

# 显微组织和热处理对直缝电阻焊管沟槽腐蚀的影响\*

王 荣

(西安石油学院机电与材料工程学院, 西安 710065)

**摘 要** 采用恒电位极化测定了不同显微组织和热处理的 J55 钢直缝电阻焊管焊接区的沟槽腐蚀性能。结果表明, 明显流线组织的钢板易产生沟槽腐蚀, 具有高的沟槽腐蚀敏感性, 常在焊接区出现多个腐蚀沟槽; 而不连续流线组织的钢板具有较低的沟槽腐蚀敏感性, 在焊缝处产生单腐蚀沟槽。足够时间的无相变退火可显著降低直缝电阻焊管焊接区的沟槽腐蚀敏感性。电阻焊接过程中, 短时加热重熔和快冷导致的焊缝合金元素部分损失和焊接区的残余应力是低含硫钢电阻焊管沟槽腐蚀的主要原因。

**关键词** 显微组织, 热处理, 沟槽腐蚀, 电阻焊管

**中图分类号** TG113.1, TG457.1, U177 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2002)12-1281-06

## EFFECTS OF MICROSTRUCTURE AND HEAT-TREATMENT ON GROOVING CORROSION OF ELECTRIC RESISTANCE WELDED PIPES

WANG Rong

Institute of Mechanical and Materials Engineering, Xi'an Petroleum University, Xi'an 710065

Correspondent: WANG Rong, professor, Tel: (029)8383240, E-mail: rongw123@pub.xaonline.com

Manuscript received 2002-02-03, in revised form 2002-05-30

**ABSTRACT** The constant potential polarization approach has been used to investigate the performances of grooving corrosion of steel J55 electric resistance welded pipes with different microstructures and heat-treatment techniques. The steel with continuous flowline microstructure has higher grooving corrosion susceptibility and more corrosion grooves often exist in the welded zone. The steel with discontinuous flowline microstructure has lower grooving corrosion susceptibility and only single corrosion groove exists along the welding line. The annealing treatment with enough time below the phase transformation point reduces the grooving corrosion susceptibility of electric resistance welded pipes considerably. It is pointed that the main reasons of grooving corrosion for the steel with low sulfur content are alloy element loss and the residual stress in the welding zone caused by the rapid heating and cooling in processing of electric resistance welding.

**KEY WORDS** microstructure, heat-treatment, grooving corrosion, electric resistance welded pipe

直缝电阻焊 (ERW) 是一种低成本、高效率的管道生产技术。由于焊接区和母材电化学性能的差异, ERW 焊接管道在腐蚀介质中使用时焊接区将会产生沟槽腐蚀<sup>[1,2]</sup>, 缩短焊管的使用寿命, 限制焊管的应用, 故研究 ERW 焊管沟槽腐蚀与显微组织、热处理的关系具有重要的意义。本文采用恒电位电化学极化方法, 在人工海水溶液中研究了 J55 钢 ERW 焊管的沟槽腐蚀现象, 探讨了显微组织、热处理与沟槽腐蚀的关系, 为设计具有高沟槽腐蚀抗力的 ERW 焊管提供了理论依据。

## 1 实验方法

### 1.1 试件和热处理

实验采用直径为 139 mm, 长为 7.72 mm 和直径为 339 mm, 厚为 10.00 mm 两种规格的 J55 钢 ERW 焊管, 分别设定其为 No.1 和 No.2 焊管。试件直接从 ERW 焊管上切取, 加工成 (20×15×3) mm 的电化学腐蚀试件, 使焊缝处于试件的中央, 且实验面为管道的内表面。

取样后将焊管的焊接区通过热模拟进行热处理, 热模拟在焊接热模拟机上进行, 热模拟的热处理规范为: (1) 920 ℃ + 550 ℃ (记作 HT-1); (2) 650 ℃ + 950 ℃ (记作 HT-2), 峰值温度保温 3 s。另外, 对取样在 450 和 250 ℃ 进行整体退火热处理。

