

# 选择性激光熔化镍基高温合金的工艺优化

刘泽程<sup>1,2,3)</sup>, 王国伟<sup>1,2,3)</sup>, 肖祥友<sup>1,2,3)</sup>, 刘 锋<sup>1,2,3)</sup>✉

1) 中南大学粉末冶金研究院, 长沙 410083    2) 中南大学粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083

3) 中南大学高温结构材料研究所, 长沙 410083

✉通信作者, E-mail: liufeng@csu.edu.cn

**摘 要** 采用实验设计田口法及响应面法, 对镍基高温合金选择性激光熔化过程中的三个工艺参数(激光功率、扫描速度和扫描间距)进行优化, 以成形样品的相对密度作为评价标准, 研究工艺参数对最终试样相对密度的影响。基于方差分析、信噪比、主效应图、响应曲线图等, 分析各因素及其之间的相互作用对样品相对密度的影响。研究结果表明, 不同工艺参数对试样相对密度的影响效果差别很大, 其中扫描间距的影响效果最大, 其次是激光功率和扫描速度, 此外扫描速度与扫描间距的交互作用对于试样相对密度的影响也比较显著。两种不同优化方法获得的最佳工艺参数组合相同, 均为激光功率 280 W、扫描速度 1000 mm·s<sup>-1</sup> 以及扫描间距 0.12 mm。

**关键词** 选择性激光熔化; 镍基高温合金; 工艺优化; 田口法; 响应面法

**分类号** TG132.3+2

## Process optimization of selective laser melting nickel-based superalloy

LIU Ze-cheng<sup>1,2,3)</sup>, WANG Guo-wei<sup>1,2,3)</sup>, XIAO Xiang-you<sup>1,2,3)</sup>, LIU Feng<sup>1,2,3)</sup>✉

1) Powder Metallurgy Research Institute, Central South University, Changsha 410083, China

2) State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China

3) Institute of High Temperature Structural Materials, Central South University, Changsha 410083, China

✉Corresponding author, E-mail: liufeng@csu.edu.cn

**ABSTRACT** The experimental design Taguchi method and response surface methodology were used to optimize the process parameters of the selective laser melting for Ni-based superalloy (laser power, scanning speed and scanning spacing). The effect of the process parameters on the relative density of the final samples was determined by using the relative density as the evaluation standard. Based on the analysis of variance, signal-to-noise ratio, main effect diagram, and response curve, the effects of the process parameters and the parameter interactions on the relative density of samples were evaluated. In the results, the effects of the process parameters on the relative density of the final samples vary greatly, the scanning spacing shows the largest effect, followed by laser power and scanning speed. In addition, the interaction between scanning speed and scanning spacing is also significant for the effect on the sample relative density. The best process parameters obtained by two different optimization methods are the same as the laser power is 280 W, the scanning speed is 1000 mm·s<sup>-1</sup>, and the scanning spacing is 0.12 mm.

**KEY WORDS** selective laser melting; nickel based-superalloy; process optimization; Taguchi method; response surface methodology

收稿日期: 2020-02-15

DOI: 10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2020020004; <http://pmt.ustb.edu.cn>

近 20 年, 增材制造技术在制造高价值且形状复杂的零件方面得到了广泛地应用, 选择性激光熔化 (selective laser melting, SLM) 技术作为其中之一, 在金属零件制造方面有着巨大的优势。Kempen 等<sup>[1-2]</sup> 和 Zhang 等<sup>[3]</sup> 采用选择性激光熔化技术制造出近乎完全致密的部件, 部件的力学性能相当于甚至超过传统铸造或锻造产品的性能。随着激光技术的发展, 选择性激光熔化设备能够加工各种材料, 如 Fe、Ni、Ti、Cu 等<sup>[4]</sup>。选择性激光熔化技术突破了铣削、车削、铣削和磨削等传统方法的局限性, 在航空航天、医疗、汽车制造等领域得到了广泛的应用<sup>[4-5]</sup>。

镍基高温合金在高温环境下具有良好的高温强度、热稳定性以及抗辐照性能, 适合长时间在高温环境下工作, 被广泛应用于航空航天领域<sup>[6]</sup>。镍基高温合金通常采用传统工艺加工成形, 随着现代工业不断发展, 传统工艺在制造结构复杂的零件上存在着生产效率低、成本高、交付周期长等缺点, 不能很好地满足工业发展的需求<sup>[7]</sup>。因此, 迫切需要将选择性激光熔化技术应用于镍基高温合金的生产中。

