

DOI: 10.3901/JME.2016.12.052

Mg/Al 合金爆炸焊连接及其界面接合机制*

张婷婷^{1,2} 王文先^{1,2} 袁晓丹^{1,2} 刘瑞峰^{1,2} 谢瑞山^{1,2}

(1. 太原理工大学材料科学与工程学院 太原 030024;
2. 太原理工大学先进镁基材料山西省重点实验室 太原 030024)

摘要: 采用爆炸焊接技术制备以 AZ31B 镁合金为基板, 以 6061 铝合金为覆板的 AZ31B/6061 合金的层状复合板。对复合板界面的宏观形貌、微观组织、界面元素扩散行为及界面接合性能进行测试、分析。结果表明: AZ31B/6061 合金爆炸复合板接合界面呈波状接合; 靠近接合界面处的塑性变形程度最大, 以孪晶和再结晶形式为主; 在 AZ31B 一侧靠近界面处出现与界面呈 45° 的绝热剪切带组织, 带内为动态再结晶形成的细晶粒组织; 接合界面两侧的显微硬度分布为: 随着距离接合界面的增大, AZ31B 和 6061 侧的显微硬度值递减趋势; 复合板的拉-剪试验结果表明, 界面接合强度达 193.3 MPa; 复合板界面接合机制为压力焊、扩散焊及局部熔化焊综合作用的结果。

关键词: Mg/Al 合金; 爆炸焊接; 界面接合机制

中图分类号: TG392

Interface Bonding Mechanism of Mg/Al Alloy Explosive Welded

ZHANG Tingting^{1,2} WANG Wenxian^{1,2} YUAN Xiaodan^{1,2} LIU Ruifeng^{1,2} XIE Ruishan^{1,2}

(1. College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024;
2. Shanxi Key Laboratory of Advanced Magnesium-based Materials,
Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024)

Abstract: The AZ31B/6061 alloy composite plate is fabricated by explosive welding, as the base plate of AZ31B magnesium alloy material and the flyer plate of 6061 aluminum alloy material. The macro/micro-structure, elements diffusion and bonding strength of the composite bonding interface. The results show that the bonding interface presents a periodical wave; near the bonding interface the plastic deformation is serious and microstructure in the form of twin and recrystallization mainly; adiabatic shear bands are found on the AZ31B Mg alloy side adjacent to the interface by the direction of 45° and the microstructure is fine grain microstructure by recrystallization; the micro-hardness distribution characteristics is decrease with the increase of distance from the bonding interface both of AZ31B and 6061 plate; the interface bonding strength is 193.3 MPa and the bonding mechanism of pressure welding, diffusion welding and local melting welding.

Key words: Mg/Al alloy; explosive welding; interface bonding mechanism

0 前言

基于轻质高强和资源丰富的优势, 镁合金材料已成为继钢铁、铝合金材料之后的第三大金属材料, 是 21 世纪具有发展潜能的环保节能型结构材料, 在汽车工业领域、航空航天领域呈现出广阔的应用前景^[1-2]。然而, 镁合金由于其强度低、耐蚀性差缺点直接制约了其更广泛的应用。

铝合金由于具有密度低、比强度高、塑性和加工性能好, 耐腐蚀性强等一系列优点, 同时具有自修复功能^[3-4]。因此, 采用以镁合金板为基体, 在其上

覆铝合金材料制备出的 Mg/Al 合金复合材料可同时兼具镁合金材料和铝合金材料的性能优势, 有利于拓宽镁合金材料的应用领域。

目前, 用于 Mg/Al 合金复合板的复合技术有 CHANG 等^[5-6]研究的叠层轧制、POURAHMAD 等^[7]研究的搅拌摩擦焊、LIU 等^[8]研究的径角挤压法和柳绪静等^[9]研究的激光-TIG 复合热源焊接等方法。根据镁-铝合金相图可知, 任何冶金结合技术或加热温度条件下的压力连接接合区域镁铝金属间化合物都是不可避免的, 这些硬脆的金属间化合物直接影响着复合材料的结合强度的使用、服役性能。

