

doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2014.01.014

# 回火焊道对核电低合金钢表面镍基堆焊层 热影响区性能的影响\*

朱 平, 赵建仓, 王淦刚, 石云哲

(苏州热工研究院有限公司 再制造与电力安全中心, 江苏 苏州 215004)

**摘 要:** 采用钨极氩弧焊接方法在核电用 16MND5 低合金钢表面进行 690 镍基焊丝堆焊, 分别堆焊 1 层和利用回火焊道方法堆焊 3 层, 研究回火焊道对堆焊层热影响区的硬度、组织和冲击韧性的影响。结果表明: 回火焊道产生的回火效应可有效降低合金钢镍基堆焊层热影响区的硬度至可接受硬度范围 320 HV<sub>10</sub> 以下, 堆焊层热影响区的冲击韧性提高 27% 以上, 均值达到 163 J/cm<sup>2</sup>, 热影响区板条状组织得到有效回复, 获得满足 RCC-M 标准要求要求的低合金钢焊接热影响区硬度和冲击韧性指标。研究表明利用回火焊道技术可实现低合金钢镍基堆焊免除高温回火热处理。

**关键词:** 镍基合金; 堆焊; 回火焊道; 热影响区; 硬度

**中图分类号:** TG174.44; TG115.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2014)01-0087-06

## Influence of Tempering Bead on Performance of Heat Affected Zone of Nickel-based Alloy Surfacing Layer for Nuclear Power Low Alloy Steel

ZHU Ping, ZHAO Jian-cang, WANG Gan-gang, SHI Yun-zhe

(Remanufacturing and Electrical Safety Center of SNPI Suzhou Nuclear Power Research Institute Co. Ltd., Suzhou 215004, Jiangsu)

**Abstract:** Tungsten argon arc welding method is used to surfacing 690 nickel-based alloy welding wire on low alloy steel 16MND5, the first layer and the third layer using tempering bead technology, respectively. The hardness, microstructure, and impact toughness of the surfacing layer heat affected zone are investigated. The results show that the hardness of surfacing layer HAZ can be dropped to below 320 HV<sub>10</sub> by the effect of tempering bead, impact toughness of surfacing HAZ increases by more than 27%, and the average reaches 175 J/cm<sup>2</sup>, strip microstructure can be improved effectively, which can satisfy the requirements of RCC-M standard for low alloy steel welding HAZ hardness and toughness index. Studies show that the use of tempering bead technology can achieve the post weld heat treatment exemption of low-alloy nickel-based surfacing.

**Key words:** nickel-based alloy; surfacing; tempering bead; heat affected zone; hardness

### 0 引 言

核电站不锈钢与低合金钢异质接头内壁缺陷可采用在焊接接头表面直接堆焊的方法进行修复, 称为 Weld Overlay 修复方法<sup>[1]</sup>, 该方法原理是通过外壁堆焊使内壁产生压缩应力以阻止

缺陷扩展, 获得足够的结构强度, 从而保证结构安全运行。该方法因不接触核电一回路冷却剂介质, 使得焊接操作人员受辐射程度大大降低。堆焊材料一般为镍基合金, 该条件下堆焊层热影响区因为镍基合金与低合金钢母材之间成分差

