

锌锡复合合金化对镁/铝 FSLW 组织与性能的影响

万 葛^{1,2} 蔡 达^{1,2} 赵一帆^{1,2} 沈小琨^{1,2} 赵 丽^{1,2} 董仕节^{2,3} 胡心彬^{1,2}
(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.武汉轻工大学)

摘 要 通过设计正交试验研究了添加 Zn 箔或 Sn 箔,以及 Zn 箔和 Sn 箔复合添加来进行界面合金化 Mg/Al 异种合金搅拌摩擦搭接试验。结果表明,进给速度对接头力学性能的影响最大,Zn 箔厚度对接头力学性能的影响程度大于 Sn 箔。在 Sn 箔和 Zn 箔厚度均为 0.05 mm、焊接速度为 110 mm/min、旋转速度为 750 r/min 时,焊接接头的拉伸剪切强度最大。相较于单独添加 Zn 箔或 Sn 箔,复合添加的接头中脆性 Mg-Al 金属间化合物的含量更低,接头组织主要由 Mg-Zn-Al 三元相、Mg-Zn 金属间化合物组成,接头力学性能比单独添加 Zn 或 Sn 时提升了 35% 左右。

关键词 镁合金/铝合金; 锌箔/锡箔; 搅拌摩擦搭接焊; 微观组织; 力学性能

中图分类号 TG146.22;TG113.25

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.12.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Influence of Zn-Sn Composite Alloying on the Structure and Properties of Magnesium-aluminum FSLW

Wan Ge^{1,2}, Cai Da^{1,2}, Zhao Yifan^{1,2}, Shen Xiaokun^{1,2}, Zhao Li^{1,2}, Dong Shijie^{2,3}, Hu Xinbin^{1,2}

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

Abstract: The orthogonal design test was used to investigate the process of adding zinc or tin foil, and the composite addition of zinc foil and tin foil to carry out the friction stir lap test of interfacial alloying magnesium/aluminum dissimilar alloy. The orthogonal experiment results show that the feed speed has the greatest influence on the mechanical properties of the joint, and the thickness of the zinc foil has a greater influence on the mechanical properties of the joint than that of tin foil. When the thickness of tin foil and zinc foil are both 0.05 mm, the welding speed is 110 mm/min, and the rotation speed is 750 r/min, the welded joint presents the maximum tensile shear strength. Compared with adding zinc foil or tin foil alone, the content of brittle magnesium-aluminum intermetallic compound in the joint added by composite is decreased. The joint is mainly composed of magnesium-zinc-aluminum ternary phase and magnesium-zinc intermetallic compound. The mechanical properties of the joint are about 35% higher than those of ones with zinc or tin alone.

Key Words: Magnesium Alloy/Aluminum Alloy, Zn Foil/Sn Foil, Friction Stir Lap Welding, Microstructure, Mechanical Properties

随着汽车轻量化的不断发展,轻质材料在汽车车身上的应用越来越多。镁合金和铝合金由于具有密度小、比强度高等特点,被广泛应用于轨道交通、航空航天和汽车制造业^[1]。镁/铝异种合金的复合结构能充分发挥两种材料的优势,在未来汽车制造业上应用潜力很大^[2],因此镁/铝异种合金的有效连接非常重要。然而,由于镁合金与铝合金存在着较大的物理、化学性能上的差异,通过传统的熔焊很难实现二者之间的可靠连

接^[3],重要原因之一是焊接接头生成了大量的脆性金属间化合物 Mg_2Al_3 和 $Mg_{17}Al_{12}$ 。目前,针对 Mg/Al 异种材料的连接方法主要有扩散焊、电阻点焊和搅拌摩擦焊^[4]。搅拌摩擦焊与其他焊接方法相比,对于异种材料的焊接具有明显的优势^[5],并且已经广泛应用,如 Al-Cu、Al-Mg、Al-Ti、Al-Fe 等^[6~9]。因此,搅拌摩擦焊对 Mg/Al 异种材料的焊接十分合适。

然而,无论采用哪种焊接方法,都存在 Mg/Al 异种

收稿日期:2021-05-18;修改稿收到日期:2021-06-24
基金项目:中央引导地方科技发展专项基金资助项目(2019ZYD015)
第一作者简介:万葛,男,1995 年出生,硕士研究生,武汉(430068),E-mail:1049288660@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: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.
WAN G, CAI D, ZHAO Y F, et al. Influence of Zn-Sn composite alloying on the structure and properties of magnesium-aluminum FSLW [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(12):1 478-1 484.

