**文章编号**：1001-1455(2014)06-0685-06 **DOI**：10.11883/1001-1455(2014)06-0685-06

# 过渡层对锆/钢爆炸复合板剪切强度的影响*

王小绪[1]，赵 铮[2]，王金相[3]，何 勇[1]

(1. 南京理工大学机械工程学院，江苏 南京 210094；
2. 南京理工大学能源与动力工程学院，江苏 南京 210094；
3. 南京理工大学瞬态物理重点实验室，江苏 南京 210094)

**摘要**：为了考察钛作为过渡层提高锆/钢复合板结合强度的有效性，同时给出合理的爆炸焊接碰撞参数，对双层锆/钢和三层锆/钛/钢进行了小倾角法爆炸焊接实验研究。借助金相显微技术测量了复合板结合界面的波形参数，采用光滑粒子动力学法模拟得到了不同位置的碰撞速度和碰撞角，并按照国家标准(GB/T 6396-2008)测量了复合板结合界面的爆炸态及退火态的剪切强度。结果表明：钛作为过渡层能够显著提高锆/钢界面的剪切强度；退火消除加工应力后，锆/钢及钛/钢结合面的剪切强度会有所降低；当锆/钛界面的碰撞速度为 734～805 m/s，碰撞角为 19.8°～20.8°，钛/钢界面的碰撞速度为 803～904m/s，碰撞角为 19.5°～20.5°时，锆/钛/钢三层复合板的锆/钛和钛/钢界面的剪切强度都能高于 140 MPa。

**关键词**：爆炸力学；剪切强度；爆炸焊接；锆/钢复合板；过渡层

**中图分类号**：O389 **国标学科代码**：13035 **文献标志码**：A

锆是一种具有极强耐腐蚀性能的稀有金属，其耐蚀性能优于不锈钢、钛和镍合金，可用于硝酸、盐酸、过氧化氢以及氯化乙烯等化工产品的生产和存储装置。由于锆的价格昂贵，所以通常将锆与钢复合后使用，目前主要通过爆炸焊接技术来制备大面积的锆/钢复合板[1-2]。爆炸焊接是一种高能率固相焊接方法，它是利用炸药爆轰驱动复板与基板高速撞击来实现焊接的。焊接后，在复板与基板的结合面处会产生准正弦波形状的波纹，称为界面波[3]。界面波是判断爆炸焊接结合强度的一个标准，细小而规则的界面波表示基复板结合强度高，无界面波或界面波过大，则表示结合强度较差[4-5]。

锆与钢直接复合时，容易形成脆硬的金属间化合物，降低复合板的结合强度。因此复合时，需要在锆与钢之间添加过渡层[6]。钛、锆为同族元素，材料冶金性能相近，两者爆炸复合不会产生金属间化合物，而钛与钢的爆炸复合工艺成熟，可充分保证结合质量，所以本文选用钛作为锆/钢复合板的过渡层。

本文中，拟对锆/钢和锆/钛/钢进行小倾角法爆炸焊接实验，测量各结合界面的波形参数和剪切强度，分析过渡层及退火处理对剪切强度的影响。另外，采用光滑粒子流体动力学(smoothed particle hydrodynamics，SPH)法模拟锆/钛/钢三层爆炸焊接，计算碰撞速度和碰撞角，获得锆/钛/钢最佳结合质量对应的最优爆炸焊接动态参数。

## 1 小倾角爆炸焊接实验

小倾角法爆炸焊接实验是将复板和基板预置一定的角度，一般为 2°～6°，使复板与基板的间距连续变化，从而在不同加速距离下获得连续变化的碰撞速度和碰撞角[7]，实验装置如图 1 所示。小倾角法可在一次实验中实现多组不同碰撞速度和碰撞角下的爆炸焊接，适合进行爆炸焊接动态参数的优化。实验中采用的复板为 Zr-3 锆板，基板为 Q345 钢板，过渡层为 TA1 钛板。复板尺寸为 400 mm×160 mm×3 mm，基板尺寸为 360 mm×160 mm×10 mm，过渡层尺寸为 360 mm×160 mm×2 mm。采用的

