

# 304 不锈钢/Q235 钢的多层爆炸焊接

杨 明<sup>1</sup>, 马宏昊<sup>1,2</sup>, 沈兆武<sup>1</sup>, 李雪交<sup>3</sup>, 王 波<sup>3</sup>

(1. 中国科学院材料力学行为和设计重点实验室 中国科学技术大学, 合肥 230026; 2. 火灾科学国家重点实验室 中国科学技术大学, 合肥 230026; 3. 安徽理工大学 化学工程学院, 淮南 232001)

**摘 要:** 为解决传统爆炸焊接中能量利用率和工作效率较低的问题, 提出了一种多层爆炸焊接新方法. 以五层爆炸焊接为例, 304 不锈钢板和 Q235 钢板分别作为复板和基板, 进行了多层爆炸焊接和传统单层爆炸焊接的对比试验, 并对爆炸焊接窗口和复板碰撞速度进行了理论计算. 结果表明, 与传统爆炸焊接技术相比, 五层爆炸焊接中可节省炸药量 63%, 并且五层爆炸焊接技术通过一次爆炸作业可获得五块焊接板, 有利于提高爆炸焊接作业的工作效率. 此外, 得到了 304 不锈钢和 Q235 钢的爆炸焊接窗口并对结合质量进行了预测, 试验和预测结果吻合良好.

**关键词:** 爆炸焊接; 多层结构; 能量利用率; 焊接窗口; 结合质量

**中图分类号:** TG 456.6, TJ 55 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.2019400013

## 0 序 言

爆炸焊接作为一种特殊的焊接技术, 其不仅能对同种或相似金属进行焊接, 而且对于许多物理性质差异巨大而常规焊接方法无法焊接的材料也能实现很好的焊接效果<sup>[1-2]</sup>. 目前, 爆炸焊接已实现了三百多种金属材料之间的焊接, 其产品在许多工业领域都有着不可替代的作用<sup>[3-4]</sup>. 然而, 传统爆炸焊接采用平铺式裸露装药, 炸药爆炸所释放的能量大部分以冲击波的形式传入空气中, 能量利用率较低, 而且还造成严重的噪音污染. 史长根等人<sup>[5]</sup>发明了一种双立式爆炸焊接方法以提高炸药的能量利用率. 缪广红等人<sup>[6]</sup>提出了蜂窝结构炸药并将其应用平铺式双面爆炸焊接中. 虽然双面焊接技术极大的提高了炸药的能量利用率, 但在实际生产中均面临着复合板飞散防护的问题<sup>[7]</sup>.

为解决上述问题, 提出了一种多层爆炸焊接新方法, 即将一组或多组双面爆炸焊接组合从下到上依次叠放, 而在其最上端叠放一组单面爆炸焊接组合. 以 SUS304 不锈钢板和 Q235 钢板分别作为复板和基板进行了五层爆炸焊接试验, 并对爆炸焊接

窗口和复板碰撞速度进行了理论计算, 预测了多层爆炸焊接的焊接质量.

