

• 工艺技术 Technology •
DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2026.5152

选区激光熔化制备 20%SiC 颗粒增强 铝基复合材料的工艺优化及性能研究

吴怡星¹, 刘永勤¹, 高志明², 康祥晋¹, 郭茹萍¹, 职希玉¹, 朱满¹

(1. 西安工业大学材料与化工学院, 陕西西安 710016 2. 西安科技大学机械工程学院, 陕西西安 710054)

摘要: 选区激光熔化(selective laser melting, SLM)技术成形的零件不仅有快速凝固的组织特征,同时还可以制备形状复杂的结构件,因此 SLM 技术在航空航天、汽车及医疗等领域有着广泛的应用。本文利用 SLM 技术制备了 20% SiC 颗粒增强 AlSi10Mg 的复合材料,研究不同扫描速度和激光功率对成形件的显微组织和力学性能的影响规律。结果表明,成形零件的硬度随着不同的激光功率在 160~175 HV 之间变化;当扫描速率为 1 000 mm/s 时,随着激光功率的升高,材料的硬度逐渐升高,在 410 W 时达到峰值 172.3 HV;而当扫描速率为 1 200 mm/s 时,随着激光功率的升高,硬度变化幅度较大,在 390 W 时硬度最大达到 171.2 HV。同时,在激光功率 390 W,扫描速度 1 200 mm/s 时,试样内部的裂纹和孔洞较少, SiC 颗粒在铝基体中分布均匀,与铝基体有理想熔合界面。

关键词: 选区激光熔化; SiC_p 颗粒; Al 基复合材料; 维氏硬度

中图分类号: TG665

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2026)02-0182-07

Study on the Process Optimization and Properties of 20 vol.% SiC Particle Reinforced Aluminium Matrix Composites Prepared by Selective Laser Melting

WU Yixing¹, LIU Yongqin¹, GAO Zhiming², KANG Xiangjin¹, GUO Ruping¹, ZHI Xiyu¹, ZHU Man¹

(1. School of Materials and Chemical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710016, China; 2. College of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Parts formed via selective laser melting (SLM) technology exhibit rapid solidification characteristics while enabling the fabrication of complex geometries, making it widely applicable in the aerospace, automotive, and medical fields. Thus, a 20 vol.% SiC particle-reinforced AlSi10Mg composite was developed via SLM to investigate how varying scanning speeds and laser powers affect microstructure and mechanical properties. The results indicate that the hardness fluctuates between 160~175 HV depending on the laser power. At the 1 000 mm/s scanning speed, the hardness of the material gradually increases, reaching a peak of 172.3 HV at 410 W. However, at the 1 200 mm/s scanning speed, the hardness significantly varies, reaching a maximum of 171.2 HV at 390 W. Notably, the samples processed at 390 W and 1 200 mm/s present fewer internal cracks and pores, with SiC particles uniformly distributed within the aluminium matrix and forming an ideal fusion interface.

Key words: selective laser melting; SiC_p particles; Al-based composites; Vickers hardness

轻质高强度金属基复合材料在现代航空航天、汽车制造及精密仪器领域具有不可替代的战略地位^[1-2],其中碳化硅(SiC)颗粒增强铝基复合材料因其优异的比强度、高耐磨性和良好的尺寸稳定性成为

最具发展前景的材料体系之一^[3-4]。而 AlSi10Mg 合金具有密度低、比强度高及凝固开裂倾向低等优点成为铝合金的更优选择^[5]。

激光选区熔化技术(selective laser melting, SLM)

收稿日期: 2025-07-17

基金项目: 陕西省重点研发计划(2025CY-YBXM-021)

作者简介: 吴怡星, 2001 年生, 硕士生。研究方向为激光增材制造铝基复合材料的制备技术及缺陷形成机制。

Email: 15709271855@163.com

通信作者: 刘永勤, 1982 年生, 副教授。研究方向为金属凝固和激光增材制造理论及技术。Email: yq_liu760@126.com

引用格式: 吴怡星, 刘永勤, 高志明, 康祥晋, 郭茹萍, 职希玉, 朱满. 选区激光熔化制备 20%SiC 颗粒增强铝基复合材料的工艺优化及性能研究[J]. 铸造技术, 2026, 47(2): 182-188.

WU Y X, LIU Y Q, GAO Z M, KANG X J, GUO R P, ZHI X Y, ZHU M. Study on the process optimization and properties of 20 vol.% SiC particle reinforced aluminium matrix composites prepared by selective laser melting[J]. Foundry Technology, 2026, 47 (2): 182-188.

是一种先进的金属增材制造技术^[6]。SLM 使用高功率密度的激光束作为热源,选择性地完全熔化预先铺好的金属粉末层,使其熔融凝固并逐层堆积,制造出致密且具有良好机械性能的复杂三维金属零件^[7]。Simchi 等^[8]制备了不同体积分数(5%、10%、15%、20%)的 SiC 增强铝基复合材料,研究了激光工艺窗口对不同复合材料成形的影响规律,结果表明 SiC 颗粒降低了铝基体的凝固速度,随着 SiC 颗粒的增多,熔体的稳定性越高,成形件表面越光滑,致密性越高。Ghoshl 等^[9-10]针对 SiC 体积分数与颗粒粒径增强铝基复合材料的裂纹密度与磨损性能进行研究。结果发现,由于激光选区熔化过程中热应力与收缩应力的作用,使得成形件容易产生裂纹,且当 SiC 体积分数超过 15%时,有明显增加趋势^[11-12]。而复合材料的磨损率在一定体积分数的 SiC 颗粒条件下,随颗粒尺寸的减小而增大,耐磨性能随 SiC 含量的增加而升高,但在 SiC 含量超过 20%后不再发生变化^[13-15]。目前针对高体积分数 SiC_p(>10%)增强铝基复合材料的 SLM 成形结果相对较少,尤其是 SiC 颗粒的体积分数为 20%的工艺—组织—性能关系尚不明确。因此,确定较为准确的成形工艺范围和对性能改变的研究很有必要。

