

研究综述

选区激光熔化金属表面成形质量控制的研究进展

李淮阳, 黎振华, 杨睿, 滕宝仁, 申继标

(昆明理工大学 材料科学与工程学院, 昆明 650093)

摘 要: 选区激光熔化是目前应用广泛的金属增材制造方法, 能够实现复杂精密金属件的成形。但是, 由于技术原理的限制, 选区激光熔化金属表面与切削加工表面相比, 成形质量仍然存在较大差距, 影响了这一方法的进一步应用。如何提高表面成形质量, 是目前选区激光熔化金属成形领域重要的研究方向。介绍了选区激光熔化成形原理, 分析了影响选区激光熔化金属表面成形质量的因素, 总结了目前选区激光熔化金属表面成形质量的控制方法及相关研究进展。指出合理地布置成形件位置、避免将成形质量要求高的轮廓面设置为第三类表面、优化扫描工艺参数, 是控制和提高选区激光熔化金属表面成形质量的主要途径。

关键词: 选区激光熔化; 表面粗糙度; 工艺参数; 扫描策略

中图分类号: TG665 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)09-0118-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.09.012

Research Progress in Forming Quality Control of
Selective Laser Melting Metal Surface

LI Huai-yang, LI Zhen-hua, YANG Rui, TENG Bao-ren, SHEN Ji-biao

(School of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

ABSTRACT: Selective laser melting is a widely used metal additive manufacturing method and can form complex metal parts. However, due to the limitations on technical principle, the selective laser melting metal surface still has large difference in forming quality when compared with machined surface, which further limits the application of this method. How to improve the forming surface quality is an important research direction in the field of selective laser melting. The principle of selective laser melting was introduced, the factors affecting the forming quality of selective laser melted metal surface were analyzed and the current quality control methods and related research progresses were summarized. It points out that reasonable position of the formed parts, avoiding setting the contour surface with high forming quality requirements as the third kind of surface, and optimization of scanning process parameters, are the main ways to improve the forming surface quality of the selective laser melting parts.

KEY WORDS: selective laser melting; surface roughness; parameter; scanning strategy

收稿日期: 2020-03-20; 修订日期: 2020-04-25

Received: 2020-03-20; Revised: 2020-04-25

基金项目: 国家自然科学基金(51961017); 云南省重点研发计划(2018BA064); 昆明理工大学实验室建设与管理研究基金项目(SYYJ08)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51961017), Yunnan Science and Technology Major Project (2018BA064) and Kunming University of Science and Technology Laboratory Construction and Management Research Fund (SYYJ08)

作者简介: 李淮阳(1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为金属增材制造。

Biography: LI Hai-yang (1992—), Male, Master, Research focus: metal additive manufacturing.

通讯作者: 黎振华(1976—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为 3D 打印与增材制造。邮箱: lzhkust@sina.com

Corresponding author: LI Zhen-hua (1976—), Male, Doctor, Professor, Research focus: 3D printing and additive manufacturing. E-mail: lzhkust@sina.com

引文格式: 李淮阳, 黎振华, 杨睿, 等. 选区激光熔化金属表面成形质量控制的研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(9): 118-124.

LI Huai-yang, LI Zhen-hua, YANG Rui, et al. Research progress in forming quality control of selective laser melting metal surface [J]. Surface technology, 2020, 49(9): 118-124.

选区激光熔化 (Selective laser melting, SLM) 是一种使用高能聚束激光逐点扫描熔化金属粉末, 逐层凝固累积成形的增材制造技术^[1-3]。它成形精度较高, 能够成形其他方法难以加工的复杂结构, 是目前最为成熟的金属增材制造方法^[4], 在航空航天^[5]、汽车^[6]、医疗^[7-8]等领域获得了广泛关注。

但是, 由于技术原理的限制, 选区激光熔化金属成形过程存在粉末粘附、球化飞溅、台阶效应, 表面成形质量与传统精加工表面仍有较大差距^[9]。表面成形质量主要指成形表面的粗糙度和尺寸精度, 除了影响后续加工、配合精度、外观等, 还影响成形件力学、疲劳及耐蚀等使用性能^[10]。本文在介绍选区激光熔化原理的基础上, 围绕影响选区激光熔化金属表面成形质量的因素, 综述了国内相关研究现状, 总结了提高表面成形质量的方法, 并对未来研究发展

进行了展望。

1 选区激光熔化原理

选区激光熔化以激光为热源, 根据离散的三维数据逐点扫描熔化粉床上的金属粉末, 逐层凝固叠加, 实现零件成形, 具体过程如图 1 所示。聚焦激光束在振镜作用下, 根据分层切片离散化的零件三维数字模型, 逐点扫描粉床上的金属粉层, 扫描后熔化凝固的金属粉末形成单层成形面及轮廓。随后基板下降, 送粉仓上升, 粉末在刮刀作用下平铺到粉床上, 激光继续开始扫描, 熔化下一层, 如此重复, 层层叠加, 完成三维实体的成形^[11-13]。为保证铺粉顺利和粉床的稳定, 一般情况下, 选区激光熔化的成形平台均为水平面, 而在竖直方向通过逐层叠加累积成形。

