

选区激光熔化成形 Inconel 718 合金 孔隙缺陷的研究

王志强¹, 王学德¹, 谢瑞鹄², 周鑫¹, 张佩宇¹, 李秋良¹

(1.空军工程大学 航空等离子体动力学重点实验室, 西安 710038; 2.94691 部队, 福州 350000)

摘要:目的 研究选区激光熔化成形 Inconel 718 合金的孔隙缺陷, 对缺陷进行科学分类并探究其形成机制, 建立熔池溅射特征与缺陷形貌的对应关系, 优化工艺参数, 抑制缺陷产生。方法 采用扫描电子显微镜 (SEM)、能量色散 X 射线光谱仪 (EDX) 分别对 Inconel 718 粉末的显微组织和化学成分进行观测, 使用数字视频显微镜分析成形件内部缺陷, 利用高速摄像机拍摄金属液滴的动态飞溅过程, 并定量分析溅射特征参数。结果 随着激光功率的增大, 能量密度升高, 总的溅射数量增大, 孔隙数量增多; 当扫描速度增大时, 能量密度降低, 总的溅射面积减小, 孔隙尺寸变小。当缺陷的圆度 $Circ \geq 0.731$ 或纵横比 $AR \leq 1.368$ 时, 缺陷形貌由不规则向规则演变。当能量密度 $E=95.24 \text{ J/mm}^3$ 时, 相对致密度达到 99.94%。经测量, 所有样品的孔隙率和孔隙尺寸的平均值分别为 2.249% 和 $2.774 \mu\text{m}^2$ 。结论 孔隙缺陷可分为不规则的匙孔缺陷和规则的气孔缺陷两类, 存在发生演变的圆度/纵横比门槛值。熔池震荡引起溅射特征变化, 对应产生不同形貌特征的缺陷。减小激光功率和增大扫描速度可降低能量密度, 使熔池震荡程度减弱, 从而抑制缺陷产生, 提高成形件的相对致密度。

关键词: 增材制造; 选区激光熔化; Inconel 718 合金; 孔隙缺陷; 溅射行为; 相对致密度

中图分类号: TG146.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)09-0378-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.09.044

Pore Defects of Inconel 718 Alloy Fabricated by Selective Laser Melting

WANG Zhi-qiang¹, WANG Xue-de¹, XIE Rui-kun², ZHOU Xin¹, ZHANG Pei-yu¹, LI Qiu-liang¹

(1.Key Laboratory of Airborne Plasma Dynamics, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2.94691 Military Unit, Fuzhou 350000, China)

ABSTRACT: The work aims to study the pore defects of Inconel 718 alloy fabricated by selective laser melting and scientifically classify the defects and explore the formation mechanism and then establish the corresponding relationship between the sputtering

收稿日期: 2019-11-18; 修订日期: 2020-02-23

Received: 2019-11-18; Revised: 2020-02-23

基金项目: 国家自然科学基金培育项目 (9186010207); 广东省重点研发计划 (2018B090905001); 国家自然科学基金 (51801231)

Fund: Supported by Training Program of the National Natural Science Foundation of China (9186010207), Guangdong Province Key Research and Development Plan (2018B090905001) and the National Natural Science Foundation of China (51801231)

作者简介: 王志强 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为选区激光熔化技术。

Biography: WANG Zhi-qiang (1995—), Male, Master, Research focus: selective laser melting.

通讯作者: 周鑫 (1983—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为增材制造技术。邮箱: dr_zhouxin@126.com

Corresponding author: ZHOU Xin (1983—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: additive manufacturing. E-mail: dr_zhouxin@126.com

引文格式: 王志强, 王学德, 谢瑞鹄, 等. 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.

WANG Zhi-qiang, WANG Xue-de, XIE Rui-kun, et al. Pore defects of Inconel 718 alloy fabricated by selective laser melting[J]. Surface technology, 2020, 49(9): 378-385.

characteristics of the molten pool and the defect morphology to optimize the process parameters to inhibit the formation of defects. The microstructure and chemical composition of Inconel 718 powder were observed with scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX), respectively. A digital video microscope was used to analyze the internal defects of the forming parts. The dynamic spatter process of metal droplets was filmed by high speed camera and the sputtering characteristic parameters were quantitatively analyzed. As the laser power increased, the energy density, the total number of sputtering drops and the number of pores al so increased. However, when the scanning speed increased, the energy density, the total sputtering area and the pore size decreased. Moreover, when the circularity of the defect was $Circ \geq 0.731$ or the aspect ratio of the defect was $AR \leq 1.368$, the defect morphology changed from irregular to regular. At the energy density $E=95.24 \text{ J/mm}^3$, the relative density reached 99.94%. The average values of porosity and pore size of all samples were 2.249% and $2.774 \text{ }\mu\text{m}^2$, respectively. Pore defects can be divided into two types: irregular keyhole defects and regular stomatal defects. There are evolving circularity/aspect ratio thresholds. The sputtering characteristics change due to the shock of the molten pool, which corresponds to the defects with different morphologies. Decreasing the laser power and increasing the scanning speed can reduce the energy density and weaken the shock degree of the molten pool, thus inhibiting the formation of defects and increasing the relative density of the formed parts.

