

X90 管线钢母材和焊缝在近中性模拟溶液中 不同加载电位下的应力腐蚀行为

罗金恒^{1,2} 维设计³ 李丽锋^{1,2} 张良^{1,2} 武刚^{1,2} 朱丽霞^{1,2}

1. 中国石油集团石油管工程技术研究院 2. 石油管材及装备材料服役行为与结构安全国家重点实验室 3. 西安石油大学

摘 要 X90 是继 X80 和 X100 管线钢后开发的新一代管线钢, 已成为国内外研究的新热点。为了深入了解加载电位对 X90 管线钢土壤应力腐蚀行为的影响, 采用电化学测试和慢应变速率拉伸试验 (SSRT) 的方法研究了 X90 管线钢直缝焊管母材和焊缝在近中性模拟溶液 (NS4) 中不同加载电位下的应力腐蚀行为, 应用扫描电子显微镜 (SEM) 对其断口形貌进行了观察, 分析应力腐蚀行为的机理。研究表明: ① NS4 溶液中的 X90 管线钢直缝焊管母材、焊缝的极化曲线均表现为阳极溶解特征, 无活化-钝化现象; ② X90 管线钢直缝焊管母材和焊缝在 NS4 溶液中具有一定的应力腐蚀敏感性, 随着加载电位的负移, 用延伸率的损失率和断面收缩率的损失率表示的应力腐蚀敏感性指标先减小后增大, 焊缝的应力腐蚀敏感性大于母材的应力腐蚀敏感性; ③ X90 管线钢直缝焊管母材和焊缝在 NS4 溶液中的应力腐蚀开裂行为存在以下 3 种机制——外加电位为 E_{OC} 的阳极溶解机制、外加电位为 -850 mV 的阳极溶解+氢脆机制、外加电位为 -1000 mV 和 -1200 mV 的氢脆机制。结论认为, 该研究成果可以为 X90 管线钢的大规模使用提供技术支撑和理论依据。

关键词 X90 管线钢 直缝焊管 母材 焊缝 土壤应力腐蚀行为 加载电位 阳极溶解 氢脆

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2018.08.014

Stress corrosion cracking behavior of X90 pipeline steel and its weld joint at different applied potentials in near-neutral solutions

Luo Jinheng^{1,2}, Luo Sheji³, Li Lifeng^{1,2}, Zhang Liang^{1,2}, Wu Gang^{1,2} & Zhu Lixia^{1,2}

(1. CNPC Tubular Goods Research Institute, Xi'an, Shaanxi 710077, China; 2. State Key Laboratory of Performance and Structural Safety for Petroleum Tubular Goods and Equipment Material, Xi'an, Shaanxi 710077, China; 3. Xi'an Shiyu University, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 38, ISSUE 8, pp.96-102, 8/25/2018. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: X90 pipeline steel is a new generation of pipeline steel developed after X80 and X100 pipeline steels, and it is now a new research hotspot at home. In order to thoroughly study the effect of applied potential on the soil stress corrosion cracking (SCC) behavior of X90 pipeline steel, we investigated the SCC behaviors of base metal and weld joint samples in the straight-weld pipe of X90 pipeline steel at different applied potentials in near-neutral solution using electrochemical measurements methods and slow strain rate testing (SSRT). Besides, the fracture surfaces were observed through scanning electron microscopy (SEM) and the mechanisms of the corrosion cracking behaviors were analyzed. And the following research results were obtained. First, the polarization curves of the base metal and weld joint samples in NS4 solution present the typical characteristics of anodic dissolution but no activation-passivation phenomenon happens. Second, In NS4 solution, the base metal and weld joint samples present SCC sensitivity. The SCC sensitivity indicator which is expressed by yield loss percentage elongation and yield loss percentage elongation area decreases firstly and then increases with the negative increase of the applied potential, and the SCC sensitivity of weld joint is higher than that of base metal. Third, there are three mechanisms on the SCC behaviors of base metal and weld joint samples, i.e., anodic dissolution mechanism when the applied potential is open circuit potential (E_{OC}), anodic dissolution and hydrogen embrittlement mechanism when the applied potential is -850 mV, and hydrogen embrittlement mechanism when the applied potential is -1000 mV and -1200 mV. It is concluded that the research results can provide a technical support and theoretical basis for the large-scale application of X90 pipeline steel.

Keywords: X90 pipeline steel; Straight-weld pipe; Base metal; Weld joint; Soil stress corrosion cracking behavior; Applied potential; Anodic dissolution; Hydrogen embrittlement

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划课题“危险化学品储存设施燃爆毁伤效应及事故调查技术”(编号: 2016YFC0801204)。

作者简介: 罗金恒, 1972 年生, 教授级高级工程师, 本刊第八届编委会委员, 博士; 主要从事油气管道及储运设施完整性技术方面的研究与工程服务工作。地址: (710077) 陕西省西安市雁塔区锦业二路 89 号。电话: (029) 81887989。ORCID: 0000-0001-5564-4127。E-mail: luojh@cnpcc.com.cn

