

# AlSi 合金中间层对铝/镁扩散连接界面组织性能的影响

刘 宁<sup>1</sup>, 刘灿春<sup>1</sup>, 付 莹<sup>2</sup>, 殷福星<sup>1</sup>, 梁春永<sup>1</sup>

(1. 河北工业大学材料科学与工程学院, 天津 300130)

(2. 渤海大学工学院, 辽宁 锦州 121013)

**摘 要:** 以 Al-10Si 合金粉末和纯 Al 粉混合(质量比为 1 : 1)粉末为中间层, 在 450 ℃ 下保温 1 h, 对工业纯铝和工业纯镁进行了扩散连接。采用扫描电子显微镜(SEM)、电子探针(EPMA)分析了界面区域的微观组织和元素分布。结果表明, 在 450 ℃ 下保温 1 h, 混合粉末与铝、镁两侧基体间发生元素扩散, 形成梯度结构的反应层, 反应层从铝侧向镁侧依次为  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  层(I)、 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  层(II)、富硅相层(III)和  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17} + \delta\text{-Mg}$  (IV) 共晶层。反应层总厚度约为 520  $\mu\text{m}$ , 且富硅相层的厚度大于其它 3 层。硬度测试结果显示, Al 和 Mg 两侧基体的平均硬度(HV)分别为 242 和 478 MPa, 靠近 Al 侧的  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  化合物层硬度最高, 硬度值为 2520 MPa;  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17} + \delta\text{-Mg}$  共晶区域的平均硬度为 2100 MPa, 而富硅相层区域的平均硬度为 1980 MPa。拉伸剪切试验结果显示, 增加 AlSi 合金中间层后, Al/Mg 异种金属扩散连接界面结合强度达到 23 MPa; 拉伸剪切断口 XRD 分析表明, 断裂位置位于硬度值最高的  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  化合物层, 拉伸断口呈现典型的脆性断裂特征。

**关键词:** 铝/镁复合材料; 中间层; 界面; 扩散; 结合强度

**中图分类号:** TG146. 21      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1674-3962(2019)02-0173-04

## Effect of AlSi Alloy Interlayer on Microstructure and Mechanical Properties of Diffusion-Bonded Mg/Al Joints

LIU Ning<sup>1</sup>, LIU Cancun<sup>1</sup>, FU Ying<sup>2</sup>, YIN Fuxing<sup>1</sup>, LIANG Chunyong<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

(2. Engineering Department, Bohai University, Jinzhou 121013, China)

**Abstract:** Al-10Si alloy powder and pure Al powder (with a ratio of 1 : 1) were mixed as the intermediate layer, and the diffusion-bonded Mg/Al joints with the interlayer have been investigated. Scanning electron microscopy (SEM) and electron probe (EPMA) were used to analyze the microstructure and element distribution in the interface region. The results show that elemental diffusion occurs between the mixed powder layer and the bases, forming a gradient structure reaction layer.  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$ ,  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ , Si-rich phase and  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17} + \text{Mg}$  eutectic layers are observed in the interface from Al side to Mg side. The thickness of the Si-rich phase layer is greater than that of the other three layers. The hardness test results show that the average hardness value of aluminum and magnesium bases are 242 and 478 MPa, respectively. The  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  intermetallic compound layer near the Al side has the highest hardness, which reaches 2520 MPa. Meanwhile, the average hardness value of the  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17} + \text{Mg}$  eutectic and the Si-rich phase layers are 2100 and 1980 MPa, respectively. Tensile-shear test results show that the bonding strength of Al/Mg joint with the interlayer is 23 MPa. The XRD analysis shows that the fracture site is located in the  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  layer. The fractures exhibit typical brittle fracture characteristics.

