

# Inconel 718 增材成形件的铣削分析及工艺参数优化\*

张乐<sup>①</sup> 白海清<sup>①②</sup> 张祎<sup>①</sup> 贾宗强<sup>①</sup> 周俊<sup>①</sup> 任泽康<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>陕西理工大学机械工程学院, 陕西 汉中 723001;

<sup>②</sup>陕西省工业自动化重点实验室, 陕西 汉中 723001)

**摘要:** 鉴于激光选区熔化 Inconel 718 成形件的表面质量和尺寸精度难以满足精密零部件的使用要求, 首先, 通过铣削减材后处理工艺, 分析了不同铣削参数(铣削速度  $v_c$ 、铣削深度  $a_p$ 、铣削宽度  $a_e$ 、每齿进给量  $f_z$ ) 组合对切削合力 ( $F$ )、表面粗糙度值 ( $Ra$ ) 的影响规律, 再基于灰色关联分析方法, 将多目标转化为灰色关联度 ( $GR$ ) 单一目标优化, 采用逐步回归法建立  $GR$  二阶回归预测模型, 最后利用粒子群算法得到最优参数组合。结果表明, 对  $F$  影响的重要性依次为  $f_z$ 、 $v_c$ 、 $a_p$ 、 $a_e$ , 对  $Ra$  影响的重要性依次为  $f_z$ 、 $a_p$ 、 $v_c$ 、 $a_e$ , 铣削减材后  $Ra$  最大下降 97.80%, 平均下降 94.03%; 所建立预测模型最大误差不超过 5%;  $GR$  最优解为 0.8173, 所对应的最优铣削工艺参数组合为  $v_c=46.96$  m/min、 $a_p=0.25$  mm、 $a_e=2.90$  mm、 $f_z=0.025$  mm/z。

**关键词:** 激光选区熔化; 铣削; 表面粗糙度; 灰色关联分析; 粒子群算法

**中图分类号:** TH162 **文献标识码:** B

**DOI:** 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2024.08.021

## Milling analysis and optimization of process parameters for Inconel 718 additively formed parts

ZHANG Le<sup>①</sup>, BAI Haiqing<sup>①②</sup>, ZHANG Yi<sup>①</sup>, JIA Zongqiang<sup>①</sup>, ZHOU Jun<sup>①</sup>, REN Zekang<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>College of Mechanical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, CHN;

<sup>②</sup>Shaanxi Key Laboratory of Industrial Automation, Hanzhong 723001, CHN)

**Abstract:** In view of the fact that the surface quality and dimensional accuracy of laser selective melting Inconel 718 formed parts are difficult to meet the requirements of precision parts. Firstly, the influence of different milling parameters (milling speed  $v_c$ , milling depth  $a_p$ , milling width  $a_e$ , feed per tooth  $f_z$ ) on the cutting force ( $F$ ) and surface roughness ( $Ra$ ) is analyzed through the milling and cutting post-processing process. Then, based on the grey relation analysis method, the multi-objective was transformed into a single objective optimization of grey relation ( $GR$ ), the second-order  $GR$  regression prediction model was established by the stepwise regression method, and finally the particle swarm optimization was used to obtain the optimal parameter combination. The results show that the importance of the influence on  $F$  is  $f_z$ ,  $v_c$ ,  $a_p$  and  $a_e$ , the importance of the influence on  $Ra$  is  $f_z$ ,  $a_p$ ,  $v_c$  and  $a_e$  respectively, and the maximum decrease of  $Ra$  is 97.80% and the average decrease is 94.03% after milling. The maximum error of the established prediction model is not more than 5%; The optimal solution of  $GR$  is 0.8173, and the corresponding optimal milling process parameter combination is  $v_c=46.96$  m/min,  $a_p=0.25$  mm,  $a_e=2.90$  mm,  $f_z=0.025$  mm/z.

**Keywords:** selective laser melting; milling; surface roughness; grey correlation analysis; particle swarm algorithm

激光选区熔化 (selective laser melting, SLM) 是一种使用高能聚束激光逐点扫描熔化金属粉末, 逐层凝固累计成形的粉末床成型技术, 因具有高自由

度、高材料利用率和高生产效率等优点, 所增材金属部件成为机械制造行业应用发展的新趋势<sup>[1-2]</sup>。Inconel 718 是高温镍基合金中最常用的材料, 因其

\* 陕西省重点研发计划项目 (2023-YBGY-385); 陕西省教育厅 2023 年度一般专项科学研究计划项目 (23JK0357)

