

[新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.02.012

# 2A14 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊工艺研究

赵汉文<sup>1</sup>, 张立强<sup>1</sup>, 李宇昊<sup>2</sup>

(1. 上海工程技术大学 机械工程学院, 上海 201620; 2. 上海拓璞数控科技股份有限公司, 上海 201111)

**摘要:**为了获得性能良好的焊接接头,对厚为5 mm的2A14-T6铝合金进行双轴肩搅拌摩擦焊(bobbin tool friction stir welding, BT-FSW)工艺研究。采用一种特殊设计的搅拌头,通过正交试验方法,对2A14铝合金进行BT-FSW焊接试验;利用光学显微镜和电子万能试验机分析不同焊接参数下焊缝的组织形态和力学性能,得出优化后的工艺试验窗口。研究表明:BT-FSW焊缝组织特征与常规FSW明显不同,呈“哑铃型”,随着焊速的增加,抗拉强度与延伸率先增加后降低,最大的抗拉强度在焊速为250 mm/min时获得,其抗拉强度约为239 MPa,达到了母材强度的54%,延伸率仅为3.2%,接头断在有细微裂纹的地方。这项研究表明此工艺试验方案是切实可行的。

**关键词:**焊接技术;双轴肩;搅拌摩擦焊;焊接试验;力学性能检测

中图分类号:TG453 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2018)02-0065-04

## Research on Process of Bobbin Tool Friction Stir Welding for 2A14 Aluminum Alloy

ZHAO Hanwen<sup>1</sup>, ZHANG Liqiang<sup>1</sup>, LI Yuhao<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2. Shanghai Top Numerical Control Technology Co., Ltd., Shanghai 201111, China)

**Abstract:** The research on process of bobbin tool friction stir welding for 5mm thick 2A14-T6 aluminum alloy was conducted to obtain better performance of the welded joints. A special designed stir heads were adopted, and Bobbin tool friction stir welding tests of 2A14 aluminum alloy were carried out by orthogonal test. Effect of different welding parameters on texture and mechanical properties of the welded joint was analyzed by using optical microscope and electronic universal testing machine to achieve the optimized process. Research shows that the macrostructure of BT-FSW is obviously different from that of conventional FSW, which is "dumbbell-shaped". With the increase of welding speed, the tensile strength and elongation first increase and then decrease. When the welding speed is 250 mm/min, the maximum tensile strength is obtained. The tensile strength is about 239 MPa, which reaches 54% of that of the base metal, and the elongation is only 3.2%. The joints are broken in the presence of microcracks. This shows that the scheme of process test is feasible.

**Keywords:** welding technology; bobbin tool; FSW (friction stir welding); welding test; mechanical properties testing

随着科技的飞速发展,铝合金被广泛应用<sup>[1]</sup>的同时对其焊接性能研究也随之深入。双轴肩搅拌摩擦焊(bobbin tool friction stir welding, BT-FSW)是搅拌摩擦焊(friction stir welding, FSW)技术发展史上一个里程碑,具备较高的研究及应用价值。与常规FSW相比,

BT-FSW技术可以同时焊接试件上、下表面,既提高了焊接速度,又消除了未焊透等焊接缺陷;用下轴肩替代原有的刚性垫板,既简化了工装,又降低了焊接过程中的顶锻力,增强了对焊接工况的适应性<sup>[2-3]</sup>。

搅拌头的设计决定着BT-FSW接头质量的好坏。

收稿日期:2017-11-30;修回日期:2018-02-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51305254);上海市教委科研创新项目(13YZ108)。

