

钛钢爆炸复合板波状界面的扩散行为

刘继雄¹, 张杭永¹, 王鼎春¹, 刘润生¹, 江海涛²

(1. 宝钛集团有限公司, 宝鸡 721014;

2. 北京科技大学 冶金工程研究院, 北京 100083)

摘 要: 利用光学显微镜、扫描电子显微镜分析不同热处理温度下钛钢爆炸复合板波状界面的扩散特征。结果表明: 在界面上首先形成 TiC。随后在波头处发生分解, 形成 Ti-Fe 金属间化合物, 铁元素向钛侧扩散。铁元素沿波状界面由波头向波尾扩展, 扩散层随温度升高而增加。界面曲率的变化和浓度梯度给元素的扩散提供了驱动力。

关键词: 钛钢复合板; 扩散行为; 组织特征; 热处理; 曲率

中图分类号: TD 111.91

文献标志码: A

Diffusion behavior of wave interface of titanium explosive clad steel

LIU Ji-xiong¹, ZHANG Hang-yong¹, WANG Ding-chun¹, LIU Run-sheng¹, JIANG Hai-tao²

(1. Baoti Group Co. Ltd., Baoji 721014, China;

2. Metallurgical Engineering Research Institute, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: With optical microscopy and scanning electron microscopy, the wavy interface diffusion characteristics of titanium steel explosive clad plate were analyzed at different heat treatment temperatures. The results show that TiC is firstly formed on the interface, followed by decomposition in the head of wave, and then forms Ti-Fe intermetallic compound. The iron diffuses toward the titanium side. The iron diffuses from the front to the tail along the wave interface, the diffusion layer increases with the increase of the temperature. Changes of the interface curvature and the concentration gradient provide driving force for diffusion.

Key words: titanium clad steel plate; diffusion behaviour; microstructure characteristics; heat treatment; curvature

钛钢复合板利用钛材的耐蚀性能和钢的力学性能, 获得了优异的综合性能, 节约了贵金属钛的使用, 降低了材料成本。钛钢复合板在化工设备、火力发电脱硫烟囱等领域得到广泛的应用。由于爆炸复合法制备的钛钢复合板面积和钛层的厚度有限, 为此利用爆炸-轧制复合法制备大面积薄复层的钛钢复合板^[1-5]。钛钢爆炸复合板的热处理工艺研究为生产爆炸轧制复合板的打下良好的基础。目前, 对爆炸法生产的复合板在热加工的过程中扩散行为研究较多。在热处理过程中, Ti、Fe 和 C 元素发生扩散。颜学柏等^[6-10]研究

了加热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。850 °C 加热主要是 TiC 影响结合性能, 破碎发生在 TiC 与钢层之间; 而在 900 °C 以上加热时, 形成的 Ti-Fe 金属间化合物影响结合性能, 破坏发生在 FeTi 和 Fe₂Ti 之间。热处理过程中, 在界面上形成的 TiC 对钛、铁金属间化合物的形成具有抑制作用^[11]。在 900 °C 以下热处理时, 界面主要形成 TiC, 阻碍 Fe 和 Ti 的相互扩散; 在 950 °C 以上加热时, 界面形成 Fe₂Ti 和 FeTi。但是, 钛钢爆炸复合板在复合的过程中, 由于

基金项目: 国家压水堆重大专项经费资助项目(2012ZX06004-020); 2012 年陕西省科技统筹创新工程项目(2012KTZB01-03-06)

收稿日期: 2013-07-28; **修订日期:** 2013-10-10

通信作者: 刘继雄, 工程师, 博士; 电话: 0917-3382271; E-mail: liujixiong2007@126.com

工艺的差异, 界面结合形状会有很多差异。有平直的结合界面, 还有波状的结合界面。目前, 人们对于波状界面下钛钢爆炸复合板的扩散行为研究较少^[12]。为此, 本文作者主要研究热处理过程中钛钢爆炸复合板波状界面的元素扩散行为。

