

文章编号: 1001-1455(2004)02-0189-04

# 爆炸焊接外复法制取铌-不锈钢复合棒\*

焦永刚, 马东康, 郭悦霞, 裴大荣

(西北有色金属研究院复合金属材料研究所, 陕西西安 710016)

摘要: 采用爆炸焊接中的外复法, 并控制爆炸能量, 使 3.8 mm 的不锈钢管与铌棒在固态下产生高强度的冶金结合, 其性能超过了预定的技术指标。若炸药的品种、药量、间隙等影响爆炸复合的主要工艺参数选择得当, 动态条件合适, 其最高结合强度可以达到铌材的强度, 产生等强结合。

关键词: 爆炸力学; 复合棒; 爆炸焊接; 不锈钢; 铌; 外复法; 冶金结合

中图分类号: O381; TG456.6; 国标学科代码: 430·5510 文献标志码: A

## 1 引言

爆炸焊接技术主要用于生产层状金属复合材料, 如复合板(片)、复合棒、复合管、复合过渡接头, 包含了几十种金属组合, 它以组合形式多、结合强度高、成本低等优势在化工、医药、航空、航天、国防、核工业等领域的应用越来越广泛。在本文中, 介绍了采用外复法制取新型的铌-不锈钢复合棒的研究过程, 给出了这种爆炸复合态双金属的试验方法和结合性能<sup>[1~2]</sup>, 试验证明在合适的动态条件下, 可形成铌与不锈钢的冶金结合。该样品拟用于核燃料后处理工程。

## 2 研制过程

### 2.1 工艺研究

根据需方的要求, 应选用适合的铌材和不锈钢材作为原料。经协商, 不锈钢材的材质为 316L(需方自备), 铌材的材质选为 Nb-1Zr 合金。

为了使铌与不锈钢形成冶金结合, 拟采用爆炸焊接中的外复法制取。利用此项技术, 使二者在固态下结合, 通过控制爆炸能量, 以获取铌-不锈钢高强结合的爆炸复合工艺。

### 2.2 原料材质

#### 2.2.1 不锈钢

试验用固溶态棒材, 牌号 316L, 适用标准: JIS-G4318-1991, 化学成分及力学性能见表 1、表 2。

表 1 化学成分

Table 1 Chemical component

值类	C	Si	Mn	P	S
需求值 / (%)	≤0.03	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.03
测量值 / (%)	0.019	0.89	1.38	0.024	0.022
值类	Ni	Cr	Mo	Cu	N
需求值 / (%)	≤15.00	≤18.00	≤3.00	≤0.60	≤0.08
测量值 / (%)	12.08	16.12	2.17	0.24	0.03

表 2 力学性能

Table 2 Mechanical properties

参 量	需求值	测量值
$\sigma_s$ / (N/mm <sup>2</sup> )	≥175	235
$\sigma_b$ / (N/mm <sup>2</sup> )	≥480	550
$\delta$ (%)	≥40.0	60.0
$\psi$ (%)	≥60.0	73.0
$H_B$ / (kg/m <sup>2</sup> )	≤187	142

注:  $\sigma_s$  为屈服强度;  $\sigma_b$  抗拉强度;  $\delta$  为延伸率;  $\psi$  为断面收缩率;  $H_B$  为布氏硬度。

腐蚀性能: 好; UT(Ultrasonic)探伤: 好。

\* 收稿日期: 2003-05-09; 修回日期: 2003-08-12

作者简介: 焦永刚(1975—), 男, 硕士研究生, 工程师。

### 2.2.2 铌材

热锻态棒材, 牌号 Nb-1Zr, 参考标准: Q/XB1401-95, 化学成分、力学性能、横断面硬度见表 3、表 4、表 5。

表 3 化学成分

Table 3 Chemical component

值类	C	N	H	O	Zr	W
需求值/(%)	≤0.015	≤0.015	≤0.002	≤0.02	0.8~1.2	≤0.03
测量值/(%)	≤0.01	0.003	0.001~0.002	≤0.01	0.86~0.91	0.02
值类	Mo	Fe	Si	Ti	Ta	Cr
需求值/(%)	≤0.01	≤0.005	≤0.005	≤0.002	≤0.25	≤0.002
测量值/(%)	≤0.01	<0.0014	<0.0028	<0.0014	<0.1	<0.0014

表 4 力学性能

Table 4 Mechanical properties

$\sigma_{0.2}$ /(N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_b$ /(N/mm <sup>2</sup> )	$\delta_5$ /(%)	$\psi$ /(%)
407	456	24	85

