

钛-钢爆炸复合板热处理过程中的扩散行为及数学模型

江海涛¹, 阎晓倩¹, 刘继雄², 曾尚武¹, 段晓鸽¹

(1. 北京科技大学, 北京 100083)

(2. 宝钛集团有限公司, 陕西 宝鸡 721014)

摘要: 利用光学显微镜、扫描电子显微镜、X 射线衍射仪、俄歇电子能谱分析仪和拉剪实验, 研究了不同的热处理加热温度和保温时间对钛-钢爆炸复合板界面组织特征和性能的影响。热处理温度为 750、850、950 °C, 保温时间为 30、60、120 min。结果表明: 热处理过程加速了组织转变和界面元素扩散。界面元素扩散主要形成的化合物为 TiC 和 Ti-Fe 金属间化合物 (Fe₂Ti/FeTi)。随着温度的升高, 界面扩散层厚度增加, 复合板剪切强度下降。根据实验数据, 提出了界面扩散层厚度和剪切强度与加热温度和保温时间的函数关系。

关键词: 钛钢爆炸复合板; 热处理; 扩散行为; 力学性能

中图分类号: TG156.24, TB331

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2015)04-0972-05

钛钢复合板充分利用钛材的耐蚀性能和钢材的力学性能, 获得了良好的综合性能, 降低了材料成本。在化工、海水淡化、真空制盐和电厂脱硫烟筒等领域得到广泛应用^[1-7]。爆炸法是生产钛钢复合板的主要方法之一。目前对未热处理的钛钢复合板断裂行为和力学行为研究较多^[8-10]。颜学柏等^[11]研究了热处理对钛钢爆炸复合板性能的影响, 结果表明 850 °C 以上加热使复合板的剪切强度和分离强度大大降低。对热处理后的钛钢爆炸复合板界面扩散行为的定性研究较多, Mousavi 等^[12]研究了不同热处理工艺下钛钢爆炸复合板扩散区形成的界面金属间化合物的组成和厚度。Kundu 等^[13]研究了工业纯钛和不锈钢复合材料在不同温度不同时间下的扩散行为。Tadashi 等^[14]研究了不同碳含量的钢与钛合金扩散焊接, 在不同温度下界面元素的不同扩散行为。然而目前对扩散的定量行为分析较少, 且有这方面发展的趋势, 一些国内外学者^[15, 16]已经提出了其他金属复合材料的扩散数学模型。

本工作主要研究在不同热处理条件下, 钛钢爆炸复合板的界面组织转变和结合性能的变化, 引入了定量分析的方

法, 得到复合板组织性能与热处理条件参数的函数关系。

1 实验

实验材料是爆炸复合工艺生产的钛钢爆炸复合板, 复层为 TA2 钛, 基层为 Q235B 钢。厚度规格为 4 mm (TA2)+36 mm (Q235B)。表 1 和表 2 分别为复材 TA2 和基材 Q235B 的成分和力学性能。

热处理设备为电阻炉, 最高加热温度为 1300 °C。热处理工艺: 保温温度分别为 750、850 和 950 °C, 保温时间为 30、60、120 min, 冷却方式为空冷。

组织观察方法: 观察试样在结合界面处切取。经机械打磨和抛光后, 分别用 4% 的硝酸乙醇侵蚀钢侧组织, 用 10% HNO₃+3% HF+85% H₂O 溶液侵蚀钛侧组织。采用光学显微镜 (ZEISS AX10) 观察组织形貌。界面组织特征观察方法: 试样经机械打磨和抛光后直接观察。利用 ZEISS ULTRA 55 热场发射扫描电镜和俄歇电子能谱仪 (PHI700) 分析界面扩散层的特征。利用 12 kW 旋转阳极 X 射线衍射仪 XRD (日本理学 (Rigaku) D/MAX-RB) 分析剥离面相组成。

表 1 复材 TA2 和基材 Q235B 的化学成分

Table 1 Chemical composition of TA2 and Q235B (wt%)

Materials	Fe	Ti	C	Mn	Si	P	S	N	H	O
TA2	0.031	Bal.	0.009	-	-	-	-	0.012	0.002	0.06
Q235B	Bal.	-	0.16	0.50	0.15	0.011	0.010	-	-	-

收稿日期: 2014-04-12

作者简介: 江海涛, 男, 1976 年生, 副研究员, 北京科技大学冶金工程研究院, 北京 100083, 电话: 010-62332598, E-mail: nwpujht@163.com

