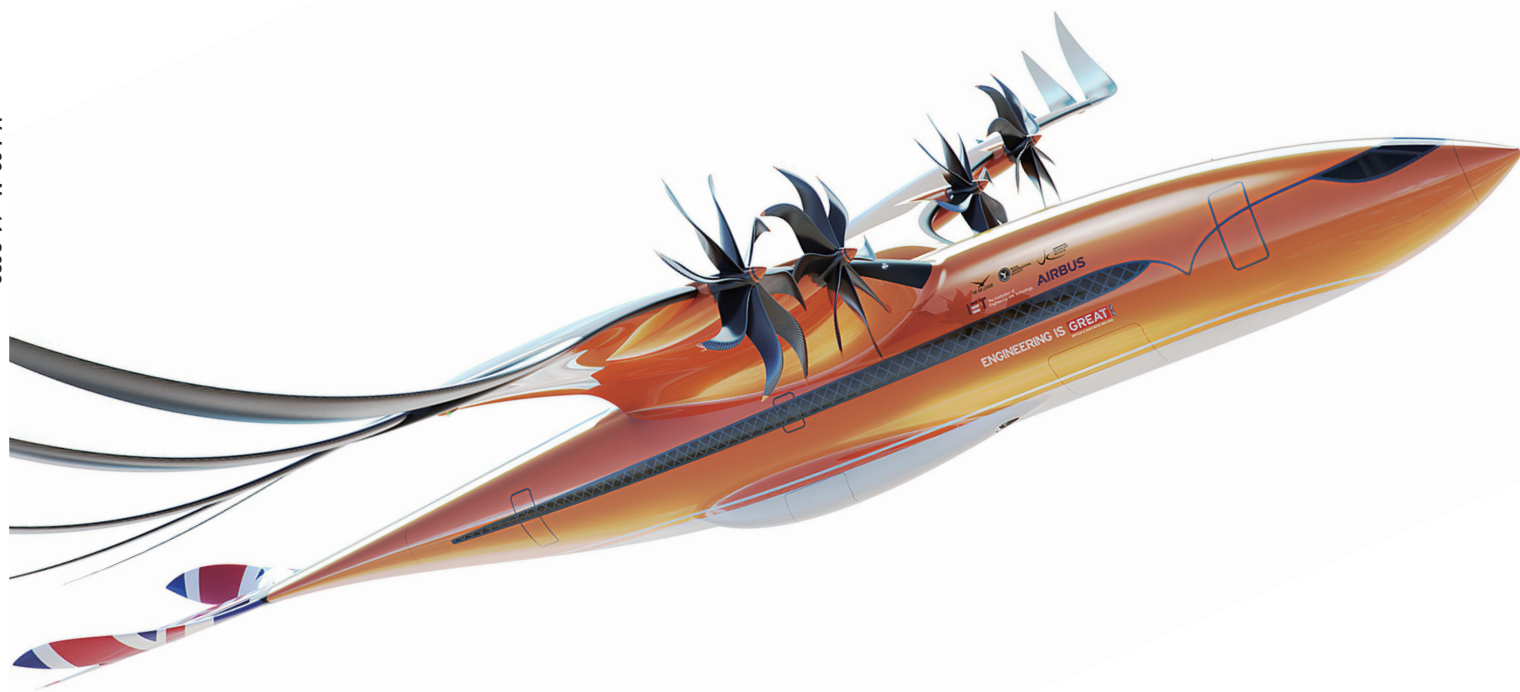


# 航空制造技术

## 2023 大飞机专刊

2023年 第14期  
Vol.66 No.14



封面文章

### 未来大型客机发展方向及 关键设计技术研究

专稿

### 难加工金属材料超低温冷却 加工表面完整性研究进展

论坛

### 难加工材料高效高质加工

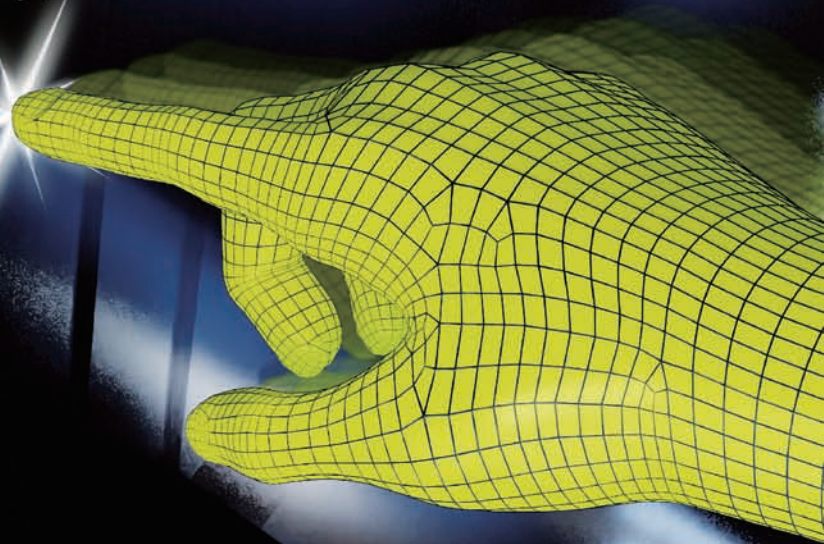


HEIDENHAIN

HEIDENHAIN

TNC7

Enter a new level



## 全新TNC7数控系统

简单易用 聚焦任务 可自定义

全新功能

更高过程可靠性

更高工作效率

从最初设计到成品，新一代数控系统 TNC7 为切削加工的全过程提供全新功能，使切削加工的专业人员如虎添翼。全新开发的图形化编程功能、可定制的用户界面、加工件和加工区的逼真显示以及大量智能化功能，极致地简化日常操作。在生产的全过程，TNC7 都为您提供贴心的帮助。TNC7 全新的数控技术将给您的操作体验和工艺可靠性更上一层楼。未来已来！



约翰内斯·海德汉博士(中国)有限公司

[www.heidenhain.com.cn](http://www.heidenhain.com.cn)

广告索引号23-1038

地址：北京市顺义区天竺空港工业区A区天纬三街6号

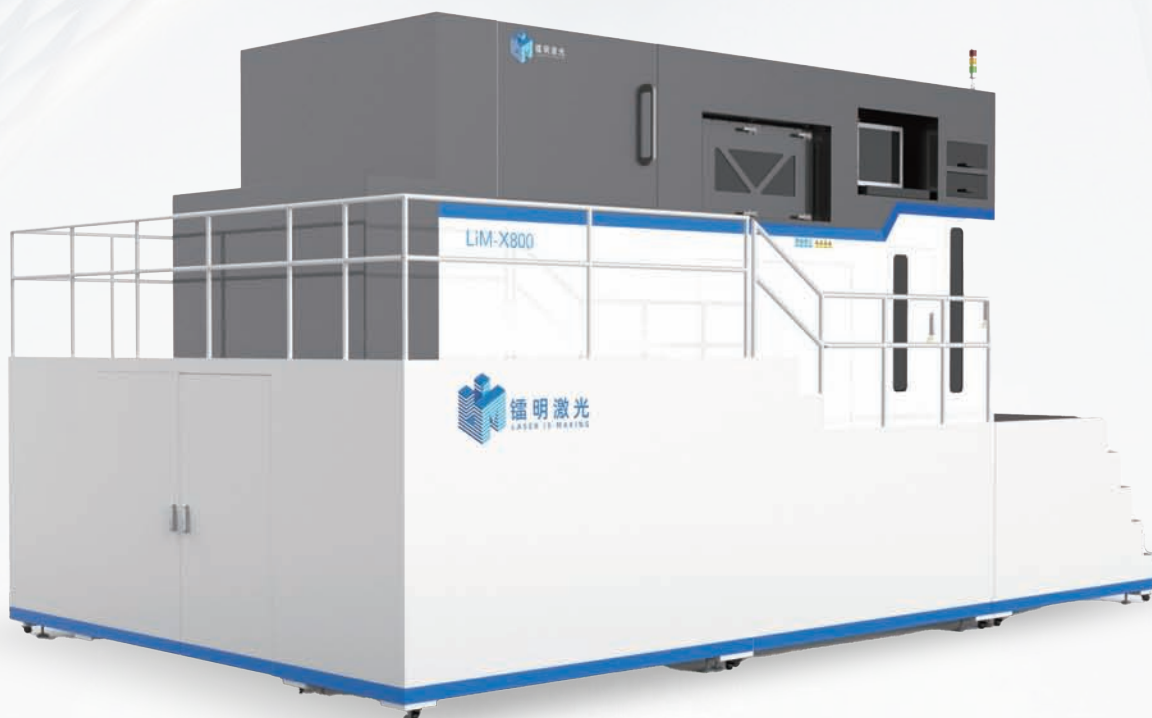
邮编：101312

电话：010-80420000

传真：010-80420010

E-mail: [sales@heidenhain.com.cn](mailto:sales@heidenhain.com.cn)

# 金属3D打印整体解决方案提供商



激光选区熔化装备

## LIM-X800系列

多激光配置

大幅面成形

安全·稳定

开源可定制

成形尺寸 800mm × 800mm × 1080mm  
800mm × 800mm × 1660mm

成形速度 150cm<sup>3</sup>/h六激光；200cm<sup>3</sup>/h八激光；250cm<sup>3</sup>/h十激光

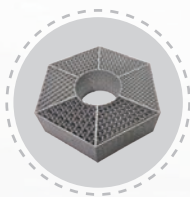
设备尺寸 ≤6.5m × 2m × 5m



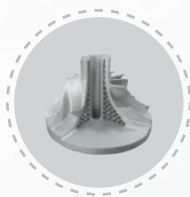
发动机组件



主体



点阵盒



叶轮



航空发动机排气组件

■ 深圳国际增材制造、粉末冶金与先进陶瓷展览会 (Formnext + PM South China)

2023.08.29-31 深圳国际会展中心6号馆 展位号C01

■ 亚洲3D打印、增材制造展览会 (TCT Asia)

2023.09.12-14 国家会展中心 (上海) 4.1馆 展位号H19

广告索引号23-1066



编委会

Editorial Board

主任 李志强  
Director Li Zhiqiang

常务副主任 王向明  
Executive Vice-Director Wang Xiangming

副主任 李涤尘 隋少春  
Vice-Director Li Dicheng Sui Shaochun

国内编委

Domestic Members

包建文 毕运波 陈玮  
Bao Jianwen Bi Yunbo Chen Wei  
程普强 丁国智 董绍明  
Cheng Puqiang Ding Guozhi Dong Shaoming

冯晶 高兰宁 郭洪波  
Feng Jing Gao Lanning Guo Hongbo

赫晓东 晋严尊 李金山  
He Xiaodong Jin Yanzun Li Jinshan

李克明 李黎 李文龙  
Li Keming Li Li Li Wenlong

刘黎明 刘雪峰 刘战强  
Liu Liming Liu Xuefeng Liu Zhanqiang

卿新林 沈洪才 师俊东  
Qing Xinlin Shen Hongcai Shi Jundong

石竖鯤 史玉升 宋晓国  
Shi Shukun Shi Yusheng Song Xiaoguo

陶飞 王俊升 王立平  
Tao Fei Wang Junsheng Wang Liping

王清江 王先模 夏峥嵘  
Wang Qingjiang Wang Xianmo Xia Zhengrong

肖贵坚 肖世宏 邢丽英  
Xiao Guijian Xiao Shihong Xing Liying

徐九华 徐正扬 杨辉  
Xu Jiuhua Xu Zhengyang Yang Hui

杨树明 姚为 曾元松  
Yang Shuming Yao Wei Zeng Yuansong

张博 张文武 张振宇  
Zhang Bo Zhang Wenwu Zhang Zhenyu

章顺虎 赵安安 朱继宏  
Zhang Shunhu Zhao An'an Zhu Jihong

朱嘉琦 朱利民  
Zhu Jiaqi Zhu Limin

国际编委

International Members

Chrsitoph Hartl (Germany) Dae-Cheol Ko (Korea)

Jim Williams (U.S.) John Dear (UK)

Lihui Wang (Sweden) Paulo Martins (Portugal)

AERONAUTICAL MANUFACTURING TECHNOLOGY

# 航空制造技术



1958年创刊·中文核心期刊·中国科技核心期刊·中国科学引文数据库(CSCD)核心期刊

主管单位  
Competent Authority  
中国航空工业集团有限公司  
Aviation Industry Corporation of China, Ltd.

主办单位  
Sponsor  
中国航空制造技术研究院  
AVIC Manufacturing Technology Institute

出版人 李志强  
Publisher Li Zhiqiang

总编辑 罗京华  
Chief Editor Andy Luo  
执行主编 孙秀云  
Executive Editor-in-Chief Sharon Sun  
学术编辑 崔静/王雪坤/王燕萍  
Academic Editor Jaime Cui/Shirley Wang/Emma Wang  
文字编辑 张晓眉/程学平/郝爽/李明  
Text Editor May Zhang/Linda Cheng/Seven Hao/Winne Li  
市场总监 何欣  
Marketing Director Xin He  
设计/排版 王艳  
Art Supervisor/Art Editors Yan Wang  
编辑出版 《航空制造技术》编辑部  
Edition Aeronautical Manufacturing Technology Magazine  
广告总代理 北京贝特里科技发展有限公司  
Advertising Agent Beijing BAMTRI Technology and Development Co., Ltd.  
通信地址 北京市340信箱(100024)  
Address P.O.Box 863, Beijing 100024 China  
邮发代号 82-26  
Subscription Code 82-26  
国外发行 中国国际图书贸易集团有限公司  
Distributor Abroad China International Book Trading Corporation  
国外代号 BM6680  
Code Abroad BM6680  
印刷 北京市宣武兴华印刷厂  
Printing Beijing Xuanwu Xinghua Printing House  
刊号 ISSN 1671-833X CODEN HGJIEO  
CN 11-4387/V  
电话 (010)85700465  
传真 (010)85700466  
在线投稿 http://www.amte.net.cn  
电子信箱 zscbyjyb@amte.net.cn

国内定价: 20.00元 国外定价: 16.00美元

版权声明: 凡投稿本刊或允许本刊登载的作品, 均视为已授权上载于www.amte.net.cn, 以及本刊授权的合作媒体使用。

# » 创新计量解决方案 INNOVATIONS IN METROLOGY



3D 数字化解决方案



便携式测量解决方案



汽车测量解决方案



无损测量工业 CT 解决方案



齿轮测量解决方案



三坐标测量技术



高速光学扫描测量解决方案



温泽测量微信公众号

温泽测量仪器(上海)有限公司

上海市青浦区崧秀路219号

电话: +86 21 5970 3088

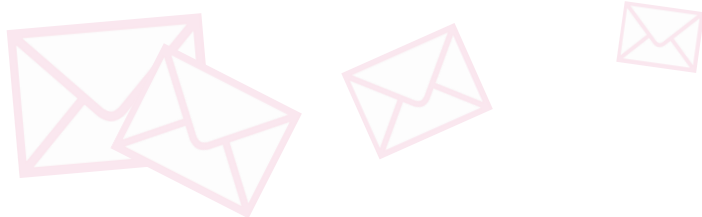
传真: +86 21 5970 3082

邮箱: info@wenzel-cmm.cn



编-读-往-来

## READERS & EDITORS



大型客机的市场竞争压力越来越大,飞机设计与制造将以更高要求面向市场。随着以数字化、网络化、智能化为特征的信息化浪潮蓬勃兴起,航空产业面临全球制造业信息化变革和新型制造体系的演变,急需将信息化技术贯穿到大型客机的研制过程中,以信息化引领产业变革,加快释放信息化技术的巨大潜能。

本期大飞机专刊,封面文章由中国航空研究院雷国东研究员阐述了大型客机的未来形态和关键设计技术。专稿中大连理工大学王永青教授分享了超低温冷却加工的研究进展。设置“难加工材料高效高质加工”专栏,邀请国内先进制造领域的优势团队针对航空难加工材料给出加工解决方案,并探讨制造技术发展趋势。在此,对各位专家学者的支持表示衷心的感谢!

学术编辑 崔 静

《航空制造技术》作为我国航空制造领域的老牌综合性科技期刊,聚焦报道国内外先进制造技术的研究成果和前沿发展动态,关注包括焊接、表面工程等技术领域的最新研究进展,所报道的新材料、新工艺、新技术对于推动我国航空制造技术的快速发展具有重要意义。经过多年发展,期刊在业界享有良好口碑和影响力,已成为航空制造科研工作者宝贵的交流平台。

衷心祝愿期刊越办越好,为我国航空制造技术的发展做出更大贡献。

天津工业大学航空航天学院 郑 洋



《航空制造技术》在航空航天、机械制造等领域为广大科技工作者提供了一个广泛的交流平台,论文以先进性、实用性见长。近年来,期刊紧跟科技发展,刊登了大量有关先进制造、智能制造、智能监测与诊断等技术的优秀论文,为读者解放思想、开阔思路、改革创新提供了方向。

在当前科学技术日新月异、迅猛发展的新时代,衷心希望期刊能够不忘初心,坚持在航空制造领域多出新品、精品,发挥桥梁和纽带作用,推进我国航空事业的高质量发展。

天津职业技术师范大学机械工程学院 张仕海





北京博鲁斯潘精密机床有限公司

五轴联动叶片铣削中心  
BM40-5i



五轴联动



高精度



高刚性



高速度



高效率



BM40-5i五轴联动叶片铣削中心，是专为航空发动机叶片精密、高效加工研制的高刚度、高精度高档数控机床。主要用于范围在400mm以内的航空发动机中、小叶片的高速精密铣削加工。

广告索引号23-1044



## 专稿 Feature

### 14 难加工金属材料超低温冷却加工表面完整性研究进展

王永青 左月帅 韩灵生 姜少玮 李建明 刘阔 刘海波  
Surface Integrity of Difficult-to-Machine Metal Materials for Cryogenic Machining: A Review

WANG Yongqing ZUO Yueshuai HAN Lingsheng JIANG Shaowei LI Jianming LIU Kuo LIU Haibo

## 封面文章 Cover Story

### 26 未来大型客机发展方向及关键设计技术研究

雷国东 徐悦  
Development Directions and Key Design Technologies Research of Future Large Airliners

LEI Guodong XU Yue

## 论坛 Forum

### 难加工材料高效高质加工

#### High-Efficiency and High-Quality Processing of Difficult-to-Cut Material

### 40 陶瓷基复合材料多能场辅助高效低损伤铣削加工工艺

安庆龙 李晗 陈杰 明伟伟 陈明  
Multi-Energy Field Assisted High-Efficiency and Low Damage Milling Process of Ceramic Matrix Composites

AN Qinglong LI Han CHEN Jie MING Weiwei CHEN Ming

### 52 基于等效刃型矢量法的钛合金螺旋铣孔切削力机械模型研究

周兰 安国升 李光奇 朱宗孝 冯照和  
Research on Mechanistic Model of Cutting Force in Helical Milling of Titanium Alloy Based on Equivalent Cutting Edge Vector Method

ZHOU Lan AN Guosheng LI Guangqi ZHU Zongxiao FENG Zhaohe

### 59 难加工材料超高速磨削亚表面损伤研究

郭塞 江庆红 刘昊 卢守相 张璧  
Subsurface Damage in High-Speed Grinding of Difficult-to-Machine Materials

GUO Sai JIANG Qinghong LIU Hao LU Shouxiang ZHANG Bi

### 72 超声纵振辅助螺旋铣削内壁形貌预测模型

徐捷 冯平法 颜健辉 张建富 许超 马原 冯峰  
Prediction Model of Inner Wall Morphology in Ultrasonic Longitudinal Vibration Assisted Helical Milling

XU Jie FENG Pingfa YAN Jianhui ZHANG Jianfu XU Chao MA Yuan FENG Feng



爱深智EINSENSE

自主研发

匠心打磨

# 铸就3D数字化检测软件精品

## 工业级三维检测软件



自主可控



安全替代



高性价比



可定制化

- GD&T 形位公差分析和质量控制解决方案
- 获得德国物理研究院(PTB)精度认证
- 为产品质量保驾护航
- 可与机器人无忧协作，实现自动化3D在线检测



杭州宏深科技有限公司

广告索引号23-1073

电话: 0571-83698073 | E-mail: market@einsense.com | 网址: www.einsense.com

- 80 芳纶纸蜂窝芯结构件加工技术研究与应用进展  
—————周进 袁信满 陈杰 胡智钦 张也 陈保林 罗潘 侯珺森  
Research Progress and Application Status on Machining Technology of Aramid Honeycomb Core  
ZHOU Jin YUAN Xinman CHEN Jie HU Zhiqin ZHANG Ye CHEN Baolin LUO Pan HOU Junsen
- 100 外涵对开机匣精密高效加工工艺研究  
—————张世贵 张晟玮 陈鹏飞 王灿 王宇航 王国名 孙剑飞  
Research on High-Effect and Precise Machining Technology of Bypass Duct Split Casing  
ZHANG Shigui ZHANG Shengwei CHEN Pengfei WANG Can WANG Yuhang WANG Guoming SUN Jianfei

## 专题 Special Topic

### 柔性装配 Flexible Assembly

- 108 基于滑模控制的球头自适应入位技术  
—————张忠清 李沈霖 刘洋  
Adaptive Positioning Method for Ball Head Based on Sliding Mode Control  
ZHANG Zhongqing LI Shuanggao LIU Yang
- 118 弱刚性薄壁件夹具布局优化方法研究概述  
—————王张浩 李东升 翟雨农  
A Review of Fixture Layout Optimization Method for Weakly-Rigid Thin-Walled Workpieces  
WANG Zhanghao LI Dongsheng ZHAI Yunong

### 视觉检测 Visual Inspection

- 136 面向航空发动机油路密封管件的高鲁棒性视觉定位算法研究  
—————崔俊佳 刘泉 赖铭 王绍螺 蒋浩 李光耀  
Research on Robust Visual Localization Algorithm for Aero-Engine Oil Sealing Pipe Fitting  
CUI Junjia LIU Xiao LAI Ming WANG Shaoluo JIANG Hao LI Guangyao
- 143 基于机器视觉的铣刀磨损在机检测方法  
—————彭锐涛 丁珑 赵林峰 陈美良 高江雄 刘嘉晨  
Milling Cutter Wear Detection Method Based on Machine Vision  
PENG Ruitao DING Long ZHAO Linfeng CHEN Meiliang GAO Jiangxiong LIU Jiachen



# 提高您的检测能力

## 适用于非接触式检测的高性能五轴测量方案

REVO®五轴测量系统可显著提高坐标测量机的测量效率。利用全新REVO-2测座提供的五轴运动和无级定位功能，用户能够高速采集大量数据。

RVP影像测头将非接触式检测功能添加至REVO-2机器现有的触发式、高速扫描和表面粗糙度测量功能中。

详情请访问 [www.renishaw.com.cn/RVP](http://www.renishaw.com.cn/RVP)



扫描关注雷尼绍官方微信

上海 T +86 21 6180 6416 E [shanghai@renishaw.com](mailto:shanghai@renishaw.com)  
北京 T +86 10 8420 0202 E [beijing@renishaw.com](mailto:beijing@renishaw.com)  
广州 T +86 20 8550 9485 E [guangzhou@renishaw.com](mailto:guangzhou@renishaw.com)  
深圳 T +86 755 3369 2648 E [shenzhen@renishaw.com](mailto:shenzhen@renishaw.com)  
武汉 T +86 27 6552 7075 E [wuhan@renishaw.com](mailto:wuhan@renishaw.com)

天津 T +86 22 8485 7632 E [tianjin@renishaw.com](mailto:tianjin@renishaw.com)  
成都 T +86 28 8652 8671 E [chengdu@renishaw.com](mailto:chengdu@renishaw.com)  
重庆 T +86 23 6865 6997 E [chongqing@renishaw.com](mailto:chongqing@renishaw.com)  
苏州 T +86 512 6660 6825 E [suzhou@renishaw.com](mailto:suzhou@renishaw.com)  
沈阳 T +86 24 2334 1900 E [shenyang@renishaw.com](mailto:shenyang@renishaw.com)

青岛 T +86 532 8503 0208 E [qingdao@renishaw.com](mailto:qingdao@renishaw.com)  
西安 T +86 29 8833 7292 E [xian@renishaw.com](mailto:xian@renishaw.com)  
宁波 T +86 574 8791 3785 E [ningbo@renishaw.com](mailto:ningbo@renishaw.com)  
郑州 T +86 371 6658 2150 E [zhengzhou@renishaw.com](mailto:zhengzhou@renishaw.com)

[www.renishaw.com.cn](http://www.renishaw.com.cn)

© 2022 Renishaw plc. 版权所有。

广告索引号23-1055

## 浙大团队创造出新物质“弹性陶瓷塑料”

浙江大学化学系教授唐睿康、研究员刘昭明合作团队发明了一种新物质,从分子尺度将有机化合物与无机离子化合物融合在一起,完美地实现了硬度与弹性在同一物质中的“兼容”,同时还能像塑料那样拥有可塑性。该团队将这种新物质命名为“弹性陶瓷塑料”。2023年6月8日,这项研究成果在网刊发表在 *Nature* 上。

该团队科研人员将“弹性陶瓷塑料”的性能与常规的陶瓷、橡胶、塑料、金属作对比,发现既有大

理石的硬度,而且加热后不会软化,在硬度、回弹、强度、形变和可加工性等几个指标上都得到了高分。该项研究成果得到了论文审稿人和编辑的高度评价。

此前科学界主要通过将有机物与无机物混合在一起来尝试折中两种物质的性能,在微观尺度上有机物和无机物仍然是相对独立的存在。而这次浙大团队首次在分子级别上实现有机化合物与无机离子化合物的结合,得到了一种性质完全不同于以往材

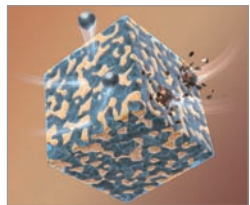
料的新物质。简而言之,就是科研人员通过拼接的含有有机物和无机物的分子单元,创造出了一个新的分子,从而构成了新的物质世界。

这个打破认知的新物质,从分子层面上看是相互交织的有机共价和无机离子网络,其中有机物和无机物的化学比例大约各占一半;从宏观材料上说,就是兼具橡胶与陶瓷特性的复合塑料。

该项研究获得了国家自然科学基金、国家重点研发项目、中央高校基本科研业务费等资助。

下图为具有双连续网络的弹性陶瓷塑料概念图。

(本刊记者 逸飞)



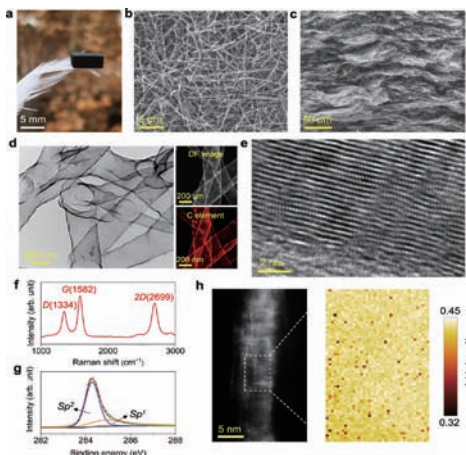
## 西安交大高性能碳气凝胶研究取得新进展

近日,西安交通大学材料学院王红洁教授课题组以前期研发的硅基陶瓷气凝胶为模板,将牺牲模板法和化学气相沉积法相结合,研发出了一种由  $sp^2-sp^3$  杂化的柔性碳管组成的、具有高度交联互锁的均匀三维网络结构的层状碳气凝胶。该碳气凝胶中高度交联互锁的三维网络结构赋予了材料优异的协同变形能力,可有效避免在压缩过程中局部应力集中所导致的结构性破坏;而碳管中局部存在的  $sp^3$  键则可在一定程度上抑制管壁间由于弱范德华键所造成的相对滑移,进而提高管状结构的稳定性及刚

度。这些综合性能使其具备了在极端环境下的应用价值。

近日,该研究成果以“Highly cross-linked carbon tube aerogels with enhanced elasticity and fatigue resistance”为题在线发表在 *Nature Communications* 上。西安交通大学材料学院青年教师庄磊为论文第一作者,王红洁教授为论文通讯作者。西安交通大学金属材料强度国家重点实验室是该研究的唯一通讯单位。该项研究得到了国家自然科学基金的支持。

下图为碳气凝胶的结构图。(本刊记者 逸飞)



## 中国科学院力学所研发出一种超高强塑性钨高熵合金

近日,中国科学院力学所戴兰宏研究团队在前期的相关研究基础上,研发了一种具有剪切自锐(Self-sharpening)特性的钨高熵合金,首次在铸态钨合金中实现了自锐性的突破,使高速穿甲侵彻能力获得显著提高。该团队联合加州大学伯克利分校、北京航空航天大学、香港理工大学和香港城市大学,在超高强钨高熵合金的研究中又取得了重要进展。研究人员提出了一种逐级可控有序纳米沉淀强韧化的新策略,在高温(900 °C)和中温(650 °C)分级时效,成功实现了纳米片层状  $\delta$  相和纳米颗粒状  $\gamma$  相差异性可控的双共格纳米沉淀析出,使所制备钨高熵合金材料具有2.15 GPa的超高温强度和15%的拉伸塑性。同时,该钨高熵合金在800 °C高温环境下仍可保持1 GPa以上的高屈服强度。与已

报道相关钨合金和难熔高熵合金相比,该团队所研制钨高熵合金强塑性在国际上处于最优水平。研究人员对不同拉伸变形阶段的微观结构进行系统表征分析,揭示位错滑移切过两种共格沉淀相并保持完美的共格结构,实现材料晶体结构“切过而不断”,是该合金材料具有超高强塑性的主要原因。逐级可控的沉淀结构实现了钨高熵合金的超高强塑性,为高性能先进合金材料研发提供了新的思路。

近日,该项研究成果以“Ultra-strong tungsten refractory high entropy alloy via stepwise controllable coherent nanoprecipitations”为题发表在 *Nature Communications* 上。该项研究得到了国家自然科学基金、中国科学院B类战略性先导科技专项等资助。(本刊记者 逸飞)

## 中南大学在超强耐热铝合金设计方面取得进展

中南大学粉末冶金国家重点实验室杜勇教授、李凯副教授等提出了在耐热高强铝合金析出相与基体界面处构建多重界面结构的新设计策略。近日,相关研究成果以“Synergy of multiple precipitate/matrix interface structures for a heat resistant high-strength Al alloy”为题发表在 *Nature Communications* 上。

该研究团队利用相图热力学计算(CALPHAD)方法优化合金元素含量及其比例,从而优化物相组合,避免无益的微米尺度第二相的生成,同时促进预期的最优纳米相的析出及界面结构的形成。由此设计的Al-Cu-Mg-Ag-Si-Sc合金中,主强化相

$\theta'-Al_2Cu$ 在210 °C热暴露过程中的粗化行为得到显著抑制,实现了铝合金强度与耐热性能的协同提升,尤其是在参照行业标准开展200 °C-100 h热暴露测试后,屈服强度仅下降3%,仍高达400 MPa。

其具体机理在于,欠时效状态下先析出的C/L-AlMgSiCu相促进了主强化相 $\theta'-Al_2Cu$ 的异质形核析出,提高了其数密度,从而保障了合金的高强度。在峰时效状态下,在 $\theta'-Al_2Cu$ 界面处形成了包含C/L界面相、 $\chi-AgMg$ 界面相及Sc偏聚层的多重界面结构,有效包覆了析出相,进而阻断了其溶解-粗化机制。第一性原理计算结果表明界面结构(C以及

$\chi-AgMg$ 界面相)的存在可以降低 $\theta'-Al_2Cu$ 形成能,提高 $\theta'-Al_2Cu$ 的稳定性,从而有效抑制 $\theta'-Al_2Cu$ 在热暴露过程中的粗化行为。

综上所述,通过在析出相/基体界面处构建多重界面结构,有效延缓了 $\theta'-Al_2Cu$ 纳米析出相的粗化,实现了合金强度与耐热性的协同提升。该合金完全采用传统工艺生产,具有很好的应用前景。这种通过CALPHAD优化合金成分从而在析出相/基体界面处构建多重界面结构的设计策略,可为其他耐热材料的设计提供参考。该创新工作为跨尺度结构调控的国际难题提供了一种可借鉴的解决思路。(本刊记者 逸飞)



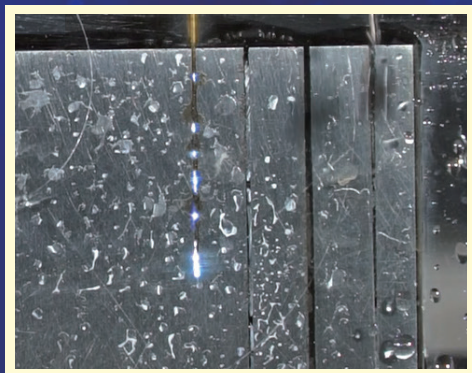
DIC<sup>®</sup>-305

# 电火花钻孔液

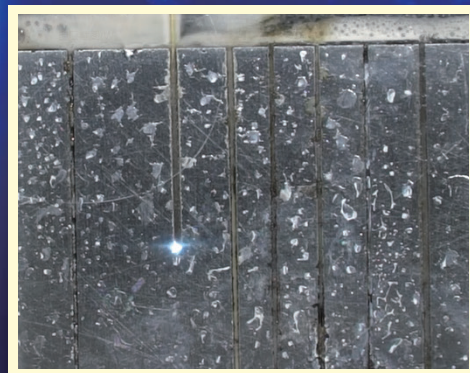
*EDM drilling fluid*

## 无锥度 电极损耗小

加工中电极不产生锥度 加工所得孔腔无锥度



采用水穿孔



采用 DIC<sup>®</sup>-305 钻孔液穿孔

钛合金变质层小于0.5 $\mu$ m

北京东兴润滑剂有限公司

电话: 010-64368739 13901051209 传真: 010-64343485 邮编: 100102 广告索引号23-1004

地址: 北京市东直门外东辛店 网址: [www.dic.cn/www.bjdxr.com](http://www.dic.cn/www.bjdxr.com) E-mail: [rh6816@163.com](mailto:rh6816@163.com)

产品执行标准: Q/CY DSR 004-2012

环境体系证书编号: 00119E30065R3S/1100  
质量体系证书编号: 00119Q30178R4S/1100



近日,中国航发“太行110”重型燃气轮机(代号AGT-110)在深圳通过产品验证鉴定,标志着拥有自主知识产权的110 MW级重型燃气轮机通过整机验证,填补了中国该功率等级产品空白。

中国航发“太行110”重型燃气轮机设计功率110 MW,具有启动迅速、综合热效率高、维护简便等优点,可使用燃油、天然气及中低热值气等多种燃料发电,可应用热电联产、天然气调峰电站、联合循环发电等多个领域,还可

配合风电、光伏、水电等多种能源耦合供电。与同功率火力发电机组相比,110 MW级重型燃气轮机一年可减少碳排放超过1000000 t,联合循环1 h发电量超过150000 kW时,可以满足1.5万个家庭一天的用电需求。

2016年,中国航发打造了以中国航发燃气轮机有限公司为主体的燃气轮机产业发展平台,运用先进航空发动机的设计、制造和质量管理体系,全面推进“太行110”重型燃气轮机改进改型,如期实

现技术升级、质量提升等既定目标。2019年“太行110”重型燃气轮机被列为国家能源局首批燃气轮机创新发展示范项目,2020年改进型重型燃气轮机总装下线,2022年在中海油深圳电厂启动示范运行。目前,“太行110”重型燃气轮机已累计运行突破14000当量小时,其中单台运行时数超过7000当量小时。

中国航发“太行110”重型燃气轮机改进改型研制中,集合国内航空、机械、石油、电力等多行业力量,已取得102项专利,突破重型燃气轮机设计、先进材料制备、整机制造、试验及调试等一系列关键核心技术,建立具有自主知识产权的重型燃气轮机设计、研制、试验、调试等一批先进研究平台,培养了一支高度专业化的重型燃气轮机设计研发和制造生产人才队伍。

(本刊记者 逸飞)

## 柔性应变传感器的手势识别应用研究取得新进展

近日,中国科学院金属研究所沈阳材料科学国家研究中心薄膜与微尺度材料及力学性能研究团队,在前期柔性基体金属薄膜力学行为的基础研究工作上,基于柔性器件传感的力学原理,提出将裂纹类传感器的传感机制引入高机械鲁棒性蛇形曲流结构中,通过对传感层进行巧妙的高/低电阻区调控实现高灵敏度传感的学术思想,研制了一种灵敏度与裂纹类传感器相当(GF > 1000)且机械鲁棒性优异的柔性应变传感器。

该研究团队将传感器进一步集成到自主设计的无线可穿戴人机交互系统中,结合机器学习、用户界面设计等技术实现了实时手语翻译功能。传感器的高灵敏度和响应速度赋予了该系统及时准确的感知

能力,高机械鲁棒性则赋予该系统在实际应用场景中长期可靠服役的能力。研究工作为实现柔性条件下的稳定增敏机制提供了新思路,有望促进可穿戴人机交互系统的应用和产业化发展。此外,该研究团队还研制出了一种微机电系统(MEMS)用超长服役寿命的纳米复合材料,有望应用于航天、通信等领域的射频MEMS上。

该研究成果以“Ultra-robust and sensitive flexible strain sensor for real-time and wearable sign language translation”为题在线发表在*Advanced Functional Materials*上,得到了国家自然科学基金、金属研究所“引进优秀学者”项目、沈阳材料科学国家研究中心青年人才和基础前沿及共性关键技术创新项目的资助。(本刊记者 逸飞)

## 清华大学电子系课题组在超快机器视觉领域取得进展

随着人工智能神经网络应用的持续深化,机器视觉算法复杂度剧增,亟须高算力支持。近日,清华大学电子系方璐副教授课题组建立了空时域超快智能光计算架构,提出了跨维度空时域匹配方法和联合空时域矩阵向量光计算模型,首次实现了三维空时域智能光计算系统,突破了数字内存读写的掣肘,将动态机器视觉处理速度提升3个数量级(达到纳秒量级)。

该课题组通过刻画多维光场传播模型,首次建立空时域计算表征,同时在空间和时序维度完成连续光计算。针对空间光场和时序光场内在维度失配问题,提出空间复用和光谱复用计算模型,匹配进一步建立时序矩阵乘加计

算模型,扩展空时域光计算维度。所有空间和时序计算操作均在光学模拟域完成,因此空时域光计算的速度不受限于电子内存的传输和读写。该研究进一步提出了多变量全光非线性函数,成功构建多层非线性神经网络,支撑复杂视觉智能任务的高速推理。在多个视频数据集上的试验结果表明,空时域光计算能够将视频智能处理速度提升至数百兆赫兹量级,有望为后摩尔时代高性能智能计算以及瞬态科学现象的实时分析和控制等带来新的契机。

该研究工作以“Ultrafast dynamic machine vision with spatiotemporal photonic computing”为题发表在*Science Advances*上,并入选期刊首页专题文章。(本刊记者 逸飞)

## 借助高通量方法获取具有类金刚石耐磨性能的非晶合金

中国科学院物理研究所/北京凝聚态物理国家研究中心柳延辉、汪卫华团队前期基于材料基因工程理念,发展了高通量试验方法,开发出高温块体非晶合金,发现了非晶合金形成能力的新判据,为非晶合金新材料高效研发提供了有利工具。

近日,该团队针对非晶合金的力学性能设计了高通量表征方法,结合前期发展的高通量制备和非晶筛选技术,研发出摩擦系数、磨损率均与类金刚石材料相当的超耐磨高温非晶合金。该团队选择Ir-Ni-Ta高温非晶合金体系为突破口。该合金体系具有良好的非晶形成能力和高玻璃转变温度,能够克服非晶合金在摩擦过程中的结构失稳问题。

该团队通过对特定成

分的微纳力学表征证明了该高通量表征方法的有效性,在Ir-Ni-Ta组合样品中的富Ta区域发现了具有极低摩擦系数和磨损率的非晶合金。

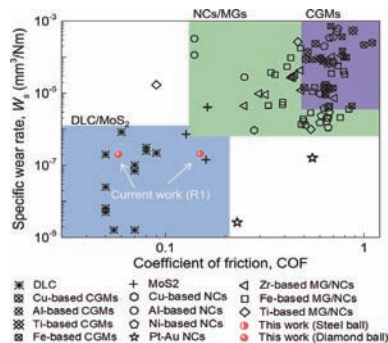
该研究结果不仅证明了新发展的高通量力学表征方法对快速筛选强化非晶合金成分的有效性,更有助于理解非晶合金耐磨性的起源。

该研究成果近日以“*Achieving diamond-like*

*wear in Ta-rich metallic glasses*”为题在线发表在*Advanced Science*上,得到了国家重点研发计划、中国博士后科学基金、国家自然科学基金委员会、中科院、广东省基础与应用基础研究重大专项的支持。

下图为富Ta高温非晶合金的摩擦磨损性能与类金刚石材料及传统金属材料对比。

(本刊记者 逸飞)



## SF-4

### 精密数控电火花成形机床

配置 windows 系统,自动升降油槽、兼容机械手、电极物料架等,可方便的实现自动化及无人加工。兼容柔性线及工厂自动化系统,可配备高精度 C轴、B轴,能进行五轴五联动精密加工,并预留六轴六联动接口。

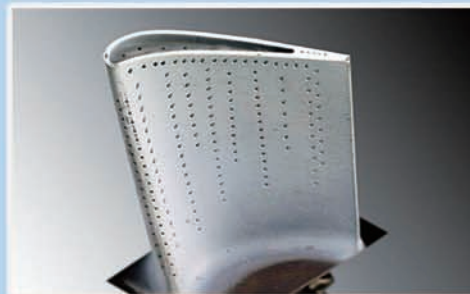
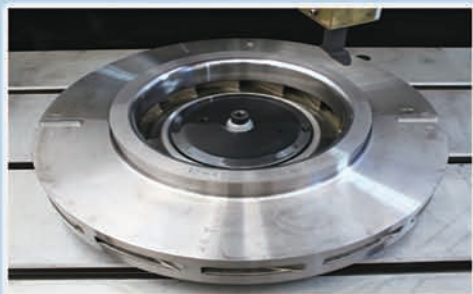
主要用于航空航天发动机整体叶轮、机匣、环件、等封闭扭曲型腔,及各种高温合金、钛合金、导电陶瓷等难加工材料的零件加工。



## HS 600

### 精密数控电火花小孔机床

配置windows系统、自动安全门,具有电容增爆、微精低损加工回路,具备穿透检测、电极自动更换等功能,可方便的实现自动化及无人加工,无缝对接工厂自动化系统。



引文格式:王永青,左月帅,韩灵生,等.难加工金属材料超低温冷却加工表面完整性研究进展[J].航空制造技术,2023,66(14):14-25.

WANG Yongqing, ZUO Yueshuai, HAN Lingsheng, et al. Surface integrity of difficult-to-machine metal materials for cryogenic machining: A review[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(14): 14-25.

# 难加工金属材料超低温冷却加工表面完整性研究进展\*

王永青,左月帅,韩灵生,姜少玮,李建明,刘阔,刘海波

(大连理工大学,大连 116024)

[摘要] 超低温冷却加工是一种在材料切削过程中采用液氮等超低温介质进行冷却的清洁加工技术。该技术被广泛应用于航空航天等领域的难加工金属材料加工,以改善这些材料常规冷却加工时冷却效能不足、加工质量较差等问题。为了阐明超低温冷却加工对难加工金属材料表面完整性的影响,本文综述了这类材料表面粗糙度、微观形貌、微观结构、显微硬度、残余应力等在不同冷却条件下变化规律分析的研究进展。结果表明,超低温冷却介质可带走大量切削热并降低刀具磨损,进而减小加工表面粗糙度、抑制表面缺陷、促进晶粒细化、提高显微硬度、增大残余压应力等。最后,对超低温冷却加工表面完整性研究进行了总结,并展望了未来需要开展的研究工作。

关键词:超低温冷却加工;难加工金属材料;表面完整性;残余应力;显微硬度;晶粒细化

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.14.014



王永青

教授,博士生导师,主要研究方向为超低温冷却加工理论与技术、测量-加工一体化制造理论与技术、装备在机测量理论与技术、智能机电装备与系统。

\*基金项目:国家自然科学基金(U20B2033);基本科研业务费项目(DUT22LAB505)。

近年来,为满足极端工况条件下高端装备的高使役性能要求,以钛合金、镁合金、高温合金为代表的金属材料,因具有密度小、耐高温、耐磨损、耐腐蚀、抗冲击等优异的机械性能,被广泛应用于航空航天、深海探测、生物医疗等领域。例如,国产WS10发动机的钛合金用量占比约25%。德国金牛座系统公司和瑞典博福斯公司合作开发的导弹KEPD-350的加强框、壁板、舵面、隔板等30余种零件共使用了约100 kg的GW83和ZK61高性能镁合金<sup>[1]</sup>。国产航空发动机燃烧室、涡轮叶片和涡轮盘的制造中广泛应用了镍基高温合金<sup>[2]</sup>。

然而,该类材料都具有典型的难加工特性,常规加工难以获得优异的加工精度和加工质量。例如,钛合金具有导热系数低、弹性模量小、高温

化学亲和性强等特点,在切削过程中易出现刀具磨损和切屑黏附;高温合金不仅导热系数低,而且在加工过程中易出现刀具粘结、断屑困难和加工硬化严重等问题;镁合金具有极高的化学活性,切屑在高温下极易起火,而且遇到水基乳化液容易产生氢爆现象。以上问题都和切削温度过高密不可分,而现阶段主要采用干切削或常规切削液冷却加工手段,难以解决上述材料加工时冷却效能不足、特殊要求类零件表面污染等问题<sup>[3-5]</sup>,亟须寻求一种清洁的高效冷却加工方法。

超低温冷却加工是一种采用液氮(-196℃)等超低温介质进行冷却的切削加工工艺方法。20世纪60年代,液氮首次作为冷却介质应用于金属材料切削,在喷射压力作用下进入切削区域,依靠热传导、热对流、汽

化吸热等方式降低切削温度,进而改善加工质量,提高刀具寿命。此外,液氮是一种无色、无味、无毒的介质,不会对环境造成污染。而且,氮在空气中的体积分数约为 78%,故液氮易于获取、成本较低<sup>[6]</sup>。鉴于超低温冷却加工在提高零件加工质量与加工效率、延长刀具寿命、降低综合加工成本、绿色环保等方面的独特优势,该技术逐渐成为国内外相关领域的研究热点。

因超低温冷却加工技术在改善难加工金属材料的加工性能与提高加工表面完整性方面的优异表现,国外的肯塔基大学、哥伦比亚大学和法国国立高等工程技术学校,国内的大连理工大学、南京航空航天大学、济南大学和山东大学等诸多高校开展了超低温冷却加工技术的相关研究<sup>[7-14]</sup>。表面完整性是衡量零件加工质量的关键指标,其对零件的耐磨性、耐腐蚀性、疲劳寿命及使役性能有着重要影响,因此本文对难加工金属材料超低温冷却加工的表面完

整性进行了综述,并重点关注了超低温冷却加工装置,以及超低温冷却对材料表面粗糙度、表面微观形貌、表面或亚表面微观结构、显微硬度和残余应力等方面的影响。

### 1 超低温冷却施加方式与加工装置

超低温冷却因其施加方式不同,冷却效果也不尽相同,且结合不同的施加方式可以研制出不同的超低温冷却加工装置。

#### 1.1 超低温冷却施加方式

目前,超低温冷却的施加方式主要分为刀具内循环冷却、外喷式冷却和刀具内喷式冷却 3 种。其中,刀具内循环冷却(图 1(a))的冷却介质不喷射至刀尖,而是通过刀具上的循环结构对刀体内部进行冷却<sup>[15-16]</sup>,该方式虽对切削区域的冷却效果一般,但非常适合一些切削温度适中、热膨胀系数很大但对加工尺寸精度要求很高的材料。外喷式冷却(图 1(b))是通过外部喷嘴将超低温冷却介质

喷射到切削区域<sup>[17]</sup>,这种方法易于实现,但存在冷却介质利用率较低、机床功能集成性差、钻铣削冷却能力较弱等问题。刀具内喷式冷却(图 1(c))是将冷却介质通过刀具的内部通道输送至刀尖处<sup>[18]</sup>,实现对切削区域直接、充分的冷却,冷却介质消耗量低、冷却效能更高。与上述冷却方式相结合产生的超低温车削、铣削、钻削和磨削如图 2 所示<sup>[18-20]</sup>。

#### 1.2 超低温冷却加工装置

国外对超低温冷却加工装置的研究较早。2010 年,美国 MAG 公司研制出世界上第一台液氮超低温冷却加工机床,如图 3(a)所示<sup>[18]</sup>,该装备可将液氮输送至距切削点不到 1 mm 处,充分冷却切削区域及刀具,大幅提高加工效率并延长刀具寿命。MAG 公司与 Lockheed Martin 公司合作,进一步探索了航空发动机关键部件的超低温冷却加工方法,并将其成功应用于 F-35 战斗机钛合金叶盘的高效加工中,使加工质量和效率得到显著提升。美国 Air Products 公司

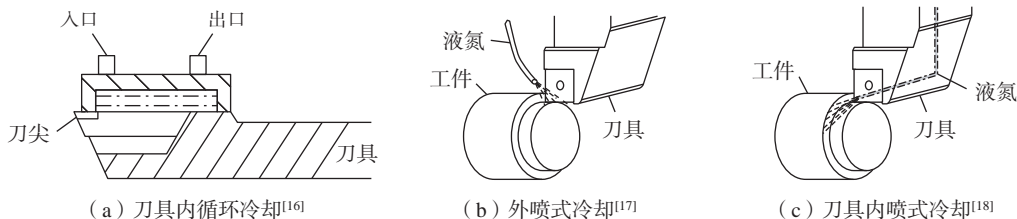


图 1 超低温冷却的施加方式  
Fig.1 Application forms of cryogenic cooling

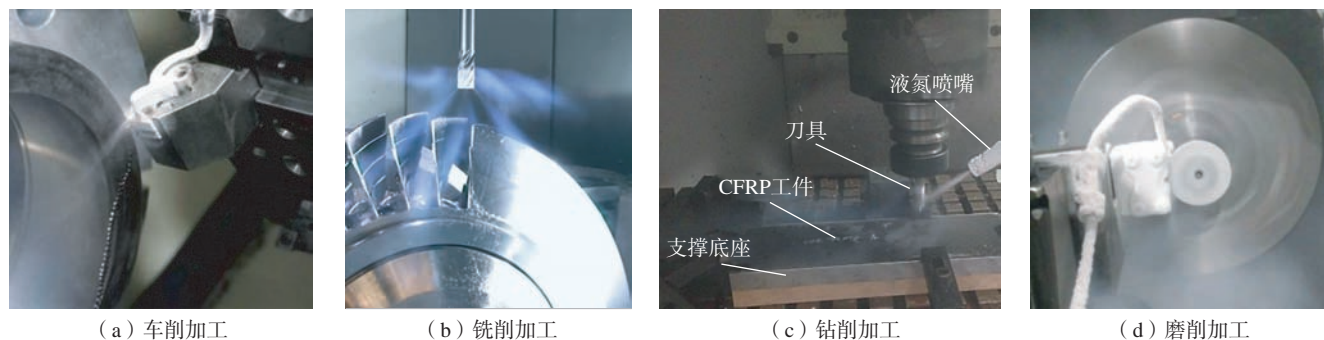


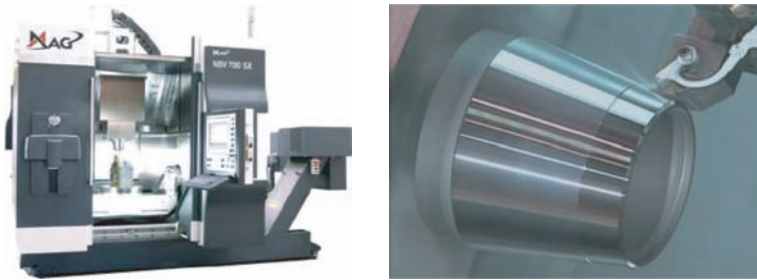
图 2 超低温冷却与传统加工方式的结合<sup>[18-20]</sup>  
Fig.2 Combination of cryogenic cooling and traditional processing methods<sup>[18-20]</sup>

开发了 ICEFLY 超低温冷却车削工艺,将液氮直接喷射到刀尖和切削区域,显著降低切削温度并改善了零件加工表面质量,如图 3 (b) 所示<sup>[21]</sup>。但是,上述技术与装备对我国封锁和禁运。

近年来,国内高校也开展了超

低温冷却加工装置研究。大连理工大学自主研制出液氮内喷式机械主轴(最高转速 6000 r/min)<sup>[22]</sup>、刀柄<sup>[23]</sup>及系列内冷式刀具<sup>[24]</sup>,开发了液氮在线制备与智能调控系统<sup>[10]</sup>,研发出国内首台液氮自给、内喷式超低温冷却加工机床,如图 4 (a) 所示<sup>[25]</sup>。

南京航空航天大学构建了低温介质外喷式冷却切削试验系统,如图 4 (b) 所示<sup>[26]</sup>,并应用于 TC4 钛合金、35CrMnSiA 高强度钢等材料的加工试验研究。华中科技大学开发了一种双喷头式液氮冷却系统,如图 4 (c) 所示<sup>[27]</sup>,并应用于 Inconel 718 镍基合金的超低温加工试验研究。



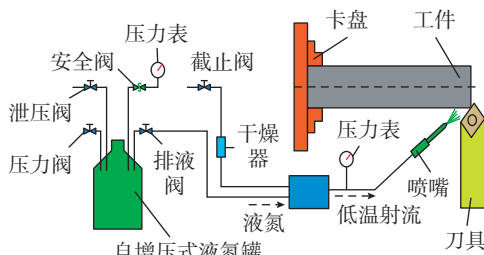
(a) MAG液氮内喷式加工机床<sup>[18]</sup> (b) ICEFLY超低温冷却加工<sup>[21]</sup>

图 3 国外超低温冷却加工装备与工艺

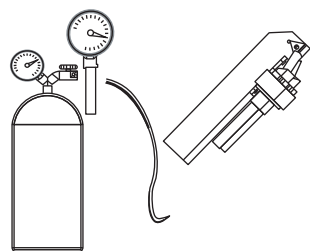
Fig.3 Foreign cryogenic machining equipment and technology



(a) 液氮内喷式超低温冷却加工机床<sup>[25]</sup>



(b) 低温外喷式冷却切削试验系统<sup>[26]</sup>



(c) 双喷头式冷却系统<sup>[27]</sup>

图 4 国内超低温冷却加工装备与系统

Fig.4 Domestic cryogenic machining equipment and system

## 2 超低温冷却加工零件表面完整性

表面完整性是衡量零件加工质量的关键指标,通常受切削速度、进给速度、切削深度、刀具几何形状、材料属性及加工过程中冷却润滑条件等因素的影响<sup>[28]</sup>。在液氮等介质的超低温冷却作用下,金属材料的表面粗糙度、微观形貌、组织结构、显微硬度和残余应力等均得到不同程度的改善。

### 2.1 超低温冷却对表面粗糙度的影响

表面粗糙度是量化零部件加工表面完整性的主要指标之一,可直接影响零部件的耐磨性和耐腐蚀性,从而影响其服役性能和使用寿命。Toker 等<sup>[29]</sup>研究了冷却条件和切削速度对 Inconel 718 镍基合金表面粗糙度的影响规律,结果发现相较于乳化液冷却,50 m/min 切削速度下超低温冷却加工表面粗糙度由 1.05  $\mu\text{m}$  降低至 0.85  $\mu\text{m}$ ,如图 5 所示。Danish 等<sup>[30]</sup>研究发现与干切削相比,在超低温微量润滑条件下

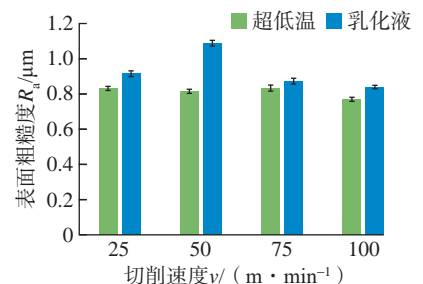


图 5 切削速度和冷却条件对表面粗糙度的影响<sup>[29]</sup>

Fig.5 Influence of cutting speed and cooling conditions on surface roughness<sup>[29]</sup>

Inconel 718 镍基合金的加工表面粗糙度降低了约 60%。Salur<sup>[31]</sup> 研究了干切削、风冷、微量润滑(MQL)和超低温冷却 4 种冷却条件对 Inconel 718 镍基合金加工质量的影响,结果发现在切削速度为 100 m/min,进给量为 0.1 mm/r 时,超低温冷却加工表面粗糙度值最低可达 0.2 μm。李建明<sup>[13]</sup> 和王相宇<sup>[14]</sup> 分别研究了干切削、乳化液冷却和液氮冷却加工 Inconel 718 镍基合金的表面完整性,发现超低温冷却可以有效抑制热软化效应,且加工表面粗糙度值最小,结果如图 6 所示。Kaynak<sup>[32]</sup> 的研究也表明,超低温冷却在 Inconel 718 镍基合金铣削中有更好效果。

Liu 等<sup>[33]</sup> 对比了 3 种切削条件对 Ti-5553 钛合金表面粗糙度值的影响,结果显示超低温冷却条件下被加工材料的三维形貌最好,表面粗糙度值最小,约为 0.3 μm。戴明华等<sup>[34]</sup> 开展了干切削、乳化液冷却和液氮冷却下的 TC4 钛合金切削试验,发现液氮冷却可以减小工件的变形和摩擦,有效抑制积屑瘤和鳞刺的产生,加工表面粗糙度值最小,如图 7 所示。Gan 等<sup>[35]</sup> 研究了液氮冷却方式对 TA15 钛合金表面质量的影响规律,结果显示液氮内喷式冷却可有效抑制莱顿弗罗斯特现象,提高冷却效率,相比于干切削,TA15 钛合金的表面粗糙度最高降低了 45%。宋戈等<sup>[36]</sup> 发现高速铣削 TC4 钛合金时,液氮冷却加工表面粗糙度值要比 MQL 条件降低约 50%。Ahmed 等<sup>[19]</sup> 开展了 TC4 钛合金的超低温冷却钻削试验,结果表明超低温冷却钻削方式可以增强断屑,保证良好的加工质量,这是因为低温环境可以有效抑制热黏附现象,同时液氮的润滑作用有利于减小摩擦力,试验结果如图 8 所示。

在镁合金及其他难加工金属材料加工方面,超低温冷却也能够改善表面质量。Dinesh 等<sup>[37]</sup> 研究了不同冷却条件和切削速度对 ZK60 镁

合金的加工表面完整性的影响,发现超低温冷却加工时摩擦力和切削力更小,表面粗糙度比干切削降低了 25%~40%,如图 9 所示。Pu 等<sup>[38]</sup> 超低温冷却车削 AZ31B 镁合金,发现表面粗糙度较干切削降低了 17%。Dhar 等<sup>[39]</sup> 开展了 AISI-4037 不锈钢的车削加工试验,结果显示在同样的切削参数下,超低温冷却加工的表面粗糙度值均有不同程度的减小,如

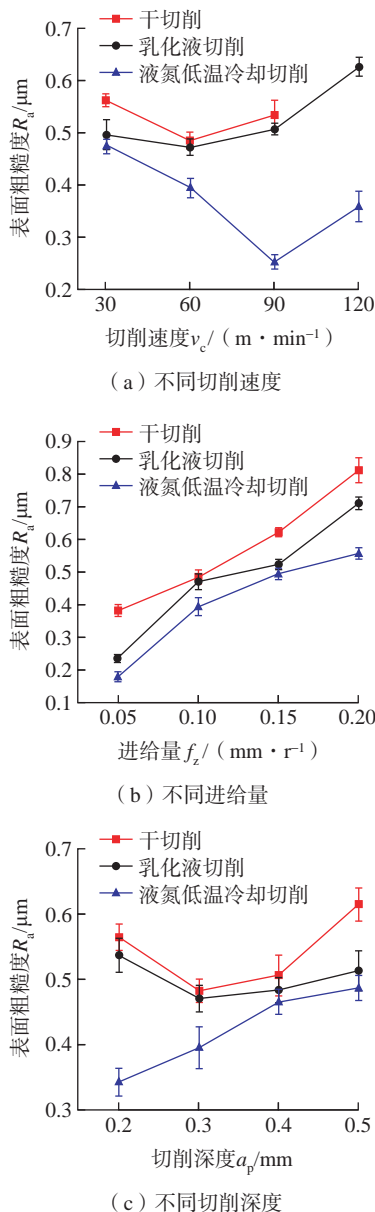


图 6 不同冷却条件和切削参数下的表面粗糙度<sup>[13]</sup>  
Fig.6 Surface roughness under different cooling conditions and cutting parameters<sup>[13]</sup>

图 10 所示,究其原因是液氮射流使切削区的温度降低,刀具磨损减小,

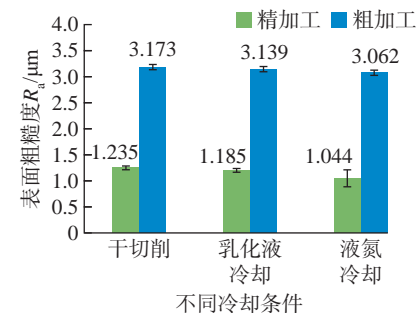


图 7 不同冷却条件下的表面粗糙度对比<sup>[34]</sup>  
Fig.7 Comparison of surface roughness for different cooling conditions<sup>[34]</sup>

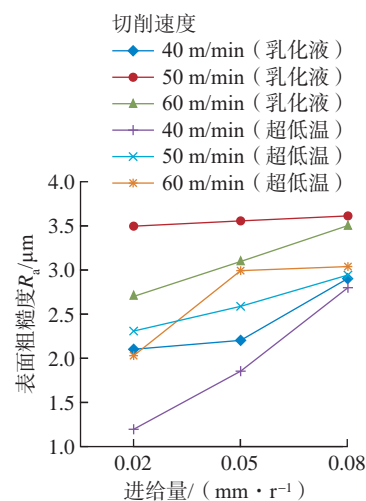


图 8 乳化液和超低温冷却加工中不同的进给量和切削速度下的表面粗糙度<sup>[19]</sup>  
Fig.8 Surface roughness at various combinations of feed rate and cutting speed in wet and cryogenic machining<sup>[19]</sup>

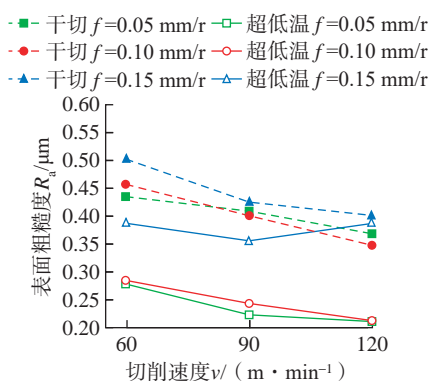


图 9 不同切削条件下加工样件的表面粗糙度<sup>[37]</sup>  
Fig.9 Surface roughness of machined sample under various cutting conditions<sup>[37]</sup>

进而提高了加工质量。Pu 等<sup>[40]</sup>进行了 Mg-Al-Zn 合金的超低温冷却抛光试验,结果表明超低温冷却条件下表面粗糙度也产生一定程度的减小。

### 2.2 超低温冷却对表面形貌和加工缺陷的影响

微观形貌和加工缺陷是反映零部件加工质量的重要指标,对零件的服役性能有着重要的影响。Percin 等<sup>[41]</sup>开展了 TC4 钛合金在干切削、乳化液冷却、MQL、超低温冷却下的钻削试验,发现超低温冷却可以抑制钻削产生的毛刺,提高钻孔质量,如图 11 所示。Shokrani 等<sup>[42]</sup>在超低温冷却铣削 TC4 钛合金时发现,与干切削和乳化液冷却相比,超低温冷却条件下加工表面缺陷减少,如图 12 所示,干切削加工表面切屑黏

附现象严重,并伴有表面侧向流动和明显的刀痕;乳化液冷却加工表面质量虽有一定程度的提高,但仍然可以发现切屑黏附、表面侧向流动和刀痕;超低温冷却时加工缺陷得到了明显的抑制。

刘泉等<sup>[43]</sup>对比了干切削、乳化液冷却和液氮冷却条件对 7075 铝合金已加工表面鳞刺分布和尺寸的影响,结果如图 13 所示;与干切削条件相比,使用乳化液冷却和液氮冷却均

能减小已加工表面的鳞刺分布密度,且液氮冷却条件对鳞刺的抑制效果最好,鳞刺高度最低。张慧萍等<sup>[44]</sup>开展了高强钢的车削试验,发现超低温冷却条件下可以生成更加光滑平整的表面,其波峰波动均匀,峰谷差距较小,改善了加工表面质量。Pan 等<sup>[45]</sup>研究了超低温冷却车削铝合金的表面完整性,发现在超低温冷却条件下获得了更好的表面质量,如图 14 所示;在干切削条件下加工表

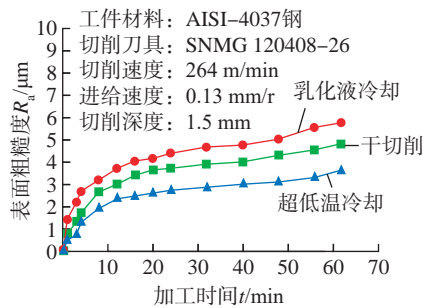


图 10 不同冷却条件下表面粗糙度随时间的变化<sup>[39]</sup>

Fig.10 Surface roughness developed with machining time under different cooling conditions<sup>[39]</sup>

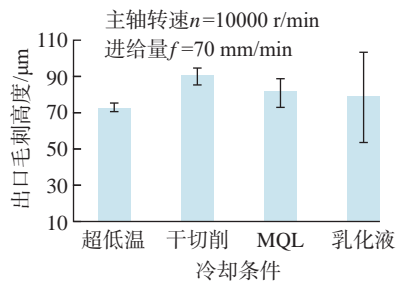


图 11 不同冷却条件下孔出口表面的毛刺高度<sup>[41]</sup>

Fig.11 Burr height at hole exit surface under different cooling conditions<sup>[41]</sup>

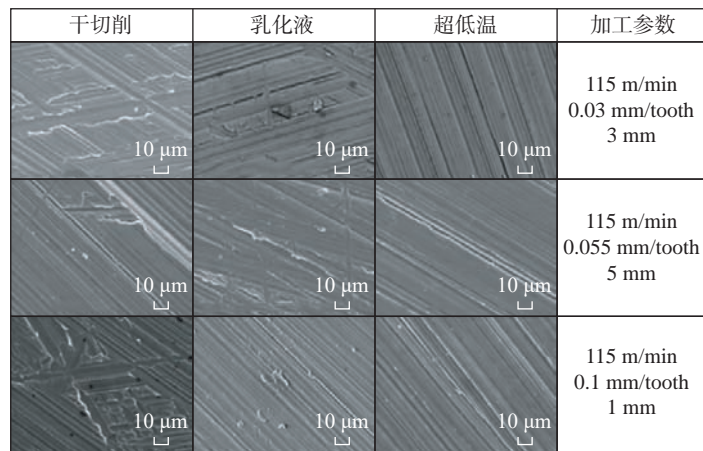


图 12 不同试验条件下样品加工表面形貌<sup>[42]</sup>

Fig.12 Surface topography of machined samples from different experiments<sup>[42]</sup>

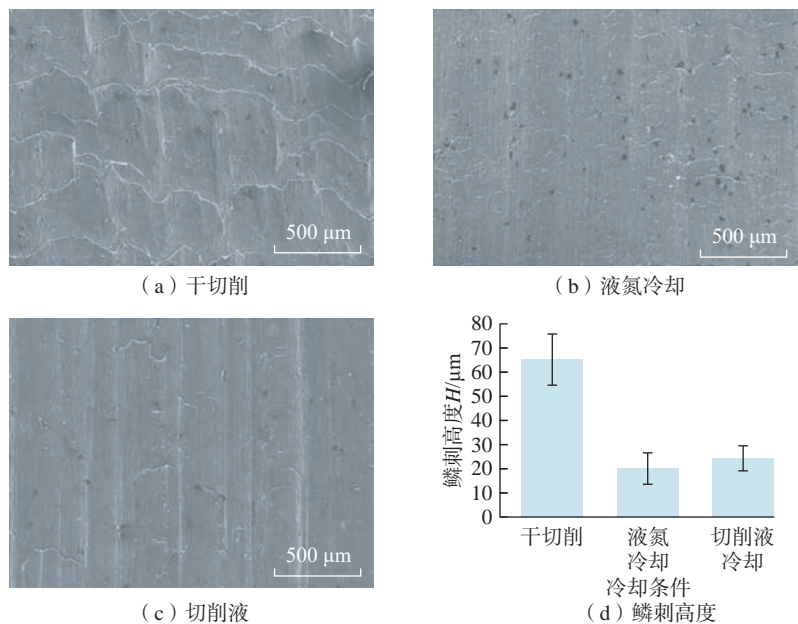


图 13 不同冷却条件下鳞刺分布及高度<sup>[43]</sup>

Fig.13 Distributions and heights of the scale thorn with different cooling conditions<sup>[43]</sup>

面存在大量的毛刺和毛边缺陷,而在乳化液冷却和超低温冷却条件下工件表面更为光滑,其中,超低温冷却条件下加工表面质量最优,这是因为局部超低温环境可以提高材料的脆性,使工件表面的塑性变形能力变弱。

薄壁类金属构件由于径向刚度低,采用传统装夹方式在加工过程中易出现受力变形,引发加工缺陷与精度误差,导致表面加工质量较差。采用超低温冷却加工与冰固持技术相结合的方式,非常适合于这类零件的高质高效加工<sup>[46]</sup>。王永青等<sup>[47]</sup>利用水在低温下会自然结冰的特性,设计了一种新颖的冰固持夹具来夹持薄壁件,同时用液氮作为冷却介质进行辅助加工以带走切削过程产生的切削热,来保证稳定的固持作用。图

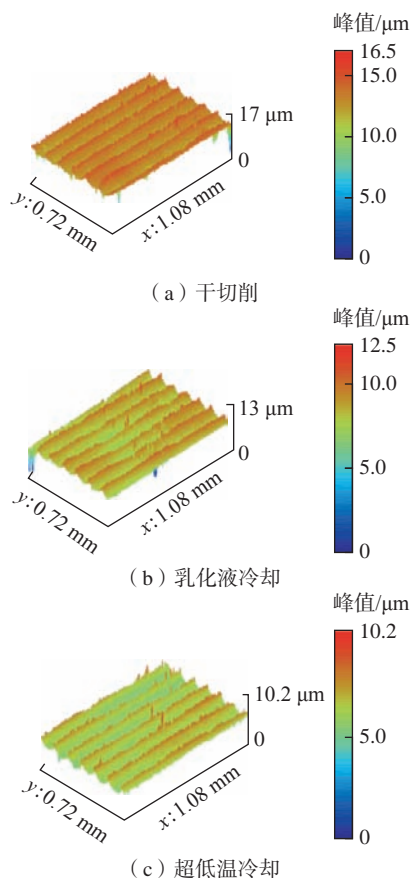


图 14 不同冷却条件下加工表面三维形貌<sup>[45]</sup>  
Fig.14 Three-dimensional morphology of machined surface with various cooling conditions<sup>[45]</sup>

15<sup>[48]</sup>为超低温冰固持加工和常规固持加工的薄壁件表面,可以看出超低温冰固持加工后的工件表面边缘毛刺得到明显抑制。姜少玮等<sup>[49]</sup>开展了GH4099高温合金蜂窝芯的超低温冰固持铣削加工试验,结果表明,在蜂窝芯加工中引入冰固持装夹和超低温冷却加工方式,可以显著提高蜂窝芯的面内刚度,减少蜂窝芯塌边、撕裂和毛刺等加工缺陷,进而实现金属蜂窝芯的高质量加工,如图16所示。

### 2.3 超低温冷却对晶粒细化和显微硬度的影响

零件表面或亚表面微观结构,尤其是晶粒大小,会直接影响其耐腐蚀性能、耐磨性能和疲劳寿命等机械性能。晶粒细化有助于提升金属材料延展性,增加表面显微硬度。深

度塑性变形(SPD)已被证明是细化晶粒的有效方法,而超低温冷却加工则被认为是一种新的SPD方法<sup>[40]</sup>。Rotella等<sup>[50]</sup>对比了干切削、MQL和超低温冷却3种条件对车削TC4钛合金的影响,发现超低温冷却可以促进晶粒的动态再结晶,产生更细化的晶粒,如图17所示。殷晓龙等<sup>[51]</sup>通过超低温挤出切削法对7075铝合金进行加工,发现材料的晶粒被细化至纳米级。范雷等<sup>[52]</sup>研究了切削三要素和冷却介质对ZK61M镁合金车削加工表面完整性的影响规律,发现液氮冷却条件下加工表层晶粒出现明显细化。Pu<sup>[38]</sup>和Danish<sup>[53]</sup>等在AZ31B和AZ31C镁合金的超低温铣削中也得出了类似的结论,冷却条件对加工表面组织有显著影响,如图18所示。

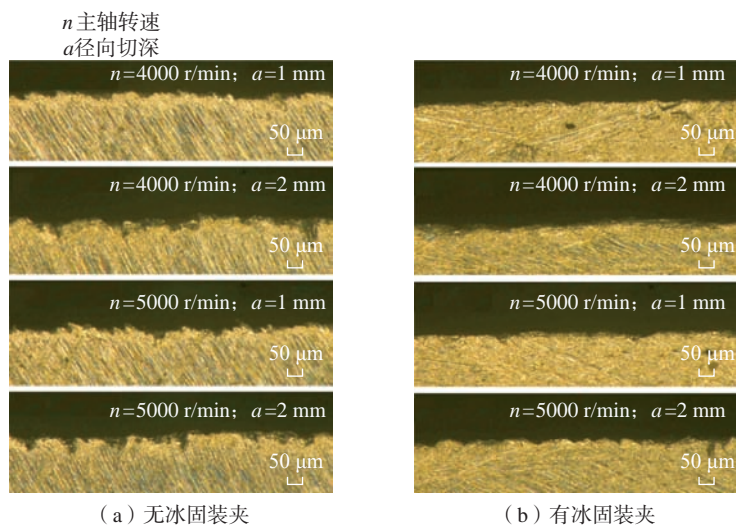


图 15 不同装夹条件下加工表面边缘毛刺结果对比<sup>[48]</sup>

Fig.15 Comparison of machining results of edge burrs under different clamping conditions<sup>[48]</sup>

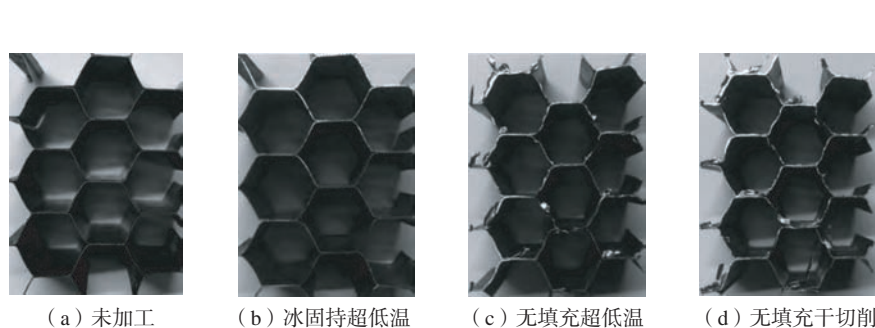
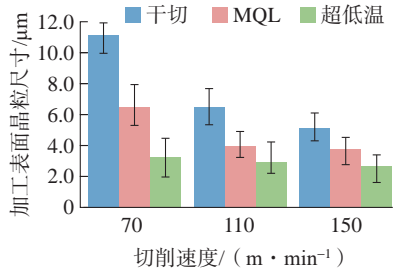
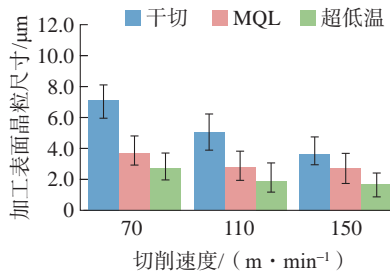


图 16 不同加工条件下蜂窝芯加工质量<sup>[49]</sup>

Fig.16 Machining quality of honeycomb core under different machining conditions<sup>[49]</sup>



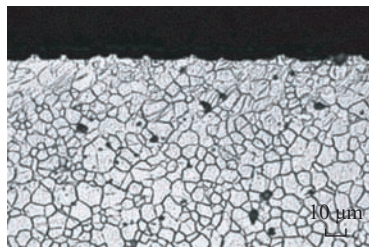
(a) 进给量0.05 mm/r时不同切削速度



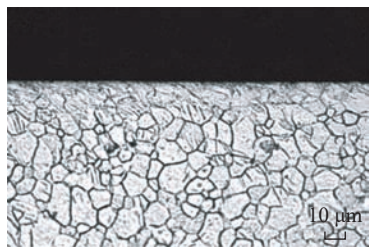
(b) 进给量0.10 mm/r时不同切削速度

图 17 不同切削速度和进给量下晶粒尺寸变化的比较<sup>[50]</sup>

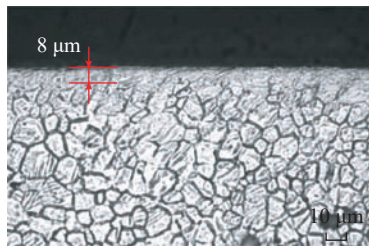
Fig.17 Comparison of measured grain size variation at varying the cutting speed and feed rate<sup>[50]</sup>



(a) 加工前



(b) 干切削加工



(c) 超低温冷却加工

图 18 不同冷却条件下的表面微观结构<sup>[38]</sup>

Fig.18 Microstructure of the surface under different cooling conditions<sup>[38]</sup>

显微硬度受冷却条件的影响较为明显,大量研究表明,在干切削条件下,刀具-工件界面受摩擦效应产生的热量很高,这增强了热软化效应并导致了更低的显微硬度值<sup>[54]</sup>。在使用液氮作为冷却介质的超低温冷却加工中,热软化效应得到缓解,加工表面和亚表面的显微硬度也得到提高。李祥等<sup>[55]</sup>通过开展不同射流温度下 GH2132 高温合金的切削试验,发现随着射流温度降低,工件已加工表面显微硬度增大,在 -190 °C 时达到最大值。如图 19 所示, Kheireddine

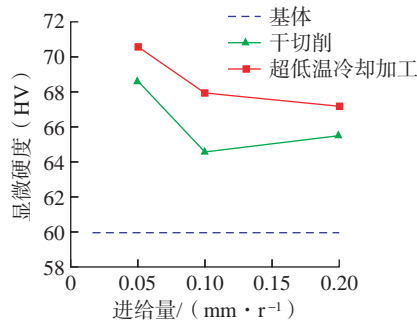
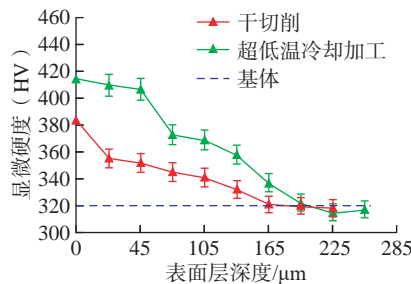
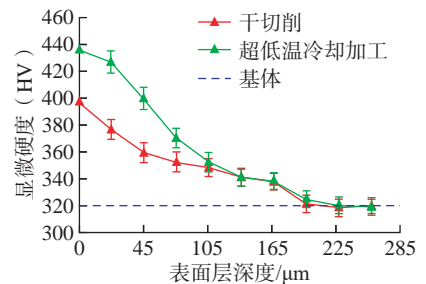


图 19 不同进给量下测量的表面硬度<sup>[56]</sup>

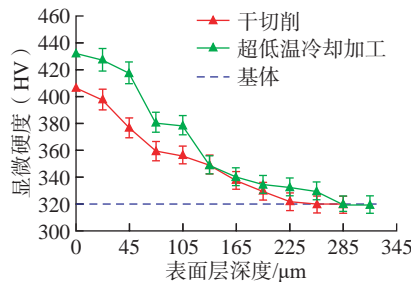
Fig.19 Measured surface hardness at varying values of feed<sup>[56]</sup>



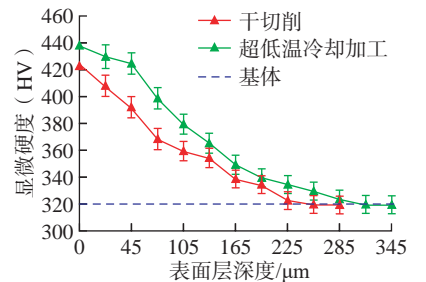
(a) 切削速度30 m/min



(b) 切削速度50 m/min



(c) 切削速度70 m/min



(d) 切削速度90 m/min

图 20 在干切削和超低温冷却加工中不同切削速度下显微硬度变化<sup>[57]</sup>

Fig.20 Microhardness variation in dry and cryogenic machining at different cutting speeds<sup>[57]</sup>

等<sup>[56]</sup>研究表明 AZ31B 镁合金在超低温冷却钻孔时硬度明显高于干切削。Fallah 等<sup>[57]</sup>研究了超低温冷却和干切削条件下 TC4 钛合金显微硬度的变化规律,结果表明,超低温冷却加工的显微硬度高于干切削,且随着切削速度的增加,显微硬度和硬化层深度也会增加,如图 20 所示。苏文佳<sup>[12]</sup>开展了干切削和液氮冷却条件下 TC17 钛合金的铣削试验,如图 21 所示,结果表明液氮冷却加工表面显微硬度大于干切削,这主要是因为液氮冷却条件下新生成的加工表面更易与氮元素结合生成硬质层,进而增大表面显微硬度。

## 2.4 超低温冷却对残余应力的影响

残余应力是固体材料在外部机械载荷和热载荷消除后的一种自平衡内应力,对零件使役性能和疲劳寿命有重要影响,机械载荷产生的压应力对零部件使役性能有益,而热载荷产生的拉应力如果过大则有危害。超低温冷却可大幅度削弱热效应,进而抑制工件表面和亚表面产生的残余拉应力<sup>[7,58]</sup>。Toker 等<sup>[29]</sup>研究了不同

冷却条件和切削参数对 Inconel 718 镍基合金残余应力的影响,结果显示所有被加工工件都表现出残余压应力,如图 22 所示,这表明在表面层生成过程中没有明显的热软化效应。Behera 等<sup>[59]</sup>研究了超低温车削 Inconel 718 镍基合金对表面完整性的影响,对比高压乳化液冷却(HPJ)、超低温冷却和 MQL (nMQL 为纳米微量润滑),发现液氮(LN<sub>2</sub>)超低温冷却可显著改善加工表面完整性,并减小残余拉应力,如图 23 所示。

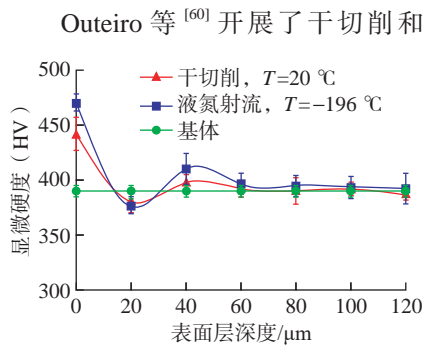


图 21 干切削和液氮冷却条件下的加工表面显微硬度<sup>[12]</sup>

Fig.21 Microhardness of machined surfaces under dry and cryogenic cooling conditions<sup>[12]</sup>

超低温冷却条件下 AZ31B 镁合金的切削试验,其轴向深度残余应力曲线如图 24 所示,结果表明超低温冷却加工有助于增加残余压应力。钱景行等<sup>[61]</sup>利用有限元软件 ABAQUS 建立了 AZ31B 镁合金的切削模型,用来预测已加工表面的残余应力分布,发现以液氮为冷却介质进行加工时,残余拉应力向残余压应力进行转变,且残余压应力最大值有所增加。牟海阔等<sup>[62]</sup>开展了铝锂合金的干切削和液氮冷却切削试验,结果表明在高转速、大切深、高进给情况下液氮冷却加工可以获得更高的表面残余压应力,同时也能提高材料的去除效率。

Zhao 等<sup>[63]</sup>研究了超低温冷却切削对 Ti-5553 钛合金疲劳寿命的影响,结果显示,相比于干切削和乳化液冷却条件,超低温冷却降低了加工过程产生的热载荷,减小残余拉应力并增加了残余压应力。刘召欢<sup>[11]</sup>建立了液氮冷却条件下的 TC4 钛合金加工表面残余应力有限元模型,结果表明超低温冷却可增大残余压

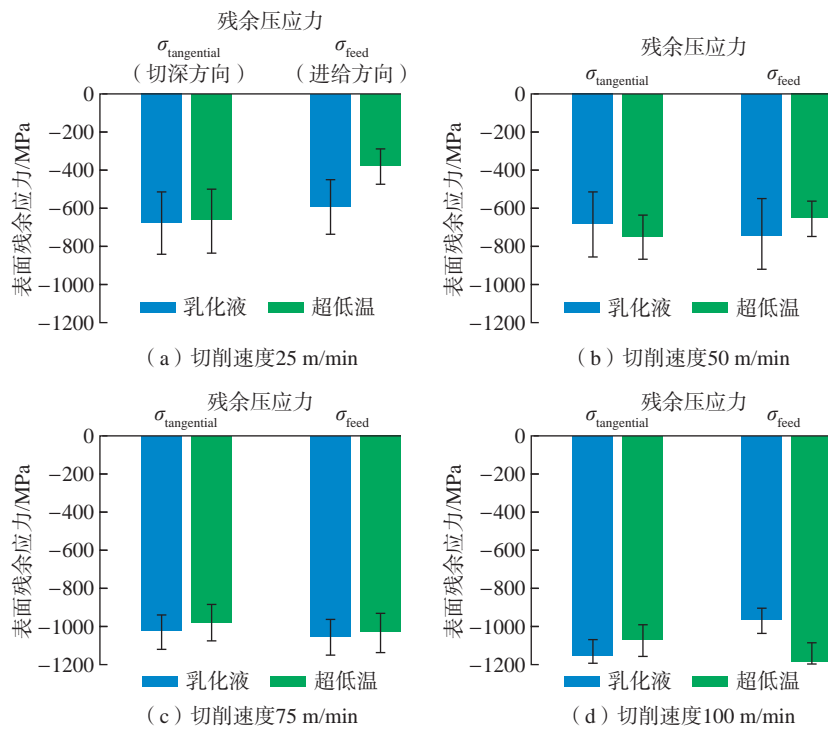


图 22 不同切削速度下加工表面的残余应力变化<sup>[29]</sup>

Fig.22 Residual stresses variation of machined surface as a function of cutting speed<sup>[29]</sup>

力。Li 等<sup>[64]</sup>对比分析了干切削、乳化液冷却和超低温冷却条件对车削 TC4 钛合金的表面完整性的影响,结果发现,相比于干切削条件,液氮冷却和乳化液冷却均能降低切削温度,减小由热效应产生的残余拉应力,但液氮冷却条件下的残余压应力值更高。

### 3 结论

本文介绍了超低温冷却施加方式和相应加工装置,并对难加工金属材料超低温冷却加工表面完整性展开了综述与分析。结果表明,与干切削、乳化液冷却和 MQL 条件相比,超低温冷却有利于改善钛合金、高温合金和镁合金等难加工金属材料的加工表面完整性。本文研究的主要结论如下。

(1) 超低温冷却加工可以降低表面粗糙度。液氮的强冷却作用可带走大量切削热,使切削区域温度大幅度降低,进而抑制刀具磨损,减少积屑瘤和切屑黏附现象,利于表面质量的改善;在超低温环境下,材料塑性下降、硬度提高,加工侧向塑性流动和材料变形得到有效抑制,最终使粗糙度降低。

(2) 超低温冷却加工可以增大加工表面和亚表面的显微硬度。在液氮冷却条件下,切削第三变形区热软化效应下降,使得应变硬化效应得到加强,促进了加工表面显微硬度的

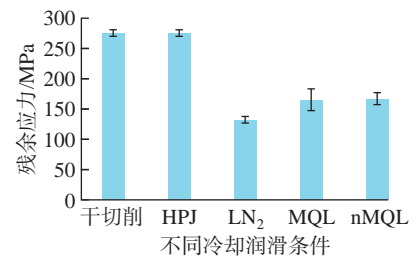


图 23 不同冷却润滑条件下的残余应力变化<sup>[59]</sup>

Fig.23 Variation of residual stress under different cooling and lubrication conditions<sup>[59]</sup>

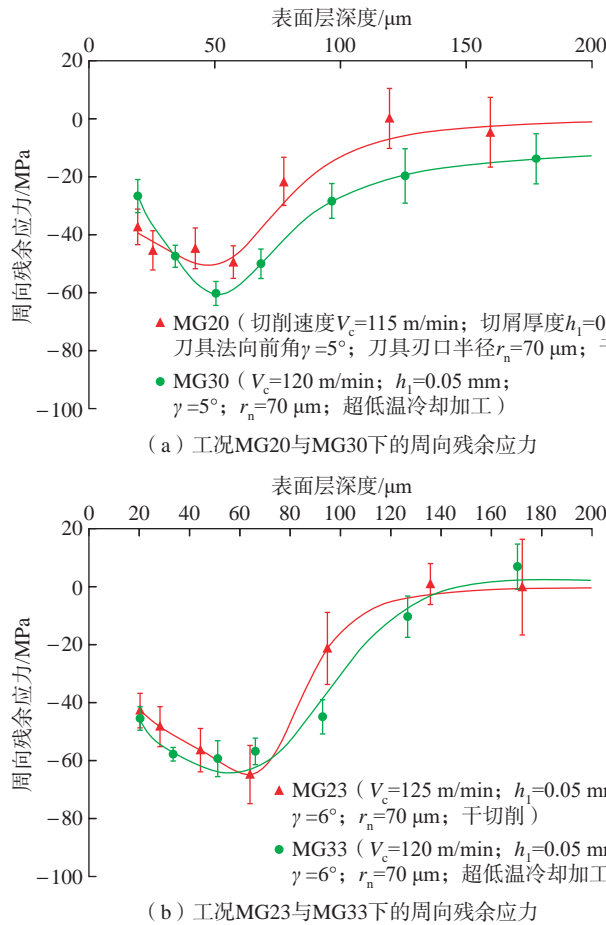


图 24 干切削和超低温切削条件下周向深度残余应力分布<sup>[60]</sup>

Fig.24 In-depth residual stress profiles in the circumferential direction under dry and cryogenic cutting conditions<sup>[60]</sup>

提高;液氮极强的冷却速度会促进亚表面层晶粒细化,提高亚表面显微硬度。显微硬度提高可有效提升零件强度、硬度和耐磨性。

(3)超低温冷却加工可以改善表面残余应力。在液氮冷却条件下,材料自身塑性变形能力下降,同时热应力造成的塑性变形减小,所以超低温冷却加工中零件表层残余拉应力要比常规切削时明显减小,且表层所形成的残余应力梯度小,应力分布更为合理。

现阶段,在金属材料超低温冷却加工表面完整性测试与分析方面,已取得了较为丰富的研究成果。但是,超低温冷却加工特有的机理与规律

以及更深层次表面完整性成因,还需要进一步的研究,以探明其科学本质。超低温刺激下,被加工材料可能发生复杂的应激式反应,需要定量评价超低温冷却对材料服役性能的影响,确定超低温介质对不同材料的影响阈值。实施超低温冷却,在常规切削过程中引入了新的影响因素,亟须探索超低温冷却加工中的切削热、切削力行为,以及材料断裂机理。上述工作可为超低温冷却加工表面完整性的全面、深入研究提供必要支持。

### 参考文献

[1] 康风, 闫峰, 杨鄂川, 等. 轻合金在国内外航空炸弹上的应用研究[J]. 材料导报,

2014, 28(2): 136-138.

KANG Feng, YAN Feng, YANG Echuan, et al. Application of the light structure material in the foreign aerial bomb[J]. Materials Review, 2014, 28(2): 136-138.

[2] MOHSAN A U H, LIU Z Q, PADHY G K. A review on the progress towards improvement in surface integrity of Inconel 718 under high pressure and flood cooling conditions[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(1): 107-125.

[3] 郭东明. 高性能精密制造[J]. 中国机械工程, 2018, 29(7): 757-765.

GUO Dongming. High-performance precision manufacturing[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(7): 757-765.

[4] 白清顺, 郭永博, 陈家轩, 等. 超洁净制造的研究与发展[J]. 机械工程学报, 2016, 52(19): 145-153.

BAI Qingshun, GUO Yongbo, CHEN Jiakuan, et al. Research and development of ultra-clean manufacturing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(19): 145-153.

[5] SHOKRANI A, DHOKIA V, NEWMAN S T. Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 57: 83-101.

[6] YILDIZ Y, NALBANT M. A review of cryogenic cooling in machining processes[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48(9): 947-964.

[7] UMBRELLO D, MICARI F, JAWAHIR I S. The effects of cryogenic cooling on surface integrity in hard machining: A comparison with dry machining[J]. CIRP Annals, 2012, 61(1): 103-106.

[8] HONG S Y, DING Y C. Cooling approaches and cutting temperatures in cryogenic machining of Ti-6Al-4V[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2001, 41(10): 1417-1437.

[9] TAHRI C, LEQUIEN P, OUTEIRO J C, et al. CFD simulation and optimize of LN2 flow inside channels used for cryogenic machining: Application to milling of titanium alloy Ti-6Al-4V[J]. Procedia CIRP, 2017, 58: 584-589.

- [10] 杨子健. 超低温加工用液氮在线制备及调控系统研制[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- YANG Zijian. Development of on-line preparation and control system of liquid nitrogen for ultra-low temperature processing[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [11] 刘召欢. Ti-6Al-4V 钛合金液氮冷却加工表面残余应力仿真分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- LIU Zhaohuan. Simulation analysis of surface residual stress of Ti-6Al-4V titanium alloy in liquid nitrogen cooling process[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [12] 苏文佳. 钛合金低温力学性能与低温铣削基础试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.
- SU Wenjia. Basic experimental study on low temperature mechanical properties and low temperature milling of titanium alloy[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021.
- [13] 李建明. 液氮冷却车削高温合金 Inconel 718 材料去除机理研究[D]. 济南: 济南大学, 2020.
- LI Jianming. Study on material removal mechanism of liquid nitrogen cooling turning superalloy Inconel 718[D]. Jinan: University of Jinan, 2020.
- [14] 王相宇. 高温合金 GH4169 的切削加工性评价方法和本构模型研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- WANG Xiangyu. Study on machinability evaluation method and constitutive model of superalloy GH4169[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [15] WANG Z Y, RAJURKAR K P. Wear of CBN tool in turning of silicon nitride with cryogenic cooling[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1997, 37(3): 319-326.
- [16] WANG Z Y, RAJURKAR K P. Cryogenic machining of hard-to-cut materials[J]. Wear, 2000, 239(2): 168-175.
- [17] LI S J, HU Y K, JIANG X, et al. Experimental study on cryogenic cutting of high-strength steel with liquid nitrogen cooling[J]. Advanced Materials Research, 2011, 328-330: 470-473.
- [18] MAG. Cryogenic machining takes flight with F-35[J]. Manufacturing Engineering, 2011, 147(5): 33, 35-38.
- [19] AHMED L S, KUMAR M P. Cryogenic drilling of Ti-6Al-4V alloy under liquid nitrogen cooling[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2016, 31(7): 951-959.
- [20] HUANG B, KAYNAK Y, SUN Y, et al. Surface layer modification by cryogenic burnishing of Al 7050-T7451 alloy and validation with FEM-based burnishing model[J]. Procedia CIRP, 2015, 31: 1-6.
- [21] 王永青, 郭东明, 郭立杰, 等. 超低温加工技术的研究现状及发展趋势[J]. 上海航天, 2020, 37(3): 11-21.
- WANG Yongqing, GUO Dongming, GUO Lijie, et al. Research status and development trend of cryogenic machining technology[J]. Aerospace Shanghai, 2020, 37(3): 11-21.
- [22] LIU K, HAN L S, WANG Y Q, et al. Theoretical and experimental research towards labyrinth sealing mechanism of liquid nitrogen in the cryogenic spindle[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 167: 108502.
- [23] 赵地, 王永青, 刘阔, 等. 超低温介质内冷式刀柄的设计及试验研究[J]. 中国机械工程, 2022, 33(5): 600-606.
- ZHAO Di, WANG Yongqing, LIU Kuo, et al. Design and experimental study of cryogenic medium internal cooling toolholders[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(5): 600-606.
- [24] GAN Y Q, WANG Y Q, LIU K, et al. The development and experimental research of a cryogenic internal cooling turning tool[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 319: 128787.
- [25] 王永青, 韩灵生, 刘阔, 等. 超低温加工机床的液氮冷却介质可靠传输与精准调控[J]. 机械工程学报, 2020, 56(1): 187-195.
- WANG Yongqing, HAN Lingsheng, LIU Kuo, et al. Reliable transmission and precise regulation of liquid nitrogen as the coolant of cryogenic machine tool[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(1): 187-195.
- [26] ZHAO W, GONG L, REN F, et al. Experimental study on chip deformation of Ti-6Al-4V titanium alloy in cryogenic cutting[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96(9): 4021-4027.
- [27] 张小明, 贺子和, 丁汉, 等. 一种适用于 Inconel 718 切削加工的双喷头式液氮冷却系统: CN105583689A[P]. 2017-09-12.
- ZHANG Xiaoming, HE Zihang, DING Han, et al. A dual nozzle liquid nitrogen cooling system for Inconel 718 machining: CN105583689A[P]. 2017-09-12.
- [28] ULUTAN D, OZEL T. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(3): 250-280.
- [29] TOKER G P, SCHOOP J, KARACA H. Machining-induced surface integrity and nanocrystalline surface layers in cryogenic finishing turning of Inconel 718[J]. Machining Science and Technology, 2022, 26(4): 640-664.
- [30] DANISH M, GUPTA M K, RUBAIEE S, et al. Influence of hybrid Cryo-MQL lubri-cooling strategy on the machining and tribological characteristics of Inconel 718[J]. Tribology International, 2021, 163: 107178.
- [31] SALUR E. Understandings the tribological mechanism of Inconel 718 alloy machined under different cooling/lubrication conditions[J]. Tribology International, 2022, 174: 107677.
- [32] KAYNAK Y. Evaluation of machining performance in cryogenic machining of Inconel 718 and comparison with dry and MQL machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 72(5): 919-933.
- [33] LIU E L, WANG R Y, ZHANG Y, et al. Surface integrity analysis of Ti-5553 under different cooling strategies[J]. Ferroelectrics, 2022, 593(1): 51-62.
- [34] 戴明华, 刘阔, 张红哲, 等. 液氮超低温冷却车削钛合金的综合实验[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(8): 55-60.
- DAI Minghua, LIU Kuo, ZHANG Hongzhe, et al. Comprehensive experiment of liquid nitrogen cryogenic cooling turning titanium alloy[J]. Experimental Technology and Management, 2021, 38(8): 55-60.
- [35] GAN Y Q, WANG Y Q, LIU K, et al. Machinability investigations in cryogenic internal cooling turning Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V titanium alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 120(11): 7565-7574.
- [36] 宋戈, 姜振喜, 李卫东, 等. 基于液氮低温冷却的钛合金铣削技术研究[J]. 制造技术与机床, 2020(7): 22-26.

