

激光与光电子学进展

基于最大熵阈值分割算法的激光选区熔化过程 溅射特征研究

赵林君¹, 张国庆^{2,3*}, 张大林¹, 李志文⁴

¹南昌职业大学工程技术学院, 江西 南昌 330500;

²武汉大学工业科学研究院, 湖北 武汉 430072;

³武汉大学深圳研究院, 广东 深圳 518057;

⁴江西制造职业技术学院机械工程学院, 江西 南昌 330095

摘要 激光选区熔化(SLM)加工过程中的溅射形态随工艺参数变化,难以实现所有工艺参数下的溅射提取。基于传统阈值分割的溅射提取方法仅支持部分工艺参数且没有误差分析工作,处理结果不能反映真实溅射状态。基于高速摄像机采集的SLM过程溅射图像,提出一种强鲁棒性图像处理方法对其进行提取和处理。图像处理方法包含五个步骤,其中阈值分割过程基于最大熵阈值分割算法完成。结果表明,该溅射图像处理方法可准确提取多工艺参数下的溅射信息。当激光功率在100~150 W范围时,溅射面积和数量的变化取决于粉末熔化状态;当激光功率在150~200 W范围时,溅射面积和数量的减少由溅射叠加导致。

关键词 材料; 溅射提取; 最大熵阈值分割; 图像处理; 激光选区熔化

中图分类号 TH164

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1916004

Investigation of Spatter Characteristics in Selective Laser Melting Based on Maximum Entropy Threshold Segmentation Algorithm

Zhao Linjun¹, Zhang Guoqing^{2,3*}, Zhang Dalin¹, Li Zhiwen⁴

¹College of Engineering and Technology, Nanchang Vocational University, Nanchang 330500, Jiangxi, China;

²Institute of Technological Sciences, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China;

³Shenzhen Research Institute, Wuhan University, Shenzhen 518057, Guangdong, China;

⁴School of Mechanical Engineering, Jiangxi Technical College of Manufacturing,
Nanchang 330095, Jiangxi, China

Abstract The spatter morphology during selective laser melting (SLM) processing varies with process parameters, and it is difficult to achieve spatter extraction under all process parameters. The spatter extraction method based on traditional threshold segmentation only supports some process parameters and has no error analysis work, and the processing results cannot reflect the real spatter state. This paper proposes a robust image processing method to extract and process them based on the spatter images of the SLM process collected by high-speed cameras. The image processing method includes five steps, in which the threshold segmentation process depends on maximum entropy threshold segmentation algorithm. The results show that the spatter image processing method can accurately extract the spatter information under multiple process parameters. When the laser power is in the range from 100 W to 150 W, the change in the spatter area and number is determined by the molten state of the powder. And the reduction of spatter area and number is caused by spatter superposition when the laser power is in the range from 150 W to 200 W.

Key words materials; spatter capture; maximum entropy threshold algorithm; image processing; selective laser melting

收稿日期: 2021-09-13; 修回日期: 2021-09-27; 录用日期: 2021-10-08

基金项目: 2020年江西省教育厅科学技术研究项目(206307)、中央高校基本科研业务费专项资金资助(2042021kf0034)、广东省基础与应用基础研究基金(2020A1515110790)

通信作者: *guoqingzhang_1989@126.com

1 引言

选择性激光熔化(SLM)是一项新兴制造技术,该技术以计算机三维 CAD 数据模型为基础,运用离散-堆积的原理,在软件与数控系统的控制下将材料熔化逐层堆积,直接制造具有复杂结构的三维部件^[1]。SLM 技术为高性能复杂结构金属构件的低成本、短周期、净成形制造提供了一体化解决方案,在航空航天等领域具有广阔的应用及发展前景^[2]。近年来,尽管选择性激光熔化技术取得了重大进展^[3-4],但实际加工中仍有一些缺陷产生影响工艺稳定性^[5],特别是溅射^[6]。

马兰戈尼效应和反冲压力的作用会影响熔池稳定性,产生的高压金属蒸气和等离子体会挤出熔池中的熔融金属,从而产生溅射^[7-9]。溅射的发生还涉及诸多复杂物理过程,如:粉末的快速熔化和冷却、熔池的动力学和传热理论等^[10]。溅射大小因工艺参数不同而改变,其尺寸一般在 100~200 μm 之间,会直接或间接导致打印缺陷的产生^[11]。溅射的产生会减少打印部位材料,导致下一次铺粉厚度不均匀,进而演变成孔洞缺陷。溅射颗粒在打印腔体飞行被部分氧化形成氧化物,掉落在打印表面阻碍正常粉末之间相互烧结,降低打印件整体密度^[12]。

