

电子束增材制造 TiB₂/Al-Zn-Mg-Cu 复合材料的微观组织与机械性能研究

高屹¹, 李晓东², 杨彬¹, 赵云², 李险峰¹

¹上海交通大学材料科学与工程学院 上海

²云南昆船机械制造有限公司 云南昆明

【摘要】电子束自由成形制造 (EBF³) 因其适用于太空环境而受到研究人员的广泛关注。本文研究了通过 EBF³ 制造的 TiB₂/Al-Zn-Mg-Cu 复合材料的微观结构和力学性能。结果发现, 该复合材料的主要相为 α -Al 基体和均匀分布的 TiB₂ 颗粒。组织中存在等轴晶粒, 平均晶粒尺寸分布范围为 17.3 μ m 至 22.2 μ m。从基体到零件顶部, 横截面显微硬度总体呈增加趋势, 从 66HV 增加到 128HV。该增材构件在水平方向上的极限抗拉强度为 360MPa, 屈服强度为 216MPa, 伸长率为 16%。

【关键词】电子束自由成形制造; 铝基复合材料; 微观组织; 力学性能

【收稿日期】2024年8月25日

【出刊日期】2024年9月20日

【DOI】10.12208/j.ijms.20240001

Microstructure and mechanical properties of TiB₂/Al-Zn-Mg-Cu composite fabricated by electron beam freeform

Yi Gao¹, Xiaodong Li², Bin Yang¹, Yun Zhao², Xianfeng Li¹

¹School of Materials Science & Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai

²Machinery Manufacturing Co., Ltd. of KSEC, Kunming, Yunnan

【Abstract】 Electron beam freeform fabrication (EBF³) is attracting more and more attention from researchers due to its suitability for space environments. In this paper, we report the microstructure and mechanical properties of a TiB₂/Al-Zn-Mg-Cu composite manufactured by EBF³. The main phases were α -Al and TiB₂ particles. There were equiaxed grains in the composite, and the average grain size distribution ranged from 17.3 μ m to 22.2 μ m. The cross-sectional microhardness exhibits an overall increasing distribution from 66 to 128 HV1 from the substrate to the top of the part. It had 360 MPa ultimate tensile strength, 216 MPa yield strength, and 16% elongation in the horizontal direction.

【Keywords】 Electron beam freeform fabrication; Aluminum matrix composites; Microstructure; Mechanical properties

Al-Zn-Mg-Cu 铝合金因其高比强度、硬度和抗疲劳性而广泛应用于航空和军事工业中^[1-2]。在电子束自由成形制造 (Electron Beam freeform Fabrication, EBF³) 中, 使用电子束作为热源, 将熔融金属沉积在基板或先前沉积的层上^[3-5]。EBF³ 的工作环境接近太空环境, 因此它比其他增材制造方法更适用于太空环境。最近, 研究人员致力于在钛合金和 Al-Cu 合金上研究并实施该方法^[6-7]。

Taminger 等人^[8]揭示了通过加速 EBF³ 2219 铝合金中的电压来实现微观结构控制的潜力。Cui 等人^[9]证明了 EBF³ 技术在获得完全等轴晶粒、减少元素

偏析和抑制裂纹方面的优势。Lei 等人^[10]研究了 EBF³ TiB₂/ZL205 薄壁构件的微观结构和力学性能。Bian 等人^[11]成功利用电子束熔化 (Electron Beam Melting, EBM) 工艺细化 Al-Si 合金的晶粒尺寸, 从而提高了其拉伸延展性。

然而, 关于 EBF³ 制备的 TiB₂/Al-Zn-Mg-Cu 复合材料的可行性、微观结构或力学性能的研究很少。在本研究中, 通过 EBF³ 技术将原位自生 TiB₂/Al-Zn-Mg-Cu 焊丝增材制造为 TiB₂/Al-Zn-Mg-Cu 复合材料薄壁构件, 并对其微观结构和力学性能进行了相关的测试和分析。

1 实验材料及方法

本试验选用直径 1.2 mm 的 TiB₂/Al-Zn-Mg-Cu 复合材料焊丝作为填充材料, 该丝材通过混合盐法得到 TiB₂/Al-Zn-Mg-Cu 复合材料铸锭后拉丝制成。EBF³ 制备工艺采用 Zcomplex X3 在真空条件下 (约 7.6×10^{-2} Pa) 进行, 所选热源为电子束, 电流采用 40 mA, 频率为 300 Hz。送丝速度和行进速度保持不变, 分别为 3.2 m/min 和 500 mm/min。表 1 为丝材和所制备的 EBF³ 构件不同位置的材料化学成分。

