

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.05.10

焊前打磨对 6005A-T6 铝合金型材搅拌摩擦焊接头性能的影响

张欣盟¹, 邓 钢¹, 田 宇¹, 王世君¹, 耿 明¹, 黄 林¹, 刘 松¹,
范明保¹, 王贝贝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: 针对轨道客车常用 6005A-T6 铝合金型材焊前是否需机械打磨去除表面氧化膜的问题, 在搅拌头转速 2 000 r/min、行进速度 2 000 mm/min 的高速搅拌摩擦焊 (FSW) 条件下, 对比研究了焊前未机械打磨与机械打磨两种表面处理方式对搭接 FSW 接头 (对接厚度 4 mm) 显微组织、硬度、拉伸及疲劳性能的影响。结果表明, 高速 FSW 过程可对焊缝中的氧化膜产生良好的破碎效果; 两种处理条件下接头的显微组织、硬度和拉伸强度及疲劳强度无显著差异, 硬度均呈“W”形分布, 最低位于热影响区, 约 68 HV。10⁷ 周次下未打磨接头疲劳强度约为 105 MPa, 打磨接头约为 110 MPa, 差异不大。NaOH 腐蚀后, 未打磨试样焊核区“S”线较打磨试样更明显, 但两种条件下拉伸与疲劳断裂均未沿“S”线发生, 表明高速 FSW 条件下焊前打磨并非必要工序。

关键词: 搅拌摩擦焊; 6005A-T6 铝合金; 焊前打磨; 显微硬度; 疲劳性能

中图分类号: TG453 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)05-0088-05

Effect of Pre-weld Polishing on Properties of High-Speed Friction Stir Welded 6005A-T6 Aluminum Alloy Profile Joints

ZHANG Xinmeng¹, DENG Gang¹, TIAN Yu¹, WANG Shijun¹, GENG Ming¹, HUANG Lin¹,
LIU Song¹, FANG Mingbao¹, WANG Beibei²

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 question of whether pre-weld mechanical polishing is necessary to remove the surface oxide film on 6005A-T6 aluminum alloy profiles for rail vehicles, the effects of unpolished and polished pre-weld treatments on the microstructure, microhardness, tensile properties and fatigue properties of friction stir welded (FSW) joints were comparatively investigated under high-speed welding conditions with a rotational speed of 2 000 rpm and a travel speed of 2 000 mm/min. The results indicate that the high-speed FSW process can effectively break up the oxide film in the weld. The microstructure, microhardness distribution and tensile strength of the joints under both conditions show no significant differences, with the microhardness exhibiting a "W"-shaped profile and the minimum value located in the heat-affected zone (approximately 68 HV). The fatigue strength at 10⁷ cycles is approximately 105 MPa for the unpolished joints and 110 MPa for the polished joints, showing minimal difference. After NaOH etching, the "S-line" in the nugget zone of the unpolished specimens is more distinct than that of the polished specimens; however, neither tensile nor fatigue fracture propagates along the "S-line" under both conditions, indicating that pre-weld polishing is not a necessary procedure under high-speed FSW conditions.

Keywords: friction stir welding; 6005A-T6 aluminum alloy; pre-weld polishing; microhardness; fatigue property

收稿日期: 2026-04-15 修回日期: 2026-04-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U25B20152)

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

引用格式:张欣盟,邓钢,田宇,等. 焊前打磨对 6005A-T6 铝合金型材搅拌摩擦焊接头性能的影响[J]. 电焊机,2026,56(5):88-92.
Citation:ZHANG Ximmeng, DENG Gang, TIAN Yu, et al. Effect of Pre-weld Polishing on Properties of High-Speed Friction Stir Welded 6005A-T6 Aluminum Alloy Profile Joints[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(5): 88-92.

