

文章编号: 1001-1455(2012)01-0103-05

钛/钢复合板爆炸焊接实验*

张越举^{1,2,3}, 杨旭升¹, 李晓杰², 王 勇³, 姚 政³, 肖 辉¹, 赵恩军³

(1. 沈阳军区司令部工程科研设计院, 辽宁 沈阳 110162;

2. 大连理工大学工业装备分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116023;

3. 大连船舶重工集团爆炸加工研究所有限公司, 辽宁 大连 116021)

摘要: 以 3 mm 厚的 TA2 钛板和 26 mm 厚的正火态 Q345R 为材料, 通过爆炸焊接实验, 对钛/钢复合板爆炸焊接的动态参数进行了研究。结合复合板结合界面特征、复合板结合强度(剪切强度)以及界面波的金相组织, 讨论了钛/钢爆炸焊接时获得高强度结合和规则的界面结合波状形态的条件。对于 3 mm 厚 TA2 与 26 mm 厚正火态 Q345R, 该条件是动态碰撞角 $\beta > 17^\circ$, 动态碰撞速度 $v_p > 760$ m/s。根据界面波及基板轧制金相组织形态, 分析了形成界面波的机理, 认为射流阻碍复板连续碰撞基板是形成界面波的一个主要原因。

关键词: 爆炸力学; 界面波; 爆炸焊接; 钛/钢复合板; 动态参数

中图分类号: O389

国标学科代码: 1303599

文献标志码: A

在各种金属复合材料组合中, 钛/钢复合材料是较特殊的一类复合材料。这种复合材料对爆炸焊接的工艺参数要求较高, 也就是可焊性窗口较小。经典的可焊性窗口是动态碰撞角 β 和碰撞点移动速度 v_{cp} 坐标下 4 条曲线构成的区域^[1], 也可以是动态碰撞速度 v_p 和 v_{cp} 坐标下 4 条曲线构成的区域^[2]。这二者并没有本质区别, 这是由于在爆炸焊接条件下, 存在 $v_p = f(\beta)$ 关系。然而在爆炸焊接的实践中, 我们发现控制金属爆炸焊接优劣的工艺参数主要表现在 v_p , 尽管 v_{cp} 也是一个非常重要的控制参数, 但 v_{cp} 只要在可焊性窗口确定的范围内, v_{cp} 变化对焊接质量的影响没有 v_p 显著。关于这点, 裴大荣^[3] 认为钛/不锈钢爆炸焊接中剪切滑移会导致结合强度的降低, 而 v_{cp} 不是直接影响剪切滑移的因素, 因为不同 v_{cp} 下都会产生剪切滑移波; 直接影响剪切滑移的因素是碰撞速度 v_p 。遗憾的是, 他并没有进一步给出 v_p 与结合强度的对应关系。对于钛/钢复合板爆炸焊接的可焊性窗口, 裴大荣等^[4] 用 TA2 与 Q235B 的材料组合进行了大量的实验研究, 并给出了具体的范围: $1.8 \text{ km/s} < v_{cp} < 2.6 \text{ km/s}$, $11^\circ < \beta < 17^\circ$ 。然而, 我们在实验过程中, 发现对 3 mm 厚的 TA2 钛板与正火态的 Q345R 进行爆炸焊接时, 动态角度在这个范围内很难得到良好的焊接结合。本文中, 因此进行了 3 mm 厚 TA2 和 26 mm 厚 Q345R 材料之间的爆炸焊接实验。

1 实验材料及参数

钛 TA2 中其余元素的质量分数分别为: $w(\text{Fe}) = 0.03\%$, $w(\text{C}) = 0.02\%$, $w(\text{N}) = 0.01\%$, $w(\text{H}) = 0.001\%$, $w(\text{O}) = 0.15\%$, $w(\text{其他}) = 0.10\%$; 钢 Q345R 中其余元素的质量分数分别为: $w(\text{C}) = 0.15\%$, $w(\text{Si}) = 0.32\%$, $w(\text{Mn}) = 1.43\%$, $w(\text{P}) = 0.012\%$, $w(\text{S}) = 0.004\%$, $w(\text{Al}) = 0.04\%$ 。采用粉状膨化铵油炸药为主, 以一定比例的珍珠岩和工业食盐为稀释剂进行炸药爆速调节, 使炸药在一定厚度条件下的爆速处于设计的爆速范围内 ($2.2 \sim 2.6 \text{ km/s}$)。

