

6061 铝合金中间层对 SiC_p/2024 铝基复合材料激光焊接头组织和性能的影响

靳永伟

北京小米移动软件有限公司南京分公司, 江苏 南京 210012

DOI: 10.61369/SSSD.2025020009

摘要 : 开展6061铝合金作为中间层开展20%SiC_p/2024铝基复合材料激光焊接工艺研究, 分析中间层对焊缝显微组织及拉伸性能的影响。结果表明: 无中间层时, 焊缝区相组成包含 α -Al基体、针状 Al₄C₃相、Si颗粒及 Al-Si共晶组织, 其中针状 Al₄C₃相导致接头力学性能劣化, 抗拉强度仅为 109.3MPa。当引入0.65mm厚度的6061中间层后, 焊缝区通过稀释 SiC颗粒浓度有效抑制了 Al₄C₃相生成, 接头显微组织显著优化, 抗拉强度提升至 201.5MPa, 达到母材强度的 52.9%。

关键词 : 激光焊接; SiC_p/2024 铝基复合材料; 6061 铝合金中间层; 微观组织; 力学性能

Effect of 6061 Aluminum Alloy Interlayer on the Microstructure and Properties of SiC_p/2024 Aluminum Matrix Composite Laser Welded Joints

Jin Yongwei

Beijing Xiaomi Mobile Software Co., Ltd. Nanjing Branch, Nanjing, Jiangsu 210012

Abstract : A study was conducted on the laser welding process of 20% SiC_p/2024 aluminum based composite materials using 6061 aluminum alloy as the interlayer, and the influence of the interlayer on the microstructure and tensile properties of the weld seam was analyzed. The results showed that the phase composition included α -Al matrix, needle shaped Al₄C₃ phase, Si particles, and Al-Si eutectic structure in weld zone without interlayer. The needle shaped Al₄C₃ phase led to the deterioration of the mechanical properties of the joint, with a tensile strength of only 109.3 MPa. After introducing the 6061Al interlayer with 0.65mm thickness, the formation of Al₄C₃ phase was effectively suppressed by diluting the SiC particle concentration. The microstructure of the joint was significantly optimized, and the tensile strength was increased to 201.5MPa, reaching 52.9% of the base metal strength.

Keywords : laser welding; SiC_p/2024 aluminum matrix composites; 6061 aluminum alloy interlayer; microstructure; mechanical properties

引言

SiC 颗粒增强铝基复合材料 (SiC_p/Al) 因具备高比模量、高比强度、优异耐磨性能、低膨胀系数、良好尺寸稳定性及抗疲劳特性, 且原材料丰富、制备成本低、工艺难度小, 然而, 该材料增强相与铝基体间显著的物理化学性质差异, 导致熔化焊过程中易产生焊接气孔、增强体团聚及脆性 Al₄C₃相生成等缺陷^[1], 严重影响接头成形质量与力学性能。

界面反应调控是 SiC_p/Al 熔化焊接的核心难题, 焊缝区铝基体与 SiC 颗粒反应生成的针状 Al₄C₃相是导致接头性能劣化的关键因素^[4]。当前主流调控工艺包括焊接热输入优化与中间层材料引入。孙文昊等^[7]对比激光填丝工艺发现, 单光束填丝焊接在控制针状相尺寸与气孔率上优势显著, 对应接头力学性能最佳。中间层材料的引入为界面调控提供新路径: 陈永来等^[8]采用 Ni 箔中间层, 通过调节熔池碳活度抑制 SiC 溶解; 张鹏等以 Ti 箔为中间层, 厚度超 0.2mm 时, Al₄C₃相被 TiC 颗粒取代, 形成以 TiC 和 Al₃Ti 为增强相的组织^[9]。

本研究选取 6061 铝合金作为中间层, 开展 SiC_p/2024Al 激光焊接工艺研究, 重点分析中间层对接头微观组织与力学性能的作用机制, 以期为该类材料的优质激光连接提供新的技术路径。

