

SLM 成型零件型腔内表面电解辅助 磁粒研磨加工研究*

刘文浩 陈燕 王杰 丁叶 张泽群 潘明诗
(辽宁科技大学机械工程和自动化学院 鞍山 114051)

摘要: 为了去除选区激光熔化技术成型的零件表面缺陷和降低表面粗糙度,并寻求最佳的加工参数。从理论上解析电解辅助磁粒研磨的加工机理,利用仿真软件模拟加工区域的磁感应强度分布,设计 Box-Behnken 试验方案,先对材料为 Ti6Al4V 的钛合金工件表面进行电解钝化,后进行机械磁粒研磨,根据试验结果建立表面粗糙度的二次响应回归方程并对建立的数学模型进行方差分析,最后用响应面分析法分析主轴转速、磨料粒径、电解温度和电解电压对表面粗糙度的影响规律,得到最佳的加工参数,在最佳工艺参数下对磁粒研磨和电解辅助磁粒研磨的加工效果进行比较和分析。建立的回归方程调整后的拟合优度为 92.14%,经过优化后的电解辅助磁粒研磨最佳加工参数如下:电解液为浓度 16% 的硝酸钠溶液,电解温度 28 ℃,电解电压 12 V,磨料粒径 180 μm,主轴转速 1 100 r/min,使用磁粒研磨加工 60 min 后,工件表面粗糙度由原始的 Ra 10.7 μm 降为 Ra 0.52 μm,使用电解辅助磁粒研磨加工 60 min 后,工件表面粗糙度由原始的 Ra 10.7 μm 降为 Ra 0.354 μm。使用电解辅助磁粒研磨可以有效去除选区激光熔化技术成型零件型腔内表面的缺陷,并降低零件的表面粗糙度,通过响应面分析法可以有效优化加工参数,使用电解辅助磁粒研磨加工比单一磁粒研磨加工的加工效果好,加工效率高。

关键词: 磁粒研磨; 电解辅助磁粒研磨; 选区激光熔化; 表面粗糙度; 响应面分析; 加工参数

中图分类号: TG356

Study on Electrolysis Assisted Magnetic Abrasive Finishing of SLM Parts Cavity Surface

LIU Wenhao CHEN Yan WANG Jie DING Ye ZHANG Zequan PAN Mingshi
(School of Mechanical Engineering and Automation,
University of Science and Technology, Anshan 114051, China)

Abstract: In order to remove the surface defects and reduce the surface roughness of parts formed by selective laser melting technology, and seek the best processing parameters. The mechanism of electrolysis assisted magnetic abrasive finishing was analyzed theoretically, and the magnetic induction distribution in the machining area was simulated by using the simulation software. The box Behnken test scheme was designed. Firstly, the surface of titanium alloy workpiece with Ti6Al4V was electrolytically passivated, and then mechanical magnetic abrasive grinding was carried out. According to the test results, the quadratic response regression equation of surface roughness was established, and the established mathematical model was analyzed by variance. Finally, the influence of spindle speed, abrasive particle size, electrolysis temperature, and electrolysis voltage on the surface roughness was analyzed by the response surface method, and the best machining parameters were obtained. Under the optimal process parameters, the machining effects of magnetic abrasive finishing and electrolytic assisted magnetic abrasive finishing were compared. The goodness of fit of the established regression equation was 92.14%, and the optimized parameters were as follows: electrolyte was 16% sodium nitrate solution, electrolysis temperature was 28 ℃, electrolysis voltage was 12 V, abrasive particle size was 180 μm, spindle speed was 1 100 r/min,

* 国家自然科学基金(51775258)、辽宁省自然科学基金重点项目(20170540458)和精密与特种加工教育部重点实验室基金(B201703)资助项目。

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51775258), Natural Science Foundation Plan Key Projects of Liaoning Province (20170540458), and Key Laboratory Fund of Ministry of Education for Precision and Special Processing (B201703).

20210309 收到初稿,20210415 收到修改稿

The surface roughness of the workpiece was reduced to Ra 0.52 μm by magnetic abrasive finishing and Ra 0.354 μm by electrolysis assisted magnetic abrasive finishing. Electrolysis assisted magnetic abrasive finishing can effectively remove the surface defects and reduce the surface roughness of parts formed by selective laser melting technology. The processing parameters can be optimized effectively by response surface analysis. The results show that the machining effect of electrolysis assisted magnetic abrasive finishing is better than that of single magnetic abrasive finishing.

Keywords: magnetic abrasive finishing; electrolysis assisted magnetic abrasive finishing; selective laser melting; surface roughness; response surface methodology; processing parameters

0 前言

目前,增材制造技术已经成为衡量一国制造业发展水平的重要标志。作为增材制造技术的一个重要分支,选区激光熔化技术(Selective laser melting, SLM)在工业生产中的作用越来越大,SLM与传统减材制造的方法相比,可以快速成型复杂的零件,自动化程度较高,大大降低了零件制造的成本和时间^[1-2]。但由于成型过程中存在热交互和飞溅以及阶梯效应等现象,生产出来的零件表面质量较差,无法满足应用时的表面粗糙度要求,因此常常需要对成型后的零件进行表面光整加工以消除部分缺陷和降低其表面粗糙度^[3-5]。

常见的对 SLM 成型零件后处理的方法有热处理、喷丸、喷砂、机械研磨和超声滚压等加工方法。江庆红^[6]研究了机械喷丸和激光喷丸两种不同的处理方式对 SLM 成型合金的影响,机械喷丸处理后的工件表面的缺陷基本去除,但易对表面造成损伤且表面粗糙度仍然较高,激光喷丸可以起到细化表面晶粒的作用,延缓疲劳裂纹的扩展,但对工件表面的强化作用不明显且作用范围较窄,不适用于缺陷较多的零件。王震^[7]利用超声滚压加工技术对 SLM 成型的零件表面进行后处理加工,有效降低了表面粗糙度并起到了一定强化工件表面的作用,但该方法仅对平面类零件加工效果较好,不适用于曲面和阶梯面的加工。

