

选区激光熔化 LaB₆/ZL205A 复合材料组织与性能

游俊磊 汪志太 欧阳奇 徐志锋

(南昌航空大学轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室)

摘要 通过低能球磨制备 LaB₆ 含量分别为 0.5%、1.0% 的 LaB₆/ZL205A 复合粉末,采用选区激光熔化(SLM)技术制备了 LaB₆/ZL205A 铝基复合材料。通过 XRD、EDS 和 SEM 等方法对比分析 ZL205A 铝合金和 LaB₆/ZL205A 铝基复合材料的显微组织和力学性能。结果表明,LaB₆ 含量为 0.5% 的 LaB₆/ZL205A 铝基复合粉末性能最佳,其纳米 LaB₆ 颗粒分布均匀,无明显团聚。对比 ZL205A 铝合金,复合粉末试样的晶粒尺寸明显细化,柱状晶逐渐向等轴晶转变,硬度(HV)从 91.3 提升至 96.2,抗拉强度从 279.4 MPa 提升至 320.5 MPa,伸长率从 3.9% 提升至 6.2%。

关键词 选区激光熔化;ZL205A 铝合金;纳米 LaB₆;组织性能

中图分类号 TB331;TG113

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.09.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Microstructure and Performance of Selective Laser Melted LaB₆/ZL205A Composites

You Junlei, Wang Zhitai, Ouyang Qi, Xu Zhifeng

(National Defense Key Discipline Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology,
Nanchang Hangkong University)

Abstract: LaB₆/ZL205A compound powder with LaB₆ content of 0.5% and 1.0% was fabricated by low-energy ball grinding, and LaB₆/ZL205A composites were prepared by SLM. The microstructure and mechanical properties of ZL205A and LaB₆/ZL205A composites were analyzed comparatively by XRD, EDS and SEM. The results indicate that the 0.5% LaB₆/ZL205A powder possesses optimal performance, where the nano LaB₆ particles are evenly distributed without obvious agglomeration. Compared with that of ZL205A, the grain size of composite powder specimens is significantly refined, and the columnar crystal is gradually transformed to isoaxial, where the hardness is increased from 91.3 HV to 96.2 HV, the tensile strength is increased from 279.4 MPa to 320.5 MPa, and elongation is increased from 3.9% to 6.2%.

Key Words: SLM, ZL205A Aluminum Alloy, Nano LaB₆, Microstructure and Performance

铝合金具有低密度、高比强度、切削加工性和热成形性好、耐腐蚀等特点,在航空航天、交通运输、食品包装、建材、船舶等领域得到广泛应用^[1]。工程制件的传统制造方法主要有铸造、轧制、锻造、挤压等,然而这些技术已经难以满足现代工业对于材料的制造要求,制备出高性能材料成为挑战。

选区激光熔化技术(SLM)^[2]具有零件的综合性能力强、制备周期短、研发效率高和制造成本低,以及材料的利用率高且对产品形状几乎没有限制等特点,特别适用于复杂零件和人工植入体的制造。国内外对于 SLM 成形 AlSi10Mg 铝合金的研究已经相当成熟,成形件致密度很高,力学性能优于传统铸件,已有部分打印零件

开始了初步的工业应用^[3]。Al-Cu 合金在 SLM 成形过程中易氧化、对激光反射率高且热裂倾向大,这极大地限制了 SLM 成形技术的发展^[4]。而 LaB₆ 颗粒对激光的反射率低,在铝合金粉末中加入纳米 LaB₆ 颗粒,可以提高铝合金对激光的吸收率^[5]。

本研究采用纳米级稀土化合物颗粒对 ZL205A 铝合金粉末进行表面改性,通过低能球磨方式制备复合粉末。通过优化 ZL205A 铝合金粉末的 SLM 成形工艺参数,重点研究纳米 LaB₆ 颗粒的添加对 SLM 成形 ZL205A 铝合金试样组织和性能的影响,确定最佳的 LaB₆ 添加量,旨在为制备具有更加理想综合性能的材料以及 SLM 成形 ZL205A 铝合金的应用提供参考。

收稿日期:2022-09-06;修改稿收到日期:2022-10-26

基金项目:江西省教育厅科技资助项目(DA202103174)

第一作者简介:游俊磊,男,1998 年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail:983266283@qq.com

通信作者:汪志太,男,1983 年出生,讲师,南昌(330063),E-mail:wangzt@nchu.edu.cn

引用格式:游俊磊,汪志太,欧阳奇,等. 选区激光熔化 LaB₆/ZL205A 复合材料组织与性能[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(9):1 200-1 204.

