

中间层对铝/镁搅拌摩擦焊界面组织与性能的影响

陈书锦, 何亚斌, 徐洋, 田雄文, 赵浩钰

(江苏科技大学, 材料科学与工程学院, 镇江, 212100)

摘要: 采用 Ag 箔和 Zn 箔作为中间层, 对 2 mm 厚 5052 铝合金和 AZ31 镁合金进行对接焊接, 分析了不同中间层对接头界面 IMCs 厚度、分布和类型的影响规律. 结果表明, 不加中间层的接头界面 IMCs 厚度为 3.52 μm , 主要为 Al_3Mg_2 和 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$, 且沿板厚方向在界面处连续分布; 接头在带状区域发生断裂, 抗拉强度和断后伸长率分别为 175 MPa 和 2.75%, 呈现脆性断裂特征. 与纯 Al/Mg 接头相对比, 加入 Ag 中间层接头界面 IMCs 厚度、分布和类型都发生了改变, IMCs 厚度减小到 2.38 μm , 界面上的 Al_3Mg_2 和 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 转变为不连续分布, 同时生成了 Ag_2Al 和 Mg_3Ag , 接头抗拉强度和断后伸长率达到最高, 分别为 190 MPa 和 5.13%, 呈韧性断裂特征. 加入 Zn 中间层的接头界面 IMCs 厚度为 3.09 μm , 在界面上并未生成含 Zn 类 IMCs, 抗拉强度和断后伸长率均低于不加中间层和加入 Ag 中间层的接头, 仅为 161 MPa 和 1.45%.

创新点: (1) 使用 Ag 作为中间层使接头获得了极高的抗拉强度, 提高了断后伸长率.

(2) 通过对比三种接头界面 IMCs 的厚度、分布和类型, 解释了接头发生断裂的机理.

关键词: 搅拌摩擦焊; 铝/镁异种金属; Ag 中间层; Zn 中间层; 金属间化合物

中图分类号: TG 456.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20240907001

Effect of interlayer on interface microstructure and properties of Al/Mg friction stir welded joints

CHEN Shujin, HE Yabin, XU Yang, TIAN Xiongwen, ZHAO Haoyu

(School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, 212100, China)

Abstract: In this paper, Ag foil and Zn foil were used as interlayers for butt welding of 2 mm thick 5052 aluminum alloy and AZ31 magnesium alloy, and the influence of different interlayers on the thickness, distribution and type of IMCs at the joint interface was studied. The results show that the interfacial IMCs without the interlayer are 3.52 μm thick, and the main types are Al_3Mg_2 and $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$, which are continuously distributed along the plate thickness direction. The fracture of the joint occurred in the band area, and the tensile strength and elongation were 175 MPa and 2.75%, respectively, showing the characteristics of brittle fracture. Compared with the pure Al/Mg joint, the thickness, distribution and type of IMCs at the interface with Ag interlayer are changed, and the thickness of IMCs decreases to 2.38 μm , Al_3Mg_2 and $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ on the interface are discontinuous, and Ag_2Al and Mg_3Ag are generated at the same time. The tensile strength and elongation of the joint are the highest, 190 MPa and 5.13%, respectively, showing the characteristics of ductile fracture. The interface IMCs thickness of the joint with Zn interlayer is 3.09 μm , and no Zn-containing IMCs are generated at the interface. The tensile strength and elongation of the joint with Zn interlayer are the lowest, only 161 MPa and 1.45%, which is lower than those of the joints without interlayer and with Ag interlayer.

Highlights: (1) The use of Ag interlayer can significantly improve tensile strength and elongation of the Al/Mg joints.

(2) By comparing the thickness, distribution, and types of IMCs at the interfaces of three types of joints, the mechanism of joint fracture was explained.

Key words: friction stir welding; Al/Mg dissimilar metals; Ag interlayer; Zn interlayer; intermetallic compounds

0 序言

铝合金和镁合金作为轻质结构材料,具有低密度、高比强度和良好电磁屏蔽等特点,在汽车、高铁和航空航天领域发挥着极其重要的作用^[1-3]. Al/Mg 复合结构可以进一步的减轻重量并发挥各自性能优势. 当采用熔焊的方法获得的 Al/Mg 接头时,由于热输入过大,容易形成气孔、裂纹和大量脆硬金属间化合物 (intermetallic compounds, IMCs) 等缺陷,严重降低接头力学性能^[4-5]. FSW 是一种固相焊接技术,能有效抑制 IMCs 的形成^[6-7],被广泛用于异种材料的焊接.

由于 FSW 过程存在较大的热-力耦合作用,加剧 Al 和 Mg 之间发生冶金反应,以至于产生脆硬 Al-Mg 类型 IMCs,甚至形成共晶组织^[8-10]. 为了减少接头中 Al-Mg 类型 IMCs 的形成,有学者尝试采用添加中间层的方式改变 IMCs 类型,从而达到改善接头成形及力学性能的作用. Abdollahzadeh 等人^[11] 在 6061 铝合金和 AZ31 镁合金对接接头中使用 Zn 作为中间层,结果发现添加 Zn 中间层的接头的抗拉强度从 141 MPa 提高到 175 MPa,断后伸长率从 0.7% 提高到 1.9%,在接头中存在 Mg-Zn IMCs,并没有发现 Al-Mg 类的 IMCs;董少康等人^[12] 使用 6061 铝合金和 AZ31 镁合金对接接头中使用 Ni 作为中间层,在界面发现 $Al_{12}Mg_{17}$, Al_3Mg_2 和 Mg_2Ni 等 IMCs 及分布均匀的 Ni 颗粒,抗拉强度提高了 56 MPa;Dewangan 等人^[13] 在 7075 铝合金和 AZ31 镁合金对接接头中使用 Cd 作为中间层,抗拉强度从 110 MPa 提高到 129 MPa,断后伸长率有所降低,从 3.4% 降低到 1.3%,在接头中形成 $CdMg$ 和 $CdMg_3$ 等 IMCs, Cd 抑制了 $Al_{12}Mg_{17}$ 的形成. 综上所述,尽管加入中间层都提高了接头的抗拉强度,但是对接头断后伸长率提升有限.

Ag 与 Al 和 Mg 的物理和化学性质比较接近,Ag 的热膨胀系数与 Mg 和 Al 相差不大,Ag 和

Al 具有相同的晶格结构,三者原子半径非常接近,并且 Ag 具有高延展性和良好的冶金性能^[14],是较为理想的中间层材料. 王仪宇^[15] 使用 Ag 中间层 (Ag 箔和 Ag 薄膜) 制备了 Al/Ag/Mg 扩散焊接头,Ag 层使得接头力学性能显著提高,阻止了 Al-Mg IMCs 的生成,接头界面处的典型微观结构为 Mg-Mg₃Ag-MgAg-Al 多层结构;Peng 等人^[16] 采用超声点焊 (USW) 方法将轻质 ZEK100-O 镁合金与带有银夹层的 6022-T4 铝合金进行焊接,研究发现 Al-Mg 界面被 Mg-Ag 和 Al-Ag 界面取代,不利的 $Al_{12}Mg_{17}$ 被消除.

在 Al/Mg 搅拌摩擦焊接领域,Ag 中间层对接头界面组织及力学性能的影响尚不明确,文中以 5052 铝合金和 AZ31 镁合金为母材,分别在 Al/Mg FSW 对接接头中置入 Ag 和 Zn 中间层,分析不同中间层对接头宏观形貌、显微组织和力学性能的影响.

1 试验方法

试验材料使用厚度为 2 mm 的 5052 铝合金和 AZ31 镁合金,化学成分和力学性能见表 1,中间层使用厚度为 10 μ m 的纯 Ag 和纯 Zn,试板尺寸为 100 mm \times 50 mm \times 2 mm,采用搅拌摩擦对接焊的方法进行焊接,如图 1 所示. 焊接过程中将镁板置于前进侧 (advancing side, AS),铝板置于后退侧 (retreating side, RS),搅拌针偏移量为 0.7 mm. 焊接位置和测温点示意图如图 2 所示,图中 A, B 两点为测温位置,距离搅拌针中心线 3 mm,使用 K 型热电偶,每隔 0.5 s 记录一次温度. 经过前期试验,搅拌头转速为 800 r/min,焊接速度为 30 mm/min,下压量为 0.1 mm. 铝/镁 FSW 完成后,使用 1g 草酸 + 1 mL 硝酸 + 100 mL 去离子水溶液对接头截面形貌进行金相侵蚀,侵蚀时间为 12 s. 采用 Zeiss Merlin Compact 扫描电镜 (SEM) 对 FSW 接头微观组织进行分析,使用 B 型能谱仪 (EDS) 和 D8 Advance A25 型 X 射线衍射仪 (XRD) 对接头中 IMCs 种类进行

表 1 5052 铝合金和 AZ31 镁合金的化学成分及力学性能 (质量分数, %)
Table 1 Chemical composition and mechanical properties of 5052 Al and AZ31 Mg alloy

材料	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Ni	Zn	Al	Mg	抗拉强度 R_m /MPa	断后伸长率 A (%)
AZ31	0.10	0.005	0.05	0.20	—	0.005	1.00	2.50	余量	240.5	20.56
5052	0.25	0.400	0.10	0.10	0.15	—	0.10	余量	2.20	267.0	22.76

表征. 采用 WDW-10 型微机控制电子万能试验机对接头进行抗拉强度测试, 拉伸速率为 0.5 mm/min, 每组接头制备 3 个拉伸试样, 拉伸样尺寸如图 1 所示, 测试结果取平均值.

