

焊后热处理对6061-T6铝合金激光-MIG复合焊接头力学性能及组织的影响

金鑫, 祝喏, 唐鸿洋, 田春雨, 刘东利

(辽宁忠旺集团有限公司, 辽宁 辽阳 111000)

摘要: 以采用激光-MIG复合焊的船舶用6061-T6铝合金为主要研究对象, 通过对焊后试样进行单级时效及固溶+时效两种热处理制度, 分析焊后热处理对焊缝内部金相显微组织及力学性能的影响。研究表明: 在复合焊后进行热处理并未对焊缝区组织产生明显影响, 只是晶粒组织得到了不同程度的细化; 单级时效制度下接头硬度提高了15.7 HV, 固溶+时效热处理制度下接头硬度提高18.6 HV; 单级时效制度下接头拉伸强度相比于未热处理提升18 MPa, 固溶+时效制度下接头拉伸强度相比于未热处理提升30 MPa; 在单级时效及固溶+时效后, 接头处的韧窝变浅, 塑性降低, 强度有所提高, 并且经固溶+时效后接头断裂位置由HAZ(热影响区)转至焊缝处。

关键词: 焊后热处理; 6061-T6铝合金; 激光-MIG复合焊; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG146.21; TG166.3; TG407

文献标志码: A

文章编号: 1005-4898(2024)06-0064-05

doi: 10.3969/j.issn.1005-4898.2024.06.13

0 前言

在船舶制造行业节能减排的大环境背景下, 采用轻质材料作为原材料替代传统钢制船体及内部结构用料已经成为趋势, 由于铝合金具有强度高、质量轻、耐腐蚀、加工性良好及可焊性高等优点, 目前已经成为铝合金船舶制造用首选材料^[1]。同时铝合金材料已经大量应用到航空、交通等领域^[2-5]。由于6×××系铝合金在T6状态下具有良好的工艺性能, 耐蚀性强, 因此6×××系铝合金可广泛应用在船舶领域。铝合金焊接主要包括弧焊、FSW、激光焊和激光+弧焊等^[6-9]。船舶舱体及内部带筋型材在焊接过程中主要采用焊接热输入较大的弧焊为主, 焊后性能较低, 变形量较大, 严重限制了铝合金的应用范围^[10-12]。本文主要研究采用激光-MIG复合焊的船舶用6061-T6铝合金, 对焊后试板进行单级时效及固溶+时效热处理, 对比不同热处理制度下接

头组织及性能的变化, 为扩大铝合金在船舶上的应用积累基础数据。

1 试验材料、设备及试验方法

1.1 试验材料

试验母材选用6061-T6铝合金板材, 母材尺寸为180 mm×240 mm×3 mm, 填充金属采用 ϕ 1.2 mm的ESAB 5087焊丝, 母材的合金元素成分及拉伸性能数据分别见表1和表2。

表1 6061-T6铝合金母材合金元素成分(质量分数/%)

Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Al
0.60	1.0	0.23	0.23	0.07	0.17	0.02	余量

表2 6061-T6铝合金力学性能

屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%
278	295	10

1.2 试验设备

激光焊设备: 采用德国通快公司生产的固体激

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB3704205)

作者简介: 金鑫(1994-), 男, 辽宁鞍山人, 工程师, 主要从事铝合金焊接工艺方面的研究。

收稿日期: 2024-05-26

光器, 型号为 Trudisk 8002, 激光头为 HIGHYAG BIMO, 焊接机器人手臂采用库卡作为载体, 激光功率为 160~8 000 W, 光纤直径为 400 μm , 波长为 1 030~1 080 nm, 激光光斑最小直径为 0.42 mm, 采用 99.99%Ar 进行熔池保护。

弧焊设备: Fronius TPS 5000-MIG 焊机, 伏能士 Magic Wave 4000 送丝机构, 焊接电流通过送丝速度进行一元化调节。

1.3 试验方法

正式焊接前, 先采用碗刷对焊缝两侧进行打磨处理, 清理母材表面氧化膜, 可有效抑制气孔缺陷的产生, 并在打磨清理后立即进行焊接试验, 防止母材再次氧化。本试验采用激光-MIG 复合焊, 激光在焊接方向前端, 电弧在焊接方向后端的方式, 激光起到穿透引导的作用, 电弧起到填充覆盖焊缝的作用。在焊接过程中, 需要将激光光斑与焊丝保持 3~4 mm 间距, 避免电弧与激光的耦合作用, 导致焊缝成形质量变差。具体焊接试验参数见表 3, 试板热处理方式及制度见表 4。

