

本文引用格式: 王勇,何承昊,米高阳,等.热处理对沉积态纳米 TiC/7034 复合材料组织性能的影响[J].自动化与信息工程,2025,46(4):51-62.

WANG Yong, HE Chenghao, MI Gaoyang, et al. Effect of heat treatment on microstructure and properties of as-deposited nano-TiC/7034 composite materials[J]. Automation & Information Engineering, 2025,46(4):51-62.

热处理对沉积态纳米 TiC/7034 复合材料组织性能的影响*

王勇¹ 何承昊² 米高阳² 洪春权³ 郑凛²

(1.上海航天动力技术研究所, 上海 201105

2.华中科技大学材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430074

3.华中科技大学机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 纳米 TiC 颗粒增强 7034 铝基复合材料因具有高强度、高硬度和低密度等特点, 已成为具有广阔应用前景的轻量化材料。针对 7034 铝合金中低沸点 Zn、Mg 元素含量较高, 在高温熔池中易沸腾蒸发, 产生气孔、裂纹等缺陷, 影响其力学性能的问题, 采用摆动激光-电弧复合增材制造工艺制备纳米 TiC 颗粒增强 7034 铝基复合材料, 并研究固溶、固溶时效处理对其微观组织结构、力学性能的影响。测试结果表明: 固溶处理可促进 MgZn₂ 相的溶解, 在固溶处理后再进行时效处理, 可使试样的第二相分布更均匀、尺寸更细化, 其抗拉强度最高提升至 569.83 MPa, 延伸率为 1.44%。通过优化固溶温度和时效工艺, 使复合材料的抗拉强度提高了 70%。

关键词: 纳米 TiC 颗粒; 7034 铝基复合材料; 激光-电弧复合增材制造; 固溶时效处理; 热处理

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

文章编号: 1674-2605(2025)04-0007-12

DOI: 10.12475/aie.20250407

开放获取

Effect of Heat Treatment on Microstructure and Properties of As-deposited Nano-TiC/7034 Composite Materials

WANG Yong¹ HE Chenghao² MI Gaoyang² HONG Chunquan³ ZHENG Lin²

(1.Shanghai Space Propulsion Technology Research Institute, Shanghai 201105, China

2.School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China 3.School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and

Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Nano-TiC particle-reinforced 7034 aluminum matrix composites exhibit high strength, high hardness, and low density, making them promising lightweight materials. However, the high content of low-boiling-point elements (Zn, Mg) in 7034 aluminum alloy leads to boiling and evaporation in the high-temperature molten pool, resulting in defects such as pores and cracks, which degrade mechanical properties. To address this, a swing laser-arc hybrid additive manufacturing process was employed to fabricate nano-TiC-reinforced 7034 aluminum matrix composites. The effects of solution treatment and solution-aging treatment on microstructure and mechanical properties were investigated. The results indicate that solution treatment promotes the dissolution of MgZn₂ phases. Subsequent aging treatment after solution treatment leads to a more uniform distribution and finer size of secondary phases, increasing the ultimate tensile strength to 569.83 MPa with an elongation of 1.44%. By optimizing the solution temperature and aging process, the tensile strength of the composite was improved by 70%.

Keywords: nano-TiC particles; 7034 aluminum matrix composites; laser-arc hybrid additive manufacturing; solution-aging treatment; heat treatment

0 引言

颗粒增强铝基复合材料是将小尺寸颗粒（多为陶瓷颗粒）添加到铝合金中形成的复合聚集体。该类材料既能保持铝合金原有的优异机械性能，又能充分发挥增强颗粒的优势，被广泛应用于航空航天、轨道交通、精密仪器等领域^[1-7]。其中，纳米 TiC（碳化钛）颗粒增强 7034 铝基复合材料（以下简称 TiC/7034 铝基复合材料）是一种理想的轻量化合金材料^[8-9]。7034 铝合金以 Zn（锌）、Mg（镁）等为主要强化元素，其中 Zn 元素含量通常为 11~12 wt%，起固溶强化与第二相强化作用。Zn、Mg 等合金元素成本相对较低，使得 7034 铝合金经济优势明显，从而得到更广泛的应用^[10-12]。TiC 是一种具有高熔点（约 3 140 ℃）、高硬度（>28 GPa）、低密度（约 4.93 g/cm³）以及优异耐磨性和耐腐蚀性的陶瓷颗粒。其化学性质稳定，在高温环境下表现出良好的抗氧化性、较低的热膨胀系数，且与铝基体匹配性较好。在 7034 铝合金中添加纳米 TiC 颗粒，可进一步改善铝基复合材料的第二相分布，细化晶粒，提高材料的耐磨性、耐腐蚀性等，从而提高 7034 铝合金的性能^[13-15]。因此，TiC/7034 铝基复合材料能够进一步拓展铝基复合材料的应用范围，发展前景广阔。

摆动激光-电弧复合增材制造工艺是在电弧送丝增材制造（wire arc additive manufacturing, WAAM）的基础上引入摆动激光，不仅能够保持 WAAM 的高

效成型特性，还能通过摆动激光优化熔池动态行为，减少沉积层的内部气孔率，提升沉积层成型质量，从而获得更均匀的微观组织结构和更优异的力学性能，是制备 7034 铝基复合材料的一种有效途径^[16-20]。

通过摆动激光-电弧复合增材制造工艺制备的 TiC/7034 铝基复合材料沉积态试样内部的陶瓷颗粒与强化相分布，可能因为沉积过程的微小扰动而发生变化，造成偏析、偏聚等现象，或由于激冷激热而产生残余应力集中^[21]。对沉积态试样进行热处理，可改善其微观组织分布、消除内部残余应力。

为此，本文利用摆动激光-电弧复合增材制造工艺制备 TiC/7034 铝基复合材料样品，并对其沉积态试样开展固溶、固溶时效处理研究，探索不同热处理工艺对 TiC/7034 铝基复合材料相分布、力学性能的影响，为其增材制造工艺优化提供新思路。

1 实验设计

1.1 材料

本实验采用尺寸为 12 mm×100 mm×200 mm 的 6061 铝合金作为基板，直径为 1.2 mm 的特制纳米 TiC 颗粒增强 7034 铝合金焊丝作为送丝材料。其中，TiC 颗粒直径范围为 200~400 nm，TiC 含量为 1.20 wt%，送丝材料与基板的化学成分如表 1 所示。送丝材料的扫描电子显微镜（scanning electron microscope, SEM）图像、能量色散 X 射线光谱仪（energy dispersive X-ray spectroscopy, EDS）面扫描结果如图 1 所示。

表 1 送丝材料与基板的化学成分（质量分数）

元素	Si	Cu	Fe	Cr	Zn	Ti	Mg	TiC	Al
送丝材料	0.04	0.15~0.40	0.08	0.01	12.20	0.30	3.20	1.20	Bal.
基板	0.40~0.80	0.01	0~0.70	0.04~0.35	0.25	0.15	0.80~1.20	—	Bal.

