

专题——金属局部腐蚀及测试技术

酸性土壤环境中剥离涂层下 X80 钢应力腐蚀行为及机理

李宗书, 刘智勇, 杜翠薇, 李彩玉

(北京科技大学 腐蚀与防护中心, 北京 100083)

摘 要: 目的 研究酸性土壤环境中剥离涂层下 X80 管线钢应力腐蚀行为及机理。方法 采用电化学极化曲线测试、慢应变速率拉伸试验和腐蚀形貌扫描电子显微镜观察, 对服役于鹰潭土壤环境的 X80 管线钢在剥离涂层下滞留液中的应力腐蚀行为及机理进行了分析研究。结果 X80 管线钢在剥离涂层下的滞留液中具有一定的 SCC 敏感性, 应力腐蚀开裂类型属于 TGSCC, 敏感性较大位置为近漏点处、剥离区中下部及剥离区底部, 且近漏点处滞留液体系中 X80 钢的 SCC 机理受阳极溶解(AD)机制控制, 剥离区底部滞留液中 SCC 机理受阳极溶解+氢脆(AD+HE)的混合机制控制。结论 服役于酸性土壤中的 X80 管线钢在外防腐涂层破损后, 除开放破损处将发生腐蚀外, 剥离涂层下的管线钢还会存在一定的应力腐蚀敏感性。

关键词: X80 管线钢; 酸性土壤; 应力腐蚀(SCC); 剥离涂层; 滞留液

中图分类号: TG172 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2016)07-0001-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.07.001

Stress Corrosion Cracking Behavior and Mechanism of X80 Pipeline Steel in Simulated Trapped Solution of Yingtan-soil under Disbonded Coating

LI Zong-shu, LIU Zhi-yong, DU Cui-wei, LI Cai-yu

(Corrosion and Protection Center, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the stress corrosion cracking (SCC) behavior and mechanism of X80 pipeline steel in the simulated trapped solution of Yingtan-soil in China under disbonded coating. **Methods** The potentiodynamic polarization, slow

收稿日期: 2016-03-21; 修订日期: 2016-06-18

Received: 2016-03-21; Revised: 2016-06-18

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划, 2014CB643300); 国家自然科学基金项目(51171025, 51371036, 51131001, 51471034); 北京市青年英才计划资助

Fund: Supported by National Basic Research Program of China (2014CB643300), National Natural Science Foundation of China (51171025, 51371036, 51131001, 51471034) and Beijing Higher Education Young Elite Teacher Project

作者简介: 李宗书(1992—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为管线钢应力腐蚀行为与机理。

Biography: LI Zong-shu (1992—), Female, Master graduate student, Research focus: mechanism and behavior of SCC of pipeline steels.

通讯作者: 刘智勇(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为应力腐蚀。

Corresponding author: LIU Zhi-yong (1978—), Male, Ph. D., Associate professor, Research focus: SCC of materials.

strain rate test (SSRT) and corrosion morphologies examination by scanning electronic microscopy (SEM) were applied for the research. **Results** X80 pipeline steel had high SCC sensitivity in simulated trapped solution, and the corrosion type was TGSCC. The SCC susceptibility of X80 pipeline steel in trapped solution of near-breakage region, lower parts and bottom was higher than others. The mechanism in trapped solution of near-breakage region was controlled by anodic dissolution (AD). And in trapped solution of bottom, the mechanism of X80 pipeline steel was mix-controlled by anodic dissolution and hydrogen embrittlement (AD+HE). **Conclusion** When a coating of X80 pipeline steel used in acid soil environment was disbonded, in addition to corrosion at the open breakage, stress corrosion cracking also occurred under the disbonded coating.

