

# 选区激光熔化 AlSi10Mg 拱形点阵成形工艺优化

潘文瀚<sup>1,2</sup>, 许明三<sup>1,2</sup>, 韦铁平<sup>1,2</sup>, 朱峰立<sup>1,2</sup>, 杨林沂<sup>1,2</sup>

(1. 福建理工大学机械与汽车工程学院, 福建福州 350118;

2. 福建省智能加工技术及装备重点实验室, 福建福州 350118)

**摘要:** 基于响应面法建立选区激光熔化成形工艺参数与拱形点阵成形质量的数学模型, 分析工艺参数对拱形点阵成形质量的影响规律, 通过工艺优化获得内部致密、外部成形优异的工艺参数组合。结果表明, 扫描间距与激光功率分别是影响点阵孔隙误差和致密度最显著因素, 成形工艺优化组合如下: 激光功率 292 W、扫描速度 1 095 mm/s、扫描间距 0.10 mm。优化后拱形点阵孔隙误差和致密度分别为 0.65% 和 99.20%, 相较预测值, 误差控制在 5% 内, 表明所建立模型预测精度高, 可有效实现对拱形点阵成形质量的预测与控制。

**关键词:** 选区激光熔化; 拱形点阵; 成形质量; 响应面法; 工艺优化

中图分类号: TG146.2; TN249 文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2024)03-0291-07

## Optimization of selective laser melting AlSi10Mg arch lattice forming process

PAN Wenhan<sup>1,2</sup>, XU Mingsan<sup>1,2</sup>, WEI Tieping<sup>1,2</sup>, ZHU Fengli<sup>1,2</sup>, YANG Linyi<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical & Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Fujian Key Laboratory of Intelligent Machining Technology and Equipment, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** A mathematical model based on response surface experiments was established to correlate the process parameters of selective laser melting forming with the pore error and density of the arch lattice; analysis was conducted of the influence of process parameters on the forming quality of the structure, and the process was optimized to obtain an internal dense and externally well-formed process parameter combination. Results show that the scanning spacing and laser power are the most significant factors affecting the structure's pore error and density. The optimized process combination for forming quality is as follows: laser power 292 W, scanning speed 1 095 mm/s, and scanning spacing 0.10 mm. The resulted arch lattice pore error and density after optimization are 0.65% and 99.20% respectively, with an error within 5% of the predicted values, demonstrating the high prediction accuracy of the established model and its effective capability for precise prediction and control of the forming quality of the arch lattice.

**Keywords:** selective laser melting; arched lattice; forming quality; response surface method; process optimization

选区激光熔化技术 (selective laser melting, SLM) 是金属增材制造的重要分支, 它基于离散-堆积原理利用高能激光束熔化金属粉末成形三维零件, 其较高的设计自由度与较短的制造周期可实现对复杂零部件的快速成形<sup>[1]</sup>。

SLM 成形是激光、粉末、气体等多因素影响

下的复杂过程, 针对成形件质量控制与工艺优化等关键问题, 国内外学者开展了相关研究。何国豪等<sup>[2]</sup>分析了 SLM 工艺参数对微流道表面粗糙度影响, 得出扫描速度是影响悬垂与侧表面粗糙度的最显著因素。杨高林等<sup>[3]</sup>在 SLM 成形表面结构研究中通过减小分区尺寸降低整体形状误

收稿日期: 2023-11-21

基金项目: 福建省自然科学基金项目 (2020J01872)

第一作者简介: 潘文瀚 (1999—), 男, 浙江温州人, 硕士研究生, 研究方向: 激光增材制造技术。

通信作者: 许明三 (1974—), 男, 福建仙游人, 教授, 硕士, 研究方向: 激光增材制造技术、硬脆材料加工技术。

差。孔隙是影响 SLM 成形质量的主要缺陷之一, Tan 等<sup>[4]</sup>在对 SLM 成形的致密化行为研究中,分析了成形工艺参数对孔隙和裂纹缺陷的影响关系。Wei 等<sup>[5]</sup>通过数值模拟方式研究了选区激光熔化中熔池热动力学行为,发现工艺参数影响下强烈的马朗戈尼流会造成熔池内的扰动,导致孔隙的形成。张鑫何等<sup>[6]</sup>基于遗传算法优化了 SLM 成形参数,获得了高致密度的成形件。尽管诸多学者对 SLM 成形工艺展开了相关研究,但多集中于单一参数对致密度、表面粗糙度等性能影响,未能细致分析多参数综合影响下的结果。