溅射特征随工艺参数变化,因此对溅射特征的研究具有优化工艺参数的潜在可能^[9]。如今仍缺乏有效的溅射图像获取装置和溅射图像处理算法来实现打印参数的优化,比如:瞬态溅射行为难以捕捉,图像处理算法不能适用全部工艺参数,溅射特征反馈物理模型难以建立等^[13-15]。SLM 加工技术与激光焊接技术基本原理具有共性,对于激光焊接在线监测技术和数据图像处理方法的研究起步较早,包括熔池监测^[16]、羽辉监测^[17-18]、溅射监测^[19-20],其为 SLM 特征在线监测提供了技术依据。基于激光焊接在线监测及相关技术基础,

SLM 在线监测技术在过去取得众多成果。其最初研究对象主要聚焦动态熔池,包括:搭建熔池数据在线获取系统装置;开发针对熔池数据处理的算法和数学模型;探索利用熔池参数实现在线反馈调节 SLM 打印^[21-26]。为探索更多反馈调节参数,针对 SLM 过程溅射的研究,引起了业内研究者的兴趣。2018 年,Andani 等^[27]基于高速摄像机获取的溅射图像开展了 SLM 过程溅射研究,结果表明:激光扫描速度相较于激光功率(能量密度)对溅射现象的形成具有更大影响。Repossini 等^[28]开展了 SLM 过程溅射在线研究,基于最大类间方差法对获取溅射图片进行图像分割处理,并据此开发逻辑回归模型描述 SLM 打印质量。2020 年 Tan 等^[29]通过所搭建在线监测装置成功获取 SLM 过程溅射图片,基于卷积神经网络实现 SLM 打印过程溅射特征的精确提取。结果显示,该方法可实现 70 ms 提取 80.48% 溅射的技术指标。本文基于上述在线监测研究,搭建了获取 SLM 加工过程中溅射图像的装置。并基于最大熵阈值分割算法,提出一种溅射图像提取方法。该方法不仅能够精确提取溅射,还可以量化溅射区域的面积和数量等信息。本文的溅射图像提取方法和相关结论可为 SLM 在线反馈调控实现 SLM 构件的高质量成形提供有效依据。

2 溅射图像处理方法

2.1 溅射图像获取装置

SLM 加工过程溅射图像采集装置示意图如图 1 所示,由一台 SLM 打印机、高速摄像机和计算机组成。其中,SLM 打印机包括加工腔、空气循环系统和人机交互软件系统,其加工精度为 $\pm 0.1 \text{ mm}$,铺粉层厚为 20~50 μm 。扫描系统由一个双轴镜定位系统和振镜光学扫描仪组成,可以实现激光束的定位和能量传输。透镜系统中包含一个 $f-\theta$ 透镜,其焦距约为 163 mm。本实验中 SLM 打印机更多的技术参数如表 1 所示。

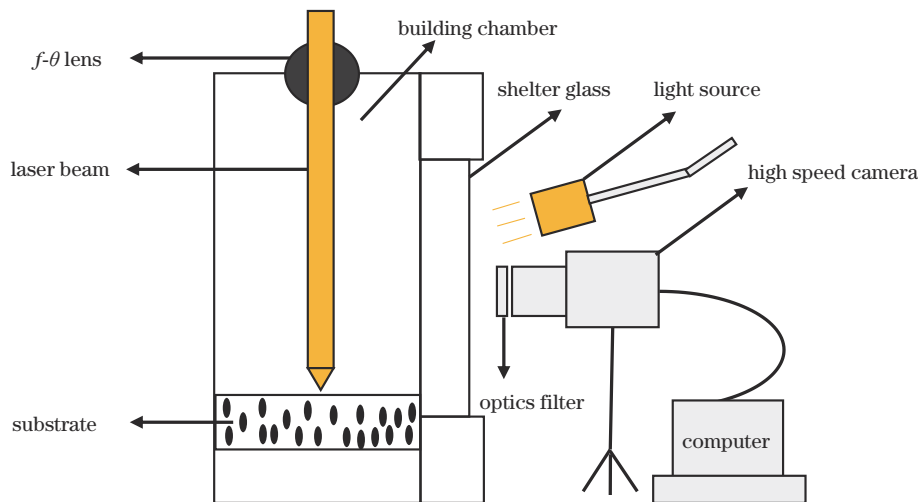


图 1 溅射图像的获取装置

Fig. 1 Device for acquiring spatter images

表 1 本实验中 SLM 的主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of SLM in the experiment

Item	Wavelength /nm	Max laser power / W	Focus beam size / μm	Building chamber / (mm \times mm \times mm)	Scan speed / (mm \cdot s $^{-1}$)
Value	1090	200	70	100 \times 100 \times 120	400

