

# 5 mm 厚铝合金双面搅拌摩擦焊接

刘会杰<sup>1</sup>, 冯吉才<sup>1</sup>, 陈迎春<sup>1</sup>, 藤井英俊<sup>2</sup>, 前田将克<sup>2</sup>, 野城清<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001;

2. 日本大阪大学 接合科学研究所, 大阪 567-0047)

**摘要:** 对 5 mm 厚的 1050-H24 铝合金板材进行了双面搅拌摩擦焊接(FSW), 重点研究了接头的拉伸性能和断裂部位及其影响因素。研究结果表明, 一次焊接参数、二次焊接参数和焊接方向对双面 FSW 接头的拉伸性能和断裂部位有不同程度的影响。一次焊接参数的影响较小, 而二次焊接参数的影响显著并且存在最佳取值。同向焊接的接头强度较高且断在前进侧(AS)或后退侧(RS), 而异向焊接的接头强度较低且只断在 AS。在文中的试验条件下, 1 500 r/min 的旋转速度、400 mm/min 的二次焊速和同向焊接方式是最佳的工艺组合, 接头最高强度达到母材强度的 78%。

**关键词:** 搅拌摩擦焊接; 双面焊接; 拉伸性能; 断裂部位; 铝合金

中图分类号: TG453.9 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2004)05-09-04



刘会杰

## 0 序 言

搅拌摩擦焊接(FSW)方法具有高质量、低成本的显著特点, 因而在较短的时间内得到了广泛而深入的研究, 并正从开发阶段走向实用化<sup>[1]</sup>。采用这种方法所焊的材料也从最初的铝合金扩展到了镁合金<sup>[2]</sup>、铜合金<sup>[3]</sup>、钛合金<sup>[4]</sup>、铝基复合材料<sup>[5]</sup>及不锈钢<sup>[6]</sup>, 而研究的内容涉及 FSW 机理<sup>[7,8]</sup>、工艺<sup>[9~11]</sup>和设备<sup>[12]</sup>的各个方面。但在这些研究中, 除了大厚度板材采用双面 FSW 之外, 还未见到有关中小厚度板材双面 FSW 的报道。一些单面 FSW 的研究结果表明, 一个 FSW 接头的上、中、下三个组成部分具有不同的力学性能, 其中上部分总是具有最高的抗拉强度<sup>[13]</sup>。而且, 不同材料的 FSW 焊缝两侧的力学性能也不相同, 有些材料焊缝前进侧(AS)的性能低<sup>[14,15]</sup>, 而有些材料焊缝退出侧(RS)的性能低<sup>[16]</sup>。因此, 通过双面 FSW 调整接头上、下和两侧的组成部分, 就能改变接头的力学性能。正是基于这种思想, 作者拟研究一个 5 mm 厚的铝合金对双面 FSW 的适应性, 并将研究的重点放在接头的拉伸性能和断裂部位及其影响因素上。

收稿日期: 2004-05-24

基金项目: 日本全球研究中心(COE)优先资助项目; 中国高技术研究发展规划(863)资助项目(2002AA724040)

## 1 试验材料和方法

试验材料采用 5 mm 厚的形变强化并经部分退火的 1050-H24 铝合金板材, 其化学成分和力学性能如表 1 所示。板材被加工成 300 mm 长、80 mm 宽的长方形焊接试样, 并采用 FSW 焊机对其进行双面分次对接, 具体过程如图 1 所示。首先在试样的上面焊接一次焊缝, 然后翻转工件, 在与一次焊缝相同位置处焊接二次焊缝, 从而形成双面焊接的对接接头。为分析方便, 将二次焊缝的 AS 和 RS 分别定义为接头的 AS<sub>1</sub> 和 RS<sub>1</sub>, 将二次焊缝的焊接方向与一次焊缝的焊接方向相同的焊接方式称为接头的同向焊接, 反之称为接头的异向焊接。

表 1 母材的化学成分(质量分数, %)和力学性能

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of base material

Al	Si	Fe	Cu	Mg	V	Ti	抗拉强度 $\sigma$ /MPa	延伸率 $\delta$ (%)
99.58	0.04	0.32	0.02	0.01	0.01	0.02	106	18.6

双面 FSW 所用焊具尺寸和焊接工艺参数如表 2 所示, 其中只有焊接方向、一次焊速和二次焊速是可变参数。焊后采用线切割机沿垂直于焊接方向将接头切割成金相分析试样和拉伸性能测试试样。金相分析试样采用氧化铝悬浮液抛光, 采用凯勒试

