

航空制造技术

2021年 第3期
Vol.64 No.3



封面文章
**金属增材制造数据处理
与工艺规划研究综述**

专稿
**大型自由曲面光学器件
的超精密抛光方法**

论坛
金属增材制造

走进科研
**高效精密加工与装备技术
教育部工程研究中心**

www.amte.net.cn

ISSN 1671-833X



ISSN 1671-833X CN 11-4337/V



格外重要的 零部件轻量化

增材制造为航空业带来独特优势



DMP Flex 350

减重

更轻的零部件能在降低运营成本和排放的同时提高燃油效率。

更少的耗材实现更佳的品质

增材制造使设计驱动式的制造成为可能、在不增加额外成本的情况下实现任何复杂内部结构和弯曲通道。不受模具和铸造工艺的约束。

为何轻量化很重要

整合组件、提高零件性能和供应链效率带来显著优势、同时当需要把物体在空中航行或送入太空时、轻量化的重要性尤其凸显。

燃油经济性

在航空航天领域、即使在火箭再利用方面取得了现代化的进步、将22吨的有效载荷送入低地球轨道（LEO）也要花费6,200万美元。每公斤2,818美元。

检测&测试软件

附加的机械和功能测试是任何生产验证过程中的重要组成部分，以确保在涉及工艺、材料和表面处理的情况下，您拥有适当的优势组合。



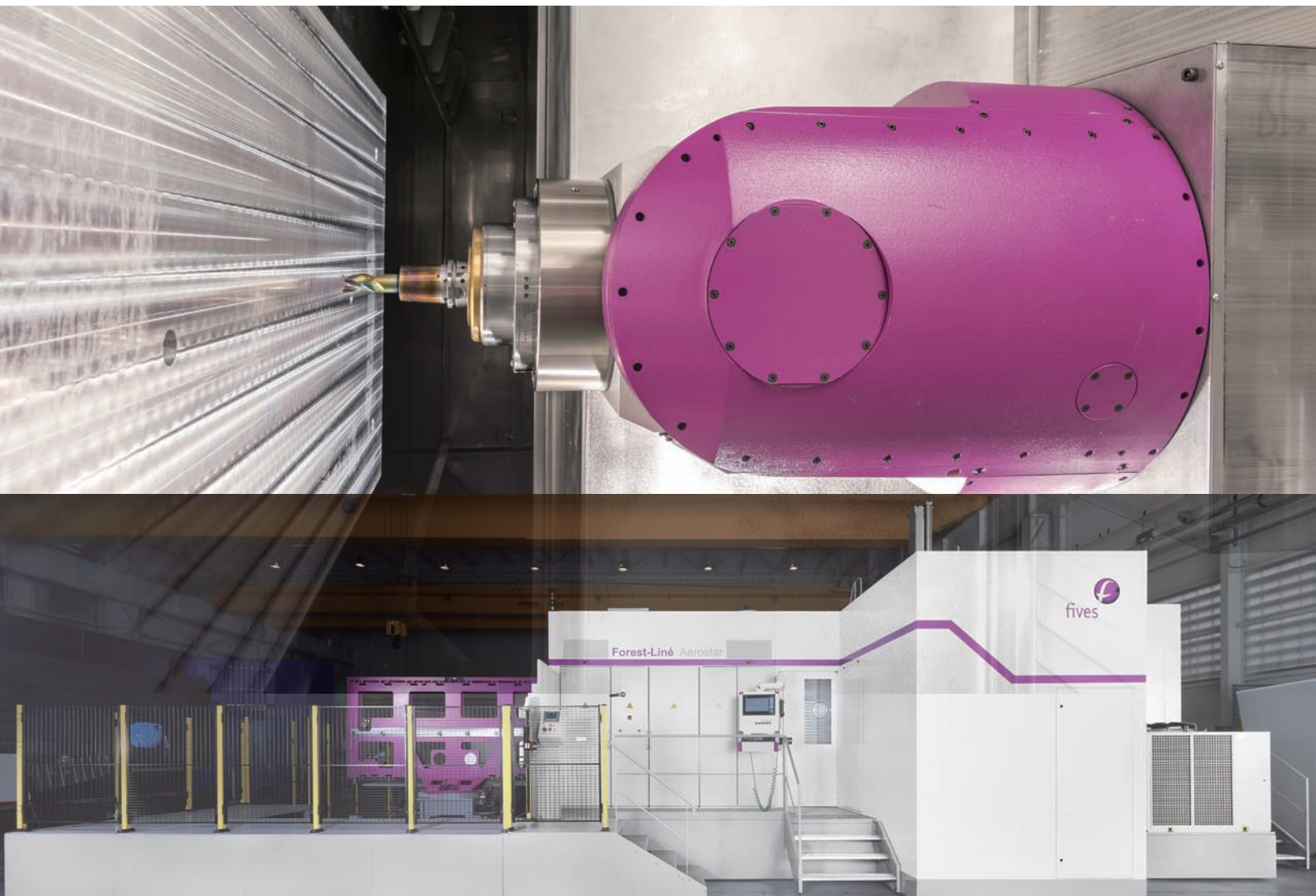
扫描下载
零部件轻量化
电子书



三维数模可以发送并打印成多种金属合金，如铝、钛、钴铬和不锈钢等。



Fives Forest-Liné Aerostar 高速卧式加工中心 金属去除量高-强势推进复杂航空结构件的加工



工业引领生活

Cincinnati
Gidding & Lewis
Forest-Liné
Liné Machines

Landis
Giustina
Cranfield Precision
Landis-Bryant

CIMT 2021 北京
展台号：W1-A201

法孚机床

销售热线：400 650 9398

服务热线：400 650 8318

fap.fms-china@fivesgroup.com

www.fivesgroup.com

法孚高精机床



广告索引号 21-1056

AERONAUTICAL MANUFACTURING TECHNOLOGY

航空制造技术



1958年创刊 · 中国科技核心期刊 · 《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊

编委会

Editorial Board

名誉主任 关 桥
Honorary Director Guan Qiao

主任 李志强
Director Li Zhiqiang

常务副主任 陈 刚
Executive Vice-Director Chen Gang

副主任 吕宏军 李涤尘
Vice-Director Lü Hongjun Li Dichen

国内编委

Domestic Members

毕树生 曹正华 陈贵林
Bi Shusheng Cao Zhenghua Chen Guilin
程普强 戴 棣 邓景辉
Cheng Puqiang Dai Di Deng Jinghui
董绍明 杜宝瑞 高兰宁
Dong Shaoming Du Baorui Gao Lanning
高星海 巩水利 古远兴
Gao Xinghai Gong Shuili Gu Yuanxing
官建国 郭德伦 黄传跃
Guan Jianguo Guo Delun Huang Chuanyue
李红卫 李金山 刘黎明
Li Hongwei Li Jinshan Liu Liming
卢廷钧 孟 光 彭 飞
Lu Tingjun Meng Guang Peng Fei
乔利杰 桑建华 单德彬
Qiao Lijie Sang Jianhua Shan Debin
石竖鲲 史玉升 宋利康
Shi Shukun Shi Yusheng Song Likang
汤立民 唐晓松 王立平
Tang Limin Tang Xiaosong Wang Liping
王 鸣 王清江 王时龙
Wang Ming Wang Qingjiang Wang Shilong
王向明 夏跃波 徐九华
Wang Xiangming Xia Yuebo Xu Jiuhua
杨宏青 杨 辉 姚 为
Yang Hongqing Yang Hui Yao Wei
曾元松 张伟刚 张文武
Zeng Yuansong Zhang Weigang Zhang Wenwu
赵希宏 赵祖德 郑 耀
Zhao Xihong Zhao Zude Zheng Yao

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)

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

社长/总编辑 罗京华
President/Chief Editor Andy Luo
副主编 孙秀云
Vice Editor-in-Chief Sharon Sun
学术编辑 王雪坤/崔 静/王燕萍
Academic Editor Shirley Wang/Jaime Cui/Emma Wang
文字编辑 程学平/张晓眉/王艺源
Text Editor Linda Cheng/May Zhang/Eva Wang
市场总监 何 欣
Marketing Director Xin He
设计 白若薇
Art Supervisor Jane Bai
排版 王 艳
Art Editors Wang Yan
编辑出版 《航空制造技术》编辑部
Edition Aeronautical Manufacturing Technology Magazine
广告总代理 北京中航时代文化传播有限公司
Advertising Agent China Aerotime Media 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 北京荣华世纪印刷有限公司
Printing Beijing Ronghuashiji Printing Co., Ltd.
刊号 ISSN 1671-833X CODEN HGJIEO
CN 11-4387/V
广告经营许可证 京朝工商广字第0051
电话 (010)85700465
传真 (010)85700466
在线投稿 <http://www.amte.net.cn>
电子信箱 zscbyyjb@amte.net.cn

中航时代传媒
CHINA AEROTIME MEDIA

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, 及本刊授权的合作媒体使用。



肯纳金属致力于 为航天航空业内的客户 提供高效增值服务及卓越的产品

HARVI™ Ultra 8X



扫描二维码
了解产品详细讯息

HARVI™ III



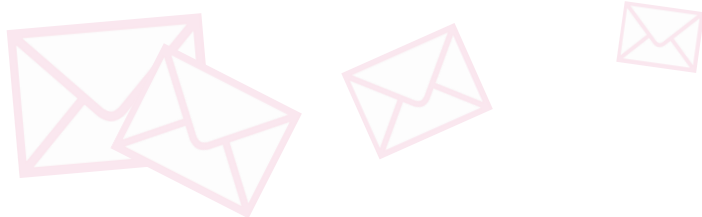
扫描二维码
了解产品详细讯息

广告索引号 21-1017



编-读-往-来

READERS & EDITORS



航空金属构件多服役于极端严苛环境中,具有超强承载、极端耐热、超轻量化和高可靠性等特性,对构件的材料、结构、工艺和性能等提出了严峻挑战。基于增材制造技术可实现复杂结构金属构件的材料-结构一体化净成形,为航空高性能构件的设计与制造提供了新的工艺技术途径。

本期以“金属增材制造”为题,邀请华中科技大学、航空工业沈阳飞机工业(集团)有限公司、同济大学、西安赛隆金属材料有限责任公司的研究团队阐述相关研究进展,展示最新研究成果。此外,专稿中中国科学院沈阳自动化研究所周波副研究员提出一种大型自由曲面光学器件的超精密抛光方法。在此,对各位专家团队的大力支持表示最诚挚的感谢。

学术编辑 王雪坤

感谢《航空制造技术》提供了这个学术交流的平台,期刊刊登的关于激光技术的文章对我的研究工作有很大帮助,尤其是关于激光技术的新进展和新应用的文章,信息量大,涉及面广,其中介绍的新工艺方法对解决实际问题有很好的参考和借鉴价值。近年来,增材制造(3D打印)技术的发展十分迅速,在航空航天领域的应用越来越广,一些新技术不断涌现,希望期刊刊登更多关于增材制造技术在航空航天领域应用研究的文章,有条件可以组织专家撰写、出版增材制造在航空制造领域的专刊。

最后,在我国农历新年来临之际,祝《航空制造技术》编辑部的工作人员牛年幸福,工作顺利,祝愿《航空制造技术》越办越好!

北京工业大学激光工程研究院 陈继民



首先,衷心地感谢编辑部采纳我的稿件,并安排在《专稿》栏目刊发。各位编辑工作很认真,在审稿的过程中,逐字逐句地认真核对并跟本人核实。同时也对本人敲钟,写稿件时要更加认真。非常感谢,你们辛苦了。《航空制造技术》期刊,顾名思义,代表着我们国家从事航空方面科研工作者的技术水平,同时刊登更有参考价值的文章,给科研工作者提供更先进,技术含量更高的论文参考,对航空制造技术的发展起到不可估量的推进作用。希望期刊多关注先进的航空制造工艺和航空材料的发展,使期刊的知名度更上一层楼。

中国航空制造技术研究院复合材料技术中心 乌云其其格



高级集成 (PI) 800 机床: 出色的(P)ECM工艺入门产品

✓ 紧凑

✓ 高性能

✓ 高效

✓ 精确



亮点

- + 紧凑型结构, 集成电解液过滤系统
- + 脉宽范围50 μ s 到DC (直流电)
- + 标配手动或半自动启动系统
- + 快速升级到全自动化
- + 可提供优化工艺和生产效率的选项
- + 振动模块, 行程200mm
- + 沉降模块, 行程400mm
- + 可扩展电源技术/脉冲技术
- + 西门子 S7-1500 机床控制系统



法兰



3D模具



电机轴



埃马克(中国)机械有限公司
地址: 太仓市陈门泾路101号工业园区2号厂房
邮编: 215400 · 电话: 0512-53574098 · 传真: 0512-53575399
网址: www.emag.com · 邮箱: info@emag-china.com

广告索引号 21-1020

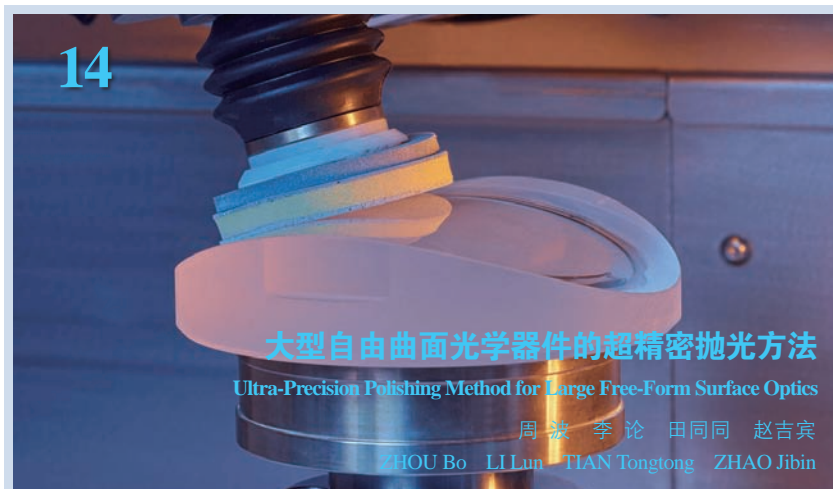


新浪微博



官方微信

专稿 Feature



封面文章 Cover Story

论坛 Forum

金属增材制造

Metal Additive Manufacturing

22 金属增材制造数据处理与工艺规划研究综述

张李超 胡祺 王森林 张楠 史玉升
Review: Data Processing and Process Planning of Metal Additive Manufacturing
ZHANG Lichao HU Qi WANG Senlin ZHANG Nan SHI Yusheng

34 金属增材制造技术应用于军用飞机维修保障浅析

潘新 张英伟 刘艳梅 毛剑锋 王静 殷俊
Applications of Metal Additive Manufacturing Technology in Maintenance and Support for Military Aircraft
PAN Xin ZHANG Yingwei LIU Yanmei MAO Jianfeng
WANG Jing YIN Jun

44 成型态选区激光熔融Ti-6Al-4V钛合金缺陷与微观组织研究进展

李琛 弭光宝 冯艾寒 黄旭 曲寿江
Research Progress in Defect and Microstructure of As-Built Selective Laser Melting Ti-6Al-4V Titanium Alloy
LI Chen MI Guangbao FENG Aihan HUANG Xu QU Shoujiang

52 TiAl 合金粉床电子束选区熔化成形研究进展

车倩颖 李会霞 贺卫卫 朱纪磊 陈睿 程康康 金园园 王宇
Research Progress in TiAl Alloys Prepared by Powder Selective Electron Beam Melting
CHE Qianying LI Huixia HE Weiwei ZHU Jilei CHEN Rui
CHENG Kangkang JIN Yuanyuan WANG Yu

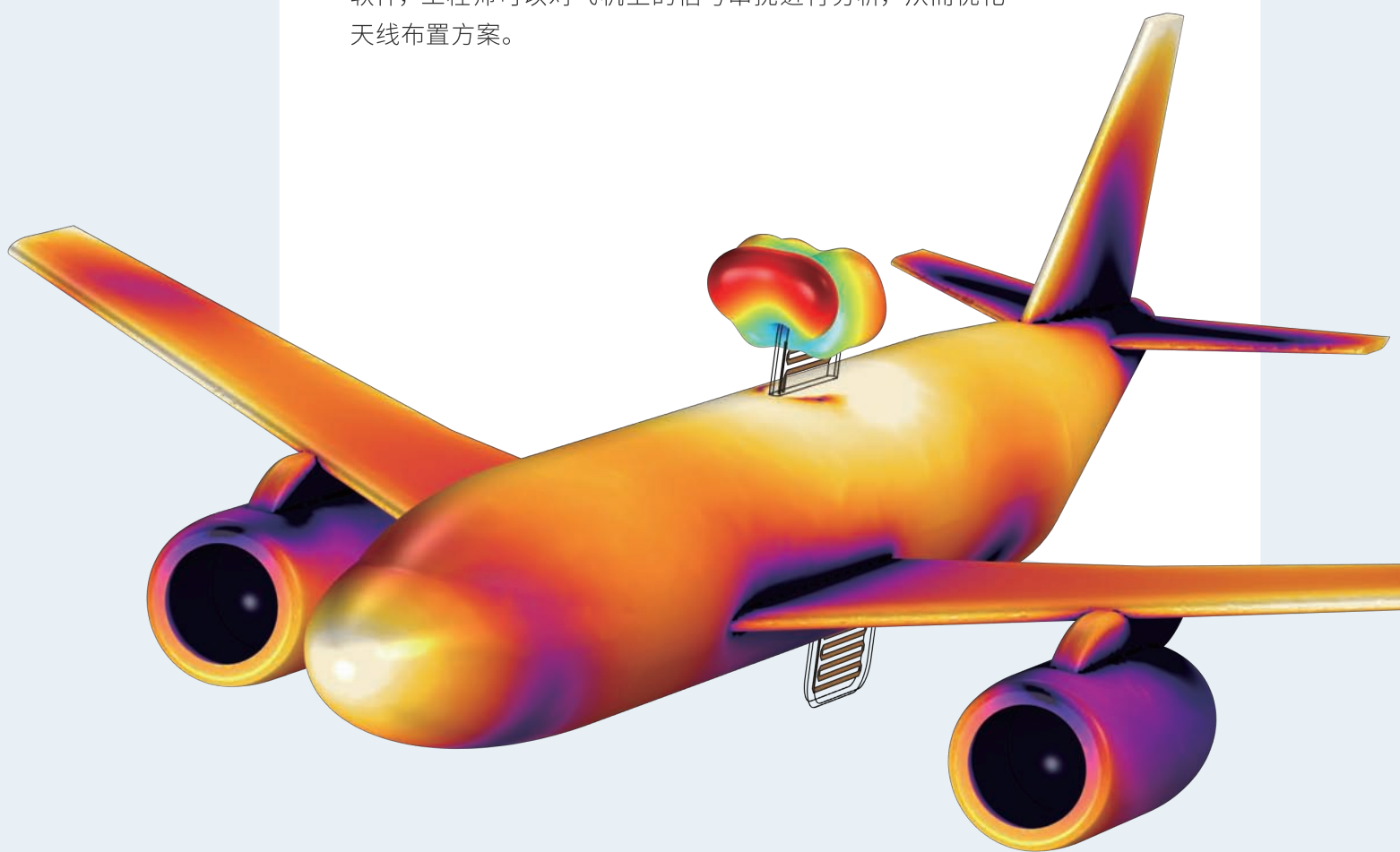
61 TiB₂ 颗粒诱导AlSi5 电弧增材微观组织演变及性能研究

靳鹏 任惠圣 刘一搏 李军兆 李富祥 孙清洁
Microstructural Evolution and Mechanical Property of TiB₂ Nanoparticles Reinforced AlSi5 Alloy in Wire and Arc Additive Manufacturing
JIN Peng REN Huisheng LIU Yibo LI Junzhao LI Fuxiang SUN Qingjie

仿真案例

多物理场仿真 优化航空通信系统

航空通信系统变得日益复杂，飞机上通常需要安装多根天线以满足通信需求。发射与接收天线的排布方式可能会造成信号串扰现象影响飞机正常运行。借助 COMSOL 多物理场仿真软件，工程师可以对飞机上的信号串扰进行分析，从而优化天线布置方案。



COMSOL

COMSOL Multiphysics® 多物理场仿真软件被广泛应用于工程、制造和科学研究等领域。了解更多 COMSOL 仿真应用，请访问：cn.comsol.com

广告索引号 21-1001



阅读更多
仿真案例

走进科研

Approaching Science



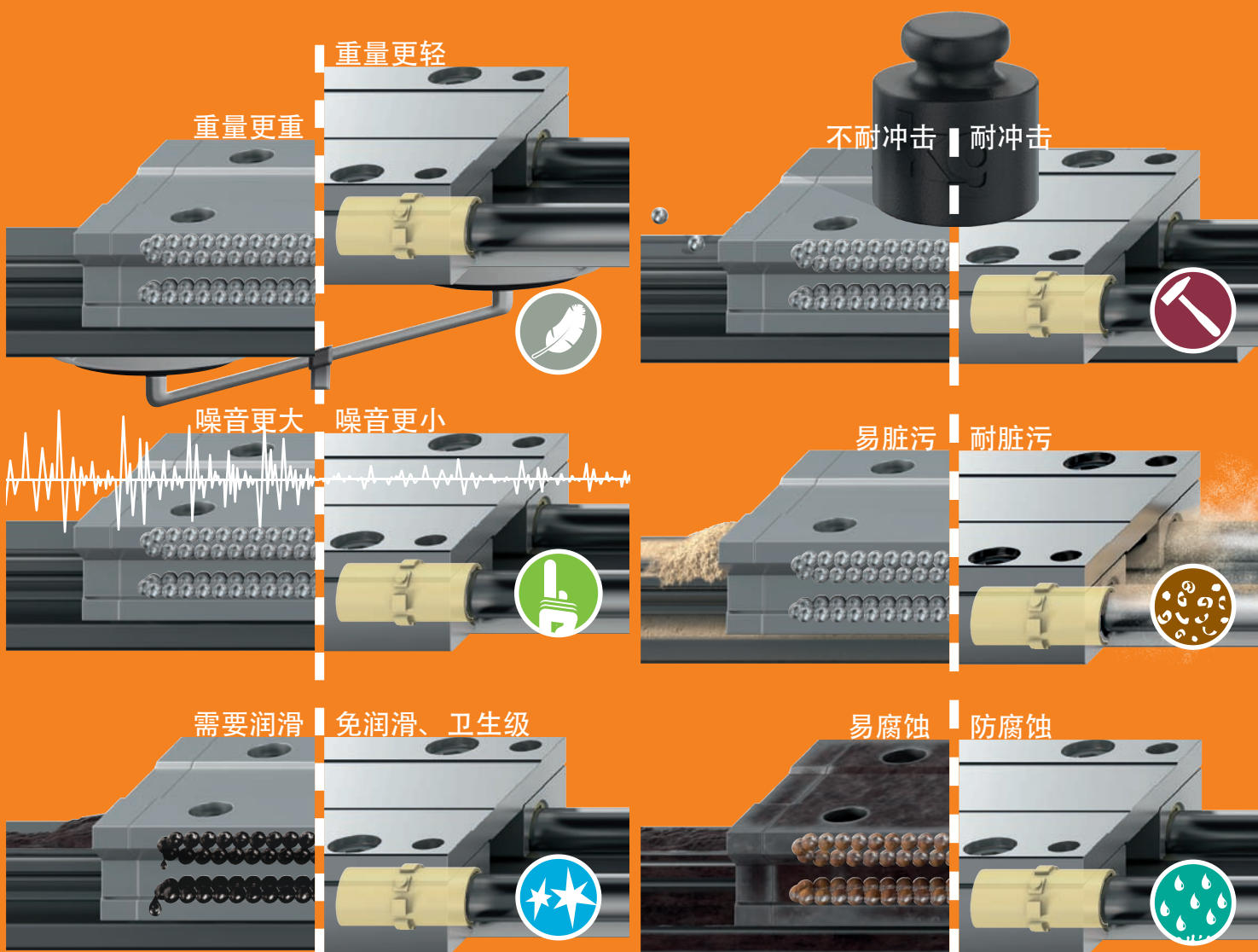
研究论文

Research

- 70 基于背散射电子的电子束加工过程在线观测系统研制
张红玉 许海鹰 路开通 左从进
Development of Online View System Based on Backscattered Electrons for Electron Beam Processing
ZHANG Hongyu XU Haiying LU Kaitong ZUO Congjin
- 76 面向飞机蒙皮对缝的工业机器人自主跟踪方法
王文辉 黄翔 孟亚云 鲁小翔 李根
A Mobile Robot Autonomous Tracking Method for Aircraft Skin Seam
WANG Wenhui HUANG Xiang MENG Yayun LU Xiaoxiang LI Gen
- 83 飞机大部件装配能力测算方法研究
龙安林 何凤涛 蒋超 陈爱民 刘大鹏
Research on Evaluating Method of Assembly Capacity of Large Aircraft Component
LONG Anlin HE Fengtao JIANG Chao CHEN Aimin LIU Dapeng
- 87 数字孪生车间在复杂产品装配过程中的应用探索
胡秀琨 张连新
Study on Application of Digital Twin Workshop in Assembly Process of Complex Products
HU Xiukun ZHANG Lianxin
- 97 热处理制度对激光增材制造TA15钛合金力学性能的影响
谷美邦
Influence of Heat Treatment on Mechanical Properties of TA15 Titanium Alloy Fabricated by Laser Additive Manufacturing
GU Meibang

运动应用？用塑料！

...drylin®直线轴承为您节约40%成本...



易格斯工程塑料轴承可在线计算其使用寿命：www.igus.com.cn/drylin



航空工业与吉林大学签订战略合作协议

2020年12月21日,航空工业与吉林大学在吉林省长春市举行战略合作协议签约仪式。航空工业党组书记、董事长谭瑞松和吉林大学党委书记姜治莹出席仪式并致辞,吉林大学校长张希主持签约仪式,航空工业党组副书记李本正,党组成员、副总经理郝照平出席签约仪式。

签约仪式上,双方就全面开启战略合作,构建产学研深度融合的校企合作模式,共同推动人才培养,科技创新等方面作了深入交流。谭瑞松表示,航空工业与吉林大学有着良好的合作传统,吉林大学持续为航空工业所属单位输送优秀人才,为航空工业发展注入新鲜血液。以航空工业沈飞、沈阳所为代表的所属单位与吉林大学开展多项基础研究及应用,建立了校企协同创新的桥梁,此次签约是双方期盼已久、共同



筹划的事情。谭瑞松对于校企战略合作提出了3个重点方向:一是合力推动设立国家实验室。充分发挥双方优势,汇聚材料、信息、复杂系统等重大领域科学家和工程师,以战略性手段形成创新链、产业链协同平台。二是协作构建创新工厂。航空工业正构建以技术和产品的原型机为交付物的创新工厂,这将为双方科研人员的开创性、跨专业、高风险技术探索提供验证与实践的机会,共同加快推动新一代航空技术发展进程。三是携手定制新兴专业人才。航空工业始终坚定“人才是引领发展第一资源”的理念,目前正积极

筹划新兴专业人才定制,期盼吉大能够与航空工业携手,共同为新一代航空武器装备研制储备、培养人才。

在签约仪式上,李本正介绍协议主要内容并签约,谭瑞松、郝照平等相关领导见证签约,双方领导共同为两个实验室揭牌。签约仪式过后,双方领导共同参观了吉大校史馆、特种工程塑料教育部重点实验室等场所。航空工业规划发展部、人力资源部、科技与信息化部、沈飞、沈阳所,吉大相关院系、部门有关领导和同志参加了签约仪式。上图为签约仪式现场。

(本刊记者 雪松)

首届国际高端测量仪器高层论坛暨第11届精密工程测量与仪器国际会议在京召开

2020年12月11~13日,首届国际高端测量仪器高层论坛暨第11届精密工程测量与仪器国际会议在京召开。本次会议由中国工程院、国际测量与仪器委员会共同主办,中国工程院信息与电子工程学部、中国仪器仪表学会、中国计量测试学会、哈尔滨工业大学联合承办,北京信息科技大学协办。中

国工程院院士、哈尔滨工业大学精密仪器工程研究院院长谭久彬教授担任大会主席并主持会议。

中国工程院金国藩、周立伟、叶声华、李天初等院士出席了大会。国际测量技术联合会(IMEKO)前主席 Kenneth T V Grattan 教授、美国加州理工大学 Lihong V. Wang 教授、德国 PTB Jens Flügel

博士、美国密歇根大学 Steven Cundiff 教授等国际学术大师和世界顶级科学家参加了大会。大会主席团成员金国藩院士、中国仪器仪表学会张彤秘书长、中国计量测试学会马爱文秘书长先后在大会开幕式上致辞。

本次论坛根据世界科技革命与产业变革趋势,探讨和判断高端测量仪器技术发展趋势和仪器产业发展趋势;提出促进世界高端测量仪器科技与产业重点发展方向;共同推进世界范围内高端测量仪器技术形态和产业业态的变革,为科技发展提供更有力的支撑。左图为论坛现场。(本刊记者 雪松)



华盛顿大学:钛粉可在粉末床电子束熔融3D打印中重复使用30次

近日,在华盛顿大学的一个研究小组最近发表的一项研究中发现,利用X射线微型计算机断层扫描(CT),对Ti6Al4V的粉末床熔融-电子束熔化(PBF-EB)增材制造产生的孔隙率进行了一系列30次构建周期(包括约480h的累积构建时间)的表征。研究表明,增材制造粉末可以重复使用多达30次,而孔隙率没有显著增加。

孔隙来源于气体雾化粉末的孔隙,以及由熔池不完全融合引起的孔隙。虽然随着粉末的重复使用,孔隙大小分布略有减少,但总体平均体积孔隙率为 $0.10\% \pm 0.02\%$,且随着重复使用的增加,孔隙率没有明显变化。

此外,研究还发现孔隙与球形度之间存在反比关系,大孔隙构成更大的有效应力集中。而最大的孔隙密度位于等高线与熔体梁之间的过渡处,约0.5~1.0mm的表面附近的零件,最大的孔隙位于内部孵化区域。

因此,尽管颗粒逐渐变形,氧化程度增加,但在Ti6Al4V的PBF-EB增材制造中,随着粉末的重复使用,金属孔隙率没有明显的变化。随着增材制造行业向规模化生产过渡,重复使用增材制造粉末,特别是PBF工艺所需的高球形粉末,将是降低整体零件成本的关键因素。

(本刊记者 雪松)

在津批产AC312E民用直升机成功首飞

2020年12月29日,天津总装的AC312E直升机成功首飞,标志着天津民用直升机产业基地进入全面加速发展阶段。当日15时14分,由机长赵洪芳、副驾驶张凤龙、空中机械师徐洋组成的首飞机组驾驶AC312E直升机拔地而起,在完成无地效悬停、近地面机动、旋转上升、俯冲跃升倒转、8字盘旋、机场上空起落航线飞行等一系列既定试飞科目后,于15时24分平稳降落,成功完成首飞任务。

航空工业党组书记、董事长谭瑞松,天津市人民政府副市长王卫东,航空工业党组副书记、总经理罗荣怀,天津市人民政府副秘书长朱玉兵,航空工业党组成员、副总经理洪蛟、何胜强等出席首飞仪式。民航局等政府部门及有关单位,天津市等地方政府,用户代表,航空工业有关部门和所

属单位领导,AC312E的主要供应商代表等参加了首飞仪式。

王卫东指出,AC312E等多个优质民用直升机项目布局天津,必将成为天津直升机产业亮丽的新名片。罗荣怀表示,航空工业高度重视与天津市的战略合作,积极在天津布局发展民机产业,融入区域经济发展。在津批产的AC312E成功首飞,并与用户签订销售协议,是加快天津直升机产业创新发展的良好开端。

仪式上,航空工业天津分别与新兴通用航空(天津)有限公司、中通航翔湖南通用航空有限公司各签订2架AC312E销售意向协议。此外,航空工业首次发布了4t级新型民用直升机AC332,并与启动用户北大荒通用航空有限公司签订2架意向订单。

(本刊记者 雪松)



狄克[®] DIC-206[®]

免排放

Water-Soluble WEDM Concentrate

水溶性线切割液

通过沉淀分离可循环使用不排放

关爱生命、保护环境、节约资源



北京东兴润滑剂有限公司

电话: 010-64368739 13901051209 传真: 010-64343485 邮编: 100102

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

广告索引号 21-1004

材料表征的“利刃”：亚微米空间分辨率的真空紫外激光系统

真空紫外激光通常是指波长介于 10 ~200nm 的激光。相比于更大波长的激光,其单光子能量较高,更容易破坏原子键或激发出光电子,因此真空紫外激光光源在微观成像、光电子谱学研究、工业加工等领域均有广泛应用。

然而,由于高能量的光子会被空气中的氧气及水蒸气分子强烈吸收,因此真空紫外激光面临着空间传输、波前整形等方面

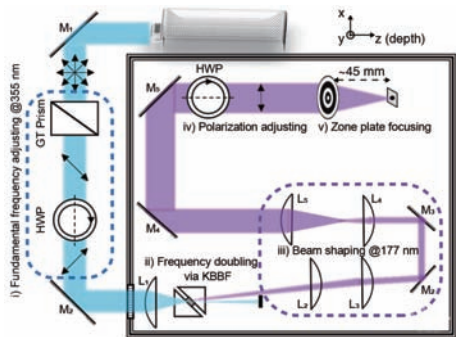
的难题。尤其在角分辨光电谱等离轴的谱表征系统中,利用真空紫外激光实现长焦距、高空间分辨能力等功能是极具挑战性的课题。另一方面,双层转角石墨烯、高温铜基超导薄膜等新材料体系促进许多新物理、新现象的发现,而这些材料的尺寸均在微纳尺度,其表征过程需要较高的空间分辨率。因此,若实现对真空紫外激光的空间整形和聚

焦,将极大地拓展其在新量子材料中的研究。

近日,针对该问题,由国防科技大学、中国科学技术大学、清华大学和牛津大学组成的国际研究团队提出一种利用平板衍射透镜聚焦真空紫外激光(177nm 波长)的新途径,在长焦距的条件下(~45 mm),实现了亚微米级(<1 μm)的焦斑尺寸,首次将基于真空紫外激光光源的光电子能谱仪的空间分辨能力提高至微量级。

利用 KBBF 晶体对波长 355nm 准连续激光进行倍频,并对倍频后的 177nm 激光进行空间整形。最终采取平面透射式、无球差型的菲涅尔波带片来聚焦激光,实现了在 45mm 焦距位置上的亚微米级聚焦光斑。左图为 177nm 激光的产生及光束整形与聚焦。

(本刊记者 良辰)



金属增材制造优化的全新解决方案

近期,澳大利亚新南威尔士大学的研究人员通过对 AlSi10Mg 合金的研究,提出了一种基于机器学习的参数优化方案,并通过图像识别技术更全面细致地刻画了材料显微结构特征。此研究最终阐述并建立了“打印过程参数-材料显微结构-材料机械性能”三者之间的量化关系,对于材料的工业应用具有指导性作用。相关论文以 *Machine-learning assisted laser powder bed fusion process optimization for AlSi10Mg: New microstructure description indices and fracture mechanisms* 为题发表在 *Acta Materialia*。

研究选择 AlSi10Mg 为目标材料,通过 LPBF 技术以不同的打印参数

加工出一定量的块体材料,进行密度测量后作为输入训练集,通过高斯过程回归(Gaussian process regression, GPR)进行参数优化,从而得到一个范围较大的优化参数窗口,为科研人员或材料使用者提供更多的加工参数选择。在得到优化参数窗口后(可以得到密度大于 99% 样品的打印参数区域),5 组新的打印参数被挑选出来作为验证集测试预测准确性。试验结果表明,高斯过程回归可以在较少训练数据的情况下保持较高的预测准确性。更广的参数选择范围为材料发展提供了更多的可能性与更灵活的应用性。

从密度优化参数窗口新选择出来的 5 组打

印参数,可制备更多的样品用于显微结构刻画与机械性能测试。该研究通过利用图像识别技术(Image processing, IP)与主成分分析技术(Principal components analysis, PCA),基于 10 个图像特征全新构建了两个显微结构特征参数 I_d 与 I_s , 以此更全面地刻画、表征出 Al-Si 胞状结构显微特征。此外,该研究还进行了硬度测试、拉伸测试以及断裂韧性测试,从多方面反应材料的机械表现性能。通过机器学习预测所得出的较大参数优化窗口,发现了更多新的优化打印参数,打印试样最终得到了此前未达到的机械性能。

(本刊记者 良辰)

降低航空发动机环境障涂层孔隙率新策略

针对未来航空发动机陶瓷基复合材料热端部件环境障涂层,其主要面临环境腐蚀物侵蚀的挑战。目前,环境障涂层通常采用大气等离子喷涂、等离子喷涂-物理气相沉积方法来制备,但鉴于其沉积机理,涂层中避免不了存在少量的开孔及裂纹,这就为环境中的腐蚀介质提供了渗透路径,造成涂层失效。

来自广东省科学院新材料研究所与西安交通大学的研究人员合作,提出了压渗熔融铝的方法来封堵涂层中的开孔及微裂纹,重点从热力学角度分析了熔融铝在孔隙中浸渗的困难性。结果表明,通过控制外压可获得良好的浸渗效果,这一研究结果有望为制备高致密环境障涂层提供新思路。相关论

文以 *Infiltration thermodynamics in wrinkle-pores of thermal sprayed coatings* 为题发表在 *Applied Surface Science*。

该研究首先基于真实涂层的复杂孔隙结构建立了开放孔隙几何模型——“褶皱孔”,以及熔体浸渗的物理模型和数学模型。通过数学模型计算获得了熔体能量随浸渗深度的变化规律,进而通过计算驱动力、分力等,得知造成能垒的主要因素是弯曲液面附加压即毛细力。除了毛细力,内、外压也同样影响浸渗行为,采用升高外压、同时降低内压的方法在实践中比较容易实施。通过调节孔隙内外压力的方法应用于调控熔体在复杂孔隙内的浸渗深度具有热力学可行性。

(本刊记者 良辰)

麻省理工研究人员发现一种更好的金属合金设计方法

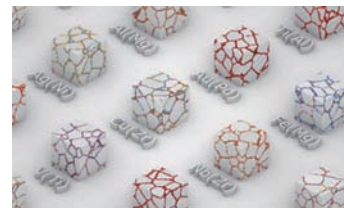
当两种金属混合在一起时,次级金属的原子可能会沿着晶界聚集,或者通过晶界内的原子晶格分散开来。材料的整体性能很大程度上取决于这些原子的行为,但迄今为止还没有系统方法可以预测它们的行为。

麻省理工学院的科研人员现在找到了一种方法,结合计算机模拟和机器学习过程,对这些性质进行详细预测,从而引导用于各种应用的新型合金的开发。这些发现发表在《自然-通讯》杂志上,论文由研究生 Malik Wagih、

博士后 Peter Larsen 以及材料科学与工程教授 Christopher Schuh 撰写。

在这项研究中,该团队基于文献中描述的基本组合,检测了 200 多种不同的贱金属和合金金属组合,并系统地模拟了其中一些化合物,以研究其晶界构型。机器学习的预测与详细的测量结果非常吻合。这项研究汇编的新数据库已经在公共领域开放,可以帮助任意一位正在设计新合金的人。

研究人员发现了一种新的方法,基于在原始金属晶粒边界之间的反应,



可以预测金属合金的性能。左图为彩色的圆点表示原子沿着边界聚集而非穿透边界的可能性。

(本刊记者 雪松)

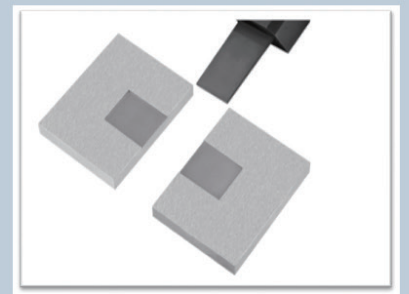
DMNC-EDM

ADV 600

精密数控电火花成形机床

PRECISION CNC SPARK MACHINE

配置 windows 系统,自动升降油槽、丰富的数据接口可兼容机械手、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



www.dmnc-edm.com 北京迪蒙数控技术有限公司 010-60775392

广告索引号 21-1009

引文格式:周波,李论,田同同,等.大型自由曲面光学器件的超精密抛光方法[J].航空制造技术,2021,64(3):14-21.

ZHOU Bo, LI Lun, TIAN Tongtong, et al. Ultra-precision polishing method for large free-form surface optics[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(3): 14-21.

大型自由曲面光学器件的 超精密抛光方法*

周波^{1,2}, 李论^{1,2}, 田同同^{1,2}, 赵吉宾^{1,2}

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016;

2. 中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 沈阳 110169)

[摘要] 旨在提高大尺寸自由曲面光学器件精密抛光技术的精度与效率。通过构建一个机器人抛光中心作为抛光平台,并在包括单位圆域、单位正方形域及自由边界域在内的平面映射域内求解旅行商问题,通过投影计算圆形度数,进行映射区域的分类,并将所获得的平面轨迹映射到曲面上获得用于大尺寸自由度超精密光学器件的抛光路径。本文算法综合考虑计算效率以及边界覆盖质量:当投影区域的圆形度超过0.9,则采用单位圆域作为映射平面域;当投影区域的圆形度值相对小,介于0.8与0.9之间,则采用单位方域作为映射平面域;当圆形度值小于0.8,则采用自由边界映射域。仿真及试验验证抛光结果表明,该方法可以获得高效的无交叉路径,有效降低单一方向运行导致的中频、高频误差,满足抛光路径方向不断变化的实际抛光加工需求,有效消除抛光纹理,并显著提高抛光精度和效率。

关键词:自由曲面;超精密光学部件;自由边界域;抛光;机器人;旅行商问题

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.03.014



周波

副研究员,博士,主要从事增材制造、机器人智能制造等相关技术研究。

目前,球形和非球形光学系统的应用越来越受到成像性能以及现代光学系统的高质量要求的挑战,而由自由曲面表达的复杂光学表面是解决此问题的关键^[1]。光学自由曲面通常是指不可展的复杂光学表面,它可以具有任意规则或不规则的表面结构^[2]。与传统的光学部件相比,它具有不对称的结构并具有灵活的空间布局。经优化设计扩展的自由度,显著提高了光学系统的视场适应性,并使光学系统可以获得更大的成像视场,改善了其光学性能,并简化了系统结构,可减少镜片的数量以及镜片的尺寸^[3]。因此,基于自由曲面的

光学系统研究已成为发展新一代高性能光学系统的重要方向。

高轮廓精度的自由曲面的应用,使得大视场、高分辨率反射长焦系统的设计日益成为欧美发达国家的关注焦点,并在自由曲面研究领域取得了突破。NASA已使用的自由曲面的红外光谱成像仪也采用了自由形式的表面^[4]。国际知名的光学系统制造商徕卡(Leica)为欧洲航天局(ESA)开发了一种新型的自由曲面光学表面^[5]。TMA相机也使用自由曲面,并且全场波像差的RMS值从 $\lambda/7$ 提高到 $\lambda/20$ ^[6]。

大口径自由形状零件的高端加

* 基金项目:国家重点研发计划(2016YFB11005);国家自然科学基金(51605475,51775542)。

工技术和设备被以美国为首的西方国家视为战略资源,并严格限制了出口。由于其特殊的几何结构和材料特性,对打磨的路径规划技术的要求非常高。综上所述,以自由曲面表示的复杂光学表面在重要的光学工程、国防军事等先进领域具有广阔的应用前景,将成为光学系统技术发展的主要方向。为解决现有自由曲面光学器件表面加工的关键问题,开发了用于大直径自由曲面零件的智能、高精度、高效超高精度机器人抛光加工平台。

传统的数控轨迹生成方法,如等距轮廓偏置、螺旋轨迹以及往复路径等,均需要避免路径交叉并追求更高的效率以实现高速加工。但是,抛光路径为了防止单一方向运行导致的中频、高频误差,其方向需要不断变化,以有效地消除抛光纹理。现在的抛光路径除了前述的传统方法,还有基于分形算法的谢尔宾斯基曲线或者希尔伯特曲线,但是其生成路径有规律可循,一定程度上仍无法做到消除中频及高频误差。基于此,本文提出下述抛光轨迹算法,具体见图1的算法流程图。

自由曲面的不规则形状特性为光学系统赋予了新的活力,但同时也

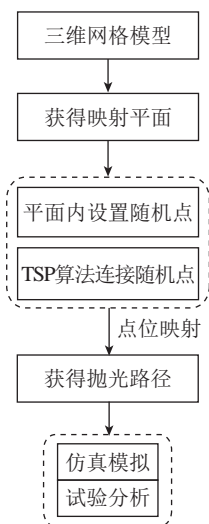


图1 算法流程图

Fig.1 Flow chart of algorithm

为其制造技术带来了巨大挑战。依赖于手动和简单机械的传统加工方法属于质量不稳定的研磨和抛光技术,无论精度或加工效率,都无法满足复杂曲面的加工要求。

随着机器人技术的日益成熟及其具有的更大加工灵活性以及加工范围,可以使用六轴工业机器人夹持抛光工具进行抛光操作,其更具有成本低廉的特性,但由于工业机器人的低刚性(约0.1mm)而降低了其定位精度^[7]。很多研究人员使用CNC机床进行此类精加工阶段。Lin等^[8-9]设计和开发了一种五轴CNC柔性砂布轮抛光机床,并研究了其抛光工艺^[10],柔性抛光有效地改善了表面质量,而又不影响工件的深层质量。Tsai和Huang^[11]设计了一种特殊的五轴机床进行抛光操作。

计算机控制的光学抛光(Computer control optics surface, CCOS)技术^[12],特别是一些新颖的抛光技术,如应力板抛光、磁流变抛光、离子束抛光和球囊抛光等确定性抛光技术的创新,促进了光学元件的革命性高精度制造。但是,当将上述商用抛光技术应用到大直径光学自由曲面的高精度加工时,存在一个明显的问题:自由曲面元件不同于球形表面和简单的非球形元件,并具有一定的边界功能。目前,商业数字抛光技术加工坐标系无法实现复杂曲面光学元件的识别和精密加工。同时,因数控机床的加工范围有限及其不具有机器人的加工灵活性,这些新颖的抛光技术绝大多数采用了机器人平台进行抛光。

本研究克服了现有技术的局限性,并提出基于旅行商问题生成无交叉路径的抛光方法。

边界参数化

对曲面进行参数化就等于找到从合适的域到曲面的一对一映射。对表面网格进行参数化的目的是找

到从平面网格到三角网格曲面的一对一映射规则。一个好的映射规则需要符合角度变形(共形参数化)或面积变形(保面积参数化)最小化的规则。根据所需的边界参数化类型,可以将不同的参数化方法分为3类:固定边界、自由边界和无边界^[13]。本文采用前两种边界法。

1 分层切片算法

固定边界表面参数化法是定义一组约束边界参数化的方法,即沿边界的每个顶点由两个 u 、 v 坐标^[13]来定义。为固定边界方法选择边界参数化方案时,提供两种不同的选择:

(1)用户可以在两种常用方法中选择边界参数化:均匀或弧长参数化。均匀即等距划分的边界参数化虽然会产生较差的视觉效果,但更稳定。为了更符合减小加工误差的原则,在默认情况下,使用弧长边框参数化的方法。

(2)由两个标准形状中的一个形状来代表平面域的边界形状:圆形或正方形。正方形边界参数化通常用于近似矩形。圆形边界参数化对应于近似于圆形的投影。

相对于固定边界表面参数化法,自由边界表面参数化法保证更好的映射精度^[14-16],但是映射域的边界复杂,加大了规划路径的难度。传统的往复路径(即Zig-Zag)或等距轮廓偏置(即CPO)因路径生成简单,可以适用于自由边界映射域的路径规划。而前述的谢尔宾斯基曲线或者希尔伯特曲线,则不适用于自由边界映射域,因两者均在圆域或方域内方便进行分形计算,在自由边界域内规划非常困难。本文采用的通过在映射域内生成随机点的方法,突破了上述路径因映射精度及路径规划难度等问题,可以在圆域、方域及自由边界映射域内生成无交叉路径,完成了抛光路径的生成。

针对上述平面域的选择问题,通

过将曲面网格投影到平面上,可以获得区域轮廓,根据计算圆形度的数值来判断形状并选择边界参数化类型,如图2所示。

圆形度的计算公式如下:

$$\text{Circularity} = 4 \times \text{Area} / \text{Length}^2 \quad (1)$$

式中, Circularity 为圆形度; Area 为投影区域的轮廓包围面积; Length 为投影区域的轮廓长度。当投影区域的圆形度接近 1 (本文选择为超过 0.9), 则适用于选择圆域; 当投影区域的圆形度值相对小(考虑到方形域为 0.785, 本文选择为介于 0.8 与 0.9 之间), 则适用于选择方域; 当圆形度值小于 0.8, 则选择自由边界映射域。

2 重心坐标系

参考 2D 广义重心坐标^[17]的定义, 其提供了为二维三角形定义的广义重心坐标的高效的实现方法。为了方便地产生抛光轨迹, 必须将映射平面内三角形的坐标以重心坐标系的形式表达, 再将该坐标映射到三维网格曲面上, 从而方便地获得最终的抛光轨迹, 如图 3、4 所示。

点 q 的三角形上的任何点都可以表示为式(2), 见图 5。

$$q = \{I p_1 + J p_2 + K p_3 \mid I + J + K = 1, I, J, K \geq 0\} \quad (2)$$

可以将 q 表示为三角形顶点的加权平均值。如前文所述, 平面域的索引遵循一对一的映射规则, 并且与原始曲面网格相同, 点 q 对应于原始曲面网格的平面域上面片内的一个点坐标, 其坐标可以通过式(2)计算。

轨迹规划

传统的抛光路径方法包括: 往复、等距轮廓偏置、螺旋形、希尔伯特(Hilbert)填充曲线^[18]、均匀有理 B 样条曲线(NURBS)曲线拟合^[19]等。为了防止单一方向运行导致的中频、高频误差, 并消除抛光纹理, 抛光路径方向需要不断变化。相对于有规

律可循的基于分形算法的谢尔宾斯基(Sierpinski)曲线^[20]或者希尔伯特曲线的抛光路径, 无规律的随机路径更适用于消除中频、高频误差, 但是需要采用一种高效的且可以将随机点用“一笔画”的方式进行连接, 以生成无交叉的高效随机路径。

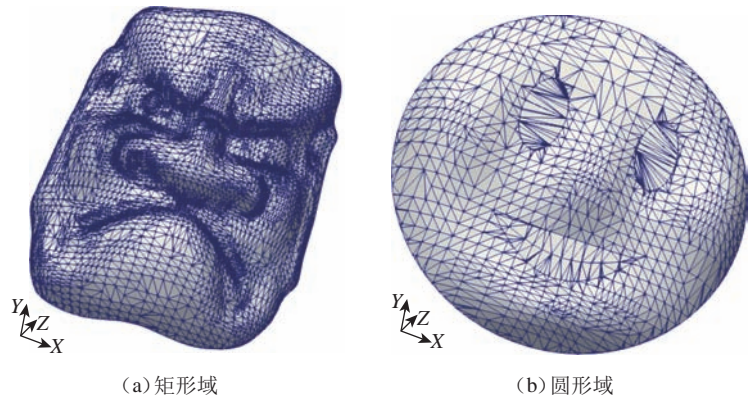


图 2 网格曲面适用类型
Fig.2 Applicable types of mesh surfaces

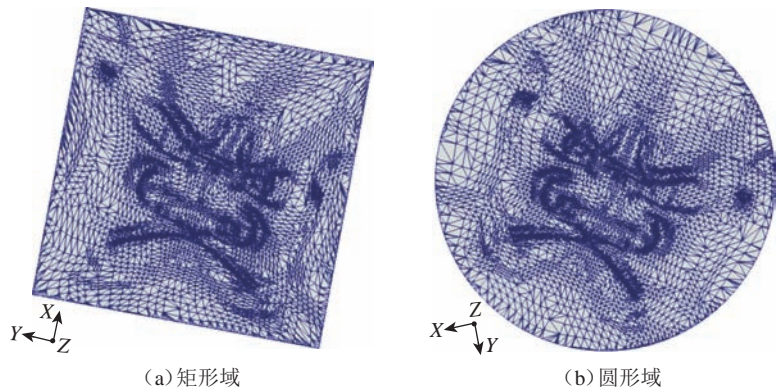


图 3 天狗面具的映射平面域
Fig.3 Mapping plane of tengu mask

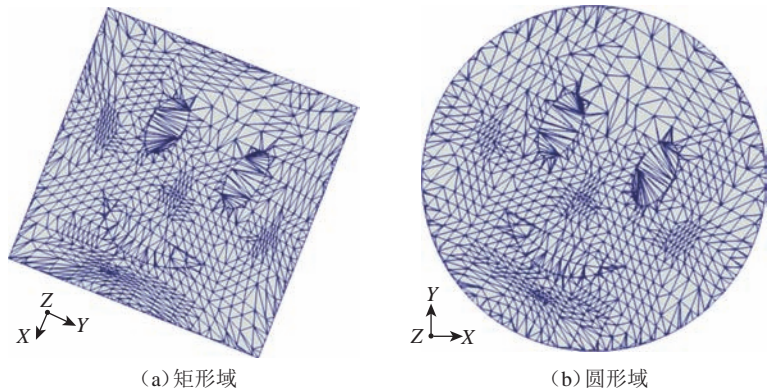


图 4 Emijo 面具的映射平面域
Fig.4 Mapping plane of Emijo mask

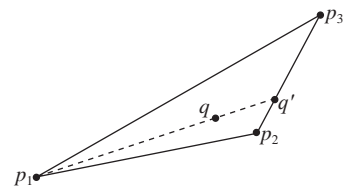


图 5 平面网格面片上的重心坐标
Fig.5 Gravity coordinate on patch

旅行商问题(Travelling salesman problem, TSP)是计算数学中研究最深入的问题之一。给定一个城市的集合以及每对城市之间的旅行成本,那就是找到访问所有城市并返回起点的最经济的方法^[21]。对于抛光轨迹,可以在平面网格中生成随机点,并通过 TSP 方法进行连接,从而可以使抛光轨迹最短。

但是 TSP 问题尚无有效的解决方法^[22],任何方法均不能保证其获得的是最短的路径,只有相对短和高效的算法。在这些求解方法中,加拿大 Uwaterloo 大学的研究人员^[23]提出的算法和基于 Lin-Kernighan 的本地搜索算法^[24]求解 TSP 都非常节省时间并保证结果是相对优良的。随着点数的增加,各个计算方法的时间消耗将急剧增加。比较随机点(2000 个点)的时间消耗和准确性的计算结果,如表 1 所示。

可见,基于 Lin-Kernighan 算法求解 TSP 的算法具有良好的时间消耗和准确性。虽然路径长度略大于 Uwaterloo 大学的计算结果,但是计算效率的优势非常明显。相对于缩短冗长的打磨抛光路径长度的难度,计算效率的提高更具有实际意义,这样才能实现算法较高的“质速比”。

1 蚁群算法

本文采用蚁群算法来提高计算速度。蚁群算法是一种用来寻找优化路径的概率型算法,1992 年由 Dorigo^[25]在其博士论文中提出,其灵感来源于蚂蚁在寻找食物过程中发现路径的行为。这种算法具有分布计算、信息正反馈和启发式搜索的特征,本质上是进化算法中的一种启发式全局优化算法^[26]。本文采用蚁群算法解决前述的以 TSP 求解路径连接问题,算法的流程如下(以某一只蚂蚁的行走路径代表一个可行解,即一个路径连接方案):

(1) 设定迭代次数。

(2) 确定蚂蚁数 n 。

① 对每只蚂蚁,随机选择一个抽象点作为起点;

- 进入循环选择后 $n-1$ 个抽象点;
- 根据所有与当前抽象点相连的路径上的信息素多少,决定下一步,

即选择信息素最多的路径;

- 蚂蚁有一定概率选择错误,即随机选择下一步要走的路径;

- 在选择的路径上按照一定规则留下一定量的信息素;

② 蚂蚁行走路径就是本次搜索的轨迹连接路径;

(3) 每群蚂蚁结束后,所有路径上的信息素进行一次衰退,保证越后进行的蚂蚁的信息素影响越大。

(4) 等待迭代结束。

设定更新选择的路径上的信息素方式为式(3),其中 u 为信息素衰退因子; Q 为常数因子; len 为从起始城市回到城市的路径距离。

$$Message_{ij}=Message_{ij} \times u + Q/len \quad (3)$$

并设定全局更新信息素为蚁群系统。

$$Message_{ij}=Message_{ij} \times u + Q \quad (4)$$

2 TSP 算法对比分析

将几种 TSP 算法运行对比,以验证所提出算法的有效性,轨迹连接效果和统计数据分别见图 6 及表 2。

从表 2 可以看出:(1)除 Uwaterloo 大学及本文所提出的算法,其余算法都存在交叉;(2)虽然 Uwaterloo 大学所提出的算法路径最短,但是计算时间显著较长,其算法的时空效果并不好。与连接路径的长度相比,本文方法在时间消耗方面表现出更好的性能。因此本文推荐使用蚁群算法计算 TSP。

3 TSP 随机点预设置数量

曲面模型的表面积可以通过累计每个面片计算,

$$A_i = \sum_{index=0}^{index=n} b_i \quad (5)$$

式中, i 是每个面片的索引,且 b_i 是第 i 个面片的面积。设打磨工具的有效投影面积为 s 。则 TSP 随机点预设数量 n 为:

$$n=A_i/s \quad (6)$$

考虑到三角网格曲面模型的复杂程度不同,本文逐次适当放大随

表 1 仿真结果统计

Table 1 Statistics of simulation results

方法	随机点数目	消耗时间 /s	长度 /mm	是否存在交叉
Lin-Kernighan 算法	2000	接近 3.5	5057.02	否
Uwaterloo 大学算法		超过 600	5049.24	否

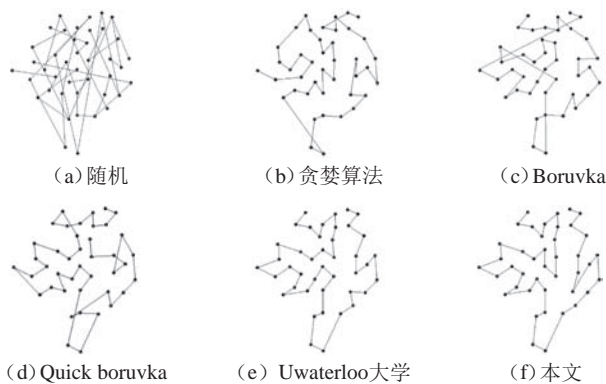


图 6 多种连接方法对比

Fig.6 Comparison results between multiple connection methods

机点数以保证不残留加工区域以及不过度加工,则放大的随机点数数量 $n' = (1.05 \sim 1.1) m \times n$ 。其中, m 是逐次放大随机点数目的次数。

尤其需要注意的是,在自由边界平面域内生成随机点的数量不同于圆域及方域。因自由边界平面域外轮廓复杂,首先需要在单位方域内进行随机点的生成,再判断这些点落在自由边界平面域的情况,进行随机点的补充。本文是以方域的面积与自由边界域的面积相比,适当放大随机点生成的数量,以保证有足够的数量落在自由边界域内。

数值模拟及抛光试验验证

为了评估所提出的 TSP 轨迹规划算法,图 2 中所示的两个网格曲面被用作工作示例:“天狗面具”和“Emijo 面具”网格曲面,都包含多个小面片。前者包含 4000 多个三角面片,后者的网格构成了 600 多个切面。通过前述参考加工参数,分别确定 TSP 点的预设数量。如果预设的 TSP 点数少(实际上不能覆盖表面网格),则 TSP 点数会增加,同时也会影响加工效率。因此,在合理的限制范围内考虑加工精度和耗时,本文中的 TSP 数量将设置为 1174 和 464。统计数据如表 3 所示。

1 仿真模拟

1.1 “天狗面具”实例

在图 7 中所示的“天狗面具”的平面网格内随机分布 1174 个随机点。

图 8 示出了根据重心坐标对应获得的抛光工具路径。

该模型的投影域圆形度为 0.813,所以适用于采用方域作为映射域进行计算。从图 8 中也可以得出,方域映射后获得的抛光路径的边界覆盖情况比圆域的情况要理想;圆域映射后在模型的边界处出现多处路径没有覆盖到的情况。因此,采用方域进行映射是合理的。

1.2 “Emijo 面具”实例

在图 9 中所示的“Emijo 面具”的平面网格内随机分布 464 个随机点。

图 10 示出了根据重心坐标对应获得的抛光工具路径。

该模型的投影域圆形度为 0.925,所以适用于采用圆域作为映射域进行计算。从图 10 中也可以得出,圆映射后获得的抛光路径的边界覆盖情况比方域的情况要理想;而

表 2 TSP 轨迹生成时间统计

Table 2 Statistics of TSP trajectory generation time-consuming

方法	随机点数目	消耗时间 /s	长度 /mm	是否存在交叉
随机连接	42	0	383.864	是
贪婪算法		<0.1	168.074	是
Boruvka 算法		<0.1	140.778	是
Quick Boruvka 算法		<0.1	147.485	是
Uwaterloo 大学算法		>0.5	130.969	否
本文算法		<0.1	133.615	否