磁粒研磨加工(Magnetic abrasive finishing, MAF)是一种常用于工件表面研磨和抛光的特种加工技术,具有自锐性好、柔性和自适应性等诸多优点,可以适用于不同类型零件的加工,但 MAF 属于微量切削加工,材料去除效率低,尤其是对硬度较高的合金金属进行加工工时,磁性磨粒上的切削刃极易磨钝进而导致磨削性能下降,所以在加工硬度较高的工件表面时,单纯的 MAF 往往无法达到较为理想的研磨效果^[8-10]。

电解辅助磁粒研磨(Electrolysis assisted magnetic abrasive finishing, EMAF)是在 MAF 的基础

上将电解加工技术融入进去进而形成的一种复合加工技术,EMAF 不仅具有 MAF 的优点,而且由于电解后形成了表面钝化膜,使 MAF 研磨的对象由硬度较高的工件基体变为硬度较软的金属钝化膜,可以极大地降低 MAF 受金属工件硬度约束的影响,加工效率也比单纯的 MAF 要高,特别适用于对工件表面的后处理加工^[11-15]。为了去除 SLM 零件表面缺陷和降低零件表面粗糙度,探究电解加工和 MAF 加工相结合后产生的加工效果,文中使用 EMAF 的后处理加工方法对材料为 Ti6Al4V(钛六铝四钒)的 SLM 成型零件型腔内表面进行加工,先进行电解,后进行机械磁粒研磨,使用 Box-Behnken 设计进行试验方案的制定,根据试验结果建立了二次回归预测模型,并用方差分析验证了模型的合理性,然后通过响应面分析法确定了最佳加工参数,并在此参数下设计了对比试验验证使用 EMAF 和 MAF 两种加工方法的加工效果,最终通过测定加工后的表面粗糙度和观测表面形貌发现 EMAF 的加工效果要优于 MAF 的加工效果。

1 加工机理

1.1 EMAF 加工过程中的电化学反应原理

EMAF 中的电化学反应是一种氧化还原反应,其反应原理如图 1 所示。工件与电源正极相连,成为电化学反应的阳极,空心石墨电极与电源负极相连,成为电化学反应的阴极,试验中选用硝酸钠溶液作为电解质溶液。整个电解反应的过程实际上是电解水的过程,通过电解水产生氢离子和氢氧根离子,电源通电后,工件表面的难加工金属元素(如 Ti、Al 和 V 等)发生氧化反应,由原子状态变为离子状态,然后与电解质溶液中的氢氧根离子结合形成不溶于水的氢氧化物,与此同时,溶液之中的氢离子由于电荷之间的相互吸引而逐渐向空心石墨电极处聚集,最终与阴极处的电子结合形成氢气^[16-19]。电解辅助磁粒研磨加工过程中的主要电化学反应如式(1)~(4)所示



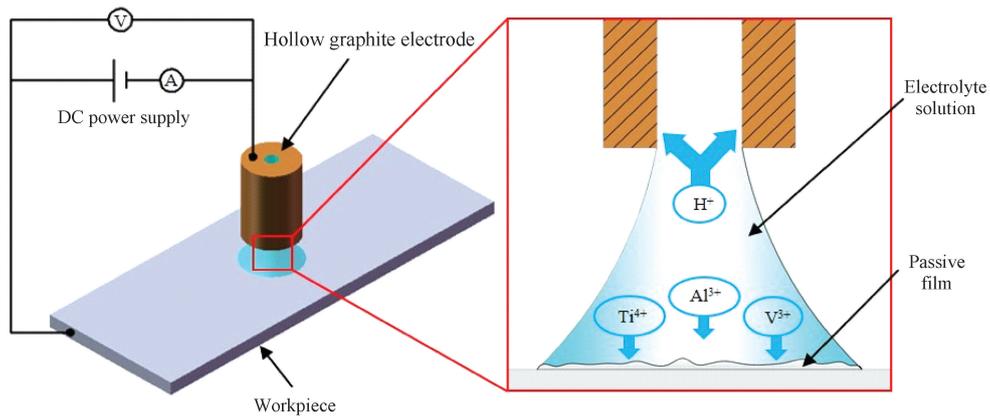
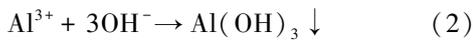


图1 EMAF加工过程中电化学反应原理图

Fig.1 Schematic diagram of electrochemical reaction in EMAF process



$$F_y = \chi \mu_0 H \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) \quad (6)$$

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (7)$$

1.2 EMAF 加工过程中的 MAF 加工机理

MAF 加工机理如图 2 所示,待加工工件型腔内表面为不规则曲面,根据曲面的形状设计一种仿形组合磁极,磁极仿形压附于工件表面并与工件表面保持一定的距离。在磁极和工件之间 1~2 mm 间隙填充磁性磨粒,在磁场中,磁性磨粒被磁化沿磁力线方向有序地排列聚集形成具有一定刚度的柔性磁粒刷,通过对磁极施加旋转运动,使磁极带动磁粒刷与工件表面做相对运动,此时工件被固定保持不动,从而实现对工件表面的光整加工^[20-21]。单一磁性磨粒在磁场中所受的合力 F 可分解为沿磁力线方向的分力 F_x 和沿磁等势线方向的分力 F_y 。各个力的表达如式(5)~(6)所示

$$F_x = \chi \mu_0 H \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) \quad (5)$$

式中, F_x 为沿磁力线方向的分力, F_y 为沿磁等势线方向的分力, F 为单一磁粒所受合力, V 为磁粒的体积, χ 为磁粒的磁化率, μ_0 为真空磁导率, H 为磁场强度, $(\partial H/\partial x)$ 和 $(\partial H/\partial y)$ 分别为磁场强度在磁力线和磁等势线方向上的梯度分量。