对选择性激光熔化工艺参数进行优化是控制材料特性和加工件质量的重要步骤, 其中涉及到许多可以改变的参数, 例如激光功率、扫描间距、扫描速度、粉层厚度、扫描策略等, 它们都对最终的样品质量造成影响。Jia 和 Gu<sup>[8]</sup> 通过调节激光功率和扫描速度来改变激光能量密度, 提高了材料的高温抗氧化性和抗磨损性能。Wang 等<sup>[9]</sup> 研究扫描策略对金属的表面质量、残余应力和变形的影响, 最终得到具有较高致密性的零件, 并对零件的残余应力分布以及变形程度的控制具有一定的改善作用。

实验设计 (design of experiments, DOE) 的方法在提升产品品质、优化工艺流程中起着重要作用<sup>[10]</sup>。Sun 等<sup>[11]</sup> 选用田口法研究了制备 Ti6Al4V 的最佳工艺, 确定了可获得最大相对密度样品的选择性激光熔化技术的激光功率、扫描速度、扫描间距以及扫描策略等参数。Read 等<sup>[12]</sup> 通过响应面法优化了 AlSi10Mg 的选择性激光熔化工艺参数, 发现通过选择性激光熔化技术制备的合金比同成分的铸造合金在强度、延伸率及持久寿命等方面更优异。虽然田口法可以找出影响产品性能的主要变量, 但是不能描述变量与响应之间的非线性关系, 而响应面法正好可以弥补田口法的不足, 能对孤立的试验点进行分析, 实现过程的连续优化<sup>[13-15]</sup>。

综上所述, 本文研究了选择性激光熔化工艺参数对镍基高温合金组织的影响。基于田口法和响应面法, 通过实验设计对激光功率、扫描速度以及扫描间距三个工艺参数进行优化, 提升最终成形样品的相对密度, 使得选择性激光熔化试样的相对密度达到最大。

## 1 实验材料及方法

### 1.1 实验材料与设备

表 1 给出了实验所用镍基粉末高温合金的具体成分, 镍基粉末采用真空感应熔炼以及氩气雾化制粉获得, 制粉设备为中南大学粉末气雾化设备 HERMIGA 100/2。采用 Mastersizer 3000 激光衍射粒度分析仪对粉末粒度进行测量, 粉末平均粒度为 50.3  $\mu\text{m}$ 。

表 1 镍基粉末高温合金化学成分 (质量分数)

Al	Cr	Fe	Ti	Y	Cu	Si	C	Ni
0.25	21.00	0.85	0.57	0.68	0.009	0.002	0.059	余量

实验样品由华曙科技生产的型号为 FS271M 选择性激光熔融设备所制备, 选择性激光熔化原理如图 1 所示。所有样品都是在氧质量分数低于 0.4% 的氮气气氛中制备的, 铺粉层厚为 30  $\mu\text{m}$ , 扫描策略是激光以两层的扫描方向、保持 67°角旋转的方式逐层打印, 如图 2 所示。

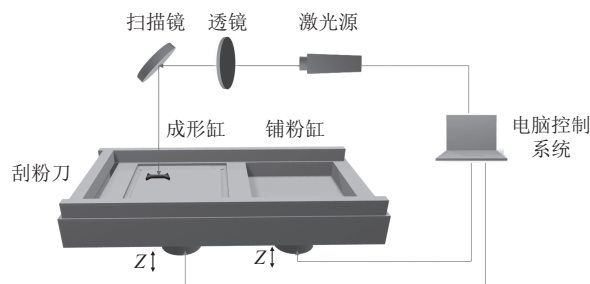


图 1 选择性激光熔化原理图

Fig.1 Schematic diagram of the selective laser melting

### 1.2 基于田口法与响应面法的实验设计

#### 1.2.1 田口法

田口法 (Taguchi method, TM) 使用信噪比 ( $S/N$ ) 来检测产品的质量特征, 它基于正交实验, 可以综合考虑多因素的一种稳健设计方法, 通过田口法对实验数据的计算, 可以得到性能最为稳定且可靠的实验方案, 能够从根本上减少系统性能和质

量的波动, 提高产品质量的稳定性<sup>[15-16]</sup>。田口法在实验设计中的具体应用步骤: 首先, 根据实验分析选择合适的质量特性与工艺参数; 其次, 选择合适的正交矩阵表, 并将第一步中的工艺参数分配给正交数组, 进行实验并记录结果, 并进行信噪比计算; 最后, 根据结果确定最优工艺参数。

