

Zn 中间层对镁/钢搅拌摩擦搭接焊组织与性能的影响

沈小琨^{1,2,3} 赵一帆^{1,2,3} 万 葛^{1,2,3} 刘 省^{1,2,3} 胡心彬^{1,2,3}

(1.湖北工业大学材料与化学工程学院; 2.绿色轻工材料湖北省重点实验室;
3.车用轻质材料与加工湖北省工程实验室)

摘 要 对 AZ31B 镁合金板和 DP600 高强钢进行搅拌摩擦搭接焊试验,研究了旋转速度和添加不同厚度 Zn 箔中间层对镁/钢搭接接头宏观形貌、微观组织及力学性能的影响。结果表明,Zn 箔中间层的添加对镁/钢搭接接头强度有明显影响,接头剪切载荷随 Zn 箔中间层厚度和旋转速度的增大呈先增大后减小的趋势。当焊接速度为 80 mm/min、下压力为 0.1 mm、旋转速度为 900 r/min、Zn 箔中间层厚度为 0.05 mm 时,接头剪切强度达到最大值 104 MPa,此时接头断口表现为韧脆混合断裂。Mg 与 Zn 在镁/钢界面处发生反应生成 MgZn、MgZn₂、Mg₂Zn₃、Mg₂Zn₁₁ 金属间化合物。通过第一性原理计算 Mg-Zn 系金属间化合物的弹性常数及模量,结果显示此类化合物中除 MgZn 呈现较小的脆性外,其他均呈塑性。

关键词 镁合金;高强钢;搅拌摩擦搭接焊;中间层

中图分类号 TG146.22;TG113.25 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.012.011 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Influence of Zn Interlayer on Structure and Properties of Mg/Steel Friction Stir Lap Welding

Shen Xiaokun^{1,2,3}, Zhao Yifan^{1,2,3}, Wan Ge^{1,2,3}, Liu Sheng^{1,2,3}, Hu Xinbin^{1,2,3}

(1.School of Materials and Chemical Engineering, Hubei University of Technology;
2.Hubei Provincial Key Laboratory of Green Materials for Light Industry;
3.Hubei Engineering Laboratory of Automotive Lightweight Materials and Processing)

Abstract: Friction stir lap welding experiments between AZ31B magnesium alloy plate and DP600 high strength steel plate were carried out. The effects of rotation speed and addition of Zn foil intermediate layer with different thickness on the macro morphologies, microstructures and mechanical properties of magnesium/steel lap joints were investigated. The results indicate that the addition of Zn foil intermediate layer has significant effects on the strength of magnesium/steel lap joint, where the shear load of the joint is firstly increased and then decreased with the increase of the thickness of Zn foil intermediate layer and rotation speed. The shear strength of the joint reaches the maximum value of 104 MPa and presents a mixed ductile-brittle fracture mode when the welding speed, down pressure, rotating speed and thickness of Zn foil intermediate layer are set to 80 mm/min, 0.1 mm, 900 r/min and 0.05 mm, respectively. Mg reacts with Zn at the magnesium/steel interface to form MgZn, MgZn₂, Mg₂Zn₃ and Mg₂Zn₁₁ intermetallic compounds. The elastic constants and modulus of Mg-Zn intermetallic compounds are calculated by first principle method. The results reveal that most of these intermetallic compounds exhibit plastic behavior except for MgZn with minor brittle performance.

Key Words: Magnesium Alloy, High Strength Steel, Friction Stir Lap Welding, Intermediate Layer

收稿日期:2022-11-11;修改稿收到日期:2023-01-05

基金项目:中央引导地方科技发展专项资金资助项目(2019ZYD015)

第一作者简介:沈小琨,女,1999 年出生,硕士研究生,武汉(430068),E-mail:1402686981@qq.com

通信作者:胡心彬,男,1970 年出生,教授,武汉(430068),E-mail:huxbshu@163.com

引用格式:沈小琨,赵一帆,万葛,等. Zn 中间层对镁/钢搅拌摩擦搭接焊组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(12):1 647-1 653.
SHEN X K, ZHAO Y F, WAN G, et al. Influence of Zn interlayer on structure and properties of Mg/steel friction stir lap welding[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(12):1 647-1 653.

[13] 林涛,全晓军,郑平.连续冷冻铸造制备超长定向孔隙毛细芯[J].工程热物理学报, 2021, 42(11): 2 926-2 932.

[14] SAIKAEW C, WIENGWISSET S. Optimization of molding sand composition for quality improvement of iron castings[J]. Applied Clay Science, 2012, 67-68: 26-31.

[15] AOYAMA K, KATO T, KATO F. Development of frozen mold castings system at the bronze casting[J].Journal of Japan Foundry Engineering Society, 2014, 86(9): 734-738.