准备好 EBF³ 构件后利用电火花线切割机在如

图 1 (a) 所示位置分别截取金相试样和拉伸试样。通过 X 射线衍射仪 (XRD) 和能量色散光谱 (EDS) 对不同位置试样进行了相组成的分析。通过实验室高分辨率 X 射线显微断层扫描 (XCT) 系统上对该样品进行了孔隙测试。使用配备有电子背散射衍射 (EBSD) 检测器的 TESCAN 扫描电子显微镜 (SEM) 观察了微观结构。使用 HVS-30P 维氏硬度计对样品进行硬度测试, 载荷为 10kg, 加载时间为 15 s。拉伸测试采用应变控制模式进行, 拉伸速度 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。

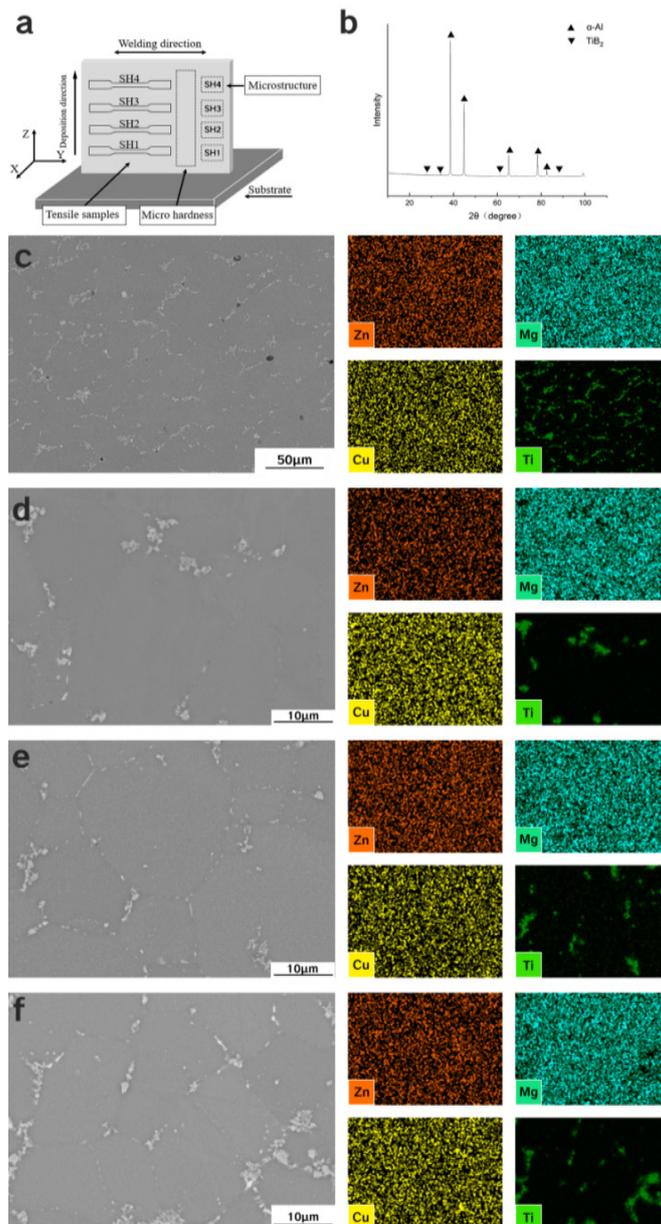


图 1 (a) 不同位置取样示意图; (b) EBF³ 制备的 TiB₂/Al-Zn-Mg-Cu 复合材料的 XRD 结果; (c) - (f) SEM 结果: (c) SH1; (d) SH2; (e) SH3; (f) SH4

表 1 TiB₂/Al-Zn-Mg-Cu 丝材和 EBF³ 构件不同位置的化学成分 (wt.%)

Compositions	Zn	Mg	Cu	Cr	Si	Fe	Ti	B	Al
Wire	5.740	2.500	1.650	0.220	0.027	0.012	2.640	1.150	Bal.
SH1	1.150	0.905	1.722	0.282	0.029	0.189	2.591	1.171	Bal.
SH2	2.347	1.666	1.832	0.237	0.026	0.013	2.624	1.149	Bal.
SH3	2.062	1.543	1.732	0.240	0.025	0.013	2.598	1.171	Bal.
SH4	1.696	1.296	1.766	0.243	0.024	0.012	2.638	1.200	Bal.

