

# 激光选区熔化技术制备 Al-Si-Mg 合金的组织及力学性能研究<sup>①</sup>

刘勇

(宜春职业技术学院, 江西 宜春 336000)

**摘要:** 采用激光选区熔化(SLM)技术制备了高比强度的 Al-Si-Mg 合金,并与铸造 Al-Si-Mg 合金的相组成、微观形貌、元素分布、晶体学特性及力学性能进行了对比。结果表明:SLM 技术制备 Al-Si-Mg 合金的相组成为  $\alpha$ -Al 基体相和共晶 Si 颗粒,由于 Fe、Mg 等元素的固溶强化效应, $\alpha$ -Al 固溶体的衍射峰向低角度偏移;SLM 技术制备 Al-Si-Mg 合金晶粒尺寸约 18.35  $\mu\text{m}$ ,合金内部位错密度  $1.91 \times 10^{15}/\text{m}^2$ ,表面硬度  $(117.8 \pm 4.7)\text{HV}$ ,抗拉强度  $(436 \pm 13)\text{MPa}$ ,延伸率  $(7.98 \pm 0.27)\%$ ,远高于铸造 Al-Si-Mg 合金的相应性能;SLM 技术制备合金的强化机制为细晶强化、固溶强化、位错强化和第二相强化的协同作用,断裂机制为韧性断裂。

**关键词:** 激光选区熔化; 3D 打印; 增材制造; Al-Si-Mg 合金; 硬度; 抗拉强度; 强化机制; 固溶强化; 细晶强化; 位错强化

中图分类号: TG146

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.01.031

文章编号: 0253-6099(2025)01-0166-05

## Microstructure and Mechanical Properties of Al-Si-Mg Alloy Prepared by Selective Laser Melting

LIU Yong

(Yichun Vocational Technical College, Yichun 336000, Jiangxi, China)

**Abstract:** A high-strength Al-Si-Mg alloy was prepared by adopting selective laser melting (SLM), and then compared to the as-cast Al-Si-Mg alloy in terms of phase composition, microstructure, element distribution, crystallographic characteristics, and mechanical properties. It is found that Al-Si-Mg alloy prepared by SLM consists of  $\alpha$ -Al matrix and eutectic Si particles, and the diffraction peaks of  $\alpha$ -Al solid solution shift to lower angles due to the solid solution strengthening effect of Fe and Mg elements. The Al-Si-Mg alloy prepared by SLM has grain size approaching 18.35  $\mu\text{m}$ , the dislocation density of  $1.91 \times 10^{15}/\text{m}^2$ , the surface hardness of  $(117.8 \pm 4.7)\text{HV}$ , the tensile strength of  $(436 \pm 13)\text{MPa}$ , and the elongation of  $(7.98 \pm 0.27)\%$ , presenting superior performance than the as-cast Al-Si-Mg alloy. The alloy prepared by SLM technology is under the synergetic effect of fine grain strengthening, solid solution strengthening, dislocation strengthening and second phase strengthening, and the ductile fracture is its main failure mechanism.

**Key words:** selective laser melting (SLM); 3D printing; additive manufacturing; Al-Si-Mg alloy; hardness; tensile strength; strengthening mechanism; solid solution strengthening; fine grain strengthening; dislocation strengthening

激光选区熔化(SLM)技术是一种以激光为热源、金属粉末为原料,将3D模型分解成2D平面逐层叠加、自下而上的材料制备方法<sup>[1-3]</sup>。SLM技术作为一种近净成形增材制造工艺,具有精度高、生产周期短、制造复杂零件能力强等优点,被广泛应用于汽车、冶金、航空航天等领域<sup>[4-6]</sup>。由于输入能量的定向沉积,SLM过程中容易沿沉积方向积累热量,导致合金内部

产生强烈的热应力和裂纹<sup>[7]</sup>,传统高强度、凝固温度范围大的铝合金材料如 Al-Zn、Al-Cu 等,在加工过程中更容易产生裂纹,导致材料失效<sup>[8]</sup>。

