

doi: 10.7690/bgzdh.2022.03.013

## 激光选区熔化熔池视频监测与评价

彭浩<sup>1</sup>, 高椿明<sup>1</sup>, 张萍<sup>1</sup>, 张凯<sup>2</sup>, 张长东<sup>2</sup>, 刘婷婷<sup>2</sup>

(1. 电子科技大学光电科学与工程学院, 成都 610054; 2. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

**摘要:** 为对激光选区熔化的加工过程进行监测和反馈调节, 建立一套同轴高速相机熔池图像采集系统, 研究 10 kHz 高速熔池图像在线实时监测与评价方法。完成有限元的建模, 通过仿真分析熔池的正常形貌; 基于 FPGA 开发高速图像采集与处理系统, 实现 10 kHz 图像的实时分析、处理和输出。把高速视频系统在粉末床激光选区熔化 (laser powder bed fusion, LPBF) 技术上集成, 并开展实验测试与验证。实验结果表明: 该系统可实时监测和输出熔池的评价参数, 为激光选区熔化闭环控制奠定技术基础。

**关键词:** 粉末床激光选区熔化; 图像采集与处理; FPGA 熔池监测; 熔池仿真分析; 熔池特征提取

**中图分类号:** TP391 **文献标志码:** A

## Molten Pool Video Monitoring and Evaluation of LPBF

Peng Hao<sup>1</sup>, Gao Chunming<sup>1</sup>, Zhang Ping<sup>1</sup>, Zhang Kai<sup>2</sup>, Zhang Changdong<sup>2</sup>, Liu Tingting<sup>2</sup>

(1. School of Optoelectronics Science & Engineering, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 610054, China;

2. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to monitor and adjust the process of selective laser melting, a set of molten pool image acquisition system with coaxial high-speed camera was established, and the online real-time monitoring and evaluation method of 10 kHz high-speed molten pool image was studied. The finite element modeling was completed, and the normal morphology of the molten pool was analyzed by simulation. The high-speed image acquisition and processing system was developed based on FPGA, and the real-time analysis, processing and output of 10 kHz images were realized. The high-speed video system is integrated on the laser powder bed fusion (LPBF) technology, and the experimental test and verification are carried out. The experimental results show that the system can monitor and output the evaluation parameters of the molten pool in real time, which lays a technical foundation for the closed-loop control of selective laser melting.

**Keywords:** laser powder bed fusion; image acquisition and processing; FPGA molten pool monitoring; simulation analysis of molten pool; feature extraction of molten pool

## 0 引言

增材制造技术以其柔性定制化生产、制造模型数字化的特点不断地改变传统生产方式。粉末床激光选区熔化 (LPBF) 以其能够使用广泛的金属粉末材料, 无需通过粘结剂即可制造结构复杂、复合材料的轻量化金属结构件被认为是最具前景的主流技术<sup>[1-2]</sup>, 广泛地应用于航空航天、军工、医疗器械制造、车辆以及一般金属零件制造领域<sup>[3]</sup>。

LPBF 技术在制造工艺、设备控制、无损检测等方面仍不够成熟, 所制造的金属工件中会出现一些缺陷(孔隙、裂纹、翘曲、球化等)<sup>[4-5]</sup>, 极大地影响金属结构工件的强度、表面粗糙度等工件质量, 进而降低良品率, 以致浪费大量人力物力<sup>[6]</sup>。改善良品率的研究主要关注 3 方面: 1) 加工过程工件的

实时监测<sup>[7]</sup>; 2) 加工过程中熔池形貌特征的实时监测与反馈控制<sup>[8]</sup>; 3) 铺粉质量的自动实时监控等<sup>[9-10]</sup>。其中, 熔池形貌特征变化的实时采集与处理最受关注。

在 LPBF 的加工过程中, 高温、烟尘、强干扰光、气流扰动、激光高速运动与随机抖动等均会导致缺陷。这些因素均会在加工熔池的形貌中有所反应。笔者利用高速 CCD 相机对金属粉末增材制造加工过程进行在线实时监测, 并实时处理图像、提取特征信息、分析结果、反馈调节工艺参数, 能改善加工品质, 提升成品率。

## 1 熔池形貌对加工状况的监测原理和方法

加工过程中, 原材料均匀一致性直接影响成形质量<sup>[11]</sup>。因机械振动、烟尘等原因导致激光光斑变

收稿日期: 2021-11-10; 修回日期: 2021-12-28

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1103002)

