

表面失效及防护

# pH 对 Q235B 钢在船舶尾气脱硫液中 电化学腐蚀行为的影响

龚鹏, 张光旭, 杨超, 陈建

(武汉理工大学 化学化工与生命科学学院, 武汉 430070)

**摘要:** **目的** 研究 pH 值对 Q235B 钢在脱硫液中腐蚀行为的影响, 为后续工艺参数控制与防护方案设计奠定基础。**方法** 开展浸泡实验和电化学实验, 研究 Q235B 钢在不同 pH 值脱硫液中的腐蚀行为, 并通过电子扫描显微镜与能谱仪, 对不同 pH 值下腐蚀产物的形貌与元素组成进行分析。**结果** 失重法测定 Q235B 钢的腐蚀速率时, 腐蚀速率随 pH 值的升高而减小, 且变化幅度越来越小。电化学测试中, Q235B 钢在脱硫液中的开路电位随 pH 值的升高而正移, 极化曲线测试没有出现钝化区, 自腐蚀电位也随 pH 值的升高不断正移, 而腐蚀电流密度反之。Nyquist 图为非标准的半圆形容抗弧, 随 pH 值的升高而不断扩大。通过扫描电镜观察, pH 为 4.0 时, 腐蚀产物较少且零星分布在碳钢表面, 结构形似花蕾且空隙较多; 随着 pH 值的升高, 腐蚀产物显著增多, 结构发生改变; 当 pH 为 10.0 时, 碳钢表面覆盖一层红褐色的产物, 结构呈球状且紧密堆积。能谱分析显示: 腐蚀产物主要由 Fe 和 O 元素构成, 随着 pH 值升高, 两者含量在产物中的占比不断增加; 另外, 还含有少量的 Na、S 和 Zn 元素。**结论** 在所研究的 pH 值范围内, Q235B 钢在脱硫液中的腐蚀速率随 pH 值的升高而降低, 腐蚀受到不同程度的抑制。pH 值的升高能促进生成有效且致密的腐蚀产物层。在 pH 值较低时, Q235B 钢的腐蚀主要受阳极活化控制; 随着 pH 值的升高, 溶液中  $\text{OH}^-$  浓度增大, 腐蚀主要受阴极氧去极化控制, 耐腐蚀性能增强, 腐蚀速率减小。

**关键词:** Q235B 钢; pH 值; 脱硫液; 极化曲线; 交流阻抗谱; 腐蚀行为; 腐蚀形貌

**中图分类号:** TG172.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)12-0181-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.12.025

## Influence of pH on the Electrochemical Corrosion Behavior of Q235B Steel in Ship Exhaust Desulfurizing Liquid

GONG Peng, ZHANG Guang-xu, YANG Chao, CHEN Jian

(School of Chemistry, Chemical Engineering and Life Science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the effect of pH value on corrosion behavior of Q235B steel in desulfurizing liquid, in

收稿日期: 2018-03-02; 修订日期: 2018-06-03

Received: 2018-03-02; Revised: 2018-06-03

基金项目: 国家重点研发计划 (CDGC01-KT16)

Fund: Supported by the National Key Research and Development Program (CDGC01-KT16)

作者简介: 龚鹏 (1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为腐蚀与防护。

Biography: GONG Peng (1994—), Male, Master, Research focus: corrosion and protection.

通讯作者: 张光旭 (1964—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为环境与资源化工。邮箱: zhanggx2002@163.com

Corresponding author: ZHANG Guang-xu (1964—), Male, Doctor, Professor, Research focus: environment and resources chemical industry.  
e-mail: zhanggx2002@163.com