良好的高温力学性能、抗蠕变性和耐腐蚀性，被誉为航空航天、石油化工、核工业等高端领域最具潜力的材料之一，制造应用于航空航天涡轮发动机、燃气轮机、工作叶片和燃烧室等重要零部件<sup>[3-4]</sup>。随着航空技术的快速发展，激光选区熔化 Inconel 718 (SLM Inconel 718) 复杂结构零部件的需求日益增长<sup>[5]</sup>。现阶段，由于 SLM Inconel 718 成形过程存在粉末黏附、球化飞溅和台阶效应，其表面成形质量<sup>[6]</sup>、力学性能<sup>[7]</sup>及显微组织结构<sup>[8]</sup>等方面与传统 Inconel 718 合金存在较大差异，且激光成形过程中因热变形而出现尺寸精度低、形状精度低及表面质量差的问题，通常难以满足精密零部件的精度要求，导致无法直接应用<sup>[9-11]</sup>。

近年来，国内外学者为了解决上述问题，对 SLM Inconel 718 材料的后处理工艺进行了深入研究。Zhang B C 等<sup>[12]</sup>对 SLM Inconel 718 零件进行不同持续时间电化学抛光 (ECP) 的表面形貌和粗糙度演变研究，发现在 ECP 5 min 的条件下，表面粗糙度从 6.05  $\mu\text{m}$  降低到 3.66  $\mu\text{m}$ 。Kaynak Y 等<sup>[13]</sup>研究干冷空气条件下的精加工车削 (FM)、拖动精加工 (DF) 和振动精加工 (VSF) 对 SLM Inconel 718 合金表面和亚表面性能的影响，发现直接成型件经过 FM 加工后表面粗糙度降低 96%，DF 和 VSF 加工后表面粗糙度降低到 73%~88%。Ćwikła Michał 等<sup>[14]</sup>研究了在空气和氩气的分别作用下激光抛光 (LP) 对 SLM Inconel 718 的表面质量影响，表明在空气和氩气不同条件下，LP 使得零件平均粗糙度分别降低 82.8% 和 87.9%。Ji H S 等<sup>[15]</sup>研究 SLM Inconel 718+微铣削显微组织和可加工性，发现微铣削使 SLM Inconel 718 组织出现轻微晶体粗化现象，且残余应力随主轴转速的增加而减小，随进给速度的增加而增大，刀具磨损随主轴转速和进给速度的增大而增大。

上述研究采用不同后处理工艺分析，改善了 SLM Inconel 718 的表面质量和力学性能，但目前对 SLM Inconel 718 成形件切削后处理机理和工艺优化的研究鲜见。因此开展相应高效切削加工研究，优化切削工艺，降低刀具磨损，提高表面质量和加工效率对 SLM Inconel 718 成形件的广泛应用具有重要推动作用。

本研究选择铣削减材后处理工艺，设计四因素四水平正交试验，分析不同条件下的切削力、表面

粗糙度的变化规律，同时基于灰色关联分析、逐步回归法和粒子群算法实现以切削力、表面粗糙度和材料去除率为性能指标的多目标参数优化，建立灰色关联度与工艺参数的二阶回归预测模型，获得使得切削力最小、表面粗糙度最小和材料去除率最大的最优参数组合，为增减材 Inconel 718 加工提供一定的理论参考。

## 1 试验

### 1.1 SLM 增材试验

试验设备选用图 1 所示的 EP-M150 金属 3D 打印机，试验材料选用由雾化法制备的 Inconel 718 高温合金球形金属粉末，粒径范围为 15~53  $\mu\text{m}$ ，化学成分见表 1。SLM 成型工艺参数<sup>[16]</sup>：激光功率 295 W，扫描速度 950 mm/min，扫描间距 0.1 mm，层厚 0.04 mm，制备得到 50 mm×30 mm×20 mm 的块状样品，如图 2 所示。



图 1 EP-M150 金属 3D 打印机

表 1 Inconel 718 粉末化学成分 (%)

Ni	Cr	Nb	Mo	Ti	Al	Co	Cu	C	B	Fe
51.08	19.24	5.28	3.13	0.87	0.6	0.19	0.1	0.05	0.006	余

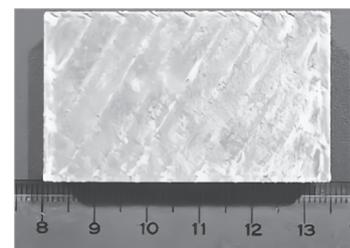


图 2 SLM 成形零件

### 1.2 铣削减材试验

影响增材件铣削加工结果的因素较多，综合考虑后采用  $L_{16}(4^5)$  正交表，设计四因素四水平正交试验，选择数值见表 2。试验设备选用 DMU50 五轴联动加工中心，铣削加工刀具采用厦门鸿鹭联创公司的 TiAlN 涂层硬质合金立铣刀，所属系列 S10-R4-