作者简介: 彭浩(1996—), 男, 四川人, 硕士, 从事机器感知研究。E-mail: ph\_466@qq.com。

形与能量密度分布不均匀<sup>[12]</sup>, 都会引起加工中产生飞溅、球化、孔隙等缺陷<sup>[13]</sup>。这些缺陷的产生过程, 以及翘曲变形或裂纹缺陷处, 熔池形貌特征都出现异常, 通过有限元仿真分析异常情况下熔池形貌与异常的关联, 建立熔池形貌对加工异常的监测方法。

### 1.1 材料及工艺对熔池影响

通过简化模型, 在 COMSOL 仿真软件中设置 3 种不同材料组成加工平面, 以模拟粉末不均匀及基板裸露的情况, 与材料均匀一致的加工平面进行仿真对比。如图 1 所示, 当加工面材料不一致均匀时, 熔池温度值由材料不一致分界处热辐射显著增大, 产生明显的温度值分界线。从熔池形态上看, 熔池不再近似为圆或椭圆, 而是因材料的不一致在材料不均匀。

分界线上产生畸变, 在监测过程中熔池圆度与熔池面积、长宽比皆会异常。

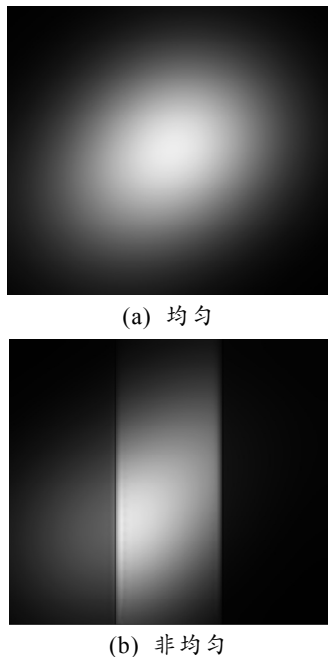


图 1 熔池材料一致性仿真计算结果

熔池当前状态温度场与工艺参数密切相关, 也直接影响到飞溅、羽流、孔隙等缺陷的产生。为了研究成形工艺参数、温度场、熔池形貌间的关联关系, 分别以不同工艺参数组合进行熔池形貌仿真。如图 2 所示, 随激光功率增大与速度降低, 熔池面积长宽加大, 总体温度增加, 相应中心温度值增大。这是由于随着激光功率增大与激光扫描速率降低, 单位时间内激光能量相对更加集中, 导致激光熔化熔池的作用温度升高, 相关联的熔池中心与边界温度升高, 热辐射显著增强。