YOU J L, WANG Z T, OUYANG Q, et al. Microstructure and performance of selective laser melted LaB₆/ZL205A composites[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(9):1 200-1 204.

1 试验材料及方法

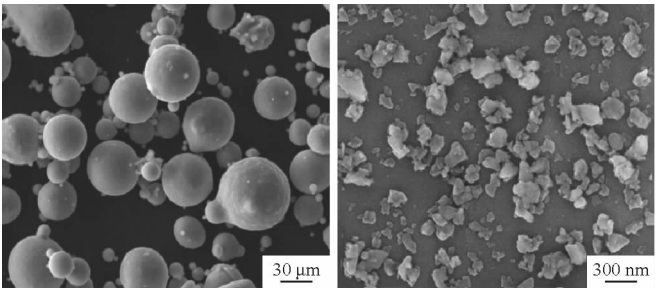
1.1 粉末材料

采用雾化法制备 ZL205A 铝合金粉末, LaB₆ 质量分数为 99%。ZL205A 合金化学成分见表 1。

表 1 ZL205A 铝合金粉末的化学成分

Tab.1 Chemical composition of ZL205A powders %							
w _B							
Cu	Mn	Ti	Cd	V	Zr	B	Al
4.6~5.3	0.3~0.5	0.15~0.35	0.15~0.25	0.05~0.3	0.05~0.2	<0.005	余量

图 1 为 ZL205A 和 LaB₆ 粉末的显微形貌。可以看出, 铝合金粉末大部分为球形, 粒径为 20~55 μm, 圆整度良好, 有部分卫星粉末颗粒附着在大尺寸球形粉末表面上, LaB₆ 平均粒径为 50 nm, 呈多边形不规则状且易团聚。



(a) ZL205A 铝合金粉末 (b) LaB₆ 粉末

图 1 ZL205A 和 LaB₆ 粉末的显微形貌

Fig.1 Morphologies of ZL205A and LaB₆ powders

1.2 试验方法

通过低能球磨后制得 LaB₆ 含量分别为 0.5%、1.0% 的 LaB₆/ZL205A 复合粉末。转速为 130 r/min, 球磨时间为 3 h, 球料比为 1:1。复合粉末置于真空干燥箱中, 在 110 ℃ 下保温 5 h。采用 BLT-S210 型选区激光熔化设备制备 LaB₆/ZL205A 铝基试样, 激光功率为 220 W, 扫描速度为 800 mm/s, 扫描间距为 0.15 mm, 铺粉层厚为 0.03 mm, 层间转角为 67°。试样尺寸分别为 10 mm×10 mm×10 mm 和 φ10 mm×55 mm。

1.3 试样表征与分析

SLM 成形的 LaB₆/ZL205A 复合材料和 ZL205A 铝合金试样, 经过研磨、抛光后使用凯勒试剂腐蚀 15 s, 用 FEI Nova Nano SEM450 型场发射扫描电镜观察其显微组织, 利用设备自带的 INCA 250 X-Max 50 型能谱仪分析元素成分。用 HVD-10001S 型数字显微硬度计测试试样的硬度, 载荷为 0.05 N, 加载时间为 10 s, 在 SLM 成形试样的纵截面上, 每隔 0.5 mm 连续测 10 个

点, 取平均值。采用 WDW-50Y 型微机控制电子万能试验机进行静态拉伸试验, 应变速率为 1 mm/min, 测试 3 个试样并取平均值。使用 SU1510 型钨灯丝扫描电镜观察断口形貌。使用 D8 ADVANCE-A25 型 X 射线衍射仪对试样进行物相检测, 选用 Cu 靶, 扫描速度为 0.05(°)/s, 扫描角度范围为 20°~80°。

2 试验结果与分析

2.1 物相组成

图 2 为 SLM 成形的 ZL205A 铝合金及 LaB₆/ZL205A 复合粉末的 XRD 图谱。从图 2a 看出, 复合粉末试样的相组成与 ZL205A 铝合金试样一致, 主要由 α-Al 和 Al₂Cu 组成。由于 LaB₆ 含量较低, 只能在复合粉末试样中发现微弱的 LaB₆ 相的衍射峰强度。从图 2b 看出, 随着纳米 LaB₆ 颗粒含量的增加, α-Al 相峰位逐渐向高角度区域偏移, 且衍射峰的强度也逐渐增大。根据布拉格方程^[6]:

