

# 压气机叶片安装板内侧面自动化磨抛加工

侯广库<sup>1</sup>, 姜绍西<sup>1</sup>, 叶欢<sup>2</sup>, 刘瑞松<sup>2</sup>

(1. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 沈阳 110043;

2. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191)

**[摘要]** 针对压气机叶片安装板的自动化磨抛加工, 基于北航提出的自动化磨抛加工工艺开展了应用研究。结合叶片安装板区域复杂曲面或结构特点, 通过对磨抛轮的粒度优选、磨抛过程的优化以及接触压力的调整, 实现了磨抛精度及表面粗糙度符合设计要求的攻关目标。试验结果表明: 磨抛后表面粗糙度  $R_a$  在  $0.4\mu\text{m}$  以下, 去除量在  $0.03\text{mm}$  以内, 实现了替代手工磨抛的目的。在磨抛效率上也实现了与多台数控铣的节拍匹配, 在 200 件叶片试制过程中磨抛工艺系统稳定, 拟将该技术广泛应用于压气机叶片的研制和生产中。

**关键词:** 压气机叶片; 安装板; 复杂结构; 自动化磨抛; 超硬磨料; 轮式抛光

## Automatic Polishing Method for Inner Side of Compressor Blade Mounting Plate

HOU Guangku<sup>1</sup>, JIANG Shaoxi<sup>1</sup>, YE Huan<sup>2</sup>, LIU Ruisong<sup>2</sup>

(1. AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang 110043, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

**[ABSTRACT]** Aiming at the polishing of compressor blade mounting plate, this paper carries out the applied research based on the automatic polishing technology proposed by Beihang University. Combined with the complex surface or structural features of blade mounting plate area, the polishing accuracy and surface roughness can meet the design requirements by the optimization of polishing wheel granularity, polishing process and contact pressure. The test results show that the purpose of replacing manual polishing has been realized, with the surface roughness  $R_a$  being less than  $0.4\mu\text{m}$  and material removal amount less than  $0.03\text{mm}$ . The polishing efficiency has also been matched with the production cycle of several NC milling machines. The process system is stable during the trial production (200 blades). It is proposed that the polishing technology will be widely used in the development and production of compressor blades.

**Keywords:** Compressor blade; Mounting plate; Complex structure; Automatic polishing; Superabrasive; Wheeled polishing

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2019.12.068

在航空发动机研制过程中,设计是主导,材料是基础,制造是保障,试验是关键,其中先进的材料和制造技术保证了发动机的效率、使用寿命、稳定性和可靠性<sup>[1]</sup>。就制造而言,目前压气机叶片叶身全型面抛光方法为手工磨抛,但是手工磨抛的一致性差、稳定性低、寿命波动大,同时过程中产生的粉尘和噪音危害人体健康、污染环境、难以满足我国的叶片制造需求,严重制约了我国航空航天事业的发展<sup>[2]</sup>。因此,需要一种稳定的自动化磨抛技术替代手工磨抛,保证加工精度和表面质量符合设计要求,并可实现稳定生产。

在国外,自动化抛光技术已经成功应用于叶片抛光,如德国 Metabo 公司和美国 SBS 公司的数控砂带磨削技术,美国 GE 公司与 Lehr Precision 公司合作发展

的数控电解加工技术,以及美国 ACME、Huck 等公司的机器人抛光技术等。近年来,国内一些高校和科研院所都相继开展了自动化磨抛技术研究,并取得了一定的成果。黄云等<sup>[3]</sup>在数控砂带磨削技术方面开展了多年的研究,目前已应用于某些叶片叶盆和叶背等开敞区域的抛光,取得了一定的成果。但是针对叶根圆弧、进排气边以及整体叶盘等狭小或曲率变化大的区域,数控砂带磨抛难以解决工具尺寸过大、可达性不佳、易发生干涉、加速度大、控制精度低等问题。此外,史耀耀等<sup>[4]</sup>对多轴联动轮式抛光技术方面开展了一定的研究工作;高航等<sup>[5]</sup>建立了整体叶盘磨料流抛光加工试验平台,并在此基础上进行了磨料流加工模拟分析及可行性研究;陈修文<sup>[6]</sup>在电解抛光技术方面、张海洋<sup>[7]</sup>在机器人抛光方

