

SLM过程中线性能量密度和保护气流方向 对飞溅的影响

刘琦^{1a,1b}, 安达^{1a,1b}, 李晓丹², 张广权^{1a,1b}, 山玥^{1a,1b}, 杨光^{1a,1b}

(1. 沈阳航空航天大学 a. 机电工程学院, b. 辽宁省高性能金属增材制造工程研究中心, 沈阳 110136;

2. 中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司 创新分公司, 沈阳 110850)

摘要: 为研究激光选区熔化过程中产生的熔池及飞溅行为, 搭建高速相机监测平台。利用高速相机在不同的保护气流方向和线性能量密度下以不同曝光时间拍摄单道扫描过程中的熔化图像。提出一种图像处理办法, 对采集到的熔化过程图像进行处理。从飞溅数量、面积、角度等方面对保护气流方向和不同线性能量密度下飞溅的特征进行具体分析。研究表明, 与线性能量密度相比, 保护气流方向对飞溅特征的影响更为显著, 建议在激光选区熔化过程中使用较低的线性能量密度(在适当范围内)结合逆气流方向来抑制飞溅。

关键词: 激光选区熔化; 飞溅; 熔池; 线性能量密度; 保护气流方向

中图分类号: TH142; TG665

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1248.2026.04.003

The influence of linear energy density and shielding gas flow direction on spatter in SLM process

LIU Qi^{1a,1b}, AN Da^{1a,1b}, LI Xiaodan², ZHANG Guangquan^{1a,1b}, SHAN Yue^{1a,1b}, YANG Guang^{1a,1b}

(1. a. College of Mechatronics Engineering, b. Liaoning Provincial High-Performance Metal Additive Manufacturing

Engineering Research Center, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. Science and Technology Innovation Branch, AVIC Shenyang Aircraft Industrial (Group)

CO., Ltd., Shenyang 110850, China)

Abstract: In order to study the molten pool and spatter behavior during selective laser melting, a high-speed camera monitoring platform was built. The high-speed camera was used to capture the melting images in the single-channel scanning process under different shielding gas directions and linear energy densities at different exposure times. An image processing method was proposed to process the collected melting process images. The characteristics of spatter under different linear energy density and shielding gas direction were analyzed from the aspects of spatter number, area and angle. It is found that compared with the linear energy density, the direction of the shielding gas direction has a

收稿日期: 2026-04-07 修回日期: 2026-05-05 接受日期: 2026-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(项目编号: 52375359); 沈阳市科学技术计划重大科技专项(项目编号: 23-401-1-02)。

作者简介: 刘琦(1999—), 女, 辽宁大连人, 博士研究生, 主要研究方向为航空航天结构增材制造, E-mail: liuqi09189467@163.com; 杨光(1978—), 男, 辽宁沈阳人, 教授, 博士, 主要研究方向为航空航天结构增材制造, E-mail: yangguang@sau.edu.cn。

more significant effect on the spatter characteristics. It is recommended to use a lower linear energy density (within an appropriate range) in the selective laser melting process combined with the reverse airflow direction to suppress the spatter.

Key words: selective laser melting; spatter; molten pool; linear energy density; shielding gas flow direction

激光选区熔化(selective laser melting, SLM)技术是将激光作为热源,按照预先在程序中设置的路径,逐层扫描铺设好的粉末材料并使其在一定程度上熔化形成熔池,再经冷却凝固后成形。该技术具有加工周期短、节省试验材料成本、可加工材料种类丰富和易于成形复杂结构的零件等众多优点。SLM目前已广泛应用于生物医疗、航空航天^[1]、汽车和军工制造业等领域^[2]。在SLM成形过程中,存在一系列复杂的物理现象。图1为SLM过程中的复杂物理现象,展示了粉末颗粒对激光辐射一部分能量的吸收、粉末颗粒之间的传热、粉末颗粒与基板间的传热、粉末颗粒的熔化与凝固、高温熔体蒸发的金属蒸汽与周围环境之间的辐射传热、金属熔池的流动与传热、高温熔体和粉末飞溅等现象。此过程中复杂的热传导伴随着飞溅产生,此现象不可避免,且极大地影响了制造过程的稳定性、能量利用率和成形件的质量精度^[3]。