KEY WORDS: X80 pipeline steel; acid soil; stress corrosion cracking (SCC); disbonded coating; trapped solution

涂层防护结合阴极保护技术是目前防止管线钢外腐蚀、提高其服役寿命的重要方法^[1]。然而, 由于运输和安装过程中的机械损伤及使用过程中涂层老化降解等因素, 管线钢涂层不可避免地会产生针孔、起泡或翘起等开放性缺陷, 进而在管线钢与涂层之间形成狭长的剥离区域^[2-6]。长时间埋地服役使土壤溶液中的腐蚀性介质沿开放性破损口进入剥离区, 并通过化学及电化学反应逐步演化为与土壤溶液理化性质截然不同且腐蚀性更强烈的滞留液, 加之涂层剥离后金属外表面得不到有效的阴极保护, 因而这类剥离涂层下阴极保护失效的腐蚀性滞留液环境成为管线钢发生应力腐蚀问题的根源^[7-13]。研究发现, 剥离涂层下环境的形成极为复杂, 影响因素众多, 如土壤环境、阴保水平和失效模式等^[14]。我国东南部土壤类型主要为致密、含水量高、含氧量低、含有较多腐质酸且 pH 值为 3.5~6 的酸性土壤, 且土壤中的 CO₂ 含量较高, 一旦发生了涂层剥离, 剥离涂层下便可封存富含 CO₂/HCO₃⁻ 的近中性 pH 敏感环境, 管线钢在该环境中的腐蚀等级较高^[15-17]。目前对于我国典型土壤类型中管线钢剥离涂层下应力腐蚀行为的研究尚未完全展开。

本文在前期涂层下滞留液特征研究的基础上, 对我国典型酸性土壤——鹰潭土壤环境中 X80 钢在剥离涂层下滞留液中的应力腐蚀行为机理进行了研究, 以期为我国的 X80 钢油气管线 SCC 防控工作提供基础。

1 试验

材料选用宝钢产 X80 钢热轧板, 主要化学成分 (以质量分数计) 为: C 0.026%, Mn 1.600%, Si 0.220%, Ni 0.150%, Cr 0.270%, Cu 0.270%,

Nb 0.097%, Ti 0.014%, S 0.001%, P 0.003%, Fe 余量。电化学实验采用尺寸为 10 mm × 10 mm × 2 mm 的正方形试样, 试样背面点焊引出铜导线, 并用环氧树脂将非工作面包封。实验前工作面用 SiC 水砂纸逐级打磨至 2000[#], 然后用丙酮除油, 并用去离子水清洗后吹干待用。慢应变速率拉伸实验 (SSRT) 采用板状试样, 依照国标 GB/T 15970 制定, 如图 1 所示, 厚度 2 mm。实验前先将试样表面用水砂纸打磨至 2000[#], 打磨时以与拉伸方向呈 45° 及 -45° 进行交替打磨, 以后一组方向划痕完全覆盖住前一组为标准, 最后一组要沿拉伸方向轴向打磨, 使最终划痕与拉应力方向一致, 再用去离子水清洗后用丙酮脱水除油。

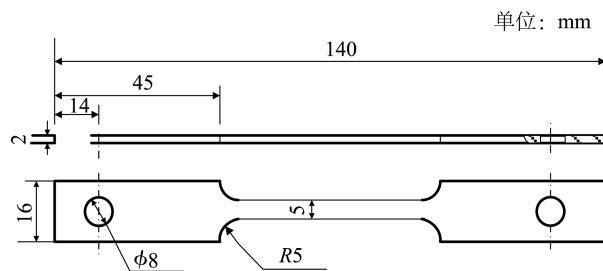


图 1 SSRT 试样尺寸

Fig.1 Dimension of specimen for SSRT

根据赵博^[18]关于鹰潭土壤模拟溶液中 X80 管线钢剥离涂层下距离破损口处不同位置的离子分布的研究, 结合刘智勇等^[19]提出的配平原则, 模拟剥离涂层下距离破损处 (漏点) 不同位置的滞留液化学成分如表 1 所示, 其中 d 为距漏点距离。pH 值采用 10% 的醋酸溶液调节。

电化学实验过程中采用三电极体系, 其中 X80 管线钢试样为工作电极, Pt 片为辅助电极, 饱和甘汞电极 (SCE) 为参比电极, 文中所有电位均为相对于 SCE 的电位。电化学实验所用溶液在实验前通高纯度 N₂ 除 O₂ 2 h, 并在实验过程中持续通 N₂

表 1 模拟剥离涂层下距离破损处不同位置的滞留液化学成分
Tab.1 Chemical composition of simulated trapped solution of Yingtan-soil under disbonded coating with different positions away from breakage

