

DOI : 10.3901/JME.2017.04.018

# 锌夹层添加对镁-铝异种金属搅拌摩擦点焊接头组织与性能的影响\*

徐荣正<sup>1,2</sup> 刘春忠<sup>1</sup> 倪丁瑞<sup>2</sup> 马宗义<sup>2</sup>

(1. 沈阳航空航天大学材料科学与工程学院 沈阳 110136 ;  
2. 中国科学院金属研究所 沈阳 110016)

**摘要 :** 对于镁-铝异种金属的搅拌摩擦点焊(Friction stir spot weld, FSSW), 镁-铝界面处连续分布的脆性 Mg-Al 金属间化合物是影响其强度的关键因素。针对 AZ31 镁合金和 2024 铝合金薄板的 FSSW, 采用 0.1 mm 厚纯锌箔作为预置夹层, 分析锌夹层添加对接头微观组织与力学性能的影响。结果表明, 无夹层时, 接头中仅在钩状区中的镁-铝界面处生成了厚度约为 5  $\mu\text{m}$  的连续金属间化合物层, 其余部分以机械结合为主, 接头拉剪载荷仅为 0.8 kN。锌夹层添加后, 降低了钩状区中靠近匙孔一侧的过渡层厚度(约 2  $\mu\text{m}$ ), 并使钩状区外侧界面处生成了新型 Al-Zn、Zn-Mg 化合物组织, 起到了阻碍该区域 Mg-Al 金属间化合物生成的作用, 达到了促进镁、铝之间冶金结合的效果。与无夹层相比, 有夹层接头拉剪载荷提高了 75%, 达到 1.4 kN。  
**关键词 :** 异种金属; 搅拌摩擦点焊; 锌夹层; 金属间化合物  
中图分类号: TG456

## Influence of Zn Interlayer Addition on Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welded Mg-Al Dissimilar Joints

XU Rongzheng<sup>1,2</sup> LIU Chunzhong<sup>1</sup> NI Dingrui<sup>2</sup> MA Zongyi<sup>2</sup>

(1. College of Material Science and Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136;  
2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

**Abstract :** For the friction stir spot welding (FSSW) of Mg-Al dissimilar metals, the joint strength is deteriorated due to the formation of intermetallic compound (IMC) layer at the interface. In the present study, AZ31 Mg and 2024 Al sheets are friction stir spot welded with and without the addition of a Zn interlayer 0.1 mm in thickness. The results show that the load of the Mg-Al FSSW joint without the Zn interlayer is only 0.8 kN due to the mechanical bonding between Mg and Al substrates as well as the formation of 5  $\mu\text{m}$  thick IMC layer at the interface. For the joints with Zn interlayer, for the region away from the keyhole in the hook region, the Zn interlayer reacts with the substrates, forming the Al-Zn zone and Zn-Mg zone, thereby eliminating the formation of Mg-Al IMCs. In addition, the Zn interlayer reacts with the substrates, reducing the IMC layer thickness to about 2  $\mu\text{m}$  next to the keyhole in the hook region. As a result, the joint load increases from 0.8 kN to 1.4 kN with a increase of 75%.

**Key words :** dissimilar metals ; friction stir spot welding ; Zn interlayer ; intermetallic compound

## 0 前言

铝合金与镁合金是工业上应用广泛的两种轻质合金材料, 在汽车以及航空航天等领域备受关注<sup>[1-3]</sup>。随着两种轻金属材料应用的不断深入, 不可

避免地涉及二者之间的焊接问题<sup>[4]</sup>。

点焊作为一种重要的连接技术, 在汽车以及航空航天等领域应用极为广泛。目前, 针对镁-铝异种金属间的点焊方法主要有电阻点焊<sup>[5]</sup>、磁脉冲焊<sup>[6]</sup>、真空扩散焊<sup>[7]</sup>以及钎焊<sup>[8]</sup>等。由于镁、铝异种金属之间的扩散焊、钎焊等工艺操作复杂, 限制了其进一步推广和应用; 而采用电阻点焊时, 在界面处极易形成大量的 Mg-Al 脆性金属间化合物相, 严重恶化接头的力学性能。

\* 国家自然科学基金(51331008, 51601121)、辽宁省自然科学基金(201602570)和辽宁省教育厅(L201624)资助项目。20160725 收到初稿, 20161228 收到修改稿

搅拌摩擦点焊(Friction stir spot welding, FSSW)是在搅拌摩擦焊(Friction stir welding, FSW)基础上发展起来的一种固相点焊技术,对于解决异种金属的焊接具有突出优点,其中对于镁-铝异种金属的FSSW研究较早。研究表明,在直插式FSSW接头中,界面处存在大量连续分布的硬脆Mg-Al金属间化合物,严重降低了接头强度<sup>[9]</sup>。通过减少工具下压量,虽然可在一定程度上降低热输入,但在界面区域仍然存在连续金属间化合物<sup>[10]</sup>。为了避免搅拌针匙孔的形成,增加接头结合面积,采用回填式FSSW技术可使接头性能有所提高,但并不明显。由于受界面处连续分布的Mg-Al金属间化合物脆性相的限制,匙孔的消除并没有明显提高接头强度<sup>[11]</sup>。

综上所述,如何减少甚至避免Mg-Al金属间化合物的形成,是镁-铝异种金属FSSW面临的首要问题。本研究拟采用低熔点的金属锌箔作为夹层,抑制接头内部Mg-Al金属间化合物的过度生成,以达到促进镁、铝基体材料之间冶金结合的效果,从而提高接头强度。