合金的接触,导致焊接接头中产生脆性 Mg-Al 金属间化合物^[10],从而恶化接头性能。因此,抑制或者减少脆性 Mg-Al 金属间化合物的生成十分重要。当前,研究者主要集中在焊接工艺参数:旋转速度、进给速度、下压量、搅拌头偏置、搅拌头形状、搅拌头倾角等^[11,12],添加单一元素进行合金化,如 Zn、Cu、Ni、Zr、Ti 等^[5,13,14],以及改进焊接方式,如水下焊接^[15]、双面焊与超声波辅助焊接等。其中合金化是一种能有效提高 Mg/Al 异种合金搅拌摩擦焊接头强度的方法,但是复合添加对异种焊接组织与性能的相关研究报道较少,而且对复合添加的焊接工艺参数也少有报道。ZHENG H T 等^[16]采用 Zn-Cd 复合夹层进行了 Mg-Al 合金 MIG 焊,发现复合夹层可以抑制 Mg 和 Al 的直接反应,降低 Mg-Al 金属间化合物层的厚度。LIU J 等^[17]利用 Nb/Cu 为中间层材料,进行了 Ti-6Al-4V 和 Ni-Cr 合金的激光焊接试验,发现 Nb/Cu 中间层可以抑制金属间化合物的形成,从而提高接头的力学性能。

本课题采用 Zn 箔与 Sn 箔作为复合添加的元素,通过正交试验设计,结合对焊接接头的力学性能、微观组织的分析,探索 Sn 箔与 Zn 箔以及焊接工艺参数对 Mg/Al 合金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

试验采用尺寸为 300 mm×75 mm×3 mm 的 AZ31B 镁合金板,尺寸为 300 mm×75 mm×2 mm 5052H32 的铝合金板,具体化学成分见表 1。试验所用 Sn 箔、Zn 箔均为高纯箔片。焊接之前,将板材、金属箔片表面用砂纸打磨去除氧化层,并用乙醇清洗干净。焊接方式为搭接,搭接宽度为 30 mm,考虑到铝合金板的导热系数大于镁合金板,故将铝合金板置于镁合金板之上,具体的焊接示意图见图 1。所有的焊接试样均通过 FSW-TS-S08 型搅拌摩擦焊机进行,搅拌头材质为 H13 钢,形状为圆台带螺纹,其中搅拌针的长度为 3 mm,宽度为 3.2 mm,轴肩宽度为 10 mm,焊接下压量为 0.2 mm,搅拌头倾斜角度为 2°。

表 1 镁合金和铝合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of magnesium alloy and aluminum alloy									%
材料	w _B								
	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Ni	Zn	Al	Mg
5052H32	0.25	0.40	0.10	0.10	0.15	—	0.10	余量	2.20
AZ31B	0.10	0.005	0.05	0.2	—	0.005	1.00	2.50	余量

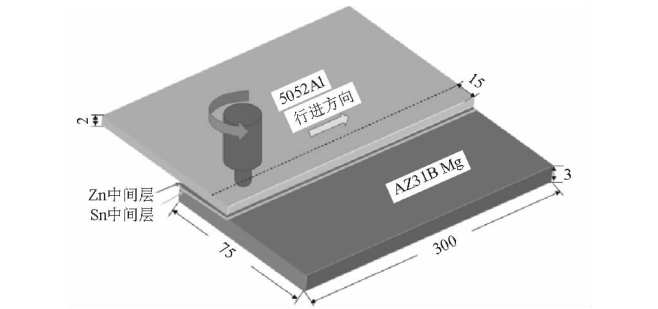


图 1 Zn、Sn 复合添加 Mg-Al 搅拌摩擦焊示意图
 Fig.1 Schematic diagram of Mg-Al friction stir welding with Zn-Sn composite addition

1.2 试验方法

在 Mg/Al 搅拌摩擦搭接焊试验过程中,影响焊接接头性能的主要因素有焊接速度、旋转速度和下压量等参数。因此,采用 4 因素 3 水平的正交试验设计,探索 Sn 箔、Zn 箔以及工艺参数对接头组织和性能的影响,见表 2。另外,为了探索复合添加对 Mg/Al 搅拌摩擦搭接焊接头组织与性能的影响,在正交方案设计时,考虑了 Sn 箔厚度与 Zn 箔厚度、Sn 箔厚度与旋转速度、Zn 箔厚度与旋转速度之间的交互作用。

表 2 因素水平表

Tab.2 Factor level table				
水平	Sn 箔厚度 (A)/mm	Zn 箔厚度 (B)/mm	旋转速度(C)/(r·mm ⁻¹)	进给速度(D)/(mm·min ⁻¹)
1	0	0	750	50
2	0.05	0.05	1 050	80
3	0.1	0.1	1 350	110

焊接完成后,通过线切割机截取金相试样和剪切试样。剪切试样的示意图见图 2,每组工艺下制取 3 个剪切试样,用 CMT 型万能拉伸试验机对剪切试样进行力学性能测试,以 3 组数据的平均值作为该工艺下的接头性能。经镶嵌处理后,依次用 400、800、1500、2000、3000 号的砂纸进行打磨并抛光,然后进行腐蚀处理,所选取的 Mg 侧腐蚀试剂的成分配比为 6 g 苦味酸+10 mL 蒸馏水+10 mL 乙酸+100 mL 乙醇,铝侧腐蚀试剂为凯勒试剂,腐蚀时间为 10 s。采用 GX51 型金相显微镜测试样的微观组织,采用 D/max-2500pc D8Advance