(编辑:彭瑾)

随着汽车轻量化的不断发展,同时也为了提高能源效率,轻质材料在汽车车身中的使用占比逐年提升^[1]。镁合金是最轻的金属结构材料之一,同时具有较高的比强度和易于回收利用等特点,被广泛应用于航天航空以及汽车制造业^[2-3]。镁合金与钢连接的混合结构可以将两种材料的优势充分利用,降低汽车车身质量。因此,对镁合金和钢之间的连接进行研究具有积极意义。

镁和钢在理化性能上具有很大的差异^[4]。镁是密排六方结构,钢在熔融态是体心立方结构,因此两者极难互溶。镁和钢的熔点相差巨大,因此很难同时以液相状态存在。从相图看出,Mg 和 Fe 之间没有金属间化合物产生,固溶度非常低。目前国内外焊接镁/钢主要采用电阻点焊^[5]和激光熔钎焊^[6]等方法。搅拌摩擦焊(Friction stir welding,FSW)是一种新型固相连接技术,与传统焊接方法相比,其作为固相焊,不会使材料发生熔化,焊接过程中热输入较低,可以避免大量金属间化合物以及气孔等缺陷产生,在解决异种材料性能差异大、焊接困难等方面具有很大优势,是比较理想的异种材料连接方法^[7]。CHEN Y 等^[8]采用无匙孔搅拌摩擦点焊 ZEK100 镁合金与 DP600 钢;KASAI H 等^[9]研究了不同的 Al 含量对镁/钢搅拌摩擦焊接头性能的影响。添加中间元素是增加镁/钢焊接质量的重要手段^[10-11]。REN D X 等^[12]在 MIG 搭接点焊中添加了 Cu 中间层来改善界面反应,发现 Cu 显著提高了镁/钢的润湿性,起到了熔化的钎焊作用及形成复合过渡层结合作用。FENG Y Q 等^[13]使用电阻点焊将热浸镀锌钢 Q235 做中间层焊接镀锌钢 DP600/AZ31 镁合金,发现熔化的 Q235 被挤出熔核并在外围形成焊接区,形成的密闭真空环境提高了接头的力学性能。PATEL V K 等^[14]、FU B L 等^[15]在镁/钢超声波点焊中,发现镀锌钢的镀锌层产生了 Mg-Zn 金属间化合物(Intermetallic compounds,IMCs)薄层。

本研究以车用 DP600 高强钢和 AZ31B 镁合金为对象,在镁上、钢下搭接条件下,在镁/钢中间添加 Zn 箔进行搅拌摩擦焊,通过对焊接接头的微观组织、力学性能进行分析,探索 Zn 箔中间层及焊接工艺对镁/钢搅拌摩擦焊接头力学性能的影响,旨在为其应用提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

采用尺寸为 300 mm×75 mm×2.5 mm 的 AZ31B 镁合金板和 300 mm×75 mm×2 mm 的 DP600 高强钢板,其化学成分见表 1。所用 Zn 箔为质量分数为 99.99%的高纯箔片,厚度为 0.01、0.05 和 0.1 mm。焊接前,将板材表面用砂纸打磨除去氧化层,并用无水乙

醇将板材和 Zn 箔片清洗干净。采用搭接焊接方式,镁合金板置于钢板之上,焊接示意图见图 1。焊接试样均通过 FSW-TS-S08 型搅拌摩擦焊机进行,搅拌头材质为钨铼合金,形状为圆台带螺纹,其中搅拌针长度为 2.8 mm,直径为 $\phi 6$ mm,轴肩直径为 15 mm,搅拌头倾斜角度为 2°。

表 1 AZ31B 镁合金和 DP600 钢的化学成分

Tab.1 Chemical composition of AZ31B alloy and DP600 steel %

材料	w_B							
	Zn	Al	Mn	Si	Cu	C	Mg	Fe
AZ31B	1.1	3.3	0.3	0.02	0.04	-	余量	-
DP600	-	0.03	1.3	0.44	0.02	0.09	-	余量

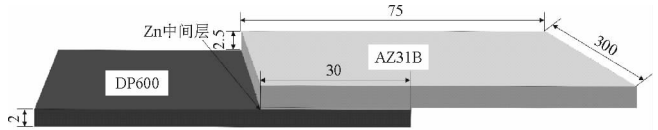


图 1 添加 Zn 箔中间层的镁/钢搅拌摩擦焊示意图

Fig.1 Schematic diagram of magnesium/steel friction stir welding with Zn foil intermediate layer

1.2 试验方法

在镁/钢搅拌摩擦搭接焊试验过程中,分别将 0.01、0.05 和 0.1 mm 厚的 Zn 箔置于镁板与钢板之间,焊接速率为 80 mm/min,下压量为 0.1 mm,旋转速率分别选用 600、900 和 1 200 r/min。焊后通过线切割机切取拉伸试样和金相试样,拉伸试样见图 2,每组工艺下取 3 个拉伸试样,用 CMT 型万能材料拉伸试验机进行力学性能检测,拉伸速率为 1 mm/min,取平均值。金相试样经过镶嵌处理后,依次通过 400、800、1500、2000 和 3000 号砂纸打磨后抛光,采用体积分数为 4%的硝酸酒精对钢侧金相试样进行腐蚀处理,腐蚀时间为 15 s,镁侧腐蚀试剂的成分配比为 6 g 的苦味酸+10 mL 的蒸馏水+10 mL 的乙酸+100 mL 的乙醇,腐蚀时间为 10 s。采用 GX51 型金相显微镜(Optical Microscope, OM)和 ZEISS Gemini 300 扫描电镜(Scanning Electron Microscope, SEM)分析接头焊缝区域的显微组织;采用牛津 Xplore 30 能谱分析(Energy Dispersive Spectroscopy,EDS)以及 D/max-2500pc 型 X 射线衍射仪(X-ray diffraction,XRD)分析接头物相的组成。

