

doi: 10.3969/j.issn.1673-9833.2013.03.017

# 铝镁合金板材 MIG 焊接接头组织与性能研究

蹇海根<sup>1,2,3</sup>, 谢幸儿<sup>2</sup>, 尹志民<sup>3</sup>, 姜 锋<sup>3</sup>, 赵 毅<sup>3</sup>

(1. 湖南工业大学 冶金工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 银宇控股集团, 浙江 杭州 311255;  
3. 中南大学 材料科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘 要:** 通过拉伸、弯曲、硬度试验, 金相及透射电子显微分析等方法, 对铝镁合金板材熔化极惰性气体保护焊(MIG)焊接接头的力学性能和显微组织进行了研究。结果表明: 采用铝镁钎合金焊丝焊接铝镁合金板材时, 焊接效果良好, 且焊接接头具有较好的力学性能, 焊接强度系数达 85%; 显微硬度值在 84~104 之间, 其中焊缝中心硬度最低。通过添加微量 Zr 细化焊缝晶粒及其 Al<sub>3</sub>Zr 粒子的析出, 能显著改善焊接接头的力学性能和抗热裂性。

**关键词:** 铝镁合金; 熔化极惰性气体保护焊; 焊接接头; 微观组织

中图分类号: TG442

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2013)03-0079-05

## Study on Microstructure and Properties of MIG Welding Joint for Al-Mg Alloy Sheet

Jian Haigen<sup>1,2,3</sup>, Xie Xinger<sup>2</sup>, Yin Zhimin<sup>3</sup>, Jiang Feng<sup>3</sup>, Zhao Yi<sup>3</sup>

(1. School of Metallurgical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;  
2. Yinyu Holding Group, Hangzhou 311255, China;  
3. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Microstructure and mechanic properties of Al-Mg alloy sheet joint were investigated by tensile, bending and hardness tests as well as metallographic and transmission electron microscope analysis. The results show that the joint of Al-Mg alloy sheet welded with Al-Mg-Zr wire by MIG has good welding quality, and the welding joint has good mechanical properties with the welding strength coefficient of 85%. The hardness value of welded joint is within 84~104, of which the lowest is in weld center. Minor Zr can improve significantly the mechanical property and resistance thermal crack of welded joint, because of the fine grain strengthening and precipitation strengthening by Al<sub>3</sub>Zr.

**Keywords:** Al-Mg alloy; metal inert-gas welding; welded joint; microstructure

## 0 引言

由于铝合金具有质量轻、比强度高、抗蚀性强和易加工的优点, 其焊接结构在车辆、船舶、建筑、化工机械和宇航工业等领域获得了广泛应用<sup>[1-2]</sup>。铝镁合金为典型的非热处理强化铝合金, 当与适当成

分的填充焊丝配合时, 可焊性好、抗蚀性能强。但当 Mg 的质量分数大于 5% 时, 铝镁合金容易发生应力腐蚀, 通常通过添加 Mn 或 Cr 来改善其抗应力腐蚀性能<sup>[3-4]</sup>。为了细化焊缝晶粒和促进析出强化, 一般添加 Zr, Sc 等微量元素来改善焊缝组织和提高焊

收稿日期: 2013-01-27

基金项目: 湖南省教育厅科学研究基金资助项目(12C0049), 湖南工业大学自然科学研究基金资助项目(2012HZX29)

作者简介: 蹇海根(1980-), 男, 湖南衡阳人, 湖南工业大学讲师, 博士, 主要研究方向为新型铝合金研发,

E-mail: jianhaigen2001@163.com

接强度系数<sup>[5-6]</sup>。同时,为了防止常温时发生失效软化现象,焊接后可进行稳定化处理<sup>[7]</sup>。

目前,应用较广泛的铝合金焊接方法为熔化极惰性气体保护焊(metal inert gas welding, MIG),这种焊接是在氩、氮等惰性气体气氛中进行的。由于铝合金有熔点低、吸氢和线膨胀系数大等特点,如果焊接工艺不当很容易引起烧损,产生氧化膜夹杂及形成热裂纹等焊接缺陷<sup>[8-9]</sup>。为此,课题组采用自制的新型铝镁钼合金焊丝<sup>[10]</sup>对铝镁合金板材进行焊接,并对MIG焊接接头组织性能进行研究,一方面对铝镁钼合金焊丝质量进行焊接评价,另一方面也为该合金板材焊接结构在相关领域的实际应用提供技术参考。