* **收稿日期**：2013-04-08；**修回日期**：2013-08-09
**基金项目**：国家自然科学基金项目(11272158)；部委技术基础项目(C1820130005)；
部委预研支撑基金项目(62201070510)；瞬态物理重点实验室基金项目(9140C300402120C30113)
**作者简介**：王小绪(1972— )，男，博士研究生，副研究员。

炸药为改性铵油炸药，装药密度 0.84 g/cm$^3$，爆速 2.6 km/s。

锆/钢双层实验预置倾角为 3°，最大间距为 19 mm，装药厚度 35 mm。锆/钛/钢三层实验的复板与过渡层间的预置倾角为 3°，最大间距为 19 mm。过渡层与基板平行放置，架高为 8 mm。装药厚度为 40 mm。各板间结合面均经抛光处理，复板与炸药接触表面涂抹黄油防止烧蚀。

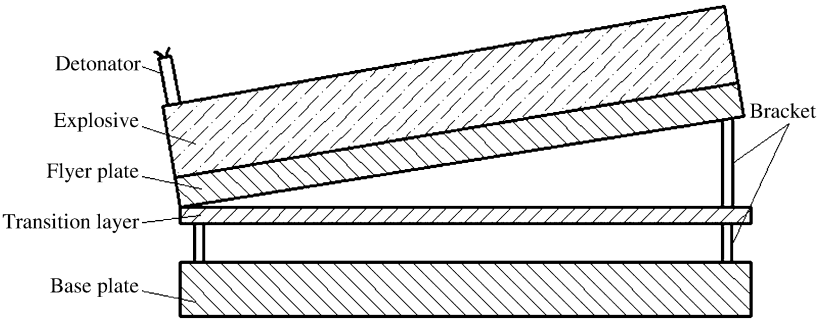


图 1 三层小倾角法爆炸焊接装置示意图

Fig. 1 The equipment of three-layer explosive welding at small angle

爆炸焊接后得到的锆/钢及锆/钛/钢复合板无空鼓和开裂，表面无烧蚀，经超声波检测其结合率为 100%。在每块复合板上沿长度方向切割出 360 mm×20 mm 的长条，再截断成 40 mm 长的小试样，用于金相及剪切强度检测。

## 2 结果与分析

### 2.1 波形参数

金属板爆炸焊接时会在结合界面形成界面波，界面波的大小与爆炸复合板的结合强度有关。一般界面波细小时，结合强度高，无界面波或界面波粗大时，结合强度低。界面波的大小可由波形参数来表示，波形参数包括波长 $s$、波高 $h$ 和比波长 $s/h$。

锆/钢复合板 9 个试样的界面波如图 2 所示。可以看出，试样 1 的结合界面平直无波纹，试样 2 的左半部无波纹，右半部开始出现细小波纹，其他 7 个试样的结合界面都有波纹产生，而且沿爆轰波传播方向界面波越来越明显。试样 9 的右半部没有界面波，这是受爆炸焊接末端稀疏效应的影响所致。