表2 复材 TA2 和基材 Q235B 的力学性能

Table 2 Mechanical properties of TA2 and Q235B

Materials	Yield strength/MPa	Tensile strength/MPa	Total elongation/%
TA2	321	440	32
Q235B	260	445	31

按照国标 GB/T 8547-2006《钛-钢复合板》和 GB/T6396-2008(复合钢板-机械和技术检测)进行剪切强度测试。剪切试验机为 Instron-1185, 剪切速度为 0.5 mm/min。每个板沿爆炸方向取 3 个拉剪试样, 剪切强度取平均值。

2 结果与讨论

2.1 热处理过程中钛侧和钢侧的组织转变规律

图 1 为钛钢爆炸复合板热处理前后的钢侧组织转变特征, 钛钢爆炸复合板钢侧原始组织为铁素体和珠光体。加热过程中, 钢中碳元素在浓度差和 Ti-C 强结合力的共同作用下向钛侧扩散, 形成铁素体脱碳层, 并在界面上生成黑色的 TiC。随着加热温度的增加和保温时间的延长, 碳元素的扩散距离增加, 从而导致脱碳层厚度增加。图 1f 中为 950 °C/30 min 时的钢侧组织特征, 从完全奥氏体区温度下冷却, 材料发生重结晶, 晶粒细化。

图 2 为钛钢爆炸复合板经不同热处理后钛侧的组织特征, 图 2a 为原始组织, 靠近界面附近, 晶粒发生轻微地变形。图 2b、2c 分别为 750 和 850 °C 保温的钛侧组织, 随着温度的增加, 等轴 α 钛的晶粒粗大。

图 2d 为 950 °C 保温的钛侧组织, 钛合金 α/β 的转变温度为 882 °C 左右, 热处理温度在 β 相区, 冷却得到锯齿状的 α 钛。

2.2 热处理过程中界面扩散层转变规律

在热处理过程中, 钛钢爆炸复合板界面元素会发生扩散, 在界面附近形成扩散层, 随着加热温度的升高, 扩散层的厚度增加, 主要参与扩散的元素有 C、Fe 和 Ti。图 3 为钛钢爆炸复合板不同热处理条件下的界面能谱分析结果, 从图 3a1、3a2 中可以看出, 原始状态下的钛钢爆炸复合板界面几乎不存在元素的扩散, 在爆炸过程中, 由于爆炸波的传播速度较快, 时间较短, 元素来不及扩散, 所以无可见的元素扩散情况。对钛钢爆炸复合板在 750 °C 进行热处理, 保温 60 min, 对界面进行能谱分析, 如图 3b1、3b2 所示。Ti 和 Fe 元素没有发生扩散, C 元素在界面处存在浓度的小高峰, 钢侧的 C 元素向界面扩散。图 3c1、3c2 为热处理温度达到 950 °C 时的钛钢爆炸复合板能谱分析结果, 除了 C 元素的能谱曲线发现浓度高峰外, Ti 和 Fe 元素的能谱曲线出现很明显的浓度波动, 在这个温度下, Ti 和 Fe 发生互扩散。

元素向界面附近扩散, 达到一定浓度时, 会发生扩散反应, 生成化合物, 为了分析界面上生成化合物的类型, 对热处理后的钛钢爆炸复合板进行剥离试验, 对剥离后的界面进行 XRD 分析, 图 4 为 850 °C 下保温 60 min 后的剥离面界面化合物。由于 Ti、Fe、C 元素的扩散, 界面上形成的化合物主要是 TiC、TiFe 和 TiFe₂, 结合界面的断裂主要是由于这些化合物的地方

