

SLM 成形 GH4169 合金孔隙特征及致密度优化

夏东浩¹, 谢国印², 寇宏超³, 徐小渲³, 杨刚², 汤帅²

(1. 西北工业大学国家卓越工程师学院, 陕西 西安, 710072; 2. 中国航发动力股份有限公司, 陕西 西安 710072;
3. 西北工业大学凝固技术全国重点实验室, 陕西 西安 710072)

*通讯作者: 寇宏超, 男, 教授, 博士。E-mail: hchkou@nwpu.edu.cn

摘 要: 孔隙是选区激光熔化 (SLM) 成形 GH4169 合金常见缺陷, 本文通过改变激光功率和扫描速度研究能量密度对孔隙特征的影响, 并利用响应曲面法优化 SLM 成形 GH4169 合金工艺窗口。结果表明: GH4169 合金孔隙随能量密度增加由不规则状向块状、球状转变, 孔隙球形度与等效直径呈负相关性, 试样边缘易造成孔隙聚集, 试样内部孔隙在沉积方向和法线方向分布较为均匀; 合金高致密成形工艺窗口为: 激光功率 280-320 W, 扫描速度 900-1100 mm/s, 扫描间距 85-105 μm 。

关键词: 选区激光熔化; GH4169 合金; 孔隙; 致密度; 工艺优化

Pore Characterization and Density Optimization in GH4169 Alloy Fabricated by Selective Laser Melting

XIA Dong-hao¹, XIE Guo-yin², KOU Hong-chao³, XU Xiao-xuan⁴, YANG Gang²,
TANG Shuai² and **KOU Hong-chao³

(1. National Outstanding Engineers Institute, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shanxi 710072, China; 2. AECC Aviation Power Co., Ltd, Xi'an, Shanxi 710072, China; 3. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shanxi 710072, China)

Abstract: Porosity is a common defect in GH4169 alloy fabricated by Selective Laser Melting (SLM). This study investigated the effects of energy density on pore characteristics through controlled variations in laser power and scanning speed, subsequently optimizing the SLM processing window using Response Surface Methodology (RSM). Results demonstrate that: pores transitioned from irregular to angular and spherical morphologies with increasing energy density; pore sphericity exhibited a significant negative correlation with equivalent diameter; pronounced pore aggregation occurred at specimen edges while internal pores maintained uniform distribution along deposition/normal directions. The optimized high-density processing window was identified as: laser power 280–320 W, scanning speed 900–1100 mm/s, and hatch spacing 85–105 μm .

Keywords: : SLM ; GH4169; Pore; Relative Density; Process Optimization

1 前言

GH4169 是一种铁-铬-镍基沉淀强化型变形高温合金, 高温强度、抗氧化、抗腐蚀性能优异, 被广泛应用于航空航天领域盘、轴、紧固件等部件^[1,2], 常见的成形方法有粉末冶金、塑性成形、增材

制造等, 其中, 选区激光熔化技术(Selecting laser melting, SLM)具有精度高、原料利用率高等特点, 已成为制造 GH4169 复杂结构的重要方法^[3,4]。在 SLM 成形过程中, 粉末层经历了熔化-凝固-重熔-再凝固的循环过程, 熔池温度变化剧烈, 成形材料内部易产生较多孔隙缺陷^[5,6], 严重降低材料或结构的力学性能和可靠性。为此, 探讨孔隙形成机理

及其影响因素成为 SLM 技术领域关注的热点。研究发现, SLM 成形孔隙大致分为气孔、匙孔及未熔合孔隙三种, 其产生过程与工艺条件和参数密切相关。其中, 部分圆形孔隙是由保护气体进入熔池未能及时溢出形成的^[7], 而不规则孔隙则与粉末层的未完全熔化相关^[8,9]。随着激光能量密度的升高, 熔池形貌由 U 型向 V 型转变, 传热模式则由传导模式向匙孔模式转变^[10,11], 不同工艺参数下熔池震荡引起的溅射特征变化, 也会影响孔隙形貌^[12]。另外, 也有学者采用实验和 Flow 3D 数值模拟方法研究激光功率、扫描速度、扫描间距与孔隙特征和致密度的关系、孔隙缺陷形成原因^[13,14], 但关于工艺参数对孔隙特征影响的研究欠缺系统性, 尤其对孔隙形貌、分布的精确表征描述。为此, 本文采用金相分析和工业 CT 精确表征 SLM 成形 GH4169 合金的孔隙特征, 分析不同激光能量密度下孔隙尺寸、形貌及分布特征, 并利用响应曲面法优化工艺参数, 得到成形高致密度试样工艺窗口, 期望为 GH4169 合金的高质量成形提供依据。

表 1 GH4169 合金粉末成分

Table 1 Chemical composition of GH4169 alloy powder (wt.%)

Elements	Cr	Fe	Nb	Mo	Al	Ti	Si	C	Mn	Ni
fraction	18.06	17.96	5.47	3.11	0.40	1.03	0.024	0.03	0.004	Bal.