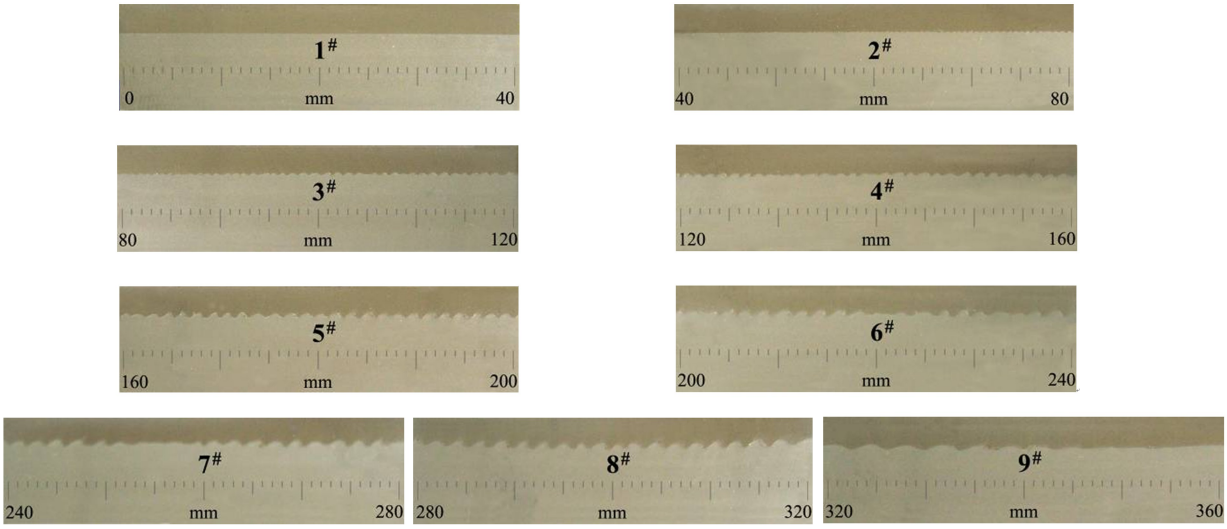


图 2 锆/钢复合板的界面波

Fig. 2 The interfacial waves of the Zr/steel clad plate

为了测量各试样的波形参数，在每个试样的中间位置，对结合界面进行金相显微观察，如图 3 所示。可以看出，试样 1 基本无界面波，其余 8 个试样的界面波形状相似，波长逐渐增大。在图 3 中测量出界面波的波长和波高，具体波形参数见表 1。图中的位置表示界面波波峰至起爆点的距离，在距离起爆点 60 mm 处界面波的波长、波高和比波长均发生了突变，说明开始产生界面波。此后随着远离起爆点，波长和波高逐渐增加，比波长先减小后增加。