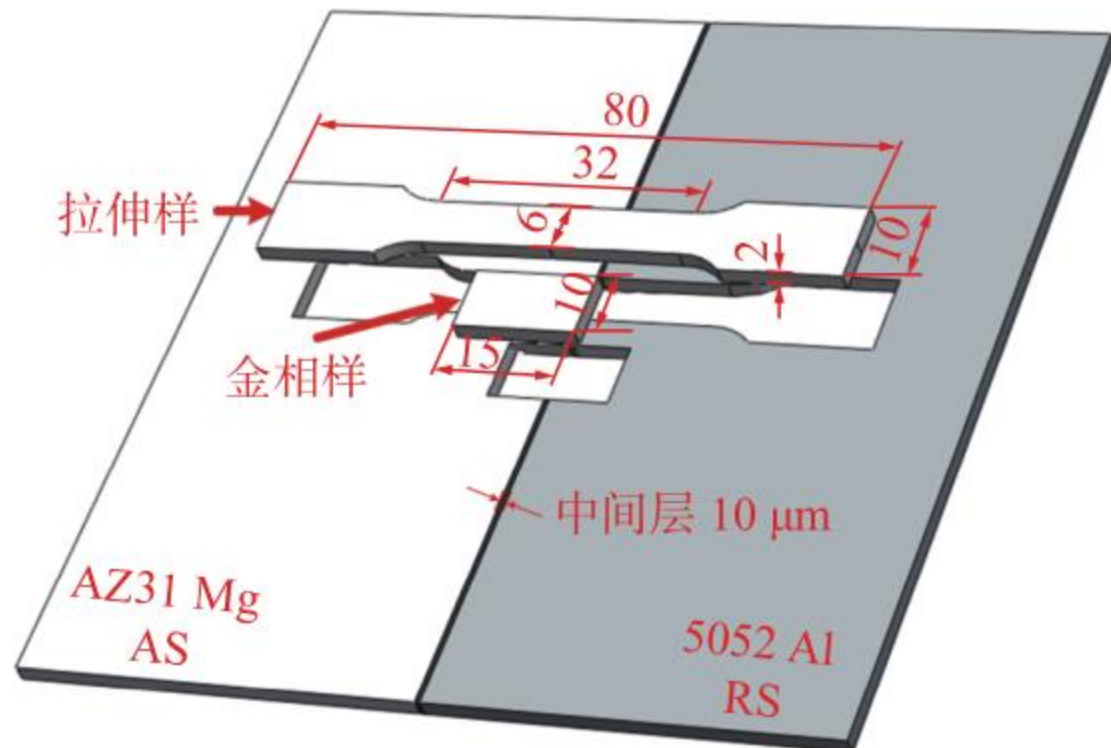


图 1 Al/Mg 对接 FSW 装配方式及试样尺寸 (mm)
Fig. 1 Al/Mg butt FSW assembly method and specimen dimension diagram

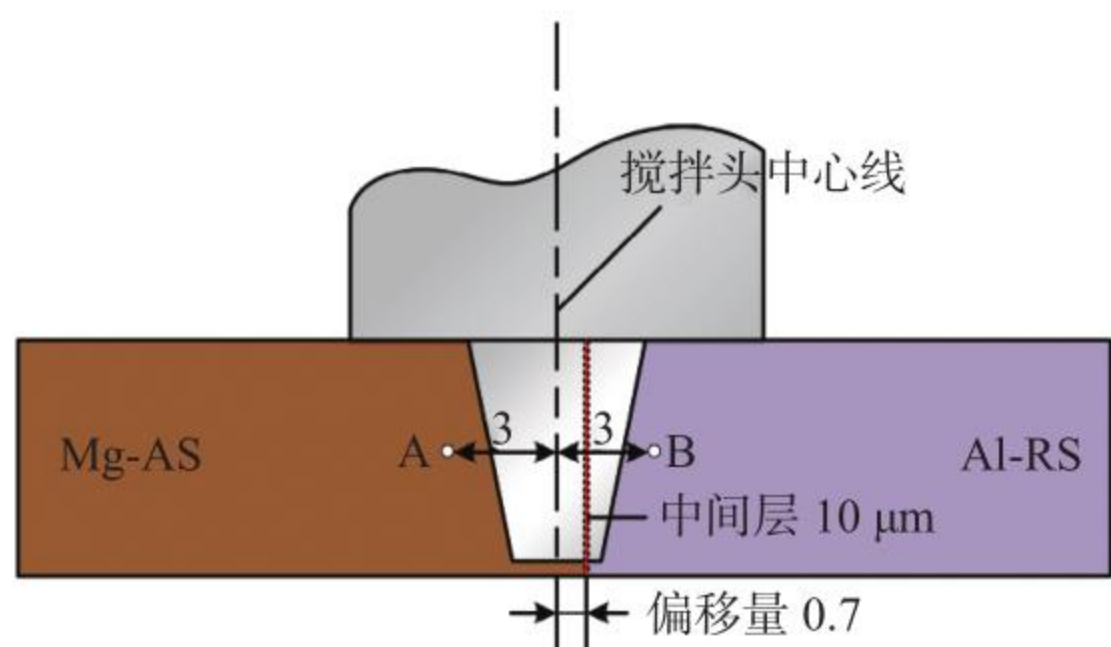


图 2 焊接位置和测温点示意图 (mm)
Fig. 2 Schematic diagram of welding position and temperature measurement point

2 结果与讨论

2.1 接头截面形貌

图 3 为无中间层、Ag 层和 Zn 层条件下获得的接头截面形貌. 接头由两侧母材区 (base metal, BM), 热影响区 (heat-affected zone, HAZ), 热力影响区 (thermo-mechanically affected zone, TMAZ) 和焊核区 (weld nugget zone, WNZ) 4 个部分组成^[17]. 从图 3(a) 中可以看出, 在 WNZ 靠近 TMAZ 有明显的带状组织 (banded structure, BS), Al 和 Mg 在搅拌针的作用下剧烈混合, 腐蚀后在光学显微镜 (OM) 下呈现出黑色和灰色交替重叠的带状, 在轴肩的作用下, Mg 被带到上表面的 RS, 覆盖了从 RS 带到 AS 的 Al, 整个界面宏观上呈现出一种“Z”状结构; 图 3(b) 和图 3(c) 中, “Z”状的界面更加不明显, 尤其是加入 Zn 中间层的接头界面, 这可能是由于中间层 (Ag 箔, Zn 箔) 的存在阻碍了 Al 和 Mg 之间

的混合, 使得两边的材料混合的程度远弱于未加入中间层的接头, 这也解释了在腐蚀相同的时间 (12 s), 未加入中间层的 Al/Mg 接头在 OM 下黑色的区域比另外两种接头更加明显.

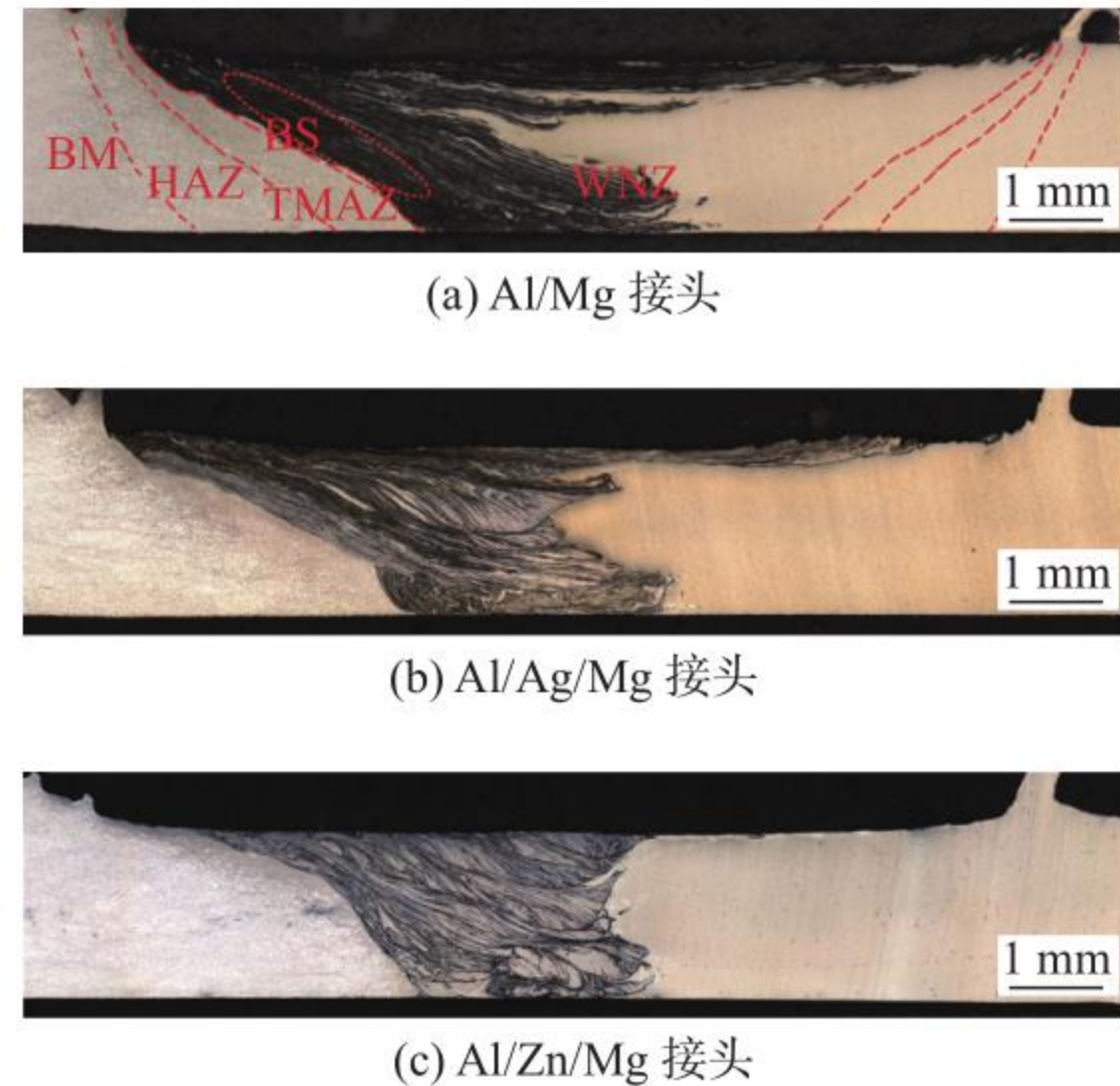


图 3 接头截面形貌
Fig. 3 The cross-section morphology of the weld joint. (a) Al/Mg joint; (b) Al/Ag/Mg joint; (c) Al/Zn/Mg joint

