

引文格式: 侯可为, 杨森, 任军学, 等. 整体叶盘机器人柔性磨抛工艺研究[J]. 航空制造技术, 2025, 68(13): 40–48.

HOU Kewei, YANG Sen, REN Junxue, et al. Investigation of flexible grinding and polishing processes of integral blisk on robot platform[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(13): 40–48.

整体叶盘机器人柔性磨抛工艺研究*

侯可为¹, 杨森¹, 任军学², 雷海峰¹, 赵华卫¹

(1. 中国航发动力股份有限公司, 西安 710021;

2. 西北工业大学, 西安 710072)

[摘要] 整体叶盘是新一代航空发动机实现结构创新和技术跨越的核心关键零部件, 其型面精度与表面质量对航空发动机的疲劳性能和气动性能影响显著。目前国内整体叶盘磨抛工艺仍然处于落后的人工打磨阶段, 叶片表面质量差, 一致性难以保证, 人工打磨劳动强度大、效率低。本文介绍了整体叶盘机器人砂带磨抛设备及其工艺原理, 并利用该设备开展了针对钛合金整体叶盘磨抛工艺试验。基于整体叶盘的结构特点和人工打磨经验, 提出了整体叶盘自动化磨抛工艺方法, 包括磨抛轨迹规划方法、磨具和加工参数优化方法等, 并通过工艺过程控制和参数反馈调整机制, 实现其在整体叶盘加工中的应用。结果表明, 整体叶盘机器人磨抛后表面粗糙度 R_a 小于 $0.4 \mu\text{m}$, 磨抛效率和磨抛型面一致性显著提高, 叶片磨抛去除量为 $0.008\sim 0.013 \text{ mm}$, 磨抛后叶型轮廓度满足设计公差要求。

关键词: 整体叶盘; 轨迹规划; 机器人柔性磨抛; 加工参数优化; 表面粗糙度

中图分类号: V26; TG58

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.13.040

Investigation of Flexible Grinding and Polishing Processes of Integral Blisk on Robot Platform

HOU Kewei¹, YANG Sen¹, REN Junxue², LEI Haifeng¹, ZHAO Huawei¹

(1. AECC Aviation Power Co., Ltd., Xi'an 710021, China;

2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[ABSTRACT] The integral blisk is a key component in enabling the new generation of aircraft engines to achieve structural innovation and a technological leap. Its profile accuracy and surface quality have a significant impact on the fatigue and aerodynamic performance of the aircraft engine. Currently, the integral blisk grinding and polishing process in China remains in a backward stage, characterized by manual polishing, which results in poor blade surface quality, inconsistent performance, high labor intensity and low efficiency. This paper introduces the robot belt grinding and polishing equipment for integral blisks and its technical principle, and uses this equipment to carry out the process testing of the titanium alloy integral blisk. Based on the structural characteristics of the integral blisk and the experience of manual polishing methods, this paper proposes an automated polishing process method for integral blisk, including polishing trajectory planning, optimization of grinding tools and processing parameters, and realizes its application in the processing of integral blisk through process control and parameter feedback adjustment. The results show that the surface roughness R_a of the integral blisk after robot polishing is less than $0.4 \mu\text{m}$, the grinding and polishing efficiency is significantly improved, and the consistency of the grinding and polishing profile is also enhanced remarkably. The material removal amount of the blades during polishing is $0.008\sim 0.013 \text{ mm}$, and the blade profile tolerance meets the design requirements.

Keywords: Integral blisk; Trajectory planning; Robotic belt polishing; Optimization of machining parameters; Surface roughness

* 基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52375465); 中国航发自主创新专项资金项目(ZZCX-2017-040)。

航空发动机工作环境恶劣,长期面临着高温、高压、高冲击的挑战,这对部件材料的性能和可靠性提出了严苛的要求^[1]。叶片是航空发动机的关键零件,种类多、数量大、型面复杂、几何精度要求高^[2]。现代航空发动机为提高气动性能、简化结构、降低重量、减少故障率、提高可靠性,在风扇、压气机部件中大量采用了整体叶盘结构。叶盘的整体结构避免了原本结构的气流损失,降低了因装配不当引起微动磨损和裂纹等故障发生的可能性,从而提高了航空发动机的疲劳寿命和工作性能^[3]。整体叶盘典型加工工艺方法有精密锻造、精密铣削、精密磨削抛光、振动光饰、喷丸等。在经过精密铣削工序后,整体叶盘的叶片表面会留下明显的铣削刀痕。抛光工序不仅能去除这些刀痕,还能提升叶片的表面质量,延长航空发动机的使用寿命,因此研究先进抛光工艺至关重要。

抛光是获得高质量工件表面的重要工艺过程。整体叶盘与叶片等航空发动机零件在铣削加工后一般留有一定的微小余量,通过抛光工艺,在去除预留余量的同时,可得到较高的表面质量。整体叶盘对叶型及流道的尺寸精度要求较高,而零件的叶片扭转和复杂结构使得抛光时可达性较差。磨抛工序可以大大提高整体叶盘叶片表面耐腐蚀、耐磨损的能力,进而提高其疲劳强度,延长航空发动机的使用寿命^[4-5]。由于我国在整体叶盘光整加工技术领域起步较晚,并且国外对所有加工技术高度保密,对外实行全面技术封锁,因此我国在整体叶盘光整加工技术上与国外的先进技术还有一定的差距。目前国内整体叶盘抛光主要采用手动抛光,使用一块或多块百叶轮,通过手工操作将表面研磨剂与工件表面摩擦,从而达到抛光效果。手动抛光根据不同的要求,选择不同的研磨剂和百叶轮材料,可以在硬度、粗糙度等方面进行调整。然而,百叶轮抛光通常需要熟练的技术和经验,仅适用于小批量生产,以及复杂形状工件的加工,存在抛光后零件一致性较差、一次性合格率较低、返工率高及抛光效率低等问题^[6]。因此,保证叶型尺寸精度并提高加工效率是目前整体叶盘磨抛加工中的难点及关键点。机器人自适应磨抛加工技术利用工业机器人进行自动抛光,通过编程和传感器的帮助,使用砂带对工件表面进行抛光。相比于百叶轮抛光,机器人砂带抛光具有以下优势:(1)能够实现自动化和无人化操作,降低人力投入并减轻劳动强度;(2)机器人可以连续、高速地进行砂带抛光操作,提高生产效率;(3)通过设备精准控制抛光压力、速度和运动路径,能够在大批量生产中确保抛光效果的一致性。整体叶盘的叶片及流道手工抛光,难以根据叶片实际尺寸进行针对性抛修,机器人砂带抛光可以有效解决这一问题^[7-8]。

