

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.06.08

铝合金型材间隙填料搅拌摩擦焊接头疲劳性能研究

张欣盟¹, 王世君¹, 王大臣¹, 杨 健¹, 陈禹昕¹, 张林儒¹, 张 超¹,
王贝贝², 薛 鹏²

1. 中车长春轨道客车股份有限公司, 吉林 长春 130062

2. 中国科学院金属研究所 沈阳材料科学国家研究中心, 辽宁 沈阳 110016

摘 要: 针对轨道车辆 6005A-T6 铝合金型材搅拌摩擦焊(FSW)过程中装配间隙导致的接头成形与服役性能问题, 该研究以 1 mm 间隙型材 FSW 接头为对象, 分别采用 6005A 铝合金填片(同质)和 ER5087 铝合金异质填丝(直径 1 mm)两种方式填充间隙, 在优化工艺参数(转速 800 r/min、200 mm/min)下制备 FSW 接头, 对比研究两种填料对接头疲劳性能及断裂行为的影响。结果表明, 6005A 铝合金同质填片和 ER5087 异质填丝均实现较好接头成形和有效熔合。S-N 曲线结果表明, 同质填片接头在 10^7 周次下的疲劳强度约 40 MPa, 而异质填丝接头提升至约 70 MPa。两种接头的疲劳断裂主要发生在热影响区, 而非焊核区, 且裂纹未沿“S”线扩展, 表明在优化参数下外加填料未成为主导疲劳失效的主要因素。断口分析显示, 裂纹多从试样表面边角或焊缝“鱼鳞纹”下方萌生, 裂纹扩展区以解理特征为主, 瞬时断裂区呈韧窝形貌。研究结果可为轨道车辆铝合金型材间隙填充 FSW 工艺优化及服役可靠性评价提供参考。

关键词: 搅拌摩擦焊; 铝合金型材; 间隙填料; 疲劳性能; 断裂行为

中图分类号: TG405 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)06-0064-06

Fatigue property of Gap-Filling Friction Stir Welded Joints in Aluminum Alloy Profiles for Rail Vehicles

ZHANG Xinmeng¹, WANG Shijun¹, WANG Dachen¹, YANG Jian¹, CHEN Yuxin¹, ZHANG Linru¹,
ZHANG Chao¹, WANG Beibei², XUE Peng²

1. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun 130062, China

2. Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

Abstract: To address the joint formation and service performance issues caused by assembly gaps during friction stir welding (FSW) of 6005A-T6 aluminum alloy extruded profiles for rail vehicles, FSW joints with a 1 mm gap were fabricated using two gap-filling methods: 6005A aluminum alloy homogeneous filler strip (1 mm thick) and ER5087 aluminum alloy heterogeneous filler wire (1 mm in diameter). The joints were produced under optimized welding parameters (rotational speed of 800 rpm and travel speed of 200 mm/min), and the effects of the two filler methods on high-cycle fatigue performance and fracture behavior were comparatively investigated. The S-N curve results indicate that the fatigue strength at 10^7 cycles of the homogeneous filler-strip joint is approximately 40 MPa, while that of the heterogeneous filler-wire joint increases to approximately 70 MPa, representing a significant improvement in fatigue performance. Fatigue fracture in both types of joints predominantly occurs in the heat-affected zone (HAZ) and parent material (PM), rather than in the stir zone (SZ). No crack propagation along the "S-line" or hook defects is observed, indicating that under the optimized parameters, the introduced filler materials are not the dominant factor controlling fatigue failure. Fractographic analysis reveals that fatigue cracks generally initiate from the specimen surface corners or beneath the welding ripples, the crack propagation region ex-

收稿日期: 2026-04-30 修回日期: 2026-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(U25B20152)

作者简介: 张欣盟(1980—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事轨道车辆焊接工艺方面的研究。E-mail: xinmengzhang@163.com。

hibits predominantly cleavage characteristics, and the final fracture region displays dimple morphology. These results provide experimental references for the selection of gap-filling FSW process schemes for aluminum alloy profiles in rail vehicle applications.

