

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2023.10.007

## 酪氨酸衍生物对 Q235 钢的缓蚀性能研究

田会娟<sup>1\*</sup>, 赵玥<sup>1</sup>, 曹玉霞<sup>1</sup>, 吕燕<sup>1</sup>, 郭强强<sup>2</sup>

(1. 唐山学院 新材料与化学工程学院, 河北 唐山 063000; 2. 唐山师范学院 化学系, 河北 唐山 063000)

**摘要:** 针对酸洗剂对金属的腐蚀问题, 为了提高环保型氨基酸类缓蚀剂的缓蚀效果, 设计合成了酪氨酸衍生物, 并采用红外光谱和核磁共振氢谱(<sup>1</sup>H NMR)对产物进行了表征。采用失重法、极化曲线和交流阻抗(EIS)等方法研究了在 30 °C 0.5 mol·L<sup>-1</sup> 硫酸溶液中酪氨酸衍生物对 Q235 钢的缓蚀性能, 并探讨了缓蚀机理。结果表明: 在相同浓度时, 酪氨酸衍生物的缓蚀率明显高于酪氨酸。当酪氨酸衍生物缓蚀剂使用浓度为 200 mg·L<sup>-1</sup> 时, 缓蚀率即可达到 93.88 %。酪氨酸衍生物能同时抑制阴极和阳极反应, 为混合抑制型缓蚀剂。电荷转移电阻随缓蚀剂浓度的增加而增加, 说明酪氨酸衍生物分子在碳钢表面吸附形成了保护膜, 从而起到缓蚀作用。

**关键词:** 缓蚀剂; 酪氨酸; 酪氨酸衍生物; 碳钢

中图分类号: TG174.42

文献标识码: A

## Study on corrosion inhibition of Q235 steel by tyrosine derivative

Tian Huijuan<sup>1\*</sup>, Zhao Yue<sup>1</sup>, Cao Yuxia<sup>1</sup>, Lyu Yan<sup>1</sup>, Guo Qiangqiang<sup>2</sup>

(1. School of New Material and Chemical Engineering, Tangshan University, Tangshan 063000, China; 2. Department of Chemistry, Tangshan Normal College, Tangshan 063000, China)

**Abstract:** In order to improve the corrosion inhibition effect of environment-friendly amino acid corrosion inhibitors, tyrosine derivative was designed and synthesized, and the product was characterized by infrared spectroscopy and H nuclear magnetic resonance(<sup>1</sup>H NMR). The corrosion inhibition of tyrosine derivative on Q235 steel at 30 °C in 0.5 mol·L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> was studied by weight loss method, polarization curve and electrochemical impedance spectroscopy (EIS). The corrosion inhibition mechanism was also discussed. The results showed that the inhibition efficiency of tyrosine derivative was significantly higher than that of tyrosine at the same concentration. When the concentration of tyrosine derivative corrosion inhibitor was 200 mg·L<sup>-1</sup>, the inhibition efficiency was 93.88 %. The results showed that tyrosine derivative can inhibit both cathode and anode reactions and belonged to mixed inhibitory corrosion inhibitor. The charge transfer resistance increased with the increase of corrosion inhibitor concentration, indicating that tyrosine derivative molecules adsorbed on the surface of carbon steel to form a protective film, thus playing a role in corrosion inhibition.

**Keywords:** corrosion inhibitor; tyrosine; tyrosine derivative; carbon steel

收稿日期: 2023-03-06

修回日期: 2023-04-19

\*通信作者: 田会娟(1982—), 女, 博士, 副教授, email: hjtian82@163.com

基金项目: 唐山市科技局项目(21130232C); 河北省高等学校科学技术(青年)项目(QN202205); 唐山师范学院校内项目(2222C40)

腐蚀是世界各国共同面对的问题,涉及资源、环境、人类健康等问题。据有关统计,每年腐蚀损失约占各国 GDP 的 3%~5%,远远大于自然灾害、各类事故损失的总和<sup>[1]</sup>。因此保护好金属材料,防止、减缓和抑制其腐蚀十分必要。在金属表面用覆盖涂层、在金属所处腐蚀介质中加入缓蚀剂等方法,是抗腐蚀的主要手段<sup>[2-4]</sup>。特别是在酸洗除去氧化铁皮、酸洗除垢、油井酸化等过程中,酸洗剂对金属设备和材料都会造成腐蚀,而向酸洗剂中添加缓蚀剂是一种抑制金属腐蚀的简单而有效的方法。缓蚀剂分子会吸附在金属表面形成保护膜,可防止金属暴露在酸性溶液中,从而抑制金属腐蚀<sup>[5]</sup>。