<i>d</i> /cm	pH	$\rho /(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$					
		NaCl	CaCl ₂	KNO ₃	NaHCO ₃	Na ₂ SO ₄	MgCl ₂ · 6H ₂ O
0	4.5	0.0593	0.0167	0.0293	0.0151	0.0352	0.0169
5	6.3	0.0725	0.0111	0.0098	0.0019	0.0220	0.0085
10	6.0	0.0587	0.0111	0.0065	0.0018	0.0206	0.0169
15	5.5	0.0840	0.0083	0.0033	0.0017	0.0220	0.0169
20	5.3	0.1812	0.0111	0.0049	0.0017	0.0206	0.0169
25	4.1	0.1022	0.0056	0.0049	0.0017	0.0206	0.0169

除 O₂。使用 PARSTAT 2273 工作站进行动电位极化曲线测试。

慢应变速率拉伸实验 (SSRT) 在 WDML-3 型微机控制慢应变速率拉伸试验机上进行, 拉伸速率为 $1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 。拉伸开始之前将试样置于溶液中, 在 500 N 左右的应力下预拉伸 24 h。

采用 Cambridge S-360 型扫描电镜 (SEM) 对拉伸断口及二次裂纹形貌进行观察。

2 结果及分析

2.1 慢应变速率拉伸试验

图 2 为鹰潭土壤环境中的 X80 钢在剥离涂层下不同滞留液中的拉伸曲线。由图 2 可知, 与空气中的拉伸相比, 剥离涂层下滞留液中的 X80 钢的抗拉强度和延伸率均下降, 说明 X80 钢在剥离涂层下滞留液中具有较强的 SCC 敏感性。在近漏点处及剥离区底部处的滞留液中, X80 钢的抗拉强度及延伸率较空气中有较大程度的下降, 说明在近漏点处以及剥离区底部处 X80 钢的 SCC 敏感性相对较大。值得注意的是, 漏点处滞留液中 X80 钢 SCC 敏感性相对剥离区滞留液中的较小, 由于漏点处的滞留液实际上是土壤本体溶液, 说明剥离涂层体系滞留液比土壤本体溶液的 SCC 腐蚀性更加强烈。

图 3 为根据图 2 结果对 X80 钢在不同滞留液中延伸率及断面收缩率的统计结果, 由图 3 可见, X80 钢在滞留液体系中的延伸率和断面收缩率均较空气中的低, 非漏点处滞留液中的延伸率和断面收缩率均较漏点处的低, 与拉伸实验结果相一致。这说明 X80 钢在模拟剥离区近漏点以及底部的滞留液体系中有明显的 SCC 敏感性, 在模拟剥离区中部滞留液体系中 SCC 敏感性相对较弱。

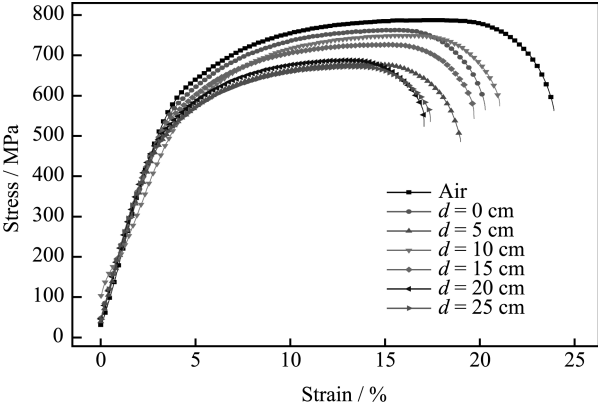


图 2 鹰潭土壤模拟溶液中 X80 钢在剥离涂层下不同滞留液体系中的拉伸曲线
Fig.2 SSRT curves of X80 pipeline steel in air and simulated trapped solution under disbonded coating

