

激光表面改性技术

# 选区激光熔化 TC4 球化飞溅机理及其试验研究

石文天<sup>1</sup>, 韩玉凡<sup>1</sup>, 刘玉德<sup>1</sup>, 景艳龙<sup>1</sup>, Bing Ren<sup>2</sup>

(1.北京工商大学 人工智能学院, 北京 100048;  
2.佛罗里达大学 机械与航空航天工程系, 盖恩斯维尔 FL 32611, 美国)

**摘要:** **目的** 提升单熔道、单层面的成形质量和打印精度, 通过对球化、飞溅缺陷机理的研究及试验探索, 寻找减少其产生的最优工艺路径。**方法** 采用不同激光功率、点间距、线间距的打印策略成形单熔道, 通过单熔道的成形质量, 初步选取表面质量较好的成形工艺参数范围, 进行单层面的成形试验。在单熔道、单层面成形试验中, 进行球化、飞溅缺陷产生的研究和分析, 探讨其产生机理及对表面质量的影响, 并进一步进行单层面试验研究, 找到合理的工艺参数取值范围, 以此提升单层面表面质量。**结果** 球化、飞溅缺陷对于单熔道、单层面的成形质量及精度都有较大影响。能量密度是影响缺陷产生的主要原因, 适当的能量密度可以提升表面质量, 线能量密度在 0.4~0.6 J/mm、面能量密度在 4~6 J/mm<sup>2</sup> 时, 所成形的样件表面较为平整, 球化、飞溅缺陷明显减少, 成形质量好, 精度较高。**结论** 当能量密度合适时, 球化、飞溅缺陷明显减少, 单熔道、单层面的成形效果好, 流动均匀且连续。球化、飞溅缺陷有一定的规律性, 可以通过最优工艺参数进行避免。

**关键词:** 选区激光熔化; TC4 钛合金; 单熔道; 打印策略; 球化缺陷; 飞溅缺陷; 能量密度

**中图分类号:** TG146.23; TG665 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)11-0075-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.11.005

## Mechanism and Experimental Study of TC4 Spheroidization and Splash in Selective Laser Melting

SHI Wen-tian<sup>1</sup>, HAN Yu-fan<sup>1</sup>, LIU Yu-de<sup>1</sup>, JING Yan-long<sup>1</sup>, Bing Ren<sup>2</sup>

(1.School of Artificial Intelligence, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China;  
2.Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Florida, Gainesville FL 32611, USA)

**ABSTRACT:** The aims to improve the molding quality and printing precision of single melt channel and single layer through research and experimental exploration and find the best process path to reduce spheroidization and splash defects. The single melt channel was formed by printing with different laser power, point spacing and line spacing. According to the single melt channel forming quality, the range of forming process parameters with better surface quality was selected, and the single layer forming experiment was carried out. The spheroidization and splashing defects were studied and analyzed in the single melt

收稿日期: 2021-08-16; 修订日期: 2021-10-21

Received: 2021-08-16; Revised: 2021-10-21

基金项目: 国家自然科学基金 (51505006, 51975006)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51505006, 51975006)

作者简介: 石文天 (1980—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为先进制造技术。

Biography: SHI Wen-tian (1980—), Male, Doctor, Professor, Research focus: advanced manufacturing technology.

通讯作者: 景艳龙 (1979—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为金属材料激光选区熔化技术及表面残余应力。

Corresponding author: JING Yan-long (1979—), Male, Master, Engineer, Research focus: selective laser melting and surface residual stress.

引文格式: 石文天, 韩玉凡, 刘玉德, 等. 选区激光熔化 TC4 球化飞溅机理及其试验研究[J]. 表面技术, 2021, 50(11): 75-82.

SHI Wen-tian, HAN Yu-fan, LIU Yu-de, et al. Mechanism and experimental study of TC4 spheroidization and splash in selective laser melting[J]. Surface technology, 2021, 50(11): 75-82.

channel and single layer forming tests, and their generation mechanism and influence on surface quality were discussed. The single layer test was further carried out and the reasonable range of process parameters was found to improve the surface quality of the single layer. The surface spheroidization and splash defects have great influence on the forming quality and accuracy of single melt channel and single layer, and the energy density is the main reason for the defects. Proper energy density can improve the surface quality. When the linear energy density is 0.4~0.6 J/mm and the surface energy density is 4~6 J/mm<sup>2</sup>, the formed sample surface is relatively flat, and it's good in quality and high in precision, the spheroidization and splash defects are significantly reduced. When the energy density is appropriate, the defects of spheroidization and splash are obviously reduced. The forming effect of single melt channel and single layer is good, and the flow is uniform and continuous. Spheroidization and splash defects happens with some regularity, which can be avoided by optimal process parameters.

**KEY WORDS:** selective laser melting; TC4; single melt channel; print strategy; spheroidization; splash; energy density

选区激光熔化技术 (Selective Laser Melting, SLM) 是 3D 打印技术的一种<sup>[1-2]</sup>, 因其具有成形表面质量好、成形精度高、致密度高等优点而获得了广泛应用<sup>[3]</sup>。近年来, 3D 打印钛合金在航空航天、化工等领域都有较大的发展<sup>[4-5]</sup>。目前对 SLM 成形 TC4 钛合金的研究众多, 其中有不少学者对成形过程中的球化和飞溅缺陷开展了研究。Liu 等<sup>[6]</sup>研究了选区激光熔化制备镁合金的宏观表面形貌和球化机理, 发现球化缺陷的主要影响因素是激光能量密度。Biffi 等<sup>[7]</sup>通过热分析, 发现激光能量密度对球化和飞溅缺陷有影响。Pere 等人<sup>[8]</sup>研究发现, 球化缺陷多发生在试件的表层区域。Wang 等<sup>[9]</sup>研究发现, 曝光时间不同, 飞溅形式也会不同, 且当曝光时间为 80 μs 时, 存在最小的飞溅颗粒。Wu 等<sup>[10]</sup>研究表明, 氩气对颗粒飞溅的影响可以忽略不计, 增加激光扫描速度会削弱激光熔化过程中的飞溅行为。