1 实验

实验材料是爆炸复合工艺生产的钛钢复合板, 复层为 TA2, 基层为 Q235B。厚度规格为 4 mm(TA2)+36 mm(Q235B)。TA2 和 Q235B 的成分如表 1 所列。

热处理设备为电阻炉, 最高加热温度为 1 300 ℃。热处理工艺如下: 保温温度分别为 750、800、850、900 和 950 ℃, 保温时间为 60 min。冷却方式为空冷。

表 1 基层 Q235B 和复层 TA2 成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of TA2 and Q235B (mass fraction, %)

Alloy	C	Fe	Ti	Mn	Si
Q235B	0.16	Bal	—	0.50	0.15
TA2	0.009	0.031	Bal	—	—

Alloy	P	S	N	H	O
Q235B	0.011	0.010	—	—	—
TA2	—	—	0.012	0.002	0.06

试样经机械打磨和抛光后, 用 4 %的硝酸酒精侵蚀, 利用光学显微镜 ZEISS AX10 进行组织观察。利用 ZEISS ULTRA 55 热场发射扫描电镜分析界面元素的扩散特征。

2 实验结果

2.1 钛钢爆炸复合板界面特征

图 1 所示为钛钢爆炸复合板钢侧界面特征, 其中, 图 1(a)所示为剥离钛层后的钢侧表面, 钛钢爆炸复合板的结合界面为波状界面; 图 1(b)所示为一个周期内波形结合界面; 图 1(c)、(d)所示为钢侧波状界面示意图。在钢侧波头的漩涡处, 是钛和铁元素共存的区域。在爆炸复合的过程中, 界面发生碰撞形成波状结合界面的同时, 将部分钛元素包裹了起来。钛钢爆炸复合板, 钢中铁元素与钛元素接触的区域分为两部分: 一部分是波状结合界面上, 这部分结合面积大; 另一部分是波状界面的波头漩涡处, 这部分结合面积较小。钛钢爆炸复合过程中, 反应时间短, 界面扩散反应距离小。

2.2 钛钢爆炸复合板界面元素扩散特征

图 2 所示为钛钢爆炸复合板扩散界面特征, 热处理工艺为 750 ℃时保温 60 min; 其中: 图 2(a)所示为

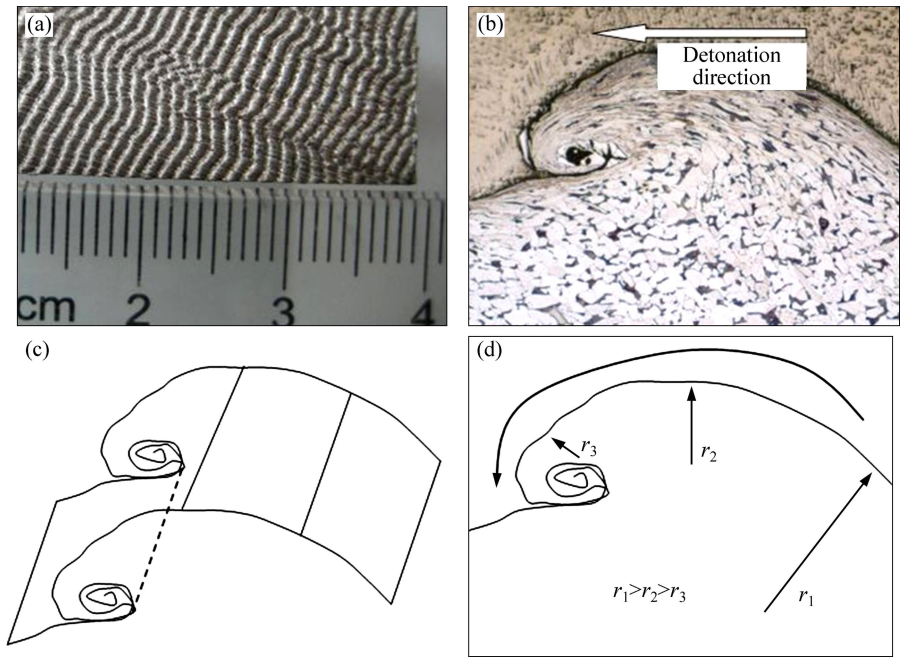


图 1 钛钢爆炸复合板界面特征

Fig. 1 Interface characteristics of titanium explosive clad steel: (a) Steel side interface after peeled titanium layer; (b) Interface morphology of titanium explosive clad steel; (c), (d) Wave interface of steel side