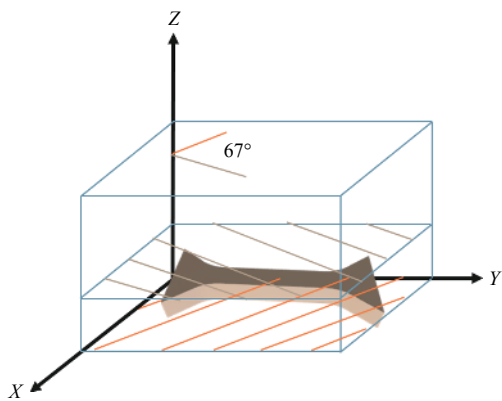


图 2 扫描策略在选择性激光熔化实验中的应用

Fig.2 Application of the scanning strategy in the selective laser melting experiment

如果质量特征是连续的, 信噪比特性可以分为三类: (1) 期望结果越大越好的望大特性; (2) 结果越小越好的望小特性; (3) 结果越接近目标越好的望目特性<sup>[17]</sup>。在本研究中, 选择相对密度作为评价标准, 期望得到的结果越大越好, 用到田口法的望大特性模型, 如式 (1) 所示。

$$\eta_i = \frac{S}{N} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (1)$$

式中:  $\eta_i$  为检验指标, 即信噪比;  $n$  为试验次数;  $y_i$  为第  $i$  个性能特征的观测数据。

1.2.2 响应面法

响应面法 (response surface methodology, RSM) 是由 Box 等提出的用于实验设计的方法, 可以使用 Design-Expert 软件进行实验设计及优化。在响应面实验设计中, 较为常用的设计方法有 Full Factorial Design (FFD)、Box-Behnken Design (BBD) 以及 Central Composite Design (CCD)<sup>[18-19]</sup>。本研究中采用 BBD 设计方法, 适用于 2~5 个因素的优化, 安排以 0 为中心, +1、-1 放置立方点的最大值与最小值<sup>[18]</sup>。采用最小二乘多元回归方法研究自变量和因变量之间的关系, 实验设计结果用二次多项式方程拟合, 将响应与自变量关联起来<sup>[20]</sup>, 如式 (2) 所示。

$$\gamma = \beta_{k0} + \sum_{i=1}^k \beta_{ki} x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{kii} x_i^2 + \sum_{i < j=2}^k \beta_{kij} x_i x_j \quad (2)$$

式中:  $\gamma$  表示预测响应;  $\beta_{k0}$  表示模型截距;  $\beta_{ki}$ 、 $\beta_{kii}$  及  $\beta_{kij}$  分别表示回归一次、二次和交互系数;  $x_i$ 、 $x_j$  表示编码的独立因子;  $k$  代表因子数。

1.3 相对密度

所有试样都按照表 2 及表 3 中的参数进行构建。制备得到的样品采用阿基米德排水法测量密度, 首先在空气中测量样品的质量 ( $m_{i0}$ ), 接着在塑料烧杯中装入纯净水, 测量杯与水的质量 ( $m_{i1}$ ), 最后将样品悬挂置于杯中, 此时水、杯与样品三者的组合质量为 ( $m_{i2}$ ); 每一项质量均进行两次测量, 取它们的平均值 ( $M_{i0}$ 、 $M_{i1}$ 、 $M_{i2}$ ), 根据式 (3) 计算样品密度 ( $\rho_i$ ), 其中  $i$  代表样品序号。根据相关文献<sup>[21]</sup>, 实验用镍基高温合金粉末的成分与 MA754 相似, 因此其理论密度值 ( $\rho$ ) 应在  $8.55 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  左右。

$$\rho_i = \rho_{\text{水}} M_{i0} / [(M_{i2} - M_{i1}) \rho] \quad (3)$$

表 2 田口法分析的输入参数及其水平

Table 2 Input parameters and the levels of Taguchi method

水平	激光功率 / W	扫描速度 / (mm·s <sup>-1</sup> )	扫描间距 / mm
水平1	240	600	0.09
水平2	280	800	0.12
水平3	320	1000	0.15
水平4	360	—	—
水平5	400	—	—

表 3 响应面中 Box-Behnken 分析的输入参数及其水平

Table 3 Input parameters and the levels of Box-Behnken analysis in response surface

水平	因素		
	激光功率 / W	扫描速度 / (mm·s <sup>-1</sup> )	扫描间距 / mm
-1	280	600	0.09
0	320	800	0.12
1	360	1000	0.15

