

# Manufacture Technology of Ti-CS Clad Plate for Nuclear Station

Jun Song, Hui Zhao, Pingcang Li

Xi'an Tianli Metal Composite Material Co. Ltd., Xi'an Shaanxi  
Email: huier7921@126.com

Received: Nov. 5<sup>th</sup>, 2015; accepted: Nov. 24<sup>th</sup>, 2015; published: Nov. 27<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

In this paper, computer simulation was employed to optimize the manufacturing process of the Ti-CS clad plate. Then the clad plate was inspected and tested with OP, SEM and mechanical properties. The test results show that, the clad plate interface is wavy. And no departure, melted block or other defect was inspected in the interface. Shearing test results showed that the bonding strength is more than 200 MPa. It meets the requirements of the specification. Moreover, after bending, the sample also showed good properties.

## Keywords

Nuclear Station, Ti-CS Clad Plate, Explosive Bonding

---

# 核电用钛钢复合板制备技术研究

宋 军, 赵 惠, 李平仓

西安天力金属复合材料有限公司, 陕西 西安  
Email: huier7921@126.com

收稿日期: 2015年11月5日; 录用日期: 2015年11月24日; 发布日期: 2015年11月27日

---

## 摘 要

本文采用计算机模拟法优化爆炸焊接工艺参数, 然后制备出核电用复合板。从金相检验、SEM和力学性

能检验结果来看,复合材的界面均匀,呈现爆炸焊接所特有的波状界面,且界面处无分层、熔化等缺陷。剪切试验结果说明复合板结合强度高于200 MPa,弯曲满足核电领域使用要求。

## 关键词

核电, 钛复合材, 爆炸焊接

## 1. 前言

随着经济的蓬勃发展,能源紧缺越来越突出。核电是和平利用核能的重要形式。自从我国首座自主设计建造的秦山核电站于1991年12月15日实现首次并网发电以来,截至2014年5月,我国大陆已建成并运行19台核电机组和一座实验快堆,装机容量1704万千瓦,在建的核电机组29台,装机容量3188万千瓦。为了实现到2020年国民生产总值在现有基础上再翻两番的宏伟目标,电力发展必须与经济发展相适应。预计到2020年,我国的电力装机容量将增至9亿千瓦以上。随着核电行业的大力发展,核电站的关键设备用料——钛钢复合板,则越来越受到设备制造方的关注[1]-[3]。本文主要研究高性能核电用钛钢复合板的制备技术,采用该技术制备的复合板剪切强度均在180 MPa以上,远高于常规标准要求。

## 2. 试验材料与方法

### 2.1. 试验材料

试验所用复层TA1,基层为SA 516Gr70板材,尺寸分别为 $5 \times 3500 \times 4500$  mm和 $30 \times 3500 \times 4500$  mm。材料的化学成分分别如表1,表2所示。

### 2.2. 试验方法

根据爆炸复合过程的特点,建立炸药、基板和复板的三维立体模型。所用软件为ANSYS--LSDYNA。在建立有限元分析模型时,为减少计算时间,节省计算机资源,实体模型可简化成三层结构,如图1所示,第一层为炸药,第二层为复板,第三层为基板。

计算模型如文献[4]所述,对爆炸复合过程中复板的运动状态进行模拟分析,采用3Dsolid 164实体单元,有限元软件当中3Dsolid 164实体单元采用八节点六面体单元,在数值模拟过程中,将几何实体进行六面体映射网格划分,通过模拟爆炸复合过程,优化复合工艺。根据爆炸复合过程特点,引入Johnson-Cook Grunsem Model Behavior部分模型:

第一部分涉及应力

$$\sigma_y = \left( A + B \bar{\epsilon}^{p^n} \right) \left( 1 + C \ln \dot{\epsilon}^* \right) \left( 1 - T^{*m} \right) \quad (1)$$

第二部分则是涉及断裂时的应变

$$\epsilon_f = \left[ D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*) \right] \left[ 1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}^* \right] \left[ 1 + D_5 T^* \right] \quad (2)$$

