

文章编号: 1005-0523(2026)03-0110-10



SiC_p/Al 复合材料的激光焊接技术研究现状

赵龙志¹, 张淑芳^{1,2}, 赵明娟¹

(1. 华东交通大学材料科学与工程学院, 江西 南昌 330013; 2. 江西科技师范大学材料与能源学院, 江西 南昌 330038)

摘要: SiC_p/Al 复合材料因其低密度、高比强度/模量、优良的耐磨性与耐高温性等综合优势, 在航空航天、轨道交通等领域展现出显著应用潜力。然而, 增强相 SiC 与基体 Al 间物理化学性能的显著差异导致其焊接性极差, 严重制约了其工程化应用。激光焊接技术以能量输入高度集中、热影响区窄及加工精度卓越等优点, 被誉为 SiC_p/Al 复合材料焊接的理想技术。综述了 SiC_p/Al 复合材料激光焊接技术的研究进展, 探讨了其面临的主要挑战, 梳理了现有工艺优化策略, 重点分析了焊缝的界面反应机理、界面结构调控方法及其对焊缝性能的影响, 并阐述了相关的强化机制。最后, 在剖析当前研究不足与挑战的基础上, 对未来研究方向进行了展望, 旨在为该技术的深入研究和工程应用提供参考。

关键词: SiC_p/Al 复合材料; 激光焊接; 增强体; 界面反应; 合金化; 工艺优化

中图分类号: TG456.7

文献标志码: A

本文引用格式: 赵龙志, 张淑芳, 赵明娟. SiC_p/Al 复合材料的激光焊接技术研究现状[J]. 华东交通大学学报, 2026, 43(3): 110-119.

Research Progress and Interface Mechanism Analysis in Laser Welding of SiC_p/Al Composites

Zhao Longzhi¹, Zhang Shufang^{1,2}, Zhao Mingjuan¹

(1. School of Materials Science and Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. School of Material Science and Energy, Jiangxi Science and Technology Normal University, Nanchang 330038, China)

Abstract: SiC_p/Al composites demonstrate substantial potential for applications prospects in aerospace, rail transportation and other industries, owing to their low density, high specific strength, high specific modulus, excellent wear resistance and superior high-temperature performance. However, the significant disparities in physical and chemical properties between the reinforcing SiC phase and the Al matrix result in poor weldability, which severely hinders their adoption in engineering contexts. Laser welding has emerged as a highly promising joining technique for SiC_p/Al composites due to its benefits of high energy density, minimal heat-affected zones and precise processing control. This paper reviews the research progress in laser welding technology for SiC_p/Al composite materials, explores the main challenges it faces, summarizes the existing process optimization strategies, and focuses on analyzing the interface reaction mechanism of the weld seam, methods for interface structure control, and their impact on weld seam performance. It also elaborates on the related strengthening mechanisms. Finally, based on an analysis of the current research deficiencies and challenges, it prospects for future research directions, aiming to provide reference for the in-depth research and engineering application of this technology.

收稿日期: 2024-12-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51965022); 江西省自然科学基金项目(20242BAB25272)

Key words: SiC_p/Al matrix composites; laser welding; reinforcement; interface reaction; process optimization

Citation format: ZHAO L Z, ZHANG S F, ZHAO M J. Research progress and interface mechanism analysis in laser welding of SiC_p/Al composites[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2026, 43(3): 110–119.

轻量化设计是现代工业技术发展的关键驱动力之一,在航空航天及轨道交通等高端装备制造领域,需求尤为迫切。SiC_p/Al 复合材料密度仅 3.0 g/cm³,原材料来源广泛,制造成本相对较低,成为实现结构轻量化的首选材料^[1],在工业应用中具有明显的经济优势。SiC_p/Al 复合材料不仅继承了铝合金的低密度特性,还因高硬度、高模量 SiC 颗粒的融入,呈现出更卓越的比强度、比模量、导热系数、耐磨性、耐腐蚀性、耐高温性、减振性和抗疲劳性能^[2]。

尽管 SiC_p/Al 复合材料展现出诸多优异特性,其工程化应用的推广仍面临严峻挑战。主要原因是增强体 SiC 与基体 Al 之间存在显著的物理化学性能差异,导致复合材料整体的塑性与断裂韧性相对较差。此外,复合材料制备过程中工艺参数的精确控制存在一定的难度,且后续的二次加工(如切削、连接等)也面临诸多困难,这些因素共同制约了 SiC_p/Al 复合材料工程应用的拓展与深化。

因此,为促进 SiC_p/Al 复合材料在各工业部门的广泛使用,除需优化制备工艺以及提升材料的固有性能外,还须攻克表面防护,焊接等关键制造环节中的界面反应等技术难题。有效解决这些加工技术难题,是彰显 SiC_p/Al 复合材料优异特性,实现其更广泛产业化应用的前提。

实现 SiC_p/Al 复合材料的可靠连接是拓展其工程应用的关键环节之一。目前, SiC_p/Al 复合材料的主要焊接方法可分为 3 类:固态焊(摩擦焊和扩散焊)、钎焊和熔化焊^[3]。固态焊接技术通过在固态下促进界面原子扩散与结合来实现材料连接,其主要优势在于可有效避免高温熔化过程引发的复杂冶金反应及缺陷(气孔、裂纹、界面有害产物 Al₄C₃),但通常对设备精度和工件表面状态有较高要求。熔化焊作为最早应用于 SiC/Al 复合材料连接的技术之一,凭借其优异的适应能力与操作灵活性,在众多领域得到广泛应用。此类技术主要包括:利用电弧热源的电弧焊(如 TiG 焊、MiG 焊)、基于电阻热的电阻焊、高能量密度的等离子弧焊、激光焊以及

电子束焊。

激光焊接凭借其能量密度高度集中,光斑尺寸小,焊缝深宽比大以及热影响区窄等优势,在现代工业精密制造领域占据核心地位^[4]。其工艺特性为攻克 SiC_p/Al 复合材料连接难题提供了新途径。然而,激光焊接技术应用于 SiC_p/Al 复合材料时,由于材料本身的特性,仍面临产生气孔、裂纹、成分偏析和脆性相金属间化合物等一系列问题和挑战,亟需通过研究加以解决。