本文从 AlSi10Mg 合金材料入手,探讨拱形点阵

的最佳 SLM 成形工艺参数组合,采用响应面法综合分析工艺参数对样件孔隙误差和致密度的影响规律,通过工艺参数优化,提高拱形点阵的成形质量。

## 1 试验设计

### 1.1 材料与设备

试验选用气雾化法制备的 AlSi10Mg 合金粉末,其粒径分布在 15~53  $\mu\text{m}$ ,使用前将粉末置于 70  $^{\circ}\text{C}$  烘干箱中烘干 6 h 以上,粉末的化学成分见表 1。成形设备为 SLM125-HL,打印完成后通过线切割从基板上分离样件,最后用超声去除样品表面附着的粉末与油污。

表 1 AlSi10Mg 粉末的化学成分

Tab.1 Chemical composition of AlSi10Mg powder

化学成分	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Cu	Al
质量分数/%	9.00~11.00	0.20~0.45	$\leq 0.10$	$\leq 0.55$	$\leq 0.45$	$\leq 0.05$	$\leq 0.05$	Bal.

### 1.2 拱形点阵设计

三维点阵由杆件单元和节点组成的单胞按一定规律周期排列而成。八面体单胞组成的结构可在空间内独立排布,结构简单的同时还有优异的压缩性能。同时相比于梁柱直构件,拱形结构具有在承受竖向荷载作用下将产生的弯矩转化为轴向压力的显著受力特点<sup>[7]</sup>,其结构刚度大、抗压能力强。

将拱形特征和点阵结构相结合,用拱形杆代替直杆形成拱形单胞,阵列形成拱形点阵。其中拱形高跨比  $R$ 、单胞杆径  $D$  和单胞高度  $H$  为拱形点阵中 3 个重要的设计参数。拱形高跨比  $R$  为拱形中心线上拱高  $h$  与跨长  $2l$  的比值,单胞杆径  $D$  和单胞高度  $H$  分别为点阵单胞任一圆形截面上的径长和在压缩方向上的尺寸,如图 1 所示。本文以高跨比 0.5、单胞杆径 1 mm、单胞高度 5 mm 的拱形点阵为对象展开成形研究。

### 1.3 测量与表征方法

孔隙误差和致密度是 SLM 点阵成形工艺优化时首先需要关注的性能指标,孔隙误差  $\Delta\varphi$  为拱形点阵实际成形孔隙率与理论设计孔隙率的误差值,其中理论设计孔隙率为 85.05%,实际成形孔隙率由拱形点阵样件通过干重法测量获得,公式如下:

$$\Delta\varphi = \varphi_t - \varphi_a = \frac{m_1}{\rho_p S_1 H_1} - \frac{V_s}{V_o} \quad (1)$$

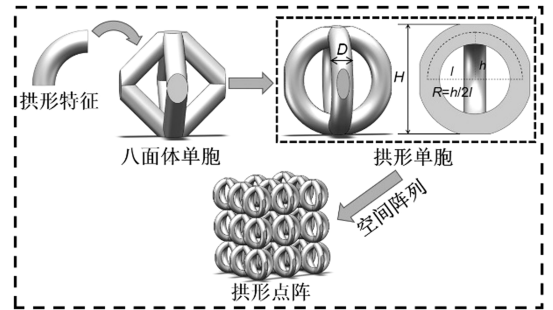


图 1 拱形点阵设计

Fig.1 Arch lattice design

式中, $\Delta\varphi$  为点阵样件孔隙误差,%; $\varphi_t$  和  $\varphi_a$  分别为点阵样件理论与实际的宏观孔隙率,%; $m_1$  为点阵样件质量,g; $S_1$  为点阵样件整体横截面积, $\text{mm}^2$ ; $H_1$  为点阵样件高度,mm; $V_s$  和  $V_o$  为点阵结构实体设计体积与外轮廓体积, $\text{mm}^3$ ; $\rho_p$  为 AlSi10Mg 合金粉末密度,取 2.68  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

