热处理对 SLM-AlSi10Mg 组织与力学性能的影响①

王森[1], 李明亮[1], 刘春花[2], 闫国兵[3]
(1.盐城工业职业技术学院 汽车与交通学院, 江苏 盐城 224005; 2.南昌航空大学 材料科学与工程学院, 江西 南昌 330063; 3.江苏星创未智能科技股份有限公司, 江苏 盐城 224005)

摘 要: 研究了 SLM-AlSi10Mg 铝合金母材经不同热处理后的组织与力学性能的差异,并将其与 ZL104 铸造铝合金组织和力学性能进行了对比。结果表明,母材抗拉强度为 545 MPa,塑性为 5.28%;母材经直接时效处理后,组织和力学性能与母材基本接近,为无效热处理;母材经固溶+时效处理后,α-Al 基体转变成粒径约 2 μm 的等轴晶,且第二相呈弥散的球状颗粒相,减弱了网状共晶 Si 对 Al 基体的割裂作用,其抗拉强度为 391 MPa,低于母材却高于 ZL104 的抗拉强度,塑性为 14.09%,明显高于母材和 ZL104 的塑性,为有效热处理。经固溶和时效处理的 SLM-AlSi10Mg 材料力学性能优于目前常用的 ZL104 铸造铝合金,在实际工程应用中可替代 ZL104 铸造铝合金,从而降低铝合金零件制造成本、提高生产效率。

关键词: 热处理; 增材制造; AlSi10Mg; 力学性能; ZL104; 选区激光熔化
中图分类号: TG156 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.01.032
文章编号: 0253-6099(2026)01-0192-05

Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of SLM-AlSi10Mg Alloy

WANG Miao[1], LI Mingliang[1], LIU Chunhua[2], YAN Guobing[3]
(1.*School of Automobile and Transportation, Yancheng Polytechnic College, Yancheng* 224005, *Jiangsu, China*; 2.*School of Materials Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang* 330063, *Jiangxi, China*; 3.*Jiangsu Xingchuangwei Intelligent Technology Co., Ltd., Yancheng* 224005, *Jiangsu, China*)

Abstract: SLM-AlSi10Mg aluminum master alloy is compared to differently heat-treated LM-AlSi10Mg aluminum alloys and ZL104 cast aluminum alloy for investigating the difference in microstructure and mechanical properties. It is shown that the base material has a tensile strength of 545 MPa and plasticity of 5.28%, and also has similar microstructure and mechanical properties after direct aging treatment, indicating this heat treatment is ineffective for the alloy; after the base material is subjected to solution-aging treatment, the α-Al matrix is transformed into equiaxed crystals with a grain size of about 2 μm and the second phase presents as dispersed spherical particles, which weakens the splitting effect of reticular eutectic Si on the Al matrix. Such heat-treated alloy has the tensile strength of 391 MPa, which is lower than that of base mater but higher than that of ZL104, and has the plasticity of 14.09%, which is significantly higher compared to the base material and ZL104, indicating that such heat treatment is effective. After solution-aging treatment, the SLM-AlSi10Mg alloy exhibits better mechanical properties compared to the commonly used ZL104 cast aluminum alloy, thus is considered to replace ZL104 cast aluminum alloy in practical engineering applications, which can not only reduce the manufacturing cost of aluminum alloy parts but also improve production efficiency.

Key words: heat treatment; additive manufacturing; AlSi10Mg; mechanical properties; ZL104; selective laser melting

选区激光熔化(selective laser melting,SLM)是一种基于粉末床熔融(PBF)的激光增材制造技术,它通过高能激光束选择性熔化金属粉末,以逐层熔化和冶金结合的方式,精确控制激光能量进行逐层制造,从而实现高精度复杂三维金属零件的成型[1-2]。

随着医疗器械、汽车制造等领域对高性能、轻量化

① **收稿日期**: 2025-09-02
基金项目: 盐城市应用基础研究计划指令性项目(YCBK2025023);盐城市激光增材制造高性能铝基复材工程技术研究中心项目(302)
作者简介: 王森(1990—),男,江苏盐城人,硕士,讲师,主要研究方向为铝合金成型及热处理。E-mail:947410191@qq.com

