

# SLM 过程中飞溅形成机制和控制方法综述

刘琦<sup>1,2</sup>, 杨光<sup>1,2</sup>, 殷俊<sup>3</sup>, 赵朔<sup>1,2</sup>, 安达<sup>1,2</sup>

(1. 沈阳航空航天大学 机电工程学院, 辽宁 沈阳 110136)

(2. 辽宁省高性能金属增材制造工程研究中心, 辽宁 沈阳 110136)

(3. 沈阳飞机工业(集团)有限公司, 辽宁 沈阳 110086)

**摘要:** 由于选区激光熔化 (SLM) 技术加工周期较短、易于成形结构复杂的零件, 现已广泛应用于生物医疗、航空航天、汽车和军工制造业等领域。但是由于在成形过程中激光与粉末间复杂的相互作用, 选区激光熔化制件的缺陷呈现出多样化的特点, 且控制难度加大, 这在一定程度上限制了该技术和应用。对于飞溅缺陷的形成机制和控制方法的研究, 是近年来研究的热点之一。总结了近年来的相关研究成果, 将粉末、熔池及成形层作为线索, 从飞溅物对成形件的影响、飞溅物形成原因、监测和控制方法以及未来研究方向 4 部分阐述 SLM 过程中飞溅形成机制和控制方法, 并展望了未来的发展方向。

**关键词:** SLM; 缺陷; 飞溅; 熔池

**中图分类号:** TG665

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2024)07-2094-15

增材制造 (additive manufacturing, AM) 是在预先设计出三维模型的基础上, 再导出模型的轮廓数据, 通过材料逐层累加来制造零件的一门工艺<sup>[1]</sup>。AM 技术自二十世纪末出现以来, 经过不到四十年的快速发展, 现已分门别类成多种相对成熟的工艺, 包括选区激光熔化技术 (selective laser melting, SLM)、选择性激光烧结技术 (SLS) 和电子束选择性熔化技术 (EBSM) 等<sup>[2]</sup>。其中, SLM 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, 具有加工周期短、节省实验材料成本、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、汽车和军工制造业等领域<sup>[3]</sup>。

飞溅行为作为 SLM 过程中一种不可避免的普遍现象, 其形成与演变由熔池状态直接决定<sup>[4-7]</sup>。金属粉末在高能激光束的作用下熔化进入熔池后很快凝固的过程中, 复杂的热传导过程伴随着的飞溅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<sup>[8]</sup>。飞溅作为 SLM 成形中常见的缺陷源之一<sup>[9]</sup>, 是激光与粉末材料相互作用的直接产物, 会影响零件的成形过程和成形质量。本文从 SLM 过程中飞溅物对成形件的影响、形成原因、监测和控制方法和未来研究

方向几部分进行总结, 并对未来的研究方向进行探索, 为相关领域的研究提供参考。

## 1 飞溅对成形件的影响

在成形过程中, 当零件尺寸较大或多个零件同时成形时, 易产生飞溅, 从而影响成形精度和成形效率, 甚至导致成形失败。飞溅物不仅会破坏粉末床的稳定性, 还会改变粉末的能量吸收率, 影响零件的表面平整度。飞溅物与原始粉末混合还会对成形零件的微观组织和力学性能造成严重影响。

### 1.1 飞溅对成形件表面平整度的影响

飞溅会对成形件表面平整度造成影响, 而体能量密度与飞溅现象密切相关。易涛等<sup>[10]</sup>研究发现可通过调节激光输出功率使体能量密度增大来强化零件致密度。Kivirasi 等<sup>[11]</sup>用高速相机观察发现激光输入能量与表面粗糙度在一定范围内呈反相关。Martin 等<sup>[12]</sup>研究发现在振镜作用下, 激光扫描加速度改变, 拐点处熔池深度受影响, 最终体现在成形件表面平整度方面。Qiu 等<sup>[13]</sup>结合高速相机和数值模拟观察并预测了液滴飞溅对熔道表面粗糙度的影响。

为了更直观地分析表面形貌, Wang 等<sup>[14]</sup>和刘洋<sup>[15]</sup>通过对比使用新粉末 (如图 1a 和 1b) 和重复使用的旧粉末 (如图 1c 和 1d) 制备零件, 发现附着在零件

收稿日期: 2023-07-18

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFE0122600); 中央引导地方科技发展资金 (2023JH6/100100044)

作者简介: 刘琦, 女, 1999 年生, 硕士生, 沈阳航空航天大学机电工程学院, 辽宁 沈阳 110136, E-mail: liuqi09189467@163.com

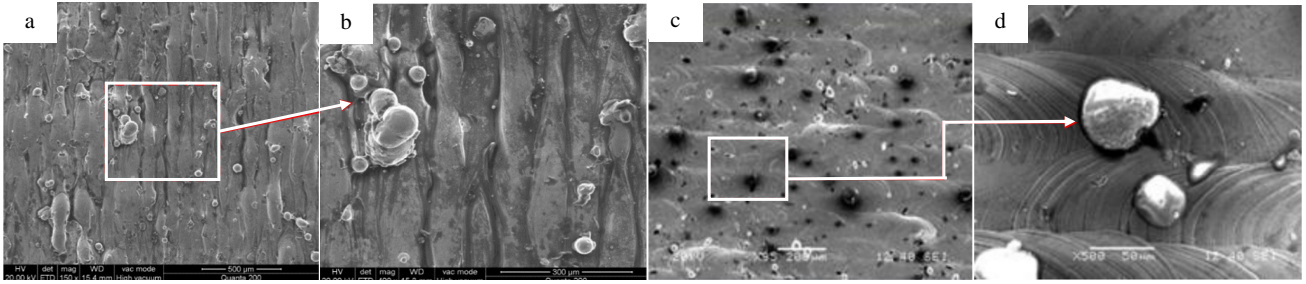


图 1 嵌入溅射颗粒的 SLM 制品表面的 SEM 图像

Fig.1 SEM images of the surface morphologies of SLMed parts embedded with spattering particles: (a-b) SLMed CoCr alloy using new powder and (c-d) SLMed CoCr alloy using old powder (used for 6 times)<sup>[14]</sup>

表面的飞溅颗粒随使用次数增多而增多。此外，气体环境也影响飞溅的产生。Matthews 等<sup>[16]</sup>和 Ly 等<sup>[17]</sup>研究发现在不同气体环境下，当气流夹带粉末飞溅停留在轨道中会影响成形件的表面平整度。不同粉末形态也会影响飞溅的产生。张晓雅等<sup>[18]</sup>通过调整工艺参数，解决了水雾化工艺下的铜合金粉末球形度不佳、各向异性以及成形时熔化不充分等问题。

### 1.2 飞溅对成形件内部结构的影响

飞溅行为关系到成形件的质量精度，导致冶金缺陷的产生和机械性能的退化。Furumoto 等<sup>[19]</sup>研究发现飞溅物落在已成形结构上会诱发结构缺陷。Zhu 等<sup>[20]</sup>发现热飞溅物落在冷凝区粘黏附近粉末，或在飞溅过程中聚集成具有局部应力的大颗粒，都会影响内部结构。Ye 等<sup>[21]</sup>发现由于熔体黏度高、流动性差，快速冷却时由飞溅引起的孔隙或未熔合来不及填充，诱发组织缺陷。

粉末颗粒氧化和重新沉积也会影响成形件的内部结构。Li 等<sup>[22]</sup>研究发现熔池中的氧化飞溅颗粒导致孔隙缺陷的产生，如图 2，球化加剧，最终影响成形件内部结构。Schwerz 等<sup>[23]</sup>研究发现表面氧化的粉末需更多的能量输入才能熔化进入熔池，导致未熔合缺陷

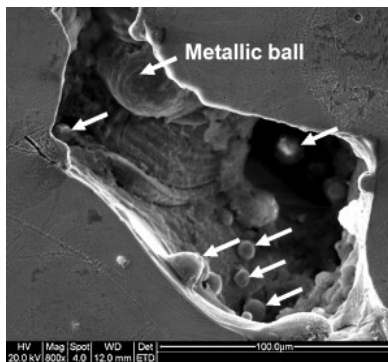


图 2 抛光切片的扫描电镜图像显示球化诱导孔隙图

Fig.2 SEM image of polished section showing the spheroidization-induced pore<sup>[22]</sup>

显著增多。Sutton 等<sup>[24]</sup>发现严重氧化的飞溅物重新沉积到高温熔池中会逆转 Marangoni 对流方向。

### 1.3 飞溅对成形件微观组织的影响

SLM 区别于铸造、锻造、焊接等传统加工方法，采取离散、堆积的制造理念，成形过程中粉末材料经历复杂的热作用过程后，产生独特的微观组织<sup>[3,15,24]</sup>。在激光扫描粉末材料成形过程中，部分大颗粒飞溅物受辐照熔化，但熔化不均使得周围粉末与激光相互作用受阻<sup>[7,25]</sup>，飞溅颗粒周围熔池形成不充分<sup>[26-28]</sup>，导致层间结合不良，或者飞溅落入粉床或已成形结构上造成组织缺陷。

飞溅对于成形件微观组织的影响，包括对粉末床稳定性和熔池运动两方面。Genenthiram 等<sup>[4,29]</sup>发现飞溅物会影响 SLM 加工过程的稳定性。Zhao 等<sup>[30]</sup>研究发现飞溅物夹杂于干净的粉末中会引起孔隙和夹杂等缺陷，导致成形件的微观组织以及力学性能受到一定的负面影响。Panwisawas 等<sup>[27]</sup>通过对飞溅行为与熔池演变的研究，发现气孔形成和熔池失控均与飞溅有关。图 3 为 Bidare 等<sup>[28]</sup>在研究熔池运动和微观组织缺陷问题时，用纹影相机监测到扫描过程产生的飞溅和飞溅过程中的气流运动。