KEY WORDS: additive manufacturing; selective laser melting; Inconel 718 alloy; pore defects; sputtering behavior; relative density

选区激光熔化（Selective Laser Melting, SLM）技术是基于离散堆积原理，控制激光束按照内部和轮廓填充信息选择性照射金属粉末使其熔化凝固，逐层构建三维实体的一种增材制造技术^[1-2]。SLM 技术具有研发周期短、净成形生产、适合复杂结构件制造、降低成本等优点，已广泛应用于航空航天、医疗和船舶制造等领域^[3-9]。Inconel 718（IN 718）是一种铌改性镍基高温合金，因其优异的抗腐蚀性、耐磨性和良好的焊接性能，且在高温条件下具有高的抗拉强度、疲劳强度、抗蠕变强度、断裂强度，常用作飞机发动机部件的制造中，如关键旋转部件、机翼、支承结构和压力容器等^[10-11]。

由于成形过程中温度场不稳定，熔池温度变化剧烈，SLM 零件中会出现球化效应、气孔、融合不良、裂纹等成形缺陷^[12-15]。孔隙缺陷是这些缺陷中的一种关键缺陷，严重降低成形致密度，低致密度会对 SLM 成形件的硬度、拉伸强度等力学性能产生不利的影响，影响所生产零件的机械性能和质量^[16-19]。因此，有必要对孔隙缺陷进行研究，优化工艺以提高致密度。

针对上述问题，国内外已开展了大量的研究。宋长辉等^[20]对激光功率、扫描速度、扫描间距 3 个关键 SLM 工艺参数进行了工艺验证与分析，获得了低孔隙率的 CoCrMo 零件，致密度达 99.02%。康进武等^[21]研究了激光功率和扫描速度对 IN 718 合金棒材的组织 and 力学性能的影响。随着激光功率的增加和扫描速度的降低，熔池的堆积趋于有序，孔隙缺陷减少，机械性能提高。Li 等^[22]对不同的激光能量输入下 316L 不锈钢零件的孔隙缺陷进行了研究，发现沿扫描速度变化的梯度方向，孔隙率逐渐增大。

Aboulkhair 等^[23]探讨了 AlSi10Mg 合金样品中的孔隙缺陷种类，并分析了每类缺陷的特征和形成机理。Galy 等^[24]研究了工艺参数与缺陷形貌之间的关系，揭示了不同缺陷形成的原因。Gong 等^[25-26]引入了工艺窗口用来显示激光熔覆 Ti-6Al-4V 粉末时激光功率和扫描速度对缺陷的影响，对孔隙特征进行了统计评价。

但以上研究缺乏对缺陷形貌进行定量分析及建立熔池溅射特征与缺陷形貌特征的关系。本文定量表征了缺陷的形状特征，分析了缺陷的微观形貌和演化过程。在此基础上，建立缺陷分类，将金属液滴飞溅与缺陷形貌相关联，探究了缺陷的形成机理。

1 试验

1.1 实验材料

采用 IN 718 粉末进行 SLM 实验，该粉末为气体雾化粉末，图 1a 为粉末在扫描电镜下的显微组织形貌，主要表现为球形、椭球形。使用 HHTA0014 激光粒径分析仪对粉末进行了测量，颗粒粒径分布在 24.085~46.333 μm （D10—D90），如图 1b 所示。粉末的化学组成用能量色散 X 射线光谱仪（EDX）测定，见表 1。

表 1 IN 718 粉末的化学成分

Tab.1 Chemical composition of IN 718 powder

wt.%

Ni	Cr	Fe	Mo	Nb	Co	Al	Ti
Bal.	20.20	19.20	3.00	5.01	0.09	0.52	0.85

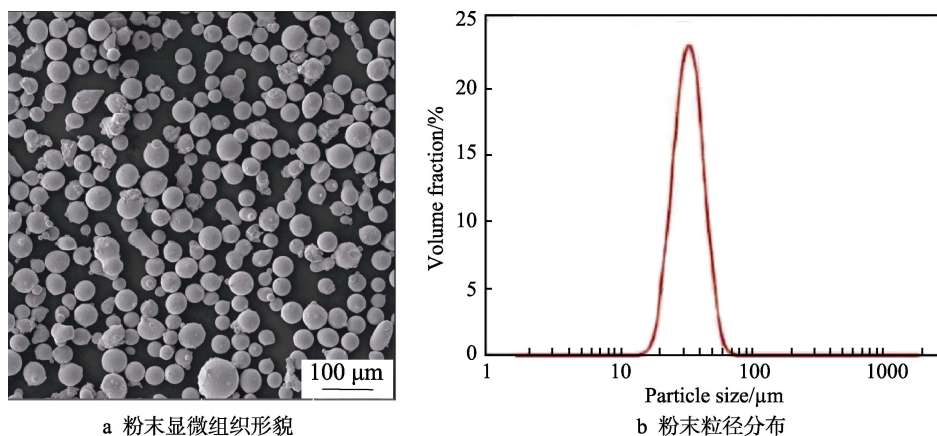


图1 IN 718 粉末的显微组织形貌和粒径分布

Fig.1 Microstructure and particle size distribution of IN 718 powder: a) micromorphology of powder; b) powder size distribution

1.2 实验设计及方法

本文采用 Di-Metal 50 选区激光熔化设备, 该设备由红外掺镜光纤激光器、扫描系统和路径规划控制软件等组成。激光器可选配的最高功率为 75 W, 激光辐射波长范围为 1060~1070 nm。扫描系统配有高精度扫描振镜, 最高扫描速度为 7 m/s。焊头配备焦距为 100 mm 的准直器, 最小光斑尺寸为 20 μm。成形腔尺寸为 50 mm×50 mm×50 mm, 分层厚度为 0.02~0.1 mm。供料方式采用双缸单向供粉。成形过程中通入高纯度氩气作为保护气体。