Keywords: friction stir welding; aluminum alloy profile; gap filler; fatigue performance; fracture behavior

引用格式:张欣盟,王世君,王大臣,等. 铝合金型材间隙填料搅拌摩擦焊接头疲劳性能研究[J]. 电焊机,2026,56(6):64-69.

Citation: ZHANG Xinmeng, WANG Shijun, WANG Dachen, et al. Fatigue property of Gap-Filling Friction Stir Welded Joints in Aluminum Alloy Profiles for Rail Vehicles[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(6): 64-69.

0 引言

搅拌摩擦焊(Friction stir welding, FSW)作为一种固相连接技术,凭借热输入低^[1]、焊接变形小^[2]、残余应力低^[3]、生产效率高等优点,成为铝合金轨道车辆制造中最受关注的焊接方法之一。目前,FSW在国外轨道交通车辆制造中已获得较为广泛的应用。为满足车体轻量化、高刚度、低焊缝数量及易制造性等核心设计与生产需求,国内轨道车辆铝合金车体制造过程中广泛使用长大铝合金挤压型材,这一结构特征为FSW技术的应用提供了优势^[4-5]。然而,长大型材在实际FSW生产中面临一个突出难题——装配间隙。受型材自身直线度公差、部件装配偏差以及焊接工装定位精度不足等多重因素的综合影响,焊前装配阶段普遍存在不同程度的间隙问题^[6]。间隙对FSW接头质量的影响是多方面的。一方面,间隙破坏了焊缝区材料正常的塑性流动行为,当间隙宽度超过板厚的10%时,材料填充不足以覆盖整个焊缝截面,极易引发孔洞、隧道等典型缺陷;另一方面,在搅拌头压力作用下,已塑化的金属会向间隙内流失,导致焊缝区域有效截面减薄,接头承载能力显著下降^[7-9]。上述问题直接威胁车体结构的连接强度与疲劳可靠性,亟需寻求有效的工艺解决途径。

针对间隙问题,采用填充材料补偿材料缺失是一种直观且可行的技术思路。通常FSW焊接过程无需填充金属,依靠旋转搅拌头与工件间的摩擦热使母材达到热塑性状态,经搅拌、塑性流动与锻压成形,实现母材界面的可靠冶金结合。引入填料后,填充材料的成分与状态将直接影响焊核区的组织与性能。基于此,本研究设计了两种填料方案:其一为与6005A-T6母材同质的6005铝合金薄片,

以保持FSW焊缝与母材同质;其二为传统6005A-T6铝合金MIG焊(熔化极惰性气体保护焊)常采用的ER5087铝合金焊丝。需要说明的是,两种填料在材质与形态上均不相同,本文旨在从工程应用角度对比两种填料方案对FSW接头疲劳性能的影响规律。重点对比分析了同质填片及与异质填丝两种条件下FSW接头的疲劳性能及断裂行为。研究结果可为轨道列车铝合金型材间隙填充FSW工艺方案选择提供实验依据。

1 试验材料与方法

试验选用6005A-T6铝合金型材为母材,对搭接FSW接头形式,焊接位置对接板厚为4 mm,焊前用丙酮清洗油污。以1 mm组配间隙为研究对象,选用两种填充材料:一种为1 mm厚的6005铝合金薄片,另一种为直径1 mm的商用ER5087铝合金焊丝。6005铝合金填片的制备方法为:将6005A型材板块在热处理炉中加热至400 °C并保温1 h,然后用轧机热轧至1 mm厚度,示意图如图1所示。需要指出的是,6005A-T6合金经400 °C/1 h加热后已显著过时效,填片的力学性能低于T6态母材,后续讨论中将结合此因素分析其对疲劳性能的影响。