通过对加工区域进行磁场仿真可以更加直观地分析磁粒刷的状态,利用 MAXWELL 软件建立 2 D 仿真模型,组合磁极的材料设定为 N35 (NdFeB),工件材料设置为不导磁材料,对建立完的模型进行仿真分析,加工区域的磁感应强度分布云图如图 3 所示。从仿真结果可以直观地看到磁极边缘处的磁感应强度较强,说明磁极边缘处的磁力线较密集,更有利于在加工区域形成稳定的磁粒刷,进而对工件表面进行有效的光整加工。

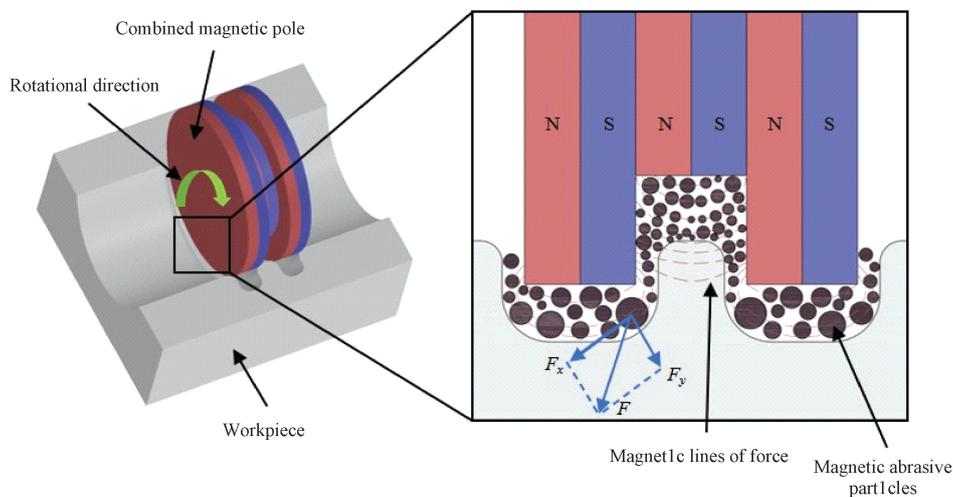


图2 MAF加工机理示意图

Fig.2 Schematic diagram of MAF processing mechanism

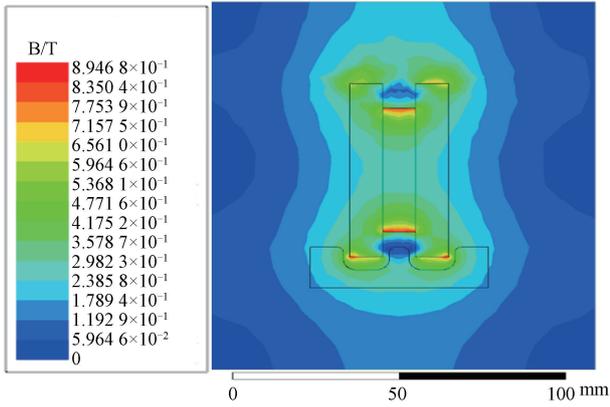


图 3 加工区域磁感应强度分布云图

Fig. 3 Cloud map of magnetic induction intensity distribution in processing area

2 试验

2.1 试验装置与加工过程

图 4 为试验装置的外观图,试验装置主要由小型数控机床、仿形磁极、蠕动泵、直流电源和空心石墨电极等组成,电解辅助磁粒研磨加工示意图如图 5 所示,工件被固定在可以移动的机床工作台上,直流电源的正极通过导线与工件相连,负极则与空心石墨电极相连,仿形磁极由两个 $\Phi 35 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的

磁极和一个 $\Phi 25 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的磁极组合而成。整个加工过程分为两个工位完成,第一个工位上发生的是电化学反应,电解液经过过滤器过滤后,在蠕动泵的驱动下,通过软管喷洒到待加工工件的表面,直流电源通电后,工件作为阳极发生氧化反应,在工件表面形成一层质地较软的钝化膜,然后将工件移动到第二个工位上,利用磁粒研磨加工的方法,去除工件表面上硬度较低的钝化膜。

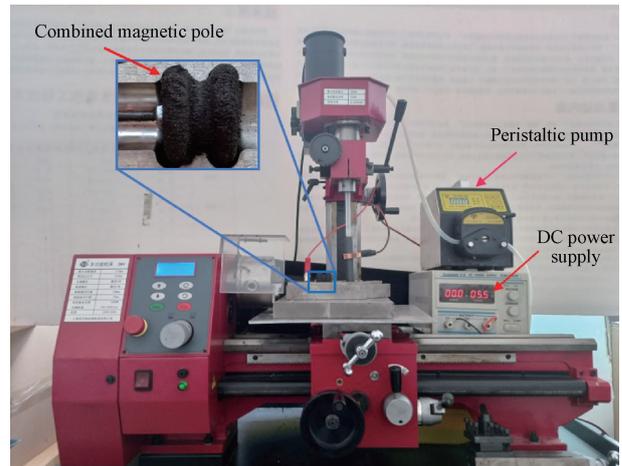


图 4 EMAF 加工装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of EMAF processing device

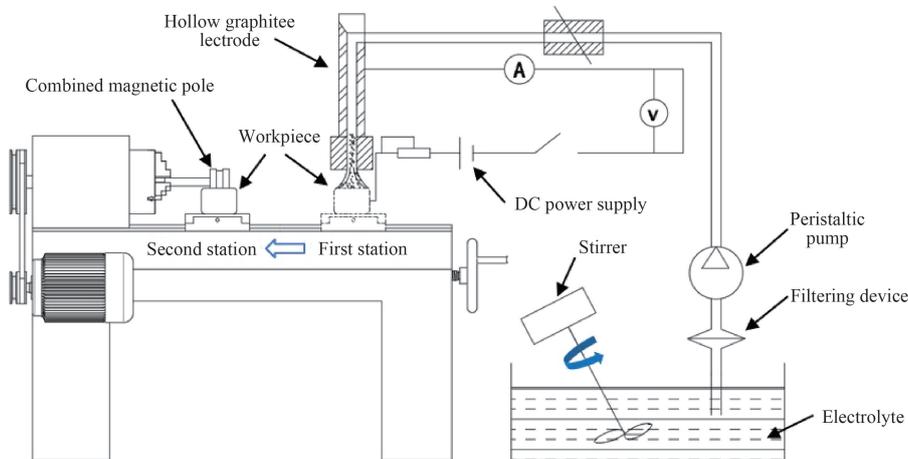


图 5 EMAF 加工过程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of EMAF process

