

文章编号: 1006-9941(2016)08-0798-06

钛-钢爆炸压接-轧制复合板的研究

李雪交, 马宏昊, 沈兆武, 王鲁庆, 余勇

(中国科学技术大学 中科院材料力学行为和设计重点实验室, 安徽 合肥 230026)

摘要: 为减小焊接炸药装药量, 采用间隙配合的 Q345 燕尾槽钢板与 TA2 燕尾槽钛板, 分别作为覆板和基板。燕尾槽的上底面、下底面和高分别为 2, 3, 1 mm。所有燕尾槽的间隔为 3 mm。间隙配合的钛板和钢板通过爆炸压接以及热轧得到尺寸为 7.0 mm×300 mm×750 mm 的钛-钢复合板。用力学性能检测以及微观形貌观察分析复合板界面结合质量。结果表明, 间隙配合的燕尾槽钛板与钢板经爆炸压接-热轧工艺实现冶金结合, 复合板界面结合良好, 界面呈直线形, 无金属间化合物生成, 复合板弯曲性能良好。爆炸压接-热轧法制备钛-钢复合板相比爆炸焊接法可节约 62.7% 炸药。

关键词: 爆炸压接; 热轧; 间隙配合; 燕尾槽; 冶金结合

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.08.013

1 引言

随着现代工业的发展, 单一金属组元的性能难以满足要求, 而层状金属复合板结合了金属组元各自的优点, 具有较高的经济效益与应用前景, 已广泛应用于航空航天、汽车、机械制造、船舶、化工等领域^[1-3]。目前层状金属复合板的生产主要采用轧制法、爆炸焊接法和爆炸焊接-轧制法。但爆炸焊接法生产层状复合板覆层厚度受到限制, 覆层较厚时碰撞能量较大, 界面易产生过熔现象, 而且焊接药量较大, 产生严重的环境污染、震动和噪声^[4]。热轧法生产复合板工艺复杂, 金属材料较为活泼时复合板界面金属易氧化, 而冷轧法生产复合板的厚度受到轧机轧制力的限制。

钛及其合金具有良好的耐腐蚀性能、耐热性以及碳钢的强度和塑性, 广泛应用到石化设备容器制造、核电设备冷凝器、海水工程等领域。钛-钢复合板具有钛材优良的耐腐蚀性能以及钢材的强度, 而且可降低成本和节约大量的钛材。但钛-钢爆炸焊接时界面易产生过熔现象和脆性金属间化合物, 影响复合板界面

的结合质量。韩丽青^[5]等研究了 TA2/316L 复合板结合区附近显微组织结构和成分。结果表明结合区存有不连续的熔化层, 该层含有大量金属基体小碎块和金属间化合物, 并伴随着裂纹、气孔等缺陷的产生。赵峰^[6]等分析爆炸焊接-热轧条件下钛-钢复合板界面两侧金属元素分布和界面微观形貌变化, 结果表明复合板界面呈平直状, 靠近钢侧界面出现脱碳层, 引起界面附近碳元素重新分布。Mousavi^[7]等研究表明较高爆炸载荷时钛-钢复合板界面生成大量的脆性金属间化合物 Fe_2Ti 、 $\text{Fe}_2\text{Ti}_4\text{O}$ 和 Cr_2Ti , 波峰和波谷的熔化块随着爆炸载荷的增大而增加。Manikandan^[8]等认为复合板界面中间过渡层的厚度取决于覆层与基层碰撞过程的动能损失。

针对目前钛-钢爆炸复合存在的药量较大、覆层较厚难以焊合等问题, 本研究提出开有燕尾槽的钛板与钢板间隙配合后, 通过爆炸压接-热轧工艺制备钛-钢复合板。

2 实验材料

实验采用尺寸为 5.5 mm×150 mm×300 mm 的 Q345 钢板和 30 mm×150 mm×300 mm 的 TA2 钛板分别作为爆炸压接的基层与覆层, 其物理与力学性能如表 1 所示。

钢板表面开出上底面 2 mm、下底面 3 mm、高 1 mm 的燕尾槽后, 将表面开有相同尺寸的燕尾槽钛板与燕尾槽钢板间隙配合一起, 其中两金属板的燕尾槽

收稿日期: 2016-01-08; 修回日期: 2016-02-23

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51374189); 中央高校基金科研业务费专项基金(WK6030000003)

