

文章编号: 1002-025X(2020)02-0009-04

MIG 焊叠加对铝合金 FSW 焊残余应力的影响研究

张铁浩¹, 张 贺¹, 张风东¹, 杨志斌^{1,2}, 史春元²

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111; 2. 大连交通大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116028)

摘要: 文中针对 4 mm 厚 6A01-T5 铝合金 FSW 焊缝叠加 MIG 焊, 研究了 MIG 焊叠加对 FSW 焊残余应力分布的影响。研究结果表明: FSW 焊残余应力在焊缝两侧分布不对称, 前进侧残余应力较大, 峰值残余应力位于前进侧热机影响区附近; MIG 焊叠加 FSW 焊后残余应力同样分布不对称, 峰值残余应力位于叠加 MIG 焊缝中心附近; 与 FSW 焊相比, 叠加 MIG 焊后正面残余应力均有一定程度降低且 FSW 后退侧叠加时横向残余应力下降最明显, 叠加 MIG 焊后背面纵向残余应力下降不明显, 横向残余应力均呈增大趋势, 且 FSW 后退侧热机影响区叠加时的横向残余应力增加最显著。

关键词: 搅拌摩擦焊; 熔化极气体保护焊; 叠加焊; 残余应力; 铝合金

中图分类号: TG456.9 文献标志码: B

DOI:10.13846/j.cnki.cn12-1070/tg.2021.02.003

0 前言

目前, 轨道列车高速化、轻量化已经成为现代交通运输业的主要发展方向^[1]。铝合金因具有密度低、比强度高、耐腐蚀性强和成形性好等优点, 在轨道交通、航空航天、舰船及海洋工程等领域应用广泛, 随着现代大型中空薄壁铝型材成形技术的持续发展, 铝合金已成为高速列车车体轻量化制造的主要材料^[2-3]。

搅拌摩擦焊 (FSW) 是一种新型的固相焊方法, 不仅可以解决传统气体保护焊 (MIG) 容易出现的气孔、夹渣及裂纹等焊接缺陷, 而且具有焊缝美观、接头性能高等优点^[4-5]。现阶段, 在国内外轨道列车铝合金车体的焊接制造领域, FSW 焊已经成为主要焊接工艺之一^[6-7]。因此, 铝合金 FSW 焊研究吸引了大量研究学者, 并取得了丰硕的研究成果^[8-10]。

随着 FSW 焊在高速列车铝合金车体制造中的规模化应用, 产品结构设计也日益多样化和复杂化, 难以避免地出现了 MIG 焊与 FSW 焊重叠, 甚至是交叉的特殊结构形式。MIG 焊叠加 FSW 焊时, 因 FSW 焊缝组织再次经历焊接热循环, 接头的残余应力分布将会发生复杂的变化, 进而影响接头性能。但是,

当前关于 MIG 焊叠加对铝合金 FSW 焊接头残余应力影响的研究尚未见公开报道, 尚需深入研究, 以拓展 FSW 焊在铝合金车体制造中的应用范围。

文中对 4 mm 厚 6A01-T5 铝合金 FSW 焊缝叠加 MIG 焊, 主要研究了 MIG 焊叠加对 FSW 焊残余应力分布的影响, MIG 焊分别叠加在 FSW 焊缝中心、FSW 焊缝前进侧热机影响区、FSW 焊缝后退侧热机影响区。该研究结果可为焊接结构设计提供理论依据, 同时为实际生产提供技术支持。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验材料选取 4 mm 厚 6A01-T5 铝合金中空双面板材, 试件尺寸为 600 mm×1 000 mm, 选取直径为 1.2 mm 的 ER5356 铝合金焊丝为 MIG 焊填充材料。母材及填充材料的化学成分见表 1。

表 1 母材与填充材料的化学成分 (质量分数) (%)

材料	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
6A01-T5	0.60	0.25	0.20	0.40	0.68	0.20	0.10	0.08	余量
ER5356	0.10	0.4	0.1	0.15	4.8	0.1	0.1	0.13	余量

1.2 焊接设备及方法

FSW 焊采用 ESAB 动龙门式双机头搅拌摩擦焊机和轴肩直径 15 mm, 针长 4.2 mm 的搅拌头, 接头形式为带锁底的对接接头; MIG 焊采用 KEMPPI 3200 型 MIG 电焊机。

