

基于弹性基体磨具的 3D 打印 高温合金叶片磨抛试验

郭磊^{1,2}, 王家庆¹, 明子航¹, 郭万金¹, 马臻³, 靳淇超¹

(1.长安大学 工程机械学院, 西安 710064; 2.重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044; 3.中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

摘要: **目的** 验证弹性基体磨具自适应磨削抛光加工增材制造镍基高温合金叶片的工艺可行性。**方法** 以硅橡胶基体磨具弹性磨抛技术为基础, 建立弹性磨具与叶片接触的有限元模型, 分析磨具与工件接触区域内应力和材料去除分布。以有限元分析结果为指导, 研究磨具接触变形和材料去除对轨迹规划的影响, 确定合理的轨迹步长和间距, 并通过控制工件位姿角的变化, 保证在磨抛过程中磨具与工件的接触状态不变。以 GH4169 镍基合金叶片为加工对象, 采用硅橡胶弹性固结磨料磨具在小型四轴加工平台上进行磨抛试验。**结果** 仿真结果表明, 弹性磨具与曲面工件之间的接触区域为椭圆形, 应力和材料去除分布都由椭圆心到周围逐渐减小; 当弹性磨具的压缩量为 3 mm 时, 基于弹性接触有限元分析结果确定的最优轨迹间距为 9 mm。试验结果表明, 采用自适应磨抛轨迹抛光后, 叶片表面无明显划痕和抛光纹理, 表面粗糙度 R_a 由开始的 $1.846\text{ }\mu\text{m}$ 降至 $0.182\text{ }\mu\text{m}$, 标准差由 $0.108\text{ }\mu\text{m}$ 降至 $0.026\text{ }\mu\text{m}$, 材料去除率为 $3.432\times 10^9\text{ }\mu\text{m}^3/\text{min}$ 。**结论** 硅橡胶弹性固结磨料磨具可用于 GH4169 镍基合金叶片的超精密磨抛, 基于弹性磨具接触区域应力分布及工件位姿变换提出的自适应轨迹规划能够保证叶片磨抛区域表面质量的一致性。

关键词: 自适应磨削; 柔性抛光; 镍基高温合金; 轨迹规划; 表面质量

中图分类号: TG58 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2023)02-0043-12

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.02.005

Grinding and Polishing Test of 3D-printed Superalloy Blade Based on Elastic-matrix Abrasive Tool

GUO Lei^{1,2}, WANG Jia-qing¹, MING Zi-hang¹, GUO Wan-jin¹, MA Zhen³, JIN Qi-chao¹

(1. School of Construction Machinery, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China)

ABSTRACT: Shape-Adaptive Polishing (SAP) is an effective method for the polishing of hard and brittle materials. The work aims to verify the feasibility of the adaptive grinding and polishing of 3D-printed nickel-based superalloy engine blades with

收稿日期: 2022-09-01; 修订日期: 2022-11-02

Received: 2022-09-01; Revised: 2022-11-02

基金项目: 国家自然科学基金 (51805044); 陕西省自然科学基金研究计划 (2022JM-254); 中国博士后科学基金 (2020M673318); 机械传动国家重点实验室开放基金 (SKLMT-MSKFCT-202006)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51805044); Basic Research plan of Natural Science of Shaanxi (2022JM-254); China Postdoctoral Science Foundation (2020M673318); Open Fund of State Key Laboratory of Mechanical Transmission (SKLMT-MSKFCT-202006)

作者简介: 郭磊 (1986—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为精密与智能制造技术

Biography: GUO Lei (1986-), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: precision and intelligent manufacturing technology.

引文格式: 郭磊, 王家庆, 明子航, 等. 基于弹性基体磨具的 3D 打印高温合金叶片磨抛试验[J]. 表面技术, 2023, 52(2): 43-54.

GUO Lei, WANG Jia-qing, MING Zi-hang, et al. Grinding and Polishing Test of 3D-printed Superalloy Blade Based on Elastic-matrix Abrasive Tool[J]. Surface Technology, 2023, 52(2): 43-54.

elastic matrix abrasive tools. Firstly, a finite element model of the elastic contact between the polishing tool and the blade was established based on the elastic grinding and polishing techniques with silicon rubber-based abrasive tools. In addition, the stress distribution and material removal function within the contact area were analyzed. Furthermore, the effect of contact deformation and material removal of abrasive tools on trajectory planning was studied according to the finite element analysis. Finally, the reasonable trajectory step size and spacing were determined, where the contact state between the grinding tool and the workpiece was kept unchanged during the grinding and polishing process. The experimental tests were carried out on a desktop CNC machining system. EOSM290 3D printer was employed to fabricate the blade, and the GH4169 nickel-based alloy was selected as the source material. The preparation of the abrasive tool was realized by a molding process, where the Smooth-On Ecoflex 0050 silicon rubber and micron-sized diamond grains were selected as the binder matrix material and abrasives. During the experiment, the rotation axis of the silicon rubber-based abrasive tool was consistently vertical to the blade surface by controlling the position and orientation of the blade. The simulation results showed the elliptical contact area between the elastic tool and the curved surface workpiece. Also, the stress distribution and material removal rate decreased gradually from the ellipse's center to the periphery. The optimal track spacing determined was 9 mm when the compression of the elastic abrasive tool was 3 mm. The optimal track spacing increased with the increasing compression of the elastic abrasive tool. The polished blade surface topography was observed through the optical microscope. The experimental results showed that the blade surface had no noticeable scratches and dents after polished with the adaptive polishing tool and planned trajectory. The reason was that the elastic matrix abrasive tool had excellent flexibility in the polishing process and deformed with the blade surface according to the shape, thereby achieving flexible adaptive and uniform polishing under the condition of ensuring the stability of polishing parameters. A group of 10 sample points was taken in the polishing area of the blade surface for measuring the surface roughness by Mitutoyo SURFTEST SJ-310 roughness meter. The surface roughness value was reduced from $1.846\text{ }\mu\text{m}$ to $0.182\text{ }\mu\text{m}$, and the standard deviation was decreased from $0.108\text{ }\mu\text{m}$ to $0.026\text{ }\mu\text{m}$. The blade weight loss before and after polishing was measured by an electronic balance, and the material removal rate was calculated as $3.432\times 10^9\text{ }\mu\text{m}^3/\text{min}$. In summary, the silicon rubber-based abrasive tool can realize the precision polishing of GH4169 nickel-based alloy blades. The adaptive trajectory planning based on the stress distribution in the contact area of the elastic abrasive tool and the transformation of the workpiece position and orientation is promising to improve the consistency of the surface quality in the blade polishing area.

KEY WORDS: adaptive grinding and polishing; compliant polishing; nickel-based superalloy; trajectory planning; surface quality

镍基高温合金材料因其耐高温、耐腐蚀、抗冲击、抗疲劳等优异的服役性能,被广泛应用于航空、航天、能源、化工等领域的高端装备关键基础零部件制造^[1-4],突出的高温力学性能也使镍基高温合金成为主要的高强、高韧、难加工材料之一。磨削作为镍基高温合金材料精密与超精密加工的主要方式之一,在加工过程中,无法完全避免因较大的磨削力和磨削温度引起的表面、亚表面应力残余及损伤、缺陷等问题,进而导致工件的加工精度、表面质量及完整性不足^[5-7]。镍基高温合金涡轮叶片作为航空发动机的核心零部件,对于复杂曲面精度、加工表面质量及损伤、应力残余等指标的要求越来越高,其磨削抛光质量直接决定航空发动机的工作效率和使用寿命^[8-9]。如何在保证材料去除的同时提高加工精度、表面质量,并减小损伤和应力残余,是镍基高温合金超精密加工领域亟待解决的关键问题。

航发叶片的轮廓形状比较复杂,加工精度要求较高,传统的人工手动打磨抛光方法不但耗时耗力、污染环境,还高度依赖操作人员的经验,且难以保证批

量产品的加工一致性^[10]。目前,叶片磨削抛光以基于多轴机床或机器人平台的接触式磨具确定性加工为主,相较于常规刚性系统与刚性工具磨抛方法,以砂带磨削^[11-13]、气囊磨抛^[14]、砂布轮磨抛^[15]、弹性磨头磨抛^[16]为代表的柔性自适应磨削抛光技术具有工件形状适应性好、材料去除效率高、表面及亚表面损伤较小、加工一致性良好、可控性良好等显著特点,能够在一定程度上满足涡轮叶片高精度、高效率、高完整性、低损甚至无损的高性能加工需求。

