

# Al/Mg 异种金属板材电磁脉冲焊接工艺 及力学性能研究

朱聪聪<sup>a</sup>, 蒙奕帆<sup>b</sup>, 柳泉潇潇<sup>b</sup>, 李光耀<sup>b</sup>, 崔俊佳<sup>b</sup>

(湖南大学 a. 材料科学与工程学院; b. 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082)

**摘要:** **目的** 研究不同工艺参数下铝合金-镁合金磁脉冲焊接接头的微观组织和力学性能。**方法** 利用磁脉冲焊接技术对厚度为 1.5 mm 的 7075 铝合金板材和 AZ31 镁合金板材进行焊接, 利用金相显微镜、扫描电子显微镜和万能试验机对焊接接头的微观形貌和力学性能进行测试和分析。**结果** 随着焊接时放电能量的增加, 焊接接头的最大拉伸-剪切力呈先增大后减小的趋势, 当放电能量为 35 kJ 时, 焊接接头的力学性能最好。通过金相观察结果可知, 焊接界面由波形界面和平直界面组成。通过扫描电镜分析可知, 无论是波形界面还是平直界面处均发生了不同程度的元素扩散, 波形界面处的元素扩散宽度为 2  $\mu\text{m}$ 。**结论** Al/Mg 磁脉冲焊接界面由平直界面和波形界面组成, 并且界面处发生了一定程度的元素扩散, 波形界面区的元素扩散程度高于平直界面区, 这说明磁脉冲焊接的界面是机械结合和冶金结合共同作用的结果。不同工艺参数下的磁脉冲焊接接头具有不同的力学性能, 放电能量越大, 碰撞速度越大, 波形区的长度更长, 因而焊接接头力学性能更好, 但放电能量超过一定值时, 过高的碰撞速度会造成微小裂纹、金属间化合物等缺陷, 导致焊接接头的力学性能下降。

**关键词:** 磁脉冲焊接; 铝合金-镁合金异种材料; 微观组织; 力学性能

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2021.04.007

**中图分类号:** TG393 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2021)04-0045-07

## Study on Process and Mechanical Properties of Al/Mg Dissimilar Metal Sheet Joints by Magnetic Pulse Welding

ZHU Cong-cong<sup>a</sup>, MENG Yi-fan<sup>b</sup>, LIU Quan-xiao-xiao<sup>b</sup>, LI Guang-yao<sup>b</sup>, CUI Jun-jia<sup>b</sup>

(a. College of Material Science and Engineering; b. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China)

**ABSTRACT:** The purpose of this paper was to study the microstructure and mechanical properties of Al/Mg magnetic pulse welding joints under different process parameters. The 7075 aluminum alloy sheets and AZ31 magnesium alloy sheets with a thickness of 1.5 mm were welded by magnetic pulse welding. The microstructure and mechanical properties of Al/Mg welded joints were tested and analyzed by metallurgical microscope, scanning electron microscope and universal testing machine. With the increase of the discharge energy, the maximum tensile-shear force of Al/Mg welded joints increased first and then decreased. When the discharge energy was 35 kJ, the mechanical properties of the welded joint were the best. It can be seen from the metallographic observation that the welding interface was composed of the wave interface and the straight interface. It can be seen

收稿日期: 2021-04-12

基金项目: 国家自然科学基金 (51975202); 湖南省自然科学基金优秀青年科学基金 (2019JJ30005)

作者简介: 朱聪聪 (1994—), 女, 博士生, 主要研究方向为异种金属材料的连接。

通讯作者: 崔俊佳 (1983—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为新能源汽车制造、异种材料高效连接技术、汽车轻量化、冲击动力学。

that different degrees of element diffusion occurred at both the wave interface and the straight interface through scanning electron microscopy analysis. The element diffusion width at the wave interface was 2  $\mu\text{m}$ . The Al/Mg magnetic pulse welding interface consists of a straight interface and a wave interface, and a certain degree of element diffusion occurs at the interface. The element diffusion in the wave interface zone is higher than that in the flat interface zone. This indicates that the formation of the interface of magnetic pulse welding is the result of mechanical bonding and metallurgy bonding. The magnetic pulse welding joints under different process parameters have different mechanical properties. The greater the discharge energy is, the greater the collision speed will be, and the longer the length of the wave area will be, so the mechanical properties of the welded joint will be better. However, when the discharge energy exceeds a certain value, the excessively high collision speed will produce defects such as micro cracks and intermetallic compounds, which will cause the decline of the mechanical properties of the welded joint.