第一作者简介:赵汉文(1991),男,江苏连云港人,硕士研究生,主要研究方向为精密制造和数控技术。E-mail:2364382025@qq.com

王鹏浩等<sup>[4]</sup>揭示了不同轴肩端面对双轴肩搅拌摩擦焊接质量的影响。刘会杰等<sup>[5]</sup>设计的上、下轴肩不等尺寸的搅拌头,解决了焊接过程中热输入过大及搅拌针容易断裂等问题。通过对接头组织与性能的研究,可为优化工艺试验窗口提供理论依据。张健<sup>[6]</sup>、赵衍华<sup>[7]</sup>和张会杰<sup>[8]</sup>等分别对厚为6 mm 2000系列铝合金 BT-FSW 接头组织形态与力学性能作了详细分析,研究表明,接头呈“哑铃型”,焊接接头系数均达到了70%。显然,接头强度有待进一步提高。

接头组织与性能的问题,始终是 BT-FSW 研究的热点,尤其是针对焊接工艺参数、接头组织形态及力学性能3者相互影响关系的研究进一步促进了 BT-FSW 的工程应用。课题组采用了 BT-FSW 技术对2A14铝合金试验板材进行对接拼焊,焊后观察了焊缝表面是否有明显的缺陷,并且利用电子万能试验机和光学显微镜完成了拉伸试验、金相组织观察,得出工艺参数对接头组织与性能的影响规律。

## 1 试验方法

试验母材是尺寸为300.0 mm × 75.0 mm × 4.8 mm的2A14铝合金试板,为Al-Cu系合金<sup>[9]</sup>,接头形式为对接,其主要化学成分和机械性能如表1所示。焊前通过正交试验方法选取主轴转速、焊接速度和轴肩间距为试验的3个因素,每个因素均考虑3个水平,具体如表2所示。

表1 2A14铝合金主要化学成分和机械性能

Table 1 Main chemical compositions and mechanical properties of 2A14 aluminum alloy

化学成分(质量分数)/%				力学性能	
Cu	Si	Mn	Mg	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	延伸率 $\delta$ /%
3.9~4.8	0.6~1.2	0.4~1.0	0.4~0.8	$\geq 440$	$\geq 10$

表2 正交试验因素及其水平

Table 2 Factors and levels of orthogonal test

水平	因素		
	主轴转速 $n$ / ( $r \cdot \min^{-1}$ )	焊接速度 $v$ / ( $\text{mm} \cdot \min^{-1}$ )	轴肩间距 $d$ /mm
1	400	200	4.3
2	450	250	4.4
3	500	300	4.5

焊接试验在FSW1270试验机床上进行。试验所用的搅拌头材料为H13钢,采用分体式设计,其实物如图1所示。搅拌针直径为8 mm,采用三截面的形式;上、下轴肩直径为16 mm且开有同心圆槽;轴肩间距为4.3 mm,搅拌针固定于回抽轴上,轴肩间距可调

节。与常规FSW焊接过程有所不同,BT-FSW焊接过程不包括搅拌针插入阶段,搅拌头以一定的速度平行于工件旋转摩擦进入接缝处。当搅拌头移动一定距离以后,提高焊接速度,并以此焊接速度完成整个焊接过程。焊后观察焊接表面是否有明显的缺陷。根据GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验》的第1部分:室温试验方法,用线切割将焊接接头切成标准试样。在MJDW-200B微机控制电子万能试验机上进行拉伸试验,并以3个试样的平均值作为接头性能的评定结果;沿着垂直于焊接方向切割金相试样,经过机械打磨、抛光以及侵蚀以后,用光学显微镜进行金相组织的观察并附上其照片。

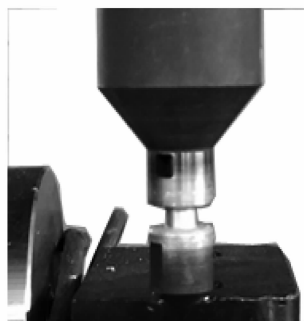


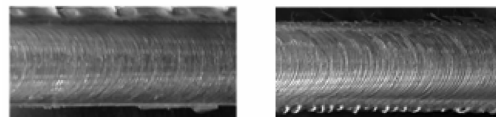
图1 双轴肩搅拌头实物图

Figure 1 Photograph of bobbin tool

## 2 试验结果及其分析

### 2.1 BT-FSW 焊缝表面成形

在9组不同的焊接参数下,试件都获得了表面成形较好的焊缝。上、下表面无沟槽缺陷,但前进侧鱼鳞纹并不完整;焊缝上、下表面后退侧有较大的飞边挤出,这可能会影响接头质量<sup>[10]</sup>,焊缝表面特征如图2所示。图2为主轴转速400 r/min,焊接速度250 mm/min,轴肩间距4.4 mm的焊缝表面成形情况。