本文对 SLM 成形 20%SiC 颗粒增强 AlSi10Mg 复合材料的成形工艺展开研究。通过多组工艺参数的调试与优化,确定适用于该复合材料 SLM 成形的最佳工艺参数。在此基础上,对不同工艺参数制备的试样进行硬度测试与显微组织表征分析,深入探究 SLM 工艺参数对复合材料成形件性能的影响规律。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

本实验采用西安铂力特公司购买的呈近球形、平均粒径约为 30 μm 的 AlSi10Mg 粉末及等效粒径约为 7 μm 的 SiC 颗粒作为研究对象。所采用的 AlSi10Mg 粉末微量元素含量如表 1 所示。

表1 AlSi10Mg化学成分
Tab.1 Chemical composition of AlSi10Mg
(mass fraction/%)

Si	Mg	Mn	Cu	Fe	Ni	Zn	Sn	Al
9.2	0.48	0.21	0.26	0.84	0.25	0.17	0.11	Bal.

1.2 实验方法及参数设计

本实验采用的原料为 AlSi10Mg 粉末(15~53 μm)与 SiC 粉末(7 μm),将原始粉末按 80:20 的体积比进行称量配制,将其放入不锈钢罐中进行抽真空处理,通过机械球磨制备 SiC_p/AlSi10Mg 粉末。转速设置为 140 r/min 并配合直径 3~5 mm 与 8~10 mm 的小

球^[16-20],按照 2:1 比例混合使用,通过正反转交互进行的方式使原始粉末混合均匀,并保持原有粉末形貌粒度。为保持粉末干燥性,在真空干燥箱 60~80 °C 的条件下烘干处理 10 h。随后在惰性气氛(氩气)保护下,将混合处理好的粉末进行分层铺粉,通过高精度激光束选择性熔化粉末层,逐层累积成形复合材料构件^[21-22]。本文主要探究激光功率、扫描速度、扫描间距以及粉末层厚的影响,如表 2 所示。

表 2 SLM 制备 SiC_p 增强 AlSi10Mg 复合材料参数范围设置
Tab.2 Parameter range setting of SLMed SiC_p enhanced AlSi10Mg composites

Process parameters	Unit	Numerical value
Laser power	W	390~410
Scanning speed	mm/s	1 000~1 200
Scan spacing	mm	0.12
Powder layer thickness	μm	30

2 实验结果及讨论

2.1 金相显微组织分析

图 1 为激光功率 390 W 下不同扫描速度的金相组织。扫描速度为 1 000 mm/s 时(图 1a)可观察到明显的贯穿性热裂纹,其沿晶界呈树枝状扩展,裂纹路径穿过颗粒团聚区域,表明 SiC 颗粒在 SLM 成形过程中引发了局部应力集中与热导率不均,造成热应力集中,导致热裂纹的产生^[23-24]。放大倍数增大至 500 倍可以观察到 SiC 颗粒主要分布于晶界处,起到了异质形核的作用,显著细化了 α-Al 基体晶粒。颗粒呈类球状、界面结合较好,未见明显脱落或反应产物,说明该参数下基体与 SiC 颗粒间存在一定的润湿性。扫描速度提升至 1 200 mm/s 发现,颗粒整体弥散性有所提升,呈现相对均匀的小颗粒分布特征,颗粒链状团聚现象较少,但仍存在部分富集区域;同时,在界面与熔合带附近有非贯穿型微裂纹,裂纹形态较 1 000 mm/s 扫描速度时更短、更少,可能是提高扫描速度后热输入降低导致^[25]。放大至 500 倍(图 1d)发现晶粒尺寸较小,颗粒主要分布于晶界,局部呈线性富集,有强化异质形核的作用,表明高扫描速度提升了冷却速率,抑制了晶粒长大。综上,扫描速度为 1 200 mm/s 时,改善了颗粒的分散性与热裂倾向,有助于获得更有利的组织结构。

图 2 为激光功率 400 W 下不同扫描速度的金相组织,材料整体表现出 SiC 颗粒弥散性一般。图 2a(1 000 mm/s)中可见大量垂直或次垂直方向的宏观热裂纹,裂纹沿晶界扩展,说明当前激光参数下热输入较高,导致冷却速率较慢及热应力积聚严重,是形成贯穿性裂纹的主要原因^[26]。图 2b 中,α-Al 基体

