

# 基于灰色关联分析的选区激光熔化成形 18Ni300 模具钢多目标工艺优化

陈侠宇, 黄卫东\*, 张伟杰, 赖章鹏, 练国富

福建工程学院机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118

**摘要** 为研究 18Ni300 模具钢选区激光熔化成形过程中多目标最优工艺问题, 设计了以激光功率、扫描速度、扫描间距、铺粉厚度为工艺参数, 以致密度、硬度、耐磨性为响应目标的响应面中心组合设计实验。结合灰色关联分析得到多目标的综合灰色关联度, 通过分析实验的灰色关联度得到了拟合度达 78.50% 的回归预测模型, 以及针对三个响应目标的最优工艺参数, 分别为激光功率 250 W, 扫描速度 850 mm/s, 扫描间距 0.05 mm, 铺粉厚度 0.02 mm, 此工艺参数理想的灰色关联度可达 0.9312; 在最优工艺参数下得到了相对密度为 99.5%、硬度为 41.5 HRC、磨损体积为 192000  $\mu\text{m}^3$ 、灰色关联度为 0.8895 的验证样件, 该样件符合预期结果, 说明优化方法切实可行。

**关键词** 激光技术; 选区激光熔化; 多目标工艺优化; 灰色关联分析; 致密度; 硬度; 耐磨性

中图分类号 TG142

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0502003

## Multiple Targets Technology Optimization Based Grey Relative Analysis of 18Ni300 Die Steel Formed by Selective Laser Melting

Chen Xiayu, Huang Weidong\*, Zhang Weijie, Lai Zhangpeng, Lian Guofu

School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou, Fujian 350108, China

**Abstract** This study design a surface response central composite design experiment to research the multiple targets technology optimization problem during the selective laser melting forming 18Ni300 die steel. Here, laser power, scanning speed, hatching distance, and powder coating thickness are considered as technology parameters and relative density, hardness, and wear resistance are considered as response targets. Combining with gray relational analysis to obtain the gray relational grade (GRG) of multiple targets and by analyzing the GRG value, we developed a regression model whose fitting value could reach 78.50%. Simultaneously, a group of optimized technology parameters, such as laser power of 250 W, scanning speed of 850 mm/s, hatching distance of 0.05 mm, and powder coating thickness of 0.02 mm, could be obtained. With the same arithmetic, optimized technology parameters group could get a better GRG value of 0.9312. Subsequent to performing confirmatory experiments, we obtained the sample with a relative density of 99.5%, hardness of 41.5 HRC, wear volume of 192000  $\mu\text{m}^3$ , and GRG of 0.8895. The result is consistent with the prediction and the optimization method is reliable.

**Key words** laser technique; selective laser melting; multiple targets technology optimization; gray relational analysis; relative density; hardness; wear resistance

**OCIS codes** 140.3390; 160.3380; 350.3850

## 1 引言

选区激光熔化 (SLM) 成形技术是一种激光增材制造技术。该技术以三维数字模型为基础, 利用高能激光熔化粉床产生成形层, 成形层堆叠成实

体<sup>[1]</sup>。基于这种成形方式, SLM 技术能够快速地将模型转化为产品, 大大地节约时间成本; 此外, 材料粉末可以筛分回收, 提高了材料的利用率。SLM 技术几乎可以加工出任何形状的产品, 大大提高了设计自由度<sup>[2]</sup>。

收稿日期: 2019-09-06; 修回日期: 2019-09-29; 录用日期: 2019-12-11

基金项目: 国家自然科学基金(51775113)

\* E-mail: hwd@fjut.edu.cn

针对激光增材制造成形件的性能,国内外学者进行了很多相关研究:Khorasani 等<sup>[3]</sup>通过田口实验研究了 Ti6Al4V 经 SLM 成形后的多种性能,探讨了工艺参数对其性能的影响,同时揭示了各性能之间相互影响的规律;Read 等<sup>[4]</sup>采用能量密度模型研究了成形工艺参数对铝合金成形样件孔隙率的影响,结果表明,AlSi10Mg 铝合金在成形过程中存在一个能量密度临界值,该值约为 60 J/m<sup>3</sup>,在该能量密度下成形的样件具有最高的致密度;Lian 等<sup>[5]</sup>研究了 TiC 涂层激光熔覆增材制造工艺参数对镍基合金显微硬度和耐磨性的影响,并建立了相应的预测模型;张虎等<sup>[6]</sup>利用 SLM 技术制备了 Al-Cu-Mg 合金,并研究了激光能量密度对 SLM 成形样件致密度的影响,结果显示,在能量密度为 2.4 kJ/m<sup>3</sup>时,合金样件的致密度可以达到 99.8%,接近于全致密;宗学文等<sup>[7]</sup>研究了多种工艺参数下 316L 不锈钢的组织、性能及各向异性,结果表明,可以通过调整能量密度和成形方向来实现熔池平整和组织定向生长,从而获得更好的性能;徐锦岗等<sup>[8]</sup>利用 SLM 进行了 H13 钢材料的单道熔覆实验,研究了工艺参数对样件缺陷的影响;卓林蓉等<sup>[9]</sup>利用 SLM 技术制备了 CuZnAl 形状记忆合金,研究了激光能量密度对合金微观组织、致密度、显微硬度和抗拉强度的影响,揭示了激光能量密度通过影响组织进而影响性能的机理;金剑波等<sup>[10]</sup>使用 SLM 设备制备了 GH4169 块体样件,通过计算调整成形的能量密度得到了致密度高达 99.7%的样件。

综上所述,很多学者利用激光增材制造技术制备了多种材料,并通过研究微观组织和激光能量密度等手段来优化工艺参数,但大多数优化工艺仅是针对单一性能目标进行的,且未给出预测模型。当性能目标变化后,最优工艺参数往往会发生变化,而在工程环境下,SLM 成形件往往有多目标的性能需求。