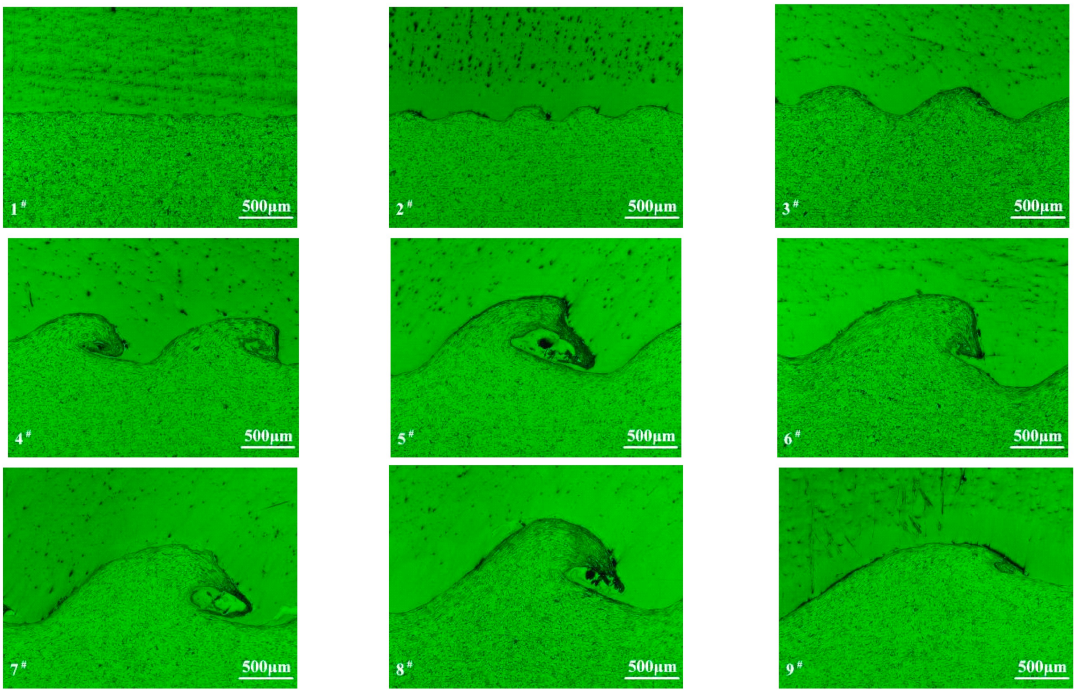


图 3　锆/钢复合板界面的形貌

Fig. 3　The interfacial morphology of the Zr/steel clad plate

**表 1　复合板的波形参数**

**Table 1　The interfacial wave parameters of the clad plates**

| 试样编号 | $s$/mm | $h$/mm | $s/h$ | $s$/mm | $h$/mm | $s/h$ | $s$/mm | $h$/mm | $s/h$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 锆/钢界面 | | | 锆/钛界面 | | | 钛/钢界面 | | |
| 1 | 0.189 | 0.011 | 17.18 | 0 | 0 | 0 | 0.500 | 0.111 | 4.50 |
| 2 | 0.511 | 0.133 | 3.84 | 0.120 | 0.110 | 1.09 | 0.889 | 0.200 | 4.45 |
| 3 | 1.056 | 0.278 | 3.80 | 0.222 | 0.167 | 1.33 | 0.833 | 0.189 | 4.41 |
| 4 | 1.444 | 0.411 | 3.51 | 0.389 | 0.278 | 1.40 | 1.111 | 0.222 | 5.00 |
| 5 | 1.944 | 0.711 | 2.73 | 0.445 | 0.333 | 1.34 | 1.278 | 0.278 | 4.60 |
| 6 | 2.111 | 0.833 | 2.53 | 0.556 | 0.389 | 1.43 | 1.444 | 0.333 | 4.34 |
| 7 | 2.333 | 0.722 | 2.23 | 0.611 | 0.444 | 1.38 | 1.611 | 0.333 | 4.84 |
| 8 | 2.444 | 0.822 | 2.97 | 0.667 | 0.500 | 1.33 | 1.667 | 0.333 | 5.00 |
| 9 | 2.833 | 0.777 | 3.64 | 0.844 | 0.510 | 1.65 | 1.889 | 0.333 | 5.67 |

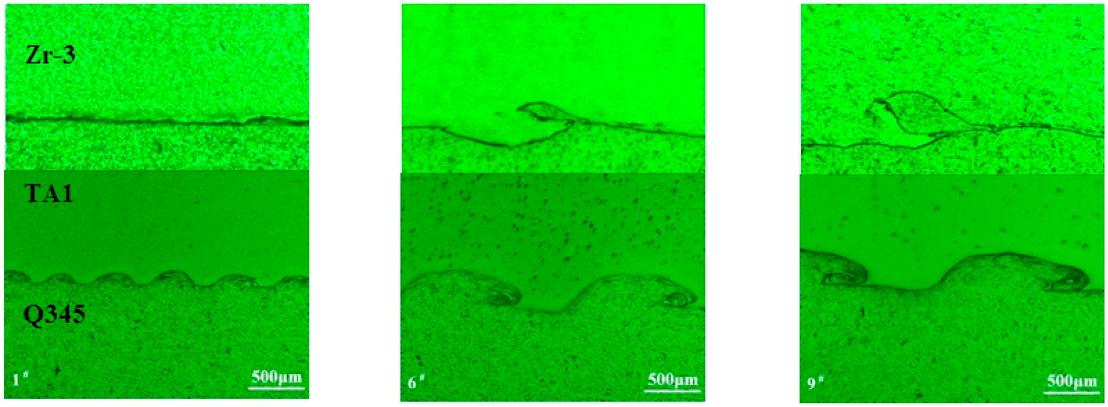


图 4　锆/钛/钢复合板界面的形貌

Fig. 4　The interfacial morphology of the Zr/Ti/steel clad plate

采用同样方法测量锆/钛/钢试样的界面波波形参数。锆/钛/钢复合板包含 2 个界面,锆/钛界面和钛/钢界面,所以分别对 2 个界面进行金相显微观察,然后将同一位置 2 个界面的图像合成在一起,如图 4 所示。由于篇幅所限,只列举了 1、6 和 9 号试样。锆/钛界面在 20 mm 处无界面波,在 60 mm 开始出现微小界面波,此后波长和波高逐渐增加,比波长为 1.4 左右。钛/钢界面在 20 mm 处就形成了界面波,此后波长逐渐增加,波高增加到 0.333 mm 后,就不再变化,其比波长值为 5.0 左右。锆/钛/钢复合板的波形参数见表 2。

