第3卷 第1期

2009年3月

文章编号:1673-9981(2009)01-0023-05

# 镁/铝异种材料连接界面的显微组织与 结合强度研究\*

付晓鹏1,梁 伟1,2,李线绒1,朱 波1,王红霞1

(1. 太原理工大学材料科学与工程学院,山西太原 030024;

2. 新材料界面科学与工程教育部重点实验室太原理工大学,山西太原 030024)

摘 要:用镁铝共晶合金粉末作为连接剂,分别在 420 °C 和 450 °C 下加压保温一定时间,对 AZ91D 镁 合金与 5056 铝合金进行了连接.用扫描电子显微镜及配备 EDS 能谱,对铝、镁合金结合界面的显微组 织进行了分析.结果表明,镁铝共晶粉末与两侧基体形成了明显的扩散层,420 °C 时扩散层由 a-Mg+ Mg<sub>17</sub> Al<sub>12</sub>层、Mg<sub>2</sub> Al<sub>3</sub> 层、a-Al 层组成,450 °C 时扩散层由 Mg<sub>17</sub> Al<sub>12</sub>层、Mg<sub>2</sub> Al<sub>3</sub> 层、a-Al 层组成.通过三点 弯曲实验对界面结合强度进行测试,结果表明,当 450 °C 下保温 90 min 时,镁/铝合金连接效果最佳,强 度约达 27 MPa.

关键词:镁合金;铝合金;界面显微组织;结合强度 中图分类号:TG146.4 文献标识码:A

镁及镁合金具有良好的导热性、导电性、电磁屏 蔽性、机加工性及比强度高和可再循环利用等特性, 这些特性使其在汽车、航空及电子工业领域中得到 较多地应用,但大部分镁合金的耐腐蚀性能差<sup>[1-2]</sup>. 由于铝表面易生成一层薄而致密的自然氧化膜<sup>[3]</sup>, 使铝及铝合金在大气及中性介质中具有很好的耐蚀 性,同时具有自我修复功能<sup>[4]</sup>.因此,在镁合金表面 连接铝合金板材,可制备出具备镁合金及铝合金优 异性能的复合材料<sup>[5]</sup>.本文采用添加中间连接剂的 方法对镁合金及铝合金进行连接,并对接头进行显 微组织结构研究和测试结合强度.

## 1 试验部分

1.1 原料

试验的基体材料为 AZ91D 镁合金及 5056 铝合 金,它们的成分分别列于表 1 和表 2. 采用线切割法 将 5056 铝合金及 AZ91D 镁合金加工成 10 mm×10 mm×15 mm 的块体,分别用 600 号及 800 号的 SiC 砂纸打磨,再用丙酮擦拭以除去表面油污,备用.中 间连接层为镁铝共晶合金粉末 Mg-31Al,其粒径为 165 μm.

表 1 AZ91D 镁合金化学成分

Table 1 Chemical composition of AZ91D magnesium	i allovs
---	----------

成分	Al	Mn	Zn	Si	Cu	Ni	Fe	Be	Mg
含量 w/%	9.32	0. 20	0.68	0.048	0.001	0.0005	0.0031	0.001	余量

收稿日期:2008-11-25

\* 基金项目:山西省自然科学基金(2006011051);山西省归国留学人员基金(2007-25);山西省大学生创新创业专项基金(07010727);山西 省青年科技研究基金(2008021033)

作者简介:付晓鹏(1981一),男,山西寿阳人,硕士研究生.

表 2 5056 铝合金化学成分 Table 2 Chemical composition of 5056 aluminium alloys 成分 Si Fe Cu Mn Mø Cr Zn AI 含量 w/% 0.3 0.4 0.1 0.1 余量 0.1 5.0 0.1

#### 1.2 方法

首先在两金属块中间均匀铺一层镁铝共晶合金 粉,然后将它们置于自制模具中(图 1),在 420 °C 及 450 °C、压力为 31.5 MPa 条件下,分别保温 0.5 h,1 h,1.5 h 及 2 h,最后卸载随炉冷却至室温,获得试 样.用 JEOL6700-F 型扫描电镜观察试样结合面的 显微组织结构,用 OXFORD INCA 能谱仪对试样扩 散层进行成分分析,在 INSTRON-5544 型试验机上 测试试样的结合强度.



