

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2023.05.008

## 磁力光整加工 SLM Inconel625 合金的工艺优化

刘 宁<sup>1</sup>, 张桂香<sup>1\*</sup>, 陈春增<sup>2</sup>, 刘 雪<sup>1</sup>, 张浩哲<sup>1</sup>

(1. 山东理工大学 机械工程学院, 山东 淄博 255000;

2. 山东京宏智能科技有限公司, 山东 淄博 255314)

**摘要:** 激光选区熔化技术 (Selective Laser Melting, SLM) 制备的 Inconel625 合金存在表面质量较差的问题, 采用磁力光加工技术 (Magnetic Abrasive Finishing, MAF) 提高成形侧表面的表面质量。通过主轴改造后的 XK7136C 数控铣床作为加工平台, 采用雾化快凝法制备的 CBN/Fe 基球形磁性磨料对 SLM Inconel625 合金进行磁力光整试验研究。基于响应曲面法, 经磁力光整后样件的表面粗糙度值 ( $R_a$ ) 为响应值, 对主轴转速、进给速率和加工间隙进行优化。在主轴转速 1200 r/min, 进给速度 13 mm/min, 加工间隙 2.2 mm 的条件下研磨 40 min, 试验结果表明: 样件的表面粗糙度值由初始的 0.700  $\mu\text{m}$  下降至 0.043  $\mu\text{m}$ , 磁力光整加工后样件表面不规则凸起和划痕均被去除, 表面质量得到极大的改善。

**关键词:** 激光选区熔化技术; 磁力光整加工技术; Inconel625 合金; 响应曲面法; 表面质量

中图分类号: TH161+.14

文献标识码: A

## Process optimization of magnetic abrasive finishing on SLM Inconel625 alloy

Liu Ning<sup>1</sup>, Zhang Guixiang<sup>1\*</sup>, Chen Chunzeng<sup>2</sup>, Liu Xue<sup>1</sup>, Zhang Haozhe<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;

2. Shandong Jing Hong Intelligent Technology Co. Ltd., Zibo 255314, China)

**Abstract:** The surface quality of Inconel625 alloy fabricated by selective laser melting (SLM) is relatively poor. And magnetic abrasive finishing (MAF) was used to enhance the quality of the forming surface. The XK7136C CNC milling machine after the spindle transformation was selected as the processing platform. The magnetic abrasive finishing experiments on SLM Inconel625 alloy were performed with CBN/Fe-based magnetic abrasives prepared by gas atomization with rapid solidification. Selected the surface roughness ( $R_a$ ) after MAF as the response value, the spindle speed, feed rate, and machining gap were optimized based on the response surface methodology. Under the conditions of spindle speed 1200 r/min, feed rate 13 mm/min and machining clearance 2.2 mm, the sample was continuously finished for 40 min. The results illustrate that surface roughness of the sample decreases from 0.700  $\mu\text{m}$  to 0.043  $\mu\text{m}$ . The irregular bumps and scratches on the surface are removed after MAF. The surface quality has been greatly improved.

**Keywords:** selective laser melting; magnetic abrasive finishing; Inconel625 alloy; response surface methodology; surface quality

收稿日期: 2022-11-16

修回日期: 2022-12-04

作者简介: 刘宁 (1997—), 男, 硕士研究生, email: 913768695@qq.com

\*通信作者: 张桂香, email: zhanggx@sdut.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52275448)

激光选区熔化技术(SLM)是一种以高功率激光作为热源逐层选择性扫描金属粉末,粉末完全熔化并层层叠加直至成形的增材制造技术,其显著优点是设计自由度高、无需模具或工具、粉末材料的高效利用、生产周期短等<sup>[1-3]</sup>,为具有任意复杂形状特征的高性能、难加工材料一体化、轻量化成形提供了新的技术途径<sup>[4-5]</sup>。尽管 SLM 技术拥有传统制造技术无法比拟的优势,但成形样件较高水平的表面粗糙度仍是该技术的主要局限性之一<sup>[6]</sup>,因此,SLM 零部件通常进行必要的表面后处理,以满足其表面功能的要求,如减少表面流体阻力、摩擦磨损和增加疲劳强度、耐腐蚀性能等。