Lv 等^[17]为了解决采用机器人砂带磨削加工叶片加工余量分布不均匀的问题,提出考虑插值算法和加工余量阈值的轨迹规划方法。结果表明,采用新的轨迹规划方法对叶片进行加工后,叶片表面轮廓精度分别提高了 34.2%和 55.1%,平均加工表面粗糙度达到 $0.3\text{ }\mu\text{m}$,加工效率得到明显提高。Li 等^[18]为了研究超声振动辅助砂带磨削对 GH4169 表面完整性的影响,建立了考虑砂带柔性特性的超声辅助砂带磨削运动学模型,分析了磨粒的运动特性和材料去除规律。结果表明,采用超声振动辅助砂带磨削能够将表面粗糙

度降低 25%, 有效地提高了 GH4169 材料的表面完整性和疲劳寿命。肖贵坚等^[19]为了提高叶片的表面完整性, 提出基于灰色关联法的机器人砂带磨削, 试验结果表明, 叶片的表面粗糙度达到 $0.4\ \mu\text{m}$, 且叶片的精度达到 $0.04\ \text{mm}$, 有效地提高了叶片的表面质量。林泽文等^[20]研究了机器人气囊抛光过程中机器人末端刚度对气囊抛光稳定性的影响, 基于 Preston 理论建立了含变形误差的气囊抛光去除函数, 通过试验可知, 抛光斑在 xy 截面轮廓线上皆呈类高斯形状, 且 xy 截面轮廓线基本一致, 具有较好的重合度。对比不同抛光位置的截面轮廓线, 其相对误差小于 5%, 验证了其在离散进动抛光时的稳定性。淮文博等^[21]为了掌握砂布轮柔性抛光叶片表面完整性关键表征数据, 对比分析了叶片试件抛光试验前后的表面粗糙度、微观形貌等参数的变化情况。结果表明, 砂布轮柔性自适应抛光可使工件表面粗糙度小于 $0.4\ \mu\text{m}$, 提高了表面形貌一致性。王志伟等^[22]为了解决抛光叶片表面砂布轮沿接触曲线上的径向压缩量偏差导致材料去除量一致性较差问题, 提出了一种基于压缩量偏差约束的路径规划方法。结果表明, 试件抛光区域粗糙度由 $0.26\ \mu\text{m}$ 降至 $0.21\ \mu\text{m}$, 并且表面轮廓曲线的一致性得到明显改善。Zhang 等^[23]针对叶片材料去除不均匀、表面粗糙度较大等问题, 建立了砂布轮与叶片接触的有限元仿真模型。仿真和试验结果表明, 提出的柔性自适应轨迹规划方法可以使叶片的表面粗糙度达到 $0.3\ \mu\text{m}$, 前缘和后缘的表面粗糙度达到 $0.2\ \mu\text{m}$, 总抛光效率提高了约 9.4%。周天择^[24]为了满足自由曲面表面质量的需求, 通过 Preston 材料去除公式, 建立了弹性抛光工具在恒定抛光力和压力控制下的材料去除区域模型, 根据材料去除模型建立了基于光栅抛光路径的椭圆曲面最优路径生成算法, 试验结果表明, 优化轨迹磨抛后的工件表面粗糙度得到明显降低, 表面粗糙度从 $0.3942\ \mu\text{m}$ 降至 $0.2488\ \mu\text{m}$, 验证了优化轨迹算法的合理性。

虽然上述文献分析了接触区域的应力和速度分布, 建立了弹性接触区域的材料去除模型, 但是并未考虑柔性接触变形过程中磨具压缩量对弹性磨具磨

削抛光轨迹规划算法的影响。由此, 文中考虑弹性磨具磨削抛光过程中的磨具压缩量, 提出一种基于弹性磨具的自适应磨削抛光轨迹规划方法, 深入研究接触区域应力分布对磨抛轨迹的影响, 通过接触区域应力分布指导优化磨抛轨迹的生成, 最后试验得出加工后工件的表面粗糙度、材料去除效率及工件的面型精度, 以验证算法的可行性。

1 弹性磨具与叶片的接触分析

1.1 弹性磨具与叶片的结构

文中采用的弹性磨具以硅橡胶为结合剂基体, 混合微米级金刚石磨料, 并通过模压成型方法制备成半球形, 半球形的半径 R 为 $15\ \text{mm}$, 由特定夹具夹持后连接至主轴进行磨抛加工。弹性磨具结构如图 1 所示, 在磨抛过程中, 弹性磨具以一定转速和压力与工件接触, 通过磨具表面的磨粒来实现材料的去除。该弹性磨具具有以下特点: 弹性磨具与工件表面为非刚性接触, 能够有效减少材料表面、亚表面的损伤和边缘效应; 弹性磨具以面接触、固结磨料磨削进行磨抛加工, 既有助于仿形加工, 又能够保证较高的材料去除率; 弹性基体对磨粒较弱的把持力, 使得磨损的磨粒更易从磨具表面脱落, 加快了磨具的自锐。

叶片采用涡轮喷气发动机叶片的一部分, 长度为 $51.2\ \text{mm}$, 宽度为 $40\ \text{mm}$, 前缘厚度为 $6.4\ \text{mm}$, 后缘厚度为 $1\ \text{mm}$, 三维模型如图 2 所示。通过 EOS M290 金属 3D 打印机实现成品的打印, 该打印机采用选区激光熔化 (Selective Laser Melting, SLM) 技术。SLM 技术能够以近净成形方式实现难加工金属材料零部件的加工, 相较于传统机加工方法, SLM 不仅能够实现 CNC 加工无法完成的镂空结构等复杂形状特征零部件的制造, 还降低了材料与刀具的消耗成本, 并且简化了工艺流程。打印工艺如图 3 所示, 打印过程工艺参数如表 1 所示。以金属粉末为加工原料, 采用高能密度激光束将铺洒在金属基板上的粉末逐层熔覆堆积, 从而形成金属零件。

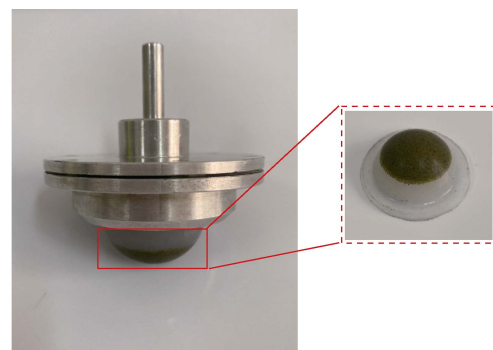
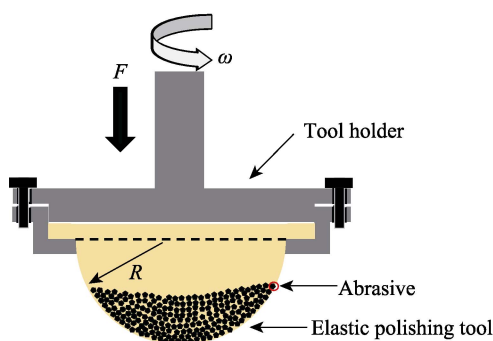


图 1 硅橡胶弹性固结磨料磨具
Fig.1 Silicon rubber-based elastic abrasive tool

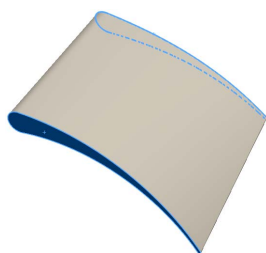


图 2 叶片三维模型图
Fig.2 3D model of blade

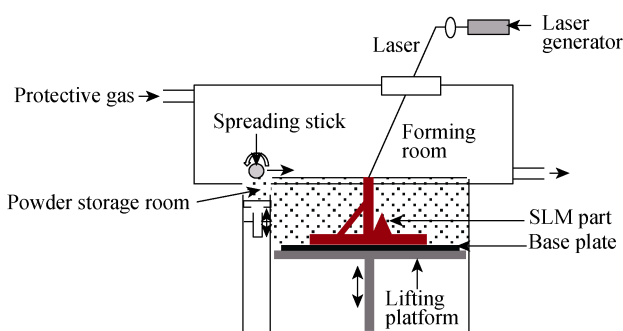


图 3 金属 3D 打印工艺
Fig.3 3D printing process of metal parts

表 1 3D 打印工艺参数
Tab.1 Process parameters of 3D printing

Parameters	Value
Laser power/W	350
Scanning speed/(mm·s ⁻¹)	1 800
Scanning spacing/μm	90
Layer thickness/mm	0.035
Diameter of the spot/μm	80

1.2 接触模型的建立与仿真

采用 ABAQUS 仿真软件对弹性磨具与叶片之间的接触情况进行有限元分析。首先, 设置磨具和叶片三维模型的材料属性, 参数设置如表 2 所示; 然后通

过平移和选择等操作完成磨具与叶片的接触装配, 并以叶片凸面和磨具外表面作为相互接触面; 接着将叶片固定, 对磨具施加位移载荷; 最后划分网格, 进行静力学分析, 仿真模型和结果如图 4 所示。从图 4 可以看出, 接触区域为椭圆形, 其长半轴为 a , 短半轴为 b 。椭圆中心处的应力最大, 应力由中心到边界逐渐减小。接触区域的大小和中心最大应力值与弹性磨具、叶片材料属性和弹性磨具的压缩量有关。