表 3 计算数据统计

Table 3 Statistics of TSP calculation results

模型	打磨头半径 /mm	总面 /mm ²	预设随机点数量	最终预设点数量
天狗面具	20.0	2235.765	1118	1174
Emijo 面具	—	843.179	422	464

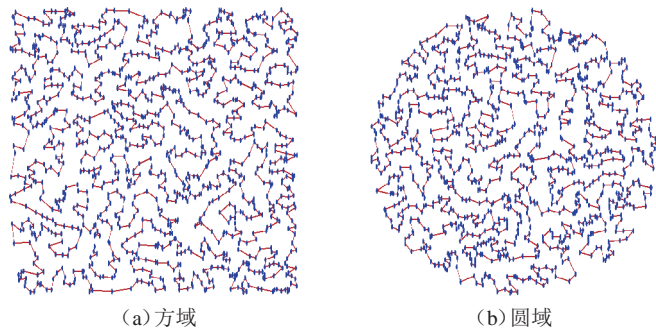


图 7 天狗面具平面域内 TSP 路径

Fig.7 TSP path in plane domain of Tengu mask

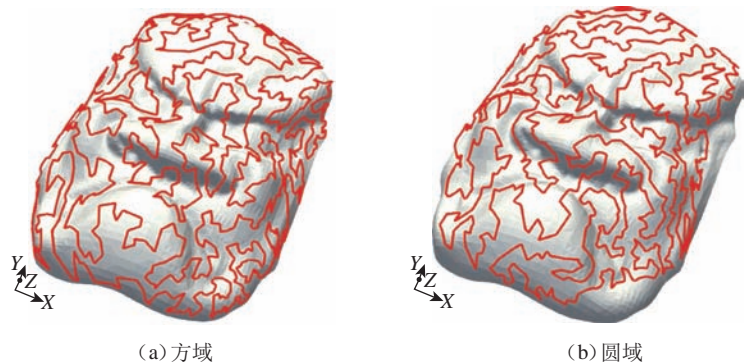


图 8 天狗面具 TSP 抛光路径

Fig.8 TSP polishing path of Tengu mask

方域映射后在模型的边界处出现多处路径没有覆盖到的情况。因此,采用方域进行映射是合理的。

2 抛光试验

本文通过试验对比所提出的 TSP 路径规划方法与基于谢尔宾斯基轨迹的抛光轨迹规划方案的打磨效果。因所选择的模型(原件为某自由曲面,材料为光学玻璃)具有较大的坡度且部分区域具有尖锐的几何特征,投影后的圆形度数值仅为

0.602,显然采用圆域和方域并不适合进行路径规划。此外,采用谢尔宾斯基路径,阶数及等分的数量(圆域)将直接影响生成效率,本文给出生成近似数量(2700)的点所消耗的时间,并在图 11 中的平面域内规划谢尔宾斯基路径(阶数为 7),在表 4 统计生成点位及计算时间,可见所提出的算法在时间消耗方面具有优势。

试验装置采用 KUKA 机器人

(吊装方式安装),额定负载 30kg,末端装置自制打磨盘(配 1200# 砂纸)进行抛光试验,抛光压力均为 5N;抛光盘半径为 48.0mm,如图 12 所示。
(1)采用谢尔宾斯基路径:在圆域生成路径(阶数为 9,大致为 7200 个点),打磨一次旋转 60°,共抛光 6 次;
(2)采用所提出的 TSP 路径:同样进行 6 次抛光加工,每次生成随机点 7200 个,如图 13 所示。试验后,参数及结果统计如表 5 所示。

采用 TSP 方法,当预设随机点数量与谢尔宾斯基方法获得的点数量接近时,每次生成路径的时间以及路径总长度均是每组试验中最小的。试验最后,本文所提出方法的抛光表面粗糙度数值略好于采用谢尔宾斯基路径。

结论

本文提出了一种基于 TSP 方法的柔性抛光轨迹规划方案。它以自

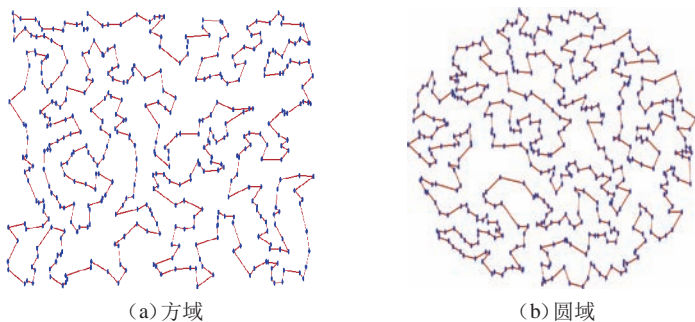


图 9 Emijo 面具平面域内 TSP 路径

Fig.9 TSP path in plane domain of Emijo mask

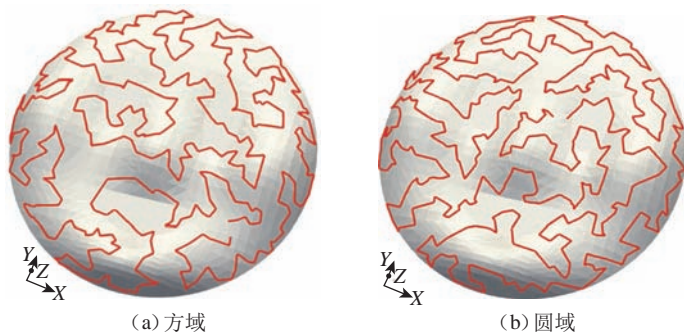


图 10 Emijo 面具 TSP 抛光路径

Fig.10 TSP polishing path of Emijo mask

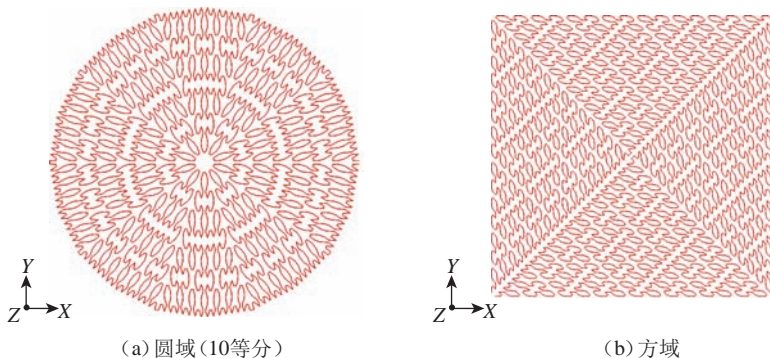


图 11 谢尔宾斯基平面域内路径(4 阶)

Fig.11 Sierpinski polishing path of Emijo mask

表 4 计算数据统计

Table 4 Statistics of calculation results

类型	点数量	总耗时 /s
谢尔宾斯基圆域	2688	127.4
谢尔宾斯基方域	2745	131.1
TSP 自由域	2800	37.5



图 12 抛光试验

Fig.12 Polishing experiment

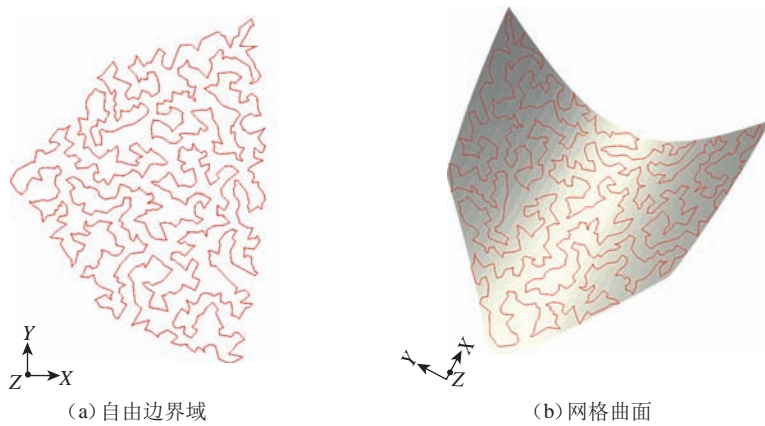


图 13 TSP 抛光路径
Fig. 13 TSP polishing path

表 5 参数及结果统计

Table 5 Statistics of TSP parameter and calculation

类型	平均路径长度 /mm	每次生成点数量 / 预设随机点数量 / 个	每次路径生成时间 /s	粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$
谢尔宾斯基圆域	7795.5	7142	358.7	0.089
谢尔宾斯基方域	8103.3	7172	362.2	0.091
TSP 自由域	7423.9	7200	158.6	0.087

适应选择的边界参数化获得平面形状,将点位换算到重心坐标系并具有 TSP 点的预设数量的功能。根据自适应选择标准,该映射域可以选择正方形、圆形或自由边界域。在已经满足预设的系统精度要求的前提下,确定抛光的初始 TSP 点数。本文提出的方法主要可以解决以下问题:

(1) 解决了 TSP 轨迹规划问题,在保证加工精度的同时,可以有效控制预设的随机点数。

(2) 根据不同的投影平面圆形度数值,调用自适应方法确定选择形状。

(3) 通过比较链接路径长度和时间消耗的结果,如果抛光点的数量相对较大,我们建议使用蚁群算法求解 TSP。

(4) 自由边界域对边界的覆盖较好,但是需要增加判断随机点落在自由边界域的过程,路径计算耗时要大于圆域及方域。

(5) 通过试验结果可知,本文所提出的方法在计算时间及路径长度上均优于谢尔宾斯基路径且精度较高。

参考文献

[1] 李圣怡,陈善勇,戴一帆.自由曲面光学器件检测技术[J].纳米技术与精密工程,2005,3(2):126-136.
LI Shengyi, CHEN Shanyong, DAI Yifan. Inspection of free-form optics[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2005, 3(2): 126-136.
[2] 陈军.自动光学检测设备重复定位精度测试与分析[J].机械设计与制造,2011(1):210-212.
CHEN Jun. Test and analysis of repositioning accuracy for automated optical inspection[J]. Machinery Design & Manufacture, 2011(1): 210-212.
[3] 杨荟琦,李显凌.光学元件表面疵病检测仪的精度建模及预测[J].机械设计与制造,2018(6):98-101.
YANG Huiqi, LI Xianling. Precision

modeling and prediction of the defect detector for optical element surface[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(6): 98-101.

[4] XIONG H W, PAN M, ZHANG X W. Three registration strategies for point clouds in optical inspection of free form shaped plastic parts[C]//Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering, Beijing, 2010.

[5] CAULIER Y. Inspection of complex surfaces by means of structured light patterns[J]. Optics Express, 2010, 18(7): 6642.

[6] MIÑANO J C, BENÍTEZ P, SANTAMARÍA A. Free-form optics for illumination[J]. Optical Review, 2009, 16(2): 99-102.

[7] MOUMEN M, CHAVES-JACOB J, BOUAZIZ M, et al. Optimization of pre-polishing parameters on a 5-axis milling machine[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(1-4): 443-454.

[8] LIN X J, WU D B, SHAN X F, et al. Flexible CNC polishing process and surface integrity of blades[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2018, 32(6): 2735-2746.

[9] 蔺小军,杨艳,吴广,等.面向叶片型面的五轴联动柔性数控砂带抛光技术[J].航空学报,2015,36(6):2074-2082.

LIN Xiaojun, YANG Yan, WU Guang, et al. Flexible polishing technology of five-axis NC abrasive belt for blade surface[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(6): 2074-2082.

[10] 段继豪,史耀耀,张军锋,等.航空发动机叶片柔性抛光技术[J].航空学报,2012,33(3):573-578.

DUAN Jihao, SHI Yaoyao, ZHANG Junfeng, et al. Flexible polishing technology for blade of aviation engine[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(3): 573-578.

[11] TSAI M J, HUANG J F. Efficient automatic polishing process with a new compliant abrasive tool[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 30(9-10): 817-827.

[12] DENG W J, ZHANG X J, WANG X K. Novel method for optimizing polishing tool-path in CCOS based on weighted-iterative algorithm[C]//Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering, Chengdu, 2009.

[13] SABORET L, ALLIEZ P, LÉVY B, et al. CGAL: Triangulated surface mesh

- parameterization[EB/OL]. [2020-11-02]. https://doc.cgal.org/latest/Surface_mesh_parameterization/group_PkgSurfaceMeshParameterizationRef.html.
- [14] SAWHNEY R, CRANE K. Boundary first flattening[J]. ACM Transactions on Graphics, 2017, 37(1): 1-13.
- [15] ZENG W, LUI L M, GU X F, et al. Shape analysis by conformal modules[J]. Methods and Applications of Analysis, 2008, 15(4): 539-556.
- [16] ZHONG Z C, SHUAI L, JIN M, et al. Anisotropic surface meshing with conformal embedding[J]. Graph Models. 2014, 76(5): 468-483.
- [17] ANISIMOV D, BOMMES D, HORMANN K, et al. CGAL: 2D Generalized barycentric coordinates[EB/OL]. [2020-11-02]. https://doc.cgal.org/latest/Barycentric_coordinates_2/index.html.
- [18] ZHAI X Y, CHEN F L. Path planning of a type of porous structures for additive manufacturing[J]. Comput-Aided Design, 2019, 115: 218-230.
- [19] ZHOU B, ZHAO J B, LI L. CNC double spiral tool-path generation based on parametric surface mapping[J]. Comput-Aided Design, 2015, 67-68: 87-106.
- [20] ZHOU B, ZHAO J B, LI L, et al. A smooth double spiral tool path generation and linking method for high-speed machining of multiply-connected pockets[J]. Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, 2016, 46: 48-64.
- [21] 耿振余, 陈治湘, 黄路炜, 等. 计算方法及其军事应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- GENG Zhenyu, CHEN Zhixiang, HUANG Luwei, et al. Soft computing method and its military application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.
- [22] 沈显君. 自适应粒子群优化算法及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- SHEN Xianjun. Adaptive particle swarm optimization algorithm and its application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015.
- [23] COOK W J. In pursuit of the traveling salesman: Mathematics and the limits of computation[M]. Princeton: Princeton University Press, 2012.
- [24] GEORGE K, VIPIN K. Parallel multilevel k-way partitioning scheme for irregular graphs[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 1998, 48(1): 96-129.
- [25] DORIGO M, MANIEZZO V, COLORNI A. The ant system: optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, 1996, 26(1): 1-13.
- [26] GALLISTEL C R, CRAMER A E. Computations on metric maps in mammals: Getting oriented and choosing a multi-destination route[J]. The Journal of Experimental Biology, 1996, 199: 211-217.

通讯作者: 周波, E-mail: zhoubo@sia.cn.

Ultra-Precision Polishing Method for Large Free-Form Surface Optics

ZHOU Bo^{1,2}, LI Lun^{1,2}, TIAN Tongtong^{1,2}, ZHAO Jibin^{1,2}

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China)

[ABSTRACT] This paper aims to improve the precision and efficiency of precision polishing technology for large-scale free-form surface optical devices. By constructing a robotic polishing center as a polishing platform, the travelling salesman problem is solved in a planar mapping domain including unit circle domain, unit square domain and free boundary domain. For the quotient problem, the circularity value is calculated by projection, the mapping area is classified, and the obtained planar trajectory is mapped to the curved surface to obtain the polishing path for the ultra-precision optical device with large-scale freedom. The algorithm in this paper takes into account the calculation efficiency and boundary coverage quality. When the circularity of the projection area exceeds 0.9, the unit circle domain is used as the mapping plane domain. when the circularity value of the projection area is relatively small, between 0.8 and 0.9, the unit square domain is used as the mapping plane domain. When the circularity value is less than 0.8, the free boundary mapping domain is adopted. Simulation and experimental verification of polishing results show that this method can obtain an efficient non-crossing path, effectively reduce the intermediate frequency and high frequency errors caused by a single direction operation, meet the actual polishing processing requirements of changing direction of the polishing path, effectively eliminate the polishing texture, and significantly improve the polishing accuracy and efficiency.

Keywords: Freeform surface; Ultra-precision optics; Free boundary domain; Polishing; Robot;

Travelling salesman problem

(责编 阳光)

引文格式: 张李超, 胡祺, 王森林, 等. 金属增材制造数据处理与工艺规划研究综述 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(3): 22-31.

ZHANG Lichao, HU Qi, WANG Senlin, et al. Review: Data processing and process planning of metal additive manufacturing[J].

Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(3): 22-31.

金属增材制造数据处理与工艺 规划研究综述*

张李超, 胡 祺, 王森林, 张 楠, 史玉升

(华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室, 武汉 430074)

[摘要] 金属增材制造数据处理与工艺规划是金属增材制造软件系统的核心, 涵盖了金属支撑结构设计、模型切片以及路径规划等内容, 决定着最终金属零部件的产品性能。从金属增材制造模型前处理出发, 较为全面地概述了与之相关的多类型支撑设计和新型支撑优化等数据处理内容, 针对金属增材制造数据处理中模型切片这一关键环节, 分别从平面切片、自适应切片和曲面切片等方面进行了研究进展综述, 同时对金属增材制造工艺中的路径规划研究进展进行了概述, 最后对其发展趋势做了初步展望。

关键词: 支撑设计; 模型切片; 路径规划; 工艺规划; 金属增材制造

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.03.022



张李超

副教授, 主要研究领域为 3D 打印及激光先进制造软件。主持国家“863”项目 1 项、国家自然科学基金项目 1 项、04 重大专项子课题 1 项, 主持省部级及横向科研项目 10 余项。获得国家技术发明二等奖 1 项、省部级一等奖 5 项。获得发明专利 10 余项, 论文 SCI 检索 20 余篇。

增材制造(Additive manufacturing, AM)技术, 又称为 3D 打印(Three-dimension printing, 3DP)技术, 是一种以数字模型为基础, 将材料逐层堆积制造出实体的新兴制造技术, 体现了信息技术与先进材料技术、数字制造技术的密切结合, 涵盖了计算机辅助设计(Computer-aided design, CAD)、计算机辅助制造(Computer-aided manufacturing, CAM)、计算机数字控制(Computerized numerical control, CNC)等数字化制造领域, 更是先进制造技术(Advanced manufacturing technology)的重要组成部分。相对于传统材料去除类型的“减材制造”工艺(如: 切、削等)以及直接材料成形的“等材制造”工艺(如: 铸造、锻压等), 增材制造技

术是一种“自下而上”材料累加的制造过程。

金属增材制造是相对于非金属增材制造而言的, 是借助于激光、电子束、电弧等作为能量源, 并按照逐点、逐域、逐层的成形方式, 将金属材料(粉末、丝材、片状等形式)形成致密的金属零部件的多种增材制造工艺的统称^[1], 被誉为一种低成本、短周期、设计制造一体化的变革性制造技术^[2]。金属增材制造在制造形状复杂、材料昂贵的金属零部件和小批量定制生产方面具有独特的优势, 是最有潜力的增材制造技术, 也是先进制造技术的重要发展方向, 在航空航天、汽车行业以及国防等领域具有广阔的应用前景^[3-4]。金属材料由于其高硬度、高强度、高熔点等特性, 决

* 基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1105300); 广东省重点领域研发计划“激光与增材制造”重大专项(2020B090924002)。

定了金属增材制造过程是一个多尺度多物理场耦合问题,包括复杂的传热传质、相变和材料微观组织演化等物理现象^[5],涉及宏观尺度上的零件成形温度场和热致变形力学、介观尺度上熔池热致流体力学、微观尺度上熔池内的晶粒生长动力学^[6],从而有更复杂的工艺条件和更多的技术壁垒要突破,因此发展受到了限制,同时获得了广泛的关注。而金属增材制造数据处理与工艺规划是整个金属增材制造技术的核心,目前尚存在处理效率不够高、工艺规划不够智能和复杂结构难处理等问题,为了满足金属增材制造在航天航空等高端制造领域日益发展的更高要求,面向复杂大尺寸模型的金属增材制造高效数据处理与新型工艺规划方法研究具有重要的理论和实际意义。根据国际标准化组织(ISO)与美国材料与测试协会(American Society for Testing and Materials, ASTM)共同制定的增材制造标准规范,金属增材制造技术大致可以归为两类^[7]:一类是粉末床融合(Power bed fusion, PBF),另一类是定向能量沉积(Directed energy deposition, DED)。根据能量源类型、金属材料类型等因素,上述金属增材制造工艺类型还可进一步细分,如PBF类型可分为激光选区熔融(Selective laser melting, SLM)^[8]、电子束熔化成形(Electron beam melting, EBM)^[9]等工艺,DED类型可分为激光近净成形(Laser engineered net Shaping, LENS)^[10-11]、电子束熔丝沉积(Electron beam deposition, EBD)^[12]以及电弧增材

制造(Wire arc additive manufacture, WAAM)^[13-14]等工艺。需要注意的是,上述两类PBF和DED增材制造工艺属于直接金属增材制造工艺,即通过增材制造软件控制增材制造设备,从而直接将金属材料成形为金属零部件,不需要其他中间环节。与直接金属增材制造工艺相对应,另一类则称为间接金属增材制造工艺,如3DP^[15]工艺常用于金属铸造领域的砂芯成形,超声波增材制造(Ultrasonic additive manufacturing, UAM)^[16]工艺用于金属板材的堆叠成形等。

金属支撑生成方法概述

支撑结构在金属增材制造技术中起着非常关键的作用,一方面需要支撑起零部件模型的悬垂区域,并将成形的金属零部件锚定到基板之上,避免成形过程中由于重力以及外部作用力(如SLM中铺粉棍移动等)而引起金属零部件加工失败;另一方面则是起到热传导作用,将成形过程中的金属零部件积累的热量传导出去,避免由于热应力、残余应力而

引起的翘曲变形、裂纹等。图1^[17]展示了对于具有悬垂区域特征的金属零部件在没有添加支撑结构情况下的成形效果。在金属支撑结构设计中,研究有效的支撑结构生成方法来应对并解决加工制造中的问题是金属增材制造工艺优化中不可或缺的一环。

当前,应用于金属增材制造工艺的支撑结构类型多种多样,按照支撑结构形态,可以将这些支撑结构划分为以下几类^[18]:点状支撑、柱状支撑^[19-20]、块状支撑^[21]、网状支撑^[22-23]、环状支撑、线状支撑等,如图2^[18]所示。

由于这类支撑结构生成方法并不复杂,在当前的增材制造CAD软件(如Magics、3DXpert等)、增材制造CAM软件(如Cura、Kisslicer、Slic3r、IceSL等)以及支撑设计专用软件(如E-Stage等)中都能够提供支持。最近几年,也有相关研究人员探索将点阵结构、晶胞单元等填充类型作为打印模型的支撑结构。Hussein等^[24]提供了将具有较低体积分数的点阵结构创新应用于金属支撑结构的高效设计生成方法,从而降低了金属增

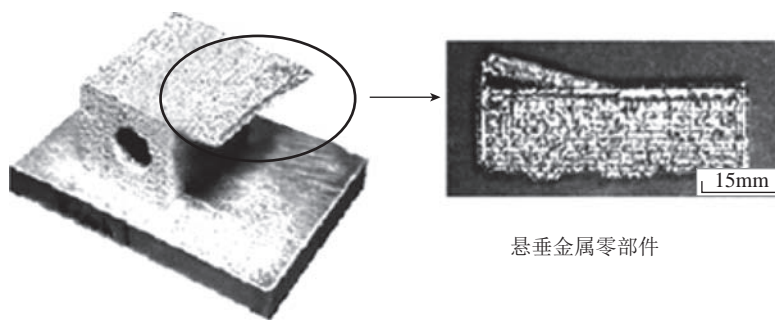


图1 具有悬垂区域特征金属零部件在SLM工艺下的成形结果

Fig.1 Forming results of metal parts with overhanging area under SLM process

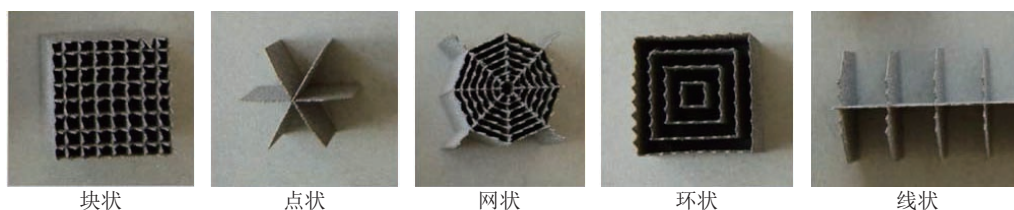


图2 不同类型支撑结构应用于金属增材制造工艺成形效果

Fig.2 Forming effect of different types of support structures applied to metal additive manufacturing processes

材制造的材料消耗,缩短了增材制造的成形加工时间,该支撑结构成形结果如图 3^[24]所示。Strano 等^[25]则提出了一种将 3D 隐式函数用于以晶胞为支撑结构的设计生成方法,并应用于金属增材制造工艺。Lu 等^[26]提出了一种内部结构掏空优化方法,采用非规则的蜂窝状结构作为内部支撑结构来提高模型实体的外部抗冲击压力。Vanek 等^[27]提出了一种基于桁架单元生成的桥形支撑结构,从而确保所生成的支撑结构具有更少的材料消耗以及较为稳定的支撑效果,该桥形支撑结构可以通过 IceSL 软件获取。Zhang 等^[28]提出了一种基于局部质心的树形支撑层次化生成方法,确保了树形支撑结构具有较高的生成效率、较优的支撑结构形态以及较为稳定的支撑效果。该树形支撑结构可以通过华中科技大学快速制造中心研发的增材制造模型处理软件 HUST 3D Print Maser 获取,此外在 Meshmixer 软件中也能提供树

形支撑结构的生成。

在某些金属增材制造应用中,对于具有不容易介入特征(如孔洞、管道、腔体等)的金属零部件而言,添加金属支撑结构并不是最优选择,一方面新添加的支撑结构增加了后处理去除支撑的工作量,另一方面去除支撑后的金属零部件往往具有粗糙的表面特征,从而降低了金属零部件的性能,因此研究无支撑的金属增材制造方法是解决上述问题的潜在解决方案。VELO 公司研发了一种无需添加支撑结构的金属增材制造软件 VELO3D^[29],通过模拟仿真、闭环熔池能量控制以及无接触刮刀设计等方式,在金属增材制造工艺应用中能够实现具有悬垂特征以及不容易介入特征的金屬零部件直接成形制造,而不需要添加支撑结构。EOS 公司对金属增材制造工艺中无支撑结构优化也有较深的研究,提出了一种无接触的支撑包套设计,如图 4^[30]所示。

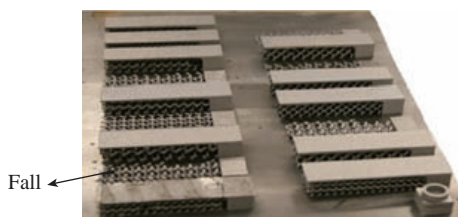


图 3 点阵支撑结构成形结果

Fig.3 Forming result of lattice support structure

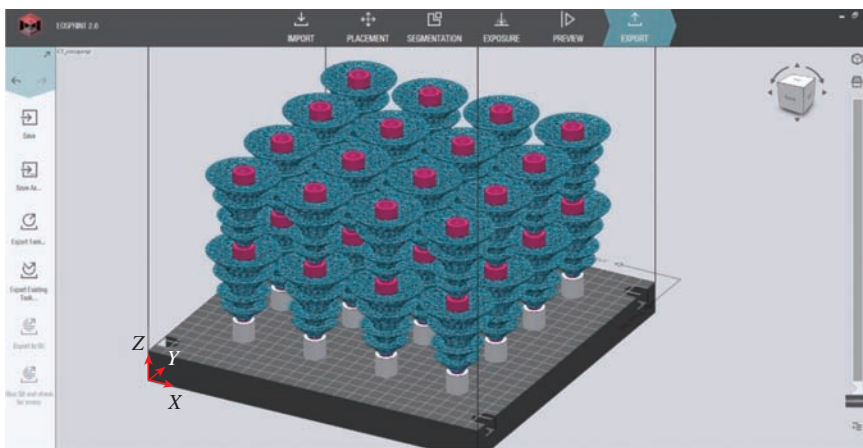


图 4 EOS 公司设计开发的一种无支撑堆叠包套设计结构

Fig.4 An unsupported stacking package structure designed and developed by EOS Company

总的来说,支撑生成技术是目前金属增材制造数据处理中的一个至关重要的环节,直接关系到增材制造数据处理效率、模型成形加工效率、成形实体的质量以及加工制造的成本。随着金属增材制造技术在航天航空等领域的深入应用,需要解决如何高效生成金属支撑结构以及支撑结构优化设计的问题。目前,各种类型的支撑提供软件往往是闭源的,虽然基本解决了支撑结构生成的问题,但面向复杂大尺寸模型的支撑高效生成与结构优化仍有待解决。另外,无支撑设计作为一种新的结构优化思路也是当前支撑设计生成领域的研究热点。

模型切片方法概述

模型切片是增材制造 CAM 软件中的关键环节,因此多种金属增材制造软件都能提供相应的切片模块支持。通过模型切片处理,可实现将金属零部件模型进行离散。目前应用最为广泛的模型切片方法是基于平面的离散处理,典型的是“平面切片方法”和“自适应切片方法”。对于某些特殊应用的增材制造工艺,又逐渐衍生出了非平面的模型切片方法,即“模型曲面切片方法”。

1 平面切片方法

由于 STL 文件一直作为增材制造技术的事实上的标准文件格式,因而当前针对模型切片方法的研究几乎都是基于 STL 文件展开的。如 Zhang 等^[31]根据切平面和三角面片的空间位置关系构建面表数据结构,然后求取交线段,得到轮廓切片数据;马良等^[32]根据建立的三角面片之间的局部拓扑关系,实现了基于 STL 文件动态拓扑重建的快速切片算法。王春香等^[33]提出了对模型三次排序的方法,实现了在每层求交计算仅仅与当前层的三角面片进行处理,并运用 Trioutline 函数直接获取交线与交点,从而缩短了模型切片处理时间,节约了内存空间,提高了三

维模型切片处理效率。此外,针对含有裂缝等错误信息的 STL 模型切片问题, Huang 等^[34]提出了一种容错模型切片方法,通过在模型拓扑重构阶段对孔洞建立相应的数据结构模型,能够直接从含有空洞的 STL 模型中生成正确的切片结果,提高了模型切片方法的鲁棒性。

对于含有复杂结构特征(如多孔晶格结构等)的三维模型,当通过三维建模软件创建后,往往需要再次转化为 STL 文件格式,极易造成相应的 STL 模型文件的数据膨胀问题,降低增材制造模型切片的数据处理效率。为了解决上述问题,其中一类研究人员致力于研究更加高效的模型切片方法,如 Lefebvre 等^[35]提出了一种基于 GPU 来加速 CSG 模型的切片方法。马旭龙等^[36]提出了一种基于 OpenMP 架构的数据并行的模型分层方法,通过把 STL 数据分成多组,并在每组内进行拓扑关系重

建,然后利用多核 CPU 的并行计算优势来加速模型切片处理过程。此后又提出了一种基于流水线模式的并行切片方法,如图 5^[37]所示,证明了基于流水线的并行切片方法优于数据并行计算方法。Zhang 等^[38]提出了一种基于区域的网格模型切片方法,通过降低每个子区域的三角面片的数据规模,提高基于区域分割的切片轮廓的处理效率,如图 6^[38]所示,由于每个子区域的三角面片切片处理互不相关,因此该方法非常适合并行处理。

另一类研究人员则致力于研究基于三维造型原始数据格式的模型切片方法,从而避开 STL 模型复杂耗时的转化环节,提高模型切片的效率以及切片精度。如 Starly 等^[39]等采用光线投射的方式直接获得 STEP 模型的包围盒交叉点,然后通过求解 NURBS 方程得到切平面与曲线的交点,从而获得精确的切片轮廓数

据。Sikder 等^[40]研究了一种直接针对 IGES 模型数据进行切片的方法,提出了适用于非均匀有理 B 样条(NURBS)的快速切片技术,该技术采用误差函数定义总轮廓误差,通过使误差函数最小化的方式来获取最佳的切片数据。最近,来自美国西雅图的软件开发商 Dyndrite Corporation 研发了基于 GPU 的原生几何建模引擎 Dyndrite Kernel,以及基于该内核引擎的增材制造软件 Dyndrite Additive Toolkit,通过对原生建模数据(如样条曲线等)的直接支持,可以直接处理 CAD 建模文件,并通过维护原始建模数据来驱动整个增材制造的模型数据处理流程,从而简化传统的直接基于 STL 文件数据处理流程,同时提高了基于 STL 模型数据处理的精准度和输出质量。

2 自适应切片方法

由于常规平面切片方法存在固有的“台阶效应”缺陷,从而降低了

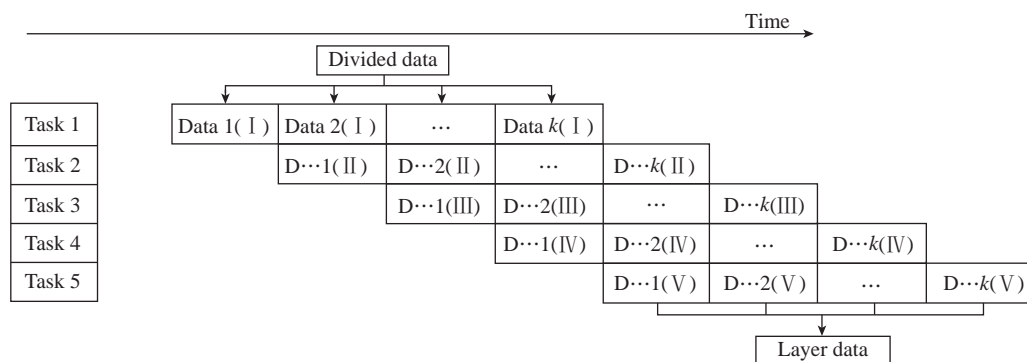


图 5 流水线并行切片算法

Fig.5 Pipeline parallel slicing algorithm

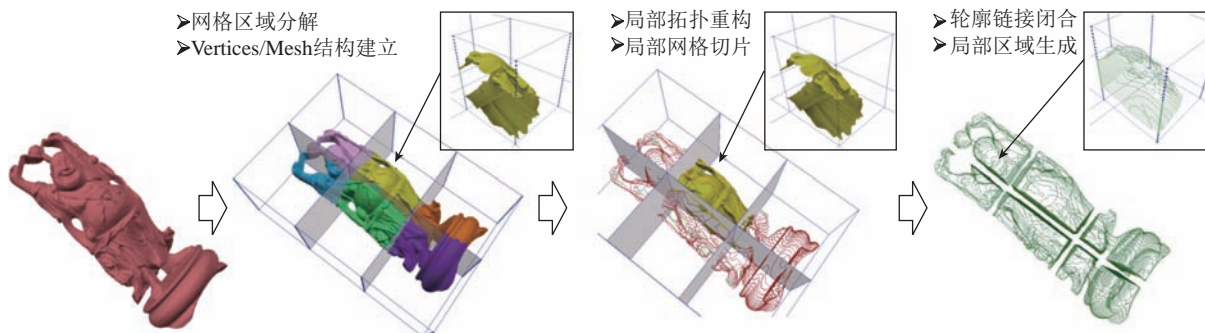


图 6 基于区域的快速分割切片方法

Fig.6 Region-based fast segmentation and slicing method

金属增材制造成形零部件的表面光洁度,如图7(a)所示。尽管可通过减少分层厚度的方式来减少常规平面切片方法的“台阶效应”,然而过于精细的分层厚度往往导致三维模型的成形效率降低。由此,自适应切片方法被提出,以平衡解决常规平面切片方法中的成形效率与成形质量相互制约的问题。基于自适应分层方法中的自适应方式,可将其划分为以下两类:一类是根据三维模型的表面细节特征采用自适应分层厚度的方式实现^[41],如图7(b)所示。林洁琼等^[42]依据三维模型成形过程中的正、负偏差原理实现了一种在用户允许最大弦高范围内设定切片厚度从而实现自适应切片的方法。Zhao等^[43]通过把相邻层投影到平面上比较两者的面积确定一个偏差比的参数,完成了切片厚度的自适应调整。另一类是根据三维模型的几何特征,采用基于区域的变层厚切片方法实现,如张李超等^[44]提出了一种用于增材制造技术的自适应分层方法,通过设置主层厚和次层厚的方法,在模型切片处理中既保留了基于区域的模型切片特征,又保留了基于层厚的自适应模型切片特征,极大提高了增材制造的效率,如图7(c)所示。

3 曲面切片方法

为突破传统金属增材制造必须基于平面分层制造的局限,一些金属增材制造工艺需要借助于曲面切片方法以实现曲面成形制造,如WAAM工艺、LENS工艺等。一方

面可以借助金属材料形成过程中的表面张力实现无支撑加工制造,另一方面可以增强成形的金属零部件性能。如Alsharhan等^[45]提出了一种基于非平面增材制造过程的挤出成形方法,通过从输入的曲面方程模型中逐层获取曲面成形路径数据,从而实现基于曲面的增材制造成形制造。Singamneni等^[46]提出一种曲面分层方法,将成形丝材沿着曲线路径而不

是平面路径堆积,利用自由曲面的数学表达,通过将每一点沿曲面法线偏移一定的切片厚度,从而得到曲面层切片,如图8^[46]所示。Huang等^[47]采用基于零件表面点云数据的矢量叉乘方法,将自适应分层和曲面分层结合在一起,同时考虑了针对自适应分层的面片角度和残余高度,从而可以直接获取三维模型的曲面分层结果,如图9所示。

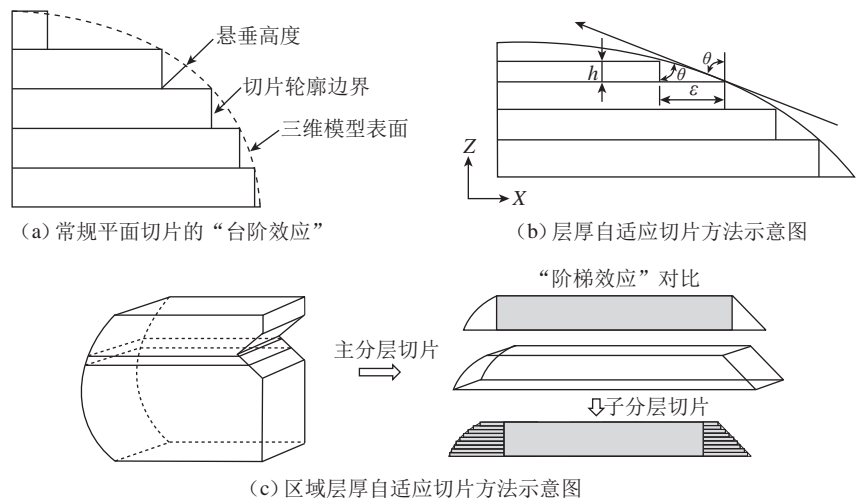


图7 自适应切片方法示意图

Fig.7 Schematic diagrams of adaptive slicing methods

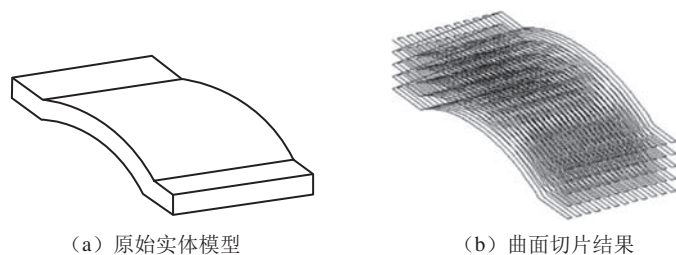


图8 适用于金属电弧增材制造的曲面切片及路径规划实例

Fig.8 Example of curved surface slicing and path planning suitable for metal arc additive manufacturing

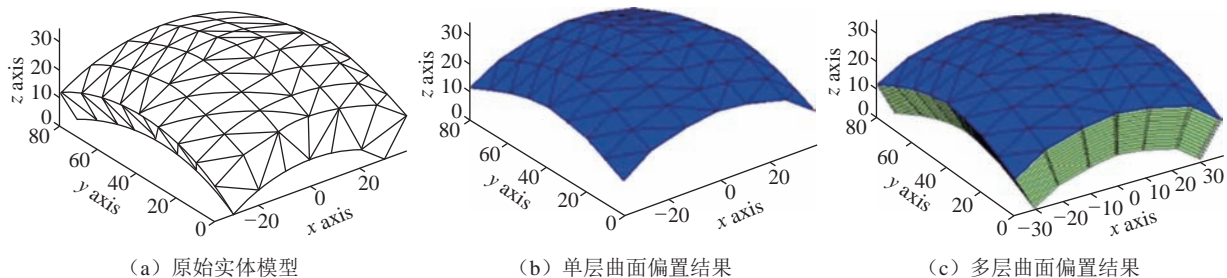


图9 曲面自适应切片方法

Fig.9 Surface adaptive slicing method

模型切片处理流程作为整个金属增材制造“数字模型降维离散”过程的第一阶段,主要解决模型的离散分层问题,获得轮廓数据,并作为后续路径规划模块的输入数据。传统的模型平面切片研究已经较为成熟,目前需要解决的问题集中在面向复杂大尺寸模型的高效切片、缓解“台阶效应”的自适应智能切片和突破平面限制的曲面切片研究上,以满足金属增材制造对数据处理效率和成形质量越来越高的需求。

路径规划方法概述

由于路径规划策略与增材制造成形过程密切相关,通过路径规划环节来调控金属增材制造的成形质量是金属增材制造工艺优化的另一个研究内容。为了提高成形金属零部件的性能,减少热应力以及残余应力对金属零部件的影响,以及提高增材制造加工效率,在金属增材制造CAM软件中需要研究更加合理的路径规划方法。

传统路径规划主要基于模型切片处理之后,在获取的切片轮廓数据基础上逐层进行路径规划,主要有光栅扫描和螺旋扫描两类。其中光栅式扫描可以归纳为两种,图10(a)中,相邻扫描线的起始点在不同的两端,虽然扫描线之间也是通过空跳连接但是这样可以减少空跳的距离;图10(b)中,扫描线的起点始终在同一端,相邻扫描线之间是通过空跳连接,所以需要跳转较大的距离。连贯的光栅扫描在遇到孔洞的截面时,需要关闭激光,因而存在空跳,影响加工效率。在此基础上出现了一种改进的光栅分区扫描方式,图10(c)中,在扫描过程中遇到孔洞时,会存在大量的空跳,图中虚线为空跳;而图10(d)中扫描线避开了孔洞,通过对截面进行分区扫描,每一个分区内部除减少空跳外,具有和连贯扫描相同的其他优缺点。

为了提高金属零部件的表面精度,在金属增材制造工艺中应用了螺旋式扫描路径规划方法,相应的扫描线由模型切片轮廓环的一系列等距偏置线构成,如图10(e)所示。如Yang等^[48]提出了基于模型单层轮廓的等距偏置路径规划,切片轮廓向内均匀偏置形成填充路径,但是这种方法在处理复杂图形时效率不高且容易发生偏置路径重叠,歧义情况较多且不易处理。由于轮廓线在偏置过程中是逐渐向内等距收缩,对于不规则的图形可能会出现图10(f)的自交现象。吕鹏辉^[49]提出了一种基于Voronoi图的多边形路径填充算法,能够直接获取三维模型切片轮廓的渐进填充扫描线。

在SLM等金属增材制造应用中,最典型的是采用分块扫描路径规划方法,通过将模型的切片轮廓区域进一步划分为若干的成形区域

子块,然后采用光栅扫描等方式分别来填充扫描每个子块,通过这样的路径规划方法,能够有效降低金属增材制造中成形零部件的热应力以及残余应力,提高成形金属零部件的加工质量。图11为华中科技大学快速制造中心研发的HUST 3D Print Master软件提供的实时路径规划方法执行结果,能够根据不同子块的能场分布动态调控相应的激光扫描功率,如图12所示,从而降低成形零部件表面的热应力以及残余应力,提高成形质量。

随着金属增材制造技术对成形零部件的成形质量以及成形效率的要求越来越高,研究人员提出了各种各样的新型路径规划方法。如针对WAAM工艺,Ding等^[50]提出了一种减少内部空隙的中轴转换(MAT)路径规划方法,如图13(a)^[50]所示,随后又提出了一种自适应实时可变

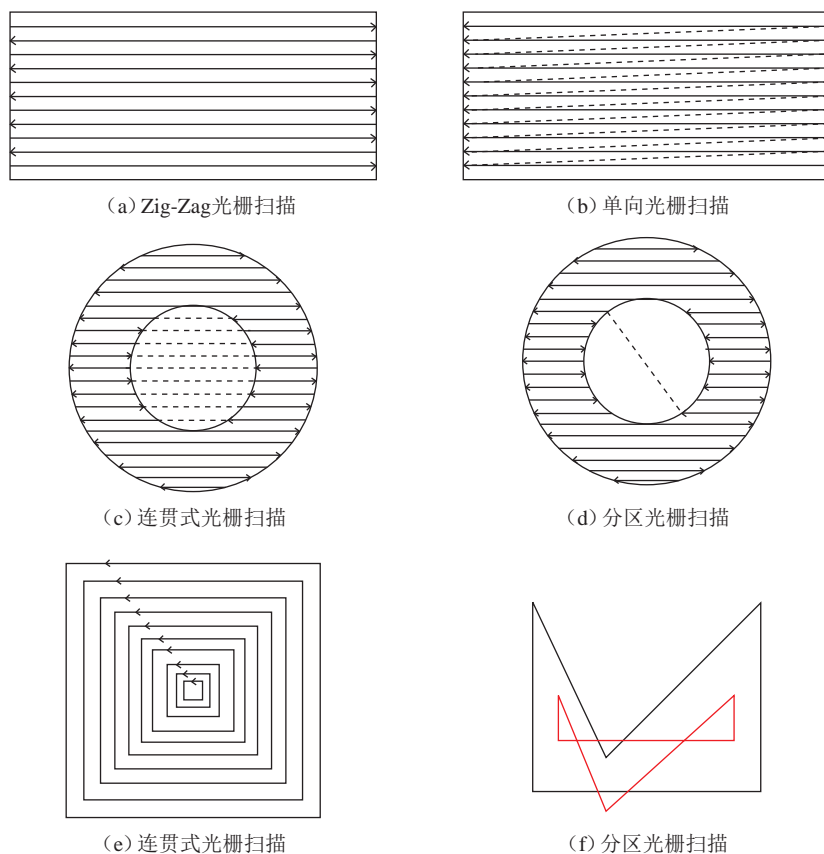


图10 常规路径规划方法示意图

Fig.10 Schematic diagrams of conventional path planning methods

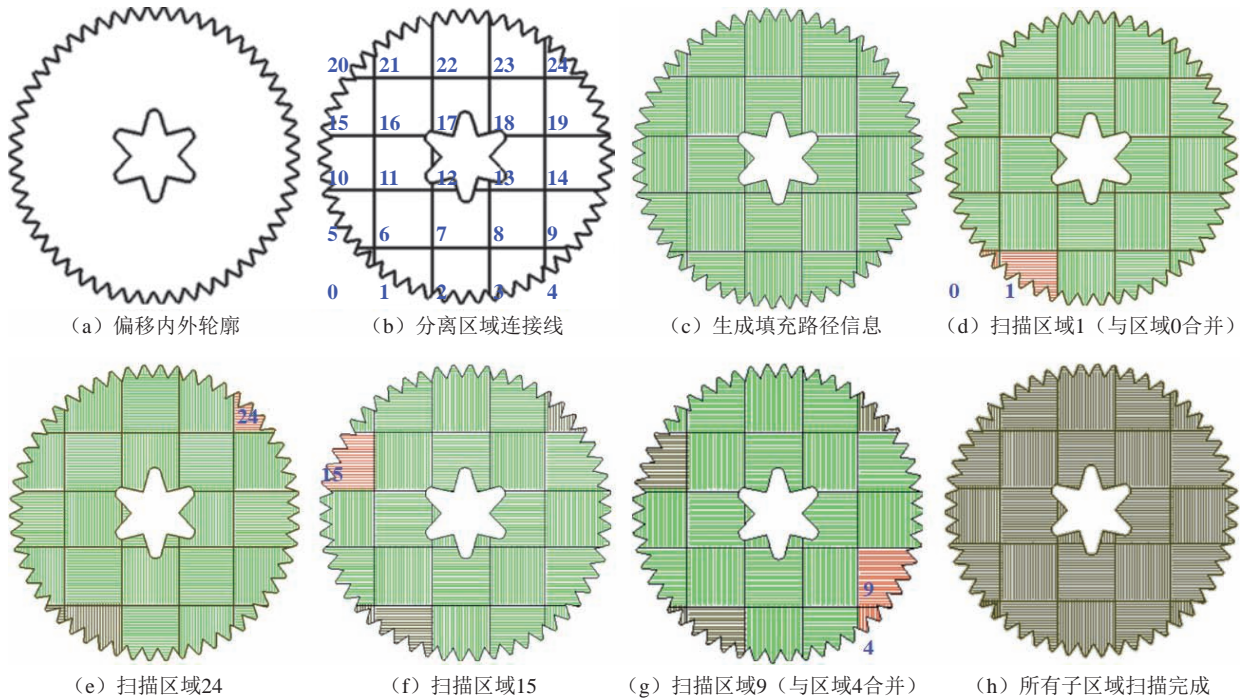


图 11 HUST 3D Print Master 软件中实时路径规划方法

Fig.11 Real-time path planning method in HUST 3D Print Master software

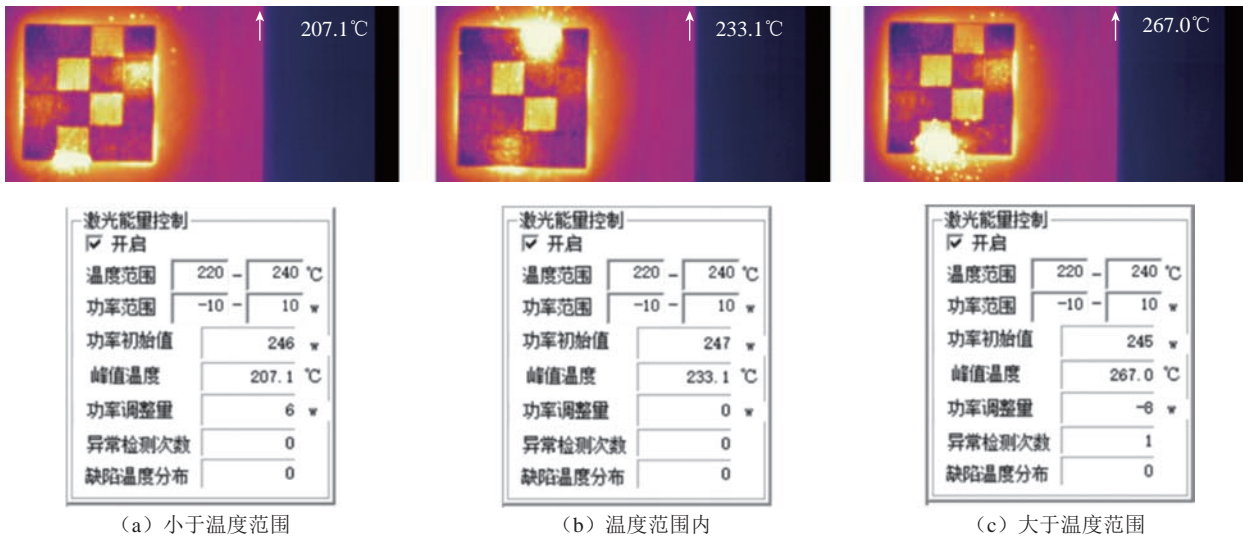


图 12 HUST 3D Print Master 软件中基于能场的路径规划方法

Fig.12 Path planning method based on energy field in HUST 3D Print Master software

宽路径规划方法,如图 13 (b)^[51] 所示,来进一步提高金属零部件的成形精度和效率。李子健^[52]提出了一种固定可变宽度路径规划方法,通过在不同区域设定不同的沉积宽度,达到更高的填充率。曲面路径规划是近年来发展起来的较为新颖的路径规划方法。Dai 等^[53]研究了一种多轴

机器人增材制造系统,基于体素模型思想,在得到的曲面层上运用费马螺旋曲线进行路径规划,从而达到无支撑的直接增材加工制造。

路径规划处理流程作为整个金属增材制造“数字模型降维离散”过程的第 2 阶段,主要在所获取的切片轮廓数据内,按照不同的金属增材制

造工艺成形原理,生成相应的加工路径,为后续控制制造过程提供加工路径数据。常规的路径规划方法研究相对饱和,当前研究热点主要是针对加工效率、金属件精度及两者兼顾的新型路径规划方法,如何高效、健壮地生成金属增材制造加工路径并优化以提高成形质量和效率仍是亟

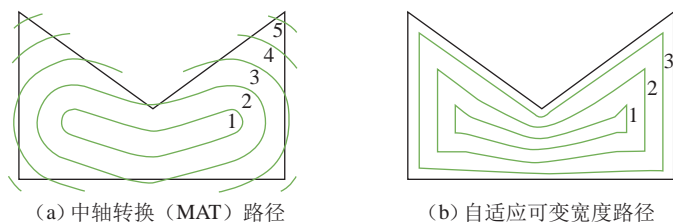


图 13 WAAM 工艺中新型路径规划方法
Fig.13 New path planning method in WAAM process

需解决的问题。

发展趋势与展望

金属增材制造技术通过高能集中热束(激光、电子束或电弧等)逐点扫描-逐线搭接-逐层熔化凝固堆积材料,可实现三维零件制造的“近净”成形,在航空、航天、核电和医疗等领域有巨大的应用空间和发展前景。金属增材制造数据处理与工艺规划是整个金属增材制造技术的核心,涵盖了金属零部件成形从模型前处理到制造加工全流程,因此针对数据处理流程与工艺规划技术的优化是突破金属增材制造瓶颈、满足其在航空航天等高端制造领域高精要求的有效技术手段。

随着材料工艺的逐步优化,在线监测的普及和智能控制的发展,在金属增材制造技术的研究与发展中,以下方向值得关注:

(1) 研发面向金属复杂点阵网格模型的设计及拓扑优化方法,以满足金属增材制造技术的发展需求,匹配高端制造业对工业零件在多材料、多梯度、多结构层面上的要求;

(2) 研发金属增材制造无支撑工艺优化和自支撑模型设计以进一步降低制造成本,并提高制件性能,满足航空航天等领域的高层次需求;

(3) 研发面向金属复杂大型构件的快速切片方法以满足金属增材制造技术的发展需求,随形曲面切片和多核并行加速是未来的发展趋势;

(4) 研究基于模型特征、零件性能和工艺特性的金属增材制造智能

路径规划方法,缩短加工时间,提升制件质量,以达到金属增材制造工艺规划对高效性、健壮性的要求;

(5) 研发金属增材制造工艺质量监控软件,进一步提高金属增材制造工艺的鲁棒性,从而构建全封闭、数字化的金属增材制造数字孪生系统,是金属增材制造数据处理与工艺规划软件系统未来发展的必然趋势。

参考文献

- [1] GUO S Q, LIU W, HUANG S, et al. Development of laser additive manufacturing technology for metals[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(3): 56-62.
- [2] 王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造:若干材料基础问题[J]. 航空学报, 2014, 35(10): 2690-2698.
- [3] WANG Huaming. Materials' fundamental issues of laser additive manufacturing for high-performance large metallic components[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(10): 2690-2698.
- [4] DEBROY T, WEI H L, ZUBACK J S, et al. Additive manufacturing of metallic components-Process, structure and properties[J]. Progress in Materials Science, 2018, 92: 112-224.
- [5] 林鑫, 黄卫东. 应用于航空领域的金属高性能增材制造技术[J]. 中国材料进展, 2015, 34(9): 684-688, 658.
- [6] LIN Xin, HUANG Weidong. High performance metal additive manufacturing technology applied in aviation field[J]. Materials China, 2015, 34(9): 684-688, 658.
- [7] 陈嘉伟, 熊飞宇, 黄辰阳, 等. 金属增材制造数值模拟[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50(9): 104-128.
- [8] CHEN Jiawei, XIONG Feiyu, HUANG Chenyang, et al. Numerical simulation on metallic additive manufacturing[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2020, 50(9): 104-128.
- [9] 顾冬冬, 戴冬华, 夏木建, 等. 金属构件选区激光熔化增材制造控形与控性的跨尺度物理学机制[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(5): 645-652.
- [10] GU Dongdong, DAI Donghua, XIA Mujian, et al. Cross-scale physical mechanisms for structure and performance control of metal components processed by selective laser melting additive manufacturing[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(5): 645-652.
- [11] OLIVEIRA J P, SANTOS T G, MIRANDA R M. Revisiting fundamental welding concepts to improve additive manufacturing: From theory to practice[J]. Progress in Materials Science, 2020, 107: 100590.
- [12] KAMATH C, EL-DASHER B, GALLEGOS G F, et al. Density of additively-manufactured, 316L SS parts using laser powder-bed fusion at Powers up to 400 W[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 74(1-4): 65-78.
- [13] KHAIRALLAH S A, ANDERSON A T, RUBENCHIK A, et al. Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones[J]. Acta Materialia, 2016, 108: 36-45.
- [14] MALUKHIN K, EHMANN K. Material characterization of NiTi based memory alloys fabricated by the laser direct metal deposition process[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2006, 128(3): 691-696.
- [15] RIZA S H, MASOOD S H, WEN C E, et al. Dynamic behaviour of high strength steel parts developed through laser assisted direct metal deposition[J]. Materials & Design, 2014, 64: 650-659.
- [16] SAFDAR A, HE H Z, WEI L Y, et al. Effect of process parameters settings and thickness on surface roughness of EBM produced Ti-6Al-4V[J]. Rapid Prototyping Journal, 2012, 18(5): 401-408.
- [17] DING D H, PAN Z X, CUIURI D, et al. Wire-feed additive manufacturing of metal components: Technologies, developments and

- future interests[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(1-4): 465-481.
- [14] DING J, COLEGROVE P, MEHNEN J, et al. Thermo-mechanical analysis of wire and arc additive layer manufacturing process on large multi-layer parts[J]. Computational Materials Science, 2011, 50(12): 3315-3322.
- [15] METEYER S, XU X, PERRY N, et al. Energy and material flow analysis of binder-jetting additive manufacturing processes[J]. Procedia CIRP, 2014, 15: 19-25.
- [16] FRAZIER W E. Metal additive manufacturing: A review[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(6): 1917-1928.
- [17] OSAKADA K, SHIOMI M. Flexible manufacturing of metallic products by selective laser melting of powder[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(11): 1188-1193.
- [18] JÄRVINEN J P, MATILAINEN V, LI X Y, et al. Characterization of effect of support structures in laser additive manufacturing of stainless steel[J]. Physics Procedia, 2014, 56: 72-81.
- [19] 陈岩, 王士玮, 杨周旺, 等. FDM 三维打印的支撑结构的设计算法[J]. 中国科学: 信息科学, 2015, 45(2): 259-269.
- CHEN Yan, WANG Shiwei, YANG Zhouwang, et al. Construction of support structure for FDM 3D printers[J]. Scientia Sinica Informationis, 2015, 45(2): 259-269.
- [20] 董学珍, 莫健华, 张李超. 光固化快速成形中柱形支撑生成算法的研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2004, 32(8): 16-18.
- DONG Xuezheng, MO Jianhua, ZHANG Lichao. The algorithm of pillar support generation for stereolithography[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2004, 32(8): 16-18.
- [21] LEE J, LEE K. Block-based inner support structure generation algorithm for 3D printing using fused deposition modeling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(5-8): 2151-2163.
- [22] JIN Y, HE Y, FU J Z. Support generation for additive manufacturing based on sliced data[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80(9-12): 2041-2052.
- [23] QIAN B, ZHANG L C, SHI Y S, et al. Support fast generation algorithm based on discrete-marking in stereolithography rapid prototyping[J]. Rapid Prototyping Journal, 2011, 17(6): 451-457.
- [24] HUSSEIN A, HAO L, YAN C Z, et al. Advanced lattice support structures for metal additive manufacturing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(7): 1019-1026.
- [25] STRANO G, HAO L, EVERSON R M, et al. A new approach to the design and optimization of support structures in additive manufacturing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66(9-12): 1247-1254.
- [26] LU L, SHARF A, ZHAO H S, et al. Build-to-last: Strength to weight 3D printed objects[J]. ACM Transactions on Graphics, 2014, 33(4): 97.
- [27] VANEK J, GALICIA J A G, BENES B. Clever support: Efficient support structure generation for digital fabrication[J]. Computer Graphics Forum, 2014, 33(5): 117-125.
- [28] ZHANG N, ZHANG L C, CHEN Y, et al. Local barycenter based efficient tree-support generation for 3D printing[J]. Computer-Aided Design, 2019, 115: 277-292.
- [29] VELO. SupportFree™ Metal Additive Manufacturing[EB/OL]. [2020-09-20]. <https://www.velo3d.com/applications/supportfree/>.
- [30] WOHLFART M. Building without support? Possibilities and limitations[EB/OL]. [2020-09-20]. <https://www.linkedin.com/pulse/building-without-support-possibilities-limitations-michael-wohlfart>.
- [31] ZHANG Z Y, JOSHI S. An improved slicing algorithm with efficient contour construction using STL files[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80(5-8): 1347-1362.
- [32] 马良, 黄卫东. 基于 STL 数据模型动态拓扑重构的快速切片算法[J]. 中国激光, 2008, 35(10): 1623-1626.
- MA Liang, HUANG Weidong. Rapid slicing algorithm based on dynamic topological reconstruction for STL model[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(10): 1623-1626.
- [33] 王春香, 郝志博. 快速成型技术 STL 模型等厚分层算法研究[J]. 机械设计与制造, 2014(4): 133-136.
- WANG Chunxiang, HAO Zhibo. The uniform thickness hierarchical algorithm of rapid prototyping technology STL model[J]. Machinery Design & Manufacture, 2014(4): 133-136.
- [34] HUANG S H, ZHANG L C, HAN M. An effective error-tolerance slicing algorithm for STL files[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2002, 20(5): 363-367.
- [35] LEFEBVRE S. IceSL: A GPU accelerated CSG modeler and slicer[C]//Proceedings of AEFA' 13, 18th European Forum on Additive Manufacturing. Paris, 2013.
- [36] 马旭龙, 林峰. 基于 OpenMP 的快速并行分层算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(4): 747-753.
- MA Xulong, LIN Feng. A parallel slicing algorithm based on OpenMP for additive manufacturing[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2015, 27(4): 747-753.
- [37] MA X L, LIN F, YAO B. Fast parallel algorithm for slicing STL based on pipeline[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(3): 549-555.
- [38] ZHANG N, ZHANG L C, WANG S L, et al. Region-based layered infill area generation of STL models for additive manufacturing[J]. Rapid Prototyping Journal, 2020, 27(1): 99-111.
- [39] STARLY B, LAU A, SUN W, et al. Direct slicing of STEP based NURBS models for layered manufacturing[J]. Computer-Aided Design, 2005, 37(4): 387-397.
- [40] SIKDER S, BARARIA, KISHAWY H A. Global adaptive slicing of NURBS based sculptured surface for minimum texture error in rapid prototyping[J]. Rapid Prototyping Journal, 2015, 21(6): 649-661.
- [41] SUN S H, CHIANG H W, LEE M I. Adaptive direct slicing of a commercial CAD model for use in rapid prototyping[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 34(7-8): 689-701.
- [42] 林洁琼, 王一博, 靖贤, 等. 增材制造中 STL 模型的自适应分层算法研究[J]. 机械设计与制造, 2018(2): 51-53, 57.
- LIN Jieqiong, WANG Yibo, JING Xian, et al. Research on adaptive slicing algorithm

of STL model in additive manufacturing[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(2): 51–53, 57.