\* 收到初稿日期: 2002-02-03, 收到修改稿日期: 2002-05-30

作者简介: 王 荣, 男, 1962 年生, 教授, 博士

## 1.2 沟槽腐蚀实验

沟槽腐蚀实验采用 3.5%NaCl 中性溶液 (pH=6.5—7.5), 在室温下进行. 采用恒电位电化学极化评价沟槽腐蚀的敏感性, 具体方法为: 采用三电极系统, 对试件施加 -550 mV (相对饱和甘汞电极, SCE) 极化电位进行阳极极化, 极化 144 h 后将试件取出清除腐蚀产物, 按图 1 所示的方法在 30 倍工具显微镜下测定沟槽腐蚀的几何参数. 计算沟槽腐蚀敏感性系数

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

式中,  $h_2$  和  $h_1$  分别为腐蚀实验前试件原始表面到腐蚀沟槽底的深度和母材的腐蚀深度. 一般认为,  $\alpha < 1.3$  时, 焊管对沟槽腐蚀不敏感;  $\alpha > 1.3$  时, 焊管具有高的沟槽腐蚀敏感性.

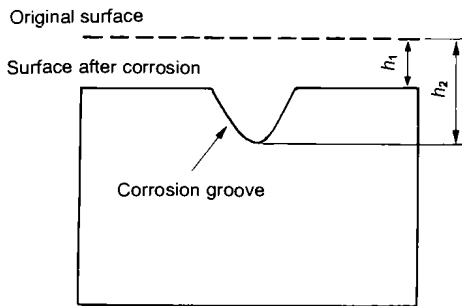


图 1 沟槽腐蚀敏感性系数测定示意图

Fig.1 Illustration of determining sensitivity coefficient of grooving corrosion

在沟槽腐蚀敏感性实验过程中, 每隔 12 h 更换腐蚀溶液一次. 恒电位电化学极化实验在 PS-2 恒电位 / 恒电流仪上进行.

腐蚀电位和极化曲线测试在 PS-168 微机控制电化学测试系统上进行, 电位扫描速率为 0.2 mV/s, 腐蚀溶液为 3.5%NaCl 中性溶液. 腐蚀电位测量时, 从母材一侧开始逐步剥层测定腐蚀电位, 直到焊缝中心, 然后测定焊缝中心的极化曲线.

## 1.3 理化分析

显微组织分析在 4X 型金相显微镜上进行. ERW 焊缝和母材的化学成分分析在 SPECTROAC-1000 型直读光谱仪上进行.

## 2 实验结果

### 2.1 电化学性能分析

直径  $d$  分别为 139 mm (No.1) 和 339 mm (No.2) 两种规格 ERW 焊管的开路腐蚀电位  $E_{\text{corr}}$ , 以及采用慢速极化扫描实验测定腐蚀体系净电流  $I=0$  时对应的电位  $E_k$  在焊接区的分布如图 2 所示. 可见, 无论是  $E_{\text{corr}}$  还是  $E_k$  的分布, 在 ERW 焊缝中心部位的腐蚀电位具有较低的值, 即焊接区相对母材的电化学活性较高. No.1 和

