

表面失效及防护

# 离子渗氮对 X80 管线钢在碱性土壤模拟溶液中 腐蚀行为的影响

孙彦伟, 陈吉, 朴楠, 许志显, 陈晓明

(辽宁石油化工大学 机械工程学院, 辽宁 抚顺 113001)

**摘要:**目的 对 X80 管线钢表面进行离子渗氮处理,研究其渗氮层在库尔勒土壤模拟溶液中浸泡 30,60,90 d 的腐蚀性能及规律。方法 通过动电位极化和交流阻抗谱分析 X80 管线钢渗氮层对腐蚀性能的影响,采用 SEM,XRD 和 EDS 技术对腐蚀产物膜的表面形貌和组成成分进行分析测试。结果 随着腐蚀时间的增加,渗氮 X80 钢的自腐蚀电流密度减小到  $1.33 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ,自腐蚀电位增加至  $-225 \text{ mV}$ ,腐蚀速率显著减小;腐蚀产物主要为  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}(\text{OH})$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  和  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 。结论 浸泡相同时间,离子渗氮试样的自腐蚀电位更正,自腐蚀电流密度降低 1 个数量级,电荷转移电阻增大 2 个数量级,比原始 X80 管线钢更耐蚀。

**关键词:** X80 管线钢; 离子渗氮; 土壤模拟溶液; 腐蚀行为

中图分类号: TG174.445; TG172.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2015)02-0093-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.02.018

## The Effect of Plasma Nitriding on the Corrosion Resistance of X80 Pipeline Steel in Alkaline Soil Simulation Solution

SUN Yan-wei, CHEN Ji, PIAO Nan, XU Zhi-xian, CHEN Xiao-ming

(Department of Mechanical Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China)

**ABSTRACT:** **Objective** The surface of commercial X80 pipeline steel was modified using plasma nitriding, to study the corrosion resistance and rule of plasma nitriding X80 steel immersed in Ku'erle soil simulation solution for 30 days, 60 days, and 90 days. **Methods** The effect of the nitrided layer on the corrosion resistance of X80 steel was investigated by potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) measurement, The morphology and composition of the corrosion products were investigated using SEM, XRD, and EDS. **Results** The results showed that: with the increasing corrosion time, the corrosion current density of nitrided X80 steel decreased to  $1.33 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , the corrosion potential increased to  $-225 \text{ mV}$ , and the corrosion rate was significantly reduced; the corrosion products were mainly composed of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}(\text{OH})$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  and  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . **Conclusion**

收稿日期: 2015-01-08; 修订日期: 2015-01-18

Received: 2015-01-08; Revised: 2015-01-18

基金项目: 辽宁省自然科学基金项目(201202127)

Fund: Supported by Natural Science Foundation of Liaoning Province (201202127)

作者简介: 孙彦伟(1989—),男,辽宁北票人,硕士研究生,主要研究方向为过程装备新型材料与设备腐蚀防护。

**Biography:** SUN Yan-wei (1989—), Male, from Beipiao, Liaoning, Master graduate student, Research focus: process equipment new materials and corrosion protection of equipment.

As compared with the X80 steel, after immersion for the same time, the specimen treated by plasma nitriding had a more positive corrosion potential, the corrosion current density was decreased by one order of magnitude, the charge transfer resistance was increased by two orders of magnitude, and the corrosion resistance was higher.

**KEY WORDS:** X80 pipeline steel; plasma nitriding; simulated soil solution; corrosion behavior

大管径、高压已经成为 21 世纪管线钢的发展趋势, X80 管线钢具有高强度、高韧性的优势, 被广泛应用到石油天然气运输工程中<sup>[1-2]</sup>。在我国西气东输二线工程中, 已经开始大规模应用 X80 管线钢。由于管线钢长期与土壤腐蚀介质相接触, 极易发生电化学腐蚀, 通常会在钢体表面形成许多腐蚀微观电池和宏观电池, 从而对管道造成严重的破坏。据统计<sup>[3-4]</sup>, 因为埋地管道腐蚀发生的事故, 平均每 1 年就发生 5 次。管线钢的土壤腐蚀问题是地下工程急需解决的一个实际问题<sup>[5-6]</sup>, 在我国新疆库尔勒地区埋有大量的石油天然气管道<sup>[7]</sup>, 该地区具有我国西部主要的荒漠盐渍土壤特征, 盐含量较高, 土壤呈碱性<sup>[8]</sup>, 对材料的腐蚀破坏性较大。因此, 研究 X80 管线钢的土壤腐蚀是十分重要的。