2.2 接头界面显微组织

温度对界面微观结构有重要影响, 图 2 中 A 和 B 两个位置的热循环曲线如图 4 所示. 镁前进侧 A 点峰值温度达到了 378 °C, 铝后退侧 B 点温度达到 326.8 °C, 由于测温点距离搅拌区较远, 所以理论温度实际高于测得温度. 根据 Mg-Al, Mg-Ag, Al-Ag 二元合金相图^[18] 可知, 在 400 °C 左右即可以形成金属间化合物. 搅拌摩擦焊过程是剧烈的塑性变形过程, 在铝/镁异种材料焊接中仍是扩散反应, 且反应速度远高于一般的扩散焊, 所以即使温度低于共晶温度, 也可以实现良好的冶金结合.

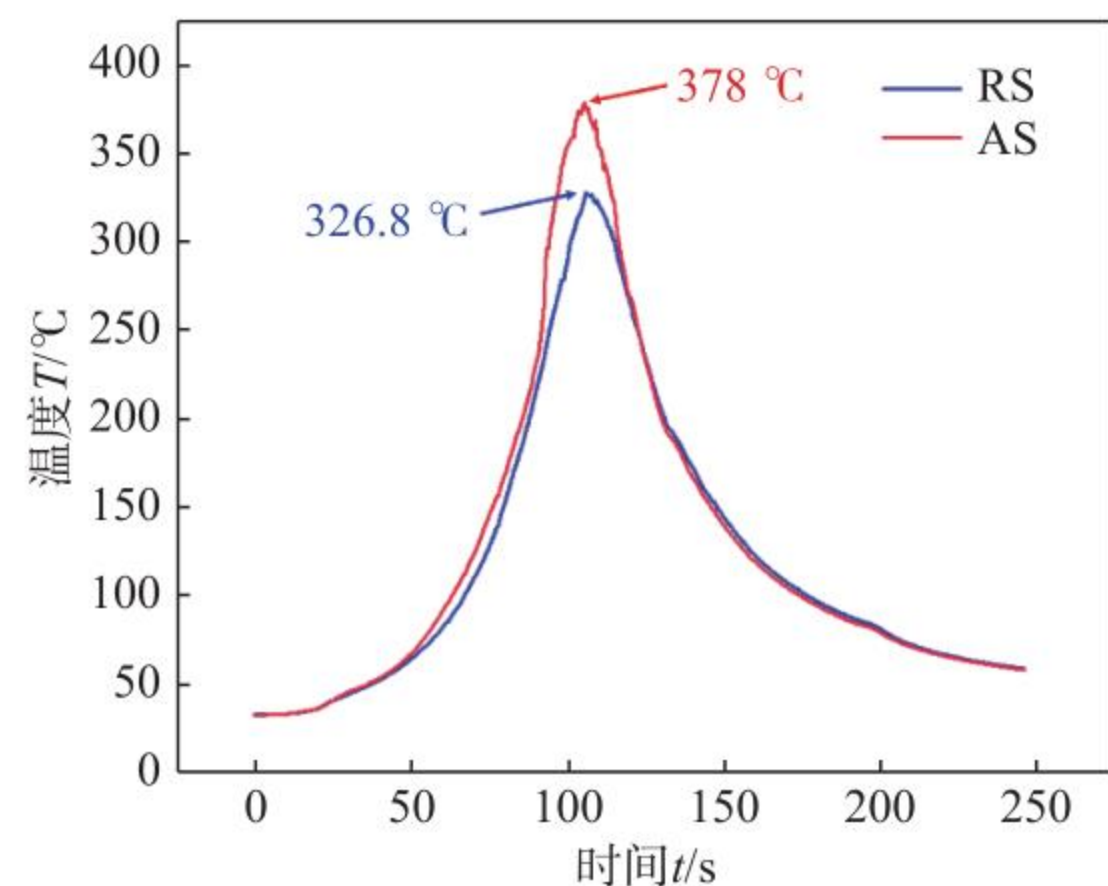


图 4 Al/Mg FSW 接头界面附近热循环曲线
Fig. 4 Thermal cycle curve near the interface of Al/Mg FSW joint

图 5 为未加入中间层 Al/Mg FSW 接头微观组

织形貌. 图 5(b)~图 5(g) 为无中间层接头界面和 BS 的显微组织, 表 2 为图 5 中各区域 EDS 分析结果, 从 SEM 图中可以看出在界面处 Al/Mg 的流动模式非常复杂. 从图 5(b)~图 5(e) 中可以看出, Al-Mg IMCs 在界面上呈现出亮白色, 两边为基体相, 通过测量得到每个位置界面的 IMCs 层厚度, 计算得出界面 IMCs 平均层厚度为 $3.52 \mu\text{m}$, 且在界面

连续分布. 根据表 2 中 EDS 分析, 靠近 Al 基体一侧的 Al 元素含量高于 Mg 元素的含量, 如图 5(b)~图 5(e) 中 1, 3, 4, 7 区域, 可能生成了 Al_3Mg_2 , 而靠近 Mg 基体附近则是 Mg 元素含量高于 Al 元素含量, 如区域 5, 6, 8, 9, 可能生成了 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$, 由此可以判断, 尽管薄板 Al/Mg 焊接过程中生成的 IMCs 层厚度较薄, 但也是呈层状分布.

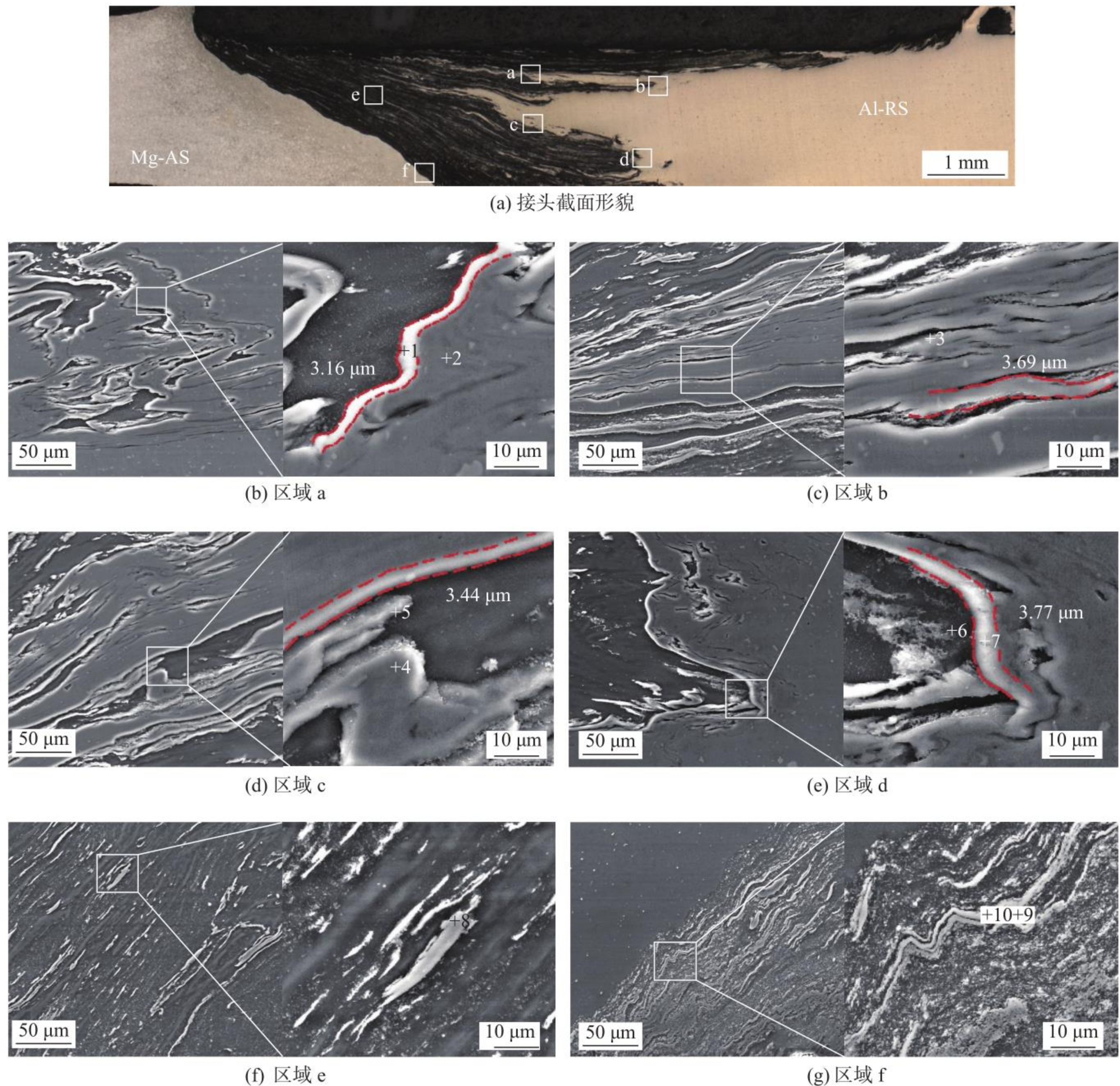


图 5 Al/Mg FSW 接头微观组织

Fig. 5 Microstructure of Al/Mg FSW joint. (a) the morphology of the weld joint cross-section; (b) section a; (c) section b; (d) section c; (e) section d; (f) section e; (g) section f