2.2 试验设计及方法

试验设备采用西安铂力特增材技术股份有限公司生产的 S600 型激光选区熔化增材制造系统, 激光器类型为 IPG 光纤激光器, 最大功率 500W, 波长 1060-1080nm。成形过程使用逐层旋转 67° 扫描策略, 铺粉层厚 40 μ m。

基于激光功率和扫描速度的双因子试验方案如表 2 所示, 每组试样分别对应不同激光功率和扫描速度。P 代表激光功率(Laser Power), V 代表扫描速度(Scanning Speed), H 代表扫描间距(Hatch Spacing), D 代表层厚(Depth)。

表 2 基于激光功率和扫描速度的双因子试验方案

Table 2 Two-factor experimental scheme based on laser power and scanning speed

Runs	Parameters	Min	Max	Increment
42	P/W	100	400	50
	V/(mm/s)	500	2000	300
	H/ μ m		100	
	D/ μ m		40	

2 试验过程

2.1 试验材料

本文所采用 GH4169 合金粉末成分如表 1 所示, 图 1(a)为粉末在扫描电镜下的形貌, 主要表现为球形及椭球形。利用 Wnner2308B 激光粒度分析仪对粉末粒径进行统计, 结果如图 1(b)所示, 粒径分布在 18.8-50.32 μ m (D_{10} - D_{90})。

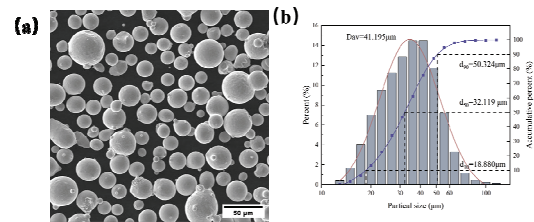


图 1 GH4169 合金粉末形貌(a)及粒径分布(b)

Fig.1 Morphology (a) and particle size distribution of GH4169 powder

为了优化 SLM 成形 GH4169 合金的致密度, 采用 3 因素 5 水平的中心复合设计(central composite design)响应曲面分析试验, 精确建立激光功率(P)、扫描速度(V)、扫描间距(H)与试样致密度的关系模型, 最终获得高致密度的工艺加工窗口。遵循中心复合原则设计的 SLM 成形工艺参数因子和水平设计如表 3 所示。

表 3 基于响应面中心复合原则的 GH4169 合金 SLM 成形工艺参数

Table 3 SLM Process Parameters for GH4169 Alloy Based on

Parameters	-1.682	-1	0	1	1.682
P/W	216	250	300	350	384
V/(mm/s)	932	1000	1100	1200	1268
H/ μ m	66	80	100	120	134

Central Composite Design of Response Surface Methodology

本实验采用阿基米德排水法测试试样密度, GH4169 理论密度取 8.24g/cm³。沿金相试样纵截面取样, 随后采用 240、400、800、1000、1500、2000 目数 SiC 砂纸打磨至表面存在微小划痕, 再使用二

氧化硅悬浮液机械抛光。利用 Axio Vert. A1 型光学显微镜进行金相观察,利用 Tescan Clara GMH 型场发射扫描电子显微镜进行组织形貌观察。利用德国 YXLON FF85 型 CT 检测设备对孔隙特征进行观察。

3 试验结果及分析

3.1 能量密度对孔隙特征的影响

3.1.1 激光能量密度对孔隙率的影响

双因子实验中各组试样工艺参数以体能量密度进行表示,激光体能量密度 (Laser energy density, 单位: J/mm^3)反映了单位体积上的能量大小,是决定成形质量的核心参数,其表达式

$$LED = \frac{P}{VDH} \quad (1)$$

式中: P 为激光功率(W); V 为扫描速度(mm/s); D 为层厚(mm); H 为扫描间距(mm)。

图 2 为 SLM 成形 GH4169 合金孔隙率随能量密度的变化趋势,为便于比较,图中也给出了文献中^[15-21]不同能量密度下成形 GH4169 合金的孔隙率。可以看出,随着能量密度的升高,孔隙率呈现出先减小后增大的趋势,变化趋势及高致密度区间与文献^[20]中的结果相一致。在能量密度为 $50\text{-}90\text{J}/\text{mm}^3$ 范围内,调整工艺参数能够获得孔隙率小于 0.5% 的高致密度材料。