实验前, 考虑到 IN 718 粉末含水量的影响, 将粉末置于 DZF 型真空干燥箱中烘干(90 ℃下干燥 5 h 以上), 确保粉末具有良好的流动性及去除挥发性杂质。成形前, 向成形腔中通入氩气, 预抽真空以防止样品氧化。当成形腔氧含量降低到 0.01% 以下时, 继续通入氩气维持 1~2 min, 使空气充分排尽, 从而提高成形质量。基于激光功率和扫描速度的双因子实验方案如表 2 所示, 按方案重复做两组实验, 每组包含 16 个 10 mm×10 mm×10 mm 的块体样品, 每个样品分别对应不同的激光功率和扫描速度。将样品用环氧

树脂 HERMES 进行冷镶, 然后用 SiC 砂纸把样品打磨到 2000 目至表面只存在微小规则的划痕, 最后在金相磨抛机上, 分别用 6、2.5、1 μm 的高效金刚石抛光剂对试样进行抛光。能量密度可用式(1)表示^[27]。其中, E 为能量密度, P 为激光功率 (Laser Power), SS 为扫描速度 (Scanning Speed), HS 为扫描间距 (Hatch Spacing), LT 为铺粉层厚 (Layer Thickness)。

$$E = \frac{P}{SS \cdot HS \cdot LT} \quad (1)$$

表 2 基于激光功率和扫描速度的双因子实验方案
Tab.2 Two-factor experimental scheme based on laser power and scanning speed

Runs	Parameters	Min	Max	Increment
16	P/W	50	59	3
	$SS/(mm \cdot s^{-1})$	200	350	50
	$LT/\mu m$		25	
	$HS/\mu m$		60	

拍摄熔池溅射的装置示意图如图 2 所示, 该装置由 SLM 设备和高速相机组成。相机型号为 Phantom v2512, 摄像头前加置光学滤光片, 拍摄帧频为 3000 frames/s,

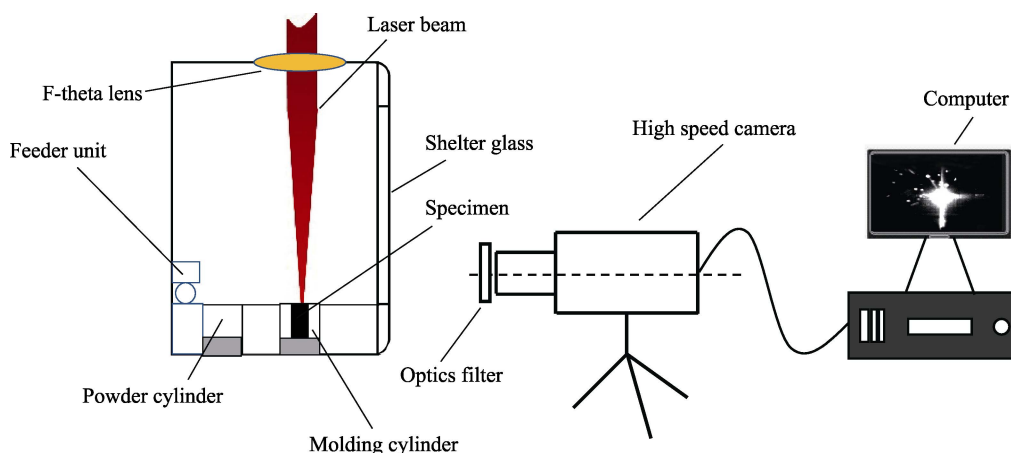


图2 拍摄熔池溅射的装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of the device for photographing the molten pool sputtering

曝光时间为 330 μs , 分辨率为 512×512。当高能激光作用到粉末时, 熔池迅速形成并伴随着飞溅的产生, 发出耀眼的亮光。相机是基于 CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor) 图像传感器, 将数字图像摄取目标转换成图像信号, 利用专用的图形处理系统, 可获得不同帧频下的时间序列图像。因此, 在高帧频拍摄模式下, SLM 成形过程中金属液滴的动态飞溅细节得以显示出来, 利于对熔池飞溅特征进行研究。

1.3 定量测试及表征样品

定量测试及表征的内容主要包括缺陷的轮廓形状、特征参数以及金属液滴的飞溅状况, 分别用数字视频显微镜 (HIROX, RH-8800)、ImageJ 软件和高速相机图像处理系统对实验结果进行表征。用数字视频显微镜对样品中缺陷的微观形貌进行观察, 然后利用 ImageJ 软件对图像进行阈值二值化处理, 通过颗粒分析得到圆度、纵横比、孔隙率及孔隙尺寸, 高速

相机图像处理系统用于对溅射面积和溅射数量进行表征。

2 结果及分析

2.1 孔隙缺陷种类及演化过程

对一组实验中 16 个样品横截面的缺陷形貌进行观察并编号, 每个编号对应一个样品, 每个样品包含一种工艺参数, 网格线交点处坐标为该编号所对应的工艺参数 (例如编号 1 所对应的参数为 50 W 和 200 mm/s), 见图 3。图 3 展示了不同激光功率和扫描速度对缺陷形貌的影响, 可将缺陷图划分为 I 区和 II 区两个区域。孔隙缺陷主要分为两类: 一类是在熔化-凝固过程中形成的气孔缺陷, 呈圆形或椭圆形, 见 I 区; 另一类是在搭接或逐层堆积过程中形成的匙孔缺陷, 呈条状或块状, 见 II 区。

