

# 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

李香玉<sup>1,2</sup>, 杨凤<sup>1</sup>, 刘桐<sup>1,2</sup>, 郑文茹<sup>2</sup>, 赵海超<sup>2</sup>, 王立平<sup>2</sup>

(1.沈阳化工大学, 沈阳 110142; 2.中国科学院宁波材料所, 浙江 宁波 315201)

**摘要:** **目的** 研究苯胺四聚体 PEG 两亲性嵌段共聚物 (PEG-TA) 对 Q235 钢在 1 mol/L HCl 介质中的缓蚀性能。**方法** 采用静态失重测试、电化学测试、腐蚀表面形貌分析研究了自制的 PEG-TA 在 1 mol/L HCl 介质中对 Q235 钢的缓蚀性能, 并探讨了其在 Q235 钢表面的吸附行为。**结果** 红外和紫外表征表明, 氨基封端苯胺四聚体和聚乙二醇为原料成功合成了两亲性嵌段共聚物 PEG-TA。极化曲线研究表明, PEG-TA 的加入明显可以抑制 Q235 钢在 1 mol/L HCl 介质中的腐蚀, 且随着 PEG-TA 浓度的增加, 缓蚀效果越好, 在 25 °C 的实验温度范围内, 质量浓度为 30 mg/L 时, PEG-TA 的缓蚀效率可以达到 93.97%, 属于阴极抑制为主的混合型缓蚀剂。电化学阻抗图谱研究表明, 随着 PEG-TA 浓度的增加, Q235 钢表面腐蚀反应的电荷转移电阻和膜电阻逐渐增大, 钢表面缓蚀剂的含量和覆盖率增加, 腐蚀抑制性增强。PEG-TA 缓蚀剂分子在 Q235 钢表面的吸附遵循 Langmuir 等温模型, 并且属于物理和化学混合吸附。SEM 研究证明, 在 1 mol/L HCl 中, PEG-TA 可有效地抑制碳钢的腐蚀。**结论** PEG-TA 在 1 mol/L HCl 中有效提高了 Q235 钢的耐蚀性, 是一种高效环保的缓蚀剂。

**关键词:** PEG-TA; Q235 钢; 嵌段共聚物; 盐酸介质; 腐蚀抑制剂; 缓蚀效率

**中图分类号:** TG174.42 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)11-0090-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.11.013

## Corrosion Inhibition of PEG-TA Amphiphilic Block Copolymer on Q235 Steel in 1 mol/L HCl Medium

LI Xiang-yu<sup>1,2</sup>, YANG Feng<sup>1</sup>, LIU Tong<sup>1,2</sup>, ZHENG Wen-ru<sup>2</sup>, ZHAO Hai-chao<sup>2</sup>, WANG Li-ping<sup>2</sup>

(1.Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China;

2.Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study corrosion behavior of aniline tetramer-PEG amphiphilic block copolymer (PEG-TA) on Q235 steel in 1 mol/L HCl medium. Corrosion inhibition of self-made PEG-TA on Q235 steel in 1 mol/L HCl medium was studied by performing static weightlessness test, electrochemical test and corrosion surface observation, and its adsorption behavior on Q235 steel was discussed. FTIR and UV spectra showed that the amphiphilic block copolymer PEG-TA was successfully

收稿日期: 2017-05-31; 修订日期: 2017-07-15

Received: 2017-05-31; Revised: 2017-07-15

基金项目: 中国科学院百人计划基金 (Y60707WR04); 浙江省自然科学基金 (LY16B040004)

Fund: Supported by the One Hundred Talented People of the Chinese Academy of Sciences (Y60707WR04) and Zhejiang Provincial Natural Science Fund (LY16B040004)

作者简介: 李香玉 (1992—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为表面防护技术。

Biography: LI Xiang-yu (1992—), Female, Master, Research focus: surface protection technique.

通讯作者: 赵海超 (1973—), 男, 研究员, 主要研究方向为先进功能高分子材料、功能型有机涂层。

Corresponding author: ZHAO Hai-chao (1973—), Male, Professor, Research focus: advanced functional polymers and organic coatings.