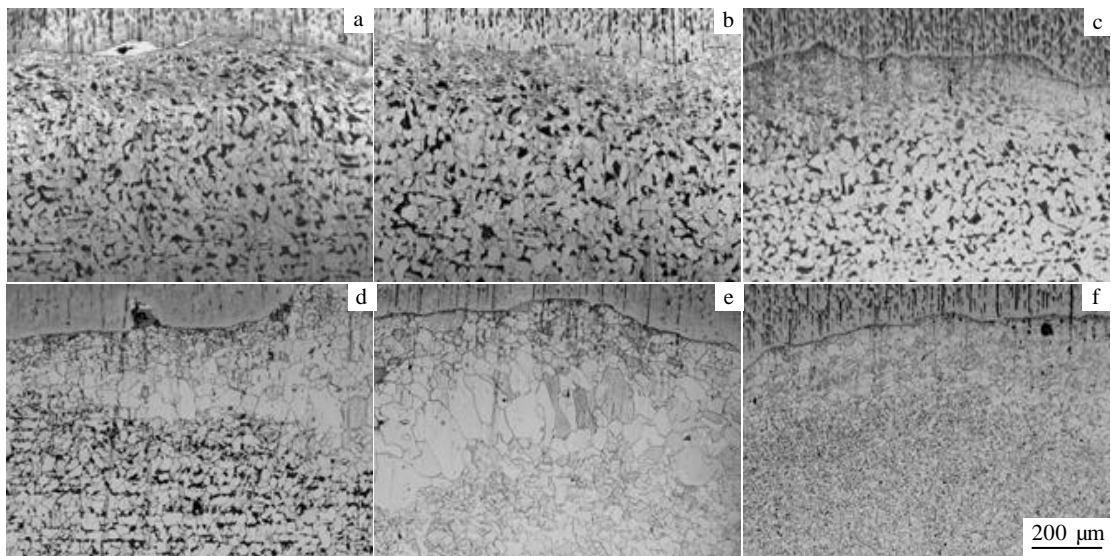


图1 钛钢爆炸复合板热处理前后的钢侧组织

Fig.1 Microstructure at the steel side of Ti-steel explosive clad plate after different heat treatments: (a) before heat treatment, (b) 750 °C/30 min, (c) 850 °C/30 min, (d) 850 °C/60 min, (e) 850 °C/120 min, and (f) 950 °C/30 min

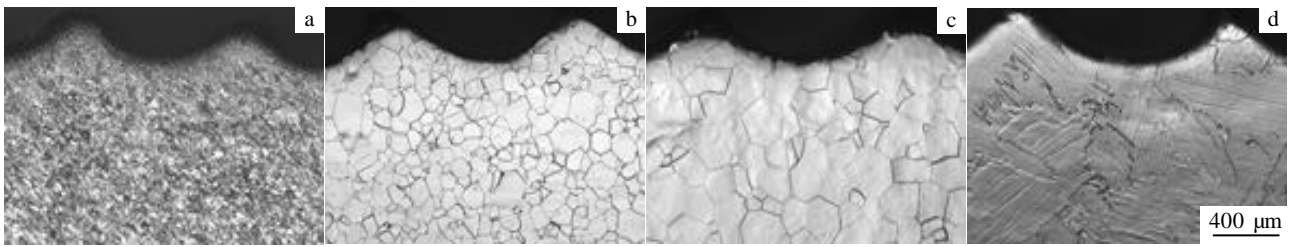


图 2 钛钢爆炸复合板热处理前后钛侧组织

Fig.2 Microstructure at the titanium side of Ti-steel explosive clad plate after different heat treatments: (a) before heat treatment, (b) 750 °C/30 min, (c) 850 °C/30 min, and (d) 950 °C/30 min