JWL材料模型主要是用来描述压力与体积应变之间的关系:

$$P = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (3)$$

材料机械性能和Johnson-Cook方程的模型参数,如表3所示。所选用炸药为0#炸药,炸药的JWL模型参数,如表4所示。

**Table 1.** Chemical composition of SA516Gr70  
**表 1.** 优质碳素钢 SA516Gr70 板的化学成分

C%	Mn%	Si%	S%	P%
0.20	1.13	0.15	0.015	0.015

**Table 2.** Chemical composition for titanium  
**表 2.** 钛板(TA1)的化学成分

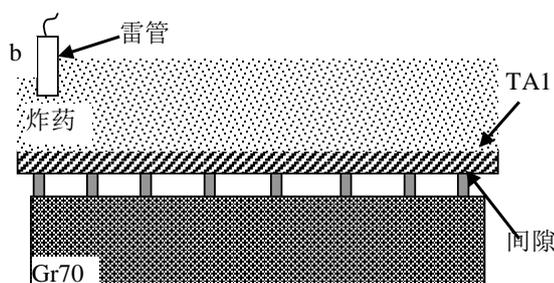
Fe%	C%	N%	H%	O%
0.04	0.02	0.012	0.001	0.06

**Table 3.** Mechanical properties and parameters of Johnson-Cook  
**表 3.** 钛、钢机械性能和 Johnson-Cook 方程的模型参数

Parameter	Density ( $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	Volume modulus (GPa)	Shearing modulus (GPa)	Hardness constant	Strain rate constant	Thermal softening index	Melting point (K)
Gr70	7.8	159	82.5	500	0.012	1.02	1540
TA1	4.5	178	60	380	0.26	0.7	1670

**Table 4.** JWL parameters of 0# explosive  
**表 4.** 0#炸药 JWL 的模型参数

Parameter	$A_J$ (100 GPa)	$B_J$ (100 GPa)	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$E_0$ (GPa)	$\rho_e$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
Explosive	1.3275	0.00439	4.5	0.81	0.21	0.32	600	2200



**Figure 1.** The sketch of computer simulation  
**图 1.** 简化后数值模拟实体模型

爆炸复合后利用 UT 法检验复合板结合率, 验收标准执行 ASME SA578 C 级。利用 OLYMPUS GX51 型金相显微镜和 SS550 扫描电镜及 EDX 能谱仪观察界面微观组织。TY8000 型实验机被用来检测复合板的拉伸强度, 拉伸实验执行 ASTM E8 标准, 试验温度为常温。弯曲试验在 MC009-GW40A 型实验机进行, 执行 ASTM E190, 弯曲角为  $180^\circ$ 。力学性能验收标准为 ASTM A898-2011。

### 3. 结果与分析

#### 3.1. 计算机模拟

爆炸复合过程为中心起爆, 为节约计算时间, 本次模拟仅计算四分之一尺寸模型。爆炸焊接工艺中最关键的参数为间隙的高度, 本次试验就利用计算机模拟的方法, 首先确定复合板的间隙高度。图 2~4