## 1 多层爆炸焊接

### 1.1 多层爆炸焊接结构

多层爆炸焊接结构如图 1 所示, 其由一组或多组双面爆炸焊接组合和一组单面爆炸焊接组合从下到上依次叠放而成. 其中双面爆炸焊接组合关于

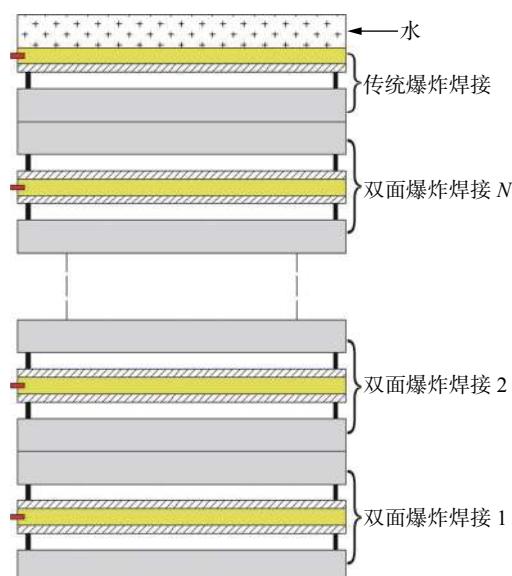


图 1 多层爆炸焊接装置示意图

Fig. 1 Diagram of the multilayer explosive welding setup

收稿日期: 2018-04-30

基金项目: 国家自然科学基金资助 (51674229); 国家自然科学基金资助 (51374189); 中国科学技术大学重要方向项目培育基金 (WK2480000002)

炸药二侧对称,且所有双面焊接组合的构造一致,而单面焊接组合与双面焊接组合中去掉上端基复板后的结构一致,为提高单面焊接组合中炸药的能量利用率,其炸药的上端用水箱进行覆盖。

1.2 多层爆炸焊接机理

对于多层爆炸焊接,雷管设置在每一层炸药的同一位置,并同时进行起爆。炸药爆炸后,产生的冲击波驱使复板以几百米每秒的速度与基板高速斜碰撞,使待焊接面产生射流、熔化并达到冶金结合。在基复板碰撞过程中一小部分能量被耗散,而剩余的能量则转化为复合板的动能。如果复合板处于无约束状态,其将以很高的速度向外飞行,极易造成复合板损坏和安全隐患。对于双面爆炸焊接组合,所有复合板所获得的速度大小均相等,最下端的复合板速度方向向下,其运动被地基限制;对于中间各复合板,相邻两块复合板速度大小相等,方向

相反,因此相邻两块复合板的运动被互相限制;而最上端的复合板速度向上,与此对应的是单面爆炸焊接所形成的复合板速度向下,故二者的运动也被互相约束。因此,多层爆炸复合中所有复合板的运动都被限制,避免了双面爆炸焊接中复合板飞散的棘手问题。此外,多层爆炸焊接中,采用了双面爆炸焊接组合,利用了炸药两侧的能量,且单面焊接中在炸药上表面设置了覆盖物以提高炸药的做功能力,所以多层爆炸复合能明显提高炸药的能量利用率。

2 试验方法

试验基板和复板分别为 Q235 钢和 SUS304 不锈钢,尺寸分别为 300 mm × 150 mm × 20 mm 和 300 mm × 150 mm × 2 mm,其物理和力学性能参数如表 1 所示。

表 1 基板和复板的材料特性参数  
Table 1 Material properties of base plate and flyer plate

材料	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	维氏硬度 $H_v/\text{MPa}$	声速 $c/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	抗拉强度 $R_m/\text{MPa}$	熔化温度 $T_m/^\circ\text{C}$	导热系数 $K/(\text{J}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	热容 $c_p/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$
Q235	7 850	1 300	6 000	405	1 493	0.38	0.5
SUS304	7 930	1 700	4 500	560	1 454	0.22	0.5

试验所用炸药为蜂窝结构炸药,如图 2 所示。将乳化炸药均匀填充至蜂窝铝结构的空腔中即可制得,其中乳化炸药由 85% 乳胶基质和 15% 玻璃微球混合而成,乳胶基质组分见表 2。蜂窝铝结构中铝箔壁厚为 50  $\mu\text{m}$ ,正六边形胞元的边长为 8 mm,高度为 10 mm。蜂窝结构是自然界中最稳定的结构之一,因此蜂窝结构炸药能显著的提高炸药的力学性能,有效的解决了炸药上端被覆盖物“压死”而产生拒爆的问题。



图 2 蜂窝结构炸药  
Fig. 2 Honeycomb structure explosive

表 2 乳胶基质组分  
Table 2 Component of the emulsion matrix

组分	质量分数 $w(\%)$	组分	质量分数 $w(\%)$
$\text{NH}_4\text{NO}_3$	75	$\text{C}_{18}\text{H}_{38}$	4
$\text{NaNO}_3$	10	$\text{C}_{24}\text{H}_{44}\text{O}_6$	2
$\text{H}_2\text{O}$	8	$\text{C}_{12}\text{H}_{26}$	1