作者简介: 李雪交(1986-), 男, 博士研究生, 主要从事含能材料及爆炸复合相关领域研究。e-mail: lxj116@mail.ustc.edu.cn

通信联系人: 马宏昊(1980-), 男, 副教授, 主要从事爆破器材与工业安全及爆炸力学相关领域研究。e-mail: hhm@ustc.edu.cn

间距均为 3 mm。然后将蜂窝结构炸药平铺覆板表面,起爆端位于炸药的中间位置,如图 1 所示。实验采用铝蜂窝板作为炸药药框,其材质为厚 50 μm 的 3003H24 铝合金,蜂窝孔呈正六边形,边长 8 mm,如图 2 所示。蜂窝铝结构炸药由填满蜂窝板孔隙的低爆速乳化炸药制成,如图 3 所示。

表 1 金属材料的物理与力学性能

Table 1 Physical and mechanical properties of metallic materials

material	T /°C	ρ /g · cm ⁻³	HV	σ_s /MPa	σ_b /MPa	C /m · s ⁻¹
TA2 titanium	1668	4.51	145	372	442	4140
Q345 steel	1512	7.85	168	600	609	5924

Note: T is the melting point of metallic material; ρ is the density of metallic material; HV is the Vickers hardness of metallic material; σ_s is the yield strength of metallic material; σ_b is the tensile strength of metallic material; C is the sonic speed of metallic material.

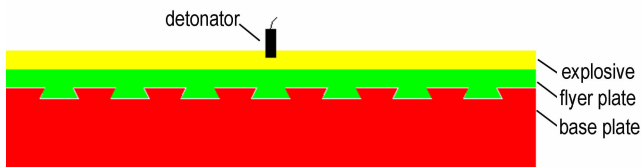


图 1 爆炸压接装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of explosive press bonding set-up

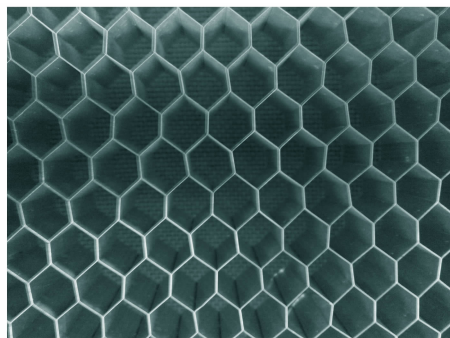


图 2 铝蜂窝板

Fig. 2 Aluminum honeycomb panel

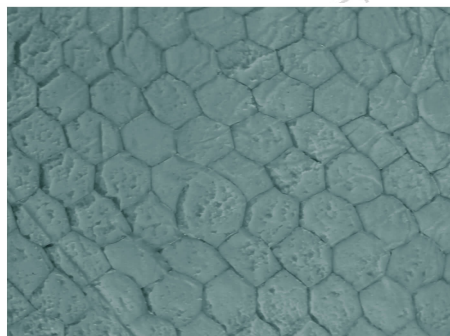


图 3 蜂窝铝结构炸药

Fig. 3 Aluminum honeycomb explosive

爆炸压接和热轧后分别采用 Carl Zeiss Axio Imager A1m 型金相显微镜和 XL-30 type 型扫描电镜观察钛-钢复合板界面微观形貌,再通过 TTR-III 型 X 射线衍射仪分析爆炸压接-热轧复合板界面相组分。钛-钢复合板的腐蚀液为 kroll 试剂(HF : HNO₃ : H₂O=2 : 4 : 94)。

3 爆炸压接-轧制参数

3.1 蜂窝铝结构炸药临界厚度

实验采用蜂窝铝结构炸药作为爆炸压接炸药,为得到填充蜂窝板的乳化炸药和蜂窝铝结构炸药的临界厚度,分别选用 4 种不同厚度(7,8,9,10 mm)的蜂窝铝结构炸药测量爆速,结果见表 2。

表 2 蜂窝铝结构炸药临界厚度

Table 2 Critical thickness of aluminum honeycomb explosive

thickness/ mm	detonation velocity of A /m · s ⁻¹	detonation velocity of B /m · s ⁻¹
7	misfire	-
8	half-explosion	-
9	2549	-
10	2513	-
16	-	misfire
17	-	half-explosion
18	-	2460
19	-	2506

Note: A is aluminum honeycomb explosive; B is emulsion explosive.