常用的酸洗缓蚀剂有乌洛托品<sup>[6]</sup>、硫脲<sup>[7]</sup>、喹啉及其衍生物<sup>[8]</sup>等有机化合物,这些物质的杂原子上有孤对电子或环上有 $\pi$ 电子,可与金属空的 d 轨道作用,吸附在金属表面,抑制金属腐蚀<sup>[9]</sup>。近年来,人们开始研究开发绿色环保型酸洗缓蚀剂,如植物提取物缓蚀剂、天然大分子缓蚀剂和氨基酸类缓蚀剂<sup>[10-12]</sup>。氨基酸类缓蚀剂成本低、来源广泛、绿色可降解,是一种具有工业应用潜力的缓蚀剂。氨基酸小分子在金属表面形成的保护膜不牢固,单独使用,缓蚀效果不理想,但可根据缓蚀协同作用进行复配<sup>[13-16]</sup>或合成氨基酸衍生物<sup>[17-21]</sup>以提高缓蚀率。

本文从 20 多种氨基酸中选取了带有苯环的酪氨酸,先制备中间产物酪氨酸盐酸盐,再合成酪氨酸衍生物,通过外红外光谱对目标产物进行了表征。采用失重法和电化学方法研究了酪氨酸衍生物的缓蚀作用,并探讨了缓蚀机理。

## 1 实验

### 1.1 酪氨酸衍生物的合成

按照文献所述方法先制备酪氨酸盐酸盐<sup>[22]</sup>,再通过与己胺反应生成目标产物—酪氨酸衍生物<sup>[19]</sup>,化学反应式如图 1 所示。采用德国布鲁克 TENSOR37 傅里叶红外光谱仪和美国 Anasazi EFT-90 核磁共振波谱仪对产物结构进行表征。

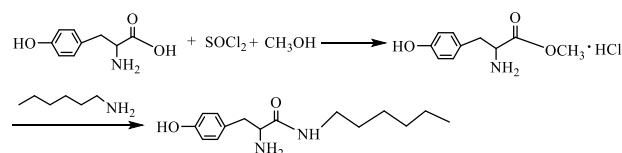


图 1 酪氨酸衍生物合成路线图

Fig.1 Synthesis route of tyrosine derivative

## 1.2 缓蚀性能测试

### 1.2.1 失重法

实验碳钢(Q235 钢)试片选用尺寸为 72.4 mm×11.5 mm×2.0 mm Q235 钢的腐蚀试片,表面积为 20 cm<sup>2</sup>。经过丙酮和乙醇擦拭,冷风吹干,称重后,分别悬挂在 500 mL 不含和含有不同浓度酪氨酸、酪氨酸衍生物缓蚀剂的 0.5 mol·L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中,不含缓蚀剂的为空白溶液,在 30 ℃静置 8 h,之后取出试片,先用去离子水冲洗,橡皮擦掉表面腐蚀物,再依次用去离子水、乙醇擦拭表面,冷风吹干,最后再次称重。采用以下公式计算缓蚀率<sup>[23]</sup>( $\eta_w$ ):

$$W_{\text{corr}} = \frac{m_1 - m_2}{At} \quad (1)$$

$$\eta_w = \frac{W_{\text{corr}} - W'_{\text{corr}}}{W_{\text{corr}}} \times 100 \quad (2)$$

式中: $m_1$ 和 $m_2$ 分别为浸泡在腐蚀溶液前、后的质量, $A$ 为试片的面积,cm<sup>2</sup>;  $t$ 为腐蚀时间,h; $W_{\text{corr}}$ 和 $W'_{\text{corr}}$ 分别为未添加缓蚀剂(空白溶液)和添加缓蚀剂的腐蚀溶液中碳钢试片的腐蚀速率。

### 1.2.1 电化学测试

电化学测量在德国札纳 Zennium pro 电化学工作站上进行。采用常规的三电极体系,碳钢片作为工作电极,其采用环氧树脂密封,留下 1 cm<sup>2</sup>的面积接触腐蚀溶液,铂电极作为对电极,饱和甘汞电极(SCE)为参比电极。工作电极用去离子水清洗,用丙酮脱脂,再次用去离子水清洗,然后立即插入含有 50 mL 腐蚀溶液的电解池中。工作电极在 0.5 mol·L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中浸泡 30 min 左右,获得稳态开路电位(OCP)。极化曲线扫描范围为 -250~+250 mV,扫描速率为 0.5 mV·s<sup>-1</sup>。交流阻抗测量频率 10<sup>-4</sup>~10<sup>3</sup> Hz。