灰色关联分析适用于解决涉及多目标、多因素间复杂关系的问题。SLM 成形过程中各因素、各响应之间的相互作用比较复杂,属于灰色系统,适合采用灰色关联分析。目前,灰色关联分析已被用于激光熔覆、材料制备、机械设计等诸多工程领域<sup>[11-13]</sup>。此外,主成分分析可以真实客观地评定各响应在多目标优化时所占的比重,因此可以很好地解决 SLM

成形过程中的多目标优化问题。SLM 成形件的致密度、硬度和耐磨性直接关系到构件的耐用性,因此本文将灰色关联分析法与响应面设计相结合,以 18Ni300 模具钢为对象,将成形件的致密度、硬度及磨损量作为优化目标进行成形件性能的多目标工艺优化。

## 2 实验设备及方法

### 2.1 实验设备

SLM 成形设备结构如图 1 所示。

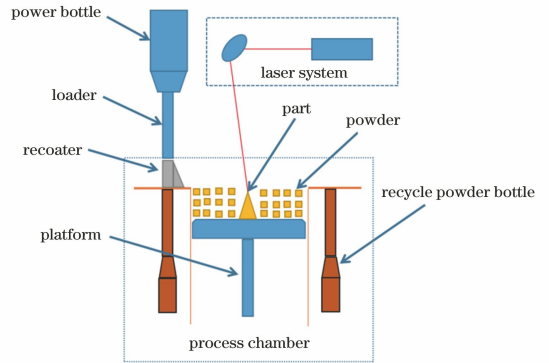


图 1 SLM 成形设备结构示意图

Fig. 1 Structural representation of SLM forming equipment

成形实验设备采用 SLM-Solutions 125HL 金属打印机,其成形空间为 125 mm × 125 mm × 125 mm,配备单个 400 W 光纤式激光器,成形腔保护气为氮气。实验材料为 SLM-Solutions 公司的 18Ni300 模具钢粉末,其粒径范围为 10~45 μm,该粉末的化学成分如表 1 所示,粉末形貌如图 2 所示。

实验测量设备包括 ME204E 分析天平、44308 手持电子显微镜、TM3030 plus 台式扫描电子显微镜、MVA-402TS 硬度计、UMT-Tribolab 高载荷划痕仪、KH1300 三维显微系统。

### 2.2 实验过程及实验方法

在 SLM 成形过程中,若单位体积上的能量输入过大,则可能发生成形件收缩变形、粉末球化甚至气化等现象;若单位体积内的能量输入过小,则成形粉末可能无法完全熔化,从影响成形件的性能。单位体积内能量的大小可用体能量密度进行表征,其定义为<sup>[4]</sup>

$$\psi = \frac{P}{v \cdot d \cdot t}, \quad (1)$$

表 1 18Ni300 模具钢粉末的化学成分

Table 1 Chemical composition of 18Ni300 die steel powder

Element	C	S	P	Si	Mn	Al	Ti	Mo	Co	Ni	Fe
Mass fraction / %	0.03	0.01	0.01	0.1	0.1	0.15	0.8	5.20	9.50	18	Bal.

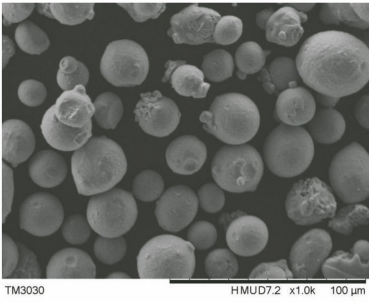


图 2 18Ni300 模具钢粉末的 SEM 图像

Fig. 2 SEM image of 18Ni300 die steel powder

式中： $\psi$  为激光能量密度； $P$  为激光功率； $v$  为扫描速度； $d$  为扫描间距； $t$  为铺粉厚度。本文选取激光功率、扫描速度、扫描间距、铺粉厚度作为成形参数，制备尺寸为  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  的立方体，用于测量致密度、硬度及磨损体积。成形前，将粉末在  $80\text{ }^\circ\text{C}$  下真空烘干  $6\text{ h}$ ，以保证粉末的干燥性和铺展性。基板选用 45 钢，并进行喷砂处理。

使用响应面中心组合进行实验设计；使用灰色关联分析及主成分分析对数据进行处理；使用阿基米德排水法测量合金的致密度，即相对密度，相对密度为样件的实际密度与材料理论密度之比，即

$$D = \frac{m_1 \rho_L}{\rho_0 m_2} \quad (2)$$

式中： $D$  为样块的致密度； $m_1$  为样块的质量； $\rho_L$  为

使用排水法测量时使用的液体的密度； $\rho_0$  为材料的理论密度； $m_2$  为样块排出液体的质量。

进行硬度测试时加载的载荷为  $500\text{ N}$ ，加载时间为  $30\text{ s}$ ，使用显微镜标尺测量样件表面菱形压痕对角线的尺寸，然后计算得到硬度。为提高数据的准确度，每块样件选择纵向平面即与成形方向平行的平面进行采样，沿成形方向间隔约  $1.5\text{ mm}$  依次取  $5$  个压痕点，取点方向如图 3 所示。除去最大值和最小值再求平均值得到样件的硬度。

进行磨损量测试时的加载载荷为  $20\text{ N}$ ，磨损时间为  $10\text{ min}$ ，划痕长度为  $2\text{ mm}$ 。使用  $5\%$  硝酸酒精（硝酸的体积分数为  $5\%$ ）溶液对样件表面进行腐蚀，腐蚀时间为  $30\text{ s}$ ，然后采用显微镜观察样件的组织。

实验参数水平如表 2 所示。

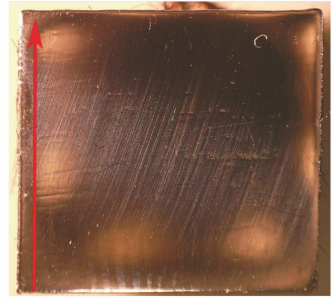


图 3 硬度测试点的取点方向

Fig. 3 Direction of choosing measuring points of hardness

表 2 实验参数水平

Table 2 Levels of experiment parameters

Parameter	Symbol	Level of parameter				
		Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
Laser power /W	A	150	200	250	300	350
Scanning speed /( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	B	650	700	750	800	850
Hatching distance /mm	C	0.05	0.08	0.11	0.14	0.17
Powder coating thickness /mm	D	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06

