

# 装配间隙对铝合金搅拌摩擦焊接头力学性能的影响

刘杰<sup>1</sup>, 屈志军<sup>2</sup>, 遇境润<sup>1</sup>

(1. 长春工程学院, 长春 130012; 2. 中车长春轨道客车股份有限公司, 长春 130062)

**摘要:** 采用不同装配间隙(搭接间隙、对接间隙和错边量), 对异质铝合金 5083-O/6082-T6 的 T 形接头实施了搅拌摩擦焊, 对焊后接头力学性能进行了对比分析。结果表明, 当搭接间隙、对接间隙和错边量在一定范围内增加时, T 形接头的拉伸性能和剪切性能波动不大, 弯曲性能逐渐下降; 当搭接间隙控制在 0.6 mm、对接间隙 1.2 mm 和错边量 0.6 mm 时, T 形接头成形良好, 未发现隧道孔、孔洞等缺陷, 壁板和筋板之间均得到有效的连接, 可作为 T 形接头在实际工程上实施搅拌摩擦焊的关键控制点。

**关键词:** 装配间隙; 铝合金; 搅拌摩擦焊; 力学性能

中图分类号: TG456.9 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hj.20230222001

## Effect of assembly gaps on mechanical properties of aluminum alloy friction stir welding joints

Liu Jie<sup>1</sup>, Qu Zhijun<sup>2</sup>, Yu Jingrun<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China;

2. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun 130062, China)

**Abstract:** The T-type joint of heterogeneous aluminum alloy 5083-O/6082-T6 was subjected to friction stir welding by using different assembly gaps including lap gap, butt gap and misalignment, and the mechanical properties of the welding joint were compared and analyzed. The test results show that when the lap gap, butt gap and misalignment increase within the certain range, the tensile and shear properties of the T-joint do not fluctuate significantly, and the bending performance decreases. The lap gap is controlled at 0.6 mm, the butt gap is 1.2 mm, and the misalignment is 0.6 mm, the T-joint is in good shape, no tunnel, hole and other defects are found, and the wall plate and rib plates are effectively connected, which can be used as the key control point for the T-joint to implement friction stir welding in engineering application.

**Key words:** assembly gaps, aluminum alloy, friction stir welding, mechanical properties

### 0 前言

搅拌摩擦焊(friction stir welding, 简称 FSW)作为一种新型的固相焊接方法, 具有焊缝成形美观、综合力学性能良好、焊接变形小、绿色环保和无需添加焊材等优点, 在轨道客车铝合金车体制造技术中已呈现出主流的趋势, 得到了广泛的关注和推广应用<sup>[1-5]</sup>。目前, 搅拌摩擦焊工艺多应用车体地板、车顶及侧墙部件的长直焊缝的对接、对搭混合接头的焊接, 在司

机室结构件上 FSW 应用的较少<sup>[6-10]</sup>。

T 形接头设计是实现轻量化的关键结构之一, 但传统熔化焊在 T 形构件角焊缝焊接方面并无明显优势, 作为一种固相焊接技术, 搅拌摩擦焊采用特殊的焊接夹具, 对中、薄板 T 形构件实行单面焊成形技术, 显著降低焊接热输入, 减少焊接变形, 因此 T 形接头结构实施搅拌摩擦焊工艺是具有一定的实际意义和发展前景<sup>[10-13]</sup>。由于 T 形接头固有的接头形式及产品的尺寸公差, 生产过程中的装配间隙不可避免, 采

收稿日期: 2023-02-22

基金项目: 吉林省教育厅科学技术研究项目(JJKH20210693KJ); 博士科研启动基金项目(04010192020019)。

用不同的装配间隙(搭接间隙、对接间隙和错边量),对异质铝合金 5083-O/6082-T6 的 T 形接头实施了搅拌摩擦焊,研究装配间隙对铝合金 T 形接头力学性能的影响规律,为加快搅拌摩擦焊技术在铝合金车体司机室部件的应用提供一定的理论支撑。

### 1 试验方法

试验所用材料为 5000 系与 6000 系铝合金,其中蒙皮材料为厚度 4 mm 5083-O,筋板材料为厚度 8 和 10 mm 6082-T6,与实际生产所用材料一致,为研究装配间隙对 T 形接头组织和性能的影响,搭接间隙、对接间隙及错边量的组对形式,如图 1 所示。

