

试验与研究

## Al/Mg 搅拌摩擦焊接接头组织及性能研究<sup>\*</sup>

李海宁<sup>1</sup>, 周 伟<sup>1,2</sup>, 华 鹏<sup>1</sup>, 王云龙<sup>1</sup>, 李先芬<sup>1</sup>, 李玉虎<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 材料科学与工程学院, 合肥 230009;

2. 南洋理工大学 机械与航空学院, 新加坡 639798)

**摘 要:** 针对 5052 铝合金/AZ31 镁合金, 进行了异种搅拌摩擦焊搭接试验, 通过宏观和微观分析、硬度和拉剪力测试探究了 Zn 中间层对于铝/镁搭接接头组织和性能的影响。结果显示, 焊缝搅拌区底部形成了厚度较均匀的金属间化合物 (intermetallic compounds, IMCs) 层, 未加 Zn 层时, IMCs 层由铝基体、尺寸较大呈条带状的  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  及网格状  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  化合物组成, 拉剪力为 3.9 kN, 断裂方式为解理脆性断裂; 加入 Zn 层后, IMCs 厚度随 Zn 中间层厚度的增加而增加, IMCs 层厚度最小为 330  $\mu\text{m}$ , 内部主要由网格状  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  组成, 网格状内部出现了小尺寸颗粒状的 Mg-Zn 以及 Al-Mg-Zn IMCs; 焊缝截面水平方向, 搅拌区硬度为 160HV, 垂直方向硬度值最高达 210HV, 拉剪力最大值为 4.79 kN。研究表明, 生成的 Mg-Zn 和 Al-Mg-Zn IMCs 是导致拉剪力较未加 Zn 层时提高 20% 的主要原因。

**关键词:** 搅拌摩擦焊; 5052 铝合金; AZ31 镁合金; Zn 中间层

中图分类号: TG406

文献标识码: A

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2022.02.004

### Research on Microstructure and Properties of Al/Mg Friction Stir Lap Welded Joints

LI Haining<sup>1</sup>, ZHOU Wei<sup>1,2</sup>, HUA Peng<sup>1</sup>, WANG Yunlong<sup>1</sup>, LI Xianfen<sup>1</sup>, LI Yuhu<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. School of Mechanics and Aeronautics, Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore)

**Abstract:** The dissimilar friction stir welding lap test was carried out for 5052 aluminum alloy/AZ31 magnesium alloy. The effect of Zn interlayer on the microstructure and properties of aluminum/magnesium lap joint was explored through macro and micro analysis, hardness and tensile shear test. The results show that the Intermetallic Compounds (IMCs) layer with uniform thickness is formed at the bottom of the weld stirring zone. Without Zn layer, the IMCs layer is composed of aluminum matrix, strip  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  and grid  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  compound with large size. The tensile shear force is 3.9 kN and the fracture mode is cleavage brittle fracture. After adding Zn layer, the thickness of IMCs increases with the increase of Zn interlayer thickness. When adding Zn, the minimum thickness of IMCs layer is 330  $\mu\text{m}$ . The IMCs layer is mainly composed of grid  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ , and there are small-size granular Mg-Zn and Al-Mg-Zn IMCs in the grid. In the horizontal direction of the weld section, the hardness of the mixing zone is 160 HV, the hardness value in the vertical direction is up to 210 HV, and the maximum tensile shear force is 4.79 kN. The results show that the generated Mg-Zn and Al-Mg-Zn IMCs are the main reasons for the increase of tensile shear force by 20% compared with that without Zn layer.

**Key words:** friction stir welding; 5052 aluminum alloy; AZ31 magnesium alloy; Zn intermediate layer

<sup>\*</sup> 基金项目: 安徽省自然科学基金资助项目 “铁素体耐热钢搅拌摩擦焊接接头组织演变和性能特征研究”(项目编号 1808085ME150)。