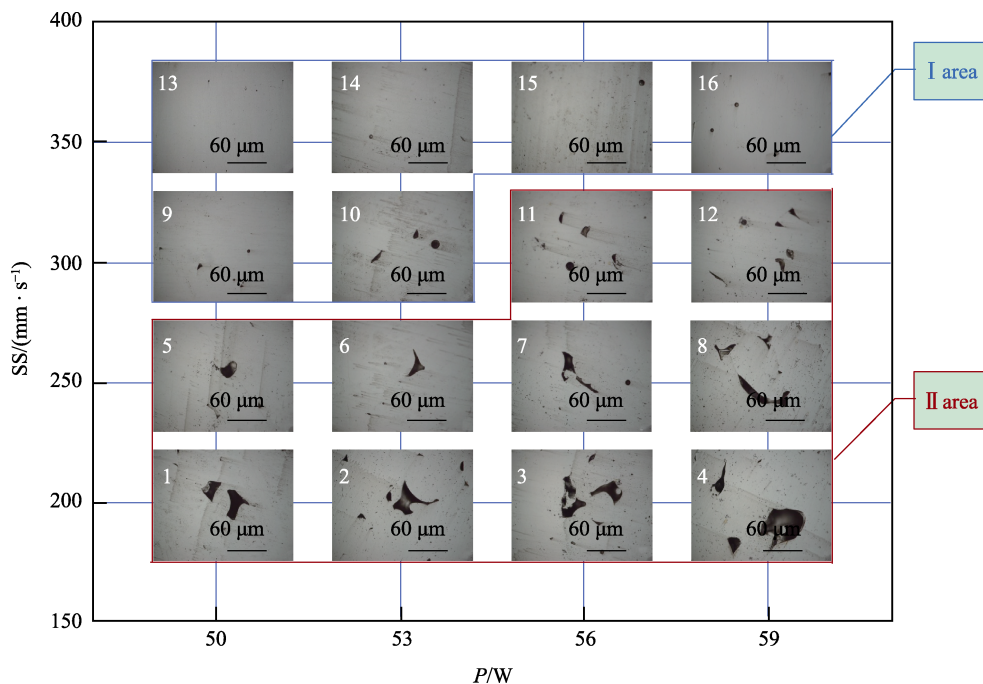


图 3 不同激光功率和扫描速度对缺陷形貌的影响

Fig.3 Effect of different laser power and scanning speed on defect morphology

所有孔隙缺陷的形貌可等效为“拟合椭圆”, 故可引入纵横比 AR (aspect ratio) 和圆度 Circ (circularity) 对缺陷形貌进行表征, 计算公式分别如式 (2) 和式 (3) 所示。其中, major_axis 为孔隙缺陷形貌的“拟合椭圆”长轴, minor_axis 为孔隙缺陷形貌的“拟合椭圆”短轴, area 是孔隙缺陷的面积, perimeter 为孔隙缺陷的周长。圆度值为 1 表示正圆, 越接近 0 表示形状越长。

$$AR = \frac{\text{major_axis}}{\text{minor_axis}} \quad (2)$$

$$\text{Circularity} = \frac{4 \cdot \text{area}}{\pi \cdot \text{perimeter}^2} \quad (3)$$

圆度越小, 纵横比越大, 缺陷的形貌越不规则, 故每个样品中缺陷形貌的最小圆度和最大纵横比能反映出整体缺陷形貌的规则程度。对图 3 中所有样品缺陷形貌的最小圆度和最大纵横比进行统计分析, 如图 4 所示。从图 4 可以得出, I 区缺陷圆度分布在 0.731~0.951, 纵横比分布在 1.051~1.368; II 区缺陷圆度分布在 0.192~0.725, 纵横比分布在 1.379~5.212。同时, 可发现当 $\text{Circ} \geq 0.731$ 或 $\text{AR} \leq 1.368$ 时, 匙孔缺陷开始演化为气孔缺陷, 故确定本实验条件下门槛圆度 $\text{Threshold}_{\text{Circ}} = 0.731$, 门槛纵横比 $\text{Threshold}_{\text{AR}} = 1.368$ 。原因在于激光功率和扫描速度会影响缺陷的形

状尺寸和数量,进而影响圆度和纵横比大小,因此有必要进一步研究工艺参数对缺陷数量和尺寸的影响。

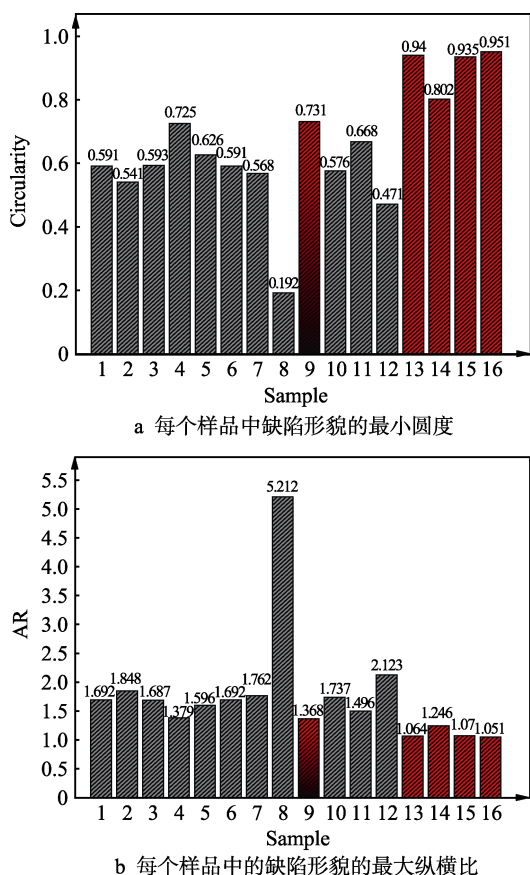


图4 不同样品中缺陷形貌的最小圆度和最大纵横比
Fig.4 Minimum circularity and maximum aspect ratio of defect morphologies in different samples: a) minimum circularity of defect morphology in each sample; b) maximum aspect ratio of defect morphology in each sample