美国 ACME 和 HUCK 等公司成功地将机器人抛光技术应用于整体叶盘的抛光^[9]。德国的 Uhlmann 等^[10-11]采用机器人砂带对叶片进行抛光加工,并研究了抛光力的控制技术。Sun 等^[12]通过系统校准和力控制提高了机器人抛光的效果,将机器人应用到叶片的磨削加工中。Yong 等^[13]针对叶片抛光,设计出了一种七轴六联动数控砂带磨削装置,并对砂带磨损及表面粗糙度等进行了大量研究。肖贵坚等^[14-16]针对整体叶盘磨抛加工进行了全方面的研究,试验表明,磨抛后整体叶盘各叶片型面精度一致性明显提升。Zhang 等^[17]针对砂布页轮磨具抛光航空发动机整体叶盘进行了研究,提出了一种新的走刀方式并进行了抛光试验,结果表明,该走刀方式可以有效改善抛光后整体叶盘的表面质量。Yang 等^[18]对砂布页轮抛光航空发动机整体叶盘时的抛光力展开研究,通过构建单颗磨粒抛光力模型,实现对总抛光力的预测。叶欢等^[19]对航空发动机整体叶盘叶片分区域抛光加工进行了研究,通过该方法提升了抛光效率并降低了抛光工具损耗。余广渊等^[20]针对航空发动机整体叶盘 TC17 钛合金材料,基于正交试验研究了砂带抛光工艺参数对表面粗糙度的影响规律,结果表明,选用 200 目砂带,同时采用较大的砂带线速度和较小的进给速度,可以获得较小的表面粗糙度。张军锋等^[21]基于灰色关联分析发现,粒度对表面粗糙度的影响最大,线速度和抛光深度的影响次之,进给速度的影响最小。

本文以某型号航空发动机第一级整体叶盘为例,结合该叶盘叶片型面磨抛的工艺特性,采用“6+2”轴机器人砂带磨抛设备,提出了一种整体叶盘柔性砂带磨抛方法。

1 整体叶盘机器人砂带磨抛设备和磨抛工艺原理

整体叶盘机器人砂带磨抛设备如图 1 所示,主要分为操作室和机器人工作间。操作人员在操作室进行加工程序调试,机器人工作间的机械臂接收指令抓取相应磨具后对整体叶盘的叶型进行磨抛加工。机器人砂带磨抛机构主要由六自由度工业机器人、砂带磨具、夹盘及工装等组成,砂带磨具通过夹盘及工装安装于机器人上,机器人带动砂带磨具对叶盘进行磨抛。砂带磨具有多种类型的结构,可适配各类叶盘,以及各种不同加工位置的磨削抛光需求。机器人采用离线编程的方式控制夹持末端的运动轨迹,使其与工件表面刀触点贴合,进而实现砂带磨抛。图 1 中, $\{B\}$ 为机器人基坐标系; $\{M\}$ 为刀具坐标系; $\{P\}$ 为刀触点坐标系; $\{W\}$ 为工件坐标系。各坐标系之间构成了如式(1)所示的闭合运动学链。

$$T_M^B = T_W^B T_P^W T_M^P \quad (1)$$

式中, T 为 4 阶齐次矩阵。磨抛加工时, 工件固定不动, 因此 T_W^B 为定值。

砂带磨具通过 BT30 刀柄连接在安装壳主体上, 如图 2 所示。由于整体叶盘叶片在凹 / 凸型面和前 / 后缘处特征不同, 导致材料去除规律相差较大, 因此使用不同的砂带磨具进行磨抛加工。实际工作中, 装配在机器人上的安装壳主体移动至砂带磨具托盘架, 根据需求行至砂带磨具处, 利用导轨进行精准定位, 随后自动夹取所需的砂带磨具, 从而完成砂带磨具的自动快速更换。该快速更换磨具机构显著减少了磨具更换时间, 提升了磨抛机构自动化程度, 进一步完善并推动了整体叶盘全型面机器人磨抛技术的发展。

2 整体叶盘磨抛工艺方法研究

2.1 整体叶盘磨抛工艺方法总体流程

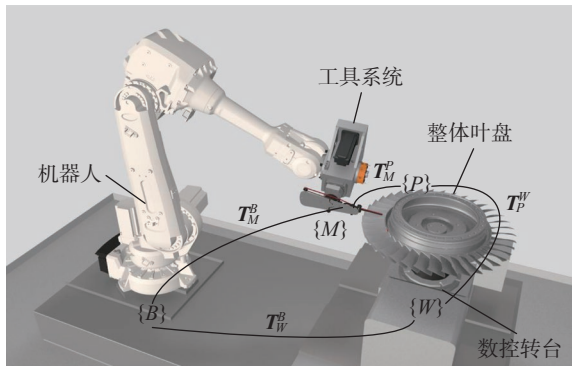
图 3 为整体叶盘机器人砂带磨抛工艺总体流程方案, 该方案主要由叶型检测、磨具选择、加工参数选定 3 部分构成。在完成叶型精铣后, 整体叶盘会进入磨抛工序, 然后根据最终尺寸和要求进行验收与评价。采用 Leitz Reference HP 22.12.9 整体叶盘测量机及 Quindos