### 1.4 飞溅对成形件力学性能的影响

以上 1.3 节所述的飞溅行为对微观组织的影响，最后将体现在成形件的力学性能上。由于 SLM 使用的材料是粉末，其内部复杂的热传导使得研究 SLM 过程中的飞溅机理变得更加困难，Wang 等<sup>[31]</sup>研究发现较大的飞溅颗粒与粉末混合为夹杂物，影响成形件的力学性能。Andani 等<sup>[32]</sup>用高速相机研究发现双光束较单光束产生的飞溅数量明显增加，降落的大颗粒飞溅物参与后续成形，降低成形件的力学性能。Wang 等<sup>[7]</sup>监测发现飞溅物颗粒嵌入零件表面后，如图 4，严重影响粉末床和激光扫描的稳定性。

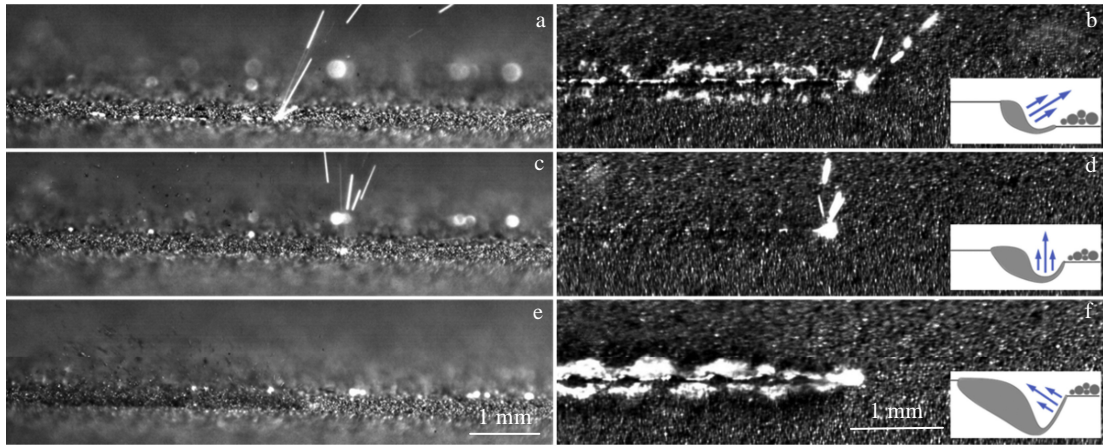


图 3 扫描（左-右）过程产生的飞溅和飞溅过程中的气流运动

Fig.3 High-speed images of side and top views during scanning process of single tracks (left to right scan direction) with different laser powers and scanning speeds: (a-b) 50 W and 0.1 m/s, (c-d) 100 W and 0.5 m/s, and (e-f) 200 W and 1 m/s<sup>[28]</sup>

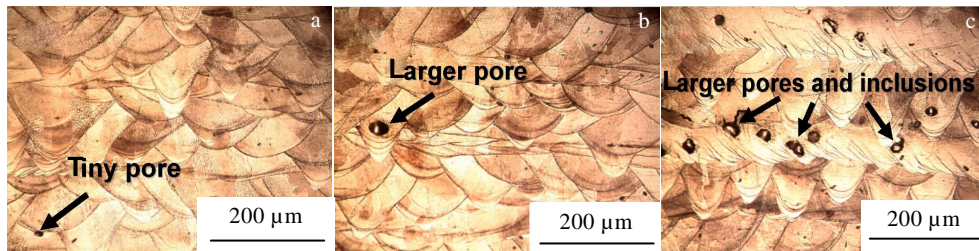


图 4 飞溅颗粒嵌入微观组织中引起的孔隙及夹杂物微观结构

Fig.4 Microstructures (xz direction) of pores and inclusions in SLMed parts with different powder use times: (a) 1 time, (b) 3 times, and (c) 6 times<sup>[7]</sup>

目前，针对 SLM 成形件力学性能的研究，大部分集中在疲劳行为和拉伸性能 2 方面<sup>[33]</sup>。Tang 等<sup>[34]</sup>研究发现被氧化的飞溅物影响成形件的疲劳性能。Zhao 等<sup>[30]</sup>研究发现夹杂于干净粉末中的飞溅物引起孔隙、夹杂等缺陷，如图 5，严重影响到零件的延伸率和疲劳强度。此外，Liu 等<sup>[35]</sup>对新鲜和污染的 316L 不锈钢粉末进行拉伸试验，由于使用污染粉末的试样在断裂处存在更多会导致裂纹萌生并加速裂纹扩展的孔隙，试样的机械性能急剧下降。刘洋<sup>[15]</sup>通过对比用干净和被飞溅污染的粉末加工的零件的拉伸性能，发现虽然两者同为韧性断裂，但后者存在更多的飞溅颗粒导致零件内部存在较多孔洞，这些断裂源严重降低了零件的力学性能。

## 2 飞溅形成原因

在 SLM 过程中，飞溅物是激光与粉末材料相互作用不可避免的产物之一<sup>[4,7-8]</sup>，其形状主要为球形、近

球形和粗球形且尺寸在体积比例上大于初始合金粉末<sup>[36]</sup>。针对 SLM 飞溅的形成原因，以下在阐述飞溅物分类的基础上，分别从能量密度、气体环境、扫描速度和扫描间距、粉末材料和实验环境几大方面来分析。

### 2.1 飞溅物分类

Chen 等<sup>[37]</sup>将成形过程分成 3 个阶段，如图 6，先是金属蒸汽开始喷射，接着蒸汽射流沿某一方向运动，最后金属蒸汽关闭，整个过程都伴随飞溅。

关于飞溅物形成机制和分类，至今还形式多样，没有统一的定义。Ly 等<sup>[17]</sup>通过分析飞溅物在气流夹带作用下的形成机制，将其分为金属熔体在反冲压力作用下脱离熔池成为飞溅物；粉床上部分粉末颗粒在夹带作用下被拉起成为热飞溅物；未经加热脱离粉床成为冷飞溅物。Liu 等<sup>[35]</sup>根据 SLM 成形过程中飞溅形成机理，将飞溅物分为由熔池失稳（金属蒸汽反冲压、熔池 Marangoni 效应）引起的液滴飞溅<sup>[6,27,38]</sup>和金属蒸汽卷吸作用引起的粉末飞溅<sup>[3]</sup>。

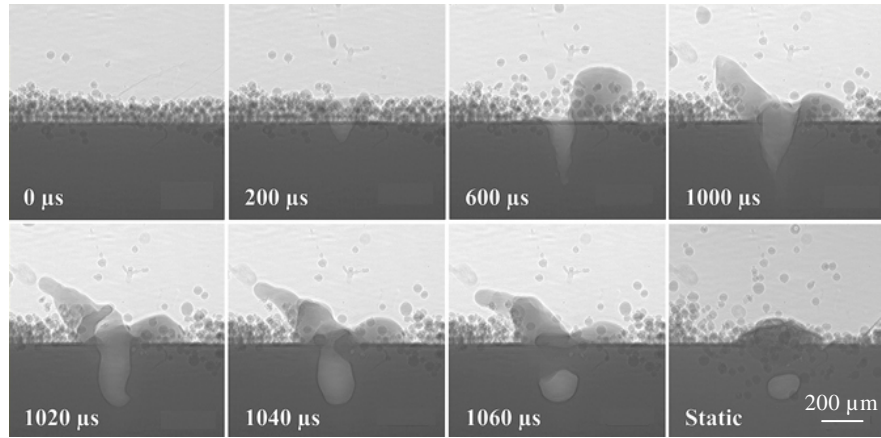


图 5 选区激光熔化 Ti-6Al-4V 过程的动态 X 射线图像

Fig.5 Dynamic X-ray images of SLMed Ti-6Al-4V process with laser power of 520 W<sup>[30]</sup>