Al-Si-Mg合金具有优异的强重比、良好的可焊接性,被广泛应用于汽车和航空航天等领域<sup>[9]</sup>。然而,铸造 Al-Si-Mg合金会产生缩松、气孔等缺陷,严重影响 Al-Si-Mg合金的力学性能,采用 SLM 技术可以避免

① 收稿日期: 2024-09-12

基金项目: 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ2204305)

作者简介: 刘勇(1981—),男,江西宜春人,硕士,副教授,主要研究方向为材料加工工程。E-mail: liuyongycedu@126.com

铸造过程中产生的气孔和缩松等缺陷。已有研究证实,SLM 具有  $10^4 \sim 10^6$  K/s 的高冷却速率,制品组织相对精细,从而具有良好的力学性能<sup>[10-11]</sup>。本文采用 SLM 技术制备了适用于汽车配件的具有高比强度的 Al-Si-Mg 合金,采用 X 射线衍射技术、扫描电子显微镜、背电子衍射技术研究了 Al-Si-Mg 合金的相组成、元素分布和晶体学特性,并对合金力学性能进行了测试和表征。

## 1 实验材料及实验方法

实验材料为 Al-Si-Mg 合金粉末,粒度  $15 \sim 53 \mu\text{m}$ ,其化学成分如表 1 所示。

表 1 Al-Si-Mg 合金粉末化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of Al-Si-Mg alloy powder %

Mg	Si	Ni	Fe	Mn	Ni	Al
0.30	10.50	13.50	0.55	0.45	0.05	余量

进行 SLM 实验前,在氩气保护下对粉末进行烘干处理,氩气纯度 99.99%,烘干温度  $70^\circ\text{C}$ 。SLM 实验用 TS-300A 金增材制造设备主要由 IPG-YLR-500 光纤激光器[波长  $(1070 \pm 10)$  nm,最大功率 500 W]组成。经过一系列前期基础实验,选择 SLM 工艺参数如下:激光功率 350 W,扫描速度 1 500 mm/s,单层厚度 0.04 mm,光斑尺寸 0.1 mm,离焦距离  $-3.5$  mm。

SLM 样品制备后,利用电火花切割技术从样品中心切割出  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$  立方体,进行微观组织表征。根据标准金相试样制备程序对金相试样进行机械研磨和抛光,采用 Keller 试剂(2.5 mL  $\text{HNO}_3$  + 1.5 mL  $\text{HCl}$  + 1.0 mL  $\text{HF}$  + 95 mL 蒸馏水)腐蚀金相试样。采用扫描电镜(SEM)和能谱仪(EDS)观察 Al-Si-Mg 样品的微观结构。采用 X 射线衍射仪(XRD)分析样品相组成。采用场发射扫描电子显微镜(SEM)和电子背向散射衍射仪(EBSD)表征样品晶粒形貌、取向特征以及晶界特征,在 EBSD 表征前,利用精密蚀刻涂布器通过离子束蚀刻标准金相试样。采用显微硬度计测试 Al-Si-Mg 样品的显微硬度,负载 200 g,压痕时间 10 s,保压时间 20 s,每个样品测试 20 次取平均值。拉伸试样按照 ISO 6892-1:2009 标准设计,在万能试验机上进行,加载速率 0.5 mm/min。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 相组成及微观结构

图 1 为 SLM 技术制备 Al-Si-Mg 合金样品的 XRD 图

谱。结果表明,Al-Si-Mg 合金样品的相组成为  $\alpha$ -Al 基体和共晶 Si 相。SLM 技术制备合金  $\alpha$ -Al 基体的最强衍射峰在  $38.32^\circ$  处,而  $\alpha$ -Al 基体的标准衍射峰在  $38.47^\circ$  处(PDF#04-0787),表明 SLM 技术制备 Al-Si-Mg 合金中  $\alpha$ -Al 基体衍射峰发生了偏移现象, $\alpha$ -Al 基体晶格常数发生了变化。这是由于 Al-Si-Mg 合金中存在少量 Fe、Mn 等元素,这些元素固溶在  $\alpha$ -Al 基体中,引发了  $\alpha$ -Al 的晶格畸变,从而导致  $\alpha$ -Al 基体衍射峰向低角度偏移<sup>[12]</sup>。这种偏移现象表明 Fe、Mg 等元素促进了  $\alpha$ -Al 基体的固溶强化作用,提升了  $\alpha$ -Al 基体的强度和硬度。

