

高镁铝合金搅拌摩擦交叉焊接头微观组织与力学性能

林志成^{1,2}, 赵运强¹, 闫德俊³, 刘莉^{1,2}, 董春林¹

(1. 广东省科学院中乌焊接研究所, 广东省现代焊接技术重点实验室, 广州, 510650; 2. 广东省机器人数字化智能制造技术企业重点实验室, 广州, 510535; 3. 中船黄埔文冲船舶有限公司, 广州, 510715)

摘要: 为满足大型铝合金船舶壁板的制造需求, 对新一代高镁铝合金进行了搅拌摩擦交叉焊接试验. 结果表明, 交叉焊接头成形良好, 搅拌区晶粒尺寸最小, 热力影响区晶粒形态没有明显方向性, 与单道搅拌摩擦焊相比, 交叉焊接头搅拌区晶粒组织更细. 显微硬度测试结果表明, 交叉焊接头显微硬度变化范围较小, 前进侧接头软化明显; 拉伸试验测试结果表明, 交叉焊接头抗拉强度为 340 MPa, 为母材强度的 87%, 对比搅拌摩擦焊接头抗拉强度 358 MPa 略微降低, 在热影响区断裂, 断裂方式为 45°韧性断裂; 疲劳裂纹萌生于焊缝底部, 在最大应力 150 MPa 下循环超 2×10^6 次未断裂, 疲劳性能良好, 瞬断区断裂方式为韧性断裂.

创新点: (1) 针对新一代高镁铝合金, 进行了搅拌摩擦交叉焊接试验.

(2) 通过微观组织、力学性能和疲劳性能分析, 首次揭示了新一代高镁铝合金搅拌摩擦交叉焊接头组织力学相关性.

(3) 交叉焊接头力学性能和疲劳性能优异, 为新一代高镁铝合金大板拼接等工程化应用提供理论以及技术支撑.

关键词: 新一代高镁铝合金; 搅拌摩擦交叉焊; 微观组织; 力学性能; 疲劳性能

中图分类号: TG 457 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20220510001

0 序言

Al-Mg 合金以其优良的耐腐蚀性被广泛应用于船舶制造中^[1-2]. 新一代高镁铝合金 (Mg 含量大于 5%) 强度更高, 耐蚀性更好, 在新一代铝合金舰船制造中具有重大应用潜力^[3-5]. 目前对于新一代高镁铝合金焊接方式的研究主要集中在传统熔化焊, 焊后接头易产生变形和气孔等缺陷^[6]. 搅拌摩擦焊 (friction stir welding, FSW) 作为新型固相焊接技术在铝合金焊接应用中愈发广泛^[7-9]. 对于铝合金船舶壁板等大型构件, FSW 与 FSW 的交叉焊接 (FSW/FSW) 是实现其拼接制造必要技术手段. 目前, 已有学者针对高镁铝合金搅拌摩擦焊接工艺及微观组织性能等方面进行了研究^[10]. 但对于新一代高镁铝

合金 FSW/FSW 的报道相对较少, 在船舶等中大型壁板拼接应用过程中缺乏试验基础. 基于此, 文中采用搅拌摩擦焊接技术对新一代高镁铝合金进行交叉焊接, 对交叉焊接头的宏观及微观组织、硬度、抗拉强度及疲劳性能进行测试分析, 研究结果将为新一代高镁铝合金大板拼接等工程化应用提供理论以及技术支撑.

1 试验方法

试验采用 200 mm × 100 mm × 4 mm 轧制态新一代高镁铝合金板材, 化学成分如表 1 所示. 焊接前将待焊板材的表面及对接面进行打磨, 并用无水乙醇擦拭, 从而去除氧化膜和油污等杂质. 搅拌工具采用直径 12 mm 的同心环形貌轴肩, 3.8 mm 的螺纹锥状形貌搅拌针. 试验设备采用大型重载龙门式搅拌摩擦焊设备 (FSW-D-5020-10T-2D), 可精准实现对焊接过程中的精准力-位控制.

焊接过程采用恒位移控制, 压深 0.05 mm, 固定倾角 2.5°, 焊接速度 200 mm/min, 转速 800 r/min.

收稿日期: 2022-05-10

基金项目: 国家自然科学基金 (51905112); 国家重点研发计划项目 (2020YFE0205300); 工信部高技术船舶项目 (MC-201704-Z02); 广东特支计划项目 (2019TQ05C752); 东莞市重点领域研发项目 (20201200300122); 广州市科技计划项目 (202102021032).