7.0 分析评价软件对零件进行检测并给出结论。

2.2 整体叶盘磨抛轨迹规划方法

某型号航空发动机第一级整体叶盘是压气机部件中的关键部件, 为典型整体叶盘结构, 如图 4 所示。零件材料为 TC17, 最大直径为 664 mm, 最小直径为 206 mm, 总高 109.5 mm, 叶片大小为 89 mm × 49 mm, 由一体化铣削加工成形。叶型粗糙度要求 $R_a \leq 0.4 \mu\text{m}$, 叶型表面抛光后不允许保留机加刀纹, 前、后缘无尖边、削边、平头等现象。叶身轮廓度要求 $-0.05 \sim 0.08 \text{ mm}$, 前、后缘轮廓度要求 $-0.04 \sim 0.06 \text{ mm}$, 在前、后缘 1 mm 处有最小厚度 C_{qmin} 、 C_{hmin} 的要求, 弦长公差均为 $\pm 0.05 \text{ mm}$ 。

整体叶盘机器人砂带磨抛主要对叶背、叶盆、前/后缘、流道面进行加工。在磨抛前, 先利用整体叶盘测量机对整体叶盘的全型面展开检测, 随后依据检测结果进行模型重构。模型重构一般基于非均匀有理 B 样条



(a) 设备示意图



(b) 磨抛加工

图 1 整体叶盘机器人砂带磨抛设备示意图

Fig.1 Schematic diagram of robot belt grinding and polishing equipment for integral blisk



图 2 砂带磨具主体连接示意图

Fig.2 Schematic diagram of abrasive belt grinding tool body connection

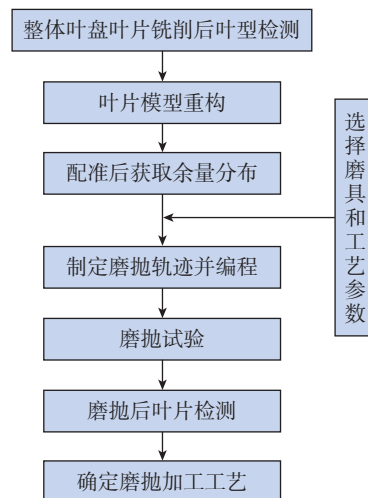


图 3 整体叶盘机器人砂带磨抛试验总体流程方案

Fig.3 Overall flow scheme of the robot abrasive belt grinding and polishing test for integral blisk

曲线 (Nonuniform rational B-splines, NURBS) 来完成。一条 p 次 NURBS 曲线的定义为

$$C(\mathbf{u}) = \left(\sum_{i=0}^n N_{i,p}(\mathbf{u}) w_i D_i \right) / \left(\sum_{i=0}^n N_{i,p}(\mathbf{u}) w_i \right) \quad (2)$$

式中, D_i 为控制顶点; n 为控制点个数; $\mathbf{u} = [u_0, u_1, \dots, u_{m-1}, u_m]$ 是非递减节点矢量, 即 $u_i \leq u_{i+1}$ ($i=0, \dots, m-1$); w_i 为控制点对应的正值权因子; $N_{i,p}$ 是节点矢量上第 i 个 p 次 B 样条基函数, 定义为

$$\begin{cases} N_{i,0}(\mathbf{u}) = \begin{cases} 1, & u_{i-1} \leq u \leq u_{i+1} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ N_{i,k}(\mathbf{u}) = \frac{u - u_i}{u_{i+k} - u_i} N_{i,k-1}(\mathbf{u}) + \frac{u_{i+k+1} - u}{u_{i+k+1} - u_{i+1}} N_{i+1,k-1}(\mathbf{u}) \\ \text{规定 } \begin{matrix} 0 \\ 0 \end{matrix} \end{cases} \quad (3)$$

式中, k 为 B 样条基函数的阶数。

将测得叶片截面的离散数据点按顺序排列构成拟合曲线的型值点, 用 Q_i ($i=0, 1, 2, \dots, n$) 表示。用一条 p 次 NURBS 曲线拟合这些型值点, 建立一个关于所给型值点 Q_i 与控制顶点 D_j ($j=0, 1, \dots, m$) 关系的方程, 其中型值点 Q_i 对应的节点为 \bar{u}_i ($i=0, 1, \dots, n$)。根据曲线端点插值条件, 控制点的起止点与型值点重合, 即 $D_0 = Q_0, D_{n+2} = Q_n$, 可以反算出控制点, 再依次通过各截面曲线拟合生成 NURBS 曲面。理论上, 曲线拟合的阶次越高, 光顺性越好, 但是次数的升高会导致计算量增大、计算效率降低。当 $p=3$, 权因子 $w=1$ 时, 已经能够满足叶片曲面的光顺性要求。通过型值点反算控制顶点并拟合曲面, 如图 5 (a)~(c) 所示。根据重构的模型获得整体叶盘磨削余量分布, 并根据测量数据进行曲面拟合, 得到最优匹配数模 (图 5 (d))。

结合所使用磨具及砂带确定磨抛过程中的工艺参数及磨抛轨迹。参数线加工路径计算简单、效率高, 是最常

用于参数曲面的一种刀触点轨迹规划方法。主要原理是保证相邻两条加工路径各对应刀触点之间具有恒定的材料残留高度, 以保证加工后工件表面具有较高的一致性。以图 6 (a) 叶背凸面加工为例, 假设相邻两条路径的刀触点处于同一圆弧上, 第 $i-1$ 条加工路径的当前刀触点 $P(u_i)$ 的加工行距 L_{cv} 可根据几何原理计算得出。

$$L_{cv} \approx 2\sqrt{2R'h} \sqrt{\frac{R}{R+R'}} \quad (4)$$

式中, R 为当前刀触点曲率半径; R' 为接触轮半径; h 为残留高度。通过计算加工行距, 可以进行第 i 条加工路径相对应的刀触点 $P'(u_i)$ 计算。叶盆刀触点的加工行距 L_{cc} 也可以用同样的方式进行计算。

$$L_{cc} \approx 2\sqrt{2R'h} \sqrt{\frac{R}{R-R'}} \quad (5)$$

接触轮由橡胶等弹性材料构成, 因此在砂带磨削或指状磨具磨削过程中, 刀具由于挤压变形导致设定残留高度与实际残留高度不一致, 即两者之间存在残留高度误差 Δh 。同时, 由于叶片型面各刀触点的曲率半径变化较大, 导致加工行距计算结果差异明显, 很难保证叶片型面的高质、高效加工。因此, 在上述基础上继续进行残留高度误差补偿, 基本原理: 首先通过基础性试验