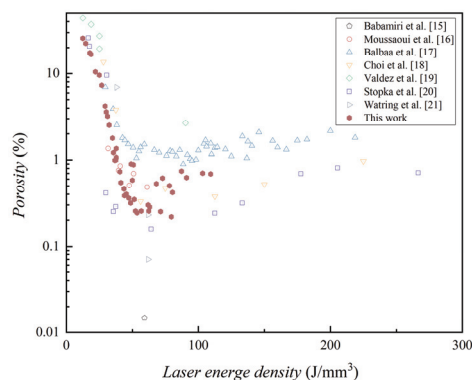


图 2 SLM 成形 GH4169 合金激光能量密度与孔隙率的关系

Fig. 2 Comparison of porosity of specimens under different laser energy densities

3.1.2 孔隙特征

图 3 为能量密度 26.78、40.58、71.42、90.90 J/mm^3 时 GH4169 合金的表面孔隙特征。可以看出,在较低能量密度 ($26.78\text{ J}/\text{mm}^3$) 下,成形试样表面

存在大面积不规则孔隙,随着能量密度的增大至 $40.58\text{ J}/\text{mm}^3$,孔隙数量较少,但仍呈现出大尺寸不规则块状特征,这是典型的未熔合孔隙特征。随着能量密度进一步增大至 71.42 和 $90.90\text{ J}/\text{mm}^3$,孔隙形貌转变为小尺寸圆形及月牙形,缺陷类型变为气孔及匙孔。

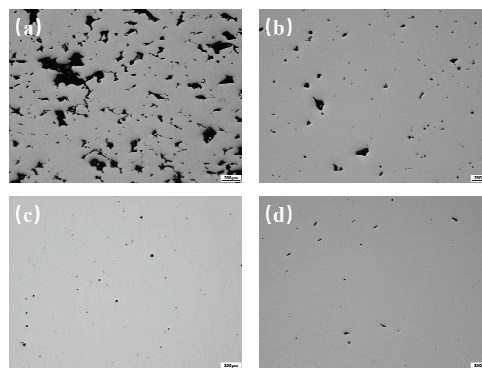


图 3 不同激光能量密度下 SLM 成形 GH4169 合金的孔隙形貌

Fig. 3 Pore morphology of GH4169 under different laser energy densities: (a) $26.78\text{ J}/\text{mm}^3$; (b) $40.58\text{ J}/\text{mm}^3$; (c) $71.42\text{ J}/\text{mm}^3$; (d) $90.90\text{ J}/\text{mm}^3$

利用工业 CT 对 SLM 成形 GH4169 试样内部孔隙缺陷进行扫描分析,扫描区域为从试样表面对沉积方向的法线方向截取 $2\times 2\times 10\text{mm}$ 的长方体区域。图 4 为能量密度 $40.58\text{ J}/\text{mm}^3$ 时的孔隙分布,可以看出,沿沉积方向的法线方向上,孔隙分布较为均匀,相对而言,试样侧面边缘位置存在更多的集中孔隙现象。这是由于试样边缘位置在成形过程中始终与外部气体环境相接触,热量散失速度较快,同时试样内部区域在后续沉积中经历了多次的热循环重熔过程,能够消除部分孔隙,而表面边缘位置缺乏后续重熔过程,导致产生并聚集了较多的孔隙。

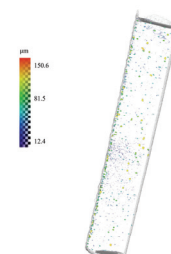


图 4 能量密度 $40.58\text{ J}/\text{mm}^3$ 成形 GH4169 合金沿沉积方向的法线方向孔隙分布

Fig. 4 Pore distribution in the normal direction along the deposition direction for GH4169 under laser energy density of $40.58\text{ J}/\text{mm}^3$