order to lay the foundation for optimizing the subsequent process parameters and designing the protection coating. Immersion test and electrochemical measurement were conducted to study the corrosion behavior of Q235B steel in desulfurizing liquid with different pH values. The morphologies and element composition of corrosion products in different pH values were analyzed by SEM and EDS. When the corrosion rate of Q235B steel was measured by weight loss method, the corrosion rate decreased with the increase of pH value and change range became smaller. In the electrochemical test, the open circuit potential of Q235B steel in desulfurization solution positively shifted with the increase of pH value. There was no passivation area in the polarization curve. Self-corrosion potential positively shifted with the increase of pH value, whereas corrosion current density was on the contrary. The Nyquist graph was a nonstandard semicircular capacitance arc which increased with the increase of pH value. Through observation by scanning electron microscope, when pH was 4.0, corrosion products were scattered on the surface of steel and the structural shape looked like bud with void. With the increase of pH value, the corrosion products obviously increased and the structure also changed. When pH was 10.0, the steel surface was covered by a layer of rufous products, whose structure was spherical and compacted. The EDS analysis showed that corrosion products were mainly composed of Fe and O. With the increase of pH value, the proportion increased. What's more, there was a small amount of Na, S and Zn elements. In the range of studied pH values, corrosion rate of Q235B steel in desulfurizing liquid decreases with the increase of pH value, and the corrosion is inhibited to different degrees. The increase of pH value can promote the formation of effective and compact corrosion products layers. When the pH value is lower, the corrosion of Q235B steel is mainly controlled by anode activation. With the increase of pH value, concentration of  $\text{OH}^-$  increases, corrosion is controlled by cathodic oxygen depolarization, corrosion resistance is enhanced and corrosion rate declines.

**KEY WORDS:** Q235B steel; pH; desulfurizing liquid; polarization curve; electrochemical impedance spectroscopy; corrosion behavior; corrosion morphology

随着我国经济的发展,与世界各国的贸易往来日益密切,船舶运输占比不断增加,排放的废气对大气和水体造成的污染日趋严重。随着人们环保意识的提升,国际海事组织(IMO)颁布了一系列的防污染公约,以加强对海洋、大气环境的保护。船舶尾气处理已然成为一个全球性的难点与热门研究方向。近 10 年来,已经开发出多种船舶尾气脱硫技术,其中,适用于远洋船舶的脱硫技术只有湿法脱硫。为了减少对船舶空间的占用与耦合 SCR 法脱硝工艺的能耗,王战科等<sup>[1]</sup>以较新的视角,深入探究了高浓度钠碱脱除尾气中  $\text{SO}_x$  的机理,目前正积极开展中试实验。Q235B 钢因加工、焊接性能优异,性价比较高等优势<sup>[2]</sup>,被用作脱硫工段设备与管线的材料,并考虑作为工业化应用的候选材料。但 Q235B 钢在高盐、含化学介质的环境中易被腐蚀,须针对腐蚀机理制定相应的防护措施。

钠碱脱硫技术即采用淡水溶解 NaOH 作为脱硫剂,在脱硫塔中循环使用,从而脱除尾气中的  $\text{SO}_x$ ,并通过离心将  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  从吸收液中分离。为了降低设备与管道的腐蚀,满足 5 年检修一次的行业标准,必须严格控制设备与管道内脱硫液的化学条件,如 pH、溶解氧以及温度等。其中, pH 是影响碳钢腐蚀行为的关键因素<sup>[3]</sup>。研究表明, pH 值降低会减小钝化膜的电荷转移电阻,使得膜中  $\text{OH}^-/\text{O}_2$  比例增加,造成更为严重的点蚀<sup>[4-5]</sup>; pH 值升高可有效地减小腐蚀速率,但过高容易发生缝隙腐蚀<sup>[6-7]</sup>。稳定工况下,脱硫液 pH 值在 6~8 之间动态变化;在遇到开、停船或颠簸等特殊情况下,进入脱硫塔中的尾气量会实时变

化或影响传质过程,使得 pH 值波动范围有所增大。目前,对 Q235B 钢在不同 pH 值脱硫液中的腐蚀研究未见系统报道,为了完备钠碱脱硫技术<sup>[8]</sup>,促进我国船舶事业的发展,本文通过浸泡实验与电化学实验,结合失重法与 SEM、EDS 等分析方法,研究 Q235B 钢在 pH 值为 4.0~10.0 范围内的脱硫液中的腐蚀行为,探讨其腐蚀规律,为后续工艺参数控制、设备选材与防护方案的设计等工作积累试验数据。

## 1 实验

### 1.1 实验材料及介质

实验材料为上海国师钢铁有限公司生产的 Q235B 钢,与尾气后处理中试车间所用钢材为同一批次,其化学成分见表 1。

表 1 Q235B 的元素组成  
Tab.1 Element composition of Q235B

wt%						
C	Al	Si	P	S	Mn	Fe
0.152	0.184	0.128	0.017	0.013	0.218	Bal.