虽然目前对于球化、飞溅缺陷的研究开展较多, 但对于如何具体减少加工缺陷的基础单熔道研究尚不完善, 成形过程中球化、飞溅缺陷依然没有很好的解决方法。本研究从球化、飞溅两种缺陷的机理方面进行了研究, 力求得到成形球化、飞溅缺陷少的 TC4 样件, 为高质量、高精度成形 TC4 样件的制备提供一定的理论依据。

## 1 试验

### 1.1 设备及材料

试验在 Renishaw AM400 (Renishaw plc, London, UK) 设备上, 氩气作为保护气充入, 保持氧气质量浓度低于 2×10<sup>-5</sup> mg/m<sup>3</sup>。试验所采用的 TC4 钛合金粉末直径在 15~53 μm, 其平均直径为 17 μm, 粉末的微观形貌如图 1 所示<sup>[11]</sup>。

### 1.2 试验方法

试验分为两个部分, 先进行单熔道试验, 基于前期课题组研究<sup>[12]</sup>, 设定工艺参数如表 1 所示。

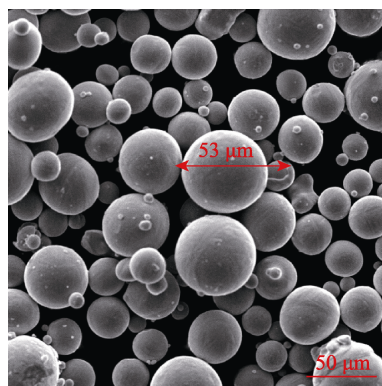


图 1 粉末微观形貌图

Fig.1 Microscope pictures of powder SEM

表 1 单熔道试验参数取值范围

Tab.1 Parameter range of single melt channel

Laser power/W	Exposure time/μs	Point spacing/μm
200~400	50~100	25~75

根据上述单熔道试验的研究结果, 优选成形质量高的单熔道打印参数, 再进行单层面成形试验, 具体如下表 2 所示。

表 2 单熔道单层面成形试验参数范围

Tab.2 Parameter range of single-layer lap for single melt channel

Laser power/W	Exposure time/μs	Point spacing/μm	Line spacing/μm
200~300	50~75	25~75	100~150

采用 Phenom 扫描电子显微镜 (Phenom XL)、基恩士超景深数码显微系统 (VHX-600) 对成形样件表面形貌、单熔道连续性、搭接情况进行观测。

对形成球化、飞溅缺陷的重要影响因素是激光的能量密度。能量密度主要有三种, 分别是线能量密度  $\eta_1$ 、面能量密度  $\eta_2$  和体能量密度  $\eta_3$ , 由于本研究主要面向单层面的工艺优化, 所以重点研究线能量密度  $\eta_1$ 、面能量密度  $\eta_2$  这两个参数, 如式(1)、(2)所示。

$$\eta_1 = \frac{P}{v} \quad (1)$$

$$\eta_2 = \frac{P}{vl}$$

(2)

式(1)、(2)中,  $P$  为激光功率,  $v$  为扫描速度(点间距/曝光时间),  $l$  为扫描线间距。

2 结果及分析

2.1 SLM 成形单熔道基本理论

SLM 技术加工原理是对零件三维模型进行分层处理, 按照每层的扫描区域选择照射激光进行熔化, 逐层叠加, 最终完成预设零件的成形工作<sup>[13]</sup>。如图 2

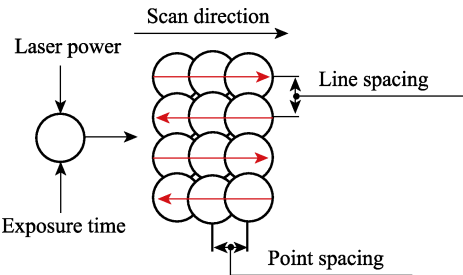


图 2 选区激光熔化成形原理图  
Fig.2 SLM forming principle

所示, 本实验为单熔道试验以及单层面搭接试验, 相较于打印过程中所存在的孔隙、熔池间未熔合等缺陷, 球化、飞溅缺陷对于表面质量的影响尤为突出。

2.2 成形试验形貌结果及分析

通过改变激光功率、点间距这 2 个重要参数, 进行了单熔道成形质量试验研究, 试验结果如图 3 所示。激光功率 200 W、点间距 25~75  $\mu\text{m}$  时所成形的单熔道球化、飞溅缺陷非常明显, 单熔道成形质量差; 激光功率 300 W、点间距 25~50  $\mu\text{m}$  时所成形的单熔道流动均匀、连续, 球化、飞溅缺陷明显减少; 激光功率 400 W 时, 单熔道容易过熔, 流动性增加, 从而导致表面出现塌陷。

为探究线能量密度与面能量密度的合理取值范围及其对球化、飞溅缺陷形成的影响, 进行单熔道单层面试验, 取值范围如表 3 所示, 其试验结果如图 4 所示。图 4c 中, 成形表面缺陷较为明显, 球化(图 4a)与飞溅(图 4b)现象严重; 图 4e 中, 表面沟槽比较明显, 粉末过熔(图 4f); 图 4d 中, 成形样件的表面较为平整, 飞溅球化现象较少, 成形质量好。