使用 10×10×10  $\text{mm}^3$  方块样件通过排水法测得致密度  $\eta$ ,公式如下:

$$\eta = \frac{m_b \rho_w}{m_d \rho_p} \quad (2)$$

式中, $\eta$  为样件致密度,%; $m_b$  为方块样件质量,g; $m_d$  为方块样件排水质量,g; $\rho_w$  为室温下水的密度,通常取 0.998  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

### 1.4 试验方案与结果

选用 Box-Behnken 响应面法进行试验设计,

研究激光功率、扫描速度、扫描间距对点阵样件孔隙误差和致密度的影响规律。参考现有相关研究确定激光功率、扫描速度和扫描间距的研究范围为 275~375 W、800~1 200 mm/s 和 0.07~0.13 mm,通过对各影响因子编码使每个因子在高水平、中心点、低水平上变化,整体共设 17 组试验。方案见表 2,SLM 成形样件如图 2。

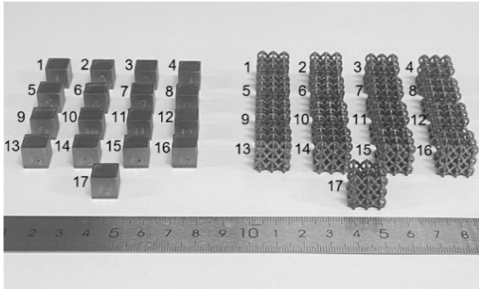


图 2 SLM 样件成形

Fig.2 SLM sample forming

表 2 试验方案与结果

Tab.2 Experimental design scheme and results

序号	$P/W$	$v/(mm \cdot s^{-1})$	$L/mm$	$\Delta\varphi/\%$	$\eta/\%$
1	375	800	0.10	2.50	95.51
2	325	800	0.13	1.20	96.75
3	325	1 000	0.10	0.80	98.05
4	325	800	0.07	3.39	95.28
5	325	1 000	0.10	0.60	98.13
6	275	800	0.10	1.62	97.12
7	275	1 000	0.13	1.08	98.24
8	325	1 000	0.10	0.71	98.38
9	325	1 000	0.10	0.78	98.09
10	325	1 200	0.13	1.18	97.68
11	375	1 000	0.07	3.28	95.10
12	325	1 200	0.07	2.03	97.74
13	275	1 200	0.10	1.05	99.08
14	275	1 000	0.07	2.16	98.32
15	325	1 000	0.10	0.75	98.23
16	375	1 200	0.10	1.26	97.13
17	375	1 000	0.13	1.47	97.38

## 2 结果与分析

### 2.1 响应模型方差分析

二阶回归模型作为描述自变量与因变量常见的数学模型,具有较强的灵活性与准确性。基于多项式回归模型理论,建立二阶多项式方程:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{j,i=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \varepsilon \quad (3)$$

式中, $y$  为预测响应值; $\beta_0$ 、 $\beta_i$ 、 $\beta_{ij}$ 、 $\beta_{ii}$  为回归系数; $x_i$ 、 $x_j$  为自变量; $\varepsilon$  为试验误差。

利用二阶回归方程拟合试验数据,建立以激光功率、扫描速度、扫描间距为变量,样件孔隙误差与致密度为响应量的二阶多项式数学模型。

$$\Delta\varphi = 0.728 0 + 0.325 0P - 0.398 8v - 0.741 3L + 0.167 5Pv - 0.182 5PL + 0.335 0vL + 0.463 5P^2 + 0.416 0v^2 + 0.806 0L^2 \quad (4)$$

$$\eta = 98.18 - 0.955 0P + 0.871 3v + 0.451 3L + 0.590 0PL - 0.382 5vL - 0.284 3P^2 - 0.681 8v^2 - 0.631 7L^2 \quad (5)$$

