

引文格式: 吕奇钊, 周祥曼, 罗彬, 等. 电弧增材制造纳米TiC颗粒增强铝基复合材料组织与性能研究[J]. 航空制造技术, 2024, 67(10): 115-121, 130.

LÜ Qizhao, ZHOU Xiangman, LUO Bin, et al. Study on microstructure and properties of wire arc additive manufactured aluminum matrix composites reinforced by nano-TiC particles[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(10): 115-121, 130.

电弧增材制造纳米TiC颗粒增强铝基复合材料 组织与性能研究*

吕奇钊¹, 周祥曼¹, 罗彬¹, 李波¹, 吴海华¹, 张海鸥²

(1. 三峡大学机械与动力学院, 宜昌 443002;

2. 华中科技大学机械科学与工程学院, 武汉 430074)

[摘要] 在金属材料中引入第二相粒子是提高金属材料力学性能的重要手段之一。本文提出一种 Al6061 铝箔包裹 TiC 和 Al6061 的混合粉末形成一种特殊填料焊丝的 TiC/Al6061 复合材料电弧增材制造的新方法, 并分别研究质量分数为 1%、2% 和 3% 的 TiC 颗粒对制备的铝基复合材料组织与性能的影响。结果表明, TiC 质量分数为 3% 的复合材料与基体材料相比, 试样的平均晶粒尺寸由 45.5 μm 减小到 25.3 μm , 细化了 44.4%; 抗拉强度和屈服强度由 148.5 MPa 和 118.0 MPa 提升到 178.1 MPa 和 157.3 MPa, 分别提升了 19.9% 和 33.3%; 平均显微硬度由 50.5HV 增加至 65.2HV, 提升了 29.1%。理论结合及试验分析表明, TiC 的载荷传递强化和晶粒细化以及 Orowan 强化机制, 是材料力学性能提高的主要原因。

关键词: 电弧增材制造; 铝基复合材料 (AMCs); TiC; 微观组织; 力学性能

Study on Microstructure and Properties of Wire Arc Additive Manufactured Aluminum Matrix Composites Reinforced by Nano-TiC Particles

LÜ Qizhao¹, ZHOU Xiangman¹, LUO Bin¹, LI Bo¹, WU Haihua¹, ZHANG Haiou²

(1. College of Mechanical & Power Engineering of Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. School of Mechanical Science & Engineering of Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

[ABSTRACT] Introducing the second phase particles into metal materials is one of the important means to improve the mechanical properties of metal materials. In this paper, a new arc additive manufacturing method of TiC/Al6061 composite material coated with TiC reinforced particles in aluminum foil to form a special filler welding wire is presented. The effects of 1%, 2% and 3% TiC reinforced particles on the microstructure and properties of aluminum matrix composites were investigated. The results show that: Compared with the matrix material, the average grain size of the composite material with TiC mass fraction of 3% decreased from 45.5 μm to 25.3 μm , and the tensile strength and yield strength increased from 148.5 MPa and 118.0 MPa to 178.1 MPa and 157.3 MPa, which increased by 19.9% and 33.3%, respectively. The average microhardness increased from 50.5HV to 65.2HV, which increased by 29.1%. The results show that the load transfer strengthening and grain refinement of TiC and Orowan strengthening mechanism are the main reasons for the improvement of mechanical properties of the materials.

Keywords: Wire arc additive manufacturing; Aluminum matrix composites (AMCs); TiC; Microstructure; Mechanical property

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2024.10.115

* 基金项目: 国家自然科学基金 (51705287); 湖北省教育厅科研计划项目 (D20211203)。

铝合金密度低、塑性好,具有良好的导热性、导电性和耐腐蚀性^[1],是航空航天^[2-3]、交通运输^[4-6]、海洋船舶^[7]及其他装备制造行业^[8-9]的关键基础材料。尤其在航空航天领域,飞机的铝合金使用量达到70%^[10]。随着装备性能不断提升,传统铝合金已经达到了强度极限,很难再有突破性的发展,因此对高强度铝合金的需求更加迫切。铝基复合材料(Aluminum based matrix composites, AMC)可以将铝合金基体和硬质增强颗粒结合^[11],使得铝合金的强韧性进一步提高。

目前,铝合金制件的成形制造主要以工艺流程复杂且依赖模具的铸造、锻造、挤压等传统技术为主。随着装备性能的发展,传统技术不仅难以满足复杂结构整体成形的要求,更难以满足随装备设计变化所需快速响应的短流程制造需求。增材制造技术是根据三维模型直接成形的生产制造技术,可以快速近净成形复杂构件。近年来,增材制造技术^[12-15]开始广泛应用于金属构件的制造,采用材料逐渐累加的方式直接、短流程^[16]地制造零件,使各种复杂结构的轻量化设计到整体制造成为可能。目前,金属增材制造根据热源的不同,可以分为激光增材制造、电子束增材制造和电弧增材制造(Wire arc additive manufacturing, WAAM)。电弧增材制造相比于其他两种金属增材制造技术,具有设备简单、能量利用率高、对环境要求低和可制造大型零件^[13,17]的优势,开始广泛应用在铝合金材料以及铝基复合材料制备领域。Cong等^[18]采用超声波脉冲变极性TIG制备了2024铝合金薄壁结构,发现超声频率脉冲电弧可以提高试样的垂直拉伸性能,改善性能的各向同性。此外,Fu等^[19]使用电弧增材制造技术制备了TiC/AA7075复合材料,结果表明,TiC纳米颗粒的加入提高了铝合金的动态力学性能。Sun等^[20]使用直接送粉法和送丝复合电弧增材制造了添加B₄C、SiC、TiC和WC/W₂C颗粒的铝基复合材料,结果表明,陶瓷颗粒的加入可以提高复合材料的硬度和耐磨性。但是,直接制作复合焊丝成本过高,且制作焊丝需要将增强粉末加入熔融状态的金属,持续的高温会破坏增强颗粒的结构;直接送粉法会影响电弧稳定性,影响成形质量,且粉末材料的利用率较低。

