

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.11.002

CTAB 对 SA210C 钢在酸性环境中腐蚀电化学行为的影响

毛晓飞¹, 刘宣义¹, 刘帅岐², 徐媛媛¹, 黄世福¹, 董雪峰¹, 何华林³, 刘光明^{2*}

(1. 国家能源集团科学技术研究院有限公司武汉分公司, 湖北 武汉 430070; 2. 南昌航空大学材料科学与工程学院, 江西 南昌 330063; 3. 成都诺嘉伟业科技有限公司, 四川 成都 611330)

摘要: 针对不同浓度十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)对 SA210C 钢在两种酸性模拟溶液中的缓蚀效果, 采用动电位扫描曲线与电化学阻抗谱(EIS)方法分析了不同条件下 SA210C 钢电化学腐蚀特征, 计算了不同浓度缓蚀剂的缓蚀效率(IE, %), 研究了 pH 值和缓蚀剂对腐蚀速率的影响。结果表明: 未添加缓蚀剂时, SA210C 钢在 pH=6.5 模拟溶液中自腐蚀电位较在 pH=5.5 溶液中更正, 但腐蚀电流密度有所下降; 添加缓蚀剂后, SA210C 钢在相同 pH 值下自腐蚀电位和腐蚀电流密度均呈现先减小后增大趋势, 缓蚀剂添加量为 60 mg/L 时缓蚀效率达到最高值 75.60%。pH 值降低时, SA210C 钢容抗弧半径减小, 减小趋势与规律同极化曲线所得规律一致。因此, 未添加缓蚀剂时, SA210C 钢在酸性环境中表现为活性溶解状态; 与 pH=5.5 溶液相比, SA210C 钢在 pH=6.5 溶液中腐蚀倾向高但腐蚀速率较缓慢。随着 CTAB 添加量的增加, 其对 SA210C 钢在酸性环境中的缓蚀效果呈现先增大后减小趋势, 缓蚀剂浓度为 60 mg/L 时有最佳缓蚀效果, 继续添加至 80 mg/L 后, 缓蚀效果显著下降。

关键词: SA210C 钢; CTAB; 缓蚀剂; 酸性环境; 电化学测试; 腐蚀

中图分类号: TG172

文献标识码: A

Effect of CTAB on the corrosion behavior of SA210C steel in an acidic environment

Mao Xiaofei¹, Liu Xuanyi¹, Liu Shuaiqi², Xu Yuanyuan¹, Huang Shifu¹, Dong Xuefeng¹, He Hualin³, Liu Guangming^{2*}

(1. Wuhan Branch of National Energy Group Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430070, China; 2. School of Material Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 3. Chengdu Nuo Jia Weiye Technology Co., Ltd., Chengdu 611330, China)

Abstract: This work investigates the corrosion inhibition effect of different concentrations of cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) on SA210C steel in two acidic simulated solutions. The electrochemical corrosion characteristics of SA210C steel under different conditions were analyzed by potentiodynamic polarization (PDP) curves and electrochemical impedance spectroscopy (EIS), and the corrosion inhibition efficiencies were calculated for different concentrations of corrosion inhibitors, and the effects of pH and corrosion inhibitor on corrosion rate were also analyzed. It was found that when no corrosion inhibitor was added, the self-corrosion potential of SA210C steel in the simulated solution at pH 6.5 was more positive than that in the solution at pH 5.5, but the corrosion

收稿日期: 2024-01-05

修回日期: 2024-01-21

作者简介: 毛晓飞(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, email: maogun2004@163.com.

*通信作者: 刘光明, email: gemliu@162.com.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51961028).

current density decreased. After the addition of a corrosion inhibitor, the self-corrosion potential and the corrosion current density of SA210C steel showed a trend of decreasing and then increasing under the same pH. The corrosion inhibition efficiency reached a maximum of 75.60% with the addition of an inhibitor of 60 mg/L. The corrosion inhibition efficiency (IE, %) of different concentrations of corrosion inhibitors was calculated, and the analysis of the effect of pH and inhibitor on the corrosion rate was also conducted, resulting in 75.60%. As the pH value decreases, the arc radius capacity of the SA210C steel decreases, showing a decreasing trend and following the same law as the polarization curve obtained. The results show that when no corrosion inhibitor is added, SA210C steel exhibits an active dissolution state in an acidic environment. Compared to a solution of pH5.5, corrosion tendency of SA210C steel is high in a solution of pH6.5, but the corrosion rate is slow. With the increase of CTAB additive amount, its corrosion inhibition effect on SA210C steel in an acidic environment showed a trend of increasing and then decreasing. The corrosion inhibitor concentration of 60 mg/L has the best corrosion inhibition effect, and continues to decrease significantly when added to 80 mg/L.