式中, $P$  为激光功率,W; $v$  为扫描速度,mm/s; $L$  为扫描间距,mm。

孔隙误差和致密度的方差分析如表 3、表 4 所示,由表 3、表 4 可知,样件孔隙误差与致密度模型的  $P$ -value 值小于 0.000 1,而失拟项  $P$ -value 值均大于 0.05,表明模型检验显著而失拟项检验不显著。两个模型的决定系数值  $R^2$  非常接近 1,调整决定系数  $R^2_{adj}$  与预测决定系数  $R^2_{pred}$  差值小于 0.2,表明模型可准确预测试验值中误差,有效揭示工艺参数对样件孔隙误差及致密度的作用关系。此外,对比各输入变量的  $F$ -value 值可知,各工艺参数对样件孔隙误差均有显著的影响,其中扫描间距对样件孔隙误差的影响最为显著,扫描速度与激光功率的影响程度依次降低,而工艺参数对样件致密度的影响程度从大到小依次为激光功率、扫描速度、扫描间距。

表 3 孔隙误差方差分析

Tab.3 Variance analysis of pore error

变量来源	平方和	自由度	均方	$F$ -value	$P$ -value	评价
模型	12.030 0	9	1.340 0	128.03	<0.000 1	显著
$P$	0.845 0	1	0.845 0	80.97	<0.000 1	显著
$v$	1.270 0	1	1.270 0	121.88	<0.000 1	显著

续表

变量来源	平方和	自由度	均方	F-value	P-value	评价
<i>L</i>	4.400 0	1	4.400 0	421.18	<0.000 1	显著
<i>Pv</i>	0.112 2	1	0.112 2	10.75	0.013 5	显著
<i>PL</i>	0.133 2	1	0.133 2	12.77	0.009 1	显著
<i>vL</i>	0.448 9	1	0.448 9	43.01	0.000 3	显著
失拟项	0.048 0	3	0.016 0	2.55	0.193 8	不显著

注:表中  $R^2=0.994\ 0$ ,  $R_{\text{adj}}^2=0.986\ 2$ ,  $R_{\text{pred}}^2=0.933\ 3$ 。

表 4 致密度方差分析

Tab.4 Variance analysis of density

变量来源	平方和	自由度	均方	F-value	P-value	评价
模型	21.380 0	9	2.380 0	89.30	<0.000 1	显著
<i>P</i>	7.300 0	1	7.300 0	274.23	<0.000 1	显著
<i>v</i>	6.070 0	1	6.070 0	228.24	<0.000 1	显著
<i>L</i>	1.630 0	1	1.630 0	61.23	0.000 1	显著
<i>Pv</i>	0.028 9	1	0.028 9	1.09	0.332 0	不显著
<i>PL</i>	1.390 0	1	1.390 0	52.33	0.000 2	显著
<i>vL</i>	0.585 2	1	0.585 2	22.00	0.002 2	显著
失拟项	0.116 3	3	0.038 8	2.22	0.228 4	不显著

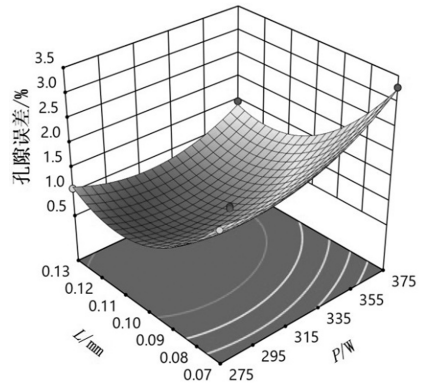
注:表中  $R^2=0.991\ 4$ ,  $R_{\text{adj}}^2=0.980\ 3$ ,  $R_{\text{pred}}^2=0.908\ 6$ 。