表 3 试验参数

功率 /kW	离焦量 /mm	焊接速度 /($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	光丝 间距 /mm	电流 /A	保护气 体流量 /($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	焊枪偏 转角 /($^{\circ}$)
2.4~2.6	0	1.5	3	85	30	40~55

表 4 热处理方式及制度

编号	热处理方式	热处理制度
T6-0	未热处理	—
T6-1	人工时效	175 $^{\circ}\text{C}\times 8\text{ h}$
T6-2	固溶+时效	525 $^{\circ}\text{C}\times 0.5\text{ h}+175\text{ }^{\circ}\text{C}\times 8\text{ h}$

2 试验结果分析

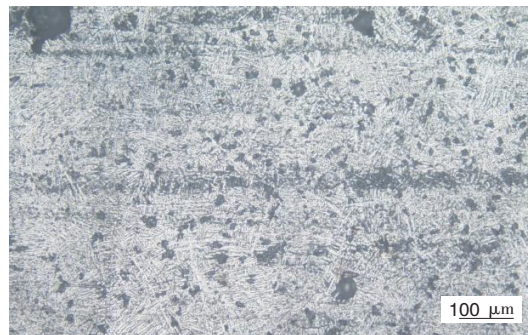
2.1 热处理前后接头金相显微组织分析

金相检测设备选用蔡司 M2m 显微镜。图 1、图 2、图 3 分别为不同热处理制度下的接头金相组织。图 1 (a)、图 2 (a)、图 3 (a) 分别为未热处理、单级时效及固溶+时效制度下的焊缝区金相组织, 可以看到在焊缝区域金相呈现为铸态组织, 熔合线处柱状晶在向焊缝中心生长, 焊缝的中心位置为大小均匀的等轴晶, 在焊接后进行热处理并未对焊缝区组织产生明显影响^[13]。

由于激光-MIG 复合焊具有激光焊接快速熔化

冷却的优势, 在较短时间内熔池具有凝固快的特点, 未经过焊后热处理的焊缝接头不能给 Mg_2Si 强化相析出提供过多时间, 使得 Mg、Si 等元素溶入到铝基体中, 强化相起不到明显效果。通过对焊后试板进行时效操作, 接头中 Mg_2Si 大量结晶析出, 细化晶粒, 接头性能得到提高, 明显改善熔合线区域晶粒组织不均匀分布的现象^[14-15]。

图 1 (b)、图 2 (b)、图 3 (b) 为不同热处理制度下的接头熔合线处金相组织, 未热处理熔合区晶粒相比于经过时效处理后较粗大, 在经过不同时效制度热处理后, 晶粒均有不同程度的减小, 说明接头性能得到一定提高。在熔合区时效前后柱状晶均有明显长大趋势, 方向性较强, 焊后试板在人工时效制度下, Mg_2Si 晶粒还是出现聚集现象, 但是呈均匀分布, 接头晶粒组织更加细化。从图 2 (b) 中可以看出, 在经过 175 $^{\circ}\text{C}\times 8\text{ h}$ 单级时效热处理后, 析出相分布较均匀, 在熔合线附近的不均匀性得到改善。图 3 (b) 中可以看出, 在经过 525 $^{\circ}\text{C}\times 0.5\text{ h}+175\text{ }^{\circ}\text{C}\times 8\text{ h}$ 热处理后, Mg、Si 等元素发生回溶, 在熔合线附近以 Mg_2Si 强化相形式大量析出, 在焊缝处主要呈均匀分布、大小相当的强化相, 晶粒组织更加细小, 因此接头性能更高。



