

基于几何特征分解和环状切片的整体叶轮五轴混合加工工艺规划方法*

唐新宇¹, 汪祥¹, 李昊翔¹, 邓晓鹏¹, 赵明宇¹, 刘长青¹, 乔辉²

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016;
2. 机械工业第六设计研究院有限公司, 郑州 450007)

[摘要] 整体叶盘、叶轮等航空发动机零件形状复杂、精度要求高, 对传统加工方法提出了很大挑战。混合加工技术结合了增、减制造技术优点, 是解决复杂零件加工问题的有效手段。针对以上问题, 基于几何特征将叶轮分解为叶片与叶盘两个部分, 利用五轴环状切片方法规划了叶轮的增减材混合加工工艺, 并在自主搭建的五轴混合加工平台基础上, 对叶轮进行了加工试验, 验证了该混合加工工艺规划方法的可行性。

关键词: 整体叶轮; 环状切片; 增减材混合加工; 特征分解; 增材制造

Five-Axis Additive-Subtractive Hybrid Machining Process Planning Method for Blisk Based on Geometric Feature Decomposition and Annular Slicing

TANG Xinyu¹, WANG Xiang¹, LI Haoxiang¹, DENG Xiaopeng¹, ZHAO Mingyu¹, LIU Changqing¹, QIAO Hui²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. SIPPR Engineering Group Co., Ltd., Zhengzhou 450007, China)

[ABSTRACT] Aero-engine parts such as blisks and impellers have complex shapes and high precision requirements, which pose great challenges to traditional processing methods. Additive-subtractive hybrid machining method can be used to machine before obstacles formed, which is an effective way to solve complex part processing problems. In view of the above problems, the impeller is decomposed into two parts, the blade and the disc based on geometric features. The five-axis annular slicing method is used to plan the additive-subtractive hybrid machining process of the impeller. Based on a self-built five-axis hybrid processing platform, an impeller was processed and tested to verify the feasibility of the hybrid processing planning method proposed in this paper.

Keywords: Integral impeller; Annular Slicing; Additive-subtractive hybrid manufacturing; Feature decomposition; Additive manufacturing

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.08.081

航空航天制造业涉及多个专业和学科, 在国民经济和国防建设中具有重要作用。叶轮作为航空发动机等透平机械的核心部件, 是一类具有代表性且造型比较规范的通道类复杂零件。加工精度及表面粗糙度对叶轮的能有很大影响。叶轮通常具有复杂型腔结构, 叶片表面常为自由曲面, 形状复杂, 使得叶片间对于刀具的干涉问题也难以解决, 给制造带来了许多困难^[1-2]。此外, 其工作在高温、高压、高转速条件下, 对材料有严格

要求, 所以通常采用钛合金、高温高强度合金等难加工金属材料。由于合金材料的难加工特性和叶片加工的复杂性, 目前叶轮制造技术通常是将叶片与叶盘分体制造, 在一定程度上降低了叶片的加工难度, 却也带来了新的问题: 叶片与叶盘之间通常使用螺栓或榫卯结构进行连接, 增加了结构的复杂性以及削弱了整体结构的力学性能^[3]。

混合加工是指在一台设备上可实现两种不同机理的加工过程^[4-5]。增减材混合加工同时具有加工范围广与表面质量高的优点, 显著地提高了难加工结构和难加工材料的加工效率, 是解决叶轮这类复杂零件加工问题的

* 基金项目: 南京航空航天大学教师能力提升研究重点课题 (1611JF0502Z)。

有效手段,也是未来机械制造业发展的一个新的趋势^[6]。然而,增减材混合加工在打印路径规划、工艺路线规划方面仍然没有有效的解决办法^[7]。

本研究通过对叶轮零件的特征分析,规划了叶轮的工艺路线,通过对叶盘和叶片的环形切片处理生成了适用于五轴增减材混合加工方法的打印路径,并在自主搭建的小型平台上打印出了叶轮模型,验证了算法的可行性。本研究为叶轮整体成型制造提供了新的方法,为后续的研究奠定了基础。