近年来, 工程中用于防止埋地管道腐蚀的主要措施有电极保护法和绝缘涂层防护法<sup>[9-10]</sup>。表面等离子渗氮作为材料表面改性的一种方法<sup>[11-13]</sup>, 操作简单, 渗氮层与钢材基体紧密结合成一体, 能显著改善材料表面的性能。因此, 本文主要研究经过等离子渗氮处理之后的 X80 管线钢表面渗氮层在库尔勒土壤模拟溶液中的腐蚀行为和腐蚀规律。

## 1 实验

基材为 X80 管线钢 20 mm 厚热轧钢板, 试样尺寸为 10 mm×10 mm×3 mm, 化学成分(以质量分数计)为: C 0.043%, Si 0.23%, Mn 1.87%, P 0.01%, Ni 0.23%, Mo 0.27%, Cu 0.13%, Al 0.042%, Nb 0.06%, V 0.006%, Ti 0.017%, S 0.0028%, Cr 0.025%。样品表面预先经过 60#, 200#, 400#, 600#, 800#, 1000#, 1200# 砂纸逐级打磨, 用丙酮除油, 用去离子水超声波清洗, 冷风吹干后进行渗氮处理。采用武汉热处理研究所研制的 LDMC-30A 离子渗氮炉, NH<sub>3</sub> 为渗氮气源, 流量为 0.5 L/min, 气体压力为 400 Pa, 电压为 650 V, 渗氮温度为 530 ℃, 渗氮时间为 8 h。试样截面使用 4% (质量分数) 硝酸酒精表面侵蚀, 用 Leica 金相显微镜观察渗氮层组织结构; 采用岛津 X7000 型 X 射线衍射仪分析渗氮层的物相组成。

腐蚀介质为库尔勒土壤模拟溶液, 根据我国库尔

勒地区地下 100 ~ 150 cm 处土壤的理化性质配制该模拟溶液, 其化学组成为: NaHCO<sub>3</sub> 0.1462 g/L, KNO<sub>3</sub> 0.2516 g/L, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2.5276 g/L, CaCl<sub>2</sub> 0.2442 g/L, NaCl 3.1703 g/L, MgCl<sub>2</sub> · 6H<sub>2</sub>O 0.6699 g/L。采用去离子水和分析纯化学试剂配制溶液, 用 5% (质量分数) NaOH 或 10% (质量分数) H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 调节模拟溶液的 pH=9.1±0.2。将渗氮和原始 X80 管线钢试样放在库尔勒土壤模拟溶液中分别浸泡 30, 60, 90 d 后取出, 除去表面疏松的腐蚀产物膜, 烘干密封保存。采用 TESCAN VEGA3 型扫描电子显微镜对腐蚀产物形貌进行观察。

采用 PARSTAT 2273 型电化学工作站, 在传统三电极体系中测定浸泡试样在模拟溶液中的极化曲线, 工作电极为试件, 参比电极为饱和甘汞电极, 辅助电极为石墨, 扫描速度为 0.5 mV/s, 测试温度为 (25±0.5) ℃。

## 2 结果与分析

### 2.1 渗氮层组织形态

图 1 是 X80 管线钢离子渗氮后的截面形貌。渗氮层中白亮层与扩散层界面明显, 扩散层与基体过渡平缓。其中, 白亮层组织均匀致密, 厚度约 350 μm。由于不同原始晶粒取向不同, 氮原子在不同晶粒内扩散速度具有各向异性, 造成白亮层与扩散层的界面明显弯曲。