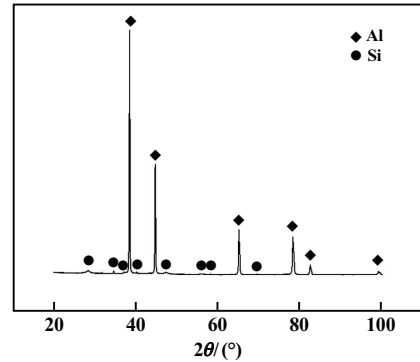


图 1 SLM 技术制备 Al-Si-Mg 合金样品的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD pattern of Al-Si-Mg alloy sample prepared by SLM technology

图 2 为 SLM 技术制备 Al-Si-Mg 合金的微观组织形貌及元素分布。从图中可以观察到基体组织和基体表面析出的第二相颗粒。结合元素面分布图和 XRD 图谱,表明基体组织为  $\alpha$ -Al 固溶体,均匀分布的第二相颗粒为共晶 Si 颗粒,它们在 Al-Si-Mg 合金中起第二相强化作用,可显著提升 Al-Si-Mg 合金的强度和硬度<sup>[13]</sup>。

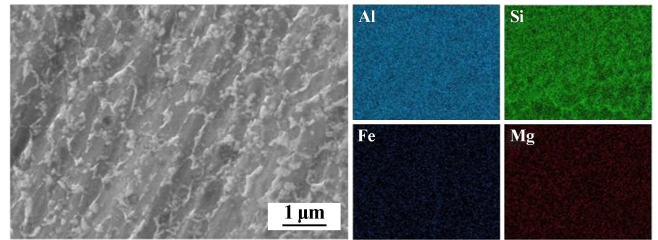


图 2 SLM 技术制备 Al-Si-Mg 合金微观组织形貌及元素分布

Fig. 2 Microstructure and element distribution of Al-Si-Mg alloy prepared by SLM technology

图 3 为铸造和 SLM 技术制备 Al-Si-Mg 合金的截面中部区域 EBSD 分析结果。由图 3 可以看出,SLM 技术制备 Al-Si-Mg 合金具有极为细小的晶粒组织,而铸造 Al-Si-Mg 合金的晶粒组织较为粗大,且 SLM 技术制备 Al-Si-Mg 合金晶粒由柱状晶和等轴晶组成。Channel 5 软件计算结果表明,SLM 技术制备 Al-Si-Mg