1 叶轮加工工艺研究现状

目前传统的叶轮制造方法主要分为精密铸造技术、精密锻造技术以及多轴数控铣削加工^[8-10]。

北京航空材料研究院于20世纪90年代研究成功了高温合金整体叶轮细晶铸造工艺,制造了以叶片为定向柱晶、轮盘为等轴晶的双性能整体叶轮,但不能实际应用^[11]。使用精密锻造技术制造叶轮的毛坯,既可以节省材料,也可以提高叶轮的疲劳强度与使用寿命。美国GE公司采用等温锻造技术成功制造了压气机整体叶轮转子,极大地提高了材料利用率^[12]。哈尔滨工业大学采用有限元分析软件模拟了叶轮的半固态挤压锻造过程,研究了叶轮锻造成形主要参数的变化规律^[13],并利用等温锻模技术加工出铝合金及钛合金整体叶轮^[14]。但其加工效率较低,且只能锻造型面较为简单的叶轮毛坯,精加工依然依靠整体成型后的多轴铣削。多轴数控铣削整体叶轮加工的研究也有很多:韩国全州全北国立大学的Min-Ho Cho等^[15]利用车间已有的叶轮高效加工方案,开发了一种基于案例的叶轮加工路径规划系统(CBIMS),通过分析比较新叶轮和已存在叶轮间叶片形状和加工区域的相似性,可快速创建叶轮的加工方案,极大地提高了整体叶轮的编程效率。瑞士丰泰Sulzer Innotec根据加工准则开发了自动生成叶轮加工路径的程序,加工窄的流道时,这种方法能够良好地适应刀轴方向和轴加速度的快速变化^[16]。

目前多轴数控铣削加工在整体叶轮制造中应用最为广泛,但也具有一定的局限性:多轴数控系统的路径生成较为困难^[17],且针对带冠整体涡轮等复杂叶面的大型涡轮依然很难解决加工过程中刀具与相邻叶片以及已加工表面的干涉问题。

混合加工可借助其增减材复合分层加工的天然优势,减少了加工深度以及铣削时的干涉结构,很好地解决了刀具干涉问题,同时极大地提高了材料利用率及加工效率。

华中科技大学创形创质实验室张海鸥教授开发了等离子熔积与铣削复合制造技术(Hybrid Plasma

Deposition & Milling, HPDM),用该工艺方法并复合三轴铣削精确成形,制造了螺旋桨叶轮模型^[18](见图1),极大地发挥了快速成形制造技术的优势,提高了生产效率,缩短了制造周期。但其主要研究方向是从三轴的角度进行加工,虽然也涉及五轴加工部分,但只涉及铣削,对于叶片部分的增材制造来说,仍是只沿Z轴进行切片堆积,难以解决复杂叶片增材制造时的支撑问题以及由于叶片延伸结构带来的刀具干涉问题。

因此,本文提出了五轴增材制造与五轴铣削集成的整体叶轮加工工艺,既避免了堆叠过程中的支撑结构又解决了刀具干涉问题。

2 叶轮整体式混合加工工艺方法研究

整体式叶轮的加工可按其几何结构分解为叶盘和叶片两部分,先加工叶盘,然后在叶盘上直接加工叶片,实现叶轮的整体成形。其中叶盘为回转体结构,叶片为不规则曲线薄片结构,可分别使用与其特征相适应的五轴切片技术进行打印。工艺方法规划流程如图2所示。

2.1 叶轮五轴打印基本思路

如前所述,叶轮被划分为回转体结构的叶盘以及薄片结构的叶片。叶盘部分可沿其回转母线的各处法线方向进行切片,使得各层沿母线方向进行堆叠,避免台阶效应以及支撑结构。同时可充分将回转体结构的特点与五轴机床的C回转轴相结合,加工过程中打印头仅作母线截面内运动,回转成形运动由C轴完成,减少运动复杂度,提高成形精度。

对于叶片部分可利用环状切片方法或根据其发生线的方向作截面切片,使得加工过程中叶片沿其发生线逐渐“生长”。叶片的打印直接在叶盘上进行,叶盘回转一周的过程中,打印头在各叶片分布位置上打印各叶片的第一层,随后提高Z轴,继续打印下一层,这样可以使得每个叶片的两层之间有充分的冷却时间,减少热变形。