[43] ZHAO Z W, LUC Z. Adaptive direct slicing of the solid model for rapid prototyping[J]. International Journal of Production Research, 2000, 38(1): 69–83.

[44] 张李超, 张楠, 何森, 等. 一种自适应分层的增材制造方法: ZL 201710766233.6[P]. 2019–12–13.

ZHANG Lichao, ZHANG Nan, HE Sen, et al. Adaptive layering type additive manufacturing method: ZL 201710766233.6[P]. 2019–12–13.

[45] ALSHARHAN A T, CENTEA T, GUPTA S K. Enhancing mechanical properties of thin-walled structures using non-planar extrusion based additive manufacturing[C]// Proceedings of ASME 2017 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference Collocated With the JSME/ASME 2017 6th International Conference on Materials and Processing, Los Angeles, California, USA. 2017.

[46] SINGAMNENI S, ROYCHOUDHURY A, DIEGEL O, et al. Modeling and evaluation of curved layer fused deposition[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(1): 27–35.

[47] HUANG B, SINGAMNENI S B. Curved Layer Adaptive Slicing (CLAS) for fused deposition modelling[J]. Rapid Prototyping Journal, 2015, 21(4): 354–367.

[48] YANG Y, LOH H T, FUH J Y H, et al. Equidistant path generation for improving scanning efficiency in layered manufacturing[J]. Rapid Prototyping Journal, 2002, 8(1): 30–37.

[49] 吕鹏辉. 填充路径规划与支撑算法在 3D 打印中的研究与设计 [D]. 太原: 太原理工大学, 2018.

Lǚ Penghui. Research and design of filling path planning and supporting algorithm in 3D printing[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018.

[50] DING D H, PAN Z X, CUIURI D, et al. Bead modelling and implementation of adaptive MAT path in wire and arc additive

manufacturing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 39: 32–42.

[51] DING D H, PAN Z X, CUIURI D, et al. Adaptive path planning for wire-feed additive manufacturing using medial axis transformation[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 133: 942–952.

[52] 李子健. SLA 变光斑扫描方法研究与实现 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.

LI Zijian. Research and realization of SLA variable spot scanning method[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.

[53] DAI C K, WANG C C L, WU C M, et al. Support-free volume printing by multi-axis motion[J]. ACM Transactions on Graphics, 2018, 37(4): 134.

通讯作者: 张楠, 博士研究生, 研究方向为智能制造 CAD、CAM 软件系统以及增材制造几何模型处理, E-mail: zhangnan@hust.edu.cn.

Review: Data Processing and Process Planning of Metal Additive Manufacturing

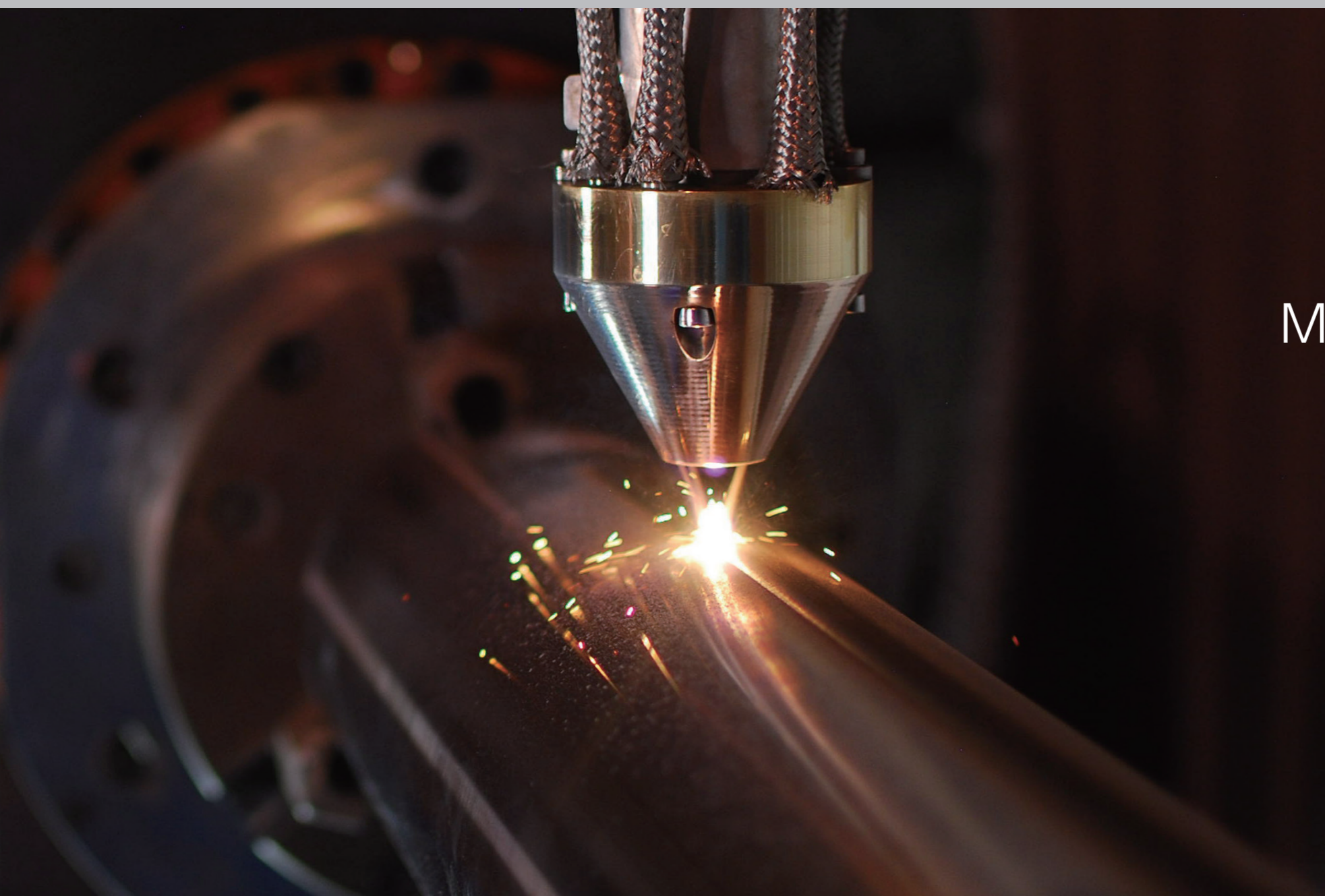
ZHANG Lichao, HU Qi, WANG Senlin, ZHANG Nan, SHI Yusheng

(State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

[ABSTRACT] Metal additive manufacturing data processing and process planning are the core of metal additive manufacturing software system, covering metal support design, model slicing and path planning, etc. and determine the product performance of the final metal parts. Starting from the model pre-processing of the metal additive manufacturing, a more comprehensive overview of the related data processing content such as multi-type support design and novel support optimization is summarized. With regard to the model slicing, a critical part of the data processing in metal additive manufacturing, the research progress is reviewed from the aspects of normal slicing, adaptive slicing and surface slicing. The path planning in metal additive manufacturing process is also reviewed. Finally, the development trend of data processing and process planning in metal AM software is preliminary proposed.

Keywords: Support design; Model slicing; Path planning; Process planning; Metal additive manufacturing

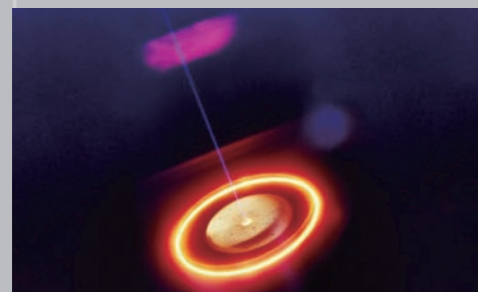
(责编 雷松)



金属增材制造

Metal Additive Manufacturing

近年来,我国增材制造技术发展水平显著提升,其中金属增材制造装备、材料、工艺、软件等朝着国产化、产品化、专业化方向不断推进,特别是在航空航天重大需求的牵引下,高性能大尺寸金属构件激光增材制造的工艺研发及应用水平已走在了国际前列。



引文格式: 潘新, 张英伟, 刘艳梅, 等. 金属增材制造技术应用于军用飞机维修保障浅析[J]. 航空制造技术, 2021, 64(3): 34-43.

PAN Xin, ZHANG Yingwei, LIU Yanmei, et al. Applications of metal additive manufacturing technology in maintenance and support for military aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(3): 34-43.

金属增材制造技术应用于军用飞机维修保障浅析*

潘新, 张英伟, 刘艳梅, 毛剑锋, 王静, 殷俊

(航空工业沈阳飞机工业(集团)有限公司, 沈阳 110850)

[摘要] 金属增材制造技术的发展为军用飞机维修保障提供了一条数字化、定制化、高性能、短周期的技术新途径, 可提升军用飞机维修保障的技术水平和能力。本文综述了军用飞机维修保障的国内外现状, 指出了金属增材制造技术的应用优势, 介绍了军用飞机零件的典型损伤形式、不同增材制造工艺的适用性及修复工艺选取方案, 分析了所涉及的逆向建模、结构优化、智能机器人等关键技术, 详述了目前存在的成熟度与可靠性不高、修复原则不明确、标准规范不统一等主要问题及解决措施, 指出了增材制造技术在军用飞机维修保障领域未来的发展方向和趋势, 并给出了具体的应用建议。

关键词: 军用飞机; 金属增材制造; 维修保障; 结构优化; 激光熔化沉积; 冷喷涂

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.03.034



潘新

研究员级高级工程师, 主要从事航空智能制造及装配研究, 航空工业特级技术专家, 辽宁省优秀专家, 辽宁省“百千万人才工程”百层次人选, 沈阳市领军人才, 先后获得专利 8 项, 荣获各级科技成果 12 项, 主持国家及国防重大科研项目 8 项。

对于民用飞机而言, 其维修与保障的首要目标是实现经济价值的最大化, 而军用飞机维修与保障的首要目标是实现作战能力的最大化, 其次是在此基础上寻求经济性的最优化^[1]。因此, 从实战的角度出发, 军用飞机在服役使用过程中, 要恢复、保持和提高其作战能力, 必须要有相应的维修与保障工作与之匹配。

目前, 随着各种新型军用飞机的服役, 越来越多的新材料、新结构和新技术应用于飞机零部件的制造过程中, 这给飞机的维修保障工作带来了新的挑战。尤其近年来, 金属增材制造技术在国内外日益受到重视, 其关键技术不断取得突破, 并已经实际应用于飞机关键零部件的

研发和试制^[2-6]。金属增材制造技术一般可分为广义和狭义两大类, 狭义金属增材制造主要指激光选区熔化成形、激光熔化沉积(激光熔覆)成形、电子束选区熔化成形、电子束熔丝成形、电弧/等离子弧熔丝成形 5 类基于高能束流的成形技术, 广义金属增材制造还包括热喷涂、冷喷涂、气相沉积等技术, 每一类技术的优势和特征各不相同^[7-12], 所以, 如果能充分发挥金属增材制造的技术优势, 将其应用于军用飞机的维修和备件应急保障中, 则既可以实现快速、精准、高效的保障目标, 又能够有效降低备件的库存量, 同时也满足现代战争对战地实时维修保障的实际需求。

* 基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1104000)。

军用飞机维修保障现状

飞机在使用过程中,需要定期进行维护保养,更换易损件和失效零部件。在日常的维修保障中,一个零部件的供应不及时甚至会导致整个飞机无法正常服役,停飞很长时间。在战备演习训练或实际作战情况下,飞机的抢修保障就显得更为重要,由于保障不足会导致作战时机的错失,甚至会直接决定一场战争的胜负。

对于一般故障零部件的维修,目前多数采用向飞机制造商采购原产零部件进行更换的方式,对于严重故障零部件的维修,甚至需要将飞机整体运输至制造商工厂进行全面维修,这类维修保障模式主要存在两个方面的问题。

1 维修保障需求和保障供给能力不匹配

维修保障的需求有差异,是个性化的,而保障供给是通用的。这种不匹配主要表现在两个方面。

(1) 零部件供给不足。一般军用飞机的零部件数量都在一万件以上,高性能军用飞机零部件数量甚至更多。这些零部件形状各异,材料种类繁多,且随着科技进步,新材料、新工艺和新结构的新型零部件大量涌现,各类零部件出现故障的概率各不相同,尤其新型零部件在实际应用过程中总会不可避免地出现许多意想不到的故障。战时状态下,各类飞机零部件损伤的情况更加难以估计和预测,而制造商不可能把所有零部件都当作备件进行大批量实物生产,这样会占用大量的人力、物力、财力资源,这就导致飞机维修急需的零部件制造商可能没有库存或备件。

近年来,我国航空工业取得了飞跃式发展,各类新型飞机不断服役,飞机更新换代速度加快,制造商的生产线不断更新换代,一些老旧型号的飞机生产线已经停用或报废,相对应

的零部件生产单元已无法恢复,且随着工艺水平提升,一些老旧工艺已经淘汰,这也间接导致个别常规备件无库存的情况。

(2) 零部件供给过剩。飞机制造商一般会对一些常用的易损件进行一定数量的备件生产,跟这些备件相关的图纸、工艺装备、实物备件等大量封装存放在库房中等待使用,而一旦飞机退役,跟它相关的零备件也会随之报废。在飞机服役到退役的有限时间里,大量备件甚至从未得到过使用,造成了资源的极大浪费。

2 维修保障需求和保障供给效率不匹配

维修保障需求具有及时性、便捷性,而零部件备件的生产制造是需要周期的,且可能是跨地域协作。飞机零部件数量巨大,种类繁多,使用现场不可能存放所有的零部件备件。如果飞机的某个零部件出现故障,而使用现场又找不到备件进行更换维修,在影响飞行安全的情况下,飞机如不能实现转场维修,那就只能等待备件运送至使用现场。飞机制造商在批生产过程中,一直面临着科研型号任务和维修保障任务冲击和占用批生产资源的矛盾,这种矛盾在近些年新型号不断研发和老旧型号陆续将要退役的背景下表现得尤为突出,有的时候不得不将维修备件的生产任务延后,这使得飞机维修周期无法得到有效保障。在老旧生产线已经停用或生产工艺已经更新换代的情况下,为了生产某个特定的备件,需要重新启用专用制造设备,有的甚至需要专用的工具和工装夹具或者需要采购特定的原材料,以保证备件整套制造工艺和使用性能与原件相同。飞机制造商在这种情况下,在具体组织实施过程中需要克服非常大的困难,调动和协调的资源价值有时候远远超过了备件本身,间接导致了生产成本的增加。

金属增材制造应用于军用飞机维修保障的技术优势

金属增材制造技术应用于军用飞机维修保障中可有效解决传统维修保障模式存在的问题,具有独特的技术优势。

1 数字化敏捷制造

数字化敏捷制造解决了传统备件生产周期长、效率低、需要大量辅助配套设施和资源的问题,避开了焊接、组装、夹持固定等繁琐工序,简化了复杂的制造流程,因此极大地缩短了生产周期。增材制造的数据源是零件的三维工艺模型文件,原材料是金属粉末或丝材,设备相对精小,可实现设计、加工、后处理、检测全流程的数字化控制。对于中小尺寸的备件,从三维工艺数模设计到精加工完成,整个生产周期一般小于一周,有的甚至十几个小时就能得到成品。因此,增材制造备件的复杂程度对生产制造周期的影响不大,与传统制造相比,对于一些特别复杂异形结构件的制造,采用增材方式后其生产周期反而会更加明显地缩短。

2 定制化制造

定制化制造解决了传统备件供给不足或供给过剩的问题。增材制造以三维数模为驱动,只要有急需备件的三维模型就可以实时生产,因此,备件生产和库房库存可以实现有效的动态平衡,减少对大量库存的依赖程度。无论是某个单件的制造需求还是一定数量的小批量制造需求都会得到快速满足,且不会因为备件数量的多寡增加生产周期或成本。

3 修复再制造

修复再制造解决了军机维修成本高的问题。飞机在服役过程中每个零部件的工况条件和受力状态各不相同,零部件受到各种突发、非正常工况及其他一些因素的作用,待修复区的形状和位置千差万别,且修复加工的费用必须低于新制零件的

费用,否则修复就失去了批量应用价值。增材修复再制造可以将失效件、磨损件或缺损件的局部区域重新修复到原厂零部件的形状、尺寸精度和性能状态,同时满足每个零件个性化的修复需求。即使不同材料的多个零件也可以根据每个零件的具体修复形状和位置自由调整修复方案,无需频繁改变辅助条件,修复可完全实现个性化,并且不会增加制造成本。此外,增材修复再制造降低了传统加工工艺对大面积厂房库等资源的依赖程度,甚至整套生产设备可以放置到特制的交通工具上,实现车载、舰载、机载等远距离机动运输,成为移动工厂。如我国和美国均研制了“移动零件医院(MPH)”方舱^[13-15],通过增材制造和数控加工技术实现了损伤零件的现场修复或重制,并已经实际应用于军事战场,该类型增材制造方舱设备如图1^[14-15]所示。未来战争必然是快节奏的高技术战争,维修人员和装备也必须紧随作战部队进行大规模机动转场,该类方舱装备恰好符合极强战场机动性的要求,有助于战时快速反应、快速部署及快速维修能力的实现。因此,利用增材制造来修复飞机缺损零件是一种经济且高效的方法。基于增材制造技术的军机零件修复应用实践,已从最初的发动机叶片损伤修



图1 “移动零件医院(MPH)”方舱
Fig.1 Mobile parts hospital shelter

复逐步发展到飞机框、梁、摇臂、支架、起落架活塞杆等各类零件的表面缺陷及损伤修复^[16-18]。

综合上述分析,金属增材制造应用于军用飞机维修保障的技术优势可以概况为:无需大量备件,突发保障能力强,前线修复能力足,后方修复或重新制造新零件周期短且方式多。

金属增材制造应用于军用飞机维修保障的典型工艺方案

1 可修复性评估和分类

可修复性是指通过一定的技术手段修复失效零部件使其恢复自身使用性能,甚至使其使用性能超过新制造零部件的能力。当军用飞机零部件使用性能劣化或失效后,首先要对其可修复性进行评估和分类。零部件使用性能劣化或失效可分为表

面涂层类、内部材料强度类、形状尺寸超限类3类,各类别典型损伤表现形式及可修复性见表1^[19]。

一般而言,综合考虑经济性和修复周期,增材修复表面涂层类和形状尺寸超限类损伤效果较好,修复部位与基体冶金结合良好,修复后失效零部件的各项性能可基本恢复至原有性能甚至有所提升。而对内部材料强度类损伤,有时修复并不经济,故本着安全从严的原则,可采用增材制造方式新制零件予以更换。

2 维修工艺方案选取

军用飞机金属构件大致可分为机身、起落架、机翼、平尾垂尾、发动机等5个部位,各部位零件类型、材料和劣化失效类别有所不同,所采用的增材修复或新制工艺也有所差异,如图2所示。

由于铺粉类固有的工艺特征决

表1 飞机零件典型损伤形式和其可修复性

Table 1 Typical damage failure pattern and reparability assessment of aeroplane parts

性能劣化或失效类别	典型损伤表现形式	可修复性及措施
表面涂层类	划伤、擦伤、浅表点蚀、氧化变色等	较强,增材修复
内部材料强度类	断裂、压裂、疲劳裂纹、剥离、缺损、分层、深度腐蚀烧蚀等	弱,增材新制
形状尺寸超限类	磨损、变形、卡滞、间隙超差、密封泄露、局部凹坑等	较强,增材修复



图2 不同部位零件损伤形式及维修工艺

Fig.2 Typical damage failure pattern and maintenance technologies of different components

定了它只适用于金属零件全新制造,不适合用于受损零件的修复,其他几类技术既可用于零件制造,也可用于受损零件的修复。此外,在成形效率、精度、尺寸、环境要求、安全性等方面各类增材工艺也有所不同,如表 2^[20]所示,需要根据失效零件的损伤类别和典型特征综合选取合适的维修工艺方案。

基于金属增材制造的军用飞机维修保障关键技术

1 逆向建模技术

金属增材制造必须以三维模型为制造数据源,而三维模型的获取方式主要有原始三维软件设计和逆向建模两种。对于一些老旧型号飞机而言,其零件一般是以二维图纸、模线样板或专用模具为依据进行制造的,随着生产线拆除和样板模具的报废,已经很难通过原始图样来精准构建维修零件的三维整体设计数模,这时就必须采用逆向建模技术。逆向建模的工艺流程一般是借助一定

的数据采集技术获得零件的空间三维点云数据,然后再使用专业建模软件将点云转化为网格,再由网格拟合重建生成光顺的曲面、平面、实体等特征,最后将特征拟合重构成三维高精度实体模型。目前主要的数据采集技术包括常规测量、三坐标测量、三维扫描测量、激光跟踪测量、工业 CT 测量等,各技术的应用特征及局限性见表 3^[21]。三维模型获得后的应用主要分两种情况:(1)增材成形全新零件。针对没有三维数模的老旧零件或经过评估已经失去维修价值的零件,可在新模型基础上进行标准模型修正,再选取合适的增材制造技术来生产全新的零件,用以替换受损的零件。(2)增材修复零件。即利用逆向建模方法获取的模型与原始的标准模型做比对,找出缺陷部位、类型及尺寸分布特征并构建精准的三维缺陷模型,根据缺陷模型规划增材修复的方式、材料、路径、工艺参数及运动程序等,最后驱动设备对零件的缺陷依次进行修复成形。

表 2 不同增材制造工艺的适用性

Table 2 Applicability of different additive manufacturing technologies

工艺类别	成形效率	成形精度	成形尺寸	环境要求	安全性	零件失效类别	零件典型特征
铺粉类	中	高	小	高	低	内部材料强度类	小而精,复杂异形
同步送粉类	高	低	大	高	中	形状尺寸超限类	大而简,机加可达
高压喷粉类	低	高	大	低	低	表面涂层类	浅表局部,异质
同步送丝类	高	低	大	中	高	形状尺寸超限类	大而简,机加可达

表 3 逆向数据采集技术的应用特征对比

Table 3 Characteristic comparisons of different data acquisition methods based on reverse technique

技术类别	综合精度	获取速度	内部特征	外形特征	成本
常规测量	0.5mm	慢	严重受限	严重受限	低
三坐标测量	0.5 μ m	慢	严重受限	无限制	高
三维扫描测量	40 μ m	快	严重受限	无限制	适中
激光跟踪测量	20 μ m	慢	严重受限	受限	较高
工业 CT 测量	30 μ m	较慢	无限制	无限制	高

2 定向能量沉积技术

定向能量沉积技术中的激光熔化沉积成形技术是国内外关注和研究最多,也是最成熟的一种增材制造技术,它在航空航天领域的最典型应用就是对受损零件的修复。在修复过程中,通常采用增减材复合制造手段,即首先对受损件进行全尺寸三维扫描测量,通过和原始设计数模的精准对比确定零件的受损部位和程度,进而针对某单一零件进行个性化的修复方案制定。其次利用激光熔化沉积技术对受损区域进行同种金属的增材填充成形,然后结合数控加工减材技术,去除增材后的余量材料,最后为保证修复的尺寸精度需再次进行修复部位的三维测量。在未来,开发集成高精度测量定位、缺陷域模型重建、增减材制造路径自动规划等于一体的辅助制造软件或系统,将有助于复杂几何结构零件的快速自动化修复,尤其对于外形轮廓性很强且受损较严重的零件,增材修复将比换新件更加经济高效。

3 面向增材制造的结构优化技术

在某些情况下,军用飞机的磨损零件修复的意义已经不大,必须更换全新的零件。这时主要有两种情况:一种是基于传统设计方案,只是采用增材制造方式来制造全新的零件;另一种是面向增材制造工艺的结构功能一体化优化设计方案,即在充分利用增材制造工艺特征优势的基础上,面向功能需求重新设计零件。与第 1 种方案相比,第 2 种方案更符合未来主流的修复技术发展方向和应用趋势。

由于增材制造技术本身受制造工艺约束较少,因此在重新设计零件时可将传统基于“工艺优先”的设计模式向基于“性能优先”的设计模式转变,在兼顾生产效率与经济性的同时,采用拓扑优化结构、蜂窝点阵结构等更优的创新构型设计思路,通过结构空间上的复杂性和多样性实现

功能上的集成和使用性能上的综合最优^[22-27]。飞机上一些如接头类、支架类零件经拓扑优化后,在保证高性能的同时较传统结构可减重 30% 以上,且新的零件构造也更加体现了结构设计和制造中的艺术美感,如图 3^[28] 所示。

4 智能机器人技术

智能机器人有别于传统的工业机器人,它具有感知、识别、推理和判断的能力,可以根据外界条件和环境的变化,在一定范围内通过自主学习来修正执行程序,通过总结经验来获得优化程序。在飞机零件增材制造修复过程中,由于零件外形尺寸、受损部位和程度千差万别,不可能仅仅依靠一套标准程序和参数完成各类零件的修复,且修复过程中大量的测量、示教编程、数据分析、轨迹规划等工作如果全部依赖人工来完成,将极大降低维修效率,增加维修周期和成本。因此,未来智能化机器人技术和数字化增材制造技术紧密结合,恰好满足了飞机单一零件个性化高精度修复的应用需求,在损伤零件大面积区域的缺陷检测和图像处理、局部修复区的精准识别和定位、复杂曲面的自动化编程和轨迹参数优化等方面将大大提升飞机零件增材制造修复技术的灵活性和应用空间。美国 GE 公司已经将机器人辅助的冷喷涂技术应用用于飞机零件的修复中,如图 4^[29] 所示。

5 基于增材工艺的模拟仿真技术

增材修复过程涉及一系列复杂变化的瞬态力热耦合过程,且待修复零件的缺陷位置和大小不尽相同,因此,需要结合增材修复工艺针对具体零件开展工艺模拟仿真分析。增材工艺模拟仿真应针对整个增材设计制造链的各个环节,包括拓扑优化设计、工艺参数调整验证、成形工艺过程、后处理过程等,借助模拟仿真达到零件宏观精准控形和微观稳定控性的目的,减少工艺试错,解决宏观

上的翘曲、变形、开裂及微观上的气孔、熔合不良等问题,保证修复质量稳定性,提升一次修复合合格率。

金属增材制造在军用飞机维修保障方面存在问题及应对建议

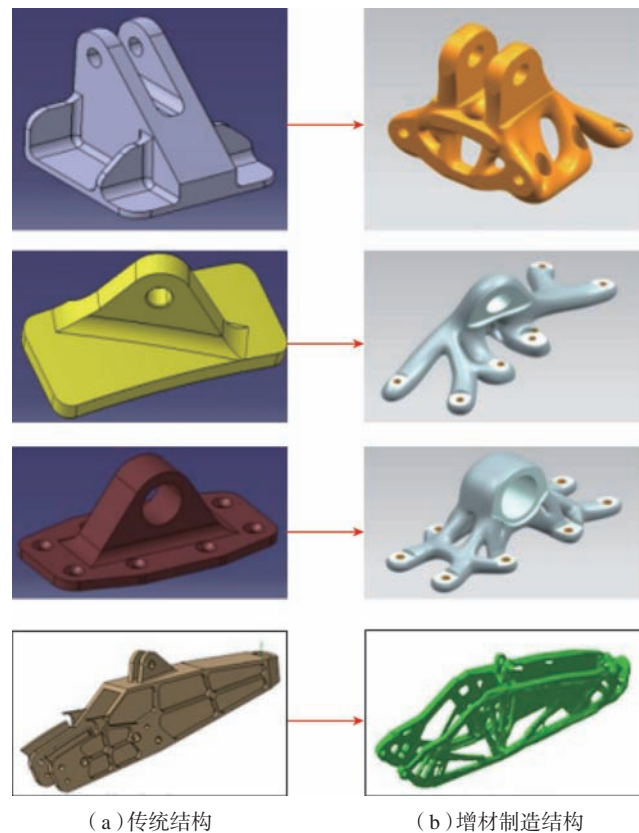
1 存在的问题

目前,金属增材制造技术在飞机

维修保障方面虽然已经取得了很多重大的进展,但是相对于工业革命后积累了上百年研究、应用和发展经验的近代传统制造技术而言,金属增材制造依然存在着许多的问题和不足,主要体现在 3 个方面。

1.1 技术成熟度与可靠性的问题

金属增材制造技术经过几十年的发展,虽然技术成熟度不断提升,



(a) 传统结构 (b) 增材制造结构

图 3 传统结构与增材制造结构对比

Fig.3 Comparison of traditional structures with additive manufacturing structures



图 4 机器人辅助的冷喷涂技术应用用于飞机零件修复

Fig.4 Maintenance of aeroplane parts based on robot-assisted cold spraying additive manufacturing technology

但对于航空产业来说,任何新技术的应用都必须遵循循序渐进的原则。材料、工艺、装备、检测、质量控制等环节,都要经过严格的考核和可靠性认证,在被确认是成熟的且具有高可靠性的技术后才会被允许装机应用。从这个角度来看,金属增材制造的备件离真正的规模化装机应用还有很长的路要走。增材制造的备件无论在制造商工厂还是战时抢修现场,虽然可以快速完成备件制造或修复,但该备件的可用性和可靠性在程序上有待验证确认,这种备件不能直接装机使用,而必须经过严格测试或多轮评审,证明其与原始零件具有完全可替换性,才被允许装机使用,这种情况在关键部件和主承力部件上体现得更加明显。目前,金属增材制造的备件或维修件应用研究的对象主要是非关键部件和非结构部件,因为这些零部件风险性更小,即使在使用过程中发生损伤或失效,飞机也不至于坠毁,不会对飞行安全造成威胁,这也反映出金属增材制造零部件应用在飞机维修方面,其安全性和可靠性是面临的最大挑战。美国空军给出的增材制造零部件绝对安全可靠的参考标准是万分一以下的不合格品率或故障率,即在10000个金属增材制造零部件中不能找出多于一个的不合格品,或在10000个金属增材制造零部件使用过程中不能出现大于一次的失效或故障情况^[30]。因此,美国空军在飞机维修方面也处于谨慎使用金属增材制造零部件的阶段。

1.2 修旧如旧还是修旧如新的问题

飞机维修需要更换的零部件多数是采用传统制造技术生产的,而备件制造希望通过增材制造技术生产,在这个过程中,零件的结构形式和材料类别等都没有变化,只不过是制造方式发生了改变,即采用新技术制造“旧”零件。这个“旧”不是指零件是旧的零件,而是指零件的设计理念

和结构形式是基于传统制造技术的,是“旧”的。而增材制造技术真正的潜力在于创新设计理念,增强工艺实现能力,满足精准构型和整体功能需求,而不是简单的制造方式或方法的替代,这也是有些零部件采用增材制造优势并不明显的内在原因。目前,在新机研制过程中,利用增材制造技术,实现了随形内流道、复杂薄壁、复杂内腔、镂空点阵、多部件集成等复杂结构形式零件的制造及应用,但在飞机备件制造和维修方面,却还在修旧如旧的道路上徘徊不前。因此,飞机维修和备件保障不应该继续采用逆向工程或图纸精准复制原物以实现简单替代的旧道路上发展前进,而是应该开辟一条修旧如新的新道路,即采用增材制造技术,结合零部件的具体结构形式和功能需求,重新精准设计、优化和制造,以实现精准维修和整体综合性能的提升。例如,可依据损伤零件的部位和损伤特征,基于增材制造技术制备具有梯度复合结构特性的备件,如图5^[31]所示。这类梯度复合结构在力学性能上有别于同质结构,可显著提高结构减重效率

及疲劳寿命,具有承载、耐热、抗蚀等多功能特性^[31-32]。点阵轻量化结构、异形内流道结构和拓扑优化结构等新构型也正在被越来越多地研究,以期未来能慢慢应用到备件领域,如图6^[22]所示。俄罗斯的苏霍伊设计局甚至构想飞机机身大部段乃至整机机身结构都采用拓扑优化构型,以期更好地减重和扩大作战半径,如图7所示。当然,这种新结构在实际应用过程中会产生维修成本增加、风险增大等一系列具体的困难和问题,这些都是需要逐一克服和解决的。

1.3 标准化的问题

标准化是增材制造技术成熟的主要标志,也是其规模化应用的基础和前提。在飞机维修和保障方面,增材制造的标准化困境主要表现在3个方面。

(1) 原材料未成体系。

粉体或丝材等原材料是金属增材制造的“粮食”,研究开发出更高质量的原材料是增材制造广泛应用的首要条件。相对于传统金属材料上千个牌号而言,目前适用于金属增材制造的材料牌号仅仅数十种,尤其

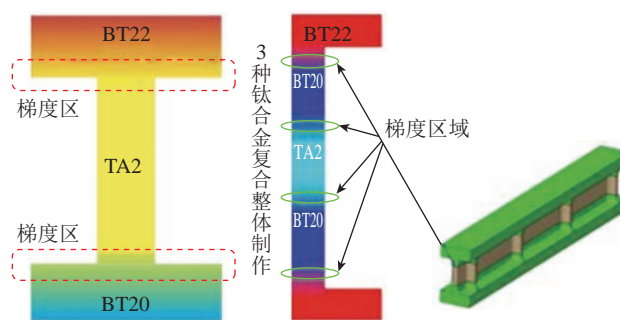


图5 梯度复合结构

Fig.5 Material graded structure



图6 点阵轻量化结构与异形内流道结构

Fig.6 Lightweight lattice structure and inner flow channel structure

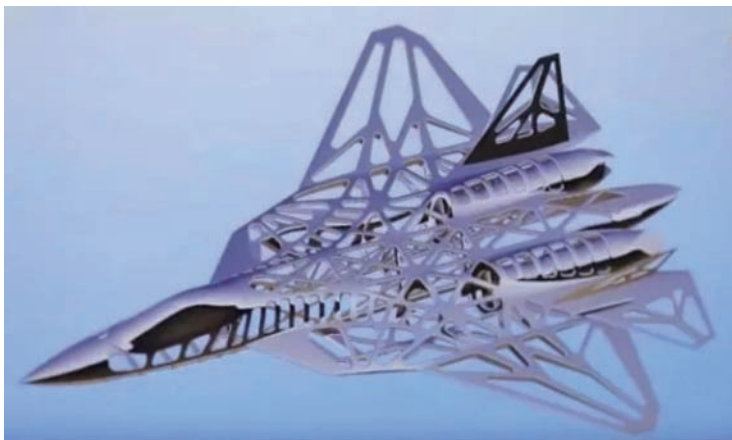


图7 飞机机身结构拓扑优化设计

Fig.7 Topology optimization in aircraft fuselage structures

缺少基于工艺特征的对现有材料改性的材料或新开发的材料,这使得材料基础性能数据匮乏,导致可用于飞机零部件维修的材料种类有限。在工艺和装备逐渐趋于成熟的条件下,原材料体系的不健全对应用端的限制和制约越来越明显,如果材料供应商不加大新合金材料和多工艺复合低成本制粉/制丝技术的研发投入,飞机维修保障面临的“粮荒”问题很难在短期内得到有效解决。

(2)设备不统一,工艺不通用。

目前,虽然主流的金属增材制造设备的基本组成结构大体相同,但每个制造商的设备都有自己的独特之处,在成形尺寸、能量源功率和束径、送粉/送丝方式、成形精度、预热温度等方面都不相同,甚至原材料、工艺软件和工艺参数也都是各自开发。原材料、设备和工艺紧密绑定,没有相关标准来对其兼容性和质量要素进行规范,这使得同一个飞机零部件若在不同厂家的设备上制造,其工艺不一定通用,必须开展工艺适应性试验和验证,这无疑导致了生产周期的延长和成本的增加。

(3)性能评价与认证体系不完善。

增材制造零件和传统锻造或铸造零件在成形工艺、显微组织、力学性能、缺陷类型、检测方法等方面是有差异的^[33],一项增材制造零部

件是否能够安全可靠地使用,需要通过一系列力学性能指标和无损检测方法来评价。力学性能表征需要建立材料的全面力学性能数据库,但目前所研究和使用的材料牌号较少,积累的力学性能数据也很有限,性能数据库并不完善,且各制造商的材料性能数据并不直接共享,一些新研材料甚至没有性能数据指标。此外,由于增材制造件组织和缺陷存在不均匀性和各向异性等特征,超声检测、射线照相检测、工业CT检测、荧光渗透检测等方法与标准不能直接沿用,否则易出现识别和界定增材制件的缺陷类型、尺寸、数量、分布等特征不到位或存在检测盲区等问题^[34-36]。目前,采用什么标准方法、什么规定设备能有效识别不同类型缺陷,采用常规方法检测不准或无法检测的缺陷又怎样判定等一系列问题还缺少统一的评价标准和认证规范。

2 应对措施及建议

针对以上存在的问题,应对措施的核心是建立面向重点行业企业的国家重大装备领域的应用示范体系,通过应用示范的带动效应牵引全产业链条的发展,促进技术成熟度的提升及应用标准规范体系的建立和完善。现阶段要鼓励和引导航空航天等企业从源头上挖掘增材制造技术

的应用空间,从结构设计、制造工艺、制件后处理、质量检测、性能验证、应用及评价6个方面加强科研院所与应用企业的协作创新,防止各立山头,单打独斗,同时支持和鼓励国家级行业协同创新平台的建立,通过不断扩大的应用市场带动整个产业链的发展和相关问题的解决。

金属增材制造在军用飞机维修保障方面的应用方向与建议

1 军用无人机大胆应用

无人机是由人为操纵的不载人飞机,主要用于完成特殊的军事侦察或作战任务。未来无人机将主要分为3大类,即高空长航时无人机、高速机动无人机和低成本无人机,其任务和用途也会从主要用于侦察逐步发展到通信中继、电子对抗、后勤补给和空中打击等领域。这要求无人机在有限的体积内要具有更轻的质量、更好的力学性能以及实现更大的任务载荷的能力。有些无人机甚至要将78%~80%的机体质量让渡给燃油、武器和隐身补偿等系统^[37],这使得无人机的零部件朝着轻量化、整体化、拓扑化、结构功能一体化方向发展。一些特异形状和结构的零部件一旦损伤,采用传统的制造方法制造成本很高甚至难以实现,而采用增材制造技术生产这类零部件在缩短制造周期的情况下几乎不会增加额外成本。因此时效性和经济性是无人机维修保障时选择增材制造技术的首要因素。此外,增材制造技术应用于无人机维修和保障的风险性相对更小,一些小型无人机在损伤的情况下甚至可以整体更换外部构件,这可以显著提升作战效率,降低作战装备成本,具有真正的实战应用意义。

2 军用有人机由点及面有序推进

有人机维修保障中,使用零部件的高可靠性和保障人的绝对安全性是首要的考虑因素,因此未经过全面

考核验证的零部件是不能直接装机使用的。飞机零部件一般可分为关键件、重要件和一般件,对于一般性的零件,其损伤后对飞行安全是不会造成影响的,因此,采用增材制造生产的备件可先从一般性零件开始尝试应用,逐步考核验证,有序推进,慢慢应用到关重零件上。例如,对于接近退役的飞机,其零部件早已停产,在库存备件已经用完的情况下,其升级改造过程可尝试使用增材制造技术生产一些非关键零部件,且可以有效结合逆向工程和结构优化技术制造轻量化和整体化类型的零件,这样可以有效延长其服役期,提升作战飞机的可用性和出勤率,在此过程中,逐步考核验证其零件的可靠性和稳定性。在长期积累的大量数据和实践经验的基础上,将增材制造的备件逐步应用到现役飞机和关重零部件上。

3 地面随机保障设备和工具可全面应用

军用飞机离不开地面保障,随着飞机型号和种类越来越多,保障设备和工具的规模也越来越大,而保障设备和工具本身也是需要维修和备件的,这类设备和工具的通用性程度一般不高,存在大量的专用设备和维修工具。战场环境下这类设备和工具的使用与平时有很大不同,突出表现为使用频率大、强度高、磨损快、换新时效性高。此外,在实战中,地面保障设备很容易成为敌方攻击的目标,一旦遭到摧毁或损伤,就会使飞机失去所依赖的保障条件,因此,地面保障设备和工具也应考虑机动作战要求,提升快速维修效率,降低转场携带的数量和规模。增材制造技术在这方面恰恰有其独特优势,特别是战损时能够实现本地化生产和快速修理,数模可通过逆向工程或远程网络传输获得,这将大大提高备件更换的时效性,缓解地面保障装备和工具的发展滞后于军用飞机装备

发展的矛盾。

金属增材制造在军用飞机维修保障领域的发展趋势

随着军用飞机从三代、四代向五代、六代发展,大量的在役飞机需要维修和保障,金属增材制造技术在飞机维修保障领域的应用时间比较短,但应用空间是巨大的。随着金属增材制造技术体系的不断发展,上下游技术产业的不断完善,金属增材制造在飞机维修保障领域未来的发展趋势主要体现在3个方面。

(1) 技术能力的提升与融合。目前增材制造技术在成形效率、成形精度、材料种类及表面质量等方面还有很大的提升空间,一些新技术如多能量源或复合能量源大幅域成形技术、过程在线监测与数据分析技术、粉末自动筛分循环技术、4D增材技术等不断涌现和发展,各技术之间的交叉融合与优势互补性逐步加强,未来增材制造的技术能力会有大幅提升。

(2) 技术装备的智能化、复合化与模块化。人工智能、5G通讯、大数据等技术将越来越多地融入增材制造装备中,未来装备的智能化程度会越来越高,装备拥有自主的推理、判断和决策能力,甚至通过人机对话就能实现增材制造过程。一台装备可以复合多种增材制造工艺,如增减材复合一体化、激光熔覆与冷喷涂复合一体化等,且装备可以模块化组装与拆分,方便战场状态下的运输与维护。

(3) 原材料的系列化、复合化与安全性。未来增材制造专用的原材料将逐渐标准化和系列化,一些复合材料如金属-陶瓷复合粉体、纳米增强复合丝材等应用会越来越广泛,且粉体会更加安全,适合携运且没有爆炸等危险。

结论

针对军用飞机维修保障存在的保障供给能力不足和供给效率较低等问题,利用金属增材制造的快速响应敏捷制造、定制式制造和维修再制造等独特优势,提高金属增材制造的技术应用成熟度,不断完善无人机、有人机和地面随机保障等军用飞机产品的金属增材制造维修保障体系,提升保障供给能力,提高保障供给效率,推动金属增材制造技术在军用飞机维修保障领域应用的广度和深度。

参考文献

- [1] 何宇廷,张腾,崔荣洪.基于作战效能的军用飞机维修与保障[J].空军工程大学学报(自然科学版),2019,20(1):1-6.
HE Yuting, ZHANG Teng, CUI Ronghong. Maintenance and support for military aircraft based on the combat effectiveness[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(1): 1-6.
- [2] 苏亚东,吴斌,王向明.增材制造技术在航空装备深化应用中的研究[J].航空制造技术,2016,59(12):42-48.
SU Yadong, WU Bin, WANG Xiangming. Research on further application of additive manufacturing technology on aviation equipment[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(12): 42-48.
- [3] 张学军,唐思熠,肇恒跃,等.3D打印技术研究现状和关键技术[J].材料工程,2016,44(2):122-128.
ZHANG Xuejun, TANG Siyi, ZHAO Hengyue, et al. Research status and key technologies of 3D printing[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(2): 122-128.
- [4] 黄卫东,林鑫.激光立体成形高性能金属零件研究进展[J].中国材料进展,2010,29(6):12-27,49.
HUANG Weidong, LIN Xin. Research progress in laser solid forming of high performance metallic component[J]. Materials China, 2010, 29(6): 12-27, 49.
- [5] 汤海波,吴宇,张述泉,等.高性能大型金属构件激光增材制造技术研究现状与发展趋势[J].精密成形工程,2019,11(4):58-63.
TANG Haibo, WU Yu, ZHANG Shuquan,

et al. Research status and development trend of high performance large metallic components by laser additive manufacturing technique[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11(4): 58-63.

[6] 王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造: 若干材料基础问题[J]. 航空学报, 2014, 35(10): 2690-2698.

WANG Huaming. Materials' fundamental issues of laser additive manufacturing for high-performance large metallic components[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(10): 2690-2698.

[7] 关桥. 焊接/连接与增材制造(3D打印)[J]. 焊接, 2014(5): 1-8, 73.

GUAN Qiao. Welding/joining technologies and additive manufacturing(3D printing)[J]. Welding & Joining, 2014(5): 1-8, 73.

[8] 耿海滨, 熊江涛, 黄丹, 等. 丝材电弧增材制造技术研究现状与趋势[J]. 焊接, 2015(11): 17-21, 69.

GENG Haibin, XIONG Jiangtao, HUANG Dan, et al. Research status and trends of wire and arc additive manufacturing technology[J]. Welding & Joining, 2015(11): 17-21, 69.

[9] 李文亚, 张冬冬, 黄春杰, 等. 冷喷涂技术在增材制造和修复再制造领域的应用研究现状[J]. 焊接, 2016(4): 2-8, 73.

LI Wenya, ZHANG Dongdong, HUANG Chunjie, et al. State of the art of cold spraying additive manufacturing and remanufacturing[J]. Welding & Joining, 2016(4): 2-8, 73.

[10] LI W Y, LIAO H L, LI C J, et al. On high velocity impact of micro-sized metallic particles in cold spraying[J]. Applied Surface Science, 2006, 253(5): 2852-2862.

[11] SINGH H, SIDHU T S, KALSI S B S. Cold spray technology: Future of coating deposition processes[J]. Frattura Ed Integrità Strutturale, 2012, 6(22): 69-84.

[12] 陈玮, 李志强. 航空钛合金增材制造的机遇和挑战[J]. 航空制造技术, 2018, 61(10): 30-37.

CHEN Wei, LI Zhiqiang. Additive manufacturing of aerospace titanium alloys: Opportunities and challenges[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(10): 30-37.

[13] 李岳彬, 魏世丞, 盛忠起, 等. 方舱技术发展综述[J]. 机械设计, 2019, 36(4): 5-11.

LI Yuebin, WEI Shicheng, SHENG Zhongqi, et al. Summary of the development of shelter technology[J]. Journal of Machine Design, 2019, 36(4): 5-11.

[14] 张安峰, 李涤尘, 梁少端, 等. 高性能金属零件激光增材制造技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2016, 59(22): 16-22.

ZHANG Anfeng, LI Dichen, LIANG Shaoduan, et al. Development of laser additive manufacturing of high-performance metal parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(22): 16-22.

[15] 张连重, 李涤尘, 崔滨, 等. 战场环境3D打印维修保障系统—装备快速保障利器[J]. 现代军事, 2017(4): 110-112.

ZHANG Lianchong, LI Dichen, CUI Bin, et al. 3D printing system for maintenance and support in battle field environment—The most effective and powerful tools of military equipment[J]. Conmilit, 2017(4): 110-112.

[16] 曹强, 程宗辉, 张志强. 激光熔覆技术在飞机修理中的应用[J]. 长沙航空职业技术学院学报, 2015, 15(1): 39-42.

CAO Qiang, CHENG Zonghui, ZHANG Zhiqiang. The application of laser cladding on aircraft repair[J]. Journal of Changsha Aeronautical Vocational and Technical College, 2015, 15(1): 39-42.

[17] 郭双全, 钱磊, 谢京, 等. 微束等离子弧增材制造技术在航空发动机维修中的应用[J]. 航空维修与工程, 2015, (8): 75-76.

GUO Shuangquan, QIAN Lei, XIE Jing, et al. Application for micro plasma arc additive manufacturing technology in aero-engine maintenance[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2015, (8): 75-76.

[18] 秦仁耀, 张学军, 于波, 等. 飞机端轴颈的激光3D熔覆维修[J]. 航空维修与工程, 2015, (9): 125-126.

QIN Renyao, ZHANG Xuejun, YU Bo, et al. 3D laser cladding repair of aircraft end journal[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2015, (9): 125-126.

[19] 龚群甫, 安小慧. 增材制造修复技术在飞机大修中的应用[J]. 民用飞机设计与研究, 2020, (3): 49-53.

GONG Qunfu, AN Xiaohui. Application of additive manufacturing repair technology in aircraft overhaul[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2020, (3): 49-53.

[20] 马振书, 陈广森, 马东玺, 等. 面向装备应急保障的金属增材制造技术[J]. 兵器材料科学与工程, 2016, 39(6): 119-124.

MA Zhenshu, CHEN Guangsen, MA Dongxi, et al. Metal additive manufacturing technologies used in equipment emergency support[J]. Ordnance Material Science and

Engineering, 2016, 39(6): 119-124.

[21] 闫超. 基于激光选区熔化快速制造的零件模型重构与结构再设计方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.

YAN Chao. Research on model reconstruction and structure redesign rapid manufacturing method of metal parts based on selective laser melting[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015.

[22] 朱继宏, 何飞, 张卫红. 面向增材制造的飞行器结构优化设计关键问题[J]. 航空制造技术, 2017, 60(5): 16-21.

ZHU Jihong, HE Fei, ZHANG Weihong. Key optimization design issues for achieving additively manufactured aircraft and aerospace structures[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(5): 16-21.

[23] ORME M, MADERA I, GSCHWEITL M, et al. Topology optimization for additive manufacturing as an enabler for light weight flight hardware[J]. Designs, 2018, 2(4): 51.

[24] SONG B, ZHAO X, LI S, et al. Differences in microstructure and properties between selective laser melting and traditional manufacturing for fabrication of metal parts: A review[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2015, 10(2): 111-125.

[25] LIU J K, GAYNOR A T, CHEN S K, et al. Current and future trends in topology optimization for additive manufacturing[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2018, 57(6): 2457-2483.

[26] MEZZADRI F, BOURIAKOV V, QIAN X P. Topology optimization of self-supporting support structures for additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2018, 21: 666-682.

[27] LEARY M, MERLI L, TORTI F, et al. Optimal topology for additive manufacture: A method for enabling additive manufacture of support-free optimal structures[J]. Materials & Design, 2014, 63: 678-690.

[28] 朱胜利, 郭超, 寇廷清. 拓扑优化技术在整体结构件上的应用[C]//2017 Altair技术大会论文集. 南京: 澳汰尔工程软件有限公司, 2017.

ZHU Shengli, GUO Chao, KOU Yanqing. Application of topology optimization technology in monolithic components[C]//Proceedings of 2017 Technology Conference on Altair. Nanjing: Altair Engineering, Inc, 2017.

[29] ALEX DERBER, 李璇. 数字化时代的发动机维修[J]. 航空维修与工程, 2019(12):

22-24.

ALEX Derber, LI Xuan. Engine repair in the digital age[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2019(12): 22-24.

[30] 朱丽娅, 刘劲华, 陈宇. 美国空军利用 3D 打印解决航空维修中的部件短缺问题 [J]. 航空维修与工程, 2016, (10): 22-24.

ZHU Liya, LIU Jinhua, CHEN Yu. The utilization of 3-D printer in US airforce's aircraft part maintenance[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2016, (10): 22-24.

[31] 王向明, 崔灿, 苏亚东, 等. 飞机高能束增材制造结构研究 [J]. 航空制造技术, 2017, 60(10): 16-21.

WANG Xiangming, CUI Can, SU Yadong, et al. Aircraft structures technology based on power beam additive manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(10): 16-21.

[32] 王向明, 苏亚东, 吴斌. 增材技术在飞机结构研制中的应用 [J]. 航空制造技术, 2014, 57(22): 16-20.

WANG Xiangming, SU Yadong, WU Bin.

Application of additive manufacturing technology on aircraft structure application of additive manufacturing technology on aircraft structure Development[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(22): 16-20.

[33] 郝晓宁. 激光增材制造毛坯与传统锻件铸件差异性分析 [J]. 航空制造技术, 2017, 60(5): 82-86.

HAO Xiaoning. Difference analysis between laser additive manufacturing and conventional forging and casting[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(5): 82-86.

[34] 杨平华, 高祥熙, 梁菁, 等. 金属增材制造技术发展动向及无损检测研究进展 [J]. 材料工程, 2017, 45(9): 13-21.

YANG Pinghua, GAO Xiangxi, LIANG Jing, et al. Development trend and NDT progress of metal additive manufacturing technique[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(9): 13-21.

[35] CERNIGLIAD, SCAFIDIM, PANTANO A, et al. Inspection of additive-manufactured

layered components[J]. Ultrasonics, 2015, 62: 292-298.

[36] 胡婷萍, 高丽敏, 杨海楠. 航空航天用增材制造金属结构件的无损检测研究进展 [J]. 航空制造技术, 2019, 62(8): 70-75, 87.

HU Tingping, GAO Limin, YANG Hainan. Application of nondestructive testing techniques on additive manufacturing in aerospace fields[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(8): 70-75, 87.

[37] 刘磊, 刘柳, 张海鸥. 3D 打印技术在无人机制造中的应用 [J]. 飞航导弹, 2015, (7): 11-16, 49.

LIU Lei, LIU Liu, ZHANG Hai'ou. Application of 3D printing technology in UAV manufacturing[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2015, (7): 11-16, 49.

通讯作者: 张英伟, 高级工程师, 硕士, 研究方向为增材制造技术的航空应用及其标准规范体系, E-mail: saczyw@163.com。

Applications of Metal Additive Manufacturing Technology in Maintenance and Support for Military Aircraft

PAN Xin, ZHANG Yingwei, LIU Yanmei, MAO Jianfeng, WANG Jing, YIN Jun
(AVIC Shenyang Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Shenyang 110850, China)

[ABSTRACT] The development of metal additive manufacturing technology provides a new way on the research of digitization, personalized customization, high-performance and short period for the maintenance and support of military aircraft, which can improve the technical level and ability of military aircraft maintenance and support. In this paper, the current situation of military aircraft maintenance and support at home and abroad is summarized and the application advantages of metal additive manufacturing technology are pointed out. The typical damage forms of military aircraft parts, the applicability of different additive manufacturing processes and the selection scheme of repair process are introduced and the key technologies such as reverse modeling, structural optimization and intelligent robot are analyzed. The main problems as well as the solutions of low technology maturity and reliability, unclear repair principle and inconsistent standards and specifications are described in detail. The paper also points out the future development direction and trend of additive manufacturing technology in the field of military aircraft maintenance and support and gives specific application suggestions.

Keywords: Military aircraft; Metal additive manufacturing; Maintenance and support; Structural optimization; Laser melting deposition; Cold spraying

(责编 雷松)

引文格式: 李琛, 弭光宝, 冯艾寒, 等. 成型态选区激光熔融 Ti-6Al-4V 钛合金缺陷与微观组织研究进展 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(3): 44-51.

LI Chen, MI Guangbao, FENG Aihan, et al. Research progress in defect and microstructure of as-built selective laser melting Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(3): 44-51.