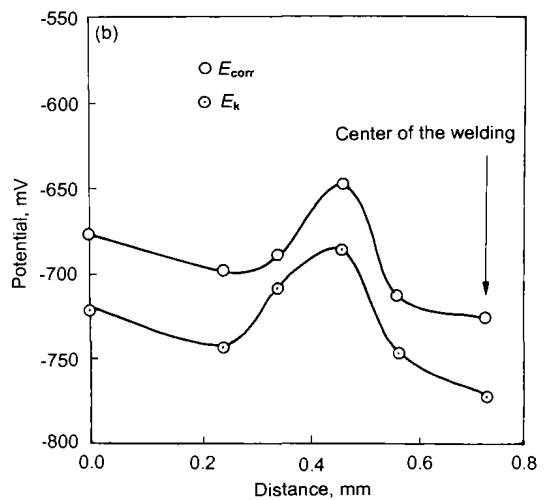
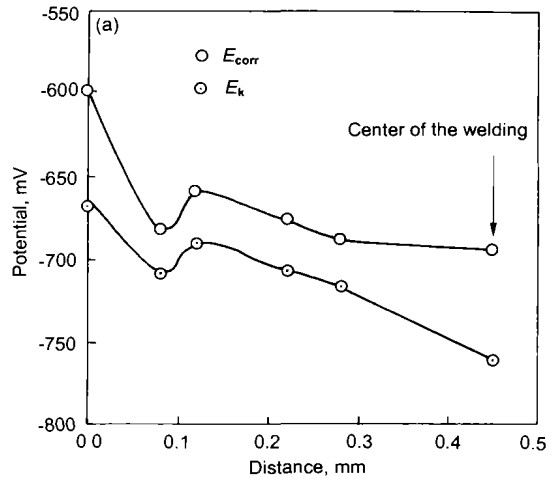


图 2 两种规格 ERW 焊管腐蚀电位在焊接区的分布

Fig.2 Distribution of corrosion potential in the welding zone

(a) weld pipe No.1 ( $d=139$  mm)

(b) weld pipe No.2 ( $d=339$  mm)

No.2 ERW 焊管基体金属和焊缝金属的  $E_{\text{corr}}$  最大差分别为 33 和 50 mV,  $E_k$  最大差分别为 62 和 50 mV. 母材和 ERW 焊缝的极化曲线对比如图 3 所示. 在弱极化区, 焊缝金属的极化曲线位于基体金属的下方且偏右. 在强极化区, 因为焊缝的宽度很小, 通常在 0.4—0.6 mm 以下, 极化已经进入基体金属, 二者的阳极极化曲线差别不大. 因此, ERW 焊缝在腐蚀环境中因母材和焊缝的电化学差别, 在焊接区会产生沟槽腐蚀.

### 2.2 沟槽腐蚀敏感性

两种规格 ERW 焊管在室温 3.5%NaCl 中性溶液中, 恒电位 -550 mV (SCE) 极化 144 h 后的表面腐蚀形貌如图 4 所示. 由图 4 可见, No.1 焊管出现多个腐蚀沟槽, 除焊缝处的腐蚀沟槽外, 距焊缝两侧约 1 mm 处各出现一个腐蚀沟槽, 焊缝处腐蚀沟槽的平均腐蚀敏感性系数  $\bar{\alpha}_{1,1} = 1.783$ , 两侧腐蚀沟槽的平均腐蚀敏感性系数