表 1 新一代高镁铝合金化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of new generation high-magnesium aluminum alloy

Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Zr	Cu	Al
6.2	0.85	0.4	0.35	0.12	0.017	0.012	余量

采用显微维氏硬度计在 FSW/FSW 接头横截面上测试显微硬度分布, 试验载荷为 300 g, 加载时间为 10 s. 参照 GB/T 16865—2013 标准进行拉伸试验, 参照 GB/T 3075—2008 标准进行疲劳试验, 应力比 0.1, 频率 30 Hz, FSW/FSW 接头拉伸及疲劳样品几何尺寸图如图 1 所示, 在室温条件下进行. 拉伸和疲劳试验前, 焊缝铣平, 样品依次经过 200 号和 600 号砂纸打磨去除毛边. FSW 和 FSW/FSW 接头金相经简单机械抛光后采用电解抛光, 抛光液为 10% 高氯酸 + 90% 无水乙醇 (体积分数), 冷却至 $-20 \sim -30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间, 电压 27 V, 电解时间 12 ~ 20 s. 电解抛光后进行阳极覆膜, 溶液为 2.5% (体积分数) 氟硼酸水溶液, 溶液冷却至 $-20 \sim -30\text{ }^{\circ}\text{C}$, 电压 27 V, 时间 2 ~ 3 min, 采用光学显微镜 (OM) 对接头微观组织进行观察. 采用扫描电子显微镜 (SEM) 对接头拉伸及疲劳断口进行观察.

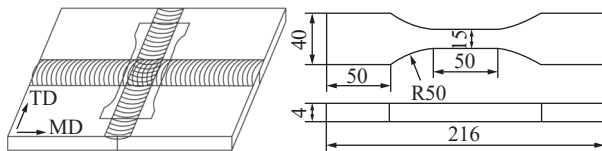


图 1 FSW/FSW 接头拉伸及疲劳样品几何形状 (mm)
Fig. 1 The geometry of tensile and fatigue samples of FSW/FSW joints

2 试验结果与分析

2.1 接头宏观特征与微观组织

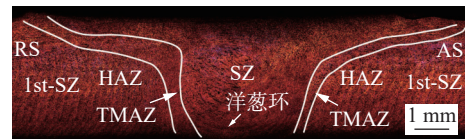
2.1.1 接头宏观特征

图 2 为同一参数下 FSW 接头和 FSW/FSW 接头横截面宏观形貌图, FSW/FSW 是在第一道沿工件纵向 FSW 焊缝基础上进行横向 FSW 焊接, FSW/FSW 接头取样部分为拉伸及疲劳试样中间位置宽度方向. 图 2a FSW 接头与图 2b FSW/FSW 接头无孔洞和“S”线缺陷. FSW 接头焊缝组织主要分为四个区, 即搅拌区 (SZ)、热机影响区 (TMAZ)、热影响区 (HAZ) 和母材 (BM). FSW/FSW 接头不同于 FSW 接头有一个首次搅拌区 (1st-SZ), 位于 FSW/FSW 接头横截面左右两侧, 为纵向 FSW 接头

的 SZ 位置. 由于轴肩和搅拌针的作用区域不同, FSW 接头与 FSW/FSW 接头 SZ 均呈现上宽下窄的漏斗形状. SZ 下方受搅拌针作用, SZ 上方受轴肩作用, SZ 下方清晰可见“洋葱环”形貌, 图 2a “洋葱环”形貌在图 2b 1st-SZ 呈现自下而上的流线形貌. SZ 两侧分别为 TMAZ, 靠近 AS 侧 TMAZ 与 SZ 的分界明显, 靠近 RS 侧 TMAZ 与 SZ 分界不明显. 分析认为, 1st-SZ 经横向 FSW 后, 仍具备 FSW 的典型宏观外貌, 1st-SZ 晶粒在搅拌针作用下塑性变形大, 流动性强, 形成 FSW/FSW 接头 SZ. 外围 1st-SZ 受搅拌针作用相对较小, 塑性变形及流动性不足, 造成界面差异. 靠近 AS 端塑性体速度差异较大, 过渡区域窄, 界面明显, 靠近 RS 端所受应变较大, 过渡区域较宽, 过渡相对平滑, 分界相对模糊. FSW 接头中 TMAZ 与 BM 之间为 HAZ, FSW/FSW 接头中 TMAZ 与 1st-SZ 之间为 HAZ.