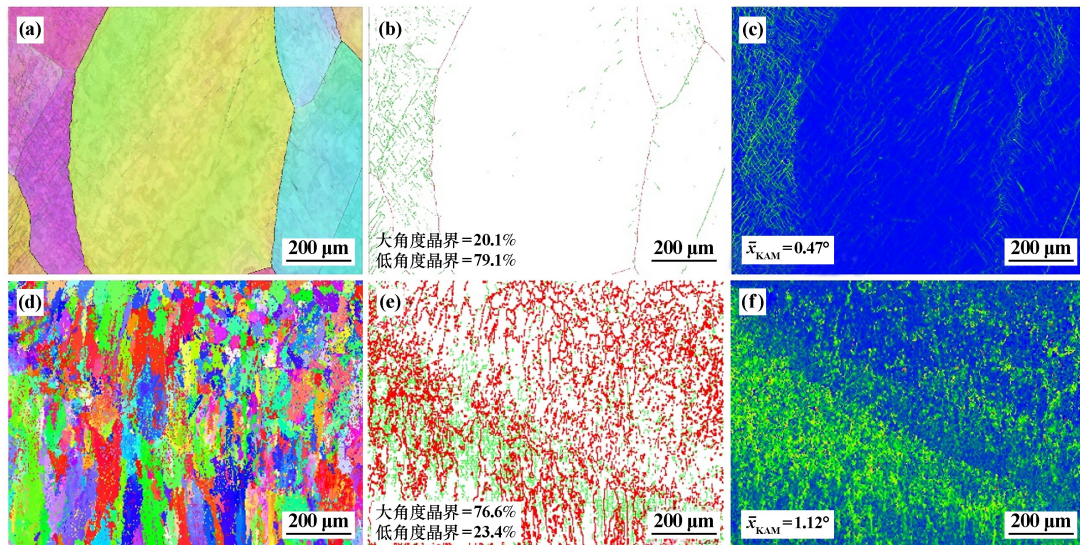
合金平均晶粒尺寸为  $18.35 \mu\text{m}$ , 铸造 Al-Si-Mg 合金平均晶粒尺寸为  $237.55 \mu\text{m}$ 。SLM 技术可显著提升合金的细晶强化效应<sup>[10]</sup>。铸造 Al-Si-Mg 合金低角度晶界占比更高, 这是铸造 Al-Si-Mg 合金晶粒尺寸较大, 晶粒间取向差异较小, 导致高角度晶界占比较小; SLM 技术制备 Al-Si-Mg 合金织构强度较低, 晶粒间取向差异较大, 大角度晶界占比较高<sup>[14]</sup>。经计算可得, 铸造 Al-Si-Mg 合金和 SLM 技术制备 Al-Si-Mg 合金的核平均错误取向 (KAM) 值分别为  $0.47^\circ$  和  $1.12^\circ$ 。KAM 在一定程度上可以反映合金内部的位错密度, KAM 值越

高, 表明合金内部的位错密度越大。

Al-Si-Mg 合金的位错密度 ( $\rho_{\text{GNDs}}$ ) 计算式<sup>[15]</sup>为:

$$\rho_{\text{GNDs}} = \frac{2\bar{x}_{\text{KAM}}}{\mu b} \quad (1)$$

式中:  $\bar{x}_{\text{KAM}}$  为所选区域的 KAM 平均值;  $\mu$  为 EBSD 测试的步长, 这里取  $\mu = 0.5 \mu\text{m}$ ;  $b$  为伯格向量, 为  $2.35 \times 10^{-10}$ 。经计算, 铸造 Al-Si-Mg 合金和 SLM 技术制备 Al-Si-Mg 合金的位错密度分别为  $0.8 \times 10^{15}/\text{m}^2$  和  $1.91 \times 10^{15}/\text{m}^2$ , 表明 SLM 技术制备 Al-Si-Mg 合金的内部存在较高的位错密度, 可显著提升合金强度和韧性<sup>[16]</sup>。



(a) 铸造合金反极图; (b) 铸造合金高、低角度晶界图; (c) 铸造合金 KAM 图;

(d) SLM 技术制备合金反极图; (e) SLM 技术制备合金高、低角度晶界图; (f) SLM 技术制备合金 KAM 图

图3 铸造合金和 SLM 技术制备合金的 EBSD 分析结果

Fig.3 EBSD analysis results of as-cast alloy and alloy prepared by SLM technology

## 2.2 Al-Si-Mg 合金的力学性能分析

表 2 为铸造和 SLM 技术制备 Al-Si-Mg 合金的平均显微硬度, SLM 技术制备 Al-Si-Mg 合金具有较高的显微硬度。

表 2 铸造和 SLM 技术制备 Al-Si-Mg 合金的平均显微硬度  
Table 2 Average microhardness of as-cast alloy and Al-Si-Mg alloy prepared by SLM technology

种类	平均显微硬度 (HV)
SLM 技术制备合金表面	$117.8 \pm 4.7$
SLM 技术制备合金截面	$124.1 \pm 5.9$
铸造合金	$98.4 \pm 3.1$

图 4 为铸造和 SLM 技术制备 Al-Si-Mg 合金的应力应变曲线, 附图为 Al-Si-Mg 合金拉伸样品尺寸。SLM 技术制备 Al-Si-Mg 合金的抗拉强度为  $(436 \pm 13) \text{MPa}$ ,