(a) 上表面

(b) 下表面

图2 焊缝表面成形

Figure 2 Surface shape of weld

### 2.2 BT-FSW 接头横截面金相组织

从图3可看出,主轴转速为400 r/min时,焊缝无明显焊接缺陷;而主轴转速为450和500 r/min时,几乎都在前进侧存在焊接缺陷,这可能是由于试验板材在焊接过程中,后退侧的金属没有及时填充到前进侧导致前进侧金属量减少,留下隧道型缺陷。

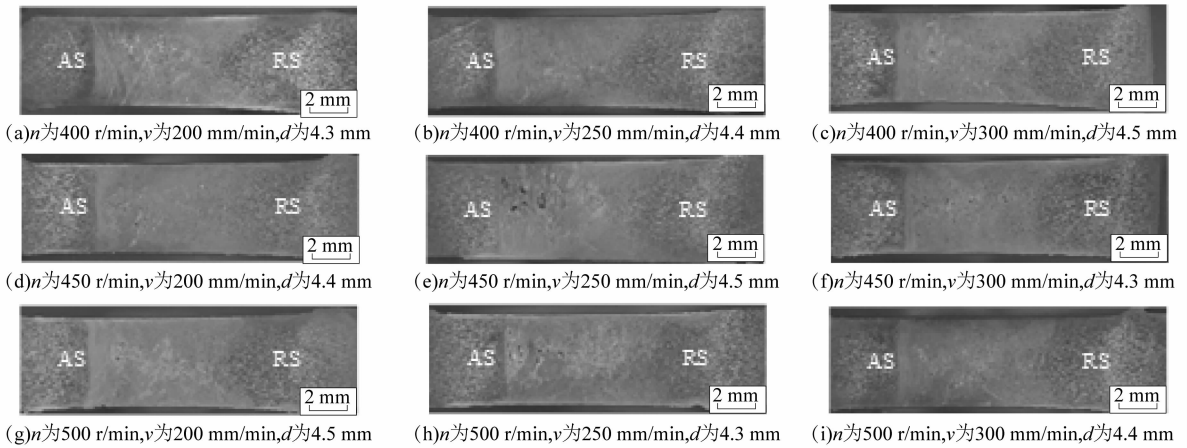


图3 不同焊接参数接头横截面形貌

Figure 3 Morphology of joint on cross section with different welding parameters

图4所示为主轴转速400 r/min,焊接速度250 mm/min,轴肩间距4.4 mm的接头横截面宏观组织。由图4可知,焊缝低倍组织视场存在明暗差异,可分为焊核区(WNZ)、热机影响区(TMAZ)、热影响区(HAZ)和母材4个区域,焊缝区域上、下较宽,中部偏窄,总体上呈“哑铃型”,前进侧与后退侧均与焊缝厚度中心对称。这主要是由于双轴肩焊接时,存在上、下两个相同的轴肩,热输入由焊缝表面向焊缝中心传递,热输入量大且均匀,有助于改善焊缝的性能。利用下轴肩替代常规FSW的背部刚性垫板,从根本上消除了常规FSW的背部弱连接或未焊透的问题。