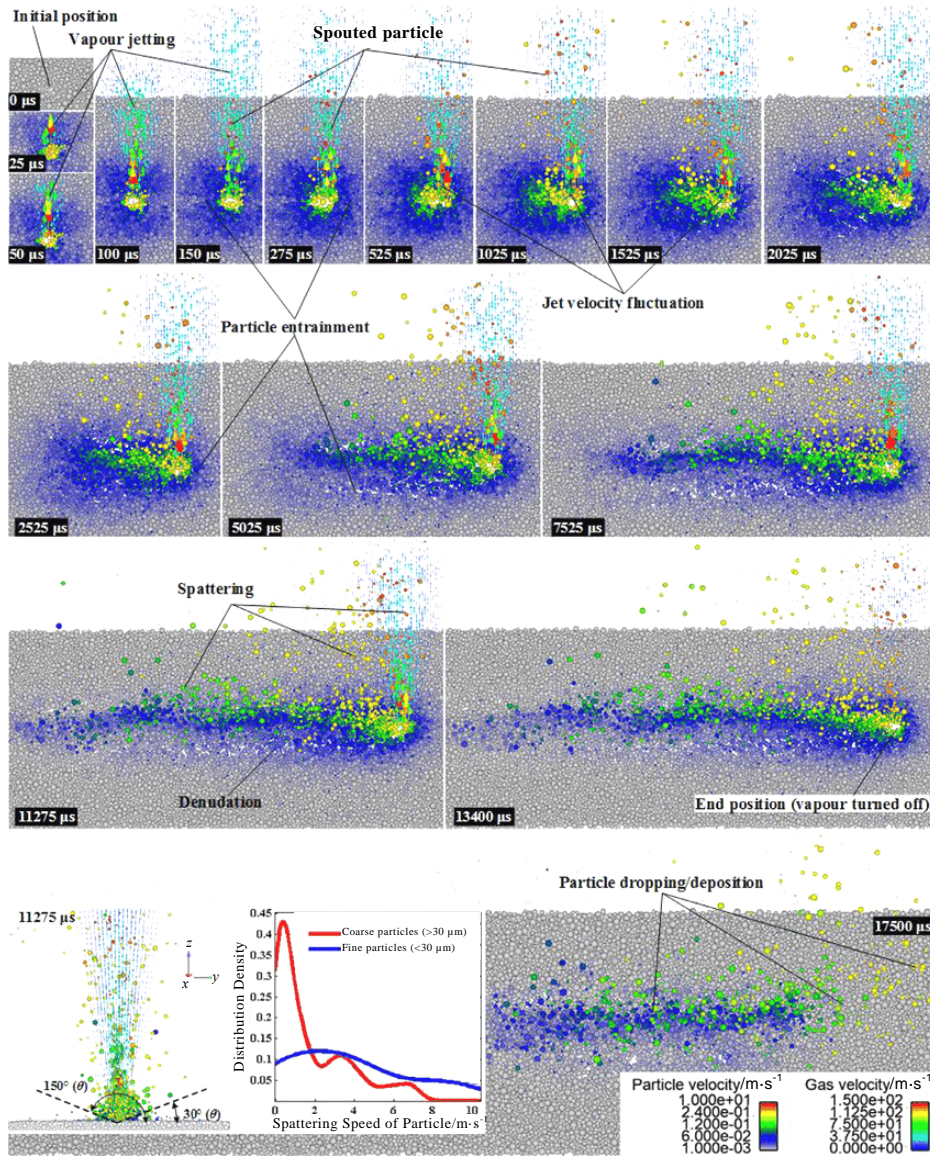


图 6 粉末颗粒与气相多相流动力学行为的模拟图

Fig.6 Simulation diagrams of dynamical behavior of powder particles and gas phase multiphase flow<sup>[37]</sup>

在此基础上, Wang 等<sup>[39]</sup>使用高速相机对 SLM 过程中飞溅进行动态实时监测, 研究发现飞溅的 3 个主要来源分别是反冲压力、Marangoni 效应和熔池中的热效应, 对应图 7 中 3 种类型的飞溅形貌, 分别是来源于球形原始粉末飞溅、熔池中粉末材料在金属蒸汽作用下形成的粗球形飞溅和熔体逃离熔池形成的不规则飞溅。由此, 在实际成形过程中, 各类飞溅是同时存在的, 甚至在特定的条件下, 飞溅物之间可发生相互转变。

## 2.2 能量密度

能量密度是飞溅缺陷产生的主要原因, 在某些特定的能量密度下可得到相对理想的表面质量。Shi 等<sup>[40]</sup>研究发现将能量密度调控到一定范围, 飞溅缺陷明显

减少, 熔池流动均匀且连续, 单道单层的成形精度明显提高。Jiang 等<sup>[41]</sup>发现随着能量密度的升高, 飞溅等缺陷的数量减少到一定程度后增多。Bitharas 等<sup>[42]</sup>通过测量不同能量密度下熔池羽流稳定性, 由图 8a 发现随输入能量密度的增加, 熔池稳定性降低, 由图 8b 证实了从稳定的羽流到混乱的羽流的转变。

激光功率会影响飞溅物的数量和体积, 大多数情况下, 高激光功率输入对应严重的飞溅行为。Jiang 等<sup>[41]</sup>结合激光功率研究能量密度对缺陷的影响, 发现在一定能量密度下, 高激光功率成形零件致密度更高。Ye 等<sup>[21]</sup>发现激光功率尤其影响粉末颗粒的熔化状态, 如图 9。Wang 等<sup>[39]</sup>研究发现当激光功率变化到一定值, 足够的金属蒸汽和气体流动导致原始金属粉末发生飞

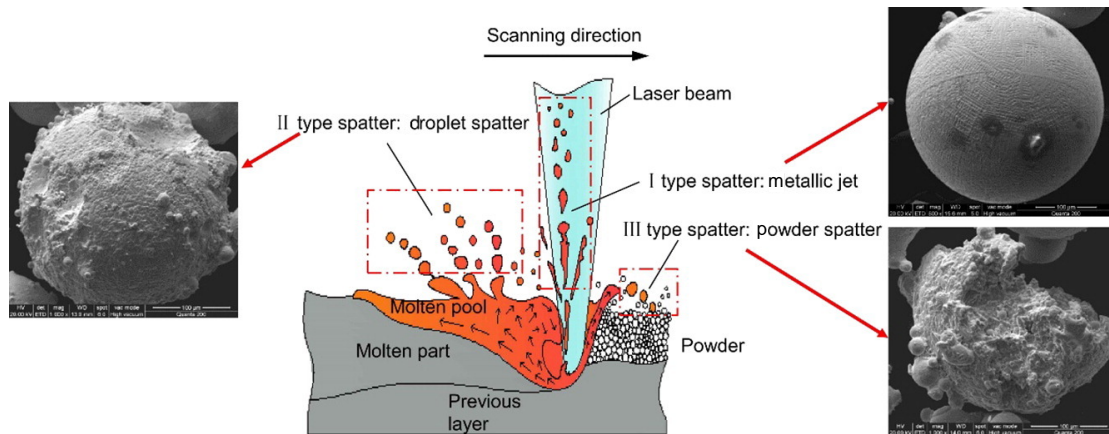


图 7 SLM 过程中不同类型飞溅的形成机制

Fig.7 Formation mechanisms of three different types of spatters in SLM process<sup>[39]</sup>

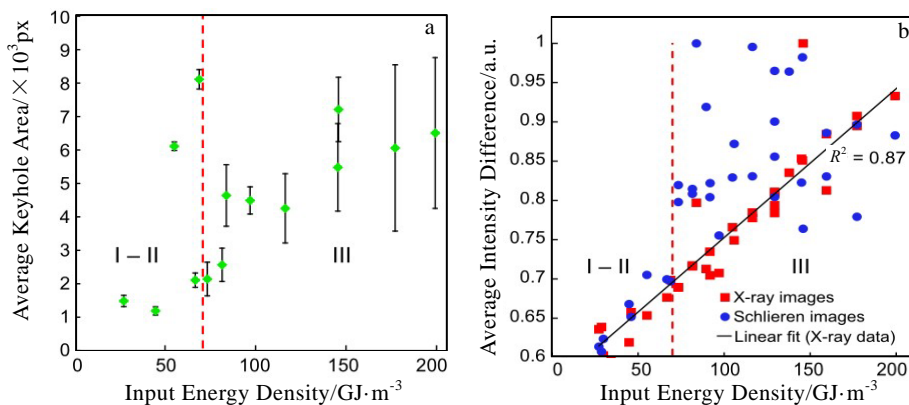


图 8 不同输入能量密度下熔池/羽流稳定性分析示意图

Fig.8 Schematic diagrams of molten pool/plume stability under different input energy densities: (a) plots of keyhole area (error bars: standard deviation  $\pm\sigma$ ), showing that the molten pool becomes increasingly unsteady as the input energy density increases and (b) average intensity difference between consecutive frames<sup>[42]</sup>

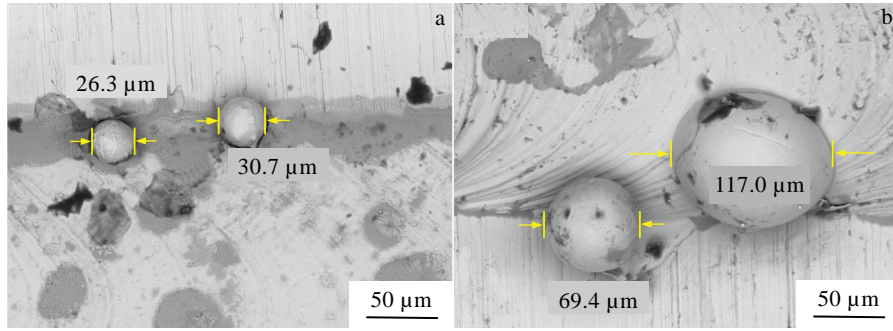


图 9 扫描电镜下 100 和 150 W 激光功率下的液体飞溅的飞溅尺寸

Fig.9 SEM images of spatter sizes: (a) powder spatter attached on the tracks under 100 W and 100 mm/s; (b) liquid spatter attached on the tracks under 150 W and 100 mm/s<sup>[21]</sup>

溅。Andani 等<sup>[43]</sup>发现降低输入的激光功率可减少成形过程中的飞溅。Leung 等<sup>[44]</sup>通过调整激光束的功率和分布控制熔池温度在某一范围,显著减少飞溅物的产生。

此外, Genenthiram 等<sup>[29]</sup>研究了体能量密度<sup>[10]</sup>与铺粉层厚对飞溅的影响,发现可通过低体能量密度结合较大激光斑点显著减少飞溅。Alkahari 等<sup>[45]</sup>研究发现熔池运动随铺粉厚度增加变得无序。更全面地, Furumoto 等<sup>[46]</sup>发现减少激光功率,或增大扫描速度、层厚,熔池面积都将缩减,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。综上,有必要针对能量密度<sup>[47]</sup>问题进行进一步的研究以得到理想的成形精度。

### 2.3 保护气体环境

气体环境也是影响飞溅缺陷产生的原因之一<sup>[48]</sup>。Matthews 等<sup>[16]</sup>研究发现在不同气体环境下,气流对飞溅的产生有较大影响。而且 Esmailizadeh 等<sup>[49]</sup>发现当气流方向垂直于扫描方向时,与气流同向的一侧带走

更多飞溅物。Anwar 等<sup>[50]</sup>通过量化分析飞溅物的分布情况,发现控制稀有气体水平可减少飞溅物,如图 10。Bidare 等<sup>[51]</sup>发现随着环境压力降低,粉末颗粒到达熔池受阻。