**KEY WORDS:** magnetic pulse welding; aluminum alloy-magnesium alloy dissimilar materials; microstructure; mechanical properties

铝合金和镁合金广泛应用于航空航天、电子通讯、汽车工业等领域。为了充分发挥不同材料的优良性能,工业应用中存在着异种材料焊接或连接的需求<sup>[1-3]</sup>,因此,实现铝合金-镁合金异种材料间的焊接,获得优质焊接接头具有重要的意义。由于铝合金和镁合金之间的物理、化学性能差异较大,根据铝-镁二元相图可知,铝和镁焊接极易形成脆性 Al-Mg 金属间化合物,采用传统的熔化焊等方法难以实现有效连接,限制了铝合金和镁合金的应用<sup>[4]</sup>。

磁脉冲焊接是一种高速固相焊接技术,在几毫秒内即可完成焊接<sup>[5]</sup>。磁脉冲焊接技术是在电磁成形工艺的基础上发展而来,它利用电磁力驱动金属件高速碰撞,从而实现焊接<sup>[6]</sup>。磁脉冲焊接工艺由于其不需要辅料、不需要加热、焊接效率高、无热影响区、大幅减小焊接界面金属间化合物的产生等特点,被广泛应用于异种材料的连接<sup>[7]</sup>。已有学者采用磁脉冲焊接的方法实现了 Al/Al<sup>[8]</sup>、Al/Fe<sup>[9-11]</sup>、Al/Cu<sup>[12]</sup>、Al/Ti<sup>[13]</sup>、Al/Mg<sup>[14-18]</sup>等异种材料的有效连接,并且从数值模拟、接头性能、界面形貌结构及界面形成机理等方面对磁脉冲焊接工艺进行了研究。Shim 等<sup>[19]</sup>通过建立 3D 耦合场模型研究了 Al-Fe 管件磁脉冲焊接工艺的过程,分析数值模拟结果获得了最佳的工艺参数。于海平等<sup>[20]</sup>研究了 Al-Fe 接头的抗拉性能和抗扭转性能,发现工艺参数合适的条件下,焊接接头的性能高于铝母材。Geng 等<sup>[10]</sup>研究了 Al/Fe 异种材料磁脉冲焊接界面的微观组织,发现焊接界面形貌由平直界面和剪切波界面组成,并且在界面处存在一层非晶。陈树君等<sup>[15-16]</sup>研究了 Al/Mg 异种材料磁脉冲焊接界面的形貌及界面

间产热机制,结果表明通过优化工艺参数可以减少脆硬第二相的产生,获得性能良好的焊接接头。

以上研究表明,磁脉冲焊接接头的界面形貌、组织结构等是影响接头质量的根本原因。不同的放电参数影响焊接界面的形貌,从而影响 Al/Mg 焊接接头的力学性能。文中采用磁脉冲焊接工艺连接 7075 铝合金和 AZ31 镁合金异种材料,分析探讨了不同放电参数下 Al/Mg 异种金属焊接接头的力学性能和界面微观形貌特点。

## 1 试验

### 1.1 材料

所采用的板材为工业常用的 7075 铝合金和 AZ31 镁合金。7075 铝合金和 AZ31 镁合金板材的厚度均为 1.5 mm,板材成分如表 1 所示,其截面的原始金相照片如图 1 所示。

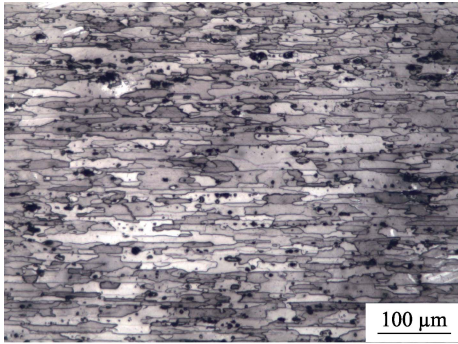
### 1.2 试件准备

文中铝合金-镁合金异种材料采用搭接的形式进行连接,铝合金和镁合金的试样尺寸为 35 mm×120 mm,垫片的厚度为 1.4 mm,具体的放置位置及尺寸如图 2 所示。由于镁合金受到冲击后易产生裂纹,使其自身力学性能大幅度下降,因此文中选取 AZ31 镁合金为飞板,7075 铝合金为基板。在焊接前,采用酒精擦拭待焊的铝板表面,除去油污等杂质,采用 1200 目金相砂纸打磨待焊的镁板表面,然后再用酒精清洗擦拭,去除镁板表面的氧化层和杂质等。