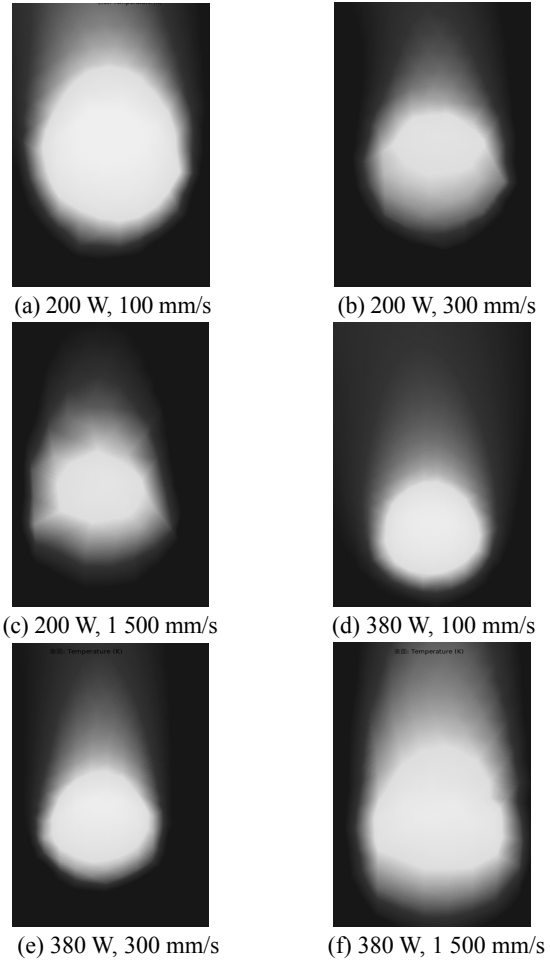


图 2 变工艺参数熔池热场仿真

### 1.2 翘曲形变对熔池影响

以翘曲形变作为异常熔池形貌的代表, 开展仿真模拟研究。使用 Ti-6Al-4V (TC4) 材料为基体, 在 1 cm×1 cm×1 cm 的基体上构造 1 000 μm 曲面翘曲模型。使用高斯面热源模型, 模型边界条件设置工件表面对空气热对流, 以及工件表面对环境热辐射。以激光是否聚焦于加工平面上的熔池状况分别表示正常情形与翘曲情形下熔池状况, 计算结果灰度图如图 3 所示。翘曲变形区域熔池相较于正常情况, 熔池面积减小, 中心温度降低, 同时出现明显的拖尾现象。这是因为翘曲变形时, 激光实际加工位置远离了激光本应聚焦加工的加工平面, 激光离焦使得激光光斑增大, 同时能量密度减小, 使得熔池温度降低, 中心熔池面积减小, 同时加热区域增大, 未完全降温熔池被再次加热, 留下较长拖尾。上述仿真结果表明: 通过提取熔池面积、长宽及其比值、熔池温度对熔池面积的比值、每个像素点熔池温度值之和, 可以有效反映熔池的正常或异常状态。

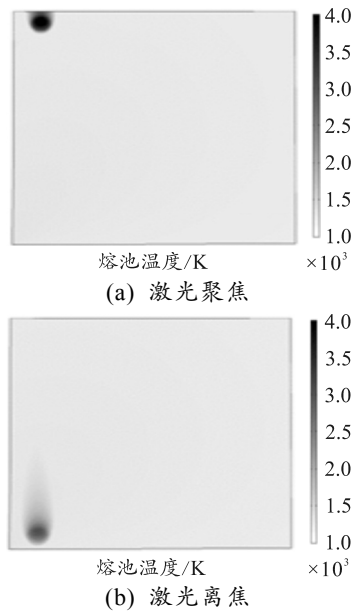


图 3 正常与翘曲熔池状态计算结果

### 2 高速熔池监测与特征提取系统

如图 4 所示，以 NJUST-001 LPBF 增材制造平台作为工艺实验平台。成形过程中熔池产生的辐射光经扫描振镜、相机适配器中的反光镜、滤光衰减片后，由单色高速相机接收监测，所使用激光器波长为 1 064 nm，输出功率上限为 500 W。为了滤除激光反射光与可见光的干扰，令相机只接收熔池辐射光，在相机前加装 800~900 nm 的带通滤光片。高速相机设定分辨率为 160×160，此时对应的帧率为 10 026 fps，曝光时间为 95 μs。集成 FPGA 芯片的图像采集卡进行 10<sup>4</sup> fps 的高速图像处理，将图像特征信息通过 PCIE 接口传输至上位工控机中进行图像特征信息的分析与反馈。

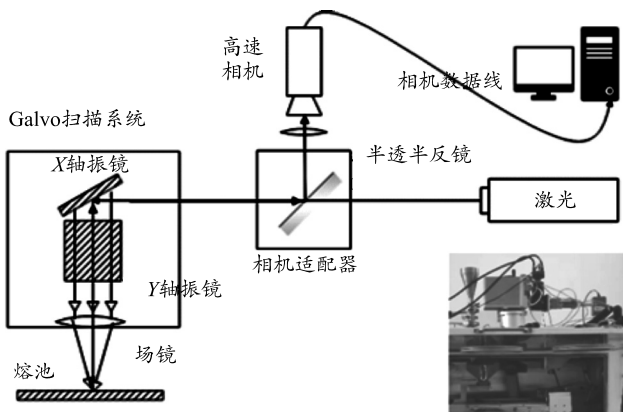


图 4 熔池监测系统

实际加工过程中，熔池的特征随加工时间的推进动态变化，需通过图像滤波算法消除多余无效信号，以获得完整无干扰的熔池图像。同时，为获取

到较准确的熔池形貌特征信息，需对图像二值化及滤波后查找最大连通域，将此作为整个熔池以提取熔池形貌的特征参数信息。通过数个形貌特征，与先验的熔池特征知识库作对比，反映出熔池图像是否符合标准，是否与正常或缺陷情况相匹配，从而判断 LPBF 过程中熔池质量进而反馈控制。其中，需要提取的特征参数有：