2 实验结果与讨论

2.1 微观组织

通过图 1 中的 EDS 图谱与 XRD 数据, 可以清晰地看出, 几乎没有合金元素的偏析现象发生, 且仅在晶界处观察到极少量的相。这一现象得益于 EBF³ 的真空环境以及其缓慢的热耗散特性, 它们共同促进了热应力的减少和元素偏析的抑制^[5, 8]。进一步观察发现, TiB₂ 沿铝的晶界均匀分布。

如图 2 所示, XCT 扫描结果清晰地展示了 EBF³-TiB₂/Al-Zn-Mg-Cu 复合材料从底部到顶部的微孔分布情况。在底部层, 孔隙率保持在较低的 0.2%。然而, 随着沉积高度的增加, 开始出现少量分布不均的大孔隙, 导致孔隙率显著上升至约 4.7%。这些孔隙主要集中在熔池边界附近, 并且整体上, 孔隙率随着沉积高度的增加而增加。在图中, 暗色区域代表较低的密度, 相对地, 亮色区域则表明合金元素含量更高, 材料性能更优。此外, 图 2

中的对比度变化与表 1 中的数据相吻合, 进一步证实了孔隙分布的观察结果。以熔池边界为界, 孔隙密集的区域在视觉上呈现出较浅的色调, 与致密部分形成鲜明对比。这一现象为图 4 (a) 中所示的硬度波动提供了一定程度的解释。

图 3 展示了 TiB₂/Al-Zn-Mg-Cu 复合材料的 IPF 图及其晶粒尺寸分布统计情况。从图中清晰可见, 晶粒呈现出均匀的等轴晶形态。在沉积过程中, 随着每一层的逐层堆叠与冷却, 热量从前一层有效传递至后一层, 为后一层提供了预热效果。这种预热机制显著降低了温度梯度, 并构建了一个循环的热场环境, 进而导致了打印件中部区域晶粒的粗化现象 (具体表现为 SH1 层晶粒尺寸为 17.3 μm, SH2 层为 20.7 μm, SH3 层为 22.2 μm)^[12]。相比之下, 由于顶层所经历的热循环次数较少, 几乎无法产生显著的原位热处理 (Intrinsic Heat Treatment, IHT) 效果, 因此其晶粒尺寸相对较小, 仅为 18.9 μm。