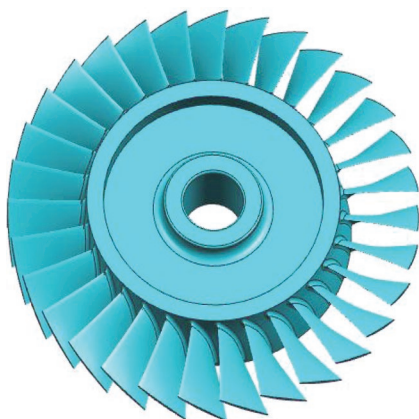
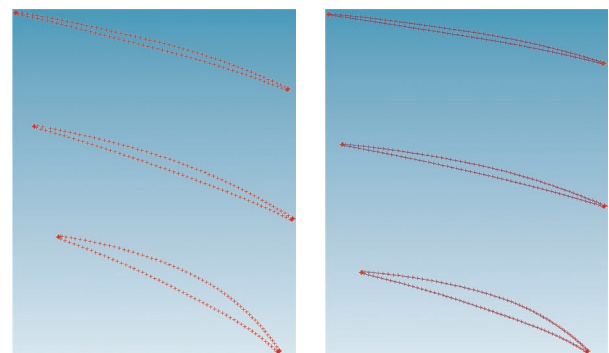
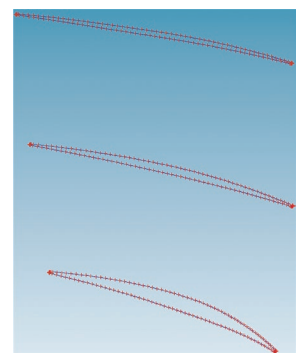


图 4 第一级整体叶盘结构示意图

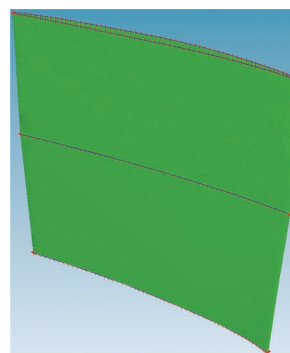
Fig.4 Schematic diagram of the first stage integral blisk structure



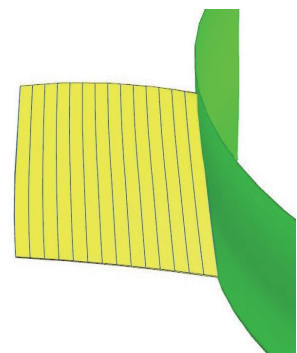
(a) 测量点云



(b) 截面线拟合



(c) 型面拟合



(d) 模型重构

图 5 三坐标测量点云拟合叶片型面

Fig.5 Fitting blade profile from point cloud measured by coordinate measuring machine

补偿残留高度误差以修正加工行距计算模型,随后根据几何插值算法进行下一条加工路径的计算直至完成当前加工区域路径规划。

磨抛轨迹采用往复的切削模式,走刀方向根据拟合叶型曲面的参数线方向确定,磨抛过程中尽量减少进退刀,如图6(b)所示。磨抛轨迹应保证模具和磨抛叶型曲面的有效贴合,同时避免磨具与零件、工装的干涉,以此确定模具的刀轴和磨抛姿态,并进行仿真,最后实现整体叶盘全型面磨抛加工。

在磨抛过程中,由于叶片间空间位置狭小,磨削难以快速散发,易造成磨削热集中,进而影响表面质量。因此磨削过程中需采用磨削液冷却的方式,合理配置冷却液浇灌角度,实现最优冷却效果。

2.3 整体叶盘磨具与加工参数选择

由于整体叶盘前/后缘的型面精度对发动机气流动力性能影响较大,因此机器人磨抛的优势主要体现在叶片的前/后缘加工中。整体叶盘在精密铣削后,受残余应力等影响,存在一定的变形。叶型及前/后缘轮廓度尺寸精度要求严格,传统手工及非柔性砂带磨抛难以满足其精度要求。

目前所采用的传统方法极易造成叶片前/后缘出现削边、平头、缩颈、尖头、钝头、偏头等型面误差,如图

7所示(黑色表示实际边缘轮廓,红色表示公差带范围,绿色表示理论轮廓)。可以看出,虽然叶片型面精度在误差范围以内,但是仍然无法满足真实边缘型面的要求,严重影响航空发动机气流动力性能。

叶片边缘误差形成如图8所示。叶片变形后的轮廓如图8(a)所示。常规加工只能沿着理论型线加工,难以实现变形随形磨抛(图8(b)),加工以后容易出现

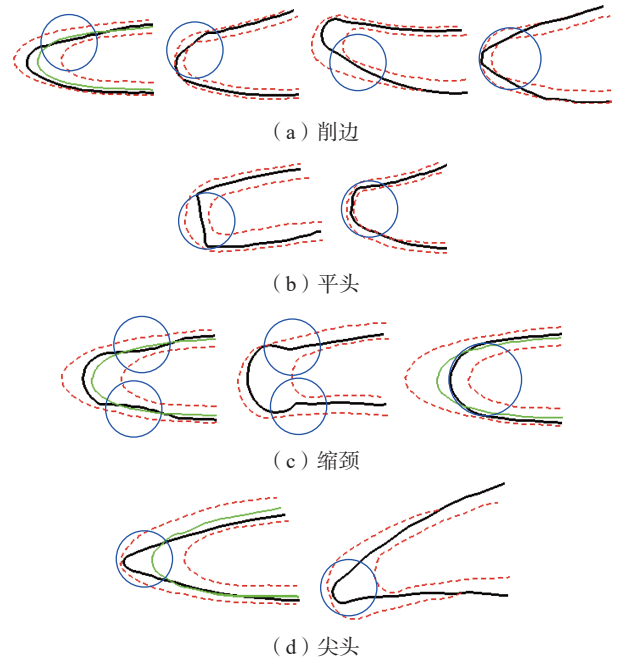
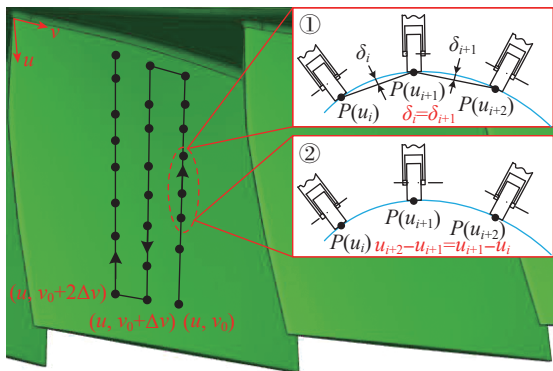
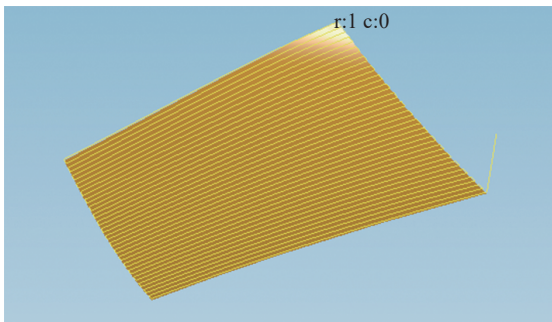