由表 2 可知,蜂窝铝结构炸药临界厚度为 9 mm,平均爆速为 2530.5 m · s⁻¹。而填充铝蜂窝板的低爆速乳化炸药的临界厚度为 18 mm,平均爆速为 2483 m · s⁻¹。这是由于蜂窝板孔隙各向约束提高了炸药的传爆能力,降低了炸药的临界厚度,故爆速也有所提高^[4]。

3.2 钛-钢复合板爆炸焊接参数

单位面积炸药药量与药厚的经验公式可表达为^[9]:

$$W_g = k_g \sqrt{\delta_1 \rho_1} \quad (1)$$

$$\delta_0 = W_g / \rho_0 \quad (2)$$

$$R = \rho_0 \delta_0 / \rho_1 \delta_1 \quad (3)$$

式中, k_g 为计算系数,金属钛板取 1.43; R 为覆板与炸药的质量比; W_g 为单位面炸药量, g · cm⁻²; ρ_0 为炸药的密度, g · cm⁻³; δ_0 为炸药厚度, cm; δ_1 为覆板的厚度, cm; ρ_1 为覆板的密度, g · cm⁻³。

由式(1) ~ (3) 得到钛-钢复合板爆炸焊接参数,如表 3 所示。

表 3 钛-钢复合板爆炸压接参数

Table 3 Explosive pressure welding parameters of Ti-Steel clad plate

method	explosive pressure welding	explosive welding
density of explosive/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	0.82	0.82
charge per unit area/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$	0.82	2.20
amount of charge/g	369	990
mass ratio	0.33	0.88
thickness of explosive/mm	10.0	26.8

3.3 钛-钢复合板爆炸压接参数

由于平均爆速 $2530.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的蜂窝铝结构乳化炸药临界直径为 9 mm , 所以采用厚 10 mm 的蜂窝铝结构炸药进行钛-钢爆炸压接实验, 其参数如表 3 所示。

3.4 钛-钢复合板热轧参数

爆炸压接后将钛-钢复合板放入高温电炉保温 30 min , 开轧温度为 $800 \text{ }^\circ\text{C}$ [1,10-11], 然后沿着平行燕尾槽方向进行轧制, 最终得到尺寸为 $7.0 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 750 \text{ mm}$ 的钛-钢复合板, 其中钛层厚 $0.9 \sim 1.1 \text{ mm}$, 如图 4 所示。

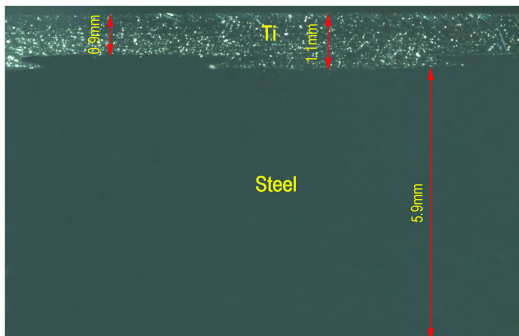


图 4 钛-钢爆炸压接-热轧复合板

Fig. 4 Ti-Steel clad plate by explosive pressure welding and hot rolling

4 实验结果与分析

由图 4 可知, 间隙配合的燕尾槽钛板与钢板采用爆炸压接-热轧法生产的钛-钢复合板界面结合良好, 其比爆炸焊接法节约 62.7% 炸药 (见表 3), 可减小爆炸产生的环境污染、震动与噪声。爆炸压接-热轧法生产钛-钢复合板可减小炸药药量, 而且无爆炸焊接可焊性窗口的限制。

爆轰压力作用下间隙配合的两金属板界面产生塑性变形, 导致燕尾槽钛板与钢板相互挤压啮合一起。由于复合板界面两侧的钛和铁元素浓度呈阶梯分布, 轧制变形过程界面裸露出的新鲜金属在高温的作用下

相互扩散, 并产生紧密的结合力。总之, 爆炸压接-热轧复合板在燕尾槽的挤压啮合以及金属间的相互扩散共同作用下实现冶金结合。

4.1 钛-钢复合板界面微观形貌观察

为研究钛-钢复合板界面结合质量, 分别观察爆炸压接以及热轧后复合板界面微观形貌。图 5 为钛-钢复合板金相组织观察位置, 分别位于复合板燕尾槽界面拐角处 (A)、倾斜面 (B)、上底面 (C) 和下底面 (D)。

