

增材制造燃油喷嘴特征件磨粒流抛光研究

党稼宁¹, 雷力明², 石磊², 郭龙钊¹, 吕谦¹, 刘维伟¹

(1. 西北工业大学机电学院, 西安 710072;

2. 中国航发上海商用航空发动机制造有限责任公司, 上海 200241)

[摘要] 燃油喷嘴的增材制造在缩短制造周期、降低制造成本以及提升合格率方面具有明显优势, 但是喷嘴内流道表面的光整处理成为打印工艺亟需突破的关键技术难题。对增材制造燃油喷嘴内流道特征件进行磨粒流四因素抛光试验, 结果表明在本文的试验条件下, 磨粒流抛光可有效去除表面黏粉、球化现象, 改善表面台阶效应; 通过优化计算获得了磨粒流抛光的最优工艺参数, 经试验验证, 喷嘴内流道表面粗糙度 R_a 由 $9.10\mu\text{m}$ 降至 $2.70\mu\text{m}$ 。

关键词: 增材制造; 磨粒流抛光; 响应曲面法; 表面粗糙度; 回归模型

Study on Abrasive Flow Machining of Additive Manufacturing Fuel Nozzle Features

DANG Jianing¹, LEI Liming², SHI Lei², GUO Longzhao¹, LÜ Qian¹, LIU Weiwei¹

(1. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. AECC Shanghai Commercial Aviation Engine Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200241, China)

[ABSTRACT] The fuel nozzle manufactured by additive manufacturing has significant advantages in shrinking production cycle, lowering cost and boosting qualified rate. However, polishing technology of additive manufacturing fuel nozzle through abrasive flow has become the vital technology that needs to be worked out promptly for additive manufacturing. This research develops a four-factor polishing experiment of abrasive flow for test pieces acquired the characteristics of internal flow path of additive manufacturing fuel nozzle. The result shows that powder adhered to surface, spheroidization effect and step-effect can be eliminated effectively and efficiently by abrasive flow polishing. The optimal process parameters of abrasive flow polishing were obtained by optimization calculation and the surface roughness R_a of the flow channel in the nozzle was reduced from $9.10\mu\text{m}$ to $2.70\mu\text{m}$ through the experiment.

Keywords: Additive manufacturing; Abrasive flow polishing; Surface response method; Surface roughness; Regression model

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.07.079

航空发动机燃油喷嘴是航空发动机的核心部件之一, 其精度要求高, 结构复杂。目前, 传统方式制造的燃油喷嘴存在零件数量多、制造周期长等问题。增材制造技术在减少燃油喷嘴的制造周期及提升合格率方面具有显著优势。其中, 选择性激光熔化技术(SLM)因可成形金属零件而被广泛地应用于航空航天、汽车制造领域^[1-2], 但喷嘴毛坯内流道表面粗糙度较高, 无法满足设计要求, 需要后续表面光整。而磨粒流抛光技术加工可达性好, 适用于燃油喷嘴内流道表面光整^[3]。

目前, 采用 SLM 技术通过改变激光扫描速度可以控制孔隙率, 部件的致密度可达到 99% 以上, 其力学性能已优于铸件^[4]。但金属增材制造零件表面粗糙度一般仍在 $10\sim 50\mu\text{m}$ 之间, 粉末“球化效应”、“粉末粘附”

等现象是导致其表面粗糙度较高的主要因素^[5]。西北工业大学赵涛等研究了喷嘴环磨粒流抛光工艺, 认为磨粒目数越小对粗糙度较高的表面加工效果越明显, 但随着表面粗糙度降低, 小目数的磨粒的加工效果逐渐降低, 大目数的磨粒则产生更好的效果^[2]。印度理工学院 Jha 等认为磨粒流初期抛光只是去除表面的松散材料, 而真正的抛光是暴露出实际的不规则表面后才开始的, 经过长时间加工才能获得表面粗糙度较低和纹理质地良好的零件表面^[6]。长春理工大学 Li 等认为小的磨粒切削角可以获得更好的表面质量^[7]。

