

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.09.03

铝合金搅拌摩擦焊搅拌头横向偏移容限及接头性能研究

火巧英, 曹兴华, 戴忠诚

中车南京浦镇车辆有限公司, 江苏 南京 210031

摘要: 以6 mm厚6005A-T6铝合金列车地板型材为研究对象,系统探究搅拌摩擦焊(FSW)过程中搅拌头横向偏移对焊缝成形及接头性能的影响,并确定其偏移容限。通过设计横向偏移(不超过搅拌针直径的1/3,即3 mm)试验,对比分析了搅拌头偏向搭接侧与支撑侧时的接头宏观/微观组织、硬度、拉伸性能、残余应力及疲劳性能。结果表明:偏移方向改变顶锻力分布及接头变形模式,偏向支撑侧有利于减小搭接间隙;接头显微硬度呈“W”形分布,热影响区硬度最低为力学薄弱区;偏移量在容限时,接头抗拉强度达211~222 MPa(超过母材强度80%),断裂位置均位于搭接侧热影响区,断口呈现典型韧性断裂特征;横向残余应力呈中间高、两端低分布,最大值约169~171 MPa;疲劳极限为112 MPa(50%存活率)。综合认为,当横向偏移量控制在搅拌针直径1/3以内时,可保证有效熔深、控制变形并避免隧道或孔洞缺陷,建议在实际焊接中优先使搅拌头偏向型材腹板支撑侧布置。

关键词: 铝合金6005A-T6; 搅拌摩擦焊; 横向偏移; 显微硬度; 力学性能

中图分类号: TG457.14 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2303(2026)09-0023-08

Study on Tool Lateral Offset Tolerance and Joint Performance in Friction Stir Welding of Aluminum Alloys

HUO Qiaoying, CAO Xinghua, DAI Zhongcheng

CRRC Nanjing Puzhen Vehicle Co., Ltd., Nanjing 210031, China

Abstract: This study systematically investigates the effect of tool lateral offset on weld formation and joint performance during friction stir welding (FSW) of 6 mm thick 6005A-T6 aluminum alloy train floor extrusions, and determines the offset tolerance. Through lateral offset tests (within 1/3 of the pin radius, i.e., 3 mm), a comparative analysis was conducted on the macro/microstructure, hardness, tensile properties, residual stress, and fatigue performance of joints when the tool was offset toward the lap side and the support side. The results show that the offset direction significantly affects the distribution of forging force and joint deformation; offset toward the support side helps reduce the lap gap. The microhardness distribution of the joint exhibits a “W” shape, with the heat-affected zone (HAZ) being the mechanically weak region. When the offset is within the tolerance, the joint tensile strength reaches 211-222 MPa (exceeding 80% of the base metal strength), and fracture occurs in the HAZ on the lap side, with the fracture surface showing typical ductile fracture characteristics. The transverse residual stress distribution is high in the middle and low at both ends, with a maximum value of approximately 169-171 MPa. The fatigue limit is 112 MPa (at 50% survival rate). It is concluded that when the lateral offset is controlled within 1/3 of the pin radius, effective penetration depth can be ensured, deformation controlled, and tunnel or void defects avoided. In practical welding, it is recommended to preferentially position the tool toward the support side of the profile web.

Keywords: Aluminum alloy 6005A-T6; friction stir welding (FSW); lateral offset; mechanical properties; fatigue

引用格式: 火巧英, 曹兴华, 戴忠诚. 铝合金搅拌摩擦焊搅拌头横向偏移容限及接头性能研究[J]. 电焊机, 2026, 56(9): 23-30.

Citation: HUO Qiaoying, CAO Xinghua, DAI Zhongcheng. Study on Tool Lateral Offset Tolerance and Joint Performance in Friction Stir Welding of Aluminum Alloys[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(9): 23-30.

收稿日期: 2026-07-01 修回日期: 2026-08-15

作者简介: 火巧英(1981—),女,学士,高级工程师,主要从事轨道车辆组装焊接工艺的研究工作。E-mail:huo1026@163.com。

0 引言

随着高速列车轻量化需求的不断提升,6005A-T6 铝合金因其良好的挤压成形性能、耐腐蚀性及适中的强度,被广泛用于列车地板等大型中空型材结构的制造。搅拌摩擦焊(FSW)作为一种固相连接技术,能够有效避免传统熔化焊产生的气孔、热裂纹等缺陷,已成为铝合金轨道交通部件连接的首选工艺之一。然而在实际生产过程中,由于型材装配误差、夹具刚性不均以及焊接热力变形等因素,搅拌头难以始终精确对中焊缝中心,从而产生一定程度的横向偏移。这种偏移会改变焊接区塑性金属的流动行为及热力分布,进而影响焊缝成形质量、接头力学性能及服役可靠性。