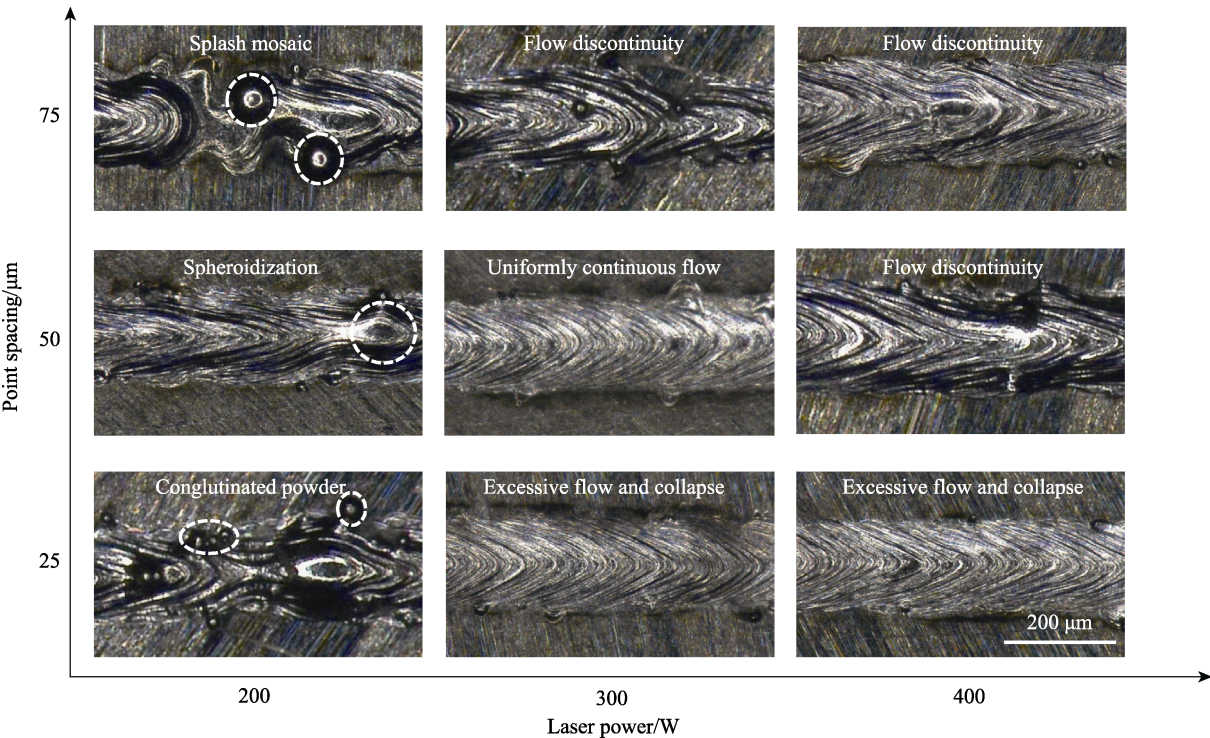


图 3 单熔道试验结果对比  
Fig.3 Comparative results of single melt channel

表 3 线能量密度与面能量密度对应关系

Tab.3 Corresponding relationship between linear energy density and surface energy density

Linear energy density/(J·mm <sup>-1</sup> )	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3
Area energy density/(J·mm <sup>-2</sup> )	12	10	8	6	4	2



对于成形后样件表面缺陷处、未熔化粉末处进行取样,分别取球化后团聚的大颗粒、飞溅粉末进行SEM分析。球化团聚后的颗粒作为一种表面缺陷,其尺度通常在毫米级,观察表面SEM照片(图5)发现,球化颗粒表面裂纹(图5a)较明显。这可能是由于在受到激光热源照射后,有一部分残余应力过大的粉末变形团聚在一起所造成的,且球化的表面粘粉现象(图5b)对于成形样件的表面质量也有一定

影响。试验表明,线能量密度在 $0.4\sim 0.6\text{ J/mm}$ ,面能量密度在 $4\sim 6\text{ J/mm}^2$ ,可有效减少粉末的团聚现象,增加粉末熔化后的流动性,减少球化缺陷。

液态金属与固体表面接触角原理如图6所示,金属粉末在激光热源的照射下完全熔化,液态金属的表面张力大、黏度小,故易形成大量分散的金属球。形成球化的原因之一可归因于液态金属和固体表面的润湿问题,当液体滴落到光滑均匀的固体表面时,如