2 结果与讨论

2.1 田口法的分析

2.1.1 方差分析结果

根据表 4 中的信噪比, 利用 ANOVA 研究了各工艺参数对相对密度的影响, 信噪比的 ANOVA 结果如表 5 所示。可以明显看出, 扫描间距是影响试样相对密度的最主要的因素。

表4 田口法实验记录的相对密度及其信噪比

Table 4 Relative density and signal-to-noise ratio recorded by Taguchi method

序号	因素			响应	
	激光功率 / W	扫描速度 / (mm·s <sup>-1</sup> )	扫描间距 / mm	相对密度 / %	信噪比 / dB
1	320	800	0.09	95.97	39.64
2	400	600	0.12	95.42	39.59
3	400	800	0.15	94.74	39.53
4	400	1000	0.09	95.76	39.62
5	360	1000	0.09	96.61	39.70
6	360	800	0.15	94.96	39.55
7	320	600	0.15	94.29	39.49
8	280	600	0.09	96.19	39.66
9	280	1000	0.12	96.85	39.72
10	400	600	0.09	95.38	39.59
11	240	1000	0.15	93.70	39.43
12	240	600	0.09	95.83	39.63
13	320	800	0.09	95.97	39.64
14	280	600	0.15	96.29	39.67
15	360	800	0.09	95.35	39.59
16	240	800	0.12	95.96	39.64
17	400	800	0.12	95.36	39.59
18	240	600	0.09	95.83	39.63
19	240	800	0.12	95.96	39.64
20	360	600	0.12	95.40	39.59
21	280	800	0.12	95.49	39.60
22	320	600	0.12	96.44	39.69
23	280	800	0.09	95.40	39.59
24	360	600	0.12	95.40	39.59
25	320	1000	0.12	96.54	39.69

表5 相对密度的方差分析

Table 5 Variance analysis of the relative density

来源	激光功率 / W	扫描速度 / (mm·s <sup>-1</sup> )	扫描间距 / mm	残差误差	合计
自由度	4	2	2	12	20
平方和	0.017280	0.006672	0.033382	0.043051	0.100385
平方均值	0.003780	0.002618	0.016691	0.003588	—
F值	1.05	0.73	4.65	—	—
P值	0.421	0.502	0.032	—	—
贡献 / %	17.21	6.65	33.25	42.89	—

## 2.1.2 信噪比结果

为了比较不同因素对选择性激光熔化样品相对

密度的影响, 需要计算每个因素的每一水平相应的平均信噪比, 如表6所示。为了直观观察整体波动变化情况, 根据表6绘制出影响因素的水平信噪比响应图, 如图3所示。由表6及图3可知, 各影响因素对选择性激光熔化工艺影响作用的大小顺序为: 扫描间距>激光功率>扫描速度, 最优工艺参数组合为激光功率 280 W、扫描速度 1000 mm·s<sup>-1</sup> 及扫描间距 0.12 mm。

表6 各因素的平均信噪比及极差范围

Table 6 Average signal-to-noise ratio and the range of each factor

水平	因素		
	激光功率	扫描速度	扫描间距
水平1	39.57	39.61	39.63
水平2	39.65	39.59	39.64
水平3	39.63	39.64	39.54
水平4	39.61	—	—
水平5	39.58	—	—
极差范围	0.08	0.04	0.10
排序	2	3	1

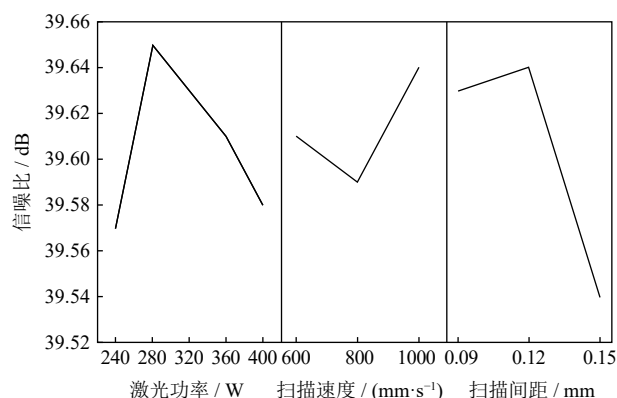


图3 各因素的相对密度信噪比对比图

Fig.3 Signal-to-noise ratio of relative density for various factors

## 2.2 响应面法的分析

基于 Box-Behnken 设计的响应面法工艺参数及其相对密度如表7所示。通过 Design-Expert 软件的 Analysis 项, 分别采用一阶线性模型、2FI 模型以及二阶模型检验实验结果显著性, 各模型的统计数据如表8所示。相关系数 ( $R^2$ ) 越大, 相关性越好, 所以选择二阶模型是最为合适的, 因此后续分析采用二阶模型进行。