溅射图像由一台与防护玻璃窗呈固定角度放置的高速摄像机进行采集,根据实际相机支架高度和 SLM 打印腔体内基板与相机距离,实验发现该监测系统中相机与玻璃窗呈 45° 放置具有最佳视场。摄像机镜头前安装有窄带通滤波片,防止强光损坏高速摄像机传感器。摄像机配有超高感光度、超高像素图像传感器及超高感光度高速 CMOS 传感器,具有高摄像速度,可记录轮廓鲜明的单色图像,其采样速率范围为 3000~40000 frame/s,可以根据分辨率需要匹配不同的帧速,本实验中以 5000 frame/s 帧速采集溅射图像,单张图像像素值可达 2000 \times 2000,像素大小为 11 $\mu\text{m}\times$ 11 μm ,满足对溅射尺寸 100~200 μm 的分辨率要求。镜头焦距为 100 mm,满足基板中心到玻璃窗的距离要求。为了提升高速摄像机采集溅射细节信息

的能力,高速摄像机旁配有高亮无频闪冷光源进行打光,其显色指数可达 80,在 100000 frame/s 的帧速下仍能保持均匀的照度。

本实验使用材料为 316L 不锈钢,其化学成分如表 2 所示。粒度分布如下: $d_{10}=22.5 \mu\text{m}$, $d_{50}=39.02 \mu\text{m}$, $d_{90}=56.04 \mu\text{m}$,铺粉厚度为 50 μm 。以 Fang 等^[26]的实验打印参数作为依据,利用上述溅射图像采集装置对以下打印参数过程进行拍摄:扫描速度 $v=400 \text{ mm/s}$;激光功率分别为 $P=100 \text{ W}$, $P=125 \text{ W}$, $P=150 \text{ W}$, $P=175 \text{ W}$, $P=200 \text{ W}$ 。实验发现,当激光功率以 25 W 逐步递增时,能量输入增加较少,溅射现象剧烈程度无显著变化,故本文仅以激光功率 $P=100 \text{ W}$, $P=150 \text{ W}$, $P=200 \text{ W}$ 为例展示原始采集图像,部分结果如图 2 所示,其中 t_0 为溅射图像截取初始点。当激光

表 2 316L 不锈钢粉末化学成分

Table 2 316L stainless steel powder chemical compositions

Chemical composition	C	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	O	Fe
Mass fraction /%	0.03	17.53	12.06	2.16	0.86	0.38	0.13	66.85

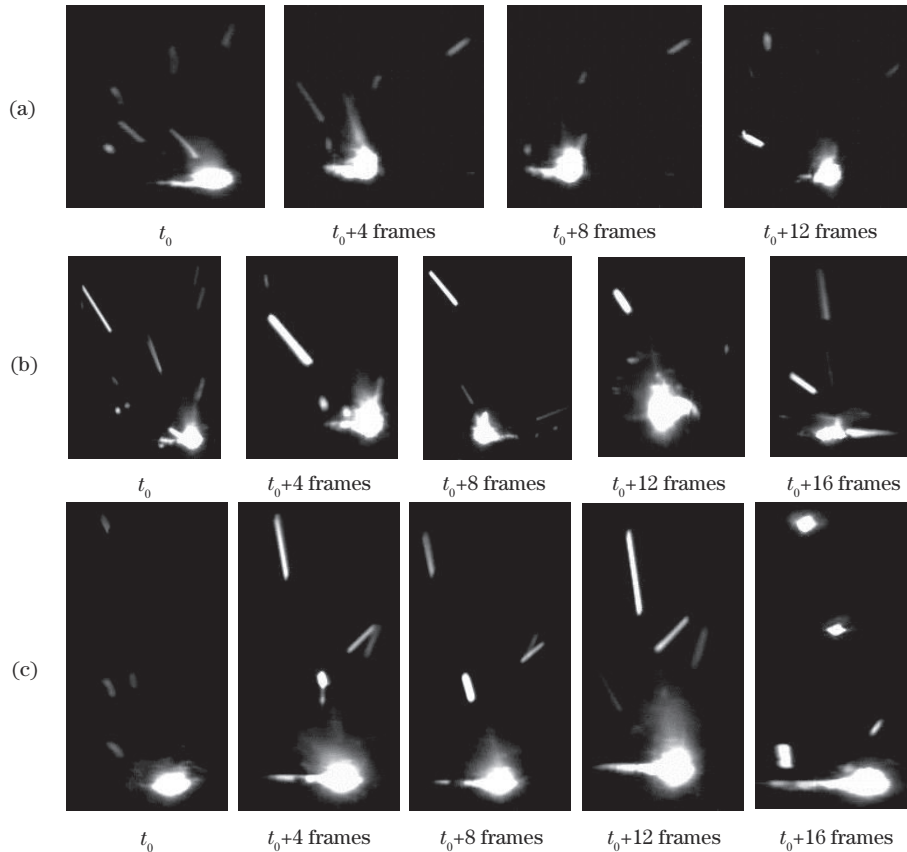


图 2 不同激光功率下的溅射图像。(a) $P=100 \text{ W}$; (b) $P=150 \text{ W}$; (c) $P=200 \text{ W}$

