

# 基于集成 RSM 和 NSGA-II 的 SLM 成形 GH3625 高温合金尺寸精度优化研究

曾 权<sup>1</sup>, 王克鲁<sup>1</sup>, 鲁世强<sup>1</sup>, 鲁翠媛<sup>2</sup>, 李 鑫<sup>1</sup>, 周 潼<sup>1</sup>, 汪增强<sup>1</sup>

(1. 南昌航空大学 航空制造工程学院, 江西 南昌 330063)

(2. 南昌大学 先进制造学院, 江西 南昌 330031)

**摘 要:** 为了提高选区激光熔化 (SLM) 成形零件的尺寸精度, 本研究提出了一种集成响应面法 (RSM) 和非支配排序遗传算法-II (NSGA-II) 的方法来优化 SLM 成形 GH3625 高温合金的尺寸精度。首先采用响应面法建立了 SLM 工艺参数与 X、Y 和 Z 方向的尺寸误差模型, 然后通过 NSGA-II 对模型进行多目标优化。结果表明: 响应面法构建的模型具有较高的预测精度, 其相关系数  $R^2$  依次为 0.9456、0.9842、0.9704; 优化算法在迭代 1500 次时, 能够获得最优的加工参数区间: 激光功率 250.8~310 W、扫描速度 1028~1400 mm/s、扫描间距 0.071~0.084 mm; 最终, 试验验证结果表明该集成方法具有较高的可靠性, 其 X、Y、Z 方向尺寸误差的 ARE 依次为 5.95%、4.92%、3.97%。

**关键词:** 选区激光熔化; GH3625 高温合金; 尺寸精度; 响应面法; 非支配排序遗传算法-II

**中图分类号:** TG132.3<sup>+</sup>3; TG146.1<sup>+</sup>5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2024)09-2624-09

选区激光熔化 (selective laser melting, SLM) 是目前最具吸引力和最有前景的金属增材制造技术之一, 被广泛应用于航空航天、生物和医学等领域<sup>[1-3]</sup>。尽管 SLM 具有诸多优势, 但是在加工过程中存在的复杂热物理行为, 使其成形零件的尺寸精度依然无法满足工业应用的需求<sup>[4]</sup>。

在近些年来, 不少学者对 SLM 成型件的尺寸精度进行了探讨。Zhang<sup>[4]</sup>等研究了 SLM 工艺参数对成形零件尺寸精度的影响, 结果表明, 激光功率、扫描速度和扫描间距对 X 和 Y 方向上的尺寸精度影响最为显著。许明三<sup>[5]</sup>等通过有限元研究了 SLM 工艺参数对薄壁零件尺寸精度的影响。戴世民<sup>[6]</sup>等研究发现, 扫描间距对 SLM 成形件尺寸误差的影响较小, 而扫描速度对其的影响与之相反。上述研究表明, 工艺参数对零件尺寸精度的影响较大。因此可以考虑从优化工艺参数的角度, 改善 SLM 成形件的尺寸精度。

传统试错法都是基于大量试验后获得最佳的工艺参数, 但是这会消耗大量的时间和成本。响应面法 (RSM) 作为一种简单、高效、低成本的优化方法, 被广泛用于解决增材制造工艺参数的优化问题。例如, Shi<sup>[7]</sup>等基于 RSM 建立了 SLM 工艺参数和钛镍合金马氏体转变温度的二次模型, 结果表明, 预测结果与实

验结果的平均相对误差分别在 7.42% 和 3.83% 以内。邓朝阳<sup>[8]</sup>等采用 RSM 研究了 SLM 成形铝合金的显微硬度和相对密度, 优化后得到了相对密度高达 99.11% 的铝合金试样。刘泽程<sup>[9]</sup>等通过响应面法构建了工艺参数与样品相对密度的模型, 基于 17 组实验数据, 最后在激光功率为 280 W、扫描速度为 1000 mm/s 和扫描间距为 0.12 mm 时获得最高的相对密度。贾志宏<sup>[10]</sup>等通过中心复合设计的响应面法对 SLM 成形铝合金的格栅孔成形精度进行了优化, 实验结果表明, 与预测模型相比尺寸误差仅为 5.86%。

尽管响应面法能够很容易拟合出高精度的模型, 但是在求解多目标优化问题时往往容易趋于局部最优解。为了解决这个问题, 有些研究人员将响应面法与智能多目标优化算法相结合, 通过智能优化算法较强的全局优化能力解决多目标优化问题, 并且最终取得了不错的优化效果。例如, Tian<sup>[11]</sup>等将响应面法与多目标粒子群 (MOPSO) 算法相结合对道路聚合物进行了多目标优化, 结果表明预测结果和实验结果仅相差 5% 左右。Li<sup>[12]</sup>等通过响应面法和非支配排序遗传算法-II (NSGA-II) 对翘曲、体积收缩和残余应力进行了多目标优化, 优化结果表明该组合方法能够有效解决纤维增强复合材料注塑成型质量的多目标优化问题。

收稿日期: 2023-09-15

基金项目: 江西省自然科学基金 (20232BAB214001); 江西省研究生创新专项资金 (YC2022-s720)

作者简介: 曾 权, 男, 1998 年生, 硕士生, 南昌航空大学航空制造工程学院, 江西 南昌 330063, E-mail: 1163725392@qq.com

Chen<sup>[13]</sup>等通过响应面和 NSGA-II 对质子交换膜燃料电池的性能进行了优化, 优化结果表明, 其功率密度、系统效率和放能效率依次提高了 13.18%、7.06% 和 20.29%, 证明了该方法能够有效优化该燃料电池的性能。但是目前鲜有关于结合响应面法与多目标优化算法应用于增材制造工艺参数优化的研究报道, 特别是对 SLM 成形零件尺寸精度的研究。

