

DOI: 10.11973/jxgccl202302001

选区激光熔化成形 316L 不锈钢零件中的缺陷及形成机理研究进展

丛佳琦¹, 计云萍^{1,2,3}, 王磊¹, 康学良^{1,2,3}, 李一鸣^{2,3}, 任慧平^{2,3}

(内蒙古科技大学 1. 材料与冶金学院(稀土学院),

2. 白云鄂博共生伴生矿资源高效综合利用省部共建协同创新中心, 包头 014010;

3. 内蒙古自治区新金属材料重点实验室, 包头 014010)

摘要: 选区激光熔化(SLM)是目前应用最广泛的金属增材制造技术之一。SLM成形零件中不可避免会产生许多缺陷,包括孔隙、表层粉末球化、裂纹等;缺陷的形成不仅会影响成形过程的顺利进行,也会破坏零件内部完整性,降低零件的服役性能。对SLM成形316L不锈钢零件中孔隙、表层粉末球化、裂纹3种缺陷的主要特征进行了综述,对这3种缺陷的形成机理和影响因素进行了总结,提出了控制缺陷的主要措施,最后给出了今后的研究方向。

关键词: SLM技术; 316L不锈钢; 缺陷; 形成机理; 影响因素

中图分类号: TG249.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2023)02-0001-06

Research Progress on Defects and Forming Mechanisms of Selective Laser Melting Formed 316L Stainless Steel Parts

CONG Jiaqi¹, JI Yunping^{1,2,3}, WANG Lei¹, KANG Xueliang^{1,2,3}, LI Yiming^{2,3}, REN Huiping^{2,3}

(1. School of Materials and Metallurgy (School of Rare Earth), 2. Collaborative Innovation Center of Integrated Exploitation of

Bayan Obo Multi-Metal Resources, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;

3. Inner Mongolia Autonomous Region Key Laboratory of Advanced Metal Materials, Baotou 014010, China)

Abstract: Selective laser melting (SLM) is one of the most widely used metal additive manufacturing techniques. Many defects are inevitably produced in the SLM formed parts, including pores, surface layer powder spheroidization, cracks and so on. The formation of defects not only affect the smoothness of the forming process, but also damage the internal integrity of the part and reduce its serviceability. The main characteristics of three defects including pores, surface layer powder spheroidization and cracks in SLM formed 316L stainless steel parts are reviewed. The formation mechanisms and influencing factors of these three defects are summarised, and the main measures to control the defects are proposed. Finally, future research directions are put forward.

Key words: SLM technique; 316L stainless steel; defect; formation mechanism; influence factor

0 引言

316L 不锈钢(国标牌号 022Cr17Ni12Mo2)是一种超低碳奥氏体不锈钢,具有优良的耐腐蚀性能、冲击韧性和高温力学性能,广泛用于生物医学、航空

航天、核能、机械等领域零件的制造^[1]。其中,船用螺旋桨、发动机涡轮叶片等零件的形状很复杂,采用传统方法制造往往存在制造周期长、难度大、成本高等问题。与传统制造技术相比,增材制造技术可实现近净成形,从而节省材料并缩短生产周期^[2]。选区激光熔化(selective laser melting, SLM)是目前应用最广泛的金属增材制造技术之一,该技术基于计算机辅助设计模型,使用高功率激光束使金属粉末局部熔化随后快速凝固,通过道道扫描、层层堆叠的方式成形出完整的零件。目前,SLM技术广泛用

收稿日期:2022-01-04;修订日期:2022-11-30

基金项目:内蒙古自然科学基金资助项目(2021MS05010)

作者简介:丛佳琦(1995-),女,内蒙古赤峰人,硕士研究生

通信作者(导师):计云萍教授

于成形 316L 不锈钢、钛合金、铝合金和钴铬合金等零件^[3-4]。但是,SLM 成形不可避免地会在零件中产生缺陷,包括孔隙、表层粉末球化、裂纹等。缺陷的形成不仅会影响成形过程的顺利进行,也会破坏零件内部完整性,降低零件的服役性能。因此,掌握 SLM 成形过程中缺陷的产生机理及其影响因素具有重要意义。目前国内外主要通过大量试验方法来调整 SLM 工艺以获得高致密的零件,但是有关缺陷的形成机理与控制方法尚需深入研究^[5-6]。为了给相关研究人员提供参考,并为预测、控制缺陷,提高成形性提供一定的理论参考,作者综述了 SLM 成形 316L 不锈钢零件中缺陷的类型、形成机理及影响因素。