made from amine-capped aniline tetramer and polyethylene glycol. Polarization curve study showed that the addition of PEG-TA could obviously inhibit the corrosion of Q235 steel in 1 mol/L HCl medium, the inhibition efficiency increased as the PEG-TA concentration increased. Provided with experimental temperature of 25 °C and mass concentration of 30 mg/L, inhibition efficiency of the PEG-TA was up to 93.97%, hence PEG-TA was a cathodic inhibition-oriented mixed type inhibitor. The electrochemical impedance spectroscopy study showed that with the increase of PEG-TA concentration, charge transfer resistance and film resistance of surface corrosion reaction gradually increased, content and coverage of corrosion inhibitors on steel increased, corrosion inhibition improved. Adsorption of PEG-TA inhibitor molecules on Q235 steel surface adsorption coincided with Langmuir isothermal model, and was classified as physical and chemical mixed adsorption. SEM study further proved that PEG-TA could effectively inhibit the corrosion of Q235 steel in 1 mol/L HCl. PEG-TA is an effective corrosion inhibitor which can effectively improve the corrosion resistance of Q235 steel in 1 mol/L HCl.

**KEY WORDS:** PEG-TA; Q235 steel; block copolymer; HCl medium; corrosion inhibitor; inhibition efficiency

酸性溶液广泛应用于化工和工业生产中, 如酸洗、除鳞、油井酸化等<sup>[1,2]</sup>。为了控制金属在酸性条件下的溶解和损耗, 添加缓蚀剂是一种最流行、有效、实用的方法<sup>[3,4]</sup>。在众多种类的缓蚀剂中, 有机高分子化合物或聚合物是十分重要的一类<sup>[5,6]</sup>。大多数已知的有机缓蚀剂通常含有不饱和键的共轭芳香环或杂原子(如 N、P、O、S), 可在金属表面形成屏障膜, 阻止腐蚀介质与金属直接接触, 并且可中和介质中的氢离子和溶解氧<sup>[7,8]</sup>。

聚苯胺(PANI)结构中富含电负性相对较大的 N、O 极性基团和丰富的高度共轭的孤对  $\pi$  电子, 能与金属空 d 轨道形成配位键, 通过物理或化学作用吸附在金属表面, 阻碍腐蚀性物质的渗透, 因此被认为是最有前途成为缓蚀剂的物质之一<sup>[5,9]</sup>。然而, 聚苯胺作为缓蚀剂应用的一个障碍是聚苯胺在水介质中的溶解度非常差。为了解决这个问题, 聚苯胺掺杂几种酸(如十二烷基苯磺酸、聚丙烯酸、磺化壳聚糖和聚苯乙烯磺酸)后, 已发展成为酸性和盐水介质中的缓蚀剂<sup>[10,11]</sup>。与聚苯胺不同, 低聚物具有与聚苯胺相似的电活性, 同时表现出优异的溶解性和精确的分子结构。本实验合成苯胺四聚体 PEG 两亲性嵌段共聚物, 并通过静态失重试验、电化学测试、分析腐蚀形貌, 研究其对 Q235 钢在 1 mol/L HCl 介质中的缓蚀性能。

## 1 试验

### 1.1 缓蚀剂合成与表征

PEG-TA 两亲性嵌段共聚物按图 1 所示路线制备。在 60 °C 的四氢呋喃溶液中, 聚乙二醇单甲醚(PEG, 10 mmol, Mw=2000)与甲苯二异氰酸酯(10 mmol)反应 3 h 后, 加入氨基封端的苯胺四聚体(TANI, 10 mmol)继续反应 24 h。反应结束后所得产物在正己烷中沉淀, 放入真空烘箱内干燥处理, 得到 PEG-TA 两亲型嵌段共聚物, 产率为 98%。采用红

外(NICOLET 6700)和紫外光谱仪(Lambda 950)对产物进行表征。

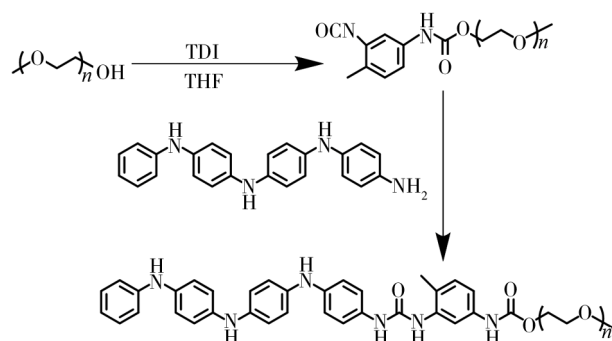


图 1 PEG-TA 两亲性嵌段共聚物合成路线

Fig.1 Synthetic route of PEG-TA amphiphilic block copolymer

### 1.2 静态失重实验

将 Q235 钢(1 cm × 1 cm × 0.1 cm)用 150<sup>#</sup>、400<sup>#</sup>、800<sup>#</sup>砂纸逐级打磨, 经蒸馏水、无水乙醇清洗后干燥, 称取质量。将钢片浸泡于含有不同浓度 PEG-TA 的 1 mol/L HCl 中 24 h, 结束后用镊子将钢片取出, 用蒸馏水和无水乙醇反复冲洗, 去除表面杂质, 置于真空环境内干燥, 称取质量并计算腐蚀效率。