表 7 基于 Box-Behnken 设计的响应面法工艺参数及其相对密度

Table 7 Process parameters and the relative density of RSM based on Box-Behnken design

序号	因素			相对密度 / %
	激光功率 / W	扫描速度 / (mm·s <sup>-1</sup> )	扫描间距 / mm	
1	360	800	0.15	94.96
2	280	600	0.12	96.13
3	320	800	0.12	95.82
4	360	600	0.12	95.40
5	320	800	0.12	95.82
6	280	800	0.09	95.40
7	320	800	0.12	95.82
8	320	800	0.12	95.82
9	320	600	0.15	94.29
10	280	1000	0.12	96.85
11	320	1000	0.09	96.06
12	360	800	0.09	95.35
13	320	1000	0.15	96.37
14	320	800	0.12	95.82
15	360	1000	0.12	96.41
16	280	800	0.15	95.89
17	320	600	0.09	95.43

以激光功率 ( $A$ )、扫描速度 ( $B$ ) 以及扫描间距 ( $C$ ) 为自变量, 相对密度 ( $R$ ) 为响应值, 对二阶模型中的一次项、交互项以及平方项等参数进行研究, 最终得到的响应面二次模型的方差分析, 结果如表 9 所示, 用于预测相对密度的回归方程如式 (4) 所示。

$$R = 95.82 - 0.27 \times A + 0.56 \times B - 0.091 \times C + 0.072 \times A \times B - 0.22 \times A \times C + 0.36 \times B \times C + 0.12A^2 + 0.26 \times B^2 - 0.54 \times C^2$$

(4)

图 4 为相对密度的残差正态概率分布图, 图 5 为相对密度的残差实际值与预测值分布图。图 4 显示出相对密度的残差分布点大多数处于一条直线上, 图 5 中相对密度的残差实际值与预测值呈现无规律的分布, 证明本次拟合出的二阶回归模型在相对密度上具备较好的适应性。

2.3 基于田口法和响应面法的结果优化和验证

2.3.1 结果优化

由上述田口法已知, 最优参数组合为激光功率 280 W、扫描速度 1000 mm·s<sup>-1</sup> 以及扫描间距 0.12 mm, 利用最佳水平工艺参数估计的信噪比 ( $\hat{\eta}$ ) 可用式 (5) 进行计算<sup>[19]</sup>。

$$\hat{\eta} = \eta_m + \sum_{i=1}^q (\bar{\eta}_i - \eta_m)$$

(5)

表 8 各模型的统计信息

Table 8 Statistics for each model

类型	均方差	相关系数, $R^2$	调整决定系数	预测决定系数	预测误差平方和	选择建议
一阶线性模型	0.44	0.5558	0.4533	0.0755	5.860	—
2FI	0.42	0.6879	0.5006	-0.5815	8.410	—
二阶模型	0.23	0.9582	0.9004	0.3311	15.588	建议

式中:  $\eta_m$  是信噪比的总平均值,  $\bar{\eta}_i$  是最佳水平下的平均信噪比,  $q$  是显著性影响特性的工艺参数数量。根据表 4 中数据计算得到 A2B3C2 (激光功率 280 W, 扫描速度 1000 mm·s<sup>-1</sup>, 扫描间距 0.12 mm) 的预测相对密度的信噪比 39.7 dB, 转化为相对密度值为 96.61%。

为了获得最大相对密度的最优参数, 选用了基于响应面模型的优化方法。图 5 显示了通过提取响应面最高点的优化结果。由图可知, 最佳参数组合为激光功率 280 W、扫描速度 1000 mm·s<sup>-1</sup>、扫描间距 0.134 mm。但根据表 9 可知, 扫描间距对于试样相对密度的影响不显著, 在扫描间距所做的参数实验中, 0.12 mm 优于 0.15 mm, 所以田口法优化出的工艺参数在响应面法中也是比较优质的参数

组合。由式 (4) 得到在响应面法中 A2B3C2 参数下预测得到的相对密度值为 96.95%。

2.3.2 验证实验

表 10 所示为田口法及响应面法下最优工艺参数的预测值与实验验证值。由图可知, 两种优化方式与验证实验间的误差值都远小于 5%, 从统计学角度看, 优化预测与实际实验结果间具有比较强的相关性, 田口法与响应面法对于工艺参数的优化都是成功的, 且响应面法对于工艺参数的优化表现比田口法好。