成型态选区激光熔融 Ti-6Al-4V 钛合金缺陷与微观组织研究进展

李琛¹, 弭光宝², 冯艾寒¹, 黄旭², 曲寿江¹

(1. 同济大学材料科学与工程学院, 上海 200092;

2. 中国航发北京航空材料研究院先进钛合金重点实验室, 北京 100095)

[摘要] 选区激光熔融 (Selective laser melting, SLM) 近年来在钛合金制造领域应用广泛, 然而, 其性能受限于工艺缺陷和马氏体组织特征。综述了 SLM 技术下成型态 Ti-6Al-4V 合金的缺陷和微观组织研究进展, 包括缺陷和微观组织类型、调节 SLM 工艺参数对减少缺陷和改善微观组织的作用以及基于变体选择的 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变研究。在综述目前研究的基础上, 指出完善工艺参数与组织特征联系以及研究工艺参数对相变变体选择的影响是今后研究的重要方向。

关键词: 钛合金; 选区激光熔融; 工艺参数; 缺陷; 微观组织; 变体选择

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.03.044



李琛

硕士研究生, 研究方向为钛合金增材制造技术。

增材制造 (Additive manufacturing, AM) 是根据 3D 模型数据逐层制造零件的方法。相对于传统金属零件制造的“上而下 (top-down)”思路, AM 采用了“下而上 (bottom-up)”思路^[1-2]。因此, 在复杂几何零件从设计到生产的循环中, 它具有极大的经济和效率优势。AM 独有的近净成形能力, 对原料要求的较高灵活性^[3]及原料可回收利用的特性, 使其更具有成本效益^[4-5]。随着以激光束和电子束为代表的高能束技术的发展, AM 可以制造多类别和高性能的金属零件, 目前已广泛应用于航空航天、医疗、军事和汽车等行业^[6-7]。

AM 技术的热源分为激光束、电子束和电弧等^[8-9], 原材料包括金属粉末和金属丝材^[10], 并结合不同的

工艺参数来完成熔融。近年来 AM 技术更倾向于被分为以粉末铺床为技术特征的粉末床熔融 (Powder bed fusion, BF) 和以同步送粉为技术特征的定向能量沉积 (Directed energy deposition, DED)^[11-13], 在应用较为广泛的技术中, 选区激光熔融、选区激光烧结 (Selective laser sintering, SLS)、电子束熔化 (Electron beam melting, EBM) 等是前者的代表, 激光工程化净成形 (Laser-engineered net shaping, LENS)、激光金属沉积 (Laser metal deposition, LMD)、直接金属沉积 (Direct metal deposition, DMD) 等是后者的代表。

在金属粉末 AM 领域, 钛合金因具有较高的比强度和良好的耐腐蚀性能, 成为应用 AM 技术最重要的合金

体系。Ti-6Al-4V 合金是典型的 $\alpha+\beta$ 型钛合金,具有很好的延展性、疲劳和断裂性能,成功应用于航空航天、医疗等领域,但其在成形复杂零件时受限于制造周期长和加工成本高,因此 AM-Ti-6Al-4V 合金成为重点研究对象。值得关注的是,成形过程中,金属粉末在能量束作用下产生熔池,周期性发生着熔化和凝固^[14],特别是 SLM 无预热的技术条件下,由于集中的局部热输入造成高冷却速率^[15],成形态零件具有马氏体组织特征,并具有较高残余应力,很大程度影响其机械性能^[16-17]。尽管热等静压技术(Hot isostatic pressing, HIP)^[18-20]和热处理^[21-23]被证明可以有效改善微观组织,并提高机械性能,但 HIP 技术可能导致形状复杂的零件(图 1^[24])失去其形状精度^[24],热处理则可能导致零件的微观组织不均匀^[25],从而会影响其性能。因此,本文重点关注成形态 SLM-Ti-6Al-4V 零件,对其工艺缺陷、微观组织等方面研究进行总结,以提高其广泛应用的可行性。

SLM 技术

SLM 是一种较为成熟的 AM 技术,属于粉末床熔融,即根据 CAD 模型的数据,用激光束按照特定路径选择性扫描和熔化先前铺在基材上的粉末,一层完成后,将成形平台降低等于层厚的高度,并铺上一层新的粉,重复上述过程直至零件成形^[1]。图 2^[26]为典型的 SLM 技术示意图和常见的 SLM 工艺参数示意图。

SLM 技术以激光为热源,是应用最为广泛的钛合金 AM 技术。相较于电子束,激光热源具有更小的束斑直径和更高的能量密度,因此 SLM 技术成形的零件具有更高的表面质量,可达到更小的零件壁厚,避免了粉末假烧结状态,无需考虑粉末清理,在实现零件复杂细节特征方面具有明显优势。

SLM 技术在制造零件过程中经

历了复杂的物理过程,包括激光能量的吸收和传导^[27],粉末的快速熔化和冷却,组织演变^[28],熔池流动^[29]和材料蒸发^[30]等。因此,除提高粉末质量和进行后处理外,SLM 技术需要大量的工艺参数研究作为支撑,如图 2(b)所示的焦距(Focal offset distance, FOD)、熔池宽度(Hatch spacing)、层厚(Layer thickness)和激光功率(Laser beam power)等,以控制复杂的物理过程,减少缺陷,改善组织,得到较好的综合性能。

基于复杂的物理过程,成形态的 SLM 零件常具有气孔、未熔合孔、裂纹和杂质等缺陷,影响了零件加工和机械性能,从而限制了其应用^[1]。由于快速冷却过程,成形态 SLM 零件

也生成了以针状 α' 马氏体为主的微观组织^[16],机械性能受此影响,具有较高的强度和较差的塑性。

SLM 钛合金零件缺陷及形成机理

缺陷是影响成形态 SLM-Ti-6Al-4V 合金零件精度和力学性能的关键问题,常见的缺陷可分为气孔、不完全熔合孔和裂纹等。本节论述总结了 SLM 零件缺陷的形成机理及其与原材料和工艺的联系。

气孔是 SLM 工艺中最常见的缺陷类型,分布无明显规律,以近球形为主,通常小于 100 μm ,且难以通过后处理手段消除。其形成机理得到过充分探讨^[1, 26, 31-32],主要源于金属

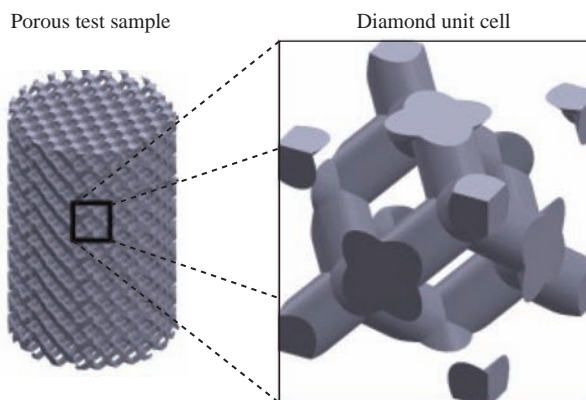
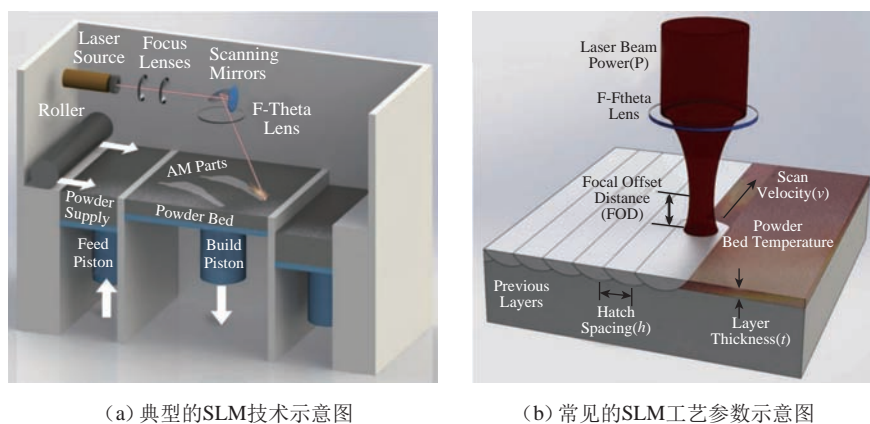


图 1 SLM 工艺制造的多孔样品模型和金刚石晶胞 3D 模型

Fig.1 3D visual representation of porous sample by SLM and diamond unit cell



(a) 典型的 SLM 技术示意图

(b) 常见的 SLM 工艺参数示意图

图 2 典型的 SLM 技术示意图和常见的 SLM 工艺参数示意图

Fig.2 Schematic of typical SLM machine and common process parameters studied for SLM processing

粉末的低堆积密度,粉末间的气体溶于熔池,在高冷却速率导致的快速凝固过程中,无法及时离开熔池,因此气体保留在凝固的 SLM 零件中。此外,SLM 过程如果使用了中空的金属粉末,也将导致气体的溶解与保留。

值得注意的是, Gong 等^[33]认为规则形状的球形气孔可能是由于快速凝固下气泡无法及时逸出导致,这些气泡可能是由于合金中的低熔点成分的气化引起,这将归因于向熔池提供的高激光能量。因此可以认为气孔出现来源于原材料粉末的缺陷及低堆积密度,同时,提供过高能量的不稳定工艺也将引起熔池中夹带气体。

不完全熔合孔也被称为熔合不足(Lack of fusion, LOF)缺陷,通常分布在扫描轨道之间和沉积层之间,主要是由于 SLM 过程中缺乏能量输入。LOF 缺陷直接源于金属粉末的不完全熔化,致使新粉末层与上一层粉末未产生足够的交叠^[31, 33-34], LOF 缺陷一般表现为产生不良黏合(图 3(a)),甚至出现完全未熔化的金属粉末(图 3(b))^[34]。

除产生层间结合外, LOF 缺陷也来自于扫描轨迹间的重叠不足,这直接导致了轨道间形成了未熔合现象。Stef 等^[35]利用显微计算机断层成像(Micro computed tomography, μ CT)技术对成形态 SLM 打印的 Ti-6Al-4V 合金孔隙进行了三维重构,并结合扫描路径进行分析。孔隙形态与分布和扫描路径直接相关,图 4^[35]展示了轨迹间重合不足区域包含大量 LOF 缺陷,这与激光能量低导致熔池宽度较小有关。

裂缝产生于高局部激光能量输入下的快速熔化和快速凝固过程。在 SLM 工艺高达 108K/s 的冷却速率下,成形态零件将产生较大的温度梯度,并相应地产生较大残余热应力。裂缝易产生于 LOF 缺陷处,特别是未熔化金属粉末表面^[36],在残

余热应力的影响下裂纹迅速扩展,具有明显的穿晶扩展特征。

综上所述, SLM 过程的工艺参数和金属粉末质量直接影响了缺陷类型和缺陷分布。球形度和均匀性差的粉末导致了气孔形成,激光能量密度过高或过低分别诱导气孔和 LOF 缺陷的产生,扫描策略和已有缺陷形貌对缺陷产生位置有重要影响。缺陷是影响成形态 SLM 零件精度和力学性能的关键问题,现阶段研

究比较全面涉及了 SLM 过程中各类参数对缺陷的影响,但在机理讨论上比较浅显,未来可借助仿真模拟和 μ CT 等检测手段来表征、预测和预防 SLM 过程的缺陷。

SLM-Ti-6Al-4V 合金组织特征

1 组织形貌

在 SLM 过程中,微观组织特征会受到工艺参数影响。对于 SLM 工艺下的成形态 Ti-6Al-4V 合金,最为

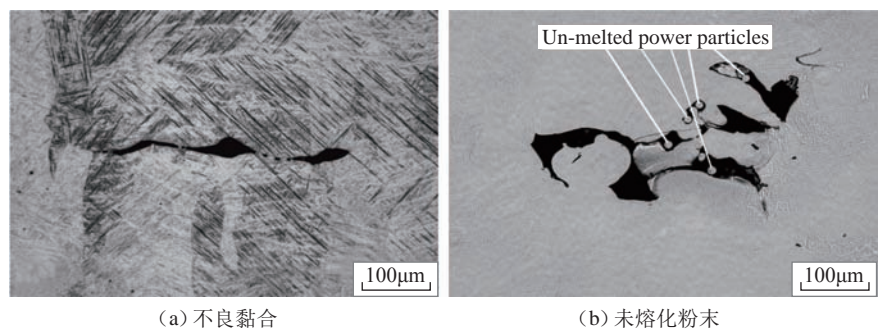


图 3 SLM-Ti-6Al-4V 零件中 LOF 缺陷的两种类型
Fig.3 Optical images of LOF defects in SLM-Ti-6Al-4V parts

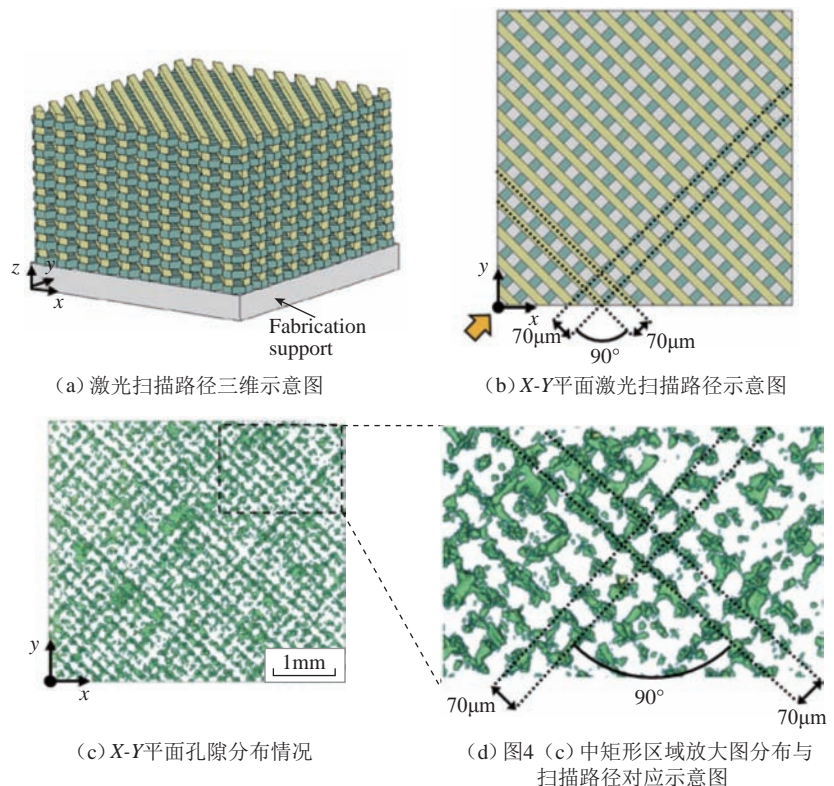


图 4 孔隙空间分布和扫描策略之间的关系
Fig.4 Relationship between defects distribution and scanning strategy

常见的组织是初生 β 柱状晶析出针状 α' 马氏体, 这种组织的出现伴随着较高的冷却速率^[37]。

Yang 等^[38]的研究表明, α' 马氏体可分为初生马氏体、二次马氏体、三次马氏体和四次马氏体, 尺寸上从较粗大的 $1\sim 3\mu\text{m}$ 到细小的 20nm 不等, 这些大小和数量不等的马氏体产生于 SLM 工艺中的快速加热和冷却的热循环过程中。Yang 等^[39]的另一项研究则发现了层状 α 相和针状 α' 马氏体相结合的组织, 这是由于熔池面积增加增强了 SLM 工艺的热循环过程, 即促进了 $\beta\rightarrow\alpha$ 的扩散转变过程。

大量研究表明, 具有层片状 $\alpha+\beta$ 微观结构的 Ti-6Al-4V 合金, 可以在不牺牲屈服强度的情况下具有较高的延展性, 因此希望通过改变工艺参数来获得层片状 $\alpha+\beta$ 组织的成型态 SLM 钛合金。Simonelli 等^[40]和 Xu 等^[41]的研究表明调节 FOD 和激光能量 (Energy density) 可以实现打印过程的固有热处理 (Intrinsic heat treatment), 利用新沉积过程的残余热量保持旧沉积层的温度, 分解马氏体组织, 得到具有 $\alpha+\beta$ 组织的成型态零件。

Xu 等^[42]也利用依托于层沉积的热循环过程, 对成形平台温度进行控制, 在打印样品的不同高度分别发现了层片状 $\alpha+\beta$ 组织、更细的

$\alpha+\beta$ 层片组织和马氏体 α' 组织 (见图 5^[42])。成形平台温度控制对组织的影响得到了 Ali 等^[43]的进一步验证, 粉末床预热促进了 $\beta\rightarrow\alpha$ 转变, 抑制了 α' 相的形成, 不同预热温度对 $\alpha+\beta$ 组织相占比等具有较大影响。

通过激光重复扫描实现固有热处理和粉末床预热是当前改善 SLM 钛合金组织的主要手段, 即使热处理和 HIP 等后处理可以改善微观组织,

通过改进工艺参数进行原位组织调控仍具有降低制造时间和成本、保证零件形状精度和组织均匀性等独特优势。

2 相变的变体选择

在钛合金 $\beta\rightarrow\alpha$ 相变中, α 相的位向关系和变体选择一直以来都是学者关注的热点。目前被广泛接受的观点^[44-47]是, 在满足伯格取向关系 ($\{0001\}_\alpha // \{110\}_\beta$) 和

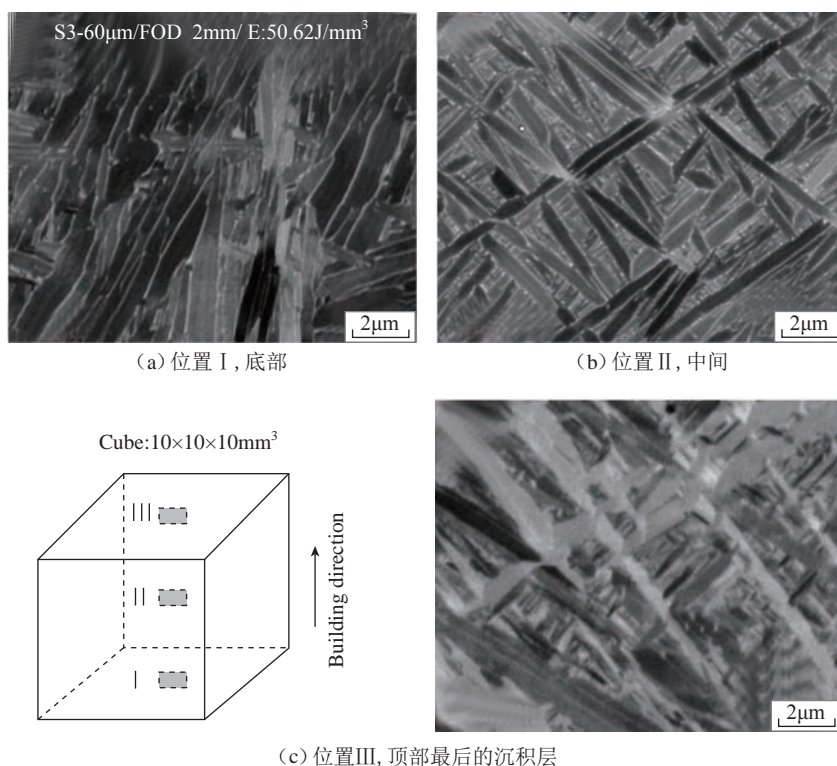


图 5 SLM-Ti-6Al-4V 零件沿沉积方向的组织变化

Fig. 5 Microstructure variation along the sample building direction of SLM Ti-6Al-4V part

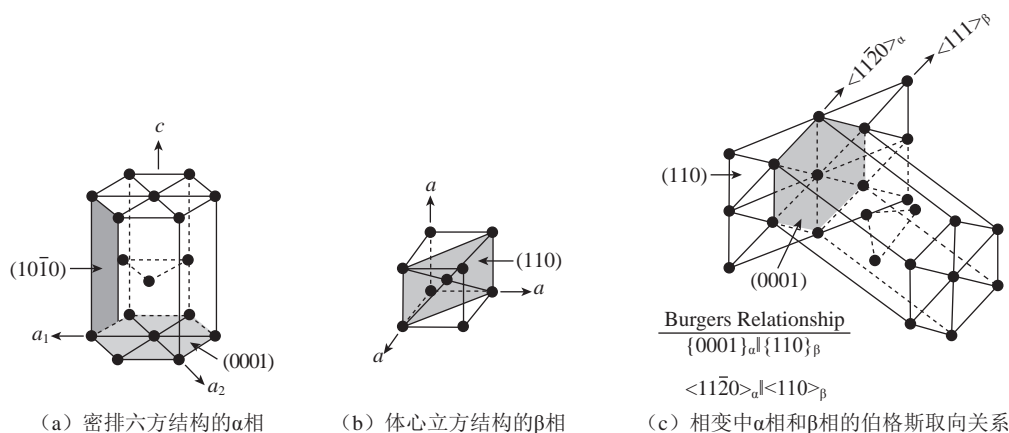


图 6 钛合金 α 相与 β 相 Burgers 取向关系示意图

Fig. 6 Schematic of Burgers orientation relationship between α and β phases during phase transformation of Ti alloy

$\langle 11\bar{2}0 \rangle_{\alpha} // \langle 111 \rangle_{\beta}$ 时, $\beta \rightarrow \alpha$ 相变会产生 12 种 α 相变体。根据理论计算^[44], 12 种 α 相的变体两两组合会形成 144 个位向关系, 它们可以分为 6 类, 除同种变体间形成 12 个小角度位向关系外, 其余 132 个位向关系可归为 5 类, 以轴角对方式表示即 $[11\bar{2}0]/60^{\circ}$, $[\bar{1}377\bar{1}2.377\ 0.359]/60.83^{\circ}$ 、 $[\bar{1}0\ 5\ 5\ 3]/63.26^{\circ}$ 、 $[\bar{1}2.38\ 1.38\ 0]/90^{\circ}$ 和 $[0001]/10.53^{\circ}$, 理论占比分别为 18.2%、36.4%、18.2%、18.2% 和 9.1%。

除了理论推导之外, 许多学者^[44-46, 48-49] 通过电子背散射衍射 (Electron backscatter diffraction, EBSD) 技术表征了 TA2 钛合金 (工业纯钛) 和 Ti-6Al-4V 合金 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变中的变体及位向关系。Wang 等^[44] 最早发现工业纯钛中马氏体相变中的 5 种位向关系占比与其理论预测值不符, Beladi 等^[46] 也在 Ti-6Al-4V 合金中发现了类似的现象: 第 1 类 ($[11\bar{2}0]/60^{\circ}$) 和第 3 类 ($[\bar{1}0\ 5\ 5\ 3]/63.26^{\circ}$) 位向关系分别占比最高 (图 7^[46])。Wang 等^[44] 研究表明, 纯钛中变体位向关系的择优出现, 与相变中变体的自适应现象相关, 可通过马氏体相变唯象理论解释: 3 个变体团簇两两之间互相形成第 1 类或第 3 类位向关系时, 晶格畸变 (bcc \rightarrow hcp 的 Bain 应变)、非均匀切变和刚性转动产生的应变相互适应, 达到总畸变最小化。

近年来 Farabi 等^[48] 对 Ti-6Al-4V 合金进行了相似研究, 由于 Al 元素的存在而优化了 Bain 应变的计算, 得到了相近的结论。此外, Farabi 等^[49] 在工业纯钛和 Ti-6Al-4V 合金中分别提取了 35530 和 21447 个三变体团簇界面进行变体间位向关系的研究, 如图 8^[49] 分类, 发现三变体两两之间的位向关系, 倾向于类别 1 和类别 3, 在 TA2 钛合金和 Ti-6Al-4V 合金中占比分别为 99% 和 98%。同时, 类别 3 中 I 型界面常为 $[11\bar{2}0]/60^{\circ}$ 和 $[\bar{1}\ 0\ 5\ 5\ 3]/63.26^{\circ}$,

这与前述总畸变最小化的预测一致, 但类别 1 界面形成原因无相关理论支撑。

值得注意的是, 在 Ti-6Al-4V 合金的 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变中, 除上述 5 种理论预测的位向关系外, EBSD 的观察中常出现 $[11\bar{2}0]/30^{\circ}$ 的位向关系^[45, 49-50], 这种理论预测中没有出现的界面的产生尚无明确原因, 仅有 Wang 等^[50] 借助分子动力学模拟, 证明该类界面能量最低, 不违背变体出现的基本规律。

Ti-6Al-4V 合金 AM 的过程也会发生 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变, 其热过程会导致初生 β 相的 $\langle 100 \rangle$ 晶向平行于沉积方向, 决定了 AM 零件具有力学性能的各向异性^[51-53], 而 β 相的强织构也为 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变的变体选择研究提供了新思路。Zhang 等^[54] 研究了 EBM 制造的 Ti-6Al-4V 合金中 α 变体选择的影响, 在 EBSD 数据中分别提取出 α 相不同变体, 分别进行 α 相总体和各类 α 相变体基于 $\{0001\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$ 基面滑移系 (被普遍认为是室温下最主要的滑移系^[55-56]) 的 Schmid 因子分析 (图 9^[54]), 不同受力状态下各类变体呈现出完全不同的 Schmid 因子数值, 因此 α 相的变体选择对力学性能各向异性具有明显的影响。

SLM 等激光打印工艺下的 Ti-6Al-4V 合金, 由于快速冷却形成的细小组织和较大的内应力, EBSD 测试的识别率往往较差, 限制了对其进行 α 变体研究。仅有 Fu 等^[51] 在 2019 年对激光立体成形 (Laser solid forming, LSF) 的 Ti-6Al-4V 合金进行了 α 相变体的研究, 对不同沉积高度的不同形貌组织进行了 5 种基本位向关系的定量分析, 发现 $[11\bar{2}0]/60^{\circ}$ 界面具有最大的形状应变自适应性 (图 10^[51]), 而 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变过程则未进一步研究。

SLM 过程中的相变与组织演变受复杂工艺参数的影响, SLM 制造

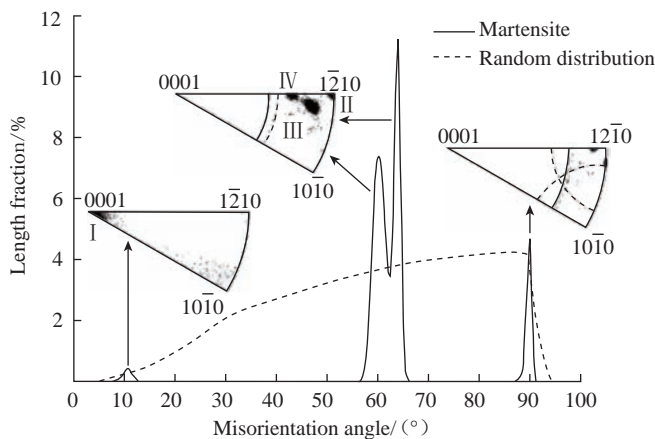


图 7 符合 Burgers 取向关系的马氏体间错配角分布情况

Fig.7 Misorientation angle distribution of martensite associated with Burgers orientation relationship

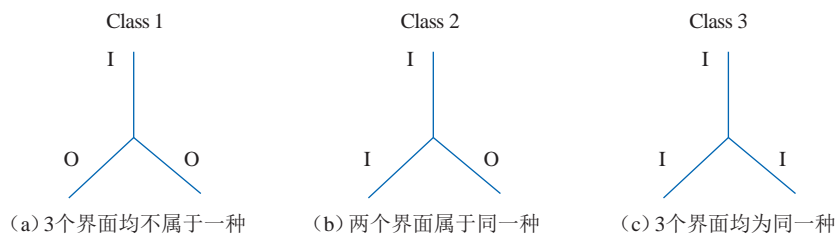


图 8 基于变体界面类型的三叉界面分类

Fig.8 Classification of triple junctions based on variant boundary type

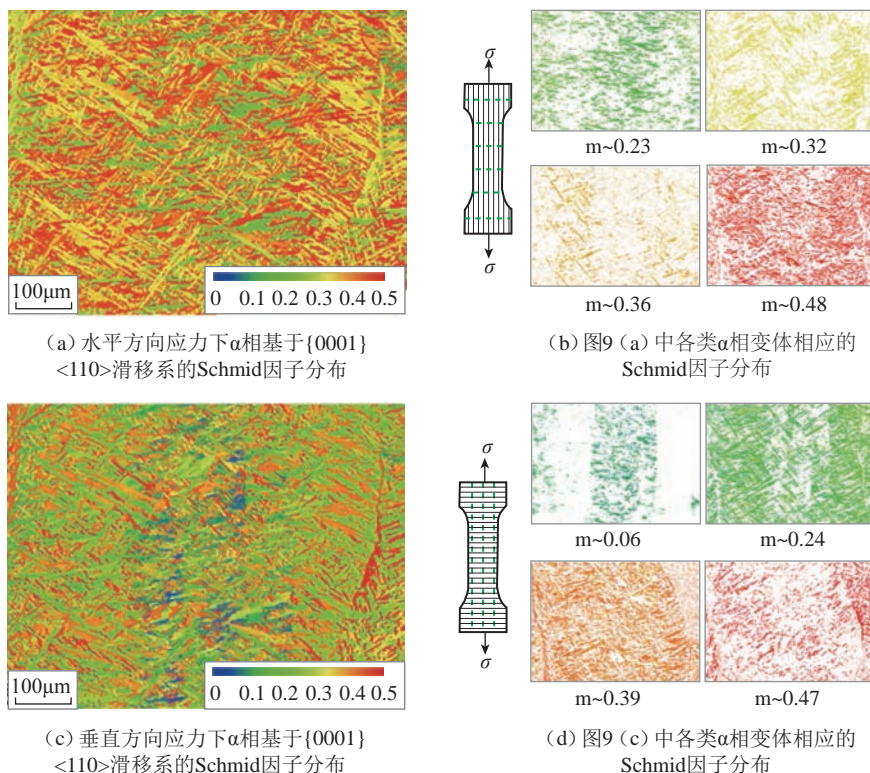


图9 电子束打印 Ti-6Al-4V 合金的 EBSD 结果

Fig.9 EBSD map of EBM Ti-6Al-4V part

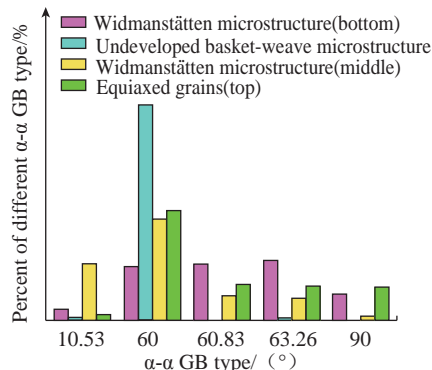


图10 LSF Ti-6Al-4V 合金不同组织中界面分布情况

Fig.10 Grain boundary types of different microstructures in LSF Ti-6Al-4V

的 Ti-6Al-4V 合金零件面向直接应用,调节工艺参数将成为改善微观组织的重要手段。 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变在 SLM 过程中决定了成形零件的微观组织,建立工艺参数与相变变体选择的联系,将从原理上指导微观组织的改善,是重要的研究方向。

结论

SLM 技术以其成本效益和性能

优势,在钛合金制造领域有着广泛的应用前景,SLM 技术制备 Ti-6Al-4V 合金在工艺、组织和性能等方面已经进行了大量研究,具有成熟的工艺,可以媲美传统钛合金制备工艺,在工业生产领域具有极大潜能。然而,SLM 技术制备的 Ti-6Al-4V 合金往往伴随部分缺陷,呈针状马氏体组织,这将导致成形零件塑性较差,限制其实际推广应用。通过热处理

和 HIP 等后处理可减少缺陷并改善组织,但无法有效减少气孔等缺陷,也可能引起组织不均匀和零件宏观形变等问题。因此,通过调节工艺参数的原位调控来减少缺陷、改善微观组织是更值得青睐的选择,本文对此进行了总结和展望。

(1) SLM-Ti-6Al-4V 合金中气孔和 LOF 等缺陷与工艺参数有密切联系,特别是 LOF 缺陷的形成和分布,受到激光功率、层厚和熔池宽度等多种参数的影响,借助仿真模拟和 μ CT 等检测手段,有助于进一步完善缺陷形成机理,建立工艺参数与缺陷的直接联系。

(2) SLM 过程中通过固有热处理和基板预热等手段,控制依托于层沉积的热循环过程,可有效原位改善形态 Ti-6Al-4V 合金的微观组织。

(3) Ti-6Al-4V 合金 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变的 α 相变体选择对微观组织和力学性能有较大影响,但 AM 过程中 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变研究尚未深入,研究工艺参数与 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变的联系,将从相变角度为原位改善成形形态 SLM-Ti-6Al-4V 合金的微观组织提供新思路。

参考文献

- [1] ZHANG B, LI Y T, BAI Q. Defect formation mechanisms in selective laser melting: A review[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(3): 515-527.
- [2] GIBSON I, ROSEN D W, STUCKER B. Development of additive manufacturing technology[M]//Additive Manufacturing Technologies. Boston: Springer, 2010.
- [3] FOTOVVATI B, NAMDARI N, DEGHANGHADIKOLAEI A. Fatigue performance of selective laser melted Ti6Al4V components: State of the art[J]. Materials Research Express, 2018, 6(1): 012002.
- [4] ALLEN J. Investigation into the comparative costs of additive manufacture vs. machine from solid for aero engine parts: RTO-MP-AVT-139[R]. Derby: Rolls-Royce PLC.
- [5] GALARRAGA H, WARREN R J, LADOS D A, et al. Effects of heat treatments on microstructure and properties of Ti-6Al-4V ELI

- alloy fabricated by electron beam melting (EBM) [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 685: 417–428.
- [6] XIONG F Y, CHEN J W, HUANG C Y, et al. Numerical simulation on metallic additive manufacturing[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2020, 50(9): 090007.
- [7] ZHANG L C, LIU Y J, LI S J, et al. Additive manufacturing of titanium alloys by electron beam melting: A review[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2018, 20(5): 1700842.
- [8] YU J, ROMBOUTS M, MAES G, et al. Material properties of Ti6Al4V parts produced by laser metal deposition[J]. *Physics Procedia*, 2012, 39: 416–424.
- [9] LEUDERS S, THÖNE M, RIEMER A, et al. On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance[J]. *International Journal of Fatigue*, 2013, 48: 300–307.
- [10] SEIFI M, SALEM A, BEUTH J, et al. Overview of materials qualification needs for metal additive manufacturing[J]. *Journal of Materials*, 2016, 68(3): 747–764.
- [11] LEWANDOWSKI J J, SEIFI M. Metal additive manufacturing: A review of mechanical properties[J]. *Annual Review of Materials Research*, 2016, 46(1): 151–186.
- [12] FRAZIER W E. Metal additive manufacturing: A review[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, 23(6): 1917–1928.
- [13] FROES F H, DUTTA B. The additive manufacturing (AM) of titanium alloys[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 1019: 19–25.
- [14] SHIN Y C, BAILEY N, KATINAS C, et al. Predictive modeling capabilities from incident powder and laser to mechanical properties for laser directed energy deposition[J]. *Computational Mechanics*, 2018, 61(5): 617–636.
- [15] KATINAS C, LIU S Y, SHIN Y C. Self-sufficient modeling of single track deposition of Ti–6Al–4V with the prediction of capture efficiency[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2019, 141(1): 011001. DOI:10.1115/1.4041423.
- [16] TAMMAS-WILLIAMS S, ZHAO H, LÉONARD F, et al. XCT analysis of the influence of melt strategies on defect population in Ti–6Al–4V components manufactured by Selective Electron Beam Melting[J]. *Materials Characterization*, 2015, 102: 47–61.
- [17] BISWAS N, DING J L, BALLA V K, et al. Deformation and fracture behavior of laser processed dense and porous Ti6Al4V alloy under static and dynamic loading[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 549: 213–221.
- [18] HRABE N, GNÄUPEL-HEROLD T, QUINN T. Fatigue properties of a titanium alloy (Ti–6Al–4V) fabricated via electron beam melting (EBM): Effects of internal defects and residual stress[J]. *International Journal of Fatigue*, 2017, 94: 202–210.
- [19] GU Y B, NESTERENKO V F. Dynamic behavior of HIPed Ti–6Al–4V[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(4): 771–783.
- [20] CAO S, CHEN Z E, LIM C V S, et al. Defect, microstructure, and mechanical property of Ti–6Al–4V alloy fabricated by high-power selective laser melting[J]. *Journal of Materials*, 2017, 69(12): 2684–2692.
- [21] ALCISTO J, ENRIQUEZ A, GARCIA H, et al. Tensile properties and microstructures of laser-formed Ti–6Al–4V[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2011, 20(2): 203–212.
- [22] HAYES B J, MARTIN B W, WELK B, et al. Predicting tensile properties of Ti–6Al–4V produced via directed energy deposition[J]. *Acta Materialia*, 2017, 133: 120–133.
- [23] VRANCKEN B, THUIS L, KRUTH J P, et al. Heat treatment of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting: Microstructure and mechanical properties[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, 541: 177–185.
- [24] WAUTHLE R, VRANCKEN B, BEYNAERTS B, et al. Effects of build orientation and heat treatment on the microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V lattice structures[J]. *Additive Manufacturing*, 2015, 5: 77–84.
- [25] LIU S Y, SHIN Y C. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review[J]. *Materials & Design*, 2019, 164: 107552.
- [26] SHIPLEY H, MCDONNELL D, CULLETON M, et al. Optimisation of process parameters to address fundamental challenges during selective laser melting of Ti-6Al-4V: A review[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2018, 128: 1–20.
- [27] HUSSEIN A, HAO L, YAN C Z, et al. Finite element simulation of the temperature and stress fields in single layers built without-support in selective laser melting[J]. *Materials & Design (1980–2015)*, 2013, 52: 638–647.
- [28] XU W, SUN S, ELAMBASSERIL J, et al. Ti–6Al–4V additively manufactured by selective laser melting with superior mechanical properties[J]. *Journal of Materials*, 2015, 67(3): 668–673.
- [29] 张晓博, 党新安, 杨立军. 选择性激光熔化成形过程的球化反应研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(6): 061401.
- ZHANG Xiaobo, DANG Xin'an, YANG Lijun. Study on balling phenomena in selective laser melting[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(6): 061401.
- [30] THUIS L, KEMPEN K, KRUTH J P, et al. Fine-structured aluminium products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder[J]. *Acta Materialia*, 2013, 61(5): 1809–1819.
- [31] VILARO T, COLIN C, BARTOUT J D. As-fabricated and heat-treated microstructures of the Ti–6Al–4V alloy processed by selective laser melting[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2011, 42(10): 3190–3199.
- [32] QIU C L, ADKINS N J E, ATTALLAH M M. Microstructure and tensile properties of selectively laser-melted and of HIPed laser-melted Ti–6Al–4V[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 578: 230–239.
- [33] GONG H J, RAFI K, GU H F, et al. Analysis of defect generation in Ti–6Al–4V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes[J]. *Additive Manufacturing*, 2014, 1–4: 87–98.
- [34] LIU Q C, ELAMBASSERIL J, SUN S J, et al. The effect of manufacturing defects on the fatigue behaviour of Ti–6Al–4V specimens fabricated using selective laser melting[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 891–892: 1519–1524.
- [35] STEF J, POULON-QUINTIN A, REDJAIMIA A, et al. Mechanism of porosity formation and influence on mechanical properties in selective laser melting of Ti–6Al–4V parts[J]. *Materials & Design*, 2018, 156: 480–493.
- [36] 张升, 桂睿智, 魏青松, 等. 选择性激光熔化成形 TC4 钛合金开裂行为及其机理研究[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(23): 21–27.
- ZHANG Sheng, GUI Ruizhi, WEI Qingsong, et al. Cracking behavior and formation mechanism of TC4 alloy formed by selective laser melting[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(23): 21–27.
- [37] AHMED T, RACK H J. Phase transformations during cooling in $\alpha+\beta$ titanium alloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1998, 243(1–2): 206–211.
- [38] YANG J J, YU H C, YIN J, et al.

Formation and control of martensite in Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting[J]. *Materials & Design*, 2016, 108: 308–318.

[39] YANG J J, HAN J, YU H C, et al. Role of molten pool mode on formability, microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy[J]. *Materials & Design*, 2016, 110: 558–570.

[40] SIMONELLI M, TSE Y Y, TUCK C. The formation of $\alpha+\beta$ microstructure in as-fabricated selective laser melting of Ti-6Al-4V[J]. *Journal of Materials Research*, 2014, 29(17): 2028–2035.

[41] XU W, SUN S, ELAMBASSERIL J, et al. Ti-6Al-4V additively manufactured by selective laser melting with superior mechanical properties[J]. *Journal of Materials*, 2015, 67(3): 668–673.

[42] XU W, BRANDT M, SUN S, et al. Additive manufacturing of strong and ductile Ti-6Al-4V by selective laser melting via in situ martensite decomposition[J]. *Acta Materialia*, 2015, 85: 74–84.

[43] ALI H, MA L, GHADBEIGI H, et al. In-situ residual stress reduction, martensitic decomposition and mechanical properties enhancement through high temperature powder bed pre-heating of selective laser melted Ti6Al4V[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 695: 211–220.

[44] WANG S C, AINDOW M, STARINK M J. Effect of self-accommodation on α/α

boundary populations in pure titanium[J]. *Acta Materialia*, 2003, 51(9): 2485–2503.

[45] STANFORD N, BATE P S. Crystallographic variant selection in Ti-6Al-4V[J]. *Acta Materialia*, 2004, 52(17): 5215–5224.

[46] BELADI H, CHAO Q, ROHRER G S. Variant selection and intervariant crystallographic planes distribution in martensite in a Ti-6Al-4V alloy[J]. *Acta Materialia*, 2014, 80: 478–489.

[47] GEY N, HUMBERT M. Specific analysis of EBSD data to study the texture inheritance due to the $\beta\rightarrow\alpha$ phase transformation[J]. *Journal of Materials Science*, 2003, 38(6): 1289–1294.

[48] FARABI E, HODGSON P D, ROHRER G S, et al. Five-parameter intervariant boundary characterization of martensite in commercially pure titanium[J]. *Acta Materialia*, 2018, 154: 147–160.

[49] FARABI E, TARI V, HODGSON P D, et al. On the grain boundary network characteristics in a martensitic Ti-6Al-4V alloy[J]. *Journal of Materials Science*, 2020, 55(31): 15299–15321.

[50] WANG J, BEYERLEIN I J. Atomic structures of $\{0\bar{1}10\}$ symmetric tilt grain boundaries in hexagonal close-packed (HCP) crystals[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2012, 43(10): 3556–3569.

[51] FU M S, YUAN Y R, MA X, et

al. A study of α variant selection in laser solid forming Ti-6Al-4V[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 792: 1261–1266.

[52] SIMONELLI M, TSE Y Y, TUCK C. Effect of the build orientation on the mechanical properties and fracture modes of SLM Ti-6Al-4V[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 616: 1–11.

[53] YANG J J, YU H C, WANG Z M, et al. Effect of crystallographic orientation on mechanical anisotropy of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy[J]. *Materials Characterization*, 2017, 127: 137–145.

[54] ZHANG Y L, CHEN Z, QU S J, et al. Multiple α sub-variants and anisotropic mechanical properties of an additively-manufactured Ti-6Al-4V alloy[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 70: 113–124.

[55] LEO PRAKASH D G, HONNIBALL P, RUGG D, et al. The effect of β phase on microstructure and texture evolution during thermomechanical processing of $\alpha + \beta$ Ti alloy[J]. *Acta Materialia*, 2013, 61(9): 3200–3213.

[56] DAWSON P R, BOYCE D E, PARK J S, et al. Determining the strengths of HCP slip systems using harmonic analyses of lattice strain distributions[J]. *Acta Materialia*, 2018, 144: 92–106.

通讯作者: 弭光宝, 高级工程师, 博士, 研究方向为航空发动机高温钛合金, E-mail: miguangbao@163.com.

Research Progress in Defect and Microstructure of As-Built Selective Laser Melting Ti-6Al-4V Titanium Alloy

LI Chen¹, MI Guangbao², FENG Aihan¹, HUANG Xu², QU Shoujiang¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Titanium Alloys, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

[ABSTRACT] Selective laser melting (SLM) has been widely used in production of titanium alloy parts in recent years, but its performance is limited by process defects and martensite microstructure. The research progress of defects and microstructure of as-built SLM-Ti-6Al-4V was summarized, including defects types and microstructure types, the effect of adjusting process parameters on reducing defect and regulating microstructure, and the $\beta\rightarrow\alpha$ phase transformation research based on variant selection. Based on the main research mentioned above, improving the relationship between process parameters and microstructure characteristics and studying the influence of process parameters on phase transformation variant selection will be the focused directions in the further research.

Keywords: Titanium alloy; Selective laser melting (SLM); Process parameter; Defect; Microstructure; Variant selection

(责编 阳光)

引文格式: 车倩颖, 李会霞, 贺卫卫, 等. TiAl 合金粉床电子束选区熔化成形研究进展 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(3): 52-60, 67.
CHE Qianying, LI Huixia, HE Weiwei, et al. Research progress in TiAl alloys prepared by powder selective electron beam melting[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(3): 52-60, 67.

TiAl 合金粉床电子束选区熔化成形研究进展*

车倩颖¹, 李会霞¹, 贺卫卫^{1,2}, 朱纪磊^{1,2}, 陈睿¹, 程康康¹, 金园园¹, 王宇¹

(1. 西安赛隆金属材料有限责任公司, 西安 710018;

2. 西北有色金属研究院金属多孔材料国家重点实验室, 西安 710016)

[摘要] 粉床电子束选区熔化成形是增材制造脆性 TiAl 合金复杂构件的理想技术。从原料粉末、致密化、化学成分、微观组织、凝固及相变、后处理、力学性能、成形精度与表面粗糙度等几个方面综述了粉床电子束选区熔化成形 TiAl 合金的研究现状, 对目前存在的问题及应对措施进行了评述, 并对其未来研究方向进行了展望。

关键词: TiAl 合金; 电子束选区熔化成形; 化学成分; 微观组织; 力学性能

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.03.052



车倩颖

助理工程师, 主要从事稀有金属粉床电子束增材制造研究相关工作。参与陕西省科技重大专项、广东省重点领域研发计划等多个项目研究。

TiAl 合金具有低密度、高比强度、高温抗氧化及抗蠕变性能优异等特点, 被认为是极具应用潜力的轻质耐热材料, 在 600~900℃ 范围内有望替代镍基高温合金成为新一代航空发动机用高温结构材料^[1-3]。目前, TiAl 合金大部分采用铸造、锻造、粉末冶金等成形技术。常规铸造技术易形成粗大的组织和严重的成分偏析, 产生孔隙、夹杂等缺陷, 不能形成细小均匀的组织, 需通过后续机械热处理细化晶粒。锻造技术经大变形加工获得综合力学性能优异的细小组织, 但在复杂零件成形方面存在困难。粉末冶金可从根本上解决组织粗大、成分偏析等问题, 制备出致密的 TiAl 合金, 但常用的热等静压方法费时且成本较高。TiAl 合金室温脆性大, 加工性能差, 传统的加工手段越来越难以满足工程化应用的需

求, 增材制造技术作为一种制备 TiAl 合金的近成形工艺, 被寄予厚望。

目前, 激光金属沉积(Laser metal deposition, LMD)、激光选区熔化(Selective laser melting, SLM)和电子束选区熔化(Selective electron beam melting, SEBM)等 3D 打印技术, 都被人们用来尝试制备 TiAl 合金, 但 LMD 和 SLM 工艺都无法解决成形时由于热应力导致的开裂问题。SEBM 可预热温度至 1000℃ 以上, 有效降低增材制造快速熔化、凝固过程中的温度梯度, 同时利用电子束快速扫描预热提高温度场分布均匀性, 并进行随形热处理, 进行残余应力原位释放, 有效解决 TiAl 合金成形过程中的变形开裂问题; 且在真空环境下成形, 可有效控制 TiAl 合金氧、氮等间隙元素增量, 防止零件性能恶化; 另外电子束能量密度

* 基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2019B090904001); 陕西省科技重大专项(2019zdzx01-04-03); 陕西省重点研发计划(2019GY-196)。

高,使高熔点 TiAl 合金粉末充分熔化,实现致密化,成形效率高,交货周期短^[4-5]。由于 SEBM 技术在制备 TiAl 合金复杂构件方面具有独特优势,国外意大利 Avio Vero 公司采用电子束 3D 打印技术制造的 TiAl 合金航空发动机燃烧室、喷嘴、空心叶片等构件,已成功应用在新一代航空发动机上,同时该公司为美国 GE 公司 Gnx 发动机研制的 TiAl 合金叶片已完成 GE9x 发动机飞行测试,并于 2020 年 9 月 28 日取得 FAA 适航认证,这将 SEBM 成形 TiAl 合金叶片的应用推向了新高点。

本文综述了 TiAl 合金 SEBM 成形技术的研究现状,从粉末原料、致密化、化学成分、微观组织、凝固相变、后处理、力学性能、成形精度与表面粗糙度等方面全方位解读了 SEBM 成形过程面临的关键技术问题、产生机理及应对措施,并对 TiAl 合金 SEBM 成形的发展进行了展望。

关键问题分析

1 原料粉末

粉末在成形底板上连续均匀致密地铺展,是电子束作用下形成连续液态熔池的基础,也是致密化的基本保证。因此 TiAl 合金的 SEBM 成形对合金粉末的粒度分布、形貌、流动性、松装密度具有较高的要求。目前 SEBM 选用 TiAl 预合金粉末粒度范围通常为 45~150 μm ,粉末的制备通常采用惰性气雾化(GA)与等离子旋转电极雾化(PREP)两种方法,制备的粉末微观形貌如图 1 所示,粉末的物化性能如表 1 所示。GA 粉末粒度更细,球形度良好,但常伴随不规则粉末、卫星粉及空心粉(图 1(a)),空心粉在 SEBM 过程中易形成气孔缺陷。PREP 粉末几乎无空心粉,球形度更高($\geq 95\%$),无卫星粉(图 1(b)),但粒度较粗且存在 Al 组分在粉末近表面区域的挥

发问题^[6]。从表 1 可以看出,GA 粉末的氧含量更低。PREP 工艺制备的 TiAl 合金粉末截面组织存在树枝状和包状两种状态,不同组织的粉末对传统塑性变形致密化工艺的表现不同^[7],但还没有关于粉末初始显微结构对 SEBM 成形质量影响的报道。TiAl 合金粉末循环利用过程中,粉末形貌、表面状态、粒度分布、流动性、松装密度、化学成分(尤其氧、铝含量)都会发生变化,对粉末的工艺适用性产生剧烈影响,但目前还没有针对 TiAl 合金粉末循环利用建立使用和修复标准。西安赛隆金属材料有限责任公司与西北有色金属研究院联合制定了适用于传统粉末冶金及增材制造用球形钛铝粉末的有色金属行业标准(YS/T 1296—2019),以 PREP 方法制备的 TiAl 合金粉末已得到广泛应用。

2 致密化

成形高致密的 TiAl 合金是保证力学性能的基础,SEBM 成形 TiAl 合金的缺陷包括变形开裂、气孔和熔合不良(图 2)。变形开裂问题主要源于增材制造快速熔化-凝固过程中

产生的热应力,目前主要解决措施为利用电子束快速预热成形底板及逐层铺置的粉末,降低成形过程中的温度梯度,提高热场分布均匀性^[8]。目前 TiAl 合金成形底板的预热温度在 1000~1150 $^{\circ}\text{C}$ 之间,粉床预热工艺由于采用的设备、原材料等诸多方面的不同,还未形成统一,但其最终目的是维持底板及粉床工作温度以保证粉床的稳定性^[9-11]。形成气孔的原因有两种^[5,12]:(1)金属粉末制备过程中,氩气进入粉末,形成氩气泡,成形时残留在试样中形成气孔,且不能通过调整工艺参数消除,通过热等静压(HIP)可将孔隙率(2%)降低至 1%以内^[12];(2)成形过程中铝元素的挥发导致球形气孔的产生^[13]。通常采用较小的能量密度和调整扫描策略等工艺参数减少熔池过热,通过控制铝元素损失减少气孔的形成。

层间结合不良缺陷通常呈长缝状,主要原因是熔池深度无法贯穿多个粉末层,使粉层间部分区域无法形成良好的冶金结合。可以通过调整工艺参数进行消除,研究发现,低扫描速度高线能量密度或高扫描速度

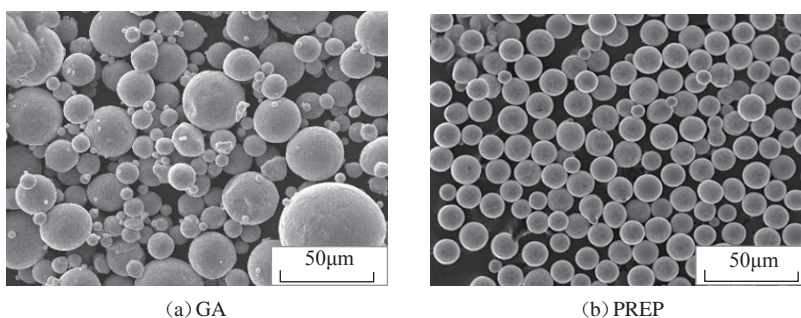


图 1 GA 与 PREP 法制备的 Ti-48Al-2Cr-2Nb 粉末微观形貌

Fig.1 Morphology of Ti-48Al-2Cr-2Nb powders prepared by GA and PREP

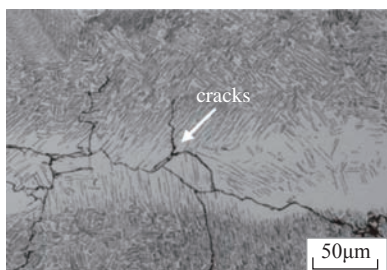
表 1 GA 与 PREP 法制备的 Ti-48Al-2Cr-2Nb 粉末的物理化学性能

Table 1 Physicochemical properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb powders prepared by GA and PREP

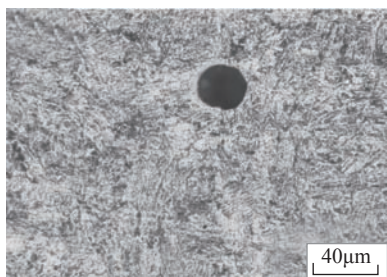
物化性能	流动性 / ($\text{s} \cdot 50\text{g}^{-1}$)	松装密度 / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	振实密度 / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	球形率 /%	氧含量 /%
GA	29.0	2.20	2.24	≥ 85	≤ 0.08
PREP	27.8	2.37	2.50	≥ 95	≤ 0.12

低线能量密度可获得高致密度试样^[13],同时降低粉末层厚度也是提高致密化的一种方法^[14]。Juechter等^[9]在SEBM成形Ti-45Al-4Nb-C的研究中发现扫描速度和扫描间距对能量输入有很大的影响,如图3所示,虚线代表形成致密试样所需的最小能量输入,随着扫描速度和扫描间距的增加,热量的损失较小,因此获得致密试样所需的能量输入逐渐减小至稳定值。

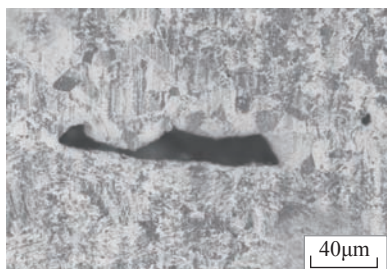
目前,研究更多的是利用调整工艺参数和减小铺粉厚度等对TiAl合金成形质量进行控制,合适的工艺参数可以获得表面光滑、高致密度的成形件,致密度超过99%,但成形件内部仍存在一些较小的孔隙缺陷,通过对成形件进行热等静压处理,可使部分孔隙闭合。



(a) 变形开裂



(b) 气孔

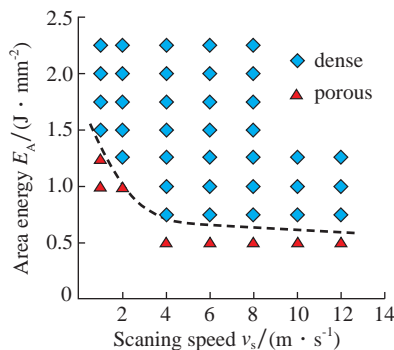


(c) 熔合不良

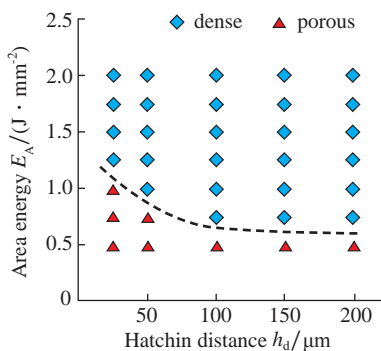
图2 SEBM成形TiAl合金试样中的缺陷
Fig.2 Defects in SEBM TiAl alloy specimens

3 化学成分

在某种意义上O、N元素可视为TiAl合金的合金化元素,不同含量的O对TiAl合金具有固溶强化和析出强化(Al_2O_3)作用,可以提高合金的蠕变抗力和屈服强度,但会导致合金室温塑性(O的质量分数 $\geq 0.12\%$)急剧下降^[15]。SEBM过程在真空下进行,TiAl合金SEBM成形件较粉末基本没有氮增量,不同设备、不同工艺下,氧增量控制差异比较大,最终氮、氧应控制在引发脆性的浓度值以内(O的质量分数是0.1%,N的质量分数是0.06%)^[12]。但是针对TiAl合金粉末循环使用过程中氧含量的变化还鲜有报道,缺乏系统研究,工程化问题中一个关键任务就是建立粉末循环使用规范。



(a) 能量输入与扫描速度的关系
(扫描间距恒定100 μm)



(b) 能量输入与扫描距离的关系
(功率恒定600W)

图3 Ti-45Al-4Nb-C合金致密化工艺窗口
Fig.3 Densification processing window of Ti-45Al-4Nb-C alloy

TiAl合金在高温区相对较窄的Al含量范围内存在2个包晶反应,使得其物相组成及显微组织对Al含量很敏感,而SEBM成形时能量输入短时较高,铝元素损失尤为明显,因此TiAl合金SEBM过程中Al元素的控制对其组织性能的掌握尤为关键。Al元素挥发的影响因素主要有:(1)能量输入。有研究发现随着能量输入增加,Al的损失逐渐增加,当线能量为 $1.1J/mm^2$ 时,Al的原子百分比损失最高可达4%^[13];(2)合金成分。高Nb-TiAl合金中Al的质量分数损失量(2%)高于低Nb-TiAl合金(1%)中的数值,主要是高Nb-TiAl合金中难熔元素含量的增加导致熔化温度增加,较高的熔池温度加快了Al的挥发速率^[16];(3)位置分布。陈玮等^[17]在SEBM成形Ti-48Al-2Cr-2Nb试棒过程中,采用外围“contour(轮廓)”工艺+内部“hatch(孵化)”工艺,由于内部与外围能量输入的不同,在外围区域形成了1.5mm宽的条带。沿着过渡区域进行EDS扫描发现,Al含量由内到外逐渐下降。定量分析发现内部Al烧损2.58%,外围Al烧损高达3.99%。由于Al含量的差别,其内部组织主要为 γ 等轴晶,而外围组织则更加细小。

对于Al元素挥发问题的攻克主要有以下3个思路:(1)粉末原料中进行Al补偿。早期研究大多采用此种方法,但Al补偿之后的材料成分已与待研究体系不同,会改变合金的相组成,基于TiAl合金对Al元素的敏感性,并不能单一依靠Al补偿来解决该问题^[18]。(2)较小的线能量密度。成形过程中采用较低的线能量密度可以降低熔池温度,避免局部过热导致Al损失,同时为保证粉末充分熔化、零件致密化,应减小扫描间距和切层厚度。同时较小的扫描间距使材料不断加热,达到固相线温度,较大的扫描间距导致材料瞬时熔化,熔池过热,Al损失增加。Zhou等^[19]在SEBM

成形 TiAl 合金时采用多次低能量密度和分区扫描的特殊扫描策略,可以使 Al 元素的损失量相比传统单次扫描降低 50%~67%。由此可见,避免 Al 损失的关键是防止局部过热。(3) 提高真空室压力。Al 元素临界挥发温度随真空室压力的增大而升高,从而对抑制 Al 元素的挥发起到积极的作用。Zhou 等^[19]在 EBSM 制备 Ti-47Al-2Cr-2Nb 合金的研究中表明, 4×10^{-3} Pa 低真空压力下 Al 损失明显高于 1 Pa 真空压力的损失量(见图 4),在线能量为 28.8 J/mm^2 时 Al 损失率最高达 31%。

除了 Al 元素损失,还应重点关注元素分布的均匀性问题。SEBM 过程中熔池冷却速度较快,合金元素无法进行充分混合,导致 Al 元素分布不均匀,同时,较小的线能量密度导致 Al 元素不均匀分布现象更加明显^[13]。基于 TiAl 合金对 Al 含量的敏感性,Al 元素在 SEBM 过程中的损失与分布均不可忽略,这使得线能量密度的协调控制显得尤为重要。

4 微观组织

TiAl 合金有 4 种典型的组织结构:近 γ 组织(NG)、双态组织(DP)、近片层组织(NL)、全层片组织(FL)。SEBM 制备的 TiAl 合金纵剖面通常呈现独特的层带交替组织,一层是由细小片状 α_2 晶粒及等轴 γ 晶粒组成

的双态组织,另一层由更粗大的等轴 γ 相晶粒组成。层带中晶粒尺寸细小($\sim 20 \mu\text{m}$),远低于传统方法制备试样的晶粒尺寸。Kan 等^[20]采用 SEBM 成形 Ti-45Al-8Nb 合金,发现在成形试样底部存在明显的片层晶团退化及片层粗化现象,主要是后续的扫描过程使凝固组织经历原位热循环过程,同时电子束成形时熔池快速凝固,导致内部存在残余应力,显微组织发生变化。此外,成形时的温度梯度和 Al 元素的损失使显微组织呈现不均匀分布,可通过降低熔化电流改善组织不均匀现象^[21]。另外, Yang 等^[22]采用 $1200 \text{ }^\circ\text{C}/2\text{h}$ 和 $1300 \text{ }^\circ\text{C}/10\text{min}$ 的工艺对沉积态 TiAl 合金进行热处理,通过热处理,组织均匀性得到较大改善,整体呈现粗大的全片层结构。另外试样的建造方向对组织也有重要的影响, Todai 等^[11]研究了不同试样摆放角度对层带交替组织的影响,发现层带组织的平均晶粒尺寸与成形角度变化无关,层带组织间隔接近单层铺粉厚度, SEBM 成形时熔池深度不同,所经历的温度场不同,显微组织从上到下呈现不同的特征,如图 5(b)~(e)分别呈现为 FL、NL、DP 和 NG 组织结构,随着逐层铺粉及熔化,已成形金属接受循环热处理,使组织发生转变,形成了这种特殊的层状结构,但事实上层状结构之间的界限并

不清晰,这可能与粉末尺寸、分布、扫描路径、Al 元素的蒸发等因素有关。文献[3]指出层带组织呈现为贫铝区和富铝区,贫铝区的形成是由于熔池顶部轻质元素 Al 的蒸发。电子束流决定着能量输入的大小,也是影响微观组织的重要因素。Yue 等^[10]在 SEBM 成形 TiAl 合金的研究中表明,随着束流从 4.5mA 增加到 8.5mA,晶粒尺寸逐渐增大,显微组织从双相结构转变为近 γ 结构。

5 凝固及相变

Ti-Al 合金二元相图的中间部分如图 6 所示。可以看出 TiAl 合金液相凝固时主要有 3 种不同的路径, Al 的原子分数在 42%~45% 范围为 β 凝固,凝固路径为 $L \rightarrow L + \beta \rightarrow \alpha + \beta \rightarrow \alpha \rightarrow \alpha + \gamma \rightarrow \alpha_2 + \gamma$, 非平衡凝固时高温 β 相转变成有序相 B2。Al 的原子分数在 45%~48% 之间属于典型的包晶凝固, α 相凝固路径为 $L \rightarrow L + \beta \rightarrow \alpha \rightarrow \alpha + \gamma \rightarrow \alpha_2 + \gamma$, 具有片层粗大,凝固组织强、合金强度较低等缺点。Al 的原子分数在 49%~55% 时为 γ 凝固,凝固路径为 $L \rightarrow L + \alpha \rightarrow \alpha + \gamma \rightarrow \gamma$ 。目前具有工程化应用前景 TiAl 合金的 Al 的原子分数在 42%~48%, 在此范围内,两种凝固路线的区别在于 β 凝固经过 $\alpha + \beta$ 两相区生成 α 相,包晶凝固中 α 相直接由包晶反应生成,其余过程基本相同。对于具有任意 Al 原子分数的 TiAl 合金而言,其垂直线与 α 相和 $\alpha + \gamma$ 相界的交点温度和共晶温度分别为 T_α 和 T_c ($1120 \text{ }^\circ\text{C}$), 在 α 单相区(a 区)进行热处理,保温后冷却至室温, α 相析出物转变成 α_2 和 γ 相板条交替的 FL 组织; 在 $\alpha + \gamma$ 双相区的较高温区(b 区)进行热处理,获得等轴 γ 晶和片层组织组成的 NL 组织; 在 $\alpha + \gamma$ 双相区的较低温区(c 区)热处理时,形成细小片层和等轴 γ 晶组成的 DP 组织; 在较低温区(d 区)的 $\alpha_2 + \gamma$ 双相区进行热处理,组织为

