

机器人磨抛氧化锆涂层工艺研究*

田凤杰¹, 安宏伟¹, 李小龙¹, 李论²

(1. 沈阳理工大学机械工程学院, 沈阳 110159;
2. 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016)

[摘要] 使用搭建的机器人自动磨抛平台系统, 针对氧化锆热障涂层磨抛工艺开展了研究, 旨在通过机器人磨抛加工对涂层厚度及表面粗糙度进行合理控制, 提高涂层表面质量。基于 Preston 理论建立了氧化锆涂层材料的去除模型; 通过单因素试验研究了主要磨抛参数对材料去除深度的影响规律, 基于正交试验确立了氧化锆涂层材料磨抛最优工艺参数组合和工艺步骤, 对航空发动机喉道密封片氧化锆涂层进行了磨抛加工。试验结果表明, 在一定范围内, 材料去除深度随着磨抛压力及磨抛盘转速的增大而增大, 随着进给速度的增大而减小; 磨抛压力对材料去除深度的影响较大, 磨抛倾角对去除深度的影响较小。机器人磨抛系统采用力控方式实现了定量均匀去除, 涂层厚度和表面质量一致性良好, 加工效率显著提高, 同时也验证了本机器人自动磨抛系统的实用性和优越性。

关键词: 机器人自动磨抛; 氧化锆涂层; 正交试验; 参数优化

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.10.038



田凤杰

副教授, 主要从事机器人先进制造理论与技术应用方面的研究, 主持多项国家、省市级纵向科研项目和横向项目工作, 发表论文近 30 篇, 其中 SCI 和 EI 收录 10 余篇, 授权发明专利 3 项。

热障涂层具备优良的隔热效果, 主要用来降低基体的温度, 提高零件的使用寿命, 因此被大量应用在叶片、燃烧室、隔热屏、火焰筒和尾喷管等航空发动机热端部件上^[1-2]。在种类众多的热障涂层材料中, 氧化锆陶瓷涂层凭借优异的隔热和耐热性而成为航空零部件的首选^[3]。由于氧化锆陶瓷本身的硬脆性导致材料可加工性差, 难以获得优异的表面质量, 而热障涂层的厚度及涂层表面粗糙度与热障涂层热循环寿命及隔热性有密切的关系^[4], 所以热障涂层的磨抛加工对涂层厚度的控制及表面质量的改善有重要的意义。

近年来, 机器人自动磨抛加工技术引起了广泛的关注^[5-6]。国内外研究人员相继开展了对金属模具^[7-8]、有机玻璃^[9]、钛合金^[10]等材料的机器人磨抛相关研究, 而针对氧化锆热障涂层的磨抛加工目前鲜见报道。目前氧化锆热障涂层的磨抛加工主

要依靠人工, 且工作环境特别恶劣, 难以保证加工去除的一致性。

本文针对航空发动机喉道密封片氧化锆热障涂层的磨抛加工, 以 Preston 理论为基础建立了材料去除模型, 利用搭建的机器人磨抛加工系统采用单因素试验研究了主要磨抛参数对材料去除深度的影响规律, 基于正交试验确定了最佳磨抛工艺参数并进行了零件的磨抛加工, 取得了良好的加工效果。

机器人磨抛加工系统

图 1 为机器人自动磨抛加工系统, 主要由六自由度库卡 30-3 机器人、美国 ATI 工业自动化公司六维力/力矩传感器(型号 SI-330-30)、计算机、磨抛工具、工作台等构成。六维力/力矩传感器安装在机器人末端执行器与磨抛工具之间, 用来在线检测磨抛压力的大小, 并将数据上传至计算机, 计算机经过运算和处理后

* 基金项目: 辽宁省自然科学基金指导计划项目(20180550648); 国家自然科学基金资助项目(51775542)。

将信息发送给机器人控制器,补偿调整磨抛工具与工件加工区域的相对距离,保证磨抛工具与工件间恒定的接触压力,进而实现定量去除。磨抛工具主要由支架、气动马达、弹性磨抛盘(砂纸贴在磨抛盘底部)等组成,气动马达提供磨抛动力,磨抛盘进行材料的加工去除。图2为机器人磨抛加工系统整体示意图,其中库卡30-3机器人最大负荷为30kg,最大工作空间为2033mm,最大作用范围达2700mm,重复定位精度 $< \pm 0.06\text{mm}$ 。