图7 典型型面误差示意图

Fig.7 Schematic diagram of typical profile error



(a) 叶片型面参数线加工路径



(b) 程序轨迹模拟

图6 等参数线加工路径

Fig.6 Iso-parametric curve machining path

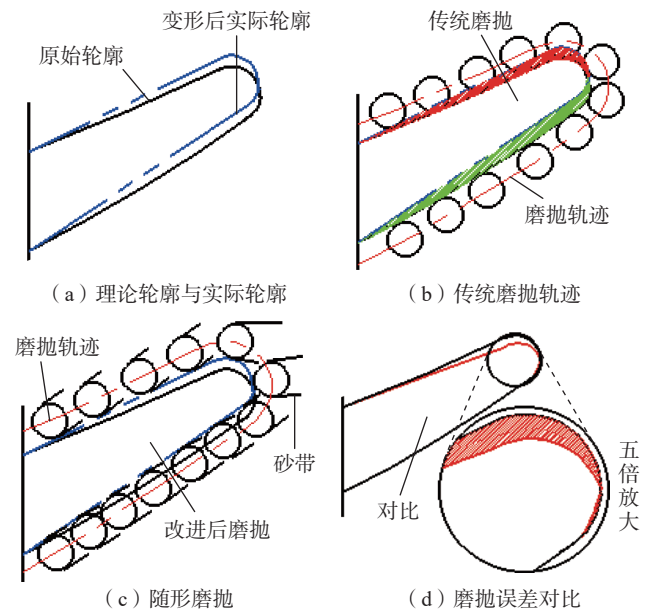


图8 叶片边缘误差形成示意图

Fig.8 Schematic diagram of blade edge error formation

误差。如图 8 (c) 所示,具有弹性特性的砂带磨抛能够很好地适应变形,保证整体叶盘边缘精度要求。

从以上分析可以得出,加工高精度整体叶盘叶片缘头必须规避强力砂带磨削。因为在强力砂带磨削区域,磨削量难以精确控制,容易造成边缘受力变形进而影响磨削精度。因此应采用柔性复合磨削方法实现整体叶盘叶片缘头的精密加工。

由于整体叶盘流道面深、窄,且开敞性较小,在磨削过程中需要将接触轮深入到两片叶片之间进行磨抛。为避免与叶片产生干涉,同时确保对叶型进行精准加工,砂带磨具的接触轮及其包角应尽量小。因此,最终选择曲面砂带磨抛装置,如图 9 所示。

在对整体叶盘叶型进行磨抛时,砂带会对接触轮形成一个与走刀方向相反且与接触轮相切的摩擦力。因此,选用了两端厚、中间薄的弹性复合杆状砂带磨具,如图 10 所示。当接触轮受到摩擦力时,会促使支撑杆产生弯曲形变。当支撑杆形变达到一定程度时,支撑杆的回复应力会将支撑杆拉回。结合砂带本身对整体叶盘的磨抛,形成一个上下往复磨抛的效果,从而提高磨抛质量。并且,在去除量较大或者不规则的部位,支撑杆易形变的性质有利于杜绝大冲击力的危害,防止磨头受损,提高了砂带磨具的自适应性和安全性。

本试验采用包角控制轮和弹簧组成一个包角控制装置,如图 11 所示。根据实际加工情况,可通过调节或

更换弹簧,达到对包角的控制。

为满足零件尺寸要求,将使用不同粒度的砂带,搭配多种工艺参数对零件进行磨削抛光。在砂带型号的选择方面,需考虑零件材料及加工实际情况。金刚石砂带抗磨损能力强,磨削后去除余量均匀,结合现场实际应用,最终确定使用规格为 1200 mm × 10 mm, 200# (电镀) 的金刚石砂带及 1200 mm × 10 mm, 800# (CX4) 的金刚石砂带作为叶型部位磨削工具,同时使用 200# 的金刚石指状磨头作为流道部位的磨削工具,如图 12 所示。

第一级整体叶盘磨抛分为叶型加工和流道加工两部分,这两部分采用不同的加工方式、工具和加工参数。根据实际加工结果分析,最终确定磨抛加工顺序为前缘 → 尾缘 → 叶盆 → 叶背。使用“粗抛 - 精抛”的加工工艺,粗抛时使用高转速,粗粒度砂带对机加刀纹及接刀进行去除;精抛时使用低转速,细粒度砂带用于满足零件的表面质量及粗糙度要求。3 组参数如表 1 所示。

3 结果分析

3.1 检测结果分析

试验完成后,检测得出叶型表面粗糙度全部满足 $R_a \leq 0.4 \mu\text{m}$, 叶片最大去除量分别为 0.008 mm、0.015 mm、0.021 mm。图 13 为整体叶盘叶片面磨削前、后对比图。可以明显看出,采用新型开式砂带磨抛以后,



