

# 镁/铝层合板 FSW 接头微观组织及力学性能

陈洪胜<sup>1</sup>, 王文先<sup>2</sup>, 陈伟<sup>2</sup>, 张婷婷<sup>1</sup>, 刘润爱<sup>1</sup>, 杨涛<sup>1</sup>

(1. 太原理工大学, 太原, 030024; 2. 先进镁基材料山西省重点实验室, 太原, 030024)

**摘要:** 文中采用搅拌摩擦焊 (FSW) 方法对 Mg/Al 层合板进行单面、双面对接方式焊接, 对接头的微观组织和力学性能进行测试. 结果表明, 随着焊接速度和搅拌针旋转速度的增加, 焊缝表面成形良好, 接头不同区域未见气孔、裂纹等缺陷, 物相主要由  $Mg_{17}Al_{12}$ ,  $Mg_2Al_3$  和 MgAl 等组成, 接头部位的晶粒尺寸得到明显细化, 产生了动态再结晶, 金属间化合物的形成有利于动态再结晶的形核. Mg/Al 层合板双面 FSW 焊接头的拉伸强度和断后伸长率高于单面焊接接头的强度和断后伸长率, 主要是由于接头部位金属间化合物的数量和分布不同, 抑制接头部位金属间化合物的形成有利于提高 Mg/Al 层合板 FSW 接头的性能.

**关键词:** Mg/Al 层合板; 搅拌摩擦焊; 金属间化合物; 拉伸强度; 断后伸长率

**中图分类号:** TG 456      **文献标识码:** A      **doi:** 10.12073/j.hjxb.20190918002

## 0 序言

随着航空航天工程、车辆工程和武器装备等的快速发展, 对轻量化提出了越来越高的要求. 镁、铝合金由于具有密度低, 高比强度、高比刚度等特点, 使其在轻质高强结构材料领域具有广泛的应用前景<sup>[1-3]</sup>.

铝合金属于面心立方结构, 具有良好的耐腐蚀性、韧性高和良好的加工性能. 镁合金属于密排六方结构, 轻质高强, 但其塑性和耐腐蚀性能较差. 因此, 将铝合金作为覆材, 镁合金作为基材, 制备成 Mg/Al 层合板综合了镁、铝合金的优势<sup>[4]</sup>.

目前制备层合板的方法主要有热压法<sup>[5]</sup>、多道次热轧法<sup>[6-7]</sup>、波纹轧制法<sup>[8]</sup>和爆炸焊复合法<sup>[9]</sup>. 在上述方法中, 爆炸焊方法是利用被引爆的炸药产生爆炸波形成动能和热能作为焊接热源, 特别适合于同种或异种金属大面积板材的制备, 例如钢/铝、碳钢/不锈钢、Mg/Al 等层状复合板, 具有效率高和异种材料相容性要求低, 不受材料、板材尺寸和形状限制等特点<sup>[10-11]</sup>.

采用传统的熔化焊方法在焊接 Mg/Al 层合板的过程中, 容易在焊接接头部位产生脆性的  $Mg_{17}Al_{12}$ ,

$Al_3Mg_2$  等金属间化合物而恶化接头性能<sup>[12]</sup>. 搅拌摩擦焊方法 (FSW) 属于固相连接方法, 具有焊接热输入低、大变形和高应变等特点, 对于焊接 Mg/Al 层合板具有独特的优势<sup>[13]</sup>. Sameer 等人<sup>[14]</sup>采用 FSW 方法对 AZ91 镁合金和 AA6082-T6 铝合金进行了焊接. 在焊接 Mg-Al 异种材料的过程中, 焊接接头部位不可避免的产生脆性的金属间化合物. 因此, 抑制 Mg/Al 层合板焊接接头金属间化合物的产生是目前研究的重点.

基于上述研究分析, 采用爆炸焊方法制备了大尺寸的 Mg/Al 层合板, 采用 FSW 方法对 Mg/Al 层合板进行焊接, 焊接方式选用单面焊和双面焊两种方式的对接接头, 研究不同的焊接工艺参数下焊接接头的微观组织演化和力学性能的变化规律, 并对焊接接头的断裂机理进行讨论, 为获得高性能的 Mg/Al 层合板焊接接头提供理论指导.

## 1 试验方法

选用爆炸焊后的 Mg/Al 层合板为原材料, 尺寸为  $200\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ , 通过搅拌摩擦焊 (FSW) 方法进行单面和双面对接接头形式进行焊接, 原始板材微观形貌如图 1 所示.