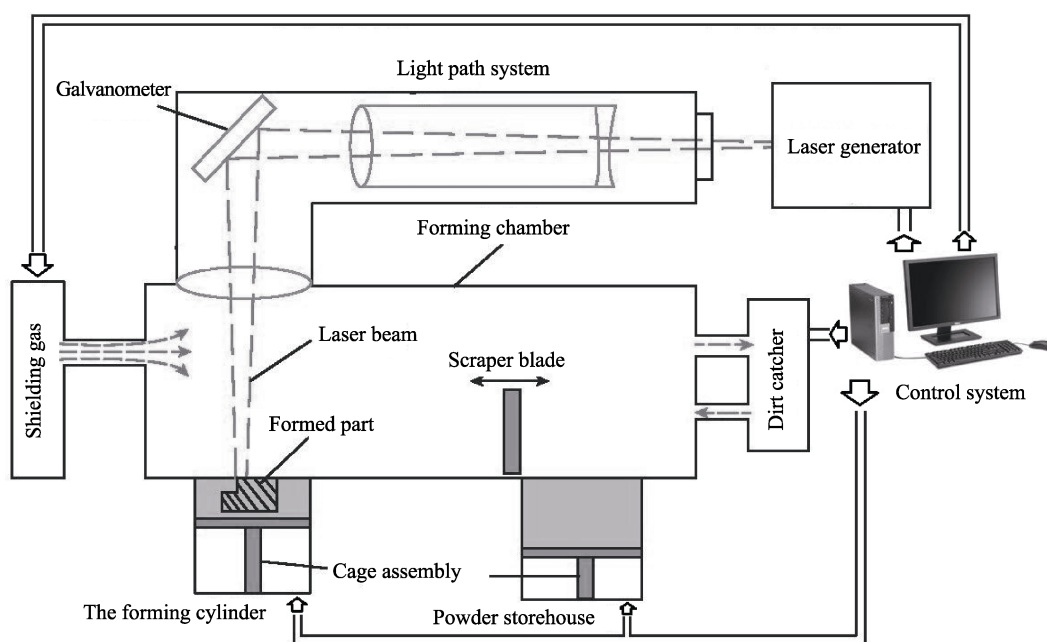


图 1 选区激光熔化原理^[11]
Fig.1 Principle of selective laser melting^[11]

2 影响选区激光熔化金属表面成形质量的主要因素

2.1 球化和飞溅

球化现象 (Balling phenomenon) 是金属粉末在激光作用下熔化后, 金属液表面能最小的球形转变的现象^[14-15]。飞溅 (Splashing) 现象是指激光扫描熔化过程中, 在粉末中原有气体的膨胀、部分金属的气化、激光对熔池金属液的冲击以及表面张力差异引起的马朗戈尼效应 (Marangoni effect) 的共同作用下, 金属液被排挤出熔池, 形成细小液滴以及部分未熔粉末在成形表面集聚的现象^[16-17]。选区激光熔化过

程中, 不同位置会产生不同类型的飞溅, 如图 2 所示。其中, 激光作用区域粉末间隙的气体膨胀导致的金属

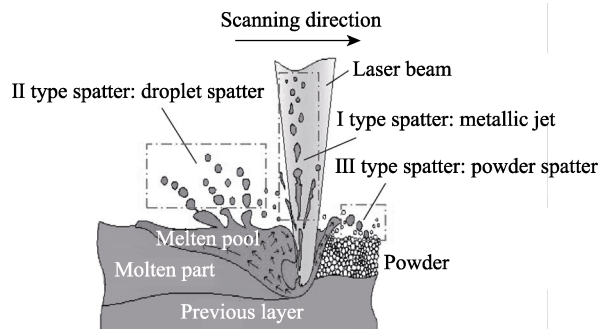


图 2 不同类型飞溅物的形成机理^[16]
Fig.2 Forming mechanism of different types of splashes^[16]

喷射为I型飞溅。熔池中的高温金属液由于马朗戈尼效应 (Marangoni effect), 由高温底部向低温侧壁和后部边缘流动并被冲击出熔池, 形成II型飞溅。激光光斑前端喷射集聚的金属液滴和部分未熔金属粉末, 在激光热冲击和气体膨胀的作用下形成III型飞溅。球化和飞溅通常影响与成形平台平行的表面成形质量, 导致表面凹凸不平, 妨碍下一层粉末铺粉均匀性, 进而影响成形件组织致密性和表面成形质量。

2.2 粉末粘附

选区激光熔化过程依靠无数微小熔池叠加实现, 熔池周围存在热影响区, 熔池边界和热影响区的金属粉末处于不完全熔化或烧结状态^[18], 粘附在成形件外轮廓上, 导致表面产生粉末粘附 (Powder adhesion), 如图3所示。粉末粘附是影响与成形平台不平行轮廓表面成形质量的重要原因^[19]。

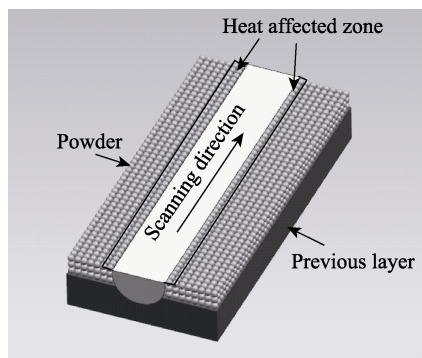


图3 粉末粘附形成原理
Fig.3 Forming principle of powder adhesion

2.3 台阶效应

增材制造基于离散-堆积原理, 核心在于分层制造。分层制造的缺陷在于, 当相邻两层在同一方向上的尺寸不完全一致时, 会形成台阶结构^[20-21], 产生台阶效应 (Stair effect), 如图4所示。除了垂直或者平行于成形方向的表面, 其他表面上都会产生台阶效应。