Keywords: SA210C steel; cetyltrimethylammonium bromide (CTAB); corrosion inhibitor; acidic environment; electrochemical test; corrosion

火力发电机组设备选材时,为兼顾实用性与经济性要求,火电锅炉备件常选取 SA210C 钢作为受压、受热件用碳钢材料,以提高该材料在高温环境下服役时间,并针对此类材料高温失效机理及防护方法做了大量研究^[1-4]。然而材料除在设备服役温度发生高温腐蚀外,也会在储存和运输过程中受大气成分、空气湿度等因素影响发生大气腐蚀,一些研究结果指出,在中性环境中钢铁腐蚀产物以 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 和 FeOH^+ 为主,在含 Cl 海洋大气环境中材料腐蚀情况依基体材料成分差别有不同表现,但腐蚀整体呈现加速趋势^[5-8]。当材料在工业区附近堆积时,不同于大多数土壤或混凝土中碱性腐蚀环境,受 SO_2 、 CO_2 等气体排放易造成酸性降雨影响,材料周围多为酸性潮湿环境,但考虑到材料通常不会长期露天存放,因此该反应往往发生在高于酸雨加权平均 pH 值(约为 4.7)的弱酸性环境中, pH 取值在 5.5 到 6.5 范围内浮动^[9-13]。

实际情况中 pH 值对碳钢腐蚀产物结构与形成机制有重要影响,选择优良缓蚀剂是一种有效防腐方案。针对 SA210C 钢材腐蚀行为研究主要集中在高温服役环境中,对该材料在常温下电化学腐蚀行为研究较少。在现有缓蚀剂相关文献中,李香玉等^[14]发现苯胺四聚体聚乙二醇嵌段共聚物对 Q235 钢在盐酸介质中腐蚀行为有高效缓蚀效果;高阳等^[15]分析了 N-烷基苯并咪唑阳离子在酸性环境中

对碳钢的缓蚀行为;李文涛等^[16]认为二苯乙酮咪唑啉季铵盐通过“几何覆盖效应”对酸性介质中碳钢起混合型缓蚀效果。但 SA210C 钢在不同 pH 值中最佳缓蚀方案未有明确结论,考虑到生产实践中经济性等因素的影响,本工作以不同浓度十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)作为缓蚀剂,通过极化曲线和电化学阻抗谱(EIS)技术,分析不同 pH 值模拟酸性潮湿环境溶液存放环境下 SA210C 钢材电化学腐蚀特征,以对后续进一步研究减少该材料非服役期间损耗可行方案提供研究^[17-20]。

1 实验

实验用 SA210C 钢材化学成分(质量分数)为: 0.22 wt.% C、0.84 wt.% Mn、0.22 wt.% Si、0.003 wt.% S、0.009 wt.% P、余量 Fe,尺寸为 15 mm×10 mm×3 mm。在其一侧点焊固定 BV1.5 塑铜线,采用亚克力粉与配套固化剂调制冷镶嵌料对试样进行封装,待其固化后,用砂纸逐级打磨,砂纸目数依次为 400#、800#和 1000#,打磨后经丙酮除油及去离子水清洗待用。模拟溶液选用质量分数 1 wt.% NaCl+1 wt.% Na_2SO_4 溶液,用 5 wt.% 冰醋酸和 5 wt.% NaOH 溶液调节模拟液 pH 值,采用 CT-6821 型酸度计将其 pH 值控制在 6.5 和 5.5。实验用缓蚀剂选用上海青析化工科技有限公司生产的分析纯十六烷基三甲基溴化铵(含量% > 99.0)。

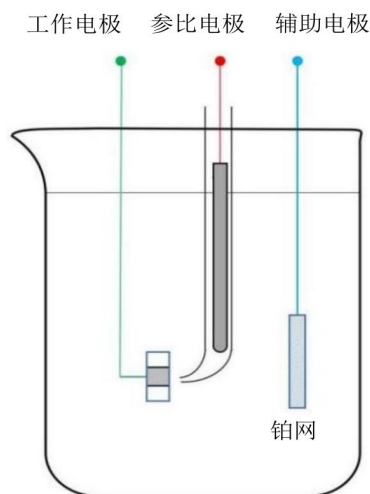


图1 电化学测试装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of electrochemical test device

实验前按图1结构组装电化学装置,测试仪器选用 CHI650D 型电化学工作站,工作电极为 SA210C 钢,辅助电极为 Pt 网,参比电极为饱和甘汞电极(SCE),电解质溶液为两种 pH 值模拟液,实验

温度控制为 30 °C 至 35 °C,待开路电位测试(OCP)稳定后,测定极化曲线和电化学阻抗谱。极化曲线扫描速率为 1 mV/s,扫描范围起始值设为开路电位-400 mV,终止值为开路电位+400 mV。电化学阻抗谱设置开路电位数值为测试电位,正弦交流信号振幅 5 mV,频率扫描范围 10^{-2} ~ 10^5 Hz。