### 3 实验结果及数据处理

#### 3.1 实验结果

实验成形件如图 4 所示，其相关数据如表 3 所示。



图 4 成形样件

Fig. 4 Forming samples

#### 3.2 实验数据处理

##### 3.2.1 归一化处理

对致密度、显微硬度和耐磨性数据进行归一化处理，以避免不同单位的响应值对结果的影响。一般情况下，在 SLM 成形过程中，致密度和硬度具有望大特性，而表征耐磨性的磨损体积具有望小特性。致密度和显微硬度归一化的计算公式为<sup>[14]</sup>

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

式中： $i$  为实验组数； $n$  为响应目标数； $x_i(n)$  通常被称为参考序列； $x_i^*(n)$  通常被称为比较序列。耐磨性归一化的计算公式为<sup>[14]</sup>

表 3 成形样件的相关数据  
Table 3 Data of forming samples

No.	Forming parameter				Response value		
	A /W	B /(mm·s <sup>-1</sup> )	C /mm	D /mm	Relative density (RD) /%	Hardness (HD) /HRC	Wear resistance (WR) /μm <sup>3</sup>
1	300	800	0.08	0.03	99.8	27.6	430780
2	350	750	0.11	0.04	99.9	35.5	1226820
3	250	750	0.11	0.04	98.2	39.7	883720
4	300	700	0.14	0.05	97.5	43.4	533680
5	200	700	0.14	0.05	93.8	33.5	450080
6	250	750	0.11	0.04	99.2	39.1	1081940
7	200	700	0.08	0.05	96.6	40.1	513880
8	300	700	0.08	0.05	99.4	42.9	1454260
9	200	800	0.14	0.05	96.0	33.6	1825140
10	150	750	0.11	0.04	93.2	38.3	845880
11	300	800	0.08	0.05	99.6	36.5	648780
12	200	700	0.08	0.03	98.5	40.9	1901920
13	250	750	0.11	0.02	99.9	36.1	915040
14	250	650	0.11	0.04	99.4	36.5	998560
15	250	750	0.05	0.04	98.7	37.3	831540
16	300	700	0.14	0.03	99.6	39.3	156060
17	300	800	0.14	0.05	95.7	39.2	816140
18	200	800	0.08	0.03	99.9	40.9	917560
19	300	700	0.08	0.03	99.7	39.0	860520
20	250	750	0.11	0.06	99.8	40.7	818740
21	300	800	0.14	0.03	96.1	38.1	600280
22	200	800	0.08	0.05	94.0	38.2	621960
23	200	700	0.14	0.03	97.9	39.7	1461940
24	200	800	0.14	0.03	92.2	37.1	1505180
25	250	750	0.11	0.04	95.8	40.6	651760
26	250	750	0.11	0.04	94.9	41.1	604780
27	250	850	0.11	0.04	95.1	40.6	415180
28	250	750	0.11	0.04	98.8	37.3	765940
29	250	750	0.11	0.04	98.8	39.0	724240
30	250	750	0.17	0.04	92.0	40.7	290960

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

### 3.2.2 计算灰色关联系数(GRC)

参考序列和比较序列之间灰色关联系数的计算公式为<sup>[15]</sup>

$$\lambda[x_i(n), x_i^*(n)] = \frac{\Delta_{\min} + \xi \Delta_{\max}}{\Delta(n) + \xi \Delta_{\max}} \quad (5)$$

式中: $\Delta(n)$ 为参考序列和比较序列的差值,称为偏差序列,有 $\Delta(n) = |x_i(n) - x_i^*(n)|$ ;  $\Delta_{\max} = \max \Delta(n)$ ;  $\Delta_{\min} = \min \Delta(n)$ ;  $\xi$ 表示分辨系数,通常取 0.5。

### 3.2.3 主成分分析及确定响应目标权重

确定响应目标权重需要对高维度特征数进行降维处理,保留其重要特征的同时去除噪声和一些非重要特征,从而提高数据的处理速度<sup>[16]</sup>。主成分分析是数据降维的方法之一。通过主成分分析可以得到各因子对响应的影响程度,从而得到各响应目标

的权重。

主成分分析过程如下。

#### 1) 构造样本矩阵

$$\mathbf{X} = \begin{Bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1l} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2l} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{ml} \end{Bmatrix}, \quad (6)$$

式中: $l$ 表示响应目标数,本文取 $l=3$ ;  $m$ 表示实验组数,本文取 $m=30$ 。

#### 2) 计算相关关系矩阵 $\mathbf{R}_{jk}$ , $\mathbf{R}_{jk} = [r_{jk}]$ ,

$$r_{jk} = \frac{\text{Cov}[x_i(j), x_i(k)]}{\sigma[x_i(j)] \cdot \sigma[x_i(k)]}, \quad (7)$$

式中: $r_{jk}$ 为相关关系矩阵内的元素;  $\text{Cov}[x_i(j), x_i(k)]$ 为 $x_i(j)$ 和 $x_i(k)$ 的协方差;  $\sigma[x_i(j)]$ 和 $\sigma[x_i(k)]$ 分别为 $x_i(j)$ 和 $x_i(k)$ 的标准差。

#### 3) 令 $\mathbf{E}$ 为单位矩阵,通过解特征方程

$$|\lambda_k \mathbf{E} - \mathbf{R}_{jk}| = 0 \quad (8)$$

得到矩阵  $\mathbf{R}_{jk}$  的特征值  $\lambda_k$ , 将得到的特征值按从大到小排列, 即  $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_k > 0, k = 1, 2, 3, \dots, n$ 。

$$a_k = \lambda_k / \left( \sum_{i=1}^n \lambda_i \right), \quad (9)$$

$a_k$  即为响应目标权重值。使用 Minitab 对各响应目标进行主成分分析, 分析结果如表 4 所示。

4) 计算主成分贡献率  $a_k$ , 计算公式为

表 4 主成分分析结果

Table 4 Principal component analysis results

Parameter	Principal component 1	Principal component 2	Principal component 3	Eigenvalue	Contribution / %
Relative density	-0.681	0.072	-0.728	1.1910	39.7
Hardness	0.417	0.856	-0.305	0.9758	32.5
Wear resistance	0.601	-0.512	-0.613	0.8332	27.8