试验采用飞片式无起爆药雷管,能有效保证所有雷管被同时起爆,单面爆炸焊接中炸药上端用水箱覆盖,其中水的重量与复板重量一致。

试验共分两组,其中第一组采用五层爆炸装置,即一组单面爆炸焊和两组双面爆炸焊组合,参见图 1。而第二组试验采用传统的单面爆炸焊接装置(图 3)作为对比试验。五层爆炸焊接装药实物图如图 4 所示,其具体的试验参数见表 3。两组试验均在直径为 2.5 m,长 5 m 的圆柱形容器中进行,容器内壁涂有一层泥土,以检测五层爆炸焊接中复合板是否会与容器内壁相碰撞。

为观测焊接界面的微观形貌,爆炸完成之后,在每一块板中心位置处切取 30 mm × 30 mm 的样品,对平行于爆轰波传播方向的截面进行打磨、抛

光和腐蚀, 其中腐蚀液由 4 mL 硝酸和 96 mL 无水乙醇混合而成, 最后用金相显微镜 (Leica DM4M) 进行观测。

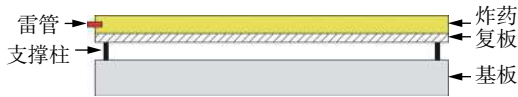


图 3 单面爆炸焊接装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of single side explosive cladding setup



图 4 五层爆炸焊接装药实物图

Fig. 4 Picture of charge for five layers explosive cladding

表 3 爆炸焊接工艺参数

Table 3 Selected parameters for explosive cladding

试验编号	试验方法	间距 s/mm	药厚 t/mm	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	爆速 $v_d/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	碰撞角 $\beta/(\text{°})$
1	五层	8	10	0.80	3 000	11.1
2	传统	8	16	0.80	3 000	11.1

### 3 爆炸焊接窗口

在爆炸焊接中, 获得良好焊接的质量的关键在于选择合理的动态参数<sup>[8]</sup>。碰撞点移动速度、碰撞速度和碰撞角是主要的动态参数, 这三个参数中由于几何关系的存在而只有两个参数为独立变量。

$$v_p = 2v_c \sin(\beta/2) \quad (1)$$

式中:  $v_p$  为碰撞速度 (m/s);  $v_c$  为碰撞点移动速度 (m/s);  $\beta$  为碰撞角 (°)。

对于平行法爆炸焊接, 碰撞点移动速度  $v_c$  与炸药爆速  $v_d$  相等; 碰撞速度  $v_p$  和碰撞角  $\beta$  主要由炸药与复板质量比、基复板间距、炸药能量等静态参数决定<sup>[9]</sup>。三个动态参数中任意两个参数均可在同一平面内构成可焊性区域, 即爆炸焊接窗口。故选用碰撞点移动速度和碰撞角来计算爆炸焊接窗口。

#### 3.1 碰撞速度下限

为保证基复板碰撞压力超过材料屈服强度, 使

界面金属产生塑性流动和金属射流, 复板的碰撞速度必须大于碰撞速度下限, 同种或相似金属爆炸焊接产生金属射流的最小碰撞速度如式 (2) 所示<sup>[10]</sup>

$$v_{p\min} = \left( \frac{R_m}{\rho} \right)^{1/2} \quad (2)$$

式中:  $R_m$  是金属材料的抗拉强度 (Pa);  $\rho$  是金属材料的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。

#### 3.2 碰撞速度上限

为避免焊接过程中能量过大造成金属界面出现连续熔化层, Carvalho<sup>[11]</sup> 给出了碰撞速度上限为

$$v_{p\max} = \frac{1}{N} \frac{(T_m c)^{1/2}}{v_c} \left( \frac{k c_p c}{\rho h} \right)^{1/4} \quad (3)$$