本文提出了一种普通焊丝和特殊填料焊丝同时送进的TiC/Al6061复合材料电弧增材制造的新方法。基于TiC颗粒合适的比重^[20]、润湿性好^[21]和强金属性^[22]等优点,通过使用Al6061铝箔包裹TiC和Al6061混合粉末制备特殊填料焊丝的方法,快速、方便地将TiC颗粒引入基体材料,并开发了相关的送填料焊丝设备,制备了TiC质量分数不同的TiC/Al6061复合材料,详细对比分析不同质量分数的TiC对TiC/Al6061复合材料微观组织、物相成分和力学性能的影响规律和机理。

1 试验装置及材料制备方法

1.1 复合材料制备的试验装置

本文使用电弧增材TiC/Al6061复合材料制备装置及成型过程如图1所示。焊接电源为逆变式交直流脉冲氩弧焊机,运动控制装置为三轴数控平台,采用普通焊丝和特殊填料焊丝同时送进的方法制备TiC/Al6061复合材料。

1.2 增强粉末和填料焊丝的制备

本文采用的是普通焊丝和特殊填料焊丝同时送进的方法,其中特殊填料焊丝采用Al6061铝箔包裹TiC和Al6061的混合粉末。因此,要制备不同TiC质量分数的TiC/Al6061复合材料,需要计算TiC颗粒的质量分数,即

$$C_{TiC} = \frac{m_{TiC}}{m_{焊丝} + m_{铝粉} + m_{铝箔} + m_{TiC}} \quad (1)$$

式中, C_{TiC} 为TiC颗粒的质量分数, m_{TiC} 、 $m_{焊丝}$ 、 $m_{铝粉}$ 和 $m_{铝箔}$ 分别为TiC粉末、焊丝、铝粉和铝箔的质量。

第1步,计算使用的焊丝质量,即

$$m_{焊丝} = \rho \pi R^2 FS \quad (2)$$

式中, ρ 为焊丝密度; R 为焊丝半径; F 为送丝速度; S 为送丝时间。

第2步,据式(1)和(2),以及复合材料中TiC的质量分数,计算需要加入的TiC颗粒的质量,然后量取TiC颗粒。本文所使用的TiC颗粒尺寸为800 nm。将量取的TiC颗粒和Al6061粉末混合,制备TiC和Al6061混合增强粉末,制备流程如图2所示。

具体流程如下:先将TiC分散在无水乙醇溶液中(TiC和无水乙醇的质量比为1:200),经过12 h的超声振荡后使其充分分散和均匀混合;然后将一定量的铝粉加入TiC-无水乙醇悬浊液中,经过12 h的超声振荡后,在加热磁力搅拌下处理至混合溶液为糊状,再经过80℃的真空干燥6 h,得到混合粉末;为了进一步增加TiC的分散均匀性,最后使用真空球磨对混合粉末进行处理。球料质量比为3:1,转速为250 r/min,采用

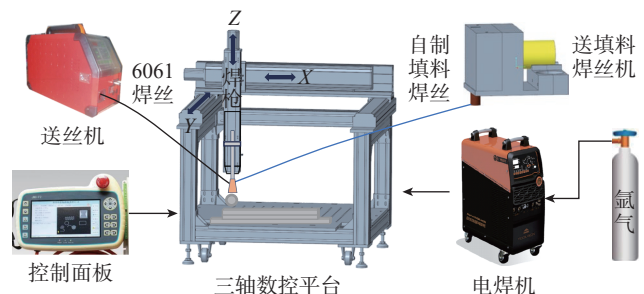


图1 TiC/Al6061复合材料电弧增材制造装置及成型方法
Fig.1 TiC/Al6061 composite material arc additive manufacturing device and molding method

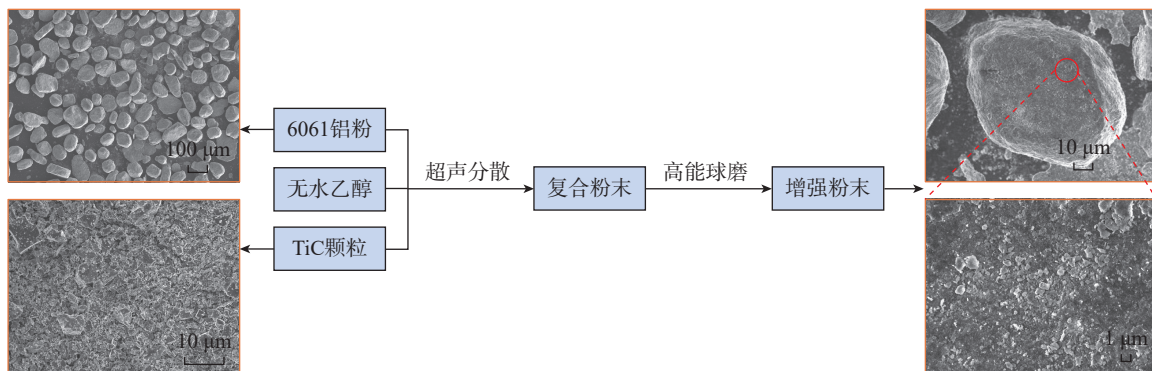


图2 增强粉末制备流程

Fig.2 Reinforced powder preparation process

分段球磨法球磨 3 h。3 种不同 TiC 质量分数的 TiC 和 Al6061 混合增强粉末的 SEM 照片如图 3 所示。

第 3 步,制作填料焊丝。将相应重量的 TiC 和 Al6061 混合粉末均匀地包裹在铝箔之中。在填料焊丝制作完成后对其进行压紧操作排除内部空气,使其变为矩形截面的填料焊丝(图 4)。为防止制作过程中填料焊丝表面粘附杂质,使用无水乙醇擦拭表面并在恒温烘干箱内烘干。

2 结果与讨论

本文所用的焊接电流为 180~160 A,随着焊接层数的增加电流逐渐降低;焊接速度 4 mm/s、送焊丝速度 240 mm/min、送自制焊丝速度 240 mm/min。