磨抛加工主要参数包括磨抛工具的转速 n 、进给速度 v_f 、磨抛压力 F 及磨抛倾角 β 。Preston理论在材料柔性加工去除方面得到了广泛的应用,它把材料磨抛去除过程近似看作是一个线性的加工过程为^[11-12]:

$$\frac{d_z}{d_t} = k_p \times p(x, y) \times v(x, y) \quad (1)$$

式中, $\frac{d_z}{d_t}$ 为单位时间内涂层材料磨抛去除量; k_p 为Preston系数; $p(x, y)$ 为接触区域某点在 t 时刻接触压强; $v(x, y)$ 为接触区域内点 (x, y) 处磨抛工具与工件的相对速度。

本文使用的磨抛工具为圆形橡胶盘,如图3(a)所示,磨抛加工时,磨抛盘倾斜一定的角度,便于排屑和散热。如图3(b)所示,接触形状近似为由弧 EOB 和弧 EFB 组成的弓形,在接触区域建立坐标系 xOy ,弧 EOB 为变形与未变形的分界线,设橡胶盘的半径为 R ,接触区域最大宽度为 L ,则在 CD 处任意一点的横坐标可表示为:

$$x = \sqrt{R^2 - y^2} - (R - L) \quad (2)$$

在磨抛加工过程中,由于磨抛盘的转速 n 远高于机器人进给速度 v_f ,所以 CD 上任意一点的速度 v 可近似表示为:

$$v(x, y) = \omega r = \frac{\pi n}{30} \times \sqrt{(x + R - L)^2 + y^2} \quad (3)$$

假设在 d_t 时间内,作用在微元 N 上的磨抛压力为 F_0 ,则微元上的压强可以表示为:

$$P = \frac{F_0}{A_0} \quad (4)$$

式中, A_0 表示微元的面积。

设机器人加工时进给速度为 v_f ,则:

$$d_x = v_f \times d_t \quad (5)$$

磨抛加工材料的去除是一个累

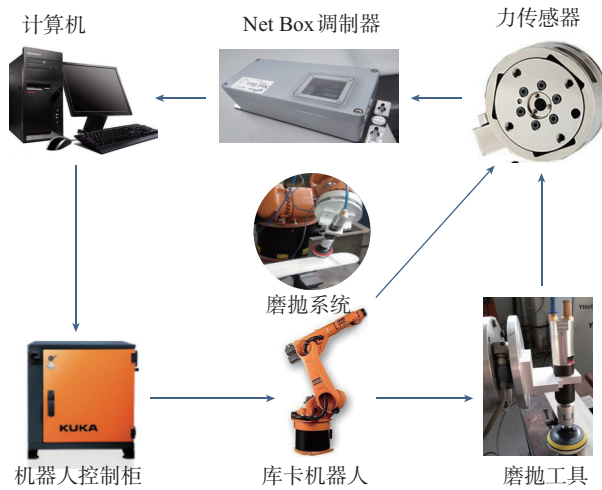


图1 机器人自动磨抛加工系统

Fig.1 Automatic grinding and polishing system of robot

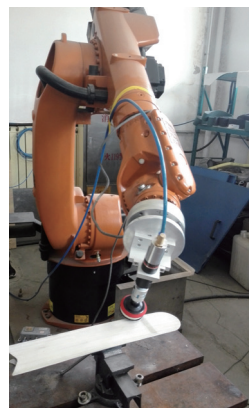


图2 机器人磨抛加工系统整体示意图

Fig.2 Overall diagram of robot automatic grinding system

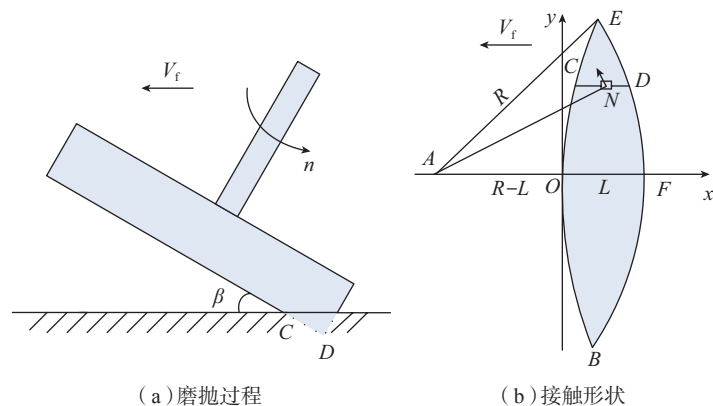


图3 磨抛示意图

Fig.3 Polishing diagram

加的过程,接触区域内一点的磨抛加工可看做从C点到D点的累积,对式(1)进行积分,将式(2)、(3)、(4)、(5)代入式(1)中,则材料去除函数可表示为

$$z = \frac{k_p F_0 \pi n}{30 v_f A_0} \int_{x_2}^{x_1} \sqrt{(R-L+x)^2 + y^2} dx \quad (6)$$

从式(6)可以看出,在一定范围内,垂直于进给方向的材料截面去除深度与磨抛压力及磨抛盘转速成正比,而与进给速度成反比。

机器人磨抛工艺研究

1 单因素试验

在搭建的机器人自动磨抛加工系统的基础上开展试验研究,工件材料为氧化锆热障涂层,砂纸为200目树脂金刚石砂纸,加工参数如表1所示,开展单因素试验。磨抛试验后用MarSurf XC20 轮廓仪分别测量各工件表面垂直磨抛进给方向的截面轮廓,提取轮廓上样本点数据并对数据进行处理,去除异常点,对轮廓曲线进行重新拟合,得到不同磨抛参数对垂直磨抛进给方向的截面去除深度的影响规律,如图4~7所示。

由图4可知:磨抛压力由2N增加至8N,随着磨抛压力的增大,磨抛盘变形增大,磨抛区域单位面积所受力增大,涂层表面去除宽度和深度随之增大,涂层表面去除最大深度差值约为12μm。由图5可知,当磨抛进给速度由1mm/s增加至5mm/s时,单位面积磨抛盘停留时间减少,涂层去除深度随进给速度的增大而减小,涂层表面去除最大深度的差值约为6μm。

由图6可知,随着磨抛转速的增大,单位时间参与磨抛的磨粒数目增加,磨抛去除深度随之变大;当磨抛转速由800r/min增大至1200r/min时,涂层表面去除最大深度的差值约为6μm。由图7可知,在其他因素相

表1 磨抛加工参数
Table 1 Grinding parameters

工艺参数	参数值
磨抛压力 /N	2, 5, 8
进给速度 / (mm·s ⁻¹)	1, 3, 5
转速 / (r·min ⁻¹)	800, 1000, 1200
磨抛倾角 / (°)	5, 10, 15