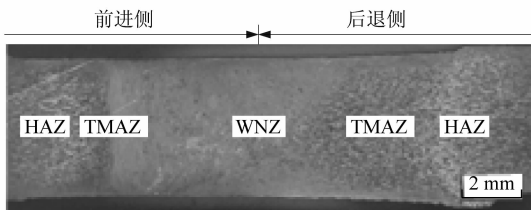


图4 接头横截面宏观组织

Figure 4 Macrostructure of joint on cross section

由图4还可看出,焊核区与热机影响区的分界在前进侧与后退侧有所不同,前进侧分界明显,后退侧分界比较模糊。出现此种现象可能与焊接过程中两侧合金的塑性流动状态的差别有关。另外,接头横截面两侧的宏观组织形貌也有明显的差别,并且热机影响区在焊缝前进侧的宽度明显小于其在焊缝后退侧的宽度。

图5所示为接头横截面的微观组织形貌。图5(a)为焊缝前进侧热机影响区的组织形貌,主要由弯

曲变形的板条形晶粒组成,仍然维持着原本2A14铝合金轧制晶粒的边界特征,并且前进侧的热机影响区与焊核区的交互界面更加清晰可见。同时也可看出,处于焊缝上、下部的热机影响区晶粒方向分别由焊缝的中心向焊缝的上、下表面弯曲。

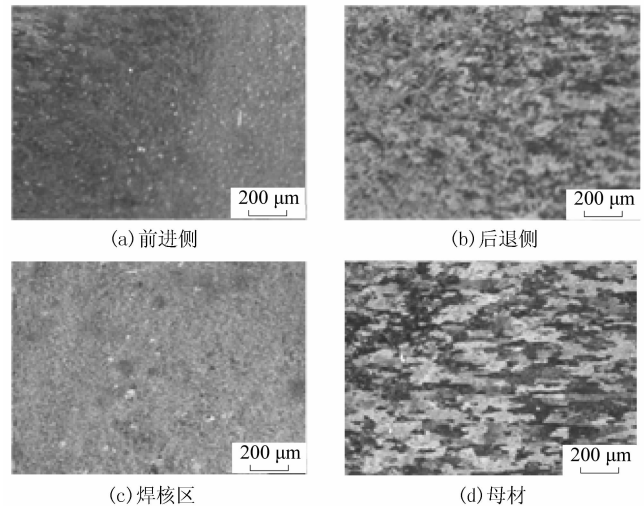


图5 接头横截面微观组织

Figure 5 Microstructure of joint on cross section

后退侧的热机影响区与焊核区以及热影响区的交互界面比较模糊,晶粒尺寸的变化梯度比前进侧小,由热影响区的粗大板条形晶粒逐渐变化到热机影响区的弯曲变形晶粒,再由热机影响区的弯曲变形晶粒逐渐变化到焊核区的细小等轴晶粒,如图5(b)所示。BT-FSW焊缝热机影响区组织的形成过程与常规FSW类似,均是因为焊接材料在搅拌针附近受到的机械作用较弱,同时受到了热量的影响而发生动态不完全再结晶形成的。

BT-FSW 焊缝焊核区的组织为均布的细小等轴晶,如图 5(c)所示。这是因为焊核区受到了双轴肩搅拌头较强的热力作用,发生动态的完全再结晶过程,并且已经发生动态再结晶的晶粒等不及长大就被高速旋转的搅拌针打碎,从而形成了细小的等轴状晶粒;焊核区的晶粒尺寸一致,说明该区域经历的焊接热循环基本相同。

图 5(d)为 2A14 铝合金母材的显微组织,主要由一系列横向的板条形晶粒组成,这与母材的轧制过程紧密相关。

### 2.3 BT-FSW 接头力学性能

取无明显缺陷的焊接试验板材做拉伸试验,接头的拉伸测试结果如表 3 所示。3 条焊缝抗拉强度均在 200 MPa 以上,达到母材性能的 45% 以上,延伸率仅为 3% 左右。拉伸试样及拉断后照片如图 6~7 所示。