以工业生产中普遍采用的平行安装结构进行爆炸焊接实验。复板和基板的板幅全部采用 $(3+26) \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 的规格尺寸。爆炸焊接后在距离复合板末端 80 mm 处切割, 将距末端 80 mm 复合板的界面剥离, 以观察界面波形态。在剩余复合板上按照规范 ASTM B898-05 加工剪切试样, 进行界面结合强度检验。取样示意图如图 1 所示。

* 收稿日期: 2010-10-19; 修回日期: 2011-01-15

作者简介: 张越举(1974—), 男, 博士, 工程师。

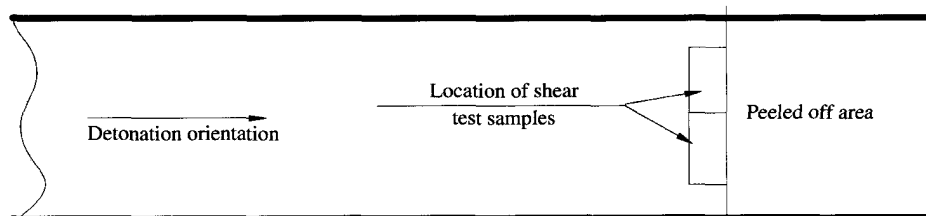


图 1 取样位置示意图

Fig. 1 The schematics of the location of experiment samples

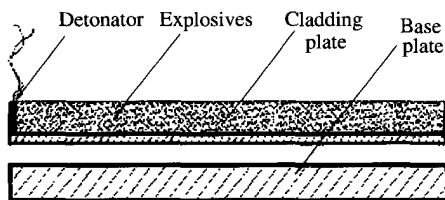


图 2(a) 爆炸焊接装置

Fig. 2(a) The explosive welding set

爆炸焊接采用平行法布置,如图 2 所示。炸药平铺在飞板上,采用等厚度布药模式。从试板的一端起爆炸药。

参照文献[4]给出的钛/钢爆炸焊接实验窗口,将炸药的爆速控制在 $2.4 \sim 2.5 \text{ km/s}$ 范围内,通过调整炸药的厚度和基、复板间的距离,获得不同条件的爆炸焊接复合板。具体爆炸焊接参数列于表 1 中,表中 t_e 为炸药厚度, ρ 为炸药密度, v_d 为爆轰速度, h 为间隔距离。

2 实验结果及分析

爆炸焊接后,对钛/钢复合板按照规范 ASTM A578/A578M 进行超声波探伤,除边界部位存在边界效应导致的贴合不良(一般不超出 20 mm),7 次实验所得钛/钢复合板结合都非常好,其余部位均达到完全贴合。

在所进行的 7 次实验中,其中实验 2~3、4~5、6~7 这 3 组 6 次实验各采用同批次炸药进行爆炸焊接。表 2 为剪切强度实验结果,表中 σ_1 、 σ_2 为同次实验两个部位的剪切强度, β 、 v_p 根据文献[5]

方法计算得出。由表 2 可见:实验 2~3 不仅爆炸焊接参数相同,而且钛/钢复合板的结合强度也非常接近,都具有高的剪切强度。尽管实验 4~5 采用同一炸药和炸药厚度,由于基复板间距存在差别,致使爆炸焊接中复板斜碰撞基板的速度和角度都有所不同,这导致了复合板结合性能的明显差别。结合实验所得复合板结合界面的宏观波状结合形态(见图 3),可以很容易地看到,高强度对应着规则的波状结合形态。界面波曲线越连续、越清晰,基复板的结合就越紧密,强度就越高,分离就越困难。需要指出的是,图 3 中实验 5 的界面波曲线虽然也很规则,连续性也很好,但由于波幅较小,波长较短,因此结合性

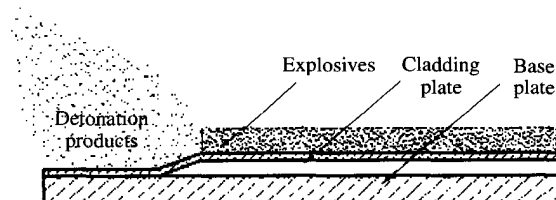


图 2(b) 爆轰过程

Fig. 2(b) Explosive welding process

表 1 爆炸焊接实验参数

Table 1 Parameters of explosive welding experiments

No	t_e/mm	$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	$v_d/(\text{km}/\text{s})$	h/mm
1	30	0.50	2.500	14
2	38	0.62	2.447	10
3	38	0.62	2.447	10
4	40	0.65	2.500	10
5	40	0.65	2.500	8
6	25	0.85	2.450	12
7	25	0.85	2.450	6