2.2 增、减材加工的混合方式

采用增、减材加工交替进行的方式进行混合加工。

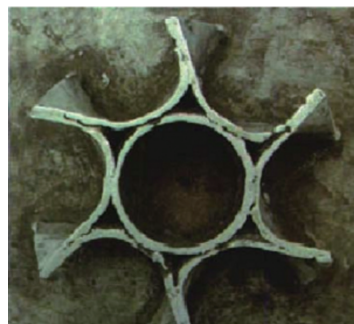


图1 HPDM制造的螺旋桨叶轮模型
Fig.1 Propeller wheel model manufactured by HPDM

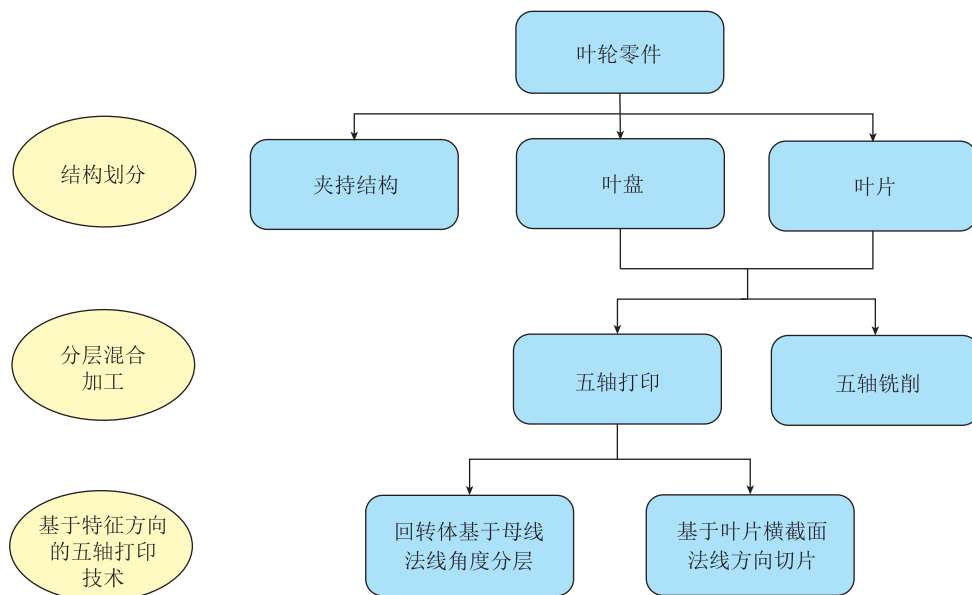


图2 叶轮混合加工方法

Fig.2 Impeller hybrid machining processing method

对于叶片结构,每打印一定层数(高度)后进行一次铣削,可有效避免完全成形后进行铣削时带来的刀具干涉问题。

此外还需额外考虑夹持问题,普通增材加工技术中仅需工件附着在底盘上便可持续加工,而在混合加工过程中有切削力的存在,因此必须有夹持结构。夹持结构可根据具体情况额外设置,加工完成后去除,也可选用工件自身已加工部分。

2.3 叶轮混合加工具体刀轨规划

本项目中选择了一种较为简单的叶轮结构进行加工工艺的规划。如图3所示,其叶盘为普通圆环状,叶片截面为一拟合曲线经平移得到的闭合轮廓,沿拟合曲线一端的径向进行延伸。叶片沿圆周方向等距分布共18片,间距为 20° 。

2.3.1 叶盘混合加工工艺规划

由于叶盘为简单的回转体,可利用五轴机床的优点进行不同于普通三轴切片的方式进行增材制造,其加工工艺如下:由于其结构为圆环状,中心有孔,因此可以在一圆柱体表面进行堆叠,待加工完成后去除中心的圆柱体即可。设计图4所示的心轴,其底部的3个延伸体可以嵌入三爪卡盘的槽中,起到支撑待加工叶盘的作用。此时将 B 轴旋转 90° ,则心轴的圆柱面母线变为水平方向,这时将挤出头贴近圆柱面, C 轴旋转便可以使挤出头沿圆周方向在整个圆柱面上堆叠材料,抬升 Z 轴即相当于沿径向延伸堆叠材料,这边实现了以一系列同心圆进行分层。在加工一层的过程中,挤出头始终保持在心轴的最高母线上,只进行 X 轴方向的移动。例如,以