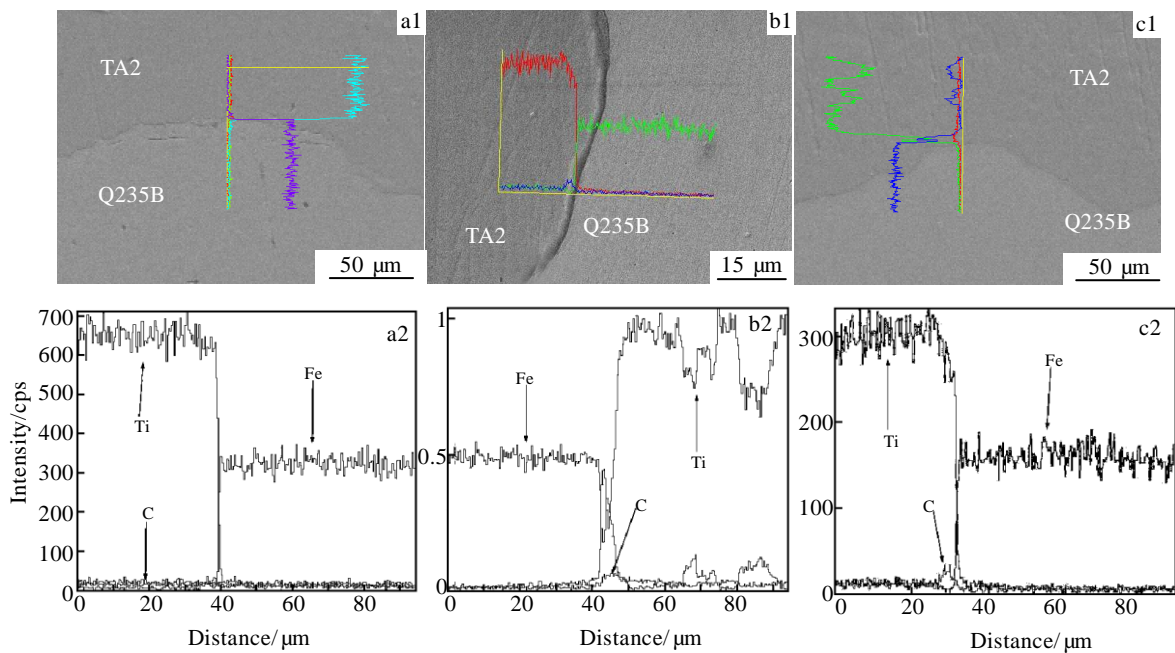


图 3 钛钢爆炸复合板不同热处理后的界面能谱分析

Fig.3 SEM images of interface and element distribution profiles by EDS after different heat treatments: (a) before heat treatment, (b) 750 °C/60 min, and (c) 950 °C/60 min

出现裂纹，并发生扩散。图中 TiC 主要出现在钛侧，TiFe 和 TiFe₂ 主要在钢侧，由此可知 TiC 的形成在界面附近偏向钛侧，而 TiFe 和 TiFe₂ 的形成在界面附近偏向钢侧，裂纹主要出现在 TiC 和钢侧之间或 TiFe 和 TiFe₂ 与钛侧之间。

钛钢爆炸复合板在不同温度保温，界面附近的 Ti 和 Fe 元素会发生互扩散，形成一定厚度的扩散层。利用俄歇能谱仪，可以得到界面 Ti 和 Fe 元素互扩散的浓度分布曲线，如图 5 所示，还可以得到不同的处理条件下的扩散层厚度 (D)，见表 3。因为扩散层厚度 (D) 与加热温度 (θ) 和保温时间 (t) 有关，所以 D 可以表示为 θ 和 t 的函数。

$$D=f(\theta, t) \tag{1}$$

近似假设，该函数可以用二阶多项式回归方程表示，应变量 D 用 Y 来表示，那么可能的多项式为：

$$Y=b_0+b_1(\theta)+b_2(t)+b_3(\theta^2)+b_4(t^2)+b_5(\theta t) \tag{2}$$

式中， b_0 、 b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 、 b_5 为常数。

利用 MATLAB 软件，根据实验数据进行拟合，得到 Ti-Fe 扩散层厚度的函数方程为式(3)，对比厚度的实验值和根据拟合函数得到的预测值，发现数据很接近，所以式(3)可以用来近似计算热处理过程中 Ti-Fe 扩散层的厚度。

$$D=-0.0007\theta-0.1308t-0.0001t^2+0.0005\theta t \tag{3}$$

2.3 热处理过程中界面结合强度转变规律

图 6 可以反映热处理对钛钢爆炸复合板剪切强度的影响。同一热处理温度下，随着保温时间的增加，

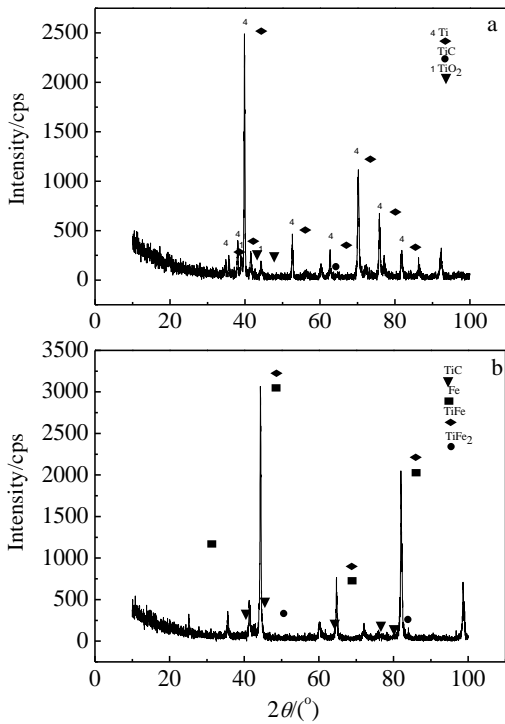


图 4 钛钢爆炸复合板 850 °C 保温 60 min 后的断口 XRD 图谱
Fig.4 X-ray diffraction patterns of fractured surfaces with heat treatment of 850 °C /60 min: (a) titanium side and (b) steel side