磁力光整加工技术(MAF)通过磁场控制磁性磨粒形成的柔性磁力刷可实现仿形研磨,可达性强,是提高自由曲面、新型内表面、薄壁件、复杂流道表面质量的有效手段<sup>[7-9]</sup>,该工艺已经成功地应用于激光选区熔化技术制备的铝合金<sup>[10]</sup>、镍基合金<sup>[11]</sup>、不锈钢<sup>[12]</sup>、钛合金<sup>[13]</sup>等样件的表面精加工处理中。Inconel625 是一种固溶强化型镍基高温合金,主要借助 Ni-Cr 基体中难熔 Mo、Nb 元素的固溶强化获取高强

度,服役温度可从低温到超过 1000 °C 的超热环境,具有良好的屈服强度、蠕变强度、疲劳强度及在腐蚀环境下优异的抗高温氧化和耐腐蚀性能,常用于航空航天发动机热端零部件。然而 SLM 成形的 Inconel625 样件侧表面粗糙度通常在 5  $\mu\text{m}$  左右,无法满足航空航天领域要求的 0.1  $\mu\text{m}$  以下。本文旨在利用 MAF 技术提高 SLM Inconel625 样件表面质量,得到最优研磨参数,建立研磨参数与表面粗糙度的函数关系式。

## 1 试验加工条件

### 1.1 试验材料

选用粒径分布为 15~53  $\mu\text{m}$  的 Inconel625 合金粉末作为打印原材料,在 SLM<sup>®</sup>125HL 机器上制备成形角度为 90°,尺寸为 30 mm×3 mm×12 mm 的长方体样件。打印参数:激光功率 200 W,扫描速度 800 mm/s,舱口间距 0.12 mm,铺粉层厚 0.03 mm。由于侧表面在粉末黏附效应下具有较高的表面粗糙度<sup>[14]</sup>,故作为后续研磨对象。实体样件及侧表面如图 1 所示。