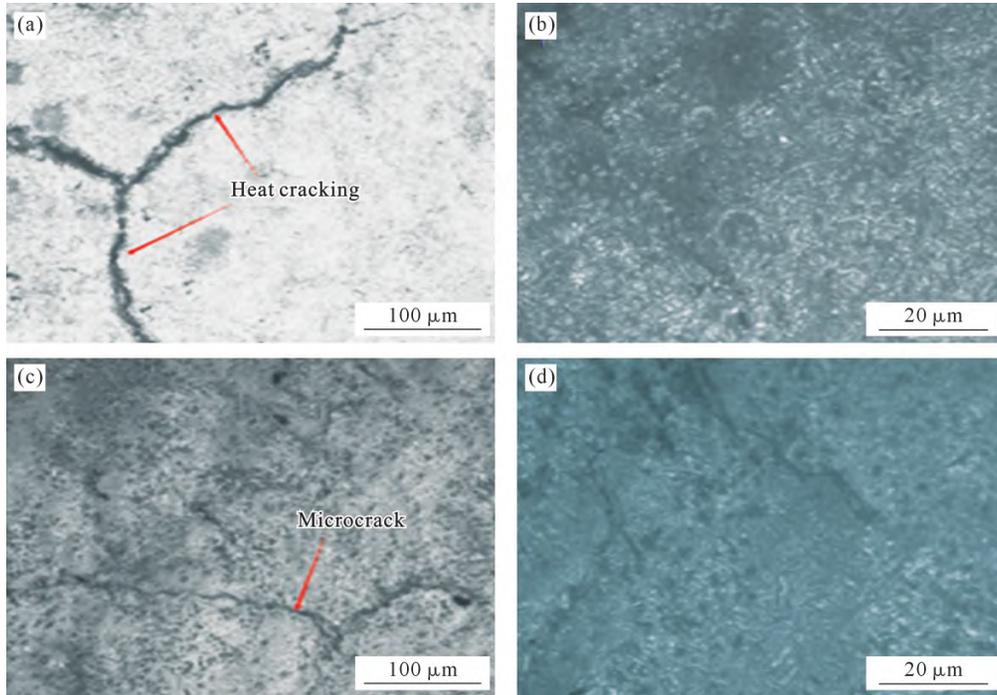


图 1 SLM 成形 SiC_p(20%)/AlSi10Mg 不同工艺参数下的典型金相图:(a) 390 W, 1 000 mm/s; (b) 390 W, 1 000 mm/s; (c) 390 W, 1 200 mm/s; (d) 390 W, 1 200 mm/s

Fig.1 Typical metallography of SLMed SiC_p(20 vol.%)/AlSi10Mg under different process parameters: (a) 390 W, 1 000 mm/s; (b) 390 W, 1 000 mm/s; (c) 390 W, 1 200 mm/s; (d) 390 W, 1 200 mm/s

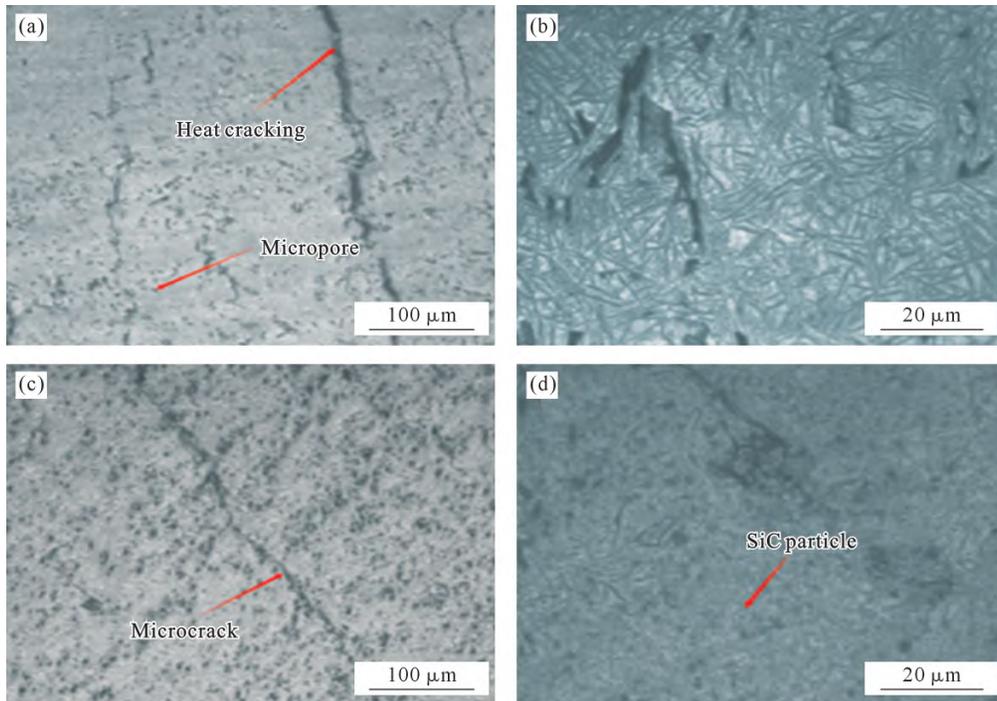


图 2 SLM 成形 SiC_p(20%)/AlSi10Mg 不同工艺参数下的典型金相图:(a) 400 W, 1 000 mm/s; (b) 400 W, 1 000 mm/s; (c) 400 W, 1 200 mm/s; (d) 400 W, 1 200 mm/s

Fig.2 Typical metallography of SLMed SiC_p(20 vol.%)/AlSi10Mg under different process parameters: (a) 400 W, 1 000 mm/s; (b) 400 W, 1 000 mm/s; (c) 400 W, 1 200 mm/s; (d) 400 W, 1 200 mm/s

呈现粗大树枝晶,局部颗粒间夹杂暗带,推测为颗粒团聚导致局部未熔合或残余应力积累区,且树枝晶界清晰,组织粗化明显,进一步表明热输入过高导致凝固时间延长,不利于晶粒细化与组织致密化^[27]。扫描速度提升至 1 200 mm/s 时发现裂纹数目明显减少,主要为非贯穿型微裂纹,推测为冷却速