关于实验室的气体环境影响飞溅形成,主要考虑惰性气体的主要成分(Ar、He、N<sub>2</sub>、50%Ar-50%He混合物)和次要成分(O<sub>2</sub>)对飞溅行为的影响。其中,主要成分在成形过程中起保护作用,比如氦的高导热性使熔池温度较低,熔池运动不明显,进而抑制飞溅。Pauzon 等<sup>[52]</sup>发现与使用纯氩气相比,在纯氩气或氩氦混合气环境下可将热飞溅物减少一半左右。但考虑到成本,在实际生产中更多地还是选择氩气充当保护气。而关于惰性气体的次要成分,氧气作为混合气中的一种微量成分,会很大程度上影响飞溅物氧化。吴伟辉等<sup>[38]</sup>研究发现,保护气中的氧气虽是微量,但是如图 11,略微增加氧气含量,飞溅物则明显增多,且飞溅物颗粒中的氧元素含量也随之增加。

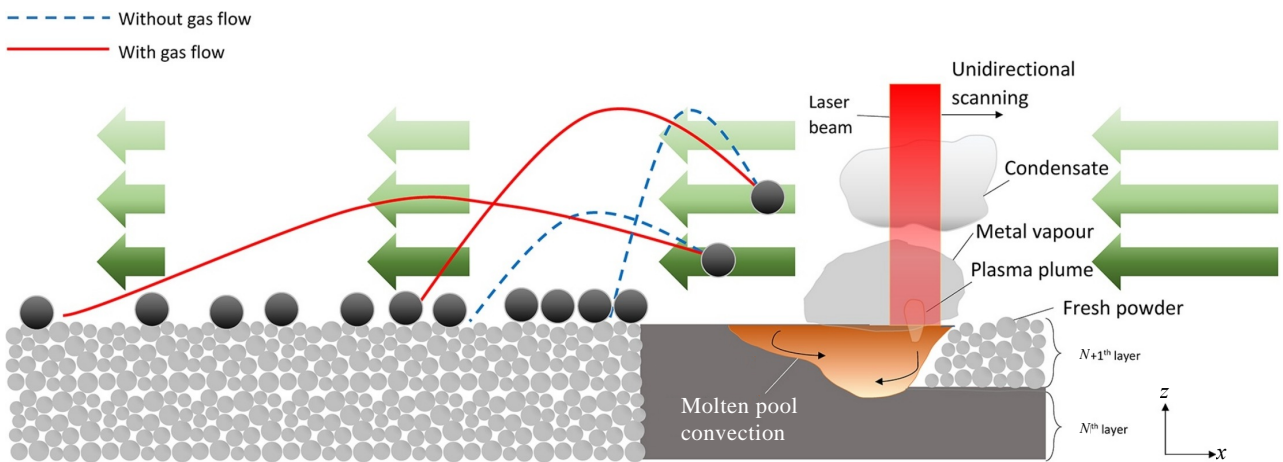


图 10 熔池飞溅轮廓图及气体流动对粒子轨迹的影响

Fig.10 Schematic of spatter ejection profiles from molten pool and the effect of gas flow on the particle trajectories<sup>[50]</sup>

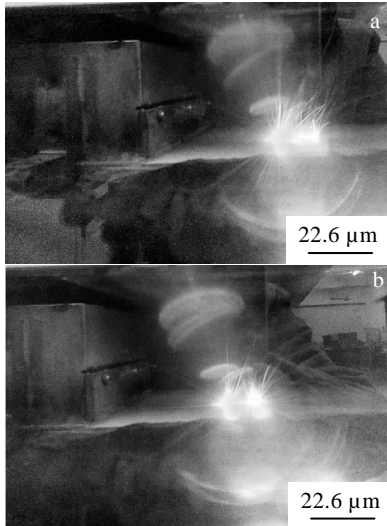


图 11 不同含氧量下的飞溅

Fig.11 Photos of splashing phenomenon under different oxygen contents: (a) 0.28% and (b) 5%<sup>[38]</sup>

在实际操作中，可以考虑预先多次循环成形室内的气体，将氧气含量保持在一定的微量水平。此外，将成形室保持在略高于大气压可防止氧气从设备外部进入，同时，在特定的某一方向上的流动惰性气体可

以一定程度上消除产生的飞溅。

### 2.4 扫描速度和扫描间距

激光扫描速度和扫描间距也会影响飞溅的产生。Andani 等<sup>[43]</sup>研究发现在一定程度上提高激光扫描速度可减少 SLM 过程中飞溅。Gunenthiram 等<sup>[29]</sup>发现较高扫描速度对应较少的热飞溅产生，但由于夹带作用引起的冷飞溅物将增多。Bidare 等<sup>[28]</sup>进一步研究发现随激光功率和扫描速度增加，飞溅粒子溅射方向沿着扫描路径由前向后变化。Young 等<sup>[53]</sup>研究发现工艺参数对飞溅机理的影响和蒸汽射流方向密切相关，如图 12，在恒定激光扫描速度下改变激光功率（12a~12c）或相反状态（12d~12f）可显著改变熔池凹陷区的几何形状，飞溅物溅射方向也随之改变。

Kivirasi 等<sup>[11]</sup>进一步研究发现在使用 316L 气体雾化粉末时，扫描速度对飞溅数量的影响大于激光功率、扫描距离或体能量密度，且飞溅离散。Yin 等<sup>[54]</sup>从熔池动力学角度研究飞溅与熔道的关系，发现在蒸汽羽流作用下主要向熔池后喷溅，低扫描速度下熔池爆炸现象更剧烈，但较长的熔体回流时间使炸坑回填充分。

扫描策略也会影响到飞溅的产生。Salman 等<sup>[25]</sup>发现与无轮廓扫描策略相比，轮廓扫描（如图 13）下组织更细、可检测孔隙率或未熔化颗粒较少，对应的

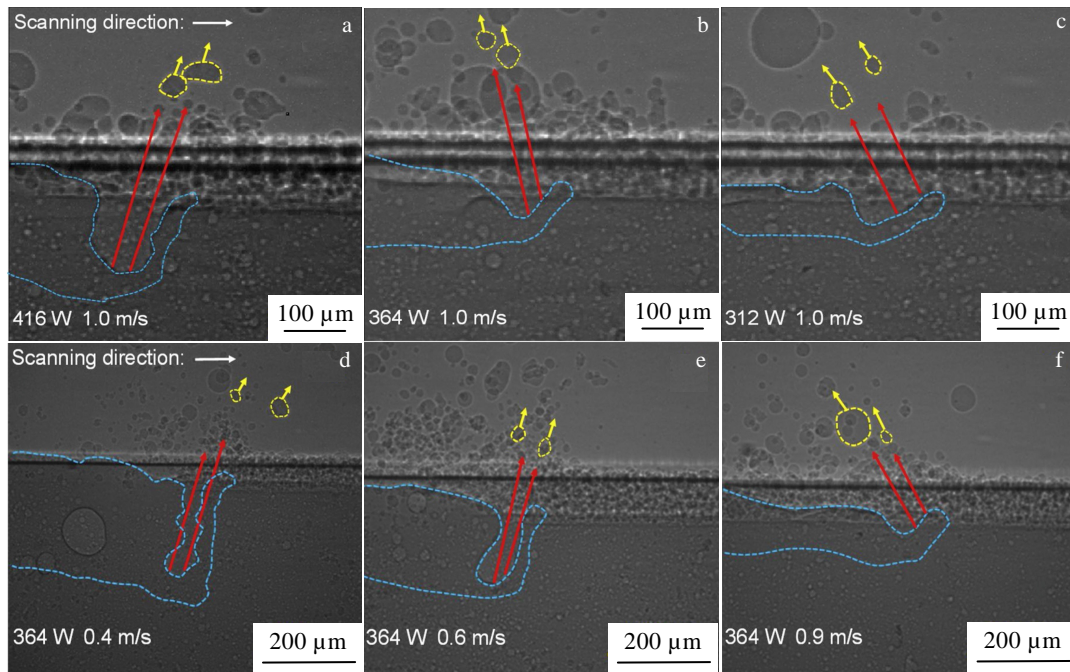


图 12 工艺参数对溅射方向的影响

Fig.12 Effects of process parameters on spatter direction: (a-c) X-ray images demonstrating the effects of laser power on spatter direction and depression zone geometry; (d-f) X-ray images showing the effects of scanning speed on spatter direction and depression zone geometry<sup>[53]</sup>

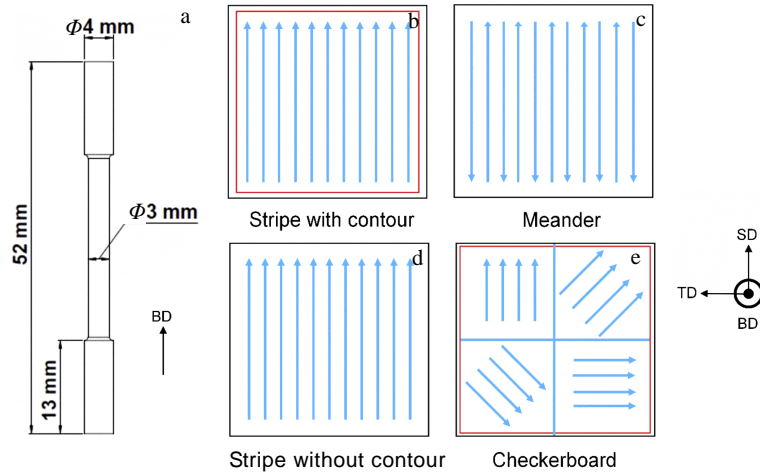


图 13 SLM 拉伸试样的示意图和 4 种扫描策略

Fig.13 Schematic of a tensile specimen fabricated by SLM (a) and illustrations of the four scanning strategies used in this work: (b) stripe with contour, (c) meander, (d) stripe without contour, and (e) checkerboard<sup>[25]</sup>

