

具有误差修正功能的叶片变预压量抛光技术*

陈志同¹, 易鹏², 朱正清¹, 张云¹, 项德义², 苏帅¹, 李珊珊¹

(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191;

2. 中国航发南方工业有限公司, 株洲 412002)

[摘要] 针对目前部分叶片铣削后具有较大轮廓度误差以及微小进排气边, 采用力控抛光方法难以达到预定要求的状况, 提出了一种利用柔性金刚石抛光轮的变预压量误差修正抛光方法。首先, 利用在机快速测量装置测量获取叶片待加工余量情况, 然后通过分析测量数据确定叶片抛光轨迹和抛光预压量, 从而达到对抛光去除量大小的控制, 实现叶片型面自适应抛光的结果。最后, 利用常规3轴机床对某型号叶片进行了包含叶根过渡圆弧的全型面抛光试验, 试验结果表明, 用该方法抛光后, 叶片型面轮廓度由抛光前的0.02~0.12mm 改变为-0.04~-0.005mm, 余量稳定控制到了公差带内。与传统的方法相比, 采用高精度超硬磨料复杂母线弹性抛光轮可以实现叶片非均匀去量, 有效地改善了叶片型面轮廓度。该技术可以广泛用于中小叶片的低成本高精度抛光加工。

关键词: 定轨迹抛光; 误差修正; 变预压量; 叶片; 柔性金刚石抛光轮

New Aero-Engine Blade Polishing Technology Available to Correct Machining Errors Through Presetting Wheel Contact Deformation

CHEN Zhitong¹, YI Peng², ZHU Zhengqing¹, ZHANG Yun¹, XIANG Deyi², SU Shuai¹, LI Shanshan¹

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. AECC South Industry Co., Ltd., Zhuzhou 412002, China)

[ABSTRACT] To decrease or eliminate milled blades' profile errors and to solve the problem in leading/trail edge polishing under presetting pressure control, a new polishing technology available to correct machining errors through presetting contact deformation for wheels was proposed in this paper. Firstly, to obtain the real distribution of machining margin on the surface of blades. Secondly, to determine the different material depth of each local position on the blade surface to be removed with polishing and to adjust the polishing paths and presetting the wheel deformation contacting with workpiece according the obtained depths distribution. Finally, to polish the engine blades with a conventional three-axis machine tool to verify the capability of the proposed method. The polishing results show that the blades profile error distribution was changed from 0.02~0.12mm to -0.04~-0.005mm after polishing, which was successfully controlled within the designed tolerance. Comparing with the conventional polishing technology, the proposed method is of the ability to remove different quantity of material in depth with flexible diamond polishing wheel and to increase blade profile accuracy, which can be widely used to realize the low cost and high precision polishing of small and medium size aero-engine blades.

Keywords: Presetting tool bath polishing; Error correction; Variable preload; Aero-engine blade; Flexible diamond polishing wheel

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.017.080

叶片是航空发动机中数量最多、加工难度最大、生产工作量最大的核心零件之一, 其加工质量和效率直接决定航空发动机的整体制造水平和气动性能^[1]。新型

高性能叶片结构向着高精度、大弯掠、壁厚薄、进排气边小等方向发展, 叶片型面的精密加工成形和表面抛光加工难度越来越高。同时, 抛光加工表面质量对叶片的疲劳强度和可靠性具有显著的影响, 尤其是对叶根和小半径进排气边等难抛光部位的表面质量提升意义重大。