## 1 试验

### 1.1 试验材料

试验用材料:厚度为8 mm的退火态铝镁合金板材作基材, $\Phi 1.6$  mm的配用焊丝。基材和焊丝的具体化学成分见表1。

表1 基材和配用焊丝化学成分  
Table 1 Chemical composition of the substrate and welding wire %

成分	Mg	Mn	Cr	Zr
质量分数 基材	6.00~7.00	0.30~0.70	0.10~0.20	0.10~0.20
质量分数 焊丝	5.20~6.20	0.30~0.70	0.10~0.20	0.10~0.20

成分	Ti	Fe+Si	Al
质量分数 基材	0.15	0.40	Bal.
质量分数 焊丝	0.15	≤0.40	Bal.

### 1.2 焊接参数及测试方法

焊接方法为MIG,保护气体为单一的体积分数为99.99%的Ar,接头形式为对接。按照GB985—1988《气焊、焊条电弧焊、气体保护焊缝坡口的基本形式与尺寸》要求,试件开60°V型坡口,具体如图1所示。焊接前对基材和焊丝进行油污及氧化膜清除,并进行焊前预热。焊接道次为3层4道,先进行反面焊接打底,机械焊缝清根处理后再进行填充,最后为2道盖面。MIG焊机型号为松下YD-400GE,焊接电流200 A,喷嘴直径16 mm,氩气流量19 L/min,焊接速度为600 mm/min。

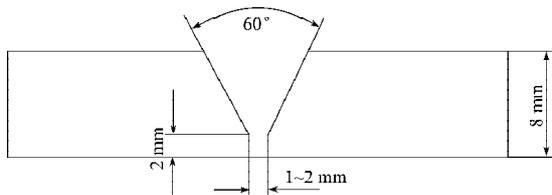


图1 焊接接头坡口形式

Fig. 1 Type of welding joint groove

焊后采用线切割方法截取接头试样进行性能测试和组织分析。焊接接头力学性能测试在长春试验机研究所生产的CSS-44100型万能测量试验机上进行,显微硬度测试在恒思盛大仪器公司生产的HVA-10A型低负荷维氏硬度计上进行。在焊接接头取样后先进行机械预磨、抛光,腐蚀后采用德国产POLYVER-MET金相显微镜进行金相组织观察,并利用FEI公司生产的TECNAI G<sup>2</sup> 20型场发射透射电子显微镜进行微观组织分析。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 宏观形貌观察

铝镁合金板材MIG焊接接头的宏观形貌如图2所示。由图可知,焊缝表面干净光洁,焊道直形且宽度均匀,成形良好,未见明显的裂纹、缩孔等焊接缺陷。

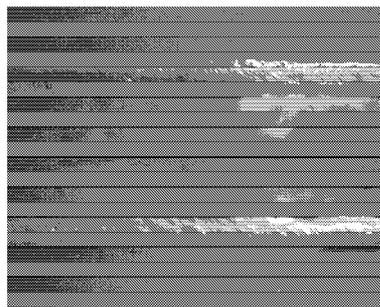


图2 焊接接头宏观形貌

Fig. 2 Macrograph of welded joint

### 2.2 力学性能试验

表2为焊接接头的室温拉伸力学性能结果,拉伸断裂后焊接接头断口形貌扫描结果见图3。

表2 焊接接头拉伸实验结果

Table 2 Tensile strength of welded joint

抗拉强度	屈服强度	延伸率	焊接强度	断裂
$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta$ /%	系数 /%	位置
288	164.5	13.5	85	焊缝区