式中:  $v_{p\max}$  为碰撞速度上限 (cm/s);  $N$  为经验常数, 对于不锈钢和钢取 0.062<sup>[12]</sup>;  $T_m$  为复板的熔化温度 (°C);  $c$  为复板体积声速 (cm/s);  $v_c$  为碰撞点移动速度即平行法中炸药的爆速 (cm/s);  $k$  为复板导热系数 ( $\text{J}/\text{cm}\cdot\text{s}$ );  $c_p$  为复板热容 [ $\text{J}/(\text{g}\cdot\text{°C})$ ];  $h$  为复板厚度 (cm)。

#### 3.3 碰撞速度上限碰撞点移动速度下限

为形成良好的波形结合界面, 碰撞点移动速度必须大于碰撞点移动速度下限  $v_{c\min}$ ,  $v_{c\min}$  可以通过式 (4) 求得<sup>[13]</sup>, 即

$$v_{c\min} = \left[ \frac{2R_e(H_1 + H_2)}{\rho_1 + \rho_2} \right]^{1/2} \quad (4)$$

式中:  $R_e$  为雷诺数, 对于钢取为 10.6;  $H_1$  和  $H_2$  分别为复板和基板的维氏硬度 (Pa)。

#### 3.4 碰撞点移动速度上限

为保证射流的形成, Abrahamson<sup>[14]</sup> 提出碰撞点移动速度上限应为碰撞角的函数, 碰撞点移动速度上限为

$$v_{c\max} = \frac{\beta}{10} + 5.5 \quad (5)$$

利用式 (1)~式 (5) 可以计算得到 SUS304/Q235 的爆炸焊接窗口, 计算所需材料特性参数列于表 1, 计算结果见图 5, 其中图 5 还显示了试验所用参数。

## 4 试验结果分析及讨论

#### 4.1 复板碰撞速度

在爆炸焊接中, 炸药上端是否有覆盖板将会显著影响复板的碰撞速度, 根据 Gurney 公式可以得到设有覆盖板情况下复板碰撞速度的计算式为<sup>[15]</sup>



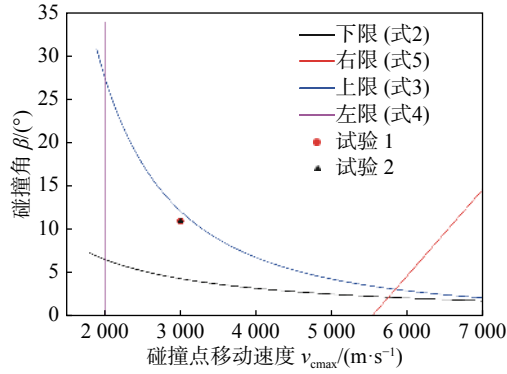


图 5 SUS304/Q235 爆炸焊接窗口和试验参数

Fig. 5 Welding window of SUS304/Q235 for explosive cladding and selected parameters

$$v_p = \sqrt{2E} \left[ \frac{1+A^3}{3(1+A)} + \frac{N}{C}A^2 + \frac{M}{C} \right]^{-1/2} \quad (6)$$

式中:  $v_p$  为复板的碰撞速度 (cm/s);  $E$  为格尼能 (J/kg);  $N$  为盖板质量 (kg);  $C$  为炸药质量 (kg);  $M$  为复板质量 (kg).