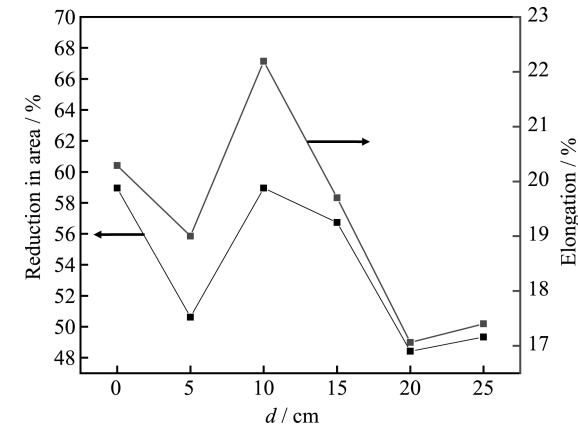


图 3 X80 钢在剥离涂层下滞留液体系中的延伸率和断面收缩率
Fig.3 Reduction in area and elongation of X80 pipeline steel in air and simulated trapped solution under disbonded coating

2.2 SSRT 断口侧面形貌

一般认为, 若在腐蚀性介质中的拉伸试样断口侧面存在微裂纹 (二次裂纹), 则表明该材料在该腐蚀性介质中具有 SCC 敏感性^[20]。因此本文对空气和各滞留液中的 X80 钢拉伸试样断口侧面进行

了观察,结果如图 4 所示。

由图 4 可知,空气环境下拉伸试样断口侧面未观察到二次裂纹(图 4a),剥离涂层区域滞留液中的 X80 拉伸试样侧面均发现了不同程度的二次裂纹。在漏点处滞留液中 X80 钢断口侧面二次裂纹不明显,但可观察到明显的腐蚀形貌特征(图 4b),说明 X80 钢在该处虽发生局部腐蚀,但 SCC 敏感性较弱。剥离涂层下近漏点及剥离底部处滞留液内 X80 钢的二次裂纹尺寸较大,裂纹较深,数量较多,尤其是在剥离区底部($d=25\text{ cm}$)滞留液中, X80 钢侧面还存在强烈的腐蚀形貌特征(图 4c、4f 和 4g),说明 X80 钢在近漏点($d=5\text{ cm}$)及底部区域($d=20、25\text{ cm}$) SCC 敏感性较大。此外,当 X80 钢拉伸断口侧面存在点蚀坑和二次裂纹时,二次裂

纹在点蚀坑处较大,而在非点蚀坑处较小(图 4c),说明点蚀坑的存在有利于裂纹的萌生和进一步扩展。这是因为当有点蚀坑存在时,外加应力在点蚀坑周围,尤其是点蚀坑底部会产生应力集中,进而会促进裂纹的萌生及扩展。在剥离区中部($d=10、15\text{ cm}$)滞留液中,试样侧面微裂纹小且浅,数量较少,说明 X80 钢在这两处的 SCC 敏感性较弱,与上述实验结果一致(图 4d 和图 4e)。

进一步观察各图,可以看出各滞留液体系中的拉伸试样侧面出现的二次裂纹均较平直,因此可以判断 X80 钢在鹰潭土壤环境中剥离涂层下滞留液环境中的拉伸断裂属于穿晶型应力腐蚀断裂(TGSCC),与管线钢在近中性环境中的应力腐蚀断裂特征相同。