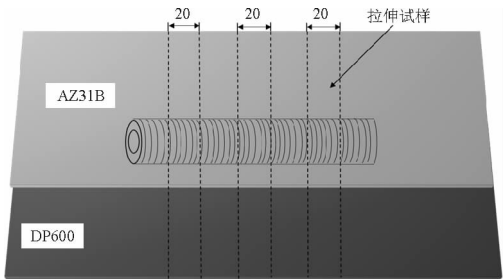


图 2 拉伸试样示意图

Fig.2 Schematic diagram of tensile specimen

2 试验结果与分析

2.1 接头宏观形貌及截面形貌

图 3 为 900 r/min 转速下试样的焊缝宏观形貌。可以看出,添加 Zn 箔后焊缝的飞边明显增多,且在添加 0.05 mm 厚 Zn 箔时,部分熔化的 Zn 在轴肩的压力

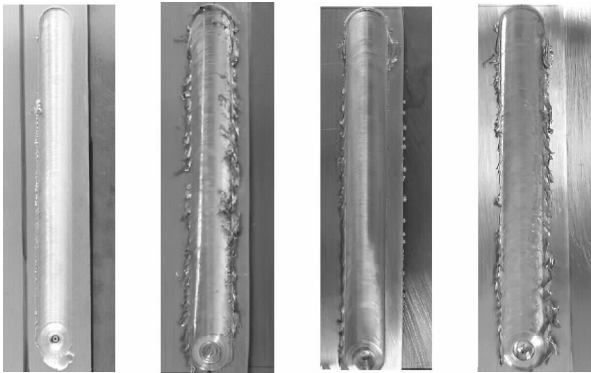


图 3 不同厚度 Zn 箔中间层下的镁/钢搅拌摩擦
搭接焊焊缝宏观形貌

Fig.3 Macro morphologies of magnesium/steel friction stir welding lap joints under Zn foil interlayer with different thicknesses

作用下被挤出焊缝冷却形成球状 Zn。添加 0.1 mm 厚 Zn 箔时,焊缝表面不平整,沟槽增多,是由于添加的 Zn 箔过厚,在焊接时熔化吸收热量,使得焊接前进过程热输入不足,母材流动性不足而未能平整填充焊缝。

不同工艺下的接头截面宏观形貌见图 4。可以看出,4 种工艺下的接头搅拌区(Stir zone, SZ)的形状各不相同,但是总体上呈碗状结构,主要差异在 hook 结构上。hook 结构的位置和形状大小影响着接头的有效搭接宽度(Effective lap width, ELW),进而影响着接头的力学性能。添加 Zn 箔的接头试样相比于无添加的接头试样 hook 结构更为明显,机械结合程度更高。从图 4e 与图 4h 可以看出,随着 Zn 箔厚度增加,hook 结构的形状有一定程度的增大,ELW 同时增加,这可能是 Zn 箔增大了搅拌过程中金属的流动性,使机械结合的效果更好。从图 4k 可以看出,其 hook 结构相较于图 4h 的更为细小,这可能是由于其所添加的中间层为 0.1 mm 厚的 Zn 箔,Zn 熔点为 419 ℃,在焊接过程中熔化吸收搅拌头对焊接板材的热输入,传递到钢侧的热输入减少,使钢在搅拌过程中的流动性降低,从而导致机械结合程度减弱。