剂腐蚀，并用数字式光学显微镜观察和照相。拉伸试样按有关标准制作，其计量长度和宽度分别为 50 mm 和 12.5 mm。每个接头的拉伸性能用三个拉伸试样来评定，拉伸测试在室温下进行。拉伸测试前，采用自动维氏硬度计沿拉伸试样侧面中心线测量接头的硬度分布。拉伸测试后，利用硬度压痕的位置坐标计算接头的断裂部位。

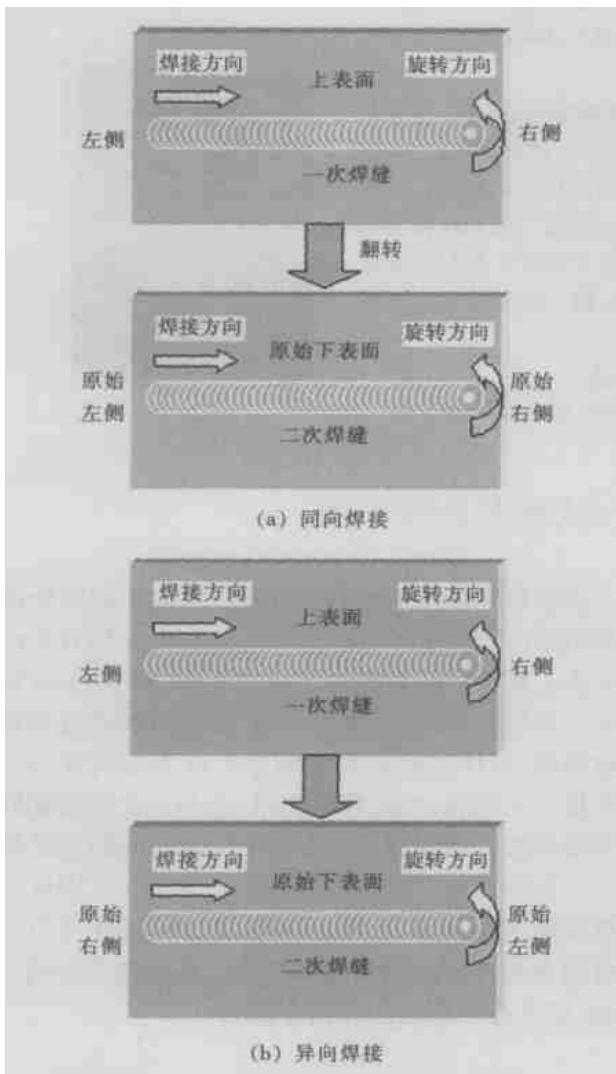


图 1 双面 FSW 焊接过程示意图

Fig. 1 Schematic illustration of two-sided FSW process

表 2 焊具尺寸和工艺参数

Table 2 Tool size and process parameters

编 号	轴肩直 径 $d/\text{mm}$	焊针直 径 $d_1/\text{mm}$	焊针长 度 $l/\text{mm}$	焊接 方向	转速 $\omega/\text{(r}^{\circ}\text{min}^{-1}\text{)}$	焊速 $v/\text{(mm}^{\circ}\text{min}^{-1}\text{)}$
1	15	6	4.7	同向	1500	400/200
2	15	6	4.7	同向	1500	400/400
3	15	6	4.7	同向	1500	400/600
4	15	6	4.7	同向	1500	800/400
5	15	6	4.7	异向	1500	400/400

\* 斜线左侧和右侧的数据分别表示一次焊速和二次焊速

## 2 试验结果和讨论

### 2.1 试验结果

图 2 和图 3 分别给出了不同焊接条件下双面 FSW 接头的拉伸性能和断裂部位。其中，断裂部位主要是指接头断在 AS 或 RS，以及断裂表面到焊缝中心的距离。由图 2 和表 1 可知，每个接头的拉伸性能都低于母材。比较 1 号、2 号和 3 号接头可以看出，当二次焊速在小于 400 mm/min 的范围内增加时，接头的抗拉强度增加，而延伸率降低，接头既可断在 AS，也可断在 RS，且距焊缝中心较远；当二次焊速超过 400 mm/min 时，接头的抗拉强度反而降低，而延伸率降低得更显著，接头只在 AS 断裂，且距焊缝中心较近。这些结果表明，二次焊速对接头的拉伸性能和断裂部位有明显的影响，而且存在一个 400 mm/min 的临界速度，它所对应的接头抗拉强度为 82 MPa，相当于母材抗拉强度的 78%。