## 0 前 言

在轻量化技术的发展浪潮中,越来越多的轻质材料进入大众视野,如在汽车热交换器制造行业,通常采用铝管代替铜管以降低材料成本<sup>[1]</sup>。焊接作为焊管生产的一个重要环节,通常对焊管质量起着决定性的作用,传统的熔焊方法有电弧焊、激光焊等等,这些熔化焊接方法导致焊接过程温度高,容易在界面结合处生成大量连续的 IMCs 层,另外熔焊过程中气体未完全溢出就会产生气孔,如果存在应力,还会产生裂纹等缺陷,导致焊接质量较差。搅拌摩擦焊是英国焊接研究所(TWI)在二十世纪末发明的新型固相连接技术,是一种加工效率高且无有害气体产生的强塑性加工方法。其优势尤其适用于铝、镁等轻质合金的同种或异种焊接,为轻合金的工程结构制造领域开辟了新途径<sup>[2]</sup>。采用搅拌摩擦焊的方法连接轻质材料,同时加入中间层改善连接性能,在轻量化方面具有十分重要的意义与应用价值。李兴康等<sup>[3]</sup>通过搅拌摩擦焊成功实现了对 GIL 铝合金管的焊接,改善了铝合金管的搅拌摩擦焊工艺。于欢等<sup>[4]</sup>探究了焊接速度及 Hook 成形效果对 5A06 铝合金和 AZ31 镁合金搅拌摩擦焊的连接性能影响,适当的降低焊接速度能增大有效搭接厚度及有效搭接宽度,但焊接速度过低会导致 Hook 沟附近产生明显的金属化合物过渡层,导致过渡区开裂,使 Hook 沟处达到良好的冶金结合能提升拉剪性能。谢吉林等<sup>[5]</sup>利用搅拌摩擦焊-钎焊复合焊接方式探究 Zn 单质钎料对连接性能的影响。研究发现 Zn 可作为液态润滑剂,不仅对结合界面处有净化作用,促进冶金结合,也抑制了 Al-Mg 系 IMCs 的形成,用 Al-Mg-Zn 系 IMCs 取而代之,最大拉剪强度为 5.5 kN,提高了 10%左右。牛士玉等<sup>[6]</sup>通过超声辅助制备了带 Zn 中间层的铝镁搭接接头,研究发现外部超声可以增加接头的有效搭接宽度和有效板厚,Zn 中间层可以使接头的 Al-Mg IMCs 变为弥散分布的

Mg-Zn 及 Al-Mg-Zn IMCs,提高接头的拉剪力。Abdollahzadeh 等<sup>[7]</sup>研究了搅拌摩擦对接 6061 铝合金和 AZ31 镁合金中加入锌片的影响。发现微观组织以 Al-Mg-Zn、Mg-Zn 化合物及残余的 Zn 单质为主,消除了 Al-Mg 系 IMCs,其中焊缝强度由 141 MPa 提升至 175 MPa,断口形貌与不加锌层时基本一致。由此可见,IMCs 的种类、分布与尺寸与焊接接头性能密切相关。由于采用传统熔化焊接方法连接 Al/Mg 异种材料构件时,焊接温度较高,在 Al/Mg 界面处易生成 Al-Mg 系 IMCs,而搅拌摩擦焊属于固相连接,焊接过程中母材不发生熔化和凝固过程,为此完全避免了传统熔化焊中因材料熔化及凝固过程而带来的气孔、裂纹及合金元素烧损等问题,因此本研究采用搅拌摩擦焊方法,添加 Zn 中间层,连接铝镁合金,研究界面处 IMCs 分布规律以及 Zn 的作用机制。

## 1 试验材料及方法

本研究使用材料为 5052 铝合金和 AZ31 镁合金,化学成分见表 1。两种材料加工尺寸均为 75 mm×150 mm×3 mm,用于后续搭接试验及拉伸测试制样。使用的中间层材料是北京佳铭铝业公司生产的单质 Zn 箔,纯度为 99.99%,厚度分别为 20 mm、50 mm 和 100 mm。

试验前使用 W40、W20 砂纸对铝合金和镁合金板材表面打磨,目的是去除表面氧化膜,并用酒精、丙酮溶液清洗洁净,防止表层氧化膜及杂质影响搅拌摩擦搭接焊接质量。对 5052 铝合金及 AZ31 镁合金搭接区域进行标识,搭接区域长度为 30 mm,同时对 Zn 箔进行裁剪,尺寸为 30 mm×120 mm,并将 Zn 层置于经过标识的铝/镁搭接中间区域,其搭接方式如图 1 所示,采用铝板在上、镁板在下的搭接方式,利用工装夹具固定试样,防止其在焊接过程中因自身热膨胀系数大等造成焊接变形。

表 1 5052 铝合金及 AZ31 镁合金化学成分

材料	化学成分/%									
	w(Al)	w(Si)	w(Cu)	w(Mg)	w(Zn)	w(Mn)	w(Cr)	w(Fe)	w(Ca)	w(Ni)
5052	余量	≤0.25	≤0.10	2.2~2.8	≤0.10	≤0.10	0.15~0.35	≤0.40	—	—
AZ31	2.5~3.5	≤0.10	0.01	余量	0.6~1.4	0.2~1.0	—	微量	0.04	微量