且具有复杂内部结构的增材制造零件的需求日益迫切,国内外学者针对 SLM 技术制备的 SLM-AlSi10Mg 合金展开了广泛研究。相较于传统铝合金铸造工艺,SLM 技术无需模具即可直接成型,不仅大幅缩短研发周期、降低制造成本,还能突破铸造工艺在结构设计上的限制,因此,该技术特别适用于制造传统工艺难以实现的特殊零件,如薄壁件、异形流道结构件、航空航天零部件以及生物医用植入体等。同时,SLM 技术通过精确控制激光能量与逐层熔化冶金结合,可获得致密度更高、晶粒更细小均匀的微观组织,使零件具备特殊的性能。

AlSi10Mg 是目前增材制造领域较为常用的一种材料,前期大量实验研究发现,SLM-AlSi10Mg 零件的力学性能为:强度硬度很高,但塑性韧性差,易发生疲劳和脆性断裂失效,使用寿命较短。这是制约激光增材铝合金零件代替传统铸造铝合金零件的主要原因。为此,本文试图通过对 SLM-AlSi10Mg 母材进行热处理改性,实现组织与力学性能的调控,并探究热处理对材料微观组织与力学性能影响的内在机理;同时本文还选取了目前铝合金铸造领域较为常用且成分与 AlSi10Mg 较为接近的 ZL104 铸造铝合金作为参照材料,目的是探讨 SLM-AlSi10Mg 及后热处理这一工艺制备的零件取代目前使用的 ZL104 铸造铝合金零件的可能性,也为今后复杂结构的铝合金零件生产工艺从传统开模铸造转向激光增材制造及后热处理提供新的生产思路和技术参考。

1　实验材料与方法

实验材料 AlSi10Mg 粉末平均粒径 30 μm,其 SEM 图像如图 1 所示,球形度符合 SLM 成型要求。AlSi10Mg 粉末化学成分见表 1。

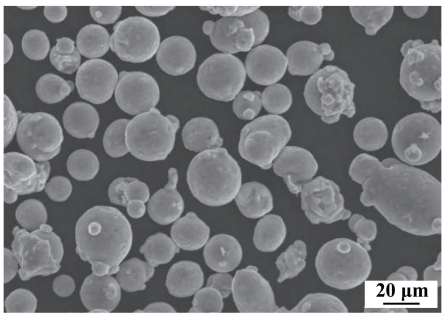


图 1　AlSi10Mg 铝合金粉末 SEM 图像

Fig. 1　SEM image of AlSi10Mg aluminum alloy powder

选区激光熔化实验设备为 iSLM280 型金属 3D 打印机。在制备 SLM-AlSi10Mg 铝合金时,具体参数设置如下:激光功率 88 W,扫描速度 1 400 mm/s,扫描间距 0.16 mm,光斑直径 0.1 mm,层厚 0.04 mm,层间旋转角度 67°。

表 1　AlSi10Mg 粉末化学成分(质量分数)

Table 1　Chemical composition of ALSi10Mg powder　%

Si	Mg	Mn	Cu	Al
9~11	0.2~0.45	≤0.45	≤0.05	余量

采用不同热处理工艺对 SLM-AlSi10Mg 铝合金进行热处理,工艺参数见表 2。

表 2　SLM-AlSi10Mg 铝合金热处理工艺参数

Table 2　Heat treatment process of SLM-AlSi10Mg alloy

试样名称	热处理工艺
SLM-AlSi10Mg(母材)	—
母材直接时效处理	180 ℃×4 h,空冷
母材固溶处理	500 ℃×1 h,水冷
母材固溶+时效处理	500 ℃×1 h,水冷;180 ℃×4 h,空冷
ZL104 铸造铝合金	—

为表征材料组织和力学性能,依次开展金相组织观察、维氏硬度测试、拉伸性能测试及断口形貌分析。将表 1 中不同试样制备成金相试样,首先通过冷镶嵌固定不同试样并裸露出观察面,再对观察面进行磨平和抛光处理,将试样观察面浸泡在 Keller 试剂(95 mL H_2O + 2.5 mL HNO_3 + 1.5 mL HCl + 1.0 mL HF)腐蚀 15~80 s 后取出(因不同试样对 Keller 试剂腐蚀敏感性不同,具体腐蚀时间以看清晶粒为准),随后在金相显微镜下观察并拍摄记录各试样显微组织。将 SLM-AlSi10Mg 试样及其热处理后的试样切割成 10 mm × 10 mm × 3 mm 的金属薄片,用砂纸将表面打磨平整后,对其进行 XRD 物相分析,XRD 扫描角度范围 30°~80°。采用 WT-401MVD 型维氏硬度计测试各合金硬度,载荷 200 g、保压时间 15 s。在 W9W-30 型电子万能试验机上进行拉伸试验,拉伸速率 0.2 mm/s,载荷 10 kN,拉伸试样尺寸如图 2 所示。通过扫描电子显微镜观察拉伸试样断口并拍摄记录形貌,以分析各试样断裂机制。

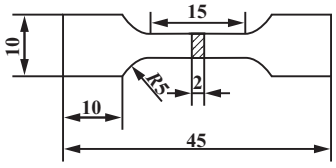


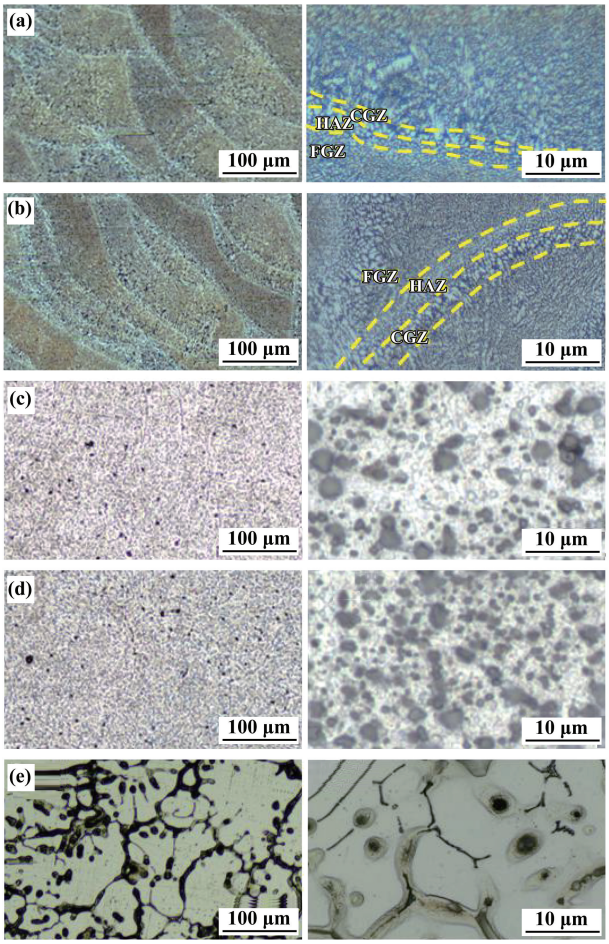
图 2　拉伸试样示意图(单位:mm)

Fig. 2　Schematic drawing of specimen for tensile test

2 实验结果与讨论

2.1 微观组织

不同热处理工艺条件下的 SLM-AlSi10Mg 铝合金与 ZL104 的金相组织如图 3 所示。母材呈现层层堆叠的“鱼鳞状”熔池特征,高倍金相组织显示,其主要由细晶区(FGZ)、粗晶区(CGZ)以及边界热影响区(HAZ)构成,α-Al 晶粒尺寸均在 1 μm 以下,共晶 Si 沿着 α-Al 基体边界生长,呈连续网状结构,可能对 α-Al 基体晶界有一定割裂作用,降低材料塑性。母材直接时效后试样仍保留“鱼鳞状”熔池特征,组织与母材并无实质差异,表明直接时效未显著改变母材组织结构。母材固溶处理后,在固溶温度下母材熔池轮廓完全消失,较大的 α-Al 基体晶粒通过吞并小晶粒加速生长,平均晶粒尺寸约 2 μm,呈等轴超细晶结构,网状共晶 Si 一部分溶解于 α-Al 基体,参与晶粒重组,另一部分未溶的颗粒相逐渐聚集,发生粗化。母材固溶+时效处理后,可见大量微小的球状第二相析出,弥散分布在 α-Al 基体当中。对 SLM-AlSi10Mg 母材及热处理后试样进行了 XRD 分析,结果如图 4 所示。各试样衍射图谱均呈现 α-Al 基体的特征衍射峰,同时在特定角度出现 Si 单质及 Mg_2Si 相的衍射峰,未检测到其他杂相。与母材相比,固溶处理后的试样中 Si 相及 Mg_2Si 相的衍射峰强度略有减弱,表明部分第二相溶解于 α-Al 基体;固溶+时效处理后的试样中,除检测到 Si 相,其 Mg_2Si 相的衍射峰强度略有增强,且峰型更尖锐,说明时效过程中析出了高密度的 Mg_2Si 强化相,这与显微组织观察结果一致。XRD 分析结果证实,热处理未改变 SLM-AlSi10Mg 的主要物相组成,但通过调控第二相的溶解与析出,影响了材料的微观组织,进而影响力学性能。ZL104 铸造铝合金组织呈现典型的铸造树枝晶结构特征,该组织主要由 α-Al 基体、共晶硅、初晶硅及 α-Fe 相共同构成。



(a) 母材;(b) 母材直接时效处理;(c) 母材固溶处理;(d) 母材固溶+时效处理;(e) ZL104 铸造铝合金

图 3 试样金相组织

Fig. 3 Metallographic structure of samples

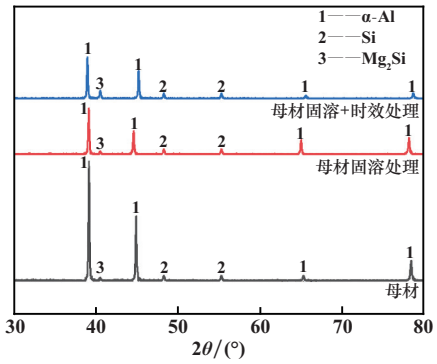


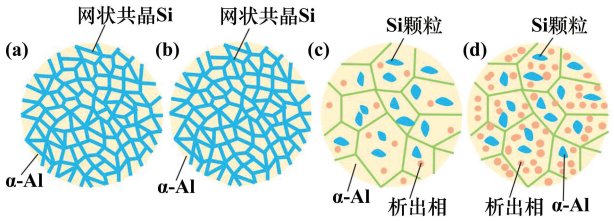
图 4 试样 XRD 图谱

Fig. 4 XRD patterns of samples

有研究证实,Gibbs-Thompson 效应会使 SLM-AlSi10Mg 铝合金中网状共晶 Si 在固溶处理过程中发生溶解、断裂和逐渐球化,并促使 α-Al 基体晶粒进一步生长[3]。为清晰表达母材在不同热处理前后金相组织变化特征,本文绘制了显微组织变化示意图,见图 5。母材和母材经直接时效处理后的组织差异不明显;固溶处理后,α-Al 晶粒显著增大,且网状共晶 Si 组织发生了溶解或聚集球化,这是由于共晶 Si 表面内压促使曲率半径较小、自由能高的区域优先扩散,进而导致网状结构溶解断裂与聚集球化[3];母材经固溶+时效处理后,组织结构与固溶处理态存在显著差异,Si 颗粒周围的析出相明显增多。

2.2 维氏硬度

不同热处理工艺参数下的铝合金维氏硬度测试结果见表 3。母材直接时效处理后试样硬度略有下降;母材固溶处理后平均硬度骤降;母材经固溶+时效处理后试样硬度比固溶前有所提高;ZL104 平均硬度为 81.62HV。



(a) 母材;(b) 母材直接时效处理;
(c) 母材固溶处理;(d) 母材固溶+时效处理

图 5　不同试样组织变化示意图

Fig. 5　Difference in structures of samples

表 3　不同试样维氏硬度

Table 3　Vickers-hardness of samples

试样名称	平均维氏硬度(HV)
母材	145.46
母材直接时效处理	136.47
母材固溶处理	67.02
母材固溶+时效处理	92.55
ZL104 铸造铝合金	81.62

2.3　拉伸性能

图 6 为各试样应力-应变曲线,对应的力学性能指标见表 4。母材试样抗拉强度最高(545 MPa),但延伸率仅 5.28%,塑性欠佳,这是由于网状共晶 Si 一方面通过阻碍晶界变化和位错运动提升了硬度与强度,另一方面网状共晶 Si 割裂 α-Al 基体晶界导致母材脆性增加。母材直接时效处理后,试样抗拉强度降至 411 MPa,延伸率 2.94%。母材经固溶处理后,试样抗拉强度大幅降至 249 MPa,延伸率却升高为 12.21%,这归因于 α-Al 基体不规则晶粒转变为塑性较好的等轴晶,且网状共晶 Si 一部分溶解到 α-Al 基体中,另一部分聚集并长大形成球状 Si 颗粒相,从而减弱了网状共晶 Si 对 Al 基体的割裂作用,对材料塑性的提升有积极作用,但也使得抗拉强度和硬度略有下降。母材经固溶+时效处理后,试样具备了较好的综合力学性能,抗拉强度增至 391 MPa,延伸率达到 16.28%,抗拉强度及塑性均优于 ZL104(抗拉强度 274 MPa,延伸率 9.84%)。母材经固溶+时效处理后,其塑性的提升主要源于 α-Al 基体固溶后转变成等轴超细晶,第二相全部球化呈弥散细小颗粒相分布于 Al 基体中,减弱了网状共晶 Si 对 Al 基体的割裂作用;其抗拉强度的提升源于母材固溶+时效处理后促使 Al 基体析出了主要成分为 Mg_2Si 的针状 β″、β′相及圆形的 β 相,这些析出相通过阻碍位错运动提升材料的抗拉强度和硬度[4-5]。