2.2 工艺参数对缺陷数量和尺寸的影响

在本实验中,有 P 、 SS 两个因子变动,因子 P 取 4 个不同的水平 P_1 、 P_2 、 P_3 和 P_4 , SS 取四个不同的水平 SS_1 、 SS_2 、 SS_3 和 SS_4 ,为研究交互效应对实验结果的影响,在 (P, SS) 水平组合下相互独立进行两次实验,记结果为 X_{ijk} ,影响程度为 ε_{ijk} ,建立有交互效应的双因素方差模型,见式(4) — (14)。

$$\mu = \frac{1}{rs} \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s \mu_{ij} \quad (4)$$

$$\mu_i = \frac{1}{s} \sum_{j=1}^s \mu_{ij} \quad (5)$$

$$\mu_j = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \mu_{ij} \quad (6)$$

$$\alpha_i = \mu_i - \mu \quad (7)$$

$$\beta_j = \mu_j - \mu \quad (8)$$

$$\gamma_{ij} = \mu_{ij} - \mu - \alpha_i - \beta_j \quad (9)$$

$$X_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^r \alpha_i = 0 \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^s \beta_j = 0 \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^r \gamma_{ij} = 0 \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^s \gamma_{ij} = 0 \quad (14)$$

其中, $\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma^2)$, 相互独立; $i=1, 2, \dots, r$,

$j=1, 2, \dots, s$, $r=s=4$, $k=1, 2$; μ 为一般平均, μ_{ij} 为 (P_i, SS_j) 组合下实验结果的均值, α_i 为因子 P 的第 i 个的水平效应, β_j 为因子 SS 的第 j 个的水平效应, γ_{ij} 为因子 P 的第 i 个水平和 SS 的第 j 个水平的交互效应。

对所有样品的孔隙率和孔隙尺寸进行方差分析,分别计算 P 、 SS 及其组合 $SS \cdot P$ 下的平方和 ss 、自由度 df 、均方和 ms 及 F 值,得到孔隙率和孔隙尺寸的方差计算结果分别如表 3 和表 4 所示。

表3 因子 P 、 SS 及其组合 $SS \cdot P$ 对孔隙率方差的影响
Tab.3 Effects of factors P , SS and their combination $SS \cdot P$ on variance of porosity

Source	ss	df	ms	F value	Prob>F
SS	144.0535	3	48.0178	55.8719	1.07×10^{-8}
P	22.2220	3	7.4073	8.6189	0.0012
SS·P	14.7316	9	1.6368	1.9046	0.1250
Error	13.7508	16	0.8594		
Total	194.7580	31			

表4 因子 P 、 SS 及其组合 $SS \cdot P$ 对孔隙尺寸方差的影响
Tab.4 Effects of factors P , SS and their combination $SS \cdot P$ on variance of pore size

Source	ss	df	ms	F value	Prob>F
SS	57.7860	3	19.2620	20.7317	9.28×10^{-6}
P	25.8257	3	8.6086	9.2654	0.0009
SS·P	19.3968	9	2.1552	2.3196	0.0681
Error	14.8657	16	0.9291		
Total	117.8743	31			

从图 3 中可发现,工艺参数对缺陷数量和尺寸的影响规律如下:孔隙尺寸随着扫描速度的增大而减小,孔隙数量随着激光功率的增大而增多,所有样品测得的孔隙率和孔隙尺寸的平均值分别为 2.249% 和 $2.774 \mu\text{m}^2$,最低孔隙率达 0.06%。若 $P \geq 0.05$,则对应实验因子无显著影响;若 $P < 0.05$,则对应实验因子有显著影响;若 $P < 0.01$,则该实验因子有高度显著影响。从表 3 和表 4 分析得出, P 和 SS 均对孔隙率和孔隙平均尺寸有高度显著的影响,但 SS 是影响两者的最主要因素。表 3 和表 4 中 $P \cdot SS$ 对应的 P 值分别 0.1250 和 0.0681,均大于 0.05,故 $P \cdot SS$ 因子的

交互效应对孔隙率和孔隙尺寸无明显影响。

2.3 孔隙缺陷的形成机制

利用高速相机对成形过程中的金属液滴飞溅过程进行拍摄, 得到不同工艺参数下熔池的溅射过程图像, 见图 5a。对时间序列图像进行回放, 记录每个样品在 1 s 内飞溅剧烈的次数, 见图 5b。

如图 5a 所示, 当激光刚照射到粉末上时, 飞溅还

未形成, 此时熔池为稳定状态; 随着时间推移, 飞溅开始产生, 此时熔池为溅射状态。从图 5b 中可以看出, 在同一扫描速度下, 飞溅次数随着激光功率的增大而增多; 激光功率一定时, 扫描速度越大, 飞溅次数越少。这与能量密度变化引起熔池震荡的剧烈程度不同有关。对图 5a 中不同工艺参数的飞溅图像进行定量分析, 去除熔池面积后得到金属液滴的溅射面积, 如图 6 所示。