$A$  由式 (7) 确定, 即

$$A = \frac{1+2\frac{M}{C}}{1+2\frac{N}{C}} \quad (7)$$

采用多层爆炸焊接时, 双面爆炸焊接组合和单面焊接组合中炸药上端覆盖与复板质量相等的覆盖板情况下均有  $N=M$ , 此时复板的速度可以简化为

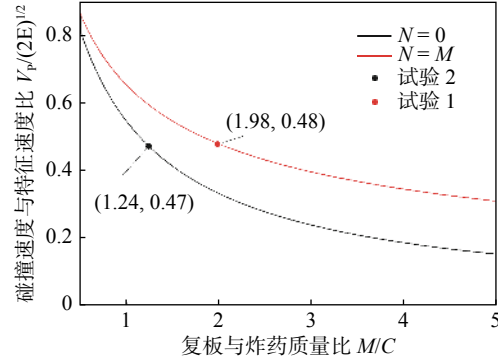
$$v_p = \sqrt{2E} \left[ \frac{1}{3} + 2\frac{M}{C} \right]^{-1/2} \quad (8)$$

当采用传统爆炸焊接方法时, 炸药上端处于无约束状态即  $N=0$ , 此时复板的速度为<sup>[15]</sup>

$$v_p = \sqrt{2E} \left[ \frac{\left(1+2\frac{M}{C}\right)^3 + 1}{6\left(1+\frac{M}{C}\right)} + \frac{M}{C} \right]^{-1/2} \quad (9)$$

根据式 (8) 和式 (9), 可以得到两种工况下, 复板碰撞速度随复板与炸药质量比  $M/C$  的变化曲线. 如图 6 所示, 图 6 中还显示了两组试验所选参数. 由图 6 可知, 复板与炸药质量比  $M/C$  相同的情况下, 多层爆炸焊接中复板所获得的碰撞速度明显高于传统爆炸焊接方法, 并且质量比  $M/C$  越大, 两者之间差距越显著. 两组试验计算得到的复板碰撞速度基本相同, 但采用传统爆炸焊接时所用炸药量为采用多层爆炸焊接的 1.6 倍 (1.98/1.24), 这表明多层爆炸焊接可以明显减少炸药的使用量.

试验所用炸药为乳化炸药, 目前并没有其准确的格尼能参数, 文献 [16] 基于能量守恒原理给出了

图 6 碰撞速度与特征速度之比随复板与炸药质量比  $M/C$  的变化曲线Fig. 6 Change in the ratio of the collision velocity to the characteristic velocity with mass ratio  $M/C$  of flyer plate to explosive

格尼能的计算式, 即

$$E = \frac{1}{\gamma^2 - 1} \left( \frac{\gamma}{\gamma + 1} \right)^\gamma D^2 \quad (10)$$

式中:  $\gamma$  为爆炸产物的多方指数, 对于乳化炸药取 3,  $D$  为炸药爆速.

将式 (10) 代入式 (8) 和式 (9) 可分别计算得到两组试验复板的碰撞速度, 然后再根据几何关系 (公式 1) 即可计算出动态碰撞角, 计算结果见表 3. 由表 3 可知两组试验动态碰撞角一致, 且处于焊接窗口中同一位置, 但采用多层爆炸焊接方法时, 炸药厚度为 10 mm 且 3 份炸药可以焊接 5 块复合板, 而采用传统的爆炸焊接方法时, 炸药厚度为 16 mm 且一份炸药仅能提供一块焊接板, 所以采用五层爆炸焊接的方法可以节约药量 63%.

#### 4.2 复合板宏观分析

五层爆炸焊接通过一次爆炸作业和一块爆炸场地获得了五块焊接板, 有利于提高爆炸焊接工作效率和节约爆炸场地. 所得焊接板如图 7 所示, 其中 1~5 号分别对应焊接装置 (图 4) 中从下往上的五块焊接板. 由图 7 可知, 基复板间没有出现分离、凸起等宏观缺陷出现, 并且经超声波检测, 五块焊接板结合率均达到了 100%. 此外, 在爆炸容器内

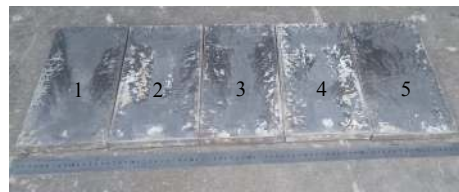


图 7 五层爆炸焊接板实物图

Fig. 7 Picture of welded plates produced by five-layer explosive welding

壁没有发现复合板与容器内壁碰撞的痕迹, 这表明五块复板的运动均被约束, 证明了多层爆炸焊接的可行性. 而传统爆炸焊接试验所获得的复合板经超声波检测也实现了 100% 结合率的焊接.