### 1.3 缓蚀性能测试

测试采用上海辰华 CHI660 电化学工作站, 采用标准三电极体系, 工作电极是裸露面积为 1 cm<sup>2</sup> 的 Q235 钢, 参比电极为饱和甘汞电极(SCE), 辅助电极为铂电极。Q235 钢表面用砂纸逐级打磨至 800<sup>#</sup>, 经丙酮超声脱脂、无水乙醇和蒸馏水冲洗后即放入待测溶液中, 25 °C 浸泡 2 h 后进行电化学测试。极化曲线的扫描区间为 -250 ~ 250 mV, 扫描速率为 0.2 mV/s, 利用 CHI660 软件对相关电化学参数进行分析。电化学阻抗图谱扫描频率范围为 0.01 ~ 10<sup>5</sup> Hz, 交流激励信号幅值为 20 mV, 采用 Zsimpwin3.21 软件对阻抗数据进行解析。

## 1.4 腐蚀产物表征

利用场发射电子扫描电镜 (FEI Quanta FEG 250) 在场发射电压为 20 keV 对碳钢表面的腐蚀产物形貌进行分析。

## 2 结果及分析

### 2.1 缓蚀剂的表征

图 2a 为 PEG-TA 两亲性嵌段共聚物的红外光谱。结果表明,  $2888\text{ cm}^{-1}$  和  $1467\text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰分别为 PEG 上  $\text{—CH}_2$  的对称伸缩振动和弯曲振动,  $1112\text{ cm}^{-1}$  处为  $\text{C—O—C}$  伸缩振动峰,  $1507\text{ cm}^{-1}$  处为苯胺四聚体苯环结构振动峰, 同时在  $1653\text{ cm}^{-1}$  与  $1736\text{ cm}^{-1}$  处出现酰胺键与酯键的羰基伸缩振动吸收峰<sup>[12]</sup>。以上实验结果说明, 成功得到了两亲性嵌段共聚物。图 2b 为 PEG-TA 两亲性嵌段共聚物的紫外光谱。在 300 nm 和 589 nm 处出现两个明显的吸收峰, 其中 300 nm 处吸收峰对应于苯环中  $\pi\text{—}\pi^*$  的共轭吸收, 589 nm 处吸收峰对应于醌环的共轭吸收。

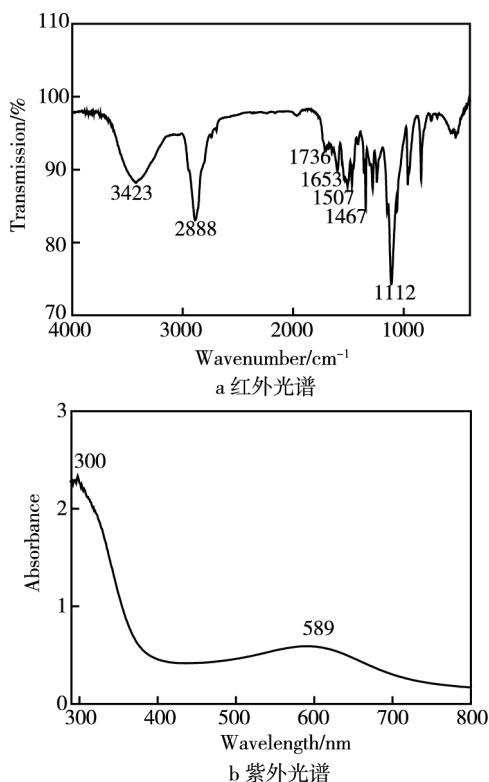


图 2 PEG-TA 两亲性嵌段共聚物  
Fig.2 PEG-TA amphiphilic block copolymer

### 2.2 静态失重分析

图 3 为缓蚀效率 (IE, %) 随 PEG-TA 质量浓度变化的曲线。缓蚀效率计算公式  $\text{IE} = \frac{m_0 - m}{m_0} \times 100\%$ , 其中  $m_0$  和  $m$  分别为添加缓蚀剂前后碳钢在 1 mol/L