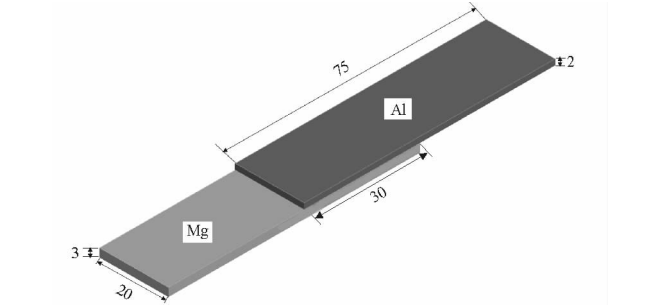


图 2 剪切试样示意图
 Fig.2 Schematic diagram of shear specimen

X 射线衍射仪对接头的物相进行分析,采用 SU8010 扫描电镜及其附带的能谱仪对接头的元素分布及含量进行分析。

2 试验结果与讨论

2.1 正交试验分析

正交试验结果见表 3。对于多水平且包含交互作

用的正交试验分析,不能直观地通过极差 R 和 K 值的大小来确定各因素对试验指标的影响主次和优化方案的选取,需计算方差进行显著性分析,结果见表 4。从表 3 可以看出,在不考虑交互作用的情况下,优选方案为 $A_3B_3C_1D_3$ 。从方差分析的结果可以看出交互作用 $A \times B$ 和 $B \times C$ 对试验结果无显著影响,交互作用 $A \times C$ 对试验结果有显著影响,依据因素 A 和 C 的因素搭配表,优先选取 A_2C_1 。因素 B 对试验结果的影响较

表 3 正交试验结果
Tab.3 Orthogonal test results

编号	A	B	$(A \times B)_1$	$(A \times B)_2$	C	$(A \times C)_1$	$(A \times C)_2$	$(B \times C)_1$	D	空白列	$(B \times C)_2$	空白列	空白列	剪切强度/N
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	185.18
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	421.53
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1 734.14
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3	1 119.54
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1	1 894.78
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	614.84
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2	1 920.88
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3	1 969.66
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	1 508.67
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	2 200.09
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1	1 106.35
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2	1 067.12
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2	2 551.73
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3	537.36
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1	6 68.51
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1	2 223.36
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2	1 337.33
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	1 377.28
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1 840.54
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3	1 672.91
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1	1 026.87
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1	2 098.91
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	1 311.18
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3	2 046.79
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3	1 547.94
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1	2 077.78
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2	1 220.11
K_1	11 369.22	11 254.73	12 735.70	10 944.28	15 688.17	11 400.38	10 500.41	12 940.72	11 589.45	11 691.03	12 075.19	13 812.45	12 790.41	
K_2	13 069.13	15 843.64	12 848.55	13 107.45	12 328.88	15 554.92	12 886.27	13 077.03	11 141.66	12 842.69	12 223.11	12 275.54	12 285.26	
K_3	14 843.03	12 183.01	13 697.13	15 229.65	11 264.33	12 326.08	15 894.70	13 263.63	16 550.27	14 747.66	14 983.08	13 193.39	14 205.71	
极差 R	3 473.81	3 928.28	961.43	4 285.37	4 423.84	4 154.54	5 394.29	322.91	5 408.61	3 056.63	2 907.89	1 536.91	1 920.45	

表 4 正交试验方差分析表 Tab.4 Table of variance analysis for orthogonal experiment						
差异源	SS	df	MS	F	显著性	
$A \times B$	1 081 652.00	4.00	270 413.00	1.61	不显著	
D	2 002 344.93	2.00	1 001 172.46	5.96	显著	
C	1 184 757.64	2.00	592 378.82	3.53	不显著	
$A \times C$	2 680 884.24	4.00	670 221.06	3.99	显著	
A	670 510.04	2.00	335 255.02	2.00	不显著	
$B \times C$	601 955.92	4.00	150 488.98	0.90	不显著	
B	867 728.55	2.00	433 864.27	2.58	不显著	
误差 e	882 680.50	6.00	147 113.42	0.88		
误差 e^Δ	2 352 364.96	14.00	168 026.07			
总和		26				

注:SS 为离差平方和;df 为自由度;MS 为平均离差平方和

小,结合表 3 中 K 值的大小,选取 B_2 。因素 D 对试验结果有显著影响,结合表 3 中 K 值的大小,选取 D_3 。最终所得优选方案为 $A_2B_2C_1D_3$,即 Sn 箔厚度为 0.05 mm、Zn 箔厚度为 0.05 mm、旋转速度为 750 r/min、焊接速度为 110 mm/min。

2.2 宏观形貌分析

为了解单独添加 Sn、Zn 以及复合添加对接头组织和力学性能的影响,对试样 7、13、19 的接头进行分析,见图 3。试样 7 添加 0.1 mm 厚的 Zn 箔,试样 13 添加 0.05 mm 厚的 Zn 箔和 0.05 mm 厚的 Sn 箔,试样 19 添

加 0.1 mm 厚的 Sn 箔。3 组工艺参数下的接头宏观形貌见图 3b、图 3e、图 3h。可以看出,图 3b 和图 3e 所对应参数下的接头无明显焊接缺陷,而图 3h 的接头在搅拌区底部存在明显的孔洞缺陷,这可能是由于锡箔的熔点较低,在焊接过程中融化成液态,容易在搅拌针和轴肩的共同作用下被挤出焊缝,而焊接热输入不足以使足够的塑性材料填充熔融 Sn 箔被挤压出焊缝时所留下的空隙,导致孔洞缺陷产生。3 种工艺下的接头搅拌区所呈现的形状不完全一致,总体上都呈现碗状结构,主要差异表现在 hook 钩的形态上。从图 3b 可以看出,钩状结构比较明显,但钩子较为细小,机械结合程度不会太高。由于界面合金种类不同的原因,该工艺下的接头后退侧 hook 钩向 Al 侧伸入,高度大于前进侧 hook 钩向 Al 侧深入高度,而 hook 钩的形状及位置又影响着搭接接头的有效搭接宽度(ELW)及有效搭接厚度