在不同的焊接工艺参数下, 采用金相显微镜 (OM)、配有能谱 (EDS) 和背散射电子衍射 (EBSD) 的扫描电子显微镜 (SEM) 对单面和双面焊 Mg/Al

收稿日期: 2019 - 09 - 18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51805358); 博士后科学基金资助项目 (2018M631773); 山西省青年基础研究项目 (201801D221122).

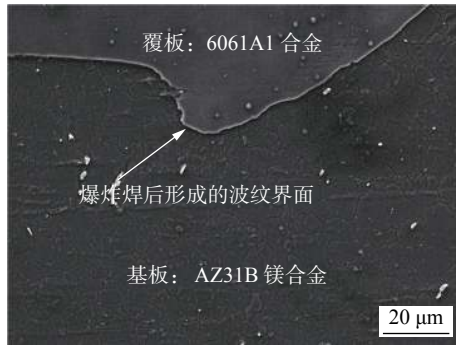
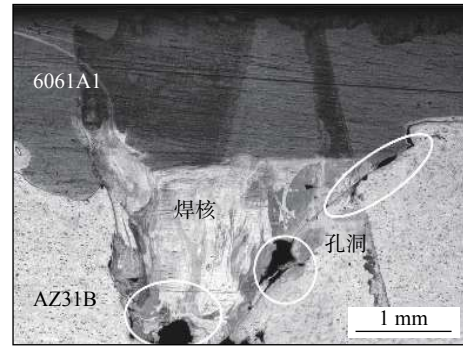


图 1 爆炸焊 Mg/Al 层合板微观形貌  
Fig. 1 Microstructure of Mg/Al plate

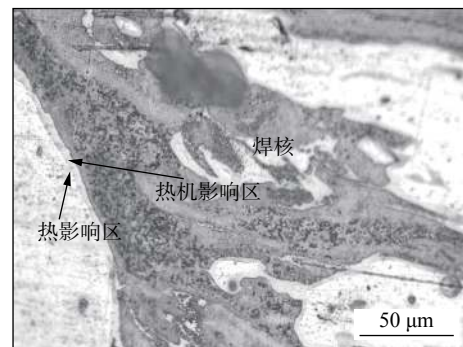
层合板焊接接头的焊核区、热机影响区和热影响区的微观组织形貌进行观察, 通过 X 射线衍射仪 (XRD) 对焊接接头不同区域的物相进行分析, 采用 Instron 万能试验机对焊接接头的力学性能进行测试, 拉伸速度为 0.2 mm/min, 对拉伸断口的微观组织形貌进行观察, 并对其断裂机理进行讨论。

## 2 微观组织及物相分析

图 2 为在搅拌针速度为 1 200 r/min, 焊接速度为 140, 160 mm/min, 压下量为 0.2, 0.4 mm 工艺参数下单面焊焊接接头的微观组织形貌。表 1 为单面和双面焊接过程中的焊接工艺参数。由图 2a 可以看出, 在焊接接头处存在孔洞, 孔洞位置主要集中在镁合金层与焊核的交接处。这主要是由于在搅拌针的作用下, 铝层和镁层的金属进行搅拌混合, 铝合金搅拌到镁合金一侧。镁/铝金属混合后产生镁铝的金属间化合物, 镁、铝间金属化合物呈脆硬性, 流动性能较差, 容易在界面连接处产生孔洞, 产生“隧道效应”, 形成贯穿形孔洞缺陷。在焊接接头的热影响区和热机影响区可明显的观察到界面扩散层, 如图 2b 所示。



(a) 1 号参数下微观形貌



(b) 2 号参数下微观形貌

图 2 单面焊焊接接头的缺陷

Fig. 2 Welding defects of single welded. (a) microstructure of No. 1 sample; (b) microstructure of No. 2 sample

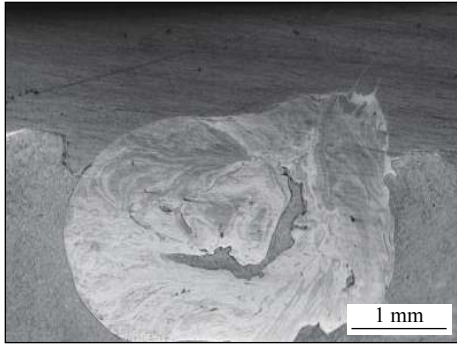
图 3 为通过改变 FSW 焊接工艺参数, 增大热输入后焊接接头的微观组织相貌。由图 3a 可见, 在焊接接头部位未见明显的孔洞等缺陷, 在剪切力和轴肩力的作用下, 被焊材料发生了严重的塑性变形, 覆板铝合金搅拌到基板镁合金中, 形成类似“旋涡状”层线状形貌。在镁合金侧, 焊核部位与基板镁合金存在明显的界面, 如图 3b 所示。