表 2 剪切强度实验结果及动态参数

Table 2 The results of shear experiments and the dynamic parameters

No	σ_1/MPa	σ_2/MPa	$\beta/(\circ)$	$v_p/(\text{m}/\text{s})$
1	101	55	16.3	709
2	387	297	18.4	785
3	318	373	18.4	785
4	314	289	18.7	815
5	166	171	17.5	760
6	210	199	19.0	806
7	123	152	17.3	737

能比实验4的差。以往的研究^[6-7]认为,爆炸焊接界面波的波长 λ 与动态碰撞角 β 之间存在关系

$$\lambda = k\delta_1 \sin^2(\beta/2) \quad (1)$$

式中: k 为因数, δ_1 为复板厚度。

而张登霞等^[8]通过量纲一分析和实验研究认为,爆炸焊接界面波的波长 λ 不仅与动态碰撞角有关,而且还受材料比强度 $\bar{\sigma}$ 的影响

$$\lambda = \begin{cases} \delta_1 k (\beta/2)^{2.1} \exp(-13.6\bar{\sigma}) & 23 \leq 1/\bar{\sigma} \leq 50 \\ \delta_1 k_1 (\beta/2)^{2.1} & 1/\bar{\sigma} > 50 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\bar{\sigma} = 2\sigma_y / (\rho v_i^2)$, σ_y 为材料静力学强度, v_i 为炸药爆速, k, k_1 为因数。

从实验4~5的界面波特征上看,式(1)似乎是成立的,至少是与现象一致的函数关系,式(2)也反映了碰撞角度对波长的影响,同时表明在一定比强度范围内,材料强度对波长也有一定的影响。但将实验5、7进行比较,就会发现,两次实验的动态碰撞角相差甚小,实验所用基复板材料各为同一张整板,因而材料静力学强度不会有很大变化,实验5、7所用炸药的爆速也相差很小,而复合板界面结合的波状形态差异很大。这说明,影响钛/钢爆炸焊接界面结合波状形态的因素不仅仅是动态碰撞角和材料强度。就目前的实验结果而言,可以推测,动态碰撞速度也是影响界面波波参数的重要因素。对照动态参数 v_p 和界面的波状形态,可以得出,对于3 mm厚TA2和Q345R组合,要形成连续规则的宏观界面波状结合,爆炸焊接的动态参数 v_p 最小应该达到760 m/s,而且与此相对应的动态碰撞角应大于17°。