2 结果与讨论

2.1 极化曲线

图2为SA210C钢在含不同浓度CTAB的两种pH值模拟液中的极化曲线。由图可见,溶液中pH值变动时,除无缓蚀剂和添加20 mg/L缓蚀剂后SA210C钢有小范围钝化区,其余情况均未见明显钝化现象,阳极极化曲线在活化区表现为活性溶解过程。对比图2(a)和图2(b)可发现,材料在pH值较高溶液中极化曲线自腐蚀电位更负,表明SA210C钢在其它条件相同时腐蚀趋势随溶液pH值增加而增加;溶液pH值相同时,CTAB添加量为60 mg/L时SA210C钢自腐蚀电位最正,说明缓蚀剂添加至该浓度时钢材腐蚀倾向最低。

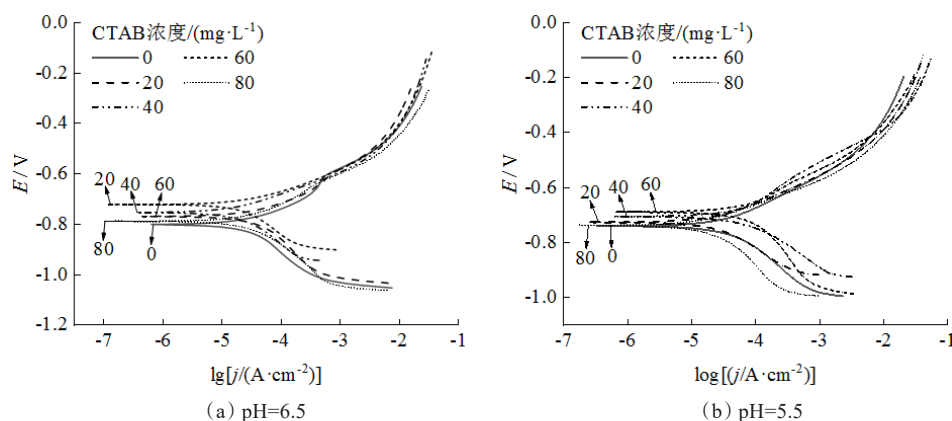


图2 SA210C钢在含不同浓度CTAB的两种pH值模拟液中的极化曲线

Fig.2 Polarization curves of SA210C steel in two kinds of pH simulated solutions with different concentrations of CTAB

表1为SA210C钢在两种pH值模拟液中加入不同浓度缓蚀剂后极化曲线拟合参数,其中 c 为溶液中CTAB浓度, j_{corr} 为自腐蚀电流密度, φ_{corr} 为自腐蚀电位, β_{A} 为阳极极化曲线Tafel斜率, β_{C} 为阴极极化曲线Tafel斜率。由表可知,SA210C钢在pH值较高溶液中自腐蚀电流密度较小腐蚀程度较轻,且材料阳极Tafel斜率均大于阴极Tafel斜率,表明在模拟溶液中实验材料阳极溶解过程为腐蚀的控制步骤。

2.2 电化学阻抗谱

图3(a)和图3(b)为OCP测试后SA210C钢阻抗谱测试Nyquist图,添加缓蚀剂后SA210C钢在两种pH值模拟液中均表现出中高频容抗弧与低频Warburg阻抗弧特征,几种条件下SA210C钢腐蚀模式基本一致。低频区出现Warburg阻抗,表明SA210C钢受扩散控制逐渐超过电化学控制,因电极表面粗糙度有差异,阻抗弧-轴线夹角可偏离

表1 SA210C钢在含不同浓度CTAB的两种pH值模拟液中极化曲线拟合参数

Tab.1 Fitting parameters of polarization curve of SA210C steel in two kinds of pH simulation solutions containing different concentrations of CTAB

pH	$c/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$j_{\text{corr}}/$ ($\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$)	$\varphi_{\text{corr}}/$ V	$\beta_A/$ ($\text{V}\cdot\text{dec}^{-1}$)	$\beta_C/$ ($\text{V}\cdot\text{dec}^{-1}$)
6.5	0	8.848×10^{-6}	-0.804	8.552	8.348
	20	6.799×10^{-6}	-0.771	8.544	4.856
	40	3.032×10^{-6}	-0.752	12.144	5.706
	60	2.159×10^{-6}	-0.723	11.277	5.827
	80	3.518×10^{-6}	-0.784	7.834	5.579
5.5	0	1.388×10^{-5}	-0.741	8.793	6.039
	20	7.764×10^{-6}	-0.728	10.174	6.574
	40	5.341×10^{-6}	-0.708	7.037	5.956
	60	3.864×10^{-6}	-0.689	7.670	4.371
	80	6.624×10^{-6}	-0.738	11.823	5.476