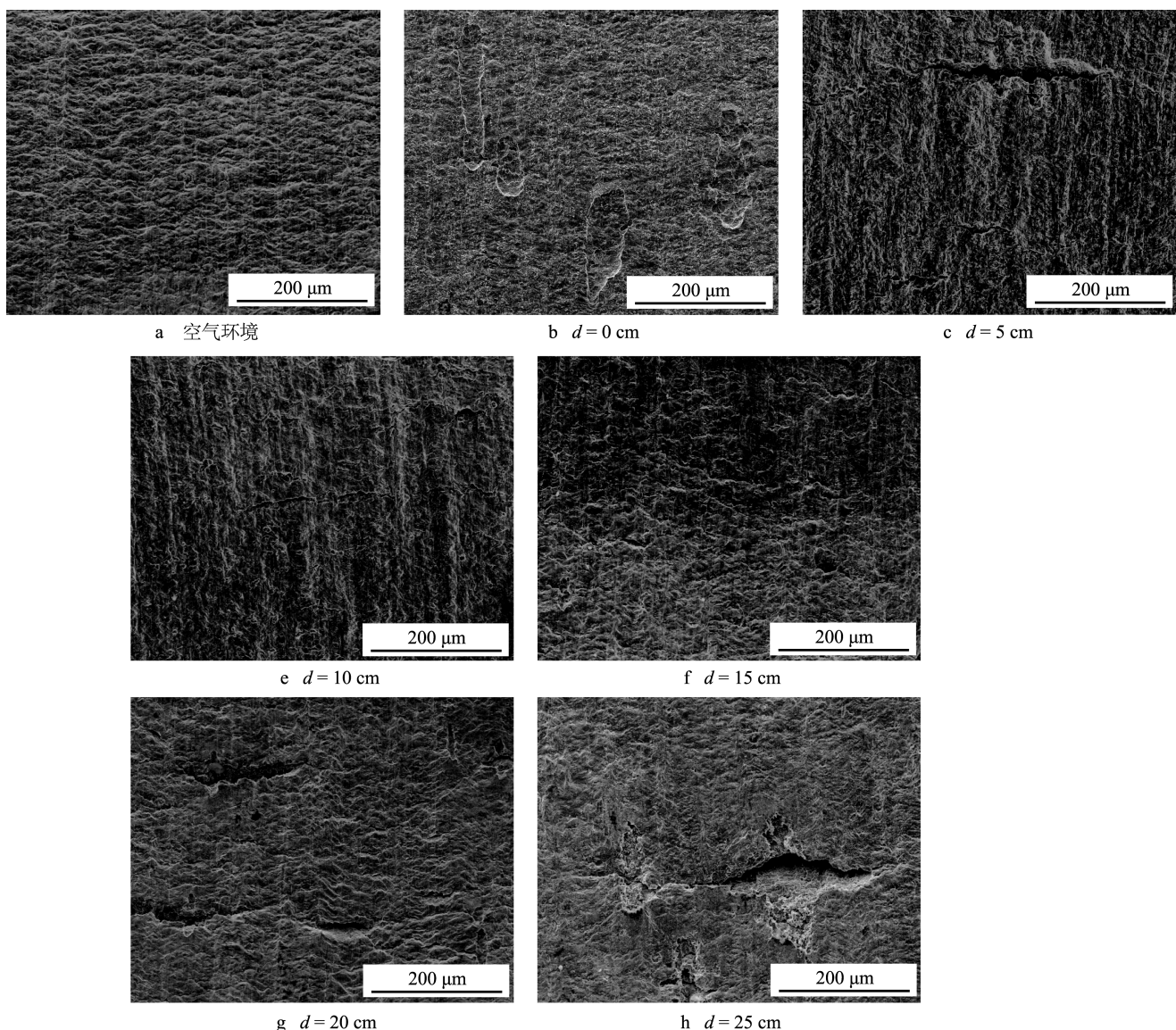


图 4 X80 钢在空气和剥离涂层下滞留液中的拉伸断口侧面二次裂纹 SEM 像

Fig.4 SEM images of the side near fracture surface of X80 pipeline steel in air and simulated trapped solution under disbonded coating

2.3 电化学特性

采用不同扫描速率下的动电位极化曲线可以确定管线钢在特定溶液中的 SCC 敏感电位区间。其中,快速扫描可以最大程度屏蔽成膜过程的影响,使工作电极表面始终处于无膜的新鲜金属状态,进而发生阳极腐蚀溶解反应,因此快速扫描极化曲线可反映 SCC 裂纹尖端的电化学特性,慢速扫描极化曲线则可以反映非裂纹尖端的金属表面的电化学行为^[21-23]。根据不同电位区间内快扫电流密度 J_f 和慢扫电流密度 J_s 的大小可确定 X80 钢在滞留液中的 SCC 敏感电位,通过 J_f 和 J_s 的差异还可以确定阳极溶解机制(AD)下 SCC 敏感性的相对大小,两者差异越大,则由 AD 机制控制的 SCC 敏感性越强^[24]。