0 引言

6005A-T6 铝合金型材因强度高、质量轻、易成形,广泛应用于地铁及高铁的车体制造领域。搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW)作为固相连接技术^[1],特别适合铝及铝合金的优质高效焊接^[2-3],其接头性能明显优于传统熔化焊接头^[4-5],近年来在轨道交通领域已得到不同程度的应用^[6-7]。

铝合金化学性质较为活泼,在自然环境下表面极易生成氧化膜。Sato 等^[8]的研究证实,“S”线的形成原因是搅拌针剧烈搅动使母材对接面氧化膜破碎后随焊接材料流动并重新分布,因此“S”线与焊缝内氧化膜的形态分布密切相关。针对轨道车辆铝合金车体部件,焊缝长度大、数量多,焊前机械打磨去除表面氧化膜的工作量巨大,且打磨过程中会产生大量粉尘,严重影响生产效率与厂房作业环境。基于此,本文在前期研究基础上^[9],针对 6005A-T6 铝合金型材,在焊前不打磨与打磨两种工况下,对比研究了 FSW 接头显微组织、常规力学性能及疲劳性能,以期为实际生产提供理论参考。

1 试验材料与方法

本研究用 6005A-T6 铝合金型材,焊接接头为对搭接形式,对接厚度 4 mm,焊接试样长 500 mm、单侧型材宽 150 mm,横截面如图 1 所示。其化学成分如表 1 所示。

焊前用丙酮清洗油污。为对比焊前机械打磨的影响,一种试样仅用丙酮清洗去除表面油污,另

表 1 6005A-T6 铝合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of 6005A-T6 Al alloy (wt. %)

Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti	Al
0.4~0.7	0.5~0.9	0.35	0.3	0.5	0.3	0.2	0.1	Bal.

一种试样在丙酮清洗后再进行机械打磨去除表面氧化膜。

焊接工具轴肩直径为 20 mm,搅拌针长为 4.2 mm,搅拌针根部直径为 9 mm,搅拌头前倾角为 1.5°。焊接方向平行于挤压方向,采用恒压力控制,压力为 20 kN,搅拌头旋转速度为 2 000 r/min,行进速度为 2 000 mm/min。

采用 Olympus Corporation HC-300Z/OL 型光学显微镜和 Zeiss Supra 55 型扫描电镜观察 FSW 接头微观组织和疲劳试样断口形貌。采用电火花切割机垂直于焊缝方向截取横向金相试样,截取取保留搭接界面下部分母材,以观察完整焊接接头特征。经磨制、抛光处理,分别采用 Keller 试剂(2.5 mL HNO₃+1.5 mL HF+95mL H₂O)和 10%NaOH 溶液对金相试样进行腐蚀,然后进行金相观察。

采用 Leco-LM-247AT 型显微硬度计测试 FSW 接头横截面硬度分布,测试载荷为 500 g,保压 15 s,测点沿焊缝中心每隔 1 mm 打点。

在 SANS-CMT 5205 型电子万能力学试验机上进行拉伸测试,拉伸速率为 1 mm/min。拉伸试样尺寸如图 2 所示,为了考察对搭接接头的拉伸特性,拉伸试样保留对搭接接头特征(见图 2b)。