爆炸焊接技术是利用爆炸产生的爆轰波使待焊金属材料接触面发生高速碰撞, 在接触面产生局部熔化或塑性变形而导致的紧密接合, 特别适合于

* 国家自然科学基金资助项目(51375328)。20150619 收到初稿, 20151202 收到修改稿

异种金属、层状复合材料的制备^[10-12]。Mg/Al 复合材料的爆炸焊接过程是瞬时完成的,可极大地制约镁铝间金属化合物的出现。爆轰波一方面对待焊金属面有清洁作用;另一方面高压、高温、瞬时作用下使待焊金属连接,复合材料界面处原子没有足够的时间扩散。同时,爆炸焊接技术制备复合板的不足之处主要体现在界面接合主要是机械咬合,界面接合强度低于搅拌摩擦焊或其他熔焊方法获得的接合界面强度。

本次试验中,以镁合金为基材、以铝合金为覆板进行爆炸焊接连接,获得镁/铝层状复合板。通过对结合界面的金相显微镜(Optical microscope, OM)分析、扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM)和能谱(Energy dispersive spectrometer, EDS)测试分析和拉-剪试验综合分析 Mg/Al 爆炸复合板的界面接合机制。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

本次试验选用的试验基板和覆板分别为尺寸 600 mm×300 mm×15 mm 的 AZ31B 镁合金板和尺寸 600 mm×300 mm×3 mm 的 6061 铝合金板。两种母材的化学成分见表 1。

表 1 AZ31B 和 6061 的化学成分(质量分数) %

材料	Mn	Zn	Ti	Si	Fe	Mg	Al
AZ31B	0.63	1.10	—	0.10	0.005	余量	3.02
6061	0.15	0.25	0.15	0.4~0.8	0.7	0.8~1.2	余量

1.2 试验方法

爆炸焊接之前对 AZ31B 镁合金和 6061 铝合金的待接触面打磨、清洗干净;采用平行放置爆炸焊接法获得 AZ31B/6061 合金复合板;试验采用的基板和覆板的间隙柱高度为 3 mm;选用的炸药类型为铵油炸药;爆炸焊接工艺装置示意图如图 1 所示。

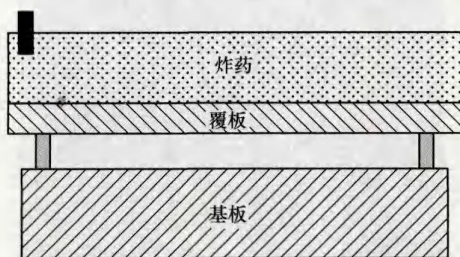


图 1 Mg/Al 合金爆炸焊接工艺装置示意图

先经超声探伤仪对 AZ31B/6061 合金爆炸复合板是否复合测试,随后在接合界面处截取金相试样,用 OM 对其接合界面附近组织演变进行分析研究;

采用 EDS 能谱对接合界面的元素扩散行为进行测试分析;对 AZ31B/6061 合金复合板爆炸焊接复合板界面强度进行测试分析,做复合材料的拉-剪试验(试样的尺寸示意图如图 2 所示),在万能试验机上进行拉伸,拉-剪速率为 0.1 mm/min。并采用 SEM 和 EDS 对其断口形貌及成分特征进行进一步分析。

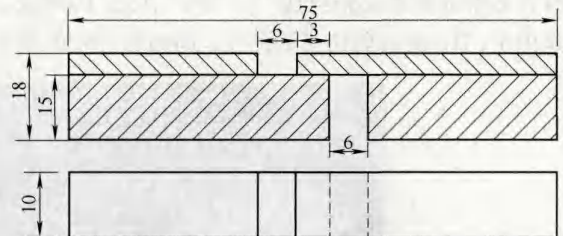


图 2 复合板拉-剪试样尺寸示意图

2 复合板接合界面组织、成分特征分析

2.1 接合界面的显微组织特征

经爆炸焊接得到的 AZ31B/6061 合金复合板的宏观形貌如图 3 所示,由图 3 可知:复合板试样表面平整、无起裂、起皱等明显缺陷,只在复合板四周边部出现少量的边裂现象。