图 6 为拉伸试样的实物图。由图 7 可见,拉伸试样断在焊缝前进侧。结合应力-应变曲线,表明断裂是发生在有细微裂纹的地方。

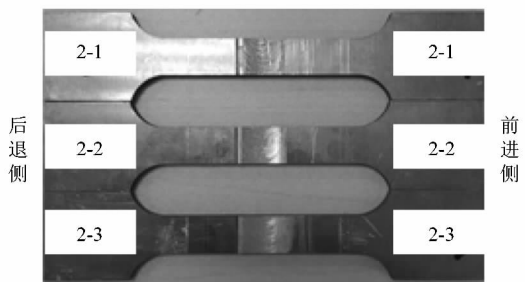


图 6 拉伸试样实物图

Figure 6 Photograph of tensile specimens

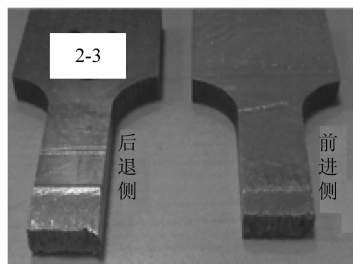


图 7 接头拉伸断裂照片

Figure 7 Tensile fracture photograph of joint

表 3 接头拉伸试验结果

Table 3 Tensile test results of joint

编号	主轴转速 $n/$ ( $r \cdot \min^{-1}$ )	焊接速度 $v/$ ( $\text{mm} \cdot \min^{-1}$ )	轴肩间距 $d/\text{mm}$	抗拉强度 $R_m/\text{MPa}$	延伸 率/%
1	400	200	4.3	221.94	3.09
2	400	250	4.4	238.79	3.21
3	400	300	4.5	206.83	3.02

### 3 结论

1) 采用上、下轴肩直径 16 mm、搅拌针直径 8 mm、轴肩间距可调的双轴肩搅拌头,以 400 r/min 的主轴转速、200~300 mm/min 的焊接速度、4.3~4.5 mm 的轴肩间距,可以实现 5 mm 厚 2A14-T6 铝合金焊接。

2) 所得 BT-FSW 焊缝内部成形较好,在拉伸测试时抗拉强度达到母材强度的 45% 以上,延伸率仅为 3% 左右。随着焊接速度的加快,抗拉强度与延伸率先增加后降低。主轴转速 400 r/min、焊接速度 250 mm/min、轴肩间距 4.4 mm 时,接头的抗拉强度为 239 MPa,延伸率为 3.2%,均达到最大,接头系数为 54.1%。

### 参考文献:

- [1] 刘静安,谢水生. 铝合金材料的应用与技术开发[M]. 北京:冶金工业出版社,2011.
- [2] OKAMOTO K, SATO A, PARK S H C, et al. Microstructure and mechanical properties of FSWed aluminum extrusion with bobbin tools [J]. Materials science forum, 2012, 706/707/708/709: 990-995.
- [3] 苏斌,贺地求,杨坤玉,等. 3 mm 厚 6061 铝合金板固定双轴肩搅拌摩擦焊接头的显微组织与拉伸性能[J]. 机械工程材料, 2013, 37(5): 59-61.
- [4] 王鹏浩,陈书锦,李浩,等. 不同轴肩组合对双轴肩搅拌摩擦焊接质量的影响[J]. 电焊机, 2015, 45(10): 23-29.
- [5] LIU H J, HOU J C, GUO H. Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of self-reacting friction stir welded 6061-T6 aluminum alloy[J]. Materials and design, 2013, 50: 872-878.
- [6] 张健,李光,李从卿,等. 2219-T4 铝合金双轴肩 FSW 与常规 FSW 接头性能对比研究[J]. 焊接, 2008, 425(11): 50-52.
- [7] 赵衍华,李延民,郝云飞,等. 2219 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接头组织与性能分析[J]. 宇航材料工艺, 2012, 244(6): 70-75.
- [8] 张会杰,王敏,张骁,等. 2A14-T6 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊特征及接头组织性能分析[J]. 焊接学报, 2015, 36(12): 65-68.
- [9] 郑峰. 铝与铝合金速查手册[M]. 北京:化学工业出版社, 2008.
- [10] 张忠科,廖蕴博,王希靖,等. LF21 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊组织与性能[J]. 电焊机, 2016, 46(11): 26-30.