很多学者对磨粒流抛光工艺进行了大量研究, 但由于磨粒流加工的不确定性, 工艺参数与表面粗糙度之间并未有明确的关系。磨粒规格、磨料浓度及加工压力等

工艺参数不同程度地影响零件表面加工的质量,因此选择可获得最佳表面质量的磨粒流加工工艺参数尤为重要。为解决增材制造燃油喷嘴内流道表面磨粒流的抛光问题,开展内流道试验件磨粒流抛光工艺试验,分析零件表面抛光效果以及工艺参数对表面粗糙度的影响,建立工艺参数与表面粗糙度的数学模型,为增材制造航空发动机燃油喷嘴的工程化应用进行必要的技术探索。

1 磨粒流加工机理及抛光试验设计

1.1 磨粒流加工机理

磨粒流抛光指由磨粒和黏弹性载体混合形成的胶状磨料,在压力作用下,不断地对零件表面进行微切削,从而实现零件表面的光整。如图 1 (a) 所示,磨粒可简化尖顶为圆弧面的棱锥。在载体作用下,磨粒颗粒压紧在零件表面上,并对表面进行切削。磨粒流抛光存在遇硬退让、沿零件轮廓去除材料、入口处材料去除率高和漏流强磨等特点。其抛光效果受到磨料类型、加工参数、夹具形状和零件初始表面粗糙度等因素的影响。

磨料在内流道的流动过程可分为 3 个部分,如图 1 (b) 所示,在入口区,流动空间由大变小,磨料产生弹性变形引起压力损失,同时,高压磨料极易过度切削内流道入口,导致入口处倒出圆角。在全展流区,磨料稳定流动,对表面微切削并产生压降。在出口区,磨料会胀大恢复至未弹性变形状态,除软性磨料外,均会在内流道出口处倒出圆角^[3,8]。

1.2 抛光试验设计

1.2.1 特征件初始形貌

抽取燃油喷嘴内流道特征,设计试验件,如图 2 (a) 所示,试验件材料为 solution 公司生产的 IN718 合金粉末,其在 -253~650℃ 有良好的综合性能。通过 SLM 技术垂直于 316 不锈钢基板并在 solution m280 设备上进

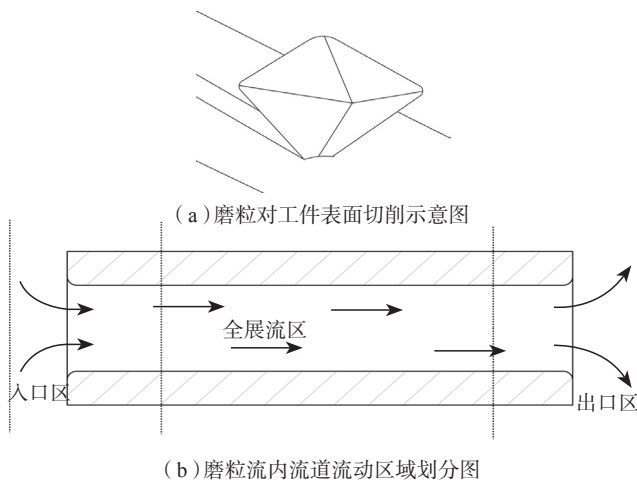


图1 磨粒流加工机理及特点

Fig.1 Mechanism and characteristics of abrasive flow machining

行打印,设定打印功率为 200W,扫描速度为 900mm/s,扫描间距为 0.12mm,层厚 30μm,获得零件毛坯如图 2 (b) 所示。

试验件长 40mm,内流道直径为 φ4mm。选取部分试验件,观测内流道表面形貌和表面粗糙度。图 3 (a) 所示为试验件入口处形貌,在内流道表面存在大量波峰波谷结构,最大峰谷值为 94μm。图 3 (b) 所示为试验件内流道表面形貌,在表面上未发现较强的球化现象,但由于成形时内流道与金属粉末直接接触引起了表面粉末黏接现象,从而降低了试验件内流道的表面质量,经过测量,内流道表面粗糙度 R_a 为 9.10μm。

1.2.2 磨粒流抛光试验设计

本文采用响应曲面法设计试验,基于 BBD 原理,以磨粒规格、磨料浓度、加工压力和加工时间为设计因素,研究其对表面粗糙度的影响。设计因素取值范围如表 1 所示,磨料选用碳化硅高分子弹性软磨料,磨粒流设备为 SMKS-B701,加工方式为单向连续抛光,磨料沿长端入口流入,短端流出。

2 磨粒流抛光试验结果

2.1 试验结果

抛光后,内流道表面粗糙度 R_a 最小值为 2.80μm,材料去除率为 0.20mg/s。其中,材料去除率为被切削掉的金属质量与加工时间的比值,也是衡量加工效率的指标,其值越大,表明对内流道的加工效率越高。