表 2 ABAQUS 模拟的参数
Tab.2 Parameters of ABAQUS simulation

Parameters	Value
Elastic polishing tool's elastic modulus E_1 /MPa	6
Blade's elastic modulus E_2 /GPa	199
Elastic polishing tool's Poisson's ratio ν_1	0.47
Blade's elastic Poisson's ratio ν_2	0.3
Elastic polishing tool's radius R /mm	15
Contact compression δ /mm	3

1.3 接触区域的材料去除分布

Preston 方程被广泛应用于磨抛加工的材料去除模型中。根据 Preston 方程可知, 材料去除率与抛光压力和相对速度成正比, 其表达式见式 (1) [25]。

$$\frac{dh}{dt} = k_p \cdot p \cdot v_r \quad (1)$$

式中: k_p 为 Preston 常数, 一般由试验确定; p 为弹性磨具与工件接触区域的压力; v_r 为弹性磨具与工件之间的相对速度。

从图 4 可以看出, 接触区域中应力的分布近似为椭圆形, 并且接触过程满足赫兹接触定律, 其表达式见式 (2) [26]。

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 = 1 \quad (2)$$

接触区域椭圆的长半轴 a 和短半轴 b 的计算见式 (3)。

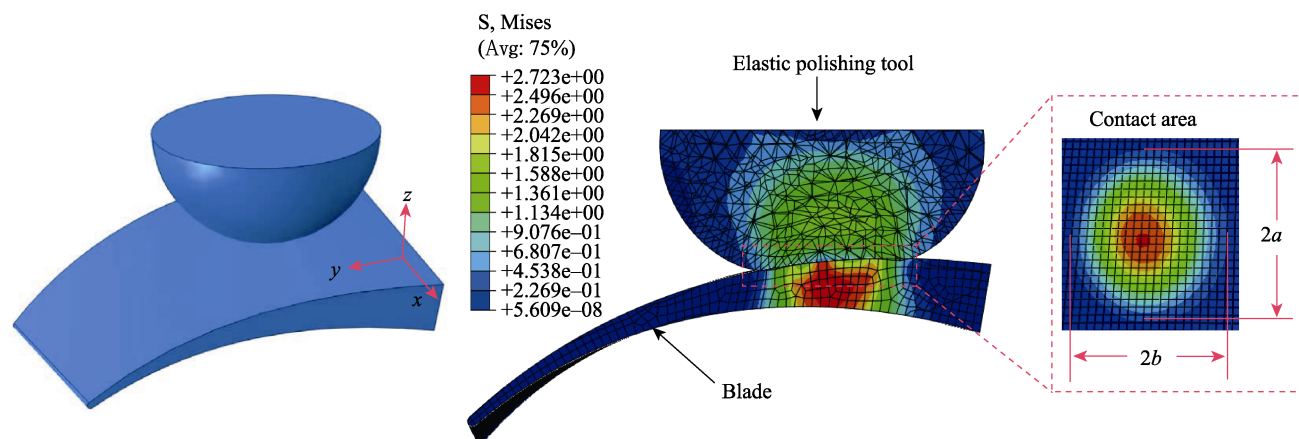


图 4 接触区域应力分布模拟
Fig.4 Simulation of the stress distribution in contact area

$$a = \left[\frac{3k^2 \varepsilon(k) F_n R_c}{\pi E_c} \right]^{1/3}, \quad b = \left[\frac{3\varepsilon(k) F_n R_c}{\pi E_c} \right]^{1/3} \quad (3)$$

$$\text{其中 } \frac{1}{E_c} = \frac{1-\nu_1}{E_1} + \frac{1-\nu_2}{E_2} \quad (4)$$

$$R_c = \frac{1}{k_1 + k_2} \quad (5)$$

$$k \approx 1.0339 \left(\frac{k_2}{k_1} \right)^{0.636} \quad (6)$$

$$\varepsilon(k) \approx 1.003 + 0.5968 \left| \frac{k_1}{k_2} \right| \quad (7)$$

式中: E_c 为弹性磨具与工件之间的相对弹性模量, MPa; F_n 为弹性磨具与工件之间的法向接触力, N; R_c 为曲率的相对半径, mm; E_1 、 ν_1 为弹性磨具的弹性模量和泊松比; E_2 、 ν_2 为工件的弹性模量和泊松比; $\varepsilon(k)$ 为第 2 类椭圆积分; k_1 为弹性磨具的曲率; k_2 为工件在接触点处的曲率。

根据赫兹接触理论可知, 接触区域内任意点的应力分布可以表示为式 (8)。

$$p(x, y) = \frac{3F_n}{2\pi a \cdot b} \left[1 - \left(\frac{x}{a} \right)^2 - \left(\frac{y}{b} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

磨具相对于工件表面的运动速度也是决定磨具材料去除能力的重要因素, 对接触区域内任一点 $G(x, y)$ 建立如图 5 所示的接触模型。

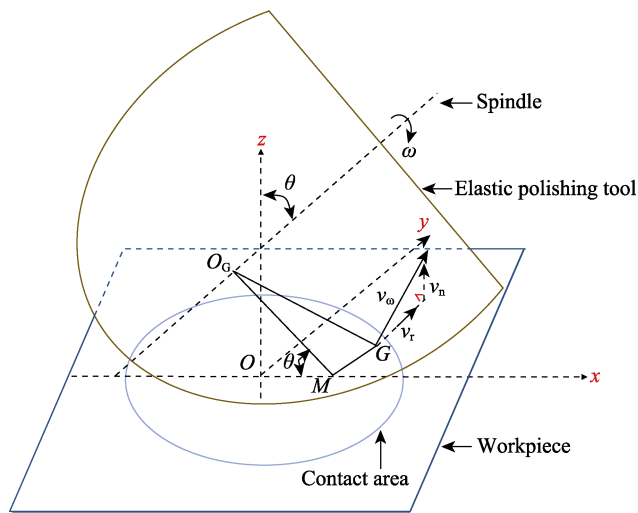


图 5 接触区域的速度分布模型

Fig.5 Velocity distribution model in the contact area

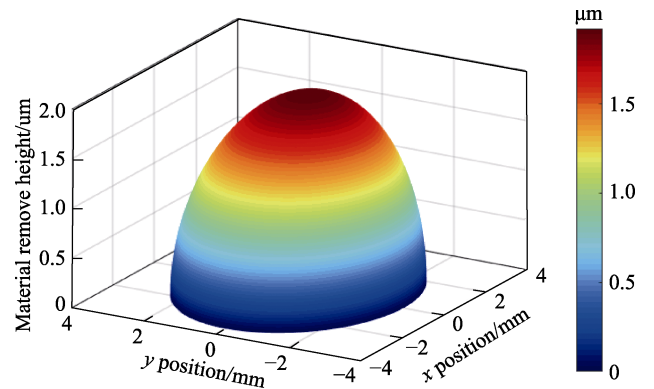
由图 5 可知, 接触区域中的速度分布与弹性磨具半径 R 、压缩量 δ 、位姿角 θ 、磨具转速 ω 有关, 接触区域内任意一点 $G(x, y)$ 处的速度为 v_w 。速度 v_w 可以分解为切向速度 v_t 和法向速度 v_n 。法向速度 v_n 在实际磨抛过程中非常小, 其对磨削过程中材料去除的影响可以忽略不计, 因此接触区域内任意一点 $G(x, y)$ 处的相对速度为 v_t , 可以表示为式 (9)。

$$v_t(x, y) = v_t = \omega \cdot \sqrt{(y \cos \theta)^2 + [x \cos \theta + (R - \delta) \sin \theta]^2} \quad (9)$$

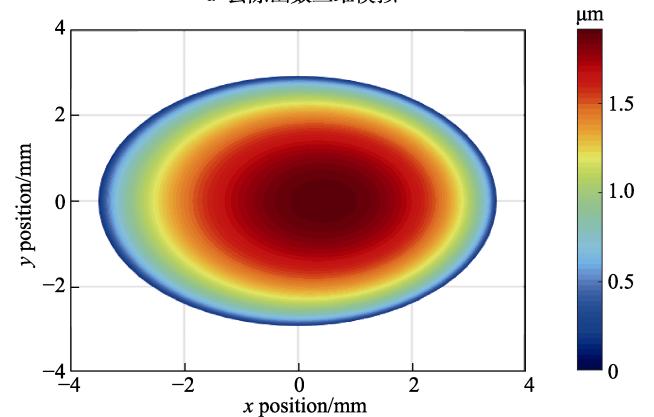
将式 (8) — (9) 代入式 (1) 就可得到材料去除模型的表达式, 见式 (10)。

$$\frac{dh}{dt} = k_p \cdot \omega \cdot \frac{3F_n}{2\pi a \cdot b} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a} \right)^2 - \left(\frac{y}{b} \right)^2} \cdot \sqrt{(y \cos \theta)^2 + [x \cos \theta + (R - \delta) \sin \theta]^2} \quad (10)$$