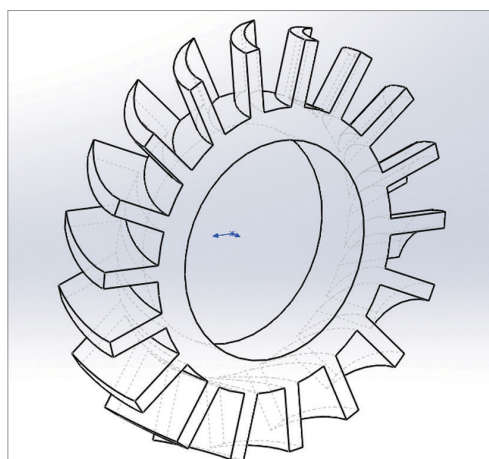


图3 测试叶轮模型

Fig.3 Experimental impeller model

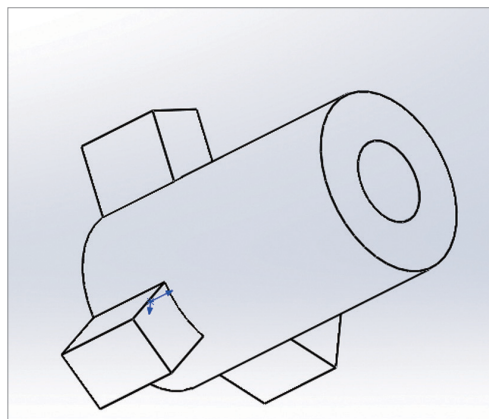


图4 支撑心轴

Fig.4 Support mandrel

0.2mm 为层高,0.5mm 为行间距,在每一层加工时,保持挤出头位置不变,C 轴旋转 360°,然后挤出头沿 X 轴移动 0.5mm,C 轴再次旋转 360°,如此往复直至 X 移动 12mm (即叶盘的厚度),然后 Z 轴抬升 0.2mm,进行下一层堆叠,这样便实现了径向延伸加工出盘状零件。其挤出量可按照等角度划分,设 C 轴转角为 $\Delta\theta$,心轴半径为 r ,Z 轴抬升高度为 z ,挤出量 Δl 计算公式为: $\Delta l = \Delta\theta \cdot (r+z)$ 。

考虑到节省材料以及减重的需要,使用此种方法制造盘状零件时也可以根据填充率的概念,对内部实行网格状填充,其挤出路径规划如下:首先底层按照 0.5mm 行距完全堆叠 3 层作为内表面,此后的堆叠中采用图 5 中的路径,首先挤出①~④ 4 条圆周,作为两侧的“外墙”,然后 C 轴每转一定角度 $\Delta\theta$,挤出头同步从②的 X 坐标移至③的 X 坐标,如此往复,便可沿圆周方向堆叠出蛇形折线,在 Z 轴提升至下一层后,C 轴先空转 $\frac{\Delta\theta}{2}$,然后重复上一层的步骤,使相邻两层的折线交错为网格状,提升了填充结构的强度。在最外圈同样的完全填充 3 层,作为“封顶”。

当堆叠工作完成后,便可以切换立铣刀分别贴近两侧表面,只需旋转 C 轴即可完成两侧表面的铣削加工,提高表面质量及尺寸精度。然后将 B 轴转回 0° 水平位置,对圆环外圆周面进行铣削。

特别的,当叶盘环径较大,立铣刀无法在堆叠完成后一次完成对两侧“外墙”表面的加工时(长度不足),则可进行分层复合加工,每堆叠一定高度边进行一次铣削。

2.3.2 叶片环状切片混合加工工艺规划

如图 6 所示,叶片截面形状为一拟合曲线平移得到,基本加工思想是首先在叶盘圆柱面上走出曲线轨

迹,然后 C 轴偏转一微小角度,重复走一次曲线轨迹实现曲线沿圆周方向扩展,如此反复直至加工出叶片的厚度。曲线轨迹的拟合通过采样一定数量的点数,使用 G1 直线插补指令来逼近原曲线。如图 7 所示,加工时,原曲线上一采样点直角坐标系下的坐标 (x, y) 的 x 坐标由挤出头 X 轴运动到达,而 y 坐标则转变为圆周方向的 C 轴转动来实现,转角 $\theta = \frac{y}{r+z} \times \frac{180^\circ}{\pi}$,由此可以将一系列采样点坐标 (x_i, y_i) 变为 (x_i, θ_i) ,同一层中相邻两曲线的微小转角由给定圆周方向偏移量 0.5mm 确定, $\Delta\theta = \frac{0.5}{r+z} \times \frac{180^\circ}{\pi}$ 。这种分层方式其实与原模型有误差,由于层高上升,相同弧长 y 不能够保证整个叶片沿曲线一端的径向延伸,其末端相比于底层在 Y 轴方向会变宽。如果严格限制叶片平行于一条径向延伸,每一层