0 引言

油气管道通常埋地铺设, 采用阴极保护+涂层的防护措施来减缓或防止管线钢的土壤腐蚀。管道在运行过程中, 由于涂层老化和其他原因会导致涂层破损, 在应力和土壤环境的协同作用下, 管线容易产生应力腐蚀开裂 (Stress Corrosion Cracking, SCC) [1-2]。管线钢在土壤环境中的 SCC 破坏主要可分为高 pH—SCC 和近中性 pH—SCC [3-4], 自从 1965 年美国发生第一例管线钢高 pH—SCC 和 1985 年加拿大发生第一例近中性 pH—SCC 以来, 国内外学者对管线钢的应力腐蚀开裂行为进行了广泛的研究, 已在 X80 以下钢级的研究上取得了不少成果 [5-8], 并公认管线钢高 pH—SCC 为膜破裂+阳极溶解机制仍未达成共识, 然而对于管线钢近中性 pH—SCC 机理至今仍未达成共识。

随着“西气东输”战略的实施, 大口径、长距离、高压输送已经成为我国天然气管道输送的发展方向。高强度管线钢的使用, 可大幅度提高长输天然气管道的运营能力, 这需要管线钢具有更高的强度 [9-10]。X70、X80 管线钢已成功应用于长输管道建设, X100、X120 等超高强管线钢虽然已有试验段的应用, 但受其安全性评估的影响未能实现大批量工程应用 [11-12]。X90 是继 X80 和 X100 管线钢后开发的新一代管线钢, 已成为国内外研究的新热点 [13-14], 研究主要集中在 X90 管线钢的试制开发 [15-17] 和组织性能测试方面 [18-20], 关于 X90 管线钢在服役环境中的安全性研究鲜见报道。因此, 笔者采用慢应变速率拉伸试验 (Slow Strain Rate Tension, SSRT)、电化学测试技术和断口分析相结合的方法, 研究了不同加载电位下 X90 管线钢直缝焊管母材和焊缝在近中性模拟溶液 (NS4) 的应力腐蚀行为, 并对其机理进行了探讨, 以期 X90 管线钢的使用提供技术支撑和理论依据。

1 实验材料与方方法

实验材料为国产的 X90 直缝焊管, 焊管的直径为 1 219 mm, 壁厚为 19.6 mm, 母材的化学成分 (质量分数): C 含量为 0.056%, Si 含量为 0.21%, Mn 含量为 1.92%, P 含量为 0.01%, S 含量为 0.0018%, Cr 含量为 0.33%, Mo 含量为 0.21%, Nb 含量为 0.081%, Ti 含量为 0.012%, Cu 含量为 0.22%, Al 含量为 0.029%; 焊缝的化学成分 (质量分数): C 含量为 0.056%, Si 含量为 0.29%, Mn 含量为 1.91%,

P 含量为 0.013%, S 含量为 0.0031%, Cr 含量为 0.23%, Mo 含量为 0.28%, Nb 含量为 0.050%, Ti 含量为 0.017%, Cu 含量为 0.17%, Al 含量为 0.015%。X90 直缝焊管母材的显微组织为 B 粒+少量 PF+P, 焊缝的显微组织为 PF+MA+P。

实验介质为 NS4 模拟溶液, 采用分析纯试剂和去离子水配制而成, pH 值约等于 7, 溶液组成见表 1。

表 1 NS4 测试溶液的成分表

组分	KCl	CaCl ₂ · 2H ₂ O	NaHCO ₃	MgSO ₄ · 7H ₂ O
含量 / (mg · L ⁻¹)	122	181	483	131

在 X90 直缝焊管上截取面积为 1 cm×1 cm 的电化学测试试样, 试样分母材和焊缝两种, 在试样上焊接 Cu 导线, 试样的工作面暴露, 非工作面用固化剂和环氧树脂密封。实验前用 100 ~ 1000 号砂纸打磨电化学试样, 用酒精和去离子水清洗试样。电化学测试采用标准的三电极体系, X90 管线钢母材和焊缝试样为研究电极, 参比电极选用饱和甘汞电极 (SCE), 金属 Pt 片作为辅助电极。电化学测试在 PARSTAT2273 电化学工作站上进行, 扫描电位范围介于 -1.3 ~ -0.4 V, 扫描速度设定为 1 mV/s 和 10 mV/s, 电化学测试前先向溶液中通入纯度为 99.5% 的 N₂ 除氧 2 h, 使溶液的 pH 值稳定在 6.6 ~ 6.8, 为维持近中性 pH 值环境, 实验过程中向溶液中连续通入 95%N₂ + 5%CO₂ 混合气体, 实验温度为室温。

SSRT 实验试样沿焊管的环向取样, 按国家标准 GB/T 228—2002 加工成 6 mm×4 mm 的板状慢拉伸试样, 其尺寸如图 1 所示。SSRT 实验按照 GB/T 15970.7—2000, 在 PLT-5 型微机控制慢应变速率应力腐蚀试验机上进行, 试验机的控制精度为 ±2 N。腐蚀溶液为 NS4 近中性土壤模拟溶液。实验前通入纯度为 99.5% 的 N₂ 除氧 2 h, 使溶液的 pH 值稳定在 6.6 ~ 6.8, 实验过程中连续通入 95%N₂ +