图 4 为不同焊接工艺参数下, 双面焊的焊接接头微观组织形貌。焊接铝合金一侧时, 搅拌针长度近似为铝合金覆板的厚度, 焊接镁合金一侧时, 搅

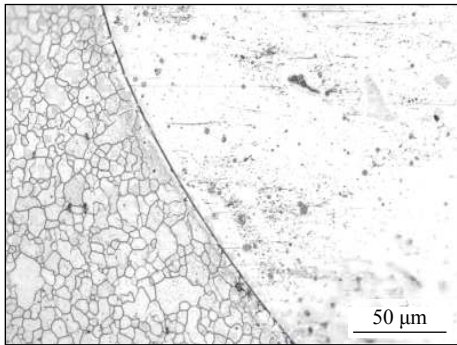
表 1 单面和双面 FSW 焊接过程中的焊接工艺参数

Table 1 Welding parameters of single and double FSW during process

焊接形式	序号	搅拌针直径 $d_1$ /mm	轴肩直径 $d_2$ /mm	焊接速度 $v$ /(mm·min <sup>-1</sup> )	转速 $n$ /(r·min <sup>-1</sup> )	下压量 $\Delta h$ /mm
单面焊	1	10	25	140	1 200	0.2
单面焊	2	10	25	160	1 200	0.4
单面焊	3	10	25	160	1 500	0.2
单面焊	4	10	25	160	1 500	0.4
双面焊Al侧	5	4	12	160	1 200	0.2
双面焊Al侧	6	4	12	160	1 200	0.4
双面焊Mg侧	7	3	9	160	800	0.2



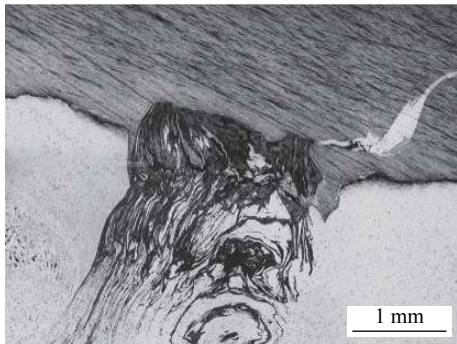
(a) 3号参数下微观形貌



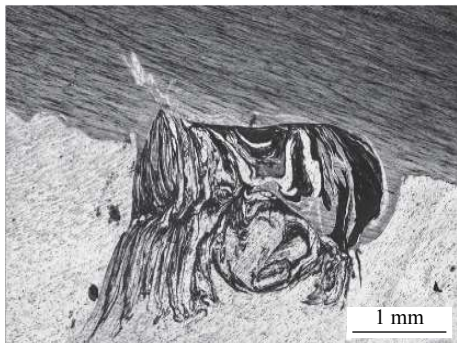
(b) 3号参数下界面处

图 3 单面焊接接头金相组织形貌

Fig. 3 Microstructure of single welded. (a) microstructure of No. 3 sample; (b) microstructure of No. 3 interface



(a) 5号参数下微观形貌



(b) 7号参数下微观形貌

图 4 双面焊接接头微观组织形貌

Fig. 4 Microstructure of double welded. (a) No. 5 sample; (b) No.7 sample

拌针长度为镁合金基板的厚度. 由不同焊接工艺参数下焊接接头的微观组织形貌可以看出, 在焊接接头部位未见明显的孔洞等焊接缺陷, 焊核区域呈“层线”状条带, 组织结构较为复杂. 对单面焊 Mg/Al 层合板 FSW 焊接接头不同位置的物相进行分析, 图 5 为 XRD 衍射图谱. 由图可知, 在镁层侧和铝层侧的焊核和热机影响区均存在  $Mg_{17}Al_{12}$ ,  $Al_3Mg_2$  和  $AlMg$  金属间化合物.