根据式 (10) 可知, 材料去除不仅取决于接触区域内的法向接触压力和相对速度, 还与磨具及工件本身的材料属性息息相关。对材料去除函数进行仿真 (如图 6 所示), 材料去除大致呈高斯分布, 接触区域中心材料的去除量最大, 靠近磨抛区域的边缘, 材料去除量逐渐减小, 与接触应力分布模拟结果 (如图 4 所示) 基本一致; 最大材料去除的位置沿 x 轴方向有轻微偏移, 这是因为弹性磨具以一定位姿角进行加工时, 接触区域中的相对速度非对称分布。基于接触区域内的材料去除分布, 在轨迹规划的过程中适当调整轨迹的步长和间距, 可以有效地提高工件的加工精度。



a 去除函数三维模拟



b 去除函数平面分布

图 6 材料去除函数仿真

Fig.6 Simulation of material removal function: a) 3D model of removal function; b) plane distribution of removal function

2 轨迹规划算法

在对叶片的轨迹规划过程中, 需要考虑弹性磨具与工件接触区域的材料去除, 通过合理调整磨具运动轨迹的步长、间距、弹性磨具进动角等工艺参数, 可

以均匀去除加工表面的材料,提高叶片的表面质量。叶片磨抛轨迹点的提取流程如图7所示,首先选定需要磨抛的表面,并进行参数化,确定磨抛区域边界 uv 值,方向 u 定义为叶片表面垂直于截面轮廓的方向,方向 v 定义为叶片表面沿着轮廓曲线的方向,磨抛区域(图8)可表示为 $u_1 \leq u \leq u_2, v_1 \leq v \leq v_2$;其次,确定第1条轨迹 T_1 的方向,并设定一个初始轨迹点 P_1 ;接着根据等弦高误差方法迭代计算第1条轨迹上的其他轨迹点($P_1, P_2, P_3, \dots, P_i$),并确保轨迹点都在磨抛区域内;然后根据相邻轨迹上沿着方向 v 上的2个轨迹点处接触区域应力分布叠加情况的有限元分析,确定与相邻轨迹 T_2 之间的最优间距 L ,得出相邻轨迹 T_2 ,然后依次迭代计算出相邻轨迹($T_3, T_4, T_5, \dots, T_i$);最后当规划的轨迹点完全覆盖磨抛区域时,即完成所有轨迹 T_i 的规划,提取出各个轨迹点 P_i 数据。

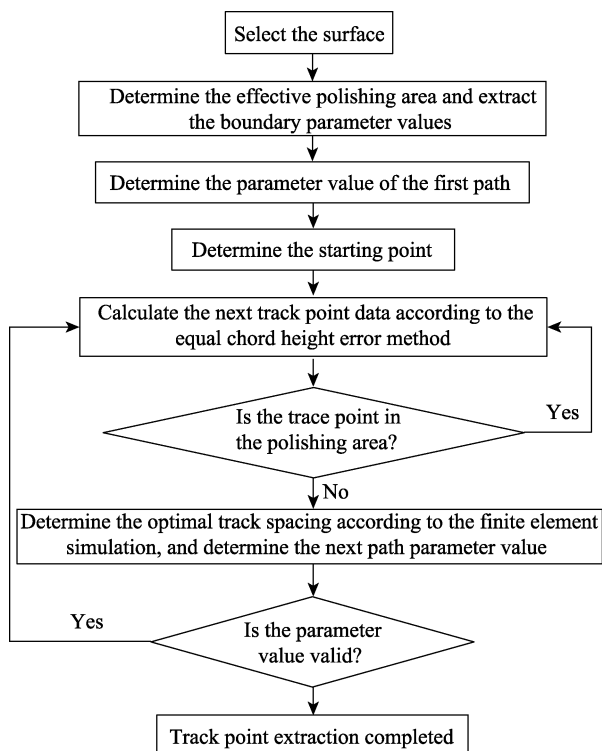


图7 叶片磨抛轨迹点提取流程

Fig.7 Extraction process of blade polishing trajectory points

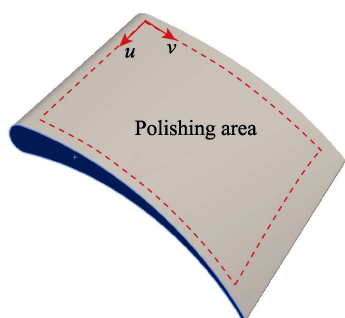


图8 磨抛区域的确定

Fig.8 Determination of polishing area

2.1 步长计算

叶片表面为自由曲面,通过有限元仿真软件将叶片进行网格划分,内部节点将叶片表面划分为多个子区域,将这些子区域组合拼接就可以合成复杂的自由曲面,即将叶片视为已知的参数化曲面。根据不同的方向进行轨迹规划,需要计算不同方向上的步长和行距。为了保持相邻轨迹点之间的曲率基本相同,需要使步长尽可能小,但是步长过小会增加加工成本,因此合理地调整步长显得尤为重要。文中以方向 u 为单条轨迹的规划方向,采用等弦高误差方法^[27]计算 u 向的步长,如图9所示。

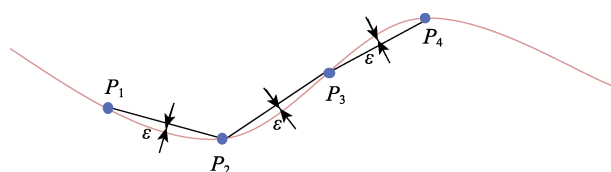


图9 等弦高误差模型

Fig.9 Model of equal chord deviation fitting

在弹性磨具与工件接触的过程中,磨具受力后发生弹性变形,以贴合曲面,磨具的变形程度与受力大小和磨抛进动角密切相关。由此可见,在轨迹规划过程中需要考虑磨具的弹性变形,步长的计算如图10所示。其中, v_{fu} 为磨具沿着磨抛轨迹在方向 u 上的进给速度。

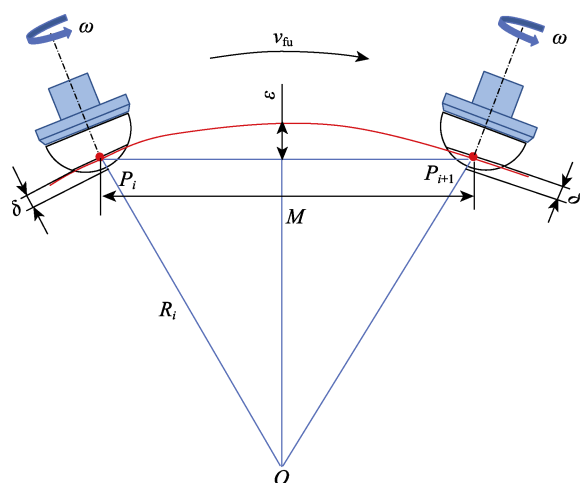


图10 步长的计算

Fig.10 Calculation of step length

由图10可知, δ 为弹性磨具基体压缩量,可以表示^[28]为式(11)。

$$\delta = \frac{3\varepsilon(k)F_n}{2\pi E_c a} \quad (11)$$

ε' 为最大弦高误差,与材料的去除深度有关。由此,磨具弹性变形后的弦高误差 ε 可表示为式(12)。

$$\varepsilon = \varepsilon' - \delta \quad (12)$$

点 P_i 和点 P_{i+1} 是加工表面同一条磨抛轨迹上的 2 个相邻轨迹点, R_i 为加工方向的叶片表面的局部曲率半径, M 为相邻轨迹点之间的步长, ε 为弦高误差, 则步长 M 可表示为式 (13)。

$$\left(\frac{M}{2}\right)^2 = R_i^2 - (R_i - \varepsilon)^2 \quad (13)$$

$$\text{即 } M = 2\sqrt{R_i^2 - (R_i - \varepsilon)^2} = 2\sqrt{2R_i\varepsilon - \varepsilon^2} \quad (14)$$

相较于传统的等弦高误差方法, 引入弹性磨具基体压缩量, 能够有效地降低实际加工中由相邻轨迹点之间的曲率突变引起的弦高误差变化程度, 从而缩短加工步长, 增大轨迹点的密度, 提高误差控制的曲率适应性。