图 3 AZ31B/6061 合金爆炸复合板宏观形貌

截取 AZ31B/6061 合金爆炸复合板接合界面处的金相试样,对接合界面附近合金组织演变金相观察、分析,得到的金相组织图如图 4 所示,其中图 4a 为 AZ31B/6061 合金复合板界面的整体界面微观形貌,图 4b 为远离界面的 AZ31B 一侧微观形貌特征,图 4c 为界面处局部放大的微观形貌特征。

由图 4a 可知, AZ31B/6061 合金复合板连接界面呈波状界面,且界面处未出现未接合或局部熔化现象,界面接合良好。一般而言,爆炸焊接所获得的连接界面有:平直界面、波状界面和熔化层界面^[13]。对于爆炸焊接技术形成的复合板波状界面的性能优于平直界面,且小波状界面接合强度优于大的波状界面接合强度^[14-16]。由图 4a 中靠近界面的 AZ31B 一侧,出现了沿界面呈 45° 方向的绝热剪切带(Adiabatic shear bands, ASB),由界面处向基板一

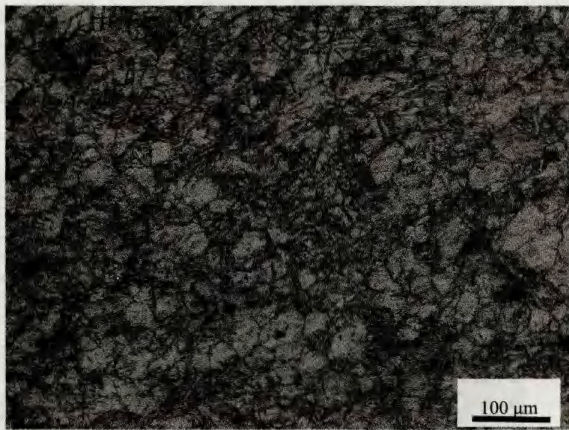
侧延伸,最后消失。ASB是由于高速变形形成的一种在狭长体积内组织极不均匀甚至含有微裂纹的一种缺陷,是一种动态破坏,是高速变形中的一种形变特征^[15,17-18]。

由图4c中放大的ASB区对比图4b的远离界面的AZ31B基板的显微组织形貌可得知,ASB内是有许多孪晶和细晶粒组成^[15]。关于ASB的形成,是由于:①局部剪切带的萌生:局部剪切带的萌生

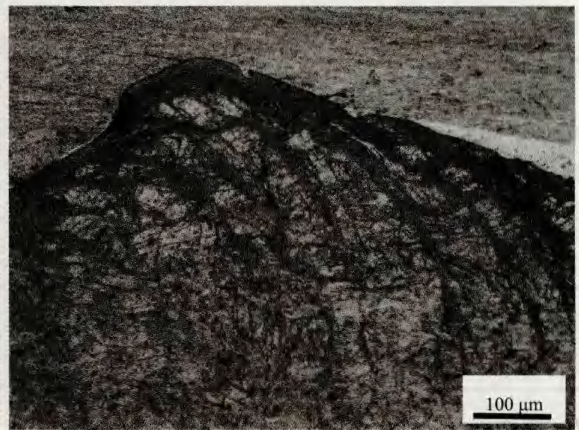
首先以单个晶粒内位向有利的晶体滑移方式出现;②局部剪切带的扩展:然后通过合作滑移或交叉滑移的方式向临近晶粒扩展,导致其在整个变形试样范围内剪切局部化的扩展,最终形成宏观绝热剪切带。同时,在ASB形成过程中,伴随着晶粒内部的滑移和孪生;晶界的滑移和交滑移的联合作用;应变和应变率硬化软化;晶粒的动态再结晶现象。这也是导致绝热剪切带区晶粒较周围晶粒细小的原因。



