

DOI:10.11951/j.issn.1005-0299.20160233

# 化学镀锡层对镁铝异种金属超声波焊接的影响

崔庆波, 李玉龙, 杨瑾, 王裕波, 余啸

(江西省机器人与焊接自动化重点实验室(南昌大学机电工程学院), 南昌 330031)

**摘要:** 为提高镁铝异种金属超声波焊接接头强度, 预先在铝合金表面镀锡后进行镁铝异种金属超声波点焊, 并对接头的微观组织和力学性能进行分析。研究表明: 无镀锡层的镁铝超声波焊接接头界面出现了大量的  $Mg_3Al_2$  和  $Mg_{12}Al_{17}$  相, 其接头的最大拉伸剪切强度为 27.5 MPa; 含镀锡层的铝镁超声波焊接结合区由镁锡反应扩散层、残余锡层和铝锡反应扩散层组成, 其中, 铝锡反应层是固溶体层, 镁锡反应层主要是过饱和的固溶体基体及弥散析出的中间相  $Mg_2Sn$ , 其接头的最大拉伸剪切强度为 32.9 MPa。镀锡层的加入有效阻止了镁铝的相互扩散, 抑制了硬脆的 Mg-Al 系金属间化合物的生成, 提高了镁铝超声波焊接接头强度, 与镁铝超声波焊接相比最大拉伸剪切强度提高了 19.6%。

**关键词:** 镀锡层; 镁铝异种金属; 超声波点焊; 接头强度; 金属间化合物

**中图分类号:** TG456.9      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-0299(2017)02-0035-04

## Effects of chemical plating Sn coating on the ultrasonic spot welding of Mg/Al dissimilar metals

CUI Qingbo, LI Yulong, YANG Jin, WANG Yubo, YU Xiao

(Key Laboratory of Robot and Welding Automation of Jiangxi Province(Nanchang University, Mechanical & Electrical Engineering School), Nanchang 330031, China)

**Abstract:** Main problem of magnesium/aluminum joining is the formation of hard and brittle Mg-Al intermetallic compounds (IMCs) at the interface. To improve the strength of the welding joints, the aluminum alloy was firstly chemical plated with a Sn layer and then welded with the magnesium alloy using the ultrasonic spot welding (USW) method. After that, the microstructure and mechanical properties were analyzed. Result shows that lots of  $Mg_3Al_2$  and  $Mg_{12}Al_{17}$  phases were found on the interface of Mg/Al USW joint without Sn layer, and the maximum lap shear strength of the joint is 27.5 MPa. While a characteristic of a multilayer sandwich structure was found on the interface of Mg/Al USW joint with Sn layer, which includes the transition zone of Mg-Sn, the residual Sn interlayer, as well as the transition zone of Al-Sn. The transition zone of Al-Sn is mainly composed of a solid solution structure, while the Mg-Sn transition zone is consist of supersaturated solid solution Mg and  $Mg_2Sn$  IMCs after a rapid eutectic reaction, and the maximum lap shear strength of the joint is 27.5 MPa. Sn coating is found to inhibit the inter-diffusion between Mg and Al alloys, eliminate the formation of the brittle Mg-Al IMCs, thus resulting in an enhancement of 19.6% of the lap shear strength of the joint compared to that of the directly welded Mg/Al joints.

**Keywords:** chemical plating Sn layer; Mg/Al dissimilar metals; ultrasonic spot welding; joint strength; inter-metallic compounds

镁合金和铝合金是重要的有色金属材料, 已广泛应用于航空航天、兵器、电子通讯等领域。在

汽车工业中, 为了使汽车车身轻量化, 高强度正逐渐被比强度和比刚度更高的镁合金和铝合金所取代<sup>[1-3]</sup>。为了获得可靠的汽车车身结构, 镁合金和铝合金的连接受到越来越高的重视。

镁铝异种金属的焊接一直是焊接领域的技术难题。目前, 镁和铝采用的焊接方法主要包括钨极

收稿日期: 2016-07-23.

网络出版时间: 2017-04-01.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51265035).

作者简介: 崔庆波(1991—), 男, 硕士研究生.

通信作者: 李玉龙, E-mail: liyulong@ncu.edu.cn.