**收稿日期:** 2013-08-15; **修回日期:** 2013-11-14; **基金项目:** \* 国家能源应用技术研究工程示范项目(NY20111201-1)

**作者简介:** 朱平(1980-), 男(汉), 江苏苏州人, 高级工程师, 硕士; **研究方向:** 核电焊接技术开发及性能评价

**网络出版日期:** 2013-12-20 07:26; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20131220.0726.011.html>

**引文格式:** 朱平, 赵建仓, 王淦刚, 等. 回火焊道对核电低合金钢表面镍基堆焊层热影响区性能的影响 [J]. 中国表面工程, 2014, 27(1): 87-92.

异,引起稀释,熔合区会生成马氏体带<sup>[2]</sup>,粗晶区会形成带有板条特征的贝氏体组织,该类组织脆性较大、韧性较差,需高温回火改善,但现场修复中结构和服役条件决定了难以进行焊后高温回火热处理,回火焊道技术通过后续焊道对前焊道的回火作用有效改善热影响区组织和性能<sup>[3]</sup>,同时降低焊接残余应力<sup>[4]</sup>,可在该领域进行尝试应用。文中重点研究回火焊道对低合金钢镍基堆焊层热影响区的硬度和韧性影响,结合组织和断口特征,分析利用回火焊道产生的回火效应能否得到满足使用要求的堆焊层热影响区,进而是否可免除高温回火热处理,验证回火焊道技术应用可行性。

## 1 试验材料和方法

采用镍基合金在低合金钢板上进行堆焊,堆焊焊材为 ERNiCrFe-7A 镍基焊丝,成分见表 1,规格为 2.0 mm;低合金钢板牌号为 16MND5,成分见表 2,规格为 350 mm×250 mm×35 mm。采用钨极氩弧焊(GTAW),堆焊焊接热输入量控制在 5~10 kJ/cm。预热温度为 150 ℃,道间温度控制在 150~200 ℃,分别堆焊 1 层和堆焊 3 层,焊后 250 ℃×3 h 消氢处理。切取堆焊 1 层的硬度和冲击试样,堆焊 3 层的中部和边缘区域

硬度及冲击试样,测试其硬度及冲击韧性,结合显微组织及断口特征进行分析。

## 2 性能检测结果

### 2.1 截面各区域硬度

采用 HVS50Z 型自动转塔数显维氏硬度计在试样金相面上进行硬度测试,试验载荷 10 kg。图 1(a)为测试位置,图 1(b)代表堆焊 1 层后自熔合线向母材垂直焊道波峰和波谷两个位置的硬度分布,图 1(c)代表堆焊 3 层后自熔合线向母材垂直焊道波峰和波谷两个位置硬度分布。图 2(a)为测试位置,图 2(b)为堆焊 3 层的边缘焊道自母材向热影响区(箭头方向,自右向左)平行于熔合线方向的横向硬度分布,图 2(c)为堆焊 3 层的边缘焊道自堆焊层向母材(箭头方向,自上向下)垂直于熔合线的纵向硬度分布。

图 1 显示,堆焊 1 层情况下,最高硬度达到 450 HV<sub>10</sub>,两条曲线中 7 个测点硬度在 350 HV<sub>10</sub> 以上,堆焊 3 层后的硬度峰值降至 310 HV<sub>10</sub> 左右,其余数据均降至 300 HV<sub>10</sub> 以下。图 2 显示,低合金钢母材硬度在 200 HV<sub>10</sub> 以下,边缘焊道热影响区的最右侧硬度在 330 HV<sub>10</sub> 以上。沿箭头向左,热影响区硬度有所下降,硬度平均值为 291 HV<sub>10</sub>。

表 1 ERNiCrFe-7A 焊丝的化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of the ERNiCrFe-7A wire (w/%)

Element	C	Cr	Mo	Fe	Mn	Si	N	Other	Ni
Content	0.035	28.0—31.5	0.50	8.0—11.0	1.00	0.50	0.030	0.50	Bal.
Element	P	S	Cb+Ta	Ti	Co	Cu	Al	Al+Ti	
Content	0.010	0.008	0.10	1.0	0.020	0.20	1.10	1.50	

表 2 16MND5 低合金钢的化学成分(质量分数/%)

Table 2 Chemical composition of the 16MND5 low alloy steel (w/%)

Element	C	Mn	P	S	Si	Ni
Content	≤0.22	1.15—1.60	≤0.012	≤0.012	0.10—0.30	0.50—0.80
Element	Cr	Mo	V	Cu	Al	Co
Content	≤0.25	0.43—0.57	≤0.01	≤0.20	≤0.04	≤0.03