### 3.2.4 计算灰色关联度 (GRG)

灰色关联度为灰色关联系数的加权和, 计算公式为<sup>[17]</sup>

$$\gamma[x(n), x_i^*(n)] = \sum_{n=1}^l \beta_n [x(n), x_i^*(n)], \quad (10)$$

式中:  $\sum_{n=1}^l \beta_n = 1, \beta_n$  为第  $n$  个响应变量的权重, 可由 3.2.3 节的主成分分析确定。实验数据处理结果如表 5 所示, 其中, RD 表示相对密度, HD 表示硬度, WR 表示磨损体积。

表 5 实验数据处理结果

Table 5 Result of experimental data processing

No.	Normalization			GRC			GRG
	RD	HD	WR	RD	HD	WR	
1	0.0126582	1	0.1573551	0.9753086	0.3333333	0.7606239	0.7070
2	0	0.5	0.6133138	1	0.5	0.4491097	0.6844
3	0.2151898	0.2341772	0.4167918	0.6991150	0.6810345	0.5453801	0.6505
4	0.3037974	0	0.2162945	0.6220472	1	0.6980369	0.7660
5	0.7721518	0.6265822	0.1684098	0.3930348	0.4438202	0.7480440	0.5082
6	0.0886075	0.2721518	0.5303289	0.8494624	0.6475410	0.4852819	0.6826
7	0.4177215	0.2088607	0.2049534	0.5448276	0.7053571	0.7092667	0.6427
8	0.0632911	0.031645	0.7435877	0.8876405	0.9404762	0.4020625	0.7698
9	0.4936708	0.6202531	0.9560217	0.5031847	0.4463277	0.3434015	0.4403
10	0.8481012	0.3227848	0.3951176	0.3708920	0.6076923	0.5585858	0.5000
11	0.0379746	0.4367088	0.2822219	0.9294118	0.5337838	0.6392048	0.7202
12	0.1772151	0.1582278	1	0.7383178	0.7596154	0.3333333	0.6327
13	0	0.4620253	0.4347313	1	0.5197368	0.5349131	0.7146
14	0.0632911	0.4367089	0.4825702	0.8876404	0.5337838	0.5088695	0.6673
15	0.1518987	0.3860759	0.3869039	0.7669903	0.5642857	0.5637590	0.6446
16	0.0379746	0.2594937	0	0.9294118	0.6583333	1	0.8609
17	0.53164557	0.2658228	0.3780830	0.4846626	0.6528926	0.5694222	0.5629
18	0	0.1582278	0.4361747	1	0.7596154	0.5340883	0.7924
19	0.0253164	0.2784810	0.4035031	0.9518072	0.6422764	0.5534015	0.7405
20	0.0126582	0.1708861	0.3795722	0.9753086	0.7452830	0.5684581	0.7874
21	0.4810126	0.3354430	0.2544419	0.5096774	0.5984848	0.6627415	0.5811
22	0.746835443	0.329113924	0.266859886	0.4010152	0.6030534	0.6520096	0.5365
23	0.253164557	0.234177215	0.747986666	0.6638655	0.6810345	0.4006453	0.5963
24	0.974683544	0.398734177	0.772753829	0.3390558	0.5563380	0.3928489	0.4246
25	0.518987342	0.17721519	0.283928837	0.4906832	0.7383178	0.6378130	0.6121
26	0.632911392	0.14556962	0.257019463	0.4413408	0.7745098	0.660485	0.6105
27	0.607594937	0.17721519	0.14841969	0.4514286	0.7383178	0.7711055	0.6335
28	0.139240506	0.386075949	0.34932927	0.7821782	0.5642857	0.5886998	0.6576
29	0.139240506	0.278481013	0.325444194	0.7821782	0.6422764	0.6057345	0.6877
30	1	0.170886076	0.07726851	0.3333333	0.7452830	0.8661481	0.6153

### 3.3 建立分析灰色关联度的二阶预测模型

为优化 SLM 成形过程中多目标工艺参数, 需

要建立 4 个工艺参数与灰色关联度之间的映射关系。工艺参数和灰色关联度基于响应面实验的二阶

回归方程为

$$\hat{y} = \alpha_{GRG} - \epsilon = \sum_{i=1}^4 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=i+1}^4 \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^4 \beta_{ii} x_i^2 + \beta_0, \quad (11)$$

式中： $\hat{y}$  为灰色关联度预测值； $\alpha_{GRG}$  为灰色关联度； $\epsilon$  为实验误差； $\beta$  为回归系数； $x$  为成形工艺参数。

$\sum_{i=1}^4 \beta_i x_i$  表示线性效应， $\sum_{i=1}^4 \sum_{j=i+1}^4 \beta_{ij} x_i x_j$  表示交互效应， $\sum_{i=1}^4 \beta_{ii} x_i^2$  表示二次效应。

使用 Minitab 软件对灰色关联数据进行响应面分析，得到如下预测模型：

$$\begin{aligned} \hat{y} = & -3.29 + 0.00833A + 0.00667B + \\ & 17.21C - 18D - 0.000007A^2 - 0.000001B^2 - \\ & 8.1C^2 + 230D^2 - 0.000009AB + 0.0195AC + \\ & 0.0310AD - 0.0289BC - 0.0127BD + 3.7CD. \end{aligned} \quad (12)$$

从图 5 可以看出数据散点分布在直线附近，表明预测模型具有较高的拟合度。从图 6 可以看出模型残差均匀分布于零线附近，表明预测模型和样本测量数据较为吻合。预测模型的方差分析如表 6 所