综上所述, 本研究以 SLM 成形 GH3625 高温合金为例, 通过集成 RSM 和 NSGA-II 对其尺寸精度进行多目标优化。以激光功率, 扫描速度和扫描间距为输入变量, 以 X、Y 和 Z 方向的尺寸误差为输出变量构建响应面模型。通过方差分析筛选了非显著项, 结合三维曲面图分析了其尺寸精度随工艺参数的演变规律。最后通过 NSGA-II 算法搜索 SLM 成形零件尺寸精度的 Pareto 最优解, 并通过试验进行了验证。该研究结果可为 SLM 成形 GH3625 合金尺寸精度的工艺开发提供技术指导, 并为增材制造工艺参数优化提供一种有效的新途径。

### 1 实 验

本实验采用真空气体雾化制备的 GH3625 高温合金粉末作为成形材料, 图 1a 为原始合金粉末的宏观形貌, 可以看到大部分粉末接近球形。通过激光粒度仪测得粉末的粒度分布如图 1b 所示, 其粉末粒径分布为  $D_{10}=19.6 \mu\text{m}$ ,  $D_{50}=34.1 \mu\text{m}$ ,  $D_{90}=56.8 \mu\text{m}$ 。具体化学成分见表 1。

采用江苏永年激光成形制造有限公司独立研发的 SLM (YLM-300) 设备制造 GH3625 合金试样。该设

备配备了最大功率为 500 W 的 IPG 单模光纤激光器, 激光波长为 1064 nm, 光斑直径约为 70  $\mu\text{m}$ 。在成形过程中不断冲入氩气以降低成型室内的氧气含量。采用 304 不锈钢作为打印基板, 预热 100  $^{\circ}\text{C}$  以降低成形件的残余应力。采用相邻层间旋转 67 $^{\circ}$  作为激光成形扫描策略, 如图 2a 所示。竣工的 GH3625 高温合金方块试样如图 2b 所示。

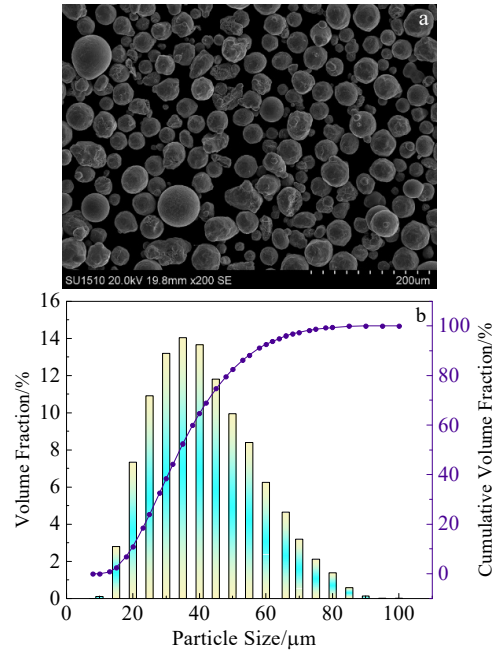


图 1 GH3625 高温合金粉末 SEM 形貌及粒度分布  
Fig.1 SEM morphology (a) and particle size distribution (b) of GH3625 superalloy powder

表 1 GH3625 高温合金粉末成分

Table 1 Composition of GH3625 superalloy powder ( $\omega/\%$ )

Cr	Mo	Nb	Fe	Co	Si	Mn	Al	Ti	Cu	P	S	C	O	N	Ni
22.19	9.03	3.57	1.78	0.062	0.096	0.05	0.046	0.1	0.032	0.0064	0.0024	0.011	0.0198	0.01	Bal.

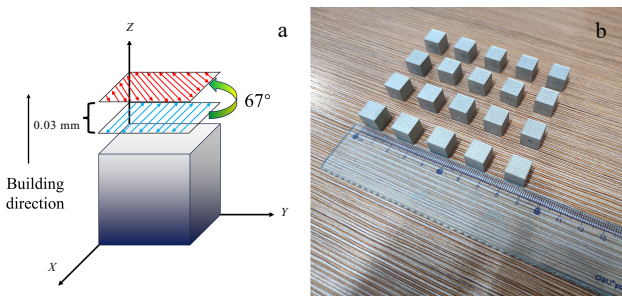


图 2 SLM 扫描策略示意图及竣工的 GH3625 高温合金零件  
Fig.2 Schematic diagram of SLM scanning strategy (a) and appearance of as-built GH3625 superalloy part (b)

尺寸精度可以通过零件的尺寸误差反映, 误差越小反映零件精度越高。在这部分中尺寸误差的定义为零件设计尺寸与实际尺寸之差的绝对值。因此立方体零件 X、Y、Z 方向的尺寸误差可以用等式 (1) ~ (3) 表示:

$$DX = |X_d - X_e| \tag{1}$$

$$DY = |Y_d - Y_e| \tag{2}$$

$$DZ = |Z_d - Z_e| \tag{3}$$

其中  $DX$ 、 $DY$  和  $DZ$  依次代表 X、Y 和 Z 方向上的尺寸误差, 下标 “d” 和 “e” 分别表示零件设计尺寸和实际测量尺寸。实际尺寸通过螺旋测微器测量, 为了降低测量误差, 取零件该方向上 16 个不同位置所测的平均值作为实际尺寸。

## 2 优化方法及框架

### 2.1 响应面法实验设计

本研究使用中心复合设计 (CCD) 对 SLM 成形零件的尺寸精度进行响应面试验和建模。基于 CCD 的试验点由中心点、立方点和轴向点组成,如图 3 所示。在这项研究中,以激光功率 (LP)、扫描速度 (SS) 和扫描间距 (HS) 为输入变量,以成形件 X、Y 和 Z 3 个方向的尺寸误差为优化输出变量。针对 GH3625 合金的 SLM 成形,确定合适工艺参数范围对模型构建十分重要。查阅相关文献[14-15]后确定了一个合适的工艺参数范围:激光功率为 250~310 W,扫描速度为 1000~1400 mm/s,扫描间距为 0.07~0.09 mm,对应的因素水平和编码如表 2 所示。其中  $\alpha$  代表轴向点,当影响因素的个数为 3 时,可通过公式  $\alpha = \sqrt[4]{2^k}$  计算出  $\alpha$  的值为 1.682<sup>[16]</sup>。基于表 2 的因素水平及编码获得的试验方案及响应值如表 3 所示。

