

SLM 成形 AlSi10Mg 合金显微组织与力学性能的研究

方武¹, 何振波², 张奕³, 郭奉彬², 刘奕¹, 杨孝梅¹, 蹇海根^{1, 2, 3}

(1. 湖南工业大学材料与先进制造学院, 湖南株洲 412007;

2. 航桥新材料科技(滨州)有限公司, 山东滨州 256600;

3. 株洲欧科亿数控精密刀具股份公司, 湖南株洲 412500)

摘要: 采用光学金相显微镜、扫描电子显微镜 (SEM)、电子背散射衍射 (EBSD) 和力学拉伸测试等技术手段对选区激光熔化 (SLM) 成形 AlSi10Mg 合金的显微组织与性能进行了深入研究。结果表明, 合金由 α -Al 基体和 Al-Si 共晶组织所组成, 以细化的等轴晶为主, 平均晶粒尺寸为 7.34 μm 。合金沉积面与纵截面具有不同的显微结构特征, 且抗拉强度、屈服强度和伸长率分别达到 465 MPa、320 MPa 和 8.4%, 远高于传统铸造 AlSi10Mg 合金。

关键词: 选区激光熔化; AlSi10Mg 合金; 微观组织; 力学性能

相较于传统的减材制造, 增材制造技术是一种通过点、线和面自下而上的材料叠加制造技术, 成形过程中不需要磨具, 可直接加工出形状复杂化、薄壁化和精密化的构件^[1]。常见的增材制造技术主要有立体光固化、熔融沉积、选择性激光烧结、三维印刷及选区激光熔化等^[2]。其中, 选区激光熔化技术是通过将三维模型转化为二维数据, 并利用计算机控制高能激光束选择性地熔化金属粉末, 从而逐层叠加出目标构件^[3]。

目前, 国内外学者在有关 SLM 技术成形钛合金、镍合金和不锈钢等方面取得较积极的研究成果^[4-8]。但是, 由于铝合金的激光反射率特性, SLM 成形铝合金相关研究进展则较为缓慢, 这也在一定程度上限制了其进一步的推广与应用^[9]。近年来, 部分学者针对 SLM 成形铝合金譬如 AlSi10Mg、Al12Si 和 6061 等展开了大量的研究, 并在成形工艺、微结构分析和后热处理等方面取得了一些有意义的研究成果^[10-12]。Chen 等探讨了激光功率、扫描速度和扫描间距对成形合金致密度的影响, 并对比优化出最适宜的成形工艺参数^[13]。张文奇研究发现 SLM 成形 AlSi10Mg 合金的致密度随扫描速度的增加而降低, 但一定范围内合金致密度与扫描间距和层厚没有太大关系^[14]。王小军对 SLM 成形过程中存在的缺陷及形成机理进行了研究, 发现缺陷主要分为球化、裂纹、残余应力和翘曲变形等^[15]。Wei 等研究了 T6 热处理对 SLM 成形 AlSi10Mg 合金耐磨和耐蚀性能的影响, 结果表明合金的耐磨和耐蚀性能均随固溶温度的升高而降低^[16]。

SLM 成形过程中存在极大的温度梯度 (约 $10^6 \text{ K} \cdot \text{m}^{-1}$) 和冷却速率 (约 $10^6 \sim 10^8 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$), 合金属于典型的急凝固铸态组织。激光扫描熔池的凝固结晶行为、晶粒微取向及织构特征等与传统加工工艺所得到的合金有着较大的差异, 目前与之相关的研究也鲜有报道。基于此, 本文采用自制的 AlSi10Mg 金属粉末, 通过 SLM 技术叠层打印成形, 并深入研究打印件的显微组织特征及力学性能, 以期研究结果为 SLM 成形铝合金的推广应用提供一定的技术支持和数据参考。

作者简介:

方武 (2000-), 男, 硕士生, 主要研究方向为金属增材制造。电话: 17362803379, E-mail: 1115155682@qq.com。

通信作者:

蹇海根, 男, 教授, 博士生导师。电话: 0731-22183451, E-mail: jianhaigen2001@163.com

中图分类号: TG146.21;

TG113

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2025)

10-1352-06

收稿日期:

2025-03-31 收到初稿,

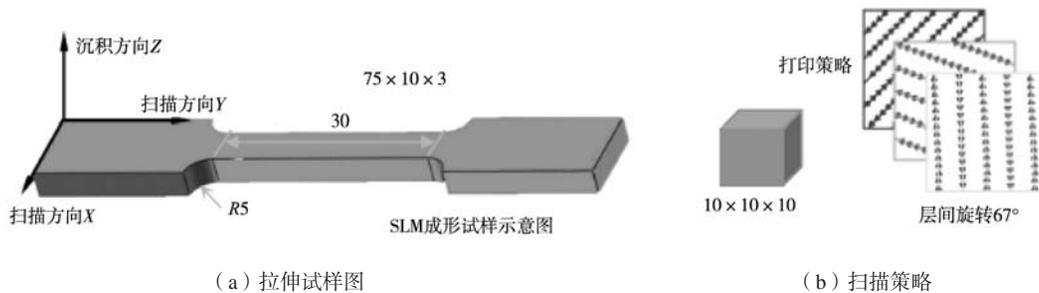
2025-05-08 收到修订稿。

1 试验材料与方法

AlSi10Mg金属粉末是通过气雾法自行制备的^[17], SLM成形设备为苏州倍丰激光科技有限公司自主研发的AmPro SP-500, 激光器选用IPG 2 × 500 W光纤激光器, 激光光斑直径100 μm。将金属粉末在120 °C真空干

燥环境中保温4 h, 然后SLM成形出用于显微组织观察和性能测试的试样, 其力学拉伸试样示意图及扫描策略如图1所示。AlSi10Mg金属粉末的化学成分及SLM成形工艺参数分别见表1和表2。

将打印试样由粗到细逐级研磨并抛光, 超声清洗



(a) 拉伸试样图

(b) 扫描策略

图1 SLM成形AlSi10Mg合金拉伸试样图及扫描策略

Fig. 1 Tensile specimen diagram and scanning strategy of AlSi10Mg alloy formed by SLM

表1 AlSi10Mg金属粉末化学成分
Tab. 1 Chemical composition of AlSi10Mg powder

	Si	Mg	Mn	Cu	Fe	Zn	Ni	Ti	Al
$w_B / \%$	10.17	0.37	0.006	0.005	0.092	0.008 1	0.009 7	0.005	余量

表2 SLM成形工艺参数
Tab. 2 SLM process parameters

激光功率/W	扫描速度/(mm · s ⁻¹)	扫描间距/mm	铺粉层厚/μm	旋转角度/(°)	尺寸精度/μm	基板预热	保护气氛
200	1 200	0.09	30	67	± 0.05	250 °C/2 h	氩气

后在Keller试剂(95 mL H₂O+1.5 mL HCl+2.5 mL HNO₃+1 mL HF)中腐蚀处理, 然后采用Leica DMC4500金相显微镜和JSM-IT200扫描电子显微镜对样品行显微组织观察。将精抛后的样品继续进行电解抛光, 电解液为5% HClO₄+95% CH₃CH₂OH, 抛光电压为5 V, 抛光时间为3~5 s, 然后在Oxford C-nano 电子背散射仪上进行EBSD测试, 并用Channel 5软件对采集的数据进行处理, 获取晶粒取向和织构等结果。

参考GB/T 228.1—2021金属材料室温拉伸试验方法, 将打印试样, 如图1(c)所示, 在UTM 4204万能力学试验机进行室温拉伸直至断裂, 加载速率为2 mm/min, 根据拉伸应力应变曲线计算出抗拉强度、屈服强度和伸长率, 并对拉伸断口进行微观形貌分析。