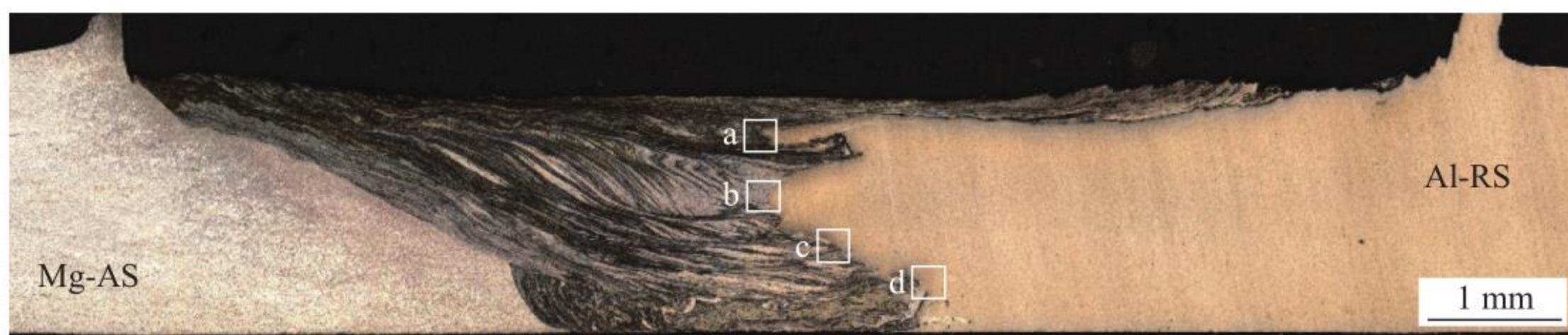
图 5(f) 和图 5(g) 为 BS 显微组织, 从图中可以看出, BS 有大量层片状组织, 数量远多于界面处, 底部的 BS 比顶部的 BS 更不规则和不均匀, BS 中 IMCs 的形成机制可能归因于焊接过程中发生的组分液化, 如果液膜不能承受冷却时的应力, 就会沿 BS 形成热裂纹^[19], 在区域 f 可能会成为裂纹源.

图 6 为加入 Ag 中间层 Al/Ag/Mg FSW 接头微观组织形貌. 图 6(b)~图 6(e) 为加入 Ag 中间层的 Al/Ag/Mg 接头显微组织, 表 3 为图 6 中各区域 EDS 分析结果. 从图 6 中可以看出, 加入 Ag 中间层接头界面有大量的微观互锁结构. 根据 EDS 分析, 加入 Ag 中间层的接头界面可能有 Al_3Mg_2 和

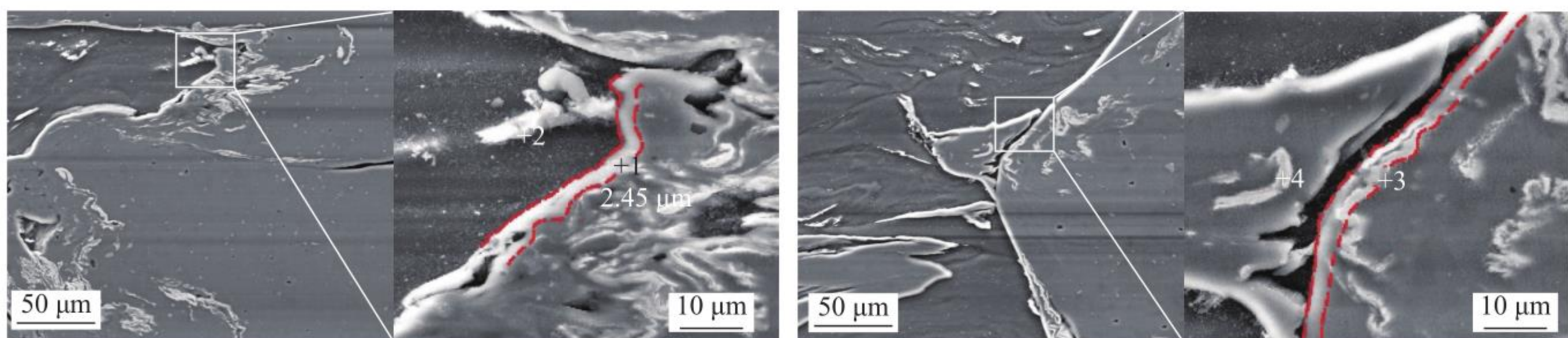
表 2 图 5 中相应区域化学成分 (原子分数, %)
Table 2 Chemical composition of corresponding marked positions in Fig.5

位置	Mg	Al	可能的相
1	33.74	66.26	Al_3Mg_2
2	9.38	90.62	Al
3	41.02	58.08	Al_3Mg_2
4	20.28	79.72	Al_3Mg_2
5	66.70	33.30	$\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$
6	54.13	45.87	$\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$
7	41.19	58.81	Al_3Mg_2
8	59.80	40.20	$\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$
9	66.51	33.49	$\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$
10	42.98	57.02	Al_3Mg_2

$\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 存在,但是不同于未加中间层接头的界面,加入 Ag 中间层的 Al-Mg 类 IMCs 并不连续,如图 6(b)和图 6(c)中区域 2, 3, 4 有一定含量的 Ag 元素出现,在这些位置可能生成了 Mg_3Ag 和 Ag_2Al 等 IMCs. 在图 6(c) 区域 4 的位置 Ag 的含量高达 73.05%,说明除了生成 Ag_2Al 的 IMCs,界面上还存在少量未完全反应的 Ag 单质. 通过测量得到每个位置 IMCs 层厚度,最后计算得到平均层厚为 $2.38 \mu\text{m}$,明显小于未加入中间层接头 IMCs 厚度,表明 Ag 中间层一定程度上阻止了 Al 元素和 Mg 元素的相互扩散,界面 IMCs 由厚且连续分布转变为薄的不连续分布,IMCs 类型也从 Al_3Mg_2 和 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 转变为 Al_3Mg_2 , $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$, Mg_3Ag 和 Ag_2Al 等多种类型.

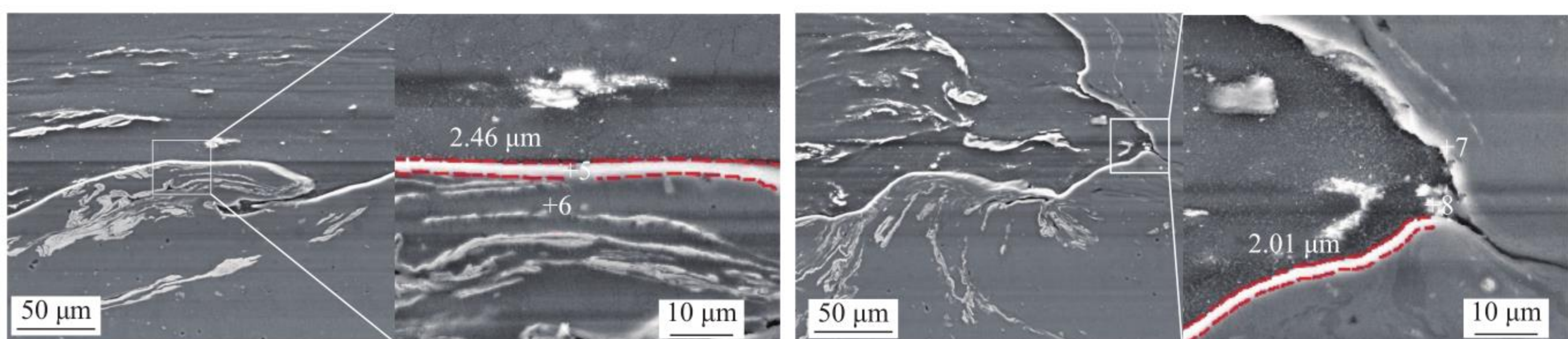


(a) 接头截面形貌



(b) 区域 a

(c) 区域 b



(d) 区域 c

(e) 区域 d

图 6 Al/Ag/Mg FSW 接头微观组织

Fig. 6 Microstructure of Al/Ag/Mg FSW joint. (a) the morphology of the weld joint cross-section; (b) section a; (c) section b; (d) section c; (e) section d

图 7 为加入 Zn 中间层 Al/Zn/Mg FSW 接头微观组织形貌,表 4 为图 7 中各区域 EDS 分析结果.从放大图可以看出,不同于未加入中间层和加入 Ag 中间层的接头,加入 Zn 中间层的界面明显更加