目前,FSW 工艺参数的研究主要集中在焊接速度、旋转速度、下压量等方面,而对于搅拌头横向偏移对焊缝成形及接头性能的系统研究相对较少,尤其缺乏针对列车地板型材这类具有搭接侧与支撑侧非对称结构的偏移容限分析。为此,本文以 6 mm 厚 6005A-T6 铝合金列车地板型材为对象,系统研究搅拌摩擦焊过程中搅拌头横向偏移(不超过搅拌针直径的 1/3)对焊缝成形、微观组织、力学性能及疲劳性能的影响,并确定合理的横向偏移容限,旨在为实际生产中搅拌头对中精度的控制及工艺优化提供实验依据。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

试验材料为 6 mm 厚 6005A-T6 铝合金列车地板型材,母材抗拉强度约为 255 MPa。

1.2 焊接工艺参数

选取了 10 组参数,搅拌头轴肩 16 mm,搅拌针根部直径约为 9 mm,搅拌针针长 6 mm。在保证质量的前提下力求提高效率,具体焊接工艺参数如表 1 所示。

1.3 检测方法

通过试验获得了表面成形良好的焊缝,并对接头进行了宏观/微观金相、拉伸、硬度、应力等检测。

表 1 搅拌摩擦焊焊接工艺参数

Table 1 Welding process parameters for friction stir welding

项目	转速/(r·min ⁻¹)	焊速/(mm·min ⁻¹)	横向偏移量/mm
1 组	1 400	700	3
2 组	1 400	1 000	3
3 组	1 600	800	3
4 组	1 600	1 000	3
5 组	1 800	1 500	3
6 组	1 800	2 000	3
7 组	2 500	2 000	3
8 组	2 500	2 400	3
9 组	2 800	2 400	3
10 组	2 800	2 600	3

上述参数虽各不相同,但焊缝成形均较好,飞边较小,目视检验符合相关标准。

2 搅拌头横向偏移的影响研究

2.1 偏移试验设计

理想状态下,焊接时搅拌针应始终对准焊缝中心。然而,焊前对中依赖人工目视,存在固有误差;焊接过程中焊缝局部可能发生微小弯曲,也会导致搅拌针偏离中心。根据经验,过大的偏移会影响有效熔深,进而损害接头力学性能。

为了验证铝合金型材 FSW 搅拌头横向偏移容限值,焊接试验分偏向搭接侧和偏向支撑侧两种情况,两种试验接头完全相同。根据经验及反复试验,当横向偏移量不超过搅拌针根部直径 1/3 时,能获得良好的焊接接头。故本试验设定横向偏移极限值为 3 mm,目标是在偏移后确保接头焊接深度大于 6 mm,且型材侧面不发生变形,焊缝接头能获得良好的力学性能。焊缝接头横向偏移试验设计示意图如图 1 所示。

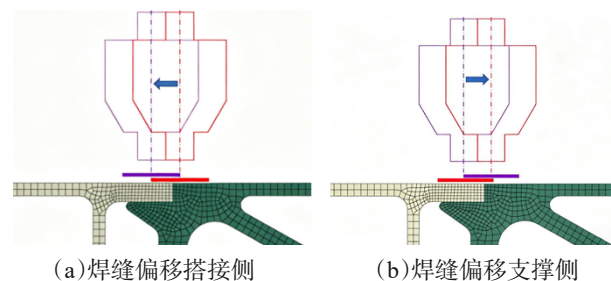


图 1 焊缝接头横向偏移示意

Fig. 1 Schematic diagram of lateral offset of the weld joint

2.2 横向偏移容限结论

试验结果表明,当焊缝发生横向偏移时,相较于支撑侧,搭接侧会发生明显下挠,从而产生明显搭接间隙。而焊缝偏移支撑侧时,由于型材腹板支撑的固定约束,腹板承受几乎所有的顶锻力,焊缝接头间隙变得不明显。焊缝接头偏移方向不同,造成顶锻力作用点不同,使结构产生不同的变形,从而在接头处出现大小不等的间隙。且间隙随着搅拌头位置的右移先增大后减小。因此,在保证有效焊缝尺寸的前提下,应尽可能使搅拌头偏向型材腹板支撑侧布置。对于本研究的铝合金型材FSW,当搅拌针偏移量不超过搅拌针直径的1/3时(试验设定值为3 mm),可确保接头焊接深度并控制接头变形,型材侧壁无变形,焊缝成形良好,无隧道、孔洞等缺陷。

3 接头宏观微观金相检测

采用OLYMPUS-DSX-WZ体式显微镜和OLYMPUS BX 53M金相显微镜观察铝合金型材FSW宏、微观组织。金相样品的制备过程如下:首先采用600~5000目砂纸对金相样品进行逐级水磨,以后一级砂纸的划痕可以完全覆盖掉前一级为准;然后使用金刚石抛光膏在抛光机上对样品表面进行机械抛光至无划痕;再使用氧化镁悬浊液在人造麂皮上对样品进行精抛至样品表面呈镜面状态。用流动水冲洗样品,酒精吹干。腐蚀试剂为Keller试剂($\text{HF}:\text{HCl}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}=2:3:5:190$),腐蚀60 s后水流冲洗,无水乙醇吸水吹干后进行宏观组织观察。