2.2 试验条件与加工参数

电解辅助磁粒研磨加工的主要恒定参数如表 1 所示,工件是通过选区激光熔化技术直接成型得到,其材料为 Ti6Al4V,工件示意图如图 6 所示,其形状为不规则形状,内表面为较为复杂的曲面组合,采用 JB-8E 触针式表面粗糙度仪对工件表面进行表面粗糙度测量,每次检测的最大区域长度为 4 mm,工件表面的初始表面粗糙度在 $Ra 10.5 \mu\text{m}$ 和 $Ra 11.0 \mu\text{m}$

之间,电解液是影响电解效果的基本因素,中性电解液中常见的电解质有 NaCl 、 NaNO_3 和 NaClO_3 , NaCl 溶液的成本较低但易对工件和设备产生腐蚀作用, NaClO_3 溶液腐蚀作用较弱,但其成本较为昂贵,且加工过程中 ClO_3^- 离子容易损失,需要不断地补充电解质溶液,所以综合考虑,选择浓度为 16% 的 NaNO_3 溶液作为电解质溶液,在进行 MAF 加工之前在第一工位上提前进行电解,电解时间

为 5 min,随后在第二工位上进行 MAF 加工,加工时间为 60 min,磁极与工件之间的加工间隙设置为 2 mm。

表 1 EMAF 加工过程中的主要恒定参数

Table 1 Main constant parameters of EMAF process

Items	Parameters
Workpiece material	Ti6Al4V
Magnetic pole material	N35(NdFeB)
Electrolyte	NaNO ₃
Initial roughness/ μm	10.5~11.0
Processing time/min	60
Working gap/mm	2

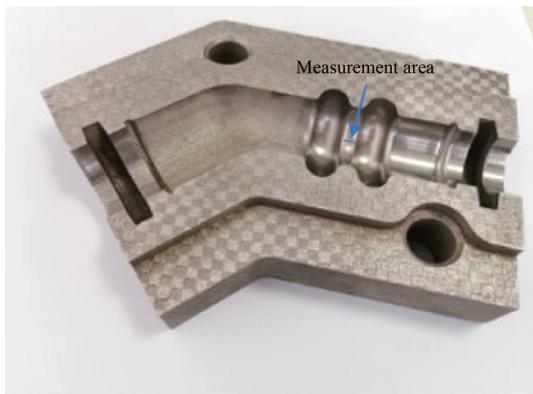


图 6 工件示意图

Fig. 6 Schematic diagram of workpiece

影响 EMAF 最终加工效果的参数有很多,通过文献调研,将主轴转速、磨料粒径、电解温度、电解电压和电解液浓度确定为主要影响因素^[14,22-24],由于在电解过程中,电解液在不断地流动与损耗,其浓度也在不断地变化,无法维持稳定的状态,因此无法将电解液浓度作为独立的参数水平设计因素水平试验。其他主要影响因素均设置三个水平,独立参数水平表如表 2 所示。主轴转速受机床性能的影响,当主轴转速低于 1 000 r/min 时,磁粒刷不能有效地去除工件表面的钝化膜,而转速高于 1 200 r/min 时,磁粒刷往往会不稳定,磁粒链易断裂,从而降低加工效率,因此将主轴转速的范围设置为 1 000~1 200 r/min。磁性磨料是通过烧结法制备的,将铁粉和 Al₂O₃ 粉末以 2:1 的比例均匀混合后,经过制坯、压制、烧结、粉碎和筛分等步骤制备得到,选用粒径分别为 150 μm 、180 μm 和 250 μm 的磁性磨料作为研究对象。电解温度和电解电压都是影响电化学反应的重要因素,在配置电解液时通过温控装置控制电解液的温度,并将温度保持在 20 $^{\circ}\text{C}$ 、30 $^{\circ}\text{C}$ 和 40 $^{\circ}\text{C}$ 3 个水平,同时,调节直流电源将电解电压设置为 5、10 和 15 V 3 个水平。

表 2 独立参数水平

Table 2 Levels of independent factors

Process parameters	Levels		
	-1	0	1
Spindle rotational speed(X_1)/(r/min)	1 000	1 100	1 200
Magnetic abrasives size (X_2)/ μm	150	180	250
Electrolysis temperature(X_3)/ $^{\circ}\text{C}$	20	30	40
Electrolytic voltage(X_4)/V	5	10	15

3 结果与讨论

3.1 试验结果

运用 Box-Behnken 设计进行响应曲面试验设计,Box-Behnken 设计无需进行多次连续试验,可以大大减少试验的次数,并且可以有效评估加工因素的非线性影响^[25],每隔 60 min 测一次零件表面的粗糙度数值,并且记录在表格中,所设计的试验方案及试验结果如表 3 所示,然后利用软件 MINITAB 进行数学建模,所建立的多元二次回归模型如式(8)所示

$$Ra = 5.811 - 0.0637X_3 + 0.0115X_4 - 0.02938X_2 - 0.006225X_1 + 0.000967X_3X_3 + 0.004067X_4X_4 + 0.000207X_2X_2 + 0.000003X_1X_1 + 0.000100X_3X_4 - 0.000025X_3X_2 + 0.000009X_3X_1 - 0.000375X_4X_2 - 0.000075X_4X_1 + 0.000001X_2X_1 \quad (8)$$