采用 GPS20 高周疲劳试验机进行应力控制高周疲劳性能测试,试验应力比 R=0.1、频率 110 Hz。拉伸及疲劳样品垂直于焊接方向取样。

2 试验结果与讨论

2.1 接头微观组织

焊前机械打磨及非打磨 FSW 接头经 Keller 试剂腐蚀后的横截面宏观形貌如图 3 所示。两种接头差异不大,均呈现典型 FSW 盆状结构^[10],且均未有

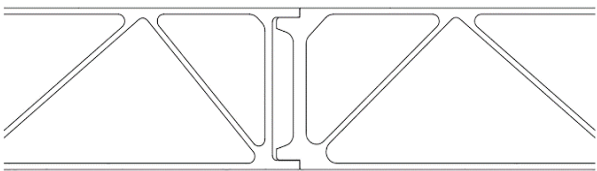


图 1 6005A-T6 铝合金型材 FSW 接头横截面示意图

Fig. 1 Cross section schematic of FSW 6005A-T6 Al alloy profile joint

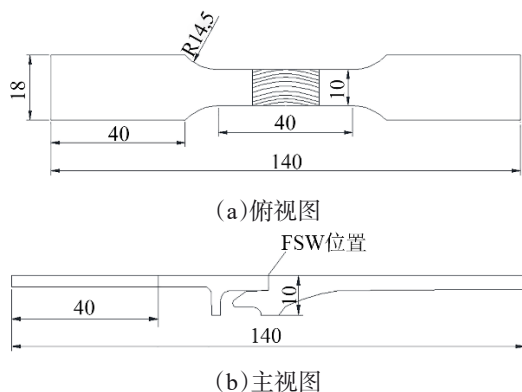


图2 拉伸试样尺寸

Fig. 2 Dimension of tensile specimen

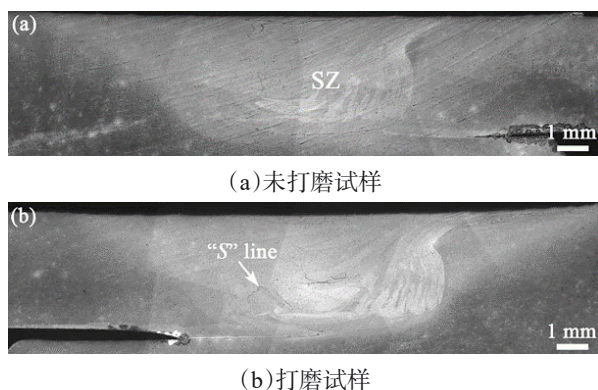


图3 6005A-T6 铝合金FSW接头宏观形貌(Keller试剂腐蚀)

Fig. 3 Macrostructure of Various FSW 6005A-T6 Al profile joints by Keller solution corroded

孔洞等缺陷存在。同时两种样品的焊核区可见“S”线存在,但并不清晰。

采用10%NaOH溶液腐蚀后的宏观形貌如图4所示。由图4可见,经过NaOH溶液腐蚀后,焊核区轮廓相对更为明显,“S”线清晰可见。经对比,未打磨样品的“S”线较为清楚。

2.2 显微硬度

对NaOH溶液腐蚀后的金相样品进行显微硬度测试,硬度曲线如图5所示。

由图5可知,打磨和未打磨FSW接头的硬度分布曲线大体一致,均呈“W”形分布特征,其中母材硬度约为92 HV,最低硬度区位于热影响区,硬度约为68 HV。因6005A-T6为人工时效强化铝合金,FSW过程的热循环作用使得母材金属中的析出相发生粗化与溶解,热影响区硬度降低^[11]。焊核区由于动态再结晶使晶粒细化,硬度较热影响区有所回升^[11],约为78 HV,但仍低于母材。

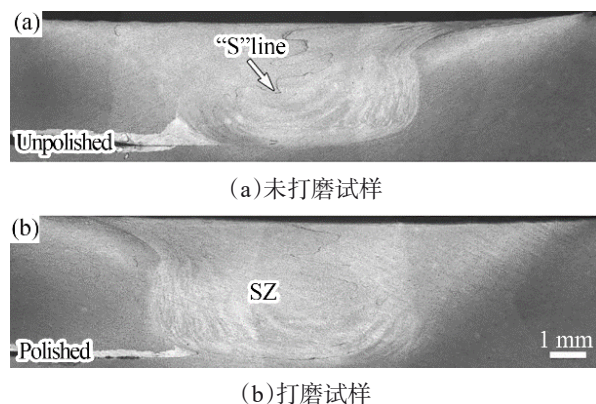


图4 6005A-T6 铝合金FSW接头宏观形貌(NaOH剂腐蚀)

Fig. 4 Macrostructure of Various FSW 6005A-T6 Al profile joints by NaOH solution corroded