### 2.2 回归模型构建

本研究将 X、Y 和 Z 方向上的尺寸误差作为优化指标,采用三元二次多项式对三输入变量 LP、SS、HS 以及优化输出 DX、DY、DZ 进行拟合。该二次多项式如等式 (4) 所示:

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} a_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (4)$$

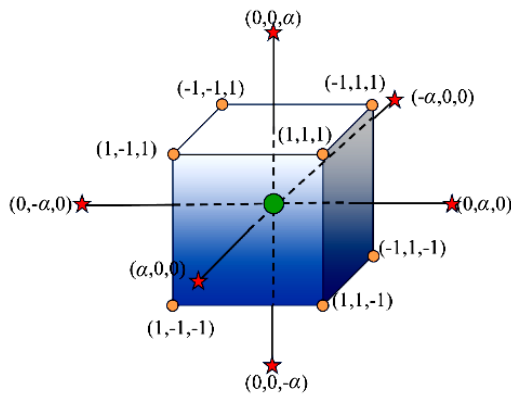


图 3 中心复合设计试验点分布图

Fig.3 Distribution of test sites for the center composite design

表 2 因素水平及编码

Table 2 Factor levels and coding

Parameter	Level				
	$-\alpha$	-1	0	1	$\alpha$
LP/W	230	250	280	310	330
SS/mm·s <sup>-1</sup>	864	1000	1200	1400	1536
HS/mm	0.063	0.07	0.08	0.09	0.097

表 3 试验方案及响应值结果

Table 3 Test protocol and response value results

No.	LP/W	SS/mm·s <sup>-1</sup>	HS/mm	DX/mm	DY/mm	DZ/mm
1	280	1536	0.08	0.098	0.059	0.281
2	230	1200	0.08	0.124	0.107	0.202
3	330	1200	0.08	0.059	0.142	0.189
4	310	1000	0.09	0.076	0.078	0.197
5	280	1200	0.08	0.089	0.051	0.157
6	280	1200	0.08	0.094	0.061	0.152
7	250	1000	0.07	0.104	0.167	0.263
8	250	1400	0.07	0.106	0.068	0.268
9	280	1200	0.08	0.099	0.049	0.166
10	280	1200	0.08	0.095	0.058	0.159
11	280	1200	0.08	0.091	0.056	0.163
12	280	1200	0.097	0.124	0.075	0.219
13	280	1200	0.063	0.104	0.134	0.238
14	310	1000	0.07	0.107	0.103	0.254
15	250	1400	0.09	0.149	0.036	0.312
16	280	1200	0.08	0.094	0.052	0.168
17	310	1400	0.09	0.109	0.126	0.246
18	280	864	0.08	0.077	0.125	0.226
19	310	1400	0.07	0.074	0.145	0.213
20	250	1000	0.09	0.098	0.153	0.187

式中, Y 表示优化输出, x 为输入变量,  $a_0$ 、 $a_i$ 、 $a_{ii}$  和  $a_{ij}$  为二次模型的回归系数。最后可以通过三维曲面图将该模型可视化,可以清晰地得到输出变量及其交互作用对输出变量的影响。

### 2.3 NSGA-II

Pareto front 是多目标优化问题中的一组最优解集,其中每个子集都是对应的最优解。在 Pareto front 中的每一个解都只能通过降低其中解而改善另一个解。本研究采用基于精英策略的非支配排序遗传算法-II (NSGA-II) 搜索 Pareto front。NSGA-II 是一种十分流行的多目标优化遗传算法,于 2002 年所开发,具有运行速度快、求解能力强的特点<sup>[17]</sup>。并在能源、化工等领域取得了不错的效果<sup>[11-13]</sup>。该算法实现的具体步骤依次为:(1) 初始化种群,随机产生一组初始种群,并根据它们的遗传信息进行排序;(2) 通过选择、交叉和变异等遗传操作产生一组新的子代;(3) 将群体内的亲代与子代混合,并按照适应度值将个体进行排序;(4) 根据排序获得的最佳个体构建一个新的种群。优化目的是为了调节各输入变量,使成形零件各方向尺寸精度达到最优。由表 2 所知,优化框架可以用数学方程 (5) 描述:

$$\begin{cases} \min DX(LP, SS, HS) \\ \min DY(LP, SS, HS) \\ \min DZ(LP, SS, HS) \\ s.t 250 \leq LP \leq 310 \\ 1000 \leq SS \leq 1400 \\ 0.07 \leq HS \leq 0.09 \end{cases} \quad (5)$$

Z 方向的尺寸误差进行预测；决定系数  $R^2$  依次为 0.9456、0.9842、0.9704 与 1 十分接近，反映了 3 种模型的相关性较高；精密度（Adeq precision）为模型的有效信号与噪声的比值，在本研究中均大于 4，证明模型合理、适应性较好<sup>[18-20]</sup>。

由表 4 可知，SLM 工艺参数中激光功率对 X 方向尺寸误差的影响最大，其次是扫描速度，影响最小的为扫描间距。除激光功率和扫描间距的交互作用项对目标不显著外，其他项对模型均有显著的影响。从表 5 中可以看到，SLM 工艺参数中扫描速度对 Y 方向的尺寸误差的影响最大，其次是扫描间距，最小为激光功率。从表 6 中 Z 方向尺寸误差的方差分析可以得到，在 SLM 工艺参数中对 Z 方向的尺寸误差影响最大的为扫描速度，其次为激光功率，最小为扫描间距，其 P 值略小于 0.05。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 模型方差分析

X、Y、Z 方向的尺寸误差的方差分析如表 4~表 6 所示，对应模型的 P 值均小于 0.0001，表明该 3 个模型均极其显著；模型所对应的“Lack of Fit”项的 P 值依次为 0.0671、0.0805、0.0505 均大于 0.05 不显著，这表明 3 个模型具有较高的可靠性，能够有效对 X、Y、