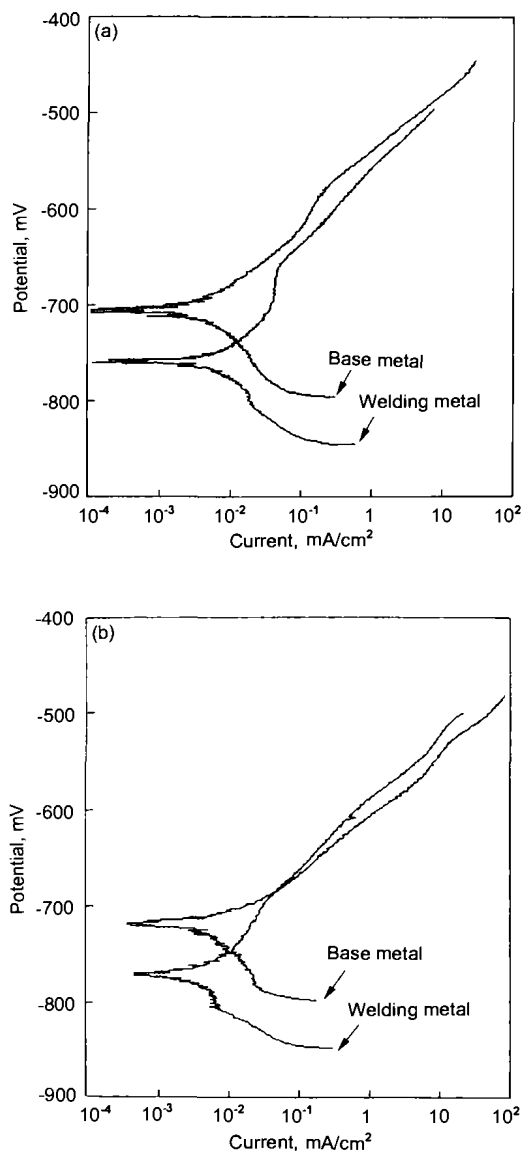


图 3 焊缝和母材的极化曲线

Fig.3 Polarization curves of the welding line and the base metal

(a) weld pipe No.1 (b) weld pipe No.2

$\bar{\alpha}_{1,2}=2.149$ ; No.2 焊管出现单腐蚀沟槽, 腐蚀沟槽的部位在 ERW 焊缝处, 其平均腐蚀敏感性系数  $\bar{\alpha}_{2,1}=1.184$ . 因此, 这两种规格焊管的沟槽腐蚀性能和特征存在很大差异, No.1 焊管具有很高的沟槽腐蚀敏感性, 且出现多个腐蚀沟槽, 它们的沟槽腐蚀的敏感性系数  $\bar{\alpha}$  均远超过 1.3.

### 2.3 热处理对沟槽腐蚀敏感性的影响

No.1 焊管在 HT-1 (920 °C + 550 °C) 以及 HT-2 (650 °C + 950 °C) 两种热模拟热处理后, 恒电位为 -550 mV, 极化 144 h 后的表面腐蚀形貌如图 5 所示.

由图可见, 模拟热处理后仍然为多沟槽腐蚀. 模拟热处理后, 焊缝处和焊缝两侧腐蚀沟槽的平均腐蚀敏感性系数  $\bar{\alpha}$  与热处理工艺的关系如图 6 所示. 虽然沟槽腐蚀的敏感性

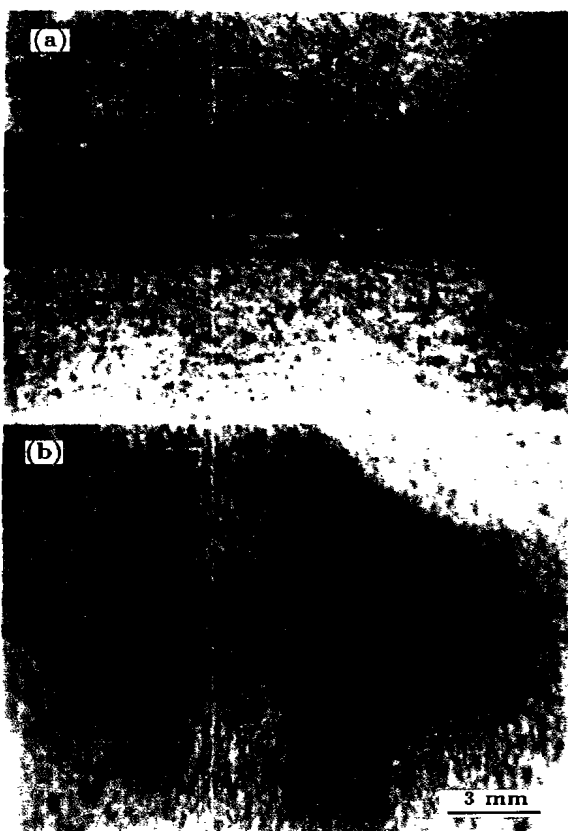


图 4 恒电位极化 144 h 后两种焊管的沟槽腐蚀形貌

Fig.4 Morphologies of grooving corrosion after 144 h polarization

(a) weld pipe No.1 (b) weld pipe No.2

系数均比无热处理 (No HT) 的有所降低, 但沟槽腐蚀的敏感性仍然很高.