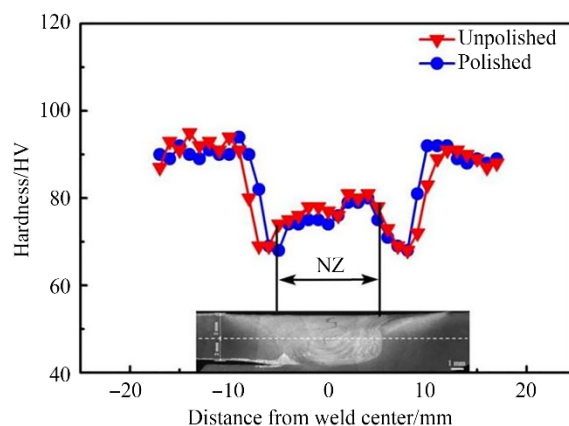


图5 6005A-T6 铝合金型材FSW接头硬度曲线分布图

Fig. 5 Microhardness profiles of the FSW 6005A-T6 Al profile joints

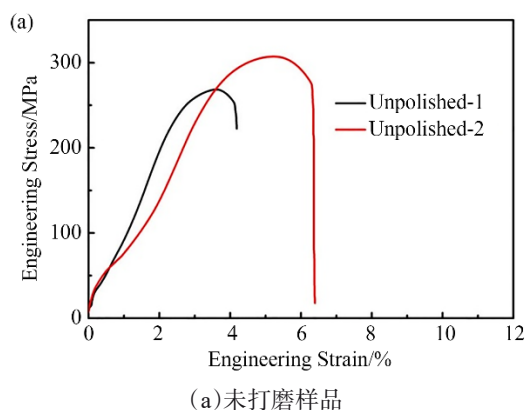
2.3 拉伸性能

焊前未打磨和打磨FSW试样的拉伸曲线如图6所示。未打磨FSW接头1#、2#样品的抗拉强度分别为268 MPa和307 MPa,打磨FSW接头1#、2#样品的抗拉强度分别为273 MPa和292 MPa。两种条件下抗拉强度均有所波动,但总体差异不大。

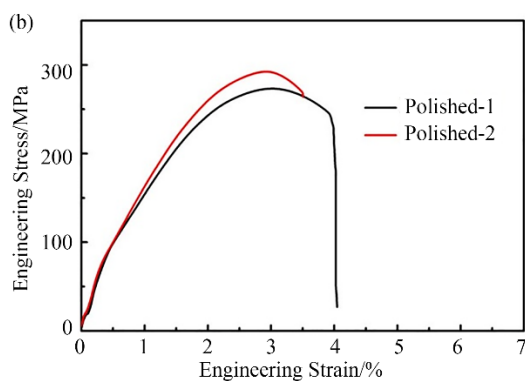
图7为焊前未机械打磨FSW接头拉伸断裂试样形貌。可以看出,拉伸断裂位置位于焊缝后退侧。结合图1所示接头结构特征,前进侧为支撑筋侧,该侧热影响区材料厚度明显大于后退侧,因此拉伸断裂位置位于后退侧热影响区。

2.4 疲劳性能

图8a、8b分别给出了焊前未打磨和打磨FSW接头的疲劳应力-寿命(S-N)曲线。由S-N曲线拟合数据可知,10⁷周次下未打磨接头疲劳强度约105 MPa,打磨接头约110 MPa,两者差异不大。