## 2.2 孔隙误差模型分析

图 3 为扫描速度 1 000 mm/s 时激光功率和扫描间距交互作用响应面。分析发现在激光功率增大的过程中,点阵样件的孔隙误差总体呈现先减小后增大趋势,同时在较低扫描间距下激光功率的变化使得孔隙误差普遍处于较大值,表明点阵样件的理论模型与实际成形间的误差较大。同样地,扫描间距的增大也使得样件的孔隙误差先减小后增大。原因是低激光功率与大扫描间距情况下整体能量输入偏少,形成的熔池较小且相邻熔道间距过大,未能充分搭接的熔池影响了样件的成形质量,而随着激光功率的增大和扫描间距的逐渐降低,样件成形效果得到一定提高。

随着能量输入的持续加大,特别是在激光功率为 375 W、扫描间距为 0.07 mm 时,激光穿透粉层熔化粉末形成向下塌陷的熔池,结构下表面出现明显挂渣现象而增大样件孔隙误差,这在点阵拱形悬垂部分尤为明显,如图 4 所示。

图 5 反映了激光功率为 325 W 时,扫描速度和扫描间距交互作用对孔隙误差的影响,随着扫描速度和扫描间距的同时减小,响应曲面起伏变化明显。其中扫描间距对样件孔隙误差的影响极为显著,这与方差分析中呈现结果一致。当扫描间距处

图 3 *PL* 交互对孔隙误差影响Fig.3 Effect of *PL* interaction on pore error

于 0.10 mm 时,样件孔隙误差较小,结构整体成形较好。而在扫描间距为 0.07 mm、扫描速度为 800 mm/s 时,结构成形误差达最大值为 3.39%。

这主要是由于当扫描间距过小时,易形成较宽的重熔区,加之低扫描速度下光粉作用时间的延长而造成局部热量过度累积,加剧了拱形悬垂部位挂渣现象,严重影响拱形点阵结构成形质量。扫描间距为 0.10 mm 时,相邻熔道间结合良好,理论模型和实际成形贴合度较高,孔隙误差较小。而扫描速度与扫描间距太大时,过短的光粉作用时间与相邻两条熔道间过大的距离使得激光能量

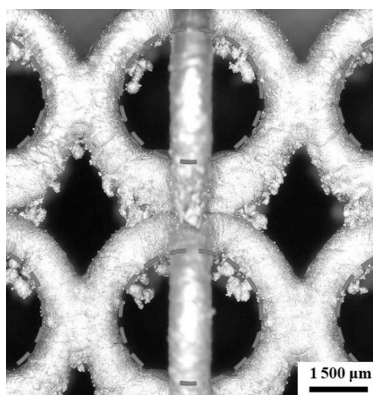


图 4 结构挂渣

Fig.4 Structural slagging

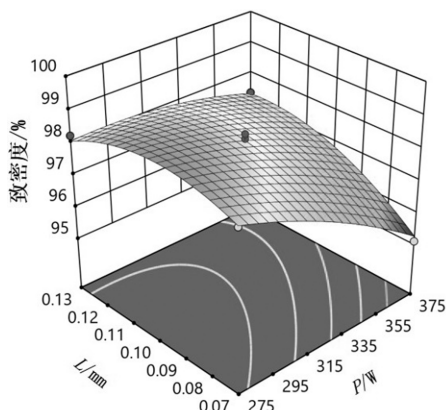


图 6 PL 交互对致密度影响

Fig.6 Effect of PL interaction on density

形成大量规则气孔,不利于致密样件的形成,此现象在激光功率从 275 W 增大至 375 W 时非常明显,样件显微形貌如图 7(b)、图 7(c)。此后扫描间距的增大使得熔池重叠区减小,缓解了局部热量累积效应,如图 7(d)所示样件内部孔隙减少,致密度得到一定提高。