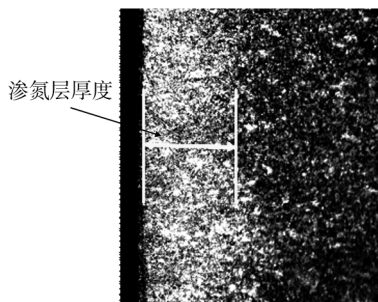


图 1 X80 管线钢在 530 ℃ 离子渗氮 8 h 后截面样形貌(100×)  
Fig. 1 Cross-section topography of X80 after plasma nitriding at 530 ℃ for 8 h (100×)

### 2.2 X80 管线钢渗氮层的物相组成

图 2 为 X80 管线钢渗氮层与基体的 X 射线衍射

图谱对比情况。离子渗氮后,X80 管线钢表面形成由  $\epsilon$ - $\text{Fe}_3\text{N}$  相和  $\gamma'$ - $\text{Fe}_4\text{N}$  相组成的复合渗氮层,基体 Fe 的特征峰完全消失。离子渗氮时,在高压电场能作用下, $\text{NH}_3$  在 Fe 的催化下很容易电离出  $\text{N}^+$ ,渗入铁素体中形成含氮的  $\alpha$ -Fe;随着  $\text{N}^+$  的进一步扩散,根据 Fe-N 相图可知,Fe 和  $\text{N}^+$  之间可形成不稳定的  $\gamma'$  相;当氮浓度在  $\gamma'$  相中达到饱和后就会生成  $\epsilon$  相。

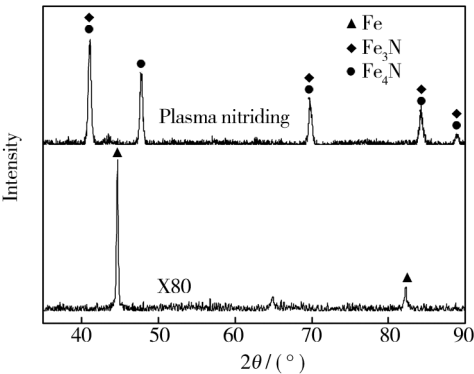
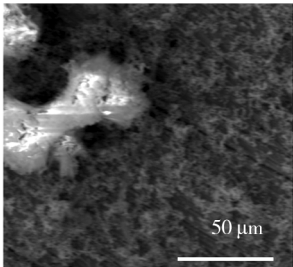


图 2 X80 管线钢的 XRD 谱图

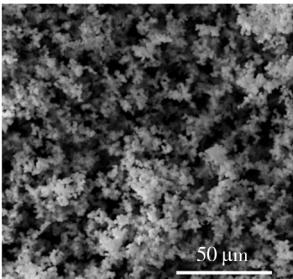
Fig. 2 XRD patterns of the X80 pipeline steel

2.3 腐蚀产物微观形貌分析

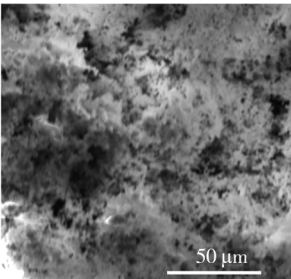
图 3 和图 4 分别为 X80 管线钢在库尔勒土壤模拟溶液中腐蚀前后的 SEM 形貌。可以看出,经离子渗氮处理之后,表面腐蚀产物少,腐蚀产物颗粒较大,随着腐蚀时间的增加腐蚀产物逐渐增厚;原始 X80 管线钢的表面产物膜呈现出凹凸不平状,颗粒细小,形