## 1 试验材料、设备与方法

### 1.1 试验方法

焊接材料为AZ31镁合金和2024铝合金轧制板材,板厚分别为2.4 mm和1.5 mm,两种材料的主要成分如表1所示。采用纯锌作为镁-铝FSSW添加的夹层材料,锌箔厚度为0.1 mm。

表1 AZ31镁合金与2024铝合金主要成分(质量分数) %

材料	Mg	Al	Zn	Mn	Cu
AZ31	余量	3.11	0.68	0.47	<0.05
2024	—	余量	0.005	0.5	3.8~4.9

### 1.2 试验设备

FSSW试验采用FSW-5LM-020型数控静龙门搅拌摩擦焊机。该设备采用FAGOR 8055数控系统,可实现X、Y、Z三个方向的控制。试验中工具倾角固定为0°。

### 1.3 试验方法

焊接试验:焊前先用400#砂纸去除板材表面氧化皮,后用酒精予以清洗,清除油污和粉尘。板材与夹层的搭接方式及焊接方法如图1a和1b所示。采用凹形轴肩,直径为10 mm,配合锥形螺纹搅拌针,其中针长为2.8 mm,根部直径为5 mm,端部直径为3 mm。选用的参数为:转速3 000 r/min,下压量为0.2 mm,下压速度2.5 mm/s,持续时间为5 s。

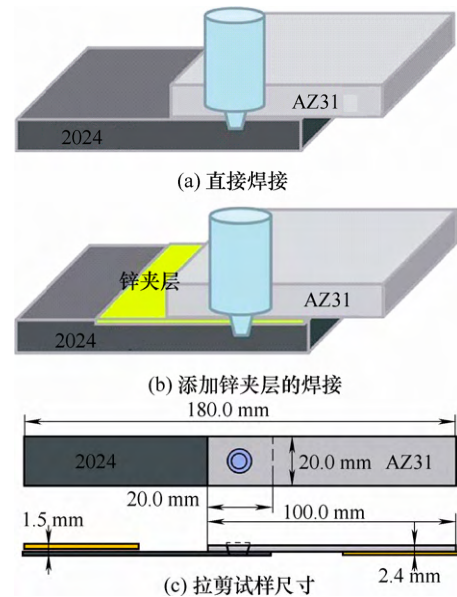


图1 镁-铝FSSW过程示意图及拉剪试样尺寸

金相观察:采用ZiessAxio Observer Z1m光学金相显微镜和配备能谱仪(Energy dispersive spectrometer, EDS)的LEO Supra 35场发射扫描电镜(Scanning electron microscope, SEM)对样品微观组织、界面元素分布和断口特征进行观察。样品经磨制和机械抛光,用6 g苦味酸+10 mL醋酸+10 mL蒸馏水+70 mL酒精配制的浸蚀剂,刻蚀10~20 s。

拉剪性能测试:采用尺寸为100 mm×20 mm的AZ31镁合金和2024铝合金板材,选用镁板在上、铝板在下的搭接方式,搭接部分尺寸为20 mm×20 mm。拉剪试验时,在镁板和铝板的夹持端分别采用1.5 mm和2.4 mm厚垫板,以提高拉剪试验的准确性,如图1c所示。采用Instron5582拉伸试验机对接头进行拉剪载荷测试,速度0.5 mm/min。拉剪载荷取3个试样的平均值。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 镁-铝异种金属直接搅拌摩擦点焊

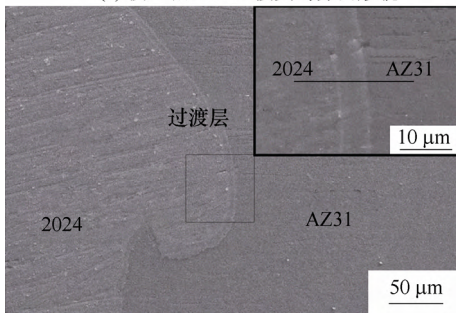
图2a是镁-铝异种金属直接FSSW接头的截面形貌,接头内部存在一个由于搅拌针拔出留下的匙孔。焊接时下板材料在搅拌工具的热机作用下,会沿着搅拌针向上运动,在界面处形成一个钩形曲线,钩形曲线所在区域也被称为钩状区<sup>[12-13]</sup>。对于前进侧的钩状区进一步观察可见,镁、铝基体之间结合良好,并在界面处形成一个明显的过渡层组织,厚度为5 μm左右(图2b)。

对于过渡层中的元素分布分析表明,主要为Mg、Al两种元素(图3),依据Mg-Al二元合金相图可推测,该组织应为二者由扩散反应形成的金属间

化合物。在匙孔外围区域(图 2a 中 C 和 D 区域),尽管仍可形成过渡层组织,但出现了明显的裂纹缺陷(图 4a 和 4b)。由此可见,实际上接头内部仅在临近匙孔的钩状区内形成了以镁-铝金属间化合物形式进行连接的冶金结合区(图 2b 和图 4a),在接头截面部分的长度约为 1.5 mm,而在其他位置并未形成有效连接,而是以机械结合为主(图 2 和图 4b)。