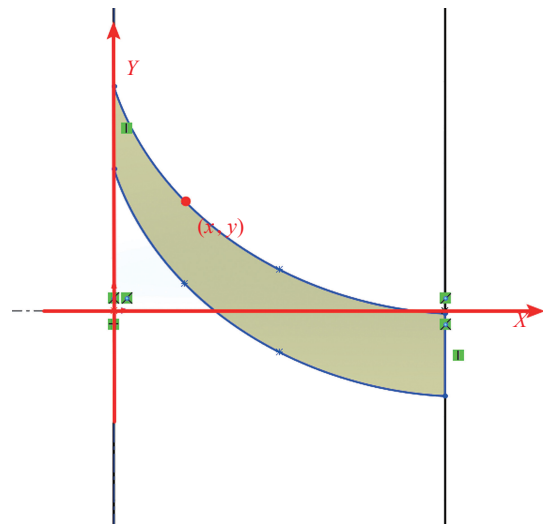


图 6 叶片截面曲线
Fig.6 Section curve of blade

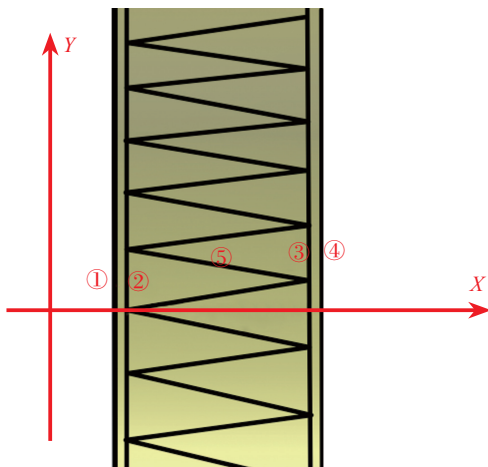


图 5 叶盘填充路径
Fig.5 Filling path of disc

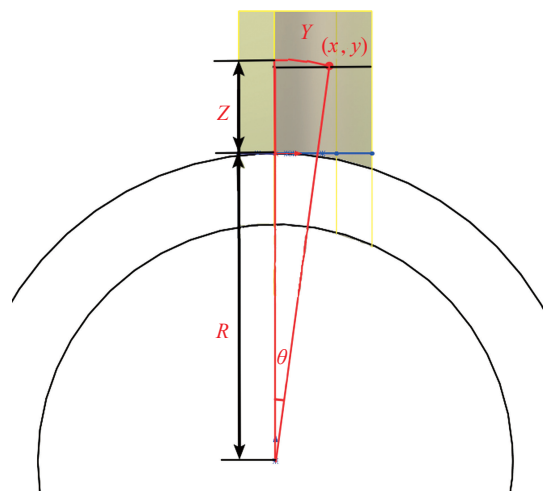


图 7 竖直加工叶片坐标换算
Fig.7 Coordinate conversion of blade machining

曲线按水平方向分割,则转角 $\theta' = \arctan\left(\frac{y}{r+z}\right) \cdot \frac{180^\circ}{\pi}$,

$\Delta\theta' = \arctan\left(\frac{0.5}{r+z}\right) \times \frac{180^\circ}{\pi}$, $\Delta z = \sqrt{y^2 + (r+z)^2} - z$ 。如此

便多带来了Z轴的偏移以及底部相切线下悬空的三角部分,得不偿失。鉴于叶盘直径较大,使用第一种分层方式带来的误差并不大,且可以通过铣削加工完全消除,因此使用第一种分层方法更为合理。