一、试验材料与方法

选择 6061 铝合金, 厚度为 0.65mm。

试验采用 TruDisk6002 型激光器, 最大功率为 6kW。焊接工艺参数为: 激光功率为 2200W, 焊接速度 20mm/s, 表面聚焦模式, 氩气保护气流量为 20L/min。

待焊母材为挤压态 SiC_p/2024 铝基复合材料, 尺寸为 60mm × 30mm × 2mm, SiC 颗粒体积分数约为 20%。中间层材料

采用线切割截取接头横截面金相试样，经镶嵌、逐层打磨、抛光后，以 Keller 试剂腐蚀 5~10s。通过 Zeiss 金相显微镜（OM）及 QuantaFEG250 扫描电镜（SEM）观察显微组织与断口形貌，采用能谱仪（EDS）半定量分析析出相成分，借助电子万能试验机进行室温拉伸试验，拉伸速率为 1mm/min。

二、分析与讨论

（一）接头成形及微观组织

图 1 为未添加和添加铝合金中间层后获得的接头截面形貌和微观组织。由图可知当添加铝合金中间层后，接头焊缝区熔合比降低至 0.6，且焊缝区未见孔洞的产生。对接头进行了 EDS 测试，结果如表 1 所示。对于无中间层接头而言，焊缝区产生大量针状相和灰色块状相。采用 SEM 对焊缝区进行高倍观察，发现焊缝区存在较高含量的网状组织。EDS 测试结果表明，焊缝区针状相富含 Al、C 和 O 元素，结合文献^[10]结果，该针状相为 Al_4C_3 相。熔池中液态铝与 SiC 颗粒发生剧烈的界面反应，生成大量针状 Al_4C_3 相及 Si 颗粒。此外，焊缝区网状组织富含 Al 和 Si 元素，结合 Al-Si 相图^[12]可知，该组织为 Al-Si 共晶组织，在腐蚀过程中 Al 基体被腐蚀，呈现出共晶 Si 颗粒形貌。添加中间层后，焊缝区针状相长度和含量由 82.7 μm 和 18.89% 降至 43.2 μm 和 10.56%。

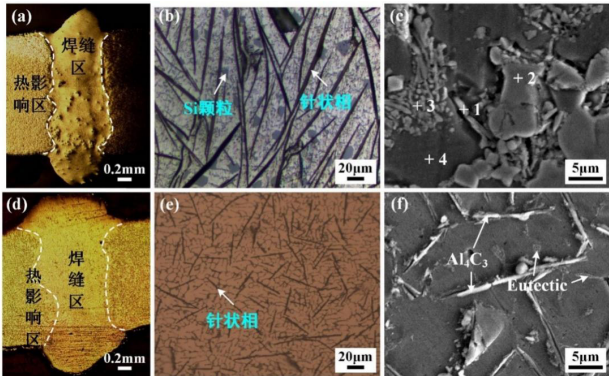


图 1 添加中间层获得的接头宏观形貌和焊缝区组织。
（a）（b）（c）无中间层；（d）（e）（f）0.65mm

表 1 焊缝区不同物相化学成分（原子分数，%）

区域	C	O	Al	Si	Cu	可能相
1	23.91	19.81	52.72	3.56	—	Al_4C_3
2	—	—	2.24	97.76	—	Si
3	—	—	76.22	21.38	2.41	Al-Si 共晶
4	10.36	2.86	74.20	12.58	—	Al 基体

（二）接头拉伸性能分析

表 2 和图 2 分别展示了两类接头的拉伸性能测试结果及断裂位置。由图可知，接头全部断裂于焊缝区，且无显著的颈缩现象。加入 0.65mm 厚度的 6061 铝合金中间层后，接头平均拉伸强度达到峰值（201.5MPa），约为母材强度的 52.9%。对接头断裂截面观察发现，接头微裂纹主要沿针状相和共晶组织扩展，这是由于针状相脆硬性显著大于基体相，在拉伸变形过程中针状相与基体界面区域易产生应力集中，从而诱发微裂纹形成并扩展^[13-14]。而当添加中间层后，由于针状相及共晶组织含量显著降低，改善了针状相与基体之间的协同变形，同时缓解了接头残余应力，因而提高了接头力学性能^[15]。