根据上述实验结果,剥离涂层底部区域滞留液中 X80 钢敏感性较明显,且该溶液较具代表性,因而选择该溶液进行 X80 钢的快扫(50 mV/s)、慢扫(0.5 mV/s)极化曲线的测试,如图 5 所示。电位范围大致可分为三个区间:在-1200~-985 mV 区间内,裂尖区域和非裂尖区域均发生阴极析氢反应,同时快、慢扫曲线几乎重合,即 J_f 同 J_s 的差异很小,说明此区间内 AD 机制的作用可以忽略,当外加电位在该区间时,X80 钢 SCC 机制为氢脆机制(HE);在-980~-855 mV 区间内,裂尖区域发生阳极溶解反应,非裂尖区域发生阴极析氢反应,因此当外加电位在该范围内时,X80 钢 SCC 机制为阳极溶解与氢脆(AD+HE)的混合机制,且在该区域内随着电位升高, J_f 同 J_s 的差异先减小后增大,表明 AD 机制的作用为先减弱后增强;在高于-855 mV 区间内,裂尖区域和非裂尖区域均发生阳极溶解反应,理论上 AD 区内只有当 $J_f > J_s$ 时,试样才可能发生 SCC。由此可将该范围进一步细分,在-855~-532 mV 区间内, J_f 始终大于 J_s ,说明在此电位区间内,X80 钢在剥离区底部滞留液中具有较大 SCC 敏感性,且裂尖腐蚀速率始终大于非裂尖腐蚀速率,裂纹尖端以 AD 方式生长,SCC 机制受阳极溶解机制(AD)控制;当外加电位正于-532 mV 时, $J_f < J_s$,此时 X80 钢不具有 SCC 敏感性,且 J_f 同 J_s 的差异减小,表明此时 SCC 机制已不受 AD 机制单独控制,同时 HE 机制作用微弱,或应以其他机制进行解释。

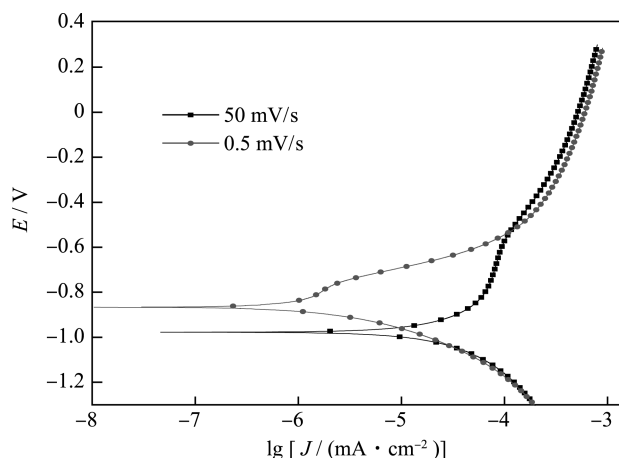


图 5 X80 钢在剥离涂层下剥离区底部滞留液中快扫和慢扫极化曲线

Fig.5 Fast (50 mV/s) and slow (0.5 mV/s) sweep polarization curves of X80 steel pipeline in simulated trapped solution which is 25 cm away from breakage

2.4 应力腐蚀过程

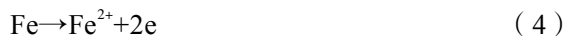
滞留液体系中 pH 值较低,且在除 O_2 条件下可忽略 O_2 的阴极去极化反应,因此仅考虑析氢反应。由于漏点处滞留液的 pH 较低,且 X80 管线钢的耐蚀性较差,剥离区的电位无法为漏点处提供完全的阴极保护,因此漏点处将发生阳极溶解反应,其反应方程式如式(4)所示。同时析氢反应产生的 H 将促进氢脆的产生,但由于此处 pH 值为 4.5,酸性不明显,因此此处材料力学性能下降可能是以阳极溶解机制(AD)为主。

在近漏点处,由于阴极保护同样不充分,酸性也不明显,因此 X80 钢 SCC 机制主要为阳极溶解机制(AD),同时此处为富 Cl^- 环境,因此会造成局部点蚀行为的发生,结合力学因素的作用,点蚀坑将成为裂纹的萌生点,进一步降低管线钢的力学性能,导致试样整体的 SCC 敏感性增强,这与图 5c 观察结果一致。在剥离区底部,由于此处与漏点存在明显的电位差,剥离底部管线钢为阳极,发生阳极溶解反应,产生的阳离子发生水解从而使裂尖内介质酸化,进而为阴极析氢过程创造了条件,并促进 H 在裂尖内的扩散,使氢脆机制的倾向增大。同时由于剥离底部溶液酸化,pH 较低,酸性较大,可并行发生化学腐蚀过程,使得氢的析出量增大,相伴的氢脆机制加重,因此此处 X80 钢断裂失效机制以阳极溶解和氢脆的混合(AD+HE)机制为主。