收稿日期: 2020-05-22

MIG 焊叠加前, 在 MIG 焊叠加位置, 即 FSW 焊缝中心、FSW 焊缝前进侧热机影响区、FSW 焊缝后退侧热机影响区位置加工深度为 2 mm 的 V 形坡口, 以保证 MIG 焊熔深。并且在 MIG 焊叠加前需利用铝合金清洗剂 and 不锈钢丝刷进行清理。FSW 焊缝开口位置及叠加 MIG 焊位置如图 1 所示。

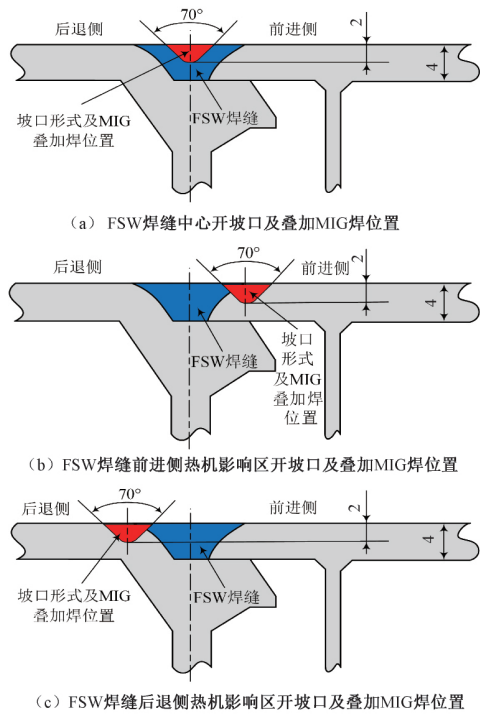


图 1 FSW 焊缝开口位置及叠加 MIG 焊位置示意图

1.3 残余应力分布测试

残余应力分布测试采用超声波法焊接残余应力自动化测量系统, 分别对型材正面焊缝和背面焊缝的横向及纵向残余应力分布进行测试, 残余应力测试点连线垂直于焊缝, 测试设备及试件如图 2 所示。其中 AS 表示 FSW 焊缝前进侧, RS 表示 FSW 焊缝后退侧。

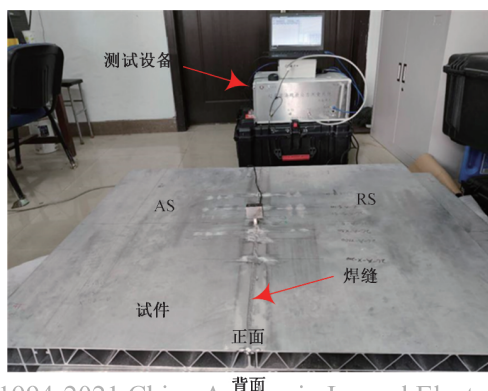
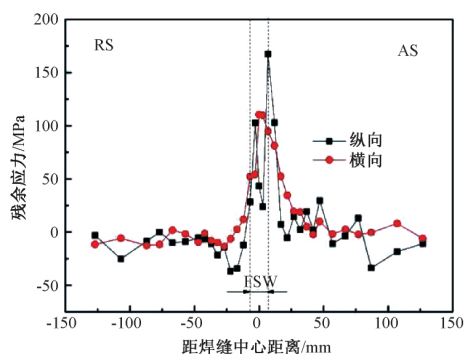


图 2 残余应力分布测试设备及试板

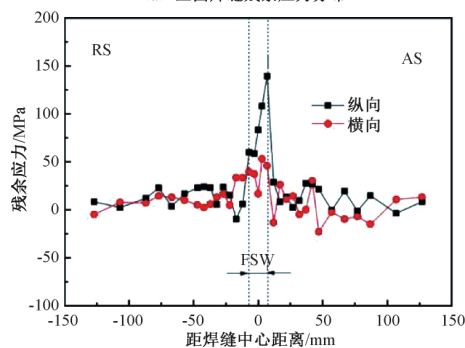
2 试验结果及分析

2.1 FSW 焊残余应力分布

FSW 焊残余应力分布测试结果如图 3 所示, 由图可知: FSW 焊残余应力非对称分布, 峰值残余应力位于 FSW 焊缝前进侧热机影响区附近, 纵向残余应力高于横向残余应力。在正面焊缝, 峰值纵向残余应力为 167 MPa, 峰值横向残余应力为 110 MPa, 如图 3a 所示; 在背面焊缝, 峰值纵向残余应力为 139 MPa, 峰值横向残余应力为 53 MPa, 如图 3b 所示。通过对比可以发现, 正面焊缝的峰值纵向和横向残余应力均高于背面焊缝。