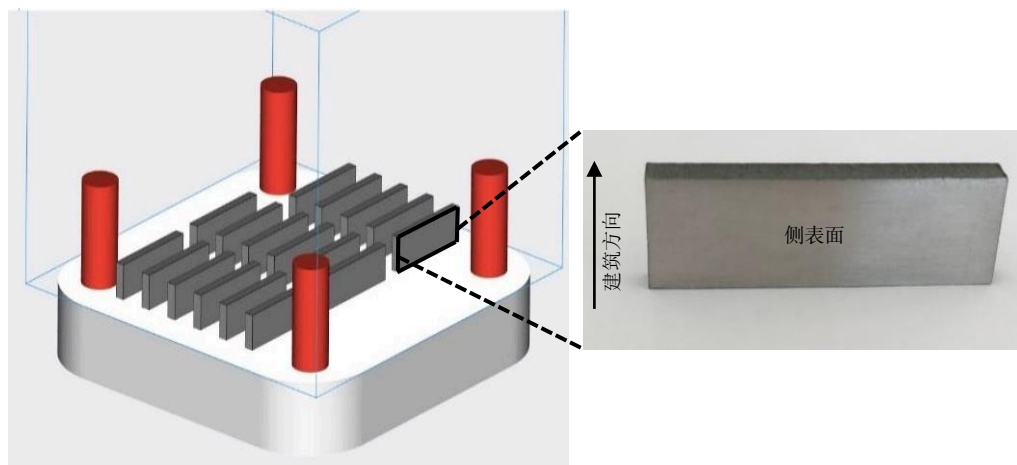


图1 SLM Inconel625 合金

Fig.1 SLM Inconel625 alloy

### 1.2 磁力光整加工装置

开“\*”槽的 N52 钕铁硼永磁极被固定在 XK7136C 数控铣床的连接杆上,永磁极开槽尺寸为 2 mm,槽深与槽宽比为 1:1。选用雾化快凝法制备的 CBN/Fe 基球形磁性磨料,磨粒粒径为 80 目,研磨相粒径 W7(5~7  $\mu\text{m}$ ),该磨料具有球形度好、铁基体与磨粒相结合强度高及服役寿命长等优点,特别适用于高硬度和高韧性的 Inconel625 合金表面光整加

工中,可实现具有镜面效果的外观。采用 MB132 油基类研磨液。

## 2 试验设计

试验优化方案采用响应曲面方法中的 Box-Behnken 分析法<sup>[15]</sup>,该试验方法主要优点是在较少的试验次数中拟合出一个精度良好的响应预测模型。主轴转速、进给速度、加工间隙的零水平设定值

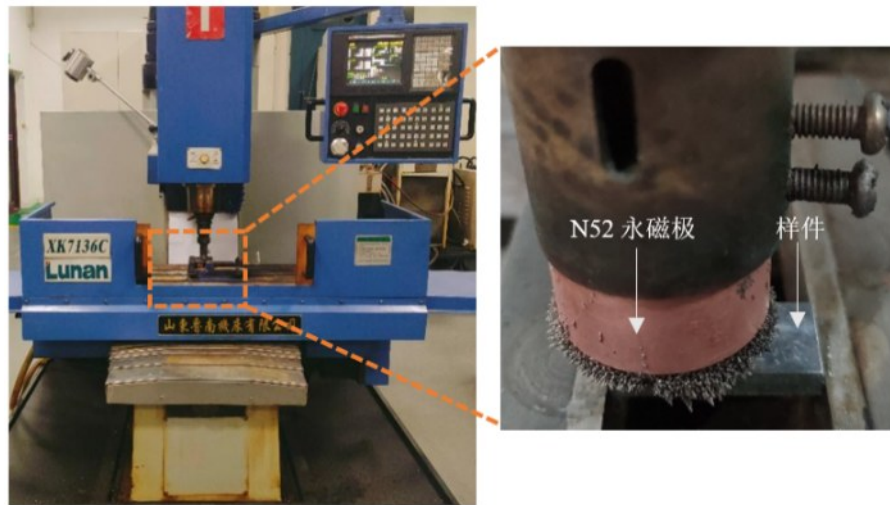


图2 磁力光整加工设备

Fig.2 Magnetic abrasive finishing equipment

分别为  $1200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $14 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $2.2 \text{ mm}$ , 原因是在此水平上下波动范围取值的数值组合可观察到具有规律的研磨效果。磁力光整加工参数水平及编码设定如表1所示。

表1 研磨因素水平及编码值表

Tab.1 Table of factors levels and coding value

影响因子	影响水平及编码		
	-1	0	1
主轴转速 $X_1/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	1000	1200	1400
进给速度 $X_2/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	7	14	21
加工间隙 $X_3/(\text{mm})$	2.0	2.2	2.4

需要建立响应曲面方法中目标响应和自变量因子之间的二次线性回归方程<sup>[16]</sup>, 如公式(1):

$$R_a = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i X_i + \sum_{i=1}^n \alpha_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^n \alpha_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

式(1)中:  $\alpha_0$  为常数项;  $\alpha_i$  表示线性影响系数;  $\alpha_{ii}$  表示二次线性影响系数;  $\alpha_{ij}$  表示交互作用影响系数。

### 3 结果与分析

#### 3.1 SLM Inconel625 合金表面粗糙度值

采用 NDT150 型手持粗糙度测试仪测量样件侧面粗糙度。取 6 组实际测量值的平均值作为最终结果。SLM Inconel625 合金样件先用 320# 耐水性砂纸打磨, 经磁力光整加工后最终试验数据如表 2 所示。