**Key words:** aluminum/magnesium composites; interlayer; interface; diffusion; bonding strength

## 1 前 言

进入 21 世纪以来, 世界能源危机、环境污染和温室效应等问题日益严重, 汽车尾气的排放已经给人类的生活带来了重要的负面影响。镁合金作为新型绿色环保工程材料, 具有重量轻、比强度高、比刚度高等优点, 在汽车轻量化和节能减排等方面具有广泛的应用前景<sup>[1]</sup>。但是, 镁合金耐腐蚀性差是制约其应用的主要因素。铝

合金是工业中使用最广泛的绿色结构材料之一，具有较低的密度、良好的成型性能和高的耐腐蚀性等特点。因此，将铝和镁连接形成复合材料，则能充分发挥铝镁各自的优势，具有重要的实际意义<sup>[2-4]</sup>。

目前，Al/Mg 异种金属的连接采用的方法主要是轧制复合法和扩散连接法。真空扩散连接是在高温和一定压力作用下，通过元素的相互扩散作用而实现连接。扩散连接能够有效避免熔焊时裂纹、变形、偏析等缺陷的影响，从而获得结合良好的界面。但是由于高温扩散时 Al, Mg 异种金属在界面处易形成高硬度的脆性中间相化合物，从而降低了界面结合强度和复合材料性能。因此，本研究尝试通过添加 Al 和 Al-10Si 合金混合粉末作为中间层的方法，改变 Al, Mg 异种金属扩散连接时的界面结合状态，从而提高结合性能，为获得界面结合良好的 Al/Mg 复层材料探索新的途径并提供相应的理论和实验依据。

## 2 实验

### 2.1 实验材料

实验的基体材料为工业纯铝(质量分数 99.7%)和工业纯镁(质量分数 99.9%)，中间层材料为 AlSi 合金粉末 (Al 和 Si 原子比为 9:1)和高纯 Al 粉(质量分数 99.9%)。

### 2.2 实验方法

采用线切割方式从工业纯铝锭和工业纯镁锭中分别切下  $\Phi 40\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  的圆柱状块体试样，经砂纸打磨后在丙酮中超声震荡 5 min 并吹干。在 Al, Mg 样品界面处均匀铺一层厚度约为 300  $\mu\text{m}$  的 AlSi 合金粉末和纯 Al 混合粉末，Al-10Si 合金粉和 Al 粉质量比为 1:1。然后将样品放入真空烧结炉内，并施加 50 MPa 的压力压实样品。加热前对炉内进行抽真空处理，当真空度小于 1 Pa 后，以 20  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的速率升温至 450  $^{\circ}\text{C}$ ，保温 1 h 后随炉冷却。当炉内温度降至 200  $^{\circ}\text{C}$  后，将试样取出空冷。

### 2.3 检测分析

采用 JSM-7100F 型扫描电镜(SEM)对试样界面区域进行显微组织观察；采用 JXA-8530F 型电子探针(EPMA)对界面区域元素进行分析；采用 HMV-2T 显微硬度仪对界面区域的硬度进行测量，实验载荷为 10 g、保压时间为 15 s，每个区域测量 3 个点取平均值作为该区域的硬度值；采用岛津 AGS-X 电子万能试验机测量样品在常温下界面结合强度，拉伸速率为 1 mm/min；采用 SEM 和 D8 DISCOVER-X 射线衍射仪(XRD)对断口的形貌和物相进行检测分析。

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 微观组织与成分分布

图 1 为扩散加热温度 450  $^{\circ}\text{C}$ 、保温 1 h，中间连接区域粉末为 Al 粉与 Al-10Si 粉按质量比 1:1 混合的界面区域 SEM 照片、线扫描分析图谱及 EDS 选点位置。从图 1a 中可以看出，铝镁之间实现了完好结合，界面区域没有观察到明显裂纹；同时在界面处形成厚度约为 520  $\mu\text{m}$  的反应层，根据微观形貌的不同可将反应层分为 4 层，从 Al 侧向 Mg 侧依次标记为 I 层、II 层、III 层和 IV 层。图 1b~1d 分别为图 1a 中界面位置(A 区域)、III 层(B 区域)和 IV 层(C 区域)的高放大倍率 SEM 照片，可以观察到，反应层 III 的微观组织比反应层 IV 的细小，且在结合处形成明显的界面。根据 Al-Mg 二元合金相图，当炉膛内的温度达到 437  $^{\circ}\text{C}$  时，中间层粉末中的 Al 会与镁基体中的 Mg 发生共晶反应，从而使中间层粉末呈现液态。另外，由于界面区域存在元素的浓度梯度，发生了元素的相互扩散。线扫描结果进一步证明，在界面区域 Al 和 Mg 发生了明显扩散，Al 和 Mg 元素含量均有一个明显的渐变过程，从 Mg 侧到 Al 侧基体，Mg 的含量逐渐降低，而 Al 呈现相反的变化规律。在冷却过程中，随着温度的不断降低，生成不同的化合物层。同时，虽然反应层 III 与 IV 中 Al, Mg 含量没有明显变化，但由于 Si 元素的存在，导致其微观组织发生了改变。