08010, 参数见表3。试验采用干式顺铣方式加工, 使用瑞士奇石乐 Kistler 9527B 压力传感器和 Kistler 5070A 多通道电荷放大器以及数据采集系统 5697A1 型对三向切削力实时监测, Dyno ware 软件记录变化曲线。使用 TR200 表面粗糙度测量仪测量工件铣削前后的表面粗糙度, 使用基恩士 VHX-7000 超景深显微镜观察铣削前后表面形貌、铣削加工试验与测量数据现场如图3所示。

表2 试验因素水平表

水平	铣削速度 $v_c / (\text{m/min})$	铣削深度 $a_p / \text{mm}$	铣削宽度 $a_e / \text{mm}$	每齿进给量 $f_z / (\text{mm/z})$
1	30	0.25	2.0	0.025
2	60	0.35	2.5	0.050
3	90	0.45	3.0	0.075
4	120	0.55	3.5	0.100

表3 刀具参数

$L / \text{mm}$	$d / \text{mm}$	$L_c / \text{mm}$	$d_1 / \text{mm}$	$\gamma_0 / (^\circ)$	$\alpha_0 / (^\circ)$	$\beta / (^\circ)$
60	8	20	8	9.37	15.36	35

注:  $L$ 为总长;  $d$ 为刃径;  $L_c$ 为刃长;  $d_1$ 为柄径;  $\gamma_0$ 为前角;  $\alpha_0$ 为后角;  $\beta$ 为螺旋角。

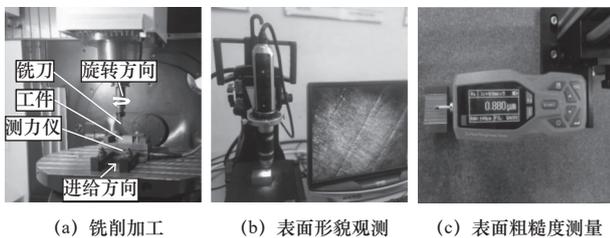


图3 铣削试验与测量数据图

## 2 结果与分析

为了获得科学观测值, 在测力仪软件数据中取实时值相对稳定位置的数据均值作为  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向的铣削力数值, 并根据式(1)求其铣削合力  $F$ 。为提高加工效率引入材料去除率  $MRR$ ,  $MRR$  由式(2)计算得出。表面粗糙度  $Ra$  选用五点测量法, 数据中去掉最大值和最小值后再取平均进行记录。正交试验设计结果见表4, 铣削前测得表面粗糙度为  $14.804 \mu\text{m}$ 。

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (1)$$

$$MRR = \frac{v_c a_p z a_e f_z}{\pi d} \quad (2)$$

式中:  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  分别为  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向的铣削分力;  $z$  为铣刀齿数, 本试验  $z$  取 4。

表4 正交试验设计与结果

编号	$v_c / (\text{m/min})$	$a_p / \text{mm}$	$a_e / \text{mm}$	$f_z / (\text{mm/z})$	$F / \text{N}$	$Ra / \mu\text{m}$	$MRR / (\text{cm}^3/\text{min})$
1	30	0.25	2.0	0.025	117.63	0.325	0.06
2	30	0.35	2.5	0.050	212.77	0.705	0.21
3	30	0.45	3.0	0.075	273.24	1.337	0.48
4	30	0.55	3.5	0.100	340.79	1.823	0.92
5	60	0.25	2.5	0.075	207.45	0.514	0.45
6	60	0.35	2.0	0.100	299.89	0.763	0.67
7	60	0.45	3.5	0.025	225.20	0.541	0.38
8	60	0.55	3.0	0.050	234.71	0.996	0.79
9	90	0.25	3.0	0.100	282.25	1.113	1.07
10	90	0.35	3.5	0.075	294.84	0.705	1.32
11	90	0.45	2.0	0.050	220.77	0.729	0.64
12	90	0.55	2.5	0.025	208.49	0.621	0.49
13	120	0.25	3.5	0.050	271.71	0.931	0.84
14	120	0.35	3.0	0.025	252.98	0.529	0.50
15	120	0.45	2.5	0.100	346.93	1.628	2.15
16	120	0.55	2.0	0.075	295.47	0.890	1.58

### 2.1 铣削参数对响应变量的影响分析

根据表4数据进行极差法分析, 结果见表5和表6, 绘制不同水平下响应变量与铣削参数的影响变化图, 结果如图4~图7所示。

表5 铣削合力  $F$  极差表

因素	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	极差 $R$	主次顺序
$v_c$	236.1	241.8	251.6	291.8	55.7	2
$a_p$	219.8	265.1	266.5	269.9	50.1	3
$a_e$	233.4	243.9	260.8	283.1	49.7	4
$f_z$	263.3	286.2	384.8	395.3	132.0	1