**表 2 复合板结合界面的剪切强度**

**Table 2 The interfacial shear strength of clad plate**

| 试样编号 | $\sigma_s$/MPa | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 锆/钢界面 | | 锆/钛界面 | | 钛/钢界面 | |
| | 爆炸态 | 退火态 | 爆炸态 | 退火态 | 爆炸态 | 退火态 |
| 1 | 57 | 41 | 63 | 185 | 47 | 160 |
| 2 | 77 | 68 | 124 | 180 | 110 | 160 |
| 3 | 103 | 94 | 150 | 193 | 138 | 166 |
| 4 | 115 | 101 | 163 | 163 | 147 | 132 |
| 5 | 142 | 121 | 155 | 191 | 144 | 157 |
| 6 | 155 | 131 | 164 | 217 | 148 | 179 |
| 7 | 124 | 110 | 158 | 183 | 143 | 165 |
| 8 | 84 | 78 | 166 | 156 | 146 | 131 |
| 9 | 51 | 46 | 133 | 131 | 115 | 112 |

## 2.2 剪切强度

爆炸复合板的结合强度是评价复合板质量的重要参数,通常用剪切强度 $\sigma_s$ 来表示。复合板的剪切强度一般根据 GB/T 6396-2008[8] 进行检测。按照该标准对锆/钢和锆/钛/钢试样进行加工,复合板剪切强度检测装置及剪切后的试样如图 5 所示。

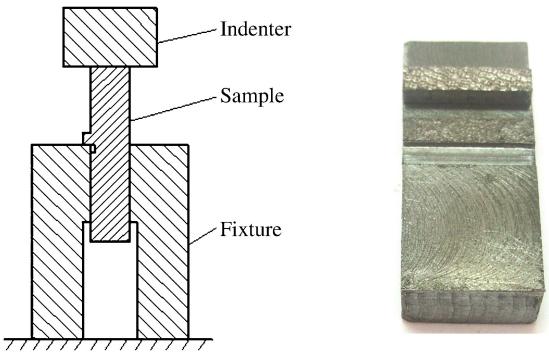


图 5 复合板剪切强度测试装置示意图

Fig. 5 The testing device for shear strength

各试样结合界面的剪切强度见表 2,其中退火态是指经过退火处理消除了加工应力的试样,退火温度为 580 ℃,保温 1 小时。爆炸态为没有经过退火处理的试样。从表 2 可以看出,退火后复合板结合界面的剪切强度降低约 20%。

根据锆/钢复合板行业标准 YST 777-2011[9] 得知,退火态锆/钢复合板结合界面的剪切强度应高于 140 MPa。由表 2 可以看出:在没有过渡层的情况下,锆/钢复合板不同试样的退火态剪切强度均低于 140 MPa;而增加了过渡层后,锆/钛/钢复合板的 5、6 和 7 号试样的锆/钛界面和钛/钢界面的剪切强度均高于 140 MPa,其中锆/钛/钢试样 6 在 2 个界面上的剪切强度均为最大值,锆/钛界面的剪切强度为 148 MPa,钛/钢界面的剪切强度为 179 MPa。这表明钛作为过渡层可提高锆/钢复合板的剪切强度,使之达到行业标准要求。另外,对比表 1 可知:当锆/钛界面波波长约为 0.5 mm,钛/钢界面波波长约为 1.5 mm 时,结合界面的剪切强度较高。

## 3 数值模拟

为了获得小倾角实验的碰撞速度和碰撞角,采用 SPH 法对锆/钛/钢三层爆炸焊接进行数值模拟。SPH 法是一种拉格朗日无网格方法,采用带有各种物理量的粒子构成离散计算域。任意粒子 $i$ 的物理量 $f_i$ 可以通过其周围粒子插值得到。SPH 法不用定义接触,各材料的粒子就可实现相互作用。材料

