

# N80、45<sup>#</sup>、20<sup>#</sup>钢在京11区块注入水中的腐蚀规律

李桢<sup>1</sup>, 孙阳超<sup>2</sup>, 郭蒙蒙<sup>1</sup>, 吕强<sup>2</sup>, 余吉良<sup>3</sup>, 胡松青<sup>2</sup>

(1.中石化管道储运公司, 江苏 徐州 221008;

2.中国石油大学(华东)理学院, 山东 青岛 266580;

3.华北油田公司采油工程研究院, 河北 任丘 062552)

**摘要:**目的 研究三种油田常用材质 N80、45<sup>#</sup>、20<sup>#</sup>钢在华北油田京 11 断块注入水中的腐蚀行为。方法 采用离子色谱法对京 11 断块注入水进行水质分析, 采用失重法和电化学极化曲线测试方法研究了 N80、45<sup>#</sup>、20<sup>#</sup>钢管材在华北油田京 11 断块注入水中的腐蚀规律与腐蚀机理, 并对试样腐蚀前后的形貌进行了记录分析。结果 当注入水中的碳酸钠质量浓度为 1000 mg/L 和 4000 mg/L 时, 45<sup>#</sup>、20<sup>#</sup>和 N80 三种试样的腐蚀速率较大, 45<sup>#</sup>钢的腐蚀速率最大, 为 0.1322 mm/a, 且试样表面均产生了明显的腐蚀坑及大量腐蚀产物; 当碳酸钠质量浓度为 12 000 mg/L 和 20 000 mg/L 时, 3 种试样的腐蚀速率很小, 远远低于 0.076 mm/a, 且试样表面几乎不产生腐蚀产物。结论 当京 11 断块注入水中的碳酸钠投加量低于 12 000 mg/L 时, 管柱的腐蚀较严重; 当碳酸钠投加量高于 12 000 mg/L 时, 管柱的腐蚀较为轻微, 并且在相同的腐蚀环境下, N80 钢比 20<sup>#</sup>、45<sup>#</sup>钢具有更好的耐蚀性能。

**关键词:**失重实验; 碳酸钠; 电化学方法; 氧腐蚀; 华北油田; 京 11 断块

**中图分类号:** TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)11-0099-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.11.015

## Corrosion Law of N80, 45<sup>#</sup> and 20<sup>#</sup> Steels in Injected Water of Jing 11 Block

LI Zhen<sup>1</sup>, SUN Yang-chao<sup>2</sup>, GUO Meng-meng<sup>1</sup>, LYU Qiang<sup>2</sup>, YU Ji-liang<sup>3</sup>, HU Song-qing<sup>2</sup>

(1.Pipeline Transportation and Storage Company, Xuzhou 221008, China;

2.School of Science, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

3.Petroleum Production Engineering Research Institute, Huabei Oilfield Company, Renqiu 062552, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study corrosion behavior of three common oilfield materials-N80, 45<sup>#</sup> and 20<sup>#</sup> steels in injected water of Jing 11 fault block of Huabei Oilfield. The ion content of injecting water was analyzed by ion chromatography. Corrosion law and mechanism of the three ordinary materials of steel pipe injected to water of Jing 11 fault block of Huabei Oilfield were studied by virtue of weight-loss method and electrochemical polarization curve tests. Moreover, morphology of the speci-

收稿日期: 2016-01-27; 修订日期: 2016-04-11

Received: 2016-01-27; Revised: 2016-04-11

基金项目: 中国石油天然气股份公司重大科技专项(2014E-3507); 中国石油大学(华东)校科研启动基金(2014010574)

Fund: Major Science and Technology Projects of China Petroleum and Natural Gas Corporation(2014E-3507); Scientific Research Foundation of China University of Petroleum(East China) (2014010574)

作者简介: 李桢(1982—), 男, 高级工程师, 主要从事油气集输设备研究工作。

Biography: LI Zhen (1982—), Male, Senior engineer, Research focus: oil and gas gathering equipment.