2.1 试样切取位置

通过图 1 的装置制备如图 5 所示的堆积试样,每种组分分别堆积 3 个试样,并在图 5 所示的位置取样分别制备拉伸试样、金相组织、显微硬度和物相观测试样,其中每个堆积试样切取 3 个拉伸试样。根据 GB/T228.1—2010 切取拉伸试样,拉伸试样的尺寸如图 6 所示。

2.2 物相分析

为了探究不同质量分数的 TiC 颗粒对电弧增材制造 TiC/Al6061 复合材料试样析出相的影响,利用 X 射线衍射仪对试样进行物相分析,分析结果如图 7 所示。可以看出,随着 TiC 颗粒的加入,检测到了 TiC 的衍射峰,随着 TiC 质量分数的逐渐增加, TiC 的衍射峰逐渐变强,可知 TiC 颗粒未被完全分解,并且作为异质形核使晶粒细化。从图 7 (b)、(c)和 (d)中可以看出,随着 TiC 颗粒的逐渐增多, Si 的衍射峰变弱。如图 7 (c)所示,当 TiC 的质量分数为 2% 时, Si 的衍射峰强度最低,这是因为在电弧增材制造铝基复合材料过程中 Si 发生了固溶^[23],同时 Si 元素和部分 TiC 在界面上发生化学反应,生成 Ti-Si 化合物^[24-25],使得 Si 的衍射峰强度减弱。此外,随着 TiC 颗粒的加入,物相中检测到了 Al_4C_3 ,这是部分被分

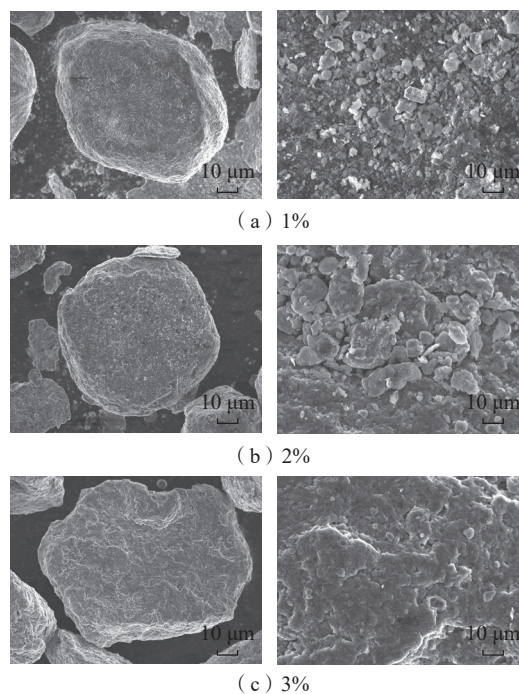


图3 不同 TiC 质量分数的 TiC 和 Al6061 混合增强粉末

Fig.3 Mixed TiC and Al6061 reinforced powders with different TiC mass fractions

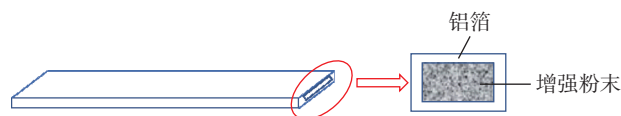


图4 填料焊丝示意图

Fig.4 Schematic diagram of filler wire

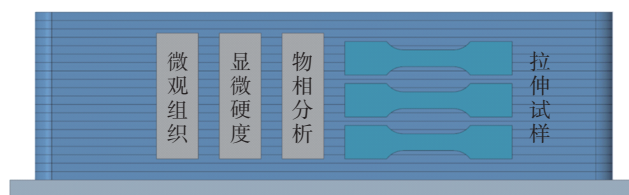


图5 试样取样位置

Fig.5 Specimen sampling location

解的 TiC 产生了游离的 C, C 和 Al 基体发生界面反应, 生成的硬脆相^[26-28]。

2.3 微观组织

图 8 为未添加 TiC 颗粒和添加 TiC 颗粒的样品沿沉积方向的截面微观组织和晶粒尺寸统计图。晶粒尺寸使用复旦大学开发的 Nano Measurer 软件进行统计。通过对比可以发现, 未添加 TiC 颗粒的试样中, 晶粒主要为柱状晶粒和粗等轴晶。其中, 柱状晶有明显的方向性; 添加 TiC 颗粒后, 晶粒由柱状晶和粗等轴晶向细等轴晶转变, 晶粒的平均尺寸减小; 当 TiC 质量分数为 3% 时, 和未添加 TiC 颗粒相比, 晶粒全部转变为细等轴晶, 晶粒尺寸由 45.5 μm 细化至 25.3 μm , 均晶粒尺寸缩小了 44.4%。这是因为 TiC 颗粒可以充当非自发形核的核心^[29], 在凝固过程中, 形成异质形核使晶粒细化。随着 TiC 质量分数的增加, 提供给铝熔体的异质形核点增加, 晶粒细化越明显。此外, 随着 TiC 质量分数的逐渐增加, 晶粒的生长方向从沿堆积方向生长逐渐变为无序生长。这表明, TiC 颗粒的加入使得晶粒生长方向区趋于随机。

图 9 为添加不同质量分数 TiC 颗粒的 SEM 图。可以看出, 随着 TiC 质量分数的增加, 越来越多的 TiC 颗粒分布于晶界。这些 TiC 颗粒在晶粒长大的过程中被推到凝固前沿, 并阻碍了晶粒的生长^[30]。

图 10 为 TiC 质量分数 3% 的 TiC/Al6061 复合材料试样 EDS 各元素总谱图。可以看出, EDS 图谱中检测到了 Ti 和 C, 证明了晶界处的颗粒为 TiC_x 相^[31], 根据 2.2 节的物相分析, 推测其可能为 TiC。