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} = \frac{\lambda}{2\sin\theta} \approx \frac{\lambda}{\sin 2\theta} \quad (1)$$

式中, d_{hkl} 为晶面间距; a 为晶格常数 (Al 为 0.404 96 nm); h 、 k 、 l 为晶面密勒指数; θ 为衍射角; λ 为 X 射线波长。由式(1)可知, 衍射角 2θ 增大, 晶格常数 a 减小, 晶面间距 d_{hkl} 减小。因此, 峰位向高角度偏移说明添加了 LaB₆ 后试样的 α-Al 晶格常数变小, 晶面间距也减小。

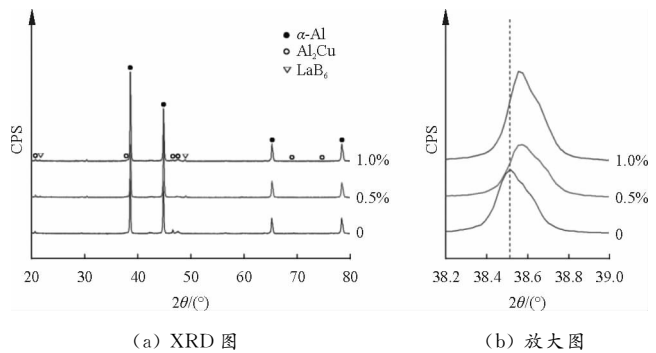


图 2 SLM 成形不同含量 LaB₆/ZL205A 试样的 XRD 图谱
Fig.2 XRD patterns of SLMed LaB₆/ZL205A specimens with different LaB₆ contents

2.2 显微组织

图 3 为 SLM 成形 ZL205A 铝合金和不同 LaB₆ 含量的 LaB₆/ZL205A 复合试样 SEM 形貌。可以看出, 3 组试样显微组织均由灰色的基体、沿柱状晶晶界析出的不连续白色长条状第二相以及在柱状晶晶内析出的点状第二相组成。从图 3a 和图 3b 看出, 晶粒的生长具有取向性, 朝着熔池边界法向方向生长, 熔池外形形成粗大

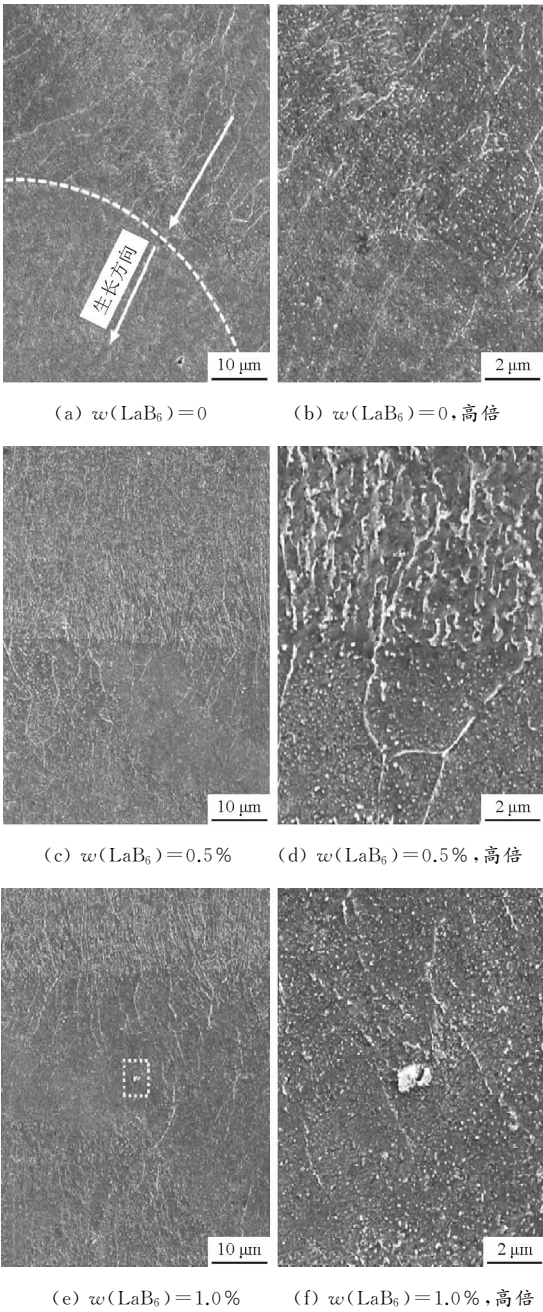


图 3 SLM 成形不同 LaB_6 含量 ZL205A 复合粉末试样的纵截面 SEM 形貌

Fig.3 SEM morphologies of cross section of SLMed ZL205A compound powder specimens with different LaB_6 contents