1 缺陷的类型

1.1 孔隙

孔隙是 SLM 成形件中最常见的缺陷。由于熔池内部会发生复杂的冶金物理化学反应,成形件中的孔隙不可能完全避免。国内外学者对于孔隙的研究主要集中在孔隙的检测方法、孔隙对于性能的影响,以及孔隙控制 3 个方面。SLM 成形 316L 不锈钢零件中的孔隙按照形貌大致可分为 3 种:气孔、匙孔和未熔合孔隙。气孔的形状近于球形,具有光滑的边缘^[7],尺寸从亚微米到几十微米不等^[8-9]。匙孔因其形状类似钥匙孔而得名,其截面形貌相对规则^[10],平均直径可高达几百微米^[9]。大尺寸的匙孔破坏了零件的连续性,在零件使用过程中会成为应力集中位置,诱发微裂纹,影响零件的力学性能。未熔合孔隙是缺乏冶金结合导致的一类缺陷,其长度可达几百微米,通常沿熔池边界形成,跨越几个熔池,在其内部可以观察到尚未熔化的粉末^[7]。未熔合孔隙会导致零件的疲劳寿命和疲劳极限明显下降^[11-12]。

1.2 表层粉末球化

表层粉末球化是 SLM 成形过程中金属熔滴在表面张力作用下向球形转变的现象,也是工艺参数偏离最佳成形窗口最直接的表现。表层粉末球化是可以在 SLM 成形零件表面直接观察到的现象,目前有关这方面的研究主要集中在球化颗粒的尺寸和分布特征上,未见关于粉末球化对零件内部缺陷影响的研究。SLM 成形 316L 不锈钢零件表层粉末球化可分大尺寸粉末球化与小尺寸粉末球化,大尺寸粉末球化的颗粒通常呈椭圆形,尺寸可达几百微米,

小尺寸粉末球化颗粒的球形度较高,尺寸一般小于 $10\ \mu\text{m}$ ^[13]。大尺寸粉末球化可以通过调整 SLM 工艺参数来避免,小尺寸粉末球化则无法避免。大尺寸粉末球化会在成形过程中使表面形成明显凸起,影响下一层粉末均匀铺展,使零件内部产生缺陷,降低致密性。小尺寸粉末球化由于颗粒尺寸小于粉末层厚度,对成形件质量影响较小^[14-15]。

1.3 裂纹

裂纹是 SLM 成形零件中非常具有破坏性的缺陷;当零件承受一定载荷时,裂纹会迅速扩展,导致零件报废^[16-18]。根据作者对 SLM 成形 316L 不锈钢零件形貌的观察以及国内外学者的研究结果发现,SLM 成形 316L 不锈钢零件中几乎不会形成明显的裂纹。但是,潘露等^[17-18]在采用 SLM 技术制备 316L 不锈钢零件时发现了裂纹,并将裂纹分为孔隙聚集型裂纹、气泡聚集型裂纹和热裂纹 3 类。孔隙聚集型裂纹由多个孔隙连接而成,其形成与孔隙的形成相关;气泡聚集型裂纹由气泡聚集而形成,这与熔池内部滞留的气体有关;热裂纹由主裂纹和二次裂纹构成,其中主裂纹呈折线状延伸。裂纹的出现会使 SLM 成形 316L 不锈钢零件发生变形,增加开裂分层的风险,从而恶化材料的力学性能,缩短零件的使用寿命。

2 缺陷的形成机理

2.1 孔隙的形成机理

大多学者认为气孔的形成是滞留在熔池中的气体造成的;但有关气体的来源,不同学者有不同的看法。ABOULKHAIR^[19]认为气孔是粉末所携带的孔隙造成的,或者是成形过程中滞留在零件中的保护气体(如氮气、氩气)形成的;而 GALY^[20]、TAN^[8]两位学者认为气体来自制粉过程中夹带的惰性气体以及合金元素的蒸发;还有学者认为气孔可能是在成形下一层的过程中刮刀将上一层飞溅到成形表面的熔滴颗粒带走而形成的^[21]。