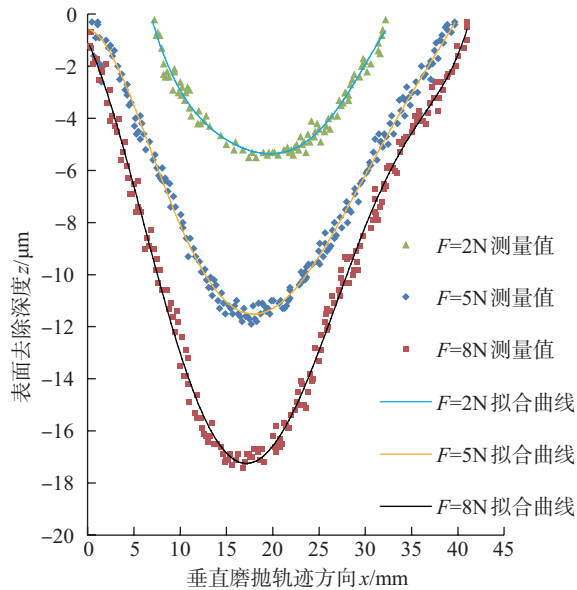


图4 磨抛压力对去除深度影响规律

Fig.4 Influence rule of grinding force on removal depth

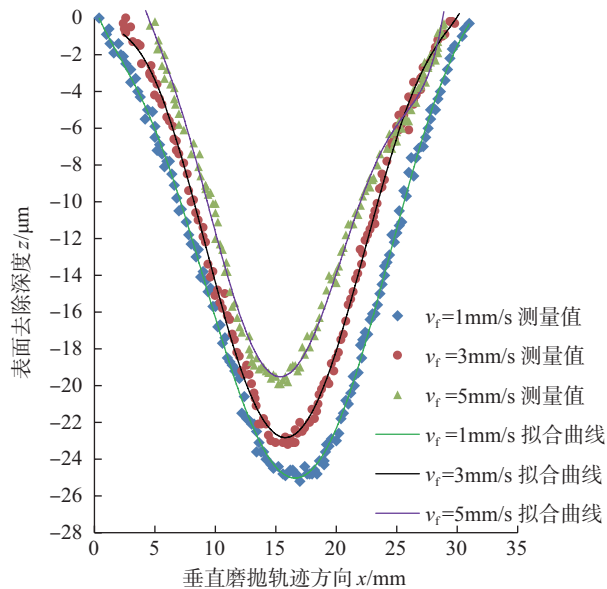


图5 进给速度对去除深度影响规律

Fig.5 Influence rule of feed rate on removal depth

同的情况下,磨抛倾角越大,磨抛接触面积变小,故磨抛截面宽度越窄,去除深度越深;当磨抛倾角由5°增大至15°时,涂层表面去除最大深

度差值约为 $2\mu\text{m}$ 。综合图 4~7, 通过对比磨抛去除最大深度的差值可以看出, 磨抛压力对涂层去除深度的影响最大, 进给速度和磨抛转速的影响次之, 磨抛倾角对其影响最小。

2 正交试验

进行正交试验设计, 根据单因素磨抛试验确定 4 个主要因素 $A\sim D$ 的变化范围: 磨抛压力 $F=2\sim 8\text{N}$, 磨抛盘转速 $n=800\sim 1200\text{r/min}$, 磨抛倾角 $\beta=5^\circ\sim 15^\circ$, 机器人进给速度 $v_f=1\sim 5\text{mm/s}$ 。设计每个因素取 3 个水平, 开展正交试验, 因素水平表如表 2 所示。

选取正交表, 使用 200 目砂纸进行磨抛加工试验, 试验结果如表 3 所示。

运用正交试验中直观分析法, 涂层去除厚度的均值与各因素关系如图 8 所示。由图 8 可以看出, 最佳的工艺参数为 $A2B2C3D1$, 即在磨抛压力 5N , 机器人进给速度 3mm/s , 磨抛盘转速 1200r/min , 倾角为 5° 的情况下进行磨抛加工, 平均去除厚度为 $30\mu\text{m}$ 。同样的, 选用 400 目砂纸进行磨抛试验, 工艺参数的选取与 200 目相似, 与之不同的是磨抛压力 F 分别取 3N 、 5N 、 7N , 结果证明选用 400 目砂纸在磨抛压力 7N 、机器人进给速度 3mm/s 、磨抛盘转 1200r/min 、倾角为 5° 的情况下磨抛去除效果最好, 涂层去除平均厚度为 $10\mu\text{m}$ 。

由表 3 通过极差分析可知, 试验中对涂层去除影响从大到小依次为: 磨抛压力 > 转速 > 进给速度 > 磨抛倾角, 与单因素中得出的结论一致, 验证了单因素试验结果的正确性。

3 磨抛加工试验

对航空发动机喉道密封片氧化锆涂层进行磨抛加工, 磨抛工艺步骤及参数如表 4 所示。磨抛前后, 分别用 MarSurf PS1 粗糙度仪和 Fischer 测厚仪测量涂层表面粗糙度和涂层厚度。在磨抛表面沿长度方向均匀取 10 个样本点分别记录其磨