a 30 d

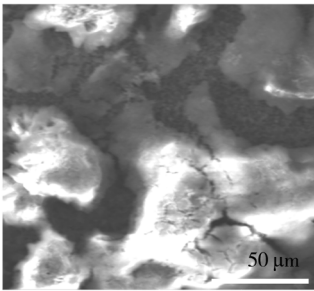


b 60 d

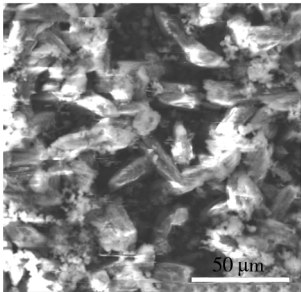


c 90 d

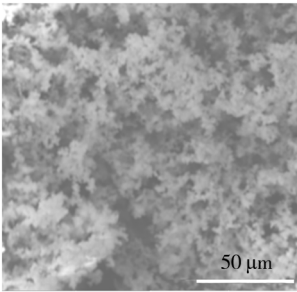
图 3 原始 X80 管线钢在库尔勒土壤模拟溶液中 SEM 腐蚀形貌  
Fig. 3 SEM corrosion morphology of original X80 Steel in Ku'erle soil simulation solution



a 30 d



b 60 d



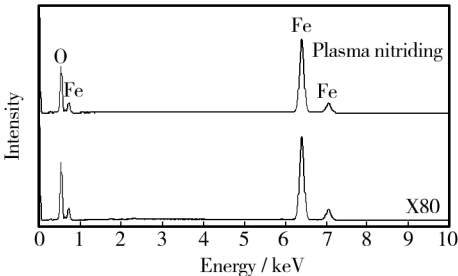
c 90 d

图 4 渗氮层在库尔勒土壤模拟溶液中 SEM 腐蚀形貌  
Fig. 4 SEM corrosion morphology of X80 Steel after plasma nitriding in Ku'erle soil simulation solution

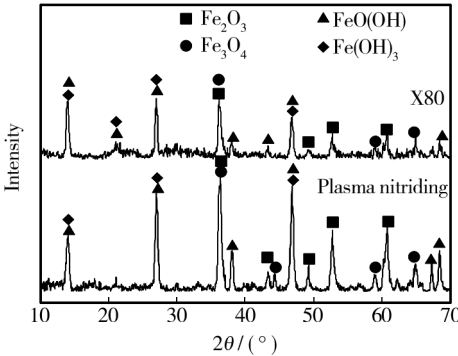
成的腐蚀产物较多,容易被腐蚀。

2.4 表面腐蚀产物分析

图 5 为 X80 管线钢在库尔勒土壤模拟溶液中浸泡 90 d 后的腐蚀产物的 EDS 和 XRD 分析。结果表



a EDS分析



b XRD分析

图 5 X80 管线钢腐蚀产物 EDS 和 XRD 分析  
Fig. 5 EDS and XRD analysis of X80 steel corrosion products

明,腐蚀产物的主要元素是 Fe 和 O,腐蚀产物主要是  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}(\text{OH})$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  和  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ <sup>[14]</sup>。

2.5 动电位极化曲线分析

图 6 为 X80 管线钢在库尔勒土壤模拟溶液中浸泡不同时间的动电位极化曲线。渗氮 X80 管线钢的极化曲线随着浸泡时间的增加向左上方移动,没有出现钝化现象;原始 X80 管线钢的极化曲线无明显变化。利用 Tafel 外推法对 X80 管线钢在库尔勒土壤模拟溶液中的极化曲线进行拟合,结果见表 1。经离子渗氮后 X80 管线钢的自腐蚀电位( $E_{\text{corr}}$ )随浸泡时间的增加而逐渐升高;原始 X80 管线钢的自腐蚀电位随浸泡时间的增加先降低后略有升高,在浸泡 90 d 时比渗氮 X80 管线钢低 423 mV。渗氮 X80 管线钢的自腐蚀电流随浸泡时间的增加逐渐减小,浸泡时间从 30 d 增至 90 d 时,自腐蚀电流密度( $J_{\text{corr}}$ )从 20.95  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  减小至 1.33  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ;原始 X80 管线钢的自腐蚀电流密度随浸泡时间的增加先增大后减小,在浸泡 90 d 时,自腐蚀电流密度最小,为 19.42  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。经过相同时间的浸泡后,原始试样的自腐蚀电流密度显著大于渗氮试样。这说明渗氮能显著提高 X80 管线