(a) 正面焊缝残余应力分布



(b) 背面焊缝残余应力分布

图 3 FSW 焊残余应力分布

FSW 焊缝残余应力分布不对称的原因, 主要是因 FSW 焊过程中各区域受到的热作用、机械约束作用以及冷却速度不同。前进侧轴肩线速度与焊接方向相同形成叠加效应, 使轴肩与母材间相对运动速度较高; 而后退侧轴肩线速度与焊接方向相反, 使轴肩与母材间的相对运动速度较低。相对运动速度的不同, 使得焊缝两侧的受力状态和热输入均有较大差异, 从而导致残余应力分布不对称。

2.2 FSW 焊缝中心叠加 MIG 焊残余应力分布

FSW 焊缝中心叠加 MIG 焊残余应力分布测试结

果如图 4 所示。由图 4 可知: FSW 焊缝中心叠加 MIG 焊后, 正面焊缝和背面焊缝的残余应力均呈现非对称分布的状态, 峰值残余应力位于 MIG 焊缝中心附近, 且峰值纵向残余应力大于峰值横向残余应力。在正面焊缝, 峰值纵向残余应力为 113 MPa, 峰值横向残余应力为 87 MPa, 如图 4a 所示; 在背面焊缝, 峰值纵向残余应力为 139 MPa, 峰值横向残余应力为 87 MPa, 如图 4b 所示。通过对比可以发现, FSW 焊缝中心叠加 MIG 焊后, 正面焊缝纵向残余应力峰值低于背面焊缝的, 而正面焊缝横向残余应力峰值与背面焊缝的相同。

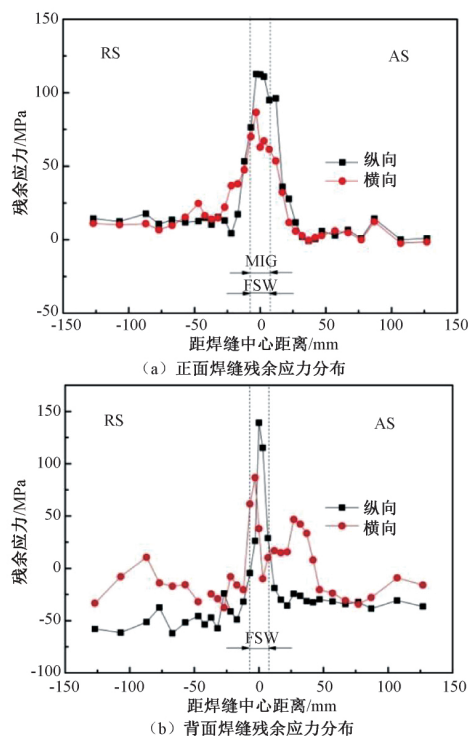


图 4 FSW 焊缝中心叠加 MIG 焊残余应力分布

2.3 FSW 前进侧热机影响区叠加 MIG 焊残余应力

FSW 焊缝前进侧热机影响区叠加 MIG 焊残余应力分布测试结果如图 5 所示。由图 5 可知: FSW 焊缝前进侧热机影响区叠加 MIG 焊后, 正面焊缝和背面焊缝的残余应力同样呈非对称分布的状态, 峰值残余应力均位于叠加的 MIG 焊缝中心线附近。在正面焊缝, 纵向残余应力峰值为 113 MPa, 横向残余应力峰值为 80 MPa; 在背面焊缝, 纵向残余应力峰值为 133 MPa, 横向残余应力峰值为 122 MPa。通过对比可以发现, FSW 焊缝前进侧热机影响区叠加 MIG 焊后, 正面和背面焊缝的横向和纵向残余应力