(EST),最终影响着接头的力学性能。从图 3e 可以看出,钩状结构也较为明显,且比图 3b 所示的钩状结构更为粗大,机械结合程度更高。从图 3h 可以看出,钩状结构很不明显,机械结合程度较弱,这可能是由于其所添加的中间夹层为 0.1 mm 厚的 Sn 箔,塑性材料在搅拌针螺纹的摩擦力和压力作用下向上作螺旋形运动,同时又受轴肩的挤压作用呈向下运动趋势,但 Sn 的熔点仅为 231 ℃,其中间层金属的流动性较好,导致钩状结构不明显。接头的结合力来自沟状结构的机械结合和中间界面层的冶金结合,对于图 3b,钩状结构较为细小,机械承载力不足;对于图 3e,钩状结构最粗大,机械结合程度也最高;对于图 3h 的接头而言,搅拌区左右两侧几乎不以钩状形式存在,机械结合程度较弱,且由于搅拌区底部孔洞缺陷的存在,在一定程度上影响了冶金结合的程度,从而削弱了接头的力学性能。

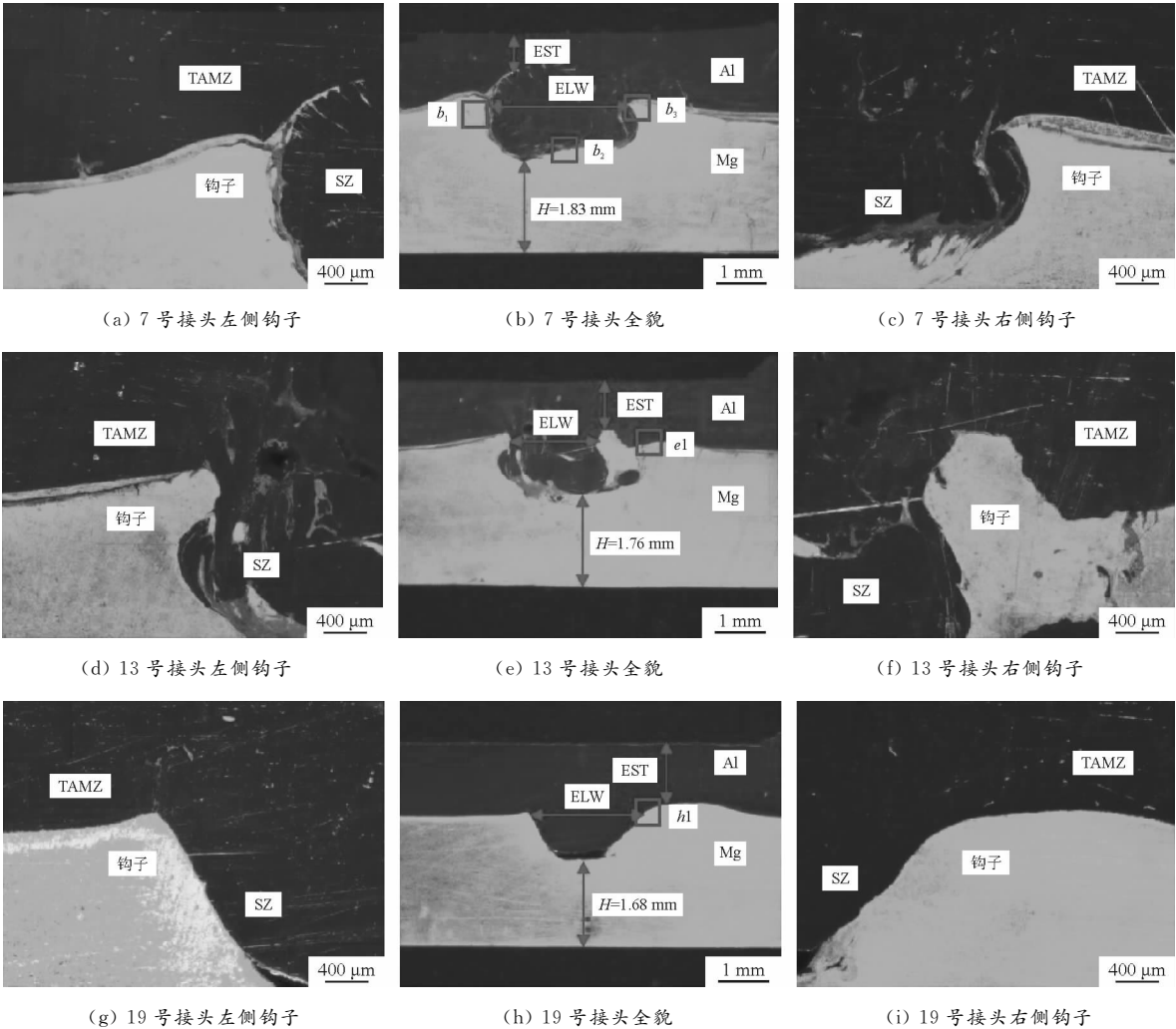


图 3 不同合金夹层下的 Mg/Al 搅拌摩擦焊搭接接头宏观形貌(TAMZ 为热机械影响区,SZ 为焊核区)