通讯作者: 胡松青(1967—), 男, 博士, 教授, 从事石油工业材料的腐蚀与防护研究。

Corresponding author: HU Song-qing(1967—), Male, Doctor, Professor, Research focus: corrosion and protection of Petroleum Materials.

mens before and after corrosion was recorded and analyzed. When the mass concentration of sodium carbonate injected to water was 1000 mg/L or 4000 mg/L, 45<sup>#</sup>, 20<sup>#</sup> and N80 demonstrated higher corrosion rate, and 45<sup>#</sup> specimen demonstrated maximum corrosion rate of 0.1322 mm/a. In addition, many obvious corrosion pits and a plenty of corrosion products were present on the surface of specimens. When the concentration of sodium carbonate was 12 000 mg/L or 20 000 mg/L, the corrosion rates of three specimens were very low and much lower than 0.076 mm/a, little corrosion product was produced on the surface of specimens. The corrosion is very serious when the additive amount of sodium carbonate injected to water is lower than 12 000 mg/L. The corrosion of pipe column is very slight and N80 steel demonstrates better corrosion resistance than 45<sup>#</sup> and 20<sup>#</sup> in the same corrosion environment when the additive amount of sodium carbonate is higher than 12 000 mg/L.

**KEY WORDS:** weight-loss experiment; sodium carbonate; electrochemical experiment; oxygen corrosion; Huabei Oilfield; Jing 11 fault block

华北油田砂岩油藏整体上进入高含水、高采出程度的“双高”开发阶段,大量原油依靠常规技术难以采出,而实施三次采油可以显著提高油田的采收率。目前,国内大部分油田已经进入了三次采油阶段,其中弱碱三元复合驱由于在注采能力、采油速度、乳化能力等方面具有明显的优势<sup>[1-2]</sup>,因此受到各大油田的广泛关注。但是在提高采收率的同时,三元体系中的碱剂会对管柱产生一定的腐蚀破坏作用<sup>[3]</sup>。

目前科研工作者针对弱碱三元复合驱管柱的腐蚀规律开展了大量的研究工作。毕凤琴等<sup>[4]</sup>发现油田常用的油管钢(10<sup>#</sup>、20<sup>#</sup>、45<sup>#</sup>)及储罐用钢(Q235)在不同浓度的三元复合驱溶液中,随着碱浓度的提高,不同钢在采出液中的腐蚀性基本呈下降趋势,其中Q235钢和20<sup>#</sup>钢在高浓度碱液中由于出现钝化几乎不发生腐蚀。朱殿瑞等<sup>[5]</sup>发现20<sup>#</sup>钢在三元复合驱弱碱复合体系溶液中的腐蚀性随碱浓度的提高而减缓。李海玲等<sup>[6]</sup>发现在特定体系的油田污水中,随着碱浓度的增加,Q235钢的腐蚀速率逐渐降低。何英华等发现强碱对管材具有缓蚀作用,碳酸钠浓度的增大或矿化度的降低有利于腐蚀率的下降。费小丹等<sup>[7]</sup>发现随着碳酸钠浓度的增加,X70钢的腐蚀速率先增加后减小,自腐蚀电位先正移后负移,当碳酸钠浓度增加到0.1 mol/L时,X70钢开始钝化。韩霞等<sup>[8]</sup>发现复合驱油剂中的碳酸钠对Q235钢的腐蚀有一定的抑制作用,且随着含量的增加,对Q235钢的腐蚀抑制作用增强。京11断块的驱油方式为弱碱三元复合驱,碳酸钠对管柱会产生一定的腐蚀破坏作用,因此基于以上实验研究,采用腐蚀失重法及动电位极化法对N80、45<sup>#</sup>、20<sup>#</sup>三种油田常用材质在京11注入介质

中的腐蚀规律进行研究,研究结果对于减轻京11区块注入介质对管柱的腐蚀破坏作用具有一定的指导意义。

## 1 实验

### 1.1 仪器及材料

实验仪器:FS-II型高温高压动态反应釜,大连科茂实验设备有限公司;Reference\_600\_电化学工作站,武汉科思特仪器有限公司;CP225D半微量分析天平,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;尼康D5100单反照相机,尼康影像仪器有限公司;游标卡尺,上海恒量量具有限公司;N80、20<sup>#</sup>、45<sup>#</sup>试样(5 mm×2.5 mm×1 mm,江苏省扬州市祥玮机械有限公司)。

实验材料:华北油田京11注入水(水质分析见表1)、碳酸钠(分析纯)、六次甲基四胺(分析纯)、无水乙醇(分析纯)、丙酮(分析纯)、盐酸(分析纯)、酸洗液(配方见表2)。