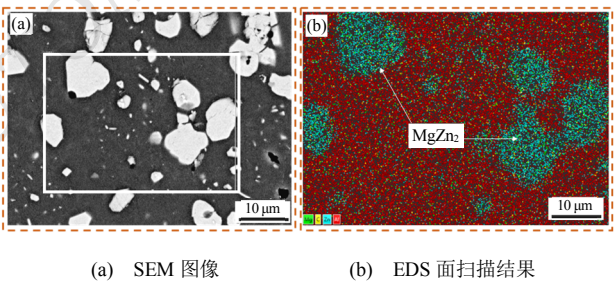


图 1 送丝材料的 SEM 图像、EDS 面扫描结果

由图 1(a)可以看出，在黑色铝基体中分布着较大的白色不规则相以及尺寸较小的球形相。

由图 1(b)可以看出：红色的大片区域为铝基体，绿色区域为 Mg、Zn 元素的聚集区，结合文献[22]可知，该绿色区域为 MgZn₂ 相，是 7034 铝合金的主要强化相，可作为第二相，用于增加晶界数量，提高铝合金抵抗位错滑移的能力，从而增强其力学性能。

1.2 实验过程

本文采用电弧引导-摆动激光后处理的复合增材工艺。实验装置主要由光纤激光器、摆动激光头、冷金属过渡 (cold metal transfer, CMT) 焊枪、CMT 电源等部分组成, 其示意图如图 2 所示。

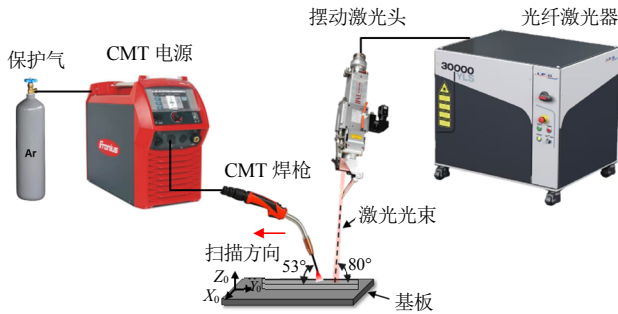


图 2 实验装置示意图

其中, 光纤激光器采用 YLS-30000 连续光纤激光器, 激光波长为 1 070 nm, 最大功率为 30 000 W; 摆动激光头采用 FLW-D50-W 激光摆动焊接头, 准直焦距为 180 mm, 聚焦镜焦距为 300 mm, 焦点光斑直径为 0.5 mm; CMT 电源为 TPS-500i 智能化焊接电源, 输入电压为三相 380 V, 频率为 50~60 Hz, 可分别实现 3~500 A 与 2~39 V 的工作电流、电压调节。CMT 焊枪与摆动激光头均通过装夹工具固定在 KUKA KR60HA 六轴机器人上, 并通过机械臂运动控制激光、电弧的移动。

在实验过程中, 摆动激光头与水平方向呈 80° 夹角, 以减少高反现象, 并避免试样成型过程中金属飞溅损伤光纤激光器; CMT 焊枪与水平方向呈 53° 夹角, 以方便送丝材料的送入与熔滴过渡。沉积开始前, 送丝材料的伸长量为 12 mm, 激光采用零离焦方式; 焦点光斑摆动后, 其摆动中心与送丝材料末端的距离为 5 mm; 试样成型过程中, 利用纯度为 99.99%、流量为 30 L/min 的氩气保护熔池, 避免熔池及熔覆层被氧化。

在制备气孔率较低的 TiC/7034 铝基复合材料样品, 并通过最佳工艺参数制备其沉积态试样后, 采用 KSL-1200X 高温马弗炉对沉积态试样进行热处理, 以进一步优化 TiC/7034 铝基复合材料的力学性能, 并

研究固溶、固溶时效处理对材料微观组织结构、力学性能的影响。沉积态试样热处理参数设置如表 2 所示, 其中升温速率为 10 °C/min。

表 2 沉积态试样热处理参数设置

热处理工艺	阶段	温度/°C	时间/h	冷却方式
固溶处理		470	2	水冷
		480	2	水冷
		490	2	水冷
固溶时效处理	固溶	480	2	水冷
	时效	110	24	空冷
		120	24	空冷
		130	24	空冷

1.3 组织表征和力学性能测试

为进行后续的组织表征和力学性能测试, 利用电火花线将沉积态 TiC/7034 铝基复合材料切割成金相试样与拉伸试样。其中, 金相试样的尺寸为 10 mm×10 mm×5 mm, 拉伸试样的尺寸示意图如图 3 所示。

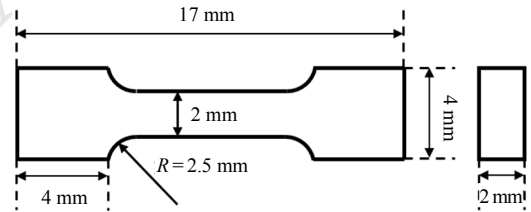


图 3 拉伸试样尺寸示意图

在利用镶样机制备标准金相试样后, 通过 Buehler EcoMet 30 自动磨抛机对金相试样进行精磨和抛光处理, 并采用凯勒试剂 (HCl:HNO₃:HF:H₂O=2:3:5:90) 进行腐蚀; 通过 Gemini SEM 300 对金相试样微观组织结构进行观察与分析, 并利用其配套的 EDS 与电子背散射衍射技术 (electron back scattering diffraction, EBSD) 分别对金相试样的元素分布、晶粒尺寸与取向、位错分布、晶粒生长情况等进行测试分析。进行 EBSD 测试前, 先使用 TenuPol-5 自动电解抛光腐蚀剂与 10% 的高氯酸酒精溶液对金相试样表面进行预处理, 以去除表面应力层。

本文力学性能测试主要包括显微硬度和拉伸性能测试。其中, 显微硬度测试采用 HVS-1000A 维氏

硬度计, 测试载荷为 200 g, 加载压力后的保压时间为 15 s, 测试点位分布为十字形, 横向与纵向各 10 个点, 共计 19 个点, 测试点间距为 200 μm ; 拉伸性能测试在 Instron 68TM-50 通用测试系统上进行, 并配备 Instron AVE-2 非接触式视频引伸计, 恒定应变速率为 0.001 s^{-1} 。每个样品至少重复测试 3 次, 以确保结果的准确性。

2 结果与讨论

7034 铝合金因合金元素含量较高, 在热加工过程中易出现元素偏析现象, 可能导致局部应力集中, 进而成为裂纹萌生的起始点, 最终对 7034 铝基复合材料的力学性能产生不利影响。因此, 需要对沉积态试样进行热处理, 以改善其内部成分分布, 消除残余应力。本文先通过分析不同固溶、固溶时效处理试样, 观察其微观组织结构和成分的变化, 再对不同试样的力学性能进行测试, 建立不同热处理工艺与 7034 铝基复合材料组织性能之间的联系。

对沉积态 TiC/7034 铝基复合材料进行热处理之前, 先通过差示扫描量热法 (differential scanning calorimetry, DSC) 对其进行分析, 结果如图 4 所示。