- SONG Ge, JIANG Zhenxi, LI Weidong, et al. Study on milling technology of titanium alloy based on low-temperature liquid nitrogen cooling[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2020(7): 22–26.
- [37] DINESH S, SENTHILKUMAR V, ASOKAN P, et al. Effect of cryogenic cooling on machinability and surface quality of bio-degradable ZK60 Mg alloy[J]. *Materials & Design*, 2015, 87: 1030–1036.
- [38] PU Z, OUTEIRO J C, BATISTA A C, et al. Enhanced surface integrity of AZ31B Mg alloy by cryogenic machining towards improved functional performance of machined components[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, 56: 17–27.
- [39] DHAR N R, KAMRUZZAMAN M. Cutting temperature, tool wear, surface roughness and dimensional deviation in turning AISI-4037 steel under cryogenic condition[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, 47(5): 754–759.
- [40] PU Z, YANG S, SONG G L, et al. Ultrafine-grained surface layer on Mg–Al–Zn alloy produced by cryogenic burnishing for enhanced corrosion resistance[J]. *Scripta Materialia*, 2011, 65(6): 520–523.
- [41] PERÇIN M, ASLANTAS K, UCUN İ, et al. Micro-drilling of Ti–6Al–4V alloy: The effects of cooling/lubricating[J]. *Precision Engineering*, 2016, 45: 450–462.
- [42] SHOKRANI A, DHOKIA V, NEWMAN S T. Investigation of the effects of cryogenic machining on surface integrity in CNC end milling of Ti–6Al–4V titanium alloy[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2016, 21: 172–179.
- [43] 刘泉, 邓文君, 陈海涛, 等. 低温切削 7075 铝合金鳞刺形成规律及抑制措施[J]. *中国机械工程*, 2022, 33(3): 261–269.
- LIU Xiao, DENG Wenjun, CHEN Haitao, et al. Scale thorn formation regularity and inhibitory measures in cryogenic cutting processes of aluminum alloy 7075[J]. *China Mechanical Engineering*, 2022, 33(3): 261–269.
- [44] 张慧萍, 靳杰, 王尊晶, 等. 低温微量润滑高速车削高强度钢表面质量研究[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2019, 24(6): 33–40.
- ZHANG Huiping, JIN Jie, WANG Zunjing, et al. Study on the machined surface quality in high speed turning high strength steel under cryogenic minimum quantity lubrication[J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2019, 24(6): 33–40.
- [45] PAN D, WANG X Y, NIU J T, et al. Surface integrity of turned 6061 aluminum alloy using liquid nitrogen as cooling medium[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1885(3): 032048.
- [46] LIU H B, WANG C X, LI T, et al. Fixturing technology and system for thin-walled parts machining: A review[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2022, 17(4): 55.
- [47] 王永青, 左月帅, 刘阔, 等. 一种面向金属蜂窝芯的热电制冷冰冻固持系统: CN115625544A[P]. 2023–01–20.
- WANG Yongqing, ZUO Yueshuai, LIU Kuo, et al. A thermoelectric cooling ice fixation system for metal honeycomb cores: CN115625544A[P]. 2023–01–20.
- [48] WANG C X, XIONG W T, DING G, et al. Numerical analysis of the forming mechanism of exit burrs in metal milling under ice boundary constraint[J]. *Materials*, 2022, 15(16): 5546.
- [49] 姜少玮, 王永青, 刘阔, 等. 高温合金蜂窝芯冰固持低损伤加工技术研究[J]. *中国机械工程*, 2022, 33(5): 577–582.
- JIANG Shaowei, WANG Yongqing, LIU Kuo, et al. Research on ice fixation and low damage machining technology of superalloy honeycomb cores[J]. *China Mechanical Engineering*, 2022, 33(5): 577–582.
- [50] ROTELLA G, DILLON O W, UMBRELLO D, et al. The effects of cooling conditions on surface integrity in machining of Ti6Al4V alloy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 71(1): 47–55.
- [51] 殷晓龙, 邓文君, 张嘉阳, 等. 超低温挤出切削 7075 铝合金的组织与性能[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(5): 89–95.
- YIN Xiaolong, DENG Wenjun, ZHANG Jiayang, et al. Microstructure and mechanical properties of Al7075 alloy prepared by cryogenic-temperature extrusion machining[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 47(5): 89–95.
- [52] 范雷, 颜培, 陈仕齐, 等. 镁合金低速切削性能及工艺参数优化[J]. *哈尔滨工*
- 业大学学报, 2022, 54(7): 53–63, 69.
- FAN Lei, YAN Pei, CHEN Shiqi, et al. Optimization of process parameters and performances of cryogenic cutting of magnesium alloy[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2022, 54(7): 53–63, 69.
- [53] DANISH M, RUBAIEE S, IJAZ H. Predictive modelling and multi-objective optimization of surface integrity parameters in sustainable machining processes of magnesium alloy[J]. *Materials*, 2021, 14(13): 3547.
- [54] GONG L, BERTOLINI R, BRUSCHI S, et al. Surface integrity evaluation when turning Inconel 718 alloy using sustainable lubricating-cooling approaches[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing: Green Technology*, 2022, 9(1): 25–42.
- [55] 李祥, 郑光明, 颜培, 等. 清洁切削高温合金涂层刀具切削性能及加工表面完整性[J]. *中国机械工程*, 2023, 34(4): 454–463.
- LI Xiang, ZHENG Guangming, YAN Pei, et al. Cutting performance of coated tools and machined surface integrity in superalloy clean cutting[J]. *China Mechanical Engineering*, 2023, 34(4): 454–463.
- [56] KHEIREDDINE A H, AMMOURI A H, LU T, et al. An FEM analysis with experimental validation to study the hardness of In-process cryogenically cooled drilled holes in Mg AZ31b[J]. *Procedia CIRP*, 2013, 8: 588–593.
- [57] FALLAH M M, JAFARIAN F. Cryogenic and dry machining of Ti6Al4V alloy for evaluation of microhardness, thermal loads, microstructure, and surface quality[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2022, 32: 5895–5905.
- [58] 彭泽宇, 颜培. 低温切削奥氏体 304 不锈钢残余应力研究[J]. *兵工学报*, 2019, 40(6): 1271–1276.
- PENG Zeyu, YAN Pei. Investigation into residual stress of austenitic 304 stainless steel at cryogenic temperature[J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(6): 1271–1276.
- [59] BEHERA B C, ALEMAYEHU H, GHOSH S, et al. A comparative study of recent lubri-coolant strategies for turning of Ni-based superalloy[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 30: 541–552.
- [60] OUTEIRO J C, BATISTA A C,

MARQUES M J. Residual stresses induced by dry and cryogenic cooling during machining of AZ31B magnesium alloy[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 996: 658–663.

[61] 钱景行, 于随然. AZ31B 镁合金低温切削的建模与仿真[J]. *机电一体化*, 2015, 21(2): 26–31.

QIAN Jingxing, YU Suiran. Modeling and simulation of the cryogenic machining of AZ31B magnesium alloy[J]. *Mechatronics*, 2015, 21(2): 26–31.

[62] 牟海阔, 黄信达, 袁益楚, 等. 铝锂合金高速铣削表面完整性实验研究[J]. *中国科学: 技术科学*, 2014, 44(1): 89–98.

MU Haikuo, HUANG Xinda, YUAN Yichu, et al. Investigation of surface integrity of aluminum lithium alloy in high speed machining[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2014, 44(1): 89–98.

[63] ZHAO X, LI R Y, LIU E L, et al. Effect of cryogenic cutting surface integrity on fatigue life of titanium alloy Ti-5553[J].

*Ferroelectrics*, 2022, 596(1): 115–125.

[64] LI J M, LI T Y, WANG X Y, et al. Effects of cooling conditions on surface integrity in turning of TC4 alloy[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 735(1): 012035.

通讯作者: 韩灵生, 博士后, 主要研究方向为超低温冷却加工关键技术, 超低温流体动密封理论与技术。

## Surface Integrity of Difficult-to-Machine Metal Materials for Cryogenic Machining: A Review

WANG Yongqing, ZUO Yueshuai, HAN Lingsheng, JIANG Shaowei, LI Jianming,  
LIU Kuo, LIU Haibo

(Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**[ABSTRACT]** Cryogenic machining is a cleaner processing technology which uses cryogenic coolants such as liquid nitrogen for cooling in material cutting process. It is widely used in the processing of difficult-to-machine metal materials in aerospace and other fields to solve problems such as insufficient cooling efficiency and poor machining quality during conventional cooling processing for these materials. In order to clarify the effect law of cryogenic machining on the surface integrity of difficult-to-machine metal materials, this paper particularly reviews the research progress in the analysis of surface roughness, micromorphology, microstructure, microhardness and residual stress of such materials under different cooling conditions. The results show that cryogenic coolant can take away a large amount of cutting heat and reduce tool wear, thus reducing the machined surface roughness, inhibiting surface defects, promoting grain refinement, improving microhardness and increasing residual compressive stress. Finally, researches on the surface integrity of cryogenic machining are summarized, and works which have not been carried out in relevant aspects are prospected.

**Keywords:** Cryogenic machining; Difficult-to-machine metal materials; Surface integrity; Residual stress; Microhardness; Grain refinement

(责编 逸飞)

引文格式: 雷国东, 徐悦. 未来大型客机发展方向及关键设计技术研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(14): 26-37.

LEI Guodong, XU Yue. Development directions and key design technologies research of future large airliners[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(14): 26-37.

# 未来大型客机发展方向及关键设计技术研究\*

雷国东, 徐悦

(中国航空研究院, 北京 100012)

[摘要] 未来大型客机将会朝着新能源化、低能耗化及超声速化方向发展, 并涉及这 3 个方向的综合应用。大型客机新能源化主要是指绿色低碳能源的应用, 包括常温液态可持续航空燃料(Sustainable aviation fuels, SAF)、低温液氢或液化甲烷燃料等。大型客机低能耗化发展包括节能气动布局与节能推进技术以及两者的综合应用, 节能气动布局包括大展弦比布局与翼身融合布局等; 节能推进技术包括超大涵道比加齿轮传动涡扇推进与低噪声桨扇推进技术等; 布局与推进综合应用包括边界层吸入式推进、分布式推进等。超声速化大型客机主要包括各种马赫 2~3 量级的低阻低声爆的大型超声速客机及未来水平起降大型高超声速客机, 声爆抑制、解决大型客机布局与推进的高低速设计矛盾等成为关键设计技术。大型客机的新能源化与低能耗化趋势是基于全球石油能源危机与全球变暖及导致的极端气候应对措施“绿色低碳”倡议与行动而得出, 需要分别从改变能源的“类型”与“数量”方向降低化石碳排放; 而超声速化趋势是基于人类对高速交通工具的迫切需求以及地面轨道交通工具高速化对航空制造业和航空运营企业带来的竞争压力, 以及跨洲跨洋高速交通需求等问题而归纳的。本文通过对大型客机的替代能源、低能耗设计、超声速化的发展趋势和关键技术进行阐述, 为未来民用航空的发展提供新的思路。

关键词: 绿色低碳; 可持续航空燃料(SAF); 翼身融合(BWB); 桨扇推进; 边界层吸入式推进(BLI); 声爆抑制

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.14.026



雷国东

研究员级高级工程师, 博士, 研究方向为新概念及新能源飞行器设计。

\* 基金项目: 航空科学基金(2019ZA004003); 中国航空研究院五性自立科学基金(ZC272006201)。

未来大型客机将会朝着新能源化、低能耗化及超声速化等方向发展, 包括这 3 个方向综合交叉应用, 如新能源化与低能耗化综合应用、低能耗化与超声速化综合应用、新能源化与超声速化或高超声速化综合应用等。大型客机新能源化主要是指满足“碳达峰与碳中和”政策与国际大趋势要求的绿色低碳航空能源的应用, 包括常温液态可持续航空燃料(Sustainable aviation fuels, SAF)、低温液氢或 LNG(Liquid natural gas)燃料等<sup>[1-4]</sup>。大型客机低能耗化发展方向包括节能概念气动布局与节能推进技术, 以及两者的综合应用即节能概念气动布局综合节能推进技术, 节能概念气动布局包括单纯增大

展弦比的大展弦比气动布局客机, 如支撑翼布局大型客机等, 以及协调发展弦比与浸湿面积比的翼身融合布局客机等; 节能推进技术包括超大涵道比加齿轮减速传动涡扇(Gear transferred fan, GTF)推进与低噪声桨扇(Prop-Fan、Open rotor)推进技术等; 布局与推进综合应用包括边界层吸入式推进(Boundary layer ingestion, BLI)及分布式推进等。大型客机超声速化主要包括各种马赫数 2~3 量级常规吸气式推进的低阻力与低声爆的大型超声速客机, 以及未来新型吸气式推进或火箭动力推进的水平起降大型高超声速客机。声爆抑制技术、大型客机的水平起降技术、超声速或高超巡航的气动布局

与推进系统高低速矛盾的解决途径等成为关键设计技术,此外还包括气动热防护、宽速域发动机技术等。

## 1 大型客机的替代能源

未来大型客机的新能源化是伴随着“碳达峰与碳中和”政策与抑制全球变暖及极端气候的大趋势而必须采取的技术,这个发展方向已经逐渐从“全球倡议”转变为收取“碳排放税”等主动制裁手段,尤其是欧盟各国对新能源航空激进地推进<sup>[5-6]</sup>。中国以积极态度向世界承诺实施“双碳”行动以遏制全球变暖和极端气候,而大型客机作为现代高科技工业的典型代表,是发达国家还能大规模盈利的尖端制造业产品,所以中国必须采取有效的新能源化策略以应对可能的技术突袭或者适航规章阻挡,同时应对不确定的国际石油危机等对航空业的打击。

### 1.1 常温替代型燃料

SAF是指可持续航空燃料<sup>[7-10]</sup>,主要包括生物制或清洁电能合成的航空煤油等燃料,大型客机使用的常温 SAF 与来自化石能源的航空燃料的理化性质十分接近,因而现有的大型客机设计制造框架几乎不需要改动,这也是美国和波音公司坚持研制 SAF 大型客机的基本原因,美国国内用于制造生物航空煤油的玉米等农作物产量丰富,而且国内人口相对较少,有足够的生物材料制作生物航空煤油,而欧盟和中国没有这个优势;此外美国的 PtX 技术,包括清洁电能制造航空煤油技术已经取得巨大突破,以来自大气或工厂的二氧化碳、水及清洁电能就可以合成航空煤油,而同期中国和日本等国家也在这项技术上取得了显著进展。用玉米、麻风树种子等制备植物能源产品不仅破坏生物多样性,而且成本过高,因而不会大规模推广,使用工厂化的微藻来制造航空煤油对人类和生物圈不具有危害性,但是需要巨大的投资

和商业运营成本;另外,可以使用工农业和人类生活有机废弃物制造航空燃料,例如利用厨余垃圾中的“地沟油”来制作航空煤油值得推广,但是“地沟油”可收集的量有限,处置成本较高,这限制了该项技术的大规模推广。

SAF 在考虑全生命周期时可以是“零碳”燃料, SAF 燃料中的碳排放可以完全来自大气圈或者生物圈,排放之后又有等量的碳被生物圈吸收或者 PtX 转化,在全生命周期总量上是平衡的,因此这类碳排放属于“碳循环”;对大气层和生物圈有害的碳排放是指来自化石燃料的二氧化碳排放,这类碳来自地壳深处,如果人类不去开采,极少有可能会排入大气层和生物圈中,进而造成全球气候变暖和极端气候频发;火山爆发,地震、闪电等自然现象也会使来自地壳内部的碳燃烧造成二氧化碳排放,

但这些与人类工业革命 300 年以来制造的碳排放相比十分微小。图 1 展示了“碳循环”和“碳排放”概念的不同,图 2 展示了 PtX 电制燃料发展路线。采用清洁电能,结合碳捕集技术、电解水制氢技术、空气分离氮气技术,可以化学合成甲烷、甲醇、氨气等清洁燃料,甚至合成更加复杂的碳氢化合物,例如汽油、柴油、航空煤油等,由于原料来自大气和水,能源来自清洁能源,合成的各种燃料可以成为全生命周期“零碳”燃料。使用这些碳氢化合物而不是液氢的原因在于这类合成工业技术,以及储存和运输、直接应用技术成熟,现有的动力装置不需做出较大改变,此外合成氨可以作为液氢远程运输的中介物质,液氨的运输和储存远比液氢成熟和便捷。

当前基于生物来源燃料的掺混或 100% SAF 成分的试验飞行器在

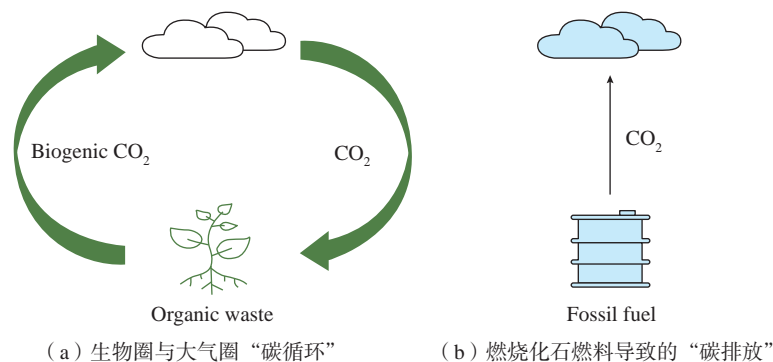


图 1 “碳循环”与“碳排放”

Fig.1 Carbon cycling and emission

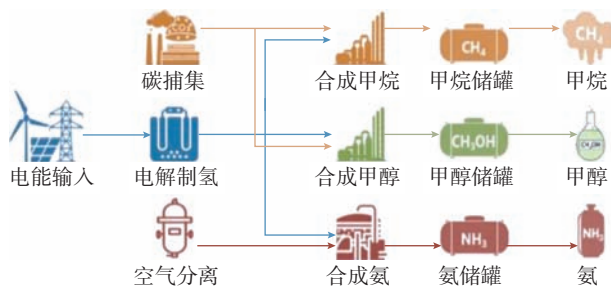


图 2 PtX 电制燃料技术路线示意图

Fig.2 PtX fuel technical approaches

国内外已研制成功,而基于清洁电能和碳捕集技术合成 SAF 的制造技术在国内外也已获得成功;基于 LNG 燃料的航空技术则在近 50 年前的苏联 Tu-155 客机上就试飞成功,欧盟和 NASA 近年来也提出基于生物 LNG 的概念飞机;LNG 与液氢不同,存储温度高约 90℃,密度是液氢的 7 倍,爆炸极限远窄于氢气,甲烷对金属材料也没有“氢脆”的风险和隐患,市场终端价格远低于液氢,甚至接近航空煤油一半,但是其热值却显著高于航空煤油,因汽车、船舶、航天工业应用广泛,所以外围应用配套设施技术十分成熟,是一种潜力极大的可持续航空燃料,生物型与合成型甲烷的生产没有技术门槛。

对于航空业本身,碳排放实际只占人类总碳排放量的 3%,航空行业排放的二氧化碳本身的危害性并不大,但是民航飞机制造的“尾迹云”却对地球温室效应影响显著。“尾迹云”的主要成分是冰晶,来自于发动机排气中的水蒸气,可长时间漂浮于平流层底部。“911 事件”之后全美的民航飞机禁飞,科学家统计并分析了禁飞期间 4000 多个气象站的记录数据,发现相较于非禁飞期间,气温白天偏高、夜间偏低明显,这实际上就是典型的地球温室效应显著削弱迹象,白天没有“尾迹云”反射阳光,地面接受了更多太阳辐射,而夜间没有“尾迹云”的阻挡,地面的热辐射更多地发射到了外太空。

水蒸气实际上也是一种温室气体<sup>[11]</sup>,甚至比二氧化碳和甲烷等典型温室气体更严重,而且水蒸气不能被人类控制,江河湖海大量水源会自行蒸发,地球的温室效应 60% 以上是由水蒸气造成,但国际上并未将其列入需要控制的温室气体名单,正是因其不可控;中国的“火炉”城市如重庆、武汉、杭州、南京等夏季的极端高温,一个重要原因是这些城市位于大江大河附近,大量水蒸气蒸发形

成“桑拿”效应。水蒸气与二氧化碳的主要不同在于水蒸气饱和之后会以雨雪冰雹等形式重回地面,同时溶解一部分二氧化碳形成酸雨回到地表,但“尾迹云”的温室效应却不会以这种形式缓解,而其“保温”效果会充分施展。

## 1.2 低温替代型燃料

低温燃料主要是指液氢或 LNG 等大型客机可以使用的需要低温存储的液态燃料<sup>[12-14]</sup>,即以液氢或 LNG 等作为能源,使用低温燃料航空发动机推进。图 3 是苏联进行飞行试验的低温燃料飞机,其同时成功试验了液氢和 LNG 两种低温燃料。图 4 是欧盟及美国 NASA 和波音公司提出的两种基于生物 LNG 的民用飞机概念,利用了 LNG 相对液氢的高体积能量密度特性。图 5 展示了 SAF、液氢燃料、生物 LNG 对气候影响的增量,如果考虑客机“尾迹云”的影响,液氢客机的温室效应消减效果甚至不如生物 LNG 客机,因为液氢燃料客机制造了更多的“尾迹云”,同时液氢过低的体积能量密度也导致了同级别客机的最大航程相对 SAF 和 LNG 显著减小。液氢作为能源使用的最大优势是质量能量密度极高,相当于航空煤油的 2.8 倍,且能源本身完全没有碳排放;劣势是液氢密度过低导致体积能量密度过低,而且需要极低温度存储(-253℃),导致低温储箱体积庞大,挤压了客机的有效可用容积,同时氢气的易爆炸性与易氢脆性等安全风险问题也必须得到可靠解决。氢气的制造,包括电解水或者甲烷制氢,其大部分来自化石能源,称之为“灰氢”,碳排放不仅没有减少反而增加;如果来源于清洁能源,例如风能、水能、光伏、生物质能源或核能,称为“绿氢”、“紫氢”,这两类氢碳排放显著降低。除了采用清洁能源电解水制氢的成本较高外,氢气的压缩与液化能耗也比较大,同时因为密度

过低导致的储存与运输成本也极高,其单位质量短途运输成本超过了航空煤油的终端价格,这都是氢能源飞机研发与应用中必须解决的主要问题,即制氢成本、储存成本、短途运输成本,其长途直接运输成本甚至超过

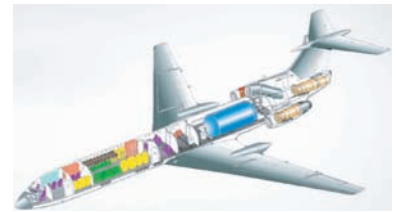


图 3 Tu-155 液氢和 LNG 低温燃料试验飞机  
Fig.3 Tu-155 plane fueled by LH<sub>2</sub> and LNG



(a) 欧盟生物 LNG 飞机概念



(b) NASA 的 LNG 燃料支撑翼客机概念

图 4 欧盟生物 LNG 螺旋桨与 NASA LNG 支撑翼概念飞机

Fig.4 Bio-LNG propeller planes of EU and LNG strut-braced wing plane of NASA

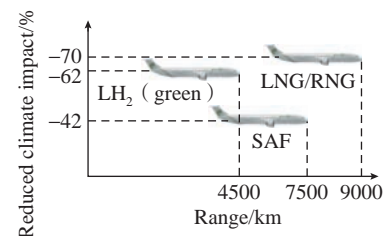


图 5 3 类燃料宽体远程客机航程与对气候影响  
Fig.5 Range and impacts on climate of three kinds of wide-body long range civil planes

将氢转化为液氢再由液氢制氢的成本。液氢可能是未来长途运输氢气的较好中介。

液氢燃料飞机的总体气动设计与现有的客机框架有比较大的差别,见图6和7,同时客机的配套设施,例如机场维护、燃料运输加注等都需要采取一定的改进措施。主要安全性问题有:(1)氢气爆炸极限极宽,为4%~75.6%;(2)氢脆问题,对铝、铁、钛等多种金属存在腐蚀性,存储和传输需预防氢脆隐患;(3)膨胀爆炸问题,液氢极易气化,一旦发生热泄露,储氢或传输装置内部压力增大易于膨胀爆炸;(4)低温伤害性,-253℃极低温度对设备材料和人体都是严重安全隐患,低温泄露极易发生冻伤危害。液氢燃料的市场价格过高,目前同等能量下难以与常规燃料的经济性竞争。

针对氢燃料的存储、传输、应用方面,有人提出将氢气通过吸附或溶解等物理方式获得比压缩氢更大的储氢密度,但是这些技术不成熟,很难应用于航空航天工业。另一类思路则是将氢气通过化学技术(如PtX),制成易于存储、传输、应用的含氢化合物,其典型形式是甲醇、甲

烷和氨气。甲醇常温是液态且易于合成,化学制氨技术也十分成熟且氢气液化容易,但是甲醇和液氢质量能量密度过低难以作为航空燃料使用;在长途运输之后,液氢加热并使用催化剂后易分解为氢气和氮气,而氢气则可直接作为燃料使用;甲烷液化后单位体积含氢量甚至比液氢还高约50%,体积能量密度约为液氢的2.5倍,质量能量密度接近液氢的50%,爆炸极限是5%~15%,沸点大大高于液氢;LNG燃料的存储温度为-162℃,密度为0.43 t/m<sup>3</sup>,甚至“可再生”,性能优良。生物天然气已成为成熟的替代能源技术,且国内产量潜力逼近化石天然气,而使用二氧化碳和水合成甲烷的技术也日趋成熟,尤其是没有氢脆的问题,对现有燃油发动机的改造极小,因此可以认为是一种极佳的“化学”储氢方式,同时天然气工业技术非常成熟,而且价格相对液氢更为便宜。

低温燃料储存技术可借鉴航天工业对液氢和液化甲烷的储存和应用,以及汽车和船舶工业中液氢燃料及LNG燃料的储存和使用,区别在于航天级低温储箱极为轻便,汽车和船舶工业低温储箱可以接受较大的

单位面积重量。近年来,波音公司的“幻影之眼”液氢内燃机无人机、德国DLR的双体4座液氢燃料电池载人飞机、Universal Hydrogen公司的液氢改型常规布局飞机相继试飞成功,这些都说明液氢能源在飞机上的存储问题已经初步得到解决,见图8~10。但是较大航程下液氢需要



(a) “幻影之眼”液氢无人机



(b) 包含巨大低温储氢罐的“幻影之眼”机身

图8 波音“幻影之眼”液氢内燃机驱动无人机  
Fig.8 “Phantom eye” liquid hydrogen plane of Boeing



图9 德宇航的双体氢能飞机  
Fig.9 Twin-body hydrogen plane of DLR



图10 Universal Hydrogen公司氢能改型飞机  
Fig.10 Modified hydrogen fueled planes of Universal Hydrogen company



(a) 液氢支线客机



(b) 液氢中程客机



(c) 液氢远程客机

图6 空客的3类液氢飞机概念

Fig.6 Three hydrogen civil planes of Airbus



(a) 液氢支线客机



(b) 液氢窄体客机



(c) 液氢宽体客机

图7 英国FlyZero项目3款氢动力客机概念

Fig.7 Three hydrogen fueled planes of UK FlyZero

占用机身较大体积这个“物理问题”仍然客观存在,“幻影之眼”采用了巨大罐状机身以容纳液氢的庞大体积,DLR的双体液氢飞机则采用“双机身”设计所提供的较大容积容纳液氢燃料的较大体积,而 Universal Hydrogen 公司的改型飞机试飞试验飞行时间极短,如果要执行较长时间的飞行任务也必须解决液氢较大体积的存储问题,似乎只有大型翼身融合布局才有可能提供充足的存储空间<sup>[15-16]</sup>。

### 1.3 关键设计技术研究

能源特性的不同导致总体设计的差异,对于常温 SAF 型新能源,现有的大型客机技术框架甚至配套设施几乎不需要改变,因为无论是生物型航空煤油还是合成型航空煤油,与现有的化石燃料(例如航空煤油)的理化性质差异十分微小;但是对于低温燃料,液氢或 LNG,由于燃料密度过小(航空煤油  $0.78 \text{ t/m}^3$ ; 液氢  $0.07085 \text{ t/m}^3$ ; LNG  $0.43 \text{ t/m}^3$ )需要较大的内部或外置存储容积,且因需要低温储存,无法设计和利用机翼油箱,为减低巡航阻力一般使用机舱容积,必然挤压客舱或货舱可用容积,带来总体设计上的较大改变。

在总体设计上,对于低温燃料由于机翼不必设计存储燃料的油箱,可以设计为更薄的外形和结构,使机翼阻力降低,但机身可能需要设计加粗加长,因此低温燃料的储存将使大型客机的总体布置与气动外形以及结构设计产生较大改变。如果采用外置低温燃料箱,例如将低温燃料箱置于翼尖或翼下等典型部位,则会导致全机巡航阻力显著增加,因此需要更加全面的总体参数权衡。采用新型气动布局例如翼身融合或者双机身布局或可解决内部低温存储容积不足的问题,但翼身融合布局本身的安全问题与飞行控制以及适航等问题必须先行得到有效解决。

在安全保障方面,低温燃料的安全性保障将成为大型客机设计的一项关键技术,低温状态对人员和设备的伤害非常严重,剧烈的物理膨胀所造成的爆炸风险也是必须重点关注和解决的。对于液氢燃料,由于其爆炸极限极宽,一旦在机舱聚集产生化学爆炸的风险极为严重,历史上使用氢气的“齐柏林”飞艇曾经取得过辉煌的成绩,但是发生一次大爆炸之后立即全面反思和停飞,这是液氢燃料大型客机必须吸取的前车之鉴。液氢对多种金属材料(铝、铁、钛等)的“氢脆”危害也必须得到彻底解决,以避免氢气对大型客机的机体承力结构金属材料的隐蔽性破坏风险。

在地面配套方面,低温燃料的运输和加注技术是必须解决的关键问题。液氢燃料由于极低的存储温度和极高的安全风险,同时因其密度不足航空煤油的十分之一,配套运输同样重量液氢燃料需要超过 10 倍的运输车辆,因此运输储存和加注技术成本必然比较高,基本上需要重新进行基础设施建设;但是对于 LNG 燃料,其密度约为液氢 7 倍,运输储存和加注技术,以及在航天工业、船舶和汽车工业上应用比较成熟,因此在航空业应用会水到渠成。

## 2 大型客机的低能耗设计技术

低能耗化是指客机本身因气动布局的升阻比较高、推进系统效率较高,或者特殊的推进系统设计带来气动布局升阻比较高,从而显著降低总体能耗的一类设计。根据布雷盖航程公式,巡航升阻比与比油耗是大型客机非常关键的两个设计参数,升阻比的增大、比油耗的降低可以显著提升大型客机的总体性能。升阻比与客机机翼的展弦比呈正相关关系,与全机浸湿面积比的倒数呈正相关关系,这就解释了常规布局大型客机一般通过增大机翼展弦比提升气动性

能;而翼身融合布局大型客机则是通过降低浸湿面积比,并适度增大展弦比来增大巡航升阻比。常规布局大型客机的展弦比现已由 8 增大到 11 以上。而推进效率的增加可采取的技术包括增大涡扇发动机的涵道比,采用齿轮减速传动使风扇与压气机及涡轮均处于高效率状态,甚至采用桨扇推进技术(桨扇又名开式转子)。通过共轴对转设计将一般螺旋桨制造的无推进作用的旋流消除,因而推进效率较高,使巡航比油耗显著降低,可以视为介于螺旋桨发动机和涡扇发动机之间的一类推进形式,典型飞机包括苏联的 An-22 共轴对转桨扇推进运输机(最大起飞重量 250 t)和乌克兰的 An-70 运输机(最大起飞重量 140 t),见图 11 和 12。

桨扇推进既可像螺旋桨发动机一样具有较高的推进效率,又可像涡扇发动机那样可以执行高亚音速巡航,螺旋桨飞机一般巡航马赫数低于 0.6,而桨扇飞机的巡航马赫数可达 0.6~0.9,但桨扇推进的噪声问题比较严重,较难满足适航噪声要求。布局与推进综合增效设计技术,如边界层吸入式推进,将涡扇或电动风扇置于



图 11 苏联 An-22 共轴对转桨扇推进运输机  
Fig.11 Coaxial reverse rotating prop-fan An-22 airliner of USSR



图 12 乌克兰的 An-70 运输机  
Fig.12 An-70 transport aircraft of Ukraine

后机身边界层流动区域内,降低来流对风扇的冲击阻力,并给机身尾迹负压区增加能量,从而显著降低飞行阻力,但 BLI 推进技术需要涡扇发动机的压气机可以容忍较大范围的进气畸变和总压损失等问题,目前处于前沿研究状态;分布式推进技术则兼有 BLI 效应、增大推进发动机涵道比及齿轮减速传动使转速匹配增效的效果,但是推进系统过于复杂,如果是电力推进,又带来发电和电动系统重量,从而显著降低了推进系统的功重比。

### 2.1 节能性气动布局

增大展弦比和采用翼身融合技术是未来大型客机可显著改进气动性能的设计技术,见图 13 和 14,增大展弦比设计已在大型客机上应用,但会导致翼展超出机场适航要求。4E 级机场要求大型客机翼展不大于 65 m,波音 777X 飞机的翼展高达 71.8 m,由于采用了可折叠低阻翼尖设计,使其既满足了 4E 级机场翼展要求,又兼顾了气动效率;空客公司的 A380 客机翼展约 80 m,没有采用折叠翼尖设计,故只能在 4F 级机场起降和停放,这就严重影响了 A380 客机的机场适应性,从而影响了销量,而销量不足最终导致不得不停产。一种增大展弦比的极致设计是支撑翼布局,而支撑翼布局也可采用折叠翼尖类设计满足民航机场对大型客机翼展的适航要求。

翼身融合布局设计大概率不会成为未来大型客机的典型设计型式,人类对未来长航程超大型客机的需求并不迫切,现实航空客运青睐大型客机点对点模式,而不是超大型客机的枢纽式运输,依据是波音 747 与空客 A380 等超大型客机的停产。只有超大型设计才可充分发挥翼身融合布局的气动优势,这是由于机舱高度是受商载装载限制的,小型化的翼身融合布局相对常规布局客机并无显著优势,甚至存在安全性、舒适性、

飞行控制以及适航等问题。现有常规布局设计足以满足当前人类的航空客运需求,并有较大潜力可挖掘,并非翼身融合布局这项技术不行,而主要是市场需求不足,例如翼身融合布局航空器在军用方向已经成为现实,甚至成为某些类型军机的主要形式。如果人类经济持续繁荣使广大亚非拉国家,尤其是中国与印度这类超大人口国家乘坐飞机出行人口比例大幅度增加,翼身融合布局客机或可迎来春天;在人口密度较大的国家和地区,相对廉价且运输量更大的地面交通工具的大幅度提速对翼身融合布局等大型客机的研发是巨大挑战;能源科技的革命性

进步则是抑制翼身融合布局客机应用的另一项不利因素,翼身融合布局的显著优势是巡航升阻比极高,但是氢能等新型替代能源或新型推进技术的进步则可从降低巡航比油耗这一维度超越翼身融合布局的优势。

### 2.2 节能性推进技术

超大涵道比加齿轮传动涡扇推进与低噪声桨扇推进是大型客机降低能耗的重要手段,桨扇推进实际上可以视为一种超大涵道比的涡扇发动机,兼顾了螺旋桨推进的低比油耗特性及涡扇推进适应高亚音速巡航的特点,见图 15。但是共轴对转设计和没有涵道外壳体的阻挡造成



(a) 波音777X客机的折叠翼尖



(b) 波音公司的支撑翼民航概念机

图 13 波音 777X 折叠翼尖设计及波音公司的支撑翼概念民航

Fig.13 Foldable wing-tip of Boeing 777X, and braced wing civil conceptual plane of Boeing company



(a) 波音公司的翼身融合布局概念



(b) 空客公司的翼身融合布局客机概念

图 14 波音和空客的翼身融合布局民航概念

Fig.14 BWB conceptual airliners of Boeing and Airbus



(a) CFM公司的试验型桨扇发动机



(b) CFM公司的3种不同桨扇布置客机概念

图 15 CFM 公司的桨扇推进装置与 3 种桨扇推进客机概念

Fig.15 Prop-fan engine and three conceptual prop-fan airliners of CFM company

对外辐射噪声极大,较难满足飞行和机场适航规章对大型客机噪声的要求,历史上仅有苏联和乌克兰等推出不太关注噪声要求的轰炸机、运输机及大型客机型号,见图 16;近年来随着能源价格的上涨,这类推进技术再一次被先进飞机和发动机公司推出,DLR 和 NASA 近年来均加强了低噪声桨扇设计研究及低噪声桨扇客机的设计方案研究,前者从桨叶设计的角度降低桨扇发动机的噪声,而后者则结合飞机设计,在桨扇发动机噪声无法降低的条件下,采用翼面或者机身遮挡设计降低噪声对外界的影响,见图 17。

### 2.3 布局与推进综合应用

边界层吸入式推进与分布式推进是两种综合布局和推进设计技术,以显著降低大型客机能源消耗为设计目标。边界层吸入式推进将推进风扇(包括燃气涡轮风扇或电驱动风扇)置于机身边界层之中,降低了高亚声速来流对风扇和涵道壳体的冲击阻力,风扇前来流马赫数一般只需 0.4~0.5,而大型客机的飞行马赫数一般为 0.8 左右,同时由于推进气流处于机身尾迹之中,减少了机身后的负压区,考虑到风扇较大的迎风面积,因此边界层吸入式推进减阻明显。但是吸入边界层的高畸变和高总压损失气流对涡轮发动机的压气机是有害的,因此需要有降畸变的涡轮风扇和进气道设计技术革新。另一种思路是直接采用电动风扇推进,以电动机取代涡轮核心机,没有压气机也就能容忍高畸变气流,但是电推进必须引入发电机与电动机,造成整个推进系统功重比的降低,因此需要高功重比的发电机与电动机的技术突破。而分布式推进技术以多个小型电推进风扇替代了集中的 2 个或 4 个大型涡扇发动机,一方面增大了推进装置的涵道比,同时也给机翼或机身尾迹负压区注入了能量,协调了涡轮与压气机及推进风扇的转速,可使其均

处于最佳匹配状态,类似齿轮传动风扇协调的效果,因而具有显著的节能功效。分布式推进技术甚至可以与边界层吸入式推进综合使用,或翼身融合布局加边界层吸入加分布式推进技术,以最大可能挖掘低能耗潜力。

图 18 所示概念客机的翼下燃油动力主要用于发电,翼下的推进风扇迎风面积减小可以显著降低翼下推进装置的迎风阻力,而机尾的电动推进风扇布置于机身边界层低速气流之中,不会被主流区高速气流冲击,因而外流冲击阻力显著降低,且给机尾的低压尾迹区注入了能量,可以明显降低全机阻力;由于采用了电推进风扇,也不会有边界层气流畸变破坏压气机的问题,尾部推进风扇同时具有增大翼下推进装置涵道比和类似齿轮传动的效果。图 19 所示概念设计将发电动力装置至于机尾,也采

用了边界层吸入设计,其压气机必须容忍边界层气流的进气畸变,而将分布式推进风扇布置于翼下,相当于增加了发动机涵道比,同时电传动设计协调了发电机和推进风扇的转速,使其均处于最佳转速,也就具有了 GTF 的节油效果,这个概念同时采用了减阻与节油设计。图 20 所示概念设计则使用了部分翼身融合、分布式推进及边界层吸入式推进等布局与推进综合技术。

### 2.4 关键节能设计技术研究

节能型气动布局与节能型推进



图 18 “日本航空机开发协会”5兆瓦级混动客机

Fig.18 5 MW hybrid fuel-electric plane of JADC



(a) Tu-95轰炸机



(b) Tu-114客机

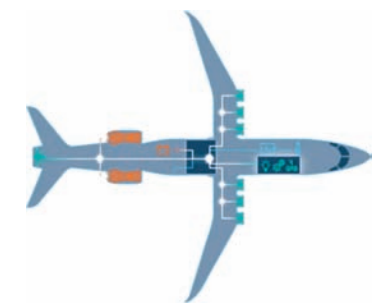
图 16 苏联 Tu-95 轰炸机与 Tu-114 大型客机

Fig.16 Tu-95 bomber and Tu-114 airliner of USSR

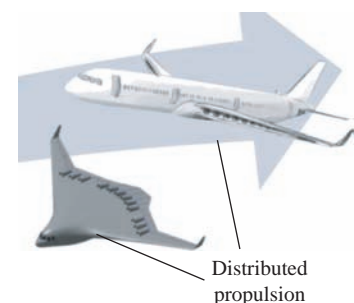


图 17 空客的低噪声桨扇推进概念飞机

Fig.17 Low-noise prop-fan conceptual airliner of Airbus



(a) 常规布局BLI推进+分布式推进



(b) 翼身融合布局+分布式推进

图 19 借助边界层吸入式推进或分布式电推进掩盖油电转化的能量损失  
Fig.19 BLI and distributed propulsion technologies to cover energies conversion loss

技术目前在客机上已经得到一定的应用,如波音 777X 低阻折叠翼尖;由于新型材料和结构的采用,未来客机机翼展弦比可以得到更大增加,翼身融合布局大型客机对现有客机的布局和机场设施具有颠覆性的革新,尽管不大可能被采用,但是未来仍可能部分应用于常规布局客机,例如局部设计采用翼身融合原理减阻。其应用在军用飞机上已经非常成功,完全采用的如 B-2 轰炸机,部分应用的如 Tu-160、B-1b、F-16、Su-27 等轰炸机或战斗机。新兴科技从军用开始逐渐扩展至民用是非常正常的逻辑和顺序,节能型气动布局与新型能源的综合应用研发也逐渐在国内外航空界出现。

节能型推进技术如大涵道比发动机、GTF 发动机等逐渐进入实际应用,而超大涵道比的桨扇推进技术已经在大型客机 Tu-114 上得到应用,但是噪声限制了该技术在客机上的应用。实际上在 20 世纪 70 年代石油危机期间,美国波音、麦道等公司也推出了相应的桨扇推进客机,甚至为桨扇推进专利权产生了纠纷,随着石油危机缓解,桨扇客机并未推向市场。未来低噪声桨扇技术如得到解决,对现有的亚声速大型客机推进系统将会产生碾压性的技术和市场压力, NASA 和 DLR 近年来持续加大了对减噪桨扇和减噪桨扇布局的技术研发。而边界层吸入式推进技术、油电混动分布式推进技术及其与客机布局综合设计应用技术目前已

在国内外逐渐开展,未来出现此类应用的大型客机将会具有颠覆性的市场竞争能力。

### 3 大型客机的超声速化

大型客机的超声速化包括马赫数 2~3 的超声速化以及马赫数 5 以上的高超声速化。超声速大型客机相对于高亚声速客机,类似于现代化高铁、超高速磁悬浮高铁相对于普通快速列车。高铁的速度有继续大幅度提升的计划,例如磁悬浮列车、真空通道磁悬浮列车等概念,当前速度为 300 km/h 的高铁已经对航空业形成巨大跨行业竞争压力,国内真空磁悬浮列车(时速可达 2900 km/h)已经开始论证和试验,而真空通道的磁悬浮高速列车一旦出现将会使亚声速民航大型客机的速度先进性彻底丧失,因此超声速与高超声速大型客机的研发对于航空行业十分紧迫。

#### 3.1 新一代超声速大型客机

马赫数 2~3 超声速大型客机历史上曾经出现过两种,协和客机与 Tu-144 客机(图 21),最终因票价过高、安全事故、噪声及声爆问题退出历史舞台。声爆是与噪声不同的一类物理现象,是指在超声速巡航状态下客机头部的激波与尾部的膨胀波等组成至少两次剧烈的压力突变。声爆是目前超声速客机难以被大众接受的首要问题,某些国家甚至因此禁止在本国领土上空进行任何民航超声速飞行,协和客机因而主要在大西洋上空进行商业超声速飞行。

未来大型超声速客机如果要在人口稠密的大陆上空进行商业超声速飞行,首要解决低声爆设计问题,其次是降低超声速巡航油耗,而超声速客机气动布局的低阻力设计(如层流减阻技术)也是迫切需要优先解决的。除了从大型客机气动布局方面着手,对于推进系统,超声速巡航的比油耗一般是高亚声速巡航的两倍以上,而且也不能以增大涵道比等方式降低巡航比油耗。由于大型超声速客机的机舱容积非常紧凑,一般难以使用液氢这类密度过低的航空燃料,低温燃料也难以储存于过度狭窄的超声速客机的机翼之中。马赫数 2~3 的超声速大型客机航程一般难以达到高亚声速大型客机的航程。超声速客机的气动布局高低速设计矛盾已经显现, Tu-144 客机设计了一对折叠鸭翼用以增强低速起降能力,远距鸭翼涡流在机翼上表面形成有利干扰,而协和客机则在机头两侧布置一对涡流发生器达到类似的效果;超声速客机吸气式发动机的高低速设计矛盾并未过于突出,巡航马赫数继续增加则会使这类矛盾逐渐凸显,成为马赫数 4 或 5 量级的吸气式推进超声速飞机进展迟滞的一个关键原因,组合动力或预冷技术理论上可以解决这一问题,但应用于大型客机还需要较长的工程探索时间。

#### 3.2 高超声速大型客机

高超声速客机是指巡航马赫数在 5 以上的客机。二战末期,高超声速飞行概念面世不久,钱学森即提出



图 20 空客油电混动边界层吸入推进民机概念  
Fig.20 BLI technologies used in hybrid fuel-electric propulsion civil plane of Airbus



(a) 带机头涡流发生器的无尾布局协和客机



(b) 带可折叠鸭翼的 Tu-144 客机

图 21 协和超音速客机与 Tu-144 超音速客机  
Fig.21 Concorde and Tu-144 supersonic transport airliner

通过“平衡滑翔”高超声速飞行(钱学森弹道)实现跨大西洋客运,而在二战中奥地利科学家欧根桑格尔提出通过“水漂式”跳跃滑翔弹道(桑格尔弹道)制造跨大西洋的高超声速轰炸机,这两项技术对于今天也依然是超前的。但今天人类已经掌握了制造高超客机和高超轰炸机的布局、结构与推进等关键技术,例如从近地轨道再入返回的航天飞机就可视为一类重型滑翔式高超飞行器。航天飞机为减速采取了大攻角再入等一系列措施,但仍能滑翔飞行超过8000 km,其商载可达约20 t,但主要问题是制造和使用成本过高。为了降低制造和使用成本,苏联和德国等曾提出空基发射技术,利用高空稀薄大气环境降低火箭发动机比冲和推力损失的原理,可将一般陆基火箭约3%的入轨质量比提升到8%~12%。近年来英美等国持续开展了一系列空基发射试验,如空射运载火箭、空射载人飞机等,尤其是“维珍航空”成功进行了空射载人太空旅游飞机试验,因水平起降加空基发射技术导致其票价仅为竞争对手“蓝色起源”垂直起降可回收火箭的1/10。解决气动热问题是高超声速客机设计与制造的一项关键技术,除了隔热与烧蚀等解决思路,科学合理的飞行轨迹设计可大幅度降低气动热影响,甚至成为主要解决手段,使气动热能量缓慢释放,如登月返回舱以第二宇宙速度(以平流层声速计算马赫数约为37)返回时,隔热与烧蚀等技术已经无法保障返回舱的安全性,这时“水漂式”返回轨迹设计可以显著降低气动热的危害,类似的技术也可应用于高超声速客机。

高超声速客机还有一类思路是“吸气式推进”型式,但是目前在气动布局和推进系统两个方面均存在非常严重的高低速设计矛盾和技术瓶颈,高超飞行需要小展弦比机翼,甚至仅通过机身升力而不需要机翼,

但是起飞、爬升和降落、着陆等阶段需要大展弦比机翼。超声速战斗机等马赫数较小的超声速飞行器可通过边条、鸭翼、增升装置、弹射装置等解决气动布局的高低速设计矛盾,但载弹量可能仍然受到严重限制;高超声速客机马赫数更高、比油耗更大导致起飞重量更大,为了高超飞行减阻,机翼展弦比可能更小,美国的高超试验飞行器如X-43A、X-51A等一般采用火箭发射或空基发射,无法水平起飞。而吸气式推进高低速矛盾更加严重,马赫数3以下只能采用涡扇或涡喷发动机,更高马赫数的涡喷发动机需要进气预冷装置,或者超燃冲压发动机,进气预冷技术需要使用低温燃料,低温燃料需要较大的内部存储容积,这与高超飞行器的紧凑外形存在矛盾;而超燃冲压则需要组合动力技术,否则低速启动问题无法解决,而且存在燃烧稳定性、进气道热防护以及防热与减阻矛盾等问题。此外高超客机的吸气式推进系统不可能类似“弹箭式”飞行器一次性使用,而必须是长寿命的反复使用。

气动布局及推进系统的高低速设计矛盾是高超声速大型客机需要解决的重大难题,因为关系到高超客机能否安全地水平起飞与降落,而保障安全水平起降是客机的首要和基本要求。大型客机不可能只在一种状态下飞行,而是包括了起飞、巡航、爬升、下降、着陆等多种必需的工作状态,这对于大型高超客机的气动外形与推进系统提出了挑战。起飞状

态由于满载商载和燃料,重量最大且速度较低,需要较大的机翼面积与升力系数以提供足够的起飞升力,但巡航状态下由于速度较高而速压足够,仅需要较小的机翼面积和升力系数。对于亚声速客机,一般通过增升装置这类可变形装置改变机翼面积与弯度等技术解决升力不足的问题,包括吹气襟翼增升等。一般亚声速大型客机的燃料重量仅占起飞总重的40%左右,通过这类增升装置可以解决低速起飞与高速巡航的矛盾问题,但是高超声速大型客机如采用火箭动力推进,燃料重量一般可占到80%量级,同时其必须采用小展弦比且后掠角很大的机翼设计,以避免高超巡航时机翼触及马赫锥导致的安全性和气动阻力过大问题,起飞爬升等低速状态需要小后掠角和大展弦比机翼设计,这种剧烈的高低速设计矛盾很难通过一种机翼及其增升装置来解决。所以即便是小型的X-15、X-43A、X-51A等试验型高超飞行器都不具备水平起降能力,而须依靠B-52轰炸机携带进行高空投放启动。“维珍航空”公司试验成功的水平起降太空旅游飞机,利用亚声速载机携带火箭动力飞行器进入平流层高度,采用空基发射方法一举解决了气动布局和推进装置的高低速设计矛盾,图22(a)为载机与太空旅游飞机组合状态,图22(b)为单独太空旅游飞机滑翔式返回状态,滑翔飞行的能源来自助推阶段火箭动力化学能转化的动能和势能。



(a) 载机与太空旅游飞机组合状态



(b) 单独太空旅游飞机滑翔式返回状态

图22 “维珍银河”公司的组合空射式太空旅游飞机

Fig.22 Assembled air-launch tourism spaceplane of Virgin airlines

对于吸气式推进系统,同样存在高低速设计矛盾,起降状态与爬升状态低于声速,适宜采用涡扇与涡喷发动机,但是对于高超巡航状态,马赫数在5以上,涡扇与涡喷发动机无法使用,需要采用超燃冲压发动机或低温预冷涡轮发动机。而超燃冲压发动机低于马赫数3无法启动,因此需要涡轮基组合循环发动机,或者简单外置组合,目前在一些弹箭类飞行器上获得成功应用,其弹尾的火箭发动机将其加速至马赫数3,翼下的亚燃冲压发动机提供后续的飞行动力。但涡轮基组合循环发动机目前尚不能使用在大型高超客机上。相对于组合循环动力等吸气式推进系统,使用火箭动力的助推滑翔式大型高超客机的可行性和技术成熟度更高。美国的“平流层发射器”公司研制了一种翼展达120 m的巨型空基发射载机(图23),可用于空基发射多种高超声速或者空天飞行器,值得注意的是,这些飞行器全部是基于可行性与技术成熟度更高的火箭动力。

滑翔式高超原理现在已用于制造各种先进的极难防御的滑翔弹头,而钱学森提出的目的是制造跨洲际高超大型客机<sup>[17]</sup>,以当前科技水平实现高超客机可行性比较大。除了巡航方式与轨迹,另一个重要且关键的问题是客机的起降,最佳方案还是水平起降,而不是按照陆基火箭那样垂直发射。考虑到高超飞行器极为尖锐的高低速设计矛盾,空基发射方案是最为可行的技术方案,基本上既解决了气动布局的高低速设计矛盾,也解决了推进系统的高低速设计矛盾,而且可以做到水平起降;空基发射的另一好处是可以显著改进推进效率,因为火箭发动机仅在高空稀薄大气中使用,该环境有利于降低火箭发动机的推力和比冲损失<sup>[17-20]</sup>。滑翔式高超飞行器的一大优势是几乎可以设计出任意航程,包括环绕地球

赤道一周的航迹,见图24。滑翔高超飞行介于吸气式推进飞行和轨道飞行之间,纯粹的吸气式高超飞行航程受限于飞机携带的燃料重量,滑翔式高超客机携带的燃料多少取决于载机的载重能力,其燃料在数分钟之内迅速用完,能量用于增加高度和速度,抛掉外置燃料箱后,高超客机以轻便的外形依靠积蓄的重力势能与动能实施远程航行,升力部分源自气动力、部分源自离心力,因此可以认为是部分的“轨道飞行器”。而对于常规的亚跨超飞行器则一般基于“平板地球假设”,离心力的数量级一般可以忽略不计,是纯粹的吸气式推进升力型航空器,与高超客机因为马赫数较高必须涉及一部分离心力的物理机制存在较大区别<sup>[21-24]</sup>。滑翔式高超对于大型客机的另一项好处是,主要的航程中并没有携带大量的燃料飞行,因为助推阶段时间极短,助推剂的化学能大部分转化为客机本体和商载的重力势能和动能。

2021年,英国“维珍航空”制造的太空旅游飞船采用空基发射的火箭动力飞行器实现了携带普通乘客的太空之旅,其返回完全是滑翔式的。尽管其到达的“太空”仅是NASA和美国空军认定的80 km高度而不是“国际航空联合会”认定的100 km高度,但这是由于所采用的标准不同而已,以这类飞行器的能力到达公认的“卡门线”并非难事,毕竟“卡门线”的高度只是人为定义的,80 km与100 km高度物理意义的区



图23 “平流层发射器”公司空基发射的多种高超和空天飞行器  
Fig.23 Air launched hypersonic and aerospace vehicles of Stratolaunch company

别十分微小。美国的X-15火箭动力飞机、X-43A、X-51A等高超飞行器等都是通过空基发射启动和运行的,因为此类飞行器的低速和巡航状态过于矛盾,无法权衡。美国“平流层发射器”公司制造了世界上现存最大的航空器,用作空基发射多种高超和空天飞行器的载机,但是这一计划前景不明,而“平流层发射器”或者类似航空器用于发射滑翔式高超客机技术的可行性是显而易见的。这些试验型高超飞行器虽未直接应用于大型客机,却是在为大型客机的高超化探索关键技术。

### 3.3 超声速与高超大型客机关键技术

低声爆与低阻力设计的气动布局是未来超声速大型客机首要解决的关键设计技术,低声爆设计关系到超声速大型客机能否推出市场得到商业应用,低阻力气动布局与低能耗的超巡推进系统关系到其能否具有一定的商业盈利能力。对于高超大型客机,解决气动布局和推进系统的高低速设计矛盾是其首先需要解决的关键设计技术。空基发射技术可以同时解决气动布局和推进系统的高低速设计矛盾,并获得极佳的节能效果,而且大型高超客机水平起降十分适于普通乘客,目前国外已进展到试飞验证阶段。滑翔式高超客机的

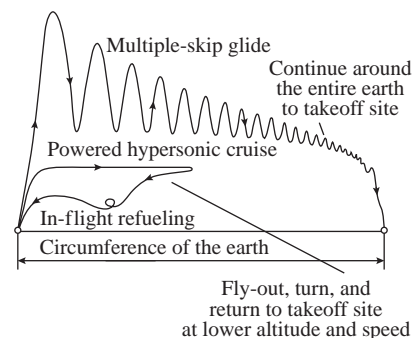


图24 滑翔式高超与吸气推进式高超航程潜力对比  
Fig.24 Potential range comparison of gliding hypersonic and air-breath cruising hypersonic flight

吨位取决于空射载机的吨位,而大型双体或其他简单且稳健的气动布局的大型空射载机设计制造技术,对于掌握了 200 t 级大型高亚声速巡航运输机的国家来说并不困难。

#### 4 结论

未来大型客机的发展方向之新能源化与低能耗化是基于全球石油能源危机、全球变暖及其导致的极端气候应对措施“绿色低碳”的倡议与行动而考虑的,大型客机的新能源化的主要发展方向是常温 SAF 与低温但高质量能量密度燃料(液氢与 LNG 等),常温燃料可使现役大型客机框架不变,而低温燃料将会给大型客机的外形与结构、机舱与机翼的布局与结构等带来显著改变。低能耗化包括节能气动布局与节能推进技术以及二者的综合应用,节能气动布局如翼身融合布局、支撑翼与可折叠翼布局等;节能推进技术包括大涵道比涡扇、GTF 涡扇、开式转子推进等;布局与推进综合应用包括边界层吸入式推进与分布式推进技术等。在人类造成的温室气体排放中,当前航空业的排放量仅占全球温室气体排放的 3% 量级,但是增长极快,到 21 世纪中叶可达 22%。同时大型客机的新能源化是解决全球石油资源分布不均、未来石油危机,以及石油枯竭问题而不得不采取的应对措施,是针对中国石油资源极度贫乏,易于出现“卡脖子”风险而不得不主动采取的行动,因此国家大力倡导和推进各行各业的新能源化与低能耗化。其他行业降低了排放份额,航空业的排放份额会显著上升,即便当前航空业的碳排放量有限,但增长过于迅速。新能源化是从开源的角度解决传统能源危机与枯竭的问题,而大型客机的低能耗化则是从节流的角度开展大型客机高科技研发,低能耗化的大型客机意味着市场商业竞争力强,未来的中国大型客机不能在

这一维度落后。

大型客机的超声速化是基于人类对跨洲跨洋高速交通工具的迫切需求以及地面轨道交通工具高速化跨域解决方案等总结出的。人类已经进行过一轮超声速大型客机制造与运营,在此过程中存在着声爆、安全性与经济性等显著问题。新一代超声速客机必须完善声爆抑制技术以通过适航取证,高低速权衡优化以提高起降安全性,完成超声速巡航减阻以解决运营经济性的问题。高超客机则必须解决布局与推进的高低速设计矛盾、空基发射高超滑翔或吸气推进技术、气动热防护与缓解等关键技术问题。如果地面交通工具跑赢了大型客机,必然导致整个航空业的萧条与萎缩;而在不便修建高速地面轨道交通的地方,如跨越大洋或人口分布过于稀薄的大片冻土、雨林、高原、沙漠等陆地区域如西伯利亚、加拿大北部、亚马逊河流域等,大型客机是唯一高速解决方案。中国经济的迅速强大对跨洋与跨洲高速交通工具需求日益迫切,超声速化包括高超声速化的大型客机在未来必定会出现。

#### 参考文献

- [1] WITHERS M R. Environmental and economic assessment of alternative transportation fuels[D]. Provo: Brigham Young University, 2014.
- [2] TELIKAPALLI S, SWAIN R M, CHEETHAM P, et al. Electric aircraft fueled by liquid hydrogen and liquefied natural gas[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2022, 1241(1): 012035.
- [3] ROBERTS R A, NUZUM S R, WOLFF M. Liquefied natural gas as the next aviation fuel[C]//Proceedings of 13th International Energy Conversion Engineering Conference. Reston: AIAA, 2015: 4247.
- [4] CABRERA E, DE SOUSA J M M. Use of sustainable fuels in aviation—A review[J]. Energies, 2022, 15(7): 2440.
- [5] NELSON E S, REDDY D R. Green aviation: Reduction of environmental impact

through aircraft technology and alternative fuels[M]. London: Taylor and Francis Group CRC Press, 2017.

- [6] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. “十四五”现代能源体系规划[EB/OL]. (2022-03-22)[2023-03-15]. [http://www.nea.gov.cn/1310524241\\_16479412513081n.pdf](http://www.nea.gov.cn/1310524241_16479412513081n.pdf).

National Development and Reform Commission. 14th Five-year Plan for modern energy system[EB/OL]. (2022-03-22)[2023-03-15]. [http://www.nea.gov.cn/1310524241\\_16479412513081n.pdf](http://www.nea.gov.cn/1310524241_16479412513081n.pdf).

- [7] AGORA. The future cost of electricity-based synthetic fuels[R]. Berlin: Strommarkttreffen, 2018.

- [8] YUGO M, SOLER A. A look into the role of e-fuels in the transport system in Europe (2030-2050)[EB/OL]. (2019-10-08)[2023-03-15]. <https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/E-fuels-article.pdf>.

- [9] 王顺超. 全球电制燃料技术发展分析[R]. 北京: 电力规划设计总院, 2022.

WANG Shunchao. The development technical analysis of the global PtX fuels[R]. Beijing: China Electric Power Planning & Engineering Institute, 2022.

- [10] ZINI G, TARTARINI P. Solar hydrogen energy systems: Science and technology for the hydrogen economy[M]. Milan: Springer, 2012.

- [11] 柳下再会. 以碳之名: 低碳骗局幕后的全球博弈[M]. 北京: 中国发展出版社, 2010.

LIUXIA Zaihui. In the name of carbon dioxide: The global game behind the low carbon fraud[M]. Beijing: China Development Press, 2010.

- [12] 曹冠杰, 王业辉, 孙小金. 氢能航空发展现状分析[J]. 航空动力, 2022(2): 29-33.

CAO Guanjie, WANG Yehui, SUN Xiaojin. Development status of hydrogen in aviation[J]. Aerospace Power, 2022(2): 29-33.

- [13] ROBERTS R A, NUZUM S R, WOLFF M. Liquefied natural gas as the next aviation fuel[C]//Proceedings of the 13th International Energy Conversion Engineering Conference. Reston: AIAA, 2015.

- [14] KRIJNEN J A, ASTABURUAGA M F. Environmental, economical and technical aspects of a cryoplane in the preliminary design phase[C]//Proceedings of 23rd Congress of International Council of the Aeronautical

Sciences. Toronto: ICAS, 2002.

[15] 雷国东, 李岩, 徐悦. 一种液氢燃料超远程翼身融合布局运输飞机及运行方法: CN113978697A[P]. 2022-01-28.

LEI Guodong, LI Yan, XU Yue. A blended wing body configuration transport aircraft fueled by liquid hydrogen and its application method: CN113978697A[P]. 2022-01-28.

[16] AIRBUS. Liquid hydrogen fuelled aircraft system analysis[R]. Berlin: Airbus Deutschland GmbH, 2001.

[17] 姚红, 程文华, 张雅声. 飞行器动力学与控制 Simulink 仿真 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2018.

YAO Hong, CHENG Wenhua, ZHANG Yasheng. Simulink simulation of aircraft dynamics and control[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2018.

[18] 雷国东, 李岩, 徐悦. 基于双机身平直翼布局载机的空基发射系统: CN215285312U[P]. 2021-12-24.

LEI Guodong, LI Yan, XU Yue. The air

launched systems based on the twin-fuselage configuration carrier aircraft with the flat wings: CN215285312U[P]. 2021-12-24.

[19] 雷国东, 李岩, 徐悦. 基于外翼可 C 形折叠的 BWB 载机的空射系统: CN215285313U[P]. 2021-12-24.

LEI Guodong, LI Yan, XU Yue. The air launched systems based on the BWB configuration carrier aircraft with the foldable outboard wings: CN215285313U[P]. 2021-12-24.

[20] 雷国东, 李岩, 徐悦. 基于翼身融合布局载机的组合空射飞行器概念设计与气动优化 [J]. 气体物理, 2022, 7(5): 50-62.

LEI Guodong, LI Yan, XU Yue. Conceptual design and aerodynamic shape optimization for the assembled air launched vehicles based on the BWB carrier aircraft[J]. Physics of Gases, 2022, 7(5): 50-62.

[21] CORDA S, LONGO C, KREVIOR Z. Stratolaunch air-launched hypersonic testbed[C]//Proceedings of 22nd AIAA International Space Planes and Hypersonics

Systems and Technologies Conference. Reston: AIAA, 2018: 5257.

[22] LEDOGAR J, HERMETZ J, SOHIER H, et al. Eole, an innovative flying scale demonstrator for air-launch-to-orbit automatic systems[C]//Proceedings of 28th international Congress of the Aeronautical Sciences. Brisbane: ICAS, 2012.

[23] CLARKE J P, CERVEN K, MARCH J, et al. Conceptual design of a supersonic air-launch system: AIAA 2007-5841[R]. Reston: AIAA, 2007.

[24] FRONTING H D, MCKINNEY L, CHASE R. Aerospace plane trajectory optimization for sub-orbital boost glide flight: AIAA-96-4519-CP[R]. Reston: AIAA, 1996.

[25] FRONING H D, MCKINNEY L E, CHASE R L. Aerospace plane trajectory optimization for sub-orbital boost glide flight[C]//Proceedings of Space Plane and Hypersonic Systems and Technology Conference. Reston: AIAA, 1996: 4519.

## Development Directions and Key Design Technologies Research of Future Large Airliners

LEI Guodong, XU Yue

(Chinese Aeronautical Establishment, Beijing 100012, China)

**[ABSTRACT]** The alternative energy technologies, the low energy consumption technologies, the supersonic flight technologies, and the integrated application of the three technologies are the main development directions of the future large airliner. The alternative energy for the large airliner mainly refers to the green and low carbon emission fuels, for example the normal temperature liquid SAF (Sustainable aviation fuels), the cryogenic liquid hydrogen and LNG (Liquid natural gas) fuels. The low energy consumption technologies for large airliner mainly refers to the energy-saving aerodynamic configurations, energy-saving propulsion technologies, and the integrated application of the two technologies, for example the BWB (Blended wing body) airliners and the airliners with large aspect ratio wings, the energy-saving propulsion technologies including extra-large BPR (Bypass ratio) or GTF (Gear transferred fan) turbofan engines, the low noise propfan engines, and the BLI (Boundary layer ingestion) and distributed propulsion methods for integrated configurations and propulsions. The supersonic flight technologies for large airliners mainly refers to the Mach 2-3 supersonic airliners and the future horizontal takeoff and landing hypersonic airliners, the sonic boom depression, the technologies to resolve the conflicts of the low speed states and the high speed states in both the aerodynamic configurations and the propulsion systems are the key design technologies. This article elaborates on the development trends and key technologies of alternative energy sources, low energy design, and supersonic technology for large passenger aircraft, providing new ideas for the future development of civil aviation.

**Keywords:** Green and low carbon emission; Sustainable aviation fuels (SAF); Blended wing body (BWB); Prop-fan engines; Boundary layer ingestion (BLI); Sonic boom inhibition

(责编 逸飞)



# 难加工材料 高效高质加工

High-Efficiency and  
High-Quality Processing of  
Difficult-to-Cut Material

随着高性能难加工材料的开发和应用,传统的机械加工方式难以达到所需的面形精度和表面质量。在难加工材料的超精密制造过程中,激光辅助、振动辅助、电磁辅助等多场辅助制造方式可有效弥补传统制造能力的不足,成为研究热点。



引文格式: 安庆龙, 李晗, 陈杰, 等. 陶瓷基复合材料多能场辅助高效低损伤铣削加工工艺[J]. 航空制造技术, 2023, 66(14): 40-51.

AN Qinglong, LI Han, CHEN Jie, et al. Multi-energy field assisted high-efficiency and low damage milling process of ceramic matrix composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(14): 40-51.

# 陶瓷基复合材料多能场辅助高效低损伤铣削加工工艺\*

安庆龙<sup>1</sup>, 李晗<sup>1</sup>, 陈杰<sup>2</sup>, 明伟伟<sup>1</sup>, 陈明<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学, 上海 200240;

2. 航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610091)

[摘要] 陶瓷基复合材料具有高硬度、高强度、各向异性和非均质性的特点, 导致其在加工过程中刀具磨损严重, 加工质量差, 加工效率低。对经过激光烧蚀处理的试样进行铣削加工, 证明了铣削粉末状烧蚀产物时几乎不产生力和热量。利用有限元仿真并进行单向超声振动辅助铣削, 发现超声振动辅助铣削工艺可以在不降低加工效率的前提下实现陶瓷基复合材料低损伤切削加工。提出了激光烧蚀与超声振动辅助铣削的组合加工工艺。基于加工质量、加工效率、刀具成本等多维指标对铣削加工策略进行综合评价。激光烧蚀+超声振动辅助铣削策略可以获得质量更好的已加工表面, 同时加工时间少, 刀具成本低, 综合来看是可以实现陶瓷基复合材料高效低损伤铣削加工的工艺方案。

关键词: 陶瓷基复合材料; 铣削; 多能场辅助加工; 加工质量; 低损伤

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.14.040



安庆龙

教授, 博士, 主要研究方向为高性能制造、切削过程仿真与智能加工、复合材料高效加工等。

连续纤维增强陶瓷基复合材料(Fiber reinforced ceramic matrix composites, FRCMCs)是一种通过在陶瓷基体中加入连续纤维增强相进行外源性增韧, 并采用适当的弱界面相进行优化, 从而得到的韧性陶瓷材料<sup>[1-2]</sup>。FRCMCs克服了金属材料的不耐高温和密度大, 陶瓷材料的高脆性和可靠性差, 碳材料的抗氧化性差等缺点, 具有轻质、强度高、耐高温、抗氧化、耐腐蚀等优异的综合性能<sup>[3]</sup>。

FRCMCs-SiC的超高硬度和易损伤特性极大限制了加工效率<sup>[4-5]</sup>, 铣削时的每齿进给量仅为数 $\mu\text{m}$ <sup>[6-7]</sup>, 因此往往需要借助其他能量的输入来提高材料在切削加工中的可加工性。Yang等<sup>[8]</sup>探索了利用纳秒激光诱导CVD金刚石发生石墨化, 实现了CVD金刚石微铣刀的高效高质

量精密磨削。Xia等<sup>[9]</sup>研究了利用纳秒激光在富氧气氛中照射高硬度TiB<sub>2</sub>-TiC陶瓷, 以产生几十 $\mu\text{m}$ 的疏松氧化层。研究表明, 激光诱导氧化工艺大幅提高了TiB<sub>2</sub>-TiC的微细铣削效率, 且提高了加工质量和精度。赵国龙等<sup>[10]</sup>研究了纳秒激光辐照下TiAl金属间化合物的氧化机理, 并提出了激光诱导可控氧化辅助微细铣削复合加工方法。研究表明, 相比于常规微细铣削工艺, 激光诱导可控氧化辅助微细铣削工艺下的铣削力和刀具磨损较低, 且刀具寿命显著提高。目前, 针对FRCMCs-SiC的激光辅助加工大部分为激光加热辅助加工, 激光诱导烧蚀辅助加工具有重要的研究意义。

超声振动辅助加工技术广泛应用于硬脆材料的切削加工中, 利用切削

\* 基金项目: 航空发动机及燃气轮机基础科学中心项目(P2022-A-IV-002-001)。

刃或磨粒运动学特性变化引起的加工特性的改变,实现难加工材料可加工性的提升。针对碳化硅陶瓷单相均质脆性材料, Cao 等<sup>[11]</sup>探讨了使用超声振动辅助磨削的方式进行加工,证实超声振动辅助磨削提高了延脆转变临界切深,有利于实现在延性域去除材料,从而减少加工损伤。Zheng 等<sup>[12]</sup>通过对 SiC<sub>f</sub>/Al 复合材料超声振动辅助划痕过程进行有限元仿真,提出超声振动辅助工艺使得碳化硅颗粒倾向于保持结构完整性,而不是在材料去除过程中发生破碎和拔出,这有利于提高已加工表面质量。Xu 等<sup>[13]</sup>针对 CFRP 开展了椭圆超声振动辅助加工的有限元仿真和试验研究,发现利用刀具振动可以使得切削力减小,工件亚表面损伤减少。由此可见,无论是对于脆性材料还是复合材料,超声振动辅助加工技术在减小加工损伤和提高已加工表面质量方面都具有积极作用。目前鲜有关于使用切削刃刀具进行 FRCMCs-SiC 超声振动辅助切削加工的研究,超声振动辅助加工工艺在切削加工中减少加工损伤的作用机理仍有待深入探索。

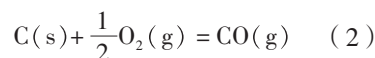
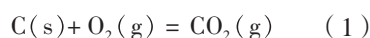
对于陶瓷基复合材料,激光烧蚀预处理的铣削加工可以大幅提高其可加工性和加工效率,而超声振动辅助铣削工艺可以在不降低加工效率的前提下实现低损伤切削加工。本文对经过激光烧蚀处理的试样进行铣削加工,利用有限元仿真并进行单向超声振动辅助铣削,提出激光烧蚀与超声振动辅助铣削的组合加工工艺,并基于多维度指标对铣削加工策略进行综合评价,为实现陶瓷基复合材料高效低损伤铣削加工提供了可行的工艺方案。

## 1 SiC<sub>f</sub>/SiC 陶瓷基复合材料激光诱导烧蚀辅助高效铣削加工

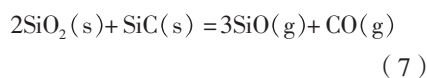
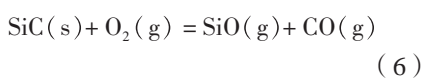
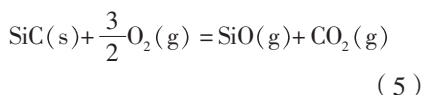
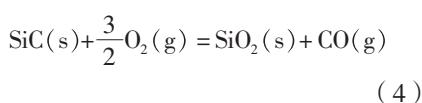
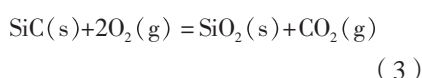
### 1.1 激光诱导可控烧蚀原理

本研究所用材料为碳化硅纤维

增强碳化硅基复合材料(SiC<sub>f</sub>/SiC),界面相为热解碳(PyC),当温度超过 550 °C 时开始发生氧化反应。根据氧分压值的不同,高温氧化后可能产生二氧化碳或一氧化碳气体,如式(1)和(2)所示。



碳化硅纤维和碳化硅基体的成分均为 3C-SiC。因此, SiC<sub>f</sub>/SiC 复合材料中的绝大部分材料是 SiC。当激光束照射 SiC<sub>f</sub>/SiC 复合材料表面时,会瞬间产生几千 °C 的高温。当温度超过 2700 °C 时, SiC 会升华,形成 SiC 蒸气。另外, SiC 在高温下会与空气中的氧发生化学反应。如图 1 所示<sup>[14]</sup>,在不同温度和不同氧分压条件下, SiC 会分别发生主动氧化和被动氧化。SiC 的被动氧化产物为固体的 SiO<sub>2</sub>,如式(3)和(4)所示。SiC 的主动氧化产物均为气态物质,如式(5)和(6)所示。此外, SiC 的被动氧化产物 SiO<sub>2</sub> 会与 SiC 反应生成 SiO 和 CO 气体,从而促进烧蚀引起的重量损失,如式(7)所示。



以上是基于材料性质和氧化热力学的初步分析。因此,通过激光束照射产生的高温诱导 SiC<sub>f</sub>/SiC 复合材料发生烧蚀反应是可行的,且烧蚀产物极有可能为疏松多孔的氧化物。关于 SiC<sub>f</sub>/SiC 复合材料的激光烧蚀机理和烧蚀产物有待于通过试验进

一步研究。

### 1.2 激光烧蚀产物及烧蚀层深度影响因素分析

图 2 为连续激光烧蚀产物沿层深方向分布的微观形貌和能谱分析。层 1 位于烧蚀产物的最顶部,氧元素含量最高,碳元素含量最低。根据 A 区放大后的微观形貌图来看,层 1 由大小为数十纳米的颗粒组成,且极为疏松多孔。结合 XRD 谱图和 EDS 能谱,这些纳米级的颗粒可以被证实是非晶态 SiO<sub>2</sub>。激光束作用于 SiC<sub>f</sub>/SiC 复合材料表面,使 SiC 在数千 °C 的高温下升华。气态的 SiC 在高温下和空气中的氧气发生主动氧化反应,形成非晶态 SiO<sub>2</sub>。由于是气态的碳化硅与氧气反应,气相反应产生的 SiO<sub>2</sub> 颗粒极小。烟雾状的非晶态 SiO<sub>2</sub> 凝结沉积在烧蚀层表面,因此将层 1 命名为凝烟层。凝烟层下面是层 2,这一层氧元素含量逐渐降低,碳元素和硅元素含量逐渐上升。从 B 区放大后的微观形貌图来看,层 2 主要由大小为数 μm 的固体颗粒组成,且颗粒上附着了少量的 SiO<sub>2</sub> 烟尘。激光照射产生的高温下升华的 SiC,在靠近试样上表面的部分和空气接触时容易发生氧化形成 SiO<sub>2</sub>。但是在试样亚表层区域产生的 SiC 蒸气与空气隔绝,大部分的气

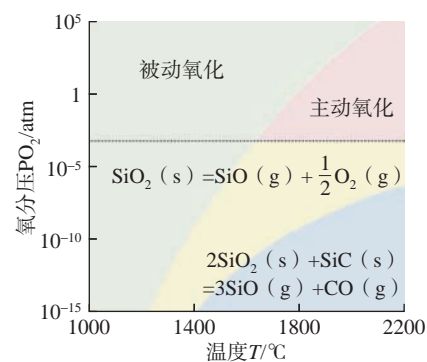


图 1 碳化硅主/被动氧化转变过程中氧分压与温度的关系<sup>[14]</sup>

Fig.1 Relationship between oxygen partial pressure and temperature for transition of active/passive oxidation of SiC<sup>[14]</sup>

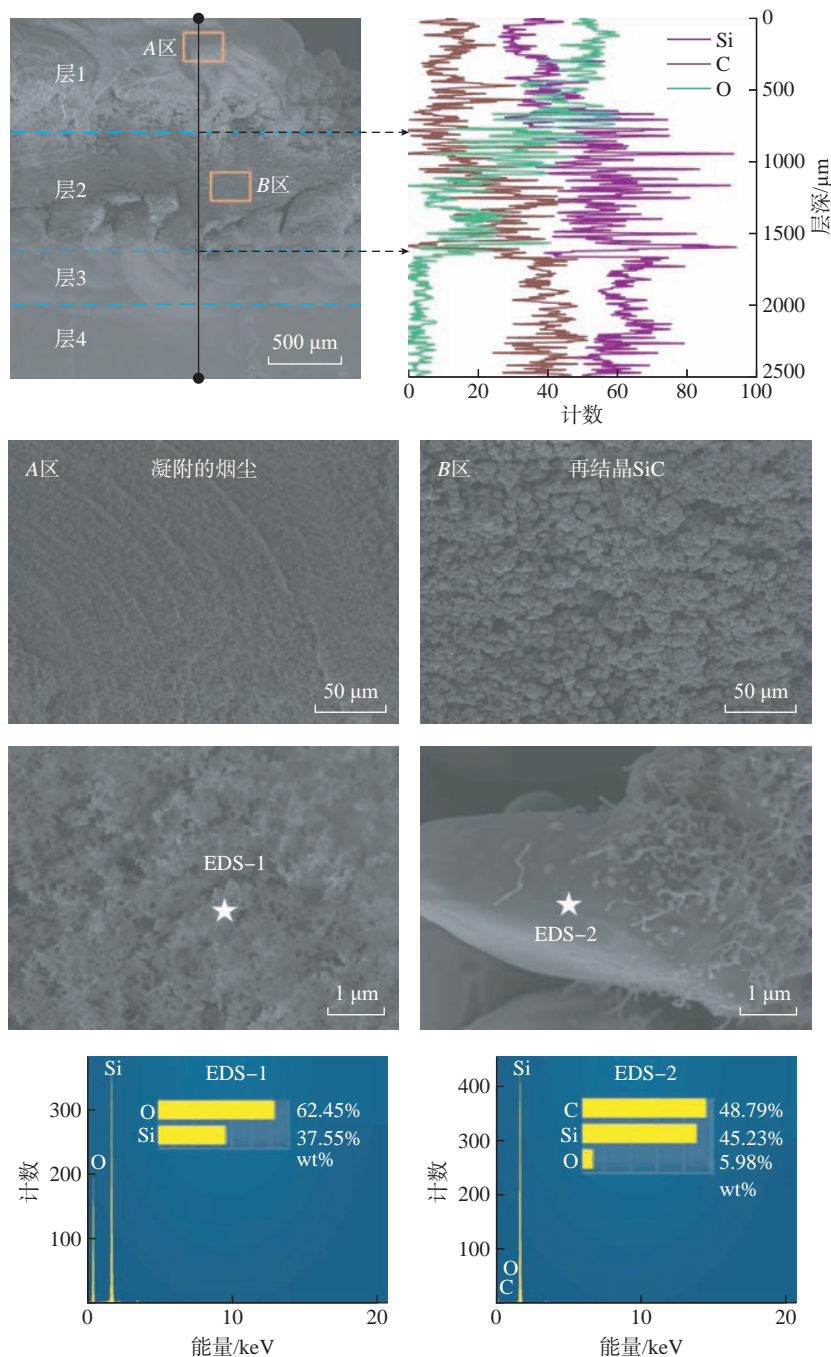


图2 连续激光烧蚀层微观形貌和能谱分析

Fig.2 Micromorphology and EDS analysis of ablation layer induced by CW laser

态 SiC 在冷却后重新结晶。由于再结晶 SiC 颗粒之间存在大量空隙,因此会有少量 SiO<sub>2</sub> 烟尘渗入,并附着于 SiC 颗粒表面。据此层 2 被命名为再结晶 SiC 层。升华再结晶层下面一层是层 3,为热影响层。热影响层的碳元素、氧元素和硅元素的含量

与无影响层(层 4)的基本一致。综上所述,根据烧蚀产物的形态和种类差异, SiC<sub>r</sub>/SiC 复合材料的激光烧蚀产物可分为凝烟层(层 1)、再结晶 SiC 层(层 2)、热影响层(层 3)、无影响层(层 4)。

在光学显微镜下观察烧蚀层和

热影响层,并测量烧蚀层深度和热影响层深度,如图 3 所示。测量各组试验参数下的最大烧蚀层深度和热影响层深度作为统计数据。激光功率的增加导致照射材料表面的激光功率密度增加。因此随着激光功率增加,烧蚀层深度和热影响层深度增大。随着扫描行间距增大,扫描区域覆盖率下降,烧蚀层深度和热影响层深度减小。在连续激光模式下,烧蚀层深度和热影响层深度随着激光扫描速度的减小而增大,且非常显著。在脉冲激光模式下,烧蚀深度随着脉冲宽度的增加而增大,因为脉冲宽度增大增加了激光的入射能量。烧蚀深度随着脉冲频率的增加而增大,这是因为频率增加使得激光光斑的重复率提高。但是在脉冲激光模式下,随着扫描速度的增加,烧蚀深度先增大后减小。如果扫描速度过小,则前一周期激光烧蚀产生的热量就有时间充分耗散,缓解热量累积;如果扫描速度过大,每一个周期内烧蚀产生的热量不能充分传导,无法形成稳定的烧蚀高温,因此烧蚀深度不大。

对比连续激光和脉冲激光这两种模式,连续激光能制造更深的烧蚀层,由于激光束在整个扫描持续时间内不间断照射材料表面。脉冲激光模式下,由于激光束在每一个周期内只作用于脉宽时间段内,因此烧蚀深度更小,同时热影响层深度也略小<sup>[15]</sup>。

### 1.3 激光诱导烧蚀辅助铣削加工的热行为和热行为

为了验证激光烧蚀预处理铣削加工技术对提高 FRCMCs-SiC 可加工性的效果,采用 SiC<sub>r</sub>/SiC 复合材料分别进行了常规铣削加工和激光烧蚀预处理铣削加工,从铣削力、铣削温度、表面完整性、刀具磨损等维度展开综合分析<sup>[15-16]</sup>。

图 4 为常规铣削和激光烧蚀预处理铣削的平均铣削力对比。径向切宽 0.5 mm 为本试验参数条件下的最大径向切宽,当切宽进一步增大

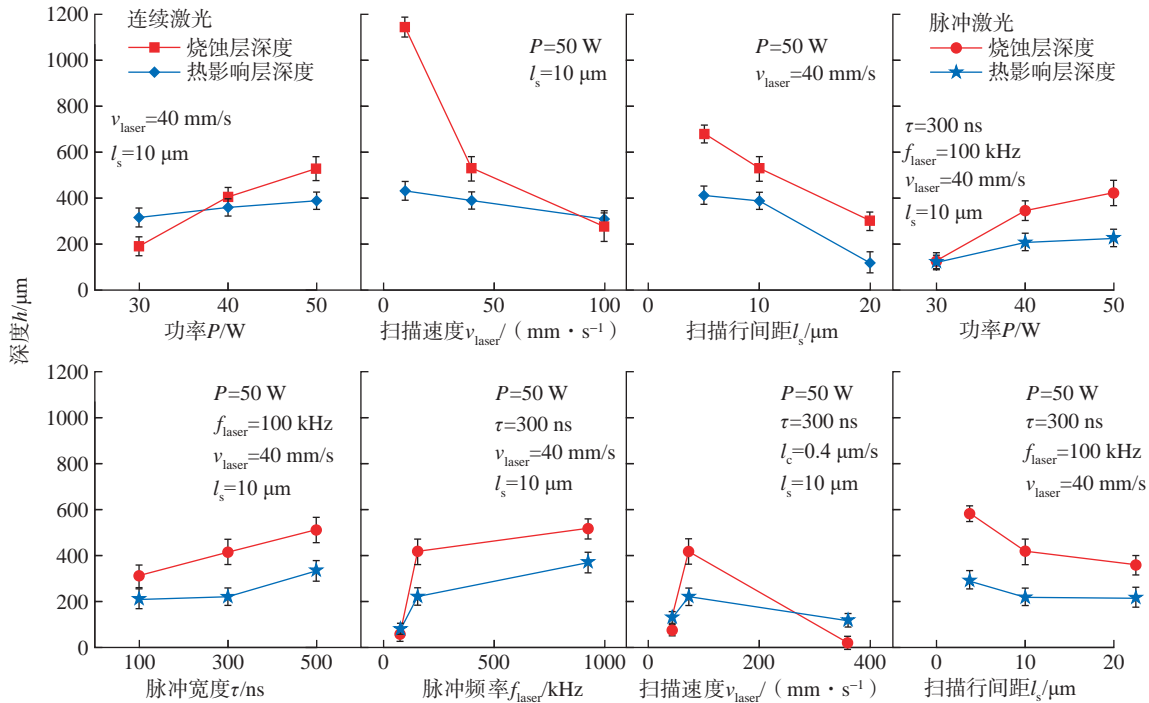


图3 烧蚀层和热影响层深度

Fig.3 Ablation depth and HAZ depth

时,加工过程极易产生振动,且PCD刀具极易崩刃失效。当径向切宽为0.5 mm时,在常规铣削条件下,随着每齿进给量增加,平均铣削力逐渐增大;当径向切宽为2 mm时,平均铣削力大幅提升,且加工过程极不稳定,PCD刀具也发生了大面积的崩刃,加工无法进行。对于常规铣削无法加工的径向切宽为2 mm的试样,首先进行激光烧蚀预处理,形成烧蚀层,然后进行铣削加工。试验结果表明,激光烧蚀预处理铣削条件下,随着每齿进给量增加,平均铣削力也逐渐增大。由图4可知,当主轴转速、轴向切深、每齿进给量一致时,径向切宽2 mm的激光烧蚀预处理铣削条件下的平均铣削力比径向切宽为0.5 mm的常规铣削条件下的平均铣削力略有减小。由于烧蚀层深度在可控范围内的微小变化,导致了激光烧蚀预处理铣削加工的平均铣削力试验结果的误差棒要比常规铣削时的平均铣削力试验结果的误差棒大。

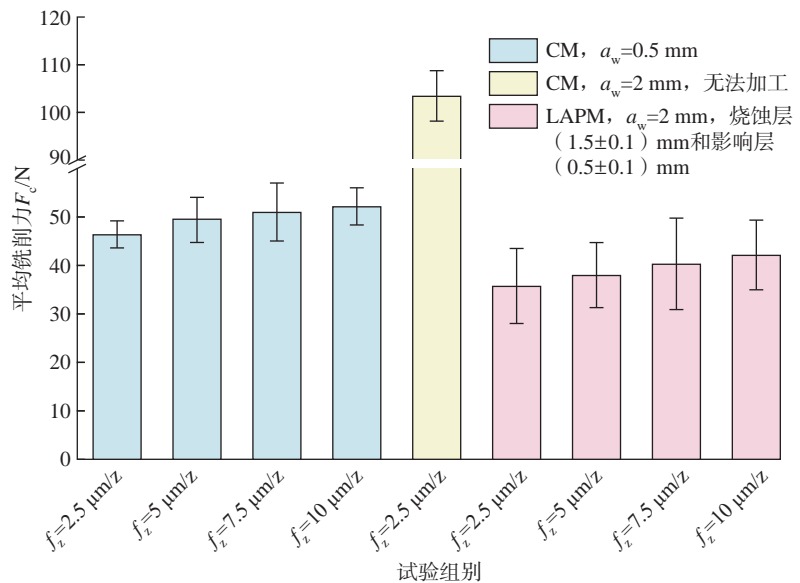


图4 常规铣削和激光烧蚀预处理铣削的平均铣削力对比

Fig.4 Comparison of average milling forces between conventional milling and laser ablation pretreatment milling

图5为常规铣削和激光烧蚀预处理铣削的铣削温度统计结果对比。当径向切宽为0.5 mm时,在常规铣削条件下,随着每齿进给量增加,铣削温度逐渐减小,可知常规铣削条件

下,从铣削温度的角度分析这一参数不利于加工。对于常规铣削无法加工的径向切宽为2 mm的试样,首先进行激光烧蚀处理,然后进行铣削加工。试验结果表明,在激光烧蚀预处理

理铣削条件下,随着每齿进给量增加,铣削温度也逐渐减小。由于烧蚀层深度在可控范围内变化,也导致了激光烧蚀预处理铣削加工的铣削温度试验结果的误差棒要比常规铣削时的误差棒大。

通过对铣削时的力和温度的分析,可以发现切除粉末状激光烧蚀产物时几乎不会产生力和热量,这是跨越性提升 SiC<sub>r</sub>/SiC 复合材料可加工性的充分条件。

#### 1.4 已加工表面三维形貌和粗糙度

图 6 和 7 为常规铣削和激光烧蚀预处理铣削表面微观形貌。随着每齿进给量增加,材料去除逐渐从微观脆性断裂域向宏观脆性断裂域转变,且两种铣削方式下的材料去除机理和表面损伤具有一致性。在相同的加工参数下(激光烧蚀预处理铣削的径向切宽的选择依据无影响层厚度),激光烧蚀预处理铣削加工技术不会对已加工表面造成额外的机械损伤和热损伤。

图 8 为常规铣削和激光烧蚀预处理铣削表面三维形貌。当每齿进给量为 2.5 μm/z 时,常规铣削和激光烧蚀预处理铣削表面都比较平整,少数的凹坑也主要是基体 SiC 脆性断裂形成的。随着每齿进给量增加,表面凹坑数量也逐渐增加。当每齿进给量增加至 10 μm/z 时,已加工表面除了基体 SiC 脆性断裂形成的凹坑,还有部分 SiC 纤维宏观脆性断裂形成的凹坑,造成表面粗糙度增加。总体而言,当其他加工参数一致,常规铣削的径向切宽为 0.5 mm,激光烧蚀预处理铣削的径向切宽为 2 mm (其中无影响层 0.5 mm) 时,两种铣削工艺加工出的表面具有相似的三维形貌。

图 9 为常规铣削和激光烧蚀预处理铣削表面粗糙度对比。当径向切宽为 0.5 mm 时,在常规铣削条件下,随着每齿进给量增加,已加工表面粗糙度逐渐增大。在常规铣削条

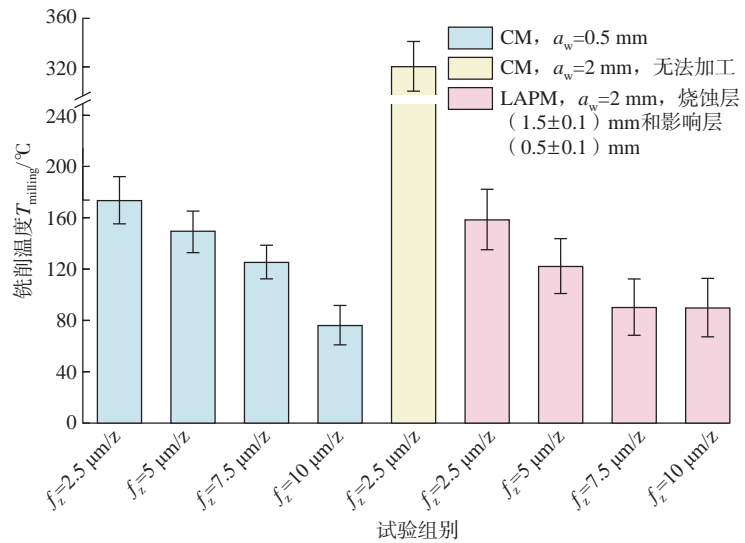


图 5 常规铣削和激光烧蚀预处理铣削的铣削温度对比  
Fig.5 Comparison of milling temperature between conventional milling and laser ablation pretreatment milling

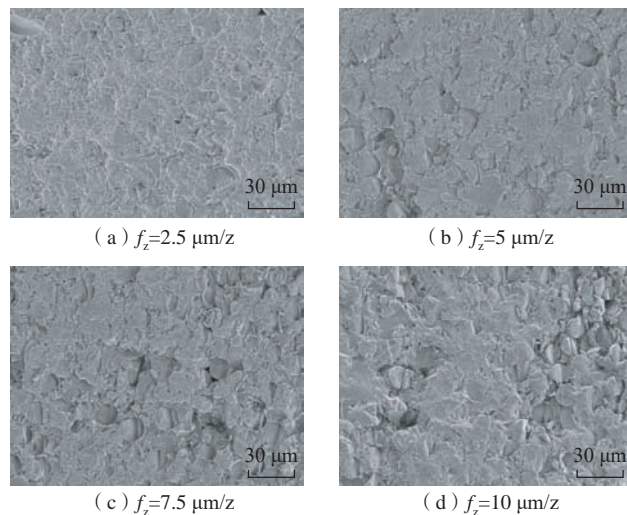


图 6 常规铣削表面微观形貌  
Fig.6 Micromorphology of machined surface by conventional milling

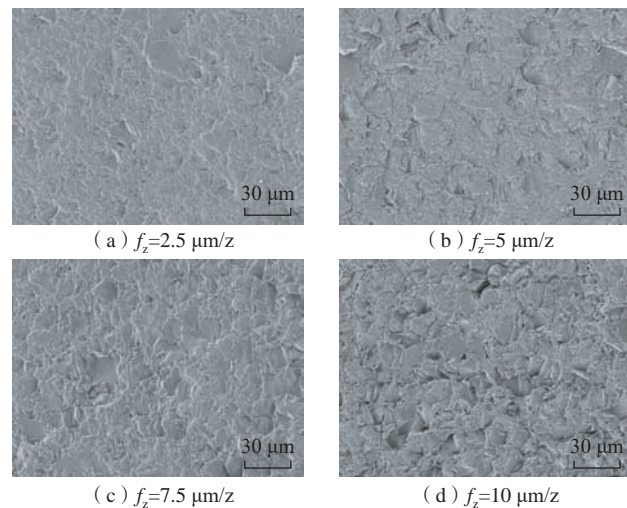


图 7 激光烧蚀预处理铣削表面微观形貌  
Fig.7 Micromorphology of machined surface by laser ablation pretreatment milling