峰值均低于背面焊缝的。

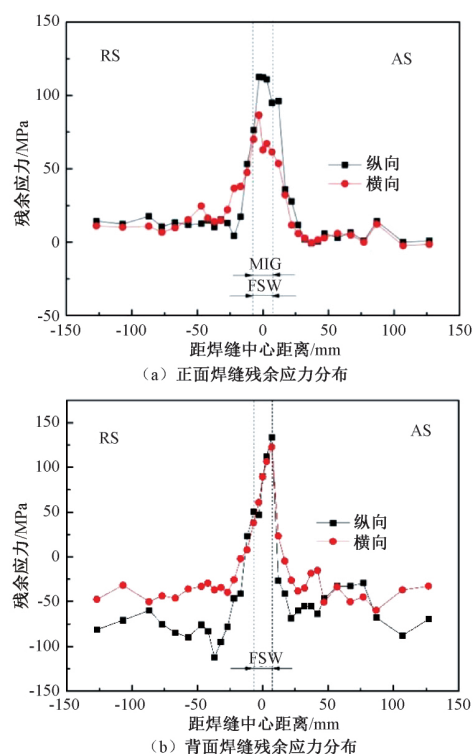


图 5 FSW 前进侧热机影响区叠加 MIG 焊残余应力分布

2.4 FSW 后退侧热机影响区叠加 MIG 焊残余应力

FSW 焊缝后退侧热机影响区叠加 MIG 焊残余应力分布测试结果如图 6 所示。

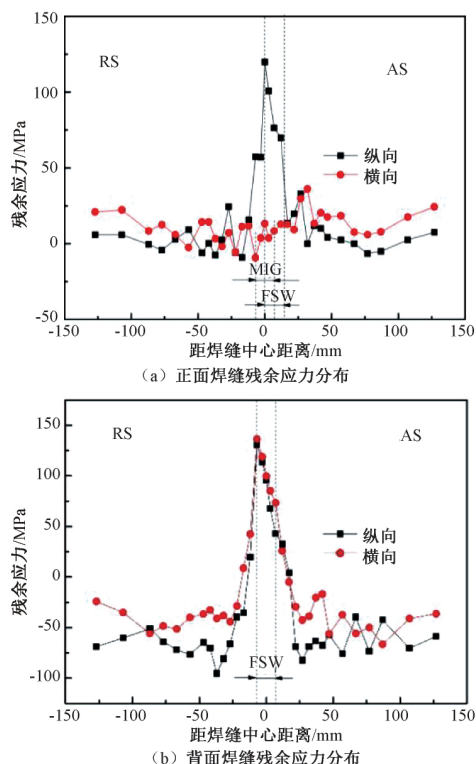


图 6 FSW 后退侧热机影响区叠加 MIG 焊残余应力分布

由图 6 可知: FSW 后退侧热机影响区叠加 MIG

焊后,正面和背面的残余应力同样呈非对称分布的状态,残余应力峰值均位于叠加的 MIG 焊缝中心线附近。在正面焊缝,纵向残余应力峰值为 120 MPa,横向残余应力峰值为 36 MPa;在焊缝背面,纵向残余应力峰值为 131 MPa,横向残余应力峰值为 136 MPa。通过对比可以发现,FSW 焊缝中心叠加 MIG 焊后,正面焊缝纵向和横向残余应力峰值均低于焊缝背面的,尤其是横向残余应力峰值。

2.5 残余应力分布对比分析

由图 3~图 6 对比可以发现,FSW 焊与不同 MIG 焊叠加位置的残余应力分布均呈非对称状态,FSW 焊残余应力峰值位于前进侧热机影响区附近,MIG 焊叠加 FSW 焊残余应力峰值均位于 MIG 焊缝中心线附近的。

FSW 焊与不同 MIG 焊叠加位置的残余应力峰值对比如图 7 所示。通过对比可以发现,相比原始 FSW 焊,不同叠加位置 MIG 焊的正面纵向和横向残余应力峰值均有一定程度的降低,其中纵向残余应力峰值的降低程度基本一致,而 FSW 后退侧热机影响区叠加时的横向残余应力下降最为明显,由 139 MPa 降低至 36 MPa;不同叠加位置 MIG 焊的背面纵向残余应力下降不明显,而横向残余应力均呈增大趋势,FSW 后退侧热机影响区叠加时的横向残余应力增大最显著,由 53 MPa 增大至 136 MPa。