表 2 不同接头力学性能测试结果

接头类型	接头抗拉强度 σ /MPa	接头强度系数 /%	断后延伸率 /%
SiC _p /2024	380.7	100	7.4
无中间层	109.3	28.7	2.17
0.65mm 中间层	201.5	52.9	2.7

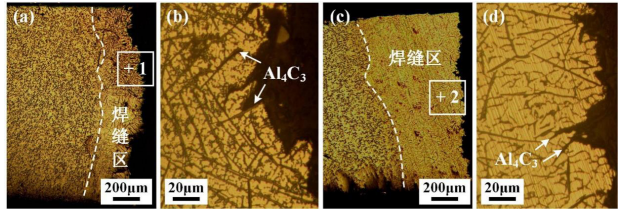


图 2 两类接头截面拉伸断裂位置及路径。（a）（b）无中间层；（c）（d）0.65mm 中间层

三、结论

本文通过添加 6061 铝合金中间层实现了 SiC_p/2024 铝基复合材料的激光高质量连接，分析了接头微观组织及力学性能演变，获得的结论如下：

（1）激光直接焊接接头焊缝区相组成包括 α -Al 基体、针状 Al_4C_3 相、Si 颗粒和 α -Al/ Al_2Cu 共晶。接头引入中间层后，焊缝区针状 Al_4C_3 相和共晶组织含量显著降低，且针状相尺寸减小。

（2）无中间层时，接头抗拉强度仅为 109.3MPa，而引入 0.65mm 厚度的中间层后，接头拉伸强度达到 201.5MPa，约为母材强度的 52.9%。

参考文献

[1] 翟兆阳，梅雪松，王文君，等. 碳化硅陶瓷基复合材料激光刻蚀技术研究进展 [J]. 中国激光，2020，47(6): 0600002.

[2] 马国楠，张乐，欧阳，等. 选区激光熔化 SiC 颗粒增强 AlMgScZr 复合材料的微观组织与力学性能 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版)，2025，53(01): 118-128.

[3] 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/SiCp metal-matrix composite[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 49: 373-384.

[4] 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，2021：26-27.

[5] 陈茂爱，武传松，刘国栋. SiC_p/LD2 复合材料的激光焊缝组织及性能 [J]. 焊接学报，2006(09): 51-54.

[6] 牛济泰，王慕珍，来忠红，等. SiC_w/6061Al 铝基复合材料激光焊机理 [J]. 焊接学报，2000(01): 1-5.

[7] 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): 1002105.

[8] 陈永来，于利根，王华明，等. 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.

[9] 张鹏. SiC_p/Al 复合材料激光填粉焊接研究 [D]. 南昌：华东交通大学，2021.

[10] 黄永攀，李道火. 激光焊接条件下 20%SiC_w/6061 铝基复合材料焊缝特性分析 [J]. 焊接学报，2005(01): 58-60.

[11] 韩梦霞. Al_4C_3 对 Mg-Al 系合金细化机制及其原位合成的研究 [D]. 济南：山东大学，2017.

[12] 顾伟璐，陆从相，周鹏飞. Mg 对过共晶 Al-Si 合金组织改性作用研究 [J]. 铸造，2021，70(08): 921-927.

[13] Han K, Han R, Li X, et al. Laser welding of SiC_p/2024Al composites with novel TiB₂/2024Al composite filler[J]. Materials Letters, 2023, 349: 134657.

[14] 朱超，马琳，周长壮，等. SiC 颗粒增强铝基复合材料焊接研究现状 [J]. 热加工工艺，2021，50(07): 1-6.

[15] 王志伟. SiC_p/6061Al 基复合材料电弧超声等离子弧原位焊接工艺研究 [D]. 镇江：江苏大学，2010.