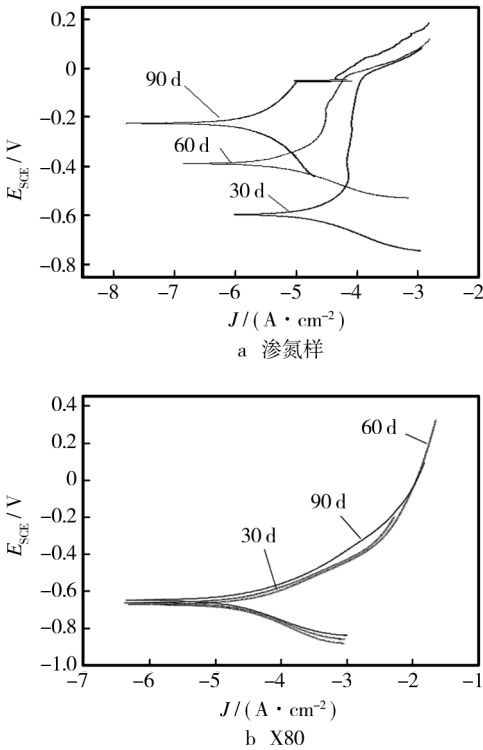


图 6 X80 管线钢在库尔勒土壤模拟溶溶液中浸泡不同时间的极化曲线

Fig. 6 Polarization curves of X80 pipeline steel after different immersion time in Ku'erle soil simulation solution

表 1 动电位极化曲线的拟合结果

Tab. 1 Fitting results of the potentiodynamic polarization curve

时间 / d	X80		Plasma nitriding X80	
	$J_{\text{corr}} / (\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	$E_{\text{corr}} / \text{mV}$	$J_{\text{corr}} / (\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	$E_{\text{corr}} / \text{mV}$
30	21.28	-663	20.95	-596
60	23.33	-673	8.16	-390
90	19.42	-648	1.33	-225

钢在库尔勒土壤模拟溶液中的耐蚀性。

2.6 电化学阻抗谱分析

图 7 是 X80 管线钢在库尔勒土壤溶液中的 Nyquist 分析。曲线是位于第一象限内的容抗弧,渗氮处理后阻抗谱的曲率半径明显大于原始 X80 管线钢,一般来说,阻抗谱曲率半径越大,耐蚀性能越好,由此说明,渗氮处理提高了 X80 管线钢的耐蚀性能。表 2 是渗氮和原始 X80 管线钢的 Nyquist 曲线的拟合数据,其中  $R_s$  为溶液电阻,  $Q$  为双电层电容的常相位元件,  $n$  为其弥散指数,  $R_{\text{ct}}$  为表面电荷转移电阻。从拟合结果可以看出,经渗氮处理之后,电荷转移电阻至少比原始 X80 管线钢高出一个数量级。电荷转移电阻反映的是电极过程中电荷穿过电极和电解质溶

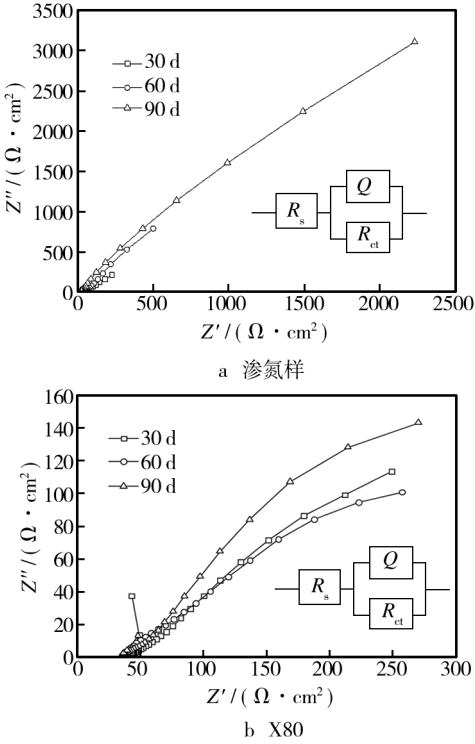


图 7 X80 管线钢在库尔勒土壤溶液中的 Nyquist 图  
Fig. 7 Nyquist of X80 in Ku'erle soil simulated solution



