DOI: 10.11883/1001-1455(2016)05-0640-08

铝合金与槽型界面钢板的爆炸焊接*

李雪交,马宏昊,沈兆武
(中国科学技术大学近代力学系,安徽 合肥 230027)

摘要:采用尺寸为 4 mm×410 mm×410 mm 的 5083 铝合金和尺寸为 15 mm×400 mm×400 mm、表面开有燕尾槽的 Q345 钢板作为爆炸焊接的覆板与基板,根据理论公式得到铝合金-钢爆炸焊接下限后,选取其附近的参数进行爆炸焊接,再通过力学性能检测和微观形貌观察研究 5083/Q345 复合板界面的结合性能。实验结果表明:铝合金与钢在冶金结合和燕尾槽的挤压啮合共同作用下实现爆炸复合;铝合金与燕尾槽上底面、倾斜面和下底面的界面均呈平直状。铝合金与燕尾槽上底面、下底面以直接结合和不连续熔化块相结合的方式复合,而铝合金与燕尾槽倾斜面以连续熔化层的方式复合;复合板的剪切强度大于 172 MPa,满足 Al/Fe 复合板结合强度的要求。

关键词:爆炸力学;爆炸焊接;挤压啮合;冶金结合;燕尾槽;结合强度
中图分类号:O389 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

随着现代工业发展,单一金属材料的性能已很难满足要求,层状金属复合板结合了金属组元各自的优点,可获得单一金属材料不具有的物理和化学性能,同时节约了大量贵重金属材料,具有很高的经济价值与应用前景。目前层状金属复合板广泛采用爆炸法进行焊接[1]。

铝合金具有密度小、导电性好、导热率高、耐腐蚀等优点,其复合板材已广泛应用于航空航天、汽车、机械制造、船舶、化工等领域。由于铝合金与钢直接爆炸焊接存在一定困难,通常在基覆板中间加入纯铝、钛、镍等过渡层,然后经过 2 次或多次爆炸焊接将铝合金与钢复合在一起,形成铝合金-铝-钢、铝合金-钛-钢、铝合金-钛-镍-钢等 3 层或者多层结构的复合板[2-5],但爆炸焊接工序多、效率低、成本较高。

本文中采用铝合金与表面开有燕尾槽的钢板进行直接爆炸焊接,为铝合金与钢的爆炸焊接提供一种新方法。其具有简化焊接工序、降低焊接药量、减少环境污染以及提高焊接质量和效率等优点。

1 实验材料及方法

爆炸焊接基板为 Q345 钢,尺寸为 15 mm×400 mm×400 mm,覆板为 5083 铝合金,尺寸为 4 mm×410 mm×410 mm。其物理性能和机械性能如表 1 所示。表中 T_m、c、ρ 和 H_V 分别为金属材料的熔点、体积声速、密度和维氏硬度;σ_s 和 σ_b 分别为金属材料的拉伸强度和屈服强度。

表 1 基板与覆板的物理和机械性能

Table 1 Physical and mechanical properties of flyer and base plates

金属材料	T_m/℃	ρ/(g·cm^{-3})	H_V	σ_s/MPa	σ_b/MPa	c/(m·s^{-1})
5083 铝合金	570~640	2.72	61	125	270	6 300
Q345 钢	1 523	7.85	168	385	609	6 000

在基板表面分别沿着横向和纵向开出上底面 2 mm、下底面 3 mm、高 1 mm 的燕尾槽,其中燕尾槽上底面的间距为 3 mm,如图 1 所示。

实验以乳化基质、敏化剂膨胀珍珠岩以及稀释剂工业食盐调配成的低爆速乳化炸药作为焊接炸药。

* **收稿日期**:2015-03-04;**修回日期**:2015-06-03
基金项目:国家自然科学基金面上项目(51374189,51174183)
第一作者:李雪交(1986—),男,博士研究生;**通信作者**:马宏昊,hhma@ustc.edu.cn。