2 试验结果与分析

2.1 显微组织观察

对SLM成形试样的沉积面(XOY)和侧面(YOZ)进行金相显微组织观察, 其结果如图2所示。

从金相照片可以直接观察到扫描轨迹、相邻轨迹间形成的搭接区以及扫描层间存在的重熔区, 整个微观组织并非完全均匀分布。同时, 在扫描界面区域, 还发现了少量孔洞, 如图2中红色箭头所示。

如图2(a)所示, XOY沉积面由不规则的条状熔敷道组成, 部分熔敷道平行排列, 部分存在着67°左右的旋转角度, 这与扫描策略是匹配的, 如图1(d)所示。经过测量发现, 条状熔敷道的宽度分布在75~110 μm之间, 这基本相当于激光光斑直径的尺寸(100 μm)。如图2(b)所示, YOZ侧面由深度和宽度不均匀的熔池所组成, 相邻熔池之间具有相似的几何形貌, 但大小不一, 相互搭接并沿着垂直于沉积方向堆积, 呈现鱼鳞状熔池堆积结构。测量相邻熔池间距为86 μm左右, 这与激光扫描间距(90 μm)大小几乎对应。

对SLM成形AlSi10Mg合金XOY沉积面进行扫描电镜观察分析, 如图3所示。熔池主要由灰黑色的岛状基体相和灰白色的网状相组成。在极快速的冷却凝固过

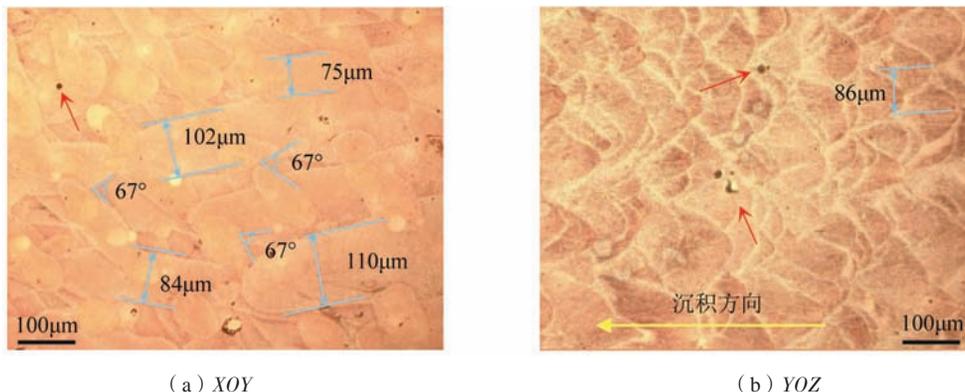


图2 SLM成形AlSi10Mg合金金相组织

Fig. 2 Metallographic structure of AlSi10Mg alloy formed by SLM

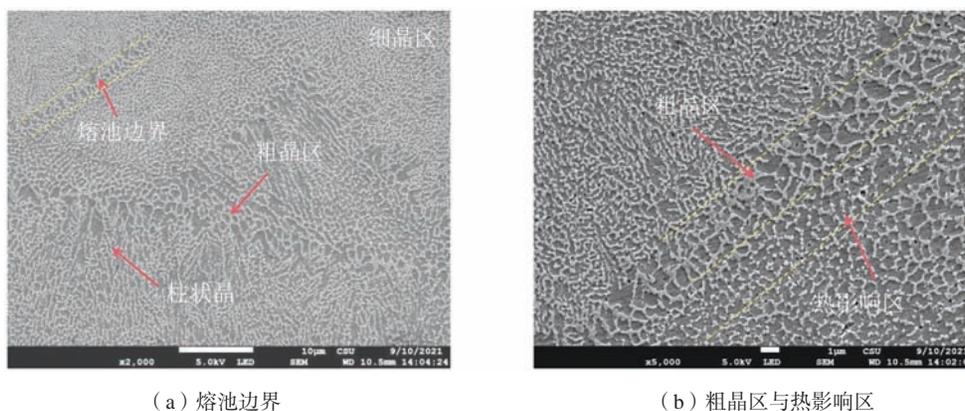


图3 SLM成形AlSi10Mg合金微观组织

Fig. 3 Microstructure of AlSi10Mg alloy formed by SLM

程中， α -Al固溶体优先形核长大，Si原子向固液界面前沿移动，造成剩余液相Si原子浓度上升，在共晶成分点形成Al-Si共晶组织，并呈连续网状结构分布在 α -Al晶界上^[18]。