Fig.3 Macro morphology of magnesium-aluminum friction stir welding lap joints under different alloy sandwiches

2.3 微观组织分析

图 4 为 7 号试样的微观形貌。其中图 4a 为接头界面左侧的 hook 结构,对应图 3b 中的 b_1 区域,图 4b 和

图 4c 分别为搅拌区底部和接头界面右侧 hook 沟处的微观形貌,分别对应图 3b 中的 b_2 、 b_3 区域。从微观形貌可以看出该区域部分合金元素之间可能发生了反应,

生成了新的金属间化合物。对图 4a 的左侧 hook 处的组织进行 EDS 点扫描,扫描的位置见图 4d。其能谱结果见表 5。可以看出,点 1 和点 3 的组织为 Mg-Zn 金属间化合物,中间夹层的 Zn 箔在搅拌针的作用下与下层塑性状态的 Mg 发生混合。点 2 处的组织为单质 Mg 和 Mg-Zn IMC,在搅拌针螺纹的作用下,下层塑性状态

的 Mg 被卷入到中间层位置,一部分与融化态的锌结合生成金属间化合物 Mg-Zn IMC,多余的 Mg 以单质的形式存在。从点扫描的结果来看,该区域没有发现脆性 Mg-Al 金属间化合物 $Al_{12}Mg_{17}$ 和 Al_3Mg_2 ,说明在焊接过程中 Mg 倾向于优先与 Zn 形成化合物,一定程度上 Zn 起到了抑制 Mg-Al 金属间化合物生成的作用,起到

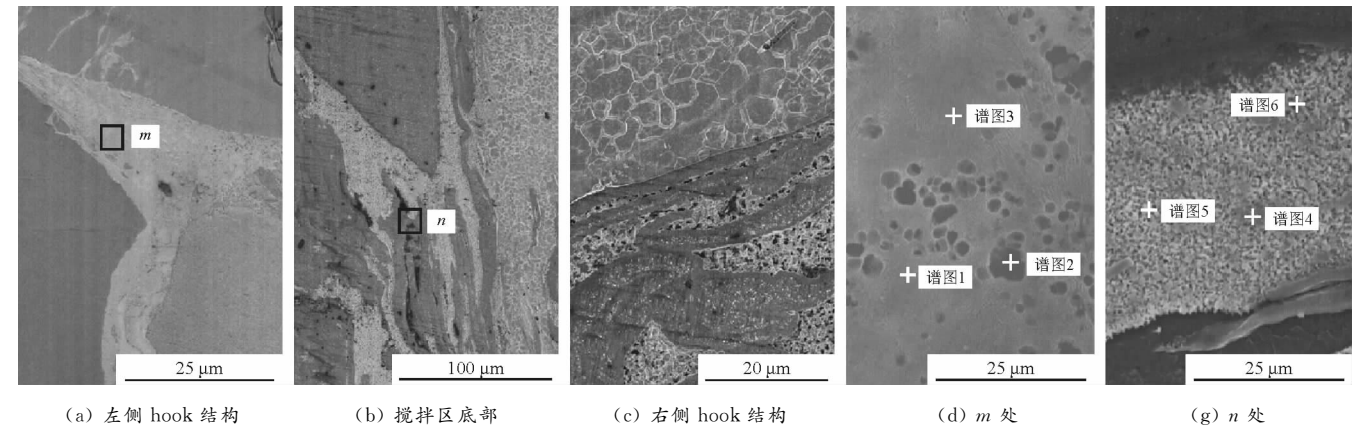


图 4 单独添加 0.1 mm 厚的 Zn 箔的 7 号试样微观形貌

Fig.4 Micro-morphology of specimen 7 with 0.1 mm Zn foil addition

了提高接头力学性能的作用。

从图 4b 可以看出,搅拌区底部有条带状的组织存在,这极有可能是 Mg-Al 金属间化合物层所呈现的形态。对该处进行 EDS 点扫描分析,其扫描位置的放大图片见图 4e。可以看出,在界面处存在金属间化合物的过渡层,点 4 处的 Mg、Al、Zn 摩尔分数组成分别为 55.89%、25.81%、18.30%,分析认为该处的物相组成为 $Al_{12}Mg_{17}+Mg-Zn$ IMC,该区域发生了 $L \rightarrow Al_{12}Mg_{17}+Mg$ 的共晶反应,也发生了 Mg 和 Zn 之间的共晶反应,点 5 和点 6 处的物相组成为 Mg-Zn+Al-Mg-Zn,有 Al-Mg-Zn 三元固溶体生成,起到了固溶强化的作用,提高了接头的力学性能。

表 5 试样 7 的 m 和 n 处 EDS 结果

Tab.5 EDS results of m and n points of specimen 7 %

谱图	x_B			相组成
	Mg	Al	Zn	
1	58.13	6.52	35.35	Mg-Zn
2	80.61	3.98	15.41	Mg+Mg-Zn
3	59.54	7.29	33.17	Mg-Zn
4	55.89	25.81	18.30	$Al_{12}Mg_{17}+Mg-Zn$
5	56.73	17.04	26.23	Mg-Zn+Al-Mg-Zn
6	56	14.07	29.93	Mg-Zn+Al-Mg-Zn