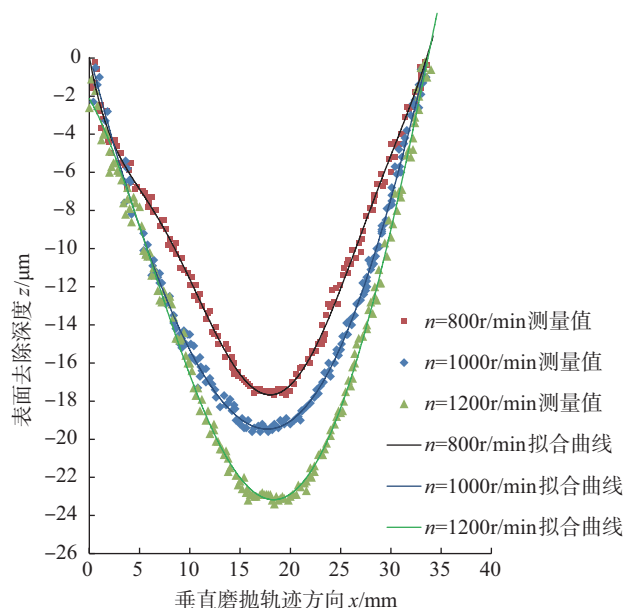


图6 磨抛转速对去除深度影响规律

Fig.6 Influence rule of grinding speed on removal depth

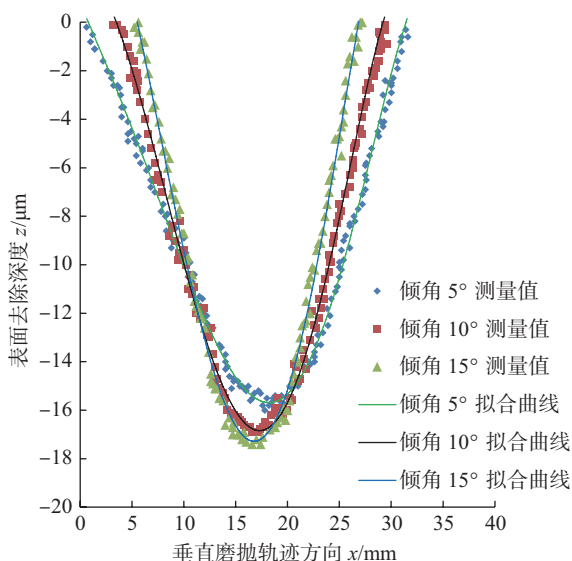


图7 磨抛倾角对去除深度影响规律

Fig.7 Influence rule of grinding angle on removal depth

表2 因素水平表

Table 2 Factor level table

因素水平	F/N	$v_f/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	$n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	$\beta/(\text{ }^\circ)$
1	2	1	800	5
2	5	3	1000	10
3	8	5	1200	15

抛前后的涂层厚度值及粗糙度值, 如图 9~10 所示。结果表明, 磨抛前后涂层厚度平均值由 $228\mu\text{m}$ 降低至 $189\mu\text{m}$, 方差由最初 $16.16\mu\text{m}^2$ 降

低为 $3.81\mu\text{m}^2$; 粗糙度平均值 R_a 由 $6.5\mu\text{m}$ 降低至 $2.1\mu\text{m}$, 方差由最初 $0.0893\mu\text{m}^2$ 降为 $0.0129\mu\text{m}^2$, 去除均匀, 涂层厚度及表面粗糙度均达到了

表3 涂层去除厚度试验结果

Table 3 Test results of coating removal thickness

因素	F/N	$v_f/(mm \cdot s^{-1})$	$n/(r \cdot min^{-1})$	$\beta/(\circ)$	涂层去除厚度/ μm
试验 1	1	1	1	1	10
试验 2	1	2	2	2	12
试验 3	1	3	3	3	9
试验 4	2	1	2	3	25
试验 5	2	2	3	1	30
试验 6	2	3	1	2	18
试验 7	3	1	3	2	28
试验 8	3	2	1	3	24
试验 9	3	3	2	1	20
均值 1	10.3	21	17.3	20	—
均值 2	24.3	22	15.7	19.3	—
均值 3	24	15.7	22.3	19.3	—
极差 R	14	6.3	6.6	0.7	—