延伸率为  $(7.98 \pm 0.27)\%$ , 其抗拉强度远高于铸造合金 [抗拉强度  $(248 \pm 24) \text{MPa}$ , 延伸率  $(3.66 \pm 0.17)\%$ ]。SLM 技术制备 Al-Si-Mg 合金具有较高抗拉强度的主要原因如下: ① SLM 加工过程中具有极高的冷却速度, 制备的合金具有细小的晶粒尺寸, Al-Si-Mg 合金内部晶界数量增多, 产生细晶强化效应<sup>[17]</sup>; ② 结合 XRD 和 EDS 分析结果, 有少量 Fe、Mg 元素溶解于  $\alpha\text{-Al}$  基体中, 引发  $\alpha\text{-Al}$  基体产生晶格畸变, 从而产生  $\alpha\text{-Al}$  固溶强化效应; ③ 结合 EBSD 分析结果, Al-Si-Mg 合金内部存在位错, 这些位错在合金受到变形作用时会产生阻碍作用, 从而进一步提升合金强度; ④ 从图 2 中观察到大量网格状 Si 颗粒均匀分布在  $\alpha\text{-Al}$  基体中, 这些 Si 颗粒起到第二相强化作用, 从而显著提升合金强度和抗变形能力<sup>[18]</sup>。综上所述, SLM 制备 Al-Si-Mg 合金具有较高硬度和抗拉强度可归因于细晶强化、固溶强化、位错强化和第二相强化的协同强化作用。

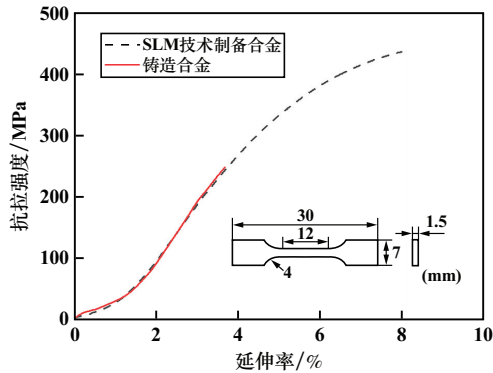
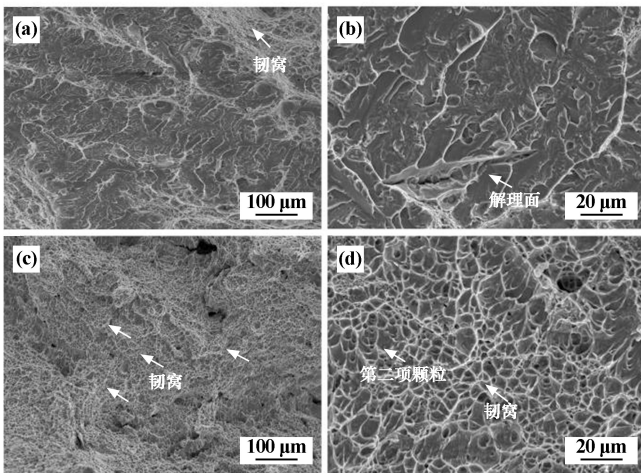


图 4 铸造和 SLM 技术制备 Al-Si-Mg 合金的应力应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves of as-cast alloy and Al-Si-Mg alloy prepared by SLM technology

图 5 为铸造和 SLM 技术制备 Al-Si-Mg 合金常温拉伸后的典型断口形貌。铸造合金断口表面观察到少量韧窝和明显的解理面,这是由于铸造合金的晶粒尺寸较大,粗大的晶粒在拉伸过程中出现沿晶断裂,生成解理面。铸造合金断裂机理为韧性断裂和脆性断裂,且脆性断裂为主导断裂机制。SLM 技术制备 Al-Si-Mg 合金断口形貌中可观察到大量韧窝,且没有明显的解理面。在韧窝内部观察到细小的第二相颗粒,这些第二相颗粒可诱发第二相强化效应,显著提升材料强度。因此,SLM 技术制备 Al-Si-Mg 合金具有较高的抗拉强度和延伸率,其断裂机理为韧性断裂。