Fig. 2 Spatter images at different laser powers. (a) $P=100 \text{ W}$; (b) $P=150 \text{ W}$; (c) $P=200 \text{ W}$

功率 $P=100\text{ W}$ 时, 溅射现象比较微弱, 溅射角呈发散状; 当激光功率 $P=150\text{ W}$ 时, 溅射现象增强, 出现较大的条状溅射; 当激光功率 $P=200\text{ W}$ 时, 条状溅射增加且溅射的高度明显上升。

2.2 溅射处理算法

本文采用最大熵阈值分割算法对高速摄像机采集的熔池和溅射区域图像进行分割。溅射图像的像素灰度值出现的概率为

$$p(i) = \frac{h(i)}{MN}, \quad (1)$$

式中: $h(i)$ 为溅射图像中灰度值为 i 的个数; $i \in [0, 255]$; 溅射图像的像素个数为 $M \times N$ 。则溅射图像的熵值信息可以表示为

$$H = - \sum_{i=0}^k p_i \ln p_i. \quad (2)$$

假设阈值 β 为选定的分割阈值, 将溅射图像的信

息熵值分割为 A 和 B 两个部分, 则 A 和 B 的总熵值信息可以表示为

$$\varphi(\beta) = H(A) + H(B) = \ln \left(\sum_{i=0}^{\beta} p_i \right) + \ln \left(\sum_{i=\beta+1}^k p_i \right) - \frac{\sum_{i=0}^{\beta} p_i \ln p_i}{\sum_{i=0}^{\beta} p_i} - \frac{\sum_{i=\beta+1}^k p_i \ln p_i}{\sum_{i=\beta+1}^k p_i}. \quad (3)$$

当阈值 β 可使 $\varphi(\beta)$ 最大时, β 为分割溅射的最佳阈值^[30]。

2.3 溅射处理步骤

本文基于最大熵阈值分割算法提取溅射图像分为 5 个步骤: 形态学滤波、最大熵阈值分割、熔池干扰去除、溅射轮廓提取、误差数据去除。如图 3 所示, 以激光功率 $P=200\text{ W}$, 扫描速度 $v=400\text{ mm/s}$ 的溅射图像为例, 对上述步骤进行说明。

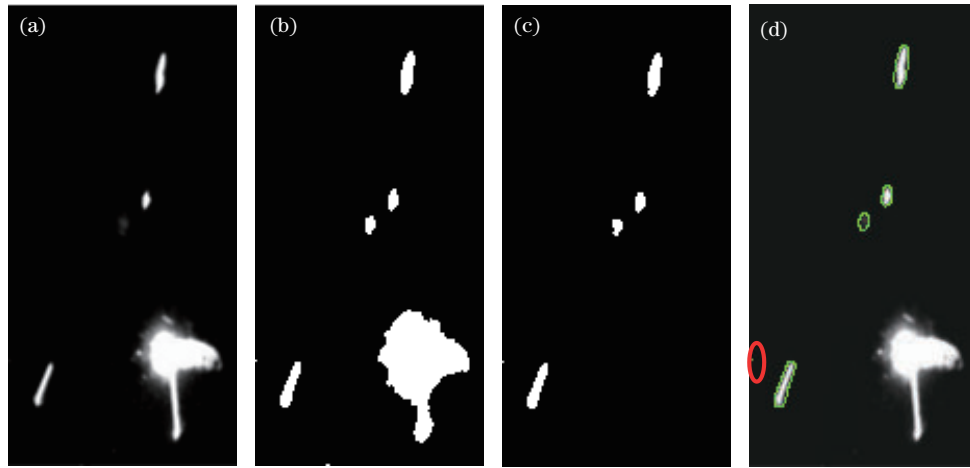


图 3 溅射图像处理步骤。(a) 形态学滤波; (b) 最大熵阈值分割; (c) 熔池干扰去除; (d) 溅射轮廓提取

Fig. 3 Spatter images processing process. (a) Morphological filtering; (b) maximum entropy thresholding segmentation; (c) molten pool interference removal; (d) spatter contour extraction

形态学滤波可以在保留溅射图像细节特征的基础上抑制图像的干扰噪声, 即先对图像进行开运算平滑溅射颗粒边界, 再进行闭运算去除未熔化粉末反光产生的噪声, 如图 3(a) 所示。本文基于最大熵对溅射图像进行阈值分割, 即对溅射灰度图像初始分割阈值进行多次迭代计算得到最佳阈值。图 3(a) 的溅射图像灰度直方图如图 4 所示, 迭代之后的最佳阈值为 17, 分割后的二值化图像见图 3(b)。本文的研究目标是溅射, 但最大熵阈值分割后的二值化图像中包含了熔池信息[图 2(b)]。本文利用 MATLAB 编写了最大连通区去除函数, 达到了将熔池信息去除的目的, 如图 3(c) 所示。最后, 为了验证最大熵阈值分割算法对溅射检测的有效性, 将阈值分割后的溅射轮廓叠加到原图进行对比, 如图 3(d) 所示。