根据表 2 所得到的试验数据及公式(1), 得到三个主要研磨参数和表面粗糙度之间的二次响应曲面

表2 响应曲面法试验设计及结果

Tab.2 Experimental design and results of response surface methodology

序号	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$R_a/\mu\text{m}$
1	-1	0	-1	0.0614
2	0	0	0	0.0395
3	0	-1	-1	0.0534
4	0	1	-1	0.0560
5	1	-1	0	0.0500
6	-1	0	1	0.0553
7	0	0	0	0.0430
8	1	0	-1	0.0583
9	1	0	1	0.0527
10	0	0	0	0.0415
11	1	1	0	0.0528
12	0	1	1	0.0516
13	-1	-1	0	0.0525
14	-1	1	0	0.0537
15	0	0	0	0.0423
16	0	0	0	0.0412
17	0	-1	1	0.0487

模型的回归公式, 如式(2)所示。

$$R_a = 0.042 - 0.001137X_1 + 0.001188X_2 - 0.002600X_3 + 0.000400X_1X_2 + 0.000125X_1X_3 + 0.000075X_2X_3 + 0.007625X_1^2 + 0.003125X_2^2 + 0.007800X_3^2 \quad (2)$$

表 3 中方差分析总体模型显著度  $P < 0.0001$ , 表明所建立的  $R_a$  模型是具有统计学意义的; 失拟项显著度为  $0.5788 > 0.05$ , 说明无失拟项存在。多元相关系数  $R^2 = 0.9871$ , 调整后相关系数  $R_{\text{Adj}}^2 = 0.9706$ , 说明

表面粗糙度模型能够解释 98.71% 的响应值。 $X_1$ 、 $X_1^2$  在  $P < 0.0001$  水平下高度显著,  $X_3$ 、 $X_1X_3$ 、 $X_3^2$  在  $P < 0.05$  水平下显著。对比  $P$  值可以得出三个主要研磨参数的影响度排序为  $X_3 > X_2 > X_1$ 。

表 3 磁力光整后表面粗糙度方差分析

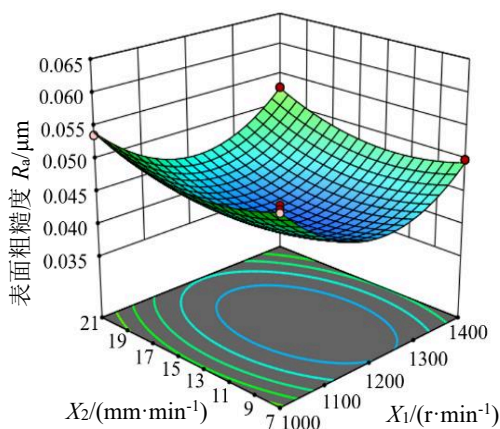
Tab.3 Anova analysis of surface roughness after MAF

项目	平方和	均方差	F 值	P 值
模型	$6.724 \times 10^{-4}$	$7.471 \times 10^{-5}$	59.65	<0.0001
$X_1$	$1.035 \times 10^{-5}$	$1.035 \times 10^{-5}$	8.26	0.0238
$X_2$	$1.128 \times 10^{-5}$	$1.128 \times 10^{-5}$	9.01	0.0199
$X_3$	$5.408 \times 10^{-5}$	$5.408 \times 10^{-5}$	43.18	0.0003
$X_1X_2$	$6.400 \times 10^{-7}$	$6.400 \times 10^{-7}$	0.51	0.4979
$X_1X_3$	$6.250 \times 10^{-8}$	$6.250 \times 10^{-8}$	0.05	0.8296
$X_2X_3$	$2.250 \times 10^{-8}$	$2.250 \times 10^{-8}$	0.018	0.8972
$X_1^2$	$2.448 \times 10^{-4}$	$2.448 \times 10^{-4}$	195.45	<0.0001
$X_2^2$	$4.112 \times 10^{-5}$	$4.112 \times 10^{-5}$	32.83	0.0007
$X_3^2$	$2.562 \times 10^{-4}$	$2.562 \times 10^{-4}$	204.53	<0.0001
残差	$8.768 \times 10^{-6}$	$1.253 \times 10^{-6}$	—	—
失拟项	$1.788 \times 10^{-6}$	$5.958 \times 10^{-7}$	0.34	0.7980
纯误差	$6.980 \times 10^{-6}$	$1.745 \times 10^{-6}$	—	—
总和	$6.812 \times 10^{-4}$	—	—	—