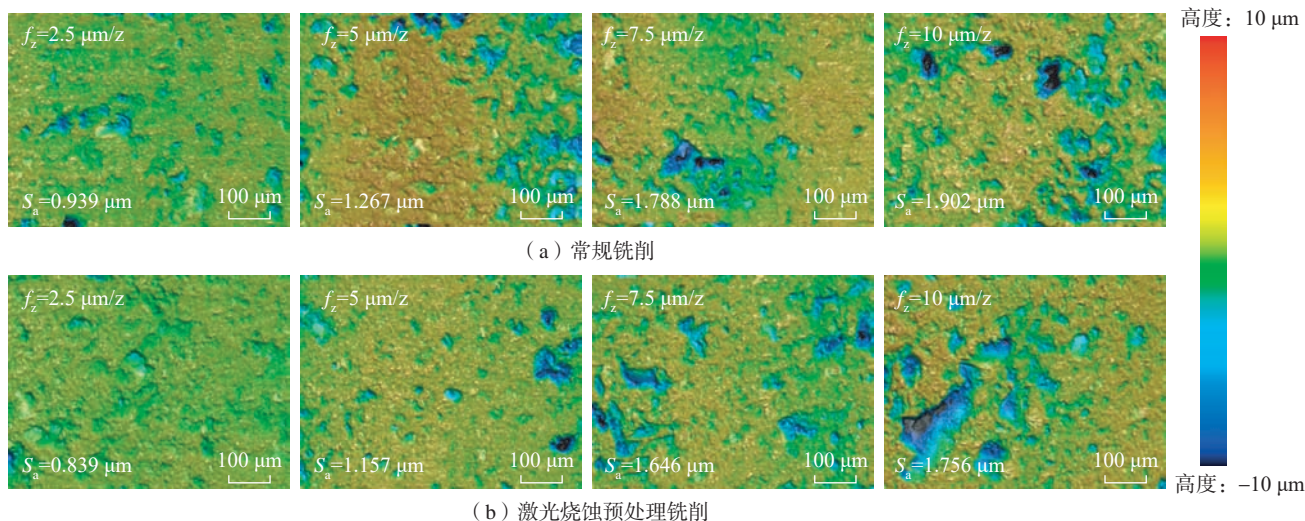


图 8 常规铣削和激光烧蚀预处理铣削加工表面三维形貌

Fig.8 3D morphology of machined surface by conventional milling and laser ablation pretreatment milling

件下,径向切宽为 2 mm 时,已加工表面粗糙度大幅提升。对于常规铣削无法加工的径向切宽为 2 mm 的试样,首先进行激光烧蚀处理,然后进行铣削加工。试验结果表明,在激光烧蚀预处理铣削条件下,随着每齿进给量增加,已加工表面粗糙度也逐渐增大,但已加工表面质量优于常规铣削。

对于激光烧蚀预处理铣削加工,实际径向切宽为无影响层深度。总体而言,当实际径向切宽一致时,激光烧蚀预处理铣削加工的表面质量能保证与常规铣削加工的表面质量一致。

### 1.5 刀具磨损

在铣削 FRCMCs-SiC 时,刀具磨损严重也是制约其加工效率的因素之一。图 10 为常规铣削和激光烧蚀预处理铣削试验后 PCD 刀具后刀面磨损微观形貌。如图 10 (a) 所示,常规铣削试验后 PCD 刀具后刀面磨损带总体上也较为均匀连续,但是磨损宽度比常规铣削略小,在刃口处并未发现大尺寸的微崩刃,刀具磨损形式为晶粒剥离,与常规铣削的一致。

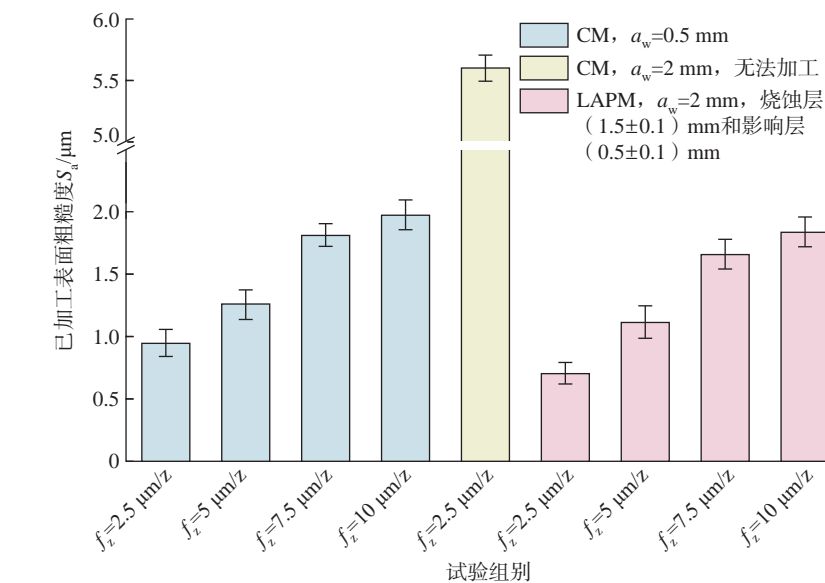


图 9 常规铣削和激光烧蚀预处理铣削的已加工表面粗糙度对比

Fig.9 Comparison of machined surface roughness between conventional milling and laser ablation pretreatment milling

发生晶粒剥离,从而导致刀具刃口磨损。如图 10 (b) 所示,激光烧蚀预处理铣削试验后 PCD 刀具后刀面磨损带总体上也较为均匀连续,但是磨损宽度比常规铣削略小,在刃口处并未发现大尺寸的微崩刃,刀具磨损形式为晶粒剥离,与常规铣削的一致。

由于常规铣削和激光烧蚀预处理铣削的实际径向切宽接近,因此两

者加工后的刀具磨损量也近似,可见疏松多孔的激光烧蚀产物极易被去除,几乎不会额外造成 PCD 刀具的磨损。对于 FRCMCs-SiC 而言,PCD 刀具的磨损形式主要为晶粒剥落,后刀面磨损带也较为均匀连续,另外当切削力过大时还会出现较大尺寸的微崩刃,会加速刀具失效。从刀具磨损的角度分析,激光烧蚀预处理铣削加工工艺在实现大幅提高

材料去除率的同时不会加剧刀具磨损<sup>[17-18]</sup>。

## 2 SiC<sub>f</sub>/SiC 陶瓷基复合材料超声振动辅助低损伤铣削加工

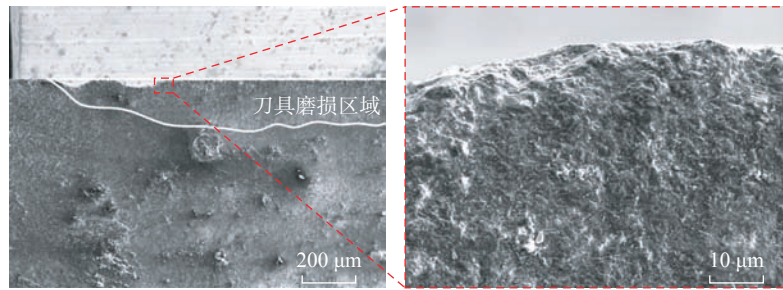
### 2.1 基于有限元仿真的超声振动辅助切削材料去除机理分析

图 11 为切深 5 μm 时沿切削方向超声振动辅助切削的仿真结果。在沿切削方向对刀具施加超声振动时,由于最大切削速度提高,纤维-刃口接触区具有应力集中的趋势(图 11 (a))。应力分布区域减小有利于避免在切削加工过程中造成纤维亚表面损伤,从图 11 (b)可以看出,沿切削方向超声振动辅助切削时,纤维亚表面损伤的数量大幅减小,且纤维亚表面损伤层深度也减小至 18.9 μm。鉴于在沿切削方向超声振动是纤维-刃口接触区应力集中效应,且切削速度提高带来应变率增加,从图 11 (c)可以看出,超声振动下铣削加工切削力大幅降低,峰值降低至 0.2 N。因此,在微观脆性断裂域切削 FRCMCs-SiC 时,施加沿切削方向的超声振动可以减小切削力,且减小纤维亚表面损伤数量和损伤层深度。

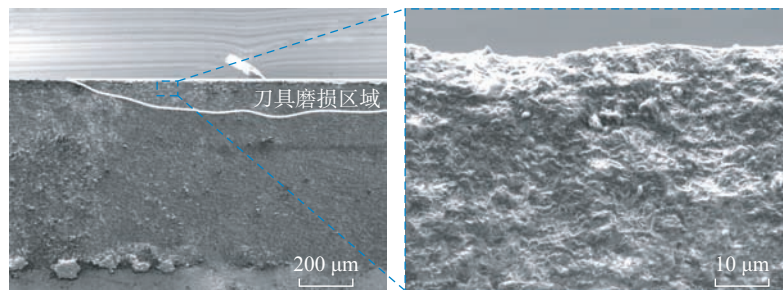
图 12 为切深 5 μm 时垂直于切削方向超声振动辅助切削的仿真结果。当对刀具施加垂直于切削方向的超声振动时,刀具轨迹会发生沿切深方向的正弦波动,切深也会相应发生从 2~8 μm 的正弦波动。如图 12 (a) 所示,切深增大和刃口对材料的挤压作用会直接造成纤维-刃口接触区应力增大,且应力分布会沿着切削速度方向深入材料内部。从图 12 (b) 可以看出,垂直于切削方向超声振动辅助切削时,纤维的已加工表面高度会随着切削轨迹的正弦波动而相应变化。从图 12 (c) 可以看出,切削力反而增大,峰值也超过 0.4 N。因此,在微观脆性断裂域切削 SiC<sub>f</sub>/SiC 时,施加垂直于切削方向的超声振动

反而会使已加工表面平整度下降,切削力增大,且会造成亚表面损伤加剧。

基于有限元仿真分析,总体而言,沿切削方向施加超声振动,无论是在微观脆性断裂域还是宏观脆性



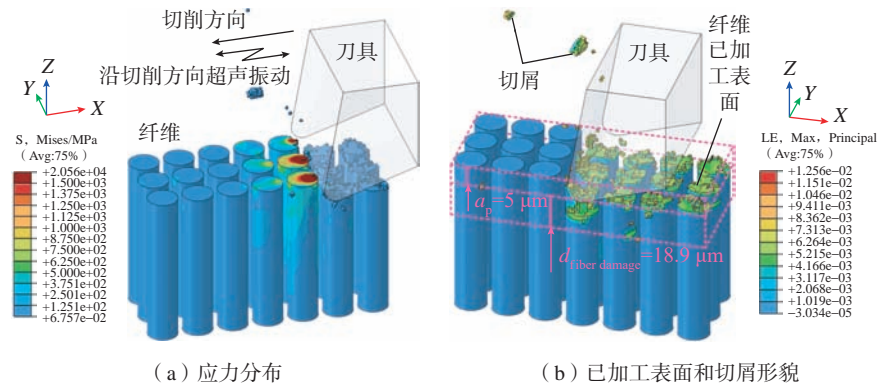
(a) 常规铣削



(b) 激光烧蚀预处理铣削

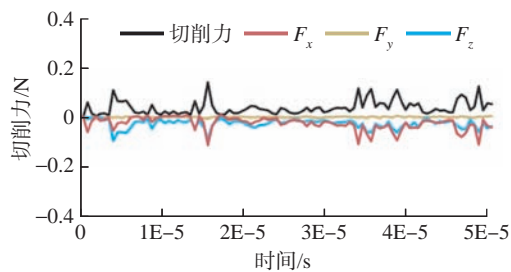
图 10 PCD 刀具磨损微观形貌

Fig.10 Micromorphology of PCD tool wear



(a) 应力分布

(b) 已加工表面和切屑形貌



(c) 各向切削力随切削时间变化

图 11 仿真结果(沿切削方向超声振动)

Fig.11 Simulation results (ultrasonic vibration along cutting direction)

断裂域都有利于减小切削力、已加工表面粗糙度和亚表面损伤层深度。但是垂直于切削方向施加超声振动时,在宏观脆性断裂域可以促进纤维断裂而有利于排屑和减小亚表面损伤层深度,但在微观脆性断裂域反而降低加工质量<sup>[19-20]</sup>。

### 2.2 超声振动参数对 SiC<sub>f</sub>/SiC 切削性能的影响

通过进行单向超声振动辅助铣削试验,研究超声振动参数(振动方向和振幅)在不同纤维取向角时对切削力和已加工表面质量的影响规律。

图 13 为不同纤维取向角时超声振动方向和超声振幅对切削力的影响规律。当施加沿进给方向的超声振动时,随着超声振幅增大,切削力雷达图轮廓逐渐向中心收缩,说明各纤维取向角下的切削力都逐渐减小。但是当施加沿径向切宽方向的超声振动时,随着振幅增加,切削力雷达图轮廓反而有向外扩张的趋势,说明各纤维取向角下的切削力反而增大。

图 14 为不同纤维取向角时超声振动方向和超声振幅对表面粗糙度的影响规律。与切削力的规律类似,高强高硬的基体弱化了纤维取向在铣削加工中的影响,使表面粗糙度数据雷达图的各向异性显著性下降。

### 2.3 纵扭复合旋转超声铣削加工提高陶瓷基复合材料已加工表面质量

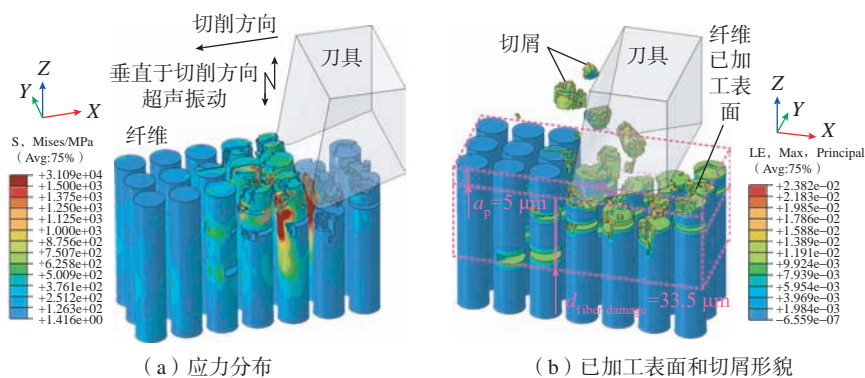
基于有限元仿真和单向超声振动辅助铣削试验结果可知,当超声振动的扭转振幅增大时,刀具侧刃的最大切削速度相应增大,应变率的提高有利于减小切削力。因此当超声振动振幅增大时,平均切削力减小。图 15 为每齿进给量和纵向振幅对平均切削力的影响。

铣削加工的切削区为半开放区,因此没有切屑堆积,散热良好,并且

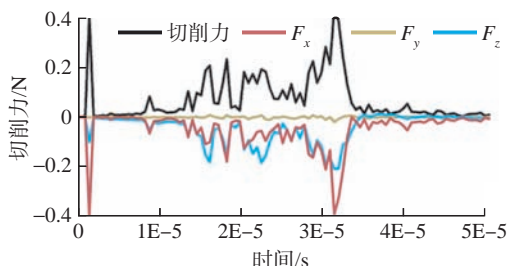
陶瓷基复合材料属于脆性材料,切削时几乎没有材料塑形变形产生的热量,因此铣削温度较低。图 16 为每齿进给量和纵向振幅对铣削温度的影响。陶瓷基复合材料是典型的脆性材料,切削热主要来源于刀具与已加工表面的摩擦。随着进给速度的增加,刀具与工件之间的相互作用

用力增大,摩擦产生的热量增加。由于超声振动大幅降低了切削力,因此超声振幅增大可以有效降低铣削温度。

每齿进给量和纵向振幅变化引起的材料去除机理的转变是表面粗糙度变化的主要因素。随机选取 3 个不同区域对每组参数的已加工表



(a) 应力分布 (b) 已加工表面和切屑形貌



(c) 各向切削力随切削时间变化

图 12 仿真结果(垂直于切削方向超声振动)

Fig.12 Simulation results (ultrasonic vibration perpendicular to cutting direction)

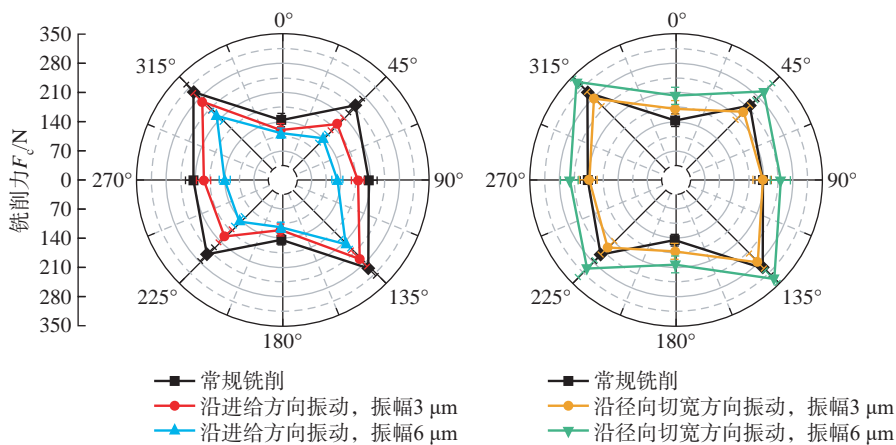


图 13 不同纤维取向角时超声振动参数对切削力的影响

Fig.13 Influence of ultrasonic vibration parameters on milling forces for different fiber orientation angles

面进行测量。图 17 为每齿进给量和纵向振幅对已加工表面粗糙度的影响规律。随着每齿进给量的增加,表面粗糙度大幅增加。当施加旋转超声振动时,底刃的纵向振动诱发的二次切削效应有利于降低已加工表面粗糙度,但是施加的纵向振动的振幅不宜过大。当纵向振幅超过  $4\ \mu\text{m}$  时,表面粗糙度反而随纵向振幅的增大而增大。

### 3 面向高效低损伤陶瓷基复合材料铣削策略评价

#### 3.1 SiC<sub>f</sub>/SiC 铣削加工工艺方案

基于上述研究,制定出 3 种不同的铣削加工策略,铣削加工工艺参数如表 1 所示。

铣削试验在 HURCO VMX42 加工中心上进行,试验中使用两刃直槽 PCD 铣刀,刀具直径为 6 mm,前角为  $3^\circ$ ,后角为  $10^\circ$ 。采用纵扭复合旋转超声刀柄实施超声振动辅助铣削加工。力学性能测试试样制备采用的是侧铣加工,只有扭转振动发挥了作用,因此选择了可以达到最大扭转振幅  $2.5\ \mu\text{m}$  的超声刀柄。针对激光烧蚀处理,在激光烧蚀试验平台上开展,根据力学性能测试试样的形状和尺寸计算得到待去除材料区域。

#### 3.2 力学性能测试试验装置

所有的力学性能测试都是在室温下进行,力学性能测试试验装置如图 18 所示。使用 MTS 公司的 MTS809 电液伺服材料试验机,针对荷载和位移的独立闭环控制,采用 Testar IIs 全数字控制系统。为了实时监测试样在力学性能测试试验中的损伤演变规律,使用 PAC 公司的 PCI-2 声发射系统采集声发射信号。采用道康宁公司的 HVG 高真空润滑硅脂作为声发射传感器和试样之间的偶联剂,并使用 BOPP 薄膜胶带将声发射传感器固定于试样上。使用 AEWIn 软件对声发射信号进行处理分析。

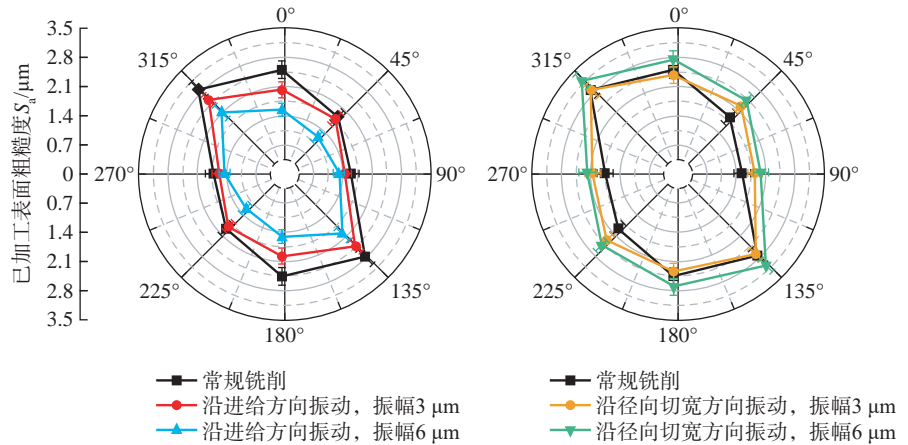


图 14 不同纤维取向角时超声振动参数对表面粗糙度的影响

Fig.14 Influence of ultrasonic vibration parameters on machined surface roughness for different fiber orientation angles

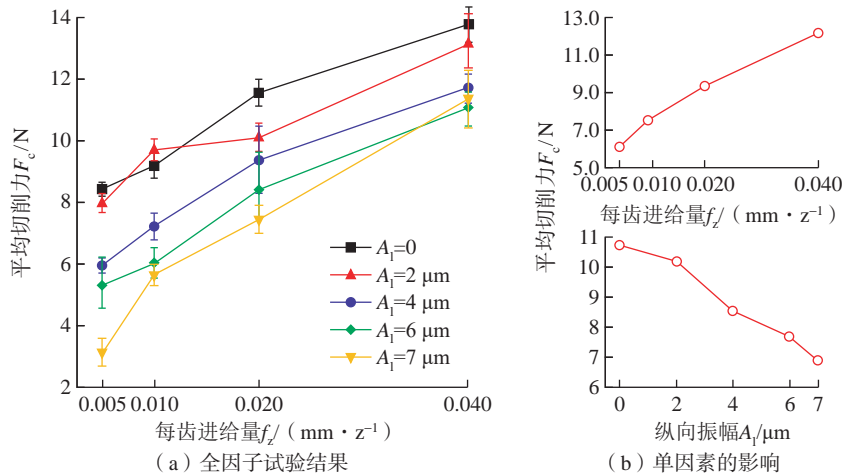


图 15 每齿进给量和纵向振幅对平均铣削力的影响

Fig.15 Effect of feed per tooth and longitudinal amplitude on average milling force

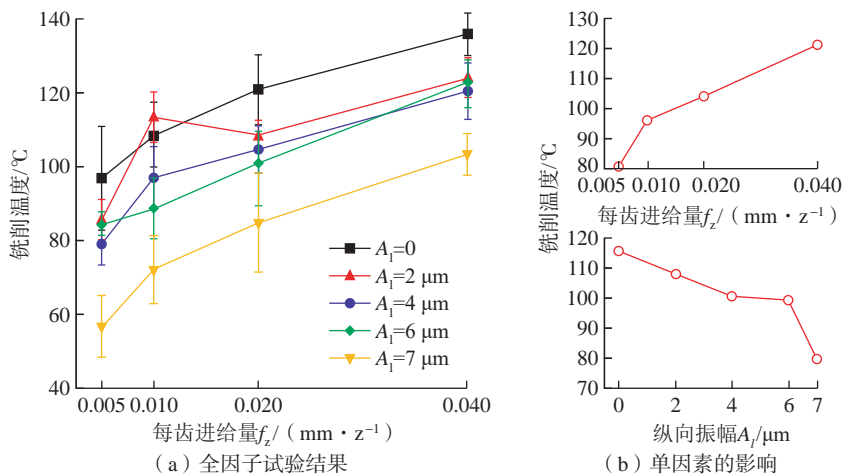


图 16 每齿进给量和纵向振幅对铣削温度的影响

Fig.16 Effect of feed per tooth and longitudinal amplitude on milling temperature

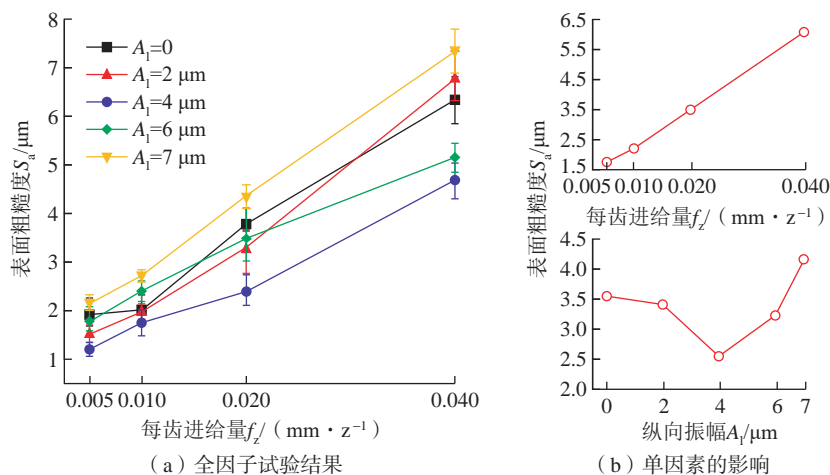
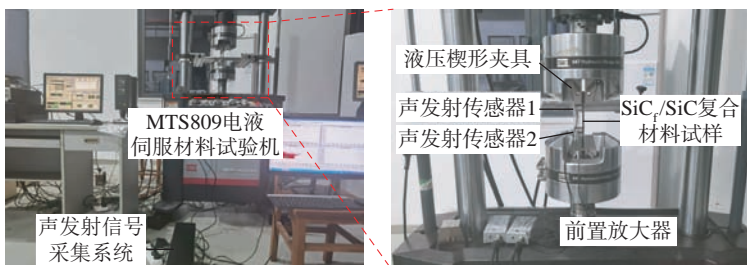
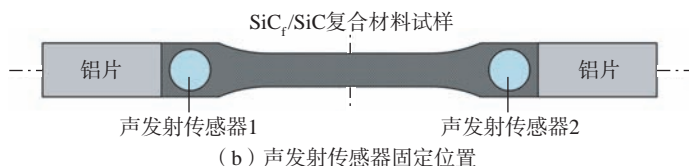


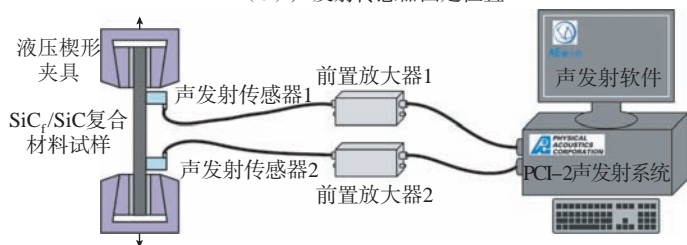
图 17 每齿进给量和纵向振幅对表面粗糙度的影响  
Fig.17 Effect of feed per tooth and longitudinal amplitude on surface roughness



(a) MTS809电液伺服材料试验机



(b) 声发射传感器固定位置



(c) 声发射信号采集装置示意图

图 18 力学性能测试试验装置

Fig.18 Mechanical test device

表 1 SiC<sub>f</sub>/SiC 力学性能测试试样铣削加工工艺参数

Table 1 Milling parameters of SiC<sub>f</sub>/SiC specimens for mechanical property tests

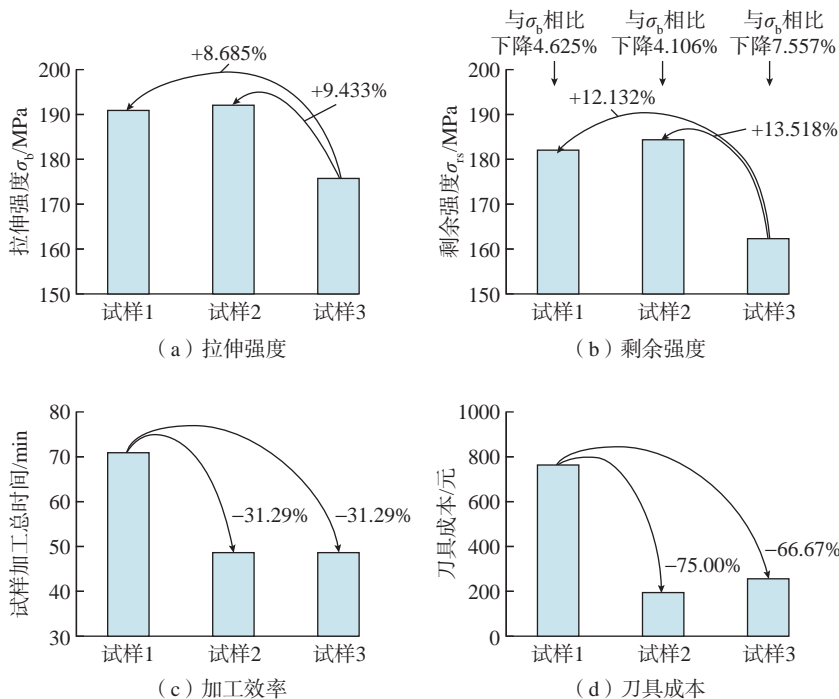
试样编号	铣削加工策略	铣削加工工艺参数
1	超声振动辅助铣削	主轴转速 $n=3000\text{ r/min}$ 、径向切宽 $a_w=0.2\text{ mm}$ 、轴向切深 $a_p=4.5\text{ mm}$ 、每齿进给量 $f_z=10\mu\text{m/z}$ 、超声频率 $19.7\text{ kHz}$ 、扭转振幅 $A_t=2.5\mu\text{m}$ (第 1 次进刀时径向切宽 $0.1\text{ mm}$ 、之后以 $0.2\text{ mm}$ 的径向切宽进行铣削加工)
2	激光烧蚀 + 超声振动辅助铣削	连续激光模式、激光功率 $P=56\text{ W}$ 、扫描速度 $v_{\text{laser}}=13\text{ mm/s}$ 、扫描行间距 $l_s=10\mu\text{m}$ 、平均烧蚀层深度 $2.3\text{ mm}$ 、主轴转速 $n=3000\text{ r/min}$ 、径向切宽 $a_w=2.5\text{ mm}$ 、轴向切深 $a_p=4.5\text{ mm}$ 、每齿进给量 $f_z=10\mu\text{m/z}$ 、超声频率 $19.7\text{ kHz}$ 、扭转振幅 $A_t=2.5\mu\text{m}$
3	激光烧蚀 + 常规铣削	连续激光模式、激光功率 $P=56\text{ W}$ 、扫描速度 $v_{\text{laser}}=13\text{ mm/s}$ 、扫描行间距 $l_s=10\mu\text{m}$ 、平均烧蚀层深度 $2.3\text{ mm}$ 、主轴转速 $n=3000\text{ r/min}$ 、径向切宽 $a_w=2.5\text{ mm}$ 、轴向切深 $a_p=4.5\text{ mm}$ 、每齿进给量 $f_z=10\mu\text{m/z}$

### 3.3 铣削加工策略多维度综合评价

鉴于已加工表面质量对零件的服役力学性能产生影响,基于试样拉伸性能和剩余强度对试样的铣削加工质量进行评价。图 19 (a)和(b)分别为铣削加工策略对试样拉伸强度和剩余强度的影响。与试样 3 相比,试样 1 和试样 2 的拉伸强度分别提高了 8.685% 和 9.433%,剩余强度分别提高了 12.132% 和 13.518%。试样 1 和试样 2 的剩余强度与拉伸强度相比,下降程度小于试样 3。因此,与常规铣削相比,通过超声振动辅助铣削加工工艺制备出的表面质量好,可以有效避免试样力学性能下降。

目前,加工效率低是制约陶瓷基复合材料零件应用推广的重要因素。因此有必要从加工效率的维度对不同的铣削策略进行评价。图 19 (c)为铣削加工策略对加工效率的影响。此外,考虑到经济问题,有必要从加工成本的维度对不同的铣削策略进行评价。图 19 (d)为铣削加工策略对刀具成本的影响。

图 20 为 3 种铣削加工策略多维度综合评价结果。分别从加工质量(以拉伸强度和剩余强度为评价指标)、加工效率(以加工总时长为评价指标)、刀具成本等维度进行综合评价。基于评价结果可以看出,超声振动辅助铣削策略的加工质量好,但是效率低,刀具成本也高。激光烧蚀 + 超声振动辅助铣削策略的加工质量好,且加工效率高,刀具成本也低。



注: 试样 1 为超声振动辅助铣削; 试样 2 为激光烧蚀 + 超声振动辅助铣削; 试样 3 为激光烧蚀 + 常规铣削。

图 19 铣削加工策略对试样拉伸强度、剩余强度、加工效率和刀具成本的影响

Fig.19 Effects of multiple milling strategies on tensile strength and residual tensile strength of specimens, machining efficiency and cost of tools

激光烧蚀 + 常规铣削策略的加工质量差,但是加工效率高,刀具成本也较低。总的来说,基于激光烧蚀预处理的铣削加工工艺可以有效提高陶瓷基复合材料铣削加工的效率,且减小刀具磨损,延长刀具寿命,从而降低刀具成本。超声振动辅助铣削加工工艺则可以减少加工损伤,提高加工质量,从而弱化铣削加工损伤造成的试样力学性能下降。总的来说,激光烧蚀 + 超声振动辅助铣削可以获得质量更好的加工表面,同时加工时间少,刀具成本低,综合来看是可以实现陶瓷基复合材料高效低损伤铣削加工的工艺方案。

#### 4 结论

本文提出激光烧蚀与超声振动辅助铣削的组合加工工艺,为实现陶瓷基复合材料高效低损伤铣削加工提供了可行的工艺方案。

(1) 提出了一种基于激光烧蚀

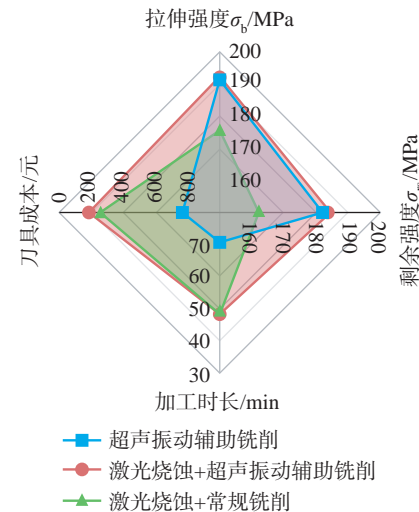


图 20 3 种铣削加工策略多维度综合评价结果

Fig.20 Multi-dimensional comprehensive evaluation results of three milling strategies

预处理的铣削加工工艺方法。通过高能量密度的激光束直接照射材料表面,使材料发生高温烧蚀,引起待加工层材料性能的急剧损失,然后进行铣削加工,可以在保证加工质量不

变的前提下大幅提高材料去除率,从而为大幅提高陶瓷基复合材料可加工性和加工效率提供了有效可行的工艺方案。

(2) 超声振动辅助铣削工艺通过沿切削方向施加超声振动,有利于降低切削力和加工表面粗糙度,并减少亚表面损伤层深度,从而实现陶瓷基复合材料低损伤切削加工。

(3) 基于加工质量(以拉伸强度和剩余强度为评价指标)、加工效率、刀具成本等多维指标的综合评价结果,提出了激光烧蚀与超声振动辅助铣削的组合加工工艺策略是实现陶瓷基复合材料高效低损伤铣削加工有效可行的工艺方案。

#### 参考文献

- [1] YIN X, CHENG L, ZHANG L T, et al. Fibre-reinforced multifunctional SiC matrix composite materials[J]. International Materials Reviews, 2017, 62(3): 117-172.
- [2] CHEN J, AN Q L, CHEN M. Transformation of fracture mechanism and damage behavior of ceramic-matrix composites during nano-scratching[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2020, 130: 105756.
- [3] AN Q L, CHEN J, MING W W, et al. Machining of SiC ceramic matrix composites: A review[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(4): 540-567.
- [4] ZOU F, CHEN J, AN Q L, et al. Influences of clearance angle and point angle on drilling performance of 2D C/SiC composites using polycrystalline diamond tools[J]. Ceramics International, 2020, 46(4): 4371-4380.
- [5] HU M, MING W W, AN Q L, et al. Experimental study on milling performance of 2D C/SiC composites using polycrystalline diamond tools[J]. Ceramics International, 2019, 45(8): 10581-10588.
- [6] ZHANG X W, YU T B, ZHAO J. An analytical approach on stochastic model for cutting force prediction in milling ceramic matrix composites[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 168: 105314.
- [7] ZHANG X W, YU T B, LI M, et al. Effect of machining parameters on the milling process of 2.5D C/SiC ceramic matrix composites[J]. Machining Science and

Technology, 2020, 24(2): 227–244.

[8] YANG Y F, ZHAO G L, HU M S, et al. Fabrication of CVD diamond micro-milling tool by hybrid machining of laser-induced graphitization and precision grinding[J]. *Ceramics International*, 2019, 45(18): 24127–24136.

[9] XIA H J, ZHAO G L, MAO P C, et al. Improved machinability of TiB<sub>2</sub>-TiC ceramic composites via laser-induced oxidation assisted micro-milling[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(8): 11514–11525.

[10] 赵国龙, 夏宏军, 李亮, 等. 激光诱导可控氧化辅助微细铣削 TiAl 金属间化合物的研究 [J]. *机械工程学报*, 2021, 57(9): 254–263.

ZHAO Guolong, XIA Hongjun, LI Liang, et al. Investigation on laser-induced controllable oxidation assisted micro milling of titanium aluminum intermetallic alloy[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(9): 254–263.

[11] CAO J G, NIE M, LIU Y M, et al. Ductile-brittle transition behavior in the ultrasonic vibration-assisted internal grinding of silicon carbide ceramics[J]. *The International*

*Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 96(9): 3251–3262.

[12] ZHENG W, WANG Y J, ZHOU M, et al. Material deformation and removal mechanism of SiC<sub>p</sub>/Al composites in ultrasonic vibration assisted scratch test[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(13): 15133–15144.

[13] XU W X, ZHANG L C, WU Y B. Elliptic vibration-assisted cutting of fibre-reinforced polymer composites: Understanding the material removal mechanisms[J]. *Composites Science and Technology*, 2014, 92: 103–111.

[14] RAJ R, TERAUDS K. Bubble nucleation during oxidation of SiC[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2015, 98(8): 2579–2586.

[15] CHEN J, AN Q L, MING W W, et al. Investigations on continuous-wave laser and pulsed laser induced controllable ablation of SiC<sub>p</sub>/SiC composites[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, 41(12): 5835–5849.

[16] CHEN J, AN Q L, GONG Q H, et al. Machinability improvement in milling of SiC<sub>p</sub>/SiC composites based on laser controllable ablation pretreatment[J]. *Journal of the European*

*Ceramic Society*, 2023, 43(4): 1352–1365.

[17] CHEN J, AN Q L, MING W W, et al. Hole exit quality and machined surface integrity of 2D C<sub>f</sub>/SiC composites drilled by PCD tools[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, 39(14): 4000–4010.

[18] 陈杰, 安庆龙, 明伟伟, 等. PCD 刀具几何参数对 C<sub>f</sub>/SiC 复合材料铣削质量的影响 [J]. *工具技术*, 2020, 54(10): 3–8.

CHEN Jie, AN Qinglong, MING Weiwei, et al. Influence of PCD tool geometric parameters on milling quality of C<sub>f</sub>/SiC composites[J]. *Tool Engineering*, 2020, 54(10): 3–8.

[19] CHEN J, MING W W, AN Q L, et al. Mechanism and feasibility of ultrasonic-assisted milling to improve the machined surface quality of 2D C<sub>f</sub>/SiC composites[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(10): 15122–15136.

[20] CHEN J, AN Q L, MING W W, et al. Investigation on machined surface quality in ultrasonic-assisted grinding of C<sub>f</sub>/SiC composites based on fracture mechanism of carbon fibers[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 109(5): 1583–1599.

## Multi-Energy Field Assisted High-Efficiency and Low Damage Milling Process of Ceramic Matrix Composites

AN Qinglong<sup>1</sup>, LI Han<sup>1</sup>, CHEN Jie<sup>2</sup>, MING Weiwei<sup>1</sup>, CHEN Ming<sup>1</sup>

(1. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610091, China)

**[ABSTRACT]** Ceramic matrix composites have the characteristics of high hardness, high strength, anisotropy and heterogeneity, which lead to severe tool wear, poor processing quality and low processing efficiency during processing. The milling process of the laser ablation treated samples proved that almost no force and heat are generated when milling the powdery ablation products. Using finite element simulation and unidirectional ultrasonic vibration-assisted milling, it is found that the ultrasonic vibration-assisted milling process can achieve low-damage machining of ceramic matrix composites without reducing the processing efficiency. A combined processing technology of laser ablation and ultrasonic vibration assisted milling is proposed. Based on multi-dimensional indicators such as machining quality, machining efficiency, and tool cost, the milling machining strategy is comprehensively evaluated. The strategy of laser ablation+ultrasonic vibration assisted milling can obtain a better quality machined surface, and at the same time, the processing time is less, and the tool cost is low. In general, it is a process scheme that can realize high-efficiency and low-damage milling of ceramic matrix composites.

**Keywords:** Ceramic matrix composites; Milling; Multi-energy field assisted machining; Processing quality; Low damage

(责编 古系)

引文格式:周兰,安国升,李光奇,等.基于等效刃型矢量法的钛合金螺旋铣孔切削力机械模型研究[J].航空制造技术,2023,66(14):52-58.

ZHOU Lan, AN Guosheng, LI Guangqi, et al. Research on mechanistic model of cutting force in helical milling of titanium alloy based on equivalent cutting edge vector method[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(14): 52-58.

# 基于等效刃型矢量法的钛合金螺旋铣孔切削力机械模型研究\*

周 兰<sup>1</sup>,安国升<sup>1</sup>,李光奇<sup>1</sup>,朱宗孝<sup>1</sup>,冯照和<sup>2</sup>

(1. 兰州理工大学,兰州 730050;

2. 杭州汽轮机股份有限公司,杭州 310022)

**[摘要]** 为了准确预测钛合金螺旋铣孔过程中多齿复杂刃型专用刀具瞬时切削力的变化规律,采用等效刃型矢量法建立专用刀具的切削力机械模型。通过分析螺旋铣孔运动学特征,实现任意切削点运动轨迹的数学描述;对刀具在稳定加工阶段产生的未变形切屑与加工表面进行几何仿真分析;根据双刃切削原理,计算端刃的等效刃长及其未变形切屑的切削深度与切削宽度,同时结合侧刃的切削力分析,构建整体切削力机械模型;最后,通过试验标定切削力模型系数,实现切削力仿真值预测。结果表明,该仿真值能够准确预测专用刀具的瞬时切削力变化规律,说明等效刃型矢量法是实现螺旋铣孔切削力建模中的有效途径。

**关键词:** 等效刃型;螺旋铣孔;切削力;钛合金;机械模型

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2023.14.052



周 兰

副教授,博士,主要研究方向为航空难加工材料的先进制孔技术。

螺旋铣孔技术可有效降低切削力,大幅提高制孔质量,已逐渐替代传统钻削,被广泛应用于钛合金切削加工<sup>[1-3]</sup>。作为一种先进制孔技术,其偏心加工特征将对切削过程产生积极影响:首先,由于运动学轨迹呈周期性交叉重叠,可使实际切削量减少、切屑几何尺寸变小,同时降低切削力水平;其次,彻底改变近似封闭的加工空间状态,其瞬时加工区域与孔壁之间的空隙明显增大,实现了成屑与排屑过程快速散热,从而有效避免切削温度对刀具磨损和切削力产生的不利影响<sup>[4]</sup>。因此,采用偏心加工方式的螺旋铣孔技术,其切削力相较于传统钻削工艺更小,但其变化规律更为复杂,成为相关领域的研究热点。

目前,已有大量研究围绕螺旋铣切削力模型的构建,以及相关系数标

定、仿真分析与试验验证展开。Rey等<sup>[5]</sup>基于螺旋铣运动学轨迹与刀具几何特征,得到切屑模型,通过计算瞬时切屑厚度,实现了螺旋铣孔过程切削力建模。Li等<sup>[6]</sup>基于刀具跳动效应,采用解析法分别计算底刃和侧刃产生的瞬时未变形切屑厚度,结合已标定切削力系数,建立了两种刃型的切削力模型。Shang<sup>[7]</sup>和Shi<sup>[8]</sup>等构建了螺旋铣孔过程切削力模型,并分别通过槽铣加工和螺旋铣孔试验对侧刃和端刃的切削力模型系数进行标定。Zhou等<sup>[9]</sup>基于螺旋铣运动学特点,计算了未变形切屑的几何特征,构建了一种非线性切削力模型,并验证了该模型的准确性。Wang等<sup>[10]</sup>根据球头铣刀在螺旋铣孔加工中材料的去除特征,采用微分单元法对切削力变化规律进行分析,

\* 基金项目:国家自然科学基金(52265025)。

结果表明该刀具可实现高质量稳定切削。王海艳等<sup>[11]</sup>基于经典切削理论(直角切削与斜角切削),分析了螺旋铣孔过程的切削力变化趋势,提出了切削力系数辨识方法。上述切削力模型大多围绕传统铣刀展开,刀具结构相对简单;但是,目前钛合金高效高品质的螺旋铣制孔加工亟须发挥多齿复杂刃型专用刀具的优势,已有切削力模型难以阐明刀具不同刃型与工件之间复杂的作用关系,未能准确描述切屑与加工表面的非规则几何特征。因此,已有模型在螺旋铣孔瞬时切削力变化规律的研究中存在局限。

等效刃型矢量法是解决由不同刃型造成排屑干涉问题的有效途径。它基于金属加工中普遍存在的非自由切削特征而提出<sup>[12-13]</sup>。该方法首先将刀具沿刀刃划分为一系列单元刀具,进而对其不同刃型的相应矢量进行几何与运动分析,计算加工中产生的切削深度与切削宽度,建立单元刀具的切削力模型,最终采用积分法分析整体刀具的切削力变化规律。

本文基于螺旋铣孔切削原理,结合专用刀具刃型特征,对未变形切屑与加工表面几何形貌进行仿真分析;采用等效刃型矢量法,将刀具端刃沿轴向离散,通过数学描述其单元刃型矢量之间的关系,计算相应等效刃长及其产生的切削深度与切削宽度,进而建立单元刃型的切削力机械模型,最终实现专用刀具在螺旋铣孔过程中的瞬时切削力预测。

### 1 螺旋铣孔运动学

螺旋铣孔加工被视为圆周铣削与插铣二者的结合。该制孔过程中,刀具的三维切削轨迹由绕刀具轴线的自转运动、绕待加工孔轴线的周期性公转运动与沿刀具轴线的轴向进给运动组成,如图1所示。自转与公转均为顺时针方向运动。公转与轴向进给组合成螺旋进给运动,可进一步分解为切向进给分量与轴向进给

分量。刀具的自转与螺旋进给运动具有各自不同的运动周期。由以上螺旋铣运动学特点可知该制孔工艺属于偏心加工类型,与传统钻削中加工空间近似封闭的情况不同,螺旋铣孔过程中刀具与孔壁之间存在间隙,使其在迅速排屑与散热方面凸显优势。

为了实现对螺旋铣孔运动学的数学描述,首先设定运动变量和时间变量分别为自转转速  $N_{rot}$ , r/min; 公转转速  $N_{rev}$ , r/min; 轴向进给速度  $v_{fa}$ , mm/s; 时间  $t$ , s。进而建立运动学分析坐标系,如图2所示。该坐标系由3个坐标系构成:工件坐标系  $XYZ$ , 固定于工件上不动; 刀具坐标系  $x_{ti}y_{ti}z_{ti}$  固定在刀具上; 参考坐标系  $x_iy_iz_i$  用于辅助分析刀具上任意切削位置的运动轨迹。

基于以上坐标系,刀具的自转角速度和公转角速度的计算公式为

$$\begin{cases} \omega_{rot} = \frac{\pi \cdot N_{rot}}{30} \\ \omega_{rev} = \frac{\pi \cdot N_{rev}}{30} \end{cases} \quad (1)$$

刀具中心  $O_{ti}$  在工件坐标系  $XYZ$  中的瞬时公转角度  $\theta_{ti}$ , 刀齿1在刀具坐标系  $x_{ti}y_{ti}z_{ti}$  中的瞬时自转角度  $\varphi_{ti}$  可计算为

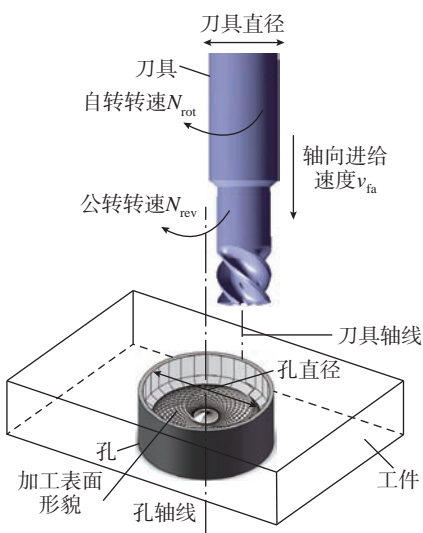


图1 螺旋铣孔运动学特征  
Fig.1 Characteristics of helical milling kinematic

$$\begin{cases} \theta_{ti} = \theta_{t0} + \omega_{rev} \times t \\ \varphi_{ti} = \varphi_{t0} + \omega_{rot} \times t \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\theta_{t0}$  为刀具中心在工件坐标系  $XYZ$  中的初始公转角度;  $\varphi_{t0}$  为刀齿1在刀具坐标系  $x_{ti}y_{ti}z_{ti}$  中的初始自转角度。

因此,刀具切削刃上任意位置点的运动轨迹方程为

$$\begin{cases} X = e_p \times \cos\left(\frac{\pi \times N_{rev}}{30} \times t\right) + R_M \cos\left[\frac{\pi}{30} \times (N_{rot} + N_{rev})\right] \times t \\ Y = e_p \times \sin\left(\frac{\pi \times N_{rev}}{30} \times t\right) + R_M \times \sin\left[\frac{\pi}{30} \times (N_{rot} + N_{rev})\right] \times t \\ Z = z_M - v_{fa} \times t \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $e_p$  为刀具中心与孔中心之间距离(偏心量);  $R_M$  为任意位置点与刀具轴线的距离;  $z_M$  为任意位置点在初始时刻在  $Z$  轴上的截距。

### 2 未变形切屑与加工表面仿真分析

螺旋铣孔过程中所产生切屑与加工表面的几何特征对其切削力变化具有重要影响。在实际加工中,刀具与工件相互作用情况瞬时变化,产生大量小尺寸且非规则切屑,同时形成了极其复杂的加工表面,使得对其

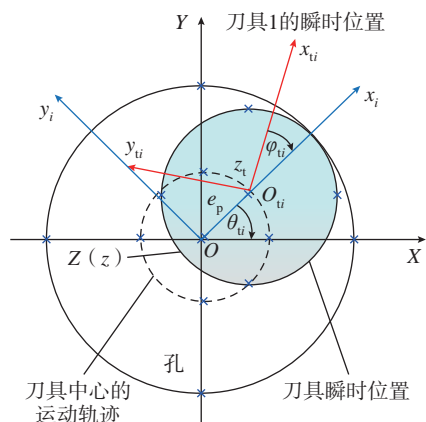


图2 运动学分析坐标系  
Fig.2 Coordinate system of kinematic analysis

几何特征进行数学描述和解析建模难以实现。因此,本文基于前期研究中的专用刀具刃型结构<sup>[4]</sup>,结合螺旋铣孔运动学特征,采用仿真方法实现了对未变形切屑与加工表面的几何建模。该模型以螺旋铣孔稳定加工阶段为研究对象,应用 SolidWorks 软件实现刀具、工件与加工轨迹的几何造型,并采用布尔运算得到未变形切屑及其相应加工表面的几何模型。主要的仿真步骤包括:

(1) 首先简化专用刀具几何结构,使其只包含端刃和侧刃的几何轮廓,并绕刀具轴线旋转形成实体 1;

(2) 绘制圆柱形实体 2,代表制孔过程的加工体积;

(3) 绘制刀具中心在公转运动中形成的螺旋线状加工轨迹,并将实体 1 绕该螺旋线实现几何阵列操作,进而与实体 2 实现逻辑减操作,由此得到加工表面的几何模型;

(4) 对阵列后最后一项与加工表面的几何结构实施逻辑与操作,可得到未变形切屑的几何模型。

在未变形切屑和加工表面的仿真分析中,重点考虑了两个影响因素,分别为自转与公转之间转速比、每公转轴向进给量。当转速比为 40,每公转轴向进给量为 0.1 mm/r 时,按照上述仿真步骤可得到未变形切屑与加工表面的几何仿真模型,如图 3 所示。

图 3 (a) 为专用刀具螺旋铣孔稳定加工阶段切削情况示意图。其中,  $H_h$  为工件总厚度,  $h_0$  为刀具端刃完全参与切削时的加工深度。在实际加工中,与加工深度  $h_0$  对应的切削体积由端刃与侧刃共同完成,分别对应图 3 (a) 中绿色与蓝色部分。端刃与螺旋侧刃的实际加工情况呈现出不同特点,前者对应加工区域呈圆锥体,完成切削体积较大;侧刃加工区域近似为非规则三棱锥,产生切削体积极小。由于切削体积与切削力水平存在正相关,可知侧刃产生的

切削力远小于端刃。另外,根据专用刀具端刃几何参数,加工深度  $h_0$  可进一步表示为

$$h_0 = l_{j2} \times \sin \beta_{j2} \text{ 或 } h_0 = l_{j1} \times \sin \beta_{j1}, \quad j=1,2,3,4 \quad (4)$$

式中,  $l_{j1}$  和  $l_{j2}$  为各刀齿端刃的外侧刃和内侧刃长度;  $\beta_{j1}$  和  $\beta_{j2}$  为各刀齿端刃的外侧刃和内侧刃的倾斜角度;  $j$  为刀齿序号。

图 3 (b) 为稳定加工阶段产生的未变形切屑与加工表面的几何仿真模型。可见未变形切屑具有 4 个不同几何特征部分,与四齿端刃结构一一对应。其中,体积最大的一部分切屑呈蝌蚪状,头部方正,尾部细长;其他部分切屑为细长形,体积较小。由加工表面的几何形貌特征可知,刀具的运动轨迹没有任何一条完全相同,说明其铣削路径非常复杂,故而难以实现准确的数学描述。若以孔中心为圆心,可将加工表面划分为 3 个同心圆区域,刀具在不同区域的加工轨迹各不相同,但在同一区域,其加工轨迹呈现相同的曲线类型;此外,相邻区域之间还存在少数加工轨迹重叠的现象。与此同时,侧刃的加工过程与传统铣削类似,并形成最终的孔壁表面。

上述未变形切屑与加工表面几何特征的仿真分析充分说明,实际工况下专用刀具与工件材料之间的相

互作用情况瞬时变化,随之产生的切削力变化规律异常复杂。

### 3 切削力机械模型

基于对端刃与侧刃在稳定加工阶段的切削情况分析,以下分别建立二者在螺旋铣孔过程中产生的切削力模型。

#### 3.1 端刃

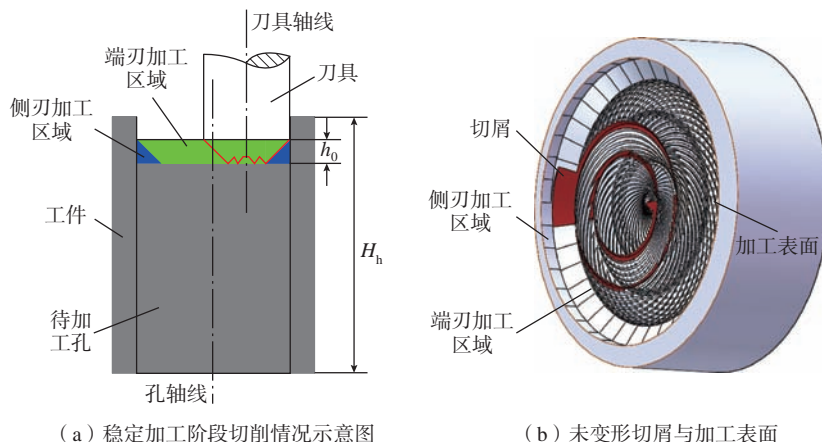
##### 3.1.1 等效刃长的计算

专用刀具具有两种类型单齿,记为 I 型刀齿(刀齿 1 和刀齿 3)与 II 型刀齿(刀齿 2 和刀齿 4),其端刃结构关于刀具轴向对称分布,且两种类型刀齿皆为三段式结构。各单齿端刃的单元等效刃型如图 4 所示。

由于该端刃刃型在切削过程中呈现出双刃切削的特性,可采用等效刃型法实现对端刃切削过程的简化。首先,沿刀具轴向将端刃离散为  $N$  个单元微刃(记为  $i = 0, 1, 2, \dots, N-1$ ); 随后,采用等效刃型法计算各个单齿微刃的等效刃长。

图 4 所示的刀齿 1 和刀齿 3 端刃的单元等效刃长的计算公式为

$$\begin{cases} \vec{C}_i = \vec{A}_i + \vec{B}_i \\ |\vec{C}_{i1}| = |\vec{A}_{i1}| \times \cos \beta_{i2} + |\vec{B}_{i1}| \times \cos \beta_{i1}, \\ |\vec{C}_{i3}| = |\vec{A}_{i3}| \times \cos \beta_{i2} + |\vec{B}_{i3}| \times \cos \beta_{i1}, \\ i = 0, 1, 2, \dots, N-1 \end{cases} \quad (5)$$



(a) 稳定加工阶段切削情况示意图

(b) 未变形切屑与加工表面

图 3 螺旋铣孔稳定加工阶段的未变形切屑与加工表面几何仿真模型

Fig.3 Geometric simulation model of undeformed chips and machining surfaces at steady cutting stage of helical milling process

同理,刀齿 2 和刀齿 4 端刃的单元等效刃长计算为

$$\begin{cases} \vec{F}_i = \vec{D}_i + \vec{E}_i \\ |\vec{F}_{i2}| = |\vec{D}_{i2}| \times \cos\beta_{22} + |\vec{E}_{i2}| \times \cos\beta_{21} \\ |\vec{F}_{i4}| = |\vec{D}_{i4}| \times \cos\beta_{42} + |\vec{E}_{i4}| \times \cos\beta_{41} \end{cases} \quad (6)$$

图 4 中刀齿 1 (刀齿 3) 端刃的最外侧刃与第 2 段刃的刃长分别记为  $l_{11}$  ( $l_{31}$ ) 与  $l_{12}$  ( $l_{32}$ ), 刀齿 2 (刀齿 4) 端刃的最外侧刃与第 2 段刃的刃长分别记为  $l_{21}$  ( $l_{41}$ ) 与  $l_{22}$  ( $l_{42}$ ), 可简称为  $l_{j1}$  与  $l_{j2}$ , 均为端刃的已知几何参数。以上刀齿对应的单元刃型的刃长可分别表示为  $l_{11-i}$  ( $l_{31-i}$ ),  $l_{12-i}$  ( $l_{32-i}$ ),  $l_{21-i}$  ( $l_{41-i}$ ) 与  $l_{22-i}$  ( $l_{42-i}$ ), 简化标记为  $l_{j1-i}$  与  $l_{j2-i}$ 。因此, 图 4 中各单齿单元等效刃长计算公式可进一步表示为

$$\begin{cases} |\vec{C}_{ij}| = l_{j2-i} \times \cos\beta_{j2} + l_{j1-i} \times \cos\beta_{j1}, \\ i = 0, 1, 2, \dots, N-1, j = 1 \text{ 或 } 3 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} |\vec{F}_{ij}^*| = l_{j2-i} \times \cos\beta_{j2} + l_{j1-i} \times \cos\beta_{j1}, \\ i = 0, 1, 2, \dots, N-1, j = 2 \text{ 或 } 4 \end{cases} \quad (8)$$

上式中  $l_{j1-i}$  与  $l_{j2-i}$  可计算为

$$\begin{cases} l_{j1-i} = l_{j1}/N \\ l_{j2-i} = l_{j2}/N \end{cases} \quad (9)$$

### 3.1.2 未变形切屑的几何参数计算

将式(9)代入式(7)与(8), 四齿端刃等效刃型的瞬时切削宽度  $b_{ij}$  可计算为

$$\begin{cases} b_{ij} = l_{j2-i} \times \cos\beta_{j2} + l_{j1-i} \times \cos\beta_{j1}, \\ i = 0, 1, 2, \dots, N-1, j = 1, 2, 3, 4 \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $i$  为离散的  $N$  个单元微刃的序

号;  $j$  为刀齿序号。

最大切削宽度  $b_{Mj}$  计算为

$$b_{Mj} = l_{j2} \times \cos\beta_{j2} + l_{j1} \times \cos\beta_{j1}, \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (11)$$

另外, 四齿端刃等效刃型的瞬时切削深度  $h_{ij}$  的计算公式为

$$h_{ij} = v_{fa} \times t_i = \frac{h_0}{N} \times i, i = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (12)$$

将式(4)代入式(12)可得

$$\begin{cases} h_{ij} = \frac{l_{j2} \times \sin\beta_{j2}}{N} \times i \text{ 或 } h_{ij} = \frac{l_{j1} \times \sin\beta_{j1}}{N} \times i \\ i = 0, 1, 2, \dots, N-1, j = 1, 2, 3, 4 \end{cases} \quad (13)$$

### 3.1.3 切削力模型

单齿端刃的单元微刃的切向、径向和轴向切削力分别计算为

$$\begin{cases} F_{vij} = K_{vij} \cdot h_{ij}^{1-q_{vij}} \cdot b_{ij} \\ F_{rij} = K_{rij} \cdot h_{ij}^{1-q_{rij}} \cdot b_{ij} \\ F_{ajj} = K_{ajj} \cdot h_{ij}^{1-q_{ajj}} \cdot b_{ij} \end{cases}, \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1, j = 1, 2, 3, 4 \quad (14)$$

式中,  $t$ 、 $r$ 、 $a$  分别表示切向、径向和轴向;  $i$  为单元微刃的数目;  $j$  为刀齿序号。专用刀具端刃的各向切削力为四齿端刃的切削力之和, 计算为

$$\begin{cases} F_{ui} = \sum_{j=1}^4 F_{vij} \\ F_{ri} = \sum_{j=1}^4 F_{rij}, \\ F_{ai} = \sum_{j=1}^4 F_{ajj} \end{cases}, \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1, j = 1, 2, 3, 4 \quad (15)$$

以上为刀具坐标系下的切削力计算公式, 可通过转换矩阵  $T_1$  和  $T_2$  得到工件坐标系下刀具端刃的切削力计算公式为

$$\begin{cases} F_{xi} = T_2 \cdot T_1 \cdot F_{ri} \\ F_{yi} = T_2 \cdot T_1 \cdot F_{ui} \\ F_{zi} = F_{ai} \end{cases} \quad (16)$$

其中转换矩阵表示为

$$T_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_{ti} & -\sin\theta_{ti} & 0 \\ \sin\theta_{ti} & \cos\theta_{ti} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$T_1 = \begin{bmatrix} \cos\varphi_{ti} & -\sin\varphi_{ti} & 0 \\ \sin\varphi_{ti} & \cos\varphi_{ti} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

## 3.2 侧刃

为实现侧刃切削力建模, 需针对该螺旋状刃型特征, 分析其产生的未变形切屑几何特征。与端刃分析方法类似, 沿刀具轴向将侧刃离散为  $N$  个微刃单元, 则第  $j$  个单齿的第  $i$  个微刃单元的切入角可计算为

$$\phi_{ij}(z) = \phi_0 + j\phi_p - \psi_i, i = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (19)$$

式中,  $\phi_0$  为参考刀齿 (通常设定为刀齿 1) 的瞬时切入角度;  $\phi_p$  为刀齿之间的空间夹角;  $\psi_i$  为刀齿在不同轴向位置时的滞后角度, 可表示为

$$\begin{cases} \phi_p = 2\pi/N_t \\ \psi_i = k_\beta z \\ k_\beta = (2\tan\beta)/D_t \end{cases} \quad (20)$$

式中,  $\beta$  为侧刃螺旋角度;  $D_t$  为刀具直径;  $N_t$  为刀具齿数。因此, 螺旋侧刃第  $j$  刀齿的第  $i$  个微刃单元的切削厚度计算公式为

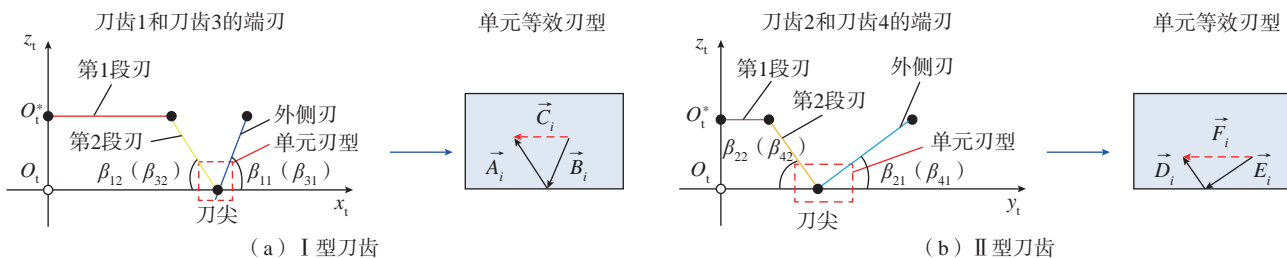


图 4 专用刀具各单齿端刃的单元等效刃型

Fig.4 Unit equivalent edge of front cutting edges for each tooth of dedicated cutter

$$h_{ij}^*(\phi, z) = f_{i0} \times \sin\phi_{ij}(z),$$

$$i=0, 1, 2, \dots, N-1, j=1, 2, 3, 4 \quad (21)$$

刀具中心每齿进给量  $f_{i0}$  表示为

$$f_{i0} = \frac{\pi N_{\text{rev}} \times (D_h - D_t)}{N_{\text{rot}} \times N_t} \quad (22)$$

单齿侧刃的单元微刃的切向、径向和轴向切削力分别计算为

$$\begin{cases} dF_{t,ij}(\phi, z) = K_{tp} h_{ij}^*(\phi_{ij}(z)) dz \\ dF_{r,ij}(\phi, z) = K_{rp} h_{ij}^*(\phi_{ij}(z)) dz, \\ dF_{a,ij}(\phi, z) = K_{ap} h_{ij}^*(\phi_{ij}(z)) dz \end{cases}$$

$$i = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1, j = 1, 2, 3, 4 \quad (23)$$

在刀具坐标系下,侧刃的单元微刃在切向、径向和轴向的切削力分量可表示为

$$\begin{cases} dF_{x,ij}(\phi_{ij}(z)) = -dF_{t,ij} \cos\phi_{ij}(z) - dF_{r,ij} \sin\phi_{ij}(z) \\ dF_{y,ij}(\phi_{ij}(z)) = +dF_{t,ij} \sin\phi_{ij}(z) - dF_{r,ij} \cos\phi_{ij}(z) \\ dF_{z,ij}(\phi_{ij}(z)) = +dF_{a,ij} \end{cases}$$

$$i = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1, j = 1, 2, 3, 4 \quad (24)$$

对上式进行积分运算,可得

$$\begin{cases} F_{x,ij}(\phi_{ij}(z)) = \left. \begin{cases} \frac{f_{i0}}{4k_\beta} [-K_{tp} \cos 2\phi_{ij}(z) + K_{rp} [2\phi_{ij}(z) - \sin 2\phi_{ij}(z)]] \end{cases} \right\}^{v_{\text{rot}}} \\ F_{y,ij}(\phi_{ij}(z)) = \left. \begin{cases} \frac{-f_{i0}}{4k_\beta} [K_{tp} (2\phi_{ij}(z) - \sin 2\phi_{ij}(z)) + K_{rp} \cos 2\phi_{ij}(z)] \end{cases} \right\}^{v_{\text{rot}}} \\ F_{z,ij}(\phi_{ij}(z)) = \frac{1}{k_\beta} K_{ap} \cos\phi_{ij}(z) \end{cases}$$

$$i = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1, j = 1, 2, 3, 4 \quad (25)$$

由式(25)计算可得四齿侧刃在刀具坐标系下的各向切削力分量:

$$\begin{cases} F_x(\phi) = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=1}^4 F_{x,ij} \\ F_y(\phi) = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=1}^4 F_{y,ij} \\ F_z(\phi) = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=1}^4 F_{z,ij} \end{cases} \quad (26)$$

将式(17)代入式(26)中,进而得到工件坐标系下的各向切削力分量:

$$\begin{cases} F_X(\phi) = T_2 \times \sum_{i=0}^{N-1} F_{xi} \\ F_Y(\phi) = T_2 \times \sum_{i=0}^{N-1} F_{yi}, \\ F_Z(\phi) = T_2 \times \sum_{i=0}^{N-1} F_{zi} \end{cases} \quad (27)$$

$$i = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1$$

基于式(16)和(27)对端刃与侧刃在螺旋铣孔中产生的瞬时各向切削力计算值求和,即可实现专用刀具整体切削力机械模型的构建,为

$$\begin{cases} F_X = F_{Xi} + F_X(\phi) \\ F_Y = F_{Yi} + F_Y(\phi) \\ F_Z = F_{Zi} + F_Z(\phi) \end{cases} \quad (28)$$

#### 4 试验与分析

本文采用的螺旋铣孔专用刀具为硬质合金 YG8,具有四齿对称结构,刀具直径为 10 mm。该刀具的主要空间几何角度包括螺旋角为 40°,法向前角为 5°,两个后角分别为 12°和 25°。工件材料为钛合金 Ti6Al4V,厚度为 8 mm。通过设计实施钛合金螺旋铣孔试验,采用平均力法对切削力模型中的切削力系数进行标定<sup>[15]</sup>,进而实现该机械模型的试验验证。上述加工系统包括 KUKA 工业机器人加工平台、螺旋铣制孔单元、专用刀具与测力仪等<sup>[14]</sup>。在实施螺旋铣孔试验过程中,利用 Kistler 9257B 测力仪采集制孔时所产生的切削力信号,并通过 5070A 型电荷放大器对其进行放大处理,然后将获得信号 A/D 转换后经由 PC-DAS16/16 数据采集卡,最后应用 Dynaware Type 2825D-02 软件将处

理后的切削力变化曲线显示在计算机上。

在螺旋铣孔标定试验中,为避免刀具磨损的影响,同时保证一定的加工效率,选择以下加工参数:切削速度保持 94 m/min 不变,轴向每齿进给量为 0.0005 mm/z、0.0015 mm/z、0.0025 mm/z,切向每齿进给量为 0.05 mm/z、0.15 mm/z、0.25 mm/z。选取稳定加工阶段 20 组半自转周期内的 X、Y、Z 3 个方向切削力测量值,根据式(29)计算径向、切向和轴向切削力平均值( $\bar{F}_r, \bar{F}_t, \bar{F}_a$ )。

$$\begin{cases} \bar{F}_t = \frac{F_{Y\text{max}} - F_{Y\text{min}}}{2} \\ \bar{F}_r = \frac{F_{X\text{max}} - F_{X\text{min}}}{2} \\ \bar{F}_a = \bar{F}_Z \end{cases} \quad (29)$$

根据式(14)与(23),径向、切向和轴向切削力平均值( $\bar{F}_r, \bar{F}_t, \bar{F}_a$ )可进一步表示为

$$\begin{cases} \bar{F}_t = K_{tt} \bar{h}_{ij}^{1-q_{ij}} \bar{b}_{ij} + K_{tp} \overline{h_{ij}^*(\phi_{ij}(z))} \\ \bar{F}_r = K_{rt} \bar{h}_{ij}^{1-q_{ij}} \bar{b}_{ij} + K_{rp} \overline{h_{ij}^*(\phi_{ij}(z))}, \\ \bar{F}_a = K_{at} \bar{h}_{ij}^{1-q_{ij}} \bar{b}_{ij} + K_{ap} \overline{h_{ij}^*(\phi_{ij}(z))} \end{cases}$$

$$i = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1, j = 1, 2, 3, 4 \quad (30)$$

式(30)中的切削深度与切削宽度的平均值可计算为

$$\begin{cases} \bar{h}_{ij} = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=1}^4 h_{ij} / N \\ \bar{b}_{ij} = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=1}^4 b_{ij} / N \\ \overline{h_{ij}^*(\phi_{ij}(z))} = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=1}^4 h_{ij}^*(\phi_{ij}(z)) / N \end{cases} \quad (31)$$

由式(31)可计算得到端刃与侧刃的切削深度和切削宽度的平均值,代入式(30),进而求得切削力系数,如表1所示。

表1 切削力系数  
Table 1 Cutting force coefficients

$K_{tt}$	$K_{rt}$	$K_{at}$	$q_{tt}$	$q_{rt}$	$q_{at}$	$K_{tp}$	$K_{rp}$	$K_{ap}$
28.05	76.57	923.31	0.675	0.331	0.01	72.52	50.46	23.91

将切削力系数代入第3节中切削力模型,对比机械模型的求解值和螺旋铣试验的切削力测量值,可实现对切削力模型的验证。该模型验证及其系数标定皆可通过SolidWorks程序实现。

在螺旋铣孔试验中,由于刀具运动位置的变化极其复杂,难以将切削力测量值与刀具位置完全准确对应,且通过切削力模型得到的X、Y方向切削力分量预测值与试验测量值也存在一定偏差。因此,在任意半自转周期内,采用周向力 $F_{XY}$ 取代切削力分量 $F_X$ 与 $F_Y$ ,并通过式(32)进行计算。

$$F_{XY} = \sqrt{F_X^2 + F_Y^2} \quad (32)$$

对应的预测值 $F_n$ 计算公式为

$$F_n = \sqrt{F_r^2 + F_t^2} \quad (33)$$

图5为螺旋铣孔稳定加工阶段的切削力变化曲线,加工参数为 $v_c=94$  m/min、 $f_{za}=0.0015$  mm/tooth、 $f_{zt}=0.15$  mm/tooth,反映了刀具在6个公转周期(6 s)内的切削力水平。其中,轴向力 $F_Z$ 与周向力 $F_{XY}$ 的平均值分别为162.11 N和48.68 N。

同时,采用与图5中相同加工参数下,对半自转周期内产生的切削力测量值( $F_Z$ 与 $F_{XY}$ )与对应预测值( $F_a$ 与 $F_n$ )进行对比,如图6所示。其中,图6(a)中轴向力的试验测量值 $F_Z$ 随着加工过程的实施近似呈周

期性抛物线变化规律,其幅值范围为(29.58 N,176.16 N)。当加工时间从0.005 s进行到0.010 s阶段, $F_Z$ 的变化曲线出现了较为明显的波动,该现象与刀具参与加工过程的具体受力情况紧密相关。相应地,轴向切削力的预测值 $F_a$ 随加工时间的增加呈现典型的周期性抛物线变化特点,其幅值范围为(41.26 N,155.89 N)。由以上分析可知,轴向力测量值与预测值的变化趋势相一致,但存在一定差异性。图6(b)中周向力的试验测量值 $F_{XY}$ 由式(32)计算得到,该取值随着制孔过程的进行呈现一定的波动变化,其幅值范围为(2.68 N,93.03 N)。当加工时间从0.003 s进行到0.010 s阶段, $F_{XY}$ 幅值的波动较大,该现象与加工系统稳定性、刀具的受力与磨损情况,尤其是刀具径向跳动现象息息相关<sup>[16]</sup>。与轴向力预测值 $F_a$ 相类似,通过式(33)计算得到的周向力预测值 $F_n$ 随制孔加工的进行呈周期性抛物线变化,其幅值范围为(35.01 N,48.89 N)。由此可见, $F_n$ 幅值的波动较 $F_{XY}$ 显著偏小。

基于以上分析,虽然轴向力与周向力的试验值和预测值的极值之间存在差异,但二者平均值的绝对误差不超过10%。另外,预测值较试验值波动范围小,根本原因在于切削力机械模型无法考虑到实际加工中所有因素的影响。

## 5 结论

(1)基于螺旋铣运动学规律,结合专用刀具几何结构特征,对稳定加工阶段刀具产生的未变形切屑与理想状态下形成的螺旋状工件表面的几何形貌进行了仿真分析,可实现对任何加工参数下螺旋铣孔过程所产生切屑与孔壁几何形貌的预测。

(2)由于端刃在螺旋铣孔过程中体现出双刃切削的特点,采用等效刃型矢量法对其两种刃型的离散单元实施简化与数学描述,计算了螺旋铣孔时的切削深度与切削宽度,构建了端刃在螺旋铣加工中的切削力模型。

(3)通过试验对切削力模型系数进行标定,并验证该模型可预测螺旋铣孔切削力的变化规律,其轴向力与周向力试验值和预测值的平均值绝对误差不超过10%。

## 参考文献

- [1] OZTURK O M, KILIC Z M, ALTINTAS Y. Mechanics and dynamics of orbital drilling operations[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2018, 129: 37–47.
- [2] TIAN Y L, LIU Y P, WANG F J, et al. Modeling and analyses of helical milling process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90(1): 1003–1022.
- [3] LIU C Y, WANG G, DARGUSCH M S. Mechanics and dynamics of helical milling

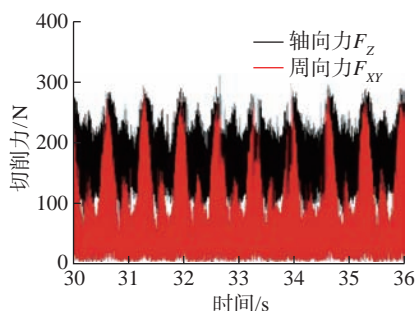
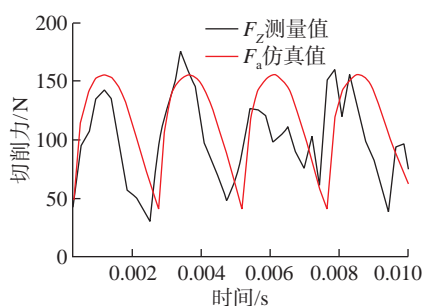
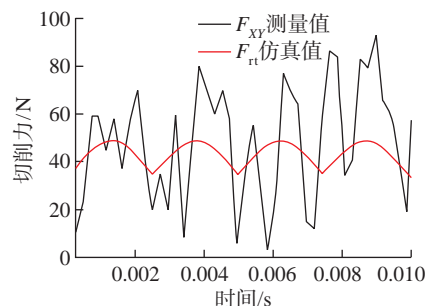


图5 螺旋铣孔稳定加工阶段切削力测量值变化曲线

Fig.5 Measured cutting forces at steady machining stage of helical milling



(a) 轴向力对比



(b) 周向力对比

图6 切削力预测值与测量值的对比

Fig.6 Comparison of predicted and measured cutting forces

operations[J]. *Strojniški Vestnik—Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 60(11): 716–724.

[4] LIU C Y, WANG G, DARGUSCH M S. Modelling, simulation and experimental investigation of cutting forces during helical milling operations[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 63(9): 839–850.

[5] REY P A, LEDREF J, SENATORE J, et al. Modelling of cutting forces in orbital drilling of titanium alloy Ti–6Al–4V[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2016, 106: 75–88.

[6] LI Z L, DING Y, ZHU L M. Accurate cutting force prediction of helical milling operations considering the cutter runout effect[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 92(9): 4133–4144.

[7] SHANG S, QIN X D, LI J H, et al. Modelling of cutting forces and researching calibration method in helical milling[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 94(5): 2949–2960.

[8] SHI M R, QIN X D, LI H, et al.

Cutting force and chatter stability analysis for PKM–based helical milling operation[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 111(11): 3207–3224.

[9] ZHOU L, DONG H Y, KE Y L, et al. Modeling of non-linear cutting forces for dry orbital drilling process based on undeformed chip geometry[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 94(1): 203–216.

[10] WANG H Y, TAO K X. Study on material removal and cutting analysis in ball helical milling process[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2022, 236(24): 11493–11504.

[11] 王海艳, 周秩同, 武晔, 等. 基于斜角切削理论的钛合金螺旋铣孔切削力建模[J]. *中国机械工程*, 2023, 34(2): 142–147.

WANG Haiyan, ZHOU Zhitong, WU Ye, et al. Modeling of cutting force in helical milling of titanium alloys based on oblique cutting theory[J]. *China Mechanical Engineering*, 2023, 34(2): 142–147.

[12] 刘战强. 基于等效切削刃的切削力预报模型[J]. *山东工业大学学报*, 2001, 31(3):

201–208.

LIU Zhanqiang. A prediction model for cutting force based on equivalent cutting edge[J]. *Journal of Shandong University of Technology*, 2001, 31(3): 201–208.

[13] 师汉民. 金属切削理论及其应用新探[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2003.

SHI Hanmin. *Metal cutting theory and practice a new perspective*[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2003.

[14] ZHOU L, DONG H Y, KE Y L, et al. Analysis of the chip-splitting performance of a dedicated cutting tool in dry orbital drilling process[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 90(5): 1809–1823.

[15] ALTINTAS Y. *Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*[M]. New York: Cambridge University Press, 2000.

[16] WANG H Y, QIN X D. A mechanistic model for cutting force in helical milling of carbon fiber-reinforced polymers[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 82(9): 1485–1494.

## Research on Mechanistic Model of Cutting Force in Helical Milling of Titanium Alloy Based on Equivalent Cutting Edge Vector Method

ZHOU Lan<sup>1</sup>, AN Guosheng<sup>1</sup>, LI Guangqi<sup>1</sup>, ZHU Zongxiao<sup>1</sup>, FENG Zhaohe<sup>2</sup>

(1. Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Hangzhou Steam Turbine Company Limited, Hangzhou 310022, China)

**[ABSTRACT]** The mechanistic model of cutting force for the dedicated cutter was established by using the method of the equivalent cutting edge vector, in order to accurately predict the changing law of the instantaneous cutting forces generated by the complex multi-tooth dedicated cutter during helical milling. Firstly, the kinematic characteristics of helical milling was analyzed, and the mathematic description of the motion path of any cutting position was achieved. Then the undeformed chips and machining surfaces generated at stable cutting stage were simulated. Thirdly, the length of the equivalent cutting edge, the depth of cut and the width of cut for its corresponding undeformed chip were calculated. Simultaneously, the peripheral cutting edge was analyzed and the whole simulated cutting force model was created. Finally, the simulation value of cutting force was solved through identification experiment of cutting force coefficient. The results show that the values above can accurately predict the instantaneous cutting force change law of the dedicated cutter, and the equivalent edge vector method is an effective way to realize the cutting force modeling of helical milling process.

**Keywords:** Equivalent cutting edge; Helical milling; Cutting force; Titanium alloy; Mechanistic model

(责编 古京)

引文格式: 郭塞, 江庆红, 刘昊, 等. 难加工材料超高速磨削亚表面损伤研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(14): 59-71.

GUO Sai, JIANG Qinghong, LIU Hao, et al. Subsurface damage in high-speed grinding of difficult-to-machine materials[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(14): 59-71.

## 难加工材料超高速磨削亚表面损伤研究\*

郭 塞, 江庆红, 刘 昊, 卢守相, 张 璧

(南方科技大学, 深圳 518055)

[摘要] 航空航天领域关键零部件往往采用高性能难加工材料制成, 极差的磨削性使得材料的高质高效加工成为难以突破的瓶颈。本文提出采用超高速磨削方法解决上述问题, 并针对多种具有代表性的航空航天领域工程材料, 包括钛合金、镍基高温合金、反应烧结碳化硅及铝基碳化硅开展超高速磨削试验, 对材料表面完整性进行了表征和分析讨论。结果表明, 超高速磨削可提高工件表层材料的应变梯度和温度梯度, 改善难加工金属、陶瓷、复合材料的可磨削性, 降低亚表面损伤深度, 提高材料去除效率。本文的探索性研究为航空航天难加工材料零部件的高质高效加工提供了一条可行的技术路线, 具有广阔的应用前景。

关键词: 超高速磨削; 钛合金; 镍基高温合金; 反应烧结碳化硅(RB-SiC); SiC<sub>p</sub>/Al; 亚表面损伤

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.14.059



郭 塞

博士研究生, 研究方向为难加工材料的超高速磨削机理。

航空航天飞行器的服役条件极端恶劣, 因而要求其关键零部件具备重量轻、强度高、耐高温、抗疲劳等优

\* 基金项目: 深圳市孔雀技术创新项目(KQJSCX20180322152221965); 深圳市重点项目(JSGG20210420091802007)。

异性能, 普通金属材料难以满足这些性能要求。以钛合金、镍基高温合金、反应烧结碳化硅(RB-SiC)、铝基碳化硅(SiC<sub>p</sub>/Al)为代表的高性能金属、陶瓷和复合材料在航空航天领域的应用越来越广泛。例如, 钛合金普遍用于航空发动机叶片、叶轮、叶盘, 用量约占发动机重量的33%<sup>[1]</sup>; 镍基高温合金主要用于航空发动机的热端部件, 如燃烧室与涡轮叶盘, 用量占发动机重量的40%~60%<sup>[2]</sup>; RB-SiC具有成本低、制备周期短、近净成形的优点, 是制造大口径空间反射镜的优选材料<sup>[3]</sup>; SiC<sub>p</sub>/Al复合材料是最常用的金属基复合材料, 通常代替铝合金作为飞行器结构件, 或用于空间光学与精密仪器的电子封装及热控元件<sup>[4]</sup>。

航空航天高性能材料的高质高效加工问题是制约飞行器研发进程的瓶颈难题。由于对零部件精度和表面完整性要求极高, 必须采用精密加工方法, 目前主要依靠磨削加工。

对于光学镜片等需要超高精度无损伤表面的零部件, 则还需要更长时间的抛光。因此, 难加工材料的高效低损伤磨削是产品制造周期中至关重要的环节, 提高磨削表面完整性有助于直接达到设计要求或大大降低后续抛光时间。

然而, 难加工材料的可磨削性很差。钛合金、镍基高温合金的强度高、导热性差, 导致磨削区域温度高, 容易导致工件表面烧伤和砂轮堵塞的问题<sup>[5-6]</sup>; RB-SiC硬度高、脆性大, 易发生表面裂纹、亚表面损伤<sup>[7-8]</sup>; SiC<sub>p</sub>/Al复合材料基体耐热性差、易软化、增强相硬度高, 容易导致工件表面裂纹、凹坑及砂轮堵塞<sup>[9-10]</sup>。

为了解决难加工材料可磨削性差的问题, 国内外研究人员尝试了多种新型磨削工艺, 取得了显著进展。例如, 采用磨粒有序化砂轮技术, 可增加动态有效磨粒数, 提高磨粒出刃高度和容屑空间, 降低磨削力和磨削温度<sup>[11-13]</sup>。陈琛等<sup>[14]</sup>采用热管砂轮

技术,依靠热管内部冷却介质的相变进行热交换,可实现基于内冷却方式对磨削弧区的强化换热。彭锐涛等<sup>[15]</sup>采用在砂轮内部开设内冷却流道的技术降低磨削温度。Zhou<sup>[16]</sup>和冯平法<sup>[17]</sup>等采用超声振动辅助磨削技术,通过磨粒的冲击作用和断续切削作用降低磨削力和砂轮磨损。Rao等<sup>[18]</sup>采用电火花机械复合磨削技术,通过放电作用使工件表面产生软化的重铸层从而容易被磨粒去除,进而提高磨削效率。Li等<sup>[19]</sup>采用激光辅助磨削技术,通过激光对磨削区域进行预热,降低材料硬度,从而使硬脆材料容易去除并且抑制亚表面损伤。

大幅度提高磨削速度也是解决材料难加工问题的一种可行途径。回顾切削磨削加工历史,加工线速度的每一次跃升,都使曾经的“难加工材料”变得易于加工。早在1931年,德国的Carl J. Salomon就提出著名猜想,预测在足够高的切削速度下,切削温度会大幅度下降。随着超硬磨料、静压轴承、超高速电主轴、超高速砂轮等设备关键技术的突破,其磨削速度得到了极大提升,奠定了超高速磨削技术的物质基础。南方科技大学张璧团队在超高速磨削理论方面开展了前沿探索性理论研究,认为在极高的应变率条件下,无论塑性材料还是脆性材料,都会发生“材料脆化”现象<sup>[20]</sup>,而且加工损伤存在“趋肤效应”<sup>[21]</sup>,奠定了超高速磨削技术的理论基础。南京航空航天大学丁文峰团队在高速磨削钛合金/钛基复合材料方面开展了大量研究工作,结果表明,提高磨削速度有利于改善难加工材料的表面完整性<sup>[22-24]</sup>。

为了进一步验证超高速磨削对改善难加工材料可磨削性的效果,本文以钛合金、镍基高温合金、RB-SiC、SiC<sub>p</sub>/Al复合材料为研究对象,涵盖了航空航天领域常用的金属、

陶瓷、复合材料等多种具有代表性的工程材料,将磨削速度提升至超过300 m/s,考察上述难加工材料的表面完整性随磨削速度提高的变化趋势,并对超高速磨削机理进行简要分析。

## 1 超高速磨削试验方法

### 1.1 超高速磨削装置

本研究中的超高速磨削在Hardinge Quest GT27磨床上进行。该磨床配备了作者单位向TDM SA

定制的超高速液体静压电主轴(图1(a))。该超高速液体静压电主轴最高转速能够达到60000 r/min,径向/轴向运动误差小于0.1 μm,功率高达12.5 kW,径向刚度超过40 N/μm,径向负载能力超过380 N。为了在减轻重量的情况下改善砂轮的阻尼特性,超高速磨削采用了以碳纤维增强复合材料(CFRP)为基体的陶瓷基CBN砂轮。研究中使用的高速砂轮由作者单位与郑州三磨所合作制造。超高速砂轮的详细信息如表1所示。

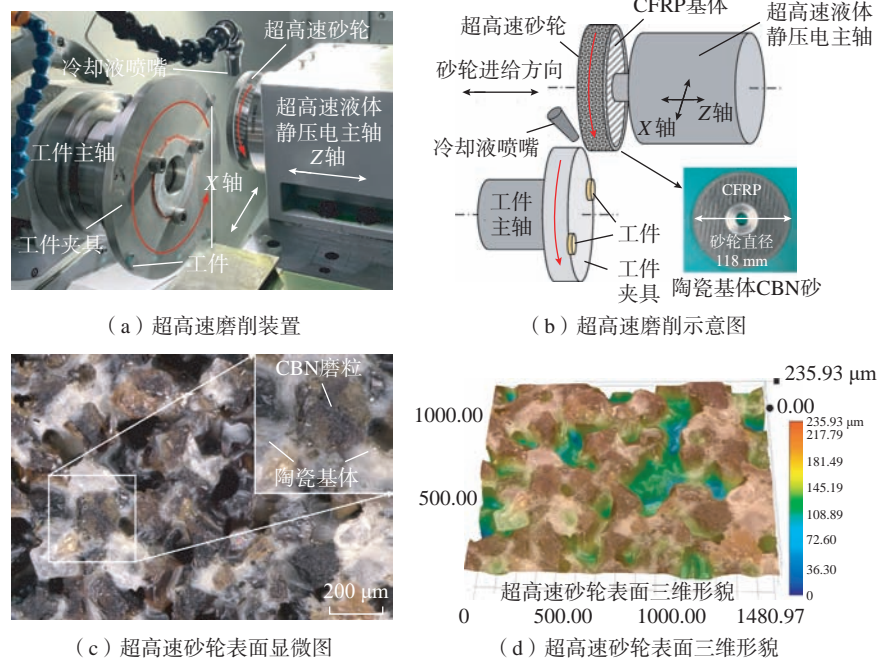


图1 磨削装置  
Fig.1 Grinding equipment

表1 超高速砂轮参数  
Table 1 Parameters of the wheel for HSG

超高速砂轮参数	描述
制造商	郑州三磨所
砂轮基体	CFRP
磨料层	陶瓷基体 CBN
磨粒目数	#120 (磨粒平均粒径 124 μm)
直径	118 mm
厚度	10 mm
砂轮浓度	175%

## 1.2 超高速磨削试验流程

在每次磨削试验之前,首先用目数为 #60 的金刚石滚轮对超高速砂轮进行修整。在修整过程中,金刚石滚轮沿 X 轴方向的进给速度 200 mm/min、修整深度 0.5  $\mu\text{m}$ /次,超高速砂轮和金刚石滚轮分别以 22000 r/min 和 5000 r/min 的转速沿相同方向旋转。超高速砂轮修整完成后,使用目数为 #180 的 SiC 砂轮对超高速砂轮进行修锐,修锐参数与修整相同。砂轮修整修锐完成后,使用动平衡仪 (BMT240M.2, MPM, 德国) 在预设的磨削速度下对超高速砂轮进行动平衡测试和调节,然后在预设的磨削参数下进行磨削试验。在整个砂轮修整、修锐和磨削过程中均使用流速为 10 L/min 的水基冷却液进行泛流冷却。

## 1.3 表面完整性表征

工件经过磨削之后,利用扫描电子显微镜 (SEM, 型号: Merlin, 德国 Zeiss 公司) 观察表面形态,使用白光干涉仪 (型号: talysurf CCI, 美国 Taylor hobson 公司) 获取磨削表面的三维形貌和对应的表面粗糙度。磨削亚表面损伤表征采用 3 种方法: (1) 用精密线切割机将磨削样品截开,再经过打磨、抛光和腐蚀,最后在电子显微镜下观察亚表面损伤; (2) 在聚焦离子束 (FIB, 型号: Helios Nanolab 600i, 美国 FEI 公司) 刻蚀后的磨削横截面进行离子束成像; (3) 对 FIB 制备的透射电镜 (TEM) 样品进行 TEM (型号: Talos F200X G2, 美国 FEI 公司) 观察分析。具体的 TEM 制样流程如图 2 所示。在 FIB 刻蚀操作前,所有样品表面均镀上碳保护层,以防镓离子轰击造成样品损伤。

## 2 结果与分析

### 2.1 钛合金 Ti6Al4V 的表面完整性

Ti6Al4V 磨削速度设置在 40~240 m/s 之间,磨削深度 5  $\mu\text{m}$ 。Ti6Al4V 磨削表面三维形貌及其表面粗糙

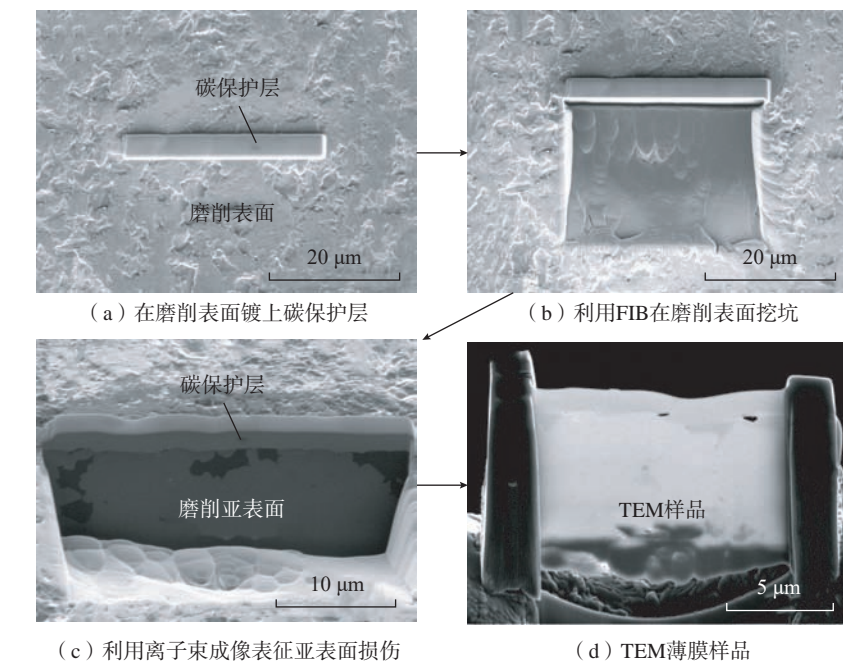


图 2 利用 FIB 进行磨削亚表面损伤表征和 TEM 样品制样的流程

Fig.2 Procedures of subsurface damage characterization and lamellar specimen preparation for TEM analysis via the FIB

度统计如图 3 所示,低速磨削加工时 (40 m/s),被加工表面磨痕较深 ( $R_z > 2.1 \mu\text{m}$ ),表面粗糙度相对较大 ( $R_a > 0.4 \mu\text{m}$ )。随着磨削速度的增加,表面磨痕明显变浅,表面粗糙度呈现下降趋势。当速度达到 240 m/s 时,  $R_z$  为 1.34  $\mu\text{m}$ ,  $R_a$  为 0.23  $\mu\text{m}$ 。

图 4 为不同磨削速度下表面形貌 SEM 检测图。在低速磨削条件下,表面存在较多鱼鳞状涂覆缺陷,且观测到垂直于磨削方向的大裂纹 (裂纹长度超过 20  $\mu\text{m}$ )。表面缺陷随着磨削速度提高得到有效抑制,同时表面裂纹的数量和尺寸也明显降低。当磨削速度达到 190 m/s 时表面还存在少量微裂纹,当速度提高到 240 m/s 时,磨削表面未检测到裂纹。

如图 5 所示,磨削速度对亚表面损伤也有显著影响。在低速磨削条件下,磨削样品横截面存在撕裂缺陷,亚表面塑性变形层深度最大 (9  $\mu\text{m}$ )。随着磨削速度提高,亚表面塑性变形层深度减小,变形损伤层趋于表面。在最高速度 240 m/s 下变形层深度降低为 4.5  $\mu\text{m}$ ,与 40 m/s 磨削速度

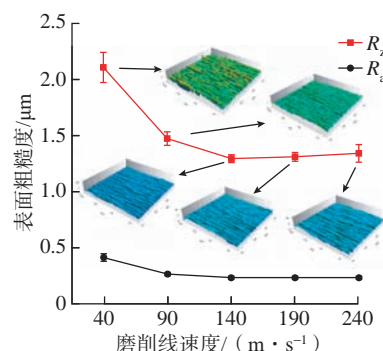


图 3 不同加工速度下 Ti6Al4V 表面三维形貌及其粗糙度统计

Fig.3 Three-dimensional topography and surface roughness statistics of Ti6Al4V workpieces subjected to different grinding speeds