试验介质为脱硫液,按照 GB/T 5750.2—2006,从上海某公司船舶尾气后处理中试实验现场采集。脱硫液为浑浊的黑色液体,静置过滤后,取澄清滤液,并依照 GB/T 8538—2008 对其成分进行分析,结果见表 2。根据尾气实际处理方法,通过自配的  $\text{H}_2\text{SO}_3$  和

表 2 脱硫液分析结果  
Tab.2 Analysis results of the desulfurizing liquid

Constitution	Concentration/(mg·L <sup>-1</sup> )	Constitution	Concentration/(mg·L <sup>-1</sup> )
Na <sup>+</sup>	2785.5	Ca <sup>2+</sup>	26.2
K <sup>+</sup>	540.7	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	224.5
Zn <sup>2+</sup>	90.2	Mg <sup>2+</sup>	4.7
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	15 300.2	SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	9580.3
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0.3	PAHs	158
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	3.4	Solid content	2519

NaOH 溶液, 将脱硫液 pH 值调节至 4.0、5.5、7.0、8.5、10.0, 均匀搅拌后静置 24 h。

1.2 浸泡实验

浸泡实验样片尺寸为 20 mm×20 mm×2 mm, 用 SiC 砂纸依次逐级打磨至 3000#, 然后用粒度为 1 μm 的金刚石研磨膏抛光至镜面光亮, 再用蘸有酒精的脱脂棉擦拭掉样片表面的打磨碎屑和污渍, 热风迅速吹干后, 置于干燥箱中至恒重, 用精度为 0.1 mg 的分析天平称量后待用。浸泡实验参考 GB 10124—1988 《金属材料实验室均匀腐蚀全浸实验方法》, 在恒温箱中进行。将 Q235B 钢分别浸泡在 pH 值为 4.0、5.5、7.0、8.5、10.0 的脱硫液中, 21 d 后取出。用酸洗液 (20 g 六次甲基四胺+500 mL HCl+500 mL H<sub>2</sub>O) 去除试样表面的腐蚀产物, 待试样表面腐蚀产物除净后, 用大量的去离子水冲洗掉, 无水乙醇脱水, 冷风吹干后称量, 同时用空白组试样校正缓释液对基体的腐蚀, 根据腐蚀失重计算腐蚀速率  $v_a$ :

$$v_a = \frac{(m_0 - m_1) \times 3650}{\rho s t}$$

(1)

式中:  $m_0$  和  $m_1$  分别为实验前后试样的质量;  $\rho$  为试样的密度,  $\rho=7.85 \text{ g/cm}^3$ ;  $s$  为试样表面积 ( $\text{cm}^2$ );  $t$  为实验时间 (d)。

1.3 电化学测试

电化学测试均在 CS2350 型电化学站上进行, 测

试使用经典的三电极体系, Q235B 钢为工作电极 (暴露面积为  $0.196 \text{ cm}^2$ ), 对电极为 Pt 丝电极, 参比电极为 Hg/Hg<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (饱和 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 电极, 参比电极和工作电极之间采用鲁金斯毛细管连接, 实验温度为 25 ℃。测试时首先使工作电极在 -1.5 V 预极化 3 min, 除去表面的氧化膜, 然后进行开路电位测试, 以获得稳定的自腐蚀电位。电化学交流阻抗谱测试是在 OCP 下施加 5 mV 交流电位扰动, 扫描频率为 0.01 Hz~10 kHz。动电位极化曲线测量的电位范围为 -0.1~0.1 V (vs. OCP), 扫描速率为 0.5 mV/s。文中电位均是相对于参比电极。测试结束后, 采用 CVIEW 和 ZVIEW 软件分别对极化曲线和交流阻抗谱进行拟合。

1.4 腐蚀试样表面分析

浸泡实验结束后, 取出用于表面分析的腐蚀试样, 用乙醇脱水, 真空干燥后, 置于脱氧袋中送检。采用电子扫描显微镜 (JSM-IT300, SEM) 观察试样表面腐蚀产物层形貌, 采用自带的能谱仪 (EDS) 分析腐蚀产物层的元素组成。