图 5 为 13 号试样的右侧 hook 区扫描能谱图。可以看出存在类似河流状冶金结合区域,熔融态的 Zn 和 Sn 与塑性状态的镁母材以及铝母材发生了冶金反应,生成的 Mg-Sn 金属间化合物和 Mg-Sn 金属间化合物部

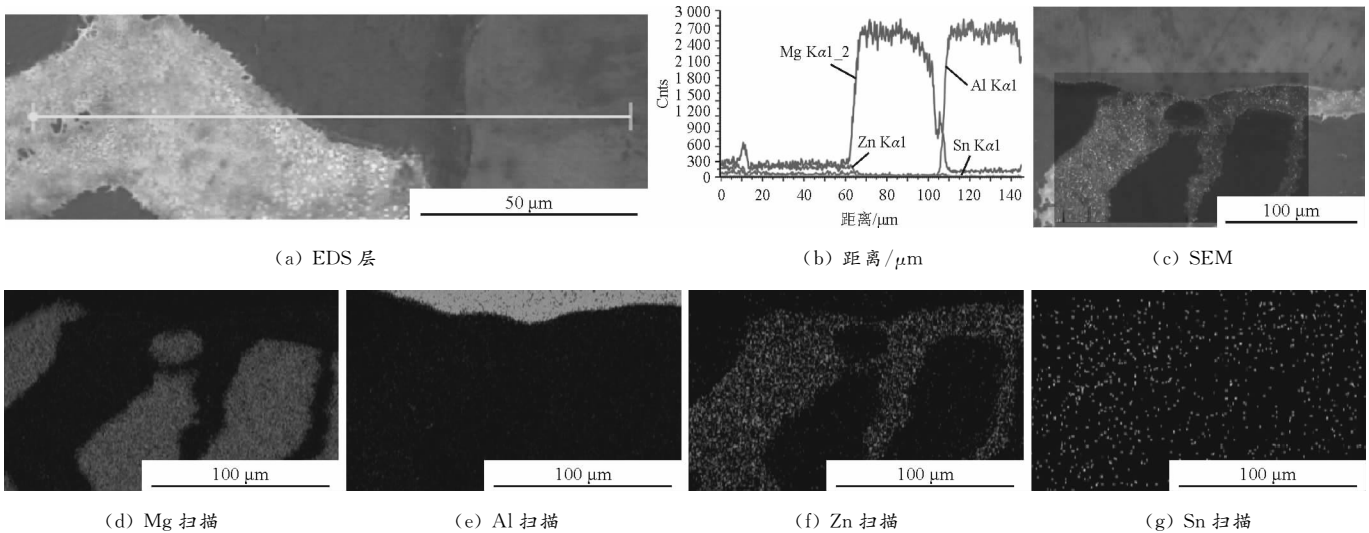


图 5 复合添加 0.05 mm 厚的 Sn 箔、0.05 mm 厚的 Zn 箔的 13 号试样能谱图

Fig.5 Energy spectrum of specimen 13 with composite addition of 0.05 mm Sn foil and 0.05 mm Zn foil

分代替了原本的脆性 Mg-Al 金属间化合物,在一定程度上抑制了 Mg、Al 之间的共晶反应。从 7 号试样的点扫描结果可以推断,在 13 号试样中同样有固溶体产生。由图 5c~图 5g 可以看出,Al 只有很少部分被轴肩及搅拌针带入到搅拌区,Sn 均匀分布在整个区域中,可以看出,Mg 与 Zn 之间的冶金结合程度不及 7 号试样,部分 Mg 与均匀分布在搅拌区的 Sn 发生冶金结合,接头的强化方式存在 hook 沟处的机械结合、微量 Mg、Al 之间的冶金结合、Mg、Zn 以及 Mg、Sn 之间的冶金结合,乃至三者之间形成的固溶体所带来的固溶强化效果等。

图 6 为 19 号试样中间界面的能谱图。从图 6b 可以看出,Sn 箔的存在使得 Mg、Al 之间的共晶结合大大

降低,Sn 箔由于其熔点较低、流动性较好,从而均匀分布在界面处,一部分熔融的液态 Sn 在轴肩的作用下被挤出焊缝,使得参与反应的 Sn 含量有所降低,这也是焊接过程中有待提高的地方。根据其 XRD 图谱可以发现,除了 Mg-Al 金属间化合物之外,接头同样检测到 Mg-Sn 化合物的存在。由第一性原理分析可知,生成的 Mg_2Sn 延性强于 Mg-Al 金属间化合物 $Al_{12}Mg_{17}$ 和 Al_3Mg_2 ,生成的 Mg-Sn 金属间化合物部分代替脆性的 Mg-Al 金属间化合物,熔融态的 Sn 也起到改善金属塑性流动的作用,更好地促进金属之间的机械结合及冶金结合。相比与 Mg、Al 之间的直接搭接焊而言,起到了提高接头力学性能的作用。