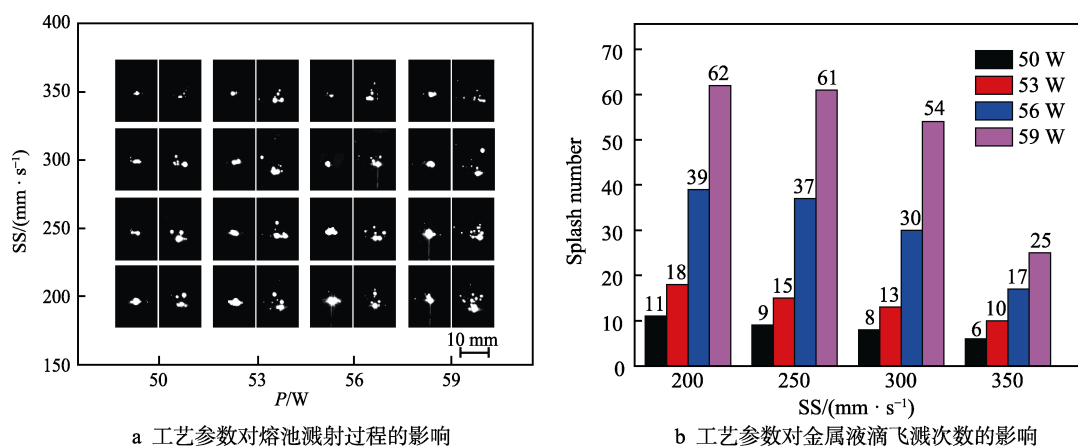


图 5 工艺参数对熔池溅射过程和金属液滴飞溅次数的影响

Fig.5 Effects of technological parameters on sputtering process in molten pool and splash number of metal droplets: a) effect of technological parameters on sputtering process in molten pool; b) effects of process parameters on splash numbers of metal droplets