的柱状晶。同时, Al_2Cu 在柱状晶的边界连接成线。从图 3c 和图 3d 看出, 晶粒朝温度梯度生长的趋势已经不明显, 柱状晶向等轴晶转变, 且在试样内部没有发现大尺寸或团簇的 LaB_6 颗粒。从图 3e 和图 3f 可以看出, 在两个熔池的重叠交汇区域, 发现有团簇的纳米 LaB_6 颗粒, 团簇物的尺寸约为 $2\text{ }\mu\text{m}$ 。同时, 在两个熔池重叠区的析出相尺寸比熔池内部的要大, 这是因为熔池的叠加使温度升高, 晶粒发生二次生长, 导致晶粒粗大。

图 4 为 SLM 成形 LaB_6 含量为 1.0% 的 $\text{LaB}_6/\text{ZL205A}$ 铝基试样从 $\alpha\text{-Al}[110]$ 晶带轴观察的 TEM 明场像。从图 4a 看出, 析出相形态不一, 分布散乱, 尺寸约为 120 nm , Cu 富集在晶界处, 有一定的元素偏聚现象; 此外, 在晶界边缘和晶粒内部发现亮色的团簇物, 见图 4b。

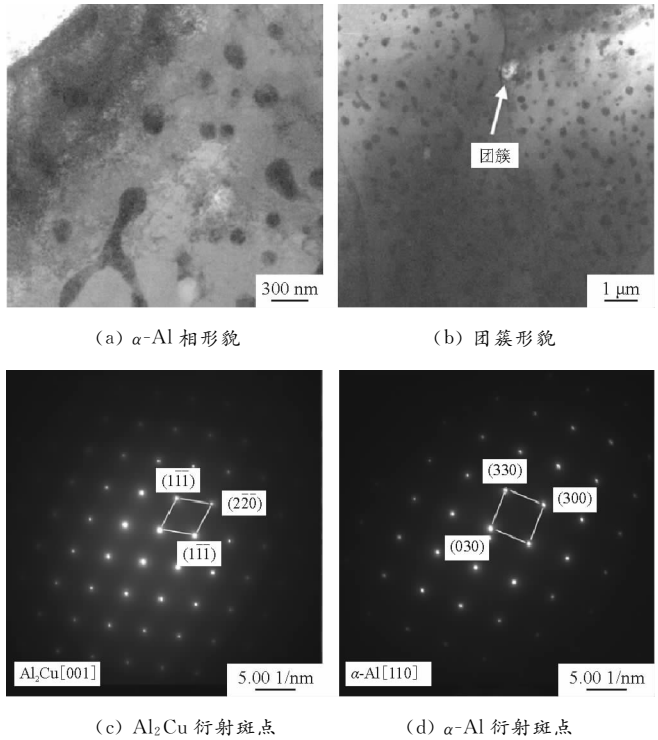


图 4 LaB_6 含量为 1.0% 的 $\text{LaB}_6/\text{ZL205A}$ 试样的 TEM 形貌

Fig.4 TEM morphologies of 1.0% $\text{LaB}_6/\text{ZL205A}$ specimens

图 5 为 LaB_6 含量 1.0% 时复合材料的 SEM 形貌及

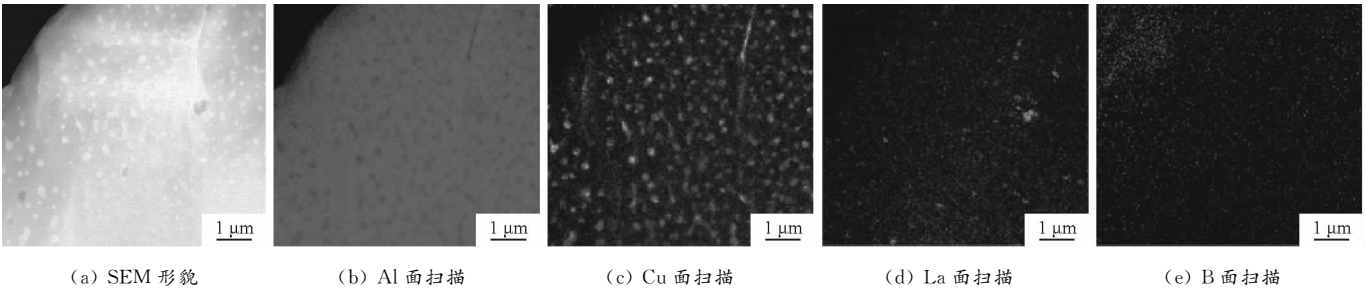


图 5 LaB_6 含量 1.0% 的 $\text{LaB}_6/\text{ZL205A}$ 试样 SEM 形貌和 EDS 面扫描分析

Fig.5 SEM morphology and EDS results of 1.0% $\text{LaB}_6/\text{ZL205A}$ specimens

EDS 面扫描。可以看出,团聚处 La 富集,ZL205A 合金中不含有 La,因此认为该团聚物为 LaB₆。细化晶粒的原理是因为不规则纳米颗粒的齐纳钉扎效应阻碍晶界迁移,从而抑制晶粒长大。部分 LaB₆ 颗粒团簇是因为 SLM 成形过程快速冷却,在较冷的条件下,固液界面捕获粒子的能力较强,部分 LaB₆ 团聚被固液界面“捕获”而留在晶粒内部^[7],当含量过高时,剩余 LaB₆ 被推向晶界处,聚集成大尺寸的团簇物。对不规则析出相进行标定,衍射斑点见图 4c,标定后确定为 θ -Al₂Cu 相,这与 XRD 测试结果一致;对灰色区域进行标定,衍射斑点见图 4d,标定后确定为 α -Al 基体。