(a) FSW 接头横截面宏观形貌



(b) FSW/FSW 接头横截面宏观形貌

图 2 FSW 与 FSW/FSW 接头横截面形貌

Fig. 2 Cross-sections of FSW and FSW/FSW joints.
(a) Cross-section of FSW joint; (b) Cross-section of FSW/FSW joint

2.1.2 接头微观组织

图 3 给出了 FSW 各区微观组织图. 如图 3a 所示, FSW 的 BM 晶粒呈长条状. 如图 3b 和图 3c 所示, TMAZ 晶粒有明显的方向性. 如图 3d 所示, SZ 晶粒形貌为细小等轴晶. 由于在搅拌摩擦焊过程中轴肩和搅拌针对焊缝各区域的机械搅拌和热输入情况不同, 造成了搅拌摩擦焊各区域晶粒形态不同. 靠近 SZ 的组织受搅拌针作用, 塑性变形强烈, 动态再结晶后晶粒细化, 呈现出等轴晶的形貌^[1]. HAZ 的组织相较于 BM 组织出现粗化现象, 与焊

接热循环影响下的回复反应有关.

图 4 给出了 FSW/FSW 接头的各区微观组织图, 在 FSW/FSW 接头的 1st-SZ, 如图 4a 中, 在第一道纵向搅拌摩擦焊的搅拌针搅拌作用的影响下, 经

历高温热循环后, 晶粒发生了动态再结晶的过程, 在搅拌针的作用下从新一代高镁铝合金母材的拉长纤维状组织转变为细小等轴晶组织, 部分区域有明显“流线”形貌, 是 FSW 接头 SZ 内“洋葱环”形