表 4 DX 模型的方差分析结果

Table 4 Analysis of variance for the DX model

Source	Sum of squares	df	Mean square	F value	P value	
Model	0.0071	7	0.0010	29.78	<0.0001	Significant
LP	0.0029	1	0.0029	86.61	<0.0001	
SS	0.0006	1	0.0006	16.84	0.0015	
HS	0.0004	1	0.0004	12.02	0.0047	
LP*SS	0.0004	1	0.0004	10.35	0.0074	
LP*HS	0.0001	1	0.0001	4.01	0.0683	
SS*HS	0.0017	1	0.0017	48.73	<0.0001	
HS <sup>2</sup>	0.0010	1	0.0010	29.90	0.0001	
Residual	0.0004	12	0.0000	-	-	
Lack of fit	0.0003	7	0.0000	4.19	0.0671	Not significant
Pure error	0.0001	5	0.0000	-	-	
Cor total	0.0075	19	-	-	-	
				$R^2=0.9456$	Adeq precision=22.9952	

Note: df-the number of variables that take on unrestricted values in a statistical model; F value-ratio of between-group mean square to within-group mean square; P value-probability values used to test for correlation between features and variables

表 5 DY 模型的方差分析结果

Table 5 Analysis of variance for the DY model

Source	Sum of squares	df	Mean square	F value	P value	
Model	0.0323	9	0.0036	69.35	<0.0001	Significant
LP	0.0006	1	0.0006	10.67	0.0085	
SS	0.0041	1	0.0041	79.42	<0.0001	
HS	0.0026	1	0.0026	50.63	<0.0001	
LP*SS	0.0117	1	0.0117	226.03	<0.0001	
LP*HS	$5.000 \times 10^{-7}$	1	$5.000 \times 10^{-7}$	0.0097	0.9237	
SS*HS	0.0000	1	0.0000	0.3476	0.5686	
LP <sup>2</sup>	0.0087	1	0.0087	168.47	<0.0001	
SS <sup>2</sup>	0.0025	1	0.0025	47.86	<0.0001	
HS <sup>2</sup>	0.0044	1	0.0044	85.55	<0.0001	
Residual	0.0005	10	0.0001	-	-	
Lack of fit	0.0004	7	0.0001	3.91	0.0805	Not significant
Pure error	0.0001	5	0.0000	-	-	
Cor total	0.0328	19	-	-	-	
				$R^2=0.9842$	Adeq precision=27.3995	

表 6 *DZ* 模型的方差分析结果

Table 6 Analysis of variance for the *DZ* model

Source	Sum of squares	df	Mean square	<i>F</i> value	<i>P</i> value	
Model	0.0405	8	0.0051	45.00	<0.0001	
<i>LP</i>	0.0015	1	0.0015	13.12	0.0040	
<i>SS</i>	0.0039	1	0.0039	34.62	0.0001	
<i>HS</i>	0.0006	1	0.0006	5.04	0.0463	
<i>LP*SS</i>	0.0019	1	0.0019	16.56	0.0019	
<i>SS*HS</i>	0.0055	1	0.0055	49.06	<0.0001	
<i>LP</i> <sup>2</sup>	0.0032	1	0.0032	28.63	0.0002	
<i>SS</i> <sup>2</sup>	0.0181	1	0.0181	161.16	<0.0001	
<i>HS</i> <sup>2</sup>	0.0102	1	0.0102	90.81	<0.0001	
Residual	0.0012	11	0.0001	-	-	
Lack of fit	0.0011	6	0.0002	4.93	0.0505	Not significant
Pure error	0.0002	5	0.0000	-	-	
Cor total	0.0417	19	-	-	-	

*R*<sup>2</sup>=0.9704 Adeq precision=19.5934

通过方差分析筛选部分非显著项后，最终确定了 *DX*、*DY*、*DZ* 的三元二次响应面模型，如等式 (6) ~ 式 (8) 所示：

$$DX = 0.690323 + 0.001936 \times LP - 0.000233 \times SS - 17.530288 \times HS - 0.000001 \times LP \times SS - 0.01375 \times LP \times HS + 0.007188 \times SS \times HS + 83.13623 \times HS^2 \quad (6)$$

$$DY = 6.036318 - 0.022814 \times LP - 0.002599 \times SS - 28.772011 \times HS + 0.000006 \times LP \times SS + 0.000833 \times LP \times HS - 0.00075 \times SS \times HS + 0.000027 \times LP^2 + 0.0000003 \times SS^2 + 175.3319 \times HS^2 \quad (7)$$

$$DZ = 4.894281 - 0.006593 \times LP - 0.002381 \times SS - 58.968105 \times HS - 0.000003 \times LP \times SS + 0.013125 \times SS \times HS + 0.000017 \times LP^2 + 0.0000009 \times SS^2 + 266.08798 \times HS^2 \quad (8)$$

图 4a~4c 依次为 *DX*、*DY*、*DZ* 模型的残差分布图，从图 4 中可知，各模型的残差数据均匀地分布在直线上，呈现出了正态分布。这证明了所建立的回归模型

是随机的，没有系统性的偏差。从图 5a~5c 各个模型预测值与试验值的对比图可以看出，图中各个数据点沿着对角线紧密分布，说明模型的预测精度较高，这与对应模型的决定系数 *R*<sup>2</sup> 所反映的一致。综上所述，所构建的二次模型能够准确有效地预测 *DX*、*DY*、*DZ* 的尺寸误差。