的变形不依赖网格，能够避免有限元法的网格畸变，因此被广泛应用于爆轰、侵彻等各种大变形问题的计算[10-11]。李晓杰等[12]和 Wang Xiao 等[13]将该方法用于爆炸焊接研究，经与实验结果比较，证明计算精度较高。

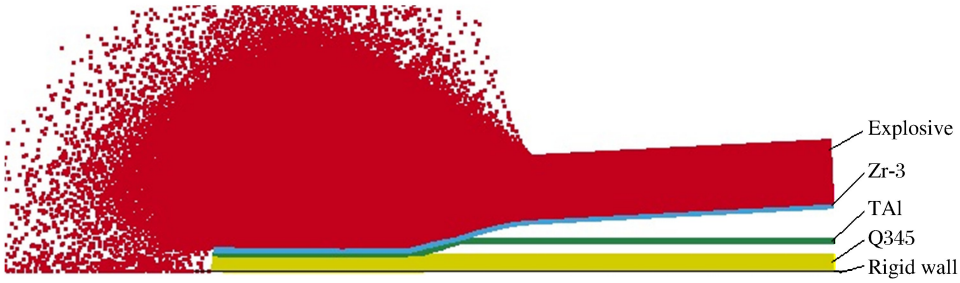


图 6 锆/钛/钢爆炸焊接的 SPH 模型

Fig. 6 The SPH model of explosive welding for Zr/Ti/steel clad plate

采用 SPH 法对锆/钛/钢小倾角法爆炸焊接进行数值模拟，质点模型由 5 部分组成(见图 6)：炸药、锆板、钛板、钢板和刚性壁，其中刚性壁模拟爆炸焊接时钢板下方的垫板。爆炸焊接时架高的阻力可忽略不计，所以模型中省略了架高。起爆点位于炸药左上角。由于是对整个爆炸焊接过程进行宏观模拟，质点间距较大，所以没有模拟出界面波。按照表 1 中各试样的中点位置，在锆板和钛板下表面依次各取 9 个点，间隔均为 40 mm，计算得到各点的碰撞速度 $v$ 和碰撞角 $\beta$，见表 3。

通过模拟，得出了锆/钛/钢 5、6 和 7 号试样的碰撞速度和碰撞角。由此得到一组合理的锆/钛/钢碰撞参数，即锆/钛界面的 $v$ 为 734～805 m/s，$\beta$ 为 19.8°～20.8°；钛/钢界面的碰撞速度为 803～904 m/s，碰撞角为 19.5°～20.5°。

**表 3 锆/钛/钢界面的碰撞参数**

**Table 3 Impact parameters for Zr/Ti/steel interface**

| 试样 | $v$/(m·s$^{-1}$) | $\beta$/(°) | $v$/(m·s$^{-1}$) | $\beta$/(°) |
|---|---|---|---|---|
| | 锆/钛界面 | | 钛/钢界面 | |
| 1 | 325 | 5.2 | 485 | 3.3 |
| 2 | 501 | 10.1 | 554 | 8.5 |
| 3 | 602 | 13.5 | 684 | 14.2 |
| 4 | 680 | 17.0 | 755 | 16.8 |
| 5 | 734 | 19.8 | 803 | 19.5 |
| 6 | 774 | 20.4 | 871 | 20.2 |
| 7 | 805 | 20.8 | 904 | 20.5 |
| 8 | 823 | 21.2 | 923 | 20.9 |
| 9 | 850 | 21.5 | 939 | 21.3 |

## 4 结　论

通过对锆/钛/钢进行了小倾角法爆炸焊接实验及数值模拟，得出如下结论：(1)钛板作为过渡层，可显著提高锆/钢复合板的剪切强度。(2)小倾角实验可获得波长连续变化的界面波，当锆/钛界面波波长约为 0.5 mm，钛/钢界面波波长约为 1.5 mm 时，结合界面的剪切强度较高。(3)当锆/钛界面的碰撞速度为 734～805 m/s，碰撞角为 19.8°～20.8°，钛/钢界面的碰撞速度为 803～904 m/s，碰撞角为 19.5°～20.5°时，锆/钛/钢三层复合板的锆/钛和钛/钢界面的剪切强度都能高于 140 MPa。

## 参考文献：

[1] 王应植，袁彪，张林贤，等. 锆-钢复合板压力容器制造技术研究[J]. 石油机械，2008，36(6)：28-31.
Wang Ying-zhi, Yuan Biao, Zhang Lin-xian, et al. Study of manufacturing technology of zirconium-steel clad plate paressure vessel[J]. China Petroleum Machinery, 2008, 36(6): 28-31.