式中, X_1 为磁极转速, X_2 为磨料粒径, X_3 为电解温度, X_4 为电解电压。

用方差分析的方法对所建立的回归模型的有效性和合理性进行分析,分析结果如表 4 所示,该模型的总自由度 DF 为 26,拟合优度 R^2 为 96.37%,远远大于 85%,且调整后的拟合优度 R^2 (adj) 为 92.14%,与调整前的拟合优度差别较小,故说明该回归模型的拟合效果较好,所拟合的模型具有良好的有效性。另外,观察回归模型的残差图,从图中可以直观地看出残差图上的点在残差值为 0 的线上下呈无规律随机均匀分布,说明回归模型响应的随机性部分合理,进一步验证了该回归模型的合理性,回归模型的残差图如图 7 所示。

3.2 加工参数对表面粗糙度的影响

电解温度对表面粗糙度的影响如图 8a 所示,随着电解温度的升高,工件表面粗糙度值呈现先减小后增大的趋势,这是因为在温度相对较低时,增加电解温度可以促进金属元素(如 Ti、Al 和 Fe 等)向离子态的转变,并且温度越高,越容易形成稳定的高价态金属离子,有利于钝化膜的形成,从而在第二工

表 3 Box Behnken 试验设计及结果
Table 3 Box Behnken experimental design and results

Exp. No.	Spindle rotational speed (X_1)/(r/min)	Magnetic abrasives size (X_2)/ μm	Electrolysis temperature (X_3)/ $^{\circ}\text{C}$	Electrolytic voltage (X_4)/V	Surface roughness $Ra/\mu\text{m}$
1	1 200	150	30	10	0.46
2	1 000	250	30	10	0.68
3	1 100	180	40	15	0.50
4	1 100	150	30	15	0.45
5	1 100	180	40	5	0.61
6	1 100	250	20	10	0.50
7	1 100	180	30	10	0.35
8	1 000	180	20	10	0.64
9	1 200	180	40	10	0.51
10	1 100	150	40	10	0.55
11	1 100	180	20	15	0.50
12	1 000	150	30	10	0.64
13	1 100	250	30	15	0.51
14	1 100	180	20	5	0.63
15	1 100	150	20	10	0.52
16	1 100	180	30	10	0.35
17	1 200	180	30	15	0.36
18	1 100	150	30	5	0.61
19	1 100	250	40	10	0.55
20	1 000	180	40	10	0.70
21	1 100	250	30	5	0.52
22	1 100	180	30	10	0.35
23	1 200	250	30	10	0.49
24	1 000	180	30	15	0.72
25	1 200	180	20	10	0.38
26	1 000	180	30	5	0.64
27	1 200	180	30	5	0.58

表 4 响应面方差分析
Table 4 ANOVA for response surface

Source	DF	adj. SS	adj. MS	F	p	R^2	R^2 (adj)
Model	14	0.303 671	0.021 691	22.78	0.000	96.37%	92.14%
Linear	4	0.158 583	0.039 646	41.64	0.000		
Square	4	0.115 513	0.028 878	30.33	0.000		
Interactions	6	0.029 575	0.004 929	5.18	0.008		
Error	12	0.011 425	0.000 925				
Lack-of-fit	10	0.011 425	0.001 142				
Pure error	2	0.000 000	0.000 000				
Total	26	0.315 096					

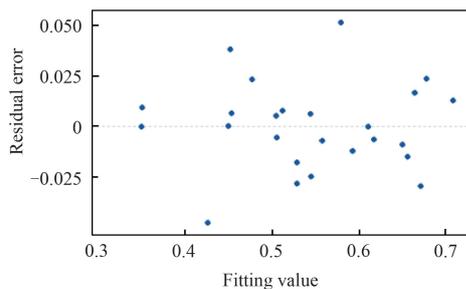


图 7 回归模型的残差图

Fig. 7 Residual graph of regression model

位进行加工时能够有效去除钝化膜和降低表面粗糙度,而在电解温度较高时,随着电解温度的增加,电流效率不断降低,所以无法及时有效地形成钝化膜,在第二工位进行磁粒研磨时,易对工件基体产生过磨,最终使工件表面的粗糙度值升高。

电解电压对表面粗糙度的影响如图 8b 所示,随着电解电压的升高,工件表面的粗糙度值先减小后增大,出现这种现象的原因是因为在低电压时,电解的电压越高,电子的移动速度越快,所以工件表面上

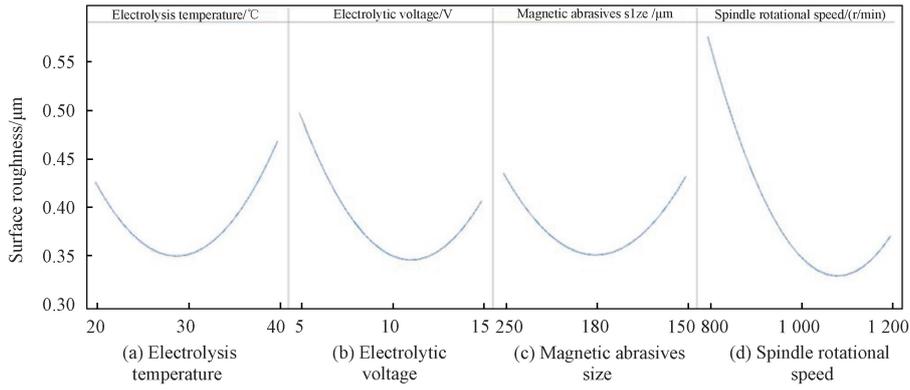


图 8 加工参数对表面粗糙度的影响

Fig. 8 Influence of processing parameters on surface roughness

钝化膜的形成速率较快,但当电解电压过高时,易出现过电解的现象,所形成的钝化膜较厚,以至于在相同的加工时间内,钝化膜未被完全去除,最终工件表面的粗糙度值反而会增大。

磨料粒径对表面粗糙度的影响如图 8c 所示,一方面,磨料的粒径较大时,在相同的研磨时间内,去除钝化膜的速率较快,但易对工件表面产生过度磨损,工件表面的粗糙度值随着磨料粒径的减小而逐渐减小。另一方面,当使用粒径较小的磨料进行研磨时,去除钝化膜的效率较低,且钝化膜往往无法得到完全去除,加工完后仍有部分钝化膜存留在工件表面,致使加工后的表面粗糙度值较大。