45°;模拟液pH值相同时,CTAB浓度增加引起SA210C钢高频区容抗弧半径先增大后减小,浓度为60 mg/L时有最佳缓蚀效果;对比两种pH值下SA210C钢阻抗谱,模拟液pH值为5.5时容抗弧半径整体小于模拟液pH值为6.5时容抗弧半径,电极与模拟液间电荷转移阻力随模拟液pH增大而增大。

对比图4(a)和图4(b),pH较小时SA210C钢阻抗模值有所降低,同种pH值不同CTAB浓度模拟液中材料阻抗模值与Nyquist图有相似规律,此现象表明材料腐蚀反应逐渐加剧。图5(a)和5(b)为SA210C钢阻抗相位角曲线,不同pH值下曲线峰均出现在中频区至低频区,曲线峰值反映氧化膜致密度情况,不添加缓蚀剂时相位角峰值最小,氧化膜致密性较差,溶液中CTAB浓度达到60 mg/L时相位角峰值最大,氧化膜致密性最佳。

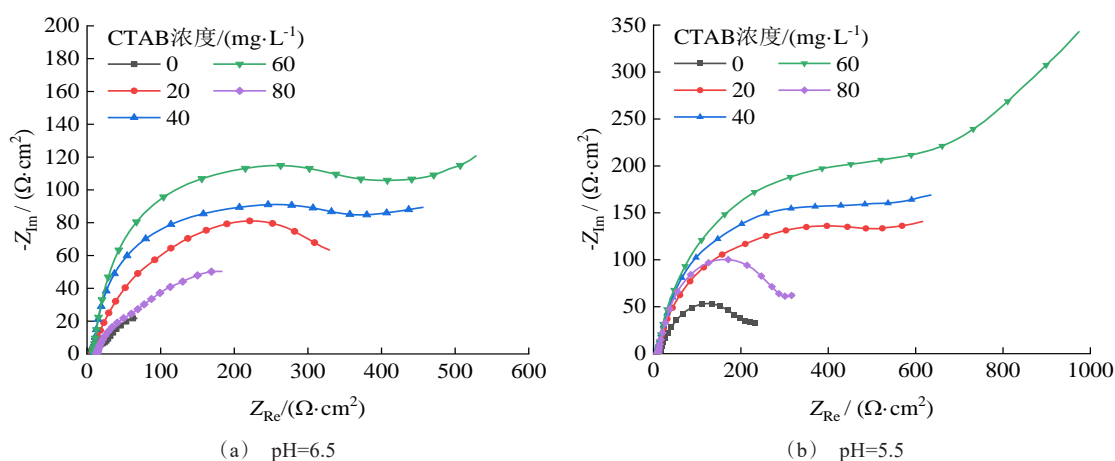


图3 SA210C钢在含不同浓度CTAB的两种pH值模拟液中的Nyquist图

Fig.3 Nyquist diagrams of SA210C steel in two kinds of pH simulation solutions containing different concentrations of CTAB

SA210C钢主要发生活性溶解,考虑到电极表面光滑程度与物质吸附情况,将理想电容 C 以相位角原件 Q 代替,未添加缓蚀剂时其电化学阻抗谱可由图6(a)中等效电路($R_s(QR_{ct})$)拟合;添加CTAB后电极表面吸附有缓蚀剂等,阻抗谱由图6(b)等效电路($R_s(Q(R_{ct}W))$)拟合。等效电路图中 R_s 为模拟溶液电阻,高频相位角原件 Q 为电极/溶液界面双电层电容, R_{ct} 为腐蚀产物层下活性基体电荷转移电阻, W 为反映离子及腐蚀产物扩散阻力的Warburg扩散电阻。

表2为SA210C钢在含不同浓度CTAB两种pH值模拟液中电化学阻抗谱拟合参数。表中 Y 为相位角元件 Q 的导纳,由于有机缓蚀剂分子介电常数比水分子小,因此其数值大小反映了电极表面有效吸附的缓蚀剂粒子量^[21]; n 代表电极/溶液界面的弥散指数, Z 为混合控制下电路总阻抗,其数值大小可直接反映系统耐蚀能力。由表中信息可知,置于较大pH值模拟液中时材料 R_{ct} 数值增加,SA210C钢在较小pH值溶液中溶解速率更快;CTAB浓度小于60 mg/L时, Y 数值随缓蚀剂添加量增加而减小,达