盐酸溶液中的质量。由图 3 可知, PEG-TA 对 Q235 钢有缓蚀效果, 且缓蚀效果与缓蚀剂的浓度密切相关。当 PEG-TA 质量浓度达到 30 mg/L 时, 缓蚀效果达到最大, 为 93.97%。这是由于缓蚀剂分子在钢表面形成了一层吸附膜, 有效阻挡了腐蚀介质对钢表面的腐蚀。随着 PEG-TA 含量的增加, 缓蚀效率随之增大, 但是当 PEG-TA 含量继续增大时, 缓蚀效率却下降。这可能是由于金属表面被缓蚀剂完全覆盖后, 电极表面活化溶解加速, 导致缓蚀效率有所降低<sup>[13]</sup>。

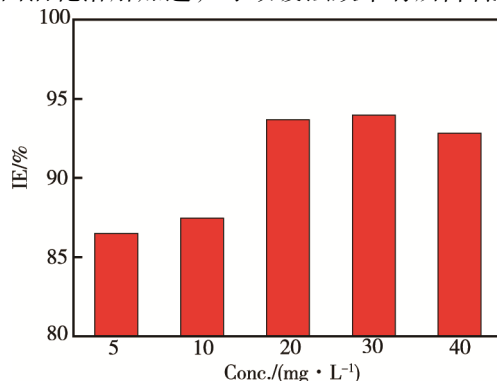


图 3 缓蚀效率随 PEG-TA 浓度的变化  
Fig.3 Inhibition efficiency as a function of PEG-TA concentration

### 2.3 电化学表征

图 4 是 Q235 钢在含有不同浓度 PEG-TA 的 1 mol/L HCl 中浸泡 2 h 的动电位极化曲线, 通过 CHI660 分析得到的参数见表 1。其中,  $E_{\text{corr}}$  为自腐蚀电位,  $J_{\text{corr}}$  为腐蚀电流密度,  $b_a$  为阳极极化斜率,  $b_c$  为阴极极化斜率, IE (%) 为缓蚀效率, 极化曲线缓蚀效率计算公式为:  $\text{IE} = \frac{J_{\text{corr}}^0 - J_{\text{corr}}}{J_{\text{corr}}^0} \times 100\%$ , 式中:  $J_{\text{corr}}^0$  和  $J_{\text{corr}}$  分别为添加缓蚀剂前后的腐蚀电流密度值。

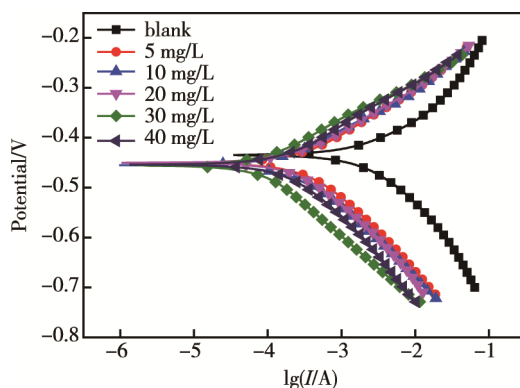


图 4 Q235 钢在添加不同浓度 PEG-TA 的 1 mol/L HCl 中的极化曲线  
Fig.4 Polarization curves of Q235 steel in 1 mol/L HCl with different PEG-TA content

由图 4 和表 1 可以看出, Q235 钢电极在含 PEG-TA 的介质中的自腐蚀电位与未添加缓蚀剂的 1 mol/L

表 1 Q235 钢在不同浓度 PEG-TA 的 1mol/L HCl 中的  
电化学参数和缓蚀效率

Tab.1 Electrochemical parameters and inhibition efficiency of Q235 steel in 1 mol/L HCl with different PEG-TA concentration					
Conc./ (mg·L <sup>-1</sup> )	-E <sub>corr</sub> / mV	J <sub>corr</sub> / (μA·cm <sup>-2</sup> )	b <sub>a</sub> / (mV·dec <sup>-1</sup> )	b <sub>c</sub> / (mV·dec <sup>-1</sup> )	IE/ %
0	435	2456.0	83.56	60.09	
5	450	310.7	105.35	76.90	87.35
10	448	174.7	118.78	78.72	92.88
20	450	141.9	113.39	79.97	94.22
30	455	92.2	126.93	77.43	96.25
40	454	172.6	110.82	77.05	92.97