表1 京11注入水各离子含量  
Tab.1 Ion content in injecting solution of Jing 11

组分	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	4335	40	31	106	4308	93.6	2173.5	176

### 1.2 方法

#### 1.2.1 失重法

实验前将试样表面用180<sup>#</sup>、400<sup>#</sup>、800<sup>#</sup>、1200<sup>#</sup>水砂纸依次打磨,然后用去离子水冲洗其表面,再

用丙酮、乙醇依次对试样进行脱脂并清洗，干燥后用天平称其质量  $m_0$ 。利用高温高压动态反应釜模拟华北油田京 11 断块现场工况条件进行腐蚀挂片实验，腐蚀环境温度设置为 54 ℃，压力为常压，搅拌速度设置为 120 r/min，实验周期为 72 h。试样取出后，用单反相机拍照记录其宏观及微观腐蚀形貌，随后用配制的酸洗液清洗，吹干后称其质量  $m_t$ ，由试样的失重计算其腐蚀速率，计算公式：

$$v = (m_0 - m_t) / (\rho \cdot A) \cdot t =$$
$$(1/\rho) \cdot v_w \cdot (365 \times 24 \times 10 / 100^2) =$$
$$8.76 \cdot (v_w / \rho)$$

(1)

表 2 酸洗液成分  
Tab.2 Composition of pickling solution

组分	六次亚甲基四胺	盐酸	去离子水
含量	0.14 g/L	20 mL	180 mL

式中： $v$  和  $v_w$  分别为按深度计算的腐蚀速率 (mm/a) 和按质量计算的腐蚀速率 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )； $\rho$  为试样的密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )； $A$  为试样表面积 ( $\text{m}^2$ )。

1.2.2 电化学方法

在电化学工作站上测量体系的极化曲线，实验采用三电极体系，参比电极为饱和甘汞电极 (SCE)，辅助电极为铂电极，工作电极为 N80、20<sup>#</sup>、45<sup>#</sup>钢。测试前，将试样表面用 180<sup>#</sup>—1500<sup>#</sup> 水砂纸逐级打磨，然后用去离子水冲洗其表面，再用丙酮、乙醇依次对试样进行脱脂并清洗，干燥后置于温度恒定 (54 ℃) 的待测溶液中，采用控温磁力搅拌器为腐蚀介质提供温度及转速。待自腐蚀电位稳定后进行测试。扫描电位范围设置为 -250~1500 mV，扫描速率设置为 0.16 mV/s。待测溶液与失重实验采用的腐蚀介质相同。

2 结果及讨论

2.1 失重法测试结果分析

图 1 为 N80、20<sup>#</sup>和 45<sup>#</sup>钢在京 11 区块注入水中的腐蚀速率随溶液中碳酸钠浓度的变化曲线。当碳酸钠质量浓度为 1000 mg/L 和 4000 mg/L 时，3 种试样的腐蚀速率随溶液中碳酸钠浓度的增加逐渐增大，且均大于 0.076 mm/a。然而碳酸钠浓度超过 4000 mg/L 时，试样的腐蚀速率随碳酸钠浓度的

增加迅速减小，当碳酸钠含量高于 12 000 mg/L 时，试样腐蚀速率的变化趋于平缓。此外，在相同碳酸钠浓度下，45<sup>#</sup>和 20<sup>#</sup>钢试样的腐蚀速率相差不大，而 N80 钢试样的腐蚀速率均小于这两种试样的腐蚀速率，这表明在这种腐蚀环境下，N80 钢的耐腐蚀性能优于 45<sup>#</sup>及 20<sup>#</sup>钢。

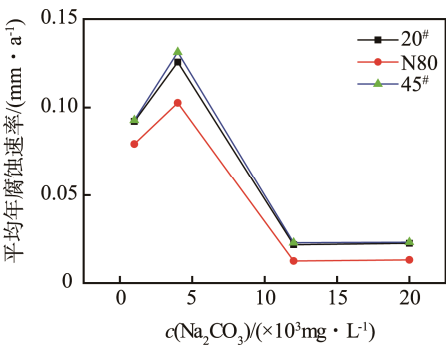


图 1 平均年腐蚀深度-碳酸钠浓度变化曲线  
Fig.1 Changes of average corrosion rate with the concentration of Sodium carbonate