### 3.2 响应曲面分析

图 6~图 8 为 SLM 工艺参数对尺寸误差影响的三维曲面图，从中可以分析变量对响应值的影响。从图 6a 中可以观察到激光功率的增加和扫描速度的降低能够导致 *X* 方向的尺寸误差显著降低，并在激光功率约为 310 W 和扫描速度约为 1000 mm/s 时获得最佳的尺寸精度。从图 6b 中可以看到，当扫描间距恒定在 0.08 mm 左右时，*X* 方向的尺寸误差随着激光功率的增加而降低。从图 6c 中可以看到，当扫描间距保持在 0.086 mm 左右的 1 个范围时，*X* 方向的尺寸误差随着扫描速度的降低而降低，最终能够达到 1 个最小值。因此，提高激光

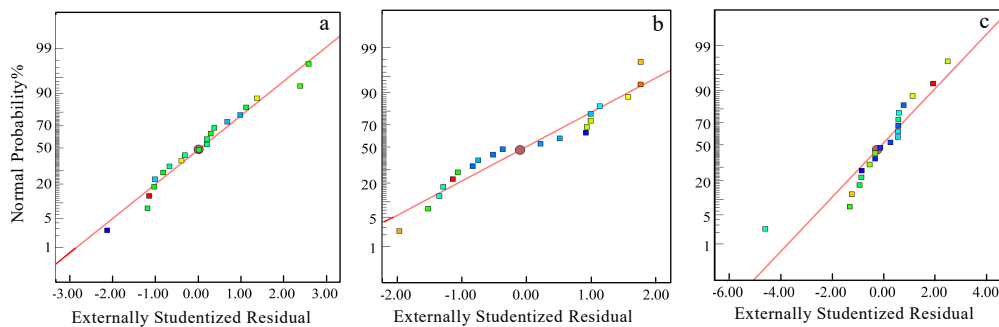


图 4 优化模型的残差分布图

Fig.4 Residual distributions of the optimized model: (a) *DX*, (b) *DY*, and (c) *DZ*

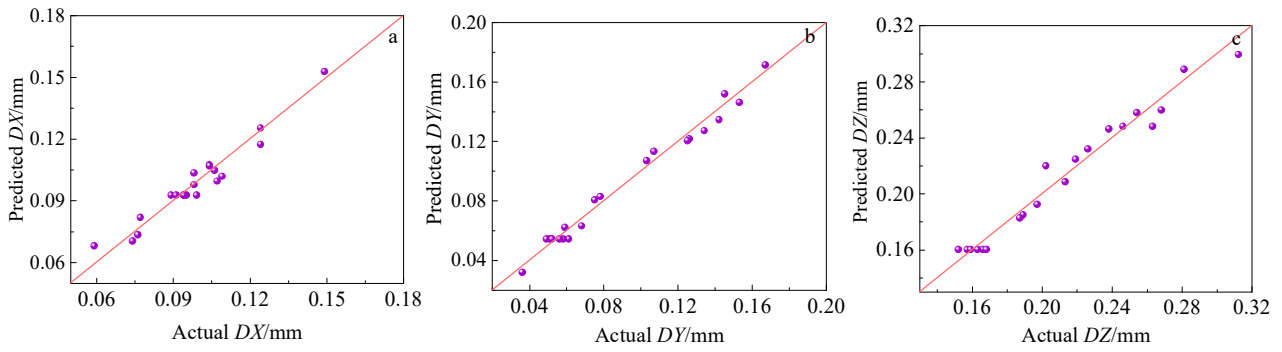


图 5 优化模型的预测值与真实值对比图

Fig.5 Plots of predicted values vs actual values of the optimized model: (a)  $DX$ , (b)  $DY$ , and (c)  $DZ$

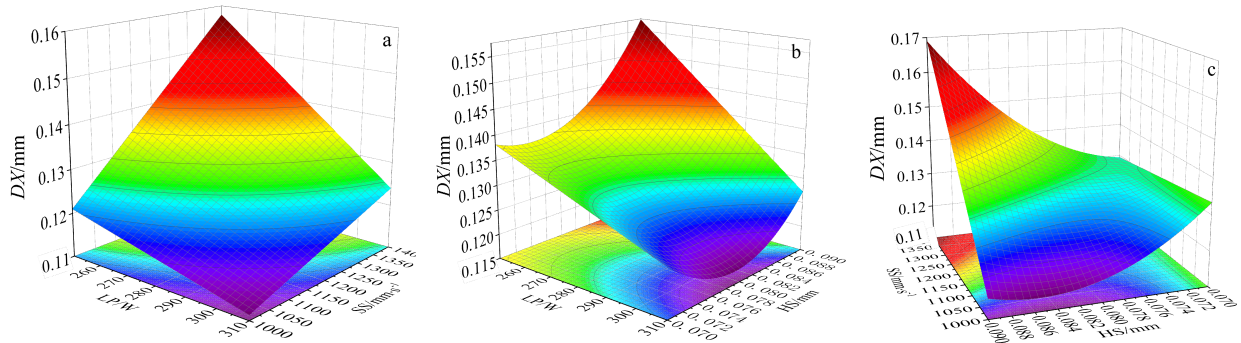


图 6 不同加工参数下  $DX$  值的三维曲面图

Fig.6 3D surface mappings of  $DX$  values for different machining parameters: (a)  $LP$ - $SS$ , (b)  $LP$ - $HS$ , and (c)  $SS$ - $HS$

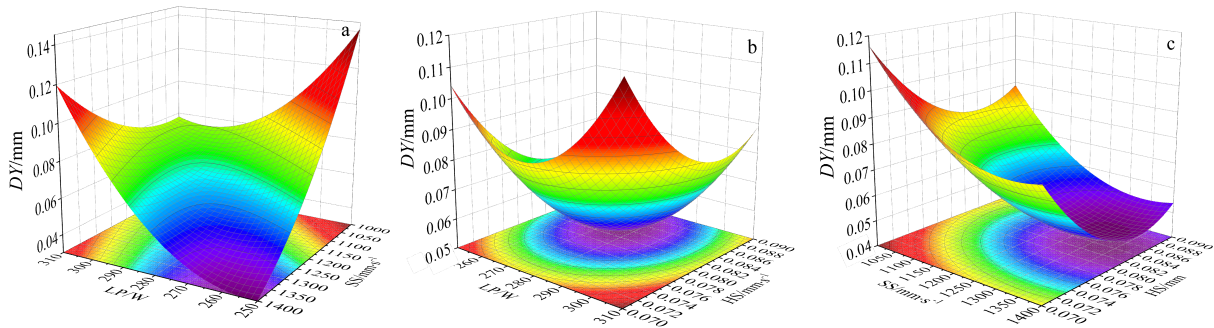


图 7 不同加工参数下  $DY$  值的三维曲面图

Fig.7 3D surface mappings of  $DY$  values for different machining parameters: (a)  $LP$ - $SS$ , (b)  $LP$ - $HS$ , and (c)  $SS$ - $HS$