(a) 焊缝

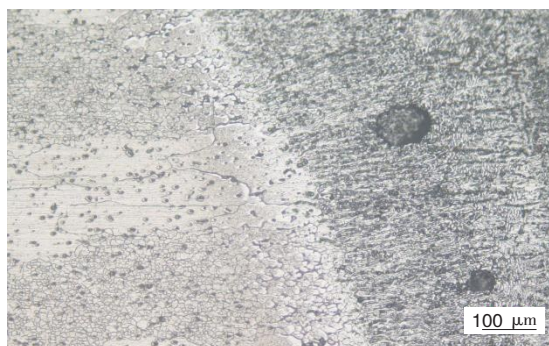


(b) 熔合线

图 1 未热处理的接头金相组织



(a) 焊缝

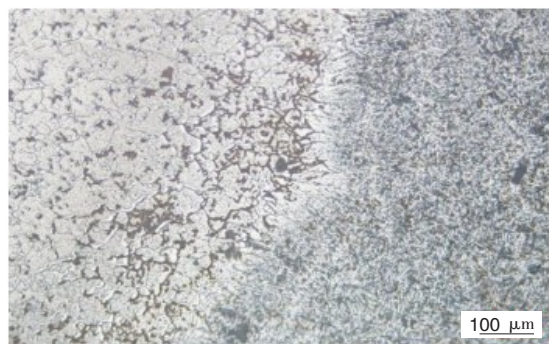


(b) 熔合线

图2 175 °C × 8 h单级时效后接头金相组织



(a) 焊缝



(b) 熔合线

图3 525 °C × 0.5 h + 175 °C × 8 h热处理后接头金相组织

2.2 显微硬度分析

硬度试验设备选用FV-810, 每种接头共进行3次试验, 取3次数据平均值作为最终硬度数据进行

曲线绘制, 3种接头显微硬度数据结果如图4所示。

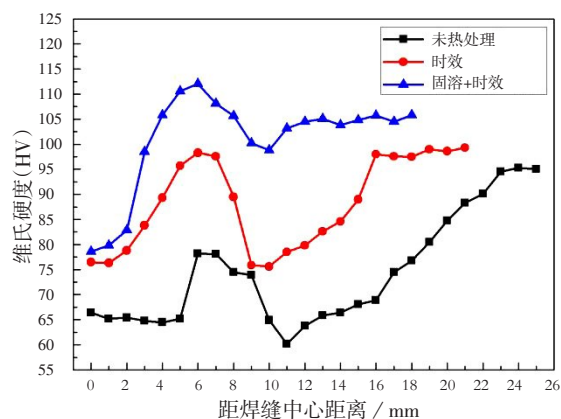


图4 显微硬度

从图4中可以看出, 焊后未热处理、焊后单级时效和焊后固溶+时效3种接头硬度曲线变化趋势基本一致, 均呈现出随着到焊缝中心距离的增加先升高再降低再升高的趋势, 焊后未热处理及焊后单级时效两种接头硬度最低值均出现在HAZ, 焊缝处硬度高于HAZ, 说明在HAZ处存在明显的软化现象, 这是由于在焊接过程中激光及电弧能量的加入使得HAZ晶粒有长大的趋势, 进而导致该区域力学性能下降。

固溶+时效处理后, HAZ处硬度值高于焊缝处, 说明该处软化区消失, 并且经过固溶+时效热处理后, 接头硬度大幅提升, 接头组织得到细化, 析出相分布得更加均匀, 强化相重新析出。焊后未热处理接头硬度最低值为60.2 HV, 经过人工时效制度处理后焊缝硬度最低值为75.9 HV, 固溶+时效热处理制度下硬度最低值为78.8 HV, 说明试样在经过焊后热处理后接头性能得到明显提升。

2.3 焊接接头力学性能分析

对试样进行室温拉伸试验, 力学拉伸结果见表5。可以看出, 试样在经过时效、固溶+时效处理后, 接头性能均有不同程度的提升, 说明在HAZ的晶粒组织有着不同程度的细化, Mg_2Si 等强化相在接头位置分布均匀性得到明显改善, 因此焊后热处理后接头处的力学性能得到提高。

表 5 拉伸试验结果

编号	焊接方法	抗拉强度 /MPa	接头系数	断裂位置
T6-0	激光-MIG 复合焊	215	0.73	HAZ
T6-1		233	0.79	HAZ
T6-2		245	0.83	焊缝