学者普遍认为加工过程中的能量密度和气体环境与零件的力学性能和致密度密切相关。

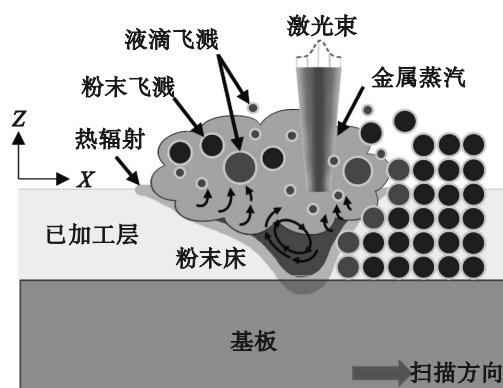


图1 SLM过程中的复杂物理现象

关。一方面,能量密度会影响飞溅物的数量和体积^[4],Ye等^[5]发现能量密度尤其影响粉末颗粒的熔化状态;Alkahari等^[6]发现减少能量密度或增大层厚都将导致熔池面积缩减,熔池与基板间的润湿作用减少,熔池运动稳定性降低,飞溅显著;Salman等^[7]发现与无轮廓扫描策略相比,采用轮廓扫描的组织更细,可检测的孔隙率或未熔化颗粒较少,对应的飞溅也最少。另一方面,Matthews等^[8]发现气流对飞溅的产生有较大影响;Bin等^[9]通过量化分析飞溅物的分布情况,发现控制保护气体流量可减少飞溅物。由于激光、粉末与成形部分的相互作用复杂交错,飞溅的数量和种类增多,监测也更为复杂。目前已有少量监测飞溅的技术,包括超高速光学相机成像^[10]、纹影成像^[8]、超高速同步加速器X射线成像^[11]、红外视频成像^[12]等,可清晰地监测激光与粉末颗粒之间的相互作用过程。

在SLM成形过程中,加工参数的设定对零件质量有很大的影响。然而,尚未有学者对不同加工参数下液滴飞溅特性进行统计研究。本文采用高速摄像机对SLM的飞溅过程进行捕捉,得到不同加工参数(线能量密度、保护气流方向)下的飞溅数量、面积和角度。最后,对未来研究方向进行探索,为相关领域研究提供参考。

1 实验设计

实验在实验室的SLM设备上开展(西安铂力特生产的BLT-S210SLM成形设备),该设备的光纤激光器波长为1 060 nm,激光功率最高

可达 500 W。S210 最大成形尺寸为 105 mm×105 mm×200 mm。使用气雾化 316L 不锈钢球形粉末进行单熔道成形实验,316L 不锈钢球形粉末的粒度分布及粒径如表 1 所示。图 2 为 S210 SLM 实验设备的实拍图。利用高速相机(iX-Cameras 公司生产的 i-SPEED3 系列高速摄像机)和滤光片截止波段为 810 nm 的变焦显微光学镜头,以 2 000 fps 的速度拍摄。粉末层厚度为 50 μm,根据 Liu 等^[13]的研究,将保护气流方向设为逆气流(用 GD-L 表示)和顺气流(用 GD-W 表示)的扫描方向,气流速度分布为 1.5 m/s。