国内外学者主要采用高能束 X 射线衍射仪分析 SLM 成形过程中熔池的变化,并对缺陷的形成机理进行了研究^[22-23]。在高激光功率和低扫描速度的参数下,激光能量较大,导致大量金属蒸发,在金属液面产生向下的作用力,致使熔融金属向下凹陷,熔池形状变得窄而深,形似钥匙,熔池的这种变化称为匙孔模式。由于熔池凝固速率快,金属蒸气来不及逸出,就留在了熔池内部,形成匙孔^[8,10,24-26]。

因此,匙孔一般位于熔池底部。

未熔合孔隙是由于成形件中道与道之间或层与层之间没有实现良好冶金结合导致的。当激光功率低、扫描速度快、体能量密度低时,激光热输入小,造成熔池温度低,无法形成足够的金属液使相邻层、相邻熔道之间有效重叠,从而形成未熔合孔隙^[27]。通过优化工艺参数来实现道与道以及层与层之间的完全冶金结合,是避免未熔合孔隙形成的主要方法。

2.2 表层粉末球化机理

表层粉末球化是熔化后的粉末在表面张力作用下倾向于形成表面能低的球形颗粒造成的。许多研究者将大尺寸粉末球化现象的产生归结为液态金属与固态金属表面的润湿问题^[14,28]。当气、液相间表面张力与液、固相间表面张力的夹角 θ 小于 90° 时,熔滴可以均匀地铺展在前一层上,不会形成粉末球化现象;反之,当夹角 θ 大于 90° 时,熔滴会凝固成球形颗粒黏附于前一层上,形成粉末球化现象。周鑫^[29]考虑界面氧化、杂质和温度梯度等因素的影响后,提出当熔滴铺展时间小于熔滴凝固时间时可避免粉末球化,其中熔滴铺展时间与材料本身的物理性能密不可分,而熔滴凝固时间与熔滴温度有关。研究^[29-30]发现,当 316L 不锈钢熔滴的温度超过 2 100 K 时,凝固时间会超过铺展时间($61.4 \mu\text{s}$),成形过程中不易出现大尺寸粉末球化现象。增大激光体能量的输入,提高熔滴温度可避免大尺寸粉末球化,保证成形性能。小尺寸粉末球化与激光对熔滴的冲击有关;熔滴将激光的动能转化为表面能而变成细小球状,凝固后形成球形颗粒,因此小尺寸粉末球化现象难以避免。

2.3 裂纹的形成机理

裂纹的产生与残余应力有着密切的关系。在粉末熔融和凝固过程中,液、固相变导致的体积变化会在熔池内部及附近区域产生较大的残余应力。此外,成形件上层的熔融金属升温速率较下层已经凝固部分的升温速率大,较大的温度梯度使成形件内部产生残余应力;同时在后续的凝固过程中,熔融金属与下层凝固部分的散热条件不同,导致 2 个部分的冷却速率不同,也会使得成形件中产生残余应力。当残余应力大于材料的极限强度时就会出现裂纹^[31-32]。由于 SLM 成形熔池内温度梯度与长大速率之比较大,凝固过程易产生穿越几个熔池的晶粒,形成发达的柱状晶;这种微观结构易使裂纹沿着晶界扩展^[8,33]。残余应力的产生也与材料本身的物理

性质有关,一般弹性模量高以及熔点高的材料,其热应力较大,产生应力集中的可能性也较大^[34]。由于 SLM 成形过程中的热输入位置变化快,零件不同区域温度分布不均匀,并且温度场连续变化,导致零件中的应力场也在时刻变化,因此 SLM 成形过程中温度场和应力场的实时监控很困难。目前,多采用有限元模拟的方法对成形过程中温度场和应力场进行分析^[35]。

