# 镁合金与铝合金的夹层扩散焊连接

赵丽敏, 刘黎明, 徐荣正, 张兆栋 (大连理工大学 三束材料改性国家重点实验室, 辽宁大连 116024)

摘 要:采用锌夹层在 356 ℃温度下对镁铝异种金属进行扩散焊连接,并对接头的微观组织和力学性能进行分析。结果表明,利用镁与锌原子互扩散形成低熔点共晶液相区,能够实现镁铝材料的可靠连接。镁铝焊接接头界面区由铝锌反应层、未充分扩散锌层、锌镁反应扩散层组成。铝基体侧铝锌反应层是固溶体层,镁基体一侧锌镁反应扩散 层主要是过饱和的固溶体基体及弥散析出的中间相,该区的中间相成分为 MgZn11及 MgZn2。锌夹层的加入可有效阻止镁铝之间的互扩散。锌夹层镁铝扩散焊接头抗剪强 度远超过镁铝直接真空扩散焊接头的抗剪强度。断口观察及相分析表明,接头失效发 生在锌镁反应扩散层。



-009-04 赵丽敏

中图分类号: TG456.9 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2007)10-009-04

0 序 言

作为21 世纪最具发展潜力的绿色工程材料, 镁合金具有重量轻、比强度高、比刚度高, 良好的力 学性能, 价格低廉等一系列优点, 成为现代工业产 品的理想结构材料。铝合金是目前应用最广泛的金 属材料之一, 具有高的机械强度, 良好的耐蚀性瞪特 点。随着镁合金在汽车、电子、航空航天等高新技术 领域的逐渐推广应用, 镁合金与其它金属的连接问 题将是今后镁合金焊接的前沿课题<sup>[1-3]</sup>。

关键词: 镁合金; 铝合金; 锌夹层; 扩散焊; 接头强度

目前 Mg/Al 异种金属的连接,采用的焊接方法 主要是熔焊<sup>41</sup>和固相焊<sup>15-71</sup>,包括钨极氩弧焊、电子 束焊、搅拌摩擦焊、电阻点焊以及直接真空扩散焊 等。研究结果表明,无论采用哪种焊接方法,Mg/Al 异种金属焊接接头由于镁铝的直接接触,结合区均 存在高硬度的脆性 Mg-Al 系金属间化合物相。这大 大降低了 Mg/Al 异种金属接头的塑韧性,限制了接 头的应用<sup>181</sup>。目前,对于 Mg/Al 异种金属夹层扩散 焊连接还未见文献报道。采用 Mg/Al 异种金属夹层 扩散焊,以及对接头组织结构性能的研究,对推动  $M_g/Al$ 异种金属焊接接头应用具有重要的意义。

文中采用在焊缝中添加过渡金属夹层的办法对 Mg/Al接头进行快速加热、快速冷却的惰性气体保 护扩散焊。选取金属锌作为中间层,分析接头的微 观组织、元素分布、力学性能、断口相组成,阐述焊接 接头的形成过程。

#### 1 试 验

#### 1.1 试验材料

试验采用的母材为 6061 铝合金和 AZ31B 镁合 金,尺寸分别为 60 mm×13 mm×3.0 mm, 60 mm×13 mm×2.5 mm,中间层为金属锌。上述材料的化学成 分见表 1,表 2 和表 3。

表 1 AZ31B 镁合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of AZ31B magnesium alloy

Al	Zn	Mn	Ca	Si	Cu	Ni	Fe	Mg
2.5~3.5	0.5~1.5	0. 2~ 0. 5	0.04	0.1	0.05	0.005	0.005	余量

表 2 6061 铝合金的化学成分(质量分数, %)

Table 2 Chemical composition of 6061 aluminium alloy

				•		•		
Mg	Zn	Mn	Si	Cu	Fe	Ti	Cr	Al
0.967 8	0.0005	0.003 8	0.5527	0.217 5	0. 140 1	0.0127	0.071 8	余量

收稿日期: 2006-12-11

基金项目:国家"十一五"科技支撑计划资助项目(2006BE04B05)