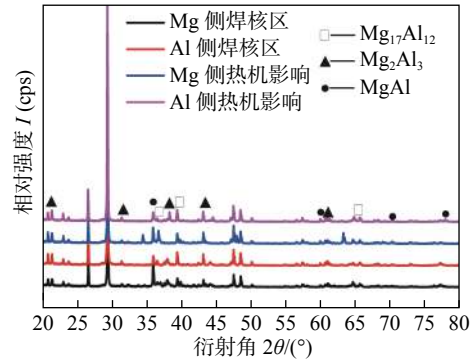


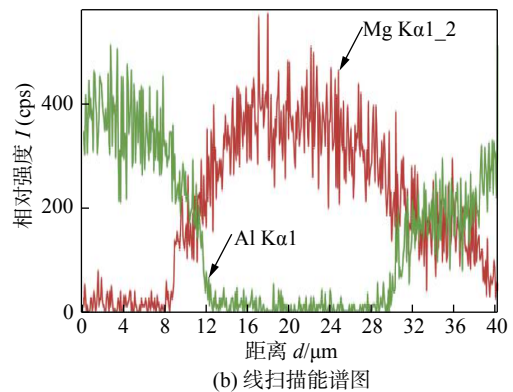
图 5 Mg/Al 层合板 FSW 接头 XRD 衍射图谱

Fig. 5 XRD patterns of FSW welded of Mg/Al plate

图 6 为单面焊 Mg/Al 层合板 FSW 焊接接头的微观组织形貌及能谱分析. 由图 6b 线扫描能谱可以看出, 在界面处的 Mg, Al 元素扩散较为平缓, 未见元素的突变. 由图 7 可知, 在焊核区域位置, 局部存在的 Mg 合金与铝合金产生界面反应, 在 Mg/Al 界面处产生了界面扩散层, 厚度约 2.5 微米.



(a) 单面焊 SEM 形貌



(b) 线扫描能谱图

图 6 单面焊 SEM 形貌和能谱图

Fig. 6 SEM image and line scan pattern of single welded. (a) SEM image; (b) line scan pattern



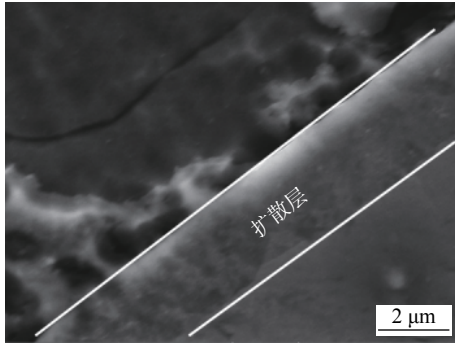


图 7 焊核区局部放大

Fig. 7 Local magnification of nugget zone

图 8 为双面焊 Mg/Al 层合板 FSW 焊接接头微观组织形貌及点扫描图谱. 由微观组织形貌可以看出, 焊核区域中呈“层线”状和“网格”状混合分布. 对“层线状”不同区域进行点扫描分析, 分析位置如图 8b 中的位置所示, 点扫描结果如图 8d 和 8e 所示. 由白色物相“A”点的结果可知, Mg 元素的原子百分比为 67.5%, Al 元素的原子百分比为 24%, 原子比例接近 3:2, “B”点的 Mg 元素的原子百分比为 76.3%, Al 元素的原子百分比为 9.6%. 因此, 白色物相为镁铝间金属化合物, 镁铝间金属化合物分

布在镁合金的晶界位置处, 晶界处的微观组织形貌如图 8c 所示.

图 9 为 FSW 焊接接头的 EBSD 微观形貌. 图 9a 焊接接头的物相图, 由图可知, 在爆炸焊后 Mg/Al 界面处存在少量的金属间化合物, 在热机影响区部位形成了  $Al_3Mg_2$  的金属间化合物. 图 9b 为晶界图, 黑色代表晶界取向大于  $15^\circ$  的高角度晶界 (HAGBs), 绿色代表晶界取向小于  $15^\circ$  的小角度晶界 (LAGBs). 在爆炸焊后形成 Mg/Al 层合板的 Mg 和 Al 层当中, Al 层中的 LAGBs 数量高于 Mg 层中的 LAGBs 数量, 在焊核区域中, 晶粒尺寸得到了明显的细化, 晶粒细化的原因是由于在 FSW 过程中, 焊核区域和热机影响区发生了严重的塑性变形, 导致镁、铝合金的晶粒发生动态在结晶, 同时在焊核区和热机影响区形成的金属间化合物, 可作为动态在结晶的形核点, 有利于动态在结晶的形核, 细化晶粒. 图 9c 为接头区域的再结晶、亚结构和变形的微观形貌. 焊接区域经过塑性变性后, 变形晶粒数量减少, 动态再结晶数量增加. 图 9d 为局部取向差图, 经过大塑性变形后, 各位置的局部取向差增加.