2.4 力学性能

图 11 为不同 TiC 质量分数的 TiC/Al6061 复合材料试样的拉伸性能, 可以看出, 随着 TiC 质量分数的增加, 抗拉强度和屈服强度逐渐增加, 延伸率则呈现下降趋势。当 TiC 质量分数增加到 3% 时, 试样的抗拉强度和屈服强度达到最大值, 分别为 178.1 MPa 和 157.3 MPa, 相比沉积

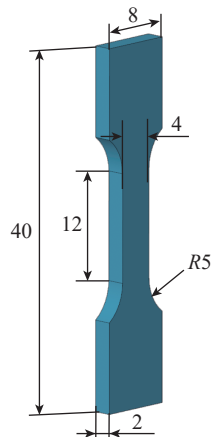


图 6 拉伸试件尺寸 (mm)

Fig.6 Tensile specimen size (mm)

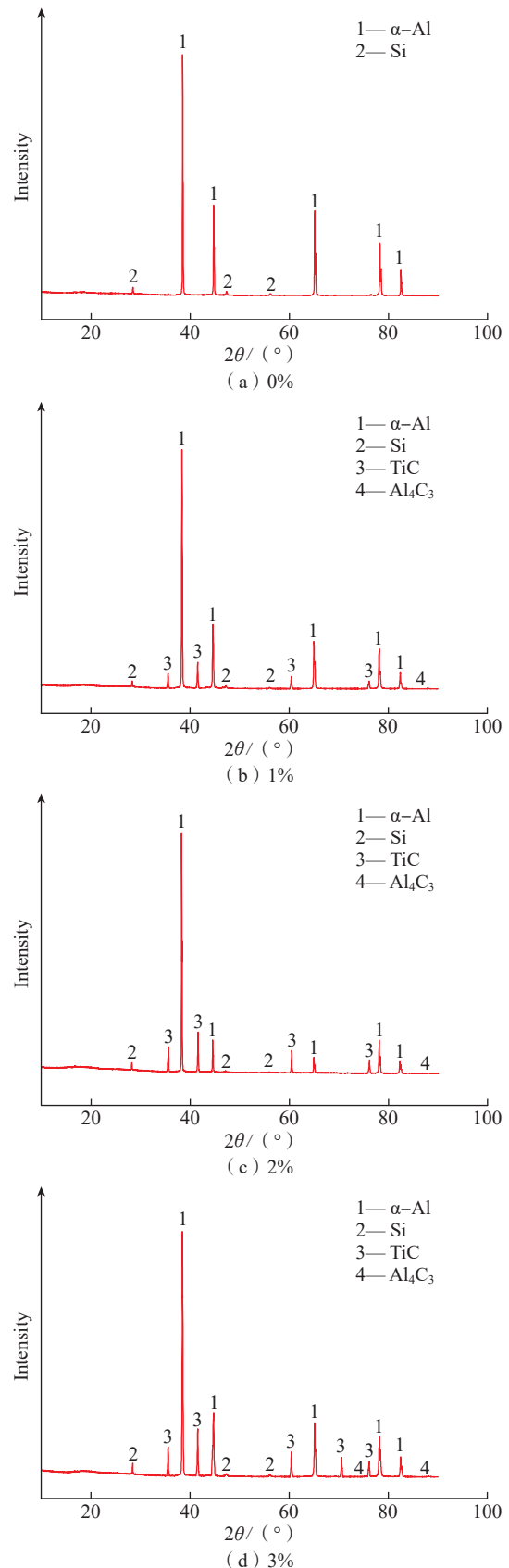


图 7 不同 TiC 质量分数的 TiC/Al6061 复合材料试样的 XRD 图谱

Fig.7 XRD patterns of TiC/Al6061 composite specimens with different TiC mass fractions

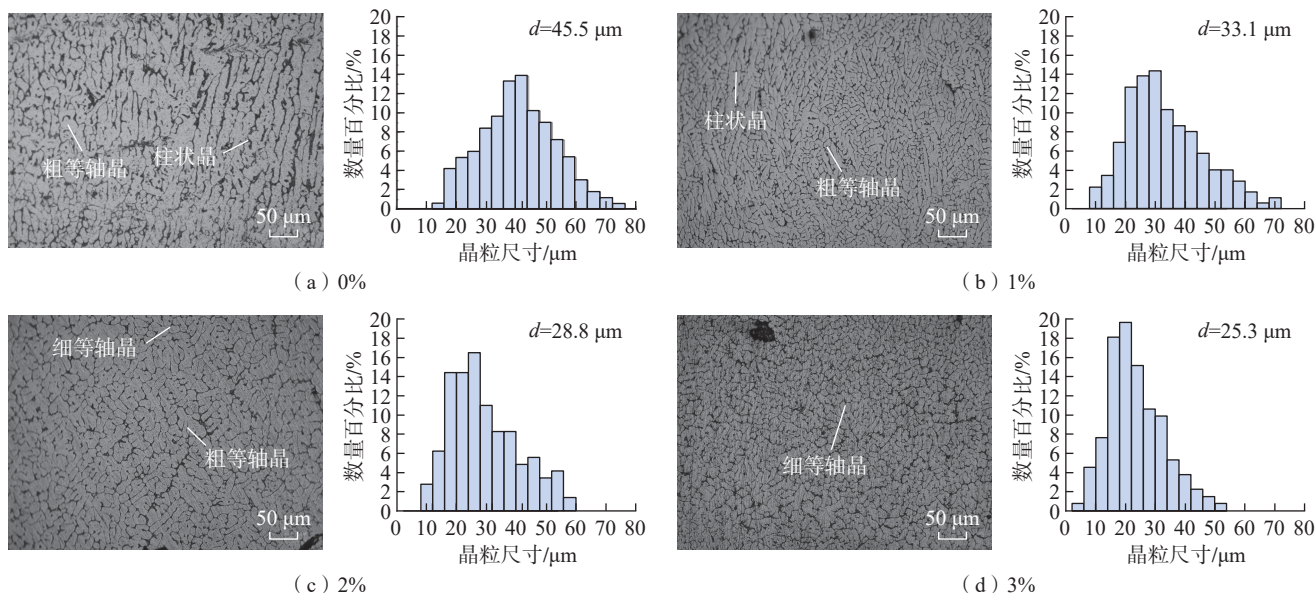


图 8 不同 TiC 质量分数的 TiC/Al6061 复合材料试样的金相组织及晶粒尺寸统计图

Fig.8 Metallographic microstructure and statistical graphs of grain size of TiC/Al6061 composite specimens with different TiC mass fractions