率提升、热梯度减缓所致。颗粒分布相对更均匀,呈现出较少的链状团聚结构,表明较高扫描速度改善了熔池稳定。放大至 500 倍发现基体组织进一步细化,胞状晶粒尺寸更小,边界清晰,SiC 颗粒呈均匀弥散分布,多数位于晶界,有效发挥异质形核作用,促进晶粒细化,局部区域界面模糊,可能存在元素相

互扩散或形成新相 Al_4C_3 ^[28-29]。可见适当提高扫描速度可显著改善 SLM 成形过程中颗粒分散性与裂纹控制效果,同时提升组织致密性与细化程度。激光功率 400 W 扫描速度 1 200 mm/s 条件下获得的组织结构更为优良,是实现高性能 20%SiC/AlSi10Mg 复合材料的潜在工艺窗口。

图 3 为激光功率 410 W 下不同扫描速度的金相组织。1 000 mm/s 时可以观察到存在明显缺陷,中下部区域呈现出熔池塌陷和大尺寸孔洞,与周边裂纹相互贯通,显示出较高的热输入条件下存在显著的能量过饱和问题。结合图 3b 发现晶粒呈粗大针状的树枝晶结构,晶界处 SiC 颗粒团聚严重,表明局部温度梯度大,冷却速率相对较低,导致晶粒粗

化、颗粒间隙液相分离并引起热裂纹。同时,颗粒之间形成的黑色相界区域,有可能是铝基体元素偏析或生成了 Al_4C_3 。这些组织特征明显不利于材料的致密化与力学性能提升。1 200 mm/s 时(图 3c)可见裂纹数目有所下降,分布不再呈贯穿状,说明较快的扫描速度有效缓解了热应力积聚,提升了熔池稳定性。SiC 颗粒分布更为均匀,整体呈现弥散状态,链状团聚现象显著减轻。图 3d 中晶粒形态趋于细小, SiC 颗粒多数聚集于晶界附近,促进异质形核,形成清晰、规则的细晶组织;同时部分区域晶界模糊,推测可能发生了元素扩散或新相生成的界面反应,进一步提升界面结合强度^[30-31]。综上,激光功率为 410 W 时,提升扫描速度至 1 200 mm/s 显著改善了

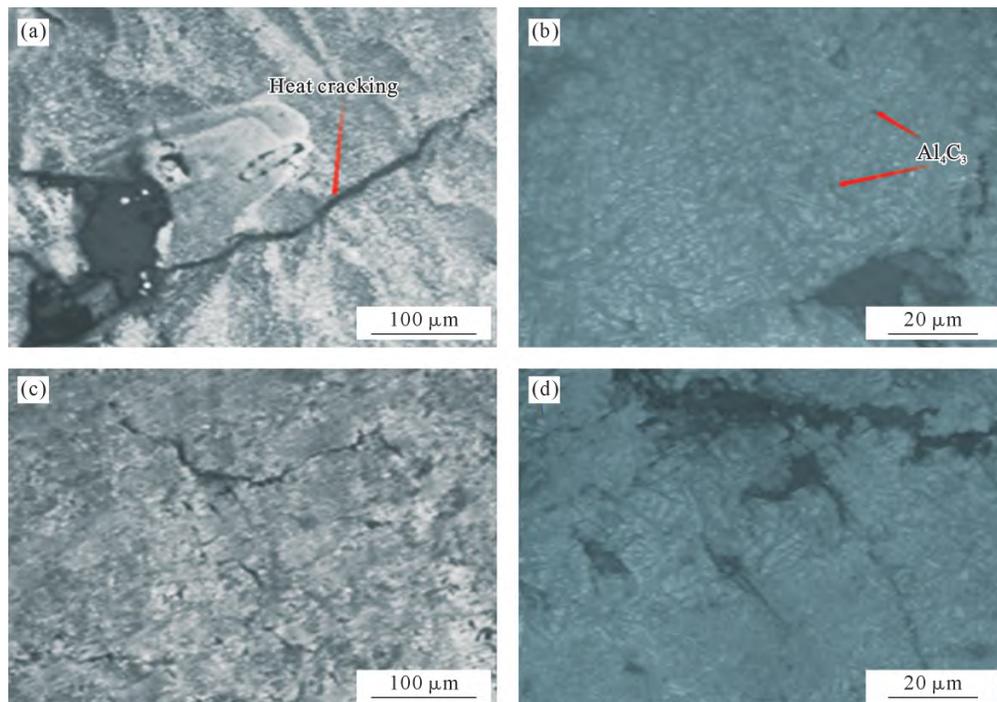


图 3 SLM 成形 SiC_p (20%)/AlSi10Mg 不同工艺参数下的典型金相图:(a) 410 W, 1 000 mm/s; (b) 410 W, 1 000 mm/s; (c) 410 W, 1 200 mm/s; (d) 410 W, 1 200 mm/s

Fig.3 Typical metallography of SLMed SiC_p (20 vol.)/AlSi10Mg under different process parameters: (a) 410 W, 1 000 mm/s; (b) 410 W, 1 000 mm/s; (c) 410 W, 1 200 mm/s; (d) 410 W, 1 200 mm/s