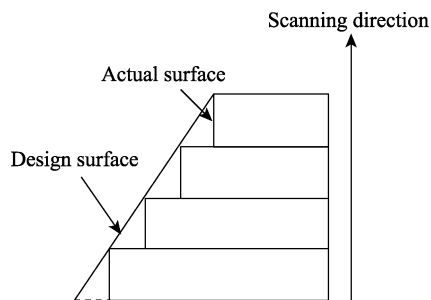


图4 台阶效应原理图
Fig.4 Schematic diagram of step effect

台阶效应是由于数据模型分层离散时斜面 and 曲面形貌特征的缺失造成的, 减小分层厚度有利于减少台阶效应对表面质量的影响。但是, 铺粉分层厚度被

所使用粉末的直径所限制^[22], 不能无限缩小。因此, 对于选区激光熔化成形而言, 不与成形方向垂直或平行表面上的台阶效应无法消除, 且与分层厚度及成形角度有关。

3 合金成分对选区激光熔化金属表面成形质量的影响

不同合金熔点、熔化后金属液的黏度、表面张力、收缩特性等不同, 导致粉末粘附、球化飞溅等程度均不相同, 表面质量有很大差别。顾冬冬等^[23]在对纯铜混合低熔点 CuSn 和 CuP 粉末球化现象的研究中发现, 由于熔点 $Cu > CuSn > CuP$, 所以当激光功率低、扫描速度高时, CuP 完全熔化, CuSn 不完全熔化, 而 Cu 不熔化, 于是形成液体围绕固体结构颗粒散布成圆柱形的连续膜, 在凝固过程中, 由于颗粒间的金属液产生液相收缩, 导致液膜破裂, 最终引起球化。而在高激光功率、低扫描速度下, 液相的增多和液相存在时间的延长导致熔体黏度降低, 低熔点相过热度的增加和马朗戈尼效应的影响会导致大量单个小球产生, 也会产生球化。对 316L 不锈钢球化现象的研究中发现^[24], 在不锈钢粉末中加入脱氧剂 H_3BO_3 和 KBF_4 可以得到无球化现象的表面。这是因为借助于脱氧剂, 可以充分减轻熔体表面的氧化膜。表面氧化物的减少有利于在先前烧结层上充分分散熔体并使熔体变平, 确保熔体具有良好的润湿特性, 从而保证粉末在逐层凝固的过程中不出现明显的起球。

4 成形件结构和成形面位置对选区激光熔化金属表面成形质量的影响

成形件结构对选区激光熔化金属表面成形质量的影响主要体现在两方面。一是结构复杂的成形件, 其台阶效应会在表面明显体现, 导致表面成形质量降低; 二是对于尺寸小而精密的结构, 其热影响区容易叠加重合, 导致粉末粘附加剧。

选区激光熔化时, 无论何种结构的成形件, 其自由表面可根据与成形平台和成形方向的相对位置分为三类:

第一类表面为与成形平台平行的水平表面, 该类表面与成形方向垂直, 不会产生台阶效应。这类表面又可以分为上表面和下表面。由于金属液固收缩和应力的限制, 水平下表面通常需要设置支撑结构, 成形后与支撑结构相连, 一般不单独考察其表面成形质量。而水平上表面则通常是成形件的外部上表面, 其成形质量主要受熔化后金属液由于表面张力导致的球化、飞溅及扫描道搭接造成的起伏所影响。

第二类表面为与成形平台垂直的表面, 它与成形方向平行, 同样也不存在台阶效应。它是每层水平成

形面的外边缘线逐层累积叠加而成的,影响这类表面成形质量的主要因素是粉末粘附。

第三类表面是第一类和第二类表面之外的其他所有表面。它与成形平台既不垂直,也不平行,由每层水平成形面的侧边缘按照一定角度累积叠加而成,台阶效应明显。粉末粘附和台阶效应的共同作用使得同一成形件上,第三类表面成形质量最差,且与分层厚度和成形角度直接相关,粉层厚度越大,与成形平台夹角越大,成形质量越差。

三类表面的成形质量均与成形过程中工艺参数及扫描策略有关,在成形工艺稳定的情况下,第一类表面通常具有最好的表面质量^[25]。因此,在选区激光

成形时,对于表面质量要求高的成形面,应该尽量使其成为第一类表面,也就是置于水平位置,同时应尽量减少第三类表面的数量。

零件的摆放角度决定了表面在成形过程中所属的类型。G. Strano 等^[26]制备了具有与成形平台呈 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 一系列表面的成形件,结果表明,随着角度增加,粘附在成形件表面的粉末增多。刘婷婷等^[27]的研究指出:与 Z 轴的倾斜角度是影响悬垂面表面质量的关键因素,倾斜角度越小,表面质量越差。Zhao-wei Xiang 等^[28]研究了斜角坡面对 316L 不锈钢表面粗糙度的影响,结果表明随着斜角增大,坡面质量显著提高,如图 5 所示。