飞溅也是最少。此外，层厚过高也会导致大量飞溅的产生。Zhang 等<sup>[55]</sup>发现，当层厚超过粉末颗粒尺寸 2 倍时，飞溅物颗粒产生速度将减慢。Schwerz 等<sup>[23]</sup>对不同层厚进行了实验，发现随层厚累加，熔池散热受周围粉末限制，稳定性下降导致飞溅物颗粒的数量增加。

在清除飞溅物颗粒方面，飞溅颗粒的喷射轨迹取决于激光扫描的方向，且二者方向相反。Anwar 等<sup>[56]</sup>研究发现，当激光扫描与保护气流方向相反时，飞溅方向与保护气流方向一致，成形室保护气体出口附近积攒的飞溅物颗粒大大减少。由于飞溅对工艺参数的依赖性很强，很难对不同类型的飞溅进行定量分析，所以需针对飞溅物喷射方向、熔池形状与激光加工参数之间相关性进行更多研究。

### 2.5 粉末材料

粉末的圆度、粒径，还有粉末材料本身性质也会影响飞溅的产生。在 SLM 过程中，飞溅物是激光热源与粉末材料相互作用的产物之一，形状主要为近球形且尺寸比初始金属粉末大<sup>[57]</sup>。Zheng 等<sup>[58]</sup>发现飞溅物中初始粉末颗粒占大多数。Furumoto 等<sup>[19]</sup>发现飞溅行为与粉末材料的初始状态有关。粉末材料的种类和特征影响飞溅行为。Bertoli 等<sup>[59]</sup>发现雾化粉末对应产生多且离散的飞溅物，较水雾化粉末有明显差异。Gunenthiram 等<sup>[4]</sup>实验发现对于不同类的粉末，如图 14，其飞溅行为差异更明显。

飞溅物一部分成为大颗粒粉末落入粉床造成污染，影响粉末循环使用次数、能量吸收与热传递，进而影响成形精度。Simonelli 等<sup>[60]</sup>和顾冬冬等<sup>[6]</sup>通过对 SLM 过程中飞溅和氧化现象的研究，发现飞溅物中的

化学成分与初始粉末相比变化显著，且氧元素含量明显升高。Gunenthiram 等<sup>[4]</sup>发现飞溅物对氧元素的吸收限制了可循环次数，不同粉末可循环使用次数差异明显。Wang 等<sup>[7]</sup>通过对比重复使用 1~6 次的 CoCrW 合金粉末，发现随循环使用次数增多氧化和粘结现象加重，且飞溅物中的 O、C、Si 等元素含量显著升高。因此，在成形过程中要筛选使用过的粉末，去除重熔或黏结很多小颗粒的大尺寸颗粒。

粉末自身的物理性质和含氧量也会影响飞溅行为。较高粘度、导热性、密度或较低含氧量的粉末投入使用可大幅降低飞溅的产生。Gunenthiram 等<sup>[29]</sup>发现由于粉末致密性，熔池被粉末床覆盖，抑制了熔池内的飞溅散射出熔池表面而污染粉末床，如图 15。Leung 等<sup>[61]</sup>研究发现在低粘度熔体中，可通过抑制 Marangoni 对流来抑制由此驱动而易产生的液滴飞溅。此外，Fedina 等<sup>[62]</sup>研究发现随粉末中氧元素含量增加，熔池运动剧烈，飞溅物及其中氧元素含量都随之上升。

### 2.6 其他影响因素

实验的环境会影响飞溅物的产生，这一部分将从实验环境压力、基板温度、光斑直径和实验的预处理操作等多方面具体分析。在实验环境压力方面，Bidare 等<sup>[63]</sup>和 Li 等<sup>[64]</sup>通过研究不同环境压力中的气流、气固相互作用和粉末运动，发现随环境压力的降低，散射角度和粉末飞溅颗粒增多。Annovazzi 等<sup>[65]</sup>研究发现真空条件和高速激光降低粉末层稳定性，引起更多飞溅，如图 16。此外，增加保护气中氦气占比、保证氧气微量水平、控制成形室压力略大于大气压，都可对抑制飞溅起到一定的积极影响。

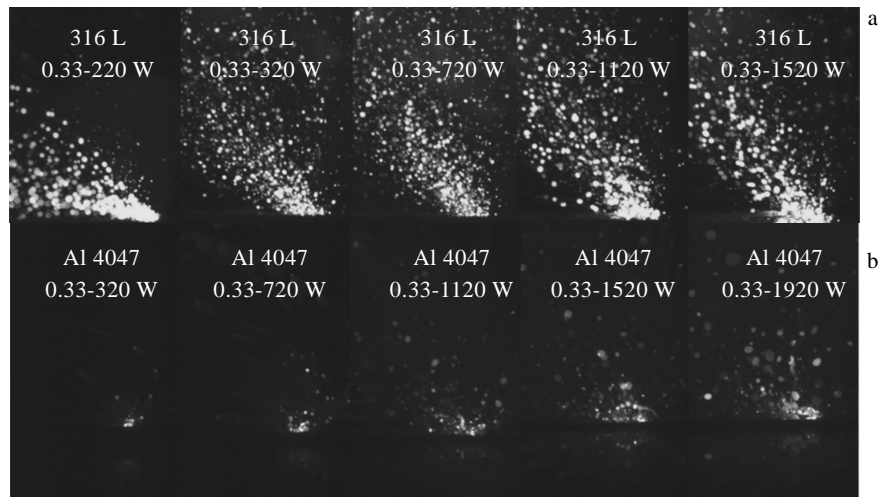


图 14 不同材料的飞溅对比

Fig.14 Superimposition of 1000 recorded images of spatters ( $v_s=0.33$  m/s) for 316L steel (a) and Al 4047 (b)<sup>[4]</sup>

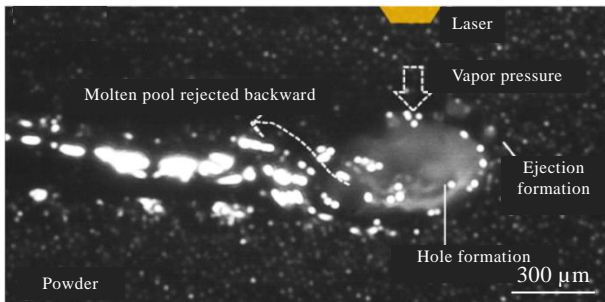


图 15 在 0.75 m/s 和 1270 W 的单次 SLM 轨道中熔池行为分析

Fig.15 Molten pool behavior analysis of a single SLM track at 0.75 m/s and 1270 W<sup>[29]</sup>

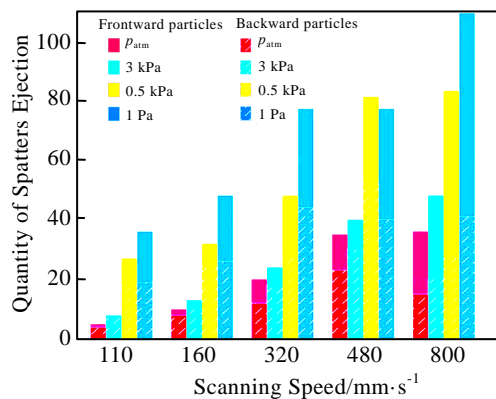


图 16 受激光速度和环境压力的变化影响的飞溅物总量

Fig.16 Total amount of spatter ejected with evolution of laser velocity and pressure ( $p_{atm}$ ) along backward (striped area) or frontward (filled area) directions<sup>[65]</sup>

在光斑直径方面，Young 等<sup>[66]</sup>研究熔池动力学发现 SLM 过程中激光光斑大小会显著影响液滴飞溅的产生。Gunenthiram 等<sup>[4]</sup>和 Sow 等<sup>[67]</sup>发现当熔池足够深时，大光斑结合较低水平的体能量密度，可提高工艺稳定性、减少飞溅的产生，改善成形件质量精度。

此外，一些实验预处理操作也会影响飞溅行为，Furumoto 等<sup>[19]</sup>发现预热基板可显著减少飞溅量。Khairallah 等<sup>[68]</sup>、Achee 等<sup>[69]</sup>和 Annovazzi 等<sup>[65]</sup>研究发现一定能量密度结合预烧结粉末也可显著抑制飞溅的产生。Simonelli 等<sup>[60]</sup>发现金属粉末的热吸收率明显高于固体大块金属或大颗粒重熔颗粒，可用低能量密度激光结合预烧结来抑制飞溅。

### 3 飞溅物的监测和控制

在 SLM 成形过程中，飞溅可被直接观测到，但由于单晶颗粒的微小，不能对其进行定量分析。为此，很多学者都致力于对飞溅物的监测和控制优化方向的研究。

#### 3.1 飞溅物的监测与模拟

##### 3.1.1 飞溅物的监测

SLM 工艺涉及到很多领域，其工艺参数的复杂性决定了工艺的复杂性，对各种影响因素的定量表征提出了相应的检测手段。相比于传统的激光焊接、切割，SLM 具有更小的斑点和熔池、以及更高的扫描速度，但由于激光与粉末加之成形部分的相互作用复杂交错，飞溅的数量和种类增多，对应的监测也更为复杂<sup>[70]</sup>。

目前已有少量关于监测飞溅的技术。包括超高速光学相机成像<sup>[28]</sup>（图 3）、纹影成像<sup>[71-72]</sup>、超高速同步加速器 X 射线成像<sup>[30,73]</sup>、红外视频成像<sup>[74]</sup>等技术手段可

