

## N80 钢级 HFW 焊管焊缝电化学性能研究\*

任永峰<sup>1,2</sup>, 王 涛<sup>1,2</sup>, 黄晓辉<sup>1,2</sup>, 何石磊<sup>1,2</sup>, 施宜君<sup>1,2</sup>, 赵西岐<sup>1,2</sup>

(1. 宝鸡石油钢管有限责任公司, 陕西 宝鸡 721008;

2. 国家石油天然气管材工程技术研究中心, 陕西 宝鸡 721008)

**摘 要:** N80 钢级 HFW 焊管焊缝的耐蚀性是影响其使用寿命的重要因素。采用微电极扫描法、电化学自腐蚀电位法, 研究 N80 钢级 HFW 焊管焊缝焊态和热处理后的电化学性能。分析认为: 相较于焊态, 热处理后的 N80 钢级 HFW 焊管, 其焊缝区和母材区的电流密度分布更均匀、电位差更小, 组织均匀性更好; 沟槽腐蚀敏感性系数由焊态的 1.32 降至 1.21, 沟槽腐蚀发生概率降低。

**关键词:** HFW 焊管; 电化学极化法; 微电极扫描法; 电流密度

**中图分类号:** TG335.75 **文献标志码:** B **文章编号:** 1001-2311(2017)05-0034-04

## Research on Electrochemical Properties of Weld Joint of N80 HFW Welded Pipe

REN Yongfeng<sup>1,2</sup>, WANG Tao<sup>1,2</sup>, HUANG Xiaohui<sup>1,2</sup>, HE Shilei<sup>1,2</sup>, SHI Yijun<sup>1,2</sup>, ZHAO Xiqi<sup>1,2</sup>

(1. Baoji Petroleum Steel Pipe Co., Ltd., Baoji 721008, China; 2. National Petroleum and Gas Tubular Goods Engineering Technology Research Center, Baoji 721008, China)

**Abstract:** The corrosion resistance of N80 HFW welded pipe is an important parameter which affects its service life. The electrochemical properties of the weld joint of the N80 HFW welded pipe under the weld condition and after heat treatment are studied by means of the microelectrode scanning method and the electrochemical self-corrosion potential method. The results show that, compared to the as-welded N80 HFW pipe, the N80 HFW pipe as-heat treated has such advantageous electrochemical properties as more uniform distribution of current density, smaller potential difference, and better microstructure homogeneity both in the weld zone and base metal zone; and the sensitivity coefficient of grooving corrosion is reduced from 1.32 under the weld condition to 1.21 after heat treatment so that the chances of occurrence of grooving corrosion is reduced.

**Key words:** HFW welded pipe; electrochemical polarization; microelectrode scanning; current density

目前, 高频焊接(HFW)钢管已广泛应用于石油和天然气领域<sup>[1-3]</sup>。HFW 焊管焊接时, 金属经历了从液相到固相的结晶转变, 冷却至较低温度下又经历了重结晶转变(固态下相变)。HFW 焊管焊接过程中, 在焊缝处形成焊缝区、热影响区和母材区, 焊缝区在焊接加热和连续冷却过程中发生组织

转变。而受焊接热过程的影响, 发生了焊缝区与母材区原始组织和性能不同的变化, 从而形成了焊缝附近不同的显微组织<sup>[4]</sup>, 也使得焊缝区和母材区的电化学性能产生差异, 致使 HFW 焊接管道焊接区在腐蚀介质中易于出现沿焊缝熔合线选择性腐蚀, 即沟槽腐蚀<sup>[5-6]</sup>, 从而缩短了 HFW 焊管的使用寿命, 并限制了其应用。

本文采用微电极扫描法和电化学极化法, 研究 N80 钢级 HFW 焊管焊缝区热处理前后的电化学性能变化规律, 为降低 HFW 焊管沟槽腐蚀敏感性提供理论依据。

\* 国家科技支撑计划: 高强度耐腐蚀石油天然气集输与输送用管线钢生产技术(2011BAE25B03)