加工中A轴(即送料机)运动量则由计算下一点偏移量得出:

$$\Delta l = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}$$

根据立铣刀长度与叶片长度,叶片每堆叠到一定层高以后便换立铣刀对叶片表面进行铣削加工,其铣削路径可根据当前层高的叶轮模型使用UG或CATIA等CAM软件快速导出五轴铣削代码,在进行适配机床的后处理后与增材过程代码整合,如此反复进行混合加工即可完成在叶盘上直接加工出叶片。

3 叶轮加工试验

3.1 硬件平台介绍

混合加工平台由铣削机床与3D打印设备集合而成。该平台由一小型三轴雕刻机加装摇篮式摆台改装而来,从而拥有五轴运动功能。

从平台适用性上考虑,可与五轴铣削机床集成的增材制造装置有直接金属激光烧结技术(Direct Metal Laser-Sintering, DMLS)^[7]以及目前市场上普遍的熔融沉积成形技术(Fused Deposition Modeling, FDM),FDM技术主要使用PLA或ABS等塑料材料,其设备价格也便宜很多。由于研究目的是为混合加工装置和工艺验证初步提供研究的平台,因此从成本和技术上考虑,选择使用FDM装置为本机床集成的增材制造装置。

FDM装置包括挤出头、送料机构以及温度控制系统。本研究中将FDM打印喷头相连的直线导轨安装在主轴夹具上,实现增减材刀具的固结合,使两者可以使用同一套运动控制机构。

送料机构及其电机使用远程送料方式,整套送料机构安装在机床的龙门横梁上,通过送料管与挤出头相连。

由于挤出头已经固连到主轴电机上,考虑到混合加工时挤出头、铣刀与工件三者之间不得发生干涉,且FDM增材制造时是以Z轴分层加工的,因此应保证在挤出头工作时挤出头与铣刀头两者之间挤出头的Z轴位置最低,而换为铣刀工作时,铣刀应处于最低点。故需要一套自动换刀装置对挤出头固连在主轴电机上的

Z轴位置进行升降,从而实现混合加工过程中两种加工装置的互不干扰。其自动换刀信号的指令通过M指令宏编程实现。

3.2 加工试验

为验证本文提出的叶轮五轴整体式加工工艺方案的可行性,采用刀轨分析过程中使用的叶轮模型(图3)作为加工对象。使用C++语言编写了对应的切片程序,生成五轴打印G代码,并通过C++编写后处理程序将五轴铣削代码、五轴打印代码以及换刀代码集成到一起,生成最终的自动混合加工程序。加工程序的刀轨仿真如图8所示。

加工中使用材料为PLA,叶盘及叶片打印层高均为0.2mm,叶盘内部填充率约50%,打印速度50mm/min,使用 $\phi 3.5\text{mm}$ 立铣刀进行铣削加工。

图9为叶盘增材加工过程,图10为叶片铣削过程。

3.3 试验结果及讨论

通过试验加工得到的叶轮成品如图11和图12

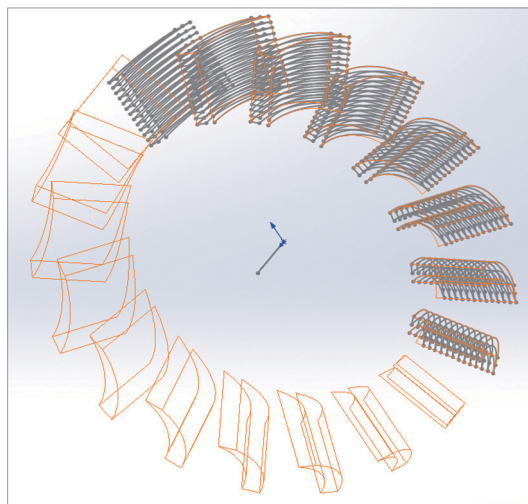


图8 叶片加工刀轨
Fig.8 Tool path of blade machining



图9 在心轴上加工叶盘
Fig.9 Processing leaf disc on mandrel



图 10 叶片铣削
Fig.10 Blade milling



图 11 增材制造叶轮成品
Fig.11 Finished impeller by additive manufacturing



图 12 混合加工叶轮成品
Fig.12 Finished impeller by hybrid machining

所示,其中图 11 为仅通过增材加工方法得到的叶轮,图 12 为通过混合加工方法得到的叶轮。仅增材方法得到的叶轮已具备完好的叶轮外形,同时叶片部分外形在没有支撑结构的情况下也没有变形,验证了上述工艺规划方法中的五轴增材轨迹规划部分的可行性。混合加工得到的叶轮成品表面平滑,全部都经过铣削加工,叶盘的径向以及叶片高度方向上都为增材过程