清晰地监测激光与粉末颗粒之间的相互作用过程，如图 17 和图 3，不同高速相机获取的监测信息差异明显。Guo 等<sup>[75]</sup>通过 X 射线成像技术监测发现飞溅过程中的颗粒运动是由熔池中激光诱导的金属羽流和粉末床上方的环境气体夹带作用引起的。

其中，高速可见光相机观察 SLM 分为同轴架构和旁轴架构，如图 18<sup>[76-78]</sup>。Alkahari 和 Furumoto 等<sup>[45-46]</sup>用高速相机观察 SLM 成形过程中熔池的形成过程，研究了激光功率、扫描速度和分层厚度对熔池形貌的影响。曹润辰<sup>[79]</sup>通过高速相机观测不同金属粉末在不同工艺参数下的熔化现象，分析了粉末熔化过程中的熔池运动和气固相互作用的演变机理。

除了粉末颗粒，熔池也是飞溅物的主要来源之一，对于熔池的监测，由于高速相机表征能力有限，通常采用 X 射线成像技术。Zhao 等<sup>[30]</sup>用 X 射线成像对 SLM

过程中熔池内部情况进行拍摄，记录了飞溅的运动轨迹。Leung 等<sup>[61]</sup>、Zhao 等<sup>[30]</sup>和 Cunningham 等<sup>[80]</sup>采用 X 射线成像观测研究了激光与粉末相互作用过程中熔池的变化，监测到飞溅颗粒的运动轨迹。Leung 等<sup>[44]</sup>利用 X 射线高速相机观测 SLM 过程中缺陷的形成过程和熔池运动，分析了飞溅的形成机制。

其次，纹影成像也是一种常见的飞溅监测方法<sup>[81-82]</sup>。Bidare 等<sup>[28]</sup>在高速相机的基础上，结合纹影成像技术研究了 SLM 过程中飞溅行为。综上，对飞溅的检测是目前的研究热点之一，受限于观测角度、观测机位距离、可见光干扰等因素，仍需对成像质量进一步提高。

### 3.1.2 飞溅物的模拟仿真

对 SLM 过程中仿真与监测密切相关，对粉末的模型建立是研究飞溅形成机制的基础。Bruna-Rosso 等<sup>[83]</sup>假设粉末均匀分布后对 SLM 过程的温度场及熔池形状进

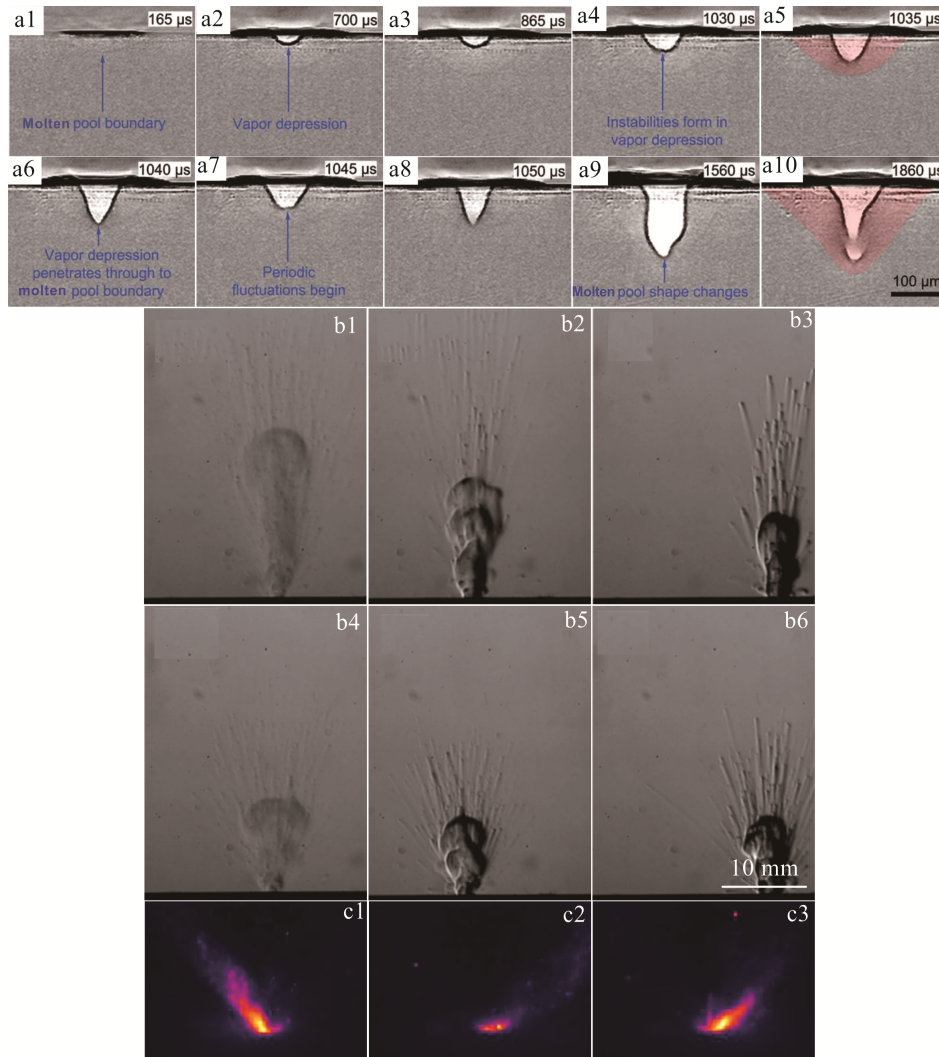


图 17 不同原位检测技术获得的特征图

Fig.17 Feature maps obtained by different in-situ detection techniques: (a1-a10) X-ray imaging<sup>[73]</sup>, (b1-b6) schlieren imaging<sup>[72]</sup>, and (c1-c3) continuous infrared video imaging<sup>[74]</sup>

行了有限元仿真。Panwisawas 等<sup>[84]</sup>根据流体动力学在有限元软件中建立了粉滴模型，直观地模拟出粉末颗粒的分布。Khairallah 等<sup>[85]</sup>则是假定粉末粒子随机分布建立粉末模型，研究发现 SLM 过程中伴随飞溅。

在激光热源的辐照下，粉末运动促进了飞溅形成。Panwisawas 等<sup>[27]</sup>在高速相机的基础上结合数值模拟研究发现液滴飞溅影响 SLM 熔道表面粗糙度。Zhirnov 等<sup>[86]</sup>对熔池的蒸发过程进行数值模拟，以此来研究高能激光下的液滴飞溅行为。此外，Bidare 等<sup>[28]</sup>将飞溅物的运动特征与模型结合，解释了飞溅的诱因。Ly 等<sup>[17]</sup>发现保护气体的夹带作用是飞溅形成的主要原因，如图 19。而 Shi 等<sup>[87]</sup>考虑了熔池动力学、微观结构、固态相变和微弹性响应，建立了一个集成多物理和多尺度的框架。综上，影响飞溅的因素较多，且密切相关，通过对 SLM 成形过程的模拟仿真，可更好地了解飞溅行为，对成形件性能的控制和质量精度的提高具有重要意义。

### 3.2 飞溅物的控制方法

在线监控并反馈控制是获得高效、高精度的金属增材制造的关键<sup>[88]</sup>。可通过记录、收集飞溅物的运动特征并对其进行测量来反映 SLM 过程中熔池运动的稳定性。基于飞溅与激光、粉末间的密切关系，

Repossini 等<sup>[89]</sup>和 Ye 等<sup>[90]</sup>通过建立回归模型显著提高了对粉末运动的预测能力。

SLM 过程中实时监测数据量庞大，可结合机器与人工智能来提取并分析飞溅的特征信息。Zhang 等<sup>[91]</sup>和 Ye 等<sup>[90]</sup>利用神经网络对飞溅物进行特征提取与分类。目前，对飞溅缺陷控制的研究还需进一步深入。

## 4 未来研究方向

SLM 作为一种重要的增材制造工艺，其不可忽视

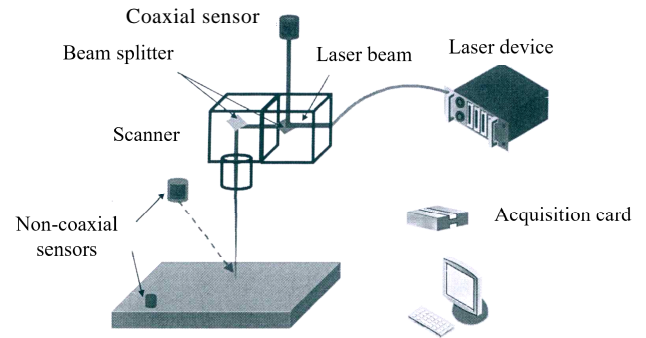


图 18 SLM 原位检测系统同轴和旁轴采集方式

Fig.18 Coaxial and paraxial acquisition mode of SLM in-situ detection system<sup>[78]</sup>