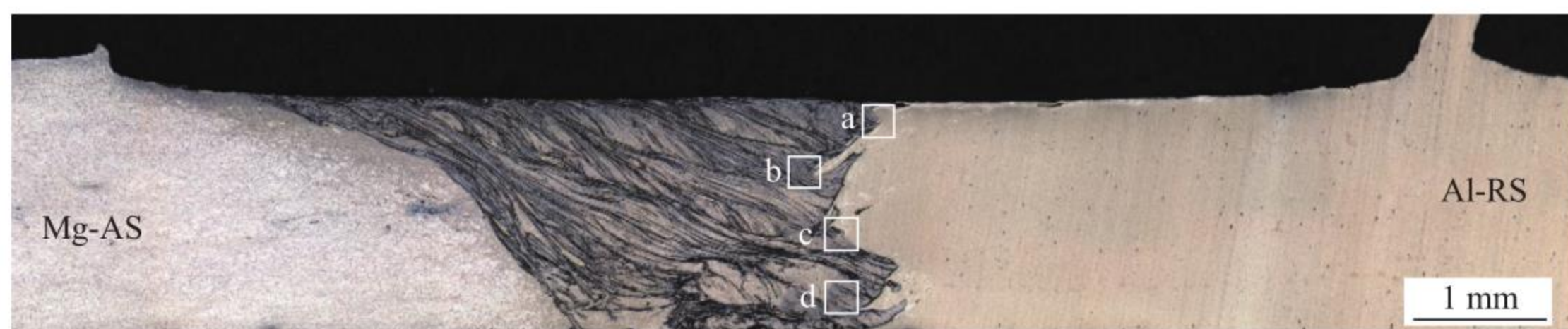
平直,几乎只在界面上存在 IMCs,且机械互锁结构很少.根据 EDS 分析,加入 Zn 中间层的 Al/Zn/Mg 接头界面可能的 IMCs 类型为 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 和 Al_3Mg_2 ,与加入 Ag 中间层不同,在加入 Zn 中间层的界面

表 3 图 6 中相应区域化学成分 (原子分数, %)
Table 3 Chemical composition of corresponding marked positions in Fig.6

位置	Mg	Al	Ag	相组成
1	48.28	51.96	2.94	Al_3Mg_2
2	54.13	45.87	18.21	$Mg_3Ag + Ag_2Al$
3	15.83	33.18	50.98	$Ag_2Al + Mg$
4	4.58	22.38	73.05	$Ag_2Al + Ag$
5	65.49	30.01	4.50	Al_3Mg_2
6	3.81	68.27	27.91	$Ag_2Al + Al$
7	19.82	77.47	2.71	Al_3Mg_2
8	51.59	27.12	21.29	$Mg_3Ag + Al$

上 Zn 的含量最高仅为 4.83%, 并没有与 Al 或

Mg 基体形成 Al-Zn 或 Mg-Zn 类型的 IMCs. 一般而言, Zn 的熔点低 ($419.5\text{ }^\circ\text{C}$), 且更易与 Mg 形成 Mg-Zn 类金属间化合物, 但是由于 Zn 的熔点过低, 且试验中加入 Zn 箔的厚度仅为 $10\text{ }\mu\text{m}$, 这导致在较高的热输入下, Zn 箔发生液化, 在搅拌头作用下液化的 Zn 箔被带入到 WNZ, 实际上并未与 Al 或 Mg 基体发生冶金反应, 所以在界面处没有发现 Al-Zn 或 Mg-Zn 类型的 IMCs. 通过计算得到界面 IMCs 平均层厚为 $3.09\text{ }\mu\text{m}$, 小于未加入中间层接头、大于加入 Ag 中间层接头的界面 IMCs 厚度, 尽管搅拌针的作用减少了界面处的 Zn 元素含量, 但是余下的少量 Zn 也可以在一定程度上减少 Al 和 Mg 的相互扩散^[11].



(a) 接头截面形貌

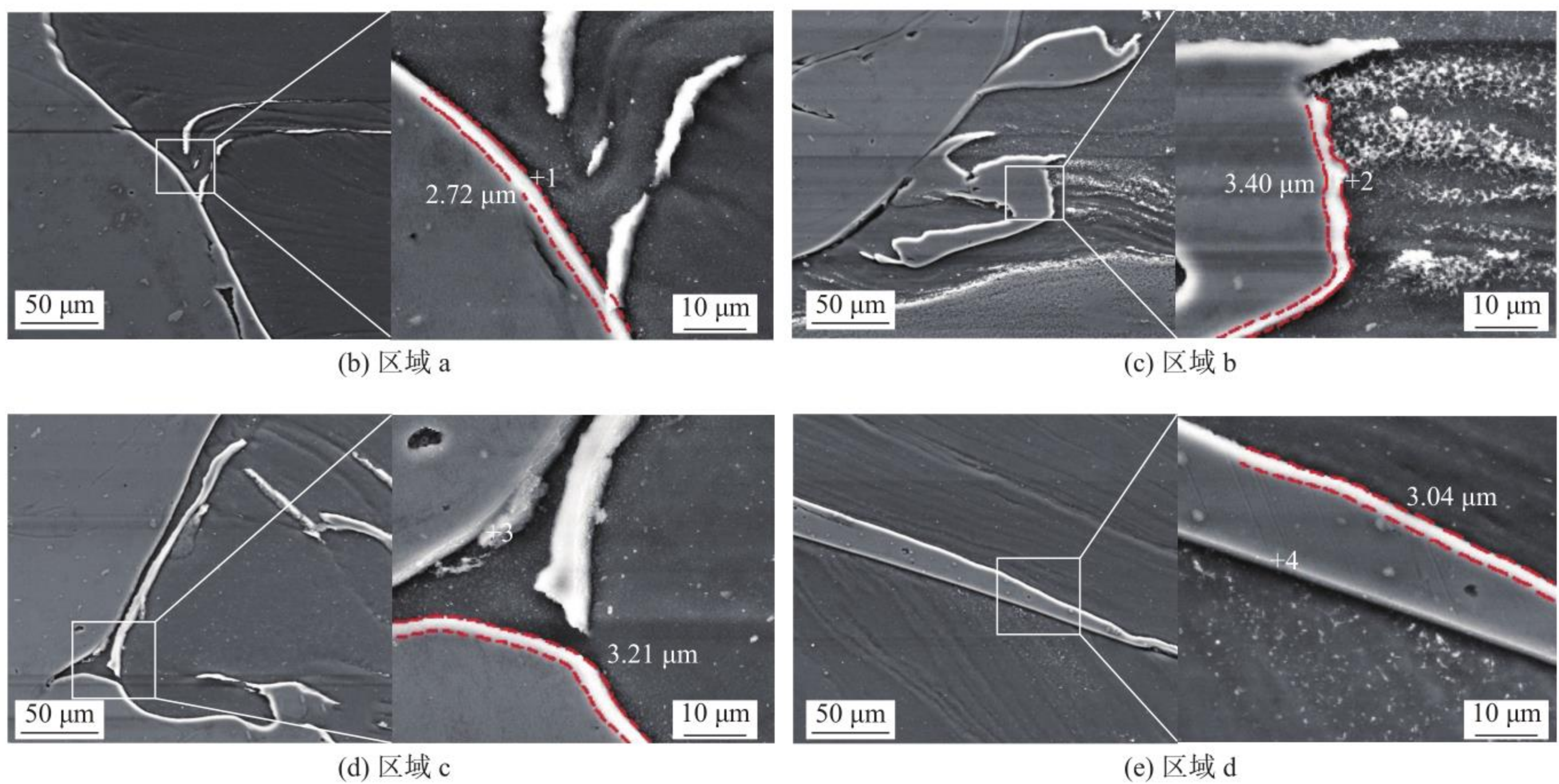


图 7 Al/Zn/Mg FSW 接头微观组织

Fig. 7 Microstructure of Al/Zn/Mg FSW joint. (a) the morphology of the weld joint cross-section; (b) section a; (c) section b; (d) section c; (e) section d

XRD 分析确定了接头界面上的 IMCs 类型. 图 8 为三种接头界面微区 XRD 谱图, 从图中可以得到, 除了 Al 和 Mg 基体相, 在 Al/Mg 和 Al/Zn/Mg 两种接头中主要的相为 $Al_{12}Mg_{17}$ 和 Al_3Mg_2 , 在 Al/Ag/Mg 接头中除了 $Al_{12}Mg_{17}$ 和 Al_3Mg_2 , 还有 Mg_3Ag 和 Ag_2Al 存在, 这与 EDS 结果一致.

