

钛/铝/镁爆炸焊复合板波形界面及力学性能

张婷婷^{1,2}, 王文先^{1,2}, 魏屹^{1,2}, 曹晓卿^{1,2}

(1. 太原理工大学 先进镁基材料山西省重点实验室, 太原 030024;

2. 太原理工大学 材料科学与工程学院, 太原 030024)

摘要:文中提出以薄的铝合金板作为过渡层,采用爆炸焊接技术成功制备钛/铝/镁层状复合材料. 对钛/铝接合界面、铝/镁接合界面及钛/铝/镁爆炸复合板的整体力学性能进行了分析研究. OM 和 SEM 试验结果表明,钛/铝接合界面和铝/镁接合界面均为波状接合界面,在铝/镁界面出现了局部熔化区;钛/铝接合界面为小尺寸波($\lambda = 160 \mu\text{m}, h = 26 \mu\text{m}$),铝/镁接合界面为大尺寸波($\lambda = 1\,740 \mu\text{m}, h = 406 \mu\text{m}$);拉-剪试验表明,复合板沿着铝/镁接合界面断裂;弯曲性能测试表明,钛板一侧受拉时复合板弯曲强度和塑性均优于镁合金板一侧受拉,断裂始于铝/镁接合界面,最终从镁合金板一侧剪切断裂失效.

关键词:钛/铝/镁爆炸焊复合板;波形界面;力学性能

中图分类号: TG 392 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb.20151021001

0 序 言

镁及镁合金是目前工程应用中最轻的金属结构材料,其比重为 1.74 g/cm^3 ,约为铝的 2/3、钛的 1/3,具有优于铝和钛的高比强度和比刚度,以及优良的再生性,已成为继钢铁、铝合金材料之后的第三大金属工程材料,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^[1-3]. 但是,由于镁合金室温塑性差和耐腐蚀性能差的不足极大地制约了其发展. 因此,文中考虑制备以强度高、耐腐蚀性能好的钛为复板,镁合金为基板的钛/镁复合材料,该复合材料可以很好地发挥钛板和镁合金板的优势、扬长避短,以拓宽镁合金的应用领域.

目前,用于镁基层状复合板的连接技术有扩散焊^[4]、热轧^[5]、累积轧制^[6]、爆炸焊接^[7]、搅拌摩擦焊^[8]等. 研究发现当采用高温或熔融焊接均会在镁/铝合金连接的结合界面不可避免地出现镁铝金属间化合物. 爆炸焊接技术是利用爆炸产生的爆轰波使得待焊金属材料接触面发生高速碰撞,其爆轰波可以很好地清洁待焊试样表面,进而可避免金属间化合物的产生^[9]. Aonuma 等人^[10]研究了纯镁和钛板的搅拌摩擦焊,获得的复合板接头部位不可避免地出现了未熔合或过熔等焊接缺陷,削弱了焊接接

头的强度. Habib 等人^[11-12]研究了镁/钛复合板水下爆炸焊技术,研究发现,钛/镁采用水下爆炸焊接制备的复合板接合界面为平直界面;提出将薄的镁合金板作为中间过渡层材料,接合界面处的未熔合缺陷也很难避免.

文中提出以铝合金板为过渡层材料、以镁合金板为基板,以钛板为复板进行三层板爆炸焊接一次复合成形,制备钛/铝/镁层状复合板. 对其接合界面的波形接合界面,进行扫描电镜(SEM)和能谱(EDS)分析,并对复合板的拉-剪和弯曲性能测试、分析.

1 试验方法

试验选用的基板材料为 AZ31B 镁合金板、中间过渡层为 6061 铝合金板和覆板 TA2 钛板,板材尺寸分别为 $600 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$, $650 \text{ mm} \times 350 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 和 $650 \text{ mm} \times 350 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$,三种材料的常温力学性能如表 1 所示.