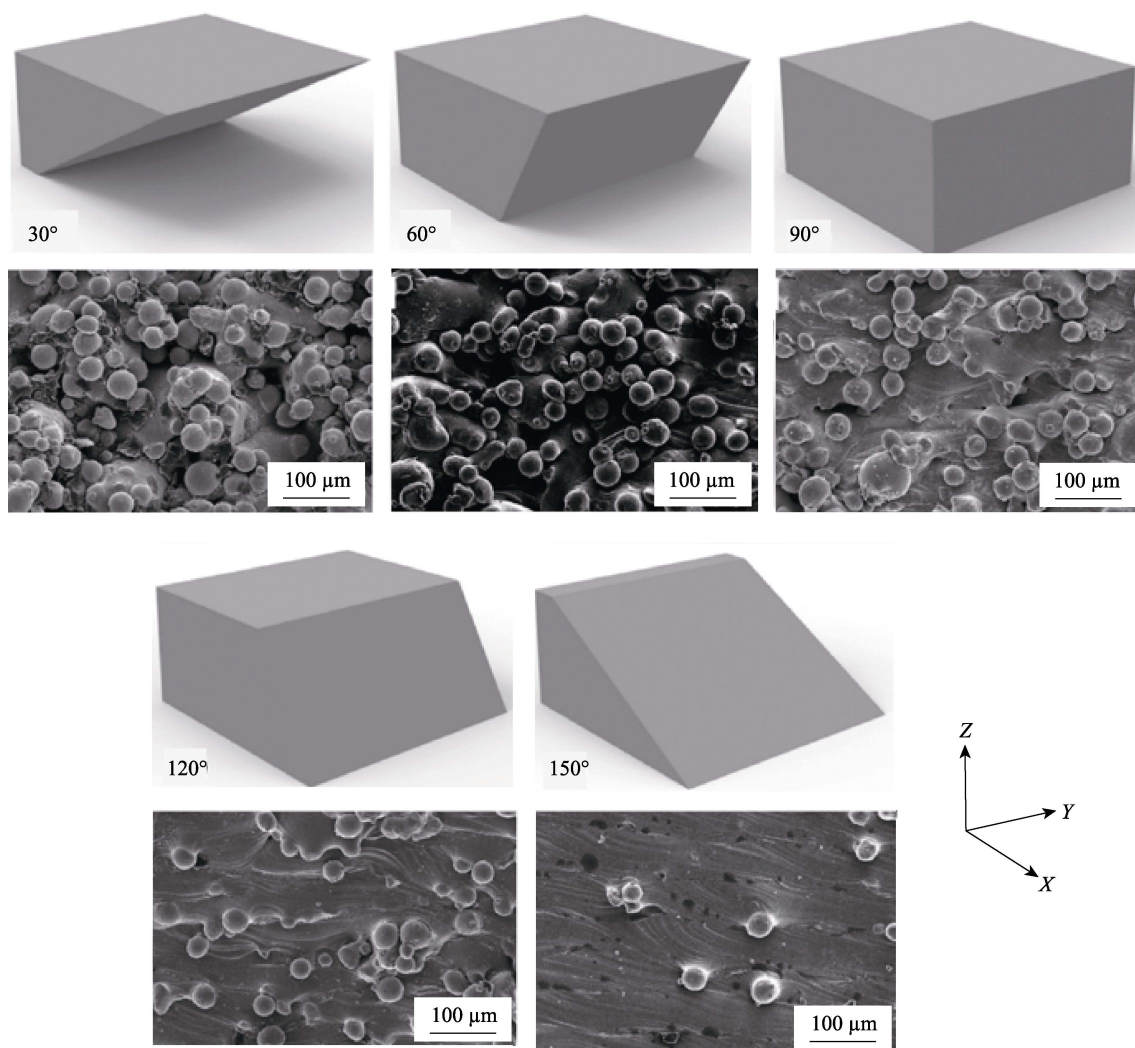


图 5 选区激光熔化成形件斜角为 30° 、 60° 、 90° 、 120° 和 150° 的 CAD 模型和表面形态^[28]

Fig.5 CAD model and surface morphology of selective laser melting parts with slant angle of 30° 、 60° 、 90° 、 120° and 150° ^[28]

5 工艺参数对选区激光熔化金属表面成形质量的影响

除了合金成分、成形件结构、成形面位置、铺粉厚度等会影响选区激光熔化金属表面成形质量外,扫描参数、成形保护气氛、重熔工艺、扫描策略、粉末

直径与粒度分布等工艺参数^[29]也会影响表面成形质量。

5.1 扫描参数

扫描参数对表面成形质量的影响很大。Y. Pupo 等^[30]的研究表明,钴铬合金上表面表面粗糙度受到激光功率、扫描间隔和扫描速度的强烈影响。赵曙明等^[31]研究了体能量密度对 316L 不锈钢第一类表面的表面

粗糙度的影响, 结果表明, 单层扫描的表面粗糙度 Ra 值随着体能量密度的增大呈减小趋势, 扫描间距对表面粗糙度的影响最大, 随着扫描间距的减小, 扫描道之间的重叠率增加^[32], 表面粗糙度呈减少趋势, 最终得到 Ra 值在 $4\text{ }\mu\text{m}$ 以下的表面。N. T. Aboulkhead 等^[33]发现, 当激光扫描速度过快或粉层过厚时, 往往会产生球化效应。

吴伟辉等^[34]研究了扫描速度和扫描功率对 316L 不锈钢粉末粘附的影响。结果表明, 当能量输入过低时, 打印过程中, 熔融金属周围未熔颗粒间的气体膨胀力不足以将粉末与熔融金属分离, 导致粉末粘附增加; 而当能量输入过高时, 熔融金属对周围未熔粉末的吸附力增大, 也会导致粉末粘附大量增加。Tao Yang^[35]发现使用合适的线能量密度 ($4.625\sim 7.4\text{ J/cm}$), AlSi10Mg 垂直表面的表面粗糙度可以降到 $6\text{ }\mu\text{m}$ 以下。

对于第三类表面, Yang Tian 等^[36]的研究表明, 倾斜表面的上表面粗糙度与扫描工艺参数的关系较小, 而下表面粗糙度则随扫描功率增加而增大, 随扫描速度的增加而减小。Xue-song Han 等^[37]在不同扫描速度和扫描间距下的 45° 斜柱中发现, 侧壁表面粗糙度随着扫描速度和扫描间距的增大而减小; 且在不同的扫描间距和扫描速度下, 由于粉末粘附和台阶效应的同时存在, 斜柱上表面粗糙度波动较小, 下表面由于粉末粘附, 粗糙度高于上表面。M. Król 等^[38]通过对激光功率、扫描速度、扫描间隔等参数的优化, 使部件表面粗糙度 $Ra < 9\text{ }\mu\text{m}$ 。Hong-yu Chen 等^[39]的研究表明, 体能量密度过高或过低均会造成表面质量下降。Mumtaz 和 Hopkinson^[40]的研究则表明, 高功率配合高扫描速度有利于降低 Inconel 625 多层薄壁零件侧壁表面粗糙度。