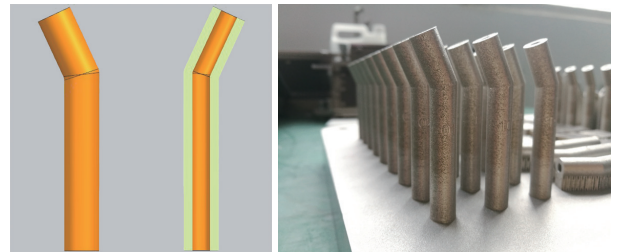


图2 特征试验件的制备

Fig.2 Manufacture of feature test piece

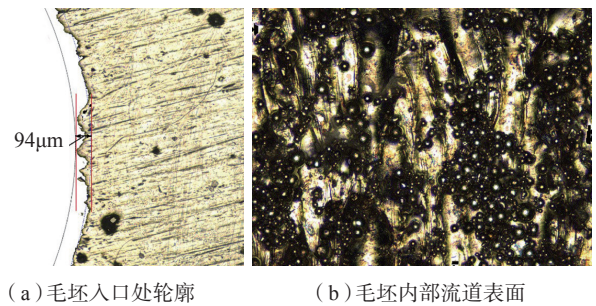


图3 毛坯原始形貌

Fig.3 Original appearance of the blank

经过磨料对内流道的抛光,内流道表面质量有明显的改善,表面黏接的粉末颗粒基本被消除,其抛光效果如图4所示。如图4(a)所示,当磨粒规格为60目,磨料浓度为40%,加工压力为8.5MPa,加工时间为240s时,内流道表面有沿磨料流动方向切削的痕迹,虽黏粉已被去除,但仍然存在大量波峰,这表明抛光强度不足,可增加抛光强度以提高表面质量。如图4(b)所示,当磨粒规格为80目,磨料浓度为40%,加工压力为10MPa,加工时间为480s时,内流道表面波峰有切削的痕迹,但抛光效果沿流道方向逐渐变差。如图4(c)所示,当磨粒规格为60目,磨料浓度为30%,加工压力为11.5MPa,加工时间为360s时,内流道表面波峰已基本被去除且没有残余凹陷,表面粗糙度 R_a 降低为 $2.80\mu\text{m}$ 。如图4(d)所示,当磨粒规格为40目,磨料浓度为40%,加工压力为10MPa,加工时间为480s时,零件表面波峰已被基本消除,但由于抛光压力大且加工时间较长,零件表面在磨料的作用下出现了严重的划痕。

2.2 加工参数对抛光效果的耦合影响

本文基于响应曲面法分析4个设计因素对表面粗糙度的耦合影响,每次交叉选择两个因素,分析表面粗

表1 抛光设计因素水平设定表

Table 1 Polishing effect influence factor level setting table

因素	低水平	高水平
磨粒规格 $A/\text{目}$	40.00	80.00
磨料浓度 $B/\%$	30.00	50.00
加工压力 C/MPa	8.50	11.50
加工时间 D/s	240.00	480.00