* 基金项目: 国家科技重大专项(2015ZX04001201)。

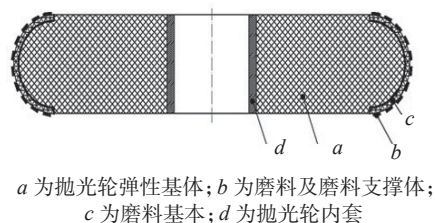
由于国外在叶片抛光技术方面对我国实行严密技术封锁,因此国内目前对于叶轮叶片的抛光仍然主要采用人工打磨抛光的方法,人工方法无法保证叶片具有稳定的加工质量,现已成为制约我国航空发动机制造的技术瓶颈。国内从20世纪50年代起就已经有大量科研机构和知名学者开始研究叶片的自动化抛光技术,崔海军等^[2]阐述了国内外抛光技术现状以及抛光难点,总结出了叶片抛光技术的发展趋势,指出了高效高质的自动化抛光的重要性。重庆大学黄云教授等^[3-5]在引进消化德国叶片砂带抛光技术方面开展了富有成效的研究工作,并在大型叶片抛光加工方面发挥了积极的作用,下一步希望将砂带抛光技术引入到整体叶盘抛光加工过程^[6]。北京胜为弘技公司在华中科技大学支持下也开发成功了一款6轴砂带抛光机床,成功用于大型汽轮机叶片的抛光加工^[7]。西北工业大学在叶片砂带磨削抛光和整体叶盘数控抛光方面也开展了长期研究工作^[8]。这些方法对于大型曲面和精度要求较低的曲面具有良好的适应性,但是上述研究大多局限于传统的压力控制式砂带抛光方法(虽然也有部分研究采用了百叶轮抛光工具,但是这些工具的稳定性较差,难以满足精密叶片和整体叶盘的抛光要求),难以解决小曲率半径进排气边的抛光加工难题和叶根等易干涉曲面的抛光加工问题,这是因为当曲面曲率半径很小时,砂带机构的庞大运动惯量大,限制了压力控制精度的提高,且砂带很难解决叶根区域的干涉问题。北京航空航天大学与秦川机床工具集团有限公司等单位合作研发出了高精度5轴联动叶片磨床QMK50A和QMK100,采用复杂母线超硬磨料砂轮和弹性复杂母线金刚石抛光轮解决了多家航空发动机企业的多种重要型号叶片高精度磨削与抛光加工难题^[9]。

为了进一步发挥弹性超硬磨料抛光轮^[10]的作用,本文提出了一种在常规3轴或4轴机床上进行叶片变预压量抛光加工的方法,并探索利用弹性抛光工具实现叶片加工误差修正的可行性。弹性金刚石抛光工具为本课题组所研制,其结构简单,可沿用加工中心的自动换刀方法进行拆装,其精度保持性好,可以制作成任意复杂型面,特别适合对小半径进排气边以及叶根过渡圆弧等微小结构进行抛光加工,实物如图1所示。

1 变预压量抛光加工和误差修正原理

本文提出的基于在机测量方法的叶片变预压量抛光技术,主要原理是通过检测获得叶片型面的轮廓度误差分布情况,并按照试验所获得的预压量和去除量之间的关系增大欠切误差较大区域抛光轮预压量来减少轮廓度误差,并通过多次抛光使不同位置的欠切高度差逐步缩小,同时达到修正加工误差和实现表面抛光加工的目的。

变预压量定轨迹抛光原理如图2所示。其中叶片测量可采用触发式测头^[11]和本课题组设计的特定环面测针。由于有抛光轮具有一定的弹性,实际的压紧量远大于实际的材料去除深度,因此可以适当降低在机检