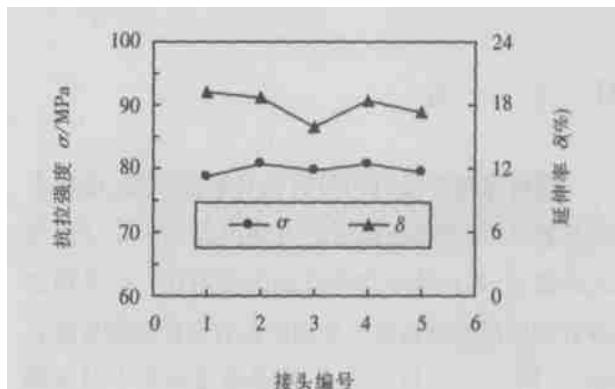


图 2 双面 FSW 接头的拉伸性能  
Fig. 2 Tensile properties of FSW joints

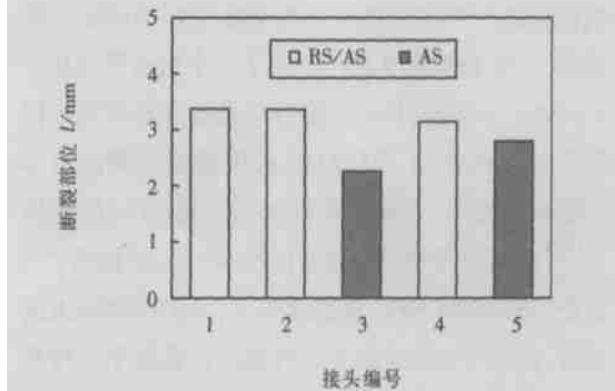


图 3 双面 FSW 接头的断裂部位  
Fig. 3 Fracture locations of FSW joints

比较 2 号和 4 号接头可知，虽然它们的一次焊速明显不同，但它们的拉伸性能（包括抗拉强度和延

伸率)基本相同, 接头的断裂部位也基本一致。这说明在一次焊速大于二次焊速的条件下, 一次焊速对接头的拉伸性能和断裂部位的影响很小。

由表 2 可知, 2 号和 5 号接头的焊接参数相同, 但它们的焊接方向不同, 前者为同向焊接, 后者为异向焊接。由图 2 和图 3 可以看出, 2 号接头的拉伸性能(包括抗拉强度和延伸率)比 5 号接头高, 2 号接头断在 AS 或 RS, 而 5 号接头只断在 AS。这说明焊接方向对接头的拉伸性能和断裂部位有显著的影响。从拉伸性能来看, 同向焊接优于异向焊接。

## 2.2 讨论

从本质上讲, FSW 接头的拉伸性能和断裂部位取决于接头的微观组织(包括缺陷)。对于一定的母材来讲, 接头的微观组织在很大程度上取决于焊接过程参数。图 4 给出了不同焊接条件下双面 FSW 接头的典型截面照片。当二次焊速大于临界速度(400 mm/min)时, 由于热输入的不足就会使接头产生内部缺陷(见图 4 中的 3 号接头)。由于缺陷的存在破坏了焊缝金属的连续性, 因而降低了接头的拉伸性能(见图 2 中的 3 号接头)。同时, 由于缺陷狭长且偏向接头的 AS, 因而接头在 AS 断裂, 且断裂部位离焊缝中心较近(见图 3 中的 3 号接头)。

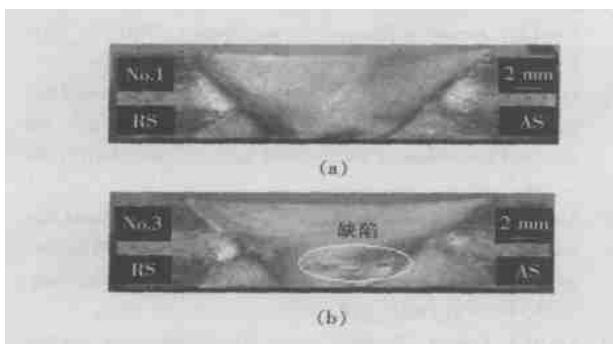


图 4 双面 FSW 接头的截面照片

Fig. 4 Cross sections of FSW joints

然而, 当二次焊速小于临界速度时, 热输入足以使焊缝金属产生充分的塑性流动, 从而形成没有缺陷的 FSW 接头(见图 4 中的 1 号接头)。在这种情况下, 接头的拉伸性能和断裂部位主要由接头热输入的高低或微观硬度的分布来决定<sup>[13~16]</sup>。图 5 给出了不同焊接条件下双面 FSW 接头的微观硬度分布。与单面 FSW 接头一样, 所有双面 FSW 接头都出现了软化现象, 即接头中形成了一个硬度降低的区域, 因而接头的拉伸性能低于母材(见表 1 和图 2)。在接头的软化区中存在一个最低硬度, 它所在的位置就是接头的断裂部位, 而它数值的大小决