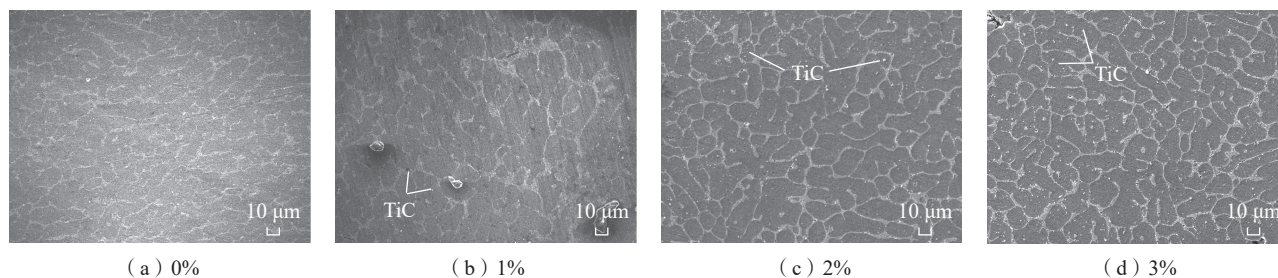
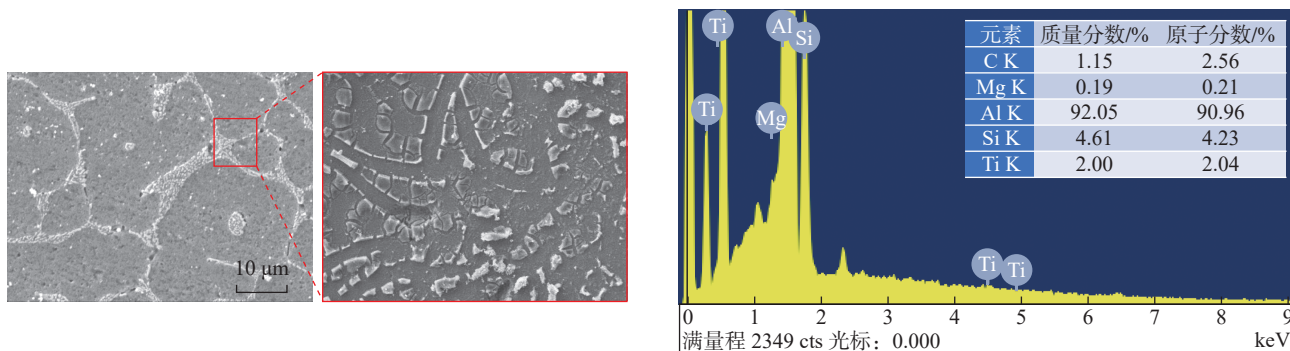


图 9 不同 TiC 质量分数的 TiC/Al6061 复合材料试样的 SEM 图

Fig.9 SEM images of TiC/Al6061 composite specimens with different TiC mass fractions



(a) 电子显微图

(b) 图10 (a) 红色区域的元素总谱图

图 10 TiC 质量分数 3% 的 TiC/Al6061 复合材料试样 EDS 各元素总谱图

Fig.10 EDS total spectrum of each element of TiC/Al6061 composite specimen with TiC mass fraction of 3%

态分别提升 19.9% 和 33.3%, 延伸率降低了 13.3%。说明 TiC 颗粒的加入提高了复合材料的强度, 但是降低了塑性。

图 12 (a) 为不同 TiC 质量分数的 TiC/Al6061 复合材料试样的显微硬度分布图, 图 12 (b) 为添加不同质量分数 TiC 颗粒的 TiC/Al6061 复合材料试样平均硬度分

布图。从图 12 (b) 中可以看出, 随着 TiC 质量分数的增加, 试样的硬度呈现逐渐上升的趋势。当 TiC 质量分数 3% 时, 试样的硬度最高, 分布区间为 60HV~70HV, 平均显微硬度增加至 65.2HV, 相比沉积态, 平均硬度提升了 29.1%。

图 13 为不同 TiC 质量分数的 TiC/Al6061 复合材料试样的拉伸断口形貌。可以看出,随着 TiC 质量分数的增加,韧窝的大小趋于稳定。但韧窝变浅且数量增多,

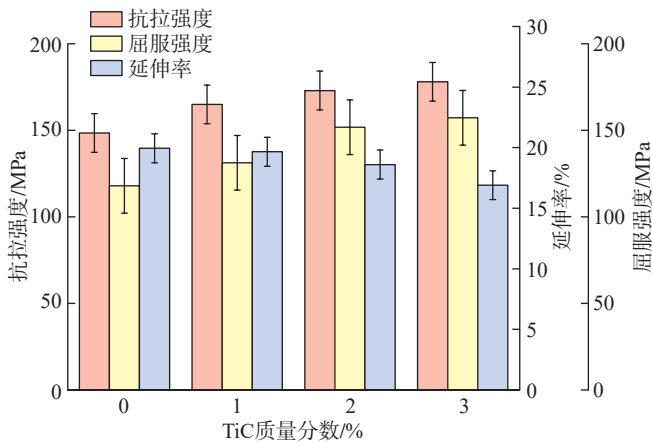


图 11 不同 TiC 质量分数的 TiC/Al6061 复合材料试样的拉伸性能
Fig.11 Tensile properties of TiC/Al6061 composite specimens with different TiC mass fractions

