

开式整体叶盘通道高效粗加工方法研究*

Research on Rough-Cutting Machining Method for Blisk

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 史耀耀 左安邦 董婷 董宏亮 宁立群



史耀耀

西北工业大学机电学院教授、博士生导师。主要从事机电控制及自动化、专用数控工艺装备、高速高效数控加工、加工表面光整技术等方面的研究工作。主持和参加各类科研项目 20 余项,发表学术论文 30 余篇,获国家发明专利 3 项,获国家、省部级奖励 5 项,入选“2006 年度中国高等学校十大科技进展”。

整体叶盘是现代航空发动机的重要组成部分,对提高发动机性能具

本文以钛合金开式整体叶盘为加工对象,介绍几种常见开槽粗加工方法,重点分析各方法的适用性及优缺点。在此基础上,提出一种高效强力复合铣削工艺方法,对其加工过程进行仿真分析。从加工效率方面对各加工方法进行计算、比较、分析。

有十分积极的作用。美国综合高性能涡轮发动机技术 (IHPTET) 计划与经济可承受多用途先进涡轮发动机 (VAATE) 计划均将整体叶盘列为重点突破技术^[1]。国内整体叶盘技术与欧美发达国家相比差距较大。

与传统叶片和轮毂装配结构相比,整体叶盘省去了连接用的榫头、榫槽及相应的连接件,减轻了重量,提高了推重比,使发动机的工作寿命与安全可靠性得到提升。整体叶盘分为开式与闭式两种结构。

开式整体叶盘具有叶片薄、叶展长、扭曲大、受力易变形,叶片间通道深而窄、开敞性差的特点,其制造难度极大,属于国外严密封锁技术。整体叶盘加工技术主要分为先进连接与铸造技术、切削式(即材料去除式)

表1 整体叶盘加工技术分类

| 加工技术种类 | 具体方法 |
|-----------|---------|
| 先进连接与铸造技术 | 电子束焊接 |
| | 锻接与扩散连接 |
| | 线性摩擦焊接 |
| | 精密铸造 |
| 切削加工技术 | 数控铣削 |
| | 电火花加工 |
| | 电解加工 |
| | 线切割 |
| | 射流切割 |

加工技术两大类,如表 1 所示。

在国外,先进连接与铸造技术中的电子束焊接与线性摩擦焊较成熟。由欧洲 4 国联合研制的 EJ200 发动机采用了电子束焊接的整体叶盘;美国 P&W 公司采用线性摩擦焊

* 西北工业大学研究生创业种子基金项目 (Z2011056) 资助。

技术加工 F119 发动机带有空心叶片的风扇 1 级叶盘及风扇 2、3 级叶盘和压气机 1、2 级叶盘^[2]。切削加工技术中的数控铣削、电解加工、电火花加工较成熟。美国的 GE 公司和 P&W 公司、英国 R·R 公司在研制整体叶盘时,采用了五坐标数控加工技术^[3];美国 GE 公司采用电解方法先后加工了 T700 发动机的钢制整体叶盘、F22 的 GE37/YF120 发动机整体叶盘及 F414 发动机整体叶盘^[4];美、俄等国将电火花工艺应用于带冠整体叶轮加工中。

在国内,涡轮整体叶盘制造以铸造、电火花加工、铣削加工为主^[5]。风扇及压气机整体叶盘的制造技术包括数控铣削、电解加工、电火花加工等,其中数控铣削较为成熟,在生产中普遍采用,而结构复杂的带有薄型叶片的整体叶盘使用电解及电火花加工具有优越性。

本文以钛合金开式整体叶盘为加工对象,介绍几种常见开槽粗加工方法,重点分析各方法的适用性及优缺点。在此基础上,提出一种高效强力复合铣削工艺方法,对其加工过程进行仿真分析。从加工效率方面对各加工方法进行计算、比较、分析。

开槽粗加工方法研究

多数用于风扇、压气机的开式整体叶盘材料为 $\alpha + \beta$ 双相钛合金(如 Tc4、Tc11 等牌号),其锻造毛坯通常为矮圆柱状,如图 1 所示。毛坯与最终零件的形状存在较大差别,约 90% 的材料被去除,其中绝大部分是在叶盘通道粗加工过程中完成的^[6]。叶盘通道粗加工应在满足精加工余量要求的前提下,尽量逼近叶型表面,保证余量分布均匀,同时最大限度提高加工效率,缩短加工时间。