表 3 不同热处理条件下的扩散层厚度 (D)

Table 3 Thickness of diffusion layers after different heat treatment conditions

No.	Condition of heat treatment		Thickness of Ti-Fe diffusion layer/ μm	
	Heating temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Holding time/min	Experimental value	Predicted value
0	0	0	0	0
1	750	30	-	-
2	750	60	-	-
3	750	120	-	-
4	850	30	3.99	3.9121
5	850	60	4.32	4.4368
6	850	120	4.89	4.8511
7	950	30	5.27	5.3479
8	950	60	6.55	6.4332
9	950	120	7.93	7.9689

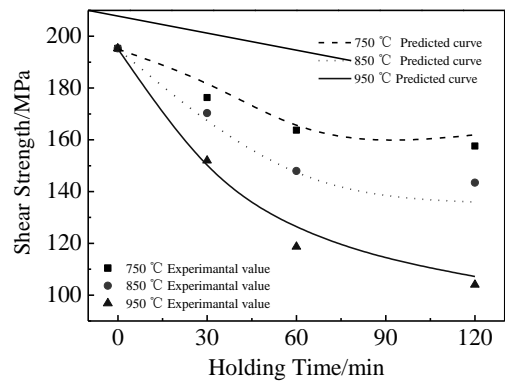


图 6 钛钢爆炸复合板剪切强度的实验值和预测结果
Fig.6 Shear strength test values and prediction curves of Ti-steel explosive clad plate

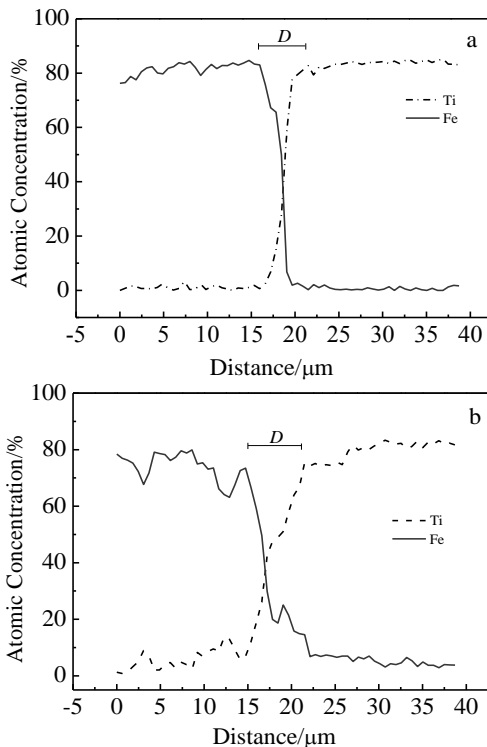


图 5 钛钢爆炸复合板热处理后界面元素分布
Fig.5 Element distribution profiles of samples after different heat treatments by ASE: (a) 950 °C /30 min and (b) 950 °C /60 min

复合板的剪切强度下降。除此之外，同一保温时间条件下，随着热处理温度的升高，剪切强度下降，且 950°C 时，剪切强度下降明显。在不同的加热温度或保温时间下，界面生成不同的化合物，界面结合性能也有所不同。

钛钢爆炸复合板，经过不同的热处理过程后，得到不同的剪切强度 (S_S)，同样的剪切强度可以表示为加热温度 (θ) 和保温时间 (t) 的函数。

$$S_S = f\{\theta, t\} \tag{4}$$

利用 MATLAB 软件，对实验数据进行拟合，得到的函数方程为式(5)，对比实验数据和预测曲线 (图 6) 可知，方程(5)可以用来近似计算不同热处理条件下的钛钢爆炸复合板的界面剪切强度。

$$S_S = 195.0343 + 0.1228\theta - 0.0400t - 0.0001\theta^2 + 0.0052t^2 - 0.0013\theta t \tag{5}$$