2.3 力学性能

表 2 为 SLM 成形不同 LaB₆ 含量 LaB₆/ZL205A 铝基试样的力学性能。可以看出,LaB₆ 含量为 0.5% 的 LaB₆/ZL205A 铝基试样的平均硬度(HV)从未添加 LaB₆ 时的 91.3 提高到 96.2,抗拉强度和伸长率分别从 279.4 MPa、3.9% 提升至 320.5 MPa、6.2%。

表 2 SLM 成形不同 LaB₆ 含量的 LaB₆/ZL205A 粉末的力学性能

Tab.2 Mechanical properties of SLMed LaB ₆ /ZL205A powders with different LaB ₆ contents			
试样	抗拉强度/MPa	伸长率/%	硬度(HV)
ZL205A	279.4±9.5	3.9±0.28	91.3
0.5LaB ₆ /ZL205A	320.5±5.3	6.2±0.26	96.2
1.0LaB ₆ /ZL205A	225.9±3.1	2.1±0.32	82.6

图 6 为 SLM 成形不同 LaB₆ 含量的 LaB₆/ZL205A 试样的维氏硬度。可以看出,LaB₆ 含量 1.0% 的 LaB₆/L205A 试样的平均硬度最低,而 LaB₆ 含量 0.5% 的 LaB₆/ZL205A 铝基试样平均硬度最高。当晶粒更细时意味着维氏硬度也越高,正是因为 LaB₆ 的加入,使得晶粒得到细化,细晶强化的作用使试样硬度值提升。同时,马兰戈尼流的扰动作用使纳米 LaB₆ 能够均匀分布,这是弥散强化的效果^[8]。细晶强化和弥散强化结合使试样的显微硬度上升。因此,分析认为细晶强化和弥散强化是 LaB₆/ZL205A 试样的显微硬度提升的原因。

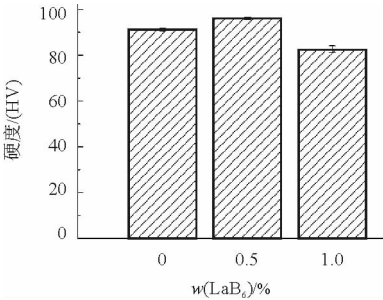


图 6 SLM 成形不同 LaB₆ 含量的粉末试样纵截面的硬度
Fig.6 Hardness of cross section of SLMed LaB₆/ZL205A powders with different LaB₆ contents