图 1 实验装置示意图

(1) AZ91D 镁合金;(2) 镁铝共晶粉末;

(3) 5056 铝合金;(4) 热电偶;(5) 模具;(6) 管式电阻炉
Fig. 1 Schematic diagram of the experimental equipment
(1) AZ91D Mg alloy;(2) Mg-Al eutectic alloy powder;(3)
5056 Al alloy;(4) thermocouple;(5) die;(6) tube type resistance furnace

2 试验结果与讨论

#### 2.1 显微组织分析

图 2 为 420 °C 下保温 2 h 的试样横截面的背散 射 SEM 图像. 从图 2 可以看出,镁合金与铝合金中 间形成了明显的扩散层.表明,二者结合良好. 这是 由于中间合金粉末与镁合金基体、铝合金基体之间 存在元素浓度的梯度,三者之间会发生元素的互扩 散,适当的温度和压力可以促进扩散的进行,从而形 成扩散层.为了进一步分析扩散层的成分,把图 2 中

所示区域放大并进行 EDS 能谱分析.图 3(a)为放大 后结合界面的背散射 SEM 图像,由图 3(a)可见,靠 近镁合金基体的扩散层由两种颜色不同的相混合组 成(图中1点和2点所在区域).图3(b)为对应的 EDS 线扫描谱图,由图 3(b)可见,镁、铝合金两侧均 有扩散发生,在靠近铝一侧的界面上成分变化梯度 较镁侧要大.由表3的成分分析结果可知,图3(a) 中1点和3点处为 Mg17 Al12相,而2点处为 a-Mg 相,4点和5点所在层的镁和铝原子比不同,分别为 Mg<sub>2</sub> Al<sub>3</sub> 及 a-Al 相. 根据相律<sup>[6]</sup>,在二元扩散过程 中,反应扩散只能形成单相层.同时结合 Mg-Al 二 元相图可知,3点、4点及5点所在层的相分别为 Mg17 Al12相、Mg2 Al3 相和 a-Al 相. 显然扩散层的形 成过程是:在靠近镁合金一侧,镁元素向中间连接合 金层扩散,使原先共晶成分合金层中的 α-Mg 相增 多,同时中间连接合金中的铝元素向镁合金基体扩 散,反应生成 Mg<sub>17</sub> Al<sub>12</sub>相,中间连接合金中的 Mg<sub>17</sub> Alua相随之减少;在靠近铝合金一侧,铝元素向中间 连接合金层扩散,反应生成 Mg<sub>2</sub> Al<sub>3</sub> 相并逐渐形成 Mg<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>单相层,随着铝元素的进一步扩散,使中间 连接合金层中的 Mg<sub>17</sub> Al<sub>12</sub> 相增 多, 以致形成 Mg17Al12单相层,同时中间连接合金层中的镁元素 向铝合金基体扩散,形成了 a-Al 固溶体;而在镁侧 连接界面上出现的两相区,则是未完全扩散的镁铝 共晶合金粉末. 所以, 在温度 420 °C 下镁铝连接界 面的组织可以划分为未完全扩散的镁铝共晶合金 层、 $Mg_{17}Al_{12}$ 层、 $Mg_2Al_3$  层及 a-Al 层.



图 2 420 °C 下保温 2 h 试样横截面的背散射 SEM 图像 Fig. 2 Cross-sectionnal SEM backscattering image of the bonded specin卷n holding for 2 h at 420 °C





Fig. 3 Enlarged SEM image of the marked area in the cross-section of the specimen and the corresponding line-scanning EDS spectrum.

(a) SEM image; (b) line-scanning EDS spectrum

图 4 为 450 ℃保温 2 h 后试样横截面的背散射 SEM 图像及对应的 EDS 线扫描谱图.由图 4(a)可 见,扩散层明显的分为三层.与图 3(a)相比较,靠近 镁合金基体的扩散层颜色单一,与基体的界限明显, 没有两相区.由镁铝二元相图可知,437 ℃时会发生 共晶反应 L→ $\alpha$ -Mg + Mg<sub>17</sub> Al<sub>12</sub>.在温度升至 450 ℃ 过程中,镁合金与铝合金基体保持固态,而中间的镁 铝共晶合金粉末达到熔点而熔化成液相,元素在液 体中的扩散速率增大,从而使中间层完全扩散.结合 图 4(b) EDS 线扫描谱图及表 3 中界面处各点成分 分析结果,推断出扩散层应由 Mg<sub>17</sub> Al<sub>12</sub>层、Mg<sub>2</sub> Al<sub>3</sub> 层及 a-Al 层组成.



图 4 450 °C 保温 2 h 后试样横截面的背散射 SEM 图像及对应的 EDS 线扫描谱图 (a) SEM 图;(b) EDS 线扫描谱图

Fig. 4 Cross-sectionnal SEM backscattering image of the bonded specimen holding for 2h at 450 °C and the corresponding line-scanning EDS spectrum,

(a) SEM image, (b) line-scanning EDS spectrum

表 3 图 3(a) 及图 4(a) 中所示各点成分分析结果

Table 3 Concentration analysis results corresponding to fig-

u	ure 3 (a) and figure 4(a)				
*== *	原子百	分比/%		原子百分比/	分比/%
19か小点	ホペ ——— Mg	Al	你不尽	Mg	Al
1	66. 33	33. 67	6	57.29	42.71
2	91. 80	8. 20	7	40.61	59.39
3	61.36	38.64			
4	41. 30	58.70	8	43.10	56.90
5	12.70	87, 30	9	11.26	89.74

#### 2.2 弯曲强度测定

通过三点弯曲实验来测试镁铝复合材料的结合 强度.弯曲试样大小为 28 mm×10 mm×5 mm,中 间为结合界面.图 5 为三点弯曲实验示意图.结合强 度  $\sigma_{max}=3FL/2bh^2$ ,其中 F 为最大施加力,跨距 L= 20 mm,试样宽度 b=10 mm,厚度 h=5 mm.