根据塔菲尔外推法计算腐蚀电流密度( $i_{\text{corr}}$ )和腐蚀电位( $E_{\text{corr}}$ ),再由腐蚀电流密度计算极化曲线法的缓蚀率( $\eta_i$ ),如式(3)所示<sup>[17]</sup>:

$$\eta_i = \frac{i_{\text{corr}} - i_{\text{corr(inh)}}}{i_{\text{corr}}} \times 100 \quad (3)$$

式中: $i_{\text{corr}}$ 和 $i_{\text{corr(inh)}}$ 分别表示未添加缓蚀剂(空白溶液)和添加缓蚀剂的硫酸介质中碳钢的腐蚀电流密度。

交流阻抗的缓蚀效率( $\eta_R$ )由电荷转移电阻值计算,如式(4)所示<sup>[9]</sup>:

$$\eta_R = \frac{R_{ct(inh)} - R_{ct}}{R_{ct(inh)}} \times 100 \quad (4)$$

式中: $R_{ct}$ 和 $R_{ct(inh)}$ 分别表示未添加缓蚀剂(空白溶液)和添加缓蚀剂的电荷转移电阻。

## 2 结果与讨论

### 2.1 目标产物表征

#### 2.1.1 红外光谱分析

酪氨酸及其衍生物的红外光谱图如图2所示。从图2可以看出,酪氨酸衍生物在 $2924\text{ cm}^{-1}$ 和 $2854\text{ cm}^{-1}$ 附近的峰,分别为 $-\text{CH}_2-$ 的不对称伸缩振动和对称伸缩振动,由于增加了碳链,此处的峰强度较大, $1652\text{ cm}^{-1}$ 是酰胺键中 $\text{C}=\text{O}$ 伸缩振动峰,与酪氨酸羧基中 $1598\text{ cm}^{-1}$ 波数的 $\text{C}=\text{O}$ 伸缩振动峰相比,向波数较高的方向移动,证明成功合成了酪氨酸衍生物。

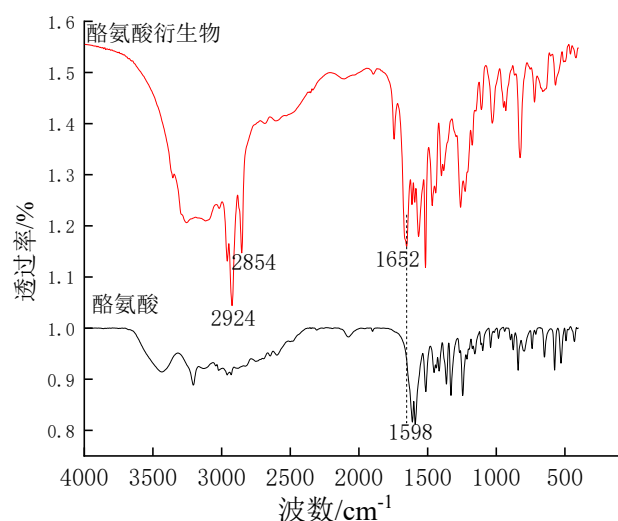


图2 酪氨酸及其衍生物的红外光谱图

Fig.2 Infrared spectra of tyrosine and its derivative

#### 2.1.2 核磁共振氢谱分析

为了进一步确定产物结构,进行了核磁共振氢谱 $^1\text{H NMR}$ 的检测,结果如图3所示。由图3分析可知,其中 $\delta\ 6.89$ 对应的是一 $\text{OH}$ 质子的化学位移, $\delta\ 6.10$ 和 $\delta\ 5.82$ 对应的是一 $\text{NH}$ —质子的化学位移, $\delta\ 4.35$ 对应的是苯环上质子的化学位移, $\delta\ 6.10$ 对应的是 $-\text{NH}_2$ 质子的化学位移, $\delta\ 1.87$ 、 $\delta\ 1.63$ 和 $\delta\ 0.38$ 分别对应和苯环相连的 $-\text{CH}_2-$ 、碳链 $-(\text{CH}_2)_6-$ 及 $-\text{CH}_3$ 质子的化学位移,由此可推断已成功制备了此种酪氨酸衍生物。