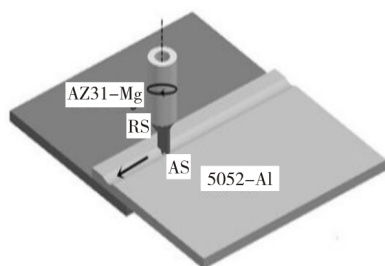


图1 铝板和镁板搭接方式示意图

采用 X53K 立式铣床改装成的搅拌摩擦焊接设备进行搭接焊试验, 搅拌头选择圆柱螺纹搅拌头; 搅拌针长度为 3 mm, 直径为 3 mm; 轴肩直径 17 mm, 倾角  $2.8^\circ$ ; 焊接旋转速度 950 r/min, 行进速度为 30 mm/min, 压下量为 0.7 mm; Zn 层厚度分别选择 0.02 mm、0.05 mm 和 0.07 mm。

焊接后, 使用 RXQ-2 型金相试样镶嵌机将切割后的接头试样进行镶嵌, 将镶嵌试样表面进行粗磨和细磨, 研磨完成后, 在 PG-2B 型抛光机上使用粒度为 W2.5 的水溶金刚石抛光膏进行抛光处理, 之后用超声波清洗仪清洗, 时间约为 10 min。金相腐蚀剂选用 10% 硝酸酒精溶液, 腐蚀时间为 10 s, 腐蚀结束后, 采用蔡司 Stemi305 型体视镜、江南 MR5000 光学显微镜、日立 SU8020 型场发射

扫描电子显微镜观察分析 Al/Mg 异种搅拌摩擦搭接界面宏观和微观组织特征。利用 VTD401 数显显微硬度计测量接头横截面的显微硬度, 载荷为 50 g, 加载时间为 10 s。依据 GB/T 228.1—2010《金属材料室温拉伸试验方法设计拉伸试样》, 拉伸试验在 CMT-5150 型万能力学试验机上进行, 拉伸试样尺寸如图 2 所示, 拉伸试验所采用的拉伸速率均为 0.5 mm/min。采用荷兰帕纳科公司生产的 X'Pert PRO MPD 型 X 射线衍射仪进行 XRD 试验。

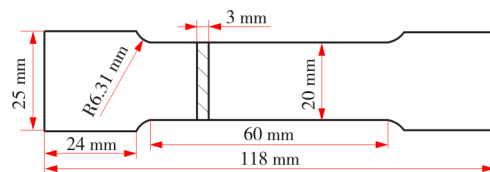
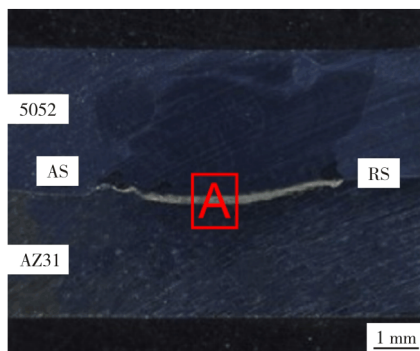


图2 拉伸试样尺寸示意图

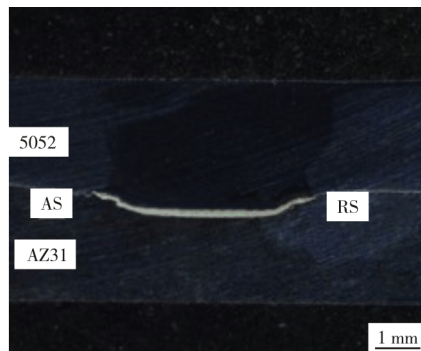
## 2 试验结果及分析

### 2.1 宏观形貌、微观组织及物相分析

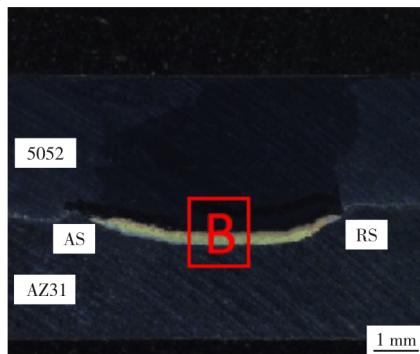
焊缝截面形貌如图 3 所示。加入 Zn 层后, 焊缝截面形貌较未加 Zn 层时无较大区别, 没有发现焊接缺陷, IMCs 层沿搅拌区底部分布, 厚度较为均匀。IMCs 层厚度统计如图 4 所示, 随