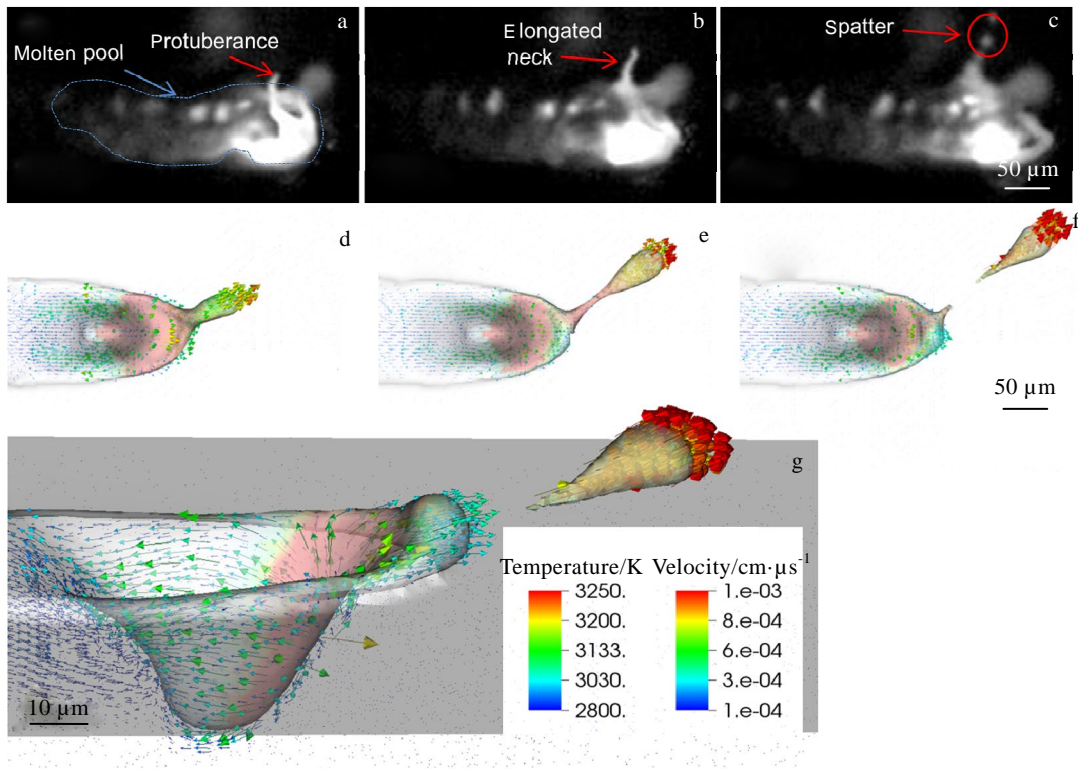


图 19 激光驱动 SS316L 基板飞溅过程

Fig.19 Comparison between experiment (a-c) and simulation (d-g) of the laser-driven spatter process for a bare SS316L substrate<sup>[17]</sup>

的优势使其发展迅速并已形成一定的规模。但是,SLM工艺中的飞溅问题严重地影响了成形的质量。在此基础上,本文提出了进一步的研究工作。

#### 4.1 多激光下飞溅成形机制

飞溅的形成机制复杂多样,不同范围的能量密度、激光扫描速度和扫描间距等其他工艺参数、保护气体环境、粉末材料、实验预操作等因素,都将在一定程度上影响飞溅缺陷的产生,进而影响熔池流动均匀性和最终成形精度。

多激光器协作是提高SLM成形效率和实现大尺寸构件成形的有效途径,也是目前SLM领域的一个研究热点。与单一激光成形不同,多激光成形的工作点数较多,各工作点之间相互作用导致飞溅形成机制更为复杂,飞溅数量大幅增加。由于成形室的尺寸很大,所以通过常见的控制气流的方式来带走飞溅物比较困难,为此,开展多光束加工过程中的飞溅问题的研究尤为重要。

#### 4.2 多信息融合及处理技术

鉴于SLM飞溅复杂的成形机制及对成形精度危害较大,需对其进行动态监测和调控,对气液两相流场进行动态反馈,最大限度地消除飞溅。而随着SLM成形过程的进行,多个传感系统所需的温度、辐射、光强、声音和熔池等信息呈现几何倍数的增长,如图20<sup>[78]</sup>。将神经网络等人工智能技术与传统的算法结合,可有效解决传统手工操作难以解决的问题。

#### 4.3 提高原位飞溅检测质量

现有高速成像装置存在视觉、景深和清晰度受限等问题,提高成像条件和合理运用多种实时监测手段,是对SLM过程中飞溅行为进行深入研究的重要方向。将X射线成像技术与可见光相机联合应用于飞溅检测是一种新的技术发展方向,将两者结合可对从内(熔池)向外(粉末床)的飞溅过程进行深入地分析,从而对飞溅过程有更深入的了解。

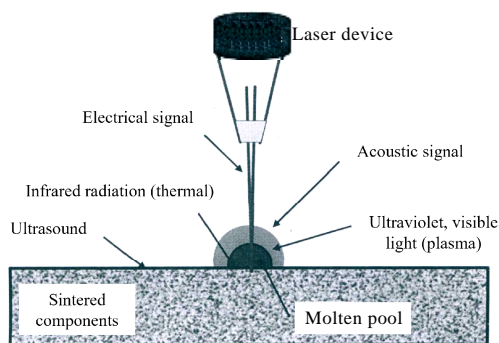


图20 SLM过程中产生的信号

Fig.20 Signals generated in SLM process<sup>[78]</sup>

#### 4.4 飞溅缺陷的抑制措施

当前,通过多尺度多物理场仿真与模拟,并加以成型腔内流场的优化设计,可提高SLM成形质量并达到优化工艺参数的目的,有助于后续对缺陷进行一系列有效抑制措施,是今后SLM成形工艺的一个重要发展方向。而通过控制气体环境来抑制飞溅主要是考虑各种气体的含量、导热性、成本以及气流方向、速度和压力等,以此达到成形室内流场的优化设计。

除此之外,通过控制能量密度和激光扫描速度扫描间距、层厚等参数在某些范围内,强化熔池运动稳定性,保证粉末颗粒的熔化状态,也可明显减少飞溅缺陷,得到相对理想的成形质量。关于粉末材料则是根据其圆度、粒径,还有自身性质来改变其初始状态、种类含量、含氧量和特征来解决差异明显的飞溅问题。而关于实验环境对飞溅物的影响,可通过对比研究不同环境压力中的气流、气固相互作用和粉末运动,将环境压力维持在一定范围内、控制光斑大小、预热基板等操作,来达到控制散射角度和粉末飞溅数量的目的。

#### 参考文献 References

- [1] Zhang Heng(张衡), Yang Ke(杨可). *Packaging Engineering*(包装工程)[J], 2021, 42(16): 9
- [2] Zeng Shaolian(曾绍连). *China Metal Bulletin*(中国金属通报)[J], 2022, 4: 186
- [3] Zhang Yalian(张亚莲), Chang Ruohan(常若寒), Yao Caogen(姚草根) et al. *Aerospace Materials & Technology*(宇航材料工艺)[J], 2022, 52(2): 67
- [4] Gunenthiram V, Peyre P, Schneider M et al. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2017, 251: 376
- [5] Nandwana P, Peter W H, Dehoff R R et al. *Metallurgical and Materials Transactions*[J], 2016, 47(1): 754
- [6] Gu Dongdong(顾冬冬), Dai Donghua(戴冬华), Xia Mujian(夏木建) et al. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*(南京航空航天大学学报)[J], 2017, 49(5): 645
- [7] Wang Di, Ye Guangzhao, Dou Wenhao et al. *Optics and Laser Technology*[J], 2020, 121: 105678
- [8] Guo Yueling, Jia Lina, Kong Bin et al. *Chinese Journal of Aeronautics*[J], 2018, 31(4): 860
- [9] Chen Shuai(陈帅), Liu Jianguang(刘建光), Wang Weidong(王卫东) et al. *Journal of Netshape Forming Engineering*(精密成形工程)[J], 2020, 12(5): 122
- [10] Yi Tao(易涛), Cheng Jing(成靖), Zhao Zhongzhe(赵仲哲) et al. *Iron Steel Vanadium Titanium*(钢铁钒钛)[J], 2022, 43(4): 75