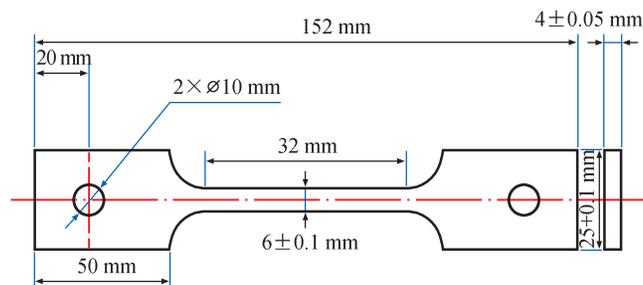


图 1 SSRT 实验试样尺寸图

5%CO₂ 混合气体, 以维持近中性 pH 值环境。SSRT 实验的电极体系与电化学测试的电极体系一致。应变速率为 10⁻⁶/s, 采用 PS168 型恒电位仪分别对试样施加开路电位 (E_{OCP})、-850 mV、-1 000 mV 和 -1 200 mV 的极化电位。断口分析在 JSM-6390 型扫描电子显微镜上进行。所有实验在室温下进行, 所施加的电位值均相对于饱和甘汞电极 (SCE)。

通常采用对暴露到实验环境中惰性环境中的相同试样进行比较的方法来评定应力腐蚀的敏感性^[21], 为了量化讨论 X90 管线钢在 NS4 溶液中的应力腐蚀敏感性, 以延伸率损失 (I_{δ}) 和断面收缩率损失 (I_{ψ}) 作为管线钢应力腐蚀敏感性的评价指标:

$$I_{\delta} = \frac{\delta_a - \delta_{\text{SSRT}}}{\delta_a} \times 100\% \quad (1)$$

$$I_{\psi} = \frac{\psi_a - \psi_{\text{SSRT}}}{\psi_a} \times 100\% \quad (2)$$

式中 δ_a 和 ψ_a 分别表示大气中 SSRT 实验断裂试样的延伸率和断面收缩率; δ_{SSRT} 和 ψ_{SSRT} 分别表示腐蚀溶液中 SSRT 断裂试样的延伸率和断面收缩率。

2 试验结果与分析

图 2 为 NS4 溶液中 X90 直缝焊管母材、焊缝试样的开路电位 (E_{OCP}) 随时间的变化规律。由图 2 可知, 实验初期的 0 ~ 20 min 内, 母材、焊缝试样的 E_{OCP} 快速下降; 从 20 min 开始, 随着时间的延长, 母材、焊缝试样的 E_{OCP} 下降程度有所减缓。当实验时间达到 4 h 时, 母材的 E_{OCP} 稳定在 -708 mV, 焊缝的 E_{OCP} 稳定在 -718 mV, 说明母材的热力学稳定性优于焊缝的热力学稳定性。

2.1 SSRT 实验

图 3 和表 2 为 X90 直缝焊管母材和焊缝试样

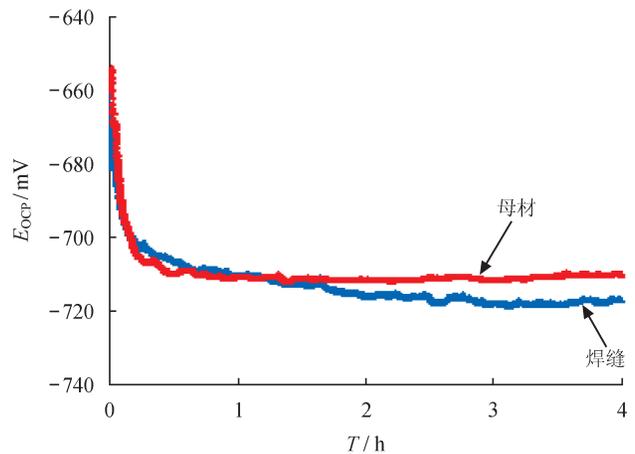


图 2 X90 直缝焊管母材、焊缝试样在 NS4 溶液中的开路电位 (E_{OCP}) 随时间的变化规律

在空气、NS4 溶液中未加电位和不同外加电位下的 SSRT 曲线和实验结果 (其中 σ 表示应力, ε 表示应变, σ_b 表示抗拉强度)。由图 3 可知, 与空气中的 SSRT 实验结果相比, 不同电位下 X90 管线钢母材和焊缝的断裂时间、断后延伸率 (δ)、断面收缩率 (ψ) 均有不同程度的减小, 说明 X90 管线钢母材和焊缝在不同电位下均表现出一定的 SCC 敏感性。随着外加电位的负移, X90 管线钢母材和焊缝的应力腐蚀敏感性指标 I_{δ} 和 I_{ψ} 呈现出先减小后增大的趋势, 用断面收缩率表示的应力腐蚀敏感性指标 I_{ψ} 大于用延伸率表示的应力腐蚀敏感性指标 I_{δ} , 且焊缝的应力腐蚀敏感性指标均大于母材的应力腐蚀敏感性指标, 这说明焊缝相比于母材更容易发生 SCC。这是因为焊缝的成形是一个冶金过程, 焊缝在成形过程中, 相当于焊缝附近的金属承受了不同工艺的热处理。在焊接中, 由于焊接热过程的局限性、瞬时性及温度场分布的不均匀性都将导致热影响区和焊缝存在不同的组织结