从热处理工艺参数的比较可见, 无相变的退火处理作为最终热处理, 对减轻沟槽腐蚀的效果比较显著. 由于模拟热处理是模拟 ERW 焊管在自动生产线上焊后的在线热处理, 热处理的加热时间有限, 因而这种短时的热处理对改善 J55 钢 ERW 抗沟槽腐蚀性能也是有限的.

No.1 焊管在以上两种模拟热处理后, 再经 450 °C, 1 h (HT-1+A, HT-2+A) 和 250 °C, 24 h (HT-1+B, HT-2+B) 的整体退火, 然后分别进行恒电位极化实验, 极化 144 h 后沟槽腐蚀的敏感性系数  $\bar{\alpha}$  与热处理工艺的关系如图 7 所示. 450 °C, 1 h 退火, 试件表面的腐蚀沟槽变为不连续状, 还是出现 3 个腐蚀沟槽, 但腐蚀沟槽的  $\bar{\alpha}$  值已显著降低; 250 °C, 24 h 退火后, 腐蚀沟槽的形貌基本为在焊缝部位的单腐蚀沟槽, 焊缝两侧的腐蚀沟槽已经消失, 其沟槽腐蚀的  $\bar{\alpha}$  值也显著降低. 因此, 在相变点以下足够时间的退火热处理可显著降低 ERW 焊管沟槽腐蚀的敏感性, 使沟槽腐蚀的敏感性系数  $\bar{\alpha}$  在 1.3 以下.

### 2.4 显微组织分析

两种规格 ERW 焊管采用控轧钢板, 其组织为铁素

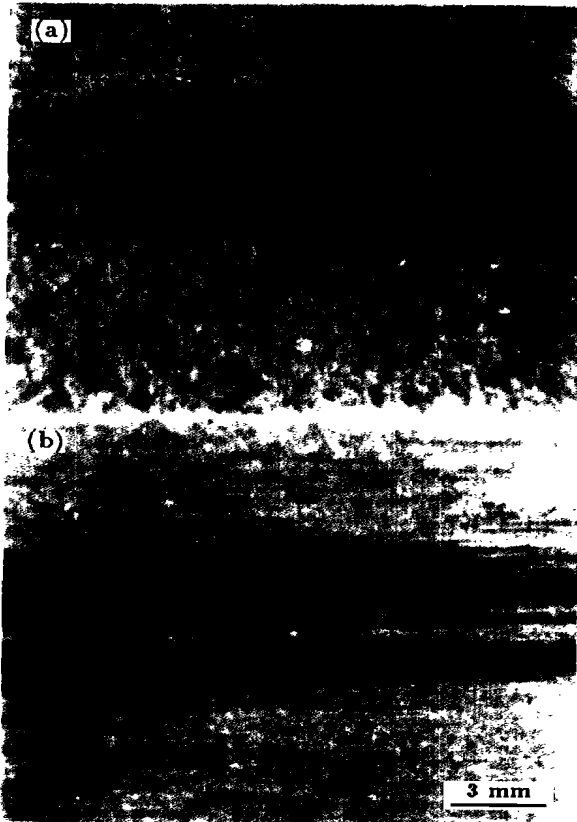


图 5 No.1 焊管模拟热处理后沟槽腐蚀的形貌

Fig.5 Morphologies of grooving corrosion of weld pipe No.1 after postwelding imitated heat treatment (a) 920 °C + 550 °C (b) 650 °C + 950 °C