表 5 横断面硬度  $H_B$ Table 5 Hardness ( $H_B$ ) of the cross section

中心	1/2 区	1/3 区
118~121	105~112	113

### 2.3 环境及参数选择

首先进行原料制备, 将不锈钢棒材加工成管材后, 对内壁进行抛光。铌合金棒材进行车光、抛光, 进行超声波探伤(UT)。

选用规格尺寸较小的原料进行初步试验, 目的是通过爆炸复合, 应用 UT、金相观察、热处理等方法获取适当的工艺参数, 给后续样品试制提供参数资料。为此, 选用不锈钢管材规格为  $\varnothing 28.5 \text{ mm} \times \varnothing 20.8 \text{ mm} \times 84.5 \text{ mm}$ ; 铌合金棒材规格为  $\varnothing 19.1 \times 90.5 \text{ mm}$ 。使用外复法进行制取, 炸药品种为 TB 系列, 药包直径为  $\varnothing 60 \sim 80 \text{ mm}$ , 爆速在  $2100 \sim 2500 \text{ m/s}$ 。试验装置如图 1。

复合后检测结果如下:

(1) 外径尺寸: 不锈钢管长度增长  $2 \sim 3 \text{ mm}$ , 铌合金棒长度增长  $1 \sim 2 \text{ mm}$ ; 头部外径较尾部大  $1 \sim 1.5 \text{ mm}$ 。

(2) UT 探伤: 头部不结合长度小于  $20 \text{ mm}$ , 尾部不结合区 UT 探伤示波图形不明显。

(3) 金相观察: 结合界面呈现细小波纹与直线型交替形态; 不锈钢面晶粒较大。

(4) 热处理后金相:  $800 \text{ }^\circ\text{C} \times 10 \text{ min}$  热处理后, 金相观察未发现界面扩散层。

初步试验结果说明工艺参数选择基本恰当, 后续样品试制应进一步调整工艺参数, 减小不结合区面积。

### 2.4 样品制取

不锈钢管材规格尺寸为  $\varnothing 29 \text{ mm} \times \varnothing 22 \text{ mm} \times 170 \text{ mm}$ ; 铌合金棒材规格尺寸为  $\varnothing 19.5 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$ 。采用初步试验中的试验装置和试验方法, 得到铌-不锈钢复合棒坯, 对其进行检测。

#### 2.4.1 外径尺寸

沿复合棒轴向特定位置, 测得外径尺寸变化, 结果见表 6。

#### 2.4.2 结合性能

(1) 超声波探伤: 使用水浸聚焦探头, 调整探伤灵敏度能探出结合界面  $\varnothing 2 \text{ mm}$  当量平底孔检测。逐根检测, 结果在起爆端和尾端各去除长度  $20 \text{ mm}$  的边界效应区之后, 复合棒的结合率达到  $100\%$ 。

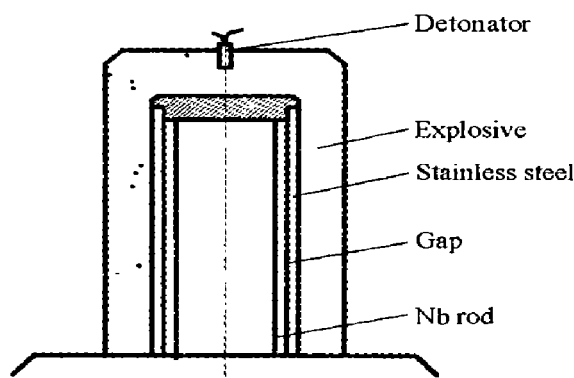


图 1 爆炸复合装置

Fig. 1 Explosive welding device

表 6 复合棒外径尺寸

Table 6 Outer diameter of the samples

到初始炸药处的距离/mm	10	40	70	100	130	160	170
外径/mm	27.30	27.40	27.34	27.30	27.00	26.10	24.90
	27.38	27.46	27.40	27.34	27.30	26.20	25.20
平均外径/mm	27.34	27.42	27.36	27.32	27.18	26.14	25.00

(2) 金相观察: 在与爆轰波传播方向平行的截面进行金相观察, 典型界面形貌如图 2 所示, 其主要特征是波形结合整齐, 且 125 倍下无明显漩涡, 无明显可见熔化分布。

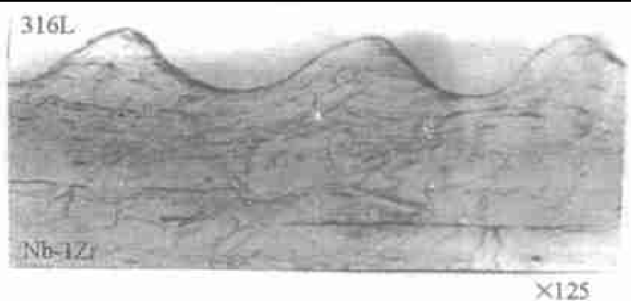


图 2 复合棒波形结合界面

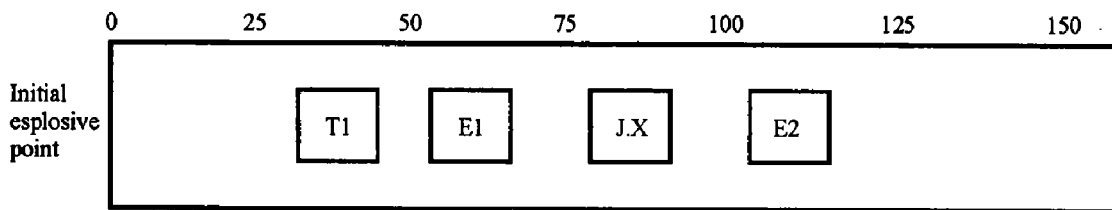
Fig. 2 The wavy interface of clad rod

2.4.3 热循环后金相观察

取样图见图 3。热循环条件: 第一次 800 °C × 5min, 空冷 2min; 第二至第十次为 800 °C × 3min, 空冷 2min。结果如图 2 所示, 结合界面无明显变化, 受腐蚀的不锈钢面无明显再结晶, 界面附近无明显元素扩散带。