鉴于此,本文总结激光焊接技术在 SiC_p/Al 复合材料连接工程中的应用情况,综述该技术的研究现状、面临的挑战、关键技术以及焊缝界面反应与组织调控机理。

1 SiC_p/Al 复合材料激光焊接工艺及优化

1.1 激光焊接工艺

SiC_p/Al 复合材料是一种新型复合材料,激光焊在该材料中的应用研究相对较少。SiC 颗粒增强相与 Al 基体性能差异较大,激光焊接过程中容易诱发脆性相 Al₄C₃ 和气孔等冶金缺陷,严重影响了焊缝质量,制约了其在工业中的广泛应用^[5-6]。

1.1.1 脆性相的形成与抑制

在焊接过程中, SiC 颗粒对激光束的吸收率远高于 Al 基体,导致高能量密度的激光优先被 SiC 颗粒吸收,颗粒周围局部温度急剧升高。随后,热量通过热传导方式向周边的 Al 基体传递,这种非均匀加热机制使 SiC 颗粒及其邻近 Al 基体区域温度远高于熔池的平均温度,极易诱发脆性相 Al₄C₃ 的形成,破坏增强相与基体的界面结合。值得注意的是,针状 Al₄C₃ 相在潮湿环境中极易发生水解反应,生成甲烷,加剧焊接接头内部微观损伤,从而严重降低焊缝组织性能。

为有效抑制焊缝中脆性相 Al₄C₃ 的形成,目前主要采取以下措施:工艺参数优化,通过改变激光功率、焊接速度和离焦量等焊接工艺参数精确调控焊接过程中热量的输入,提高熔池中 C 和 Si 的热力学活度,从动力学角度减缓 SiC 颗粒在焊接过程中

的溶解速率;界面反应调控,添加具有强碳化物形成倾向的合金元素,如Ti、Ni和Zr等,对焊缝实施“原位”合金化处理^[7-11]。这些合金元素在凝固过程中能够优先与C元素结合,形成高稳定性的碳化物(如TiC、ZrC),同时配合添加能够抑制界面反应和提高界面润湿性的Si元素,从热力学和动力学两方面竞争性地抑制脆性相 Al_4C_3 的形成。

1.1.2 气孔缺陷的形成与抑制

SiC_p/Al复合材料激光焊过程中气孔形成的主要原因包括:

1) 物相熔点差异效应:SiC颗粒的熔点(2 827 ℃)显著高于Al基体的沸点(2 327 ℃),使得焊接过程中金属基体先行熔化而增强相保持固态,导致熔池黏度显著提高,熔池黏度越大,填充匙孔速度越慢,从而增大了气孔形成的几率。

2) 颗粒迁移效应:部分SiC颗粒随熔化的Al基体流动而迁移至熔池。由于该区域流动性差,凝固时间短,熔融金属缺乏足够时间填补SiC颗粒迁移后留下的空隙,导致该区域产生较多的气孔。

3) 气体溶解度差异:焊接过程中裹入的气体、

因不同液固状态溶解度差异溢出的气体以及低沸点元素汽化产生的气体,在高黏度熔池状态下扩散受阻,难以及时逸出,最终在凝固过程中形成气孔。

4) 凝固收缩效应:熔池在凝固过程中,若熔融金属不能充分补偿凝固收缩和热应力引起的体积变化,晶粒生长间可能会形成孔洞或空隙,这些孔洞或间隙有可能进一步演变成裂纹。

为有效抑制SiC_p/Al复合材料激光焊接中的气孔缺陷,目前主要采取优化焊接工艺参数和引入辅助技术,如磁场或超声波辅助,以改善熔池流动特性、促进气体排出并优化凝固组织结构,从而提高焊接接头的综合性能。

1.2 合金化与工艺优化

1.2.1 合金化

合金元素的添加是抑制焊接缺陷的有效方法。目前,合金元素的添加方式主要有3种:①将金属合金制成箔片作为夹层进行添加^[7-8,12];②焊接过程中通过送丝的方式加入^[6,13-14];③与激光焊接同步输送进行添加^[15]。添加的主要合金元素包括Ti、Ni、Zr、Al和Si等,具体添加元素及性能参数见表1。

表1 不同元素对SiC/Al复合材料焊接中 Al_4C_3 生成及性能影响

Tab.1 Effect of different elements on Al_4C_3 formation and properties during welding of SiC/Al composites

元素	焊接方式	添加方式	组织	是否生成 Al_4C_3	母材性能/MPa	焊缝性能/MPa
Ti	激光焊、 双光束激光焊、 等离子弧焊	Ti箔 ^[7-8,12] 、Ti粉、 Ti-6Al-4V ^[13] 、 含Ti元素焊丝 ^[12,14]	Ti、 Al_3Ti 、TiC、 Ti_5Si_3	否	360 ^[7]	196.98 ^[7] 125.6 ^[8] 258 ^[13]
Zr	激光焊、 激光摆动焊 ^[11]	Zr粉 ^[10] 、Zr箔 ^[11]	ZrC、 Al_3Zr	否	—	220 ^[11] 、216 ^[11] (激光摆动焊)
Ni	激光焊	Ni箔片	Al_3Ni 、 Al_3SiC_4	部分抑制	—	—
Si	激光焊、 双光束激光焊	Al-Si焊丝 ^[6] 、 (Ti_3Si_3) _x ($AlSi_{12}$) _{1-x} 粉 ^[15]	Al 、 Al_4C_3 ^[6] Al_3Ti 、TiC ^[15]	是 ^[6] 否 ^[15]	299 ^[6]	228.1 ^[6]