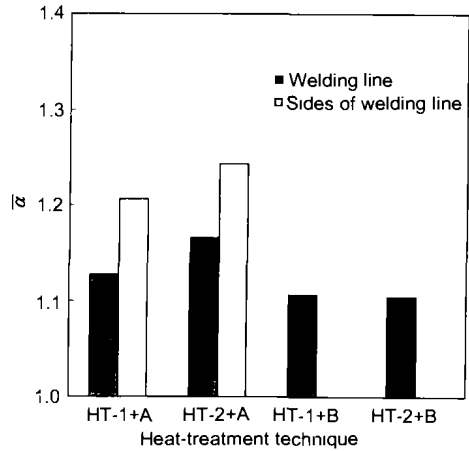


图 7 退火热处理后的沟槽腐蚀敏感性系数

Fig.7 Coefficients  $\bar{\alpha}$  of grooving corrosion after annealing with enough time (A—450 °C, 1 h. B—250 °C, 24 h)

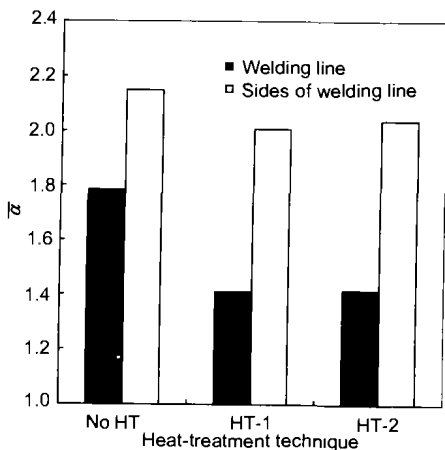


图 6 模拟热处理后的平均沟槽腐蚀敏感性系数

Fig.6 Coefficients  $\bar{\alpha}$  of grooving corrosion after imitated heat-treatment (No HT—no heat treatment, HT-1—920 °C + 550 °C, HT-2—650 °C + 950 °C)

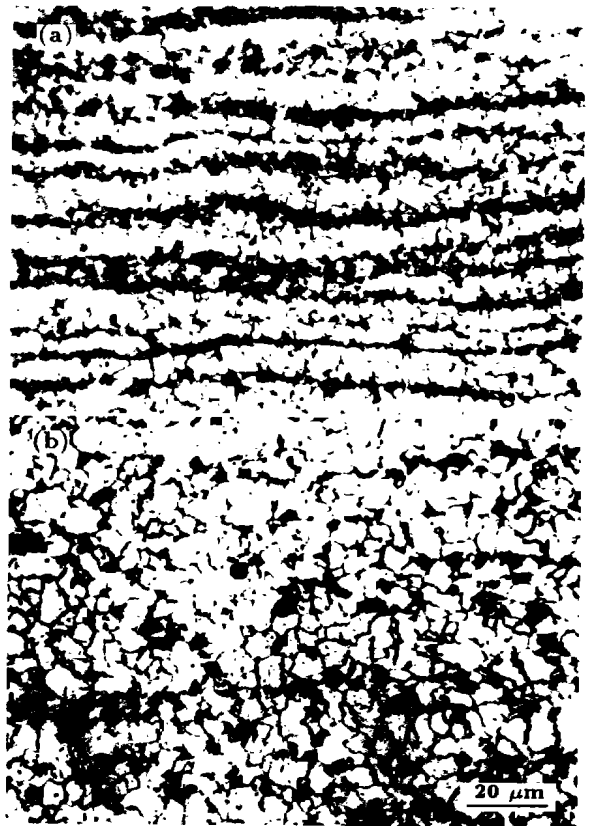


图 8 两种规格 ERW 焊管基体的显微组织

Fig.8 Morphologies of the microstructure of the base metal (a) weld pipe No.1 (b) weld pipe No.2

体 + 珠光体 (图 8)。由于含 C 量的差别和珠光体的含量不同, No.1 焊管为连续的流线组织, 流线内的铁素体较细; 而 No.2 焊管为近等轴的不连续流线组织, 其铁素体较 No.1 焊管的粗大。