2 结果及分析

2.1 腐蚀产物分析

图 1 为 Q235B 钢在酸性、中性与碱性三种典型 pH 值脱硫液中腐蚀 21 d 后的表面腐蚀产物层形貌。可以看出, 试样表面均会形成腐蚀产物层, 且 pH 值变化, 产物形貌随之改变。当 pH 值为 4.0 时, 产物呈规律生长, 但覆盖率低, 零星分布在碳钢表面, 质地松软, 对基体保护作用较差, 结构似花蕾并有极少量球状细小颗粒附着其上。随着 pH 值的升高, 腐蚀产物显著增多, 产物层变厚且堆积较为致密, 对基体具有一定的保护作用, 结构也逐步改变为柱状或棉絮状。当 pH 为 10.0 时, 碳钢表面覆盖一层红褐色的产物, 结构呈球状且紧密堆积成团, 覆盖率高, 对基体的保护性较好。因此, pH 值的升高可通过影响腐蚀产物层结构, 延缓 Q235B 钢的腐蚀进度。

试样腐蚀后的能谱分析结果见表 3。从表 3 可知,

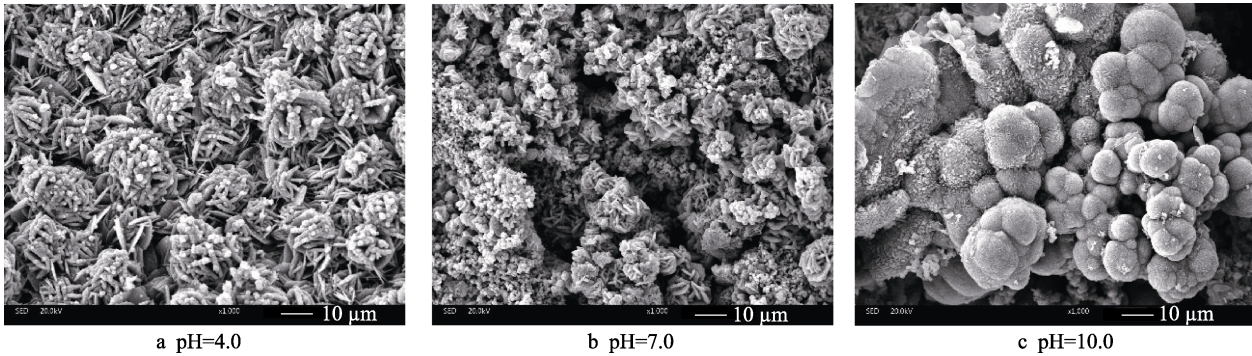


图 1 Q235B 钢在不同 pH 值的脱硫液中腐蚀后的微观形貌  
Fig.1 SEM micrographs of Q235B steel aftercorrosion in desulfurizing liquid with different pH

表 3 不同 pH 值下 Q235B 钢腐蚀产物的能谱分析结果  
Tab.3 EDS analysis of Q235B steel corrosion products in desulfurizing liquid with different pH

								wt%
pH	O	Na	Si	S	Fe	Zn	Ca	
4.0	36.24	20.27	0.68	10.66	27.49	4.67	—	
7.0	44.72	6.66	0.85	6.77	34.62	6.38	—	
11.0	48.19	6.42	1.44	1.95	36.87	4.15	0.98	

腐蚀产物中主要是 Fe 和 O 元素,说明腐蚀产物主要为铁的氧化物,同时含有少量的 Na、S 和 Zn 元素,这可能是脱硫液中的盐分参与构成产物层。随着 pH 值的升高,Fe 和 O 元素的含量增加,说明腐蚀产物中保护性较强的铁的氧化物占比增加,对基体的保护作用增强,腐蚀速率下降。结合图 1 进一步分析可知,pH 值的升高能促进形成有效的腐蚀产物层,抑制腐蚀进程。