#### 4.3 结合界面微观形貌

图 8 和图 9 分别为试验 1 和试验 2 中焊接板的结合界面微观形貌. 对于双面爆炸焊接组合, 由于两侧的复板所受炸药载荷一致, 理论上两块复合的结合界面没有差别, 所以任取一块复合板来进行微观分析. 根据爆炸焊接窗口 (图 5), 两组试验的试验参数均位于可焊性窗口以内, 所以焊接窗口预测焊接面将形成没有熔化层的波形结合界面. 金相分析结果验证了这种预测, 由图 8 可知两组试验所得的 SUS304/Q235 结合界面呈现规则的波形, 波长

大约为  $440\ \mu\text{m}$ , 波高大约为  $160\ \mu\text{m}$ , 几乎没有熔化层、孔洞和裂缝等缺陷的出现. 爆炸焊接结合界面通常有“直线”和“波形”两种结合方式, 波形结合方式通常具有更高的结合强度<sup>[17-18]</sup>, 因其结合面积更大, 并且随着炸药量的增加, 结合界面开始从平直界面转变为波形界面<sup>[19]</sup>. 但是当炸药载荷过高时, 大量的能量在碰撞过程中以热增长的形式释放会导致过熔现象<sup>[20]</sup>. 轻微过熔现象会使得熔化物在快速冷却过程中形成孔洞、裂纹等缺陷恶化焊接质量; 而严重的过熔现象会使得自由面拉伸波到达焊接界面时熔化物依旧处于熔化状态而使其被拉伸波分开, 从而导致焊接失败. 两组试验均实现了没有缺陷的高质量波形结合, 体现了所选参数的合理性.