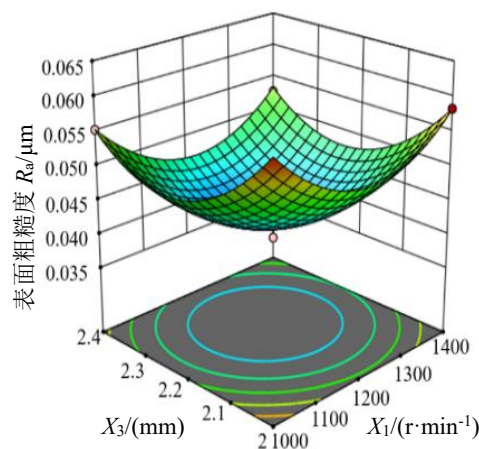
主轴转速和进给速度交互影响下样件表面粗糙度变化规律如图 3(a) 所示。较高主轴转速时, 磁性磨粒所受离心力变大, 处在磁力研磨刷边缘且距离磁极旋转中心最远的磨粒有可能被甩出加工区域, 造成磁性磨料的浪费和研磨效率低下; 当主轴转速过低时, 样件由磨削留下的长而深的划痕不易去除, 从而导致较差的表面质量。

主轴转速和加工间隙交互影响下样件表面粗糙度变化规律如图 3(b) 所示。加工间隙影响磁性磨粒所受磁力以及柔性磁粒刷的稳定性。加工间隙较低时, 柔性磁粒刷刚性增强, 可以进行更快的微切削。但会影响磁性磨粒刷的自锐性, 磁性磨料不能及时的得到翻过和更新, 变钝的磨粒继续与工件表面摩擦(不产生切削作用), 易在表面留下磨粒加工痕迹; 加工间隙过大时, 虽然能改善磨料的自锐性, 但铁基体受到的磁力会减弱, 影响加工效率。

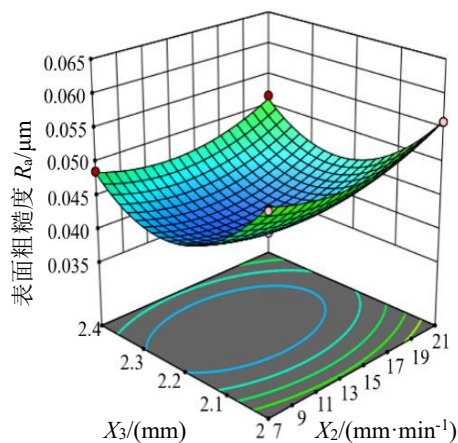
进给速度和加工间隙交互影响下工件表面粗糙度变化规律如图 3(c) 所示。进给速度决定了磁性磨粒与样件表面的接触时长, 在加工小间隙下, 选择适当的进给速度比在大间隙下能获得更小的表面粗糙度。