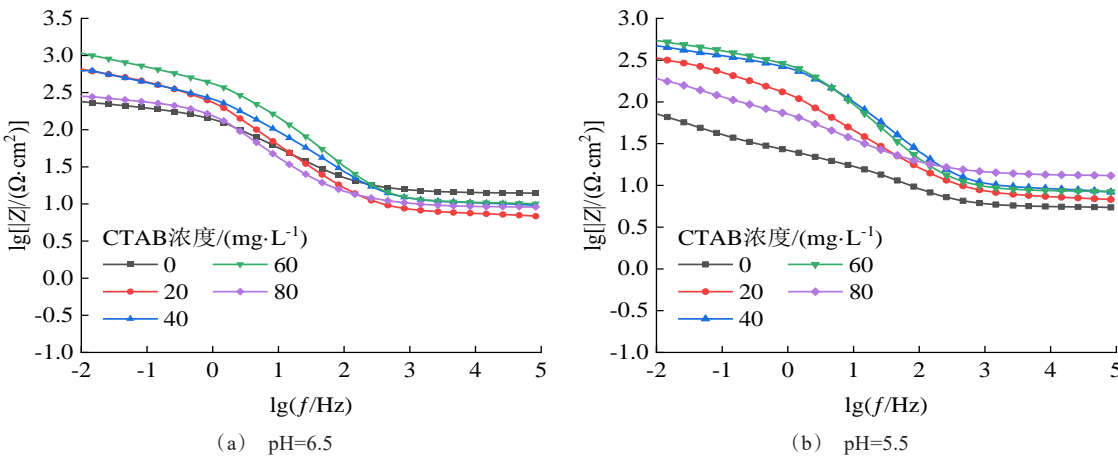


图 4 SA210C 钢在含不同浓度 CTAB 的两种 pH 值模拟液中的 Bode 模值图

Fig.4 Bode magnitude plots of SA210C steel in two kinds of pH simulation solutions containing different concentrations of CTAB

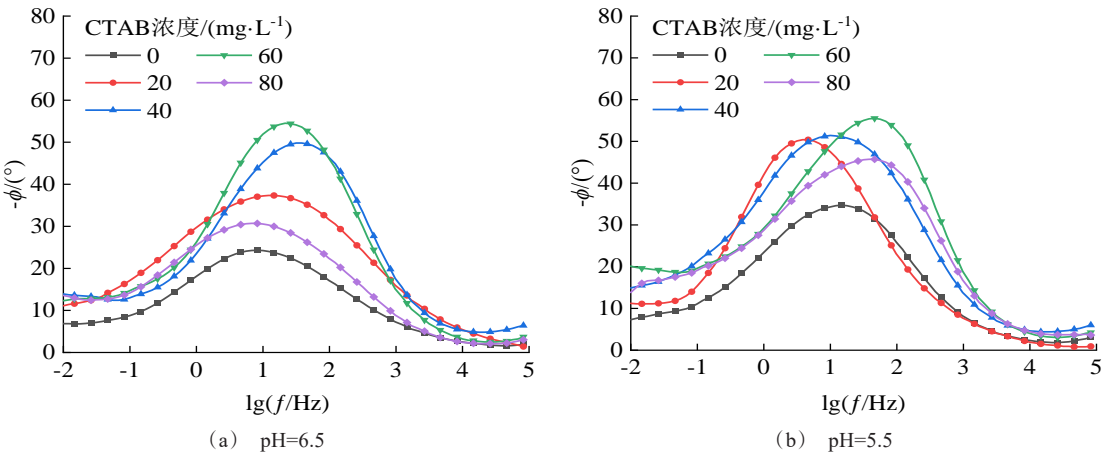


图 5 SA210C 钢在含不同浓度 CTAB 的两种 pH 值模拟液中的 Bode 相位角图

Fig.5 Bode phase plots of SA210C steel in two kinds of pH simulation solutions containing different concentrations of CTAB

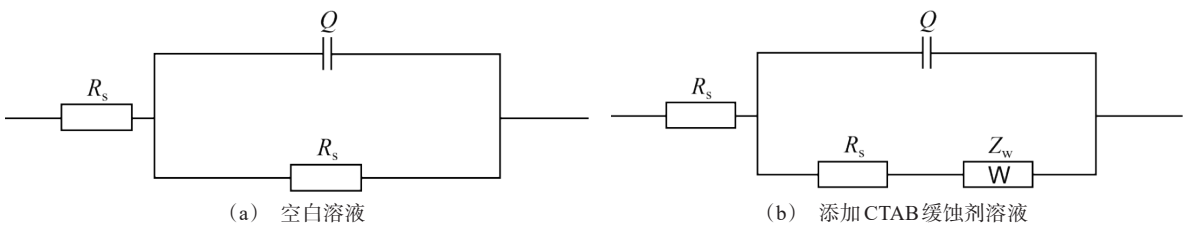


图 6 电化学阻抗谱等效电路

Fig.6 Equivalent circuit for fitting electrochemical impedance spectra: (a) blank; (b) with CTAB