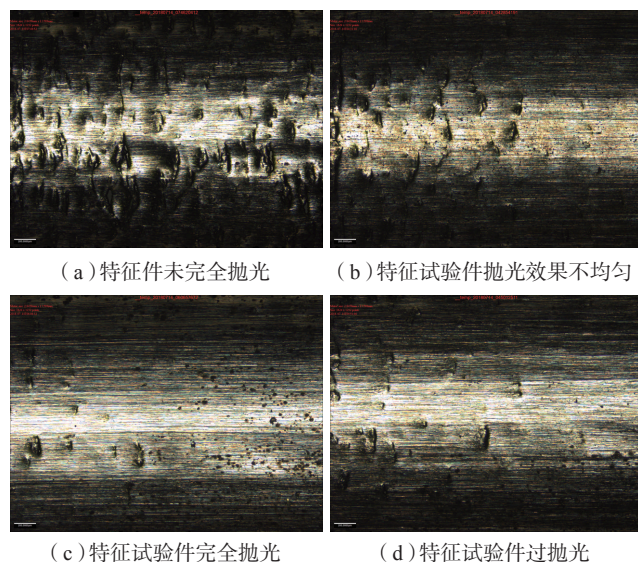


图4 抛光试验后试验件表面形貌

Fig.4 Surface appearance of the test piece after the polishing experiment

糙度变化趋势。磨粒规格是磨粒颗粒大小的指标,磨粒规格越大则表示磨粒颗粒越小。大颗粒磨粒的材料去除效率高,在以倒圆角、去毛刺为目的的加工中有明显优势,而小颗粒磨粒材料去除精细,在以表面光整为目的时,效果显著。磨料浓度指磨粒质量占总质量的比例,磨料浓度越高可使更多的磨粒颗粒参与抛光,但浓度过高会使流动性变差,降低抛光效果与效率^[9]。在加工过程中,磨粒规格和磨料浓度会对表面粗糙度产生耦合影响。

图5所示为加工压力为10MPa,加工时间为360s的条件下,磨粒规格和磨料浓度对表面粗糙度的耦合影响曲面。当加工时间和加工压力固定时,增大磨粒规格和减小磨料浓度均可降低表面粗糙度,其中磨粒规格的影响更大。这是因为小规格磨料中的大颗粒磨粒参与切削的锐边较长,虽然对表面波峰、黏粉的切削量大,但会过多地去除表面材料,不易于形成平整表面。而增大磨粒规格后,磨料中的小颗粒磨粒对材料去除更精细,不会划伤已光整的表面,从而可获得理想的抛光效果^[10-11]。磨料浓度则影响参与抛光的磨粒数量和磨料的流动性。磨料浓度减小可使流动性增加,提高加工效率。然而磨料浓度对表面粗糙度的影响随着数值减小而逐渐减弱。试验结果表明,在浓度较小、磨粒规格较大加工条件下,可获得理想的抛光效果。因此,在实际加工中,可通过选取大规格磨粒、低浓度磨料保证磨料的流动性,从而有效降低表面粗糙度。

增大加工压力可提高磨粒的能量、磨料流动速度,使得磨料切削能力和加工效率有所提高。其次,磨粒规格对表面粗糙度也会产生显著耦合影响。试验表明,在加工时间为360s,磨料浓度为40%的条件下,增大磨粒规格和加工压力可降低表面粗糙度。其中,磨粒规格影响较大。这是因为增大磨粒规格,同时增大加工压力,

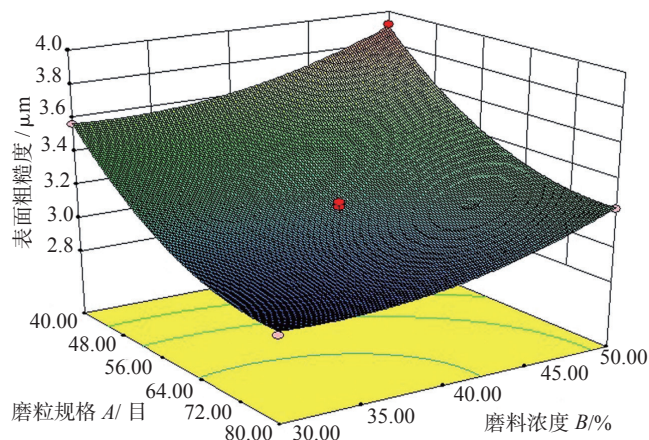


图5 磨粒规格和磨料浓度对表面粗糙度的耦合影响曲面

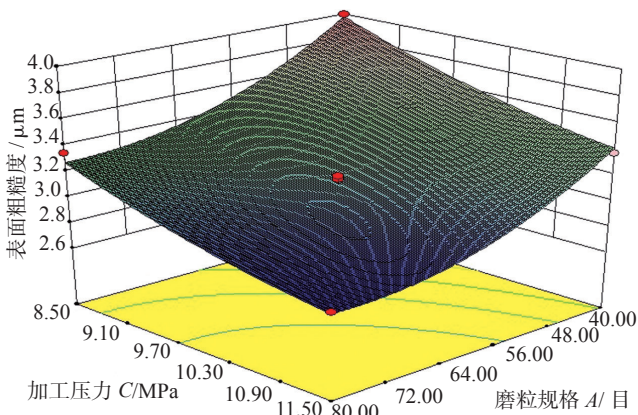
Fig.5 Joint effect of abrasive grain size and abrasive concentration on surface roughness