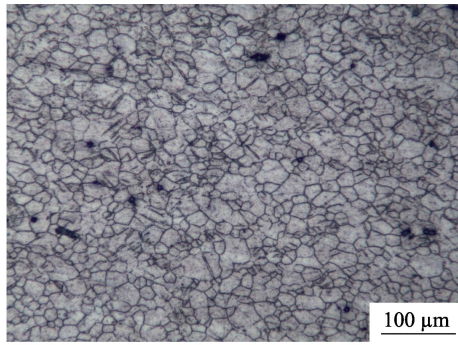
表 1 铝合金和镁合金板材的化学成分(质量分数)

Tab.1 Composition of the aluminum alloy and magnesium alloy (mass fraction)

| 合金   | Mg      | Mn      | Si   | Fe    | Cr        | Zn      | Cu      | Al      |
|------|---------|---------|------|-------|-----------|---------|---------|---------|
| AZ31 | 余量      | 0.2~1.0 | 0.08 | 0.003 |           | 0.6~1.4 |         | 2.5~3.5 |
| 7075 | 2.2~2.8 | 0.1     | 0.25 | 0.4   | 0.15~0.35 | 5.0~6.1 | 1.2~2.0 | 余量      |



a 7075 板材截面原始金相



b AZ31 板材截面原始金相

图 1 原始板材截面的金相组织照片

Fig.1 Metallographic structure of the original sheet section

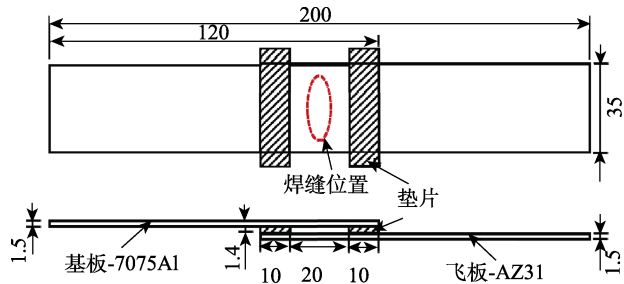


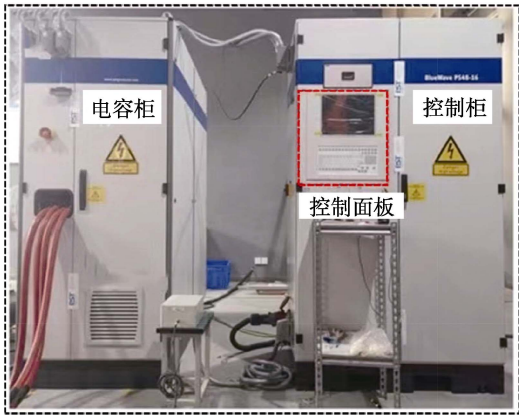
图 2 焊件尺寸示意 (mm)

Fig.2 Schematic diagram of specimen size

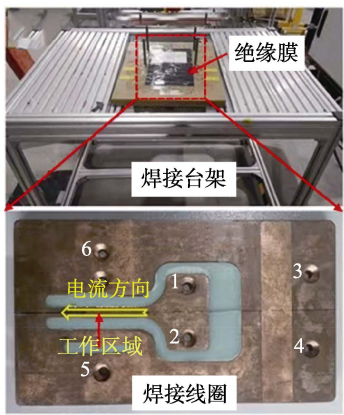
1.3 焊接设备及工艺

文中所采用的磁脉冲焊接设备主要由磁脉冲发生器和焊接工装组成，如图 3 所示。该型磁脉冲发生器由电容柜和控制柜组成，最高放电电压为 16 kV，最大放电能量为 48 kJ。

文中采用 30，35，40 kJ 这 3 个放电能量进行 Al/Mg 磁脉冲焊接，磁脉冲板件焊接的原理如图 4 所示。磁脉冲焊接时，高频脉冲电流通过线圈，线圈的周围产生强大的磁场，在飞板的 AZ31 镁合金内部产生感应电流，该电流与线圈中的电流方向相反。相反方向的电流具有非常大的相互排斥的电磁力，使飞板发生高速塑性变形，与基板高速碰撞从而实现焊接。