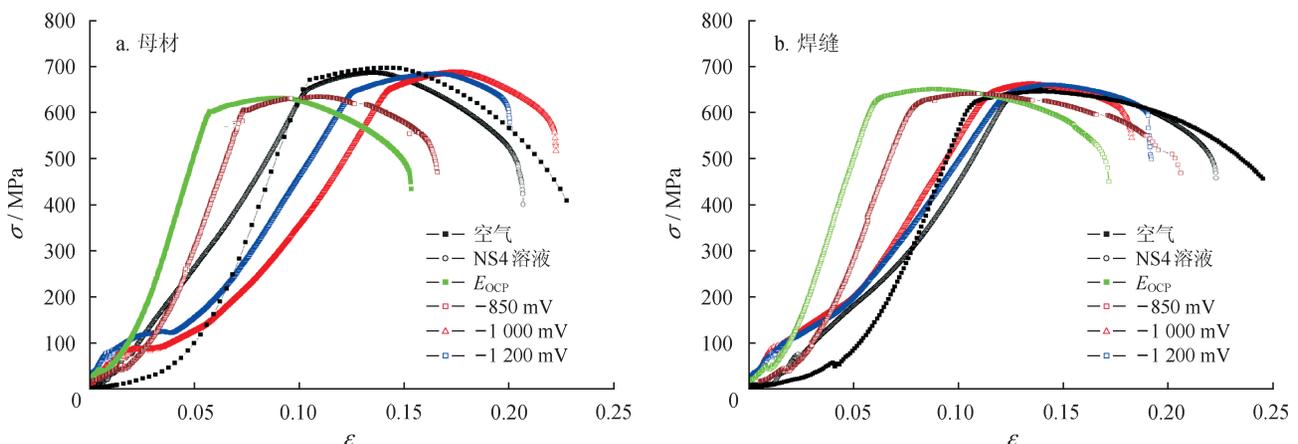


图 3 X90 直缝焊管母材和焊缝试样的 SSRT 曲线

表 2 X90 直缝焊管母材和焊缝试样的 SSRT 试验结果表

试样	试验条件	断裂时间 /h	σ_b /MPa	δ	ψ	I_δ	I_ψ
母材	空气	76.4	683	13.56%	74.99%	0	0
	NS4 溶液	64.4	686	12.40%	45.98%	8.5%	38.6%
	E_{OCP}	43.5	632	9.53%	38.49%	29.7%	48.6%
	-850 mV	44.5	635	10.12%	40.79%	25.3%	45.6%
	-1 000 mV	69.2	686	8.98%	37.80%	33.8%	49.6%
	-1 200 mV	62.5	684	8.00%	25.70%	41.0%	65.7%
焊缝	空气	76.2	653	14.23%	67.44%	0	0
	NS4 溶液	68.7	651	12.44%	36.50%	12.5%	45.8%
	E_{OCP}	48.4	652	9.82%	34.00%	30.9%	49.6%
	-850 mV	54.8	642	10.21%	35.21%	28.3%	47.8%
	-1 000 mV	56.3	661	9.20%	28.70%	35.3%	57.4%
	-1 200 mV	54.6	668	8.04%	26.52%	43.4%	65.7%

构，从而影响钢的性能。此外，焊缝的冷却速度较高，导致热影响区和焊缝区域存在较多的晶格缺陷，从而使热影响区和焊缝的电化学活性较高。对于热影响区，焊接热循环会导致其显微组织和性能发生改变，通常会造成局部的硬化和脆化，以及材料的韧性下降，从而在热影响区产生残余拉应力，使拉伸试样的热影响区成为 SCC 的敏感区域，易产生应

力腐蚀开裂。X90 直缝焊管母材和焊缝在空气、NS4 溶液中未加电位和不同外加电位下的 SCC 敏感性顺序为： $-1\ 200\text{ mV} > -1\ 000\text{ mV} > E_{OCP} > -850\text{ mV} > \text{NS4 溶液} > \text{空气}$ 。