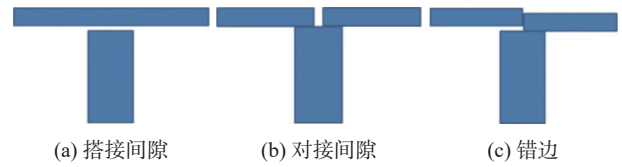


图 1 T 形接头装配示意图

焊接试验在搅拌摩擦焊专用设备上进行,采用设计专用搅拌头,搅拌头的参数为轴肩 20 mm、针长 6 mm 及顶端直径 7 mm,焊接前倾角 2.5°<sup>[14]</sup>,焊接工艺参数为转速 1 200 r/min,焊接速度 500 mm/min,下压力 0.2 mm,试验选择 13 组装配间隙进行焊接,具体装配间隙条件见表 1。

表 1 试验采用的装配间隙条件

搭接间隙 $H_1$ /mm				对接间隙 $H_2$ /mm					错边量 $D$ /mm			
8d-1	8d-2	8d-3	8d-4	10e-1	10e-2	10e-3	10e-4	10e-5	10f-1	10f-2	10f-3	10f-4
0.2	0.4	0.6	0.8	0.05	0.3	0.6	0.9	1.2	0.3	0.6	0.9	1.2

力学试验示意图如图 2 所示,焊接试验完成后,机械加工制取金相、拉伸、弯曲试样<sup>[15]</sup>,拉伸试验在室温条件下进行,采用 CMT4304 型电子万能试验机分别进行 T 方向剪切和 L 方向拉伸试验,加载速率 10 mm/min,试验示意图如图 2a、2b 所示;弯曲试验

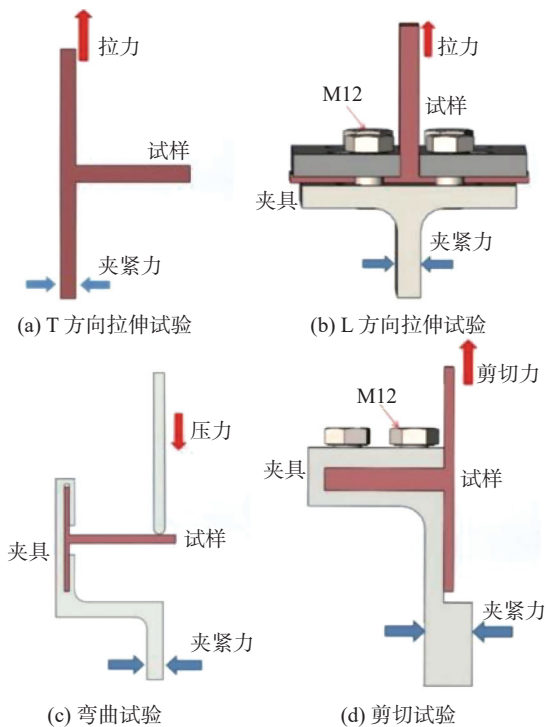


图 2 力学性能试验示意图

示意图如图 2c 所示,试验对 T 形接头分别进行 AS/RS 侧(前进侧/后退侧)的弯曲试验,在试验过程中固定筋板,同时保证压头与筋板保持滑动关系,通过力-弯曲角度曲线测算断裂时的弯曲角度,并依据弯曲断裂角度评价接头的弯曲性能;剪切试验示意图如图 2d 所示,在试验过程中固定筋板,同时保证筋板受到向上的剪切力,试验结果得到剪切力,并以此为依据评价 T 形接头的剪切性能。

### 2 试验结果与分析

#### 2.1 搭接间隙对铝合金 T 形接头力学性能的影响

图 3 是不同搭接间隙 T 形接头的宏观形貌,筋板与壁板得到有效连接,前进侧搅拌作用明显,呈镰刀状,后退侧搅拌作用不明显,搭接界面向壁板方向发生偏移;搭接间隙在 0.2~0.6 mm 的条件下,T 形接头成形良好,未发现隧道孔、孔洞等缺陷,壁板筋板之间均得到有效的连接;当搭接间隙大于 0.6 mm 时,T 形接头出现表面开裂现象,成形不良。