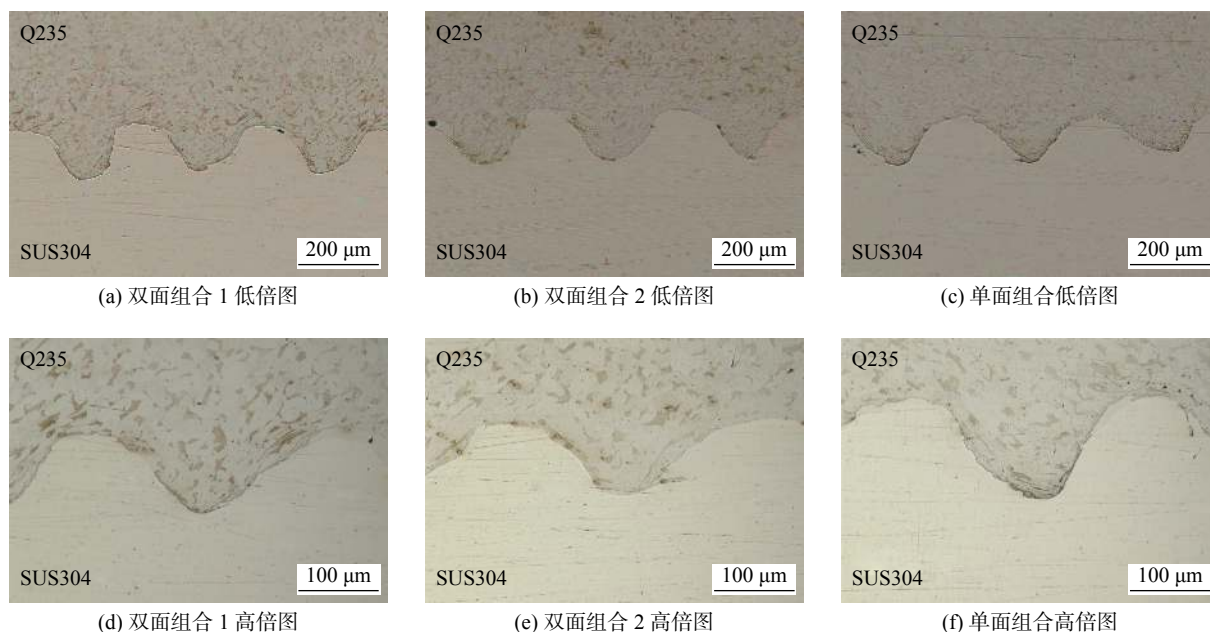


图 8 第一组试验焊接界面微观形貌

Fig. 8 Morphology of weld interface for Test No.1

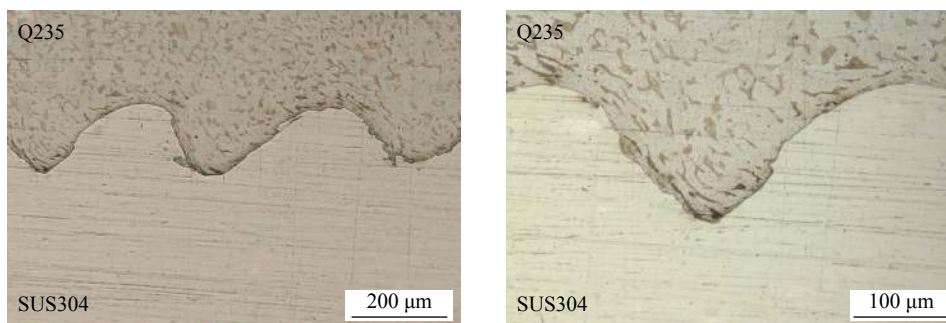


图 9 第二组试验焊接界面微观形貌

Fig. 9 Morphology of weld interface for Test No.2

图 8 和图 9 分别为多层爆炸焊接和传统爆炸焊接二种不同方法所获得的焊接界面, 但两组试验

计算的动态参数一致. 因此, 理论计算表明两组试验将获得一致的结合界面. 试验结果与理论计算吻合良好, 两组试验所获得界面波形大小基本一致. 这表明通过合理的选择焊接参数, 多层爆炸复合可以取得和传统爆炸复合一致的焊接效果.

## 5 结 论

(1) 多层爆炸焊接中各复合板运动互相约束, 避免了双面爆炸焊接中复合板飞散的问题, 且通过合理的选择焊接参数, 获得了高质量的结合界面, 这表明了多层爆炸焊接的具有可行性.

(2) 与传统爆炸焊接方法相比, 多层爆炸焊接可以明显提高炸药的能量利用率, 其中所用五层爆炸焊接可节约炸药量 63%.

(3) 多层爆炸焊接通过一次爆炸作业可以获得多块焊接板, 有利于提高爆炸作业的工作效率和节约爆炸场地.

(4) 理论计算了 SUS304/Q235 的爆炸焊接窗口和复板的碰撞速度, 计算结果表明, 两组试验均处于可焊性窗口以内, 故焊接窗口预测焊接面将形成带有波形的冶金结合界面, 试验和预测结果吻合良好.