2.4 拉伸断口 SEM 分析

利用扫描电子显微镜对 T6-0、T6-1、T6-2 共 3 种试样拉伸断口形貌进行分析, 图 5 为断口形貌

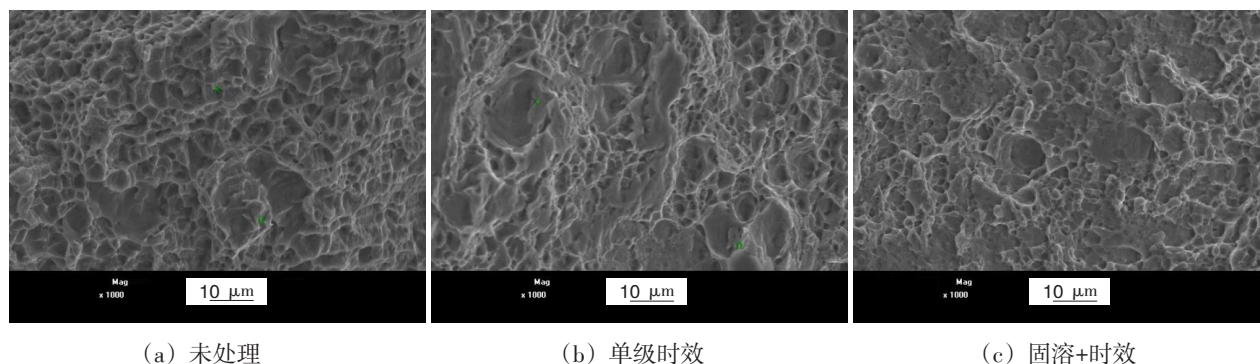


图 5 断口形貌

匀, 接头拉伸性能得到大幅提升。

3 结论

(1) 焊缝区域金相组织呈现为铸态组织, 熔合线处柱状晶在向焊缝中心生长, 焊缝的中心位置为大小均匀的等轴晶, 在焊接后进行热处理并未对焊缝区组织产生明显影响, 只是晶粒组织得到了不同程度的细化。

(2) 单级时效后接头硬度相比于未热处理提高了 15.7 HV, 固溶+时效处理后接头硬度提高了 18.6 HV, 硬度最低位置由 HAZ 转移至焊缝处。

(3) 焊后经过 175 °C×8 h 单级时效后接头抗拉强度由 215 MPa 提高至 233 MPa, 经过 525 °C×0.5 h+175 °C×8 h 固溶+时效后接头抗拉强度提高至 245 MPa, 接头强度均有不同程度的提升。

(4) 热处理前后激光-MIG 复合焊接头的断口均呈现出塑性断裂, 在单级时效及固溶+时效后, 韧窝均有不同程度变浅的现象, 说明接头处的塑性降低, 强度有所提高。

参考文献

[1] 茅海波, 丁荣辉, 朱其柱, 等. 船舶用铝合金板材性

电镜扫描结果。从图中可以看出, 焊后未热处理的拉伸断口, 韧窝小且浅, 在经过焊后单级时效热处理后, 韧窝明显变浅, 韧窝变大, 数量变少, 说明在 HAZ 处析出相较多, 热处理后接头的塑性降低, 但拉伸性能提高, 这与拉伸结果相匹配。在经过固溶时效处理后, 韧窝尺寸变小, 大小均匀, 韧窝较浅, 塑性降低, 合金中的 Mg、Si 元素重新固溶, 并且 HAZ 处软化区消失, 强化相分布更加均

能、应用与展望[C]//第六届中国长三角铝业高峰论坛暨上海铝业行业协会年会. 中国长三角铝业高峰论坛暨上海铝业行业协会年会论文集. 杭州. 2013: 48-60.

- [2] 孙晓红, 杨萌, 孔德猛, 等. 6082-T6 铝合金板材高低温力学性能研究 [J]. 电焊机, 2019, 49 (2): 51 - 54.
- [3] 王静, 徐国富, 李耀, 等. 淬火冷却速率对 6082 铝合金力学性能的影响 [J]. 材料研究学报, 2020, 34 (5): 337 - 344.
- [4] 刘胜胆, 张新明, 黄振宝. 淬火速率对 7055 铝合金组织和力学性能的影响 [J]. 材料科学与工艺, 2008, 16 (5): 650 - 653.
- [5] ISKANDAR M, REYES D, GAXIOLA Y, et al. On identifying the most critical step in the sequence of heat treating operations in a 7249 aluminium alloy [J]. Engineering Failure Analysis, 2003, 10 (2): 199 - 207.
- [6] 邢艳双, 张志强, 赵秦亿, 等. 6082-T6/6061-T6 异种铝合金 MIG 焊接头的组织与性能 [J]. 轻合金加工技术, 2018, 46 (7): 58 - 64.
- [7] ADAMOWSKI J, SZKODO M. Friction Stir Welds (FSW) of aluminium alloy AW6082-T6 [J]. Journal of Achievements of Materials and Manufacturing Engineering, 2007, 20 (1/2): 403 - 406.
- [8] PENG Y, SHEN C B, ZHAO Y D, et al. Comparison of electrochemical behaviors between FSW and MIG joints for