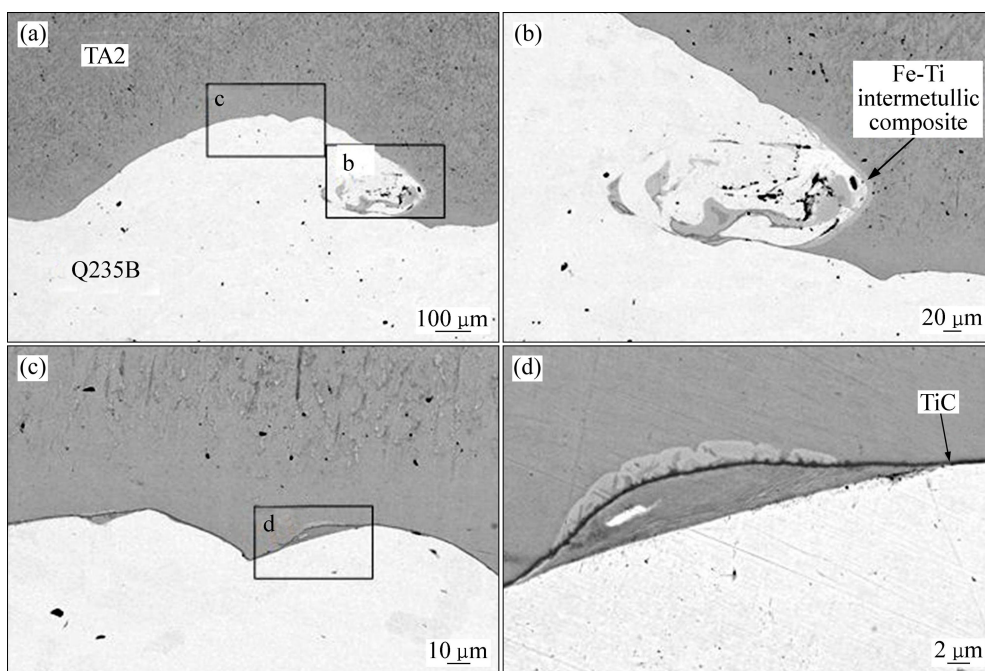


图 2 经 750 °C、60 min 热处理时的钛钢爆炸复合板扩散界面特征

Fig. 2 Diffusion interface characteristics of titanium explosive clad steel heat treated at 750 °C for 60 min

一个周期的波形界面特征。波状界面上有一些小的起伏；图 2(b)所示为波头处的界面特征，波头处有爆炸复合过程中形成的 Fe-Ti 的两相混合层，为浅灰色；图 2(c)和(d)所示为波峰处的界面特征，界面上形成黑色的反应层为 TiC，沿状界面分布。

图 3 所示为钛钢爆炸复合板扩散界面特征，热处理工艺为 800 °C 时保温 60 min。其中：图 3(a)所示为波头处的界面特征，Fe-Ti 的两相混合层的厚度增加；图 3(b)所示为波峰处的界面特征，界面上黑色的物质为 TiC。

图 4 所示为钛钢爆炸复合板扩散界面特征，热处理工艺为 850 °C，保温 60 min。其中：图 4(a)所示为一个周期的波形界面特征，波状界面上铁元素向钛侧扩散。图 4(b)所示为波头处的界面特征，波头处有爆炸复合过程中形成的 Fe-Ti 的两相混合层，为浅灰色。扩散区域没有观察到黑色的 TiC 层。将扩散层分为 4 个区域：1 区为钛基体，2 区为铁扩散的低浓度区，3 区为铁元素扩散的高浓度区，4 区为铁基体。其中 3 区与 4 区之间无连续分布的 TiC。图 4(c)所示为波峰处的界面特征，界面上形成黑色的反应层为 TiC，沿状界面分布，TiC 的厚度为 1 μm 左右。图 4(d)所示为波尾处的界面扩散特征。同样分为 4 个区域：1 区为钛基体，2 区为铁扩散的低浓度区，3 区为碳、铁、钛元素的共存区，4 区为铁基体，2 区与 3 区之间存在