铝合金型材FSW接头的宏观组织结果、各区划分及微观组织观察位置如图2所示,微观组织观察结果如图3所示。焊缝接头的热机影响区宽度约为122 μm ,热影响区晶粒平均尺寸约为71 μm ,搅拌区晶粒平均尺寸约为7.2 μm ;搅拌区底部“S”线长度约为1 693 μm 。

搅拌区在焊接过程中直接受到搅拌针强烈的机械搅拌作用,晶粒在较高温度热循环下,发生动态再结晶,形成细小的等轴晶。热机影响区位于热影响区与搅拌区之间,由于焊接过程中热机影响区的焊接热循环温度低于搅拌区,晶粒的再结晶程度

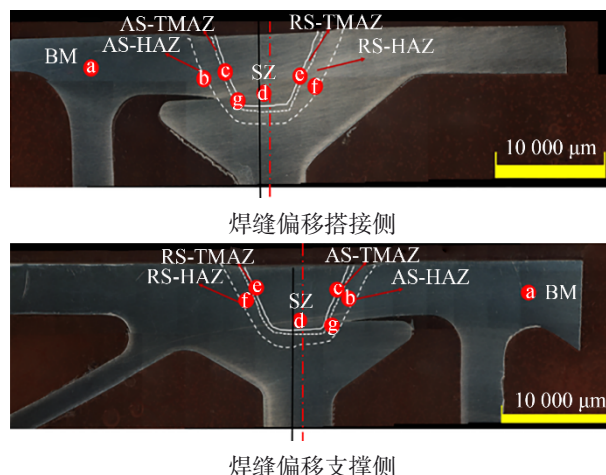


图2 宏观区域划分示意

Fig. 2 Macroscopic zone division of the joint

低于搅拌区,且受到剪切力的作用,热机影响区主要为拉伸变形的晶粒。前进侧与后退侧热机影响区晶粒均与搅拌区有明显分界线:靠近搅拌区一侧为较细小的变形等轴晶,存在明显的晶粒细化区域;靠近热影响区一侧为较粗大的变形等轴晶。晶粒细化区的产生与金属塑性流动有关。焊接过程中,搅拌针侧面切线方向的剪切力与母材金属流动相反,导致前进侧的塑性变形程度较大。后退侧母材金属流动方向与前进侧相反,其变形程度较小,导致后退侧热机影响区与搅拌区之间的分界线更加模糊。热影响区未受到机械力的作用,仅受焊接热循环影响,晶粒发生粗化。母材区主要为等轴状晶粒。

4 焊接接头力学性能

4.1 显微硬度检测

显微硬度测试采用Wilson-Wolpert 401MVD数显显微维氏硬度计,以焊缝中心为界(包含中心点)左右各打20个硬度点,点间距1 mm,加载载荷为100 g,保载时间10 s。

铝合金型材FSW接头的横向显微硬度测试结果如图4所示。横向偏移靠近搭接侧时,搅拌区中心硬度较低,约为67 HV;热机影响区及热影响区的硬度下降至62 HV左右;靠近母材的热影响区硬度逐渐上升至105 HV左右;母材区硬度变化平稳;搅拌区左右两侧的硬度变化趋势基本一致,横向硬度