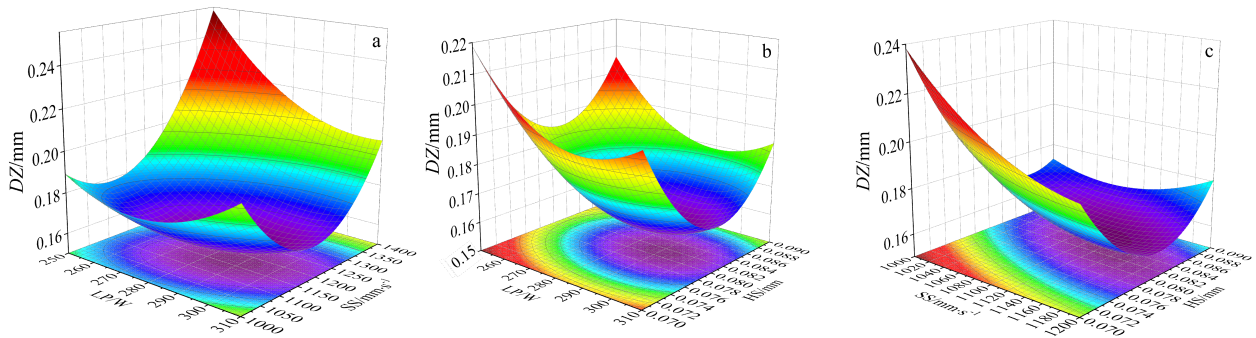


图 8 不同加工参数下  $DZ$  值的三维曲面图

Fig.8 3D surface mappings of  $DZ$  values for different machining parameters: (a)  $LP$ - $SS$ , (b)  $LP$ - $HS$ , and (c)  $SS$ - $HS$

功率降低扫描速度，同时扫描间距保持在 1 个较低的范围内的情况下，能够获得最小的 X 方向的尺寸误差。

### 3.3 多目标优化

将构建好的模型导入 NSGA-II 算法内，通过该算法对 3 个模型进行多目标优化。优化算法的优化效果很大程度上取决于算法参数，而迭代次数是算法中的关键参数<sup>[21]</sup>。因此，为了使本研究获得最佳的优化结果，对迭代次数进行单因素试验，其他参数在本研究中保持不变。通过计算对应迭代次数下所求 Pareto front 解集的超体积指标(HV)，用于寻求本研究中最佳的迭代次数。超体积评价方法由 Zitzler 等<sup>[22]</sup>提出，它表示由 Pareto front 中的个体和空间中的参考点所构成超立方体的体积。一般情况下，超体积越大对应的优化算法所求的 Pareto front 的收敛性和均匀性越好。初步试验发现当迭代次数超过 2000 次后，对应 Pareto 解集的超体积基本不变。因此本研究只考虑迭代 2000 次内的优化结果。选择 500 为迭代次数的试验间隔(迭代次数依次为 500、1000、1500、2000)，计算出对应的超体积结果如表 7 所示。相对应的 Pareto front 在图 9a~9d 中给出。从表 7 的计算结果可知，迭代次数为 1500 次的 Pareto front 具有最高的超体积指标值，表明这组 Pareto front 具有更好的收敛性和分布性。因此，迭代次数为 1500 次更适合本研究中提出的多目标优化问题。从图 9c 中最佳的 Pareto front 可以获得最优的工艺参数范围，当激光功率为 250.8~310 W、扫描速度为 1028~1400 mm/s、扫描间距为 0.071~0.084 mm 时，在该工艺参数范围内制造的高温合金零件能够获得最低的尺寸

误差，即最高的尺寸精度。

### 3.4 优化结果验证

从迭代 1500 次后获得的 Pareto 最优解集中随机选择一组工艺参数 ( $LP=289.2$  W、 $SS=1166.8$  mm/s、 $HS=0.0823$  mm)，对该优化方法的有效性进行验证。通过等式 (9) 计算出 3 个优化目标的绝对相对误差 (ARE)，验证结果如表 8 所示。 $DX$ 、 $DY$ 、 $DZ$  对应的绝对相对误差依次为 5.95%、4.92%、3.97%，较低的试验误差表明试验值与预测值具有较高的一致性，同时也证明了 RSM 结合 NSGA-II 的优化算法能够有效对 SLM 成形零件的尺寸精度进行优化。

$$ARE = \frac{|\text{Experimental-Predicted}|}{\text{Experimental}} \times 100\% \quad (9)$$

图 10 为在优化后的工艺参数下成形试样的微观组织，图 10a、10b 为光学显微镜所拍摄的 XOY 和 XOZ 平面的熔池形貌。可以看到在 XOY 方向上，相邻熔池之间的夹角呈现出 67°，这与设计的扫描策略相符；

表 7 不同迭代次数下所求 Pareto front 的超体积指标计算结果

Table 7 Calculation of hypervolume indicator for the proposed

Pareto front with different number of iterations		
No.	Iteration	HV
1	500	0.7458
2	1000	0.7596
3	1500	0.8012
4	2000	0.7803