面、郭龙文等<sup>[8]</sup>在磁力研磨抛光技术方面,以及刘浩等<sup>[9]</sup>都开展了一定的研究工作。不过,由于压气机叶片安装板的结构较为复杂,可达性差,采用以上方法进行磨抛的难度很大,目前国内还未有利用以上磨抛方法进行安装板抛光的应用实例。

北京航空航天大学(简称北航)和中国航发黎明公司等在近20年内针对叶片磨削抛光技术开展了长期紧密的合作研究,基于北航提出的利用一种具有复杂母线的超硬磨料柔性抛光轮进行定轨迹数控磨抛的工艺方法,完成了多种结构的磨抛加工。其中,磨抛工具可以安装在通用机床上,降低了设备成本,同时通过安装多角度动力头增加轴数,可以降低对设备的要求。在此基础上,本文主要阐述了针对压气机安装板的自动化磨抛技术应用研究,旨在攻克这一行业难题。

## 1 压气机叶片结构及磨抛需求

图1为某压气机静子叶片的设计结构图,其主要由轴颈、叶身型面和安装板(即流道)两部分构成。其中,叶身型面以及安装板是整个叶片的空气动力学部分,目前其主要成形加工方式为铣削或精锻。对于铣削加工成形的叶片,安装板铣削后的表面粗糙度 $R_a$ 约为 $1.2\mu\text{m}$ ,不符合 $R_a$ 小于 $0.4\mu\text{m}$ 的设计要求,需要通过抛光降低表面粗糙度。由于安装板及其与型面转接 $R$ 处区域狭小,采用数控砂带磨抛的可达性差,控制复杂,因此目前叶片安装板采用手工抛光的方式。但受工人技能水平和状态的影响,抛光表面的一致性和稳定性较差,质量难以保证。

## 2 自动化磨抛加工技术

### 2.1 叶型磨抛区域划分

合理划分叶身型面的磨抛区域对磨抛方案的确定

十分重要。磨抛区域的结构和表面曲率不同,采取的磨抛方法、磨抛工具以及相应的参数也会有所不同。压气机叶身型面的抛光区域划分见图2,根据区域的特征,叶身型面及安装板划分为5个磨抛区域,其中3、4、5区域开敞性好,对磨抛工具形状尺寸要求低,可采用数控砂带进行磨抛;1、2区域相对狭小,如采用数控砂带磨抛加工,不仅需要至少六坐标的机床,需要大大减小砂带的尺寸,而且易与叶身发生干涉,同时由于力控机构的灵敏度限制,在曲率变化较大的转接 $R$ 处的磨抛精度难以达到公差要求。若采用轮式定轨迹数控磨抛,通过设计合适形状的磨抛工具,结合可转位刀柄,可以利用五坐标机床完成磨抛加工,且定轨迹的控制方法稳定可靠,对机床的动态性能要求低,因此采用数控轮式自动化磨抛工艺对安装板区域进行磨抛加工。