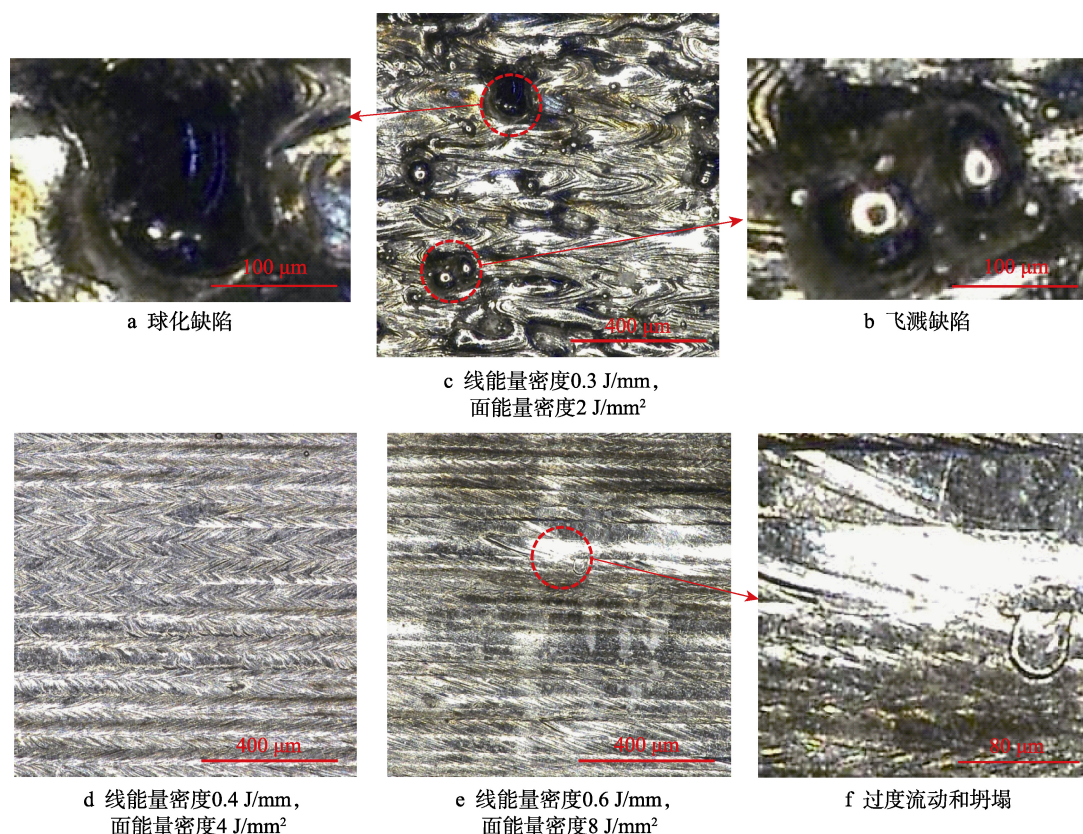


图4 线能量密度和面能量密度对单层面成形的影响

Fig.4 Influence of linear energy density and surface energy density on single-layer lap formation: a) spheroidization; b) splash; c) the linear energy density is  $0.3\text{ J/mm}$ , and the area energy density is  $2\text{ J/mm}^2$ ; d) the linear energy density is  $0.4\text{ J/mm}$ , and the area energy density is  $4\text{ J/mm}^2$ ; e) the linear energy density is  $0.6\text{ J/mm}$ , and the area energy density is  $8\text{ J/mm}^2$ ; f) excessive flow and collapse

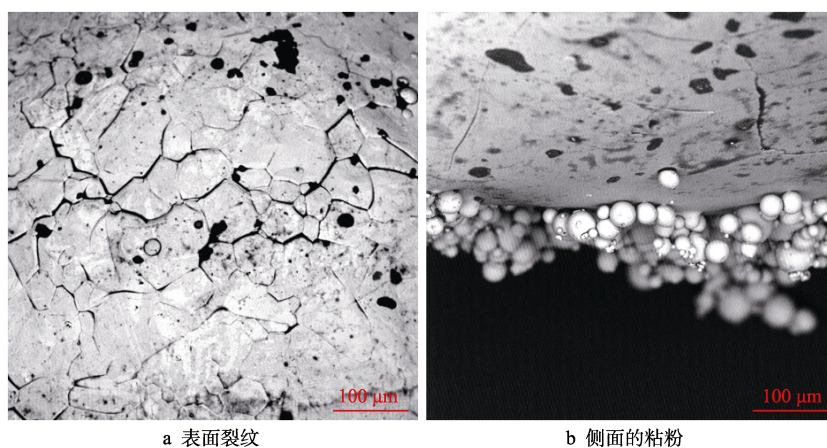


图5 大尺寸球化颗粒扫描电镜照片

Fig.5 Scanning electron microscope pictures of spheroidization: a) surface crack; b) adhesive powder on the side



果不散开, 就会形成液滴, 这些液滴聚集在一起就会形成球形缺陷。液态金属的形状是由固液态与气液态界面切线的夹角  $\theta_c$  (接触角或润湿角) 决定的。液态金属的接触角主要与金属的物理性质有关<sup>[14]</sup>。SLM 的加工过程包括两个步骤: 第一, 粉末在接受激光的热量后熔化; 第二, 液态金属在基底或前体层上固化。其中, 第二步是均匀润湿过程。均匀润湿是相似材料基底上熔融润湿的主要机理。这是一个非平衡过程, 包括流体流动、热传导和凝固<sup>[15]</sup>。

根据杨氏方程 (式(3)),  $\theta_c$  为接触角,  $\gamma_{sv}$ 、 $\gamma_{sl}$ 、 $\gamma_{vl}$  分别为固-气、固-液和液-气界面的表面张力), 并结合图 6 可以看出, 当  $\theta_c$  为  $180^\circ$  ( $\cos\theta_c=-1$ ) 时, 完全不润湿;  $\theta_c$  小于  $90^\circ$  ( $0<\cos\theta_c<1$ ) 时, 液体容易在固体表面铺展, 润湿性好 (图 6a);  $\theta_c$  为  $90^\circ\sim 180^\circ$  ( $-1<\cos\theta_c<0$ ) 时, 液体很容易在固体表面收缩成球形, 也就是说液体不会润湿固体 (图 6b)。

$$\gamma_{sv} - \gamma_{sl} = \gamma_{vl} \cos \theta_c \quad (3)$$

能量密度是影响接触角的直接因素, 能量密度小时, 粉末颗粒受热不充分, 接触角较大; 能量密度较为合适时, 颗粒受热充分, 容易在固体表面铺展。单熔道截面形貌如图 7 所示。线能量密度在  $0.3 \text{ J/mm}$ 、面能量密度在  $2 \text{ J/mm}^2$  时, 接触角  $\theta_c$  较大, 易在固体表面收缩形成球形, 产生球形缺陷 (图 7a); 线能