氩弧焊、激光焊的熔焊<sup>[4-7]</sup>和电阻焊、搅拌摩擦焊以及超声波焊接等固相连接方法<sup>[8-13]</sup>。研究表明,无论采取哪种焊接方法,由于镁铝直接接触,都不可避免地接头结合区形成硬脆的 Mg-Al 系金属间化合物,降低了接头强度,限制了接头的应用。因此,研究人员提出通过添加中间层控制界面 Mg-Al 相的大面积形成,以达到提高接头可靠性的目的<sup>[14-17]</sup>。

Al、Sn 不会形成金属间化合物,且 Sn 能够提高镁合金和铝合金焊接时的可焊性<sup>[16,18]</sup>。本文在铝合金表面化学镀锡后进行铝镁超声波焊接,成功抑制了镁铝超声波焊接头内的 Mg-Al 脆性相的形成,提高了接头的可靠性。

## 1 试验

试验采用 AZ31B 镁合金和 6061 铝合金薄板,厚度均为 0.3 mm,尺寸为 80 mm×15 mm。试验中,首先对铝合金用 50 g/L NaOH 溶液浸蚀 3 min 除油和除氧化膜,然后,采用 50% 硝酸光亮浸蚀 5~15 s,将处理后的铝合金试样采用化学镀锡的方法(锡酸钠 40 g/L,酒石酸钾钠 10 g/L,焦磷酸钾 10 g/L,十二烷基硫酸钠 1 g/L,乙二胺四乙酸二钠 1 g/L,55 °C,4~5 min)在其表面涂覆一层 3 μm 的金属锡层。镁合金试样表面用 400, 600, 800, 1 000 号砂纸打磨去除表面氧化膜,用丙酮擦拭表面去油污。将镀锡铝和镁试样搭接后进行超声波焊接。超声波焊头为密齿型,尺寸为 10 mm×10 mm,焊接参数:延时时间 400 ms,焊接时间 90 ms,焊接压力 1.8、4.4、7.1、9.8、12.4 MPa。

采用 SU8010 扫描电镜观察了焊接接头微观形貌。利用 TM3000 能谱仪(Energy Dispersive Spectrometer, EDS)和 D8 Advance 的 X 射线衍射仪(X-Ray Diffractometer, XRD)分析了接头中各元素的分布情况和相的组成。采用 CTM2500 万能试验机测试了接头的拉伸剪切强度。

## 2 结果及讨论

图 1 为无镀锡层和含镀锡层的镁铝超声波焊接接头截面微观形貌,可见两接头界面均形成了良好的连接,没有裂纹、未焊牢等焊接缺陷。但界面的微观组织形貌发生了明显变化。图 1(a)为无镀锡层铝镁超声波焊接头界面微观组织图,可以看到,接头处两母材之间有一个明显的过渡层,A 点和 B 点的元素含量(原子分数,%)分别为 68.70Al-29.59Mg 和 20.05Al-79.95Mg。根据镁铝二元合金相图推测,靠近镁侧的深色区域为扩散反应

产生的脆性相  $Al_{12}Mg_{17}$ ,靠近铝侧的灰色区域为  $Al_3Mg_2$ 。有文献对铝镁直接超声波点焊中 IMCs 层的生长情况进行了详细研究<sup>[12]</sup>,研究发现,通过界面元素相互扩散作用,在焊接界面镁侧将率先形成岛状的  $Al_{12}Mg_{17}$ 相;随着扩散的进行, $Al_{12}Mg_{17}$ 相将形成连续反应层;随后  $Al_3Mg_2$ 相在焊接界面铝的一侧形成并快速生长。图 1(b)是含镀锡层的镁铝超声波焊接头界面微观组织照片,可以看到,界面反应层明显比无镀锡层的界面更厚(约 20 μm)。

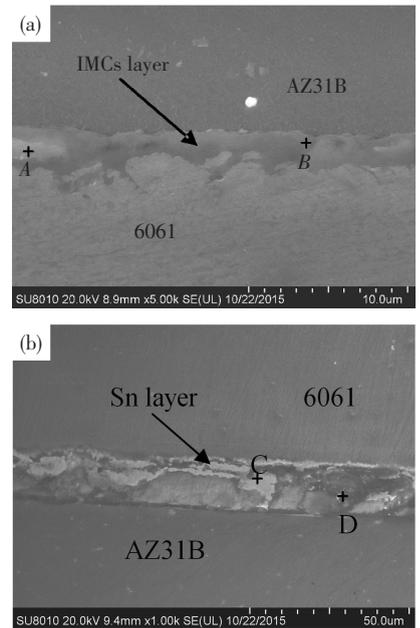


图 1 镁铝超声波焊接头截面微观形貌

Fig.1 Cross section morphology of Mg/Al ultrasonic spot welded joint: (a) without Sn interlayer; (b) with Sn interlayer