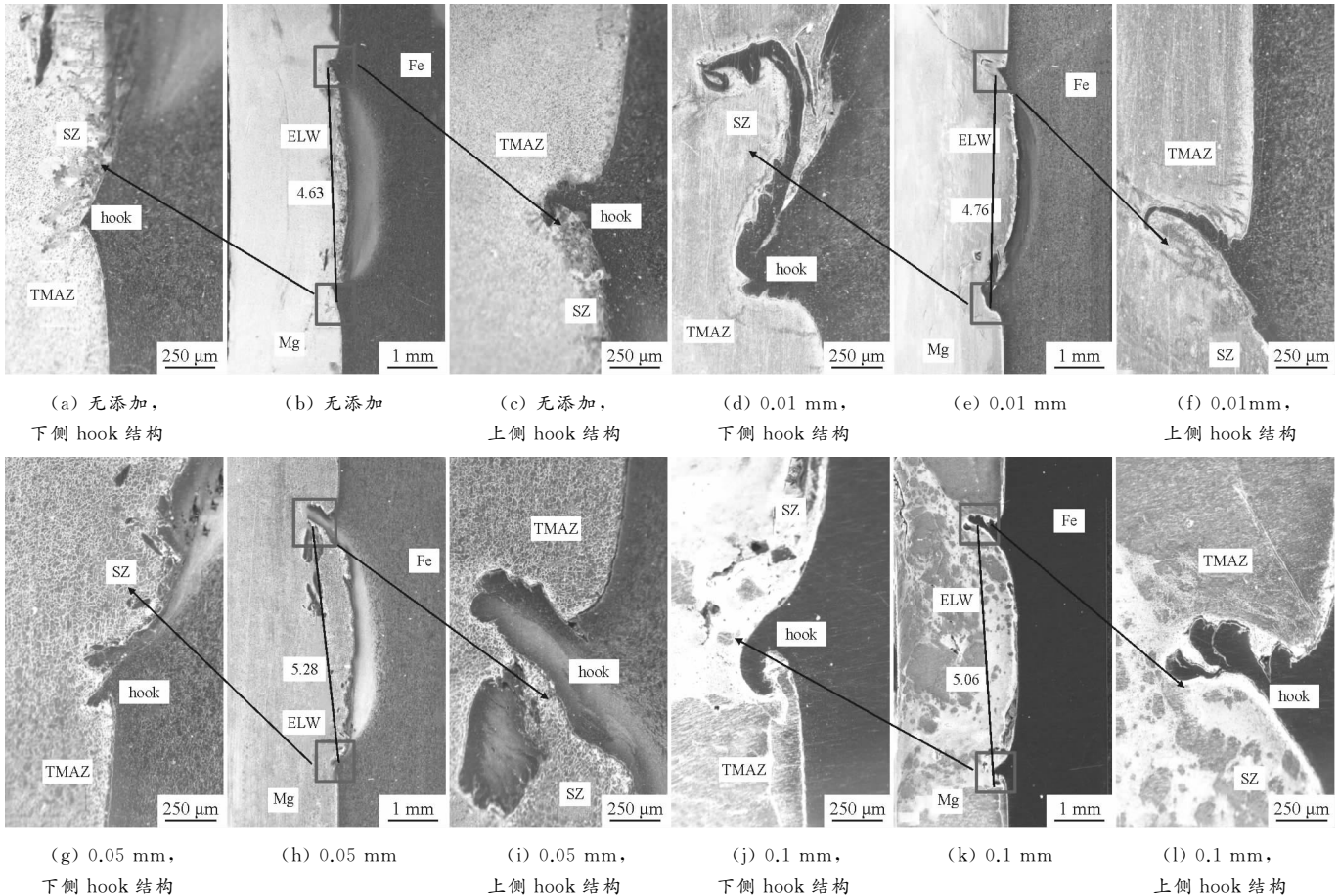


图 4 不同厚度 Zn 箔夹层下的镁/钢搅拌摩擦焊接接头截面宏观形貌

Fig.4 Macro morphologies of cross sections of magnesium/steel friction stir welding lap joints under Zn foil intermediate layer with different thicknesses

2.2 接头显微组织及物相

图 5 为无添加 Zn 箔接头试样的微观形貌。可以看出,在镁钢直接接触搅拌摩擦焊条件下,界面处没有过渡层或金属间化合物产生,接头呈机械结合。

图 6 为添加 0.05 mm 厚 Zn 箔中间层接头试样的微观形貌。可以看出,在搅拌区部分合金元素之间可能生成了新的金属间化合物。对左侧 hook 结构界面处的组织进行 EDS 点扫描,扫描位置见图 6b,其能谱结果见表 2。可以看出,点 1、点 2 和点 3 的组织为 Mg-Zn 系金属间化合物,中间层 Zn 箔在搅拌过程中,搅拌针的热输入使塑性状态的 Mg 与 Zn 相结合,以及少量的 Fe 通过搅拌针的螺纹,被卷入上层位置。图 6b 中 Mg-Zn IMCs 在界面 Mg 侧成网状结构存在。沿晶界均匀密布在接头界面各处,起到了提高接头力学性能的作用^[15]。相较于左侧 hook 结构区域界面处,Mg-Zn 系金属间化合物有一定程度的减少,见图 6c,这可能是在搅拌区中部热输入较大,Zn 箔熔化后部分被挤出中部区

域。对搅拌区中部界面处的镁侧组织进行 EDS 点扫描,扫描位置见图 6d,可见点 4、点 5 处 Fe 含量上升,这可能是中部钢通过搅拌针的搅拌,导致搅碎程度更高,通过螺纹被带入 Mg 侧,Fe 含量增高可以使这部分区域的硬度提升。

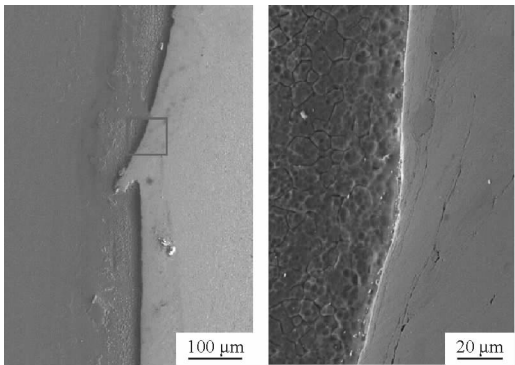


图 5 无添加 Zn 箔中间层接头试样的微观形貌

Fig.5 Micro morphology of joints without Zn foil interlayer

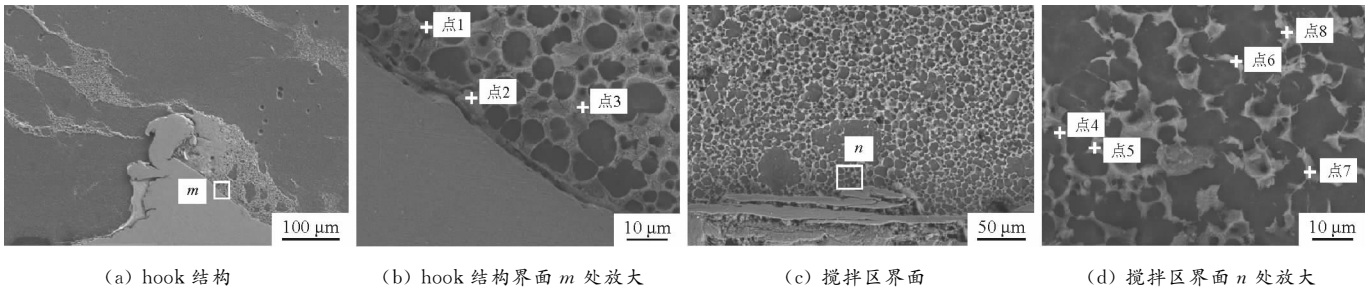


图 6 添加 0.05 mm 厚 Zn 箔接头试样微观形貌

Fig.6 Micro morphologies of joints after Zn foil addition with 0.05 mm

表 2 添加 0.05 mm 厚 Zn 箔接头试样 EDS 结果

点	$x_B/\%$				可能 相成分
	Mg	Zn	Al	Fe	
1	54.13	34.99	5.29	5.59	Mg-Zn
2	58.83	29.49	4.89	6.78	Mg-Zn
3	48.44	46.54	3.9	1.12	Mg-Zn
4	58.99	16.47	4.51	24.03	Mg 基体+Mg-Fe-Zn
5	60.14	24.49	4.09	11.27	Mg 基体+Mg-Fe-Zn
6	64.27	31.41	4.28	0.03	Mg-Zn
7	54.26	39.62	5.59	0.54	Mg-Zn
8	69.02	23.38	3.71	3.9	Mg 基体+Mg-Zn