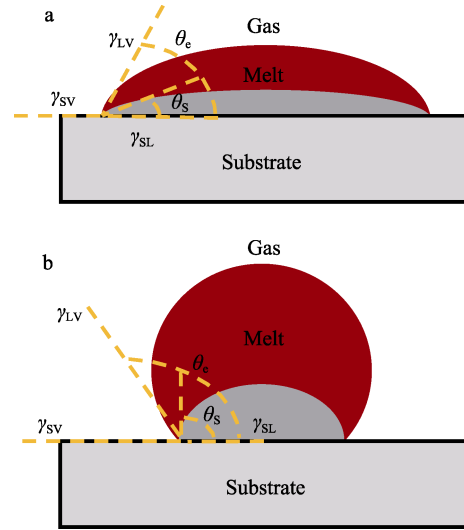


图 6 液态金属与固体表面接触角示意图

Fig.6 Schematic diagram of contact angle of spheroidization surface

量密度在  $0.5 \text{ J/mm}$ 、面能量密度在  $6 \text{ J/mm}^2$  时, 接触角  $\theta_c$  较为合适, 不易产生球形缺陷 (图 7b); 线能量密度在  $0.7 \text{ J/mm}$ 、面能量密度在  $10 \text{ J/mm}^2$  时, 接触角  $\theta_c$  过小, 单熔道塌陷较为严重 (图 7c)。

能量密度不同, 还会导致飞溅粉末在尺寸上的差异, 如图 8 所示。其中图 8a 所显示的飞溅粉末主要

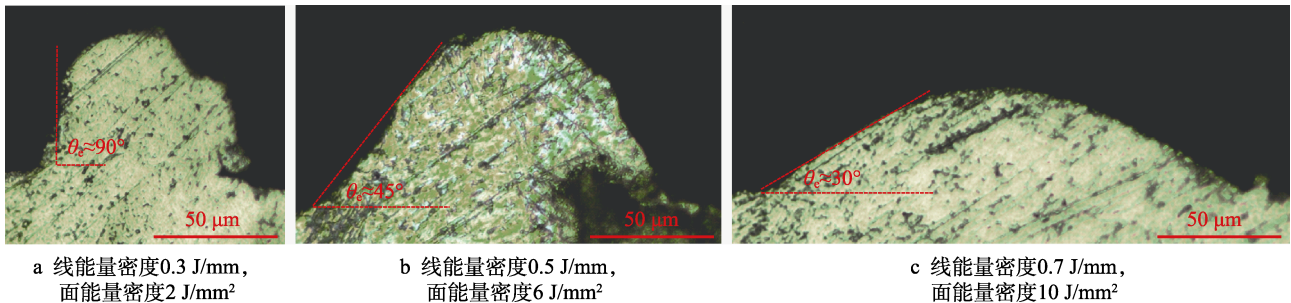
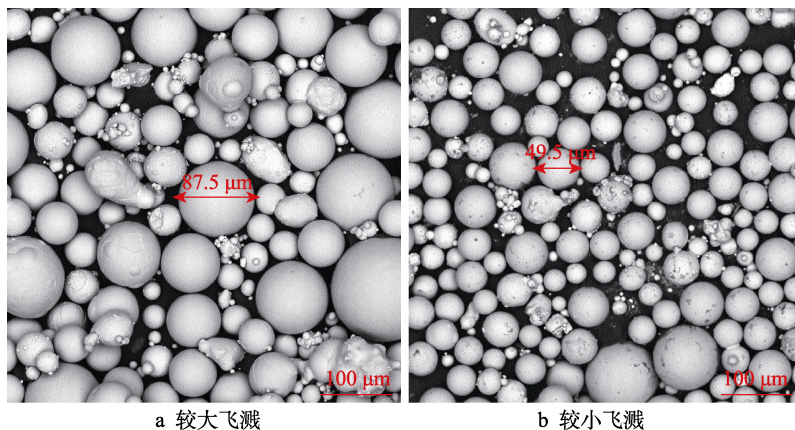


图 7 单熔道截面光镜照片

Fig.7 Optical microscope of single melt channel: a) the linear energy density is  $0.3 \text{ J/mm}$ , and the area energy density is  $2 \text{ J/mm}^2$ ; b) the linear energy density is  $0.5 \text{ J/mm}$ , and the area energy density is  $6 \text{ J/mm}^2$ ; c) the linear energy density is  $0.7 \text{ J/mm}$ , and the area energy density is  $10 \text{ J/mm}^2$



a 较大飞溅

b 较小飞溅

图 8 飞溅部分扫描电镜照片

Fig.8 Scanning electron microscope pictures of splash part a) larger splash; b) minor splash

由较大尺寸(90  $\mu\text{m}$  左右)的颗粒构成,而图 8b 所显示的飞溅粉末尺寸较小,在 50  $\mu\text{m}$  左右,两者相差一倍左右。出现这种差异主要是由于粉末熔化程度的不同。粉末在激光源照射下熔化需要一定的时间,如果扫描速度过快,会导致线能量密度过小,就会有一部分粉未来不及熔化,从熔池中飞溅出去,形成大尺寸的飞溅颗粒。熔化时间的长短导致了飞溅粉末尺寸的差异,同时飞溅的粉末也会出现粘粉现象(指飞溅的粉末粘接上未熔粉末),致使飞溅粉末体积增大,表面缺陷更显著。