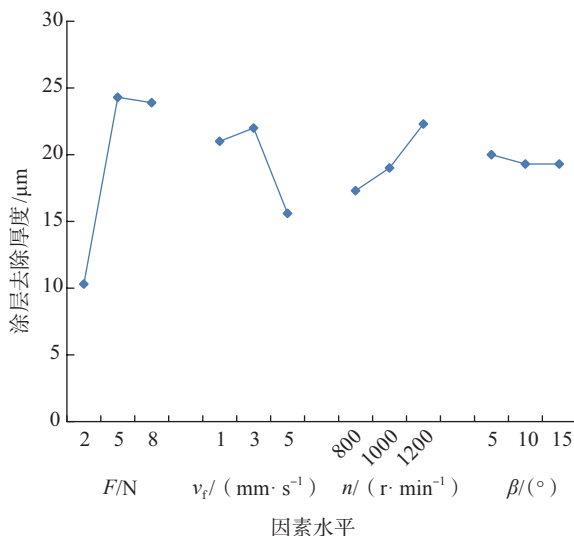


图8 涂层去除厚度与因素关系表

Fig. 8 Relationship table of coating removal thickness and factor

表4 磨抛工艺步骤及参数

Table 4 Grinding process steps and parameters

步骤	磨抛工具	工具转速 / ($r \cdot min^{-1}$)	磨抛压力 / N	进给速度 / ($mm \cdot s^{-1}$)	磨抛倾角 / (\circ)	行间距 / mm
1	200 目	1200	5	3	5	10
2	400 目	1200	7	3	5	15

工艺要求,工件加工前后表面质量如图 11 所示。

结论

通过开展氧化锆热障涂层的磨抛加工试验研究,可以得出以下结论。

(1) 本机器人磨抛系统稳定可靠,对于不适用于磨削机床加工的氧化锆等难加工涂层材料有着良好的加工性能,克服了传统打磨系统质量不稳定、打磨环境差的缺点。

(2) 基于力控去除的机器人自动磨抛加工氧化锆热障涂层去除厚

度可控性良好,恒力控制去除均匀,可以获得较高的表面质量,磨抛表面高度差小,表面均匀性好,表面粗糙度较小,一致性良好,可以完全替代手工加工。

(3) 在氧化锆热障涂层磨抛的过程中,磨抛压力对其去除厚度影响较大,磨抛倾角对其影响较小。磨抛压力越大,去除深度越大,加工效率越高,而表面粗糙度也会越大,所以选择合适的磨抛压力对于提高加工效率,改善表面质量意义重大。

(4) 通过氧化锆热障涂层的磨抛试验,获得其磨抛工艺知识,客观性较强,对于其他材料的磨抛加工研究也具有一定的参考价值。

参考文献

[1] 徐庆泽,梁春华,孙广华,等. 国外航空涡扇发动机涡轮叶片热障涂层技术发展[J]. 航空发动机, 2008, 34(3): 52-56.
 XU Qingze, LIANG Chuanhua, SUN Guanghua, et al. Development of thermal barrier coating for foreign turbofan engine turbine blade[J]. Aeroengine, 2008, 34(3): 52-56.

[2] BOSE S, DE MASI-MARCIN J T. Thermal barrier coating experience in gas turbine engines at Pratt & Whitney, NASA CP 3312[R]. Kennedy: Thermal Barrier Coating Workshop, 1995.

[3] 朱正权,黄永章,李兴彦,等. 氧化锆基热障涂层陶瓷材料的研究进展[J]. 金属功能材料, 2011, 18(2): 79-82.
 ZHU Zhengquan, HUANG Yongzhang, LI Xingyan, et al. Research and development of zirconia ceramin thermal barrier coating[J]. Metallic Functional Materials, 2011, 18(2): 79-82.

[4] 沈君,詹华,刘新基,等. 热障涂层表面粗糙度对涂层高温性能的影响[J]. 热喷涂技术, 2012, 4(2): 44-46.
 SHEN Jun, ZHAN Hua, LIU Xinji, et al. Effect of surface roughness on high-temperature properties of thermal barrier coating[J]. Thermal Spray Technology, 2012, 4(2): 44-46.