## 2.2 腐蚀速率

不同 pH 值下 Q235B 钢在脱硫液中的腐蚀速率见图 2。由图 2 可知,随着 pH 值的升高,Q235B 钢的腐蚀速率不断减小。pH 值在 4.0~7.0 范围内,腐蚀速率较大,且溶液 pH 值升高,腐蚀速率下降趋势较大。pH 值为 4.0 时,腐蚀速率为 0.085 mm/a; pH 值为 7.0 时,腐蚀速率下降到 0.063 mm/a; pH 值在 7.0~10.0 范围内时,腐蚀速率较小,且腐蚀速率的下降幅度较小,当 pH 值为 10.0 时,腐蚀速率为 0.059 mm/a,变化量仅占前者的五分之一左右。

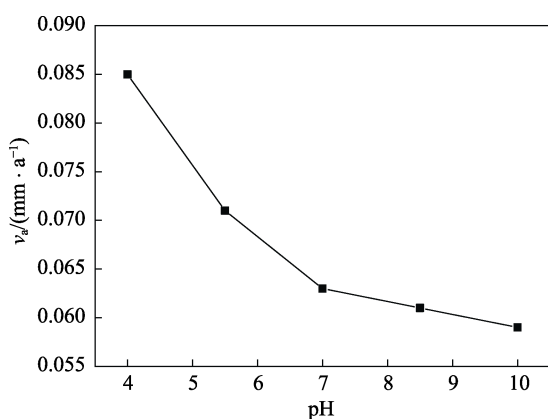


图 2 Q235B 钢在不同 pH 值脱硫液中的腐蚀速率  
Fig.2 Corrosion rates of Q235B steel in desulfurizing liquid with different pH values

## 2.3 不同 pH 下的开路电位 (OCP)

Q235B 钢在不同 pH 的脱硫液中的开路电位如图 3 所示。从图 3 来看,开路电位首先快速负移,随着时间的延长,电位趋向稳定。因此,在后续电化学测试前,都先将工作电极在介质中浸泡 1 h,待电位稳定后再进行测试,以确保测试结果准确可靠。不同

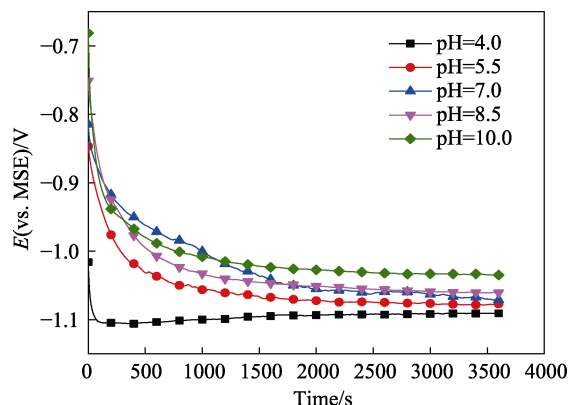


图 3 不同 pH 下 Q235B 钢在脱硫液中的开路电位  
Fig.3 Open circuit potential of Q235B steel in desulfurizing liquid with different pH values

pH 值下,稳定的开路电位值不一样,介质 pH 值越高,稳定的开路电位值越正。

## 2.4 极化曲线

图 4 为 Q235B 钢在不同 pH 脱硫液中的动电位极化曲线,表 4 为相应的拟合结果。由图 4 可知,当 pH 值为 8.5~10.0 时,极化曲线阴极区存在明显的极限扩散电流密度,表明 Q235B 钢在脱硫液中受氧去极化控制;极化曲线未表现出钝化特征,说明电极表面没有形成有效的腐蚀产物层,呈活化溶解状态<sup>[9]</sup>。分析可知,当 pH 值为 7.0~10.0 时,溶液中  $H^+$  浓度较低,阴极反应以  $O_2$  还原为主,溶解氧含量决定腐蚀速率,腐蚀反应主要由氧去极化控制;当  $pH < 7.0$  且继续降低时,溶液中  $H^+$  浓度升高, $O_2$  还原受到抑制,阴极区极限扩散平台逐渐变得不明显,腐蚀反应转而以活化控制为主。