2.3 力学性能

图 9 和图 10 分别为三种接头应力—位移曲线及抗拉强度和断后伸长率柱状图. 从图 9 中可以看出, 常规 Al/Mg 接头的抗拉强度为 175 MPa, 断后伸长率为 2.75%; 加入 Ag 中间层的 Al/Ag/Mg 接头抗拉强度高达 190 MPa, 断后伸长率提高到

表 4 图 7 中相应区域化学成分 (原子分数, %) Table 4 Chemical composition of corresponding marked positions in Fig. 7

位置	Mg	Al	Zn	相组成
1	33.09	66.27	0.64	Al ₃ Mg ₂
2	54.61	40.56	4.83	Al ₁₂ Mg ₁₇
3	41.90	57.17	0.93	Al ₃ Mg ₂
4	63.75	31.77	4.47	Al ₁₂ Mg ₁₇

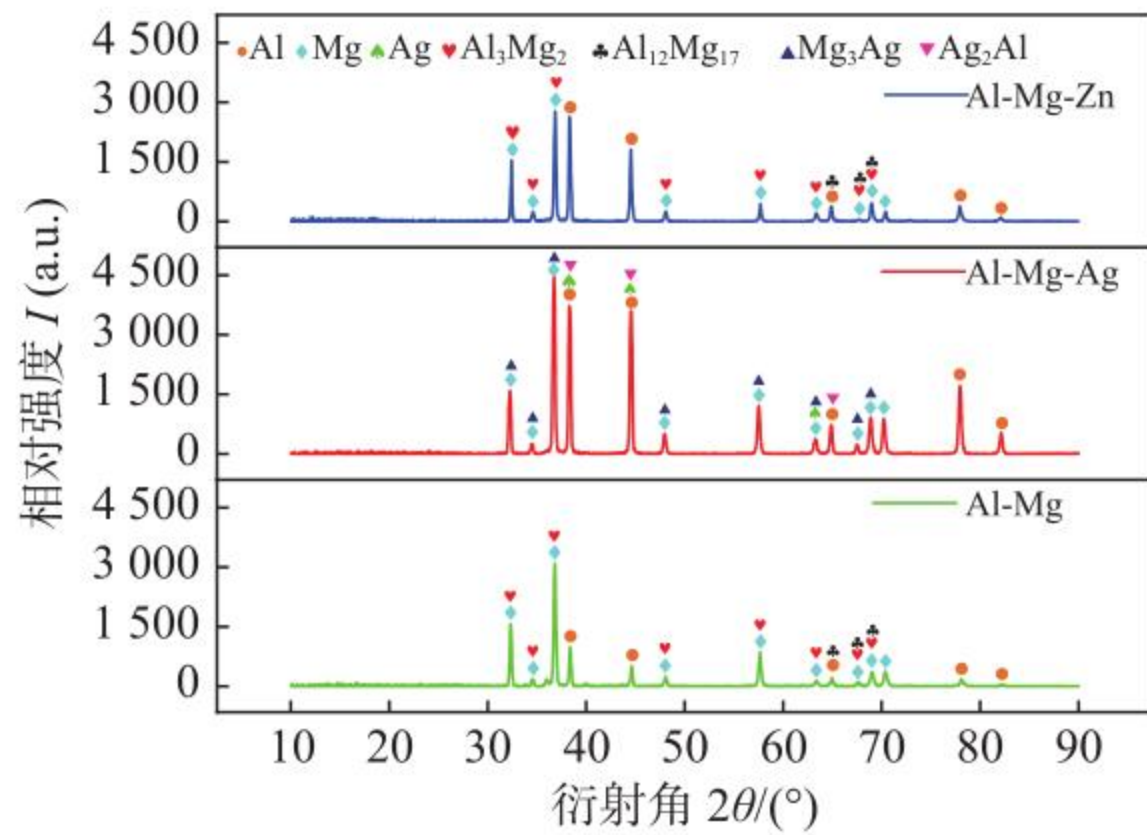


图 8 不同中间层 FSW 接头 XRD 分析 Fig. 8 XRD analysis of FSW connectors of different interlayers

5.13%; 加入 Zn 中间层的 Al/Zn/Mg 接头抗拉强度最低, 为 161 MPa, 断后伸长率为 1.45%.

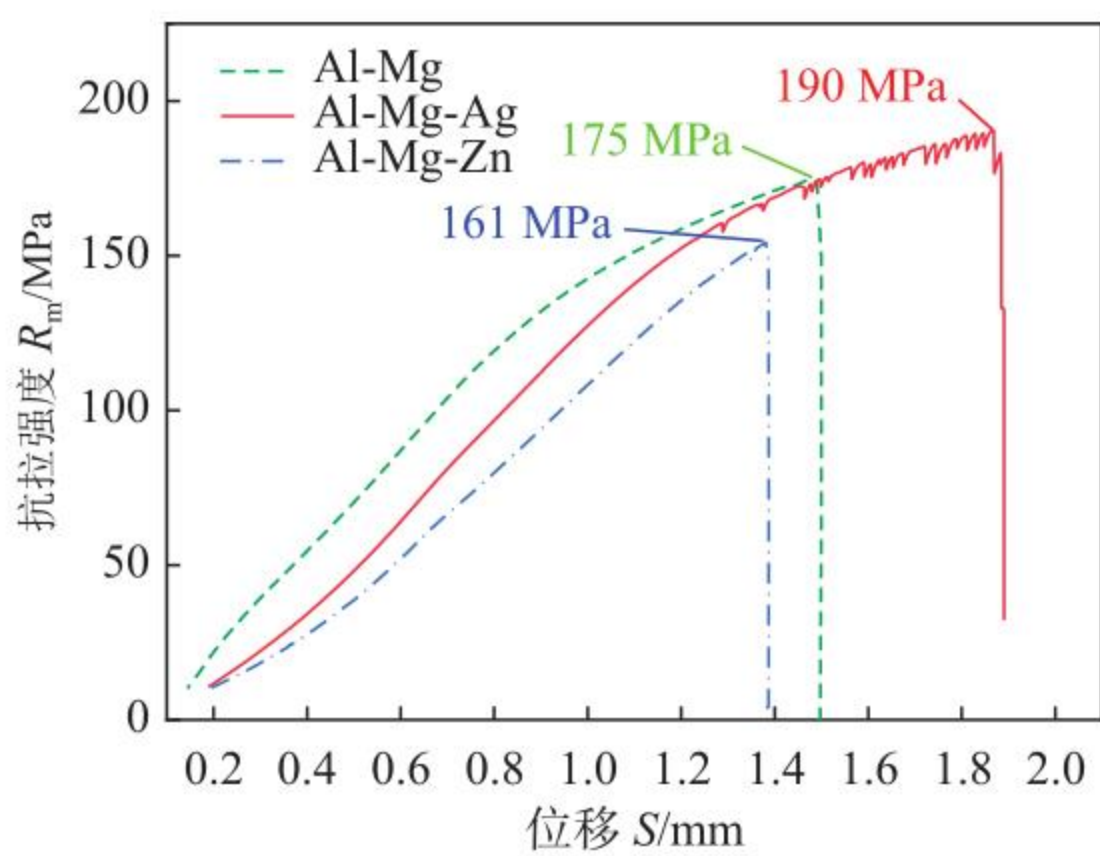


图 9 不同中间层作用接头抗拉强度—位移曲线 Fig. 9 Tensile stress-displacement curves of joints with different interlayers effects

图 11 为三种接头断裂位置的截面宏观形貌, 从图 11(a) 可以观察到, Al/Mg 接头的断裂位置在 BS, 从图 5 可以看出, 在 BS 有大量片状或颗粒状的脆性 IMCs 交替重叠, 裂纹在这些脆性的 IMCs 上形成扩展, 最终断裂. 结合断口形貌图 12(a) 分析, 断裂方式呈现为脆性断裂; 从图 11(b) 可以观察到, 在 Al/Ag/Mg 接头中, 裂纹穿过了界面机械互锁的区域, 沿界面发生断裂, 结合图 12(b), 断口上存在大量韧窝, 断裂方式表现为韧性断裂. 根据前面

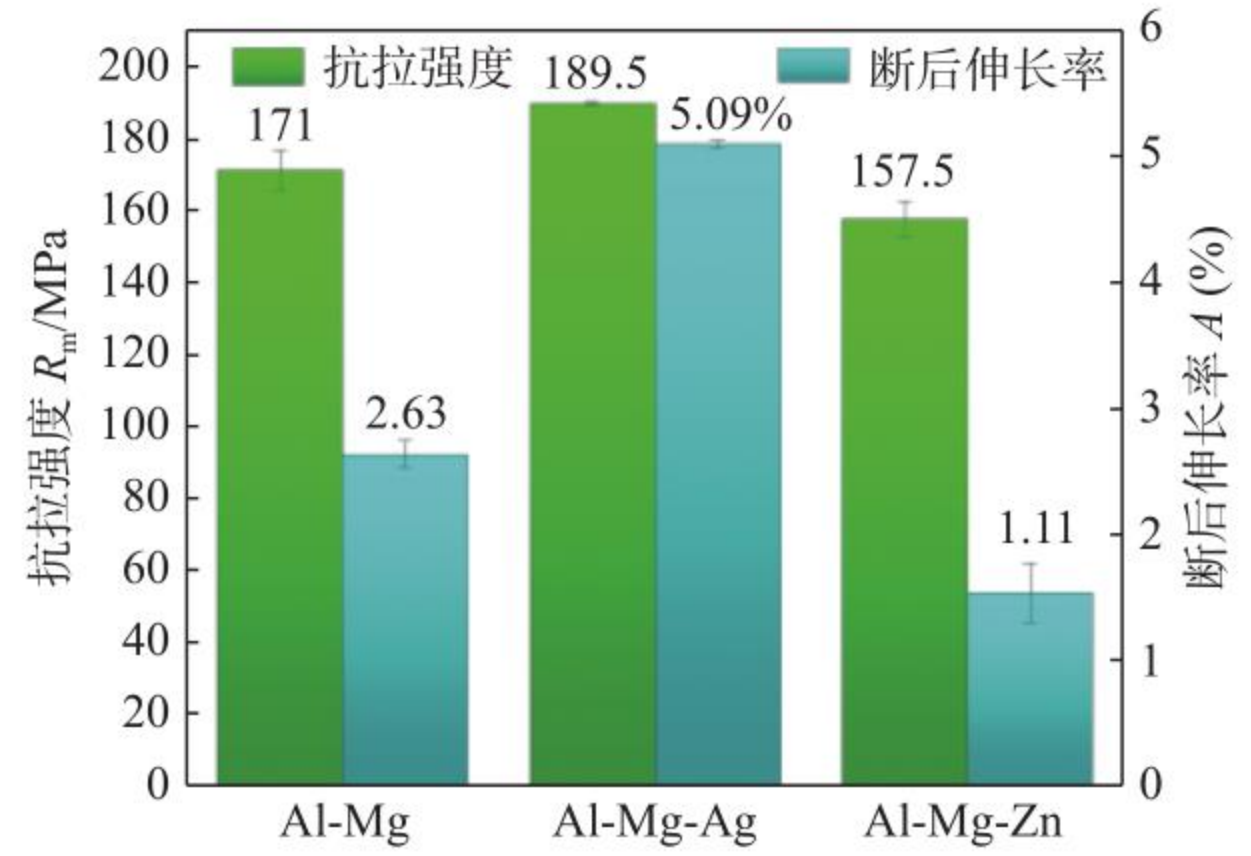


图 10 不同中间层接头抗拉强度及断后伸长率 Fig. 10 Tensile strength and elongation of different interlayer joints

