

# 焊后热处理对 7075 铝合金搅拌摩擦焊接头组织及性能的影响

崔少朋<sup>1,2</sup>, 朱 浩<sup>1,2</sup>, 郭 柱<sup>1,2</sup>, 王彦红<sup>1,2</sup>, 赵熠朋<sup>1,2</sup>

(1. 河北省交通工程材料重点实验室, 河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学 材料科学与工程学院, 河北 石家庄 050043)

**摘要:**使用搅拌摩擦焊(FSW)设备对厚度为 6 mm 的 7075 高强铝合金平板进行对接试验。采用不同热处理工艺(固溶温度、时效时间)对接头进行热处理,并对不同热处理工艺下的接头进行微观组织观察和显微硬度测试。研究表明:7075 铝合金 FSW 接头由焊核区(WNZ)、热机影响区(TMAZ)及热影响区(HAZ)组成,WNZ 为细小均匀的等轴晶组织;热处理后接头 WNZ 部分晶粒发生粗化;随着固溶温度的升高,晶粒粗化程度增大;随着时效时间的延长,WNZ 晶粒粗化程度变化不明显;FSW 接头显微硬度分布呈“W”型,热处理后接头显微硬度均有不同程度的升高,随着时效时间的延长,接头的显微硬度先增大后减小;固溶温度 490 °C、时效温度 120 °C、时效时间 24 h 是厚度为 6 mm 的 7075 铝合金 FSW 接头的最佳热处理工艺参数。

**关键词:**7075 铝合金;搅拌摩擦焊;焊后热处理;微观组织;显微硬度

**中图分类号:**TG457.14 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2015)04-0104-05

## 0 引言

铝合金由于其密度小、比强度高、良好的耐腐蚀性、低温韧性及易成型性等特点,被广泛应用于载运工具制造领域<sup>[1-3]</sup>。采用传统熔焊方法对其连接时易产生气孔、热裂纹及热影响区软化等问题<sup>[4]</sup>。搅拌摩擦焊(FSW)是英国焊接研究所发明的一种全新固态连接技术,与传统熔焊方法相比具有优质、高效、低耗、焊接变形小等特点<sup>[5-6]</sup>。采用 FSW 连接铝合金能够很好地避免气孔、热裂纹等问题。文献<sup>[7-9]</sup>对铝合金 FSW 接头进行组织与力学性能研究发现,采用合适的焊接参数能够得到无缺陷的焊接接头,但热影响区软化(HAZ)的问题仍然存在,它降低了整个接头的承载能力。焊后热处理是改善焊接接头 HAZ 软化的有效方法之一,对此国内外学者进行了大量的研究<sup>[10-14]</sup>。目前,关于厚度为 6 mm 的 7075 铝合金 FSW 接头焊后热处理工艺的研究尚不完善。本文选用厚度为 6 mm 的 7075 铝合金平板进行 FSW 对接试验,对接头进行不同工艺(固溶温度、时效时间)的焊后热处理,研究热处理前后接头的微观组织及力学性能,探讨不同热处理工艺对 7075 铝合金 FSW 接头组织及力学性能的影响。

## 1 实验材料和方法

实验材料为厚度 6 mm 的 7075 铝合金平板(供货状态:T6)。焊件尺寸规格为 500 mm×150 mm,焊接方式为对接拼焊。焊接工艺参数如下:搅拌针旋转速度为 550 r/min、焊接速度为 180 mm/min。搅拌头轴肩直径为 15 mm,搅拌针选用锥形螺纹针,根部直径为 6 mm,长度为 5.8 mm。热处理工艺如下:不同加热温度下固溶处理 1 h 后进行水淬,随后进行 120 °C 人工时效,其中固溶温度分别为 450 °C、470 °C

收稿日期:2014-07-15 责任编辑:刘宪福 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.2015.04.19

作者简介:崔少朋(1989—),男,硕士研究生,研究方向为金属材料与加工。E-mail:cuishaopeng8911@163.com

基金项目:河北省自然科学基金(2012210001);河北省教育厅基金(2010204);河北省高等学校科学技术研究重点项目(ZD2010209);教育部科学技术研究重点项目(211022);河北省高校重点学科建设项目资助

崔少朋,朱浩,郭柱,等.焊后热处理对 7075 铝合金搅拌摩擦焊接头组织及性能的影响[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2015,28(4):104-108.