3 缺陷的影响因素

3.1 SLM 工艺参数

学者们对 SLM 工艺参数中的激光功率、扫描速度、扫描间距、扫描策略等进行了相关研究,发现激光功率和扫描速度对缺陷的影响最为显著。激光功率与扫描速度会影响熔池的形状,进而影响缺陷的形成。研究^[36-37]发现,随着扫描速度的增加,熔池温度降低,熔池的润湿性变差,难以铺展,熔池内的粉末颗粒不能完全熔化,熔道之间不连续,零件中易形成大尺寸的未熔合孔隙。但是过低的扫描速度会导致孔隙生长,不利于提高零件致密性^[38]。激光功率通过影响熔池的深度来影响零件的致密性。在较低激光功率下,熔池较浅,熔池之间不能有效搭接,在道与道之间、层与层之间会产生未熔合孔隙;在较高激光功率下,熔池较深较窄,会增加前一层凝固部分的重熔程度,更容易得到高致密的零件^[39-41]。但是深而窄的熔池,其熔化模式易转变为匙孔,使零件中形成匙孔,从而降低零件的致密性^[10]。

激光体能量密度可反映材料单位体积的激光能量输入,与激光功率、扫描速度、扫描间距、铺粉厚度 4 个工艺参数有关。较大的激光体能量密度可以消除零件中的未熔合孔隙,并且避免大尺寸粉末球化,但是容易使熔池进入匙孔模式而产生匙孔,因此应在一个适当的工艺窗口下增加激光功率或减小扫描速度。PENG 等^[42]研究发现,当激光体能量密度大于 $30 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-3}$ 时,SLM 成形 316L 不锈钢零件中不规则的未熔合孔隙消失,但是当激光体能量密度大于 $80 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-3}$ 时,零件中出现匙孔。ZHANG 等^[43]认为,当激光体能量密度在 $75.76\sim 151.52 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-3}$ 时,可避免 SLM 成形 316L 不锈钢零件中形成未熔合孔隙,而当激光体能量密度大于 $151.52 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-3}$ 时,零件中则会产生匙孔。TUCHO 等^[44]研究发现,当激光体能量密度在 $65\sim 80 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-3}$ 时,SLM

成形 316L 不锈钢零件的孔隙率小于 1%。刘艳等^[45]通过试验得到,SLM 成形 316L 不锈钢零件获得较高相对密度的最佳体积能量密度为 $62.1 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}$ 。作者前期研究发现,在激光体能量密度为 $50 \sim 100 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}$ 时 SLM 成形 316L 不锈钢零件的相对密度大于 99%。为了提高工艺优化的效率,可结合数值模拟研究不同工艺参数下的熔池形状、温度场和应力场等,探讨工艺参数对 SLM 成形 316L 不锈钢零件缺陷的影响。

3.2 粉末相关参数

粉末粒度和粒度分布对 SLM 成形零件的致密性影响较大。较细的粉末颗粒有较大的比表面积,能够更好地吸收激光能量,同时较细的粉末颗粒更容易填充到大尺寸颗粒的缝隙中,增加粉末的松装密度,从而提高零件的致密性^[46-47]。粒度分布较窄的粉末有团聚倾向,而粒度分布较宽的粉末有偏析倾向,因此粒度分布较宽和较窄均会导致零件内部出现孔隙及表层粉末球化现象。

粉末中的氧也会影响 SLM 成形零件中缺陷的形成;粉末中的氧可能来自于粉末本身,也可能来自于成形气氛。粉末表面的氧化层会加大对激光能量的吸收,增加熔池体积,影响固相金属和液相金属之间的润湿性,破坏熔道之间的结合^[28]。粉末中较高含量的氧会导致马兰戈尼对流逆转,使金属液由熔池边缘流向熔池中心,导致熔池形状变得深而窄,影响熔滴的铺展行为,也会将未熔化粉末带进熔池内部,使成形零件熔道之间形成未熔合孔隙^[29]。

在 SLM 成形过程中,循环使用的 316L 不锈钢粉末因带有弱磁性而易造成零件中出现缺陷和翘曲。研究^[48-49]发现,循环多次的 316L 不锈钢粉末中含有 δ 铁素体,提高了粉末的磁性。带有弱磁性的粉末会严重影响 SLM 铺粉过程,影响粉末层厚度的均匀性,从而影响粉末对激光能量的吸收,进而在零件内部产生气孔、未熔合孔隙等缺陷^[50]。