SLM 成形的组织质量,降低了裂纹、孔洞等缺陷的发生,同时细化了晶粒并优化了颗粒分布模式。

2.2 XRD 分析

如图 4 所示,对 20%SiC-AlSi10Mg 进行 XRD 分析检测,从图谱可以看出,所有样品的主要衍射峰均来自 Al、Si、SiC 以及少量 Al_4SiC_3 等相,说明 SLM 过程中并未引入其他杂相,且 SiC 颗粒在高温下保持较好热稳定性,未发生严重分解^[32]。随着激光功率从 390 W 提升至 410 W,扫描速度从 1 000 mm/s 提升至 1 200 mm/s,各衍射峰的强度、宽度和出现的新相也随之发生变化。在激光功率 410 W 扫描速度 1 200 mm/s 时,Al 和 Si 衍射峰强度较高,表明基体

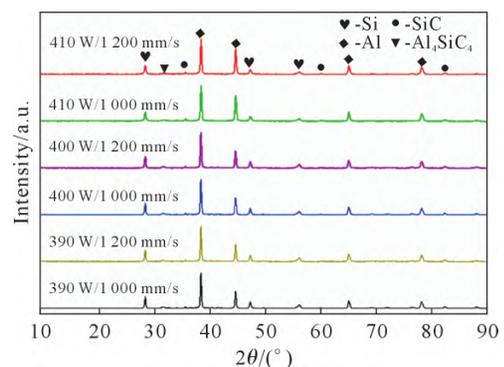


图 4 不同工艺参数下 SLM 成形 SiC_p (20%)/AlSi10Mg 的 XRD 谱
Fig.4 XRD patterns of SLMed SiC_p (20 vol.)/AlSi10Mg under different process parameters

组织更加致密、结晶度较高,晶粒取向更为稳定,同时也出现较明显的 Al_4SiC_4 相峰。这可能由于较高的能量密度与快速冷却共同作用,促进了 Al 与 SiC 之间的反应,生成稳定的界面产物 Al_4SiC_4 ,有助于提高界面结合强度^[33-34]。而在激光功率 390 W 扫描速度 1 200 mm/s 的条件下, Al_4SiC_4 峰几乎未见,表明界面反应程度较弱或存在缺陷。综上,XRD 结果进一步说明了在 SLM 参数优化过程中,适当提高激光功率与扫描速度有助于晶粒细化并促进颗粒与铝基体之间良好的熔合界面反应,从而提升材料的整体性能。

2.3 硬度分析

图 5 为维氏硬度测试图,从图中可以看出 SLM 成形 20%SiC 增强 AlSi10Mg 复合材料在不同激光功率与扫描速度下表现出明显的硬度变化趋势。激光功率与扫描速度都对样品硬度具有显著影响,其中激光功率 390 W 扫描速度 1 200 mm/s 时材料的硬度最高,为 171.2 HV,而激光功率 400 W 扫描速度 1 200 mm/s 时材料硬度最低,仅为 160 HV。其原因可能是 390 W/1 200 mm/s 组合对应较高的扫描速度和较低的激光功率,能量输入适中,有利于形成细小致密的晶粒结构,同时快速凝固过程限制了 Si 元素的粗大化,维持了良好的基体均匀性,且 SiC 颗粒分布更加均匀,从而提升材料的整体硬度。而在 400 W/1 200 mm/s 条件下,虽然激光功率升高带来更强的熔池扰动,但同时可能引发颗粒偏析、烧蚀或 SiC 与铝基体反应生成脆性相 Al_4SiC_4 ,导致材料硬度下降。在相同激光功率下,随着扫描速度从 1 000 mm/s

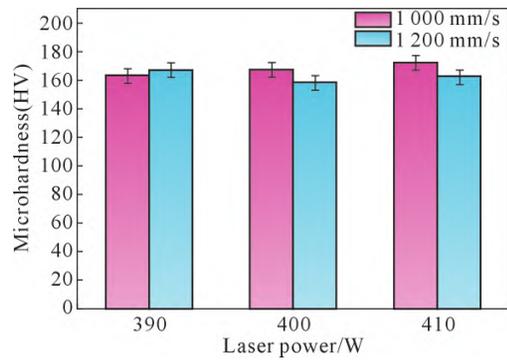


图 5 不同工艺参数对应的硬度
Fig.5 Hardness corresponding to different process parameters

增加至 1 200 mm/s,由于较高的冷却速率导致组织细化,材料硬度总体呈上升趋势;另一方面,快速扫描可减少激光对颗粒的热影响,降低颗粒烧蚀与界面反应程度,使增强效果更明显。总的来看,激光功率 390 W、扫描速度 1 200 mm/s 为最佳参数组合,在兼顾致密度、颗粒分布和晶粒细化的同时,有效避免了过强界面反应带来的负面效应,从而实现了较高的硬度表现。

2.4 断口形貌分析

图 6 为 SLM 成形 20SiC-AlSi10Mg 1 000 倍断口形貌,由于材料脆性过大,未经过拉伸就发生了断裂,故只能对现有的断口进行分析。通过图 6 观察发现大量的孔洞出现在断口组织形貌中,其中孔洞内有 SiC 颗粒。此次断裂是典型的脆性断裂,主要区域全为放射区域,无韧窝出现。通过图 6c 的断口形貌可以明显观察到材料主要在 Al_4SiC_4 相的影响下发