表明得出的复合材料的塑性随 TiC 质量分数的增加而降低^[23,32],可以看出,断裂方式都表现为有韧窝的塑性断裂。

由上文分析可知, TiC 颗粒的添加使得复合材料强度提升,主要原因:(1)TiC 颗粒的添加使复合材料晶粒尺寸减小,根据 Hall-Petch 理论^[33],晶粒的细化也可以提高强度和硬度;(2)根据 Orowan 机制^[34],外部载荷作用下,第二相的 TiC 颗粒阻碍运动中的位错继续运动,从而提高复合材料的强度;(3)TiC 颗粒的强度比 Al 基体的高,在受到外部载荷时, TiC 颗粒可以承载并传递一部分载荷,从而对铝合金起到直接强化^[35-38]的效果;(4)由于 TiC 颗粒和 Al 基体的热膨胀系数不同,在铝合金电弧增材制造的熔池形成和凝固过程中,两者的冷却收缩程度不同,产生热应力,使 TiC 颗粒和基体中的位错密度提高,从而起到间接强化效果^[15,39]。同时,由于复杂的界面反应,部分 TiC 颗粒在熔池冶金过程中分解,与合金基体发生界面反应,生成了脆硬相 Ti-

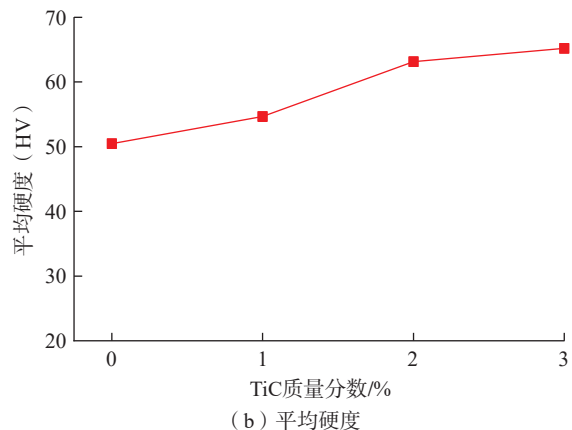
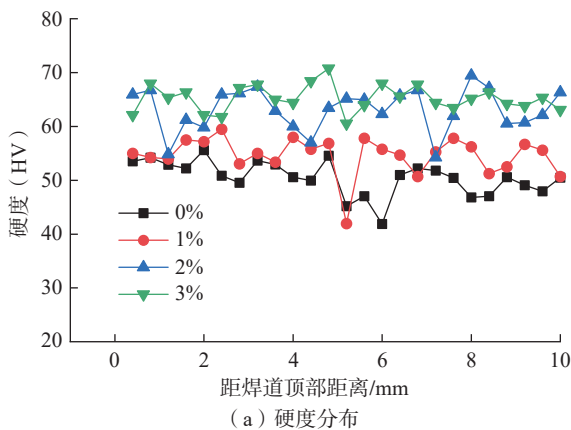


图 12 不同 TiC 质量分数的 TiC/Al6061 复合材料试样硬度
Fig.12 Hardness of TiC/Al6061 composite specimens with different TiC mass fractions

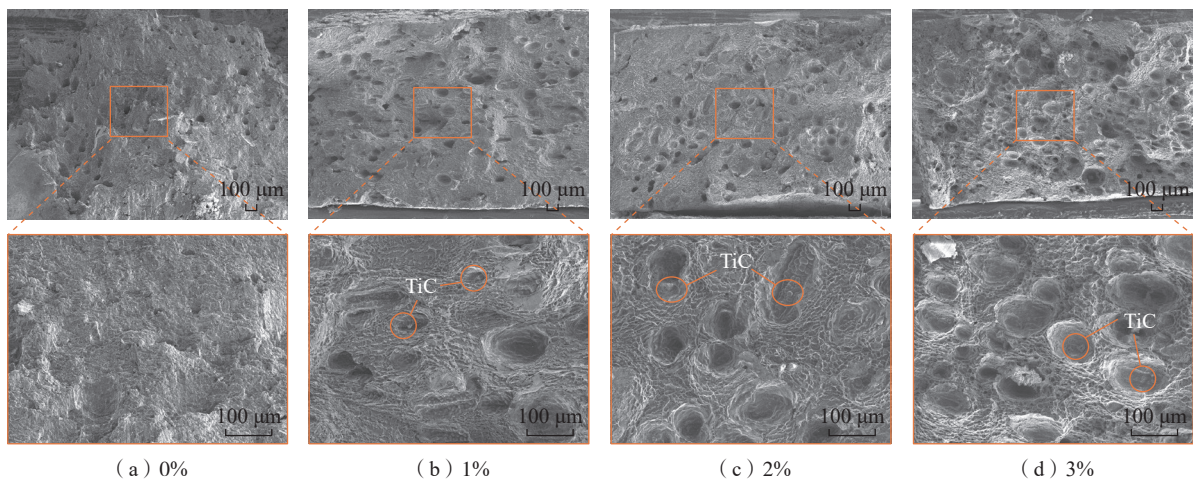


图 13 不同 TiC 质量分数的 TiC/Al6061 复合材料试样的断口显微形貌
Fig.13 Fracture microscopic morphology of TiC/Al6061 composite specimens with different TiC mass fractions

Si 化合物和 Al_4C_3 , 使得复合材料硬度增加, 但增强相与金属基体之间结合减弱, 从而降低理论的增强效果及材料的塑性。

3 结论

本文研究了不同质量分数的 TiC 对电弧增材制造铝基复合材料组织与性能的影响, 从微观组织、力学性能等方面展开分析, 得出以下结论。

(1) 添加 TiC 颗粒有助于细化晶粒, 改变晶粒生长方向。随着 TiC 质量分数的增加, 试样的平均晶粒尺寸由 $45.5\ \mu\text{m}$ 细化为 $25.3\ \mu\text{m}$, 细化了 44.4%; 晶粒种类由柱状晶向细等轴晶转变, 且组织更加均匀。

(2) 随着 TiC 质量分数的增加, 试样的抗拉强度和屈服强度都有较为明显的提升, 最高抗拉强度提升至 178.1 MPa, 屈服强度为 157.3 MPa, 分别提升了 19.9% 和 33.3%, 延伸率下降; 硬度由 50.5HV 提升至 65.2HV, 提升了 29.1%。