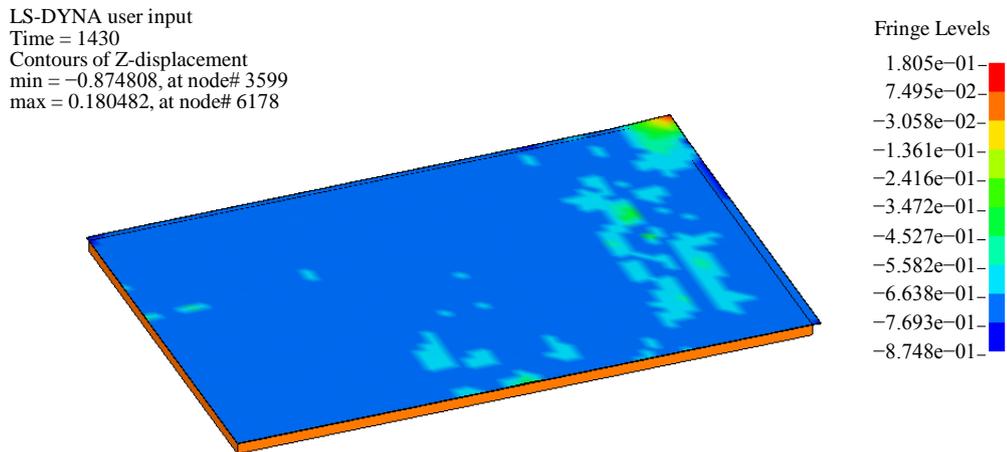


Figure 2. Computer simulation results with 8 mm spacer

图 2. 间隙高度为 8 mm 时模拟结果

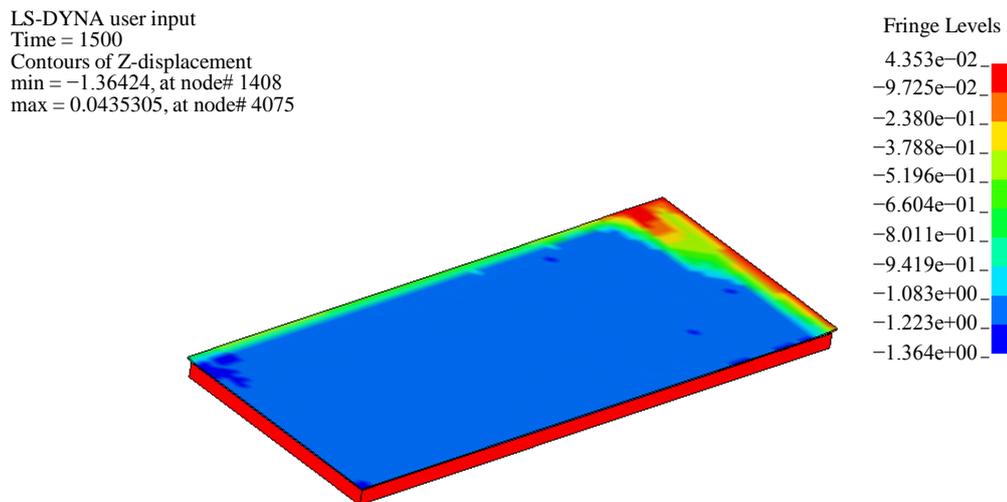


Figure 3. Computer simulation results with 10 mm spacer

图 3. 间隙高度为 10 mm 时模拟结果

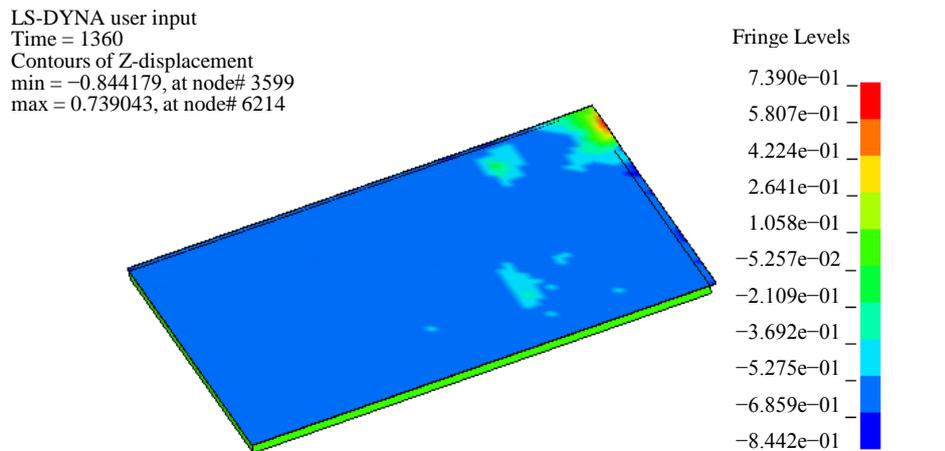


Figure 4. Computer simulation results with 12 mm spacer

图 4. 间隙高度为 12 mm 时模拟结果

本别是间隙高度为 8 mm, 10 mm 和 12 mm 时的模拟结果。从图中可以看出, 间隙高度低于或超过 10 mm 时, 复合后复合板均存在不结合区域。因此本次工艺中间隙高度选取 10 mm。

### 3.2. UT 检验

图 5 为 UT 检验结果。从图中可以看出, 底波高度远远高于界面波高度, 这说明复合板结合状态良好。满足 ASTM B898 中的要求。

### 3.3. 微观组织检验

图 6 为复合板界面微观组织形貌, 从图中可以看出, 复合材界面均匀, 无裂纹、分层或金属夹杂等影响结合强度的缺陷, 满足标准要求。通常情况下, 这样的界面对应的较高的结合强度。图 7 为 SEM 的界面的微观组织形貌, 从图中可以看出, 在高衬度条件下, 界面仍然完整, 无缺陷。