4 结束语

SLM 成形 316L 不锈钢零件中的缺陷类型主要包括孔隙、表层粉末球化、裂纹等,这些缺陷不仅会降低零件的致密性,还会导致零件性能达不到使用要求。气孔的产生与滞留在熔池内部的气体有关;过高或过低的激光体能量密度易导致零件内部出现匙孔、未熔合孔隙、表层粉末球化缺陷;裂纹的产生与残余应力密切相关。影响缺陷形成的因素主要包

括工艺参数及粉末相关的参数两方面。减少缺陷最直接且最有效的方法是在工艺窗口范围内适当增加激光功率或减小扫描速度。同时,采用粒度小、氧含量低的粉末也会减少缺陷的形成。由于 SLM 成形过程复杂难以研究,目前的研究工作不能精准控制缺陷的产生,因此未来的研究工作应主要集中在:(1)结合成形过程中温度场及熔池特征的数值模拟,优化工艺参数,减少成形件中缺陷的产生;(2)通过微量成分调整,消除柱状晶,以避免裂纹沿晶扩展;(3)借助应力场的数值模拟,分析应力分布的关键控制因素,减少或消除裂纹;(4)探索消除粉末中 δ 铁素体的方法,提高循环粉末利用率。

参考文献:

- [1] GHILAN A, CHIRIAC A P, NITA L E, et al. Trends in 3D printing processes for biomedical field: Opportunities and challenges[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2020, 28(5): 1345-1367.
- [2] ZHANG Y Z, LIU F R, CHEN J M, et al. Effects of surface quality on corrosion resistance of 316L stainless steel parts manufactured via SLM[J]. Journal of Laser Applications, 2017, 29(2): 022306.
- [3] VIGNAL V, VOLTZ C, THIÉBAUT S, et al. Pitting corrosion of type 316L stainless steel elaborated by the selective laser melting method: Influence of microstructure[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2021, 30(7): 5050-5058.
- [4] ALI H, GHADBEIGI H, MUMTAZ K. Residual stress development in selective laser-melted Ti6Al4V: A parametric thermal modelling approach[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(5/6/7/8): 2621-2633.
- [5] 刘畅, 马行驰, 马海彬. 工艺参数对 SLM 成型 316L 不锈钢致密度的影响及缺陷表现方式[J]. 热加工工艺, 2021, 50(12): 44-49.
- [6] LIU C, MA X C, MA H B. Effect of process parameters on density of 316L stainless steel by SLM and defects manifestation methods[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(12): 44-49.
- [7] WOŹNIAK A, ADAMIAK M. Main defects observed in titanium GRADE II and 316L stainless steel elements obtained by selective laser melting[J]. Solid State Phenomena, 2020, 308: 33-50.
- [8] LIVERANI E. Effect of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 249: 255-263.
- [9] TAN Q Y. Effect of processing parameters on the densification of an additively manufactured 2024 Al alloy[J]. Journal of

Materials Science & Technology, 2020, 58: 34-45.