TiC 层。

图 5 和 6 所示为钛钢爆炸复合板扩散界面特征，热处理工艺分别为 900 和 950 °C，保温时间都为 60 min。可以观察到铁元素沿界面由波头处向波峰、波尾处扩散。

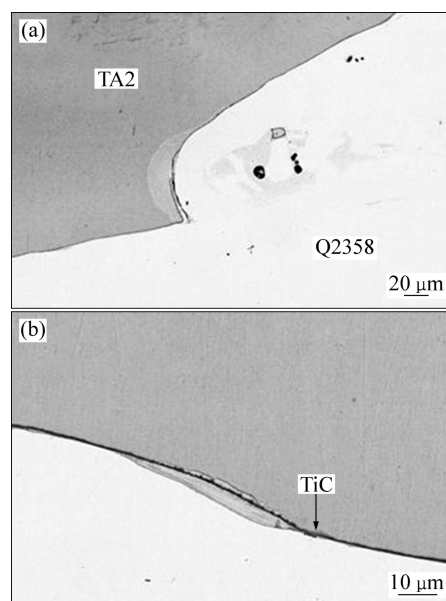


图 3 经 800 °C、60 min 热处理时的钛钢爆炸复合板扩散界面特征

Fig. 3 Diffusion interface characteristics of titanium explosive clad steel heat treated at 800 °C for 60 min

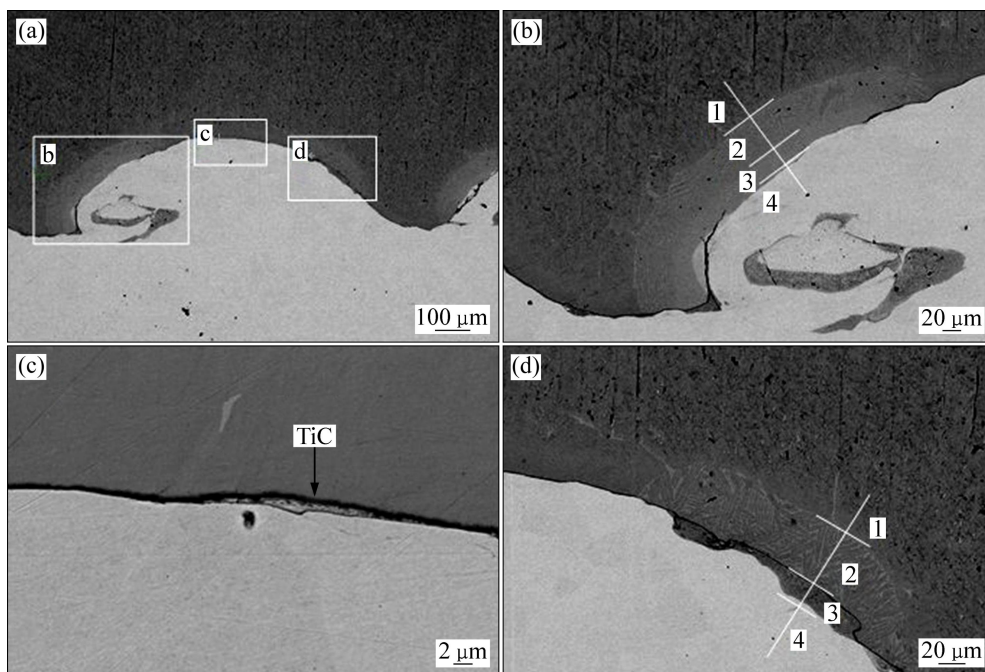


图 4 经 850 °C、60 min 热处理时的钛钢爆炸复合板扩散界面特征

Fig. 4 Diffusion interface characteristics of titanium explosive clad steel heat treated at 850 °C for 60 min