2.2 确定最优行距

由于弹性磨具与工件之间为面接触, 因此在轨迹规划时不仅要考虑轨迹在工件表面的覆盖均匀性, 还要考虑磨具沿着相邻 2 条轨迹运动时的磨抛区域重叠问题。经过理论计算和仿真分析 (如图 4 和图 6 所示) 可知, 椭圆接触区域圆心处的法向抛光力最大, 材料去除最大; 随着与椭圆心距离的增大, 材料的去除量逐渐减小。定义相邻 2 条轨迹间的距离为轨迹间距 L , 轨迹间距 L 过小会导致走刀次数的增加, 从而降低加工效率; 在间距 L 过大时, 基于接触区域的材料去除分布, 每条轨迹附近的磨抛区域中心材料的去除量会增多, 周围材料的去除量会减少, 导致表面出现波纹, 无法满足加工精度要求。由此, 进一步分析相邻轨迹点接触区域内的材料去除叠加情况, 确定相邻轨迹的最优间距 L , 是提高磨抛区域内材料去除一致性的关键。

由前文内容可知, 接触区域内的材料去除与应力有相似分布情况, 因此文中通过对相邻 2 个轨迹点处的接触应力叠加情况进行有限元分析, 并以此结果分析指导材料去除叠加情况。在计算最优轨迹间距之前, 需要先确定合理的弹性磨具压缩量 δ 。磨具的压缩量 δ 过小时, 磨具与工件之间的接触区域和接触应力也很小, 材料的去除能力减弱, 从而降低加工效率; 当磨具的压缩量 δ 过大时, 会产生较大的正压力, 在加工刚度较小的薄壁工件时, 工件受力变形, 产生了加工误差, 这会降低加工精度。通过试验选定磨具的压缩量 δ 为 3 mm, 此时法向接触力 F_n 约为 6 N。然后采用 ABAQUS 模拟了不同轨迹间距 L 下相邻轨迹点接触区域的应力叠加情况, 结果如图 11 所示。当轨迹间距 L 较小 ($L < 9$ mm) 时, 叠加区域内出现了应力集中现象; 随着轨迹间距 L 的增大 ($L > 9$ mm), 叠加区域内又逐渐出现应力分布空隙, 这 2 种情况都不利于材料的均匀去除。最终确定, 当弹性磨具的压缩量 $\delta=3$ mm 时的最优轨迹间距 $L=9$ mm。

用相同的方法分别模拟了弹性磨具的压缩量 δ 为 1、2、3、4、5 mm 时的最优轨迹间距, 结果如图

12 所示, 并通过曲线拟合方法得出最优轨迹间距 L 与磨具压缩量 δ 之间的变化关系, 见式 (15)。

$$L = 0.0833 \times \delta^3 - 0.4643 \times \delta^2 + 2.4524 \times \delta + 4.000 \quad (15)$$

通过式 (15) 可以得出不同磨具压缩量下的最优轨迹间距, 用于加工过程中磨具压缩量变换时的轨迹点快速确定。

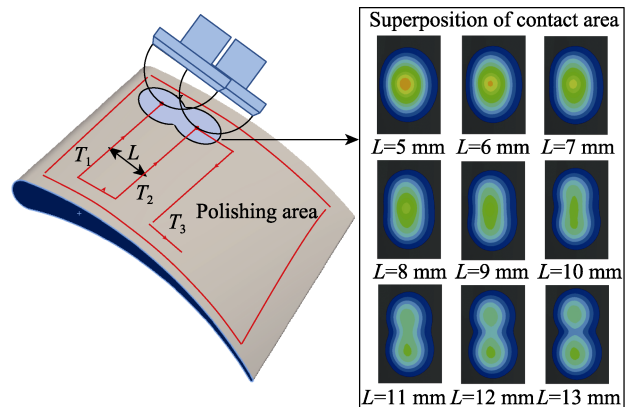


图 11 不同间距下相邻 2 个轨迹点处的接触应力分布
Fig.11 Contact stress distribution at two adjacent trajectory points under different track spacing

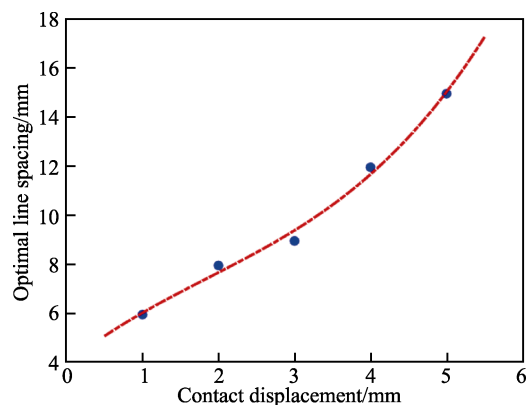


图 12 不同磨具压缩量的轨迹最优行距
Fig.12 Optimal track spacing under different displacement of abrasive tool

2.3 进动角的计算

进动角 θ 为弹性磨抛过程中弹性磨具与叶片接触时 $y-z$ 平面内磨具轴线与 z 轴的夹角, 常规方法中选取进动角一般为 0, 或始终保持一定的倾角。文中为了使磨削过程中材料的去除更加均匀, 需保证弹性磨具磨抛过程中磨具始终与叶片的法线方向一致, 这就需要进动角 θ 实时地改变, 以适应叶片表面曲率的不断变化。如图 13 所示, (T_1, T_2, \dots, T_i) 为已规划的不同轨迹, 点 P_i 与点 P_j 为相邻磨抛轨迹上在方向 v 上的 2 个磨抛点, v_{iv} 为磨具在方向 v 上的进给速度。由于相邻磨抛点之间的路径间隔较小, 进动角的变化也很小, 为了便于计算, 将 2 个磨抛点 P_i 与 P_j 弦长中点的垂线与 z 轴的夹角作为点 P_j 处的进动角。根据图 13 中的几何关系, 任意磨抛点的进动角 θ_i 可

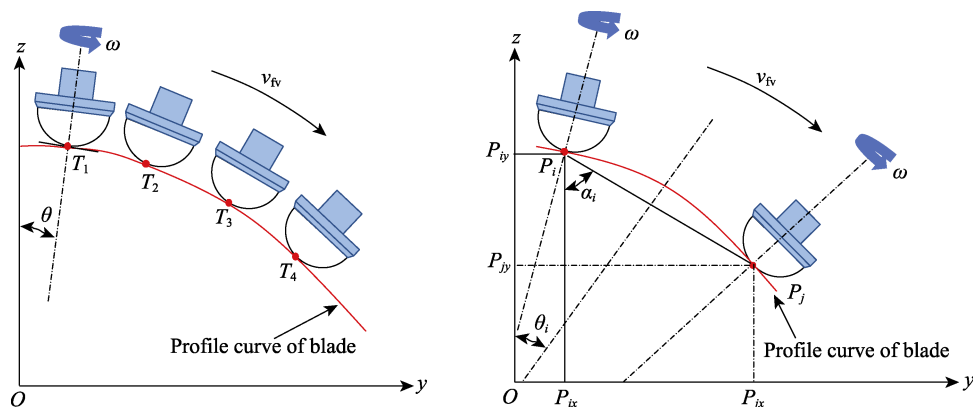


图 13 进动角计算示意图
Fig.13 Calculation of precession angle

表示为式 (16)。

$$\theta_i = \frac{\pi}{2} - \alpha_i \quad (16)$$

$$\text{其中: } \alpha_i = \arctan \left(\frac{P_{jx} - P_{ix}}{P_{jy} - P_{iy}} \right) \quad (17)$$

现假定第 1 条磨抛轨迹 T_1 上各磨抛点的进动角为 0, 然后将相邻 2 条轨迹 T_1 和 T_2 在方向 v 上相邻磨抛点的坐标值代入式 (16) 和式 (17), 计算出轨迹 T_2 上各个磨抛点处的进动角, 接着依次迭代计算轨迹 (T_3, T_4, \dots, T_i) 上各磨抛点处的进动角 θ_i 。通过计算不同磨抛点的进动角可以指导优化磨抛轨迹, 获得叶片表面自适应性轨迹规划方法, 使叶片表面材料的去除更加均匀, 从而提高叶片的表面质量。

3 试验与讨论

3.1 试验条件

试验中选用的叶片材料为 GH4169 镍基高温合金。GH4169 镍基高温合金具有良好的抗疲劳、抗辐射、抗氧化、耐腐蚀性能, 在 650 °C 以下的屈服强度居变形高温合金的首位, 在航空航天、石油化工、核能等领域得到广泛应用。GH4169 镍基高温合金的主要力学性能如表 3 所示。

表 3 GH4169 镍基高温合金的力学性能
Tab.3 Mechanical properties of GH4169 nickel-based superalloy