主轴转速对表面粗糙度的影响如图 8d 所示,工件表面的粗糙度值随主轴转速的增加而先减小后增大。在主轴转速较低时,随着主轴转速的增加,磁性磨粒对工件表面钝化膜的刮擦速率逐渐

增加,钝化膜去除效率逐渐提高,但当主轴转速过高时,磁性磨料容易被甩出加工区域,从而使参与研磨的有效磨料减少,且在高速的情况下,磁性磨料易磨损,降低钝化膜的去除速率,最终使表面粗糙度值升高。

3.3 加工参数优化及结果

3.3.1 响应面分析法优化加工参数

以任意两个加工参数为自变量,以表面粗糙度为因变量,构建 6 个响应曲面,所构建的工件表面粗糙度响应曲面如图 9 所示,通过观察该响应曲面,发现在部分响应曲面中存在极小值,因此可以根据式 (8) 所构建的回归模型进行优化分析来寻找一组使工件表面粗糙度值最小的加工参数,利用软件 MINITAB 中的响应面优化器对加工参数进行优化,优化后的加工参数如下:电解温度 28.282 8 °C,电解电压 12.27 V,磨料粒径 183.33 μm,主轴转速 1 115.15 r/min。

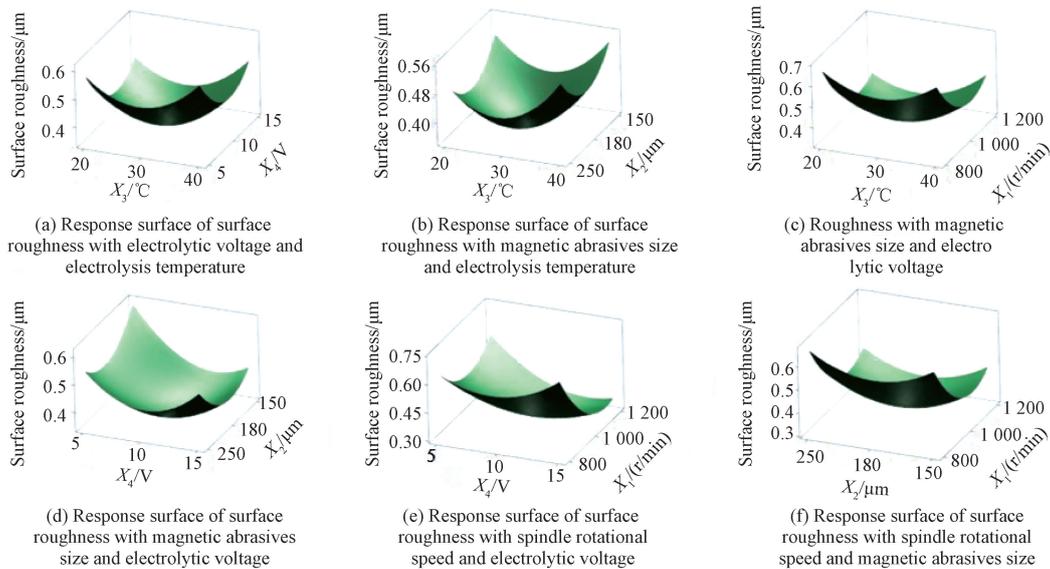


图 9 工件表面粗糙度响应曲面

Fig. 9 Response surface of workpiece surface roughness

3.3.2 优化后的试验结果

由于无法准确地 在试验设备上设定优化后的加工参数, 所以将优化后的加工参数的近似值 (即电解温度 28 ℃, 电解电压 12 V, 磨料粒径 180 μm, 主轴转速 1 100 r/min) 作为试验条件,

并运用改良后的最佳加工参数对材料为 Ti6Al4V 的合金模具型腔内表面进行加工, 分别采用 MAF 和 EMAF 两种加工方法进行对比试验, 以此来判断两种加工方法的优劣, 优化后的加工参数如表 5 所示。

表 5 优化后的 MAF 和 EMAF 加工参数

Table 5 Processing parameters of MAF and EMAF after optimization

Processing method	Spindle rotational speed/(r/min)	Magnetic abrasives size/μm	Processing time/min	Working gap/mm	Electrolysis temperature/℃	Electrolytic voltage/V
MAF	1 100	180	60	2		
EMAF	1 100	180	60	2	28	12

通过观察加工后工件表面形貌和测定工件表面的粗糙度值来评价加工后的工件表面质量, 工件表面形貌和粗糙度值如图 10 所示, 其中, 图 10a 为工件表面的原始形貌, 从图中可以清晰地看到工件表面有很多凹坑和凸起, 并且在表面附着一层黑色的氧化皮, 其表面粗糙度 Ra 10.7 μm, 使用 MAF 加工 60 min 后, 工件表面的粗糙度降为 Ra 0.52 μm, 凹坑等缺陷得到较为明显的去除, 表面粗糙度降低了 95.14%, 使用 EMAF 先电解 5 min 后进行 MAF 加工 60 min 后, 工件表面的缺陷得到进一步去除, 表面粗糙度进一步降低, 最终表面粗糙度值达到 Ra 0.354 μm, 表面粗糙度降低了 96.69%, 工件表面质量得到极大提升。产生这种现象的原因是因为单纯的 MAF 所加工的对象是工件的基体, 而工件的基体

材料为硬度较高的钛合金, 随着加工时间的增加, 磨料易于磨损, 磨料寿命降低, 从而导致加工效果不理想, 而 EMAF 加工则不受工件材料硬度的影响, 其所加工的对象为电解后在工件表面形成的钝化膜, 钝化膜的硬度要低于工件基体, 在使用磁粒刷研磨加工的过程中, 磨料磨损相对较慢, 使用寿命变长, 从而可以获得较好的表面质量, 且残存在工件表面上的钝化膜可以在一定程度上起到抗氧化和耐腐蚀的作用。