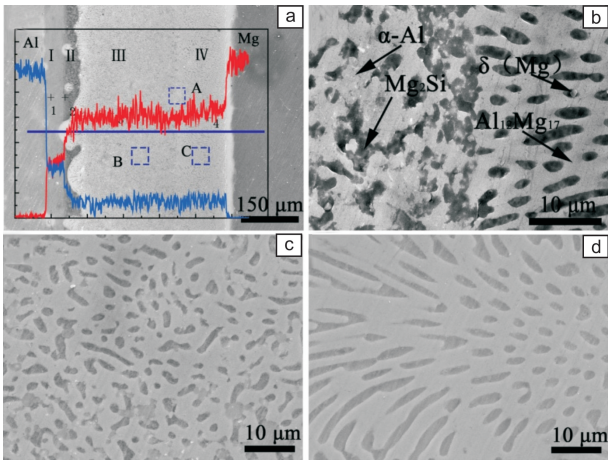


图 1 试样界面区域 SEM 照片及线扫描分析结果(a)，区域 A (b)，区域 B(c) 和区域 C(d) 的局部放大 SEM 照片

Fig. 1 SEM image of the interface of the sample and line scanning result (a), region A (b), region B (c) and region C (d) in Fig. 1a

表 1 为图 1 中界面不同位置处的 EDS 分析结果。由表 1 可知，位置 1( I 层) Al 和 Mg 的原子百分比分别为 62.29%和 37.71%，原子比接近 3 : 2；位置 2( II 层) Al

和 Mg 的原子百分比分别为 46.26% 和 53.74%，原子比接近 12 : 17。结合 Al-Mg 二元合金相图<sup>[5]</sup>，可以认为 I 层和 II 层的物相分别为  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  和  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 。在靠近 Mg 侧基体的 4 位置 (IV 层) 中，Al 和 Mg 原子比大于 12 : 17，可认为该位置是  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  + Mg 的共晶组织；3 位置处 (III 层) Al, Mg, Si 元素的原子百分数分别为 12.4%，56.9% 和 30.7%，结合 Al-Mg-Si 三元合金相图，可认为其为富 Si 的共晶组织。

表 1 Al/Mg 扩散连接界面 EDS 分析结果  
Table 1 EDS results of the Al/Mg interface

Point	Element content (at%)		
	Al	Mg	Si
1	62.29	37.71	—
2	46.26	53.74	—
3	10.43	61.37	30.90
4	30.78	69.22	—

图 2a 为界面区域背散射电子成像照片，图 2b~2d 分别为该区域内 Al, Mg, Si 元素 EDS 面扫描分析结果。由图可见，界面区域根据成分分布的不同可分为 4 层，左侧为 Al 基体，右侧为 Mg 基体，在界面区域 Al 和 Mg 元素呈现明显的梯度分布，在每一层内各元素呈现均匀分布。Si 元素仅分布在 III 层。靠近 Al 侧的  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  层厚度约为 70  $\mu\text{m}$ ， $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  层、富硅共晶层和  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  + Mg 共晶层厚度分别为 15、350 和 120  $\mu\text{m}$ 。