(a) AZ31B/6061 合金复合板连接波状界面的显微组织



(b) AZ31B 基板的显微组织



(c) 接合界面附近的绝热剪切带(ARB)组织

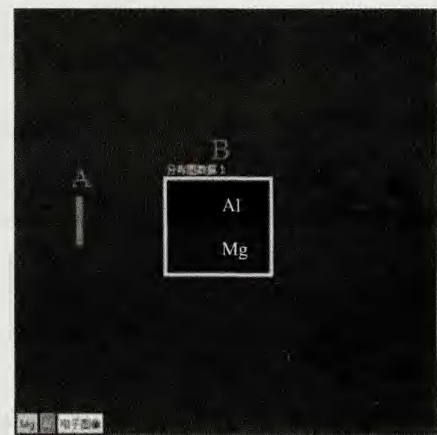
图4 AZ31B/6061 合金爆炸复合板界面显微组织特征

2.2 接合界面的元素分布、成分分析

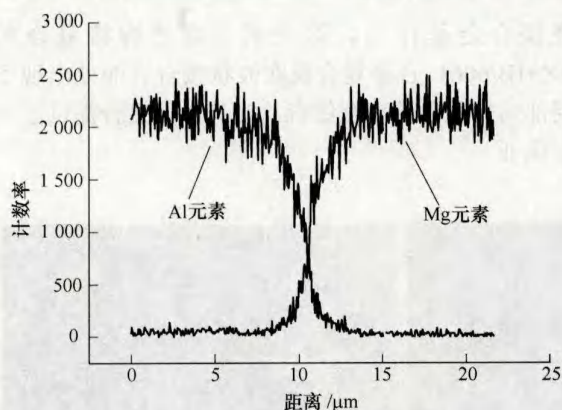
图5所示为在AZ31B/6061合金复合板界面的EDS线扫描结果及EDS面扫描结果。图5a为AZ31B/6061合金复合板界面的局部放大SEM图,在图中A位置的EDS线扫描结果见图5b中的曲线,在图中B区域面扫描结果见图5c和5d。

由图5b可知,AZ31B/6061合金复合板界面处发生了一定的扩散,在接合界面处,元素变化曲线没有出现明显的台阶,即界面接合区未出现明显的金属间化合物,从而保证获得的复合板界面接合强度较高。因为界面处存在的金属间化合物为硬脆相,可使界面的结合强度减小^[19-21]。可由图5c和5d亦可知,AZ31B/6061合金复合板接合界面处元素发生了一定的扩散,接合界面处元素的扩散可促进界