焊接炸药的药框采用铝蜂窝板，材质为厚 50 μm 的 3003H24 铝合金，蜂窝孔呈正六边形，边长 8 mm，如图 2 所示。其具有结构稳定、强度高、刚度大、平面度好等优点。根据焊接药量选择合适高度的铝蜂窝板后，将炸药填入铝蜂窝板孔隙，制成铝蜂窝炸药，如图 3 所示。铝蜂窝板可保证各位置焊接炸药厚度相同。

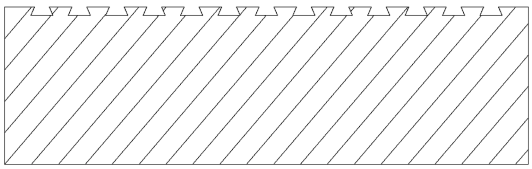

图 1 燕尾槽截面示意图

Fig. 1 Schematic of cross-section of dovetail grooves

爆炸焊接装置为平行安装结构，起爆端位于炸药的中心位置，如图 4 所示。爆炸焊接后采用 Carl Zeiss Axio Imager A1m 型金相显微镜和 XL-30 ESEM 型环境电子扫描显微镜观察铝合金与燕尾槽钢爆炸复合板结合界面的微观形貌，然后再采用 MTS-810 型万能试验机进行拉伸和剪切实验，检测爆炸复合板的力学性能。

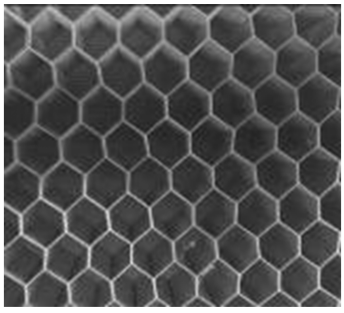

图 2 铝蜂窝板

Fig. 2 Aluminum honeycomb panel

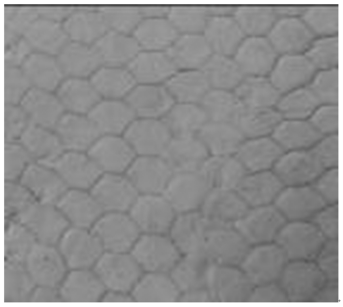

图 3 铝蜂窝炸药

Fig. 3 Aluminum honeycomb explosive

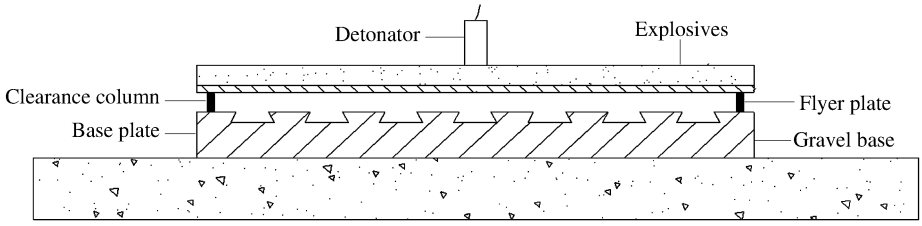

图 4 爆炸焊接装置示意图

Fig. 4 Schematic of explosive welding set-up

2　铝合金-钢爆炸焊接参数

选择合理的焊接参数是实现爆炸焊接并获得良好焊接质量的前提和关键。动态碰撞角、碰撞点移动速度、碰撞速度是爆炸焊接的主要动态参数，其中任意两参数相互独立，其在同一平面内构成了爆炸焊接区域，即爆炸焊接窗口[6]。在此窗口内均可获得良好的焊接质量，而且一般爆炸焊接下限附近复合板的焊接质量最好[7-8]。