可减小表面切削槽痕的尺寸且增加磨粒切削能力。磨粒对表面黏粉、球化现象的去除更加细致彻底,使表面质量得到提升,磨粒规格与加工压力的耦合影响曲面如图 6(a)所示,磨粒规格和加工时间对表面粗糙度的耦合影响有类似规律,增加抛光时间可增加磨粒对表面的切削次数,从而改善表面质量,但降低了加工效率,其耦合影响曲面如图 6(b)所示。

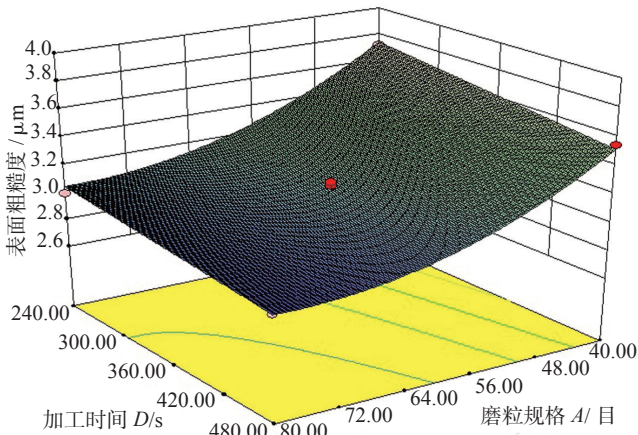
磨料浓度与加工时间分别在一定范围内不会对抛光效果有明显的影 响,二者耦合影响曲面如图 7 所示,试验结果表明,在加工压力为 10MPa、磨粒规格为 60 目的条件下,降低磨料浓度,增加加工时间可降低表面粗糙度。一方面,磨料浓度的降低增强了流动性,提高了单位体积的磨料动能,使得切削能力提升^[10];另一方面,较长的加工时间使得切削次数逐渐增多,对波峰、黏粉的去 除效果提升,使试验件表面切削微痕分布更加均匀,提高了表面质量^[12]。

3 回归模型建立

本文基于响应曲面法,以磨粒规格、磨料浓度、加工



(a)磨粒规格和加工压力对表面粗糙度的耦合影响曲面



(b)磨粒规格和加工时间对表面粗糙度的耦合影响曲面

图6 磨粒规格分别与加工压力和加工时间对表面粗糙度的耦合影响

Fig.6 Joint effect of abrasive grain size with machining pressure and machining time on surface roughness

压力和加工时间为设计变量,以表面粗糙度为评价指标,建立了回归方程,其方差分析如表 2 所示^[13-14]。

$$R_a=14.3911-0.0708A-0.1382B-0.9335C-0.0029D+0.0046BC+5.2\times 10^{-5}BD+4.5\times 10^{-4}A^2+0.0011B^2+0.0287C^2 \quad (1)$$

由方差分析(ANOVA)可以看出自变量一次项 A、B、C、D,交互项 BC、BD,二次项 A²、B²、C² 显著。其中, F=70.613>F_{0.05}(9, 18)=2.96,表明回归方程模型(1)极显著,失拟项不显著表明方程模拟比较合理,回归模型的复相关系数 r²=0.9710,校正决定系数 R²=0.9572,模型分辨率等于 30.046,这表明预测值与实际值有很高的相

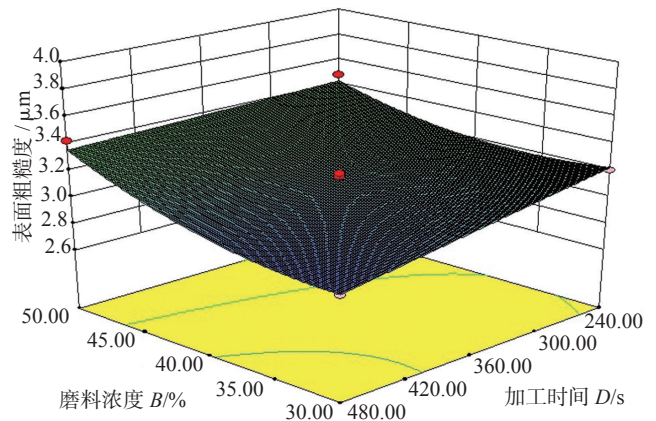


图7 磨料浓度和加工时间对表面粗糙度耦合影响曲面

Fig.7 Joint effect of abrasive concentration and processing time on surface roughness