表 1 316L 不锈钢球形粉末的粒度分布及粒径

粒度分布	粒径 $d/\mu\text{m}$
D10	21.0
D50	34.3
D90	56.5

试验主要分为以下两个部分:1)能量输入:在保持 SLM 工艺充分熔化的条件下,设定

激光功率为 205 W、扫描速度为 1 020 mm/s,高速相机的曝光时间为 66 μs,分析 SLM 过程中飞溅的形成。2)激光加工参数对飞溅形成的影响:聚焦研究线性能量密度和气流方向对液滴飞溅的影响,分别对线性能量密度为 0.15、0.20、0.25、0.30 J/mm 及气流方向 GD-L、GD-W 下的 24 种场景进行激光熔化实验,其工艺参数如表 2 所示,并采集实验过程中的飞溅图像信息。线性能量密度的计算公式为

$$E=P/v \tag{1}$$



图 2 实验设备实拍图

表 2 激光熔化实验工艺参数

试验组别	激光功率 P/W	扫描速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	线性能量密度 $E/(\text{J}\cdot\text{mm}^{-1})$
1	120	780	0.15
2	150	970	0.15
3	180	1 165	0.15
4	180	875	0.20
5	210	1 020	0.20
6	240	1 165	0.20
7	240	930	0.25
8	270	1 050	0.25
9	300	1 165	0.25
10	300	970	0.30
11	330	1 070	0.30
12	360	1 165	0.30

在数值模拟中,用于模拟计算的粉末粒径在 15~53 μm 之间,且这些 316 L 不锈钢球形粉末粒径的分布遵从正态分布。激光吸收率恒定为 0.6,激光光束半径为 35 μm,饱和蒸汽压力为 1.013×10⁵ Pa,惰性保护气流为

氩气。仿真选用 316 L 不锈钢材料的热物理参数,其部分物理参数如表 3 所示。模拟中采用的 316 L 不锈钢球形粉末的几何参数与实验保持一致。

表 3 316L 不锈钢材料的部分物理参数	
材料参数	数值
固相线温度 T_s/K	1 650
液相线温度 T_L/K	1 731
沸点 T_b/K	3 134
熔化潜热 $L_m/(J \cdot kg^{-1})$	2.77×10^5
蒸发潜热 $L_v/(J \cdot kg^{-1})$	6.34×10^6
摩尔质量 $M/(g \cdot mol^{-1})$	56.299
热辐射系数 ϵ	0.4
理想气体常数 $R/(J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1})$	8.314
初始温度 T_0/K	293

2 图像处理与分析

在图像处理过程中,每组选取 50 帧,并增加有效帧间间隔^[14],确保可以采集到足够多且可靠的数据信息以进行后续分析。图 3 是在 GD-L 条件下采集的原始图像,图 4 是高速摄像机在 GD-W 条件下采集的原始图像。图像中收集到的信息包括熔池、羽流和液滴飞溅。