定接头的抗拉强度。实际上, FSW 接头的最低硬度是由焊接热输入决定的, 也就是由焊接工艺参数决定的。对于双面 FSW 来讲, 哪次焊接所采用的焊接参数所引起的热输入大, 哪次焊接对接头最低硬度的影响就大。在焊具旋转速度一定的条件下, 该焊接参数就是焊接速度。因此, 只要二次焊速小于一次焊速, 无论一次焊速如何变化, 一次焊速对接头热输入的影响都很小, 因而对接头拉伸性能的影响就很小(见图 2 中的 2 号和 4 号接头)。同时, 当二次焊速小于一次焊速时, 接头的热输入将随二次焊速的增加而降低, 因而接头的软化程度降低, 接头的拉伸性能提高(见图 2 中的 1 号和 2 号接头)。在焊具转速为 1500 r/min 的条件下, 当二次焊速增加到 400 mm/min 时, 接头处于软化程度最低且没有内部缺陷的最佳状态, 因而接头的抗拉强度最高, 达到母材抗拉强度的 78%。

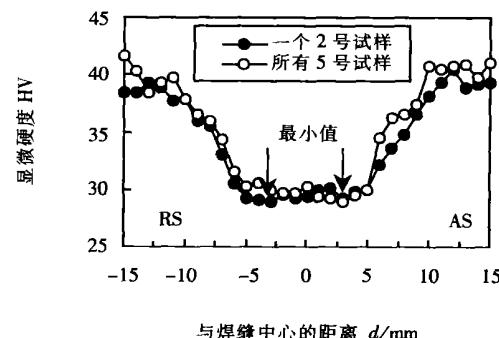


图 5 双面 FSW 接头的硬度分布

Fig. 5 Hardness profiles of FSW joints

对 1050-H24 铝合金的单面 FSW 研究表明, 接头最低硬度的位置总是出现在焊缝的 AS<sup>[13, 14]</sup>。对于双面 FSW 而言, 当采用异向焊接时, 接头的 AS 既是一次焊缝的 AS 也是二次焊缝的 AS, 接头的 RS 既是一次焊缝的 RS 也是二次焊缝的 RS。因此, 根据单面 FSW 的研究结果不难判断, 异向焊接的双面 FSW 接头的最低硬度必然出现在接头的 AS, 且其数值较低(见图 5 中的 5 号接头), 因而接头必然断在 AS, 且拉伸性能较低(见图 2 和图 3 中的 5 号接头)。然而, 当采用同向焊接时, 接头的 AS 由一次焊缝的 RS 和二次焊缝的 AS 组成, 接头的 RS 由一次焊缝的 AS 和二次焊缝的 RS 组成。也就是说, 接头的每一侧都是由一个 AS 和一个 RS 所组成。在这种情况下, 依据单面 FSW 的研究结果可以推断, 同向焊接的 FSW 接头的最低硬度既可出现在接头的 AS, 也可出现在接头的 RS, 且最低硬度值较异向焊接时高

(见图 5 中的 2 号和 5 号接头), 因而接头既可断在 AS, 也可断在 RS, 接头的拉伸性能也较异向焊接时高(见图 2 和图 3 中的 2 号和 5 号接头)。

### 3 结 论

(1) 一次焊接参数和二次焊接参数对双面 FSW 接头的拉伸性能和断裂部位有不同程度的影响。一次焊接参数的影响较小, 而二次焊接参数的影响显著并且存在最佳取值。

(2) 焊接方向明显影响双面 FSW 接头的拉伸性能和断裂部位。同向焊接时接头强度较高, 接头断在 AS 或 RS; 异向焊接时接头强度较低, 所有接头均断在 AS。

(3) 在文中的试验条件下, 1500 r/min 的旋转速度、400 mm/min 的二次焊速和同向的焊接方式是最佳的工艺组合, 接头最高强度达到母材强度的 78%。

### 参考文献:

[ 1 ] Okamura H, Aota K, Ezumi M. Friction stir welding of aluminum alloy and application to structure[ J ]. Journal of Japan Institute of light metals, 2000, (50): 166—171.