### 2.2 磨抛工艺系统

通过上述分析,构建由五轴联动机床、弹性抛光轮、多角度动力头组成的磨抛工艺系统。其中,抛光轮的复杂母线形状和较长使用寿命使得安装板内侧面与转接

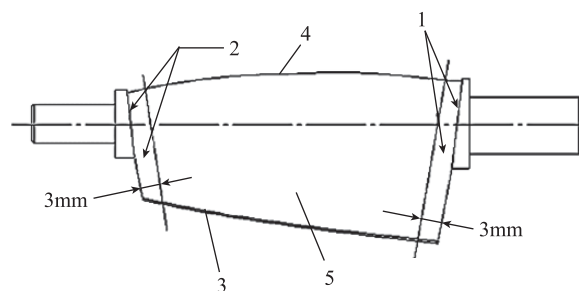


图2 磨抛区域划分示意图

Fig.2 Schematic diagram of division of grinding-polishing area

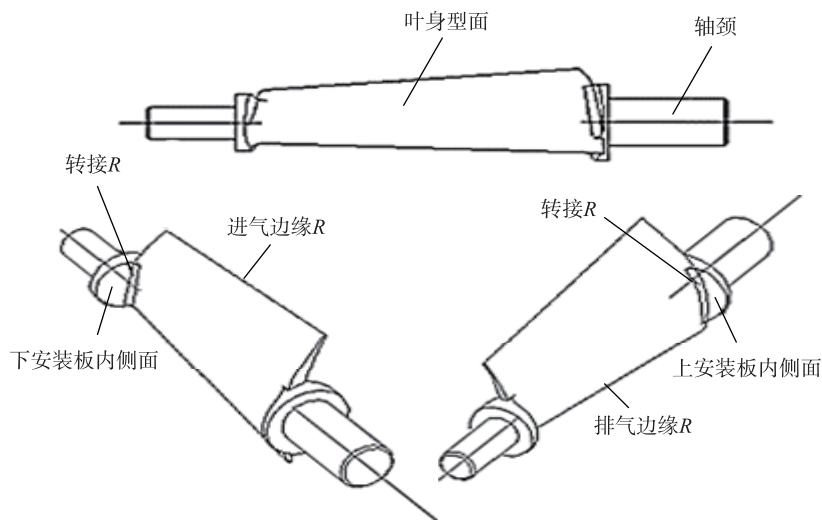


图1 静子叶片设计结构图

Fig.1 Diagram of structure design of stator blade

$R$  的数控抛光成为可能,而多角度动力头实现  $3+X$  轴抛光加工,保证了抛光过程的稳定。

### 2.2.1 磨抛轮的设计

磨抛轮是决定自动化抛光稳定有效的关键,磨抛轮的设计包括几何形状与物理性能两方面。根据北航陈志同提出的一种具有局部增强结构的弹性抛光轮及其制作方法<sup>[10]</sup>,对磨抛轮的尺寸、形状、轴向刚度、径向刚度以及磨料粒度进行设计和优选(图3)。其中,对于磨抛影响较大的是磨抛轮在径向和轴向的硬度,该指标对于侧向磨抛和转接  $R$  的磨抛影响较大,如果磨抛轮的轴向硬度较高,对于测向磨抛去除力效果较好,但是在磨抛转接  $R$  时如果接触过于靠近零件,则会出现磨抛轮“憋停”的现象。磨抛轮选用轮缘镀有金刚石的橡胶轮,金刚石的粒度号主要有  $200\#$ 、 $400\#$ 、 $800\#$ 、 $1200\#$  和  $2000\#$ ,可根据磨抛去除量和粗糙度的不同进行选择。

### 2.2.2 转位刀柄的设计

为了实现将主轴绕  $Z$  轴的旋转转化为绕  $X$  轴的旋转,根据北航提出的利用多角度动力头实现  $3+X$  轴抛光加工的方法和装置设计转位刀柄。如图4所示,转位刀柄采用锥齿轮传动实现刀具旋转轴的改变。主轴的动力通过锥齿轮,将旋转输出的方向绕  $Y$  轴旋转  $90^\circ$ ,再利用齿形带将动力传递至磨抛轮,带动磨抛轮进行加工。通过改变锥齿轮的传动比可以实现不同磨抛速度范围的调整。锥齿轮采用高强度的尼龙或复合材料制作,提高了传动的平稳性,降低了加工时的噪声。

### 2.2.3 磨抛设备选择

磨抛设备采用 QMK50A 五坐标数控叶片磨床,其结构如图5所示。夹具通过螺钉固定在  $A$  轴的主动轴端, $A$  轴随动轴即  $a$  轴采用轴颈抱紧的方式进行装夹。通过主轴上安装转位刀柄,将立式主轴的转动转化为卧式转动。

### 2.3 磨抛程序编制及参数选择

整个磨抛程序分为4部分进行,即盆侧和背侧的大、小安装板及转接  $R$ ,磨抛方向大致与轴颈中心线垂直,缘板内侧面及转接  $R$  合并加工,程序编制简单,进给速度可进一步提高。考虑到磨抛轮的尺寸偏差、叶片加工的实际偏差,同时也为便于调整磨抛去除量的大小,磨抛程序的编制采用  $R$  参数编程,如图6所示,在程序的每一行程序段的  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 、 $A$ 、 $B$  均有  $R$  参数作为变量含在其中,其作用是能够调整近似法向的接触距离,如  $R=-0.1$ ,表示向接触点法向接近  $0.1$ ,相反如  $R=0.1$ ,则表示向接触点法向远离  $0.1$ ,同样也可以通过可编程零点偏置指令进行坐标系的偏置,如 SINMENS 系统 TRANS X0.1Y0.2Z0.3。