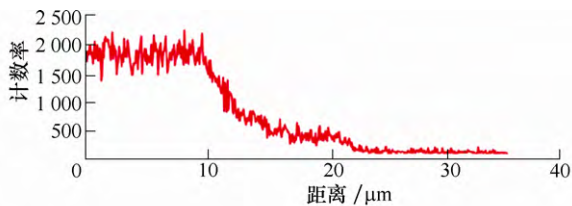


(a) 镁-铝 FSSW 接头的界面形貌

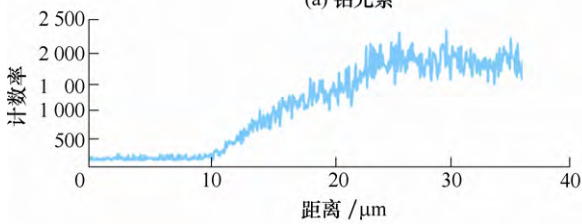


(b) 前进侧的高倍组织

图 2 接头宏观形貌与微观组织



(a) 铝元素



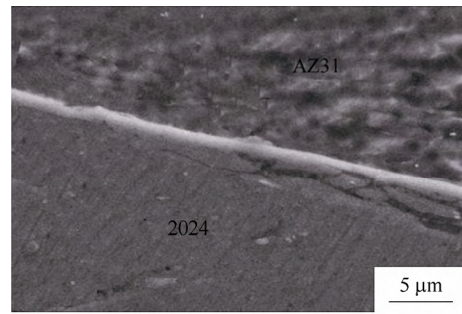
(b) 镁元素

图 3 镁-铝 FSSW 接头的界面中过渡区元素的线分析

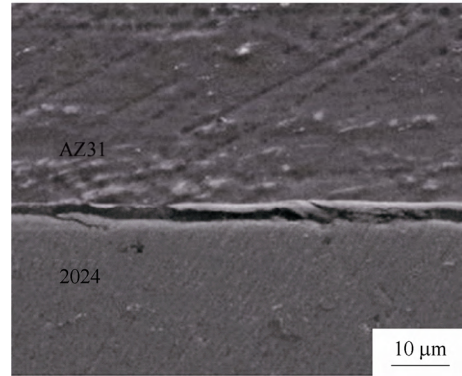
对镁-铝接头的拉伸测试表明,平均拉剪载荷约为 0.8 kN。接头沿着上下板界面位置开裂,失效形式为典型的界面断裂(图 5a),断口表面无明显韧窝,呈现典型的脆性断裂特征(图 5b)。可见,虽然 FSSW 可实现二者的点焊连接,但接头强度较低。说明接头内部以机械连接为主的结合方式,以及上下板界面间形成的 Mg-Al 金属间化合物组织是影响接头强度的关键因素。

### 2.2 添加锌夹层的镁-铝异种金属点焊

图 6a 是添加锌夹层后,镁-铝 FSSW 接头的截面宏观形貌,接头结构与无夹层的类似。对前进侧



(a) C 区组织

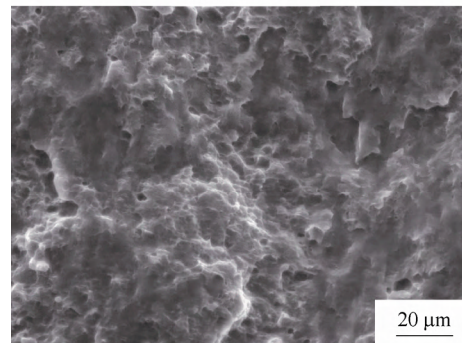


(b) D 区组织

图 4 图 2a 中不同区域的高倍 SEM 形貌



(a) 断裂位置



(b) 断口形貌

图 5 镁-铝直接 FSSW 接头断裂特征

组织的分析发现,在紧邻匙孔一侧的界面上部区域(图 6a 中 B 区域)分布了较多的颗粒状结构(图 6b)。在 6c 中的 E~H 区,界面处反应层的厚度明显增加(图 6c 和 6d)。

对图 6b 中 I 区域中的颗粒状物质的元素分析显示,其内部除了含有 Mg、Al 元素外,还包含较多的 Zn 元素(图 7a)。对该界面区域的元素线分析表明,其与无夹层接头明显不同(图 3)。添加锌夹层后,界面处出现了锌元素富集的现象(图 7b),这表明锌夹层参与了 Mg-Al 间的界面扩散反应。