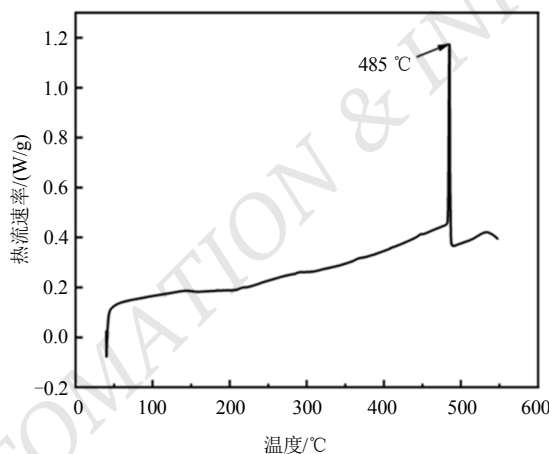


图 4 沉积态 TiC/7034 铝基复合材料的 DSC 曲线

由图 4 可以看出, 沉积态 TiC/7034 铝基复合材料的 DSC 曲线在约 485 $^{\circ}\text{C}$ 时出现一个明显的峰值, 对应 $\alpha\text{-Al}$ 相的熔化。根据文献[23-24], 铝合金的最佳固溶温度应低于其共晶反应温度 20~50 $^{\circ}\text{C}$ 。考虑

到 DSC 测试时可能存在温度滞后现象, 本文设定固溶温度为 470、480、490 $^{\circ}\text{C}$ 。

2.1 固溶处理对沉积态 TiC/7034 铝基复合材料的影响

2.1.1 微观组织结构影响

沉积态 TiC/7034 铝基复合材料试样及在不同固溶温度 (470、480、490 $^{\circ}\text{C}$) 下所得固溶处理试样的 SEM 图像如图 5 所示。470 $^{\circ}\text{C}$ 固溶处理试样 SEM 图像中各点 (点 1、点 2、点 3 (母材)、点 4) 的 EDS 能谱如表 3 所示。

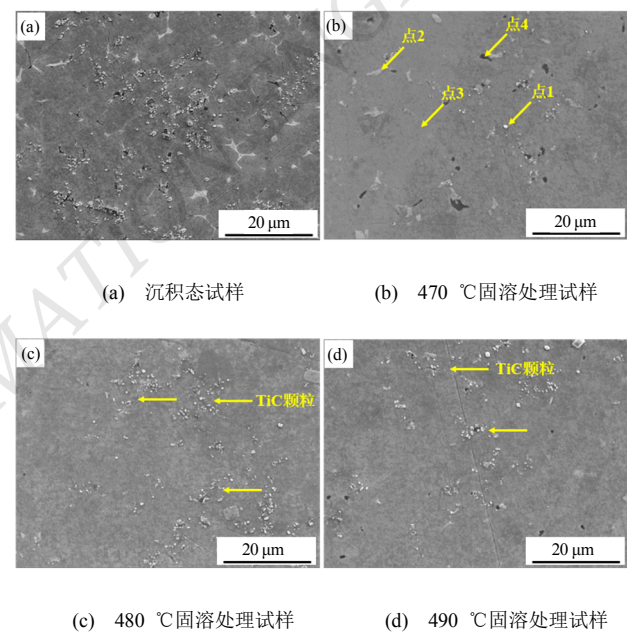


图 5 沉积态试样与固溶处理试样的 SEM 图像

表 3 470 $^{\circ}\text{C}$ 固溶处理试样 SEM 图像中各点的 EDS 能谱

	元素的原子百分比/%					可能相
	Al	Ti	C	Zn	Mg	
点 1	30.6	25.3	41.5	1.3	1.2	TiC
点 2	74.0	0.2	22.4	1.8	1.6	Al
点 3	91.1	0.5	2.1	2.8	3.5	Al
点 4	81.7	0.3	13.0	2.3	2.6	Al

由图 5 可以看出: 随着固溶温度的升高, 固溶处理试样中 MgZn_2 相的数量明显减少, 甚至在固溶温度升至 480 $^{\circ}\text{C}$ 后, MgZn_2 相几乎消失; TiC 增强相 (点

1) 的分布更均匀, TiC 聚集相数量减少, 这是由于固溶处理促进了 MgZn_2 相向铝基体中溶解, 从而减少了第二相分布; 同时, 晶界或亚晶界处的 MgZn_2 相溶解, 加之固溶温度升高对 TiC 颗粒运动的促进作用, 使 TiC 颗粒分布更加分散; 但当 MgZn_2 相溶解后, 铝基体未能及时补充, 形成类似缩松的缺陷结构(点 4), 减小了材料受力面积, 降低了其力学性能; 灰白色相(点 2) 的数量也随升温分解而逐渐减少。

为了进一步研究不同固溶温度对沉积态 TiC/7034 铝基复合材料微观组织结构的影响, 对固溶处理试样进行 EBSD 分析, 其反极图(inverse pole figure, IPF) 如图 6 所示。

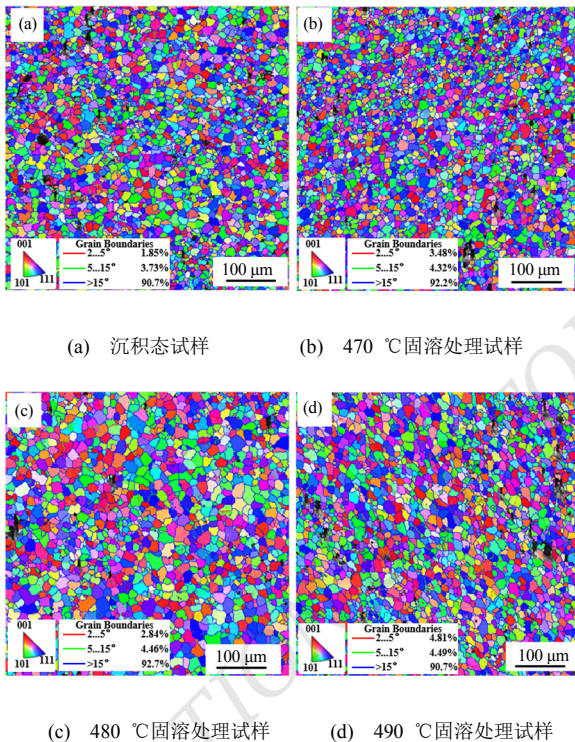
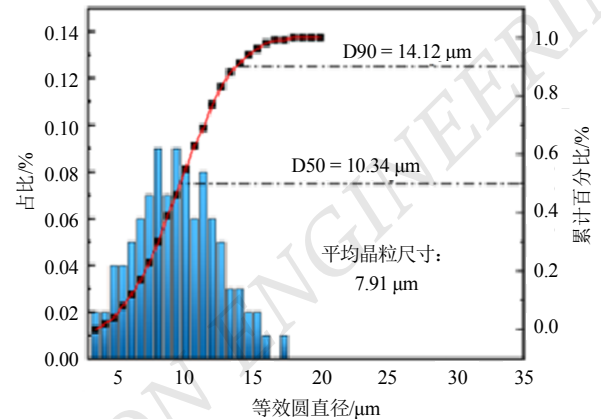