(3) 本文为电弧增材制造技术制备复合材料提供了新思路新方法, 为后续的研究奠定了基础。

参考文献

- [1] WU B T, PAN Z X, DING D H, et al. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: Properties, defects and quality improvement[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 35: 127–139.
- [2] AAMIR M, GIASIN K, TOLOUEI-RAD M, et al. A review: Drilling performance and hole quality of aluminium alloys for aerospace applications[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(6): 12484–12500.
- [3] 李雪伍, 王红星, 石甜, 等. 航空用超疏水 7075 铝合金的高效可控制备及防腐机理[J]. *稀有金属材料与工程*, 2022, 51(1): 6–10.
- LI Xuewu, WANG Hongxing, SHI Tian, et al. Efficient preparation and anticorrosion mechanism of superhydrophobic 7075 aviation aluminum alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2022, 51(1): 6–10.
- [4] NARHARI TEKALE S, DOLAS D R. Study of fabrication methods and various reinforcements with aluminium for automotive application—A review[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 62: 2768–2773.
- [5] HIRSCH J. Recent development in aluminium for automotive applications[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(7): 1995–2002.
- [6] GUAN W Y, GAO G J, LI J, et al. Crushing analysis and multi-objective optimization of a cutting aluminium tube absorber for railway vehicles under quasi-static loading[J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 123: 395–408.
- [7] HOSSEINABADI O F, KHEDMATI M R. A review on ultimate strength of aluminium structural elements and systems for marine applications[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 232: 109153.
- [8] LUO X J, REN C H, WU J S, et al. Experimental and computational insights into self-assembly sodium oleate on anodized aluminum interface in electric field[J]. *Corrosion Science*, 2022, 203: 110334.
- [9] AZARNIYA A, TAHERI A K, TAHERI K K. Recent advances in ageing of 7xxx series aluminum alloys: A physical metallurgy perspective[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 781: 945–983.
- [10] 尤芳怡, 钟明杰, 刘建春, 等. 铝合金磨削加工的研究综述[J]. *航空制造技术*, 2022, 65(23/24): 133–141.
- YOU Fangyi, ZHONG Mingjie, LIU Jianchun, et al. Review of research on grinding of aluminum alloy[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2022, 65(23/24): 133–141.
- [11] MONDAL S, MONDAL P, MISHRA D P. Research progress on ceramic nanomaterials reinforced aluminum matrix nanocomposites[J]. *Materials Science and Technology*, 2023, 39(15): 1841–1857.
- [12] ARMSTRONG M, MEHRABI H, NAVEED N. An overview of modern metal additive manufacturing technology[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 84: 1001–1029.
- [13] KUMAR SINHA A, PRAMANIK S, YAGATI K P. Research progress in arc based additive manufacturing of aluminium alloys—A review[J]. *Measurement*, 2022, 200: 111672.
- [14] LAVA KUMAR P, LOMBARDI A, BYCZYNSKI G, et al. Recent advances in aluminium matrix composites reinforced with graphene-based nanomaterial: A critical review[J]. *Progress in Materials Science*, 2022, 128: 100948.
- [15] VYAVAHARE S, MAHESH V, MAHESH V, et al. Additively manufactured meta-biomaterials: A state-of-the-art review[J]. *Composite Structures*, 2023, 305: 116491.
- [16] AL-RASHID A, KHAN S A, AL-GHAMDI S G, et al. Additive manufacturing: Technology, applications, markets, and opportunities for the built environment[J]. *Automation in Construction*, 2020, 118: 103268.
- [17] BARTSCH H, KÜHNE R, CITARELLI S, et al. Fatigue analysis of wire arc additive manufactured (3D printed) components with unmilled surface[J]. *Structures*, 2021, 31: 576–589.
- [18] CONG B, CAI X Y, QI Z, et al. The effects of ultrasonic frequency pulsed arc on wire + arc additively manufactured high strength aluminum alloys[J]. *Additive Manufacturing*, 2022: 102617.
- [19] FU R, DUAN S Y, MA Y L, et al. Dynamic mechanical properties of nanoparticle-enhanced aluminum alloys fabricated by arc-directed energy deposition[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 952: 169997.
- [20] SUN J X, YU H S, ZENG D X, et al. Wire-powder-arc additive manufacturing: A viable strategy to fabricate carbide ceramic/aluminum alloy multi-material structures[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 51: 102637.
- [21] PANDEY U, PUROHIT R, AGARWAL P, et al. Effect of TiC particles on the mechanical properties of aluminium alloy metal matrix composites (MMCs)[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2017, 4(4): 5452–5460.
- [22] KARANTZALIS A E, LEKATOU A, GEORGATIS E, et al. Solidification behaviour of ceramic particle reinforced Al-alloy matrices[J]. *Journal of Materials Science*, 2010, 45(8): 2165–2173.
- [23] 宗意勋. GNP-Ni/Cu 复合材料的界面调控与强化机理研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- ZONG Yixun. Strengthening mechanism and interface control of GNP-Ni/Cu composite[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.
- [24] 叶想平, 李英雷, 翁继东, 等. 颗粒增强金属基复合材料的强化机理研究现状[J]. *材料工程*, 2018, 46(12): 28–37.
- YE Xiangping, LI Yinglei, WENG Jidong, et al. Research status on strengthening mechanism of particle-reinforced metal matrix composites[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2018, 46(12): 28–37.

(下转第 130 页)

[8] 赵丽滨, 龚愉, 张建宇. 纤维增强复合材料层合板分层扩展行为研究进展[J]. 航空学报, 2019, 40(1): 522509.

ZHAO Libin, GONG Yu, ZHANG Jianyu. A survey on delamination growth behavior in fiber reinforced composite laminates[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2019, 40(1): 522509.

[9] WANG C Z, YAO L, HE W T, et al. Effect of elliptical notches on mechanical response and progressive damage of FMLs under tensile loading[J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 154: 106866.