5.2 成形气氛与预热

成形时的保护气氛和预热条件影响熔池的稳定性, 主要影响第一类表面的成形质量。Dong-hua Dai 等^[41]通过对 TiC 和 AlSi10Mg 粉末成形时的保护气氛

的研究发现, 不同的保护气体会对熔池产生不同的影响: He 气氛下, 熔池表面出现了严重的弯曲; N_2 气氛下, 熔池有轻微波动; Ar 气氛下, 熔池基本无波动, 得到的表面质量较高。Monica Mahesh Savalani 等^[42]则发现, 预热有利于提高镁选区激光熔化过程中熔池内金属的浸润性, 改善表面质量, 获得更为光滑的表面。

5.3 重熔工艺

重熔工艺是指成形后, 对表面再进行一次激光扫描。合适的重熔工艺能够有效改善第一类表面的表面质量。Kruth 和 Yasa 等^[43]使用激光重熔, 提高了水平成形面的成形质量。K. Alrbacy 等^[44]在 316L 不锈钢的选区激光熔化过程中使用激光重熔工艺, 发现表面质量较未重熔前提高 80%, 获得了 $Ra=1.4\text{ }\mu\text{m}$ 的表面。Vaithilingam 等^[45]发现, 虽然激光重熔可以有效地改善第一类表面成形质量, 但是也会改变表面的元素分布。Di Wang 等^[46]研究了重熔次数对表面质量的影响, 发现 5 次重熔表面的粗糙度 ($Ra=3.34\text{ }\mu\text{m}$) 比 2 次重熔表面的粗糙度 ($Ra=8.20\text{ }\mu\text{m}$) 低很多。但重熔次数的增加会显著降低成形效率。

5.4 扫描策略

扫描策略是指激光在选区熔化时光斑的扫描方式和扫描路径。葛亚楠等^[47]研究了如图 6 所示三种不同扫描策略成形的钛合金试样, 结果表明, 成形件侧面的表面粗糙度受扫描策略的影响较大。对于单向和 Z 型扫描策略, 在平行于扫描方向的侧表面打印过程中, 激光持续前行熔融粉末, 使得成形表面连续平整; 垂直于扫描方向的侧表面位于熔池的端部, 而熔池的截面形状为半圆形, 各熔池相互搭接导致其平面凹凸不平, 且激光行进到熔池端部时稍作停留, 使得端部粉末熔融的时间比熔池中部的更长, 造成粉末粘附。而螺旋线扫描策略成形件的整体表面粗糙度低于单向和 Z 型扫描策略。

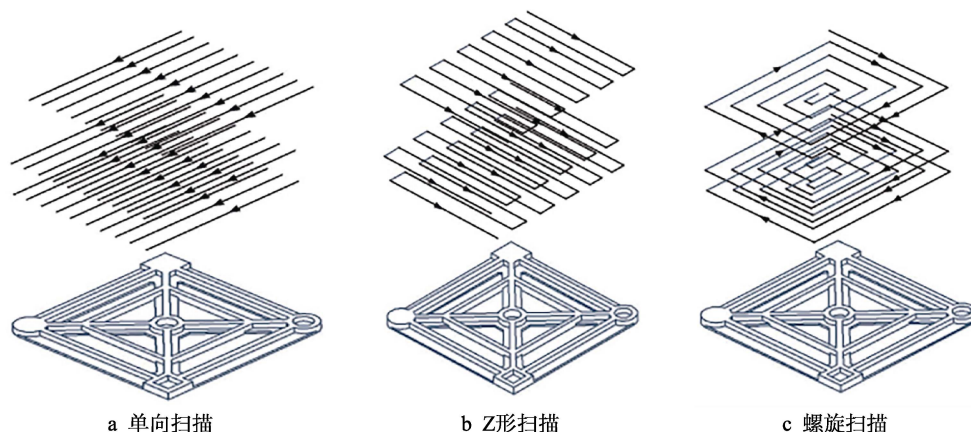


图 6 不同扫描策略成形的钛合金试样^[46]

Fig.6 Titanium alloy specimen formed by different scanning strategies^[46]: a) single-direction scanning; b) Z-scanning; c) spiral scanning

研究表明,内部实体填充扫描过后再在周围进行勾边扫描的扫描策略,有利于提高侧面的成形质量。BALC Nicolae 等^[48]研究了勾边参数对 Ti-6Al-4V 成形件侧面成形质量的影响,在激光功率 110 W、扫描速度 0.2 m/s 下得到了 $Ra=4\text{ }\mu\text{m}$ 的打印表面。闫岸如等^[49]发现,外轮廓成形质量与勾边扫描线能量输入有较大关系,且心部和轮廓的打印次序对表面质量有很大影响,先心部后轮廓的顺序打印表面质量较好。

5.5 粉末粒径

台阶效应与粉末粘附主要受制于所用粉末的直径,合理地设置粉末粒径分布或降低粉末粒径可以改善第二、三类表面质量。Cloots 等^[50]的研究结果表明,粒径分布均匀且平均粒径为 $13\text{ }\mu\text{m}$ 的粉末成形后的表面质量,劣于含有一定比例粒径为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以下但整体平均粒径为 $24\text{ }\mu\text{m}$ 的粉末的成形表面。Abele 等^[51]使用粒径为 $3.62\sim 5.69\text{ }\mu\text{m}$ 的粉末,在铺粉厚度为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以下进行成形,最终得到了表面粗糙度 $Ra=1.69\text{ }\mu\text{m}$ 的表面。但粉末粒径减少后流动性变差,铺粉困难,影响成形。