图 6 沉积态试样与固溶处理试样的 EBSD-IPF

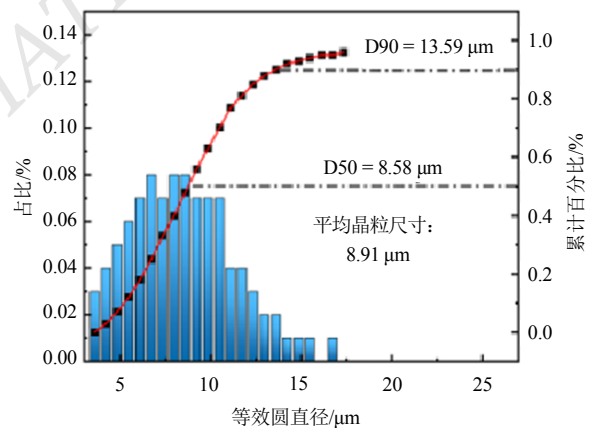
由图 6 可以看出: 经固溶处理后的 TiC/7034 铝基复合材料沉积态试样仍为等轴晶, 且晶粒尺寸较为均匀, 未见明显长大现象; TiC 颗粒主要分布在 Al 晶粒内部, 在分别进行 470、480 °C 固溶处理后, 低角度晶界(2°~5°) 占比从沉积态的 1.85% 分别增加到 3.48%、2.84%, 中角度晶界(5°~15°) 占比从沉积态的 3.73% 增加到 4.32%、4.46%; 当固溶温度升至 490 °C

时, 低角度晶界占比进一步增加至 4.81%, 说明随着固溶温度升高, 沉积态 TiC/7034 铝基复合材料的抗裂纹能力有所下降。

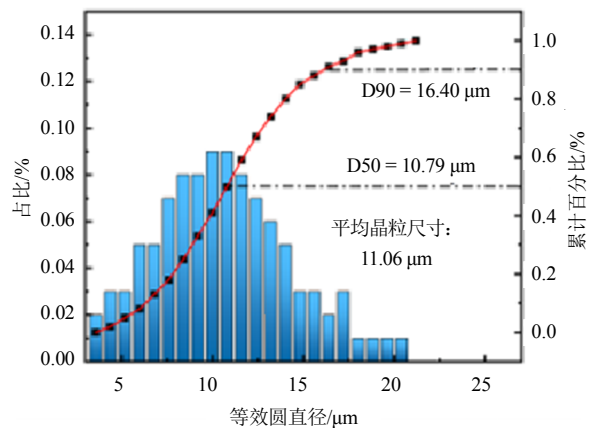
沉积态试样与固溶处理试样的晶粒尺寸统计图如图 7 所示。



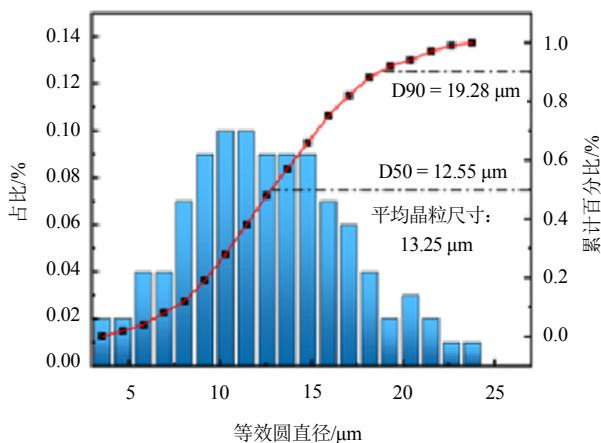
(a) 沉积态试样



(b) 470 °C 固溶处理试样



(c) 480 °C 固溶处理试样

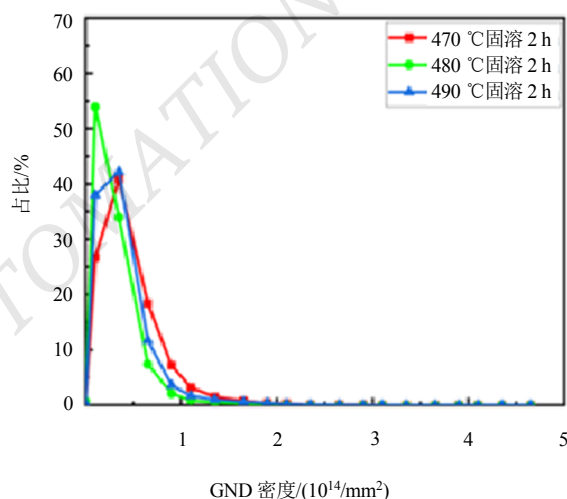


(d) 490 °C 固溶处理试样

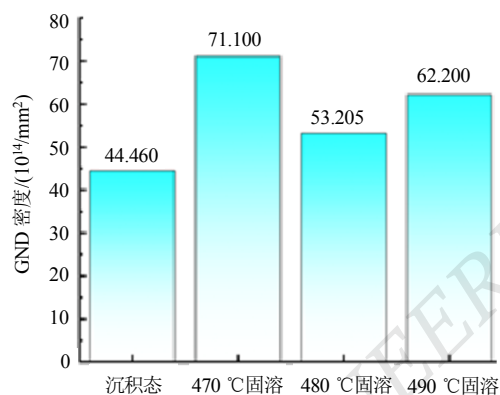
图 7 沉积态试样与固溶处理试样的晶粒尺寸统计图

由图 7 可以看出：相比于沉积态试样，固溶处理试样的晶粒尺寸均有增加，但幅度不大，当固溶温度从 470 °C 升至 490 °C 时，晶粒尺寸从 8.91 μm 增长到 11.06 μm (480 °C) 与 13.25 μm (490 °C)；当固溶温度为 470 °C 时，固溶处理试样中 90% 的晶粒尺寸与沉积态试样相差不大，但当固溶温度升至 480 °C 以上时，晶粒增长的趋势变得更加明显。

固溶处理试样的几何必需位错 (geometrically necessary dislocations, GND) 密度变化曲线与统计图如图 8 所示。



(a) 固溶处理试样的 GND 密度变化曲线



(b) 固溶处理试样的 GND 密度统计图

图 8 固溶处理试样 GND 密度的变化曲线与统计图

由图 8 可以看出，相比于沉积态试样，固溶处理试样的 GND 密度增加，这可能是固溶处理淬火过程中快速冷却产生的热应力所致。

2.1.2 力学性能影响

沉积态 TiC/7034 铝基复合材料固溶处理试样的显微硬度测试结果如图 9 所示。

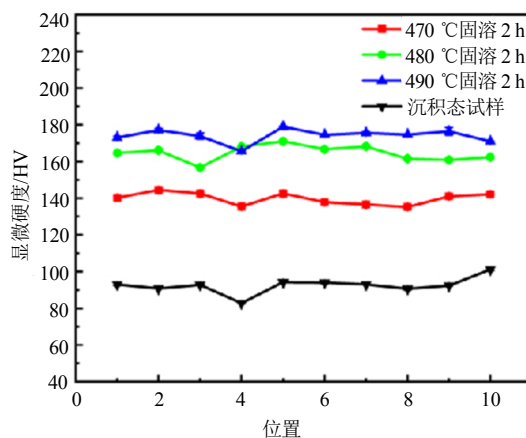


图 9 固溶处理试样的显微硬度测试结果

由图 9 可以看出：相比于沉积态试样，固溶处理试样的显微硬度均有明显提升，且随着固溶温度的升高，提升幅度趋势增加，平均显微硬度从沉积态的 92.47 HV 增长到 139.80、164.60、174.04 HV，分别增长了 51.2%、78.0%、88.2%；固溶处理试样显微硬度的波动程度有所减小，说明其微观组织变得更加均匀。