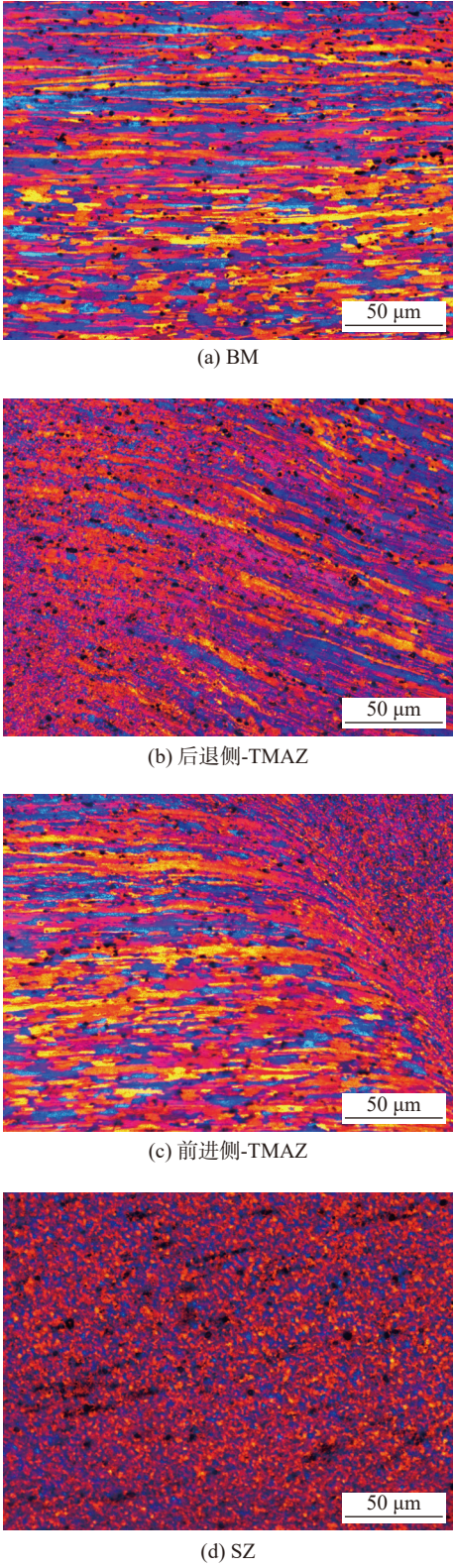


图 3 FSW 各区微观组织

Fig. 3 Microstructure of joints by FSW. (a) BM; (b) RS-TMAZ; (c) AS-TMAZ; (d) SZ

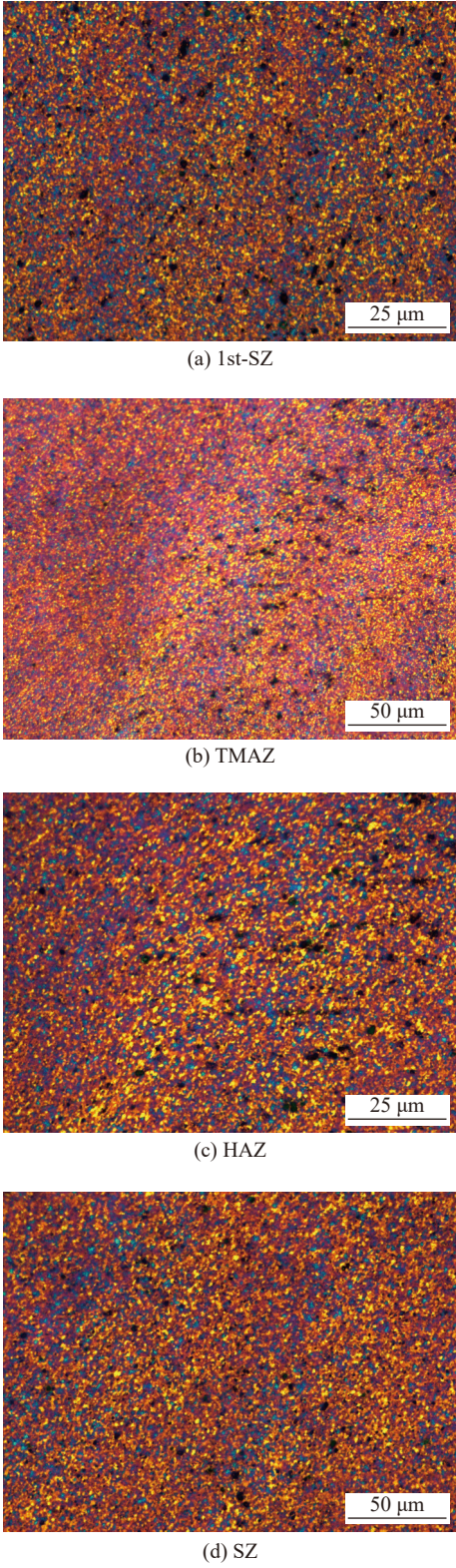


图 4 FSW/FSW 接头各区微观组织

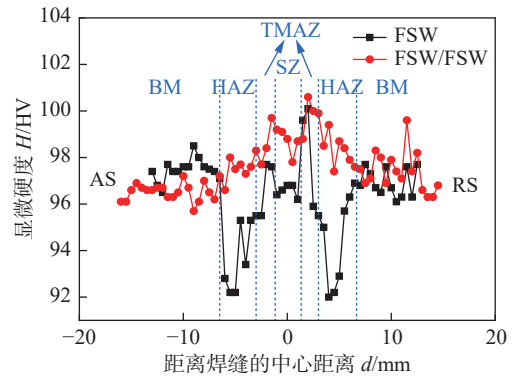
Fig. 4 Microstructure of joints by FSW/FSW. (a) 1st-SZ; (b) TMAZ; (c) HAZ; (d) SZ

貌的纵抛面体现. FSW/FSW 的 TMAZ 内, 如图 4b 中, 随着靠近 SZ, 晶粒尺寸逐渐减小, 晶粒二次动态再结晶细化作用明显, 相较于 FSW 接头微观图 3c, 交叉焊后的等轴晶形态没有明显方向性, 未见 TMAZ 组织出现拉长或扭曲的组织形貌, 晶粒界限模糊. FSW/FSW 接头的 HAZ 内, 如图 4c 中, 对比 TMAZ 晶粒尺寸上略有生长. FSW/FSW 接头的 SZ 内, 如图 4d 中, 第一次 FSW 作用下形成的动态再结晶的晶粒在搅拌针的强烈作用下, 会再次发生动态再结晶的过程, 相较于 FSW 接头微观图 3d, 晶粒尺寸进一步减小, 同时形成的晶粒形态没有明显的方向性. 根据 FSW/FSW 接头微观金相图可以看出在接头中黑色第二相在各区域内均有分布, 形貌上无较大差别, 主要集中在 TMAZ 和 1st-SZ, SZ 第二相较少. 分析认为可能 SZ 受搅拌针影响较大, 温度较高, 第二相发生部分打碎和溶解.