[5] 张庆伟,韩利利,徐方,等. 基于打

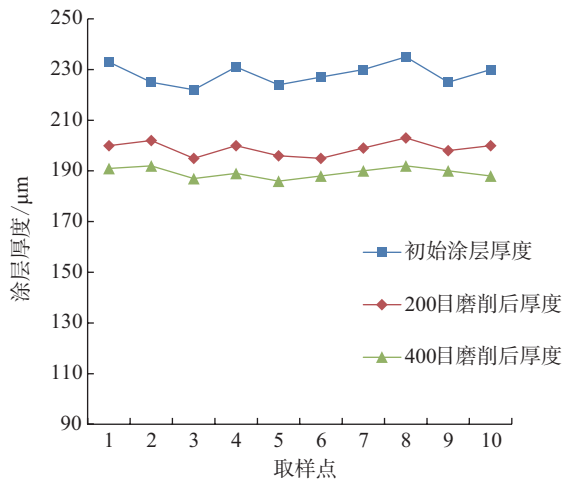


图9 磨抛前后厚度测量

Fig.9 Measurement of coating thickness

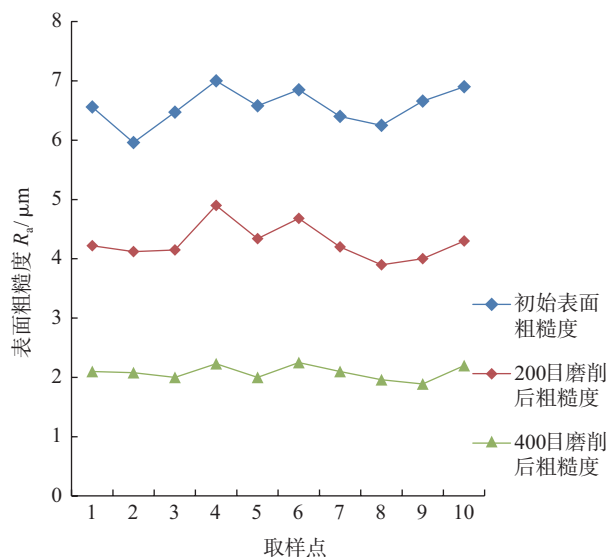
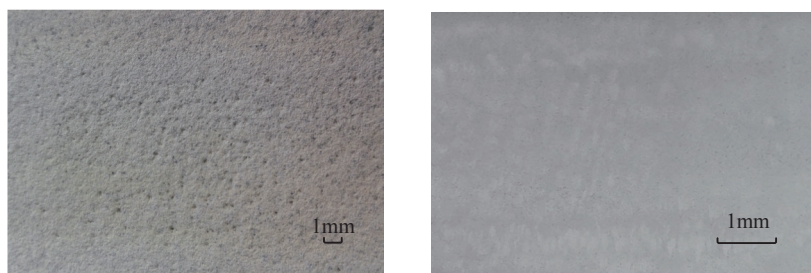


图10 磨抛前后粗糙度测量

Fig.10 Roughness of coating surface



(a) 磨抛前

(b) 磨抛后

图11 氧化锆涂层磨抛前后表面对比

Fig.11 Comparison of zirconia coating surface before and after grinding

磨机器人的力/位混合控制策略研究[J]. 化工自动化及仪表, 2012, 39(7): 884-887.

ZHANG Qingwei, HAN Lili, XU Fang, et al. Research on hybrid position/force control for

grinding robots[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2012, 39(7): 884-887.

[6] DIESTE J A, FERNÁNDEZ A, ROBA D, et al. Automatic grinding and

polishing using spherical robot[J]. Procedia Engineering, 2013, 63: 938-946.

[7] NAGATA F, HASE T, HAGA Z, et al. CAD/CAM-based position/force controller for a mold polishing robot[J]. Mechatronics, 2007, 17(4): 175-276.

[8] 韩光超, 张海鸥, 王桂兰, 等. 基于游离磨料的机器人抛光工艺实验研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(18): 2152-2155.

HAN Guangchao, ZHANG Haiou, WANG Guilian, et al. Experimental study on the robotic polishing process with dissociating abrasive[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(18): 2152-2155.