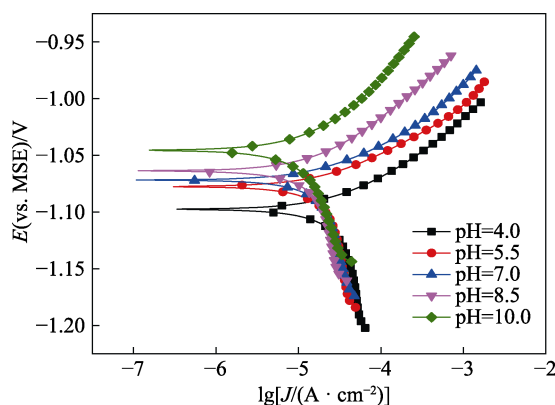


图 4 Q235B 钢在不同 pH 脱硫液中的极化曲线  
Fig.4 Polarization curves of Q235B steel in desulfurizing liquid with different pH values

此外,从表 4 可知,在  $pH < 7.0$  时,随着 pH 值的升高,Q235B 钢的腐蚀速率显著减小;当  $pH > 7.0$  时,随着 pH 值继续升高,腐蚀速率虽继续减小,但是幅度很小,这与浸泡实验结果相吻合。其原因可能

表 4 Q235B 钢在不同 pH 的脱硫液中  
极化曲线的相关参数  
Tab.4 Parameters of polarization curves of Q235B steel in  
desulfurizing liquid with different pH values

pH	$E_{\text{corr}}/\text{V}$	$J_{\text{corr}}/(\times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2})$	$V_{\text{corr}}/(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$
4.0	-1.098	4.556	0.53
5.5	-1.078	3.264	0.38
7.0	-1.072	2.952	0.34
8.5	-1.064	2.797	0.32
10.0	-1.046	2.647	0.31

是因为溶液中  $\text{OH}^-$  浓度增大, 有助于碳钢表面氢氧化物膜的形成, 抑制阳极反应<sup>[10-11]</sup>, 腐蚀电流密度与腐蚀速率满足 Farady 第二定律<sup>[12]</sup>, 故也随着 pH 值的升高而减小。Q235B 钢的自腐蚀电位随 pH 值的升高不断正移。通常造成自腐蚀电位正移的原因有二: 一是阴极过程被促进, 二是阳极过程受到抑制<sup>[13-14]</sup>。在所研究体系中, 自腐蚀电位正移应该是阳极过程受到抑制的结果。因此, pH 值对 Q235B 钢腐蚀行为的影响明显, 随着脱硫液 pH 值的升高, Q235B 钢的自腐蚀倾向减小, 不易被腐蚀。

2.5 交流阻抗谱 (EIS)

腐蚀产物层的性质对腐蚀行为与进程影响较大, EIS 能反映出产物膜的性质与阻抗模值。图 5 为 Q235B 钢在不同 pH 脱硫液中的交流阻抗谱图, 可知 Q235B 钢在不同 pH 值脱硫液中的 EIS 均为单容抗弧, 说明表面产物膜中发生的是离子转移过程。另外, 容抗弧并非标准的半圆, 这可能是由于形成腐蚀产物后, 工作电极与溶液界面间存在弥散效应, 影响电极表面电流的分布<sup>[15]</sup>。容抗弧大小随着 pH 值的降低而减小, 说明电化学反应的阻力随 pH 值的降低而减小, 腐蚀加剧。

采用图 6 所示的等效电路分别对 Nyquist 图进行拟合, 得到的参数列于表 5 中。其中,  $R_s$  为溶液电阻,

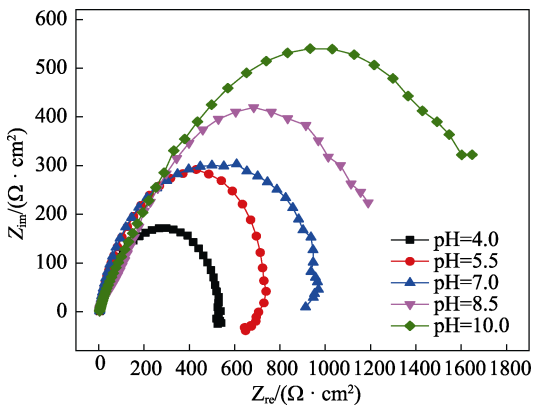


图 5 Q235B 钢在不同 pH 脱硫液中的交流阻抗谱图  
Fig.5 Nyquistplot of Q235B steel in desulfurizing  
liquid with different pH values