1 数控铣削技术

传统数控铣削使用立铣刀在五坐标数控机床上分层侧铣,如图 2 所示。利用五轴联动功能,依靠刀具侧

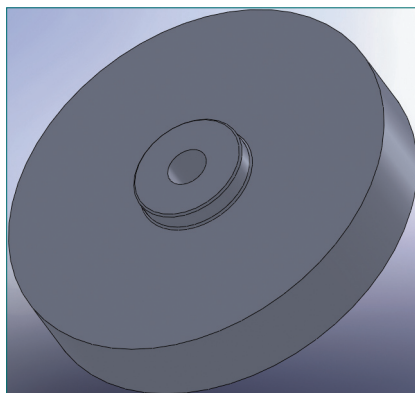


图1 整体叶盘毛坯

刃可一次加工直纹型面到尺寸,无残留脊棱,表面加工质量好。但对窄、深且开敞性差的通道,必须使用细长刀具,加工时受径向力大,使刀具易产生振动,甚至出现断刀现象。侧铣后工件残余应力较大,加工余量难以控制,对后续精加工造成不良影响。

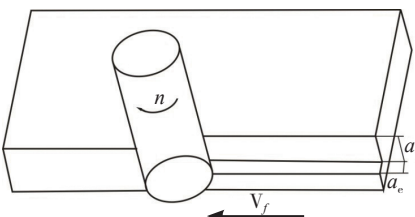


图2 侧铣加工方法

近年来,西北工业大学展开了开式整体叶盘高效开槽插铣加工工艺的研究^[7]。插铣法又称 Z 轴铣削法,在加工过程中刀具沿轴线方向做进给运动,利用底部切削刃进行钻、铣组合切削,采用分行定轴的加工思路,改变刀具受力方向,使径向切削力大幅减小^[8]。试验表明,与侧铣法相比,插铣法将整体叶盘粗加工效率提高 1 倍以上,在刀具伸长量较大的场合中有效减小了切削力及刀具振动现象,保证了加工过程中叶盘零件的安全性。

2 数控电解加工技术

将电解加工与数控技术结合的数控电解加工方法既具有电解加工的工具阴极无损耗、工件无残余应力及变形、加工效率较高的优点,又能发挥数控技术的柔性功能,因此适于加工难切削材料及带有长、薄叶片、

狭窄通道的整体叶盘^[9]。

南京航空航天大学在数控展成电解加工方面取得了许多重要研究成果,该方法与数控铣削相似,以“直线刃”阴极进行数控展成运动,基于电化学阳极溶解原理完成叶盘通道加工^[10]。该方法只能加工具有直纹面曲面的叶盘,而目前处于研究阶段的成形或近成形阴极柔性电解技术为具有自由曲面的叶盘提供了新的加工思路。

电解加工的优点突出,但也存在固有缺陷与局限性。其加工精度及加工稳定性不易控制,对电源的要求高(加工时电压小电流极大),电解液和电解产物需专门处理,环境污染严重。

3 电火花加工技术

电火花加工与电解加工的特点基本相同,但是其加工精度与加工稳定性更好。电火花加工后的工件表面会产生熔化后形成的再铸层,该层中存在着残余应力,给后续精加工带来困难。数控电火花成型加工技术相对成熟,在加工涡轮整体叶盘时使用较多。成型电极在数控系统的控制下沿给定轨迹运动,完成通道材料去除。加工中电极损耗会影响成型精度,因此需要经常更换电极或采取其他措施,提高了加工成本,降低了加工效率^[11]。

近年来发展快速的高效放电铣削加工为整体叶盘高效加工提供了新思路,进行了一些成功的尝试^[12]。

4 3 种加工方法的对比

电火花线切割技术、射流切割技术在整体叶盘粗加工中均有应用,具有独特优势,但在叶盘通道加工过程中的二次余量去除无法实现,且设备成本昂贵,在实际生产中较少使用。

目前,开式钛合金整体叶盘常用的五坐标数控铣削技术已得到广泛的使用并将继续发挥作用;数控电解及电火花加工技术为数控铣削加工困难或无法加工的整体叶盘提供

了新的有效的解决方法。3种加工方法的加工特点、适用范围及局限性如表2所示。

表2 整体叶盘通道加工方法比较

| 方法 | 加工特点 | 局限性 | 适用范围 |
|-------|-------------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| 铣削加工 | 表面质量好,精度高,稳定性与可靠性好,响应快速 | 加工后存在残余应力,薄壁叶片受力易变性,加工设备需要进口,成本高 | 可加工各种尺寸开式整体叶盘及闭式整体叶盘 |
| 电解加工 | 工件无残余应力及变形,工具无损耗,效率较高 | 稳定性不高,电解液与电解产物易污染环境,要专门处理 | 用于加工难切削材料及带有长、薄叶片,狭窄通道的整体叶盘 |
| 电火花加工 | 工件无变形,精度与稳定性较高 | 加工中形成的再铸层会影响后续精加工,电极需经常更换,加工效率较低 | 主要用于加工闭式整体涡轮叶盘 |