图 9 曲面精密砂带磨抛装置

Fig.9 Device for precision belt grinding and polishing of curved surfaces

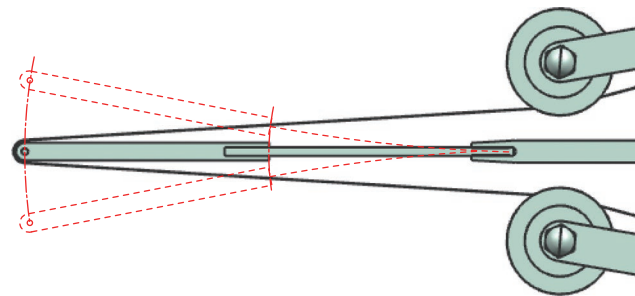


图 10 具有弹性的支撑杆

Fig.10 Flexible support rods

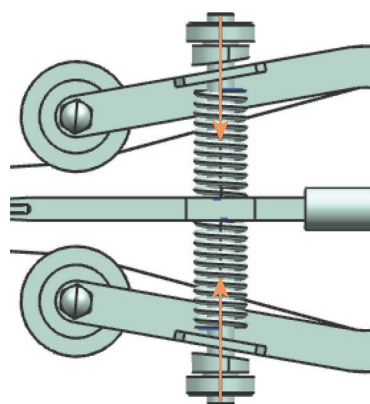


图 11 可调控的包角控制装置

Fig.11 Adjustable wrap angle control device



(a) 200#砂带

(b) 800#砂带

(c) 200#指状磨头

图 12 加工磨具

Fig.12 Processing of abrasives

加工表面为典型的塑性磨削痕迹,基本没有黏附物的存在,叶片表面质量显著提高,完全消除了精铣以后的机加铣削纹路,叶片表面没有出现明显的烧伤、刮痕等缺陷。

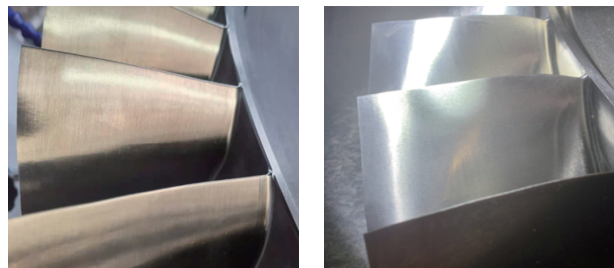
使用整体叶盘测量机对叶型进行检测,得到叶型磨抛后的检测数据,如图 14 所示。可以看到,实测轮廓与理论轮廓重合度较好,并且叶型光滑、平滑,无接刀痕迹等异常,前、后缘无尖边、削边、平头等现象。

对叶片进行多点采样测量表面粗糙度,平均值 $R_a=0.19 \mu\text{m}$,满足加工精度要求 ($R_a \leq 0.4 \mu\text{m}$)。从图 15 可以看出, R_a 从 $0.481 \mu\text{m}$ 降低到 $0.196 \mu\text{m}$ 。对磨抛前、后多个叶片进行表面粗糙度测量。磨抛后,表面粗糙度值及其一致性有了极大提高。并且,在砂带磨削过程中,

表 1 试验加工参数

Table 1 Experimental processing parameters

试验序号	磨削位置	砂带材质	砂带粒度	转速/(r/min)
1	叶盆	金刚石	200#	1000
	叶背	金刚石	200#	1000
	前缘	金刚石	800#	500
	尾缘	金刚石	800#	500
	流道	金刚石指状磨具	200#	3000
2	叶盆	金刚石	200#	1500
	叶背	金刚石	200#	1500
	前缘	金刚石	800#	500
	尾缘	金刚石	800#	500
	流道	金刚石指状磨具	200#	3000
3	叶盆	金刚石	200#	2000
	叶背	金刚石	200#	2000
	前缘	金刚石	800#	500
	尾缘	金刚石	800#	500
	流道	金刚石指状磨具	200#	3000



(a) 磨抛前 (b) 磨抛后

图 13 叶片磨抛前、后对比

Fig.13 Comparison of the blade before and after grinding and polishing

基于砂带与接触轮的柔性特性,砂带与工件在接触压力作用下呈面接触状态。同时在砂带与工件之间裹挟着崩碎的磨粒和冷却液,从而形成研磨抛光的效果。整体叶盘在砂带磨削过程中具有磨削和抛光的双重作用,因此可获得较低的表面粗糙度。

3.2 加工效率及质量提升

与传统手工作业相比,整体叶盘机器人砂带磨抛在加工效率、一次交检合格率等方面有极大的提升。在某型号航空发动机第一级整体叶盘磨抛加工中,采用机器人砂带磨抛工艺时配备了两套磨具交替作业。当一套磨具进行磨抛加工时,操作工可以在另一套磨具上进行砂带更换,磨抛加工不会因更换砂带而暂停,进而缩短加工周期。

机器人砂带抛光和手工抛光在加工效率及质量方面的对比如图 16 所示。使用机器人进行单叶片磨抛加工的时间为 43 min,整盘叶型磨抛时间共计 29.5 h;传统手工作业整盘叶型磨抛平均耗时为 102 h,整盘加工效率提升了约 71%。

整体叶盘机器人砂带磨抛加工具有一致性高的特点。与手工作业相比,叶型一次交检合格率由原来的不足 65% 提升至 95% 以上。在加工过程中,砂带磨损呈现出较强的规律性。经统计,整体叶盘叶型采用机器人砂带磨抛工艺,砂带消耗量比手工磨抛减少了 10%。

3.3 叶型磨抛加工工艺固化

对检测数据进行分析,最终确定第一级整体叶盘的机器人砂带磨抛加工工艺如下:先使用 200# 金刚石砂带对叶盆及叶背进行粗抛,再使用 800# 金刚石砂带对叶片进行精抛,最后使用 200# 金刚石指状磨头对流道部位进行加工。经过多组试验交叉验证表明,本文提出的工艺方法能够确保叶片表面抛光质量的可靠性和稳定性。