表6 表面粗糙度  $Ra$  极差表

因素	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	极差 $R$	主次顺序
$v_c$	1.048	0.704	0.792	1.002	0.344	3
$a_p$	0.721	0.676	1.066	1.083	0.407	2
$a_e$	0.677	0.875	0.994	1.000	0.323	4
$f_z$	0.504	0.840	0.862	1.339	0.835	1

注:  $k_i$  为该因素下第  $i$  水平所对应试验结果求和平均值, 极差  $R$  为  $k_i$  中最大值与最小值之差。

由表5和表6可知, 铣削参数对铣削合力  $F$  的影响主次顺序依次是  $f_z$ 、 $v_c$ 、 $a_p$ 、 $a_e$ 。铣削参数对表面粗糙度  $Ra$  的影响主次顺序依次是  $f_z$ 、 $a_p$ 、 $v_c$ 、 $a_e$ 。

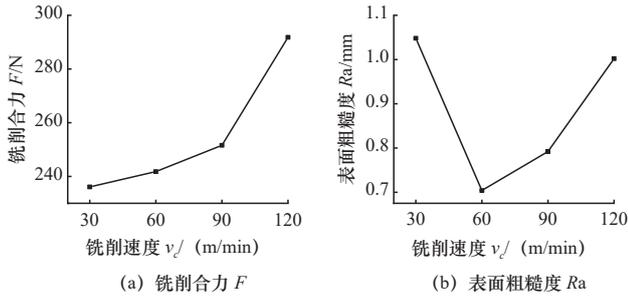


图4 铣削速度对响应变量的影响

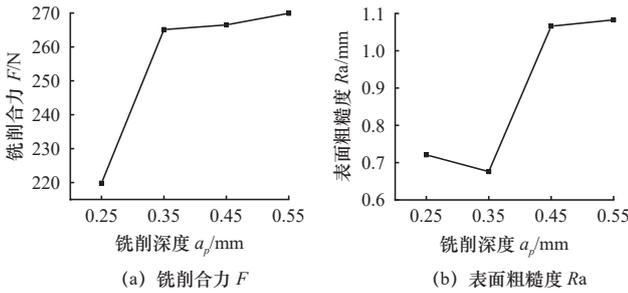


图5 铣削深度对响应变量的影响

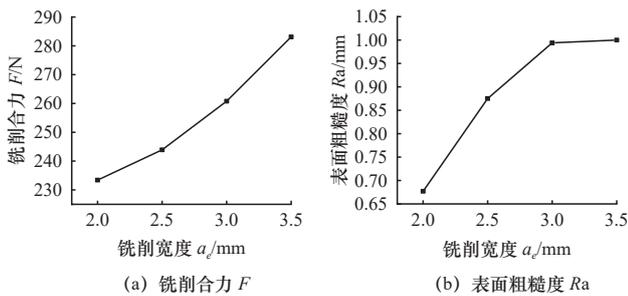


图6 铣削宽度对响应变量的影响

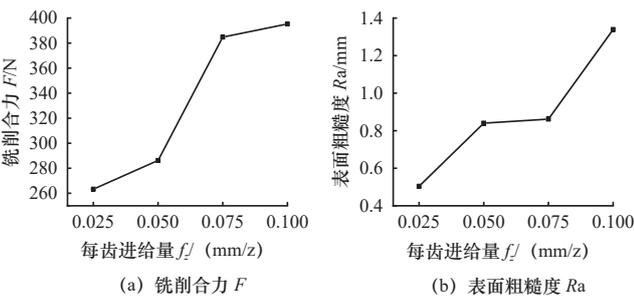


图7 每齿进给量对响应变量的影响

由图4a可知，在试验四水平内，随着铣削速度的增加，铣削速度与铣削合力  $F$  呈正相关，但增加速率不同，增加速率在 30~60 m/min 过程最小，增加速率在 90~100 m/min 过程最大。这是因为铣削速度的增加伴随着单位时间内切削厚度的增大，铣削力呈上升趋势。由4b可知，表面粗糙度值随着铣削速度的增大呈现快速下降后递增的趋势，铣削速度为 60 m/min 时，表面粗糙度值降到最小。这

是因为持续高温环境对材料有一定程度的软化，工件与刀具之间的摩擦系数下降，材料表面粗糙度降低，而当速度持续增加时，刀具的磨损和与工件之间的颤振现象会导致表面粗糙度值增大，所以增材件的铣削速度在一定范围内增大可以改善表面质量，但不宜过大。