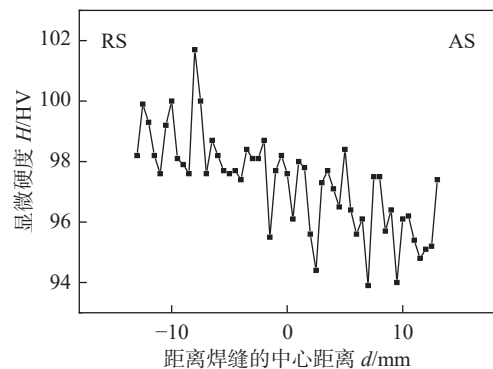
2.2 显微硬度

图 5 为焊接接头硬度分布图, 图 5a 为 FSW 接头与 FSW/FSW 接头横向硬度分布, FSW 接头硬度呈“W”形分布, HAZ 软化明显, SZ 中间硬度值稳定在 96.6 HV 附近, TMAZ 硬度值明显升高, 硬度值最高点位于 RS 侧 TMAZ 附近, 为 100.1 HV. FSW/FSW 接头横向硬度变化范围较小, 为 95.7 HV ~ 100.6 HV, 硬度变化趋势与第一道 FSW 接头硬度变化基本一致, 仅在 HAZ 存在差异. AS 端 HAZ 比 RS 端 HAZ 的软化现象明显, RS 端 TMAZ 向 HAZ 过渡时硬度变化不大. 分析认为, 横向硬度的变化解释了第二道 FSW 焊缝对第一道 FSW 焊缝各分区硬度变化的影响机制, 在第二道 FSW 焊缝影响下, 原焊缝组织在搅拌头作用下变为细小等轴晶, 由于搅拌头作用于拉长纤维状组织和细小等轴晶效果不同, 作用后晶粒尺寸不同, 导致了新分区的硬度范围的差异. 细小等轴晶二次动态再结晶后尺寸更小, 硬度更高, AS 端的 HAZ 软化区仍是 FSW/FSW 接头强度的薄弱环节. 图 5b 为 FSW/FSW 接头纵向硬度分布图, 左侧为 RS, 右侧为 AS. 焊缝硬度值整体变化不大, 为 93.9 ~ 101.7 HV, 且有 AS 侧略低于 RS 侧的趋势. SZ 中心位置硬度值稳定在 97.7 HV 附近, 略微高于 FSW 的 SZ 中心位置. RS 侧 TMAZ 附近出现硬度值最高点, 为 101.7 HV, 略高于 FSW 最高位置硬度值. 硬度最低点出现在 AS 端的 HAZ 位置, 为 93.9 HV. 分析认为, 交叉焊

对接头的硬度变化影响较小, 原 FSW 焊缝 SZ 细小等轴晶组织经搅拌作用动态再结晶后仍为细小等轴晶, 尺寸上变小, 硬度升高. 交叉焊 AS 端的软化效果大于 RS 端, 与 AS 端搅拌头剧烈作用有关, 等轴晶长大, 硬度降低.



(a) FSW 接头与 FSW/FSW 接头横向硬度分布



(b) FSW/FSW 接头纵向硬度分布

图 5 接头硬度分布

Fig. 5 Microhardness distributions of joints. (a) crosswise microhardness distribution of FSW and FSW/FSW joint; (b) Lengthwise microhardness distribution of FSW/FSW joint

2.3 拉伸性能

图 6 为接头抗拉强度图, 图 6a 中, FSW/FSW 接头屈服强度为 241 MPa, FSW/FSW 接头抗拉强度平均值为 340 MPa, 为母材的 87.0%, 对比 FSW 接头抗拉强度 358 MPa (为母材的 91.6%), FSW/FSW 接头抗拉强度略有降低. 图 6b 中, FSW/FSW 较 FSW 屈服强度变化不大, 断后伸长率降低. 分析认为, 对于第一次 FSW, SZ 晶粒呈细小等轴晶, 抗拉性能较高, BM 为轧制态长条状晶粒, 易于变形, 延伸性较好, 经交叉焊后, 1st-SZ 为细小等轴晶, 断后伸长率较差, AS 侧 HAZ 软化现象严重, 造成力学性能减弱. 图 7 为 FSW/FSW 接头拉伸断口, 断裂位置在 HAZ, 呈 45°断裂, 在焊缝底部 a 区位置显示断口呈现韧窝形貌, 分布均匀, 在焊缝中上部 b 区韧窝小

而浅. 分析认为, 拉伸断裂裂纹源产生在焊缝底部, 断裂方式为韧性断裂.

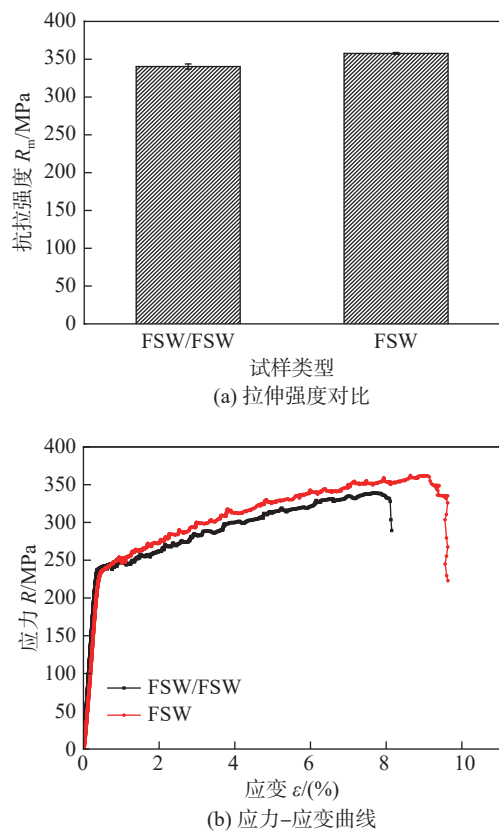


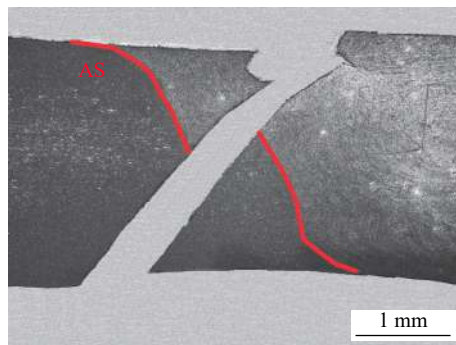
图 6 接头抗拉强度

Fig. 6 Tensile strengths of joints. (a) Tensile strength comparison; (b) Stress-strain curve