Parameters	Brinell hardness	Tensile strength/MPa	Yield strength/MPa	Elongation/%
Value	≥363	≥965	≥550	30

试验采用硅橡胶基体固结磨料磨具, 结合剂为 Smooth-On Ecoflex 0050 双组分液态硅橡胶, 磨粒选用粒径为 150 μm 的金刚石磨粒。制备过程: 首先以磨料浓度 (75%) 配制硅橡胶基体与金刚石磨料混合物, 磨料浓度为金刚石与 CBN 等超硬磨料磨具的特

定性能参数, 当磨具中超硬磨料的体积分数为 25% 时, 将磨料的浓度计为 100%。文中实验采用金刚石磨料浓度为 75%, 金刚石磨料在硅橡胶基体中的含量为 0.66 g/cm³; 待液态硅橡胶与金刚石磨料均匀混合后, 将混合物注入成型模具中, 完成磨具弹性接触部分的填充; 将液态硅橡胶注入模具, 完成磨具非接触部分的填充, 利用真空泵环境排出混合物中的残留气泡, 在室温下静置 3 h 后脱模修整成型。

试验在晶研 CNC4040F 四轴小型数控加工平台上完成, 如图 14 所示, 主轴的最高转速可达 24 000 r/min。在磨抛过程中, 主轴的转速为 1 500 r/min, 进给速度为 100 mm/min, 磨抛时间为 1 h, 采用 GANIS 磨削液进行冷却, 以及及时清洗工件表面细小的切屑, 减少对试验结果的影响。在磨抛加工中, 硅橡胶磨具的压缩量保持不变, 磨具初始压缩量 δ 为 3 mm, 然后通过图 7 所示流程进行轨迹规划, 提取所有轨迹点, 并采用 MATLAB 生成磨抛轨迹, 结果如图 15 所示。

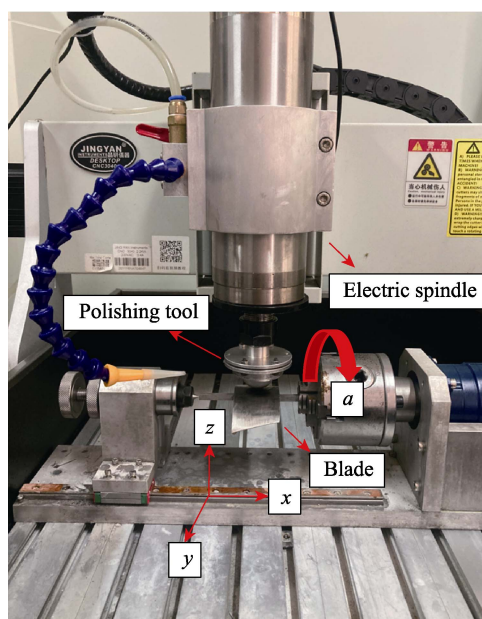


图 14 试验平台
Fig.14 Experimental platform

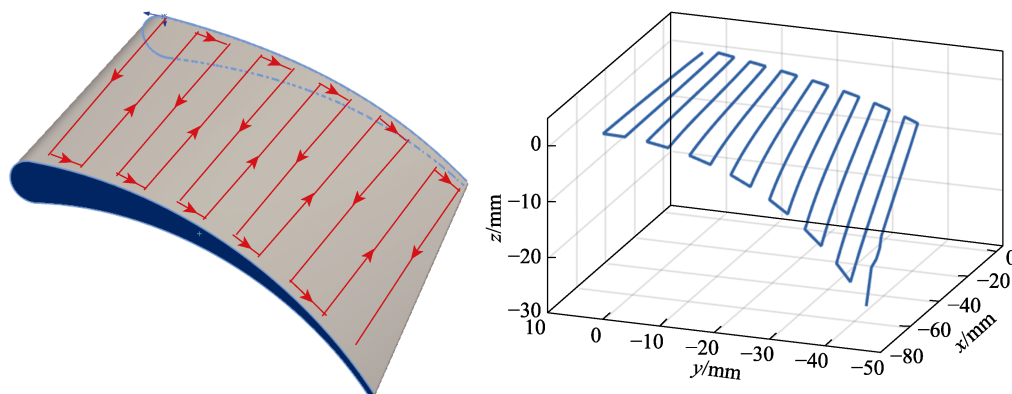


图 15 磨抛轨迹

Fig.15 Polishing trajectory

3.2 试验结果

叶片凸面磨抛前后的效果如图 16 所示, 表面的金相显微对比如图 17 所示。在磨抛前, 叶片表面存在明显 3D 打印工序残留的表面层纹; 经过弹性磨具磨抛后, 叶片表面具有良好的光泽度, 且没有明显的凸起和凹坑, 一致性较好。这是因为弹性磨具在磨抛过程中具有较大的弹性, 能与叶片曲面随形接触, 在确保磨抛工艺参数稳定的情况下能实现柔性自适应均匀抛光。同时也可以看出, 所提轨迹规划算法对曲面曲率变化的跟踪效果较好。

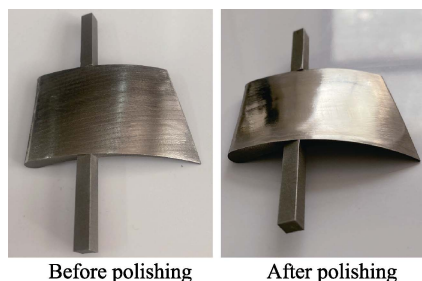


图 16 磨抛前后效果对比

Fig.16 Comparison of effects before and after polishing

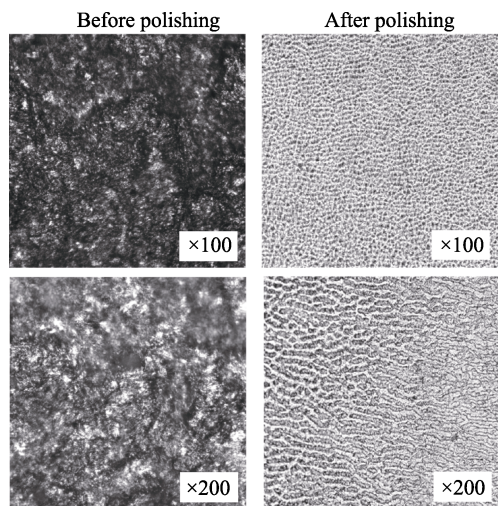


图 17 磨抛前后金相显微图

Fig.17 Metallographic micrograph before and after polishing

在已磨抛区域均匀取 10 个点, 使用 Mitutoyo SURFTEST SJ-310 粗糙度仪测量表面粗糙度 Ra , 测得磨抛区域磨抛前的表面粗糙度 Ra 的平均值为 $1.846 \mu\text{m}$, 磨抛后的表面粗糙度结果如图 18 所示。由图 18 可知, 表面粗糙度 Ra 的平均值由开始的 $1.846 \mu\text{m}$ 降至 $0.182 \mu\text{m}$, 计算出的标准差由 $0.108 \mu\text{m}$ 降至 $0.026 \mu\text{m}$, 符合叶片抛光粗糙度的要求。叶片已磨抛区域的表面质量一致性和表面粗糙度 Ra 平均值证明了轨迹规划方案的合理性。

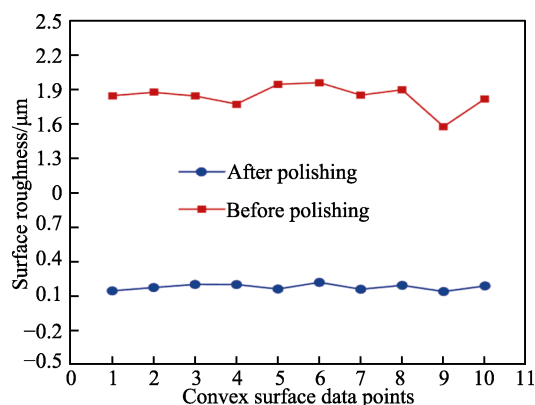


图 18 磨抛前后工件表面粗糙度的变化情况

Fig.18 Change of workpiece surface roughness before and after polishing

采用三维形貌轮廓仪测量叶片表面磨抛区域内相同位置处磨抛前后的微观形貌变化。其中, 取样区域长度为 0.62 mm , 宽度为 0.47 mm , 取样区域内微观形貌变化情况如图 19 所示。取样区域中心点 x 轴截面与 y 轴截面的粗糙度轮廓线变化情况如图 20 所示。在磨抛前, 叶片表面具有明显的波峰和沟槽。在磨抛后, 叶片表面的均匀性得到改善, 最大表面粗糙度 Sa 为 $0.164 \mu\text{m}$ 。使用 FA1204B 电子天平测量叶片磨抛前后的质量, 磨抛 1 h 前后叶片的质量由 68.397 g 减至 68.227 g , 材料去除率为 $3.432 \times 10^9 \mu\text{m}^3/\text{min}$, 在保证材料去除效率的同时获得了较高的表面精度。