相比下降 50%。

图 6 为磨削速度 40 m/s、140 m/s、240 m/s 下的亚表面 EBSD 分析结果。其亚表面损伤深度与 SEM 观测结果基本一致。此外,根据亚表面晶粒形貌与取向特征,可将亚表面分为 3 个区域: I 严重变形层、II 晶粒变形拉长层、III 基体层。其中,严重变形层晶粒应变很大,晶粒显著细化,在 EBSD 检测中难以标定识别。晶粒变形拉长层中晶粒发生明显塑性

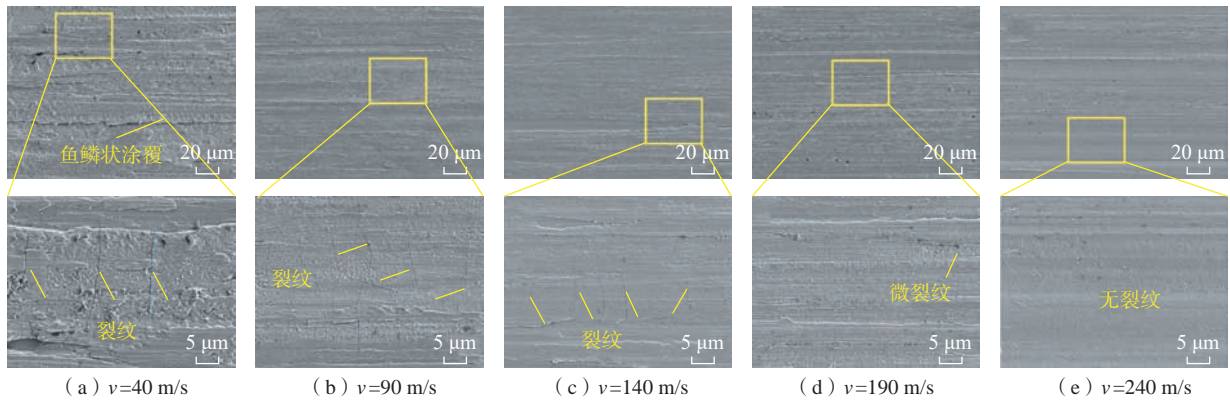


图4 不同加工速度下 Ti6Al4V 表面 SEM 形貌分析

Fig.4 Surface morphology of Ti6Al4V via SEM characterization after grinding at different speeds

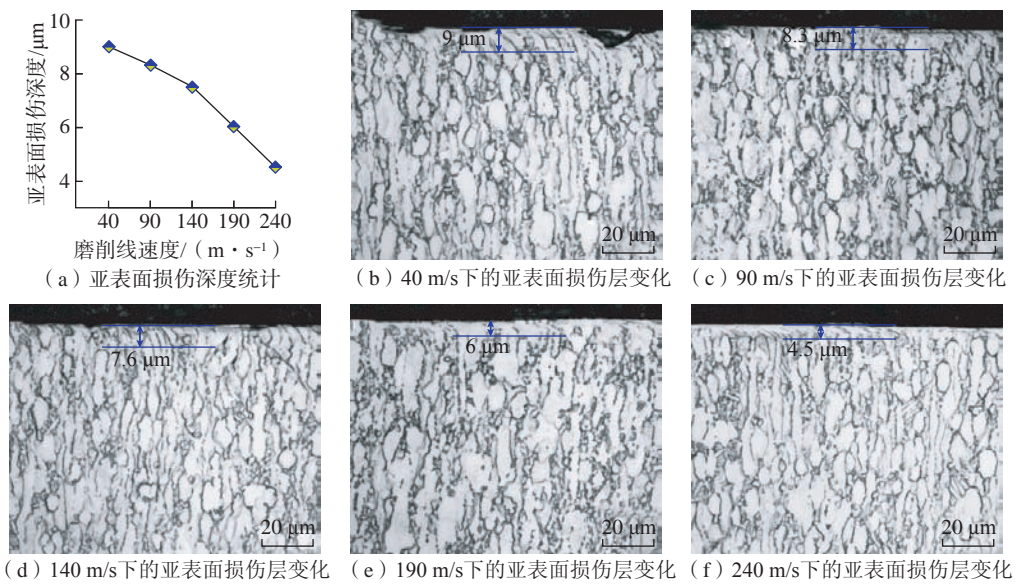


图5 磨削速度对 Ti6Al4V 亚表面损伤深度的影响

Fig.5 Effect of grinding speed on subsurface damage of Ti6Al4V workpieces

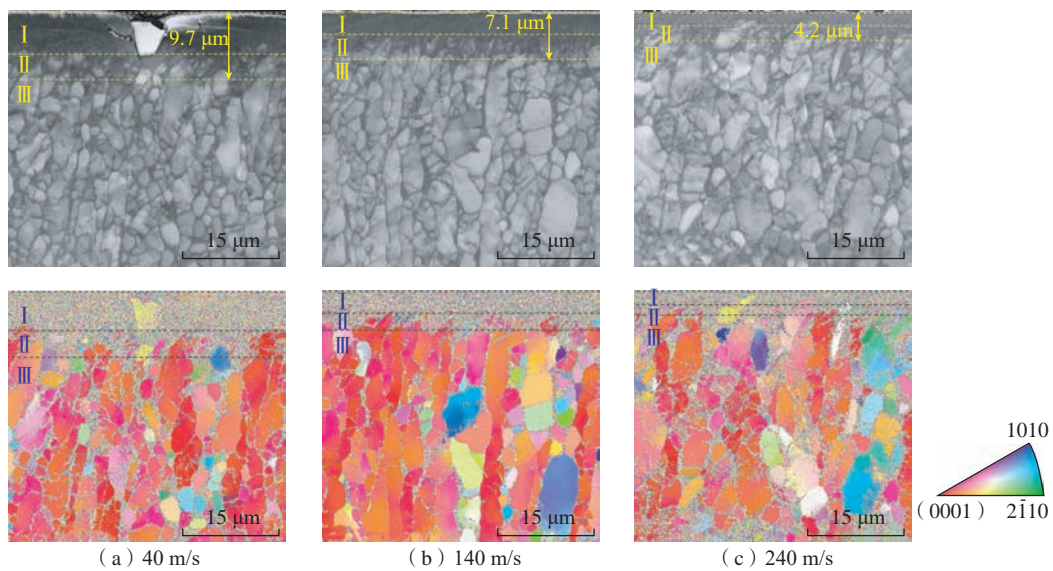


图6 不同磨削速度下 Ti6Al4V 亚表面 EBSD 分析

Fig.6 Effect of grinding speed on subsurface damage of Ti6Al4V workpieces via EBSD

变形,并沿着磨削方向拉长。基体层中晶粒形貌与取向无明显变化。

## 2.2 IN718 高温合金的表面完整性

IN718 磨削速度设置在 40~240 m/s 之间,磨削深度 5  $\mu\text{m}$ 。图 7 为 IN718 磨削加工典型表面损伤形式。主要包含表面的撕裂,材料的涂覆,碳化物的开裂、破碎、侧流和孔洞,以及磨屑的粘结。在磨削速度较低或磨粒较钝的情况下,极易造成表面撕裂的损伤。

图 8 为不同磨削速度下 IN718 工

件的表面形貌,可以看到在 70 m/s 的常规磨削速度下,磨削表面的磨屑粘结现象比较严重(图 8 (a)),同时伴随大量的材料涂覆;随着磨削速度的提高,160 m/s 速度下工件表面几乎没有磨屑的粘结(图 8 (b)),同时材料涂覆现象有较大的改善,涂覆颗粒的尺寸和数量均减小;当磨削速度到达 240 m/s 时,工件表面的材料涂覆现象微乎其微(图 8 (c))。除此之外,随着磨削速度的提高,由磨粒去除材料产生的磨痕变浅,进一步

提高了加工后工件的表面质量。以上结果表明提高磨削速度能有效抑制高温合金加工过程中的材料涂覆与磨屑粘结,同时减小磨粒产生沟槽的深度,从而降低加工后工件的表面粗糙度。

图 9 为不同磨削速度下工件的亚表面损伤情况。工件通过研磨抛光后由扫描电子显微镜的背散射信号(EBSD 模式)进行观测。如图 9 (a)所示,磨削后的工件亚表面损伤层主要分为白层(晶粒细化区)和严重塑性变形区两部分。其中白层由于工件加工过程中承受严重的力热耦合作用,同时材料承受极高的应变率,导致材料加工过程中产生动态再结晶,从而造成晶粒细化。而随着磨削速度的提高,白层深度逐渐减小。在 40 m/s 和 70 m/s 低速区的传统磨削速度下,白层厚度可达 10  $\mu\text{m}$  左右;在 220 m/s 和 240 m/s 超高速区的磨削速度下,白层厚度仅 1  $\mu\text{m}$  左右。结果表明,提高磨削速度能大幅减少工件的亚表面损伤深度。

## 2.3 反应烧结碳化硅 (RB-SiC) 的表面完整性

RB-SiC 磨削速度设置在 30.4~307.0 m/s 之间,磨削深度 2.5  $\mu\text{m}$ 。如图 10 所示,通过对比发现由磨削速

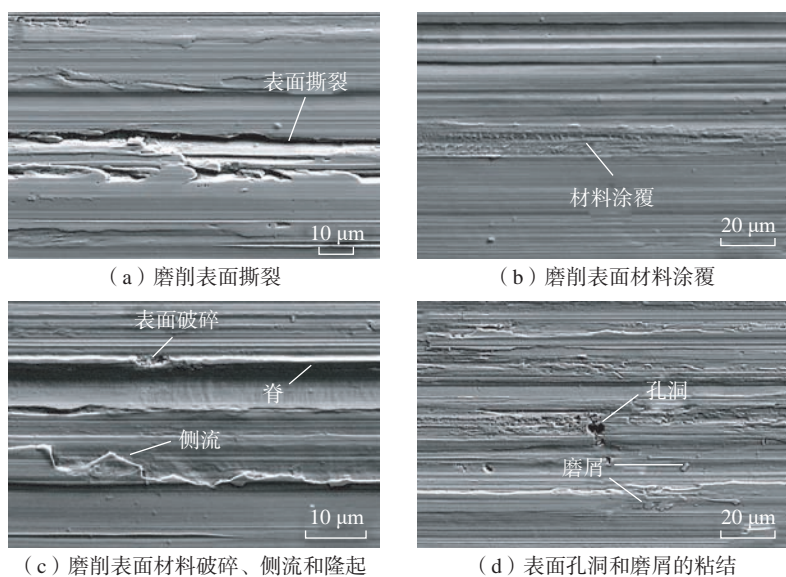


图 7 IN718 磨削典型表面损伤形式

Fig.7 Representative types of surface damage in grinding of IN718 superalloy

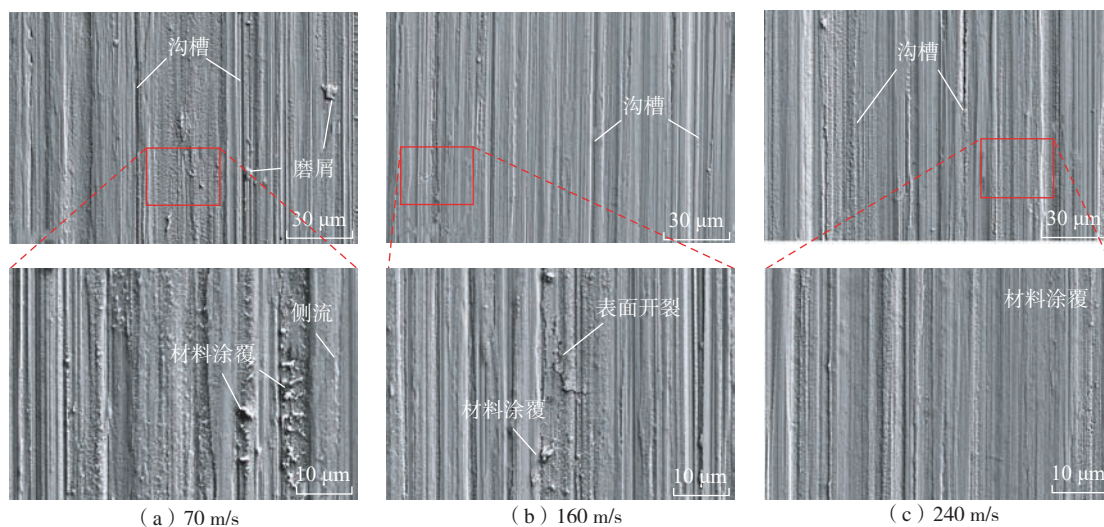


图 8 不同磨削速度下 IN718 的表面形貌

Fig.8 Surface morphology of IN718 superalloy after grinding at various speeds

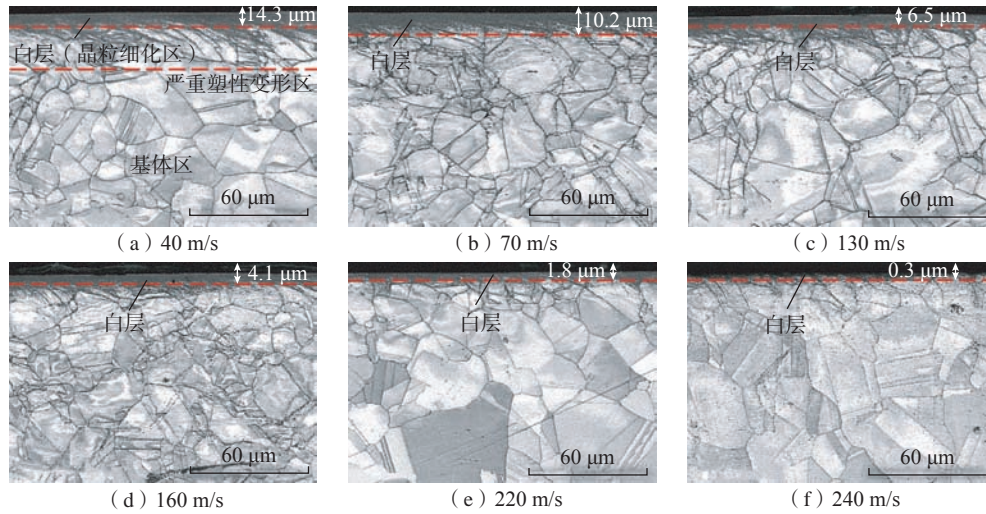
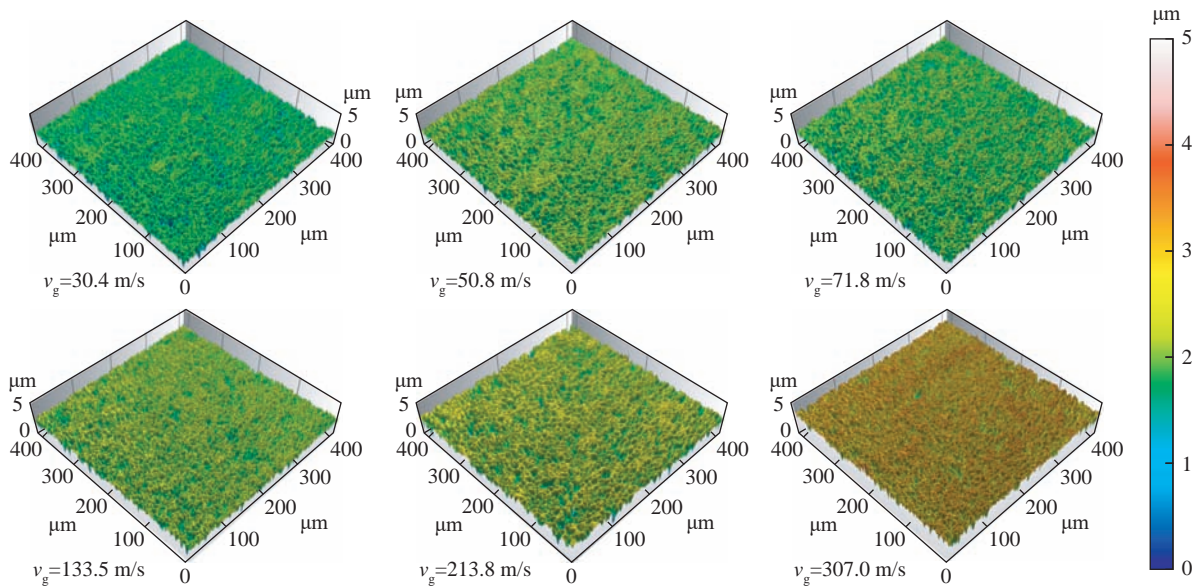
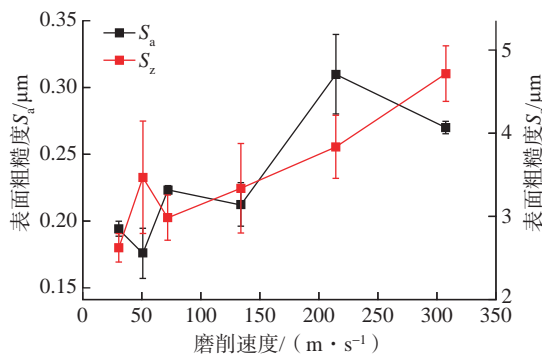


图9 不同磨削速度下IN718工件的亚表面损伤层

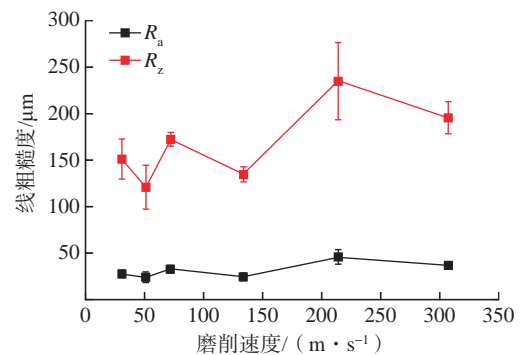
Fig.9 Subsurface damage of IN718 superalloy after grinding at various speeds



(a) 不同磨削速度下RB-SiC的表面三维形貌



(b) 图10(a)中的表面三维形貌对应的表面粗糙度



(c) 图10(a)中的RB-SiC磨削表面形貌对应的线粗糙度

图10 RB-SiC磨削表面形貌

Fig.10 Surface morphology of ground RB-SiC

度引起的表面特征差异不明显,但表面粗糙度均随着磨削速度提高而显著增大,说明更高的磨削速度让磨削表面破碎程度更加严重。如图 11 所示,在所有的磨削速度下, RB-SiC 的磨削表面均布满裂纹、碎屑和凹

坑,这是典型的脆性破坏的特征。值得注意的是,虽然脆性破坏特征布满所有的磨削表面,但在所有的磨削表面均存在局部平整的区域。

如图 12 所示,在所有的磨削速度下, RB-SiC 的磨削表面均存在局

部平整区域,其磨削表面特征为明显的平行表面沟槽。EDS 元素分析发现 Si 元素的富集区域和 C 元素的缺失区域与局部平整区域的形状吻合良好,说明表面局部平整区域均为 Si 相。

图 13 为亚表面损伤分析结果,发现通过 FIB 刻蚀获得的不同磨削速度下 RB-SiC 亚表面损伤特征主要为从磨削表面往内部延伸的裂纹。这些裂纹基本上位于浅表层 3 μm 的范围内。通过对比发现,由磨削速度引起的亚表面损伤特征差异不明显。

为了进一步探索磨削表面凹坑区域和局部平整区域的亚表面损伤特征,揭示其材料去除机理,本文利用 FIB 在不同的表面特征区域刻蚀出亚表面,再利用 TEM 进行深入分析。如图 14 所示,在磨削速度为  $v_g=307.0$  m/s 时 RB-SiC 表面凹坑区域的亚表面(图 14 (b))包含大量表层裂纹,破碎的 SiC 及滑移带。在破碎的表层 SiC 的高分辨图中发现大量高密度层错伴随着裂纹出现在浅表层。说明在表面凹坑区域同时存在着脆性破坏和延性破坏的特征。

与表面凹坑区域的亚表面微结构相比,表面局部平整区域布满平行表面沟槽,其亚表面(图 15)存在着大量从表面沟槽往工件内部延伸

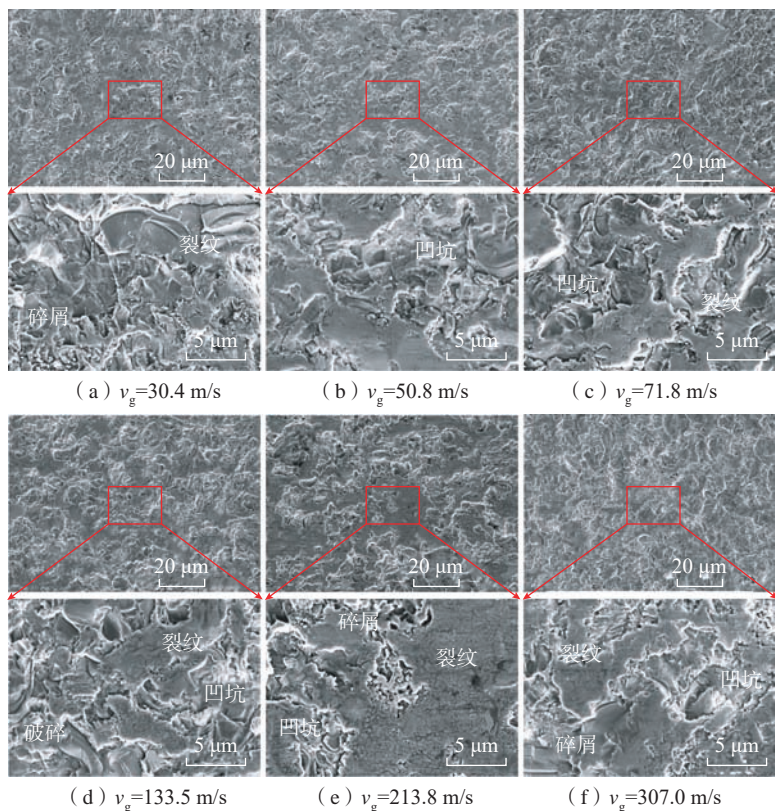


图 11 不同磨削速度下 RB-SiC 的表面形貌

Fig.11 Surface morphology of RB-SiC after grinding at various speeds

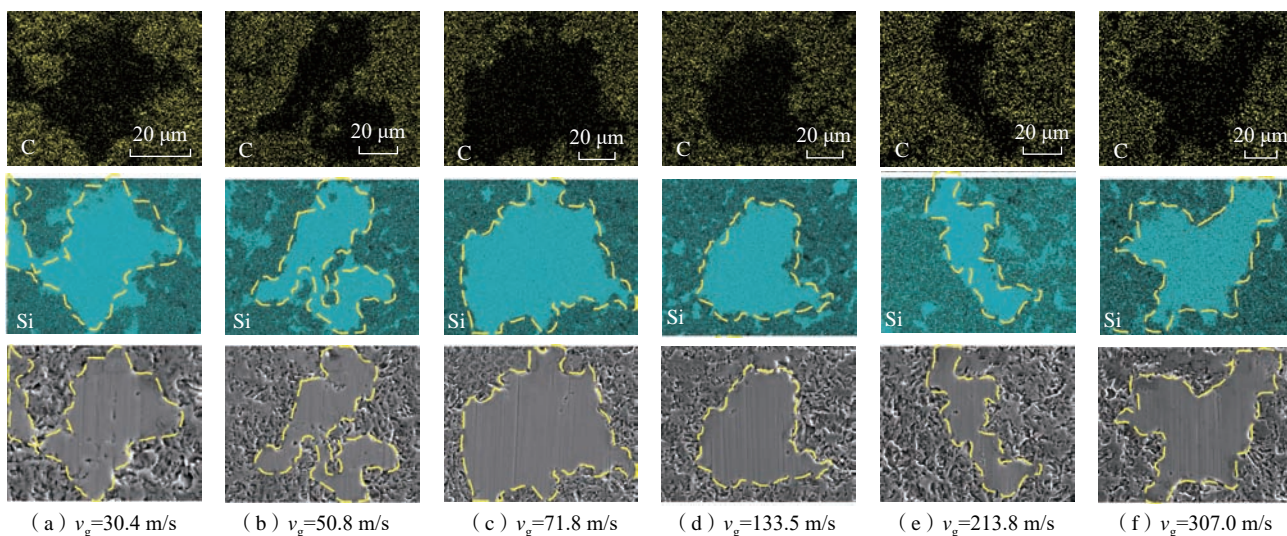


图 12 不同磨削速度下表面局部平整区域的 EDS 元素分析

Fig.12 Elemental analysis of surface flat zones on RB-SiC after grinding at various speeds

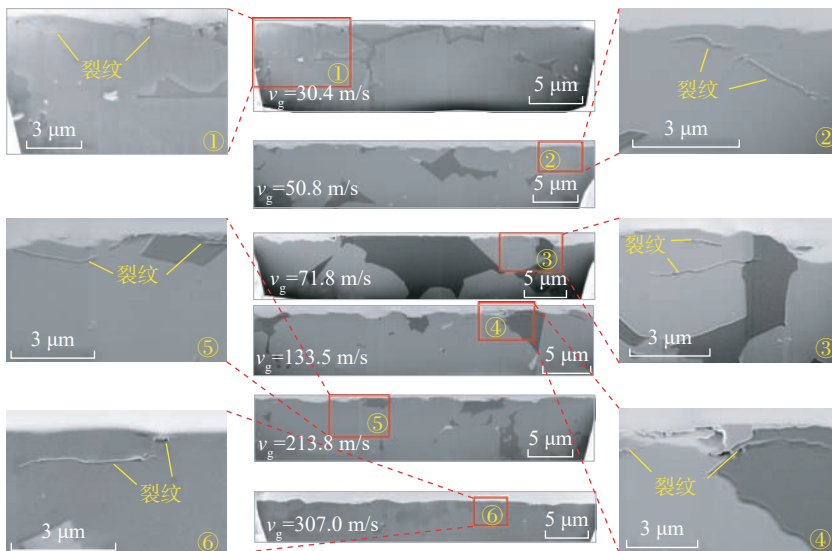


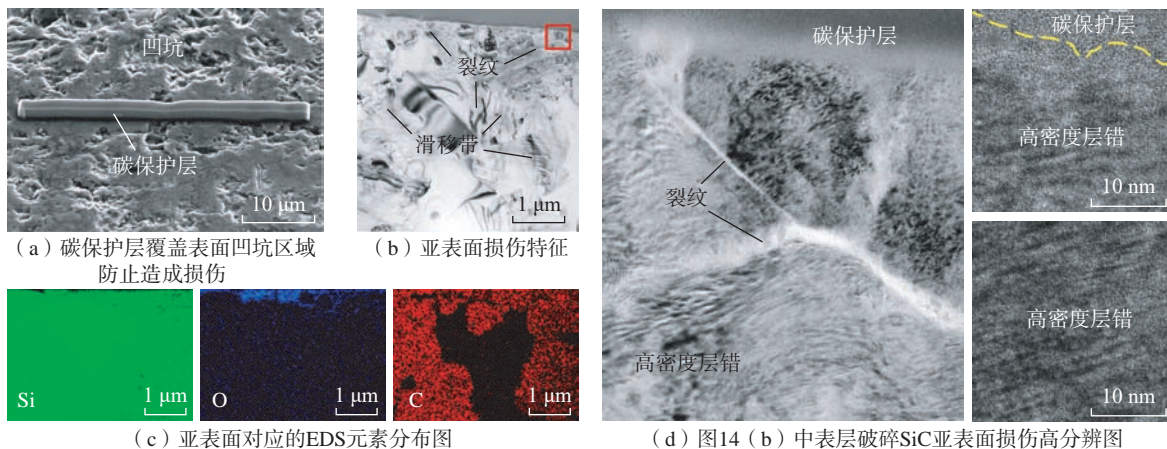
图 13 不同磨削速度下 RB-SiC 亚表面裂纹损伤对比

Fig.13 Cracks in subsurface of RB-SiC after grinding at various speeds

的高密度层错,未发现裂纹。结合选区电子衍射(SAED)分析发现,表面局部平整区域确定为 Si 相,在工件亚表面深处的 Si 为单晶结构(图 15(d)),而在表面沟槽影响下的局部区域为多晶 Si 相,这说明表面平整区域的去除机理主要为 Si 的延性去除。

#### 2.4 铝基碳化硅复合材料( $\text{SiC}_p/\text{Al}$ ) 的表面完整性

$\text{SiC}_p/\text{Al}$  磨削速度设置在 28.1~252.6 m/s 之间,磨削深度为 5  $\mu\text{m}$ 。试验中采用 3 种不同的  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  复合材料,分别用 #1、#2、#3 表示, SiC 颗粒体积分数分别为 35%、45%、55%,

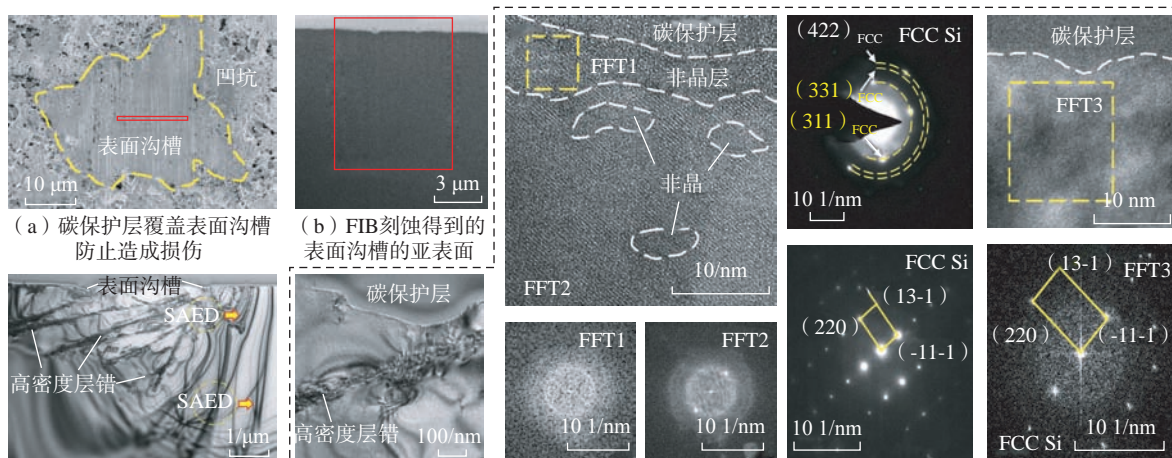


(c) 亚表面对应的EDS元素分布图

(d) 图14 (b) 中表层破碎SiC亚表面损伤高分辨图

图 14 磨削速度为  $v_g=307.0$  m/s 时 RB-SiC 表面凹坑区域的亚表面微结构

Fig.14 Microstructure of surface pit zone of RB-SiC after grinding at 307.0 m/s



(c) 图15 (b) 中的表面沟槽下的亚表面特征

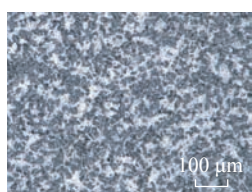
(d) 图15 (c) 中的表层Si亚表面微结构高分辨图

图 15 磨削速度为  $v_g=307.0$  m/s 时 RB-SiC 表面局部平整部位的亚表面微结构

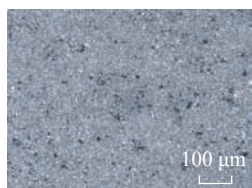
Fig.15 Microstructure of surface flat zone of RB-SiC after grinding at 307.0 m/s

平均尺寸分别为 14.4  $\mu\text{m}$ 、5  $\mu\text{m}$ 、45  $\mu\text{m}$ 。3 种材料的抛光试样表面形貌如图 16 所示。

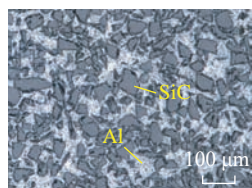
采用  $S_a$  评价磨削表面三维粗糙度。测量表面粗糙度时,在工件表面中间部分取 5 个位置测量,结果取平均值。在相同的当量磨削厚度 ( $a_{eq}=3.4 \times 10^2 \text{ nm}$ ) 条件下,表面粗糙度随磨削速度的变化趋势如图 17 所示。随着磨削速度增大,对于 #1



(a) #1



(b) #2



(c) #3

图 16 超高速磨削试验用的 3 种 SiC 增强相比例的 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料

Fig.16 SiC<sub>p</sub>/Al metal matrix composites with three ratios of SiC reinforcement used in HSG experiments

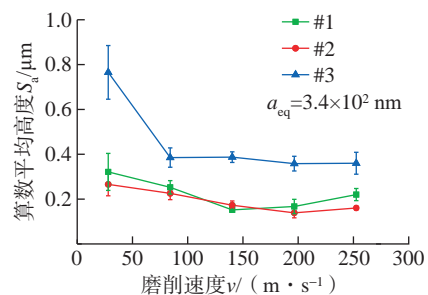


图 17 相同当量磨削厚度下  $S_a$  的变化趋势  
Fig.17 Alterations of surface roughness  $S_a$  at the same equivalent grinding depth

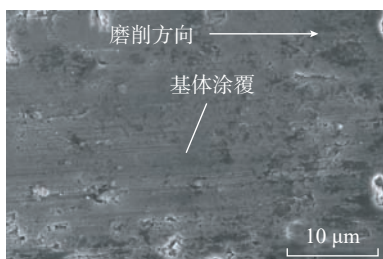
和 #2 材料,  $S_a$  先降低后缓慢上升; 对于 #3 材料,  $S_a$  先显著降低, 随后基本保持稳定。#1 和 #2 材料的  $S_a$  比较接近, 且显著低于 #3 材料。3 种材料  $S_a$  发生变化趋势转变的磨削速度各不相同, #3 材料在磨削速度达到 84.2 m/s 时  $S_a$  显著降低并保持基本稳定, 而 #1 和 #2 材料最小  $S_a$  值对应的磨削速度分别为 140.3 m/s 和 196.5 m/s。

为了清晰呈现高速磨削 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料表面损伤的微观特征, 利用 SEM 对不同磨削速度下的 3 种材料的磨削表面进行观察, 发现无论哪一种材料、哪一种磨削速度, 其表面形貌的基本特征主要有基体涂覆、龟裂、SiC 颗粒破碎、微划痕(图 18)。磨削速度在 50 m/s 以下或 200 m/s 以上, 且 SiC 颗粒体积分数较小时, 基体的涂覆比例较大, 表面呈现较为光滑的特征。基体的龟裂发生在涂覆不充分的位置, 且主要在低磨削速度下的工件表面。在工件表面 SiC 颗粒所在位置, 主要特征为颗粒的破碎, SiC 颗粒尺寸越大, 体积分数越高, SiC 颗粒的破碎在表面占的比例

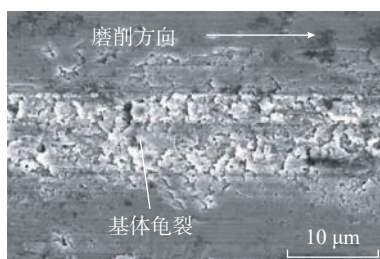
就越大。由于微小的 SiC 碎屑在磨粒挤压下沿着涂覆表面形成划擦, 因此会在涂覆表面出现微划痕。

选取最低和最高磨削速度(28.1 m/s 和 252.6 m/s)对 3 种铝基复合材料的亚表面损伤进行观察, 如图 19~21 所示。3 种材料的 SiC 颗粒尺寸不同, 体积分数各异, 但亚表面损伤的基本特征类似。在接近表面的部位, 发现铝基体的非晶层, 其中混杂着纳米尺度的 SiC 颗粒。随着与表面距离的增大, 基体的晶粒可以清晰分辨, 但仍小于材料本体的基体晶粒尺寸, 晶粒细化且沿着磨削速度方向被拉长, 而且 SiC 颗粒的碎屑尺寸也变大。SiC 颗粒与基体的界面部位存在裂纹, 同时基体的塑性流动层间也存在裂纹。

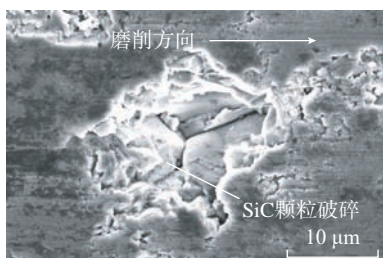
由于 SiC 颗粒形状各异、尺寸不一致、分布随机, SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料的亚表面损伤影响的范围并不均匀, 但从图 19~21 中可看出磨削速度对亚表面损伤的影响非常显著。磨削速度 252.6 m/s 时的亚表面损伤情况明显好于磨削速度为 28.1 m/s 时, 具体表现为非晶层、SiC 颗粒破碎的影响



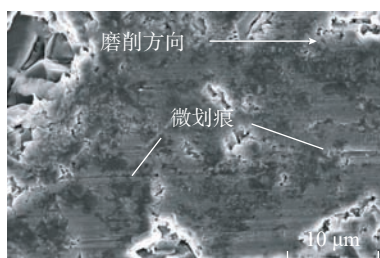
(a) 基体涂覆



(b) 基体龟裂



(c) SiC 颗粒破碎



(d) 微划痕

图 18 SiC<sub>p</sub>/Al 工件表面磨削损伤的微观形貌特征 SEM 图  
Fig.18 Surface morphology of SiC<sub>p</sub>/Al after grinding

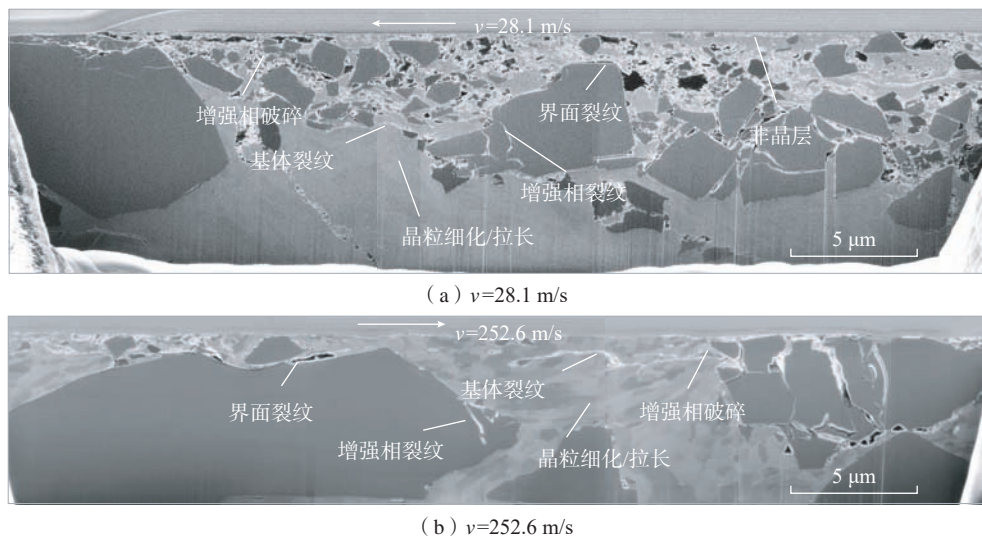


图 19 #1 SiC<sub>p</sub>/Al 材料低速 / 高速磨削亚表面损伤形貌  
Fig.19 Subsurface damage of #1 SiC<sub>p</sub>/Al after low-speed and high-speed grinding

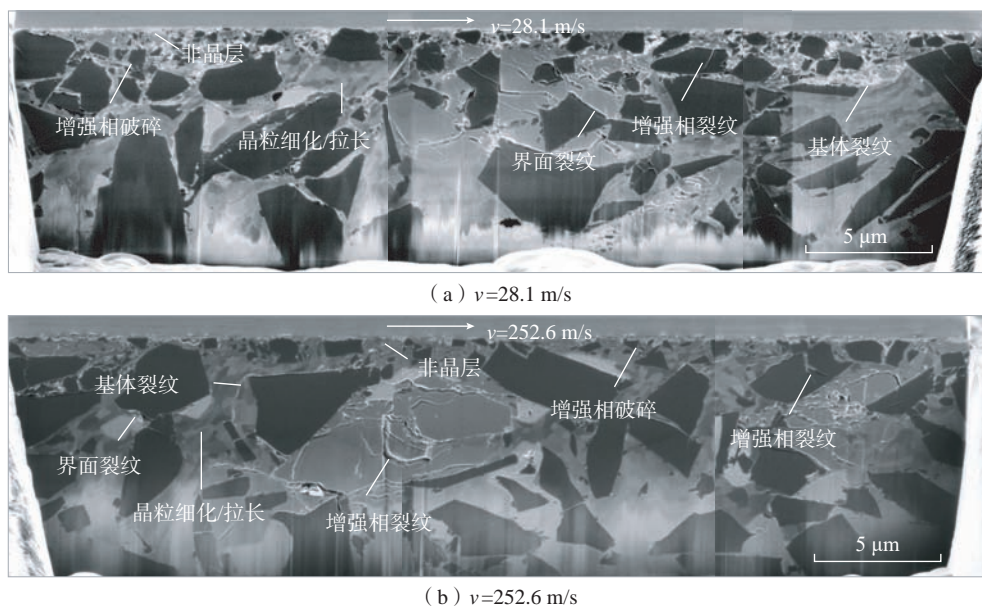


图 20 #2 SiC<sub>p</sub>/Al 材料低速 / 高速磨削亚表面损伤形貌对比  
Fig.20 Compare of subsurface damage of #2 SiC<sub>p</sub>/Al after low-speed and high-speed grinding

深度显著降低,相应地,基体的塑性流动也被抑制。#3 材料的 SiC 颗粒尺寸最大,高速下的 SiC 颗粒破碎程度降低最为明显。SiC 颗粒上的裂纹、界面裂纹的产生和扩展随机性很强,磨削速度较高时,裂纹的数量大大减少,但仍存在影响深度较深的亚表面裂纹。总体而言,提高磨削速度对于降低亚表面损伤深度具有积极的效果。

### 3 讨论

本文研究了从常规低速加工到超高速加工条件下, Ti6Al4V、IN718、RB-SiC 及 SiC<sub>p</sub>/Al 的表面完整性。众所周知,在保持其他参数不变,只增大砂轮线速度的条件下,可降低最大未变形切削厚度  $h_m$ 。超高速磨削诸如 Ti6Al4V 和 IN718 的金属材料,  $h_m$  降低有利于降低单个磨削刃上的

磨削力,从而有效抑制加工表面缺陷(材料涂覆和裂纹)的产生,降低加工表面粗糙度。在超高速磨削条件下,磨粒与工件材料干涉的时间极短,使得磨削热来不及向亚表面深处传导。因此磨削力和磨削热传导率的降低能有效抑制亚表面塑性变形,有利于降低亚表面加工损伤。

在 RB-SiC 的常规磨削中,由于其高硬度、高强度,该材料往往以形

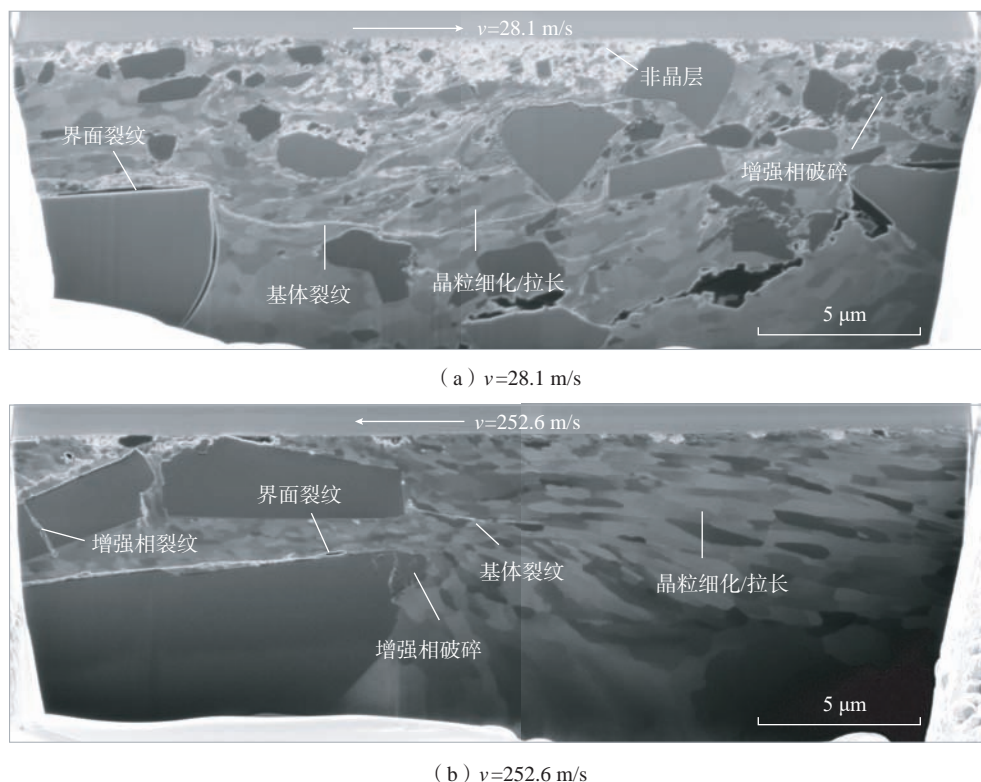


图 21 #3 材料低速 / 高速磨削亚表面损伤形貌对比

Fig.21 Compare of subsurface damage of #3 SiC<sub>p</sub>/Al after low-speed and high-speed grinding

成裂纹、碎屑、表面凹坑等脆性破坏的形式被去除。理论上,高应变率确实会在 RB-SiC 硬脆材料中引起更严重的脆性断裂,但是更严重的脆性断裂并不一定会导致工件材料出现更深的亚表面损伤。因在磨削过程中的能量耗散主要通过脆性断裂的形式发生在磨屑中,由于应变率效应 RB-SiC 的磨屑会发生严重的脆性断裂,破碎成更小的碎屑。由于工件材料表面对裂纹的阻力相比于工件材料内部更小,所以大量的裂纹更加倾向于向工件材料表面扩展,形成细小的碎屑而被去除。因此从留下的磨削加工过的工件材料上并不一定能看出由高应变率引起的更严重的脆性断裂特征或者更深的亚表面损伤。

在超高速磨削条件下,未变形切屑厚度减小,尺寸效应显著。尺寸效应有利于硬脆材料在去除过程中发生塑性变形,而高应变率有利于硬脆

材料的脆性破坏,因此硬脆材料的去除模式是尺寸效应和应变率效应耦合的结果。根据前文中的试验结果,提高磨削速度使表面粗糙度上升,而亚表面损伤深度没有明显上升,表明超高速磨削条件下,脆性去除占主导地位,可实现在不增加损伤的前提下提高材料去除效率。尽管 RB-SiC 整体呈脆性去除状态,但局部 Si 富集位置仍存在延性去除,这是由于与 SiC 相比, Si 的硬度较低而断裂韧性较高,去除过程中更容易发生塑性变形。对于 Si 相,磨削过程中的尺寸效应占据了主导地位。

SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料中的 SiC 颗粒对其磨削损伤具有决定性的影响。在没有 SiC 颗粒扰动的前提下,高速磨削铝合金的表面形貌完全由塑性变形决定,亚表面呈现比较规则的塑性变形层和再结晶层。然而在加入 SiC 颗粒后,原本规则的损伤特征变得具有随机性。SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料的

磨削损伤的降低,取决于硬脆 SiC 颗粒的断裂破碎的抑制。对于 SiC<sub>p</sub>/Al 这样的金属基复合材料,还具有其独特的磨削加工特性。首先,其硬脆增强相符合尺寸效应的影响规律,当磨粒较为锋利、切深极小时, SiC 颗粒将发生延性去除。其次, SiC 颗粒也存在尺寸效应, SiC 颗粒尺寸较大时,脆性断裂的比例也相应增大,但高速磨削的效果也较为明显; SiC 颗粒尺寸较小时,更有利于提高表面完整性,磨削损伤也相应较小。再次, SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料的界面效应明显,由于基体和增强相的性质差异很大,应力集中明显,界面裂纹容易产生,超高速磨削有利于减少基体和增强相的差异性,从而抑制界面失效。最后,温度效应主要影响基体的流动性,在磨削温度高、温度梯度小的条件下,基体的塑性流动规模较大,破碎的 SiC 颗粒混杂在基体中一起流动,容易形成基体裂纹,使表面完整

性恶化;而超高速磨削的温度梯度大,基体塑性流动范围缩小,有利于降低亚表面损伤深度,提高表面完整性。

#### 4 结论

超高速磨削对于解决难加工材料的瓶颈问题具有极大的研究潜力。本文选取 Ti6Al4V、IN718、RB-SiC 及 SiC<sub>p</sub>/Al 4 种代表性的难加工材料开展超高速磨削试验,涵盖了难加工金属、陶瓷及复合材料,对表面完整性进行了表征,并分析了超高速磨削改善其可磨削性的机理,主要结论如下。

(1) 对于难加工金属材料,超高速磨削可降低磨削力和磨削热,提高应变梯度和温度梯度,从而有效降低表面粗糙度和热损伤。

(2) 对于硬脆陶瓷材料,超高速磨削可在不增加亚表面损伤的前提下,提高脆性去除比例,从而提高材料的去除效率。

(3) 对于金属基复合材料,超高速磨削可显著降低加工变形影响层深度,减少增强相颗粒的破碎,从而降低表面粗糙度和亚表面损伤深度,提高表面完整性。

综上所述,超高速磨削对于改善难加工金属、陶瓷、复合材料的可磨削性都具有积极作用,未来通过进一步的工艺优化,有望解决航空航天领域的瓶颈问题。

#### 参考文献

[1] 丁文锋,奚欣欣,占京华,等. 航空发动机钛材料磨削技术研究现状及展望[J]. 航空学报, 2019, 40(6): 022763.

DING Wenfeng, XI Xinxin, ZHAN Jinghua, et al. Research status and future development of grinding technology of titanium materials for aero-engines[J]. Acta Astronautica Sinica, 2019, 40(6): 022763.

[2] 丁文锋,苗情,李本凯,等. 面向航空发动机的镍基合金磨削技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2019, 55(1): 189-215.

DING Wenfeng, MIAO Qing, LI Benkai, et al. Review on grinding technology of nickel-based superalloys used for aero-engine[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(1): 189-215.

[3] 郑非非. 空间反射镜材料的超声辅助磨削机理[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.

ZHENG Feifei. Ultrasonic-assisted grinding mechanism of space mirror materials[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.

[4] 卢守相. 铝基复合材料小孔低损伤加工方法的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.

LU Shouxiang. Study on low damage machining method of small holes in aluminum matrix composites[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.

[5] 徐九华. 钛合金切削磨削加工技术研究进展[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020, 40(5): 1-4.

XU Jiuhua. Research progress of titanium alloy cutting and grinding technology[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2020, 40(5): 1-4.

[6] 高宾华, 保文成, 陈超群, 等. 延塑性航空合金磨削砂轮粘附及粘附抑制技术的研究现状与展望[J]. 航空制造技术, 2021, 64(7): 53-71.

GAO Binhua, BAO Wencheng, CHEN Chaoqun, et al. Research status and future development of wheel loading and suppressed in grinding of ductility aeronautical alloys[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(7): 53-71.

[7] WU C J, LI B Z, LIU Y, et al. Strain rate-sensitive analysis for grinding damage of brittle materials[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(5): 2221-2229.

[8] AGARWAL S, RAO P V. Experimental investigation of surface/subsurface damage formation and material removal mechanisms in SiC grinding[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48(6): 698-710.

[9] ZHOU M, WANG M, DONG G J. Experimental investigation on rotary ultrasonic face grinding of SiC<sub>p</sub>/Al composites[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2016, 31(5): 673-678.

[10] DONG Z G, ZHENG F F, ZHU X L, et al. Characterization of material removal

in ultrasonically assisted grinding of SiC<sub>p</sub>/Al with high volume fraction[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93(5): 2827-2839.

[11] AURICH J C, BRAUN O, WARNECKE G, et al. Development of a superabrasive grinding wheel with defined grain structure using kinematic simulation[J]. CIRP Annals, 2003, 52(1): 275-280.

[12] DING W F, XU J H, CHEN Z Z, et al. Grindability and surface integrity of cast nickel-based superalloy in creep feed grinding with brazed CBN abrasive wheels[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 23(4): 501-510.

[13] XI X, DING W, LI Z, et al. High speed grinding of particulate reinforced titanium matrix composites using a monolayer brazed cubic boron nitride wheel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90(5-8): 1529-1538.

[14] 陈琛, 傅玉灿, 赫青山, 等. 热管砂轮缓进给深切磨削钛合金试验[J]. 航空制造技术, 2014, 57(12): 78-82.

CHEN Chen, FU Yucan, HE Qingshan, et al. Experiment of creep feed deep grinding titanium alloy with heat pipe grinding wheel[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(12): 78-82.

[15] 彭锐涛, 刘开发, 黄晓芳, 等. 流道结构对加压内冷却开槽砂轮磨削性能的影响[J]. 机械工程学报, 2019, 55(13): 212-223.

PENG Ruitao, LIU Kaifa, HUANG Xiaofang, et al. Effect of flow channel structure on performance of pressurized internal-cooling slotted grinding wheels[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(13): 212-223.

[16] ZHOU M, ZHENG W. A model for grinding forces prediction in ultrasonic vibration assisted grinding of SiC<sub>p</sub>/Al composites[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87(9): 3211-3224.

[17] 冯平法, 王健健, 张建富, 等. 硬脆材料旋转超声加工技术的研究现状及展望[J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 3-21.

FENG Pingfa, WANG Jianjian, ZHANG Jianfu, et al. Research status and future prospects of rotary ultrasonic machining of hard and brittle materials[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(19): 3-21.

[18] RAO X S, ZHANG F H, LU Y J, et al. Surface and subsurface damage of reaction-

bonded silicon carbide induced by electrical discharge diamond grinding[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2020, 154: 103564.

[19] LI Z P, ZHANG F H, LUO X C, et al. Material removal mechanism of laser-assisted grinding of RB-SiC ceramics and process optimization[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2019, 39(4): 705-717.

[20] ZHANG B, YIN J F. The 'skin effect' of subsurface damage distribution in materials subjected to high-speed machining[J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2019, 1(2): 022003.

[21] ZHANG B, YIN J. The 'skin effect' of subsurface damage distribution in materials subjected to high-speed machining[J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2019, 1(1): 012007.

[22] DING W F, ZHAO B, XU J H, et al. Grinding behavior and surface appearance of  $(\text{TiC}_p+\text{TiB}_w)/\text{Ti}-6\text{Al}-4\text{V}$  titanium matrix composites[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2014, 27(5): 1334-1342.

[23] LI Z, DING W F, SHEN L, et al. Comparative investigation on high-speed grinding of  $\text{TiC}_p/\text{Ti}-6\text{Al}-4\text{V}$  particulate reinforced titanium matrix composites with

single-layer electroplated and brazed CBN wheels[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2016, 29(5): 1414-1424.

[24] LI Z, DING W, LIU C, et al. Grinding performance and surface integrity of particulate-reinforced titanium matrix composites in creep-feed grinding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(9): 3917-3928.

通讯作者: 张璧, 教授, 博士, 研究方向为超高速加工理论和技术。

## Subsurface Damage in High-Speed Grinding of Difficult-to-Machine Materials

GUO Sai, JIANG Qinghong, LIU Hao, LU Shouxiang, ZHANG Bi  
(Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)

**[ABSTRACT]** The key components applied in the aerial and aerospace fields are often made of high-performance materials that are always difficult to machine, which has become a bottle-neck problem hindering the development of related industries due to the lack of high-efficiency and high-quality machining methods for these materials. In this paper, high-speed grinding (HSG) is proposed to solve the problems with conventional machining of titanium alloys, nickel-based superalloys, reaction-bonded silicon carbide (RB-SiC), and aluminum silicon carbide metal matrix composite ( $\text{SiC}_p/\text{Al}$ ). The surface integrity of different materials after grinding at various conditions are characterized, analyzed, and discussed. The results show that HSG can increase the workpiece surface strain gradient and temperature gradient, reduce the depth of subsurface damage, as well as improve grindability and grinding efficiency for difficult-to-machine metals, ceramics, and composites. The exploratory research in this paper provides a feasible technical route for high-efficiency and high-quality machining of difficult-to-machine materials for broad application prospects in aerial and aerospace fields.

**Keywords:** High-speed grinding; Titanium alloy; Nickel-based superalloy; Reaction-bonded silicon carbide (RB-SiC);  $\text{SiC}_p/\text{Al}$ ; Subsurface damage

(责编 晓月)

引文格式: 徐捷, 冯平法, 颜键辉, 等. 超声纵振辅助螺旋铣削内壁形貌预测模型[J]. 航空制造技术, 2023, 66(14): 72-79.

XU Jie, FENG Pingfa, YAN Jianhui, et al. Prediction model of inner wall morphology in ultrasonic longitudinal vibration assisted helical milling[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(14): 72-79.

# 超声纵振辅助螺旋铣削内壁形貌预测模型

徐捷<sup>1</sup>, 冯平法<sup>1,2</sup>, 颜键辉<sup>1</sup>, 张建富<sup>2</sup>, 许超<sup>1,3</sup>, 马原<sup>1,3</sup>, 冯峰<sup>1</sup>

(1. 清华大学深圳国际研究生院, 深圳 518055;

2. 清华大学机械工程系, 北京 100084;

3. 深圳市青鼎装备有限公司, 深圳 518133)

[摘要] 超声纵振螺旋铣削工艺可以显著提高加工质量, 然而其复杂运动学关系会导致已加工表面产生较之于传统螺旋铣削更为复杂的形貌。为了对这一工艺生成的孔内壁加工表面进行形貌预测和规律提炼, 本文提出了超声纵振螺旋铣削的表面形貌预测模型及其可视化方法, 并设计了验证试验, 对波浪纹织构、尖峰、分割层 3 类典型表面特征进行对比, 发现仿真和试验的吻合度良好。随后, 本文利用该模型评估了振幅、转速、公转进给和切向进给对表面形貌的影响。研究表明, 超声振动的振幅导致侧壁形成的波浪纹形貌, 且主轴转速的增大导致了波浪纹织构变得稀疏。此外, 切向每齿进给、每公转轴向进给和公转进给速度分别决定了斜向尖峰带的高度、分割层的间距和形貌的凸起高度。

关键词: 钛合金; 螺旋铣削; 运动学分析; 表面形貌; 超声振动辅助加工

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.14.072



徐捷

博士研究生, 主要研究方向为先进复合材料精密与极低损加工技术。

目前, 航空制造业中不同零部件之间的连接方式大多为铆钉或螺栓,

而这两种连接方式都需要在目标零部件上制孔。由于连接件在服役期间发生疲劳失效而导致的飞机失事事故中, 大多是由于连接孔加工质量低引起, 因此如何提高制孔质量是航空制造业的一个具有重大意义的课题。近年来, 不少学者提出使用螺旋铣削制备对质量要求高的孔, 与传统制孔不同, 螺旋铣削凭借其特殊的进给方式与材料去除机理, 在制孔过程中体现出了较大的技术优势, 是当前航空构件加工制造的研究重点之一。

另一方面, 随着高精密产品工艺要求提高<sup>[1]</sup>以及可控仿生功能表面加工的需要<sup>[2-3]</sup>, 表面形貌的预测成为技术突破的重要瓶颈<sup>[4]</sup>。铣削加工后的表面形貌主要由刀-工相互作用关系所决定<sup>[5]</sup>。为了实现对形

貌的预测, 国内外研究者基于运动学关系, 从解析<sup>[6]</sup>和机器学习<sup>[7]</sup>两个方面展开了大量研究, 在模型中考虑了铣刀振动和刀齿误差, 对钛合金铣削加工后表面形貌特征值( $R_q$ 、 $R_z$ 和 $S_m$ )进行预测。在此基础上, 李雅青<sup>[8]</sup>和周晓勤<sup>[9]</sup>等采用高斯过程回归法, 在自由曲面铣削上建立了表面形貌预测模型, 实现了从简单平面、柱面到复杂面的技术突破。针对复杂曲面的铣削研究, 郑勐等<sup>[10]</sup>建立了球头铣刀运动学方程, 研究了刀具倾角对表面形貌的影响。然而已有的表面形貌预测模型存在时间离散步长对网格尺寸依赖性强的缺点。基于此, 王仁伟等<sup>[11]</sup>提出了一种针对球头铣削改进时间步长算法, 并在五轴铣削加工上得以验证。

近年来, 超声振动辅助铣削凭借

其切削温度低、易于断屑、加工质量高等优点<sup>[12]</sup>逐渐代替了部分传统铣削加工<sup>[13]</sup>。同时,已有的预测模型面对这一新兴加工方式体现出了局限性,因而给表面形貌的预测技术带来了新的挑战。超声振动辅助螺旋铣削具有复杂的刀-工接触关系,其在传统铣削的基础上,叠加了公转进给以及超声频率的振动<sup>[14]</sup>,从而导致表面形貌难以预测。以往的研究关注于铣削后的底面形貌<sup>[15]</sup>,这对于铣槽和盲孔来说是有意义的。然而对于铣边和通孔来说,实际生产更加关注内孔和侧壁形貌,这对提高产品尺寸精度和公差配合有着重要意义<sup>[16-17]</sup>。

本文以钛合金超声振动辅助螺旋铣孔为研究对象,采用“Z-Map”法<sup>[18]</sup>对内孔加工表面进行布尔运算,建立了内孔表面形貌的预测模型,并设计了验证试验,从而验证预测模型的可靠性。

## 1 模型描述

### 1.1 运动学分析

在普通螺旋铣孔工艺中,刀具运动由刀具自转、轴向进给运动及绕加工孔轴线旋转运动3个部分组成,如图1所示。其中, $D_H$ 为加工目标孔径; $D_T$ 为刀具直径; $e$ 为目标孔轴线与刀具轴线间偏心距; $a_p$ 为铣刀每公转的轴向进给; $n_z$ 为铣刀自转转速; $n_g$ 为螺旋进给的转速(或称之为公转转速)。其速度方程为

$$\begin{cases} v_g = \frac{2\pi en_g}{60} \\ v_z = \frac{\pi D_T n_z}{60} \\ v_a = a_p n_g \end{cases} \quad (1)$$

式中, $v_g$ 为刀具轴线相对目标孔轴线的周向运动速度; $v_z$ 为刀尖点的速度,可以分解为刀尖点相对刀具轴线的周向相对速度; $v_a$ 为平行于刀具轴线的轴向进给运动。 $v_g$ 和 $v_z$ 相加可以得到刀尖点垂直目标孔轴线的周

向运动速度 $v_T$ 。

$$v_T = \frac{2\pi en_g + \pi D_T n_z}{60} \quad (2)$$

刀具每齿周向进给 $f_{zt}$ 与刀具每齿轴向进给量 $f_{za}$ 可以表示为

$$\begin{cases} f_{zt} = \frac{2\pi en_g}{N n_z} \\ f_{za} = \frac{n_g a_p}{N n_z} \end{cases} \quad (3)$$

当时间 $t=0$ 时,刀具中心绕着目标孔中心做旋转半径为 $e$ 的螺旋运动,刀尖 $S$ 的运动轨迹是在刀具中心运动轨迹的基础上加入刀具自转,几何关系如图2所示,刀具中心的运动轨迹方程可以描述为

$$\begin{cases} X_{HM} = e \cos \theta + D_T \cos \varphi \\ Y_{HM} = e \sin(-\theta) + D_T \sin(-\varphi) \\ Z_{HM} = \frac{a_p n_g t}{60} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $X_{HM}$ 、 $Y_{HM}$ 和 $Z_{HM}$ 为普通螺旋铣削的运动方程。 $\varphi_z=2\pi n_z t$ 、 $\varphi_g=2\pi n_g t$ ,通过Matlab软件可以绘制出如图3所示的三维轨迹图。

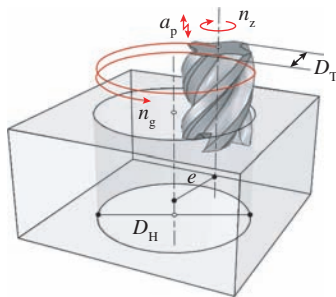


图1 螺旋铣孔原理

Fig.1 Motion principle of helical milling

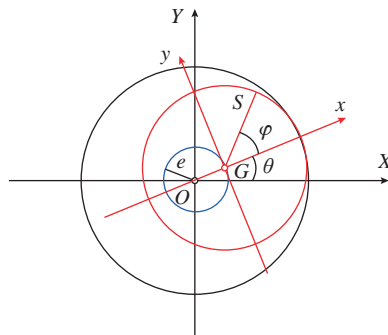


图2 螺旋铣运动学坐标系

Fig.2 Helical milling kinematic coordinate system

在超声纵振螺旋铣削中,在轴向方向需要叠加一个振幅 $A$ 、频率 $f$ 的简谐振动,该方向的速度表达式为

$$v_z = 2\pi f A \sin 2\pi f t \quad (5)$$

积分后代入式(4)中,可以得到超声纵振螺旋铣孔的三维轨迹方程为

$$\begin{cases} X_{HM} = e \cos \theta + D_T \cos \varphi \\ Y_{HM} = e \sin(-\theta) + D_T \sin(-\varphi) \\ Z_{HM} = \frac{a_p n_g t}{60} + A \sin 2\pi f t \end{cases} \quad (6)$$

通过Matlab可以绘制出图4所示的三维轨迹示意图。

### 1.2 超声纵振辅助螺旋铣削侧壁表面形貌形成机理

传统钻孔中,刀具轴心固定,切削刃上任一点绕着刀具轴线自转,因

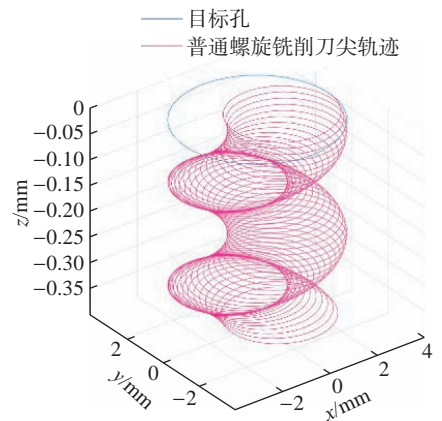


图3 普通螺旋铣刀尖轨迹

Fig.3 Trajectory of conventional helical milling kinematic

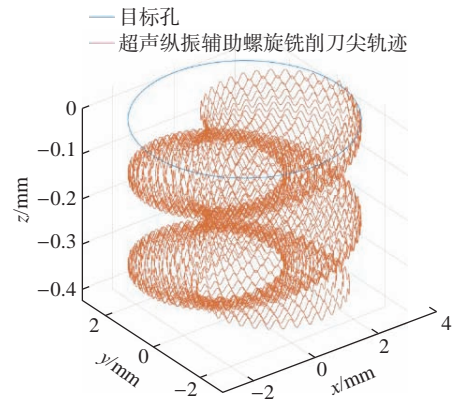


图4 超声纵振螺旋铣削刀尖轨迹示意图

Fig.4 Trajectory of ultrasonic longitudinal vibration assisted helical milling

而刀刃的轨迹为正圆,如图5中的理想轨迹所示。而在螺旋铣孔中,切削刃的运动是自转和进给公转的叠加,刀刃轨迹类似为阿基米德螺旋线。随着公转进给,第1齿(图5蓝色线)和第2齿(图5红色线)的轨迹会出现周期性的“漏切”区域(图5阴影区域),该区域是影响表面粗糙度的重要因素。

### 1.3 表面形貌预测模型

#### 1.3.1 刀具和工件模型

在预测模型中,切削刃被默认为多个元素点组成的曲线,工件认为是二维数组,该数组存储了刀具运动轨迹的高度信息,同时忽略了孔壁未加工表面的塑性变形、材料回弹,以及切屑对孔壁表面的划伤。

对于工件模型,在理想状态下,孔壁表面形貌只与刀具的运动有关。此状态下孔壁表面任意点残留高度与刀具在运动过程中经过该点的最低高度相同。以工件中任一点作为原点构建刀具坐标系  $OXYZ$ ,并将工件元素点离散为  $\Delta x$ 、 $\Delta y$ ,以其  $XOY$  面的坐标作为数组索引。

对于切削刃模型,把切削刃离散成若干个离散点,每个元素点之间的间隔为  $\Delta l$ 。参考实际加工中四刃立铣刀的刀具几何尺寸建立切削刃模型,如图6所示,以立铣刀刀具中心点为原点,刀具轴向为  $Z'$ ,切削底刃所在直线为  $X'$  向,与  $ZX'$  相垂直的方向为  $Y'$  向,建立四刃立铣刀刀

具坐标系  $X'Y'Z'$ 。设刀具半径为  $r$ ,铣刀底刃后角为  $\alpha$ ,刀尖钝圆半径为  $r_b$ ,铣刀底刃某点与铣刀中心点距离为  $l$ ,由几何关系知,铣刀底刃某元素点  $P_0$  在刀具坐标系的坐标为

$$\begin{cases} X' = l \\ Y' = 0 \\ Z' = r_b = \tan\alpha(r - (l + r_b(l + \sin\alpha))), \\ 0 \leq l < r_b(1 + \sin\alpha) \\ Z' = \sqrt{r_b^2 + (r + l)^2}, \\ r + r_b(1 + \sin\alpha) \leq l \leq r \end{cases} \quad (7)$$

设四刃铣刀螺旋角为  $\beta$ ,侧刃某点  $P_0$  与铣刀底端间高度差为  $h$ ,则铣刀侧刃上某点坐标为

$$\begin{cases} X' = r \cos \frac{h - r_b}{r \tan \beta} \\ Y' = r \sin \frac{h - r_b}{r \tan \beta}, r_b \leq h \\ Z' = h \end{cases} \quad (8)$$

考虑到在切削过程中的刀具挠曲变形与刀刃半径的微观变化,在侧刃半径中加入了数量级为纳米的正弦变量模拟刀具中随机变量。

#### 1.3.2 刀具坐标与工件坐标间变换

在预测模型中,刀具坐标系在以旋转角速度  $\omega$  做自转运动,并伴随螺旋状的进给运动与超声频的简谐振动。刀具元素点在工件坐标系下的运动轨迹可以描述为

$$P = P_0 \times C + F \quad (9)$$

式中,  $P$  为刀具元素点加工过程汇总

工件坐标系下的刀尖元素点位置;  $P_0$  为初始点;  $C$  为刀具-工件坐标系转换矩阵;  $F$  为进给运动与超声振动的运动方程。将式(9)展开可以得到

$$P = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) & 0 \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Xk \\ Yk \\ Zk \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中,路径  $k$  为

$$k = \begin{bmatrix} x_0 + v_x t \\ y_0 + v_y t \\ v_z + A \sin(2\pi f t) \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中,  $x_0$ 、 $y_0$  为加工起始点;  $v_x$ 、 $v_y$ 、 $v_z$  为3个方向的进给速度;  $t$  为时间。

#### 1.3.3 时间离散化

为了减少计算量,把时间点离散成若干个时间点,每点的时间间隔为  $\Delta t$ ,生成时间序列,每一个时间点用于刷新刀具的运动位置,得到离散的刀具运动位置。当刀具元素点高度比工件高度点低时,刷新数组中的高度信息,直到总时长计算完毕,最终可以得到加工后的表面形貌。

如图7所示,刀具模型中存在元素点  $P_0$ 、 $P_1$  和时间点  $t_0$ 、 $t_1$ 、 $t_2$  时两点沿着切削路径分别经过  $P_{0,t_0}$ 、 $P_{0,t_1}$ 、 $P_{0,t_2}$  和  $P_{1,t_0}$ 、 $P_{1,t_1}$ 、 $P_{1,t_2}$ 。根据就近原则,当选取不得当的时候,  $P_{1,t_0}$ 、 $P_{1,t_1}$ 、 $P_{1,t_2}$  3点的高度信息会与工件上的

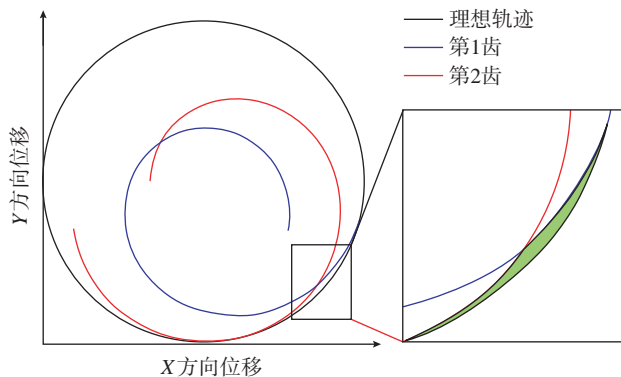


图5 螺旋铣孔刀刃在  $XOY$  平面轨迹示意图

Fig.5 Schematic diagram of helical milling tool edge trajectory in  $XOY$  plane

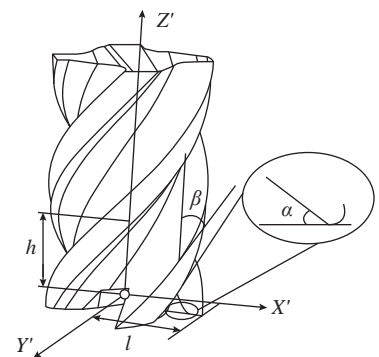


图6 四刃螺旋铣刀示意图

Fig.6 Four edge helical milling tool

A、B、C 3 点进行高度信息比对,而中间经过的其余工件点都不会被更新,被称为“漏判”现象。为了避免此现象发生,刀具元素点在时间间隔内走过的路径长度必须小于等于元素点间隔最小值,即

$$\max \Delta s \leq \min(\Delta x, \Delta y) \quad (12)$$

超声纵振辅助螺旋铣削中,运动速度最快的点位于铣刀的最外圈,因此  $\Delta s$  和  $\Delta l$  需满足

$$\begin{cases} \max \Delta s = \frac{nr\Delta t}{60} + 2\pi fi\Delta t \leq \min(\Delta x, \Delta y) \\ \Delta l \leq \min(\Delta x, \Delta y) \end{cases} \quad (13)$$

综上,超声纵振辅助螺旋铣削侧壁表面形貌预测模型的具体实现流程如图 8 所示,并通过 Matlab 软件对预测模型的结果进行可视化。

## 2 试验验证

### 2.1 试验方案

钛合金普通和超声纵振辅助螺旋铣削试验在三轴精密加工中心 (THU ULTRASONIC 850) 进行,如图 9 所示。通过三轴机床中 3 个方向的插补运动来实现螺旋铣削加工。为了防止材料塑性变形对表面形貌结果的影响,本文采用高弹性模量的钛合金 (TC4) 板材,工件尺寸为 200 mm × 100 mm × 10 mm,利用 (Kistler 9255b) 测力仪实时监测加工过程中切削力的变化情况。工件通过专用夹具夹持固定到机床工作

平台上。刀具为四刃硬质合金刀具,其中加工参数如表 1 所示,刀具尺寸如表 2 所示,模型预测如图 10 所示。

在加工完成以后对已加工孔进行切割制样,并使用超景深显微镜 (KEYENCE VH-Z500R) 分别对不同转速下的普通与超声纵振辅助螺

旋铣削后的工件进行孔壁形貌观察。

### 2.2 验证结果

如图 10 和 11 所示,在转速 3000 r/min 的条件下,仿真结果和试验的结果均显示出超声纵振辅助螺旋铣削后的内壁具有规则的波浪形织构,且波浪振幅与刀具的超声振动

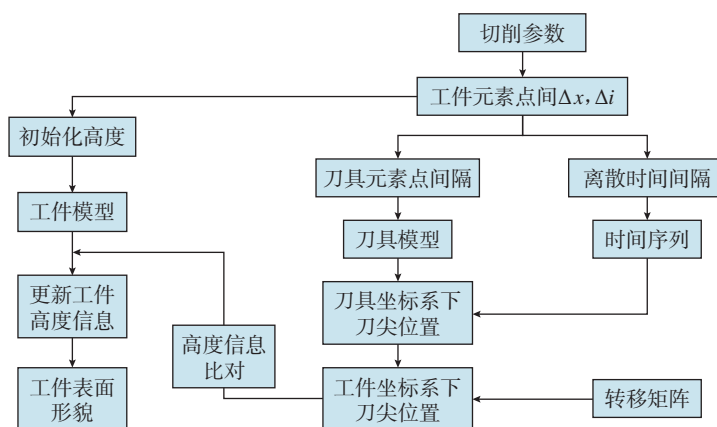


图 8 侧壁表面形貌仿真模型流程图

Fig.8 Flow chart of side wall surface topography simulation model



图 9 螺旋铣孔试验平台

Fig.9 Experimental set-up of helical milling

表 1 加工参数

Table 1 Machining parameters

主轴转速 / (r · min <sup>-1</sup> )	切向每齿进给量 / (mm · z <sup>-1</sup> )	轴向每公转进给 / (mm · z <sup>-1</sup> )	孔半径 / mm	公转半径 / mm
3000, 6000	0.0075	0.1	6	1

表 2 刀具尺寸

Table 2 Tool geometry

刀具长度 / mm	刀具直径 / mm	螺旋角 / (°)	前角 / (°)	后角 / (°)
35	4	35	10	10

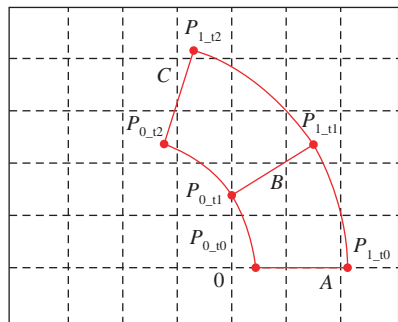


图 7 工件网格矩阵图

Fig.7 Workpiece element matrix diagram

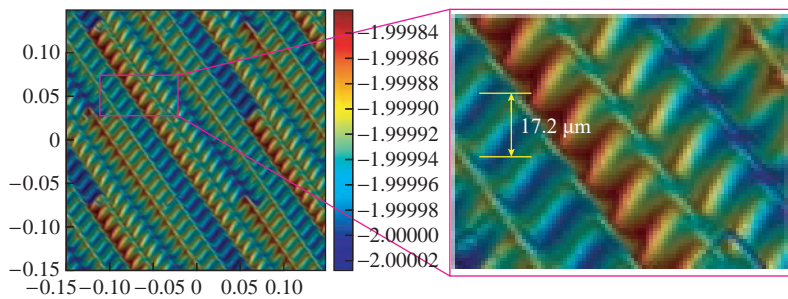


图 10 模型预测的波浪纹 (mm)  
Fig.10 Wavy texture predicted by model (mm)

的振幅大小一致。从波浪形织构的振幅对比情况来看,仿真预测的高度差为  $17.2\ \mu\text{m}$ ,而白光干涉仪测量的高度差为  $17.4\ \mu\text{m}$ ,相对误差率为 1.14%,这与仿真模型预测的结果吻合。同时,织构间存在规则的倾斜尖峰,尖峰点连线后与垂直线夹角由铣刀螺旋角决定。若刀具不发生崩刃及颤振现象,该角度理论上与螺旋角相等。如图 12 所示,仿真模型的尖峰线与垂直线夹角为  $55^\circ$  (与铣刀螺旋角相等),而白光干涉仪拍摄图像的测量结果为  $55.6^\circ$ ,相对误差率为 1.07%。

与普通铣削不同,螺旋铣削存在公转轴向进给。在不同的公转期间内,尖峰带会被切断,被切断的区域称之为“分割层”。在试验结果中,分割层以阴影形式呈现,而且模型预测结果表示为红蓝颜色的突变,如图 13 所示。

### 3 模型应用与讨论

在模型被验证可靠的基础上,进一步地对四刃螺旋铣刀(螺旋角为  $35^\circ$ ,刀具半径  $r=2\ \text{mm}$ )、制孔半径  $R=3\ \text{mm}$  的铣孔工艺展开预测和讨论,重点关注超声振动振幅、主轴转速、切向进给和公转进给对表面形貌的影响。

#### 3.1 振幅对侧壁表面形貌的影响

当主轴转速  $n=4000\ \text{r/min}$ 、切向每齿进给  $f_{z1}=0.015\ \text{mm/z}$ 、每公转轴向进给  $a_p=0.1\ \text{mm/z}$ 、超声频率

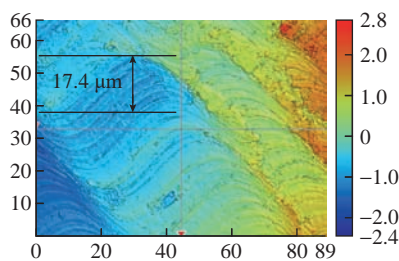
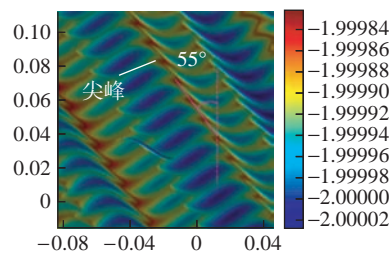


图 11 白光干涉仪观测的波浪纹 ( $\mu\text{m}$ )  
Fig.11 Wavy texture observed by white-light interferometers ( $\mu\text{m}$ )

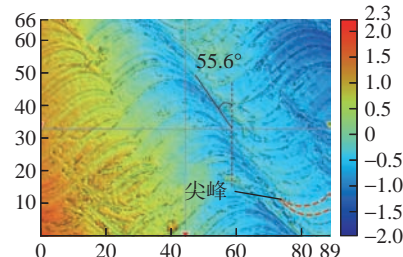
$f=22525\ \text{Hz}$  时,纵振振幅  $A$  取  $0, 2\ \mu\text{m}, 4\ \mu\text{m}, 6\ \mu\text{m}$ 。如图 14 所示,振幅  $A=0$  时为普通螺旋铣孔,加工表面的形貌取决于刀具形貌、切削速度、每齿轴向进给与每公转轴向进给,三维形貌为横向的切痕,伴随倾斜角度为铣刀螺旋角的斜向材料去除残余带。施加超声振动后,三维形貌出现简谐的波纹状织构,并伴随横向切痕(即分割层)。同时,伴随振幅的加大,加工表面上简谐振动的微观特征愈加明显,具体表现为正余弦切痕幅值增大。以上规律充分说明,振幅对侧壁波浪形织构幅值起决定性作用。

#### 3.2 主轴转速对侧壁表面形貌的影响

当切向每齿进给  $f_{z1}=0.015\ \text{mm/z}$ 、每公转轴向进给  $a_p=0.1\ \text{mm/z}$ 、超声频率  $f=22525\ \text{Hz}$ 、纵振振幅  $A=6\ \mu\text{m}$ 、主轴转速  $n$  取  $3000\ \text{r/min}, 4000\ \text{r/min}, 5000\ \text{r/min}, 6000\ \text{r/min}$ 。如图 15 所示,随着切削速度增大,波浪状织构会变得越稀疏,这是由于在相同的刀

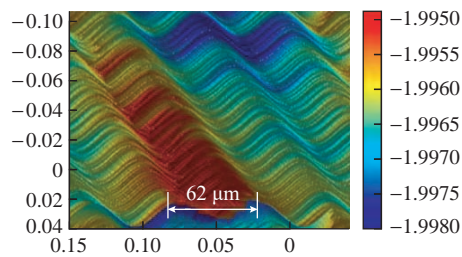


(a) 模型预测结果 (mm)

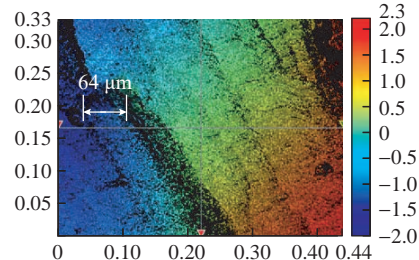


(b) 试验结果 ( $\mu\text{m}$ )

图 12 模型预测结果与试验结果的尖峰验证  
Fig.12 Sharp-like peak validation of predictions and experimental results



(a) 模型预测结果 (mm)



(b) 试验结果 ( $\mu\text{m}$ )

图 13 模型预测结果与试验结果的分割层验证  
Fig.13 Segmented layer validation of predictions and experimental results

具自转周期内,转速越低所需切削时间越长,所经历超声振动周期次数增多,从而导致超声振动对材料切除时间更长,高频的刀尖振动会形成更为密集的织构。因此,在临界转速以下,提高转速,有利于获得更为光滑的加工表面。

### 3.3 切向每齿进给对侧壁表面形貌的影响

当每公转轴向进给  $a_p=0.1$  mm/z、超声频率  $f=22525$  Hz、纵振振幅  $A=6$   $\mu\text{m}$ 、主轴转速为  $n=4000$  r/min,切向每齿进给取  $0.0075$  mm/z、 $0.015$  mm/z、 $0.0225$  mm/z、 $0.030$  mm/z。仿真结果如图 16 所示,随着切向每齿进给增

大,表面形貌没有发生规律性变化,红色区域数量的增多,意味着尖峰高度随之增大。这是由于增大切向每齿进给,铣刀完成相同公转周期所需的自转周期次数减少,导致材料切削盲区(即刀刃无法切到区域)面积变大,同样也使得材料去除量变少。

### 3.4 轴向进给对侧壁表面形貌的影响

当切向每齿进给  $f_{zt}=0.015$  mm/z、主轴转速  $n=4000$  r/min、超声频率  $f=22525$  Hz、纵振振幅  $A=6$   $\mu\text{m}$ ,公转轴向每齿进给取  $0.05$  mm/z、 $0.10$  mm/z、 $0.15$  mm/z、 $0.2$  mm/z。如图 17 所示,随着公转轴向进给增大,分割层的间距也增大,且间距大小与公转轴向

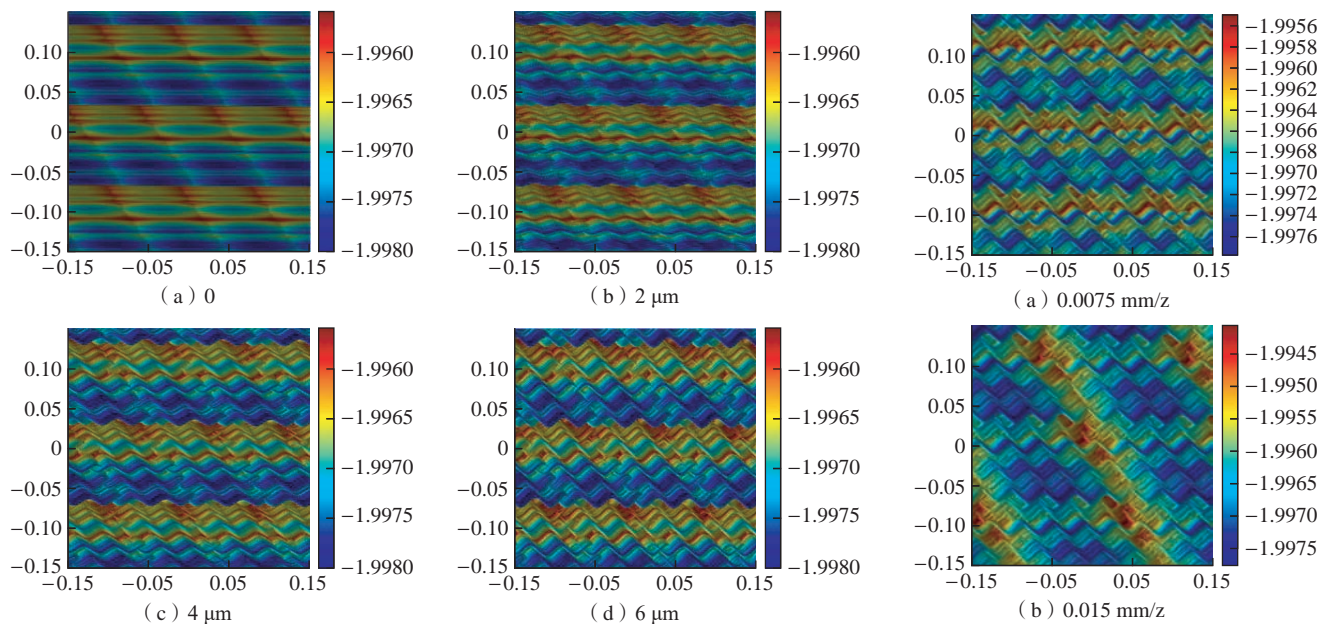


图 14 不同振幅下的孔壁形貌预测

Fig.14 Hole inner wall morphology prediction at different amplitudes

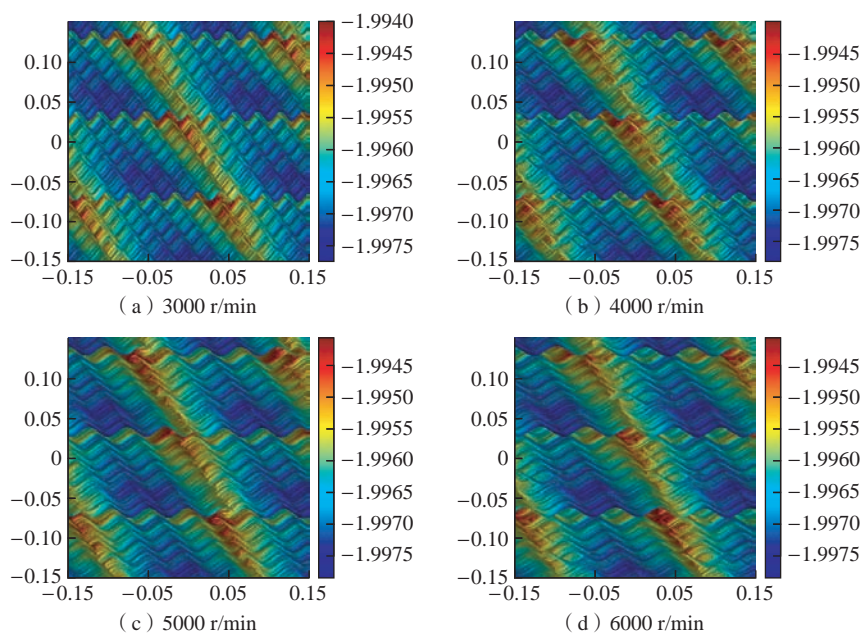


图 15 不同主轴转速下的孔壁形貌预测

Fig.15 Hole inner wall morphology prediction at different speeds of spindle

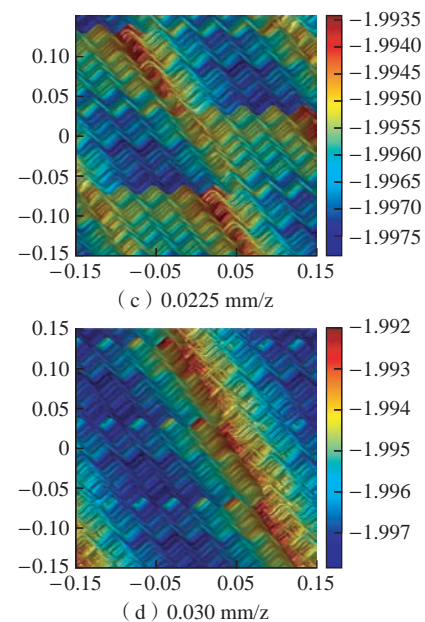


图 16 不同切向每齿进给下的超声纵振辅助螺旋铣削孔壁形貌预测

Fig.16 Hole inner wall morphology prediction at different tangential feed per tooth

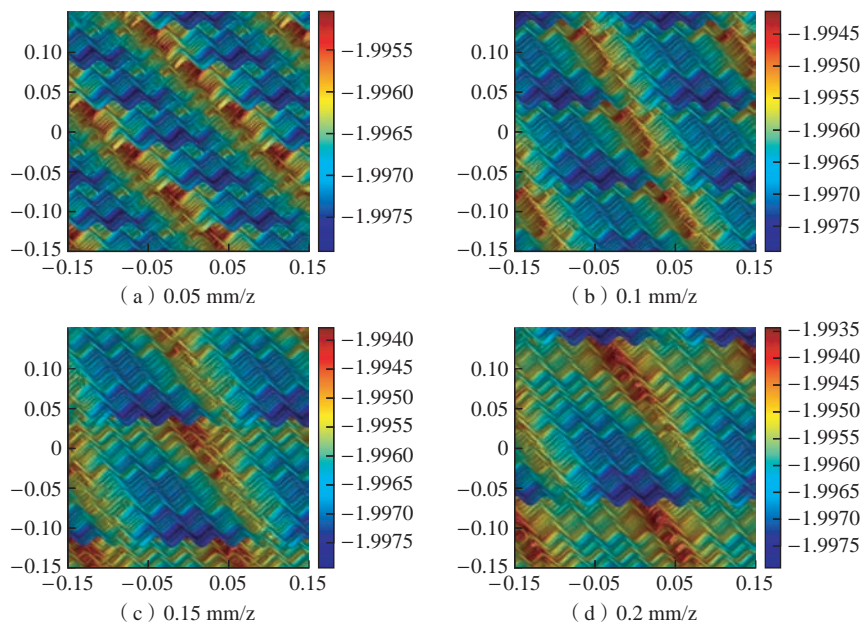


图 17 不同每公转轴向进给下的超声纵振辅助螺旋铣削孔内壁形貌预测  
Fig.17 Hole inner wall morphology prediction at different orbital feed per tooth

进给参数一致。这是因为螺旋铣削存在公转、自转及刀具振动 3 个周期,且 3 个周期相位差均不相同。因为相位差的原因,部分侧壁材料去除残余带被切断,而随着每公转轴向进给增大,被切断所需的轴向距离越大,呈正相关关系。另一方面,高度信息的结果显示,侧壁形貌的高度与每公转进给参数高度相关。当公转进给增大时,轴向切削盲区面积增大,从而导致材料去除量减少。

#### 4 结论

本文提出了超声纵振辅助螺旋铣削内孔表面形貌的预测模型,采用“Z-Map”法对内孔加工表面进行布尔运算,并将结果可视化。

(1) 试验结果有效证明了模型的可靠性,真实反映了铣削后内壁形貌中的波浪纹结构、尖峰及分割层 3 类典型微观细节。

(2) 随着振幅  $A$  的增大,在侧壁中由于简谐振动形成的波浪纹振幅越明显。

(3) 当主轴转速  $n$  增大,波浪纹结构逐渐稀疏。同时,随着切向每齿进给增大,斜向尖峰带的高度也增大。

(4) 随着每公转轴向进给的增大,分割层间距会增加;形貌凸起高度在高公转进给速度下高于低转进给速度条件。

该模型的建立和验证能够有效提高超声辅助精密加工表面质量预测能力,有助于提高产品尺寸精度的技术工艺优化效率,对于超声辅助精密加工技术领域的学术研究具有积极的意义。

#### 参考文献

[1] LIAO Z R, LA MONACA A, MURRAY J, et al. Surface integrity in metal machining—Part I: Fundamentals of surface characteristics and formation mechanisms[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2021, 162: 103687.  
[2] TOWNSEND A, SENIN N, BLUNT L, et al. Surface texture metrology for metal additive manufacturing: A review[J]. Precision Engineering, 2016, 46: 34–47.  
[3] ARIZMENDI M, JIMÉNEZ A,

CUMBICUS W E, et al. Modelling of elliptical dimples generated by five-axis milling for surface texturing[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 137: 79–95.

[4] TORTA M, ALBERTELLI P, MONNO M. Surface morphology prediction model for milling operations[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(7): 3189–3201.

[5] 徐安平, 张大卫, 黄田, 等. 柔性螺旋立铣刀数控铣削表面形貌物理仿真模型[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2000, 12(4): 262–266.

XU Anping, ZHANG Dawei, HUANG Tian, et al. Physical simulation model for peripherally milled surface topography considering the cutter flexibility[J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2000, 12(4): 262–266.

[6] CAI C Y, AN Q L, MING W W, et al. Modelling of machined surface topography and anisotropic texture direction considering stochastic tool grinding error and wear in peripheral milling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 292: 117065.

[7] RIFAI A P, AOYAMA H, THO N H, et al. Evaluation of turned and milled surfaces roughness using convolutional neural network[J]. Measurement, 2020, 161: 107860.

[8] 李雅青, 赵培轶, 姜彬, 等. 铣削钛合金加工表面形貌特征参数的预测[J]. 工具技术, 2020, 54(1): 41–46.

LI Yaqing, ZHAO Peiyi, JIANG Bin, et al. Prediction study on surface topography distribution of milling titanium alloy[J]. Tool Engineering, 2020, 54(1): 41–46.

[9] 周晓勤, 谢雪范, 马伟, 等. 自由曲面铣削表面形貌仿真方法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(1): 19–22.

ZHOU Xiaoqin, XIE Xuefan, MA Wei, et al. Research on topography simulation method in end milling free form surfaces[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2019(1): 19–22.

[10] 郑勤, 董永亨. 球头铣刀倾角对硬铝合金工件表面形貌的影响[J]. 兰州理工大学学报, 2016, 42(4): 36–41.

ZHENG Meng, DONG Yongheng. Effect of inclination-angle of ball-milling cutter on surface morphology of hard aluminium alloy workpiece[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2016, 42(4): 36–41.

[11] 王仁伟, 张松, 葛人杰, 等. 改进的球头铣刀加工表面形貌建模方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(4): 973-980.

WANG Renwei, ZHANG Song, GE Renjie, et al. Modified machined surface topography modeling in ball-end milling process[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(4): 973-980.

[12] 牛赢, 焦锋, 赵波, 等. 纵扭超声铣削残余应力三维有限元仿真与试验 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(13): 224-232.

NIU Ying, JIAO Feng, ZHAO Bo, et al. 3D finite element simulation and experimentation of residual stress in longitudinal torsional ultrasonic assisted milling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(13): 224-232.