雷玉成等^[12,14]对SiC_p/Al复合材料的焊接进行了系统研究,分别对采用不同厚度Ti箔进行激光焊接以及使用自制含Ti元素焊丝进行等离子弧焊进行了研究。研究发现,未添加Ti元素时,焊缝中存在大量气孔和粗大的 Al_4C_3 脆性相,添加Ti元素后,熔池的流动性显著改善,焊缝和热影响区的气孔数量减少,且 Al_4C_3 的生成得到了抑制。同时,焊缝中形成了TiN、TiC、AlN、AlTi和 Al_3Ti 等细小颗粒的增强相,焊接接头拉伸强度提升为母材强度的83.4%。然而,当Ti含量过高时,焊缝中生成块状 Al_3Ti ,反而对焊缝的性能产生不利影响。

1.2.2 工艺优化

为了有效调控焊缝的输入能量,除了通过调整传统的激光焊接工艺参数(如激光功率、焊接速率和离焦量)来实现外,还可以通过改变焊接模式来达成。这些模式主要包括双光束激光焊^[6]、激光冷金属过渡(CMT)复合焊接技术^[16]、激光协同复合焊^[117-18]、激光光束摆动^[19-20]、超声辅助激光焊接^[21]、以及外加磁场辅助激光焊接等技术^[22]。

Wang等^[23]采用正交试验方法系统分析了工艺参数对SiC_p/Al复合材料焊接接头容易产生气孔及针状相 Al_4C_3 等技术缺陷的影响,发现激光功率是

影响针状相 Al₄C₃ 尺寸的主要因素,功率升高会导致其尺寸增大,提高焊接速率可有效降低焊接接头孔隙率;而激光入射角对针状相尺寸和孔隙率的影响相对较小。

程东锋等^[24]深入研究了激光功率、离焦量以及焊接速率对高体积分数 SiC_p/Al 复合材料焊缝微观组织和性能的影响。研究发现,焊缝的拉伸强度随激光功率增大先增加后减小,当激光功率为 350 W 时,焊接接头获得最佳的抗拉强度,达到母材强度的 78.2%;负离焦比正离焦能够提供更高的能量密度,促进填充材料与母材的充分熔合与冶金反应;当焊接速率为 2.5 mm/s 时,抗拉强度最佳,为母材的 76.7%。

Pan 等^[6]运用双光束激光焊接技术,对比研究 3 种不同填充焊丝 (ER4043, ER4047, ER5356) 对 SiC_p/Al 复合材料焊接接头微观结构和力学性能的差异。结果表明,采用 Al-Si 焊丝 (ER4043 和 ER4047) 获得的焊接接头,其抗拉强度优于采用 Al-Mg 焊丝 (ER5356) 的焊接接头,其主要原因在于较高的 Si 含量有助于抑制 SiC 增强相与 Al 基体之间有害的界面反应。

激光-电弧复合焊结合了激光的高能量与电弧良好的填充性,形成深且窄的焊缝,提高焊接效率并改善焊缝成形,有助于克服单一激光焊接存在的缺陷^[17-18]。孙文昊等^[16]比较分析了激光-冷金属过渡 (CMT) 复合焊接技术、单光束激光填丝焊接及双光束激光填丝焊接 3 种方法应用于 SiC_p/Al 复合材料的效果。研究发现,复合焊及双光束激光焊由于研究时间短,技术尚不成熟,虽然这两种方式成功将 SiC_p/Al 复合材料进行了连接,但由于焊缝中生成了针状相 Al₄C₃,且尺寸大于单光束激光焊中生成的 Al₄C₃,激光-冷金属过渡 (CMT) 复合焊接表面还存在明显缺陷。单光束激光填丝焊接接头的力学性能更为优异,其强度可达母材强度的 69.4%。

巴现礼等^[25]创新性地采用激光-TIG 复合焊接方法对 SiC_p/Al 复合材料进行焊接,并引入 Ti 箔作为中间层以调控界面反应,其原理如图 1 所示。研究发现,尽管 Ti 箔中间层能在一定程度上抑制 Al₄C₃ 的生成,但由于焊接过程中部分 Ti 箔被烧损,其抑制作用并不完全,在 XRD 物相分析结果中仍检测到少量的 Al₄C₃。通过此工艺制备的焊缝,其强

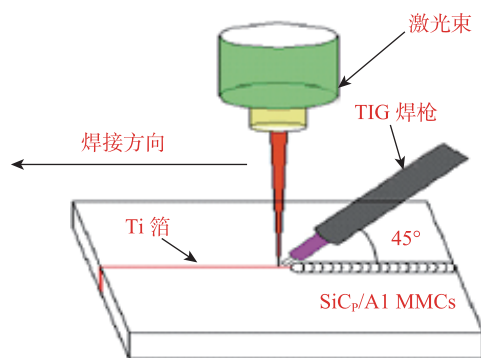


图1 低功率激光-TIG 复合焊接示意图^[25]

Fig. 1 Schematic diagram of low-power laser-TIG hybrid welding^[25]