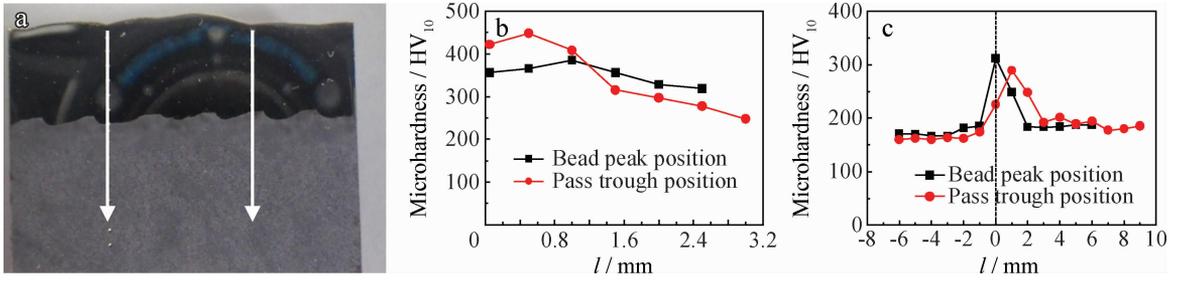
### 2.2 冲击吸收功

从堆焊层热影响区和母材分别取冲击试样进行 0 ℃ 冲击试验,试验机为 AMSLER RKP

450 仪器化摆锤冲击试验机。取样位置见图 3,分别在堆焊 1 层和堆焊 3 层后分别取热影响区冲击样,试样尺寸:55 mm×10 mm×10 mm,V 型

缺口,缺口轴线平行于试件表面,热影响区缺口根部位于堆焊层的熔合线位置,采用 GB/T 229-2007“金属材料夏比摆锤冲击试验方法”和 GB/T

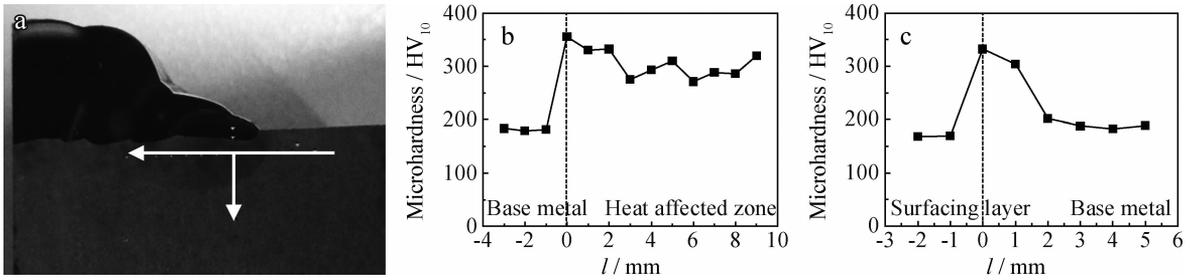
2650“焊接接头冲击试验方法”进行测试。母材、堆焊 1 层和堆焊 3 层的热影响区冲击韧性测试结果见表 3 所示。



(a) Test position (b) One surfacing layer HAZ and base metal (0 represents the fusion line) (c) Three layers surfacing (weld on the left side, base metal on the right side)

图 1 焊道纵向硬度分布

Fig. 1 Microhardness distribution of the weld longitudinal



(a) Test position (b) Transverse microhardness distribution (0 edge position on behalf of the heat affected zone) (c) Longitudinal microhardness distribution (0 position represents the fusion line)

图 2 边缘焊道硬度分布

Fig. 2 Microhardness distribution of the edge weld longitudinal

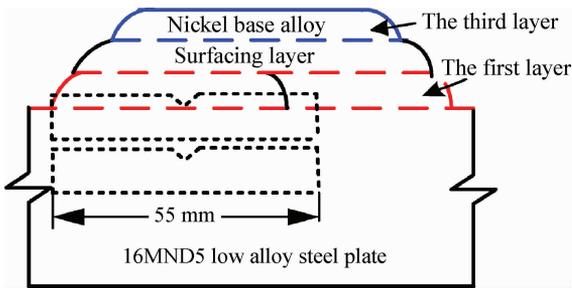


图 3 取样位置图

Fig. 3 Schematic diagram of sample location

### 3 分析讨论

试验测试了堆焊 1 层和 3 层条件下的镍基堆焊层热影响区硬度。堆焊 3 层的热影响区硬度峰值显著低于堆焊 1 层的热影响区,这是回火焊道的作用,前一焊道的熔合区和粗晶区处于后续焊道和上层相邻焊道的高温回火温度区间(见图