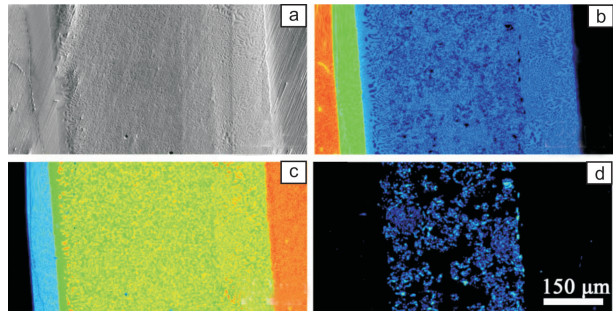


图 2 界面 EPMA 背散射照片 (a)，Al 元素面分布 (b)，Mg 元素面分布 (c) 及 Si 元素面分布 (d)  
Fig. 2 The SEM image (a), Al atom (b), Mg atom (c), and Si atom (d) distributions of the interfacial area

3.2 力学性能

界面区域的显微硬度 (HV) 测试结果如图 3 所示。从图 3 可以看出，铝镁两侧基体的平均硬度分别为 242 和 478 MPa，界面层硬度最高值位于靠近铝基体一侧的  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  层 (I 层)，其值为 2520 MPa，而中间化合物层  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  (II 层) 和  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  + Mg 共晶组织 (IV 层) 的平均硬度分别为 2235 和 2017 MPa。另外，富硅相共晶层 (III

层) 平均硬度值为 2150 MPa，略低于 IV 层硬度值。中间扩散区域的硬度值明显高于两侧基体也进一步证明了界面处高硬度、高脆性的 Al-Mg 金属间化合物层的生成。当 Al/Mg 复合材料受到载荷作用时，中间化合物层将优先作为裂纹源<sup>[6]</sup>。

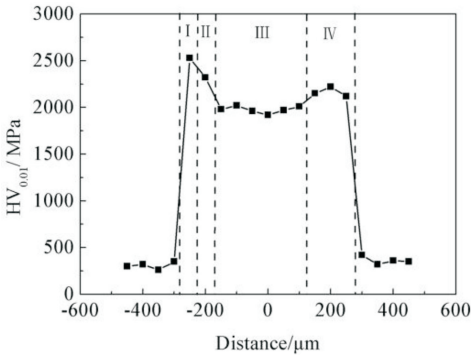


图 3 铝/镁复合材料界面区域显微硬度  
Fig. 3 Microhardness of diffusion-bonded Al/Mg joints

为了研究界面结合强度，对制备的 Al/Mg 复合材料进行室温剪切强度测试。剪切-拉伸试样如图 4a 所示，试样尺寸示意图和剪切拉伸结果如图 4b 所示。结果显示，加入 AlSi 合金中间层的 Al/Mg 复合材料界面剪切强度值最高值为 23 MPa。图 5 为剪切强度实验后 Al, Mg

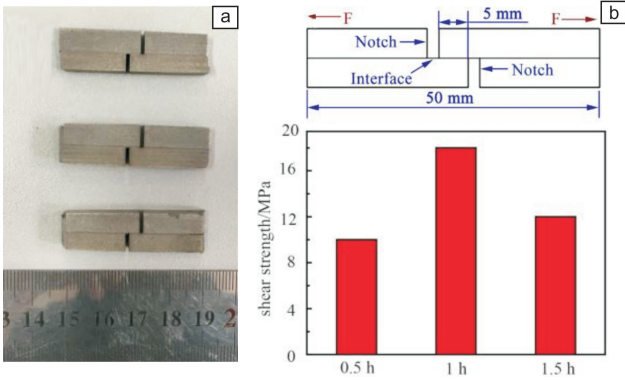


图 4 铝/镁复合材料拉伸剪切试样 (a)，拉伸剪切示意图及拉伸剪切强度 (b)  
Fig. 4 Tensile-shear test samples (a) and tensile-shear strength (b) of the Al/Mg composite with the interlayer

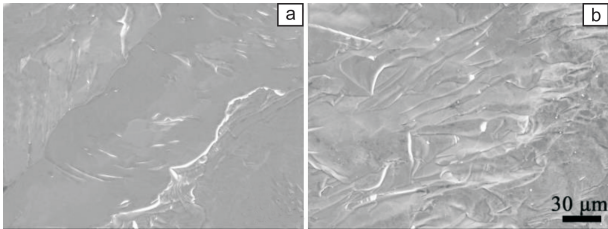


图 5 铝/镁复合材料剪切拉伸试样断面 Al 侧 (a) 及 Mg 侧 (b) SEM 照片  
Fig. 5 Fracture surfaces of Al/Mg joint with the interlayer at Al side (a) and Mg side (b)