表 1 试验用材料 TA2,6061 和 AZ31B 的力学性能
Table 1 Mechanical properties of TA2, 6061 and AZ31B

材料	抗拉强度 R_m/MPa	屈服强度 R_{eL}/MPa	断后伸长率 $A(\%)$	硬度 $H(\text{HV})$
TA2	440~560	300~430	20~30	160
6061	280~310	250~280	25~28	95
AZ31B	210~240	150~170	12~15	70

爆炸焊接前对镁合金板、铝合金板和钛板的待焊接件接触面打磨、用无水乙醇清洗干净;焊接装置示意图如图 1 所示. 焊接时将试板平行放置、一次爆炸焊接成形. 基材镁合金板和过渡层铝合金板的预置间隙(图 1 中的第一间隙柱)为 3 mm, 过渡层铝合金板和覆板钛板的预置间隙(图 1 中的第二间隙柱)为 1 mm.

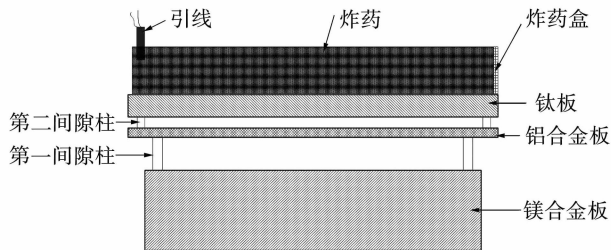


图 1 钛/铝/镁复合板爆炸焊接工艺装置图

Fig. 1 Experimental setup of Ti/Al/Mg clad plate by explosive welding technique

焊接后对钛/铝/镁爆炸焊接复合板进行超声检测,对检测确定为良好的接合区域采用 SEM 进行形貌分析;并在万能试验机上对复合板接合界面强度进行拉-剪试验(拉-剪试样见图 2 所示)和三点弯曲试验,加载速率为 0.1 mm/min.

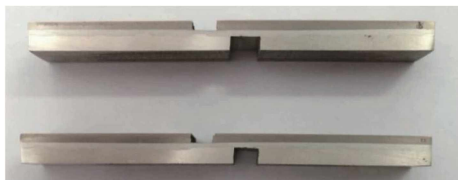


图 2 拉-剪试样

Fig. 2 Samples of tensile-shear testing

2 试验结果与分析

2.1 接合界面的形貌特征

爆炸焊接得到的钛/铝/镁复合板的宏观形貌如图 3 所示,图 3 所示的标示区域为超声检测的良好接合区域.

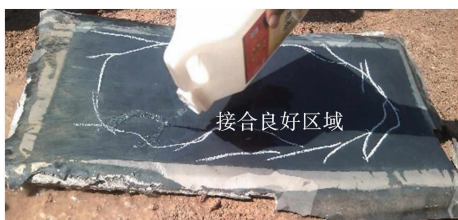


图 3 爆炸焊接获得的钛/铝/镁三层复合板宏观形貌

Fig. 3 Ti/Al/Mg clad plate fabricated by explosive welding

为进一步分析钛/铝接合界面和铝/镁接合界面形貌,采用金相显微镜和扫描电镜对接合界面进行测试,得到的测试结果见图 4 和图 5.