a 磁脉冲发生器



b 焊接工装及线圈

图 3 磁脉冲焊接设备及工装

Fig.3 Magnetic pulse welding equipment and tooling

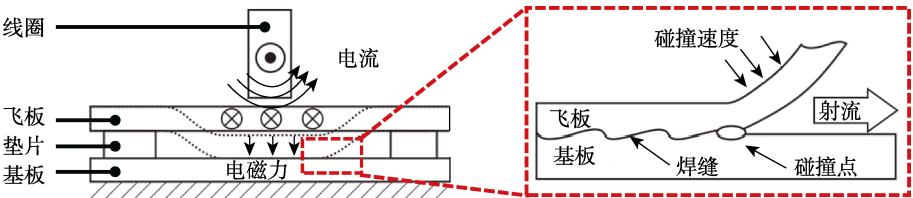


图 4 板件磁脉冲焊接过程原理

Fig.4 Schematic diagram of magnetic pulse welding process

1.4 焊件的力学性能测试及微观组织观察

Al/Mg 磁脉冲焊接实验结束后，为了检验接头的

强度，需要对其进行力学性能测试。文中的焊接接头是搭接的形式，因而使用拉伸-剪切的方法对焊接件进行测试。拉伸-剪切测试在型号为 INSTRON 5985

的万能电子实验机上进行,测试时的加载速率为2 mm/min。为了观察不同放电能量下焊接界面的形貌和组织,沿着垂直于焊接方向进行切割,取其截面制取用来观察显微组织的样品。将制取的截面样品用金相砂纸(600,1200,2000,4000目)进行打磨,并用金刚石抛光液进行机械抛光,然后在型号为DMM-400C的蔡康金相显微镜下进行观察。通过配备有能谱系统(EDS)的Quanta-200环境扫描电子显微镜(SEM)对焊接界面和拉伸-剪切断口的微观结构和元素分布进行了观察分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同能量下 Al/Mg 磁脉冲焊接接头的宏观形貌分析

图5是不同放电能量下Al/Mg磁脉冲焊接件的宏观照片。磁脉冲焊接是一个高速冲击的过程,因此在飞板与基板高速碰撞实现焊接时会使搭接区域发生一定程度的塑性变形。图5中红色虚线框为镁合金的塑性变形区域,黄色实线框是焊缝的位置。从图5可以看出,不管放电能量多大,搭接区域的镁合金板材均发生一定程度的颈缩和厚度减薄,并且随着放电能量的增大,颈缩程度越大,这是因为搭接区域的颈缩和厚度减薄主要受宽度方向变形程度的影响。焊接时的放电能量越大,飞板的初始速度越大,飞板与基板的碰撞速度越大,飞板的塑性变形程度越严重,因此焊缝区的宽度也逐渐增大,搭接区域也发生更严重的塑性变形,搭接区域的径缩程度和减薄程度也越大。

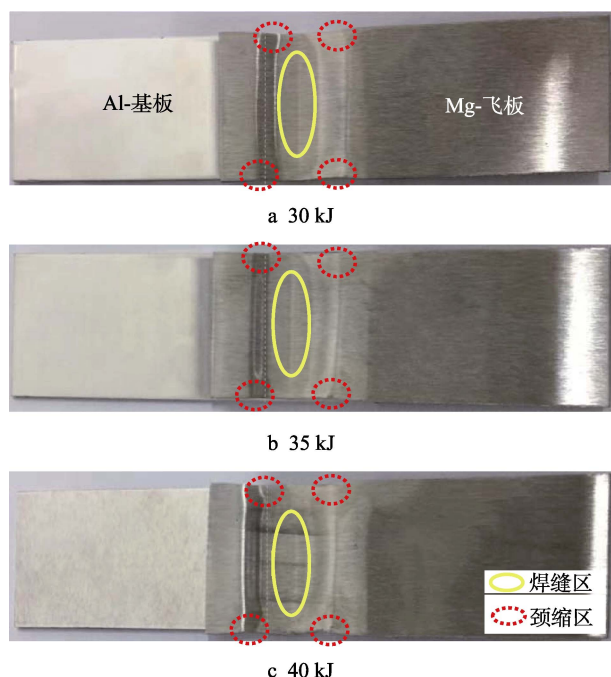


图5 不同放电能量下Al/Mg焊接件的宏观形貌  
Fig.5 Macro morphology of Al/Mg MPW joints at different discharge energies