试验所用搅拌头为内凹轴肩、锥形螺纹搅拌针的结构形式,轴肩直径16 mm,搅拌针长3.72 mm,搅拌针根部直径6 mm,螺距0.8 mm,搅拌头材质为H13热作模具钢。FSW焊接参数:主轴转速800 r/min、行进速度200 mm/min,FSW方向均平行于型材挤压方向。

疲劳性能测试依据GB/T 3075—2021《金属材料 疲劳试验 轴向力控制方法》,在GPS20型高周疲劳试验机上进行,采用应力控制模式,应力比 $R=0.1$,

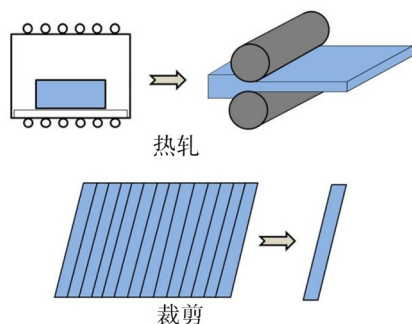


图1 铝合金填片材料制备过程示意

Fig. 1 Schematic illustration of the preparation process for aluminum alloy filler strip

加载频率 110 Hz。疲劳试样垂直于焊接方向截取。试样线切割后,上表面仅作简单打磨以尽量接近焊接件实际服役状态,侧面依次经 400#至 2000#砂纸逐级打磨。分别在多个应力幅水平下进行疲劳实验,绘制疲劳应力-寿命($S-N$)曲线,每种条件的有效试样件数不少于 3 个。

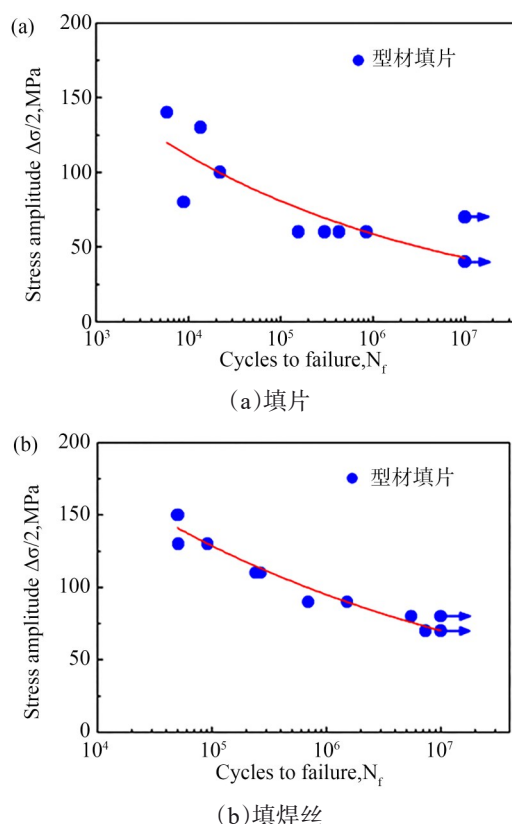
2 试验结果及讨论

2.1 接头疲劳性能

对优化参数(800 r/min, 200 mm/min)下制备的两种填料 FSW 接头进行疲劳性能测试, $S-N$ 曲线结果如图 2 所示。由图 2a 可见,同质填片 FSW 接头在 10^7 周次下的疲劳强度约为 40 MPa;由图 2b 可见,异质填丝 FSW 接头在 10^7 周次下的疲劳强度约为 70 MPa,较填片接头提升约 75%。

两种填料接头疲劳性能的差异可从以下两方面分析。其一,ER5087 铝合金的 Mg 含量(4.5%~5.5%)远高于 6005A-T6 合金(0.4%~0.6%),Mg 的固溶强化效应使 ER5087 焊丝本身具备更高的屈服强度。当 ER5087 填丝在 FSW 过程中与母材充分搅拌混合后,焊核区因引入高 Mg 合金元素而获得强度提升,从而间接提高了接头的整体疲劳承载能力。其二,在搅拌头的剪切与搅拌作用下, $\varnothing 1$ mm 焊丝的截面尺寸远小于 1 mm 厚填片,更易被搅拌针破碎并均匀混入焊核区,有利于减少因填料残留或混合不均而导致的应力集中。此外,6005A 填片经 400 °C/1 h 热轧后已显著过时效,其自身力学性能低于 T6 态母材,这也可能是同质填片接头疲劳强度较