图 7 为添加 0.05 mm 厚 Zn 箔中间层接头试样面扫描能谱图。可以看出,界面存在 Mg、Zn、Fe 均匀分布的冶金结合区域,熔融态的 Zn 与塑性状态的镁及钢母材发生了冶金反应,生成了网状的 Mg-Zn IMCs 均匀分布在 Mg 侧,与母材充分结合,且有少量 Fe 存在,提升了力学性能。界面处 Mg、Zn 大量结合,Fe 均匀分布在化合物之间,说明 Zn 的润湿作用将难以互溶的两种母材均匀结合,相比于镁/钢直接搭接焊,Zn 的存在起

到了改善金属塑性流动的作用,并与母材发生冶金结合,提升了接头的力学性能。

图 8 为不同转速下添加 0.05 mm 厚 Zn 箔中间层接头试样搅拌区中部界面处形貌,其示意图见图 9。从图 8a 可以看出,在 600 r/min 下,热输入相对较少,部分 Zn 在搅拌过程中未充分熔化,未与母材充分结合,在界面处形成的 Mg-Zn IMC 含量及均匀程度不高。在 900 r/min 下,界面处 Mg-Zn IMC 呈均匀密布的网状结构。在 1 200 r/min 时热输出过大,搅拌区部分 Zn 被轴肩的压力及搅拌针的高速旋转挤出,Zn 在搅拌区留存量减少导致 Mg-Zn IMC 形成较少,因此影响了接头的力学性能。从图 9 可以看出,随着旋转速度增大,Mg-Zn IMC 含量及均匀程度呈先增大后减少趋势。

图 10 为添加中间层前后接头试样镁/钢界面处的 XRD 分析图谱。可以看出,在无添加 Zn 箔中间层接头焊缝中只能检测到 Fe、Mg 两相,说明接头的连接主要为机械结合。添加了 Zn 箔的接头中生成了 MgZn、MgZn₂、Mg₂Zn₃、Mg₂Zn₁₁,使接头在机械结合的基础上