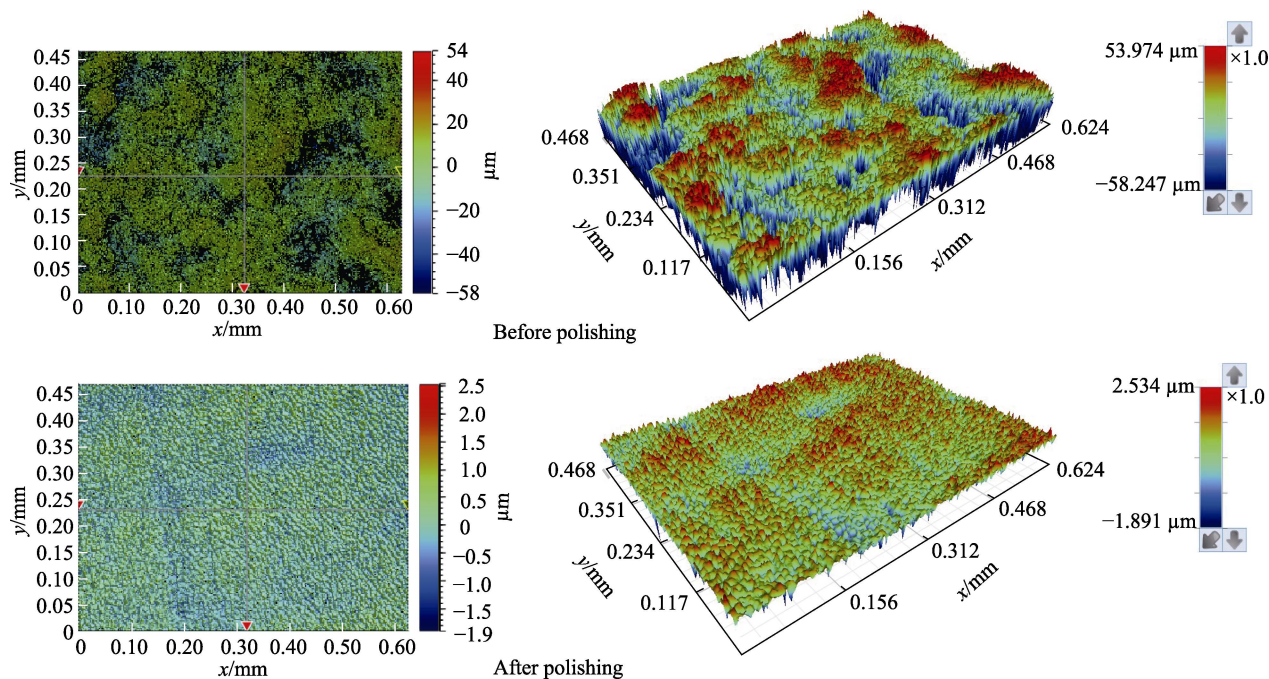


图 19 磨抛前后叶片表面微观形貌对比

Fig.19 Comparison of micro morphology of blade surface before and after polishing

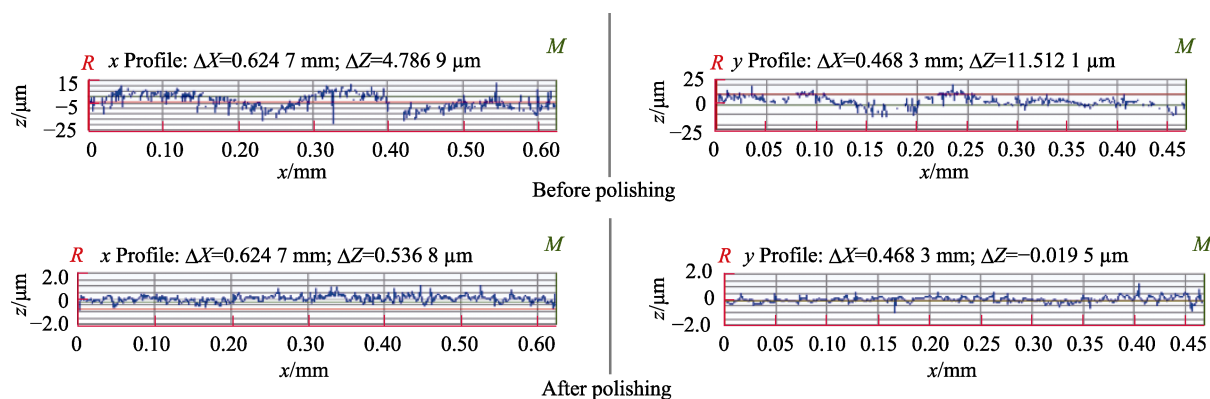


图 20 磨抛前后工件表面粗糙度轮廓线变化

Fig.20 Change of roughness profile of workpiece surface before and after polishing

4 结论

1) 针对合金叶片的弹性磨具柔性抛光, 通过有限元仿真分析得到弹性磨具变形和接触区域材料去除, 运用有限元分析结果确定了相邻轨迹的最优间距, 并采用等弦高误差方法计算了轨迹步长, 最后结合进动角的控制策略, 完成了弹性磨具自适应磨抛轨迹的规划。

2) 采用硅橡胶固结磨料磨具, 并对 GH4169 镍基高温合金叶片进行了磨抛试验。按照自适应磨抛轨迹磨抛后, 叶片的表面粗糙度 R_a 的平均值为 $0.182 \mu\text{m}$, 粗糙度的标准差为 $0.026 \mu\text{m}$, 最大表面粗糙度 S_a 为 $0.164 \mu\text{m}$, 表明轨迹的连续性和表面质量一致性较好, 验证了硅橡胶固结磨料磨具磨抛合金叶片的可行性, 以及自适应磨抛轨迹规划的合理性。

3) 试验只针对弹性磨具在 1 个压缩量下的自适应磨抛轨迹进行了验证, 后续可进一步研究不同磨具压缩量对表面完整性的影响规律, 为抛光工艺优化提供依据。

参考文献:

- [1] 黄保腾, 张彦彬, 王晓铭, 等. SG 砂轮磨削镍基合金 GH4169 砂轮磨损机理与磨削性能的实验评价[J]. 表面技术, 2021, 50(12): 62-70.
HUANG Bao-teng, ZHANG Yan-bin, WANG Xiao-ming, et al. Experimental Evaluation of Wear Mechanism and Grinding Performance of SG Wheel in Machining Nickel-Based Alloy GH4169[J]. Surface Technology, 2021, 50(12): 62-70.
- [2] 徐志强, 易理银, 张高峰, 等. 磁流变弹性体砂轮抛光