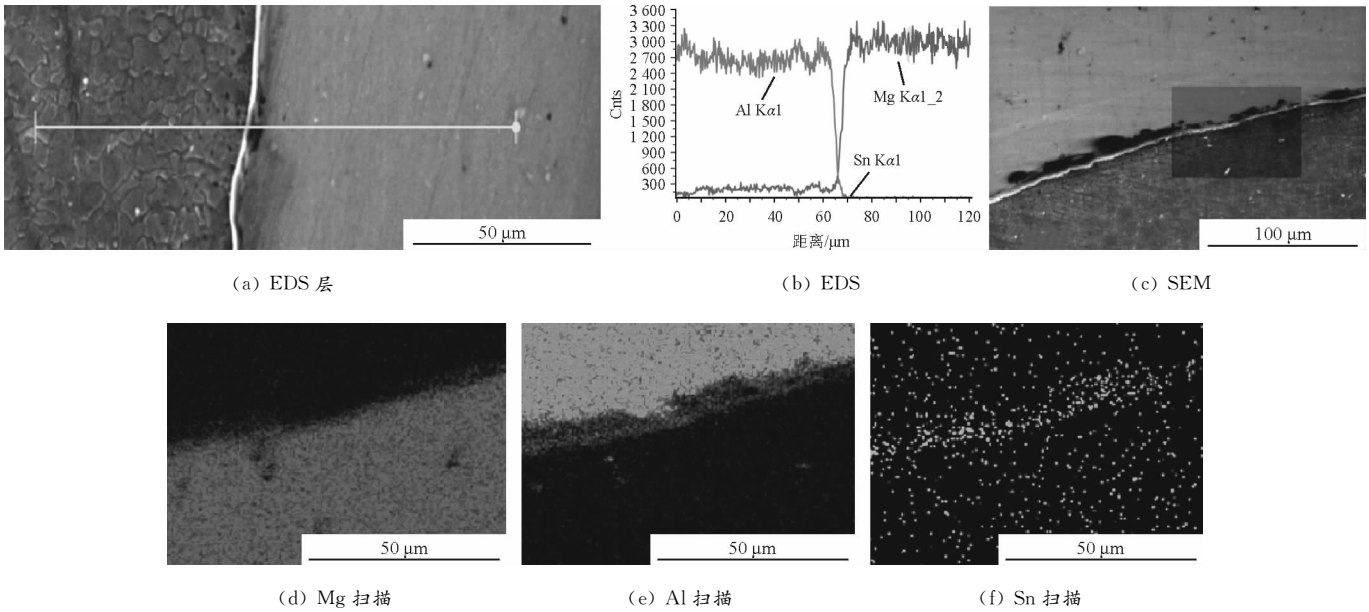


图 6 单独添加 0.1 mm 厚的 Sn 箔的 19 号试样能谱图
 Fig.6 Energy spectrum of specimen 19 with 0.1 mm Sn foil addition

2.4 XRD 衍射分析

图 7 为 3 组试样的 XRD 分析图谱。可以看出,单独添加 Zn 箔的搭接接头焊缝中检测到镁锌二元化合物和三元固溶体的生成,这与点扫描分析的结果是一致的,见图 7a。复合添加 Zn 箔和 Sn 箔的接头中同样检

测到镁锌金属间化合物和 Mg-Al-Sn 三元金属间化合物的存在,而单独添加锡箔的接头则检测到 Mg_2Sn 金属间化合物的存在,且峰值的强度不及单独添加 Zn 箔时的化合物衍射峰强度,这与部分熔融态 Sn 箔被挤出焊缝有关,见图 7b 和图 7c。

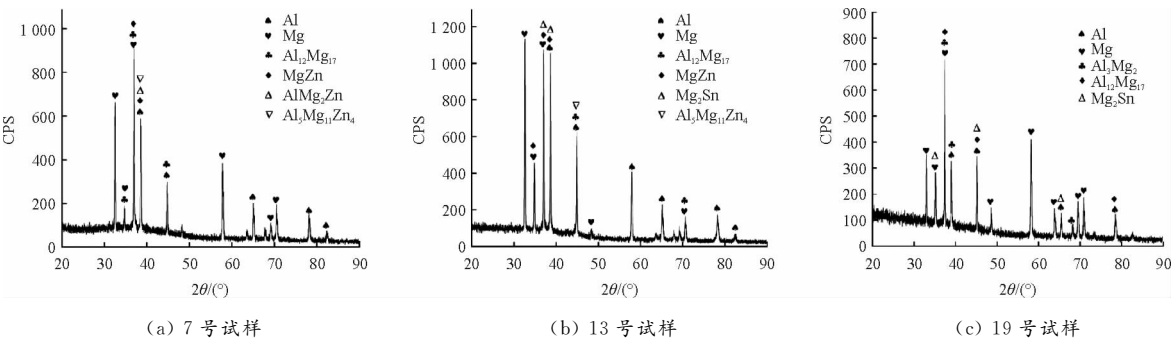


图 7 不同试样 X 射线衍射图谱
 Fig.7 X-ray diffraction pattern of different specimens

2.5 接头力学性能

图 8 为 3 组工艺下的搭接接头的剪切强度。可以看出,将 Zn 箔和 Sn 箔复合添加作为焊接中间夹层的接头剪切强度最高,其次是单独添加 Zn 箔的搭接接头,最后是单独添加 Sn 箔的接头,这在一定程度上说明复合添加的效果优于单独添加,且添加 Zn 箔的效果略优于添加 Sn 箔。