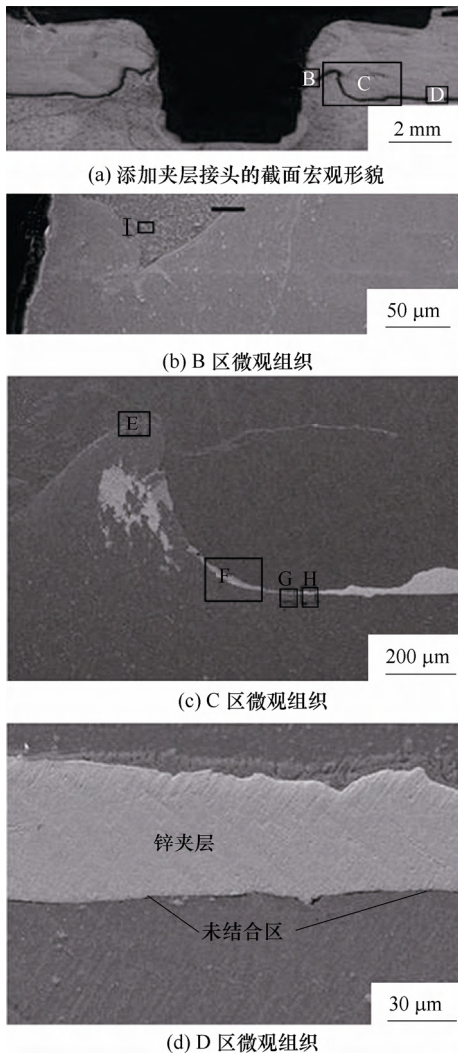


图6 添加0.1 mm 锌夹层的镁-铝 FSSW 接头的宏观形貌和各区微观组织

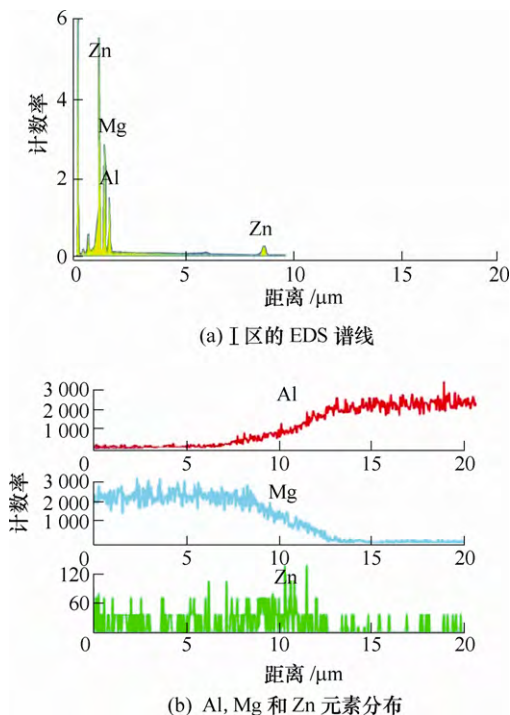


图7 图6b中I区的EDS谱线和过渡层组织的元素线分析

对图6c中的E区域进行观察可见,在Mg-Al界面间也生成了一层明显的过渡层组织,厚度大约为2 μm(图8a)。EDS线分析显示,与邻近匙孔区域元素的分布略有不同,在过渡层中主要是以镁和铝元素共存的方式为主,未发现锌元素的存在(图8b)。

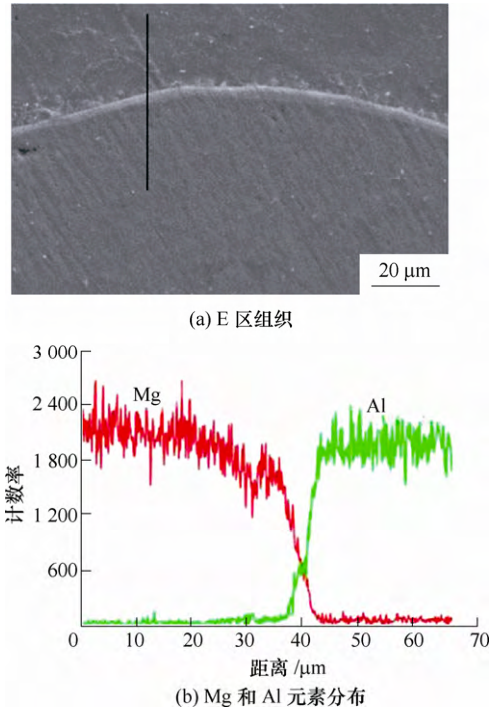
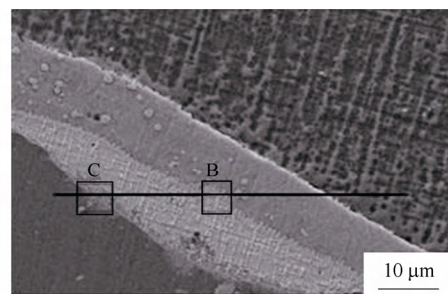


图8 图6c中E区组织和元素的线分析

对于图6c中的F区域分析表明,该区域中过渡层的厚度在10~20 μm(图9a~9c),并且从铝侧到镁侧形成了不同的过渡层组织。靠近铝侧的过渡层主要以铝和锌元素之间扩散反应形成的组织为主,并有极少量镁元素的存在(图9c和9d);靠近镁侧的过渡层则主要以锌和镁元素的合金化组织为主,几乎未发现铝元素的存在(图9c和9d),且过渡层与基体之间结合紧密,无明显缺陷(图9a~9c)。说明在该区域中,锌夹层的添加有效阻碍了Mg-Al脆性金属间化合物的生成,达到了促进镁和铝界面之间冶金结合的效果。对于图6c中的G区和F区观察发现,过渡层与镁基体之间结合紧密,但在夹层与铝基体的界面之间出现了细小的裂纹缺陷,如图10a和10b所示,且在距离匙孔越远的区域缺陷越明显(图10和图6d)。