结合图 2 能谱线扫描结果发现,反应层内几乎不存在 Mg 和 Al 元素的相互混合。这说明镀锡层的加入有效地抑制了 Mg 和 Al 在界面的相互扩散。Mg/Sn/Al 超声波焊接结合区由 Al-Sn 反应扩散层、残余锡层和 Mg-Sn 反应扩散层组成,图 1(b)中 C 点和 D 点的元素含量(原子分数,%)分别为 93.69Sn-6.31Al 和 9.76Al-85.60Mg-4.64Sn。焊接界面含 Sn 高的区域呈亮白色,主要存在于 Al-Sn 扩散层和残余锡层,由 Al-Sn 二元相图得知,Al、Sn 不会形成共晶组织,Al 向 Sn 扩散形成固溶体;含 Sn 少的区域呈暗黑色,存在于 Mg-Sn 反应扩散层,Mg、Sn 相互扩散析出  $Mg_2Sn$  金属间化合物。

图 3 为无镀锡层和含镀锡层的镁铝超声波点焊接头拉伸剪切强度测试结果。如图 2 可见,含镀锡层的镁铝超声波焊接头最大拉伸剪切强度为 32.9 MPa;而无镀锡层镁铝超声波焊接头的最大拉伸剪切强度为 27.5 MPa。可见,镀锡层的添加,有效提高了焊接接头可靠性,即拉伸剪切强度提

高了 19.6%。值得注意的是,在焊接压力低于 4.4 MPa 时,无镀锡层接头的强度反而高于含镀锡层接头的强度。这一特殊现象与超声波焊接接头形成的机制有关系。

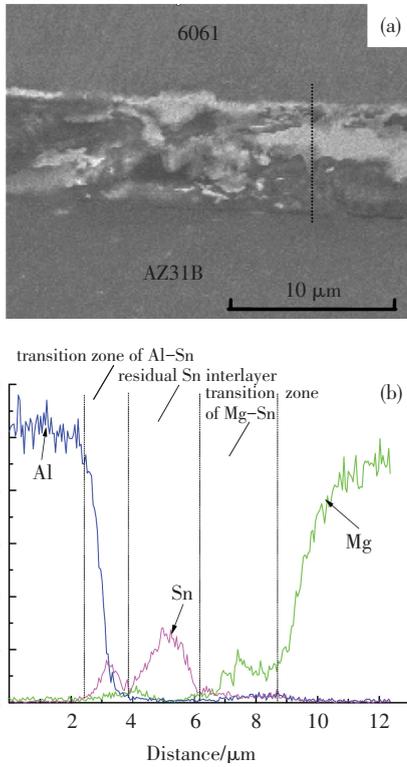


图 2 铝镁超声波焊接接头界面 EDS 分析结果

Fig.2 EDS analysis results of Mg/Al ultrasonic spot welded joint interface: (a) a microstructure of the welded joint; (b) EDS line scan across the welded joint

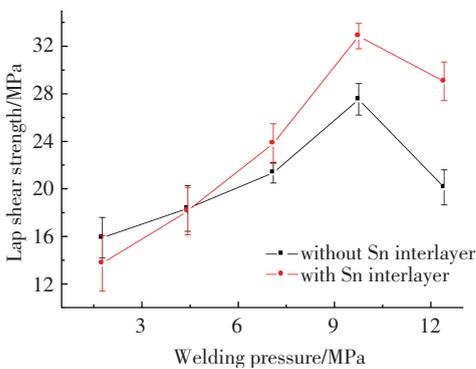


图 3 焊接接头拉伸剪切强度

Fig.3 Lap shear strength of the welded joints

超声波焊接过程中,由摩擦和振动造成焊件间发热和强烈塑性流动,使焊件的接触部分产生严重的塑性变形。这使得焊接区出现涡流状的塑性流动层(图 4),导致焊件表面之间的机械嵌合并引起物理冶金反应。当焊接压力较小时(低于 4.4 MPa),镀锡层在摩擦和振动阶段起到了润滑剂的作用,改变了镁铝摩擦行为,使得超声波能量不能有效的传递到工件,产生的热量不足以软化

或熔化锡层,不能形成有效连接。随着焊接压力增大,振动的传递条件得到了改善,焊件之间产生了足够的摩擦功,产热和塑性流动加剧,界面冶金反应也随之加剧,使得镁铝界面产生了良好的连接。当焊接压力过大时,使摩擦力过大,造成焊件间的相对摩擦运动减弱,甚至会使振幅值有所降低,接头强度也随之降低。