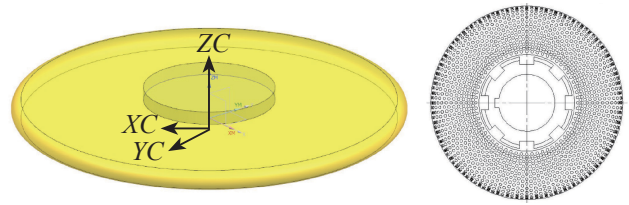


图3 磨抛轮的结构示意图

Fig.3 Schematic diagram structure of grinding-polishing wheel

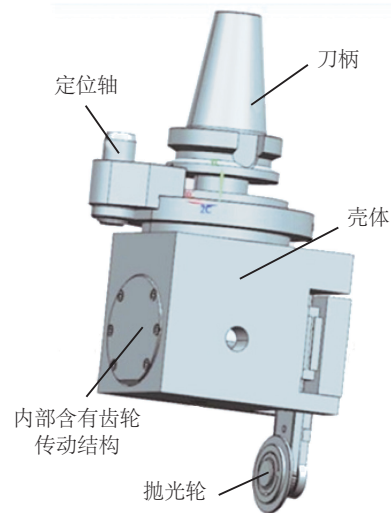


图4 可转位刀柄结构图

Fig.4 Structure diagram of indexable tool holder

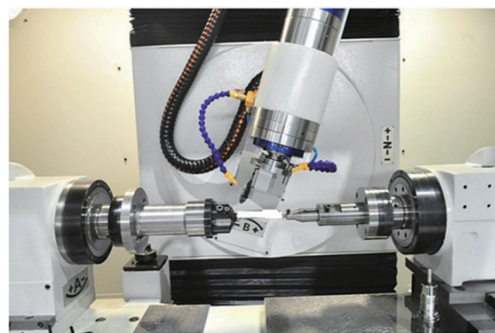


图5 安装板磨抛设备结构图

Fig.5 Structure diagram of machine tool used for machining mounting plate

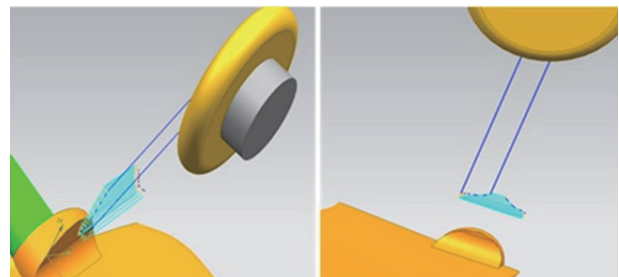


图6 横向磨抛方式的程序编制

Fig.6 Programming of transverse grinding-polishing

### 3 磨抛试验

#### 3.1 磨抛对于前工序的质量要求

叶片安装板的自动化磨抛,对于数控铣的要求较高,主要是安装板不能存在较深的纹路或是接刀,粗糙度  $R_a$  在  $1.2\mu\text{m}$  以内,并且尺寸公差要加工到成品叶片公差带的上限,如成品叶片的安装板尺寸公差为  $(2 \pm 0.05)\text{mm}$ ,数控铣削后尺寸控制在  $2_{-0.02}^{+0.05}\text{mm}$  是一个合适的公差范围。

#### 3.2 参数给定

基于北航前期在自动化磨抛方面取得的研究成果,对比不同粒度磨抛轮的磨抛粗糙度,在充分试验的基础上选择了合理转速与进给速度,控制压紧量约为  $0.1\sim 0.2\text{mm}$ ,正压力约为  $2\text{N}$ ,分别检测安装板内侧面(平面部分)、转接  $R$  的粗糙度,如表 1 所示。

另外,为了检验每个磨抛轮能够磨抛的叶片数量,采用精抛磨轮,在充分试验的基础上选择了合理转速与进给速度,控制压紧量约为  $0.1\sim 0.2\text{mm}$ ,正压力约为  $2\text{N}$ ,应用横向磨抛的方式进行,一个磨轮共计磨抛 50 件,对首末件叶片的粗糙度进行检查,检查结果如表 2 所示。

#### 3.3 磨抛去除量统计

经过对 15 件叶片的三坐标测量数据进行分析,安装板的去除量能够控制在  $0.03\text{mm}$  以内,并且尺寸稳定(图 7)。

### 4 磨抛结果

针对压气机叶片安装板磨抛存在的问题,设计了一种用于安装板磨抛的动力装置,通过对磨抛轮的粒度及磨抛参数的优化,显著降低了铣削后安装板的表面粗糙度,实现了去除深度的稳定可控,提高了磨抛质量和效率。经过近 200 件叶片的磨抛加工试验,实现了安装板内侧面的稳定磨抛加工,采用不同粒度的磨抛轮,磨抛粗糙度  $R_a$  在  $0.4\mu\text{m}$  以下,磨抛去除量在  $0.03\text{mm}$  以内,合格率达到 98% 以上。