沉积态试样与固溶处理试样的应力应变曲线如

图 10 所示。

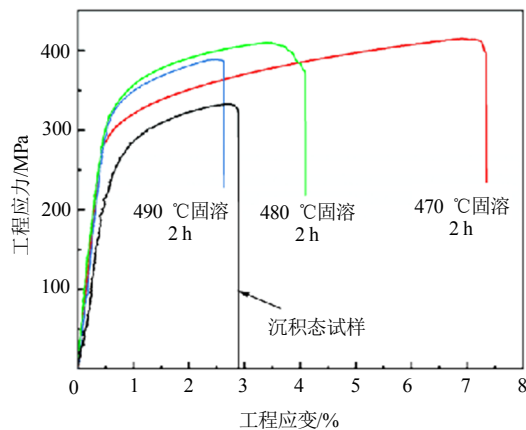
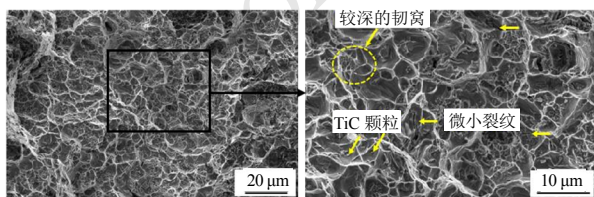


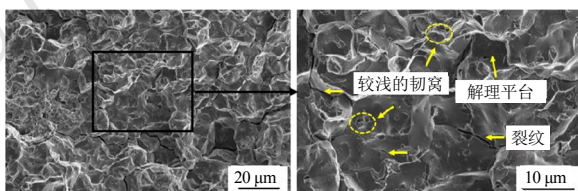
图 10 沉积态试样与固溶处理试样的应力应变曲线

由图 10 可以看出: 相比于沉积态试样, 固溶处理试样的抗拉强度均得到提升, 当固溶温度从 470 °C 升至 490 °C 时, 抗拉强度从沉积态的 330.00 MPa 分别提升至 413.56、409.62、388.46 MPa, 延伸率分别下降至 7.34%、4.07%、2.62%; 在经 470 °C 固溶处理后, 不仅试样的抗拉强度得到一定程度的提升, 还较大提升了其延展性; 当固溶温度为 480 °C 时, 试样的抗拉强度少许降低, 延伸率大幅降低, 但仍高于沉积态试样; 当固溶温度为 490 °C 时, 试样抗拉强度的提升幅度进一步减小, 同时延伸率降低, 且低于沉积态试样, 这表明当固溶温度过高时, 试样的抗拉强度与延伸率提升效果被削弱。

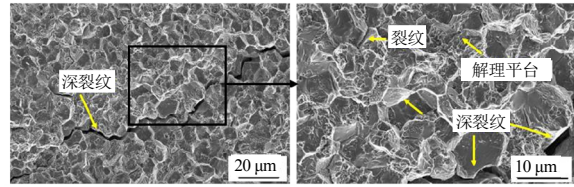
不同固溶处理试样的拉伸断口形貌如图 11 所示。



(a) 470 °C 固溶



(b) 480 °C 固溶



(c) 490 °C 固溶

图 11 不同固溶处理试样的拉伸断口形貌

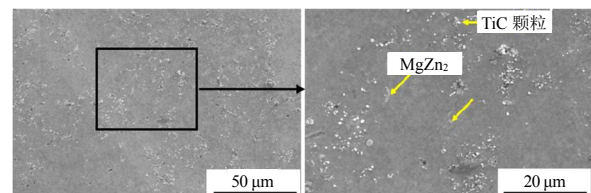
由图 11 可以看出: 在 470 °C 固溶处理试样断口上分布着许多韧窝, 深度较大且数量较多, 伴有极少量的微小裂纹, 说明其断裂形式为准解理断裂 (以韧性断裂为主, 仅有少量解理断裂); 在 480 °C 固溶处理试样断口上, 韧窝数量明显减少、深度变浅, 且裂纹数量和尺寸增加, 出现了更多解理平台, 说明解理断裂的占比增加; 在 490 °C 固溶处理试样断口上出现连贯、较深的大裂纹, 解理平台数量增多, 但仍存在少量河流状花样, 说明其断裂形式为解理断裂占比更高的准解理断裂。

综上所述: 经固溶处理后, TiC/7034 铝基复合材料的抗拉强度有小幅提升, 这是由于沉积态试样铝基体中 TiC 颗粒相与 η 相 MgZn_2 主要分布在晶界上, 在成型过程中抑制了晶粒增长, 在抵抗材料所受外力时, 第二相可增加晶界数量, 阻碍位错运动, 从而提高材料的抗拉强度; η 相 MgZn_2 溶解进入铝基体中, TiC 相在淬火过程中因快速冷却, 限制了 TiC 颗粒向晶界扩散, 导致晶界上析出的第二相数量减少, 从而提高了材料的延伸率, 但当固溶温度逐渐升高, 晶粒尺寸增大, 延伸率会逐渐下降。

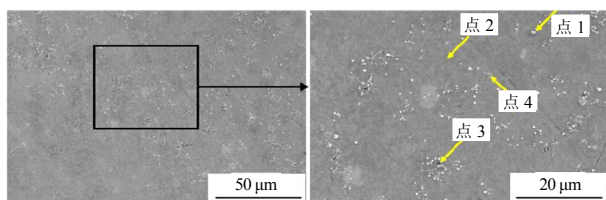
2.2 固溶时效处理对沉积态 TiC/7034 铝基复合材料的影响

2.2.1 微观组织结构影响

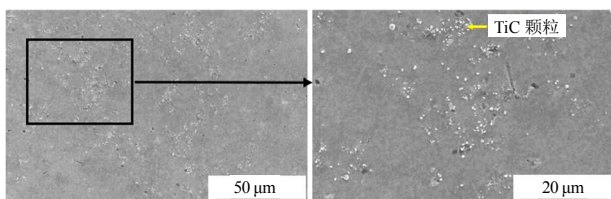
固溶时效处理试样的 SEM 图像如图 12 所示, 各点的 EDS 能谱结果如表 4 所示。