1.2 试验方法

首先用200,400号砂纸打磨铝试样,去除表面

表 3 中间层金属锌的化学成分(质量分数,%)					
Table 3	Chemical composition of zinc alloy				

Al	Ce-La	Zn
3.0	0.1	余量

氧化膜,再用丙酮擦拭表面去油污。将处理后的铝 试样在 440 °C下采用热浸镀的方法在其表面涂覆一 层金属锌。镀锌层表面再经 400,600,800 号砂纸打 磨后用丙酮擦拭干净,处理后锌层厚度约为 5 <sup>µ</sup>m; 镁试样表面用 200,400,600,800 号砂纸打磨去除表 面氧化膜,用丙酮擦拭表面去油污。将上述镁、镀锌 铝试样搭接后用夹具夹紧并确保两表面紧密接触, 放入已升温至试验温度的加热炉中进行扩散焊接。 试验温度为 356 °C,保温时间为 60 s。为确保试验 温度准确,试样上连接热电偶测温。扩散焊接过程 中采取氩气保护试件。接头连接方法如图 1 所示。 焊接完毕,迅速取出试样,空冷至室温。



图 1 Mg/AI 夹层扩散焊示意图



对焊接接头进行取样并制成金相试样。试样靠 近镁母材一侧使用 5%的苦味酸进行腐蚀;靠近铝 母材一侧使用 10%的氢氧化钠溶液进行腐蚀。通 过金相显微镜对界面微观组织进行观察,并用 EP-MA-1600型电子探针(EPMA)分析接头中各组成元 素的分布情况。利用 CSS-2205型电子万能试验机 测试接头的抗剪强度,采用 X 射线衍射(XRD)分析 接头断口的相组成。

2 试验结果及讨论

#### 2.1 Mg/AI焊接接头的显微组织特征

图 2 为焊接接头金相组织照片。其中,图 2a 为 焊缝的整体结构组成, Mg/Al 焊接接头界面区由图 中所示①②③三层不同形貌的组织构成。图 2b 为 反应层靠近镁基体侧界面处①层的微观组织,该层 颜色较暗,又可根据晶粒形状的不同分为紧邻镁基 体的柱状晶区和中心等轴晶区。柱状晶区属单相组 织,等轴晶区为连续基体上弥散分布着白色的第二 相颗粒,定义①层为锌镁反应扩散层。图 2c 为反应 层靠近铝基体侧界面处的微观组织,②层组织特征 为连续基体上弥散分布着一些黑色颗粒,初步断定 该层为未充分扩散锌层,析出物为锌的化合物及杂 质。③层为铝侧过渡区,它是一层比铝基体颜色略 浅的组织,根据 Al-Zn 二元相图判断应为在热浸镀 锌过程中形成的该二元合金的固溶体组织。



(a) 整个焊缝金相组织



(b) 镁侧焊壁金相组织

(c) 铝侧焊缝金相组织

#### 图 2 焊缝金相组织

Fig 2 Microstructure of joint

由 Mg-Zn 二元相图可知, 在平衡条件下 Mg 与 Zn 可分别在 348, 364 ℃发生共晶反应。根据前期的 大量试验, 研究中选取试验温度 T= 356 ℃, 保温时 间 t=60 s。此工艺条件下, 异种金属界面处出现共 晶液相, 形成 Mg-Zn 系中间相。这是在扩散焊接过 程中界面处 Mg 与Zn 原子相互扩散, 达到一定浓度 时在界面处发生反应, 产生共晶液相。随着焊接时 间增加, 液相区不断向焊缝两侧扩大, 同时液相中的 原子不断均匀化。保温结束, 迅速取出试样空冷, 反 应层凝固。由于冷速较快, 形成较大过冷度, 是个非 平衡凝固过程, 形成过饱和固溶体基体, 并且第二相 没有充分的时间长大, 只能以弥散状态析出。因为 接头区不同部位冷却速度不同, 越靠近基体冷速越 高, 晶粒越细小并沿冷却方向形成柱状晶, 而靠近中 心区域冷速降低, 形成晶粒较大的等轴晶区。