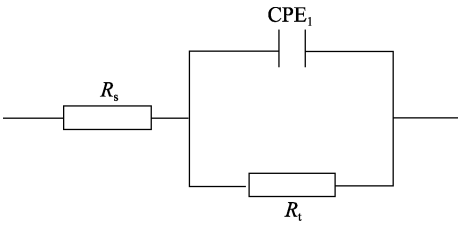


图 6 等效电路  
Fig.6 Equivalent circuits of Q235B steel in desulfurizing  
liquid with different pH values

$Q$  为双电层的电容,  $R_t$  为电荷转移电阻, 通过比较其大小可以判定耐腐蚀性的强弱<sup>[16-17]</sup>。考虑到弥散效应以及腐蚀产物的变化, 采用常相位角元件 CPE (constant phase element) 替代纯电容进行拟合, CPE 的阻抗  $Z_Q$  可用式(2)进行计算:

$$Z_Q = \frac{1}{Y_0} (j\omega)^{-n} \tag{2}$$

式中:  $Y_0$  为导纳常数;  $\omega$  为角频率;  $n$  为弥散系数, 表示与理想电容 ( $n=1$ ) 偏离程度的大小, 取值区间为(0,1),  $n$  值越大, 对应的界面均匀性越好。从表 5 可以看出,  $R_t$  值随脱硫液 pH 值的增大而增大, 与图 4 极化曲线结论一致, 说明随着脱硫液 pH 值的升高, Q235B 钢的耐腐蚀性逐渐增强, 腐蚀速率逐步减弱。

由此可见, pH 值大小对 Q235B 钢的腐蚀过程有着非常重要的影响。当 pH 值较小时, 由于  $\text{H}^+$  的去极化作用, 在碳钢表面难以生成腐蚀产物膜, 电荷转移电阻较小, 碳钢的耐腐蚀性较差。相反, 随着 pH 的不断升高, 溶液中  $\text{OH}^-$  浓度增大, 能促进碳钢表面快速形成有效的产物膜并迅速堆积, 而后在较高的电位下进一步氧化为更稳定的铁的氧化物, 保护性增强, 阻碍溶液中的腐蚀性离子与溶解  $\text{O}_2$  向碳钢表面扩散, 从而降低阳极溶解速率, 腐蚀速率减小。

表 5 等效电路拟合结果  
Tab.5 Fitting results of equivalent circuits

pH	$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$Q/(\times 10^{-5} \text{ F} \cdot \text{cm}^2)$	$n$	$R_t/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$
4.0	4.052	2.232	0.787	519
5.5	4.082	3.475	0.795	741
7.0	3.693	1.494	0.786	930
8.5	2.511	1.090	0.697	1609
10.0	2.379	0.6796	0.622	1923

3 结论

- 1) 在所研究的 pH 值范围内, Q235B 钢在脱硫液中的腐蚀速率随 pH 值的升高而降低, 腐蚀受到不同程度的抑制。
- 2) 在 pH 值较低时, Q235B 钢的腐蚀主要受阳极活化控制。随着 pH 值的升高, 溶液中  $\text{OH}^-$  浓度增

大,促进电极表面形成有效的腐蚀产物层,腐蚀主要受阴极氧去极化控制,耐腐蚀性能增强,腐蚀速率明显下降。

3) pH 值对腐蚀产物形貌影响重大, pH 值较低时,碳钢表面较难形成腐蚀产物层,产物覆盖率较低且空隙较多;随着溶液 pH 值的升高,结构发生改变,堆积致密,保护性较好。