由图5a可知，随着铣削深度的增加，铣削力也随之增加，铣削深度增加至 0.45 mm 后上升速率变得缓慢，这主要因为开始加工时，增材件表面硬化，切削层横截面增大，材料去除所需能量增大，铣削力增加，而随铣削深度的增加，加工过程可以避免表面硬化层，且铣削温度上升影响材料软化程度，铣削力增加速率变慢。由图5b可知，表面粗糙度的大小随着铣削深度的增加呈现缓慢下降后急剧上升的趋势，最后速率变慢。这主要因为开始的铣削深度较小，导致刀刃与工件表面加工震动较大，表面质量较差；当铣削深度增至 0.35 mm 时，加工趋于平稳，表面质量良好，表面粗糙度值降低；当深度继续增加时，刀具和工件之间挤压程度增大，工件塑性变形程度变大，表面粗糙度值增加。所以，增材件的表面质量优化应尽量选择较小的铣削深度。

由图6可知，随着铣削宽度的增大，铣削合力整体呈上升趋势。而当铣削宽度小于 3.0 mm 时，表面粗糙度值与其呈正相关，当铣削宽度大于 3.0 mm 时，表面粗糙度值上升趋势明显变缓。这是因为宽度增加使刀刃与工件平面的接触面积增大，单位时间内材料去除率增大，摩擦力增大，铣削力和表面粗糙度值也随之上升，当宽度增大到一定范围时，表面粗糙度受其影响明显变小。

由图7可知，随着每齿进给量的增加，铣削力与表面粗糙度值都呈现上升趋势。这主要因为刀具每齿切削间距增加使得瞬时材料去除量增加，铣削力变大，刀具与工件之间的振动变大，导致表面质量变差。因此，在对增材件的切削过程中应选择较小的每齿进给量，以获得更好的表面质量从而达到使用标准。

## 2.2 铣削工艺参数对表面形貌的影响分析

通过基恩士 VHX-7000 超景深显微镜所拍摄的铣削前后表面形貌如图8所示。在图8a中，SLM 成形件存在扫描熔道痕迹和球化物，导致表面产生较大波峰波谷，粗糙度测量值过大。而从图8b中表面形貌图可见，微铣削后表面存在铣削刀纹，且去除了 SLM 技术形成的表层材料使得孔隙减少，

同表4表面粗糙度结果综合分析可得,第1组工艺参数下加工效果更为理想,此时表面粗糙度值最低,其表面粗糙度Ra最大下降97.80%,整体平均下降94.03%。

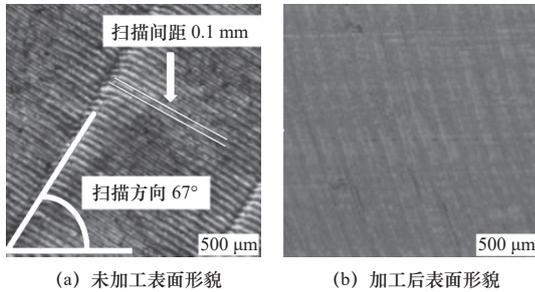


图8 表面形貌对比图

### 3 工艺参数优化

提高零件的加工质量和效率是增材件应用领域的重点关注问题,解决这一问题的最主要方法是选择合适的加工参数。本文为了探究“SLM Inconel 718+铣削”参数的最优组合,基于灰色关联分析(GRA)、逐步回归法(SR)和粒子群算法(PSO)求解。

#### 3.1 GRA分析

本文以铣削合力*F*、表面粗糙度*Ra*和材料去除率*MRR*为响应变量,对其进行多目标优化,而灰色关联分析法<sup>[17-18]</sup>可以解决优化过程的复杂性问题,将多目标优化转化为单目标优化。方法步骤如下。

##### (1) 评价指标矩阵

假设评价系统有*n*个试验方案和*p*个评价指标,则评价指标矩阵*X*为

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix}$$

##### (2) 数据归一化

对每个响应变量的试验数据进行归一化处理,使其介于0和1之间,减少可变性。公式如下:

$$x_i^*(k) = \frac{\max x_i^0(k) - x_i^0(k)}{\max x_i^0(k) - \min x_i^0(k)} \quad (3)$$

$$x_i^*(k) = \frac{x_i^0(k) - \min x_i^0(k)}{\max x_i^0(k) - \min x_i^0(k)} \quad (4)$$

式中: $x_i^*(k)$ 为归一化数值; $x_i^0(k)$ 为原始试验数据; $\max x_i^0(k)$ 为第*i*个数列中所有试验的最大水平; $\min x_i^0(k)$ 为第*i*个数列中所有试验的最小水平。