(a) 图6c中F区组织

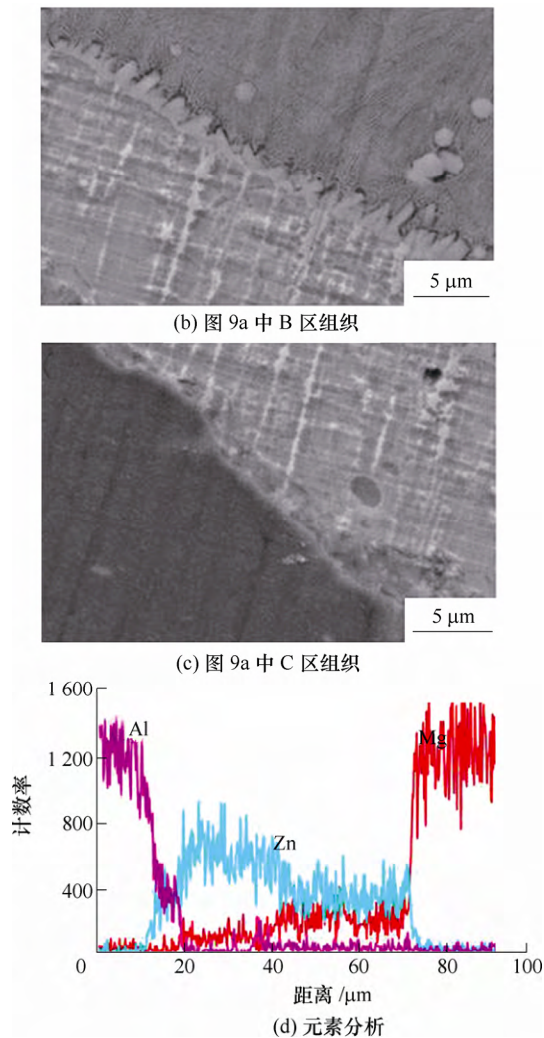


图 9 图 6c 中 F 区组织及图 9a 中各区的组织及元素线分析

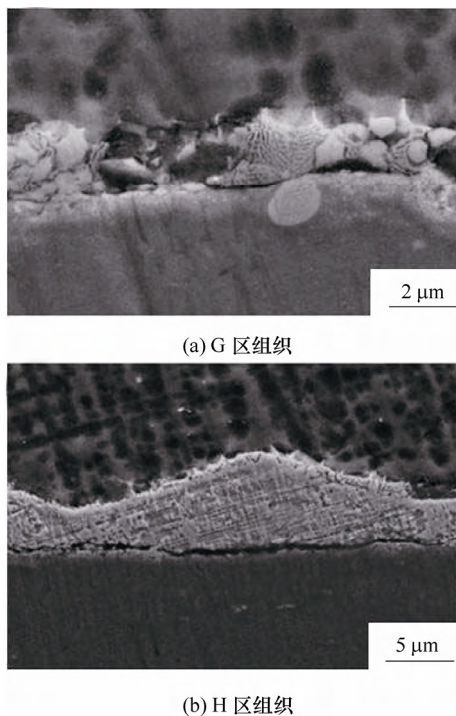


图 10 图 6c 中 G 区和 H 区的高倍形貌

拉剪试验结果表明, 添加锌夹层的接头拉剪载

荷为 1.4 kN, 相比于无夹层添加接头, 载荷提高了 75%。断口分析显示, 接头沿着上下板界面位置开裂(图 11a 和 11b)。此外, 在接头外围区域的裂纹沿着夹层和铝基体的界面位置(图 11a 和 11c), 进一步证实该区域中由于缺陷的存在, 影响了镁、铝之间的连接性能。

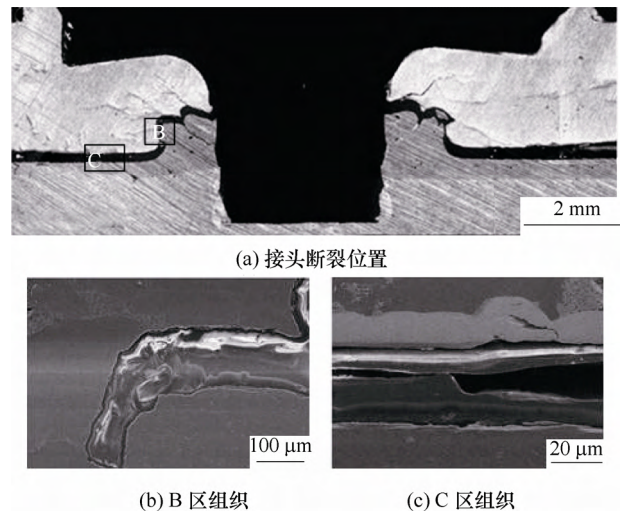


图 11 添加夹层镁-铝 FSSW 接头断裂位置及各区形貌

### 2.3 锌夹层在焊接过程中的作用机制分析

对于异种金属的焊接来说, 其主要难点是界面处极易生成大量的脆性化合物, 从而恶化接头性能。这在以往的铝-铜、铝-钢以及铝-镁的熔化焊中被广泛证实。搅拌摩擦焊之所以对异种金属的焊接具有一定可行性, 就是因为热输入低, 可有效抑制金属间化合物的过度生成。即使这样, 常规情况下, FSW 生成的化合物层还是过厚, 易于开裂。我们在铝-铜的异种焊接中证实<sup>[14-15]</sup>, 通过将搅拌针偏置在铝一侧, 便于控制界面反应。反应层过厚, 界面易开裂, 而过薄时结合效果差, 二者均不利于结合强度; 当反应层厚度约为 1 μm 时, 结合效果最佳, 接头可弯曲至 180° 而不开裂。对于铝-镁异种 FSW 来说, 其界面反应极易发生, 更难控制<sup>[16-17]</sup>。而 FSSW 作为 FSW 的衍生技术, 在镁-铝的焊接中, 同样遇到了相似的问题<sup>[9-10]</sup>。这也是目前铝-镁 FS(S)W 接头强度低、研究进展缓慢的原因所在, 而添加中间层的方式是解决上述问题的有效方式之一。