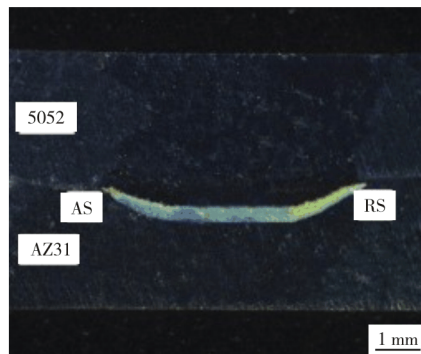
(a) 未加 Zn 层



(b) 0.02-Zn



(c) 0.05-Zn



(d) 0.07-Zn

图3 焊缝截面形貌

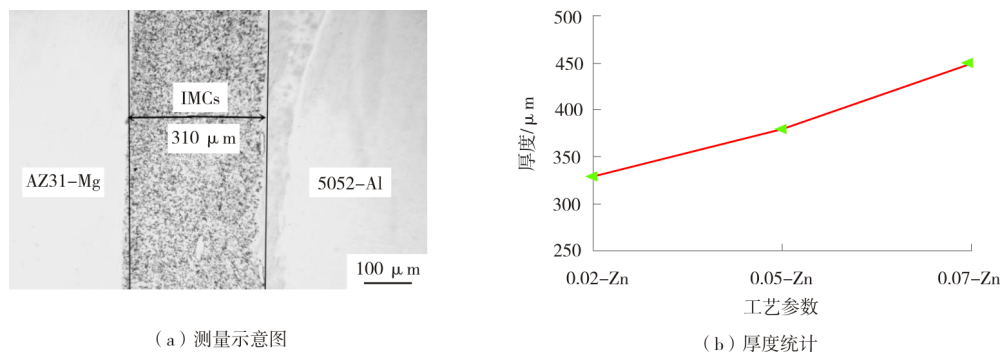


图 4 IMCs 层厚度统计

Zn 中间层厚度增加，焊缝中的 Zn 含量不断增加，界面处 IMCs 层的厚度不同程度地增大，一定程度上也反映了形成 IMCs 数量的变化。

对图 3 (a) 中 A 区域进行点分析，其 SEM 形貌如图 5 所示，分析结果见表 2。从图 5 可看出，未加 Zn 层时，IMCs 层 5 区域呈层片状的为  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$ ，IMCs 层 4、6 区域为 Al 基体，靠近铝侧的 3 区域呈长条状为  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  IMCs，靠近镁侧 2 区域呈网格状银白色结构为  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  IMCs，灰黑色部分 1 处为 Mg 基体。铝镁结合界面靠近铝侧铝含

量较高，更易形成层片状及长条状  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  IMCs，而靠近镁侧 Mg 含量较高，更易形成连续网格状  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  IMCs。尺寸较大的  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  IMCs 和尺寸较小的  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  IMCs 连续分布在搅拌区和热影响区底部边界处，组成图 4 (a) 中厚度约 310  $\mu\text{m}$  的 IMCs 层。根据镁铝二元相图，镁铝二元共晶反应式为  $\text{L} \rightarrow (\text{Mg}) + \gamma (\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}) - 450^\circ\text{C}$  以及  $\text{L} \rightarrow (\text{Al}) + \beta (\text{Al}_3\text{Mg}_2) - 437^\circ\text{C}$ ，搅拌摩擦焊过程中温度高于共晶反应温度，强烈的原子扩散本质上形成了液相，焊缝内部生成接近共晶成分的 Al-Mg IMCs。