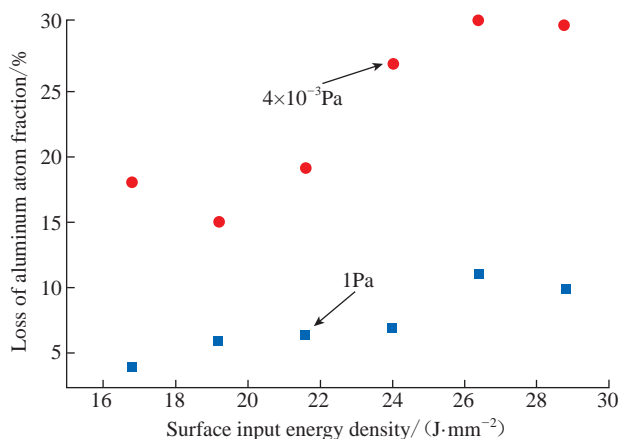


图 4 不同真空压力下 Ti-47Al-2Cr-2Nb 合金中 Al 的损失率

Fig.4 Effect of different vacuum pressures on loss of aluminum ratio of square samples

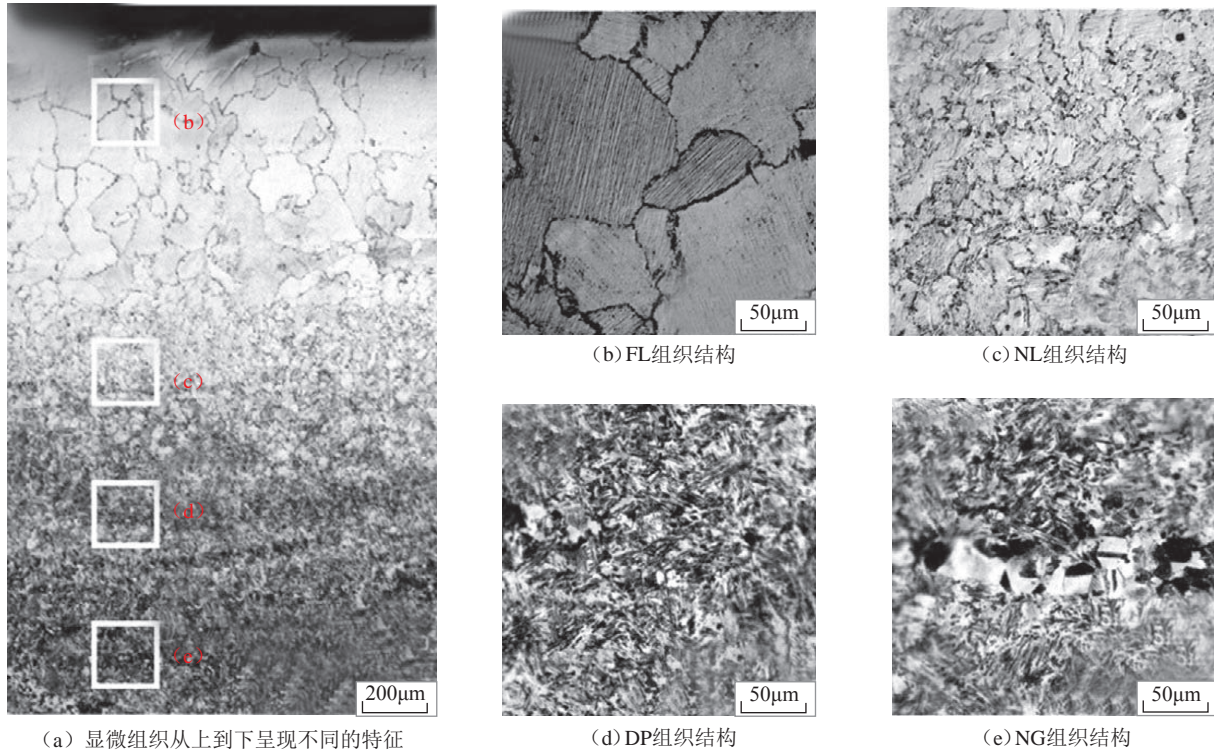


图5 SEBM成形Ti-48Al-2Cr-2Nb合金微观组织结构
Fig.5 Microstructure of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy by SEBM

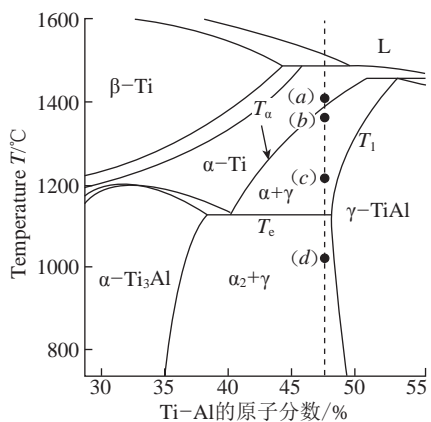


图6 Ti-Al二元相图
Fig.6 Ti-Al binary phase diagram

等轴 γ 和晶界的 α_2 相组成的NG组织。SEBM成形TiAl合金过程中相变主要与Al含量变化及热履历有关。随着Al含量损失,相平衡点向 α_2 区移动, γ 相含量减少, α_2 相含量逐渐增加^[23]。Yang等^[22]发现SEBM成形Ti-47Al-2Cr-2Nb合金的凝固通过 β 相进行,相变路径为 $L \rightarrow L + \beta \rightarrow \beta \rightarrow \beta + \alpha \rightarrow \alpha \rightarrow \alpha + \gamma$,在 $\beta \rightarrow$

$\beta + \alpha$ 转化中, α 相从 β 相中析出,使Ti偏析到残余的B2相中,随后 γ 薄片在 α 相内析出,此过程与铸态TiAl合金的凝固路径不同。岳航宇等^[8,10]在SEBM成形Ti-47Al-2Cr-2Nb合金的研究中发现,随着束流的增加,Al元素损失加剧,导致 α_2 和B2相含量逐渐增加, γ 相含量逐渐减少。另外对不同能量密度下合金的相变过程进行了研究,发现不同能量密度下均存在 $\alpha_2 \rightarrow \gamma$, $\alpha_2 \rightarrow B2$, $\alpha_2 + \gamma \rightarrow B2$ 相变过程,B2相易在片层晶团内部和 γ/α_2 界面处析出,且B2相与基体 γ 和 α_2 存在 $\langle 110 \rangle \gamma // \langle 1120 \rangle \alpha_2 // \langle 111 \rangle B2$ 和 $(111) \gamma // (0001) \alpha_2 // (110) B2$ 关系。

6 后处理

通过SEBM成形工艺的优化,TiAl合金可实现99%以上的致密度,但其内部仍存在部分气孔、长条状熔合不良等缺陷,导致零件的整体力学性能与满足实际应用需求还存在一定差距。热等静压可以一定程度上减少沉积态TiAl合金内部气孔和

熔合不良的缺陷^[24],提高致密化,促进力学性能稳定性和可靠性的提高。Ti-48Al-2Cr-2Nb通常采用1200℃、100MPa、4h的HIP工艺^[25-27],也有研究者^[12,28]选择1260℃、170MPa、4h工艺,都可实现99.8%以上致密度。Cakmak等^[26]对比了SEBM成形后TiAl合金沉积态和HIP态组织变化,发现HIP后沿沉积方向平均晶粒尺寸变大,垂直于沉积方向的晶粒则无明显变化。Seifi等^[25]对SEBM成形Ti-48Al-2Cr-2Nb合金沉积态和HIP态晶粒尺寸进行了定量统计分析(图7),结果显示HIP后粗晶和细晶尺寸及微观组织均匀性发生了变化,另外HIP消除了层状晶团,并导致 α_2 和 γ 晶粒的粗化。

热处理目的是通过调控TiAl合金显微组织来获得满足应用需求的性能。热处理温度的选择与材料的相变点 T_α 和共析转变点 T_e 有关。SEBM成形快速熔化、凝固导致TiAl合金组织为非平衡态凝固组织,相变

点 T_{α} 较传统合金有所降低^[22]。另外, Al 元素的烧损也使 T_{α} 点降低, 陈玮等^[17] 在 SEBM Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金的研究表明, 外围区域 Al 的质量分数较内部区域低 1.4%, 导致 T_{α} 降低 60℃。采用 1260℃ 和 α 相变点以上 (1360℃) 进行热处理分别获得有部分 α_2/γ 片层团的双态组织和 α_2/γ 全片层组织。Lin 等^[27] 发现 SEBM 成形 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金层状组织各层之间 Al 质量分数变化高达 2%, 导致 T_{α} 最终差异约 80℃, 当选择两层之间的温度进行热处理, 在 Al 含量较低的层中发生等轴晶向片层晶转变。SEBM 成形时沿着沉积方向经历的温度场不同, 导致显微

组织的不均匀分布。为改善 SEBM 成形 TiAl 合金组织不均匀的情况, Yang 等^[22] 对沉积态 TiAl 合金组织进行了热处理, 通过 1250℃ 油淬后 1200℃ 保温 2h, 得到了细小均匀的片层结构组织。

7 力学性能

TiAl 合金的综合力学性能取决于合金成分、冶金质量和微观组织。表 2 总结了 SEBM 制备的 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金室/高温力学性能。从表中数据可以看出, TiAl 合金沉积态试样室温下具有较高的强度, 延伸率较低^[17]。西北有色金属研究院王建等^[29] 采用 SEBM 技术制备的 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金沉积态试样,

室温下抗拉强度达到 (603 ± 18.38) MPa, 延伸率达到 $0.94\% \pm 0.06\%$ 。经过 HIP 和热处理后试样的强度较沉积态稍有降低, 延伸率明显增加, 且热处理后双态组织试样的强度和延伸率较片层组织高, 高温下 TiAl 合金力学性能也表现同样的规律^[17]。SEBM 成形 TiAl 合金强度较高的原因包括: (1) 成形过程中微小熔池和较快的冷却速度使得沉积双态组织呈现的晶粒尺寸细小^[11]; (2) 高真空下, 较高能量密度对熔池上部轻质 Al 元素有较强的气化作用, 导致 γ 相含量减少, α_2 相含量增加^[26]; (3) 片层晶团内部的 α_2 片层及 γ/α_2 片层界面有效阻止位错运动, 提高合金强度^[23]。而塑性的提高主要是 HIP 后试样内部缺陷的消除^[17], 且增加的 α_2 相溶解了间隙杂质元素 (O、N、H), 提高了延伸率^[23]。

SEBM 成形 TiAl 合金中交替出现的层状结构对材料力学性能的各向异性具有重要影响。Lin 等^[27] 对 HIP 和热处理态 (DP 和 FL 微观组织) Ti-48Al-2Cr-2Nb 试样的各向异性进行了研究, 结果表明 (图 8), 室温下, HIP 态 DP 组织试样 Z 方向的屈服强度分别比 X、Y 试样高 15MPa 和 30MPa; 热处理态 FL 组织试样 X、Y 和 Z 方向上的差异较小。700℃ 时 HIP 态和热处理态试样屈服强度仍具有最强的各向异性, 850℃ 时由于高温激活的滑移系使 HIP 态 DP 组织试样的各向异性降低。室温和高温下 HIP 和热处理态试样的延伸率均呈现明显的各向异性, 且 X、Y 方向延伸率均大于 Z 方向。实际上, 有大量的滑移和孪生集中在层状结构的 γ 层带上, 同时 γ 层带上存在较多的位错, 剪切变形时优先平行于 γ 层带发生, 导致 X、Y 方向较高的延伸率。另外, 不同的裂纹传播路径也是导致延伸率各向异性的原因。

考虑到 TiAl 合金复杂的高温服役环境, 蠕变、断裂韧性和疲劳性能

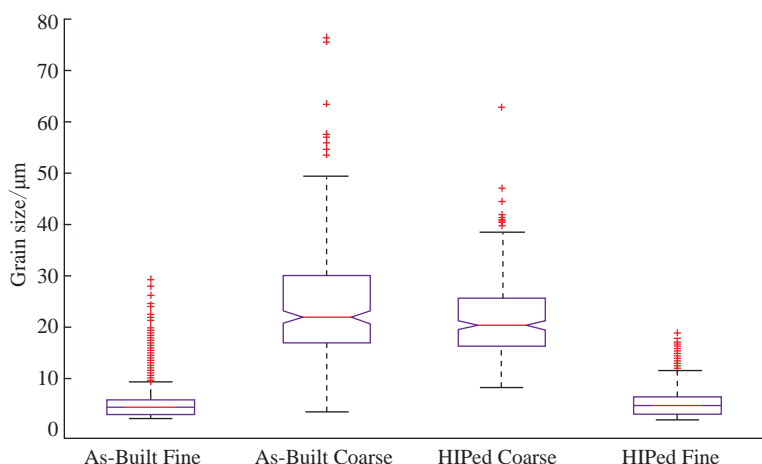


图 7 沉积态和 HIP 态材料中 γ 区粗晶和细晶晶粒尺寸的统计结果

Fig.7 Statistical comparison between coarse and fine grained γ regions in as-deposited and HIPed material

表 2 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金力学性能

Table 2 Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy mechanical properties

状态	组织类型	测试环境 / ℃	抗拉强度 / MPa	屈服强度 / MPa	延伸率 / %	文献
SEBM	等轴	室温	503 ± 18	—	0	[17]
SEBM	片层	室温	603 ± 18.38	555 ± 11.31	0.94 ± 0.06	[29]
SEBM+HIP	等轴	室温	641 ± 25	546 ± 25	2.66 ± 0.65	[25]
SEBM+HIP+HT	双态	室温	474 ± 23	382 ± 11	1.3 ± 0.3	[17]
SEBM+HIP+HT	片层	室温	429 ± 26	373 ± 13	0.8 ± 0.2	[17]
SEBM+HIP	等轴	500	657 ± 39	468 ± 10	3.99 ± 0.64	[25]
SEBM+HIP+HT	双态	800	460	—	2	[17]
SEBM+HIP+HT	片层	800	400	—	1.3	[17]

也至关重要,但目前有关 SEBM 成形 TiAl 合金蠕变、断裂韧性和疲劳性能的研究较少。Juechter 等^[9]通过对 Ti-45Al-4Nb-C 合金沉积态和热处理条件下的蠕变性能进行测试,发现随着层状相含量的增加,最小蠕变速率降低,全片层显示出最高的抗蠕变性。Kim 等^[28,30]报道了 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金的高温蠕变行为,发现 SEBM 制备合金(NG 组织)的抗蠕变性能较传统工艺制备(FL 组织)的性能差,通过热处理得到具有细等轴 γ 晶粒($\sim 15\mu\text{m}$)和薄层状结构的近片层组织,成功改善了耐高温蠕变性并保持了室温延展性。可以看出,全片层结构合金具有较好

的蠕变性能,但片层组织晶粒粗大,室温性能较差。可采用细化全片层组织的方法,获得抗拉强度、塑性和蠕变性能等综合性能优异的 TiAl 合金。

Cho 等^[31]研究了 SEBM 制备的 Ti-48Al-2Nb-2Cr 合金室温和 1023K 下摆放角度分别为 0° 和 45° 的疲劳性能(图 9)。室温下,摆放角度 45° 时,成形试样的疲劳强度($\sim 400\text{MPa}$)与经 HIP 处理的铸造合金强度相当,1023K 低周疲劳区(I 区)表现较高的疲劳强度。Seifi 等^[25]研究了 TiAl 合金的断裂和疲劳裂纹扩展行为,沉积态试样中由于缺陷的存在,表现出较低的缺口韧性(24.1 ± 6.5) $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, HIP 可以提高缺口韧性

至 $(27.8 \pm 0.4) \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,与铸态合金数据相近。通常片层组织的疲劳裂纹扩展速率较慢,由于全片层具有互锁的晶界,有效阻碍了裂纹扩展。同时 TiAl 合金中缺陷位置易引起应力集中,引发裂纹产生及传播。另外 SEBM 成形件较低的表面粗糙度也是加剧合金失效的重要原因。针对 TiAl 合金脆性材料,应减少孔洞、夹杂等缺陷,改善表面粗糙度,减少裂纹产生及扩展,提高合金疲劳强度。

8 成形精度与表面粗糙度

零件的成形精度是关系到零件能否得到实际应用的关键要素。Juechter 等^[9]研究 Ti-45Al-4Nb-C 涡轮增压器的 SEBM 制备过程(图 10),

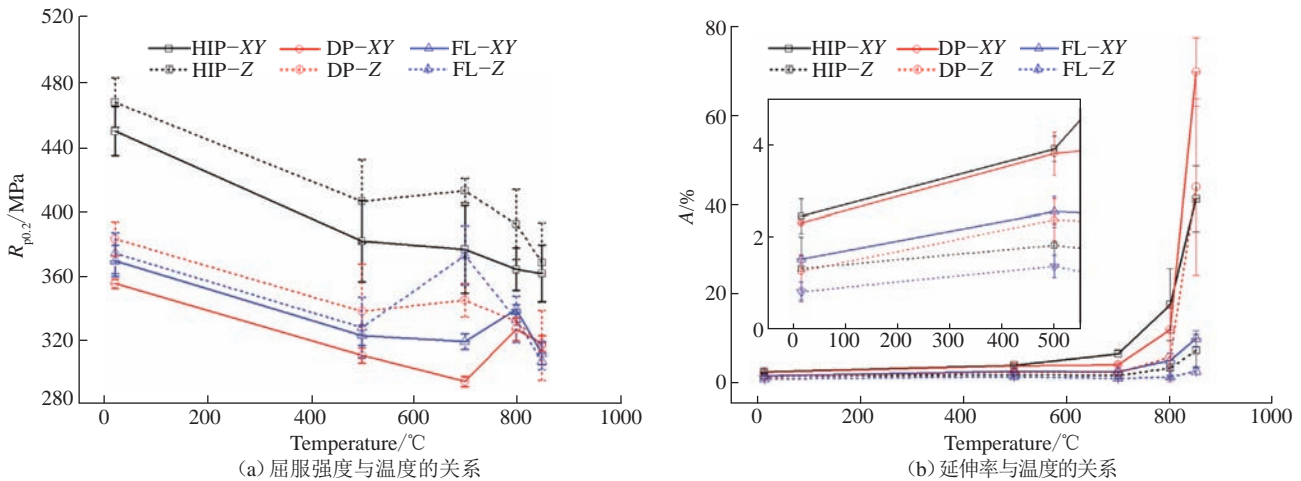


图 8 HIP 和热处理态 SEBM TiAl 合金的拉伸性能
Fig.8 Tensile properties of SEBM TiAl alloy subjected to HIP and heat treatment

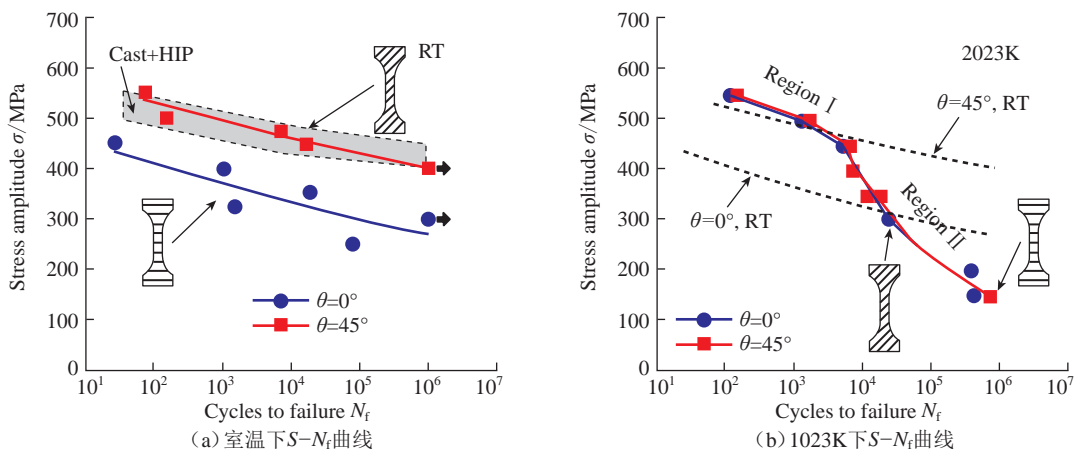


图 9 Ti-48Al-2Nb-2Cr 合金室温和 1023K 下疲劳性能
Fig.9 Fatigue properties of Ti-48Al-2Nb-2Cr alloy at room temperature and 1023K

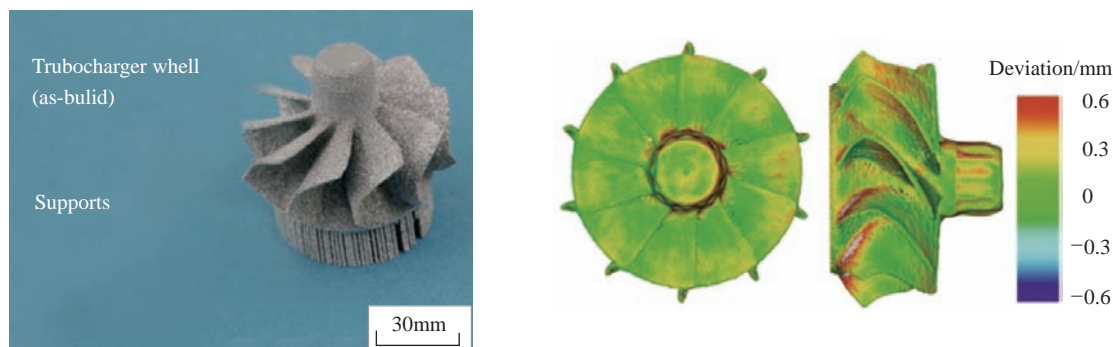


图 10 成形叶轮与 3D 模型的偏差
Fig.10 As-built condition of turbocharger wheel and resultant deviation from 3D-dataset

采用投影法分析涡轮增压器的尺寸精度,叶片和轮毂之间的过渡区域显示存在 $+0.6\text{mm}$ 的偏差。 XY 方向上的尺寸偏差通常可通过设置尺寸补偿系数来调整,而 Z 方向上的尺寸收缩通常并不是线性变化,针对不同材料,目前还未见系统的理论与实际相结合的研究。熔化电流、熔化速度、扫描策略等工艺参数直接影响成形过程中的能量密度,能量密度较高,金属熔体流动时间较长,不利于成形件精度的提高。Baudana 等^[32] 在研究 SEBM 成形 $\text{Ti-48Al-2Nb-0.7Cr-0.3Si}$ 时指出,SEBM 成形零件的表面粗糙度 R_a 在 $30\sim 40\mu\text{m}$ 之间,主要原因是:(1) 在热扩散作用下部分样品外部的烧结粉末附着在表面;(2) SEBM 过程逐层堆积的结果,过大的表面粗糙度和横截面周期性的凹槽会导致延伸率和断裂韧性的降低,同时,在文中提出可以通过调整工艺参数降低成形件的表面粗糙度,但未进行深入分析。

结论

SEBM 技术具有预热温度高、真空洁净度高和成形效率快等优点,为制备 TiAl 合金构件的理想技术。关于 SEBM 成形 TiAl 合金的研究虽历时已久,但距离大规模工程化应用还存在较大差距,针对以下方面还需要集中攻关。

(1) 原材料粉末 SEBM 成形工

艺适用性还需系统研究,注重粉末质量对改善 SEBM 成形质量的作用,深入定量研究粉末循环利用过程中氧含量、粒度、球形度、松装密度、流动性等物性变化对工艺过程、成形质量及性能的影响,形成较为完整且成熟的规范。

(2) 针对 SEBM 成形 TiAl 合金的组织与性能已有较多报道,但有关 TiAl 合金成形中 Al 元素的损失及不均匀分布对组织及性能的影响还未形成系统结论,高能量输入可以减少成形件内部缺陷,但同时会导致大量的 Al 元素损失,如何协调致密化与 Al 损失之间的矛盾关系,相关控制措施还需进一步探讨。

(3) 基于 TiAl 合金工程化应用需求,应针对拉伸、疲劳、蠕变等全套力学性能开展系统评价,通常采用优化工艺参数、热等静压及热处理等方法,减少缺陷,提高成形件的表面质量和内部冶金质量,通过控制显微组织改善力学性能。另外,同一部件不同部位性能的一致性、不同批次间性能的一致性也是决定 TiAl 合金构件工程化应用的关键因素,如何获得综合性能优异且稳定性良好的 TiAl 合金构件是后续重要的研究方向。

(4) SEBM 成形过程中,电子束选择性地熔化粉末层,并对熔池周围进行局部热处理,使成形件周围存在粉末黏附现象。如何减少成形区域附近粘粉及零件使用过程中防止表

面掉粉是工程化应用急需解决的问题。同时,针对复杂构件产品生产制造过程中的表面粗糙度、成形精度、后处理等众多问题,也将是未来国内外 TiAl 合金 SEBM 技术研发者共同努力的方向。

参考文献

- [1] 廖阳稷,顾琳,刘苏毅,等. γ -TiAl 金属间化合物加工的国内外研究现状[J]. 航空制造技术, 2020, 63(4): 22-33.
- [2] LIAO Yangjilian, GU Lin, LIU Suyi, et al. Research status of machining γ -TiAl intermetallic compounds both in china and overseas[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(4): 22-33.
- [3] 寇宏超,程亮,唐斌,等. 高温 TiAl 合金热成形技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2016, 59(21): 24-31.
- [4] KOU Hongchao, CHENG Liang, TANG Bin, et al. Progress on hot-forming techniques of high temperature TiAl alloys[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(21): 24-31.
- [5] [3] 张琛,杨森,颜银标. TiAl 基金合金成形技术的研究现状[J]. 兵器材料科学与工程, 2017, 40(4): 126-132.
- [6] ZHANG Chen, YANG Sen, YAN Yinbiao. Research progress in manufacturing of TiAl alloys[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2017, 40(4): 126-132.
- [7] [4] NARAYANA P L, LI C L, KIM S W, et al. High strength and ductility of electron beam melted β stabilized γ -TiAl alloy at 800°C [J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 756: 41-45.
- [8] [5] CHEN Y Y, YUE H Y, WANG X P. Microstructure, texture and tensile property as

a function of scanning speed of Ti-47Al-2Cr-2Nb alloy fabricated by selective electron beam melting[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 713: 195-205.

[6] 贺卫卫, 贾文鹏, 杨产守, 等. TiAl 预合金粉末制备的研究进展[J]. *钛工业进展*, 2012, 29(4): 1-6.

HE Weiwei, JIA Wenpeng, YANG Chanshou, et al. Research progress in preparation of TiAl pre-alloyed powder[J]. *Titanium Industry Progress*, 2012, 29(4): 1-6.

[7] NISHIDA M, MORIZONO Y, KAI T, et al. Microstructure dependence of compactibility of rapidly solidified Ti-rich TiAl alloy powders produced by plasma rotating electrode process[J]. *Materials Transactions*, 1997, 38(4): 334-343.

[8] 岳航宇. 电子束选区熔化成形 Ti-47Al-2Cr-2Nb 合金的组织及力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.

YUE Hangyu. Study on the microstructure and mechanical property of Ti-47Al-2Cr-2Nb alloy fabricated by selective electron beam melting[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.

[9] JUECHTER V, FRANKE M M, MERENDA T, et al. Additive manufacturing of Ti-45Al-4Nb-C by selective electron beam melting for automotive applications[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 22: 118-126.

[10] YUE H Y, CHEN Y Y, WANG X P, et al. Effect of beam current on microstructure, phase, grain characteristic and mechanical properties of Ti-47Al-2Cr-2Nb alloy fabricated by selective electron beam melting[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 750: 617-625.

[11] TODAI M, NAKANO T, LIU T Q, et al. Effect of building direction on the microstructure and tensile properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy additively manufactured by electron beam melting[J]. *Additive Manufacturing*, 2017, 13: 61-70.

[12] BIAMINO S, A. P N, ACKELID U, et al. Electron beam melting of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy: Microstructure and mechanical properties investigation[J]. *Intermetallics*, 2011, 19(6): 776-781.

[13] SCHWERDTFEGER J, KÖRNER C. Selective electron beam melting of Ti-48Al-2Nb-2Cr: Microstructure and aluminium loss[J]. *Intermetallics*, 2014, 49: 29-35.

[14] TERNER M, BIAMINO S, EPICOCO P, et al. Electron beam melting of high niobium containing TiAl alloy: Feasibility

investigation[J]. *Steel Research International*. 2012, 83(10): 943-949.

[15] 杨锐. 钛铝金属间化合物的进展与挑战[J]. *金属学报*, 2015, 51(2): 129-147.

YANG Rui. Advances and challenges of TiAl base alloys[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2015, 51(2): 129-147.

[16] TANG H P, YANG G Y, JIA W P, et al. Additive manufacturing of a high niobium-containing titanium aluminide alloy by selective electron beam melting[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2015, 636: 103-107.

[17] 陈玮, 杨洋, 刘亮亮, 等. 电子束增材制造 γ -TiAl 显微组织调控与拉伸性能研究[J]. *航空制造技术*, 2017, 60(1): 37-41.

CHEN Wei, YANG Yang, LIU Liangliang, et al. Microstructure control and tensile properties of EBM γ -TiAl[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 60(1): 37-41.

[18] 阚文斌, 林均品. 增材制造技术制备钛铝合金的研究进展[J]. *中国材料进展*, 2015, 34(2): 111-119, 135.

KAN Wenbin, LIN Junpin. Research progress on fabrication of TiAl alloys fabricated by additive manufacturing[J]. *Rare Metals Letters*, 2015, 34(2): 111-119, 135.

[19] ZHOU J, LI H X, YU Y F, et al. Research on aluminum component change and phase transformation of TiAl-based alloy in electron beam selective melting process under multiple scan[J]. *Intermetallics*, 2019, 113: 106575.

[20] KAN W B, LIANG Y F, PENG H, et al. Microstructural degradation of Ti-45Al-8Nb alloy during the fabrication process by electron beam melting[J]. *Journal of Material*, 2017, 69(12): 2596-2601.

[21] KAN W, CHEN B, JIN C, et al. Microstructure and mechanical properties of a high Nb-TiAl alloy fabricated by electron beam melting[J]. *Materials & Design*, 2018, 160: 611-623.

[22] YANG G Y, JIA W P, ZHAO P, et al. Microstructures of as-fabricated and post heat treated Ti-47Al-2Nb-2Cr alloy produced by selective electron beam melting (SEBM)[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016, 45(7): 1683-1686.

[23] 王林, 沈忱, 张弛, 等. 增材制造 TiAl 合金的研究现状及展望[J]. *电焊机*, 2020, 50(4): 1-12.

WANG Lin, SHEN Chen, ZHANG Chi, et al. Research progress and prospects of TiAl alloy produced by additive manufacturing technology[J]. *Electric Welding Machine*, 2020,

50(4): 1-12.

[24] 冉江涛, 赵鸿, 高华兵, 等. 电子束选区熔化成形技术及应用[J]. *航空制造技术*, 2019, 62(1): 46-57.

RAN Jiangtao, ZHAO Hong, GAO Huabing, et al. Selective electron beam melting technique and its application[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(1): 46-57.

[25] SEIFI M, SALEM A A, SATKO D P, et al. Effects of HIP on microstructural heterogeneity, defect distribution and mechanical properties of additively manufactured EBM Ti-48Al-2Cr-2Nb[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 729: 1118-1135.

[26] CAKMAK E, NANDWANA P, SHIN D, et al. A comprehensive study on the fabrication and characterization of Ti-48Al-2Cr-2Nb preforms manufactured using electron beam melting[J]. *Materialia*, 2019, 6: 100284.

[27] LIN B C, CHEN W, YANG Y, et al. Anisotropy of microstructure and tensile properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb fabricated by electron beam melting[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 830: 154684.

[28] KIM Y K, YOUN S J, KIM S W, et al. High-temperature creep behavior of gamma Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy additively manufactured by electron beam melting[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 763: 138138.

[29] WANG J, YANG K, LIU N, et al. Microstructure and tensile properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb rods additively manufactured by selective electron beam melting[J]. *Journal of Material*, 2017, 69(12): 2751-2755.

[30] KIM Y K, HONG J K, LEE K A. Enhancing the creep resistance of electron beam melted gamma Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy by using two-step heat treatment[J]. *Intermetallics*, 2020, 121:106771.

[31] CHO K, KOBAYASHI R, OH J Y, et al. Influence of unique layered microstructure on fatigue properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloys fabricated by electron beam melting[J]. *Intermetallics*, 2018, 95: 1-10.

[32] BAUDANA G, BIAMINO S, KLÖDEN B, et al. Electron beam melting of Ti-48Al-2Nb-0.7Cr-0.3Si: Feasibility investigation[J]. *Intermetallics*, 2016, 73: 43-49.

通讯作者: 车倩颖, E-mail: 869748154@qq.com。

(下转第 67 页)

引文格式: 靳鹏, 任惠圣, 刘一搏, 等. TiB_2 颗粒诱导 AlSi5 电弧增材微观组织演变及性能研究 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(3): 61-67.

JIN Peng, REN Huisheng, LIU Yibo, et al. Microstructural evolution and mechanical property of TiB_2 nanoparticles reinforced AlSi5 alloy in wire and arc additive manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(3): 61-67.

TiB₂ 颗粒诱导 AlSi5 电弧增材 微观组织演变及性能研究*

靳 鹏^{1,2}, 任惠圣², 刘一搏^{1,2}, 李军兆^{1,2}, 李富祥^{1,2}, 孙清洁^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学(威海)山东省特种焊接技术重点实验室, 威海 264209)

[摘要] 铝合金的电弧增材制造过程中因持续热积累而引起组织分布不均匀和溶质偏析, 导致其性能各向异性。针对这一问题, 设计了 TiB_2 纳米颗粒添加铝合金的钨极氩弧 (Tungsten inert gas, TIG) 增材制造工艺。在电弧增材制造过程中, 通过表面预涂层的方式将纳米 TiB_2 颗粒添加到试样中, 对比研究了纳米 TiB_2 颗粒不同质量分数对 AlSi5 合金微观组织的影响。结果表明, 随着 TiB_2 质量分数的增加, AlSi5 合金的微观组织不均匀性得到明显改善, 1.5% TiB_2 的添加使 AlSi5 合金的晶粒尺寸从 226 μm 减小到 85.6 μm , 且引起 (110) 和 (112) 基面上的织构明显减弱, 最大取向密度呈下降的趋势; 与无颗粒添加的 AlSi5 增材试样相比, 颗粒添加后的沉积层硬度与弹性模量均得到显著提高, 硬度值从 879MPa 增加到 1253MPa, 弹性模量从 81.9GPa 增加到 88.3GPa。

关键词: 颗粒强化; 电弧增材; 组织演变; 织构; AlSi5 合金

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.03.061



靳 鹏

博士研究生, 研究方向为铝合金电弧增材组织调控、异种金属连接界面调控及润湿机制研究, 发表学术论文 10 余篇。

铝合金具有低密度、高比强度及耐腐蚀等优点, 被广泛应用于航空航天及汽车制造等领域^[1-2]。目前, 应用于航空航天飞行器上的大型铝合金结构件(燃料储箱、导引头、索绕器壳体、支架等)通常采用铸造+锻造+焊接的方法来获得^[3-4]。然而, 铸—锻—焊制造过程复杂, 生产周期较长, 且在铸造过程中易产生溶质偏析, 使得材料的力学性能降低。为了满足生产效率提升的需求, 增材制造技术被广泛应用到大型铝合金结构件及复杂零件的制造中, 应用前景广阔。用于合金材料增材制造的方法主要包括激光增材^[5]、电子束增材^[6]、搅拌摩擦增材^[7]及电弧增材^[8]等。

电弧+丝材增材制造方法具有高效、廉价、成形精度高、周期短等优势, 被应用到铝合金燃料储箱、导引头、飞机桁梁等大型结构件的制造中。然而, 铝合金增材过程中持续热累积效应导致构件微观组织不均匀且晶界偏析严重, 进而使得力学性能呈各向异性。Gu 等^[9-11]采用电弧增材方法进行了单道多层 2219 铝合金增材制造试验, 并对试样不同位置的组织进行了表征。结果表明, 增材试样底层区为柱状晶, 层间过渡区为平面晶, 层内区为粗大胞状晶及共晶组织。大量气孔和晶界偏析使构件的力学性能大幅度降低。Wang 等^[12]研究了不同工艺参数对

* 基金项目: 国家自然科学基金(U1960102, 51705103, 51475104)。

AlSi5 合金构件组织及性能的影响, 结果表明, 无论层间位置还是层内, 晶界处均为 Al-Si 共晶。底层和中间层为粗大的柱状晶, 表面层为细小的等轴晶, 从顶层到底层的硬度逐渐减小, 且沿沉积方向和扫描方向试样的机械性能存在较大差异, 最高为 170MPa, 最低为 140MPa。Huang 等^[8]认为, 5A06 铝合金在增材制造过程中的冷却速度及温度梯度是影响其组织的关键。Zhao 等^[13]认为冷金属过渡-脉冲变极性(CMT-PADV)工艺能够有效地细化晶粒, 解决组织不均匀等问题。上述研究表明, 铝合金在增材过程中的组织差异和晶界偏析是导致其力学性能各向异性的关键因素。目前, 大多数研究者主要通过降低热输入和促进熔池流动的方式来优化增材组织, 但强化效果并不显著。在电弧增材制造过程中, 通过向合金中添加纳米颗粒, 能够引入异质形核质点来产生多位点形核, 进而起到细化晶粒及均匀化组织的效果。Girish 等^[14]在 A356.1 铝合金中添加了 ZrO₂ 纳米颗粒, 结果表明, ZrO₂ 纳米颗粒质量分数为 2.0% 时, 合金组织得到细化且硬度提高。Xi 等^[15]采用激光选区熔化的方法在 Al-12Si 铝合金粉末中加入了 TiB₂ 纳米颗粒, 铝合金对 TiB₂ 颗粒具有良好的润湿性, 添加 2.0% 的颗粒使得晶粒细化为 5.8μm, 且其强度从 144MPa 增加到 247MPa。Aboulkhair 等^[16]和 Yang 等^[17]同样采用激光选区熔化的方法将纳米 TiB₂ 颗粒添加到 AlSi10Mg 中, 纳米颗粒的添加促进了晶粒内部纳米尺度的 Si 析出, 且诱导亚微米晶胞产生, 合金的最高强度达到 530MPa。介于颗粒与熔池差的润湿性导致颗粒添加困难, 目前, 在铝合金电弧增材领域通过颗粒添加的方式来获得高性能增材试样, 相关研究工作相对较少。本文将纳米陶瓷颗粒引入到电弧增材制造中, 以期解决持续热累

积引起的 AlSi5 铝合金组织差异, 改善结晶过程, 从而提高合金的综合性能。

试验及方法

本文采用厚度为 6mm 的 6061 铝合金作为基板, 选用直径为 1.2mm 的 AlSi5 焊丝作为填充材料, 其化学成分如表 1 所示。TiB₂ 颗粒平均粒径为 ~40nm。增材试验前, 用钢丝刷对基板表面进行打磨去除基板表面的氧化膜, 将打磨好的基板放置在

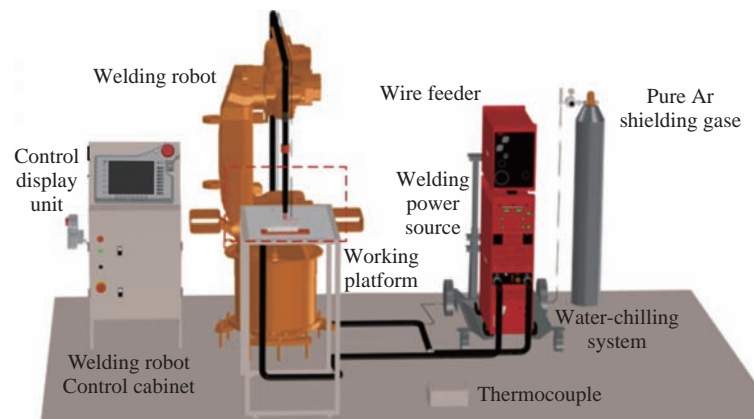
盛有丙酮的容器中超声清洗 3min, 以确保基板表面洁净。

增材制造设备由 Fronius 焊接电源、送丝机(Magic Wave 5000 Job G/F)、六轴 Fanuc 机器人、自制水冷夹具、表面涂覆装置组成, 如图 1 所示。焊枪和涂覆装置由机械手臂装卡, 通过示教器对工艺参数和涂覆量进行设置。增材制造的电流为 120A, 沉积速度为 0.15m/min, 送丝速度为 1.5m/min, 纳米 TiB₂ 颗粒涂覆量(质量分数)分别为 1.0%、1.5% 及 2.0%,

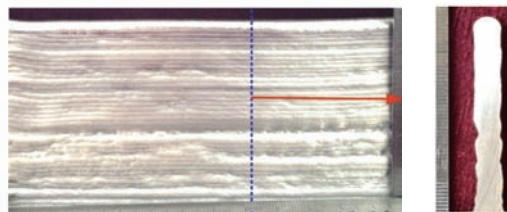
表 1 基板及焊丝的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of substrate and welding wire

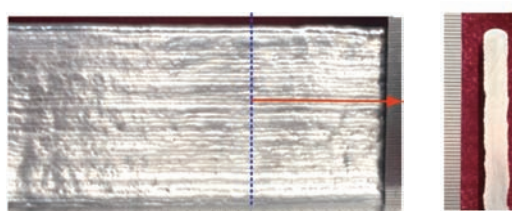
材料	Fe	Si	Mn	Mg	Zn	Cu	Al
6061	0.70	0.60	0.15	0.90	0.25	0.15	余量
AlSi5	0.80	5.00	0.05	0.05	0.10	0.305	余量



(a) 增材制造设备示意图



(b) 无颗粒添加时增材试样宏观形貌和截面形貌



(c) 添加1.5% TiB₂时增材试样宏观形貌和截面形貌

图 1 增材制造设备及试样形貌图

Fig.1 Additive manufacturing device and macroscopic morphologies

通过涂覆速度和涂层宽度参量变化来实现涂层质量的控制。试验时,先将纳米 TiB_2 颗粒涂覆在基板表面,然后设置起弧点及熄弧点,并且设置增材参数,采用 99.999% 的高纯氩气作为保护气,气流量为 15L/min,重复上述过程完成增材试验。本试验采用单道增材制造过程中添加 TiB_2 纳米颗粒的方式来研究颗粒含量对铝合金组织及性能的影响,无颗粒添加时增材墙体表面呈条纹状规则分布,颗粒添加后表面呈波浪形且沉积层宽度有所减小,但颗粒添加不影响整个增材过程,墙体垂直度不受颗粒添加的影响,如图 1 (b)~(c)所示。

试验结束后,在垂直增材制造方向取样,经打磨抛光后进行金相、微观组织及力学性能分析。抛光后的试样用凯勒试剂腐蚀 15s,并用金相显微镜(Olympus-GX51)对试样进行观察,用 Image-J 软件对胞状晶粒尺寸进行统计,用配备电子背散射衍射仪(EBSD)的扫描电镜(Zeiss MERLIN Compact)对微观组织及结构进行分析,用纳米压痕仪(Nano Indenter G2000)对微观硬度及弹性模量进行测试,最大加载力为 15mN,加载速率为 60mN/min。

结果与讨论

1 组织演变

添加不同质量的 TiB_2 纳米颗粒后,增材铝合金试样中间区域微观组织如图 2 所示。无 TiB_2 颗粒时,AlSi5 合金组织以柱状晶或枝晶、粗大的胞状晶为主,而在沉积过程中添加纳米 TiB_2 颗粒后,其枝晶消失,整个组织变为胞状晶和条棒状晶粒。当添加 1.5% 的纳米 TiB_2 颗粒时,晶粒得到显著细化,随着颗粒含量的增加,胞状晶粒尺寸呈现先减小后增加的趋势(图 3),胞状晶平均晶粒尺寸由无颗粒添加时的 $25\mu\text{m}$ 细化到 $12\mu\text{m}$ 。而随着颗粒含量的继续增加,柱状枝晶开始形成,且细化效果被削

弱,微观组织呈柱状枝晶和胞状晶相间分布。导致组织均匀性变差、晶粒粗化的原因在于,表面涂覆纳米颗粒含量过高后会恶化铝合金熔滴润湿颗粒,且熔池中高的颗粒含量增大了颗粒间的相遇概率,在范德华引力的作用下相遇的颗粒容易发生团聚现象,从而弱化细晶效果。在 AlSi5 合金电弧增材中,1.5% 的颗粒添加后组织均匀性得到明显改善,且细化效果最佳。

对试样全貌进行 EBSD 分析,结果如图 4 所示。由图 4 可知,无颗粒添加的铝合金增材试样中,柱状晶和

粗大等轴晶相间分布。颗粒添加后,组织以等轴晶为主,并且随着颗粒含量的增加,等轴晶尺寸逐渐减小。该晶粒形貌与光镜获得的晶粒形貌存在差异,原因在于光镜中的晶界大部分为非连续的小角度晶界,EBSD 检测过程中将同一晶向的胞状或柱状晶粒统一识别,从而以较大的柱状或等轴晶的形式体现出来。同时,对晶粒的尺寸范围进行了统计,如图 5 所示。无颗粒添加的增材试样中,晶粒尺寸集中分布在 $100\sim 400\mu\text{m}$ 范围内,平均晶粒尺寸为 $226\mu\text{m}$,柱状晶的产生使得组织均匀性变差。添加

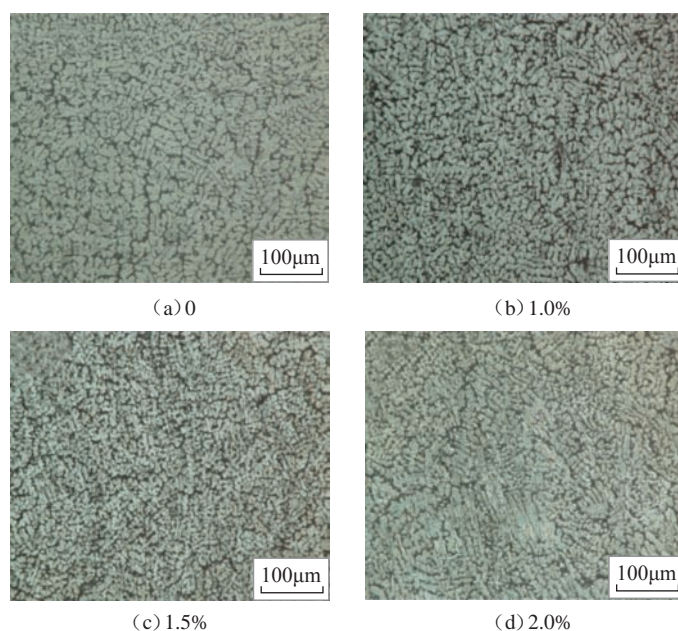


图 2 不同质量分数的 TiB_2 颗粒添加后的 AlSi5 合金的金相图

Fig.2 OM images of deposited AlSi5 alloy samples with different mass fraction of TiB_2 nanoparticles

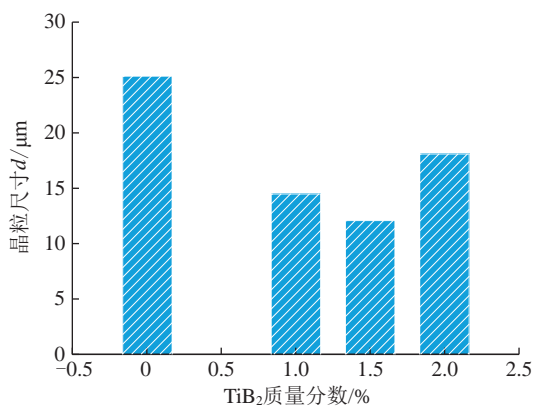


图 3 胞状晶尺寸随 TiB_2 颗粒添加量的变化

Fig.3 Variations of grain size with addition of TiB_2 nanoparticles

1.0%、1.5% 和 2.0% 的 TiB_2 后,晶粒尺寸集中分布区间为 20~160 μm ,平均晶粒尺寸分别为 94 μm 、86 μm 和

91 μm 。与无颗粒添加增材试样相比,平均晶粒尺寸显著降低,粗大的柱状晶转变为细小的等轴晶且组织

均匀性得到显著改善。由此可知,纳米 TiB_2 颗粒作为异质形核质点,能够有效细化晶粒,多位点形核破坏了柱状晶沿最大温度梯度方向的生长,从而促使柱状晶转变为等轴晶。EBSD 图谱分析同样验证了最佳纳米 TiB_2 颗粒添加量为 1.5%,此时铝合金晶粒为细小的等轴晶且分布更加均匀。

2 织构特征

上述分析表明,纳米 TiB_2 颗粒添加后的铝合金晶粒形貌和组织存在较大差异,因此有必要对铝合金的织构特征进行分析。对不同颗粒添加后铝合金增材试样进行 EBSD 检测,获得的极面特征如图 6 所示。由图 6 (a) 可知,铝合金在(001)、(110)、(111)及(112)晶面上存在织构特征,最大取向密度为 4.975,颗粒的添加使得铝合金在(110)及(112)

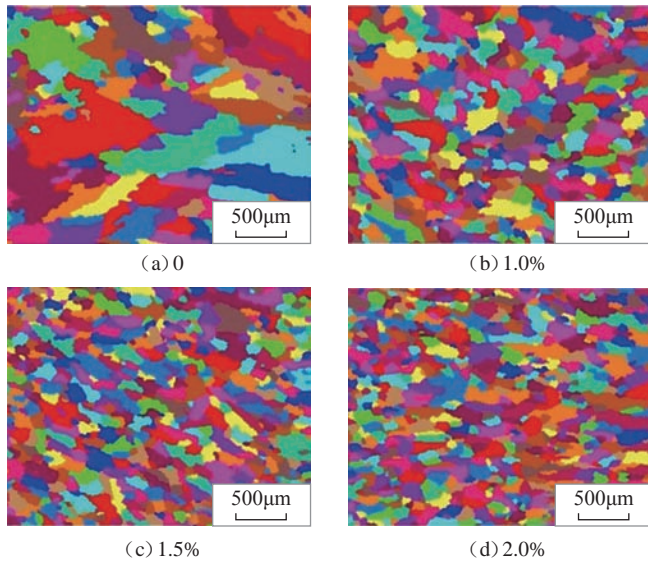


图 4 不同质量分数的 TiB_2 颗粒添加后的 AlSi5 合金的 EBSD 图

Fig.4 EBSD maps of WAAM-deposited AlSi5 alloy with different mass fraction of TiB_2 nanoparticles

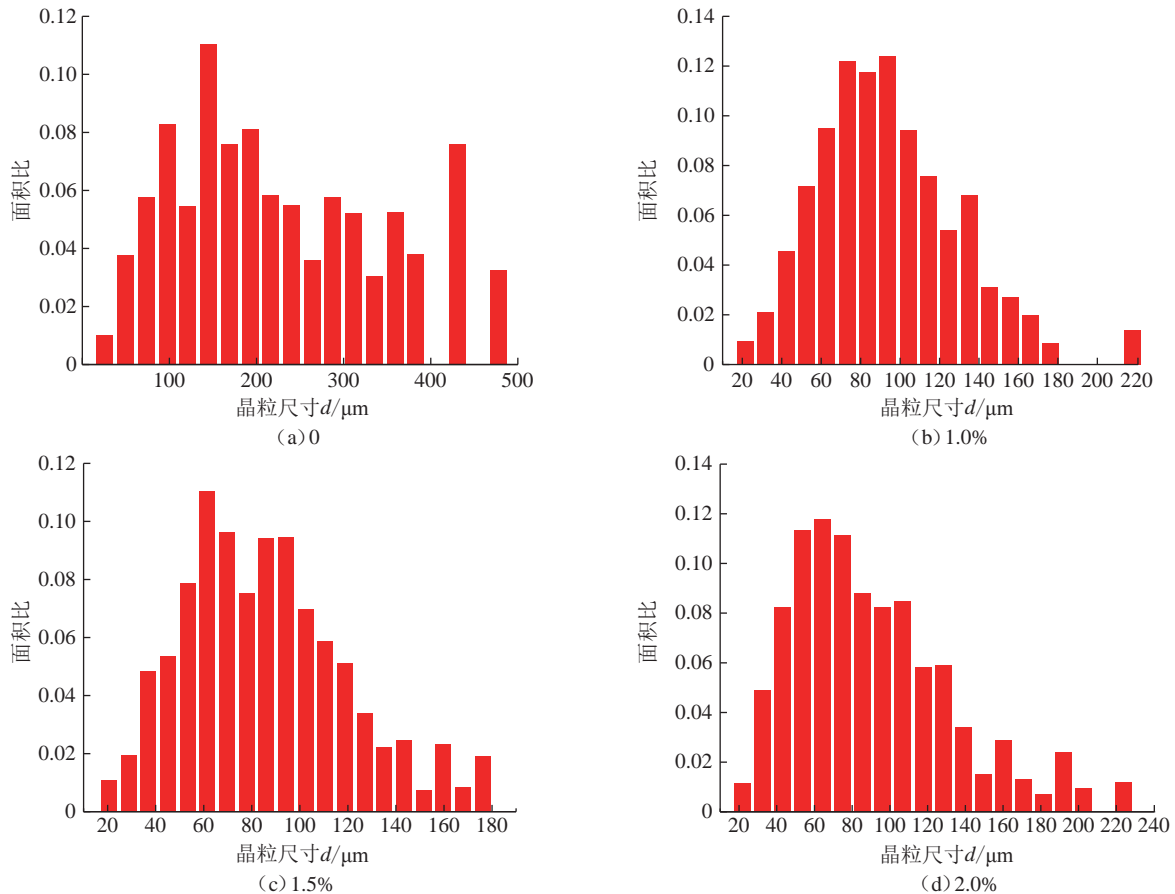


图 5 不同 TiB_2 颗粒添加量下的 AlSi5 增材试样晶粒尺寸变化图

Fig.5 Variation of average grain size for AlSi5 alloy samples with different addition of TiB_2 nanoparticles

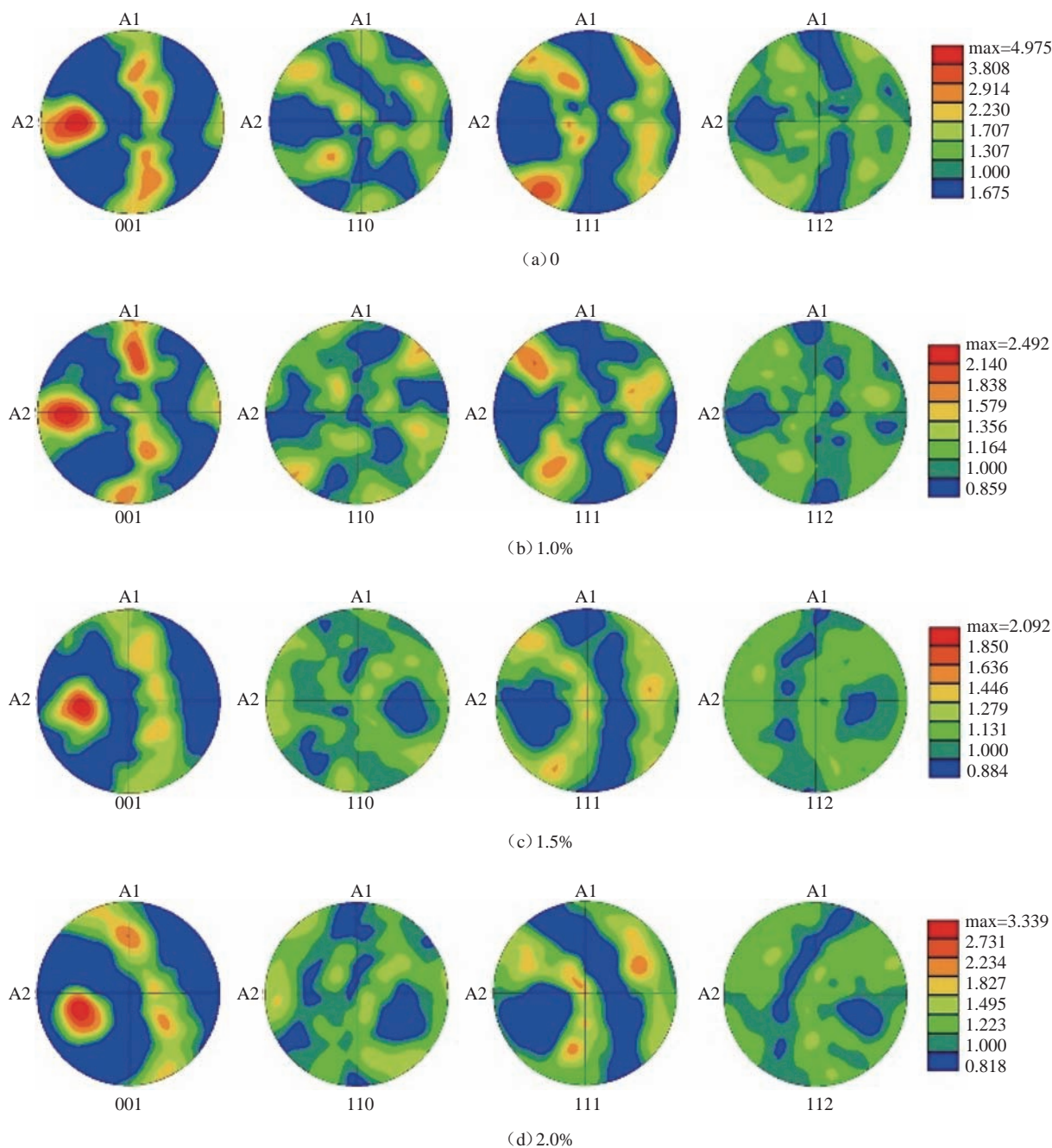


图6 不同质量分数的 TiB_2 颗粒添加后铝合金增材试样的极面图
Fig.6 Pole figures for Al-matrix samples with different mass fraction of TiB_2 nanoparticles

方向的织构特征被消除,而(001)及(112)方向的织构被削弱,最大取向密度为2.092。因此,颗粒添加能够细化晶粒并且抑制铝合金在低指数晶面上的定向生长,从而改善由组织不均匀引起的性能各向异性。

3 力学性能

对不添加纳米 TiB_2 颗粒及添

加1.5%纳米 TiB_2 颗粒的 AlSi5 试样进行纳米压痕试验,结果如图7所示。无颗粒添加的试样硬度为879MPa,弹性模量为81.9GPa,而添加1.5%纳米 TiB_2 颗粒后试样的硬度增加到1253MPa,弹性模量为88.3GPa。纳米 TiB_2 颗粒添加使得 AlSi5 合金的晶粒得到显著细化,并

且削弱了织构特征,组织均匀性得到改善,从而使得 $\text{TiB}_2/\text{AlSi5}$ 复合材料的硬度和弹性模量增加,硬度和弹性模量的增加将为提高构件的综合性能提供了可能。

结论

(1) 纳米 TiB_2 颗粒的添加使得

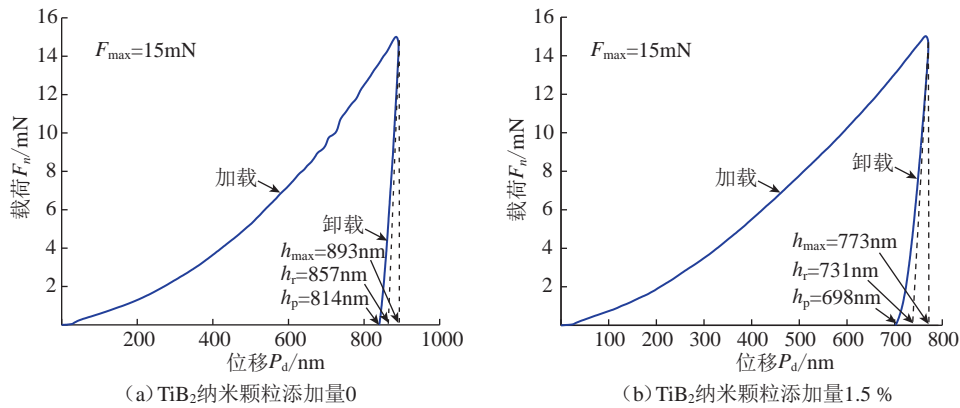


图7 AlSi5合金的纳米压痕测试曲线

Fig.7 Nanometer indentation maps for AlSi5 alloy with different mass fraction of TiB₂ nanoparticles

AlSi5合金的柱状晶转变为等轴晶,并且使晶粒得到显著细化,晶粒尺寸从226 μm 减小到86 μm ,纳米TiB₂颗粒的最佳添加量为1.5%。

(2)在增材制造的AlSi5合金中添加纳米TiB₂颗粒能够有效削弱AlSi5合金的(001)及(111)方向的织构,并且使(110)及(112)方向的织构消失。

(3)添加1.5%纳米TiB₂颗粒后,AlSi5合金试样的硬度从879MPa增加到1253MPa,弹性模量从81.9GPa增加到88.3GPa。

参考文献

[1] MCKEOWN J T, KULOVITS A K, LIU C, et al. In situ transmission electron microscopy of crystal growth-mode transitions during rapid solidification of a hypoeutectic Al-Cu alloy[J]. *Acta Materialia*, 2014, 65: 56-68.