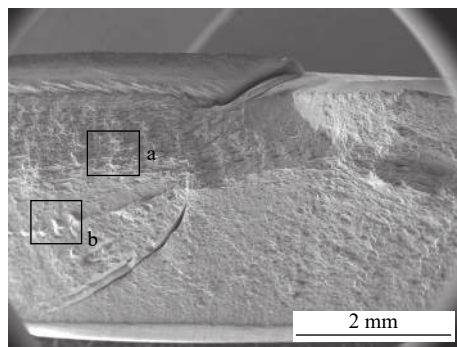
2.4 疲劳性能

对 FSW/FSW 接头试件进行疲劳试验, 测量特定载荷下的交叉焊接头疲劳性能, 应力比 0.1, 频率 30 Hz. 试验结果如表 2 所示. 1 号、2 号和 3 号是最优参数下的 FSW/FSW 疲劳接头, 1-1 号是在 1 号样品循环后的再次循环, 2-1 号和 3-1 号为未焊透样品, 压深仅为搅拌针长度. 在最大应力为 80 MPa、100 MPa 和 150 MPa 的水平下均可超过 1×10^6 次循环, 最大应力为 80 MPa 下可保证循环次数超过 1×10^7 次. 在最大应力 80 MPa 循环后, 样品 1 号在最大应力 135 MPa 下循环次数仍可达到 1.1×10^5 次. 样品 2-1 号及 3-1 号的循环次数分别为 5×10^4 次和 4.2×10^4 次. 对比闫文青等人^[12]在新一代高镁铝合金 MIG 焊疲劳性能的研究, FSW/FSW 接头仍具有优异的疲劳性能, 未焊透的焊接缺陷会大幅度降低焊后接头的疲劳性能.

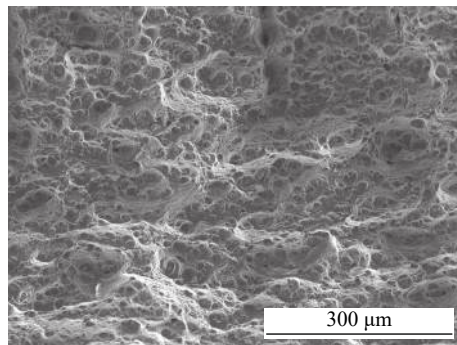
图 8 为 FSW/FSW 接头疲劳断口, 由图可知, 底部白亮处为疲劳萌生裂纹源. 分析由于搅拌头轴肩和搅拌针作用焊缝位置不同, 焊缝中上部受



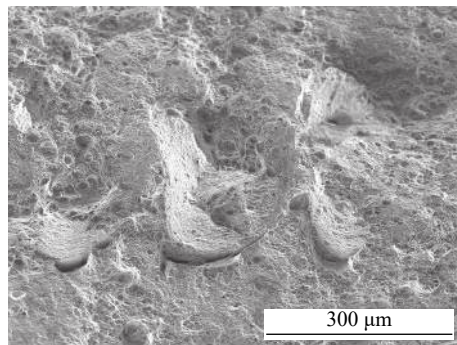
(a) FSW/FSW 拉伸断裂位置



(b) FSW/FSW 拉伸断口



(c) a 区放大



(d) b 区放大

图 7 FSW/FSW 接头拉伸断口

Fig. 7 Fracture morphologies of failure joints by FSW/FSW. (a) Fracture position of FSW/FSW; (b) Fracture morphology of FSW/FSW; (c) Area a amplification; (d) Area b amplification

到轴肩和搅拌针共同作用, 下部仅受搅拌针作用, 力和热的传导不充分, 导致裂纹起源于焊缝底部^[13-14]. 断口右侧断面较为平坦, 为疲劳扩展区,

表 2 FSW/FSW 疲劳结果

Table 2 Fatigue test results by FSW/FSW

编号	应力 σ /MPa	循环次数 N /次	断裂情况
1	80	1×10^7	未断裂
2	100	5×10^6	未断裂
3	150	2×10^6	未断裂
1-1	135	1.1×10^5	断裂
2-1	100	5×10^4	断裂
3-1	150	4.2×10^4	断裂

左侧为疲劳瞬断区. 根据图 8b 扩展区的典型形貌放大图可知, 扩展区纹线由小平面的形貌组成并具有明显的方向性, 且小平面的形貌特征呈现出与底部呈约 45° 方向由密集向稀疏扩展. 根据图 8c 及图 8d 瞬断区典型形貌放大可知, 瞬断区有明显的韧窝特征形貌, 且伴随着如图 8c 所示的类似台阶的形貌特征. 分析认为新一代高镁铝合金 FSW/FSW 接头疲劳断口瞬断区为韧性断裂的断裂方式.

