

# 微量钪对 Al-Zn-Mg-Zr 热轧板搅拌摩擦焊接头组织与性能的影响

陈继强<sup>1</sup>, 尹志民<sup>1</sup>, 何振波<sup>1,2</sup>

(1. 中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083; 2. 东北轻合金有限责任公司, 哈尔滨 150060)

**摘要:** 采用硬度测试、室温拉伸性能测试、金相显微和透射电镜研究微量钪对 Al-Zn-Mg-Zr 热轧板搅拌摩擦焊接头组织与性能的影响。结果表明: 微量钪使 Al-Zn-Mg-Zr 合金母材的抗拉强度和屈服强度分别提高 22 MPa 和 42 MPa, 使焊接接头的抗拉强度和屈服强度分别提高 19 MPa 和 33 MPa; 焊核处硬度的提高来源于搅拌摩擦引起的细晶强化、固溶强化以及第二相的弥散强化, 热影响区硬度的降低则是由于焊接热循环引起的析出相的粗化; 微量钪使 Al-Zn-Mg-Zr 合金母材及焊接接头强度的提高的主要原因是细晶强化和 Al<sub>3</sub>(Sc,Zr)粒子的析出强化。

**关键词:** 微量钪; 搅拌摩擦焊; 显微组织; 性能

中图分类号: TG457.14

文献标志码: A

## Effects of minor Sc on microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Zr hot rolled plate

CHEN Ji-qiang<sup>1</sup>, YIN Zhi-min<sup>1</sup>, HE Zhen-bo<sup>1,2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Northeast Light Alloy Co., Ltd., Harbin 150060, China)

**Abstract:** The effects of minor Sc on the microstructures and mechanical properties of friction stir welding (FSW) joint of Al-Zn-Mg-Zr alloy were studied by hardness test, tensile property test, optical microscope (OM) and transmission electron microscope (TEM) analysis. The results show that minor Sc can increase the tensile strength and yield strength of Al-Zn-Mg-Zr based alloys by 22 MPa and 42 MPa and those of FSW joints by 19 MPa and 33 MPa, respectively. The strengthening of weld nugget attributes to grain refinement strengthening, solution strengthening and precipitation strengthening caused by friction stir welding. The decrease of strength in head affected zone (HAZ) is due to coarsening of precipitated phase. The fine grain strengthening and precipitation strengthening of Al<sub>3</sub>(Sc,Zr) should be responsible for the strengthening of base alloy and the joint of Al-Zn-Mg-Zr alloy with minor Sc.

**Key words:** minor Sc; friction stir welding; microstructure; mechanical properties

与传统的熔化极焊接方法相比, 搅拌摩擦焊焊接接头具有晶粒细小, 疲劳性能、拉伸性能和弯曲性能良好, 无尘烟、无气孔、无飞溅、节能、无需焊丝、焊接时不需使用保护气体, 焊接后残余应力和变形小等优点<sup>[1-4]</sup>, 是一种有前景的焊接方法<sup>[5]</sup>。在铝合金中添加微量钪能显著提高铝合金的综合性能<sup>[6]</sup>, 特别是将钪与其他过渡金属元素(如 Zr 和 Ti)复合添加时, 效

果更佳。Al-Zn-Mg-Sc-Zr 合金是一种新型高强耐蚀可焊轻质结构材料<sup>[7-10]</sup>。目前, 关于 Al-Zn-Mg 合金搅拌摩擦焊接头组织性能已经有了一些报道<sup>[11-12]</sup>, 但是关于微量钪对这种合金搅拌摩擦焊接头组织和性能的影响还鲜有报道。本文作者分别对 Al-Zn-Mg-Zr 和 Al-Zn-Mg-Sc-Zr 2 种合金热轧板进行搅拌摩擦焊接试验, 然后对两种焊接接头的显微组织和力学性能进行

对比研究。在此基础上,从微观组织角度研究微量 Sc 对 Al-Zn-Mg-Zr 热轧板搅拌摩擦焊接头组织和性能的影响,旨在为铝锌镁合金搅拌摩擦焊接的应用提供理论和实验的依据。

## 1 实验

焊接试验所用的母材为 6 mm 厚的 Al-Zn-Mg-Zr(合金 1)与 Al-Zn-Mg-Sc-Zr(合金 2)热轧板,2 种合金的化学成分如表 1 所列。

表 1 Al-Zn-Mg-Zr 和 Al-Zn-Mg-Sc-Zr 的化学成分

Table 1 Chemical compositions of Al-Zn-Mg-Zr and Al-Zn-Mg-Sc-Zr (mass fraction, %)

Element	Mass fraction/%	
	Alloy 1	Alloy 2
Zn	6.2	6.2
Mg	2.3	2.3
Mn	0.3	0.3
Sc	—	0.2
Zr	0.1	0.1
Ti	0.02	0.02
Si	0.1	0.1
Fe	0.2	0.2
Al	Bal.	Bal.

搅拌摩擦焊在中国搅拌摩擦焊中心(北京赛福斯特技术有限公司)进行,选用螺旋形搅拌针,搅拌针直径与母材等厚,单面焊,焊速为 500~800 mm/min。在焊接好的板材上沿垂直焊缝方向截取拉伸试样,采用 Instron8019 电子拉伸机进行拉伸力学性能测试以确定焊接接头的强度系数。沿焊接接头垂直焊道方向进行硬度测试,观察焊接接头不同部位硬度的变化。用光学显微镜(POLTAR-MET)对焊接接头各区域组织进行金相观察。在焊接接头不同区域取样,机械减薄至 0.12

表 2 搅拌摩擦焊条件下两种合金的拉伸力学性能

Table 2 Mechanical properties of friction stir welded joint of two alloys

Alloy	Position	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta_5$ /%	Strength coefficient	Fracture position
1	FSW joint	368	255	9.7	0.90	HAZ
	Base alloy	408	281	13.6		—
2	FSW joint	387	288	11.2	0.90	HAZ
	Base alloy	430	323	8.8		—

mm 后,在  $V(\text{HNO}_3):V(\text{CH}_3\text{OH})=1:2$  溶液中于  $-20\text{ }^\circ\text{C}$  下双喷电解减薄,薄膜样品电镜观察在 TecnaiG220 ST 型透射电镜上进行,电压为 200 kV。

## 2 结果

### 2.1 焊接接头的力学性能

#### 2.1.1 焊接接头的硬度分布

2 种合金焊接接头上沿焊缝中心不同距离处的显微硬度分布如图 1 所示。由图 1 可看出,2 种合金焊接接头沿焊缝横截面显微硬度分布是一致的,即以焊缝中心为轴成近似对称分布,焊缝中心焊核处的硬度最高,距离焊缝中心越远,硬度逐渐下降,在离焊缝中心 12 mm 左右,热影响区的硬度达到最低值,然后硬度慢慢回升直到达到母材的硬度。比较 2 种合金的显微硬度可以知道,合金 2 的焊接接头各个区域的硬度均要比合金 1 的相应区域的高。

#### 2.1.2 焊接接头的拉伸性能

2 种合金板焊接接头的拉伸力学性能如表 2 所列。由表 2 可看出,微量钪使 Al-Zn-Mg-Zr 合金母材的抗

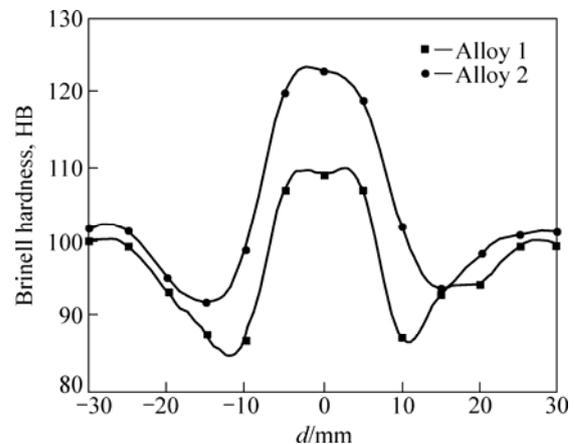


图 1 合金焊接接头显微硬度分布

Fig.1 Brinell hardness distribution of friction stir welding joint of alloys

拉强度和屈服强度分别提高了 22 MPa 和 42 MPa, 2 种合金的焊接强度系数均达到 0.9, 且拉伸试样均断在热影响区, 微量钪使 Al-Zn-Mg-Zr 合金焊接接头的抗拉强度和屈服强度分别提高 19 MPa 和 33 MPa。

## 2.2 合金焊接接头不同部位的微观组织

### 2.2.1 金相组织

Al-Zn-Mg-Zr 合金与 Al-Zn-Mg-Sc-Zr 合金搅拌摩擦焊接头焊核区(WCZ)、热机影响区(TMAZ)和热影响区(HAZ)的金相显微组织如图 2 所示。由图 2 可以看出, 2 种合金的焊核区均为细小的等轴晶(见图 2(a)和(d)); 热机影响区与焊核区的交界非常明显, 热机影响区的晶粒仍然保持着纤维状组织, 但是发生明显的扭曲变形; 热影响区仍然保持母材的纤维状组织, 只是晶粒略有长大。不同的是, 添加微量钪的合金 2 的热机影响区、热影响区及母材的晶粒明显比合金 1 的相应区域的晶粒细小。

### 2.2.2 透射电子显微组织

Al-Zn-Mg-Zr 合金与 Al-Zn-Mg-Sc-Zr 合金的搅拌摩擦焊接头母材、焊核区、热机影响区、热影响区的 TEM 像如图 3~6 所示。从图 3 可以看出, 在 2 种合金母材晶内均存在着针状的第二相, 电子衍射表明这种针状第二相为  $MgZn_2$  平衡相, 在合金 2 的母材晶内还可以看到大量的弥散分布的马蹄状粒子。根据相关文献[13]可知, 此粒子为  $Al_3(Sc,Zr)$  粒子。从图 4 可看出, 2 种合金焊核区晶内均存在着弥散分布的圆球状颗粒, 而且在添加微量钪的合金 2 的焊核区中弥散分布的球形粒子密度比合金 1 的焊核区的高。图 5 和 6 所示为 2 种合金热机影响区和热影响区的 TEM 像。从图 5 可以看出, 与焊核区不同, 在 2 种合金的热机影响区晶内均存在短棒状析出相。由图 6 可看出, 在 2 种合金的热影响区晶内都存在着针状第二相, 但是与母材相比, 第二相明显粗化。与此同时, 在合金 2 的热影响区内仍然可以观察到母材中存在的弥散分布的

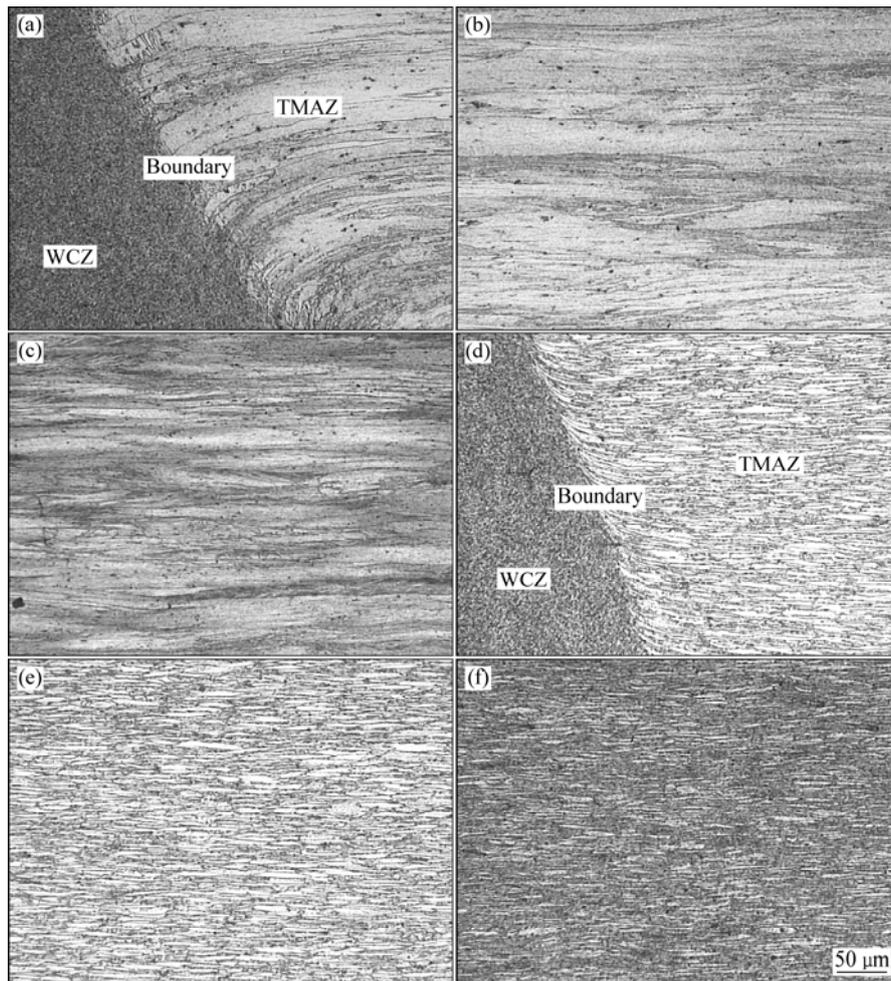


图 2 合金焊接接头不同区域的金相显微组织

**Fig.2** OM images of different zones of friction stir welded joints of alloys: (a) Alloy 1, transition zone from nugget zone to TMAZ; (b) Alloy 1, HAZ, (c) Alloy 1, base alloy; (d) Alloy 2, transition zone from nugget zone to TMAZ; (e) Alloy 2, HAZ, (f) Alloy 2, base alloy

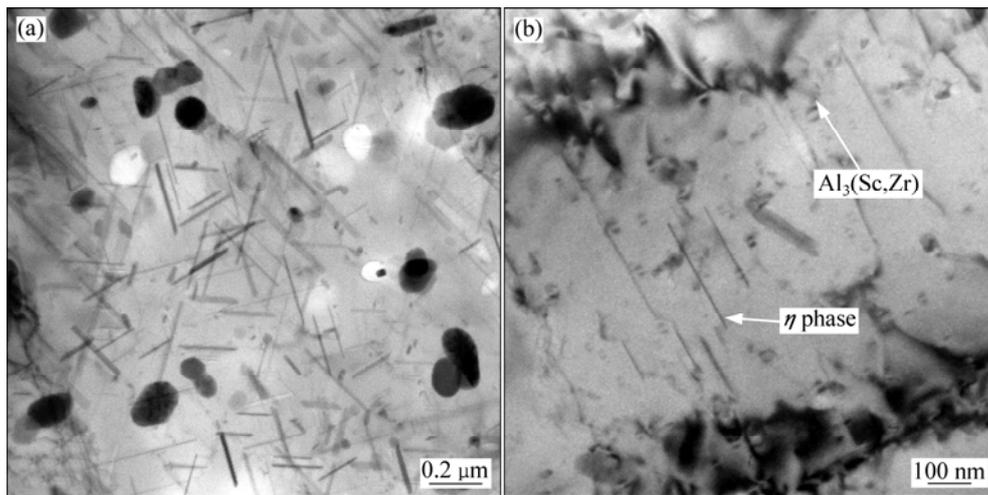


图3 合金母材的TEM像

Fig.3 TEM images of base alloys: (a) Alloy 1; (b) Alloy 2

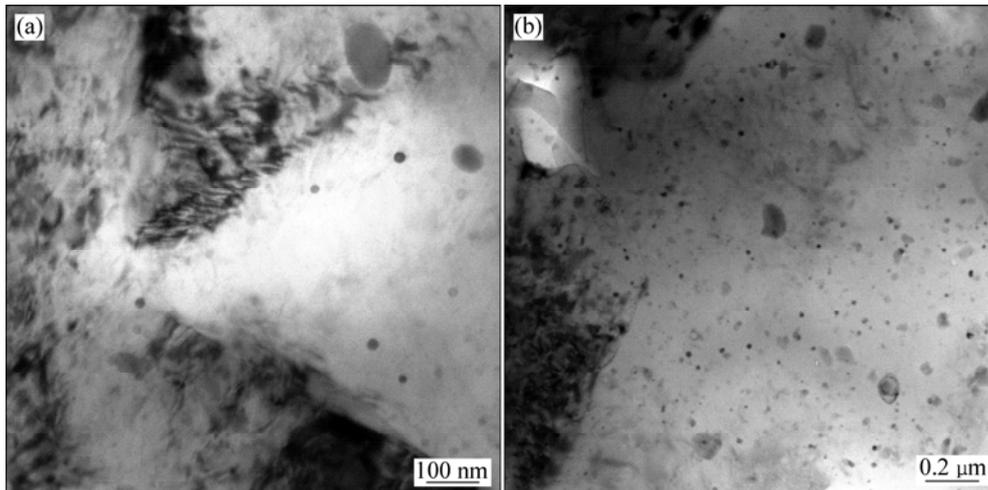


图4 合金焊核区的TEM像

Fig.4 TEM images of nugget zone of alloy joints: (a) Alloy 1; (b) Alloy 2

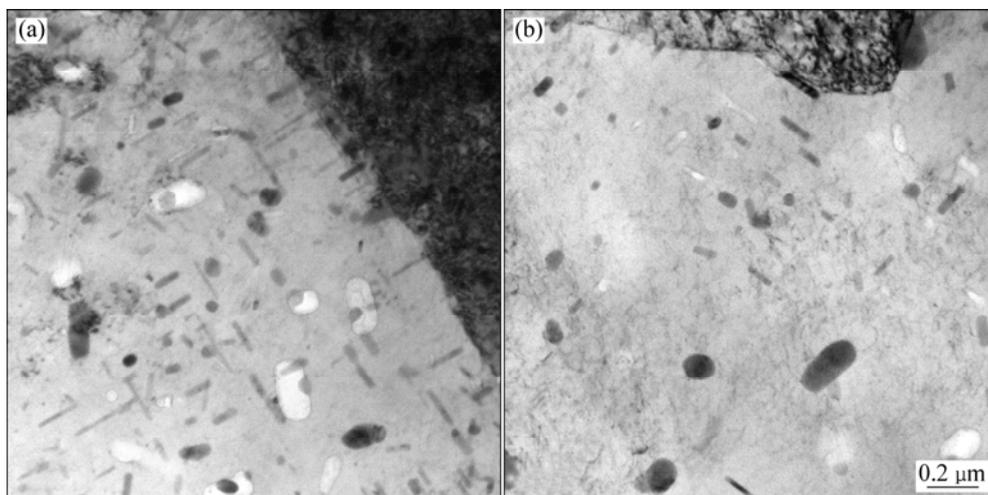


图5 合金的热机影响区的TEM像

Fig.5 TEM images of TMAZ of alloys: (a) Alloy 1; (b) Alloy 2

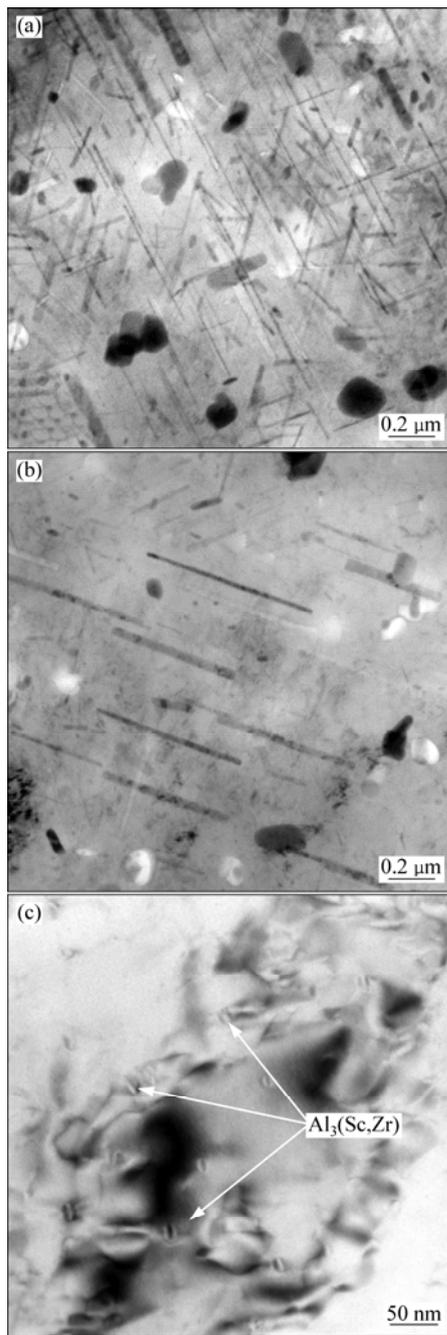


图6 合金的热影响区的TEM像

Fig.6 TEM images of HAZ of alloy joints: (a) Alloy 1; (b) Alloy 2

$Al_3(Sc,Zr)$ 粒子(见图6(c))。

### 3 分析与讨论

#### 3.1 搅拌摩擦焊接接头的显微组织

铝合金板材的搅拌摩擦焊接接头分为焊核区、热机影响区、热影响区和母材区。硬度测试实验结果

表明, 2种合金焊接接头各个区域的硬度分布趋势是一致的。

焊核区是焊接搅拌头直接搅拌的区域, 在搅拌摩擦焊接过程中, 晶粒发生严重塑性变形, 之后基体会发生动态再结晶, 从而形成特别细小的等轴再结晶晶粒组织。比较母材与焊核区TEM像可以看出, 合金母材晶内析出相在搅拌及焊接热的作用下发生破碎和溶解, 形成细小的弥散的球状粒子。焊核区由于固溶强化、细晶强化以及弥散强化, 硬度和强度相对较高。

热机影响区受焊接热作用和机械搅拌作用的影响, 热机影响区的晶粒组织发生弯曲变形, 由母材的细纤维组织变形为具有一定弧度的弯曲粗纤维组织。晶粒内部仍然保留着许多母材中的第二相 $MgZn_2$ 相, 只是 $MgZn_2$ 相在机械搅拌作用及焊接热的影响下也发生部分的剪切和破碎, 由针片状相破碎为短棒状。与此同时, 还观察到在晶粒内部存在着位错亚结构, 热机影响区由于固溶强化及位错亚结构强化, 仍然能保持较高的强度和硬度。

热影响区是受到焊接热的作用但没有受到机械作用影响的区域, 焊接热的影响相对焊核区与热机影响区都要弱。热影响区实际上经历了一个特殊的退火处理过程, 与母材相比, 热影响区内发生明显的晶粒长大(见图2), 晶内析出相 $MgZn_2$ 也明显粗化(见图6)。晶粒长大和析出相粗化对焊接接头带来不利的影响, 使得热影响区成为焊接接头的软化区域。

#### 3.2 微量钪对 Al-Zn-Mg-Zr 合金焊接接头显微组织的影响

金相显微分析结果表明, 添加微量钪的合金2的热机影响区、热影响区及母材的晶粒明显比合金1的相应区域的晶粒细小。这是由于单独添加Zr时, 合金在均匀化和热加工过程中析出的初生 $Al_3Zr$ 粒子为四方 $DO_{23}$ 型结构,  $a=0.4013\text{ nm}$ ,  $c=1.732\text{ nm}$ , 与基体成非共格关系。而复合添加Sc和Zr时析出的细小、弥散分布的 $Al_3(Sc,Zr)$ 复合粒子的晶格类型( $L_{12}$ )及晶胞尺寸与基体极为相似, 错配度非常小, 粒子呈马蹄型, 表明它们与基体共格, 与基体共格的析出粒子对晶界的运动具有强烈的钉扎作用, 可以很好地阻碍晶界的移动, 抑制晶粒长大, 从而实现晶粒细化的效果<sup>[14]</sup>。TEM像表明, 在添加微量钪的合金2的晶粒内部存在着大量细小、弥散分布的 $Al_3(Sc,Zr)$ 粒子, 在热影响区内仍然存在这种粒子。这是由于这种粒子与母材完全共格而具有非常高的热稳定性的缘故。对比2种合金焊核区的透射电子显微组织可以看出, 在添加微量钪的合金2的焊核区中弥散分布球形粒子的密度

比合金 1 的焊核区的高, 因此添加微量钪的合金 2 的焊核区的硬度也高(见图 1)。

### 3.3 微量钪对 Al-Zn-Mg-Zr 合金焊接接头力学性能的影响

焊接接头拉伸力学性能结果表明, 添加微量钪的合金 2 母材的抗拉强度和屈服强度要比不含钪的合金 1 的抗拉强度和屈服强度分别高 22 和 42 MPa, 且合金 2 的焊接接头的抗拉强度和屈服强度比合金 1 的分别高 19 MPa 和 33 MPa。这是因为在合金中添加微量钪元素之后, 在基体中会析出大量细小、弥散分布的马蹄状  $Al_3(Sc,Zr)$  粒子, 这种粒子与基体共格, 具有较高的热稳定性。一方面,  $Al_3(Sc,Zr)$  粒子对晶界的移动具有强烈的钉扎作用, 可以阻碍晶界移动从而抑制晶粒长大, 根据 Hall-Petch 公式可知, 晶粒的细化能显著提高金属的屈服强度, 许多焊接构件的强度设计是以屈服强度为参考的, 提高屈服强度即提高了材料的许用强度<sup>[15]</sup>。另一方面,  $Al_3(Sc,Zr)$  粒子对位错的运动具有强烈的钉扎作用, 从而提高合金的强度。由透射电子显微组织可知,  $Al_3(Sc,Zr)$  粒子在合金 2 的热影响区中仍然存在, 而热影响区是焊接接头的薄弱部位。由此可见, 合金 2 的母材以及焊接接头的强度的提高来源于添加微量钪导致的晶粒细化强化以及  $Al_3(Sc,Zr)$  粒子的析出强化。

## 4 结论

1) 微量钪使 Al-Zn-Mg-Zr 合金母材的抗拉强度和屈服强度分别提高了 22 MPa 和 42 MPa; 使其焊接接头的抗拉强度和屈服强度分别提高了 19 MPa 和 33 MPa。

2) 2 种合金搅拌摩擦焊接接头上的硬度分布规律基本一致, 焊核处硬度最高, 热影响区硬度最低。焊核处硬度的提高来源于搅拌摩擦引起的细晶强化、固溶强化以及第二相弥散强化, 热影响区硬度的降低主要是由于焊接热循环引起的析出相的粗化。

3) Al-Zn-Mg-Sc-Zr 合金母材及焊接接头强度的提高主要来源于  $Al_3(Sc,Zr)$  粒子钉扎晶界而抑制晶粒长大导致的晶粒细化强化以及  $Al_3(Sc,Zr)$  粒子的析出强化。

## REFERENCES

[1] DAWES C J. Introduction to friction stir welding and its development[J]. Weld Met Fabr, 1995, 63(1): 13-16.

[2] DAWES C J, THOMAS W M. Friction stir process welds aluminium alloys[J]. Weld J, 1996, 75(3): 41-45.

[3] THOMAS W M, NICHOLAS E D. Friction stir welding for the transportation industries[J]. Materials & Design, 1997, 18(4/6): 269-273.

[4] TAKESHI S. Recent development of friction stir welding—New solid state joining technology[J]. International Journal of Materials Product Technology, 2001, 2: 453-456.

[5] THOMAS W M, NICHOLAS J C, NEEDHAM J C. Friction stir butt welding: International patent application PCT/GB92/02203[P]. 1991

[6] YIN Zhi-min, JIANG Feng, PAN Qing-lin, et al. Microstructures and mechanical properties of Al-Mg and Al-Zn-Mg based alloys containing minor scandium and zirconium[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2003, 13(3): 515-520.

[7] YIN Zhi-min, PAN Qing-lin, ZHANG Yong-hong, JIANG Feng. Effect of minor Sc and Zr on the microstructure and mechanical properties of Al-Mg based alloys[J]. Mater Sci Eng A, 2000, 280(1): 151-155.

[8] JIANG Feng, YIN Zhi-min, HUANG Bai-yun, HE Yue-hui, CHEN Su-li. Homogenization and recrystallization of Al-6Mg alloys with and without Sc and Zr[J]. Journal of Rare Earths, 2004, 22(5): 600-603.

[9] PARKER B A, ZHOU Z F, NOLLE P. The effect of small additions of scandium on the properties of aluminum alloys[J]. Journal of Materials Science, 1995, 30(2): 452-458.

[10] DAIZEN W, CHIHIRO W, RYOICHI M, KAZUE T. Ostwald ripening of  $Al_3Sc$  particles in an Al-Mg-Sc alloy[J]. Journal of Japan Institute of Light Metals, 2005, 55(4): 169-174.

[11] SU J Q, NELSON T W, MISHRA R, MAHONEY M. Microstructure investigation of friction stir welded 7050-T651 aluminum[J]. Acta Materialia, 2003, 51(3): 713-729.

[12] 傅志红, 贺地求, 周鹏展, 胡爱武. 7A52 铝合金搅拌摩擦焊焊缝的组织分析[J]. 焊接学报, 2006, 27(5): 65-68.

FU Zhi-hong, HE Di-qiu, ZHOU Peng-zhan, HU Ai-wu. Structure investigation of friction stir welding of 7A52 aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(5): 65-68.

[13] WANG Sheng, LI Zhou. Microstructures and properties of welded joint of 7A52 alloy welded by the solder wire containing Sc and Zr[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2005, 28(3): 26-30.

[14] FILATOV Y A, YELAGIN V I, ZAKHAROV V V. New Al-Mg-Sc alloys[J]. Mater Sci Eng A, 2000, 280(1): 97-101.

[15] 唐仁政. 物理冶金基础[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997.

TANG Ren-zheng. The basis of physical metallurgy[M]. Beijing: Metallurgical Industry press, 1997.

(编辑 李艳红)