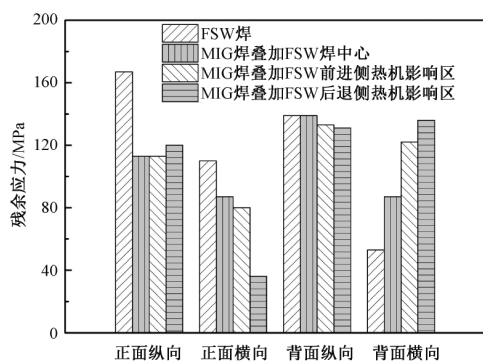


图7 FSW 焊与不同 MIG 焊叠加位置的残余应力峰值对比

3 结论

(1) 原始 FSW 焊残余应力在焊缝两侧分布不对称,前进侧残余应力较大,后退侧残余应力较小,残余应力峰值位于前进侧热机影响区附近,且纵向残余应力高于横向残余应力。

(2) MIG 焊叠加 FSW 焊缝中心、FSW 焊缝前进侧和后退侧热机影响区时,残余应力同样呈非对称分布的状态,残余应力峰值位于叠加 MIG 焊的焊缝中心附近。

(3) 与原始 FSW 焊相比,不同叠加位置 MIG 焊的正面焊缝纵向和横向残余应力峰值均有一定程度的降低,其中 FSW 后退侧热机影响区叠加时的横向残余应力下降最为明显。

(4) 与原始 FSW 焊相比,不同叠加位置 MIG 焊的背面焊缝纵向残余应力下降不明显,而横向残余应力均呈增大趋势,其中 FSW 后退侧热机影响区叠加时的横向残余应力增大最显著。

参考文献:

- [1] Lee H A, Jung S B, Jang H H, et al. Structural-optimization-based design process for the body of a railway vehicle made from extruded aluminum panels[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2015, 230(4): 1 283-1 296.
- [2] 韩晓辉,李帅贞,毛镇东,等. 高速列车用 6106-T6 铝合金型材激光-电弧复合焊接工艺及接头性能[J]. 中国激光, 2019, 46(12): 86-94.
- [3] 杨则云. 高强度铝合金及其先进焊接技术研究现状及发展方向[J]. 电焊机, 2018, 48(3): 255-259.
- [4] Peng Y, Shen C, Zhao Y, et al. Comparison of electrochemical behaviors between FSW and MIG joints for 6082 aluminum alloy[J]. Rare Metal Materials & Engineering, 2017, 46(2): 344-348.
- [5] 张铁浩,张 贺. 6005A-T6 铝合金搅拌摩擦焊接头微观组织及耐应力腐蚀性能[J]. 电焊机, 2019, 49(6): 45-49.
- [6] 韩晓辉,陶传琦,张铁浩,等. 搅拌摩擦焊接技术在轨道车辆铝合金车体制造中的应用与展望[J]. 现代焊接, 2016(6): 16-20.
- [7] 张铁浩,韩德成,刘胜龙,等. 轨道车辆铝合金车体搅拌摩擦焊的工业化应用[J]. 焊接, 2013(10): 25-30.
- [8] 王振苏,黄凌骄,柴 鹏,等. 7N01 铝合金搅拌摩擦焊接头组织与性能分析[J]. 焊接学报, 2017, 38(9): 115-118.
- [9] 高祎晗,国旭明,莫春立. 铝合金无减薄搅拌摩擦焊工艺优化及特征分析[J]. 焊接学报, 2019, 40(4): 141-147.
- [10] Huang Y X, Meng X C, Lv Z L, et al. Microstructures and mechanical properties of micro friction stir welding of 6061-T4 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology-JMR & T, 2019, 8(1): 1 084-1 091.

作者简介: 张铁浩(1977—),男,正高级工程师,国际焊接工程师,主要从事轨道交通车辆焊接工艺研究和技术管理工作。