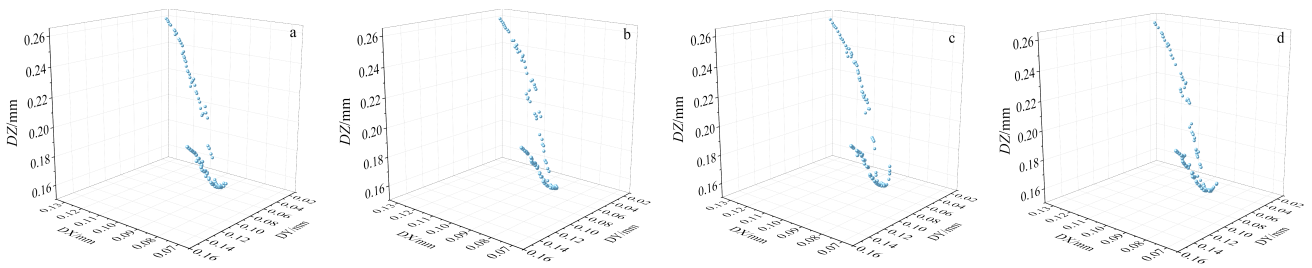


图 9 不同迭代次数下的 Pareto front

Fig.9 Pareto front for different numbers of iterations: (a) 500, (b) 1000, (c) 1500, and (d) 2000

表 8 优化结果试验验证

Table 8 Experimental validation of optimization results

	$LP/W$	$SS/mm \cdot s^{-1}$	$HS/mm$	$DX/mm$	$DY/mm$	$DZ/mm$
Predicted	289.2	1166.8	0.0823	0.089	0.058	0.157
Experimental	289	1167	0.082	0.084	0.061	0.151
ARE/%	-	-	-	5.95	4.92	3.97

XOZ 平面呈现出典型的鱼鳞状的熔池形态，这是由于激光热源呈现高斯分布导致的<sup>[23]</sup>。熔池之间结合完整，基本上无孔隙等缺陷存在，反映了在该工艺参数下制造的零件存在较强的冶金结合。图 10c、10d 为 XOY、XOZ 方向的 SEM 照片。可以看到微观组织中的晶粒尺寸较小。根据文献<sup>[24]</sup>中所提到的 Hall-Petch 效应，合金强度与晶粒尺寸呈反比，表明优化后工艺参

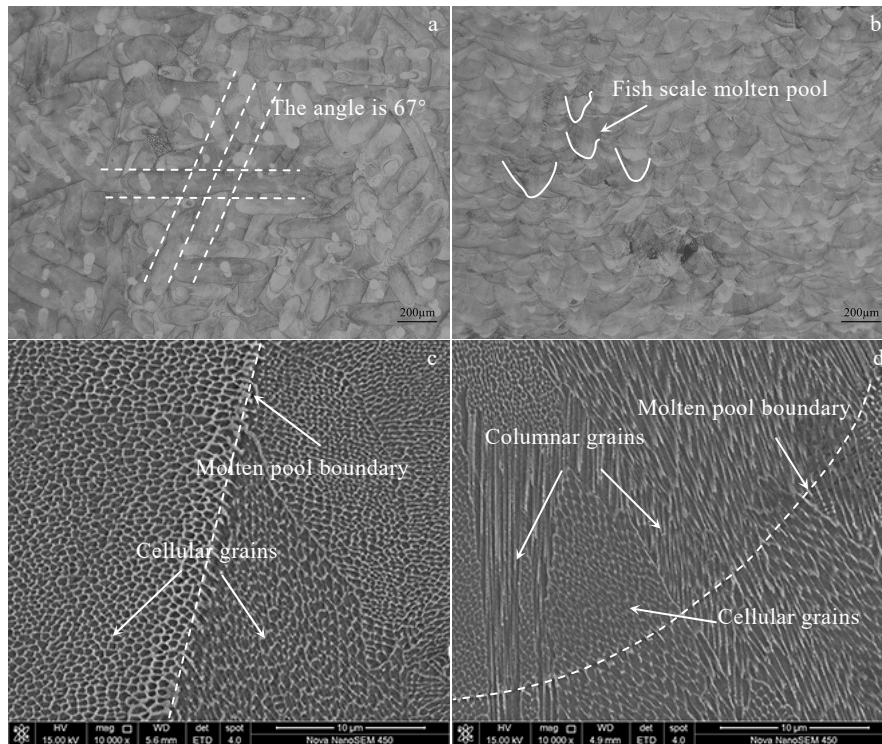


图 10 试验验证样品  $XOY$  和  $XOZ$  平面的显微组织

Fig.10 Microstructures of the sample verified in  $XOY$  (a, c) and  $XOZ$  (b, d) planes: (a-b) OM images and (c-d) SEM images

数所成形的零件力学性能较好。 $XOY$  平面呈现出胞状晶粒结构, 而  $XOZ$  方向晶粒主要呈现树枝状结构, 同时还有部分的胞状晶粒结构存在。造成该现象的原因可能是由于 SLM 工艺逐层熔化粉末, 激光与粉末相互作用时间短和局部热输入, 过程中存在较大的热梯度, 趋于熔池温度梯度, 晶粒的生长沿着熔池边界形成细长的柱状结构<sup>[25]</sup>。根据上述显微组织分析, 表明在该工艺参数下成形的零件不但具有较高的尺寸精度, 而且在成形零件质量方面也较好。

## 4 结 论

1) 通过响应面建立了 SLM 工艺参数与  $DX$ 、 $DY$ 、 $DZ$  之间的回归模型, 模型精度较高, 其相关系数  $R^2$  依次为 0.9456、0.9842、0.9704。

2) 3 个模型的  $P$  值均小于 0.01, 表明模型均显著, 除  $DZ$  模型的扫描间距外, 其他工艺参数对模型的影响均极其显著。

3) 通过 NSGA-II 对高温合金尺寸精度进行多目标优化, 并在迭代 1500 次下获得了最优的 Pareto front 解集, 具体地优化加工参数区间为: 激光功率 250.8~310 W、扫描速度 1028~1400 mm/s、扫描间距 0.071~0.084 mm。