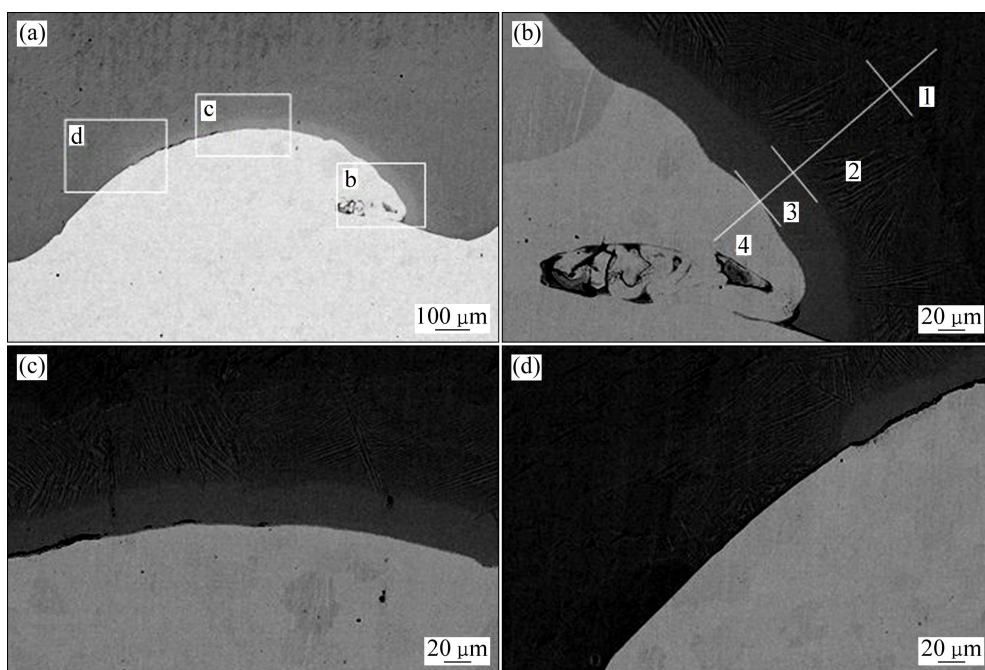


图 5 经 900 °C、60 min 热处理时的钛钢爆炸复合板扩散界面特征

Fig. 5 Diffusion interface characteristics of titanium explosive clad steel at heat treated 900 °C for 60 min (SEM-BSE)

3 讨论与分析

化学势梯度作为扩散驱动力与界面的曲率成反比。对于钛钢爆炸复合板的波状结合界面, 则

$$\mu_A^\beta - \mu_A^\alpha = \frac{\gamma \Omega_\alpha}{r_1}$$

式中: μ_A^β 和 μ_A^α 为不同界面的化学势; γ 为比表面能; Ω_α 为 α 相的摩尔体积; r_1 为半径; $\Delta\mu$ 为化学势梯度。