[2] ZWEIACKER K W, LIU C, GORDILLO M A, et al. Composition and automated crystal orientation mapping of rapid solidification products in hypoeutectic Al-4 at.%Cu alloys[J]. *Acta Materialia*, 2018, 145: 71-83.

[3] WIEZOREK J M K, MCKEOWN J T, ZWEIACKER K, et al. Capturing dynamics of pulsed laser induced melting and rapid solidification in aluminum polycrystals with nanoscale temporal resolution in situ TEM[J]. *Microscopy and Microanalysis*, 2014, 20(S3): 1582-1583.

[4] PLOTKOWSKI A, RIOS O, SRIDHARAN N, et al. Evaluation of an Al-Ce

alloy for laser additive manufacturing[J]. *Acta Materialia*, 2017, 126: 507-519.

[5] GASSER A, BACKES G, KELBASSA I, et al. Laser additive manufacturing[J]. *Laser Technik Journal*, 2010, 7(2): 58-63.

[6] KÖRNER C. Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting—a review[J]. *International Materials Reviews*, 2016, 61(5): 361-377.

[7] PALANIVEL S, NELATURU P, GLASS B, et al. Friction stir additive manufacturing for high structural performance through microstructural control in an Mg based WE43 alloy[J]. *Materials & Design (1980-2015)*, 2015, 65: 934-952.

[8] HUANG D, ZHU Z, GENG H, et al. TIG wire and arc additive manufacturing of 5A06 aluminum alloy[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2017, 45(3): 66-72.

[9] GU J L, DING J L, WILLIAMS S W, et al. The strengthening effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on the additively manufactured Al-6.3Cu alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 651: 18-26.

[10] GU J L, DING J L, WILLIAMS S W, et al. The effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on porosity in additively manufactured aluminum alloys[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 230: 26-34.

[11] GU J, BAI J, ZHU Y, et al. First-principles study of the influence of doping elements on phase stability, crystal and electronic structure of Al₂Cu (θ) phase[J]. *Computational Materials Science*, 2016, 111: 328-333.

[12] WANG H J, JIANG W H, OUYANG J H, et al. Rapid prototyping of 4043 Al-alloy parts by VP-GTAW[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 148(1): 93-102.

[13] ZHAO Y, XIAO J, CHEN S J. Comparison of microstructure and mechanical properties of aluminum components manufactured by CMT[J]. *Materials Science Forum*, 2017, 898: 1318-1324.

[14] GIRISH K B, SHOBHA B N. Synthesis and mechanical properties of zirconium nano-reinforced with aluminium alloy matrix composites[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(1): 3008-3013.

[15] XI L X, ZHANG H, WANG P, et al. Comparative investigation of microstructure, mechanical properties and strengthening mechanisms of Al-12Si/TiB₂ fabricated by selective laser melting and hot pressing[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(15): 17635-17642.

[16] ABOULKHAIR N T, EVERITT N M, ASHCROFT I, et al. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting[J]. *Additive Manufacturing*, 2014, 1: 77-86.

[17] YANG Y, LAN J, LI X C. Study on bulk aluminum matrix nano-composite fabricated by ultrasonic dispersion of nano-sized SiC particles in molten aluminum alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2004, 380(1): 378-383.

通讯作者: 刘一搏, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向为金属增材制造方法及设备、异种金属连接界面行为及机理等, E-mail: ybliu0701@hit.edu.cn.

Microstructural Evolution and Mechanical Property of TiB₂ Nanoparticles Reinforced AlSi5 Alloy in Wire and Arc Additive Manufacturing

JIN Peng^{1,2}, REN Huisheng², LIU Yibo^{1,2}, LI Junzhao^{1,2}, LI Fuxiang^{1,2}, SUN Qingjie^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. Shandong Province Key Laboratory of Special Welding Technology, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China)

[ABSTRACT] In the process of arc additive manufacturing, aluminum alloy is easy to cause inhomogeneous microstructure distribution and solute segregation due to continuous heat accumulation, leading to its anisotropic properties. In order to solve this problem, the tungsten inert gas (TIG) additive manufacturing process with addition of TiB₂ nanoparticles was designed. In the process of wire and arc additive manufacturing, TiB₂ nanoparticles were added to the deposition samples by surface pre-coating. The effects of different mass fraction of TiB₂ nanoparticles on the microstructure of AlSi5 alloy were compared and studied. The results show that the microstructure inhomogeneity of AlSi5 aluminum alloy was obviously improved with the mass fraction of TiB₂ increased. The grain size decreased from 226 μ m to 85.6 μ m with the addition of 1.5% TiB₂, and the texture on (110) and (112) basal planes decreased obviously, besides the maximum orientation density was decreased. The hardness and elastic modulus of the deposited layer were significantly improved with addition of TiB₂ nanoparticles. The value of hardness increased from 879MPa to 1253MPa, and the elastic modulus increased from 81.9GPa to 88.3GPa.

Keywords: Particle strengthening; Arc additive manufacturing; Microstructural evolution; Texture; AlSi5 alloy

(责编 阳光)

(上接第 60 页)

Research Progress in TiAl Alloys Prepared by Powder Selective Electron Beam Melting

CHE Qianying¹, LI Huixia¹, HE Weiwei^{1,2}, ZHU Jilei^{1,2}, CHEN Rui¹,

CHENG Kangkang¹, JIN Yuanyuan¹, WANG Yu¹

(1. Xi'an College Sailong Metal Materials Co., Ltd., Xi'an 710018, China;

2. State Key Laboratory for Porous Metals Materials, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

[ABSTRACT] Powder selective electron beam melting is an ideal additive manufacturing technology for the fabrication of brittle TiAl alloy complex components. In this paper, the research progress in TiAl alloys prepared by selective electron beam melting are reviewed from the aspects of raw material powder, densification, chemical composition, microstructure, solidification and phase change, post-processing, mechanical performance, forming accuracy and surface roughness. The problems existing in the research and the corresponding measures are remarked, and the future development strategies are prospected.

Keywords: Titanium aluminide alloy; Selective electron beam melting; Chemical component; Microstructure; Mechanical property

(责编 阳光)

立足航空航天重大应用需求 致力高效精密加工与装备突破

——走进高效精密加工与装备技术教育部工程研究中心

Based on Major Applications in Aerospace, Committed to Efficient Precision
Manufacturing and Equipment Breakthrough

[编者按] 高效精密加工与装备技术教育部工程研究中心(以下简称“工程中心”)于2006年6月立项,依托南京航空航天大学“机械制造及其自动化”、“航空宇航制造工程”两个国家重点学科,以建设成为国内广泛认可、具有一定国际影响的高效精密加工与装备技术领域工程技术研究与开发、科技成果转化、高层次科技创新人才和管理人才培养、科技合作与交流基地为目标,立足于制造技术自主创新和集成创新,以应用为导向,结合工程中心优势学科和技术基础,着力于精密电加工、金属结构的微细制造、难加工材料的高效精密加工、数字化制造4个方向的技术与装备研究,大力推进先进制造工艺技术与装备的社会应用转移转化,为航空航天等国防领域重大工程问题研究做出贡献。工程中心重大装备配置完整,学术团队强大,科研创新能力突出,成果显著,基础研究和应用研究同步发展,学科背景与服务领域特色鲜明。

► 科研平台与团队建设 ◀

高效精密加工与装备技术教育部工程研究中心拥有一批在高效精密加工与装备技术领域长期从事基础研究、核心关键技术攻关和技术成果转化等方面的科研人员,形成了一支结构合理、力量雄厚、学历层次高、富有朝气和创新精神的研究团队。目前工程中心拥有固定人员84人,博士和硕士研究生100余人;正高级职称47人,45岁以下的研究人员近60%。工程中心拥有中科院院士1人,教育部“长江学者”奖励计划3人,青年学者2人,国防卓青1人,国家杰出青年科学基金项目1人,国家“万人计划”领军人才2人,国家“万人计划”教学名师1人,江苏特聘教授5人,江苏省杰青3人,其他省部级以上人才称号27人次。同时,

工程中心拥有1个国防科技创新团队、1个教育部“长江学者和创新团队发展计划”创新团队、1个国家自然科学基金创新研究群体。中心总用房面积8500平方米,包括办公室、研发部和产业化基地3个日常运行部门。

工程中心自立项建设以来,针对精密电加工技术平台、金属结构的微细制造技术平台、难加工材料的高效精密加工技术平台、数字化制造技术平台开展重点建设。5年来新增投入仪器设备购置/研制经费4352.3万元,新购置/自行研制仪器设备64台/套,原有仪器设备56台/套,价值约3154万元,全部纳入工程中心固定资产,建成了开展高效精密加工与装备技术工程化研发所必需的装备平台,仪器设备配置合理,运行良好。

► 重大项目与成果 ◀

工程中心自立项建设以来,形成了4个特色鲜明的研发方向:精密电加工技术、难加工材料的高效精密加工技术、金属结构的微细制造技术、数字化制造技术。工程中心先后承担了航空发动机及燃气轮机重大专项项目、国家重点研发计划项目、民机专项项目、国防基础重点项目以及国家自然科学基金重点项目、军委各军兵种项目等数十项国家级重大研发任务,承担了包括国家自然科学基金面上项目在内的国家、省部和企业委托开发科研项目数百项。许多研究成果已直接用于生产实践,解决了多项国家重点型号工程中的制造难题,包括:复杂型面精密电解加工技术与装备、微细电解线切割加工技术与装备、难加工材料的高效精密磨削

技术与装备、航空大型复杂结构件动态加工特征驱动的超高效数控编程与加工技术、航空航天复杂大部件机器人智能装配技术与装备、大型复杂曲面钛合金蒙皮控形/控性制造、复杂整体结构件加工现场快速检测与适应性加工技术、飞行器大型薄壁整体构件高速低应力铣削技术等系列成果。成功向航空工业成飞、西飞、沈飞、洪都等,航天211厂、529厂、149厂等,航发沈阳黎明、航发东安、西安航天发动机等20余家航空航天企业推广应用,完成了歼20、C919、长征五号多个军民重大型号的研制生产,提高了核心零部件的加工和装配质量,缩短了研制周期。

工程中心近5年来,研究成果获得国家技术发明二等奖1项、国家科技进步二等奖1项、国防科技创新团队奖1项、省部级一等奖7项,其他国防及省部级科技奖20余项,在国内外学术界、工程界具有广泛的影响和很高的声誉。

► 科技成果转化与应用 ◀

工程中心积极推进政、产、学、研、用协同的成果转化与社会服务新体制,助力产业升级与技术能力提升。

近5年在专利转化方面,54件发明专利实施转化3300余万元,15项高价值专利作价入股企业,其中电火花诱导可控烧蚀及机械修整复合

切削双伺服进给加工系统等5项高价值专利,占股比例51%,增资入股与南京浦口经济开发区合办的南京航浦机械科技有限公司。机器人精度补偿技术10项相关高价值专利,占股比例49%入股,与埃斯顿自动化有限公司联合创办江苏航鼎科技股份有限公司。

在其他方面,工程中心采取成果交流会、成立联合实验室、建立中试基地等措施实施成果转化工作。例如:(1)研制成功具有自主知识产权的国内首台整体叶盘电解加工机床,填补了国内空白,打破了国外技术封锁,已在中国航发沈阳黎明航空发动机公司应用。国内首次实现了航空发动机整体叶盘的精密电解加工,提高生产效率2~3倍,降低加工费用50%以上,突破了第四代航空发动机的经济可承受规模化生产的难题。(2)中试基地南京航空航天大学浦口先进制造研究院面向航空航天发动机、燃气轮机、透平机械等高端产品领域,利用电解加工的高效率和电火花加工的高精度和高稳定性,通过工艺规划和整体优化,突破了闭式整体构件传统加工技术面临的材料难加工、结构复杂、加工要求苛刻等导致的难以实现高性能加工的问题,对我国航空发动机、燃气轮机和高性能透平机械的研制和生产做出重要贡献,取得了显著经济效益。(3)与南京埃斯顿自动化集团有限公司以机

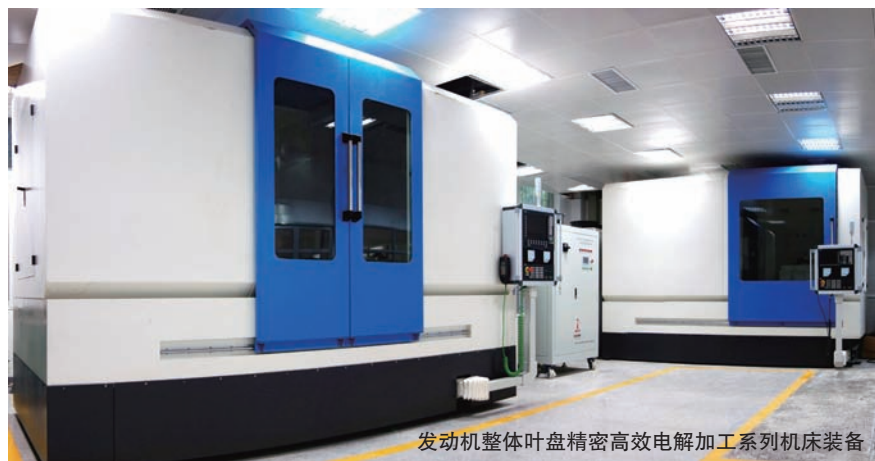
器人精度补偿技术核心知识产权为基础成立联合实验室,共同研究工业机器人精度补偿技术、高精度机器人装备,共同研制国产化高精度机器人,为我国工业机器人产业低成本、高端化探索了一条新路径,实现了国产机器人及装备在高精制造领域的推广应用,促进了我国航空航天高端装备制造智能化发展。同时其关键技术的通用性增强了企业产品市场竞争力,为企业新增销售收入超1亿元。

► 人才培养与服务社会 ◀

近年来,工程中心致力培养航空航天行业专业技术人才。例如面向“大飞机”工程,为上飞公司开办工程博士班;面向航空航天工业,为航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司、中国航发哈尔滨东安发动机有限公司、上海航天火箭总装厂、天津航天长征火箭制造有限公司等单位开办工程硕士班、工程博士班、同等学力研究生班,提升航空航天专业技术人员学力水平。同时,工程中心与国外科研机构培养创新人才,引进德、美、英、西、比等15位海外学术大师为学术骨干,承担了国家国际合作重点项目、欧盟第七框架项目等国际合作项目,创办高速加工国际会议,已成功举办6届,出国学术交流58人,国外到访27人。与英国克兰菲尔德大学联合培养“航空工程”双硕士学位30人/年。

工程中心始终把人才培养作为最主要工作之一,是高效精密加工与装备制造领域最重要的研究生培养基地之一,具有博士学位授予权,设有博士后流动站,每年超过60%的毕业研究生进入国防系统内各单位就业。5年来共计获得上银优秀机械博士论文奖银奖1篇、铜奖1篇、佳作奖4篇、特别奖1篇。一批毕业的博士、硕士研究生已成为国防重点型号的总工艺师、军工集团公司首席专家等。

(采访 雷松)



发动机整体叶盘精密高效电解加工系列机床装备

引文格式: 张红玉, 许海鹰, 路开通, 等. 基于背散射电子的电子束加工过程在线观测系统研制 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(3): 70-75.
ZHANG Hongyu, XU Haiying, LU Kaitong, et al. Development of online view system based on backscattered electrons for electron beam processing [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(3): 70-75.

基于背散射电子的电子束加工过程在线观测系统研制*

张红玉¹, 许海鹰^{1,2}, 路开通^{1,2}, 左从进¹

(1. 中国航空制造技术研究院高能束流发生器实验室, 北京 100024;
2. 南京理工大学材料科学与工程学院, 南京 210094)

[摘要] 为了在高真空、高温、高金属蒸气的电子束加工过程中获得清晰的观测效果, 采用四极板背散射电子接收传感器、高频信号放大电路、高频数据采集卡、高频偏转扫描系统等, 研制了一套基于背散射电子的在线观测系统。通过试验验证, 所研制系统可以有效观测 100mm×100mm 范围内的工件, 图像分辨率为 512 像素×512 像素, 图像处理帧数可以达到 6 帧/s。

关键词: 电子束; 背散射电子; 在线观测; 高频偏转扫描; 图像处理

Development of Online View System Based on Backscattered Electrons for Electron Beam Processing

ZHANG Hongyu¹, XU Haiying^{1,2}, LU Kaitong^{1,2}, ZUO Congjin¹

(1. High Energy Beam Generator Laboratory, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;
2. School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

[ABSTRACT] In order to obtain a clear view of electron beam processing, an online view system was developed based on backscattered electrons with four-plate backscattered electron sensor, high-frequency signal amplification circuit, high-frequency data acquisition card, and high-frequency deflection and scanning system. The experiments indicate that the system can effectively observe the workpiece in the area of 100mm×100mm, the resolution is 512 pixels×512 pixels, and the frames of image processing can reach 6 frames/second.

Keywords: Electron beam; Backscattered electrons; Online view; High-frequency deflection and scanning; Image processing

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2021.03.070

电子束加工技术具有能量密度高、参数易于控制、能量转换效率高等优点, 已经广泛应用于焊接、增材制造等领域。由于电子束加工过程通常需要在真空环境下进行, 又由于高温、高金属蒸汽的影响, 使得加工过程的监测十分困难^[1]。因此传统机器视觉观测系统很难适用于电子束加工过程的长期观测。

目前利用电子束加工过程中的二次电子和背散射电子信号来成像的技术已经得到较广泛的应用, 并且可适用于高金属蒸汽环境^[2]。相比于传统光学观测方法, 其观测图像的纹理更为清晰, 对恶劣工作环境的适应性更好, 这对提高电子束加工的质量和效率有着十分重要的意义。国外, 德国 SST、英国 TWI、乌克兰巴顿所等单

* 基金项目: 广东省重点领域研发计划项目 (2018B090904004); 国家自然科学基金 (51775527)。

位已经开展了大量研究工作,并且将其成功应用到实际生产中。而国内对此项技术的研究还处于起步阶段。为满足实际观测需求,本试验采用四极板背散射电子接收传感器、高频信号放大电路、高频数据采集卡、高频偏转扫描系统等研制了一套基于背散射电子的观测系统。相比于现有双极板传感器方案的观测图像会出现部分方向纹理不清晰的情况,本试验中采用的四极板传感器和后期图像融合算法可以实现各方向纹理的清晰观测。试验结果表明所研制系统可以满足电子束加工过程的在线观测需求。

1 系统设计

所设计的基于背散射电子的观测系统示意图见图1。图中,工控机用于系统整体逻辑控制与图像处理;函数发生卡用于产生偏转扫描系统的驱动波形及采集卡的同步触发时钟信号;偏转扫描驱动电路将输入低压小电流控制信号转化为较高电压大电流功率信号输出;背散射电子接收传感器用于收集背散射电子信号;信号放大电路放大背散射电子信号;数据采集卡采集信号并传输给工控机。由函数发生卡、偏转扫描驱动电路、偏转扫描线圈构成的偏转扫描系统按照工控机指令控制电子束逐点扫过被观测工件表面。同时,由背散射电子接收传感器、高频信号放大电路、高频数据采集卡构成的背散射电子信号采集电路按照同步时钟逐点采集信号并传输给工控机。工件上被扫描的点会因为表面形貌或者材料的不同,使得被反射的背散射电子的发散角度方向不同,采集信号经过计算机软件处理后,可以逐点重构出工件表面形貌衬度图。

1.1 背散射电子接收传感器

传感器结构如图2所示,由4块扇形铜极板、采样电阻、铜制外壳组成。其中,4块扇形铜板可以接收不同反射角度的背散射电子,分别通过各自的采样电阻与接地的外壳相连,从而将接收的背散射电子的电流

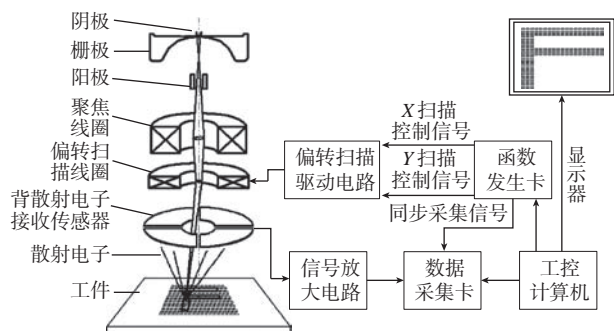


图1 基于背散射电子的观测系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of view system based on backscattered electrons

量转换为电压量,并作为传感器的输出。传感器极板与传感器外壳通过绝缘材料连接件固定,保证了良好的绝缘性^[3]。

传感器等效电路为RC低通滤波电路,即输出电压信号 U 与输入背散射电流信号 I 构成了一阶惯性环节,其传递函数为:

$$\frac{U(s)}{I(s)} = \frac{1}{R + \frac{1}{Cs}} = \frac{R}{1+RCs} = \frac{R}{1+Ts} \quad (1)$$

其中, R 为采样电阻阻值; C 为等效电容; s 为传递函数参数; T 为一阶惯性环节时间常数。等效电容主要包括两部分,一部分是传感器极板与接地外壳之间形成的电容,另一部分是传感器信号输出线的分布电容。背散射电子接收传感器一个极板的等效电路如图3所示,传感器时间常数 T 为 RC ,增益为 R 。依据香农采样定理,传感器的带宽不能低于采样频率的一半,为了保证传感器拥有足够的带宽^[4],即足够小的时间常数 T ,一方面采样电阻采用较小的阻值,另外一方面增加极板与地之间的距离、减短输出信号线的长度使得等效电容足够小。

1.2 高频信号放大电路

为了保证背散射电子接收传感器的带宽足够高,所选用的采样电阻较小。这使得传感器增益较小,所以

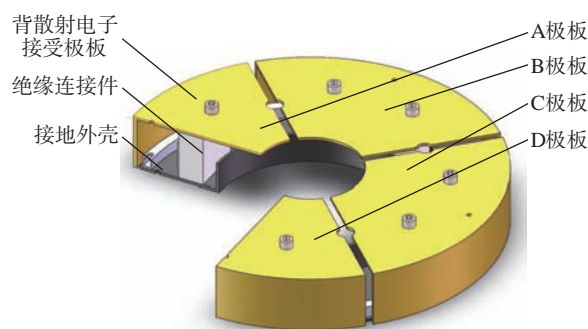


图2 背散射电子接收传感器结构剖面示意图

Fig.2 Sectional schematic diagram of structure of backscattered electron sensor

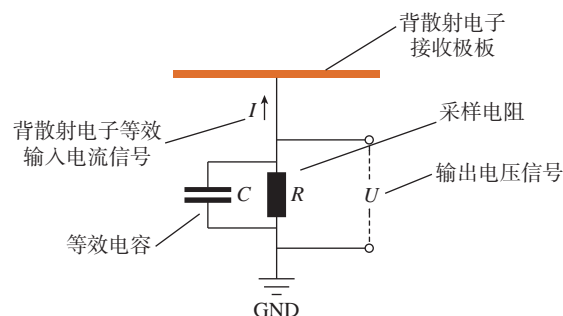


图3 背散射电子接收传感器等效工作电路

Fig.3 Equivalent circuit diagram of backscattered electron sensor

需要带宽高于传感器的信号放大电路增强信号,提高信噪比^[5]。因此设计了图4所示的高频信号放大电路。在每个传感器极板信号输出端均连接一路信号放大电路,所有信号放大电路安装于背散射传感器内部,既可以通过传感器的外壳避免辐射和电磁干扰,又可以减少传感器与信号放大器之间的电缆长度,从而使传感器的等效电容降低。在信号输入端设置 D_1 、 D_2 箝位二极管,可以有效防止电压突变对后级电路的危害。

1.3 高频偏转扫描系统

高频偏转扫描系统由图5所示的偏转扫描线圈及其驱动电路组成。为了获得更好的动态性能,偏转扫描线圈采用无磁芯结构的 Helmholtz 线圈结构,由4股漆包铜线并行绕制而成^[6-8],可有效降低趋肤效应和电感值,保证高动态性能。同时 Helmholtz 线圈产生的偏转磁场均匀性较好,从而保障电子束扫描精度。

功率驱动电路是一种基于功率运算放大器的负反

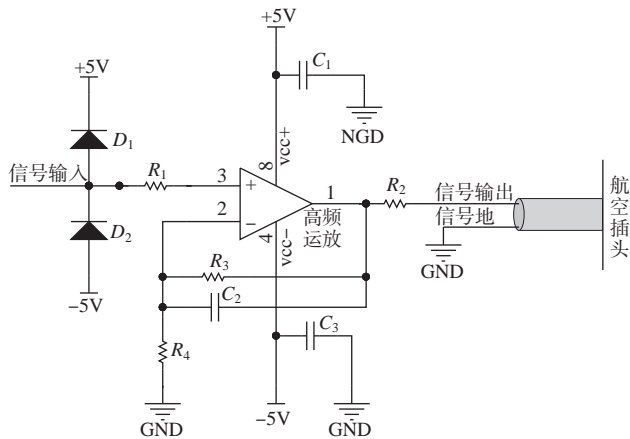


图4 高频信号放大电路

Fig.4 Circuit diagram of high-frequency signal amplifier

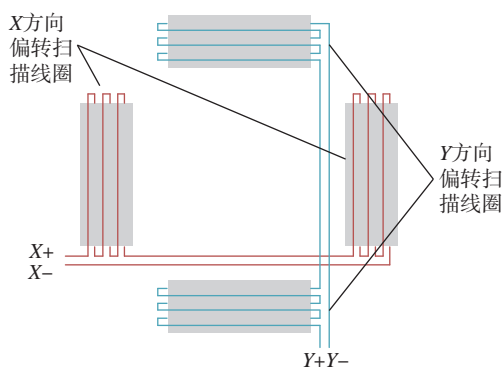


图5 高频偏转扫描线圈结构示意图

Fig.5 Structure diagram of high-frequency deflection and scanning coils

馈控制电路。由于受到功率运算放大器压摆率和最大输出电压等参数的限制,采用单个功率运算放大器的功率驱动电路响应速度较慢。而采用一对相反极性输出的功率运算放大器同时驱动感性负载的两端,可以有效提高感性负载两端驱动电压的变化速率和最大值,从而提高了功率驱动电路的动态响应速度。此外,电流检测采用高频霍尔电流传感器,避免了由反馈延迟引起的振铃现象。最终,所设计的高频偏转扫描系统的带宽为41kHz。图6所示为高频信号放大电路。

此外,所研制系统还包括了工控计算机、高频采集卡、高频函数发生卡,其均为商品化产品,使用方法查阅使用手册即可,在此不再赘述。

2 软件设计

应用软件使用 C++ 语言开发,整体框架如图7所示,包括设备接口类、图像处理模块、界面交互类3个部分。设备接口类抽象于函数发生卡与高频采集卡的开发库和驱动程序,集成了设备连接、参数设置、数据传输、设备释放等接口功能;图像处理模块基于开源的计算机视觉库 OpenCV4 开发,主要完成图像逐点重构、

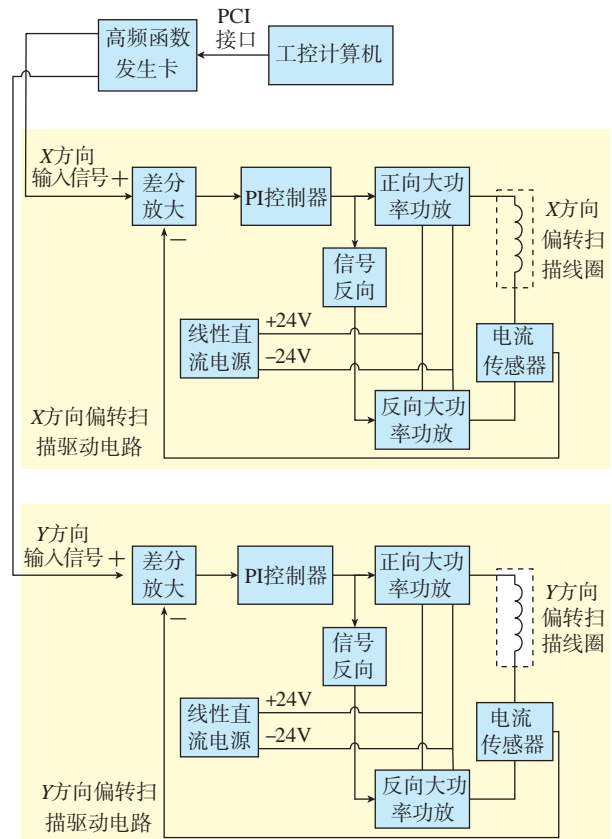


图6 高频偏转扫描驱动电路

Fig.6 Circuit diagram of high-frequency deflection and scanning driver

去噪声、显示等功能^[9]；界面交互类继承于开源计算机C++库QT5,主要提供了界面交互、多线程通信、业务逻辑等功能。

2.1 软件工作流程

软件的主要流程如图8所示,包括程序启动、设备初始化、数据采集、图像处理、程序结束等步骤。考虑到采集卡数据交换与处理需要占用较多计算机资源,程序开启了两个线程。其中主线程负责程序交互界面、设备初始化等工作;第2线程负责采集卡数据交换、图像处理等计算量密集型任务。

2.2 图像采集与重构

图像的采集重构算法流程如图9所示。其中,传感器与信号放大电路将信号输出给高频采集卡,采集卡的4个通道工作在单点触发模式,其触发时钟由函数发生卡给定,同步时钟信号保证了采集卡与电子束偏转扫描位置逐点对应。采集卡与计算机内存的数据交互采用DMA(直接内存存取)方式,即采集卡将高速采集的数据存储在采集卡板载FIFO内存上,再通过PCI接口与计算机内存上开辟出的一段缓存区直接交互,随后以中断触发的模式与应用程序交互。应用程序读取缓存数据后,将4个通道的数据逐点提取出来,并单独重构为4幅32位浮点型灰度图像。

4幅灰度图像分别对应于传感器4个极板,其灰度值与对应极板接受的散射电子数量相关。将关于中心轴对称的两对极板所对应的灰度图像分别作差,得到对应于X、Y两个方向的差分图像^[10]。再对其作对比度与饱和度调节,可得到形貌衬度较为清晰的两幅图像。

2.3 图像融合

由于差分计算特性,工件中与图像差分方向垂直的纹理在图像中呈现得非常明显,而平行方向的纹理则非常模糊甚至不可见。所以X方向的差分图像可以清晰

地呈现工件表面Y方向的纹理;而Y方向的差分图像则可以清晰地呈现工件表面X方向的纹理。图10所示的图像融合算法可以将X、Y方向的差分图像有效融合,从而完整地呈现工件表面的形貌特征。

首先,通过将X、Y方向的差分图像加权叠加到一幅灰度图中,并同时使用中值滤波将图像中的椒盐噪声去除。直接合并的图像已经有效融合X、Y方向的纹理特征。其次,为了增强图像中的纹理特征,通过将图像与其高斯模糊图像作差提取出图像中的高频部分,而高斯模糊图像则为图像中的低频部分。图像的高频部分反映了图像的纹理特征,而图像的低频部分反映了图像的背景特征^[11]。将图像的高频部分放大后与低频部分合并,则可以增强图像的纹理特征,使得图像纹理更有辨识度。

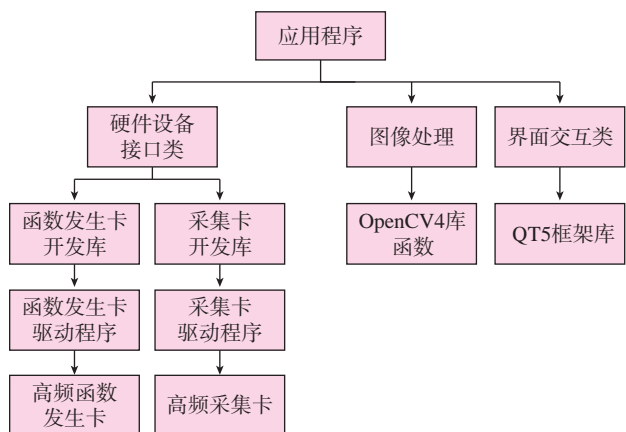


图7 软件框架示意图

Fig.7 Software framework diagram

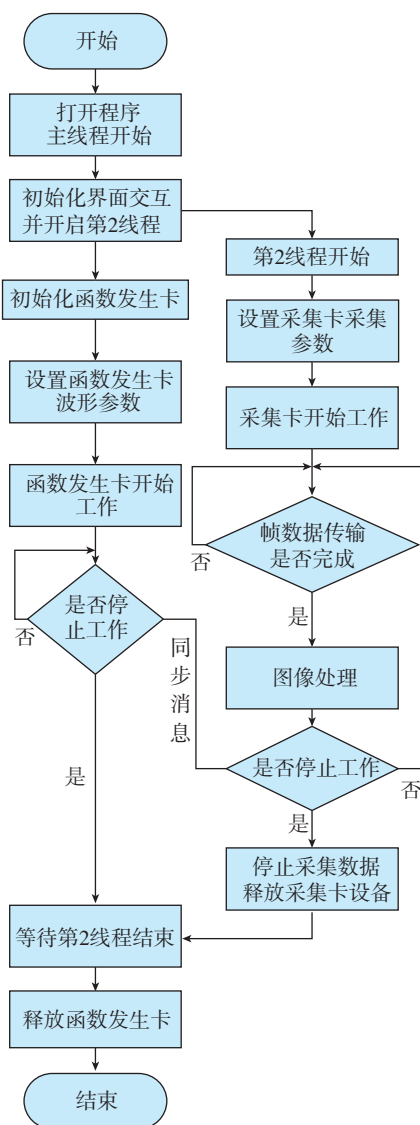


图8 软件工作流程图

Fig.8 Software work flow chart

3 试验与结果分析

3.1 试验条件

试验使用中国航空制造技术研究院自主研发的60kV/15kW直热式电子束设备。背散射电子接收传

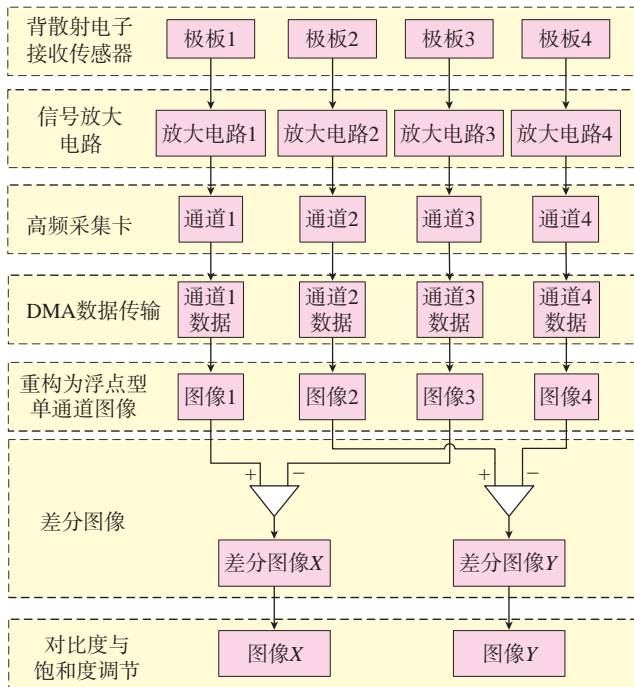


图9 图像重构算法流程图

Fig.9 Image reconstruction algorithm flow chart

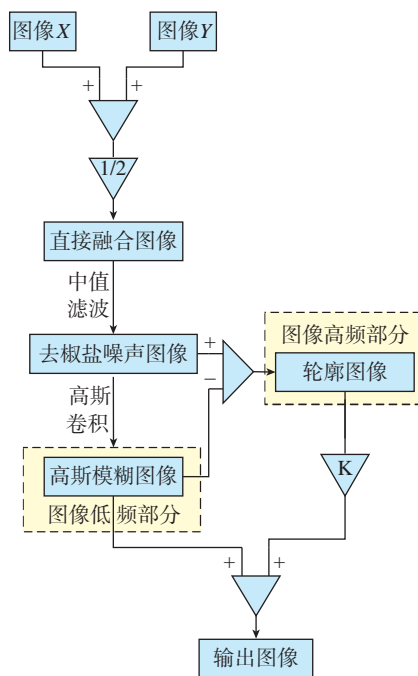


图10 图像融合算法流程图

Fig.10 Image fusion algorithm flow chart

感器安装在图11所示的电子束出口处,与其保持同轴。工作台距离背散射电子接收传感器500mm。如图12所示的钛合金试验样件摆放在工作台中央位置。

试验时,加速电压为60kV,聚焦电流为387mA,采用1.55mA小束流电子束逐行快速扫描试件,基于背散射电子的观测系统分别对试件的局部和整体进行观测。同时使用传统的光学观测系统观测真空室内的试验样件,并将两种观测结果进行对比分析。

3.2 结果与分析

对试件局部观测时,分别得到X、Y方向上的差分图像。两幅图像都反映了试验样件的形貌衬度,图13(a)所示的X方向上的差分图像更加显著地呈现了Y方向上的纹理;而图13(b)所示的Y方向上的差分图像则显著地呈现了X方向上的纹理。

图14(a)所示的图像由X、Y方向上的差分图像直接合并而成,其已经明显包括了试件X、Y两个方向上的

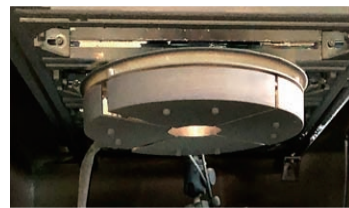


图11 传感器安装图

Fig.11 Sensor installation diagram

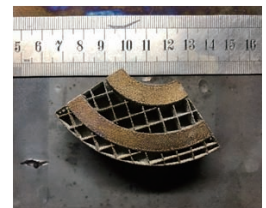
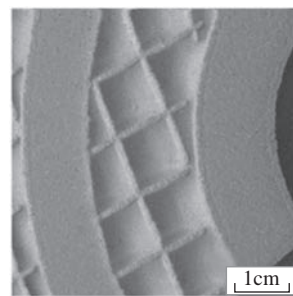
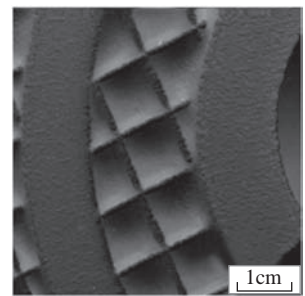


图12 试验样件

Fig.12 Test sample



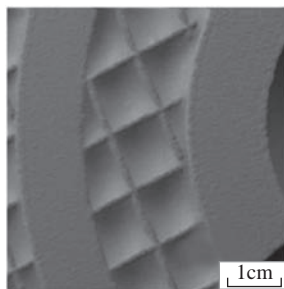
(a) X方向差分图像



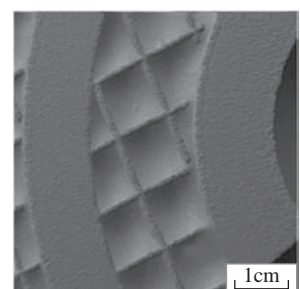
(b) Y方向差分图像

图13 差分图像

Fig.13 Difference image



(a) 直接加权合并的图像



(b) 最终融合图像

图14 图像融合

Fig.14 Image fusion

形貌特征。图 14 (b) 所示的最终融合图像, 所呈现的试件形貌纹理比直接合并的形貌图像更为清晰与明显。

对试件整体观测时的图像如图 15 所示, 工件整体形貌清晰, 其观测帧数可以达到 6 帧 /s, 分辨率可以达到 512 像素 \times 512 像素, 观测范围达到 100mm \times 100mm。

使用传统光学观测系统拍摄的图像如图 16 所示, 其观测范围较小, 清晰度较低。并且在设备工作一段时间后, 光路被金属蒸气严重污染, 观测效果更加模糊。

试验结果表明, 所研制的基于背散射电子的观测系统在电子束加工过程中, 能够为使用者提供清晰的实时观测画面, 方便使用者及时了解零件加工状态。

4 结论

(1) 研制了一套基于背散射电子的观测系统, 实现了电子束加工过程的清晰观测。

(2) 所研制的基于背散射电子的观测系统可以有效观测 100mm \times 100mm 范围内的工件, 图像分辨率为 512 像素 \times 512 像素, 图像处理帧数可以达到 6 帧 /s。

(3) 所研制的基于背散射电子的观测系统可以适用于高温、高金属蒸汽的电子束加工过程, 观测清晰度及范围优于传统光学观测系统。

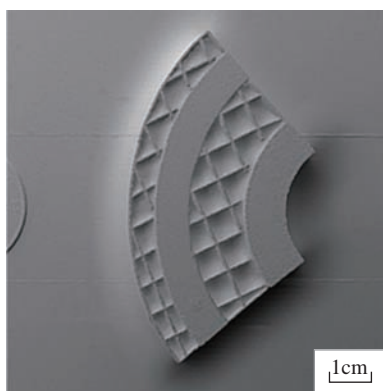


图15 大范围观测图像

Fig.15 Wide-area view image



(a) 清理光路后的观测图像



(b) 多次扫描后光路被金属蒸气遮挡的观测图像

图16 传统光学观测系统拍摄图像

Fig.16 Images taken with traditional optical view system

参考文献

- [1] SCHULTZ H. Electron beam welding[M]. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd., 1993.
- [2] ADAM V, CLAUB U, KRÜSSEL T, et al. Electron beam welding: The fundamentals of a fascinating technology[M]. Munich: Probeam AG & Co. KGaA, 2011.
- [3] 许海鹰, 邢一思, 左从进. 背散射电子接收传感器以及电子束加工过程的观察系统: CN105405733A[P]. 2016-03-16.
XU Haiying, XING Yisi, ZUO Congjin. The backscatter electron reception sensor and the observation system for the electron beam processing process: CN105405733A[P]. 2016-03-16.
- [4] FRANKLIN G. Feedback control of dynamic systems[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2005.
- [5] MANCINI R, CARTER B. Opamps for everyone[M]. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier Inc., 2009.
- [6] 路开通, 许海鹰, 彭勇. 基于亥姆霍兹线圈的电子束偏转扫描技术研究 [J]. 航空科学技术, 2019, 30(7): 73-79.
LU Kaitong, XU Haiying, PENG Yong. Research of electron beam deflection scanning coil based on Helmholtz coil[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(7): 73-79.
- [7] 赵攀峰, 刘方军, 张伟. 电子束高频偏转扫描线圈的设计与仿真 [J]. 航空制造技术, 2019, 62(3): 75-80.
ZHAO Panfeng, LIU Fangjun, ZHANG Wei. Design and simulation of high-frequency electron beam scanning deflection coil[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(3): 75-80.
- [8] 李平林, 张伟, 许海鹰, 等. 基于 Helmholtz 的低阻抗电子束偏转扫描线圈仿真 [J]. 航空制造技术, 2017, 60(12): 89-93.
LI Pinglin, ZHANG Wei, XU Haiying, et al. Design and simulation of electron beam low impedance deflection scanning coil based on Helmholtz coil[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(12): 89-93.
- [9] KAEHLER A, BRADSKI G. Learning OpenCV: Computer vision in C++ with the OpenCV library[M]. Sebastopol: O' Reilly Media Inc., 2013.
- [10] 张大同. 扫描电镜与能谱仪分析技术 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2009.
ZHANG Datong. Scanning electron microscope and energy spectrometer analysis technology[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2009.
- [11] GONZALEZ R C, WOODS R E, MASTERS B R. Digital image processing, third edition[J]. Journal of Biomedical Optics, 2009, 14(2): 029901.

通讯作者: 许海鹰, 研究员, 博士, 主要研究方向为电子束源技术等, E-mail: xhyxhy@126.com。

(责编 阳光)

引文格式: 王文辉, 黄翔, 孟亚云, 等. 面向飞机蒙皮对缝的移动机器人自主跟踪方法 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(3): 76-82.

WANG Wenhui, HUANG Xiang, MENG Yayun, et al. A mobile robot autonomous tracking method for aircraft skin seam[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(3): 76-82.

面向飞机蒙皮对缝的移动机器人自主跟踪方法

王文辉, 黄翔, 孟亚云, 鲁小翔, 李根

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

【摘要】 提出一种面向飞机蒙皮对缝的移动机器人自主跟踪方法, 用以解决大型蒙皮上表面装配对缝的自动化测量问题。移动机器人包括对缝测量模块和运动控制模块, 对缝测量模块在测量对缝间隙阶差的同时得到机器人相对于对缝的位姿, 运动控制模块控制机器人自主调姿。基于双线结构光与对缝的相对位置关系, 提出机器人在不同情况下的自主调姿方法, 解决了机器人在运动过程中与对缝产生偏差时的自主调姿问题。通过试验表明移动机器人对缝自主跟踪的位置误差为 5.81mm, 角度误差为 3.52°。

关键词: 蒙皮对缝; 双线结构光; 自主跟踪; 运动控制; 相对位姿

A Mobile Robot Autonomous Tracking Method for Aircraft Skin Seam

WANG Wenhui, HUANG Xiang, MENG Yayun, LU Xiaoxiang, LI Gen

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] In order to solve the problem of automatically measuring the assembly seams on large skins surface, a mobile robot autonomous tracking method for aircraft skin seam is proposed. The mobile robot includes a seam measurement module and a motion control module. The seam measurement module obtains the posture of the robot relative to the seam while measuring the gap and flush. The motion control module controls the robot to adjust position automatically. Based on the relative position between the dual linear structured light and the seam, an autonomous robot position adjustment method in different situations is proposed, which could solve the problem of autonomous position adjustment when the robot deviated from the seam. The experimental results show that the position error of the mobile robot for the autonomous tracking of the seam is 5.81mm and the angle error is 3.52°.

Keywords: Skin seam; Dual linear structured light; Autonomous tracking; Motion control; Relative pose

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.03.076

飞机蒙皮^[1]在飞机骨架结构外且用铆钉固定于骨架上, 蒙皮直接与空气接触, 不仅起着承载和传递气动载荷^[2]的作用, 还需要承受一定的剪流, 所以要求蒙皮具有较大的承载力和刚度。飞机蒙皮面积较大且形状复杂, 不可能实现整体加工, 所以飞机蒙皮一般由很多面积较小的结构装配而成, 进而形成许多装配对缝, 这些装配对缝的存在会对飞机的气动和隐身性能造成影响^[3]。因此必须对这些装配形成的对缝进行测量, 确认其是否满足装配精度的要求。

传统的蒙皮对缝测量方法是操作人员利用塞尺测

量对缝^[4]。但是大型蒙皮的上表面面积大, 装配对缝数量多^[5]。如果利用塞尺测量这些对缝, 操作人员需要站立在蒙皮的上表面, 这样会使蒙皮发生变形, 因此对大型蒙皮上表面的装配对缝进行测量十分困难。这种操作人员利用塞尺的测量方法稳定性差、随机误差大, 测量结果与技术人员的经验、责任心密切相关, 对操作人员的要求较高。因此需要一套可以测量对缝间隙阶差并且自主跟踪对缝特征的测量系统来代替人工检测。

近年来, 国内外研究人员对飞机蒙皮对缝跟踪技术有诸多研究。天津大学王志江等^[6]提出基于视觉的

机器人对缝纠偏控制系统,但需通过观察对缝中心与机器人的相对位置调整机器人位姿。北京航空航天大学许大帅等^[7]提出基于 iGPS 的对缝定位,在线结构光传感器测算对缝的同时,利用 iGPS 对传感器进行定位,但只能得到对缝的位置信息,难以实现自主跟踪测量。Mueller 等^[8]将蒙皮的三维点云数据与二维图像中像素点一一对应,检测出每个对缝区域的点云数据,在扫描得到大量的点云数据中,不能准确、高效地提取对缝区域。

针对上述问题,本文提出了一种面向飞机蒙皮对缝的机器人自主跟踪方法。机器人采用精度高且便携的双线结构光测量方法和灵活性好的车轮式移动方式。机器人包括对缝测量模块和运动控制模块。对缝测量模块在测量对缝间隙阶差的同时得到机器人相对于对缝的位姿,传输到运动控制模块中控制机器人自主调姿,实现对缝的自主跟踪。

1 移动机器人

1.1 结构与硬件组成

移动机器人如图 1 所示,机器人采用 3 层架构式,其外形尺寸为 300mm × 220mm × 220mm。NVIDIA Jetson TX2 开发板安装在上底盘上,STM32 单片机^[9]、BTN7971 驱动板和蓄电池依次安装在机器人的中间底盘上。工业相机和两激光器固定在中间底盘与下底盘之间的安装板上。

1.2 通讯原理

移动机器人的通讯原理如图 2 所示,机器人包括对缝测量模块和运动控制模块。

工业相机获取对缝处的激光光条图像,传输到 NVIDIA Jetson TX2 开发板中。NVIDIA Jetson TX2 开发板对光条图像进行处理^[10],一方面测量对缝的间隙阶差,另一方面得到机器人相对于对缝的位姿,然后通过串口^[11]将相对位姿发送到 STM32 单片机。STM32 单片机发送 PWM 波到驱动板,驱动电机控制麦克纳姆轮^[12]转动,调整机器人位姿。

2 对缝自主跟踪

2.1 对缝跟踪模型

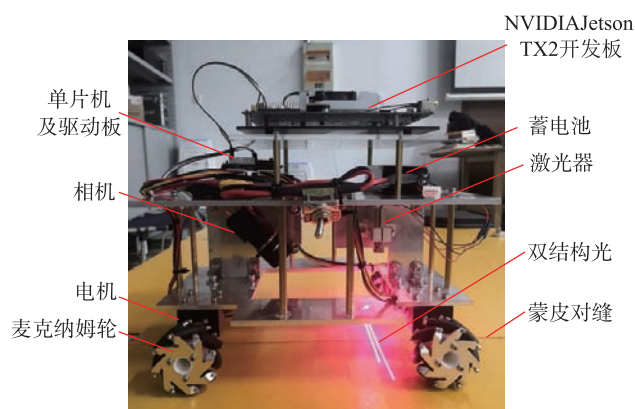
当机器人在水平方向左右移动时,相机采集到的图像中对缝的位置会随之移动。因大型蒙皮的上表面曲率较小,故可以忽略由蒙皮曲率变化造成对缝在相机 Z 轴方向的位置变化。因此,图像上对缝特征点的偏移^[13]代表了机器人相对于对缝的偏移。

在机器人运动的过程中应保证机器人中心线与对缝方向一致,避免机器人在运动过程中由于误差导致所采集的图像中激光光条未检测到缝,从而对机器人跟踪

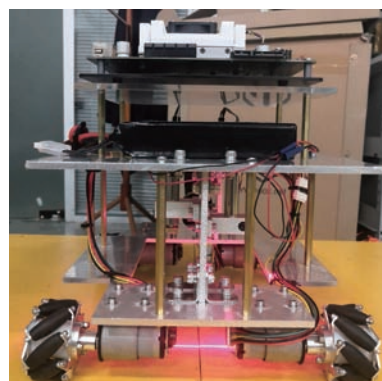
对缝产生影响。当机器人中心线与对缝方向一致时,对缝位于图像中心位置,此位置光条效果较两侧更好,图像处理精度更高^[14]。

通过以上分析,构建如图 3 所示的移动机器人对缝跟踪模型。

由图 3 可知,在机器人跟踪对缝的过程中,机器人相对于对缝的位姿包括两部分,一部分是机器人中心



(a) 正视图



(b) 侧视图

图1 移动机器人结构图

Fig.1 Mobile robot structure diagrams

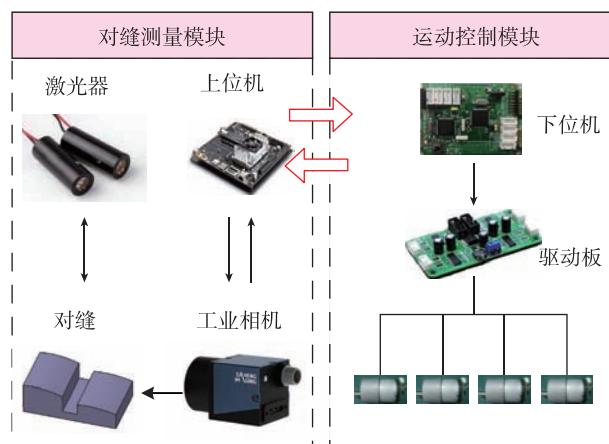


图2 通讯原理图

Fig.2 Communication schematic

线相对于对缝轨迹的偏角,用 θ 表示;另一部分是机器人中心线与对缝之间的距离,用 l 表示。 O 点为机器人的几何中心, a 和 b 分别表示机器人几何中心 O 点与两光条的距离, d 表示机器人中心线两侧激光光条的长度。

对机器人相关尺寸进行测量可知,几何中心 O 点距离两光条的距离 a 和 b 分别为65mm和70mm,机器人中心线两侧激光光条的长度 d 为70mm。

2.2 自主调姿方法

在机器人运动的过程中,机器人中心线与对缝会出现偏差,产生偏差的原因有如下3点:

- (1) 机器人位于初始位置时,由于初始位置的随机性,机器人中心线与对缝之间的相对位置关系不能得到保证;
- (2) 在机器人运动的过程中,对缝的轨迹会发生变化,从而造成机器人中心线与对缝之间产生偏差;
- (3) 在机器人运动过程中产生误差,导致其中心线偏离对缝方向。

由于上述原因,要求机器人在跟踪对缝的过程中可以调节其相对于对缝的位姿。根据图像中激光光条检测到对缝的不同情况,研究机器人的自主调姿方法分为双缝、单缝和无缝3种。

2.2.1 双缝

当机器人某一时刻相机所采集到的图像中激光光条检测到双缝,说明此时对缝轨迹之间有一锐角转角。此时,在相机所采集的图像中对缝与光条的相对位置关系有两种,如图4所示。

以图4(a)为例,详细描述机器人在检测到双缝时的调姿方法,调姿示意图如图5所示。

移动机器人根据对缝相对于图像中心的位置,向左或向右运动 l ,使对缝位于图像中心,如图5(b)所示。

根据 θ 与 90° 的大小关系,若 $\theta > 90^\circ$,则控制机器人逆时针转动 $270^\circ \sim \theta$,如图5(c)所示。同理,若 $\theta < 90^\circ$,则控制机器人顺时针转动 $90^\circ + \theta$ 。由于图像中心不是机器人的旋转中心,所以在转动之后机器人中心线方向与对缝方向相同,但图像中心并不在对缝处。

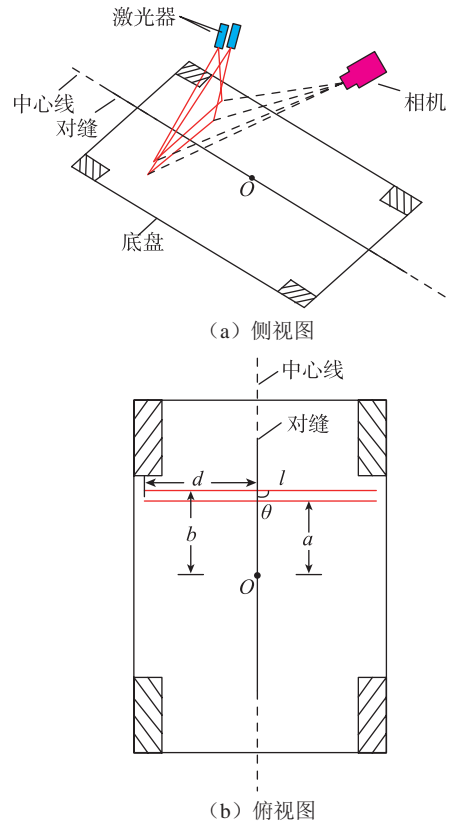


图3 机器人对缝跟踪模型

Fig.3 Robot seam tracking model

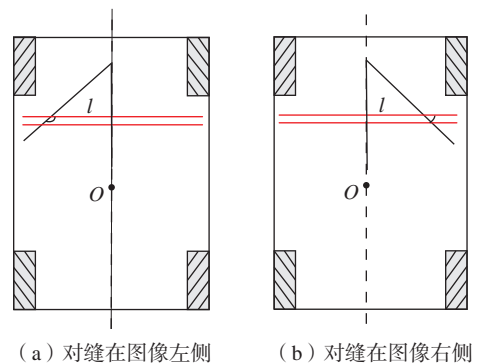


图4 双缝检测简图

Fig.4 Double seam detection diagrams

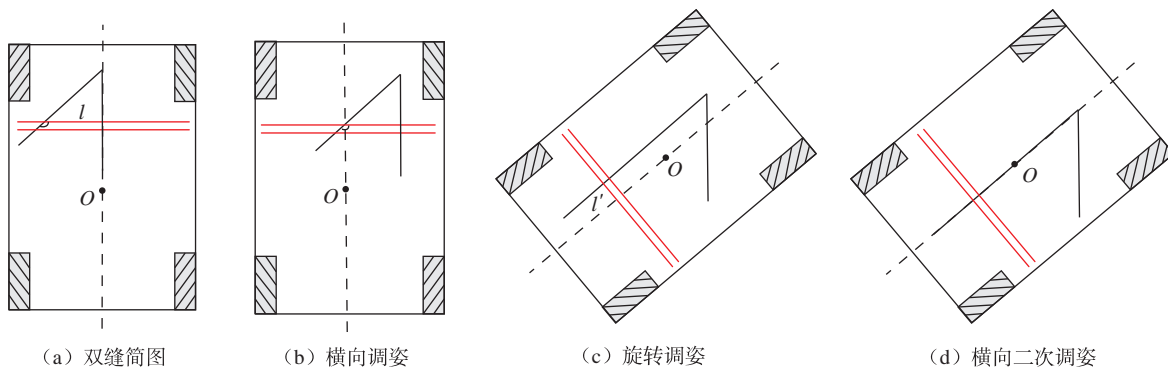


图5 双缝调姿

Fig.5 Double seam posture adjustment

由几何关系可知,逆时针转动之后对缝位于机器人中心线的右侧,对缝与机器人中心线距离 $l'=b\sin(\theta-90^\circ)$,控制机器人右移 $b\sin(\theta-90^\circ)$,如图 5 (d) 所示。同理,顺时针转动之后对缝位于机器人中心线的左侧,对缝与机器人中心线距离 $l'=b\sin(90^\circ-\theta)$,控制机器人左移 $b\sin(90^\circ-\theta)$ 。从而保证机器人中心线与对缝方向一致。

2.2.2 单缝

当机器人某一时刻相机所采集到的图像中激光光条检测到单缝。此时存在两种情况:第 1 种是机器人位于初始位置,由于放置位置的不确定性导致激光光条与对缝之间有一定的偏差;第 2 种是对缝轨迹之间存在一钝角转角,相机在某次采集图像的过程中拍摄到了钝角转角的另一条边。

在初始位置时,相机所采集的图像中对缝与光条的相对位置关系有 4 种,如图 6 所示。在对缝轨迹之间存在钝角转角时,相机所采集的图像中对缝与光条的相对位置关系有两种,如图 7 所示。

由图 6 和图 7 可知,在机器人位于钝角转角时,检测到缝的两种情况与初始位置时的情况相同。在初始位置和钝角转角两种情况下可采用相同的调姿方法。以图 6 (a) 为例,详细描述机器人在检测到单缝时的调姿方法,调姿示意图如图 8 所示。

移动机器人根据对缝的左右位置,若对缝在左侧,则向左运动 l ,如图 8 (b) 所示。同理,若对缝在图像中心的右侧,则控制机器人向右运动 l ,使对缝位于图像中心。

根据 θ 与 90° 的大小关系,若 $\theta > 90^\circ$,则控制机器人顺时针转动 $\theta \sim 90^\circ$,如图 8 (c) 所示。同理,若 $\theta < 90^\circ$,则控制机器人逆时针转动 $90^\circ \sim \theta$ 。由于图像中心不是机器人的旋转中心,所以在转动之后机器人中心线方向与对缝方向相同,但图像中心并不在对缝处。