- 1) 熔池面积：整个图像区域内最大连通域中的像素点个数，可表征当前激光功率或温度分布；
- 2) 熔池长度宽度与长宽比值：熔池外接矩形指包含熔池的最小矩形框，定义其长宽为熔池长宽，比值为熔池长宽比，与 LPBF 过程工艺参数相关联，一定程度上反映了激光热源运动速度，以及该处是否发生翘曲变形；
- 3) 熔池灰度总值：定义为在熔池图像最大连通域即熔池含其拖尾内所有像素点灰度值的总和，能够表征当前熔池温度状况；
- 4) 熔池的灰度均值：定义为在熔池图像最大连通域即熔池含其拖尾内所有像素点灰度值的平均值，与熔池温度正相关，熔池灰度均值相对更能反映出熔池温度分布状况。

图 5 所示为特征提取系统算法处理流程。

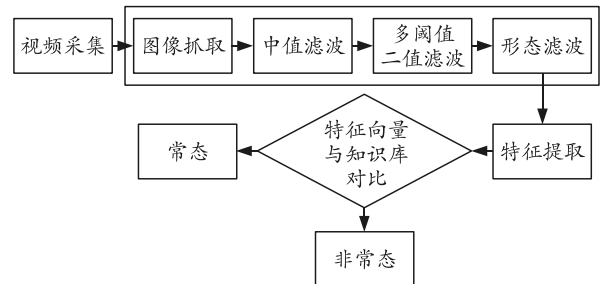


图 5 缺陷识别流程

### 3 实验及数据分析

使用 Ti-6Al-4V 粉末作为材料，成形过程中氩气保护。每层制造完毕后基板下降 50 μm，制造 20 次 5 mm×5 mm 方块工件。使用工艺参数为 200 W 激光功率，1 000 mm/s 运动速度，蛇形扫描。使用光学显微镜观测所制造工件表面，观测制造完成后表面缺陷情况，将高速相机等监测设备所得到的熔池图像等信息，提取熔池形貌特征如熔池面积、熔池拖尾长度、熔池长宽比例等信息，将该信息经过滤除无效信息后与加工过程中扫描振镜系统实时输出打印模型位置点云数据相匹配，将监测数据可视化，制造工件及可视化后的对应监测数据如图 6 所示。