到 60 mg/L 后继续添加缓蚀剂引起 Y 数值增加, 表明缓蚀剂在电极表面吸附量随 CTAB 浓度先增加后减

小; Z_w 、 Z 表现规律与 Y 相同, CTAB 添加量在 60 mg/L 时缓蚀效果最佳。

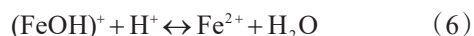
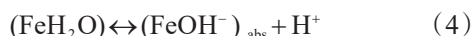
表2 电化学阻抗谱拟合参数

Tab.2 Fitted parameters of electrochemical impedance spectra

pH	$c/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$R_s/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$	$Y_1/(\Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^n)$	n	$R_{ct}/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$	$Z_w/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$	$Z/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$
6.5	0	14.06	1.49×10^{-3}	0.61	2.21×10^2	—	2.35×10^2
	20	7.12	8.64×10^{-4}	0.71	3.97×10^2	0.66×10^1	4.11×10^2
	40	9.46	6.81×10^{-4}	0.66	4.70×10^2	0.76×10^1	4.87×10^2
	60	9.79	2.64×10^{-4}	0.77	5.36×10^2	1.58×10^2	7.04×10^2
	80	9.47	1.39×10^{-3}	0.74	3.41×10^2	1.42×10^1	3.65×10^2
5.5	0	4.50	2.02×10^{-2}	0.34	1.17×10^2	—	1.22×10^2
	20	6.69	1.99×10^{-3}	0.59	2.78×10^2	1.41×10^1	2.99×10^2
	40	8.27	5.29×10^{-4}	0.56	3.67×10^2	2.62×10^1	4.01×10^2
	60	8.35	4.69×10^{-4}	0.78	4.21×10^2	5.68×10^1	4.86×10^2
	80	8.42	4.18×10^{-4}	0.73	2.79×10^2	4.12×10^1	3.29×10^2

2.3 pH值对腐蚀行为的影响

本文通过两种酸性溶液模拟潮湿环境中SA210C钢腐蚀电化学行为,SA210C钢在酸性环境中发生氧化还原反应,形成原电池,阳极材料按式(1)、式(2)反应溶解为 Fe^{2+} 后发生析氢腐蚀生成少量 H_2 ,同时水分子吸附在钢材表面,按式(3)至式(6)快速连续反应进行^[22]。模拟溶液pH值减小引起液相中 H^+ 含量上升,促使式(1)、式(2)与式(6)反应向右侧进行,因此相同缓蚀剂添加量下SA210C钢在小pH溶液中表现出更高溶解倾向。



2.4 缓蚀剂对腐蚀行为的影响

缓蚀剂对SA210C钢缓蚀作用主要源于其在材料表面发生物理吸附与化学吸附,通过抑制阳极过程使材料自腐蚀电位 φ_{corr} 正向移动,降低材料腐蚀发生倾向,以达到缓蚀效果,但受溶液温度、溶液内添加醇类或无机盐影响,添加相同质量的同种缓蚀剂也会在缓蚀效果上有所差异^[23-26]。为确定缓蚀剂吸附类型,首先通过式(7)计算缓蚀剂缓蚀效率(IE,%):

$$\text{IE} = \frac{j_{\text{corr},0} - j_{\text{corr}}}{j_{\text{corr},0}} \times 100\% \quad (7)$$

式中: $j_{\text{corr},0}$ 为未添加缓蚀剂溶时腐蚀电流密度; j_{corr} 为添加缓蚀剂后腐蚀电流密度。计算结果如图7所

示,模拟溶液中CTAB添加量60 mg/L时达到最佳缓蚀效果,溶液pH值为6.5时最佳缓蚀效率为75.59%,pH值为5.5时最佳缓蚀效率为72.16%,继续添加缓蚀剂后受阳极极化程度影响,电极表面可能因脱附作用而失去对阳极过程的抑制作用,缓蚀效果下降^[27]。

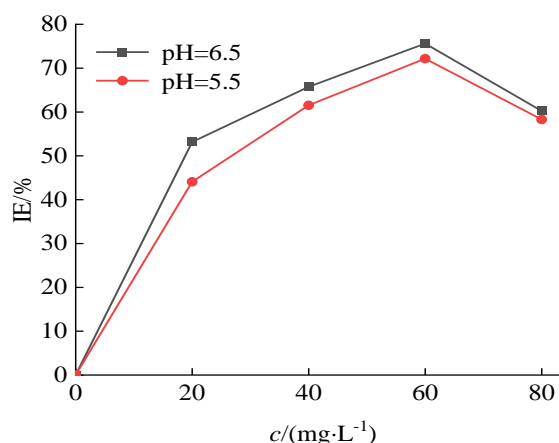


图7 CTAB浓度与pH值对SA210C钢缓蚀率的影响

Fig.7 Influence of CTAB concentration and pH value on corrosion inhibition efficiency