但随着 LaB₆ 含量增加至 1.0%,LaB₆/ZL205A 铝基试样的平均硬度反而下降。这是因为试样的硬度同时也受到致密度的影响。当 LaB₆ 含量为 1.0% 时,LaB₆ 团聚导致试样内部存在较多孔隙缺陷,LaB₆ 带来的细晶强化和弥散强化效果低于孔隙缺陷带来的负面影响,因此,LaB₆ 含量为 1.0% 的 LaB₆/ZL205A 铝基试样的显微硬度下降并波动较大。

图 7 为 SLM 成形不同 LaB₆ 含量的 LaB₆/ZL205A 铝基试样的力学性能。可以看出,抗拉强度和伸长率随纳米 LaB₆ 添加呈现出先增加后减小的趋势。未添加 LaB₆ 的试样的抗拉强度为 279.4 MPa,伸长率为 3.9%。添加了 0.5% 的 LaB₆ 的复合粉末试样的力学性能均有所提升,抗拉强度为 320.5 MPa,伸长率为 6.2%。当 LaB₆ 的含量为 1.0% 时,成形试样的抗拉强度降低至 225.9 MPa,伸长率仅为 2.1%,这可能是由于团聚的 LaB₆ 造成间隙和气孔导致试样力学性能降低。

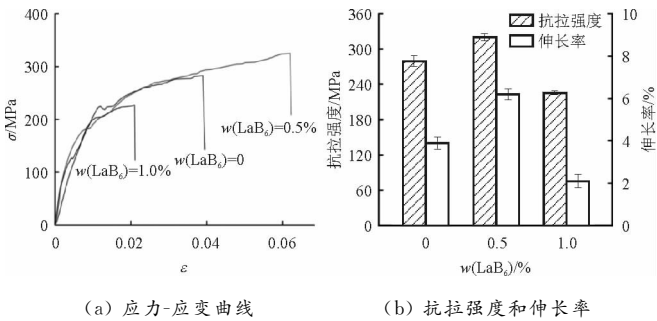


图 7 SLM 成形不同 LaB₆ 含量的 LaB₆/ZL205A 铝基试样的力学性能

Fig.7 Mechanical properties of SLMed LaB₆/ZL205A specimens with different LaB₆ contents

图 8 为 SLM 成形不同 LaB₆ 含量的 LaB₆/ZL205A 铝基试样断口形貌。在 ZL205A 试样的断口形貌中,细小韧窝和撕裂棱同时存在,断裂模式为韧性和脆性的混合型断裂,见图 8a。同时,断裂形貌上有部分球形孔洞存在,这是因为 SLM 成形过程中气体被留在了熔池内部,并在拉伸变形过程中逐渐变大。添加 LaB₆ 后试样的断裂模式相似,均为韧性和脆性的混合型断裂。在 LaB₆ 含量为 0.5% 的试样断口形貌中可以观察到大量细小的韧窝,尺寸约为 2 μm,同时在韧窝底部能够发现有部分纳米级别不规则的析出亮点,文献^[9]认为这些析出亮点极有可能是 Al₂Cu。从图 8c~图 8f 可以看出,在断口有部分飞溅形成的金属小球和球形孔洞,且韧窝的尺寸较大,同时在断口处可以观察到有团簇的 LaB₆ 颗粒,在脆性团簇变形过程中,裂纹源会由此产生,从而降低强度和塑性。