(a) 抛光轮结构



(b) 抛光轮实物

图1 柔性抛光轮

Fig.1 Flexible polishing wheel

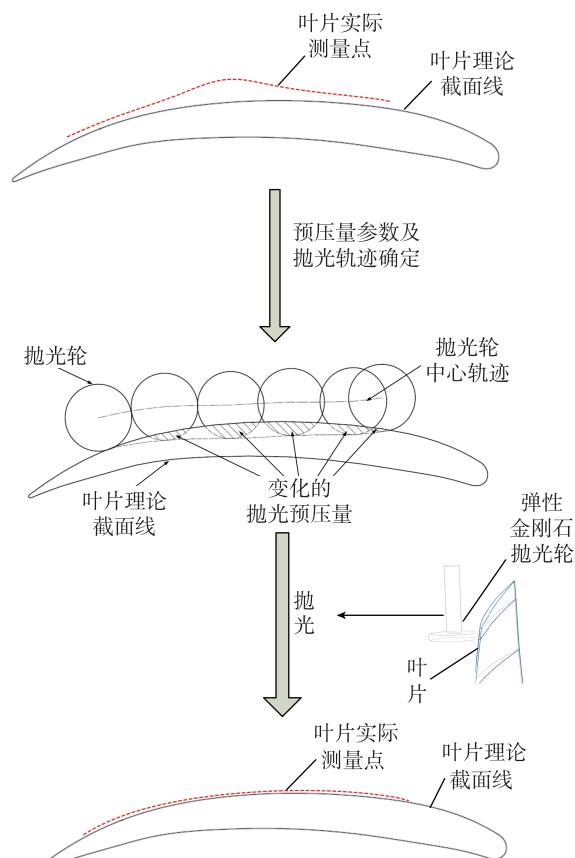


图2 变预压量抛光原理图

Fig.2 Schematic diagram of polishing with presetting contact deformation

测的精度要求。进一步对在机检测数据进行分析以获取叶片的轮廓度误差及余量分布状态,并根据试验所获得的压紧量与材料去除深度的对应关系确定叶片不同位置的抛光运动轨迹以及抛光轮和工件之间的预压力,最后采用本课题组研发的 CAD/CAM 软件生成抛光程序,并通过数控机床自动换刀来实现叶片的自动化抛光。

2 定轨迹抛光程序编制

2.1 抛光编程软件介绍

抛光轨迹和抛光参数合理与否,很大程度上决定了叶片抛光的质量与效率。本文利用北航复杂曲面先进加工技术实验室所开发的 BHCAM pro v1.0 软件进行抛光编程和抛光参数设置,其界面和试验叶片模型如图 3 所示,其界面功能与普通三维 CAD/CAM 软件基本相似,只是其中开发了某些对于叶片加工特定的功能,如本文方法所用到的定轨迹变预压力功能。

2.2 抛光轮去量分析

经过多次单因素控制抛光试验,得到了几种常用型号抛光轮抛光不锈钢叶片时抛光去除量随预压力变化的关系,由于论证本文方法试验所用到的抛光轮砂带粒度号为 400# 和 2000#,因此,此处只展示这两种型号的抛光去量关系,其结果如图 4 所示。

2.3 变预压力轨迹的确定

通过在机检测获取完叶片的型面轮廓及余量状态后,再结合抛光轮预压力与抛光去除量的关系可以确定变预压力的抛光轨迹。其抛光轨迹的生成依赖于本课题组自行开发的 BHCAM pro v1.0 软件,变抛光预压力的设置界面如图 5 所示,其中 t 和 α 为待抛光曲面参数(即曲面传参数 u 和 v),抬刀为抛光预压力,右边空白区域可以显示预压力与参数之间函数关系。通过对不同参数方向的参数值设定不同的预压力,设置点之间的预压力采用多项式拟合插值,则可以精确控制抛光轨迹以及达到指定去量要求。

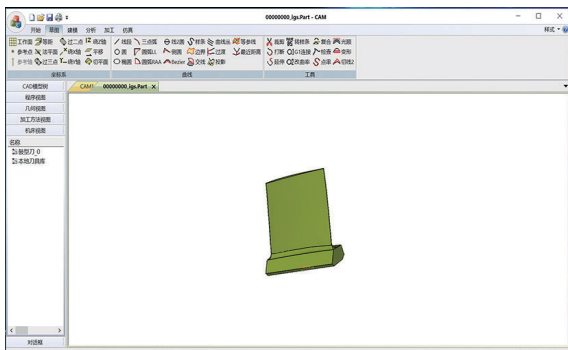
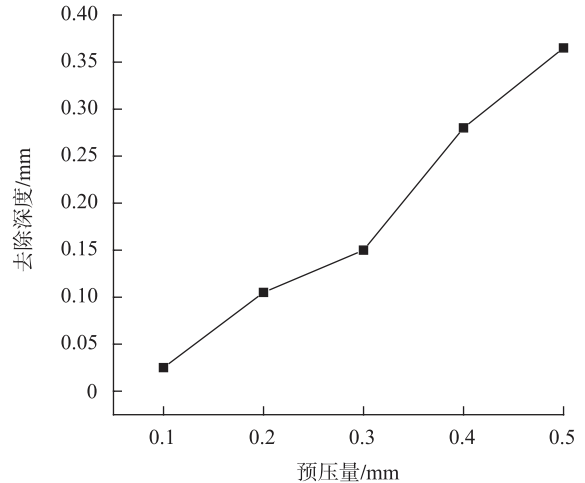