[13] 张翔宇, 隋嵩, 张德远, 等. 超声振动改善深孔镗削加工质量 [J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 143-148.

ZHANG Xiangyu, SUI He, ZHANG Deyuan, et al. The improvement of deep-hole boring machining quality assisted with

ultrasonic vibration[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(19): 143-148.

[14] 张园, 康仁科, 刘津廷, 等. 超声振动辅助钻削技术综述 [J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 33-44.

ZHANG Yuan, KANG Renke, LIU Jinting, et al. Review of ultrasonic vibration assisted drilling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(19): 33-44.

[15] 倪陈兵, 朱立达, 宁晋生, 等. 超声振动辅助铣削钛合金铣削力信号及切屑特征研究 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(7): 207-216.

NI Chenbing, ZHU Lida, NING Jinsheng, et al. Research on the characteristics of cutting force signal and chip in ultrasonic vibration-assisted milling of titanium alloys[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(7): 207-216.

[16] 陈光, 刘见, 戈家影, 等. 基于运动学及力热分析的 CFRP 超声振动辅助螺旋铣孔质量影响机制 [J]. 机械工程学报, 2021, 57(1): 199-209.

CHEN Guang, LIU Jian, GE Jiaying, et al. Experimental study on ultrasonic vibration helical milling of CFRP based on kinematic and thermal-mechanical analysis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(1): 199-209.

[17] CHEN G, REN C Z, ZOU Y H, et al. Mechanism for material removal in ultrasonic vibration helical milling of Ti6Al4V alloy[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 138: 1-13.

[18] 董永亨, 李淑娟, 洪贤涛, 等. 基于 Z-MAP 方法的球头铣刀铣削力的建模 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(19): 201-212.

DONG Yongheng, LI Shujuan, HONG Xiantao, et al. Modeling on the milling force of ball-end milling cutter based on Z-MAP method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(19): 201-212.

通讯作者: 冯峰, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要研究方向为智能制造与精密加工技术。

## Prediction Model of Inner Wall Morphology in Ultrasonic Longitudinal Vibration Assisted Helical Milling

XU Jie<sup>1</sup>, FENG Pingfa<sup>1,2</sup>, YAN Jianhui<sup>1</sup>, ZHANG Jianfu<sup>2</sup>, XU Chao<sup>1,3</sup>, MA Yuan<sup>1,3</sup>, FENG Feng<sup>1</sup>

(1. Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China;

2. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Shenzhen Tsingding Technology Co., Ltd., Shenzhen 518133, China)

**[ABSTRACT]** Ultrasonic longitudinal vibration assisted helical milling (ULVAHM) can significantly improve the machining quality. However, the complex kinematics can result in a more complex morphology of the surface machined by ULVAHM than that by a conventional helical milling. To predict the morphology and summarize the rules of the machined surface generated by ULVAHM, a morphology prediction model and its visualization method were proposed in this study, and a verification experiment was conducted to compare the three typical microscopic characteristics, namely, wave texture, sharp-like peak and segmented layer. A favorable agreement between experimental and simulation results was demonstrated. Afterwards, the effects of amplitude, rotational speed, revolution feed and tangential feed on the surface morphology were evaluated by using the model. The investigation results show that the amplitude in ultrasonic vibration leads to the formation of wavy patterns on sidewalls. As the spindle speed increases, the wavy pattern weave becomes sparser. Meanwhile, the height of oblique crest band, the spacing of split layers, and the height of shaped projection are determined by the circumferential feed per tooth, axial feed per tooth, and feed speed, respectively.

**Keywords:** Titanium alloy; Helical milling; Kinematic analysis; Surface morphology; Ultrasonic vibration assisted machining

(责编 古索)

引文格式: 周进, 袁信满, 陈杰, 等. 芳纶纸蜂窝芯结构件加工技术研究与应用进展[J]. 航空制造技术, 2023, 66(14): 80-99.

ZHOU Jin, YUAN Xinman, CHEN Jie, et al. Research progress and application status on machining technology of aramid honeycomb core[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(14): 80-99.

# 芳纶纸蜂窝芯结构件加工技术研究与应用进展

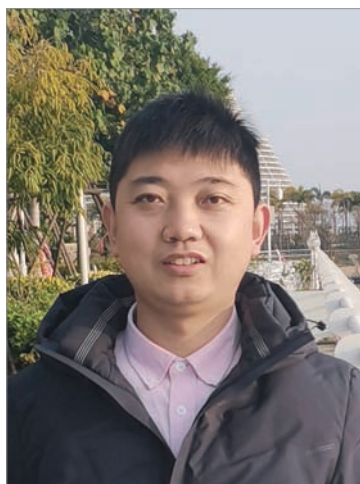
周进, 袁信满, 陈杰, 胡智钦, 张也, 陈保林, 罗潘, 侯珺森

(航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610091)

**[摘要]** 芳纶纸蜂窝芯材料是一类具有轴向比强度和比刚度高、轴向抗压能力强等优异性能的轻量化材料, 在众多先进飞机、卫星、汽车中具有广泛应用, 尤其是作为重要的轻量化结构件广泛应用于飞机的襟翼、舱门、地板等部位。在材料成型后, 机械加工是必备的重要环节, 以获得高精度的轮廓外形尺寸和装配特征。但芳纶纸蜂窝芯软质、脆性、非连续、薄壁等特性造成其加工难度极高。为解决极具挑战的加工难题, 国内外研究团队进行了广泛且深入的探索, 以实现芳纶纸蜂窝芯结构件高质高效加工。本文对芳纶纸蜂窝芯加工机理进行分析概述, 系统性归纳总结蜂窝芯结构件加工固持方法、加工刀具、加工装备和加工工艺, 介绍在典型结构件加工中的应用, 并对未来发展方向进行展望。

**关键词:** 蜂窝芯; 芳纶纸; 结构件; 加工; 超声切削; 低损伤

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2023.14.080



周进  
高级工程师。

随着全球航空技术的飞速发展, 以及航空业对低成本和环保的迫切需求, 复合材料以其优越的综合性能备受青睐。其中芳纶纸蜂窝就是一类在航空工业中被广泛应用的轻量

化复合材料<sup>[1-2]</sup>。20世纪60年代, 美国杜邦公司率先制成芳纶纸。随后, 杜邦公司依据仿生学原理, 仿照蜂巢中的正六边形阵列结构, 制备出了芳纶纸蜂窝芯(Nomex蜂窝芯)。芳纶纸蜂窝芯自研制成功以来, 由于其优异的性能, 在现代航空航天、交通运输界备受瞩目<sup>[3-4]</sup>, 并被大量用作填充材料。与传统的金属材料、泡沫材料等相比, 芳纶纸蜂窝材料具有独特的空间结构和力学性能, 其独特的六边形中空结构带来高的轴向比强度、比刚度和更低的密度, 轴向抗压能力较好, 具备一定的抗冲击性和较为突出的抗疲劳性能, 并具有优异的隔音性能。此外, 芳纶纸的纤维承力、纸浆糟粕填充特性则带来优良的化学惰性, 离开火源可立即自熄, 且具有良好的隔热性、耐高温性、电绝缘和透电磁波特性等<sup>[5-7]</sup>。因此, 芳纶纸蜂窝材料高度匹配填充材料的轻质要求被广泛应用于飞机的尾翼、

襟翼、整流罩等结构件上。其对声、电、热的绝缘性和强电磁透过性能则拓展了在机舱内壁板、装饰板、雷达罩、发动机短仓等结构件中的应用。图1为芳纶纸蜂窝芯结构件在A350客机襟翼中的应用。此外, 芳纶纸蜂窝材料的优异性能使其不仅仅局限于应用在飞机上, 在飞船返回舱、卫星、船舶、高速列车中都有优异的应用效果<sup>[8-9]</sup>。

制备芳纶纸蜂窝的原材料芳纶纸是采用间位芳纶纤维和芳纶浆粕通过斜网成形技术制备而成。目前, 在工业应用中制备芳纶纸蜂窝的方法主要为波纹法和展开法<sup>[10-11]</sup>。图2(a)为波纹法制备芳纶纸蜂窝的示意图, 首先使用模具将芳纶纸制成半六边形的蜂窝芯壁, 在波纹节点处涂抹粘接剂, 然后对合堆叠后进行固化形成芳纶纸蜂窝。波纹法制备出的材料精度相对较高, 但是大量模具的使用带来了高成本, 且效率低<sup>[12]</sup>,

因此较难实现大规模应用。图2(b)为拉伸法制备芳纶纸蜂窝芯的示意图。首先将胶条等距交错地涂抹于芳纶纸上并层层叠合,在胶固化后进行拉伸并将孔格定型为正六边形,然后浸胶固化形成芳纶纸蜂窝。拉伸法可通过调节浸渍树脂的量制造不同密度的芳纶纸蜂窝,并且效率更高,因此是一种应用更为广泛的制备方法<sup>[13]</sup>。

芳纶纸蜂窝芯通常作为填充结构支撑夹层结构零件,因此芳纶纸蜂窝的几何外形需要与面板形状相匹配,并有效粘接。不同的芳纶纸蜂窝结构件具有不同的几何结构特征,通常有平面、曲面、斜面、台阶面、异性孔、槽、型腔和超薄边缘等。为了更好地实现芳纶纸蜂窝结构件装配和连接,需要通过机械加工的方式制备高质量和高精度的型面。加工质量会直接影响芳纶纸蜂窝结构件的承载性能,并在服役过程中进一步加剧材料性能衰退和失效。此外,为了

实现芳纶纸蜂窝芯结构件的批量生产和推广使用,提高加工效率和严格控制加工成本具有非常重要的作用。因此,芳纶纸蜂窝的高质高效加工技术的研发和应用对芳纶纸蜂窝结构件应用推广至关重要<sup>[14]</sup>。

芳纶纸蜂窝芯具有独特的力学性能和空间结构,给切削加工带来了极大的挑战。芳纶纸整体具有高强度高韧特性,轴向和径向力学性能差距悬殊,且导热性能差,芳纶短纤维又使材料具有各向异性和脆性,因此加工过程中极易产生损伤。同时芳纶纸蜂窝芯特殊的正六边形薄壁阵列结构带来了弱刚性问题,加工时蜂窝壁极易发生变形从而加剧损伤,且使得结构件加工时的装夹难度大幅提高。总体而言,芳纶纸蜂窝芯结构件加工具有以下挑战<sup>[15]</sup>。

(1)加工损伤严重<sup>[16-17]</sup>。切削时,由于纤维-基体界面强度低且蜂窝薄壁易变形,纤维不易被切削刃切断,极易残留形成毛刺。此外,蜂窝

壁在切削刃作用下也极易发生撕裂、坍塌、变形等加工损伤。

(2)零件固持可靠性差<sup>[18]</sup>。蜂窝芯力学性能各向异性造成其只能通过轴向进行装夹固定,对于常规的芳纶纸蜂窝结构件通常采用胶粘或真空吸附等方式,固持力和切削力不匹配时极易发生固持失效现象,严重时甚至会直接造成零件报废。

(3)刀具磨损严重<sup>[19]</sup>。芳纶纤维具有高强高韧的性能,切削时切削区产生热量较多,且芳纶纸导热性能差,热累积效应显著,切削温度较高,在局部高应力和高温条件下,刀具磨损速度快,通常刀具寿命都较短。

(4)零件加工精度低<sup>[20]</sup>。芳纶纸蜂窝芯在面内的力学性能极差,在径向切削力作用下极易发生弹塑性变形,因此与金属等材料相比,让刀和过切等现象都造成芳纶纸蜂窝芯结构件加工精度较低。

(5)粉状切屑污染环境<sup>[21]</sup>。切削芳纶纸蜂窝芯时产生大量芳纶短纤维粉末状切屑,对人体有害,污染环境且使得生产环境存在安全隐患,但回收难度较高。

(6)加工效率低<sup>[22]</sup>。芳纶纸蜂窝芯结构件加工的易损伤特性使得实际加工时通常采用降低加工效率的方式保障零件加工质量。

(7)加工成本高<sup>[22]</sup>。芳纶纸蜂窝的难加工特性导致其加工设备成本、刀具成本、人工成本、耗材成本都较高,综合来看加工成本较高。

芳纶纸蜂窝芯是一种典型的难加工材料,但其优异性能决定了在航空等领域具有广阔的应用前景,因此必须突破芳纶纸蜂窝芯结构件高质高效加工技术瓶颈<sup>[23]</sup>。本文全面总结芳纶纸蜂窝芯切削加工研究现状和技术进展,并展望未来发展方向。

## 1 芳纶纸蜂窝芯切削加工机理

通过阐明材料的切削加工机理,

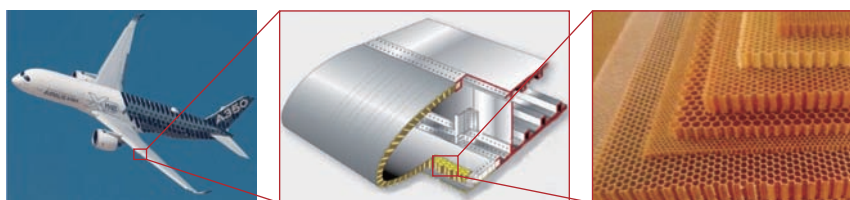


图1 芳纶纸蜂窝芯结构件在飞机中的应用

Fig.1 Application of aramid honeycomb core structure components in aircraft

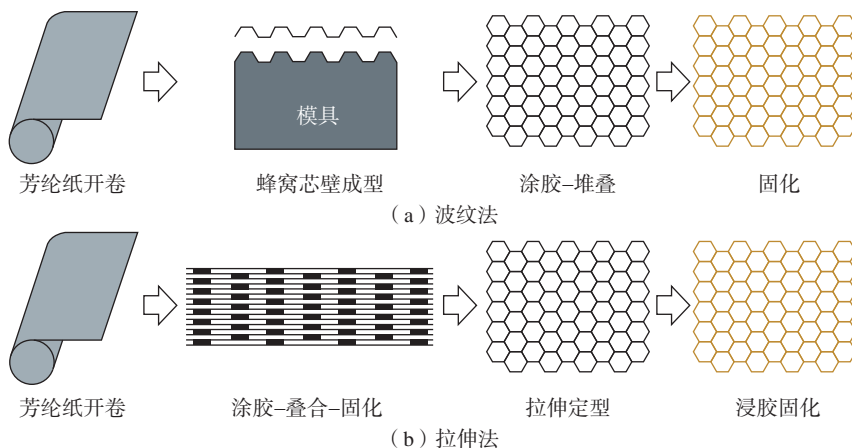


图2 芳纶纸蜂窝制备流程示意图

Fig.2 Schematic diagram of aramid honeycomb preparation process

并以此为依据进行针对性的加工工艺优化,是实现芳纶纸蜂窝优质高效加工的前提。因此,以下从材料去除机理、加工理论模型、有限元仿真等维度,分析国内外在该方面的研究成果。

### 1.1 材料去除机理

目前,国内外较为成熟的蜂窝芯加工方法有高速铣削、超声切割及磨削,下文分别对各方法的材料去除机理进行简述。

#### 1.1.1 高速铣削

高速铣削是芳纶纸蜂窝芯材料的常规加工方法,铣削时采用专用的组合刀具。如图3所示,组合刀具通常由圆盘形的刀片、沿刀体圆柱面均匀分布锯齿的粉碎刀、连接用刀杆和其他附件组成。切削加工时,刀具高速旋转,刀片沿铣削方向将材料从毛坯上切割去除,因此高速铣削时底部的圆片刀发挥了切削去除材料和形成已加工表面的作用。从切削机理进行分类,大体上可以分为有齿圆片刀的断续切削和无齿圆片刀的连续切削。有齿圆片刀在加工时高速冲击蜂窝壁,切削区的芳纶纤维复合材料

料在冲击作用下剪切承载能力下降,同时在剪切力作用下发生剪切失效,材料断裂去除。无齿圆片刀则是在加工时持续挤压造成蜂窝壁材料变形,随着刀具进给,蜂窝壁材料变形量持续增大,最终导致蜂窝壁芳纶纤维复合材料断裂去除<sup>[24]</sup>。刀片上端的粉碎刀的作用是及时将圆片刀切下的材料粉碎,避免影响刀具的正常切削<sup>[16]</sup>。

#### 1.1.2 超声振动切削

超声振动切削是一种在原有的加工刀具切削运动的基础上附加超声振动的新型加工技术,具有切削力

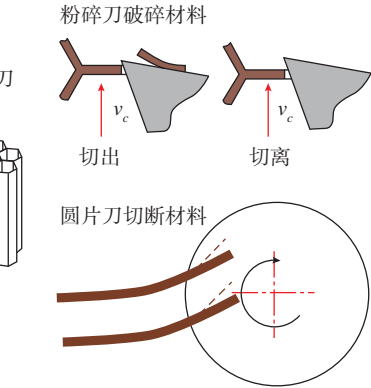


图3 芳纶纸蜂窝芯高速铣削示意图

Fig.3 Schematic diagram of high-speed milling of aramid honeycomb core

小、加工精度高等优点。该技术最早由日本学者隈部淳一郎提出,后续由奥地利GFM公司率先投入工程化应用,设计开发超声切削设备,实现了芳纶纸蜂窝芯材料航空结构件的高效精准加工<sup>[17-18]</sup>。

芳纶纸蜂窝芯材料超声切削加工采用直刃刀与圆盘刀两类专用刀具。两类刀具都采用划切的方式切削材料,形成块状的切屑,刀具的切削方式如图4所示。超声振动切削芳纶纸蜂窝的机理可以总结为两个效应:离合效应和撕裂效应。当对刀具施加超声振动时,刀具的轴向高

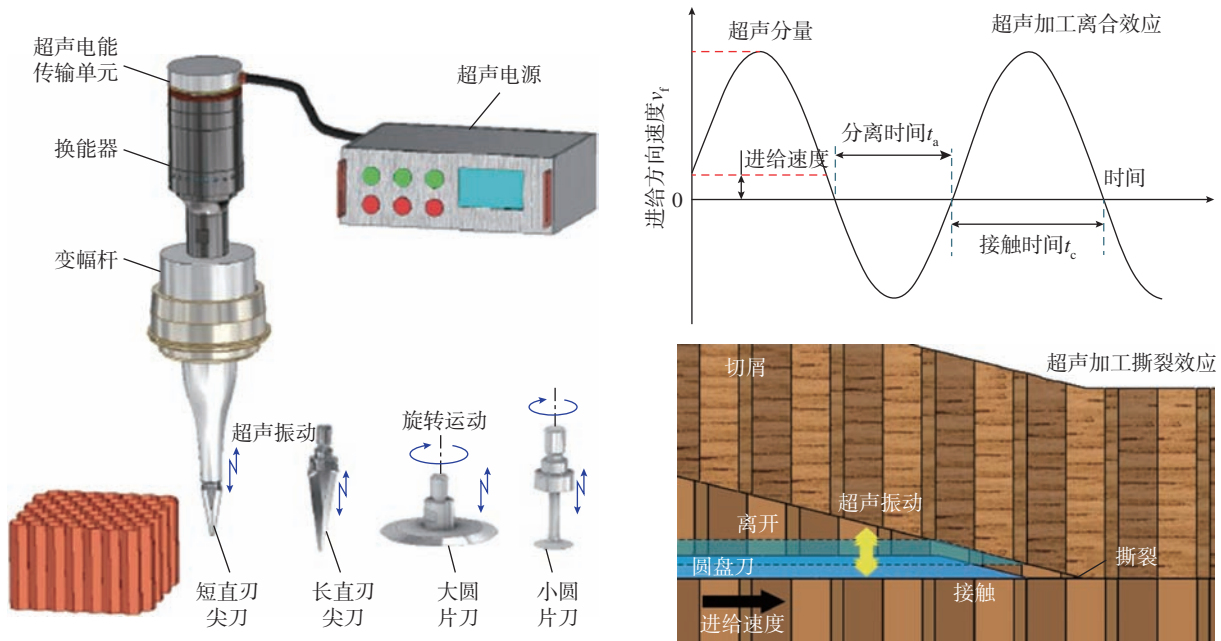


图4 芳纶纸蜂窝芯超声切削示意图

Fig.4 Schematic diagram of ultrasonic cutting of aramid honeycomb core

频振动改变了切削刃的运动轨迹,切削刃-材料的接触方式转变为断续接触,且切削刃超声振动会对材料产生高频冲击。芳纶纸蜂窝壁材料在刀具高频超声振动作用下,切削区的芳纶纤维复合材料会在更短时间内达到破坏极限,从而在较小的材料变形量下实现材料去除<sup>[19]</sup>。此外,对于长薄型的刀具,在超声振动加工中有超声撕裂效应,可以有效避免粘刀,对于降低切削力和刀具磨损、提高零件加工质量都有显著优势。通过在粗、精加工工序分别使用直刃刀和圆盘刀两类专用刀具,以及合理规划加工时的刀具姿态,可完成较为复杂的特征曲面加工<sup>[21,25]</sup>。

### 1.1.3 磨削

磨削加工是采用具有电镀金刚石等自锐、高硬度涂层的砂轮对被加工材料多余物进行切除的一种加工方法,如图5所示。磨削加工时砂轮上均匀分布的硬质磨粒划擦芳纶纸蜂窝芯材料,由于蜂窝壁刚性差,因此在磨削力作用下发生弯曲变形。随着磨粒划擦,部分芳纶纤维在磨粒剪切作用下发生剪切断裂,但更多的芳纶纤维则发生拉伸断裂和弯曲断裂。目前,磨削加工工艺仅用于高密度芳纶纸蜂窝芯的加工<sup>[22]</sup>。

目前,对于芳纶纸蜂窝高速铣削和超声振动加工材料去除机理的研究较为系统深入,并且材料去除机理研究的成果对加工设备研发和刀具设计产生了指导作用。与其他两种

加工工艺相比,关于芳纶纸蜂窝芯磨削加工机理缺乏系统深入的研究。

## 1.2 加工理论模型

在材料去除机理的基础上,为进一步定量分析加工过程响应,国内外学者分别建立了切削力、切削热和切削损伤的理论模型。

### 1.2.1 切削力模型

面向蜂窝芯材料特性,麻省理工大学 Lorna 教授以双倍壁厚蜂窝为研究对象,建立了基于等效参数的 Gibson 力学模型<sup>[23]</sup>。在此基础上,王毅丹等<sup>[26]</sup>根据 Nomex 蜂窝芯材料的弹性变形过程,获取了材料临界弹性变形量,建立了切削连续性和断续性两种状态下的切削力理论表达式;郑华林<sup>[27]</sup>和黄秀秀<sup>[28]</sup>等使用裂纹扩展理论,通过引入动态应力强度因子,建立了基于冲击断裂的切削力学模型;姚宿芳<sup>[29]</sup>和 Wang<sup>[30]</sup>等分析了直刃刀单周期内切削单个蜂窝芯格的受力情况,基于弹性薄板小扰度理论,建立蜂窝切削过程的扰度及应力模型;Wang 等<sup>[30]</sup>通过研究直刃刀切削角度与切削力之间的联系,构建了基于切削角度的切削力预测模型;Kang 等<sup>[31]</sup>对影响蜂窝芯切削力的加工参数进行分析,通过切削力的实际测量以及符合性试验分析,建立了超声铣削及高速铣削力学模型;航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司面向 Nomex 蜂窝芯复合材料开展超声振动切削工艺技术研究,建立的力学理论模型与试验误差在

13.2% 以内<sup>[18]</sup>。表1总结了芳纶纸蜂窝切削加工的典型切削力模型。

### 1.2.2 切削热模型

来源于刀具与零件之间摩擦产生的切削热是影响蜂窝零件加工质量的关键因素之一,探究切削过程各参数对切削热的影响规律,并基于规律反馈调节加工参数是实现高质稳定切削的关键。在芳纶纸蜂窝芯材料刀具切削热相关研究方面,马付建<sup>[32]</sup>和王际帆<sup>[33]</sup>等通过建立直刃刀切削力热耦合仿真模型,得出刀具直径、刃角越大,切削摩擦力越大,产生的切削热越多的重要结论。张生芳等<sup>[34]</sup>建立了圆盘刀切削力热耦合模型,通过分析发现切削温度随着刀具前角和刀具直径的增大而增大,随着刀具后角的增大而减小,从而获取了刀具结构对切削热的影响规律。袁信满等<sup>[35]</sup>通过对有限元仿真和试验结果的分析,发现切削温度随着切削宽度、切削深度、进给速度、主轴转速的增加而增加,并建立了切削温度随进给速度、主轴转速的一次回归模型,与试验对比,模型预测最大误差在 11.2% 以内。表2<sup>[32-35]</sup>总结了芳纶纸蜂窝切削加工的典型切削热模型,与切削力相比,关于切削热的研究较少,且由于热产生、热传递、热耗散过程的复杂性,目前对切削热的研究都依赖于有限元仿真。

### 1.2.3 损伤模型

在芳纶纸蜂窝芯材料的损伤机理研究方面,国内外学者都对蜂窝芯

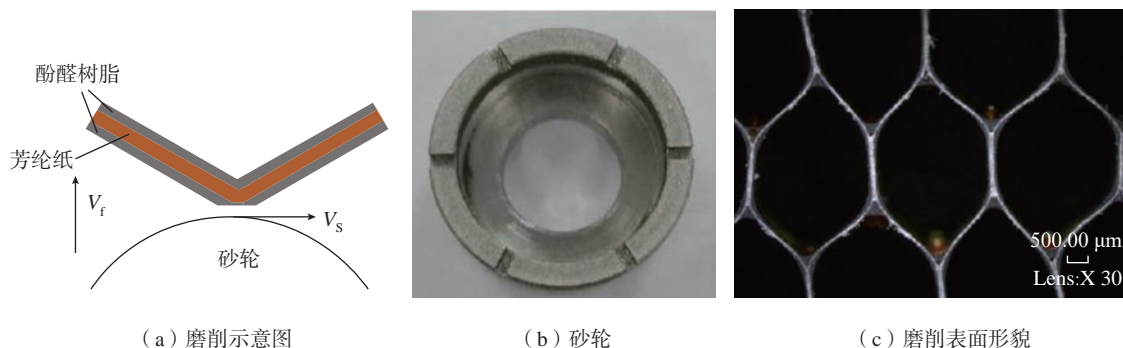


图5 芳纶纸蜂窝芯磨削加工示意图  
Fig.5 Schematic diagram of grinding of aramid honeycomb core

表 1 芳纶纸蜂窝芯切削加工典型切削力模型  
Table 1 Typical cutting force model of aramid honeycomb core cutting

编号	切削力模型	研究人员(单位)	简述
1	$\frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{t/l \left( \frac{h}{l} + 1 \right)}{\left( \frac{h}{l} + \sin\theta \right) \cos\theta} \frac{E_1^*}{E_s} = \left( \frac{t}{l} \right)^3 \frac{\cos\theta}{\left( \frac{h}{l} + \sin\theta \right) \sin^2\theta}$ $\frac{E_2^*}{E_s} = \left( \frac{t}{l} \right)^3 \frac{\frac{h}{l} + \sin\theta}{\cos^3\theta} \nu_{21}^* = \frac{1}{\nu_{12}^*} = \frac{\cos^2\theta}{\left( \frac{h}{l} + \sin\theta \right) \sin\theta}$ $\frac{G_{12}^*}{E_s} = \left( \frac{t}{l} \right)^3 \frac{\frac{h}{l} + \sin\theta}{\left( \frac{h}{l} \right)^2 (1 + 16h/l) \cos\theta} \frac{E_3^*}{E_s} = \frac{t/l \left( \frac{h}{l} + 1 \right)}{\left( \frac{h}{l} + \sin\theta \right) \cos\theta}$ $\frac{G_{12}^*}{E_s} = \left( \frac{t}{l} \right) \frac{\cos\theta}{h/l + \sin\theta} \nu_{31}^* = \nu_{32}^* = \nu_s$	Gibson 等 <sup>[23]</sup> (麻省理工大学)	基于等效参数的 Gibson 力学模型
2	$F(t) = \begin{cases} k_0 [A_x \sin(\omega t) - (A_x - h_0) + v_f t] & t_1 \leq t < t_2 \\ 0 & 0 \leq t < t_1, t_2 \leq t < T \end{cases}$	王毅丹等 <sup>[26]</sup> (大连理工大学)	基于弹性变形的切削力理论模型
3	$F_p = \frac{1}{2} [-4(\pi f) M A \sin(2\pi f t)] \cos\theta \cot\left(\frac{1}{2}\phi\right)$	黄秀秀等 <sup>[28]</sup> (杭州电子科技大学)	基于断裂力学的切削力理论模型
4	$\begin{cases} F_x = \sigma_m \cdot \cos\xi \cos\frac{\phi}{2} \cdot \left[ \frac{\left( L_0 \cos\psi + 2a_p \tan\frac{\sigma}{2} \right)^2 \cdot \cos\frac{\sigma}{2}}{8 \tan\frac{\sigma}{2} \cdot \cos\psi \cdot \cos\left(\psi + \frac{\sigma}{2}\right)} - \frac{L_0^2}{8 \tan\frac{\sigma}{2}} \right] \\ F_y = \sigma_m \cdot \cos\xi \sin\frac{\phi}{2} \cdot \left[ \frac{\left( L_0 \cos\psi + 2a_p \tan\frac{\sigma}{2} \right)^2 \cdot \cos\frac{\sigma}{2}}{8 \tan\frac{\sigma}{2} \cdot \cos\psi \cdot \cos\left(\psi + \frac{\sigma}{2}\right)} - \frac{L_0^2}{8 \tan\frac{\sigma}{2}} \right] \\ F_z = \sigma_m \cdot \sin\xi \cdot \left[ \frac{\left( L_0 \cos\psi + 2a_p \tan\frac{\sigma}{2} \right)^2 \cdot \cos\frac{\sigma}{2}}{8 \tan\frac{\sigma}{2} \cdot \cos\psi \cdot \cos\left(\psi + \frac{\sigma}{2}\right)} - \frac{L_0^2}{8 \tan\frac{\sigma}{2}} \right] \end{cases}$	袁信满 <sup>[18]</sup> (航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司)	基于切削参数的切削力预测理论模型

材料加工表面缺陷、形位误差的产生原因进行分析,通过对蜂窝零件切削损伤形貌进行微观观测,明确材料的变形损伤机制,并使用量化指标对加工表面损伤程度进行评价。Qin 等<sup>[36]</sup>使用降维模型识别蜂窝芯已加工表面的毛刺情况,并通过回归模型进行异常数据剔除,获得了更加精确的毛刺评价模型。张哲<sup>[21]</sup>对超声切削圆盘刀加工的蜂窝芯型面的变

表 2 芳纶纸蜂窝芯切削加工典型切削热模型  
Table 2 Typical cutting heat model of aramid honeycomb core cutting

编号	切削热模型	研究人员(单位)	简述
1	$Q = F_v \nu_r$	马付建等 <sup>[32]</sup> (大连交通大学)	基于刀具-工件摩擦的切削热模型
2	ABAQUS 热力耦合有限元仿真	张生芳等 <sup>[34]</sup> (大连交通大学)	C3D8T 八节点热耦合六面体网格
3	$T = +23.874 - 0.867\nu_r - 0.003n + 0.001n\nu_r$	袁信满等 <sup>[35]</sup> (航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司)	基于有限元仿真数据拟合的切削热预测模型

形缺陷及形位误差的成因及机理进行分析,结合试验结果确定了加工参数对缺陷的影响规律,形成了蜂窝芯形面误差评价模型。Xiang 等<sup>[37]</sup>依据滑移效应理论,建立了复合超声切削过程中切削力与切削损伤的关系。周直昆<sup>[38]</sup>结合超景深显微镜对芳纶纸蜂窝芯已加工表面形貌进行观测,得出了切削力与已加工表面质量成反比的关系。孟倩<sup>[39]</sup>基于形貌观测

结果,总结了不同加工条件下形成的典型缺陷形貌特征,建立了加工表面微观及宏观形貌评价模型。Jaafar 等<sup>[40]</sup>采用 3D 干涉仪采集芳纶纸蜂窝加工表面形貌,形成了芯格的三维数字化图像,并建立了一种三维的已加工表面损伤量化模型,有利于指导切削参数优选。表 3 总结了芳纶纸蜂窝切削加工的典型损伤模型。

加工理论模型的建立,对指导加

工机理的深入研究具有重要意义,并且为工艺研究和工艺参数优化等工作奠定基础。

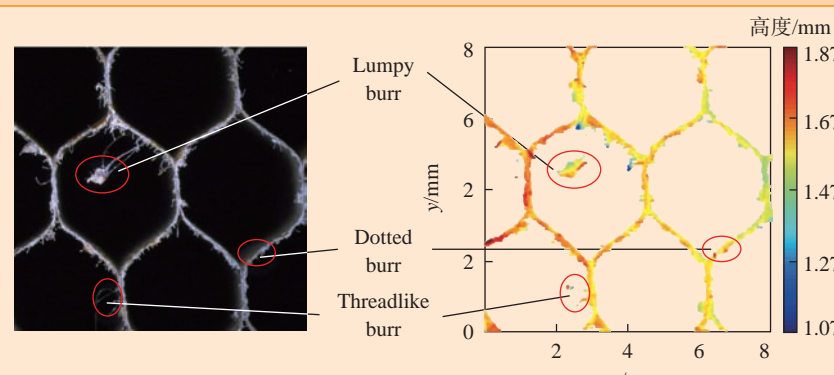
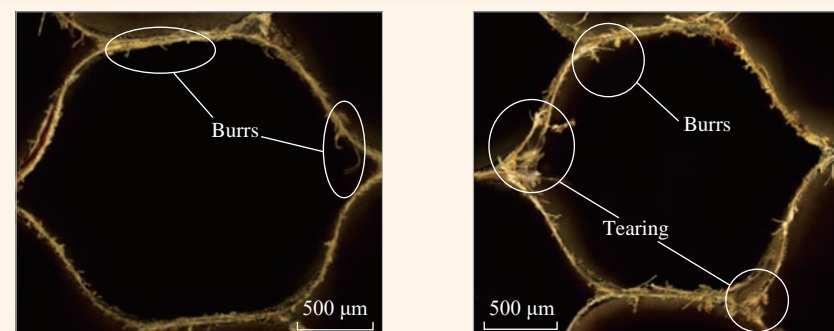
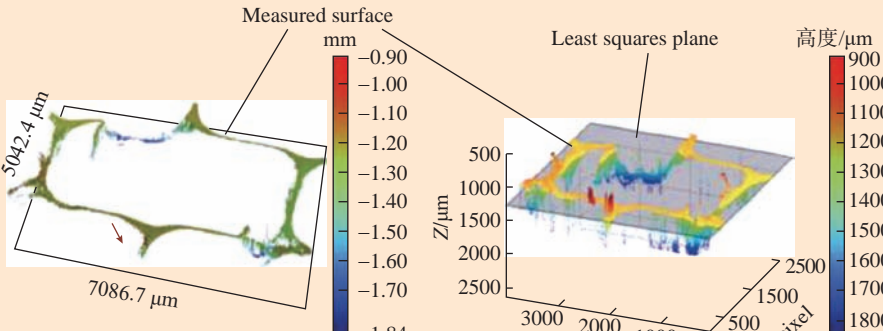
### 1.3 有限元仿真

有限元仿真是切削仿真理论分析的一种有效手段。目前,国内外学者多借用该方法对芳纶纸蜂窝芯的切削过程进行模拟,以获取材料受力变形状态、切削力与切削温度分布等信息。

Jaafar<sup>[41]</sup>等基于 Hashin 失效准

表 3 芳纶纸蜂窝切削加工典型损伤模型

Table 3 Typical damage model of aramid honeycomb core cutting

编号	损伤模型	研究人员(单位)	简述
1	 <p>(a) 已加工表面形貌</p> <p>(b) 有限元仿真结果</p>	Qin 等 <sup>[36]</sup> (大连理工大学)	使用降维模型识别蜂窝芯已加工表面的毛刺情况
2	 <p>(a) 圆盘刀纵振超声加工</p> <p>(b) 圆盘刀纵扭复合超声加工</p>	Xiang 等 <sup>[37]</sup> (河南理工大学)	建立了切削力与切削损伤之间的关系模型
3	 <p>(a) 已加工表面三维形貌</p> <p>(b) 已加工表面平面度误差分析结果</p>	Jaafar 等 <sup>[40]</sup> (University of Lorraine)	建立了三维已加工表面损伤量化模型

则,建立了 Nomex 蜂窝切削过程的 3D 有限元仿真模型,通过该模型对蜂窝芯结构与切削刀具的相互作用进行了分析。其次采用不同的原则建立了 3 种有限元仿真模型:基于各项同性原则特征化蜂窝芯壁、基于 Hashin 失效准则以及基于 Tsai-Wu 准则特征化蜂窝芯的各向异性,其中基于 Tsai-Wu 准则的建模被证明可更好地预测蜂窝芯材料的切削过程<sup>[42]</sup>。李杰<sup>[43]</sup>以高速铣削技术为基础建立芳纶纸蜂窝材料以及组合铣刀三维有限元切削仿真模型,进一步建立了动态的多齿铣刀切削力模型,分析了连续加工过程中随时间变化的切削力变化规律,并通过试验验证了其准确性。Zarrouk 等<sup>[44-45]</sup>依据 Hooke 准则建立 Nomex 蜂窝高速铣削有限元仿真模型,并通过试验验证了仿真结果的准确性,如图 6 所示,分析了刀具进给速度与转速等参数对切削力、切屑形貌的影响。

Jiang 等<sup>[46]</sup>同样使用 Hashin 失效准则建立芳纶纸蜂窝高速铣削有限元仿真模型,通过仿真确定了进刀角度和撕裂缺陷的强相关性,并通过试验进行了佐证。Li 等<sup>[47]</sup>基于剪切失效准则建立剪切破坏模型模拟直刃刀切削蜂窝芯材料,如图 7 所示,与试验获取的实际切削力相比,有限元仿真模拟值误差在 5.42% 以内。Yang 等<sup>[48]</sup>采用 Hashin 失效准则建立蜂窝切削模型,用于预测加工过程损伤,揭示加工过程材料破坏机制。

通过开展有限元仿真,从微观层面对芳纶纸蜂窝芯加工时的材料去除机理和损伤行为进行了深入研究,取得了诸多重要的结论,这是对试验研究的重要补充,对开展工艺研究具有重要意义。

## 2 蜂窝芯结构件加工固持方法

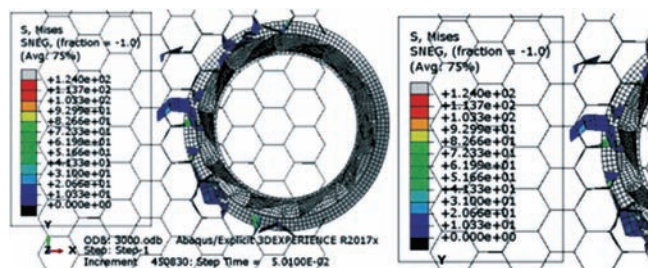
可靠的固持方案是实现蜂窝芯结构件高质高效的前提,以下从胶粘、真空吸附、磁粉固持等方面着手,

分析国内外的蜂窝芯加工固持方案。

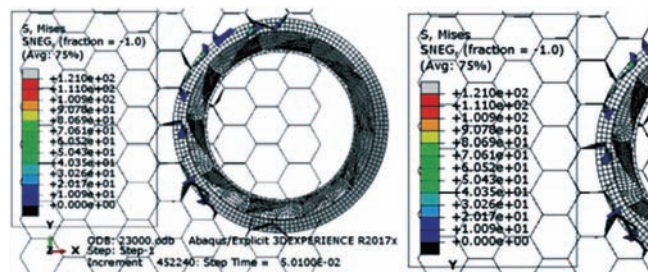
### 2.1 胶粘固持法

双面粘结带固定法<sup>[49]</sup>是航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司等飞机制造公司使用最为广泛的方法,其原理是通过维可牢尼龙搭扣的细小绒毛状丝质钩子粘在工作平台上,再将带有尼龙毛圈的搭扣条对应粘在其上,最后将蜂窝芯材料放置在双面粘结带上,并施加压力使蜂窝

芯材料与双面粘结带紧密贴合,达到对蜂窝芯材料的固持。张胜文<sup>[50]</sup>采用专用工装+双面胶带全区域粘接固持的方式实现了蜂窝芯复合材料的有效固持。王鹏程等<sup>[51]</sup>为减少蜂窝零件专用工装的使用,基于最小胶带粘接面积,提出了基于凸台搭接的蜂窝零件固持方案,如图 8 所示,可减少零件加工胶带粘接面积,节约制造成本。



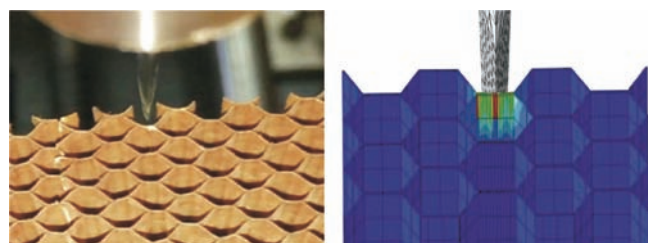
(a) 切削参数为  $F=2000 \text{ mm/min}$ ,  $N=3000 \text{ r/min}$



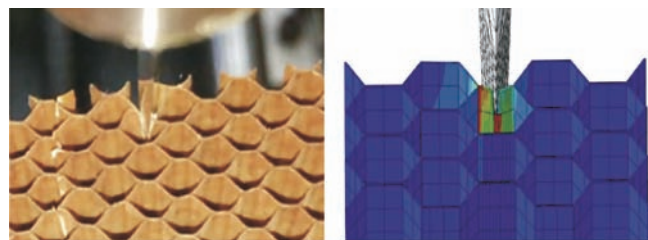
(b) 切削参数为  $F=3000 \text{ mm/min}$ ,  $N=23000 \text{ r/min}$

图 6 芳纶纸蜂窝芯高速铣削切屑堆积仿真结果

Fig.6 Accumulation of material at the front of tool when cutting aramid honeycomb core



(a) 刀具刃口与蜂窝壁接触时



(b) 蜂窝壁材料发生断裂时

图 7 蜂窝材料变形过程的实际切削试验和切削仿真试验<sup>[47]</sup>

Fig.7 Honeycomb material deformation process in actual cutting experiment and cutting simulation experiment<sup>[47]</sup>

## 2.2 真空吸附法

真空平台吸附是纸蜂窝芯固持的新兴方法,张菊霞等<sup>[52]</sup>认为隔膜真空吸附法等是实现蜂窝零件稳定固持、保证加工质量的可靠方法。余敏娟等<sup>[53]</sup>在该方法原理的基础上,通过将纸蜂窝用隔膜粘贴在切削面的对称平面上,并采用真空夹具加以吸附,进一步提高了蜂窝的固持可靠性。骆金威等<sup>[54]</sup>通过建立机床功率、真空压力、切削参数以及刀具参数与最小薄膜面积之间的解析表达式,获取了可实现加工稳定固持的最小真空吸附薄膜面积。袁信满<sup>[18]</sup>在单



图8 一种蜂窝芯的凸台搭接固持方法<sup>[51]</sup>  
Fig.8 A method for holding honeycomb core parts with false boss<sup>[51]</sup>

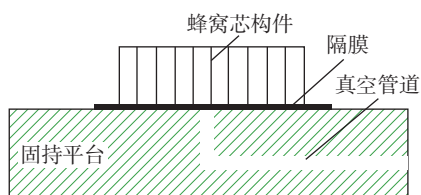


图9 真空吸附固持方案<sup>[18]</sup>  
Fig.9 Solutions for vacuum adsorption and holding<sup>[18]</sup>

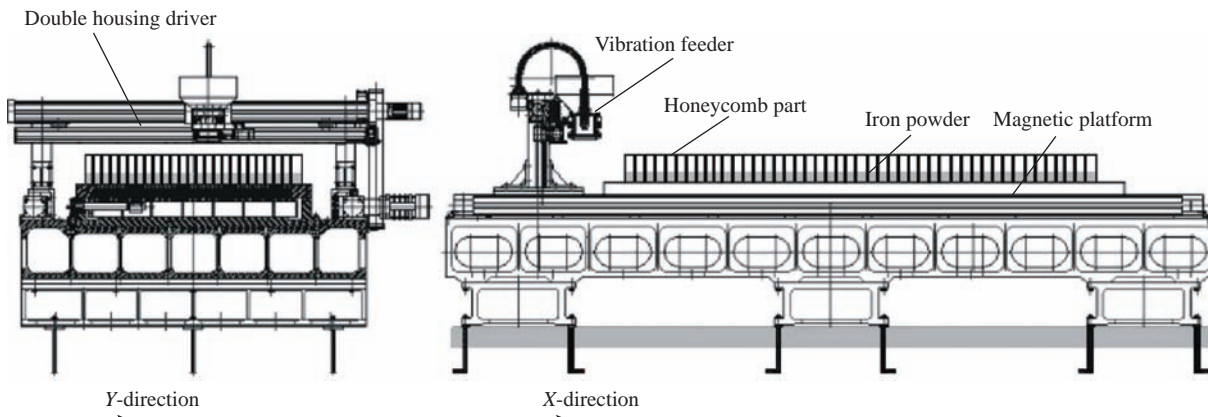


图10 磁粉固持工装示意图<sup>[56]</sup>  
Fig.10 Attractive fixture system based on magnetic field<sup>[56]</sup>

面胶纸全区域吸附方法的基础上,通过研究真空吸附固持原理,提出了局部薄膜固持、辅助套筒等新型固持方法,极大提高了加工过程的固持稳定性,如图9所示。

## 2.3 磁粉固持法

磁粉固持是纸蜂窝加工固持的一种较为新颖的固持方法,金成柱<sup>[49]</sup>基于磁场与摩擦学原理,提出蜂窝材料的磁粉固持方法,但该方法需要专用的外置设备,其通用性较差。薛辉<sup>[55]</sup>在该方法的基础上,提出了模块化的磁力固持工装理论,为蜂窝材料加工工装模块化提供了设计依据。柯映林等<sup>[56-58]</sup>设计并制造了模块固持工装,如图10所示,并通过切削试验验证了模块化工装的可靠性。Liu等<sup>[59]</sup>在磁粉固持工装的基础上,研究了电流强度、铁粉高度、气隙等相关参数与铁粉与蜂窝芯壁、蜂窝与夹持平面之间的摩擦力关系,并建立了定量分析模型,进一步实现了模块化磁粉固持工装相关参数的优化。

## 2.4 填充固持法

通过添加填充物实现蜂窝零件由“线”固定变成“面”固定的方式可有效提高蜂窝芯固持可靠性<sup>[55]</sup>,如图11所示。目前较为常用的填充物有聚乙二醇<sup>[52,56]</sup>、石蜡<sup>[53]</sup>等,其原理为固持中通过对填充物加热,使其融化充满蜂窝芯格,然后冷却使填充物凝固,从而实现蜂窝零件的稳定固

持。但该方式需要外加加热设备,成本较高,同时加工结束后,残余的填充物清理较为困难。为解决填充物需加热及清理问题,韩变枝等<sup>[60]</sup>通过研究冰结夹具,解决了蜂窝芯加工需专用的加热设备及填充物清理问题。但同时冰结加工工艺引入了加工过程冰易融化、加工后烘干等技术难题。因此,通过添加填充物实现蜂窝零件稳定固持的工艺还需进一步探索。

## 2.5 复合固持法

为实现蜂窝芯稳定固持,基于真空吸附、胶粘、添加填充物、磁粉固持等原理,刘元吉等<sup>[61]</sup>基于TRIZ理论,应用矛盾矩阵及创新原理,提出了一种以真空吸附为主,辅以磁力与胶粘的新型固持工装,解决了传统真空吸附及全尺寸胶粘的成本高、固持效率低的问题。同时为匹配零件加工需求,国内外学者针对性地提出了真空吸附+胶粘<sup>[18]</sup>(图12)、磁粉固持+胶粘<sup>[61]</sup>等组合固持方式,能有效解决蜂窝零件加工时被拉起的问题,提高航空蜂窝零件的加工质量及效率。

综上所述,各类固持方法各有优势,也有一些不足,在实际芳纶纸蜂窝结构件加工过程中,需要综合考虑加工需求和生产条件,合理选择适宜的固持方式,以保障零件高质高效低成本加工。

### 3 芳纶纸蜂窝芯加工刀具

随着航空航天领域对蜂窝零件的需求越来越大,待加工特征也愈加复杂,目前常用的加工方式主要为高速数控加工和超声波数控加工,为了提高加工效率,保证加工精度,刀具的设计及选用最为重要。选用不合理的刀具将造成蜂窝材料在加工过程中压伤、拉起等缺陷,因此加工蜂窝材料不能采用常规的刀具,需要采用适用于蜂窝结构和力学性能的特殊刀具。

#### 3.1 高速加工刀具

芳纶纸蜂窝芯材料高速加工与金属加工截然不同,芳纶纸蜂窝芯材料损伤一旦产生,往往无法通过抛磨等精加工方法修正,已损伤部位的加工难度激增。常用的蜂窝高速数控铣削刀具主要有两种类型<sup>[18]</sup>:(1)带有打碎部分的组合刀,该类型刀由刀杆、刀盘、刀片3部分组成,主要用于零件的型面铣削;(2)整体硬质合金刀具,该类刀具主要适配性设计不同结构和涂层,实现芳纶纸蜂窝芯零件高速铣削。

国外为了实现芳纶纸蜂窝芯结构高效加工,推出了几种常用刀具,如图13所示<sup>[62]</sup>。如HSS Hollow Core Cutters刀具,通过将晶格垂直于蜂窝芯晶格切削刃切断,实现蜂窝芯深槽加工及大余量去除。ONSRUD公司设计出一种整体硬质合金滚花铣刀,该种刀具特征为每个齿具有多个锋利的小切削刃,可以有效减小边缘撕裂、毛刺等缺陷。另外加工飞机壁板的槽铣刀为组合型刀具,刀具带

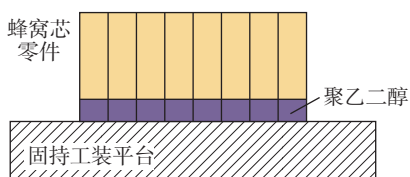


图 11 聚乙二醇填充固持示意图

Fig.11 Schematic diagram of polyethylene glycol filling and holding

PCD 切割刃,可嵌入金刚石或高速钢材料<sup>[62]</sup>。

经过多年的发展,目前国内蜂窝芯高速铣削加工刀具已经形成了种类繁多规格。常见的蜂窝专用刀具类型包括鱼鳞铣刀、无齿圆盘刀、有齿圆盘刀及组合铣刀等<sup>[63]</sup>,如图14所示。其中圆盘刀是目前蜂窝高速加工中应用最为广泛的刀具形式<sup>[64]</sup>,其主要由圆盘刀和略小于刀盘的打碎刃刀体组成,刀体上密布有锋利的打碎刃用于材料的去除和断屑。张海超<sup>[65]</sup>和徐龙<sup>[66]</sup>等对圆盘刀进行了加工验证,并面向工程化应用进行了优化与分析。然而,组合刀具的打碎刃在粉碎去除蜂窝材料时产生大量灰尘,严重影响了高速加工技术的应用发展,而且组合式铣刀只能加工纸蜂窝凸形曲面,对于凹形曲面铣削加工一般使用带有涂层的整体硬质合金铣刀等,根据齿形的不同,分为鱼鳞铣刀、菠萝铣刀、人字形铣刀、菱齿铣刀等<sup>[67]</sup>。张波等<sup>[68]</sup>针对回转蜂窝零件,设计了专用的蜂窝车削刀具。

#### 3.2 超声切割刀具

常用的超声切割刀具具有匕首刀

与圆片刀,其中匕首刀主要用于粗加工,加工效率高,而圆片刀主要用于精加工工序。从20世纪90年代开始,国外公司如奥地利GFM、德国GEISS、法国CRENO等都先后开发了专用系列化超声切割刀具,并且已经在波音、空客等知名航空制造公司得到广泛应用。国内学者沈莹<sup>[69]</sup>和Zhang<sup>[70]</sup>等通过谐响应分析和模态分析,给出了超声切削匕首刀结构;方亮<sup>[71]</sup>研制出一种超声铣削圆盘刀;王根<sup>[72]</sup>进一步优化了圆盘刀刃齿元设计;黄帅<sup>[73]</sup>和何畏<sup>[74]</sup>等改进了一种带波纹刃的圆盘刀;吴鑫<sup>[75]</sup>研制出了新型直刃匕首刀;孙丁一<sup>[76]</sup>针对蜂窝零件轮廓边界加工特征不易控制问题,设计出了满足超声振动声学特性的插切刀具,常见的超声切割刀具如图15所示。

国内部分先进航空企业在蜂窝超声加工刀具领域也进行了深入研究并实现了蜂窝超声加工工程化应用。张海超等<sup>[65]</sup>基于超声加工特点,介绍了多种国内常用的先进超声波刀具及其工况使用条件,并在工程化应用中进一步优化了结构。根据零

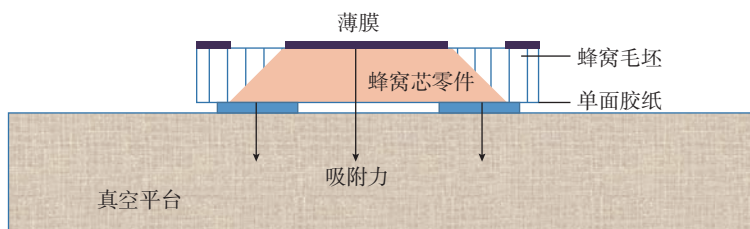
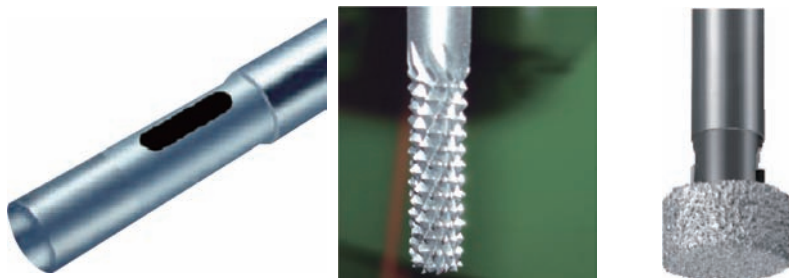


图 12 真空吸附-胶粘复合固持方法

Fig.12 Vacuum adsorption-adhesive composite holding method



(a) 粗加工蜂窝芯边缘铣刀 (b) 整体硬质合金滚花铣刀 (c) 蜂窝夹层开槽铣刀

图 13 芳纶纸蜂窝芯高速加工整体刀具<sup>[62]</sup>

Fig.13 Integral tools for high-speed machining of aramid honeycomb core<sup>[62]</sup>

件圆弧轮廓特征提出了专用新型圆弧插铣刀<sup>[77-78]</sup>。为了适应国内飞机纸蜂窝制件特殊规格尺寸特征,给出了新型的两段式匕首刀具结构,实现规格 50 mm 一次机加成形。为了提高切削能力,减少切削发热量,在原有的圆盘刀的基础上提出了带有一定角度的锯齿形刀片,将加工速度提高到了 7000 mm/min<sup>[79]</sup>,如图 16 所示。

芳纶纸蜂窝结构件加工刀具是保障零件加工质量和实现高效加工的重要工具,同时也属于高价值产品。基于深入广泛的研究,目前已经形成了系列化的芳纶纸蜂窝结构件加工刀具,有力保障了零件生产,也带动了相关产业发展。

#### 4 芳纶纸蜂窝芯结构件加工装备

研制满足蜂窝材料加工需求的装备是实现蜂窝材料铣削工业化应用的基础,蜂窝材料在轴向上的中空棱柱型结构具有各向异性的特点,在垂直于轴向方向上的承受力极弱,属于一种典型的难加工材料,目前常用

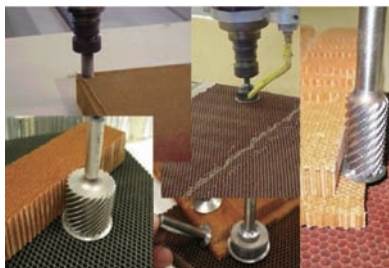


图 14 芳纶纸蜂窝芯高速加工组合刀具  
Fig.14 Combination tools for high-speed machining of aramid honeycomb core



图 15 蜂窝芯超声加工刀具  
Fig.15 Machining tools for ultrasonic cutting of aramid honeycomb core

的关键单元与装备主要包括高速机床、超声机床、超声刀柄和机器人。

##### 4.1 高速机床

高速铣削加工技术是目前广泛应用于蜂窝复合材料加工的方法,专用的蜂窝芯高速铣削机床也成为国内外众多学者分析研究的领域。

用于加工芳纶纸蜂窝芯的设备最早是由传统的高速铣削加工中心改造而来,加工方法也沿用的金属切削方法,即通过刀具的高速旋转去除材料,这也是目前国内应用最为广泛的蜂窝复合材料的加工方式<sup>[65]</sup>。芳纶纸蜂窝芯的高速铣削需要较高的主轴转速,德国 DMG 公司生产的高速数控机床,其主轴转速可达 42000 r/min,采用铣刀可以轻松将芳纶纸蜂窝芯打成碎片。意大利 CMS 公司和法国 CRENO 公司共同开发了蜂窝芯高速铣削机床。国内的日发机与浙江大学合作研制了配备磁力固持系统的蜂窝芯高速铣削加工中心<sup>[80]</sup>。航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司在原有的高速加工机床的基础上进行了改造,如图 17 所示,将现有的主轴系统、冷却系统等进行了适合蜂窝材料加工的专用装备改造,提高了加工效率,满足了复杂型面类零件的加工要求,并且设置有刀具验证块,可以实现二次防错功能。由于高速铣削过程中,蜂窝材料完全被撕碎呈碎片或粉末,会在加工区域产生大量粉尘,工件表面也会留下大量碎片和毛刺,故这种加工方式需要在密闭的车间进行加工,同时在刀具附近



图 16 航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司超声加工刀具  
Fig.16 Ultrasonic cutting tools of AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd.

增加吸尘除尘设备<sup>[81]</sup>,因此难以适应航空航天工业中对蜂窝复合材料加工的要求。

##### 4.2 超声刀柄

超声刀柄是超声切削系统中的关键部件,用于放大换能器产生的微小机械振动并传递至切削刀具,进而影响蜂窝芯结构的切削过程和切削质量。为实现蜂窝芯超声高效高质加工,国内外专家学者围绕超声刀柄核心技术超声变幅杆开展了相关研究与探索<sup>[82-83]</sup>,超声变幅杆连接超声换能器与超声刀具,作用是调整谐振频率和实现振幅放大。Ma 等<sup>[84]</sup>基于有限元设计圆柱-圆锥复合轮廓形状的超声变幅杆,并指出其轮廓形状影响变幅杆的谐振频率等振动性能。此外, Ma 等<sup>[85]</sup>还设计了一种温度稳定的全共振分离式旋转超磁致伸缩超声刀柄,如图 18 所示。Zhang<sup>[86]</sup>和张云电<sup>[87]</sup>等在忽略刀具影响的前提下,采用四端网络法设计了圆锥过渡阶梯轮廓幅杆。Ding 等<sup>[88]</sup>设计了单一贝塞尔曲线轮廓变幅杆;吴鑫等<sup>[89]</sup>设计了阶梯-悬链形变幅杆,并指出随着变幅杆的增加,变幅杆的谐振效率降低,放大系数增加,提出



(a) 高速铣削机床吸尘装置



(b) 高速铣削粉尘

图 17 高速铣削加工除尘装置  
Fig.17 Dust removal device for high-speed milling

了刀具-变幅杆一体化设计方法,采用非支配排序遗传算法优化设计了圆柱-贝塞尔复合轮廓形状的大振幅变幅杆。

现有研究分析了不同外形轮廓的变幅杆对超声振动性能的影响规律,但由于超声切削刀具本身的特性,当其与变幅杆相连成为整体进行谐振时,其整体振动特性难以满足加工需求,目前超声刀柄的设计缺少兼顾不同超声变幅杆之间的超声振幅输出和工作谐振频率一致性要求的变幅杆设计,难以同时满足匕首刀、圆盘刀对于振动输出性能的要求。

### 4.3 超声机床

近年来,随着超声加工理论的日趋成熟和相关技术的不断完善与提高,融合超声技术与数控技术的超声波切削数控加工工艺开始运用于蜂窝夹芯结构的加工,如图 19 所示。目前成熟的超声加工机床有德国 DMG 公司的 Ultrasonic-50、瑞士 Erosonic AG 公司的 Erosonic US400/US800 MS、超声波技术集团的 OptiPro Systems CRENO,以及日本 NDK 公司开发的 UM-1500SA 机床等。国内超声机床的研究起步较晚,

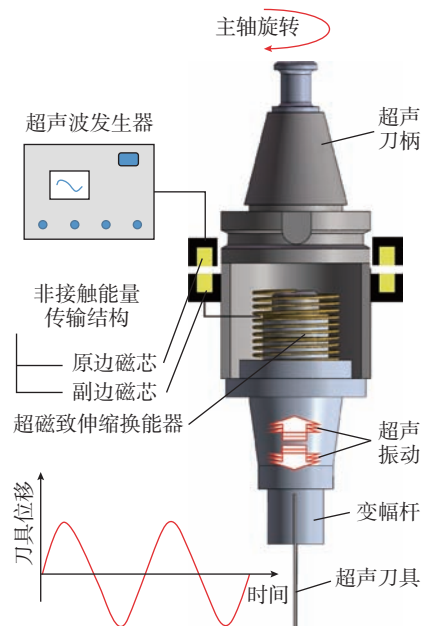


图 18 旋转超声加工刀柄<sup>[85]</sup>

Fig.18 Rotary ultrasonic machining system<sup>[85]</sup>

1970 年才有一些翻译性质的专著,2010 年以来超声机床的研究开始广泛受到关注。韩坤<sup>[90]</sup>基于 BP 神经网络给出了超声振动系统谐振频率算法,与秦川机床工具集团股份有限公司合作开发了蜂窝材料超声切削机床<sup>[91]</sup>。韩丽轩<sup>[92]</sup>通过变步长复合频率跟踪方法,提高了机床跟踪速度与精度,并联合成飞等单位,将现有高速数控机床改进成了超声切削机床。国内的皮钧<sup>[93]</sup>、周辉林<sup>[94]</sup>、Li<sup>[95]</sup>、刘礼平<sup>[96]</sup>、顾磊<sup>[97]</sup>、黄志祥<sup>[98]</sup>、黄秀秀<sup>[99]</sup>、卢斌<sup>[100]</sup>、肖德贤<sup>[101]</sup>等均研发了样机,并正在逐步走向商业化应用。现有文献显示,超声切削机床在航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司、昌飞、西飞、哈飞等国内航空主机厂均有应用,成飞的现场加工数据显示,相比普通数控机床,超声切削机床加工产品的合格率提升了 12%,加工效率提升了 32%,粉尘污染程度得到了明显改善<sup>[102-103]</sup>。

### 4.4 机器人

工业机器人作为蜂窝芯结构件加工的另一主体部分,相对于普通机床来说智能化水平更高,将超声系统安装到机器人末端执行部分,基于 Ethernet 工业以太网可实现毫秒级通讯,对于控制蜂窝超声系统来说具有无可比拟的优越性。Ahmad 等<sup>[104]</sup>研制了具有标准刀柄接口的超声切削刀柄,并开发了基于工业机器人的蜂窝材料超声切削装备,如图 20 所示。

总体而言,芳纶纸蜂窝结构件加



图 19 蜂窝芯加工超声机床<sup>[85]</sup>

Fig.19 Ultrasonic machine tool for machining honeycomb core<sup>[85]</sup>

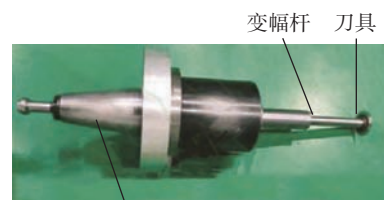
工的装备可以分为高速机床和超声加工设备。对于高速机床而言,为了实现高质高效加工,需要具备高转速(40000~50000 r/min)。超声加工设备则更为复杂,需要稳定可靠的超声波发生器,并通过换能器和变幅杆实现刀具的高频谐振,且振幅要足够大,以满足芳纶纤维复合材料的断裂去除。此外,无论是高速机床还是超声加工设备,都需具备专业吸尘系统,以保护工人健康和防止环境污染。

## 5 芳纶纸蜂窝芯结构件加工工艺

芳纶纸蜂窝芯复合材料具有独特的多孔薄壁蜂窝结构,力学特性呈弱刚性,其切削加工工艺与金属材料、碳纤维及玻璃钢等复合材料有着很大的差异。

### 5.1 加工工艺类型

芳纶纸蜂窝芯结构件目前常用的加工工艺包括高速铣削加工、超声波数控加工、电火花成型加工、高压水切割加工以及激光切割,其中研究最多也最为成熟的加工方法为高速铣削加工和超声振动切削。



BT 刀柄与换能器

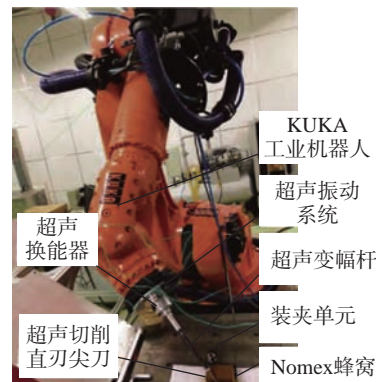


图 20 蜂窝芯机器人超声加工装备<sup>[104]</sup>

Fig.20 UVA robotic-arm processing system for honeycomb core<sup>[104]</sup>

### 5.1.1 高速铣削加工

高速铣削加工是芳纶纸蜂窝芯复合材料加工中最为成熟、应用最为广泛的加工技术,如图 21 所示,国内外学者对其进行了大量研究。Aktay 等<sup>[105]</sup>建立了 Nomex 蜂窝芯复合材料加工破碎中的微观力学模型,为蜂窝芯复合材料铣削加工提供了理论指导。金成柱<sup>[49]</sup>针对蜂窝材料高速铣削加工工艺进行了研究,总结了 Nomex 蜂窝高速铣削加工工艺流程。Kennedy<sup>[106]</sup>提出了系统的高速铣削加工工艺方案。李焱<sup>[107]</sup>和张菊霞等<sup>[52]</sup>也对高速铣削加工纸蜂窝芯的加工参数以及刀具选择进行了研究。但研究发现高速铣削在加工质量、加工效率以及粉尘污染方面存在不足<sup>[43]</sup>。对此,柯映林等<sup>[57]</sup>对铣削参数进行了优化,保证了蜂窝加工效率和加工质量。张胜文<sup>[50]</sup>提出了一种组合式铣刀加工纸蜂窝芯复合材料的方法,高速铣削加工质量得以有效提升。

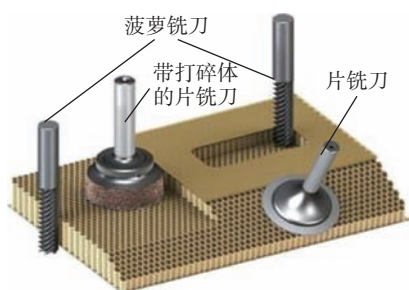


图 21 芳纶纸蜂窝芯高速铣削加工  
Fig.21 High-speed milling of aramid honeycomb core



图 22 高速铣削加工缺陷  
Fig.22 Defects in high-speed milling

上述针对芳纶纸蜂窝芯材料高速铣削加工技术的基础研究为蜂窝材料的加工及应用提供了有力的技术支撑,但高速铣削加工中高速旋转的铣刀将纸蜂窝中承力的糟粕结构打碎,将其纤维结构撕扯、拉断,难以保证加工质量,如图 22 所示,因此制约了芳纶纸蜂窝材料在更大范围、更高精度结构上的使用。

### 5.1.2 超声振动切削

针对芳纶纸蜂窝芯结构件数控高速铣削加工时孔格撕裂、变形、塌陷等缺陷频发,表面毛刺严重等问题,20 世纪 80 年代开始,国外开始对超声切削技术与装备进行研究。1980 年,奥地利 GFM 公司首次将超声技术引入了机械加工领域<sup>[108]</sup>。德国 GEISS 公司<sup>[109]</sup>和法国公司 CRENO<sup>[110]</sup>也先后将超声加工技术应用于航空领域芳纶纸蜂窝芯复合材料加工中。国内对于芳纶纸蜂窝芯超声切削的研究起步较晚,但成飞公司在芳纶纸蜂窝芯超声振动切削方面开展了大量研究,如图 23 所示。张海超<sup>[65]</sup>和高涛<sup>[102]</sup>等对比研究了芳纶纸蜂窝芯复合材料零件超声振动切削与传统高速铣削数控加工的优缺点,指出了超声振动切削加工的优势。吴胜游<sup>[111]</sup>对芳纶纸蜂窝芯复合材料精加工圆盘刀具加工工艺进行了分析,证明了超声切削加工在减小切削力、提高零件加工质量上的优势。

与高速铣削加工相比,超声加工具有降低切削热、提高刀具寿命、抑

制颤振、减少毛刺和提高加工质量等众多优势,是一种发展前景良好的加工芳纶纸蜂窝芯材料的技术。

## 5.2 工艺参数影响规律

进给速度、切削深度、切削宽度等工艺参数的选择是芳纶纸蜂窝芯加工工艺的核心内容。针对芳纶纸蜂窝加工参数影响规律的研究,主要思路是通过建立切削力模型,分析各工艺参数对切削力大小的影响趋势。黄秀秀等<sup>[28,112]</sup>建立了直刃刀切削力与工艺参数及刀具参数的关系理论模型。牛景露等<sup>[113]</sup>采用圆片刀开展了蜂窝材料无转速超声切削试验,试验结果表明,切削力随切削深度增加而递增,随振幅增加而递减。袁信满等<sup>[114]</sup>基于超声复合铣削蜂窝材料三向切削力预测模型,研究了切削宽度、走刀速度、切削深度对切削力的影响规律,发现切削力随走刀速度、铣削深度和铣削宽度的增加而增大,如图 24 所示。与之类似,Kang 等<sup>[31]</sup>将蜂窝材料简化为理想弹塑性材料,建立了切削力预测模型,试验结果表明,超声振幅和前倾角对切削力的影响最大,切削深度次之,进给速度的影响最小。

在工艺参数影响规律的理论基础上,为改善零件加工质量,提高加工效率,许多学者对切削参数优化展开了深入研究。Hu 等<sup>[115]</sup>采用控制变量法进行了超声辅助蜂窝复合材料刀片切割试验,为优化超声辅助加工过程中工艺参数提供了理论

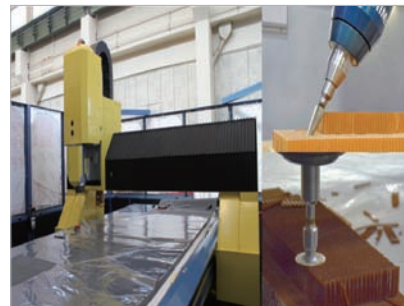


图 23 芳纶纸蜂窝芯超声振动切削  
Fig.23 Ultrasonic vibration cutting of aramid honeycomb

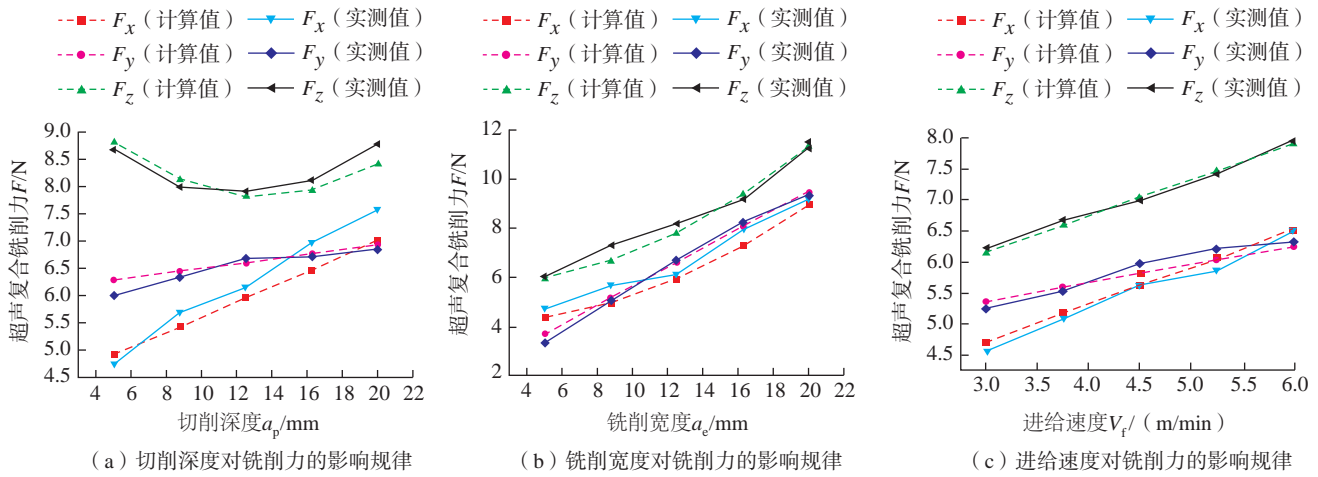


图 24 工艺参数对铣削力的影响规律<sup>[144]</sup>

Fig.24 Influence of machining parameters on milling force<sup>[144]</sup>

基础。黄秀秀<sup>[112]</sup>以切削力和材料去除率为目标函数,结合遗传算法对直刃刀切削参数进行了优化。袁信满<sup>[18]</sup>建立了参数优化模型,并结合非线性规划多目标寻优遗传算法对圆盘刀切削参数进行了优化设计。航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司对加工后的关键缺陷进行了量化,并以切削参数为优化变量,采用多目标遗传算法对加工参数进行了优化,形成了切削参数。试验结果表明采用优化后的工艺参数进行加工,零件加工质量得以有效提升,故障率明显下降。

现有研究揭示了芳纶纸蜂窝芯复合材料超声加工过程中各工艺参数对蜂窝芯材料切削力、表面质量、加工效率的影响规律,并以此为理论基础开展了切削参数优化设计,为芳纶纸蜂窝芯结构件加工工艺提供了理论参考。

### 5.3 工艺路径规划

加工工艺路径是影响芳纶纸蜂窝芯加工质量、切削效率及加工精度的重要因素,合理的走刀轨迹及切削姿态是保障零件切削完整、质量良好的前提。

袁信满<sup>[18]</sup>通过两个旋转角度定义了超声加工圆盘刀的切削姿态,并针对超声切割匕首刀和圆盘刀分别

规划了加工轨迹,如图 25 所示。

韩坤<sup>[90]</sup>对圆弧插切加工路径进行了规划,提出了基于蚁群算法的轨迹优化方法,优化后的加工轨迹有效降低了刀具移动距离。Cui 等<sup>[116]</sup>针对直刃刀提出了一种 V 字形切削轨迹规划方法,并以加工效率为目标对

轨迹参数进行了优化,试验表明加工后蜂窝材料的实际轮廓与理论轮廓吻合较好。Liu<sup>[117]</sup>和张永岩<sup>[118]</sup>等对刀具姿态控制策略进行了研究,提出了生成刀具位置数据的计算方法,并基于商用软件开发了蜂窝材料超声切削路径自动生成系统,如图 26 所

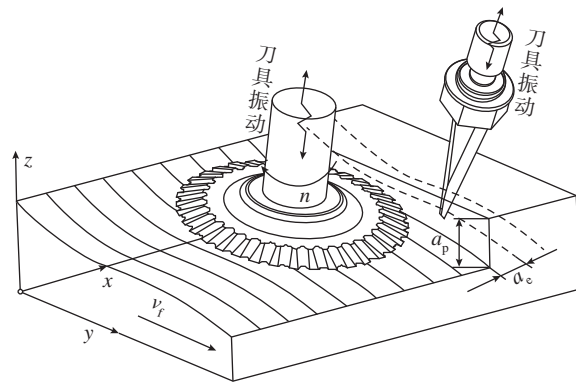


图 25 切削姿态控制及轨迹规划示意图<sup>[18]</sup>

Fig.25 Schematic diagram of cutting attitude control and trajectory planning<sup>[18]</sup>

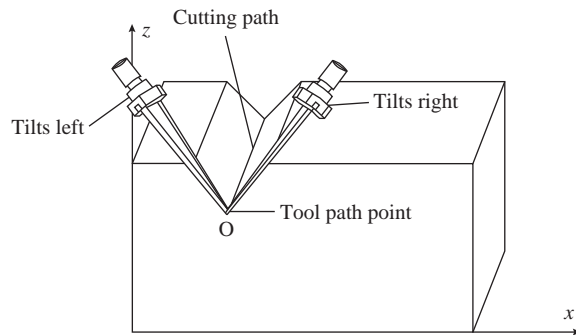


图 26 V 字形切削轨迹<sup>[118]</sup>

Fig.26 V-shaped cutting path<sup>[118]</sup>

示。航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司分析了超声切割异形薄片刀具路径规划难点,在走刀过程中对刀具刃口方向及旋转方向进行控制,并在编程软件中加载了对应控制指令,有效避免了因刀具在零件内部发生轨迹和姿态突变造成的零件过切或报废。

总体来看,在芳纶纸蜂窝加工加工工艺路径规划方面,现有研究对超声加工中的刀具姿态及加工轨迹进行了详尽的研究,已形成了适配芳纶纸蜂窝超声切削的合理有效的加工路径及工艺编程方法。

#### 5.4 零件加工检测技术

芳纶纸蜂窝芯结构件加工质量主要通过表征加工表面形貌和检测型面加工精度来评价。在蜂窝材料超声切削形貌研究方面,张迅等<sup>[119]</sup>研究了蜂窝材料超声切削微观形貌,将典型形貌归纳为树脂脱落、树脂裂纹、纤维拔出和蜂窝壁压溃等,如图 27 所示,并提出了通过树脂剥落面积评价蜂窝材料加工质量的方法。在型面加工精度检测方面,如图 28 所示,航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司提出了一种面向蜂窝芯构件复杂型面轮廓的检测单元及方法,设计了自适应专用探针,配套测量专用软件可对蜂窝芯复杂型面进行自动化精确测量。

#### 5.5 典型零件加工

##### 5.5.1 超薄复杂型面零件加工

在航空领域部分芳纶纸蜂窝结构件中,存在超薄边缘型面等特殊结构,其厚度仅 0.3~0.5 mm。加工过程中圆盘刀前角面与被加工材料一直处于连续接触摩擦状态,致使切削发热量较大,刀具易抱死,传统的单摆角加工方式无法完成该结构特征的加工。航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司通过分析边缘型面超薄结构特征,采用匕首刀变倾角的方式精确加工零件轮廓和粗切零件型面,然后采用圆盘刀变摆角渐进式去

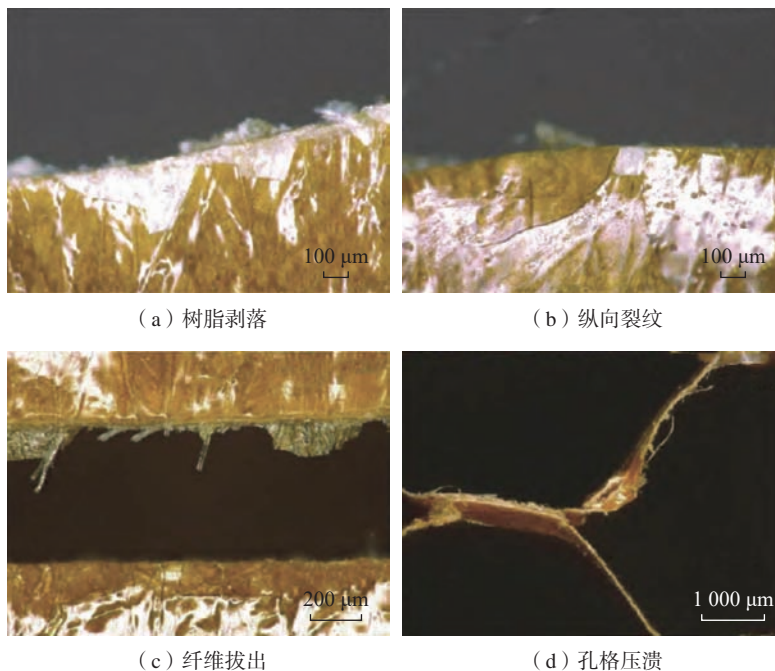


图 27 芳纶纸蜂窝芯加工损伤形貌特征<sup>[119]</sup>

Fig.27 Morphological characteristics of processing damage of aramid honeycomb core<sup>[119]</sup>

除材料的方式精加工零件型面。加工结果表明,超薄型面切削无损伤,边缘质量好,加工效果如图 29 所示。

##### 5.5.2 基于凸台搭接的双型面蜂窝芯零件加工

双型面蜂窝芯零件正、反两面都具有型面加工特征,加工第 2 面(即反面)时需定制专用型面工装进行二次固持,导致加工准备时间长,制造成本高。可采用凸台搭接的方式<sup>[51]</sup>加工双型面蜂窝芯零件,根据零件结构、尺寸、凸台大小确定毛坯大小,选择合适的片铣刀和圆柱铣刀,依据零件型面曲率特征,确定型面的加工顺序,最后用匕首刀沿零件轮廓边缘下断凸台搭接。基于凸台搭接的双型面蜂窝芯零件加工方法通过凸台连接零件,依据蜂窝芯材料的轴向性能及凸台连接片刚性支撑蜂窝芯零件的铣削,其加工后的零件几何尺寸、表面质量等均符合加工要求,如图 30 所示。

##### 5.5.3 蜂窝碳管组件加工

蜂窝碳管复合材料是蜂窝芯材料中的一种特殊材料,在蜂窝芯材料中加入了碳管作为装配定位孔。受

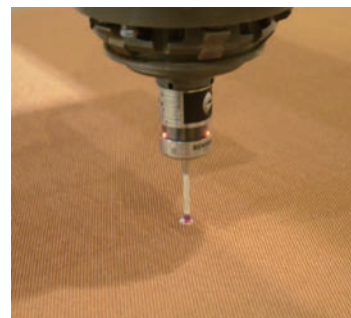


图 28 芳纶纸蜂窝芯在线检测专用探针

Fig.28 Special probe for online detection of aramid honeycomb core

材料特性的影响,该材料在加工时的切削力远远大于常规蜂窝芯。目前针对蜂窝碳管组件较好的加工方式为基于材料划分的分区域加工,将组件固持于专用工装,分别采用碳管材料和蜂窝材料的加工刀具,分区域粗、半精、精加工蜂窝芯-碳管组合件。基于材料划分的蜂窝碳管组件加工方案充分考虑了各组分材料特性,可实现蜂窝碳管复合材料的高效低损伤加工,如图 31 所示。

## 6 结论

芳纶纸蜂窝芯是航空轻量化结构件的重要材料之一,在先进飞机中

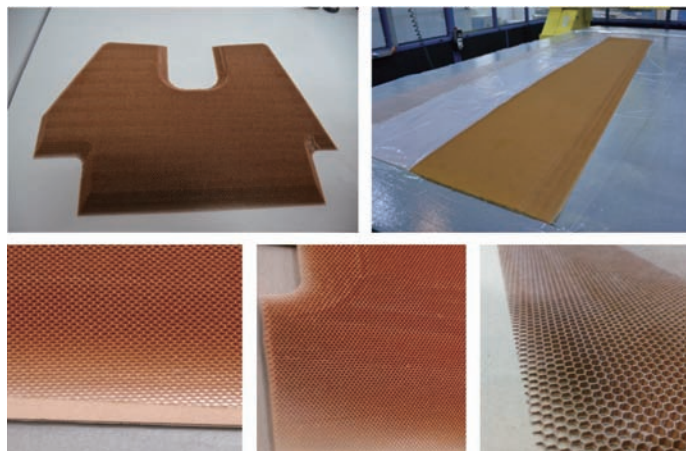


图 29 芳纶纸蜂窝芯超薄复杂型面零件

Fig.29 Ultra-thin and complex profile parts of aramid honeycomb core

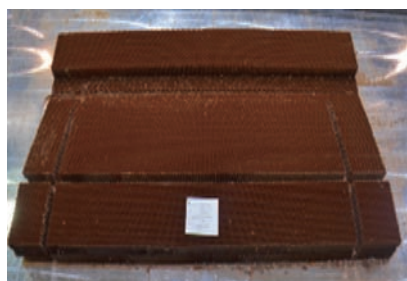


图 30 双型面芳纶纸蜂窝芯结构件

Fig.30 Double profiled aramid honeycomb core structure components



图 31 芳纶纸蜂窝芯-碳管组合件

Fig.31 Aramid honeycomb core-carbon pipe assembly

的应用日益广泛。针对芳纶纸蜂窝结构件加工难题,国内外各研究团队进行了大量研究,取得了一系列富有成效的研究成果。本文基于全面的文献调研,分析概述了芳纶纸蜂窝芯切削加工材料去除机理,总结了典型的加工理论模型,介绍了基于有限元仿真的切削加工过程分析方法,系统性归纳总结了蜂窝芯结构件加工固持方法、加工刀具、加工装备和加工工艺,并介绍了芳纶纸蜂窝芯典型结构件加工应用案例。总体而言,目前的研究成果已初步探明了芳纶纸蜂窝芯切削加工机理,并在结构件加工涉及的诸多技术中取得了重要突破,奠定了芳纶纸蜂窝芯在航空结构件中应用的重要基础。但面向未来芳纶纸蜂窝芯结构件在先进飞机中的应用以及产能扩大的需求,还需要针对芳纶纸蜂窝芯结构件高效加工进行更广泛且深入的研究,具体问

题及发展方向如下。

(1) 芳纶纸蜂窝芯切削超声作用机理有待深入研究,复杂结构刀具切削作用机理尚不明确,工艺参数对切削过程的影响机制较为浅显,需进一步深入研究超声加工切削刃-材料相互作用机理,基于有限元仿真探明损伤形成演变规律,构建切削加工理论模型,研究切削工艺方法和工艺参数影响规律,作为重要的理论基础指导芳纶纸蜂窝芯结构件加工固持方法、刀具设计和工艺方案规划。

(2) 目前仍对进口刀具存在较大依赖,使用过程中存在加工效率低,设备-刀具-工艺不匹配,部分工艺条件下切削发热严重、刀具磨损严重,且难以加工小圆弧转角特殊结构等问题。需针对实际应用情况,基于加工理论突破芳纶纸蜂窝芯加工刀具设计理论和制造技术,打破国外技术封锁,设计制造高度匹配芳纶纸

蜂窝芯结构件加工工艺要求的高性能刀具。

(3) 当前实际生产中仍多采用双面胶粘固持方法,其失效切削力阈值尚不明确,且存在耗时久、人工成本高,大型结构件长时间加工过程中容易失效,难应对大尺寸复杂型面加工中复杂切削力分布等问题。需持续研究芳纶纸蜂窝芯结构件新型固持方法,实现大型复杂结构芳纶纸蜂窝芯结构件快捷稳定固持。

(4) 大型复杂结构芳纶纸蜂窝芯结构件缺乏有效的走刀路径和刀具姿态控制算法,存在刀具干涉、零件过切、欠切等情况,影响零件加工质量和加工精度。需针对具有复杂结构特征的芳纶纸蜂窝芯大型结构件开发刀具轨迹控制算法,匹配合理的加工机床和高性能加工刀具,制定优化加工工艺方案,实现大型复杂结构芳纶纸蜂窝芯结构件高质高效加工。

### 参考文献

- [1] HUANG Z Q, LONG J, WANG Y, et al. Compressive properties characterization of PBO paper honeycomb core constituent material and relationship with honeycomb behaviors[J]. Journal of Sandwich Structures and Materials, 2023, 25(2): 251-263.
- [2] WU X Y, LIU H, YANG M J, et al. Computer simulation for high-order stability analysis of a multi-layer disk with honeycomb core under residual stress[J]. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 2023, 51(3): 1387-1407.
- [3] LUO H, DONG Z G, KANG R K, et al. Postprocessor development for ultrasonic cutting of honeycomb core curved surface with a straight blade[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2023, 18(1): 147-162.
- [4] LI C, DUAN C Z, CHANG B B. Instantaneous cutting force model considering the material structural characteristics and dynamic variations in the entry and exit angles during end milling of the aluminum honeycomb core[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 181: 109456.
- [5] XU Q H, BAO Y J, WANG Y Q, et

- al. Investigation on damage reduction method by varying cutting angles in the cutting process of rectangular Nomex honeycomb core[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 68: 1803–1813.
- [6] QIU K X, MING W W, SHEN L F, et al. Study on the cutting force in machining of aluminum honeycomb core material[J]. Composite Structures, 2017, 164: 58–67.
- [7] 史兰宇, 王晨光, 陈杰, 等. 高温合金蜂窝芯高速铣削材料去除机理与损伤行为[J]. 机械工程学报, 2022, 58(23): 284–295.
- SHI Lanyu, WANG Chenguang, CHEN Jie, et al. Material removal mechanism and damage behavior in high-speed milling of high-temperature alloy honeycomb core[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(23): 284–295.
- [8] 姜少玮, 王永青, 刘阔, 等. 高温合金蜂窝芯冰固持低损伤加工技术研究[J]. 中国机械工程, 2022, 33(5): 577–582.
- JIANG Shaowei, WANG Yongqing, LIU Kuo, et al. Research on ice fixation and low damage machining technology of superalloy honeycomb cores[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(5): 577–582.
- [9] 张琳, 党杰. 蜂窝芯零件加工技术研究[J]. 合成材料老化与应用, 2020, 49(5): 131–133, 150.
- ZHANG Lin, DANG Jie. Research on machining technology of honeycomb core parts[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2020, 49(5): 131–133, 150
- [10] 孙健淞, 康仁科, 周平, 等. 蜂窝芯超声切削技术研究进展[J/OL]. 机械工程学报, [2023-02-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20220727.1056.024.html>.
- SUN Jiansong, KANG Renke, ZHOU Ping, et al. Research progress of honeycomb core ultrasonic cutting technology[J/OL]. Journal of Mechanical Engineering, [2023-02-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20220727.1056.024.html>.
- [11] AHMAD S, ZHANG J F, FENG P, et al. Processing technologies for Nomex honeycomb composites (NHCs): A critical review[J]. Composite Structures, 2020, 250: 112545.
- [12] HUANG X X. Research on ultrasonic cutting mechanism of nomex honeycomb composites based on fracture mechanics[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(23): 205.
- [13] MA K, WANG J J, ZHANG J F, et al. A force-insensitive impedance compensation method for giant magnetostriction ultrasonic cutting system of Nomex honeycomb composites[J]. Composite Structures, 2022, 294: 115708.
- [14] HU X, CHEN S Y, ZHANG Z. Research on curved surface forming of nomex honeycomb material based on ultrasonic NC cutting[J]. Advanced Materials Research, 2012, 538–541: 1377–1381.
- [15] 赵振, 陈平, 郭鸿俊, 等. 蜂窝芯结构超声加工工艺研究[J]. 航天制造技术, 2017(6): 44–47.
- ZHAO Zhen, CHEN Ping, GUO Hongjun, et al. Study on machining technique for honeycomb core based on ultrasonic[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2017(6): 44–47.
- [16] 王毅丹. 芳纶蜂窝芯超声切削加工机理与关键技术[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- WANG Yidan. Mechanism and key technology of ultrasonic cutting of aramid honeycomb core[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [17] 朱文秀. Nomex 蜂窝材料直刃尖刀超声切割切削力分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- ZHU Wenxiu. Cutting force analysis of Nomex honeycomb material with straight-edged sharp knife in ultrasonic cutting[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [18] 袁信满. Nomex 蜂窝芯复合材料超声振动切削工艺技术研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2018.
- YUAN Xinman. Study on ultrasonic vibration cutting technology of Nomex honeycomb core composites[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.
- [19] XU J, WANG C X, FENG P F, et al. Meso-scale cracks initiation of Nomex honeycomb composites in orthogonal cutting with a straight blade cutter[J]. Composites Science and Technology, 2023, 233: 109914.
- [20] 康迪. 超声切割 Nomex 蜂窝芯材料理论及加工装置的设计研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2018.
- KANG Di. Study on the theory of ultrasonic cutting Nomex honeycomb core material and the design of processing device[D]. Shenyang: Northeastern University, 2018.
- [21] 张哲. Nomex 蜂窝芯圆片刀超声切削剖面误差分析与控制[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- ZHANG Zhe. Analysis and control of ultrasonic cutting surface error of Nomex honeycomb core disc cutter[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [22] 马义新. 高密度芳纶纸蜂窝磨削加工试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- MA Yixin. Experimental study on grinding of high density aramid paper honeycomb[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [23] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular solids: Structure and properties[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [24] 许启灏. NOMEX 蜂窝材料切边加工损伤抑制试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- XU Qihao. Experimental study on damage suppression of NOMEX honeycomb material during trimming[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [25] 庞皓文. 基于遗传算法的纸蜂窝超声圆盘切削刀具参数优化[D]. 大连: 大连交通大学, 2018.
- PANG Haowen. Parameter optimization of ultrasonic disc cutting tool for paper honeycomb based on genetic algorithm[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2018.
- [26] 王毅丹, 王宣平, 康仁科, 等. 直刃尖刀超声辅助切割 Nomex 蜂窝芯切削力分析[J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 73–82.
- WANG Yidan, WANG Xuanping, KANG Renke, et al. Analysis of influence on ultrasonic-assisted cutting force of nomex honeycomb core material with straight knife[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(19): 73–82.
- [27] 郑华林, 赵清泉, 袁信满, 等. 基于断裂力学的蜂窝芯超声切削过程分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(11): 153–157.
- ZHENG Hualin, ZHAO Qingquan, YUAN Xinman, et al. Analysis of ultrasonic cutting process of honeycomb core based on fracture mechanics[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2020(11): 153–157.
- [28] 黄秀秀, 胡小平, 于保华, 等. 基于断裂力学的 Nomex 蜂窝复合材料超声切割机理研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(23): 205–212.
- HUANG Xiuxiu, HU Xiaoping, YU Baohua, et al. Research on ultrasonic cutting mechanism of nomex honeycomb composites based on fracture mechanics[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(23): 205–212.
- [29] 姚宿芳. 吸波蜂窝材料超声加工稳定性建模研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2021.
- YAO Sufang. Study on modeling of ultrasonic machining stability of absorbing

honeycomb materials[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2021.

[30] WANG Y D, KANG R K, DONG Z G, et al. A novel method of blade-inclined ultrasonic cutting nomex honeycomb core with straight blade[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2021, 143(4): 041012.

[31] KANG D, ZOU P, WU H, et al. Study on ultrasonic vibration-assisted cutting of Nomex honeycomb cores[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104(1-4): 979-992.

[32] 马付建, 王际帆, 张生芳, 等. 刀具参数对 Nomex 蜂窝芯超声切削性能影响分析[J]. 中国工程机械学报, 2016, 14(4): 316-322.

MA Fujian, WANG Jifan, ZHANG Shengfang, et al. Study on the influence of tool parameters on ultrasonic cutting performance of Nomex honeycomb[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2016, 14(4): 316-322.

[33] 王际帆. 纸蜂窝复合材料超声切削刀具设计及切削性能研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2016.

WANG Jifan. Design and cutting performance of ultrasonic cutting tool for paper honeycomb composites[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2016.

[34] 张生芳, 王际帆, 马付建, 等. 刀具参数对超声切削蜂窝芯切削力及温度影响仿真分析[J]. 大连交通大学学报, 2017, 38(1): 57-61.

ZHANG Shengfang, WANG Jifan, MA Fujian, et al. Simulation analysis of tool parameters influence on feeding force and cutting temperature of ultrasonic cutting for honeycomb[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2017, 38(1): 57-61.

[35] 袁信满, 赵清泉, 鄢旭东, 等. 圆盘锯齿刀超声切削 Nomex 蜂窝芯力热分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(8): 27-30, 35.

YUAN Xinman, ZHAO Qingquan, YAN Xudong, et al. Force and thermal analysis of ultrasonic cutting Nomex honeycomb core with disc serrated cutter[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2021(8): 27-30, 35.

[36] QIN Y, KANG R K, DONG Z G, et al. Burr removal from measurement data of honeycomb core surface based on dimensionality reduction and regression analysis[J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(11): 115010.

[37] XIANG D H, WU B F, YAO Y L, et

al. Ultrasonic longitudinal-torsional vibration-assisted cutting of Nomex<sup>®</sup> honeycomb-core composites[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 100(5): 1521-1530.

[38] 周直昆. 超声振动辅助切割芳纶纸蜂窝复合材料的切割力和表面质量试验研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2017.

ZHOU Zhikun. Experimental study on cutting force and surface quality of aramid paper honeycomb composites assisted by ultrasonic vibration[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2017.

[39] 孟倩. 圆片刀超声切削 Nomex 蜂窝芯表面质量研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.

MENG Qian. Study on surface quality of Nomex honeycomb core by ultrasonic cutting with circular blade cutter[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.

[40] JAAFAR M, MAKICH H, NOUARI M. A new criterion to evaluate the machined surface quality of the Nomex<sup>®</sup> honeycomb materials[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 69: 567-582.

[41] JAAFAR M, ATLATI S, MAKICH H, et al. A 3D FE modeling of machining process of Nomex<sup>®</sup> honeycomb core: Influence of the cell structure behaviour and specific tool geometry[J]. Procedia CIRP, 2017, 58: 505-510.

[42] JAAFAR M, NOUARI M, MAKICH H, et al. 3D numerical modeling and experimental validation of machining Nomex<sup>®</sup> honeycomb materials[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 115(9): 2853-2872.

[43] 李杰. Nomex 纸基蜂窝材料的组合铣刀高速铣削研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.