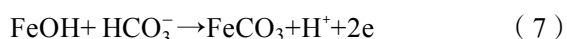
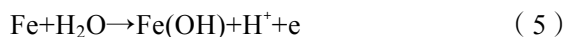
阴极反应:



阳极反应:



总反应:



3 结论

鹰潭土壤模拟溶液中的 X80 管线钢在剥离涂层下的滞留液中具有一定的 SCC 敏感性, 应力腐蚀开裂类型属于 TGSCC, 敏感性较高的位置为近漏点处、剥离区中下部及剥离区底部。其中近漏点处滞留液体系中 X80 钢的 SCC 机理受阳极溶解 (AD) 机制控制, 剥离区底部滞留液中 SCC 机理受阳极溶解+氢脆 (AD+HE) 的混合机制控制。

参考文献

- [1] NGUYEN D D, LANARDE L, JEANNIN M, et al. Influence of Soil Moisture on the Residual Corrosion Rates of Buried Carbon Steel Structures under Cathodic Protection[J]. *Electrochimica Acta*, 2015, 176(10):1410—1419.
- [2] DEFLORIAN F, ROSSI S. An EIS Study of Ion Diffusion through Organic Coatings[J]. *Electrochimica Acta*, 2006, 51(8/9): 1736—1744.
- [3] YAN M C, WANG J Q, HAN E H, et al. Local Environment under Simulated Disbonded Coating on Steel Pipelines in Soil Solution[J]. *Corrosion Science*, 2008, 50(5): 1331.
- [4] LIU Z Y, LI X G, DU C W, et al. Local Additional Potential Model for Effect of Strain Rate on SCC of Pipeline Steel in an Acidic Soil Solution[J]. *Corrosion Science*, 2009, 51(12): 2863—2871.
- [5] VUILLEMIN B, OLTRA R, COTTIS R, et al. Consideration of the Formation of Solids and Gases in Steady State Modelling of Crevice Corrosion Propagation[J]. *Electrochimica Acta*, 2007, 52(27): 7570.
- [6] 姜军, 王辉, 张春晓, 等. 三种黑色金属的土壤腐蚀行为与土壤性质的关系[J]. *装备环境工程*, 2015, 12(4): 38—44.
- JIANG Jun, WANG Hui, ZHANG Chun-xiao, et al. Relationship of Corrosion of Three Ferrous Metals in Soils and Soil Properties[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2015, 12(4): 38—44.