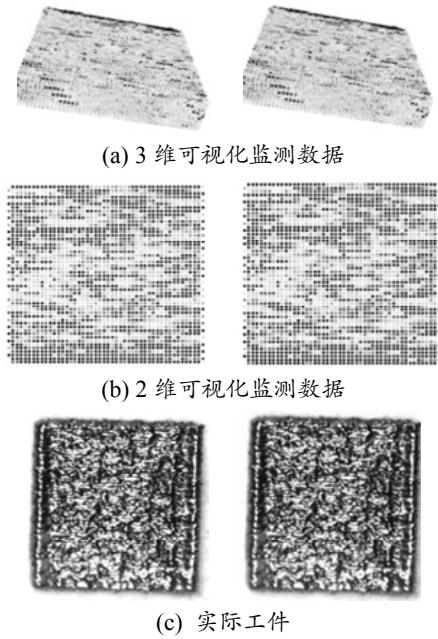


图 6 可视化监测数据与实际工件

将工件表面与原位监测数据相映射，出现气孔或翘曲处异常熔池图像。图 7 所示为正常情况与出现孔隙、翘曲时对应位置熔池反白图像。

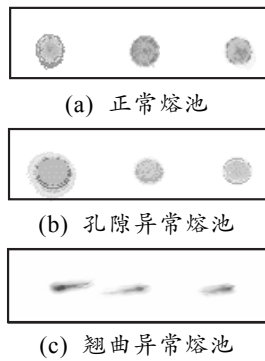


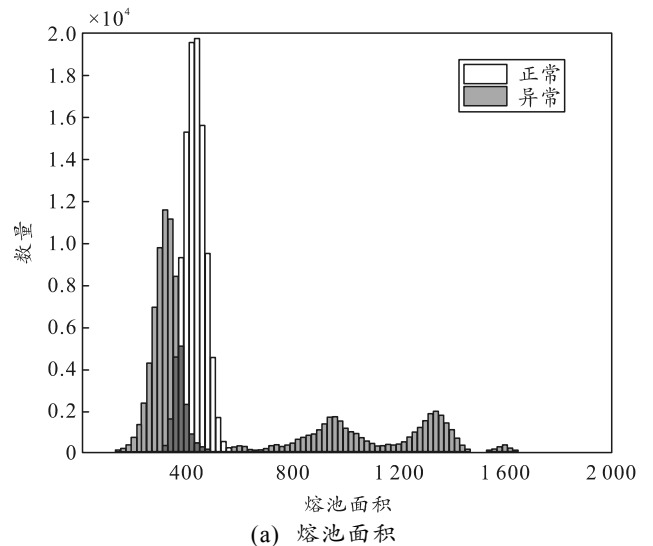
图 7 正常与异常熔池

在出现孔隙缺陷时，熔池图像的灰度总值、灰度均值会下降，同时若下降幅度大于一定阈值，熔池的面积、长宽同样会相应下降。在另一情况下，熔池灰度总值、灰度均值大幅高于一般正常情况时也对应于孔隙缺陷，即当特征值偏离正常值范围，都对应于缺陷的产生。这是由于：

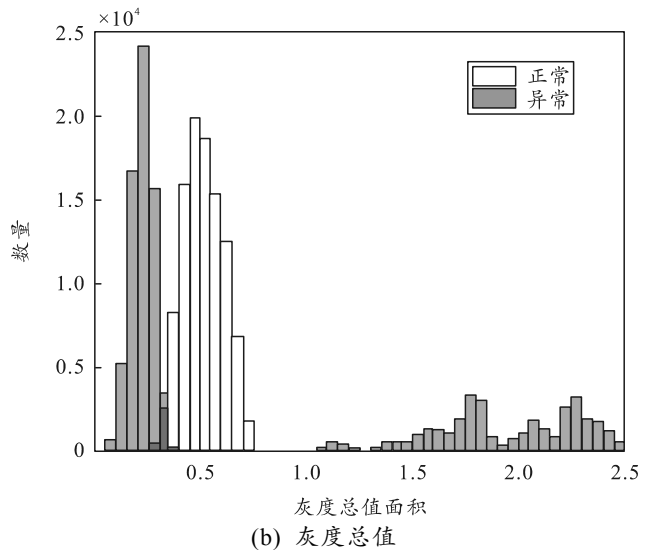
- 1) 当在低能量密度时，金属粉末融化不充分，粉末未完全熔合，出现很多非圆气孔；
- 2) 当能量密度过高时，激光熔化粉末产生凹陷，甚至可能熔化已凝固工件部分，在下一层加工时，会产生小孔模式空洞性气孔；
- 3) 在打印薄壁工件时，热应力的分布不均会导致出现翘曲变形，激光离焦使得激光光斑形变，能量密度分布异常，熔池图像长宽比增加。

出现翘曲变形时，对应区域熔池相较正常而言面积减小，中心灰度值降低，同时出现明显的拖尾现象，熔池长宽比大幅增加。这是由于与正常加工情况相比，翘曲变形后部分表面裸露于粉床，铺粉系统未能在其上铺粉，使得激光在加工此区域时直接加工到金属工件上。激光实际加工位置远离了激光本应聚焦加工的加工平面，激光离焦使得激光光斑增大，同时能量密度减小，使得熔池温度降低，与熔池温度对应的熔池灰度值降低。同时，熔池部分液相粘度变大，熔池铺展性变差，熔池面积减少，激光光斑增大，其后未完全融化粉末被再次熔化，形成重熔效果，留下较长拖尾。

在使用不同阈值分割图像时，熔池分割特征参数存在不同表现。如图 8 所示，熔池面积、图像灰度总和、长宽比、均值统计等参数在熔池正常与异常状态下存在明显差异，能以此来区分正常与缺陷情况。