图3 编程软件及试验叶片模型

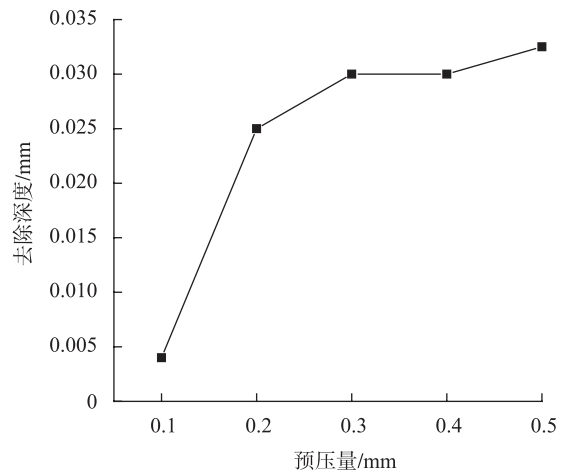
Fig.3 Programming software and blade model

3 叶片抛光试验及结果讨论

对某型号发动机叶片进行抛光试验,首先通过在机接触式位移传感器测量叶片 3 个截面,此 3 个截面为从



(a) 砂带粒度号为400#的抛光轮



(b) 砂带粒度号为2000#的抛光轮

图4 抛光去量与预压力的关系

Fig.4 Relationship between the material removed depth and presetting polishing wheel contacting deformation

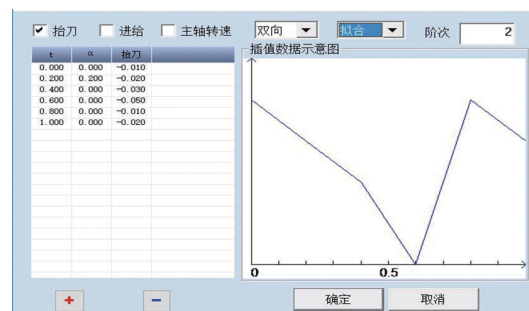


图5 抛光预压力设置界面

Fig.5 GUI of polishing wheel contacting deformation presetting

叶片最终测量截面线中选取有代表性的上中下3条截面线,记下其截面线所在参数值 u_1 、 u_2 、 u_3 。对于该试验叶片,其截面线截取位置如图6所示,其中每条截面线有17个测量点,为位移传感器间隔相同时间测量采取,其测量结果如图7所示。

根据3条截面线的测量结果可以判断叶片抛光前整体轮廓形状以及余量大小。从图7所示的测量结果来看,该叶片整体轮廓度较差,叶身波动差值约为0.02~0.012mm;不同截面波动差值也各有不同,但其在 u 参数方向余量波动基本一致,都为叶身中间余量较少,两边余量较大。

此次试验选用抛光轮砂带粒度号为2000#,由2000#粒度的抛光轮抛光去量随预压量变化的关系(图4(b)),可以将叶片两边预压量设为0.4mm,余量最小对应的 u 参数处的预压量设为0.1mm,中间采用线性函数拟合插值,在 v 方向,由于表面余量波动也相对较大,中间余量最小,两头余量大小不一,因此 v 方向的抛光预压量可以设为:0.4-0.1-0.2。中间采用线性函数拟合插值,其设置如图8(a)所示。按此设置的变预压轨迹,对叶片进行多层抛光和测量,根据每层抛光后位移传感器快速测量的结果可以适当修改预压量,以便更精确地