如图3(a)所示，熔池边界清晰，存在明显的细晶区、柱状晶区、重熔粗晶区和热影响区。细晶区主要位于熔池中心，由细小的等轴晶组成，数量多，且分布均匀致密。粗晶区主要位于熔池边界，这是由于后一道激光扫描时将前一道部分区域重熔所形成的。靠近重熔粗晶区，晶粒沿散热方向往熔池中心生长，形成了垂直于熔池边界且尺寸较大的柱状晶。将图3(a)中熔池边界区域进行高倍观察，可以发现，热影响区在两相邻激光扫描轨迹之间形成，相当于对前一道已经成形的微观组织进行了一次短时高温热处理，导致共晶Si逐渐溶解，断裂和粗化，形成颗粒状结构，尺寸大小介于粗晶区和细晶区之间，如图3(b)所示。

2.2 EBSD分析

图4(a)和(b)所示为SLM成形AlSi10Mg合金

XOY面的IPF图及其局部放大图，其中，蓝色、绿色和红色分别代表与 $[111]$ 轴、 $[101]$ 轴和 $[001]$ 轴平行的晶粒取向，中间其它取向则由标尺中给定的过渡颜色标定。合金由尺寸大致相同的多个熔池所组成，而熔池主要由经过细化的等轴晶和少部分柱状晶组成。各晶粒的尺寸大小、形状和取向等有明显差别，其中偏向于 $\langle 001 \rangle$ 方向生长的晶粒与激光扫描轨迹在一定程度上重合。

由图4(c)可知，晶粒分布范围为 $4\sim 29\ \mu\text{m}$ ，平均晶粒尺寸为 $7.34\ \mu\text{m}$ 。图4(d)为晶粒的长径比值分布情况($\text{aspect ratio}=l/w$ ， l 为晶粒纵向长度， w 为晶粒横向长度)，长径比在 $1\sim 2$ 范围内的晶粒占比超70%，这说明合金以等轴晶为主。根据晶粒取向差图的分析结果，晶粒间的取向差分布范围较广，大角度晶界占比为56.1%，小角度晶界主要出现在熔池边界附近，占比为43.9%，如图4(e)所示。

对图4(a)进行织构分析，得到SLM成形AlSi10Mg合金的ODF(Orientation distribution function)图，如图5所示。观察发现，沉积态合金中存