对不同能量密度成形 GH4169 合金的金相试样沿沉积方向截取 $2 \times 2 \times 10 \text{ mm}$ 的长方体进行 CT 扫描, 如图 5 所示, 为消除边缘孔隙的影响, 选取所截取试样内部中心区域进行孔隙尺寸统计。可以看出, 能量密度 26.78 J/mm^3 时, GH4169 合金存在较大尺寸未熔合孔隙缺陷, 在沉积方向上孔隙相互连通, 形状不规则, 但小尺寸的孔隙数量较少; 当能量密度增大到 40.58 J/mm^3 时, 合金中存在较多较大尺寸的块状孔隙, 小尺寸的球形孔隙数量较少, 在沉积方向上分布较为均匀。能量密度进一步增大到 71.42 J/mm^3 时, 大部分孔隙尺寸较小, 且集中分布沿沉积方向的中下部, 上部区域孔隙数量较少。当能量密度达到 90.90 J/mm^3 时, 孔隙尺寸较小, 且数量更多, 但在沉积方向上分布较为均匀, 除大部分接近球形形貌的孔隙外, 还存在少量长条形孔隙。

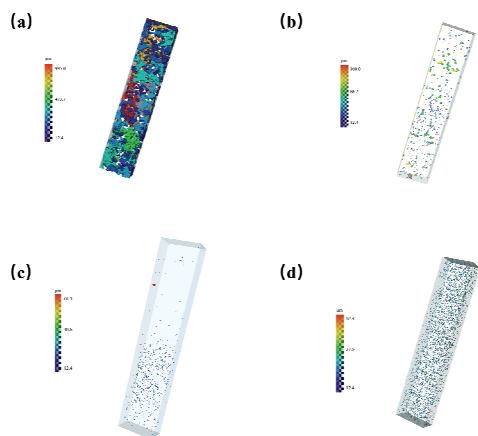


图 5 不同能量密度 SLM 成形 GH4169 合金沿沉积方向的孔隙特征

Fig. 5 Pore characteristics along deposition direction of GH4169 alloy fabricated by SLM at different energy densities: (a) 26.78 J/mm^3 ; (b) 40.58 J/mm^3 ; (c) 71.42 J/mm^3 ; (d) 90.90 J/mm^3

将扫描区域孔隙尺寸以等效直径进行表示, 并按等效直径区间的占比进行统计分析, 结果如图 6 所示, 图中给出了各区域最大等效直径的孔隙形貌。同时, 为消除 CT 扫描过程中由于设备精度而产生的伪影、噪声等的干扰, 在统计过程中将等效直径小于 $20 \mu\text{m}$ 的孔隙忽略, 提高统计准确度。可以看出, 能量密度 26.78 J/mm^3 时合金中, 最大孔隙由贯穿多个沉积层的孔隙相连而成, 等效直径达 $935 \mu\text{m}$, 25%的孔隙等效直径大于 $100 \mu\text{m}$; 当能量密度增大到 40.58 J/mm^3 时, 90%孔隙等效直径小于 $80 \mu\text{m}$, 最大孔隙等效直径为 $160 \mu\text{m}$ 。能量密度 71.42 J/mm^3 时孔隙尺寸较小, 最大孔隙等效直径为 $68 \mu\text{m}$, 其

余孔隙尺寸均小于 $50 \mu\text{m}$, 90%的孔隙等效直径小于 $35 \mu\text{m}$, 同时, 孔隙数量相对较少, 以气孔为主, 还有少量匙孔缺陷。能量密度达到 90.90 J/mm^3 时合金中孔隙尺寸与能量密度 71.42 J/mm^3 时相近, 最大孔隙等效直径为 $62 \mu\text{m}$, 90%的孔隙等效直径小于 $35 \mu\text{m}$, 但孔隙数量更多, 孔隙在成形方向上均匀分布, 大部分孔隙为类球形的气孔, 最大等效直径孔隙为长条形的匙孔缺陷。

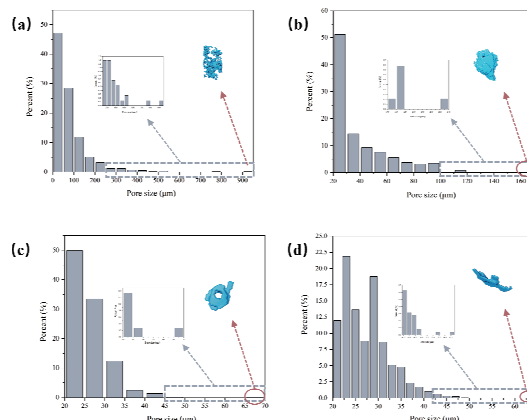


图 6 不同能量密度 SLM 成形 GH4169 合金的孔隙尺寸分布

Fig. 6 Pore size distribution of GH4169 alloy fabricated by SLM at different energy densities: (a) 26.78 J/mm^3 ; (b) 40.58 J/mm^3 ; (c) 71.42 J/mm^3 ; (d) 90.90 J/mm^3