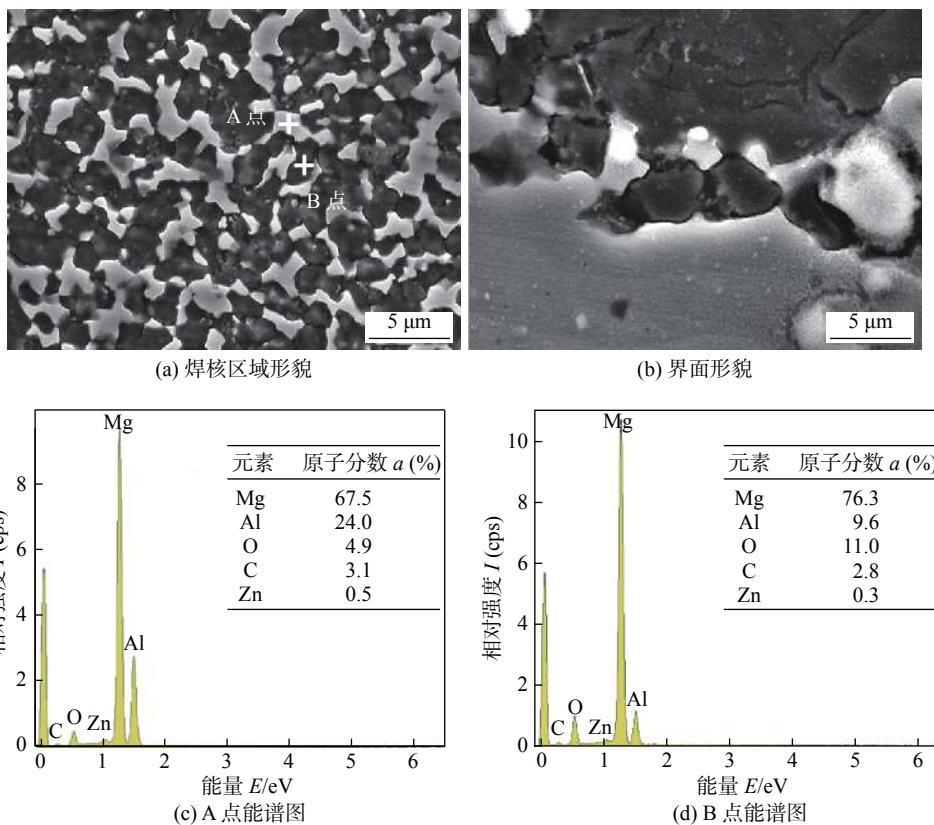


图 8 双面焊 SEM 形貌及点扫描图谱

Fig. 8 SEM image and point scan pattern of double welded. (a) SEM image; (b) interface; (c) A point scan pattern; (d) B point scan pattern