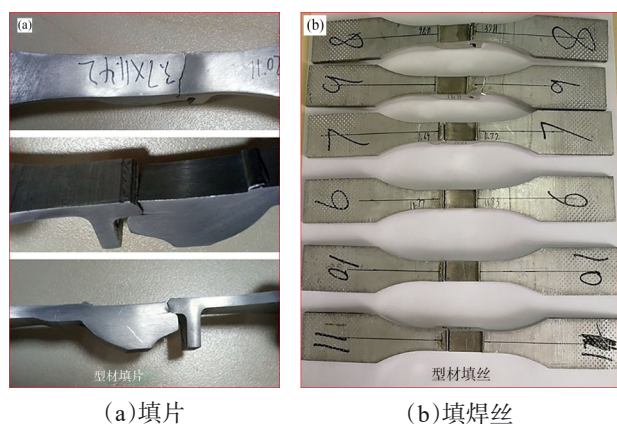
低的原因之一。需要指出的是,由于本文同时改变了填料的材质与形态,上述两种因素的各自影响尚需进一步的对照实验加以区分。

图2 型材 1 mm 间隙填料 FSW 接头疲劳 $S-N$ 曲线Fig. 2 Fatigue $S-N$ curves of FSW joints of profiles with a 1 mm gap filler

2.2 疲劳断裂特征分析

疲劳测试时,两种填料 FSW 接头的断裂位置表现出一致的规律:大部分试样断裂于 HAZ,部分样品断裂于 PM,典型断后宏观形貌如图 3 所示。接头的断裂位置与应力幅关系不大,几乎不受影响,两种填料接头均未出现断裂于焊核区(SZ)的情况。这表明两种填料在 FSW 过程中均实现了与母材金属间的有效冶金结合,焊核区并非接头的疲劳薄弱环节,且填料种类对疲劳断裂位置无显著影响。

图 4 为填片 FSW 接头疲劳测试时断裂于 HAZ 的典型横截面宏观形貌。从图中可以看出,裂纹基本沿着表面萌生并向内扩展,未贯穿至搅拌区(SZ)。两种填料 FSW 接头中均可观察到较多的氧化膜残留^[10-15],形成显著的“S”线特征^[16]。“S”线的形成源于搅拌针剧烈搅动过程中母材(PM)对接面氧化膜被破碎后随塑性金属流动并在 SZ 内重新分



(a) 填片

(b) 填焊丝

图3 填料FSW接头疲劳断裂后形貌

Fig. 3 Fracture morphology of the filler-sheet FSW joint after fatigue failure



图4 断裂在HAZ的FSW接头样品横截面宏观形貌

Fig. 4 Cross-sectional macroscopic morphology of the FSW joint fractured in the HAZ