抛光叶片。生成的抛光轨迹如图8(b)所示。

在确定完抛光轨迹之后,选用型号为D40r7,砂带粒度号为2000#的抛光轮,对某型号叶片进行抛光,抛光过程如图9所示。

抛光后叶片实物表面前后对比如图10所示。在叶片模型上抽取参数分别为 u_1 、 u_2 、 u_3 的3条等参数线(即之前位移传感器测量截面线),然后通过三坐标测量机对抛光后的3条截面线进行测量,同样测量17个点,测量机测量的17个测量点与传感器测量的17个点可能不会在同一位置,但由于抛光完后叶片表面粗糙度相对很小,位置点之间的差值不会影响到测量值的变化,即测量截面整体轮廓的形状不会因测量点位置的不同而改变。通过对抛光完后的数据进行处理,得到抛光前后对比测量对比图(图11),叶片线轮廓度抛光后的值为-0.04~-0.005。另外,对同一型号其他叶片进行对照

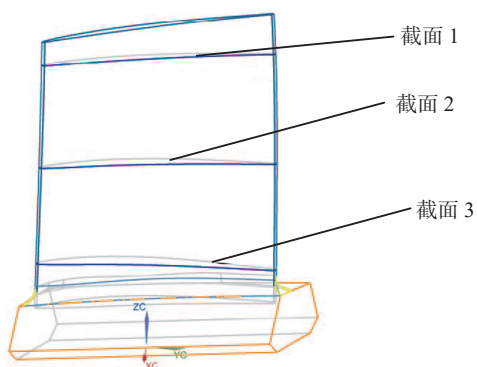


图6 测量截面线

Fig.6 Measuring sectional line

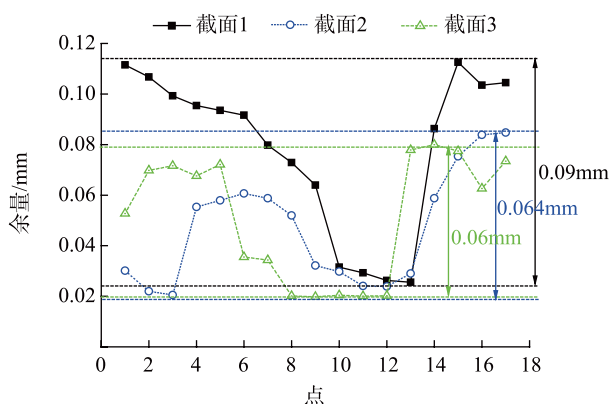
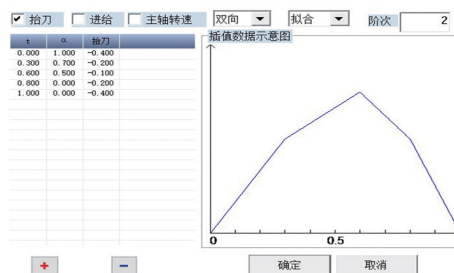
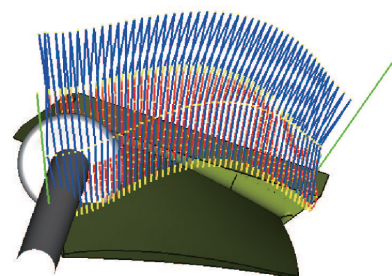