### 2.2 不同能量下 Al/Mg 磁脉冲焊接接头的力学性能分析

图6为不同放电能量下Al/Mg磁脉冲焊接接头的力-位移曲线,其中的局部照片是Al/Mg磁脉冲焊接接头拉伸-剪切后的失效断口,可以看出Al/Mg磁脉冲焊接接头的有效焊缝区域为椭圆形,板材搭接的中心区域并未发生焊合,这是由于中心区域的碰撞角较小,虽然碰撞速度很高,但是射流并不能顺利进行,难以发生良好的冶金结合,最终形成环形焊缝。从图6可以看出,随着放电能量的提升,Al/Mg焊接接头的最大剪切载荷先增大后减小。在放电能量为35 kJ时,Al/Mg焊接接头的最大剪切载荷达到最大值。在放电能量较小时,Al/Mg焊接接头的最大剪切载荷随着放电能量的增大而增大,这是由于放电能量增大,飞板的初始速度增大,飞板与基板的碰撞增大,使飞板与基板形成更好的冶金结合。当放电能量继续增大,飞板的塑性变形更加严重,使焊接过程中的碰撞角过大,碰撞速度中的切向分量将降低,不利于界面处材料的塑性变形,不能更好地形成射流,因而放电能量过大时,Al/Mg焊接接头的最大剪切载荷反而有所下降。无论放电能量的大小,焊接接头均在焊接界面处失效。为了进一步了解焊接接头失效的特点,采用扫描电镜分别对铝合金侧和镁合金侧的断裂面进行观察。图7是放电能量为35 kJ的Al/Mg磁脉冲焊接接头两侧的断口形貌。从图7可以看出,铝合金侧和镁合金侧的拉伸-剪切断面均分布着大小不一的韧窝,表明Al/Mg焊接接头的失效方式是以韧窝为主的韧性断裂。

### 2.3 不同能量下 Al/Mg 磁脉冲焊接界面的金相分析

根据已有的研究可知,磁脉冲焊接的结合界面通常表现出3种基本形式:波形结合区、平直结合区和熔化结合区<sup>[14]</sup>。图8是不同放电能量下Al/Mg磁

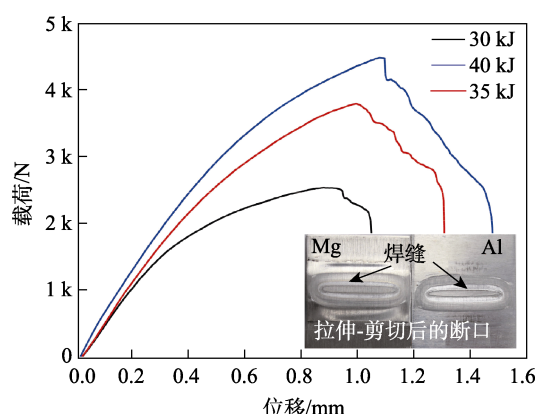


图6 不同放电能量下Al/Mg焊接件的力-位移曲线  
Fig.6 Force-displacement curves of Al/Mg MPW joints at different discharge energies

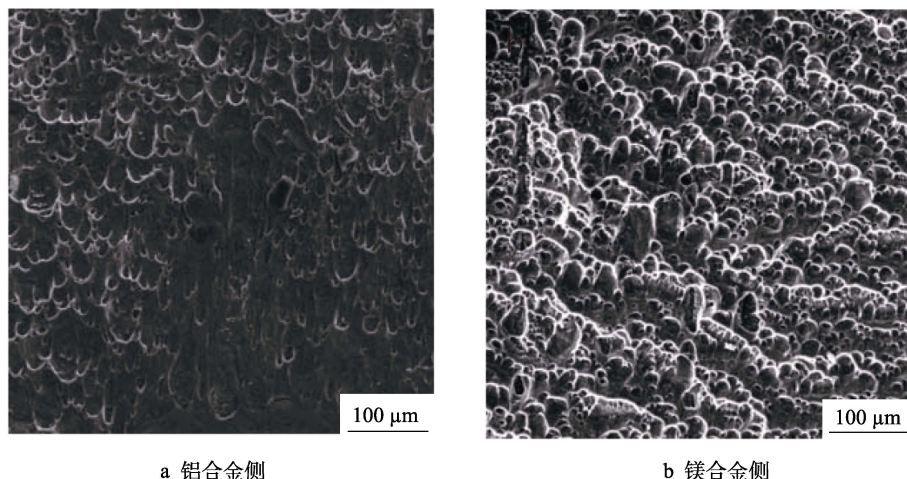


图 7 放电能量为 35 kJ 的 Al/Mg 磁脉冲焊接接头的断口形貌

Fig.7 Fracture morphology of Al/Mg joint with discharge energy of 35 kJ

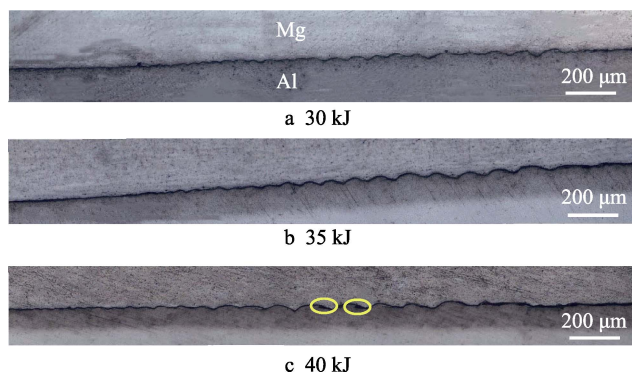


图 8 不同放电能量下 Al/Mg 焊接界面一侧的形貌

Fig.8 The interface Microstructure Al/Mg MPW joints at different discharge energies