(a) 480 °C 固溶+110 °C 时效



(b) 480 °C 固溶+120 °C 时效



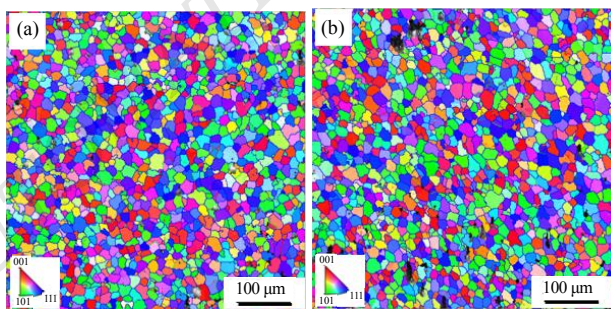
(c) 480 °C 固溶+130 °C 时效

图 12 固溶时效处理试样的 SEM 图像

表 4 固溶时效处理试样各点的 EDS 能谱结果

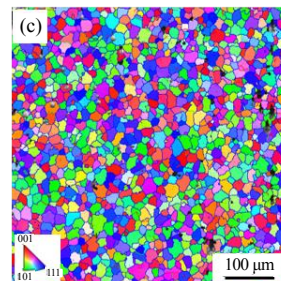
	元素的原子百分比/%					可能相
	Al	Ti	C	Zn	Mg	
点 1	14.6	42.0	42.0	0.6	0.7	TiC
点 2	73.8	14.1	6.8	3.3	2.0	Al+TiC
点 3	89.2	0.2	4.3	3.2	3.2	Al+MgZn ₂
点 4	77.6	2.8	14.9	2.0	2.7	Al

为了进一步分析固溶时效处理对试样微观形貌的影响，对固溶后不同时效温度所得的试样进行 EBSD 分析，IPF 如图 13 所示。



(a) 480 °C 固溶+110 °C 时效

(b) 480 °C 固溶+120 °C 时效

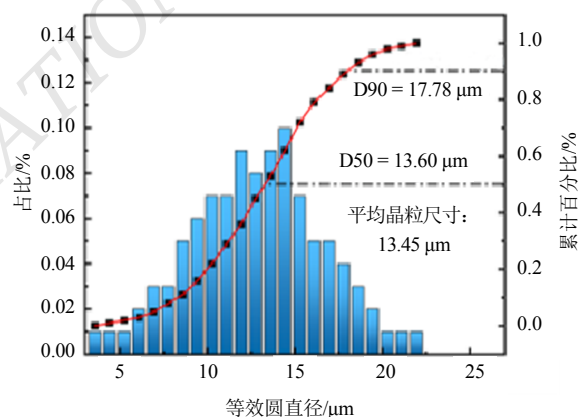


(c) 480 °C 固溶+130 °C 时效

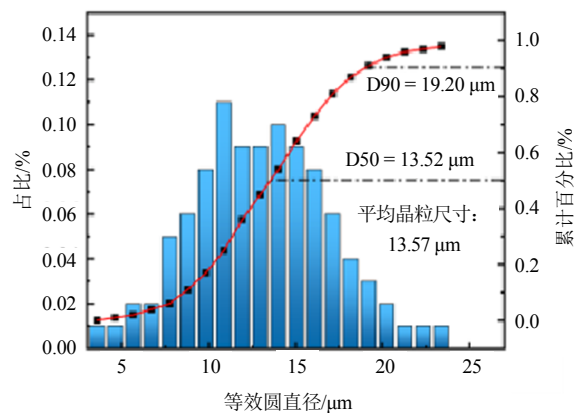
图 13 固溶时效处理后试样的 IPF

由图 13 可以看出，固溶时效处理试样内部晶粒仍为等轴晶，且晶粒尺寸分布较为均匀。

不同固溶时效处理试样晶粒尺寸的统计结果如图 14 所示。



(a) 480 °C 固溶+110 °C 时效



(b) 480 °C 固溶+120 °C 时效

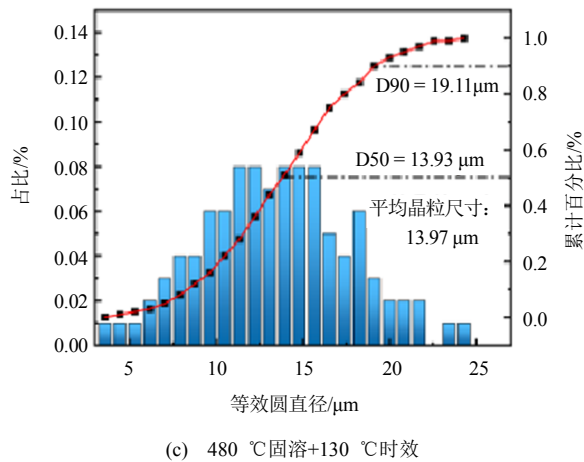


图 14 不同固溶时效处理试样的晶粒尺寸统计

由图 14 可以看出: 与沉积态试样相比, 固溶时效处理试样的平均晶粒尺寸分别增加到 $13.45\ \mu\text{m}$ (固溶后 $110\ ^\circ\text{C}$ 时效)、 $13.57\ \mu\text{m}$ (固溶后 $120\ ^\circ\text{C}$ 时效)、 $13.97\ \mu\text{m}$ (固溶后 $130\ ^\circ\text{C}$ 时效), 且随着时效温度的升高, 平均晶粒尺寸也有小幅增长, 这是由于固溶时效处理过程中, 试样吸收了更多的热量。