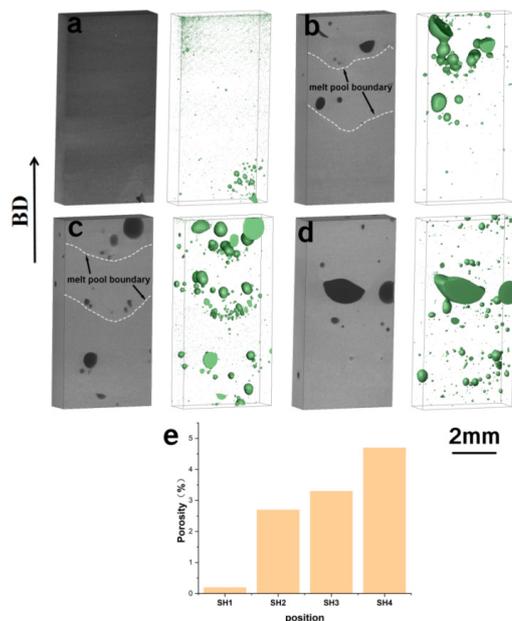


图 2 (a) - (d) XCT 结果: (a) SH1; (b) SH2; (c) SH3; (d) SH4; (e) 不同位置孔隙率

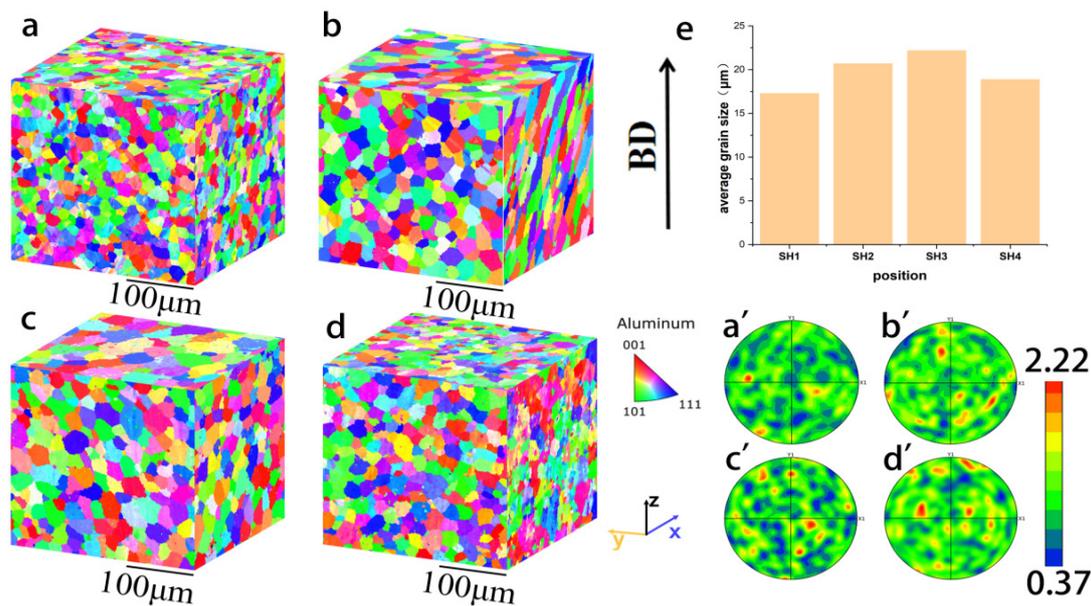


图3 (a) - (d) IPF, (a') - (d') 极图: (a) SH1; (b) SH2; (c) SH3; (d) SH4; (e) 不同位置晶粒尺寸

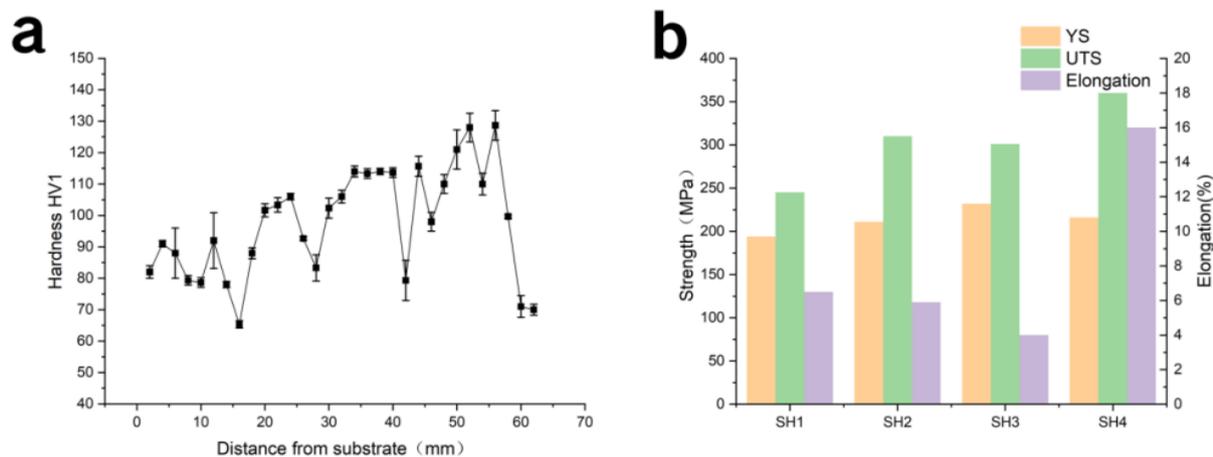


图4 (a) 沿建筑方向的硬度分布; (b) 不同位置的拉伸性能

2.2 机械性能

图4(a)展示了硬度的分布情况。可以看出,在测试过程中,EBF³-TiB₂/Al-Zn-Mg-Cu复合材料的硬度值在多个测试点间展现出显著的差异,范围从66 HV到128.7 HV不等。从横截面的底部至顶部,硬度呈现出明显的上升趋势,强度也随之逐渐增强。值得注意的是,尽管底层的晶粒相较于中部更为细小,但在此区域,合金元素的含量对硬度的贡献更为显著。此外,通过对不同样品间伸长率的方差分析,我们发现其变异程度具有统计学意义($p < 0.05$),这表明孔隙率的不均匀分布可能对材料的塑性变形能力有显著影响。为了进一步验证这一点,我们采

用了XCT技术对样品的孔隙分布进行了三维重建,如图2所示,结果表明孔隙主要集中在沉积层的边界附近,且随着沉积高度的增加,孔隙率呈现出上升趋势。图4(b)展示了不同位置的拉伸性能。可以看出,SH4的平均屈服强度和极限抗拉强度为216 MPa和360 MPa,分别比SH1高出11.3%和46.9%,显示出显著的增强效果。