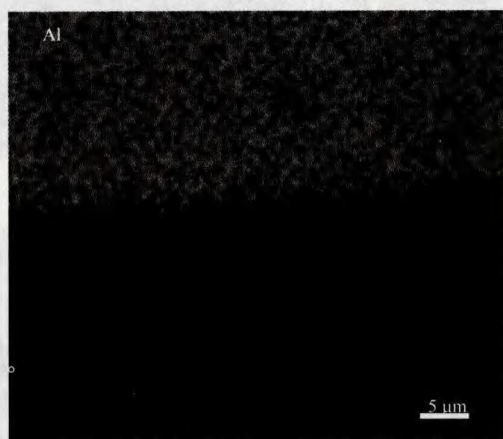
面的接合。



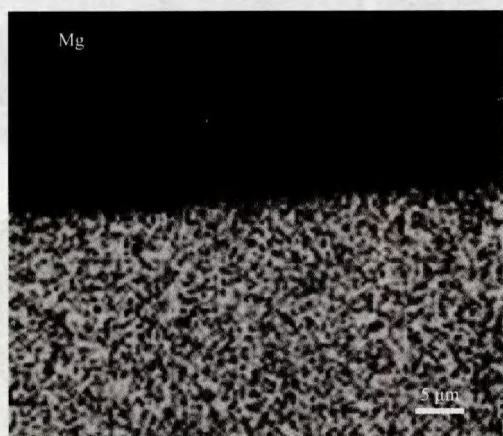
(a) AZ31B/6061 合金复合板界面 SEM



(b) 对应于图 5a 中位置 A 的 EDS 线扫描图



(c) 对应于图 5a 中位置 B 处 Al 侧 EDS 面扫描图



(d) 对应于图(a)中位置 B 处 Mg 侧 EDS 面扫描图

图 5 AZ31B/6061 合金爆炸复合板界面元素分布

3 复合板接合界面力学性能分析

3.1 接合界面的显微硬度分布

图 6 为 AZ31B/6061 合金复合板接合界面处的显微硬度分布。由图 6 中曲线的变化趋势可知, 靠近界面附近的显微硬度值高, 随着沿接合界面的距离的增加, AZ31B 一侧和 6061 一侧的显微硬度值变化整体呈递减趋势, 在远离接合界面处的显微硬

度值趋于一致, 该区域为远离界面接近母材区域。这是由于靠近界面处发生剧烈塑性变形和加工硬化程度越大导致的。此外, 在镁合金一侧 200 μm 附近出现了递增、递减的小波动, 这是由于该硬度波动发生在绝热剪切带区, 绝热剪切带区有发生动态再结晶, 导致晶粒发生了细化, 从而导致该区域的显微硬度的增加^[15]。

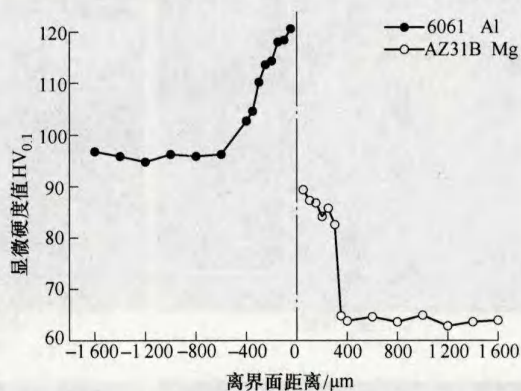


图 6 AZ31B/6061 合金爆炸复合板界面附近显微硬度分布

3.2 复接合界面的拉-剪试验强度分析

对 AZ31B/6061 合金复合板的界面接合强度通过拉-剪试验测试分析。得到的界面接合力-位移曲线如图 7 所示。对其拉-剪试样的断口进行 SEM 扫描及 EDS 面扫描分析, 得到的结果如图 8 所示。

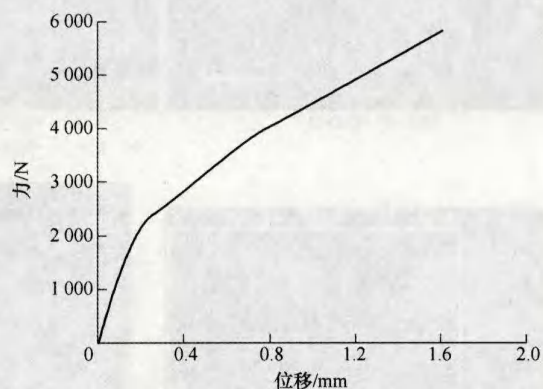


图 7 AZ31B/6061 合金爆炸复合板拉-剪试验的力-位移曲线

由图 7 得到的拉-剪试验力-位移曲线可知, 在试验过程中未出现塑性屈服阶段。根据以下公式计算

$$\text{接合强度} = \text{峰值载荷} / (\text{接合宽度} \times \text{接合长度})$$

由此可知, AZ31B/6061 合金复合板的界面接合强度为 193.3 MPa。

由图 8a、8b 可知, 拉-剪试验后的, AZ31B/6061 合金复合板断裂为沿着波形的接合界面撕裂开, 从 AZ31B 镁合金一侧和 6061 铝合金一侧的断口均可以明显观察到原始波状接合的波峰和波谷。从整体