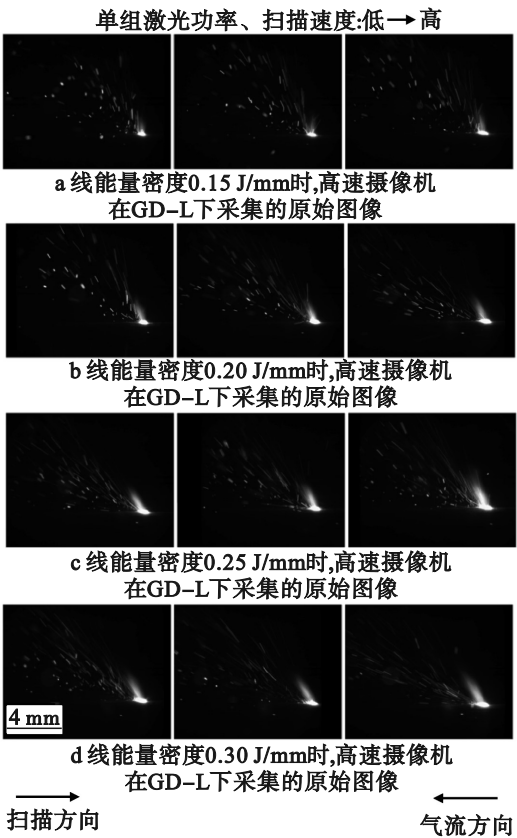


图 3 高速摄像机在 GD-L 条件下采集的原始图像

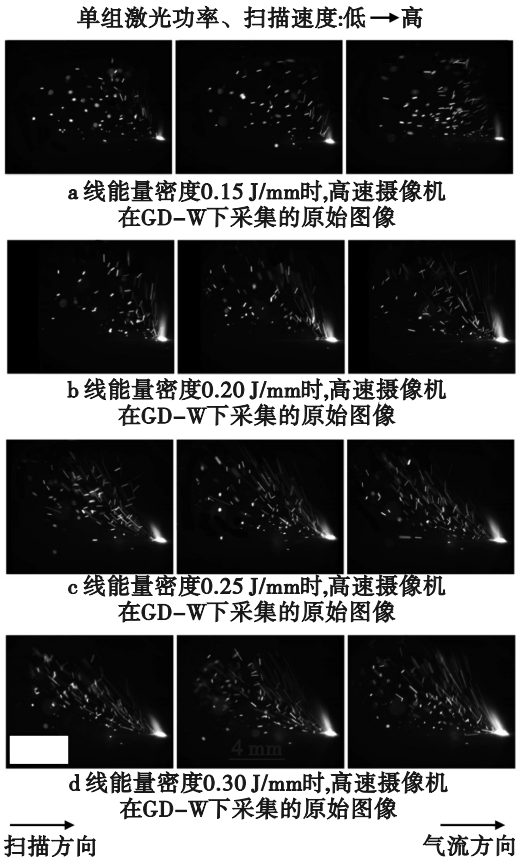


图 4 高速摄像机在 GD-W 条件下采集的原始图像

对采集到的图像进行一系列处理,目的是从原始图像中提取出有用的飞溅信息,以便进行飞溅运动的表征及统计分析。首先,使用均值滤波器^[15]去除可能干扰图像分割的噪声因素。其次,采用阈值分割^[16]的方法,设定一定的阈值范围对所选区域进行处理。最后,根据提取的飞溅特征信息计算出飞溅的面积、数量和角度等。

3 结果与讨论

3.1 SLM 成形过程中飞溅的形成过程

SLM 成形过程中激光与物质相互作用会产生复杂多样的物理现象,对 SLM 成形质量有着重要的影响。图 5 为 SLM 成形 316L 不锈钢球形粉末各物理现象演变过程,激光功率为 205 W,扫描速度为 1 020 mm/s。