图7 抛光前测量结果

Fig.7 Measurement result before polishing



(a) 预压量设置



(b) 抛光轨迹

图8 叶片抛光路径

Fig.8 Polishing tool path of blade

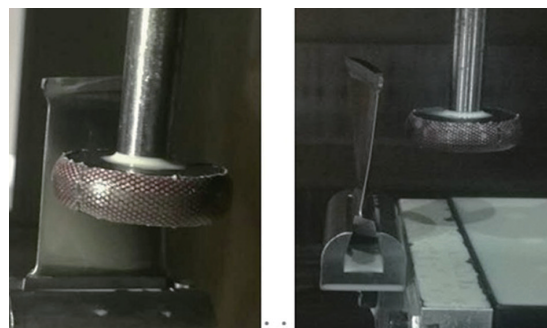
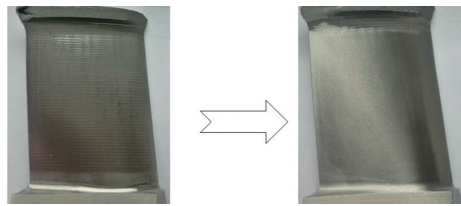
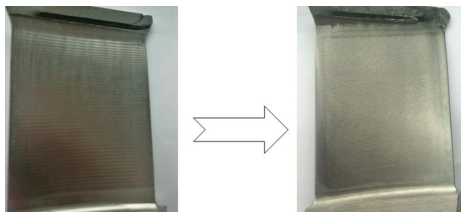


图9 叶片抛光试验

Fig.9 Polishing experiment of blade



(a) 叶盆抛光前后



(b) 叶背抛光前后

图10 抛光表面前后对比

Fig.10 Blade surface before and after polishing

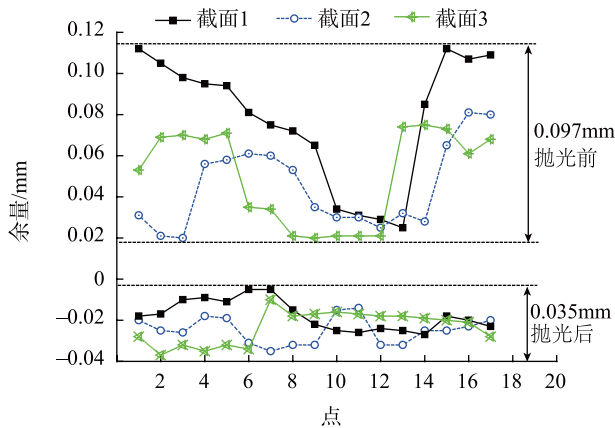


图11 抛光前后数据对比

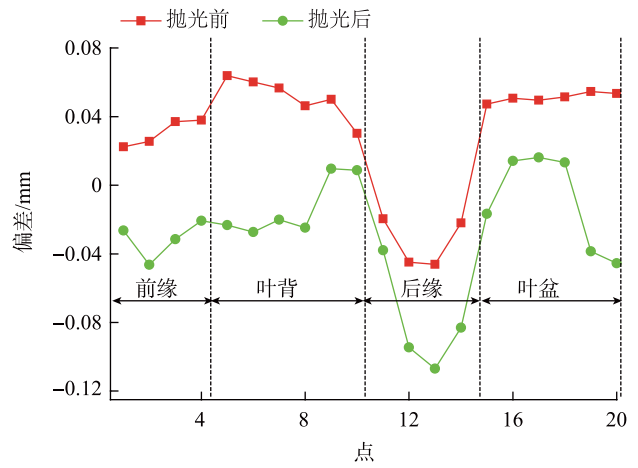
Fig.11 Data comparison before and after polishing

抛光试验,抛光过程中不使用本文所提的变预压抛光方法,直接恒预压抛光,其抛光结果如图 12 所示。可以看出,用常规的方法进行抛光,虽然能实现叶片抛光均匀去量,但抛光前后表面轮廓基本一致,并没有得到明显改善,再对比图 11 中的抛光结果,后者表面轮廓度明显得到改善。