#### 参考文献:

- [1] WANG Z K, PENG Y, REN X, et al. Absorption of sulphur dioxide with sodium hydroxide solution in spray columns[J]. Ind eng chem res, 2015, 56: 589.
- [2] CHIDIEBERE M A, OGUZIE E E, LIU L, et al. Adsorption and corrosion inhibiting effect of riboflavin on Q235 mild steel corrosion in acidic environments[J]. Materials chemistry & physics, 2015, 156: 95-104.
- [3] 张文建, 吴明, 谢飞, 等. X80 管线钢在不同 pH 满洲里土壤模拟溶液中的腐蚀行为[J]. 机械工程材料, 2016, 40(5): 81-85.  
ZHANG W J, WU M, XIE F, et al. Corrosion behavior of X80 pipeline steel in simulated manzhouli soil solution with different pH [J]. Materials for mechanical engineering, 2016, 40(5): 81-85.
- [4] MOUSSA S O, HOCKING M G. The photo-inhibition of localized corrosion of 304 stainless steel in sodium chloride environment[J]. Corrosion science, 2001, 43(11): 2037-2047.
- [5] SAITOU M, OSHIKAWA W, ISHIKAWA T. Anomalous dimension in pitting corrosion of SUS304 in a NaCl solution[J]. Corrosion science, 2002, 44(7): 1469-1475.
- [6] 赵景茂, 左禹, 熊金平, 等. pH 值对低碳钢在高含盐污水中的腐蚀影响[J]. 材料保护, 2001, 34(7): 8-9.  
ZHAO J M, ZUO Y, XIONG J P, et al. Effect of pH value on corrosion of low carbon steel in high salt waste water [J]. Material protection, 2001, 34(7): 8-9.
- [7] 张皓玥, 王津梅. 金属缝隙腐蚀的成因及实验验证[J]. 表面技术, 2017, 46(2): 204-207.  
ZHAO H Y, WANG J M. Cause of metal crevice corrosion and experiment verification [J]. Surface technology, 2017, 46(2): 204-207.
- [8] ALFA L. Understanding exhaust gas treatment systems guidance for ship owners and operators[M]. London: Lloyds Register of Shipping, 2012.
- [9] 宋春晖, 黄峰, 刘静, 等. pH 值对 X120 钢在模拟鹰潭酸性土壤溶液中电化学行为的影响[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(5): 335-339.  
SONG C H, HUANG F, LIU J, et al. Influence of pH on electrochemical behavior of X120 steel in simulated Yingtan [J]. Corrosion and protection, 2011, 32(5): 335-339.
- [10] KUANG W, MATHEWS J A, MACDONALD D D. The effect of anodamine on the corrosion behavior of 1018 mild steel in deionized water: Immersion and polarization tests[J]. Electrochimica acta, 2014, 127(5): 79-85.
- [11] 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.
- [12] 林玉珍, 杨德钧. 腐蚀和腐蚀控制原理[M]. 北京: 中国石化出版社, 2007: 203-209.  
LIN Y Z, YANG D J. Corrosion and the principle of corrosion control[M]. Beijing: Sinopec Press, 2007: 203-209.
- [13] TANG J, SHAO Y, GUO J, et al. The effect of H<sub>2</sub>S concentration on the corrosion behavior of carbon steel at 90 °C[J]. Corrosion science, 2010, 52(6): 2050-2058.
- [14] LIU J, LI X, LIN Y, et al. Study of cavitation corrosion behaviors and mechanism of carbon steel in neutral sodium chloride aqueous solution[J]. Corrosion, 2005, 61(11): 1061-1069.
- [15] 谢飞, 杨晓峰, 王丹, 等. 库尔勒土壤模拟溶液的 pH 对 X80 管线钢电化学腐蚀行为的影响[J]. 机械工程材料, 2015, 39(4): 59-62.  
XIE F, YANG X F, WANG D, et al. Effect of pH value on electrochemical corrosion behavior of X80 pipeline steel in simulated Ku'erle soil solution [J]. Materials for mechanical engineering, 2015, 39(4): 59-62.
- [16] XU C M, LI R B, WANG J L, et al. Effect of microstructures on corrosion of X80 pipeline steel in an alkaline soil[J]. Advanced materials research, 2012, 476-478: 321-328.
- [17] 蔡婷婷, 杨云, 李艳芳, 等. 电镀电流密度对铝镁合金镀层耐蚀性的影响[J]. 表面技术, 2017, 46(12): 245-250.  
CAI T T, YANG Y, LI Y F, et al. Effects of electroplating current density on corrosion resistance of aluminum-magnesium alloy [J]. Surface technology, 2017, 46(12): 245-250.