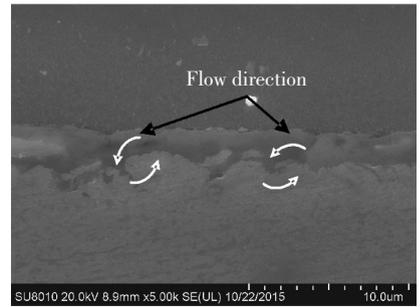


图 4 焊接区涡流状塑性流动层

Fig.4 Swirling plastic flow layer on welded zone of ultrasonic welding

图 5 为接头断口的 X 射线衍射分析结果。

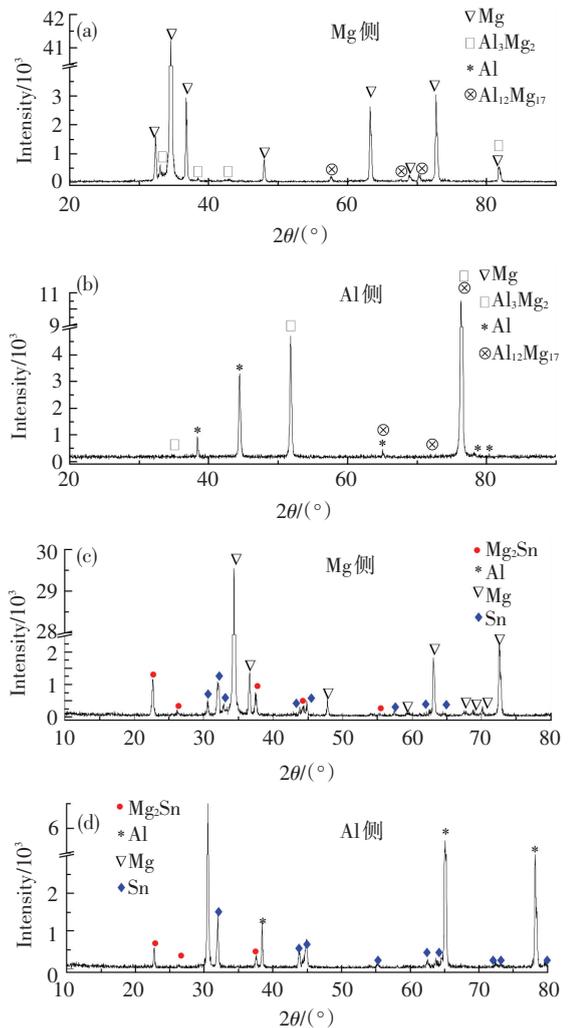


图 5 接头断口 XRD 分析结果

Fig.5 X-ray diffraction patterns obtained from fracture surfaces of (a,b) without and (c,d) with Sn interlayer

无镀锡层的镁铝超声波焊接头 X 射线衍射分析结果(图 5(a)、(b))表明,焊接接头断口 Mg 基体一侧相成分组成中未发现纯铝结构的衍射峰,同样在铝一侧未发现纯镁结构的衍射峰,另外,在断口两侧均含 Mg-Al 系金属间化合物  $Al_{12}Mg_{17}$  和  $Al_3Mg_2$ 。由此可以推断,断裂面集中在镁铝反应扩散区,造成断裂的主要原因是呈脆性的金属间化合物的存在。图 5(c)、(d) 为含镀锡层镁铝超声波焊接头的 X 射线衍射分析结果,可以看到,在铝侧和镁侧都存在 Sn 和  $Mg_2Sn$ , 并没有发现  $Al_{12}Mg_{17}$  和  $Al_3Mg_2$  的存在,这与显微形貌分析的结果相同:镀锡层有效地阻隔了镁和铝的直接扩散,抑制了硬脆的 Mg-Al 金属间化合物的形成。

### 3 结 论

1) 镀锡层的加入抑制了镁铝超声波焊接头内脆性 Mg-Al 金属间化合物的生成,提高了接头的可靠性。

2) 无镀锡层的镁铝超声波焊接头界面出现了大量的 Mg-Al 相。含镀锡层的镁铝超声波焊接头界面主要由铝锡固溶体、镁锡固溶体、残余锡层和 Mg-Sn 金属间化合物组成。

3) 含镀锡层的镁铝超声波焊接头最大拉伸剪切强度为 32.9 MPa, 而无镀锡层的镁铝超声波焊接头最大拉伸剪切强度仅为 27.5 MPa。

### 参 考 文 献:

[1] 江超, 陈辉, 车小莉, 等. 高速列车 A6005A 铝合金焊接接头断裂韧性研究[J]. 材料科学与工艺, 2013, 21(2): 55-60.  
JIANG Chao, CHEN Hui, CHE Xiaoli, et al. Fracture toughness of welded joints of A6005A aluminum alloy for high speed train[J]. Materials Science and Technology, 2013, 21(2): 55-60.