由图 5 和图 6 可知, 孔隙形貌与孔隙尺寸存在一定的对应关系, 较大尺寸的孔隙更倾向于不规则的形状, 小尺寸的孔隙倾向于球形或长条形。以球形度表征孔隙形貌, 等效直径表示孔隙大小, 对扫描区域内部分孔隙的形貌特征进行定量表征, 绘制如图 7 所示散点图, 可以看出, 孔隙球形度随等效直径的增加而减小, 等效直径大于 $50 \mu\text{m}$ 的孔隙球形度小于 0.5, 球形度与孔隙尺寸呈负相关性。

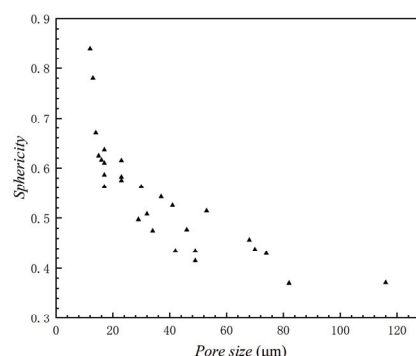


图 7 孔隙球形度与孔隙尺寸对应关系

Fig. 7 Correspondence between pore sphericity and pore size

3.2 致密度优化

前述为两因素水平的参数组合实验结果，并未考虑三因素耦合作用对致密度的影响，同时，试验过程中参数区间较大，导致成形高致密度合金的加工窗口较宽。为进一步探讨激光功率、扫描速度以及扫描间距对孔隙率的影响大小，同时缩小高致密度合金加工窗口，设计使用 CCD 响应曲面法对参

数进行优化。SLM 成形 GH4169 合金孔隙率测试结果如表 4 所示。利用二次多项式对模型进行拟合，去除非显著影响因子后成形试样孔隙率与工艺参数的拟合方程表达式为

$$\text{porosity} = -1.64784 - 0.000047 \cdot P + 0.005042 \cdot V - 0.018982 \cdot H - 0.000014 \cdot P \cdot V - 0.00005 \cdot P \cdot H + 0.000033 \cdot P^2 + 0.00018 \cdot H^2$$

式中：P 为激光功率(W)；V 为扫描速度(mm/s)；H 为扫描间距(μm)。

表 4 基于中心复合设计的 3 因素 5 水平实验测试结果

Table 4 Results of 3-factor, 5-level experimental test based on central composite design

Run	P (W)	V (mm/s)	H (μm)	LED (J/mm ³)	Porosity (%)	Predict porosity (%)	Deviation
1	250	1200	80	65.1042	0.7655	0.7994	0.0339
2	300	932	100	80.4721	0.4199	0.4248	0.0049
3	350	1000	80	109.375	0.6894	0.6697	0.0179
4	300	1100	100	68.1818	0.5207	0.5477	0.0271
5	300	1268	100	59.1483	0.7409	0.6707	0.0702
6	300	1100	100	68.1818	0.5408	0.5477	0.0070
7	300	1100	66	103.306	0.7021	0.6871	0.0150
8	300	1100	100	68.1818	0.5771	0.5477	0.0293

续表 4

Continuation Table 4

Run	P (W)	V (mm/s)	H (μm)	LED (J/mm ³)	Porosity (%)	Predict porosity (%)	Deviation
9	350	1000	120	72.9167	0.6159	0.6506	0.0347
10	250	1000	120	52.0833	0.6687	0.6895	0.0208
11	350	1200	120	60.7639	0.6230	0.6533	0.0303
12	300	1100	100	68.1818	0.5817	0.5477	0.0339
13	250	1200	120	43.4028	0.9223	0.9795	0.0572
14	350	1200	80	91.1458	0.6246	0.6724	0.0478
15	300	1100	100	68.1818	0.5300	0.5477	0.0178
16	216	1100	100	49.0909	0.8981	0.8527	0.0454
17	250	1000	80	78.125	0.5021	0.5094	0.0072
18	300	1100	100	68.1818	0.5346	0.5477	0.0131
19	384	1100	100	87.2727	0.7431	0.7133	0.0298
20	300	1100	134	50.882	0.8823	0.8239	0.0584