任永峰(1971-), 男, 工程师, 主要从事油气管材耐腐蚀性研究工作。

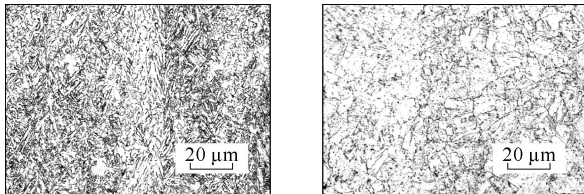
## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

试验用 N80 钢级 HFW 焊管的化学成分见表 1。以 N80 钢级 HFW 焊管(焊态)和 925 °C 正火+

表 1 试验用 N80 钢级 HFW 焊管的化学成分(质量分数)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Nb	Mo	Fe
0.34	≤0.19	≤1.19	≤0.01	≤0.002	≤0.02	≤0.01	≤0.01	≤0.03	≤0.02	余量



(a) 1 号试样管(焊态) (b) 2 号试样管(热处理后)

图 1 不同试样管焊缝的微观组织形貌

### 1.2 微电极扫描法

试验采用微电极扫描振动电极技术(SVET)。SVET 技术是利用扫描振动探针(SVP)不接触样品表面的情况下,检测样品在溶液中局部腐蚀电位的一种新技术<sup>[7]</sup>。分别在 1 号和 2 号试样管上切割 10 mm×10 mm×2 mm 大小的试样,确保焊缝区处于试样中心线,样品表面用 SiC 砂纸逐级打磨并经机械抛光、丙酮除油和酒精清洗,腐蚀介质选择一定浓度的 NaCl 溶液,扫描电极沿垂直于焊缝方向从母材区开始穿过焊缝进入另一侧母材区,准确扫描记录焊缝区到母材区的电流分布变化。

### 1.3 电化学极化法

由于 HFW 焊管焊缝区和热影响区宽度较小,采用常规的自腐蚀电位测量方法无法对焊接接头进行分区检测。为了能准确测定焊接接头各区域的自腐蚀电位及电化学极化,将 Φ6 mm 玻璃管加热,一端拉制为内径 0.15 mm 的毛细管,在管内充满 3.5%NaCl 溶液,毛细管可精确地放置在焊缝中心和热影响区位置,在玻璃管内放置细玻璃管盐桥,毛细管口下的金属微区与饱和甘汞电极组成自腐蚀电位测量回路。以焊接接头微区作为研究电极,以饱和甘汞电极作为参考电极,在 3.5%NaCl 溶液中,待溶液和研究电极界面的双电层达到稳定后,进行电化学极化及自腐蚀电位检测。

### 1.4 沟槽腐蚀敏感性系数试验

沟槽腐蚀敏感性系数试验应用恒电位电化学极

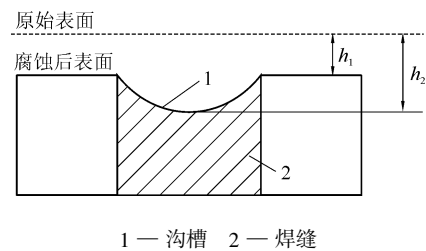
750 °C 退火工艺下的试样管为研究对象。1 号试样管(焊态)焊缝的微观组织为铁素体和珠光体,2 号试样管(热处理后)焊缝的微观组织为回火索氏体,不同试样管焊缝的微观组织形貌如图 1 所示。

化方法,采用三电极系统,辅助电极为 Pt,腐蚀介质采用 3.5%NaCl 中性溶液,试验在常温下进行。对试件施加 -550 mV 的恒电位(相对于饱和甘汞电极 SCE),试件处于阳极极化状态,焊缝区和母材区因其各自的电化学驱动力不同而具有不同腐蚀速率,呈现沟槽腐蚀,通常沿焊缝区形成腐蚀沟槽。当试样恒电位极化 144 h 后,停止试验,取出试样并清洗,测量腐蚀沟槽的几何参数,计算沟槽腐蚀的敏感性系数。