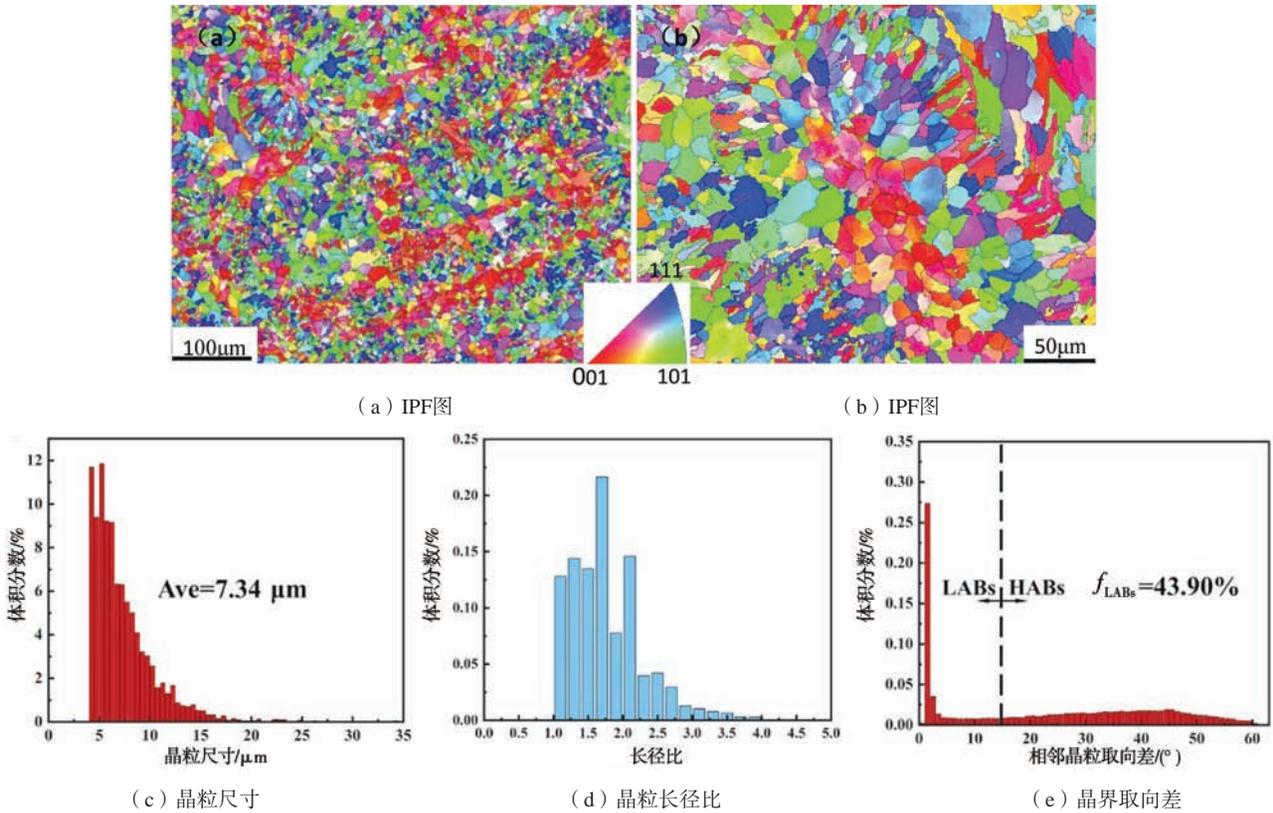


图4 SLM成形AlSi10Mg合金的EBSD分析
Fig. 4 EBSD analyse of AlSi10Mg alloy formed by SLM

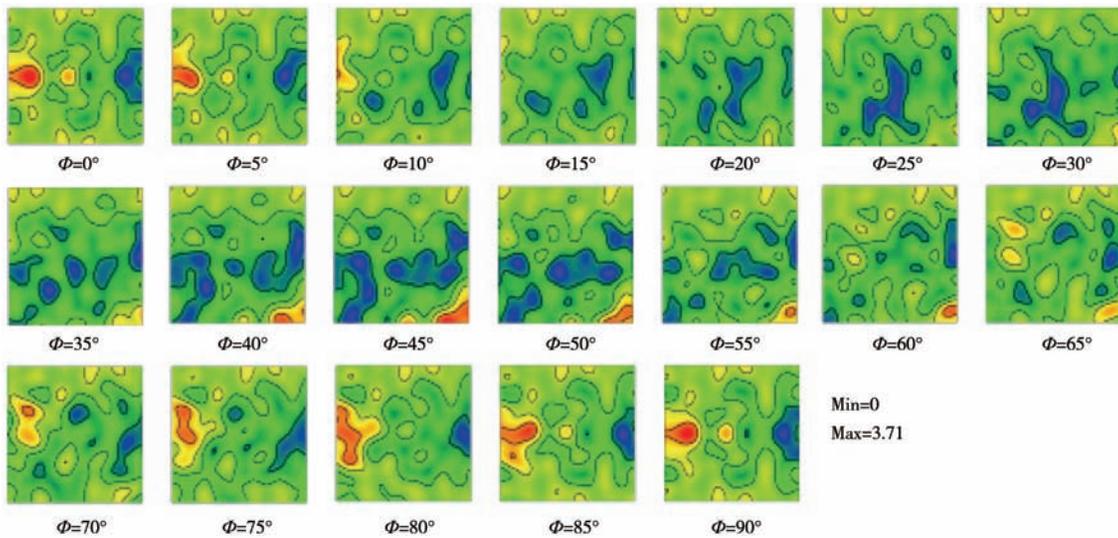


图5 SLM成形AlSi10Mg合金ODF图
Fig. 5 ODF diagram of AlSi10Mg alloy formed by SLM

在{011}<211>黄铜织构，为典型的铸造织构，最大织构强度为3.71。

2.3 力学性能测试

SLM成形AlSi10Mg合金的力学拉伸测试结果、

应力-应变曲线和断口形貌如图6所示。合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别达到了465 MPa、320 MPa和8.4%，与其他同类型SLM成形AlSi10Mg合金相比，力学拉伸测试性能基本一致^[14, 18]，但却远高于砂型铸造AlSi10Mg合金的182 MPa、149 MPa和4%^[19]。在快速

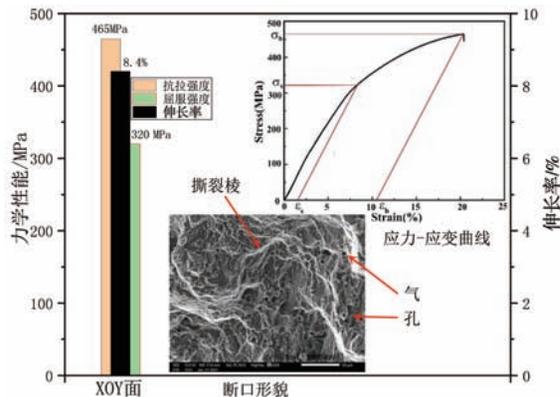


图6 SLM成形AlSi10Mg合金力学性能及断口形貌

Fig. 6 Mechanical properties, stress-strain curve and fracture porphology of AlSi10Mg alloy formed by SLM

凝固机制的作用下，作为典型的急冷铸态组织，细晶强化和固溶强化在一定程度上提升了合金的强度。试

样断口整体趋于脆性断裂，但存在一些大小不均的韧窝和一定数量的撕裂棱，同时还可以观察到少量残留气孔，这在一定程度上也将影响到合金的最终力学性能。

3 结论

(1) SLM成形AlSi10Mg合金主要由 α -Al基体和Al-Si共晶组织所组成，沉积面呈条状熔敷结构，纵截面则是鱼鳞状熔池堆积结构。沉积态合金以等轴细晶为主，存在 $\{011\}<211>$ 黄铜织构，其最大织构强度达3.71。

(2) SLM成形AlSi10Mg合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别达到465 MPa、320 MPa和8.4%，远高于传统铸造AlSi10Mg合金。但后续还需进一步优化SLM成形工艺参数，以减少凝固气孔等缺陷。

参考文献:

- [1] 董鹏, 李忠华, 严振宇, 等. 铝合金激光选区熔化成形技术研究现状 [J]. 应用激光, 2015, 35 (5): 607-611.
- [2] 刘杰, 孙令真, 李映, 等. 3D打印技术的发展及应用 [J]. 现代制造技术与装备, 2019 (3): 109-111.
- [3] LI V C F, KUANG X, HAMEL C M, et al. Cellulose nanocrystals support material for 3D printing complexly shaped structures via multi-materials-multi-methods printing [J]. Additive Manufacturing, 2019, 28: 14-22.
- [4] ALI H, GHADBEIGI H, MUMTAZ K. Effect of scanning strategies on residual stress and mechanical properties of Selective Laser Melted Ti6Al4V [J]. Materials Science and Engineering A, 2018, 712: 175-187.
- [5] 李吉帅, 戚文军, 李亚江, 等. 选区激光熔化工艺参数对Ti-6Al-4成形质量的影响 [J]. 材料导报, 2017 (10): 69-73.
- [6] TROSCHE T, JOHANNES STRÖßNER, RAINER VÖLKL, et al. Microstructure and mechanical properties of selective laser melted Inconel 718 compared to forging and casting [J]. Materials Letters, 2016, 164: 428-431.
- [7] 丁雨田, 王浩, 许佳玉, 等. 去应力退火SLM成形Inconel 738合金组织和性能演变 [J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49 (12): 4311-4320.
- [8] KAZEMI Z, SOLEIMANI M, ROKHGIREH H, et al. Melting pool simulation of 316L samples manufactured by selective laser melting method, comparison with experimental results [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2022, 176: 107538.
- [9] YU G, GU D, DAI D, et al. Influence of processing parameters on laser penetration depth and melting/re-melting densification during selective laser melting of aluminum alloy [J]. Applied Physics A, 2016, 122 (10): 1-12.
- [10] ZHUO L, WANG Z, ZHANG H, et al. Effect of post-process heat treatment on microstructure and properties of selective laser melted AlSi10Mg alloy [J]. Materials Letters, 2018, 234: 196-200.
- [11] WANG X J, ZHANG L C, FANG M H, et al. The effect of atmosphere on the structure and properties of a selective laser melted Al-12Si alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2014, 597: 370-375.
- [12] UDDIN S Z, MURR L E, TERRAZAS C A, et al. Processing and characterization of crack-free aluminum 6061 using high-temperature heating in laser powder bed fusion additive manufacturing [J]. Additive Manufacturing, 2018, 22: 405-415.
- [13] CHEN Z, WEI Z, WEI P, et al. Experimental research on selective laser melting AlSi10Mg alloys: process, densification and performance [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017, 26 (12): 5897-5905.
- [14] 张文奇. AlSi10Mg合金粉末的选区激光熔化成形工艺及性能研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [15] 王小军. Al-Si合金的选择性激光熔化工艺参数与性能研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2014.

- [16] WEI P, CHEN Z, ZHANG S, et al. Effect of T6 heat treatment on the surface tribological and corrosion properties of AlSi10Mg samples produced by selective laser melting [J]. *Materials Characterization*, 2021, 171: 110769.
- [17] 杨孝梅, 蹇海根, 张唯, 等. 选区激光熔化AlSi10Mg粉末性能研究 [J]. *新技术新工艺*, 2021 (7): 57-63
- [18] 袁广辰, 卢云, 郑学儒. T6热处理对选择性激光熔化AlSi10Mg合金组织和力学性能的影响 [J]. *热加工工艺*, 2021, 50 (10): 151-156.
- [19] 黄伯云, 李成功, 石力开, 等. *中国材料工程大典* [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.

Study on Microstructure and Mechanical Properties of AlSi10Mg Alloy Formed by SLM

FANG Wu¹, HE Zhen-bo², ZHANG Yi³, GUO Feng-bin², LIU Yi¹, YANG Xiao-mei¹, JIAN Hai-gen^{1, 2, 3}

(1. College of Materials and Advanced Manufacturing, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, Hunan, China; 2. HangQiao New Material Technology Co., Ltd., Binzhou 256600, Shandong, China; 3. OKE CNC Precision Tool Co., Ltd., Zhuzhou 412500, Hunan, China)

Abstract:

In this study, the microstructure and mechanical properties of AlSi10Mg alloy formed by selective laser melting (SLM) were characterized using an optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM), electron backscatter diffraction (EBSD), and mechanical tensile testing. The results show that the alloy consists of an α -Al matrix and Al-Si eutectic structure, with refined equiaxed grains as the dominant microstructural feature, and the average grain size is 7.34 μm . The *XOY* surface and *YOZ* surface of the alloy exhibit distinct microstructure characteristics, and the tensile strength, yield strength and elongation rate reach 465 MPa, 320 MPa and 8.4% respectively, values that are significantly higher than those of the traditional cast AlSi10Mg alloy.

Key words:

selective laser melting; AlSi10Mg alloy; microstructure; mechanical properties