(a) 主轴转速与进给速度交互作用响应曲面图



(b) 主轴转速与加工间隙交互作用响应曲面图



(c) 进给速度与加工间隙交互作用响应曲面图

图 3 MAF 工艺参数交互影响规律图

Fig.3 Interactive influence diagrams of MAF process parameters



### 3.2 表面微观形貌

为了验证最优MAF参数对SLM Inconel625合金表面质量的影响,接下来从样件表面纹理及三维形貌表征研磨效果。采用DSX1000型超景深显微镜

表征MAF前后的样件表面纹理,如图4所示。使用MicroXAM-100型白光干涉仪表征MAF前后的样件表面三维形貌,如图5所示。

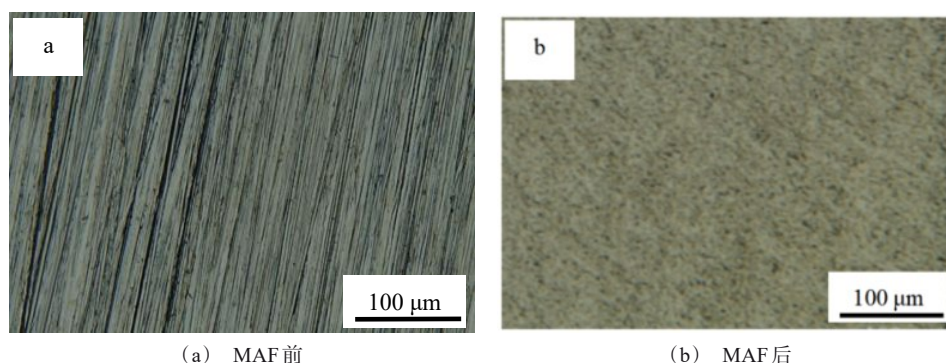


图4 SLM Inconel625合金MAF前后表面纹理

Fig.4 The surface texture of SLM Inconel625 alloy before and after MAF

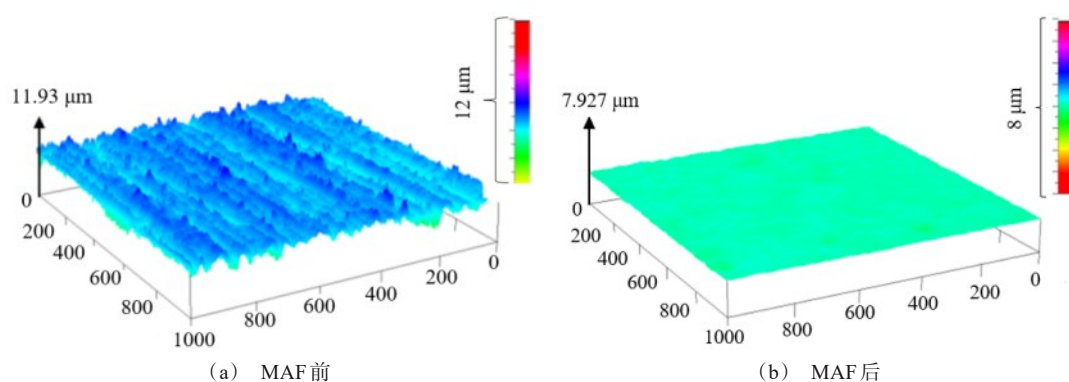


图5 SLM Inconel625合金微观MAF前后三维形貌变化图

Fig.5 Microscopic 3D morphology of SLM Inconel625 alloy before and after MAF

由于SLM工艺成形技术的特殊性,这也导致了其形成的表面缺陷和微观形貌较传统同等材料有着较大的不同<sup>[17]</sup>。主要体现在由粉末和球化效应造成的半球凸起和孔洞、完全熔化的金属粉末层层叠加形成的表面沟槽,最终形成了沟壑纵横的微观形貌<sup>[18]</sup>。在MAF工艺之前使用磨削将大部分凸起去除,一是提高整个表面光整处理的效率,另外一个重要的原因是样件表面过大的孔隙或沟槽会使磨粒嵌入其中,后续磁力研磨刷会对嵌入的磨粒施加压力,加重缺陷恶化,从而影响研磨效率和最终的表面质量<sup>[19-20]</sup>。在经过磨削加工之后,留下小部分的凸起和纹理方向一致的划痕,避免了形成过大的缺陷和