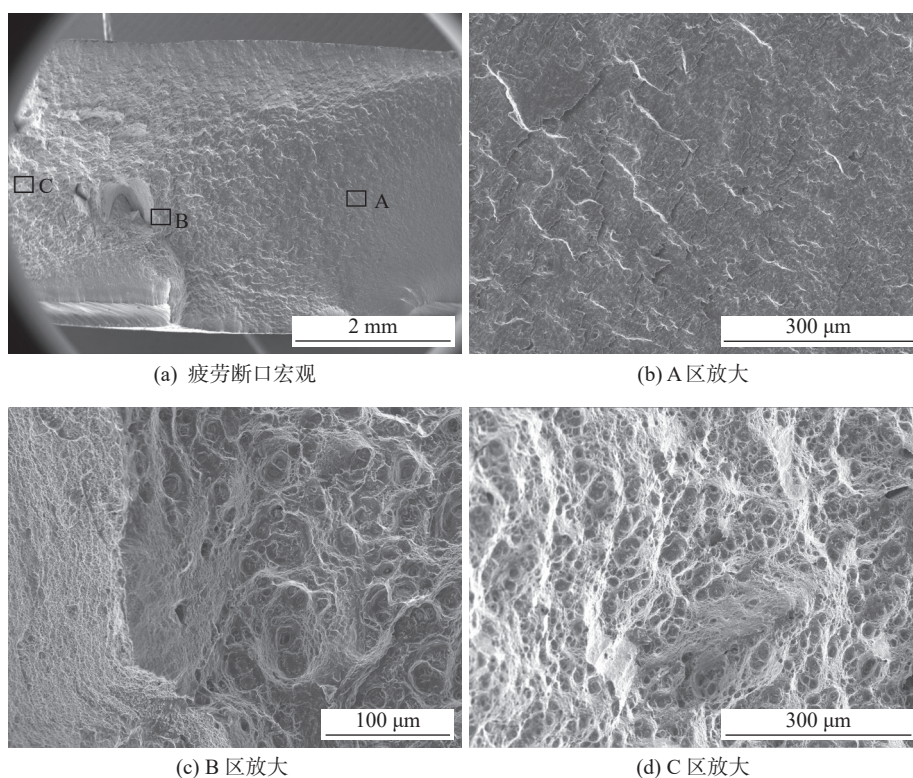


图 8 新一代高镁铝合金 FSW/FSW 接头疲劳断口

Fig. 8 The fatigue fracture of new generation high-magnesium aluminum alloy joints by FSW/FSW. (a) Macroscopic fatigue fracture; (b) Zoom in area a; (c) Zoom in area B; (d) Zoom in area C

3 结论

(1) 新一代高镁铝合金 FSW/FSW 交叉焊接, 在固定倾角 2.5° , 压深 0.05 mm, 焊接速度 200 mm/min, 转速 800 r/min 时可以获得无缺陷的交叉焊接头, 接头仍为细小等轴晶组成, SZ 尺寸最小, TMAZ 晶粒形貌没有明显的方向性.

(2) FSW/FSW 接头抗拉强度为 340 MPa, 为母材的 87.0%, 对比 FSW 接头抗拉强度 358 MPa(母材的 91.6%) 略微降低. FSW/FSW 接头 AS 侧硬度值略低于 RS 侧的趋势, 且软化现象明显, 断裂发生在 HAZ, 呈 45° 韧性断裂.

(3) FSW/FSW 接头在 150 MPa 的应力水平下均可超过 1×10^6 次循环, 在 80 MPa 应力下可保证循环次数超过 1×10^7 次, 疲劳性能良好, 瞬断区为韧性断裂的断裂方式.

参考文献

- [1] Torzewski J, Grzelak K, Wachowski M, *et al.* Microstructure and low cycle fatigue properties of AA5083 H111 friction stir welded joint[J]. Materials, 2020, 13(10): 2381.
- [2] 王德升, 王政红, 王鹏云, 等. 国产与进口 5083-H116 铝合金微观组织及疲劳裂纹扩展速率研究 [J]. 材料开发与应用, 2021, 36(5): 20 - 29.