2.3.3 预测值与验证值的比较

为了判断预测值与验证值的接近程度, 用  $C_i$

表 9 响应面二次模型的方差分析

类型	平方和	自由度	均方差	F值	P值	Prob > F
模型	5.340	9	0.590	17.86	0.0005	显著
A	0.580	1	0.580	17.38	0.0042	—
B	2.460	1	2.450	74.14	<0.0001	—
C	0.067	1	0.065	2.00	0.1998	—
AB	0.021	1	0.020	0.63	0.4525	—
AC	0.190	1	0.190	5.82	0.0465	—
BC	0.530	1	0.530	15.81	0.0053	—
A <sup>2</sup>	0.061	1	0.060	1.82	0.2189	—
B <sup>2</sup>	0.280	1	0.280	8.40	0.0230	—
C <sup>2</sup>	1.230	1	1.240	36.94	0.0005	—
残差	0.230	7	0.033	—	—	—
失拟项	0.230	3	0.078	—	—	—
纯误差	0	4	0	—	—	—
总离差	5.560	16	—	—	—	—
标准差	0.180	—	相关系数 R <sup>2</sup>	0.9583	—	—
平均值	95.740	—	调整决定系数	0.9046	—	—
变化系数 / %	0.190	—	预测决定系数	0.3325	—	—
预测误差平方和	3.720	—	精确度	17.307	—	—

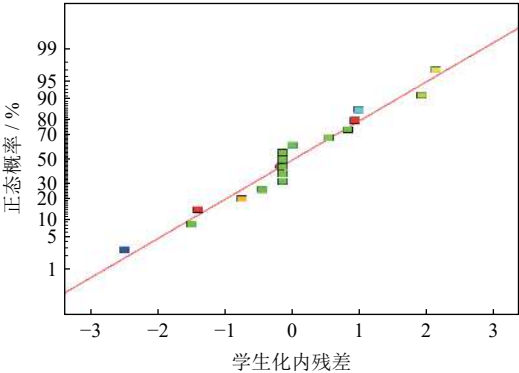


图 4 相对密度的残差正态概率分布图

Fig.4 Residual normal probability distribution of the relative density

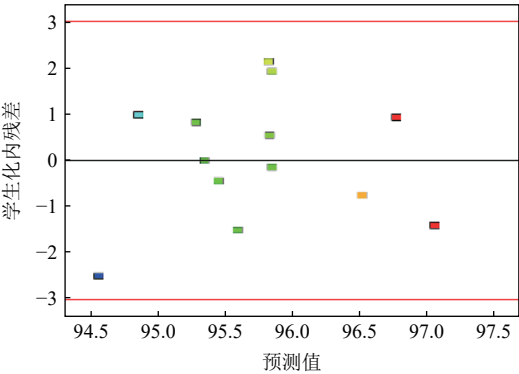


图 5 相对密度的残差与预测值分布图

Fig.5 Residual and predicted distribution of the relative density

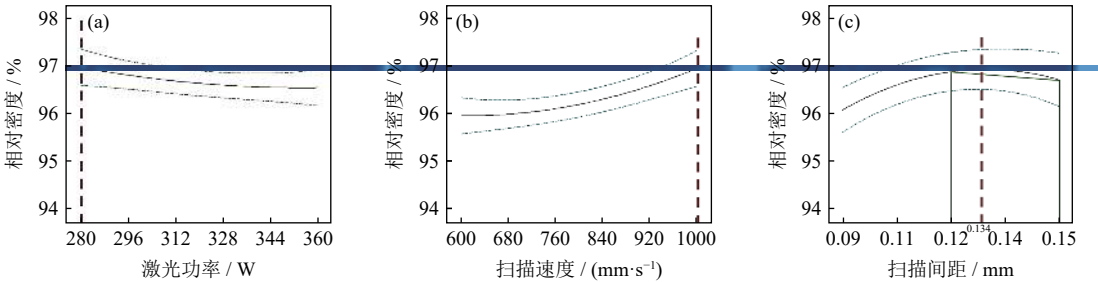


图 6 与相对密度对应的响应优化曲线图: (a) 激光功率; (b) 扫描速度; (c) 扫描间距

Fig.6 Response optimization curve corresponding to the relative density: (a) laser power; (b) scanning speed; (c) scanning spacing