#### 2.2 Mg/AI焊接接头的电子探针分析

图 3 为焊缝电子探针成分分析曲线。可以看 到, Mg 与 Al 之间没有元素的互扩散发生, 这是由于 在此扩散焊接工艺条件下, Zn 夹层的存在完全阻止 了 Mg 与 Al 之间的相互扩散, 从而避免了 Mg-Al 系 金属间化合物的生成; Al 与 Zn 反应层比较窄, 约 20 <sup>1/m</sup> 厚, 这个反应层主要在 Al 基体热浸镀 Zn 过程中 形成的; 扩散焊接过程中, 中间扩散层主要是由 Mg 与 Zn 互扩散形成的。其中 Mg 和 Zn 的分布曲线在 焊缝中保持平稳, 这是由于元素在液相中扩散速度 快, 而扩散焊接过程中由于共晶液相的出现, Mg 元 素和 Zn 元素可以很快均匀化; 由于保温时间短, 元 素扩散不充分, 还有部分未充分扩散锌层保留下来; 整个接头分布着 O 元素, 这是由于制样过程中试样 表面被氧化造成的, 而且在热镀锌的过程中锌液也 吸入一部分氧而使得焊缝区氧含量更高些。



图 3 焊缝电子探针成分分析 Fig 3 EPMA analysis result of weld

2.3 Mg/AI焊接接头的力学性能分析

对锌夹层镁铝扩散焊接头抗剪强度进行测定, 接头抗剪强度平均为 70 MPa。从宏观上看, 铝侧断 口相对于铝基体突出一些, 而镁侧断口相对于镁基 体凹进一些,可初步判定断裂发生在锌镁反应扩散 区。通过试验,采用Mg/Al 直接真空扩散焊反应,接 头抗剪强度最高不到 20 MPa。可以看到,由于锌夹 层的加入明显地提高了镁铝接头的抗剪强度。这是 由于金属锌与镁晶格类型相同,生成的中间相脆性 远小于晶格类型差异很大的铝和镁所生成的 Mg-Al 系金属间化合物。同时通过对锌夹层的微合金化及 采用合适的工艺条件改善了第二相的析出状态,提 高了接头的强度,这一点有待于进一步的试验验证。 另外,中间层的加入降低了焊接温度,减小残余应 力,且使反应易于控制。

2.4 Mg/AI焊接接头的断口形貌及相分析

对上述断口进行断口形貌分析,图4和图5分 别为Mg/Al焊接接头镁侧和铝侧断口组织形貌。可 以看出,接头呈脆性断裂,但在镁侧断口存在有少量 韧窝。



图 4 镁侧断口组织形貌 Fig. 4 Fracture appearances on Mg side



图 5 铝侧断口组织形貌 Fig. 5 Fracture appearances on AI side

图 6 和图 7 分别为接头断口镁侧和铝侧 XRD 分析结果。分析表明, 在镁基体一侧获得的 X 射线 相成分组成中未发现含铝结构, 相反在铝一侧包含 对应纯镁结构的衍射峰, 说明断裂未发生在铝锌反 应层。另外, 断口两侧的 X 射线衍射结果中均包含 锌和 Mg2 Zn11 及 MgZn2, 而且铝基体一侧的 Zn 结构含 量明显超过镁基体一侧。由此可以推断, 接头强度 试验中的断裂面主要集中在锌镁反应扩散区, 这与 宏观断口观察结果一致, 造成断裂的主要原因是呈 脆性的金属间化合物的存在。



图 6 接头断口镁侧 XRD 分析结果

Fig. 6 X-ray diffraction patterns taken from fracture on Mg side



图 7 接头断口铝侧 XRD 分析结果 Fig. 7 X-ray diffraction patterns taken from fracture on AI side