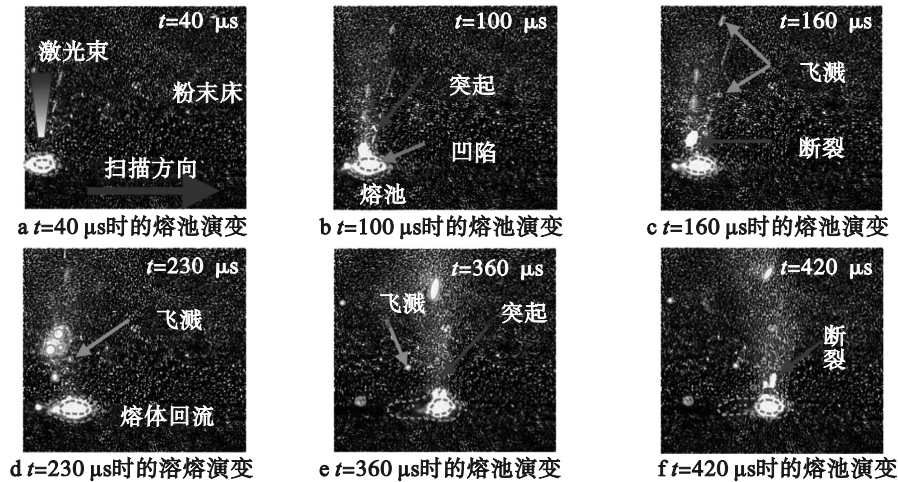


图 5 SLM 成形 316L 不锈钢球形粉末各物理现象演变的过程

如图 5 所示,激光出光后约 $40\ \mu\text{s}$,粉末床表面金属粉末颗粒在激光作用下熔化形成熔池。在 $t=100\ \mu\text{s}$ 时,在金属蒸汽诱导的反冲压力充足的情况下,熔池凹陷区域能够进一步发展成为熔池小孔模式。在 $t=160\ \mu\text{s}$ 时,蒸发持续发生,表面凸起的自身重力开始和表面张力对抗,熔体突起发展成为一个向后喷射的倾斜金属液柱。在 $t=230\ \mu\text{s}$ 时,当凸起熔体获得足够的动量以摆脱表面张力的作用时,液柱发生断裂,熔池中大量熔体被排出,液柱末端断裂后形成液滴飞溅,向斜后方飞行。在 $t=360\ \mu\text{s}$ 时,向

后翻涌的熔体与向前回落的液柱聚集,发生熔体突起。在 $t=420\ \mu\text{s}$ 时,后涌形成的熔体突起来回振荡,在熔池表面张力的束缚下维持短暂的动态平衡。综上,SLM 成形中的熔池运动伴随飞溅的产生,且熔池运动具有一定的周期性。

根据已有的研究成果^[17],能量输入在保持 SLM 工艺充分熔化的条件下,设定激光功率为 $300\ \text{W}$,扫描速度为 $1\ 500\ \text{mm/s}$ 时,SLM 成形过程 316L 不锈钢球形粉末熔池表面温度及形貌的演变如图 6 所示,验证了实验发现的熔池运动规律。

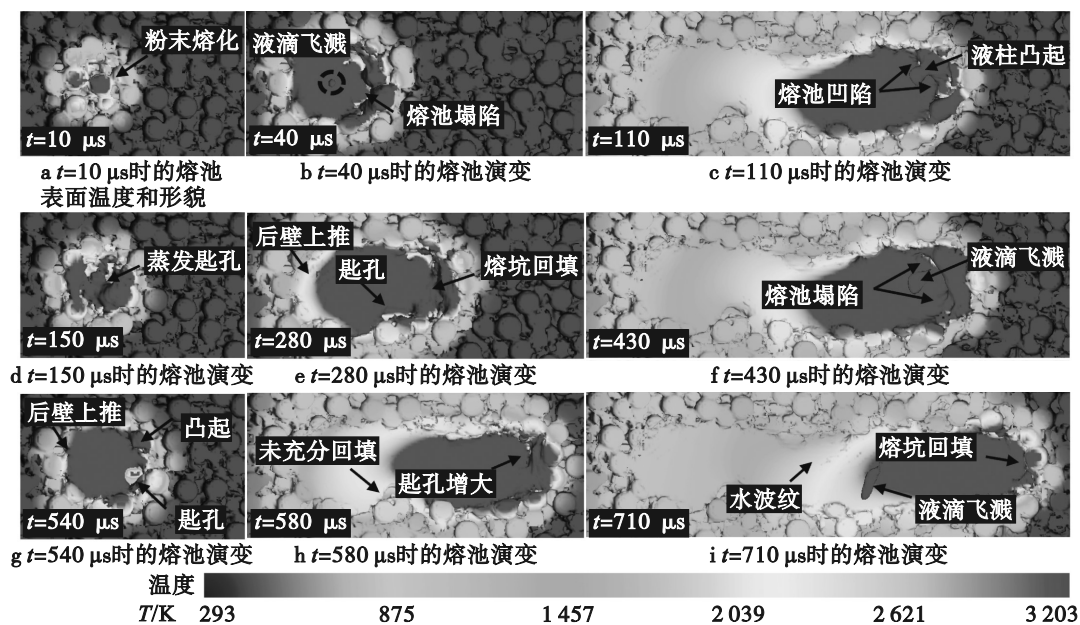


图 6 熔池表面温度及形貌演变

3.2 不同线能量密度下液滴飞溅的特征评价

图 7 为不同线能量密度下液滴飞溅的特征评价,从图 7a—7d 可以看出,在 4 组能量密度下,每一帧的飞溅数量与总像元面积的平均值和标准差都在一定的范围内变化,这表明激光熔化过程中飞溅运动呈现波动性。随着能量密度增大,飞溅数量与总飞溅面积整体均先减