两种规格 ERW 焊管焊缝及近缝区的显微组织见图 9。可见, No.1 焊管焊缝基本为等轴的晶粒, 其铁素体组织较近缝区的粗大, 焊缝的两侧因焊接时挤入量的差别, 流线上角也差别较大, 较大流线上角一侧的流线变得比较密集, 如图 9a 所示; No.2 焊管在焊缝附近出现因



图 9 两种 ERW 焊管焊接区的显微组织

Fig.9 Morphologies of the microstructure of ERW welding zone

(a) weld pipe No.1 (b) weld pipe No.2

焊接挤压形成的不连续的上升流线,但整体的组织以等轴晶粒为主要特征,焊缝的铁素体组织因焊后的快冷比近缝区的细小,如图 9b 所示.在两种规格 ERW 焊管的焊缝处,组织为等轴铁素体,未发现淬火组织.因此,具有连续流线组织的钢在 ERW 焊接后具有高的沟槽腐蚀敏感性,必须采用焊后热处理以减轻沟槽腐蚀.

### 3 讨论

#### 3.1 沟槽腐蚀产生的原因

ERW 焊接区沟槽腐蚀,是焊缝及其热影响区与基体金属在腐蚀介质中的电化学不均匀性引起的局部选择性腐蚀,其特征为焊缝具有更低的腐蚀电位(见图 2),因而在恒电位电化学极化或实际使用腐蚀环境中会出现沟槽腐蚀现象.

ERW 焊管的电化学不均匀性,是焊接过程中急热和急冷引起金属局部的一些化学、组织等变化的结果.对于高、中含 S(质量分数大于 0.01%)的钢,ERW 焊管沟槽腐蚀主要由 MnS 夹杂引起<sup>[1]</sup>,焊后的无相变退火处理对其没有影响. J55 钢为低含硫钢,其含 S 量在 0.01% 以下(见表 1).由无相变的退火热处理可显著降低沟槽腐蚀敏感性系数的事实来看, MnS 夹杂不是 J55 钢 ERW

表 1 两种 ERW 焊管基体金属和焊缝的化学成分分析结果  
Table 1 Chemical composition analysis of the base metal and the welded metal of ERW welded pipe

Element	(mass fraction, %)			
	No.1 (d=139 mm)		No.2 (d=339 mm)	
	Base metal	Welded line	Base metal	Welded line
C	0.180	0.150	0.130	0.110
Si	0.150	0.130	0.240	0.220
Mn	1.120	1.080	1.260	1.210
P	0.016	0.014	0.017	0.016
S	0.007	0.007	0.009	0.008
Ni	0.188	0.152	0.026	0.025
Nb	0.029	0.025	0.037	0.036
V	0.005	0.004	0.023	0.022
Ti	0.020	0.017	0.027	0.022
Cu	0.200	0.150	0.002	0.001

焊管沟槽腐蚀的主要原因.

表 1 列出 J55 钢两种焊管基体金属和焊缝的化学成分分析结果.可见,焊缝金属的合金元素比基体金属稍有降低.一般 C-Mn 钢的抗腐蚀性能主要靠加入的微量合金元素来提高,基体金属和焊缝的腐蚀电位差别主要应该归因于微量合金元素的差别.腐蚀电位测量时,采用剥层的方法从表面测量,因应力释放,焊接残余应力不会影响其测量结果.

根据焊后模拟热处理沟槽腐蚀性能测试的结果可知:焊后相变热处理对提高 ERW 焊管抗沟槽腐蚀性能没有明显作用(见图 6);而无相变的退火处理可显著降低沟槽腐蚀的敏感性,改善 ERW 焊管抗沟槽腐蚀性能(见图 7).因为在 J55 钢焊接区无淬硬组织,相变点以下退火处理对焊接区的组织没有影响,退火的主要作用是降低 ERW 焊接急冷过程中产生的残余应力,尤其是在 250 ℃ 长时间退火,无论是焊接区的组织和化学成分都不会发生变化,但沟槽腐蚀的敏感性系数却会大大降低.因此, No.1 ERW 焊管在焊缝两侧出现的腐蚀沟槽应该归因于焊接的残余应力.