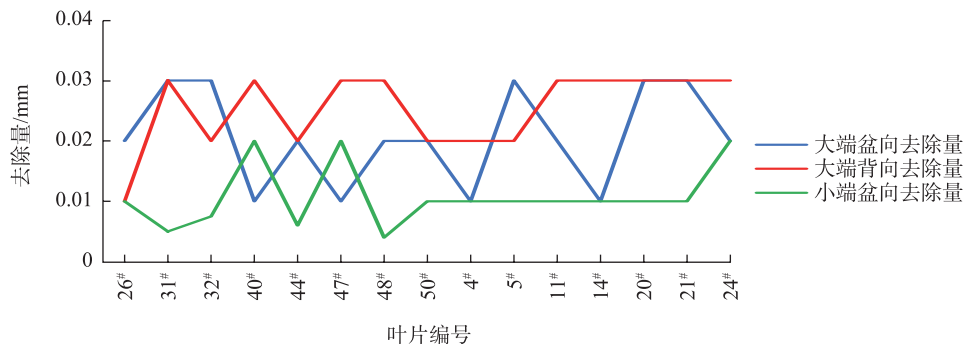


图7 安装板磨抛去除量

Fig.7 Grinding-polishing removing depth of mounting plate

### 5 结论

压气机叶片安装板内侧面采用五坐标数控设备,通过应用转位刀柄和外轮缘镀有金刚石的橡胶轮进行磨抛,能够保证磨抛尺寸符合设计图纸要求,粗糙度、去除量可控,效率与合格率得到大幅提高,可以完全替代手工抛光。上述成果主要有以下几点:

(1)实现了缘板、转接  $R$  等复杂结构的自动化抛光,表面粗糙度  $R_a$  可达到  $0.4\mu\text{m}$  以下,满足我国航空发动机叶片精密抛光加工的要求。

(2)抛光轮寿命极高,单支可满足约 50 件叶片的抛光需求,抛光表面质量稳定,去量均匀,彻底改变目前对人工抛光的依赖,实现复杂结构抛光的全面自动化,可完全替代人工抛光。

研究结果显示:这项技术完全可以扩展应用于航空航天多种关键零件的数控与机械化抛光,解决航空航天等重点领域的生产难题。

表1 不同粒度磨抛轮的磨抛粗糙度对比

Table 1 Grinding-polishing roughness comparison of different size grinding wheel

磨抛工序	内侧面表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	转接 $R$ 表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$
粗抛	1.34	0.82
	1.28	0.85
精抛	0.37	0.30
	0.35	0.26

表2 精抛磨轮磨抛首末件的粗糙度  $R_a$  检测数据统计

Table 2 Test data statistics of roughness  $R_a$  of the first and last pieces of grinding-polishing by fine polishing wheel

首末件	内侧面表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	转接 $R$ 表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$
首件	0.37	0.30
	0.35	0.26
末件	0.42	0.35
	0.48	0.35

(下转第78页)

度、成型速率、成型间距等工艺条件在一定范围内可提供准确的成型载荷趋势描述,可指导长桁的机械成型。而欠缺铺层方式的影响因素,对于铺层方式改变进而影响成型载荷变化的规律尚不明确,需进一步修改完善。