小后增大,较低或较高的激光功率与扫描速度都带来大量的液滴飞溅。此外,0.30 J/mm 线能量密度下的飞溅数明显大于其他情况,0.20 J/mm 线能量密度下的飞溅数整体均保持在较低水平。平均飞溅数量与面积的变化趋势大致一致,且相较于 GD-L,在 GD-W 下会产生更多飞溅。

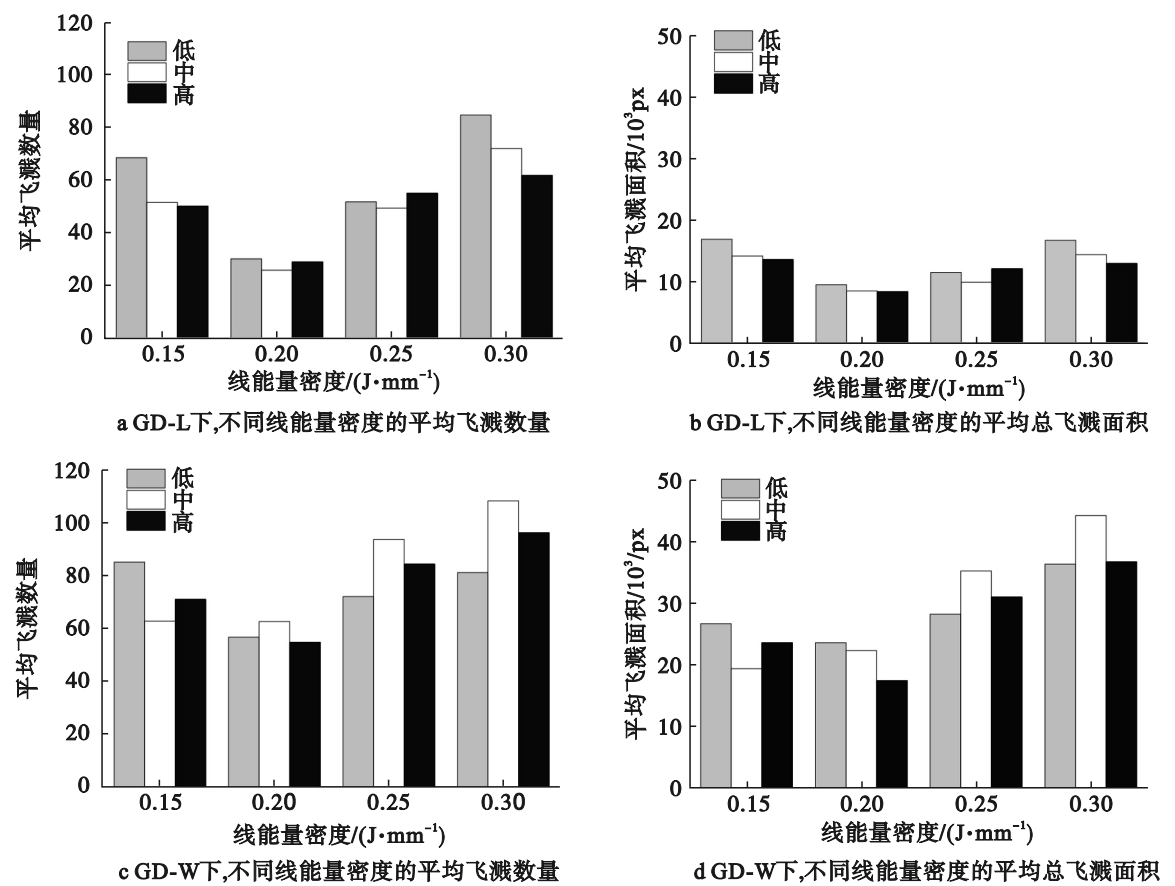


图 7 不同线能量密度下液滴飞溅的特征评价

4 结论

- 1)在激光选区熔化过程中,液滴飞溅特征与气流方向及线能量密度有较强相关性。
- 2)SLM 过程中熔池运动伴随飞溅产生,且熔池运动具有一定的周期性。
- 3)与 GD-W 工艺相比,在 GD-L 下,产生的飞溅数量与飞溅总面积更小,更利于 SLM 过