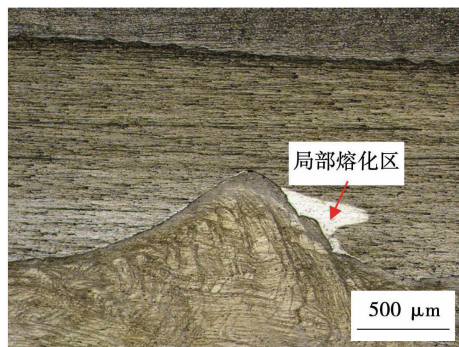


图 4 爆炸焊接获得的钛/铝/镁复合板界面微观形貌

Fig. 4 Microstructure of Ti/Al/Mg clad plate by explosive welding

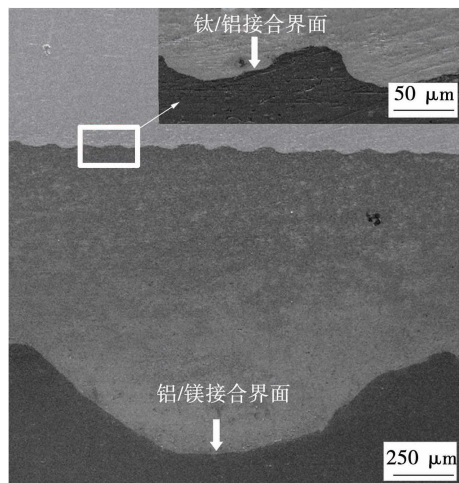


图 5 爆炸焊接获得的钛/铝/镁复合板界面 SEM 形貌

Fig. 5 SEM images of Ti/Al/Mg clad plate by explosive welding

由图 4 可知,在镁合金一侧出现了沿界面呈 45° 方向的绝热剪切带(adiabatic shear bands, ASB)组织和局部熔化区. 对图 4 所示的铝/镁合金接合界面处的局部熔化区进行 EDS 点能谱分析,得到表 2 所示的元素分布比. 由表 2 结果可知,该局部熔化区成分主要为为铝、镁元素组成的金属间化合物组织.

表 2 局部熔化区 EDS 点能谱分析(原子分数,%)

Table 2 EDS results in melted zone

测试区域	Mg	Al
局部熔化区	76.7	23.3

由图 5 可以看出,复合板的钛/铝、铝/镁界面均为波状界面.其中,钛/铝结合界面波长 λ 和波幅 h 为 $160\ \mu\text{m}$ 和 $26\ \mu\text{m}$;铝/镁结合界面波长 λ 和波幅 h 为 $1\ 740\ \mu\text{m}$ 和 $406\ \mu\text{m}$.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].

爆炸焊接时爆炸复合界面产生波状结合,其波形参数受焊接材料与爆炸焊接工艺等因素的影响.强度、硬度较高的材料在爆炸焊接时界面波形参数较小,反之则大^[14].随炸药量和覆板飞行垂直距离的增加,爆炸焊接结合波形的波长和波幅均逐渐增大.当炸药装药量一定时,随覆板飞行距离的增加,波幅和波长近似于线性增大^[15].

2.2 复合板界面抗剪强度

采用拉-剪试验表征界面结合强度试验后,各组试样抗剪强度结果见表 3 所示.

表 3 复合板剪切试验结果

Table 3 Results of shear for clad plate

试样编号	粘结面积 S/mm^2	峰值载荷 F/kN	抗剪强度 R_s/MPa
1	10×3.1	2.32	74
2	10×3.08	2.46	76
3	10×3.12	2.18	69

由表 3 试验结果可以看出,三组试验测试的抗剪强度分别为 74, 76 和 69 MPa,取其平均值 73 MPa 作为钛/铝/镁爆炸复合板的界面抗剪强度.拉-剪试样的断裂位置均为铝/镁结合界面,这主要是由于铝/镁结合界面出现的局部熔化区导致的.因为局部熔化区成分为硬、脆的镁铝金属间化合物.

2.3 结合界面的结合强度研究

为了表征钛/铝/镁爆炸焊接复合板的整体弯曲性能,在万能试验机上分别进行了正弯试验(复板钛板一侧受拉)和背弯试验(基板镁合金板一侧受拉),弯曲试验时试验速率为 $1\ \text{mm}/\text{min}$.

图 6 为钛/铝/镁爆炸复合板的弯曲试验的载荷-位移曲线.对比图 6 所示的钛/铝/镁复合板正面弯曲和背面弯曲试验得到的两组载荷位移曲线可知,钛/铝/镁爆炸焊复合板的弯曲性能不同于单一均质材料的弯曲性能,当钛板一侧受拉时的弯曲性能明显优于镁合金板一侧受拉时的弯曲性能.