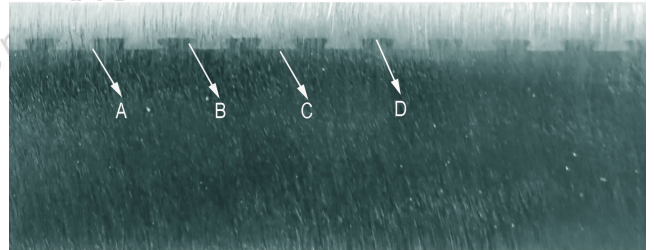


图 5 钛-钢复合板金相组织观察位置

Fig. 5 The location of morphological observation of Ti-steel clad plate

4.1.1 爆炸压接复合板界面金相组织

根据图 5 标注的位置, 采用金相显微镜得到爆炸压接复合板燕尾槽界面拐角处、倾斜面、上底面和下底面的金相组织, 如图 6 所示。

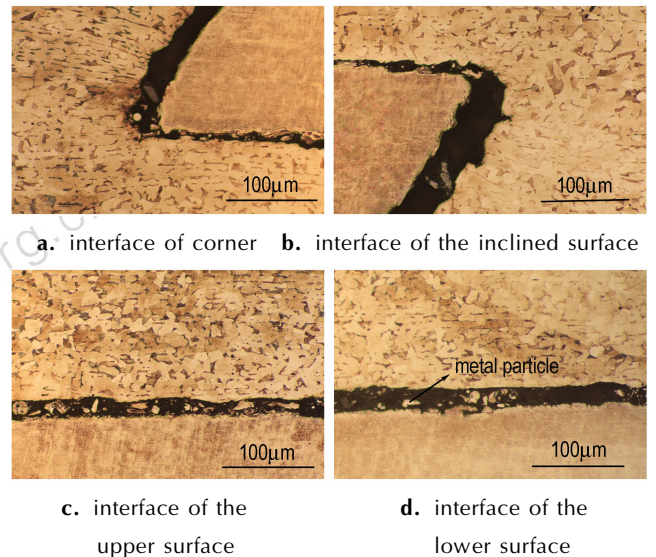


图 6 钛-钢爆炸压接复合板界面金相组织

Fig. 6 Metallographic images at the interfaces of Ti-steel clad plate by explosive pressure welding surface

图 6a 和图 6b 分别为燕尾槽界面拐角处和倾斜面的金相组织, 图 6c 和图 6d 分别为燕尾槽界面上底面以及下底面的金相组织。由图 6 可知, 爆炸压接后

复合板界面出现宽 5 ~ 45 μm 的缝隙, 缝隙内含有细小的金属颗粒, 钛-钢复合板燕尾槽倾斜面的缝隙比上底面和下底面宽, 因为爆轰压力方向与燕尾槽上底面和下底面垂直, 而与倾斜面呈一定的倾斜角, 导致燕尾槽上底面与下底面的界面压力比倾斜面大。复合板界面出现大量细小的金属颗粒则是由金属颗粒在爆轰压力的作用下脱离金属板内表面进入缝隙所引起。

由图 6b、图 6c 和图 6d 可知, 靠近界面金属的晶粒基本未发生变化, 而图 6a 拐角处 Q345 钢晶粒呈纤维状, 这是由于拐角处局部区域的 Q345 钢晶粒受到挤压, 导致该处金属产生强烈的塑性变形, 从而出现纤维状的晶粒组织。爆轰压力作用下界面两侧的金属产生强烈的塑性变形, 从而间隙配合的钛板与钢板依靠燕尾槽的挤压变形啮合一起。但界面空气受到绝热压缩产生的高温和高压不足以使界面金属产生塑性流动和冶金结合, 所以钛-钢爆炸压接复合板界面出现缝隙。

4.1.2 爆炸压接-热轧复合板界面金相组织

为将间隙配合的燕尾槽钛板和钢板焊接一起, 采用热轧法轧制钛-钢爆炸压接复合板。然后通过观察燕尾槽界面拐角处、倾斜面、上底面和下底面的金相组织, 研究钛-钢爆炸压接-热轧复合板结合质量, 如图 7 所示。