2.2 断口分析

图 4 为 X90 直缝焊管母材试样在空气、NS4 溶液中未加电位和不同外加电位下的 SSRT 断口微观

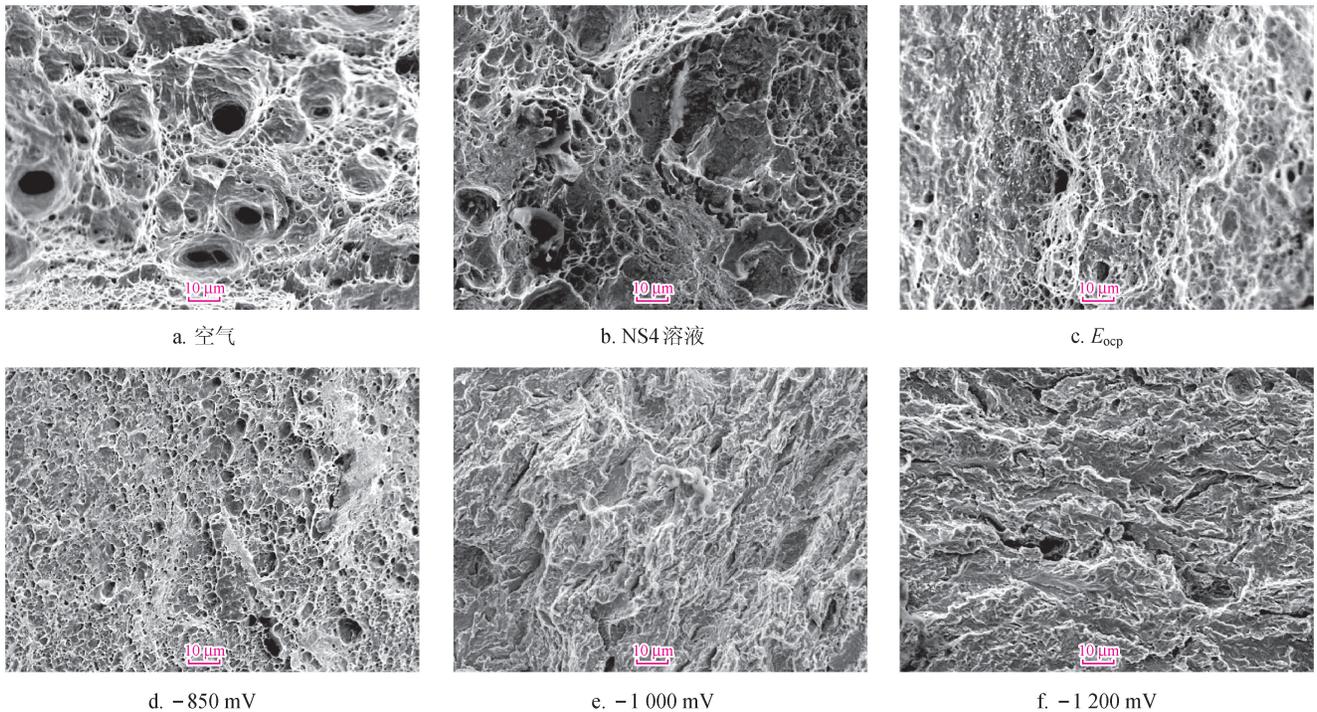


图 4 X90 直缝焊管母材试样的 SSRT 断口微观形貌图

形貌。由图 4 可知, X90 管线钢母材试样在空气中 SSRT 属于典型的韧性断裂, 断口形貌为等轴韧窝, 韧窝的大小和深度分布较均匀, 韧窝底部可观察到微孔。在 NS4 溶液中未加电位时, 其断裂属于韧性断裂, 断口形貌以韧窝为主, 韧窝上部存在着蛇形滑移的特征。当外加电位为 E_{OCP} 和 -850 mV 时, 其断口形貌以浅韧窝为主, 在断面上存在少量的具有脆性特征的小平面。当外加电位为 $-1\ 000\text{ mV}$ 时, 其断口形貌以解理断裂为主, 在解理面上存在撕裂棱, 为典型的韧-脆混合断裂, 具有准解理断裂的特征。当外加电位为 $-1\ 200\text{ mV}$ 时, 其断口形貌为典型的解理断裂, 在解理面上可明显的观察到二次裂纹, 二次裂纹与拉伸方向呈一定的角度。

图 5 所示为 X90 直缝焊管焊缝在空气、NS4 溶液中未加电位和不同外加电位下的 SSRT 断口微观形貌。由图 5 可知, X90 管线钢焊缝和母材在空气中慢拉伸的断口相似, 也属于典型的韧性断裂, 断口形貌为等轴韧窝, 与母材相比, 焊缝的韧窝数量多, 尺寸小而浅。NS4 溶液中未加电位、外加电位为 E_{OCP} 和 -850 mV 时, 其断口形貌以浅韧窝为主, 韧窝底部存在着少量的解理小平面对。当外加电位为 $-1\ 000\text{ mV}$ 时, 其断口形貌以解理断裂为主, 在解理面上存在撕裂棱, 为典型的韧-脆混合断裂, 具有准解理断裂的特征。当外加电位为 $-1\ 200\text{ mV}$ 时, 其断口形貌为解理台阶, 在解理面上可明显的观察到二次裂纹。

2.3 应力腐蚀过程及机理分析

Parkins 理论^[22]指出, 快速扫描极化曲线可用于衡量金属表面无腐蚀产物膜的裂纹尖端电化学极化特征, 慢速扫描极化曲线可用于衡量金属表面有腐蚀产物膜的非裂纹区域电化学极化特征。X90 直缝焊管母材和焊缝在 NS4 溶液中快速扫描和慢速扫描极化曲线如图 6 所示 (图中 E 表示极化电位, $\lg i$ 表示腐蚀电流)。由图 6 可知, X90 管线焊管母材和焊缝在快速扫描 (10 mV/s) 和慢速扫描 (1 mV/s) 条件下均表现为典型的阳极溶解特征, 无活化-钝化现象。对于 X90 管线钢母材来说, 当外加电位高于 -750 mV 时, 裂纹尖端和非裂纹区域均处在阳极区, 阴极反应速度小于阳极反应速度, 金属发生阳极溶解, 腐蚀电流较大, 金属发生了严重的腐蚀; 当外加电位在 $-750\sim-890\text{ mV}$ 时, 裂纹尖端发生阳极溶解, 非裂纹区域发生阴极析氢, 阴极反应过程中生成了氢, 氢通过扩散的形式进入金属内部, 使晶格的畸变能发生改变, 裂纹的扩展阻力减小, 加速了应力腐蚀的发生, 在其外加电位区间内应力腐蚀机制为阳极溶解+氢脆; 当外加电位低于 -890 mV 时, 裂纹尖端和非裂纹区域均发生了阴极析氢, 此时裂纹尖端的应力腐蚀开裂受氢脆控制; 随着外加电位的进一步降低, 当外加电位降至 $-1\ 000\text{ mV}$ 甚至 $-1\ 200\text{ mV}$ 时, 阴极反应速度加快, 析出的氢量增加, 当析出的氢在裂纹尖端聚集并达到临界氢浓度时, 将导致金属材料的内聚