图 7 为钛/铝/镁复合板弯曲试验前后断裂位置的局部放大的宏观形貌.由图 7 可以看出,无论是正弯(复板钛板一侧受拉),还是背弯(基板镁合金板一侧受拉),钛/铝/镁爆炸焊复合板的弯曲断裂失

效的起始位置均是沿着铝/镁结合界面撕裂,最后从镁合金板一侧剪切断裂.

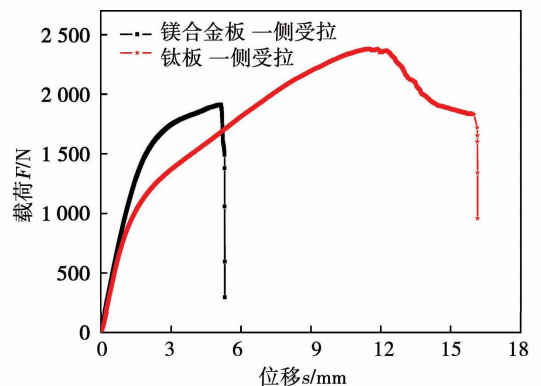
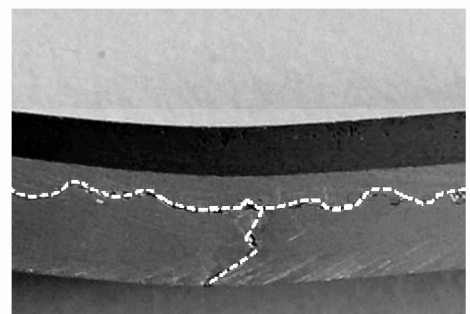
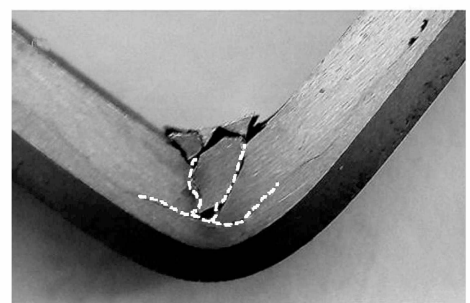


图 6 钛/铝/镁爆炸复合板的弯曲试验载荷-位移曲线(镁合金板一侧受拉;钛板一侧受拉)

Fig. 6 Load-displacement curves of Ti/Al/Mg clad plate by explosive welding under bending condition of Mg alloy side in tension and Ti side in tension



(a) 镁合金板一侧受拉



(b) 钛板一侧受拉

图 7 钛/铝/镁爆炸复合板弯曲试验前后试样的宏观形貌
Fig. 7 Photograph of Ti/Al/Mg explosion clad plate after three-point bending test

4 结 论

(1) 通过爆炸焊接成功制备了钛/铝/镁复合板.钛/铝结合界面和铝/镁结合界面均为波状接合

界面. 其中, 钛/铝接合界面的波形为小尺寸波状界面, 铝/镁接合界面的波形为大尺寸波状界面. 这主要是由于间隙柱尺寸不一导致的.

(2) 由复合板界面微观组织形貌可知, 镁合金一侧出现了绝热剪切带组织, 且在铝/镁合金界面处出现了局部熔化区; 局部熔化区的组织成分为铝、镁元素组成的金属间化合物.

(3) 由复合板弯曲试验可知, 钛板一侧受拉时强度和塑性均优于镁合金板一侧受拉. 复合板的弯曲断裂位置为铝/镁接合界面扩展, 最终从镁合金板一侧剪切断裂失效.