图 4 为不同搭接间隙铝合金 T 形接头在 T 和 L 方向上的接头抗拉强度,当搭接间隙小于 0.6 mm 时,T 方向及 L 方向的抗拉强度上下波动较小,压入量随着间隙的增加而增加;当搭接间隙达到 0.8 mm 时,T 形接头在 T 方向和 L 方向的抗拉强度降低显著,分别降至为 165 和 95 MPa,结合表面宏观形貌综合来看,



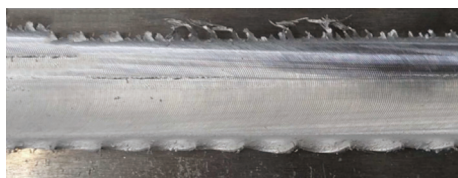
(a) 搭接间隙 0.2 mm



(b) 搭接间隙 0.4 mm



(c) 搭接间隙 0.6 mm



(d) 搭接间隙 0.8 mm

图3 T形接头宏观形貌

T方向拉伸由于存在表面缺陷导致强度下降,而L方向基本未焊合。

对焊接接头进行弯曲试验,试样弯曲宏观形貌如图5所示,AS侧弯和RS侧弯试验结果如图6所示,由图可以看出,随着搭接间隙的增加,T形接头AS/RS两侧的弯曲性能不断下降,直至搭接间隙超过0.6 mm,试样焊缝表面出现开裂,试样AS侧发生明显的屈服现象,屈服角度 $3.1^{\circ} \sim 4.2^{\circ}$ ,断裂角度 $11.8^{\circ} \sim 19.8^{\circ}$ ;RS侧屈服角度 $0 \sim 2.8^{\circ}$ ,断裂角度 $1.8^{\circ} \sim 5.6^{\circ}$ 。前进侧抗弯能力明显好于后退侧,这是因为焊接过程中,

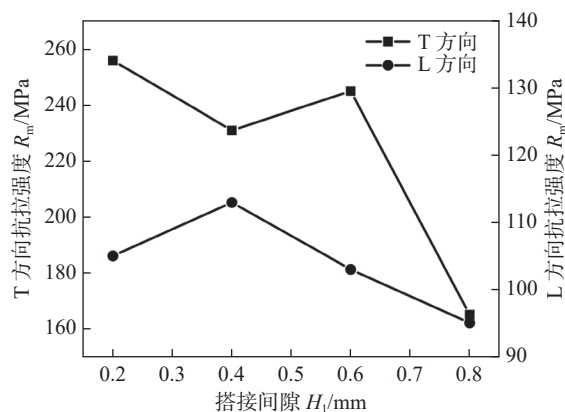
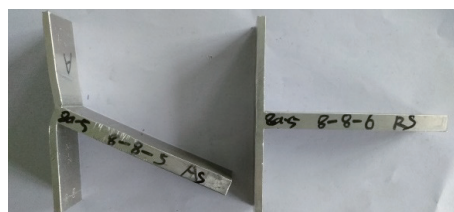
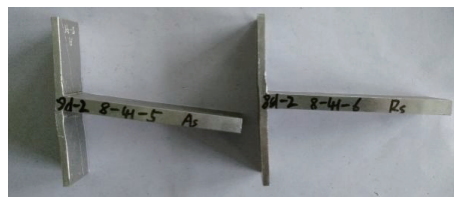