- 6082 aluminium alloy[J].Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46 (2): 344 - 348.
- [9] 火巧英, 李东风, 戴忠晨, 等.6005A-5083 异种铝合金激光-MIG 复合焊接 [J].电焊机, 2015, 45 (3): 98 - 102.
- [10] JIN X Y, SONG G H, ZHENG W G.Laser-arc hybrid welding properties of aluminium alloy 6061[J].Applied Mechanics and Materials, 2014, 3512 (651/653): 50 - 55.
- [11] DITTRICH D, STANDFUSS J, LIEBSCHER J, et al. Laser beam welding of hard to weld Al alloys for aregional aircraft fuselage design-first results[J].Physics Procedia, 2011, 12 (1): 113 - 122.
- [12] 刘晓莉.船舶制造中铝合金焊接工艺研究[D].上海: 上海交通大学, 2008.
- [13] 许飞, 陈俐, 郭路云.填充焊丝对6A02铝合金光纤激光焊接接头组织性能的影响[J].焊接学报, 2018, 39 (8): 92-96+133.
- [14] 李福泉, 李明伟, 孟祥旭.热处理对6005A铝合金激光焊接接头组织和性能的影响[J].材料科学与工艺, 2021, 29 (2): 44-50.
- [15] 夏佩云, 夏令, 余海松, 等.6061铝合金激光填丝焊接接头组织与性能 [J].焊接, 2018 (6): 51-54+68.

Effect of Postweld Heat Treatment on Mechanical Properties and Microstructure of 6061-T6 Aluminium Alloy Laser-MIG Composite Welded Joint

JIN Xin, ZHU Xiao, TANG HongYang, TIAN Chunyu, LIU Dongli
(Liaoning Zhongwang Group Co., Ltd., Liaoyang 111000, China)

Abstract: The effect of postweld heat treatment on the internal microstructure and mechanical properties of the welded 6061-T6 aluminium alloy with laser-MIG composite welding was analyzed by single stage ageing and solution+ageing heat treatment on the welded samples. The results show that postweld heat treatment has no obvious effect on the microstructure of the weld zone, but the grains are refined to different degrees. The hardness of the single stage ageing joint is increased by 15.7 HV, and the hardness of the joint under solution+ageing heat treatment system is increased by 18.6 HV. Compared with the joint without postweld heat treatment, the tensile strength of the joint under single stage ageing system is increased by 18 MPa, and the tensile strength under solution+ageing system is increased by 30 MPa. After single stage ageing and solution+ageing, the dimple at the joint becomes shallow, the plasticity decreases, the strength increases, and the fracture position of the joint changes from the HAZ to the weld after solution+ageing.

Key words: postweld heat treatment; 6061-T6 aluminium; laser -MIG composite welding; microstructure; mechanical property

中国11月未锻轧铝及铝材出口66.9万吨

海关总署数据显示, 中国11月未锻轧铝及铝材出口66.9万吨; 今年累计未锻轧铝及铝材出口615.9万吨, 同比增长18.8%。(来源: 海关总署)

中铝铝箔新能源高精板带箔项目在昆明启动

12月18日, 中铝铝箔新能源高精板带箔项目签约暨启动仪式在云南七甸产业园区举行。中铝铝箔新能源高精板带箔项目位于昆明阳宗海, 总投资21.03亿元。项目计划在2025年一季度开始全面建设, 预计在2026年年底、2027年年初完成项目建设, 项目建设完成之后, 将具备年产17万吨新能源高精铝板带箔的能力。新能源高精板带箔项目产品广泛应用于新能源汽车、消费电子、储能、无菌包装等高端领域。(来源: 有色宝)