当 γ 和 Ω_α 恒定时, r_1 减小, $\Delta\mu$ 增加。

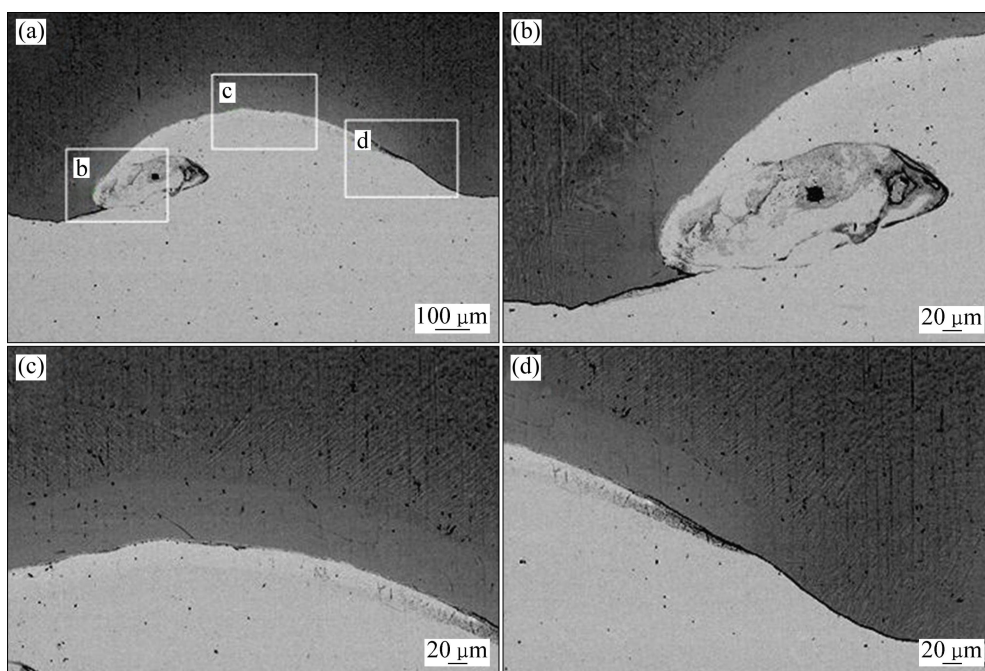


图 6 经 950 °C、60 min 热处理时的钛钢爆炸复合板扩散界面特征

Fig. 6 Diffusion interface characteristics of titanium explosive clad steel at heat treated 950 °C for 60 min

铁元素向钛侧扩散时,首先发生在 r_1 最小的区域,波头的位置首先发生,然后向波峰、波尾处扩散。

钛钢爆炸复合板的扩散行为发生在异种金属的结合界面上,因此,具有一定的复杂性。扩散行为涉及到元素的扩散,主要为Ti、Fe和C。C元素主要作为间隙原子存在于合金中,扩散激活能最小。随温度升高和保温时间的延长,C元素向钛侧扩散,在界面上发生扩散反应形成TiC。当温度继续升高时,TiC发生分解,Fe元素向钛侧扩散,在界面上发生扩散反应形成Ti-Fe金属间化合物,同时,Fe元素可以继续向钛侧扩散进入基体,形成Ti固溶体。

图7所示为钛钢爆炸复合板的扩散示意图。热处理前,由于爆炸复合的过程中,扩散反应时间短,界面元素的扩散的距离很小,或者基本认为没有扩散。随着热处理温度的增加,首先是间隙元素C的扩散,碳元素向结合界面扩散,在界面上与钛元素结合经常TiC。钢侧界面组织脱碳形成铁素体区。在750 °C保温时,随保温时间的延长,观察到钢侧界面铁素体区的厚度增加。在850 °C时,界面上的TiC发生部分分解,铁元素向钛侧扩散。TiC发生分解的位置首先发生在波头的位置。在950 °C时,界面上的TiC进一步沿界面发生分解,铁元素向钛侧扩散的距离增加。波尾和波谷处有为发生分解的TiC,仍然很好地抑制了铁元素向钛侧的扩散。从这个过程可以看出:TiC发生分解的位置首先发生在波头处,随温度升高,向波峰、

波尾处扩展。在曲率变化的界面,TiC发生分解的温度降低了,沿曲率半径增大的方向扩展。

在已发生分解TiC与未发生分解TiC的界面上,铁元素将TiC包裹起来,降低了Ti元素的浓度,使TiC更易分解。也是TiC沿界面发生分解的原因之一。

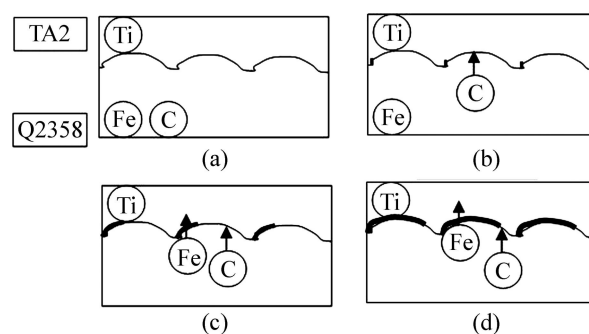


图 7 钛钢爆炸复合板的扩散示意图

Fig. 7 Diffusion behaviors of titanium explosive clad steel before heat treatment (a) and heat treated at 750 °C (b), 850 °C (c) and 950 °C (d)