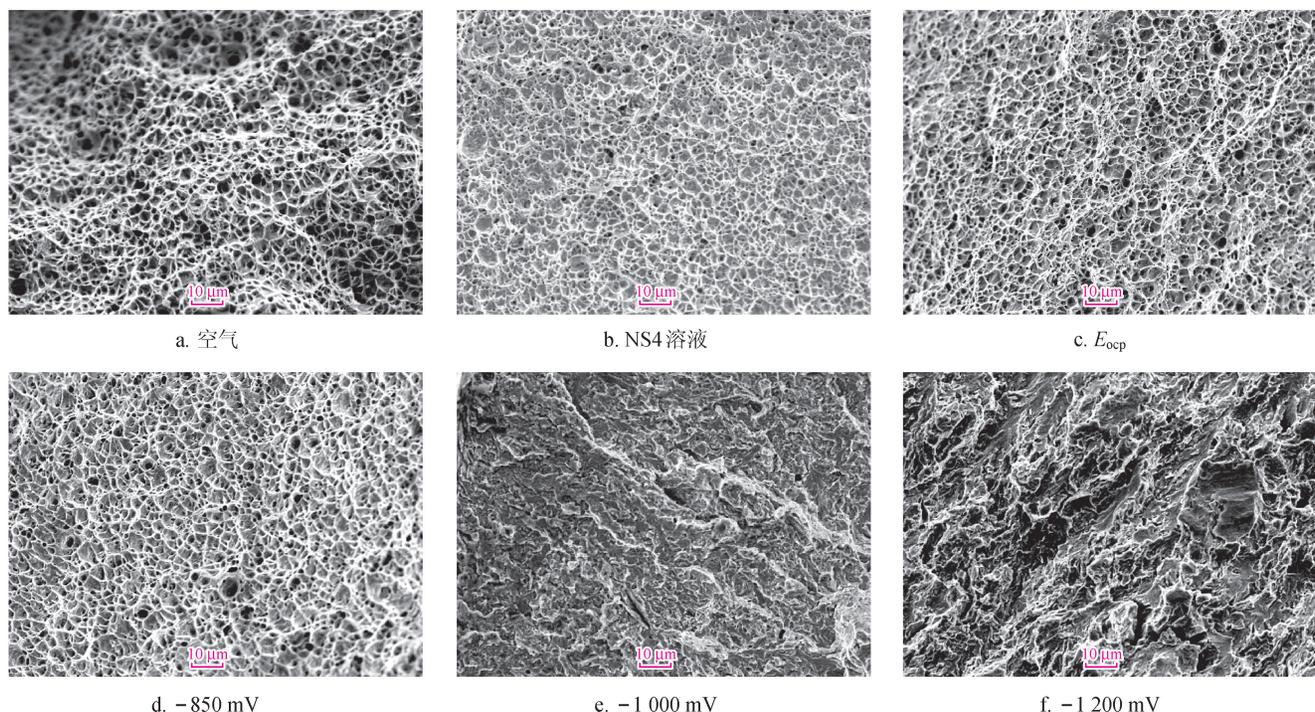


图 5 X90 直缝焊管焊缝试样的 SSRT 断口微观形貌图

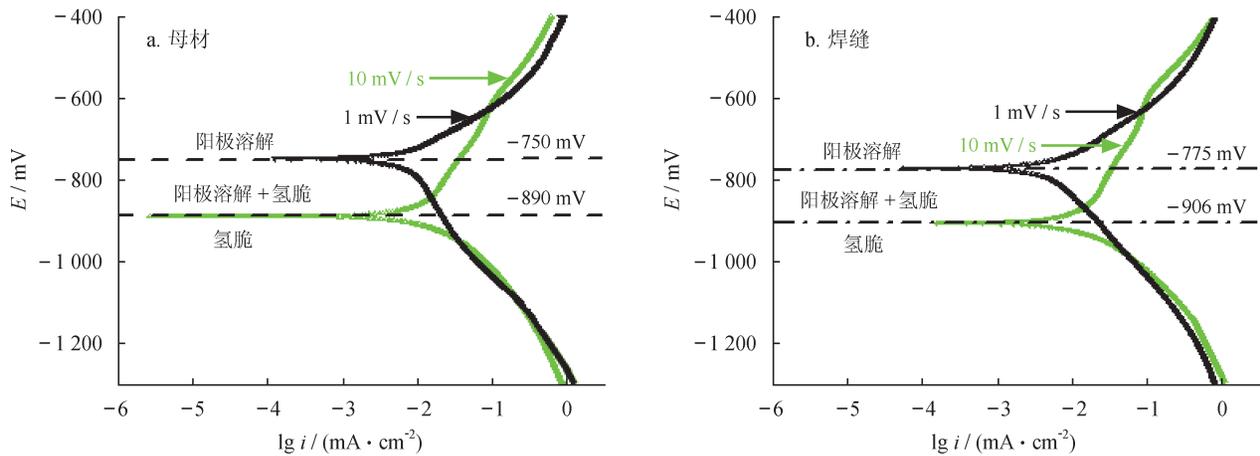
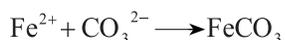
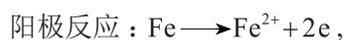
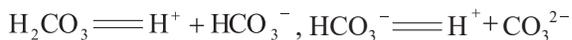