从前面微观组织、元素分析及焊缝形成过程分 析可知,焊缝主要是通过元素扩散形成共晶液相铺 展填充形成的。焊缝中主要是共晶液相的凝固组 织,随着温度的下降,溶解度的降低,组织中会析出 镁和锌的中间相 Mg2Zn11及MgZn2。

### 3 结 论

(1) 镁铝焊接接头界面区由铝锌反应层、未反 应锌层、锌镁反应扩散层组成。 锌夹层与铝基体通 过一层固溶体组织连接; 镁基体一侧过渡区主要是 过饱和的固溶体基体及弥散析出的中间相。 锌夹层 的加入有效阻止了 Mg, Al 元素的互扩散。

(2) 锌夹层镁铝扩散焊接头抗剪强度平均为 70 MPa,明显高于镁铝直接真空扩散焊接头的抗剪强 度,断口分析表明接头强度试验中的断裂发生在锌 镁反应扩散层。

#### 参考文献:

- Schubert E, Klassen M, Zemer I, et al. Light-weight structures produced by laser beam joining for future applications in automobile and aerospace industry [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 115(2): 2-8.
- [2] Mordike B L, Ebert T. Magnesium: Properties applications potential
  [J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 302(1): 37-45.
- [3] 黄伯云.我国有色金属材料现状及发展战略[J].中国有色金属学报,2004 14(5):122-127.
- [4] 柳绪静,刘黎明,王 恒,等.镁铝异种金属激光-TIG复合 热源焊焊接性分析[J].焊接学报 2005 26(8): 31-34.
- [5] Yutaka S Sato, Seung Hwan C Park, Masato Michiuchi, et al. Constitutional liquation during dissimilar friction stir welding of Al and Mg alloys[J]. Scripta Materialia, 2004, 50(9): 1233–1236.
- [6] Somasekharan A C, Murr L E. Microstructures in friction-stir welded dissimilar magnesium alloys and magnesium alloys to 6061-T6 aluminum alloy[J]. Materials Characterization, 2004, 52(1): 49-64.
- [7] Liu Peng, Li Yajiang Geng Haoran, et al. A study of phase constitution near the interface of Mg/Al vacuum diffusion bonding[J]. Materials Letters, 2005, 59(2): 2001–2005.
- [8] 刘 鹏,李亚江,耿浩然,等. Mg/Al 异种金属的焊接研究现 状[J]. Welding Technology, 2006, 35(2): 1-3.

作者简介:赵丽敏,女,1972年出生,博士研究生。主要从事镁铝 异质金属扩散焊连接研究。发表论文 2 篇。

Email: liulm@dlut.edu.cn

## MAIN TOPICS, ABSTRACTS & KEY WORDS

Simulation and experimental investigations of laser cladding temperature field on 6061 Al alloy ZHANG Song<sup>1</sup>, ZHANG Chunhua<sup>1,2</sup>, ZHANG Ning<sup>1</sup>, YU Lili<sup>1</sup>, LIU Changsheng<sup>2</sup>, Man H C<sup>3</sup>(1. School of Material Science & Engineering, Sheny ang University of Technology, Shenyarg 110023, China; 2. School of Material & Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 3. Department of Industrial & Systems Engineering, The Hongkorg Polytechnic University, Hongkorg, China). p1-4

Abstract: According to the characters of laser cladding, a computational model was established for analysis of 3D laser cladding temperature field caused by moving gauss distribution heat source and laser cladding temperature field of 6061 Al alloy was simulated dynamically by finite element method with software ANSYS. The results show that the isotherms of temperature field simulation look like ellipse and are dense at the head of the moving heat source. And the temperature gradient is high at the head of the moving heat source. But at the end of the moving heat source the isotherms are sparse and the temperature gradient is low. With continuous wave Nd: YAG laser, SiC ceramic powder was cladded on the 6061 Al alloy surface and the SiC reinforced metal matrix composites (MMC) modified layer was abtained. Al, SiC and Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>, and a little Al<sub>4</sub>SiC<sub>4</sub> were included in this layer. It was shown that the simulation results of temperature field are in accordance with the experimental results. It offers the reliance for the optimization of the laser parameters on metal matrix composites.