(a)未打磨样品



(b)打磨样品

图6 6005A-T6铝合金型材FSW拉伸曲线

Fig. 6 Engineering stress-strain curves of FSW 6005A-T6 Al profile joints



(a)俯视图

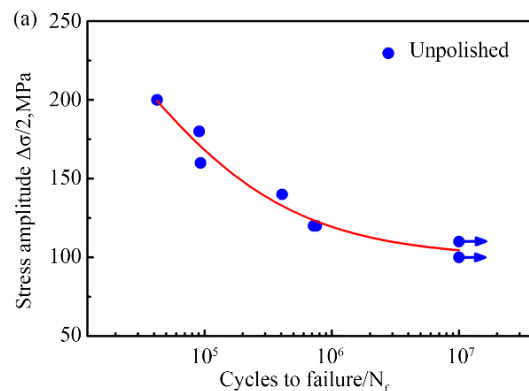


(b)主视图

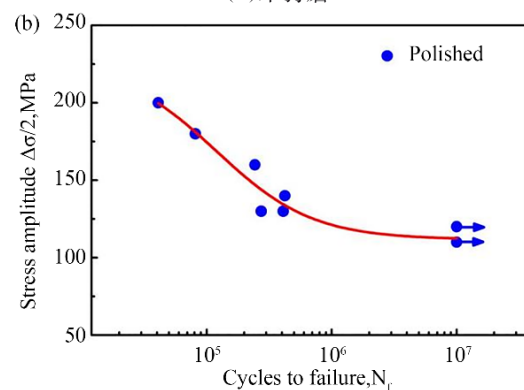
图7 未打磨FSW试样拉伸断裂试样照片

Fig. 7 Photos of the unpolished FSW sample tensile fracture specimen

图9为应力幅为120 MPa时焊前未打磨FSW接头的疲劳断口形貌。从中可见,断口形貌可分为裂纹萌生区、裂纹扩展区、瞬时断裂区三个区域,存在两个裂纹源,如图9a所示。由图9b可见,裂纹萌生区面积较小,基本从表面萌生裂纹,断口表面较为平坦,断口形貌上可观察到明显的解理断裂形貌特征。裂纹扩展区占整个断口的绝大部分区域,在两个扩展区的边界可观察到明显的二次裂纹形貌(图9c)。从图9d可以看出,瞬断区呈现出韧窝状的静态断裂特征。



(a)未打磨



(b)打磨

图8 打磨和未打磨6005A-T6铝合金型材FSW接头S-N曲线

Fig. 8 S-N curves of the FSW joints of 6005A-T6 Al alloy profiles

3 结论

(1)高速FSW过程中搅拌针的剧烈搅动可有效破碎对接面氧化膜,使其在焊核区内重新分布,因此焊前是否机械打磨去除表面氧化膜对接头宏观成形质量无影响。

(2)焊前打磨与否不影响FSW接头的软化,两种条件下热影响区均为接头最薄弱区域,拉伸断裂统一发生在后退侧热影响区而非焊核区,断裂位置由接头结构特征决定,与焊前表面处理方式无关。

(3)未打磨试样中由氧化膜残留诱导的“S”线虽在NaOH腐蚀后更明显,但未成为疲劳裂纹的优先萌生与扩展路径,说明高速FSW条件下氧化膜残留对接头静载与疲劳性能均不构成主要危害。