原始溅射图像经阈值分割并去除熔池干扰的结果如图 5 所示, 可以看到, 最大连通区去除函数能对各激

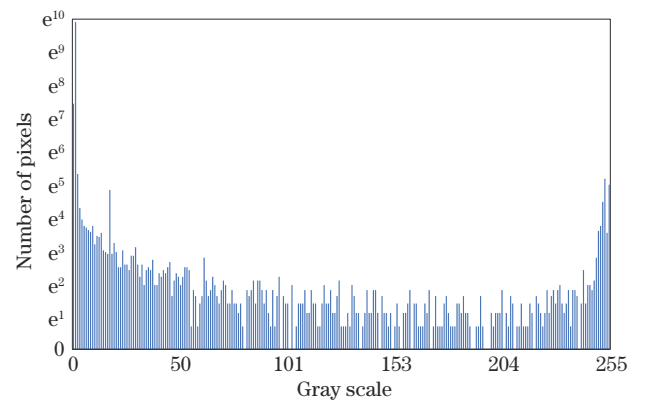


图 4 溅射图像灰度直方图

Fig. 4 Grayscale histogram of spatter images

光功率下的熔池干扰有效去除。溅射轮廓叠加到原图结果如图 6 所示, 所提取的溅射轮廓和原图完全吻合, 不同激光参数下的溅射均被准确分割。

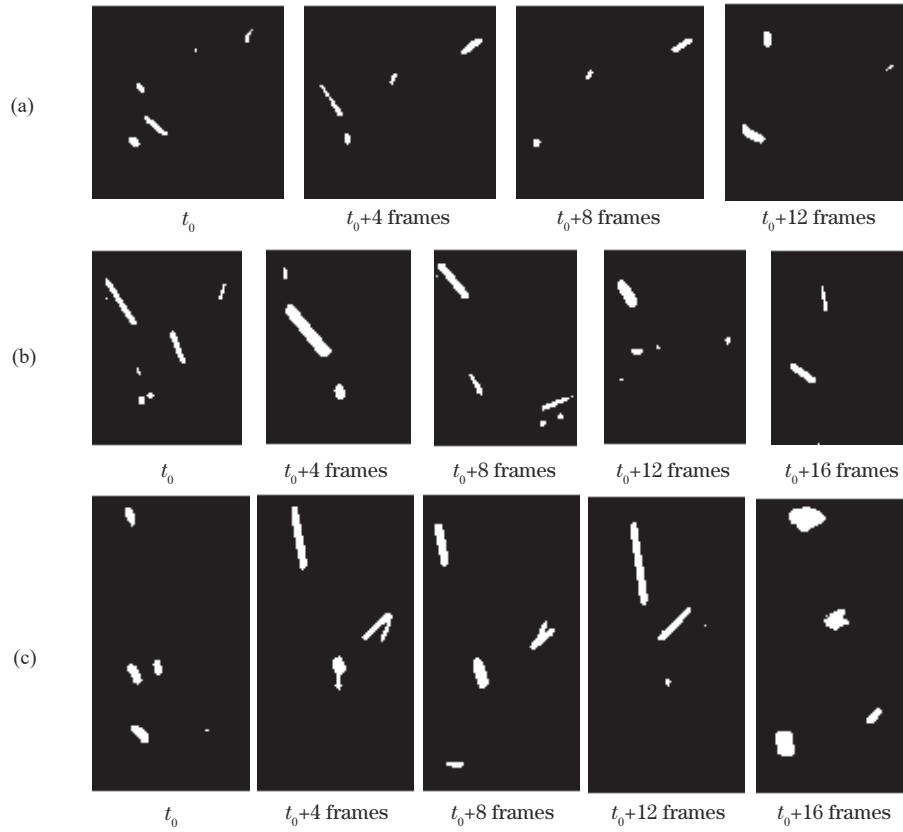


图 5 熔池干扰去除。(a) $P=100\text{ W}$; (b) $P=150\text{ W}$; (c) $P=200\text{ W}$

Fig. 5 Molten pool interference removal. (a) $P=100\text{ W}$; (b) $P=150\text{ W}$; (c) $P=200\text{ W}$