6 结语与展望

控制和提高选区激光成形金属表面成形质量有利于减小后处理难度,拓宽选区激光熔化金属 3D 打印的应用。现有研究明确了影响选区激光成形金属表面成形质量的因素,从合金成分、成形件结构位置、铺粉厚度、成形工艺等方面提出了控制和提高成形质量的方法。优化能量输入、稳定熔池、减少飞溅和球化,减少粉层厚度和粉末粒径,调整成形位置,优化扫描策略等,都是改善选区激光成形金属表面成形质量的有效手段。但是,目前选区激光成形金属表面的 Ra 值依然较高,通常水平面 Ra 值超过 $5\text{ }\mu\text{m}$,垂直面 Ra 值超过 $10\text{ }\mu\text{m}$,倾斜或不规则表面的 Ra 值则更高,往往超过 $20\text{ }\mu\text{m}$,与传统机械加工仍有较大差距。优化合金成分,提高小尺寸粉末流动性,进一步降低铺粉厚度,提高激光聚焦和扫描精度,优化勾边策略与途径,是今后依然需要努力的发展方向。

参考文献:

- [1] 田杰,黄正华,戚文军,等. 金属选区激光熔化的研究现状[J]. 材料导报,2017,31(A1): 90-94.
TIAN Jie, HUANG Zheng-hua, QI Wen-jun, et al. Research progress on selective laser melting of metal[J]. Materials review, 2017, 31(A1): 90-94.
- [2] 陈光霞,曾晓雁,王泽敏,等. 选择性激光熔化快速成形工艺研究[J]. 机床与液压,2010(1): 1-3.
CHEN Guang-xia, ZENG Xiao-yan, WANG Ze-min, et al. Research on rapid prototyping technology of selective laser melting[J]. Machine tool & hydraulics, 2010(1): 1-3.
- [3] 曾光,韩志宇,梁书锦,等. 金属零件 3D 打印技术的应用研究[J]. 中国材料进展,2014(6): 376-382.
ZENG Guang, HAN Zhi-yu, LIANG Shu-jin, et al. The applications and progress of manufacturing of metal parts by 3D printing technology[J]. Materials China, 2014(6): 376-382.
- [4] 李昂,刘雪峰,俞波,等. 金属增材制造技术的关键因素及发展方向[J]. 工程科学学报,2019,41(2): 159-173.
LI Ang, LIU Xue-feng, YU Bo, et al. Key factors and developmental directions with regard to metal additive manufacturing[J]. Chinese journal of engineering, 2019, 41(2): 159-173.
- [5] 林鑫,黄卫东. 高性能金属构件的激光增材制造[J]. 中国科学: 信息科学,2015(9): 1111-1126.
LIN Xin, HUANG Wei-dong. Laser additive manufacturing of high-performance metal components[J]. Scientia sinica: informationis, 2015(9): 1111-1126.
- [6] 张学军,唐思熠,肇恒跃,等. 3D 打印技术研究现状和关键技术[J]. 材料工程,2016(2): 122-128.
ZHANG Xue-jun, TANG Si-yi, ZHAO Heng-yue, et al. Research status and key technologies of 3D printing[J]. Journal of materials engineering, 2016(2): 122-128.
- [7] AMBROSI A, PUMERA M. 3D-printing technologies for electrochemical applications[J]. Chemical Society Reviews, 2016, 45(10): 2740-2755.
- [8] LIU Y J, WANG H L, LI S J, et al. Compressive and fatigue behavior of beta-type titanium porous structures fabricated by electron beam melting[J]. Acta materialia, 2017, 126: 58-66.
- [9] KRUTH J P, BADROSSAMAY M, YASA E, et al. Part and material properties in selective laser melting of metals[C]//International symposium on electromachining. [s. l.]: Elsevier Science SA, 2010: 3-14.
- [10] VAYSETTE B, SAINTIER N, BRUGGER C, et al. Surface roughness of Ti-6Al-4V parts obtained by SLM and EBM: effect on the high cycle fatigue life[J]. Procedia engineering, 2018, 213: 89-97.
- [11] 杨强,鲁中良,黄福享,等. 激光增材制造技术的研究现状及发展趋势[J]. 航空制造技术,2016(12): 26-31.
YANG Qiang, LU Zhong-liang, HUANG Fu-xiang, et al. Research on status and development trend of laser additive manufacturing[J]. Aeronautical manufacturing technology, 2016(12): 26-31.
- [12] XIAO D M, YANG Y Q, SU X B, et al. Topology optimization of microstructure and selective laser melting fabrication for metallic biomaterial scaffolds[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(10): 2554-2561.
- [13] 苏海军,尉凯晨,郭伟,等. 激光快速成形技术新进展及其在高性能材料加工中的应用[J]. 中国有色金属学报,2013(6): 1567-1574.
SU Hai-jun, WEI Kai-chen, GUO Wei, et al. New development of laser rapid forming and its application in high performance materials processing[J]. The Chinese journal of nonferrous metals, 2013(6): 1567-1574.
- [14] 吴伟辉,杨永强,王迪. 选区激光熔化成型过程的球化现象[J]. 华南理工大学学报,2010,38(5): 110-115.