因为铣削合力和表面粗糙度越小越好,所以选择式(3);而对于材料去除率来讲,越大越好,因此选择式(4)。

##### (3) 灰色关联系数(GRC)

将数据归一化后,代入公式计算灰色关联系数。公式如下:

$$\zeta_i(k) = \frac{\min_{j \in i} \left\| \min_{\forall k} x_0^*(k) - x_i^*(k) \right\| + \rho \cdot \max_{j \in i} \left\| \max_{\forall k} x_0^*(k) - x_i^*(k) \right\|}{\left\| x_0^*(k) - x_i^*(k) \right\| + \rho \cdot \max_{j \in i} \left\| \max_{\forall k} x_0^*(k) - x_i^*(k) \right\|} \quad (5)$$

式中: $\zeta_i(k)$ 为灰色关联系数; $\rho$ 为分辨系数,主要作用是提高关联系数之间的差异显著性, $\rho \in [0,1]$ ,本次计算取0.5; $x_0^*(k)$ 和 $x_i^*(k)$ 分别为参考序列(原始)和比较序列(归一化处理)。

##### (4) 计算灰色关联度(GRG)

取每个性能特征GRC的平均值来计算GRG,GRG值越大,对应的加工组合越接近响应变量的最优值。公式如下:

$$\zeta_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^m \zeta_i(k) \quad (6)$$

式中: $\zeta_i$ 为第*i*次试验的灰色关联度;*m*为响应变量的数量。通过式(3)~式(6)计算,结果见表7。

表7 灰色关联分析数据结果

序号	归一化处理			GRC			GRG
	<i>F</i>	<i>Ra</i>	<i>MRR</i>	<i>F</i>	<i>Ra</i>	<i>MRR</i>	
1	1	1	0	1	1	0.333 3	0.777 8
2	0.582 1	0.746 3	0.071 4	0.546 5	0.663 4	0.350 0	0.520 0
3	0.321 4	0.324 4	0.202 9	0.424 2	0.425 3	0.385 5	0.411 7
4	0.026 8	0	0.411 5	0.339 4	0.333 3	0.459 4	0.377 4
5	0.608 3	0.873 8	0.185 7	0.560 7	0.798 5	0.380 4	0.579 9
6	0.205 1	0.707 6	0.291 4	0.386 1	0.631 0	0.413 7	0.476 9
7	0.530 9	0.855 8	0.151 4	0.515 9	0.776 2	0.370 8	0.554 3
8	0.489 4	0.552 1	0.348 5	0.494 8	0.527 5	0.434 2	0.485 5
9	0.282 1	0.474 0	0.485 7	0.410 5	0.487 3	0.492 9	0.463 6
10	0.227 2	0.746 3	0.601 4	0.392 8	0.663 4	0.556 4	0.537 6
11	0.550 2	0.730 3	0.280 0	0.526 4	0.649 6	0.409 8	0.528 6
12	0.603 8	0.802 4	0.207 1	0.557 9	0.716 7	0.386 7	0.583 8
13	0.328 0	0.595 5	0.371 4	0.426 6	0.552 8	0.443 0	0.474 1
14	0.409 7	0.863 8	0.211 4	0.458 6	0.785 9	0.388 0	0.544 2
15	0	0.110 1	1	0.333 3	0.359 8	1	0.564 4
16	0.224 4	0.622 8	0.725 7	0.392 0	0.570 0	0.645 8	0.535 9

### 3.2 SR 法建立预测模型

为进行后续优化问题，需建立工艺参数与灰色关联度值之间的映射关系。采用 SR 法<sup>[19]</sup> 建立数学模型，表达式如下：

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_{0i}x_i + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=i+1}^4 \beta_{ij}x_i x_j + \sum_{i=1}^4 \beta_{ij}x_i^2 \quad (7)$$

式中： $\hat{y}$ 为 GRG 的预测值； $\beta$ 为数学模型的系数；

$\sum_{i=1}^4 \beta_{0i}x_i$ 为线性效应； $\sum_{i=1}^4 \sum_{j=i+1}^4 \beta_{ij}x_i x_j$ 为交互性效应；

$\sum_{i=1}^4 \beta_{ij}x_i^2$ 为二次效应。

运用 Matlab 软件编写逐步回归法程序计算，得到其二阶多项式回归预测模型结果如下：

$$\begin{aligned} GRG = & 1.0802 - 2.3989a_p + 0.2954a_e - 12.3823f_z + \\ & 0.0146v_c a_p + 0.0176v_c f_z + 17.0944a_p f_z - \\ & 0.0001v_c^2 - 0.0506a_e^2 + 23.9053f_z^2 \end{aligned} \quad (8)$$

其所得回归模型 P 值小于 0.05，模型泛化性较高，整体影响显著。为进一步验证模型的准确性，计算得到其残差个案次序，结果如图 9 所示，观察发现无异常点，模型残差符合正态分布规律，不存在过拟合现象。其预测值与实测值的关系如图 10 所示，误差率均小于 5%，说明其预测形态良好，可作为灰色关联度分析的预测模型。