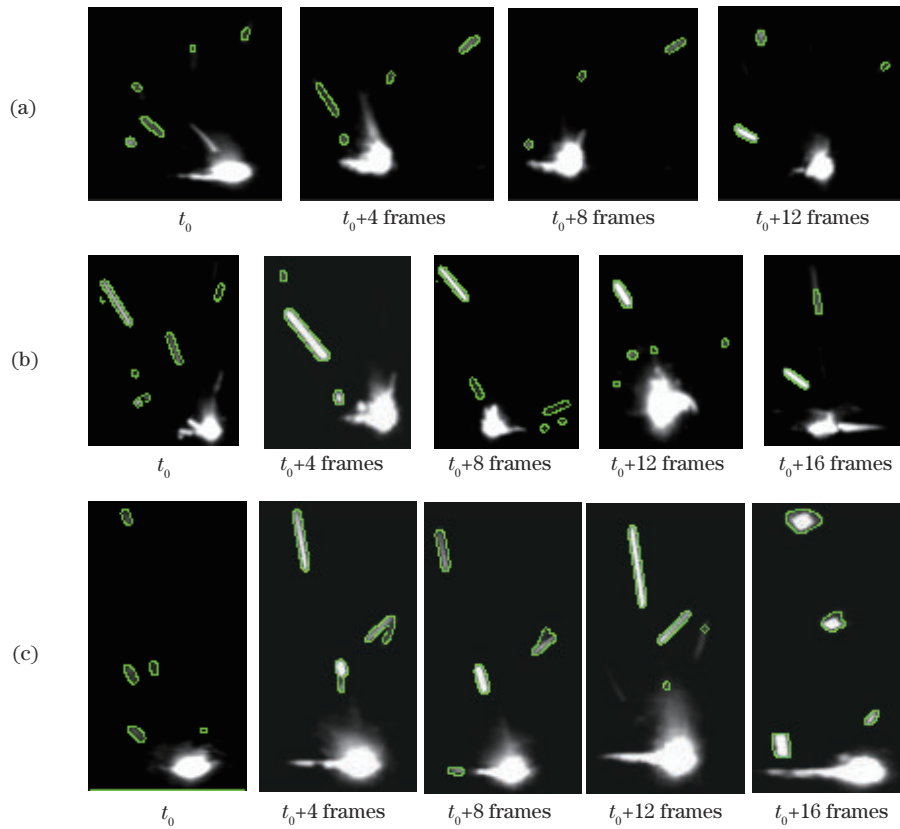


图 6 溅射轮廓叠加原始图像。(a) $P=100\text{ W}$; (b) $P=150\text{ W}$; (c) $P=200\text{ W}$

Fig. 6 Spatters contour superimposed on original image. (a) $P=100\text{ W}$; (b) $P=150\text{ W}$; (c) $P=200\text{ W}$

3 分析与讨论

3.1 溅射误差分析

尽管阈值分割前进行了滤波处理,但个别粉末颗粒的反光仍会被当作溅射提取,造成结果误差,如图 3(d)中的红色标记所示。为消除这一提取误差,对过分提取的粉末反光区域进行研究,发现其面积基本保持在 60 pixel 以下。针对此特点,基于 MATLAB regionprops 度量图像区域属性函数对阈值化后的溅射图像进行标记,删除 Area 属性中小于 60 pixel 的面积,以此消除粉末反光干扰。同时,对于粉末反光过分提取的极端情况,过量的反光粉末会导致溅射数量统计误差,故在去除小于 60 pixel 面积的基础上对提取的溅射数量也做出相应误差消除。通过研究各工艺参数下的溅射图像发现,有效溅射数量通常不会超过 25,只在过量粉末反光被提取情况下溅射数量才会超过此值。针对此特点,如果 regionprops 函数标定的溅射数量超过 25,则直接将本图像数据判为无效,防止误差数据被统计。

3.2 溅射量化分析

完成溅射图像处理后,对 5 种激光功率下的溅射面积和数量进行统计,统计数量为 780 张。总溅射面

积随激光功率的分布情况如图 7(a)所示,总溅射数量随激光功率的分布情况如图 7(b)所示,总溅射数量随溅射面积分布如图 7(c)所示。具体分析如下。

1) 由图 7(a)和图 7(b)可知,激光功率在 100~125 W 范围内,总溅射面积增加 6.3%,而总溅射数量减少 3.6%。这是因为,100 W 激光功率不能完全熔化 316L 金属粉末,溅射不明显,其形态主要为部分熔化粉末产生的小面积(100~200 pixel)溅射,而大面积(300~1000 pixel)溅射数量极少。125 W 激光功率可将粉末完全熔化,溅射变得明显,小面积(100~200 pixel)溅射减少,而大面积(300~1000 pixel)溅射开始增加且增加数量小于小面积溅射减少的数量[图 7(c)]。

2) 激光功率由 125 W 增加到 150 W 时,总溅射面积和溅射数量都逐步增加。这是因为,316L 粉末熔化后,150 W 激光功率加剧熔池流动,溅射现象进一步增强,100~1000 pixel 面积的数量均多于 125 W 激光功率[图 7(c)]。

3) 激光功率由 150 W 增加至 200 W 时,总溅射面积和溅射数量都逐步减少。这是因为,随着激光功率进一步增大,溅射密度急剧上升,导致溅射之间出现相互叠加现象,使得统计的溅射面积和数量都减少。