4 结论

1) 在界面上首先形成TiC。随后在波处发生分解,形成Ti-Fe金属间化合物,铁元素向钛侧扩散。铁元

素沿波状界面由波头向波尾扩展,扩散层随温度升高而增加。

2) 界面曲率的变化和浓度梯度给元素的扩散提供了驱动力。

REFERENCES

- [1] 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, 2002.
ZHENG Yuan-mou. Explosive welding and metal composite and their engineering application[M]. Changsha: Central South University Press, 2002.
- [2] FEHIM F. Recent developments in explosive welding[J]. Materials and Design, 2011, 32: 1081–1093.
- [3] AKBARI M S A A, SARTANGI P F. Experimental investigation of explosive welding of cp-titanium/AISI 304 stainless steel[J]. Materials and Design, 2009, 30: 459–468.
- [4] SONGA J, KOSTKAA A, VEEHMAYERB M, Raabe D. Hierarchical microstructure of explosive joints: Example of titanium to steel cladding[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528: 2641–2647.
- [5] 郑远谋. 钛-钢爆炸复合板的热轧制[J]. 钢铁, 1990, 25(3): 28–32.
ZHENG Yuan-mou. Hot-rolling of explosion-formed ti-steel clad plate[J]. Iron and steel, 1990, 25(3): 28–32.
- [6] 颜学柏, 李正华, 彭文安. 加热对钛-钢爆炸复合板界面力学性能和显微结构的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 1990, 5: 38–45.
YAN Xue-bai, LI Zheng-hua, PENG Wen-an. Heating of titanium-steel explosive cladding plate interface mechanical properties and microstructure[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1990, 5: 38–45.
- [7] AKBARI M S A A, SARTANGI P F. Effect of post-weld heat treatment on the interface microstructure of explosively welded titanium-stainless steel composite[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 494: 329–336.
- [8] XIA Chang-qing, JIN Zhan-peng. On the evolution of microstructure and diffusion paths in the titanium-steel explosion weld interface during heat treatment[J]. Journal of the Less-Common Metals, 1990, 162: 315–322.
- [9] 杨 扬, 张新明, 李正华, 李青云. 热处理后钛/钢爆炸复合界面微观组织结构[J]. 中南工业大学学报, 1995, 2(1): 105–108.
YANG Yang, ZHANG Xin-ming, LI Zheng-hua, LI Qin-yun. The microstructures in the explosive cladding titanium/mild steel interface after heat treatment[J]. Journal of Central South University of Technology, 1995, 2(1): 105–108.
- [10] 杨 扬, 张新明, 李正华, 李青云. TA2/A3 爆炸复合界面的扩散反应[J]. 金属学报, 1995, 31(4): 189–194.
YANG Yang, ZHANG Xin-ming, LI Zheng-hua, LI Qinyun. Diffusion reaction in Ta2/A3 explosive cladding interface[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1995; 31(4): 189–194.
- [11] CHIBA A, NISHIDA M, MORIZONO Y, IMAMURA K. Bonding characteristics and diffusion barrier effect of the TiC phase formed at the bonding interface in an explosively welded titanium/high-carbon steel clad[J]. Journal of Phase Equilibria, 1995, 16(5): 411–415.
- [12] YASUHIRO M, MINORU N, AKIRA C, TAKATERU Y. Effect of heat treatment on formation of columnar ferrite structure in explosively welded titanium/hypoeutectoid steel joints[J]. Materials Science Forum, 2004, 465–466: 373–378.

(编辑 陈灿华)