冲焊接界面的微观形貌。可以看出,不同放电能量下的 Al/Mg 磁脉冲焊接界面形貌大致相同,都是由波形界面和平直界面组成。在 Al/Mg 磁脉冲焊接界面上并未观察到明显的裂纹以及脆硬的金属间化合物中间层。从图 8 可以看出,Al/Mg 磁脉冲焊接界面上的波形区域是不对称的正弦波,这是由于铝合金和镁合金的密度不同,对于具有相似密度的金属界面波形是具有对称性的,而两侧金属材料的密度不同会使波形界面呈不对称现象<sup>[21]</sup>。根据 Helmholtz 失稳机理可知<sup>[22]</sup>,当铝合金和镁合金高速碰撞发生塑性变形时,由于镁合金的硬度低于铝合金,在受到压力时首先发生失稳,界面继续碰撞时,镁合金晶粒内部产生大量的位错,提高镁合金侧的抗塑性变形能力,然后铝合金侧开始发生失稳,镁合金侧受到的压力减小后位错密度也减小,塑性变形能力恢复,镁合金侧重新发生失稳,焊接界面嵌入镁合金侧,这就是 Al/Mg 磁脉冲焊接界面波形区域呈周期性变化的不规则波形的原因。

对比不同放电能量下的焊接界面发现,随着放电能量的增大,焊接界面处的波形区域长度明显增加,波形区域的波幅也有增大的趋势。放电能量过大,界

面也会出现“漩涡”形熔化区,熔化区为脆硬的金属间化合物(如图 8c 中黄色圈所示),因而会降低焊接接头的性能,并且焊接时的放电能量越大,飞板与基板的碰撞速度就越大,镁合金板材在碰撞过程中内部易产生微小的裂纹影响焊接接头及镁合金母材的性能,因此,放电能量为 40 kJ 的 Al/Mg 焊接接头力学性能低于放电能量为 35 kJ 的 Al/Mg 焊接接头。

## 2.4 Al/Mg 磁脉冲焊接界面的 SEM 分析

根据前面的力学性能和界面形貌分析可知,35 kJ 放电能量下的 Al/Mg 磁脉冲焊接接头性能最佳,为了进一步分析和研究其原因,对其焊接界面进行 SEM 观察和 EDS 元素分析。图 9 展示了 35 kJ 放电能量下的 Al/Mg 磁脉冲焊接界面一侧的全貌、不同位置的局部放大情况及相应的元素面分布情况。由于焊接过程中的碰撞是动态的,碰撞角和碰撞速度是不断变化的,所以不同位置的形貌并不相同。在焊缝焊合初期,虽然碰撞角较小,但碰撞速度较大,界面处的金属会出现一定的熔化现象,界面处的元素互相扩散,形成较不规则的焊接界面,但由于碰撞时间非常短暂且界面处元素含量并未达到形成金属间化合物所需的比例,因此界面上并无金属间化合物层,如图 9a 所示。碰撞点进一步向前移动,碰撞速度逐渐减小,界面不足以产生熔化,界面的塑性变形并不大,导致界面相对平坦,也就是图 9b 中的平直界面区。随着碰撞点的继续移动,碰撞角进一步增大,界面出现波形界面特征,并且波幅逐渐增大,当继续向前时,碰撞速度不断下降,不再能生成结合的界面。根据图 9e—h 可知,焊接界面处不仅发生了塑性变形,铝、镁元素还发生了一定的扩散,平直界面区的扩散程度低于波形界面处。从图 9g 和 9h 可知,在波形界面处(剧烈塑性变形区)存在一层宽度约 2 μm 的扩散区域,但并未形成金属间化合物层,这是 Al/Mg 磁脉冲焊接接头力学性能良好的重要原因之一。