表2 模型方差分析

Table 2 Deviation analysis of model

来源	平方和	自由度	均方差	F 值	p 值	效果
模型	2.89	9	0.321	70.613	<0.0001	显著
A	1.31	1	1.314	289.065	<0.0001	—
B	0.32	1	0.319	70.238	<0.0001	—
C	0.84	1	0.835	183.804	<0.0001	—
D	0.11	1	0.113	24.918	<0.0001	—
BC	0.02	1	0.019	4.181	0.055	—
BD	0.02	1	0.016	3.485	0.0774	—
A ²	0.22	1	0.220	48.345	<0.0001	—
B ²	0.08	1	0.085	18.615	0.0004	—
C ²	0.03	1	0.028	6.170	0.0225	—
残差	0.09	19	0.005	—	—	—
失拟项	0.06	15	0.004	0.487	0.8619	不显著
纯误差	0.03	4	0.008	—	—	—
总值	2.97	28	—	—	—	—

注:复相关系数 r²=0.9710,校正决定系数 R²=0.9572,模型分辨率 =30.046。

关性,模型误差小,并且具有足够的模型分辨力,回归模型与实际情况拟合比较好,可用于分析和预测表面粗糙度。

回归方程中各个因素取值范围如表1所示。根据模型,并考虑到加工效率,通过遗传算法,获得最优工艺参数和表面粗糙度预测值。选取最优工艺参数为试验工艺参数,进行抛光试验并对试验件内流道表面的粗糙度进行测量。最优工艺参数、表面粗糙度预测值以及最终试验结果如表3所示。

试验抛光情况如图8所示,零件表面有切削的痕迹,黏粉和波峰已被消除,抛光效果均匀,显现出金属光泽,表面粗糙度 R_a 降低至 $2.70\mu\text{m}$,为所有结果中的最低值。试验证明,对内流道试验件进行基于最优工艺参数的磨粒流抛光在本文的试验条件下可以获得最佳表面质量,同时,较大的加工压力和较短的加工时间使得在该参数组合下对零件的抛光具有较高的加工效率。

4 结论

(1)在本文的试验条件下,磨粒流工艺能有效解决激光增材制造过程中由于“粘粉效应”、“阶梯效应”等引起的表面质量问题。通过磨粒流抛光,将试验件内流道表面粗糙度 R_a 从初始 $9.10\mu\text{m}$ 降至 $2.70\mu\text{m}$ 。

(2)磨粒流加工效果受到磨粒规格、磨料浓度、磨粒流加工压力和加工时间的耦合影响。零件表面粗糙度随着磨粒规格、加工压力和加工时间的增大和磨料浓度

表3 工艺参数优化预测结果及试验验证结果对比

Table 3 Comparison of process parameter optimization prediction results and experimental verification results

项目	磨粒规格 / 目	磨料浓度 / %	加工压力 / MPa	加工时间 / s	表面粗糙度 / μm
预测值	80	36	11.50	240	2.81
试验值	80	36	11.50	240	2.70
误差	—	—	—	—	-3.91%

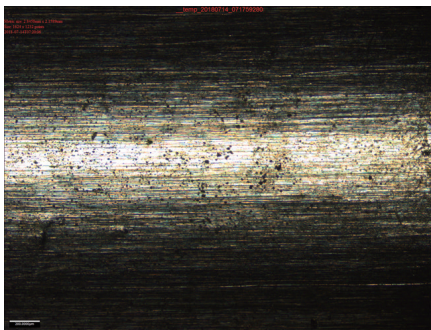


图8 特征试验件抛光试验后内流道表面

Fig. 8 Internal path surface of features after polishing experiment

的减小而降低,其中磨粒规格对抛光效果的影响最大,磨料浓度、加工压力和加工时间在一定范围内对抛光效果的影响不明显。

(3)通过建立表面粗糙度回归模型,对磨粒流抛光工艺参数进行优化,获得了最优工艺参数,当磨粒规格80目、磨料浓度36%、加工压力11.50MPa、加工时间为240s时,可获得较高的加工效率以及在本文的试验条件下的最优表面抛光效果,表面粗糙度 R_a 预测值为 $2.81\mu\text{m}$,试验值为 $2.70\mu\text{m}$ 。