[10] JAKUBCZAK P, BIENIAS J, SUROWSKA B. Interlaminar shear strength of fibre metal laminates after thermal cycles[J]. *Composite Structures*, 2018, 206: 876–887.

[11] GERENDT C, DEAN A, MAHRHOLZ T, et al. On the progressive failure simulation and experimental validation of fiber metal laminate bolted joints[J]. *Composite Structures*, 2019, 229: 111368.

[12] SHI Y, SWAIT T, SOUTIS C. Modelling damage evolution in composite laminates subjected to low velocity impact[J]. *Composite Structures*, 2012, 94(9): 2902–2913.

[13] 陈勇, 庞宝君, 郑伟, 等. 纤维金属层板低速冲击试验和数值仿真[J]. 复合材料学报, 2014, 31(3): 733–740.

CHEN Yong, PANG Baojun, ZHENG Wei, et al. Tests and numerical simulation on low velocity impact performance of fiber metal laminates[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2014, 31(3): 733–740.

[14] 翟豹, 王树彬, 张博明, 等. 阳极氧化工艺对纤维-铝合金层板力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2013, 30(3): 154–159.

ZHAI Bao, WANG Shubin, ZHANG Boming, et al. Effect of anodizing process on the mechanical properties of glass fiber reinforced aluminum laminates[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2013, 30(3): 154–159.

[15] 刘蒙恩, 张玺. 镁合金表面处理对镁合金-玻璃纤维/环氧树脂叠层板界面性能的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47(24): 93–97, 101.

LIU Meng'en, ZHANG Xi. Effect of magnesium alloy surface treatment on interfacial properties of fiber magnesium alloy glassy epoxy resin laminate[J]. *Hot Working Technology*, 2018, 47(24): 93–97, 101.

[16] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 纤维增强塑料拉伸性能试验方法: GB/T 1447—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of China, Standardization Administration of China. Fiber-reinforced plastics composites—Determination of tensile properties: GB/T 1447—2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005.

[17] HASHIN Z, ROTEM A. A fatigue failure criterion for fiber reinforced materials[J]. *Journal of Composite Materials*, 1973, 7(4): 448–464.

[18] HASHIN Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1980, 47(2): 329–334.

[19] LAPCZYK I, HURTADO J A. Progressive damage modeling in fiber-reinforced materials[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2007, 38(11): 2333–2341.

[20] CHEN J F, MOROZOV E V, SHANKAR K. A combined elastoplastic damage model for progressive failure analysis of composite materials and structures[J]. *Composite Structures*, 2012, 94(12): 3478–3489.

(上接第 121 页)

[25] SUN X D, ZHU H G, LI J L, et al. Influence of aluminum content on the microstructure and properties of the in situ TiC reinforced Al_xFeCoNiCu high entropy alloy matrix composites[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 743: 540–545.

[26] ZHANG S Z, CHEN Z, WEI P, et al. Wear properties of graphene/zirconia biphas nano-reinforced aluminium matrix composites prepared by SLM[J]. *Materials Today Communications*, 2022, 30: 103009.

[27] JIN Y, ZHAO X L, BAI P K, et al. The graphene/AlSi10Mg composites with fine cells and nano-Si precipitates fabricated using selective laser melting[J]. *Materials Letters*, 2022, 324: 132775.

[28] MA M M, CAO Y J, WANG Q, et al. Study on the forming mechanism and corrosion resistance of doping graphene composite film on the 6061 Al alloy[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2022, 107: 483–492.

[29] TAN Q Y, ZHANG J Q, SUN Q, et al. Inoculation treatment of an additively manufactured 2024 aluminium alloy with titanium nanoparticles[J]. *Acta Materialia*, 2020, 196: 1–16.

[30] ZHANG Y H, LIU Y, WANG J K, et al. Microstructure and wear resistance of direct laser-deposited TiC-enhanced aluminum-based composite coating for brake discs[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2023, 455: 129193.

[31] NGUYEN T P, PAZHOUHANFAR Y, ALI DELBARI S, et al. Characterization of spark plasma sintered TiC ceramics reinforced with graphene nano-platelets[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(11): 18742–18749.

[32] BHARAT N, BOSE P. Influence of nano-TiO₂ particles on the microstructure, mechanical and wear behaviour of AA7178 alloy matrix fabricated by stir casting technique[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 2023, 237(4): 753–766.

[33] CHEN L Y, XU J Q, CHOI H, et al. Processing and properties of magnesium containing a dense uniform dispersion of nanoparticles[J]. *Nature*, 2015, 528(7583): 539–543.

[34] LI R D, WANG M B, LI Z M, et al. Developing a high-strength Al-Mg-Si-Sc-Zr alloy for selective laser melting: Crack-inhibiting and multiple strengthening mechanisms[J]. *Acta Materialia*, 2020, 193: 83–98.

[35] WU T, HU Y, LENG Y L, et al. In situ observation of fracture in homogeneous and functionally graded 6061Al/SiC_p composites[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 830: 142279.

[36] OROPEZA D, HOFMANN D C, WILLIAMS K, et al. Welding and additive manufacturing with nanoparticle-enhanced aluminum 7075 wire[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 834: 154987.

[37] JIN P, LIU Y B, SUN Q J. Evolution of crystallographic orientation, columnar to equiaxed transformation and mechanical properties realized by adding TiC_{ps} in wire and arc additive manufacturing 2219 aluminum alloy[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 39: 101878.

[38] FU R, GUO Y L, CUI Y N, et al. Large-size ultra-high strength-plasticity aluminum alloys fabricated by wire arc additive manufacturing via added nanoparticles[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, 864: 144582.

[39] LAL S, SEHRAWAT R, SHARMA N. A short review on the developments of aluminium matrix composites[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2023.

通讯作者: 盛冬发, 教授, 博士生导师, 研究方向为黏弹性材料损伤与断裂。

(责编 晓月)

通讯作者: 周祥曼, 副教授, 博士, 主要从事电弧增材制造/再制造研究。

(责编 晓月)