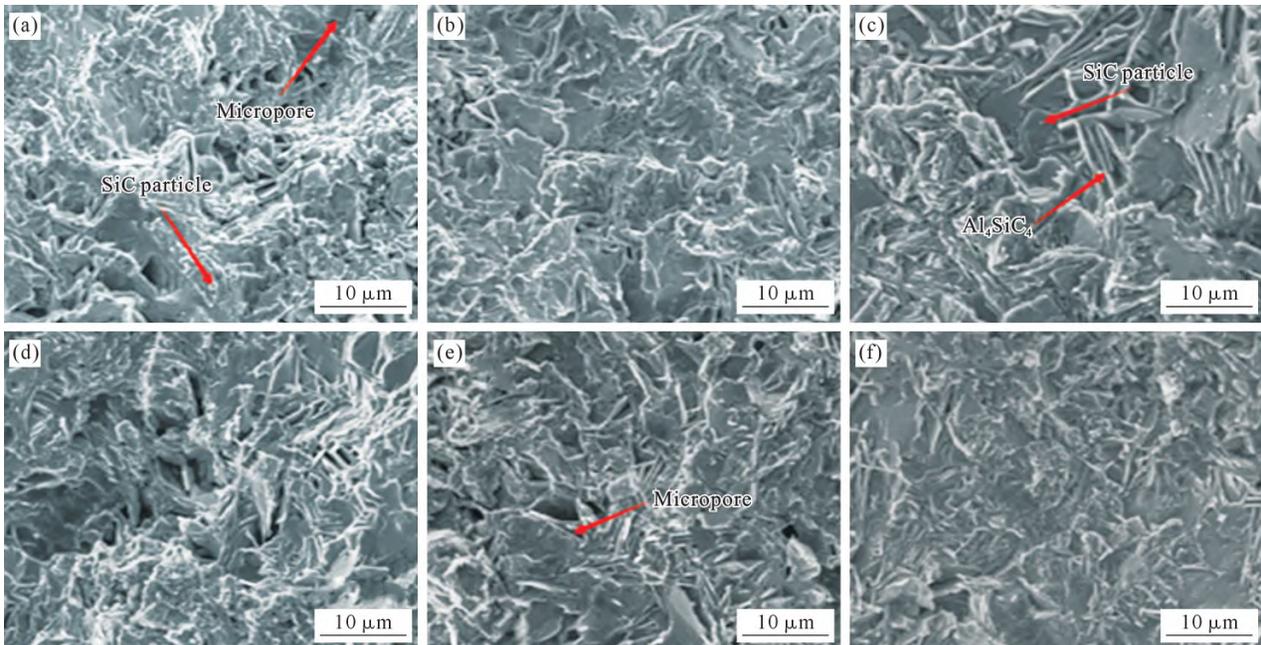


图 6 SLM 成形 $SiC_p(20\%)/AlSi10Mg$ 不同工艺参数下断口形貌:(a) 390 W, 1 000 mm/s; (b) 390 W, 1 200 mm/s; (c) 400 W, 1 000 mm/s; (d) 400 W, 1 200 mm/s; (e) 410 W, 1 000 mm/s; (f) 410 W, 1 200 mm/s

Fig.6 Fracture surface morphology under different SLM process parameters for forming $SiC_p(20\text{ vol.}\%)/AlSi10Mg$: (a) 390 W, 1 000 mm/s; (b) 390 W, 1 200 mm/s; (c) 400 W, 1 000 mm/s; (d) 400 W, 1 200 mm/s; (e) 410 W, 1 000 mm/s; (f) 410 W, 1 200 mm/s

生断裂,且 Al_4SiC_4 组织周围有大量的 SiC 颗粒,说明铝基体与 SiC 在激光的作用下发生了反应,生成了 Al_4SiC_4 脆性相,使材料脆性极大,无法拉伸出拉伸曲线。总体来说,需要在 SiC 表面附着一层涂层,使得材料在激光增材制造时, SiC 颗粒无法与铝基体反应生成脆性相,从而保证材料的韧性。

3 结论

(1)当激光功率 390 W,扫描速度 1 200 mm/s 时,试样内部的裂纹和孔洞较其他工艺参数时更少,此时 SiC 颗粒在铝基体中分布均匀,与铝基体有理想熔合界面。

(2)材料的硬度随着不同激光功率在 160~175 HV 之间变化,当扫描速率为 1 000 mm/s 时,随着激光功率的升高,材料的硬度逐渐升高,在 410 W 时达到峰值 172.3 HV;而当扫描速率为 1 200 mm/s 时,随着激光功率的升高,硬度变化幅度较大,在 390 W 时硬度最大达到 171.2 HV。

(3)选区激光熔化成形 $SiC_p(20\%)$ 增强 Al 基复合材料的最佳工艺区间为激光功率 390 W,扫描速度 1 200 mm/s。

参考文献:

- [1] NIRISH M, RAJENDRA R, BARMAVATU P. Additive layer-by-layer simulation and process parameter optimization for dynamic performance by additive manufacturing using selective laser melting (AM-SLM) of AlSi10Mg alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2025, 139(9-10): 4867-4889.
- [2] 马宗义,肖伯律,张峻凡,朱士泽,王东. 航天装备牵引下的铝基复合材料研究进展与展望[J]. 金属学报, 2023, 59(4): 457-466.
MA Z Y, XIAO B L, ZHANG J F, ZHU S Z, WANG D. Overview of research and development for aluminum matrix composites driven by aerospace equipment demand[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2023, 59(4): 457-466.
- [3] 谭海林,汪次荣,桂中祥. 基于声发射的高体积分数碳化硅颗粒铝基复合材料切削刀具效能评估[J]. 机械制造, 2020, 58(12): 48-52.
TAN H L, WANG C R, GUI Z X. Effectiveness evaluation of cutting tools made of high volume fraction silicon carbide particle aluminum matrix composites based on acoustic emission[J]. Machinery, 2020, 58(12): 48-52.
- [4] 郭耀旗,唐敏,马红林,魏文猴,王林志,范树迁,张祺. 预热温度对激光选区熔化成形 30%SiC_p/AlSi10Mg 复合材料力学性能的影响[J]. 材料导报, 2024, 38(3): 158-164.
GUO Y Q, TANG M, MA H L, WEI W H, WANG L Z, FAN S Q, ZHANG Q. Effect of preheating temperature on mechanical properties of 30% SiC_p/AlSi10Mg composites fabricated by selective laser melting[J]. Materials Reports, 2024, 38(3): 158-164.
- [5] LOUVIS E, FOX P, SUTCLIFFE C J. Selective laser melting of aluminium components[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(2): 275-284.
- [6] SIMCHI A, GODLINSKI D. Effect of SiC particles on the laser sintering of Al-7Si-0.3Mg alloy[J]. Scripta Materialia, 2008, 59(2): 199-202.
- [7] SIMCHI A, GODLINSKI D. Densification and microstructural evolution during laser sintering of A356/SiC composite powders[J]. Journal of Materials Science, 2011, 46(5): 1446-1454.
- [8] SIMCHI A, GODLINSKI D. Direct laser sintering of aluminium matrix composites[C]//Proceedings of the 21st International Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, USA: University of Texas at Austin, 2010: 441-450.
- [9] GHOSH S K, SAHA P, KISHORE S. Influence of size and volume fraction of SiC particulates on properties of ex-situ reinforced Al-4.5Cu-3Mg metal matrix composite prepared by direct metal laser sintering[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(18-19): 4694-4701.
- [10] GHOSH S K, SAHA P. Crack and wear behavior of SiC particulate reinforced aluminium based metal matrix composite fabricated by direct metal laser sintering[J]. Materials & Design, 2011, 32(1): 139-145.
- [11] ASTFALCK L C, KELLY G K, LI X. On the breakdown of SiC during the selective laser melting of aluminum matrix composites[J]. Advanced Engineering Materials, 2017, 19(8): 1600835.
- [12] FERREIDUNI E, GHASEMI A, ELBESTAWI M. Selective laser melting of aluminum and titanium matrix composites: A review[J]. Aerospace, 2020, 7(6): 77.
- [13] WANG X Y, LU Q H, ZHANG P L, YAN H, SHI H C, SUN T Z. Microstructure evolution and mechanical properties of selective laser melting fabricated hybrid particle reinforced AlSi10Mg composites[J]. Materials Characterization, 2024, 218(Part 1): 114483.
- [14] 马利,潘宇,林莺莺,陈冰清,闫泰起,吴宇,赵梓钧. 缺口应力集中对激光选区熔化 AlSi10Mg 疲劳性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2025, 62(15): 352-359.
MA L, PAN Y, LIN Y Y, CHEN B Q, YAN T Q, WU Y, ZHAO Z J. Effect of notched stress concentration on the fatigue properties of laser-selective zone-melted AlSi10Mg[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2025, 62(15): 352-359.
- [15] 付颖,杨坪川,陈根发,张玉莲,黄丹. SLM 成形 AlSi10Mg 铝合金组织性能研究[J/OL]. 机械科学与技术, 2025. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20250001>.
FU Y, YANG P C, CHEN G F, ZHANG Y L, HUANG D. Study on microstructure and properties of AlSi10Mg aluminum alloy formed by SLM[J/OL]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2025. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20250001>.
- [16] GHASHGHAY BR, ABEDI HR, SHABESTARI S G, SHAFIEIZAD A. Comparatively evaluating the room and high temperature mechanical properties of AlSi10Mg alloy produced by selective laser melting[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 21: 3570-3578.
- [17] WANG X Y, LU Q H, XU S J, ZHANG P L, YAN H, SHI H C, QIN J N, ZHOU K, CHEN K Y, SUN T Z. Effect of heat treatment patterns on microstructure and mechanical properties of selective