同种金属材料爆炸焊接产生金属射流的最小碰撞速度 $v_{p,min}$ 以及碰撞压力 p 公式为[9-10]：

$$v_{p,min}=\left(\frac{\sigma_b}{\rho}\right)^{1/2} \tag{1}$$

$$p=\frac{1}{2}\rho v_p c \tag{2}$$

式中：σ_b 为金属材料的抗拉强度，ρ 为金属材料的密度，c 为金属材料的体积声速，v_p 为金属材料的碰撞速度。

根据式(1)得到两种相同金属材料的最小碰撞速度 $v_{p,min1}$ 和 $v_{p,min2}$ 后，代入式(2)得到相应的碰撞压

力 $p_{\min 1}$ 和 $p_{\min 2}$，取 $p_{\min}=\max(p_{\min 1},p_{\min 2})$，则不同金属材料间的最小碰撞速度 $v_{\mathrm{p,min}}$ 为[10]：

$$v_{\mathrm{p,min}}=p_{\min}\left(\frac{1}{c_1\rho_1}+\frac{1}{c_2\rho_2}\right) \tag{3}$$

式中：ρ_1 和 ρ_2 分别为覆板和基板的密度，c_1 和 c_2 分别为覆板和基板的体积声速。

当碰撞点移动速度 v_{cp} 等于临界碰撞点移动速度 v_{c} 时，金属表面开始从层流过渡到湍流，为获得良好的焊接质量，碰撞点移动速度 v_{cp} 应大于临界碰撞点移动速度 v_{c} 小于金属材料的体积声速 c。临界碰撞点移动速度 v_{c} 计算公式为[11]：

$$v_{\mathrm{c}}=\left[\frac{2Re\,(H_1+H_2)}{\rho_1+\rho_2}\right]^{1/2} \tag{4}$$

式中：Re 为适用流动过程的雷诺数，取 $Re=10.6$；H_1 和 H_2 分别为覆板和基板的维氏硬度；ρ_1 和 ρ_2 分别为覆板和基板的密度。

根据式(1)～(4)得到铝合金与钢爆炸焊接的最小碰撞速度 $v_{\mathrm{p,min}}=522$ m/s、碰撞压力 $p=4.5$ GPa、临界碰撞点移动速度 $v_{\mathrm{c}}=2\,122$ m/s。

S. W. Stivers 等[10]根据临界碰撞点移动速度 v_{c} 给出了相应碰撞点移动速度 v_{cp} 大于 2 000 m/s、小于 2 500 m/s 的表达式：

$$v_{\mathrm{cp}}=v_{\mathrm{c}}+200 \tag{5}$$

炸药爆速 v_{d} 与碰撞点移动速度 v_{cp} 相等，均为 2 222 m/s，所以选用爆速约为 2 300 m/s 的乳化炸药进行爆炸焊接实验。A. A. Ezra[12]认为产生强烈塑性流动和金属射流的临界压力 p_{c} 大约为金属材料静态屈服强度的 10～12 倍，则铝合金与钢的临界碰撞压力 p_{c} 分别为 1.25～1.50 GPa 和 3.85～4.62 GPa。铝合金与燕尾槽钢爆炸焊接实验的碰撞速度 v_{p} 靠近铝合金-钢爆炸复合的最小碰撞速度 $v_{\mathrm{p,min}}$，取 $v_{\mathrm{p}}=600$ m/s，此时界面的碰撞压力 $p=5.1$ GPa，则铝合金与燕尾槽钢内表面产生强烈的塑性变形和金属射流。

覆板与基板爆炸焊接简化为一维运动，则对于 $\gamma=2.5$ 乳化炸药的覆板碰撞速度 v_{p} 可表达为[13]：

$$v_{\mathrm{p}}=1.2v_{\mathrm{d}}\frac{\left(1+\frac{32}{27}R\right)^{1/2}-1}{\left(1+\frac{32}{27}R\right)^{1/2}+1} \tag{6}$$

式中：$R=\rho_0\delta_0/\rho_1\delta_1$，$\delta_0=W_{\mathrm{g}}/\rho_0$。

覆板和基板间距的经验公式为[10]：

$$h=0.2(\delta_0+\delta_1) \tag{7}$$

式中：R 为质量比；ρ_0 为炸药密度，kg/m^3；W_{g} 为单位面积炸药药量，g/cm^2；h 为基板和覆板的间距，cm；δ_1 为覆板厚度，cm；δ 为焊接炸药厚度，mm。