- Wang Desheng, Wang Zhenghong, Wang Pengyun, *et al.* Microstructures and fatigue crack growth rates of domestic and imported 5083-H116 aluminum alloy[J]. *Development and Application of Materials*, 2021, 36(5): 20 – 29.
- [3] 韩善果, 闫德俊, 刘晓莉, 等. 1561 铝合金 TIG 焊接头组织与力学性能分析[J]. *焊接技术*, 2015, 44(1): 18 – 21.
- Han Shanguo, Yan Dejun, Liu Xiaoli, *et al.* Analysis of microstructure and mechanical properties of 1561 aluminum alloy TIG welded joint[J]. *Welding Technology*, 2015, 44(1): 18 – 21.
- [4] 闫德俊, 韩端锋, 王毅, 等. 1561 铝合金双面双弧 TIG 焊接接头的组织和力学性能[J]. *中国有色金属学报*, 2016, 26(10): 2065 – 2070.
- Yan Dejun, Han Duanfeng, Wang Yi, *et al.* Microstructure and mechanical properties of 1561 aluminum alloy joints made by double-sided arc welding[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2016, 26(10): 2065 – 2070.
- [5] 付文智, 刘晓东, 王洪波, 等. 关于 1561 铝合金曲面件的多点成形工艺[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2017, 47(6): 1822 – 1828.
- Fu Wenzhi, Liu Xiaodong, Wang Hongbo, *et al.* Multi-point forming process of 1561 aluminum alloy surfaces[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2017, 47(6): 1822 – 1828.
- [6] 闫德俊, 王赛, 郑文健, 等. 1561 铝合金薄板随焊干冰激冷变形控制[J]. *机械工程学报*, 2019(6): 67 – 73.
- Yan Dejun, Wang Sai, Zheng Wenjian, *et al.* Control of welding distortion by welding with trailing cooling of drikold of 1561 aluminum alloy thin sheet[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019(6): 67 – 73.
- [7] Ma M Y, Lai R L, Qin J, *et al.* Achieving exceptionally tensile properties and damage tolerance of 5083 aluminum alloy by friction stir processing assisted by ultrasonic and liquid nitrogen field[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2021, 806(80): 140824.
- [8] Meng X C, Huang Y X, Cao J, *et al.* Recent progress on control strategies for inherent issues in friction stir welding[J]. *Progress in Materials Science*, 2021, 115: 100706.
- [9] Liu J. Application and development of friction stir welding technology in high speed EMU manufacturing[J]. *China Welding*, 2018, 27(4): 57 – 62.
- [10] 温林秀, 赵运强, 董春林, 等. 1561 铝合金搅拌摩擦焊接过程压力特征及接头组织性能分析[J]. *焊接学报*, 2019, 40(12): 91 – 96.
- Wen Linxiu, Zhao Yunqiang, Dong Chunlin, *et al.* Study on characteristics of welding pressure, microstructures and mechanical properties of friction stir welded 1561 aluminum alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(12): 91 – 96.
- [11] 董春林, 赵运强, 温林秀, 等. 1561 铝合金搅拌摩擦焊接头微观组织分析[J]. *焊接学报*, 2020, 41(10): 1 – 5.
- Dong Chunlin, Zhao Yunqiang, Wen Linxiu, *et al.* Study on microstructures of friction stir welded joint of 1561 aluminum alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2020, 41(10): 1 – 5.
- [12] 闫文青, 刘东, 鄢文泽, 等. 1561 铝合金 MIG 焊接头的低周疲劳性能研究[J/OL]. *热加工工艺*, 1 – 4 [2022-01-24]. <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20210346>.
- Yan Wenqing, Liu Dong, Yan Wenze, *et al.* Study on low cycle fatigue properties of 1561 aluminum alloy welded joints[J/OL]. *Hot Working Technology*, 1 – 4 [2022-01-24]. <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20210346>.
- [13] 周曙君, 郭训忠, 邢丽. T6 态 7A09 铝合金搅拌摩擦焊接接头的疲劳性能及组织[J]. *机械工程材料*, 2011, 35(5): 55 – 58.
- Zhou Shujun, Guo Xunzhong, Xing Li. Fatigue property and microstructure of FSW joint of 7A09-T6 aluminum alloy[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2011, 35(5): 55 – 58.
- [14] Czechowski M. Low-cycle fatigue of friction stir welded Al-Mg alloys[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 164-165: 1001 – 1006.

第一作者: 林志成, 硕士, 主要从事焊接领域研究工作;
Email: linzhch@gwi.gd.cn.

通信作者: 赵运强, 博士, 高级工程师; Email: zhaoyq@gwi.gd.cn.

(编辑: 张基隆)