- WU Wei-hui, YANG Yong-qiang, WANG Di, et al. Balling phenomenon in selective laser melting process[J]. Journal of South China University of Technology, 2010, 38(5): 110-115.
- [15] LI R, LIU J, SHI Y. et al. Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2012, 59(9-12): 1025-1035.
- [16] WANG D, WU S, 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.
- [17] SCHWEIER M, HEINSJ F, HAUBOLD M W, et al. Spatter formation in laser welding with beam oscillation[J]. Physics procedia, 2013, 41: 20-30.
- [18] SING S L, YEONG W Y, WIRIA F E, et al. Characterization of titanium lattice structures fabricated by selective laser melting using an adapted compressive test method[J]. Experimental mechanics, 2016, 56(5): 735-748.
- [19] YADROITSEV I, SMUROV I. Surface morphology in selective laser melting of metal powders[J]. Physics procedia, 2011, 12(part-PA): 264-270.
- [20] THIJS L, VERHAEGHE F, CRAEHHS T, et al. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V[J]. Acta materialia, 2010, 58(9): 3303-3312.
- [21] ADAM G A O, ZIMMER D. Design for additive manufacturing—element transitions and aggregated structures[J]. CIRP Journal of manufacturing science and technology, 2014, 7(1): 20-28.
- [22] KRUTH J P, VANDENBROUCKE B, VAN VAERENBERGH J, et al. Digitizing the manufacturing of biocompatible metal frameworks for complex dental prostheses by means of SLS/SLM[J]. IEEE electron device letters, 2005(6): 23-25.
- [23] GU D, SHEN Y. Balling phenomena during direct laser sintering of multi-component Cu-based metal powder[J]. Journal of alloys and compounds, 2007, 432(1-2): 163-166.
- [24] GU D, SHEN Y. Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: Metallurgical mechanisms and control methods[J]. Materials & design, 2009, 30(8): 2903-2910.
- [25] ALSALLA H H, SMITH C, HAO L, et al. Effect of build orientation on the surface quality, microstructure and mechanical properties of selective laser melting 316L stainless steel[J]. Rapid prototyping journal, 2017, 24(1): 9-17.
- [26] STRANO G, HAO L, EVERSON R M, et al. Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting[J]. Journal of materials processing tech, 2013, 213(4): 589-597.
- [27] 刘婷婷, 张长东, 廖文和, 等. 激光选区熔化成形悬垂结构熔池行为试验分析[J]. 中国激光, 2016(12): 70-76.
- LIU Ting-ting, ZHANG Chang-dong, LIAO Wen-he, et al. Experimental analysis of pool behavior in overhang structure fabricated by selective laser melting[J]. Chinese journal of lasers, 2016(12): 70-76.
- [28] XIANG Zhao-wei, WANG Ling, YANG Cheng-li, et al. Analysis of the quality of slope surface in selective laser melting process by simulation and experiments[J]. Optik-international journal for light and electron optics, 2019, 176: 68-77.
- [29] TRIANTAPHYLLOU A, GIUSCA C L, MACAULEY G, et al. Surface texture measurement for additive manufacturing[J]. Surface topography: metrology and properties, 2015, 3(2): 37-38.
- [30] PUPO Y, MONROY K P, CIURANA J. Influence of process parameters on surface quality of CoCrMo produced by selective laser melting[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2015, 80(5-8): 985-995.
- [31] 赵曙明, 沈显峰, 杨家林, 等. 水雾化 316L 不锈钢选区激光熔化致密度与组织性能研究[J]. 应用激光, 2017, 37(3): 319-326.
- ZHAO Shu-ming, SHEN Xian-feng, YANG Jia-lin, et al. Investigation of densification, microstructural and mechanical properties of water-atomized 316L stainless steel parts fabricated by selective laser melting[J]. Applied laser, 2017, 37(3): 319-326.
- [32] HONG M H, SON J S, KWON T Y. Surface roughness of a 3D-Printed Ni-Cr alloy produced by selective laser melting: effect of process parameters[J]. Journal of nano-science and nanotechnology, 2018, 18(3): 2037-2040.
- [33] ABOULKHAIR N T, EVERITT N M, ASHCROFT I, et al. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting[J]. Additive manufacturing, 2014, 1-4: 77-86.
- [34] 吴伟辉, 肖冬明, 杨永强, 等. 激光选区熔化成型过程的粉末粘附问题分析[J]. 热加工工艺, 2016, 45(24): 43-47.
- WU Wei-hui, XIAO Dong-ming, YANG Yong-qiang, et al. Analysis on powder adhesion problems in selective laser melting forming process[J]. Hot working technology, 2016, 45(24): 43-47.
- [35] YANG T, LIU T, LIAO W, et al. The Influence of process parameters on vertical surface roughness of the AlSi10Mg parts fabricated by selective laser melting[J]. Journal of materials processing technology, 2018, 266: 26-36.
- [36] TIAN Y, TOMUS D, ROMETSCH P, et al. Influences of processing parameters on surface roughness of hastelloy X produced by selective laser melting[J]. Additive manufacturing, 2017, 13: 103-112.
- [37] HAN X, NIE X, WANG G, et al. Investigation on selective laser melting AlSi10Mg cellular lattice strut: Molten pool morphology, surface roughness and dimensional accuracy[J]. Materials, 2018, 11(3): 392.
- [38] KRÖL M, TANŠK T. Surface quality research for selective laser melting of Ti-6Al-4V alloy[J]. Archives of metallurgy and materials, 2016, 61(3): 1291-1296.
- [39] CHEN H, GU D, XIONG J, et al. Improving additive manufacturing processability of hard-to-process overhanging structure by selective laser melting[J]. Journal of materials processing technology, 2017, 250: 99-108.