由式(5)～(7)得到铝合金与燕尾槽钢爆炸焊接参数，炸药密度为 0.78 g/cm^3、炸药与覆层的质量比为 1.19、炸药药量为 2 168 g 和基层覆层间距为 4.1 mm。

3 实验结果与分析

3.1 铝合金-燕尾槽钢爆炸复合板

爆炸焊接后进行较平、打磨，得到厚 18 mm 的铝合金-燕尾槽钢复合板，其中铝合金层厚 3 mm，钢层厚 15 mm。然后沿着爆轰方向切割复合板，观察界面结合紧密，焊接质量良好，靠近边缘处的复合板截面如图 5 所示。由于覆板面积比基板大，将空气稀疏波作用范围引向基板边缘之外，使得靠近边缘处铝合金与燕尾槽钢的碰撞压力基本不受影响，而



图 5 爆炸复合板截面实物图

Fig. 5 Image of actual cross-section of explosive clad plate

且铝合金与钢依靠燕尾槽相互挤压啮合在一起，抑制反射拉伸波将界面拉开，所以铝合金-燕尾槽钢爆炸复合板的边缘处基本无边界效应。由于铝合金与燕尾槽钢采用一次爆炸焊接工艺复合在一起，减少了焊接工序以及药量，提高了焊接质量和效率，同时减少了环境的污染。

传统铝合金与钢直接爆炸焊接时在塑性变形热和绝热压缩热作用下界面易产生过熔现象以及多种脆性金属间化合物，而且铝合金的凝固温度范围较宽，使得界面凝固时间以及受反射拉伸波作用时间延长，造成焊接质量较差，甚至界面被拉开，所以铝合金与钢直接爆炸焊接存在一定的困难。本文中采用表面开有燕尾槽的钢板与铝合金进行直接爆炸焊接。在焊接炸药能量的作用下，一部分铝合金与燕尾槽上底面高速撞击，使得碰撞区铝合金与钢的内表面均产生强烈的塑性变形，物理性质类似流体，此时形成的金属射流消除了碰撞点前金属表面的氧化膜和污染物，露出具有活性的新鲜金属，使其在高温、高压以及剧烈的塑性变形作用下进行冶金结合，另一部分铝合金则向燕尾槽内高速运动，被压入燕尾槽的铝合金与燕尾槽下底面进行冶金结合过程中，同时向燕尾槽的倾斜面运动，充满整个燕尾槽，此时界面空气受到绝热压缩，使铝合金与燕尾槽倾斜面在绝热压缩热的作用下形成中间过渡层，从而复合在一起。总之，铝合金与燕尾槽钢在燕尾槽的挤压啮合作用下充分进行冶金结合，抑制反射拉伸波将界面拉开，实现直接爆炸焊接。

3.2　铝合金-燕尾槽钢爆炸复合板力学性能分析

界面结合强度是衡量焊接质量优劣的重要指标之一，按照 GB/T 6396-2008《复合钢板力学及工艺性能试验方法》和 GB/T 6396-2002《金属材料室温拉伸试验方法》分别切割 4 个平行试件进行拉伸实验和剪切实验，结果如表 2 所示，表中 S_b 和 σ_b 分别为拉伸试件的截面面积和拉伸强度，S_τ 和 σ_τ 分别为剪切试件的结合面积和剪切强度。。

表 2 爆炸复合板的力学性能实验结果

Table 2 Experimental results of mechanical properties of explosive clad plate

实验编号	S_b/(mm×mm)	σ_b/MPa	S_τ/(mm×mm)	σ_τ/MPa
1	10×10	522	4.5×25	178
2	10×10	538	4.5×25	183
3	10×10	527	4.5×25	190
4	10×10	543	4.5×25	172

由表 2 可知，铝合金-燕尾槽钢爆炸复合板的平均拉伸强度为 532.5 MPa，平均剪切强度为 180.8 MPa。铝合金-燕尾槽钢复合板的理论抗拉强度下限为 507.3 MPa[14]，复合板 4 个平行试件的抗拉强度均大于其理论抗拉强度下限。一般在冲击载荷作用下金属材料的抗拉强度将增大，所以铝合金-燕尾槽钢爆炸复合板的抗拉强度大于其理论抗拉强度下限。