示，可见，模型拟合度达到了 78.50%，拟合结果较好。

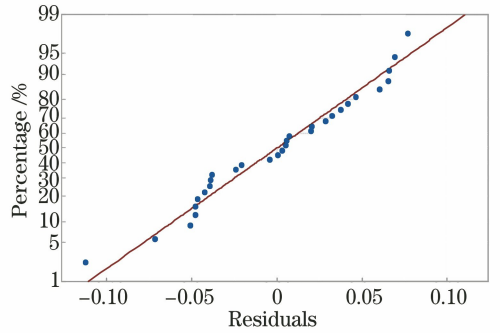


图 5 预测模型的正态概率图

Fig. 5 Normal probability plot of prediction model

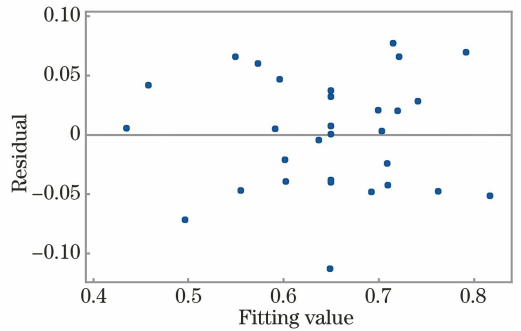


图 6 预测模型的残差图

Fig. 6 Residual plot of prediction model

表 6 预测模型的方差分析

Table 6 Variance analysis of prediction model

Source	Degree of freedom	Sum of square	Mean square	F	P
Prediction model	14	0.240364	0.017169	3.91	0.006
Error	15	0.065823	0.004388		
Total	29	0.306187			
Standard deviation		$R^2 = 78.50\%$			

## 4 工艺参数影响规律的研究及工艺参数优化

### 4.1 工艺参数对致密度的影响

从图 7 所示的致密度主效应曲线可以看出，激光功率在该数值范围内与致密度正相关，扫描速度与致密度负相关。两因素对致密度的影响有类似之

处：当激光功率过小时，单位面积内的能量输入过小，密铺粉末无法完全熔化而粘连在成形件内部，影响熔池的流动和铺展，导致了孔隙的产生；当扫描速度过大时，单位面积内的扫描时间短，能量输入不足，同样也会导致孔隙产生。22 号样件（激光功率为 200 W，扫描速度为 800 mm/s，扫描间距为

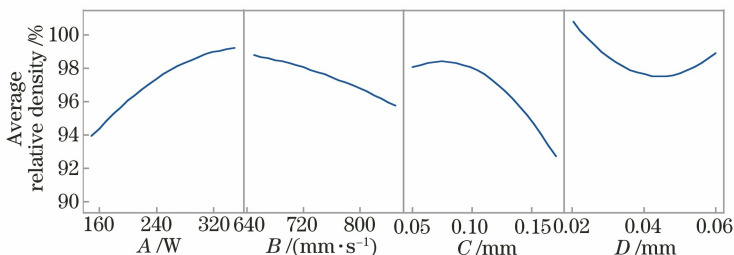


图 7 致密度主效应曲线

Fig. 7 Main effect plots of relative density

0.08 mm, 铺粉厚度为 0.05 mm) 的致密度较低, 内部孔隙特征明显, 其孔隙形貌如图 8 所示。

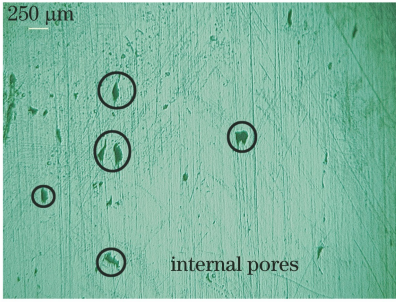


图 8 22 号样品中的孔隙

Fig. 8 Metallurgy porosity in sample No. 22

扫描间距在由小变大过程中呈现出两种致密化机理。当扫描间距为 0.05~0.1 mm 时, 两扫描线间距较小, 相邻两熔道相互搭接, 若扫描线间距过小, 则相邻熔道相接部分的能量输入就会过大, 导致金属气化产生冶金气孔, 此时将扫描间距增大至合适值, 致密度就会出现峰值; 之后, 进一步增大扫描间距, 致密度就会因为两扫描线不再搭接而出现熔道塌陷而产生大量孔隙, 导致致密度大幅降低。正常熔道和塌陷熔道的对比如图 9 所示, 图 9(a) 所示样件的扫描间距为 0.08 mm, 图 9(b) 所示样件的扫描间距为 0.17 mm。可以看到, 图 9(b) 所示样件熔道表面的间隙较大, 且熔道有部分塌陷。

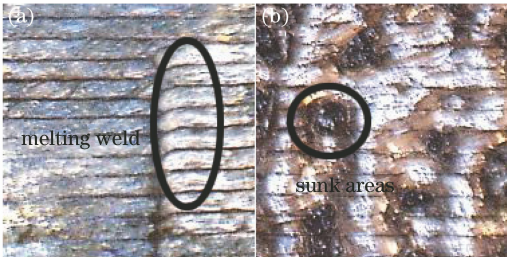


图 9 正常熔道和塌陷熔道的对比。

(a) 正常熔道; (b) 塌陷熔道

Fig. 9 Contrast of normal weld and sunk weld.