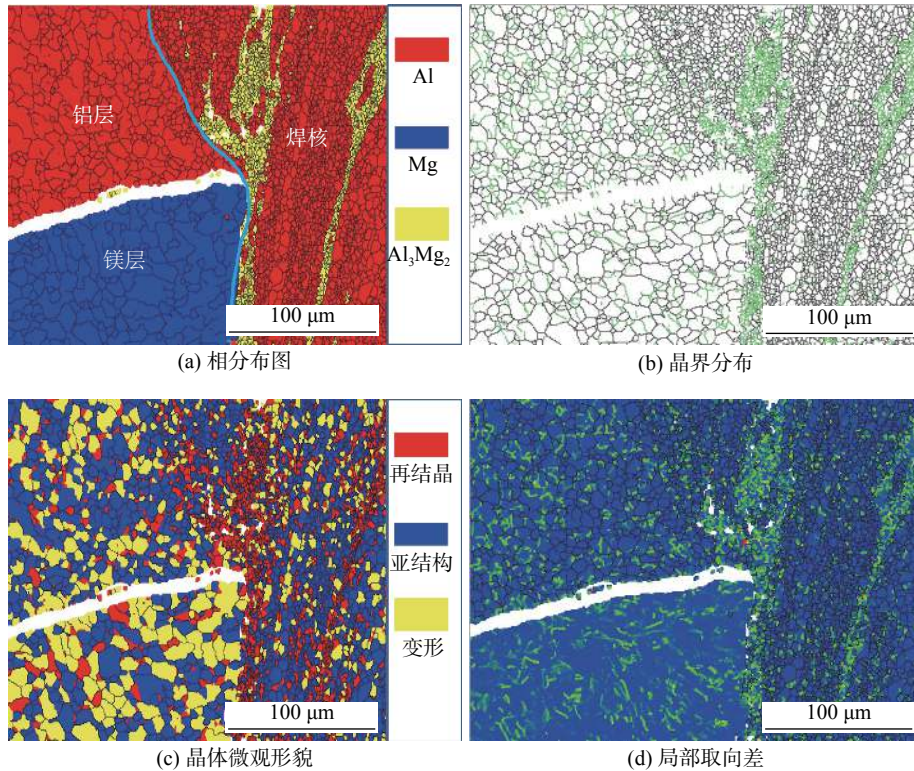


图 9 FSW 焊接接头 EBSD 形貌

Fig. 9 EBSD images of FSW welded joint. (a) phases; (b) distribution of grain boundary; (c) microstructure image; (d) local difference of orientation

### 3 焊接接头拉伸性能分析

图 10 为不同工艺条件下 Mg/Al 层合板焊接接头的应力-应变曲线。有图可以看出，双面焊焊接接头的抗拉强度可达 95 MPa，而单面焊的焊接接头最高为 65 MPa，双面焊接头的抗拉强度明显高于单面焊接头的拉伸强度，但均低于母材 Mg/Al 层合板的抗拉强度 185 MPa，同时双面焊接头的断后伸长率要优于单面焊接头的断后伸长率。主要是由于在双面焊的过程中，减少了 Al 合金和 Mg 合金之间的接触量，降低了 Mg, Al 间脆性的金属间化合物

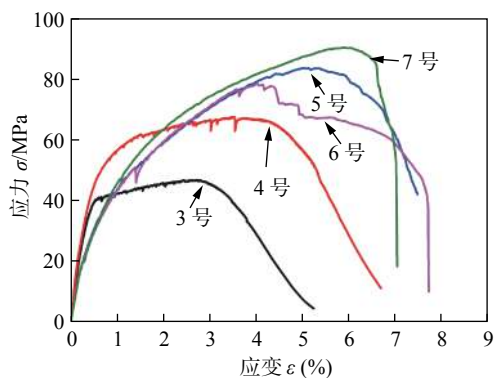


图 10 FSW 焊接接头的拉伸强度

Fig. 10 Tensile strength of FSW welded joint

物的形成。在 Mg/Al 层合板焊接接头部位降低 Mg, Al 间金属化合物的形成、细化晶粒是获得优异力学性能的有效途径。

图 11 为单面焊和双面焊 Mg/Al 层合板 FSW 焊接接头拉伸断口的微观组织形貌图。图 11a, 11b 为单面焊接头拉伸断口的微观组织相貌。由图 11a 可以看出，焊接断口呈层状分布，各层之间的断后伸长率不同。图 11b 为拉伸断口层界面之间的断口形貌，上层的铝合金层呈现明显的韧性断裂，产生了大量的拉伸韧窝，而下层的 Mg, Al 间金属化合物层产生了明显的脆性断裂，断裂呈层片状。

图 11c, 11d 为双面焊接头拉伸断口的形貌。与单面焊焊接接头相比，接头断裂的中间层位置具有一定的韧性，出现了撕裂脊，拉伸韧窝的尺寸较小，这主要是由于单面焊接过程中焊接接头部位形成了“层线”状和“网格”状结构，没有产生大面积的 Mg, Al 金属间化合物，有利于提高焊接接头的韧性。

Mg/Al 层合板 FSW 焊接接头是非均匀结构，异质界面较多，在承受拉伸载荷的过程中，脆性的金属间化合物、Mg 合金层和 Al 合金层的塑性不同，应力集中容易在异质界面处产生，当所受应力超过材料的极限强度时，萌生微裂纹，裂纹不断的