铝合金-燕尾槽钢爆炸复合板拉剪实验时界面未发生分离，断裂位置位于铝合金一侧，如图 6 所示。由表 2 可知，铝合金-燕尾槽钢爆炸复合板界面的剪切强度大于 172 MPa，满足铝合金-钢复合板结合强度的要求。铝合金与钢在冶金结合和燕尾槽的挤压啮合作用下抑制复合板界面被拉开，同时其结合面积比传统铝合金-钢复合板大 145%，使复合板界面的结合强度增大，所以拉剪实验时断裂位置位于铝合金一侧。



图 6 拉剪破坏试件实物图

Fig. 6 Image of actual tensile shear failure specimen

4 铝合金-燕尾槽钢爆炸复合板结合界面的微观形貌观察

4.1 复合板结合界面金相组织

选取铝合金-燕尾槽钢爆炸复合板结合界面的 4 个位置进行金相组织观察，分别位于铝合金与燕尾槽上底面(*A*)、倾斜面(*B*)、下底面(*C*)以及拐角处(*D*)，如图 7 所示。

根据图 7 标注的位置，采用金相显微镜得到铝合金与燕尾槽上底面、倾斜面、下底面以及拐角处结合界面的金相组织，如图 8 所示。

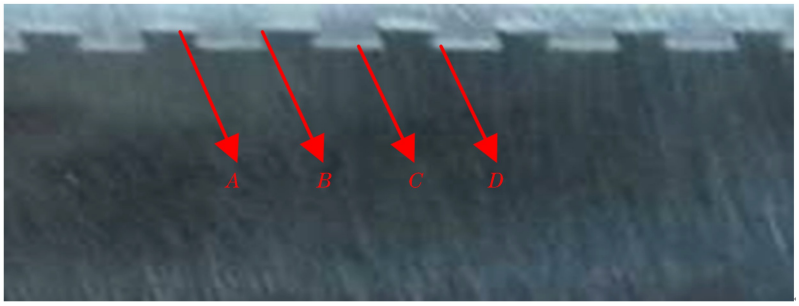

图 7 爆炸复合板金相观察位置

Fig. 7 Metallographic observation points of explosive clad plate

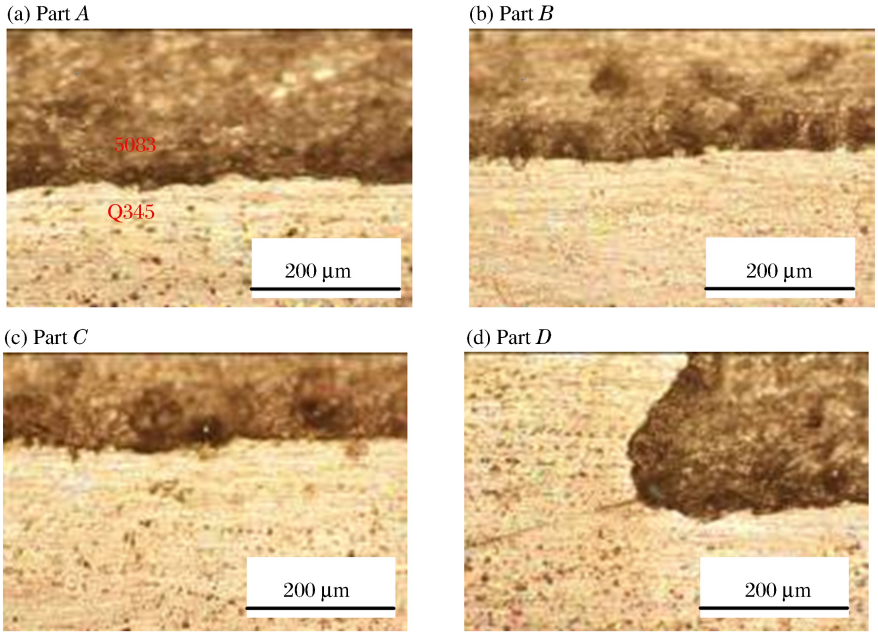

图 8 爆炸复合板界面的金相组织图

Fig. 8 Metallographic images at the interfaces of 5083/Q345 clad plate