盘铣属于断续切削,且钛合金属于难加工材料,切削过程中必然会产生较大切削力及振动,但盘铣仅为开

(1)一级风扇盘通道粗加工分析。

图6所示为一级风扇盘两叶片间的通道模型,其叶展较长,扭曲较大。经积分计算,体积为 2428233mm^3 。按照粗加工后为精加工预留 1mm 均匀余量计算,粗加工去除材料体积为 2214553mm^3 。

基于UG平台,在进行刀具轨迹

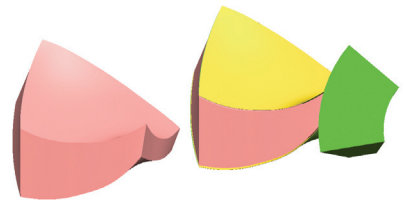


图6 一级风扇盘叶片间的通道

高效强力复合铣削方法

1 加工方法概述

在分析已有加工方法的基础上,针对开式整体叶盘结构特点,提出了一种用于通道开槽粗加工的高效强力复合铣削方法,用以提高通道粗加工效率,缩短加工时间,降低成本。

高效强力复合铣削方法是将盘铣、插铣、侧铣集成,最大限度发挥每种铣削方式的特点。该方法的加工过程是:首先利用盘铣切削效率高的特点对叶盘通道开槽,如图3所示,最大限度去除材料;在此基础上,对盘铣不可达区域(切削干涉区域)进行高效插铣,实现扩槽加工与曲面成形,如图4所示;最后,使用圆柱铣刀或球头铣刀侧铣,如图5所示,完成除棱清根,完成通道粗加工。

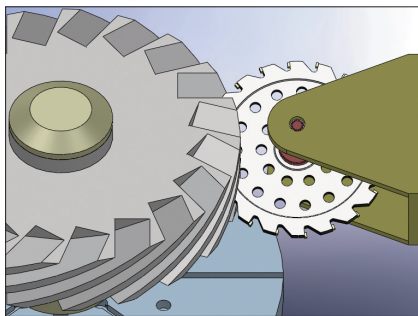


图3 盘铣高效去除材料

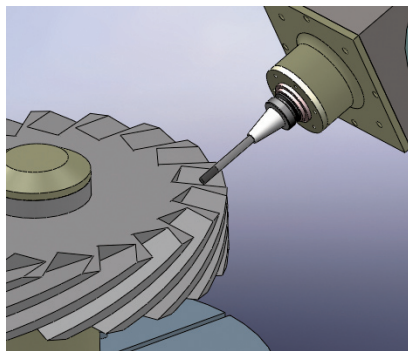


图4 插铣扩槽加工

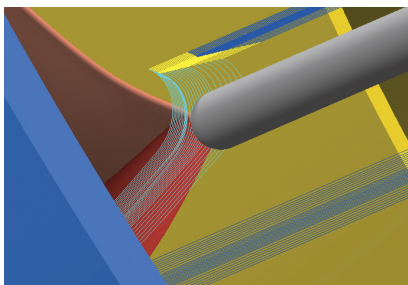


图5 侧铣除棱清根

槽粗加工阶段的第一道工序,并不会对后续加工产生影响。插铣及侧铣工艺已经十分成熟,被广泛采用。因此高效强力复合铣具有应用层面的可行性。

2 通道高效粗加工过程仿真分析

为了更加深入了解高效强力复合铣削的加工过程,以国内某型号航空发动机一级风扇盘与一级压气机盘为例,对该方法进行了仿真分析。

优化的基础上,对加工过程仿真,具体过程如下:首先进行盘铣开槽加工,如图7所示,利用盘铣最大限度去除材料,去除体积为 1613260mm^3 ;其次对盘铣无法加工到的区域进行插铣扩槽,并加工出曲面,如图8所示,材料去除体积为 457011mm^3 ;最后通过侧铣将插铣后残留的棱状波纹去除并清根,如图9所示,材料去除体积为 144282mm^3 。盘铣、插铣、侧铣材料去除量分别占通道粗加工材料去除总量的72.8%、20.6%、6.6%。

(2)一级压气机盘通道开槽效率分析。

某型号航空发动机一级压气机



图7 风扇盘通道的盘铣开槽

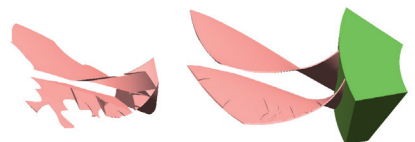


图8 风扇盘通道的插铣扩槽



图9 风扇盘通道的侧铣除棱清根

盘两片间通道体积积分计算,为 516215mm³,如图 10 所示。该叶盘叶展较短,扭曲相对较小。按照为精加工预留 1mm 均匀余量计算,粗加工去除材料体积为 482661mm³。