CTAB符合Langmuir型等温吸附模型,通过式(7)将缓蚀剂粒子脱附前数据拟合为图8所示等温吸附曲线,其中表面覆盖度 θ 计算方法如式(8)所示:

$$c/\theta = fc + f/K \quad (7)$$

$$\theta = \frac{\text{IE}}{100} \quad (8)$$

式中: K 为平衡吸附常数; c 为模拟液中CTAB浓度(mg/L); f 为校正系数。拟合后吸附等温式结果如

表 3 所示,二者相关系数 R^2 均接近 1,有较好拟合效果。缓蚀剂吸附类型通过计算式(9)吸附 Gibbs 自由能方程得到:

$$K = \frac{1}{55.5} \exp\left(\frac{-\Delta G}{RT}\right) \quad (9)$$

式中: R 为气体常数; T 为试验温度。经计算,两种 pH 值下 ΔG 值为 -31.468 kJ/mol 和 -30.823 kJ/mol,数值介于 -40 kJ/mol 与 -20 kJ/mol 之间,表明常温常压下 CTAB 在 SA210C 钢表面吸附行为自发进行且吸附模式同时包含化学吸附与物理吸附,因数值更接近 -40 kJ/mol,吸附过程中化学吸附占主导地位,此类主要依靠化学键力而非范德华力作用的单分子层吸附具有饱和性,可能是引起缓蚀剂浓度大于 60 mg/L 后缓蚀效果不增反降的另一原因。

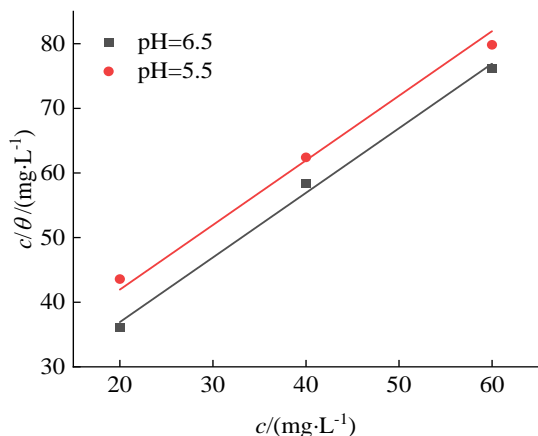


图 8 CTAB 在 SA210C 钢表面的 Langmuir 吸附曲线

Fig.8 Langmuir adsorption curves of CTAB on the surface of SA210C steel

表 3 CTAB 在 SA210C 钢表面的 Langmuir 吸附曲线拟合参数

Tab.3 Fitting parameters of Langmuir adsorption curves of CTAB on the surface of SA210C steel

pH	拟合方程	R^2
6.5	$c/\theta=1.04163 c+1.76141 \times 10^{-4}$	0.99576
5.5	$c/\theta=1.04163 c+2.28517 \times 10^{-4}$	0.98879

3 结论

(1) SA210C 钢在酸性模拟溶液中腐蚀行为受到环境 pH 值影响,混合控制下的阻抗谱特征除浓差极化外还出现电化学极化,高频区容抗弧半径随 pH 值增大而增大,电极与模拟液间电荷转移阻增大,低频部分扩散控制超过电化学控制,出现 Warburg

阻抗。

(2) 两种 pH 值酸性溶液中添加十六烷基三甲基溴化铵作为 SA210C 钢缓蚀剂有相近规律。当缓蚀剂添加量小于 60 mg/L 时,对材料缓蚀效果随溶液中十六烷基三甲基溴化铵浓度增加而提高,并在浓度达到 60 mg/L 时达到最佳缓蚀效果,继续加大缓蚀剂浓度后可能受阳极极化和吸附类型影响,缓蚀效果下降。

(3) 十六烷基三甲基溴化铵在 SA210C 钢表面符合 Langmuir 型等温吸附模型且吸附行为自发进行,在其物理吸附与化学吸附共存的混合吸附模式中化学吸附占主导地位。