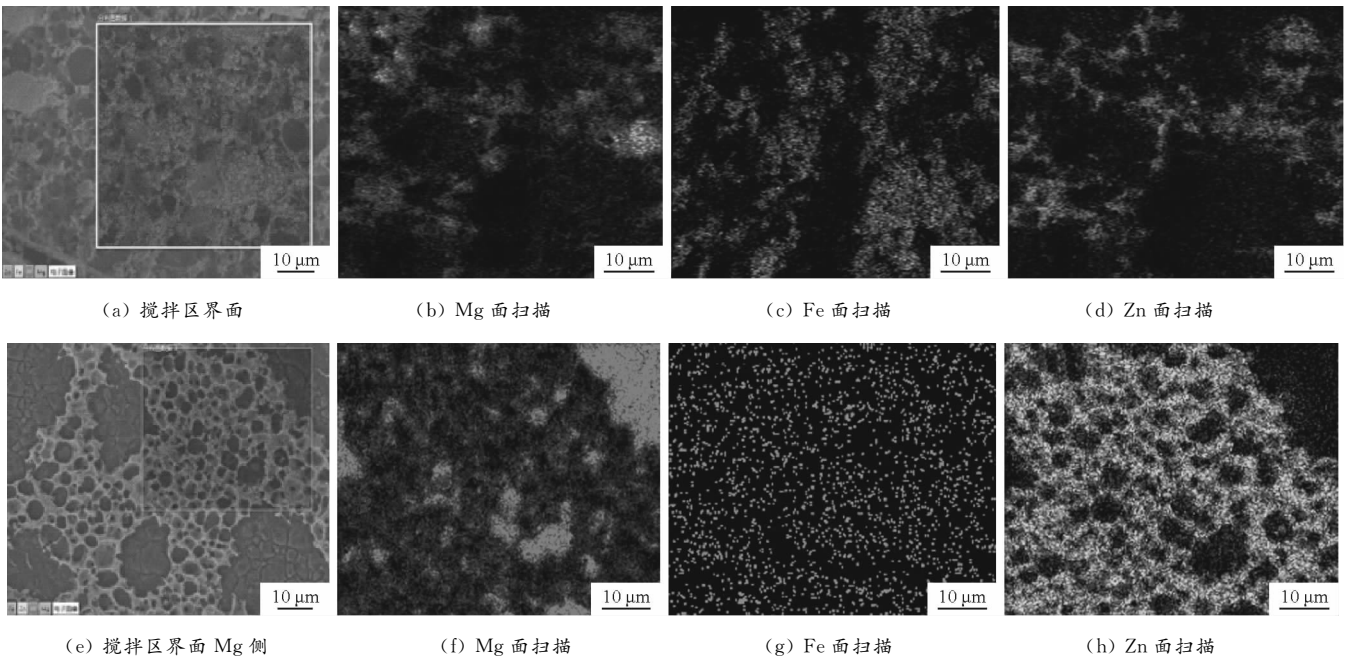


图 7 添加 0.05 mm 厚 Zn 箔中间层接头试样面扫描能谱图

Fig.7 Energy spectrum of joints after Zn foil interlayer addition with 0.05 mm

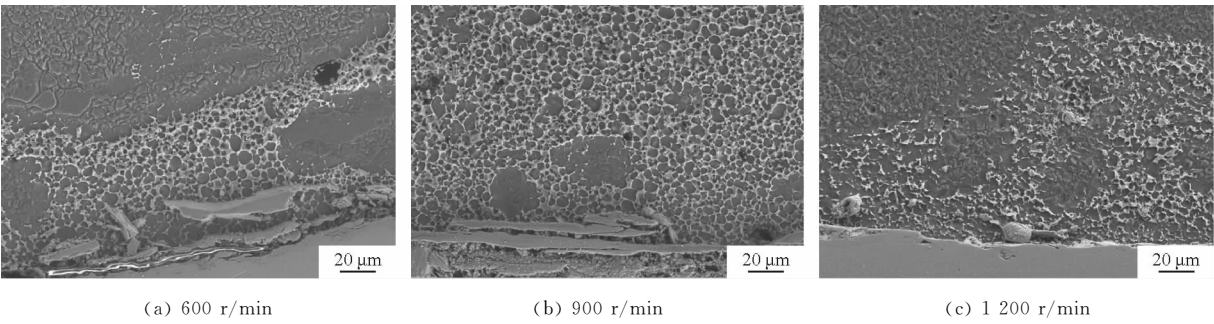


图 8 不同转速下添加 0.05 mm 厚 Zn 箔中间层接头试样搅拌区界面处微观形貌

Fig.8 Micromorphologies of joints at the interface in stir zone after Zn foil interlayer addition with 0.05 mm under different rotational speeds

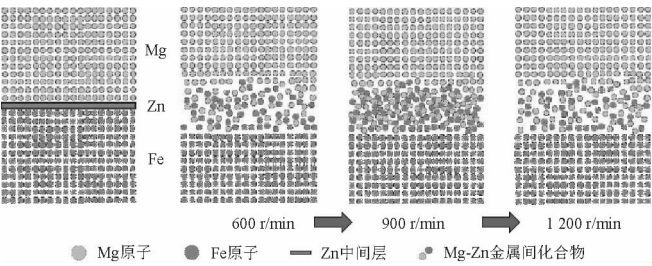
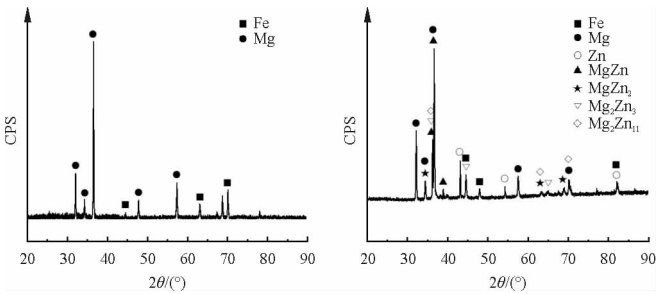


图 9 不同转速下添加 0.05 mm 厚 Zn 箔中间层接头界面示意图

Fig.9 Schematic diagram of joint interface after Zn foil interlayer addition with 0.05 mm under different rotational speeds

增加了 Mg-Zn 金属间化合物的冶金结合。

采用基于密度泛函理论的 Castep 程序包,分别优化了 MgZn、MgZn₂、Mg₂Zn₃ 和 Mg₂Zn₁₁ 的晶体结构并计算出弹性常数。MgZn、MgZn₂、Mg₂Zn₃、Mg₂Zn₁₁ 相的弹性常数见表 3。



(a) 未添加 Zn 箔中间层 (b) 添加 0.05 mm 厚 Zn 箔中间层

图 10 不同试样接头 X 射线衍射图谱

Fig.10 X-ray patterns of different specimens

表 3 弹性常数计算结果

Tab.3	Results of elastic constants						GPa
相	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₃₃	C ₄₄	C ₆₆	
MgZn	82.40	23.20	22.80	96.30	29.40	28.20	
MgZn ₂	93.60	80.70	17.60	140.90	25.60	6.50	
Mg ₂ Zn ₃	115.95	38.59	30.68	99.15	33.19	35.81	
Mg ₂ Zn ₁₁	119.40	42.40	42.40	119.40	34.50	34.50	

根据表 3 中弹性常数计算：

$$B = (C_{11} + 2C_{12})/3$$
$$G = (3C_{44} + C_{11} - C_{12})/5$$
$$E = 9BG/(3B + G)$$
$$\nu = (E - 2G)/2G$$

(1)

(2)

(3)

(4)

式中, B 为体积模量; G 剪切模量; E 为杨氏模量; ν 为泊松比, 计算结果见表 4。

表 4 模量及泊松比计算结果

Tab.4 Results of modulus and Poisson's ratio

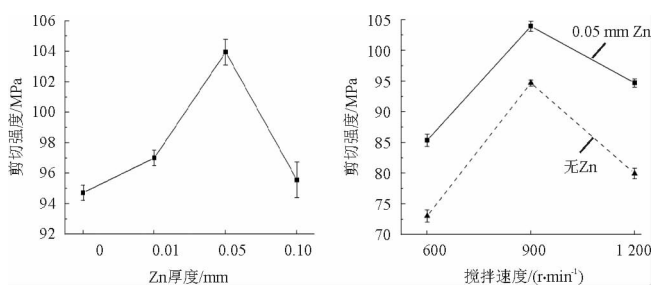
相	B/GPa	G/GPa	E/GPa	ν	G/B
MgZn	42.93	29.48	71.97	0.22	0.69
MgZn ₂	85.00	17.94	50.28	0.40	0.21
Mg ₂ Zn ₃	64.38	35.39	89.72	0.27	0.55
Mg ₂ Zn ₁₁	68.07	36.10	92.03	0.27	0.53