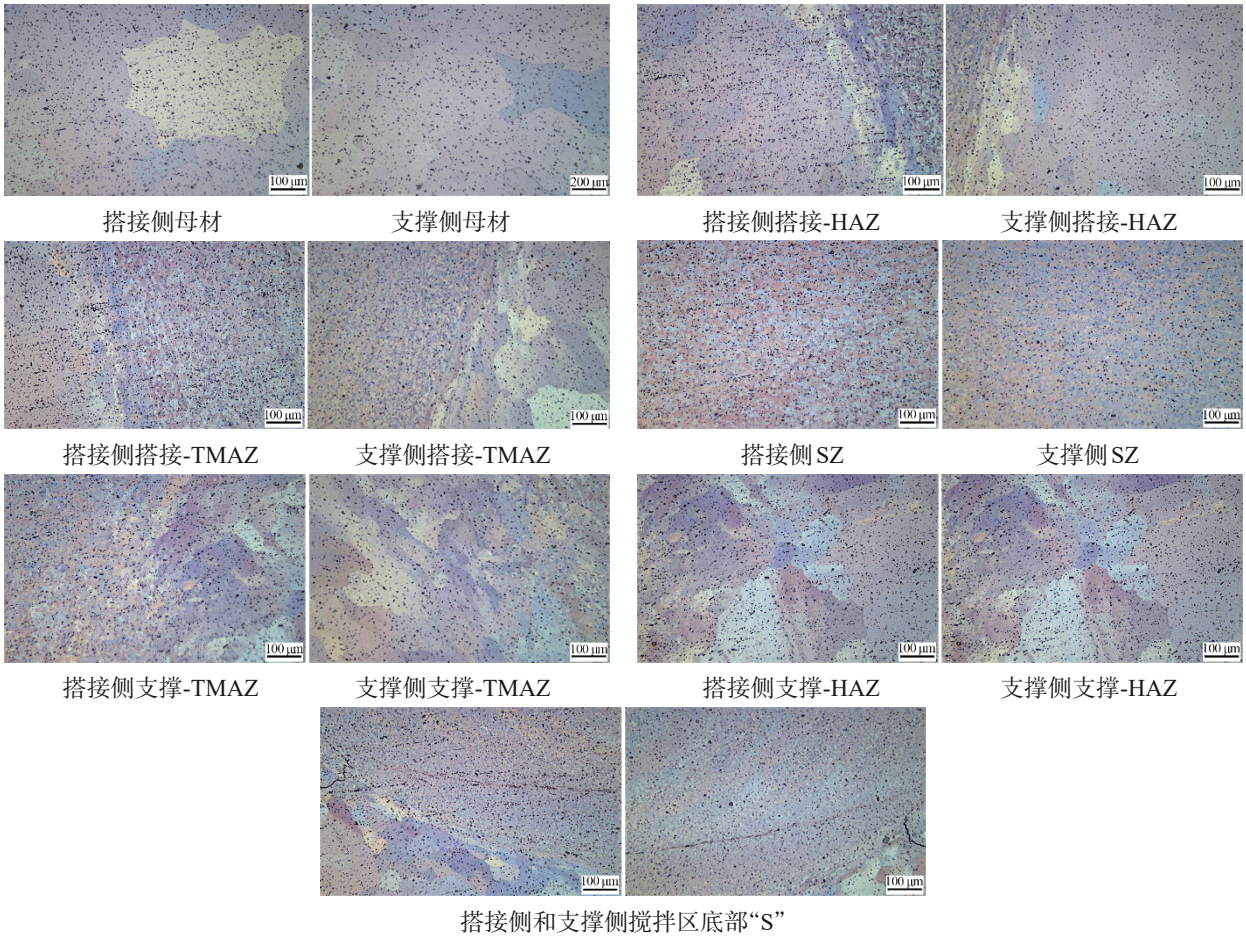


图3 焊缝微观组织示意

Fig. 3 Microstructure of the weld joint (showing different zones)

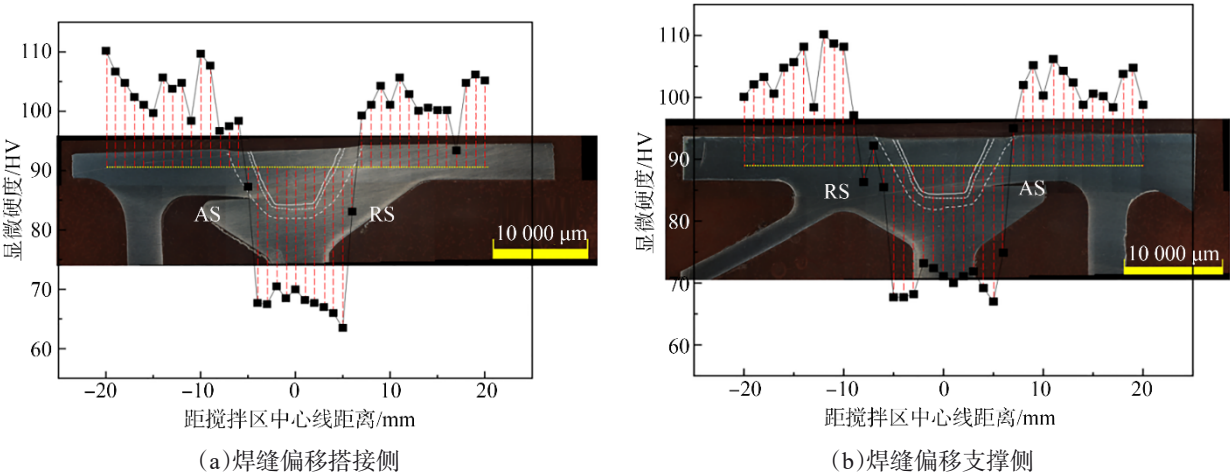


图4 接头硬度测试结果

Fig. 4 Microhardness test results of the joint

分布曲线呈“W”型。横向偏移靠近支撑侧时,搅拌区中心硬度较低,约为72 HV,热机影响区及热影响区的硬度下降至66 HV左右,其余分布趋势与搭接

侧类似。
试验母材为6005A-T6状态,该状态下 α -Al基体中析出了大量 β' 相,由焊接接头的硬度分布可知:

(1)接头的横向显微硬度呈“W”形分布,母材硬度最高,热影响区达到极小值,到热机影响区略有回升,直至搅拌区中心达到极大值。搅拌区硬度低于母材是因为该区域受搅拌针搅拌作用发生动态再结晶,晶粒细小但强化相溶解;热机影响区虽受到搅拌针搅拌作用与焊接热循环,但搅拌作用比不上搅拌区的,发生回复作用,强化相聚集、粗化,使热机影响区的显微硬度较搅拌区中心有所降低;热影响区因热循环作用,使 β' 相粗化,为过时效区,硬度较低。