4)<sup>[5]</sup>,相当于焊接热循环对前焊道热影响区起到一定的回火效应。3 层堆焊的中部区域硬度显著小于焊道边缘区域,这是因为处于中部的焊道其相邻焊道均会对其产生回火效应,而处于边缘的焊道,相应的回火效应偏弱。16MND5 钢组织为回火贝氏体,镍基合金为奥氏体组织,采用镍基合金堆焊低合金钢,在其熔合区由于焊道稀释,区域内会形成板条特征明显的马氏体组织,粗晶区由于受焊接热循环作用回火贝氏体重新奥氏体化后冷却形成贝氏体,也具有板条状特征,但多层堆焊的焊道热影响区由于回火效应,其板条组织得到回复(图 5),板条特征模糊<sup>[6]</sup>,硬度峰值大幅下降,韧性得到有效改善。

对于室温下抗拉强度  $R_m$  超过 450 MPa 的低合金钢,其焊缝和热影响区在热处理态下能接受的最高硬度为 320 HV<sub>10</sub><sup>[7]</sup>,而采用镍基合金堆焊后低合金钢热影响区硬度的最大值与该区域所

表3 试样的冲击韧性

Table 3 Impact toughness of samples

No.	Sample code	Location	$a_{kv2}/(J \cdot cm^{-2})$	Average value/ $(J \cdot cm^{-2})$	Note
1	111	HAZ	127.5		
2	121	HAZ	140.0	137.7	1-layer surfacing
3	131	HAZ	145.6		
4	11	HAZ	163.8		
5	21	HAZ	207.5	180.2	3-layer surfacing
6	31	HAZ	169.4		
7	12	Low-alloy steel base metal	223.8		
8	22	Low-alloy steel base metal	236.9	241.0	
9	32	Low-alloy steel base metal	262.5		