液界面的转移过程的难易程度,  $R_{ct}$  数值越大, 电荷转移过程越难进行, 腐蚀速率越小<sup>[15]</sup>, 分析结果说明渗氮提高了 X80 管线钢的耐蚀性能。经离子渗氮处理后, 随着腐蚀时间的增加, 电荷转移电阻  $R_{ct}$  值由起初的  $22.3\text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^2$  增加至  $2630\text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ , 相差 2 个数量级, 说明随腐蚀时间的增加, 渗氮 X80 管线钢的耐蚀性能越好。以上结果与极化曲线的结果相一致。

表 2 Nyquist 曲线的拟合数据

Tab.2 Fitting data obtained from Nyquist plots

试样	时间 / d	$R_s$ / ( $\Omega\cdot\text{cm}^2$ )	$Y_0$ / ( $\text{F}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-n}$ )	$n$	$R_{ct}$ / ( $\Omega\cdot\text{cm}^2$ )
渗 氮 样	30	35.93	$1.40\times10^{-2}$	0.49	$2.23\times10^4$
	60	37.77	$6.92\times10^{-3}$	0.62	$8.24\times10^4$
	90	38.59	$9.64\times10^{-5}$	0.71	$2.63\times10^6$
X80	30	47.13	$1.14\times10^{-2}$	0.4	$1.42\times10^3$
	60	34.60	$9.14\times10^{-3}$	0.36	$1.20\times10^3$
	90	39.08	$1.22\times10^{-2}$	0.42	$3.63\times10^3$

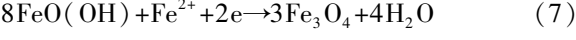
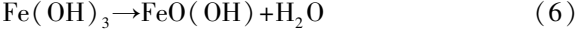
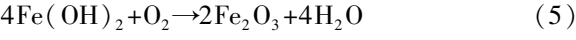
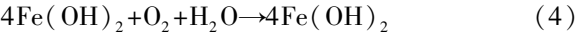
3 讨论

在库尔勒土壤模拟溶液中, 由于溶液呈碱性, X80 管线钢发生的电化学腐蚀过程如下:

阴极反应:



阳极反应:



反应(3)中生成的  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  将继续被氧化为  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 反应(7)中的  $\text{FeO}(\text{OH})$  与 X80 管线钢表面的  $\text{Fe}^{2+}$  结合生成  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ <sup>[16]</sup>, 从而在钢基体表面形成一层腐蚀产物膜。该层腐蚀产物膜随着腐蚀时间的增加随之变厚, 对钢基体起到了一定的保护作用, 能阻止侵蚀性离子直接腐蚀钢基体表面, 抑制了腐蚀反应的进一步发生, 使得腐蚀速率也逐渐减小。

根据 Farady 第二定律可知, 自腐蚀电流密度与腐蚀速率成正比关系, 自腐蚀电流密度越小, 腐蚀速率越小, 材料的耐蚀性能就越好。由电化学测试结果可知, 在浸泡相同时间时, 渗氮层的自腐蚀电流密度远远低于原始 X80 管线钢的自腐蚀电流密度。经离子渗氮处

理后, 在 X80 管线钢表面生成  $\varepsilon\text{-Fe}_3\text{N}$  相和  $\gamma'\text{-Fe}_4\text{N}$  相,  $\varepsilon$  相氮含量(以质量分数计)在 4.55% ~ 11.0% 之间,  $\gamma'$  相氮含量在 5.7% ~ 6.2% 之间, 两者氮含量较高, 有比较高的电极电位, 可以显著提高体系腐蚀电位, 使电化学腐蚀反应更难发生; 氮化物及钢中固溶氮原子, 可显著降低钢的自腐蚀电流密度, 降低腐蚀反应速度, 从而使腐蚀反应更难发生, 提高了抗腐蚀性能。