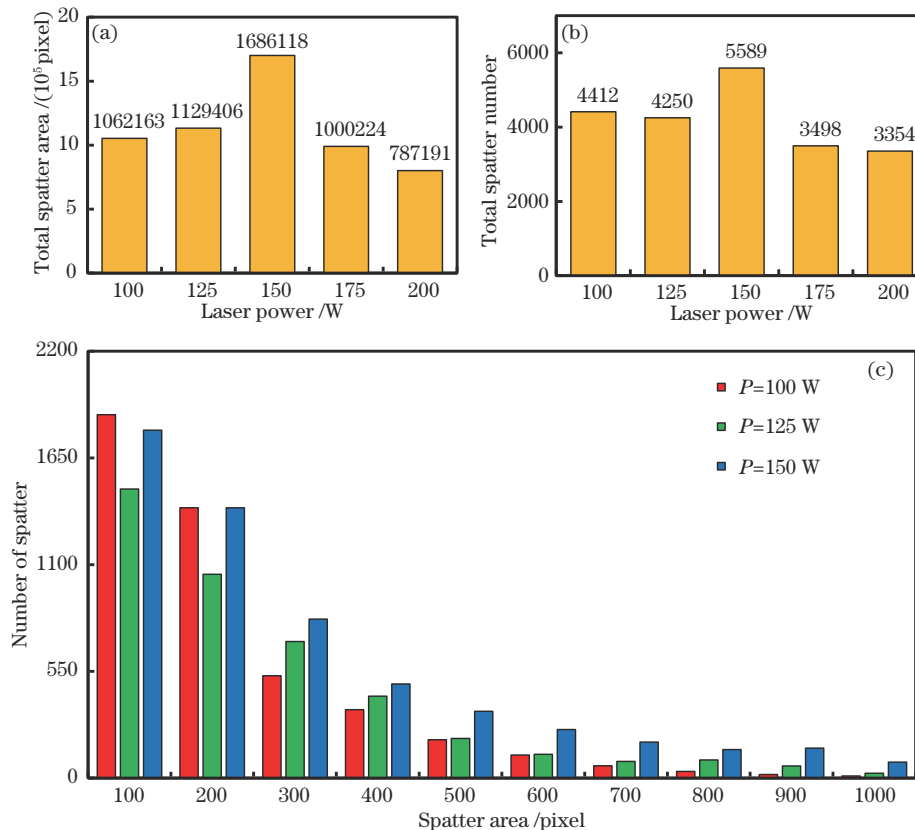


图 7 不同激光功率下的溅射特征统计。(a)总溅射面积;(b)总溅射数量;(c)总溅射数量随溅射面积分布

Fig. 7 Statistics of spatter characteristics under different laser powers. (a) Total spatter area; (b) total spatter number; (c) distribution of total spatter number as a function of spatter area

4 结 论

本文通过高速摄像机成功采集激光选区熔化加工过程溅射图像。根据溅射特点提出基于最大熵阈值分割算法的溅射处理方法,包括滤波、阈值分割、熔池去除、轮廓提取、误差数据去除等步骤。处理结果表明,所使用的溅射处理方法在多种激光参数下都具有极强的鲁棒性和精确度。量化结果表明:当激光功率在 100~150 W 范围时,溅射面积和数量的变化取决于粉末熔化状态;当激光功率在 150~200 W 范围时,溅射面积和数量的减少由溅射叠加导致。本文的溅射图像提取方法和相关结论可为 SLM 在线反馈调控实现 SLM 构件的高质量成形提供有效依据。