缺陷聚集现象。经过MAF后,由于存在尖端效应,样件表面的微观不平处、毛刺及尖角等处的磁感应强度较大,所以磨削工序留下的加工痕迹被快速去除。

图6是SLM Inconel625合金表面轮廓曲线MAF前后变化图。图7是磁力光整前后SLM Inconel625合金外观变化图。由图4(b)、图5(b)、图6(b)和图7(b)可以看出,SLM Inconel625样件表面最终变得平坦、光滑和无明显划痕,表面粗糙度由 $0.700\text{ }\mu\text{m}$ 降至 $0.043\text{ }\mu\text{m}$ ,表面光洁度得到大幅度提高。

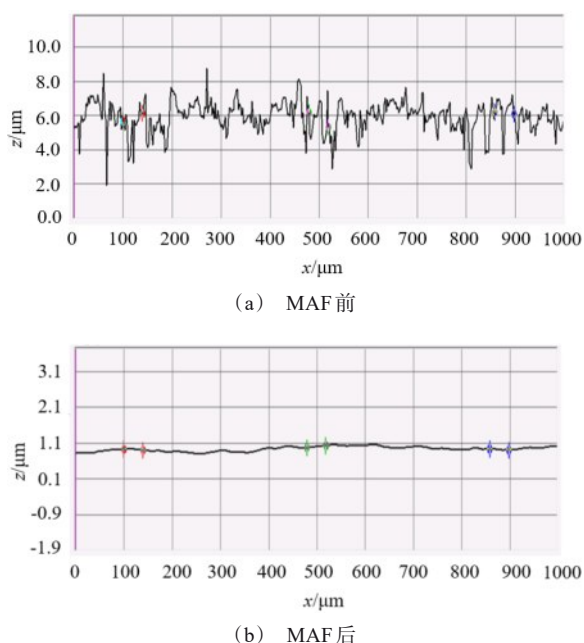


图6 SLM Inconel625 合金表面轮廓曲线 MAF 前后变化图

Fig.6 Surface profile curves of SLM Inconel625 alloy before and after MAF

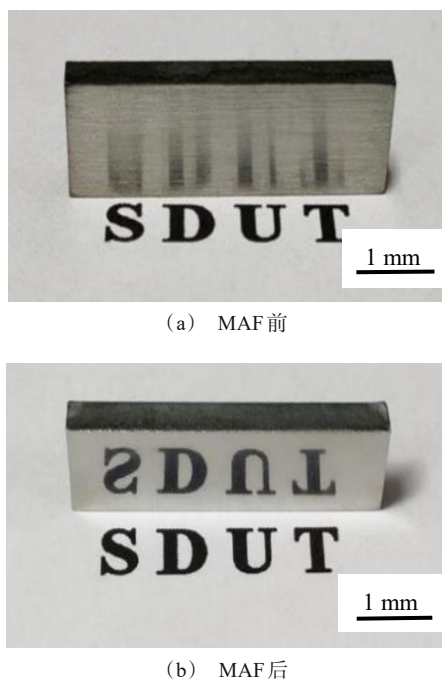


图7 磁力光整前后 SLM Inconel625 合金外观变化图

Fig.7 Appearance of SLM Inconel625 alloy before and after MAF

## 4 结论

(1)本文进行了对 SLM Inconel625 合金的磁力光整加工试验研究,从样件侧表面微观形貌及外观变化可以得出磁力光整加工技术是提高 SLM Inconel625 合金表面质量的有效手段之一。

(2)对所建立的  $R_a$  回归模型进行了方差分析及显著性检验,得出加工间隙对表面粗糙度  $R_a$  的影响作用最大,其次是进给速度,主轴转速的影响作用最小。