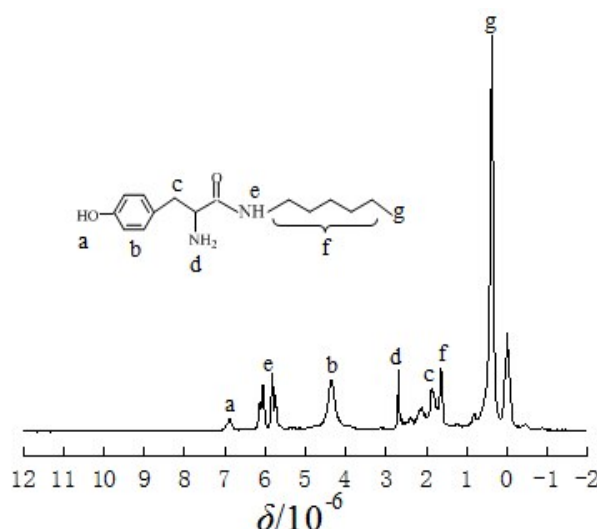


图3 酪氨酸衍生物的 $^1\text{H NMR}$

Fig.3  $^1\text{H NMR}$  of tyrosine derivatives

### 2.2 失重法分析

不同浓度的酪氨酸及其衍生物在 $30\text{ }^\circ\text{C}$   $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{H}_2\text{SO}_4$ 溶液中对碳钢的缓蚀率如图4所示。从图4可明显看出,酪氨酸及其衍生物的缓蚀率都随着添加浓度的增加而增大,在相同缓蚀剂浓度下,酪氨酸衍生物的缓蚀率明显高于酪氨酸,可能是由于酪氨酸衍生物分子结构中增加了疏水长链。当酪氨酸衍生物缓蚀剂使用浓度为 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,缓蚀率即达到 $93.88\%$ ,之后随着浓度的增加缓蚀率趋于平缓,说明酪氨酸衍生物缓蚀剂在Q235钢表面吸附达到饱和,受浓度影响因素减小。

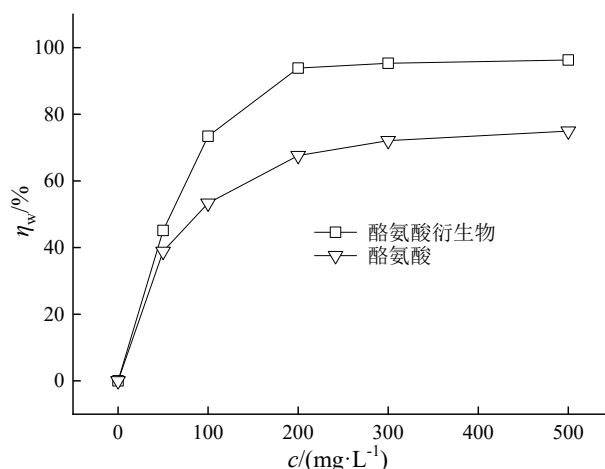


图4 酪氨酸及其衍生物的缓蚀率变化曲线

Fig.4 The curve of corrosion inhibition efficiency of tyrosine and its derivative

2.3 极化曲线分析

Q235 钢在 30 ℃添加不同浓度的酪氨酸衍生物缓蚀剂的 0.5 mol·L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中的动态电位极化曲线如图 5 所示。由极化曲线得到的腐蚀电位( $E_{\text{corr}}$ )、阳极塔菲尔斜率( $\beta_a$ )、阴极塔菲尔斜率( $\beta_c$ )和腐蚀电流密度( $i_{\text{corr}}$ )等腐蚀参数如表 1 所示。由图 5 和表 1 可知,添加了酪氨酸衍生物缓蚀剂后,阴极和阳极曲线均向腐蚀电流密度减小的方向移动,阴极和阳极的塔菲尔斜率都随浓度的变化而变化<sup>[9]</sup>,腐蚀电位稍微正移,但位移均小于 85 mV<sup>[24]</sup>,说明酪氨酸衍生物缓蚀剂是混合型缓蚀剂,它的加入减少了铁的阳极溶解,也延缓了氢离子的还原反应。随着浓度的增加,缓蚀率增大,表明缓蚀剂分子在 Q235 钢表面形成的保护膜趋于完整和稳定。失重法的计算结果为 8 h 腐蚀时间的平均值,而电化学结果是瞬态的,因此极化曲线计算的缓蚀率与失重法相比偏高一些,但缓蚀率变化趋势一致。