图 6 X90 直缝焊管母材和焊缝试样在 NS4 溶液中快速扫描 (10 mV/s) 和慢速扫描 (1 mV/s) 的极化曲线

力下降, 其应力腐蚀敏感性增加^[23]。对于 X90 管线钢焊缝来说, 当外加电位高于 -775 mV 时, 裂纹尖端和非裂纹区域均处在阳极极化区, 阴极反应速度小于阳极反应速度, 金属发生阳极溶解, 腐蚀电流较大, 金属发生了严重的腐蚀。当外加电位在 $-775 \sim -906$ mV 时, 裂纹尖端发生阳极溶解, 非裂纹尖端区域发生阴极析氢, 阴极反应过程中生成了氢, 氢通过扩散的形式进入金属内部, 使晶格的畸变能发生改变, 裂纹的扩展阻力减小, 加速了应力腐蚀的发生, 在其外加电位区间内应力腐蚀机制为阳极溶解+氢脆; 当外加电位低于 -906 mV 时, 裂纹尖端和非裂纹区域均发生了阴极析氢, 此时裂纹尖端的应力腐蚀开裂受氢脆控制; 随着外加电位的进一步降低, 当外加电位降至 -1000 mV 甚至是 -1200 mV, 阴极反应速度加快, 析出的氢量增加, 当析出的氢在裂纹尖端聚集并达到临界氢浓度时, 将导致金属材料的内聚力下降, 其应力腐蚀敏感性增加^[23]。

实验前向溶液中通入 N_2 除氧 2 h, 可消除氧的去极化过程, 实验过程中连续通入 $95\%N_2 + 5\%CO_2$ 混合气体, 可增加 CO_2 的含量。因此 X90 管线钢在 NS4 溶液中存在下列反应:



通过以上分析可知, X90 管线钢母材的 E_{corr} 高于 -750 mV、焊缝的 E_{corr} 高于 -775 mV, 当外加电位为 E_{OCP} 时, X90 管线钢的 SCC 为阳极溶解机制; 当外加电位为 -850 mV 时, X90 管线钢的 SCC 为阳极溶解+氢脆机制; 当外加电位为 -1000 mV 和

-1200 mV 时, X90 管线钢的 SCC 为氢脆机制。

3 结论

1) X90 直缝焊管母材和焊缝试样在 NS4 溶液中的 E_{OCP} 分别为 -708 mV 和 -718 mV, 其极化曲线具有典型的阳极溶解特征, 无活化-钝化现象。

2) X90 直缝焊管母材和焊缝试样在 NS4 溶液中具有一定的应力腐蚀敏感性, 随着外加电位的负移, 其应力腐蚀敏感性指标 I_δ 和 I_w 先减小后增大, 焊缝的应力腐蚀敏感性大于母材的应力腐蚀敏感性。

3) X90 直缝焊管母材和焊缝试样在 NS4 溶液中的 SCC 行为存在着 3 种机制: 在外加电位为 E_{OCP} 的条件下, X90 管线钢的 SCC 机制为阳极溶解机制; 在外加电位为 -850 mV 的条件下, X90 管线钢的 SCC 机制为阳极溶解+氢脆机制; 在外加电位分别为 -1000 mV 和 -1200 mV 的条件下, X90 管线钢的 SCC 机制为氢脆机制。

参 考 文 献

- [1] 王志英, 王俭秋, 韩恩厚, 柯伟, 闫茂成, 张峻巍, 等. 涂层剥离条件下 X70 管线钢的应力腐蚀裂纹萌生行为[J]. 金属学报, 2012, 48(10): 1267-1272.
Wang Zhiying, Wang Jianqiu, Han Enhou, Ke Wei, Yan Maocheng, Zhang Junwei, et al. Stress corrosion crack initiation behavior for the X70 pipeline steel beneath a disbonded coating[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2012, 48(10): 1267-1272.
- [2] Yan Maocheng, Sun Cheng, Xu Jin, Wu Tangqing, Yang Shuang & Ke Wei. Stress corrosion of pipeline steel under occluded coating disbondment in a red soil environment[J]. Corrosion Science, 2015, 93(1): 27-38.
- [3] Javidi M & Horeh SB. Investigating the mechanism of stress cor-