由几何关系可知,顺时针转动之后对缝位于机器人中心线的左侧,对缝与机器人中心线距离 $l'=b\sin$

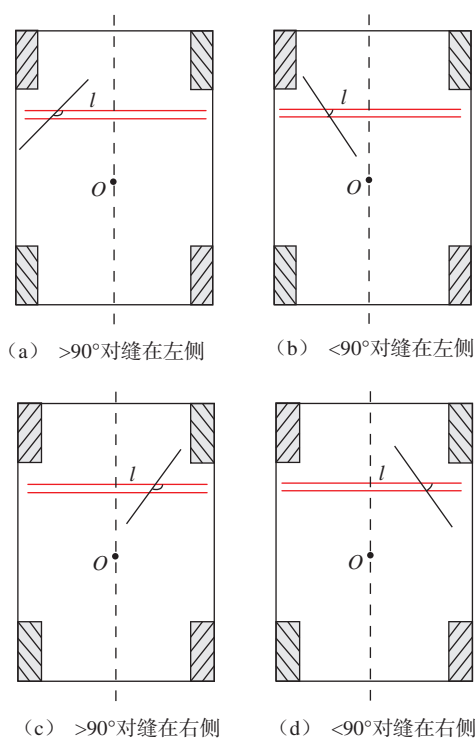


图6 初始位置简图

Fig.6 Initial position diagrams

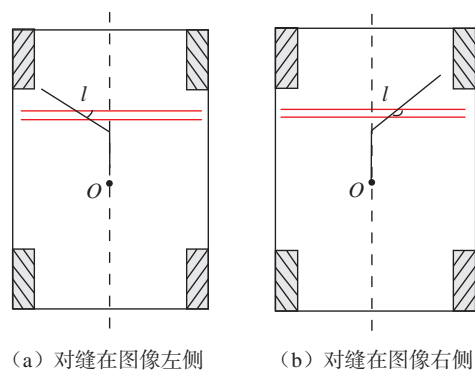


图7 单缝检测简图

Fig.7 Single seam detection diagrams

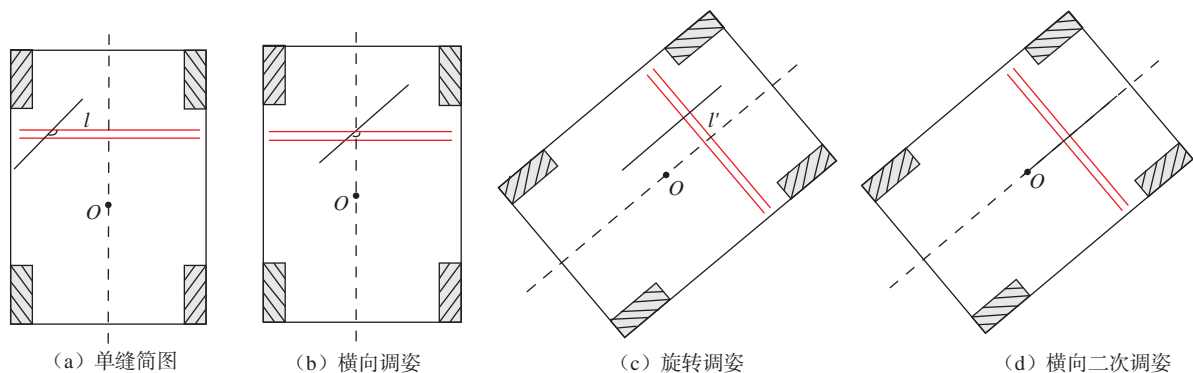


图8 单缝调姿

Fig.8 Single seam posture adjustment

($\theta-90^\circ$),控制机器人左移 $b\sin(\theta-90^\circ)$,如图 8(d)所示。同理,逆时针转动之后对缝位于机器人中心线的右侧,对缝与机器人中心线距离 $l'=b\sin(90^\circ-\theta)$,控制机器人右移 $b\sin(90^\circ-\theta)$,保证机器人中心线与对缝方向一致。

2.2.3 无缝

当机器人某一时刻相机所采集到的图像中激光光条未检测到缝。此时存在两种情况,第 1 种是对缝轨迹之间存在一钝角转角,由于机器人前一次前进距离过大导致此次拍摄的图像中光条未检测到缝。第 2 种是对缝轨迹之间存在一个直角转角。

当对缝轨迹之间为钝角转角时,相机所采集的图像中对缝与光条的相对位置关系有两种,如图 9 所示。在对缝轨迹之间为直角转角时,相机所采集的图像中对缝与光条的相对位置关系也有两种,如图 10 所示。

由图 9 和图 10 可知,机器人位于钝角转角时与直角类似,可采用相同的调姿方法。以较复杂的钝角转角图 9(a)为例,详细描述机器人未检测到缝时的调姿方法。

控制机器人逆时针转动 90° ,采集一次图像。若检测到缝,如图 11(a)所示;若仍未检测到缝则说明对缝不在机器人的逆时针方向,然后控制机器人顺时针转动 180° ,如图 11(b)所示。

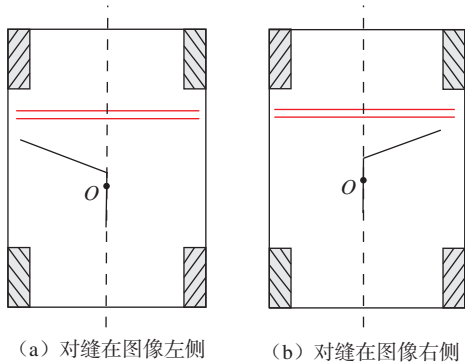


图9 钝角无缝检测简图
Fig.9 Obtuse angle seamless detection diagrams

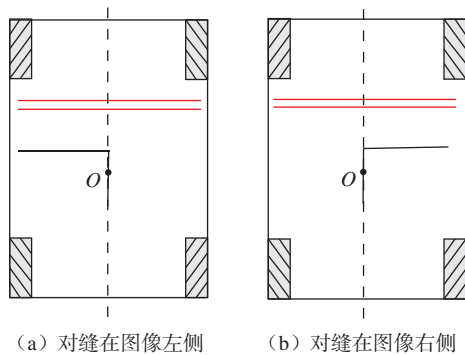


图10 直角无缝检测简图
Fig.10 Right angle seamless detection diagrams

在机器人旋转寻缝后,光条检测到单缝,下一步可按单缝调姿方法进行调整位姿。

2.3 对缝跟踪流程

机器人运动流程如图 12 所示。

步骤 1: 调姿。将机器人放到初始位置,打开开关,进行单缝调姿。

步骤 2: 运动。控制机器人直线运动,采样距离为 50mm。

步骤 3: 判断是否检测到缝。由采集到的图像判断机器人是否检测到缝。若无缝,跳转至步骤 4;若有缝,跳转至步骤 5。

步骤 4: 旋转寻缝。若机器人采集的图像中没有对缝,进行旋转寻缝。

步骤 5: 判断检测到缝的类型。若机器人采集的图

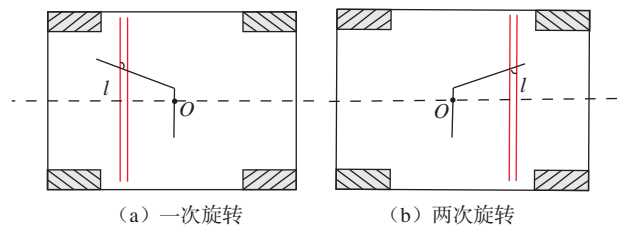


图11 旋转寻缝
Fig.11 Rotary seam finding

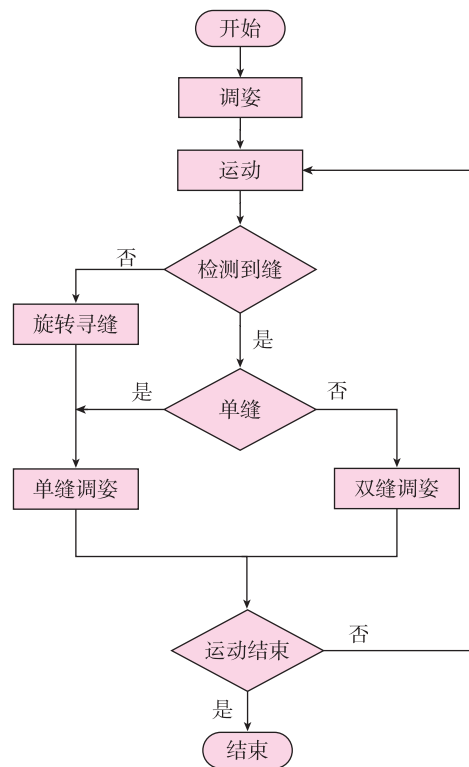


图12 机器人运动流程图
Fig.12 Robot motion flow chart

像中有对缝,判断对缝的类型。若为单缝,跳转至步骤6;若为双缝,跳转步骤7。

步骤6:单缝调姿。按单缝调姿的方法进行调姿。

步骤7:双缝调姿。按双缝调姿的方法进行调姿。

步骤8:判断运动是否结束。若机器人未运动结束,跳转至步骤2。若机器人运动结束,则停止运动。

3 试验及结果分析

3.1 试验平台

为验证移动机器人对缝跟踪精度,搭建图13所示的对缝跟踪试验平台。试验平台中,模拟件根据大型蒙皮上表面装配对缝中,形状最复杂、轨迹最长的飞机机翼与翼盒装配后形成的对缝轨迹特征设计加工形成。

模拟件表面上的对缝轨迹为锯齿形,分别有 50° 、 100° 和 90° 3种不同类型的转角。其中每条锯齿边的长为 350mm ,两条短直角边长为 700mm ,底边边长为 1600mm 。将机器人放置到图13所示位置。

3.2 试验数据及误差分析

在机器人沿模拟件上对缝运动的过程中,机器人中心线与对缝距离 l 的理论值为0,激光光条和对缝夹角 θ 的理论值为 90° 。但是在实际的对缝跟踪过程中,机器人与对缝总会存在误差。用机器人中心线与对缝距离 l 与0的差值表示机器人的位置误差;激光光条和对缝的夹角 θ 与 90° 的差值表示机器人的角度误差。

记录机器人每次采集的图像中其中心线与对缝之间的距离 l 以及激光光条与对缝的夹角 θ 。根据试验结果绘制图14所示的误差分布曲线。

在图14中,第1次测量为初调姿。由于初始位置的不确定性,当机器人位于初始位置时,机器人中心线与对缝的位置误差以及激光光条与对缝的角度误差都较大。此次试验中,初始位置时测量得到的距离为 -46.51mm ,角度为 68.53° 。

第5次测量得到的距离为 53.23mm ,角度为 168.64° 。由于距离和角度都有很大误差,说明此时到达钝角转角。

第13次测量未得到数据,第14次测量得到的距离为 46.20mm ,角度为 105.35° 。说明机器人进行了一次旋转寻缝,对缝在逆时针方向。由于位置误差较大,说明此时到达钝角转角。

第21、22次测量未得到数据,第23次测量得到的距离为 -51.39mm ,角度为 76.62° 。说明机器人进行了两次旋转寻缝,对缝在顺时针方向。由于位置误差较大,说明此时到达钝角转角。

第30次测量未得到数据,第31次测量得到的距离为 38.42mm ,角度为 104.15° 。说明机器人进行了一次

旋转寻缝,对缝在逆时针方向。由于位置误差较大,说明此时到达钝角转角。

第38次测量得到两组数据,说明到达锐角转角。其中较偏处对缝测量得到的距离为 23.50mm ,角度为 43.31° 。

第53、54次测量未得到数据,第55次测量得到的距离为 5.41mm ,角度为 92.38° 。说明机器人进行了两次旋转寻缝,对缝在顺时针方向。由于位置误差较小,说明此时到达直角转角。

第88、89次测量未得到数据,第90次测量得到的

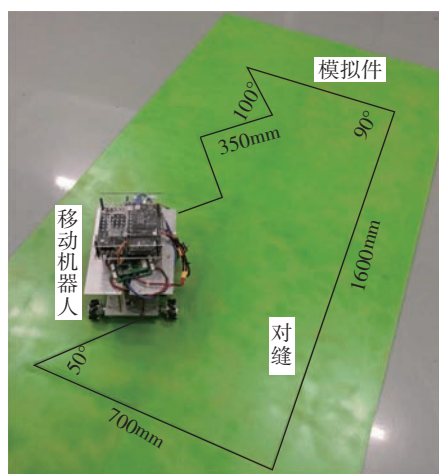


图13 对缝跟踪试验平台

Fig.13 Seam tracking experimental platform

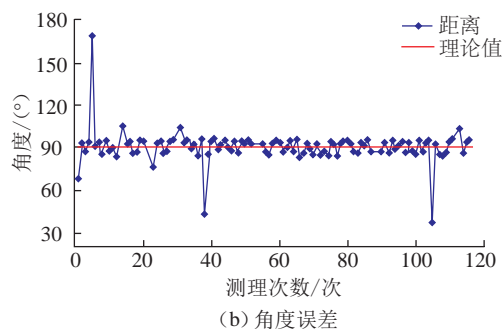
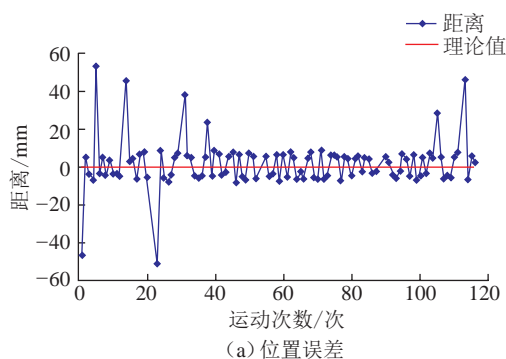


图14 误差分布图

Fig.14 Error distribution

距离为 5.38mm, 角度为 87.72°。说明机器人进行了两次旋转寻缝, 对缝在顺时针方向。由于位置误差较小, 说明此时到达直角转角。

第 105 次测量得到两组数据, 说明到达锐角转角。其中较偏处对缝测量得到的距离为 28.48mm, 角度为 36.47°。

第 112 次测量未得到数据, 第 113 次测量得到的距离为 46.22mm, 角度为 103.95°。说明机器人进行了一次旋转寻缝, 对缝在逆时针方向。由于位置误差较大, 说明此时到达钝角转角。

由试验结果可知, 经初调姿后, 机器人沿对缝直线运动时的误差较小。由于对缝轨迹发生变化, 机器人在调姿时的位置误差和角度误差较大。在不考虑调姿误差的情况下, 机器人直线运动的位置误差为 5.81mm, 角度误差为 3.52°。

4 结论

本文针对大型蒙皮上表面装配对缝的自动化测量问题, 提出了一种面向飞机蒙皮对缝的移动机器人自主跟踪方法。

(1) 对机器人的结构、硬件组成与通讯原理进行了简单的介绍。机器人采用 3 层架构式结构, 并搭载合适的硬件。NVIDIA Jetson TX2 开发板处理图像得到机器人相对于对缝的位姿, 通过串口传输到 STM32 单片机中, 进而控制机器人自主调姿。

(2) 基于双线结构光与对缝的相对位置关系, 将图像中光条检测到对缝的情况分为双缝、单缝和无缝 3 种, 提出了机器人在不同情况下的自主调姿方法, 解决了机器人在运动过程中与对缝产生偏差时的自主调姿问题。

机器人通过该方法自主跟踪对缝。通过试验表明, 移动机器人对缝跟踪时的位置误差为 5.81mm, 角度误差为 3.52°。该机器人对缝跟踪误差小, 可靠性高, 为大型飞机蒙皮上表面装配对缝的自动化测量提供了新手段。

参考文献

[1] 马张健. 飞机蒙皮接缝信息自动提取技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
 MA Zhangjian. Study of the aircraft skin information automatic extraction [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.

[2] 严成, 黄翔, 李泷泉, 等. 基于三维激光扫描的蒙皮对缝检测研究 [J]. 航空制造技术, 2017, 60(10): 70-74, 78.
 YAN Cheng, HUANG Xiang, LI Shuangqao, et al. Research on detection of skin seam based on 3D laser scanning [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(10): 70-74, 78.

[3] 丁祖娇. 面向结构光对缝测量的光条细化方法 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.

DING Zujiao. Research on light stripe thinning method in seam measurement using structured light [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.

[4] 刘巨强, 钱丰. 关于塞尺测量方法的探讨 [J]. 电子质量, 2014(2): 6-8.
 LIU Juqiang, QIAN Feng. Discussion about the measuring method of feeler gauge [J]. Electronics Quality, 2014(2): 6-8.

[5] 航空制造工程手册总编委会. 航空制造工程手册—飞机装配 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2010.
 Aeronautical Manufacturing Engineering Handbook Editorial Board. Aeronautical Manufacturing Engineering Handbook—Aircraft Assembly [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2010.

[6] 王志江, 薛坤喜, 吴定勇, 等. 基于视觉传感的机器人焊缝纠偏控制系统 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(17): 48-55.
 WANG Zhijiang, XUE Kunxi, WU Dingyong, et al. Robotic weld seam correction control system based on visual sensing [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(17): 48-55.

[7] 许大帅, 杜福洲. 基于线结构光的飞机蒙皮对缝阶差与间隙测量技术研究 [J]. 航空制造技术, 2017, 60(5): 77-81.
 XU Dashuai, DU Fuzhou. Research on measurement technique of the stepped difference and gap between aircraft skins based on linear structural light [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(5): 77-81.

[8] MUELLER E M, STARNES S, STRICKLAND N, et al. The detection, inspection, and failure analysis of a composite wing skin defect on a tactical aircraft [J]. Composite Structures, 2016, 145: 186-193.

[9] 冷雪峰. 基于 PID 的 STM32 智能小车机器人的设计 [J]. 自动化技术与应用, 2016, 35(11): 122-127.
 LENG Xuefeng. Design of STM32 intelligent car robot based on PID [J]. Techniques of Automation and Applications, 2016, 35(11): 122-127.

[10] ZHONG C Q, GAO Z, WANG X, et al. Structured light three-dimensional measurement based on machine learning [J]. Sensors, 2019, 19(14): 3229.

[11] 任毅. 单片机常用接口通信技术 [J]. 电子技术与软件工程, 2018(9): 244.
 REN Yi. Single-chip microcomputer interface communication technology [J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2018(9): 244.

[12] HE C Q, WU D, CHEN K, et al. Analysis of the Mecanum wheel arrangement of an omnidirectional vehicle [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2019, 233(15): 5329-5340.

[13] 毛志伟, 周少玲, 赵滨, 等. 双线激光传感焊枪定位与焊缝走向识别 [J]. 焊接学报, 2015, 36(2): 35-38, 114-115.
 MAO Zhiwei, ZHOU Shaoling, ZHAO Bin, et al. Welding torch position and seam orientation deviation based on two stripes laser vision sensing [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(2): 35-38, 114-115.

[14] HANG H Q, WU D D, YAO T. Research on AGV trajectory tracking control based on double closed-loop and PID control [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1074: 012136.

通讯作者: 黄翔, 教授, 博士, 研究方向为飞机装配与数字化测量, E-mail: xhuang@nuaa.edu.cn.

(责编 阳光)

引文格式: 龙安林, 何凤涛, 蒋超, 等. 飞机大部件装配能力测算方法研究 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(3): 83-86, 102.

LONG Anlin, HE Fengtao, JIANG Chao, et al. Research on evaluating method of assembly capacity of large aircraft component[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(3): 83-86, 102.

飞机大部件装配能力测算方法研究

龙安林, 何凤涛, 蒋超, 陈爱民, 刘大鹏

(航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610092)

[摘要] 针对具有典型离散型制造特征的飞机大部件结构装配能力测算问题, 以其下级部段件为研究单位, 分析了部段装配能力随工艺方案、操作熟练度、倒班模式、制造资源以及一般能力社会化等因素的动态变化关系, 提出了基于部段装配能力数据集并综合考虑飞机装配流程时序关系以及各部段装配能力匹配关系的飞机大部件实际装配能力测算方法, 通过举例计算, 验证了该方法的可行性和有效性。

关键词: 大部件; 装配能力; 离散制造; 动态; 飞机

Research on Evaluating Method of Assembly Capacity of Large Aircraft Component

LONG Anlin, HE Fengtao, JIANG Chao, CHEN Aimin, LIU Dapeng

(AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China)

[ABSTRACT] In order to evaluate the assembly capacity of large aircraft component which has typical characteristics of the discrete manufacturing, the sub-components are selected as research objects. Dynamic effects of the factors including process scheme, operational proficiency, work shift model, manufacturing resource and main manufacturer-supplier model on sub-components assembly capacity have been analyzed in advance. Based on the data set of sub-components assembly capacity, the evaluating method of actual assembly capacity of large aircraft component has been proposed. Sequential relationship of assembly process and matched degree of each sub-components assembly capacity are taken into consideration. That method is proven to be feasible and effective via an assembly demonstration.

Keywords: Large component; Assembly capacity; Discrete manufacturing; Dynamic; Aircraft

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.03.083

飞机制造是一个庞大、复杂的离散型制造工程, 从工艺设计开始, 主要经历毛坯制造、零件加工、部件装配、总装配(安装)以及试验试飞等阶段。其中, 飞机部件装配和总装配是多学科交叉的高难度、综合性工作, 工作量约占整个飞机制造工作量的 30%~45%, 装配周期一般占飞机总制造周期的 40% 以上^[1]。飞机的装配能力直接决定了飞机的生产制造能力。

飞机装配属于典型的离散型生产, 装配能力的测算工作复杂性高, 操作困难^[2]。制造资源的投入是影响飞机装配能力的最主要因素。同时, 人、机、料、法、环紧密联系, 影响飞机的装配质量, 零标件供应、成品配套以及现场故障等使得飞机装配能力具有明显的动态特性。理论分析中常用 Petri 网建模方法建立生产线模型并进行瓶颈环节分析、优化^[3], 或借助计算机以 Plant

Simulation 等软件进行装配生产线仿真^[4], 也可以采用二者相结合的方式^[5]。文献 [3-5] 运用上述方法依次对某型飞机总装、某型飞机机身装配以及某型飞机机翼装配生产线进行了建模分析, 验证了方法的有效性和可行性。

飞机部件装配主要完成飞机结构件的定位、连接工作, 其涉及的零标件多, 协调关系复杂且结构刚性较弱, 实现了飞机从零件到组件、段件、部件直至机身/机翼大部件的结构演变。因此, 飞机部件装配流程长, 层级多, 前述文献中的建模分析方法在实际工程应用中略显繁琐。

本文为测算飞机大部件装配能力, 以部段件为基本研究对象, 分析主要矛盾, 重点关注部段件架内装配型架的数量和占架时间, 化繁为简, 从实际生产数据出发, 考虑部段件装配能力在工艺方案、操作熟练度、倒班模

式、制造资源以及一般能力社会化等因素影响下随时间的动态变化关系,结合飞机装配时序关系获得机身/机翼大部件的装配能力,用于指导工程实践。

1 装配能力影响因素

装配能力定义为单位时间内完成装配的部件数量,可表示为:

$$C = \frac{Q}{T} \quad (1)$$

其中, Q 为装配产量(架); T 为完成时间(年); C 为装配能力(架/年)。影响飞机部件装配能力的因素很多,其中可控因素主要包括工艺方案、操作熟练度、倒班模式、制造资源(型架、设备)以及一般能力社会化(主制造商-供应商模式)等;不可控因素主要包括现场故障、零件与成品配套缺件等。本文主要考虑上述可控因素对装配能力的影响。

1.1 装配工艺方案

工艺方案明确了工艺分离面、装配流程、装配基准、协调关系、部件姿态等重要内容,对装配能力的影响最为深远。工艺分离面直接决定了飞机装配的并行程度,分离面越多,并行程度越高,占架周期越短,装配能力越强。F35 战机生产能够实现快速上量,很大程度上得益于其细分的工艺分离面。部件在型架内的装配姿态以及零件的装配流程都会影响操作者的工作强度、装配效率以及装配质量的稳定性。人机工程学指出,操作者在进行装配时采用站姿装配正前方的零部件是生产效率最高的。表 1 所示为通过统计装配现场数据获得的不同装配姿态下的装配效率^[6]。

1.2 操作熟练度

随着飞机产能增长,整个装配系统的熟练程度都会提升,单架次的工时成本将会降低。1936 年,美国康奈尔大学 Wright^[7] 首次给出了每架飞机的理论工时成本

表 1 不同姿态下装配效率的相对关系
Table 1 Assembly efficiency in different posture

序号	姿态	装配效率 / %
1	站姿、正前方装配	100
2	半蹲、正前方装配	95
3	弯腰、正前方装配	90
4	双膝跪地、前倾装配	85
5	单膝跪地、正前方装配	75~80
6	双膝跪地、俯视装配	65~75
7	下蹲、仰视装配	55
8	下蹲、正前方装配	50

随总产量的变化关系^[7]:

$$H = H_0 Q_{cum}^\alpha \quad (2)$$

其中, H 表示理论工时成本; H_0 为生产第一架的工时成本; Q_{cum} 为累计总产量; α 为熟练系数。当总产能翻倍时,工时成本下降率为^[8]:

$$\frac{H_1 - H_2}{H_1} \times 100\% = \frac{H_0 Q_1^\alpha - H_0 (2Q_1)^\alpha}{H_0 Q_1^\alpha} \times 100\% = (1 - 2^\alpha) \times 100\% \quad (3)$$

其中, H_1 为累计产量为 Q_1 时的工时成本; H_2 为总产量达到 2 倍 Q_1 时的工时成本。

公开资料显示,20 世纪 30 年代波音公司的工时下降率约为 20%。麦道公司 MD-90 飞机部件装配的工时下降率为 15%~20%^[9]。图 1 展示了 F35 飞机制造工时随总产量的变化^[10]。对式(2)两边取自然对数有:

$$\ln(H) = \ln(H_0) + \alpha \ln(Q_{cum}) \quad (4)$$

根据图 1 数据并结合式(4)可得图 2 所示拟合直线,对应熟练系数 α (斜率)为 -0.29,带入式(3)可得出 F35 飞机在总产量翻倍时,工时成本下降约 18%。

实际应用时,不同机型在结构形式、装配工艺以及生产管理模式等方面均存在差异,工时成本下降率可在

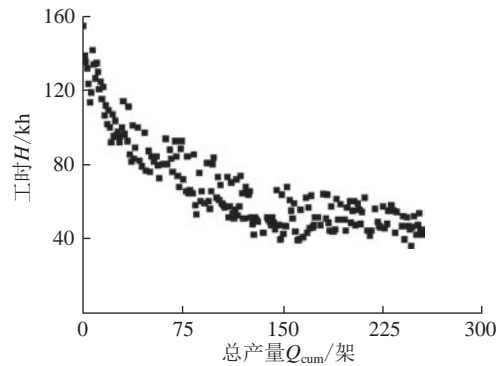


图 1 F35 飞机制造工时随总产量的变化关系

Fig.1 Relationship between F35 aircraft manufacturing hours and total production

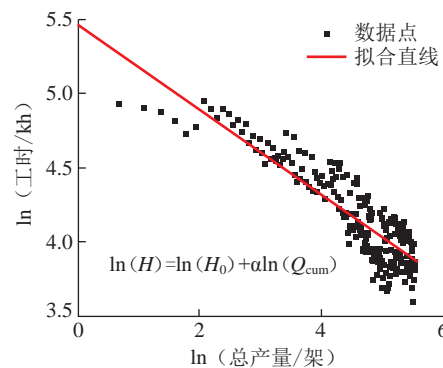


图 2 F35 飞机制造工时双对数拟合直线

Fig.2 Double logarithm fitting line of F35 aircraft manufacturing hours

15%~20% 范围内取值,同时对计算得出的理论工时进行修正:

$$H_{app} = \eta H_0 Q_{cum}^{\alpha} \quad (5)$$

其中, H_{app} 为修正后的工时; η 为修正系数,可通过在某产量下的实测工时 H_{test} 与理论工时 H 的比值得出:

$$\eta = H_{test} / H \quad (6)$$

1.3 倒班模式

飞机装配作为飞机制造的关键环节,对装配质量的要求高于一般的机械装配,采用常规的加班模式将使得装配操作者的身体机能由于劳动强度大而快速下降,劳动产出率降低,不能保证装配质量稳定。因此,可对装配操作进行专业细化,将诸如制孔、镗窝、铆接等一系列工序进行阶段性的划分,装配工人按组负责不同的阶段,轮番上架工作,实现“两班倒”或者“三班倒”工作模式。该倒班模式既能降低装配占架周期 50%~67%,又能使得工艺人员和操作人员都能保持充沛的工作热情,兼顾飞机的装配速度和质量。

1.4 制造资源

制造资源包括装配场地、型架、辅助设备等,是保证飞机装配能力的基本硬件条件。不论是并行制造还是脉动生产,都采用了以空间换时间的基本思路,使得对制造资源的需求大幅提升。在人力资源配置合理的情况下,装配能力(C)与型架数量成正比:

$$C = n \times \frac{T_{total}}{H_{ass}} \quad (7)$$

其中, T_{total} 为每年总工作日; H_{ass} 为每架占架周期; n 是型架数量。

1.5 一般能力社会化

一般能力是指在飞机装配过程中,技术成熟度高,技术难度相对较低,市场竞争充分,对最终产品质量、成本、交付、使用等不具有决定性影响的生产工序或工艺技术。一般能力社会化类似于世界民用航空业普遍采用的“主制造商-供应商”模式,洛克希德·马丁公司在 F35 的生产过程中也采用了类似的模式。一般能力社会化实现了风险、成本以及利益的分散和共享。

虽然一般能力社会化不会直接影响装配主线上型架的数量和占架周期,但是在厂房面积一定的情况下,将壁板组合、隔框组合等架下工作以及小段装配转移至供应商处,可以整理出更多现场装配面积,使得工艺布局更合理,物流更流畅,满足型架增长带来的面积需求,型架数量可表示为:

$$n = \frac{A_{ass}}{A_{tool}} \quad (8)$$

其中, A_{ass} 为装配区域总面积; A_{tool} 为单一型架及辅助工作梯面积。在对供应商的能力评估、生产组织、业绩考核合

理的情况下,一般能力社会化将会有效地提升装配能力。

2 装配能力测算方法

大部件装配一般需耗时数月,其实际装配能力会受到在制品和各部段装配能力匹配关系的影响,系统复杂。相比之下,部段件装配结构较少,便于生产管理、装配能力影响因素分析以及能力统计。综合上节的装配能力影响因素分析,可以得出部段件的装配能力:

$$C = \frac{T_{total}}{k \cdot \xi \cdot \eta C_0 Q_{cum}^{\alpha}} \cdot \frac{A_{ass}}{A_{tool}} \quad (9)$$

其中, k 为工艺方案系数,通过方案评估获得; ξ 为不同倒班模式下的占架周期系数(见表 2)。

图 3 所示为某型飞机装配流程甘特图,展示了主要占架装配任务和时序关系。飞机部件装配从 t_0 开始至 t_4 结束,整个装配过程中,部件装配能力 $C(t)$ 随时间动态变化。 t_0 时刻,各部段按照各自的装配能力 $C(t_0)$ 并行开展装配任务。 t_1 时刻的装配能力取决于当时油箱 A 的交付能力、进气道交付能力以及中机身对合能力中的最小值。 t_1 与 t_0 的差值等于油箱 A 装配与进气道装配中占架周期的最大值,其余过程以此类推。

表 3 所示为针对图 3 中装配任务给出的各部段占架周期和装配能力。受上一节所述因素的影响,表中数据随时间动态变化。结合装配流程甘特图中的时序关系(图 3)和各段装配能力基础数据(表 3)可以推导出飞机

表 2 不同倒班模式下装配占架周期系数

Table 2 Cycle coefficient of assembly jig in different work shift model

序号	倒班模式	周期系数 ξ
1	不倒班	1
2	“两班倒”	0.5
3	“三班倒”	0.33

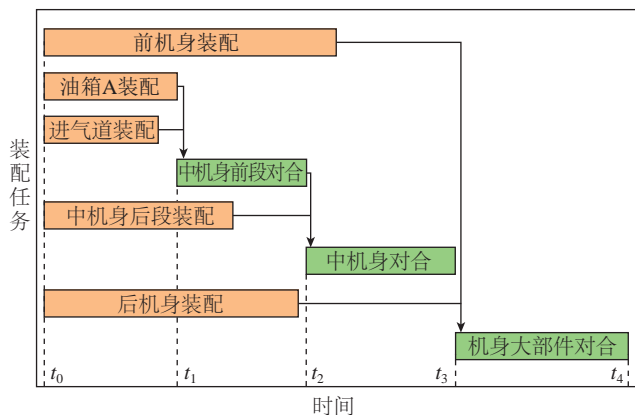


图 3 某型机装配流程甘特图

Fig.3 Gantt chart of assembly process of a certain aircraft

大部件装配能力测算方法流程图,如图4所示。

实际应用时,将图4所述算法用C++等编程语言写成小程序。由于资源配置和工艺优化的非连续性,各部件的占架周期 $H_{ass_i}(t)$ 和装配能力 $C_{ass_i}(t)$ 数据并不是连续的光滑曲线,适合用数据表的形式存储。小程序计算时调用表中数据,相邻数据点之间采用线性差值的方式提出数据。程序计算输出大部件装配能力和交付力达成时间。

结合图3所示装配流程,该型机部件装配能力变化数据如表4所示。采用图4所述方法可以得出,受在制品和各部件能力匹配的影响,从 t_0 开始,经过137个工作日后,机身大部件的实际装配能力为8架/年,其中中机身对合是瓶颈。后续为实现大部件装配能力的提升,需要重点关注中机身对合的装配能力,配置装配资源,实现能力匹配。

3 结论

(1)飞机装配属于典型的离散型制造,适合以部件为单位,通过型架的占架周期及数量测算部件装配能力,形成基础数据集。

表3 部件装配占架周期与装配能力

Table 3 Manufacturing cycle and capacity of component assembly

部段	周期 / (天 / 架)	能力 / (架 / 年)
前机身装配	$H_{ass1}(t)$	$C_{ass1}(t)$
油箱 A 装配	$H_{ass2}(t)$	$C_{ass2}(t)$
进气道装配	$H_{ass3}(t)$	$C_{ass3}(t)$
中机身前段对合	$H_{ass4}(t)$	$C_{ass4}(t)$
中机身后段装配	$H_{ass5}(t)$	$C_{ass5}(t)$
中机身对合	$H_{ass6}(t)$	$C_{ass6}(t)$
后机身装配	$H_{ass7}(t)$	$C_{ass7}(t)$
机身大部件对合	$H_{ass8}(t)$	$C_{ass8}(t)$

(2)装配能力随影响因素而动态变化,但各部件动态变化数据集并不是连续的光滑曲线,适合用离散的数据表存储变化曲线。

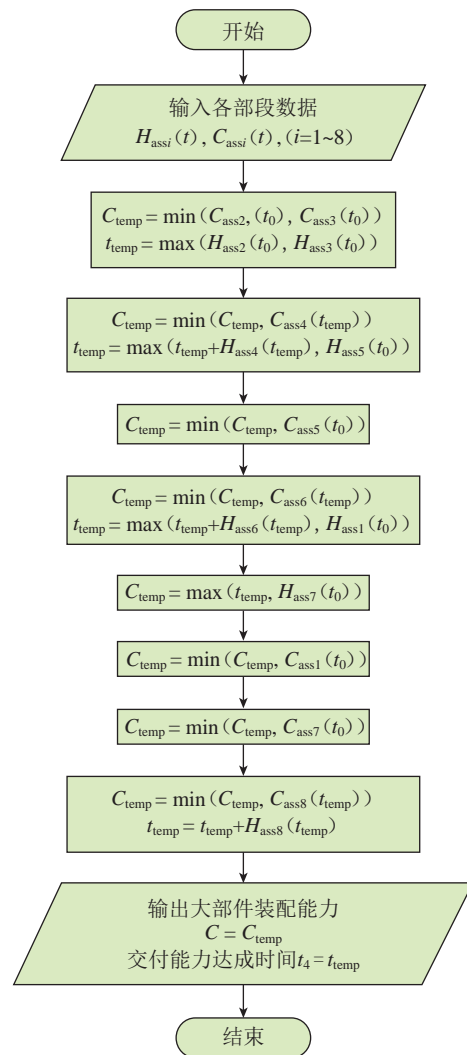


图4 大部件装配能力测算方法流程图

Fig.4 Flow chart of evaluation method for assembly capacity of large component

表4 某型机型架占架周期(天/架)与装配能力(架/年)数据表

Table 4 Manufacturing cycle and capacity of component assembly of a certain aircraft

时刻	H_{ass1}	C_{ass1}	H_{ass2}	C_{ass2}	H_{ass3}	C_{ass3}	H_{ass4}	C_{ass4}	H_{ass5}	C_{ass5}	H_{ass6}	C_{ass6}	H_{ass7}	C_{ass7}	H_{ass8}	C_{ass8}
t_0	68	9	31	10	26	12	30	10	44	10	38	8	59	10	40	8
t_1	62	10	31	10	25	12	28	11	40	15	36	8	55	11	38	8
t_2	58	10	28	16	24	19	27	11	40	15	36	8	52	12	36	13
t_3	55	16	26	17	24	19	25	18	40	15	35	13	50	15	36	13

(下转第102页)

引文格式: 胡秀琨, 张连新. 数字孪生车间在复杂产品装配过程中的应用探索 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(3): 87-96.

HU Xiukun, ZHANG Lianxin. Study on application of digital twin workshop in assembly process of complex products[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(3): 87-96.

数字孪生车间在复杂产品装配过程中的应用探索^{*}

胡秀琨, 张连新

(中国工程物理研究院机械制造工艺研究所, 绵阳 621900)

[摘要] 数字孪生车间以数字孪生技术为核心,能有效解决车间内物理空间与信息空间融合的瓶颈。阐述了当前复杂产品装配过程的特点,提出了实作装配体模型的概念,以及包括物理实体层、模型数据层、迭代分析层、协同服务层的复杂产品装配数字孪生车间的整体框架,研究了以装配体修正模型为核心的装配过程调控方法和数字孪生装配车间的运行机制。在此基础上分析了数字孪生车间对装配过程效能提升的促进作用,为复杂产品装配车间的改进提供了新的思路。

关键词: 复杂产品; 装配; 数字孪生; 数字孪生车间; 实作装配体模型; 调控方法

Study on Application of Digital Twin Workshop in Assembly Process of Complex Products

HU Xiukun, ZHANG Lianxin

(Institute of Mechanical Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

[ABSTRACT] The digital twin workshop (DTW) uses digital twin technology as the core, which could effectively solve the bottleneck of the physical-cyberspace fusion in workshop. The characteristics of the current complex products assembly process are summarized, the concept of as-built assembly model, as well as the framework of the DTW for complex products assembly including physical entity layer, model data layer, iterative analysis layer, and collaborative service layer, are proposed. The regulating method of assembly process with assembly modified model as the core and the operation mechanism of assembly DTW are studied. On this basis, the contribution of the DTW to the efficiency promotion of the assembly process is analyzed, and a new idea for improving the complex products assembly workshop is provided.

Keywords: Complex product; Assembly; Digital twin; Digital twin workshop (DTW); As-built assembly model; Regulating method

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.03.087

复杂产品组成结构复杂且产品种类多,其装配存在着技术复杂且可靠性要求高、过程复杂且交付周期短等一系列困难,随着用户需求的发展变化,传统以手工操作为主的装配过程愈发暴露出其弱点。仿真技术虽然在一定程度上帮助人们规避了复杂产品装配制造中的一些缺陷和风险,优化了部分流程,但目前的仿真行为在准确模拟装配生产过程中各种因素的耦合作用方面存在一定困难。为使复杂产品的最终质量满足新的要求,复杂产品的装配过程应向数字化、网络化、智能化的

智能制造模式转变。

实现智能制造的一大瓶颈是物理世界和信息世界的互联互通,数字孪生作为全新的理论工具,其包含的数字孪生技术能够对复杂产品全生命周期活动中产生的多源异构动态数据进行有效融合和管理,数字孪生可被看作构建与实现 CPS (Cyber-physical systems) 的必要基础^[1]。借助数字孪生的思想、理论和技术,重新定义复杂产品装配过程,为实现智能化的装配过程提供了新的思路。

由于车间是复杂产品装配制造的具体实施单位,因

* 基金项目: XXX 装检流程优化研究项目 (K1217-1923-TCA)。

此实现车间物理空间和虚拟空间的融合具有重要意义。数字孪生车间分别从物理空间和虚拟空间中提出异构要素融合、多维模型融合、物理信息数据融合以及服务应用融合4个方面的融合,提供了对装配车间内所有要素全面分析和管控,以及打通制造链、信息链的平台和手段。本文在分析当前复杂产品装配特点的基础上,结合数字孪生车间概念,提出了基于数字孪生的复杂产品装配车间框架,该框架能够为复杂产品数字孪生装配车间的设计提供一定的参考。

1 数字孪生技术的发展

1.1 从数字孪生体到数字孪生车间

Grievess 博士^[2]于2003年提出“镜像空间模型”,并将其定义为“与物理产品等价的虚拟数字表示”,该模型可以被认为是数字孪生体概念的雏形。后来,美国国家航空航天局(NASA)针对运行中的空间飞行器,利用其数字孪生体进行仿真分析,实现对空间飞行器飞行状态的监测和预测,为地面控制人员正确做出决策提供帮助。2011年Grievess^[3]引用了John Vickers所建议的“数字孪生体(Digital Twin)”这一名词,作为其镜像空间模型的别名。2012年,NASA和美国空军研究实验室提出数字孪生体是一个集成了多物理场、多尺度以及概率仿真的数字飞行器或系统,能通过超写实的物理模型、实时传感器数据和运行历史数据等反映出对应于该模型的实体飞行器的实时运行状态^[4],从此数字孪生真正引起了学界的聚焦和关注。2016年Grievess等^[5]提出数字孪生体是一组能够在微观到宏观的尺度范围内全面描述实际或潜在的物理制成品的虚拟信息结构。理想情况下,任何物理制成品的实测信息都可以通过其数字孪生体获得。2019年ISO将数字孪生体定义为现实事物(或过程)具有特定目的的数字化表达,并通过适当速率的同步使物理实例与数字实例趋于一致^[6]。

从以上数字孪生体的定义可以看出,数字孪生是实现物理与信息交互融合的重要且有效的手段,为打通车间物理空间与信息空间的交互与融合的瓶颈,北航陶飞等^[7]提出了一种基于数字孪生的数字孪生车间(Digital twin workshop, DTW)的新概念,指出DTW是一种受新一代信息和生产技术的推动,以生产车间在物理空间和虚拟空间中的双向完整映射与实时交互为桥梁,集成并融合物理车间、虚拟车间以及车间服务系统中的全要素在全制造周期产生的数据,并且以孪生数据作为驱动,在物理车间、虚拟车间及车间服务系统三者之间实现车间生产计划、管理等活动的迭代运行,从而使车间生产和管控过程在特定目标及限制条件下达到最优的全新车间运行模式。数字孪生车间包括虚拟车间和

数字化物理车间两个部分,它能够有效地将两者进行结合,从而解决车间内信息/物理空间之间存在的融合问题^[8]。

1.2 数字孪生车间架构

数字孪生车间首要目的是解决车间内物理空间和信息空间交互融合的问题,因此其最基本的应包括三大组成部分:物理车间、虚拟车间以及两者之间的连接。物理车间指车间内客观存在的实体要素的集合,如厂房设备、原料产品、测量仪器、总线网络、操作人员、能源环境等;虚拟车间是物理车间在虚拟空间的完全数字化的超写实映射;连接是指物理车间和虚拟车间在信息交流方面的互联互通,包括硬件上的连接传输以及软件上的通信交互。陶飞团队^[9-10]设计构建了包括物理车间、虚拟车间、车间服务系统以及车间孪生数据的参考架构,并进一步对此总体架构进行了分层和细化,提出了自下而上由物理层、模型层、数据层、服务层及应用层构成的数字孪生车间参考系统架构。陈振等^[11]提出了包含物理装配车间、虚拟装配车间、车间服务应用平台以及车间数据存储管理平台的基于数字孪生的飞机装配车间生产管控框架。Zhang等^[12]搭建了基于物理本体数据实现物理模型和数字仿真模型关联的数字孪生车间模型,该模型由物理模型、对应的Flexsim仿真模型及数字描述模型组成。Zhang等^[13]提出了基于数字孪生驱动的智能车间五层体系结构,该体系结构具体包括了物理车间层、车间网络层、车间数据层、信息车间层以及车间应用层。郭东升等^[14]针对航天结构件的制造车间,将数字孪生的车间模型分为物理层、模型层、信息层与系统层四层。柳林燕等^[15]提出了由物理实体层、孪生模型层以及功能层组成的车间生产过程数字孪生体系架构。综合分析上述研究可以看出,关于数字孪生车间系统框架的研究目前仍处在探索和成型阶段。

2 复杂产品装配过程分析

所谓复杂产品是一类具有复杂的用户需求、产品构成、产品技术、制造过程、项目管理等特点的产品的统称,例如复杂机电产品、汽车、航天器、飞行器、武器系统等^[16]。当前复杂产品的装配具有明显的离散型装配特征,其装配作业时间长,以手工操作为主、涉及学科广泛,参与单位众多,除汽车等少数具有规模化生产需求的产品外,大多只进行单件或小批量生产。在复杂产品生产中,因为人力物力财力的充足供应,单个零件或部件的设计、制造与管理已实现相当程度的自动化,与之相比,复杂产品的装配过程依然相对传统,即便在较为成熟的汽车行业,绝大多数的发动机组装、整车组装等仍旧离不开大量的人力参与。

2.1 复杂产品装配的问题

复杂产品涉及的零部件数量庞大且相互约束关系复杂,装配结构关系主要由静态装配数据呈现,缺少装配过程的动态演变模型,数据管理与过程管理脱钩,在装配过程中极易发生错装漏装的情况。并且由于其高精度的特点,装配质量对装配过程中的误差、干扰等极为敏感,且极其注重产品零部件表面质量,杜绝出现污渍、划痕等损伤。同时因为装配工序多、操作复杂、资源调配频繁和对设备状态、人员素质、生产环境等的高要求等特点,导致产品装配精度的影响因素繁杂,各因素之间相互关联耦合且难以解耦。在按照一定的工艺路线装配时,路线上的质量控制点之间复杂的、动态的、非线性的相关性使得质量控制极为复杂,上游工序产生的非最优装配状态中的偏差会以在制品为载体传递到下游工序,并且累积和放大,导致装配完成后的产品整体性能在零部件均检测合格的条件下仍无法达到指标要求。另外,传统的在装配完成后综合评价产品性能的方式,缺乏对装配中间过程的管控,给及时识别和定位产生质量问题的原因带来困难^[17-18]。并且由于大量的信息传递与资源协调活动进行,尤其当产品处于研制阶段时,反复的设计更改与频繁的生产扰动给生产调度工作造成了极大的复杂性和困难性。

2.2 复杂产品装配的一般要求

2.2.1 复杂产品装配的高可靠性要求

一般来说,复杂产品多以大量的壳体零件、高精度曲面类零件、精密仪器、非标准件及电线电缆组成,工件尺寸大,形状不规则,重量大且重心通常不在几何中心,抓取、定位困难,装配约束关系复杂,装配过程工序繁多且工艺复杂,因而其可靠性控制难度很大。但是,由于复杂产品对使用性能(特别是在恶劣工况下的可靠性、维修性、保障性、安全性、经济性、环境适应性指标)的要求极为苛刻,所以对其装配过程中可靠性的把控显得至关重要。复杂产品装配过程的可靠性可分为两个方面:一是装配设备的可靠性,包括装配装置、吊具夹具、仪器仪表、软件系统以及其他装配车间内的辅助设备,包括环境设备、能源设备、通信设备等的长期健康稳定运行;二是装配产品的可靠性,包括装配精度、装配应力、装配变形、表面质量、润滑密封等严格满足设计要求。

2.2.2 复杂产品装配的高一致性要求

复杂产品由于使用工况复杂,为保证使用过程的安全性和稳定性,对产品质量一致性的要求极高。复杂产品的不确定性来自于各个子系统和零件的不确定性以及它们装配关系的不确定性^[19],通常受工厂的人(Man)、机(Machine)、料(Material)、法(Method)、测

(Measurement)、环(Environment)(即5M1E要素)6个因素的影响。具体而言,在以手工操作为主的装配过程中,由于装配人员操作、设备状态、零部件质量、上游工序装配结果、测量方法与测量误差、环境参数等不确定性因素的影响,将会产生一系列的装配误差。这些误差具有随机性、不可重复性,难以补偿消除,共同影响着复杂产品装配过程的一致性,特别是手工操作主要依靠操作者的经验和知识,其带来的不确定性在很大程度上会导致同一批次产品的最终质量也无法保持很高的一致性。

2.2.3 复杂产品装配的柔性化要求

复杂产品装配大多具有多型号、小批量的生产特征,若采用传统的装配方式,对于不同产品更换不同设备、工装、量具等,将带来大量的人力、物力与时间资源的不必要消耗。同时,复杂产品装配过程必须及时对用户需求的变化、装配工艺的更改及装配过程中的干扰因素做出响应。这些特征要求复杂产品装配向柔性化的方式转变。

复杂产品装配的柔性化趋势体现在以下5个方面。

(1)资源柔性。一机多能,一人多能,即同一台设备或同一个装配人员需要具备完成不同型号、系列产品的装配的能力,从而提高设备利用率,增强响应能力,缩短装配周期,节省装配成本。

(2)物流柔性。针对不同的产品装配任务调整物流方案,包括物料清单、物流线路、物流节拍等,且能跟踪装配进程,满足多任务同时装配的物流要求。

(3)车间布局柔性。装配车间能够针对不同类型的产品装配快速地调整,良好的节拍控制能支持在不同工位的多种类型产品的同时装配。

(4)工艺柔性。针对一组装配任务,工艺路线是可以随时动态寻优的,一方面可以根据零件实测尺寸或实测装配状态调整下一步的装配工艺,另一方面在某一工位被占用或设备故障时,能够实时实施动态调度,寻找替代工位。

(5)需求柔性。装配车间在仅少量增加设备设施的情况下,能够快速满足新型号产品的装配需求,能跟踪、分析、预测用户需求。

2.2.4 复杂产品装配的协同化要求

由于复杂产品研制生产具有承研单位众多、地域分布广泛、设计制造分离等特点,一家单位通常只负责提供某些特定的模块或子系统,而这些模块和子系统一般会涉及到核心的商业秘密或国家秘密,因而装配单位难以全面获取这些模块或子系统的特性以独立开展装配工艺设计和操作。同时,围绕全制造链协同共享的复杂产品信息溯源体系也具有重要意义。与传统形式的离

散制造车间相比,复杂产品装配车间更加需要在制造方面实现横向、纵向以及端到端的集成,因而呈现出更为迫切的协同性需求。

在复杂产品装配的过程中,会有大量数据的交互以及各方人员的协同配合,主要包括:

(1)与合作配套单位、上级单位、供应商及用户之间的沟通和交流,有助于准确贯彻执行上级单位下发的生产任务,详细了解并分解用户需求,掌握各模块和子系统的接口要求及装配注意事项,在某些需多家单位共同参与的装配工序中同时且高质量地达到多方要求;

(2)调度部门对车间现场的任务指派及车间现场对调度部门的进程反馈,有助于对车间调度行为做出较好规划;

(3)设计、工艺部门对车间现场的工艺信息传达及车间现场对设计、工艺部门的生产问题反馈,有助于形成生产过程的迭代寻优,提高设计制造水平;

(4)车间现场对质量部门的装配情况报告及质量部门对车间现场的检测质量反馈,有助于及时发现并消除装配缺陷,增强装配过程的可控性。

3 基于数字孪生的复杂产品装配车间框架设计

3.1 复杂产品的实作装配体模型

复杂产品的数字孪生装配体与通常的产品数字孪生体一样,具有包括唯一性、虚拟性、超写实性(数字孪生体在外观、内容与性质等方面对物理产品的拟实度高,可以准确描述其真实状态)、多物理性、动态性、集成

性、多尺度多层次性、可计算性、概率性及多学科性等在内的多种综合特性^[20]。通常而言,利用设计参数及理想模型构建的数字孪生装配体可称为理想孪生装配体模型(Ideal digital-twin assembly model),理论上这个模型可对物理装配体包含的所有信息和知识从几何、物理、行为、规则等方面进行全面描述,如图1所示。然而由于加工误差、测量误差、壳体变形、零件磨损、环境因素以及操作不规范而引起的误差,理想孪生装配体模型并不是物理装配体完全忠实的超写实镜像模型,它与生产现场的实际产品是存在差异的。如果按照理想孪生装配体模型来指导后续装配工序,将导致这些差异被忽略和积累。由于以实映虚的过程不能保证高忠实度,模型融合时往往无法识别和补偿误差,甚至会将会误差放大,从而使以虚控实的过程难以实现。

为准确映射物理空间中的物理装配体,可在虚拟空间建立一个反映和记录产品实时装配状态和装配过程的数据集合,称之为实作装配体模型(As-built assembly model)。实作装配体模型是根据装配过程中的实测数据建立的,主要包括装配定位数据、装配应力数据、装配表面质量数据以及装配形变数据等,并随产品装配过程动态更新和迭代,因而实作装配体模型的建立是以检测为基础的,检测应贯穿整个装配过程。

实作装配体模型继承了产品数字孪生体的所有特性,它的超写实性反映的是物理装配体的真实状态,不仅描述了物理装配体宏观尺度上的状态,如尺寸、形状、位置、装配关系,而且描述了产品的表面质量、应力、应变等微观尺度上的状态;从层次性上可将实作装配模型

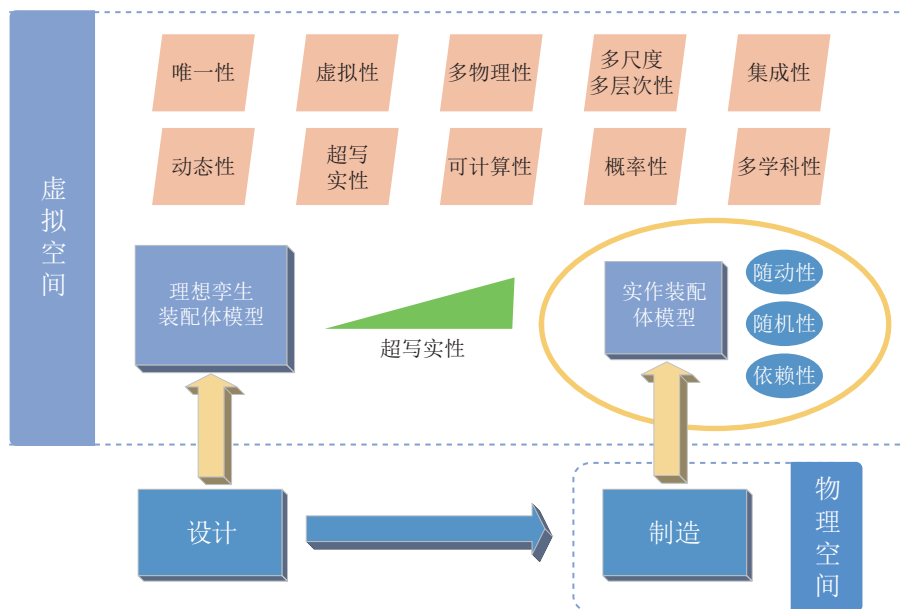


图1 实作装配体模型

Fig.1 As-built assembly model

划分为实作零件模型、实作组件模型、实作部装模型、实作总装模型等层级,并且由于其数据集的本质属性,包含了多物理场景、多学科类型的实际数据。可以说,实作装配体模型是产品数字孪生装配体在装配过程中的实例化^[21]。另外,实作装配体模型还具有以下特点:

(1) 随动性。实作装配体模型总是随着物理装配体的更新而更新,如拧紧连接螺钉后,实作装配体模型中才会增加该螺钉的位置及预紧力等数据,以保证超写实性要求;同时,随动性特点还体现在响应快,物理装配体一旦更新,即产生新的状态下的实作装配体模型,在时间上实作装配体模型的更新与物理装配体的变化趋于同步,保证了模型的时效性。

(2) 随机性。实作装配体模型描述了物理装配体的真实状态,物理装配体中的误差将会反映到实作装配体模型中,这些误差大多都是随机性的,所以实作装配体模型具有随机性;在随机性的影响下,产品在任一装配工序下的实作装配体模型都是唯一的,不同产品在同一装配工序下的实作装配体模型也不可能完全相同;

(3) 依赖性。实作装配体模型极大地依赖对装配过程参数实时全面的监测和采集,要求装配及检验设备高度集成。

3.2 复杂产品装配的数字孪生车间整体框架

复杂产品装配作为完成产品功能和性能构建的关键最终环节,对复杂产品研发品质的高低与使用性能的优劣起着重要作用,复杂产品的最终质量技术指标深受其装配质量的影响^[22]。所以实作装配体模型以其更高的超写实性,要求数字孪生驱动的装配过程应从理想孪生装配体模型指导装配向实作装配体模型指导装配转变。由于复杂产品装配过程具有的可靠性、一致性、柔性及协同性要求,数字孪生驱动的装配过程将不限于物联网平台,而是要向体现了“智慧化制造技术特征”的,以及制造资源与制造能力的物联化、虚拟化、服务化、协同化、智能化^[23]的云制造平台发展。

复杂产品装配的数字孪生车间包括装配产品数字孪生、装配流程数字孪生和装检设备数字孪生3个层面,整体框架如图2所示,由物理实体层、模型数据层、迭代分析层、协同服务层组成。

3.2.1 物理实体层

物理实体层是指装配车间内人、机、料、环及其他如传感装置、总线网络、工装夹具等在内的所有生产实体要素和物理装配体的集合。物理实体层的各要素之间应建立广泛的连接,且能够实现对多源异构数据,尤其是装配过程及装配质量数据进行连续、实时、准确地采集、传输和存储。这意味着复杂产品装配的数字孪生车

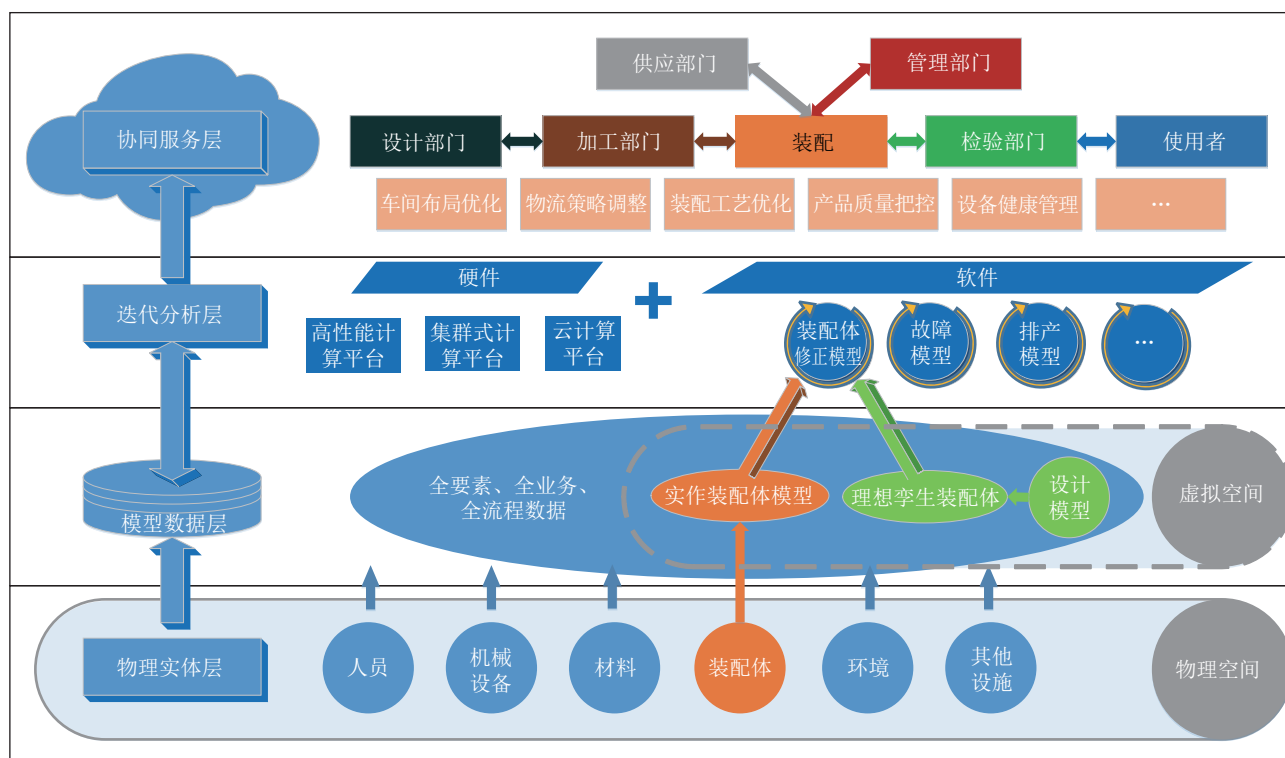


图2 复杂产品装配的数字孪生车间整体框架

Fig.2 Digital twin workshop framework for complex product assembly

间对装配设备提出了更高的要求,传统的装配设备以手工操控为主,缺少反馈控制,无法实时掌控装配质量,数字孪生车间的建设一方面能引导已有装备的改进升级,另一方面能促进新一代装配装备的研发,为复杂产品装配过程的信息化、网络化、智能化水平提升带来新的契机。适应数字孪生车间的未来装配设备可以更广泛地使用机器人以增强运动的灵活性和生产柔性,机械结构上应注重“刚柔结合”,合理设计刚性机构和需要浮动的机构,综合利用电、气、液等多种驱动方式,在核心零部件中按需嵌入传感装置以实时监测运行状态,拓展和其他设备互联的接口,能与智能管控系统交互;除此之外,装配装备的控制方式要从开环或半闭环向全闭环、智能化的方向发展;测量手段要从单一的、传统的向融合的、先进的方向发展;检测方式要从阶段检测向实时检测的方向发展。

3.2.2 模型数据层

模型数据层以数据库技术为支撑,存储了物理实体层、迭代分析层、协同服务层三者自身的数据以及在三者的交互行为中衍生出的数据,另外还包含了MES、ERP、DOM、PDM等系统提供的装配体模型设计及工艺设计阶段产生的所有数据,具备了包括多样性、海量性、高速性及多源异构等特征在内的一系列的大数据特征,完成了全业务、全要素、全流程数据的集成与融合。其中,反映和记录物理装配体实时装配状态和装配过程的数据集合即为实作装配体模型,反映和记录装配产品设计参数及理想模型的数据集合则代表了理想孪生装配体模型。实作装配体模型和理想孪生装配体模型均属于虚拟空间的范畴,同时,虚拟空间还包含了人-机-物-环等实体集合的数字镜像。这样,通过模型数据层将整个物理车间映射到了虚拟空间,形成了数字模型形式的孪生车间。模型数据层包含中的知识与规则数据可以被协同服务层当作能够直接使用的决策参考,另外一些几何、物理、行为、规则模型的数据经过封装可被迭代分析层调用进行装配过程的仿真优化^[14]。