MAF 和 EMAF 两种加工方式随时间对工件表面粗糙度的影响如图 11 所示, 从图中可以看出, 在 0~30 min, 使用 EMAF 加工的工件表面粗糙度下降较快, 并且在 30 min 以后表面粗糙度的变化不大, 基本趋于稳定, 而使用 MAF 加工的工件表

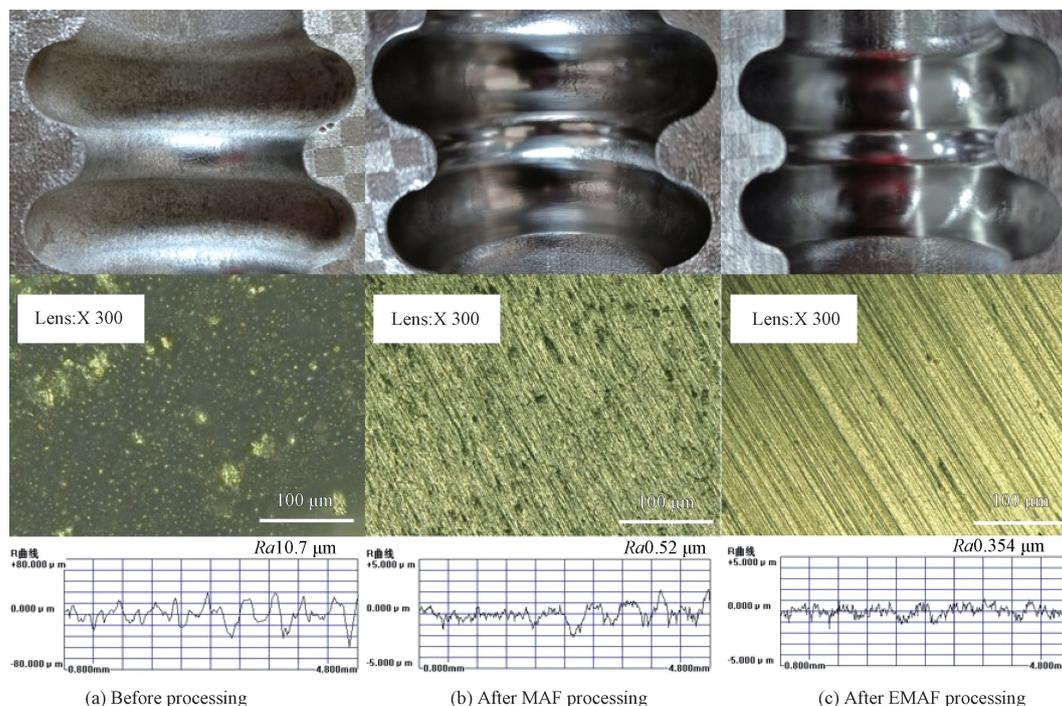


图 10 工件表面形貌和粗糙度值

Fig. 10 Surface topography and roughness of workpiece

面粗糙度一直呈下降趋势,在 50 min 左右才趋于稳定,由此可以得出,相对于单纯的 MAF 加工,EMAF 的加工效率更高,这是因为使用 EMAF 加工过程中,相对于硬度较高的工件基体材料,磁性磨粒可以比较容易地去除由电解产生的钝化膜,从而可以获得较高的材料去除效率,综上,将电解加工与 MAF 加工融合,可以在工件表面性能、磨料使用寿命和加工效率等方面有效提升 MAF 加工的技术性能。

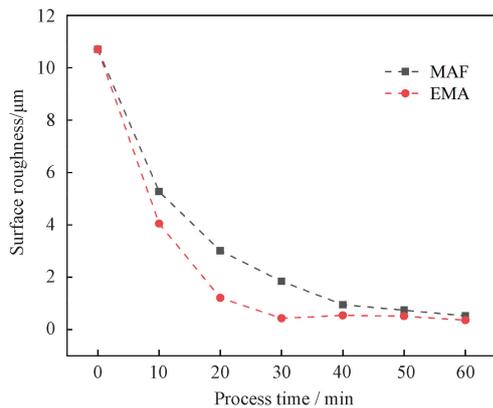


图 11 MAF 和 EMAF 对工件表面粗糙度的影响

Fig. 11 Influence of MAF and EMAF on surface roughness of workpiece

4 结论

(1) 使用电解辅助磁粒研磨的加工方法可以显著改善 SLM 成型零件型腔内表面的表面质量。

(2) 进行了 Box-Behnken 试验设计,构建了预测表面粗糙度的二次回归模型,并通过方差分析的方法验证了该模型的有效性和合理性。

(3) 用响应面分析法优化了加工参数,并且联系实际确定了最佳的加工参数:电解温度 28 ℃,电解电压 12 V,磨料粒径 180 μm,主轴转速 1 100 r/min。

(4) 在最佳加工工艺参数下,分别采用单纯磁粒研磨和电解辅助磁粒研磨两种加工方法加工工件,使用单纯磁粒研磨加工后工件表面粗糙度降低 95.14%,而使用电解辅助磁粒研磨加工后工件表面的粗糙度降低了 96.69%,电解辅助磁粒研磨的加工效果和加工效率要优于单纯的磁粒研磨。

参 考 文 献

[1] 张家莲,李发亮,张海军. 选区激光熔化技术制备金属材料研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(10): 35-44.

ZHANG J L, LI F L, ZHANG H J. Research progress on preparation of metallic materials by selective laser melting[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(10): 35-44. (in Chinese)

[2] 王虎,彭云,赵琳,等. 选区熔化 3D 打印 TiAl 基合金的研究现状及展望[J]. 表面技术, 2021, 50(1): 173-186.

WANG H, PENG Y, ZHAO L, et al. Research progress and prospecton selective melting 3D printing of TiAl-based alloys [J]. Surface Technology, 2021, 50(1): 173-186. (in Chinese)

[3] WANG J, LIU Y, RABADIA C D, et al. Microstructural homogeneity and mechanical behavior of a selective laser melted Ti-35Nb alloy produced from an elemental powder mixture[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 61: 221-233.