由图 8 中 4 个不同位置的金相组织可知，铝合金与燕尾槽上底面、倾斜面、下底面基本均以平直状的方式结合，铝合金与燕尾槽拐角处结合紧密。铝合金与钢产生金属射流的临界碰撞压力分别为 1.25～1.50 GPa 和 3.85～4.62 GPa，而本实验中铝合金与燕尾槽钢爆炸焊接的碰撞压力为 5.1 GPa，界面两侧产生强烈的塑性变形和金属射流，使得铝合金与钢以冶金结合的方式复合在一起。由于铝合金与钢的密度、熔点等物理性能相差较大，所以铝合金与钢复合板界面结合均呈平直状。

4.2 复合板结合界面扫描电镜

图 9(a)、(b)、(c)和(d)分别为铝合金与燕尾槽上底面、倾斜面、下底面以及拐角处结合界面的扫描电镜图，由图 9 可知，铝合金与钢结合界面出现不同于铝合金层与钢层的中间过渡层，其中铝合金与燕

尾槽上底面中间过渡层的厚度为 0～20 μm；铝合金与燕尾槽倾斜面的中间过渡层的厚度为 20～120 μm，其中含有气孔等微观缺陷；铝合金与燕尾槽下底面中间过渡层的厚度为 0～30 μm。铝合金与燕尾槽倾斜面的中间过渡层厚度比铝合金与上底面和下底面的中间过渡层厚度大。

铝合金与燕尾槽钢在爆炸焊接过程中，界面空气受到绝热压缩向四周和燕尾槽运动，铝合金与燕尾槽上底面与下底面高速碰撞下产生剧烈的塑性变形以及塑性变形热，使其以直接结合和不连续的熔化块相结合的方式结合，而被压入燕尾槽的铝合金在与燕尾槽下底面冶金结合过程中，同时受到挤压向燕尾槽倾斜面运动，此时界面空气受到绝热压缩，在绝热压缩热的作用下产生厚度不均的连续熔化层，从而使铝合金与燕尾槽倾斜面结合在一起。由于铝合金与燕尾槽倾斜面的空气无法全部排出，进入熔体金属内产生气孔等微观缺陷。