的研究, 加入 Ag 中间层后, 界面 IMCs 层厚度明显减小, 界面上连续分布 Al₃Mg₂ 和 Al₁₂Mg₁₇ 转变为不连续分布的 Al₃Mg₂, Al₁₂Mg₁₇, Mg₃Ag 和 Ag₂Al 等多种 IMCs, 很好的解释了加入 Ag 中间层后接头获得了极高的抗拉强度, 此外 Ag₂Al 和 Mg₃Ag 有相当好的延展性和断裂韧性^[20-21], 因此 Al/Ag/Mg 接头展现出了较高的断后伸长率; 从图 11(c) 观察到, 加入 Zn 中间层的 Al/Zn/Mg 接头裂纹沿界面扩展并发生断裂, 结合图 12(c), 断口上有明显的解理台阶, 断裂方式表现为脆性断裂, 在其他的研究中, 加入 Zn 中间层都获得了比常规 Al/Mg 接头更高的抗拉强度, 但是在文中加入 Zn 中间层反而抗拉强度降低, 从前文的结果来看, 在搅拌针作用下液化的 Zn 箔被带入到 WNZ, 剩余的 Zn 并没有在界面与 Al 或 Mg 发生反应生成 Al-Zn 或者 Mg-Zn 类型的 IMCs, 而是仅仅有很少一部分的 Zn 固溶在了 Al-Mg IMCs 中, 且界面平直, 微观互锁结构很少,

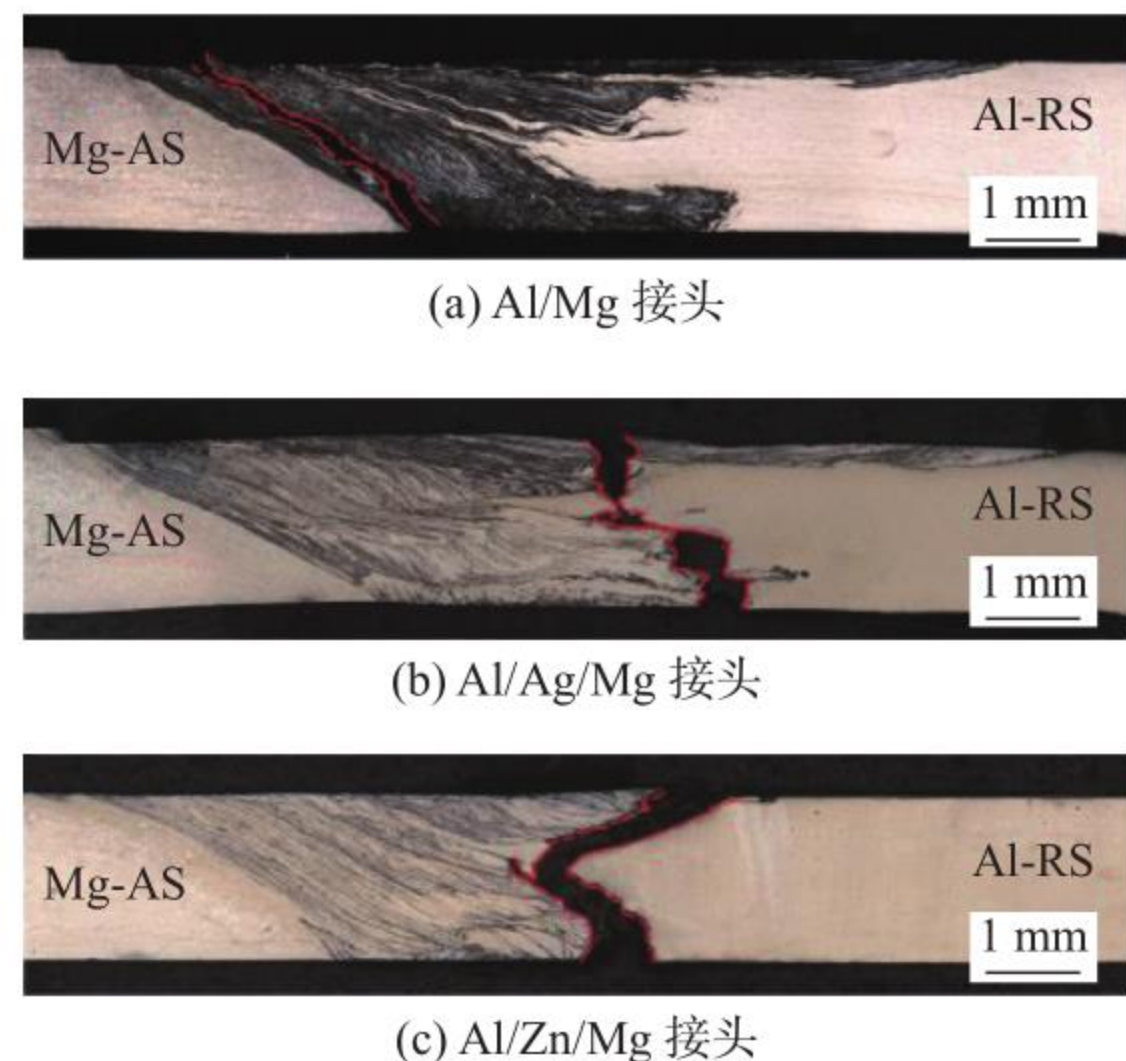


图 11 接头断裂截面 Fig. 11 Fracture section of weld joint. (a) Al/Mg joint; (b) Al/Ag/Mg joint; (c) Al/Zn/Mg joint

导致了裂纹从界面的 IMCs 中产生和扩展, 最终断裂.

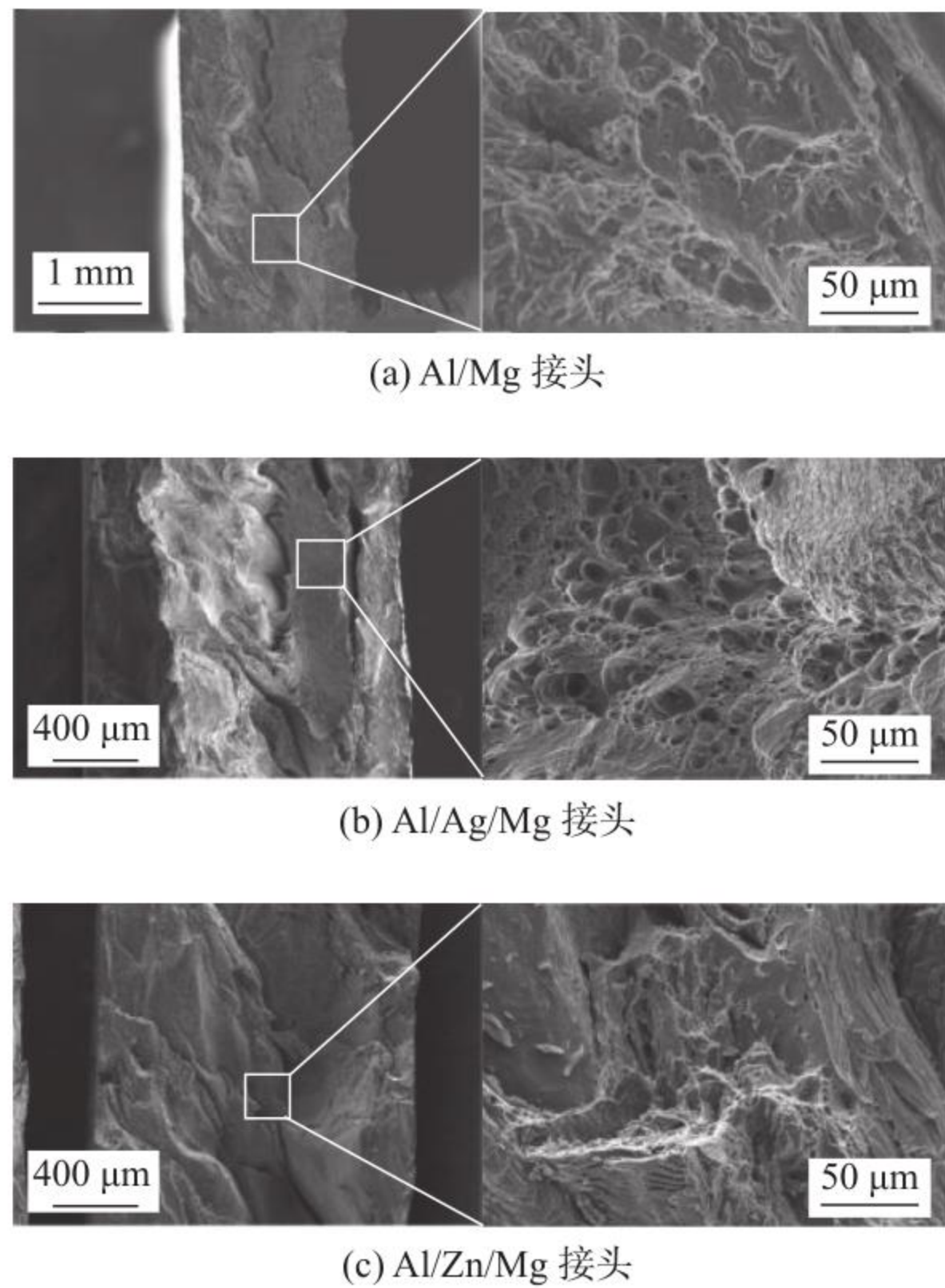


图 12 三种接头断口形貌

Fig. 12 Fracture morphology of three kinds of joints. (a) Al/Mg joint; (b) Al/Ag/Mg joint; (c) Al/Zn/Mg joint

3 结论

(1) 与未加入中间层的 Al/Mg 接头对比, 加入 Ag 中间层的接头界面 IMCs 厚度、分布和类型均发生了改变, 由厚且连续分布的 Al_3Mg_2 , $Al_{12}Mg_{17}$ 转变为薄且不连续分布的 Al_3Mg_2 , $Al_{12}Mg_{17}$, Mg_3Ag 和 Ag_2Al . 加入 Zn 中间层的接头界面 IMCs 厚度变小, 没有生成含 Zn 的 IMCs.