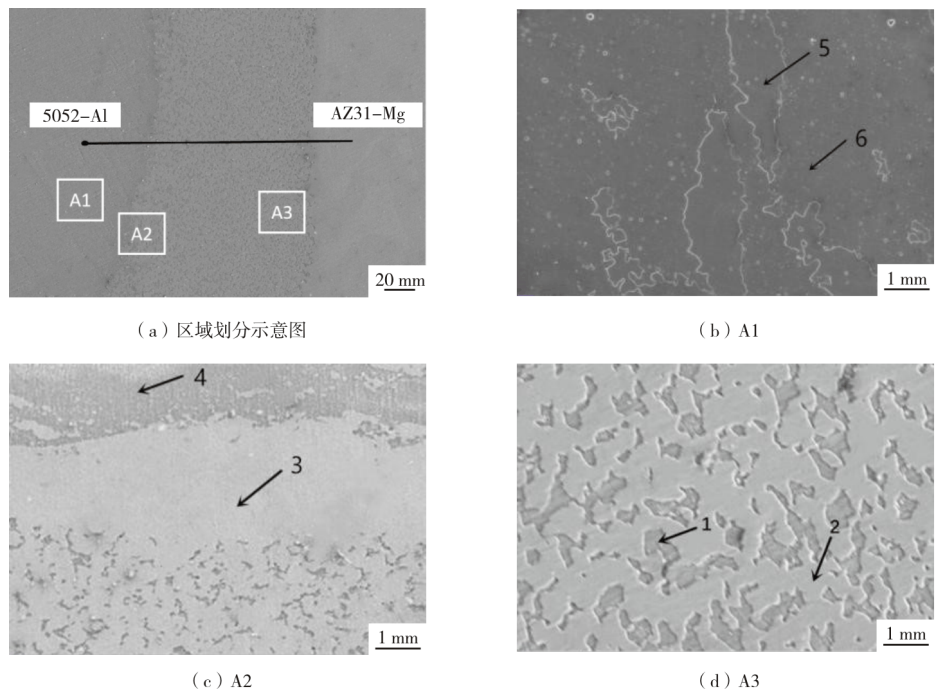


图 5 焊缝 A 区域 SEM 图及点分析图

表 2 A 区域点分析结果

区域	$w(\text{Al})/\%$	$w(\text{Mg})/\%$	相	区域	$w(\text{Al})/\%$	$w(\text{Mg})/\%$	相
1	9.33	90.67	Mg 基体	4	94.31	5.69	Al 基体
2	40.54	59.46	$\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$	5	68.88	31.12	Al+ $\text{Al}_3\text{Mg}_2$
3	61.27	38.73	$\text{Al}_3\text{Mg}_2$	6	95.72	4.28	Al 基体



对图 3 (c) 中 B 区域进行点分析, 其 SEM 形貌如图 6 所示, 点分析结果见表 3。1、7 区域为 Al 基体, 部分铝基体 (6 区域) 以块状形式流动到 IMCs 层边缘。铝侧部分区域 (2、8 区域) 可发现部分条带状  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  IMCs。在 IMCs 层的 B3 区域, 主要为断续网格状  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  IMCs (3 区域), 网格中分布着较大黑色块状  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}+\text{Al}-\text{Mg}-\text{Zn}$  混合物

(5 区域) 以及小颗粒  $\text{Mg}-\text{Zn}+\text{Al}-\text{Mg}-\text{Zn}$  混合物 (4 区域)。对比不加 Zn 中间层的点分析结果可知, IMCs 层靠近铝侧主要由铝基体及条带状  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  IMCs 组成, IMCs 层内部由网格状  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  组成, 加入 Zn 中间层后, 网格状内部出现  $\text{Mg}-\text{Zn}$  以及  $\text{Al}-\text{Mg}-\text{Zn}$  混合物, 小尺寸颗粒状  $\text{Mg}-\text{Zn}$  取代连续分布的  $\text{Al}-\text{Mg}$  IMCs, 均匀分布在搅拌区内部。