通常材料的硬度与其杨氏模量(E)和剪切模量(G)相关, 虽然不同材料的硬度与其弹性模量的关系不尽相同, 但是在一般情况下, E 值和 G 值越大, 材料的硬度越高^[16]。泊松比(ν)常用来评估材料结构抗剪切的稳定性参量, 其值越大, 对应材料结构的塑性越好。根据 G/B 可以判断材料的脆性与塑性, 当 $G/B < 0.57$ 时, 材料呈延性, 否则呈脆性。从表 4 可以看出, MgZn₂ 和 Mg₂Zn₁₁ 是塑性相, 有利于焊缝的力学性能改善, MgZn 是脆性相, 但脆性程度较低, MgZn₂、Mg₂Zn₁₁ 和 Mg₂Zn₃ 的存在可能使添加 Zn 箔的接头相对于无添加的接头的力学性能要好。

2.3 接头力学性能

图 11 为不同工艺下添加不同厚度 Zn 箔的搭接接头的剪切强度。可以看出, 添加 0.05 mm 厚 Zn 箔的接头剪切强度最高, 其次为 0.01 mm 厚 Zn 箔接头, 再次为 0.1 mm 厚 Zn 箔接头, 最后为无添加中间层接头, 这说明 Zn 箔中间层的添加对于镁/钢异种搅拌摩擦搭接接头的力学性能有所提升。随着 Zn 箔厚度提高, 接头力学性能提升的程度随之升高, 但 Zn 箔达到一定厚度后, 其对接头力学性能的提升效果变缓。从图 11b 可以看出, 在不同转速下, Zn 箔中间层的添加对接头的剪切强度都有所提升, 在 900 r/min 下接头的剪切强度达到

最高, 为 104 MPa。



(a) 900 r/min 下添加不同厚度 Zn 箔试样的剪切强度 (b) 不同转速下无添加 Zn 箔试样及添加 0.05 mm 厚 Zn 箔试样的剪切强度

图 11 不同工艺镁/钢搅拌摩擦焊接接头试样剪切强度
Fig.11 Shear strength of magnesium/steel friction stir welding lap joints under different processes

图 12 为添加 0.05 mm 厚 Zn 箔中间层接头试样的显微硬度测试结果, 其中 A 为镁侧, B 为界面处, C 为钢侧。可以看出, 接头镁合金侧显微硬度 ($\text{HV}_{0.1}$) 较低但是均匀性较好, 约为 65.9, 接头界面处硬度由于 Mg-Zn IMCs 的存在, 相比镁合金母材有所提升。钢侧的最高硬度 ($\text{HV}_{0.1}$) 约为 361.3, 高于母材的硬度。

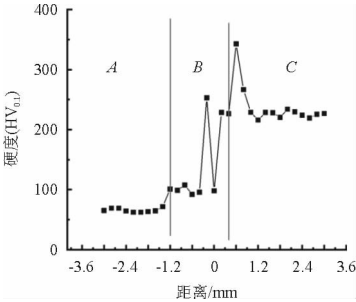
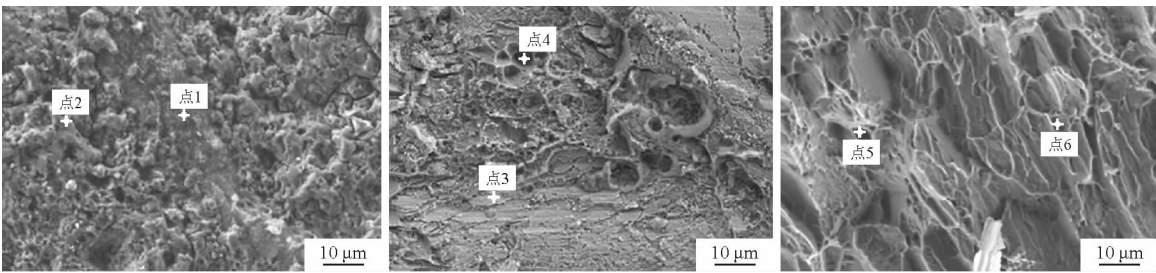


图 12 接头显微硬度分布曲线

Fig.12 Microhardness distribution curves of the joint

图 13 为添加 0.05 mm 厚 Zn 箔接头前后试样 SEM 断口形貌对应点扫描, 对应 EDS 数据见表 5。可以看出, 无添加 Zn 箔接头断口呈沿晶脆性断裂, 见图 13a。对断口位置点 1、2 进行 EDS 点扫描, 从表 5 看出, 在钢侧的断口没有形成 Mg-Fe 相, 接头没有形成冶金结合, 但存在 MgO 恶化接头性能。与无添加中间层接头断口相比, 添加 0.5 mm 厚 Zn 箔试样搅拌区出现部