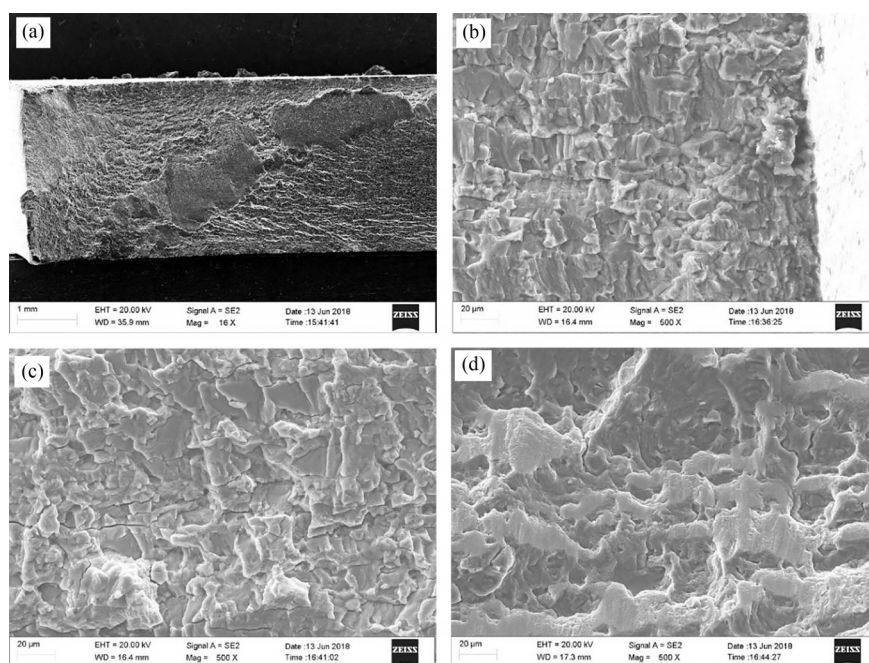
布^[17-18]。间隙填料FSW焊接时,对接面数量增多,导致“S”线数量相应增加。然而,所有疲劳断裂均未沿“S”线扩展,表明在优化参数下SZ内增多的氧化

物残留未成为主导裂纹扩展路径的控制因素。对于对搭接FSW接头,位于焊缝底部搭接面的Hook缺陷通常也是力学性能测试的薄弱区,但本试验中两种填料FSW接头均未沿着Hook缺陷处起裂,进一步说明填料引入并未恶化接头的疲劳断裂行为。

2.3 疲劳断口分析

分别选取断裂于PM和HAZ的典型填片FSW试样进行疲劳断口SEM观察,结果如图5、图6所示。断裂于PM的试样断口形貌如图5所示,宏观断口可清晰区分三个区域(见图5a)。裂纹萌生区面积较小,在试样表面边角处起裂,形貌较为平坦,呈解理特征(见图5b);裂纹扩展区面积略大于萌生区,同样以解理形貌为主(见图5c);瞬时断裂区形貌与静态断裂时的断口形貌类似,呈现出韧窝状形貌,但此时韧窝呈现出受剪切力作用的轮胎状花样,如图5d所示。整个断口未观察到沿“S”线萌生或扩展的断裂特征。

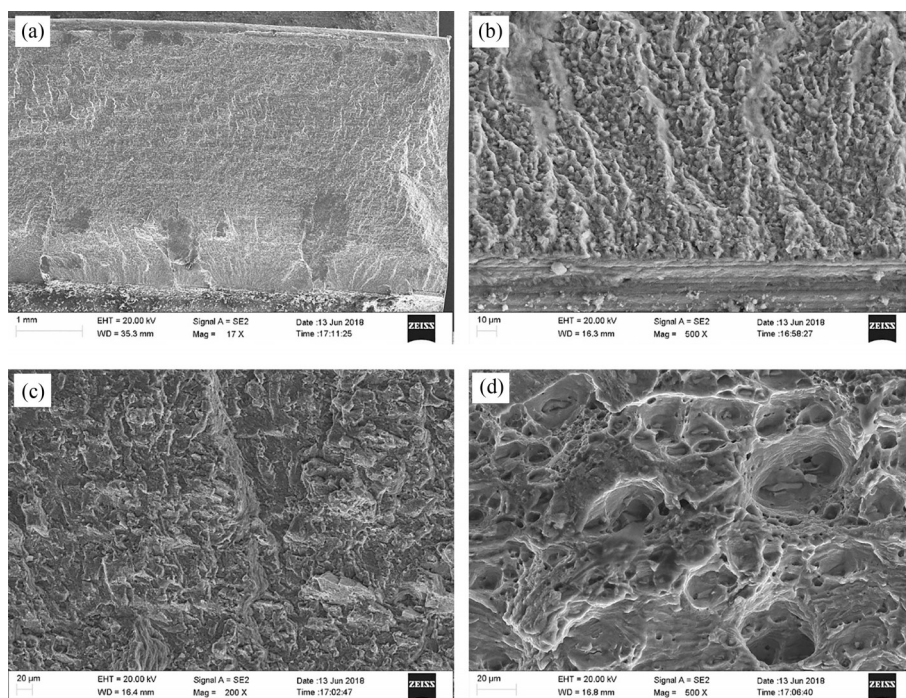
断裂于HAZ的试样断口形貌如图6所示。宏观断口同样可分为三个区域(见图6a)。裂纹萌生区面积较小,裂纹沿焊缝表面“鱼鳞纹”下方起裂,且呈现出多裂纹源的特征,裂纹萌生区表面较为平坦,断口形貌上可观察到沿晶断裂和解理的形貌特