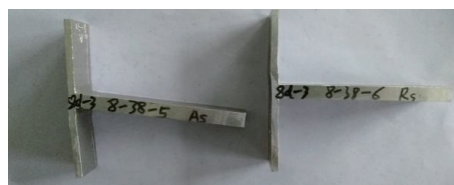
图4 搭接间隙对T形接头抗拉强度的影响



(a) 搭接间隙 0.2 mm



(b) 搭接间隙 0.4 mm



(c) 搭接间隙 0.6 mm

图5 T形接头弯曲试验宏观形貌

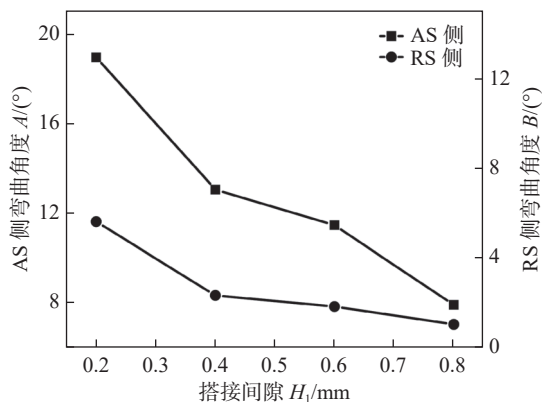


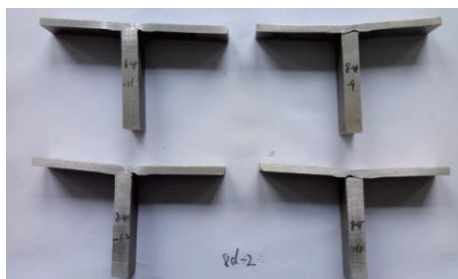
图6 不同搭接间隙试样弯曲试验测试

后退侧搭接界面向壁板方向发生偏移,导致未焊合缺陷的存在,使后退侧的抗弯能力大幅度下降。

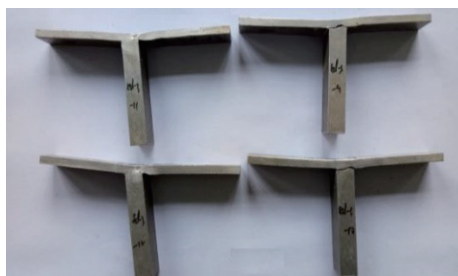
对焊接接头进行剪切试验,剪切试样宏观形貌如图7所示,搭接间隙对铝合金T形接头剪切力的影响如图8所示。RS侧的剪切力明显高于AS侧,随着搭接间隙的增加,T形接头AS/RS两侧的剪切力的差



(a) 搭接间隙 0.2 mm



(b) 搭接间隙 0.4 mm



(c) 搭接间隙 0.6 mm

图7 T形接头剪切试验宏观形貌

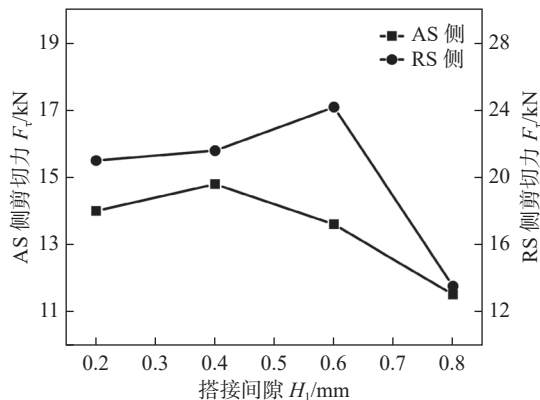


图8 不同搭接间隙试样剪切试验测试

别不大,接头按宽度 25 mm 折算,T形接头剪切力可达 20 kN,剪切性能良好;搭接间隙超过 0.6 mm 时,焊缝表面出现开裂,表明搭接间隙对T形接头剪切性能的影响不明显。

## 2.2 对接间隙对铝合金T形接头力学性能的影响

当对接间隙为 0.05 ~ 1.2 mm 时,接头均得到有效的连接,成形良好,无明显焊接缺陷。图9为不同对接间隙铝合金T形接头在T方向和L方向拉伸试验结果,由图可知,铝合金T形接头在T方向及L方向的抗拉强度上下波动不大,当对接间隙达到 1.2 mm 时,T形接头在T方向和L方向的抗拉强度分别为 205 和 82 MPa,虽然对接间隙对T形接头的拉伸性能影响不大,但是当对接间隙达到 1.2 mm 时,影响焊缝的外观,飞边也较大,存在轻微的隧道孔缺陷,观察焊缝宏观形貌,下凹量(未填满)随着对接间隙的增加而增加,已超出 ISO25239 的标准值。