飞溅原理如图 9 所示,可以看出气流对飞溅的方向起主要作用。飞溅分布区域较广,在未熔粉末处也会有较少的飞溅存在。飞溅大致可以分为以下三类:

第一类飞溅(如图 9 框中 I 所示)主要发生在熔池前方。由于激光能量密度较高,因此能够快速地将金属粉末熔化,并蒸发熔池表面液体,其所产生的蒸气反冲压力向下作用在熔池表面,造成熔池液面下沉,

在重力作用与压力持续扩张下,熔池表面瞬间坍塌,压迫熔体以金属射流形式喷出<sup>[16]</sup>。检测的电镜图如图 10a 所示。

第二类飞溅(如图 9 框中 II 所示)是由于反冲压力作用下的液态金属在马拉高尼效应<sup>[17]</sup>下,由高温的熔池底部回流至低温的熔池后方侧壁和边缘区域,同时向上蒸发的气流促使这些低粘滞性的液态金属加速向上喷出。为了降低液体表面能,喷出的液态金属在飞行过程中收缩成球状的小液滴,也就是熔滴飞溅所呈现的形态<sup>[18]</sup>。检测的电镜图如图 10c 所示。

第三类飞溅(如图 9 框中 III 所示)一部分源于光斑附近的熔融或未熔金属粉末受到反冲压力的挤压而向外溅出<sup>[19]</sup>,由于溅出的飞行距离较短,无法及时凝固成球体状,故粉末飞溅形态一般较不规则;另一部分源于熔池附近的未熔解粉末被强烈的气流所吸引,继而随气流向上喷出,导致熔池周围金属粉末缺乏,形成剥蚀缺陷<sup>[20]</sup>。检测的电镜图如图 10d 所示。

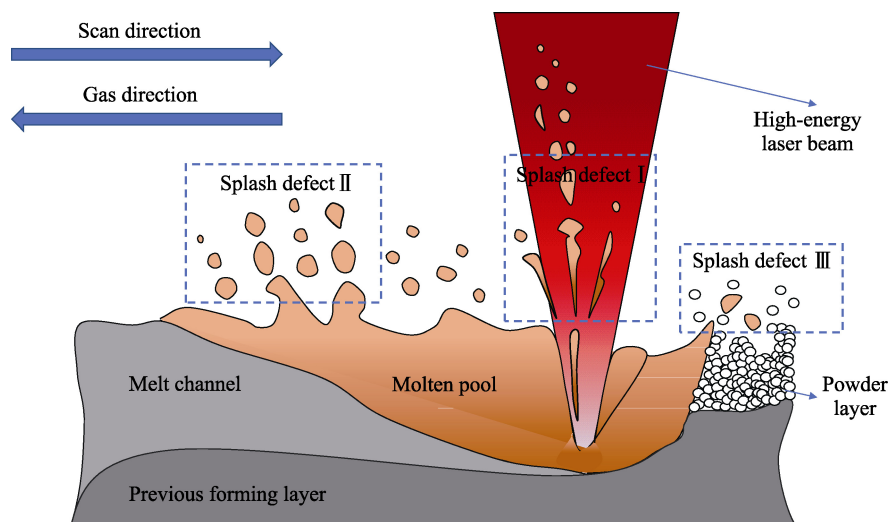


图 9 三种不同类型的飞溅示意图

Fig.9 Schematic diagrams of three different types of splash

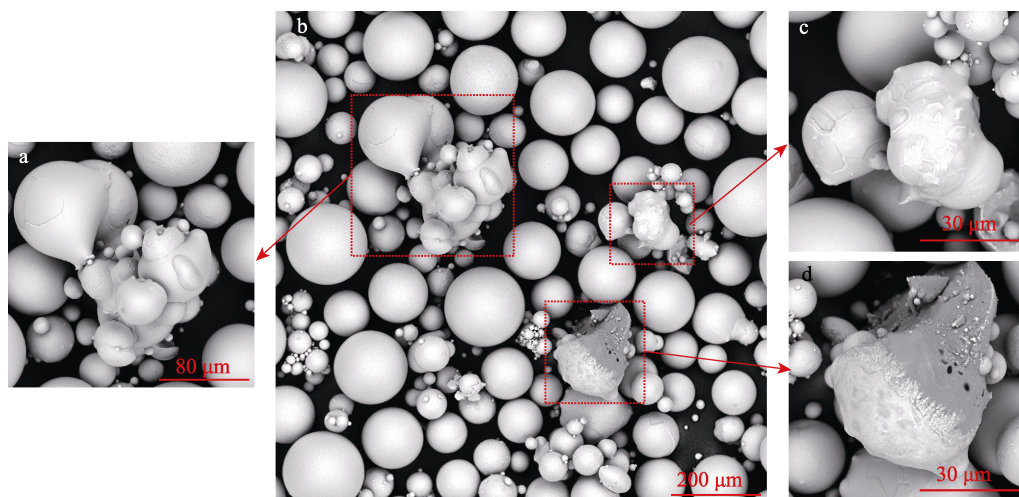


图 10 飞溅的三种类型扫描电镜照片

Fig.10 Scanning electron microscope pictures of three splash defect types



第一类飞溅主要与粉末熔化程度有关, 能量密度不宜过大, 合适的能量密度可使粉末恰好熔化而不至于飞溅出去, 可以通过调整能量密度来抑制飞溅的产生; 第二类飞溅与能量密度、舱体温度、熔池与熔体温差等多种因素都有关系, 比较复杂, 不易人为控制; 第三类飞溅主要与粉末的流动性有关, 粉末流动性越好, 所造成的剥蚀区域就越大。粉末流动性是由粉末的物理特性所决定的, 选择流动性适合的粉末材料可有效避免第三类飞溅。扫描过程的不稳定性所造成的球化与飞溅缺陷, 极大地影响了试件的表面质量, 甚至会使试件失效, 应尽量减少此类缺陷的产生<sup>[21]</sup>。