注:焊接基材的力学性能参数 $\sigma_b=340$  MPa; $\sigma_{0.2}=177$  MPa; $\delta=18\%$ 。

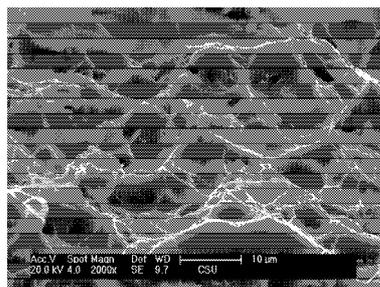


图3 焊接接头拉伸试验断口形貌

Fig. 3 Tensile fracture morphology of welding joint

由表2可知, 铝镁合金板材MIG焊接接头的抗拉强度约为基材强度的85%, 延伸率约为基材的75%。试样断裂的部位在焊缝区, 这是因为焊缝中心为典型的激冷结晶组织, 存在显著的组织不均和成分偏析, 导致接头焊缝成为最薄弱的区域。

由图3可知, 断口存在大量的韧窝, 且较光滑, 部分韧窝的底部可以清晰观察到析出相, 接头呈明显的韧性断裂。

从焊缝中心开始, 沿与焊接垂直方向每隔0.5 mm进行显微硬度测试, 测得合金焊接接头的显微硬度分布曲线, 如图4所示。

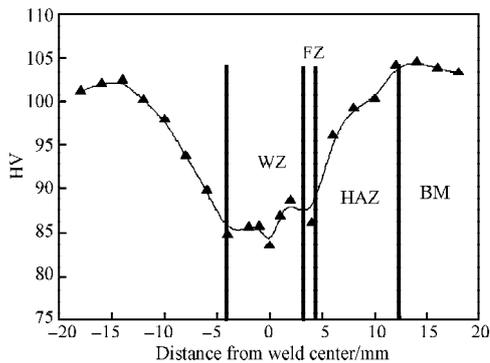


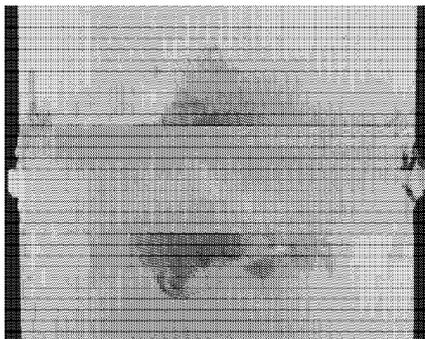
图4 焊接接头硬度分布曲线

Fig. 4 Hardness curve of welding joint

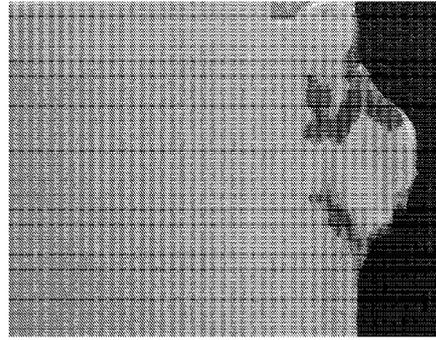
从图4可以看出, 焊接接头显微硬度值为84~104, 沿焊缝中心呈U字形对称分布。焊缝中心的硬度最低, 随着离焊缝中心距离的增加, 硬度值逐渐增大。在距离焊缝中心17 mm处, 硬度值与焊接基材 (base metal, BM) 接近。