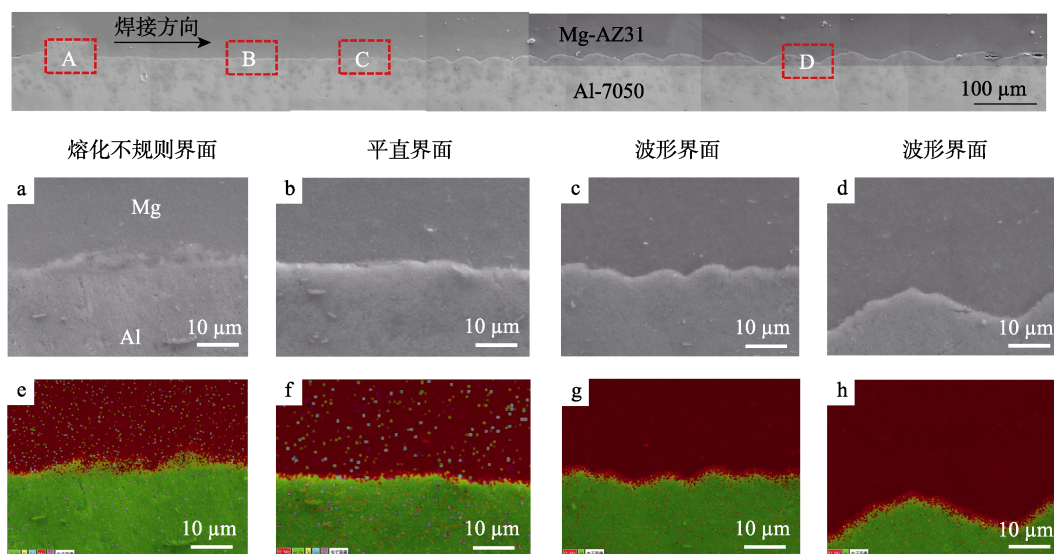


图9 35 kJ 焊接接头界面一侧不同位置的 SEM 形貌图及相应的元素分布

Fig.9 Microstructure and element distribution at different positions of Al/Mg MPW interface with discharge energy of 35 kJ

### 3 结论

针对工业常用的 7075 铝合金和 AZ31 镁合金异种材料,采用磁脉冲焊接的方式进行连接,测试和观察了不同放电能量下的 Al/Mg 磁脉冲焊接接头的力学性能和微观形貌,分析了放电能量对 Al/Mg 磁脉冲焊接接头性能和界面形貌的影响。主要结论如下。

1)通过磁脉冲焊接的方法可以有效连接 7075 铝合金和 AZ31 镁合金,Al/Mg 磁脉冲焊接接头的形貌由平直界面和波形界面组成。

2)不同放电能量下的磁脉冲焊接接头具有不同的力学性能。Al/Mg 磁脉冲焊接接头的力学性能随着焊接能量的增加呈先增大后减小的趋势。这是因为放电能量增大,飞板的碰撞速度也增大,焊接界面上波形区的长度更长,因而焊接接头力学性能更好,但放电能量超过一定值时,过高的碰撞速度会使焊接过程中的碰撞角过大,界面塑性变形差,且会造成微小裂纹、金属间化合物等缺陷,导致焊接接头的力学性能下降。

3)根据 SEM 和 EDS 结果可知,Al/Mg 磁脉冲焊接界面处发生了一定程度的元素扩散,这说明磁脉冲焊接的界面是机械结合和冶金结合共同作用的结果。波形界面区的元素扩散程度高于平直界面区,波形界面处的元素扩散宽度为 2 μm,但并未形成金属间化合物层,这是 Al/Mg 磁脉冲焊接接头性能良好的重要原因之一。

#### 参考文献:

[1] 帅朋, 吴志生, 赵菲, 等. 镁/铝异种材料焊接研究现状[J]. 焊接技术, 2017, 46(2): 1—4.  
SHUAI Peng, WU Zhi-sheng, ZHAO Fei, et al. Re-

search Status of Welding of Magnesium/Aluminum Dissimilar Materials[J]. Welding Technology, 2017, 46(2): 1—4.

- [2] 康举, 付瑞东, 栾国红, 等. 搅拌针偏移对 7075 铝合金-AZ31 镁合金接头组织及性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(S2): 294—299.  
KANG Ju, FU Rui-dong, LUAN Guo-hong, et al. Effect of the Pin Offsetting on Microstructures and Mechanical Properties of FSW Joints of 7075 Al Alloy-AZ31B Mg Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(S2): 294—299.
- [3] CHEN Wei, WANG Wen-xian, LIU Ze-peng, et al. Improvement in Tensile Strength of Mg/Al Alloy Dissimilar Friction Stir Welding Joints by Reducing Intermetallic Compounds[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 861: 157942.
- [4] MENG Yun-fei, LU Yang, LI Ze-yu, et al. Effects of Beam Oscillation on Interface Layer and Mechanical Properties of Laser-Arc Hybrid Lap Welded Al/Mg Dissimilar Metals[J]. Intermetallics, 2021, 133: 107175.
- [5] KAPIL Angshuman, ABHAY Sharma. Magnetic Pulse Welding: an Efficient and Environmentally Friendly Multi-Material Joining Technique[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 100: 35—58.
- [6] RAOELISON R N, BUIRON N, RACHIK M, et al. Study of the Elaboration of a Practical Weldability Window in Magnetic Pulse Welding[J]. Journal of Materials Process and Technology, 2013, 213: 1348—1354.
- [7] VERENA P, CHRISTIAN S, MAIK L, et al. Process Analysis for Magnetic Pulse Welding of Similar and Dissimilar Material Sheet Metal Joints[J]. Procedia Engineering, 2017, 207: 353—358.
- [8] ZHU Cong-cong, LIU Quan-xiao-xiao, WU Zhi-gang, et al. Interfacial Microstructure Characterization of Aluminum/Aluminum-Lithium Joints Fabricated by Mag-