HCl 介质中的相比,发生了明显的负向移动,而且阴、阳极极化斜率也发生了改变,腐蚀电流密度呈现减小的趋势。这些现象说明 PEG-TA 的加入明显抑制了 Q235 钢的腐蚀,且其属于阴极抑制为主的混合型缓蚀剂<sup>[14,15]</sup>。缓蚀剂浓度增加时,缓蚀效果不断增强,当质量浓度为 30mg/L 时,缓蚀效率达到最大值,为 96.25%。这是由于缓蚀剂 PEG-TA 与金属之间相互作用,在电极表面形成一层吸附膜,阻止了腐蚀介质与电极的接触,从而起到良好的缓蚀作用。这与静态失重法得到的结论一致。

25 ℃下 Q235 钢在添加不同质量浓度 PEG-TA 缓

蚀剂的 1 mol/L HCl 溶液中的电化学阻抗谱见图 5。 $R_s$  为溶液电阻,  $R_{ct}$  为电荷转移电阻,  $Q_{dl}$  为碳钢与腐蚀介质之间的双电层电容,  $R_f$  为膜电阻,  $Q_f$  为膜电容,拟合参数如表 2。 $Q_{dl}$  值随缓蚀剂的增加一直呈下降趋势,由 605.7  $\mu\text{F}/\text{cm}^2$  降到 138.0  $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ , 这表明缓蚀剂在碳钢表面发生了吸附<sup>[16]</sup>。在缓蚀剂质量浓度达到 30 mg/L 之前,  $R_{ct}$  随着缓蚀剂质量浓度的增加而增大,由 11.0  $\Omega\cdot\text{cm}^2$  增加到 133.6  $\Omega\cdot\text{cm}^2$ , 这说明缓蚀剂质量浓度的增加可以有效抑制 Q235 钢在酸性介质中的腐蚀。另一方面,  $R_f$  值随缓蚀剂质量浓度的增加而增大至 65.31  $\Omega\cdot\text{cm}^2$ , 这表明缓蚀剂的含量和表面覆盖率在增加<sup>[17]</sup>。

表 2 Q235 钢在添加不同浓度缓蚀剂的 1 mol/L HCl 介质  
中的电化学阻抗拟合参数

Tab.2 Electrochemical impedance fitting parameters of Q235 steel in 1 mol/L HCl medium with different inhibitor concentration					
Conc./ (mg·L <sup>-1</sup> )	$R_s$ / ( $\Omega\cdot\text{cm}^2$ )	$Q_{dl}$ / ( $\text{F}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	$R_{ct}$ / ( $\Omega\cdot\text{cm}^2$ )	$Q_f$ / ( $\text{F}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	$R_f$ / ( $\Omega\cdot\text{cm}^2$ )
0	1.394	605.7	11.0		
5	1.365	323.1	52.5	$3.6\times10^4$	14.76
10	1.294	165.1	70.1	$1.1\times10^4$	41.04
20	1.318	360.5	78.7	76.8	63.74
30	1.296	234.7	133.6	6879.0	65.31
40	1.493	138.0	96.3	9768.0	46.58