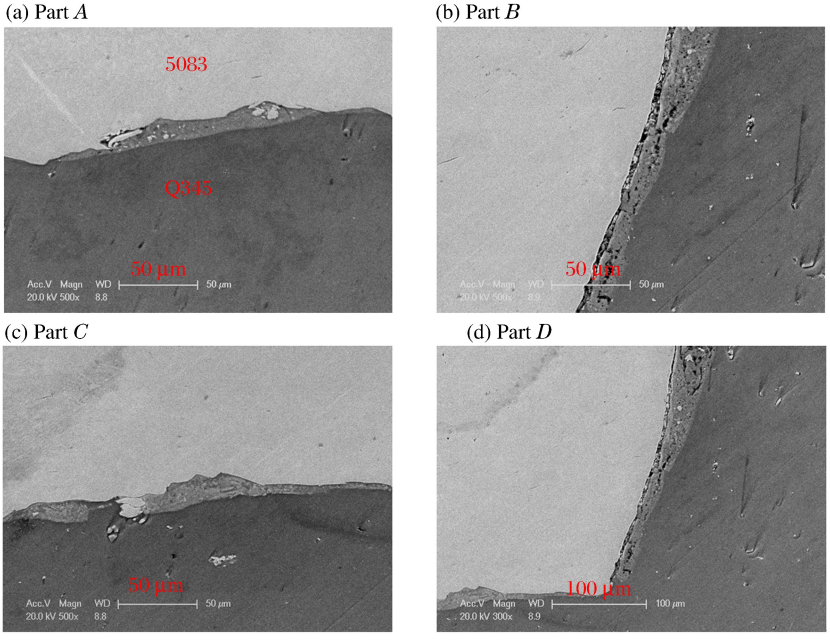

图 9　爆炸复合板界面扫描电镜图

Fig. 9　SEM images of the interfaces of explosive clad plate

4.3　铝合金-燕尾槽钢爆炸复合板结合界面能谱分析

为进一步研究铝合金-钢爆炸复合板的中间过渡层，分别对铝合金与燕尾槽上底面的界面进行线扫描能谱分析以及复合板的铝合金层、中间过渡层和钢层进行点扫描能谱分析，如图 10 和表 3 所示。

由图 10 可知，对铝合金与燕尾槽钢上底面的界面进行线扫描，在中间过渡层出现宽约 20 μm 的平

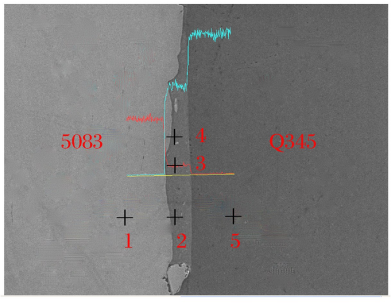

图 10　爆炸复合板界面能谱分析

Fig. 10　EDS analysis across the interface of explosive clad plate

表 3　界面不同位置的化学成分（摩尔分数）

Table 3　Chemical components at different points on the interface (mole fraction)

界面位置	x_{Al}/%	x_{Fe}/%
1	99.16	0.84
2	73.32	26.68
3	76.11	23.89
4	72.45	27.55
5	0.43	99.57

台,并根据表 3 中间过渡层铝、铁的原子分数比例可知,表明中间过渡层生成了含有 Al 和 Fe 的金属间化合物。铝与钢爆炸焊接过程中界面两侧金属在高温、高压和强烈的塑性变形作用下产生熔化,可能生成 $FeAl_3$、$FeAl_2$、FeAl 等多种脆性金属间化合物[15]。

5 结 论

(1)铝合金与燕尾槽钢在燕尾槽的挤压啮合作用下充分进行冶金结合,抑制反射拉伸波将界面拉开,从而实现爆炸复合,为铝合金与钢的爆炸焊接提供一种新方法。

(2)铝合金与燕尾槽钢爆炸复合板界面结合紧密,焊接质量良好。拉剪实验时试件断裂位置位于铝合金一侧,其剪切强度大于 172 MPa,满足 Al/Fe 复合板结合强度的要求。

(3)铝合金与燕尾槽上底面、倾斜面、下底面结合界面均呈平直状,其中铝合金与燕尾槽上底面、下底面以直接结合和不连续的熔化块相结合的方式结合,铝合金与燕尾槽倾斜面以连续的熔化层的方式结合。铝合金与燕尾槽倾斜面的中间过渡层厚度比铝合金与燕尾槽上底面以及下底面中间过渡层厚度大,而且其中间过渡层含有气孔等微观缺陷。

(4)5083/Q345 复合板界面的中间过渡层生成了含有 Al 和 Fe 的金属间化合物。

参考文献:

[1] 汪育,史长根,李焕良,等. 金属复合材料爆炸焊接综合技术[J]. 焊接技术,2013,42(7):1-5.
Wang Yu, Shi Changgen, Li Huanliang, et al. New trend in comprehensive technique of metal explosive welding [J]. Welding Technology, 2013,42(7):1-5.

[2] 王建民,朱锡,刘润泉. 铝/钢爆炸复合界面的显微分析[J]. 材料工程,2006(11):36-39.
Wang Jianmin, Zhu Xi, Liu Runquan. Micro-analysis of bonding interfaces of explosive welded aluminum/steel plates[J]. Journal of Materials Engineering, 2006(11):36-39.

[3] Han J H, Ahn J P, Shin M C. Effect of interlayer thickness on shear deformation behavior of AA5083 aluminum alloy/SS41 steel plates manufactured by explosive welding[J]. Journal of Materials Science, 2003,38(1):13-18.