4 结论

1) 离子渗氮处理使 X80 管线钢表面生成了  $\varepsilon\text{-Fe}_3\text{N}$  相和  $\gamma'\text{-Fe}_4\text{N}$ , 可以显著提高其腐蚀电位, 使电化学腐蚀反应更难发生。氮化物及钢中固溶氮原子, 可显著降低钢的自腐蚀电流密度, 降低腐蚀反应速度, 渗氮处理显著提高管线钢在碱性土壤模拟溶液中的耐腐蚀性能。

2) 随着腐蚀时间的增加, 渗氮 X80 管线钢的腐蚀电位明显增大, 自腐蚀电流密度降低 1 个数量级, 电荷转移电阻显著变大, 腐蚀速率减小。这可能是由于随着腐蚀时间的增加, 表面腐蚀产物膜逐渐变厚, 阻止了溶液中的离子直接侵蚀到钢基体表面, 从而对钢基体起到一定保护作用。

参考文献

[1] 胥聪敏, 国蓉, 胡海军, 等. X80 管线钢在海滨盐碱土壤模拟溶液中的耐腐蚀性能研究[J]. 钢铁研究学报, 2010, 22(3): 42—46.  
XU Cong-min, GUO Rong, HU Hai-jun, et al. Corrosion Resistance of X80 Pipeline Steel in Simulated Solution of Seaside Saline-Alkali Soil[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2010, 22(3): 42—46.

[2] 孔祥磊, 黄国建, 黄明浩. X80 管线钢成分工艺与组织性能研究[J]. 材料热处理技术, 2011, 40(24): 20—23.  
KONG Xiang-lei, HUANG Guo-jian, HUANG Ming-hao. Effect of Composition and Process on Microstructure and Property of X80 Pipeline Steel[J]. Material & Heat Treatment, 2011, 40(24): 20—23.

[3] SOSA E, ALVAREZ R J. Time-correlations in the Dynamics of Hazardous Material Pipelines Incidents[J]. Journal of Hazard Mater, 2009, 165(3): 1204—1209.

[4] ALAMILLA J L, ESPINOSA-MEDIN A, SOSA E. Modeling Steel Corrosion Damage in Soil Environment[J]. Corrosion Science, 2009, 51(11): 2628—2638.

[5] 任毅, 张帅, 王爽. 组织形貌对 X80 管线钢性能的影响[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(8): 798—802.