中分层多次铣削,验证了通过增减材分层复合加工方法的有效性。

由于本试验的增材加工方法仅为普通的 FDM 技术,加工的成品材质为塑料,目前暂不具备实用价值,且其主要目的为对叶轮五轴混合加工规划方法的验证,故并未对其精度、表面质量、强度等指标进行精确地检测及分析。

4 结论

通过五轴混合加工验证平台加工得到的整体叶轮具有结构上的整体性,叶片与叶盘之间省去了复杂的连接结构,大大减少了零件数量。本文混合加工试验得到的叶轮成品具有较好的表面质量和加工精度,完成了对 FDM 技术与铣削集成的混合加工工艺的验证,也体现了该混合加工平台的工艺验证功能,为后续的研究奠定了基础。今后的工作应当从以下 3 方面开展:(1)建立统一的混合加工指令生成方法;(2)建立智能化、集成化的软件系统;(3)建立全闭环控制方式。

参考文献

- [1] 李仲宇,李迎光,刘长青.基于 5+1 轴的增减材混合加工验证平台设计与研制[J].航空制造技术,2018,61(8):97-101.
- LI Zhongyu, LI Yingguang, LIU Changqing. Design and development of an additive-subtractive-integrated hybrid machining validation platform based on 5+1 axes[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(8): 97-101
- [2] CHO M H, KIM D W, LEE C G, et al. CBIMS: Case-based impeller machining strategy support system[J]. Robotics & Computer Integrated Manufacturing, 2009, 25(6): 980-988.
- [3] 周火金.复杂叶轮零件的熔积—铣削复合制造研究[D].武汉:华中科技大学,2012.
- ZHOU Huojin. Research on fusion-milling composite manufacturing of complex impeller parts[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012
- [4] 张曙.增材制造和切削混合加工机床[J].机械制造与自动化,2015(6):1-7.
- ZHANG Shu. Additive manufacturing and cutting hybrid machine tools[J]. Machine Building & Automation, 2015(6): 1-7
- [5] LAUWERS B, KLOCKE F, KLINK A, et al. Hybrid processes in manufacturing[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2014, 63(2): 561-583.
- [6] REN L, SPARKS T, RUAN J, et al. Integrated process planning for a multiaxis hybrid manufacturing system[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2010, 132(2): 237-247.
- [7] NEWMAN S T, ZHU Z, DHOKIA V, et al. Process planning for additive and subtractive manufacturing technologies[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2015, 64(1): 467-470.
- [8] 袁绍华,张海鸥,王桂兰,等.熔积和铣削复合精密无模快

速制造金属零件[J]. 新技术新工艺, 2011(11): 74-77.

YUAN Shaohua, ZHANG Haiou, WANG Guilan, et al. Fusion and milling compound precision moldless rapid manufacturing of metal parts[J]. New Technology & New Process, 2011(11): 74-77.

[9] 徐家文. 整体叶轮的特种加工方法[J]. 航空精密制造技术, 1992(4): 19-21.

XU Jiawen. Special processing method of blisk[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 1992(4): 19-21.

[10] 黄春峰. 现代航空发动机整体叶盘及其制造技术[J]. 航空制造技术, 2006, 49(4): 94-100.

HUANG Chunfen. Modern aviation engine blisk and its manufacturing technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2006, 49(4): 94-100.

[11] 汤鑫, 曹腊梅, 盖其东, 等. 高温合金双性能整体叶盘铸造技术[J]. 航空材料学报, 2006(3): 93-98.

TANG Xin, CAO Lamei, GAI Qidong, et al. Superalloy double performance blisk casting technology[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2006(3): 93-98.

[12] SHAN D B, XU W C, LU Y. Study on precision forging technology for a complex-shaped light alloy forging[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004 (151): 289-293

[13] 刘芳, 单德彬, 吕炎, 等. 压气机转子的表面造型及等温精密成形工艺[J]. 推进技术, 2003, 24(5): 474-477.