(2)热影响区的低硬度区可能成为力学性能的薄弱区。

(3)不论偏移搭接侧还是支撑侧,横向偏移量在搅拌针根部直径的1/3时,对焊接接头的硬度影响不大。

4.2 拉伸性能测试

参照 GB/T 2651—2008《焊接接头拉伸试验方

法》的规定,采用 CMT5105 拉伸试验机对焊接接头进行拉伸力学性能试验,实验在室温下(约 25 °C)进行。选用 50 mm 引伸计测量样品工作段位移,拉伸速率为 1 mm/min。拉伸试验结果需提供应力应变曲线,拍摄断后位置照片并结合性能及断裂位置进行简要分析。

力学性能测试结果表明,在搅拌头转速为 1 800 r/min、焊接速度为 2 000 mm/min 的工艺参数下,焊缝接头的拉伸试样断裂位置均在搭接侧热影响区。

4.2.1 偏移搭接侧拉伸性能测试结果

横向偏移靠近搭接侧时,接头的拉伸试样断裂位置均在搭接侧热影响区,断后拉伸断口 SEM 照片如图 5 所示,接头的拉伸性能如表 2 所示,平均抗拉强度、屈服强度及延伸率分别为 211 MPa、191 MPa 和 3.5%。断口表面有较多的韧窝分布,是典型的韧性断裂特征。

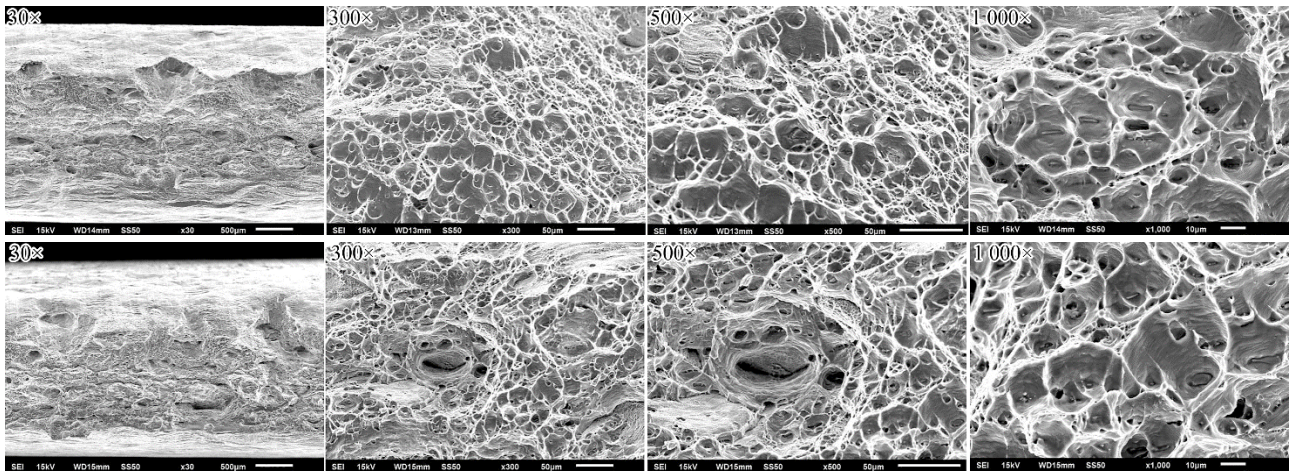


图 5 偏移搭接侧拉伸断口 SEM 测试结果

Fig. 5 SEM images of tensile fracture surface of the joint with offset toward lap side

表 2 FSW 偏移搭接侧接头的拉伸性能

Table 2 Tensile properties of FSW joints with tool offset toward the lap side

试样编号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%
搭接-L1	195	215	3.4
搭接-L2	180	200	3.7
搭接-L3	195	215	3.4
搭接-L4	195	215	3.5
平均值	191	211	3.5

4.2.2 偏移支撑侧拉伸性能测试结果

试验横向偏移靠近支撑侧时,接头的拉伸试样

断裂位置均在搭接侧热影响区,断后拉伸断口 SEM 照片如图 6 所示,接头的拉伸性能如表 2 所示。焊缝接头的平均抗拉强度、屈服强度及延伸率分别为 222 MPa、191 MP、3.4%,通过对拉伸断口的 SEM 观察可以发现,断口表面有较多的韧窝分布,是典型的韧性断裂特征。

通过对拉伸断口的 SEM 观察可以发现,断口表面均有较多的韧窝分布,是典型的韧性断裂特征。铝合金型材 FSW 焊缝接头的平均抗拉强度为 211~222 MPa,与母材标准抗拉强度 255 MPa 相比,焊接

表3 FSW 偏移支撑侧接头的拉伸性能

Table 3 Tensile properties of FSW joints with tool offset toward the support side

试样编号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%
支撑-L1	193	224	3.1
支撑-L2	192	221	3.5
支撑-L3	190	222	3.5
支撑-L4	190	221	3.5
平均值	191	222	3.4

接头的性能超过母材强度的80%以上,符合搅拌摩擦焊接头强度要求,与常规搅拌摩擦焊接相比强度达到同一水平。存在于搭接侧热影响区的低硬度区是力学性能的薄弱区,接头的拉伸试样断裂位置均在搭接侧热影响区。