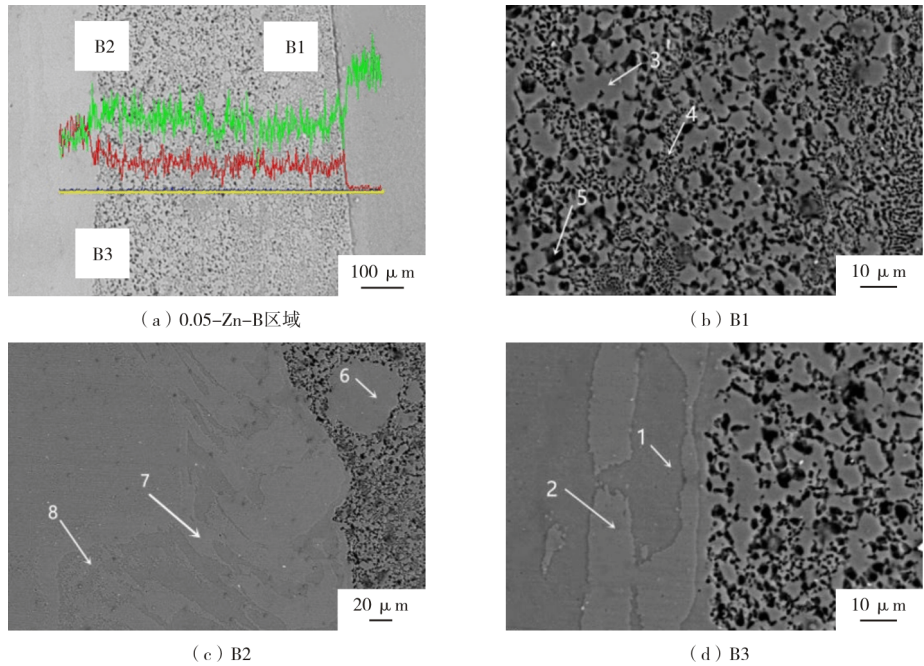


图 6 焊缝 B 区域 SEM 图及点分析图

表 3 B 区域点分析结果

区域	$w(\text{Al})/\%$	$w(\text{Mg})/\%$	$w(\text{Zn})/\%$	相
1	92.86	6.93	0.21	Al 基体
2	61.4	38.25	0.35	$\text{Al}_3\text{Mg}_2$ (条带状)
3	38.6	59.03	2.37	$\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ (断续网格状)
4	25.34	62.2	12.46	$\text{Mg}-\text{Zn}+\text{Al}-\text{Mg}-\text{Zn}$ (小颗粒状)
5	38.1	57.68	4.22	$\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}+\text{Al}-\text{Mg}-\text{Zn}$ (黑色块状)
6	93.35	6.35	0.3	Al 基体 (块状)
7	95.72	4.05	0.23	Al 基体
8	61.21	38.73	0.06	$\text{Al}_3\text{Mg}_2$ (条带状)

2.2 硬度及拉剪力测试

对上板中侧进行硬度测试, 水平方向由于测试距离不够长, 只包含了焊缝区和热影响区, 如图 7 所示。三组参数趋势相同, 都呈现了搅拌摩擦焊道典型 W 形的一部分, 焊缝搅拌区硬度在

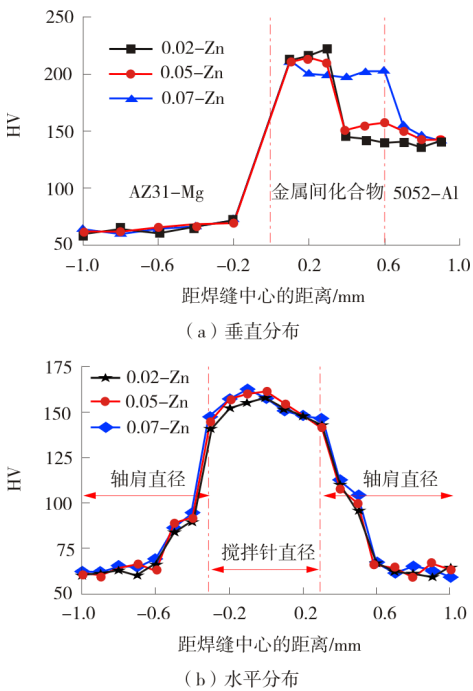


图 7 焊缝垂直及水平方向硬度分布

160HV 左右。垂直方向由镁部方向-过渡层-焊核区铝部进行,如图 7 (a) 所示,在过渡层,由于生成铝镁系 IMCs、Mg-Zn、Al-Zn 混合物,硬度为 210HV 左右。0.07-Zn 组高硬度点数显然多于其他两组参数,这也间接反映了 0.07-Zn 组过渡层的厚度大于其他两组。

拉剪测试结果如图 8 所示,未加 Zn 层时拉剪力最小,拉剪力最大值出现在 0.05-Zn 组,最大值为 4.79 kN。断口 XRD 分析如图 9 所示,出现了  $\text{MgZn}_2$ 、 $\text{Al}_6\text{Mg}_{11}\text{Zn}_{11}$  IMCs。添加 Zn 中间层后,由于焊接温度高于 Zn 的熔点,熔化的 Zn 在一定程度上增大了材料的流动性,显著改善了材料的交互行为。根据 Al-Mg-Zn 三元相图  $\text{L} \rightarrow \text{MgZn}_2 - 480^\circ\text{C}$  及  $\text{L} \rightarrow \text{MgZn}_2 + \text{Al}_6\text{Mg}_{11}\text{Zn}_{11} - 437^\circ\text{C}$  可知,生成的 Mg-Zn IMCs 以及 Al-Mg-Zn IMCs 是导致拉剪力较未加 Zn 层提高 20% 的主要原因。断口形貌如图 10 所示,由图 10 可知,未加 Zn 层时,铝侧呈现河流花样,镁侧存在撕裂棱,没有观察到韧窝的存在,分析其断裂方式为解理脆性断裂。加入