为了进一步研究球化、飞溅缺陷对单熔道单层面试验所造成的影响, 采用激光共聚焦显微镜进行表面粗糙度测试, 测试结果如图 11 所示。样件表面最大高度基本都在 100  $\mu\text{m}$  以上, 这是由于较大的球化或飞溅现象使表面产生的宏观不平度。线能量密度在 0.4~0.6 J/mm、面能量密度在 4~6 J/mm<sup>2</sup> 时, 可以有效减少球化、飞溅现象, 提高表面质量 (如图 11b—e); 过大的能量密度会造成表面高度不足, 从而导致尺寸精度产生偏差 (如图 11f); 过小的能量密度会导致表面受热不均匀, 粉末熔化不充分, 造成表面微观形貌高低不一, 表面粗糙度过大 (如图 11a)。

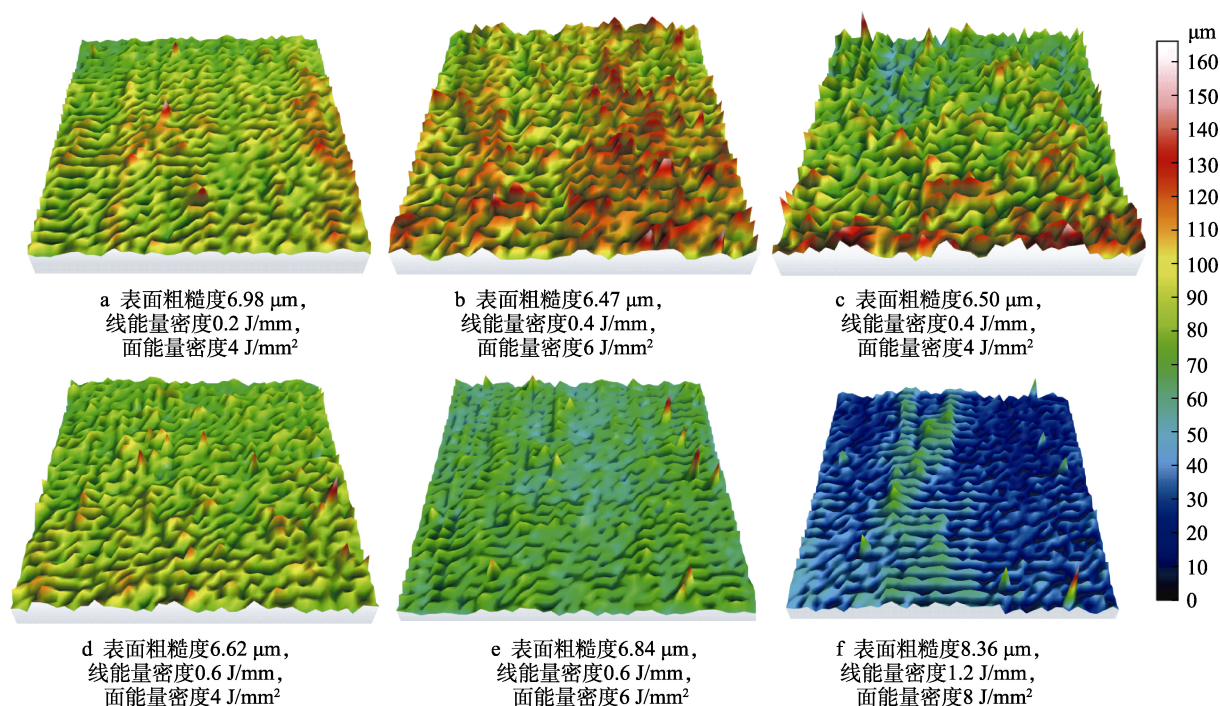


图 11 试件表面三维形貌

Fig.11 Three-dimensional photograph of sample surface: a) the surface roughness is 6.98  $\mu\text{m}$ , the linear energy density is 0.2 J/mm, and the area energy density is 4 J/mm<sup>2</sup>; b) the surface roughness is 6.47  $\mu\text{m}$ , the linear energy density is 0.4 J/mm, and the area energy density is 4 J/mm<sup>2</sup>; c) the surface roughness is 6.50  $\mu\text{m}$ , the linear energy density is 0.4 J/mm, and the area energy density is 6 J/mm<sup>2</sup>; d) the surface roughness is 6.62  $\mu\text{m}$ , the linear energy density is 0.6 J/mm, and the area energy density is 4 J/mm<sup>2</sup>; e) the surface roughness is 6.84  $\mu\text{m}$ , the linear energy density is 0.6 J/mm, and the area energy density is 6 J/mm<sup>2</sup>; f) the surface roughness is 8.36  $\mu\text{m}$ , the linear energy density is 1.2 J/mm, and the area energy density is 8 J/mm<sup>2</sup>

### 3 结论

采用选区激光熔化技术对 TC4 粉末进行了单熔道、单层面成形试验, 研究了不同激光功率、点间距、线间距参数下, 线能量密度和面能量密度对球化、飞溅缺陷的影响规律, 结合球化、飞溅缺陷的产生机理, 具体分析了能量密度对上述缺陷产生的影响, 阐述了飞溅的三种类型及其工艺避免方法。通过单熔道工艺试验参数的优选, 进一步进行单层面试验研究, 并找到合理的工艺参数取值范围, 得到了较好的单层面表面质量。试验表明: 能量密度对于试件表面形貌和单层面成形质量影响较大, 应进行合理的工艺参数优选; 通过调整能量密度可有效抑制单层面成形时球