在本研究中, 由第 2.1 节中分析可见, 采用 FSSW 直接对镁-铝异种金属进行焊接时, 在钩状区中的界面处生成了连续分布的 Mg-Al 脆性金属间化合物, 其余部位以机械结合为主, 导致接头的性能较差。综合第 2.2 节中对于添加锌夹层的镁-铝 FSSW 接头组织与性能分析可见, FSSW 过程中, 在搅拌工具的热机作用下, 夹层可以起到阻碍减少甚至避免接头内部界面处 Mg-Al 金属间化合物形成



的作用，达到促进基体之间冶金结合的效果。由于接头内部材料流动行为和热输入的差异，不同区域的夹层会与镁、铝间发生不同程度的反应，从而形成不同的微观组织。

首先，在搅拌工具作用下，位于匙孔区域的夹层会发生破碎，并随软化的铝合金基体一起沿搅拌针向上部和外侧移动。随后破碎的锌夹层在匙孔的外围与基体发生合金化反应(图 6b 和图 7a)，生成细小、复杂的 Mg-Al-Zn 化合物相。

其次，对于轴肩下部的夹层，依据反应特征可分为两个区域。位于钩状区中的锌夹层(以接头中心为原点，以匙孔在界面位置处的半径为内半径，约以 3 mm 为外半径的圆环范围内)在热机作用下，被加热、软化并随着铝基体向上运动。由于夹层的熔点较低，因此在焊接工具作用下，由于受到上板的挤压作用，软化的夹层在上升过程中，还未来得及与基体发生反应，便沿着镁-铝界面向下运动。在图 6c 中 E 区的线分析中未发现锌的存在(图 8)，也验证了上述推论。

而位于轴肩外围的夹层(即接头中约以 3 mm 为内半径，5 mm 为外半径的圆环区域)几乎不发生运动，而是在焊接工具的热压作用下与基体发生反应。由于镁和锌的结合温度较低，因此在该区域结合较好；而由于铝表面存在氧化膜，导致在锌、铝之间的界面处存在一些小的焊接缺陷(图 6d 及图 10)。

依据上述分析，焊接过程中锌夹层与上、下母材间的反应机制可通过示意图 12 描述。接头依据反应特征的差异，可以分为三个典型的区域，即图 12a 和 12b 中示意的 I 区、II 区和 III 区，各区域大致位置与尺寸如图 12b 所示。

I 区中，向上流动的铝基体和破碎的锌夹层与该区域中的镁基体发生反应，由于该区域是温度相对较高，合金化反应比较充分，因此形成了复杂的 Mg-Al-Zn 化合物相，最终分布于匙孔周围的区域(图 6b)。

II 区中，极度软化的锌夹层在随铝基体的上升过程中，受到上下板之间的挤压作用，产生了向下流动的现象，致使在钩状区上部的界面中(图 6c 中 E 区)几乎不存在锌元素，但在钩状区底部则存在较多的锌，且参与了界面反应，起到了阻碍镁、铝之间直接发生过度化合反应的作用，达到了促进镁、铝基体之间的冶金结合的效果，如图 12b 和 12c 所示)。