- laser melting fabricated SiC/AlSi10Mg composite [J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 181(Part B): 111905.
- [18] 陈焱,张昭,党博,许军锋,坚增运. SiC_p 体积分数对 SLM 成形 SiC_p/AlSi10Mg 复合材料组织及力学性能的影响[J]. *西安工业大学学报*, 2023, 43(4): 362-368.
- CHEN Y, ZHANG Z, DANG B, XU J F, JIAN Z Y. Effect of SiC_p volume fraction on microstructure and mechanical properties of SiC_p/AlSi10Mg Composites by SLM[J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2023, 43(4): 362-368.
- [19] 宋亢,坚增运,王渭中,陈焱. SLM 成形 10%SiC 颗粒增强铝基复合材料的工艺优化及性能[J]. *材料导报*, 2020, 34(S2): 1376-1380.
- SONG K, JIAN Z Y, WANG W Z, CHEN Y. Properties and process optimization of 10% SiC_p/AlSi10Mg composites by SLM[J]. *Material Reports*, 2020, 34(S2): 1376-1380.
- [20] 王海涛,林晨,樊子民,唐明强,赵放,乐晨,陈义华,黄源成. SiC 含量对铝基复合材料性能的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2024, 43(6): 2256-2261.
- WANG H T, LIN C, FAN Z M, TANG M Q, ZHAO F, LE C, CHEN Y H, HUANG Y C. Effect of SiC content on properties of aluminum matrix composite materials[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2024, 43(6): 2256-2261.
- [21] 丁雪萍,张祺,周峻莹,郭耀旗,唐敏,龚媛. SLM 成形 AlSi10Mg 合金及 SiC/AlSi10Mg 复合材料的耐蚀和耐磨性能[J]. *材料工程*, 2024, 52(10): 97-105.
- DING X P, ZHANG Q, ZHOU J Y, GUO Y Q, TANG M, GONG Y. Anti-corrosion and wear resistance properties of AlSi10Mg alloy and SiC/AlSi10Mg composites fabricated by selective laser melting[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2024, 52(10): 97-105.
- [22] CHEN K Y, LU Q H, YONG X C, ZHANG P L, YAN H, SHI H C. Process parameter optimization of SLM AlSi10Mg based on Box-Behnken design and experimental study on microstructure and mechanical properties[J]. *Materials Today Communications*, 2025, 46: 112740.
- [23] 陈柯宇,许莉敏,甘杰,文世峰,周燕. 激光功率对选区激光熔化 AlSi10Mg 组织及力学性能的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(13): 347-355.
- CHEN K Y, XU L M, GAN J, WEN S F, ZHOU Y. Effect of laser power on microstructure and mechanical properties of selective laser melted AlSi10Mg[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(13): 347-355.
- [24] JIANG X H, YE T, ZHU Y H. Effect of process parameters on residual stress in selective laser melting of AlSi10Mg[J]. *Materials Science and Technology*, 2020, 36(3): 342-352.
- [25] ZHANG X C, KANG J W, RONG Y M, WU P Y, FENG T. Effect of scanning routes on the stress and deformation of overhang structures fabricated by SLM[J]. *Materials*, 2019, 12(1): 47.
- [26] MEI J H, HAN Y, ZU G Q, ZHU W W, ZHAO Y, CHEN H, RAN X. Achieving superior strength and ductility of AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting with large laser power and high scanning speed[J]. *Acta Metallurgica Sinica(English Letters)*, 2022, 35(10): 1665-1672.
- [27] 王渭中,坚增运. 选区激光熔化工艺参数对 SiC_p/AlSi10Mg 复合材料致密度和硬度的影响[J]. *西安工业大学学报*, 2021, 41(1): 60-66.
- WANG W Z, JIAN Z Y. Influence of selective laser melting parameters on relative density and microhardness of SiC_p/AlSi10Mg composites by selective laser melting[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2021, 41(1): 60-66.
- [28] MAURYA N K, SINGH R K, GUPTA D, MISHRA R, MUSTAFA J. Evaluation of the mechanical properties of AlSi10Mg composites reinforced with TiB₂ particles (wt%) fabricated via selective laser melting (SLM) process[J]. *Life Cycle Reliability and Safety Engineering*, 2025, 14(2): 289-297.
- [29] 刘尚阳,杨波,茅健. 选择性激光熔化 AlSi10Mg 微波组件表面质量的影响因素研究[J]. *铸造*, 2024, 73(10): 1367-1373.
- LIU S Y, YANG B, MAO J. Study on factors affecting surface quality of selective laser melting AlSi10Mg microwave module[J]. *Foundry*, 2024, 73(10): 1367-1373.
- [30] 时云,王联凤,杜洋,李坤,施祥玲. AlSi10Mg 铝合金选区激光熔化成形缺陷控制和表面质量优化[J]. *应用激光*, 2023, 43(3): 19-25.
- SHI Y, WANG L F, DU Y, LI K, SHI X L. Defect control and surface quality optimization of AlSi10Mg aluminum alloy manufactured by selective laser melting[J]. *Applied Laser*, 2023, 43(3): 19-25.
- [31] 李飞阳,刘志红,乔岩欣,杨兰兰,卢道汤,汤雁冰. 激光选区熔化 316L 不锈钢在酸性氯离子溶液中的钝化行为[J]. *材料研究学报*, 2024, 38(3): 221-231.
- LI F Y, LIU Z H, QIAO Y X, YANG L L, LU D H, TANG Y B. Passivation behavior of laser zone melting 316L stainless steel in sulphuric acid containing chloride ion solution[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2024, 38(3): 221-231.
- [32] 洛毅,汪志太,胡耀政,徐志锋,刘奋成,张守银,刘丰刚. B₄C/AlSi10Mg 复合材料激光选区熔化成形工艺及性能研究[J]. *铸造技术*, 2024, 45(8): 793-801.
- LUO Y, WANG Z T, HU Y Z, XU Z F, LIU F C, ZHANG S Y, LIU F G. Study on the processes and properties of B₄C/AlSi10Mg composites formed via selective laser melting[J]. *Foundry Technology*, 2024, 45(8): 793-801.
- [33] 王娜,李文彬,庞建超,陈立佳,高崇,邹成路,张辉,李守新,张哲峰. 增材制造高温合金在不同温度下的拉伸性能与变形机制[J]. *材料研究学报*, 2025, 39(1): 1-10.
- WANG N, LI W B, PANG J C, CHEN L J, GAO C, ZOU C L, ZHANG H, LI S X, ZHANG Z F. Tensile properties and deformation mechanisms of additive manufacturing superalloy at different temperatures[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2025, 39(1): 1-10.
- [34] 周家轩,司宏丽,杨文超,张少华,卢玉章. 激光选区熔化GH4169 合金富氧燃烧行为研究[J]. *铸造技术*, 2025, 46(2): 136-143.
- ZHOU J X, SI H L, YANG W C, ZHANG S H, LU Y Z. Study on oxygen enrichment combustion behavior of laser selective melting GH4169 alloy[J]. *Foundry Technology*, 2025, 46(2): 136-143.

(责任编辑:宫文婧)