当焊接速度一定时,随旋转速度的增加,接头的屈服强度先升高后降低,抗拉强度和延伸率降低。当旋转速度一定时,随焊接速度的增加,接头

的屈服强度升高,抗拉强度先升高后降低,延伸率变化不大。同时,焊缝的横向偏移量不超过搅拌针直径的1/3时,对焊接接头的性能影响不大。

4.3 残余应力检测

采用济南西格马科技有限公司搭接MB2-16静态应变采集箱及BSF120-1.5CA-T型应变片(灵敏系数 $2.08\% \pm 0.5\%$)进行残余应力检测,如图7所示。在室温下(约25℃)以采用人工钻孔方式测量。沿垂直焊缝方向由焊缝中心向两侧每隔5 mm钻孔,检测焊缝两侧20 mm范围内的残余应力(包含中心点)。钻孔直径为1.5 mm,钻孔深度为2 mm。

铝合金型材FSW接头的横向残余应力测试结果如图8所示,由图可知,横向残余应力整体呈中间高、两端低的趋势,其中接头搭接侧残余应力的最大值为169 MPa,支撑侧的最大值为171 MPa,最大残余应力均出现在焊缝中心。由以上焊接接头的

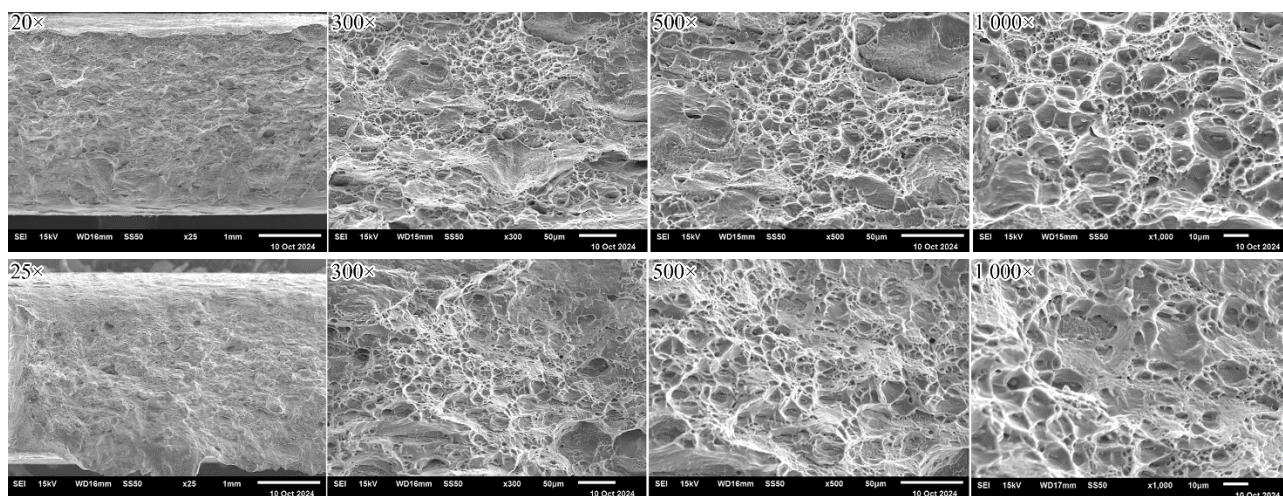


图6 偏移支撑侧拉伸断口SEM测试结果

Fig. 6 SEM images of tensile fracture surface of the joint with offset toward support side