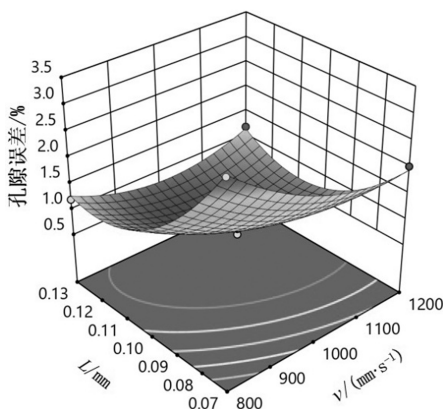


图 5 vL 交互对孔隙误差影响

Fig.5 Effect of vL interaction on pore error

分散,熔池的流动性较差,同样不利于结构良好成形。

### 2.3 致密度模型分析

图 6 所示为扫描速度为 1 000 mm/s 时,激光功率和扫描间距交互作用响应面,发现 0.07 mm 扫描间距下,激光功率的改变对样件致密度有着显著影响,随激光功率的增大样件致密度整体均呈下降趋势。在激光功率处于 275 W 时,扫描间距的逐渐增大使样件致密度呈现先上升后降低的趋势,但随着激光功率不断增大至 375 W 的过程中,样件致密度逐渐随着扫描间距的增大而提高。

一方面激光功率的提高增大了熔池内温度梯度,加剧熔池内马兰戈尼效应而逐渐形成液相不稳定的大熔池,强烈的对流行为致使部分金属液滴飞溅,产生球化现象而形成粗糙表面,影响铺粉质量,层层累积在内部形成孔隙,如图 7(a)。另一方面,较高的激光能量输入,使得局部区域温度过高,导致低熔点合金元素蒸发汽化,同时  $Al_2O_3$  高温下的再反应也加剧了蒸发现象,在样件内部

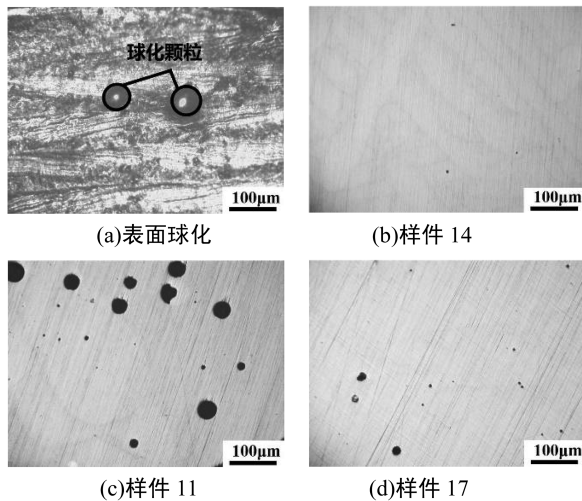


图 7 激光功率与扫描间距对显微形貌影响

Fig.7 Effect of laser power and scanning spacing on micromorphology

图 8 中发现扫描速度和扫描间距处于不同的水平下,样件致密度规律随之变化。当扫描间距为 0.07 mm 时,样件致密度随着扫描速度的增大而提高,而扫描间距不断增大至 0.13 mm 的过程中,扫描速度的增大使得样件致密度呈现先上升后降低的趋势。同样地,在 800 mm/s 扫描速度下,样件致密度随着扫描间距的增大而提高,而在较高的扫描速度下,样件的致密度随着扫描间距的增大而呈现先上升后降低的趋势。当扫描速度

处于 1 000 ~ 1 200 mm/s、扫描间距在 0.09 ~ 0.12 mm 范围内,样件致密度可达 98% 以上,如图 9(a)。当扫描间距和扫描速度同时处于最低水平时,样件致密度仅为 95.28%。