### 2.3 渗透试验

为了检测焊缝表面缺陷, 利用某些液体的渗透性对焊接接头进行无损渗透检测。首先进行渗透清理, 去除表面油污、氧化皮熔渣、飞溅物等; 然后在焊缝处涂敷渗透剂, 渗透时间应足够长, 一般应大于10 min; 清除多余的渗透剂后涂敷显像剂, 涂层要求薄而均匀; 最后采用着色法进行观察, 其检测结果如图5所示。



a) 全貌



b) 局部

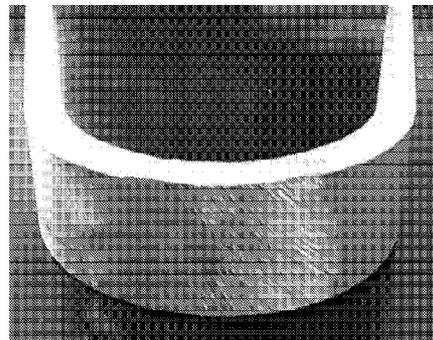
图5 焊接接头渗透试验结果

Fig. 5 Permeability test results of welding joint

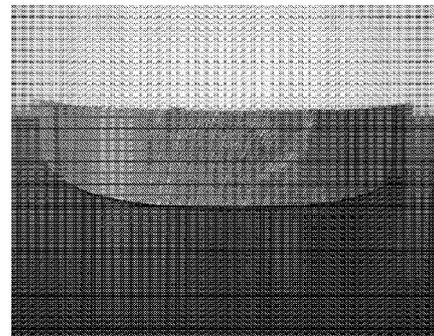
由图5可知, 焊缝的显像结果良好, 没有红色的线状和非线状缺陷显示, 只在焊接起弧和收弧位置存在红色显示, 这一部分需要裁切, 对焊接性能没有影响。根据机械工业联合会制定的JB/T 6061—2007《无损检测 焊缝磁粉检测》的标准, 该焊缝标准质量等级为1级。

### 2.4 弯曲试验

焊接接头弯曲试验按GB2653—2008《焊接接头弯曲试验方法》进行, 在试验前先去焊接余高, 弯芯直径为50 mm, 弯曲角度为180°, 其试验结果如图6所示。



a) 正弯



b) 反弯

图6 焊接接头弯曲试验结果

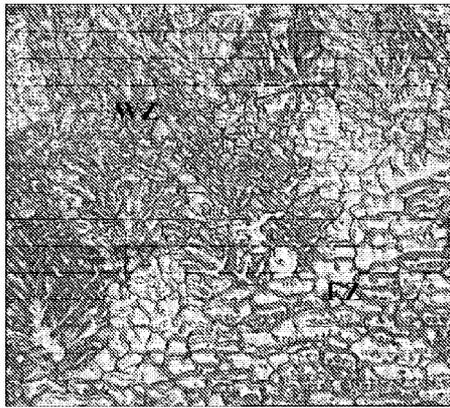
Fig. 6 Bend test results of welding joint

从焊接接头的正弯和反弯试验结果可以看出, 在弯曲表面的任何方向上均没有出现超过3 mm的裂

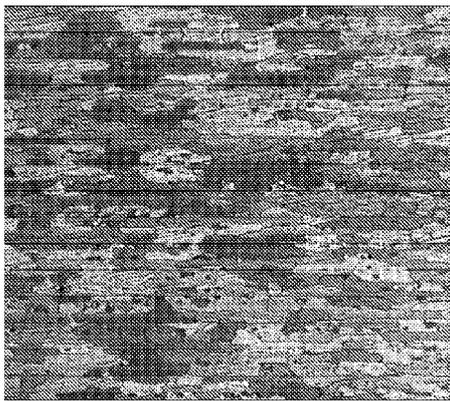
纹或其他明显缺陷,这表明焊接接头的塑性及焊缝与基材的结合强度很好,抗冷弯开裂性能好。

### 2.5 微观组织观察

焊接接头焊缝区(weld zone, WZ)、熔合区(fusion zone, FZ)及热影响区(heat affected zone, HAZ)3个不同区域的显微组织形貌如图7所示。



a) WZ 和 FZ



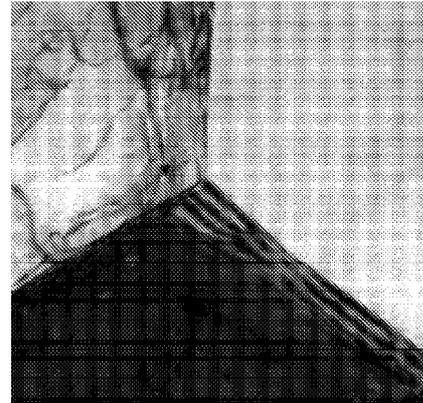
b) HAZ

图7 焊接接头显微组织形貌

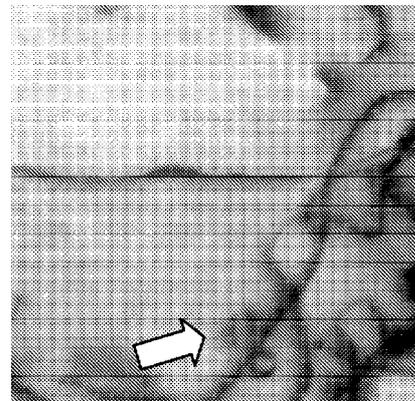
Fig. 7 Microstructure of welded joint

在焊接冷凝过程中,焊缝金属组织的过冷度随焊缝中心向外逐渐减小,焊缝区是典型的激冷结晶组织,主要由树枝状晶构成(图7a)。在焊接交界处周围的熔合区,由于位于固、液相线界面位置,熔池内液态金属与基体金属共存,靠近焊缝一侧晶粒大多为等轴晶晶粒,大小不均匀,并有少量沿散热方向生长大的柱状晶;靠近基材一侧组织为细小的等轴晶组织,晶粒大小较均匀。热影响区即为仅受到焊接热影响的基材,只出现晶粒长大和部分再结晶,且不同位置晶粒粗化的程度不一致,靠近熔合区晶粒粗化的程度较大(图7b)。

进一步对焊接接头焊缝区进行透射电子显微组织观察,其结果如图8所示。从图中可以看出,焊缝中心为典型的铸态组织,还可观察到少量马蹄形的初生析出相 $\text{Al}_3\text{Zr}$ 粒子(图8b中箭头所指处)。



a) 铸态组织



b)  $\text{Al}_3\text{Zr}$  粒子

图8 焊接接头 TEM 组织

Fig. 8 TEM microstructures of welded joint

由于焊接冷却过程很快,焊缝区得到的是典型的凝固组织,在焊接熔池金属非平衡凝固过程中析出初生的 $\text{Al}_3\text{Zr}$ 第二相粒子<sup>[11]</sup>。该粒子的晶格类型( $\text{Ll}_2$ )和晶胞尺寸与基体极为接近,较低的错配度也很容易成为非均匀形核质点,因此能得到很好的晶粒细化效果。初生析出相 $\text{Al}_3\text{Zr}$ 粒子的析出强化作用和高稳定性,能显著提高焊接接头焊缝的强度和韧性,并改善抗热裂的性能<sup>[12-13]</sup>。

## 3 结论

1) 采用自制的铝镁钎合金焊丝对铝镁合金板材进行MIG对接焊,可得到成形良好、性能达标的焊缝。焊接接头强度系数高达85%,伸长率约为基材的75%。接头区域显微硬度值为84~104,随着离焊缝中心距离的增加硬度值逐渐增大,其中焊缝中心硬度值最低,为焊接接头最薄弱的区域,拉伸试验呈韧性断裂。

2) 焊接接头焊缝中心为典型的铸态组织,主要由树枝状晶构成;熔合区主要为等轴晶晶粒和少量柱状晶;热影响区则出现晶粒长大和部分再结晶。微

量 Zr 的添加能细化焊缝晶粒, 且初生  $\text{Al}_3\text{Zr}$  粒子的析出强化作用和高稳定性, 能显著改善焊接接头的力学性能和抗热裂性。

#### 参考文献:

- [1] 肖亚庆, 谢水生, 刘静安, 等. 铝加工技术实用手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005: 639-642.  
Xiao Yaqing, Xie Shuisheng, Liu Jing'an, et al. Aluminum Processing Technology Manual[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005: 639-642.
- [2] 刘静安. 铁道车辆用大型铝合金挤压型材的开发应用[J]. 铝加工, 1995, 18(1): 16-23.  
Liu Jing'an. Development and Application of Large-Scale Aluminum Alloy Extruded Section for Railway Car[J]. Aluminum Fabrication, 1995, 18(1): 16-23.
- [3] 水野政夫. 铝及其合金的焊接[M]. 许慧姿, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1985: 68-74.  
Mizuno Masao. Aluminum and Aluminum Alloys Welding [M]. Xu Huizi, Translated. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1985: 68-74.
- [4] Jiang Feng, Yin Zhimin, Huang Boyun, et al. Homogenization and Recrystallization of Al-6Mg Alloys with and Without Sc and Zr[J]. Journal of Rare Earths, 2004, 22(5): 600-603.
- [5] 李绍禄, 潘青林, 陈显明. Sc 和 Ti 复合微合金化对 Al-Mg 合金组织与性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2003, 26(1): 11-15.  
Li Zhaolu, Pan Qinglin, Chen Xianming. Effect of Sc and Ti Additions on Microstructures and Tensile Properties of Al-Mg Alloys[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2003, 26(1): 11-15.
- [6] 何振波. Al-Mg (Sc, Zr) 合金焊接接头组织与性能试验研究[J]. 轻合金加工技术, 2006, 34(8): 44-47.  
He Zhenbo. Research on the Structure and Properties of Welding Joint for Alloy Al-Mg-(Sc,Zr)[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2006, 34(8): 44-47.
- [7] 姜锋, 赵娟, 蹇海根, 等. 焊后热处理对 Al-Mg-Sc 合金板材焊接接头组织与力学性能的影响[J]. 金属学报, 2008, 44(10): 1277-1280.  
Jiang Feng, Zhao Juan, Jian Haigen, et al. Influence of Post-Weld Heat Treatment on Microstructures and Mechanical Properties of Welded Joints for Al-Mg-Sc Alloy Sheets[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44(10): 1277-1280.
- [8] 包晔峰, 周昀, 吴毅雄, 等. 铝合金脉冲MIG焊动态特性自适应控制[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(7): 1126-1129.  
Bao Yefeng, Zhou Yun, Wu Yixiong, et al. Aluminum Alloys Pulsed MIG Welding Based on Dynamic Characteristic Self-Adaptation Control[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38(7): 1126-1129.
- [9] 李君峰, 齐彦庆, 李万锋. Al-Mg 合金 MIG 焊焊接缺陷及预防措施[J]. 化工机械, 2002, 29(3): 161-163.  
Li Junfeng, Qi Yanqing, Li Wanfeng. Weld Defects of MIG Welding of Al-Mg Alloy and Their Improvements[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2002, 29(3): 161-163.
- [10] 蹇海根, 谢幸儿, 单彪, 等. 铝镁钪合金焊丝制备工艺研究[J]. 湖南工业大学学报, 2013, 27(1): 81-85.  
Jian Haigen, Xie Xinger, Shan Biao, et al. Study on Preparation Process of Al-Mg-Zr Alloy Wire[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2013, 27(1): 81-85.
- [11] Yin Zhimin, Yang Lei, Pan Qinglin, et al. Effect of Minor Sc and Zr on Microstructures and Mechanical Properties of Al-Zn-Mg Based Alloys[J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2001, 11(6): 822-825.
- [12] Lathabai S, Lloyd P G. The Effect of Scandium on the Microstructure, Mechanical Properties and Weldability of a Cast Al-Mg Alloy[J]. Acta Materialia, 2002, 50(17): 4275-4292.
- [13] Filatov Y A, Yelagin V I, Zakharov V V. New Al-Mg-Sc Alloys[J]. Materials Science and Engineering:A, 2000, 280(1): 97-101.

(责任编辑: 邓光辉)