撕裂形貌可得出，在波峰处的断裂方式呈脆性断裂的解理台阶，波谷处呈现脆性和塑性混合断裂的断裂方式，出现了一些小的韧窝形貌。

由图 8c 中在 AZ31B 镁合金一侧波峰处局部位位置得到的面扫描结果可知，有部分铝合金组织粘贴

在镁合金基体上。这说明在爆炸焊接复合的 AZ31B/6061 合金复合板在波状结合界面处出现了局部熔化现象的冶金结合，对其界面接合提供了一定保证。

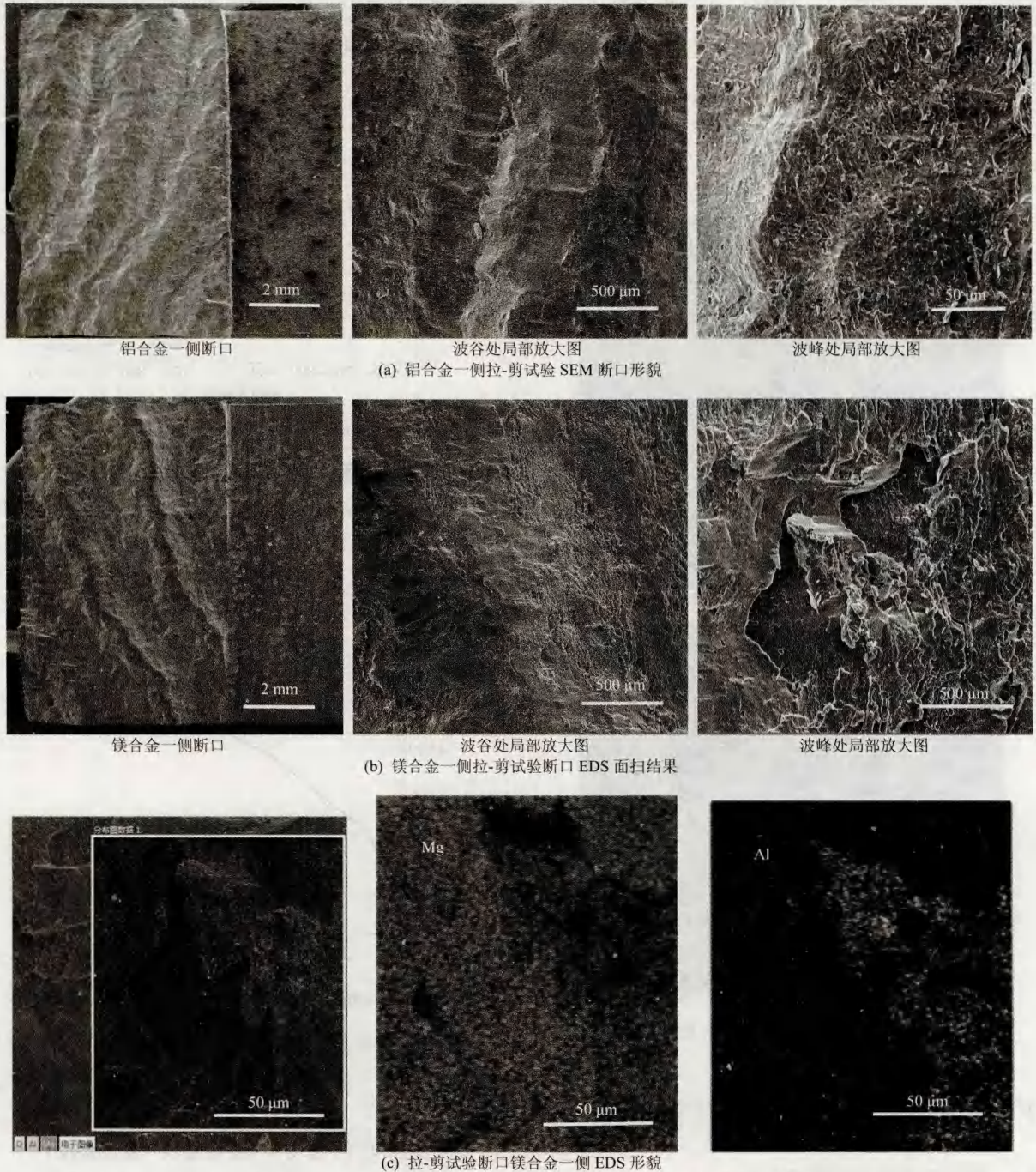


图 8 AZ31B/6061 合金爆炸复合板拉-剪断口 SEM 和 EDS 图

4 界面接合机理分析

根据前述本文对 AZ31B/6061 合金爆炸复合板

的界面组织、元素分布及拉-剪试验断口扫描测试、分析结果可知。导致 AZ31B/6061 合金复合板界面接合是由多因素综合影响的，主要包括：① 特殊压力焊，在爆炸焊接爆轰波的瞬时高压作用下，界面

附近的组织发生了明显的不同程度地塑性变形, 使得界面达到基本机械咬合; ② 一定的扩散焊, 根据界面附近的 EDS 线扫描和面扫描测试结果(图 5) 均说明, 界面附近的元素发生了一定的扩散, 而元素的扩散可促进界面的焊接; ③ 局部熔化焊, 由图 8c 结论可知, 在爆炸焊接爆轰波的瞬时高温作用下, 界面处出现局部熔化现象, 进而达到冶金接合。

5 结论

采用爆炸焊接技术成功获得了 AZ31B/6061 合金复合板。通过对界面组织演变、元素扩散、复合板界面接合强度及断口扫描分析得出以下结论。

(1) 爆炸焊接技术获得的 AZ31B/6061 合金复合板的接合界面呈波状界面。

(2) AZ31B/6061 合金爆炸复合板接合界面处组织发生了不同程度的塑性变形, 靠近界面附近的塑性变形程度最大。且在 AZ31B 一侧靠近界面处出现了与界面呈 45° 的绝热剪切带组织。

(3) AZ31B/6061 合金复合板界面两侧的显微硬度分布为: 随着距离接合界面的距离增大, AZ31B 和 6061 一侧的显微硬度值呈递减趋势。主要是由于塑性变形程度的不同所导致的。

(4) 通过对 AZ31B/6061 合金爆炸复合板的拉-剪试验结果表明: 界面接合强度为 193.3 MPa。

(5) 通过组织演变、界面拉-剪断口 SEM 结果得出: 爆炸焊接技术获得的 AZ31B/6061 合金复合板界面接合机制有: 特殊压力焊、一定的扩散焊及局部熔化焊综合作用。