采用具有相对意义的沟槽腐蚀敏感性系数  $\alpha$  作为沟槽腐蚀敏感性的评价指标,其定义为:

$$\alpha = h_2 / h_1 \quad (1)$$

在公式(1)中,  $h_2$  和  $h_1$  分别是腐蚀试验后原始表面到腐蚀沟底和母材的深度,沟槽腐蚀敏感性系数测量如图 2 所示。一般认为,当沟槽腐蚀敏感性系数  $\alpha > 1.3$ <sup>[8]</sup>,HFW 焊管具有高的沟槽腐蚀敏感性。



1 — 沟槽 2 — 焊缝

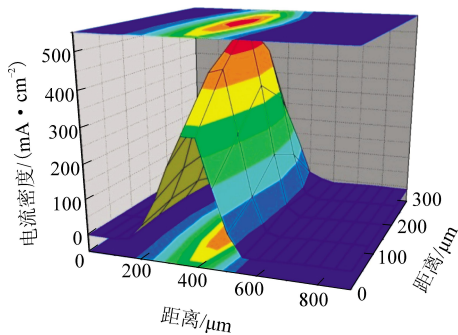
图 2 沟槽腐蚀敏感性系数测量示意

## 2 结果与讨论

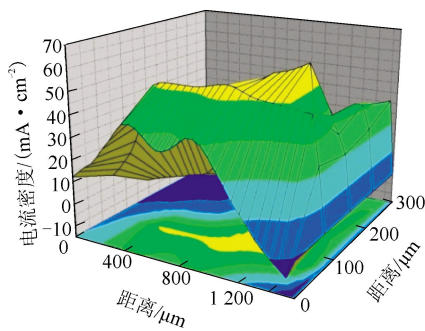
### 2.1 微电极扫描法

N80 钢级 HFW 焊管热处理前后焊缝的电流密度分布规律如图 3 所示。从图 3 可以看出:焊态的焊缝区电流密度远大于母材区与热影响区电流密度。1 号焊态试样管在焊缝区域 -200~200 μm,电流密度最大可达 400 mA/cm<sup>2</sup>,远高于热影响区和母材区,表明该区域腐蚀速率较母材与热影响区都大。从电流密度分布的投影图上可以看出,焊缝处

的电流密度分布沿焊缝方向是不均匀的,表明腐蚀过程中沿焊缝纵向也不是均匀的,这也是焊缝腐蚀沟槽出现忽深忽浅的原因。2号热处理后试样管的焊缝区电流密度大幅下降,最大电流密度降低至 $50 \text{ mA/cm}^2$ ,并与母材区电流密度基本一致。由图3可知,N80钢级HFW焊管焊缝经 $925^\circ\text{C}$ 正火+ $750^\circ\text{C}$ 退火处理后可以有效减小焊缝中心的电流密度,从而降低焊缝的沟槽腐蚀敏感性。



(a) 1号试样管(焊态)



(b) 2号试样管(热处理后)

图3 N80钢级HFW焊管热处理前后焊缝的电流密度分布规律

N80钢级HFW焊管热处理前后焊缝的电流密度分布情况如图4所示。从图4可以看出:1号焊态试样管焊缝区的电流密度分布极不均匀,出现了

较明显的波峰,且焊缝区电流密度均大于母材区电流密度;2号热处理后试样管的电流密度分布较均匀,焊缝区和母材区电流密度差值明显减小,且趋于均一。由此可见,热处理后,虽然N80钢级HFW焊管焊缝区和母材区的电流密度仍有起伏,但变化起伏明显减小,电流密度的分布更加均一平缓。