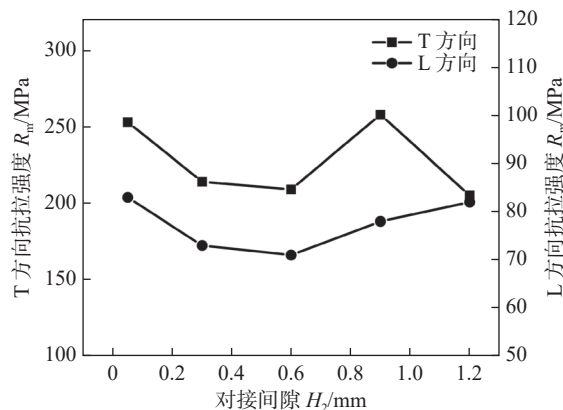


图9 对接间隙对T形接头抗拉强度的影响

对不同对接间隙的焊接接头进行弯曲试验,AS侧弯和RS侧弯试验结果如图10所示。随着对接间隙的增加,T形接头AS/RS两侧的弯曲性能均逐渐

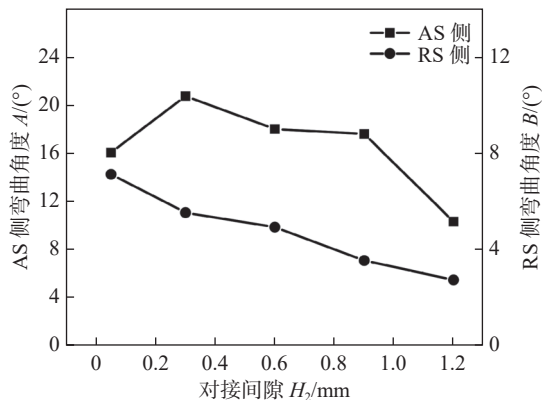


图10 不同对接间隙T形接头弯曲试验测试

下降,当对接间隙达到 1.2 mm 时,抗弯性能极差,此外,试验过程中试样 AS 侧发生明显的屈服现象,屈服角度为  $1^{\circ} \sim 3^{\circ}$ ,断裂角度为  $10^{\circ} \sim 22^{\circ}$ ;RS 侧也发生明显的屈服现象,屈服角度为  $1^{\circ} \sim 2^{\circ}$ ,断裂角度为  $2^{\circ} \sim 7^{\circ}$ 。

对焊接接头进行剪切试验,AS 剪切和 RS 剪切试验结果如图 11 所示。RS 侧的剪切力普遍高于 AS 侧,随着对接间隙的增加,T 形接头 AS/RS 两侧剪切力的差别不大,直至对接间隙超过 1.2 mm,这表明对接间隙对剪切性能的影响不大。