Zn 中间层后,断口形貌呈现解理台阶状,台阶上散落着一些小颗粒。

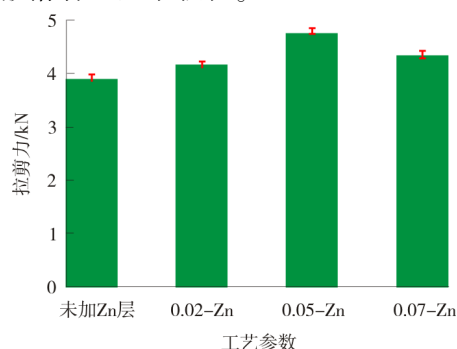


图 8 不同 Zn 中间层厚度接头拉剪数据柱状图

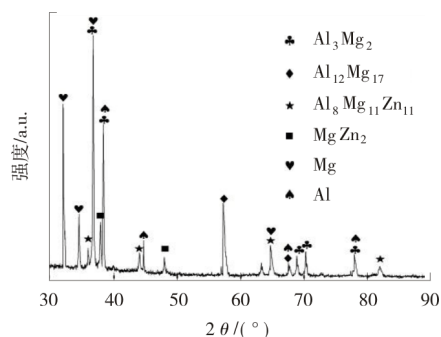


图 9 断口 XRD 测试图

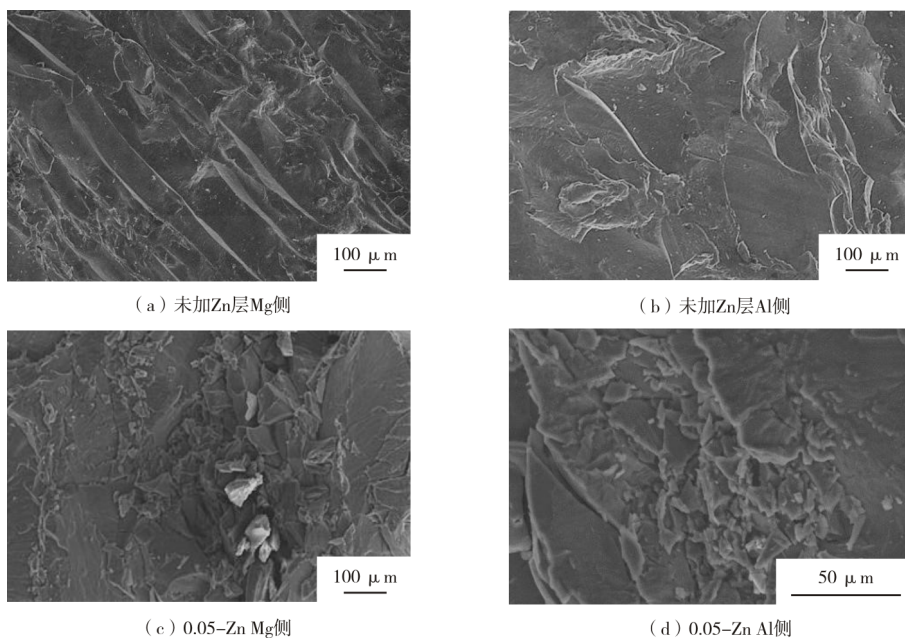


图 10 断口形貌图

### 3 结 论

(1) 将搅拌头旋转速度、焊接行进速度和压下量固定为 950 r/min、30 mm/min 和 0.7 mm,

当 Zn 层厚度变化时,焊缝表面均光滑无缺陷,焊缝微观冶金结合良好。

(2) IMCs 层沿搅拌区底部分布,厚度较为均匀。IMCs 层靠近铝侧主要由铝基体及尺寸较

大的条带状  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  化合物组成, IMCs 层内部主要由网格状  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  IMCs 组成, 加入 Zn 中间层后, 网格状内部出现了尺寸较小呈颗粒状的 Mg-Zn 以及 Al-Mg-Zn IMCs。随 Zn 中间层厚度增加, IMCs 层厚度增加, 加 Zn 时 IMCs 层厚度最小为 330  $\mu\text{m}$ 。