2.2 腐蚀形貌观察

图 2 和图 3 分别为 N80、20<sup>#</sup>、45<sup>#</sup>钢在碳酸钠质量浓度为 4000 mg/L 和 12 000 mg/L 的腐蚀介质中放置 3 d 后的微观腐蚀形貌。对于同一种试样，当腐蚀介质中碳酸钠的质量浓度为 4000 mg/L 时，试样表面覆盖了一层疏松的红褐色或浅绿色腐蚀产物。当注入水中碳酸钠的质量浓度为 12 000 mg/L 时，试样几乎未发生腐蚀破坏作用。将腐蚀产物清洗掉后，在碳酸钠质量浓度为 4000 mg/L 的腐蚀介质中放置的试样，其表面留下了明显的腐蚀痕迹。而在碳酸钠质量浓度为 12 000 mg/L 的腐蚀介质中放置的试样，表面留下了极少的腐蚀痕迹。这说明当注入水中的碳酸钠含量较低时，管材的腐蚀破坏严重；当碳酸钠含量较高时，管材的腐蚀破坏轻微。对比相同碳酸钠浓度下 3 种试样的腐蚀形貌可以发现：20<sup>#</sup>和 45<sup>#</sup>钢试样表面的腐蚀产物较多，而 N80 试样表面的腐蚀产物相对较少，这说明 20<sup>#</sup>和 45<sup>#</sup>钢试样的腐蚀情况较严重且腐蚀程度相当，而 N80 钢试样的腐蚀情况相对较轻，进而说明在这种腐蚀环境下，N80 钢试样具有更好的耐腐蚀性能。

2.3 极化曲线测试结果分析

图 4 为 45<sup>#</sup>、20<sup>#</sup>和 N80 钢在不同浓度碳酸钠溶



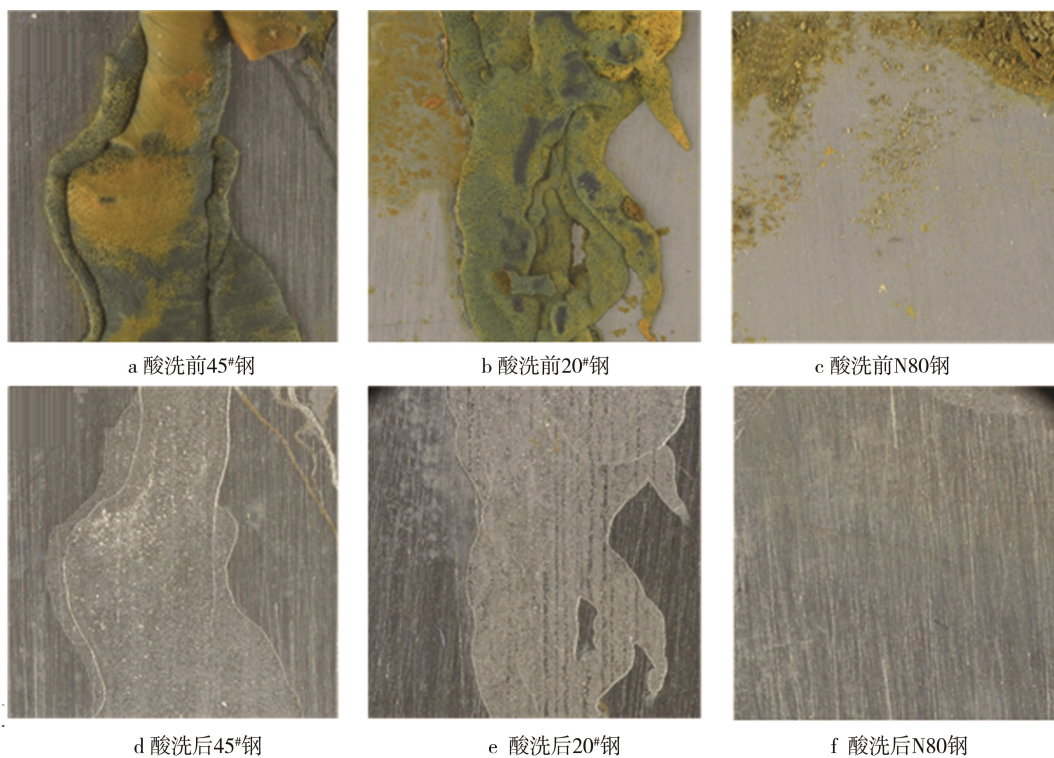


图 2 3 种试样在 4000mg/L 碳酸钠溶液中的腐蚀形貌及酸洗后的表面形貌

Fig.2 The corrosion morphology of 3 samples in 4000 mg/L sodium carbonate solution (a 45<sup>#</sup>, b 20<sup>#</sup>, c N80) and the morphology after pickling (d 45<sup>#</sup>, e 20<sup>#</sup>, f N80)