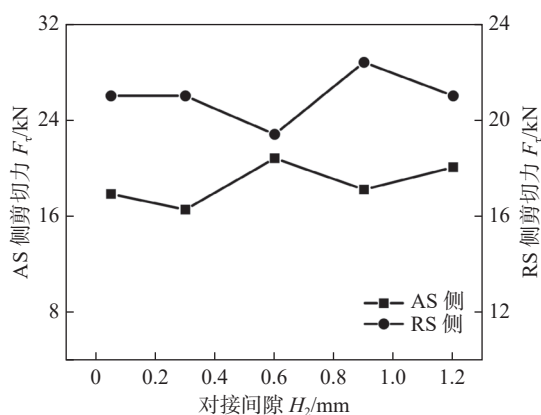


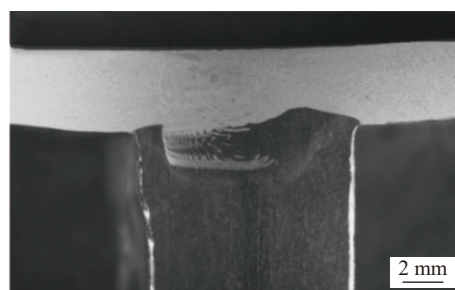
图 11 不同对接间隙 T 形接头剪切试验测试

### 2.3 错边量对 T 形接头力学性能的影响

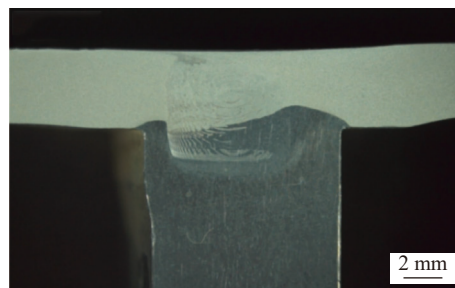
图 12 为不同错边量铝合金 T 形接头的宏观形貌,图 13 为 T 方向和 L 方向接头拉伸试验结果,当错边量小于 0.6 mm 时,T 方向及 L 方向的强度上下波动不大,错边量为 0.9 mm 时,T 方向及 L 方向的强度出现较大幅度的下降,T 方向抗拉强度降为 225 MPa,L 方向抗拉强度降为 59 MPa,压入量随着间隙的增加而增加;当错边量大于 1.2 mm 时,T 形接头出现表面开裂现象,成形不良。

不同错边量 AS 侧和 RS 侧弯曲试验结果如图 14 所示,随着错边量的增加,T 形接头 AS 侧的弯曲性能不断下降,RS 侧的弯曲性能差异不大,直至错边量超过 1.2 mm,试样表面出现开裂。在弯曲试验中,铝合金 T 形接头试样 AS 侧发生明显的屈服现象,屈服角度在  $1^{\circ} \sim 3^{\circ}$ ,断裂角度  $11^{\circ} \sim 22^{\circ}$ ;RS 侧屈服角度  $0 \sim 1.5^{\circ}$ ,断裂角度  $2^{\circ} \sim 3^{\circ}$ ,在实际工程应用中,错边量的控制是必要的。

不同错边量 AS 侧剪切和 RS 侧剪切试验结果如图 15 所示,综合分析可以看出,RS 侧的剪切力明显高于 AS 侧;当错边量控制在 0.6 mm 时,AS/RS 两侧