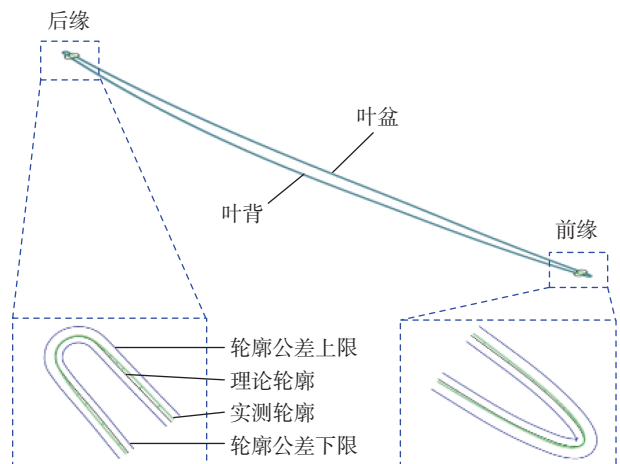


图 14 叶型测量结果

Fig.14 Results of leaf shape measurements

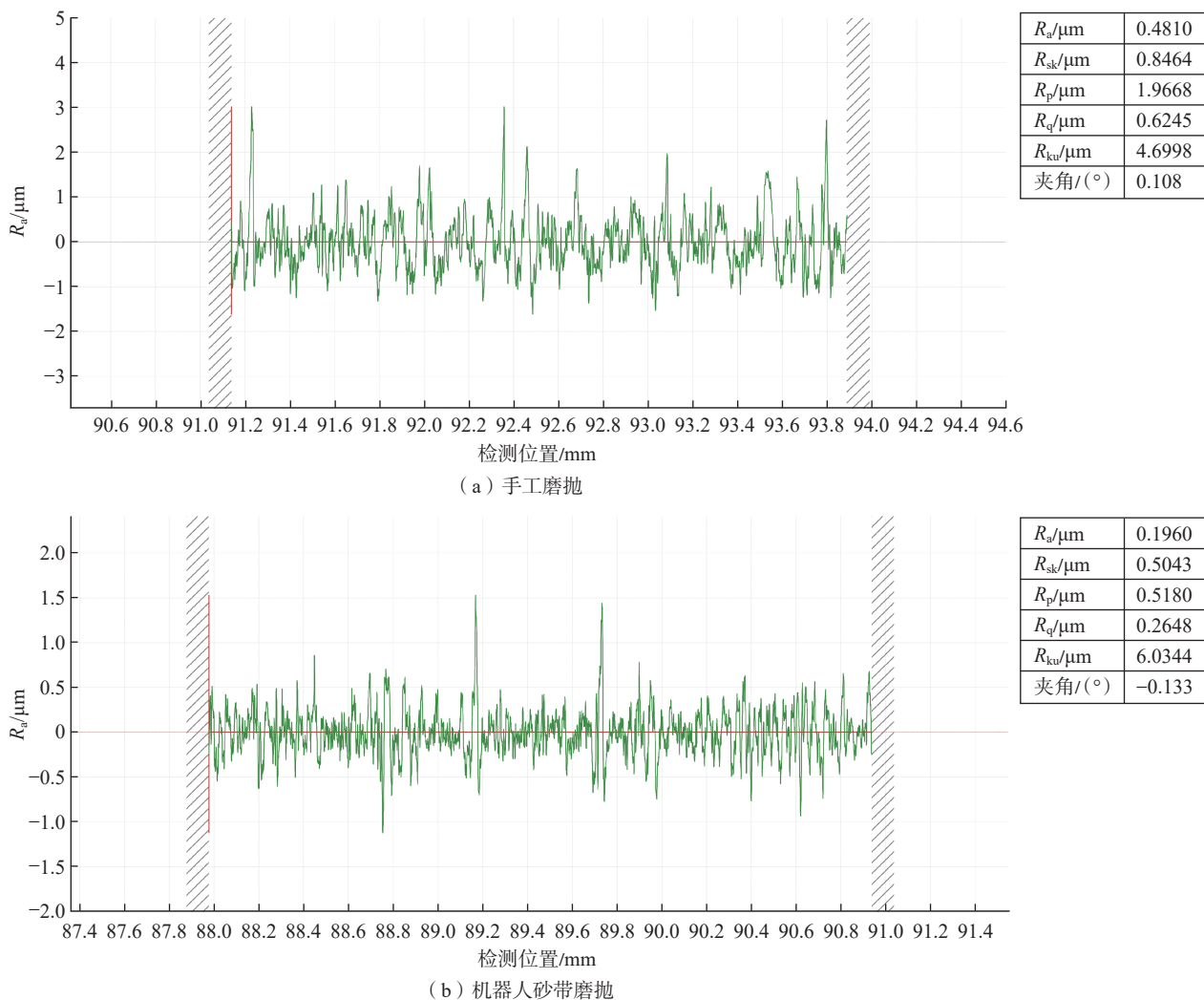


图 15 叶型表面单点表面粗糙度测量结果
Fig.15 Results of single-point surface roughness measurements on the blade profile surface

4 结论

本文以某型号航空发动机第一级整体叶盘叶型磨抛为例,研究了整体叶盘机器人柔性砂带磨抛工艺,得出如下结论。

(1)提出了整体叶盘机器人柔性砂带磨抛工艺方法,在整体叶盘机器人磨抛设备上实现了整体叶盘叶片全型面磨抛,验证了新工艺的可行性。

(2)采用整体叶盘机器人砂带柔性抛光设备进行磨抛后,磨抛表面粗糙度 $R_a \leq 0.4 \mu\text{m}$,叶型轮廓度满足设计公差要求,且磨抛后叶型一致性高。

(3)相比于传统手工磨抛,提出的整体叶盘机器人柔性砂带磨抛工艺磨抛时间整体缩短了 71%,叶型一次交检合格率由原来的不足 65% 提升至 95% 以上,砂带消耗量较传统手工磨抛工艺降低了 10%。