综上所述,固溶处理后 α-Al 晶粒等轴化,共晶 Si 溶解和球化,以及时效处理后析出相弥散强化,这些结果共同提高了母材经固溶+时效处理后的强度与塑性。

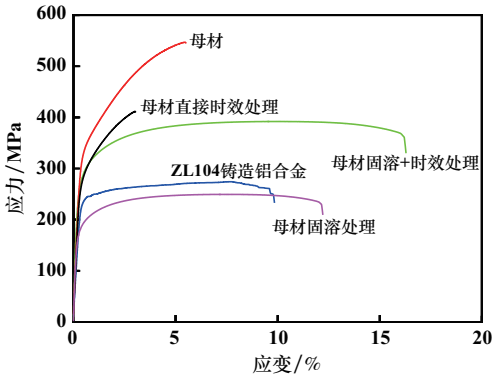


图 6　不同试样的应力-应变曲线

Fig. 6　Stress-strain curves of different samples

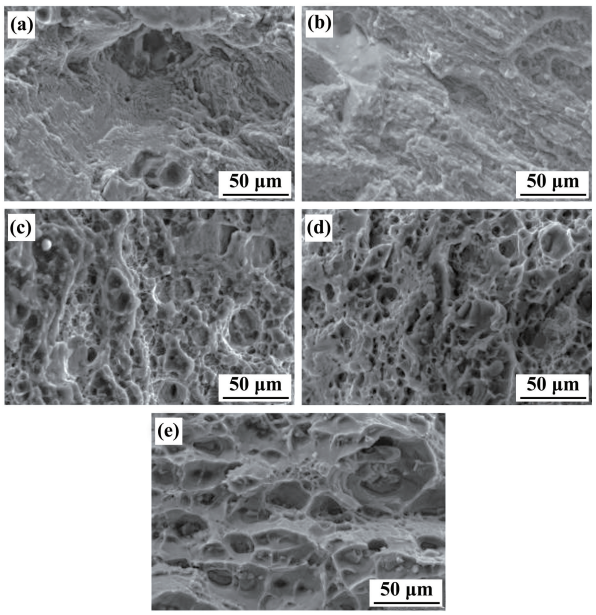
表 4　不同试样的拉伸力学性能指标

Table 4　Tensile properties of different samples

试样名称	抗拉强度/MPa	延伸率/%
母材	545	5.28
母材直接时效处理	411	2.94
母材固溶处理	249	12.21
母材固溶+时效处理	391	16.28
ZL104 铸造铝合金	274	9.84

2.4　断口形貌

材料的强韧化表现与断口形貌紧密相关。不同试样断口形貌见图 7。母材和母材直接时效处理后的拉伸试样断口形貌差异不大,断口均较为平整,几乎没有撕裂棱和韧窝,属于典型的脆性断口。固溶处理和固



(a) 母材;(b) 母材直接时效处理;(c) 母材固溶处理;
(d) 母材固溶+时效处理;(e) ZL104 铸造铝合金

图 7　不同试样断口形貌

Fig. 7　Fracture morphology of samples

溶+时效处理后的试样断口有大量密集的微小韧窝，且韧窝口有明显的撕裂棱，属于典型的塑性断口。固溶+时效处理后试样断口的韧窝更深且更圆润，表明在断裂前，发生了充分的塑性变形。韧窝形成机制与微孔形核、长大及聚集相关，材料内部的缺陷及第二相颗粒等位置因应力集中形成微孔，在外力作用下逐渐聚集并相互连接，最终在断口表面形成韧窝[6-7]。ZL104的断口呈现不规则且分布不均匀的大尺寸韧窝，撕裂棱较浅，呈现沿晶断裂特征，属于塑性和脆性并存的混合型断口。