(a) Normal weld; (b) sunk weld

当铺粉厚度为 0.02~0.04 mm 时, 由于粉末粒径为 10~45 μm, 因此致密度主要取决于粉末对激光能量的吸收能力<sup>[18]</sup>。粉床越厚, 完全熔化粉床所需要的能量就越多。当输入能量不足以完全熔化粉末时, 未完全熔化的金属粉末之间呈球形堆叠, 因此存在间隙, 导致致密度降低; 当铺粉厚度超过粉末粒径后, 且介于双层粉床的高度和单层粉床高度之间时, 如图 10 所示, 上层粉末就会被刮刀抹除, 导致实际铺粉厚度低于理论铺粉厚度, 这可能是致密度测量值回升的原因。

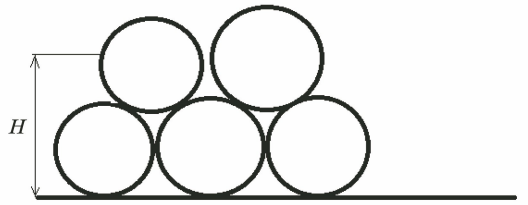


图 10 铺粉厚度超出粒径范围的粉末示意图

Fig. 10 Powder bed diagram of powder thickness over the range of particle size

#### 4.2 工艺参数对硬度的影响

从图 11 所示的硬度主效应曲线可以看出, 激光功率对硬度的影响出现了峰值, 扫描速度与硬度成反比, 铺粉厚度与硬度呈正比, 扫描间距对硬度的影响较小。18 号样件 (激光功率为 200 W, 扫描速度为 800 mm/s, 扫描间距为 0.08 mm, 铺粉厚度为 0.03 mm) 具有良好的致密度, 内部无明显的孔洞, 其显微组织如图 12 所示, 可以看出, 18 号样件的组织主要由细小的等轴晶和柱状晶组成。等轴晶的晶界较多, 因此硬度较高。结合硬度主效应图可知, 当激光功率较低、扫描速度较高时, 激光能量密度较低, 粉末的熔化不充分, 结合强度差, 成形样件内部会存在较多孔洞, 强度和硬度较差<sup>[19]</sup>。陈帅等<sup>[20]</sup>研究发现: 扫描间距对硬度的影响呈先增大后减小的趋势, 当扫描间距较小时, 激光能量密度偏大, 样件的硬度较小; 随着扫描间距适度增大, 体能量密度有所减小, 样件的硬度小幅提升; 随着扫描间距持续增加, 体能量密度进一步减小, 输入能量不足, 导致硬度下降。铺粉厚度较低时, 熔池冷却速率大, 易形成细小的等轴晶, 但由于层厚较小, 熔池会被反复重熔, 晶界破碎, 晶粒合并生长成柱状晶。随着粉层厚度增加, 晶粒呈现出两种形态: 熔池上表面与保护气有较为充分的热交换, 冷却速度较快, 易生长为等轴晶; 熔池内部冷却速率较小, 易生长成沿外延方向生长的柱状晶。当铺粉厚度合适时, 样件因大部分晶粒为等轴晶而表现出较高硬度, 进一步增加厚度, 柱状晶增加, 硬度减小。

#### 4.3 工艺参数对耐磨性的影响

从图 13 所示的耐磨性主效应曲线可以看出, 激光功率对耐磨性的影响较大, 磨损体积出现了谷值, 此时样件的耐磨性最好。对比图 11 所示的硬度主效应图可以发现, 对于激光功率来说, 硬度和耐磨性的最优点比较接近, 扫描间距的影响虽然较小, 但趋势接近, 说明这两个响应目标在一定程度上是相互关联的。庞红<sup>[21]</sup>在 Mo、Mo-5Co 合金的选区激光

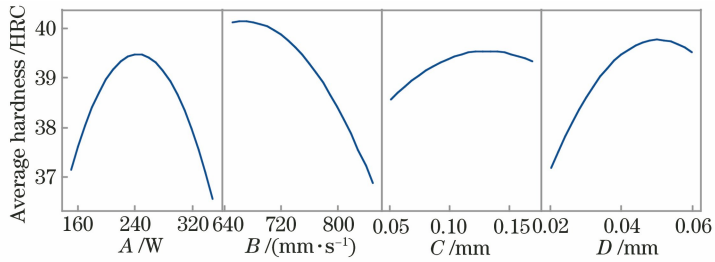


图 11 硬度主效应曲线

Fig. 11 Main effect plots of hardness

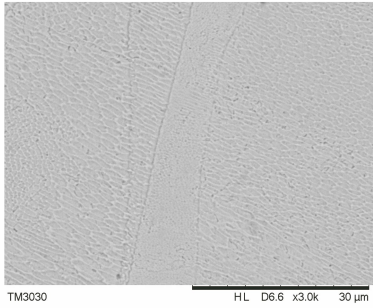


图 12 18 号样件的 SEM 图

Fig. 12 SEM image of experiment sample No. 18

熔化实验研究中也发现了耐磨性与硬度正相关的现象。结合(1)式可以看出,激光功率较低时,激光的

体能量密度较小,此时,部分粉末因输入能量不足而未完全熔化,这些未熔化的粉末在磨损过程中更易剥落;随着激光功率增大,输入能量逐步增加,成形件也趋于致密,耐磨性随之提升;随着激光功率的进一步增大,成形件内部会出现气孔、球化、裂纹等现象<sup>[22]</sup>,导致磨损加剧。扫描速度、扫描间距、铺粉厚度对输入能量的影响基本相似,各因素位于低值区时激光的体能量密度偏大,容易造成成形缺陷<sup>[23]</sup>,使得样件在磨损过程中容易剥落,导致磨损体积偏大;随着各因素数值增大,输入能量减小,成形质量变好并趋于稳定,成形件的耐磨性也随之提升。

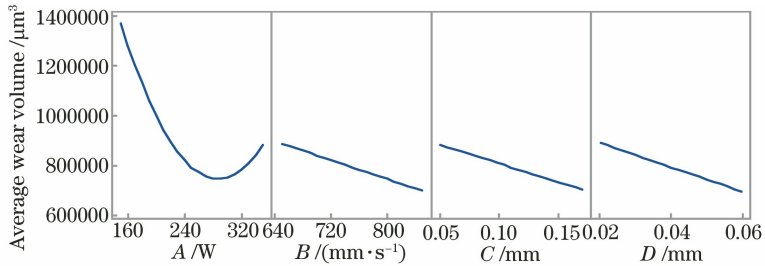


图 13 耐磨性主效应曲线

Fig. 13 Main effect plots of wear resistance

摩擦过程伴随着黏着磨损和磨粒磨损,28 号样件(激光功率为 250 W,扫描速度为 750 mm/s,扫描间距为 0.11 mm,铺粉厚度为 0.04 mm)的磨损体积大,磨痕形貌明显,如图 14 所示。这种磨损形貌的主要形成原因是在干摩擦状态下金属磨屑剥落且不能及时排除,磨粒在磨痕中发生挤压、黏结、剥落,最终形成了两种磨损特征<sup>[24]</sup>。当成形件中有大量未熔颗粒和球化现象时,成形件的结合强度较差,更易被磨损。