[9] 郭彤颖, 曲道奎, 徐方. 机器人研磨抛光工艺研究[J]. 新技术新工艺, 2006(1): 84-85.

GUO Tongying, QU Daokui, XU Fang. Research on robot grinding and polishing processing technology[J]. New Technology & New Process, 2006(1): 84-85.

[10] 杜华鹏. 基于力/位控制的钛合金零件自动抛光技术研究[D]. 大理: 大理理工大学, 2014.

DU Huapeng. Automatic polishing on titanium alloy parts based on the force/position control method[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.

[11] 田洪东. 基于研抛力控制的复杂曲面精密研抛技术研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2016.

TIAN Hongdong. Complex surface precision polishing technology research bases on polishing force controlled[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2016.

[12] 刘广保, 赵吉宾, 陈白宁, 等. 有机玻璃研抛机器人自动化工艺研究[J]. 机械设计与制造, 2014(8): 151-154.

LIU Fuangbao, ZHAO Jibin, CHEN Baining, et al. A study of robotic automation process for polymethylmethacrylate grinding and polishing[J]. Machinery Design & Manufacture, 2014(8): 151-154.

通讯作者: 田凤杰, E-mail: tianfj@sia.cn.

(下转第 50 页)

Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.

[15] 冯春, 周文. 手眼系统中摄像机标定和手眼标定的同步算法 [J]. 机械设计与制造, 2015(12): 58-61.

FENG Chun, ZHOU Wen. Synchronization algorithms for camera calibration and hand-eye

calibration in hand-eye system[J]. Mechanical Design and Manufacture, 2015(12): 58-61.

[16] 李大伟. 基于关节转角反馈的工业机器人精度补偿技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.

LI Dawei. Research on precision compensation technology of industrial robots

based on joint angular feedback[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.

通讯作者: 田威, 教授, 博士生导师, 研究方向为飞机自动化柔性装配技术, E-mail: tw_nj@nuaa.edu.cn.

A Robot Rivet Feeding System for Automatic Drilling and Riveting

LI Yufei, TIAN Wei, LI Bo, CUI Haihua

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] In the existing automatic drilling and riveting system, 90% of the faults are caused by the stuck in the rivet feeding system. In order to improve the efficiency of automatic rivet feeding system and reduce failure, a new rivet feeding system based on industrial robot and visual servo was proposed. By installing industrial camera and grasping device at the end of the robot, the quality and location of rivets were detected via machine vision. Then, the robot was guided to grasp and transfer rivets of specific types. Thus, quality of rivets is ensured before delivering and the process of delivery is optimized. The system weighs 1.1t and covers an area of 1.57m², which effectively saves the area and load of the rivet feeding system in the automatic drilling and riveting system. Experimental results illustrate that the system can detect rivets with a precision of 0.1mm and the feeding efficiency reaches six rivets per minute, which meets the performance requirements of automatic riveting and drilling system.

Keywords: Industrial robot; Aircraft assembly; Automatic drilling and riveting; Rivet feeding system; Machine vision

(责编 李丹)

(上接第 43 页)

Research on Robotic Automatic Grinding for Zirconia Coating

TIAN Fengjie¹, AN Hongwei¹, LI Xiaolong¹, LI Lun²

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;

2. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

[ABSTRACT] Based on the robot automatic grinding platform, the experimental study on the grinding process of zirconia coating was carried out in order to control the coating thickness and surface roughness properly and improve coating surface quality. Based on Preston removal equation, the material removal model was established. The effect of main parameters on the removal depth was studied by single factor experiments. The optimum process parameters and process steps were determined by orthogonal experiment and utilized on the zirconia coating of throat seal of aero-engine. The experimental results show that the removal depth of the material increases with the increasing of grinding force and speed of grinding tool, and decreases with the increasing of feed speed in a certain range. The grinding force has the more influence and the grinding angle has less influence on the removal depth. The force control method is adopted to achieve the quantitative and uniform removal, the coating thickness and surface quality are consistent, the processing efficiency is improved significantly, which verifies the practicability and advantages of the robot automatic grinding system.

Keywords: Robotic automation grinding; Zirconium oxide coating; Orthogonal test; Parameter optimization

(责编 大漠)