- [9] YANG J J. Role of molten pool mode on formability, microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy[J]. Materials & Design, 2016, 110: 558-570.
- [10] KING W E. Observation of keyhole-mode laser melting in laser powder-bed fusion additive manufacturing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(12): 2915-2925.
- [11] GONG H J. Influence of defects on mechanical properties of Ti-6Al-4V components produced by selective laser melting and electron beam melting[J]. Materials & Design, 2015, 86: 545-554.
- [12] SMITH B A, LAURSEN C M, BARTANUS J, et al. The interplay of geometric defects and porosity on the mechanical behavior of additively manufactured components [J]. Experimental Mechanics, 2021, 61(4): 685-698.
- [13] LI R D, LIU J H, SHI Y S, et al. Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 59(9/10/11/12): 1025-1035.
- [14] 张晓博, 党新安, 杨立军. 选择性激光熔化成形过程的球化反应研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(6): 061401.
ZHANG X B, DANG X A, YANG L J. Study on balling phenomena in selective laser melting [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(6): 061401.
- [15] 潘露, 张成林, 江华, 等. 选区激光熔化制备 316L 不锈钢成形工艺参数对致密度的影响和优化[J]. 锻压技术, 2019, 44(11): 103-109.
PAN L, ZHANG C L, JIANG H, et al. Influence and optimization of forming process parameters on relative density of 316L stainless steel prepared by selective laser melting[J]. Forging & Stamping Technology, 2019, 44(11): 103-109.
- [16] ZHANG H Y, LIU Y H, LI Z W, et al. Crack analysis in Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting [J]. Tungsten, 2021, 3(3): 361-367.
- [17] 潘露, 张成林, 王亮, 等. 基于选区激光熔化的 316L 不锈钢的裂纹形成规律及机理[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(10): 101401.
PAN L, ZHANG C L, WANG L, et al. Crack formation law and mechanism in selective laser melting of 316L stainless steels[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(10): 101401.
- [18] 潘露, 刘麒慧, 王亮, 等. 线能量密度对选区激光熔化制备 316L 不锈钢缺陷的影响[J]. 应用激光, 2019, 39(1): 17-23.
PAN L, LIU Q H, WANG L, et al. Effect of line energy density on defects of 316L stainless steel prepared by selective laser melting[J]. Applied Laser, 2019, 39(1): 17-23.
- [19] ABOULKHAIR N T. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting [J]. Additive Manufacturing, 2014, 1/2/3/4: 77-86.
- [20] GALY C. Main defects observed in aluminum alloy parts produced by SLM; From causes to consequences[J]. Additive Manufacturing, 2018, 22: 165-175.
- [21] GONG H J, RAFI K, KARTHIK N V, et al. Defect morphology in Ti-6Al-4V parts fabricated by selective laser melting and electron beam melting [C]//24th International SFF Symposium — An Additive Manufacturing Conference. [S. l.]: SFF 2013: 440-453.
- [22] HUANG Y Z, FLEMING T G, CLARK S J, et al. Keyhole fluctuation and pore formation mechanisms during laser powder bed fusion additive manufacturing [J]. Nature Communications, 2022, 13: 1170.
- [23] GILLESPIE J, YEOH W Y, ZHAO C, et al. In situ characterization of laser-generated melt pools using synchronized ultrasound and high-speed X-ray imaging[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2021, 150(4): 2409-2420.
- [24] HUANG L J, HUA X M, WU D S, et al. Role of welding speed on keyhole-induced porosity formation based on experimental and numerical study in fiber laser welding of Al alloy [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103(1/2/3/4): 913-925.
- [25] ZHAO C, PARAB N D, LI X X, et al. Critical instability at moving keyhole tip generates porosity in laser melting[J]. Science, 2020, 370(6520): 1080-1086.
- [26] PROMOPPATUM P, YAO S C. Analytical evaluation of defect generation for selective laser melting of metals[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103(1/2/3/4): 1185-1198.
- [27] TANG M, PISTORIUS P C, BEUTH J L, et al. Prediction of lack-of-fusion porosity for powder bed fusion [J]. Additive Manufacturing, 2017, 14: 39-48.
- [28] 李瑞迪. 金属粉末选择性激光熔化成形的关键基础问题研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
LI R D. Research on the key basic issues in selective laser melting of metallic powder [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010.
- [29] 周鑫. 激光选区熔化微尺度熔池特性与凝固微观组织 [D]. 北京: 清华大学, 2016.
ZHOU X. Research on micro-scale melt pool characteristics and solidified microstructures in selective laser melting [D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [30] LIU S, GUO H J. Balling behavior of selective laser melting (SLM) magnesium alloy [J]. Materials (Basel, Switzerland), 2020, 13(16): 3632.
- [31] DEBROY T, WEI H L, ZUBACK J S, et al. Additive manufacturing of metallic components — Process, structure and properties [J]. Progress in Materials Science, 2018, 92: 112-224.
- [32] JONES R, RANS C, ILIOPOULOS A P, et al. Modelling the variability and the anisotropic behaviour of crack growth in SLM Ti-6Al-4V [J]. Materials (Basel, Switzerland), 2021, 14(6): 1400.