和 490 ℃,时效时间分别为 8 h、16 h 和 24 h。焊接接头金相试样制取采用 DPF-1 型电解抛光仪进行抛光,抛光液为 700 ml 乙醇+100 ml 甘油+200 ml 30%高氯酸,腐蚀剂为 4 ml 氢氟酸+6 ml 盐酸+10 ml 硝酸+190 ml 水,腐蚀时间为 30 s。采用 GX51 型 OLYMPUS 光学显微镜观察接头微观组织,并用 HVS-1000 型数显显微硬度计测试接头的显微硬度。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 接头组织观察结果及分析

7075 铝合金 FSW 接头宏观组织如图 1 所示。从图 1 可以看出,焊接接头由焊核区(WNZ)、热机影响区(TMAZ)、HAZ 组成。接头各区微观组织如图 2 所示,从图 2 可以看出,WNZ 晶粒为细小且分布均匀的等轴晶,平均尺寸为 5  $\mu\text{m}$  左右。这是由于在 FSW 过程中,搅拌头与被焊金属之间产生大量的热量,使周围金属塑化并充分流动,焊缝温度上升到再结晶温度。此时,在搅拌针搅拌作用下位错的密度不断增加,当储存能增加到足够发生再结晶时,金属内就开始不断形成晶核。这种结晶过程是塑性材料在焊接热循环作用下发生的动态再结晶过程,形成的晶粒来不及长大就会在搅拌针的搅拌作用下发生破碎,形成细小的等轴晶;TMAZ 受到搅拌针的机械搅拌及焊接热循环的作用,但由于其距搅拌针较远,受到的搅拌针搅拌作用远远小于焊核区组织。因此,该区材料发生较大程度的弯曲变形,并在局部区域在热循环的作用下发生回复反应,在板条状组织内形成了回复晶粒组织;HAZ 仅受焊接热循环的作用,组织未发生变形,而经受的焊接热作用也比焊核区和热机影响区弱,仅仅发生回复反应,组织发生粗化<sup>[15]</sup>。



图 1 接头宏观组织

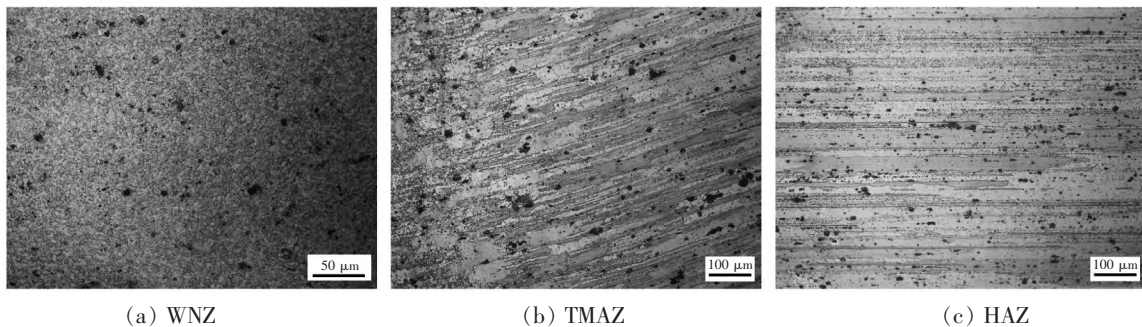


图 2 接头各区微观组织

### 2.2 不同热处理参数下接头组织观察结果及分析

不同热处理工艺下 7075 铝合金 FSW 接头宏观形貌如图 3 所示。从图 3 可以看出,热处理工艺不同,接头宏观形貌不同。热处理后接头 WNZ 部分晶粒发生了粗化。图 4 为时效时间 8 h 时,不同固溶温度下接头 WNZ 微观组织,从图 4 可以看出,随着固溶温度的增高,晶粒粗化程度增大,粗晶区范围增大。原因是固溶温度的升高使接头中热输入增多,从而导致晶粒粗化程度增大。图 5 为固溶温度 470 ℃时,不同时效时间下接头 WNZ 微观组织。随着时效时间的增大,WNZ 晶粒粗化程度变化不明显。

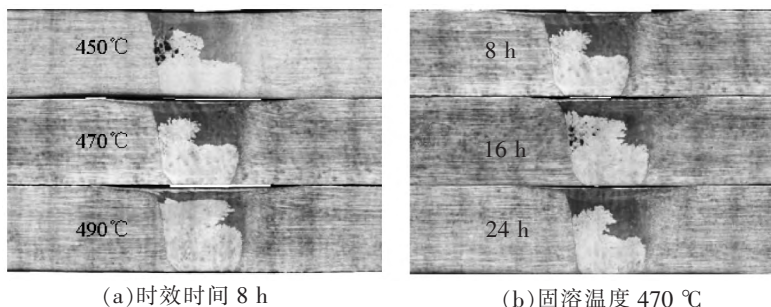


图 3 不同热处理参数下接头宏观组织

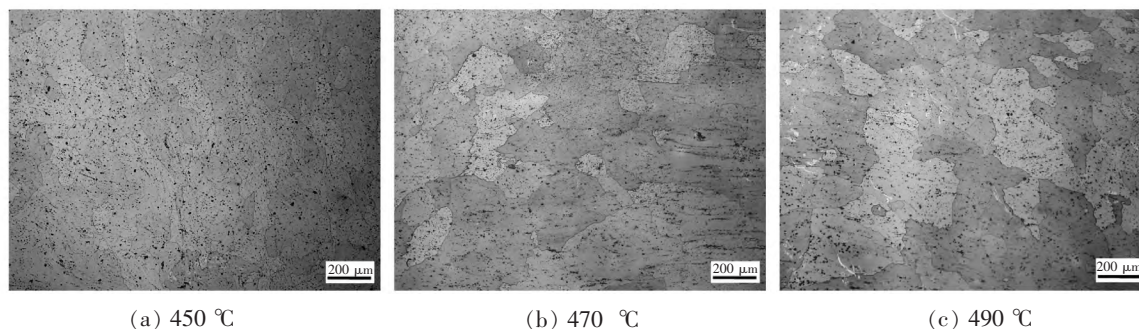


图 4 不同固溶温度下接头焊核区微观组织

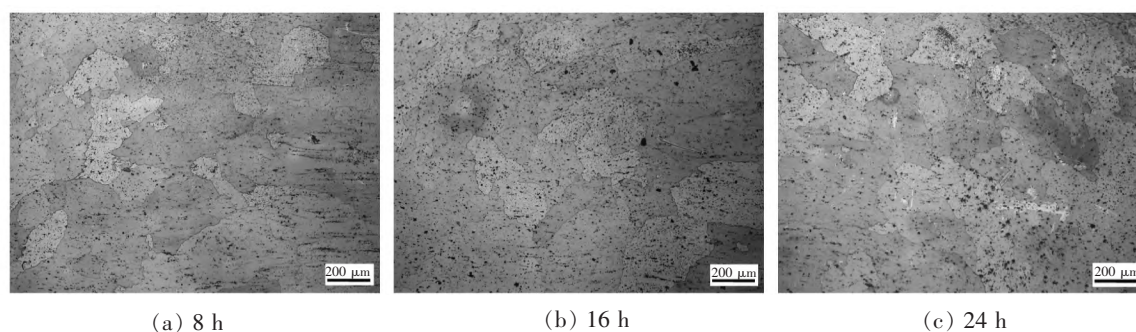


图 5 不同时效时间下接头焊核区微观组织

### 2.3 不同热处理参数下接头显微硬度结果及分析

图 6 为时效时间一定时不同固溶温度下 7075 铝合金 FSW 接头显微硬度分布曲线。从图 6 可以看出,热处理前接头显微硬度分布呈“W”型。母材区硬度值最高,WNZ 次之,HAZ 和 TMAZ 交界处硬度值最低。热处理后接头显微硬度均有很大的提高,且接头各区域的显微硬度值相近,HAZ 软化的问题的得到改善。这是由于固溶处理后,接头中的  $\eta(\text{MgZn}_2)$  相、 $\text{T}(\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3)$  相和  $\text{S}(\text{Al}_2\text{CuMg})$  相溶入基体,人工时效后析出共格的 GP 区和半共格的  $\eta'(\text{MgZn}_2)$  过渡相,由于  $\eta'$  相的强度较高,位错经过时由切过机制转变为绕过机制,受到的阻力增大,从而产生强化作用<sup>[16]</sup>。虽然热输入的增大导致晶粒粗化,但时效强化使得接头的显微硬度得到提升。总体来看,随固溶温度的提高,虽然接头各区显微硬度值有所变化,但波动范围较小,不同固溶温度下接头显微硬度分布相差不大,说明在所选温度范围内,固溶温度的不同对接头显微硬度的影响不大。

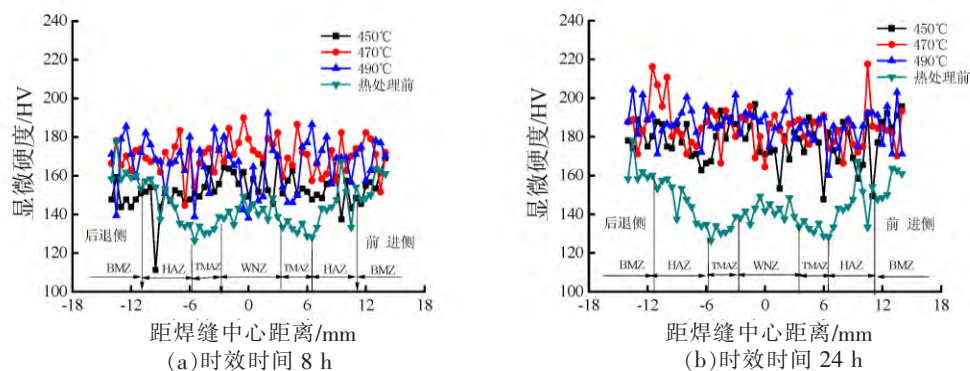


图 6 不同固溶温度下接头显微硬度

图 7 为固溶温度一定时,不同时效时间下 7075 铝合金 FSW 接头显微硬度分布曲线。从图 7 可以看出,随着时效时间的增大,接头显微硬度增大。这是由于随着时效时间的增大,接头中析出的  $\eta'$  相数量增加,从而使得时效强化作用得到了提升,导致接头显微硬度增大。



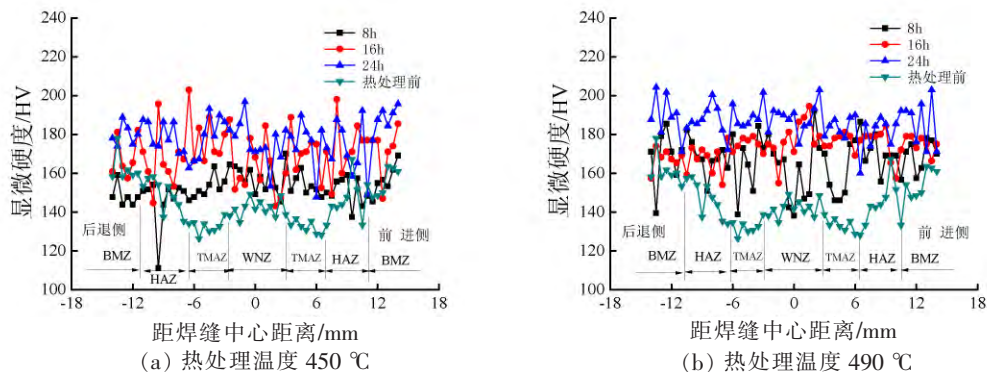


图 7 不同时效时间下接头显微硬度

图 8 为热处理后接头的平均硬度,从图 8 可以看出,随着时效时间的延长,接头的平均硬度增大。结合图 6 分析可以得出,与固溶温度相比,时效对接头显微硬度影响显著。固溶温度为 490 °C,时效时间为 24 h 时,接头的显微硬度达到最高值,为 195 HV,但这并不能说明该工艺为厚度 6 mm 的 7075 铝合金 FSW 接头最佳的焊后热处理工艺。

为了得到 7075 铝合金 FSW 接头最佳的焊后热处理工艺,选取固溶温度 490 °C,进行时效时间为 36 h 和 48 h 的焊后热处理,对热处理后接头的显微硬度进行测试,结果如图 9 所示。从图 9 可以看出,时效 36 h 和 48 h 后,接头的显微硬度较热处理前有了显著提高,焊缝各区显微硬度值相近,时效 48 h 的接头显微硬度较时效 36 h 的接头低。图 10 为固溶温度 490 °C 时,不同时效时间下接头的平均显微硬度。从图 10 可以看出,随着时效时间的延长,接头的显微硬度逐渐增大,到 24 h 时达到最大值,继续延长时效时间,接头的显微硬度减小。这是由于随着时效时间的延长,晶内  $\eta'$  相粒子发生粗化现象,晶界  $\eta'$  相长大并转变为非共格的  $\eta$  相,导致接头的显微硬度降低<sup>[17]</sup>。

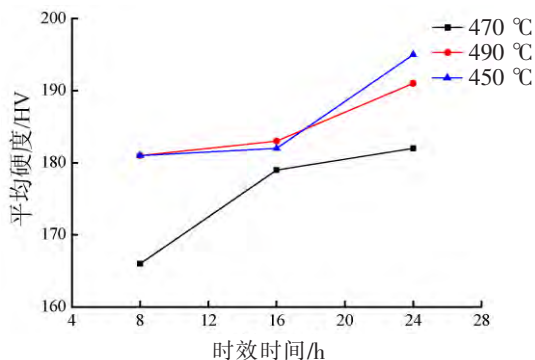


图 8 接头平均硬度

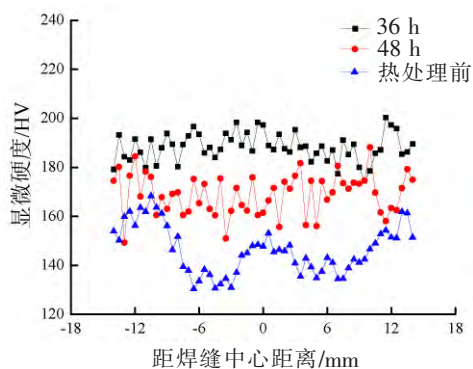


图 9 时效时间 36 h 和 48 h 接头显微硬度分布

由此可以得出结论,厚度为 6 mm 的 7075 铝合金 FSW 接头最佳的焊后热处理工艺参数为固溶温度 490 °C、时效温度 120 °C、时效时间 24 h。

### 3 结论

通过以上试验结果及分析可以得到以下结论:

(1) 7075 铝合金 FSW 接头由 WNZ、TMAZ 及 HAZ 组成,WNZ 为细小均匀的等轴晶组织。

(2) 热处理后接头 WNZ 部分晶粒发生粗化现象;随着固溶温度的升高,晶粒粗化程度增大,粗晶区范围增大;随着时效时间的增大,WNZ 晶粒粗化程度变化不明显。

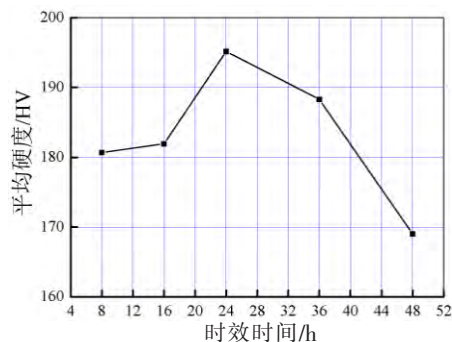


图 10 固溶温度 490 °C 时不同时效时间下接头平均硬度分布

(3)7075 铝合金 FSW 接头显微硬度分布呈“W”型;热处理后接头显微硬度均有不同程度的增高;随着时效时间的延长,接头显微硬度先增大后减小。

(4)厚度为 6 mm 的 7075 铝合金 FSW 接头的最佳热处理工艺参数:固溶温度 490 °C、时效温度 120 °C、时效时间 24 h。

## 参 考 文 献

- [1]王元良,周有龙,胡久富,等.解决运载工具铝合金焊接难题的新途径——搅拌摩擦焊[J].电焊机,2004,34(1):34-38.
- [2]王元良,周有龙,胡久富,等.运载工具的铝合金选材与焊接[J].中国有色金属学报,2001,11:1-5.
- [3]李桂华,熊飞,龙江后.车身材料轻量化及其新技术的应用[J].材料开发与应用,2009,24(2):87-93.
- [4]刘会杰.焊接冶金与焊接性[M].北京:机械工业出版社,2007:209-215.
- [5]张华,林三宝,吴林,等.搅拌摩擦焊研究进展及前景展望[J].焊接学报,2003,24(3):91-96.
- [6]罗凯,邢丽,杨成刚.搅拌摩擦焊搭接接头的研究现状与展望[J].电焊机,2010,40(6):5-9.
- [7]王海艳,戚文军,农登,等.6061 铝合金搅拌摩擦焊接头组织与性能研究[J].稀有金属,2010,34(5):638-642.
- [8]周鹏展,钟掘,贺地求.7A52 铝合金厚板搅拌摩擦焊[J].中国有色金属学报,2006,16(6):964-969.
- [9]Rajakumar S, Muralidharan C, Balasubramanian V. Influence of friction stir welding process and tool parameters on strength properties of AA7075-T6 aluminium alloy joints [J]. Materials and Design, 2011, 32: 535-549.
- [10]宋东福,戚文军,梁涛,等.焊后时效对 6061-T6 铝合金搅拌摩擦焊接头的影响[J].稀有金属,2012,36(4):535-540.
- [11]任淑荣,马宗义,陈礼清,等.焊后热处理工艺和背部二次焊接对搅拌摩擦焊接 7075-T651 铝合金性能的影响[J].金属学报,2007,43(3):225-230.
- [12]王希靖,孙桂萃,张杰,等.焊后热处理对高强铝合金搅拌摩擦焊接头的影响[J].中国有色金属学报,2009,19(3):484-489.
- [13]Chaitanya Sharma, Dheerendra Kumar Dwivedi, Pradeep Kumar. Effect of post weld heat treatments on microstructure and mechanical properties of friction stir welded joints of Al-Zn-Mg alloy AA7039 [J]. Materials and Design, 2013, 43: 134-143.
- [14]Singh R K R, Chaitanya Sharma, Dwivedi D K, et al. The microstructure and mechanical properties of friction stir welded Al - Zn - Mg alloy in as welded and heat treated conditions [J]. Materials and Design, 2011, 32: 682-687.
- [15]王国庆,赵衍华.铝合金的搅拌摩擦焊接[M].北京:中国宇航出版社,2010:1-3.
- [16]彭国胜.变形和热处理对 Al-Zn-Mg-Cu 铝合金系[D].长沙:中南大学,2011.
- [17]刘文军. Al-Zn-Mg-Cu 铝合金淬火析出行为及淬火敏感性研究[D].长沙:中南大学,2011.

## Effect of Post-weld Heat Treatment on Microstructure and Properties of Friction Stir Welded 7075 Aluminum Alloy Joints

Cui Shaopeng<sup>1,2</sup>, Zhu Hao<sup>1,2</sup>, Guo Zhu<sup>1,2</sup>, Wang Yanhong<sup>1,2</sup>, Zhao Yipeng<sup>1,2</sup>

(1. Hebei Provincial Key Laboratory of Traffic Engineering Materials, Shijiazhuang 050043, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** The butt welding was carried out on the 7075 aluminum alloy plate of 6mm thickness using friction stir welding (FSW). Post-weld heat treatments with different parameters (solution temperature, aging time) were performed on the FSW joints. The microstructure of the welded joints under different heat treatment processes was observed and the micro-hardness was tested. The results show that the FSW joints are made up of weld nugget zone (WNZ), thermo-mechanical affected zone (TMAZ) and heat affected zone (HAZ). The WNZ exhibits equiaxed fine grains, which are coarsened after heat treatment. With increased solution temperature, the grain size increases. With increased aging time, no obvious differences are observed on the coarsened grains. The microhardness of the FSW joint shows an asymmetric “W” shape and increases to some extent after heat treatment. With increased aging time, the microhardness of the joints firstly increases and then decreases. For the 7075 aluminum alloy FSW joint of 6mm thickness, the best heat treatment parameters include the heating temperature of 490 °C, solution temperature of 120 °C and the aging time of 24 h.

**Key words:** 7075 aluminum alloy; friction stir welding; post-weld heat treatment; microstructure; microhardness