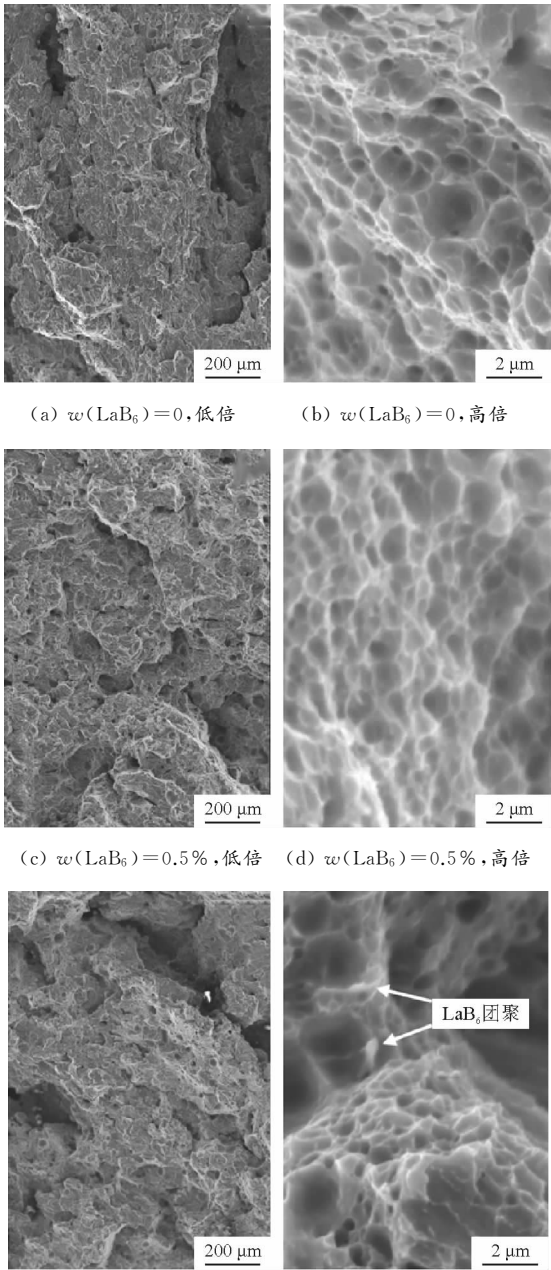


图 8 SLM 成形不同 LaB₆ 含量的 LaB₆/ZL205A 铝基试样断口形貌

Fig.8 Fracture morphologies of SLMed LaB₆/ZL205A specimens with different LaB₆ contents

3 结 论

(1) SLM 成形 LaB₆/ZL205A 铝基复合材料时, 0.5% 的 LaB₆ 能够促进试样组织从柱状晶向等轴晶转变, 过量的 LaB₆ 会使铝合金熔体粘度升高, 影响试样的成形品质。SLM 成形 ZL205A 试样和 LaB₆/ZL205A 铝基复合粉末试样的物相组成基本一致, LaB₆ 颗粒含

量对 SLM 成形试样的物相组成无明显影响, 均由 α -Al 和 θ -Al₂ Cu 相组成。加入 0.5% 的 LaB₆ 的 LaB₆/ZL205A 铝基试样中存在纳米颗粒团聚, 团簇物尺寸约为 200 nm。

(2) 添加 0.5% 的 LaB₆ 能提高 SLM 成形 ZL205A 铝合金试样的力学性能。试样硬度(HV)从 91.3 提升至 96.2, 抗拉强度从 279.4 MPa 提升至 320.5 MPa, 伸长率为 3.9% 提升至 6.2%, 细小韧窝和撕裂棱同时存在, 成形试样的断裂机制为混合断裂。而添加 1.0% 的 LaB₆ 的 SLM 成形试样力学性能均有所降低, 纳米 LaB₆ 颗粒会阻碍铝合金熔体的铺展和结合, 在断口处可以观察到 LaB₆ 颗粒团簇。

参 考 文 献

[1] 隋育栋. 铝合金及其成形技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2020.
[2] 王喜文. 中国制造 2025 解读 从工业大国到工业强国[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
[3] 秦艳利, 孙博慧, 张昊, 等. 选区激光熔化铝合金及其复合材料在航空航天领域的研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(14): 15-31.
[4] 林超, 张鸿, 毕亮, 等. 铸造 Al-Cu 合金凝固缺陷研究现状[J]. 材料导报, 2016(21): 143-119.
[5] TAKAMICHI I. The Physical Properties of Liquid Metals[M]. Oxford: Clarendon Press, 1993.
[6] 王宗胜. 碳修饰 Ti³⁺ 掺杂多孔结构 TiO₂ 及其光催化性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016.
[7] 欧阳盛. (TiH₂+TiB₂)/AA7075 复合粉末激光选区熔化成形的显微组织与力学性能[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
[8] 高超峰. 激光选区熔化成形 TiN/AlSi10Mg 复合材料组织性能与强化机理[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
[9] 胡志恒. AlCu5MnCdVA 铝合金的激光选区熔化成形熔凝行为研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.

(编辑: 彭瑾)

欢迎关注
“特种铸造”
微信公众号



- 微官网
- 微商城
- 本刊会议
- 收录动态
- 稿件系统

- 行业动态
- 铸造前沿
- 经典案例
- 铸造学堂
- 专利与发明

- 联系我们
- 免费推广
- 铸造职场
- 产品库
- 企业库