III 区中，锌夹层与镁、铝基体发生的是一种类似钎焊连接的过程。夹层与镁基体可以形成扩散反应层，但是由于铝合金表面氧化膜的存在，致使锌

夹层在该区域与铝基体之间并未发生充分的合金化反应(图 12d)，因此该区域中存在一些焊接缺陷。

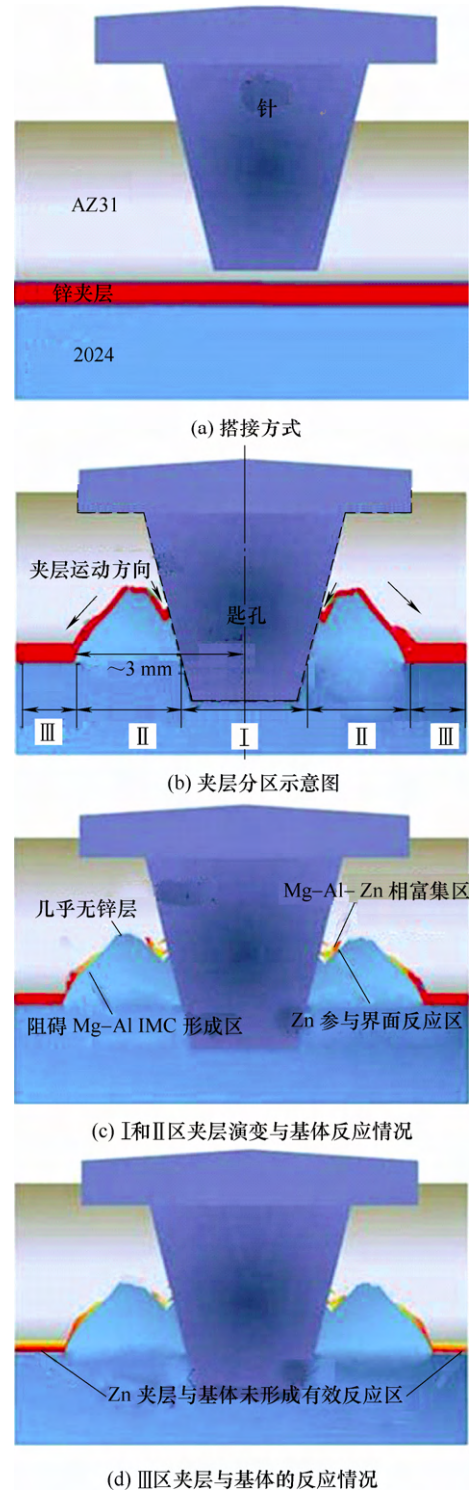


图 12 典型添加锌夹层的 FSSW 接头组织演变示意图

综上所述，采用锌作为添加夹层，通过其在焊接过程中与镁、铝合金之间的合金化反应，起到了阻碍接头中钩状区外围区域中 Mg-Al 金属间化合物生成的作用，达到了促进镁、铝基体之间冶金结合的效果。尤其对钩状区外侧的微观组织改善的效果最为明显，在该区域中锌夹层通过与镁、铝基体的

化合反应, 生成了新型的 Al-Zn、Zn-Mg 化合物, 起到阻碍 Mg-Al 金属间化合物生成的作用。另外, 夹层的添加也使钩状区靠近匙孔一侧的化合物层厚度降低(2  $\mu\text{m}$ )。可见, 锌夹层的添加, 显著提高了 FSSW 接头的强度, 其拉剪载荷由 0.8 kN 提高至 1.4 kN。

然而, 由于铝合金表面氧化膜的存在, 致使夹层与铝基体间的结合不够充分, 这在一定程度上限制了接头强度的进一步提升, 因此仍需要进一步研究如何促进该区域反应的合金化反应, 从而进一步提高接头性能。

此外, 锌夹层的添加, 使接头内部, 尤其是界面位置发生了复杂的微观组织的演变与相的变化, 虽然研究已证实焊接过程中锌的添加促进了镁、铝之间的冶金结合、实现了减少甚至避免接头中界面处 Mg-Al 金属间化合物形成的可行性, 并进行了初步的微观组织特征分析, 但是后续的研究仍需要对界面处化合物相组成进行定性分析, 从而进一步揭示锌基层添加对接头组织与性能的影响机制。

### 3 结 论

本文研究了锌夹层对镁-铝 FSSW 接头微观组织和拉剪性能的影响, 分析了锌夹层的作用机制, 得到的主要结论如下。

(1) 无夹层 FSSW 时, 接头中仅在钩状区界面处生成了厚度约为 5  $\mu\text{m}$  的硬脆的镁-铝金属间化合物层, 其余部位以机械结合为主, 受其影响, 接头强度较低, 仅为 0.8 kN, 接头失效方式为界面断裂, 断口呈现典型的脆性断裂特征。

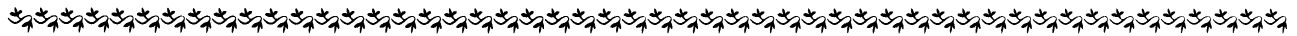
(2) 锌夹层的添加降低了钩状区域中靠近匙孔一侧的过渡层厚度(约 2  $\mu\text{m}$ ), 在钩状区外侧界面处生成了 Al-Zn、Zn-Mg 化合物组织, 起到了阻碍 Mg-Al 金属间化合物生成的作用, 达到了促进镁、铝基体之间的冶金结合的效果。

(3) 相比无夹层接头, 虽然接头失效模式未发生明显变化, 但由于锌夹层的添加, 达到了促进镁-铝基体之间冶金结合的效果, 使添加锌夹层的镁-铝 FSSW 接头的拉剪载荷达到 1.4 kN, 相比于无夹层接头提高了 75%。

### 参 考 文 献

- [1] PATEL V ,CHEN D L ,BHOLE S D. Dissimilar ultrasonic spot welding of Mg-Al and Mg-high strength low alloy steel[J]. Theoretical and Applied Mechanics Letters , 2014 , 4 : 410051-0410058.
- [2] 王涛,曹睿,陈剑虹,等. 镁和钛异种金属冷金属过渡焊接接头微观组织及力学性能的分析[J]. 机械工程学报, 2014 , 50(4) : 75-79.  
WANG Tao ,CAO Rui ,CHEN Jianhong , et al. Analysis of microstructure and mechanical properties for welding joints of dissimilar metals between magnesium and titanium by cold metal transfer method[J]. Journal of Mechanical Engineering , 2014 , 50(4) : 75-79.
- [3] 韩培培,杨超,王继杰,等. 固溶处理对 7B04-O 铝合金搅拌摩擦焊接接头微观组织与力学性能的影响[J]. 机械工程学报, 2015 , 51(22) : 35-41.  
HAN Peipei ,YANG Chao ,WANG Jijie , et al. Effects of solution heat treatment on friction stir welding joints of 7B04-O aluminum alloy[J]. Journal of Mechanical Engineering , 2015 , 51(22) : 35-41.
- [4] YAMAGISHI H ,SUMIOKA J ,KAKIUCHI S , et al. Forge welding of magnesium alloy to aluminum alloy using a Cu , Ni , or Ti interlayer[J]. Metallurgical and Materials Transactions A , 2015 , 46 : 3601-3611.
- [5] BEN-ARTZY A ,STEM A ,FRAGE N. Interface phenomena in aluminium-magnesium magnetic pulse welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining , 2008 , 13 : 402-408.
- [6] KIU P L ,LI Y J ,GENGL H R. A study of phase constitution near the interface of Mg/Al vacuum diffusion bonding[J]. Materials Letters , 2005 , 59 : 2001-2005.
- [7] LIU P ,LI Y J ,GENGL H R. Investigation of interfacial structure of Mg/Al vacuum diffusion-bonded joint[J]. Vacuum , 2006 , 80 : 395-399.
- [8] WIELAGE S ,MUCKLICH T ,GROUND T. Corrosion behaviour of soldered joints of magnesium alloys and dissimilar materials[J]. Microchimica Acta , 2006 , 156 : 151-157.
- [9] RAO H M ,YUAN W ,BADARINARAYAN H. Effect of process parameters on mechanical properties of friction stir spot welded magnesium to aluminum alloys[J]. Materials and Design , 2015 , 66 : 235-245.
- [10] SHEN J ,LI Y ,ZHANG T , et al. Preheating friction stir spot welding of Mg/Al alloys in various lap configurations[J]. Science and Technology of Welding and Joining , 2015 , 20 : 1-10.
- [11] 封小松,郭立杰,苗玉钢,等. 镁-铝异种金属填充式摩擦点焊接头特性[J]. 焊接学报, 2013 , 34(11) : 41-44.  
FENG Xiaosong ,GUO Lijie ,MIAO Yugang , et al. Joint characteristics of refill friction spot welding of magnesium-aluminum dissimilar metals[J]. Transactions of the China Welding Institution , 2013 , 34(11) : 41-44.