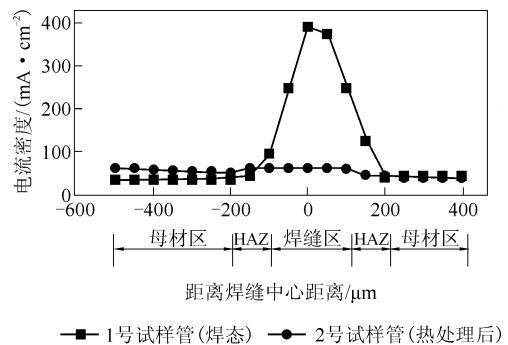


图4 N80钢级HFW焊管热处理前后焊缝的电流密度分布情况

## 2.2 热处理对焊缝电化学极化的影响

N80钢级HFW焊管焊接接头自腐蚀电位测量结果见表2,焊接接头各区域与母材的自腐蚀电位差均不同。两种不同的状态下,焊缝中心均具有最低的自腐蚀电位,热影响区次之,由于母材区的自腐蚀电位最高,表明热影响区和焊缝区具有较高的电化学活性。其中,1号焊态试样管的焊缝区与母材区的自腐蚀电位差较大,相差 $29 \text{ mV}$ ,表明该状态下的焊缝区与母材区易于形成微电池,易发生沟槽腐蚀;2号热处理后试样管,其焊缝区、热影响区与母材区的电位差均减到最小,分别为 $8 \text{ mV}$ 和 $3 \text{ mV}$ ,焊接接头的电化学性能趋于一致,表明2号热处理后试样管焊接接头的选择性腐蚀减弱,均匀腐蚀趋势增强。可见,选择合理的热处理工艺对减小焊接接头与母材区自腐蚀电位差具较大影响。

表2 N80钢级HFW焊管焊接接头自腐蚀电位测量结果

试样编号	母材	mV			
		热影响区		焊缝中心	
		自腐蚀电位	与母材电位差	自腐蚀电位	与母材电位差
1	-578	-588	10	-597	29
2	-545	-548	3	-556	8

N80钢级HFW焊管热处理前后焊缝区与母材区的极化曲线如图5所示。如图5(a)所示,1号焊态试样管母材区和焊缝区的极化曲线在弱极化区,

焊缝金属的极化曲线位于基体金属的下方,在强极化区,因焊缝区的宽度很小,通常在 $0.1\sim 0.2 \text{ mm}$ ,二者的阳极极化曲线差别不大;由于1号试样母材

区和焊缝区自腐蚀电位差别较大,因此1号试样更加易于发生沟槽腐蚀。如图5(b)所示,2号热处理试样管母材区和焊缝区的极化曲线在弱极化区,焊缝区的极化曲线仍在基体金属的下方,并且非常接近;而在强极化区焊缝极化曲线和基体金属的几乎重合,其母材区和焊缝区自腐蚀电位差别不大。