LIU Fang, SHAN Debin, LÜ Yan, et al. Surface modeling of compressor rotor and isothermal precision forming process[J]. Journal of Propulsion Technology, 2003, 24(5): 474-477.

[14] 刘芳, 林忠钦, 单德彬, 等. 2A70 铝合金转子等温闭塞式锻造工艺研究[J]. 机械工程学报, 2005, 41(9): 161-165.

LIU Fang, LIN Zhongqin, SHAN Debin, et al. Study on isothermal blocking forging process of 2A70 aluminum alloy rotor[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(9): 161-165.

[15] CHO M H, KIM D W, LEE C G, et al. CBIMS: Case-based impeller machining strategy support system[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2009, 25(6): 980-988.

[16] INNOTECH S. High-speed milling of large impellers[J]. World Pumps, 2008, 2008(507): 26-27.

[17] YOUNG H T, CHUANG L C, GERSCHWILER K, et al. A five-axis rough machining approach for a centrifugal impeller[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2004, 23(3-4): 233-239.

[18] 张海鸥, 熊新红, 王桂兰, 等. 等离子熔积成形与铣削光整复合直接制造金属零件技术[J]. 中国机械工程, 2005, 16(20): 1863-1866.

ZHANG Haiou, XIONG Xinhong, WANG Guilan, et al. Plasma fusion forming and milling finishing technology for direct manufacturing of metal parts[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(20): 1863-1866.

通讯作者: 刘长青, 博士, 副教授, 研究方向为航空航天复杂结构件数字化制造与智能制造, E-mail: lchq0123@126.com。

(责编 铃兰)

(上接第75页)

Group 28th Annual Education Training Conference. St.Louis: Additive Manufacturing Users Group, 2016.

[24] NILSSON P, APPELGREN A, HENRIKSON P, et al. Automatic ultrasonic testing for metal deposition[C]//Proceeding of 18th World Conference on Non-destructive Testing. Durban: World Conference on Nondestructive Testing, 2012.

[25] 凌松. 增材制造技术及其制品的无损检测进展[J]. 无损检测, 2016, 38(6): 60-64.

LING Song. Additive manufacture technique and related NDT for its products[J]. Nondestructive Testing, 2016, 38(6): 60-64.

[26] LOTT P, SCHLEIFENBAUM H, MEINERS W, et al. Design of an optical system for the in situ process monitoring of selective laser melting (SLM)[J]. Physics Procedia, 2011, 12(1): 683-690.

[27] RAO P, LIU J, ROBERSON D, et al. Online real-time quality monitoring in additive manufacturing processes using heterogeneous sensors[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2015, 137(6): 061007.

[28] LEVESQUE D, BESCOND C, LORD M, et al. Inspection of additive manufactured parts using laser ultrasonics[C]//Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Incorporating the European-American Workshop on Reliability of Nde. Melville: AIP Publishing LLC, 2016.

[29] ZENZINGER G, BAMBERG J, LADEWIG A, et al. Process monitoring of additive manufacturing by using optical tomography[C]//41st Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation Aip Conference. Melville: AIP Publishing LLC, 2015: 164-170.

[30] 景绿路. 国外增材制造技术标准分析[J]. 航空标准化与质量, 2013(4): 44-56.

JING Lülu. Analysis of foreign additive manufacturing technical standards[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2013(4): 44-56.

[31] 张渝, 侯慧鹏, 雷力明. 高温合金增材制造标准分析[J]. 材料导报, 2017, 31(29): 62-65.

ZHANG Yu, HOU Huipeng, LEI Liming. Analysis of standardization in super alloy additive manufacturing[J]. Materials Review, 2017, 31(29): 62-65.

[32] ISO 17296-3. Additive manufacturing-general principles (Part 3): Main characteristics and corresponding test methods[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2014.

[33] 刘琼馨, 王顺权. 我国增材制造产业综合标准化技术体系的建议[J]. 理化检验(物理分册), 2017, 53(9): 651-654.

LIU Qiongxin, WANG Shunquan. Suggestions for technology system of integrated standardization for additive manufacturing industry in china[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2017, 53(9): 651-654.

通讯作者: 高丽敏, 博士, 高级工程师, 研究方向为无损检测与健康监测, E-mail: gaolimin@comac.cc。

(责编 铃兰)