[4] Tricarico L, Spina R, Sorgente D, et al. Effect of heat treatments on mechanical properties of Fe/Al explosion-welded structural transition joints[J]. Materials & Design, 2009,30(7):2693-2700.

[5] 黄杏利,汪洋,徐鹏,等. 铝/钛/钢爆炸复合板性能[J]. 材料热处理技术,2011,40(16):103-105.
Huang Xingli, Wang Yang, Xu Peng, et al. Research on property of aluminum/titanium/steel explosive clad plate [J]. Material & Heat Treatment, 2011,40(16):103-105.

[6] 郑远谋. 爆炸焊接和金属复合材料及其工程应用[M]. 长沙:中南大学出版社,2007:16-29.

[7] 郑哲敏,杨超声. 爆炸加工[M]. 北京:国防工业出版社,1981:324-464.

[8] 杨扬. 金属爆炸复合技术与物理冶金[M]. 北京:化学工业出版社,2006:33-50.

[9] 布拉齐恩斯基. 爆炸焊接、成形与压制[M]. 李富勤,吴伯青,译. 北京:机械工业出版社,1988:189-218.

[10] Stivers S W, Wittman R H. Computer selection of the optimum explosive loading and welding geometry[C]// High Energy Rate Fabrication. Colorado, 1975:4.2.1-4.2.16.

[11] Cowan G R, Bergmann O R, Holtzman A H. Mechanism of bond zone wave formation in explosion clad metal [J]. Metallurgical and Materials Transaction B, 1971,2(11):3145-3155.

[12] 爱拉兹 A A. 金属爆炸加工的原理与实践[M]. 张铁生,梁宜强,谭渤,译. 北京:国防工业出版社,1981:399.

[13] Deribas A A, Kudinov V M, Matveenkov F I, et al. Determination of the impact parameters of flat plates in explosive welding[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 1967,3(2):182-186.

[14] 殷建军,赵海敏,安丽君,等. GB 6369-1995《复合钢板力学性能及工艺试验方法》简介[J]. 理化检验-物理分册,2000,36(6):276-281.
Yin Jianjun, Zhao Haimin, An Lijun, et al. Brief introduction to GB 6396-1995 clad plates-mechanical and technological test[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing, 2000,36(6):276-281.

[15] Li Yan, Hashimoto H, Sukedai E, et al. Morphology and structure of various phases at the bonding interface of Al/steel formed by explosive welding[J]. Journal of Electron Microscopy, 2005,49(1):5-16.

Explosive welding of interface between aluminum alloy and steel plate with dovetail grooves

Li Xuejiao, Ma Honghao, Shen Zhaowu

(*Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei* 230027, *Anhui, China*)

Abstract: In this work, using a 5083 aluminum alloy plate (4 mm×410 mm×410 mm) and a Q345 steel plate with dovetail grooves (15 mm×400 mm×400 mm) as the flyer and base plates, and based on the lower limit of explosive welding of aluminum alloy with steel calculated from theoretical formulas, we carried out explosive welding experiments with selected parameters which were close to the lower limit. We studied the bonding performances on the interfaces of the 5083/Q345 clad plate by checking its mechanical properties and observing its micro-structure. The results show that the explosive welding of aluminum alloy and steel is achieved through a combined action of the metallurgical bonding and the extraction and meshing of the dovetail grooves; the bonding interface between the aluminum alloy and the upper, lower and inclined surfaces of the dovetail grooves exhibits an even shape; the welding between the aluminum alloy and the upper and lower surfaces of the dovetail grooves is realized by both direct bonding and discontinuous melting while that between the aluminum alloy and the inclined surface of the dovetail grooves is realized by continuous melting. The tensile shear strength of the clad plate is greater than 172 MPa, which satisfies the requirement placed on the bonding strength of a Al/Fe clad plate.

Key words: mechanics of explosion; explosive welding; extraction and meshing; metallurgical bonding; dovetail groove; bonding strength

(责任编辑　曾月蓉)