(4)上述结论基于4 mm壁厚6005A-T6型材在2 000 r/min高速焊接条件下的试验结果,且拉伸试

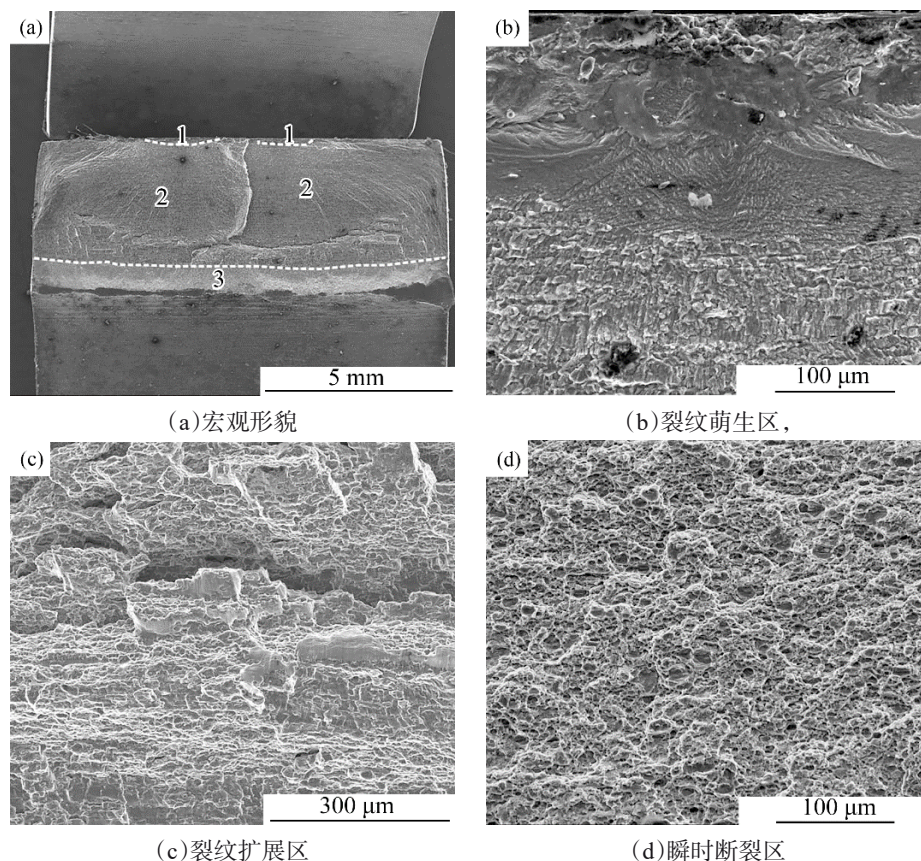


图9 焊前未打磨6005A-T6铝合金型材FSW接头应力幅120 MPa时疲劳断口形貌

Fig. 9 Typical morphologies of the fractured surface of the unpolished FSW joint failed under 120 MPa stress amplitude

样每组仅2个。对于更厚截面、更低焊接速度或不同接头形式下的适用性,需进一步验证。

参考文献:

- [1] Thomas W M, Nicholas E D, Needham J C, et al. Friction stir butt welding: United States, 5460317[P]. 1995-10-24.
- [2] Nandan R, Debroy T, Bhadeshia H K D H. Recent advances in friction-stir welding-process, weldment structure and properties[J]. Progress in Materials Science, 2008, 53(6): 980-1023.
- [3] 刘洋, 许鸿吉, 秦志恒. 不同偏移量对6005A-T6对搭接搅拌摩擦焊接头力学性能及疲劳性能的影响[J]. 电焊机, 2022, 52(8): 95-100.
LIU Y, XU H J, QIN Z H. Influence of different offsets on the mechanical and fatigue properties of friction stir welded lap joints of 6005A-T6 aluminum alloy[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(8): 95-100.
- [4] Ericsson M, Sandström R. Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds, and comparison with MIG and TIG[J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25: 1379-1387.
- [5] 王快社, 张小龙, 王训宏, 等. 搅拌摩擦焊与氩弧焊铝合金接头疲劳性能比较[J]. 材料研究学报, 2009, 23(1): 73-76.
WANG K S, ZHANG X L, WANG X H, et al. Comparison of fatigue properties between friction stir welds and TIG welds for Al alloy[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2009, 23(1): 73-76.
- [6] Thomas W M, Nicholas E D. Friction stir welding for the transportation industries[J]. Materials & Design, 1997, 18(4/6): 269-273.
- [7] 林森, 党键, 韩晓辉, 等. 基于焊接速度的6082铝合金FSW接头组织与力学性能调控研究[J]. 电焊机, 2024, 54(9): 30-37.
LIN S, DANG J, HAN X H, et al. Research on the microstructure and mechanical properties of 6082 aluminum alloy FSW joints based on welding speed[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(9): 30-37.
- [8] Sato Y S, Yamashita F, Sugiura Y, et al. FIB-assisted TEM study of an oxide array in the roof of a friction stir welded aluminium alloy[J]. Scripta Mater, 2004,