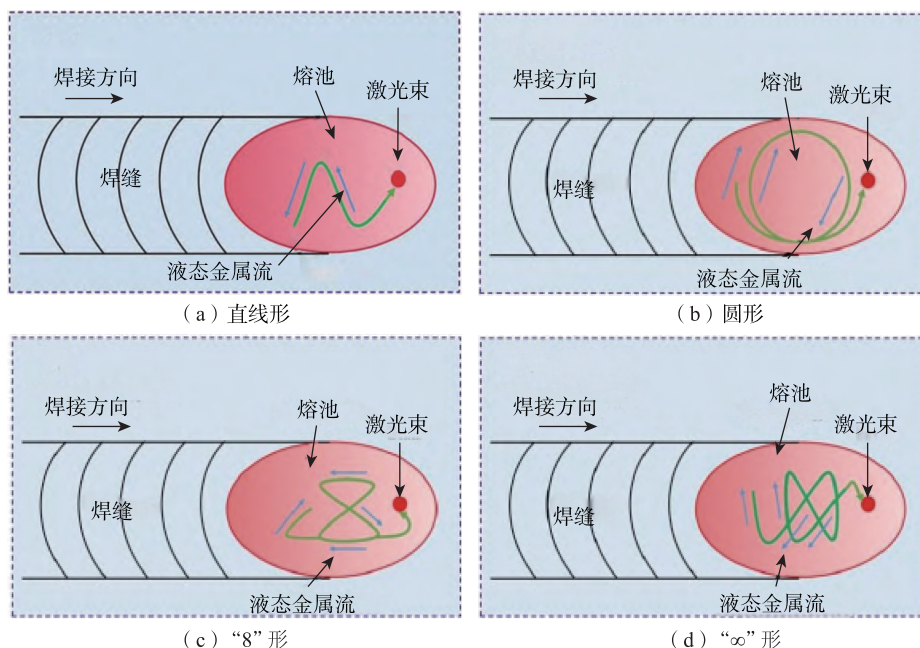
度值为母材的 54.71%。

激光摆动焊接技术是由 Rubben 等首次提出,是一种可有效抑制激光焊接过程中常见气孔缺陷和金属间化合物形成的先进焊接工艺,该技术主要采用 4 种典型摆动模式:圆形、直线型 (Linear)、“∞”和“8”字形^[19-20]。目前,激光摆动焊接技术在 SiC_p/Al 复合材料领域的研究报道相对有限。

在激光摆动焊接过程中,熔池的动态冶金反应呈现出复杂特性,难以精确控制,容易导致元素偏析和脆性相生成。与传统激光焊接相比,摆动引起的温度分布变化,熔池流动、凝固与形核过程以及熔池表面的受力状态均表现出显著差异。因此,需要构建新的数学模型来精确计算温度场分布、熔池流动行为,凝固与形核机制以及熔池表面受力状态等关键参数。

熊程等^[19]研究发现,摆动激光光束焊接可有效细化焊缝晶粒结构,并促进气体从熔池中逸出,从而有效抑制气孔形成。摆动模式对焊接效果有重要影响,不同的摆动轨迹改变了激光能量在熔池中的作用时间和空间分布,由此引发熔池内部流体流动行为的改变,不同摆动方式对熔池流态的具体影响如图 2 所示。研究显示,过于复杂的摆动模式由于其摆动路径更长,延长了熔池的高温状态时间,有利于脆性相 Al₄C₃ 的形成。相比之下,直线型摆动模式,不仅能有效抑制气孔的生成,而且其路径简单,激光与熔池作用时间短,在一定程度上抑制了 Al₄C₃ 的生成,获得了更为理想的焊接效果。

针对 SiC_p/Al 复合材料激光摆动焊接技术的研究,不同研究团队得出的结论尚不完全一致。Zhang 等^[26]研究发现,采用特定参数顺时针圆形摆

图2 不同摆动方式下熔池流动^[19]Fig. 2 Molten pool flow under different swing models^[19]

动模式进行焊接时,能够获得成形质量优良,无显著裂纹或气孔等缺陷的焊接接头,其抗拉强度可达192 MPa。然而,齐恩语等^[20]研究表明,圆形、“∞”形和“8”字形3种摆动模式工艺效果更为理想。Zhang等^[5]对SiC_p/2A14Al复合材料激光摆动焊接焊缝的微观结构、相界面及其力学性能开展了系统研究。发现激光振荡路径对焊接接头的综合性能具有显著影响。综合来看,当前激光摆动焊接技术应用于SiC_p/Al复合材料的研究结果存在一定的差异性,这表明该技术的优化及其作用机理尚需深入探讨,不同摆动参数(模式、频率、幅度等)对熔池动态行为、传热传质、界面反应及缺陷抑制的具体影响规律仍有待进一步阐明。

引入外部物理场辅助焊接是改善接头质量的另一重要途径。本研究团队^[22,27]利用COMSOL软件,构建了磁场辅助铝基复合材料激光填粉焊接过程多物理耦合模型,涵盖了熔池温度场、流场及磁场的三维数学模型。研究结果表明,在纵向稳态磁场作用下,熔池的温度梯度明显减小,热影响区范围显著缩小,熔池内部组织分布更加均匀。同时,磁场产生的电磁力改变了熔池内部的流体流动特性,有效减少了焊缝中的气孔数量,使熔池深宽比增大,为优化SiC_p/Al复合材料焊接工艺提供了新的技术路径。

2 SiC_p/Al复合材料焊缝界面机理及性能

2.1 焊缝微观组织与性能

关于SiC_p/Al复合材料激光焊接工艺及性能影响的研究主要从微观结构、相组成以及硬度、抗拉强度等两大方面展开研究。目前,针对焊缝界面的微观组织的研究主要集中在3个方面:异种材料焊缝界面特性;金属夹层焊缝界面演变规律;SiC颗粒与Al基体之间界面的反应行为。

本研究团队^[28]系统研究了SiC_p/6061Al复合材料激光焊接过程中焊缝界面的微观组织特性以及SiC颗粒与Al基体之间界面的微观形貌演变规律。研究发现,添加Ti元素可以有效抑制焊缝界面和SiC/Al界面有害金属间化合物Al₄C₃的形成,但对气孔缺陷的抑制效果不显著。同时,焊缝区域形成了TiC颗粒和块状Al₃Ti相。焊缝界面出现大量SiC颗粒偏聚现象,且SiC颗粒被白色TiC颗粒包围(如图3所示)。此外,显微硬度试验结果表明,焊缝区域硬度呈现出先减小后增大的趋势,其中Ti₂Si相的显微硬度最低,约为148.6 HV。

韩瑞等^[29-30]针对SiC_p/Al复合材料激光自熔焊过程中容易产生气孔和界面反应等关键问题,创新性地采用热挤压处理的方法,并采用惰性TiB₂/Al以及铝合金作为中间层。研究发现,虽然热挤压处理后