- 镍基高温合金 GH4169 表面完整性研究[J]. 宇航材料工艺, 2020, 50(5): 51-57.
- XU Zhi-qiang, YI Li-yin, ZHANG Gao-feng, et al. Surface Integrity of Polishing Nickel-Based Superalloys with Magnetorheological Elastomer Grinding Wheel[J]. Aerospace Materials & Technology, 2020, 50(5): 51-57.
- [3] 初铭强, 丁仁根, 张书彦, 等. 航空零部件加工表面完整性[J]. 材料导报, 2021, 35(7): 7183-7189.
- CHU Ming-qiang, DING Ren-gen, ZHANG Shu-yan, et al. Surface Integrity for Machining Aerospace Parts[J]. Materials Reports, 2021, 35(7): 7183-7189.
- [4] WANG Ting-ting, ZOU Lai, WAN Qing-hong, et al. A High-Precision Prediction Model of Surface Roughness in Abrasive Belt Flexible Grinding of Aero-Engine Blade[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 66: 364-375.
- [5] 丁文锋, 苗情, 李本凯, 等. 面向航空发动机的镍基合金磨削技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2019, 55(1): 189-215.
- DING Wen-feng, MIAO Qing, LI Ben-kai, et al. Review on Grinding Technology of Nickel-Based Superalloys Used for Aero-Engine[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(1): 189-215.
- [6] 黄保腾. SG 砂轮微量润滑磨削镍基合金 GH4169 力学模型与微观形貌评价[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2021: 1-4.
- HUANG Bao-teng. Mechanical Model and Micro-morphology Evaluation of SG Wheel Grinding Nickel-based Alloy GH4169 with Micro-lubrication[D]. Qingdao: Qingdao Tehcnology University, 2021: 1-4.
- [7] 易理银. 镍基高温合金磨削及其磁流变弹性体抛光试验研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2020: 1-3.
- YI Li-yin. Experimental Study on Grinding of Nickel-based Superalloy and Polishing of Magnetorheological Elastomer[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2020: 1-3.
- [8] 黄云, 李少川, 肖贵坚, 等. 航空发动机叶片材料及抗疲劳磨削技术现状[J]. 航空材料学报, 2021, 41(4): 17-35.
- HUANG Yun, LI Shao-chuan, XIAO Gui-jian, et al. Research Progress of Aero-Engine Blade Materials and Anti-Fatigue Grinding Technology[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2021, 41(4): 17-35.
- [9] 王辉, 赵欢, 罗来臻. 航空发动机叶片自适应磨抛定量去除研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022(5): 28-32.
- WANG Hui, ZHAO Huan, LUO Lai-zhen. Research on Quantitative Removal of Adaptive Grinding and Polishing of Aero-Engine Blades[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2022(5): 28-32.
- [10] XU Peng, CHEUNG C F, WANG Chun-jin, et al. Novel Hybrid Robot and Its Processes for Precision Polishing of Freeform Surfaces[J]. Precision Engineering, 2020, 64: 53-62.
- [11] 黄云, 肖贵坚, 邹莱. 航空发动机叶片机器人精密砂带磨削研究现状及发展趋势[J]. 航空学报, 2019, 40(3): 53-72.
- HUANG Yun, XIAO Gui-jian, ZOU Lai. Current Situation and Development Trend of Robot Precise Belt Grinding for Aero-Engine Blade[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(3): 53-72.
- [12] ZHOU Kun, XU Jia-yu, XIAO Gui-jian, et al. Enhancing Ductile Removal of C_f/SiC Composites during Abrasive Belt Grinding Using Low-Hardness Rubber Contact Wheels[J]. Ceramics International, 2022, 48(18): 26042-26054.
- [13] 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其实验研究[J]. 航空学报, 2016, 37(5): 1666-1676.
- XIAO Gui-jian, 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.
- [14] 董波. 基于残留高度峰值的自由曲面气囊抛光的轨迹规划[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019: 7-13.
- DONG Bo. Trajectory Planning of Free-form Surface Gasbag Polishing Based on Residual Height Peak[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019: 7-13.
- [15] 淮文博, 史耀耀, 杜羽寅, 等. GH4169 叶片表面粗糙度和残余应力的砂布轮抛光工艺参数区间优选[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(5): 721-726.
- HUAI Wen-bo, SHI Yao-yao, DU Yu-yin, et al. Optimization of Polishing Process Parameters for Surface Roughness and Residual Stress of GH4169 Blade with Abrasive Cloth Wheel[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2021, 40(5): 721-726.
- [16] 吴晓君, 陈竹, 周天择, 等. 弹性磨具高效磨抛 M300 钢曲面的接触特征研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(1): 171-177.
- WU Xiao-jun, CHEN Zhu, ZHOU Tian-ze, et al. Research on Processing Efficiency and Contact Characteristics of M300 Steel Surface Grinding with Elastic Abrasives[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(1): 171-177.
- [17] LV Chong, ZOU Lai, HUANG Yun, et al. A Trajectory Planning Method on Error Compensation of Residual Height for Aero-Engine Blades of Robotic Belt Grinding[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(4): 508-520.
- [18] LI Shao-chuan, XIAO Gui-jian, CHEN Ben-qiang, et al. Surface Formation Modeling and Surface Integrity Research of Normal Ultrasonic Assisted Flexible Abrasive Belt Grinding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 80: 232-246.
- [19] 肖贵坚, 张友栋, 黄云, 等. 基于灰色关联法的航发叶片机器人砂带磨削精度控制技术[J]. 航空制造技术, 2020, 63(9): 63-70.
- XIAO Gui-jian, ZHANG You-dong, HUANG Yun, et al. Robotic Belt Grinding Accuracy Control Technology of Aero-Engine Blade Based on Grey Correlation Method[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(9): 63-70.
- [20] 林泽文, 王振忠, 黄雪鹏, 等. 机器人气囊抛光去除函

- 数稳定性分析[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33(5): 24-32.
- LIN Ze-wen, WANG Zhen-zhong, HUANG Xue-peng, et al. Influence of Robotic Structural Deformation on Bonnet Polishing Removal Function[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33(5): 24-32.
- [21] 淮文博, 蔺小军, 史耀耀. 砂布轮柔性抛光表面完整性关键表征参数研究[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(11): 1735-1740.
- HUAI Wen-bo, LIN Xiao-jun, SHI Yao-yao. Study on Key Characterization Parameters of Surface Integrity in Flexible Polishing of Abrasive Cloth Wheel[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2021, 40(11): 1735-1740.
- [22] 王志伟, 蔺小军, 史耀耀, 等. 基于压缩量偏差约束的整体叶盘砂布轮数控抛光路径规划[J]. 航空学报, 2020, 41(2): 50-59.
- WANG Zhi-wei, LIN Xiao-jun, SHI Yao-yao, et al. A Polishing Path Planning Method for Blistk with Abrasive Cloth Wheel Based on Compression Deviation Constraint[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(2): 50-59.
- [23] ZHANG Jing-jing, LIU Jia, YANG Sheng-qiang. Trajectory Planning of Robot-Assisted Abrasive Cloth Wheel Polishing Blade Based on Flexible Contact[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119(11): 8211-8225.
- [24] 周天择. SIMOTION 控制的曲面抛光轨迹研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018: 10-30.
- ZHOU Tian-ze. Research on surface polishing trajectory controlled by SIMOTION[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018: 10-30.
- [25] PRESTON F W. The Theory and Design of Plate Glass Polishing Machines[J]. J Soc Glass Tech, 1927, 11: 214-256.
- [26] LI Xiao-yong, WANG Shi-long, ZHOU Jie. Analysis of Elliptical Hertz Contact of Steel Wires of Stranded-Wire Helical Spring[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(7): 2797-2806.
- [27] PARK H, KIM K, LEE S C. A Method for Approximate NURBS Curve Compatibility Based on Multiple Curve Refitting[J]. Computer-Aided Design, 2000, 32(4): 237-252.
- [28] BREWE D E, HAMROCK B J. Simplified Solution for Elliptical-Contact Deformation between Two Elastic Solids[J]. Journal of Lubrication Technology, 1977, 99(4): 485-487.
- 责任编辑: 彭颀

(上接第 24 页)

- [28] 肖乾, 王丹红, 陈道云, 等. 考虑齿间滑动影响的高速列车传动齿轮动态接触特性分析[J]. 机械工程学报, 2021, 57(10): 87-94.
- XIAO Qian, WANG Dan-hong, CHEN Dao-yun, et al. Analysis of Dynamic Contact Characteristics of High-Speed Train Transmission Gear Considering the Influence of Sliding between the Teeth[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(10): 87-94.
- [29] LIN Qin-jie, LIU Huai-ju, ZHU Cai-chao, et al. Effects of Different Shot Peening Parameters on Residual Stress, Surface Roughness and Cell Size[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 398: 126054.
- [30] ZHANG Bo-yu, LIU Huai-ju, BAI Hou-yi, et al. Ratchetting-Multi-axial Fatigue Damage Analysis in Gear Rolling Contact Considering Tooth Surface Roughness[J]. Wear, 2019, 428/429: 137-146.
- [31] WU Ji-zhan, LIU Huai-ju, WEI Pei-tang, et al. Effect of Shot Peening Coverage on Hardness, Residual Stress and Surface Morphology of Carburized Rollers[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 384: 125273.
- [32] 王仁智. 金属材料的喷丸强化原理及其强化机理综述[J]. 中国表面工程, 2012, 25(6): 1-9.
- WANG Ren-zhi. Overview on the Shot Peening Principle and Its Strengthening Mechanisms for Metallic Materials[J]. China Surface Engineering, 2012, 25(6): 1-9.
- [33] 朱鹏飞, 严宏志, 陈志, 等. 齿轮齿面喷丸强化研究现状与展望[J]. 表面技术, 2020, 49(4): 113-131.
- ZHU Peng-fei, YAN Hong-zhi, CHEN Zhi, et al. Research Status and Prospect of Shot Peening of Gear Tooth Flanks[J]. Surface Technology, 2020, 49(4): 113-131.
- [34] LIU He-li, LIU Huai-ju, BOCHER P, et al. Effects of Case Hardening Properties on the Contact Fatigue of a Wind Turbine Gear Pair[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 141: 520-527.
- [35] 秦海迪, 张亚龙, 刘海鹏, 等. 喷丸对 25CrNi₂MoV 钢滚动接触疲劳性能的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(5): 222-229.
- QIN Hai-di, ZHANG Ya-long, LIU Hai-peng, et al. Effect of Shot Peening on Rolling Contact Fatigue Properties of 25CrNi₂MoV Steel[J]. Surface Technology, 2020, 49(5): 222-229.
- 责任编辑: 彭颀