(a),(b) 铸造合金; (c),(d) SLM 技术制备合金

图 5 铸造和 SLM 技术制备 Al-Si-Mg 合金常温拉伸后的典型断口形貌

Fig.5 Typical fracture morphology of as-cast alloy and Al-Si-Mg alloy prepared by SLM technology after room-temperature stretch

综上所述,SLM 技术制备 Al-Si-Mg 合金具有较高的硬度、强度和良好的延伸率,显著优于铸造技术制备

的 Al-Si-Mg 合金。

### 3 结论

采用 SLM 技术制备了 Al-Si-Mg 合金,并对合金的相组成、微观形貌、元素分布、晶体学特性、显微硬度及力学性能进行研究,结论如下:

1) 合金的相组成为  $\alpha$ -Al 基体相和共晶 Si 颗粒,且由于 Fe、Mg 等元素的固溶强化效应, $\alpha$ -Al 固溶体衍射峰向低角度偏移。

2) EBSD 结果表明:SLM 制备 Al-Si-Mg 合金晶粒尺寸  $18.35 \mu\text{m}$ ,比铸造合金更细小;SLM 制备 Al-Si-Mg 合金内部位错密度为  $1.91 \times 10^{15}/\text{m}^2$ 。

3) SLM 技术制备 Al-Si-Mg 合金具有良好的硬度及力学性能,其表面硬度 ( $117.8 \pm 4.7$ ) HV,抗拉强度 ( $436 \pm 13$ ) MPa,延伸率 ( $7.98 \pm 0.27$ )%,远高于铸造合金。SLM 技术制备合金的强化机制为细晶强化、固溶强化、位错强化和第二相强化的协同强化作用;断裂机制为韧性断裂。

### 参考文献 (References):

- [1] 陈伟栋,汪冰峰,朱协彬,等. 选区激光熔化成形 316L 不锈钢组织控制研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(3):153-157.  
CHEN Weidong, WANG Bingfeng, ZHU Xiebin, et al. Controlling microstructure of 316L stainless steel by selective laser melting process[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(3):153-157.
- [2] 董定平,蔡小叶,程宗辉,等. 选区激光熔化 ZL116 组织与力学性能研究[J]. 粉末冶金工业, 2023,33(5):43-48.  
DONG Dingping, CAI Xiaoye, CHENG Zonghui, et al. Microstructure and properties of ZL116 alloy prepared by selective laser melting[J]. Powder Metallurgy Industry, 2023,33(5):43-48.
- [3] 楚瑞坤,李雯琪,张熹雯,等. 热处理对选区激光熔化成形  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金组织和力学性能的影响[J]. 粉末冶金工业, 2023,33(5):49-56.  
CHU Ruikun, LI Wenqi, ZHANG Xiwen, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  alloy prepared by selective laser melting[J]. Powder Metallurgy Industry, 2023,33(5):49-56.
- [4] 白晶斐,季节,邵长伟,等. 铝合金桁架晶格结构的模型建立与激光选区熔化成形可行性分析[J]. 锻造与冲压, 2024(7):53-58.  
BAI Jingfei, JI Jie, SHAO Changwei, et al. Modeling of lattice structure of aluminum alloy truss and feasibility analysis of the selective laser melting[J]. Forging & Metalforming, 2024(7):53-58.
- [5] 尹靖,陈文涛,赵桂红. 微合金化对激光增材 7075 铝合金的组织性能研究[J]. 应用激光, 2023,43(11):33-41.  
YIN Jing, CHEN Wentao, ZHAO Guihong. Study on the microstructure and properties of laser additive 7075 aluminum alloy by microalloying[J]. Applied Laser, 2023,43(11):33-41.