#### 4.4 工艺参数优化

灰色关联度越大,其相应的综合目标响应值越好。使用 Minitab 优化求解器可以得到优化结果,如图 15 所示,曲线表示该因素对灰色关联度的影响趋势,水平线表示优化后的灰色关联度。由图 15 可

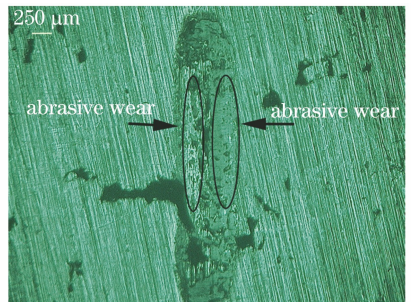


图 14 28 号样件的磨痕形貌

Fig. 14 Surface wear morphology of sample No. 28

得到最大灰色关联度为 0.9312,优化效果较好,竖直线表示该因素的取值,即最优工艺参数如下:激光功率为 250 W,扫描速度为 850 mm/s,扫描间距为 0.05 mm,铺粉厚度为 0.02 mm。



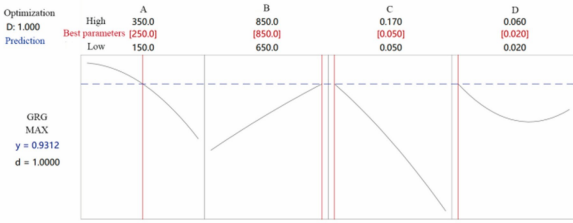


图 15 灰色关联度响应优化图

Fig. 15 Response optimized plot of GRG

#### 4.5 优化结果的实验验证

使用优化后的参数进行验证样件的成形实验,成形完成后,分别测量样件的致密度、硬度及耐磨性,测得致密度为 99.5%,硬度为 41.5 HRC,磨损体积为 192000  $\mu\text{m}^3$ 。以第 3 节所述数据处理方法得到其灰色关联度为 0.8895,预测误差为 4.5%。采用优化工艺参数成形的样件内部无明显的孔洞,如图 16 所示,显微硬度和磨损体积的测试结果较好,说明优化方法切实可行。

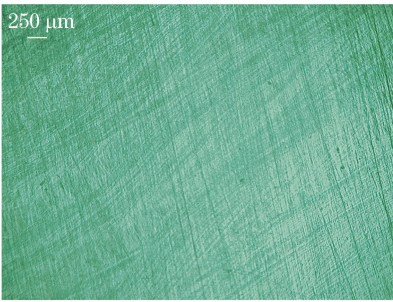


图 16 验证样件的内部形貌

Fig. 16 Internal morphology of verified sample

## 5 结 论

本文将响应面法中心组合实验设计与灰色关联分析法相结合,将致密度、硬度及耐磨性作为响应目标,通过灰色关联分析得到了多目标灰色关联度;之后进一步分析了激光功率、扫描速度、扫描间距对致密度、硬度和耐磨性的影响机理,并得到了综合性能最优的工艺参数。研究结果可归结如下:

1) 本文设计了中心组合实验,并结合灰色关联分析得到了对应的预测模型,该模型的拟合度可达 78.50%,预测模型可靠。

2) 对于致密度来说,激光功率、扫描速度、扫描间距对其有较大影响,激光功率同致密度成正比,扫描速度与致密度成反比,而扫描间距对致密度的影响会出现峰值;对于硬度来说,激光功率、扫描速度和铺粉厚度对其有较大影响,其中激光功率和铺粉厚度对硬度的影响出现了峰值,扫描速度与硬度成

反比;对于磨损体积来说,仅激光功率的影响较大,其对磨损体积的影响出现了谷值。

3) 通过优化求解器得到的最优工艺参数如下:激光功率为 250 W,扫描速度为 850 mm/s,扫描间距为 0.05 mm,铺粉厚度为 0.02 mm,理想状态下优化后的灰色关联度为 0.9312。采用最优工艺参数制得的验证样件的致密度为 99.5%,硬度为 41.5 HRC,磨损体积为 192000  $\mu\text{m}^3$ ,灰色关联度为 0.8895,优化结果与实验结果的符合程度较高。

#### 参 考 文 献

- [1] Wen S F, Chen K Y, Li W, et al. Selective laser melting of reduced graphene oxide/S136 metal matrix composites with tailored microstructures and mechanical properties [J]. *Materials & Design*, 2019, 175: 107811.
- [2] Zhang B C, Xiu M Z, Tan Y T, et al. Pitting corrosion of SLM Inconel 718 sample under surface and heat treatments [J]. *Applied Surface Science*, 2019, 490: 556-567.
- [3] Khorasani A, Gibson I, Awan U S, et al. The effect of SLM process parameters on density, hardness, tensile strength and surface quality of Ti-6Al-4V [J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 25: 176-186.
- [4] Read N, Wang W, Essa K, et al. Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: process optimisation and mechanical properties development [J]. *Materials & Design (1980-2015)*, 2015, 65: 417-424.
- [5] Lian G F, Zhang H, Zhang Y, et al. Computational and experimental investigation of micro-hardness and wear resistance of Ni-based alloy and TiC composite coating obtained by laser cladding [J]. *Materials*, 2019, 12(5): 793.
- [6] Zhang H, Nie X J, Zhu H H, et al. Study on high strength Al-Cu-Mg alloy fabricated by selective laser melting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(5): 0503007.  
张虎, 聂小佳, 朱海红, 等. 激光选区熔化成形高强 Al-Cu-Mg 合金研究 [J]. *中国激光*, 2016, 43(5): 0503007.
- [7] Zong X W, Gao Q, Zhou H Z, et al. Effects of bulk laser energy density on anisotropy of selective laser sintered 316L stainless steel [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0502003.  
宗学文, 高倩, 周宏志, 等. 体激光能量密度对选区激光熔化 316L 不锈钢各向异性的影响 [J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0502003.
- [8] Xu J G, Chen Y, Chen H, et al. Influence of process parameters on forming defects of H13 steel processed