参考文献

- [1] 徐沁,王煜,毛洁. 高压锅炉用碳钢 SA210A-1、SA210C、20G 比较分析[J]. 锅炉技术, 2016, 47(6): 59-61.
- [2] 白健美,陈辉,黄林滨,等. 1000MW 超超临界八角双切圆锅炉降低水冷壁高温腐蚀试验研究[J]. 电力科技与环保, 2023, 39(2): 111-119.
- [3] 金敏华,刘献良,赖云亭,等. 12Cr1MoVG 高温过热器爆管失效分析[J]. 电力科技与环保, 2021, 37(5): 42-45.
- [4] 陈惠玲,魏雨. 一种碳钢在模拟潮湿环境中腐蚀机理的探讨[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2006, 18(4): 255-257.
- [5] 汪川,曹公旺,潘辰,等. 碳钢、耐候钢在 3 种典型大气环境中的腐蚀规律研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2016, 36(1): 39-46.
- [6] 梁彩凤,侯文泰. 碳钢、低合金钢 16 年大气暴露腐蚀研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2005, 25(1): 1-6.
- [7] 张培军,李新梅,杨现臣,等. 镀锌层在室内模拟大气环境中腐蚀行为及寿命评估[J]. 电镀与精饰, 2023, 45(2): 94-100.
- [8] 何成,王欣欣,李富天,等. 304 不锈钢在不同 pH 的库尔勒土壤浸出液中的腐蚀电化学行为[J]. 电镀与涂饰, 2022, 41(22): 1595-1600.
- [9] 唐荣茂,刘光明,师超,等. 十二烷基苯磺酸钠在模拟混凝土孔隙液中对 Q235 钢缓蚀及吸附行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2021, 41(6): 857-863.
- [10] 张新民,柴发合,王淑兰,等. 中国酸雨研究现状[J]. 环境科学研究, 2010(5): 527-532.
- [11] 江文豪,张学超,杨智,等. 基于燃烧理论的大气污染物排放浓度折算方法研究[J]. 电力科技与环保, 2023, 39(6): 533-542.
- [12] 郭子岗,张海龙,梁舒婷. 超临界 CO₂ 锅炉研究综述[J].

- 电力科技与环保, 2023, 39(6): 490-496.
- [13] 曹圆媛, 赖力, 张婧欣. 江苏省绿色低碳发展的形势研判和路径初探[J]. 电力科技与环保, 2023, 39(1): 71-78, 86.
- [14] 李香玉, 杨凤, 刘桐, 等. 苯胺四聚体聚乙二醇嵌段共聚物在盐酸介质中对 Q235 钢的缓蚀性能[J]. 表面技术, 2017, 46(11): 90-95.
- [15] 高阳, 陈洪岭, 陈步荣, 等. 盐酸溶液中 N-烷基苯并咪唑阳离子对碳钢的缓蚀性能[J]. 材料保护, 2009, 42(7): 1-3.
- [16] 李文涛, 吴浩, 王璇, 等. HCl 介质中二苯乙酮咪唑啉季铵盐对碳钢的缓蚀行为及机制[J]. 表面技术, 2022, 51(1): 121-130.
- [17] Singh A, Ansari K R, Ali H, et al. Evaluation of corrosion mitigation properties of pyridinium-based ionic liquids on carbon steel in 15% HCl under the hydrodynamic condition: Experimental, surface, and computational approaches[J]. Journal of Molecular Liquids, 2023, 376: 121408.
- [18] Liu Y, Guo X X, Liu D L, et al. Inhibition effect of sparteine isomers with different stereochemical conformations on the corrosion of mild steel in hydrochloric acid solution[J]. Journal of Molecular Liquids, 2022, 345: 117833.
- [19] Ma X M, Wang J B, Yu S Y, et al. Synthesis, experimental and theoretical studies of triazine derivatives with surface activity as effective corrosion inhibitors for medium carbon steel in acid medium[J]. Journal of Molecular Liquids, 2020, 315: 113711.
- [20] 李岩, 李家明, 蔡成翔, 等. X70 管线钢在不同温度的钦州强酸性砖红壤模拟液中的电化学腐蚀行为[J]. 电镀与涂饰, 2022, 41(20): 1421-1429.
- [21] Wang B, Du M, Zhang J, et al. Electrochemical and surface analysis studies on corrosion inhibition of Q235 steel by imidazoline derivative against CO₂ corrosion[J]. Corrosion Science, 2011, 53(1): 353-361.
- [22] 柳鑫华, 刘会媛, 李繁麟, 等. 酸性介质中菠菜提取物与 KI 对 Q235 钢的缓蚀性能[J]. 材料保护, 2023, 56(2): 24-33.
- [23] 刘会媛, 柳鑫华, 石春杰, 等. 一种复配缓蚀剂对 Q235 碳钢的缓蚀性能及机理研究[J]. 工业水处理, 2022, 42(9): 124-132.
- [24] 姚培, 祝晓杰, 李树白, 等. 聚二甲基二烯丙基氯化铵对碳钢表面缓蚀性能的研究[J]. 化学研究与应用, 2023, 35(2): 274-282.
- [25] 杜鹏飞, 雷然, 李向红. 薇甘菊提取物对冷轧钢在氨基磺酸溶液中的缓蚀效果[J]. 腐蚀与防护, 2023, 44(4): 15-20.
- [26] 仇莉, 李向红, 雷然, 等. 椰油酸二乙醇酰胺对钢在三氯乙酸溶液中的缓蚀性能[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2023, 43(2): 301-311.
- [27] 王佳, 曹楚南, 陈家坚, 等. 缓蚀剂阳极脱附现象的研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1995, 15(4): 241-246.