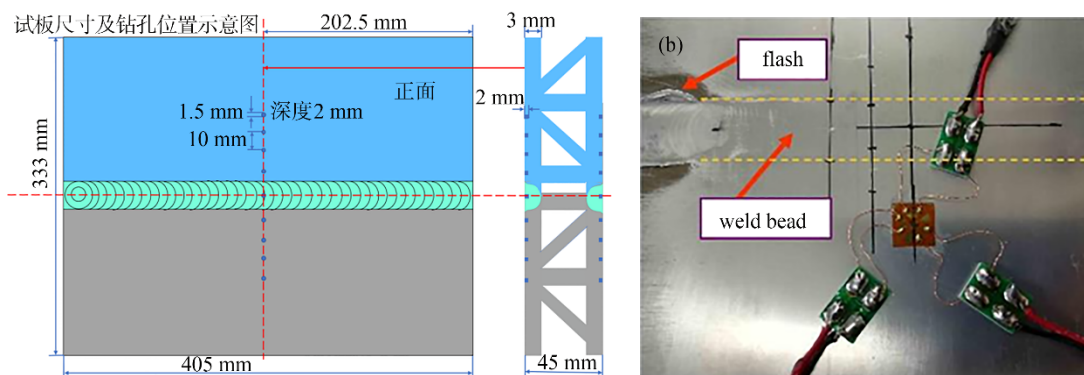


图7 残余应力检测示意

Fig. 7 Schematic diagram of residual stress measurement

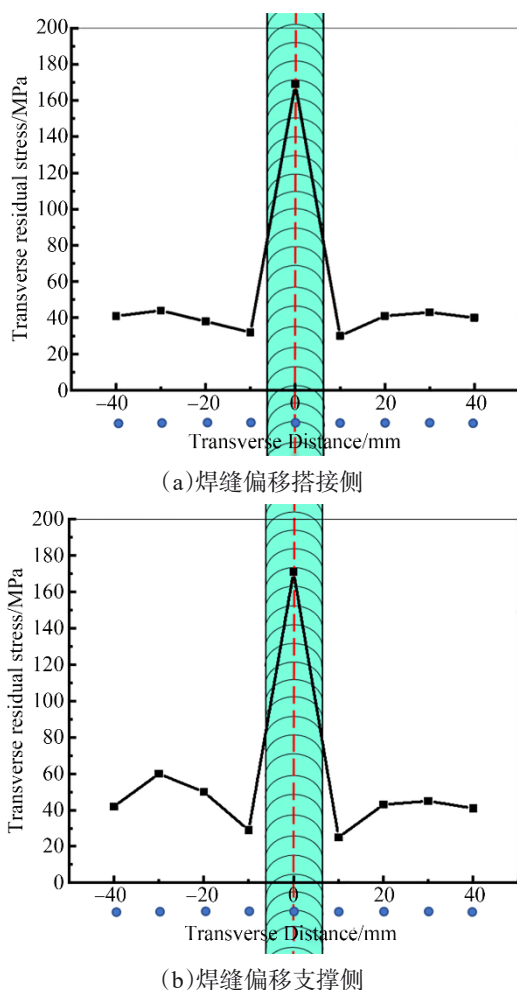


图8 横向残余应力测试

Fig. 8 Transverse residual stress distribution

横向残余应力分布结果可见,对于FSW型材对接接头,其横向残余应力整体上呈中间高两头低的趋势,其中残余应力的最大值出现在焊缝中心,残余应力最大值变化范围在169~171 MPa。

当旋转速度一定时,随焊接速度增加,接头残余应力降低。相同焊接厚度下FSW接头的最大残余应力为150~190 MPa,本文结果处于该范围内,因此控制焊缝的横向偏移量不超过搅拌针根部直径的1/3时,对焊接接头的残余应力影响不大。

4.4 疲劳性能

参照ASTM E466-15《金属材料力控制轴向等幅疲劳试验实施规程》,采用QBG-100微机控制高频疲劳试验机进行疲劳试验(室温约25℃)。疲劳试验加载载荷种类为轴向力拉伸(正弦波),应力比 $R(\sigma_{\min}/\sigma_{\max})=0.1$,试验频率为100~120 Hz,选取120

MPa、130 MPa、140 MPa、150 MPa四个应力级别,每个应力级别选取6个平行试样。定义循环次数未达到 1×10^7 次即发生断裂视为失效,最后对疲劳测试数据进行处理,绘制的额S-N曲线如图9所示。

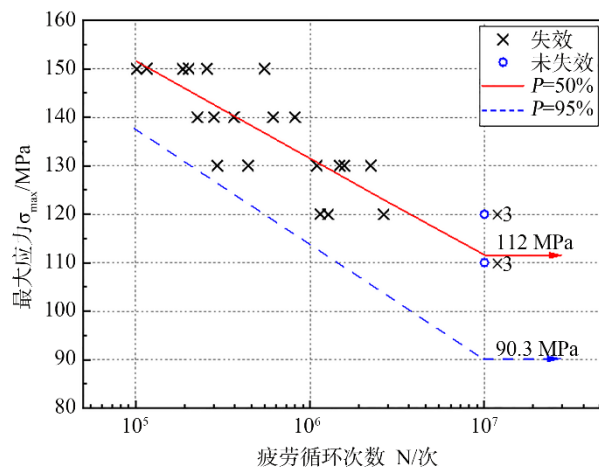


图9 疲劳试验S-N曲线

Fig. 9 S-N curve of the fatigue test

根据测试数据结果按照最小二乘法拟合出置信度 $(1-\alpha)=95\%$ 、失效概率为50%时的S-N曲线如图红线所示,疲劳强度极限为112 MPa;置信度 $(1-\alpha)=95\%$ 、失效概率5%时疲劳强度下极限为90.3 MPa,如图9的虚线所示。

5 结论

通过对搅拌摩擦焊搅拌头横向偏移非理想状态的容限研究,结合数值模拟仿真与实验验证,得出以下结论:

(1)搅拌头横向偏移方向影响接头成形及搭接间隙。偏向支撑侧时,腹板支撑约束使顶锻力集中于焊缝区域,搭接间隙明显减小,优于偏向搭接侧。偏移量控制在搅拌针直径1/3以内(容限)时,焊缝成形良好,无隧道、孔洞等缺陷,建议实际焊接中优先将搅拌头偏向型材腹板支撑侧布置。