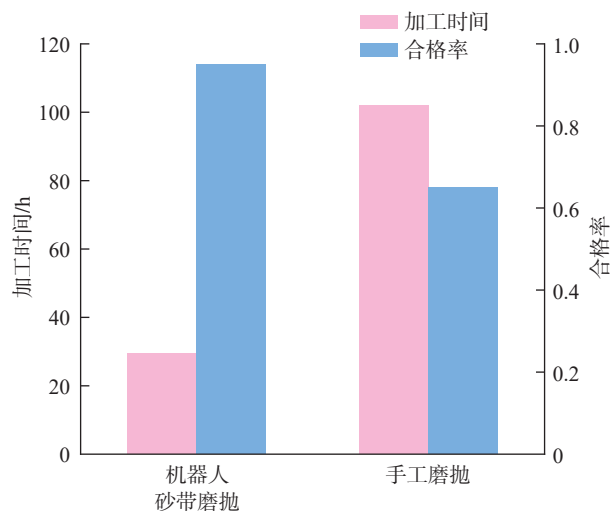


图 16 加工效率及质量对比
Fig.16 Comparison of machining efficiency and quality

参考文献

- [1] 闫含, 刘小刚. TC4 合金低塑性抛光过程数值模拟[J]. 航空发动机, 2021, 47(2): 95–102.
- YAN Han, LIU Xiaogang. Numerical simulation of low plasticity burnishing process of TC4 alloy[J]. Aeroengine, 2021, 47(2): 95–102.
- [2] 陈亚莉, 李美荣, 宋成. 压气机叶片型面精密数控铣加工技术应用研究[J]. 航空发动机, 2016, 42(4): 93–97.
- CHEN Yali, LI Meirong, SONG Cheng. Investigation on precision NC milling technology of compressor blade surface[J]. Aeroengine, 2016, 42(4): 93–97.
- [3] 张海艳, 张连锋. 航空发动机整体叶盘制造技术国内外发展概述[J]. 航空制造技术, 2013, 56(23/24): 38–41.
- ZHANG Haiyan, ZHANG Lianfeng. Development overview of aeroengine integral blisk and its manufacturing technology at home and abroad[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(23/24): 38–41.
- [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] 李小彪, 史耀耀, 赵鹏兵, 等. 航空发动机叶片砂带抛光力控制技术[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(6): 1209–1214.
- LI Xiaobiao, SHI Yaoyao, ZHAO Pengbing, et al. Polishing force control technology of aero-engine blade in belt polishing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(6): 1209–1214.
- [6] 鲜超, 史耀耀, 蔺小军, 等. 百叶轮抛光TC4的接触弧长试验研究[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(5): 1218–1232.
- XIAN Chao, SHI Yaoyao, LIN Xiaojun, et al. Experimental study on contact arc length of polishing TC4 with abrasive cloth wheel[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(5): 1218–1232.
- [7] 蔡鸣, 朱光, 李论, 等. 基于PSO-LSSVR的机器人磨抛材料去除模型[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2024(1): 174–177, 182.
- CAI Ming, ZHU Guang, LI Lun, et al. Robot polishing material removal model based on PSO-LSSVR[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2024(1): 174–177, 182.
- [8] 田凤杰, 张彦智, 朱光, 等. 机器人磨抛复杂曲面加工轨迹对表面质量的影响研究[J]. 航空制造技术, 2024, 67(5): 60–65.
- TIAN Fengjie, ZHANG Yanzhi, ZHU Guang, et al. Research on influence of machining path on surface quality in robot grinding complex surface[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(5): 60–65.
- [9] 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.
- [10] UHLMANN E, HEITMÜLLER F, MANTHEI M, et al. Applicability of industrial robots for machining and repair processes[J]. Procedia CIRP, 2013, 11: 234–238.
- [11] UHLMANN E, HEITMÜLLER F. Improving efficiency in robot assisted belt grinding of high performance materials[J]. Advanced Materials Research, 2014, 907: 139–149.
- [12] SUN Y Q, GIBLIN D J, KAZEROUNIAN K. Accurate robotic belt grinding of workpieces with complex geometries using relative calibration techniques[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2009, 25(1): 204–210.
- [13] YONG L, YUN H. Experimental investigation in the grinding and wear performance of abrasive belt grinding[J]. Mechanical Science Technology for Aerospace Engineering, 2014, 33(12): 1865–1868.
- [14] 肖贵坚, 黄云, 伊浩. 面向型面精度一致性的整体叶盘砂带磨削新方法及实验研究[J]. 航空学报, 2016, 37(5): 1666–1676.
- XIAO Guijian, HUANG Yun, YI Hao. Experimental research of new belt grinding method for consistency of blisk profile and surface precision[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(5): 1666–1676.
- [15] XIAO G J, HUANG Y, WANG J. Path planning method for longitudinal micromarks on blisk root-fillet with belt grinding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 95(1): 797–810.
- [16] XIAO G J, HUANG Y. Adaptive belt precision grinding for the weak rigidity deformation of blisk leading and trailing edge[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(10): 168781401773170.
- [17] ZHANG Y, LIN X J, SHI Y Y, et al. Effect of relative feeding direction on surface texture in abrasive cloth flap wheel polishing process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 124(1): 79–96.
- [18] YANG R, LIN X J, ZHANG Y, et al. Research on modeling of flexible polishing force of abrasive cloth flap wheel based on elastic-plastic deformation characteristics[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 125(9): 4793–4809.
- [19] 叶欢, 陈志同, 佘传瑞, 等. 整体叶盘根部与流道面分区域抛光技术[J]. 航空制造技术, 2022, 65(17): 103–109.
- YE Huan, CHEN Zhitong, SHI Chuanrui, et al. Subregional polishing technology for root and hub area of blisk[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(17): 103–109.
- [20] 余广渊, 张晟玮, 康恺煜, 等. 砂带抛光工艺参数对TC17表面粗糙度的影响规律研究[J]. 工具技术, 2023, 57(5): 49–53.
- YU Guangyuan, ZHANG Shengwei, KANG Kaiyu, et al. Research on influence of abrasive belt polishing process parameters on surface roughness of TC17 titanium alloy[J]. Tool Engineering, 2023, 57(5): 49–53.
- [21] 张军锋, 史耀耀, 蔺小军, 等. 基于灰色关联分析的叶片砂带抛光参数优化[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(4): 806–814.
- ZHANG Junfeng, SHI Yaoyao, LIN Xiaojun, et al. Parameters optimization in belt polishing process of blade based on grey relational analysis[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(4): 806–814.

通信作者: 侯可为, 工程师, 研究方向为整体叶盘 / 叶环类复杂曲面结构件加工技术。

(责编 七七)