- netic Pulse Welding[J]. *Materials Characterization*, 2020, 167: 110530.
- [9] GENG Hui-hui, XIA Ze-hua, ZHANG Xu, et al. Microstructures and Mechanical Properties of the Welded AA5182/HC340LA Joint by Magnetic Pulse Welding[J]. *Materials Characterization*, 2018, 138: 229—237.
- [10] GENG Hui-hui, MAO Jing-qi, ZHANG Xu, et al. Formation Mechanism of Transition Zone and Amorphous Structure in Magnetic Pulse Welded Al-Fe Joint[J]. *Materials Letters*, 2019, 245: 151—154.
- [11] WANG Shao-luo, XU Li-wang, SUN Tao, et al. Effects of Process Parameters on Mechanical Performance and Interfacial Morphology of Electromagnetic Pulse Welded Joints between Aluminum and Galvanized Steel[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 10: 552—564.
- [12] WANG Chen-guang, LIU Quan-xiao-xiao, LI Guang-yao, et al. Study on Mechanical Properties and Microstructural Feature of Magnetic Pulse Welding Joint between Cu and Al Sheets[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 113: 1739—1751.
- [13] CUI Jun-jia, YE Liang, ZHU Cong-cong, et al. Mechanical and Microstructure Investigations on Magnetic Pulse Welded Dissimilar AA3003-TC4 Joints[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2020, 29: 712—722.
- [14] ZHU Cong-cong, SUN Li-qiang, GAO Wen-li, et al. The Effect of Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of Al/Mg Lap Joints Manufactured by Magnetic Pulse Welding[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, 8(3): 3270—3280.
- [15] 陈树君, 夏羽, 于洋, 等. 铝-镁合金磁脉冲焊接界面形貌研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2012, 41(2): 352—355.
- CHEN Shu-jun, XIA Yu, YU Yang, et al. Morphology Study of Al-Mg Alloy Magnetic Pulse Welding Interface[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2012, 41(2): 352—355.
- [16] 陈树君, 于洋, 夏羽, 等. 铝-镁磁脉冲焊接结合界面间产热机制分析[J]. *稀有金属材料与工程*, 2013, 42(5): 998—1002.
- CHEN Shu-jun, YU Yang, XIA Yu, et al. Heat Production Mechanism at Al-Mg Magnetic Pulse Welding Interface[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2013, 42(5): 998—1002.
- [17] STERN A, AIZENSSTEIN M, MOSHE G, et al. The Nature of Interfaces in Al-1050/Al-1050 and Al-1050/Mg-AZ31 Couples Joined by Magnetic Pulse Welding (MPW)[J]. *Journal Materials Engineer Perform*, 2013, 22: 2098—2103.
- [18] STERN A, AIZENSSTEIN M. Magnetic Pulse Welding of Al to Mg Alloys: Structural-Mechanical Properties of the Interfacial Layer[J]. *Materials Science and Technology*, 2011, 27(12): 1809—1813.
- [19] SHIM J Y, KIM I S, LEE K J, et al. Experimental and Numerical Analysis on Aluminum/Steel Pipe Using Magnetic Pulse Welding[J]. *Metals & Materials International*, 2011, 17(6): 957—961.
- [20] YU Hai-ping, XU Zhi-dan, FAN Zhi-song, et al. Mechanical Property and Microstructure of Aluminum Alloy-Steel Tubes Joint by Magnetic Pulse Welding[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2013, 561: 259—265.
- [21] AKBARI M A A, HASSANI S. Numerical and Experimental Studies of the Mechanism of the Wavy Interface Formations in Explosive/Impact Welding[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2005, 53: 2501—2528.
- [22] CUI J J, SUN G Y, LI G Y, et al. Specific Wave Interface and Its Formation during Magnetic Pulse Welding[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105: 221901.