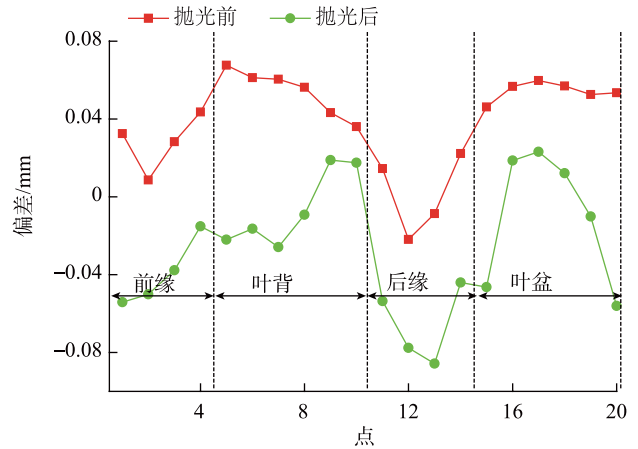
4 结论

(1) 提出了一种具有误差修正功能的叶片变预压抛光方法,开发了变预压抛光程序,实现叶片非均匀抛光去量,将叶片线轮廓度精度提高了 2 倍,并证实了本课题组所开发的长寿命复杂母线弹性金刚石抛光轮具有很强的修正叶片前道工序加工误差的能力。

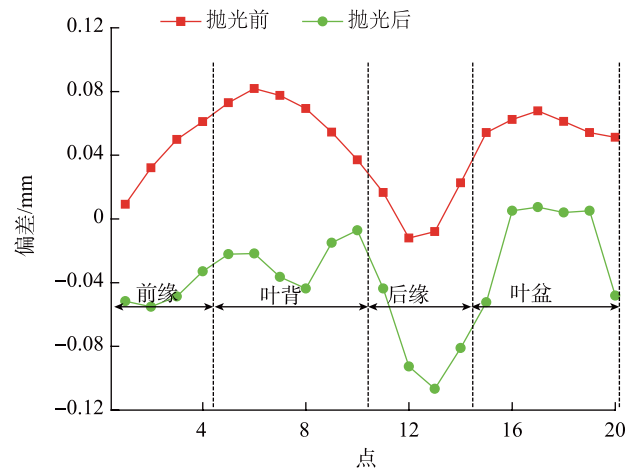
(2) 利用复杂母线抛光工具可以在 3 轴机床上实现叶片全型面数控抛光,通过试验的抛光前后数据对比可知,本文提出的定轨迹抛光技术能快速地完成叶片的型面抛光,叶片线轮廓度由抛光前的 0.02~0.12mm 改变为



(a) 截面 1



(b) 截面 2



(c) 截面 3

图12 同一型号叶片的常规抛光结果

Fig.12 Routine polishing results for the same type of blades

抛光后的 $-0.04 \sim -0.005\text{mm}$,叶身余量稳定控制到公差带内。本文提出的基于在机检测的定轨迹抛光技术,能解决表面余量不均匀的抛光问题,实现自动化抛光非均匀去量,有效地改善叶片表面轮廓度,提高表面一致性。

(下转第92页)

drilling of CFRP laminate[J]. Procedia CIRP, 2012, 1: 455-459.

[11] PHADNIS V A, ROY A, SILBERSCHMIDT V V. A finite element model of ultrasonically assisted drilling in carbon/epoxy composites[J]. Procedia CIRP, 2013, 8: 141-146.

[12] 高汉卿. 碳纤维增强树脂基复合材料宏细观切削过程仿真[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.

GAO Hanqing. The macro and micro simulation of cutting carbon fibre reinforced plastic composites[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.

[13] 杨志超. 基于应变监测的 CFRP 层合板钻孔分层缺陷机理研究[D]. 广州: 广州大学, 2016.

YANG Zhichao. Study on mechanism of holes defects in drilling of CFRP laminates based on strain monitoring[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2016.

[14] 姚运萍, 吴梦培, 徐雯. 碳纤维复合材料麻花钻钻轴轴向力的数值模拟[J]. 机械工程材料, 2015, 39(1): 107-110.

YAO Yunping, WU Mengpei, XU Wen. Numerical simulation on thrust force in drilling carbon fiber reinforced plastic[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2015, 39(1): 107-110.

[15] 高鑫. 玻璃纤维增强复合材料加工机理研究及有限元分析[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2015.

GAO Xin. Glass fiber reinforced composite materials processing mechanism research and finite element analysis[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2015.

[16] 佟沐霖. 碳纤维复合材料钻削过程仿真与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014.