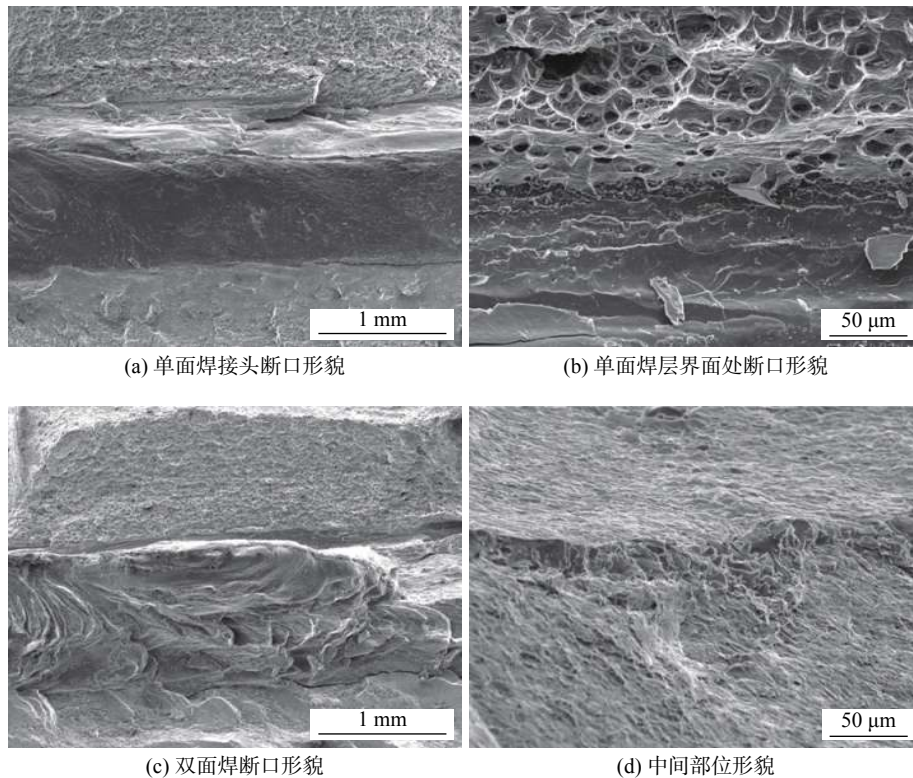


图 11 FSW 接头的断口组织形貌

Fig. 11 Fracture surface of FSW. (a) single welded; (b) interface; (c) double welded; (d) middle section

萌生和扩展。Mg、Al 间形成的金属间化合物的塑性较差, 裂纹优先萌生, 产生裂纹源, 最终导致焊接接头的失效。

#### 4 结论

(1) 文中使用爆炸焊方法制备了 Mg/Al 层合板, 采用搅拌摩擦焊 (FSW) 方法进行了焊接。结果表明, 随着焊接速度和搅拌针旋转速度的增加, 焊接接头表面成形良好, 接头微观组织中无孔洞、裂纹等焊接缺陷。

(2) 在单面焊和双面焊焊接接头中, 不同区域的组织主要呈“层线”状和“网格”状, 焊接接头的主要物相为  $Mg_{17}Al_{12}$ ,  $Al_3Mg_2$ ,  $AlMg$  等金属间化合物, 焊接区域中的晶粒得到了显著的细化, 产生了大量的动态再结晶。

(3) 双面 FSW 焊接接头的抗拉强度高于单面 FSW 焊接接头的抗拉强度, 双面焊焊接接头的抗拉强度可达 95 MPa, 断后伸长率约为 7.5%, 这是由于在焊接接头部位 Mg、Al 间金属化合物数量和分布的影响。研究结果对金属基层状复合材料的连接具有极强的指导意义和参考价值。

#### 参考文献

- [1] Wang M, He B B, Huang M X. Strong and ductile Mg alloys developed by dislocation engineering[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, 35(3): 168 – 169.
- [2] Mahmoud E, Hamed J A, Roohollah J. The study of thermo mechanical and microstructural issues in dissimilar FSW of AA6061 wrought and A390 cast alloys[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 41: 168 – 176.
- [3] Sun H Y, Zhou Q, Zhu J, et al. Deformation analysis of a friction stir-welded thin sheet aluminum alloy joint[J]. *China Welding*, doi: 10.12073/j.cw.20190902002.
- [4] Meng X C, Jin Y Y, Ji S D, et al. Improving friction stir weld ability of Al/Mg alloys via ultrasonically diminishing pin adhesion[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2018, 34(10): 1817 – 1822.
- [5] Zhu B, Liang W, Li X R. Interfacial microstructure, bonding strength and fracture of magnesium-aluminum laminated composite plates fabricated by direct hot pressing[J]. *Material Science Engineering A*, 2011, 528: 6584 – 6488.
- [6] Liu H S, Zhang B, Zhang G P. Microstructures and mechanical properties of al/mg alloy multilayered composites produced by accumulative roll bonding[J]. *Journal Material Science Technology*, 2011, 27(1): 15 – 21.
- [7] Nie H, Liang W, Chi C. Effect of annealing on microstructure and tensile properties of 5052/az31/5052 clad sheets[J]. *JOM*, 2016,