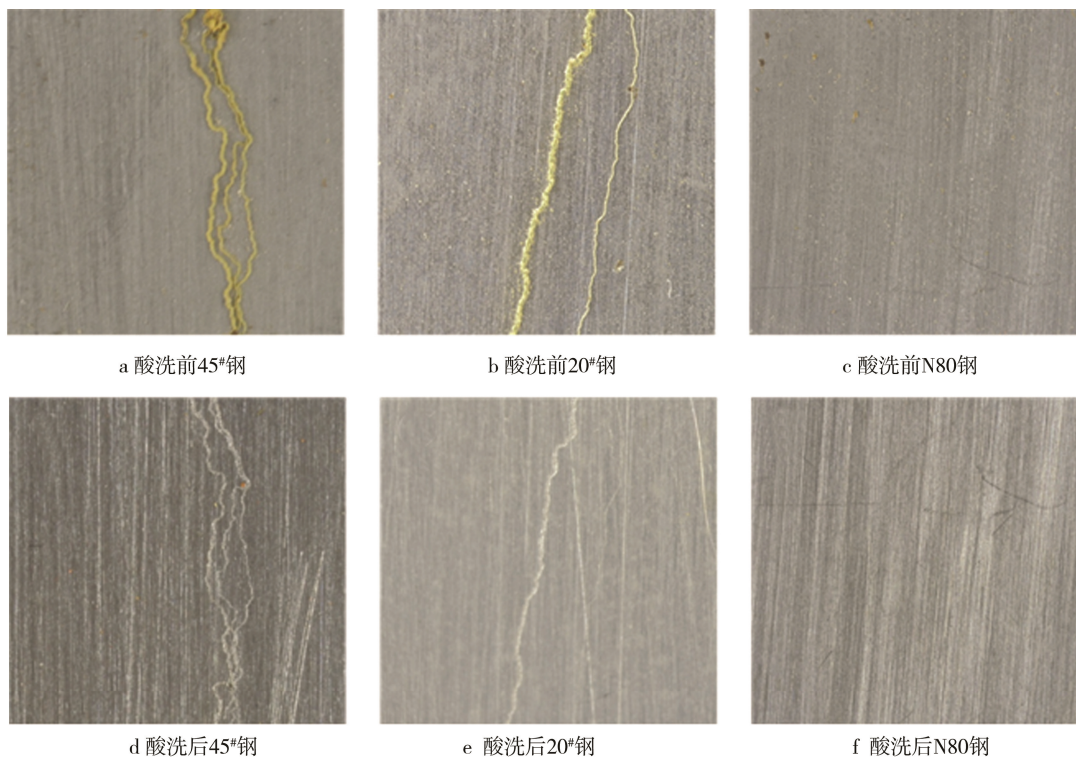


图 3 3 种试样在 12 000 mg/L 碳酸钠溶液中的腐蚀形貌及酸洗后的表面形貌

Fig.3. The corrosion morphology of 3 samples in 12 000 mg/L sodium carbonate solution (a 45<sup>#</sup>, b 20<sup>#</sup>, c N80) and the morphology after pickling (d 45<sup>#</sup>, e 20<sup>#</sup>, f N80)



液中的动电位极化曲线。3 种试样的极化曲线的变化趋势相似,以 45<sup>#</sup>钢试样(图 4a)为例进行分析。分析其阳极极化曲线可知,当试样处于碳酸钠质量浓度为 1000 mg/L 和 4000 mg/L 的京 11 注入水中时,试样未发生钝化反应;当试样处于碳酸钠质量浓度为 12 000 mg/L 和 20 000 mg/L 的京 11 注入水中时,试样的极化曲线出现了明显的钝化,维钝电流密度分别为  $3.59 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  和  $10.08 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ,而且当电位高于 734 mV 时,钝化膜才被击穿。最后分析自腐蚀电流密度(表 3)可知:处于 1000 mg/L 及 4000 mg/L 碳酸钠溶液中的试样,自腐蚀电流密度分别为  $6.88 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  和  $8.70$