参考文献:

- [1] 邱然锋, 申中宝, 李青哲. 高强镁合金点焊接头性能[J]. 焊接学报, 2016, 37(7): 5-8.
Qiu Ranfeng, Sheng Zhongbao, Li Qingzhe. Property of spot weld of high strength magnesium alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(7): 5-8.
- [2] Yan Y B, Zhang Z W, Shen W, *et al.* Microstructure and properties of magnesium AZ31B-aluminum7075 explosively welded composite plate[J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527(9): 2241-2245.
- [3] 刘奋军, 王憨鹰. AZ31B 镁合金焊接技术研究现状及发展方向[J]. 兵器材料科学与工程, 2013, 36(5): 129-132.
Liu Fenjun, Wang Hanying. Research status and development tendency of welding technology of AZ31B magnesium alloy[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2013, 36(5): 129-132.
- [4] 刘飞, 张兆东, 刘黎明. TIG 填锌丝对接焊接镁铝异种金属[J]. 焊接学报, 2011, 32(10): 49-53.
Liu Fei, Zhang Zhaodong, Liu Liming. TIG butt welding between Mg alloy and Al alloy filling with Zn wire[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(10): 49-53.
- [5] Zhu B, Liang W, Li X R, *et al.* Interfacial microstructure, bonding strength and fracture of magnesium-aluminum laminated composite plates fabricated by direct hot pressing[J]. Material Science Engineering A, 2011, 528(21): 6584-6488.
- [6] 尚晶, 王克鸿, 田宏军, 等. 冷金属过渡搭接焊镁铝异种金属接头组织及性能[J]. 焊接学报, 2011, 32(12): 41-46.
Shang Jing, Wang Kehong, Tian Hongjun, *et al.* Study on cold metal transfer welded lap joints of Mg/Al dissimilar metals[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(12): 44-45.
- [7] Paul H, Lityńska-Dobrzyńska L, Pra mowski M. Microstructure and phase constitution near the interface of explosively welded aluminum/copper plates[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2013, 44(8): 3836-3851.
- [8] Pourahmad P, Abbasi M. Materials flow and phase transformation in friction stir welding of Al 6013/Mg[J]. Transactions of Non-ferrous Metals Society of China, 2013, 23(5): 1253-1261.
- [9] Gao Y, Nakata K, Nagatsuka K. Interface microstructural control by probe length adjustment in friction stir welding of titanium and steel lap joint[J]. Materials & Design. 2015, 65(6): 17-23.
- [10] Aonuma M, Nakata K. Dissimilar metal joining of ZK60 magnesium alloy and titanium by friction stir welding[J]. Materials Science & Engineering B, 2012, 177(7): 543-548.
- [11] Habib M A, Ruan L Q, Kimura R, *et al.* Cladding of titanium and magnesium alloy by explosive welding using underwater shockwave technique and effect on interface[C]//Materials Science Forum, 2013; 160-165.
- [12] Habib M A, Keno H, Uchida R, *et al.* Cladding of titanium and magnesium alloy plates using energy-controlled underwater three-layer explosive welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 217(7): 310-316.
- [13] Mousavi S A A A, Al-Hassani S T S, Atkins A G. Bond strength of explosively welded specimens[J]. Materials & Design, 2008, 29(7): 1334-1352.
- [14] 王建民, 朱锡, 刘润泉. 爆炸焊接界面波形参数的影响因素[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(6): 636-639.
Wang Jianming, Zhu Xi, Liu Runquan. Influencing factors of wave parameters for the explosive welded bonding interface[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 30(6): 636-639.
- [15] 李选明, 李仓平, 裴大荣. 爆炸焊接工艺参数与波形参数的关系[J]. 焊接, 2003(3): 18-20.
Li Xuanming, Li Cangping, Pei Darong. Relation of parameters and waveform parameters in explosive welding[J]. Welding & Joining, 2003(3): 18-20.

作者简介: 张婷婷, 女, 1988 年出生, 博士研究生. 主要从事镁基复合板爆炸焊接连接界面行为及组织、性能方面的研究工作. 发表论文 3 篇. Email: tyzt88@163.com

通讯作者: 王文先, 男, 教授. Email: wangwenxian@tyut.edu.cn