(3) 硬度水平方向分布呈现搅拌摩擦焊典型 W 形分布的一部分, 焊缝搅拌区硬度在 160HV 左右。垂直方向上, 过渡层硬度值达 210HV 左右。

(4) Zn 中间层对拉剪力数据影响较大。拉剪力最大值出现在 0.05-Zn 组, 最大值为 4.79 kN, 生成的 Mg-Zn IMCs 以及 Al-Mg-Zn IMCs 是导致拉剪力较未加 Zn 层时提高 20% 的主要原因, 断裂方式为解理脆性断裂。

#### 参考文献:

- [1] 贺继有, 李志强, 解剑英, 等. 特薄壁铝管高频感应焊焊接质量的影响因素分析[J]. 焊接技术, 2009, 38(4): 51-55.
- [2] 张琪. 汽车覆盖件用 6xxx 系铝合金板材的研究、产业化现状及发展趋势[J]. 有色金属加工, 2020, 49(1): 1-5.
- [3] 李兴康, 李秀坤, 刘围芹, 等. 搅拌摩擦焊焊接 GIL 铝合金管工艺适应性及使用性能分析[J]. 焊接技术, 2020, 49(S1): 123-126.
- [4] 曾浩然. 搅拌针形貌及辅助加热对铝/镁 FSW 焊缝成形的影响[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2019.
- [5] 谢吉林. 铝镁异种金属“搅拌摩擦焊—钎焊”复合焊接工艺研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2016.
- [6] 牛士玉. 基于添加 Zn 的 Mg/Al 异材 FSLW 接头成形和显微组织[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2019.
- [7] ABDOLLAHZADEH A, SHOKUH FAR A, CABRERA JM, et al. The effect of changing chemical composition on dissimilar Mg/Al friction stir welded butt joints using zinc interlayer [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018(34): 18-30.
- [1] 贺继有, 李志强, 解剑英, 等. 特薄壁铝管高频感应焊焊接
- [3] CHAPETTI M D, OTEGUI J L, MANFREDI C, et al. Full scale experimental analysis of stress states in sleeve repairs of gas pipelines[J]. International Journal of Pressure Vessels & Piping, 2001, 78(5): 379-387.
- [4] 陈安琦, 马卫锋, 任俊杰, 等. 高钢级管道环焊缝缺陷修复问题初探[J]. 天然气与石油, 2017, 35(5): 12-17.
- [5] 薛慧, 孔繁荣. X80 管线钢低氢焊条根焊技术[J]. 焊管, 2015(11): 41-43, 68.
- [6] 冯斌, 刘宇, 刘方明. X70 级管线钢焊接热裂纹模拟研究[J]. 焊管, 2009, 32(1): 15-20.
- [7] 高建文, 胡建春, 宋晞明, 等. X80 长输油气管道闪光对接焊技术研究[J]. 焊管, 2015, 38(10): 28-31.
- [8] 惠文颖, 牛健壮, 胡江锋, 等. 复合材料修复管体缺陷的影响因素[J]. 油气储运, 2017, 36(7): 805-810.
- [9] 庞平, 董绍华. 钢制套筒环氧补强缺陷修复技术开发与应用研究[J]. 管道技术与设备, 2019(4): 44-48.
- [10] 赵艳梅, 张文格, 王冰, 等. 压力管道应力分析的一般途径与可靠性讨论[J]. 压力容器, 2001(4): 61-63.
- [11] 王俊强, 何仁洋. 含缺陷管道复合材料修复后承压能力研究[J]. 压力容器, 2015, 32(9): 59-65.
- [12] 王勇军, 王鹏, 王峰会, 等. 含缺陷高压管道复合材料补强有限元模拟[J]. 压力容器, 2007(10): 13-16.
- [13] 胡秀. X80 管道含缺陷环焊缝的钢制环氧套筒修复研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2020.
- [14] 李翔. 环氧套筒修复技术研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2018.
- [15] 赵秀芳, 段宇航, 蒋毅. 环氧套筒用于环焊缝缺陷修复适用性研究[J]. 当代化工研究, 2020(14): 150-153.
- [16] 钱凌云, 刘全坤, 王成勇, 等. 厚壁圆筒自增强压力的优化分析[J]. 中国机械工程, 2012, 23(14): 100-105.
- [17] 徐芝纶. 弹性力学简明教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.

作者简介: 王尊勇 (1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为管道力学。

收稿日期: 2021-09-16

编辑: 罗 刚

(上接第 24 页)