4) 在最佳的 Pareto front 中随机选择一组工艺参数进行试验验证, 其  $ARE$  依次为 5.95%、4.92%、3.97%, 结果表明优化结果和试验结果具有较高的一致性, 使用该方法能够有效地对 SLM 成形高温合金尺寸精度进行优化。

## 参考文献 References

- [1] Hou Juan(侯娟), Dai Binbin(代斌斌), Min Shiling(闵师领) et al. *Acta Metallurgica Sinica(金属学报)*[J], 2023, 59(5): 623
- [2] Li Zhenhua(黎振华), Teng Baoren(滕宝仁), Yao Bibo(姚碧波) et al. *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2023, 52(1): 283
- [3] Zeng Q, Wang K L, Lu S Q et al. *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2023, 24: 8826
- [4] Zhang L, Li Y, Zhu H. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2022, 81: 281
- [5] Xu Mingsan(许明三), Jiang Yaofeng(江尧峰), Yao Yaowu(姚耀伍) et al. *Journal of Netshape Forming Engineering(精密成形工程)*[J], 2023, 15(2): 86
- [6] Dai Shimin(戴世民), Xu Zhiming(徐志明), Hu Zhiheng(胡志恒) et al. *Optics and Optoelectronic Technology(光学与光电)*



- 技术[J], 2019, 17(2):13
- [7] Shi G, Li L, Yu Z *et al. Journal of Manufacturing Processes*[J], 2022, 77: 539
- [8] Deng Chaoyang(邓朝阳), Guo Yifan(郭一帆), Chu Qingkun(褚清坤) *et al. Materials Research and Application (材料研究与应用)*[J], 2021, 15(3): 210
- [9] Liu Zecheng(刘泽程), Wang Guowei(王国伟), Xiao Xiangyou(肖祥友) *et al. Powder Metallurgy Technology(粉末冶金技术)*[J], 2021, 39(1): 81
- [10] Jia Zhihong(贾志宏), Guan Feng(关峰), Liu Yanmei(刘艳梅) *et al. Machinist Metal Forming(金属加工热加工)*[J], 2023(7): 24
- [11] Tian Z N, Zhang Z Q, Zhang K W *et al. Construction and Building Materials*[J], 2021, 271: 121534
- [12] Li K, Yan S L, Zhong Y C *et al. Simulation Modelling Practice and Theory*[J], 2019, 91: 69
- [13] Chen Z J, Zuo W, Zhou K *et al. Energy Conversion and Management*[J], 2023, 277: 116691
- [14] Zhao Jiangbo(赵江波), Gong Hongying(龚红英), Ye Hengchang(叶恒昌) *et al. Journal of Plasticity Engineering(塑性工程学报)*[J], 2023, 30(3): 9
- [15] Chen Xiujuan(陈秀娟), Zhao Guorui(赵国瑞), Dong Dongdong(董东东) *et al. Chinese Journal of Lasers(中国激光)*[J], 2019, 46(12): 70
- [16] Huang W Y, Li Y T, Ren Y J *et al. Vacuum*[J], 2022, 206: 111447
- [17] Sharma N, Khnana R, Gupta R. *Procedia Engineering*[J], 2013, 64: 710
- [18] Liu Shujing(刘书婧), Li Yangyang(李洋洋), Liu Jingping(刘敬平) *et al. Journal of Central South University(中南大学学报)*[J], 2021, 52(9): 3366
- [19] Wang Zhanying(王占营), Ma Ying(马颖), Liang Zhilong(梁志龙) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报)*[J], 2023, 33(2): 549
- [20] Xu Tao(徐涛), Zhao Liucheng(赵留成), Li Shaoying(李绍英). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报)*[J], 2017, 27(3): 629
- [21] Singhal A, Kumari N, Ghosh P *et al. Environmental Technology & Innovation*[J], 2022, 27: 102805
- [22] Zitzler E, Thiele L. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*[J], 1999, 3(4): 257
- [23] Zhang L, Li Y T, Zhang Q *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2022, 844: 142947
- [24] Yang Q M, Yang J G, Yang H L *et al. Ceramics International*[J], 2016, 42(16): 18100
- [25] Pleass C, Jothi S, Krishnan M. *Materials Science and Engineering A*[J], 2023, 869(24): 144744

## Optimization Study on Dimensional Accuracy of SLM Forming of GH3625 Superalloy Based on Integrated RSM and NSGA-II

Zeng Quan<sup>1</sup>, Wang Kelu<sup>1</sup>, Lu Shiqiang<sup>1</sup>, Lu Cuiyuan<sup>2</sup>, Li Xin<sup>1</sup>, Zhou Tong<sup>1</sup>, Wang Zengqiang<sup>1</sup>

(1. School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

(2. School of Advanced Manufacturing, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

**Abstract:** In order to improve the dimensional accuracy of SLM-formed parts, this study proposed an integrated response surface methodology (RSM) and non-dominated sorting genetic algorithm-II (NSGA-II) approach to optimize the dimensional accuracy of SLM-formed GH3625 superalloy. Firstly, a model of SLM process parameters with dimensional errors in  $X$ ,  $Y$  and  $Z$  directions was developed by RSM, and then the model was optimized by NSGA-II for multi-objective optimization. The results show that the model constructed by RSM has high prediction accuracy, and the correlation coefficients  $R^2$  are 0.9456, 0.9842, and 0.9704 in order. The optimization algorithm is able to obtain the optimal interval of the processing parameters at 1500 iterations: the laser power is 250.8-310 W, the scanning speed is 1028-1400 mm/s, the hatching space is 0.071-0.084 mm. The experimental validation results show the high reliability of the integrated method with  $ARE$  of 5.95%, 4.92% and 3.97% for dimensional errors in  $X$ ,  $Y$  and  $Z$  directions, respectively.

**Key words:** selective laser melting; GH3625 superalloy; dimensional accuracy; response surface methodology; non-dominated sorting genetic algorithm-II

Corresponding author: Wang Kelu, Professor, School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, P. R. China, E-mail: 29018@nchu.edu.cn