Key words: laser cladding; metal matrix composite; temperature field; finite element method

**Through thickness diversity of properties in friction stir welded** 2219–T87 **thick aluminum alloy plate** ZHOU Pergzhan<sup>1, 2</sup>, LI Donghui<sup>1</sup>, HE Diqiu<sup>1</sup>, DENG Hang<sup>1</sup> (1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Zhuzhou Times New Materials Technology Co. Ltd., Zhuzhou 412007, Hunan, China). p5–8

Friction stir welding of 2219-T87 high-strength Abstract: aluminum alloy plate in 35 mm thickness was completed with a single pass. The results demonstrate that the tensile strength of weld reaches 274 MPa, and the fracture happens in the WNZ(welding nugget zone). Because the welding speed was slow for welding thick plate, and the temperature of the upper WNZ was higher, the microstructure became coarse under the pumping action of screwed stirrer. While the temperature of the bottom WNZ was lower, the microstructure became compact under the crushing action of screwed stirrer. The microhardness of upper WNZ had a decrease zone, while that of bottom changed slowly. When the welding thickness was too large, the microstructure of upper WNZ will become coarse for pumping of screwed stirrer, and it can cause microhardness decrease. It was the reason why the tensile property not high and the fracture was located in the WNZ.

Key words: friction stir welding of thick plate; 2219-T87

aluminum alloy; through thickness

#### Diffusion bonding of Mg/ Al alloy with Zn interlayer metal

ZHAO Limin, LIU Liming, XU Rongzheng, ZHANG Zhaodong (State Key Laboratory of Materials Modification by Laser, Ion and Electron Beams, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China). p9–12

Abstract The characteristics of microstructure and mechanical properties of the Mg/ Al alloy joint by diffusion bonding with a Zn interlayer were studied by means of metalloscopy, X-ray diffraction, electron probe microanalysis and mechanical property test. Investigations showed that the Mg/ Al alloy joint by diffusion bonding with Zn interlayer consists of a multilayer sandwich structure, including the transition zone of Zn-Al, the residual Zn interlayer, as well as the transition zone of Zn-Mg. The transition zone of Zn-Al is composed mainly of a solid solution structure, while the Zn-Mg transition zone has a relative larger dimension after a rapid eutectic reaction. The addition of zinc interlayer inhibits the inter-diffusion of Mg and Al alloy efficiently. The Zn-Mg transition zone constitutes the main part of the joint and consists of Mg and the new phases formed are Mg2Zn11 and MgZn<sub>2</sub> intermetallic compound. According to the phase constitution analyses executed on each side of the fracture face, it was deduced that the fracture of Mg/ Al alloy joint located around the interface of Zn-Mg transition zone. The average shear strength of Mg/Al alloy joints diffusion bonded with Zn interlayer reaches 70 MPa and exceeds that of the joints bonded without Zn interlayer enormously.

Key words: magnesium alloy; aluminum alloy; zinc interlayer; diffusion bonding; joint strength

Special-purpose electrode for 400 MPa grade ultrafine grained steel ZHAO Horgyun, XU Chunhua, YANG Xianqun, WU Jianqian (School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, Shandong, China). p13–16

Abstract: The strengthening and toughening of weld metal is a technical difficulty of ultrafine grained steel welding, and it needs to develop a kind of welding material matching the base metal in order to realize the strengthening and toughening of welded joint and avoid the cold crack. The ideal strength and toughness can be obtained by alloying mathod and controling weld structure to obtain the acicular ferrites. Through experiments, and unifying the microstructure and mechanical properties characteristics of 400 MPa grade ultrafine grained steel, a special purpose electrode of 400 MPa grade ultrafine grained steel was developed. The examination results show that, the microstructures of weld metal by this electrode are tiny acicular ferrites, and the yield strength and teusile strength of the welded joint are 435 MPa and 612 MPa, respectively. The impact absorbing energy is 148 J. Its microstructures and mechanical properties match the 400 MPa grade ultrafine grained steel well, and achieve the anticipated goal.