2.4.4 剪切强度

取样见图 3, 压剪试样及压剪模具见图 4。试样状态有爆炸和热循环状态, 测得压剪强度见表 7。



J. X: 200 ~ 800 °C thermal cycles by ten times; E: Shear strength tested directly after the explosive process; T: Shear strength tested after 200 ~ 800 °C thermal cycles by ten times.

图 3 复合棒坯取样图

Fig. 3 Positions of the samples

表 7 压剪强度

Table 7 Press-shearing strength

试样号	状态	受剪位置到起爆端距离	剪切强度 $\tau_b$ /MPa	断裂位置
E <sub>1</sub>	爆炸态	~60 mm	301	铌基材
E <sub>2</sub>	爆炸态	~110 mm	310	铌基材
T <sub>1</sub>	热循环	~40 mm	341	铌基材

2.4.5 复合棒坯测试结果对照表

测试结果见表 8。

表 8 复合棒坯测试结果对照表

Table 8 Contrast between required value and measured value

项 目	规定技术指标	样品测试结果
几何尺寸	复合棒长度 ≥ 160 mm, 外径 ≥ 26.5 mm, 芯部铌直径 19.5 mm, 外包不锈钢层厚度 < 3.5 mm。以满足图纸加工所需尺寸为主。	有效长度内外径 27.3 ~ 27.4 mm, 不锈钢层厚 3.9 mm, 满足要求。
结合面积率	> 95 %	UT 检测为 100 %
结合强度	> 250 MPa	> 300 MPa, 且断口在铌基体中
200 ~ 800 °C 热循环	结合界面保持完整	金相表明结合界面完整, 且无明显扩散层。

### 3 结论

试验证明,在合适的动态条件下,可形成铌与不锈钢的冶金结合,性能测试结果表明科研样品的性能超过了预定的技术指标。复合棒结合面积率100%,界面抗剪强度大于300 MPa,略高于铌母材的强度,说明如果炸药的品种、药量、间隙等影响爆炸复合的主要工艺参数选择得当,动态条件合适,其最高结合强度可以达到铌材的强度,产生等强结合。另外,对铌-不锈钢复合棒进行热循环实验表明,该材料可经受800 °C的多次热冲击,界面保持完好,且无明显热扩散。

### 参考文献:

- [1] 裴大荣, 郭悦霞. 钛-不锈钢复合棒结合强度评价[J]. 稀有金属材料与工程, 1997, 26(5): 51—53.  
PEI Da-rong, GUO Yue-xia. Evaluation on bonding strength of titanium-stainless steel cladding bar [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1997, 26(5): 51—53.
- [2] 周金波, 马东康, 郭悦霞, 等. 爆炸焊接 Ni/Ti 双金属复合棒的工艺与性能研究[J]. 世界有色金属, 1999, (A08): 57—59.  
ZHOU Jin-bo, MA Dong-kang, GUO Yue-xia, et al. The explosive welding technology and property research of Ni/Ti cladding bar [J]. Nonferrous Metal of World, 1999, (A08): 57—59.

## Producing Nb-stainless steel clad rods by outer-clad explosive welding method

JIAO Yong-gang<sup>\*</sup>, MA Dong-kang, GUO Yue-xia, PEI Da-rong  
(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, Shaanxi, China)

**Abstract:** The metallurgical bond between the Nb and the stainless steel was obtained under the appropriate dynamic conditions, and the predestinated technical requirements can be reached. Furthermore, a maximal bonding strength equal to that of the Nb rods can be achieved under due conditions. The so-called equal strength would be resulted if parameters, such as the type and the amount of the explosive, the gap between the prepared raw materials, are properly chosen and the dynamic conditions are suitable.

**Key words:** mechanics of explosion; clad rods; explosive welding; stainless steel; Nb; outer-clad explosive welding method; metallurgical bond

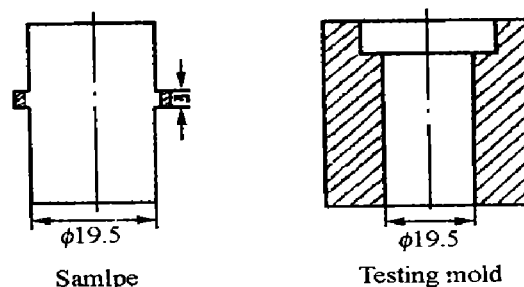


图4 压剪试样及测试模型

Fig. 4 The press-shearing sample and testing mold

\* Corresponding author: JIAO Yong-gang  
E-mail address: zlc@nin.com;  
Telephone: 029-86281815