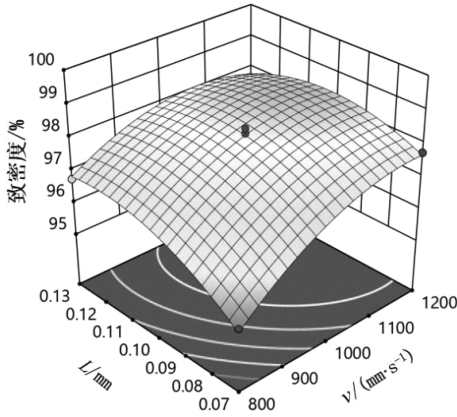


图 8  $vL$  交互对致密度影响

Fig.8 Effect of  $vL$  interaction on density

造成上述现象的原因是过小的扫描速度和扫描间距造成了较大的熔池重叠区,反复的能量输入在加剧过烧与元素蒸发的同时,促进了现有气孔的膨胀与生长,内部生成大量孔隙恶化了样件致密度,如图 9(b)。此后光粉作用时间的缩短缓解了熔池内热量累积提高了致密度,如图 9(c)。而在扫描速度较大时,随着扫描间距的增大,样件致密度最终呈现下降趋势的原因,是在较大扫描间距和较高扫描速度的同时作用下,较差的熔池流动性与过大的熔道搭接距离使得相邻熔道间存在未覆盖区,此处粉末难以充分熔化而出现不规则的未熔合孔,未熔与夹杂缺陷降低了样件致密度,如图 9(d)。

## 2.4 工艺参数优化

孔隙误差和致密度是评判多孔点阵成形质量的重要的指标,综合分析孔隙误差与致密度响应模型发现,拱形点阵结构的成形质量深受成形工艺的影响,工艺参数的组合会改变样件表面的能量输入从而影响熔池的热动力学行为。通常可用激光能量密度  $E$  来描述表面能量的输入。

$$E = \frac{P}{v \cdot L \cdot t} \quad (6)$$

式中,  $E$  为激光能量密度,  $J/mm^3$ ;  $t$  为铺粉层厚, mm。

高激光功率与低扫描间距、扫描速度组合会造成较大的激光能量输入,形成不稳定的大熔池,

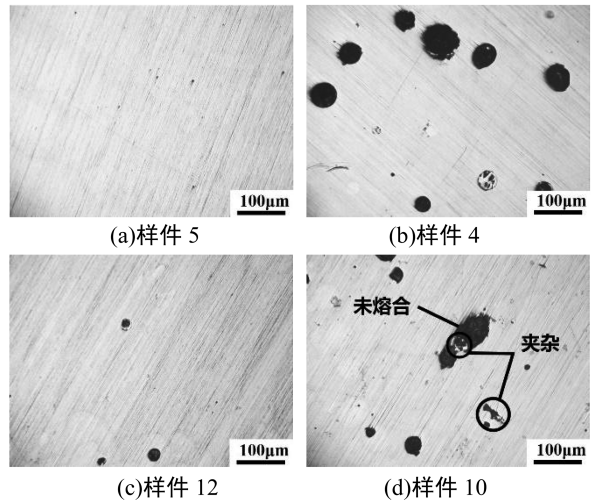


图 9 扫描间距与扫描速度对显微形貌影响

Fig.9 Effect of scanning spacing and scanning velocity on micromorphology

导致拱形点阵表面挂渣现象严重,使得结构实际成形与理论模型存在较大误差。而在内部成形中,较高的激光能量输入在加剧马兰戈尼效应致使部分金属液滴飞溅产生球化的同时,还导致低熔点合金元素蒸发,恶化了样件致密度。通过改变工艺参数而降低表面能量输入可在一定范围内减少结构内部孔隙与外部缺陷。然而过高的扫描速度与扫描间距组合又使得激光能量密度过低,导致样件表面输入能量分散,降低了熔池流动性同样不利于高致密度与低孔隙误差结构的成形,成形机制如图 10 所示。

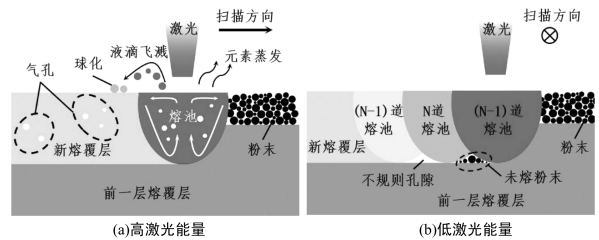


图 10 选区激光熔化成形机制图

Fig.10 Mechanism diagram of selective laser melting

为获得内部致密、外部成形优异的点阵成形工艺组合,在响应面规律的基础上对工艺参数进行优化分析。以点阵结构孔隙误差最小与致密度最大为目标进行工艺参数优化,得到期望最高的工艺参数优化方案为激光功率 292 W、扫描速度 1 095 mm/s、扫描间距 0.10 mm,此参数下样件孔隙误差与致密度的预测值为 0.62% 和 98.93%。