综上所述,低含硫的 J55 钢 ERW 焊管的沟槽腐蚀现象主要与焊接过程使焊缝合金元素的损失和焊接残余应力有关.

#### 3.2 显微组织与焊管沟槽腐蚀

J55 钢 ERW 焊管采用控轧板材成型,其组织组成物的相对含量决定控轧后的组织形态. No.1 焊管比 No.2 焊管含 C 量高,按平衡态组织近似估算,它们的组织组成物中珠光体、渗碳体的含量分别为 21.1%、2.4% 和 14.5%、1.6%.在轧制过程中,渗碳体趋向于沿轧制的流线分布,较高含碳量时呈连续的流线组织如图 8a 所示.由于渗碳体沿流线连续分布,铁素体被限制在渗碳体流线内,在 ERW 焊接的急热和急冷过程中,铁素体-奥氏体相变也被限制在渗碳体流线内,在冷却转变过程中因热应力和组织应力在渗碳体流线产生应力集中,在焊接区即焊缝两侧的热影

响区形成高的残余应力<sup>[3]</sup>,因残余应力加速腐蚀,在焊缝两侧形成基本对称的腐蚀沟槽(见图4a),即使焊后的相变热处理也很难消除(见图5),但足够时间的无相变去应力退火会显著减轻沟槽腐蚀(见图7),这也是残余应力导致沟槽腐蚀的一个佐证.

不连续的流线组织基本上在焊缝部位产生单腐蚀沟槽(见图4b),在ERW焊接的过程中这种组织中的铁素体-奥氏体相变不受连续渗碳体的限制,热应力和组织应力可充分松弛,沟槽腐蚀的敏感性也比较低.虽然20号钢和直径为139 mm的焊管(本文No.1焊管)含C量接近,但20号钢近平衡态的等轴组织在ERW焊接后,其沟槽腐蚀的特征为在焊缝的单腐蚀沟槽<sup>[4]</sup>.因此,具有连续流线组织的钢板在ERW焊后具有比较高的沟槽腐蚀敏感性,且易出现多个腐蚀沟槽.

#### 4 结论

(1) 具有连续流线组织钢板的ERW焊管易产生沟槽腐蚀,常在焊接区出现多个腐蚀沟槽的现象,具有高的沟槽腐蚀敏感性;不连续流线组织或等轴组织的ERW焊管,在焊缝部位产生单腐蚀沟槽,沟槽腐蚀的敏感性低.

(2) 焊后热处理可以降低ERW焊管沟槽腐蚀敏感性

系数,足够时间的无相变退火处理效果更显著,可消除因焊接残余应力引起的沟槽腐蚀.

(3) 低含硫钢电阻焊管沟槽腐蚀的主要原因可归结于电阻焊接过程中短时加热重熔和快冷导致焊缝合金元素的部分损失和焊接区的残余应力.

#### 参考文献

- [1] Kato C, Otoguro Y, Kado S, Hisamatsu Y. *Corros Sci*, 1978; 18: 61
- [2] Gao H L. *Pipeline Steels—Microstructure, Properties, Welding Performance*. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1995: 151  
(高惠临. 管线钢——组织、性能、焊接行为. 西安: 陕西科学技术出版社, 1995: 151)
- [3] Xiao J M. *Toughness and Toughening of Metals*. 2nd ed.. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1982: 471  
(肖季美. 金属的韧性与韧化. 上海: 上海科学技术出版社, 1982: 471)
- [4] Bai Z Q, Zhao X W, Guo S W, Fang J F. In: Chinese Society for Corrosion and Protection ed., *Proc Chinese Youth Science Meeting on Corrosion and Protection*, Wuhan, Huazhong University of Science and Technology, 1997: 53  
(白真权, 赵新伟, 郭生武, 方军锋. 中国青年腐蚀与防护学术研讨会论文集, 武汉, 华中理工大学, 1997: 53)