参 考 文 献

- [1] WANG S, SONG L, KANG S, et al. Deformation behavior and microstructure evolution of wrought magnesium alloys[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(3): 437-447.
- [2] 李落星, 周佳, 张辉. 车身用铝、镁合金先进挤压成形技术及应用[J]. 机械工程学报, 2012, 48(18): 35-43. LI Luoxing, ZHOU Jia, ZHANG Hui. Advanced extrusion technology and application of aluminium, magnesium alloy for vehicle body[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(18): 35-43.
- [3] DONG G, ZHAO C, PENG Y, et al. Hot granules medium pressure forming process of AA7075 conical parts[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 28(3): 580-591.
- [4] SHEN D, CAI J, GUO C, et al. Evolution of residual stresses in micro-arc oxidation ceramic coatings on 6061 Al alloy[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(6): 1149-1153.
- [5] CHANG H, ZHENG M Y, XU C. Microstructure and mechanical properties of the Mg/Al multilayer fabricated by accumulative roll bonding (ARB) at ambient temperature[J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 543: 249-256.
- [6] LIU H S, ZHANG B, ZHANG G P. Microstructures and mechanical properties of Al/Mg alloy multilayered composites produced by accumulative roll bonding[J]. Journal Material Science Technology, 2011, 27(1): 15-21.
- [7] POURAHMAD P, ABBASI M. Materials flow and phase transformation in friction stir welding of Al 6013/Mg[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013(23): 1253-1261.
- [8] LIU X B, CHEN R S, HAN E H, et al. Preliminary investigations on the Mg-Al-Zn/Al laminated composite fabricated by equal channel angular extrusion[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209: 4675-4681.
- [9] 柳绪静, 刘黎明, 王恒, 等. 镁铝异种金属激光-TIG 复合热源焊接性分析[J]. 焊接学报, 2005, 26(8): 31-34. LIU Xujing, LIU Liming, WANG Heng, et al. Microstructure of laser-TIG hybrid welding joint of dissimilar metals of Al and Mg[J]. Transaction of the China Welding Situation, 2005, 26(8): 31-34.
- [10] GAO Y, NAKATA K, NAGATSUKA K. Interface micro structural control by probe length adjustment in friction stir welding of titanium and steel lap joint[J]. Materials & Design, 2015, 65: 17-23.
- [11] 郭训忠, 陶杰, 袁正, 等. 爆炸焊接 TA/Al 复合管的界面及性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(1): 139-142. GUO Xunzhong, TAO Jie, YUAN Zheng, et al. Investigation on interface and performance of explosive welded SS316L/Al clad tube[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 41(1): 139-142.
- [12] HONARPISHEH M, ASEMABADI M, SEDIGHI M. Investigation of annealing treatment on the interfacial properties of explosive-welded Al/Cu/Al multilayer[J]. Materials & Design, 2012, 37: 122-127.
- [13] ACARER M, GULENC B, FIDIK F. Investigation of explosive welding parameters and their effects on

- microhardness and shear strength[J]. *Materials & Design*, 2003, 24(8): 659-664.
- [14] WRONKA B. Testing of explosive welding and welded joints: The microstructure of explosive welded joints and their mechanical properties[J]. *Journal of Materials Science*, 2010, 45(13): 3465-3469.
- [15] 韩顺昌. 爆炸焊接界面相变与断口组织[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- HAN Shunchang. Phase transformation and fractography of interface of explosive welding[J]. Beijing: National Defence of Industry Press, 2011.
- [16] XUE Q, GRAY G T. Development of adiabatic shear bands in annealed 316L stainless steel: Part II. TEM studies of the evolution of microstructure during deformation localization[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2006, 37: 2006-2447.
- [17] ACARER M, DEMIR B. An investigation of mechanical and metallurgical properties of explosive welded aluminium-dual phase steel[J]. *Materials Letter*, 2008, 62(25): 4158.
- [18] MOUSAWI S, HASSANI S, ATKINS AG. Bond strength of explosively welded specimens[J]. *Materials and Design*, 2008, 29: 1334-1352.
- [19] XIA H B, WANG S G, BEN H F. Microstructure and mechanical properties of Ti/Al explosive cladding[J]. *Materials & Design*, 2014, 56: 1014-1019.
- [20] 王耀华. 金属板材爆炸焊接研究与实践[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- WANG Yaohua. Research and practice of explosive welding of metal plates[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007.
- [21] YAN Y B, ZHANG Z W, SHEN W. Microstructure and properties of magnesium AZ31B-aluminum7075 explosively welded composite plate[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2010, 527: 2241-2245.

作者简介: 张婷婷, 女, 1988 年出生, 博士研究生。主要研究方向为铝/镁合金爆炸复合焊接界面行为。
E-mail: tyzt88@163.com
王文先(通信作者), 男, 1963 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为先进材料连接及其界面行为。
E-mail: wwx960@126.com