参 考 文 献

- [1] 秦艳利, 孙博慧, 张昊, 等. 选区激光熔化铝合金及其复合材料在航空航天领域的研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(14): 1402002.
Qin Y L, Sun B H, Zhang H, et al. Development of selective laser melted aluminum alloys and aluminum matrix composites in aerospace field[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(14): 1402002.
- [2] 顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500002.
Gu D D, Zhang H M, Chen H Y, et al. Laser additive manufacturing of high-performance metallic aerospace components[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500002.
- [3] Bahnini I, Rivette M, Rechia A, et al. Additive manufacturing technology: the status, applications, and prospects[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(1/2/3/4): 147-161.
- [4] Stampfl J, Hatzenbichler M. Additive manufacturing technologies[M]//CIRP encyclopedia of production engineering. Heidelberg: Springer, 2014: 20-27.
- [5] 刘安丽, 隋长有, 李发智, 等. 陶瓷激光增材制造等离子体特征与成形缺陷的相关性研究[J]. 中国激光, 2020, 47(6): 0602005.
Liu A L, Sui C Y, Li F Z, et al. Correlation between plasma characteristics and forming defects during laser additive manufacturing of ceramics[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(6): 0602005.
- [6] Khairallah S A, Anderson A T, Rubenchik A, et al. Laser powder-bed fusion additive manufacturing: physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones[J]. Acta Materialia, 2016, 108: 36-45.
- [7] Liu Y, Yang Y Q, Mai S Z, et al. Investigation into spatter behavior during selective laser melting of AISI 316L stainless steel powder[J]. Materials & Design, 2015, 87: 797-806.
- [8] Zhang M J, Chen G Y, Zhou Y, et al. Observation of spatter formation mechanisms in high-power fiber laser welding of thick plate[J]. Applied Surface Science, 2013, 280: 868-875.
- [9] Schweier M, Heins J F, Haubold M W, et al. Spatter formation in laser welding with beam oscillation[J]. Physics Procedia, 2013, 41: 20-30.
- [10] Wang D, Wu S B, Fu F, et al. Mechanisms and characteristics of spatter generation in SLM processing and its effect on the properties[J]. Materials & Design, 2017, 117: 121-130.
- [11] Criales L E, Arisoy Y M, Lane B, et al. Laser powder bed fusion of nickel alloy 625: experimental investigations of effects of process parameters on melt pool size and shape with spatter analysis[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017, 121: 22-36.
- [12] Wang D, Yang Y Q, Liu R C, et al. Study on the designing rules and processability of porous structure based on selective laser melting (SLM)[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(10): 1734-1742.
- [13] Grasso M, Demir A G, Previtali B, et al. *In situ* monitoring of selective laser melting of zinc powder via infrared imaging of the process plume[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, 49: 229-239.
- [14] Craeghs T, Clijsters S, Yasa E, et al. Determination of geometrical factors in layerwise laser melting using optical process monitoring[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 49(12): 1440-1446.
- [15] Clijsters S, Craeghs T, Buls S, et al. *In situ* quality control of the selective laser melting process using a high-speed, real-time melt pool monitoring system[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 75(5/6/7/8): 1089-1101.
- [16] 刘天元, 鲍劲松, 汪俊亮, 等. 融合时序信息的激光焊接熔透状态识别方法[J]. 中国激光, 2021, 48(6): 0602119.
Liu T Y, Bao J S, Wang J L, et al. Laser welding penetration state recognition method fused with timing information[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(6): 0602119.
- [17] 任勇, 武强, 邹江林, 等. 奥氏体不锈钢光纤激光同轴保护焊接的实时监测[J]. 中国激光, 2017, 44(5): 0502003.
Ren Y, Wu Q, Zou J L, et al. Real-time monitoring of coaxial protection fiber laser welding of austenitic stainless steels[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(5): 0502003.
- [18] 韩雪, 赵宇, 邹江林, 等. 基于可视化观察的光纤激光深熔焊接羽辉形成原因分析[J]. 中国激光, 2020, 47(6): 0602004.
Han X, Zhao Y, Zou J L, et al. Analysis of plume formation reasons in laser deep penetration welding based on visual observation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(6): 0602004.
- [19] Gao X D, Wen Q, Katayama S. Analysis of high-power disk laser welding stability based on classification of plume and spatter characteristics[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(12): 3748-

- 3757.
- [20] Haubold M W, Wulf L, Zaeh M F. Validation of a spatter detection algorithm for remote laser welding applications[J]. *Journal of Laser Applications*, 2017, 29(2): 022011.
- [21] Lapointe S, Guss G, Reese Z, et al. Photodiode-based machine learning for optimization of laser powder bed fusion parameters in complex geometries[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 53: 102687.
- [22] Lott P, Schleifenbaum H, Meiners W, et al. Design of an optical system for the *in situ* process monitoring of selective laser melting (SLM) [J]. *Physics Procedia*, 2011, 12: 683-690.
- [23] Doubenskaia M, Pavlov M, Chivel Y. Optical system for on-line monitoring and temperature control in selective laser melting technology[J]. *Key Engineering Materials*, 2010, 437: 458-461.
- [24] Berumen S, Bechmann F, Lindner S, et al. Quality control of laser- and powder bed-based additive manufacturing (AM) technologies[J]. *Physics Procedia*, 2010, 5: 617-622.
- [25] Chivel Y, Smurov I. On-line temperature monitoring in selective laser sintering/melting[J]. *Physics Procedia*, 2010, 5: 515-521.
- [26] Fang Q H, Tan Z B, Li H, et al. *In-situ* capture of melt pool signature in selective laser melting using U-Net-based convolutional neural network[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 68: 347-355.
- [27] Andani M T, Dehghani R, Karamooz-Ravari M R, et al. A study on the effect of energy input on spatter particles creation during selective laser melting process[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 20: 33-43.
- [28] Repossini G, Laguzza V, Grasso M, et al. On the use of spatter signature for *in situ* monitoring of laser powder bed fusion[J]. *Additive Manufacturing*, 2017, 16: 35-48.
- [29] Tan Z B, Fang Q H, Li H, et al. Neural network based image segmentation for spatter extraction during laser-based powder bed fusion processing[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 130: 106347.
- [30] Kapur J N, Sahoo P K, Wong A K C. A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram[J]. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1985, 29(3): 273-285.