图5 三点弯曲实验示意图

Fig. 5 Schematic illustration of the three-point bend test

#### 表 4 不同温度及保湿时间下试样弯曲强度的测试结果

Table 4 Bend strength test result of specimens prepared with different temperature and holding time

温度/℃	保温时间/min	弯曲强度/MPa		
420	60	20.70		
	90	15.37		
	120	16. 47		
	150	19.65		
450	30	15.77		
	60	18. 18		
	90	26.86		
	120	21.02		

表 4 为不同温度及保温时间下所制备试样弯曲 强度的测试结果.由表 4 可知,当保温温度为 450 ℃ 时,试样的连接效果总体上要比 420℃的好.这是由 于 450℃达到了共晶温度,中间层成为液相,扩散系 数较大、扩散速率快,中间层完全扩散.但随着保温 时间的延长,试样弯曲强度会有所增加,但不是越长 越好.这是由于试样连接界面处的晶粒随着保温时 间的延长而粗化,从而导致了连接强度的降低.弯曲 实验结果表明,最佳连接工艺参数为 450 ℃下保温 90 min.

## 3 结 论

(1)用镁铝共晶合金粉末作为中间层,在 420 ℃ 及 450 ℃下加压保温一定时间,能够实现 AZ91D 镁合金与 5056 铝合金的连接.

(2) 在 温度 420 °C 下 镁 铝 连 接 界 面 的 组 织 由 镁 铝 共 晶 合 金 层、Mg<sub>17</sub> Al<sub>12</sub> 层、Mg<sub>2</sub> Al<sub>3</sub> 层 及 *a* Al 层 组 成,450 °C 下 由 Mg<sub>17</sub> Al<sub>12</sub> 层、Mg<sub>2</sub> Al<sub>3</sub> 层 及 *a* Al 层 组 成.

(3)在同样保温时间和压力下,升高温度,总体 上试样的结合强度提高,但并不是保温时间越长试 样的结合强度越高,在 450 °C 下保温 90 min,试样 的连接效果最好,强度约达 27 MPa.

#### 参考文献:

- [1] 李卫平,朱立群. 镁及其合金表面防护性涂层国外研究 进展[J]. 材料保护, 2005,38(2): 41-46.
- [2] SONG G L. Recent progress in corrosion and protection of magnesium alloys [J]. Advanced Engineering Materials, 2005, 7(7): 563-586.
- [3] GODARD H P. JEPSON W B BOTHW ELL M R. et al. Corrosion of light metals [M]. New York; John Wiley & Sons Inc, 1967.
- [4] 谭成文,李珊珊,周终强,等. 镁/铝层状复合材料的扩散 连接制备及界面特性[J]. 特种铸造及有色合金,2007, 27(1): 1-4.
- [5] 李线绒,梁伟,赵兴国,等. 共晶合金中间层连接镂/铝异 种金属的界面组织及结合强度研究[J]. 稀有金属材料 与工程,2008,37(11);2016-2019.
- [6] 侯堵寿,卢光熙.金属学原理 [M].上海:上海科学技术 出版社,1990.

# Study on the microstructure and bond strength of the bonding interface of Mg/Al heterogenous alloy

FU Xiao-peng<sup>1</sup>, LIANG Wei<sup>1,2</sup>, LI Xian-rong<sup>1</sup>, ZHU Bo<sup>1</sup>, WANG Hong-xia<sup>1</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Key Laboratory of Interface Science and Engineering in Advanced Materials, Taiyuan University of Technology, Ministry of Education, Taiyuan 030024, China)

Abstract: AZ91D magnesium alloy and 5056 aluminum alloy were bonded with Mg-Al eutectic alloy interlayer under constant load in atmosphere at 420 °C and 450 °C, respectively. The cross-sectional microstructure of the interface was characterised by SEM (equipped with EDS), the results show that obvious diffusion layers are formed. The diffusion layer is composed of  $\alpha$ -Mg+Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>, Mg<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> and  $\alpha$ -Al sublayers at 420 °C, while Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>, Mg<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> and  $\alpha$ -Al sublayers at 450 °C. The bond strength of the joint was measured by three-point bend test. The results show that the bond strength of the specimen prepared at 450 °C is higher than that prepared at 420 °C. The maximum bond strength is obtained in the specimen prepared at 450 °C and held for 90min.

Key words: magnesium alloy; aluminum alloy; interface microstructure; bond strength