3 结论

(1) 对于EBF³制备的TiB₂/Al-Zn-Mg-Cu复合材料,其主要相由 α -Al和TiB₂组成,其中TiB₂颗粒大部分沿晶界分布。

(2) EBF³-TiB₂/Al-Zn-Mg-Cu复合材料的晶粒

主要为等轴晶。其晶粒尺寸呈现从底部到顶部先增加再减小的趋势。其中, 最小晶粒尺寸为 17.3 μm, 最大晶粒尺寸为 22.2 μm。

(3) EBF³-TiB₂/Al-Zn-Mg-Cu 复合材料的硬度呈现随着沉积高度的增加而增加的趋势, 从 66 HV 增加到 128 HV, 这与合金元素的分布相对应。

(4) EBF³ 构件顶部 SH4 的平均屈服强度和极限抗拉强度为 216 MPa、360 MPa, 分别比底部 SH1 高 11.3%和 46.9%。

参考文献

- [1] Sha, G., and Cerezo, A., 2004, "Early-Stage Precipitation in Al-Zn-Mg-Cu Alloy (7050)," *Acta Materialia* 52 (15): 4503-4516.
- [2] Buha, J., Lumley, R. N., and Crosky, A. G., 2008, "Secondary Ageing in an Aluminium Alloy 7050," *Materials Science & Engineering: A* 492 (1-2): 1-10.
- [3] Yan, Wuzhu, Zhufeng Yue, and Jianwen Feng. "Study on the Role of Deposition Path in Electron Beam Freeform Fabrication Process." *Rapid Prototyping Journal* 23 (2017): 1057-068.
- [4] Filippov, A V, S V Fortuna, D A Gurianov, and K N Kalashnikov. "On the Problem of Formation of Articles with Specified Properties by the Method of Electron Beam Freeform Fabrication." *Journal of Physics. Conference Series* 1115 (2018): 42044.
- [5] Watson, J K, K M Taminger, R A Hafley, and D D Petersen. "Development of a Prototype Low-voltage Electron Beam Freeform Fabrication System." *Scientific and Technical Aerospace Reports* 41.5 (2003): Scientific and Technical Aerospace Reports, 2003 41 (5).
- [6] Li, Zixiang, Yinan Cui, Li Wang, Haoyu Zhang, Zhiyue Liang, Changmeng Liu, and Dong Du. "An Investigation into Ti-22Al-25Nb In-situ Fabricated by Electron Beam Freeform Fabrication with an Innovative Twin-wire Parallel Feeding Method." *Additive Manufacturing* 50 (2022): 102552.
- [7] Xu, Junqiang, Jun Zhu, Jikang Fan, Qi Zhou, Yong Peng, and Shun Guo. "Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Alloy Fabricated Using Electron Beam Freeform Fabrication." *Vacuum* 167 (2019): 364-73.
- [8] Taminger, Karen M., Robert A. Hafley, and Marcia S. Domack. "Evolution and Control of 2219 Aluminium Microstructural Features through Electron Beam Freeform Fabrication." *Materials Science Forum* 519-521 (2006): 1297-302.
- [9] Cui, Ran, Liang Wang, Longhui Yao, Binqiang Li, Yanqing Su, Liangshun Luo, Ruirun Chen, Jingjie Guo, and Hengzhi Fu. "On the Solidification Behaviors of AlCu5MnCdVA Alloy in Electron Beam Freeform Fabrication: Microstructural Evolution, Cu Segregation and Cracking Resistance." *Additive Manufacturing* 51 (2022): 102606. Web.
- [10] Lei, Shuang, Xianfeng Li, Yaqi Deng, Yakai Xiao, Yanchi Chen, and Haowei Wang. "Microstructure and Mechanical Properties of Electron Beam Freeform Fabricated TiB₂/Al-Cu Composite." *Materials Letters* 277 (2020): 128273.
- [11] Bian, Huakang, Kenta Aoyagi, Yufan Zhao, Chikatoshi Maeda, Toshihiro Mouri, and Akihiko Chiba. "Microstructure Refinement for Superior Ductility of Al-Si Alloy by Electron Beam Melting." *Additive Manufacturing* 32 (2020): 100982.
- [12] Moritz, Sarah, Tobias Schwaneckamp, Martin Reuber, Jonathan Lentz, Johannes Boes, and Sebastian Weber. "Impact of In Situ Heat Treatment Effects during Laser - Based Powder Bed Fusion of 1.3343 High - Speed Steel with Preheating Temperatures up to 700 °C." *Steel Research International* 94 (2023): 2200775.

版权声明: ©2024 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS