

TIG 填锌丝对接焊接镁铝异种金属

刘 飞, 张兆栋, 刘黎明

(大连理工大学 辽宁省先进连接技术重点实验室, 大连 116024)

摘 要: 采用普通 TIG 电弧作为焊接热源, 对镁铝异种金属进行填加锌丝的对焊试验. 并利用金相显微镜、电子探针 (EPMA)、万能力学性能拉伸机等现代分析手段对所得到的接头进行测试分析. 结果表明, 采用这种工艺得到了锌基的合金化焊缝, 实现了 6061 铝合金和 AZ31B 镁合金的连接, 焊缝主要由 $MgZn_2$ 和少量的铝、锌的固溶体构成, 焊缝和铝合金母材之间不存在明显的过渡层, 和镁合金母材之间有厚约 20 ~ 100 μm 的过渡层. 焊缝的硬度高于 6061 铝合金和 AZ31B 镁合金母材. 对接接头的抗拉强度达到 75 MPa.

关键词: 镁铝异种金属; 填锌丝对接焊; 微观组织; 力学性能; TIG

中图分类号: TG401 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2011)10-0049-04



刘 飞

0 序 言

由于镁合金比强度高、电磁屏蔽性好、易回收, 铝合金力学性能高、抗腐蚀性好, 因此镁合金和铝合金被广泛应用在航空航天、汽车交通、电子仪表等行业中^[1]. 实现镁合金和铝合金的焊接能发挥两种金属不同的使用性能. 因此采用合理的焊接工艺对镁铝异种金属进行焊接研究, 具有重要的理论意义和实际应用价值.

目前已有许多学者对镁铝异种金属的焊接性进行了研究. 结果表明, 镁铝异种金属采用热熔焊时, Al 元素向镁母材中的扩散较少, 而 Mg 元素易向铝母材中扩散形成扩散层, 扩散到铝母材中的 Mg 元素与铝形成 $Mg_{17}Al_{12}$, Al_3Mg_2 等金属间化合物, 致使扩散层成为接头的力学性能薄弱区^[2]. 镁铝异种金属采用爆炸焊时, 被焊材料结合面表面呈波浪形, 结合面有约 3.5 μm 扩散层, 其间夹有规则的熔融后凝固的颗粒, 所得到的接头抗剪强度为 70 MPa^[3].

镁铝异种金属采用搅拌摩擦焊搭接焊时, 搭接材料的上下板过渡区中包含有 $Al_{12}Mg_{17}$, Al_3Mg_2 和 Mg_2Si 等金属间化合物. 当采用较低的焊接速度时, 接头中不产生宏观裂纹, 强度比采用高速焊接时有所提高^[4]. 镁铝异种金属采用激光中间搭接焊时,

熔池的底部有一层金属间化合物层, 当改用边缘搭接焊时, 金属间化合物层减薄, 接头的抗拉强度提高^[5]. 从目前的报道可知, 无论是传统的 TIG 焊、扩散焊还是新兴的激光焊、搅拌摩擦焊, 焊接接头中都有金属间化合物生成, 这些金属间化合物严重降低接头的力学性能. 文中采用在焊接时填加锌丝, 形成以锌为主要成分的合金化焊缝, 避免镁铝的直接接触从而减少镁铝金属间化合物的生成, 提高了接头的力学性能, 为探索出更适合焊接镁铝的焊接工艺奠定基础.

1 试验方法

试验材料为直径 3 mm 的锌丝, 6061 铝合金和 AZ31B 变形镁合金板材, 其化学成分见表 1. 板材的尺寸为 100 mm × 50 mm × 1.7 mm.

试验前用砂纸去除镁板、铝板以及锌丝表面的氧化层, 用丙酮清洗掉板材和锌丝表面的油污. 板材开 120°V 形坡口, 对接形式见图 1. 焊接工艺参数为交流标准 TIG 焊, 焊枪与水平面倾斜角度约 45°, 电流 80 A, 焊接速度 400 mm/min, 普通氩气保护, 流量 16 L/min, 填丝速度约 400 mm/min.

焊后用线切割垂直于焊缝切取试样进行力学性能测试. 接头腐蚀后用金相显微镜观察接头的组织, 腐蚀液采用的是 5 g 苦味酸 + 10 mL 醋酸 + 10 mL 水 + 100 mL 酒精. 用 EPMA 的定量分析结合二次电子图像来分析焊缝中 Mg, Al 和 Zn 元素的分布

表1 试验材料的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of these experimental materials

	Al	Mg	Zn	Si	Cu	Fe	Mn
6061 铝合金	余量	0.80~1.20	0~0.25	0.40~0.80	0.15~0.40	0~0.70	0~0.15
AZ31B 镁合金	2.50~3.50	余量	0.50~1.50	0.10	0.05	0.005	0.20~0.50
锌丝	0~0.30	—	余量	0~0.03	—	0~0.04	—

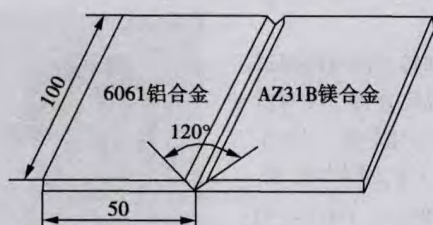


图1 试件尺寸及接头示意图(mm)

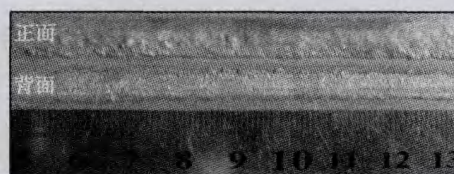
Fig. 1 Specimen size and schematic diagram of welding joint

位置和状态,定量分析所用电子束直径为 $1\ \mu\text{m}$.

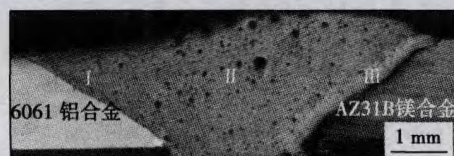
2 试验结果和讨论

2.1 焊缝的表面形貌和接头的宏观形貌

焊缝的正面、背面形貌和接头的宏观形貌如图2所示.由图2a焊缝的正面和背面成形可以看出焊缝表面成形连续,无明显的咬边.但焊缝正面有少量的凹陷,这是由于锌的熔沸点较低,焊接时锌的蒸发损失严重造成的.图2b是焊接接头的宏观形貌,可以看出焊缝中存在着零散分布的气孔,是焊接过程中锌蒸气没逸出焊缝所致.由于镁和铝的电导率不同,焊接时电弧向铝合金一侧微偏,铝合金一



(a) 焊缝的表面成形



(b) 焊接接头的宏观形貌

图2 焊缝的表面成形和焊接接头的宏观形貌

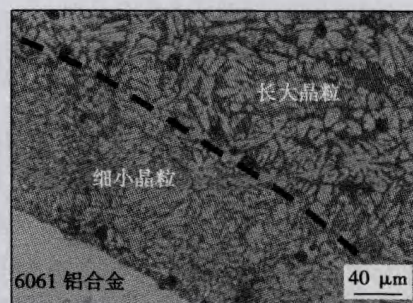
Fig. 2 Surface and cross-section appearance of weld seam

侧的锌丝蒸发损失更严重,导致铝合金侧的焊缝余高低于镁合金.

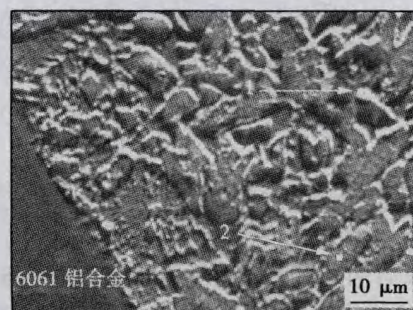
2.2 镁铝异种金属填锌对接焊接头微观组织特征

2.2.1 铝合金母材侧焊缝的微观组织特征

对图2b所示接头宏观形貌的铝母材侧、焊缝中心、镁母材侧分别进行放大来观察其微观组织特征.图3a为铝母材侧焊缝(图2b中I所示位置)的金相组织形貌.从图3a中可以看出,铝合金母材和焊缝没有明显的过渡层.靠近铝合金母材部位的焊缝散热较快,晶粒比较细小,约为 $10\sim15\ \mu\text{m}$;远离铝合金母材的焊缝晶粒有所长大,约为 $15\sim20\ \mu\text{m}$.图3b为与图3a相同部位的二次电子图像,图3b中标注点1处为枝晶间析出物,标注点2处为枝晶,其成分见表2.枝晶间的析出物主要含有Al和Zn两种元素,结合Al-Zn二元相图,枝晶间析出物为 α -Al和 β -Zn的复杂混合物.标注点2处的相根据其成分分析应该是 MgZn_2 .



(a) 铝合金母材侧焊缝的金相组织形貌



(b) 铝合金母材侧焊缝的EPMA二次电子像

图3 铝合金母材侧的金相形貌和 EPMA 二次电子像

Fig. 3 Weld metallographic morphology and EPMA secondary electron image near 6061

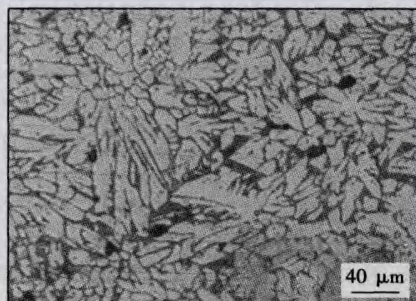
表2 二次电子图像中标注点成分(摩尔分数,%)

Table 2 Components of annotation points in secondary electron image

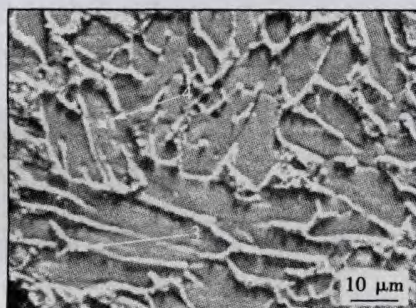
	Mg	Al	Zn	相组成
1	1.14	26.51	72.34	α -Al, β -Zn
2	30.01	2.02	67.97	MgZn ₂
3	7.65	18.15	74.20	α -Al, β -Zn, 少量 MgZn ₂
4	30.42	0.93	68.64	MgZn ₂
5	49.18	0.93	47.18	MgZn
6	53.16	3.42	43.42	γ -Mg, 少量 MgZn

2.2.2 焊缝中心的微观组织特征

图4a为焊缝中心(图2b中Ⅱ所示位置)的金相组织形貌,从图4a中可以看出焊缝中心主要有枝状晶组成,存在少量的气孔和夹渣.对比铝合金母材附近的焊缝,焊缝中心含有的晶间析出物比较少;焊缝中心枝晶约为30~40 μm ,比铝合金母材附近的枝晶尺寸大,这是由于焊缝中心冷却较慢,晶粒容易长大.图4b为焊缝中心的二次电子图像,图4b中标注点3处为枝晶间析出物,其成分和铝合金母材附近的枝晶间析出物成分不同,镁、铝含量增多,结合Al-Zn-Mg三元相图推测,此析出物是铝基固溶体(α -Al)及锌基固溶体(β -Zn)以及少量的MgZn₂.标注点4处枝晶成分与铝侧附近的枝晶成分接近,为MgZn₂.



(a) 焊缝中心的金相组织形貌



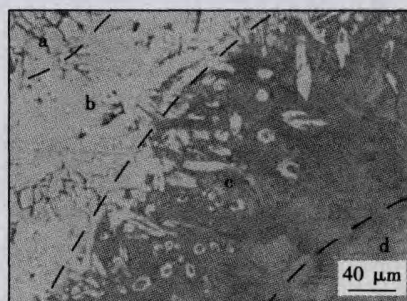
(b) 焊缝中心的EPMA二次电子图像

图4 焊缝中心的金相组织形貌和 EPMA 二次电子图像
Fig. 4 Weld metallographic morphology and EPMA secondary electron image in center of weld

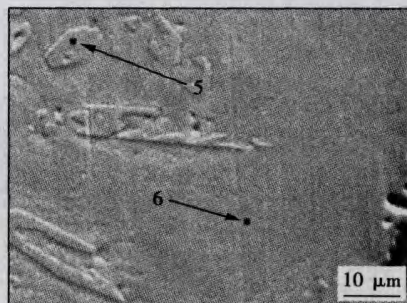
2.2.3 镁合金母材侧焊缝的微观组织特征

图5a为镁合金母材侧焊缝(图2b中Ⅲ所示位置)的金相组织形貌.焊缝和镁合金母材之间存在着厚约为20~100 μm 的过渡层.从图5a中可以看出从焊缝中心到镁合金母材依次为:a树枝晶,b胞状晶,c过渡层,d镁合金母材.其中树枝晶和胞状晶的成分接近相同,这种结晶状态的差异是由凝固时的过冷度不同造成的^[6].

图5b为图5a中c区局部的EPMA二次电子图像,标注点5处的颗粒主要含有Mg,Zn两种元素,其摩尔分数比接近1:1,为MgZn化合物,过渡层中零散分布着这种化合物颗粒.标注点6处的过渡层Mg元素含量升高,根据相图推测由镁的固溶体(γ -Mg)和MgZn化合物构成.从图5a中可以看出焊缝从上部到底部过渡层逐渐变窄,这是由于焊接时焊缝上部的金属高温区存在的时间比焊缝底部长,焊缝上部Mg原子扩散的时间较长造成的.



(a) 镁合金母材侧焊缝的金相组织形貌



(b) 镁合金母材侧焊缝的EPMA二次电子图像

图5 镁合金母材侧焊缝的金相组织形貌和 EPMA 二次电子图像
Fig. 5 Weld metallographic morphology and EPMA secondary electron image near AZ31B

由以上分析表明,焊缝主要由MgZn₂和少量的铝、锌、镁的固溶体构成.对比镁铝直接对接焊,没有大量镁铝金属间化合物的生成.由于镁铝金属间化合物会显著降低接头的力学性能^[7],此方法通过

引入 Zn 元素,形成了锌基的合金化焊缝,避免了镁铝金属间化合物的生成。

2.3 接头显微硬度和力学性能

对镁铝异种金属填锌焊对接接头的镁合金母材、焊缝和铝合金母材进行显微硬度测试,其硬度分布见图 6。测试采用 HVS-1000 维氏硬度计,载荷为 0.98 N,加载时间为 15 s。焊缝显微硬度明显高于两侧母材的显微硬度。铝合金母材侧的焊缝硬度比镁合金母材侧的焊缝硬度低。6061 铝合金和 AZ31B 镁合金母材的硬度差别不大,为 50~80 HV,镁合金母材侧的焊缝硬度最高达到 374.6 HV。

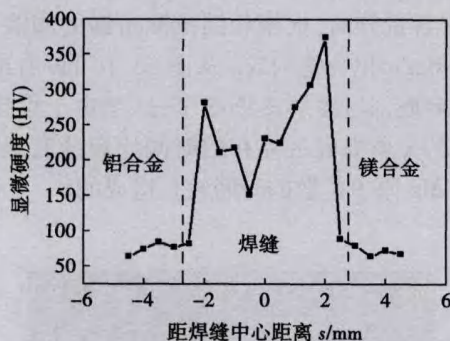


图 6 镁铝异种金属填锌焊接头的显微硬度分布
Fig. 6 Microhardness distribution of welded joint

对所得接头进行抗拉强度测试,强度为 75 MPa,远远高于镁铝直接采用热熔焊对接接头的强度^[2]。试样的拉伸接头断裂位置如图 7 所示,都靠近镁合金母材一侧。

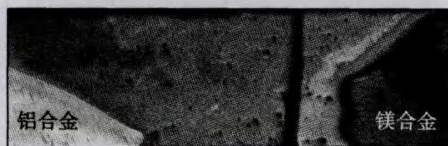


图 7 焊接接头的断裂位置
Fig. 7 Fracture locations of joints

3 结 论

(1) 通过填入锌丝实现了 6061 铝合金和

AZ31B 镁合金的连接,所得焊缝表面成形连续,接头抗拉强度达到 75 MPa。

(2) 焊缝主要由 $MgZn_2$ 和少量的铝、锌、镁的固溶体组成,没有大量的镁铝金属间化合物生成,焊缝与铝合金母材之间不存在明显的过渡层,与镁合金母材之间有厚约为 20~100 μm 的过渡层。

(3) 焊缝的硬度明显高于 6061 铝合金和 AZ31B 镁合金母材,且铝合金母材侧焊缝的硬度比镁合金母材侧焊缝的硬度低,断裂都发生在靠近镁合金母材的一侧。

参考文献:

- [1] 曾荣昌,柯伟,徐永波,等. 镁合金的最新发展及应用前景[J]. 金属学报, 2001, 37(7): 673-685.
Zeng Rongchang, Ke Wei, Xu Yongbo, et al. The latest developments and prospects of magnesium alloy[J]. Metallurgica Sinica, 2001, 37(7): 673-685.
- [2] 王恒,刘黎明,柳绪静. 镁铝异种材料 TIG 焊接接头扩散行为分析[J]. 焊接学报, 2005, 26(7): 5-8.
Wang Heng, Liu Liming, Liu Xujing. Diffusion behavior analysis of TIG welded joint between dissimilar materials Mg and Al[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(7): 5-8.
- [3] Yan Y B, Zhang Z W, Shen W, et al. Microstructure and properties of magnesium AZ31B-aluminum 7075 explosively welded composite plate[J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527(9): 2241-2245.
- [4] Chen Y C, Nakata K. Friction stir lap joining aluminum and magnesium alloys[J]. Scripta Materialia, 2008, 58(6): 433-436.
- [5] Rattana Borrisutthekul, Yukio Miyashita, Yoshiharu Mutoh. Dissimilar material laser welding between magnesium alloy AZ31B and aluminum alloy A5052-O[J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2005, 6(2): 199-204.
- [6] 黄积荣. 铸造合金金相图谱[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [7] Zhao L M, Zhang Z D. Effect of Zn alloy interlayer on interface microstructure and strength of diffusion-bonded Mg-Al joints[J]. Scripta Materialia, 2008, 58(4): 283-286.

作者简介: 刘飞,男,1986 年出生,硕士研究生。主要从事镁铝异种金属焊接技术研究。发表论文 1 篇。Email: liufei33733@163.com

通讯作者: 张兆栋,男,讲师。Email: skyeezd@dlut.edu.cn