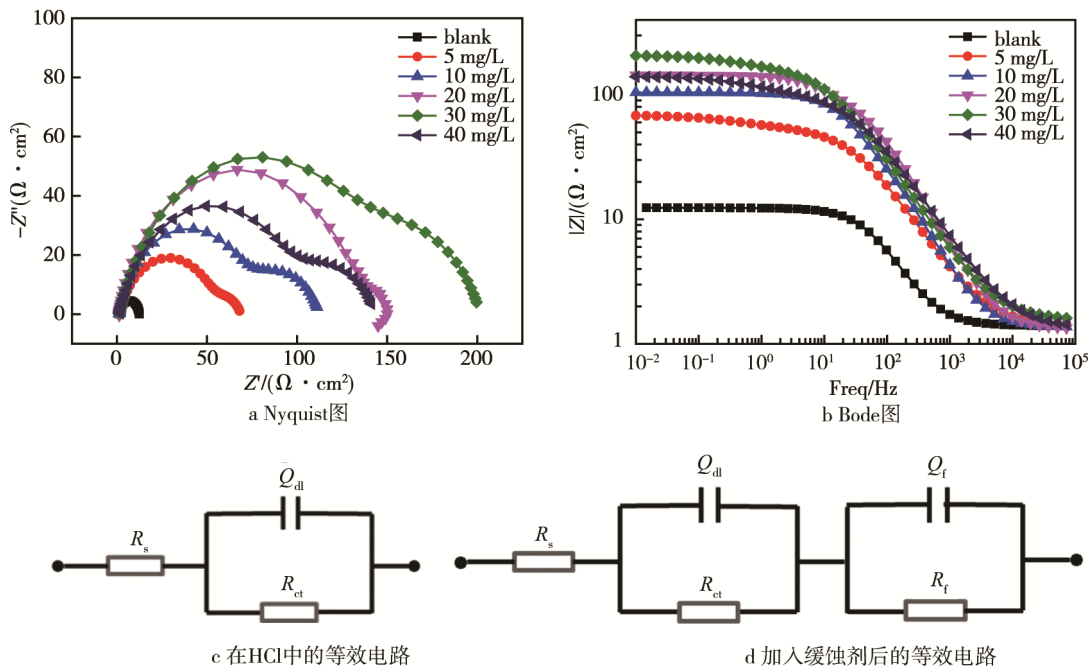


图 5 Q235 钢在添加不同浓度 PEG-TA 缓蚀剂的 1 mol/L HCl 介质中的电化学阻抗图  
Fig.5 Electrochemical impedance diagram of Q235 steel in1 mol/L HCl medium with different concentration of PEG-TA inhibitor  
a) Nyquist diagram, b) Bode diagram, c) Equivalent circuit in HCl , d) Equivalent circuit after inhibitor addition



## 2.4 腐蚀形貌分析

图6为Q235钢在不同条件下的SEM图,其中图6a为表面形貌图,其表面光滑,划痕是在打磨过程中形成。图6b是Q235钢在1mol/L HCl中浸泡2h的SEM,由图可以看出碳钢表面腐蚀严重,有明显腐蚀坑和裂纹出现。当盐酸中添加缓蚀剂后(图6c和6d),腐蚀明显减缓,只有一些小的腐蚀坑出现。在盐酸中添加30 mg/L PEG-TA缓蚀剂的腐蚀形貌(图6d)明显好于添加10 mg/L PEG-TA缓蚀剂的腐蚀形貌(图6c),说明缓蚀剂有效抑制了碳钢的腐蚀。

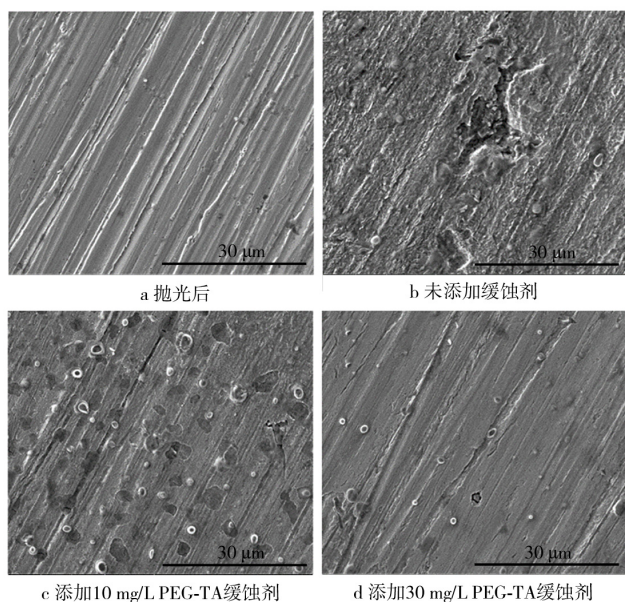


图6 Q235钢1 mol/L HCl中浸泡2h后的腐蚀形貌  
Fig.6 Corrosion morphology of Q235 steel in 1 mol/L HCl after immersion for 2 h a) Polished, b) Without inhibitor, c) with 10 mg/L PEG-TA, d) with 30 mg/L PEG-TA

## 2.5 等温吸附研究

为了确定PEG-TA缓蚀剂的吸附行为和缓蚀剂/Q235钢的吸附类型,通过吸附等温线进行研究。首先利用失重法得出缓蚀效率,计算表面覆盖度 $\theta$ ,计算公式为: $\theta = \frac{IE}{100}$ 。在25℃条件下,Langmuir吸附

等温式为: $\frac{c_{\text{inh}}}{\theta} = \frac{1}{K_{\text{ads}}} + c_{\text{inh}}$ ,式中: $c$ 为缓蚀剂的质量浓度(mg/L), $\theta$ 为表面覆盖度, $K$ 为吸附平衡常数。通过对 $c/\theta$ - $c$ 进行线性拟合处理(图7),可以得出, $c/\theta$ 对 $c$ 呈直线关系,线性回归系数高达0.99943。这表明PEG-TA缓蚀剂在1 mol/L HCl介质中对Q235钢表面的吸附遵循Langmuir吸附模型,且在Q235钢表面有吸附膜的存在。