表 10 田口法和响应面法的预测值与实验验证值

Table 10 Predicted and confirmatory values in experiment of TM and RSM

方法	因素			相对密度 / %		误差 / %
	激光功率 / W	扫描速度 / (mm·s <sup>-1</sup> )	扫描间距 / mm	预测值	验证值	
田口法	280	1000	0.12	96.61	96.87	0.27
响应面法	280	1000	0.12	96.95	96.87	0.07

检验田口法预测值的质量特征。如果预测值和验证值之间的差值在置信区间内,则可以认为最佳组

合是有效的。预测值的  $C_1$  使用式 (6) 和式 (7) 计算<sup>[22]</sup>。

$$C_I = \sqrt{\frac{F_{\alpha}(1, f_e) V_e}{n_{\text{eff}}}} \quad (6)$$

$$n_{\text{eff}} = \frac{N}{1 + \sum DOF_p} \quad (7)$$

式中:  $V_e=0.0034$  为误差方差;  $f_e$  为误差自由度和无关紧要的工艺参数, 其值为 18;  $F_{\alpha}(1, f_e)$  为在置信度  $\alpha$  下, 自由度为  $(1, f_e)$  的  $F$  分布, 其中  $\alpha=0.05$ , 则  $F_{\alpha}(1, f_e)=4.414$ ;  $N$  为总结果数, 本文中为 25;  $n_{\text{eff}}$  为有效样本的大小;  $\sum DOF_p$  为主要影响工艺参数的自由度之和, 其值为 2。由上算得  $C_I=\pm 0.0424$ 。

$R_p$  是田口法的预测值。因此, 预测的最佳  $C_I$  范围是  $R_p - C_I < R_p < R_p + C_I$ 。

为验证参数优化组合的准确性, 进行了验证试验, 结果如表 11 所示。从表可以看出, 实际测量值和预测值之间的差异在置信区间内。为了验证回归模型的正确性, 在最优参数组合下进行了验证性实验, 表 10 将验证性实验的观测值与回归模型的预测值进行了比较。从表可以看出, 实验检测结果与预测值之间吻合较好, 最优参数组合下的最大误差  $< 0.1\%$ 。因此, 所提出的数学模型可以成功地预测试样的相对密度。

表 11 田口法预测值和验证性实验值

Table 11 Predicted and confirmatory values in experiment by TM

方法	因素			相对密度 / %			
	激光功率 / W	扫描速度 / (mm·s <sup>-1</sup> )	扫描间距 / mm	测量值	预测值	$C_I$ 值及其范围	差值百分数 / %
田口法	280	1000	0.12	96.87	96.61	$\pm 4.24[92.37, 100.85]$	0.26
	240	1000	0.15	93.98	94.95	$\pm 4.24[90.71, 99.19]$	0.97

### 3 结论

(1) 根据方差分析、信噪比以及主效应图, 研究得到扫描间距对试样相对密度的影响最大, 其次是激光功率和扫描速度。

(2) 为得到高相对密度的试样, 利用田口法与响应面法确定选择性激光熔化技术的最佳工艺参数: 激光功率 280 W、扫描速度 1000 mm·s<sup>-1</sup>、扫描间距 0.12 mm。

(3) 通过响应面法拟合得到的二阶方程, 在 95% 置信水平上具有统计学意义, 残差的正态概率分布图表明, 基本上所有的残差都呈现出正态分布。在响应面二次模型的方差分析中可以看到, 扫描速度与扫描间距的交互作用对于试样相对密度的影响最为显著。

(4) 通过研究分析发现, 在预先设定的区间内, 试样相对密度随着激光功率的增大呈现先增大后减小的趋势, 随扫描速度先减少后增大, 随扫描间距先增大后减小。

### 参 考 文 献

- [1] Kempen K, Thijs L, Van Humbeeck J, et al. Mechanical properties of AlSi10Mg produced by selective laser melting. *Physics Procedia*, 2012, 39: 439
- [2] Kempen K, Yasa E, Thijs L, et al. Microstructure and mechanical properties of selective laser melted 18Ni-300 steel. *Physics Procedia*, 2011, 12: 255