- [7] SONG F M, KIRK D W, GRAYDON J W, et al. Steel Corrosion under a Disbonded Coating with a Holiday—Part 1: The Model and Validation[J]. *Corrosion*, 2002, 58(12):1015—1024.
- [8] CHEN X, LI X G, DU C W, et al. Effect of Cathodic Protection on Corrosion of Pipeline steel under Disbonded Coating [J]. *Corrosion Science*, 2009, 51(9): 2242—2249.
- [9] SONG F M, SRIDHAR N. Modeling Pipeline Crevice Corrosion under a Disbonded Coating with or without Cathodic Protection under Transient and Steady State Conditions [J]. *Corrosion Science*, 2008, 50(1): 70.
- [10] FU A Q, CHENG Y F. Electrochemical Polarization Behavior of X70 Steel in Thin Carbonate/Bicarbonate Solution Layers Trapped under a Disbonded Coating and Its Implication on Pipeline SCC [J]. *Corrosion Science*, 2010, 52(7): 2511.
- [11] 宋义全, 杜翠薇, 张新, 等. Cl^- 浓度对 X70 管线钢缝隙腐蚀的影响[J]. *金属学报*, 2009, 45(9): 1130—1134.
- SONG Yi-quan, DU Cui-wei, ZHANG Xin, et al. Influence of Cl^- Concentration on Crevice Corrosion of X70 Pipeline Steel[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2009, 45(9): 1130—1134.
- [12] GALVELEJ R. Tafel's Law in Pitting Corrosion and Crevice Corrosion Susceptibility [J]. *Corrosion Science*, 2005, 47(12): 3053.
- [13] 刘智勇, 郑文茹, 王力伟, 等. 库尔勒土壤环境中 X70 管线钢剥离涂层下的腐蚀特征[J]. *北京科技大学学报*, 2014, 36(11): 1483.
- LIU Zhi-yong, ZHENG Wen-ru, WANG Li-wei, et al. Corrosion Characteristic of X70 Pipeline Steel under Disbonded Coatings in Kuerle Soil Environment [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2014, 36(11): 1483.
- [14] 闫茂成, 王俭秋, 韩恩厚, 等. 埋地管线阴极保护屏蔽剥离涂层下薄液腐蚀环境特征及演化[J]. *金属学报*, 2014, 50(9): 1137—1145.
- YAN Mao-cheng, WANG Jian-qiu, HAN En-hou, et al. Characteristics and Evolution of Thinlayer Electrolyte on Pipeline Steel under Cathodic Protection Shielding Disbonded Coating [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2014, 50(9): 1137—1145.
- [15] LIU Z Y, LI X G, DU C W, et al. Stress Corrosion Cracking Behavior of X70 Pipe Steel in an Acidic Soil Environment [J]. *Corrosion Science*, 2008, 50(8):2251—2257.
- [16] LIU Z Y, LI X G, DU C W, et al. Effect of Inclusions on Initiation of Stress Corrosion Cracks in X70 Pipeline Steel in an Acidic Soil Environment [J]. *Corrosion Science*, 2009, 51(4):895—900.
- [17] LIU Z Y, LI X G, CHENG Y F. Mechanistic Aspect of Near-neutral pH Stress Corrosion Cracking of Pipelines under Cathodic Polarization [J]. *Corrosion Science*, 2012, 55: 54—60.

- [18] 赵博. 酸性土壤环境中的 X80 钢在剥离涂层下的局部腐蚀机理及影响因素[D]. 北京: 北京科技大学, 2014.
ZHAO Bo. Localized Corrosion Mechanism and Influencing Factors of X80 Steel under Disbonded Coating in Acidic Soil Environment[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2014.
- [19] 刘智勇, 李晓刚, 杜翠薇, 等. 管道钢在土壤环境中应力腐蚀模拟溶液进展[J]. 油气储运, 2008, 27(4): 34—37.
LIU Zhi-yong, LI Xiao-gang, DU Cui-wei, et al. Research Progress of Stress Corrosion Cracking of Pipeline Steel in Simulated Soil Solution[J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2008, 27(4): 34—37.
- [20] 褚武扬, 乔利杰, 陈奇志, 等. 断裂与环境断裂[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 109.
CHU Wu-yang, QIAO Li-jie, CHEN Qi-zhi, et al. Fault Rupture and the Environment[M]. Beijing: Science Press, 2000: 109.
- [21] 刘智勇, 翟国丽, 杜翠薇, 等. X70 钢在酸性土壤模拟溶液中的应力腐蚀行为[J]. 金属学报, 2008, 44(2): 209—214.
LIU Zhi-yong, ZHAI Guo-li, DU Cui-wei, et al. Stress Corrosion Behavior of X70 Pipeline Steel in Simulated Solution of Acid Soil [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44(2): 209—214.
- [22] 刘智勇, 王长朋, 杜翠薇, 等. 外加电位对 X80 管线钢在鹰潭土壤模拟溶液中应力腐蚀行为的影响[J]. 金属学报, 2011, 47(11): 1434—1439.
LIU Zhi-yong, WANG Cang-peng, DU Chui-wei, et al. Effect of Applied Potentials on Stress Corrosion Cracking of X80 Pipeling Steel in Simulated Yingtan Soil Solution [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2011, 47(11): 1434.
- [23] PARKINS R N. Predictive Approaches to Stress Corrosion Cracking Failure [J]. Corrosion Science, 1980, 20(2): 147.
- [24] 范林, 刘智勇, 杜翠薇, 等. 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 Zhi-yong, DU Cui-wei, et al. Relationship between High pH Stress Corrosion Cracking Mechanisms and Applied Potentials of X80 Pipeline Steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(6): 689—698.