### 参考文献

- [1] SAMUEL B T. Permanent press, no wrinkles: reinforced double diaphragm formings of advanced thermoset composites[D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [2] MONAGHAN M R, O' BRADAIGH C M, MALLON P J, et al. The effect of diaphragm stiffness on the quality of diaphragm formed thermoplastic composite components[J]. Journal of Thermo-Plastic Composite Materials, 1990, 3(3): 202-215.
- [3] ELGAMEL H E. Closed-form expressions for the relationships between stress, diaphragm deflection, and resistance change with pressure in silicon piezoresistive pressure sensors[J]. Sensors & Actuators A Physical, 1995, 50(1-2): 17-22.
- [4] PANTELAKIS S G, BAXEVANI E A. Optimization of the diaphragm forming process with regard to product quality and cost[J]. Composite Part A: Applied Science and Manufacturing, 2002, 33(4): 459-470.
- [5] COGSWELL N F. The processing science of thermoplastic composites[J]. Polymer International, 1987, 1(4): 157-165.
- [6] 文琼化, 王显峰, 何思敏, 等. 温度对预浸料铺放效果的影响[J]. 航空学报, 2011, 32(9): 1740-1745.  
WEN Qionghua, WANG Xianfeng, HE Simin, et al. Influence of temperature on placement effect of prepreg[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(9): 1740-1745.
- [7] NING H, JANOWSKI G M, VAIDYA U K. 单一膜片成形中碳 / PPS 的加工和非等温结晶动力学[J]. 复合材料学报, 2010, 44(8): 915-929.  
NING H, JANOWSKI G M, VAIDYA U K. Processing and nonisothermal crystallization kinetics of carbon/PPS in single diaphragm forming[J]. Journal of Composite Materials, 2010, 44(8): 915-929.
- [8] WIJSKAMP S. Shape distortions in composites forming[D]. Enschede: University of Twente, 2005.
- [9] BARNES J A, BYERLY G, LEBOUTON M C, et al. Dimensional stability effects in thermoplastic composites towards a predictive capability[J]. Composites Manufacturing, 1991, 2(3): 171-178.
- [10] SPENCER A J M, WATSON P, ROGERS T G. Thermoelastic distortions in laminated anisotropic tubes and channel sections[J]. Journal of Thermal Stresses, 1992, 15(1): 129-141.
- [11] NELSON R H. Prediction of dimensional changes in composite laminates during cure[C]//Proceedings of 34th International SAMPE Symposium. Reno, 1989: 2397-2410.
- [12] KEANE M A, MULHERN M B, MALLON P J. Investigation of the effects of varying the processing parameters in diaphragm forming of advanced thermoplastic composite laminates[J]. Composites Manufacturing, 1995, 6(3-4): 135-144.

通讯作者: 段跃新, 博士, 高级工程师, 研究方向为 RTM 工艺材料体系及计算机模拟仿真技术, E-mail: duanyuexin@126.com。

(责编 古京)

(上接第71页)

### 参考文献

- [1] 刘大响. 一代新材料, 一代新型发动机: 航空发动机的发展趋势及其对材料的需求[J]. 材料工程, 2017, 45(10): 1-5.  
LIU Daxiang. One generation of new material, one generation of new type engine: development trend of aero-engine and its requirements for materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(10): 1-5.
- [2] 宋瑞楨. 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.  
SONG Ruizhen. Development of flexible polishing tool with complex generatrix and optimization of polishing parameters[D]. Beijing: Beihang University, 2017.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 高航, 吴鸣宇, 付有志, 等. 流体磨料光整加工理论与技术的发展[J]. 机械工程学报, 2015, 51(7): 174-187.  
GAO Hang, WU Mingyu, FU Youzhi, et al. Development of theory and technology in fluid abrasive finishing technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(7): 174-187.
- [6] 陈修文. 整体叶盘电解加工的流场仿真与试验[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.  
CHEN Xiuwen. Flowing field simulation and experiments on electrochemical machining of blisk[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [7] 张海洋. 叶片砂带磨削机器人轨迹规划与离线编程[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.  
ZHANG Haiyang. Robotic trajectory planning and off-line programming for belt grinding of turbine blade[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [8] 郭龙文, 杨能阁, 陈燕. 磁力研磨工艺对整体叶盘表面完整性的影响[J]. 中国表面工程, 2013, 26(3): 10-14.  
GUO Longwen, YANG Nengge, CHEN Yan. Influence of magnetic abrasive finishing technology on surface integrity of vane-integrated disk[J]. China Surface Engineering, 2013, 26(3): 10-14.
- [9] 刘浩, 张雷, 冀世军, 等. 叶片难抛光区域粗糙度对压气机性能的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(8): 8-14.  
LIU Hao, ZHANG Lei, JI Shijun, et al. Influence of roughness in difficult-to-polished blade region on the performance of compressor[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(8): 8-14.
- [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备方法: CN105818008A[P]. 2016-08-03.  
CHEN Zhitong. A complex bus polishing wheel with local reinforcing structure and manufacturing method: CN105818008A [P]. 2016-08-03.

通讯作者: 侯广库, 本科, 研究员级高级工程师, 研究方向为叶片加工及材料热处理, E-mail: hgk98765@126.com。

(责编 古京)