TONG Mulin. Research on finite element analysis and experiment of drilling of carbon fiber reinforced polymer composites[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2014.

[17] 王卫滨. 碳纤维复合材料超声振动辅助制孔数值模拟及实验研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2016.

WANG Weibin. Numerical simulation and experimental study of ultrasonic vibration assisted drilling of carbon fiber composite material[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2016.

[18] 张承承, 王建军. 基于刚度退化的复合材料结构损伤研究进展[J]. 材料导报, 2016, 30(21): 8-13.

ZHANG Chengcheng, WANG Jianjun. Research advances in damage of composite strictures on stiffness degradation[J]. Materials Review, 2016, 30(21): 8-13.

[19] 陈燕, 葛恩德, 傅玉灿, 等. 碳纤维增强树脂基复合材料制孔技术研究现状与展望[J]. 复合材料学报, 2015, 32(2): 301-316.

CHEN Yan, GE Ende, FU Yucan, et al. Review and prospect of drilling technologies for carbon fiber reinforced polymer[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(2): 301-316.

通讯作者: 张臣, 博士、教授, 研究方向为数字化设计与制造、加工过程仿真、超声椭圆振动辅助切削技术、减阻结构设计与制造技术, E-mail: meeczhang@nuaa.edu.cn.

(责编 逸飞)

(上接第84页)

参考文献

[1] 于建华. 航空发动机叶片加工变形控制技术[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2016: 4-10.

YU Jianhua. Study on the distortion control technology for the machining of aero-engine blades[D]. Beijing: Beihang University, 2016: 4-10.

[2] 崔海军, 张明岐. 航空发动机叶片抛光技术现状及发展趋势[J]. 航空制造技术, 2015, 58(11): 128-131.

CUI Haijun, ZHANG Mingqi. Current situation and development trend of aircraft engine blade polishing technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(11): 128-131.

[3] 黄云, 黄智. 现代砂带磨削技术及工程[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2009: 12-16.

HUANG Yun, HUANG Zhi. Modern abrasive belt grinding technology and application in engineering[M]. Chongqing: Chongqing University press, 2009: 12-16.

[4] XIAO G J, HUANG Y. Constant-load adaptive belt polishing of the weak-rigidity blisk blade[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78(9-12): 1473-1484.

[5] XIAO G J, HUANG Y, YIN J C. An integrated polishing method for compressor blade surfaces[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88(5-8): 1723-1733.

[6] 黄云, 肖贵坚, 邹莱. 整体叶盘抛光技术的研究现状及发展趋势[J]. 航空学报, 2016, 37(7): 2045-2064.

HUANG Yun, XIAO Guijian, ZOU Lai. Current situation and development trend of polishing technology for blisk[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(7): 2045-2064.

[7] 刘树生, 杨建中. 叶片六轴联动数控砂带磨床与数控砂带磨削单元化[J]. 航空制造技术, 2010, 53(4): 32-37.

LIU Shusheng, YANG Jianzhong. 6-axis hybrid NC belt-grinding machine for blade and unitization of NC belt grinding[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(4): 32-37.

[8] 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, 2013, 33(3): 573-578.

[9] 宋瑞祯. 复杂母线柔性抛光工具研制及抛光工艺参数优化[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2017: 8-11.

SONG Ruizhen. Development of flexible polishing tool with complex generatrix and optimization of polishing parameters[D]. Beijing: Beihang University, 2017: 8-11.

[10] 陈志同. 一种具有局部增强结构的复杂母线抛光轮及其制作方法: 201610168879.X[P]. 2016-03-23.

CHEN Zhitong. A complex bus polishing wheel with local reinforcing structure and manufacturing method: 201610168879.X[P]. 2016-03-23.

通讯作者: 陈志同, 教授、博士生导师, 研究方向为航空发动机叶轮叶片磨削与抛光、复杂曲面自适应加工、测量与数控编程等, E-mail: ztchen@buaa.edu.cn.

(责编 逸飞)