(a) 错边量 0.3 mm



(b) 错边量 0.6 mm



(c) 错边量 0.9 mm



(d) 错边量 1.2 mm

图 12 不同错边量 T 形接头宏观形貌

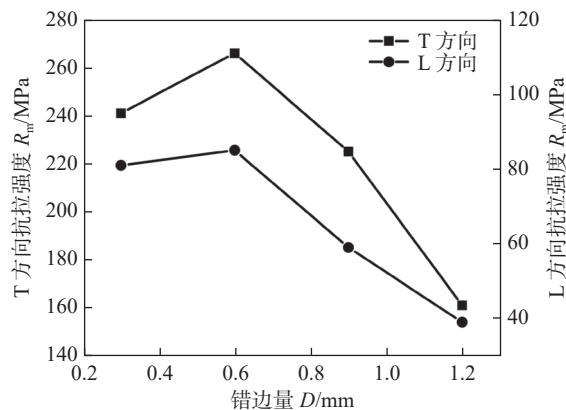


图 13 错边量对 T 形接头 FSW 试样抗拉强度的影响

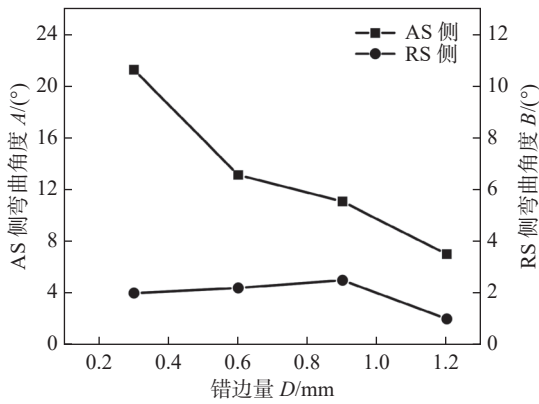


图 14 不同错边量 T 形接头弯曲试验测试结果

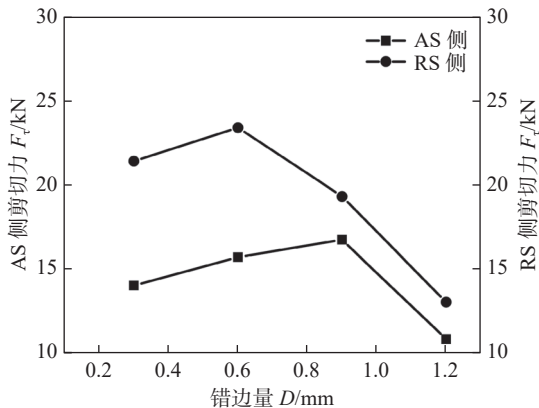


图 15 不同错边量 T 形接头剪切试验测试结果

的剪切力均可接受；随着错边量的增加，T形接头 AS/RS 两侧的剪切力差异性变小，直至错边量超过 1.2 mm，试样表面出现开裂，错边量对 T 形接头剪切性能的影响不明显。

综合以上分析可知，随着间隙/错边量的增加，筋板上方单位体积内的材料量不断减少，焊接过程中没有足够的金属填充间隙，导致 T 形接头成形困难，从而容易出现隧道孔、表面开裂等缺陷；由此，考虑工程应用变量对接头性能的影响，搭接间隙 0.6 mm、对接间隙 1.2 mm 和错边量 0.6 mm 是 T 形接头 3 种装配间隙的控制点。

### 3 结论

(1) 当搭接间隙在 0.2~0.6 mm 时，铝合金 T 形 FSW 接头 T 方向、L 方向的抗拉强度和剪切性能变化不大，AS/RS 两侧的弯曲性能随着搭接间隙的增加呈现下降趋势；当搭接间隙大于 0.6 mm 时，T 形接头焊缝出现表面沟槽，甚至开裂。

(2) 当对接间隙为 0.05~1.2 mm 时，铝合金 T 形

FSW 接头均得到有效的连接，T 方向、L 方向的抗拉强度和剪切性能变化较小，AS/RS 两侧的弯曲性能随着搭接间隙的增加而逐渐降低。

(3) 当错边量大于 0.6 mm 时，铝合金 T 形 FSW 接头 T 方向、L 方向的抗拉强度开始出现较大下降；随着错边量的增加，T 形接头 AS 侧的弯曲性能不断下降，RS 侧的弯曲性能差异不大；当错边量大于 1.2 mm 时，T 形接头表面开裂。

(4) 搭接间隙控制在 0.6 mm、对接间隙 1.2 mm 和错边量 0.6 mm 是 T 形接头在实际工程上实施搅拌摩擦焊的关键控制点。

### 参考文献

- [1] 杨坤玉, 袁朝桥, 彭彬, 等. 搅拌摩擦焊近 20 年研究与发展情况概述[J]. 焊接, 2020(1): 21-27.
- [2] Padhy G K, Wu C S, Gao S. Friction stir based welding and processing technologies processes, parameters, microstructures and applications: A review[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018(34): 1-38.
- [3] 刘刚, 王礼凡, 朱磊, 等. 6061 铝合金搅拌摩擦焊接头组织及性能[J]. 焊接, 2022(1): 21-25.
- [4] Wang Chunsheng, Liu Jie, Wang Hongxiao, et al. Application and development trend of new welding technology in railway vehicles manufacturing Industry[J]. China Welding, 2015, 24(4): 9-14.
- [5] 刘杰, 邓钢, 韩凤武. 双轴肩搅拌摩擦焊技术在铝合金车体制造中的应用发展[J]. 焊接, 2015(1): 17-20.
- [6] 张硕韶, 白彦超, 阎锋. 高速动车组铝合金司机室焊接结构设计[J]. 电焊机, 2013, 43(9): 28-32.
- [7] 宫文彪, 朱芮, 鄢新哲, 等. 6082 铝合金超厚板搅拌摩擦焊接头组织与性能[J]. 吉林大学学报, 2020, 50(2): 512-518.
- [8] 王希靖, 魏学玲, 张亮亮. 6082-T6 铝合金搅拌摩擦焊组织演变与力学性能[J]. 焊接学报, 2018, 39(3): 31-35.
- [9] 刘杰, 闫占奇, 宫文彪. 铝合金型材搅拌摩擦焊对接接头的疲劳性能研究[J]. 长春工业大学学报, 2022, 43(1): 20-27.
- [10] Tavares S M O, Castro R A S, Richter-Trummer V, et al. Friction stir welding of T-joints with dissimilar aluminium alloys: mechanical joint characterization[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2010, 15(4): 312-318.