- by selective laser melting [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(4): 041405.
- 徐锦岗, 陈勇, 陈辉, 等. 工艺参数对 H13 钢激光选区熔化成形缺陷的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(4): 041405.
- [9] Zhuo L R, Song B, Zhang Y J, et al. Study on CuZnAl memory alloy fabricated by selective laser melting [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(15): 24-30.
- 卓林蓉, 宋波, 章媛洁, 等. 激光选区熔化成形 CuZnAl 形状记忆合金工艺研究[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(15): 24-30.
- [10] Jin J B, Zhao Y, Zhao S Z, et al. Effect of TiN content on microstructure and wear resistance of Ti-based composites produced by selective laser melting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(11): 1102013.
- 金剑波, 赵宇, 赵淑珍, 等. TiN 含量对激光选区熔化成形钛基复合材料微结构与耐磨性能的影响[J]. *中国激光*, 2019, 46(11): 11102013.
- [11] Yu T B, Song B X, Xi W C, et al. Influence of laser cladding process parameters on morphology of cladding layer and its optimization [J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2019, 40(4): 537-542.
- 于天彪, 宋博学, 郗文超, 等. 激光熔覆工艺参数对熔覆层形貌的影响及优化[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(4): 537-542.
- [12] Zheng J X, Ren Y C. Comprehensive assessment of surface integrity in two dimensional ultrasonic rolling 7050 aluminum alloys [J]. *China Mechanical Engineering*, 2018, 29(13): 1622-1626.
- 郑建新, 任元超. 7050 铝合金二维超声滚压加工表面完整性综合评价[J]. *中国机械工程*, 2018, 29(13): 1622-1626.
- [13] Zhang N, Shi Y Y, Yang C, et al. Multi-objective optimization of processing parameters for disc-mill cutter machining blisk-tunnel based on GRA-RBF-FA method [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2019, 37(1): 160-166.
- 张楠, 史耀耀, 杨臣, 等. 基于 GRA-RBF-FA 的整体叶盘通道盘铣加工多目标参数优化[J]. *西北工业大学学报*, 2019, 37(1): 160-166.
- [14] Ighravwe D E, Babatunde D E. Evaluation of landfill gas plant siting problem: a multi-criteria approach [J]. *Environmental Health Engineering and Management*, 2019, 6(1): 1-10.
- [15] Ma X Y, Chen H X, Zhang X Y, et al. Effect of asphalt binder characteristics on filler-asphalt interactions and asphalt mastic creep properties [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019, 31(8): 04019138.
- [16] Ghasem F M, Hosein H. Fisher discriminant analysis (FDA), a supervised feature reduction method in seismic object detection [J]. *Geopersia*, 2019, 9(1): 141-149.
- [17] Kavimani V, Prakash K S, Thankachan T. Influence of machining parameters on wire electrical discharge machining performance of reduced graphene oxide/magnesium composite and its surface integrity characteristics [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 167: 621-630.
- [18] An C, Zhang Y M, Zhang J S. The research of influence of selective laser melting process parameters on density and surface roughness of Co-Cr alloy molding parts [J]. *Applied Laser*, 2018, 38(3): 328-333.
- 安超, 张远明, 张金松. 选区激光熔化工艺参数对钴铬合金材料成型件致密度与表面粗糙度的影响规律研究[J]. *应用激光*, 2018, 38(3): 328-333.
- [19] Liu T T, Liao W H, Zhang K, et al. Selective laser melting forming hardness rule of cobalt chromium alloy and its prediction model [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(3): 0303007.
- 刘婷婷, 廖文和, 张凯, 等. SLM 成形钴铬合金试件硬度变化规律及其预测模型[J]. *中国激光*, 2016, 43(3): 0303007.
- [20] Chen S, Tao F H, Jia C Z. Study on microstructure and properties of 18Ni300 steel fabricated by selective laser melting [J]. *Foundry Technology*, 2019, 40(7): 657-661.
- 陈帅, 陶凤和, 贾长治. 选区激光熔化成型 18Ni300 钢显微组织与性能研究[J]. *铸造技术*, 2019, 40(7): 657-661.
- [21] Pang H. Study on laser melting process and properties of Mo and Mo-5Co alloys [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019: 53-54.
- 庞红. Mo、Mo-5Co 合金选区激光熔化成形工艺及性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019: 53-54.
- [22] Chen X J, Zhao G R, Dong D D, et al. Microstructure and mechanical properties of Inconel625 superalloy fabricated by selective laser melting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1202002.
- 陈秀娟, 赵国瑞, 董东东, 等. 选区激光熔化制造 Inconel625 高温合金的组织 and 力学性能[J]. *中国激光*, 2019, 46(12): 1202002.
- [23] Rao X W, Gu D D, Xi L X. Forming mechanism and mechanical properties of carbon nanotube reinforced aluminum matrix composites by selective laser melting [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(15): 1-9.

饶项炜, 顾冬冬, 席丽霞. 选区激光熔化成形碳纳米管增强铝基复合材料成形机制及力学性能研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(15): 1-9.

[24] Zhang G Q, Yang Y Q, Lin H, et al. Study on tribology performance of CoCrMo alloy parts

manufactured by selective laser melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(8): 0802013.

张国庆, 杨永强, 林辉, 等. 激光选区熔化成型 CoCrMo 合金摩擦学性能研究[J]. 中国激光, 2016, 43(8): 0802013.