为了确定吸附类型,由 $c/\theta$ - $c$ 的截距得到吸附平衡常数 $K$ ,进一步计算得到吸附吉布斯自由能 $\Delta G$ ,

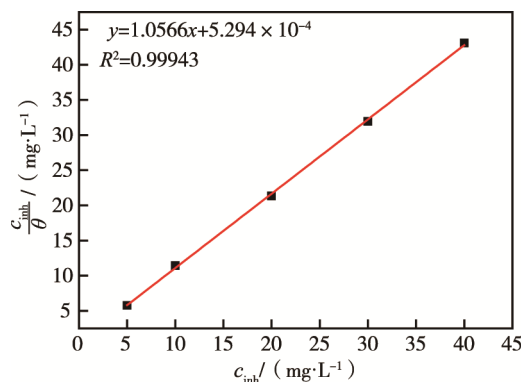


图7 Q235钢在含PEG-TA的1 mol/L HCl中的Langmuir吸附曲线

Fig.7 Langmuir adsorption curve of Q235 steel in 1 mol/L HCl containing PEG-TA.

计算公式为: $K_{\text{ads}} = \frac{1}{55.5} \exp(-\frac{\Delta G_{\text{ads}}}{RT})$ ,式中:55.5为溶剂水的浓度(mol/L), $R$ 为气体常数(J/(mol·K)), $T$ 为热力学温度(K)。热力学参数吉布斯自由能 $\Delta G$ 为负值,这说明在1 mol/L HCl中,缓蚀剂在Q235钢表面的吸附是自发过程并且形成的膜比较稳定。通常情况下,当 $\Delta G$ 大于-20 kJ/mol时,这种吸附类型被认为是物理吸附;而当 $\Delta G$ 小于-40 kJ/mol时,这种吸附被归因于化学吸附<sup>[14]</sup>。本文计算得到 $\Delta G = -28.66$  kJ/mol,表明PEG-TA在碳钢上的吸附既不是单纯的物理吸附,也不是单纯的化学吸附,而是介于两者之间的一种物理化学吸附。

## 3 结论

1) 以氨基封端苯胺四聚体和聚乙二醇为原料成功合成两亲性嵌段共聚物PEG-TA。

2) 通过静态失重和电化学阻抗分析表明在1 mol/L HCl中,PEG-TA缓蚀剂的添加有效抑制了Q235钢在1 mol/L HCl介质中的腐蚀,缓蚀效果与缓蚀剂浓度有直接关系。缓蚀剂质量浓度增加,缓蚀效果增强,当质量浓度达到30 mg/L,缓蚀效率达到最大,为93.97%。

3) 极化曲线斜率值的改变以及自腐蚀电位相对于未添加缓蚀剂时发生负移,表明缓蚀剂PEG-TA属于一种阴极抑制为主混合型缓蚀剂。

4) 吉布斯自由能 $\Delta G$ 为负值,说明PEG-TA在Q235钢表面进行自发吸附,且遵循Langmuir吸附等温模型,属于物理和化学混合吸附类型。

## 参考文献:

- [1] 谢发之,宣寒. 多点位吸附型咪唑啉季铵盐缓蚀剂的合成及其缓蚀性能[J]. 应用化学, 2011, 28(1): 94-100.