(a) 宏观形貌; (b) 裂纹萌生区; (c) 裂纹扩展区; (d) 瞬时断裂区

图5 断裂在PM样品疲劳后断口形貌

Fig. 5 Fatigue fracture morphology of the specimen fractured in the PM



(a)宏观形貌;(b)裂纹萌生区;(c)裂纹扩展区;(d)瞬时断裂区

图6 断裂在HAZ样品疲劳后断口形貌:

Fig. 6 Fatigue fracture morphology of the specimen fractured in the HAZ

征。与裂纹源区不同,裂纹扩展区形貌有所区别,解理形貌特征更为明显(见图6c)。瞬时断裂区的形貌呈现出韧窝状的静态断裂特征,如图6d所示。

综合两种断裂位置的断口分析可知:裂纹主要从试样表面边角或焊缝“鱼鳞纹”下方萌生,前者与试样的几何应力集中有关,后者则与FSW焊缝表面鱼鳞纹处的微观缺口效应相关。裂纹扩展区均以解理特征为主,表明6005A-T6铝合金在循环载荷下的裂纹扩展阶段具有较脆的特征,这与铝合金FSW接头HAZ的过时效软化机制一致^[10-11]。两种填料接头的断口形貌无本质差异,进一步佐证填料种类不影响疲劳断裂机制。

3 结论

(1)在优化工艺参数(800 r/min、200 mm/min)下,6005A同质填片和ER5087异质填丝FSW接头均可实现较好的焊接成形。外加填片和焊丝在FSW过程中能够与母材实现有效的熔合,两种填料方案用于6005A-T6铝合金型材1 mm间隙连接均具有可行性。

(2)ER5087异质填丝FSW接头的疲劳性能优于6005A同质填片接头。填片接头在 10^7 周次下的疲劳强度约为40 MPa,填丝接头提升至约70 MPa,增幅约75%。性能差异与填料材质(ER5087高Mg固溶强化)和形态(焊丝更易搅拌均匀)两方面因素均有关,同时6005A填片经热轧后的过时效软化也可能是同质填片接头疲劳强度较低的原因之一。由于两种填料在材质与形态上同时改变,各因素的独立贡献尚需后续对照实验验证。

(3)两种填料FSW接头的疲劳断裂均主要发生在热影响区和母材,而非焊核区,且裂纹未沿“S”线或Hook缺陷扩展,表明优化参数下外加填料及焊核区增多的氧化物残留并非疲劳失效的主导因素。断口形貌显示,裂纹多从表面边角或鱼鳞纹下方萌生,萌生区呈沿晶与解理混合特征,扩展区以解理为主,瞬时断裂区呈韧窝形貌,两种填料接头的疲劳断裂机制无本质差异。

参考文献:

- [1] Wang B B, Chen F F, Liu F, et al. Enhanced mechanical properties of friction stir welded 5083Al-H19 joints