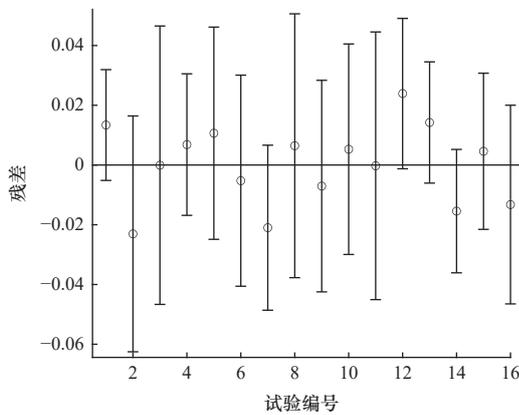


图 9 预测模型残差检验分布图

### 3.3 粒子群算法优化

基于 GRG 预测模型进行参数优化，是非线性函数寻找极值的问题，传统优化算法容易陷入局部最优解，而 PSO<sup>[20]</sup> 是基于群智能理论的优化问题，全局和局部搜索能力强，故选择 PSO。它主要包括对随机粒子群的初始化操作和逐次迭代逼近最优解，其中把每一次迭代过程所计算得到的各粒子目标函数值作为适应度值。设置粒子群群体个数为 500，

最大迭代次数 2 500，粒子加速常数均为 2。以试验参数水平范围为该优化问题的约束条件，即

$$\text{s.t.} \begin{cases} 30 \leq v_c \leq 120 \\ 0.25 \leq a_p \leq 0.55 \\ 2 \leq a_e \leq 3.5 \\ 0.025 \leq f_z \leq 0.1 \end{cases}$$

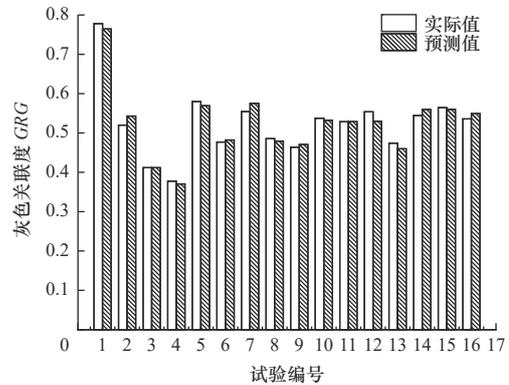


图 10 预测-实际值对比分析图

通过 Matlab 工具实现程序编写与运行，算法优化结果如图 11 所示。经过 2 500 次迭代，目标函数适应度值变化趋于稳定，此时 GRG 的最优解为 0.817 3，高于表 5 中 GRG 的最大值 0.777 8，说明在此值下的响应变量整体最优，其所对应的工艺参数组合为  $v_c=46.96$  m/min， $a_p=0.25$  mm， $a_e=2.90$  mm， $f_z=0.025$  mm/z。

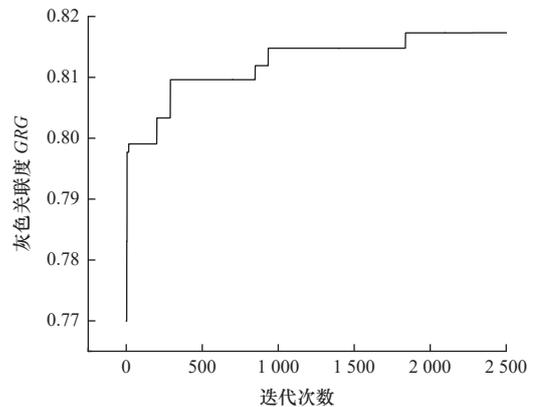


图 11 适应度值随迭代次数的变化趋势

## 4 结语

(1) 采用 SLM 增材工艺和铣削减材工艺，设计四因素四水平正交试验，得到 16 组不同工艺参数下的铣削合力、表面粗糙度值，通过极差分析得到：对  $F$  影响的重要性依次为  $f_z > v_c > a_p > a_e$ ；对  $Ra$  影响的重要性依次为  $f_z > a_p > v_c > a_e$ 。同时表明了  $F$ 、 $Ra$  在试验四水平下随  $v_c$ 、 $a_p$ 、 $a_e$ 、 $f_z$  的影响规律，

并通过对比铣削前后表面粗糙度值和表面形貌分析,验证了微铣削工艺可以改善增材件表面完整性,其  $R_a$  最大下降 97.80%, 平均下降 94.03%。

(2) 在响应变量中引入材料去除率  $MRR$ , 通过灰色关联分析法将多目标优化问题转化为单目标优化问题, 利用逐步回归法建立灰色关联度值与工艺参数的二阶多项式回归预测模型, 并通过残差图分析和实测-预测值对比图观察结果, 说明了该模型具有较高的预测精度, 其最大误差不超过 5%。