LI Jie. Study on high-speed milling of Nomex paper-based honeycomb materials with combined milling cutter[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.

[44] ZARROUK T, SALHI J E, NOUARI M, et al. Analysis of friction and cutting parameters when milling honeycomb composite structures[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2021, 13(7): 168781402110348.

[45] ZARROUK T, SALHI J E, ATLATI S, et al. Modeling and numerical simulation of the chip formation process when machining Nomex[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(1): 98-105.

[46] JIANG J M, LIU Z Q. Formation mechanism of tearing defects in machining Nomex honeycomb core[J]. The International

Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 112(11): 3167-3176.

[47] LI X Y, HU X P, WU X. Shear fracture model of ultrasonic cutting for an aramid paper honeycomb[J]. Strength of Materials, 2019, 51(4): 541-547.

[48] YANG Y X, BAO Y J, WANG J L, et al. Study on the cutting damage mechanism of aramid honeycomb based on the progressive damage model[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2022, 15(12): 4063.

[49] 金成柱. Nomex 蜂窝材料高速加工工艺及固持可靠性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.

JIN Chengzhu. Study on high-speed processing technology and holding reliability of Nomex honeycomb materials[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.

[50] 张胜文. 纸蜂窝件数控加工方法[J]. 金属加工(冷加工), 2009(16): 25-28.

ZHANG Shengwen. CNC working of paper honeycomb parts[J]. Metal Cutting, 2009(16): 25-28.

[51] 王鹏程, 高涛, 曹翔. 基于凸台搭接的蜂窝芯零件数控加工工艺技术研究[J]. 制造技术与机床, 2021(4): 74-78.

WANG Pengcheng, GAO Tao, CAO Xiang. Research on NC machining process technology of honeycomb core parts based on false boss connection[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2021(4): 74-78.

[52] 张菊霞, 田卫. 浅谈蜂窝芯零件的数控加工[J]. 航空制造技术, 2010, 53(6): 87-89.

ZHANG Juxia, TIAN Wei. Brief analysis on digital manufacturing of honeycomb core parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(6): 87-89.

[53] 余敏娟, 龚斌, 贾保国. 纸蜂窝数控加工技术研究[C]// 陕西数控机床及自动化技术专家论坛. 西安, 2011.

SHE Minjuan, GONG Bin, JIA Baoguo. Research on CNC machining technology of paper honeycomb[C]// Shaanxi CNC Machine Tool and Automation Technology Expert forum. Xi'an, 2011

[54] 骆金威, 高涛, 牟文平, 等. 面向超声波机床加工芳纶纸蜂窝芯的新型固持方法[J]. 航空制造技术, 2014, 57(22): 106-108, 115.

LUO Jinwei, GAO Tao, MU Wenping, et al. Nomex honeycomb core clamping method by ultrasonic machine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(22): 106-108, 115.

[55] 薛辉. 纸基蜂窝模块化固持工艺及加工工艺中若干问题的研究[D]. 杭州: 浙

江大学, 2010.

XUE Hui. Research on modular holding technology and processing technology of paper-based honeycomb[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.

[56] KE Y L, LIU G. Attractive fixture system based on magnetic field and friction force for numerically controlled machining of paper honeycomb core[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2005, 127(4): 901–906.

[57] 柯映林, 金成柱, 刘刚. Nomex 蜂窝芯高速铣削加工工艺的优化[J]. 中国机械工程, 2006, 17(12): 1299–1302.

KE Yinglin, JIN Chengzhu, LIU Gang. Optimization of high-speed milling process for Nomex honeycomb[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(12): 1299–1302.

[58] 柯映林, 金成柱, 刘刚. Nomex 蜂窝芯等效弹性模量的非线性分析[J]. 自然科学进展, 2006, 16(2): 252–256.

KE Yinglin, JIN Chengzhu, LIU Gang. Nonlinear analysis of equivalent elastic modulus of Nomex honeycomb core[J]. Progress in Natural Science, 2006, 16(2): 252–256.

[59] LIU G, KE Y L. Study on clamping method for paper honeycomb based on magnetic field and friction principle[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 190(1–3): 65–72.

[60] 韩变枝, 邱坤贤, 安庆龙, 等. 蜂窝材料冰结加工技术试验研究[J]. 工具技术, 2017, 51(12): 14–18.

HAN Bianzhi, QIU Kunxian, AN Qinglong, et al. Experimental research on processing honeycomb material technology with ice fixation[J]. Tool Engineering, 2017, 51(12): 14–18.

[61] 刘元吉, 刘适, 姜振喜. 基于 TRIZ 理论的飞机蜂窝芯零件数控加工固持方法研究[J]. 工具技术, 2018, 52(12): 93–97.

LIU Yuanji, LIU Shi, JIANG Zhenxi. Research of aircraft honeycomb core component clamping method for NC machining based on TRIZ theory[J]. Tool Engineering, 2018, 52(12): 93–97.

[62] 张菊霞, 田卫. 碳纤维、芳纶纤维、蜂窝芯零件数控加工刀具的选用[J]. 航空制造技术, 2010, 53(15): 71–73.

ZHANG Juxia, TIAN Wei. Selection of NC cutting tool for carbon fiber/kevlar fiber/honeycomb core part[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(15): 71–73.

[63] 唐臣升. 高效纸蜂窝复合材料专用刀具及其加工方法的研究[C]// 全国复合材

料学术会议. 北京, 2012.

TANG Chensheng. Research on special tools for high-efficiency paper honeycomb composites and their processing methods[C]// National Academic Conference on Composites. Beijing, 2012.

[64] 马成, 刘方军. 蜂窝材料加工工艺研究进展[J]. 航空制造技术, 2016, 59(3): 48–54.

MA Cheng, LIU Fangjun. Research progress in processing technology of honeycomb materials[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(3): 48–54.

[65] 张超海, 龚清洪. Nomex 蜂窝芯结构零件超声切割与传统数控加工的对比研究[C]// 全国复合材料学术会议. 北京, 2012.

ZHANG Chaohai, GONG Qinghong. Comparative study on ultrasonic cutting and traditional NC machining of Nomex honeycomb core structural parts[C]// National Academic Conference on Composite Materials. Beijing, 2012.

[66] 徐龙, 梅颖, 刘元, 等. Nomex 薄壁蜂窝芯型面加工技术[J]. 工具技术, 2018, 52(12): 116–119.

XU L, MEI Y, LIU Y, et al. Processing technology for shaped profile of Nomex thin-walled honeycomb core[J]. Tool Engineering, 2018, 52(12): 116–119.

[67] 于东民, 刘菊东, 叶衔真, 等. 铣削玻璃纤维-碳纤维芳纶纸蜂窝板的刀具磨损研究[J]. 现代制造工程, 2015(7): 108–112.

YU Dongmin, LIU Judong, YE Xianzhen, et al. Study on tool wear in milling glass fiber-carbon fiber aramid paper honeycomb panel[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2015(7): 108–112.

[68] 张波, 孙坤, 党继康. 芳纶纸蜂窝复合材料车削工艺性研究[J]. 高科技纤维与应用, 2011, 36(6): 22–24, 34.

ZHANG Bo, SUN Kun, DANG Jikang. Study of stock removing process about aramid paper honeycomb composite[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2011, 36(6): 22–24, 34.

[69] 沈莹莹. 尖形切割刀超声波声学系统研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2013.

SHEN Yingbin. Study on ultrasonic acoustic system of sharp cutting knife[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2013.

[70] ZHANG Y D, SHEN Y B, LU Z P. Design of an ultrasonic pointed cutter[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 494–495: 569–572.

[71] 方亮. Nomex 蜂窝材料超声铣削圆形刀研制[D]. 杭州: 杭州电子科技大学,

2013.

FANG Liang. Development of ultrasonic milling circular cutter for Nomex honeycomb materials[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2013.

[72] 王根. 吸波蜂窝材料超声切削盘状刀具设计与性能研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2021.

WANG Gen. Design and performance study of ultrasonic cutting disc cutter for absorbing honeycomb materials[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2021.

[73] 黄帅. 蜂窝芯材料超声切削盘刀设计与研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2018.

HUANG Shuai. Design and research of ultrasonic cutting disc cutter for honeycomb core material[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.

[74] 何畏, 黄帅, 袁信满, 等. Nomex 蜂窝复合材料超声切削锯齿圆盘铣刀动力学分析[J]. 工具技术, 2017, 51(5): 37–40.

HE Wei, HUANG Shuai, YUAN Xinman, et al. Dynamics analysis of ultrasonic milling serrated disc cutter of Nomex honeycomb composite material[J]. Tool Engineering, 2017, 51(5): 37–40.

[75] 吴鑫. Nomex 蜂窝材料超声切割直刃刀具设计与性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.

WU Xin. Design and performance research of Nomex honeycomb ultrasonic cutting straight-edge tool[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.

[76] 孙丁一. 超声插切 Nomex 蜂窝芯试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.

SUN Dingyi. Experimental study on ultrasonic cutting Nomex honeycomb core[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.

[77] 杜强, 忻龙飞, 袁信满. 一种基于超声波机床的圆弧插铣刀具: CN206241334U[P]. 2017–06–13.

DU Qiang, XIN Longfei, YUAN Xinman. An arc slotting cutter based on ultrasonic machine tool: CN206241334U[P]. 2017–06–13.

[78] 刘超亮, 袁信满, 崔爱杰, 等. NOMEX 蜂窝芯超声振动插削刀设计研究[J]. 制造技术与机床, 2020(6): 49–53.

LIU Chaoliang, YUAN Xinman, CUI Aijie, et al. Design of ultrasonic vibration slotting cutter for honeycomb core material[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2020(6): 49–53.

[79] 邱宇, 赵清泉, 袁信满, 等. 基于蜂窝芯圆盘刀切削齿的系统稳定性研究[J]. 机电工程技术, 2019, 48(9): 26–29, 61.

- QIU Yu, ZHAO Qingquan, YUAN Xinman, et al. Research on system stability based on honeycomb core disc cutter[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2019, 48(9): 26-29, 61.
- [80] 阎晓彦. 日发精机: 航空细分市场的先行者[J]. 数控机床市场, 2015(4): 54-56.
- YAN Xiaoyan. Nippon Precision Aircraft: The pioneer in the aviation market segment[J]. CNC Machine Tool Market, 2015(4): 54-56.
- [81] 侯小林, 祝益军. 蜂窝结构件的数控加工[J]. 航空制造技术, 2009, 49(S1): 60-63.
- HOU Xiaolin, ZHU Yijun. NC machining of honeycomb structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 49(S1): 60-63.
- [82] WATANABE Y, MORI E J. A study on a new flexural-mode transducer-solid horn system and its application to ultrasonic plastics welding[J]. Ultrasonics, 1996, 34(2-5): 235-238.
- [83] 林仲茂. 超声变幅杆的原理和设计[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- LIN Zhongmao. Principle and design of ultrasonic horn[M]. Beijing: Science Press, 1987.
- [84] MA K, ZHANG J F, FENG P F, et al. Design and implementation of a mini ultrasonic cutting system for nomex honeycomb composites[C]//2019 16th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST). Islamabad, Pakistan. Piscataway, 2019.
- [85] MA K, WANG J J, ZHANG J F, et al. A highly temperature-stable and complete-resonance rotary giant magnetostrictive ultrasonic system[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 214: 106927.
- [86] ZHANG Y D, MA Z Q. The study of resonant frequency of horn and circular tool of ultrasonic milling system[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 628: 283-286.
- [87] 张云电, 肖健雄, 方亮, 等. 蜂窝材料超声波切割声学系统研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(23): 3132-3136, 3146.
- ZHANG Yundian, XIAO Jianxiong, FANG Liang, et al. Research on ultrasonic cutting acoustic system of machining Nomex honeycomb material[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(23): 3132-3136, 3146.
- [88] DING S, HUANG X D, YU C J, et al. Identification of different geometric error models and definitions for the rotary axis of five-axis machine tools[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 100: 1-6.
- [89] 吴鑫, 董志刚, 康仁科, 等. 直刃尖刀形状对超声辅助切削系统振动性能的影响[J]. 航空制造技术, 2016, 59(22): 52-57.
- WU Xin, DONG Zhigang, KANG Renke, et al. Effect of shape parameters of straight blade cutter on performance of ultrasonic assisted cutting system[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(22): 52-57.
- [90] 韩坤. Nomex 蜂窝芯纵弯复合振动超声插切刀具及其超声电源的研制与应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- HAN Kun. Development and application of Nomex honeycomb core longitudinal bending composite vibration ultrasonic insertion and cutting tool and its ultrasonic power supply[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [91] 中华人民共和国科技部. 国产超声切削装备成功应用于我国航空航天领域[J]. 石河子科技, 2019(1): 44.
- Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China. Domestic ultrasonic cutting equipment has been successfully applied in China's aerospace industry[J]. Shihezi Technology, 2019(1): 44.
- [92] 韩丽轩. 面向 Nomex 蜂窝芯复合材料超声切割的智能化电源系统研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2014.
- HAN Lixuan. Research on intelligent power supply system for ultrasonic cutting of Nomex honeycomb core composites[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2014.
- [93] 皮钧, 徐西鹏. 纵扭共振超声铣削研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(10): 1163-1169.
- PI Jun, XU Xipeng. Research on longitudinal-torsional resonance ultrasonic milling(LTRUM)[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(10): 1163-1169.
- [94] 周辉林, 张建富, 冯平法, 等. 超磁致伸缩超声振子预紧特性对输出振幅的影响规律[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(3): 894-902.
- ZHOU Huilin, ZHANG Jianfu, FENG Pingfa, et al. Investigation on influence of preload characteristics on output amplitude for giant magnetostrictive ultrasonic vibrator[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50(3): 894-902.
- [95] LI X, ZHANG D Y. Ultrasonic elliptical vibration transducer driven by single actuator and its application in precision cutting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 180(1-3): 91-95.
- [96] 刘礼平. 基于机床附件化的旋转超声波加工关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- LIU Liping. Research on key technology of rotary ultrasonic machining based on machine tool attachment[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [97] 顾磊, 郑侃, 董松. 纵扭共振旋转超声加工系统设计[J]. 南京理工大学学报, 2020, 44(2): 127-133.
- GU Lei, ZHENG Kan, DONG Song. Design of miniature longitudinal-torsional ultrasonic machining system[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2020, 44(2): 127-133.
- [98] 黄志祥. 基于超声振动辅助的钛合金铆钉铆接技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- HUANG Zhixiang. Research on riveting technology of titanium alloy rivet based on ultrasonic vibration assistance[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [99] 黄秀秀, 胡小平, 于保华. 蜂窝复合材料超声切割力建模及工艺参数选择研究[J]. 机电工程, 2015, 32(1): 32-36, 95.
- HUANG Xiuxiu, HU Xiaoping, YU Baohua. Ultrasonic cutting force model of honeycomb composites and selection of the processing parameters[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2015, 32(1): 32-36, 95.
- [100] 卢斌. 超声波换能器谐振频率跟踪方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- LU Bin. Research on resonance frequency tracking method of ultrasonic transducer[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [101] 肖德贤. 旋转超声波铣削加工技术的实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2004.
- XIAO Dexian. Experimental study on rotary ultrasonic milling technology[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004.
- [102] 高涛, 骆金威, 林勇, 等. 基于超声波机床的蜂窝芯数控加工技术研究[J]. 机械制造, 2013, 51(1): 41-43.
- GAO Tao, LUO Jinwei, LIN Yong, et al. Research on NC machining technology of honeycomb core based on ultrasonic machine tool[J]. Machinery, 2013, 51(1): 41-43.
- [103] 邱宇, 赵清泉, 袁信满, 等. Nomex 蜂窝芯超声加工工艺及编程技术研究[J]. 机械研究与应用, 2019, 32(3): 139-143.
- QIU Yu, ZHAO Qingquan, YUAN Xinman, et al. Study on ultrasonic manufacturing process and programming technology of Nomex honeycomb composites[J]. Mechanical Research & Application, 2019, 32(3): 139-143.
- [104] AHMAD S, ZHANG J F, FENG P F, et al. Processing technologies for Nomex honeycomb composites (NHCs): A critical review[J].

Composite Structures, 2020, 250: 112545.

[105] AKTAY L, JOHNSON A F, KRÖPLIN B H. Numerical modelling of honeycomb core crush behaviour[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75(9): 2616–2630.

[106] KENNEDY B. The variety of composite materials and their application requirements dictate an equally wide range of machining options[J]. Competently Cutting Composites, 2008, 60(7): 237–243.

[107] 李焱, 何勇. Nomex 蜂窝芯零件的数控加工 [C]// 第二届中国航空学会青年科技论坛文集. 北京, 2006.

LI Yan, HE Yong. NC machining of Nomex honeycomb core parts[C]//Collected Papers of the Second Youth Science and Technology Forum of the Chinese Academy of Aeronautics. Beijing, 2006.

[108] BLOSS R. Automatically building or repairing composite fibre structures[J]. Assembly Automation, 2007, 27(3): 202–206.

[109] MOREL P G A. Cutting and forming of honeycombs[J]. JEC Composites Magazine, 2011(63): 102–104.

[110] CRENO. Ultrasonic cutting of Nomex honeycomb[EB/OL]. <https://www.crenoindustry.com/ultrasonic/>.

[111] 吴胜游. Nomex 蜂窝复合材料超声切割断裂机理研究 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2016.

WU Shengyou. Study on fracture mechanism of Nomex honeycomb composites by ultrasonic cutting[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2016.

[112] 黄秀秀. Nomex 蜂窝复合材料直刃刀超声复合切割机理研究 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2015.

HUANG Xiuxiu. Study on ultrasonic composite cutting mechanism of Nomex honeycomb composites with straight blade knife[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2015.

[113] 牛景露, 朱祥龙, 康仁科, 等. 圆片刀超声切削蜂窝芯材料试验研究 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2017, 37(3): 62–68.

NIU Jinglu, ZHU Xianglong, KANG Renke, et al. Experimental research on ultrasonic cutting honeycomb cores by disc cutter[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2017, 37(3): 62–68.

[114] 袁信满, 郑华林, 忻龙飞, 等. 基于响应曲面法的 Nomex 蜂窝芯超声复合铣削力预测模型构建 [J]. 制造技术与机床, 2017(1): 103–108.

YUAN Xinman, ZHENG Hualin, XIN Longfei, et al. Prediction model of Nomex honeycomb composite material force by response surface methodology[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2017(1): 103–108.

[115] HU X P, YU B H, LI X Y, et al. Research on cutting force model of triangular

blade for ultrasonic assisted cutting honeycomb composites[J]. Procedia CIRP, 2017, 66: 159–163.

[116] CUI R Y, ZHANG J F, FENG P F, et al. A path planning method for V-shaped robotic cutting of nomex honeycomb by straight blade tool[J]. IEEE Access, 2020, 8: 162763–162774.

[117] LIU E, HU X P, YU B H. Research and development of ultrasonic CNC cutting path generation system for Nomex composite materials[J]. Advanced Materials Research, 2014, 941–944: 1968–1972.

[118] 张永岩, 张超, 李薇. 超声波铣床基于 CATIA V5 复合材料蜂窝件数控编程方法研究 [J]. 航空制造技术, 2012, 55(9): 79–82.

ZHANG Yongyan, ZHANG Chao, LI Wei. Research on NC programming based on CATIA V5 of ultrasonic milling machine tool for composites honeycomb part[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(9): 79–82.

[119] 张迅, 董志刚, 王毅丹, 等. Nomex 蜂窝芯直刃尖刀超声切割表面微观形貌特征 [J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 90–99.

ZHANG Xun, DONG Zhigang, WANG Yidan, et al. Characterization of surface microscopic of nomex honeycomb after ultrasonic assisted cutting[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(19): 90–99.

通讯作者: 陈杰, 工程师, 博士。

## Research Progress and Application Status on Machining Technology of Aramid Honeycomb Core

ZHOU Jin, YUAN Xinman, CHEN Jie, HU Zhiqin, ZHANG Ye, CHEN Baolin, LUO Pan, HOU Junsen  
(AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610091, China)

**[ABSTRACT]** Aramid honeycomb core was a kind of lightweight material with excellent properties such as high axial specific strength, high axial specific stiffness, and strong axial compressive strength, which has been widely used in many advanced aircraft, satellites, and automobiles, especially as an important lightweight structural component, widely used in aircraft flaps, doors, floors, and other parts. After the material was formed, machining was an essential process to obtain high-precision contour dimensions and assembly features. However, the characteristics of soft, brittle, discontinuous and thin-walled cause poor machinability. In order to solve the extremely challenging machining problems, domestic and foreign research teams have carried out extensive and in-depth exploration to achieve high-quality and high-efficient machining of aramid honeycomb core. The analysis and overview of the machining mechanism of aramid honeycomb core has been summarized, the fixing methods, machining tools, machining equipment and machining processes of aramid honeycomb core have been systematically summarized, the application in the machining of typical structural components has been introduced, and the future development direction has been prospected.

**Keywords:** Honeycomb core; Aramid; Structure components; Machining; Ultrasonic cutting; low-damage

(责编 古系)

引文格式: 张世贵, 张晟玮, 陈鹏飞, 等. 外涵对开机匣精密高效加工工艺研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(14): 100-106.

ZHANG Shigui, ZHANG Shengwei, CHEN Pengfei, et al. Research on high-effect and precise machining technology of bypass duct split casing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(14): 100-106.

## 外涵对开机匣精密高效加工工艺研究\*

张世贵<sup>1</sup>, 张晟玮<sup>1</sup>, 陈鹏飞<sup>1</sup>, 王 灿<sup>1</sup>, 王宇航<sup>2</sup>, 王国名<sup>2</sup>, 孙剑飞<sup>2,3</sup>

(1. 中国航发成都发动机有限公司, 成都 610503;

2. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191;

3. 北京航空航天大学江西研究院景德镇分院, 景德镇 333032)

[摘要] 机匣的加工质量对航空发动机制造和使用性能极为重要, 其中对开机匣由于自身的分割式结构导致其加工工序繁冗, 加工质量难以控制。本文以高精度、高效率两项优化指标为重点对对开机匣加工工艺流程展开研究, 结合材料特点及结构特点总结分析钛合金外涵对开机匣的加工难点, 针对重点加工难点设计工艺方案, 包含高精度加工设备的选择、各工序工装夹具的选择及刀具选择与工艺参数的设定等。在此基础上重点关注特征复杂的机匣外型面铣削加工过程, 对其加工区域进行划分, 完成不同工序铣削方式及数控走刀路线的确定, 最终对切削过程进行模拟仿真, 获得完备细化的加工工艺流程。经实际零件加工验证, 优化后的工艺在加工精度和加工效率方面都有所提升。本文从工艺路线及切削参数等方面进行研究, 有效减小了零件加工变形, 获得外涵对开机匣加工的精密高效加工方法, 为大型环形对开薄壁零件的加工提供一定的经验。

关键词: 钛合金; 夹具; 刀具; 外涵对开机匣; 数控加工

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.14.100



张世贵

高级工程师, 研究方向为航空发动机机匣制造工艺。

航空发动机机匣作为航空发动机的重要零部件之一, 是整个发动机的底座, 其内部安装有静子叶片, 外部可为各种管路、线束等提供支撑, 同时也为各种内部核心结构提供保护。因此机匣的零件质量可直接影响发动机的整体性能。由于航空发动机机匣存在因设计、材料和制造带来的形状结构复杂、材料难加工、薄壁弱刚性和高去除率等特性, 导致其生产中存在工艺流程长、加工效率低和变形误差大等加工难点<sup>[1]</sup>。如某高压涡轮高温合金机匣的粗加工工序耗时超过 200 h; 生产某型号前整流钛合金机匣的整个周期需要 4 个月以上。其次机匣在加工过程中需要大量的工序流转和重复装夹, 工

艺参数的低适应性会降低生产效率, 同时由于残余应力和切削力等因素引起的加工变形对机匣的产品质量也有不利影响<sup>[2-5]</sup>。

目前国内外对机匣加工变形的研究主要聚焦在加工工艺流程制定和变形控制等方面, 包括切削仿真、装夹优化和参数选择等内容, 但对钛合金对开机匣的研究较少<sup>[6-9]</sup>。该机匣的加工工序包括零件的切割, 会对后续加工的零件质量带来极大的挑战。零件在线切割后发生显著变形, 被切割部位发生翘曲, 平面度超差直接致加工基准和配合精度不能够满足后续一系列工序的要求, 从而导致零件尺寸超差甚至直接报废。同时对开机匣的加工流程冗长、装夹手

\* 基金项目: 四川省重大科技专项(2021ZDZX0001、2021ZDZX0002); 中国航空发动机集团产学研合作项目(HFZL2019CX026)。

段不足和不合理、加工路线优化和切削参数的选择缺乏也是亟待解决的问题。

针对航空发动机大型薄壁环形件切削过程中的加工变形和效率低下等问题,对航空发动机钛合金对开结构机匣加工流程和主要难点进行分析研究,结合切削工艺经验、理论分析和切削模拟等手段,建立零件关键工序的加工变形误差预测方法,开展工艺流程、切削参数和装夹方式的研究和制定,实现钛合金对开机匣的高效、高精度和低缺陷的加工。

## 1 零件分析

### 1.1 材料性能特点

外涵对开机匣是航空发动机最复杂的承力结构零件之一,国内外机型大多采用钛合金或高温合金材料。某对开机匣采用 TA15 钛合金材料,该材料属于一种近  $\alpha$  型的低密度钛合金,具有中等的室温和高温强度、良好的热稳定性、抗蠕变性、耐腐蚀性及良好的焊接性能,且组织稳定、抗氧化性好,主要用于制造 500 °C 以下长时间工作的飞机、发动机零件和焊接承力零部件<sup>[10]</sup>。但 TA15 作为一种难加工材料,也会给对开机匣的加工带来明显的困难,在其加工过程中存在热传导性能差、弹性系数低、切削力大、刀具磨损严重等问题<sup>[11-13]</sup>。

### 1.2 零件结构特点

零件为航空发动机所用外涵对开机匣,其内型腔为分布简单的型面结构,机匣外型面结构复杂,零件尺寸公差与技术条件要求严格,属于对开机匣类零件中最难加工的典型薄壁型腔零件。零件包含两对半间带纵向安装边,两半之间由对称分布于纵向安装边上的精密孔及精密螺栓定位连接。零件前后端有安装边,用于连接外涵机匣前段、外涵机匣中段及外涵机匣后段。对开机匣外形尺寸为最大直径 1030 mm、最小内径 836 mm、总高 575 mm,部分尺寸精度为

$\pm 0.015$  mm,形位公差为 0.02 mm,且大部分型腔壁厚仅为 1.5 mm。纵向安装边的水平结合面要求着色检查,密接度不小于 95%,沿轴向不允许间断。机匣的零件结构如图 1 所示。

### 1.3 零件加工难点分析

外涵对开机匣带有纵向安装边,其外型结构比较复杂,尺寸精度和表面技术要求都非常高,在加工过程中会遇到以下 3 个主要问题:(1)部分尺寸精度和形位公差要求较高,加工过程不易保证;(2)大部分型腔壁厚仅 1.5 mm 左右,在车铣过程中,弱刚性部位容易出现让刀变形,使零件超差;(3)因具有薄壁型腔的结构特征,不合理的装夹方式容易引入装夹变形,而一般的夹具很难控制零件加工过程产生的变形。针对这些问题,进行了初步方案规划。

(1)参考以往各型号对开机匣的研制经验,制定合理的加工工艺路线。

(2)对于薄壁处车铣加工产生的变形,通过设计及制造专用工装对薄壁位置加以辅助控制,防止零件薄壁处出现严重的变形。

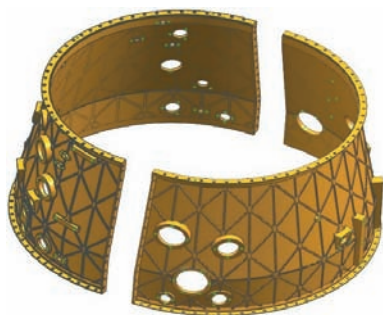


图 1 零件结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of part structure

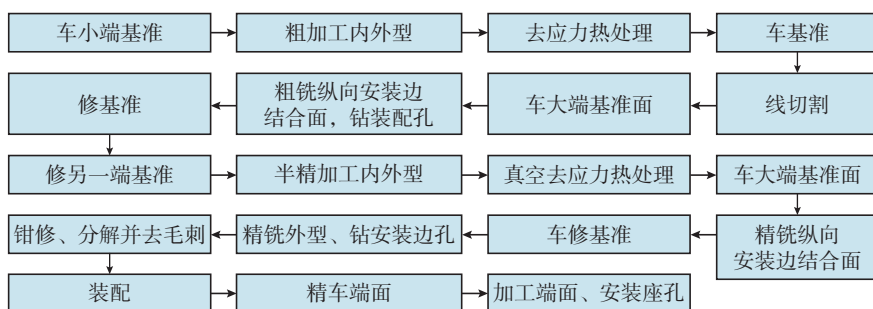


图 2 主要机加工工艺路线流程图

Fig.2 Main machining process route flow chart

(3)形位公差极小的尺寸,采用高精度机床并设计专用刀具进行加工。

(4)车铣加工产生的变形和加工效率的提高。通过合理安排刀具的选用、走刀路线及加工参数来减少变形和提高效率。

### 1.4 工艺方案

此零件来料为 TA15 的整体 II 类环型锻件,需要经过粗加工、半精加工、精加工等较长的工艺路线才能加工完成,其加工方法涵盖车加工、铣加工、线切割和钻镗孔加工,并且各项工艺相互独立,因此根据设计图技术条件相关要求和相关结构尺寸,并参考以往各型号对开机匣的研制经验,制定出主要加工工艺路线,如图 2 所示。

## 2 数控加工工艺方案

### 2.1 加工设备的选择

由于对开机匣存在特殊结构的特性,其加工过程主要为车削、钻铣削及线切割,因此应选择自动化程度高、加工质量稳定的数控车床、数控加工中心及线切割设备进行数控加工,具体设备型号如表 1 所示。车削使用数控立车,其设备有较好的稳定性和刚度,加工过程中尽可能保证精加工各表面加工余量均匀、吃刀量均匀稳定,以达到提高刀具使用寿命、减小零件变形的目的。线切割使用数控线切割机,其设备具有良好的精度及稳定性,能保证安装边后续铣削精加工的余量。钻孔、铣削使用四轴和五轴加工中心,其设备具有良好的刚度与精度,同时能满足多种机匣外

型面各种复杂特征的成型加工。加工过程中应保证型面结构尺寸、纵向安装边结合面平面度和安装边定位孔的位置精度。

### 2.2 工装夹具的选择

为预防车铣加工薄壁处产生的变形,通过设计专用工装对薄壁位置加以辅助支撑。粗车铣加工及半精车铣加工去除大量余量后,零件内部残余应力的平衡被打破,产生了相应的应力,一部分应力随着材料的去除而逐步释放,并产生变形,而另一部分需要重新产生新的应力进而产生应力平衡,这种应力会给后续精加工造成变形,从而影响尺寸公差及形位公差的精度,造成零件不合格。因此在半精加工后增加了“工序-真空去应力热处理”工序。针对真空热处理技术条件、零件材料及结构特点,设计专用真空热处理夹具来控制热处理过程中零件应力释放产生的变形,夹具结构及零件装夹方式如图3所示。

纵向安装边的水平结合面要求着色检查,密接度不小于95%,沿轴向不允许间断。应当安排单独的工序——精铣纵向安装边结合面,对结合面进行高精度加工,同时也需要专用铣削夹具进行装夹加工。专用夹具由上下两部分组成,中间用梁连接,通过对机匣大端、小端同时沿周向约束以实现铣削过程中振动的控制,从而保证安装边结合面的表面质量和相关密接度<sup>[14]</sup>。铣削夹具结构及零件装夹方式如图4所示。

半精加工后,外涵对开机匣的壁厚逐渐变薄,机匣基体壁厚1.5 mm,加工中极易产生变形,需设计制造专用夹具进行辅助支撑内型面来加工外型面,减少加工过程中产生的变形。在工序“精铣外型及钻安装边孔”和“钻铣径向多个安装座孔”中设计共用的铣削夹具进行装夹加工,铣削夹具结构及零件装夹方式如图5所示。

### 2.3 刀具的选择及工艺参数拟定

对对开机匣的机加工工艺流程图来

表1 加工设备  
Table 1 Machining equipment

设备类型	设备型号	厂家	优势
数控车床	CH5116B	武汉重型机床厂	机床刚度 高,运行 稳定
	VTL1600ATC	台湾油机	
	VL-125C	台湾荣田精机	
数控线切割机	DK77100	南昌江南电子仪器厂	切割精度 高,可切 割零件 尺寸大
	HCKX630C	陕西汉川机床厂	
四轴加工中心	THM63120IV	四川普什宁江机床有限公司	具有良好 刚度与 精度,能 同时满 足机匣 外型面 各种复 杂特征 的成形 加工
五轴加工中心	DMU125P、DMU160P	德国 DEMAGE	
		AC28 TMY 2500	意大利 PIETROCARNAGHI

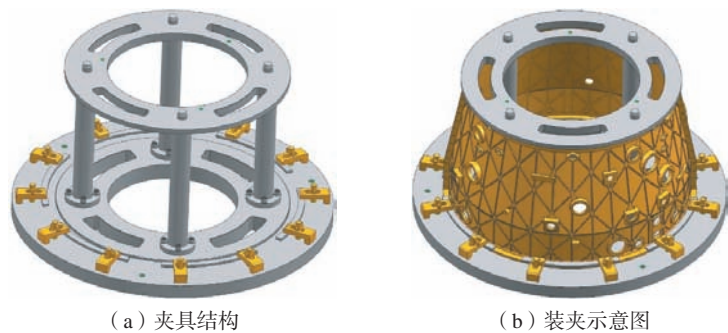


图3 真空热处理夹具结构及装夹示意图

Fig.3 Vacuum heat treatment fixture structure and clamping diagram

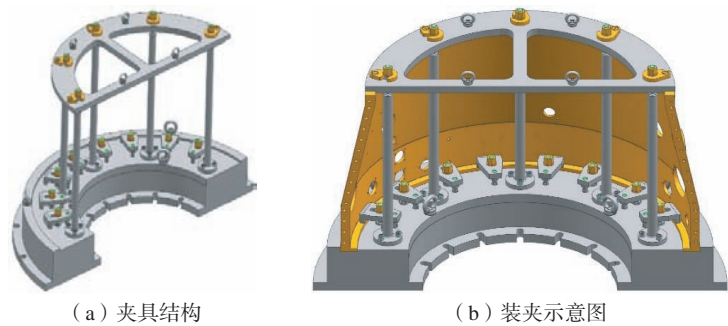


图4 结合面铣削夹具结构及装夹示意图

Fig.4 Joint surface milling fixture structure and clamping diagram

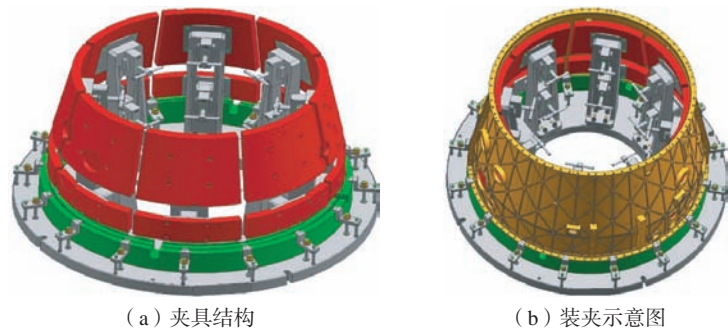


图5 外型面铣削夹具结构及装夹示意图

Fig.5 External surface milling fixture structure and clamping diagram

看,零件的加工方式有车削加工和铣削加工,不同工序的车削和铣削就需要不同的车刀和钻铣刀具来进行加工。

(1) 车削加工刀具的选择<sup>[15]</sup>。

粗加工,为保证大切深进给,多选用 80° R0.8 mm 的机夹车刀;精加工,考虑零件结构特殊、刚性差、表面质量要求高等制约因素,优先采用 35° 的机夹车刀加工,刀具选择具体清单如表 2 所示。

(2) 钻铰铣削加工刀具的选择<sup>[15]</sup>。

对开机匣外型面轮廓分布有安装座、减重型槽、加强筋等凸台特性,因此铣削加工中必然使用种类繁多的铣削刀具,必要时还需要直径较小的硬质合金铣刀来对型面轮廓的底部进行清根,保证零件表面圆滑转接。各个铣削加工阶段所用刀具清单如表 3 所示。

分布于纵向安装边上的精密定位孔和螺栓在连接时,采用专用测量具

“4B022/S19-003,  $\Phi 8 (+0.015/0)$  塞规”和“4B022/S18-390,  $\Phi 8.5 (+0.15/0)$  塞规”进行测量,判断合格后继续进行后续孔位的加工。专用刀具和测量具的使用,使孔的尺寸精度得以保证,从而保证两半对开机匣连接的装配精度。

综合考虑零件的材料、结构及加工精度,结合实际加工经验及所使用刀具推荐参数,面轮廓的铣削转速 1000~1500 r/min、进给率 100~200 mm/min; 钻铰孔转速 500~800 r/min、进给率为 50 mm/min。钛合金材料在车削加工和铣削加工过程中都需要合理地浇注冷却液,冷却液可以带走加工中产生的热量,防止刀具与钛合金在接触面产生硬化层,同时冷却液可以将金属屑冲走,防止积屑瘤堆积影响加工质量(切削液牌号为 CIMPERIAL<sup>®</sup> 和 8100 (CF))。

表 2 车削加工刀具选择  
Table 2 Turning tool selection

加工阶段	刀具型号	角度 / (°)	刀尖圆角半径 R/mm	刃数
粗车	CNMG120408MS KC5510 (肯纳)	80	R0.8	4
	CNMG120408-GJ VP10RT (三菱)	80	R0.8	4
精车	CNMG120408MS KC5510 (肯纳)	80	R0.8	4
	VCMT1600408-PF4 WSM10 (瓦尔特)	35	R0.8	2
	VNMG1600408-MJ VP10RT (三菱)	35	R0.8	4

表 3 铣削加工刀具选择  
Table 3 Milling tool selection

加工阶段	刀具直径 $\Phi$ /mm	刀尖圆角半径 R/mm	刀具类型	备注
粗铣	8~50	R0.5~6	立铣刀、盘铣刀	—
半精铣				—
精铣纵向安装边和结合面	50	R0.8	盘铣刀	—
	80	R6	盘铣刀	—
精铣外型轮廓	6	R3	球头铣刀	—
	8~50	R0.5~6	立铣刀、盘铣刀	—
纵向安装边定位孔、螺栓连接孔	7.7	—	合金钻头	4B101/S19-1C-001
	8	—	铰铰刀	4B121/S19-1C-001
	8.4	—	通用合金钻头	—
	8.58	—	铰铰刀	F151/S18-1C-078

### 3 数控加工工艺设计与实际加工验证

在数控加工中,数控程序的编制直接影响到加工的效率和质量,因此,编制合理的加工程序非常重要。在数控程序的编制过程中,如何划分加工区域、选择走刀路线、选择合理的刀具和切削参数等会直接影响到所编程序的质量。结合对开机匣的结构特点,按不同工序的尺寸要求进行以下第 3 节中描述的相关的准备。由于对开机匣内型面车削特征相对比较简单,因此主要针对对开机匣外型面的铣削加工过程进行描述。

#### 3.1 加工区域的划分

对开机匣外型面可以分为若干级腔槽,在每级腔槽内分布有形式各异的安装座、凸台和减重筋板槽等,因此,在实际加工中必须划分合理的加工区域,对实现零件的高效铣削及保证零件的加工质量至关重要<sup>[16]</sup>。在粗铣加工中,此零件从整体上看属于锥体机匣,为了在粗铣中尽可能利用较大的铣削刀具,切除较大的余量,通过仔细分析零件的特点,将零件划分为 3 个加工区域(1、2、3),如图 6 所示。在精铣加工中,根据零件特点,把零件的加工细分为各级腔槽、各级腔槽内的筋板、安装座、凸台和纵向安装边 5 大区域,然后各个区域再具体细化,采取不同的对策分别进行加工。

#### 3.2 铣削方法的制定和刀具轨迹的生成

对开机匣外型面结构复杂,在加工中需根据不同的加工部位采用多种铣削方式相结合的加工方法。粗铣加工过程中,针对零件毛料余量大、不均匀的特点,采用插铣、轴向铣削、动态铣削等方法进行铣前加工。由于对开机匣外型面安装座、加强筋、减重型槽等凸台呈罗棋布,在部分切削区域刀具运行空间较狭小,采用插铣的方法更适合,这种方法一次切深较大,每次切深 2~5 mm,单位时间内材料

的切除率较大,比较适用于狭小空间、大余量的粗加工。刀具轨迹生成采用 SURFACE 驱动,加工点扎刀的地方预先加入钻孔点,预先去除局部被加工材料,使得 SURFACE 驱动后的大部分外型轮廓可以顺利进行加工。

在精铣加工过程中,对各个腔槽的加工主要采用轴向铣削方法,这种方法在加工中零件径向受力小,可以减少零件的变形,并且可以保证零件表面的质量。在加强筋、安装座及凸台的加工中充分采用 NX/CAM 软件的功能,利用固定轴加工、变轴加工等多种方法,生成各种不同的加工路线以完成对零件的精加工。针对各种安装座、凸台采用边界驱动方式,此方式可以用制定的边界和内环来定义切削区域,能跟随复杂表面轮廓进行零件的精加工。相关工序及加工方式如表 4 所示。第 1 步对机匣外型面进行粗铣,加工方式为插铣和动态铣削相结合,沿轴向进刀,具体刀路轨迹如图 7 所示;第 2 步对安装边结合面进行铣削精加工,沿轴向进

刀,如图 8 所示;第 3 步对外型面进行铣削精加工,刀路轨迹如图 9 所示;最后对安装边安装孔进行钻铰加工,刀路轨迹如图 10 所示。

### 3.3 加工模拟仿真

为了保证程序的可加工性,减少实际试制时间,避免零件报废,将生成的加工程序利用仿真软件 Vericut 进行预先的模拟仿真<sup>[17]</sup>。通过模拟仿真可对程序进行分析,在加工中发现是否有过切和撞刀现象,特别是刀具轴变化有特殊要求,旋转角度有限的程序,均可通过模拟仿真确保刀具轴变化平稳过渡,对于模拟仿真结果不理想的程序,则可返回加工模块对加工方式、参数等进行修改,直至模拟仿真结果符合加工要求。模拟仿真示意图如图 11 所示。

### 3.4 加工工艺验证

在对加工刀路轨迹进行仿真优化的基础上,按照第 2 节所述工艺方案及工艺流程,开展外涵道对开机匣零件实际加工工艺验证。纵向结合面实际加工情况如图 12 (a)所示,可

见结合面贴合紧密,且得益于加工过程中对上下端面的同时装夹,在提升零件刚度的同时降低了加工过程中的振动,因此更大的加工参数得以使用,有效提升了加工效率。外型面实际加工情况如图 12 (b)所示,同样由于在外型面铣削过程中采用贴合内型面的内撑工装,有效抑制了薄壁

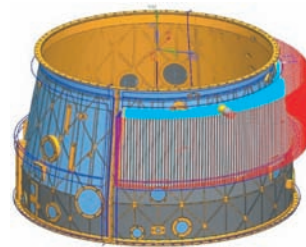


图 7 粗铣外型面刀路轨迹示意图  
Fig.7 Schematic diagram of tool path of rough milling profile

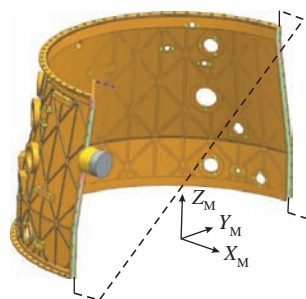


图 8 精铣纵向安装边结合面和刀具轨迹示意图  
Fig.8 Finish milling longitudinal mounting edge joint surface and schematic diagram of tool path

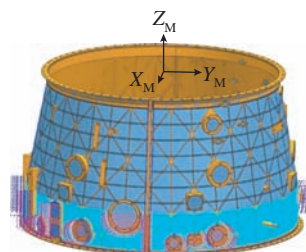


图 9 精铣外型面刀路轨迹示意图  
Fig.9 Schematic diagram of tool path of finish milling profile

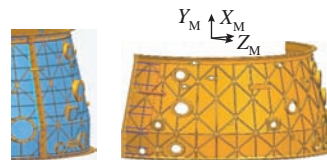


图 10 纵向安装边铣削、钻铰孔和刀路轨迹示意图  
Fig.10 Schematic diagram of longitudinal mounting edge milling, drilling, reaming and tool path

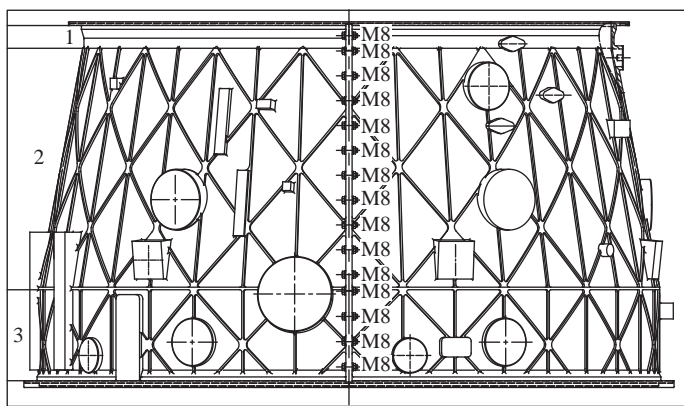


图 6 粗铣加工区域示意图  
Fig.6 Schematic diagram of rough milling area

表 4 不同工序铣削方式  
Table 4 Milling methods of different processes

顺序	工序	铣削方式
1	粗铣外型	插铣、轴向铣削、动态铣削
2	精铣纵向安装边结合面	轴向铣削
3	精铣外型	插铣、轴向铣削、动态铣削
4	钻安装边孔	整体钻通孔和铰通孔

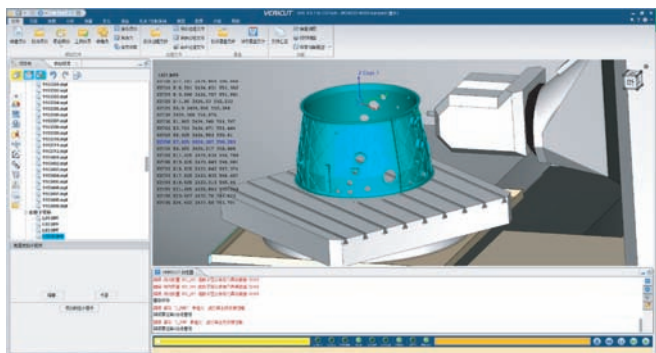


图 11 Vericut 模拟仿真  
Fig.11 Vericut simulation



(a) 结合面 (b) 外型面

图 12 两种面的实际加工情况

Fig.12 Machining results of two kinds of surface

零件加工过程中的让刀变形,提升了加工精度与加工效率。经测量,工艺优化后的加工精度得到了提升,其中端面跳动控制在 0.015 mm 以内,径向跳动控制在 0.03 mm 以内,本文提出的工艺方案与工艺流程得以验证。

## 4 结论

通过对零件材料和零件结构分析,对加工难点进行总结,围绕设备选择、夹具设计、刀具选择及工艺参数设定几方面的研究,重点关注外型面特征的铣削加工并进行刀路模拟仿真。最终有效减小了零件加工变形,获得外涵对开机匣的精密高效加工方法,为大型薄壁对开机匣零件的加工提供了一定经验。

(1) 钛合金对开机匣具有材料难加工,外型面特征复杂等特点。通过对对开机匣材料及结构特点的分析,总结出对开机匣具有特征精度要求高、薄壁弱刚性等加工难点,易造成尺寸超差、位置超差、让刀变形及装夹变形等问题。

(2) 针对关键工序“纵向安装边

结合面铣削”开发专用工装夹具,该夹具通过对机匣大端和小端的同时约束,抑制结合面加工过程中的振动,提升刚度,有效保证了结合面表面质量和相关密接度,同时提升加工效率。针对关键工序“机匣外型面铣削”开发专用工装夹具,该内撑工装在加工过程中同时对机匣大端和小端进行支撑,抑制加工过程中的让刀变形,同时可以减小加工振动,避免零件尺寸超差,有效提升了零件精度与加工效率。

(3) 根据对开机匣加工工艺路线流程图分析得到加工过程主要包括车削、钻削、铣削及线切割,根据各工序加工要求选择高精度、高稳定性的数控设备。根据实际生产经验及刀具推荐参数确定加工过程中的工艺参数。

(4) 重点关注机匣外型面铣削,根据外型面复杂特征实现其加工区域的划分,完成不同工序铣削方式及数控走刀路线的确定。最终对切削过程进行模拟仿真,采用仿真软件 Vericut 进行预先加工仿真,在加工中及早发现是否有过切和撞刀现象,

避免实际加工中遇到问题,造成不可挽回的损失并获得了完备细化的加工工艺流程。

(5) 开展对开机匣加工制造,对加工工艺进行验证。经测量,对开机匣整体端面跳动控制在 0.015 mm,径向跳动控制在 0.03 mm,纵向结合面贴合紧密。试验结果表明,由于纵向结合面铣削专用夹具、外型面铣削专用夹具等专用夹具的使用及工艺方案的优化,加工变形得到抑制,加工效率与加工精度得到显著提升。

## 参考文献

- [1] 段林升. 航空发动机机匣切削加工参数优化研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2022.  
DUAN Linsheng. Research on optimization of machining parameters of aeroengine casing[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2022.
- [2] 李忠群, 党剑涛, 刘学, 等. 航空机匣工件车削加工变形预测及切削参数优化研究[J]. 制造技术与机床, 2020(2): 107-111.  
LI Zhongqun, DANG Jiantao, LIU Xue, et al. Prediction of turning deformation and optimization of cutting parameters for aircraft case parts[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2020(2): 107-111.
- [3] 张韬. 低压涡轮机匣应力分析与工艺改进[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.  
ZHANG Tao. Stress analysis and process improvement of low pressure turbine case[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [4] 高志坤, 迟庆新, 卜嘉利. 某涡轮后机匣裂纹失效机理分析[J]. 航空发动机, 2018, 44(6): 6-10.  
GAO Zhikun, CHI Qingxin, BU Jiali. Study on the crack failure mechanism of a turbine rear casing[J]. Aeroengine, 2018, 44(6): 6-10.
- [5] GUO L, YANG F, LI T, et al. Vibration suppression of aeroengine casing during milling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 113(1): 295-307.
- [6] 王晶, 罗明, 吴宝海, 等. 航空发动机机匣摆线粗加工轨迹规划方法[J]. 航空学报, 2018, 39(6): 421814.  
WANG Jing, LUO Ming, WU Baohai, et al. A trochoidal path planning method for rough machining of aeroengine casing parts[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(6): 421814.
- [7] 孙玉民, 捧跃伟, 王丽花. 某延伸

机匣铣车复合加工工艺研究[J]. 制造技术与机床, 2015(11): 153-155.

SUN Yumin, FENG Yuewei, WANG Lihua. Explortion of milling-turning composite processing on some extending casing[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2015(11): 153-155.

[8] 徐金梅, 师俊东, 王传滨, 等. 大型薄壁铝合金机匣外环加工工艺[J]. 航空制造技术, 2014, 57(4): 92-93.

XU Jinmei, SHI Jundong, WANG Chuanbin, et al. Processing technology of large thin-walled aluminum alloy casing outer ring[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(4): 92-93.

[9] 任军学, 龚仔华, 田荣鑫, 等. 航空发动机机匣五轴插铣加工[J]. 航空制造技术, 2013, 56(9): 58-61.

REN Junxue, GONG Zihua, TIAN Rongxin, et al. 5-axis plunge milling of aeroengine case[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(9): 58-61.

[10] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册: 第4卷, 钛合金、铜合金[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001.

Editorial Committee of China Aviation Materials Manual. China aviation materials

manual: Volume 4, titanium alloy and copper alloy[M]. Beijing: Standards Press of China, 2001.

[11] 赵树萍, 吕双坤, 郝文杰. 钛合金及其表面处理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003.

ZHAO Shuping, LÜ Shuangkun, HAO Wenjie. Titanium alloy and its surface treatment[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2003.

[12] 隋楠, 曹京霞, 黄旭, 等. 合金成分对TA15钛合金组织及力学性能的影响[J]. 航空材料学报, 2019, 39(1): 48-54.

SUI Nan, CAO Jingxia, HUANG Xu, et al. Effect of composition on microstructure and mechanical properties of TA15 titanium alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2019, 39(1): 48-54.

[13] 吴广东. TA15钛合金结构件高效铣削解决方案研究[J]. 工具技术, 2015, 49(1): 58-60.

WU Guangdong. Research on efficient milling solution of TA15 titanium alloy structural parts[J]. Tool Engineering, 2015, 49(1): 58-60.

[14] 陈亚莉, 韩永武, 吴铁石, 等. 对开机匣结合面加工方案研究[J]. 中国新技术新产品, 2018(22): 70-71.

CHEN Yali, HAN Yongwu, WU Tieshi, et

al. Research on machining scheme of connecting surface of starter box[J]. New Technology & New Products of China, 2018(22): 70-71.

[15] 范忠仁, 陈世忠. 刀具工程师手册[M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1985.

FAN Zhongren, CHEN Shizhong. Tool engineer's manual[M]. Harbin: Heilongjiang Science and Technology Press, 1985.

[16] 胡晓群, 叶红雨, 冯湛. 航空发动机对开机匣高效数控铣加工技术应用研究[C]// 第三届沈阳科学学术年会论文集. 沈阳市科学技术协会, 2006: 300-304.

HU Xiaoqun, YE Hongyu, FENG Zhan. Research on the application of High Efficiency NC milling technology for aero-engine pair box[C]// Proceedings of the 3rd Shenyang Annual Conference on Science. Shenyang: Shenyang Association for Science and Technology, 2006: 300-304.

[17] 黄雪梅. VERICUT 数控仿真实例教程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2019.

HUANG Xuemei. VERICUT numerical control simulation example course[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2019.

通讯作者: 孙剑飞, 副教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为加工变形控制、难加工材料切削加工等。

## Research on High-Effect and Precise Machining Technology of Bypass Duct Split Casing

ZHANG Shigui<sup>1</sup>, ZHANG Shengwei<sup>1</sup>, CHEN Pengfei<sup>1</sup>, WANG Can<sup>1</sup>, WANG Yuhang<sup>2</sup>, WANG Guoming<sup>2</sup>, SUN Jianfei<sup>2,3</sup>

(1. AECC Chengdu Engine Co., Ltd., Chengdu 610503, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, BUAA, Beijing 100191, China;

3. Jingdezhen Research Institute of Beihang University, Jingdezhen 333032, China)

**[ABSTRACT]** The machining quality of the casing is very important to the manufacturing and performance of the aero-engine. Due to the split structure, the machining process of the split casing is complicated and the machining quality is difficult to control. In this work, the two optimization indexes of high-precision and high-efficiency are taken as the focus to study the processing flow of the bypass duct split casing. Combined with the material characteristics and structural characteristics, the processing difficulties of the titanium alloy split casing are summarized and analyzed. The process scheme is designed for the key processing difficulties, including the selection of high-precision processing equipment, the selection of tooling fixtures in each process, the selection of tools and the setting of process parameters. On this basis, the milling process of the casing outer surface with complex features is focused on, and the processing area is divided to complete the determination of different milling methods and CNC tool paths. Finally, the cutting process was simulated and a complete and detailed machining process was obtained. Through the actual parts processing verification, the optimized process has improved the processing accuracy and processing efficiency. In this work, the research is carried out from the aspects of process route and cutting parameters, which effectively reduces the machining deformation of the parts, obtains the precise and efficient machining method of the bypass duct split casing processing, and provides some experience for the processing of large annular thin-walled parts.

**Keywords:** Titanium alloy; Fixture; Tool; Bypass duct split casing; NC machining

(责编 晓月)

# 2023

# 轻质材料与轻量化 制造技术国际会议

## 主办单位

香港城市大学  
中国航空制造技术研究院  
帝国理工学院

2023年10月23-26日 · 深圳

## 大会网址

[www.icolmm.cn](http://www.icolmm.cn)

引文格式: 张忠清, 李泷杲, 刘洋. 基于滑模控制的球头自适应入位技术[J]. 航空制造技术, 2023, 66(14): 108-117.

ZHANG Zhongqing, LI Shuanggao, LIU Yang. Adaptive positioning method for ball head based on sliding mode control[J].

Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(14): 108-117.

# 基于滑模控制的球头自适应入位技术\*

张忠清<sup>1</sup>, 李泷杲<sup>2</sup>, 刘洋<sup>2</sup>

(1. 北京动力机械研究所, 北京 100074;

2. 南京航空航天大学, 南京 210016)

[摘要] 固连在飞机结构上的工艺球头准确落入数控定位器末端球窝是飞机结构进行调姿对接的前提。针对大型构件难以准确入位的难题, 本文提出一种基于滑模控制的球头自适应入位方法。首先对三维力传感器输出做限幅和 FIR 混合滤波处理以提高其测量精度; 然后构建力引导的定位器驱动模型, 基于滑模理论设计力控制器并根据 Lyapunov 稳定判据检验其设计合理性; 接着在 Simulink 环境下搭建基于滑模控制的球头入窝模型, 仿真结果显示, 设计的力反馈控制系统无振荡且响应速度快; 最后以某机身模拟件进行试验验证, 试验结果满足设计的球头低应力入位要求, 验证了该方法的有效性。

关键词: 飞机装配; 球头入位; 滑模控制; FIR 滤波; 力反馈

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.14.108



张忠清

研究员级高级工程师, 研究方向为大型飞机数字化制造技术。

部件对接是飞机装配中的重要内容, 部件保持正确的位姿是实现对接装配的关键和前提<sup>[1]</sup>。近年来, 数控定位器越来越多地应用于飞机部件的调姿对接中, 定位器末端与飞机部件或其工装上工艺球头连接形成球铰成为常见的部件支撑形式。飞机部件通过专用工装或行车吊装到指定装配站位后, 驱动定位器使得飞机部件上各球头准确落入定位器末端球窝内的过程被称为工艺球头入位<sup>[2]</sup>。为防止入位后球头与球窝相对位置发生改变, 同时为保证飞机部件的调姿精度, 球头与球窝之间的预留间隙很小, 因此驱动定位器使各工艺球头与对应球窝准确配合十分困难。

在球头入位过程中, 球头与球窝球心位置的偏差必然产生较大的侧向装配应力, 为获得球头球窝准确的球心位置, 刘春<sup>[3]</sup>提出了基于激光

跟踪仪测量的工艺球头入位方法, 通过激光跟踪仪测量可以获得准确的球心位置, 数字化集成控制系统根据测得的球心位置将规划好的入位轨迹传递给伺服控制器, 进而驱动各定位器使得定位器末端球窝球心与球头球心位置重合, 完成飞机部件的入位。测量入位虽然可行, 但激光跟踪仪测量存在误差, 球头入位过程中仍可能产生较大侧向力, 同时该方法需提前建立相应坐标系以获得球头球窝之间准确的相对位置关系, 整个过程耗时较长<sup>[4]</sup>。

为提高球窝相对球头的定位精度, Liu 等<sup>[5]</sup>提出了一种基于无标定视觉伺服的球头入位方法, 通过卡尔曼滤波在线评价雅克比矩阵, 避免了视觉系统复杂的标定过程, 使定位器球窝能自适应靠近球头。视觉伺服定位极大提高了球头入位精度, 但该方法需要配备额外的视觉测量装备,

\* 基金项目: 基本科研业务费专项科研项目 (NP2022421)。

且视觉测量易受现场环境光线的影响。为此,邱宝贵等<sup>[6]</sup>利用位移传感器设计了一套球头自适应入位装置并提出了相应的控制算法,根据位移传感器数据计算出工艺球头的球心坐标,然后驱动定位器准确到达球心坐标位置;相比视觉定位,该方法具有更好的适应性,但需要对定位器末端进行特殊设计,增加了机构的复杂性。

自适应入位通过建立入位系统与驱动系统的耦合关系来实现定位器末端对球头位置的主动找正<sup>[7]</sup>。相比直接得出球心位置后驱动定位器末端球窝靠近球头,自适应法在入位前不需要知道球头球窝的相对位置,而是在入位过程中根据球头球窝当前接触状态的反馈信息进行连续性主动找正调节,直至球头球窝达到设计的入位要求。考虑到自适应入位过程中入位系统与驱动系统之间复杂的耦合关系,对于带反馈信号的控制,一般需要设计相应的控制器以提高系统控制性能,目前常用的非线性控制器有PID控制器、阻抗控制器和滑模控制器。PID控制<sup>[8]</sup>算法蕴含了动态控制过程中过去、现在及将来的主要信息,具有较强的适应性,但PID控制参数不易调节;阻抗控制<sup>[9]</sup>能够实现系统由无约束到有约束运动的稳定转换,但在实际中难以准确得到末端执行器的环境位置和刚度等,从而无法准确实现对末端的控制;滑模控制<sup>[10]</sup>是一种非线性变结构的控制方法,对被控对象的模型误差及外部干扰不敏感,具有较好的控制鲁棒性,目前已被广泛应用于机器人柔性控制系统的设计。

基于以上分析,为解决飞机大部件工艺球头的准确入位问题,本文提出了一种基于滑模控制的飞机大部件工艺球头自适应入位方法,通过控制球头球窝实际接触力以减小入位位置偏差,从而使球头准确落入球窝。本方法主要基于飞机大部件对

接系统自带的力传感元件实现,避免了复杂的辅助工装设计;同时设计滑模控制器以提高入位系统控制性能,搭建入位控制模型并进行仿真和现场试验,试验结果满足设计的球头低应力入位要求,验证了本方法的有效性。

## 1 基于滑模控制的球头自适应入位技术路线

由多定位器构成调姿控制单元完成对飞机大部件的调姿是飞机部件对接装配中的常见形式,某部件姿态调整单元组成见图1。在调姿对接前,需要将与飞机部件固连的各工艺球头准确落入对应球窝形成球铰,使调姿部件获得稳定支撑。基于上述实际工程需求,本文提出了基于滑模控制的球头自适应入位方法。

自适应入位通过驱动定位器使其末端球窝主动找正球头,在找正过程中,球头球窝接触力可作为其球心位置偏差的映射,通过球窝下方固连的三维力传感器即可实时获取球头球窝的各向接触力。为提高三维力传感器测量精度,对传感器原始信号做限幅和FIR混合滤波处理。

球头自适应入位过程包含了驱动系统与入位系统的强耦合关系,即通过各向接触力值无法准确得出当前球头球窝的相对位置关系,因此需

要构建基于力反馈的球头入位闭环控制系统。将球头球窝侧向接触力作为定位器X/Y向传动系统输入的一部分,通过分析定位器传动系统组成得到末端受力与输出位移的关系,进而驱动定位器补偿当前球心位置偏差,实现定位器末端球窝对球头的主动找正<sup>[11]</sup>。为减小球头入位时各向接触力稳态误差,提高入位系统的控制性能,在球头入位闭环反馈控制系统中引入滑模控制,并在Simulink环境下对构建的力控制系统进行仿真试验。基于滑模控制的球头自适应入位技术路线如图2所示。

## 2 三维力传感器力值信号的提取与处理

球头自适应入位主要基于三维力传感器展开,所以力传感器的测量精度关乎最终球头入位质量。三维力传感器一般选用电阻应变片作为传感元件,应变片输出电压较小,后续电路需要将其放大近1000倍才能满足A/D转换电路输入电平的要求<sup>[12]</sup>。由于放大电路和电阻应变片本身存在热噪声和电磁噪声,使得输出的信号波动较大,因此需要对三维力传感器的输出信号做滤波处理。

### 2.1 常用数字滤波算法

常见的数字滤波方法有算数平均滤波、递推平均滤波、限幅滤波和

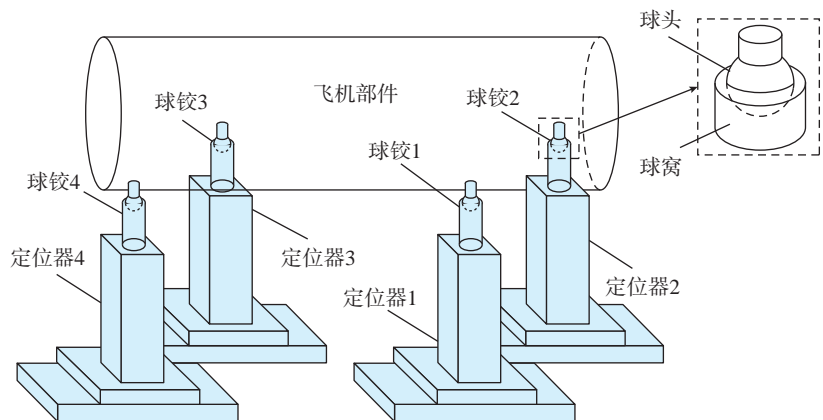


图1 姿态调整单元组成

Fig.1 Composition of attitude adjustment unit

其他一些基于 FIR 滤波器的光滑去噪方法等。

算术平均滤波作为最常用的数字滤波算法之一,通过在时刻  $T$  对信号进行连续  $N$  次采样,并对采样值做算术平均运算,作为当前时刻的信号值。当  $N$  取较大值时,信号具有较好的平滑度,此时需要多次采样,导致信号灵敏度有所下降;当  $N$  取较小值时,信号平滑度较差,但灵敏度较高。由此可见,算术平均滤波对于要求数据计算速度较快的实时控制不适用。

递推平均滤波把连续取得的  $N$  个采样值看成一个队列,将每次采样到的一个新数据放入队尾,并扔掉原来队首的一个数据,同时对队列中的  $N$  个数据进行算术平均运算,获得新的滤波结果。递推平均滤波平滑度高,适用于高频振荡系统,但其不易消除随机脉冲干扰引起的采样值偏差,同时比较浪费系统内存。

对于随机干扰,限幅滤波是一种有效的方法,通过比较相邻时刻的两个采样值,根据经验确定两次采样允许的最大偏差。如果两次采样值的差值超过最大偏差范围,则认为发生了随机干扰,并认为后一次采样值为非法值,应予删除,同时用前一时间采样值代替当前非法值;若未超过所允许的最大偏差范围,则认为本次采样值有效,基于限幅滤波的信号采样值可表示为

$$y = \begin{cases} l_- & (x < l_-) \\ x & (l_- \leq x \leq l_+) \\ l_+ & (x > l_+) \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $y$  为信号采样值;  $x$  为信号原始值;  $l_-$  和  $l_+$  分别表示限制幅值的下限和上限,限幅滤波能有效克服因偶然因素引起的脉冲信号,却无法抑制周期性的干扰,且平滑度较差。

FIR 即有限长单位冲激响应滤波器<sup>[13]</sup>,是数字滤波器的一种,对于一个  $N$  阶的 FIR 滤波器,其输出公

式  $y(n)$  可表示为

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k)x(n-k) \quad (2)$$

式中,  $h(k)$  为滤波器的系数;  $x(n-k)$  为  $x(n)$  延时  $k$  个周期。系统的传递函数  $H(z)$  可表示为

$$H(z) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k)z^{-k} = h(0) + h(1)z^{-1} + \dots + h(N-1)z^{-(N-1)} \quad (3)$$

从式(2)可以看出, FIR 滤波器的滤波过程主要是一组特定的系数与信号完成卷积的过程;从式(3)可以看出,在有限的  $z$  平面内有  $N-1$  个零点,同时其  $N-1$  个极点全部位于  $z$  平面等于 0 处,因此 FIR 滤波器也被称为全零点滤波器,是一个单位脉冲响应有限长的稳定系统。

### 2.2 限幅与 FIR 混合滤波试验

综合考虑上述滤波算法的优缺点,采用限幅与 FIR 滤波相结合的方法对三维力传感器力值做滤波处理。考虑对三维力传感器加载的便利性,

选取三维力传感器 Z 向通道进行滤波试验,在三维力传感器 Z 向加上 10 N 载荷,设置采样频率为 60 Hz,数据采集量为 200 个。对该组试验数据进行统计分析,得出原始力值数据的标准差  $\delta$  为 1.128 N。首先对原始力值进行限幅滤波处理,限制幅值为 (9.25, 10.75),滤波结果如图 3 所示。分析可知,限幅滤波的原始力值信号剔除了超差随机信号,保留下来的滤波信号幅值稳定在一定范围内,但信号平滑度并没有得到改善,于是对经限幅滤波后的信号做进一步 FIR 滤波处理,二次滤波结果如图 4 所示。

通过分析可知,对原始力值信号做限幅 FIR 混合滤波后,其信号变化幅度和平滑度都有了很大提升。进一步对经混合滤波后的力值数据做统计分析,得出滤波后的力值数据标准差  $\delta'$  为 0.759 N,相比原始力值标准差减小了 0.369 N,说明经限幅与

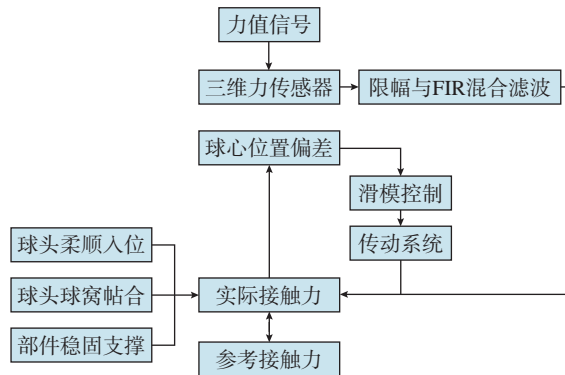


图2 球头自适应入位技术路线

Fig.2 Technique route of ball head adaptive positioning

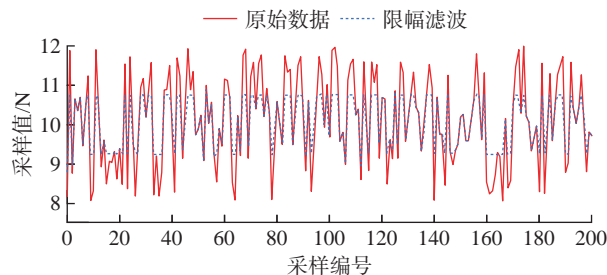


图3 限幅滤波处理效果

Fig.3 Limiting filtering processing effect

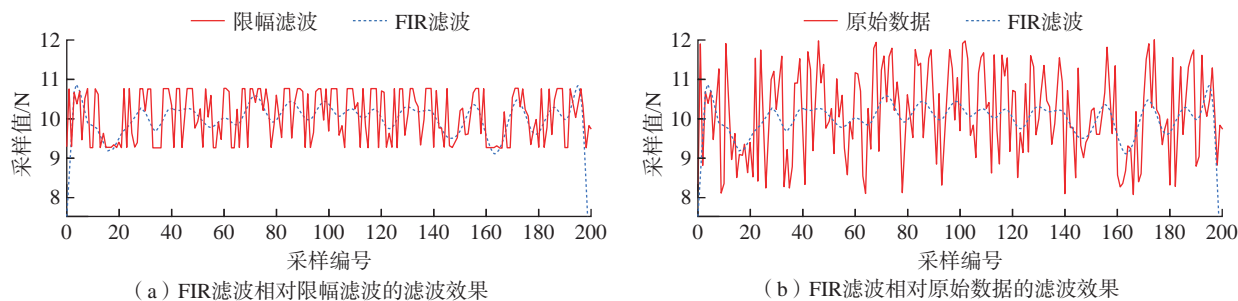


图4 FIR滤波处理效果  
Fig.4 FIR filtering effect

FIR混合滤波处理后的力传感器测量精度有了大幅提升。

### 3 球头自适应入位控制技术

在球头自适应入位过程中,定位器Z轴为位置控制轴,使球窝抬升接近球头。定位器的X/Y轴为力控制轴,通过反馈力的伺服闭环控制,引导定位器沿球头球窝接触力减小的方向移动。

#### 3.1 球头自适应入位方案设计

根据实际应用中球头球窝的相对位置关系和最终入位配合要求,可将球头入位过程分为4个阶段,如图5所示。

(1)接近阶段。部件行吊就位后,定位器与部件之间存在较大位置偏差,通过手持控制单元驱动定位器使球窝接近球头,使球头中心在水平方向上大致落在球窝开口范围内,球头相对球窝的可入位范围如图6所示。即球头球心 $O$ 在平面 $P$ 上的竖直投影 $O'$ 包含于球窝开口圆面 $K$ ,此时的圆面 $K$ 即为球窝相对球头的可入位范围。

(2)顶升阶段。顶升阶段定位器X/Y方向不动,Z轴上升,直到球头球窝开始接触。

(3)进入阶段。在球头球窝开始接触并进入的阶段,定位器Z轴为位置轴,X/Y轴为力控制轴,在球窝继续顶升的过程中,由于球头球窝存在位置偏差,球窝会受到球头带来的侧向力,三维力传感器感受到的侧向

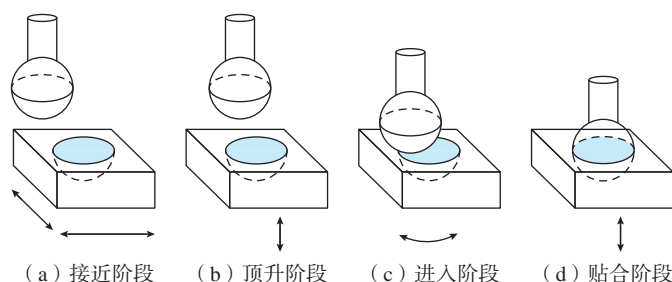


图5 球头入位过程  
Fig.5 Process of ball head positioning

力通过力控制器和传动系统后,定位器开始基于反馈力运动以补偿球头球窝位置偏差带来的强迫接触力,直至球头球窝的中心位置在X/Y向重合。

(4)贴合阶段。定位器沿Z轴继续做顶升运动,三维力传感器实时监控球头球窝Z向接触力,当接触力达到设定阈值时,可以认为球头球窝已完全贴合,此时定位器停止运动,完成球头入位。

#### 3.2 球头入窝受力模型与理论入位轨迹生成

在球头入位过程中,由于没有辅助测量设备实时监测球头球窝相对位置,且在球头入位前不知道球头球窝的各向偏移量,也无法基于定位器各轴的当前位置计算出球窝相对球头的理论驱动量,考虑到接触力是球头入位位置偏差的映射,理想状态下当接触力为0时,说明球头球窝的球心位置没有偏差,因此基于反馈力引导定位器运动<sup>[14-16]</sup>。首先建立球头入位过程中的一般受力模型,如图7所示。

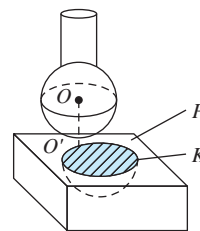


图6 球头可入位理论范围示意图  
Fig.6 Schematic diagram of theoretical range of ball head positioning

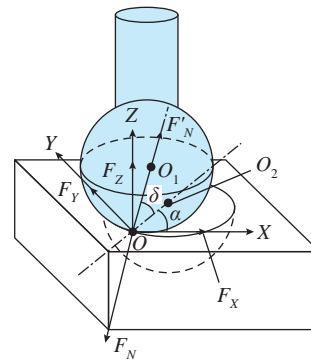


图7 球头球窝接触的一般受力模型  
Fig.7 General force model for ball head and socket contact

为满足飞机大部件支撑结构的稳固性,球头球窝的制造材料一般选取高强度结构钢,其刚度较大,且球头球窝表面较光滑,于是在构建球头入位的一般受力模型时不考虑球头与球窝之间的摩擦力。以球头球窝接触点为原点建立坐标系  $O-X/Y/Z$ , 球窝在接触点所受合力为  $F_N$ , 球头所受合力为  $F'_N$ , 由球面接触特性可知,  $F'_N$  过球头球心  $O_1$ 。过原点  $O$  作辅助线  $O-O_2$  过球窝外圆圆心  $O_2$ , 进一步由球窝自身结构特点可知, 球头所受合力  $F'_N$  在  $O-X/Y$  平面的分力(即球窝水平方向所受合力)在  $O-O_2$  连线上。 $O-O_2$  连线与  $X$  方向夹角为  $\alpha$ ,  $F'_N$  与水平面  $O-X/Y$  的夹角为  $\delta$ , 将  $F'_N$  沿  $X/Y/Z$  3 个方向进行分解可得到  $F_X$ 、 $F_Y$  和  $F_Z$ , 因此  $[-F_X \ -F_Y \ -F_Z]^T$  即为三维力传感器三向通道的理论输出值。

由二力平衡公理及静力平衡原理,可知

$$\begin{cases} F_X = F'_N \times \cos\delta \times \cos\alpha \\ F_Y = F'_N \times \cos\delta \times \sin\alpha \\ F_Z = F'_N \times \sin\delta \\ F'_N = -F'_N \end{cases} \quad (4)$$

通过对球头入位进行一般受力分析可知,若能将  $F_X$  和  $F_Y$  控制在较小水平范围内,即此时球头球窝的侧向接触力较小,就能实现调姿部件的柔顺入位。因此,基于力伺服检测并控制球头球窝侧向接触力达到期望值,即对定位器  $X/Y$  向进行显式力控制<sup>[17-18]</sup>。

基于力伺服的球头入位需要给定定位器末端球窝的理论运动轨迹,如图 8 所示,其中  $F_N$  为球头球窝接触力,  $S$  为球头球窝接触点处的切矢;  $S_H$  为球头球窝接触点切矢在水平方向的投影;  $S_X$  为  $S_H$  在  $X$  方向的投影;  $S_Y$  为  $S_H$  在  $Y$  方向的投影,球头理论入位轨迹即沿球面接触点处切矢方向的圆弧。

设球头球窝接触力  $F_N=[k_1f$

$k_2f \ k_3f]^T$ , 球头球窝接触点轨迹切矢  $S=[v_x t \ v_y t \ v_z t]^T$ , 其中  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  分别为  $X/Y/Z$  3 向接触力系数;  $f$  为设定的力值,设某一时刻球头球窝接触力  $F_N=[f_1 \ f_2 \ f_3]^T$ , 则此时可令  $k_1=1$ 、 $k_2=f_2/f_1$ 、 $k_3=f_3/f_1$ 、 $f=f_1$ ,  $v_x$ 、 $v_y$ 、 $v_z$  分别为定位器  $X/Y/Z$  3 向运动速度,则球头球窝接触点水平方向轨迹切矢  $S_H=[v_x t \ v_y t \ 0]^T$ , 由于球头球窝接触力  $F_N$  过球心,则  $F_N \perp S$ , 即

$$F_N \cdot S = |F_N| \times |S| \times \cos \langle F_N S \rangle = (k_1 \times v_x + k_2 \times v_y + k_3 \times v_z) \times f \times t = 0 \quad (5)$$

其中  $f$ 、 $t$  不为 0, 则

$$k_1 \times v_x + k_2 \times v_y + k_3 \times v_z = 0 \quad (6)$$

同时  $F_N$ 、 $S$ 、 $S_H$  共面,以球心为坐标原点,设过原点平面方程为

$$Ax + By + Dz = 0 \quad (7)$$

由  $F_N$ 、 $S$  共面有

$$F_N \times S = [(k_2 \times v_z - k_3 \times v_y) \vec{i} + (k_3 \times v_x - k_1 \times v_z) \vec{j} + (k_1 \times v_y - k_2 \times v_x) \vec{k}] \times f \times t \quad (8)$$

于是可得到

$$\begin{cases} A = (k_2 \times v_z - k_3 \times v_y) \times f \times t \\ B = (k_3 \times v_x - k_1 \times v_z) \times f \times t \\ D = (k_1 \times v_y - k_2 \times v_x) \times f \times t \end{cases} \quad (9)$$

同时  $S_H$  在  $F_N$  与  $S$  组成的平面内,则有

$$[(k_2 \times v_z - k_3 \times v_y) \times v_x + (k_3 \times v_x - k_1 \times v_z) \times v_y] \times f \times t^2 = 0 \quad (10)$$

化简可得到

$$v_x = \frac{k_1}{k_2} \times v_y \quad (11)$$

在球头入位过程中,定位器  $Z$  轴

为位置控制轴,其运动速度已知,令  $v_z=v_0$ , 则联立式(6)和(11)可以得到

$$\begin{cases} v_x = \frac{-k_1 \times k_3}{k_1^2 + k_2^2} \times v_0 \\ v_y = \frac{-k_2 \times k_3}{k_1^2 + k_2^2} \times v_0 \end{cases} \quad (12)$$

由此可得到球头理论入位轨迹表达式为

$$\begin{cases} x = v_x \times t = \frac{-k_1 k_3}{k_1^2 + k_2^2} \times v_0 \times t \\ y = v_y \times t = \frac{-k_2 k_3}{k_1^2 + k_2^2} \times v_0 \times t \\ z = v_0 \times t \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $x$ 、 $y$ 、 $z$  分别为理论入位轨迹在  $X/Y/Z$  3 个方向的分量。

### 3.3 球头入位驱动模型构建与仿真

理论入位轨迹是通过计算球头球窝接触点相对空间接触力的切矢方向实时生成的,空间接触力由三维力传感器采集得到,但三维力传感器测量精度有限,于是实际接触点切矢方向相对理论切矢方向存在偏差。同时由于定位器  $Z$  轴垂直度、球头制造精度等因素的影响,球头实际入位轨迹与理论入位轨迹之间很难完全重合,两者之间存在偏差  $\Delta L$ , 因此由胡克定律可得到球头球窝之间的实际接触力为

$$F_N = K_e \times \Delta L \quad (14)$$

式中,  $K_e$  为定位器沿球头球窝接触力方向的刚度。

以定位器  $X$  向运动为例进行力

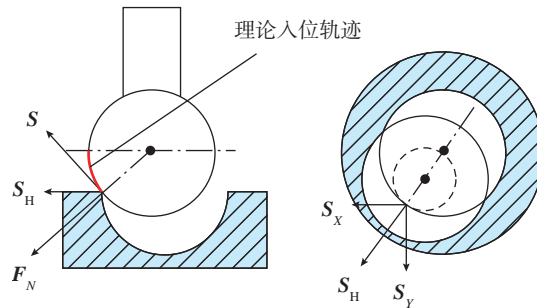


图 8 球头理论入位轨迹生成示意图

Fig.8 Diagram for generating theoretical insertion trajectory of ball head

控分析,考虑X向受力有

$$F_x = K_{ex} \times \Delta L_x \quad (15)$$

式中,  $K_{ex}$  为定位器X向刚度;  $\Delta L_x$  为球头球窝X向轨迹偏差。得到X向接触力后,还需要设计对应的力控制器以减小入位过程中X向接触力的稳态误差,考虑基于滑模控制算法设计力控制器。首先设计滑模面,选取X向实际入位轨迹与理论入位轨迹之间的偏差  $\Delta L_x$  为跟随误差  $e_x(t)$ ,设计X向滑模面  $s_x$  为

$$s_x = C \times e_x(t) + e_x(t)' = C \times (x_{1d} - x_1) + (x_{1d}' - x_1') \quad (16)$$

式中,  $C$  为正常数;  $x_{1d}$  为定位器X向理论运动轨迹;  $x_1$  为定位器X向实际运动轨迹;  $x_{1d}'$  为定位器X向理论运动速度;  $x_1'$  为定位器X向实际运动速度。

力控制器的输出主要为了使定位器实际运动轨迹能较好跟随理论运动轨迹,于是在球头球窝接触时将定位器抽象为自由刚体,其运动由力控制器输出引导,同时结合牛顿第二定律,则X向力控制器输出  $u_x$  可表示为

$$u_x = m_x \times x_1' \quad (17)$$

式中,  $m_x$  为定位器X向惯量。

检验滑模控制器设计的合理性,取Lyapunov函数为

$$V = \frac{1}{2} e_x(t)^2 \quad (18)$$

在滑模面内有  $s_x = 0$ , 即有

$$C e_x(t) + e_x(t)' = 0 \Rightarrow e_x(t) = e_x(0) \times e^{-Ct} \quad (19)$$

可以看出,在滑模面内跟随误差  $e_x(t)$  会以指数速度趋近于0。同时  $V' = e_x(t) \times e_x(t)' = e_x(t) \times (s_x - C \times e_x(t))$

$$V' = -C \times e_x(t)^2 < 0 \quad (20)$$

所以在滑模面内由Lyapunov稳定判据<sup>[19]</sup>可以知道,球头入位X向轨迹偏差  $e_x(t)$  会不断收敛。取滑膜控制趋近律为指数趋近律,即

$$s_x' = -\varepsilon \text{sgn}(s_x) - p \times s_x, \varepsilon > 0, p > 0 \quad (22)$$

式中,  $\varepsilon$  为趋近速度;  $p$  为趋近项系数,联立以上各式有

$$\begin{cases} u_x = m_x \times x_1' \\ s_x = C \times (x_{1d} - x_1) + (x_{1d}' - x_1') \\ s_x' = -\varepsilon \text{sgn}(s_x) - p \times s_x \end{cases} \quad (23)$$

可以得到定位器X向滑模控制器的输出为

$$u_x = m_x \times (\varepsilon \text{sgn}(s_x) + p \times s_x + C \times (x_{1d}' - x_1') + x_{1d}'') \quad (24)$$

于是可得到定位器X向的力控制框图,如图9所示。

定位器Y向与X向运动形式相同,在此不详细叙述定位器Y向的驱动模型构建过程,参照X向滑模控制系统可得到定位器Y向滑模控制器输出  $u_y$  为

$$u_y = m_y \times (\varepsilon \text{sgn}(s_y) + p \times s_y + C \times (y_{1d}' - y_1') + y_{1d}'')$$

$$(y_{1d}' - y_1') + y_{1d}'') \quad (25)$$

式中  $m_y$  为定位器Y向惯量;  $s_y$  为Y向滑模面;  $y_{1d}$  为定位器Y向理论运动轨迹;  $y_1$  为定位器Y向实际运动轨迹;  $y_{1d}'$  为定位器Y向理论运动速度;  $y_1'$  为定位器Y向实际运动速度。

选择定位器X向传动系统为研究对象,对设计的力控制系统进行仿真,定位器X向传动系统主要由伺服电机、联轴器、滚珠丝杠、直线导轨和滑动平台等组成,其机械结构参数如表1所示。

在Simulink中搭建定位器X向的力控制模型,其中滑模控制器参数分别取  $m_x = 128 \text{ kg}$ 、 $C = 15$ 、 $p = 10$ 、 $\varepsilon = 5$ ,具体如图10所示。

分析设计的定位器力控制模型

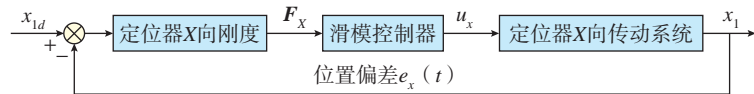


图9 X向力控制结构示意图

Fig.9 Diagram of X-direction force control structure

表1 X向平移台机械结构参数

Table 1 Mechanical structure parameters of X-direction translation platform

机械参数	数值
丝杠扭转刚度 $K_{x1}/(\text{N} \cdot \text{mm} \cdot \text{rad}^{-1})$	$6.2 \times 10^9$
丝杠转动阻尼 $B_{x1}/(\text{N} \cdot \text{mm} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1})$	60
丝杠转动惯量 $J_{x1}/(\text{kg} \cdot \text{mm})$	12.8
丝杠导程 $L_{x1}/\text{mm}$	8.0
定位器X向刚度 $K_{ex}/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	1450
定位器X向阻尼 $B_x/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{mm}^{-1})$	98
定位器X向惯量 $M/\text{kg}$	128

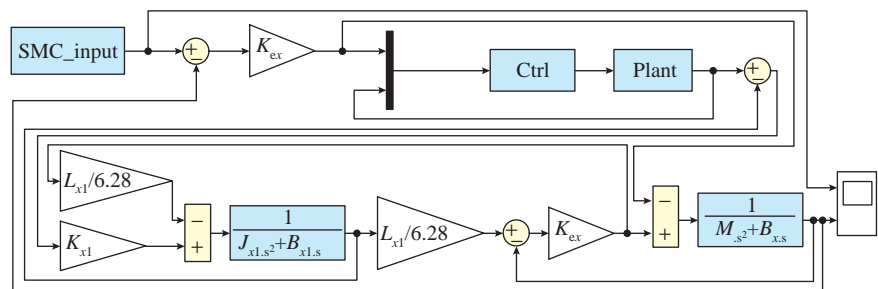


图10 定位器X向力控制的Simulink模型

Fig.10 Simulink model for X-direction force control of locator

动态特性,响应速度和稳态误差是评价构建的力控系统性能优劣的标准之一,于是输入单位阶跃信号进行测试,通过改变滑模控制的指数趋近项系数  $p$  即可改变滑模系统的收敛速度,当系数  $p$  取 10 时,系统的单位阶跃响应如图 11 所示。

从仿真结果可以看出,系统达到稳态的时间约为 0.6 s,达到稳态后系统超调量极小。因此,基于滑膜控制的力反馈控制系统不会发生振荡,系统具有较快的响应速度,同时系统稳态误差极小,说明设计的力控制器动态特性较好。

#### 4 试验验证与数据分析

试验主要基于某机身模拟件的调姿对接展开,如图 12 所示,研究部件工艺球头的自适应入位过程,评估本文提出的基于滑模控制的球头自适应入位方法的可行性和有效性。

##### 4.1 球头自适应入位试验

在球头入位过程中,实时监控定位器位置和球窝受力的变化,选择数控定位器 B 对应的球头入位为研究对象,其入位过程中各方向力值变化如图 13 所示。可以看出,在第 24 s 时,球头球窝开始接触,入位过程的最大侧向力约为 14 N,除了力传感器自身的信号抖动,整个入位过程的接触力变化较平稳;在第 43 s 时,球头球窝水平方向位置完全找正,定位器 Z 轴继续顶升,实现球头球窝的完全贴合,至此球头入位结束。

观察图 14 中的球头入位过程中各向的位置变化,其中 Z 轴作为位置控制轴做速度为 1 mm/s 的匀速顶升运动, X、Y 轴作为力控制轴其运动由侧向接触力决定,可以看到入位过程中定位器 X、Y 向运动曲线变化较平滑,说明设计的球头入位方案能较好地适应当前驱动环境,满足球头低应力柔顺入位要求。

##### 4.2 不同相对位置的球头入位试验

分别设置球头球窝在不同相对

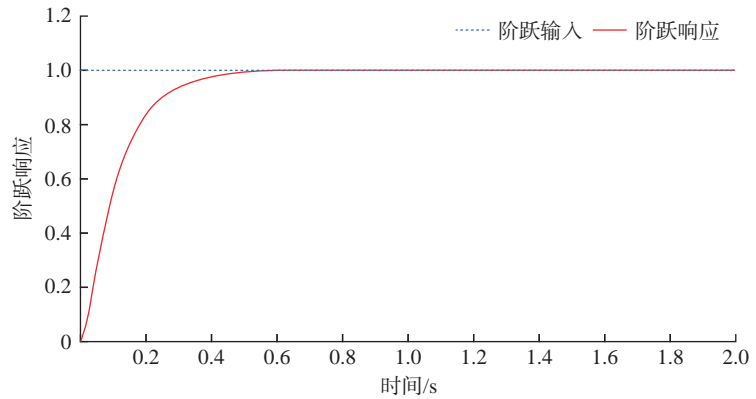


图 11 定位器 X 向力控制的单位阶跃响应

Fig.11 Unit step response of locator X-direction force control



图 12 调姿平台

Fig.12 Posture adjustment platform

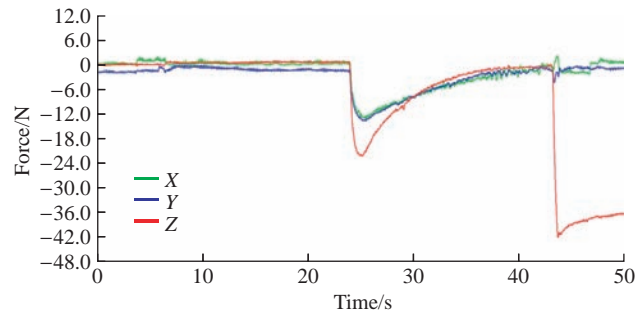


图 13 球头入位各向力值变化

Fig.13 Changes in anisotropic force values during ball head positioning

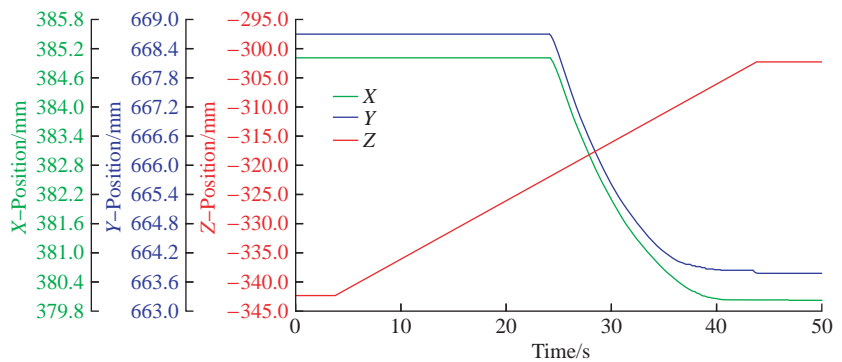


图 14 球头入位各向位置变化

Fig.14 Changes in position of ball head in all directions during insertion

位置下的入位试验,选取水平方向上球头球窝的球心相对位置为试验变量。设置试验组 1 对应的球心相对位置为  $\Delta x = \Delta y = 10$  mm; 设置试验组 2 对应的球心相对位置为  $\Delta x = \Delta y = 6$  mm; 设置试验组 3 对应的球心相对位置为  $\Delta x = \Delta y = 2$  mm, 球头在不同相对位置下的入位力值变化见图 15。

通过图 15 中不同试验组对应球头入位过程力值变化可以看出,相对位置不同会影响球头入位过程中接触力的变化,相对位置越小,球头入位过程各向接触力极值越小。由图

15 (a) 可以发现,定位器 Z 向力值在第 19~26 s 时基本不变,说明此时部件所受合力大于其自身重力,故在球头入位过程中,球头球窝的初始相对位置不应过大,以防在入位时过大的接触力使部件产生翻转。

#### 4.3 不同部件姿态的球头入位试验

进一步分析设计的球头自适应入位方案的鲁棒性,研究部件不同姿态对球头入位过程的影响。为较好地模拟机身偏转、俯仰和横滚等不同姿态,拟通过改变定位器 B 相对三定位器初始平面的轴向高度使模拟件呈现不同的位姿,位姿设置见图 16

( $d_1$ 、 $d_2$  分别代表定位器 B 相对三定位器初始位姿水平面提升的轴向高度)。不同位姿下球头入位各向力值变化见图 17。

观察不同位姿条件下入位过程中侧向接触力的变化,可以看到不同位姿条件下 X、Y 向入位力值不同,随着部件偏转姿态角的增加,定位器 X 向接触力增加、Y 向接触力减少。这说明在球头入位过程中,过大的部件姿态变化可能导致球头入位过程中的单边接触力过大,所以在实际应用中部件的入位姿态应维持在一定限度内。

## 5 结论

本文针对大型部件入位难的问题,提出了一种基于滑模控制的球头自适应入位方法,并得出了以下 3 点结论。

(1) 三维力传感器原始力值信号波动较大,很难直接使用,通过限幅滤波和 FIR 滤波相结合的方法能很好地抑制原始力值的波动,得到平稳的力值输出信号。

(2) 构建球头入位过程的定位器驱动模型,对定位器 X/Y 轴采用显式力控制,基于滑模算法设计定位器伺服闭环反馈控制系统中的力控制器,并对控制模型进行仿真。仿真结果显示系统达到稳态的调整时间约为 0.6 s,最终稳态误差趋近于 0,验证了滑模控制器输出能很好地实现对控制目标的跟随。

(3) 搭建部件调姿平台进行球头自适应入位试验,分析试验数据可知,球窝最大侧向受力未超过 15 N,各向接触力值变化较平稳,入位过程连续且没有出现失稳现象。为验证本文提出的球头入位方法的鲁棒性,进一步设计了不同相对位置和不同部件姿态下的球头入位过程,试验结果显示设计的球头入位方案能很好地适应入位环境的变化。各项试验结果都较好地验证了本文提出的基

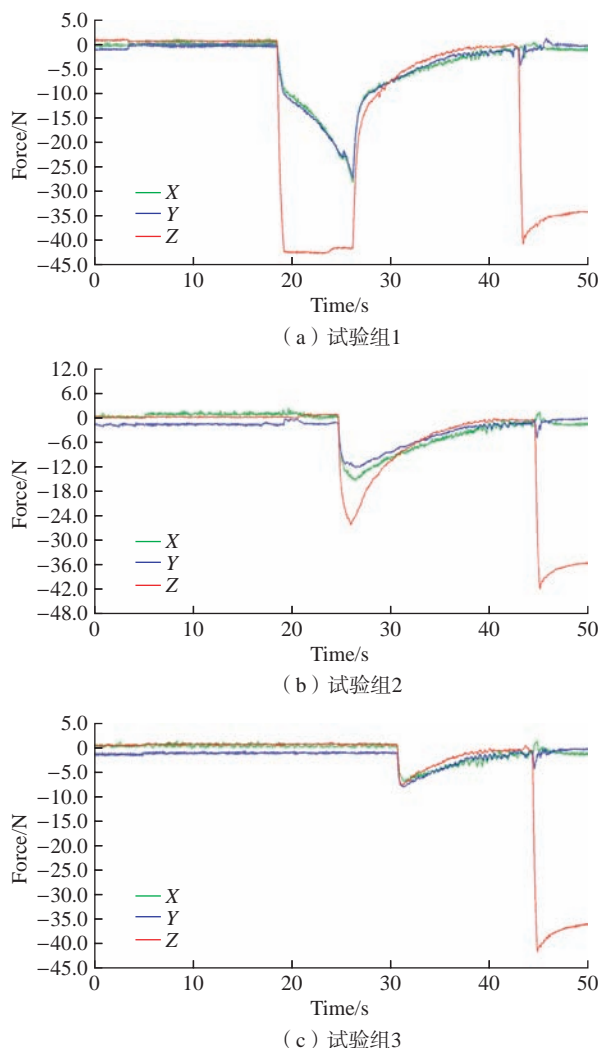


图 15 不同相对位置的球头入位

Fig.15 Positioning of ball head in different relative position

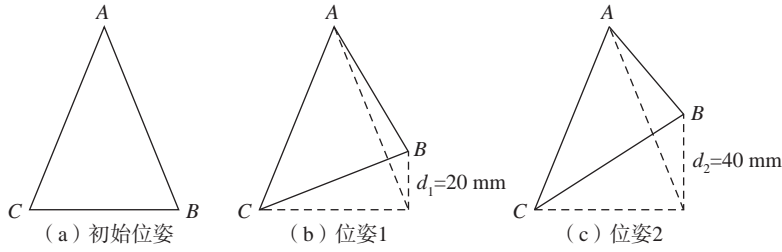


图 16 位姿设置示意图  
Fig.16 Diagram of pose setting

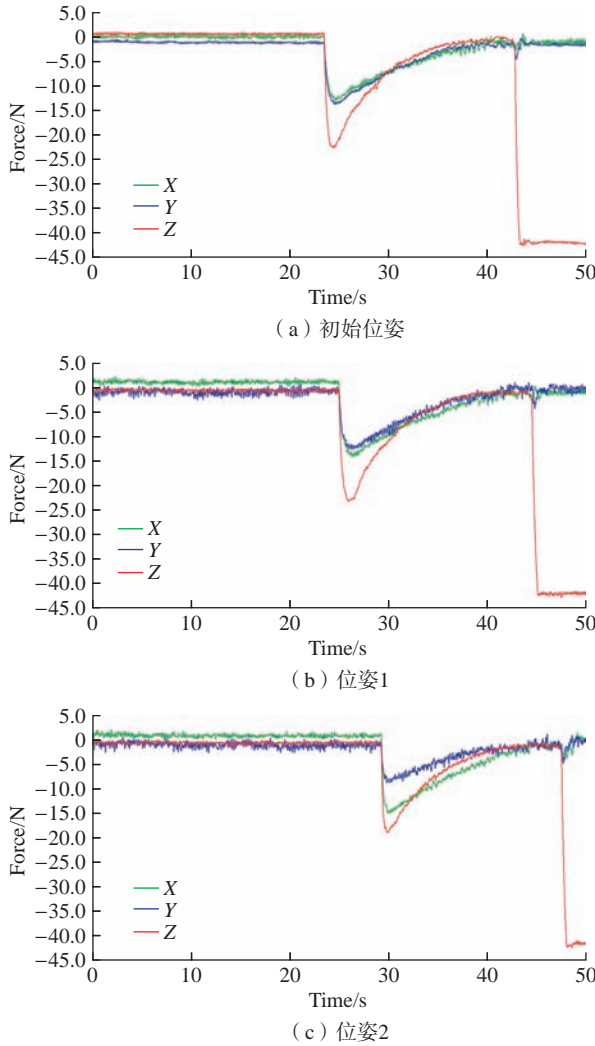


图 17 不同位姿下球头入位力值变化

Fig.17 Changes in ball head positioning force value under different postures

于滑模控制的球头自适应入位的可行性和有效性。

参考文献

[1] 秦龙刚, 陈允全, 姚定. 飞机装配先

进定位技术 [J]. 航空制造技术, 2009, 52(14): 55-57.