参考文献

- [1] 高航,李世宠,付有志,等.金属增材制造格栅零件磨粒流抛光[J].航空学报,2017,38(10):226-234.
- [2] GAO Hang, LI Shichong, FU Youzhi, et al. Abrasive flow polishing of grating parts manufactured by additive manufacturing [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(10): 226-234.
- [3] 赵涛,史耀耀,蔺小军,等.汽轮机喷嘴环磨粒流抛光工艺参数优化[J].计算机集成制造系统,2014,20(9):2203-2209.
- [4] ZHAO Tao, SHI Yaoyao, LIN Xiaojun, et al. Optimization of process parameters for turbine nozzle ring grinding process[J]. Journal of Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(9): 2203-2209.
- [5] 刘月普.倒锥形微细喷孔磨粒流加工成形研究[D].太原:太原理工大学,2014.
- [6] LIU Yuepu. Research on processing of inverted cone micro-perforation abrasive flow [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014.
- [7] TOMUS D, JARVIS T, WU X, et al. Controlling the microstructure of Hastelloy-X components manufactured by selective laser melting[J]. Physics Procedia, 2013, 41: 823-827.
- [8] 李瑞迪.金属粉末选择性激光熔化成形的关键基础问题研究[D].武汉:华中科技大学,2010.
- [9] LI Ruidi. Research on key basic problems of selective laser melting of metal powder[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010.
- [10] JHA S, JAIN V K, KOMANDURI R. Effect of extrusion pressure and number of finishing cycles on surface roughness in magnetorheological abrasive flow finishing (MRAFF) process[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 33(7-8): 725-729.
- [11] LI J Y, MENG W Q, DONG K, et al. Study of effect of impacting direction on abrasive nanometric cutting process with molecular dynamics[J]. Nanoscale Research Letters, 2018, 13(1): 1-14.
- [12] 李俊焯,周立宾,张心明,等.整体叶轮磨粒流抛光数值模拟研究[J].制造业自动化,2016,38(12):88-93.
- [13] LI Junye, ZHOU Libin, ZHANG Xinming, et al. The numerical simulation research on abrasive flow polishing integral impeller[J]. Manufacturing Automation, 2016, 38(12): 88-93.
- [14] BREMERSTEIN T, POTTHOFF A, MICHAELIS A, et al. Wear of abrasive media and its effect on abrasive flow machining results[J]. Wear, 2015, 342-343(15): 44-51.

(下转第90页)

工艺技术, 2010, 31(5): 293–295.

YI Wei, MAO Shuqin. Cylindrical through-hole conductive ring assembly technology[J]. Electronic Technology, 2010, 31(5): 293–295.

[2] 张会林, 张凤山. 精密导电环在高速高温真空环境中输电特性研究[J]. 红外与毫米波学报, 2003, 22(6): 461–463.

ZHANG Huilin, ZHANG Fengshan. Transmission characteristics of precision conducting rings in high speed and high temperature vacuum environment[J]. Journal of Infrared and Millimeter Wave, 2003, 22(6): 461–463.

[3] 薛萍, 陈少兵, 刘丽. 电滑环中的导电环和电刷[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2012(1): 11–13, 25.

XUE Ping, CHEN Shaobing, LIU Li. Conductive rings and brushes in electric slip ring[J]. Fiber and Cables in the Slip Ring and Their Application Technology, 2012(1): 11–13, 25.

[4] 马晓东, 余建军, 赵涛. 贵金属电接触材料的发展概况[J]. 山东工业技术, 2016(19): 255–256.

MA Xiaodong, YU Jianjun, ZHAO Tao. Development of precious metal electrical contact materials[J]. Shandong Industrial Technology, 2016(19): 255–256.

[5] CHANG C W, HO C E, YANG S C, et al. Kinetics of AuSn₄ migration in lead-free solders[J]. Journal of Electronic Materials, 2006, 35(11): 1948–1954.

[6] BADER W G. Dissolution of Au, Ag, Pd, Pt, Cu and Ni in a molten tin-lead solder[J]. Weld Journal, 1969, 28(12): 551–557.

[7] LAURILA T, VUORINEN V, MATTILA T. Analysis of the redeposition of AuSn₄ on Ni/Au contact pads when using SnPbAg, SnAg, and SnAgCu solders[J]. Journal of Electronic Materials, 2005, 34(1): 103–110.

[8] HO C E, CHEN Y M, KAO C R. Reaction kinetics of solder-balls with pads in BGA packages during reflow soldering[J]. Journal of Electronic Materials, 1999, 28(11): 1231–1237.

[9] BERWER D H. Solder for sick gold packing[J]. Welding Journal, 1970, 49(10): 465–470.