(a) 熔池面积



(b) 灰度总值

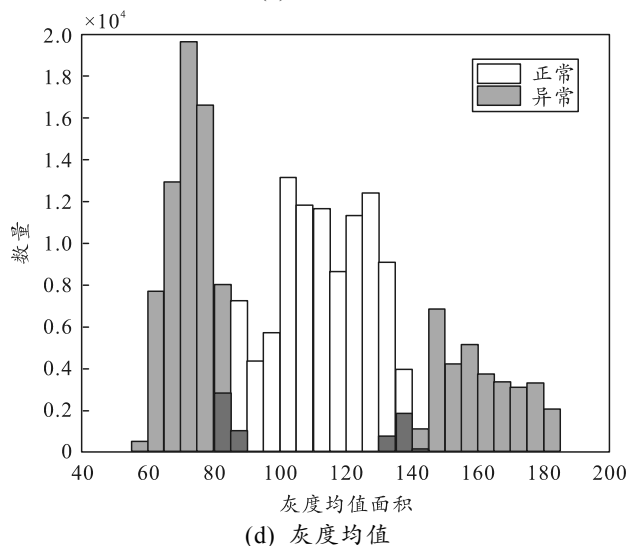
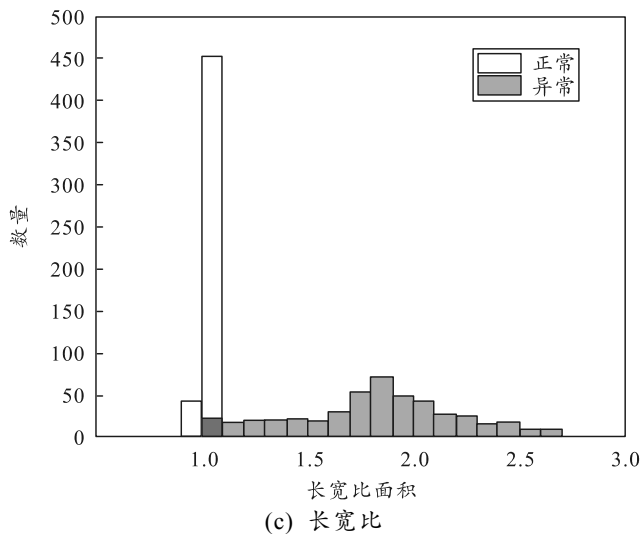


图 8 各特征参数值分布

以准确率最大原则设置各特征参数判决熔池正常或异常状态阈值范围，其中设置熔池面积下限值为 418，上限为 560；图像灰度总和，上限  $10^4$  下限为 4 175；灰度均值，设置在下限 87，上限 137；长宽比设置阈值 1.09。以 5 个评价指标来评价缺陷识别策略正确性，分别为准确率(判断正确的比例)、精确率(判断为正样本中真正正样本的比例)、召回率(正确判断正例的比例)、漏报率(正例被漏判的比例)、虚警率(被判为正例样本中负例的比例)。如表 1 所示，采用缺陷图像与正常图像，以各特征参数联合判决，得出各个判决策略的混淆矩阵、对表面气孔裂纹缺陷以及工件翘曲变形识别率。使用熔池面积、熔池灰度总和、熔池灰度均值、熔池长宽比的识别准确率均在 90%以上，表明了本文中监测系统与识别方法能够在加工过程中有效识别缺陷。

表 1 各判决策略准确性

评价指标	熔池面积	灰度总值	灰度均值	长宽比
准确率	0.906	0.909	0.929	0.915
精确率	0.874	0.850	0.912	0.942
召回率	0.921	0.944	0.944	0.884
漏报率	0.079	0.056	0.056	0.116
虚警率	0.126	0.150	0.088	0.058

基于本文中实验，该方法得出了 90%以上缺陷识别准确率，在制造过程中实时完成缺陷识别，在打印层间与扫描振镜输出位置坐标相结合，重构出与实际工件相匹配的 2 维监测数据图。可据此选出缺陷集中出现区域进行区域重熔修补当层缺陷，以改善加工质量；或当翘曲缺陷对应熔池图像特征集中出现时，可适时调整工艺参数抑制热应力对工件的损害。可将该系统加装于其他开环控制设备上，通过实验得出合理阈值设置参数，以实时监测加工过程识别加工缺陷，进而判断是否需通过重熔等手段进行在线修补。

#### 4 结论

笔者通过仿真分析 LPBF 加工过程中缺陷识别方法，完成了高速在线监测系统搭建，开展了加工缺陷识别实验，形成以下结论：

1) 仿真计算结果表明，加工异常时，熔池形貌会发生异常变化，通过熔池的图像分析可监测加工质量；

2) 通过研制的高速成像系统，完成了熔池的高速成像，以此建立了熔池形貌特征参数体系，通过实验获得优化的阈值参数，最终获得缺陷识别准确率超 90%的参数体系，验证了熔池监测的准确性，为加工缺陷改善的闭环反馈奠定了技术基础。

#### 参考文献：

[1] 产玉飞, 陈长军, 张敏. 金属增材制造过程的在线监测研究综述[J]. 材料导报, 2019, 33(9): 2839-2846.

[2] ROSSO C B, DEMIR A G, PREVITALI B. Selective laser melting finite element modeling: Validation with high-speed imaging and lack of fusion defects prediction[J]. Materials & design, 2018, 156(OCT): 143-153.

[3] 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]. Int J Adv Manuf Technol, 2014, 75: 1089-1101.