- [33] TAN Q Y. A novel strategy to additively manufacture 7075 aluminium alloy with selective laser melting[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 821: 141638.
- [34] 刘煜. 3D打印模具零件开裂的温度场和应力场模拟分析研究[D]. 大连:大连理工大学, 2021.
- LIU Y. Simulation analysis of temperature field and stress field of 3D printing mold parts cracking[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [35] 李培芬, 宾远红. 激光选区熔化成型金属零件存在的缺陷探讨[J]. 热加工工艺, 2022(12): 6-10.
- LI P F, BIN Y H. Research on defects in moulding metal parts by selective laser melting [J]. Hot Working Technology, 2022(12): 6-10.
- [36] LI R D, LIU J H, SHI Y S, et al. 316L stainless steel with gradient porosity fabricated by selective laser melting[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2010, 19(5): 666-671.
- [37] 宗学文, 张健, 卢秉恒, 等. 扫描速度对选区激光熔化成形 316L 不锈钢微观形貌和性能的影响[J]. 机械工程材料, 2021, 45(8): 15-19.
- ZONG X W, ZHANG J, LU B H, et al. Effect of scanning speed on micromorphology and properties of 316L stainless steel formed by selective laser melting [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2021, 45(8): 15-19.
- [38] MONROY K, DELGADO J, CIURANA J, et al. Study of the pore formation on CoCrMo alloys by selective laser melting manufacturing process [J]. Procedia Engineering, 2013, 63: 361-369.
- [39] JIANG H Z, LI Z Y, FENG T, et al. Effect of process parameters on defects, melt pool shape, microstructure, and tensile behavior of 316L stainless steel produced by selective laser melting[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2021, 34(4): 495-510.
- [40] GRECO S, GUTZEIT K, HOTZ H, et al. Selective laser melting (SLM) of AISI 316L—Impact of laser power, layer thickness, and hatch spacing on roughness, density, and microhardness at constant input energy density [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108(5/6): 1551-1562.
- [41] QIU C L, WANG Z, ALADAWI A S, et al. Influence of laser processing strategy and remelting on surface structure and porosity development during selective laser melting of a metallic material [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2019, 50(9): 4423-4434.
- [42] PENG T, CHEN C. Influence of energy density on energy demand and porosity of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing: Green Technology, 2018, 5(1): 55-62.
- [43] ZHANG X Z, CHEN L, ZHOU J, et al. Simulation and experimental studies on process parameters, microstructure and mechanical properties of selective laser melting of stainless steel 316L [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2020, 42(8): 1-14.
- [44] TUCHO W M. Investigation of effects of process parameters on microstructure and hardness of SLM manufactured SS316L [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 740: 910-925.
- [45] 刘艳, 李宗义, 张晓刚, 等. 316L 不锈钢粉选择性激光熔化成形工艺及成形后的性能[J]. 机械工程材料, 2018, 42(5): 40-44.
- LIU Y, LI Z Y, ZHANG X G, et al. Selective laser melting forming process of 316L stainless steel powder and properties of formed parts [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2018, 42(5): 40-44.
- [46] CHEN W, YIN G F, FENG Z, et al. Effect of powder feedstock on microstructure and mechanical properties of the 316L stainless steel fabricated by selective laser melting [J]. Metals, 2018, 8(9): 729.
- [47] SPIERINGS A B, LEVY G. Comparison of density of stainless steel 316L parts produced with Selective Laser Melting using different powder grades [C]// 20th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin: University of Texas, 2009.
- [48] PINTO F C. Defects in parts manufactured by selective laser melting caused by δ -ferrite in reused 316L steel powder feedstock [J]. Additive Manufacturing, 2020, 31: 100979.
- [49] 路超, 肖梦智, 屈岳波, 等. 激光选区熔化成形 316L 循环使用粉末特性演变机理研究 [J]. 中国激光, 2021, 48(14): 1402009.
- LU C, XIAO M Z, QU Y B, et al. Evolution mechanism of powder properties of recycled 316L stainless steel in selective laser melting [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(14): 1402009.
- [50] HEIDEN M J. Evolution of 316L stainless steel feedstock due to laser powder bed fusion process [J]. Additive Manufacturing, 2019, 25: 84-103.