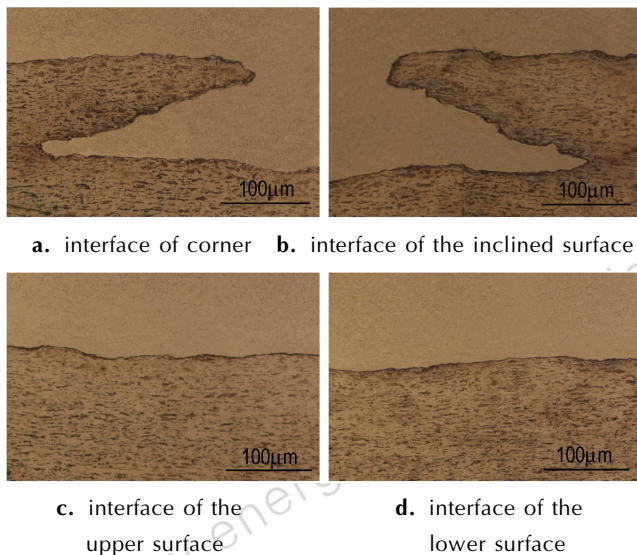


图 7 爆炸压接-热轧复合板界面金相组织
Fig. 7 Metallographic images at the interfaces of the clad plate by explosive pressure welding and hot rolling

图 7a 和图 7b 分别为爆炸压接-热轧后复合板的燕尾槽界面拐角处和倾斜面的金相组织; 图 7c 和图 7d 分别为爆炸压接-热轧后复合板的燕尾槽界面上底

面与下底面的金相组织。由图 7 可知, 爆炸压接-热轧后复合板的钛层与钢层以直接结合的方式复合, 界面呈平直状, 钢层晶粒呈纤维状。热轧变形过程中界面空气被排出, 同时界面金属破裂裸露出新鲜金属, 由于复合板界面两侧的钛和铁元素浓度呈阶梯分布, 在高温轧制力的作用下相互扩散实现冶金结合, 形成紧密的结合力。由于轧制变形较大, 复合板钢侧晶粒沿着轧制方向被拉伸, 呈细小的纤维状。

4.2 XRD 分析

钛与钢的相互扩散可能导致界面生成金属间化合物^[7,12-13], 影响复合板结合性能。实验采用 XRD 分析钛-钢爆炸压接-热轧复合界面是否有脆性相生成, 结果如图 8 所示。

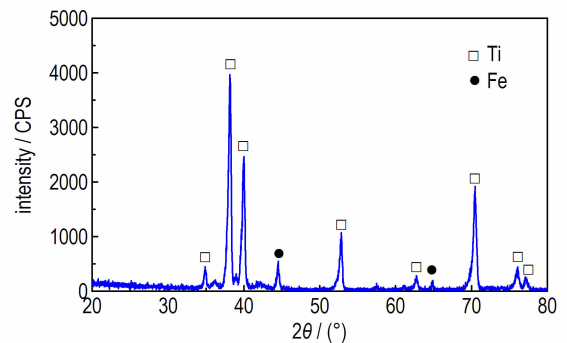


图 8 钛-钢复合板界面 XRD 图谱
Fig. 8 X-ray diffraction patterns at the interfaces of Ti-steel clad plate

由图 8 可知, 复合板结合界面由 Ti 和 Fe 两种基本相组成, 无金属间化合物生成。热轧时界面两侧的钛元素和铁元素浓度呈阶梯分布, 导致金属原子向浓度低的一侧扩散, 所以 XRD 分析时钛侧表面含有铁元素。金属原子适量的相互扩散有利于提高复合板界面结合质量。

4.3 弯曲试验

弯曲试验可表征复合材料承受弯曲载荷时的表面状态, 反映材料的塑性变形能力。根据 NB/T 47002-2009《压力容器用爆炸焊接复合板》, 分别沿着燕尾槽截面方向(见图 1)和垂直燕尾槽界面方向各切割两个弯曲试样后, 采用 MTS-809 万能试验机进行外弯和内弯试验, 检测钛-钢爆炸压接-热轧复合板承受弯曲荷载时界面结合质量。弯曲试样尺寸为 (1.1+5.9) mm × 10 mm × 180 mm, 测试条件与结果分别如表 4 和图 9 所示。