- [6] 游俊磊,汪志太,欧阳奇,等. 选区激光熔化 LaB<sub>6</sub>/ZL205A 复合材料组织与性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(9): 1200-1204.  
YOU Junlei, WANG Zhitai, OUYANG Qi, et al. Microstructure and performance of selective laser melted LaB<sub>6</sub>/ZL205A composites[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(9): 1200-1204.
- [7] 师静琳. 选区激光熔化成形高强铝合金及其强化机理研究[D]. 北京:北京有色金属研究总院, 2023.  
SHI Jinglin. Research on strengthening mechanism of high strength aluminum alloy processed by laser selective melting[D]. Beijing: General Research Institute for Nonferrous Metals, 2023.
- [8] 于江. Si/TiB<sub>2</sub> 改性 Al-Mn-Mg-Er-Zr 铝合金 SLM 成形性及力学性能[D]. 镇江:江苏科技大学, 2023.  
YU Jiang. Processability and Mechanical properties of Si/TiB<sub>2</sub> modified Al-Mn-Mg-Er-Zr aluminum alloy for SLM[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2023.
- [9] 宰春风. 激光选区熔化 Cu/TiB<sub>2</sub> 改性 Al-Si-Mg-Zr 铝合金的 SLM 成形性及力学性能研究[D]. 镇江:江苏科技大学, 2023.  
ZAI Chunfeng. SLM formability and mechanical properties of Al-Si-Mg-Zr aluminum alloy modified by laser selective melting of Cu/TiB<sub>2</sub> [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2023.
- [10] THUJS L, KEMPEN K, KRUTH J P, et al. Fine-structured aluminum products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder [J]. Acta Materials, 2023, 61(5): 1809-1819.
- [11] GU D D, SHI X Y, POPRAWA R, et al. Material-structure performance integrated laser-metal additive manufacturing[J]. Science, 2021, 372:932.
- [12] 赵群,赵晋芳,朱爽,等. NbC 添加量对风电部件用 316L 熔覆层组织及耐磨性的影响[J]. 矿冶工程, 2023, 43(2): 130-134.  
ZHAO Qun, ZHAO Jinfang, ZHU Shuang, et al. Effect of NbC content on microstructure and wear resistance of 316L coating for wind power components[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023, 43(2): 130-134.
- [13] ZHANG C C, BAO Y F, ZHU H H, et al. A comparison between laser and TIG welding of selective laser melted AlSi10Mg[J]. Optic and Laser Technology, 2019, 120:105696.
- [14] DONG Z C, LIU Y B, WEN W B, et al. Effect of hatch spacing on melt pool and as-built quality during selective laser melting of stainless steel: Modeling and experimental approaches [J]. Materials, 2018, 12:50.
- [15] 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.
- [16] 刘志威,魏祥,汪力,等. 超高速激光熔覆 Fe-Cr-B 基耐磨涂层工艺优化及性能研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(5): 169-173.  
LIU Zhiwei, WEI Xiang, WANG Li, et al. Process optimization and property investigation for ultra-high-speed laser clad Fe-Cr-B based wear-resistant coating [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023, 43(5): 169-173.
- [17] YANG K V, ROMETSTH P, JARVIS T, et al. Porosity formation mechanisms and fatigue response in Al-Si-Mg alloys made by selective laser melting [J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 712:166-174.
- [18] ZHANG C, ZHU H, HU Z, et al. A comparative study on single-laser and multi-laser selective laser melting AlSi10Mg: Defects, microstructure and mechanical properties [J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 746:416-423.
- 引用本文:刘勇. 激光选区熔化技术制备 Al-Si-Mg 合金的组织及力学性能研究[J]. 矿冶工程, 2025, 45(1): 166-170.  
LIU Yong. Microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mg alloy prepared by selective laser melting [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(1): 166-170.

## 版权声明

本刊已许可国内外文献检索系统或数据库在其官网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。同时矿冶工程杂志官网已实行论文全文免费开放获取。本刊按矿冶工程杂志相关规定向作者一次性支付稿酬及著作权使用费后,本刊及相关合作单位不再向作者支付其他费用。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意本刊上述声明。

矿冶工程杂志编辑部  
2025年2月