- 程中飞溅物的去除。
- 4)随着线能量密度增大,飞溅数量整体增多。
- 5)线能量密度为 0.20 J/mm 时,飞溅总数最少;线能量密度为 0.15 J/mm 和 0.25 J/mm 时,飞溅数量相近,0.30 J/mm 条件下飞溅数量最多。
- 6)结合不同线能量密度和保护气流方向

飞溅的分析,建议采用0.20 J/mm线能量密度并逆扫描方向施加保护气流,以保证成形过程中有较少的飞溅产生。

参考文献(References):

- [1] 邓怀波,陈玉华,李树寒,等.NiTi形状记忆合金激光增材制造研究进展[J].稀有金属材料与工程,2019,48(12):4119-4130.
- [2] 张亚莲,常若寒,姚草根,等.增材制造技术的应用进展:由3D到4D[J].宇航材料工艺,2022,52(2):67-75.
- [3] Guo Y L, Jia L N, Kong B, et al. Single track and single layer formation in selective laser melting of niobium solid solution alloy[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(4): 860-866.
- [4] 张衡,杨可.增材制造的现状与应用综述[J].包装工程,2021,42(16):9-15.
- [5] Ye D S, Zhu K P, Fuh J Y H, et al. The investigation of plume and spatter signatures on melted states in selective laser melting[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 111: 395-406.
- [6] Alkahari M R, Furumoto T, Ueda T, et al. Melt pool and single track formation in selective laser sintering/selective laser melting[J]. Advanced Materials Research, 2014, 933: 196-201.
- [7] Salman O O, Brenne F, Niendorf T, et al. Impact of the scanning strategy on the mechanical behavior of 316L steel synthesized by selective laser melting[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 45: 255-261.
- [8] Matthews M J, Guss G, Khairallah S A, et al. Denudation of metal powder layers in laser powder bed fusion processes[J]. Acta Materialia, 2016, 114: 33-42.
- [9] Bin A A, Pham Q C. Study of the spatter distribution on the powder bed during selective laser melting[J]. Additive Manufacturing, 2018, 22: 86-97.
- [10] Bidare P, Bitharas I, Ward R M, et al. Fluid and particle dynamics in laser powder bed fusion[J]. Acta Materialia, 2018, 142: 107-120.
- [11] Cunningham R, Zhao C, Parab N, et al. Keyhole threshold and morphology in laser melting revealed by ultrahigh-speed X-ray imaging[J]. Science, 2019, 363(6429): 849-852.
- [12] Grasso M, Colosimo B M. A statistical learning method for image-based monitoring of the plume signature in laser powder bed fusion[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 57: 103-115.
- [13] Liu Z X, Yang Y Q, Han C J, et al. Effects of gas flow parameters on droplet spatter features and dynamics during large-scale laser powder bed fusion[J]. Materials & Design, 2023, 225: 111534.
- [14] 林琳.多尺度特征融合下的高帧频图像关键目标识别[J].黑龙江工业学院学报(综合版),2024,24(3):73-79.
- [15] 郑佳慧.基于均值和中值滤波的关联成像去噪方法研究[D].南京:南京邮电大学,2023.
- [16] 朱正云,许平,陆迎东,等.基于机器视觉的镍板表面气孔分割算法研究[J].传感器与微系统,2024,43(5):19-22.
- [17] Lu C, Zhang R H, Wei X H, et al. An investigation on the oxidation behavior of spatters generated during the laser powder bed fusion of 316L stainless steel[J]. Applied Surface Science, 2022, 586: 152796.

(责任编辑:齐飞 英文审校:侯宁)