两侧断口的扫描照片, Al 侧断口呈现明显河流花样, 断口表面有许多连续微小平面, 断裂时伴随发生的宏观塑性变形极小; Mg 侧断口表面有许多撕裂棱和解理台阶, 并伴随有微裂纹产生, 裂纹增殖方向与解理台阶方向一致, 断面上没有发现韧性断裂的韧窝出现, 说明 Al/Mg 复合材料在拉伸过程发生了脆性断裂。图 6 为断

口表面 XRD 物相分析结果, Al 侧断口存在  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$ 、Al 相, Mg 侧断口存在  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$ 、Mg 相。两侧断口表面都存在  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$ , 说明断裂位置位于界面区域的脆性反应层  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  层, 这主要是因为高硬度、高脆性的金属间化合物的存在。

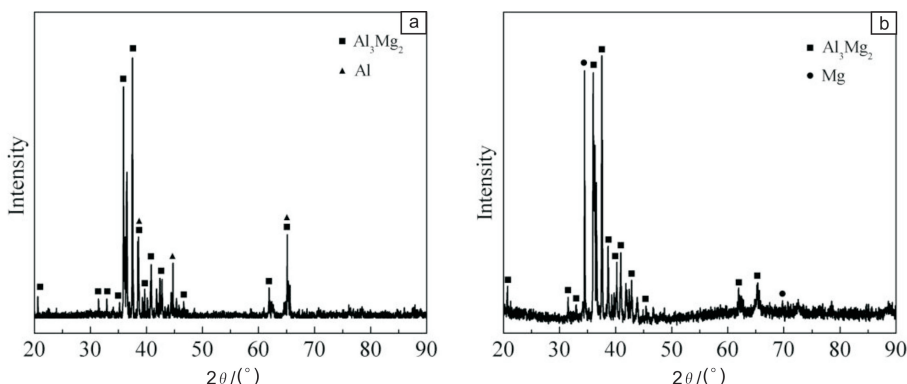


图 6 铝/镁复合材料剪切拉伸试样断面 Al 侧(a)及 Mg 侧(b)XRD 图谱

Fig. 6 XRD patterns of fracture surfaces of Al/Mg joints at Al side (a) and Mg side (b)

## 4 结 论

(1)用质量比 1:1 的 Al 粉和 Al-10Si 粉混合作为中间层, 在热压温度 450 °C 下保温 1 h, 成功实现了纯 Al 和纯 Mg 的连接。

(2)界面区域由  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  层,  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  层, 富 Si 共晶层和  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17} + \delta\text{-Mg}$  共晶层共 4 层组成, 反应层总厚度约 520  $\mu\text{m}$ 。显微硬度结果表明, 界面区域硬度值均高于两侧基体硬度, 且硬度最高值位于  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  层。

(3)剪切强度测试结果显示, 结合强度最高值为 23 MPa。断口分析结果表明, 剪切过程中在界面发生了脆性断裂, 断裂位置位于  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  化合物层。

## 参考文献 References

- [1] Song G. *Advanced Engineering Materials*[J], 2005, 7(7): 563–586.
- [2] Feng B, Xin Y, Guo F, et al. *Acta Materialia* [J], 2016, 120: 379–390.
- [3] Ashby M F, Bréchet Y J M. *Acta Materialia*[J], 2003, 51: 5801–5821.
- [4] Tokunaga T, Matsuura K, Ohno M. *Journal of Alloys and Compounds* [J], 2014, 601: 179–185.
- [5] Liu W, Long L, Ma Y, et al. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2015, 643: 34–39.
- [6] Hajjari E, Divandari M, Razavi S H, et al. *Journal of Materials Science*[J], 2011, 46(20): 6491–6499.

(编辑 张雨明)