- REN Yi, ZHANG Shuai, WANG Shuang. Effect of Structure Pattern on the Performance of X80 Pipeline Steel[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 29(8): 798—802.
- [6] 张卫华, 陈小伟, 闻康. X80 钢中非金属夹杂物的检验及其对性能的影响[J]. 理化检验, 2009, 10(45): 628—634.
- ZHANG Wei-hua, CHEN Xiao-wei, WEN Kang. Identification of Nonmetallic Inclusions and Their Influence on the Properties of X80 Pipeline Steel[J]. Physical Testing and Chemical Analysis, 2009, 10(45): 628—634.
- [7] LIANG P, DU C W, LI X G. Effect of Hydrogen on the Stress Corrosion Cracking Behavior of X80 Pipeline Steel in Ku'erle Soil Simulated Solution[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2009, 16(4): 407—413.
- [8] 杨志国, 胡传顺, 梁平. X80 钢在库尔勒和高 pH 值土壤模拟溶液的腐蚀行为[J]. 装备与环境工程, 2012, 9(1): 41—44.
- YANG Zhi-guo, HU Chuan-shun, LIANG Ping. Corrosion Behaviors of X80 Steel in Ku'erle and High pH Soil Simulated Solutions[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(1): 41—44.
- [9] CHEN Xing, ZHEHG Yue-ping, LI Lei. Study of Corrosion and Protection Technology of Oil and Gas Pipeline[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2010(2): 49—53.
- [10] 马平. 海底天然气管道腐蚀与防护[J]. 全面腐蚀控制, 2012, 26(8): 1—5.
- MA Ping. Corrosion and Protection of Submarine Gas Pipeline[J]. Total Corrosion Control, 2012, 26(8): 1—5.
- [11] 李红英, 康巍, 胡继东. X70 和 X80 管线钢的电化学腐蚀行为[J]. 材料热处理学报, 2011, 32(10): 151—153.
- LI Hong-ying, KANG Wei, HU Ji-dong. Electrochemical Corrosion Behavior of Grade X70 and X80 Pipeline Steels[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2011, 32(10): 151—153.
- [12] TANG J G. Surface Modification of Ti-6Al-4V Alloy by Cathode Assisting Discharge Setup and Conventional Plasma Nitriding Methods[J]. Science China (Technological Sciences), 2013(8): 35—38.
- [13] DLAZGUILLE N. Surface Properties of Fe4N Compounds Layer on AISI 4340 Steel Modified by Pulsed Plasma Nitriding[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2013(3): 287—289.
- [14] 梁平, 张云霞, 胡传顺. 腐蚀产物膜对 X80 钢在库尔勒土壤模拟溶液中腐蚀行为的影响[J]. 材料工程, 2012(4): 62—67.
- LIANG Ping, ZHANG Yue-xia, HU chuan-shun. Effect of Corrosion Product Films on Corrosion Behavior of X80 Pipeline Steel in Ku'erle Soil Simulated Solution[J]. Materials Science and Engineering, 2012(4): 62—67.
- [15] 曹楚南, 张鉴清. 电化学阻抗谱导论[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- CAO Chu-nan, ZHANG Jian-qing. An Introduction of Electrochemistry Impedance Spectroscopy[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [16] DU C W, LI X G, LIANG P. Effect of Microstructure on Corrosion of X70 Pipe Steel in an Alkaline soil[J]. Journal of Materials Engineering Performance, 2009, 18(2): 216—220.

(上接第 72 页)

- [10] GALKIN M P, LIBMAN M A, ESTRIN E I. Phase Transitions Use for Gradient Materials Creation[J]. Materials Science, 2014, 3: 25—28.
- [11] ZHANG N, CHEN S P, LIANG L J, et al. In-situ Synthesis of (TiC)<sub>p</sub>Ni/TiAl/Ti Functional Gradient Materials Via Field-activated[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(4): 25—38.
- [12] SURYAKUMAR S, SOMASHEKARA M A. Manufacture of Functionally Gradient Materials Using Weld-deposition [C]//24th International SFF Symposium — An Additive Manufacturing Conference. [s. l.]: SLSFF, 2013: 939—949.
- [13] 徐桃. 多次冲击碰撞载荷下 T10 钢的累积宏观塑性变形及其机理分析[D]. 苏州: 苏州大学, 2011: 22—23.
- XU Tao. Analysis the T10 Carbon Tool Steel Accumulative Macrography Plastometric Set and Mechanism at the Multi-shock Compression[D]. Suzhou: Soochow University, 2011: 22—23.
- [14] 杨胶溪, 王智勇, 左铁钊. 高功率半导体激光熔覆絮状 WC-Ni 基超硬复合材料[J]. 中国激光, 2009(12): 3262—3266.
- YANG Jiao-xi, WANG Zhi-yong, ZUO Tie-chuan. High Power Diode Laser Cladding Aggregate Tungsten Carbide-Ni Based Superhard Composites[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009(12): 3262—3266.
- [15] 石荣, 陈大明, 康沫狂, 等. 16NiCo 钢的循环硬化/软化特性及机理[J]. 钢铁, 1997(4): 55—59.
- SHI Rong, CHEN Da-ming, KANG Mo-kuang, et al. Cyclic Hardening/Softening Behavior and Mechanism of 16NiCo Steel[J]. Iron & Steel, 1997(4): 55—59.
- [16] 戴枝荣, 张明远. 工程材料[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- DAI Zhi-rong, ZHANG Ming-yuan. Engineering Materials [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.