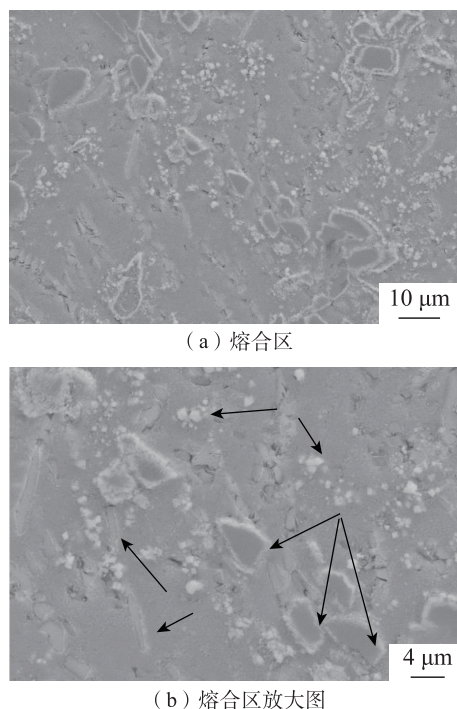


图3 Ti₃Si填充熔合区的SEM显微结构^[28]
Fig. 3 SEM microstructure in the fusion zone filled with Ti₃Si^[28]

焊缝的强度显著提升,但与母材相比仍存在一定差距。添加惰性TiB₂/Al中间层后,焊缝界面反应得到抑制,未检测到Al₄C₃相,但焊缝中仍存在大量气孔,焊缝强度仅为36 MPa。

赵文涛等^[21]在SiC_p/6061铝基复合材料激光焊接研究中,引入超声波辅助焊接技术。研究发现,施加超声波后,焊缝的熔深和熔宽均有所增加,熔池流动性改善,晶粒及焊缝组织得到细化,气孔率降低,机械性能提高。然而,当超声波振幅过大时,热效应主导机械效应,导致增强相过度增长和气孔数量增多,最终使机械性能下降。

2.2 界面反应控制

金属基复合材料的界面特性是决定其综合性能的关键因素。增强相与金属界面形成化学键可提高金属基复合材料的载荷传递效率,是一种有效策略^[28]。当界面反应控制在适宜水平时,能够有效提升界面结合力,但过量的界面反应导致有害相生成,显著降低材料的性能。目前SiC/Al界面反应研究主要集中在SiC/Al复合材料制备过程中SiC颗粒与Al基体间的界面反应特性,而焊缝中的界面反应研究则主要集中于异种材料焊接及金属中间层的界面行为,母材与焊缝之间的界面反应系统研究相对不足。

王显波等^[31]在半固态搅拌铸造SiC/Al-xSi复合材料过程中引入Ti元素作为界面调控元素,通过高分辨透射电镜系统研究了Ti元素对SiC/Al-xSi复合材料界面微观结构的影响机制。研究发现,添加Ti元素后,SiC与Al界面清晰且结合良好,有害Al₄C₃脆性相的生成被完全遏制。这一现象归因于Ti与SiC之间的强亲和力,Ti优先与C反应改变了C的活度,抑制了Al-C键的形成。另一方面,Ti倾向于富集在Si相的周围,这种趋势增强了SiC/Al界面的润湿性,进而增强界面的结合力。

本研究团队^[28]在对SiC_p/6061Al复合材料实施激光焊接时,通过同步填充含Ti金属粉末,对SiC颗粒增强相与Al基体界面的相互作用进行深入分析,创新性地探讨了焊缝与母材之间界面的影响。研究结果表明,Ti元素的添加能够有效抑制SiC颗粒增强相与Al基体之间脆性相Al₄C₃的形成,同时在SiC颗粒周围生成白色TiC颗粒。在焊缝与母材之间存在5个不同的界面层,依次为母材层、紧邻母材锯齿状相层、白色颗粒相层、白色细长网状结构相层和具有粗大菊花状结构的相层,如图4所示。

Zhang等^[5]在SiC_p/2A14Al复合材料激光对接焊接过程中,采用TEM对快速凝固过程进行了分

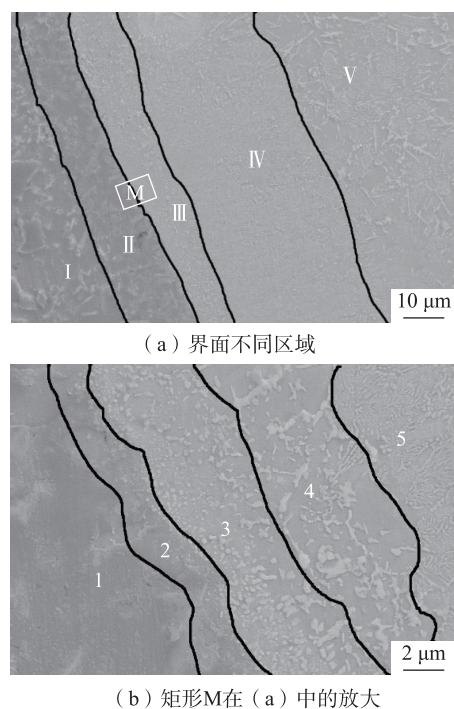


图4 Ti₃Si填充界面SEM微观组织^[28]
Fig. 4 SEM microstructure of the interface of the weld filled with Ti₃Si^[28]

析,重点分析了SiC颗粒周围铜、镁、锰和硅等合金元素的形核行为及界面特性。研究表明,铜、镁、锰和硅元素在SiC颗粒附近倾向于在特定的区域形核,且这些形核区周围通常伴随着高密度的位错,据此推断,Al基体中可能形成了弥散分布的纳米析出相,这种微观结构有助于提升铝基体的塑性变形能力。此外,TEM观察显示,所形成的各物相之间界面清晰、结合紧密,未观察到针状脆性相 Al_4C_3 的形成。

2.3 界面组织和强化机制

在 SiC_p/Al 复合材料中,SiC与Al基体的界面是实现载荷有效传递的关键载体,良好的界面结合是充分发挥载荷传递效果的前提^[32]。界面组织的形成机制主要包括原子扩散机制、化学反应机制以及物理吸附与机械咬合机制。这些机制受增强体与基体化学成分以及制备工艺等因素的影响。为实现界面结构的有效调控,可从以下3个方面进行:

1) 温度调控:在激光焊接过程中,可通过改变激光功率、焊接速度、离焦量等工艺参数,实现温度调控,从而控制基体内部合金元素的扩散及SiC颗粒的溶解,进而使SiC颗粒与基体间的界面反应及产物得到有效控制。

2) 合金成分调控:合金元素的添加可影响界面的润湿性,并决定界面的组织和微观结构。Si元素可抑制不良界面产物 Al_4C_3 的形成;Ti、Zr容易与SiC颗粒中的C结合,在界面形成TiC、ZrC颗粒,抑制 Al_4C_3 的形成;Ni和Cu元素可显著提升Al在SiC表面的润湿性,并在界面形成 NiAl_3 ^[33]。

3) SiC表面改性:通过表面处理技术,构建SiC颗粒与Al之间界面的最优构型。如SiC镀Cu后,镀层可阻碍Al基体与SiC的直接接触,抑制 Al_4C_3 的形成;SiC镀Ti后,可抑制 Al_4C_3 的形成,并在界面生成TiC、 Al_3Ti 和 Ti_5Si_3 ^[34]。

在颗粒增强型金属基复合材料中,增强体与基体之间的强化机制主要包括:载荷传递强化、位错强化、热错配强化、细晶强化(Hall-Petch)、沉淀强化、固溶强化和加工硬化强化等^[35]。目前,已成功建立了剪切滞后模型、Orowan强化模型、热错配强化模型以及细晶强化(Hall-Petch)等理论模型。载荷传递强化效果受基体的强韧性、增强颗粒几何尺寸、形态、体积分数及界面特性的影响,其中界面结合强度是实现高效载荷传递的核心要素。

优化后的界面结构不仅能够促进载荷的有效传递,还能阻遏位错滑移和裂纹扩展。圆形增强颗粒的均匀分布有利于增强作用的发挥。颗粒尺寸越小,界面基体及缺陷中的应力集中越小,载荷传递强化作用越强^[34]。

由增强颗粒阻碍位错运动而形成的Orowan强化效应与SiC颗粒尺寸和体积分数密切相关。当颗粒尺寸超过 $1\text{ }\mu\text{m}$ 时,此强化效应可忽略。相反,随着SiC颗粒尺寸的减小和体积分数的增加,Orowan效应的强化效果显著提升。纳米SiC颗粒的均匀分布可最大限度地发挥Orowan强化效应,该机制在此类复合材料的强化机制中占主导地位^[34]。

热错配强化受温度、颗粒尺寸和体积分数的影响,微米级SiC颗粒增强相产生的热错配强化效果相对有限。随着SiC颗粒体积分数增加和尺寸减小,热位错强化效应逐步增强,导致屈服强度提升。在纳米SiC/Al复合材料中,界面附近基体内位错的增殖更为显著^[33]。

Hall-Petch强化机制源于晶界对位错滑移的阻碍作用。单位体积内晶粒尺寸越小、数量越多,阻碍位错滑移的晶界就越多。在外加载荷作用下弹性变形可在多晶粒间实现更均匀的分配,有效缓解局部应力集中^[35]。细晶强化的效果随SiC颗粒尺寸和体积分数变化。根据Hall-Petch公式,见式(1),SiC颗粒尺寸越小,其屈服强度越高

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-1/2} \quad (1)$$

式中: σ_y 为屈服强度; σ_0 为材料本征屈服强度; k 为材料常数; d 为晶粒尺寸。

固溶强化通过溶质原子引起的局部点阵畸变使基体强度升高。其原理是增强体固溶于基体引起晶格畸变,进而抑制位错滑移^[35]。在SiC/Al复合材料中,固溶强化和时效强化是主要的强化机制。固溶处理过程中,当金属间化合物呈现过饱和状态时,会重新溶解进入基体,形成固溶强化效应。因此,当合金元素含量较低时,直接的固溶强化贡献相对较小。然而,固溶处理可引发显著的间接强化:①各组分热膨胀系数差异导致热错配应力;②SiC颗粒对基体塑性变形约束产生背应力。这些间接效应使得固溶处理后材料的强韧性获得明显提升。

张鑫等^[36]在碳纳米管(CNTs)表面进行SiC相的原位生长,构筑具有一定厚度的过渡层,成功制

备了含不同体积分数的CNTs-SiC复合材料,并解析了该复合材料中基体与增强相间的强化机制。研究发现,SiC过渡层的构建显著降低了碳纳米管的表面能,同时减小了基体与增强相间的密度差异,从而改善了CNTs-SiC复合相在Al基体中分散的均匀性,抑制了界面Al₄C₃的形成。弥散分布的CNTs-SiC起到钉扎作用,有效地阻止晶粒的粗化。复合材料的强化机制表现为位错强化、Orowan增强机制及细晶强化机制的联合作用。基体与增强相之间的热错配使复合材料中的位错密度大幅度增加。在承受外部应力时,复合材料发生塑性变形,弥散分布的CNTs和CNTs-SiC对周围的位错运动起阻碍作用,促使位错在其界面形成位错环,增大了位错滑移的临界切应力,并诱发位错的局部高密度积累及伴随的应力场,进而有效抑制复合材料塑性变形。当位错积累达到一定程度时,基体中原有的晶界易于演化形成亚晶界结构,SiC过渡层的引入,有利于提升CNTs-SiC/Al复合材料中大角度晶界的体积分数,并促使这些亚晶界结构向更稳定的常规晶界转变,这一过程显著细化了铝基体晶粒尺寸。晶粒的进一步细化强化了其对位错运动和裂纹扩展的阻碍作用。最终使CNTs-SiC/Al复合材料的综合性能得到显著提升。

3 结束语

尽管SiC_p/Al复合材料激光焊接研究取得了显著进展,但仍存在一些问题和挑战亟待解决,未来研究可关注以下方向。

1) 深入理解复杂物理冶金过程:结合先进的监测技术(如高速摄像、光谱分析)和高精度数值模拟,深入揭示激光与含颗粒复合材料相互作用下熔池的动态行为(包括匙孔稳定性、熔池流动、颗粒运动与分布)、界面反应动力学以及缺陷形成机制,特别是在激光摆动、复合焊、外场辅助等先进工艺条件下。