由图 9 可知, 沿着横向与纵向切割的试样弯曲时均未发生分离或局部出现裂纹等现象, 界面保持完好,

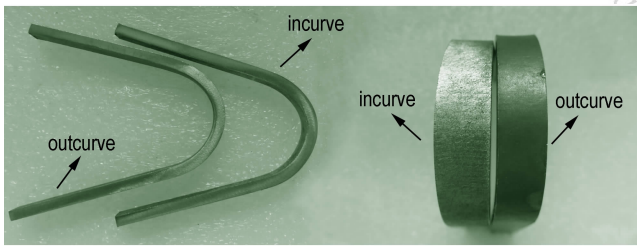
表明爆炸压接-热轧法生产的钛-钢复合板冷加工弯曲性能良好。

表 4 钛-钢复合板弯曲实验测试条件与结果

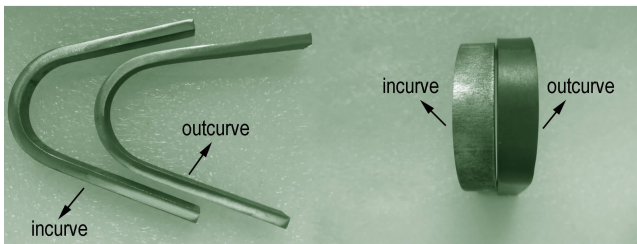
Table 4 Bending test conditions and results of Ti-steel clad plate

direction	L/mm	h/mm	D/mm	$\alpha /(^{\circ})$	bonding quality
transverse	180	6.3	40	150	no separation
longitudinal	180	6.3	40	150	no separation

Note: L is specimen length; h is specimen thickness; D is bend diameter; α is bending angle.



a. parallel to cross-section of dovetail grooves



b. perpendicular to cross-section of dovetail grooves

图 9 弯曲试样

Fig. 9 Bending specimens

5 结论

(1) 间隙配合的钛板与钢板通过爆炸压接-热轧工艺得到尺寸 $7.0 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 750 \text{ mm}$ 的钛-钢复合板,其在燕尾槽的挤压啮合以及金属间的相互扩散共同作用下实现冶金结合。

(2) 爆速为 $2530.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的蜂窝铝结构炸药临界直径为 9 mm 。铝蜂窝板可保证炸药各位置厚度基本相同。

(3) 爆炸压接钛-钢复合板界面出现 $5 \sim 45 \text{ mm}$ 的缝隙,而爆炸压接-热轧复合板实现冶金结合,界面结合质量良好,无金属间化合物生成。爆炸压接-热轧法生产钛-钢复合板比爆炸焊接法节约 62.7% 炸药。

(4) 横向和纵向试件弯曲时未出现分离,说明爆炸压接-轧制钛-钢复合板具有良好的冷加工弯曲性能。

参考文献:

- [1] 王敬忠, 颜学柏, 王伟琪, 等. 带夹层材料的爆炸-轧制钛钢复合板工艺研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(2): 309-313. WANG Jing-zhong, YAN Xue-bai, WANG Wei-qi, et al. Titanium cladding steel plates with interlayer by explosion and rolling bonding [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2010, 39(2): 309-313.
- [2] 马志新, 胡捷, 李德富, 等. 一层状金属复合板的研究和生产现状[J]. 稀有金属, 2003, 27(6): 799-803. MA Zhi-xin, HU Jie, LI De-fu, et al. Overview of research and manufacture of layer-metal composite Plate [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2003, 27(6): 799-803.
- [3] Findik F. Recent development in explosive welding [J]. *Materials & Design*, 2011, 32(3): 1081-1093.
- [4] 李雪交, 马宏昊, 沈兆武, 等. 铝/燕尾槽钢爆炸焊接的研究[J]. 含能材料, 2016, 24(2): 188-193. LI Xue-jiao, MA Hong-hao, SHEN Zhao-wu, et al. Explosive welding of aluminum-steel of dovetail groove [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(2): 188-193.
- [5] 韩丽青, 王自东, 林国标, 等. 爆炸复合 TA2/316L 板的组织和性能研究[J]. 材料热处理学报, 2008, 29(2): 107-110. HAN Li-qing, WANG Zi-dong, LIN Guo-biao, et al. Investigation on microstructure and property of TA2/316L composite plate prepared by explosive welding [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2008, 29(2): 107-110.
- [6] 赵峰, 李选明, 王虎年. 爆炸-轧制钛/钢复合板界面结合性能研究[J]. 材料开发与应用, 2010, 25(1): 30-34. ZHAO Feng, LI Xuan-ming, WANG Hu-nian. The bonding property of the explode-rolled Ti/Steel clad metal [J]. *Development and Application of Materials*, 2010, 25(1): 30-34.
- [7] Mousavi SAA A, Sartangi F P. Experimental investigation of explosive welding of cp-titanium/AISI 304 stainless steel [J]. *Materials & Design*, 2009, 30(3): 459-468.
- [8] Manikandan P, Hokamoto K, Fujita M, et al. Control of energetic conditions by employing interlayer of different thickness for explosive welding of titanium/304 stainless steel [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 195(1): 232-240.
- [9] 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, 2007: 16-29. ZHENG Yuan-mou. Explosive welding and metallic composite and the engineering application [M]. Changsha: Central South University Press, 2007: 16-29.
- [10] 阎晓倩, 江海涛, 曾尚武, 等. 退火温度对钛钢轧制复合板组织和性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2013(34): 77-81. YAN Xiao-qian, JIANG Hai-tao, ZENG Shang-wu, et al. Effect of heat treatment on microstructure and properties of titanium/steel rolling clad plate [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2013(34): 77-81.
- [11] 李平仓, 赵惠, 马东康, 等. 爆炸复合+轧制法制备钛钢复合板工艺研究 [J]. 四川兵工学报, 2014, 35(12): 130-132. LI Ping-cang, ZHAO Hui, MA Dong-kang, et al. Study on explosive bonding and rolling process parameters of the clad plate [J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2014, 35(12): 130-132.
- [12] Jiang H T, Kang Q, Yan X Q. Anovel diffusion model considering curvature radius at the bonding interface in a titanium/steel explosive clad plate [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 2015, 22(9): 956-965.
- [13] Chu Q L, Zhang M, Li J H, et al. Intermetallics in CP-Ti/bimetallic sheets filled with Cu-based flux-cored wires [J]. *Materials & Design*, 2016, 90(15): 299-306.

Study on of Ti-Steel Clad Plate by Explosive Pressure Welding-Rolling

LI Xue-jiao, MA Hong-hao, SHEN Zhao-wu, WANG Lu-qing, YU Yong

(CAS Key Laboratory of mechanical behavior and design of materials, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: To reduce the charge amount of welding explosive, TA2 titanium and Q345 steel plates were used as flyer and base plates of dovetail groove, respectively. The upper side length, the lower side length and the height of dovetail grooves were 2 mm, 3 mm and 1mm, respectively. All the intervals between dovetail grooves were 3 mm. The Ti-steel clad plate with dimension of 7.0 mm×300 mm×750 mm was obtained via Q345 steel and TA2 titanium plates with dovetail groove were loosely fitted and bonded by explosive pressure welding and hot rolling technology. Bonding quality at the interfaces of Ti-steel clad plate was analyzed by mechanical property test and microscopic morphology observation. Results show that the metallurgical bonding at the interfaces of TA2 titanium and Q345 steel plates is achieved by explosive pressure welding and hot rolling. Bonding quality at the interfaces of the clad plate is good, and the interfaces exhibit a linear shape, and intermetallic compounds do not occur. The clad plate has excellent bending performance. Compared with explosive welding, the charge amount of Ti-steel clad plate produced by explosive pressure welding and hot rolling may save by 62.7%.

Key words: explosive pressure welding; hot rolling; loose fit; dovetail grooves; metallurgical bonding

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.08.013



《含能材料》“观点”征稿

为了丰富学术交流形式,及时传递含能材料领域同行们的学术观点和思想,《含能材料》开设了“观点”栏目。“观点”栏目的来稿应观点鲜明、内容新颖、形式上短小精悍。欢迎含能材料各领域的专家积极来稿。来稿时请附个人简历及主要研究工作介绍。

《含能材料》损伤与点火专栏征稿

含能材料的损伤特征与点火过程有密切的联系,炸药、推进剂的内部损伤及其对力学特性、安全特性和点火行为的影响规律受到了含能材料学界的高度重视,为推动这一重要研究方向的学术交流,本刊特设立“损伤与点火”专栏。专栏主要征集炸药、推进剂等含能材料的损伤观测与多尺度表征技术、含损伤的本构方程、准静态与动态损伤演化规律、损伤与破坏的宏(细)观模式、损伤对起爆、爆炸、爆轰成长以及非冲击起爆行为的影响等方向的原创性研究论文。来稿请注明“损伤与点火”专栏。

《含能材料》编辑部