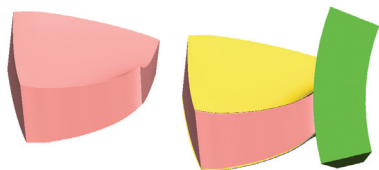


图10 一级压气机盘叶片间的通道

对该压气机盘通道的加工过程与刀具轨迹进行仿真,具体过程与风扇盘相似。盘铣、插铣、侧铣加工分别如图 11、12、13 所示,去除材料体积分别为 383623mm³、76538mm³、22500mm³,分别占粗加工去除材料总体积的 79.5%、15.8%、4.7%。

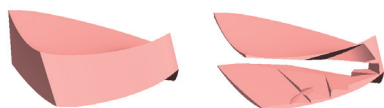


图11 压气机盘通道的盘铣开槽

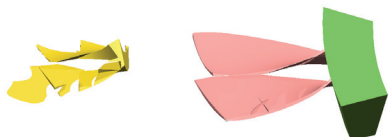


图12 压气机盘通道的插铣扩槽

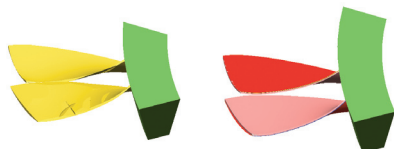


图13 压气机盘通道的侧铣除棱清根

(3) 仿真结果分析。

通过对风扇、压气机叶盘通道的加工仿真可知:在粗加工阶段盘铣能去除 70% 以上的材料,有 15%~20% 的材料靠插铣去除;侧铣完成后的工件表面较好,余量分布均匀;扭曲越大、叶展越长的通道,盘铣能够去除的材料越少;扭曲越小、叶展越短的通道,盘铣能够去除的材料越多。

开式整体叶盘通道开槽粗加工效率对比

1 盘插铣工艺对比试验

为了验证高效强力复合铣削方法的工艺可行性,进行了盘插铣工艺对比试验。试验参数如表 3 所示,试件为 Ti-6Al-4V 钛合金,试验结果如表 4 所示。结果表明,与插铣相比,盘铣切削效率提高 3 倍以上;盘铣加工虽然切削力及振动较大,但只要设备刚性足够,就能顺利完成切削加工^[13]。

表3 加工试验切削参数

| 加工方式 | 刀具尺寸 / mm | 行距 / mm | 步距 / mm | 切深 / mm | 转速 / (r·min ⁻¹) | 进给速度 / (mm·min ⁻¹) |
|------|-----------|---------|---------|---------|-----------------------------|--------------------------------|
| 插铣 | φ12 插铣刀 | 8 | 3 | 30 | 1600 | 100 |
| 盘铣 | φ160 盘铣刀 | - | 14 | 25 | 100 | 60 |

表4 盘插铣对比试验结果

| 加工方式 | 插铣 | 盘铣 |
|---|--------|-------|
| 材料去除总量 /mm ³ | 106920 | 56700 |
| 切削所用时间 /s | 1860 | 300 |
| 材料去除率 / (mm ³ ·s ⁻¹) | 57.484 | 189 |

表5 单通道粗加工所需时间对比 (h)

| 通道类型 | 高效强力复合铣 | 插铣侧铣复合 | 侧铣 | 数控电解 | 放电铣削 |
|------|---------|--------|------|------|------|
| 风扇盘 | 6.63 | 12.9 | 51.3 | 20.7 | 20.5 |
| 压气机盘 | 1.15 | 2.65 | 11.2 | 5.8 | 4.47 |

2 通道粗加工效率对比

通过查阅航空制造工程手册并结合生产加工经验可推,盘铣、插铣、侧铣在加工钛合金时的材料去除率通常能分别达到 380mm³/s、60mm³/s、12mm³/s。数控电解加工时,需要阴极工具分别以叶盆、叶背、叶根为基准走刀 3 次完成通道粗加工,根据叶盘轴向厚度计算加工所需时间^[14]。高效放电铣削加工效率取决于设备性能,国内已知电火花加工机床的最大材料去除率可达 30mm³/s^[15]。以此为依据对风扇盘与压气机盘单通道粗加工时间进行估算,计算结果如

表 5 所示。对比计算结果可知,高效强力复合铣加工效率最高,节省至少 1/2 以上时间,是一种高效率的叶盘通道粗加工方法。

结 论

为了解决钛合金开式整体叶盘通道粗加工效率低下的问题,本文分析了几种能够用于叶盘通粗加工的工艺方法,将各方法的加工特点、局限性及使用范围进行对比。

在此基础上提出了一种高效强

力复合铣削工艺方法,即盘铣、插铣、侧铣高度集成。以某型号航空发动机的一级风扇盘与一级压气机盘为对象,进行加工过程的仿真分析。

通过盘插铣工艺对比试验,验证了高效强力复合铣削的工艺可行性。分别估算各种方法完成通道粗加工所需时间并进行对比,证明了高效强力复合铣削工艺的高效性。

本文有参考文献 15 篇,因篇幅所限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 良辰)