2) 新型填充材料/中间层设计:开发新型合金化体系或功能性中间层,旨在更有效地抑制界面反应、改善熔池流动性、细化焊缝组织并引入有利的强化相,以获得更高强度和韧性的焊接接头。

3) 多技术协同优化:系统研究不同先进焊接技术(如摆动+复合焊,超声+合金化)的协同作用机制及其对焊缝质量的综合影响,探索最佳的组合工艺方案。

参考文献:

- [1] HU M S, ZHAO G L, LI L, et al. Investigation on Material Response of 55% SiC_p/Al Composites Induced by Pulsed Laser[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 37(S): 49-57.
- [2] VENKATESH V S S, DEOGHARE A B. Microstructural characterization and mechanical behaviour of SiC and kaoline reinforced aluminium metal matrix composites fabricated through powder metallurgy technique[J]. Silicon, 2022, 14(7): 3723-3737.
- [3] 郭磊磊. SiC颗粒增强铝基复合材料连接技术研究现状[J]. 热加工工艺, 2019, 48(11): 6-9.
GUO L L. Research status of joining technique of SiC particle reinforced aluminium matrix composites[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(11): 6-9.
- [4] 康悦, 占小红, 封小松, 等. 6061铝合金激光焊温度场与应力场数值模拟研究[J]. 上海航天(中英文), 2020, 37(6): 58-63, 68.
KANG Y, ZHAN X H, FENG X S, et al. Numerical simulation study on temperature field and stress-strain field of 6061 aluminum alloy in laser beam welding[J]. Aerospace Shanghai, 2020, 37(6): 58-63, 68.
- [5] ZHANG M Y, WANG C M, HUA Z J, et al. Microstructure evolution, interface and mechanical properties of SiC_p/2A14 joint during laser keyhole welding[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26: 5731-5747.
- [6] PAN P, WANG J J, CHEN S J, et al. Effect of filler metal on microstructure and mechanical properties of welded SiC_p/Al composites by dual beam laser welding[J]. Materials Letters, 2024, 372: 136984.
- [7] 朱强, 赵文涛, 雷玉成, 等. Ti对SiC_p/6092铝基复合材料激光焊缝组织和性能的影响[J]. 焊接学报, 2021, 42(3): 85-90.
ZHU Q, ZHAO W T, LEI Y C, et al. Effect of Ti on microstructure and properties of laser welding weld of SiC particle reinforced 6092 Al alloy matrix composite[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(3): 85-90.
- [8] 王亚松. 夹Ti合金层激光焊接高比SiC_p/2024铝基复合材料[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
WANG Y S. Study on laser welding of high volume fraction SiC_p/2024Al MMC with Ti alloy filler[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [9] 陈永来, 于利根, 王华明. 合金化填充材料Ni对SiC_p/6061Al复合材料激光焊接焊缝显微组织的影响[J]. 复合材料学报, 2000, 17(4): 63-65.
CHEN Y L, YU L G, WANG H M. Effect of alloying fill-

- er Ni on microstructure of laser welded seam of SiC_p/6061Al composite[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2000, 17(4): 63-65.
- [10] LONG J, ZHANG L J, ZHANG L L, et al. Effects of minor Zr addition on the microstructure and mechanical properties of laser welded joint of Al/SiC_p metal-matrix composite[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 49: 373-384.
- [11] 刘畅. 基于Zr元素添加的SiC颗粒增强铝基复合材料激光焊接工艺研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- LIU C. Research on laser welding technology of SiC particle reinforced aluminum matrix composites based on Zr element addition[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [12] 雷玉成, 胡文祥, 薛厚禄, 等. Ti-Al-Si-Mg对SiC_p/Al基复合材料等离子弧原位焊接焊缝组织和性能的影响[J]. *焊接学报*, 2011, 32(5): 9-12, 113.
- LEI Y C, HU W X, XUE H L, et al. Influence of Ti-Al-Si-Mg on microstructures and mechanical properties of plasma arc in-situ welded joint of SiC_p/Al MMCs[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2011, 32(5): 9-12, 113.
- [13] 陶汪, 李俐群, 王亚松, 等. 高体积分数SiC_p/2024Al基复合材料添加Ti-6Al-4V中间层激光焊接特性[J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 104-108.
- TAO W, LI L Q, WANG Y S, et al. Study on welding process and microstructure of laser welding high volume fraction SiC_p/2024Al matrix composite with Ti-6Al-4V filler[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(1): 104-108.
- [14] LEI Y C, ZHANG Z, NIE J J, et al. Effect of Ti-Al on microstructures and mechanical properties of plasma arc in-situ welded joint of SiC_p/Al MMCs[J]. *Transactions of Non-ferrous Metals Society of China*, 2008, 18(4): 809-813.
- [15] 赵明娟, 程梓威, 赵龙志, 等. Ti₃Si₃含量对SiC_p/2009Al激光填粉焊接接头组织性能的影响[J]. *华东交通大学学报*, 2023, 40(6): 79-85.
- ZHAO M J, CHENG Z W, ZHAO L Z, et al. Effect of Ti₃Si₃ content in filler powder on the microstructure and properties of SiC_p/2009Al laser filler welding joint[J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2023, 40(6): 79-85.
- [16] 孙文昊, 范永强, 张国涛, 等. SiC_p/Al复合材料的激光焊接接头组织与性能对比[J]. *中国激光*, 2021, 48(10): 41-51.
- SUN W H, FAN Y Q, ZHANG G T, et al. Comparison of structure and performance of laser welded joints of SiC_p/Al composite materials[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(10): 41-51.
- [17] 赵俊鹏. 铝合金激光-CMT复合焊接熔池流场与温度场的数值模拟[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.
- ZHAO J P. Numerical simulation of flow field and temperature field in aluminum alloy laser CMT composite welding pool[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023.
- [18] 祝鹏. 7075铝合金激光-MIG复合焊接温度场应力场与熔池流动数值模拟[D]. 成都: 西南石油大学, 2022.
- ZHU P. Numerical simulation of temperature field, stress field and molten pool flow in laser-MIG hybrid welding of 7075 aluminum alloy[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2022.
- [19] 熊程, 潘朋, 陈双建, 等. 激光光束摆动参数对SiC_p/Al焊接组织及性能的影响[J]. *中国激光*, 2025, 52(4): 0402105.
- XIONG C, PAN P, CHEN S J, et al. Effects of laser beam swing parameters on microstructure and properties of SiC_p/Al composites by laser welding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2025, 52(4): 0402105.
- [20] 齐恩语. SiC_p/2009Al MMCs摆动激光填丝焊工艺及接头组织性能研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2021.
- QI E Y. Study on process and joint microstructure and properties of SiC_p/2009Al metal-matrix composites oscillating laser welding with filler wire[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2021.
- [21] 赵文涛. SiC_p/6061铝基复合材料超声辅助激光焊接工艺及机理研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021.
- ZHAO W T. Study on ultrasonic assisted laser welding process and mechanism of SiC_p/6061 aluminum matrix composite[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021.
- [22] 赵龙志, 胡秀萍, 赵明娟. 纵向稳态磁场对铝基复合材料激光填粉焊接熔池动力学的影响[J]. *中国激光*, 2025, 52(4): 0402102.
- ZHAO L Z, HU X P, ZHAO M J. Effect of longitudinal steady magnetic field on dynamics of molten pool in laser powder-filling welding of aluminum matrix composites[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2025, 52(4): 0402102.
- [23] WANG Z Y, CAO H Y, LI H L, et al. Effects of laser welding parameters on the porosity and acicular phase in SiC_p/6092 aluminum matrix composite welded joints[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 23: 5127-5141.
- [24] 程东锋, 樊思燕, 苏春堂, 等. 高体分SiC_p/Al复合材料激光焊工艺研究[J]. *Saecce 2023-MS102*, 2023: 1981-1985.
- CHENG D F, FAN S Y, SU C T, et al. Study on laser welding process of high volume fraction SiC_p/Al compos-