综上所述，SLM-AlSi10Mg经固溶+时效处理后的断口形貌间接表明SLM工艺制备的AlSi10Mg合金比ZL104铸造铝合金的塑性更好、延伸率更高，这与应力-应变曲线结果吻合。

3 结论

1）SLM-AlSi10Mg母材和母材经直接时效的组织基本一致，为极细的α-Al基体晶粒和网状共晶Si构成的混合组织，网状共晶Si对α-Al基体晶界有割裂作用，脆性大，但硬度强度高，因此SLM-AlSi10Mg母材直接时效为无效热处理。

2）母材经固溶处理后，组织以Si颗粒和等轴超细晶α-Al基体为主，伴随少量析出相；进一步时效后弥散析出相的量显著增加。固溶处理能促使α-Al晶粒生长成等轴晶，且网状Si颗粒转变为球状的颗粒相，对提高材料塑性有益，但会适当降低材料强度和硬度；经进一步时效后析出相增加，固溶和时效强化的综合作用提高了SLM-AlSi10Mg母材的抗拉强度和硬度。

3）母材与母材经直接时效后断口均呈现脆性断裂特征；母材经固溶处理和固溶+时效处理后，断裂特征为韧性断裂。ZL104铸造铝合金的断口呈现脆性和塑性兼有的混合型断裂特征。

4）母材经固溶+时效处理后试样的组织和综合力学性能更好，全面优于目前铝合金铸造领域常用的ZL104铸造铝合金。对SLM-AlSi10Mg母材进行固溶+时效处理，所得材料具有取代ZL104铸造铝合金的工程应用价值。

参考文献(References)：

[1] HUANG N, LUO Q, BARTLES D L, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of AlSi10Mg fabricated using laser powder bed fusion[J]. Materials Science and Engineering A, 2024,895:146228.

[2] KARUNANITHI S P, ARASAPPAN R K, NALLATHAMBI S S. An overview on additive manufacturing of duplex stainless steels: Microstructure, mechanical properties, corrosion resistance, postheat treatment, and future perspectives[J]. Steel Research International, 2024,95(12):2400463.

[3] 李卫超，邹勇志，曾建民. 固溶温度和时间对ZL114A合金组织的影响[J]. 机械工程材料, 2008,32(11):25-27.
LI Weichao, ZOU Yongzhi, ZENG Jianmin. Influence of solution temperature and time on microstructure of ZL114A alloy[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2008,32(11):25-27.

[4] 刘强，王淼，张亚雄，等. 多道搭接FSP6061铝合金的组织与性能[J]. 中国有色金属学报, 2015,25(3):602-610.
LIU Qiang, WANG Miao, ZHANG Yaxiong, et al. Microstructure and properties of 6061 aluminium alloy processed by multi-pass friction stir process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015,25(3):602-610.

[5] 唐鹏钧，闫泰起，陈冰清，等. 固溶处理对激光选区熔化AlSi10Mg合金显微组织、拉伸性能和残余应力的影响[J]. 材料工程, 2024,52(2):155-163.
TANG Pengjun, YAN Taiqi, CHEN Bingqing, et al. Effect of solid solution treatment on microstructure, tensile properties and residual stress of selective laser melted AlSi10Mg alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2024,52(2):155-163.

[6] 李智勇，张珞，陈锐敏，等. 热处理对选区激光熔化AlSi10Mg合金组织与性能的影响[J]. 热加工工艺, 2025,54(13):31-35.
LI Zhiyong, ZHANG Luo, CHEN Ruimin, et al. Effects of heat treatment on microstructure and properties of selective laser melting AlSi10Mg alloy[J]. Hot Working Technology, 2025,54(13):31-35.

[7] WANG H Z, GAO P, YUAN Y, et al. Effects of heat treatment on mechanical properties of selective laser melted AlSi10Mg alloy[J]. JOM, 2025,77(3):1148-1160.

引用本文：王淼，李明亮，刘春花，等. 热处理对SLM-AlSi10Mg组织与力学性能的影响[J]. 矿冶工程, 2026,46(1):192-196.
WANG Miao, LI Mingliang, LIU Chunhua, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of SLM-AlSi10Mg alloy[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(1):192-196.