3.2.3 迭代分析层

迭代分析层是数字孪生车间“智能”的来源,硬件方面的主体内容由嵌入式设备、云计算服务器以及高性能图像处理平台设备构成;软件方面则主要是对几何、物理、行为及规则模型的封装调用和优化。依靠迭代分析层,模型数据层中的数据会在实时的更新过程中被整理、分析、挖掘,经过信号处理、图像处理、故障诊断、可靠性分析等方法提炼出的有用信息将作为协同服务层调控生产活动的决策依据。

与此同时,在迭代分析层中理想模型会在实作装

配体模型数据的修正下形成装配体修正模型。装配体修正模型反映了当前状态下装配体几何、物理、行为、规则等维度的模型在虚拟空间中的真实映射,以装配体修正模型为依据进行实时的装配工艺调整,有利于精准调控零件部件、装备装置及装配过程,有利于实现具备自适应、自组织以及动态响应能力的产品装配系统,有利于寻找到物理装配体完成所有工序后的最优装配状态。由于实作装配体的随机性特点,装配体修正模型并不能适应每个产品的装配要求,所以理想模型会一直参与到每个产品对应的装配体修正模型的形成过程中。

3.2.4 协同服务层

协同服务层利用互联网将在装产品全生命周期的各个阶段相连接,打通了整个制造系统的数据流与信息流,从而在制造方面实现横向、纵向与端到端集成。协同服务层提供的各类应用让制造系统上的每个节点都能实时参与到产品装配的过程中来,实现对复杂产品装配的“云监工”,并根据装配过程中产生的问题提出相应的改进方案或进行资源协调。复杂产品更加注重用户的使用需求,用户可以通过协同服务层全面了解产品的装配生产过程,监督生产质量,甚至利用虚拟现实技术进行使用和维护培训。协同服务层的应用涵盖了监测、控制、分析、管理等功能,以数据为驱动在车间各生产要素的全生命周期内实现故障预测和健康管理,以及设计和装配生产过程的优化改进。

3.3 数字孪生车间内的装配过程调控

由前所述,为保证复杂产品装配的质量,以实作装配体模型代替了理想孪生装配体模型来描述物理装配体实时的真实状态,原本用来指导装配工艺的理想模型就会在迭代分析层中被修正为装配体修正模型,根据实时信息和控制模型实现对装配策略的调整和误差的动态补偿,为装配过程质量的主动调控提供理论支持^[17]。基于装配体修正模型的装配过程调控是复杂产品装配的数字孪生车间的核心技术,整个实时装配调控过程如图3所示。

每个装配工序*i*开始前都要构建前一个装配工序*i-1*的装配体修正模型。即在第1个工序开始前,应当构建物理装配体在第0个工序(零部件准备状态)的装配体修正模型,随后每完成一个装配工序*i*后,便构建第*i*个工序的实作装配体模型,若该实作装配体模型满足要求,则会进一步形成第*i*个工序的装配体修正模型,以指导第*i+1*个工序的进行。

对装配工序*i*的实作装配体模型的评价以相似度为评判标准^[21],每个装配工序*i*完成后,迭代分析层都会计算实作装配体模型和理想孪生装配体模型的

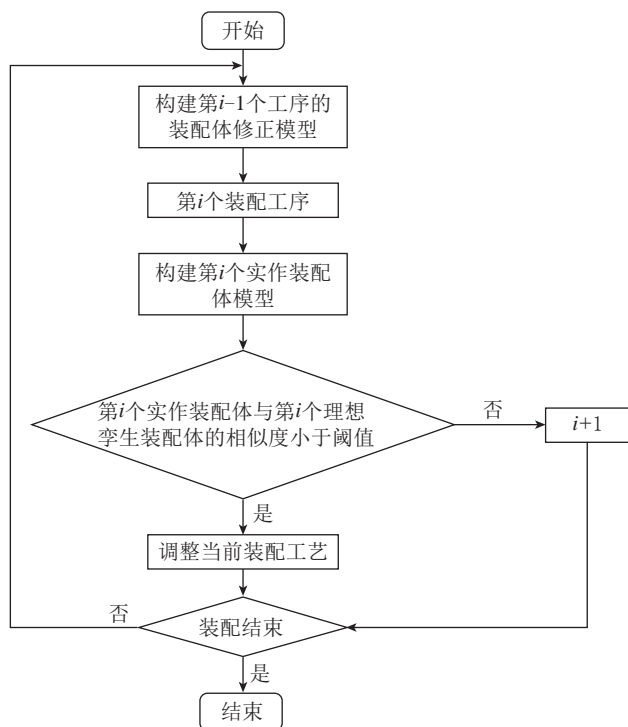


图3 基于装配体修正模型的装配过程调控方法

Fig.3 Regulating method of assembly process based on assembly modified model

相似度:

$$\begin{aligned} \text{SIM}(\text{ASAM}_i, \text{IDTAM}_i) = & \sum_{j=1}^{M_i} \alpha_j (\text{position}_{ij} - \text{position}'_{ij}) + \\ & \sum_{k=1}^{N_i} \beta_k (\text{stress}_{ik} - \text{stress}'_{ik}) + \\ & \sum_{l=1}^{S_i} \gamma_l (\text{strain}_{il} - \text{strain}'_{il}) + \\ & \sum_{m=1}^{T_i} \eta_m (\text{sq}_{im} - \text{sq}'_{im}) \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $\text{SIM}(\text{ASAM}_i)$ 表示第 i 个装配工序的实作装配体模型和理想孪生装配体模型的相似度; M_i 表示第 i 个装配工序包含的同轴度、位置度等关键定位参数的数量; N_i 表示第 i 个装配工序包含的螺栓预紧力、焊接应力等关键应力参数的数量; S_i 表示第 i 个装配工序包含的壳体变形、螺栓变形等关键应变参数的数量; T_i 表示第 i 个装配工序包含的光洁度等装配表面质量参数的数量; position_{ij} 和 $\text{position}'_{ij}$ 分别表示第 i 个装配工序的实作装配体模型及对应的理想孪生装配体中的第 j 个定位参数; stress_{ik} 和 stress'_{ik} 分别表示第 i 个装配工序的实作装配体模型及对应的理想孪生装配体中的第 k 个应力参数; strain_{il} 和 strain'_{il} 分别表示第 i 个装配工序的实作装配体模型及对应的理想孪生装配体中的第 l 个应变参数; sq_{im} 和 sq'_{im} 分别表示第 i 个装配工序的实作装配

体模型及对应的理想孪生装配体中的第 m 个表面质量参数; α_j 、 β_k 、 γ_l 、 η_m 分别表示定位参数、应力参数、应变参数、表面质量参数在实作装配体模型和理想孪生装配体模型的相似度计算中所占的权重。

设定某一相似度阈值 δ , 若计算出的相似度大于指标 δ , 则认为此工序合格; 若计算出的相似度小于指标 δ , 则形成工艺优化方案, 重新进行该装配工序的实施, 提升装配工艺的快速应变能力^[24]。

基于装配体修正模型的装配过程调控, 体现了数字孪生“以虚映实、虚实共融、以虚控实”的理念。其充分重视了复杂产品物理装配体的随机性, 以实际产品为基础, 在数字孪生车间的框架下, 可以完成从数据采集、存储、分析、优化、应用在内的所有流程, 为复杂产品装配质量的提高提供了崭新的实施思路。

3.4 复杂产品孪生装配车间的运行机制

复杂产品孪生装配车间的运行是由车间数据驱动的, 主要分为 4 个阶段(图 4)。

(1) 理想孪生装配体模型产生。

装配工艺设计部门根据复杂产品图样数据, 利用装配工艺与仿真系统实施装配信息组织、装配顺序规划等工艺行为, 获得理想情况下的复杂产品装配状态, 在此过程中形成理想孪生装配体模型。在实际装配生产过程中, 装配工艺设计部门也会随着实际装配数据的反馈形成经验积累, 产生更优的装配工艺和方法。

(2) 车间孪生模型形成。

车间孪生模型由数据驱动, 和物理车间的实时状态保持高忠实度的映射关系, 车间内任何数据的变化都会引起车间孪生模型的更新, 实作装配体模型作为车间孪生模型的组成部分和在装产品保持高度一致。车间孪生模型的构建依赖于对物理装配车间现场数据全面的、实时的感知、采集以及信息的互联互通, 利用智能传感器、RFID、物联网等技术标识各个实体要素, 形成各要素的唯一编码, 并建立广泛的传感通信网络, 使得信息可以在人-机、机-机之间高效传输, 打破异构设备及车间各类管控系统通讯的瓶颈, 以满足数字孪生体所包含的超写实性、动态性、集成性等多种特性的要求。这一阶段实现了物理空间到信息空间的映射。

(3) 以装配体修正模型为指导的装配过程管控。

智能系统(包含模型数据层和迭代分析层)所具备的数据存储与分析能力将理想孪生装配体模型与实际装配体模型相融合, 形成装配体修正模型, 并以装配体修正模型为指导向装配车间现场下发装配过程管控指令, 调整装配装备的动作, 协调设备、物流、能源等资源。这一阶段实现了信息空间到物理空间的反馈。

(4) 产品制造链上各单位协同。

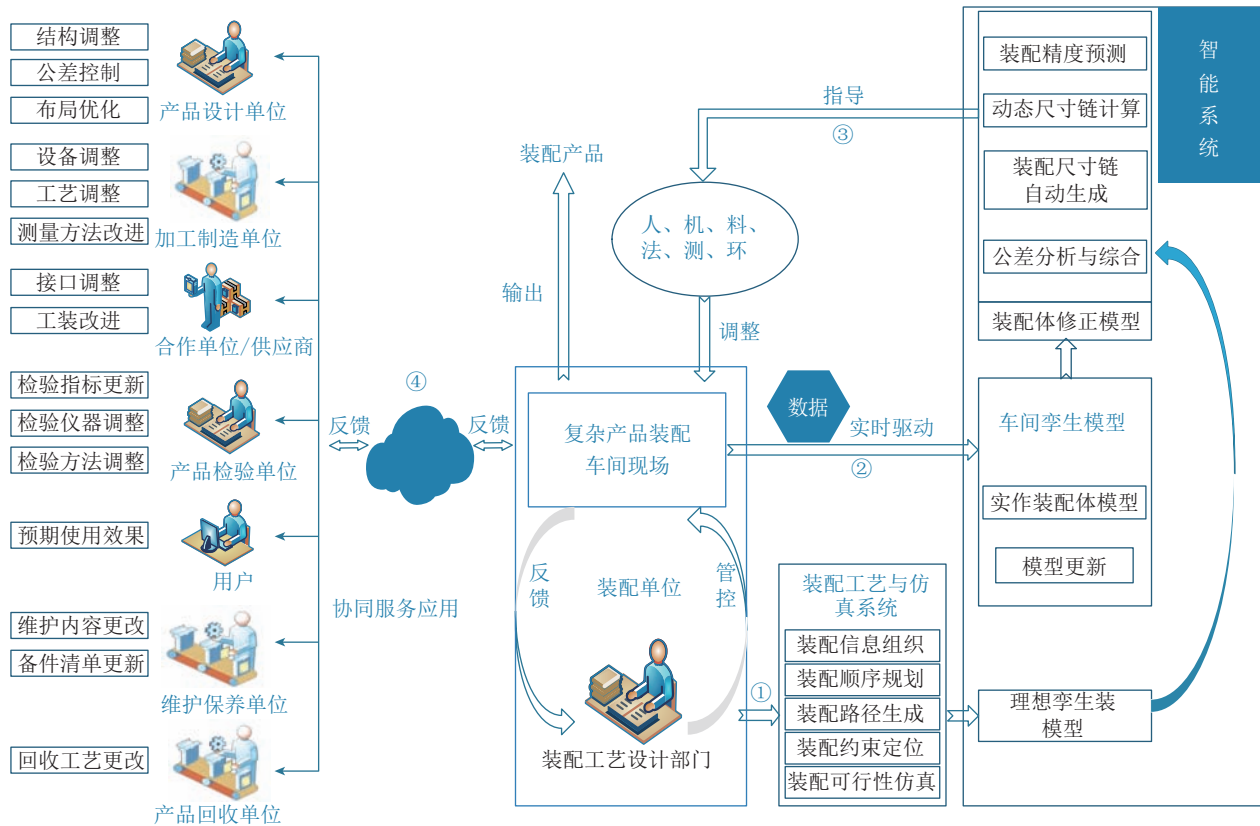


图4 复杂产品孪生装配车间的运行
Fig.4 Operation of assembly DTW for complex products

协同服务应用提供了使产品设计单位、加工制造单位、合作配套单位、产品用户等能够全方位参与复杂产品装配过程的平台,在协同服务应用上产生的交互可以推动产品设计、工艺等的迭代优化,最终实现提质增效的目标。

4 装配过程在数字孪生车间中的持续改进

以实作装配体模型为核心的数字孪生装配车间有望实现复杂产品装配过程的虚实融合,通过软硬件服务平台及工具,能够跟踪装配过程的每一个环节,对涉及的大量零部件建立完备的档案,实现对装配装备和装配过程的自组织、自适应的动态控制。数字孪生装配车间的装配过程完成了装配工艺过程从数字信息主导向虚实结合、共同进化的方式转变,实现了面向装配车间现场的、以实测数据为基础的、涉及多维工艺要素的、以大数据分析为手段的工艺知识及过程的建模、仿真与优化,实现了装配工艺问题的主动决策^[22]。

与传统装配过程相比,数字孪生车间将数据管理与过程管理挂钩,支持装配过程的动态演变,杜绝了零部件错装漏装情况的发生,智能系统为解耦各因素的影响提供了工具和方法,实时主动的监测调控能及时发现并

解决工艺问题,有效减少偏差向下游工序的传递、累积和放大的概率,从而实现复杂产品装配质量的提升。

4.1 装配过程的可靠性和一致性进一步提高

基于数字孪生的复杂产品装配车间为全生命周期的管理思想在复杂产品装配中的实践提供了平台,它以成熟的自动化为基础,全面的信息化为保障,高度的智能化为核心,以数据为驱动,有望将设计、制造、装配、使用、维护、回收各个阶段有机统一起来。数字孪生车间为寻找更优的设计思想、加工工艺、装配工艺提供了原料、工具和方法,任何零部件在设计之初都可以通过对其数字孪生模型进行仿真来预测其成品质量,找出设计缺陷产生的本质原因,并直接在数字孪生模型中进行质量问题归零和迭代设计,直到寻求到最优设计,从源头上控制和消除了装配过程中的一些不确定性因素。并且通过对数据的挖掘和分析,对理想模型进行修正,可将认知性的不确定性因素逼近到更为真实的范围,从原理上保证复杂产品更高的可靠性。而智能系统将虚拟世界和现实世界关联起来,根据实作装配体模型的实时状态自适应地调整其装配策略,确保复杂产品的装配质量始终处于一种可控和寻优的状态,最终保障了复杂产品的综合装配性能。同时通过人机的互联协同,深度融

合了机器动作的准确性优势和人类行为的灵活性特点。机器替代了大部分传统手工装配工作,其高精度的重复定位能力有效消除了手工操作的随机性,最大程度实现过程的一致性,从而保证结果的一致性,提高复杂产品装配质量的稳定性。复杂产品可靠性的提高可以减少产品故障发生率,从而带来安全性、维修性、保障性、环境适应性等性能的提高,长远来看,降低维护费用也符合经济性的要求。

4.2 装配过程的敏捷化水平进一步提高

基于数字孪生的复杂产品装配车间提供了将高素质的人员、智能化的设备、高性能的材料、先进的制造工艺、稳定的环境因素有机融合的平台,并将这些关键要素与产品装配过程进行无缝关联。这有利于提高企业的硬实力,是企业提高创新力和适应性的基础。通过传感装置对装配状态的实时感知、通信网络对异构设备的全面互联、装配设备的自适应控制以及数字孪生车间系统的统筹调度能够大幅提升装配过程的资源柔性、物流柔性、车间布局柔性、工艺柔性以及需求柔性。数字孪生车间对车间数据的全面管控有助于提供如工艺规划、智能排产、布局调整、生产监管、设备诊断、质量管控、能效优化、风险评估等服务内容,从而提高复杂产品装配质量,节约生产成本,优化供应链结构,减少污染排放,进而满足复杂产品多品种、变批量、按需生产要求。同时由于对产品使用、维护、回收等产品后生命阶段数据的挖掘,可以跟踪用户体验,找到对用户需求更有针对性的改进方向,甚至提供除产品以外的附加服务及配套产品,增加产品附加值,增强企业决策的前瞻性,提高企业的软实力。

4.3 装配过程的协同化水平进一步提高

基于数字孪生的复杂产品装配车间利用互联网将装配车间内的全要素、全流程、全业务信息共享到云平台,打破了设计者、加工者、装配者、供应商、使用者、维护者之间的壁垒。利用数字孪生车间平台,可以提高复杂产品装配过程以下 5 个方面的协同化水平。

(1) 设计 - 装配协同。装配车间实时信息的共享使得设计和装配从顺序行为变成了迭代行为,设计者可以根据实际出现的装配问题给予及时的图纸和工艺变更方案,与此同时在数字孪生模型中更新装配过程,对后续的装配工序进行修正和指导,提高对复杂产品装配质量的预判和把控能力。同时参与产品设计的多个团队将打破空间位置的限制进行并行设计,对关键零部件、产品接口等协同优化,提高复杂产品在首次设计和制造过程中的成功率。

(2) 加工 - 装配协同。数字孪生车间通过实作装配体模型架起了加工质量和装配质量之间的桥梁,使得在

装配前就能根据零部件的加工质量大致预测出复杂产品装配最终的状态,为加工工艺优化提供了指导。加工者交付加工件后还能跟踪装配过程,在此期间可以实时接收装配人员发出的修配、更换等需求,提高加工的响应能力和保障能力。

(3) 调度 - 装配协同。数字孪生车间为调度部门提供了全面的车间信息,并帮助实现对物料、设备、人员、物流、能源等各个要素的统筹规划。调度部门可以根据实际生产情况进行生产计划、人员配置、库存管理、资源调用,将复杂产品从单件装配推向多工位并行装配,提高设备的利用率,实现省时增量。

(4) 供应 - 装配协同。数字孪生车间提供的平台允许供应商实时参与装配生产过程,对其供应的产品提供在线的技术指导、安全培训和维修服务。

(5) 使用 / 维护 - 装配协同。复杂产品常常要求具有较强的测试性、维修性、保障性以及环境适应性,数字孪生车间将产品后生命周期的数据纳入管理,有利于以用户需求为导向,用户体验为反馈进行产品装配问题的消除和归零,形成装配和使用 / 维护的小闭环。

5 结论

复杂产品需求的变化对其装配过程提出了更高的要求,传统装配方式已渐渐不能适应复杂产品装配特点,信息系统和物理系统的深度融合是解决复杂产品装配难题的关键。本文对数字孪生车间在复杂产品装配过程当中的应用进行了探索。数字孪生技术能够实现物理空间与虚拟空间的映射、融合和交互,数字孪生车间基于数字孪生技术将复杂产品装配过程镜像到虚拟空间,并通过以虚控实的方式进行装配过程调控,同时有望打通复杂产品全生命周期的各个环节,全面管理全业务、全要素、全流程数据。将数据孪生车间应用于复杂产品装配能有效克服传统模式的弊端,使复杂产品的装配过程在数字孪生车间中产生颠覆性的进步。

参考文献

- [1] TAO F, QI Q, WANG L, et al. Digital twins and cyber-physical systems toward smart manufacturing and industry 4.0: Correlation and comparison[J]. *Engineering*, 2019, 5(4): 595-812.
- [2] GRIEVES M W. Product lifecycle management: The new paradigm for enterprises[J]. *International Journal of Product Development*, 2005, 2(1/2): 71.
- [3] GRIEVES M. Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication[J]. *White Paper*, 2014, 1: 1-7.
- [4] GLAESSGEN E, STARGEL D. The digital twin paradigm for future NASA and US air force vehicles[C]//53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference
20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures

Conference
14th AIAA. Virgina: AIAA, 2012.

[5] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[M]// Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Cham: Springer International Publishing, 2016.

[6] 安世亚太科技股份有限公司. 数字孪生体技术白皮书 [EB/OL].(2019-12-20)[2020-03-18]. <https://www.peraglobal.com/phone/resources/index.html>.

PARE GLOBAL. Digital twin techology white paper[EB/OL]. (2019-12-20)[2020-03-18]. <https://www.peraglobal.com/phone/resources/index.html>.

[7] 陶飞, 张萌, 程江峰, 等. 数字孪生车间——一种未来车间运行新模式 [J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(1): 1-9.

TAO Fei, ZHANG Meng, CHENG Jiangfeng, et al. Digital twin workshop: A new paradigm for future workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(1): 1-9.

[8] 陆剑峰, 王盛, 张晨麟, 等. 工业互联网支持下的数字孪生车间 [J]. 自动化仪表, 2019, 40(5): 1-5.

LU Jianfeng, WANG Sheng, ZHANG Chenlin, et al. Digital twin workshop supported by industrial internet[J]. Process Automation Instrumentation, 2019, 40(5): 1-5.

[9] TAO F, ZHANG M. Digital twin shop-floor: A new shop-floor paradigm towards smart manufacturing[J]. IEEE Access, 2017, 5: 20418-20427.

[10] 陶飞, 程颖, 程江峰, 等. 数字孪生车间信息物理融合理论与技术 [J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(8): 1603-1611.

TAO Fei, CHENG Ying, CHENG Jiangfeng, et al. Theories and technologies for cyber-physical fusion in digital twin shop-floor[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(8): 1603-1611.

[11] 陈振, 丁晓, 唐健钧, 等. 基于数字孪生的飞机装配车间生产管控模式探索 [J]. 航空制造技术, 2018, 61(12): 46-50, 58.

CHEN Zhen, DING Xiao, TANG Jianjun, et al. Digital twin-based production management and control mode for aircraft assembly shop-floor[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(12): 46-50, 58.

[12] ZHANG Q, ZHANG X M, XU W J, et al. Modeling of digital twin workshop based on perception data[M]//Intelligent Robotics and Applications. Cham: Springer International Publishing, 2017.

[13] ZHANG H, ZHANG G, YAN Q. Dynamic resource allocation optimization for digital twin-driven smart shopfloor[C]//2018 IEEE 15th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC). New York: IEEE, 2018.

[14] 郭东升, 鲍劲松, 史恭威, 等. 基于数字孪生的航天结构件制造车间建模研究 [J]. 东华大学学报: 自然科学版, 2018(4): 578-585.

GUO Dongsheng, BAO Jinsong, SHI Gongwei, et al. Research on modeling of aerospace structural parts manufacturing workshop based on digital twin[J]. Journal of Donghua University(Natural Science), 2018(4): 578-585.

[15] 柳林燕, 杜宏祥, 汪惠芬, 等. 车间生产过程数字孪生系统构建及应用 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1536-1545.

LIU Linyan, DU Hongxiang, WANG Huifen, et al. Construction and application of digital twin system for production process in workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1536-1545.

[16] 李伯虎, 柴旭东. 复杂产品虚拟样机工程 [J]. 计算机集成

制造系统, 2002, 8(9): 678-683.

LI Bohu, CHAI Xudong. Virtual prototyping engineering for complex product[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2002, 8(9): 678-683.

[17] 王小巧. 复杂机械产品装配过程质量自适应控制方法及支持系统研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.

WANG Xiaoqiao. Research on assembly quality adaptive control method and system for complex mechanical products assembly process[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.

[18] 王小巧, 刘明周, 葛茂根, 等. 复杂机械产品装配过程质量门监控系统与关键技术 [J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(11): 2869-2884.

WANG Xiaoqiao, LIU Mingzhou, GE Maogen, et al. Quality gates monitoring system and key technologies for assembly process of complex mechanical products[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(11): 2869-2884.

[19] 石博强, 段国晨, 申焱华, 等. 复杂机械系统时变不确定性设计方法 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(3): 80-84, 135.

SHI Boqiang, DUAN Guochen, SHEN Yanhua, et al. Evolution based uncertainty design for complex mechanical systems[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(3): 80-84, 135.

[20] 庄存波, 刘检华, 熊辉, 等. 产品数字孪生体的内涵、体系结构及其发展趋势 [J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(4): 753-768.

ZHUANG Cunbo, LIU Jianhua, XIONG Hui, et al. Connotation, architecture and trends of product digital twin[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(4): 753-768.

[21] 于勇, 胡德雨, 戴晟, 等. 数字孪生在工艺设计中的应用探讨 [J]. 航空制造技术, 2018, 61(18): 26-33.

YU Yong, HU Deyu, DAI Sheng, et al. Study on application of digital twin in process planning[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(18): 26-33.

[22] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索 [J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 1-18.

TAO Fei, LIU Weiran, LIU Jianhua, et al. Digital twin and its potential application exploration[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 1-18.

[23] 李伯虎, 张霖, 任磊, 等. 云制造典型特征、关键技术与应用 [J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(7): 1345-1356.

LI Bohu, ZHANG Lin, REN Lei, et al. Typical characteristics, technologies and applications of cloud manufacturing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(7): 1345-1356.

[24] 唐竞. 数字孪生在航空机电产品装配工艺中的应用研究 [J]. 航空制造技术, 2019, 62(15): 22-30.

TANG Jing. Application of digital twin in assembly process of aviation electromechanical products[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(15): 22-30.

通讯作者: 胡秀琨, 助理工程师, 硕士, 研究方向为自动化装备、智能制造与检测数字孪生车间在复杂产品装配过程中的应用探索, E-mail: huxiukunm2016@163.com.

(责编 阳光)

引文格式: 谷美邦. 热处理制度对激光增材制造 TA15 钛合金力学性能的影响 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(3): 97-102.

GU Meibang. Influence of heat treatment on mechanical properties of TA15 titanium alloy fabricated by laser additive manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(3): 97-102.

热处理制度对激光增材制造TA15钛合金力学性能的影响

谷美邦

(海装沈阳局驻沈阳地区第一军事代表室, 沈阳 110031)

[摘要] 进行了普通退火态和双重退火态激光增材制造 TA15 钛合金显微组织观察和力学性能试验。试验结果表明: 普通退火态为细片层 $\alpha+\beta$ 超细网篮组织, 双重退火态为端部带根须状形貌的初生 α 相 + 超细 β 转变组织构成的特种双态组织; 普通退火态激光增材制造 TA15 钛合金极限强度、屈服强度和疲劳极限均优于双重退火态; 双重退火态激光增材制造 TA15 钛合金具有较好的塑性和优异的断裂韧性。

关键词: 激光增材制造; 热处理; 静强度; 疲劳; 断裂韧性

Influence of Heat Treatment on Mechanical Properties of TA15 Titanium Alloy Fabricated by Laser Additive Manufacturing

GU Meibang

(The First Military Representative Office of Shenyang Marine Equipment Bureau, Shenyang 110031, China)

[ABSTRACT] This paper focused on studying the microstructure and mechanical properties of TA15 titanium alloy fabricated by laser additive manufacturing after normal annealing treatment and double annealing treatment. The results indicate that TA15 alloy has a super fine basketweave microstructure after normal annealing treatment, and which will change to a bi-modal microstructure with a crab-like primary α phase with super fine transformed β phase after double annealing treatment. The ultimate strength, yield strength and fatigue limit of the alloy after normal annealing heat treatment are better than the alloy's after double annealing treatment. But the plasticity and fracture toughness of the alloy after double annealing treatment are superior to those of the alloy after normal annealing heat treatment

Keywords: Laser additive manufacturing; Heat treatment; Static strength; Fatigue; Fracture toughness

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2021.03.097

钛合金具有高比强、耐高温、抗疲劳等优异性能, 大型复杂钛合金整体构件用量的高低, 是衡量航空装备技术先进性的重要指标^[1]。采用整体锻造等传统方法制造大型钛合金构件工艺复杂, 材料利用率低, 周期长, 成本高。增材制造技术成形大型复杂钛合金构件具有数字化、精确化、设计-材料-制造一体化等明显的技术和经济优势^[2]。大型金属构件的激光逐层熔化沉积增材制造过程, 实际上是激光冶金高温熔池在固体金属基底快速导热、温度梯度超高、冷却速度超快条件下的快速凝固及逐层堆积的过程。构件的冶金组织、力学性能呈现对工艺参数和工艺过程状态变化的高度敏感性及其复杂多变性, 给构件内部冶金组织一致性和力学性能稳定性控制带来巨大困难, 国际公认构件的内部质量控制是增材

制造技术在飞机主承力结构上应用的最大挑战之一^[3]。

钛合金的力学性能强烈受控于其宏观组织结构特征。典型沉积态宏观组织由贯穿多个熔覆层呈外延生长的粗大 β 柱状胞晶组成, 晶内微观组织是由极少量针状 α 板条、大量的魏氏 α 板条及一定体积分数的板条间 β 相组成^[4]。虽然沉积态增材制造钛合金强度优于 / 相当于锻件, 但受粗大晶粒组织影响, 其变形协调能力较差, 表现为塑性较低(低于 / 稍高于锻件的最低值)^[5-7]。通过控制热处理动力学过程优化显微组织是提高钛合金力学性能的有效方法之一^[8]。席明哲等^[9]指出将激光快速成形 TA15 钛合金在 $\alpha+\beta$ 两相区温度退火, 初生 α 相显著长大而体积分数减少, 同时在初生 α 相板条间的 β 转变组织体积分数增加, 该 β 转变组织由二次析出的

α 相薄片和残余 β 相薄片组成,这种显微组织表现出优异的综合力学性能。张霜银^[10-11]、Dinda^[12] 和 Brandl^[13] 等亦发现经热处理后沉积态 TC4 内 α 片层厚度增加,材料拉伸强度降低而塑性提高。

扩大激光增材制造钛合金关键主承力构件的应用范围已成为航空装备减轻结构重量,提升性能指标的重要手段^[14]。北京航空航天大学研究团队^[15-17] 通过热处理主动控制激光增材制造 TA15 钛合金的固态相变形核和长大动力学过程,获得优异的综合力学性能,率先实现激光增材制造飞机钛合金大型整体主承力构件。本文基于增材制造钛合金结构工程应用积累的性能数据,分析热处理制度对激光增材制造 TA15 钛合金综合力学性能的影响,为进一步优化热处理制度,降低构件研发成本,扩大增材制造结构工程应用提供技术支撑。

1 试验及方法

本试验所研究的热处理 TA15 钛合金板材来自北京航空航天大学大型金属构件增材制造国家工程实验室。沉积工艺为:采用 LMD-V 型激光成形系统,保护气体为氩气,激光功率 4~6kW,光斑直径 6~8mm,扫描速度 15~20mm/s,单层厚度 1~1.5mm,送粉速度 600~1000g/h。激光增材制造沉积过程如图 1 所示,沉积增高方向为 Z 轴所示方向,激光束扫描方向

为 X 向,垂直于沉积方向和激光扫描方向的为 Y 向,相应的各个截面分别为 XOZ、YOZ 和 XOY 截面。试样成形后,采用金相法测试得到激光增材制造 TA15 钛合金的 β 相变点为 1010℃。热处理工艺:普通退火热处理制度为 700~800℃ /1~4h,空冷;双重退火热处理制度为 950~1000℃ /0.5~1.5h,空冷或风冷+700℃ ~800℃ /1~4h,空冷,其中普通退火热处理工艺目的是去除构件内部应力,热处理温度低于 800℃,对 TA15 合金组织不造成影响^[18-19]。

为全面表征普通退火和双重退火两种热处理状态的影响,进行了两种热处理状态下显微组织表征和力学性能测试,具体试验项目和测试标准如表 1 所示。显微组织观察采用的是纵截面 YOZ 试样,腐蚀液为体积比为 1:6:43 的 HF:HNO₃:H₂O 混合溶液,腐蚀时间约 5~8s。显微组织分析中 α 相体积含量和尺寸采用 Image J 软件进行测量,体积含量测量来自 3 张扫描照片的平均值,而 α 片层宽度测量来自 3 张扫描照片共约 30 个 α 片层的平均值。

2 结果与讨论

2.1 显微组织

普通退火态和双重退火态激光增材制造 TA15 钛合金宏观组织如图 2 所示,两种热处理制度宏观组织没

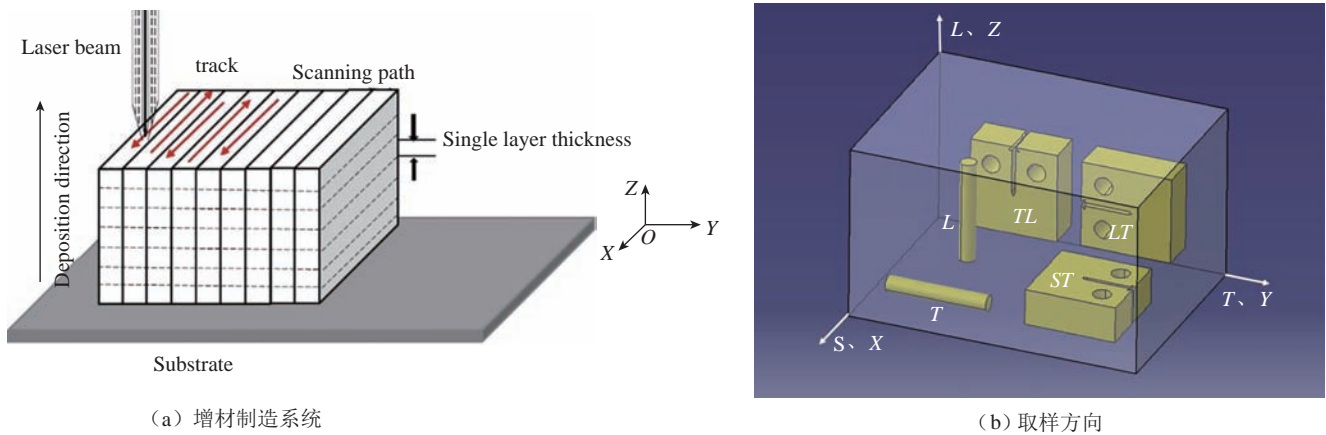


图1 激光增材制造TA15钛合金增材制造系统与取样方向示意图

Fig.1 Schematic of laser additive manufacturing process of TA15 alloy and layout of C(T) specimen in sample

表1 普通退火和双重退火态激光增材制造TA15钛合金性能测试试验内容

Table 1 Performance test of laser additive manufactured TA15 titanium alloy under ordinary annealing and double annealing

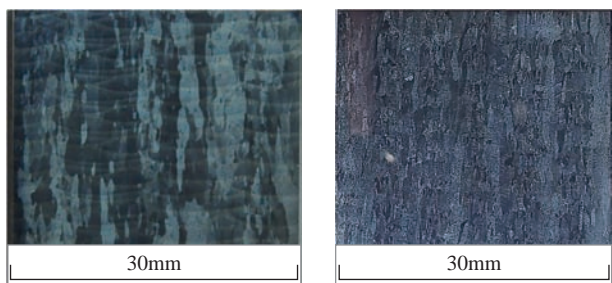
测试项目	性能指标	取样方向	试样形式	测试标准
室温拉伸	极限强度,屈服强度,延伸率	L 向, T 向	棒材	GB/T 228.1—2010 ^[20]
拉伸疲劳	S-N 曲线,疲劳极限	L 向	棒材,包括光滑和缺口试样	GB/T 3075—2008 ^[21]
损伤容限	平面应变断裂韧性	L-T, L-T	紧凑拉伸	GB/T 4161—2007 ^[22]

有明显差异,均为沿着沉积方向外延生长的粗大原始 β 柱状晶组织,柱状晶的宽度在几百 μm 到 mm 级,柱状晶的长度贯穿多个沉积层达几 cm 。

普通退火态和双重退火态激光增材制造TA15钛合金显微组织如图3所示,两种热处理制度显微组织显著不同。普通退火态激光增材制造TA15钛合金为细片层 $\alpha+\beta$ 超细网篮组织, α 相体积含量约为 $78.1\%\pm 2.1\%$,平均 α 片层厚度约为 $(1.05\pm 0.11)\mu\text{m}$ 。双重退火态激光增材制造TA15钛合金为端部带根须状形貌的初生 α 相+超细 β 转变组织构成的特种双态组织,初生 α 相体积含量约为 $40.5\%\pm 7.4\%$,初生 α 相片层宽度平均值为 $(2.45\pm 0.23)\mu\text{m}$ 。

2.2 静力性能

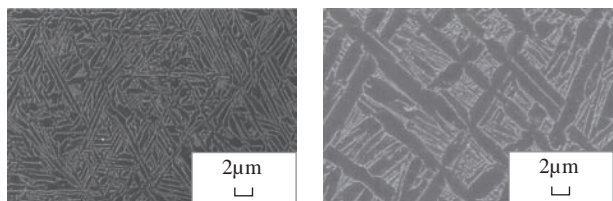
按照国家标准GB/T 228.1—2010要求,采用棒状试样对普通退火态和双重退火态激光增材制造TA15钛合金室温拉伸性能进行测试,试验结果统计分析见表2,可知,普通退火态纵向、横向的抗拉强度 R_m 为992MPa、1022MPa;纵向、横向的屈服强度 $R_{p0.2}$ 为904MPa、945MPa;纵向、横向的断后伸长率为13.3%、9.5%;双重退火态纵向、横向抗拉强度平均值为973MPa、984MPa;纵向、横向的屈服强度为910MPa、882MPa;纵向、横向的断后伸长率平均值为14.7%、10.4%;两种热处理状态下室温拉伸均呈现一定各向异性,横向较纵向强度略高,塑性低;与双重退火态相比,普通退火态激光增材制造TA15钛合金强度略高,但塑性略低。这是因为通常



(a) 普通退火态

(b) 双重退火态

图2 普通退火态和双重退火态激光增材制造TA15钛合金宏观组织
Fig.2 Macro-morphology of TA15 titanium alloy produced by laser AM under ordinary annealing and double annealing process



(a) 普通退火超细网篮组织

(b) 双重退火特种双态组织

图3 激光增材制造TA15钛合金显微组织

Fig.3 Microstructure of TA15 titanium alloy manufactured by laser AM

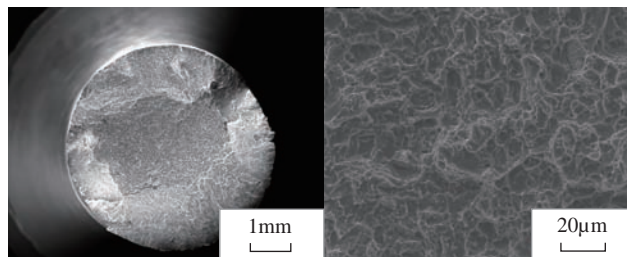
情况下,合金不同方向上的力学性能差异主要是由晶粒形貌、织构、 α 相含量及其板条宽度造成,比较退火态和双重处理态组织可以看出,其晶粒形貌、织构等均相同,但 α 相含量及其板条宽度存在较大差异,Zhang^[23]及Ren^[24]等的研究表明,随着 α 相片层尺寸的增加及含量降低,均能导致合金的强度下降,塑性提升。本试验中双重退火态的 α 相板条宽度明显厚于退火态,且导致其强度低于退火态,但塑性提升。

本文分析了激光增材制造TA15钛合金普通退火态与双重退火态 L 向室温拉伸断口形貌,如图4所示。两种热处理态试样均为杯锥状断口,具有中心纤维区和

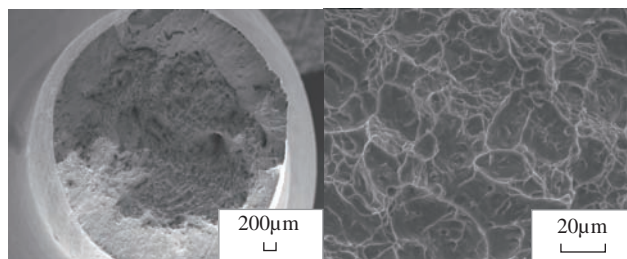
表2 普通退火和双重退火态激光增材制造TA15钛合金室温拉伸性能

Table 2 Tensile properties of laser additive manufactured TA15 titanium alloy under ordinary annealing and double annealing

性能指标	取样方向	普通退火态		双重退火态	
		均值	标准差	均值	标准差
极限强度 σ_b/MPa	T	1022	32.27	984	33.64
	L	992	27.04	973	29.61
屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	T	945	37.17	910	29.37
	L	904	26.15	882	27.16
延伸率 $A/\%$	T	9.5	2.38	10.4	2.53
	L	13.3	2.78	14.7	3.08



(a) 普通退火态



(b) 双重退火态

图4 普通退火态和双重退火态激光增材制造TA15钛合金 L 向室温拉伸断口形貌

Fig.4 Fractography of laser additive manufactured TA15 titanium alloy under ordinary annealing and double annealing

四周剪切唇区,双重退火态试样的剪切唇区比例大。高倍下能看到明显的韧窝形状,普通退火态与双重退火态的横纵向断裂机制均为韧性断裂,但双重退火态试样的韧窝形貌更深更大,说明其塑性更好。

2.3 疲劳性能

按照国家标准 GB/T 3075—2008 要求,采用棒状试样对普通退火态和双重退火态激光增材制造 TA15 钛合金应力集中系数 $K_t=1$ 光滑试样和 $K_t=3$ 缺口试样室温高周疲劳性能进行测试。测试条件为,应力比 $R=0.1$,频率 $f=120\text{Hz}$,正弦波加载,测试结果如图 5 所示。可见,激光增材制造 TA15 钛合金普通退火态的疲劳性能显著优于双重退火态。普通退火态纵向光滑试样 ($K_t=1$) 条件疲劳极限 ($N=10^7$) 为 605MPa,较双重退火态的 537.5MPa 高 67.5MPa (约 13%);纵向缺口试样 ($K_t=3$) 条件疲劳极限 ($N=10^7$) 为 400MPa,较双重退火态的 322.5MPa 高 77.5MPa (约 24%)。合金的疲劳性能主要受初生 α 片层的宽度影响,片层宽度越小,其疲劳性能越好^[23],普通退火态合金的片层宽度明显窄于双重退火态,因此其疲劳性能更优。

2.4 断裂韧性

按照国家标准 GB/T 4161—2007 要求,采用紧凑拉伸 C(T) 试样对普通退火态和双重退火态激光增材制造 TA15 钛合金平面应变断裂韧性 K_{IC} ,取样方向包括 $T-L$ 和 $L-T$ 方向,试验件厚度 35mm。试验结果如表 3 所示,可见,普通退火态和双重退火态激光增材制造 TA15 钛合金平面应变断裂韧性 K_{IC} 均表现出一定的各向异性, $L-T$ 方向的平面应变断裂韧性 K_{IC} 稍高于 $T-L$ 方向。双重退火态激光增材制造 TA15 钛合金表现出优异的断裂韧性,其平面应变断裂韧性 K_{IC} 显著高于普通退火态。Shi 等^[25] 的研究发现裂纹扩展与网篮结构中 α 片层的宽度相关,片层宽度的增加会增加裂纹扩展的阻力,提高其断裂韧性,Guo 等^[26] 也发现 α 片层宽度以及集束尺寸的增加会加大裂纹扩展的阻力从而提高断裂韧性。本试验中双重退火态的 α 片层宽度明显宽于普通退火态,使得其断裂韧性更优。

3 结论

本文对普通退火态和双重退火态激光增材制造

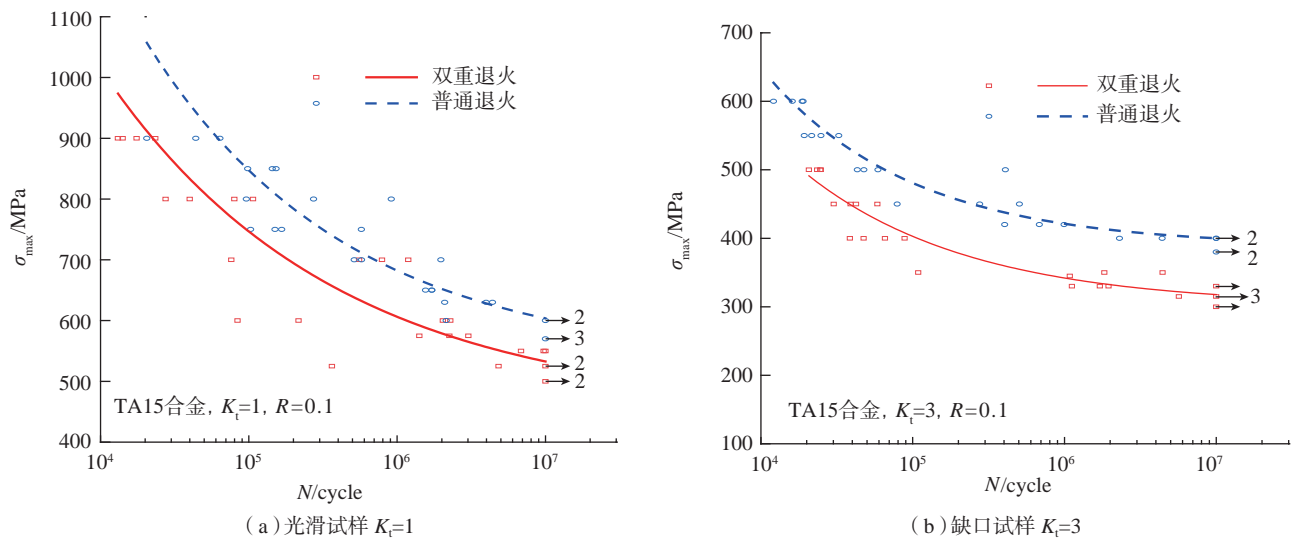


图5 激光增材制造TA15钛合金不同试样的疲劳S-N曲线

Fig.5 S-N curves of different samples for TA15 titanium alloy by laser additive manufacturing

表3 普通退火和双重退火态激光增材制造TA15钛合金平面应变断裂韧性

Table 3 Plane strain fracture toughness of ordinary annealed and double annealed TA15 titanium alloy produced by AM

性能指标	取样方向	普通退火态	双重退火态
平面应变断裂韧性 K_{IC} / (MPa · m ^{1/2})	$T-L$	70.2	97.2
	$L-T$	73.5	103.2

TA15 钛合金显微组织和力学性能进行了对比分析,得出以下结论。

(1) 两种热处理状态下激光增材制造 TA15 钛合金显微组织明显不同。普通退火态为细片层 $\alpha+\beta$ 超细网篮组织,双重退火态为端部带根须状形貌的初生 α 相 + 超细 β 转变组织构成的特种双态组织。

(2) 普通退火态激光增材制造 TA15 钛合金极限强度、屈服强度和疲劳极限均优于双重退火态。

(3) 双重退火态激光增材制造 TA15 钛合金具有较好的塑性和优异的断裂韧性。

致谢

感谢北京航空航天大学大型金属构件增材制造国家工程实验室为本文提供试验件和试验数据。

参考文献

- [1] 王华明, 张述泉, 王向明. 大型钛合金结构件激光直接制造的进展与挑战 (邀请论文) [J]. 中国激光, 2009, 36(12): 3204-3209.
WANG Huaming, ZHANG Shuquan, WANG Xiangming. Progress and challenges of laser direct manufacturing of large titanium structural components (invited paper) [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(12): 3204-3209.
- [2] 王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造: 若干材料基础问题 [J]. 航空学报, 2014, 35(10): 2690-2698.
WANG Huaming. Materials' fundamental issues of laser additive manufacturing for high-performance large metallic components [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(10): 2690-2698.
- [3] FRAZIER W E. Metal additive manufacturing: A review [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(6): 1917-1928.
- [4] 李静, 林鑫, 钱远宏, 等. 激光立体成形 TC4 钛合金组织和力学性能研究 [J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1103010.
LI JING, LIN XIN, QIAN YUANHONG, et al. Study on microstructure and property of laser solid forming TC4 titanium alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(11): 1103010.
- [5] ZHANG Q, CHEN J, ZHAO Z, et al. Microstructure and anisotropic tensile behavior of laser additive manufactured TC21 titanium alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 673: 204-212.
- [6] BRANDL E, BAUFELD B, LEYENS C, et al. Additive manufactured Ti-6Al-4V using welding wire: Comparison of laser and arc beam deposition and evaluation with respect to aerospace material specifications [J]. Physics Procedia, 2010, 5: 595-606.
- [7] BAUFELD B, BRANDL E, VAN DER BIEST O. Wire based additive layer manufacturing: Comparison of microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V components fabricated by laser-beam deposition and shaped metal deposition [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(6): 1146-1158.
- [8] DE FORMANOIR C, MICHOTTE S, RIGO O, et al. Electron beam melted Ti-6Al-4V: Microstructure, texture and mechanical behavior of the as-built and heat-treated material [J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 652: 105-119.
- [9] 席明哲, 高士友, 刘博, 等. 扫描方式和退火热处理对激光快速成形 TA15 钛合金组织与性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(2): 445-449.
XI Mingzhe, GAO Shiyu, LIU Bo, et al. Effect of scanning pattern and annealing heat treatment on microstructures and mechanical properties [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(2): 445-449.
- [10] 张霜银, 林鑫, 陈静, 等. 热处理对激光成形 TC4 合金组织及性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(7): 1263-1266.
ZHANG Shuangyin, LIN Xin, CHEN Jing, et al. Influence of heat treatment on the microstructure and properties of Ti-6Al-4V titanium alloy by laser rapid forming [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(7): 1263-1266.
- [11] ZHANG S Y, LIN X, CHEN J, et al. Heat-treated microstructure and mechanical properties of laser solid forming Ti-6Al-4V alloy [J]. Rare Metals, 2009, 28(6): 537-544.
- [12] DINDA G P, SONG L, MAZUMDER J. Fabrication of Ti-6Al-4V scaffolds by direct metal deposition [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2008, 39(12): 2914-2922.
- [13] BRANDL E, LEYENS C, PALM F. Mechanical properties of additive manufactured Ti-6Al-4V using wire and powder based processes [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2011, 26: 012004.
- [14] 王向明, 苏亚东, 吴斌. 增材技术在飞机结构研制中的应用 [J]. 航空制造技术, 2014, 57(22): 16-20.
WANG Xiangming, SU Yadong, WU Bin. Application of additive manufacturing technology on aircraft structure application of additive manufacturing technology on aircraft structure development [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(22): 16-20.
- [15] 谢旭霞, 张述泉, 汤海波, 等. 退火温度对激光熔化沉积 TA15 钛合金组织和性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(9): 1510-1515.
XIE Xuxia, ZHANG Shuquan, TANG Haibo, et al. Effect of annealing temperatures on microstructure and mechanical properties of laser melting deposited TA15 titanium alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(9): 1510-1515.
- [16] 贺瑞军, 王华明. 激光沉积 Ti-6Al-2Zr-Mo-V 钛合金高周疲劳性能 [J]. 航空学报, 2010, 31(7): 1488-1493.
HE Ruijun, WANG Huaming. HCF properties of laser deposited Ti-6Al-2Zr-Mo-V alloy [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(7): 1488-1493.
- [17] 王华明, 李安, 张凌云, 等. 激光熔化沉积快速成形 TA15 钛合金的力学性能 [J]. 航空制造技术, 2008, 51(7): 26-29.
WANG Huaming, LI An, ZHANG Lingyun, et al. Mechanical properties of titanium alloy TA15 fabricated by laser melting deposition manufacturing [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(7): 26-29.
- [18] 袁红, 方艳丽, 王华明. 热处理对激光熔化沉积 TA15 钛合金组织及压缩性能的影响 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 746-750.
YUAN Hong, FANG Yanli, WANG Huaming. Influence of heat treatment on microstructure and compressive property of laser melting deposited TA15 titanium alloy [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010,

39(4): 746-750.

[19] 谢旭霞, 张述泉, 汤海波, 等. 退火温度对激光熔化沉积TA15钛合金组织和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2008(9): 1510-1515.

XIE Xuxia, ZHANG Shuquan, TANG Haibo, et al. Effect of annealing temperatures on microstructure and mechanical properties of laser melting deposited TA15 titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008(9): 1510-1515.

[20] 中国国家标准化管理委员会. 金属材料拉伸试验第1部分 室温试验方法: GB/T 228.1—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.

National Standardization Administration of China. Metallic materials-tensile testing—Part 1: Methods of test at room temperature: GB/T 228.1—2010[S]. Beijing: China Standards Press, 2010.

[21] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 3075—2008 金属材料疲劳试验轴向力控制方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

National Standardization Administration of China. GB / T 3075—2008 Metallic materials-fatigue test-Axial force control method[S]. Beijing: China Standards Press, 2008.

[22] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 4161—2007 金属材料平面应变断裂韧性 KIC 试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

National Standardization Administration of China. GB / T 4161—2007 Metal materials-determination of plane-strain fracture toughness[S]. Beijing: China Standards Press, 2008.

[23] ZHANG B, SONG Z, LEI L, et al. Geometrical scale-sensitive fatigue properties of Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si alloys with α/β lamellar microstructures[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2014, 30(12): 1284-1288.

[24] REN H S, TIAN X J, WANG H M. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of a graded structural material[J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 614: 207-213.

[25] SHI X H, ZENG W D, SHI C L, et al. Study on the fatigue crack growth rates of Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe titanium alloy with basket-weave microstructure[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 621: 143-148.

[26] GUO P, ZHAO Y Q, ZENG W D. Fatigue crack growth behavior in TC4-DT titanium alloy with different lamellar microstructures[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(2): 277-281.

通讯作者: 谷美邦, 工程师, 硕士, 主要研究方向为舰载机制造, E-mail: 18640812356@163.com.

(责编 阳光)

(上接第 86 页)

(3) 受在制品的影响, 飞机大部件装配能力测算时需考虑时序关系, 以各部段数据表为基础, 调用实时数据通过匹配装配能力最终获得大部件实际装配能力。

参考文献

[1] 薛红前. 飞机装配工艺学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2015.

XUE Hongqian. Aircraft assembly technology[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2015.

[2] 刘强. 离散型生产线生产能力评估系统研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.

LIU Qiang. Research on production capacity evaluation system of discrete production line[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.

[3] 王青, 温李庆, 李江雄, 等. 基于 Petri 网的飞机总装配生产线建模及优化方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015(7): 1224-1231.

WANG Qing, WEN Liqing, LI Jiangxiong, et al. Modeling and optimization for aircraft final assembly line based on Petri net[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015(7): 1224-1231.

[4] 屈琦, 贾晓亮, 郑植元, 等. 飞机部件装配生产线仿真研究[J]. 航空制造技术, 2017, 60(4): 54-59.

QU Qi, JIA Xiaoliang, ZHENG Zhiyuan, et al. Simulation of aircraft components assembly line[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(4): 54-59.

[5] 孙星. 基于 Petri 网和 eM-Plant 的飞机装配线建模与仿真研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.

SUN Xing. Modeling and simulation of aircraft assembly production line based on Petri net and eM-Plant software[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.

[6] 闫振国. 复杂产品装配系统的离散动态作业过程分析与优化[D]. 西安: 西北工业大学, 2012.

YAN Zhenguo. Discrete dynamic job process analysis and optimization of complex product assembly system[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2012.

[7] WRIGHT T P. Factors affecting the cost of airplanes[J]. Journal of the Aeronautical Sciences, 1936, 3(4): 122-128.

[8] WANG T, HUANG H, YU C J, et al. Understanding cost reduction of China's biomass direct combustion power generation—A study based on learning curve model[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 188: 546-555.

[9] 程雪梅. 基于标准作业时间的 XX 航空转包项目装配产能优化[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.

CHENG Xuemei. The xx aviation subcontract projects assembly capacity optimization based on standard operation time[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.

[10] U. S. Government Accountability Office. F-35 joint strike fighter: Development is nearly complete, but deficiencies found in testing need to be resolved [EB/OL]. [2018-06-05]. https://www.gao.gov/mobile/products/GAO-18-321?utm_campaign=usgao_email&utm_content=daybook&utm_medium=email&utm_source=govdelivery.

通讯作者: 龙安林, 工程师, 博士, 研究方向为飞机部件装配与结构弹塑性变形分析, E-mail: anlinlong@126.com.

(责编 阳光)

创造价值 贡献航空

“2021复合材料增材制造” 主题征稿

选题背景

增材制造（3D打印）技术发展迅猛，已在航空航天领域展示了重大价值和广阔的应用前景。除金属材料外，复合材料在航空航天领域的应用日益扩大，对复合材料的增材制造技术研究亦逐渐成为热点。鉴于此，本刊特设专题论坛，诚挚邀请该领域专家及科研团队对其研究进展进行论述，展示该领域最新的研究成果。

征稿方向

包括但不限于：

- （1）金属基复合材料增材制造的成分设计、工艺参数、组织调控及性能分析；
- （2）树脂基复合材料增材制造的工艺参数、模拟分析及性能控制；
- （3）陶瓷基复合材料增材制造的工艺及性能分析。

截稿日期

2021年4月15日，请将论文发送到amt@amte.net.cn。

联系方式

学术编辑：王雪坤

联系电话：13811568800

010-85700465转285

邮箱：amt@amte.net.cn

公司名称	位置	索引号
3D SYSTEMS 中国	封二	21-1095
新拓三维技术（深圳）有限公司	封三	21-1057
奎克好富顿公司	封底	21-1060
法孚机床公司	1	21-1056
肯纳金属	3	21-1017
埃马克（中国）机械有限公司	5	21-1020
COMSOL中国	7	21-1001
易格斯（上海）拖链系统有限公司	9	21-1023
北京东兴润滑剂有限公司	11	21-1004
北京迪蒙数控技术有限责任公司	13	21-1009
第十七届中国国际机床展览会	104	21-1002

CIMT 2021

第十七届中国国际机床展览会

THE 17TH CHINA INTERNATIONAL MACHINE TOOL SHOW

🕒 2021年4月12-17日

🏠 北京·中国国际展览中心（新馆）

📍 北京顺义天竺裕翔路88号

Date: April 12-17, 2021

Venue: China International Exhibition Center (New Venue), Beijing



CMTBA微信订阅号

主办：中国机床工具工业协会

承办：中国机床工具工业协会

中国国际展览中心集团公司

Sponsor: China Machine Tool & Tool Builders' Association (CMTBA)

Organizers: China Machine Tool & Tool Builders' Association (CMTBA)

China International Exhibition Center Group Corporation (CIEC)

广告索引号 21-1002

新拓三维航空航天三维光学测量解决方案

从航空发动机到零部件制造, 护航飞翔梦想



自主知识产权可定制



非接触式

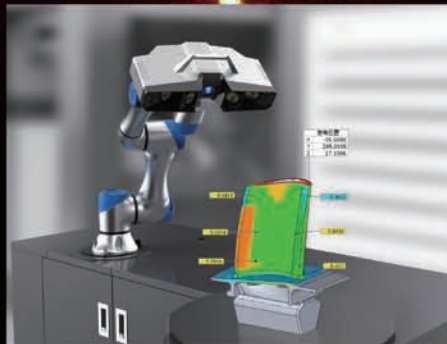


结果可靠且可追溯



XTDIC 三维全场应变测量分析系统

采用高精度数字图像相关算法,可搭配高速工业相机、万能试验机、杯突试验机、光学显微镜等多类型设备,实现全场三维应变及位移测量,在航空材料分析、机翼变形测试、风洞试验、自由落体实验、投弹运动轨迹测量等应用广泛。



XTOM 三维光学扫描测量系统

通过高精度光学扫描设备,采集零部件的三维数据,并与CAD模型进行比对,可实现全尺寸的检测和分析,是发动机叶片、叶轮、零部件的逆向设计、全尺寸几何检测的理想解决方案。



Tube Qualify 三维光学弯管测量系统

拥有自主知识产权的管路在线检测专用设备,在弯管检测、弯管逆向测量、弯管加工指导等方面应用广泛,2秒内即可提供测量结果,并通过与工业机器人工位集成,实现高效率的自动化弯管检测。



新拓三维技术(深圳)有限公司

总部地址:深圳市南山区学府路63号高新区联合总部大厦11层

电话:0755-86665401

网址:www.xtop3d.com

三维工业检测技术领跑者

深圳 | 西安 | 上海 | 北京



共同 助力飞机启航



金属加工液领域的两个全球领航者

——奎克化学和好富顿国际合并为奎克好富顿，使我们的航空航天客户在复杂多变的世界中始终保持领先。

奎克好富顿拥有一系列完整的金属加工液和化铣保护胶产品解决方案，我们很自豪地能与世界上先进的航空航天公司合作一起应对来自复杂的制造领域的挑战。

奎克好富顿拥有众多获得**波音、空客、普拉特·惠特尼、罗尔斯·罗伊斯**等航空航天OEM认证产品。

欲了解认证产品详细信息，请扫描下方二维码。



quakerhoughton.com

©2021 年奎克好富顿版权所有。保留所有权利。

广告索引号 21-1060

 **Quaker
Houghton**[™]
携手共进[™]