(a) 无添加 Zn 箔接头 (b) 添加 0.5 mm 厚 Zn 箔试样搅拌区 (c) 添加 0.5 mm 厚 Zn 箔试样 Mg 侧热影响区

图 13 不同工艺接头试样 SEM 断口形貌

Fig.13 SEM fracture morphologies of joints under different processes

表 5 图 13 对应位置 EDS 结果
Tab.5 EDS results of points in Fig.13

序号	$x_B/\%$					可能相组成
	Mg	Zn	Al	Fe	O	
1	2.39	0.12	0.85	96.64	—	Fe
2	37.12	0.43	2.83	20.57	39.05	MgO+Fe
3	66.72	27.97	3.86	1.45	—	Mg+MgZn
4	49.53	45.53	3.20	1.62	0.12	MgZn
5	52.20	43.56	4.15	—	0.09	Mg-Zn
6	42.84	53.11	2.89	1.16	—	MgZn+MgZn ₂

分韧窝,断裂模式为韧脆混合断裂,见图 13b。对断口位置点 3、4 进行 EDS 点扫描可以看出,接头搅拌区存在一些 MgZn 相,形成部分韧窝,使得添加 Zn 箔后接头力学性能提升。在热影响区断裂的断口呈现大量的韧窝状形貌,断裂模式主要为韧性穿晶断裂,且韧窝平均直径要比搅拌区韧窝大,见图 13c,说明热影响区处韧性要比搅拌区处韧性更好。点扫结果显示,热影响区可能存在 MgZn、MgZn₂ 以及其他 Mg-Zn IMCs,使得热影响区断口出现大量韧窝。

3 结 论

(1)添加 Zn 箔中间层的试样相比于无添加中间层的试样 hook 结构更为明显,有效搭接宽度更大,机械结合程度更高。

(2)在添加 Zn 箔中间层后,Zn 能与 Mg 在焊接过程中形成多种改善接头性能的 Mg-Zn IMCs,提升界面处的硬度,在机械结合的基础上形成部分冶金结合,提升接头的强度。

(3) Zn 箔的厚度对接头的力学性能有影响,0.05 mm 厚的 Zn 箔对接头的力学性能提升最大,在 Zn 箔厚度增至 0.1 mm 后,其对接头力学性能提升的效果不明显。随着旋转速度提升,Mg-Zn IMCs 在界面处的均匀程度及含量呈先提升后减少的趋势,力学性能随之变化,在 900 r/min,添加 0.05 mm 厚 Zn 箔的工艺下,接头剪切强度达到最大,为 104 MPa。

参 考 文 献

[1] 万葛,蔡达,赵一帆,等. 锌锡复合合金化对镁/铝 FSLW 组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(12): 1 478-1 484.

[2] WAHBA M, KATAYAMA S. Laser welding of AZ31B magnesium alloy to Zn-coated steel[J]. Materials & Design, 2012, 35: 701-706.

[3] SUBRAVEL V, ALAGAPPAN N, BABU N. Influence of arc oscillation frequency on tensile properties and microstructural characteristics of magnetic arc oscillation welded AZ31B magnesium alloy joints[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 22: 606-613.

[4] SONG G, LI T T, YU J W, et al. A review of bonding immiscible

mg/steel dissimilar metals[J]. Materials, 2018, 11(12): 2 515-2 539.

[5] LIU L, XIAO L, CHEN D L, et al. Microstructure and fatigue properties of Mg-to-steel dissimilar resistance spot welds[J]. Materials & Design, 2013, 45: 336-342.

[6] 谭哲,刘金水,周皓武,等. 钢/镁异种金属搭接添加 Sn 箔激光熔焊接头的微观组织分析[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 176-181.

[7] 郑博,赵丽,董仕节,等. AZ31B/6061 异种合金搅拌摩擦焊接头界面组成相与第一性原理计算[J]. 热加工工艺, 2019, 48(9): 238-241, 244.

[8] CHEN Y, CHEN J, SHALCHI A B, et al. Microstructures and properties of Mg alloy/DP600 steel dissimilar refill friction stir spot welds[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2015, 20(6): 494-501.

[9] KASAI H, MORISADAY, FUJII H. Dissimilar FSW of immiscible materials: steel/magnesium[J]. Materials Science and Engineering, 2015, 624: 250-255.

[10] ZHENG B, ZHAO L, LV Q Q, et al. Effect of Sn interlayer on mechanical properties and microstructure in Al/Mg friction stir lap welding with different rotational speeds[J]. Materials Research Express, 2020, 7(7): 076 504.

[11] ZHENG B, HU X B, LV Q Q, et al. Study of self-reaction assisted friction stir welding of AZ31B Mg/5052 Al alloys[J]. Materials Letters, 2020, 261: 127 138.

[12] REN D X, LIU L M. Interface microstructure and mechanical properties of arc spot welding Mg-steel dissimilar joint with Cu interlayer[J]. Materials & Design, 2014, 59: 369-376.

[13] FENG Y Q, LI Y, LUO Z, et al. Resistance spot welding of Mg to electro-galvanized steel with hot-dip galvanized steel interlayer[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 236: 114-122.

[14] PATEL V K, Bhole S D, CHEN D L. Formation of zinc interlayer texture during dissimilar ultrasonic spot welding of magnesium and high strength low alloy steel[J]. Materials & Design, 2013, 45: 236-240.

[15] FU B L, SHEN J J, SUHUDDIN U F H, et al. Revealing joining mechanism in refill friction stir spot welding of AZ31 magnesium alloy to galvanized DP600 steel[J]. Materials & Design, 2021, 209: 109 997.

[16] 郑博,邓威,王彦辉,等. 进给速度对铜界面合金化镁/铝 FSW 组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(11): 1 193-1 197.

(编辑:彭瑾)

欢迎使用在线稿件处理系统

投稿、查稿、审稿

敬请登录 www.special-cast.com