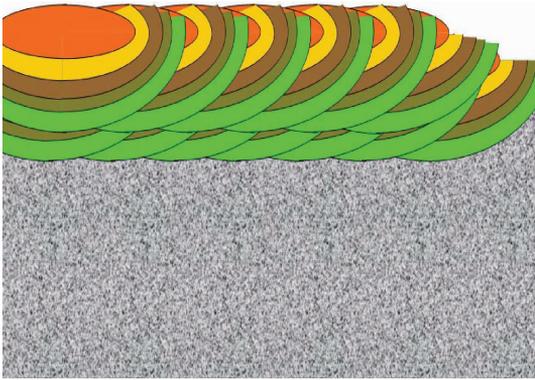


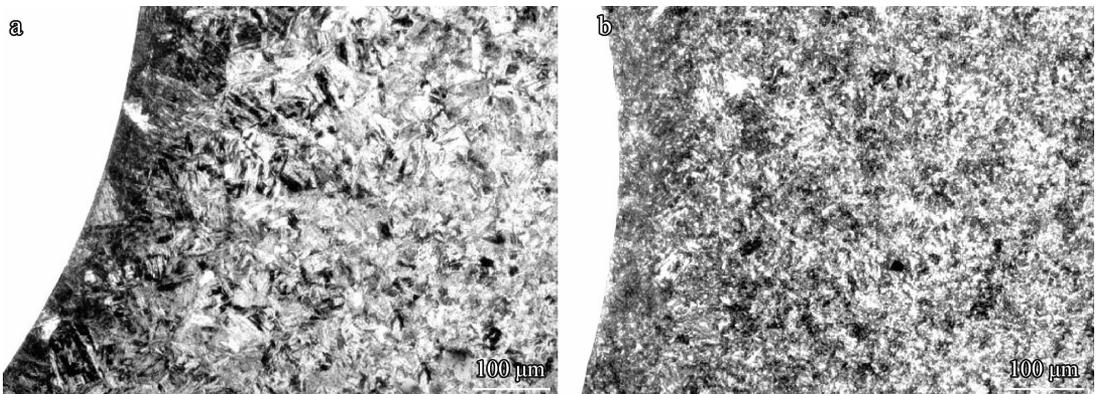
图4 堆焊焊道布置图

Fig. 4 Distribution of surfacing layer bead

经的焊接热循环次数有关,堆焊3层后处于中部的热影响区,其硬度普遍低于 $320\text{ HV}_{10}$ ,即达到热处理态下的硬度可接受范围,因此可认为该

区域不需进行焊后高温回火热处理。边缘焊道因回火效应不足,热影响区硬度峰值和均值均超过 $320\text{ HV}_{10}$ ,该区域可采用在边缘焊道上方增加堆焊焊道的方法,通过热循环增加对边缘焊道的回火效应,增加的焊道应全部位于原堆焊层,不可接触边缘的低合金钢基体,否则会产生新的未回火热影响区。

3层镍基合金堆焊层的热影响区冲击韧性单值均超过 $163\text{ J/cm}^2$ ,与1层堆焊的热影响区冲击韧性相比提高27%以上,但与母材相比有一定的差距,这是因为热影响区冲击试样的启裂区基本处于热影响区域,扩展区位于母材,与母材冲击试样的启裂和扩展区全部位于母材不同,由于启裂区处于热影响区,而热影响区的韧性不均匀,一般情况下熔合线附近、粗晶区韧性要弱于母



(a) The first layer (b) The third layer

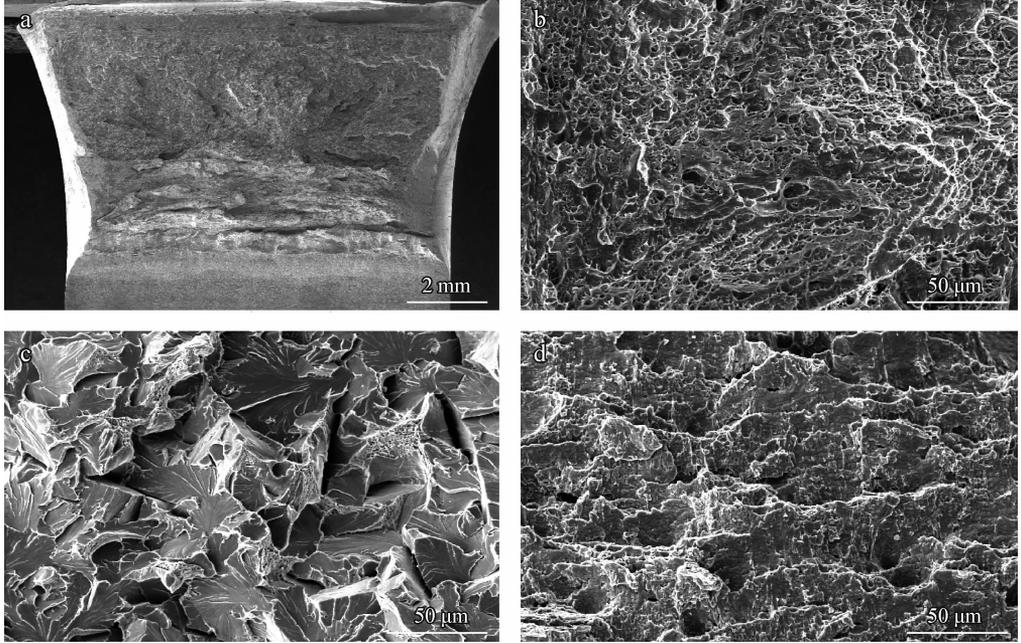
图5 堆焊层热影响区组织特征

Fig. 5 Microstructure of the heat affected zone in hardfacing layer

材,而细晶区韧性要高于母材,综合来讲细晶区的提升作用弱于熔合区和粗晶区的劣化效应。目前的实验结果与该条件下的冲击韧性要求值相比(不区分取样方向,单值最低  $90 \text{ J/cm}^2$ ,均值最低  $70 \text{ J/cm}^2$ ),富裕度仍比较高。