[ 2 ] Esparza J A, Davis W C, Trillo E A, *et al.* Friction—stir welding of magnesium alloy AZ31B[ J ]. Journal of Materials Science Letters, 2002, 21 (12): 917—920.

[ 3 ] Liu Xiaowen, Yan Junhui, Xue Chaogai, *et al.* Microstructure and mechanical properties of friction stir welded copper plate[ J ]. Transactions of the China Welding Institution, 2003, 24 (6): 47—50.  
刘小文, 鄢君辉, 薛朝改, 等. 铜板搅拌摩擦焊接头金相组织及力学性能[ J ]. 焊接学报, 2003, 24 (6): 47—50.

[ 4 ] Juhas M C, Viswanathan G B, Fraser H L. Microstructural evolution in Ti alloy friction stir welds[ A ]. Proceedings of 2nd International symposium on friction stir welding[ C ]. Gothenburg, Sweden, 2000.

[ 5 ] Prado R A, Mur L E, Soto K F, *et al.* Self—optimization in tool wear for friction—stir welding of Al 6061—20% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MMC[ J ]. Materials Science and Engineering A, 2003, A349 (1): 156—165.

[ 6 ] Reynolds A P, Tang W, Gnaupel — Herold T, *et al.* Structure, properties and residual stress of 304L stainless steel friction stir welds[ J ]. Scripta Materialia, 2003, 48 (9): 1289—1294.

[ 7 ] Seidel T U, Reynolds A P. Visualization of the material flow in AA2195 friction—stir welds using a marker insert technique[ J ]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2001, 32 (11): 2879—2884.

[ 8 ] Chao Y J, Qi X H. Thermal and thermo—mechanical modeling of friction stir welding of aluminum alloy 6061—T6[ J ]. Journal of Materials Processing and Manufacturing Science, 1998, 7 (2): 215—233.

[ 9 ] Liu H J, Fujii H, Nogi K. Microstructures and mechanical properties of friction stir welded joint of AC4A cast aluminum alloy[ J ]. Materials Science and Technology, 2003, 20 (3): 399—402.

[ 10 ] Liu H J, Fujii H, Maeda M, *et al.* Study of friction stir welding of AA5083 aluminum alloy[ J ]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2003, 13 (supplement): 14—17.

[ 11 ] Liu Xiaowen, Yan Junhui, Du Suigeng. Friction stir welding technology of LY12 alloy[ J ]. Transactions of the China Welding Institution, 2001, 22 (4): 55—57.  
刘小文, 鄢君辉, 杜随更. LY12 搅拌摩擦焊接技术. 焊接学报, 2001, 22 (4): 55—57.

[ 12 ] Thompson J. Space shuttle ET friction stir weld machine[ A ]. Proceedings of 4th international symposium on friction stir welding[ C ]. Utah, USA, 2003.

[ 13 ] Liu H J, Fujii H, Maeda M, *et al.* Heterogeneity of mechanical properties of friction stir welded joints of 1050—H24 aluminum alloy[ J ]. Journal of Materials Science Letters, 2003, 22 (6): 441—444.

[ 14 ] Liu H J, Fujii H, Maeda M, *et al.* Mechanical properties of friction stir welded joints of 1050—H24 aluminum alloy[ J ]. Science and Technology of Welding and Joining, 2003, 8 (6): 450—454.

[ 15 ] Liu H J, Fujii H, Maeda M, *et al.* Tensile properties and fracture locations of friction stir welded joints of 2017—T351 aluminum alloy[ J ]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 142 (3): 692—696.

[ 16 ] Liu H J, Fujii H, Maeda M, *et al.* Tensile properties and fracture locations of friction stir welded joints of 6061—T6 aluminum alloy[ J ]. Journal of Materials Science Letters, 2003, 22 (15): 1601—1603.

**作者简介:** 刘会杰, 男, 1962 年 11 月生, 博士/博士后, 教授。主要从事特种连接技术研究。获科技奖励 6 项及中国专利 1 项, 发表论文 100 余篇, 其中 SCI 和 EI 检索分别为 22 篇和 24 篇。

**Email:** liuhj@hope.hit.edu.cn