### 3.4. 力学性能检验

安装 ASTM B898 标准的要求对复合板进行剪切、拉伸和弯曲试验, 结果如表 5 所示。从表中可以看出, 复合板的剪切强度平均值高于 200 MPa, 超过验收制备, 说明结合强度满足使用要求。而拉伸试验结果表明复合板的强度满足使用要求。另外, 弯曲试验结果表明复合板界面无裂纹等缺陷, 说明复合板后续加工也能满足使用需求。

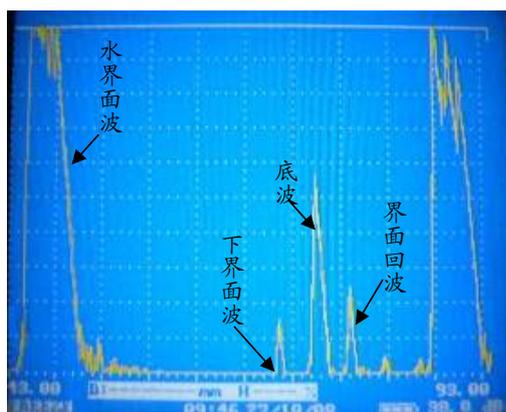


Figure 5. Wave picture of the bonding interface  
图 5. 复合板结合区界面波波形图



Figure 6. Microstructure of the bonding interface  
图 6. 复合板界面微观组织

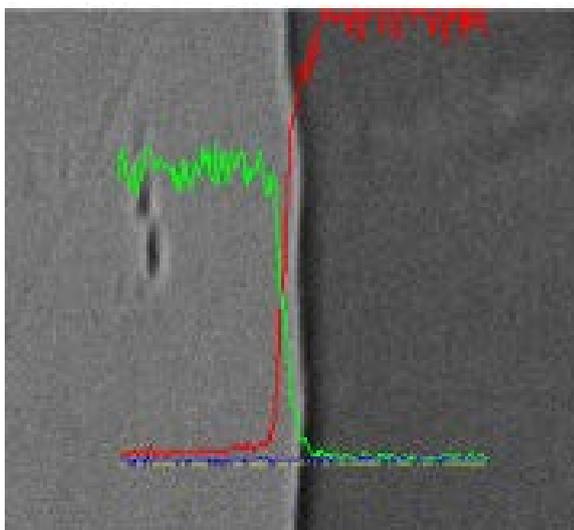


Figure 7. Microstructure of the bonding interface (SEM)  
图 7. SEM 下界面微观组织形貌

Table 5. Mechanical test result  
表 5. 力学性能检验结果

试验项目	结果(MPa)	平均值(MPa)	验收值
拉剪试验	220	204.6	≥180 MPa
	196		
	198		
拉伸试验	Rp 0.2 = 336 MPa, Rm ≥ 545 MPa, A ≥ 27%	/	Rp 0.2 ≥ 260 MPa, Rm ≥ 485 MPa, A ≥ 17%
分离强度	完好	/	180°, 无裂纹
	完好		
	完好		

#### 4. 结束语

通过上述研究, 得出以下结论:

- 1) 计算机模拟可用来优化工艺参数, 用于指导生产实际;
- 2) 采用模拟优化的工艺参数制备的复合板, UT 探伤结果表明各处结合良好; 界面均匀无分层等缺陷; 力学性能结果表明复合材的结合强度高达 200 MPa 以上, 满足验收指标;
- 3) 试验结果表明, 爆炸焊接法制备的钛钢复合板完全满足核电领域的使用要求。

#### 基金项目

国家高技术研究发展计划(2015AA03A501)。

#### 参考文献 (References)

- [1] Yinon, J. (2002) Field Detection and Monitoring of Explosives. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, **21**, 292-301. [http://dx.doi.org/10.1016/S0165-9936\(02\)00408-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0165-9936(02)00408-9)
- [2] 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: 179-204.

- 
- [3] Keshavarz, M.H. (2009) Prediction of Detonation Performance of CHNO and CHNOAI Explosives through Molecular Structure. *Journal of Hazardous Materials*, **166**, 1296-1301. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.12.040>
- [4] 薛治国, 李付国, 吕利强. 大面积钛/钢复合板爆炸焊接过程的数值模拟[J]. 焊接技术, 2007(6): 132-146.