[4] JESUS J S, BORREGO L P, FERREIRA J A M, et al. Fatigue crack growth under corrosive environments of Ti-6Al-4V specimens produced by SLM[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 118: 104852.

[5] HAN S, SALVATORE F, RECH J, et al. Effect of abrasive flow machining (AFM) finish of selective laser melting (SLM) internal channels on fatigue performance [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 59: 248-257.

[6] 江庆红. 喷丸处理对增材钛合金性能影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.

JIANG Q H. Effect of shot peening on properties of additively manufactured titanium alloy. [D]. Haerbin; Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)

[7] 王震. 激光选区熔化 Ti6Al4V 合金及其表面超声滚压加工的组织与性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.

WANG Z. Studies on microstructure and properties of selective laser melted Ti6Al4V alloy treated by ultrasonic surface rolling proces[D]. Guangzhou; South China University of Technology, 2019. (in Chinese)

[8] 刘文浩,陈燕,李文龙,等. 磁粒研磨加工技术的研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(1): 47-61.

LIU W H, CHEN Y, LI W L, et al. Research progress of magnetic abrasive finishing technology[J]. Surface Technology, 2021, 50(1): 47-61. (in Chinese)

[9] VAHDATI M, RASOULI S A. Study of magnetic abrasive finishing on freeform surface[J]. Transactions of the IMF, 2016, 94(6): 294-302.

[10] KHATTRI K, CHOUDHARY G, BHUYAN B K, et al. A review on parametric analysis of magnetic abrasive machining process [C]//IOP conference series; materials science and engineering. IOP Publishing, 2018, 330(1): 12-105.

[11] XIE H, ZOU Y, DONG C, et al. Study on the magnetic abrasive finishing process using alternating magnetic field; investigation of mechanism and applied to aluminum alloy plate [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102(5): 1509-1520.

[12] FARWAHA H S, DEEPAK D, BRAR G S. Design and performance of ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing combined with electrolytic process set up for machining and

- finishing of 316L stainless steel [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 33: 1626-1631.
- [13] SUN X, ZOU Y H. Development of magnetic abrasive finishing combined with electrolytic process for finishing SUS304 stainless steel plane [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 92(9-12): 3373-3384.
- [14] DU Z W, CHEN Y, ZHOU K, et al. Research on the electrolytic-magnetic abrasive finishing of nickel-based superalloy GH4169 [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 81(5): 897-903.
- [15] LIU G Y, GUO Z N, JIANG S Z, et al. A study of processing Al 6061 with electrochemical magnetic abrasive finishing [J]. *Procedia Cirp*, 2014, 14: 234-238.
- [16] 谭悦, 陈燕. 电解复合磁力研磨 GH4169 管内表面的光整研究 [J]. *电镀与精饰*, 2020, 42(1): 27-32.
TAN Y, CHEN Y. Surface finishing of GH4169 tube by electrolytic composite magnetic grinding [J]. *Plating and Finishing*, 2020, 42(1): 27-32. (in Chinese)
- [17] 刘新龙, 陈燕, 张国富, 等. 电解-旋转超声磁粒复合对 TC4 板抛光的研究 [J]. *电镀与精饰*, 2019, 41(10): 13-16.
TAN Y, CHEN Y, ZHANG G F, et al. Surface finishing of GH4169 tube by electrolytic composite magnetic grinding [J]. *Plating and Finishing*, 2020, 42(1): 27-32. (in Chinese)
- [18] 许召宽, 韩冰, 陈燕, 等. 基于电解-磁力复合研磨法的表面光整加工 [J]. *电镀与精饰*, 2018, 40(12): 7-10.
XU Z K, HAN B, CHEN Y, et al. Surface finishing based on electrolysis-magnetic force composite grinding method [J]. *Plating and Finishing*, 2018, 40(12): 7-10. (in Chinese)
- [19] 刘新龙, 陈燕, 王杰, 等. 电解-旋转超声复合磁力研磨去除 TC4 钛合金孔边毛刺 [J]. *电镀与涂饰*, 2019, 38(13): 680-684.
LIU X L, CHEN Y, WANG J, et al. Deburring of TC4 titanium alloy hole edge by magnetic grinding in combination with electrolysis and rotational ultrasonic vibration [J]. *Electroplating & Finishing*, 2019, 38(13): 680-684. (in Chinese)
- [20] LEE P H, CHANG J Y. A magnetic abrasive finishing (MAF) platform utilizing horizontal transverse magnetic field magnetized by permanent magnets [J]. *Microsystem Technologies*, 2021(11): 1-8.
- [21] GUNJAL S B, PAWAR P J. Improving the process performance of magnetic abrasive finishing of SS304 material using multi-objective artificial bee colony algorithm [J]. *Engineering Review*, 2020, 41(1): 34-49.
- [22] 赵传营, 赵玉刚, 刘宁, 等. 基于神经网络遗传算法的磁粒研磨 TC4 材料工艺参数优化 [J]. *表面技术*, 2020, 49(2): 316-321.
ZHAO C Y, ZHAO Y G, LIU N, et al. Optimization of process parameters of magnetic abrasive finishing TC4 material based on neural network and genetic algorithm [J]. *Surface Technology*, 2020, 49(2): 316-321.
- [23] SAXENA V, YADAV P S, PALI H S. Effect of magnetic abrasive machining process parameters on internal surface finish [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 25: 842-847.
- [24] SINGH P, SINGH L, KAUSHIK A. Parametric optimization of magnetic abrasive finishing using adhesive magnetic abrasive particles [J]. *International Journal of Surface Engineering and Interdisciplinary Materials Science*, 2019, 7(2): 34-47.
- [25] BERKANI M, KADMI Y, BOUCHAREB M K, et al. Combination of a Box-Behnken design technique with response surface methodology for optimization of the photocatalytic mineralization of CI Basic Red 46 dye from aqueous solution [J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2020, 13(11): 8338-8346.
-
- 作者简介: 陈燕, 女, 1963 年出生, 教授, 博士。研究方向为精密加工与特种加工。
E-mail: laochen412@gmail.com