(2) 加入 Ag 中间层的接头获得了最高的抗拉强度和断后伸长率, 分别为 190 MPa 和 5.13%. 由于 Zn 的熔点过低以至于液化的 Zn 箔在搅拌针作用下进入 WNZ, 并未与 Mg 和 Al 基体发生冶金反应, 导致无法在界面上起到替换 IMCs 的作用, 接头性能较低.

参考文献

- [1] Xu Y, Ke L, Mao Y, *et al.* An innovative joint interface design for reducing intermetallic compounds and improving joint strength of thick plate friction stir welded Al/Mg joints[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2023, 11(9): 3151 – 3160.
- [2] Christy J V, Mourad A H I, Sherif M M, *et al.* Review of recent trends in friction stir welding process of aluminium alloys and aluminium metal matrix composites[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2021, 31(11): 3281 – 3309.
- [3] 陈影, 沈长斌, 葛继平. Mg/Al 异种金属焊接的研究现状 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2012, 41(S2): 109 – 112.
Chen Ying, Shen Changbin, Ge Jiping. Research progress on the welding of Mg/Al dissimilar metals[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2012, 41(S2): 109 – 112.
- [4] Liu P, Li Y, Geng H, *et al.* Microstructure characteristics in TIG welded joint of Mg/Al dissimilar materials[J]. *Materials Letters*, 2007, 61(6): 1288 – 1291.
- [5] Shang J, Wang K, Zhou Q, *et al.* Microstructure characteristics and mechanical properties of cold metal transfer welding Mg/Al dissimilar metals[J]. *Materials & Design*, 2012, 34(2): 559 – 565.
- [6] 李达, 孙明辉, 崔占全. 工艺参数对铝镁搅拌摩擦焊焊缝成形质量的影响 [J]. *焊接学报*, 2011, 32(8): 97 – 100.
Li Da, Sun Minhui, Cui Zhanquan. Effect of parameters on friction stir welding joint of 7075 Al and AZ31B Mg[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2011, 32(8): 97 – 100.
- [7] Hirano S, Okamoto K, Doi M, *et al.* Microstructure of the interface in magnesium alloy to aluminium alloy dissimilar joints produced by friction stir welding[J]. *Welding International*, 2004, 18(9): 702 – 708.
- [8] 徐洋, 柯黎明, 聂浩, 等. 局部强冷作用下厚板铝合金/镁合金搅拌摩擦焊界面金属间化合物的析出行为 [J]. *金属学报*, 2024, 60(6): 777 – 788.
Xu Yang, Ke Liming, Nie Hao, *et al.* Precipitation behavior of intermetallic compounds at the interface of thick plate friction stir welded Al alloy/Mg alloy joints under local strong cooling[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2024, 60(6): 777 – 788.
- [9] 徐洋, 柯黎明, 毛育青, 等. 转速对铝/镁搅拌摩擦焊接头金属间化合物及低熔点共晶的影响 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2021, 50(12): 4209 – 4217.
Xu Yang, Ke Liming, Mao Yuqing, *et al.* Effect of rotational speed on intermetallic compounds and low melting point eutectic of Al/Mg friction stir welded joints[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2021, 50(12): 4209 – 4217.
- [10] Xu Y, Ke L, Ouyang S, *et al.* Precipitation behavior of intermetallic compounds and their effect on mechanical properties of thick plate friction stir welded Al/Mg joint[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 64: 1059 – 1069.
- [11] Abdollahzadeh A, Shokuhfar A, Cabrera J M, *et al.* The effect of changing chemical composition in dissimilar Mg/Al friction stir welded butt joints using zinc interlayer[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 34(8): 18 – 30.
- [12] 董少康, 马宇航, 朱浩, 等. 镍中间层对铝/镁异种金属搅拌摩擦焊接头微观组织的影响 [J]. *焊接学报*, 2022, 43(12): 84 – 89.
Dong Shaokang, Ma Yuhang, Zhu Hao, *et al.* Effect of Ni inter-

- layer on microstructure of aluminum/magnesium dissimilar metal friction stir welding joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(12): 84 – 89.
- [13] Dewangan S K, Tripathi M K, Manoj M K, *et al.* Material flow behavior and mechanical properties of dissimilar friction stir welded Al 7075 and Mg AZ31 alloys using Cd interlayer[J]. Metals and Materials International, 2022, 28(5): 1169 – 1183.
- [14] 胡赓祥, 蔡珣, 戎咏华. 材料科学基础 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2010.
- Hu Gengxiang, Cai Xun, Rong Yonghua. Fundamentals of materials science[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2010.
- [15] 王仪宇. Ag 作中间层的镁铝扩散焊接研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- Wang Yiyu, Study on diffusion bonding of Mg alloy and Al alloy by using silver as interlayers[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [16] Peng H, Chen D L, Bai X F, *et al.* Microstructure and mechanical properties of Mg-to-Al dissimilar welded joints with an Ag interlayer using ultrasonic spot welding[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2020, 8(2): 552 – 563.
- [17] Liu H, Hu Y, Dou C, *et al.* An effect of the rotation speed on microstructure and mechanical properties of the friction stir welded 2060-T8 Al-Li alloy[J]. Materials Characterization, 2017, 123: 9 – 19.
- [18] Venkatraman M, Neumann J P. Binary alloy phase diagrams[M]. USA: ASM Handbook, 1990.
- [19] Liang Z, Chen K, Wang Xiaona, *et al.* Effect of tool offset and tool rotational speed on enhancing mechanical property of Al/Mg dissimilar FSW joints[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2013, 44(8): 3721 – 3731.
- [20] Fu S W, Lee C C. A study on intermetallic compound formation in Ag-Al system and evaluation of its mechanical properties by micro-indentation[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2018, 29: 3985 – 3991.
- [21] 杨阳, 毛萍莉, 刘正. 金属间化合物 MgAg 和 MgY 在压力下力学性能的第一性原理计算 [J]. 铸造, 2017, 66(4): 343 – 347.
- Yang Yang, Mao Liping, Liu Zheng. First principles calculation of mechanical properties of metal compounds MgAg and MgY under pressure[J]. Foundry, 2017, 66(4): 343 – 347.

第一作者: 陈书锦, 博士, 教授, 博士研究生导师; 主要研究方向为焊接过程控制; Email: chenshujin7120@126.com.
通信作者: 徐洋, 博士; Email: xuyang_010101@126.com.

(编辑: 郑红)

[上接第 6 页]

- [6] 孔德浩, 张铭雨, 季雨凯, 等. 石墨与金属焊接技术研究现状 [J]. 焊接, 2024(1): 73 – 80.
- Kong Dehao, Zhang Mingyu, Ji Yukai, *et al.* Research status of joining between graphite and metals[J]. Welding & Joining, 2024(1): 73 – 80.
- [7] Guo W, Hu Y, Chen X, *et al.* Super-thick highly thermally conductive graphite/Sn laminated composites assembled by active Ti-containing Sn-Ag-Ti filler metals[J]. Diamond and Related Materials, 2023, 138: 110253.
- [8] Tan Z Q, Li Z Q, Xiong D B, *et al.* A predictive model for interfacial thermal conductance in surface metalized diamond aluminum matrix composites[J]. Materials & Design, 2014, 55: 257 – 262.
- [9] Chen Z B, Bian H, Hu S P, *et al.* Surface modification on wetting and vacuum brazing behavior of graphite using AgCu filler metal[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 348: 104 – 110.
- [10] Zhao J W, Zhao R, Huo Y K, *et al.* Effects of surface roughness, temperature, and pressure on interface thermal resistance of thermal interface materials[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 140: 705 – 716.
- [11] Zhao Y, Sugio K, Choi Y, *et al.* Effect of anisotropic thermal conductivity of graphite flakes and interfacial thermal resistance on the effective thermal conductivity of graphite flakes/aluminum composites[J]. Materials Transactions, 2021, 62(1): 98 – 104.
- [12] Zhu P, Zhang Q, Qu S, *et al.* Effect of interface structure on thermal conductivity and stability of diamond/aluminum composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2022, 162: 107161.

第一作者: 张俊杰, 博士研究生; 主要研究方向为新材料及异种材料连接; Email: zhangjjhit@126.com.
通信作者: 亓钧雷, 博士, 教授; Email: jlqi@hit.edu.cn.

(编辑: 郑红)