(下转第 39 页)

- 京: 化学工业出版社, 2014.
- [2] 郑韶先, 徐龙强, 赵锡龙, 等. 预置镍基合金片对异种钢 UNGW接头组织及性能的影响[J]. 焊接, 2021(1): 1 - 7.
- [3] 孙连北, 魏坤霞, 孟涛, 等. 等离子弧焊Q345B和430不锈钢异种接头的微观组织与性能[J]. 焊接, 2022(5): 19 - 23.
- [4] 靳红梅, 任世宏, 李永红, 等. 镍基合金在异种钢焊接中的应用[J]. 电焊机, 2009, 39(4): 148 - 150.
- [5] 陈太军, 谢进, 谭云华, 等. 带隔离层镍基异种钢环缝无损检测应用[J]. 西部特种设备, 2020, 3(3): 40 - 49.
- [6] 高利和, 里杨, 高博, 等. 镍基合金换热器的焊接要点[J]. 压力容器, 2015, 32(5): 75 - 79.
- [7] 闫飞, 周一凡, 唐本刊, 等. 基于磁控冶金的铝/钢异种金属焊接特性[J]. 焊接学报, 2022, 43(5): 98 - 103.
- [8] 孙国辉, 邹迪婧, 谢彦武. 镍基690合金管子与管板焊接技术[J]. 动力工程学报, 2016, 36(5): 82 - 86.
- [9] 邓为民, 董生, 杨挺. 镍基合金堆焊和管子管板焊接工艺的研究[J]. 电站辅机, 2015, 36(4): 22 - 26.
- [10] 袁浩, 马成勇, 齐彦昌, 等. 690镍基合金焊条熔敷金属的组织与性能研究[J]. 材料科学与工程, 2016, 24(2): 41 - 46.

---

第一作者: 包文红, 学士, 高级工程师; 主要从事压力容器的制造监督检验及承压类特种设备鉴定评审工作; 492342271@qq.com。

(编辑: 郑红)

---

#### 本文引用格式:

包文红, 陈宏伟, 王岑, 等. 堆焊隔离层在承压设备制造中的应用[J]. 焊接, 2023(5): 35 - 39.

Bao Wenhong, Chen Hongwei, Wang Cen, et al. Application of dissimilar steel welding with surfacing isolation layer in pressure equipment manufacturing[J]. Welding & Joining, 2023(5): 35 - 39.

---

#### (上接第 34 页)

- [11] 方远方, 张丽娜, 米彦龙, 等. 焊接位置对5083铝合金搅拌摩擦焊T形接头性能的影响[J]. 焊接, 2021(11): 52 - 56.
- [12] Jesus J S, Gruppelaar M, Costa J M, et al. Effect of geometrical parameters on friction stir welding of AA5083-H111 T-joints[J]. Procedia Structural Integrity, 2016, 33(2): 242 - 248.
- [13] Fratini L, Buffa G, Micari F, et al. On the material flow in FSW of T-joints: Influence of geometrical and technological parameters[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 44(5-6): 570 - 578.
- [14] 屈志军, 宫文彪, 刘杰, 等. 搅拌头尺寸对铝合金T型接头搅拌摩擦焊组织与性能的影响[J]. 长春工业大学学报, 2018, 39(1): 20 - 25.
- [15] 国际标准化组织委员会(ISO). 铝合金搅拌摩擦焊焊接工艺规程及鉴定: ISO25239—2020[S]. 瑞士: 瑞士出版社, 2020.

---

第一作者: 刘杰, 博士, 教授; 主要从事先进焊接技术的科研和教学工作; liujieququ@126.com。

(编辑: 郑红)

---

#### 本文引用格式:

刘杰, 屈志军, 遇境润. 装配间隙对铝合金搅拌摩擦焊接头力学性能的影响[J]. 焊接, 2023(5): 29 - 34, 39.

Liu Jie, Qu Zhijun, Yu Jingrun. Effect of assembly gaps on mechanical properties of aluminum alloy friction stir welding joints[J]. Welding & Joining, 2023(5): 29 - 34, 39.