3 结 论

1) 钛钢爆炸复合板热处理过程中，钢侧界面附近

形成铁素体脱碳层, 且随着热处理温度增加, 脱碳层厚度增加; 钛侧晶粒粗大。

2) 850 °C 热处理时, 扩散反应主要是形成 TiC; 950 °C 热处理时, 扩散反应主要形成 Fe₂Ti 和 FeTi, 包括少量的 TiC。

3) 钛钢爆炸复合板界面钛铁扩散层厚度 (D) 和复合板剪切强度 (S_s) 取决于热处理的温度 (θ) 和保温时间 (t), 其函数关系方程分别为:

$$D = -0.0007\theta - 0.1308t - 0.0001t^2 + 0.0002\theta t$$

$$S_s = 195.0343 + 0.1228\theta - 0.0400t - 0.0001\theta^2 + 0.0052t^2 - 0.0013\theta t$$

参考文献 References

- [1] Zhen Yuanmou(郑远谋). *Explosive Welding and Metal Composite and Their Engineering Application*(爆炸焊接和金属复合材料及其工程应用)[M]. Changsha: Central South University Press, 2002
- [2] Fehim F. *Mater*[J], 2011, 32: 1081
- [3] Nizamettin K, Behcet G, Fehim F. *J Mater Process Technol*[J], 2005, 169: 127
- [4] Songa J, Kostkaa A, Veehmayerb M *et al. Mater Sci Eng A*[J], 2011, 528: 2641
- [5] Manikandana P, Hokamotob K, Fujitac M *et al. J Mater Process Technol*[J], 2008, 195: 232
- [6] Wang Jingzhong(王敬忠), Yan Xuebai(颜学柏), Wang Weiqi (王韦琪) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2010, 39(2): 309
- [7] Wang Guanglei(王光磊), Lu Zongan(骆宗安), Xie Guangming(谢广明) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(2): 387
- [8] Akbari Mousavi S A A, Al-Hassani S T S, Atkins A G. *Materials and Design*[J], 2008, 29: 1334
- [9] Akbari Mousavi S A A, Farhadi Sartangi P. *Materials and Design*[J], 2009, 30: 459
- [10] Nizamettin K, Behc , et G ü lenc, Fehim F. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2005, 169: 127
- [11] Yan Xuebai(颜学柏), Li Zhenghua(李正华), Peng Wenan(彭文安). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 1990, 19(5): 38
- [12] Akbari Mousavi S A A, Farhadi Sartangi P. *Materials Science and Engineering A*[J], 2008, 494: 329
- [13] Kundu S, Roy D, Chatterjee S *et al. Materials and Design*[J], 2012, 37: 560
- [14] Tadashi Momono, Toshio Enjo, Kenji Ikeuchi. *ISJJ International* [J], 1990, 30(11): 978
- [15] Gupta K M, Pawar S J. *Materials Science and Engineering A*[J], 2005, 412: 78
- [16] Paul A, van Dal M J H, Kodentsov A A *et al. Acta Materialia*[J], 2004, 52: 623

Diffusion Behavior and Mathematical Model of Ti-Steel Explosive Clad Plate during Heat Treatment

Jiang Haitao¹, Yan Xiaoqian¹, Liu Jixiong², Zeng Shangwu¹, Duan Xiaoge¹

(1. University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

(2. Baoti Group Co., Ltd, Baoji 721014, China)

Abstract: Effects of heat treatments on microstructure and mechanical properties of Ti-steel explosive clad plates were investigated by optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), auger electronic spectrum (AES) and shear test. The Ti-steel explosive clad plates were subjected to a heat treatment process in the temperature range of 650~950 °C for 30~120 min. The results show that the heat treatment process leads to a great enhancement of diffusion and microstructural transformation. During the heat treatment process, a large amount of Ti-Fe intermetallics (Fe₂Ti/FeTi) along with some TiC distributing continuously are formed at diffusion reaction layer. With the treatment temperature increasing, the thickness of diffusion layer increases and the shear strength decreases, whose functional relationship was proposed with the heat temperature as well as the holding time according to the experimental data.

Key words: Ti-steel explosive clad plate; heat treatment; diffusion behavior; mechanical properties

Corresponding author: Jiang Haitao, Associate Researcher, Engineering Research Institute, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China, Tel: 0086-10-62332598, E-mail: nwpujht@163.com