[2] PENNER P, LIU L, GERLICH A, et al. Feasibility study of resistance spot welding of dissimilar Al/Mg combinations with Ni based interlayers[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2013, 18(7): 541-550.

[3] 宋广胜, 陈强强, 徐勇, 等. AZ31 镁合金室温拉伸微观变形机制 EBSD 原位跟踪研究[J]. 材料工程, 2016, 44(4): 1-8.  
SONG Gongsheng, CHEN Qiangqiang, XU Yu, et al. Deformation micro-mechanism of AZ31 Mg alloy during tension at room temperature by EBSD in-situ tracking[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(4): 1-8.

[4] BEN-ARTZY A, MUNITZ A, KOHN G, et al. Joining of light hybrid constructions made of magnesium and aluminum alloys [C]//Magnesium Technology 2002. Seattle, WA: TMS, 2002: 295-302.

[5] BORRISUTHEKUL R, MIYASHITA Y, MUTOH Y. Dissimilar material laser welding between magnesium alloy AZ31B and aluminum alloy A5052-O[J]. Science and

Technology of Advanced Materials, 2005, 6(2): 199-204.

[6] 刘政军, 宫颖, 苏允海. 镁铝异种金属 TIG 焊接头性能的研究[J]. 材料工程, 2015, 43(3): 18-22.  
LIU Zhengjun, GONG Ying, SU Yunhai. Study on characteristics in TIG welded joint of Mg/Al dissimilar materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(3): 18-22.

[7] 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: 559-565.

[8] LIU W, LONG L, MA Y, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of Mg/Al diffusion bonded joints[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 643: 34-39.

[9] SUHUDDIN U, FISCHER V, KROEFF F, et al. Microstructure and mechanical properties of friction spot welds of dissimilar AA5754 Al and AZ31 Mg alloys [J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 590: 384-389.

[10] CHOWDHURY S H, CHEN D L, BHOLE S D, et al. Lap shear strength and fatigue behavior of friction stir spot welded dissimilar magnesium-to-aluminum joints with adhesive[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 562: 53-60.

[11] MOHAMMADI J, BEHNAMIAN Y, MOSTAFAEI A, et al. Friction stir welding joint of dissimilar materials between AZ31B magnesium and 6061 aluminum alloys: Microstructure studies and mechanical characterizations [J]. Materials Characterization, 2015, 101: 189-207.

[12] PATEL V K, BHOLE S D, CHEN D L. Microstructure and mechanical properties of dissimilar welded Mg-Al joints by ultrasonic spot welding technique [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2012, 17(3): 202-206.

[13] PANYELI A, ROBSON J D, BROUGH I, et al. The effect of high strain rate deformation on intermetallic reaction during ultrasonic welding aluminium to magnesium [J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 556: 31-42.

[14] 赵丽敏, 刘黎明, 徐荣正, 等. 镁合金与铝合金的夹层扩散焊连接[J]. 焊接学报, 2007, 28(10): 9-12.  
ZHAO Limin, LIU Liming, XU Rong, et al. Diffusion bonding of Mg/Al alloy with Zn interlayer metal[J]. Transactions-china Welding Institution, 2007, 28(10): 9-12.

[15] GAO Q, WANG K. Influence of Zn Interlayer on interfacial microstructure and mechanical properties of TIG lap-welded Mg/Al joints[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2016, 25(3): 756-763.

[16] PATEL V K, BHOLE S D, CHEN D L. Improving weld strength of magnesium to aluminium dissimilar joints via tin interlayer during ultrasonic spot welding [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2012, 17(5): 342-347.

[17] PANTELI A, ROBSON J D, CHEN Y C, et al. The effectiveness of surface coatings on preventing interfacial reaction during ultrasonic welding of aluminum to magnesium[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2013, 44(13): 5773-5781.

[18] LIU X J, HUANG R S, WANG H Y, et al. Improvement of TIG lap weldability of dissimilar metals of Al and Mg [J]. Science and Technology of Welding & Joining, 2007, 12(3): 258-260. (编辑 吕雪梅)