采用捷克 TESCAN VEGA TS5136XM 扫

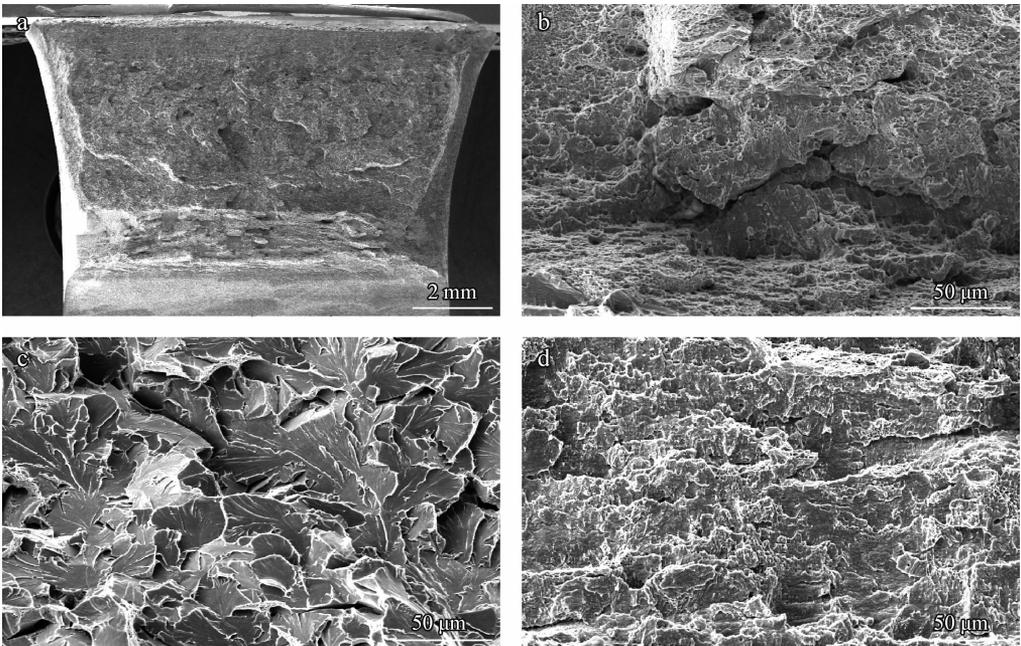
描电子显微镜对冲击断口进行微观观察。一般情况下,冲击断口存在 3 个区域,即启裂区(纤维区)、放射区及剪切唇区域<sup>[8]</sup>。其断裂过程是首先在缺口中部形成裂纹源,然后是纤维区、放射区及沿无缺口的其它三边分布的剪切唇区。21 冲击试样和 111 冲击试样断口见图 6、图 7 所示。



(a) Fracture macroscopic feature (b) Initial crack area (c) Extension area (d) Secondary fiber area

图 6 21 冲击试样的断口特征

Fig. 6 Impact fracture characteristics of the 21 sample



(a) Fracture macroscopic feature (b) Initial crack area (c) Extension area (d) Secondary fiber area

图 7 111 冲击试样的断口特征

Fig. 7 Impact fracture characteristics of the 111 sample

两个试样的启裂区均为均为韧窝特征、韧性启裂。放射扩展区均为解理特征,呈现从中心向周围发散的特征,21 试样该区域带有少量的韧窝特征,而 111 试样无韧窝特征,这与其冲击韧性有差异是对应的。两个试样断口均带有二次纤维区,这是由于裂纹进入压应力区时,压缩变形对裂纹扩展有阻滞作用,使扩展速度显著降低造成的。21 试样相对于 111 试样其压缩变形更明显,对裂纹扩展的阻滞作用更大,消耗的能量也更大。