(3) 基于灰色关联度与工艺参数的二阶非线性回归模型采用 PSO 算法优化, 结果表明,  $GRG$  的最优解为 0.817 3, 所对应的工艺参数组合为  $v_c=46.96$  m/min,  $a_p=0.25$  mm,  $a_e=2.90$  mm,  $f_z=0.025$  mm/z。

### 参 考 文 献

- [1] 果春焕, 王泽昌, 严家印, 等. 增减材混合制造的研究进展 [J]. 工程科学学报, 2020, 42(5): 540-548.
- [2] 李淮阳, 黎振华, 杨睿, 等. 选区激光熔化金属表面成形质量控制的研究进展 [J]. 表面技术, 2020, 49(9): 118-124, 156.
- [3] Zhang M H, Zhang B C, Wen Y J, et al. Research progress on selective laser melting processing for nickel-based superalloy [J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2022, 29(3): 369-388.
- [4] 郑凯元, 罗耀恩, 张屹, 等. Inconel 718 合金激光直接沉积工艺研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(23): 9-24.
- [5] 杨浩, 李尧, 郝建民. 激光增材制造 Inconel 718 高温合金的研究进展 [J]. 材料导报, 2022, 36(6): 129-138.
- [6] Kruth J P, Badrossamay M, Yasa E, et al. Part and material properties in selective laser melting of metals [C]. International Symposium on Electromachining, 2010: 3-14.
- [7] Wang X Q, Gong X, Chou K. Review on powder-bed laser additive manufacturing of Inconel 718 parts [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2017, 231(11): 1890-1903.
- [8] 鲁志杰, 郭火明, 李德香, 等. 激光选区熔化成形 Inconel718 合金的显微组织以及电化学和摩擦学性能 [J]. 机械工程材料, 2023, 47(9): 57-64.
- [9] Amir M, Dinesh M, Sasan D, et al. Post-processing of additively manufactured metallic alloys: a review [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2022, 179: 103908.
- [10] 于江, 丁红瑜, 耿遥祥, 等. 选区激光熔化金属零件后处理技术研究

进展 [J]. 材料导报, 2022, 36(S1): 392-400.

- [11] Sames J W, List A F, Pannala S, et al. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing [J]. International Materials Reviews, 2016, 61(5): 315-360.
- [12] Zhang B C, Lee X H, Bai J M, et al. Study of selective laser melting (SLM) inconel 718 part surface improvement by electrochemical polishing [J]. Materials Design, 2017, 116: 531-537.
- [13] Kaynak Y, Tascioglu E. Post-processing effects on the surface characteristics of inconel 718 alloy fabricated by selective laser melting additive manufacturing [J]. Progress in Additive Manufacturing, 2020, 5(9): 221-234.
- [14] Ćwikła M, Dziedzic R, Reiner J. Influence of overlap on surface quality in the laser polishing of 3D printed inconel 718 under the effect of air and argon [J]. Materials, 2021, 14(6): 1479.
- [15] Ji H S, Kumar M G, Song Q H, et al. Microstructure and machinability evaluation in micro milling of selective laser melted Inconel 718 alloy [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 14: 348-362.
- [16] Dong Z C, Ouyang P X, Zhang S T, et al. Effect of building direction on anisotropy of mechanical properties of GH4169 alloy fabricated by laser powder bed fusion [J]. Materials Science Engineering A, 2023, 862(18): 144430.
- [17] 王海艳, 陶克新, 王健宇, 等. 基于灰色系统理论的球头铣刀螺旋铣孔切削参数优化 [J]. 中国工程机械学报, 2020, 18(4): 348-353.
- [18] 孔晓瑶, 袁松梅, 朱光远, 等. 基于灰色关联分析的微量润滑系统工艺参数优化 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(6): 73-81.
- [19] Wu D B, Wang H, Zhang K Y, et al. Research on formation mechanism and optimization method of surface waviness of TC4 blisk blade [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 39: 305-326.
- [20] 刘士博, 程志江, 吴动波, 等. 基于 PSO 的 TC4 钛合金铣削参数优化研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(10): 155-159.

第一作者: 张乐, 男, 1999 年生, 硕士研究生, 研究方向为金属切削加工与仿真。E-mail: [2855906265@qq.com](mailto:2855906265@qq.com)

通信作者: 白海清, 男, 1970 年生, 教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向为航空零部件的数字化加工工艺和难加工材料的切削加工。E-mail: [bretmail@qq.com](mailto:bretmail@qq.com)

(编辑 李 静)

(收稿日期: 2024-03-20)

文章编号: 20240822

如果您想发表对本文的看法, 请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。