化、飞溅缺陷的产生, 试验条件下, 线能量密度在 0.4~0.6 J/mm、面能量密度在 4~6 J/mm<sup>2</sup> 时, 样件成形表面较平整, 成形精度高, 表面粗糙度低。

### 参考文献:

- [1] BOSCHETTO A, BOTTINI L, VENIALI F. Roughness modeling of AlSi10Mg parts fabricated by selective laser melting[J]. Journal of materials processing technology, 2017, 241: 154-163.
- [2] WANG Di, MAI Shu-zhen, XIAO Dong-ming, et al. Surface quality of the curved overhanging structure manufactured from 316-L stainless steel by SLM[J]. The inter-

- national journal of advanced manufacturing technology, 2016, 86(1-4): 781-792.
- [3] LIU Y J, LI X P, ZHANG L C, et al. Processing and properties of topologically optimised biomedical Ti-24Nb-4Zr-8Sn scaffolds manufactured by selective laser melting[J]. Materials science and engineering: A, 2015, 642: 268-278.
- [4] GU Dong-dong. Materials creation adds new dimensions to 3D printing[J]. Science bulletin, 2016, 61(22): 1718-1722.
- [5] ZHUANG J R, LEE Y T, HSIEH W H, et al. Determination of melt pool dimensions using DOE-FEM and RSM with process window during SLM of Ti6Al4V powder[J]. Optics & laser technology, 2018, 103: 59-76.
- [6] LIU Shuai, GUO Han-jie. Balling behavior of selective laser melting (SLM) magnesium alloy[J]. Materials, 2020, 13(16): 3632.
- [7] BIFFI C A, FIOCCHI J, TUISSI A. Selective laser melting of AlSi10Mg: Influence of process parameters on Mg<sub>2</sub>Si precipitation and Si spheroidization[J]. Journal of alloys and compounds, 2018, 755: 100-107.
- [8] BARRIOBERO-VILA P, ARTZT K, STARK A, et al. Mapping the geometry of Ti-6Al-4V: From martensite decomposition to localized spheroidization during selective laser melting[J]. Scripta materialia, 2020, 182: 48-52.
- [9] WANG Shuo, LIU Yu-de, SHI Wen-tian, et al. Research on high layer thickness fabricated of 316L by selective laser melting[J]. Materials, 2017, 10(9): 1055.
- [10] WU Hai-hua, LI Jun-feng, WEI Zheng-ying, et al. Effect of processing parameters on forming defects during selective laser melting of AlSi10Mg powder[J]. Rapid prototyping journal, 2020, 26(5): 871-879.
- [11] 郝锦曦, 刘玉德, 石文天, 等. 选区激光熔化成形 TC4 合金退火态力学性能及组织的研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(5): 607-610.  
HAO Jin-xi, LIU Yu-de, SHI Wen-tian, et al. Mechanical properties and microstructure of TC4 samples formed by selective laser melting after annealing treatment[J]. Special casting & nonferrous alloys, 2021, 41(5): 607-610.
- [12] 韩国梁, 石文天, 韩玉凡, 等. 基于单熔道试验的选区激光熔化成形 TC4 钛合金表面成形质量研究[J]. 激光杂志, 2021, 42(3): 163-169.  
HAN Guo-liang, SHI Wen-tian, HAN Yu-fan, et al. Study on surface quality of TC4 alloy formed by selective laser melting based on single-track experiment[J]. Laser journal, 2021, 42(3): 163-169.
- [13] 石文天, 王朋, 刘玉德, 等. 选区激光熔化成形 316L 表面质量及工艺试验研究[J]. 表面技术, 2019, 48(3): 257-267.  
SHI Wen-tian, WANG Peng, LIU Yu-de, et al. Experimental study on surface quality and process of selective laser melting forming 316L[J]. Surface technology, 2019, 48(3): 257-267.
- [14] WANG Di, WU Shi-biao, FU Fan, et al. Mechanisms and characteristics of spatter generation in SLM processing and its effect on the properties[J]. Materials & design, 2017, 117: 121-130.
- [15] LE T N, LO Y L. Effects of sulfur concentration and Marangoni convection on melt-pool formation in transition mode of selective laser melting process[J]. Materials & design, 2019, 179: 107866.
- [16] GUNENTHIRAM V, PEYRE P, SCHNEIDER M, et al. Experimental analysis of spatter generation and melt-pool behavior during the powder bed laser beam melting process[J]. Journal of materials processing technology, 2018, 251: 376-386.
- [17] LIU Yang, YANG Yong-qiang, MAI Shu-zhen, et al. Investigation into spatter behavior during selective laser melting of AISI 316L stainless steel powder[J]. Materials & design, 2015, 87: 797-806.
- [18] 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.
- [19] TAHERI-ANDANI M, DEGHANI R, KARAMOORAVARI M R, et al. Spatter formation in selective laser melting process using multi-laser technology[J]. Materials & design, 2017, 131: 460-469.
- [20] HRYHA E, DUDROVA E, NYBORG L. Critical aspects of alloying of sintered steels with manganese[J]. Metallurgical and materials transactions A, 2010, 41(11): 2880-2897.
- [21] SIMONELLI M, TUCK C, ABOULKHAIR N T, et al. A study on the laser spatter and the oxidation reactions during selective laser melting of 316L stainless steel, Al-Si10-Mg, and Ti-6Al-4V[J]. Metallurgical and materials transactions A, 2015, 46(9): 3842-3851.