(2)接头横向显微硬度呈“W”形分布,母材区最高,热影响区最低,热机影响区及搅拌区中心略回升。热影响区因强化相粗化为力学薄弱区,偏移量在容限内对硬度影响不大。

(3)接头拉伸断裂均位于搭接侧热影响区,断口呈韧性断裂特征。抗拉强度达到母材标准值的

80%以上,满足搅拌摩擦焊接头性能要求。两种偏移方向的屈服强度和延伸率差异较小。

(4)横向残余应力沿焊缝方向呈中间高、两端低分布,最大值位于焊缝中心。接头疲劳极限为112 MPa(50%存活率)和90.3 MPa(5%存活率),接头疲劳性能良好。

参考文献:

- [1] 李志强,董彩霞,飞尚才. 搅拌针偏置对5052-6061异种铝合金FSW接头组织性能的影响[J]. 焊接技术, 2025, 54(12): 54-58.
LI Z Q, DOONG C X, FEI S C. Technology & New Technique · Effect of stirring needle offset on the microstructure and properties of FSW joints of 5052-6061 dissimilar aluminum alloy[J]. Welding Technology, 2025, 54(12): 54-58.
- [2] 邓守鑫,袁媛,唐鸿洋,等. 搅拌针偏移对6005A-T6铝合金焊接接头性能的影响[J]. 汽车工艺与材料, 2025(9): 36-42.
DENG S X, YUAN Y, TANG H Y, et al. Effect of Tool-Pin Offset on Properties of 6005A-T6 Aluminum Alloy Joint[J]. Automobile Technology & Material, 2025(9): 36-42.
- [3] 王耀. 5083铝合金搅拌摩擦焊接头组织及力学性能研究[J]. 山西冶金, 2021, 44(4): 12-15.
WANG Y. Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Joint of 5083 Aluminum Alloy[J]. Shanxi Metallurgy, 2021, 44(4): 12-15.
- [4] 田春雨,王东辉,金鑫,等. 搅拌针长度及偏置距离对6005A-T6铝合金对搭接结构冷搭接缺陷的影响研究[J]. 有色金属加工, 2025, 54(3): 32-35.
TIAN C Y, WANG D H, JIN X, et al. Study on Influence of Stirring Needle Length and Offset Distance on Cold Overlap Defects of 6005A-T6 Aluminum Alloy in Overlapping Structures[J]. Nonferrous Metals Processing, 2025, 54(3): 32-35.
- [5] 曹鹏,管卫. 铝合金搅拌摩擦焊力参量对缺陷的响应规律研究[J]. 金属加工(热加工), 2025(3): 76-82.
CAO P, GUAN W. Research on the response of force characteristics to defect in aluminum alloy friction stir welding[J]. MW Metal Forming, 2025(3): 76-82.
- [6] 赵尉辰,岳玉梅,赵华夏. 辅助热源搅拌摩擦焊技术研究现状[J]. 航空制造技术, 2026, 69(3): 117-135.
ZHAO W C, YUE Y M, ZHAO H X. Research Status of Friction Stir Welding Technology With Auxiliary Heat Source[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(3): 117-135.
- [7] 周海鹏,邢松龄,韩赞东,等. 6005A-T6铝合金搅拌摩擦焊接头的疲劳性能分析[J]. 热加工工艺, 2025, 54(3): 35-40.
ZHOU H P, XING S L, HAN Z D, et al. Fatigue Performance Analysis for Friction Stir Welding Joints of 6005A-T6 Aluminum Alloy[J]. Hot Working Technology, 2025, 54(3): 35-40.
- [8] 卢云飞,聂浩锋,黎训学,等. 搅拌摩擦焊主轴头结构设计及焊接试验[J]. 机电工程技术, 2025, 54(1): 173-178.
LU Y F, NIE H F, LI X X, et al. Structural Design and Welding Test of Friction Stir Welding Spindle Head[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2025, 54(1): 173-178.
- [9] 王鹏,吴璇,张喆,等. 搅拌摩擦焊在镁合金焊接中的应用与进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2025, 48(1): 155-164.
WANG P, WU X, ZHANG Z, et al. Application and progress of friction stir welding in magnesium alloy welding[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2025, 48(1): 155-164.
- [10] 王磊,赵新华,丛家慧,等. 焊接工艺参数对7B04-T6铝合金搅拌摩擦点焊接头疲劳性能的影响[J]. 机械工程材料, 2020, 44(7): 28-32.
WANG L, ZHAO X H, CONG J H, et al. Effect of Welding Process Parameters on Fatigue Property of 7B04-T6 Aluminum Alloy Friction Stir Spot Welded Joint[J]. Materials For Mechanical Engineering, 2020, 44(7): 28-32.
- [11] 张航,宫文彪,赵立哲,等. 6082-T6铝合金搅拌摩擦焊“S”线的形成及其对接头组织性能的影响[J]. 热加工工艺, 2020, 49(23): 23-26.
ZHANG H, GONG W B, ZHAO L Z, et al. Formation of "S" Line and Its Influences on Microstructure and Properties of Friction Stir Welded 6082-T6 Aluminum Alloy[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(23): 23-26.
- [12] 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 Weld Lap Joints[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(8): 95-100.