- XIE Fa-zhi, XUAN Han. Synthesis and Inhibiting Performance of an Imidazolyl-quatarnary Ammonium Salts Inhibitor with Multi-activated Sites[J]. Applied Chemistry, 2011, 28(1): 94-100.
- [2] YADAV M, SHARMA D, SARKAR T K. Adsorption and Corrosion Inhibitive Properties of Synthesized Hydrazine Compounds on N80 Steel/Hydrochloric Acid Interface: Electrochemical and DFT Studies[J]. Journal of Molecular Liquids, 2015, 212: 451-460.
- [3] DESOUZA F S, SPINELLI A. Caffeic Acid as a Green Corrosion Inhibitor for Mild Steel[J]. Corrosion Science, 2009, 51(3): 642-649.
- [4] ZHANG B, HE C, CHEN X, et al. The Synergistic Effect of Polyamidoamine Dendrimers and Sodium Silicate on the Corrosion of Carbon Steel in Soft Water [J]. Corrosion Science, 2015, 90: 585-596.
- [5] 刘栓, 赵霞, 赵海超, 等.  $H_3PO_4$  掺杂聚苯胺对碳钢的缓蚀性能研究[J]. 中国材料进展, 2016, 35(8): 629-635.
- LIU Shuan, ZHAO Xia, ZHAO Hai-chao, et al. Research on Corrosion Inhibition of  $H_3PO_4$  Doped PANion Carbon Steel[J]. Materials China, 2016, 35(8): 629-635.
- [6] ANSARI KR, QURAISHI MA, SINGH A. Schiff's Base of Pyridyl Substituted Triazoles as New and Effective Corrosion Inhibitors for Mild Steel in Hydrochloric Acid Solution[J]. Corrosion Science, 2014, 79: 5-15.
- [7] EI-NAGGAR M M. Corrosion Inhibition of Mild Steel in Acidic Medium by Some Sulfa Drugs Compounds [J]. Corrosion Science, 2007, 49(5): 2226-2236.
- [8] 杨秀芳, 唐敏敏, 马养民. 曼尼希碱缓蚀剂在盐酸中对 N80 钢缓蚀性能[J]. 表面技术, 2017, 46(1): 175-181.
- YANG Xiu-fang, TANG Min-min, MA Yang-min. Mannich Base as Corrosion Inhibitor for N80 Steel in HCl Solution[J]. Surface Technology, 2017, 46(1): 175-181.
- [9] 马骏, 刘栓, 赵海超, 等. 水溶性聚苯胺纳米粒子对碳钢的缓蚀作用[J]. 腐蚀与防护, 2017, 38(1): 30.
- MA Jun, LIU Shuan, ZHAO Hai-chao, et al. Inhibition Effect of Water Soluble Polyaniline Nanoparticles on Carbon Steel[J]. Corrosion & Protection, 2017, 38(1): 30.
- [10] CHEN F, LIU P. Conducting Polyaniline Nanoparticles and Their Dispersion for Waterborne Corrosion Protection Coatings[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2011, 3(7): 2694-2702.
- [11] QIU S, CHEN C, CUI M, et al. Corrosion Protection Performance of Waterborne Epoxy Coatings Containing Self-doped Polyaniline Nanofiber[J]. Applied Surface Science, 2017, 407: 213-222.
- [12] 郎乐, 庄秀丽, 刘亚栋, 等. 苯胺四聚体-PEG 两亲性嵌段共聚物的合成、表征及自组装行为[J]. 高等学校化学学报, 2011, 32(2): 411-415.
- LANG Le, ZHUANG Xiu-li, LIU Ya-dong, et al. Synthesis Characterization and Self-assembly of PEG-Aniline Tetramer Block Copolymer[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2011, 32(2): 411-415.
- [13] 任呈强. N80 油管钢在含  $CO_2/H_2S$  高温高压两相介质中的电化学腐蚀行为及缓蚀机理研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2003.
- REN Cheng-qiang. Electrochemical Corrosion Behavior and Corrosion Inhibition Mechanism of N80 Tubing Steel In  $CO_2/H_2S$  Two-phase Medium under High Temperature and Pressure[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003.
- [14] 宋伟伟, 张静, 杜敏. 新型不对称双季铵盐缓蚀剂在 HCl 中对 Q235 钢的缓蚀行为[J]. 化学学报, 2011, 69(16): 1851-1857.
- SONG Wei-wei, ZHANG Jing, DU Min. Inhibition Performance of Novel Dissymmetric Bisquaternary Ammonium Salt to Q235 Steel in Hydrochloric Acid [J]. Journal of Chemistry, 2011, 69(16): 1851-1857.
- [15] 王奎涛, 孟庆来, 翟朋达, 等. 过氧乙酸中硅酸钠对 Q235 钢的缓蚀影响[J]. 表面技术, 2015, 44(12): 122-126.
- WANG Kui-tao, MENG Qing-lai, ZHAI Peng-da, et al. Corrosion Inhibition Effect of Sodium Silicate in Peroxyacetic Acid for Q235 Steel[J]. Surface Technology, 2015, 44(12): 122-126.
- [16] 陈文, 陶永元, 管春平, 等. 电化学法研究芭蕉叶提取物在盐酸中对碳钢的缓蚀作用[J]. 表面技术, 2016, 45(1): 124-130.
- CHEN Wen, TAO Yong-yuan, GUAN Chun-ping, et al. Electrochemical Investigation of Extracts of Musa Basjoo Leaves as Corrosion Inhibitor for Carbon Steel in Hydrochloric Acid Solution[J]. Surface Technology, 2016, 45(1): 124-130.
- [17] KICIR N, TANSUG G, ERBIL M, et al. Investigation of Ammonium(2,4-Dimethylphenyl)-Dithiocarbamate as a New, Effective Corrosion Inhibitor for Mild Steel [J]. Corrosion Science, 2016, 105: 88-99.