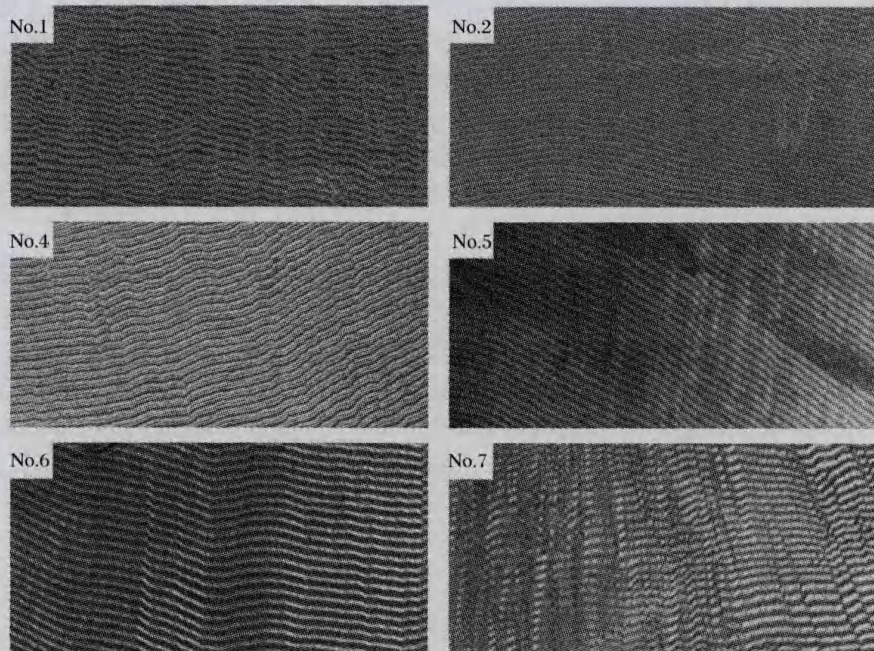


图3 钛/钢复合板界面宏观形貌

Fig. 3 The macroscopic morphology of titanium/steel clad plate interface

由我们的实验结果分析所得的结论与文献^[4]实验所得到的参数相差很大。该文献中指出,钛/钢爆炸焊接最佳的焊接参数窗口为: $11^\circ < \beta < 17^\circ$, $1.6 \text{ km/s} < v_d < 2.6 \text{ km/s}$, 其中 v_d 为炸药爆轰速度。显然,我们的实验获得了正如文献指出的具有“界面无熔化或只存在极少量的波阻漩涡区、没有夹杂和不出现有损结合强度的第三界面层的波形结合”的高强度结合界面(见图4),而界面剪切强度高的实验对应着动态弯折角超出文献给出的窗口范围。导致这种实验结果差别的原因可能是实验采用的材料不同。对于爆炸焊接的材料来说,板材的加工状态(冷轧、热轧、酸洗、退火、正火等)对材料表面物理力学性能有较明显的影响。这对爆炸焊接的参数有一定的影响。

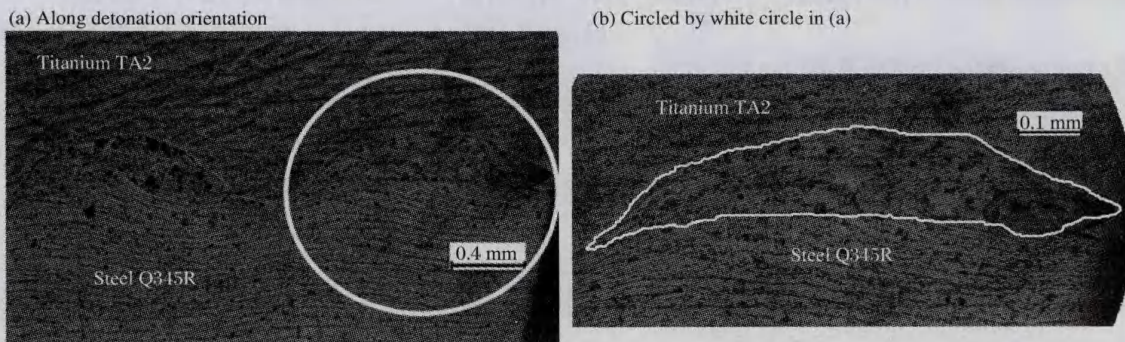


图4 实验2 钛/钢复合板沿爆轰方向截面的金相组织
Fig. 4 Metallographic structures of titanium/steel plate of No. 2

3 界面波形成机理分析

按照爆炸焊接的流体动力学理论,爆炸焊接时,复板在炸药的驱动下发生强烈的塑性变形,并与基板以高速斜碰撞,在碰撞点的附近,基板近表面薄层金属产生剧烈的挤压剪切塑性变形,使碰撞点处及附近温度瞬间升高,高温使这薄层流体特性的金属黏性降低。高压与高速度碰撞使碰撞点处金属发生流变,黏性降低,这构成了金属流体以高速喷射的条件。而喷射的金属流体同时具有一定的压力阻碍复板高速斜碰撞基板。由于金属射流的阻碍,复板不能连续与金属发生斜碰撞,这造成了从基板喷射的金属射流也具有不连续性。金属射流的压力随着离开碰撞点的距离增加,射流的压力逐渐降低,同时,尽管金属射流的黏性有所降低,但仍然属于高黏性流体,本身对于射流具有阻滞作用。在压力降低和阻滞力共同作用下,从基板喷射的射流最终以漩涡的形式保留在界面上,这时复板再次与基板发生斜碰撞,基板再次产生金属射流。如此周而复始,形成了界面上独特的波状结合界面特征。

这个结论可以从钛/钢爆炸焊接的实验结果(见图4(b))得到印证。基层钢板的轧制层状组织结构在基层侧波状结合形态的部分变得模糊不清(图中白色曲线包围的部分),这就是从基层形成的射流的一部分。这部分射流阻碍了复板连续斜碰撞基板的行为,同时由于黏性和不连续的斜碰撞以及复板的压制作用,这部分射流头部发生了卷曲并同时被挤压在界面上,形成了所谓的漩涡结构。另外,从基板轧制的组织结构还可以清晰地发现,在波头前方和所谓的漩涡与基层接触的位置处,基层层状曲线一直延续到波的结构内部。这说明基板表层材料在高速斜碰撞条件下存在着非常高的变形不均匀性,形态类似高黏性流体特征。