- 68(5): 1 – 11.
- [8] Wang T, Li S, Ren Z, *et al.* A novel approach for preparing Cu/Al laminated composite based on corrugated roll[J]. *Materials Letters*, 2019, 234: 79 – 82.
- [9] 张婷婷, 王文先, 袁晓丹, 等. Mg/Al 合金爆炸焊连接及其界面接合机制 [J]. *机械工程学报*, 2016, 52(12): 52 – 57.  
Zhang Tingting, Wang Wenxian, Yuan Xiaodan, *et al.* Interface bonding mechanism of Mg/Al alloy explosive welded[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(12): 52 – 57.
- [10] Yan Y B, Zhang Z W, Shen W. Microstructure and properties of magnesium AZ31B-aluminum7075 explosively welded composite plate[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2010, 527: 2241 – 2245.
- [11] Wang D Y, Cao X Q, Wang L Fi, *et al.* Influence of hot rolling on the interface microstructure and mechanical properties of explosive welded Mg/Al composite plates[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2017, 32(4): 863 – 873.
- [12] 杜红燕, 李亚江, 刘国良. AZ31/7005 异种材料填丝 GTAW 接头组织分析 [J]. *机械工程学报*, 2015, 51(10): 96 – 102.  
Du Hongyan, Li Yajiang, Liu Guoliang. Microstructure characteristic of AZ31/7005 joints by GTAW with filler wire of Mg-Al alloy[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(10): 96 – 102.
- [13] 温林秀, 赵运强, 董春林, 等. 1561 铝合金搅拌摩擦焊接过程压力特征及接头组织性能分析 [J]. *焊接学报*, 2019, 40(12): 91 – 96.  
Wen Linxiu, Zhao Yunqiang, Dong Chunlin, *et al.* Analysis on characteristics of welding pressure, microstructures and mechanical properties of friction stir welded 1561 aluminum alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(12): 91 – 96.
- [14] Sameer M D, Birru A K. Mechanical and metallurgical properties of friction stir welded dissimilar joints of AZ91 magnesium alloy and AA 6082-T6 aluminium alloy[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, <https://doi.org/10.1016/j.jma.2018.09.004>

第一作者简介: 陈洪胜, 1987 年出生, 博士, 副教授. 主要研究异质材料界面连接行为. Email: [chenhongsheng@tyut.edu.cn](mailto:chenhongsheng@tyut.edu.cn).

(编辑: 曲畅)

## [ 上接第 32 页 ]

- [7] Chen C, Fan C L, Cai X Y, *et al.* Analysis of droplet transfer, weld formation and microstructure in Al-Cu alloy bead welding joint with pulsed ultrasonic-GMAW method[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 271: 144 – 151.
- [8] Chen R R, Zheng D S, Guo J J, *et al.* A novel method for grain refinement and microstructure modification in TiAl alloy by ultrasonic vibration[J]. *Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2016, 653: 23 – 26.
- [9] Tuan N Q, Puga H, Barbosa J, *et al.* Grain refinement of Al-Mg-Sc alloy by ultrasonic treatment[J]. *Metals and Materials International*, 2015, 21(1): 72 – 78.
- [10] Zhang L, Eskin D G, Katgerman L. Influence of ultrasonic melt treatment on the formation of primary intermetallics and related grain refinement in aluminum alloys[J]. *Journal of Materials Science*, 2011, 46(15): 5252 – 5259.
- [11] Jiang R P, Li X Q, Zhang M. Investigation on the mechanism of grain refinement in aluminum alloy solidified under ultrasonic vibration[J]. *Metals and Materials International*, 2015, 21(1): 104 – 108.
- [12] Zhao Y L, Song D F, Lin B, *et al.* 3D characterization of ultrasonic melt processing on the microstructural refinement of Al-Cu alloys using synchrotron X-ray tomography[J]. *Materials Characterization*, 2019, 153: 354 – 365.
- [13] Chen Q H, Lin S B, Yang C L, *et al.* Effect of ultrasound on heterogeneous nucleation in TIG welding of Al-Li alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica-English Letters*, 2016, 29(12): 1081 – 1088.
- [14] Chen Q H, Lin S B, Yang C L, *et al.* Grain fragmentation in ultrasonic-assisted TIG weld of pure aluminum[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, 39: 403 – 413.

第一作者简介: 陈琪昊, 1988 年出生, 博士, 讲师; 主要从事超声-电弧复合焊接方面的工作研究. 已发表论文 10 余篇; Email: [qhchen@just.edu.cn](mailto:qhchen@just.edu.cn).

通信作者简介: 杨春利, 博士, 教授, 博士研究生导师; Email: [yangcl9@hit.edu.cn](mailto:yangcl9@hit.edu.cn).

(编辑: 曲畅)