根据预测的优化方案制备样件,获得工艺优

化后样件孔隙误差与致密度分别为 0.65% 和 99.20%,样件的整体成形质量较好,内部无明显孔隙、裂纹等缺陷,如图 11。相较预测值,样件孔隙误差和致密度的误差仅为 4.84% 和 0.27%,证明所建立模型预测精度高,能够有效实现对多孔点阵成形误差与致密度的精准预测与控制。

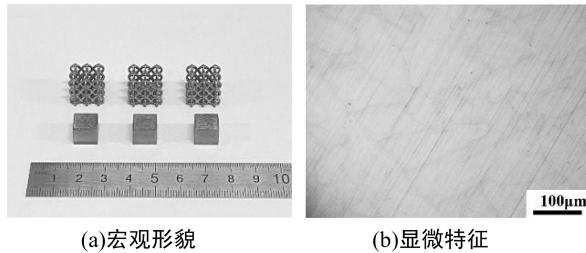


图 11 验证样件

Fig.11 Verification sample

### 3 结论

1)扫描间距对拱形点阵孔隙误差的影响最

为显著,扫描速度与激光功率的影响程度依次降低。点阵孔隙误差随着激光功率、扫描速度、扫描间距的增大呈现先减小后增大的趋势。激光功率 325 W、扫描速度 800 mm/s、扫描间距 0.07 mm 时,拱形点阵悬垂挂渣现象严重,结构孔隙误差达最大值为 3.39%。

2)工艺参数对样件致密度的影响程度从大到小依次为激光功率、扫描速度、扫描间距。其中激光功率与致密度总体呈负相关趋势,当激光功率 375 W、扫描速度 1 000 mm/s、扫描间距 0.07 mm 时,样件致密度仅为 95.10%。

3)以点阵孔隙误差最小与致密度最大为目标进行拱形点阵成形工艺优化,获得优化工艺参数:激光功率 292 W、扫描速度 1 095 mm/s、扫描间距 0.10 mm。优化后样件的成形质量较好,孔隙误差和致密度相较预测值误差仅为 4.84% 和 0.27%,表明所建立模型,能够有效实现对多孔点阵成形质量的精准预测与控制。

### 参考文献:

- [1] PIRINU A, PRIMO T, PRETE A, et al. Mechanical behaviour of AlSi<sub>10</sub>Mg lattice structures manufactured by the selective laser melting (SLM) [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 124(5/6): 1651-1680.
- [2] 何国豪, 劳子彬, 甘宏海, 等. 工艺参数对 SLM 成形 CuCrZr 合金微流道粗糙度的影响[J]. 激光技术, 2023, 47(5): 639-645.
- [3] 杨高林, 朱兆恒, 李梓杉, 等. 分区尺寸对选区激光熔化成形 316L 表面结构的影响[J]. 中国表面工程, 2023, 36(3): 74-86.
- [4] TAN Q Y, LIU Y G, FAN Z Q, et al. Effect of processing parameters on the densification of an additively manufactured 2024 Al alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 58: 34-45.
- [5] WEI P, WEI Z Y, CHEN Z, et al. Numerical simulation and parametric analysis of selective laser melting process of AlSi<sub>10</sub>Mg powder[J]. Applied Physics A, 2017, 123(8): 1-15.
- [6] 张鑫何, 白海清, 杨思瑞, 等. 基于遗传算法的钛合金 SLM 多目标优化[J]. 应用激光, 2023, 43(9): 23-31.
- [7] YAO J, ZHAO L, DING R C, et al. Study on the quasistatic compression performance of arch microstrut lattice structure by selective laser melting[J]. Advanced Engineering Materials, 2022, 24(5): 1541-1557.

(责任编辑: 陈雯)