- [3] Zhang D, Wang W, Guo Y, et al. Numerical simulation in the absorption behavior of Ti6Al4V powder materials to laser energy during SLM. *J Mater Process Technol*, 2019, 268: 25
- [4] Wang M, Song B, Wei Q, et al. Effects of annealing on the microstructure and mechanical properties of selective laser melted AlSi7Mg alloy. *Mater Sci Eng A*, 2019, 739: 463
- [5] Mo Y, Wang D Z, Du L, et al. Development overview of nickel base superalloy powder for additive manufacturing // 2018 China (International) High Level Forum on Functional Materials Technology and Industry Proceedings. Tianjin, 2018: 10  
(莫燕, 王东哲, 杜琳, 等. 增材制造用镍基超合金粉末发展概述//2018中国(国际)功能材料科技与产业高层论坛论文集. 天津, 2018: 10)
- [6] Tang Z J, Guo T M, Fu Y, et al. Research present situation and the development prospect of nickel-based superalloy. *Met World*, 2014(1): 36  
(唐中杰, 郭铁明, 付迎, 等. 镍基高温合金的研究现状与发展前景. 金属世界, 2014(1): 36)
- [7] Mishra A K, Kumar A. Numerical and experimental analysis of the effect of volumetric energy absorption in powder layer on thermal-fluidic transport in selective laser melting of Ti6Al4V. *Opt Laser Technol*, 2019, 111: 227
- [8] Jia Q, Gu D. Selective laser melting additive manufacturing of Inconel 718 superalloy parts: Densification, microstructure and properties. *J Alloys Compd*, 2014, 585: 713

- [9] Wang D, Wu S, Yang Y, et al. The Effect of a scanning strategy on the residual stress of 316L steel parts fabricated by selective laser melting (SLM). *Materials*, 2018, 11(10): 1821
- [10] Bao X F, Xie Y X, Wang H H. Improvement on the pickling process of capacitor-grade niobium powder by DOE experimental design method. *Powder Metall Technol*, 2017, 35(5): 371  
(包玺芳, 解永旭, 王晖晖. 采用DOE实验设计方法改进电容器级铌粉酸洗工艺. 粉末冶金技术, 2017, 35(5): 371)
- [11] Sun J, Yang Y, Wang D. Parametric optimization of selective laser melting for forming Ti6Al4V samples by Taguchi method. *Opt Laser Technol*, 2013, 49: 118
- [12] Read N, Wang W, Essa K, et al. Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimisation and mechanical properties development. *Mater Des*, 2015, 65: 417
- [13] Aghdeab H S, Mohammed L A, Ubaid A M. Optimization of CNC turning for aluminum alloy using simulated annealing method. *Jordan J Mech Ind Eng*, 2015, 9(1): 39
- [14] Zhang Z Z, Han C L, Li C W. Application of response surface method in experimental design and optimization. *Henan Inst Educ Nat Sci*, 2011, 20(4): 34  
(张泽志, 韩春亮, 李成未. 响应面法在试验设计与优化中的应用. 河南教育学院学报(自然科学版), 2011, 20(4): 34)
- [15] Zeng F Z, Zhao X. Taguchi method and its standardized design. *Mach Ind Stand Qual*, 2003(11): 7  
(曾凤章, 赵霞. 田口方法及其标准化设计. 机械工业标准化与质量, 2003(11): 7)
- [16] Dongxia Y, Xiaoyan L, Dingyong H, et al. Optimization of weld bead geometry in laser welding with filler wire process using Taguchi's approach. *Opt Laser Technol*, 2012, 44(7): 2020
- [17] Ghani J A, Choudhury I A, Hassan H H. Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters. *J Mater Process Technol*, 2004, 145(1): 84
- [18] Li L, Zhang S, He Q, et al. Application of response surface methodology in experiment design and optimization. *Res Explor Lab*, 2015, 34(8): 41  
(李莉, 张赛, 何强, 等. 响应面法在试验设计与优化中的应用. 实验室研究与探索, 2015, 34(8): 41)
- [19] Yolmeh M, Jafari S M. Applications of response surface methodology in the food industry processes. *Food Bioprocess Technol*, 2017, 10(3): 413
- [20] Ghorbannezhad P, Bay A, Yolmeh M, et al. Optimization of coagulation-flocculation process for medium density fiberboard (MDF) wastewater through response surface methodology. *Desalin Water Treat*, 2016, 57(56): 26916
- [21] Stephens J J, Nix W D. The effect of grain morphology on longitudinal creep properties of INCONEL MA 754 at elevated temperatures. *Metall Mater Trans A*, 1985, 16(7): 1307
- [22] Meng Z J, Wang Y, Niu L J, et al. Optimization of permanent mold casting processes for shrinkage porosity reduction in Cu-45Ag alloy by simulation and Taguchi method. *Spec Cast Nonferrous Alloys*, 2018, 38(10): 1064  
(孟志军, 王晔, 牛连杰, 等. 基于田口方法的Cu-45Ag合金金属型铸造过程仿真及工艺优化. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(10): 1064)