$\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ,而处于 12 000 mg/L 及 20 000 mg/L 碳酸钠溶液中的试样,自腐蚀电流密度分别为  $0.76 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  和  $0.85 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。这说明处于低浓度碳酸钠注入水中试样的腐蚀速率远远高于处于低浓度碳酸钠注入水中试样的腐蚀速率。分析阴极极化曲线可知:当碳酸钠质量浓度为 1000 mg/L 和 4000 mg/L 时,阴极区存在明显的极限扩散电流密度,表明该条件下 45<sup>#</sup>钢主要受氧去极化控制;碳酸钠质量浓度为 12 000 mg/L 和 20 000 mg/L 时,阴极区的极限扩散平台逐渐消失,说明此时 45<sup>#</sup>钢不再主要受氧去极化的控制,这是由于随着碳酸钠浓度的增加,溶液中的氧气含量逐渐减少造成的。

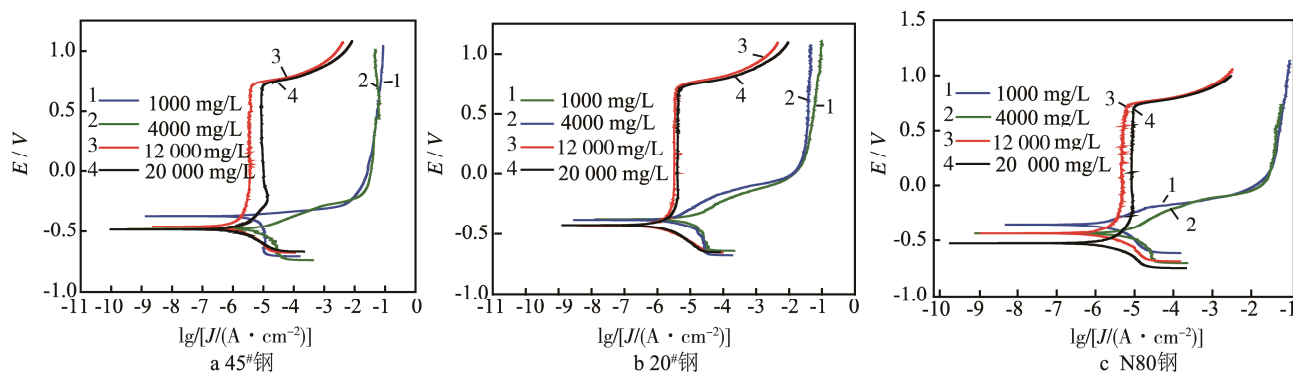


图 4 3 种试样在不同浓度碳酸钠注入水中的动电位极化曲线

Fig.4 Potentiodynamic polarization curves of 3 samples in sodium carbonate solution of different concentration of 3 samples

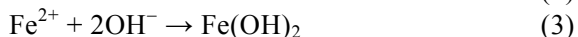
对比 3 种试样的腐蚀电流密度可知:当注入介质中碳酸钠的质量浓度为 4000 mg/L 时,20<sup>#</sup>钢试样的腐蚀电流密度为  $9.94 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ,45<sup>#</sup>钢试样的腐蚀电流密度为  $8.70 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ,N80 试样的腐蚀电流密度为  $6.19 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。20<sup>#</sup>和 45<sup>#</sup>钢试样的腐蚀电流密度相差不大,然而均大于 N80 钢试样,说明在当前腐蚀环境下,20<sup>#</sup>和 45<sup>#</sup>钢试样的腐蚀速率相近且均大于 N80 钢试样,进而说明 N80 钢试样具有更加优异的耐蚀性能。这同前面的实验结果相吻合。

综合试样的腐蚀形貌、极化曲线分析可知,在京 11 注入水中试样可能会发生如下反应。

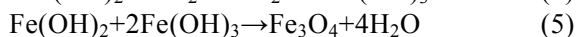
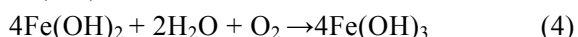
1) 当腐蚀介质中的碳酸钠含量较低时,阴极的反应以  $\text{O}_2$  的还原为主<sup>[9]</sup>:



阳极发生的主要反应为:



$\text{Fe}(\text{OH})_2$  在水中不稳定会继续发生如下反应:



## 2.4 腐蚀行为探讨

由氧的腐蚀机理<sup>[10—12]</sup>可知:腐蚀产物的主要成分为  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,但这两种产物都较疏松,不能在金属表面形成有效的保护膜,一旦在某处发生腐蚀,情况就会加剧。因此将试样从反应釜中刚刚取出时,会发现其表面覆盖了一层厚厚的浅绿色疏松腐蚀产物,放置一段时间后,变为红褐色腐蚀产物。

2) 当腐蚀介质中的碳酸钠含量较高时,溶液中的氧气含量降低。由于溶液中氧气含量的减少,使得阴极的氧去极化反应大大减弱,减弱了腐蚀反应的发生。另外,随着碳酸钠含量的增加,溶液的 pH 值也增大,在这种环境下试样表面会产生一层稳定致密的钝化膜<sup>[13—15]</sup>,其主要为  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ,抑制腐蚀的发生。

因此,当京 11 注入水中的碳酸钠含量较低时,材质腐蚀严重;当注入水中的碳酸钠含量较高时,由于溶液中氧气含量降低及材质发生了钝化反应

而大大降低了腐蚀速率。

表 3 3 种试样在不同浓度碳酸钠溶液中极化曲线的拟合结果

Tab.3 The fitting results of polarizat ion curve of 3 samples in sodium carbonate solution of different concentrations

试样	$c(\text{Na}_2\text{CO}_3)$ $/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$J_{\text{corr}}$ $/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	$E_{\text{corr}}/\text{mV}$	维钝电流
45 <sup>#</sup>	1000.00	6.884	-371.00	—
	4000.00	8.703	-408.00	—
	12 000.00	0.759	-453.00	3.588
	20 000.00	0.854	-489.00	10.082
20 <sup>#</sup>	1000.00	10.11	-375.00	—
	4000.00	9.944	-379.00	—
	12 000.00	0.734	-422.00	3.244
	20 000.00	0.766	-426.00	4.063
N80	1000.00	5.495	-489.00	—
	4000.00	6.198	-435.00	—
	12 000.00	0.473	-439.00	4.848
	20 000.00	0.506	-533.00	8.679

### 3 结论

1) 当溶液中碳酸钠质量浓度为 1000 mg/L 和 4000 mg/L 时, 45<sup>#</sup>、20<sup>#</sup>和 N80 钢试样在京 11 注入水中发生了典型的活性溶解反应, 腐蚀速率较大。当碳酸钠质量浓度为 12 000 mg/L 和 20 000 mg/L 时, 三种试样的表面发生了钝化反应, 极大地降低了试样的腐蚀作用。

2) 在相同的腐蚀环境下, 20<sup>#</sup>、45<sup>#</sup>钢试样的腐蚀程度相当且腐蚀情况较严重, 而 N80 钢试样的腐蚀情况相对较轻, 说明 N80 钢试样具有更好的耐蚀性能。

### 参考文献

- [1] 吴文祥, 张栋, 阚亮, 等. 碱剂对复合驱油体系性能的优化 [J]. 断块油气田, 2013, 20(6): 772—774.  
WU Wen-xiang, ZHANG Dong, KAN Liang, et al. Optimization Made by Alkaline Agent for the Performance of Compound Flooding System [J]. Fault-block Oil and Gas Fields, 2013, 20(6): 772—774.
- [2] 杨喜龙. 三元复合驱采油技术进展[J]. 化学工程与装备, 2015, 8: 062.  
YANG Xi-long. Advances in the Technology of

Compound Flooding of Three Elements [J]. Chemical Process and Equipment, 2015, 8: 062.