- ites[J]. Saece 2023- MS102,2023: 1981-1985.
- [25] 巴现礼, 高增, 王振江, 等. 基于 Ti 中间层的 SiC_p/6061-T6Al MMCs 低功率激光-TIG 复合焊接接头组织与性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(10): 3657-3663.
- BA X L, GAO Z, WANG Z J, et al. Microstructure and properties of SiC_p/6061-T6Al MMCs joint manufactured by low-power laser-TIG hybrid welding technology with Ti as interlayer[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(10): 3657-3663.
- [26] ZHANG M Y, WANG C M, MI G Y, et al. Laser beam oscillation welded SiC_p/2xx Al alloy: microstructure, phase interface and mechanical properties[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 820: 141482.
- [27] 胡秀萍. 磁场辅助铝基复合材料激光填粉焊接数值模拟研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2024.
- HU X P. Numerical simulation of laser filler welding of aluminum matrix composites with magnetic field assistance[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2024.
- [28] ZHANG S F, ZHAO L Z, ZHAO M J, et al. Microstructure and interfacial behavior of SiC_p/6061 aluminum matrix composite joined by laser welding with filled Ti₃Si powder[J]. Journal of Materials Science, 2024, 59(40): 18848-18863.
- [29] 韩瑞. 碳化硅颗粒增强铝基复合材料激光焊接研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
- HAN R. Research on laser welding of silicon carbide particles reinforced aluminum matrix composite[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021.
- [30] 韩瑞, 李晓鹏, 彭勇, 等. SiC_p/2024Al 复合材料热挤压对激光焊接接头组织性能的影响[J]. 兵工学报, 2024, 45(6): 2054-2064.
- HAN R, LI X P, PENG Y, et al. Effect of hot extrusion of SiC_p/2024Al composites on microstructure and properties of laser welded joint[J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(6): 2054-2064.
- [31] 王显波. Ti 元素对 SiC 颗粒增强 Al-xSi 基复合材料界面微观组织的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2024.
- WANG X B. Effect of Ti on the interfacial microstructure of SiC particle reinforced Al-xSi matrix composites[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Tehchnology, 2024.
- [32] 董翠鸽, 王日初, 彭超群, 等. SiC_p/Al 复合材料研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(11): 3161-3181.
- DONG C G, WANG R C, PENG C Q, et al. Research progress in SiC_p/Al composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(11): 3161-3181.
- [33] 苏嵒, 王爱琴, 谢敬佩, 等. SiC_p/Al-Si 基复合材料界面结构调控及强化机制的研究进展[J]. 材料热处理学报, 2024, 45(2): 1-12.
- SU B, WANG A Q, XIE J P, et al. Research progress on interface structure control and strengthening mechanism of SiC_p/Al-Si matrix composites[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2024, 45(2): 1-12.
- [34] 郭敏, 曲俊峰, 栾承华, 等. 钼基复合材料强化机制的研究进展[J]. 材料导报, 2024, 38(S2): 408-411.
- GUO M, QU J F, LUAN C H, et al. Research progress on strengthening mechanism of molybdenum matrix composites[J]. Materials Reports, 2024, 38(S2): 408-411.
- [35] 刘博. SiC_p/Al 基复合材料相界面润湿性及结合能的模拟研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2023.
- LIU B. Simulation of phase interface wettability and binding energy of SiC_p/Al matrix composites[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2023.
- [36] 张鑫. 铝基复合材料中 CNTs/SiC/Al 复合界面调控及其强化机理[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- ZHANG X. Strengthening mechanism and interfacial regulation of CNTs/SiC/Al in aluminum matrix composites[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.



第一作者: 赵龙志(1977—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为载运工具用合金及其复合材料。

E-mail: zhaolongzhi@163.com。



通信作者: 张淑芳(1978—), 女, 副教授, 博士, 研究方向为材料加工。E-mail: zhang63793@163.com。

(责任编辑: 李根)