- with additional water cooling[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2017, 33(9): 1009–1014.
- [2] Liu F C, Feng A H, Pei X, et al. Friction stir based welding, processing, extrusion and additive manufacturing[J]. *Progress in Materials Science*, 2024, 146: 101330.
- [3] Huang X, Reynolds A P. Effects of the friction stir welding process variants on residual stress[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2018, 23(4): 279–286.
- [4] Zhao T, Sato Y S, Kokawa H, et al. Predicting Tensile Properties of Friction-Stir-Welded 6063 Aluminum with Experimentally Measured Welding Heat Input[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2020, 33(9): 1235–1242.
- [5] Aziz S B, Dewan M W, Huggett D J, et al. A fully coupled thermomechanical model of friction stir welding (FSW) and numerical studies on process parameters of lightweight aluminum alloy joints[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2018, 31(1): 1–18.
- [6] 张欣盟, 何广忠, 王贝贝, 等. 6082-T6 铝合金填料搅拌摩擦焊工艺[J]. *电焊机*, 2020, 50(12): 54–58.
ZHANG X M, HE G Z, WANG B B, et al. Investigation of friction stir welded 6082-T6 Al alloy with fillers[J]. *Electric Welding Machine*, 2020, 50(12): 54–58.
- [7] Wanjara P, Monsarrat B, Larose S. Gap tolerance allowance and robotic operational window for friction stir butt welding of AA6061[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, 213: 631–640.
- [8] Inada K, Fujii H, Ji Y S, et al. Effect of gap on FSW joint formation and development of friction powder processing[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2010, 15: 131–136.
- [9] Ji S, Meng X, Xing J, et al. Vertical compensation friction stir welding of 6061-T6 aluminum alloy[J]. *High Temperature Materials And Processes*, 2016, 35: 843–851.
- [10] Sun G, Wang C, Wei X, et al. Study on small fatigue crack initiation and growth for friction stir welded joints[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 739: 71–85.
- [11] Guo S, Shah L, Ranjan R, et al. Effect of quality control parameter variations on the fatigue performance of aluminum friction stir welded joints[J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, 118: 150–161.
- [12] 沈可心, 李权, 张思聪, 等. 2195-T8 铝锂合金及其搅拌摩擦焊接头的低周疲劳行为(英文)[J]. *中国有色金属学报(英文版)*: 1–24. [2026-05-01]. <https://link.cnki.net/urlid/43.1239.TG.20260331.1119.002>.
- [13] Jolu T L, Morgeneyer T F, Gourgues-Lorenzon A F. Effect of joint line remnant on fatigue lifetime of friction stir welded Al-Cu-Li alloy[J]. *Science and Technology of welding and joining*, 2010, 15(8): 694–698.
- [14] 赵亚东, 沈长斌, 刘书华, 等. 6082 铝合金搅拌摩擦焊焊缝的电化学腐蚀行为[J]. *焊接学报*, 2008(10): 105–107.
ZHAO Y D, SHEN C B, LIU S H, et al. Electrochemical corrosion behavior of friction stir welding weld of 6082 aluminum alloy[J]. *Transactions of The China Welding Institution*, 2008(10): 105–107.
- [15] 卢峰华, 钮旭晶, 候振国, 等. 6082-T6 厚板铝合金搅拌摩擦焊焊接接头应力腐蚀的敏感性[J]. *焊接技术*, 2020, 49(06): 31–34.
LU F H, NIU X J, HOU Z G, et al. Sensitivity to stress corrosion of friction stir welded joint of 6082-t6 thick plate aluminum alloy[J]. *Welding Technology*, 2020, 49(06): 31–34.
- [16] Zhang Z, Xiao B L, Ma Z Y. Effect of segregation of secondary phase particles and “S” line on tensile fracture behavior of friction stir-welded 2024Al-T351 joints[J]. *Metallurgical and materials transactions A*, 2013, 44(9): 4081–4097.
- [17] Zhou C, Yang X, Luan G. Effect of root flaws on the fatigue property of friction stir welds in 2024-T3 aluminum alloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 418(1–2): 155–160.
- [18] Yoon T J, Kang C Y. Observations on metallurgical phenomena and formation of onion ring nugget during friction stir lap welding of dissimilar aluminum by a new 3D technique[J]. *Materials Letters*, 2015, 142: 253–257.