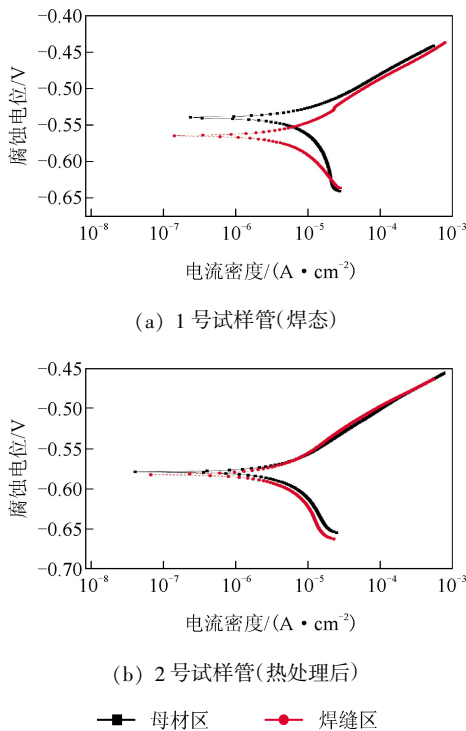


图5 N80钢级HFW焊管热处理前后焊缝区与母材区极化曲线

N80钢级HFW焊管经沟槽腐蚀试验后的宏观形貌如图6所示。对比可见,2号试样管焊缝沟槽腐蚀明显变浅,与周围的形貌接近一致。测量计算可知:1号、2号试样管的沟槽腐蚀敏感性系数 $\alpha$ 分别为1.32和1.21,2号热处理后试样管的沟槽腐蚀敏感性系数变小。因此,HFW焊管经过热处理可以降低其 $\alpha$ ,足够时间的无相变退火处理效果更加显著,可消除残余应力引起的沟槽腐蚀<sup>[9-10]</sup>。

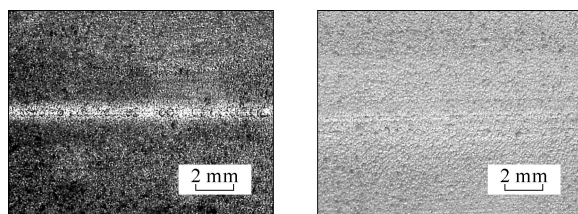


图6 N80钢级HFW焊管经沟槽腐蚀试验后的宏观形貌

因此,由于焊缝中心的自腐蚀电位较母材的低,导致焊缝和母材之间产生电位差,焊缝区的电流密度明显大于母材区,且电流分布不均匀、电位差等电化学性能存在,在实际的腐蚀环境中,焊缝区可形成局部的腐蚀电池阳极区,使焊缝区的电化学活性提高,从而导致该区域的腐蚀速率较母材区大,最终形成沟槽腐蚀。

### 3 结论

(1) N80钢级HFW焊管热处理后,其组织细化,晶粒度变小,焊缝区与母材区的组织更加接近,其均一化程度得到很大提高。

(2) N80钢级HFW焊管焊态焊缝区和母材区电流密度差值较大,而热处理后,其焊缝区和母材区电流密度差值大大减小,说明热处理后焊缝区和母材区电位差变小;1号、2号试样管的沟槽腐蚀敏感性系数分别为1.32和1.21,说明经过退火热处理的2号试样管,其沟槽腐蚀敏感性系数变小,热处理工艺降低了沟槽腐蚀发生的概率。

### 4 参考文献

- [1] 曹勇,穆东,韩会全.焊接油套管的生产工艺及其发展[J].钢管,2011,40(6):20-25.
- [2] 温宏伟,周勇.HFW焊管无缝化及实现[J].焊管,2011,34(3):51-53.
- [3] 林里.热处理工艺对HFW焊缝显微组织和力学性能的影响[J].焊管,2012,35(6):63-68.
- [4] 庚英桂,郝红苗.直缝焊管焊接接头的金相组织分析[J].焊接技术,1998,27(6):10-11.
- [5] 高慧临.管线钢——组织、性能、焊接行为[M].西安:陕西科学技术出版社,1995:151.
- [6] Kato C, Otaguro Y, Kado S, et al. Grooving corrosion in electric resistance welded steel pipe in sea water[J]. Chemischer Informationsdienst, 1978, 18(1): 61-74.
- [7] Kurisu T, Kyuno T, Harada S, et al. Effect of various factors, mechanisms and preventive methods of grooving corrosion of ERW and CBW carbon steel pipes[J]. Kawasaki Steel Technical Report, 1979, 11(3): 321-336.
- [8] 毕宗岳,任永峰,井晓天.微电极扫描法对HFW焊缝沟槽腐蚀敏感性研究[J].焊管,2011,34(10):5-8.
- [9] 曹雷,刘晓丹.在线热处理对焊接套管焊缝质量的作用[J].钢管,2012,41(6):79-81.
- [10] 王荣.显微组织和热处理对直缝电阻焊管沟槽腐蚀的影响[J].金属学报,2002,38(12):1281-1286.

(收稿日期:2017-03-08)