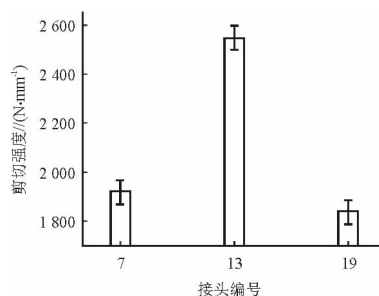


图 8 3 组工艺下的接头剪切强度

Fig.8 Joint shear strength under three sets of processes

3 结 论

(1)正交试验结果表明,进给速度对接头剪切强度的影响最显著,其次是旋转速度,Zn 箔厚度对结果的影响显著程度大于 Sn 箔,复合添加比单独添加有一定的增强效果。

(2)复合添加 Zn 箔和 Sn 箔的接头剪切强度最大,达到 2 551.73 N,强于单独添加 Zn 箔时的 1 920.88 N 或是单独添加 Sn 箔时的 1 840.54 N。

(3)单独添加 Zn 箔时,接头除了有 Mg-Zn 金属间化合物生成以外还有 Mg-Al-Zn 三元固溶相的生成,单独添加 Sn 箔时则只有 Mg-Sn 二元金属间化合物生成。复合添加时既有 Mg-Zn 和 Mg-Sn 化合物的形成,也有 Mg-Al-Zn 三元固溶体的形成。

(4)单独添加或是复合添加的意义表现在新生成的化合物是延性的,部分代替了原本的脆性 Mg-Al 金属间化合物,阻碍了 Mg 与 Al 的接触,抑制了脆性相的生成,接头中形成的固溶体也起到固溶强化的效果,同时熔化的中间夹层元素具有很好的润湿性,能更好地促进塑性母材的流动,优化接头的焊缝成形,而复合添加则兼具单独添加时的优点。

参 考 文 献

[1] 于欢,毛育青,杨平,等.铝/镁异种合金搅拌摩擦搭接焊接接头界面结构及拉剪性能[J].热加工工艺,2021,50(4):1-5.
[2] 郑博. AZ31B 镁合金/5052 铝合金异种材料搅拌摩擦焊组织与性能研究[D].武汉:湖北工业大学,2020.
[3] 魏艳妮,李辉,肖鹏,等.铜/铝搅拌摩擦焊工艺及组织研究进展[J].热加工工艺,2020,49(1):1-5.

[4] LIU J, NIU S Y, REN R, et al. Improving joint morphologies and tensile strength of Al/Mg dissimilar alloys friction stir lap welding by changing Zn interlayer thickness[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2019, 32(11): 1 385-1 395.
[5] 郑博,邓威,胡心彬,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.
[6] ZHENG B, ZHAO L, HU X B, 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.
[7] NIU S Y, JI S D, YAN D J, et al. AZ31B/7075-T6 alloys friction stir lap welding with a zinc interlayer[J]. Journal of Materials Processing Tech., 2018, 263: 82-90.
[8] SUN M, BEHRAVESHS B, WU L, et al. Fatigue behaviour of dissimilar Al 5052 and Mg AZ31 resistance spot welds with Sn-coated steel interlayer[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2017, 40(7): 1 048-1 058.
[9] AMLAN K, SATISH V, SATYAM S. Effect of mechanical mixing in dissimilar friction stir welding of aluminum to titanium with zinc interlayer[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2019, 72(6): 1 533-1 536.
[10] GAN R G, JIN Y H. Friction stir-induced brazing of Al/Mg lap joints with and without Zn interlayer[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2018, 23(2): 164-171.
[11] ZHAO Y D, LUO Y L, ZHANG Z P, et al. Fractal Dimension Characterization of Joint Surface Morphology on Dissimilar Friction Stir Lap Welding of Al/Mg[J]. Materials, 2019, 12(23): 3 941-3 910.
[12] DAI X Y, ZHANG H T, ZHANG H C, et al. Joining of magnesium and aluminum via arc-assisted ultrasonic seam welding with Sn/Zn composite interlayer[J]. Materials Letters, 2016, 178: 235-238.
[13] 郑博,赵丽,胡心彬,等.镁铝金属间化合物的第一性原理研究[J].材料导报,2019,33(14):2 426-2 430.
[14] 郑博,赵丽,胡心彬,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.
[15] MA A, ABDOLLAH Z A, MALEK G F. The effect of water cooling during dissimilar friction stir welding of Al alloy to Mg alloy[J]. Materials and Design, 2011, 36: 161-167.
[16] ZHANG H T, DAI X Y, FENG J C. Interfacial microstructure and mechanical properties of Al/Mg butt joints made by MIG welding process with Zn-Cd alloy as interlayer[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 2014, 29(6): 1 258-1 264.
[17] LIU J, LIU H, GAO X L, et al. Microstructure and mechanical properties of laser welding of Ti6Al4V to Inconel 718 using Nb/Cu interlayer[J]. Journal of Materials Processing Tech., 2019, 277: 116 467-116 475.

(编辑:张正贺)