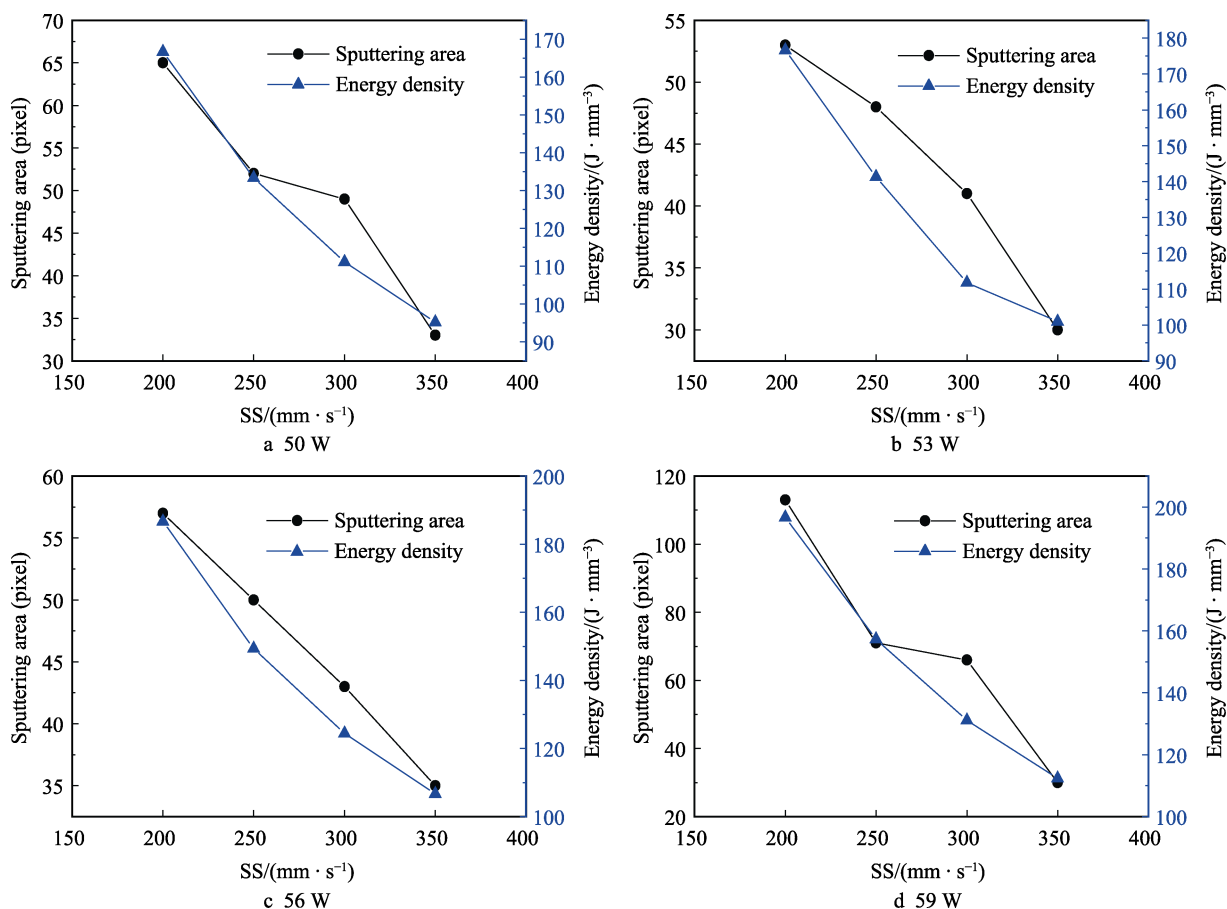


图 6 工艺参数对溅射面积和能量密度的影响

Fig.6 Effects of process parameters on sputtering area and energy density

如图6所示,随着扫描速度的增大,能量密度降低,金属液滴的溅射面积呈现不断减小的趋势,且飞溅次数不断减小(见图5b),故总的溅射面积减小。这导致熔池内金属蒸汽强度减弱,飞溅液滴的尺寸较小,快速凝固时空隙处液态金属未及时填充,形成小尺寸的缺陷,因而孔隙尺寸随扫描速度的增大而不断减小;当激光功率增大时,能量密度升高,金属液滴的飞溅数量增大(见图5a),且飞溅次数不断增多(见图5b),故总的溅射数量增大。这使得熔池剧烈震荡,产生较大的反冲压力,大液滴在冲击作用下被粉碎成许多小液滴,快速凝固时大量空隙未及时填充液态金属,形成大量孔隙,因而孔隙数量随激光功率的增大而增多。

3 结论

1) 孔隙缺陷可划分为两类:气孔缺陷(I区)和匙孔缺陷(II区)。纵横比AR和圆度Circ是用来表征缺陷形状特征的重要参数,当 $Circ \geq 0.731$ 或 $AR \leq 1.368$ 时,匙孔缺陷开始向气孔缺陷演化。

2) 激光功率和扫描速度对成形缺陷均有显著的影响,扫描速度是影响孔隙率和孔隙尺寸的最主要因子。经测得,当P为53~59 W、SS为200~350 mm/s时,所有样品的孔隙率和孔隙尺寸的平均值分别为2.249%和 $2.774 \mu m^2$,当能量密度 $E=95.24 J/mm^3$ 时,相对致密度高达99.94%。

3) 金属液滴溅射与孔隙缺陷形成密切相关。随着激光功率的增大,孔隙率升高;扫描速度增大,孔隙尺寸变小。原因在于工艺参数会决定激光能量的输入,影响金属液滴的溅射面积及数量。当激光功率增大时,能量密度升高,熔池震荡剧烈,液滴的溅射数量增大,故孔隙率升高;当扫描速度增大时,能量密度降低,液滴的溅射面积减小,熔池状态相对更加稳定,故孔隙尺寸减小。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] QI H, AZER M, RITTER A. Studies of standard heat treatment effects on microstructure and mechanical properties of laser net shape manufactured Inconel 718[J]. Metallurgical and materials transactions A, 2009, 40(10): 2410-2422.
- [4] KRUTH J P, MERCELIS P, VAN VAERENBERGH J, et al. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting[J]. Rapid proto-typing journal, 2005, 11(1): 26-36.
- [5] CHUNG NG C, SAVALANI M, CHUNG MAN H. Fabrication of magnesium using selective laser melting technique[J]. Rapid prototyping journal, 2011, 17(6): 479-490.
- [6] XIAO D, YANG Y, SU X, et al. Topology optimization of microstructure and selective laser melting fabrication for metallic biomaterial scaffolds[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(10): 2554-2561.
- [7] EDWARDS P, RAMULU M. Fatigue performance evaluation of selective laser melted Ti-6Al-4V[J]. Materials science and engineering: A, 2014, 598: 327-337.
- [8] KASPEROVICH G, HAUSMANN J. Improvement of fatigue resistance and ductility of TiAl6V4 processed by selective laser melting[J]. Journal of materials processing technology, 2015, 220: 202-214.
- [9] 马永, 朱红梅, 孙楚光, 等. TC4 钛合金表面激光熔覆掺 Y_2O_3 复合涂层的显微组织和性能[J]. 表面技术, 2017, 46(6): 238-243.
- [10] MA Yong, ZHU Hong-mei, SUN Chu-guang, et al. Microstructure and properties of Y_2O_3 -doped laser cladded composite coating on TC4 titanium alloy[J]. Surface technology, 2017, 46(6): 238-243.
- [11] HOSSEINI E, POPOVICH V A. A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718[J]. Additive manufacturing, 2019, 30: 100877.
- [12] 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.
- [13] 周鑫. 激光选区熔化微尺度熔池特性与凝固微观组织[D]. 北京: 清华大学, 2016.
- [14] ZHOU Xin. Research on micro-scale melt pool characteristics and solidified microstructures in selective laser melting[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [15] HU X A, ZHAO G L, JIANG Y, et al. Experimental investigation on the LCF behavior affected by manufacturing defects and creep damage of one selective laser melting nickel-based superalloy at 815 °C[J]. Acta metallurgica sinica (english letters), 2019, 657: 1-14.
- [16] JEON J M, PARK J M, YU J H, et al. Effects of microstructure and internal defects on mechanical anisotropy and asymmetry of selective laser-melted 316L austenitic stainless steel[J]. Materials science and engineering: A, 2019, 763: 138152.
- [17] YERATAPALLY S R, LANG C, GLAESSGEN E H. A computational study to investigate the effect of defect geometries on the fatigue crack driving forces in powder-bed AM materials[C]//AIAA scitech 2020 forum. Orlando: Convergent Science, 2020.
- [18] ZHANG P, ZHOU X, CHENG X, et al. Elucidation of bubble evolution and defect formation in directed energy deposition based on direct observation[J]. Additive manufacturing, 2020, 32: 101026.