QIN Longgang, CHEN Yunquan, YAO Ding. Advanced positioning technology for aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(14): 55-

57.

[2] 邹冀华, 刘志存, 范玉青. 大型飞机部件数字化对接装配技术研究 [J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(7): 1367-1373.

ZOU Jihua, LIU Zhicun, FAN Yuqing. Large-size airplane parts digital assembly technology[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(7): 1367-1373.

[3] 刘春. 飞机数字化装配系统中工艺球头入位测量方法研究 [J]. 航空制造技术, 2015, 58(21): 128-129, 137.

LIU Chun. Research on measuring method of ball-heads position-following in aircraft digital assembly system[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(21): 128-129, 137.

[4] MEI Z Y, MAROPOULOS P G. Review of the application of flexible, measurement-assisted assembly technology in aircraft manufacturing[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2014, 228(10): 1185-1197.

[5] LIU H, ZHU W D, DONG H Y, et al. An adaptive ball-head positioning visual servoing method for aircraft digital assembly[J]. Assembly Automation, 2019, 39(2): 287-296.

[6] 邱宝贵, 蒋君侠, 毕运波, 等. 大型飞机机身调姿与对接试验系统 [J]. 航空学报, 2011, 32(5): 908-919.

QIU Baogui, JIANG Junxia, BI Yunbo, et al. Posture alignment and joining test system for Large aircraft fuselages[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(5): 908-919.

[7] 陈利鹏. 定位器模型参考自适应控制系统设计 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.

CHEN Lipeng. Model reference adaptive control system design of localizer[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.

[8] CHEN M Q, LIU W S, MA Y Z, et al. Mixed slip-deceleration PID control of aircraft wheel braking system[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(4): 160-165.

[9] CHEN C Z, NIE H, CHEN J B, et al. A velocity-based impedance control system for a low impact docking mechanism (LIDM)[J]. Sensors, 2014, 14(12): 22998-23016.

[10] 刘金琨, 孙富春. 滑模变结构控制理论及其算法研究与进展 [J]. 控制理论与应用, 2007, 24(3): 407-418.

LIU Jinkun, SUN Fuchun. Research and development on theory and algorithms of sliding

- mode control[J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(3): 407–418.
- [11] MASON M T. Compliance and force control for computer controlled manipulators[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1981, 11(6): 418–432.
- [12] 许德章, 葛运建, 高理富. 机器人多维力传感器标定 Kalman 滤波 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2006, 20(1): 92–97.
- XU Dezhang, GE Yunjian, GAO Lifu. Kalman filter for the multi-component force/moment sensor of robot calibration[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2006, 20(1): 92–97.
- [13] DIOURI O, GAGA A, OUANAN H, et al. Comparison study of hardware architectures performance between FPGA and DSP processors for implementing digital signal processing algorithms: Application of FIR digital filter[J]. *Results in Engineering*, 2022, 16: 100639.
- [14] ZHANG J, SHAO J, REN Z J, et al. Research on dimension coupling of piezoelectric three-component force unit based on sensor assembly error[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2019, 11(5): 168781401984629.
- [15] 沈显庆, 曹庆臣. 力反馈双向伺服系统控制研究 [J]. *自动化与仪器仪表*, 2017(5): 134–136, 139.
- SHEN Xianqing, CAO Qingchen. Research on control of force feedback double direction servo system[J]. *Automation & Instrumentation*, 2017(5): 134–136, 139.
- [16] 曹清华. 基于力觉反馈的电液伺服系统设计 [J]. *机床与液压*, 2011, 39(1): 83–85.
- CAO Qinghua. Research on electro-hydraulic servo control system with force-feedback[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2011, 39(1): 83–85.
- [17] 姜俊杰, 张玉茹, 王党校. 力反馈装置控制及伺服频率分析 [J]. *微计算机信息*, 2005, 21(12): 93–95.
- JIANG Junjie, ZHANG Yuru, WANG Dangxiao. Stall torque control and update rate problem in force feedback system[J]. *Microcomputer Information*, 2005, 21(12): 93–95.
- [18] SHENG X J, XU L, WANG Z. A position-based explicit force control strategy based on online trajectory prediction[J]. *International Journal of Robotics and Automation*, 2017, 32(1): 93–100.
- [19] DASS A, SRIVASTAVA S, KUMAR R. A novel Lyapunov-stability-based recurrent-fuzzy system for the Identification and adaptive control of nonlinear systems[J]. *Applied Soft Computing*, 2023, 137: 110161.

通讯作者: 李泂泉, 副教授, 博士, 研究方向为飞机柔性装配技术、数字化测量技术等。

## Adaptive Positioning Method for Ball Head Based on Sliding Mode Control

ZHANG Zhongqing<sup>1</sup>, LI Shuanggao<sup>2</sup>, LIU Yang<sup>2</sup>

(1. Beijing Power Machinery Research Institute, Beijing 100074, China;

2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**[ABSTRACT]** The accurate placement of the ball head fixed to the aircraft structure into the ball socket at the end of numerical control locator is a prerequisite for attitude adjustment and docking of the aircraft structure. Aiming at the problem of locating large components accurately, a sliding mode control based ball adaptive positioning method was proposed. Firstly, perform amplitude limiting and FIR filtering on the output of the three-dimensional force sensor, and perform zero crossing linear regression on its calibration curve to improve the measurement accuracy of the force sensor; Secondly, a force guided locator driving model is constructed, and a force controller is designed based on sliding mode theory, of which design rationality is verified based on Lyapunov stability criteria; Then, a ball head dimming model based on sliding mode control is built in Simulink environment, and the simulation results show that the designed force feedback control system has no vibration and fast response speed; Finally, a simulation part of the fuselage is tested to verify that the test results meet the designed requirement of ball head low stress placement, which verifies the effectiveness of the method.

**Keywords:** Aircraft assembly; Ball head positioning; Sliding mode control; FIR filter; Force feedback

(责编 古系)

引文格式:王张浩,李东升,翟雨农.弱刚性薄壁件夹具布局优化方法研究概述[J].航空制造技术,2023,66(14):118-135.

WANG Zhanghao, LI Dongsheng, ZHAI Yunong. A review of fixture layout optimization method for weakly-rigid thin-walled workpieces[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(14): 118-135.

# 弱刚性薄壁件夹具布局优化方法研究概述

王张浩,李东升,翟雨农

(北京航空航天大学,北京 100191)

**[摘要]** 弱刚性薄壁件因其重量轻、强度高等特点被大量应用于航空航天、汽车等工业领域,但是同时也存在厚度小、刚性弱,在制造过程中极易发生变形的缺点。而夹具布局设计是减少薄壁件制造变形、保证其制造质量的一个非常重要的因素。传统的薄壁件夹具布局设计依赖于工程师的直观判断和经验积累,速度慢、成本高、设计随意性大。随着计算机技术的不断提高,国内外学者先后应用有限元仿真、数学规划、智能优化算法以及代理模型等理论和方法对薄壁件夹具元件的布局进行优化设计,取得了大量研究成果。根据目标函数的建模方法以及所使用的优化算法对相关研究进行了系统的分类讨论,并详细分析了各个建模方法和优化算法的优缺点。最后对弱刚性薄壁件夹具布局优化方法的相关研究进行总结,并提出了相应的研究建议。

**关键词:** 弱刚性薄壁件; 夹具布局优化; 有限元方法; 代理模型; 优化算法

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2023.14.118



王张浩

博士研究生,主要研究方向为飞机复合材料结构装配形性控制。

薄壁件通常是指厚度与长度尺寸之比小于 1/10 的工件<sup>[1]</sup>。由于具有强度高、重量轻、几何造型流畅等优点,薄壁件广泛应用于航空航天、

汽车、船舶等工业领域(图 1)<sup>[2]</sup>。薄壁件种类繁多,按结构用途可分为框类、梁类、接头类、壁板类、肋类等类型。但由于其尺寸大、刚性弱,在加工、装配、测量等阶段受自身重力和切削力、夹紧力等外部载荷作用,极易产生不可忽视的变形,严重影响薄壁件的尺寸和形状准确度,造成最终产品难以达到质量要求。分析表明,在“3-2-1”定位布局下,一个尺寸为 400 mm × 400 mm × 1 mm 的钢板在自重下的平均挠度可达到 1~3 mm<sup>[3]</sup>。因此,为了确保薄壁件按照规定的尺寸和公差制造,生产过程中必须使用夹具来抑制其过度变形。

夹具是用于在三维工作空间中定位、约束和支撑工件的装置,是制造过程中至关重要的工具。一般来说,一个夹具系统由 3 种基本元件组成<sup>[4]</sup>。

(1) 定位器。没有驱动能力的

静态定位元件,用于将工件定位到所需的位置和方向,一个典型的夹具至少有 6 个定位器。

(2) 夹紧元件。具有驱动能力的静态定位元件,用于施加力以安全地将工件固定在指定位置,一个典型的夹具至少有两个夹紧元件。

(3) 支撑元件。无驱动能力的静态定位元件,用于减少制造过程中载荷引起的工件局部弹性变形,提高夹具-工件系统的稳定性,夹具中支撑元件的存在不是强制性的,其数量没有限制。

而薄壁件夹具(图 2)除了需要具有停止刚体运动的基本功能外,还应能够抑制薄壁件因外载或重力产生的过度变形。制造过程中,夹具元件数量、位置等参数选择不当会导致薄壁件变形超差,从而影响其尺寸和形状精度,严重的情况下甚至导致产品报废。因此,夹具布局设计是保证

薄壁件制造质量的一个非常重要的因素。在夹具布局设计中,需要考虑的夹具布局参数主要有夹具元件的数量、位置、装夹顺序及夹紧力值等,需要控制的目标主要有工件变形、尺寸偏差及工件内部应力水平,常见的薄壁件材料以及不同工艺阶段中薄壁件面临的工艺载荷如表 1 所示。制造过程中,需要根据所面临的研究对象、目标函数及需要考虑的夹具布局参数,确定合适的夹具布局优化设计方法。

传统的薄壁件夹具布局设计依赖于工程师的直观判断和经验积累,速度慢、成本高、设计随意性大,难以满足越来越高的生产精度要求。随着计算机技术的不断提高,国内外学



图 1 薄壁件在各领域的应用<sup>[2]</sup>

Fig.1 Application of thin-walled workpieces in various fields<sup>[2]</sup>



图 2 典型薄壁件夹具系统

Fig.2 Typical fixture system of thin-walled workpieces

表 1 弱刚性薄壁件夹具布局设计参数

Table 1 Fixture layout design parameters of weakly-rigid thin-walled workpieces

材料	工艺阶段	工艺载荷	夹具布局参数	控制目标
金属、复合材料	加工	重力、夹紧力、切削力	夹具元件数量、位置、装夹顺序及夹紧力值等	工件变形、尺寸偏差、工件内部应力水平
	装配	重力、夹紧力,焊接、铆接等连接载荷		
	测量	重力		

者先后应用有限元仿真、数学规划、智能优化算法以及代理模型等理论和方法对薄壁件夹具元件的布局进行优化,取得了大量的研究成果。

本文对弱刚性薄壁件夹具布局优化的相关研究进行了详细的综述,并分析了各个夹具布局优化算法的优缺点,讨论了当前弱刚性薄壁件夹具布局优化算法的发展趋势,旨在为后续研究提供理论指导。本文按照目标函数的建模方法以及所使用的优化算法对当前薄壁件夹具布局优化方法进行了分类讨论,具体组织结构如下:首先,简要说明了弱刚性薄壁件夹具布局优化方法的研究背景及意义,然后讨论了基于有限元方法的夹具布局优化方法;为解决基于有限元方法的夹具布局优化方法计算成本高、优化效率低的问题,随后介绍了基于代理模型的夹具布局优化方法;最后对弱刚性薄壁件夹具布局优化方法的研究进展进行总结,并指出将来的研究方向。

## 1 基于有限元模型的夹具布局优化方法

薄壁件夹具布局优化是非常复杂的工程问题,其中涉及较多的设计变量和约束条件,目标函数与设计变量之间往往是非线性关系,而且并不总是存在解析表达式。有限元方法(Finite element method, FEM)利用数学近似的方法对真实物理系统进行模拟,其实质是将复杂的连续体划分为有限多个简单的单元体,化无限自由度问题为有限自由度问题,是一种离散的数值求解方法。作为一种

公认和可靠的建模方法,有限元方法广泛应用于薄壁件的夹具布局优化中,以计算薄壁件在不同夹具布局下的变形量,并结合优化算法,从而实现薄壁件的夹具布局优化设计。目前,将有限元分析和优化算法相结合的方法已成为薄壁件夹具布局优化设计的主流方法,具体流程如图 3 所示。按照各算法所基于的数学理论来分类,目前常用的优化算法主要有数学规划方法、元启发式方法和拓扑优化方法等。

### 1.1 采用数学规划方法的夹具布局优化方法

数学规划方法是一种确定性的优化方法,也被称为梯度方法,需要可靠的灵敏度计算。根据构成类型的不同,主要分为线性规划、线性 & 二次整数规划、序列二次规划、内点法、拟牛顿法和共轭梯度法等。这些算法会从一个初始解开始,并基于梯度,不断寻找改进解,直到达到局部最优的库恩-塔克条件,或者直到不能大幅度改进解。将其与有限元分析相结合的方法是发展最早的薄壁件夹具布局优化方法,具体流程如图 4 所示。

Rearick<sup>[5]</sup>采用有限元分析和非线性规划相结合的方法来确定可变形钣金件夹具元件的最佳位置,发现了优化过程中有限元网格重构会导致数值优化困难的问题,但没有给出相应的解决方法。Cai 等<sup>[3]</sup>首次提出了适用于柔性钣金件定位的“N-2-1”定位原理(图 5),并从理论上和数值上验证了“N-2-1”原理对钣金件定位的有效性。在此基础上,

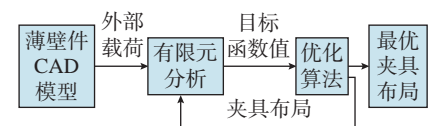


图 3 基于有限元方法的夹具布局优化流程图

Fig.3 Fixture layout optimization flowchart based on finite element method

以工件有限元模型中关键节点法向挠度的平方和最小为目标函数,基于有限差分法计算目标函数梯度,利用有限元分析软件和序列二次规划算法,对主基准面上“N”个定位器的布局进行优化。在算法实现过程中,利用 MSC/NASTRAN 中的多点约束特征,成功解决了网格重构引起的数值优化困难的问题。Ceglarek 等<sup>[6]</sup>为减小柔性钣金件在搬运过程中的变形,采用有限元方法和序列二次规划算法确定夹持末端执行器的最优位置。优化过程中,考虑了运动加速度引起的惯性力和空气阻力,并对柔性钣金件的变形行为进行了动态分析。王运巧等<sup>[7]</sup>利用 ANSYS 的设计优化模块对航空薄壁弧形件(图 6)的铣削加工夹具布局进行优化,以减小由切削力引起的工件最大弹性变形。Wang 等<sup>[8]</sup>提出一种基于有限元分

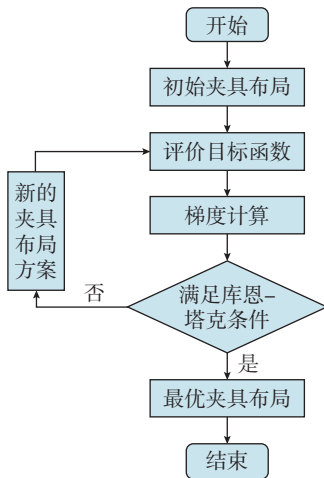


图 4 采用数学规划算法的夹具布局优化方法流程图

Fig.4 Flowchart of fixture layout optimization method using mathematical programming algorithm

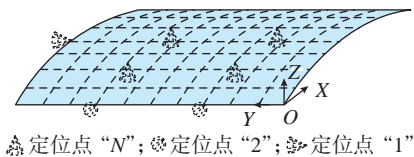


图 5 “N-2-1”定位原理<sup>[3]</sup>

Fig.5 “N-2-1” locating principle<sup>[3]</sup>

析的飞机钣金件装配夹具布局优化方法,以重力作用下钣金件关键测量点法向变形的平方和最小为目标,利用 ABAQUS 软件和非线性规划算法寻找定位器的最优数量及位置。但是,该方法没有把定位器的数量和位置耦合在一起考虑,本质上是一种异步优化。王少锋等<sup>[9]</sup>针对大型薄壁件加工过程中多点支承/定位这一基础理论问题,提出了一种跟随加工区域布置定位点的“X-2-1”定位原理与定位方法(图 7),实现对工件不同加工区域定位误差有针对性的重点防控,并且在试验中验证了该方法的正确性与合理性。在此基础上,提出了一种新颖的多点支承/定位布局优化方法,利用有限差分方法计算加工变形敏感度,建立了工件加工变形对于支承/定位点布局的解析敏感度表达式,并沿减小加工变形最敏感的方向调整支承/定位点分布,以最小化工件的最大加工变形。此外,还通过模态进一步对相应支承/定位点布局下工件固有频率以及振型等进行了测试,并以此提出了修正支承/定位点布局或添加辅助支承/定

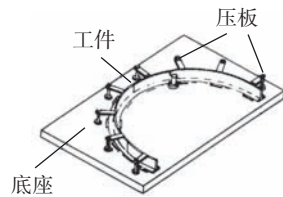


图 6 薄壁弧形件加工装夹示意图<sup>[7]</sup>

Fig.6 Schematic diagram of thin-walled arc workpieces fixturing<sup>[7]</sup>

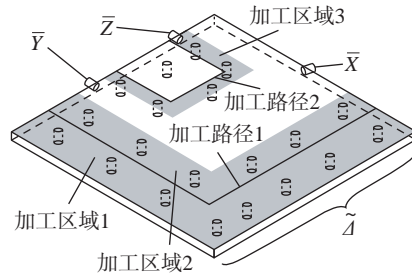


图 7 “X-2-1”跟随定位原理<sup>[9]</sup>

Fig.7 “X-2-1” following locating principle<sup>[9]</sup>

位点抑制振动变形的方 法<sup>[10]</sup>。

Camelio 等<sup>[11]</sup>提出一种考虑零件偏差、工装偏差和装配回弹的钣金件装配夹具布局优化方法,采用非线性规划算法寻找定位器的最优位置,以最小化装配偏差。Cai 等<sup>[12]</sup>在考虑了焊接偏差的情况下,利用商业有限元分析软件 MSC/NASTRAN 和非线性规划算法对定位器的位置进行优化,以最小化板材装配过程中的尺寸偏差,在算法实现过程中,将焊枪载荷建模为一个遵循标准正态分布的随机力,并建立了用于连续变量优化的夹具元件模型。

数学规划方法是最早应用于薄壁件夹具布局设计的优化算法。该方法具有技术成熟、鲁棒性好等优点,但同时也存在如下缺点。

(1) 由于夹具布局设计问题的组合复杂性,数学规划算法只能给出一个改进解,无法给出全局或近全局的最优解。

(2) 优化程序必须从初始解开始,且最终结果对优化过程的初值异常敏感。

(3) 采用数学规划算法的夹具布局优化方法需要目标函数的梯度信息。由于目标函数不是设计变量的显式函数,优化过程中通常基于有限元计算结果,采用有限差分法逼近目标函数梯度向量,但基于有限元计算的梯度往往是有噪声和不可靠的。

## 1.2 采用元启发式算法的夹具布局优化方法

元启发式算法是一种基于直观或经验构造的算法,是随机算法与局部搜索算法相结合的产物。与数学规划方法不同,元启发式算法只需要设计变量和目标函数值,不需要梯度或其他辅助信息,而且其随机性有助于摆脱局部最优。因此,元启发式算法特别适合于夹具布局优化这种目标函数和设计变量之间不存在明确定义的数学关系的问题。此外,元启发式算法还能够产生备选的优化

布局,这使设计者能够在多种选择中对夹具布局优化的多模态特性进行决策。所以,一些学者开始采用元启发式方法来解决夹具布局优化问题。常用的元启发式算法有遗传算法、蚁群算法、粒子群算法、社会辐射算法、花授粉算法、萤火虫算法、布谷鸟搜索算法等。

### 1.2.1 采用遗传算法的夹具布局优化方法

遗传算法(Genetic algorithm, GA)是一种基于自然选择和自然遗传机制的鲁棒、随机和启发式优化方法<sup>[13-14]</sup>,由3种基本遗传算子组成,即选择、交叉和变异,并将其与适者生存的概念相结合。遗传算法因其快速随机搜索和全局收敛性而被应用于许多复杂的优化和搜索问题,是夹具布局设计中应用最为广泛的优化算法。结合有限元方法和遗传算法的夹具布局优化方法具体流程如图8所示。

Krishnakumar等<sup>[15]</sup>使用有限元节点编号来表示夹具元件的位置,利用离散遗传算法对夹具布局进行优化,使整个切削过程中夹紧力和动态加工载荷造成的被加工表面的最大弹性变形最小,并讨论了基于遗传算法的夹具布局优化方法比以往报道的非线性规划方法的优点。在此基础上,Vallapuzha等<sup>[16]</sup>提出了一种利用空间坐标表示夹具元件位置并结合实数编码的新的基于遗传算法的优化方法。此外,新方法还使用了共享和增加变异等高级操作符。测试结果表明,相比于Krishnakumar等<sup>[15]</sup>的方法,新方法用更少的代数提供了更高质量的解决方案,而且增加变异和共享操作符的使用,显著提高了新方法的性能。在使用空间坐标表示夹具元件位置时,Vallapuzha等<sup>[17]</sup>还比较了连续插值与离散插值方法对夹具布局优化结果的影响。结果表明,使用连续插值的优化方法具有较好的综合性能。

Liao<sup>[18]</sup>提出了一种基于遗传算法的优化方法,自动选择钣金装配夹具中定位器的位置和夹紧元件的数量及其位置,以同时最小化重力效应产生的工件变形和零件尺寸偏差导致的装配偏差,优化过程中,通过在夹紧元件候选池中加入虚拟成员,实现了对夹紧元件数量的优化。Lai<sup>[19]</sup>以柔性钣金件焊接变形作为适应度函数,利用改进遗传算法对焊接夹具中定位器和夹紧元件的位置进行优化。Wang<sup>[20]</sup>结合有限元方法和基于知识的遗传算法(KBGA)对钣金件测量夹具定位点布局进行了全局优化。陈蔚芳等<sup>[21]</sup>针对薄壁件在切削加工过程中的装夹变形问题,利用有限元

方法和遗传算法对夹具布局和夹紧力进行了优化,以减小切削力和夹紧力引起的工件弹性变形。姜潮等<sup>[22]</sup>综合考虑了加工中普遍存在的多工位状况,采用全局收敛性强的隔代映射遗传算法(IP-GA)来寻找柔性薄板件电阻点焊焊装夹具定位点的最优布局,并通过算例将隔代映射遗传算法与小种群遗传算法( $\mu$ GA)的收敛效果进行比较,验证了该方法的有效性。陆俊百等<sup>[23]</sup>以工件加工变形最小为目标函数,通过有限元分析与遗传算法相结合的自寻优途径,实现大型薄壁件智能柔性工装系统中定位/支承阵列(图9)的全局优化。针对柔性薄板冲压件定位位置的优

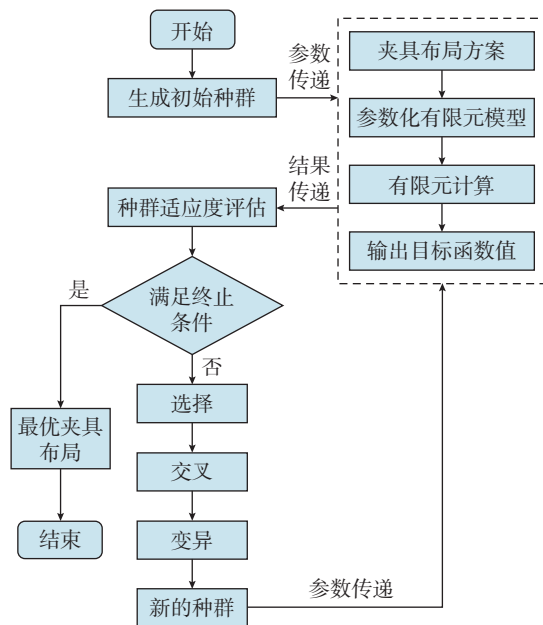


图8 采用遗传算法的夹具布局优化方法流程图

Fig.8 Flowchart of fixture layout optimization method using genetic algorithm

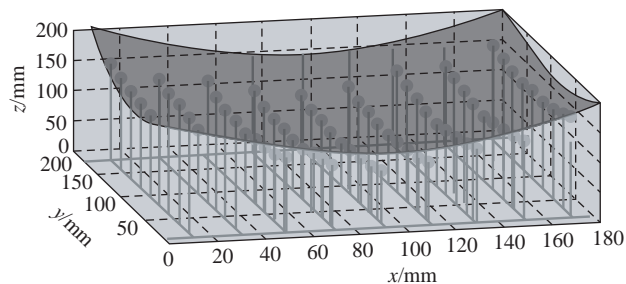


图9 薄壁件智能柔性工装系统定位/支承阵列示意图<sup>[23]</sup>

Fig.9 Schematic diagram of positioning/supporting array of thin-walled intelligent flexible fixture system<sup>[23]</sup>

化设计问题,石志云等<sup>[24]</sup>在考虑了工件制造误差及定位元件误差的基础上,基于“N-2-1”定位原理,利用ANSYS软件和遗传算法对定位方案中第一基准面“N”个定位点的数量和位置进行优化,但并没有将定位点的数量和位置耦合在一起进行同步优化,而是采用了预设“N”值,迭代搜索,逐次递加的异步优化方式,计算量大,优化效率低。梁建光<sup>[25]</sup>使用有限元分析软件HyperWorks和自适应遗传算法对蒙皮切边的多支承柔性夹具布局和夹紧力进行同步优化,以减少蒙皮的铣削切边加工变形,但将加工过程简化为在加工点施加加工静力,不足以完全反映现实波动铣削力的情况。Xiong等<sup>[26]</sup>针对大型航空薄壁件制造过程中的夹持需求,开发一种自重构的智能群夹具系统(图10),并提出了一种新的定位准则——“N-2-1-1”定位准则(图11)。基于该准则,并结合有限元分析和采用了动态突变率的遗传算法对第一基准面上“N”个支承元件的布局进行优化,以最小化工件的加工

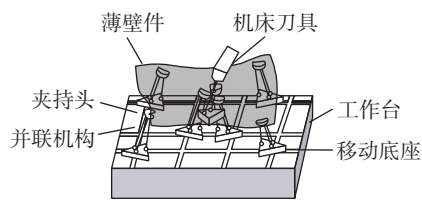


图10 自重构的智能群夹具系统结构示意图<sup>[26]</sup>  
Fig.10 Schematic diagram of self-reconfigurable swarm intelligent fixture system<sup>[26]</sup>

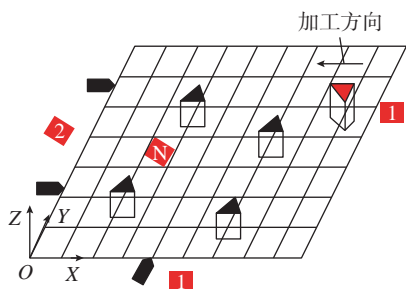


图11 “N-2-1-1”定位原理<sup>[26]</sup>  
Fig.11 “N-2-1-1” locating principle<sup>[26]</sup>

变形。Yu等<sup>[27]</sup>利用有限元分析软件ABAQUS模拟了不同装夹方案下航空接头类薄壁件在夹具夹紧力和刀具切削力作用下的变形情况,并以切削路径上各节点的平均变形量最小为目标,利用遗传算法对夹具夹紧位置进行优化。针对大型壁板自动钻铆定位变形问题,齐振超等<sup>[28]</sup>同时考虑刚性定位误差和柔性定位误差的影响,采用Monte-Carlo法模拟刚性定位误差的分布,通过齐次坐标变换分析刚性误差的传递过程,利用有限元分析软件ABAQUS计算柔性变形误差。然后综合定位变形误差预测模型,以壁板最大变形及关键特征点的变形为目标函数,采用带精英策略的非支配解排序遗传算法(NSGA-II)对定位点布局进行多目标优化。Ahmad等<sup>[29]</sup>以工件的应变能作为目标函数,结合有限元分析和遗传算法对汽车钣金件的夹具布局进行优化,以提高其在焊接过程中的刚度。Chen等<sup>[30]</sup>提出了一种基于N-M原理的汽车仪表盘柔性夹具,并以汽车仪表盘最大变形为优化目标,提出了一种遗传算法与有限元分析相结合的柔性夹具布局优化方法。在此基础上,Liu等<sup>[31]</sup>以汽车仪表盘最大变形和平均变形的加权和作为目标函数,利用有限元分析和遗传算法确定夹具元素的最优位置。为减小飞机弱刚性薄壁件在自重等外载作用下的最大变形,李西宁等<sup>[32]</sup>结合有限元分析和遗传算法对

其夹持布局和夹紧顺序进行了同步优化。

上述研究均是面向金属弱刚性薄壁件,张秋月等<sup>[33]</sup>针对飞机复合材料结构装配时出现间隙的问题,提出了基于遗传算法的压紧力大小和布局的优化算法,以复合材料翼盒(图12(a))为研究对象,建立了基于内聚力单元的有限元模型;然后,以复合材料分层损伤发生为约束条件,利用遗传算法对复合材料壁板上的压紧力大小和布局(图12(b))进行优化,以提高复材壁板的装配间隙消除率。在此基础上,为了更好地控制复材翼盒的装配应力,保证产品性能,Zhang等<sup>[34]</sup>在压紧力大小和布局优化过程中考虑了复材零件变形和成型缺陷的影响,并同时以间隙消除率和总压紧力值作为优化的目标函数,采用有限元分析和改进的遗传算法对该问题进行了求解。

遗传算法的优点是搜索空间大、容易处理大规模优化问题;优化过程中只使用设计变量和目标函数值,不需要梯度或其他辅助信息,实现相对简单,特别适合夹具布局优化设计这种非线性、非凸性、不连续性的优化问题;而且使用概率转移规则来寻找新的设计点进行探索,可以有效避免局部极小值,易于发现全局最优解。但遗传算法需要进行大量的函数评估,有限元分析计算量过大,而且容易出现早熟;遗传算法的性能很大程度上取决于交叉概率、变异概率、种

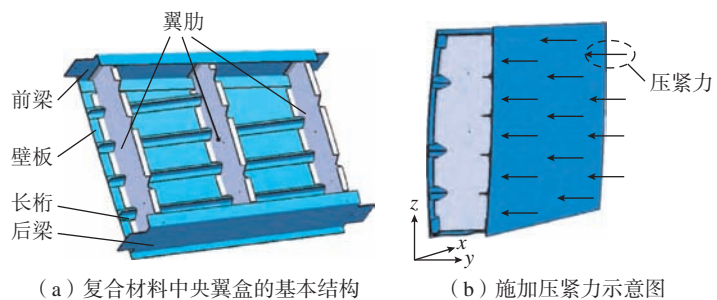


图12 通过施加压紧力消除复合材料壁板装配间隙<sup>[33]</sup>  
Fig.12 Eliminating composite panel assembly gap by applying clamping force<sup>[33]</sup>

群大小和最大迭代次数等参数的选择,但目前这些参数主要是通过试错法来确定,还缺乏相应的理论依据。

### 1.2.2 采用粒子群算法的夹具布局优化方法

粒子群算法(Particle swarm optimization, PSO)是一种模拟鸟群或鱼群社会行为的群智能和元启发式算法<sup>[35]</sup>。相比于遗传算法,粒子群算法保留了基于种群的全局搜索策略,采用简单的速度-位移模型代替复杂的遗传操作,同时其特有的记忆功能使得算法可动态跟踪当前搜索情况来调整搜索策略,对复杂的工程问题表现出较好的寻优能力<sup>[36-37]</sup>,因此逐渐被应用于解决夹具布局优化设计问题,具体流程如图13所示。

Dou等<sup>[38]</sup>利用有限元分析软件ANSYS建模分析了工件在时变加工力作用下的动态响应,并以加工区域内工件的最大弹性变形为目标,分别采用粒子群算法和遗传算法对动态条件下夹具元件(定位器和夹紧元件)的布局进行优化;为了提高遗传算法和粒子群算法的性能,提出了一种在基本遗传算法中引入共享和自适应突变得到的改进遗传算法(IGA)和一种将基本粒子群算法与自适应变异相结合得到的改进粒子群算法(IPSO);最后,通过3个布局优化案例,对GA、IGA、PSO、IPSO的性能进行测试和比较,结果表明,综合全局寻优能力和算法收敛速度,IPSO要优于GA、IGA和PSO(图14)。王鹏等<sup>[39]</sup>以汽车车门零件的测量夹具为研究对象,以有限元分析软件NX Nastran计算的零件最大变形量作为目标函数,通过粒子群算法对夹具的定位点进行优化。钱彦懿<sup>[40]</sup>以结构整体应变能代替节点法向变形作为优化目标,结合基于ABAQUS的参数化有限元分析和粒子群算法,实现对超大薄壁曲面结构

装夹布局方案的快速精准寻优。

相比于遗传算法,粒子群算法的优势在于收敛速度快,夹具布局优化

过程中需要的函数评估次数少,有限元分析计算量小,而且参数数目少,操作简单。但粒子群算法缺少突变

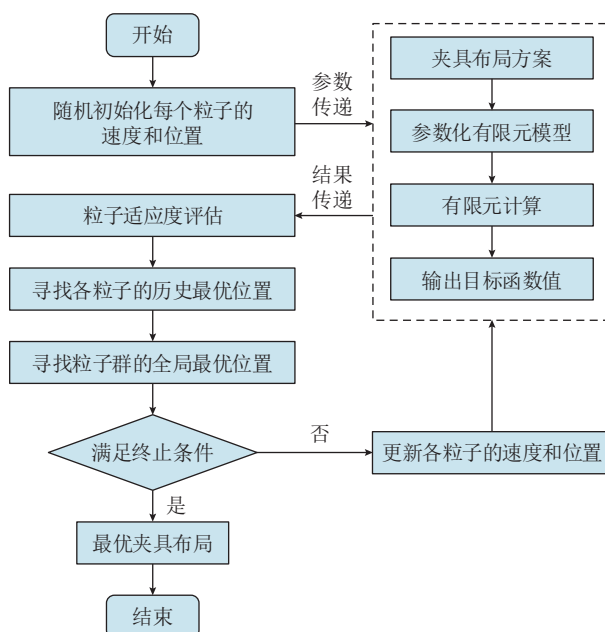


图13 采用粒子群算法的夹具布局优化方法流程图

Fig.13 Flowchart of fixture layout optimization method using particle swarm optimization algorithm

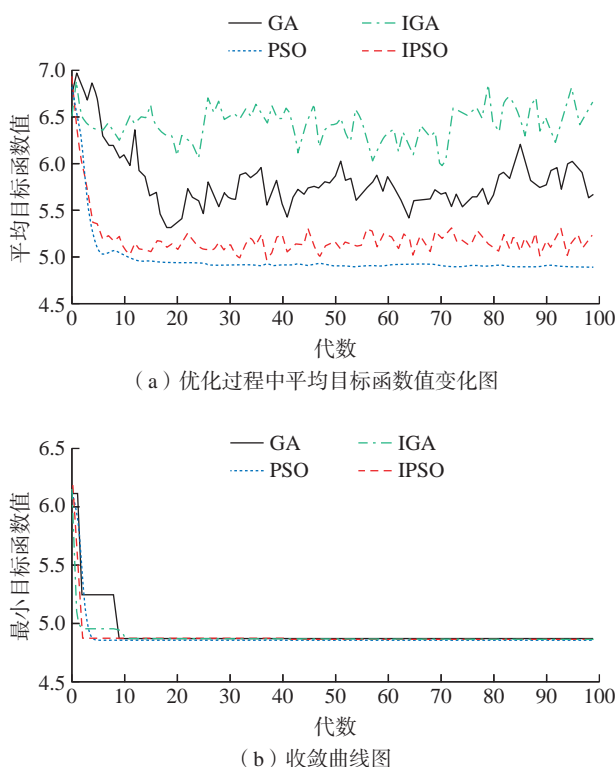


图14 GA、IGA、PSO、IPSO 夹具布局优化算法对比<sup>[38]</sup>

Fig.14 Comparison of GA, IGA, PSO and IPSO fixture layout optimization algorithms<sup>[38]</sup>

等可以跳出局部最优的算子,优化过程中容易出现早熟收敛的问题<sup>[36-37]</sup>。

### 1.2.3 采用蚁群算法的夹具布局优化方法

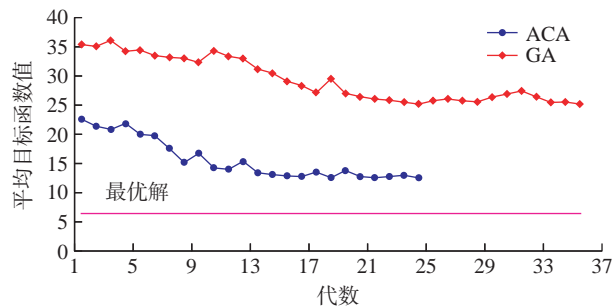
蚁群算法(Ant colony algorithm, ACA)是一种模拟蚂蚁觅食行为的群智能和启发式全局优化算法<sup>[41]</sup>。蚁群算法最早用来求解TSP问题, McMullen<sup>[42]</sup>和 Jeyaraman<sup>[43]</sup>等证明了该算法可以用于解决工程优化问题。随后,该算法被一些学者用于优化薄壁件的夹具布局。

Prabhakaran等<sup>[44]</sup>采用有限元法对加工过程中的工件变形进行建模分析,并分别使用蚁群算法和遗传算法优化夹具布局,以最小化工件的弹性变形。此外,该研究在同一工件几何形状上定义了3个不同节点数的系统,对遗传算法和蚁群算法的性能进行测试和比较。Padmanaban等<sup>[45]</sup>首先利用MATLAB开发了一个内建有限元求解器以求解加工过程中夹紧力和动态加工力引起的工件弹性变形(工件沿平面的振动),然后以定位器和夹紧元件的位置为设计变量,以工件动态响应为目标函数,采用蚁群算法和遗传算法对其夹具布局进行优化,并通过两个例子中不同的节点系统对蚁群算法和遗传算法的性能进行了测试。Prabhakaran<sup>[44]</sup>和 Padmanaban<sup>[45]</sup>等的研究均发现,蚁群算法总能比遗传算法以更快的速度得到更好的解(图15)。在此基础上,Padmanaban等<sup>[46]</sup>还比较了连续插值与离散插值方法对优化结果的影响,分析表明,基于蚁群算法的连续夹具布局优化方法能得到更优的解,但其收敛速度要慢于基于蚁群算法的离散夹具布局优化方法(图16)。周涛等<sup>[47]</sup>提出了一种基于改进蚁群算法的薄壁件柔性工装布局优化方法。该方法采用有限元分析预测工装夹紧力作为静态载荷引起的工件弹性接触变形,并将遗传算法集成到蚁群算法中,采用

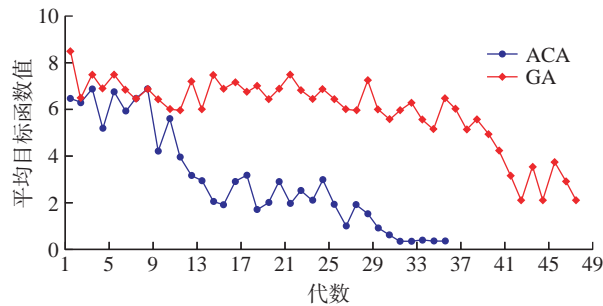
蚁群算法求解初始种群,采用遗传算法对工装定位/支承阵列的布局进行优化。Cheng等<sup>[48]</sup>在考虑了航空薄壁结构自动铆接过程中定位误差和铆接偏差的情况下,提出了一种有效的分层夹具布局方法,该方法将夹具布局问题简化为基点和定位点优化问题,并用一种新的分层矩阵来表示;然后结合遗传算法和蚂蚁算法的优点,利用遗传蚁群算法(Genetic algorithm and ants algorithm, GAAA)求解最优夹具布局,以减小关键特征

点处的装配偏差;最后,以机翼壁板为例验证了该方法的有效性和鲁棒性。Khodabandeh等<sup>[49]</sup>提出了一种基于多目标蚁群算法和有限元方法相结合的夹具布局优化方法,同时最大限度地减少板材的装配偏差和夹具的数量。

上述文献研究结果表明,采用蚁群算法的夹具布局优化方法具有鲁棒性强、收敛速度快等优点。而且在优化过程中,蚁群算法还容易与遗传算法等其他优化算法相结合,在一定



(a) Prabhakaran等研究结果<sup>[44]</sup>



(b) Padmanaban等研究结果<sup>[45]</sup>

图15 GA、ACA收敛曲线对比

Fig.15 Comparison of GA and ACA convergence curves

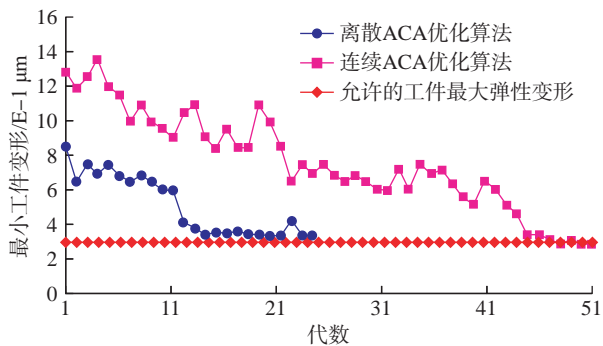


图16 离散ACA、连续ACA收敛曲线对比<sup>[46]</sup>

Fig.16 Comparison of discrete ACA and continuous ACA convergence curves<sup>[46]</sup>

程度上可以提高最终解的质量。

#### 1.2.4 采用其他元启发式算法的 夹具布局优化方法

除了传统的遗传算法、蚁群算法、粒子群算法,一些学者逐渐将社会辐射算法、萤火虫算法、花授粉算法、布谷鸟搜索算法、鲸鱼优化算法等近年发展起来的新型元启发式算法应用于薄壁件夹具布局优化设计。

社会辐射算法(Social radiation algorithm, SRA)是一种模拟社会中人类竞争的群体智能和元启发式算法<sup>[50]</sup>。为了减小复杂钣金件在焊接装配过程中的变形,Xing等<sup>[50]</sup>提出了一种基于社会辐射算法的夹具布局优化方法,首先利用工程经验剔除不可行节点,然后利用SRA生成最优可行区域,最后通过在全局区域中选择可行节点,得到最优夹具布局。该研究的优化结果表明,SRA比GA具有更高的效率和精度。随后,Xing等<sup>[51]</sup>又以关键测量点处的装配公差为目标函数,利用SRA和GA对夹具定位点的位置进行优化,以减少复杂钣金件在焊接装配过程中的尺寸偏差。在该研究中,基于GA的夹具布局优化方法得到了更优的解。在此基础上,为了同时减小复杂钣金件的装配公差和重力变形,Xing等<sup>[52]</sup>以关键测量点处的变形和装配公差为双重目标,将非支配排序算法与SRA算法相结合,提出了一种新的非支配排序社会辐射算法(Non-domination sorting social radiation algorithm, NSSRA)来优化夹具定位点布局。在该研究中,相比于NSGA-II,NSSRA表现出更高的效率和精度。

为了减小铝合金薄板件在外周铣削过程中的最大变形,Liu等<sup>[53]</sup>提出一种基于有限元方法和启发式规则的夹具布局优化方法,该方法包括两个阶段:在第1阶段中,通过在最大变形位置添加定位器来确定定位器的初始数量及位置;第2阶段在

初始布局的基础上,采用开发的启发式规则优化定位器的数量和位置(图17)。

萤火虫算法(Firefly algorithm, FA)是一种基于自然界萤火虫发光的生物学特性发展而来的新型仿生群智能优化算法<sup>[54]</sup>,具有参数较少、模型简单、收敛速度快且稳定性较好等特点<sup>[55]</sup>。王仲奇等<sup>[56]</sup>以工件在自重下的最大变形量为目标函数,结合有限元分析软件ABAQUS和萤火虫算法实现了飞机曲面结构件装配定位布局的迭代优化。

花授粉算法(Flower pollination algorithm, FPA)是一种模拟自然界中花朵授粉现象的元启发式群智能优化算法<sup>[57]</sup>,具有调节参数少、寻优能力强、实现简单等优点<sup>[58]</sup>。王仲奇等<sup>[59]</sup>结合花授粉算法和参数化有

限元分析有效地求解了自重作用下曲面薄壁件的夹具布局优化问题,在优化过程中,通过整体应变能来衡量工件所有方向上的变形,并以此作为目标函数;优化结果表明,相比于GA,FPA可提供更精确和更稳定的结果,而且收敛速度也快于GA(图18)。

布谷鸟搜索算法(Cuckoo search algorithm, CS)是一种基于布谷鸟的幼雏寄生并结合一些鸟类和果蝇的Lévy飞行行为发展而来的元启发式算法<sup>[60]</sup>。与GA和PSO相比,CS只有一个控制参数需要微调,而且一些特定问题的优化收敛速度对该参数并不敏感<sup>[61]</sup>。因此,与其他进化算法相比,CS具有更强的鲁棒性和通用性。Yang等<sup>[62]</sup>通过将布谷鸟搜索算法与有限元分析软件ABAQUS相结合,获得了最优的钣金件夹具定位布局,从而有效减小了钣金件在自重作用下的整体变形;同时,该研究还比较了布谷鸟搜索算法、粒子群算

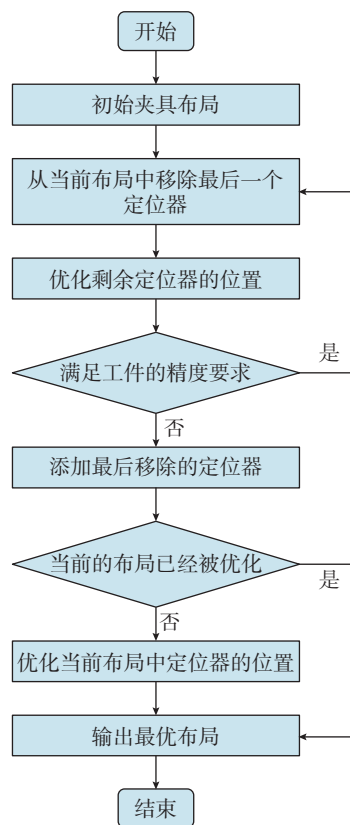
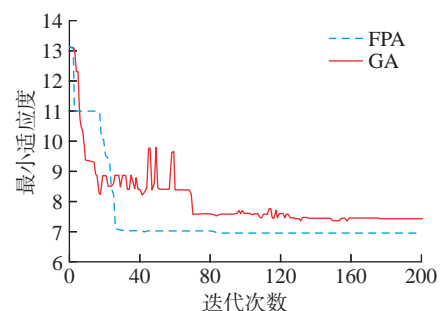
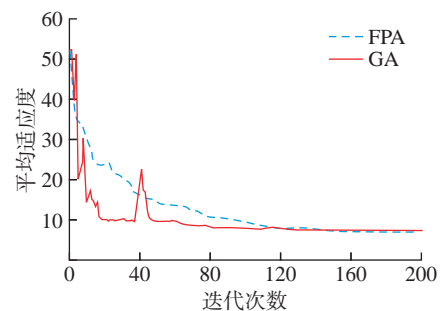


图17 基于启发式规则的夹具布局优化流程图<sup>[53]</sup>

Fig.17 Flowchart of fixture layout optimization based on heuristic rules<sup>[53]</sup>



(a) 最小适应度收敛曲线



(b) 平均适应度收敛曲线

图18 FPA、GA收敛曲线对比<sup>[59]</sup>

Fig.18 Comparison of FPA and GA convergence curves<sup>[59]</sup>

法和遗传算法对钣金件夹具定位布局优化问题的求解效果(图 19),结果表明,在解的质量、优化过程的鲁棒性及通用性上,布谷鸟搜索算法优于粒子群算法和遗传算法。

鲸鱼优化算法(Whale optimization algorithm, WOA)是一种模拟自然界中座头鲸捕猎机制的新型元启发式群体智能优化算法<sup>[63]</sup>,具有调整参数少、寻优能力强、实现简单等优点<sup>[64]</sup>。Li等<sup>[65]</sup>以曲面薄壁件的应变能为目标函数,结合有限元分析和鲸鱼优化算法对其夹具定位器的数量和位置进行了优化。

上述研究尝试性地利用社会辐射算法等新型元启发式算法对薄壁

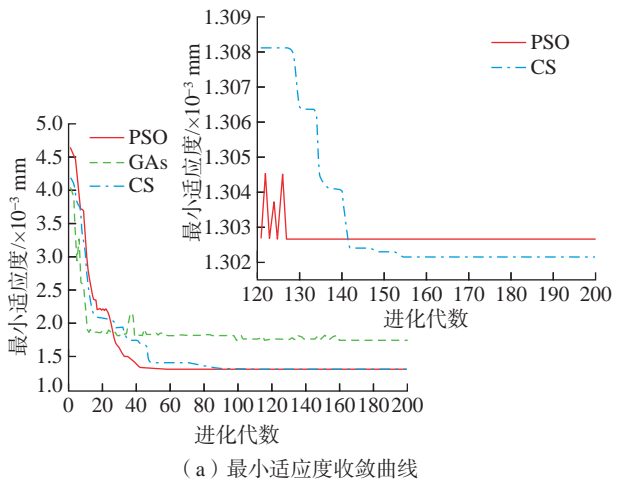
件的夹具布局进行优化,并将其与传统的元启发式优化算法进行了比较。但总体来说,这些优化算法在夹具布局优化问题中应用较少,其优化效率、适用性,特别是在面对高维复杂设计变量的夹具布局优化问题时的适用性还有待进一步的研究。

### 1.3 采用其他类型优化算法的夹具布局优化方法

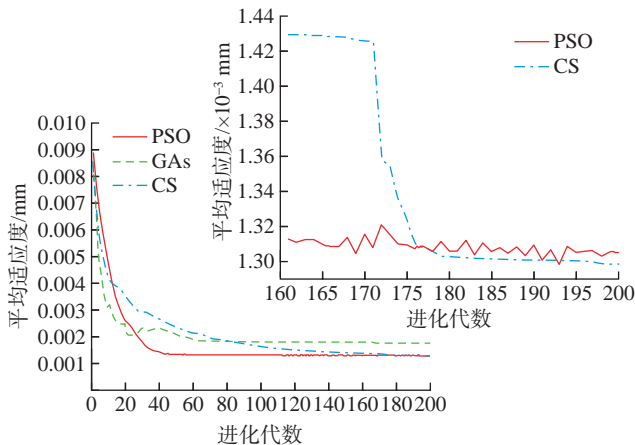
拓扑优化(Topology optimization, TO)是一种根据给定的负载情况、约束条件和性能指标,在给定的区域内对材料分布进行优化的数学方法,是结构优化的一种。其最终思想是将寻求结构布局最优拓扑问题转化为设计域内寻求结构材料分布或传

力路线最优的问题<sup>[66-67]</sup>,与数学规划算法及元启发式算法相比,更容易实现夹具元件数量与位置的同步优化。周泽斌<sup>[68]</sup>结合有限元方法和拓扑优化技术,对薄壁件切削加工过程中定位点和夹紧点的位置进行优化,以达到减小加工变形的目的,基本流程如图 20 所示。Yang等<sup>[69]</sup>提出一种航空薄壁件夹具定位布局的拓扑优化方法,以确定其装配过程中主基准面上定位器的数量和位置,从而使其变形最小化。该方法首先建立了以航空薄壁件刚度为目标函数,以定位结构体积为约束的拓扑优化模型;其次,将航空薄壁件与定位结构视为一个整体,利用 ABAQUS 拓扑优化模块(ATOM),采用基于变密度法的拓扑优化方法对定位结构进行优化;然后,根据所得到的拓扑结构进行后续模型重构,实现最优夹具定位布局;最后,以铝合金机身蒙皮为例,验证了该方法的有效性。

模式追踪采样方法(Mode-pursuing sampling method, MPS)是一种基于抽样技术的优化算法,利用 Fu等<sup>[70]</sup>的样本方法来搜索全局最优解,且优化过程中只使用目标函数值搜索设计空间。当设计变量较少



(a) 最小适应度收敛曲线



(b) 平均适应度收敛曲线

图 19 CS、GA、PSO 收敛曲线对比<sup>[62]</sup>

Fig.19 Comparison of CS, GA and PSO convergence curves<sup>[62]</sup>

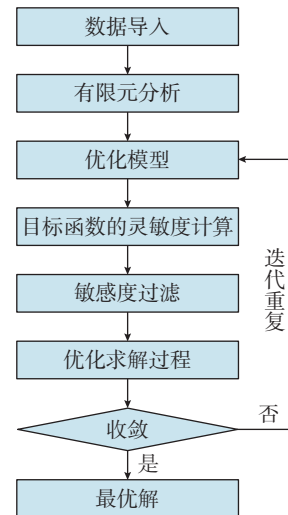


图 20 拓扑优化的基本流程图<sup>[68]</sup>

Fig.20 Flowchart of topology optimization<sup>[68]</sup>

时, MPS 所需目标函数的评价次数要少于 GA, 更适合与计算代价昂贵的有限元分析相结合, 从而对薄壁件的夹具布局进行优化。Liao 等<sup>[71]</sup> 在考虑了零件制造偏差和夹具定位偏差的情况下, 将模式追踪采样算法与有限元分析相结合, 同时搜索最优夹具布局 and 连接位置, 以最小化钣金件的装配变形。与数学规划算法和遗传算法等其他算法相比, 该方法大大减少了有限元分析的计算量。

#### 1.4 基于有限元模型的夹具布局优化方法特点分析

有限元方法是薄壁件夹具布局优化设计中应用最为广泛的目标函数建模方法, 基于该方法的夹具布局优化研究具有如下特点。

(1) 大多数研究直接使用 ANSYS、ABAQUS 或 MSC/NASTRAN 等商业有限元分析软件来计算目标函数值。有限元分析软件的优点是建模简单, 缺点是只能给出近似值, 值的精度很大程度上依赖于所选择的有限元软件。

(2) 内置有限元求解器的计算精度明显高于有限元分析软件。但是只有少数学者研究有限元方程, 并开发相应的内置有限元求解器来计算目标函数值。

(3) 不管是用商业有限元分析软件还是内置有限元求解器, 基于有限元方法的夹具布局优化方法往往需要大量调用有限元求解器, 导致计算成本高、优化效率低, 严重影响产品的制造周期与成本。

(4) 夹具布局优化过程中, 在完成目标函数的建模之后, 需要结合使用优化算法对夹具布局进行优化。各优化算法的特点如表 2 所示。上述研究大多采用元启发式算法对薄壁件夹具布局进行优化。其中, 遗传算法是应用最为广泛的优化算法, 可作为其他优化算法性能的评价基准。

(5) 优化算法产生的解空间为连续的有理数空间, 而在有限元模型

表 2 各优化算法的特点

Table 2 Characteristics of each optimization algorithm

优化算法	特点	
数学规划方法	技术成熟; 鲁棒性好; 只能给出一个改进解, 容易陷入局部最优; 需要初值及目标函数的梯度信息	
元启发式算法	遗传算法	搜索空间大; 不需要梯度或其他辅助信息; 可以有效避免局部极小值; 目标函数评估次数多; 容易出现早熟; 调节参数多
	粒子群算法	收敛速度快; 目标函数评估次数少; 调节参数少; 操作简单; 缺少可以跳出局部最优的算子; 容易早熟收敛
	蚁群算法	收敛速度快; 鲁棒性好; 易于和其他算法结合使用
	社会辐射算法	优化效率高
	萤火虫算法	调节参数较少; 模型简单; 收敛速度快; 稳定性较好
	花授粉算法	调节参数少; 寻优能力强; 实现简单
	布谷鸟搜索算法	鲁棒性和通用性好; 调节参数少, 且部分问题对该参数不敏感
鲸鱼优化算法	调节参数少; 寻优能力强; 实现简单	
拓扑优化算法	更容易实现夹具元件数量与位置的同步优化	
模式追踪采样方法	优化过程中只使用目标函数值搜索设计空间; 目标函数评估次数相对要少	

中夹具元件和工件之间的接触点被限制在模型节点, 其位置为离散域, 节点映射时需进行一定的近似处理。因此, 模型网格划分粗细直接影响优化问题的求解精度。

目前, 对薄壁件夹具布局优化问题的研究可分为离散夹具布局优化方法和连续夹具布局优化方法。相比于离散夹具布局优化方法, 连续夹具布局优化方法能给出更好的解, 但其收敛速度慢于离散夹具布局优化方法。

## 2 基于代理模型的夹具布局优化方法

针对有限元方法成本高、效率低的问题, 结合代理模型与优化算法的薄壁件夹具布局优化方法成为了新的研究关注点。代理模型 (Surrogate model, SM) 是基于统计理论, 并根据输入数据和输出响应数据构造的数学近似模型, 用于代替计算复杂度高且时间长的原模型<sup>[72]</sup>。该方法的基本思想在于使用少量的样本数据构建计算代价较小的代理模型, 随后

在优化迭代中应用代理模型代替成本高昂的原模型, 近似计算目标函数值, 从而达到减少计算成本, 提高优化效率的目的<sup>[73]</sup>。基于代理模型的夹具布局优化方法基本流程如图 21 所示。目前较为常用的代理模型有响应面模型、神经网络模型、Kriging 模型和支持向量回归模型及上述模型的改进或组合等。

### 2.1 采用响应面模型的夹具布局优化方法

响应面模型 (Response surface methodology, RSM) 是一种利用多项式函数拟合设计空间的经验统计模型<sup>[74-76]</sup>, 也是发展最早、最常用的代理模型。

邢彦锋<sup>[77]</sup> 和 Xing<sup>[78]</sup> 等基于均匀采样和有限元分析生成的有限样本集, 建立了金属薄板件装配夹具定位方案与零件节点变形之间的响应面模型。在建模过程中, 采用径向基函数 (Radial basis function, RBF) 作为响应面模型的基函数, 提高了拟合的精度。Bi 等<sup>[79]</sup> 为提高装配过程中大型机身壁板的刚度, 减少重力等

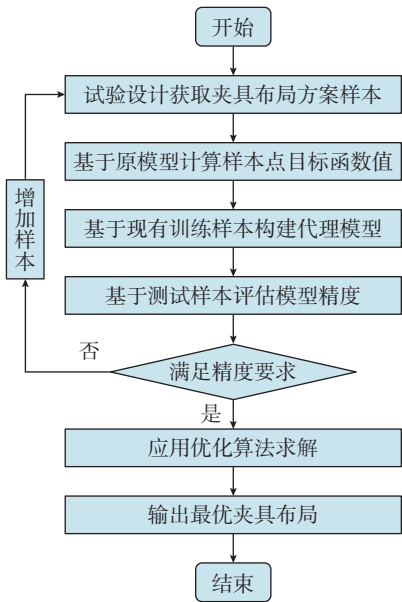


图 21 基于代理模型的夹具布局优化方法流程图

Fig.21 Flowchart of fixture layout optimization method based on surrogate model

因素引起的装配变形,提出了一种基于多工艺接头的机身壁板离散支撑布局优化方法,根据混合均匀试验设计原则,通过建立壁板与工艺接头的有限元模型,得到了不同工艺接头支撑布局下的壁板应变能。然后利用偏最小二乘回归分析法,建立了工艺接头支撑参数与壁板应变能之间的多元回归模型,进而得到了最优工艺接头支撑布局。于金等<sup>[80]</sup>以航空薄壁件多点柔性工装系统的支撑单元布局为设计变量,运用多元非线性回归方法建立以薄壁件的最大变形和平均变形为指标的铣削加工变形预测模型。为简化计算,采用加权求和的方法将多目标预测模型转化为单目标预测模型,并采用遗传算法进行优化计算,从而得到理论最优的支撑单元布局。为保证高速列车车体侧壁的焊接质量, Yu 等<sup>[81]</sup>建立了夹具定位参数与其焊接变形之间的二阶多项式响应面模型,并基于该模型对其夹具布局进行了优化。

响应面模型的优势在于数学理论基础充分扎实,系统性、实用性强,

适用广泛,简单直观且易于构建,只需要较少的样本就能在局部范围内比较精确地逼近函数关系,适合设计变量简单的低维夹具布局优化问题。但是对于设计变量复杂的高维夹具布局优化问题,其建模拟合效果不如神经网络等方法。

## 2.2 采用人工神经网络的夹具布局优化方法

神经网络(Artificial neural network, ANN)是模拟人脑神经系统对复杂信息处理机制的一种数学模型<sup>[82]</sup>,具有通用逼近、并行分布式处理、自学习、自组织、自适应、多变量系统等特点,并拥有良好的鲁棒性和全局性,被广泛用于模拟复杂的工程建模问题。目前为止,采用误差反向传播算法训练的多层前馈神经网络(Back propagation neural network, BPNN)是夹具布局优化设计中应用最为广泛的一种神经网络类型(图 22)。

刘玉梅等<sup>[83]</sup>耦合 BP 神经网络和遗传算法对铝合金薄板件装夹夹紧点位置进行优化,以减小其铣削过程中的装夹变形。Vasundara 等<sup>[84]</sup>构建了 BP 神经网络来预测不同夹具布局下工件的最大弹性变形。Selvakumar 等<sup>[85]</sup>采用有限元法计算矩形框工件在不同夹具布局下的加工变形,并将计算结果作为训练样本,构建 BP 神经网络预测模型,最后结合设计对定位器和夹紧元件的位置进行优化,以最小化夹紧力和加工力引起的工件最大弹性变形。秦国华<sup>[86]</sup>和 Qin<sup>[87]</sup>等针对框类薄壁件的多重装夹过程(图 23)建立三维有限元模型,并利用有限元法获取训练样本;然后借助 BP 神经网络的非线性映射能力,建立了给定夹紧力条件下装夹顺序、定位元件位置与装夹变形之间的非线性映射模型;最后,以薄壁件的最大装夹变形为目标函数,利用遗传算法对其装夹布局进行优化。Lu 等<sup>[88]</sup>在有限元分析的基础上,建立 BP 神

经网络模型,预测不同夹具布局 and 不同定位器误差下的钣金件变形,并利用遗传算法求解定位器的最优位置。为了减小大型复材机身壁板(图 24)在装配定位过程中的变形及应力、控制装配工装成本, Wang 等<sup>[89]</sup>提出一种结合 BP 神经网络和 NSGA-II 算法的离散夹持布局多目标优化方法。该方法首先采用一种二进制整数型变量来表征夹持布局,实现了夹持点数量和位置耦合表征;然后构建 BP 神经网络模型来描述复材机身壁板夹持布局与最大重力变形/最大 Mises 应力之间的非线性映射关系;最后以复材机身壁板的许用变形量

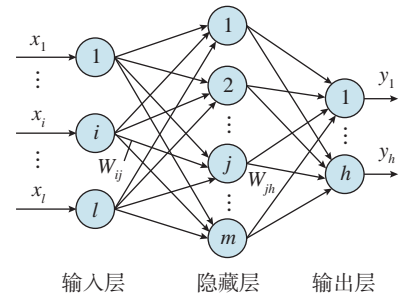
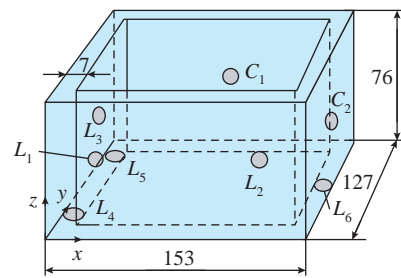


图 22 3层 BP 神经网络结构示意图  
Fig.22 Schematic diagram of 3-layer BP neural network



注: L 为定位器; C 为夹紧元件。

图 23 框类薄壁件的装夹布局示意图( mm )<sup>[86]</sup>  
Fig.23 Fixture layout diagram of frame-type thin-walled workpieces (mm)<sup>[86]</sup>

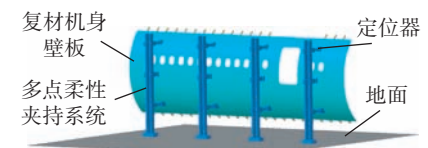


图 24 大型复材机身壁板夹持布局示意图<sup>[89]</sup>  
Fig.24 Fixturing layout diagram of large composite fuselage panel<sup>[89]</sup>

为约束条件,以应力最小和夹持点数目最少作为优化目标,采用 NSGA-II 算法寻找夹持布局的 Pareto 最优解集。

BP 神经网络的优点是具有较强的逼近、泛化能力及较好的容错性。理论上可以证明,一个 3 层 BP 神经网络能够以任意精度逼近任何一个多变量函数<sup>[90]</sup>。因此, BP 神经网络特别适合对设计变量复杂的高维夹具布局优化问题进行建模。但 BP 神经网络同时也存在结构设置参数多、收敛速度慢、容易陷入局部最优且过拟合的缺点。

径向基函数神经网络(Radial basis function neural network, RBFNN)是一种单隐层、以函数逼近为基础的前馈神经网络(图 25)<sup>[91]</sup>。其结构简单、训练简洁、学习收敛速度快,函数逼近、模式识别和分类能力都优于 BP 神经网络,而且还能克服局部极小值问题。Wang 等<sup>[92]</sup>分别构建了 BP 神经网络和 RBF 神经网络来预测不同夹具定位布局下钣金件的法向变形,首先采用均匀采样法生成样本点,并借助有限元分析构造样本数据集;然后,基于样本集分别构建了 BP 神经网络预测模型和 RBF 神经网络预测模型;实例研究表明,与使用同样样本集训练和测试的 BP 神经网络相比,基于 RBF 神经网络的预测模型精度更高,更稳定(图 26)。在此基础上,将 RBF 神经网络预测模型与蝙蝠算法结合,利用蝙蝠算法求解主基准面上“N”个夹具定位器的最优位置,从而最小化钣金件的弹性变形<sup>[93]</sup>。Ma 等<sup>[94]</sup>构建了 RBF 神经网络来预测汽车车身钣金件在不同夹具定位布局下的重力变形,并利用遗传算法对其夹具定位布局进行了优化。王鹏等<sup>[95]</sup>提出了一种基于 NSGA-II 与 RBF 神经网络的车身薄板件定位布局优化方法,该方法首先以薄板定位时的偏差传递路径最小和稳定性最高为优化目

标,应用 NSGA-II 算法优化前 3 个定位点的布局;然后在有限元样本的支持下,构建 RBF 神经网络预测模型,并结合粒子群算法对第 4 个定位点的位置进行优化,以减小其最大装夹变形。

### 2.3 采用其他代理模型的夹具布局优化方法

除了常用的响应面模型、人工神经网络模型, Kriging 模型、支持向量回归等机器学习模型也广泛应用在薄壁件的夹具布局优化中。

Kriging 模型是一种源于地质统计学的无偏估计模型,将确定性计算模型的输出建模为随机过程的实现,是一种半参数模型,由代表整体趋势的回归项和代表偏离的随机过程项构成<sup>[96]</sup>。与其他代理模型相比, Kriging 模型不仅能够给出未知点处的预测值,还能同时给出度量预测值

可信程度的预测方差。此外,对于非线性程度较高的复杂问题, Kriging 模型往往也能取得比较好的拟合效果。Yang 等<sup>[97]</sup>基于拉丁超立方抽样和有限元分析生成的有限样本集,分别建立了 Kriging 模型和 BP 神经网络模型来近似夹具定位布局与自重作用下钣金件整体变形之间的隐式函数关系;通过对比,基于相同训练数据集的 Kriging 模型预测精度更高,稳定性更好(图 27);随后,结合布谷鸟搜索算法,对钣金件夹具定位布局进行了优化。李诚等<sup>[98]</sup>以薄壁件在自重作用下的应变能为优化目标,提出一种基于 Kriging 模型和花授粉算法的夹具定位布局优化方法。

支持向量机(Support vector machine, SVM)是一种基于小样本统计学习理论的机器学习方法<sup>[99]</sup>。SVM 按照其功能的不同分为支持

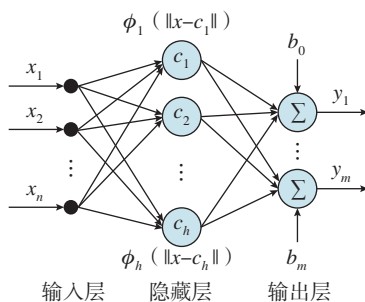


图 25 RBF 神经网络结构示意图<sup>[91]</sup>  
Fig.25 Schematic diagram of RBF neural network<sup>[91]</sup>

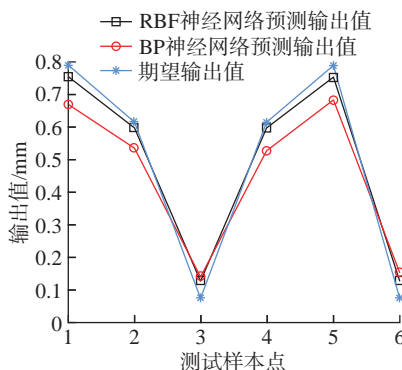
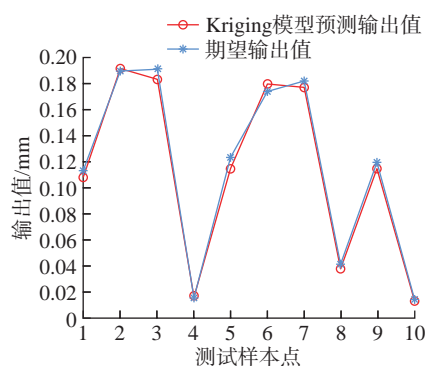
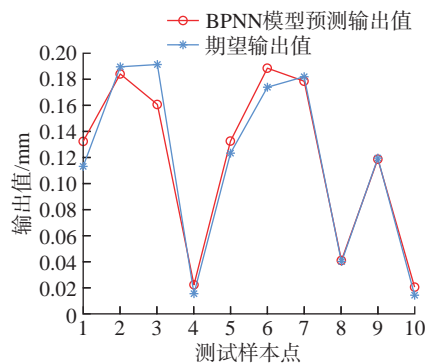


图 26 BP 和 RBF 神经网络预测精度对比<sup>[92]</sup>  
Fig.26 Comparison of prediction accuracy between BP and RBF neural network<sup>[92]</sup>



(a) Kriging 模型预测输出曲线



(b) BPNN 模型预测输出曲线

图 27 Kriging 和 BPNN 模型预测精度对比<sup>[97]</sup>  
Fig.27 Comparison of prediction accuracy between Kriging and BPNN<sup>[97]</sup>

向量回归机(Support vector machine for regression, SVR)与支持向量分类机(Support vector machine for classification, SVC)两大模型。其中,SVR模型主要用于回归预测建模。该模型最终决策函数只由少数的支持向量所确定,计算的复杂性取决于支持向量的数目,而不是样本空间的维数,这在某种意义上避免了“维数灾难”<sup>[100]</sup>。因此,SVR模型在解决设计变量复杂的高维夹具布局优化问题时非常有效,特别是在设计变量维度大于样本数时依然有很好的效果。Yu<sup>[101]</sup>利用SVR建立了柔性钣金件夹具定位布局与装配偏差之间的预测模型。杨元等<sup>[102]</sup>以航空薄壁件夹具定位点位置为设计变量,以整体应变能为目标函数,基于拉丁超立方抽样和有限元分析生成的有限样本集构建了基于SVR的夹具定位布局优化预测模型。与相同训练样本和测试样本下的RBF神经网络预测模型相比,基于SVR的预测模型精度更高(图28)<sup>[6]</sup>。在此基础上,又分别建立了薄壁件整体变形和最大变形的SVR预测模型,并以此作为评价函数,采用NSGA-II算法对夹具定位布局进行了多目标优化,并得到了帕累托最优解集<sup>[103]</sup>。

为了有效控制复材机身在装配过程中的形状偏差,Du等<sup>[104]</sup>提出了一种基于稀疏学习模型的夹持器布局优化方法。该方法首先建立了夹持器布局及夹紧力与复材机身形状偏差之间的稀疏学习模型;然后开发了一种结合二分搜索法和交替方向乘子法的模型参数估计算法,以确定夹持器的最优位置;最后采用内点法对夹紧力进行了优化。

### 2.4 基于代理模型的夹具布局优化方法特点分析

由第2.1~2.3节中综述的文献可知,在薄壁件的夹具布局优化设计过程中,代理模型作为一种目标函数的建模方法逐渐得到了越来越广泛的

应用。基于代理模型的夹具布局优化方法具有如下特点。

(1)与有限元分析耦合优化算法的夹具布局优化方法相比,基于代理模型的夹具布局优化方法确实能够在很大程度上降低计算成本,有效提高优化设计的效率。

(2)现有的应用到薄壁件夹具布局优化设计的各代理模型特点如表3所示。其中,响应面模型和人工神经网络模型是应用较为广泛的代理模型。

上述研究中,用于训练代理模型的样本大部分是采用有限元分析计算得到的。因此,基于代理模型的夹具布局优化方法求出的最优解与有限元分析相比存在偏差,其精度不如基于有限元方法的夹具布局优化方法。

### 3 结论

夹具布局优化设计可以有效减小薄壁件的制造变形,是保证其制造质量的重要因素。本文系统回顾了国内外学者在弱刚性薄壁件夹具布局优化问题上的研究进展情况。通过对相关文献的研究整理,作者认为现有的关于薄壁件夹具布局优化的研究具有如下特点。

(1)目前国内外关于弱刚性薄壁件夹具布局优化的研究主要集中在金属薄壁件加工和装配过程的稳定夹持布局上。

(2)大部分研究在夹具布局优化设计中只考虑了重力等静态载荷,对薄壁件制造过程中的动态载荷考虑不足,而动态载荷往往会引起工件振动等动态特性。现有的研究一般

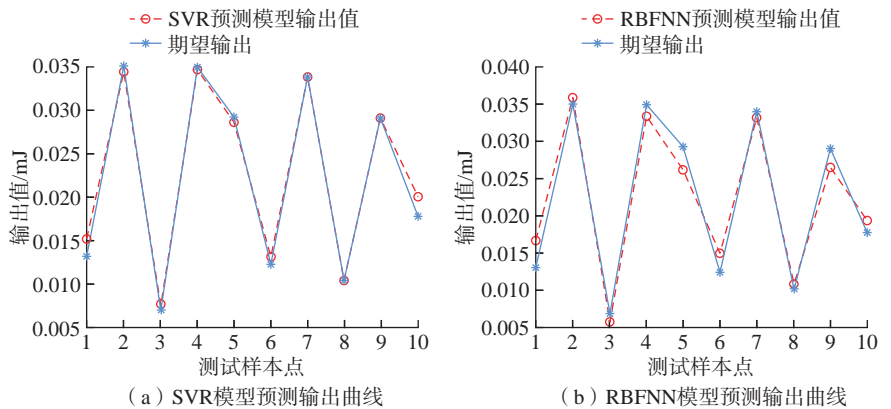


图28 SVR和RBFNN模型预测精度对比<sup>[6]</sup>

Fig.28 Comparison of prediction accuracy between SVR and RBFNN<sup>[6]</sup>

表3 各代理模型的特点

Table 3 Characteristics of each surrogate model

代理模型		特点
响应面模型		数学理论基础充分扎实;系统性、实用性强;适用广泛;简单直观且易于构建;所需样本少;适合设计变量简单的低维夹具布局优化问题;对设计变量复杂的高维夹具布局优化问题,其建模拟合效果较差
人工神经网络	BPNN	逼近、泛化能力强;容错性好;适合设计变量复杂的高维夹具布局优化问题;结构设置参数多;收敛速度慢;容易陷入局部最优且过拟合
	RBFNN	结构简单;训练简洁;学习收敛速度快;函数逼近、模式识别和分类能力都优于BPNN;可以克服局部极小值问题
Kriging模型		可以给出度量预测值可信程度的预测方差;对于非线性程度较高的复杂问题,具有比较好的拟合效果
SVR模型		所需样本少;适合设计变量复杂的高维夹具布局优化问题

将薄壁件的动态特性转换成静态特性来考虑,比如通过减小工件变形、提高工件夹具系统的刚度来抑制工件的振动。

(3) 现有的文献主要是在夹具元件数目一定的情况下优化夹具元件的位置,并没有把夹具元件的数量和位置耦合在一起进行考虑,而且也缺乏对装夹顺序的研究。

(4) 现有研究大多将薄壁件方向的总体变形或最大变形作为优化目标,忽略了其他方向的变形情况。此外,很少有研究在优化过程中考虑薄壁件的应力水平。

(5) 相比于装配阶段和测量阶段,加工过程中薄壁件所受的工艺载荷较为复杂。所以,基于有限元模型的夹具布局优化方法因其计算精度高的优势被广泛应用于薄壁件的加工夹具布局优化设计中。基于代理模型的夹具布局优化方法计算成本低、优化效率高,在薄壁件的装配和测量阶段应用较多。

(6) 有限元分析耦合元启发式优化算法是目前薄壁件夹具布局优化的主流方法,基于代理模型的夹具布局优化方法近年来逐渐成为一种趋势。

基于以上特点,今后在弱刚性薄壁件的夹具布局优化研究方面还需要开展的工作如下。

(1) 复杂动态载荷作用下弱刚性薄壁件的夹具布局优化设计。在实际制造过程中,薄壁件经常承受一些复杂动态载荷。特别是在加工过程中,大多数加工操作涉及动态负载。因此,在设计薄壁件夹具布局时应充分考虑工件-夹具系统的动态特性,以提高制造精度。

(2) 弱刚性薄壁件夹具元件数量、位置及装夹顺序的同步优化。在工程应用中,为控制工装成本,夹具布局优化过程中还需同时考虑夹具元件的数量。此外,装夹顺序也会极大地影响制造过程中薄壁件的变形。因此,为实现薄壁件夹具成本和制造

精度的协同控制,需要对夹具元件数量、位置及装夹顺序进行同步优化。而如何实现夹具元件数量、位置及装夹顺序的耦合表征是其中一个重要的研究点。

(3) 以工件变形最小、内部应力水平最低为目标的复材薄壁件夹具布局多目标优化。由于具有高比强度和比刚度、优异的耐疲劳和耐介质腐蚀性,以及独特的力学性能可设计性,复合材料薄壁件得到了越来越广泛的应用。和金属薄壁件相比,其脆性强、受力易损伤,且损伤扩展机理复杂。因此,针对复材薄壁件的夹具布局优化,不能只考虑工件变形,还需考虑其内部应力水平,以防止复材薄壁件在制造过程中损伤失效。

(4) 基于物理的有限元模型校正技术。在薄壁件的夹具布局优化过程中,无论是采用基于有限元模型的夹具布局优化方法,抑或是通过有限元分析获取代理模型的训练样本,有限元模型计算精度直接影响最终的优化结果。因此,基于实际物理数据,对材料属性参数、约束条件、制造载荷等有限元模型参数进行校正将是未来的一个研究难点。

(5) 基于小样本学习理论的代理模型建模方法。随着薄壁件尺寸越来越大、结构越来越复杂,当采用基于代理模型的夹具布局优化方法来设计薄壁件的夹具布局时,训练样本的获取代价也随之增大。因此,适用于薄壁件夹具布局优化的基于小样本学习理论的代理模型建模方法是未来的一个重要研究方向。

## 参考文献

- [1] FITZGERALD R W. Mechanics of materials[M]. MA: Addison-Wesley Publishing Company, 1982: 32-33.
- [2] 杨元. 基于先验约束的航空薄壁件定位布局规划[D]. 西安: 西北工业大学, 2018: 15-16.

YANG Yuan. Research on locating layout

planning for aeronautical sheet metal part based on prior constraint[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018: 15-16.

[3] CAI W, HU S J, YUAN J X. Deformable sheet metal fixturing: Principles, algorithms, and simulations[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1996, 118(3): 318-324.

[4] BAKKER O J, PAPASTATHIS T N, POPOV A A, et al. Active fixturing: Literature review and future research directions[J]. International Journal of Production Research, 2013, 51(11): 3171-3190.

[5] REARICK M R. Optimal fixture design for deformable sheet metal workpieces[J]. Trans. NAMRI/SME, 1993, 11: 407.

[6] CEGLAREK D, LI H F, TANG Y. Modeling and optimization of end effector layout for handling compliant sheet metal parts[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2001, 123(3): 473-480.

[7] 王运巧, 梅中义, 范玉青. 薄壁弧形零件装夹布局有限元优化[J]. 机械工程学报, 2005, 41(6): 214-217, 223.

WANG Yunqiao, MEI Zhongyi, FAN Yuqing. Finite element optimization of machining fixture layout of thin-walled arc workpiece[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(6): 214-217, 223.

[8] WANG Z Q, YANG Y A, KANG Y G, et al. A location optimization method for aircraft weakly-rigid structures[J]. International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization, 2014, 5: A18.

[9] 王少锋, 洪军, 王建国, 等. 大型薄壁件多点定位的初始布局优化算法研究[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(5): 38-44.

WANG Shaofeng, HONG Jun, WANG Jianguo, et al. Initial distribution optimization for multi-point location of large thin-walled components[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(5): 38-44.

[10] 王少锋, 洪军, 王建国, 等. 大型薄壁件的多点支承/定位方法研究[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(6): 122-129.

WANG Shaofeng, HONG Jun, WANG Jianguo, et al. Multi-point location method of large-scale thin-wall component[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(6): 122-129.

[11] CAMELIO J A, HU S J, CEGLAREK D J. Impact of fixture design sheet metal assembly variation[C]//Volume 3: 7th Design for Manufacturing Conference. Canada. ASME/DC,

2002, 36231: 133–140.

[12] CAI W. Fixture optimization for sheet panel assembly considering welding Gun variations[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2008, 222(2): 235–246.

[13] HOLLAND J H. Adaptation in natural and artificial systems[M]. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975: 46–53.

[14] GOLDBERG D E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning[M]. MA: Addison-Wesley Publishing Company, 1989: 21–24.

[15] KRISHNAKUMAR K, MELKOTE S N. Machining fixture layout optimization using the genetic algorithm[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(4): 579–598.

[16] VALLAPUZHA S, DE METER E C, CHOUDHURI S, et al. An investigation into the use of spatial coordinates for the genetic algorithm based solution of the fixture layout optimization problem[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42(2): 265–275.

[17] VALLAPUZHA S, DE METER E C, CHOUDHURI S, et al. An investigation of the effectiveness of fixture layout optimization methods[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42(2): 251–263.

[18] LIAO Y G. A genetic algorithm-based fixture locating positions and clamping schemes optimization[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2003, 217(8): 1075–1083.

[19] LAI X M. Flexible assembly fixturing layout modeling and optimization based on genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition), 2004, 17(1): 89–92.

[20] WANG J A. Locators optimization for measuring fixture design[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition), 2004, 17(3): 332–335.

[21] 陈蔚芳, 倪丽君, 王宁生. 夹具布局和夹紧力的优化方法研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(12): 1413–1417.

CHEN Weifang, NI Lijun, WANG Ningsheng. Investigation on optimization method for fixture layout and clamping forces[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(12): 1413–1417.

[22] 姜潮, 韩旭, 钟志华. 电阻点焊焊装夹具定位点的优化设计[J]. 机械工程学报, 2009, 45(4): 192–196.

JIANG Chao, HAN Xu, ZHONG Zhihua. Locator optimization for resistance-spot-welding fixtures[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(4): 192–196.

[23] 陆俊百, 周凯, 张伯鹏. 飞行器薄壁件柔性工装定位 / 支承阵列优化自生成研究[J]. 中国机械工程, 2010, 21(19): 2369–2374, 2378.

LU Junbai, ZHOU Kai, ZHANG Bopeng. Research on optimization of location/support array of flexible tooling system for aircraft large-scale thin-wall workpiece[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(19): 2369–2374, 2378.

[24] 石志云, 刘渝, 余时建. 基于遗传算法的柔性薄板冲压件定位位置优化设计[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(7): 1145–1149.

SHI Zhiyun, LIU Yu, YU Shijian. The locators' layout optimization for flexible sheet metal workpiece using the genetic algorithm[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(7): 1145–1149.

[25] 梁建光. 飞机蒙皮切边柔性夹具夹持方案的优化研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013: 41–50.

LIANG Jianguang. Study on clamping optimization of flexible fixture for aircraft skin trimming process[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013: 41–50.

[26] XIONG L, MOLFINO R, ZOPPI M. Fixture layout optimization for flexible aerospace parts based on self-reconfigurable swarm intelligent fixture system[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66(9): 1305–1313.

[27] YU J, ZHU X F, GAO Y L. The analysis of optimal clamping scheme based on genetic algorithm[J]. Advanced Materials Research, 2014, 1055: 218–223.

[28] 齐振超, 张开富, 李原, 等. 大型壁板自动钻铆定位误差分析与优化[J]. 航空学报, 2015, 36(10): 3439–3449.

QI Zhenchao, ZHANG Kaifu, LI Yuan, et al. Analysis and optimization for locating errors of large wing panel during automatic drilling and riveting[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(10): 3439–3449.

[29] AHMAD Z, SULTAN T, ASAD M, et al. Fixture layout optimization for multi point respot welding of sheet metals[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2018,

32(4): 1749–1760.

[30] CHEN C, SUN Y, NI J. Optimization of flexible fixture layout using  $N-M$  principle[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96(9): 4303–4311.

[31] LIU Z, SUN Y. Fixture layout optimization for car dashboard based on  $N-X$  locating principle[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2022, 236(9): 1282–1292.

[32] 李西宁, 王悦舜, 李玉华, 等. 基于遗传算法的飞机弱刚性件夹持方案优化设计[J]. 航空制造技术, 2019, 62(1/2): 82–86, 94.

LI Xining, WANG Yueshun, LI Yuhua, et al. Optimization design of aircraft weak rigid parts clamping scheme based on genetic algorithm[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(1/2): 82–86, 94.

[33] 张秋月, 安鲁陵, 岳烜德, 等. 基于遗传算法的飞机复合材料结构装配压紧力大小与布局的优化[J]. 复合材料学报, 2019, 36(6): 1546–1557.

ZHANG Qiuyue, AN Luling, YUE Xuande, et al. Optimization of size and layout of pressing force for composite airframe structure assembly based on genetic algorithm[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(6): 1546–1557.

[34] ZHANG W, AN L L, CHEN Y A, et al. Optimisation for clamping force of aircraft composite structure assembly considering form defects and part deformations[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2021, 13(4): 168781402199570.

[35] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]//Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks. IEEE, 1995, 4: 1942–1948.

[36] KENNEDY J F, EBERHART R C, SHI Y H. Swarm intelligence[M]. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2001.

[37] POLI R. An analysis of publications on particle swarm optimization applications[D]. Essex: University of Essex, 2007: 32–24.

[38] DOU J P, WANG X S, WANG L. Machining fixture layout optimisation under dynamic conditions based on evolutionary techniques[J]. International Journal of Production Research, 2012, 50(15): 4294–4315.

[39] 王鹏, 姜坤, 周雄辉. 基于粒子群算法的测量夹具定位点的优化设计[J]. 模具工业, 2013, 39(4): 10–15.

WANG Peng, JIANG Kun, ZHOU

- Xionghui. Optimization of locator for measurement fixture based on PSO[J]. Die & Mould Industry, 2013, 39(4): 10–15.
- [40] 钱彦懿. 基于绝对节点坐标法的超大薄壁曲面结构装配偏差分析及装夹优化设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- QIAN Yanyi. Assembly deviation modeling via ANCF and optimization of fixture scheme for large scale curved thin-walled structure[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018.
- [41] DORIGO M, GAMBARDELLA L M. Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1997, 1(1): 53–66.
- [42] MCMULLEN P R. An ant colony optimization approach to addressing a JIT sequencing problem with multiple objectives[J]. Artificial Intelligence in Engineering, 2001, 15(3): 309–317.
- [43] JAYARAMAN V K, KULKARNI B D, KARALE S, et al. Ant colony framework for optimal design and scheduling of batch plants[J]. Computers & Chemical Engineering, 2000, 24(8): 1901–1912.
- [44] P R A B H A H A R A N G , PADMANABAN K P, KRISHNAKUMAR R. Machining fixture layout optimization using FEM and evolutionary techniques[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 32(11): 1090–1103.
- [45] P A D M A N A B A N K P , PRABHAHARAN G. Dynamic analysis on optimal placement of fixturing elements using evolutionary techniques[J]. International Journal of Production Research, 2008, 46(15): 4177–4214.
- [46] PADMANABAN K P, ARULSHRI K P, PRABHAKARAN G. Machining fixture layout design using ant colony algorithm based continuous optimization method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 45(9): 922–934.
- [47] 周涛, 熊珍琦, 姚为, 等. 基于改进蚁群算法的薄壁件柔性工装布局优化[J]. 推进技术, 2016, 37(6): 1165–1174.
- ZHOU Tao, XIONG Zhenqi, YAO Wei, et al. Flexible tooling layout optimization for thin-walled workpieces based on improved ant colony algorithm[J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(6): 1165–1174.
- [48] CHENG H, LI Y A, ZHANG K F, et al. Deformation analysis method for aeronautical thin walled structures with automated riveting[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 271–272: 1526–1530.
- [49] KHODABANDEH M, SARYAZDI M G, OHADI A. Multi-objective optimization of auto-body fixture layout based on an ant colony algorithm[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2020, 234(6): 1137–1145.
- [50] XING Y F, NI J, LAN S H. Fixture layout optimization based on social radiation algorithm[C]//International Manufacturing Science and Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2014, 45813: V002T02A044.
- [51] XING Y F. Fixture layout design of sheet metal parts based on global optimization algorithms[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2017, 139(10): 101004.
- [52] XING Y F, HU M, ZENG H, et al. Fixture layout optimisation based on a non-domination sorting social radiation algorithm for auto-body parts[J]. International Journal of Production Research, 2015, 53(11): 3475–3490.
- [53] LIU S G, ZHENG L, ZHANG Z H, et al. Optimization of the number and positions of fixture locators in the peripheral milling of a low-rigidity workpiece[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 33(7): 668–676.
- [54] YANG X S. Nature-inspired metaheuristic algorithms[M]. Cambridge: Luniver Press, 2008: 55–63.
- [55] 曾冰. 基于离散萤火虫算法的装配序列规划方法研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2013.
- ZENG Bing. Research on assembly sequence planning based on discrete firefly algorithm[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2013.
- [56] 王仲奇, 黄杰, 康永刚, 等. 基于萤火虫算法的飞机弱刚性件装配定位策略优化[J]. 机械科学与技术, 2016, 35(4): 626–629.
- WANG Zhongqi, HUANG Jie, KANG Yonggang, et al. Locating strategy optimization of aircraft weakly rigid parts assembly based on firefly algorithm[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2016, 35(4): 626–629.
- [57] YANG X S. Flower pollination algorithm for global optimization[C]//DURAND-LOSE J, JONOSKA N. International Conference on Unconventional Computing and Natural Computation. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012: 240–249.
- [58] JAGATHEESAN K, ANAND B, SAMANTA S, et al. Application of flower pollination algorithm in load frequency control of multi-area interconnected power system with nonlinearity[J]. Neural Computing and Applications, 2017, 28(1): 475–488.
- [59] 王仲奇, 李诚, 杨勃, 等. 基于花粉算法的曲面薄壁件定位布局优化[J]. 中国机械工程, 2017, 28(18): 2231–2236.
- WANG Zhongqi, LI Cheng, YANG Bo, et al. Fixture locating layout optimization of curved thin-walled parts based on FDA[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(18): 2231–2236.
- [60] YANG X S, DEB S. Cuckoo search via lévy flights[C]//2009 World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC). IEEE, 2009: 210–214.
- [61] YANG X S, DEB S. Engineering optimisation by cuckoo search[J]. International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation, 2010, 1(4): 330–343.
- [62] YANG B, WANG Z Q, YANG Y A, et al. Optimization of fixture locating layout for sheet metal part by cuckoo search algorithm combined with finite element analysis[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(6): 168781401770483.
- [63] KAVEH A. Applications of metaheuristic optimization algorithms in civil engineering[M]. Cham: Springer International Publishing, 2017.
- [64] MIRJALILI S, LEWIS A. The whale optimization algorithm[J]. Advances in Engineering Software, 2016, 95: 51–67.
- [65] LI C, WANG Z Q, TONG H A, et al. Optimization of the number and positions of fixture locators for curved thin-walled parts by whale optimization algorithm[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2174(1): 012013.
- [66] ESCHENAUER H A, OLHOFF N. Topology optimization of continuum structures: A review[J]. Applied Mechanics Reviews, 2001, 54(4): 331–390.
- [67] BENDSØE M P, SIGMUND O. Topology, optimization: theory, methods, and applications[M]. Berlin: Springer, 2003.
- [68] 周泽斌. 薄壁结构件加工变形机理及夹具优化设计方法研究[D]. 上海: 东华大学, 2011.
- ZHOU Zebin. Deformation prediction

and fixture layout optimization of thin walled workpiece[D]. Shanghai: Donghua University, 2011.

[69] YANG Y, WANG Z Q, YANG B, et al. Topological optimization method for aeronautical thin-walled component fixture locating layout[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 34(4): 405–412.

[70] FU J C, WANG L Q. A random-discretization based Monte Carlo sampling method and its applications[J]. Methodology and Computing in Applied Probability, 2002, 4(1): 5–25.

[71] LIAO X Y, WANG G G. Simultaneous optimization of fixture and joint positions for non-rigid sheet metal assembly[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 36(3): 386–394.

[72] WANG G G, SHAN S. Review of metamodeling techniques in support of engineering design optimization[J]. Journal of Mechanical Design, 2007, 129(4): 370–380.

[73] KEANE A, FORRESTER A, SOBESTER A. Engineering design via surrogate modelling: A practical guide[M]. Washington, DC: AIAA, Inc., 2008.

[74] BOX G E P, DRAPER N R. Response surfaces, mixtures, and ridge analyses[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.