表 5 是去除拟合结果中非显著影响因子的二次多项式方差分析，参数 F 值表示各影响因子对结果的影响大小，P 值表示影响因子的显著性水平，P 值小于 0.05 代表显著，小于 0.01 为高度显著。其

中模型的 P 值<0.0001 代表模型有极高的拟合程度，Lack of Fit 为 0.0554>0.05 代表模型实验误差极小。图 8 反映了模型预测值与实际值的偏差，实验中测试结果实际点位于拟合曲线附近。

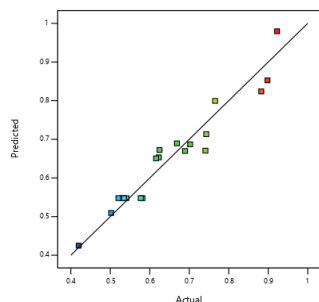


图 8 模型预测结果与实测值比较

Fig. 8 Model Predictions and Measured Values

表 5 基于中心复合设计的 SLM 工艺参数方差分析

Table 5 ANOVA of SLM process parameters based on center composite design

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	0.3434	7	0.0491	24.01	< 0.0001	significant
P	0.0235	1	0.0235	11.49	0.0054	
V	0.0731	1	0.0731	35.76	< 0.0001	
H	0.0223	1	0.0223	10.93	0.0063	
P×V	0.0413	1	0.0413	20.20	0.0007	
P×H	0.0199	1	0.0199	9.72	0.0089	
P ²	0.1007	1	0.1007	49.27	< 0.0001	
H ²	0.0779	1	0.0779	38.12	< 0.0001	
Lack of Fit	0.0212	7	0.0030	4.63	0.0554	not significant
Pure Error	0.0033	5	0.0007			

本模型在某单一因素固定的条件下，得到双因素对 SLM 成形 GH4169 合金孔隙率相互作用，结果如图 9 所示。图中显示了模型的三维曲面图，底面为曲面投影等值线，等值线均为椭圆形，响应面较陡。结合响应面趋势及方差分析结果中 F 及 P 值大小比较发现，在此实验参数区间内扫描速度对成形试样致密度的影响最大。随着扫描速度的减小，孔

隙率逐渐降低，但考虑实际成形过程中的成形效率及成形可靠性，扫描速度不宜选择过小。因此结合等值曲线及拟合方程分析，确定具有高成形效率、稳定性及高致密度试样的工艺加工窗口为：激光功率 280-320W、扫描速度 900-1100mm/s、扫描间距 85-105 μ m。

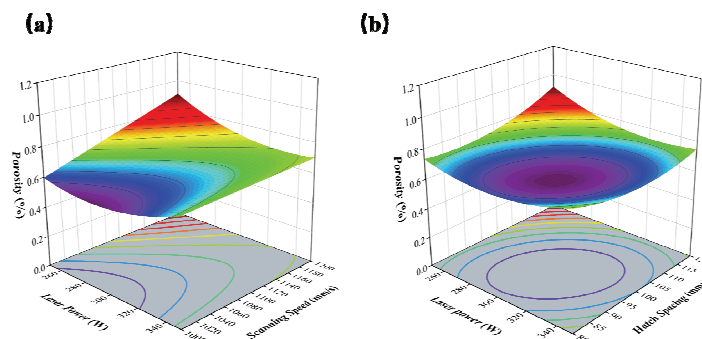


图 9 双因素对 SLM 成形件孔隙率相互作用 (a) P×V (b) P×H

Fig. 9 Two-factor interaction on porosity of SLM formations (a) P×V (b) P×H

4 结论

(1)能量密度 26.78、40.58 J/mm³ 时, SLM 成形 GH4169 合金以不规则或块状未熔合孔隙为主, 尺寸较大, 部分孔隙等效直径大于 100 μ m; 能量密度为 71.42、90.90 J/mm³ 时则以球形或长条形气孔和匙孔为主, 尺寸较小, 孔隙球形度与等效直径呈负相关性。