- [17] WANG Z, XIAO Z, TSE Y, et al. Optimization of processing parameters and establishment of a relationship between microstructure and mechanical properties of SLM titanium alloy[J]. Optics & laser technology, 2019, 112: 159-167.
- [18] MISHUROVA T, ARTZT K, HAUBRICH J, et al. New aspects about the search for the most relevant parameters optimizing SLM materials[J]. Additive manufacturing, 2019, 25: 325-334.
- [19] 安超, 张远明, 张金松, 等. 选区激光熔化成型钴铬合金致密度与孔隙缺陷实验研究[J]. 应用激光, 2018, 38(5): 30-37.
AN Chao, ZHANG Yuan-ming, ZHANG Jin-song, et al. Experimental study on density and pore defects of cobalt-chromium alloy fabricated by selective laser melting[J]. Applied laser, 2018, 38(5): 30-37.
- [20] 宋长辉, 杨永强, 王赞达, 等. CoCrMo 合金激光选区熔化成型工艺及其性能研究[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0603001.
SONG Chang-hui, YANG Yong-qiang, WANG Yun-da, et al. Research on process and property of CoCrMo alloy directly manufactured by selective laser melting[J]. Chinese journal of lasers, 2014, 41(6): 0603001.
- [21] KANG J W, YI J H, WANG T J. Effect of laser power and scanning speed on the microstructure and mechanical properties of SLM fabricated Inconel 718 specimens[J]. Material sci & eng, 2019, 3(3): 72-76.
- [22] LI R, LIU J, SHI Y, et al. 316L stainless steel with gradient porosity fabricated by selective laser melting[J]. Journal of materials engineering and performance, 2010, 19(5): 666-671.
- [23] ABOULKHAIR N T, EVERITT N M, ASHCROFT I, et al. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting[J]. Additive manufacturing, 2014, 1: 77-86.
- [24] 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.
- [25] GONG H, RAFI K, STARR T, et al. The effects of processing parameters on defect regularity in Ti-6Al-4V parts fabricated by selective laser melting and electron beam melting[C]//24th annual international solid freeform fabrication symposium—An additive manufacturing conference. Austin: TITLE, 2013: 12-14.
- [26] GONG H, RAFI K, GU H, et al. Analysis of defect generation in Ti-6Al-4V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes[J]. Additive manufacturing, 2014, 1: 87-98.
- [27] THIJS L, VERHAEGHE F, CRAEGHS T, et al. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V[J]. Acta materialia, 2010, 58(9): 3303-3312.

(上接第 369 页)

- [8] 陈燕, 张广彬, 韩冰, 等. 磁力研磨法对陶瓷管内表面超精密抛光技术的试验研究[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(2): 131-137.
CHEN Yan, ZHANG Guang-bin, HAN Bing, et al. Experimental investigation of magnetic abrasive finishing for super precision polishing of inner surface of the ceramic tube[J]. Tribology, 2015, 35(2): 131-137.
- [9] 梁伟, 张桂香, 张鹏, 等. 磁力研磨光整加工 ZrO₂ 陶瓷材料试验研究[J]. 表面技术, 2018, 47(9): 310-316.
LIANG Wei, ZHANG Gui-xiang, ZHANG Peng, et al. Experimental research on magnetic abrasive finishing for ZrO₂ ceramic materials[J]. Surface technology, 2018, 47(9): 310-316.
- [10] 陈燕, 张旭. 铁基白刚玉磁性磨料的制备工艺[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2013, 33(3): 12-16.
CHEN Yan, ZHANG Xu. Preparation technology of iron-based white corundum magnetic abrasive grits[J]. Diamond abrasives engineering, 2013, 33(3): 12-16.
- [11] 黄虎. 粘弹性磁性磨料光整加工机理及实验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.
HUANG Hu. Finishing mechanism and experiments study of viscoelastic magnetic abrasive[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014.
- [12] 侯朋坤, 杨胜强, 李文辉, 等. 粘结法制备磁性磨料及其对轴承钢外圆表面的光整加工研究[J]. 现代制造工程, 2015(3): 75-78.
HOU Peng-kun, YANG Sheng-qiang, LI Wen-hui, et al. The bounded magnetic abrasive particles and the research on bearing steel cylindrical surface finishing processing[J]. Manufacturing engineering, 2015(3): 75-78.
- [13] 赵文渊, 李文辉, 白小云, 等. 采用粘结法的磁性磨粒制备工艺及实验研究[J]. 中国机械工程, 2019, 30(5): 535-541.
ZHAO Wen-yuan, LI Wen-hui, BAI Xiao-yun, et al. Preparation technology and experimental study of magnetic abrasive particles by bonding method[J]. China mechanical engineering, 2019, 30(5): 535-541.
- [14] 余先纯, 孙德林. 胶黏剂基础[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
YU Xian-chun, SUN De-lin. Adhesive foundation[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- [15] 李广宇, 李子东, 吉利, 等. 环氧胶黏剂与应用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
LI Guang-yu, LI Zi-dong, JI Li, et al. Epoxy adhesives and application technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [16] 陈红玲, 张银喜, 郭燕莹. 粘结磁性磨料的研究[J]. 太原理工大学学报, 2001(5): 533-535.
CHEN Hong-ling, ZHANG Yin-xi, GUO Yan-ying. Research on preparation of magnetic abrasive grains with binding method[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2001(5): 533-535.