[75] 隋允康, 宇慧平. 响应面方法的改进及其对工程优化的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 95–107.

SUI Yunkang, YU Huiping. Improvement of response surface method and its application to engineering optimization[M]. Beijing: Science Press, 2011: 95–107.

[76] 邢彦锋, 金隼, 来新民, 等. 基于径向函数的响应面法在薄板装配夹具设计中的应用 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21(1): 101–106.

XING Yanfeng, JIN Sun, LAI Xinmin, et al. Application of response surface methodology based on radial basis function in fixture design[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2009, 21(1): 101–106.

[77] 邢彦锋, 王岩松. 应用 Two-Stage 方法的薄板零件定位策略优化设计 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(5): 677–682.

XING Yanfeng, WANG Yansong. Fixture locating scheme design based on two-stage

method for sheet metal components[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2012, 24(5): 677–682.

[78] XING Y F, WANG Y S. Fixture layout design based on two-stage method for sheet metal components[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2013, 227(1): 162–172.

[79] BI Y B, YAN W M, KE Y L. Multi load-transmitting device based support layout optimization for large fuselage panels in digital assembly[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2015, 229(10): 1792–1804.

[80] 于金, 高彦梁. 多点柔性工装夹具布局优化研究 [J]. 制造技术与机床, 2016(2): 124–129.

YU Jin, GAO Yanliang. Research on clamping distribution optimization of multi-point flexible tooling system[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2016(2): 124–129.

[81] YU K G, WANG X J. Modeling and optimization of welding fixtures for a high-speed train aluminum alloy sidewall based on the response surface method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119(1–2): 315–327.

[82] 蒋宗礼. 人工神经网络导论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 43–76.

JIANG Zongli. Introduction to artificial neural networks[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001: 43–76.

[83] 刘玉梅, 姜兆亮, 刘文平, 等. 基于薄板件夹具变形控制的夹紧点位置优化方法研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2011(7): 23–25.

LIU Yumei, JIANG Zhaoliang, LIU Wenping, et al. Research on clamping-point optimization based on control of the deformation in fixing thin-walled workpiece[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2011(7): 23–25.

[84] VASUNDARA M, PADMANABAN K P, SABAREESWARAN M, et al. Machining fixture layout design for milling operation using FEA, ANN and RSM[J]. Procedia Engineering, 2012, 38: 1693–1703.

[85] SELVAKUMAR S, ARULSHRI K P, PADMANABAN K P, et al. Design and optimization of machining fixture layout using ANN and DOE[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013,

65(9): 1573–1586.

[86] 秦国华, 赵旭亮, 吴竹溪. 基于神经网络与遗传算法的薄壁件多重装夹布局优化 [J]. 机械工程学报, 2015, 51(1): 203–212.

QIN Guohua, ZHAO Xuliang, WU Zhuxi. Optimization of multi-fixturing layout for thin-walled workpiece based on neural network and genetic algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(1): 203–212.

[87] QIN G H, WANG Z K, RONG Y M, et al. A unified approach to multi-fixturing layout planning for thin-walled workpiece[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2017, 231(3): 454–469.

[88] LU C, ZHAO H W. Fixture layout optimization for deformable sheet metal workpiece[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78(1–4): 85–98.

[89] WANG Z H, LI D S, SHEN L H, et al. Multi-objective optimisation of assembly fixturing layout for large composite fuselage panel reinforced by frames and stringers[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 125(3–4): 1403–1418.

[90] HORNIK K, STINCHCOMBE M, WHITE H. Multilayer feedforward networks are universal approximators[J]. Neural Networks, 1989, 2(5): 359–366.

[91] HAYKIN S S. Neural networks and learning machines[M]. 3rd ed. NJ: Pearson Education, 2010: 63–82.

[92] WANG Z Q, YANG B, KANG Y G, et al. Development of a prediction model based on RBF neural network for sheet metal fixture locating layout design and optimization[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2016, 2016: 1–6.

[93] WANG Z Q, YANG Y A, YANG B, et al. Optimal sheet metal fixture locating layout by combining radial basis function neural network and bat algorithm[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2016, 8(12): 168781401668190.

[94] MA Z H, XING Y F, HU M. Fixture layout optimization based on hybrid algorithm of gaot and RBF-NN for sheet metal parts[C]//Proceedings of the 2019 International Conference on Artificial Intelligence and Advanced Manufacturing. New York: ACM, 2019: 1–6.

[95] 王鹏, 徐家川, 曹凡, 等. 基于

NSGA-II 与 RBF 神经网络的车身薄板定位布局研究[J]. 河北科技大学学报, 2019, 40(3): 189-198.

WANG Peng, XU Jiachuan, CAO Fan, et al. Research on location and layout of auto-body sheet metal based on NSGA-II and RBF neural network[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2019, 40(3): 189-198.

[96] SACKS J, WELCH W J, MITCHELL T J, et al. Design and analysis of computer experiments: Rejoinder[J]. Statistical Science, 1989, 4(4): 409-423.

[97] YANG B, WANG Z Q, YANG Y, et al. Optimum fixture locating layout for sheet metal part by integrating kriging with cuckoo search algorithm[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(1): 327-340.

[98] 李诚, 王仲奇, 童话, 等. 基于 Kriging 与 FPA 的薄壁件夹具布局设计[J]. 航空制造技术, 2020, 63(18): 95-101.

LI Cheng, WANG Zhongqi, TONG Hua, et al. Design of fixture locating layout for thin-walled part based on kriging and FPA[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(18): 95-101.

[99] 邓乃扬, 田英杰. 数据挖掘中的新方法: 支持向量机[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 21-35.

DENG Naiyang, TIAN Yingjie. A new method in data mining: Support vector machine[M]. Beijing: Science Press, 2004: 21-35.

[100] VAPNIK V N. Statistical learning theory[M]. New York: Wiley, 1998.

[101] YU K G. Robust fixture design of compliant assembly process based on a support vector regression model[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103(1-4): 111-126.

[102] 杨元, 王仲奇, 杨勃, 等. 基于 SVR 的航空薄壁件夹具布局优化预测模型

[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(6): 1302-1309.

YANG Yuan, WANG Zhongqi, YANG Bo, et al. Prediction model for aeronautical thin-walled part fixture layout optimization based on SVR[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(6): 1302-1309.

[103] YANG Y A, WANG Z Q, YANG B, et al. Multiobjective optimization for fixture locating layout of sheet metal part using SVR and NSGA-II[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2017, 2017: 1-10.

[104] DU J A, YUE X W, HUNT J H, et al. Optimal placement of actuators via sparse learning for composite fuselage shape control[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2019, 141(10): 101004.

通讯作者: 翟雨农, 助理教授, 博士, 主要研究方向为低应力装配协调、装配性能与服役可靠性、机器人智能装配和人机协同装配。

## A Review of Fixture Layout Optimization Method for Weakly-Rigid Thin-Walled Workpieces

WANG Zhanghao, LI Dongsheng, ZHAI Yunong  
(Beihang University, Beijing 100191, China)

**[ABSTRACT]** Due to the characteristics of light weight and high strength, weakly-rigid thin-walled workpieces are widely used in aerospace, automobile and other industrial fields, but they also have the disadvantages of small thickness, low rigidity and easily deformation during the manufacturing process. The fixture layout design is a very important factor to reduce the deformation and ensure the quality of thin-walled workpieces. Traditional fixture layout design of thin-walled workpieces depends on the intuitive judgment and experience accumulation of engineers, which is slow, high cost and large randomness of design. With the continuous improvement of computer technology, many scholars applied finite element simulation, mathematical programming method, intelligent optimization algorithm, surrogate model and so on to optimize the layout of thin-walled workpieces fixture components, and have obtained a lot of research results. According to the modeling method of objective function and the optimization algorithm, the related researches are systematically classified and discussed, and the merit and demerit of each modeling method and optimization algorithm are analyzed in detail. Finally, the related researches on the fixture layout optimization method of weakly-rigid thin-walled workpieces are summarized, and the corresponding research advice are put forward.

**Keywords:** Weakly-rigid thin-walled workpieces; Fixture layout optimization; Finite element method; Surrogate model; Optimization algorithm

(责编 古系)

引文格式: 崔俊佳, 刘泉, 赖铭, 等. 面向航空发动机油路密封管件的高鲁棒性视觉定位算法研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(14): 136-142.

CUI Junjia, LIU Xiao, LAI Ming, et al. Research on robust visual localization algorithm for aero-engine oil sealing pipe fitting[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(14): 136-142.

# 面向航空发动机油路密封管件的高鲁棒性视觉定位算法研究\*

崔俊佳<sup>1</sup>, 刘泉<sup>1</sup>, 赖铭<sup>1</sup>, 王绍螺<sup>1</sup>, 蒋浩<sup>1</sup>, 李光耀<sup>2</sup>

(1. 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082;

2. 北京理工大学深圳汽车研究院(电动车辆国家工程实验室深圳研究院), 深圳 518118)

[摘要] 航空航天行业零部件种类繁多、定制化程度高, 难以进行定位夹具的开发。视觉定位技术是智能制造中的关键一环, 该技术基于机器视觉确定工件位置, 不需要定位夹具, 能够被广泛运用于各种工况。但现有视觉定位算法只适用于少数种类的零件, 泛用性不高。本文提出了一种基于 YOLOv5s 目标检测网络和 Siamese 孪生网络的新型视觉定位算法(YOLO-Siamese 变化检测网络)。网络引入 ConvDiff(卷积差分)模块来提升变化检测网络的特征提取效果, 并采用半监督学习方法对模型进行训练。试验表明, 在没有使用目标工件数据集的条件下, 算法在验证集上的 AP@0.5 达到了 99.3%, AP@0.5:0.95 达到了 89.6%, 单帧推理时间为 16.13 ms。该算法无需目标工件数据、定位精度高、运算速度快, 提高了视觉定位算法的鲁棒性和泛用性。

关键词: 变化检测网络; 视觉定位; 机器视觉; YOLO; Siamese; 孪生网络

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.14.136



崔俊佳

教授, 博士生导师, 主要研究方向为异种材料连接和智能检测。

\* 基金项目: 国家自然科学基金(52175315、51975202); 深圳市科技计划(KQTD20200820113110016)。

为响应中国制造 2025 的时代主题, 制造业发展趋势将逐步向智能化靠拢。发展智能制造对于打造我国制造业竞争新优势、促进制造业迈向中高端、实现制造强国具有重要意义<sup>[1]</sup>。航空航天制造业的零部件种类繁多、定制化程度高<sup>[2]</sup>, 为智能制造提出了新的挑战。定位是制造中的关键一环, 不论是机械加工、缺陷检测、尺寸测量或是配送生产资料都需要对目标位置进行确定<sup>[3-4]</sup>。传统定位方式通过设计与目标零部件配套的机械装置(夹具)来实现位置确定<sup>[5]</sup>。尽管使用夹具能达到较好的定位效果, 但会导致生产线只能生产单一类别零部件, 缺乏泛用性, 使得智能制造技术难以满足航空航天制造的需求。

随着工业化智能化进程的发展, 越来越多的工作引入了机器视觉等智能相关的技术。其中, 基于机器视觉的定位算法极大地提高了制造过程的柔性化程度。魏思铭<sup>[6]</sup>利用检测环境下圆柱滚子和背景灰度值较大的特点, 使用边缘提取算法来确定待检测工件的位置, 从而实现了圆柱滚子的缺陷检测; 但是, 这种定位方法仅适用于待检测工件与背景亮度差异很大的场景, 在泛用性上略有欠缺。Sun 等<sup>[7]</sup>自主开发出了边缘检测算法用于定位丝杆轮廓, 实现了一种基于两阶段视觉的滚珠丝杠关键参数测量技术; 该研究的最终测量精度在 5~8  $\mu\text{m}$  范围内, 但论文中提到的定位方法高度针对滚珠丝杠, 该算法同样具有泛用性不足的缺点。

基于深度学习的目标检测算法是一种常用的视觉定位算法。相比于传统算法,深度学习算法具有不需要手动提取特征,快速、稳定、鲁棒性高的优点<sup>[8-10]</sup>。但是,基于深度学习的目标检测一般是一个有监督的机器学习问题,使得基于目标检测算法的视觉定位模型只是在与训练数据分布相似的数据集上具有良好的泛用性。针对视觉定位算法泛用性普遍较差的问题,本文基于 YOLOv5s 目标检测网络和 Siamese 孪生网络开发了一种高泛用性,对目标工件数据集依赖小的视觉定位算法——YOLO-Siamese 变化检测网络。该算法没有机械定位装置,不需要目标工件数据,具有较高的泛化性与鲁棒性。本文将航空发动机油路密封管件为检测对象,验证提出的 YOLO-Siamese 变化检测网络。

## 1 试验及方法

### 1.1 典型件与视觉平台

为了对本研究算法进行性能验证,本文分别列举了两种型号的航空发动机油路管件。两种型号的油路密封管件均有变形特征,具有较好的代表性,如图 1 所示。航空管路系统



图 1 航空发动机油路密封管件  
Fig.1 Aero-engine oil sealing pipe fitting

被称为飞行器的“血管”和“气管”,其接头对于整个飞行器的安全至关重要。因此,本文以航空发动机油路管件为检测对象,对提出的高鲁棒性视觉定位算法进行了验证与探究。

为了模拟零件生产后的检测平台,本文搭建了一个框架式视觉平台,如图 2 所示。主要包括工业相机模组、视觉支架、螺纹底座 3 个部分。工业相机模组包括工业相机和相机镜头两个部分,主要负责对原始图像进行采集。视觉支架则用于固定相机模组,并对拍摄高度及角度进行调节。螺纹底座可以用于安装各类附加组件,如光源、转台等,但本文只将其作为载物平台。

### 1.2 YOLO-Siamese 变化检测网络

本文引入 Siamese 网络(孪生网

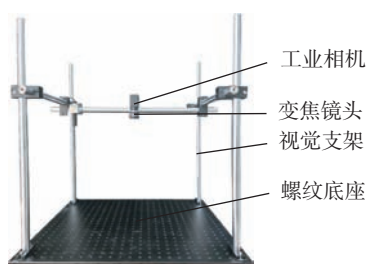


图 2 视觉平台  
Fig.2 Vision platform

络)对 YOLOv5s 目标检测算法进行改进,得到 YOLO-Siamese 变化检测网络,并基于 YOLO-Siamese 变化检测网络实现了只需少量原始训练样本的高鲁棒性视觉定位算法。如图 3 所示,算法主要流程包括图像采集、半监督训练、模型加速推理 3 个模块。图像采集模块负责获取原始背景图像和工作图像,并将图像送入检测网络中;训练模块基于半监督训练方法对网络进行训练;最后,在加速推理模块中,使用背景预推理方法对推理过程进行加速。本节将围绕变化检测网络搭建、半监督训练、网络推理加速 3 个部分进行详细介绍。

#### 1.2.1 网络搭建

变化检测网络主要基于 Siamese 网络<sup>[11-13]</sup>,其大体思想为基于权重共享的孪生网络架构(Siamese 网络)提取特征,然后使用特征差分模块得到差分特征,进而对差分特征进行增强提取以及编码输出,得到最终预测结果。但目前的变化检测网络多应用于卫星遥感图像分析领域(如分析宏观的地貌变化),无法应用到精细的视觉定位任务中。

YOLO (You only look once) 是

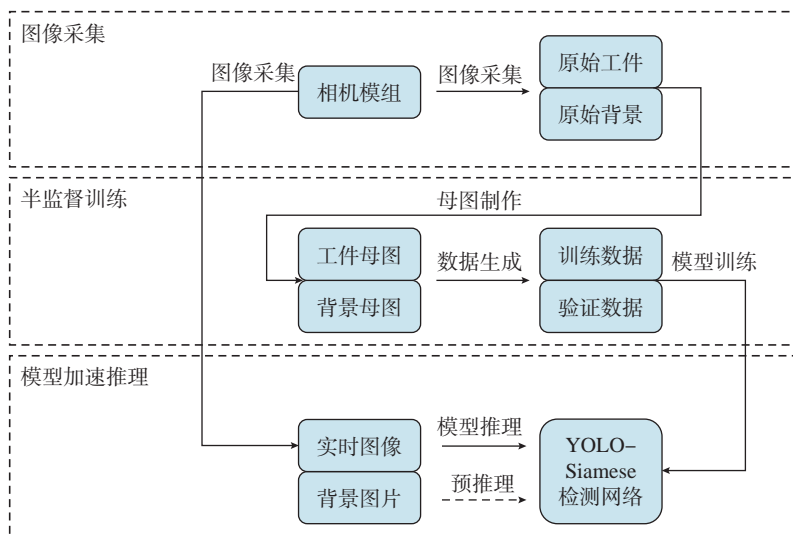


图 3 变化检测算法流程图  
Fig.3 Flowchart of the change detection algorithm

一系列开源的单阶段的端对端目标检测算法,兼具高效率和高精度<sup>[14-16]</sup>,被广泛应用于工业视觉定位任务中。YOLO系列算法目前具有多个版本,其中维护频率最高,应用最广泛的版本为 Ultralytics 公司推出的 YOLOv5。从项目发布至今,YOLOv5 已经迭代到了第 6 个版本。YOLOv5 包括 YOLOv5n、YOLOv5s、YOLOv5m、YOLOv5l、YOLOv5x 这 5 个模型。其中 YOLOv5s 为轻量化版本,网络参数量小,算力需求不大,适合部署在边缘服务器上。本研究选择 YOLOv5s 作为基准检测网络。图 4 为 YOLO-Siamese 整体结构。本研究以 YOLOv5s 为基础检测框架,借鉴 Siamese 孪生网络的权重共享思想,设计了 ConvDiff (卷积差分)模块作为特征差分模块,将 YOLOv5s 改进为 YOLO-Siamese 变化检测网络。

基于孪生网络思想的变化检测网络需要对同时输入的两张图片进行特征差分,进而计算出差分特征,实现变化检测。最简单的特征差分方式为 Siamese 网络中采用的绝对值差分,只对两张图片提取到的特征作差并求绝对值,计算公式为式(1)。但使用简单的绝对值差分方式来提取特征时,效果较不稳定,特别是两张图片没有严格对齐时,算法性能将会下降。

绝对值差分方程为

$$Feature_{diff} = f_{diff}(Feature_1, Feature_2) = |Feature_1 - Feature_2| \quad (1)$$

式中,  $Feature_{diff}$  为差分特征;  $Feature_1$  和  $Feature_2$  为骨干特征。

如图 5 所示,为了提升变化检测网络中特征差分模块的性能,本文提出了 ConvDiff 模块。ConvDiff 模块在背景图片和工件图片进行绝对值差分前,先通过一个 SE (Squeeze-and-excitation networks) 通道注意力模块及 3 层卷积激活层进行特征增强,然后再进行绝对值差分(Abs),

之后再通过一个卷积模块进一步增强特征得到最终差分特征。

SE 模块<sup>[17]</sup>是一种有效的通道注意力模块,该模块通过一个全局平均池化(GAP)、两个全连接层(Fully connect)及一个 Sigmoid 函数获得了通道注意力权重,并基于权重对权值进行调整从而实现通道注意力。SE 通道注意力模块如图 6 所示<sup>[17]</sup>。

Sigmoid 函数为

$$\text{sigmoid}(x) = \sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (2)$$

### 1.2.2 半监督训练

传统目标检测算法的训练需要大量的数据集,但大量数据集的获取往往存在困难,甚至无法获取。本文采用半监督训练方法,使用少量且易

获取的背景母图和工件母图自动地生成用于训练和验证的数据集,无需人工进行数据标注,从而降低了数据集的获取难度。图 7 所示为模型半监督训练流程,训练数据集需使用与航空航天零件无关的常见零件作为零件母图。具体模型训练步骤包括原始母图创建、数据集生成和在线数据增强训练。

#### (1) 原始母图创建。

首先拍摄几种常见的金属工件的高清图像,并对图像进行抠图操作,提取目标像素并去除背景像素。此操作得到 45 张训练集零件母图。然后,模拟工业环境拍摄 33 种背景图片作为背景母图。最后,拍摄 6 张航空发动机油路密封管件图片,在进

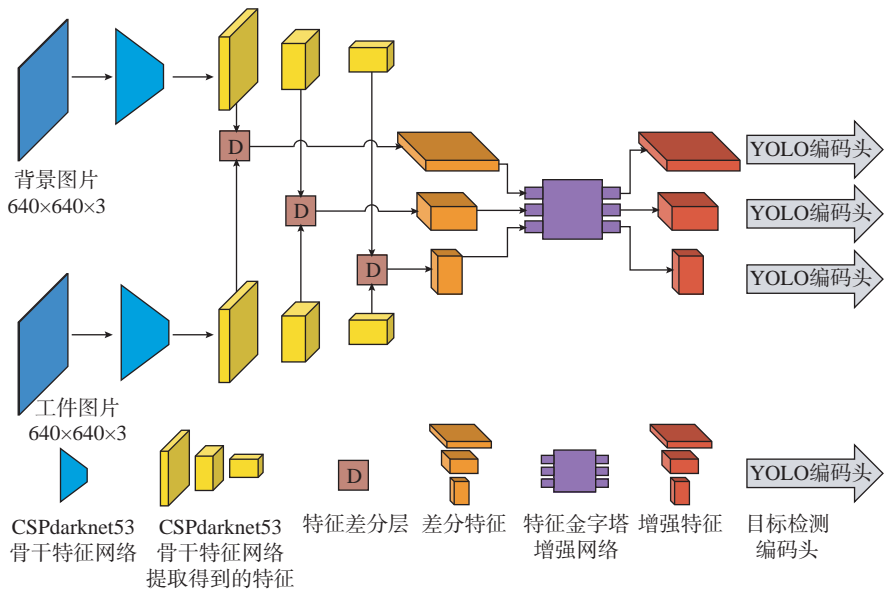


图 4 YOLO-Siamese 整体结构

Fig.4 Overall structure of YOLO-Siamese

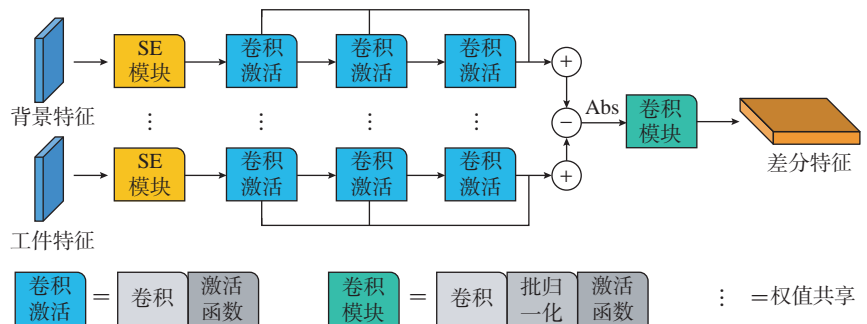


图 5 ConvDiff 模块

Fig.5 ConvDiff module

行抠图处理后作为验证母图。其中,航空发动机油路密封管件图片全程不参与模型训练,只用于对算法进行最终验证。

### (2) 数据集生成。

获得原始母图后,还需对训练集进行数据增强,防止网络过拟合工件母图的特征。采用随机裁剪(范围0.5~1.0)、缩放(比例范围0.5~1.5、旋转(0~360°)、色域变换(色彩抖动系数0.2)等方式对原始母图进行扩增,每种增强方式使用的概率均为50%。最终使用40张原始训练母图生成1000张增强工件图片。

### (3) 在线数据增强训练。

在训练过程中,采用在线数据集生成方式来提高模型的训练效果。具体步骤如下。

步骤1: 随机读取2~4张工件母图,并进行随机缩放(比例范围0.7~1.3)、旋转(0~360°)、色域变换(色彩抖动系数0.2),生成工件图片;

步骤2: 随机读取1张背景母图,并进行随机微小裁剪(比例范围为0~0.1)、旋转(-5°~5°)、色域变换(色彩抖动系数0.2),生成背景图片;

步骤3: 将步骤1中生成的工件图片随机粘贴到步骤2中生成的背景图片上,生成带工件图片,并根据粘贴位置计算目标检测标签;

步骤4: 将背景图片、带工件图片和目标检测标签送入YOLO-Siamese网络进行训练;

步骤5: 不断重复步骤1~4,直至迭代次数到达目标值,完成模型训练。

#### 1.2.3 加速推理

本研究算法由于采用了孪生网络,每次推理会分别对背景图片和工件图片进行运算,极大地增加了运算时间。因此本文采用背景特征预推理方法,在不降低模型精度的情况下,加速模型运算过程。背景预推理方法流程如图8所示,首先,对背景

图片进行特征提取并保存。之后直接使用提取得到的背景特征与工件图片提取得到的特征进行特征差分。该方法可以在背景未发生显著变化时,节省背景特征提取的时间,同时不会对算法精度造成影响。

## 2 结果与讨论

本节将以航空发动机油路密封管件为对象,对本文提出的变化检测网络进行性能验证,主要包括网络性能验证及变化检测可视化两个部分。表1为本研究用于训练及验证的计算平台的详细配置,使用1.2.2

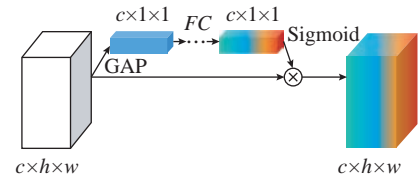


图6 SE模块<sup>[17]</sup>  
Fig.6 SE module<sup>[17]</sup>

节中生成的数据集进行模型训练及验证。

模型训练采用带动量的SGD优化器,动量值为0.937,权值衰减系数为0.0005。学习率下降方式为余弦下降,初始学习率为0.01,最小学习

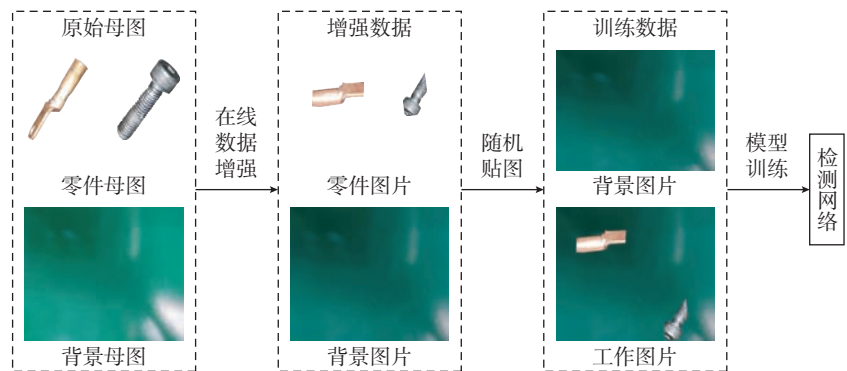


图7 半监督训练流程  
Fig.7 Semi-supervised training process

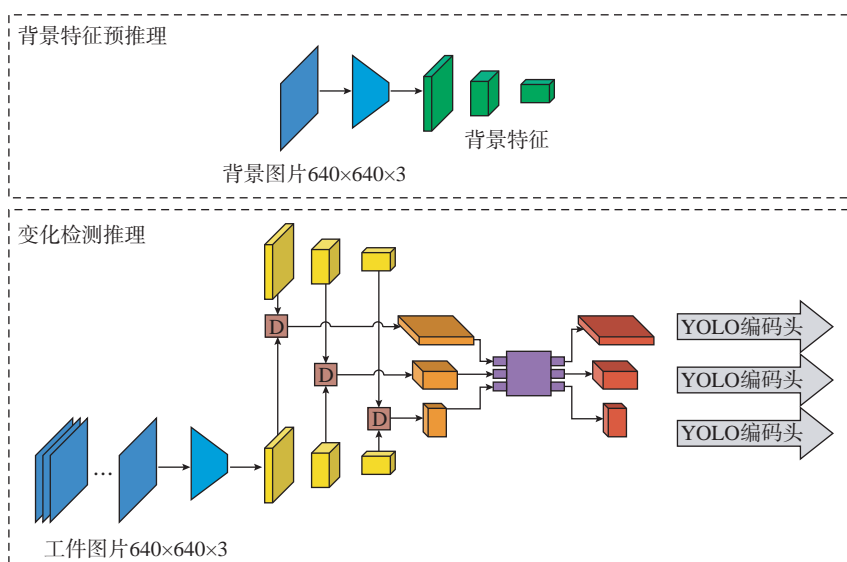


图8 背景预推理方法  
Fig.8 Background pre-inference method

率为 0.0001。数据集及数据增强方式详见第 1.2.2 节。模型训练轮次数为 100,在本文计算平台的配置下训练时间约为 10 h (YOLOv5s)及 16 h (YOLO-Siamese)。

2.1 YOLO-Siamese 变化检测网络验证结果

精度值 (AP) 是目标检测算法中最常用的评价指标,其代表的物理意义为在某一交并比阈值 (IOU) 下,绘制的准确率-召回率曲线 (PR 曲线) 与坐标轴围成的面积。精度值越高则表明算法效果越好,交并比阈值越高则代表算法判定越严格。准确率和召回率计算方法为

$$\text{Precision} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}} \quad (3)$$

$$\text{Recall} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{TN}} \quad (4)$$

式中, TP 为被预测正确的正样本数目; FP 为被预测错误的负样本数目; TN 为被预测正确的负样本数目。

采用消融试验法,对 YOLOv5s、YOLO-Siamese (Abs)、YOLO-Siamese (ConvDiff)、YOLO-Siamese (ConvDiff + SE) 及 YOLO-Siamese (ConvDiff + SE + 背景预推理) 分别进行训练及验证。其中, YOLO-Siamese (Abs) 是指采用原始 Siamese 网络的特征差分层,只使用一个绝对距离函数来计算差分特征的 YOLO-Siamese 版本; YOLO-Siamese (ConvDiff) 是指采用不带 SE 模块

的 ConvDiff 模块作为特征差分模块; YOLO-Siamese (ConvDiff + SE) 则采用带 SE 模块的 ConvDiff 模块作为特征差分模块。训练及验证数据集为第 1.2.2 节中生成的数据集。性能指标包括 IOU 设置为 0.5 时的平均精度值 AP@0.5 和 IOU 从 0.5 逐步增加到 0.95 时的平均精度值 AP@0.5:0.95。

各模型性能曲线如图 9 所示。本文提出的 YOLO-Siamese (ConvDiff+SE) 在各 IOU 下都具有最高的精度值,验证了所提出的网络结构的有效性。验证结果表明,采用 ConvDiff 模块的精度值高于采用绝对值差分 (Abs) 模块的精度值,验证了所提出的 ConvDiff 结构可以提升特征差分模块的性能。并且,在 ConvDiff 模块中引入 SE 模块后,模型性能进一步得到了提升。

4 个检测模型的模型大小、检测

精度、推理时间如表 2 所示。原始 YOLOv5s 的推理时间为 11.61 ms,无法进行变化检测。只采用原始绝对值差分的 YOLO-Siamese 变化检测网络的 AP@0.5 为 98.4%, AP@0.5:0.95 为 76.8%,具有一定的变化检测效果,网络的推理时间为 15.82 ms。采用不带注意力机制的 ConvDiff 模块的 YOLO-Siamese 变化检测网络 AP@0.5 为 99.3%, AP@0.5:0.95 为 86.2%,推理时间为 19.37 ms,模型的 AP@0.5:0.95 提升了 12.2%,但运算时间也增加了 3.55 ms。采用本研究开发的带注意力卷积差分模块 (ConvDiff + SE) 的 YOLO-Siamese 变化检测网络 AP@0.5 为 99.3%, AP@0.5:0.95 为 89.6%,模型精度得到了进一步提升,但是网络的推理时间也达到了 20.45 ms。最后,在引入背景特征预推理方法后,本研究算法的推理时间降低了 4.32 ms,达到

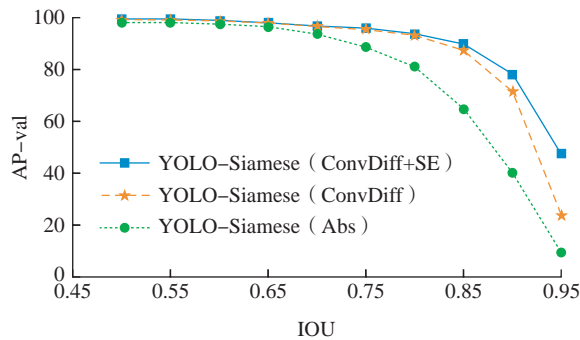


图 9 模型性能曲线

Fig.9 Model performance curves

表 1 计算平台配置

Table 1 Computer configuration

名称	配置
CPU	Intel Core i7-11700K@3.60 GHz
GPU	RTX 3060 (12 G)
GPU 加速库	Cuda11.1、Cudnn8.0
操作系统	Win10
编程环境	Python3.8.5
深度学习框架	Pytorch1.8.0

表 2 检测模型验证结果

Table 2 Validation results of detection models

检测模型	模型大小 /MB	AP@0.5/%	AP@0.5:0.95/%	推理时间 /ms
YOLOv5s	27.64	—	—	11.61
YOLO-Siamese (Abs)	27.64	98.4	76.8	15.82
YOLO-Siamese (ConvDiff)	38.10	99.3	86.2	19.37
YOLO-Siamese (ConvDiff + SE)	38.27	99.3	89.6	20.45
YOLO-Siamese (ConvDiff + SE + 背景预推理)	38.27	99.3	89.6	16.13

16.13 ms, 相比于 YOLO-Siamese (Abs) 模型的推理时间只增加了 2%, 模型精度 AP@0.5:0.95 提升了 16.7%。

## 2.2 变化检测网络推理可视化

为了对变化检测网络性能进行探究, 使用热力图对模型检测过程进行可视化。在热力图中, 网络推理过程中对结果贡献大的区域使用红色标记, 没有贡献或贡献较小的区域使用蓝色标记<sup>[18]</sup>。图 10 为变化检测网络对包含航发管件的推理及热力图可视化结果, 可以看到本研究算法非常精准地检测到了变化区域, 实现了航发管件的定位, 该结果证明了本研究设计的变化检测网络的有效性。

## 3 结论

(1) 结合 Siamese 和 YOLO 目标检测网络提出了 YOLO-Siamese 变化检测网络, 并在该网络中引入了本文自主设计的 ConvDiff 模块作为特征差分层。训练得到的模型 AP@0.5 达到 99.3%, AP@0.5:0.95 达到 89.6%, 证明本文提出的变化检测网络具有较高的检测精度。

(2) 提出了一种基于半监督的模型训练方法。该方法可以基于预先提取好的原始母图自动生成训练集和标签集, 不需要使用目标数据集, 也不需要人工标注便可完成模型的训练。

(3) 提出了背景预推理方法对模型推理过程进行加速。验证结果表明, 背景预推理方法可以在不损失任何精度的情况下, 节省 4.32 ms 的背景图片特征提取时间, 提升了 21.12% 孪生网络计算速度。

## 参考文献

- [1] 韩君, 王菲. 新发展阶段中国装备制造业智能制造发展测度[J]. 财经理论, 2022(4): 74-86.
- [2] 田宗军, 顾冬冬, 沈理达, 等. 激光增材制造技术在航空航天领域的应用与发展[J]. 航空制造技术, 2015, 58(11): 38-42.
- [3] TIAN Zongjun, GU Dongdong, SHEN Lida, et al. Application and development of

laser additive manufacturing technology in aeronautics and astronautics[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(11): 38-42.

[3] 张辉, 宋雅男, 王耀南, 等. 钢轨缺陷无损检测与评估技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2): 11-25.

ZHANG Hui, SONG Yanan, WANG Yaonan, et al. Review of rail defect non-destructive testing and evaluation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2): 11-25.

[4] 李光耀, 刘泉, 赖铭, 等. 基于自适应视觉检测的磁脉冲接管件接头深度智能检测算法研究[J]. 航空制造技术, 2022, 65(7): 54-63.

LI Guangyao, LIU Xiao, LAI Ming, et al. Research on intelligent crimping depth detection algorithm for magnetic pulse crimping pipe based on adaptive vision[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(7): 54-63.

[5] 夏群峰, 彭勇刚. 基于视觉的机器人抓取系统应用研究综述[J]. 机电工程, 2014, 31(6): 697-701, 710.

XIA Qunfeng, PENG Yonggang. Review on application research of robots scraping system based on visual[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(6): 697-701, 710.

[6] 魏思铭. 基于机器视觉的轴承圆柱滚子表面缺陷检测系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2022.

WEI Siming. Research on surface defect detection system of bearing cylindrical roller based on machine vision[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2022.

[7] SUN W F, CAO X C, CHEN B Q, et al. A two-stage vision-based method for measuring the key parameters of ball screws[J]. Precision Engineering, 2020, 66: 76-86.

[8] VASWANI A, SHAZEER N, PARMAR N, et al. Attention is all you need[C]// Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems. Long Beach: NIPS Foundation, 2017: 6000-6010.

[9] REN S Q, HE K M, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence[J]. IEEE, 2017, 39(6): 1137-1149.

[10] CARION N, MASSA F, SYNNAEVE

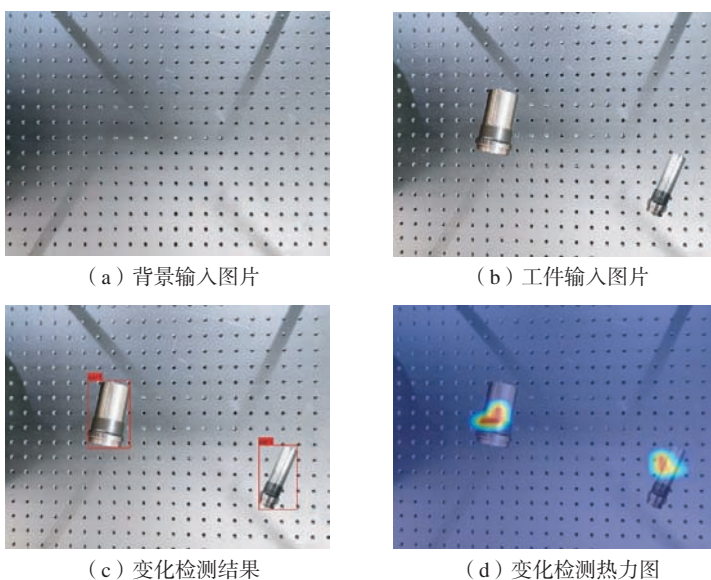


图 10 变化检测可视化  
Fig.10 Change detection visualization

G, et al. End-to-end object detection with transformers[C]//Computer Vision—ECCV 2020. Cham: Springer International Publishing, 2020: 213–229.

[11] CHOPRA S, HADSELL R, LECUN Y. Learning a similarity metric discriminatively, with application to face verification[C]//2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Diego: IEEE, 2005: 539–546.

[12] BANDARA W G C, PATEL V M. A transformer-based Siamese network for change detection[C]//IGARSS 2022—2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Kuala Lumpur: IEEE, 2022: 207–210.

[13] CHEN P, HONG D F, CHEN Z.

FCCDN: Feature constraint network for VHR image change detection[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2022, 187: 101–119.

[14] REDMON J, DIVVALAS, GIRSHICK R, et al. You only look once: Unified, real-time object detection[C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Las Vegas: IEEE, 2016: 779–788.

[15] REDMON J, FARHADI A. YOLO9000: better, faster, stronger[C]//2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Honolulu: IEEE, 2017: 6517–6525.

[16] BOCHKOVSKIY A, WANG C Y, LIAO H Y M. YOLOv4: Optimal speed and accuracy of object detection[J]. Computer Vision

and Pattern Recognition, 2020: 10934[2020–04–23]. <https://arxiv.org/abs/2004.10934>.

[17] HU J, SHEN L, SUN G. Squeeze-and-excitation networks[C]//2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Salt Lake City: IEEE, 2018: 7132–7141.

[18] ZHOU B L, KHOSLA A, LAPEDRIZA A, et al. Learning deep features for discriminative localization[C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Las Vegas: IEEE, 2016: 2921–2929.

通讯作者: 李光耀, 教授, 博士生导师, 研究方向为轻量化制造和智能制造。

## Research on Robust Visual Localization Algorithm for Aero-Engine Oil Sealing Pipe Fitting

CUI Junjia<sup>1</sup>, LIU Xiao<sup>1</sup>, LAI Ming<sup>1</sup>, WANG Shaoluo<sup>1</sup>, JIANG Hao<sup>1</sup>, LI Guangyao<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Shenzhen Automotive Research Institute (Shenzhen Research Institute of National Engineering Laboratory for Electric Vehicles), Beijing Institute of Technology, Shenzhen 518118, China)

**[ABSTRACT]** The wide variety of components and high degree of customization used in the aerospace industry make it difficult to develop positioning fixtures. Visual localization technology is a key part of intelligent manufacturing, which is based on machine vision to determine the position of the workpiece. It does not require a positioning fixture, and can be widely used in a wide variety of work conditions. However, the generality of common visual localization algorithms is not very high. Algorithms are usually only used to detect specific objects. In this paper, a novel visual localization algorithm based on YOLOv5s object detection network and Siamese network (YOLO–Siamese change detection network) was proposed. The network introduced the ConvDiff (Convolutional Difference) module to improve the effect of the feature extraction in the change detection network, and a semi-supervised learning method was used to train the model. Experiments show that without using the target artifact dataset, the algorithm reached 99.3% of the AP@0.5, 89.6% AP@0.5:0.95 on the validation set, and the single frame inference time was 16.13 ms. Without requiring target artifact data, the proposed algorithm achieved high localization accuracy and fast operation speed, thus improving the robustness and versatility of visual localization algorithms.

**Keywords:** Change detection network; Visual localization; Machine vision; YOLO; Siamese; Twin network

(责编 晓月)

引文格式: 彭锐涛, 丁珑, 赵林峰, 等. 基于机器视觉的铣刀磨损在机检测方法[J]. 航空制造技术, 2023, 66(14): 143-152.

PENG Ruitao, DING Long, ZHAO Linfeng, et al. Milling cutter wear detection method based on machine vision[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(14): 143-152.

# 基于机器视觉的铣刀磨损在机检测方法\*

彭锐涛<sup>1,2</sup>, 丁 珑<sup>1</sup>, 赵林峰<sup>1</sup>, 陈美良<sup>1</sup>, 高江雄<sup>3</sup>, 刘嘉晨<sup>1</sup>

(1. 湘潭大学, 湘潭 411105;

2. 复杂轨迹加工工艺及装备教育部工程研究中心, 湘潭 411105;

3. 株洲华锐精密工具股份有限公司, 株洲 412000)

**[摘要]** 为了解决采集图像时相机与旋转铣刀刀刃位置不确定的问题及提高图像处理的时效性, 提出了一种基于机器视觉的铣刀磨损在机检测方法。根据结构相似性算法判断刀具图像质量, 并引入图像采集间隔角度系数, 确定了图像采集间隔角度与主轴转速。采用加速段特征测试(Features from accelerated segment test, FAST)算法实现了对刀具磨损区域快速、准确地自适应裁剪。基于FAST特征点提出了自适应阈值分割方法, 有效提取出磨损区域边缘。采用Hough变换和最小外接矩形法, 实现了对主切削刃倾斜角度的校正, 进而提取出磨损区域B区的平均宽度。最后开展了铣削试验, 在16组试验中, 计算值与真实值的最大、最小和平均误差分别为4.76%、0.91%、3.63%。试验结果表明, 该方法可在主轴旋转时获取所有铣刀磨损区域的高质量图像, 进而高效、准确地提取磨损参数。

**关键词:** 机器视觉; 刀具磨损; 自动化; 结构相似性; 自适应阈值分割

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2023.14.143



彭锐涛

教授, 博士生导师, 研究方向为高效精密切削与磨削、气动优化设计、机器视觉监测、多尺度模拟与计算、传动系统NVH设计、工程反问题等。

在铣削加工过程中, 刀具达到服役寿命尚未换刀, 刀具过度磨损将导致加工表面质量显著降低<sup>[1]</sup>; 刀具尚未达到服役寿命换刀, 将严重降低刀具的利用率, 增加生产成本。现有研究表明, 刀具破损是导致意外停机的主要原因之一<sup>[2]</sup>, 因刀具失效造成的停机时间约为20%<sup>[3]</sup>, 根据主观经验换刀, 刀具的使用寿命只占服役寿命的50%~80%<sup>[4]</sup>。在传统刀具状态监测中, 生产人员基于自身经验观察加工过程中的振动、噪声和加工时间判断刀具磨损状态, 该方法受人为主观判断的影响, 不仅费时费力, 也不利于零件加工质量的提高, 严重时甚至会发生安全事故。因此, 开发一种高效、精准的刀具磨损状态在机检测方

法对降低生产成本、提高刀具利用率及加工质量、实现自动化制造具有重要意义<sup>[5]</sup>。

目前, 刀具磨损检测包括间接法和直接法。间接法是指通过振动传感器<sup>[6]</sup>、切削力传感器<sup>[7]</sup>、声发射<sup>[8]</sup>信号等与刀具磨损量建立映射关系, 从而实现对加工过程在线监测。但间接法在实际工况中使用的特定设备昂贵且容易受到外界噪声干扰, 检测精度难以保证。

机器视觉在机检测是直接法的一种, 其通过光学仪器采集刀具图像, 并通过图像处理提取刀具磨损参数, 进而判断是否需要换刀。该方法受环境影响较小、精度较高。图像采集是其首要环节。Zhu等<sup>[9]</sup>基

\* 基金项目: 国家自然科学基金(51975504、51475404); 湖南省杰出青年自然科学基金(2022JJ10045); 湖南省自然科学基金(2021JJ30676); 湖南省研究生科研创新计划资助项目(CX20210519、XDCX2022Y103)。

于双目视觉设计了一种针对车刀磨损深度的在机检测系统,该方法精度为  $15.6\ \mu\text{m}$ 。Dai 等<sup>[10]</sup>在微铣削加工中通过控制3个线性电机实现成像设备三维运动,该方法可在预定的加工时间间隔内获取刀具磨损图像。以上方法对停止运动的刀具进行在机检测时,需要安装传感器或对刀架进行改造,机床操作空间有限,同时也加大了成本支出。Hou 等<sup>[11]</sup>根据铣刀侧边条数控制主轴旋转角度,连续获取每条侧边4幅图像,取最大磨损宽度作为磨损量,该方法在主轴首次停止采集图片时,需要调整相机与刀片的位置。Qin 等<sup>[12]</sup>基于动态图像序列实现了铣刀旋转时在机检测,该方法是在主轴1s内转1圈时,获取刀具的多张照片。Peng 等<sup>[13]</sup>基于结构相似性(Structural similarity, SSIM)算法,对旋转刀具拍摄多张照片并从中选择相似度高的图像。以上方法虽能够实现对旋转刀具的在机检测,但不能保证获取所有刀刃图像。

机器视觉在机检测系统中另一难点就是图像处理在算法上的优化, Li 等<sup>[14]</sup>将马尔可夫随机场(Markov random field, MRF)模型与形态学

梯度、分水岭算法等多种算法相结合进行图像分割,结果表明,该方法较大津法(Otsu 算法<sup>[15]</sup>)可更好地降噪和获取完整的刀具磨损区域。You 等<sup>[16]</sup>通过同态滤波与直方图对比来增强磨损边缘、定位磨损区域,并基于 GrabCut 模型<sup>[17]</sup>实现对磨损区域的精准分割。Zhou 等<sup>[18]</sup>基于拉普拉斯边缘信息的 Otsu 分割算法,增强了凿边磨损图像感兴趣区域(Region of interest, ROI)的边缘。Yu 等<sup>[19]</sup>为了提高凿边磨损的测量精度,提出了一种基于积分图像和 Turkey 双核函数的非局部均值去噪方法,并采用双峰阈值法和双阈值 Otsu 法来自适应增强图像。上述方法虽能对刀具磨损区域进行较好的提取,但图像裁剪时计算量大,阈值的设置需要遍历整幅图像像素点。

鉴于此,本文在对旋转铣刀进行在机检测时,针对旋转状态下如何采集所有刀具后刀面高质量图像的问题展开方法研究,并对图像预处理和磨损区域边缘的提取进行了算法优化。首先,基于 SSIM 算法判断刀具图像质量,确定了最佳的图像采集角度阈值,并计算出图像采集的最小间隔角度,通过引入图像采集间隔角

度系数,实现了在不同转速下自动化采集多个刀后刀面磨损图像;在图像处理阶段,采用 FAST 算法识别 ROI,实现对磨损区域自适应裁剪,并通过中值滤波与分段线性拉伸算法对图像进行去噪与增强预处理;随后,基于 FAST 特征点提出了自适应阈值分割方法,并结合二值形态学法和 Canny 算子快速、准确地提取出磨损区域轮廓;接着,采用 Hough 变换和最小外接矩阵法,校正了主切削刃倾斜角度,提高了获取磨损区域 B 区的计算精度;最后,通过开展铣削试验证明了该检测方法的可行性。

### 1 刀具磨损检测系统设计

为了实现复杂工况下对刀具磨损图像的获取及处理,搭建了图1所示的刀具磨损检测平台。视觉检测系统由硬件和软件两部分组成。其中,硬件部分对图像进行有效采集,包括 Cognex 公司生产的型号 In-Sight 5403 的 CCD (Charge coupled device) 工业相机、型号 P/N 119-2043R 的 LED 环形光源、型号 PD2-5024 的光源控制器、Fujinon 公司生产的型号 CF25HA-1 的聚焦镜头、型号 R390 020A20-11M 刀杆、R390-11T3 04E-PL S30T 刀片。软件部分为 Cognex In-Sight

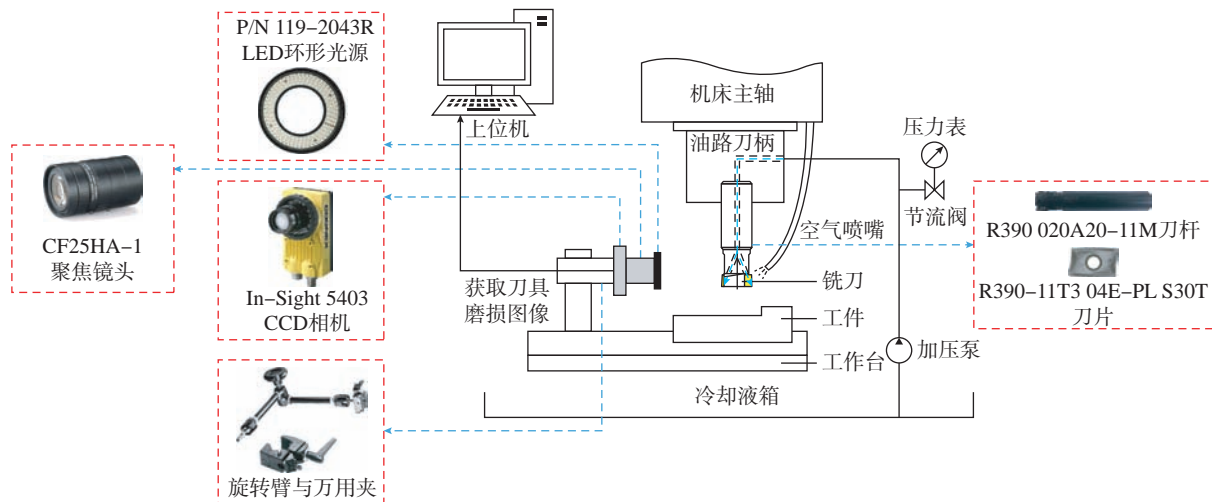


图1 刀具磨损检测平台示意图

Fig.1 Schematic diagram of tool wear monitoring platform

explorer, 以及所提出的后刀面磨损检测算法流程。

以下介绍该系统的工作原理。试验开始前经过调试, 将 CCD 相机固定在机床工作台上; 当需要对磨损量进行检测时, 刀具退回至原设定的位置, 停止冷却液供应, 此时主轴保持匀速转动使冷却液流尽, 同时通过压缩空气除去铁屑, 触发相机采集全帧图像; 将采集到的图像通过以太网接口传输至上位机进行处理并提取当前刀具的磨损量。

## 2 刀具磨损评估指标

本研究用铣刀如图 2 所示, 为山特维克 CoreMill R390 020A20-11M 型内冷铣刀, 采用 R390-11T3 04E-PL S30T 涂层硬质合金刀片。刀具通常有 3 种正常磨损形式, 如图 3 (a) 所示。前刀面磨损表现为一道凹槽, 又名月牙洼磨损。月牙洼的深度 KT 是用于衡量刀具磨损状态的一项指标, 然而因深度难以通过二维图像的形式表现, KT 的确定通常采用离线测量的方式。边界磨损大部分发生于刀尖旁边的副切削刃周边区域, 在实际切削过程中, 难以通过固定的评价指标对其进行衡量。后刀面磨损是最为普遍的磨损形式, 其以主切削刃磨损的长度为边界。铣刀的后刀面磨损带如图 3 (b) 所示, 主切削刃的顶端、中部及后端分别对应 C、B 与 N 区。磨损带 B 区宽度 VB 在数值上较为稳定, 易于检测, 故通常以 VB 制定刀具磨损的量化指标<sup>[20]</sup>。

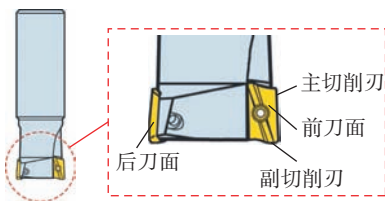


图2 铣刀示意图

Fig.2 Schematic diagram of milling cutter

## 3 刀具磨损图像分析

刀具图像分析流程如图 4 所示, 包含了 CCD 相机在线采集图片至提取磨损参数的全部步骤。

### 3.1 图像预处理

#### 3.1.1 图像采集方法

如图 5 所示, 假设刀具转动角度  $\gamma = 0^\circ$  时, 刀具后刀面正对相机, 将其称为标准图像 (Standard picture, std)。由于铣削加工结束时, 刀具转动角度  $\gamma$  具有不确定性, 为了拍到完整的刀具后刀面图像, 现有在机检测方法需要调节相机与铣刀刀刀的位置, 该过程不仅繁琐还会使检测结果产生一定误差。

(1) 确定采集图像的最佳角度阈值。

本研究采用 SSIM 算法, 该算法可计算出两幅图像的相似程度, 以此作为评价指标。考虑亮度、对比度和结构等因素, 将待检测图像  $x$

与标准图像 std 对比, 对拍摄图像的 SSIM 值进行排序。当采集的图像符合标准时, 确定刀具旋转的角度阈值  $[\gamma_{\min}, \gamma_{\max}]$ , 计算结构相似度<sup>[21]</sup>为

$$l(\text{std}, x) = \frac{2\mu_{\text{std}}\mu_x + C_1}{\mu_{\text{std}}^2 + \mu_x^2 + C_1} \quad (1)$$

$$c(\text{std}, x) = \frac{2\sigma_{\text{std}}\sigma_x + C_2}{\sigma_{\text{std}}^2 + \sigma_x^2 + C_2} \quad (2)$$

$$s(\text{std}, x) = \frac{\sigma_{\text{std}x} + C_3}{\sigma_{\text{std}}\sigma_x + C_3} \quad (3)$$

$$\text{SSIM}(\text{std}, x) = \frac{(2\mu_{\text{std}}\mu_x + C_1) + (2\sigma_{\text{std}x} + C_2)}{(\mu_{\text{std}}^2 + \mu_x^2 + C_1)(\sigma_{\text{std}}^2 + \sigma_x^2 + C_2)} \quad (4)$$

式中,  $l(\text{std}, x)$  为亮度相似度,  $c(\text{std}, x)$  为对比度相似度,  $s(\text{std}, x)$  为结构相似度, 其中  $\mu_{\text{std}}$  和  $\mu_x$ 、 $\sigma_{\text{std}}$  和  $\sigma_x$ 、 $\sigma_{\text{std}x}$  为标准图像与待测图像的均值、标准差和协方差;  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  是值很小的常数, 其作用是避免描述亮度与对比度较低区域时分母趋近于 0, 导致检测结果不稳定的情况。SSIM 的值域

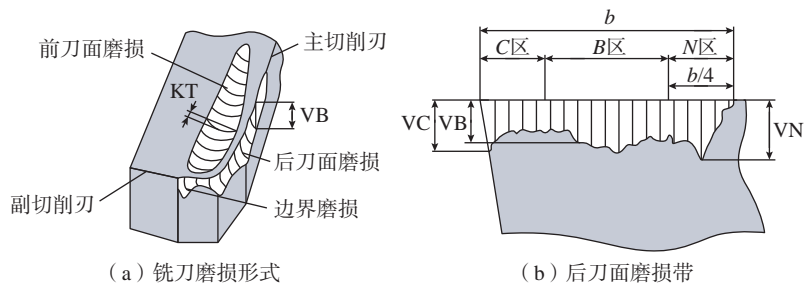


图3 铣刀磨损示意图

Fig.3 Schematic diagram of milling cutter wear

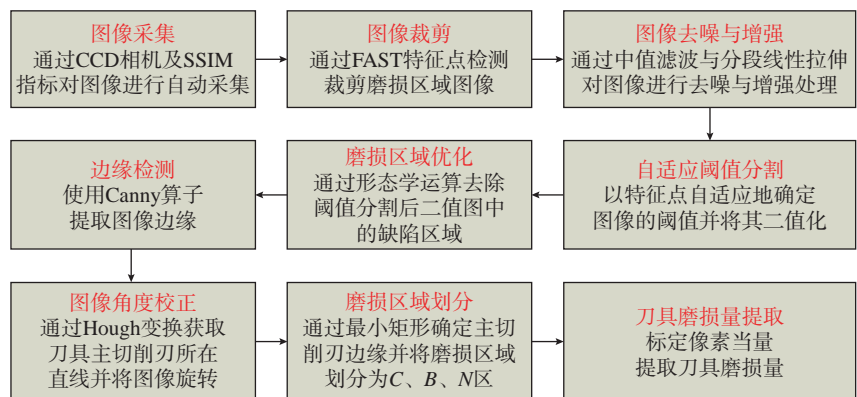


图4 刀具图像分析流程图

Fig.4 Flow chart of tool image analysis

是  $[-1, 1]$ , 标准图像下的 SSIM 值为 1, 拍摄图像相似程度越高, 越接近 1, 反之则接近  $-1$ 。标准图像和拍摄图像相似程度  $r$  为

$$r = \frac{SSIM(\text{std}, x) + 1}{2} \times 100\% \quad (5)$$

固定 CCD 相机到刀具中心距离, 为避免试验的偶然性, 采用 6 组刀片, 每组刀片旋转角度  $\gamma$  选择  $-10^\circ \sim 10^\circ$ , 旋转增量为  $2^\circ$ 。刀具转动角度和 SSIM 值的关系如图 6 所示, 可以看出, 当角度  $\gamma$  从  $0^\circ$  增加或者减少时, SSIM 有所下降, 这是因为刀具后刀面逐渐偏离正对相机位置, 与标准图像相比采集图像的相似程度降低所致。综上可得出, 当  $-8^\circ \leq \gamma \leq 8^\circ$  时, 采集到的 6 组刀片图像的 SSIM 值都大于 0.9, 此时根据式 (5) 可知, 采集图像与标准图像的相似程度  $r$  均大于 95%。这说明在该角度范围内, CCD 相机拍到的刀片后刀面的图像质量较高, 由此确定采集图像的最佳角度阈值为  $[\gamma_{\min}, \gamma_{\max}] = [-8^\circ, 8^\circ]$ 。

(2) 确定采集相邻图像的最小间隔角度  $\varphi$ 。

为了采集到质量较高的图像, 最小间隔角度应满足

$$\varphi = \frac{360^\circ}{Z} \quad (6)$$

$$Z = t \times F \quad (7)$$

$$\varphi \leq \gamma_{\max} - \gamma_{\min} \quad (8)$$

式中,  $t$  为完成图像采集所花时间;  $F$  为相机帧数 (相机在 1 s 内采集图像的数量)。本文 CCD 相机帧数为 14, 考虑到计算机处理图片的时效性, 设定相机 1 s 内采集 7 张图片, 即  $F=7$ 。由采集图像的最佳角度阈值可知, 图像采集最小间隔角度  $\varphi \leq 16^\circ$ , 再根据式 (6) 和 (7) 可知, 完成一次图像采集时间  $t \geq 3.214$  s, 根据实际工况情况设定  $t=4$  s。此时采集图像的数量是 28 张, 即  $Z=28$ 。由式 (6) 可知图像采集时相邻图像的最小间隔角度  $\varphi=12.857^\circ$ 。

基于 SSIM 值图像采集如图 7 所示, 其中各箭头代表从各个角度采集到的图像, 箭头颜色越深, 代表其 SSIM 值越高, 图像质量越好。将采集到的 28 张图像 SSIM 值进行降序排列, 选择前 3 张进行后续处理。该方法创新在于, 在实际操作过程中, 无论刀具后刀面起始拍摄位置是否正对相机, 每个刀刃对应最佳角度阈值内采集到的图像总会包含于 28 张图中。

(3) 确定图像采集间隔角度系数。

考虑到实际情况, 除了以最小间隔角度  $\varphi=12.857^\circ$  采集图像, 引进间隔角度系数  $k$ , 即以特定倍数的最小间隔角度采集图像。实际工况下, 相机固定, 刀具顺时针旋转, 为方便表达图像采集的过程, 假设刀具固定且刀具后刀面正对 CCD 相机, CCD 相机绕着刀具逆时针转动。假设相机正对刀具后刀面为 1 号位置, 简化该过程如图 8 所示, 其中数字为采集图像的顺序。当  $k=1$  时, 相机依次从刀具后刀面逆时针采集 28 张图片, 如图 8 (a) 所示; 当  $k=2$  时, 相机以 2 个最小间隔角度从后刀面采集图像, 然而相机会再次回到正对刀具后刀面位置, 所以在空间上还存在未拍摄到的位置, 如图 8 (b) 所示; 当  $k=3$  时, 相机以 3 个最小间隔角度从后刀面采集图像, 当相机逆时针转 1 圈后会与第 1 张采集到图像的位置错开, 从而在空间上完成对 28 个不同位置的图像采集, 如图 8 (c) 所示。

根据以上可以推出所有满足  $k$  值的约束条件:

$k$  属于数集  $K = \{k | 0 < k < 28, k \in Z\}$ ; 当  $k$  的取值存在图像重复采集时, 则舍弃;

以  $k\varphi$  为图像采集间隔角度, 从起始位置采集到第 1 张图像, 经过  $(z-1)$  次角度变更后, 采集到的图像应包括图 8 中箭头所有位置。

由  $k$  值的约束条件, 推导出主轴

转速为

$$n = 60(Z-1)k\varphi/360t \quad (9)$$

间隔角度系数  $k$  为 1、3、5、7、9、11、13、15、17、19、23、25、27 时, 对应的主轴转速  $n$  为 14.46、43.39、72.32、130.18、159.11、188.03、216.96、245.89、274.82、332.67、361.60、390.53 (r/min)。

当主轴转速高达 500 r/min 时仍可获取清晰的图像 [22], 上述转速值均为可取值。本文选用  $k=9$  时的主轴转速进行图像采集, 考虑到实际应用情况,  $n$  取 130 r/min, 由此便可自动获取全部铣刀刀刃的高质量图像。

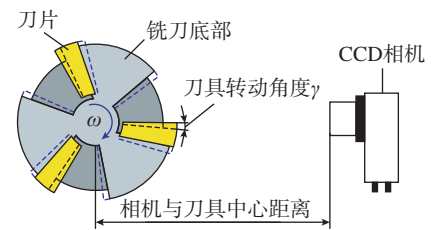


图 5 图像采集角度偏差  
Fig.5 Image acquisition angle deviation

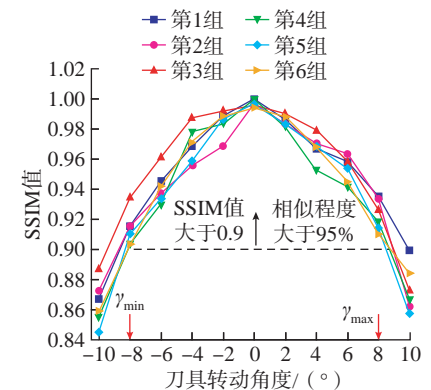


图 6 刀具转动角度与 SSIM 值的关系  
Fig.6 Relationship between tool rotation angle and SSIM value

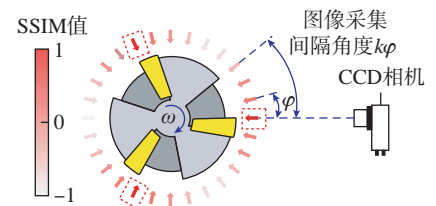


图 7 基于 SSIM 值图像采集  
Fig.7 Image acquisition based on SSIM value

### 3.1.2 图像裁剪

在图像处理前,需要先对图像中的冗余信息进行处理。FAST算法<sup>[23]</sup>可用于实时识别图像中的兴趣点,该检测方法不仅检测速度非常快,质量也非常高<sup>[24]</sup>。理论上刀具磨损区域在竖直方向最高位置,先将采集到的图像旋转180°,将所有特征点在竖直方向上降序排列,初步确定刀尖位置,为避免切削液飞溅及高光点与反光点造成检测到的特征点不是磨损区域的干扰,提取竖直方向上最高的10个特征点坐标的均值作为选定的特征点。为了使磨损区域位于图像中部,取选定特征点左右120×40

(px),上下60×100(px)的领域,实现自适应裁剪ROI区域,如图9所示。为体现基于FAST特征点自适应图像裁剪方法的快速性,取9组刀具图像,将其与基于Harris角点检测的图像裁剪方法进行对比<sup>[25]</sup>,结果如图10所示,可以看出,前者平均处理时长为18ms,后者平均处理时长为635.4ms,基于FAST特征点检测裁剪的方法大幅节省了处理时间,提高了算法的效率。

### 3.1.3 图像去噪及增强

裁剪后的图像常常带有大量的噪声点,轮廓模糊,如图11(a)所示。为去除噪声并保护刀具磨损区域的

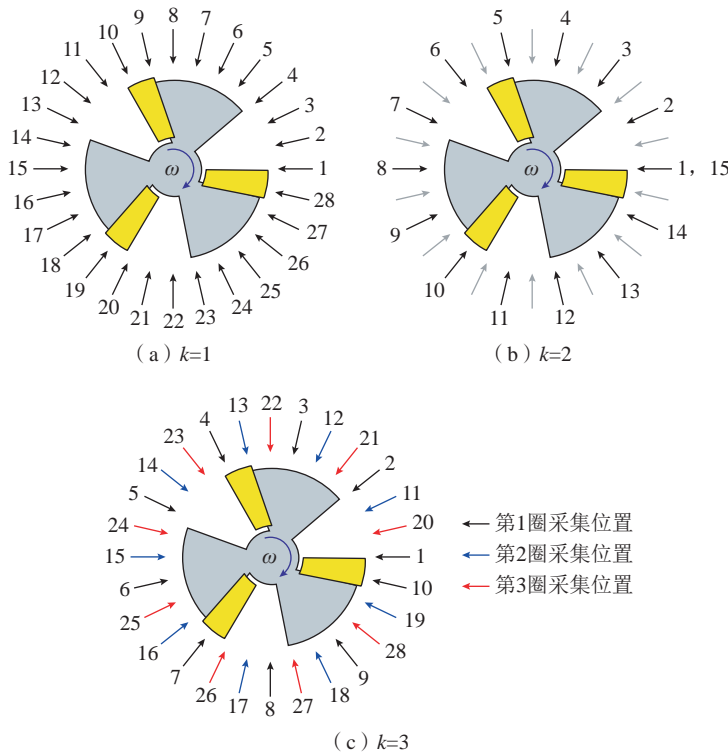


图8 图像采集过程  
Fig.8 Image acquisition process

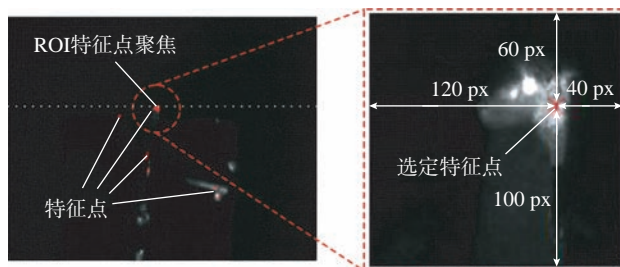


图9 基于FAST特征点的自适应图像裁剪  
Fig.9 Adaptive image clipping based on FAST feature points

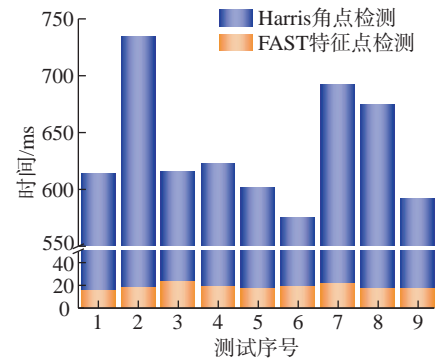


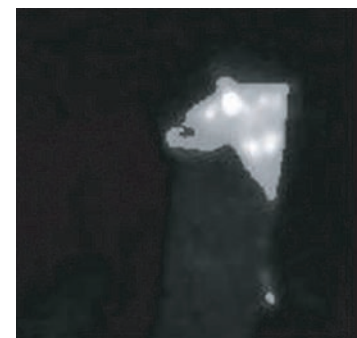
图10 两种图像裁剪方法处理时间对比  
Fig.10 Comparison of processing time of two image cropping methods



(a) 原始图像



(b) 去噪图像



(c) 增强图像

图11 图像去噪和增强结果  
Fig.11 Image denoising and enhancement results

形状,本文选用  $5 \times 5$  大小的算子进行中值滤波去噪处理,即将图像中任意选择像素点  $(i, j)$  作为中心点,在该点  $5 \times 5$  邻域内,对所有像素点灰度值进行排序,然后选择中值代替原像素点  $(i, j)$ ,处理结果如图 11 (b) 所示,可以看出,图像中噪点被有效去除。为了更有效地区分刀具磨损区域、背景区域、无关区域及提取刀具磨损的轮廓,本研究采用分段线性拉伸对图像进行增强处理,通过考虑加工环境光照环境的变化调整参数,可实现各加工环境下磨损区域的有效增强。线性拉伸后的刀具磨损如图 11 (c) 所示,可以看出磨损区域与其他区域被有效区分。

### 3.2 磨损边缘提取方法

#### 3.2.1 自适应阈值分割

为了让计算机更加准确地提取刀具磨损轮廓,需要对磨损区域和无关区域进行阈值分割。阈值分割方法的选择决定了图像分割效果。其中, Otsu 法等应用较为广泛,但对于传统的阈值分割方法来说,计算量较大,增加了实时检测的难度。本文提出一种基于 FAST 特征点自适应阈值分割的方法,该方法可根据每张图像的具体情况自适应地确定分割阈值,减少计算量,提高自动化程度。如图 12 所示,通过 FAST 算法自适应裁剪时确定的特征点,做一条竖直线,该直线一定会通过磨损区域和背景区域,也有可能经过无关区域。由

于经过图像增强处理,灰度值在其交界处会产生突变,根据现场拍摄环境,对灰度差值进行调整,以此作为自适应阈值分割的依据,该方法具体实施步骤如下。

首先获取上述直线上 161 个像素点的灰度值,并将其按从上到下顺序排列,令直线上第  $x$  个像素点的灰度值为  $f(x)$ ,相邻两个像素点  $(x, x+1)$  的灰度差值为  $g(x, x+1)$ ,计算公式为

$$g(x, x+1) = |f(x+1) - f(x)| \quad (10)$$

设定相邻像素点灰度差值且  $g_{\max} = 50$ ,当  $g(x, x+1)$  大于  $g_{\max}$  时,统计像素点对  $(x_i, x_{i+1})$ ,  $i$  为点对个数。取其相邻像素灰度值的均值,再对  $i$  个均值求平均值,将该值设为阈值,计算公式为

$$T = \frac{\sum_{i=1}^i \left( \frac{g(x_i, x_{i+1})}{2} + \min(f(x_i), f(x_{i+1})) \right)}{i} \quad (11)$$

最后根据  $T$  值将图像转换成二值图。当图像中像素点的灰度值大于  $T$  值时将其置为 255,反之置为 0。

经阈值分割处理后的图像如图 13 所示,可以明显区分出磨损区域和背景区域,但同时磨损区域中存在不连续的情况且无关区域可能会被突出,这是因为拍照时光线不均匀及阈值分割线可能会经过无关区域,所以需要进行下一步处理。

为体现出本文阈值分割方法的鲁棒性和时效性,将其与 Otsu 法进行对比,如图 14 所示,通过对 9 组刀具图像进行测试,得到 Otsu 法与自适应阈值分割法平均处理时间分别为  $435 \mu\text{s}$ 、 $128 \mu\text{s}$ ,方差分别为  $14061 \mu\text{s}^2$ 、 $28 \mu\text{s}^2$ 。结果表明,本文提出的自适应阈值分割方法较 Otsu 法平均处理时间缩短了 70.6%,同时稳定性也得到大幅提高。

#### 3.2.2 磨损区域优化与边缘提取

针对阈值分割后图像中存在磨损区域中不连续及可能存在无关区域的问题,本文采用二值形态学方法进行优化,二值形态学是一种通过构建结构元素对图像集合进行处理的方法,包括图像的腐蚀与膨胀。首先,将像素点小于 50 的无关区域移除,处理后结果如图 15 (a) 所示;然后,经二值形态学算法优化,结果如图 15 (b) 所示;最后,采用 Canny 算子提取磨损边缘轮廓<sup>[26]</sup>,结果如图 15 (c) 所示。显然,将少量像素堆积的



图 13 自适应阈值分割处理结果  
Fig.13 Results of adaptive threshold segmentation

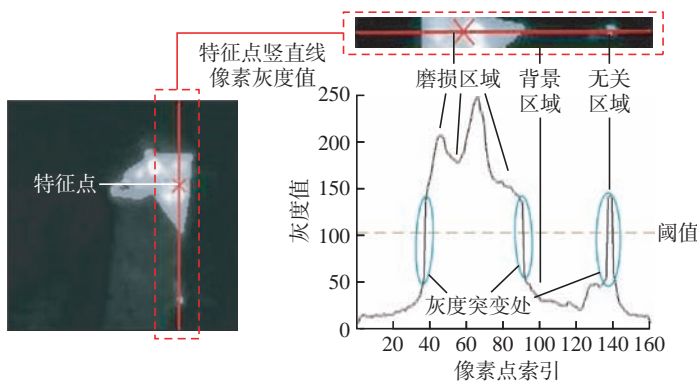


图 12 基于 FAST 特征点自适应阈值分割原理图

Fig.12 Schematic diagram of adaptive threshold segmentation based on FAST feature points

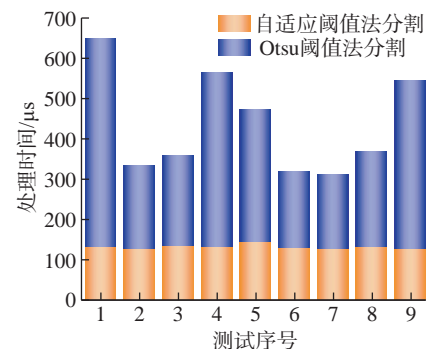


图 14 两种阈值分割方法处理时间对比  
Fig.14 Comparison of processing time of two threshold segmentation methods

区域去除消除了无关区域对边缘提取的影响,形态学处理能有效使磨损区域闭合,Canny算子能有效提取磨损边缘。

### 3.3 磨损参数提取方法

#### 3.3.1 图像角度的校正

在图16(a)中,由于主切削刃存在一定角度,直接进行扫描获取到的刀具磨损带宽度存在一定误差,因此需要对图像角度进行校正。本文采用Hough变换进行直线检测<sup>[27]</sup>,获得主切削刃与垂直方向的角度 $\theta$ ,并将其作为校正角度。具体实施步骤如图16(b)所示,首先构造一条竖直线,为确保检测到的直线是主切削刃,只保留与竖直线相差 $30^\circ$ 以内且较长的线段;当检测到一条直线时,该直线即为主切削刃;当检测到两条或者多条直线时,取其斜率的平均值作为主切削刃的斜率,计算得到角度 $\theta$ ;将图像逆时针旋转角度 $\theta$ ,校正后的磨损图像如图16(c)所示。

#### 3.3.2 磨损区域划分

旋转后的图像其磨损边缘呈锯齿状,为减少检测的误差,本文采用最小外接矩形法来确定主切削刃的边缘。刀具磨钝标准以后刀面B区宽度VB为评价指标,故将主切削刃边缘按照1:2:1分为C区、B区、N区,划分结果如图17所示。

#### 3.3.3 像素当量标定

图像以像素为单位,此时还不能获取到磨损B区宽度的真实值。通过标定像素当量,建立像素数与实际长度映射关系 $\lambda=d/p$ ,其中 $d$ 为标尺长度, $p$ 为标尺长度中像素数。通过行扫描获得B区中每一行的像素数,取其均值,均值与像素当量的乘积即为 $VB_{ave}$ 。本文相机分辨率为 $1600 \times 1200$ ,快门速度为 $0.027 \sim 1000$  ms,像素当量为0.0131。

## 4 试验验证

### 4.1 试验条件

搭建图18所示的铣削试验平



图15 磨损区域优化与边缘提取处理结果

Fig.15 Results of wear area optimization and edge extraction

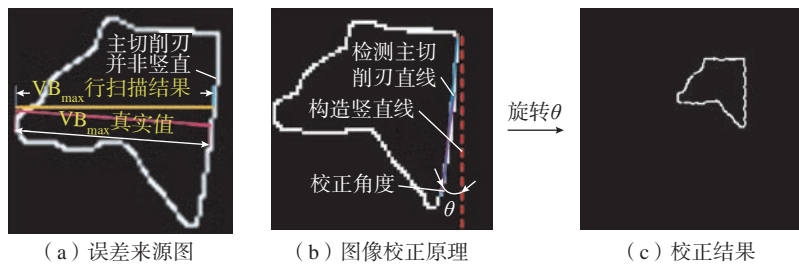


图16 图像校正过程

Fig.16 Image correction process

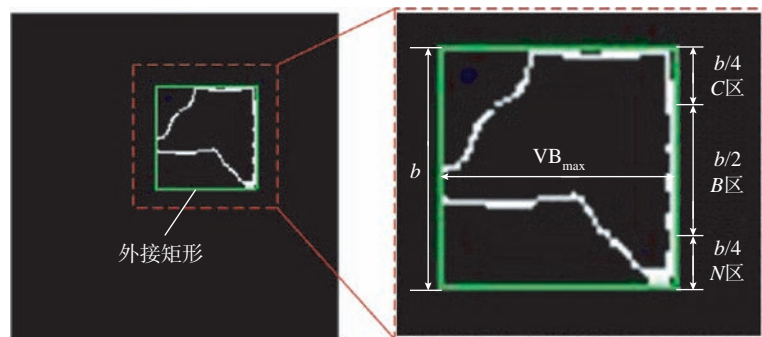


图17 磨损区域划分结果

Fig.17 Division result of wear area

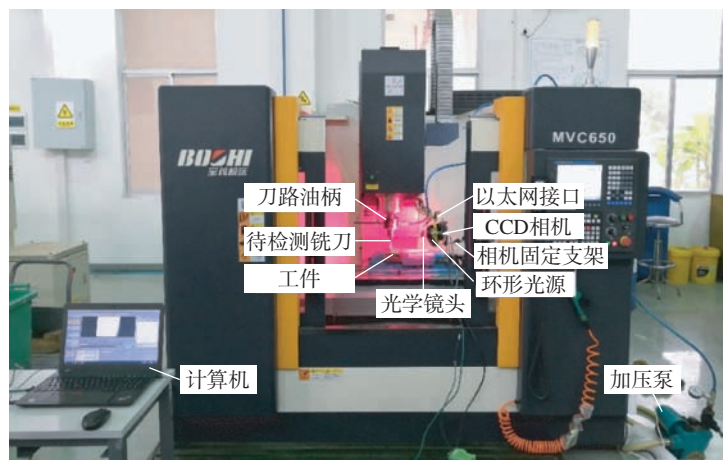


图18 铣削试验平台

Fig.18 Milling test platform

台,在 MVC650 数控铣床上进行试验。采用前文所述视觉检测系统和刀具,工件为镍基高温合金 GH4169,尺寸为 120 mm × 60 mm × 35 mm。

为避免相机工作时与刀具、工件产生干涉现象,将相机用旋转臂和万用夹固定在与机床 Z 轴有一定距离的工作台上。为减小冷却液飞溅对图像采集精度的影响,在镜头前安装保护罩。为了与视觉检测结果形成对比,本文采用型号为 Dino-Light AM4113T 的手持式显微镜对刀片真实磨损量进行检测。

### 4.2 试验设计

为验证视觉检测系统的准确性,将铣削速度  $v$ 、每齿进给量  $f_z$ 、轴向切深  $a_p$ 、走刀次数  $T'$  设为试验参数。开展 16 组试验,第 1~8 组切削参数是  $v=40$  m/min、 $f_z=0.15$  mm/z、 $a_p=0.3$  mm,第 9~16 组切削参数是  $v=60$  m/min、 $f_z=0.2$  mm/z、 $a_p=0.3$  mm,  $T'$  取值为 20、40、60、80、100、120、140、160,铣削方式为顺铣。

每组切削试验完成后,刀具退回至设定好的图像采集点,通过 CCD 相机对刀具后刀面进行采集,将图像传至计算机进行磨损量计算。随后拆下已磨损的刀片,通过手持式显微镜测量真实的磨损量,为提高测量结果的准确性,取 5 个测量点刀具磨损带宽度的平均值作为后刀面测

量值。

### 4.3 试验结果与分析

图 19 和 20 为两种切削参数下走刀次数为 100~160 时显微镜与视觉检测系统观察到的刀具磨损图。

为量化视觉检测系统的计算值和测量值的误差,将磨损量的绝对误差  $E_a$  和相对误差  $E_r$  作为量化指标,视觉检测系统精度检测结果如图 21 所示。结果表明,在 16 组试验

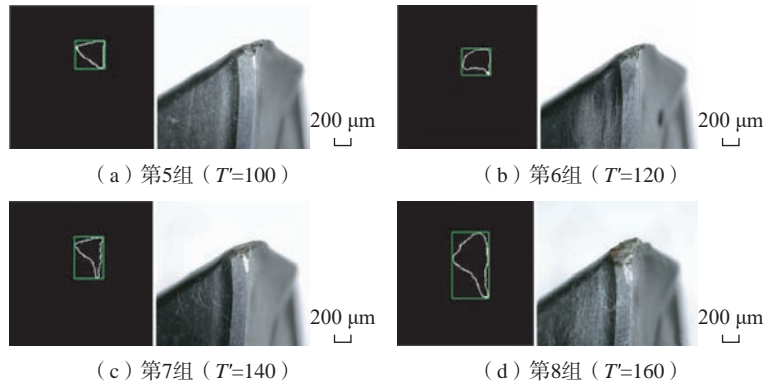


图 19 切削参数为  $v=40$  m/min、 $f_z=0.15$  mm/z、 $a_p=0.3$  mm 时刀具磨损图

Fig.19 Tool wear when cutting parameters are  $v=40$  m/min,  $f_z=0.15$  mm/z,  $a_p=0.3$  mm

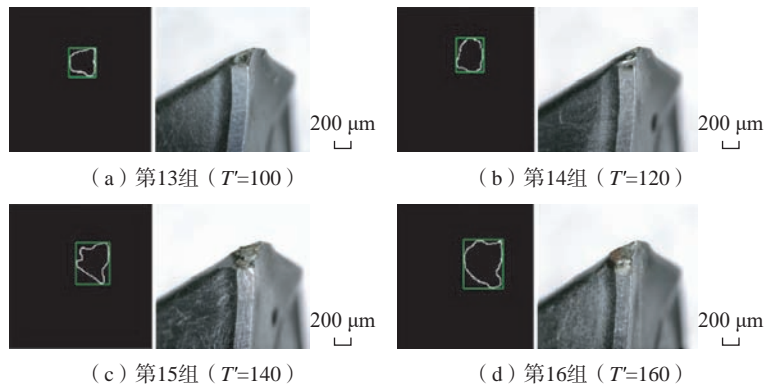


图 20 切削参数为  $v=60$  m/min、 $f_z=0.2$  mm/z、 $a_p=0.3$  mm 时刀具磨损图

Fig.20 Tool wear when cutting parameters are  $v=60$  m/min,  $f_z=0.2$  mm/z,  $a_p=0.3$  mm

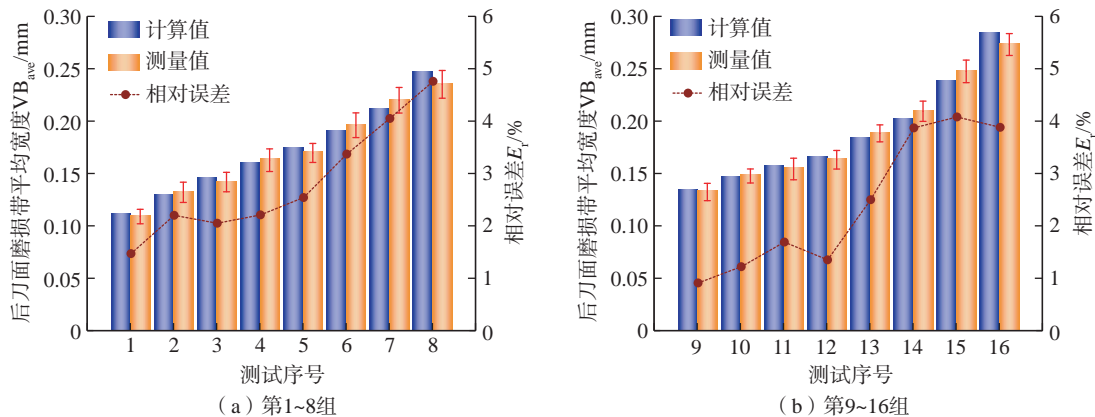


图 21 视觉检测系统精度检测结果

Fig.21 Accuracy test results of visual monitoring system

中,视觉检测系统得到的计算值与真实值的最大与最小绝对误差分别为 0.0112 mm 和 0.0012 mm;最大、最小与平均误差分别为 4.76%、0.91%、3.63%。从图 21 可以看出,在两组不同切削参数加工的条件下,相对误差有上升的趋势,这主要是因为随着走刀次数的增加,刀具后面磨损量也在增加,磨损区域形貌更加复杂。整体来看,相对误差控制在 5% 以内,说明在该条件下,通过视觉检测系统获取到的磨损量准确度较高,可作为刀具磨损检测模型的标签值。

## 5 结论

为了提高刀具磨损检测方法的自动化程度,本文提出了一种基于机器视觉的铣刀磨损在机检测方法。通过研究得到以下结论。

(1) 在图像采集阶段,基于结构相似性算法,确定了图像采集的最佳角度阈值为  $[-8^\circ, 8^\circ]$ ,计算出图像采集的最小间隔角度  $\varphi=12.857^\circ$ ,通过引入图像采集间隔角度系数  $k$ ,实现了主轴旋转工况下自动化采集多个刀具后刀面磨损图像。相较于传统停机检测的方法,本方法可用于加工间隙,省时省力,自动化程度高。

(2) 在图像处理阶段,首先基于 FAST 算法,对磨损区域裁剪平均耗时仅 18 ms,而基于 Harris 角点检测需要 635.4 ms,提高了系统的时效性;其次基于 FAST 特征点提出的自适应阈值分割方法,在磨损边缘提取时间上相较于 Otsu 法,节省了 70.6%,同时更稳定;最后采用 Hough 变换和最小外接矩阵分别校正了主切削刃的倾斜角度、确定了主切削刃的边缘,减小了计算磨损参数误差。

(3) 通过开展高温合金铣削试验表明,所搭建的视觉检测系统计算所得磨损值与显微镜下测量所得真实值误差率在 5% 以内,精度满足工业要求,为自动化监测刀具磨损状态

提供一种可行的方法。

## 参考文献

- [1] LI Y F, WANG X Q, HE Y, et al. Deep spatial-temporal feature extraction and lightweight feature fusion for tool condition monitoring[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(7): 7349–7359.
- [2] JAVED K, GOURIVEAU R, LI X, et al. Tool wear monitoring and prognostics challenges: A comparison of connectionist methods toward an adaptive ensemble model[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2018, 29(8): 1873–1890.
- [3] LINS R G, GUERREIRO B, DE ARAUJO P R M, et al. In-process tool wear measurement system based on image analysis for CNC drilling machines[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(8): 5579–5588.
- [4] LIU C Q, LI Y G, HUA J Q, et al. Real-time cutting tool state recognition approach based on machining features in NC machining process of complex structural parts[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(1): 229–241.
- [5] 王国锋,李志猛,董毅. 刀具状态智能监测研究进展[J]. 航空制造技术, 2018, 61(6): 16–23.  
WANG Guofeng, LI Zhimeng, DONG Yi. Recent advances in intelligent monitoring of cutting tool condition[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(6): 16–23.
- [6] 曹大理,孙惠斌,张纪铎,等. 基于卷积神经网络的刀具磨损在线监测[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(1): 74–80.  
CAO Dali, SUN Huibin, ZHANG Jiduo, et al. In-process tool condition monitoring based on convolution neural network[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(1): 74–80.
- [7] 廖小平,黎宇嘉,陈超逸,等. 基于核主成分和灰狼优化算法的刀具磨损状态识别[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(11): 3031–3039.  
LIAO Xiaoping, LI Yujia, CHEN Chaoyi, et al. Tool wear condition recognition based on kernel principal component and grey wolf optimizer algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(11): 3031–3039.
- [8] GOMES M C, BRITO L C, BACCI DA SILVA M, et al. Tool wear monitoring in micromilling using support vector machine with vibration and sound sensors[J]. Precision Engineering, 2021, 67: 137–151.
- [9] ZHU A B, HE D Y, ZHAO J W, et al. Online tool wear condition monitoring using binocular vision[J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2017, 59(4): 203–210.
- [10] DAI Y Q, ZHU K P. A machine vision system for micro-milling tool condition monitoring[J]. Precision Engineering, 2018, 52: 183–191.
- [11] HOU Q L, SUN J, LV Z Y, et al. An online tool wear detection system in dry milling based on machine vision[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105(1): 1801–1810.
- [12] QIN A P, GUO L, YOU Z C, et al. Research on automatic monitoring method of face milling cutter wear based on dynamic image sequence[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110(11): 3365–3376.
- [13] PENG R T, LIU J C, FU X L, et al. Application of machine vision method in tool wear monitoring[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 116(3–4): 1357–1372.
- [14] LI L H, AN Q B. An in-depth study of tool wear monitoring technique based on image segmentation and texture analysis[J]. Measurement, 2016, 79: 44–52.
- [15] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62–66.
- [16] YOU Z C, GAO H L, GUO L, et al. On-line milling cutter wear monitoring in a wide field-of-view camera[J]. Wear, 2020, 460–461: 203479.
- [17] ROTHER C, KOLMOGOROV V, BLAKE A. “GrabCut”: Interactive foreground extraction using iterated graph cuts[J]. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23(3): 309–314.
- [18] ZHOU J J, YU J B. Chisel edge wear measurement of high-speed steel twist drills based on machine vision[J]. Computers in Industry, 2021, 128: 103436.
- [19] YU J B, CHENG X, ZHAO Z H. A machine vision method for measurement of

drill tool wear[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 118(9): 3303–3314.

[20] KASIM N A, NUAWI M Z, GHANI J A, et al. Enhancing clustering algorithm with initial centroids in tool wear region recognition[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2021, 22(5): 843–863.

[21] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600–612.

[22] ZHANG Y H, ZHANG Y C, TANG H Q, et al. Images acquisition of a high-speed boring cutter for tool condition monitoring purposes[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 48(5): 455–460.

[23] ROSTEN E, DRUMMOND T. Machine learning for high-speed corner detection[C]//Proceedings of 9th European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2006: 430–443.

[24] ROSTEN E, PORTER R, DRUMMOND T. Faster and better: A machine learning approach to corner detection[J]. IEEE

Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(1): 105–119.

[25] HARRIS C G, STEPHENS M. A combined corner and edge detector[C]//Proceedings of 4th Alvey Vision Conference. Manchester: Alvey Vision Club, 1988.

[26] LI P C. Quantum implementation of the classical Canny edge detector[J]. Multimedia Tools and Applications, 2022, 81(8): 11665–11694.

[27] DUDA R O, HART P E. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures[J]. Communications of the ACM, 1972, 15(1): 11–15.

## Milling Cutter Wear Detection Method Based on Machine Vision

PENG Ruitao<sup>1,2</sup>, DING Long<sup>1</sup>, ZHAO Linfeng<sup>1</sup>, CHEN Meiliang<sup>1</sup>,  
GAO Jiangxiong<sup>3</sup>, LIU Jiachen<sup>1</sup>

(1. Xiangtan University, Xiangtan 411105, China;

2. Engineering Research Center of Complex Track Processing Technology & Equipment,  
Ministry of Education, Xiangtan 411105, China;

3. Zhuzhou Huarui Precision Tools Company Limited, Zhuzhou 412000, China)

**[ABSTRACT]** To solve the problem of uncertain position of camera and rotary milling cutter blade and improve the timeliness of image processing, a milling cutter wear detection method based on machine vision is proposed. According to the structure similarity index, the image quality of the tool was judged, and the image acquisition interval angle coefficient was introduced, and the image acquisition interval angle and spindle speed were determined. Features from accelerated segment test (FAST) algorithm was used to achieve fast and accurate adaptive cutting of tool wear area. Based on FAST feature points, an adaptive threshold segmentation method was proposed to effectively extract the edge of the wear region. Hough transform and minimum external rectangle method were used to correct the inclination angle of the main cutting edge, and then the average width of the wear zone  $B$  was extracted. Finally, the milling test was carried out. In 16 groups of tests, the maximum, minimum and average errors between the calculated value and the real value were 4.76%, 0.91% and 3.63% respectively. The experimental results show that the proposed method can obtain high-quality images of all milling cutter wear regions when the spindle is rotating, and then extract wear parameters efficiently and accurately.

**Keyword:** Machine vision; Tool wear; Automation; Structural similarity; Adaptive threshold segmentation

(责编 逸飞)

## 创造价值 贡献航空

### “先进陶瓷”专栏征稿

#### 选题背景

先进陶瓷及陶瓷复合材料作为新材料的重要分支，支撑着我国空天技术、国防工业、高端装备制造以及国家重大工程等领域的跨越式发展，是我国七大战略新兴产业和“中国制造2025”重点发展的十大领域之一。先进陶瓷及陶瓷复合材料正向着高性能、高可靠性、低成本、绿色友好、结构功能一体化等方向不断发展。陶瓷材料制备技术和纳米陶瓷复合材料技术的发展将进一步推动先进结构陶瓷力学性能、热学性能、透光透波等性能的提高，使先进陶瓷材料呈现出更加广阔的产业化应用前景。

#### 征稿范围

高品质陶瓷原材料合成、粉末制备与表征、陶瓷复合材料组成与结构设计、多功能复合原理与应用、新材料体系与新结构设计及制造，陶瓷基复合材料、陶瓷纤维复合材料、陶瓷颗粒增强复合材料、纳米陶瓷复合材料，陶瓷材料3D打印与快速烧结技术，航空航天高温陶瓷涂层、陶瓷隐身材料，高强、轻质、隔热、多孔陶瓷材料，高熵陶瓷等。

#### 投稿要求

1. 综述或研究论文均可，论文要体现出创新性，论点明确、论证充分、结论可靠。
2. 保证投稿论文的原创性，无抄袭、剽窃和侵权等行为，不一稿多投。
3. 投稿请提前与本期责任编辑联系，论文发送至yifei625@outlook.com。

#### 截稿日期

本专栏征稿截至2023年8月30日。

#### 联系方式

学术编辑：崔逸飞  
联系电话：15901138813（微信）

公司名称	位置	索引号
约翰内斯·海德汉博士（中国）有限公司	封二	23-1038
北京韦林意威特工业内窥镜有限公司	封三	23-1005
上海柴孚机器人有限公司	封底	23-1049
镭明激光	1	23-1066
温泽测量仪器（上海）有限公司	3	23-1015
北京博鲁斯潘精密机床有限公司	5	23-1044
杭州宏深科技有限公司	7	23-1073
雷尼绍公司	9	23-1055
北京东兴润滑剂有限公司	11	23-1004
北京迪蒙数控技术有限责任公司	13	23-1011
第六届中国天津国际直升机博览会	154	23-1098



第六届

中国天津国际直升机博览会

THE 6TH CHINA HELICOPTER EXPOSITION



2023年9月14-17日 | 天津·空港经济区

咨询电话：022-8672 7860

广告索引号23-1098





Part of Waygate Technologies, Baker Hughes

# Everest Mentor Visual iQ™ VideoProbe™ 系列

## 韦林超级一体化手持式工业视频内窥镜系统

### 一直被模仿，从未被超越



广告索引号23-1005



CCD原生像素值可达120万以上



可搭载ADR人工智能辅助缺陷判断系统



单物镜相位扫描三维立体测量系统



整机一体化手持机式便携型设计

北京韦林意威特工业内窥镜有限公司

贝壳休斯检测科技业务美国韦林工业内窥镜产品及服务中国专门经销商

中国北京亚运村汇欣大厦B座0901室至0907室 电话 (8610) 8499 1572 手机 (86) 13901023370 网站 [www.everestbj.com](http://www.everestbj.com)





CHAIFU

# 柴孚重载机器人 (负载0.5吨-3吨)

重载机器人行业领导者



持续推动中国机器人技术，更高平台的工业自动化领域



关注“上海柴孚机器人”  
微信公众号

400-822-7688

广告索引号23-1049

上海柴孚机器人有限公司

[www.chaifurobot.com](http://www.chaifurobot.com)