[10] 杨英惠. 厚的黄金喷镀件用的铜-铅合金[J]. 现代材料动态, 2004(9): 9.

YANG Yinghui. Indium lead alloy for thick gold spray parts[J]. Modern Material Dynamics, 2004(9): 9.

[11] MINIC D, ZIVKOVIC D, ZIVKOVIC Z, et al. Contribution to phase diagram investigation of Pb-In binary system[J]. Journal of Thermal Analysis & Calorimetry, 2003, 74(3): 915–922.

[12] 尹娜, 曲文卿, 杨淑娟. 金合金锡铅软钎焊接头脆性行为[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(5): 670–673.

YIN Na, QU Wenqing, YANG Shujuan. Brittleness behavior of gold alloy joint soldered with tin-lead solder[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(5): 670–673.

[13] 李福泉, 王春青, 杜森, 等. SnPb 钎料与 Au/Ni/Cu 焊盘反应过程中 Au 的分布[J]. 焊接学报, 2006, 27(1): 53–56.

LI Fuquan, WANG Chunqing, DU Miao, et al. Distribution of Au in reaction between SnPb solder and Au/Ni/Cu pad[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(1): 53–56.

[14] 李敏雪, 曲文卿, 代国琴, 等. AuNi₉ 导电环刷丝的钎料成

分改进及性能分析[J]. 宇航材料工艺, 2015, 45(1): 73–76.

LI Minxue, QU Wenqing, DAI Guoqin, et al. Solder composition improvement and performance analysis for the AuNi₉ conductive ring brush wire[J]. Aerospace Materials Technology, 2015, 45(1): 73–76.

[15] 尹立孟, 位松, 李望云. 电子封装用低银含量无铅钎料的研究和应用进展[J]. 焊接技术, 2011, 40(2): 1–5.

YIN Limeng, WEI Song, LI Wangyun. Progress in research and application of lead-free solders with low silver content for electronic packaging[J]. Welding Technology, 2011, 40(2): 1–5.

[16] 王立群. 宇宙空间用金属材料[J]. 国外稀有金属动态, 1991, 7(7): 425–427.

WANG Liqun. Metallic materials used in space[J]. Foreign Rare Metal Dynamics, 1991, 7(7): 425–427.

[17] LEE C C, WANG C Y, MATIJASEVIC G. Au-In bonding below the eutectic temperature[J]. Components, Hybrids and Manufacturing Technology, 1993, 16(3): 311–316.

通讯作者: 曲文卿, 副教授, 研究方向为航空宇航先进钎焊技术及基础理论, E-mail: quwenqing@buaa.edu.cn. (责编 铃兰)

(上接第83页)

[10] 李俊焯, 许颖, 杨立峰, 等. 非直线管零件的磨粒流加工实验研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(13): 1729–1734.

LI Junye, XU Ying, YANG Lifeng, et al. Experimental study on abrasive flow processing of non-linear pipe parts[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(13): 1729–1734.

[11] VENKATESH G, APURBBA K S, NITISH S. Simulation of media behaviour in vibration assisted abrasive flow machining[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2015, 51: 1–13.

[12] FURUMOTO T, UEDA T, AMINO T, et al. A study of internal face finishing of the cooling channel in injection mold with free abrasive grains[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(11): 1742–1748.

[13] 张焜州, 明伟伟, 安庆龙, 等. 响应曲面法在表面粗糙度预测模型及参数优化中的应用[J]. 上海交通大学学报, 2010, 44(4): 447–451.

ZHANG Hongzhou, MING Weiwei, AN Qinglong, et al. Application of response surface method in surface roughness prediction model and parameter optimization[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2010, 44(4): 447–451.

[14] 武文革, 刘丽娟, 范鹏, 等. 基于响应曲面法的高速铣削 Ti6Al4V 表面粗糙度的预测模型与优化[J]. 制造技术与机床, 2014(1): 39–43.

WU Wenge, LIU Lijuan, FAN Peng, et al. Prediction model and optimization of surface roughness of high speed milling Ti6Al4V based on response surface method[J]. Manufacturing Technology and Machine Tools, 2014(1): 39–43.

通讯作者: 刘维伟, 博士, 副教授, 研究方向为先进复合材料结构设计制造和 3D 打印精确成形工艺, E-mail: liuwv@nwpu.edu.cn. (责编 一元)