[2] 孙万仓，贺旭明，孙胜奇. 锆/钢复合板设备结构设计分析[J]. 钛工业进展，2012，29(1)：39-41.
Sun Wan-cang, He Xu-ming, Sun Sheng-qi. A brief introduction on the structure design of Zr-steel clad plate equipments[J]. Titanium, 2012, 29(1): 39-41.

[3] Findik F. Recent developments in explosive welding[J]. Materials and Design, 2011, 32(3): 1081-1093.

[4] Crossland B. Explosive welding of metals and its application[M]. Oxford: Oxford University Press, 1982: 35-38.

[5] Wronka B. Testing of explosive welding and welded joints: Wavy character of process and joint quality[J]. International Journal of Impact Engineering, 2011, 38(5): 309-313.

[6] 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,2007:286-287.
[7] 邵丙璜,张凯.爆炸焊接原理及其工程应用[M].大连:大连工学院出版社,1987:301-305.
[8] 中国国家标准化管理委员会.复合钢板力学及工艺性能实验方法[S].北京:中国标准出版社,2008.
[9] 中国工业和信息化部.锆-钢复合板[S].北京:中国标准出版社,2011.
[10] Liu M B, Liu G R, Lam K Y, et al. Meshfree particle simulation of the detonation process for high explosive in shaped charge unlined cavity configurations[J]. Shock Waves, 2003,12(6):509-520.
[11] Liu G R, Liu M B. Smoothed particle hydrodynamics: A meshfree particle method[M]. Singapore: World Scientific, 2003:20-23.
[12] 李晓杰,莫非,闫鸿浩,等.爆炸焊接界面波的数值模拟[J].爆炸与冲击,2011,31(6):653-657.
Li Xiao-jie, Mo Fei, Yan Hong-hao, et al. Numerical simulation of interface waves in steel explosive welding[J]. Explosion and Shock Waves, 2011,31(6):653-657.
[13] Wang Xiao, Zheng Yuan-yuan, Liu Hui-xia, et al. Numerical study of the mechanism of explosive/impact welding using smoothed particle hydrodynamics method[J]. Materials and Design, 2012,35:210-219.

# Influences of transition layer on shear strength of Zr/steel explosive clad plate*

Wang Xiao-xu[1], Zhao Zheng[2], Wang Jin-xiang[3], He Yong[1]
(1. *School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*;
2. *School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*;
3. *Science and Technology on Transient Physics Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*)

**Abstract**: In order to investigate the influence of the transition layer on the shear strength of the Zr/steel explosive clad plate and obtain the rational impact parameters of explosive welding, the difference of the Zr/steel and Zr/Ti/steel clad plates was compared by the explosive welding experiments at small angles. The interfacial wave parameters were measured by a metallographic microscope, and the impact velocities and impact angles were calculated by the smoothed particle hydrodynamics meshfree method. The shear strengths of the explosive and the annealed samples from the clad plates were measured according to the national standard (GBT 6396-2008). The results indicate that titanium as the transition layer can increase the shear strength of the Zr/steel interface and annealing treatment can decrease the shear strength. When the impact velocity is 734－805 m/s and the impact angle is 19.8°－20.8°, the shear strength of the Zr/Ti interface can be higher than 140 MPa. When the impact velocity is 803－904 m/s and the impact angle is 19.5°－20.5°, the shear strength of the Ti/steel interface can also be higher than 140 MPa.

**Key words**: mechanics of explosion; shear strength; explosve welding; Zr/steel cald plate; transition layer

* Received 8 April 2013; Revised 9 August 2013
Supported by the National Natural Science Foundation of China (11272158)
Corresponding author: Wang Jin-xiang, wjxdlut@sina.com

(责任编辑 张凌云)