2.2.2 力学性能影响

固溶时效处理试样的显微硬度测试结果如图 15 所示。

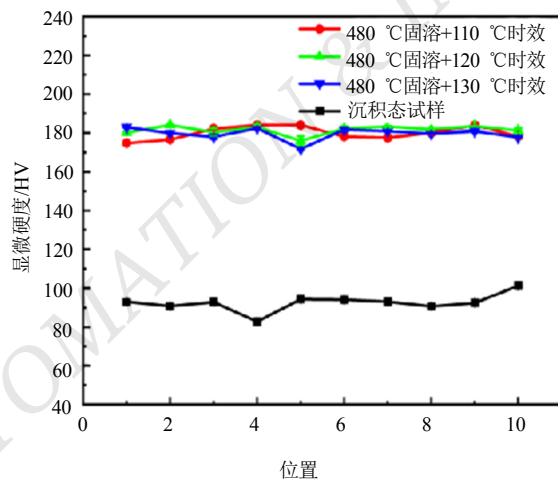


图 15 固溶时效处理试样的显微硬度测试结果

由图 15 可以看出: 固溶时效处理试样的显微硬度更趋于相同, 分别为 179.95、181.58、179.61 HV,

相较于沉积态试样分别提升了 94.6%、96.4%、94.2%; 显微硬度的波动幅度更小, 说明经固溶时效处理后, 试样的微观组织更加均匀。

对固溶时效处理试样进行拉伸性能测试, 其应力应变曲线如图 16 所示。

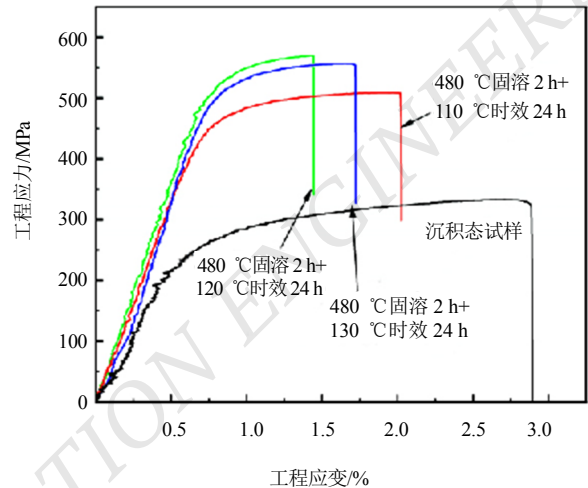
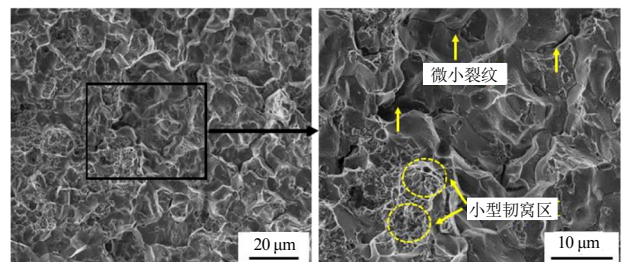
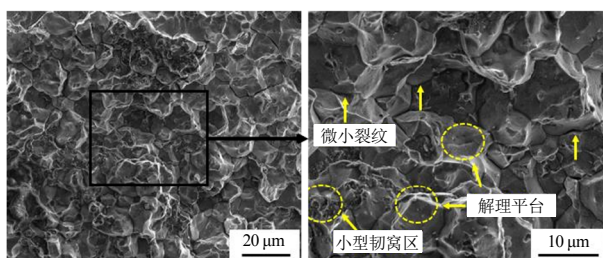


图 16 固溶时效处理试样的应力应变曲线

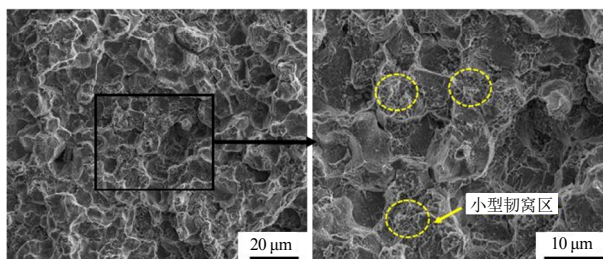
由图 16 可以看出: 相比于沉积态试样, 固溶时效处理后试样的抗拉强度均得到较大提升, 分别为 508.67 MPa (固溶+ $110\ ^\circ\text{C}$ 时效)、569.83 MPa (固溶+ $120\ ^\circ\text{C}$ 时效)、556.56 MPa (固溶+ $130\ ^\circ\text{C}$ 时效), 提升幅度分别为 53.9%、72.4%、68.5%; 延伸率有一定程度的下降, 分别为 2.01%、1.44%、1.72%, 下降幅度为 20.6%、43.1%、32.0%; 与固溶处理试样相比, 固溶时效处理试样的抗拉强度提升明显, 但延伸率下降幅度较大。

固溶时效处理试样的拉伸断口形貌如图 17 所示。

(a) $480\ ^\circ\text{C}$ 固溶+ $110\ ^\circ\text{C}$ 时效



(b) 480 °C 固溶+120 °C 时效



(c) 480 °C 固溶+130 °C 时效

图 17 固溶时效处理试样的拉伸断口形貌

由图 17 可以看出:在 480 °C 固溶+110 °C 时效处理试样断口上存在较浅的韧窝,更多区域为面积较大的解理平台,部分解理平台间可见微小的沿晶裂纹,说明该试样的断裂形式为准解理断裂,其中解理断裂的占比更高;在 480 °C 固溶+120 °C 时效处理试样断口上,解理平台数量增多、面积增大,解理平台间有较深的沟壑,结合该试样的应力应变曲线(延伸率较低),说明试样的韧性不足,但裂纹深度相对较浅,说明该试样的抗拉强度有所提高;在 480 °C 固溶+130 °C 时效处理试样断口上,韧窝数量增加,解理面光滑程度较低,可观察到河流花样,结合拉伸试验结果,说明其延展性得到改善。

综上所述:固溶时效处理试样相比固溶处理试样具有更高的抗拉强度和更低的延展率;相比时效处理试样,具有更高的延展率和抗拉强度。根据固溶时效处理试样拉伸性能的变化规律,其抗拉强度、延展性均有一定改善,且最高抗拉强度出现在 480 °C 固溶+120 °C 时效处理试样,更好的延展性出现在 480 °C 固溶+110 °C 时效处理试样,这与前文所得结论一致。

在固溶时效处理后,可使固溶处理所得的过饱和

固溶体趋于稳定,第二相析出,从而在晶界处形成均匀稳定的强化相,在获得良好的抗拉强度的同时保持较好的延伸率。

3 结论

本文主要研究固溶、固溶时效处理对摆动激光-电弧复合增材制造工艺制备的沉积态纳米 TiC/7034 铝基复合材料的微观组织结构、力学性能的影响:

1) 在对沉积态试样分别进行 470、480、490 °C 固溶处理 2 h 后,试样内部的 η 相 MgZn_2 数量明显减少,TiC 颗粒分布变得更均匀,且随着固溶温度升高,试样的晶粒尺寸也逐步增加,且全部由细小的等轴晶组成;

2) 沉积态试样经 470 °C 固溶处理 2 h 后,抗拉强度提高至 413.56 MPa,延伸率升高至 7.34%,这是由于固溶处理使原来分布在晶界上的 MgZn_2 相溶入铝基体中,形成过饱和固溶体,减弱了对晶界的钉扎作用,从而减小了试样受拉时的阻力,进而提升了延伸率;

3) 沉积态试样经 480 °C 固溶处理 2 h 后,再分别进行 110、120、130 °C 24 h 的时效处理,此时晶界上未大量析出 MgZn_2 相,但 TiC 颗粒分布得到改善,均匀分布在铝基体晶界附近,起到强化晶界的作用。沉积态试样经 480 °C 固溶处理 2 h+120 °C、24 h 时效处理后,抗拉强度达到 569.83 MPa,延伸率降低至 1.44%,但降低幅度低于时效处理所得试样。

©The author(s) 2024. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

参考文献

- [1] ZHANG H, ZHANG B, GAO Q, et al. A review on microstructures and properties of graphene-reinforced aluminum matrix composites fabricated by friction stir processing[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021,68:126-135.
- [2] LUO K, XIONG H, ZHANG Y, et al. AA1050 metal matrix composites reinforced by high-entropy alloy particles via stir casting and subsequent rolling[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022,893:162370.