- [3] 赵子刚, 张玉荣. 三元复合体系对井下金属管柱的腐蚀研究[J]. 材料保护, 1999, 32(12): 27—28.  
ZHAO Zi-gang, ZHANG Yu-rong. Study on Corrosion of Underground Metal Pipe Column by Three Element Composite System[J]. Material Protection, 1999, 32(12): 27—28.
- [4] 毕凤琴, 孙丽丽, 王勇, 等. 钢在弱碱三元复合驱采液中的腐蚀行为研究[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(9): 2318—2322.  
BI Feng-qin, SUN Li-li, WANG Yong, et al. Study of Corrosion Behavior of Steel in the Produced Liquid of Weakly Basic ASP Flooding[J]. Science Technology and Engineering, 2009, 9(9): 2318—2322.
- [5] 朱殿瑞, 刘晓东, 纪鹏荣, 等. 20<sup>#</sup>钢在三元复合驱弱碱体系采液中的腐蚀与防护[J]. 腐蚀与防护, 2008, 29(2): 71—73.  
ZHU Dian-rui, LIU Xiao-dong, JI Peng-rong, et al. Corrosion and Protection Steel in the Produced Liquid of Weakly Basic ASP Flooding[J]. Corrosion and Protection, 2008, 29(2): 71—73.
- [6] 李海玲, 范汉香. A3 钢在三元复合驱体系中的腐蚀行为研究[J]. 四川化工与腐蚀控制, 1999, 2(1): 26—28.  
LI Hai-ling, FAN Han-xiang. Study of Corrosion Behaviour of A3 Steel in ASP Flooding[J]. Sichuan Chemical and Corrosion Control, 1999, 2(1): 26—28.
- [7] 费小丹, 李明齐, 许红梅, 等. 碳酸钠浓度对 X70 钢腐蚀行为的影响[J]. 腐蚀与防护, 2007, 27(12): 624—626.  
FEI Xiao-dan, LI Ming-qi, XU Hong-mei, et al. Effect of Sodium Carbonate Concentration on the Corrosion Behaviour of X70 Steel[J]. Corrosion and Protection, 2007, 27(12): 624—626.
- [8] 韩霞. Q235 钢在三元驱油剂介质中的腐蚀特性研究[J]. 腐蚀与防护, 2003, 24(5): 192—196.  
HAN Xia. Study of Corrosion Property of Q235 Steel in ASP Flooding Media[J]. Corrosion and Protection, 2003, 24(5): 192—196.
- [9] 杨卫国, 徐君铭. (溶)氧腐蚀——一种容易被忽视的腐蚀形式[J]. 广州化工, 2008(3).  
YANG Wei-guo, XU Jun-ming. Dissolved Oxygen Corrosion—An Easily Overlooked Form of Corrosion [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2008(3).
- [10] 王磊, 胡锐, 王新虎, 等. S135 钻杆钢在钻井液中的

- 氧腐蚀行为[J]. 石油机械, 2006, 34(10): 1—4.
- WANG Lei, HU Rui, WANG Xin-hu, et al. Oxygen Corrosion Behaviour of S135 Drill Pipe Steel in Drill Fluid [J]. Petroleum Machinery, 2006, 34(10): 1—4.
- [11] 李连波. 20CrMo 抽油杆腐蚀机理研究[D]. 中国石油大学, 2008.
- LI Lian-bo. Study on Corrosion Mechanism of 20CrMo Sucker Rod[D]. China University of Petroleum, 2008.
- [12] 程海鹏, 王东江. 氧浓差电池在油井的腐蚀机理[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2014, 31(1): 46—49.
- CHENG Hai-dong, WANG Dong-jiang. Corrosion Mechanism of Differential Aeration Cell in Oil Well [J]. Petrochemical Corrosion and Protection, 2014, 31(1): 46—49.
- [13] 胡钢, 许淳淳, 池琳, 等.  $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$  浓度对 X70 管线钢钝化行为的影响[J]. 北京化工大学学报, 2004, 31(3): 43—47.
- HU Gang, XU Chun-chun, CHI Lin, et al. Effect of  $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$  Concentration on The Passivation Behavior of X70 Pipe Steel[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2004, 31(3): 43—47.
- [14] 范林, 李晓刚, 杜翠薇, 等. X80 管线钢钝化膜在各种高浓度  $\text{NaHCO}_3$  溶液中的电化学行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2012, 32(4): 322—326.
- FAN Lin, LI Xiao-gang, DU Cui-wei, et al. Electrochemical Behavior of Passive Film of X80 Pipeline Steel in All Kinds of High Concentration of  $\text{NaHCO}_3$  [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2012, 32(4): 322—326.
- [15] 董泽华, 孟凡玲. 聚合物—碱复合驱溶液中碳钢钝化行为研究[J]. 油田化学, 1998, 15(2): 155—159.
- DONG Ze-hua, MENG Fan-ling. Study of Passivation Behavior of Steel in Polymer-Alkali ASP Solution. [J]. Oilfield Chemistry, 1998, 15(2): 155—159.