- nanotubes coated by multi-layer silica for improving thermal conductivity of polymer composites[J]. Journal of thermal analysis and calorimetry, 2013, 113: 467-474.
- [7] ZHA J, LEE J K, WU Y, et al. Photoluminescence and electronic interaction of anthracene derivatives adsorbed on sidewalls of single-walled carbon nanotubes[J]. Nano letters, 2003, 3(3): 403-407.
- [8] CHEN J, DYER M J, YU M. Cyclodextrin-mediated soft cutting of single-walled carbon nanotubes[J]. Journal of the American Chemical Society, 2001, 123(25): 6201-6202.
- [9] LEE H, LEE B P, MESSERSMITH P B. A reversible wet/dry adhesive inspired by mussels and geckos[J]. Nature, 2007, 448: 338-341.
- [10] LEE M, KU S H, RYU J K, et al. Mussel-inspired functionalization of carbon nanotubes for hydroxyapatite mineralization[J]. Journal of materials chemistry, 2010, 20: 8848-8853.
- [11] LING Y, LI W Z, WANG B Y, et al. Epoxy resin reinforced with nanothin polydopamine-coated carbon nanotubes: A study of the interfacial polymer layer thickness[J]. RSC advances, 2016, 6(37): 3654.
- [12] CHEN S, CAO Y, FENG J. Polydopamine as an efficient and robust platform to functionalize carbon fiber for high-performance polymer composites[J]. ACS applied materials & interfaces, 2014, 6: 349-356.
- [13] SA R, YAN Y, WEI Z, et al. Surface modification of aramid fibers by bio-inspired poly(dopamine) and epoxy functionalized silane grafting[J]. ACS applied materials & interfaces, 2014, 6: 21730-21738.
- [14] MATOS C F, GALEMBECK F, ZARBIN A J G. Multi-functional and environmentally friendly nanocomposites between natural rubber and graphene or graphene oxide[J]. Carbon, 2014, 78: 469-479.
- [15] POTHANA L, OOMMENB Z, THOMASC S. Dynamic mechanical analysis of banana fiber reinforced polyester composites[J]. Composites science and technology, 2003, 63: 283-293.
- [16] 何曼君, 张红东, 陈维孝, 等. 高分子物理[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2007: 109-112.
HE Man-jun, ZHANG Hong-dong, Chen Wei-xiao, et al. Polymer physics[M]. Shanghai: Fudan University Press, 2007: 109-112.
- [17] SASIKUMAR K, MANOJ N R, MUKUNDAN T, et al. Hysteretic damping in XNBR-MWCNT nanocomposites at low and high compressive strains[J]. Composites part B, 2016, 92: 74-83.
- [18] CHEN S S, CAO Y W, FENG J C. Polydopamine as an efficient and robust platform to functionalize carbon fiber for high-performance polymer composites[J]. ACS applied materials & interfaces, 2014, 6: 349-356.
- [19] BROCKS T, CIOFFI M O H, VOORWALD H J C. Effect of fiber surface on flexural strength in carbon fabric reinforced epoxy composites[J]. Applied surface science, 2013, 274: 210-216.

(上接第 124 页)

- [40] MUMTAZ K, HOPKINSON N. Top surface and side roughness of Inconel 625 parts processed using selective laser melting[J]. Rapid prototyping journal, 2009, 15(2): 96-103.
- [41] DAI D, GU D. Effect of metal vaporization behavior on keyhole-mode surface morphology of selective laser melted composites using different protective atmospheres[J]. Applied surface science, 2015, 355: 310-319.
- [42] SAVALANI M M, PIZARRO J M. Effect of preheat and layer thickness on selective laser melting (SLM) of magnesium[J]. Rapid prototyping journal, 2016, 22(1): 115-122.
- [43] YASA E, KRUTH J. Application of laser re-melting on selective laser melting parts[J]. Prod Eng, 2011, 6(4): 259-270.
- [44] ALRBAEY K, WIMPENNY D, TOSI R, et al. On optimization of surface roughness of selective laser melted stainless steel parts: a statistical study[J]. Journal of materials engineering & performance, 2014, 23(6): 2139-2148.
- [45] VAITHILINGAM J, GOODRIDGE R D, HAGUE R J M, et al. The effect of laser remelting on the surface chemistry of Ti6Al4V components fabricated by selective laser melting[J]. Journal of materials processing technology, 2016, 233: 1-8.
- [46] WANG D, LIU Y, YANG Y, et al. Theoretical and experimental study on surface roughness of 316L stainless steel metal parts obtained through selective laser melting[J]. Rapid prototyping journal, 2016, 22(4): 706-716.
- [47] 葛亚楠, 武美萍, 冒浴沂, 等. 激光选区熔化扫描策略对钛合金成形精度的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(9): 268-274.
GE Ya-nan, WU Mei-ping, MAO Yu-yi, et al. Effect of scanning strategy on forming precision of titanium alloy by selective laser melting[J]. Laser & optoelectronics progress, 2018, 55(9): 268-274.
- [48] BÂLC N, COSMA S C, KESSLAR J, et al. Research on improving the outer surface quality of the parts made by SLM[J]. Applied mechanics and materials, 2015, 808: 6.
- [49] 闫岸如, 杨恬恬, 王燕灵, 等. 变能量激光选区熔化 IN718 镍基超合金的成形工艺及高温机械性能[J]. 光学精密工程, 2015(6): 1695-1704.
YAN An-ru, YANG Tian-tian, WANG Yan-ling, et al. Forming process and high-temperature mechanical properties of variable energy laser selective melting manufacturing IN718 superalloy[J]. Optics and precision engineering, 2015(6): 1695-1704.
- [50] CLOOTS M, ZUMOFEN L, SPIERINGS A B, et al. Approaches to minimize overhang angles of SLM parts[J]. Rapid prototyping journal, 2017, 23(2): 362-369.
- [51] ABELE E, KNIEPKAMP M. Analysis and optimisation of vertical surface roughness in micro selective laser melting[J]. Surface topography metrology & properties, 2015, 3(3): 034007.