- [11] Kivirasi E, Piili H, Minet-Lallemand K *et al.* *Procedia CIRP*[J], 2020, 94: 398
- [12] Martin A A, Calta N P, Khairallah S A *et al.* *Nature Communications*[J], 2019, 10(1): 1987
- [13] Qiu Chunlei, Panwisawas Chinnapat, Ward Mark *et al.* *Acta Materialia*[J], 2015, 96: 72
- [14] Wang D, Wu S B, Fu F *et al.* *Materials & Design*[J], 2017, 117(3): 121
- [15] Liu Yang(刘洋). *Research on the Mechanism of Selective Laser Melting and Direct Manufacturing of Structural Features*(选区激光熔化成型机理和结构特征直接制造研究)[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015
- [16] Matthews M J, Guss G, Khairallah S A *et al.* *Acta Materialia*[J], 2016, 114: 33
- [17] Ly S, Rubenchik A M, Khairallah S A *et al.* *Scientific Reports*[J], 2017, 7(1): 4085
- [18] Zhang Xiaoya(张晓雅), Li Xianbing(李现兵), Tan Zhen(谈震) *et al.* *Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2018, 45(10): 125
- [19] Furumoto T, Egashira K, Munekage K *et al.* *Cirp Annals-Manufacturing Technology*[J], 2018, 67(1): 253
- [20] Zhu Mingliang, Xuan Fuzhen. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*[J], 2014, 27(3): 496
- [21] Ye Dongsan, Zhu Kunpeng, Hsi Fuh Jerry Ying *et al.* *Optics & Laser Technology*[J], 2019, 111: 395
- [22] Li Ruidi, Shi Yusheng, Wang Zhigang *et al.* *Applied Surface Science*[J], 2010, 256(13): 4350
- [23] Schwerz C, Raza A, Lei X Y *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2021, 47: 47
- [24] Sutton A T, Kriewall C S, Leu M C *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2020, 31: 100904
- [25] Salman O O, Brenne F, Niendorf T *et al.* *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2019, 45: 255
- [26] Shi Wentian(石文天), Han Yufan(韩玉凡), Liu Yude(刘玉德) *et al.* *Surface Technology*(表面技术)[J], 2021, 50(11): 75
- [27] Panwisawas C, Qiu C L, Sovani Y *et al.* *Scripta Materialia*[J], 2015, 105: 14
- [28] Bidare P, Bitharas I, Ward R M *et al.* *Acta Materialia*[J], 2018, 142: 107
- [29] Gunenthiram V, Peyre P, Schneider M *et al.* *Journal of Laser Applications*[J], 2017, 29(2): 022303
- [30] Zhao C, Fezzaa K, Cunningham R W *et al.* *Scientific Reports*[J], 2017, 7(1): 3602
- [31] Wang Di, Yang Yongqiang, Liu Ruicheng *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2013, 213(10): 1734
- [32] Andani M T, Dehghani R, Karamooz-Ravari M R *et al.* *Materials & Design*[J], 2017, 131(10): 460
- [33] Miao Qiuyu(苗秋玉), Liu Miaoran(刘妙然), Zhao Kai(赵凯) *et al.* *Laser & Optoelectronics Progress*(激光与光电子学进展)[J], 2018, 55(1): 58
- [34] Tang M, Pistorius P C. *International Journal of Fatigue*[J], 2017, 94: 192
- [35] Liu Y, Yang Y Q, Mai S Z *et al.* *Materials & Design*[J], 2015, 87(15): 797
- [36] Faraj Zainab, Aboussaleh Mohamed, Zaki Smail *et al.* *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2022, 122(3): 1669
- [37] Chen Hui, Yan Wentao. *Acta Materialia*[J], 2020, 196: 154
- [38] Wu Weihui(吴伟辉), Yang Yongqiang(杨永强), Mao Xing(毛星) *et al.* *Foundry Technology*(铸造技术)[J], 2016, 37(12): 2636
- [39] Wang D, Wu S B, Fu F *et al.* *Materials & Design*[J], 2017, 117: 121
- [40] Shi Wentian, Li Jihang, Liu Yude *et al.* *Journal of Central South University*[J], 2022, 29(10): 3447
- [41] Jiang Huazhen, Li Zhengyang, Feng Tao *et al.* *Acta Metallurgica Sinica*[J], 2021, 34: 495
- [42] Bitharas I, Parab N, Zhao C *et al.* *Nature Communications*[J], 2022, 13(1): 2959
- [43] Andani M T, Dehghani R, Karamooz-Ravari M R *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2018, 20: 33
- [44] Leung C L A, Marussi S, Atwood R C *et al.* *Nature Communications*[J], 2018, 9(1): 1355
- [45] Alkahari M R, Furumoto T, Ueda T *et al.* *Advanced Materials Research*[J], 2014, 3160(933): 196
- [46] Furumoto Tatsuaki, Alkahari Mohd Rizal, Ueda Takashi *et al.* *Physics Procedia*[J], 2012, 39(11): 760
- [47] Yang Guangyu(杨广宇), Tang Huiping(汤慧萍), Wang Jian(王建) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51(2): 573
- [48] Wang Lili(汪丽丽), Feng Yi(凤仪), Cao Mengli(曹梦丽) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51(9): 3172
- [49] Esmailizadeh R, Ali U, Keshavarzkermani A *et al.* *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2019, 37: 11
- [50] Anwar A B, Pham Q C. *Additive Manufacturing*[J], 2018, 22: 86
- [51] Bidare P, Bitharas I, Ward R M *et al.* *International Journal of Machine Tools and Manufacture*[J], 2018, 130: 65

- [52] Pazon C, Hoppe B, Pichler T *et al.* *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*[J], 2021, 35: 371
- [53] Young Z A, Guo Q L, Parab N D *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2020, 36: 101438
- [54] Yin Jie, Zhang Wenqi, Ke Linda *et al.* *International Journal of Machine Tools & Manufacture*[J], 2021, 161(1): 103686
- [55] Zhang Weihao, Ma Honglin, Zhang Qi *et al.* *Materials & Design*[J], 2022, 213
- [56] Anwar A B, Pham Q C. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2017, 240: 388
- [57] Yadroitsev I, Gusarov A, Yadroitsava I *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2010, 210(12): 1624
- [58] Zheng Hang, Li Huaixue, Lang Lihui *et al.* *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2018, 36: 60
- [59] Bertoli U S, Guss G, Wu S *et al.* *Materials & Design*[J], 2017, 135: 385
- [60] Simonelli M, Tuck C, Aboulkhair N T *et al.* *Metallurgical and Materials Transactions*[J], 2015, 46(9): 3842
- [61] Leung Chu Lun Alex, Marussi Sebastian, Towrie Michael *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2018, 9(1): 1355
- [62] Fedina T, Sundqvist J, Kaplan A. *Materials Today Communications*[J], 2021, 27: 100241
- [63] Bidare P, Bitharas I, Ward R M *et al.* *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2018, 99: 543
- [64] Li X, Guo Q, Chen L *et al.* *International Journal of Machine Tools & Manufacture*[J], 2021, 170: 103797
- [65] Annovazzi A, Dembinski L, Blanchet E *et al.* *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2022, 73: 715
- [66] Young Z A, Coday M M, Guo Q L *et al.* *Materials*[J], 2022, 15(2): 530
- [67] Sow M C, De Terris T, Castelnau O *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2020, 36: 101532
- [68] Khairallah S A, Martin A A, Lee J R I *et al.* *Science*[J], 2020, 368(6491): 660
- [69] Achee T, Guss G, Elwany A *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2021: 101985
- [70] Riedlbauer D, Scharowsky T, Singer R F *et al.* *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2017, 88(5-8): 1309
- [71] Zhu Haijun(朱海军), Wang Qian(王倩), Mei Xiaohan(梅笑寒) *et al.* *Journal of Experiments in Fluid Mechanics(实验流体力学)*[J], 2022, 36(2): 49
- [72] Matthews M J, Guss G, Khairallah S A *et al.* *Acta Materialia*[J], 2016, 114: 33
- [73] Cunningham R, Zhao C, Parab N *et al.* *Science*[J], 2019, 363(6429): 849
- [74] Grasso Marco, Colosimo Bianca Maria. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*[J], 2019, 57: 103
- [75] Guo Qilin, Zhao Cang, Escano Luis I *et al.* *Acta Materialia*[J], 2018, 151: 169
- [76] Lott P, Schleifenbaum H, Meiners W *et al.* *Physics Procedia*[J], 2011, 12: 683
- [77] Zhang Weihao, Ma Honglin, Zhang Qi *et al.* *Materials & Design*[J], 2022, 213: 110301
- [78] Ye Dongsen(叶冬森). *Study of In-situ Monitoring Methods in Selective Laser Melting Process(选择性激光熔化过程的状态监测方法研究)*[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018
- [79] Cao Runchen(曹润辰). *Study on the Fabrication Process of 18Ni300 Maraging Steel by Selective Laser Melting and the Experimental Analysis on Laser Melting of Metal Powders(18Ni300 马氏体时效钢选区激光熔化工艺及金属粉末激光熔化实验研究)*[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014
- [80] Cunningham R, Zhao C, Parab N *et al.* *Science*[J], 2019, 363(6429): 849
- [81] Lu Rongsheng(卢荣胜), Wu Ang(吴昂), Zhang Tengda(张腾达) *et al.* *Acta Optica Sinica(光学学报)*[J], 2018, 38(8): 36
- [82] Bidare P, Maier R R J, Beck R J *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2017, 16: 177
- [83] Bruna-Rosso C, Demir A G, Previtali B. *Materials & Design*[J], 2018, 156: 143
- [84] Panwisawas C, Qiu C, Anderson M J *et al.* *Computational Materials Science*[J], 2017, 126: 479
- [85] Khairallah S A, Anderson A T, Rubenchik A *et al.* *Acta Materialia*[J], 2016, 108: 36
- [86] Zhirnov I, Kotoban D V, Gusarov A V. *Applied Physics A*[J], 2018, 124(2): 1
- [87] Shi R, Khairallah S, Heo T W *et al.* *JOM*[J], 2019, 71(10): 3640
- [88] Grasso Marco, Colosimo Bianca Maria. *Measurement Science and Technology*[J], 2017, 28(4): 1
- [89] Repossini G, Laguzza V, Grasso M *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2017, 16: 35
- [90] Ye Dongsen, Hsi Fuh Jerry Ying, Zhang Yingjie *et al.* *ISA Transactions*[J], 2018, 81: 96
- [91] Zhang Yingjie, Hong Geok Soon, Ye Dongsen *et al.* *Materials & Design*[J], 2018, 156: 458

## Review on Formation Mechanism and Control Methods of Spatter in SLM

Liu Qi<sup>1,2</sup>, Yang Guang<sup>1,2</sup>, Yin Jun<sup>3</sup>, Zhao Shuo<sup>1,2</sup>, An Da<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechatronics Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

(2. Liaoning High Performance Metal Reinforcement Manufacturing Engineering Research Center, Shenyang 110136, China)

(3. Shenyang Aircraft Corporation, Shenyang 110086, China)

**Abstract:** Selective laser melting (SLM) technology has been widely used in biomedical, aerospace, automotive and military manufacturing because of its short processing cycle and easy forming of complex components. However, due to the complex interaction between laser and powder in the forming process, the defects of laser selective melting parts show diversified characteristics, and SLM is more difficult to control, which limits the development and application of this technology to a certain extent. The research on the formation mechanism and control methods of spatter defects is one of the research hotspots in recent years. This paper summarizes the relevant recent research achievements. Taking powder, molten pool and forming layer as clues, this review expounds the spatter formation mechanism and control methods in the SLM process from four parts: the influence of spatter on formed parts, the cause of spatter formation, the monitoring and control methods and the future research directions, and the future development direction is proposed.

**Key words:** SLM; defect; spatter; molten pool

---

Corresponding author: Yang Guang, Ph. D., Professor, School of Mechatronics Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, P. R. China, E-mail: yangguang@sau.edu.cn