(3)响应曲面法优化后得到最优的研磨参数组合为:主轴转速 1200 r/min,进给速度 13 mm/min,加工间隙 2.2 mm,在本试验条件下,表面粗糙度最终降至 0.043  $\mu\text{m}$ 。

## 参考文献

- [1] Necati U, Adem C, Kubilay A. Machinability of 3D printed metallic materials fabricated by selective laser melting and electron beam melting: A review[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 80: 414-457.
- [2] Yu W H, Swee L S, Chee K C, et al. Influence of re-melting on surface roughness and porosity of AlSi10Mg parts fabricated by selective laser melting[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 792: 574-581.
- [3] Dirk H, Vanessa S, Eric W, et al. Additive manufacturing of metals[J]. Acta Materialia, 2016, 117: 371-392.
- [4] 顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 32-55.
- [5] 王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造: 若干材料基础问题[J]. 航空学报, 2014, 35(10): 2690-2698.
- [6] 高航, 彭灿, 王宣平. 航空增材制造复杂结构件表面光整加工技术研究及进展. 航空制造技术, 2019, 62(9): 14-22.
- [7] 张桂香. 雾化快凝磁性磨料制备及其磁力光整加工性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学机电学院, 2012.
- [8] 陈燕, 胡玉刚, 巫昌海, 等. 磁针磁力研磨去除涡轮轴内壁积碳[J]. 表面技术, 2020, 49(6): 259-266.
- [9] 代国义. 分布式永磁极的设计及其光整加工不锈钢薄板的实验研究[D]. 太原: 太原理工大学机械工程学院, 2016.
- [10] 张鹏, 孙玉利, 王燎原, 等. SLM 成形打印件振动辅助磁力研磨试验[J]. 表面技术, 2022, 51(7): 245-252+273.
- [11] 曾加恒, 陈燕, 谭悦, 等. 基于 3D 打印航空发动机喷油管磁力研磨试验研究[J]. 表面技术, 2018, 47(9):

- 296-302.
- [12] Wu P Y, Hitomi Y. Material removal mechanism of additively manufactured components finished using magnetic abrasive finishing[J]. *Procedia Manufacturing*, 2018, 26: 394-402.
- [13] Takamasa H, Tatsuya F, Hiroyuki K. Derivation of optimum abrasive for improving magnetic polishing rate for hybrid metal AM titanium alloy and creating a polishing prediction model[J]. *International Journal of Abrasive Technology*, 2020, 10(2): 106-121.
- [14] 王宣平, 段合露, 孙玉文, 等. 增材制造金属零件抛光加工技术研究进展[J]. *表面技术*, 2020, 49(4): 1-10.
- [15] 邓曰明, 赵玉刚, 刘广新, 等. 基于响应面法的镍钛合金血管支架管材内壁磁粒研磨工艺参数研究[J]. *表面技术*, 2021, 50(10): 384-393.
- [16] 刘海旭, 武庆东, 曹潇俊, 等. 基于响应曲面法的 304 不锈钢化学机械抛光工艺参数优化[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2021, 41(2): 89-95.
- [17] 宋剑锋, 宋有年, 王文武, 等. 金属粉末选区激光熔化成形表面粗糙度预测及控制方法研究[J]. *中国激光*, 2022, 49(2): 81-94.
- [18] 崔运涛. AlSi10Mg 合金 SLM 成形曲面磁力光整加工工艺研究[D]. 淄博: 山东理工大学机械工程学院, 2021.
- [19] Ross D, Wang Y M, Ramadhan H, Yamaguchi H. Polishing characteristics of transparent polycrystalline yttrium aluminum garnet ceramics using magnetic field-assisted finishing[J]. *Journal of Micro and Nano-Manufacturing*, 2016, 4(4): 1-9.
- [20] 腾潇. AlSi10Mg 合金选区激光熔化成形及其表面磁粒光整加工工艺研究[D]. 淄博: 山东理工大学机械工程学院, 2020.