- rosion cracking in near-neutral and high pH environments for API 5L X52 steel[J]. *Corrosion Science*, 2014, 80(3): 213-220.
- [4] Saleem B, Ahmed F, Rafiq MA, Ajmal M & Ali L. Stress corrosion failure of an X52 grade gas pipeline[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2014, 46: 157-165.
- [5] 朱敏, 刘智勇, 杜翠薇, 李晓刚, 李建宽, 李琼, 等. X65 和 X80 管线钢在高 pH 值溶液中的应力腐蚀开裂行为及机理 [J]. *金属学报*, 2013, 49(12): 1590-1596.
Zhu Min, Liu Zhiyong, Du Cuiwei, Li Xiaogang, Li Jiankuan, Li Qiong, et al. Stress corrosion cracking behavior and mechanism of X65 and X80 pipeline steel in high pH solution[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2013, 49(12): 1590-1596.
- [6] 范林, 刘智勇, 杜翠薇, 李晓刚. X80 管线钢高 pH 应力腐蚀开裂机制与电位的关系 [J]. *金属学报*, 2013, 49(6): 689-698.
Fan Lin, Liu Zhiyong, Du Cuiwei & Li Xiaogang. Relationship between high pH stress corrosion cracking mechanisms and applied potentials of X80 pipeline steel[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2013, 49(6): 689-698.
- [7] Contreras A, Hernández SL, Orozco-Cruz R & Galvan-Martínez R. Mechanical and environmental effects on stress corrosion cracking of low carbon pipeline steel in a soil solution[J]. *Materials and Design*, 2012, 35(3): 281-289.
- [8] Liu Zhiyong, Li Xiaogang, Cheng YF. Mechanistic aspect of near-neutral pH stress corrosion cracking of pipelines under cathodic polarization[J]. *Corrosion Science*, 2012(55): 54-60.
- [9] Hard T, Shinohard Y, Terada Y, Asahiet H & Doi N. Metallurgical design and development of high-deformable high strength line pipe suitable for strain-based design[C]//paper ISOPE-I-09-443 presented at the SPE Proceedings of the 19th International Offshore and Polar Engineering Conference, 21-26 June 2009, Osaka, Japan. Osaka: ISOPE, 2009.
- [10] 李延丰, 王庆强, 王庆国, 李晓波. X90 钢级螺旋缝埋弧焊管的研制结果及分析 [J]. *钢管*, 2011, 40(2): 25-28.
Li Yanfeng, Wang Qingqiang, Wang Qinguo & Li Xiaobo. R & D of SAWH pipes[J]. *Steel Pipe*, 2011, 40(2): 25-28.
- [11] Tanguy B, Luu TT, Perrin G, Pineau A & Besson J. Plastic and damage behaviour of a high strength X100 pipeline steel: Experiments and modelling[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2008, 85(5): 322-335.
- [12] Yakubtsov IA, Poruks P & Boyd JD. Microstructure and mechanical properties of bainitic low carbon high strength plate steels[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 480(1/2): 109-116.
- [13] 黄晓辉, 张冬冬, 符利兵, 牛爱军, 芦琳, 刘刚伟. X90 螺旋埋弧焊管抗硫化氢性能的研究 [J]. *北京联合大学学报*, 2014, 28(4): 81-85.
Huang Xiaohui, Zhang Dongdong, Fu Libing, Niu Aijun, Lu Lin & Liu Gangwei. Study on the performance of anti hydrogen sulfide of X90 SSAW pipe[J]. *Journal of Beijing Union University*, 2014, 28(4): 81-85.
- [14] Nagayama H, Nakamura J, Hamada M, Mruczek MF, Vickers M, Hisamune N, et al. Development of double joint welding procedure for X90 grade seamless pipe in rise application[C]//paper OTC-24210-MS presented at the Offshore Technology Conference, 6-9 May 2013, Houston, Texas, USA.
- [15] 钱亚军, 肖文勇, 刘理, 袁仁平, 熊祥江. 大直径 X90M 管线钢的开发与试制 [J]. *焊管*, 2014, 37(1): 22-26.
Qian Yajun, Xiao Wenyong, Liu Li, Yuan Renping & Xiong Xiangjiang. Development and trial production of X90M pipeline steel with large diameter[J]. *Welded Pipe and Tube*, 2014, 37(1): 22-26.
- [16] 章传国, 郑磊, 张备, 吴扣根, 黄卫锋, 郭胜. X90 大口径 UOE 焊管的开发研究 [J]. *宝钢科技*, 2013(3): 30-34.
Zhang Chuanguo, Zheng Lei, Zhang Bei, Wu Kougen, Huang Weifeng & Guo Sheng. Research and development of X90 large diameter UOE welded pipes[J]. *Baosteel Technology*, 2013(3): 30-34.
- [17] 刘生, 张志军, 李玉卓, 刘金生. 天然气输送管件三通用 X90 钢板的开发 [J]. *宽厚板*, 2014, 20(6): 1-5.
Liu Sheng, Zhang Zhijun, Li Yuzhuo & Liu Jinsheng. Development of X90 grade steel plate for three way pipe fitting of natural gas transmission pipeline[J]. *Wide and Heavy Plate*, 2014, 20(6): 1-5.
- [18] Zhao Wengui, Wang Wei, Chen Shaohui & Qu Jinbo. Effect of simulated welding thermal cycle on microstructure and mechanical properties of X90 pipeline steel[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2011, 528(24): 7417-7422.
- [19] 夏佃秀, 王学林, 李秀程, 由洋, 尚成嘉. X90 级别第三代管线钢的力学性能与组织特征 [J]. *金属学报*, 2013, 49(3): 271-276.
Xia Dianxiu, Wang Xuelin, Li Xiucheng, You Yang & Shang Chengjia. Properties and microstructure of third generation X90 pipeline steel[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2013, 49(3): 271-276.
- [20] 李亮, 蔺卫平, 梁明华, 仝柯, 路彩虹. X90 钢直缝埋弧焊管焊接接头的组织和性能 [J]. *金属热处理*, 2015, 40(2): 56-59.
Li Liang, Lin Weiping, Liang Minghua, Tong Ke & Lu Caihong. Microstructure and mechanical properties of X90 steel weld joint of longitudinal submerged arc welded pipe[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2015, 40(2): 56-59.
- [21] ASTM. Standard practice for slow strain rate testing to evaluate the susceptibility of metallic materials to environmentally assisted cracking: ASTM G129-2006[S]. West Conshohocken: ASTM, 2006.
- [22] Parkins RN. Predictive approaches to stress corrosion cracking failure[J]. *Corrosion Science*, 1980, 20(2): 147-166.
- [23] 陈旭, 吴明, 何川, 肖军. 外加电位对 X80 钢及其焊缝在库尔勒土壤模拟溶液中的 SCC 行为的影响 [J]. *金属学报*, 2010, 46(8): 951-958.
Chen Xu, Wu Ming, He Chuan & Xiao Jun. Effect of applied potential on SCC of X80 pipeline steel and its weld joint in Ku'erle soil simulated solution[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2010, 46(8): 951-958.