- [12] SU P, GERLICH A, NORTH T H, et al. Material flow during friction stir spot welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2006, 11: 61-66.
- [13] GERLICH A, SU P, YAMAMOTO M, et al. Material flow and intermixing during dissimilar friction stir welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2008, 13: 254-264.
- [14] XUE P, NI D R, WANG D, et al. Enhanced mechanical properties of friction stir welded dissimilar Al-Cu joint by intermetallic compounds[J]. Material Science Engineer. A, 2010, 527: 5723-5727.
- [15] XUE P, NI D R, WANG D, et al. Effect of friction stir welding parameters on the microstructure and mechanical properties of the dissimilar Al-Cu joints[J]. Material Science Engineer. A, 2011, 528: 4683-4689.
- [16] CHEN Y, NAKATA K. Friction stir lap joining aluminum and magnesium alloys[J]. Scripta Materialia, 2008, 58(6): 433-436.
- [17] KOSTKA A, COELHO R S, dos SANTOS J, et al. Microstructure of friction stir welding of aluminium alloy to magnesium alloy[J]. Scripta Mater. 2009, 60: 953-956.
- 作者简介：徐荣正，男，1981年出生，博士，讲师。主要研究方向为轻质合金的搅拌摩擦焊接技术。  
E-mail: rzxu@imr.ac.cn
- 刘春忠(通信作者)，男，1968年出生，博士，教授。主要研究方向为高强轻合金制备与加工。  
E-mail: czliu@sau.edu.cn
- 倪丁瑞，男，1976年出生，博士，副研究员。主要研究方向为搅拌摩擦焊接与加工。  
E-mail: drni@imr.ac.cn



## 第6届上银优秀机械博士论文奖——铜奖

### 大壁虎斜面运动力学、脚趾外翻脱附力学及其仿生研究

作者：王周义

毕业学校：南京航空航天大学

指导教师：戴振东

运动是动物的基本特征，许多动物具有超群的运动能力，这种能力源自于动物对运动反力的精细感知和对运动行为的精确调控。对壁虎在倾斜面的攀爬运动力学模式和黏/脱附力学规律的研究，具有重要的工程意义，可为仿生黏附机构(机器人)的机构设计、步态规划、力反馈控制、黏附系统设计等提供仿生启示；也具有重要的科学意义，完善匍匐运动动物运动力学的知识。本论文从3维运动反力测试设备的研制开始，测试壁虎在不同倾斜度表面运动的反力及行为，系统地研究壁虎是如何调节运动反力及行为以适应斜面倾斜度以及运动方向的变化；从宏观角度揭示了壁虎脚掌如何与表面形成可靠的附着从而产生在斜面运动所需的力；试验测试了壁虎脚趾外翻的力学规律，揭示壁虎是如何快速地实现脱附。

获得的主要成果如下：

(1) 基于自行研制的3维力传感器，设计研制了由多个三维力传感器组成的力测试阵列为核心的动物全空间运动反力--行为测试系统。相比于传统的力测试平台，该新型的测试系统突破了运动负荷因数对于单腿完整运动反力测试的限制，使得对于动物运动中肢体间协同作用的研究成为现实。并提出了一种表征运动反力间关系的新方法，清晰地呈现单个步足的运动反力分量之间的关系以及作用于各个步足上运动反力之间的内在联系。

(2) 确定了动物运动反力模式发生变化的倾斜度阈值，揭示了壁虎在不同斜度表面运动时体重分配、驱动模式、运动稳定、步态调节规律，发现了天花板表面上的攀爬运动必须采用匍匐运动机制和多级反向摩擦力自锁合机制。

(3) 通过电刺激控制壁虎黏/脱附行为的对应神经干，实现了脚趾外翻过程的黏附接触力学规律的测试，发现外翻过程中脱附力与实际加载的外力无关，使得在脱附过程中脚掌依然可以为运动提供稳定可靠的运动反力。

目前空间环境下在轨服务、对非合作目标捕获等作业急需稳定的可控黏附机构，研究成果已用于指导基于干黏附技术的空间仿生黏附机构(机器人)的研制。