#### 4 结 论

(1) 利用回火焊道产生的焊接热循环可对堆焊焊道热影响区产生回火效应,有效降低低合金钢镍基堆焊层热影响区的硬度,使区域内板条组织得到有效回复,获得满足标准要求的硬度和冲击韧性指标,试验结果表明利用回火焊道技术可免除 16MND5 钢镍基堆焊层热影响区焊后高温回火热处理,表明该技术可应用到 Weld Overlay 修复方法中。

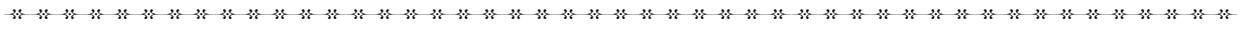
(2) 堆焊区域边缘焊道热影响区,可通过增加堆焊焊道的方法进一步增加回火效应,但增加的焊道应避免接触低合金钢基体。

#### 参考文献

- [1] Hermann R. Topical report supporting an expedited NRC review of the content of the code case needed for dissimilar metal weld overlay repairs [R]. California: EPRI, 2006.
- [2] Dupont J N, Kusko C S. Technical note; martensite formation in austenitic/ferritic dissimilar alloy welds [J]. Welding Journal, 2007, 86(8): 51-55.
- [3] 张莉莉, 张晓勇, 郝瑞辉, 等. 回火焊道热处理对 X80 管线钢热影响区组织性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2008, 37(21): 6-9.
- [4] 张亦良, 石显, 赵建平, 等. 基于新型回火焊道的焊接残余应力评价 [J]. 焊接学报, 2012, 33(7): 50-53.
- [5] Ibrahim R N, Shehata T. The maintenance and integrity of thick walled pressure vessels using temper bead welding technique [R]. Australia: Department of Mechanical Engineering, Monash University, 2012.
- [6] 王路兵, 唐获, 任毅, 等. 回火对马氏体/贝氏体高强复相钢组织性能的影响 [J]. 轧钢, 2007, 24(1): 18-22.
- [7] RCC-M-Edition 2000. Design and construction rules for mechanical components of pwr nuclear islands [S].
- [8] 苏锡九, 陈英, 王广生, 等. 金属材料断口分析及图谱 [M]. 北京: 科学出版社, 1991.

作者地址: 苏州市西环路 1788 号 215004  
 苏州热工研究院有限公司  
 Tel: (0512) 6860 2419  
 E-mail: zhuping@cgnpc.com.cn

(责任编辑: 常青)



#### • 本刊副理事长单位介绍 •

#### 武汉材料保护研究所

武汉材料保护研究所始建于 1953 年, 原为机械工业部直属大型骨干研究所, 随着我国科技体制改革的发展, 转制为科技型企业, 现隶属于国务院国有资产管理委员会管理的机械科学研究总院。经过 50 余年的发展, 武汉材料保护研究所已成为表面处理工艺、材料、设备的研发与生产, 表面覆盖层性能测试、产品质量检测, 表面保护工程设计与施工的高新技术企业。

研究所设有电沉积、化学沉积、等离子体表面技术、涂料涂装、防锈封装、表面化学转化、化学热处理、热喷涂(焊)、激光表面改性、缓蚀技术、摩擦磨损、环境腐蚀及表面保护工程等专业, 从事表面工程领域的共性技术研究、产品开发与生产、性能与质量检测及防腐蚀工程设计与施工。先后承担一大批国家、省、市重大科研项目, 包括科技部“973”、“863”计划及国防军工科研项目等。建所以来, 已取得科技成果 600 多项, 大部分成果达到国际或国内先进水平, 得到市场推广应用, 并获得各级政府奖励和国家专利。研究所具有规范、高效的管理与运行机制, 通过 ISO9001 质量管理体系认证。

武汉材料保护研究所任《中国表面工程》期刊副理事长单位, 所长顾卡丽研究员任期刊理事会副理事长。