## 参考文献:

- [1] Kahraman N, Gülenç B. Microstructural and mechanical properties of Cu-Ti plates bonded through explosive welding process[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 169(1): 67–71.
- [2] Mousavi S A A, Sartangi P F. Experimental investigation of explosive welding of cp-titanium/AISI 304 stainless steel[J]. *Materials and Design*, 2009, 30(3): 459–468.
- [3] 郑远谋. 爆炸焊接和爆炸复合材料的原理及应用 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2007.
- [4] Findik F. Recent developments in explosive welding[J]. *Materials and Design*, 2011, 32(3): 1081–1093.
- [5] 史长根, 尤 峻. 双立式爆炸焊接新方法 [J]. *爆破器材*, 2008, 37(3): 28–30.  
Shi Changgen, You Jun. New technology of double vertical explosive welding[J]. *Explosive Materials*, 2008, 37(3): 28–30.
- [6] 缪广红, 马宏昊, 沈兆武, 等. 蜂窝结构炸药及其应用 [J]. *含能材料*, 2014, 22(5): 693–697.  
Miu Guanghong, Ma Honghao, Shen Zhaowu, *et al.* Explosive with structure of honeycomb and its application[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2014, 22(5): 693–697.
- [7] 史长根, 汪 育, 徐 宏. 双立爆炸焊接及防护装置数值模拟和试验 [J]. *焊接学报*, 2012, 33(3): 109–112.  
Shi Changgen, Wang Yu, Xu Hong. Numerical simulation and experimental research of double vertical explosive welding and its safeguard[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2012, 33(3): 109–112.
- [8] Athar M M H, Tolaminejad B. Weldability window and the effect of interface morphology on the properties of Al/Cu/Al laminated composites fabricated by explosive welding[J]. *Materials and Design*, 2015, 86: 516–525.
- [9] Mendes R, Ribeiro J B, Loureiro A. Effect of explosive characteristics on the explosive welding of stainless steel to carbon steel in cylindrical configuration[J]. *Materials and Design*, 2013, 51(51): 182–192.
- [10] Li X, Ma H, Shen Z. Research on explosive welding of aluminum alloy to steel with dovetail grooves[J]. *Materials and Design*, 2015, 87: 815–824.
- [11] Carvalho G H S F L, Mendes R, Leal R M, *et al.* Effect of the flyer material on the interface phenomena in aluminium and copper explosive welds[J]. *Materials and Design*, 2017, 122: 172–183.
- [12] 杨 明, 马宏昊, 沈兆武, 等. 304 不锈钢/Q235 钢的多面约束装药爆炸焊接 [J]. *含能材料*, 2018, 26(5): 377–382.  
Yang Ming, Ma Honghao, Shen Zhaowu, *et al.* Explosive welding of 304 stainless steel to Q235 steel with multidimensional constraint charge[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2018, 26(5): 377–382.
- [13] Cowan G R, Bergmann O R, Holtzman A H. Mechanism of bond zone wave formation in explosion-clad metals[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1971, 2(11): 3145–3155.
- [14] Abrahamson G R. Permanent periodic surface deformations due to a traveling jet[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1961, 83: 519–528.
- [15] Zukas J A, Walters W P. Explosive effects and applications[M]. Springer, 1998.
- [16] Koch A, Arnold N, Estermann M. A simple relation between the detonation velocity of an explosive and its gurney energy[J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2002, 27(6): 365–368.
- [17] Xia H B, Wang S G, Ben H F. Microstructure and mechanical properties of Ti/Al explosive cladding[J]. *Materials and Design*, 2014, 56(4): 1014–1019.
- [18] Bina M H, Dehghani F, Salimi M. Effect of heat treatment on bonding interface in explosive welded copper/stainless steel[J]. *Materials and Design*, 2013, 45: 504–509.
- [19] Acarer M, Gülenç B, Findik F. Investigation of explosive welding parameters and their effects on microhardness and shear strength[J]. *Materials and Design*, 2003, 24(8): 659–664.
- [20] Hokamoto K, Izuma T, Fujita M. New explosive welding technique to weld[J]. *Metallurgical Transactions A*, 1993, 24(10): 2289–2297.

第一作者简介: 杨 明, 男, 1991 年出生, 博士研究生. 主要从事爆炸焊接方面研究. 发表论文 4 篇. Email: [ym1991@mail.ustc.edu.cn](mailto:ym1991@mail.ustc.edu.cn)

通信作者简介: 马宏昊, 男, 副教授. Email: [hhma@ustc.edu.cn](mailto:hhma@ustc.edu.cn)