(2)激光功率、扫描速度、扫描间距对 SLM 成形 GH4169 合金致密度影响显著, 其中扫描速度对致密度的影响大于激光功率及扫描间距。

(3) SLM 成形高致密度 GH4169 合金的工艺窗口为: 激光功率 280-320W, 扫描速度 900-1100mm/s, 扫描间距 85-105 μ m。

参考文献

- [1] Hosseini E, Popovich V A. A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718[J]. Additive manufacturing, 2019, 30: 100877.
- [2] Parimi L L, Attallah M M, Gebelin J C, et al. Direct laser fabrication of Inconel-718: Effects on distortion and microstructure[J]. Superalloys, 2012, 75: 509-519.
- [3] 林鑫, 黄卫东. 应用于航空领域的金属高性能增材制造技术[J]. 中国材料进展, 2015, (9): 021-25.
- [4] Gieseke M, Noelke C, Kaierle S et al. Magnesium Technology [M]. Berlin: Springer International Publishing, 2013: 10
- [5] Kruth J P, Froyen L, Van Vaerenbergh J, et al. Selective laser melting of iron-based powder[J]. Journal of materials processing technology, 2004, 149(1-3): 616-622.
- [6] Kouraytem N, Chanut R A, Watring D S, et al. Dynamic-loading behavior and anisotropic deformation of pre-and post-heat-treated IN718 fabricated by selective laser melting[J]. Additive manufacturing, 2020: 101083.
- [7] Zhang Y-N, Cao X, Wanjara P, Medraj M. Tensile properties of laser additive manufactured Inconel 718 using filler wire. Journal of Materials Research. 2014; 29(17): 2006-2020.
- [8] Vilaro T, Colin C, Bartout J D. Metallurgical & Materials Transactions A[J], 2011, 42(10): 3190
- [9] Lu L X, Sridhar N, Zhang Y W. Acta Materialia[J], 2018, 144: 801
- [10] Gao P, Huang W, Yang H, et al. Cracking behavior and control of β -solidifying Ti-40Al-9V-0.5Y alloy produced by selective laser melting[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 39: 144-154.
- [11] Gao P, Wang Z, Zeng X. Effect of process parameters on morphology, sectional characteristics and crack sensitivity of Ti-40Al-9V-0.5Y alloy single tracks produced by selective laser melting[J]. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2019, 2.
- [12] 王志强, 王学德, 谢瑞鹄, 周鑫, 张佩宇, 李秋良. 选区激光熔化成形 Inconel 718 合金孔隙缺陷的研究[J]. 表面技术, 2020, 49(9): 378-385.
- [13] Galy C, Le Guen E, Lacoste E, et al. Main defects observed in aluminum alloy parts produced by SLM: From causes to consequences[J]. Additive manufacturing, 2018, 22: 165-175.
- [14] 田军, 谢迁成, 龙樟, 等. 激光选区熔化 AlSi10Mg 成型工艺及性能研究[J]. 应用激光, 2023, 43(9): 37-48.
- [15] Babamiri B B, Indeck J, Demeneghi G, et al. Quantification of porosity and microstructure and their effect on quasi-static and dynamic behavior of additively manufactured Inconel 718[J]. Additive Manufacturing, 2020, 34: 101380.
- [16] Moussaoui K, Rubio W, Mousseigne M, et al. Effects of Selective Laser Melting additive manufacturing parameters of Inconel 718 on porosity, microstructure and mechanical properties[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 735: 182-190.
- [17] Balbaa M, Mekhiel S, Elbestawi M, et al. On selective laser melting of Inconel 718: Densification, surface roughness, and residual stresses[J]. Materials & Design, 2020, 193: 108818.
- [18] Choi J P, Shin G H, Yang S, et al. Densification and microstructural investigation of Inconel 718 parts fabricated by selective laser melting[J]. Powder Technology, 2017, 310: 60-66.
- [19] Valdez M, Kozuch C, Faierson E J, et al. Induced porosity in Super Alloy 718 through the laser additive manufacturing process: Microstructure and mechanical properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 725: 757-764.
- [20] Stopka K S, Desrosiers A, Nicodemus T, et al. Intentionally seeding pores in additively manufactured alloy 718: process parameters, microstructure, defects, and fatigue[J]. Additive Manufacturing, 2023, 66: 103450.
- [21] Watring D S, Benzing J T, Hrabec N, et al. Effects of laser-energy density and build orientation on the structure-property relationships in as-built Inconel 718 manufactured by laser powder bed fusion[J]. Additive manufacturing, 2020, 36: 101425.