- [3] SINGH L, KUMAR S, RAJ S, et al. Aluminium metal matrix composites: Manufacturing and applications[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021,1149(1): 12025.
- [4] ASHEBIR D A, MENGESHA G A, SINHA D K, et al. An insight into mechanical and metallurgical behavior of hybrid reinforced aluminum metal matrix composite[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2022(1): 7843981.
- [5] IDUSUYI N, OLAYINKA J I. Dry sliding wear characteristics of aluminium metal matrix composites: A brief overview[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019,8(3):3338-3346.
- [6] INCE J C, PEERZADA M, MATHEWS L D, et al. Overview of emerging hybrid and composite materials for space applications[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2023, 6(4):130.
- [7] KHALID M Y, UMER R, KHAN K A. Review of recent trends and developments in aluminium 7075 alloy and its metal matrix composites (MMCs) for aircraft applications[J]. Results in Engineering, 2023,20:101372.
- [8] YUAN J, PAN S, ZHENG T, et al. Nanoparticle promoted solution treatment by reducing segregation in AA7034[J]. Materials Science & Engineering, 2021,822:141691.
- [9] LIU W, CHEN N, LIU J, et al. Phase analysis and mechanical properties at room and high temperatures of nano-treated Al-Zn-Mg-Cu alloy fabricated by wire arc additive manufacturing[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025,1018:179178.
- [10] WANG F, XIONG B, ZHANG Y, et al. Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of the spray-deposited Al-10.8Zn-2.8Mg-1.9Cu alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2008, 486(1-2): 648-652.
- [11] LI H, CAO F, GUO S, et al. Effects of Mg and Cu on microstructures and properties of spray-deposited Al-Zn-Mg-Cu alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017,719:89-96.
- [12] WANG H, XU J, KANG Y, et al. Study on inhomogeneous characteristics and optimize homogenization treatment parameter for large size DC ingots of Al-Zn-Mg-Cu alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014,585:19-24.
- [13] ZOU H, LI Y, WANG H, et al. Effect of different Zn/Mg ratios on the uniformity of 7185+TiB₂/TiC aluminum alloy thick plates[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 32:1286-1298.
- [14] YAO L, WANG L, CUI R, et al. Enhancing strength and toughness of 7xxx aluminum alloys via TiC nanoparticles in electron beam rapid additive manufacturing[J]. Materials Science & Engineering. A, Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing, 2025,931:148195.
- [15] ZHENG T, PAN S, MURALI N, et al. Selective laser melting of novel 7075 aluminum powders with internally dispersed TiC nanoparticles[J]. Materials Letters, 2022, 319: 132268.
- [16] FETZER F, SOMMER M, WEBER R, et al. Reduction of pores by means of laser beam oscillation during remote welding of AlMgSi[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 108: 68-77.
- [17] WANG L, GAO M, ZHANG C, et al. Effect of beam oscillating pattern on weld characterization of laser welding of AA6061-T6 aluminum alloy[J]. Materials & Design, 2016, 108:707-717.
- [18] ZHANG M, WANG C, MI G, et al. Laser beam oscillation welded SiCp/2xx Al alloy: Microstructure, phase interface and mechanical properties[J]. Materials Science & Engineering. A, Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing, 2021,820:141482.
- [19] HAO K, GAO Y, XU L, et al. Plasticity improvement coupled by carbon nanotubes and beam oscillation in laser-arc hybrid welding of magnesium alloy[J]. Materials Science & Engineering. A, Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing, 2022,857:144093.
- [20] 李炳尘.TiC 颗粒增强 2219 铝合金摆动激光-电弧复合增材制造工艺研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2023.
- [21] 肖永康.TiSiC/IN625 复合材料激光定向能量沉积成形工艺与性能调控[D].武汉:华中科技大学,2024.
- [22] QIN Y, YUE S, SUN X, et al. Enhancing strength performance of laser welded 7075 aluminum alloy joints with TiC nanoparticle-mixed filler powder[J]. Materials Science & Engineering. A, Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing, 2024,915:147285.
- [23] 李宁.激光粉末床熔融制备 SiC-TiB₂ 增强 7075 铝基复合材料组织与性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2023.
- [24] 申志刚.TiB₂ 颗粒增强的 7075 铝基复合材料 TIG 电弧增材制造工艺与强化机理研究[D].太原:太原科技大学,2024.

作者简介:

王勇, 男, 1982 年生, 硕士研究生, 副研究员, 主要研究方向: 材料加工技术。E-mail: dfhongyu25@126.com

何承昊，男，2000 年生，硕士研究生，主要研究方向：复合材料激光加工技术。E-mail: 1175876832@qq.com
米高阳，男，1988 年生，博士研究生，副教授，主要研究方向：复合材料激光加工技术。E-mail: hustmigaoyang@163.com
洪春权，男，1986 年生，博士研究生，主要研究方向：激光增材制造。E-mail: hocquan@126.com
郑凛（通信作者），男，2000 年生，硕士研究生，主要研究方向：铝基复合材料激光加工技术。E-mail: 903421977@qq.com

《自动化与信息工程》征稿启事

《自动化与信息工程》（原《广东自动化与信息工程》）期刊由广东省科学院智能制造研究所、广州市自动化学会联合主办。国内统一连续出版物号 CN 44-1632/TP；国际标准连续出版物号 ISSN 1674-2605。国内外公开发行，面向各行业及广大自动化与信息用户，欢迎踊跃来稿。

一、稿件要求：

- 1. 投稿论文未公开发表过。
- 2. 投稿论文论点明确，论述充分，语言通顺，文字简练，图表清晰。
- 3. 投稿论文格式与要求：文章题目、作者姓名、作者单位、摘要（不超过 200 字）、关键词（3~8 个）、中图分类号、正文、参考文献；英文的题目、单位、摘要、关键词；作者简介。
 - 1）. 文中图和表格：须标有图号、图题和表序、表题，所用字符为六号或小五号宋体，图的宽度限制在 8 cm 或 16 cm 以内，随文排入。
 - 2）. 参考文献（公开出版物）按文中出现的先后次序排列，书写格式参考 GB7714-2015《信息与文献 参考文献著录规则》，建议参考文献不少于 15 篇，综述参考文献不少于 20 篇。
 - 3）. 稿中非标准缩写词（中文或英文）须在首次出现时定义清楚。外文字母必须分清大小写，正、斜体，上、下角；容易混淆的外文字母及符号，要特别注意标清。
 - 4）. 计量单位一律采用法定计量单位，名词术语必须规范化、标准化，且前后一致。
 - 5）. 文末附作者简介，内容包括：姓名、性别、出生年月、学位、职称。主要研究方向及 E-mail 地址。
 - 6）. 投稿论文一般不少于 5000 字（包括图表），综述一般不少于 8000 字（包括图表）。要求： Word 格式的电子文档。
 - 7）. 来稿请注明：邮编、详细通信地址及联系电话。
- 4. 投稿方式：请发电子邮件到邮箱：aie@giim.ac.cn。

二、说明：

- 1. 本刊原则上只收原始性稿件。已在国内外学术会议上发表或准备发表的文章必须如实说明，酌情刊登。
- 2. 作者必须对稿件内容的真实性和可靠性负责。
- 3. 若采用 AI 工具辅助论文写作，请注明所使用的 AI 工具及具体辅助写作内容。
- 4. 编辑部收到投稿后及时通知作者。来稿若不符合本刊稿约，先退给作者修改后再审稿。
- 5. 编辑部有权对来稿进行修改或删节。稿件一经采用，赠送当期期刊 3 本。
- 6. 本刊通信地址：广州市越秀区先烈中路 100 号大院 13 号楼 716 室，邮编：510070。

《自动化与信息工程》编辑部