4 结 论

- (1) 要获得高强度的 3 mm 厚 TA2 与正火态 Q345R 爆炸复合板,焊接动态参数应为: $\beta > 17^\circ$, $v_p \geq 760$ m/s;
- (2) 在一定的碰撞角度范围内,动态碰撞速度 v_p 是影响界面波波参数的重要因素;
- (3) 碰撞点前方射流阻碍复板连续碰撞基板可能是爆炸焊接界面波形成的重要原因之一。

参考文献:

- [1] 张蕾,张振逵. 爆炸焊接性窗口研究与进展[C]//第八届全国爆炸力学学术会议论文集. 江西吉安, 2007: 439-444.
- [2] 李晓杰,杨文彬,奚进一,等. 双金属爆炸焊接下限[J]. 爆破器材, 1999, 28(3): 22-25.
LI Xiao-jie, YANG Wen-bin, XI Jin-yi, et al. The low limitation of explosive welding double metals[J]. Explosive Materials, 1999, 28(3): 22-25.
- [3] 裴大荣. 爆炸焊接钛-不锈钢接头冶金结合的某些特点[J]. 稀有金属材料与工程, 1986, 4: 28-31.

- PEI Da-rong. Some metallurgical characters of explosive welding titanium-stainless steel[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1986, 4: 28-31.
- [4] 裴大荣, 张军良. 钛-钢板爆炸焊接窗口及应用[J]. 稀有金属材料与工程, 1985, 2: 17-20.
- PEI Da-rong, ZHANG Jun-liang. The explosive welding-ability window and its application to titanium/steel clad plate[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1985, 2: 17-20.
- [5] 李晓杰, 杨文彬, 奚进一. 爆炸焊接飞板运动速度的计算[J]. 爆破器材, 1998, 27(6): 1-4.
- LI Xiao-jie, YANG Wen-bin, XI Jin-yi. The calculation to the moving velocity of the fly plate in explosive welding [J]. Explosive Materials, 1998, 27(6): 1-4.
- [6] Godunov S K, Deribas A A, Kozin N S. Wave formation in explosive welding[J]. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 1971, 12(3): 398-406.
- [7] 郑哲敏, 谈庆明. 爆炸复合界面波的形成机理[J]. 力学学报, 1989, 21(2): 129-139.
- ZHENG Zhe-min, TAN Qing-ming. The mechanism of wave forming in the explosive welding interface[J]. Acta Mechanica Sinica, 1989, 21(2): 129-139.
- [8] 张登霞, 李国豪, 周之洪, 等. 材料强度在爆炸焊接界面波形成过程中的作用[J]. 力学学报, 1984, 16(1): 73-80.
- ZHANG Deng-xia, LI Guo-hao, ZHOU Zhi-hong, et al. Effect of material strength on forming process of explosive welding interface wave[J]. Acta Mechanica Sinica, 1984, 16(1): 73-80.

An experimental research on explosive welding of titanium/steel clad plate *

ZHANG Yue-ju^{1,2,3}, YANG Xu-sheng¹, LI Xiao-jie², WANG Yong³,
YAO Zheng³, XIAO Hui¹, ZHAO En-jun³

(1. *Engineering Research Institute, Shenyang Military Area Command,*
Shenyang 110162, Liaoning, China;

2. *State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment,*
Dalian University of Technology, Dalian 116023, Liaoning, China;

3. *Dalian Shipbuilding Industry Explosive Processing Research Co. LTD.,*
Dalian 116021, Liaoning, China)

Abstract: By using 3 mm thick titanium TA2 and 26 mm thick normalized steel Q345R, explosive welding experiments were performed, and the dynamic parameters were studied. In light of the characters of bonding area of the clad plate, bond strength (shear strength) and the metallurgical structures of interface waves, the conditions responsible for high bond strength and more regular interface wave morphology were discussed. For 3 mm thick titanium TA2 and 26 mm thick normalized steel Q345R, the condition is the dynamical bend angle $\beta > 17^\circ$, and dynamical impact velocity $v_p > 760$ m/s. The mechanism responsible for interface waves was discussed according to the metallurgical structures of interface waves and the striation of the base plate. The conclusion is that the jet prevents the clad plate from continuously impacting the base plate, which is one of the main reasons why the interface wave is always observed.

Key words: mechanics of explosion; interface wave; explosive welding; titanium/steel clad plate; dynamic parameters

* Received 19 October 2010; Revised 15 January 2011

Corresponding author: ZHANG Yue-ju, zhangyueju@dlwri.com