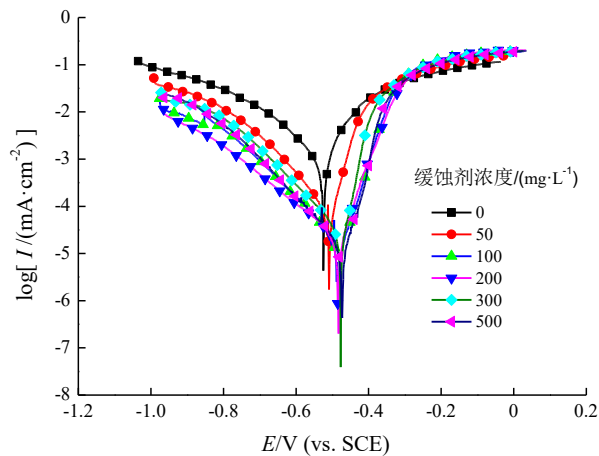


图 5 添加不同浓度酪氨酸衍生物缓蚀剂的极化曲线图  
Fig.5 Polarization curves of tyrosine derivatives with different concentrations of corrosion inhibitors

2.4 交流阻抗分析

缓蚀剂在金属表面的吸附会导致腐蚀体系阻抗的显著增加,从而导致电荷转移过程阻力的增加。因此,可以通过腐蚀体系的交流阻抗测试缓蚀剂的性能。Q235 钢在 30 ℃添加不同浓度的酪氨酸衍生物缓蚀剂的 0.5 mol·L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中交流阻抗谱图如图 6 所示。所有的阻抗谱都呈现出轻微压扁的单容抗弧,表明碳钢的腐蚀主要由电荷转移过程和金

属表面保护层的形成所控制。金属表面的不均匀性、粗糙度和质量传递等是容抗弧偏离理想半圆的主要原因<sup>[25]</sup>。随着缓蚀剂浓度的增加,容抗弧的直径增大,形状基本不变,表明缓蚀剂分子吸附在碳钢表面起到保护作用。

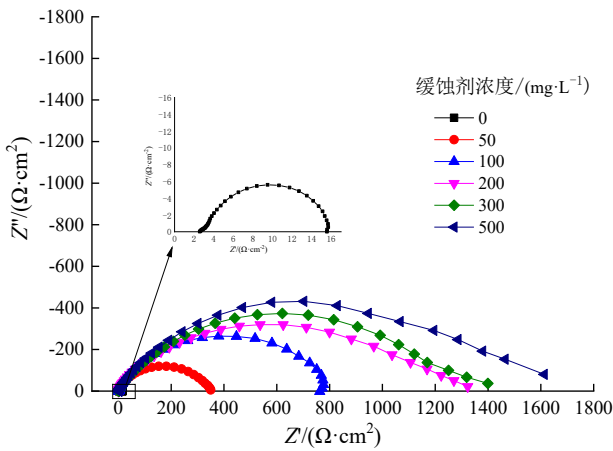


图 6 添加不同浓度酪氨酸衍生物缓蚀剂的交流阻抗谱图  
Fig.6 EIS of tyrosine derivatives with different concentrations

表 1 极化曲线的电化学拟合参数

Tab.1 Electrochemical fitting parameters of polarization curves

$c/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$-E_{\text{corr}}/\text{mV}$	$-\beta_c/(\text{mV} \cdot \text{dec}^{-1})$	$\beta_a/(\text{mV} \cdot \text{dec}^{-1})$	$i_{\text{corr}}/(\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2})$	$\eta_i/\%$
0	523	153	120	0.56200	0
50	506	53.7	25.3	0.03110	94.47
100	476	49.0	27.7	0.01180	97.90
200	484	64.5	44.8	0.00866	98.46
300	484	73.1	42.0	0.00708	98.74
500	473	41.3	28.2	0.00326	99.42

采用如图 7 所示的等效电路对交流阻抗数据进行拟合,图中  $R_s$  为溶液电阻,CPE 为长相位角元件, $R_{ct}$  为电荷转移电阻。通过拟合得到的电化学参数如表 2 所示,表中  $Y_0$  和  $n$  为 CPE 的两个参数, $Y_0$  为模数, $n$  为弥散系数( $0 < n < 1$ )。 $R_{ct}$  随缓蚀剂浓度的增加而增加,缓蚀率也随之增大,表明酪氨酸衍生物分子在碳钢表面形成了保护层,缓蚀剂浓度越大,保护层越稳定和致密,该保护层是质量传递和电荷传递的屏障<sup>[26]</sup>。缓蚀率的计算结果与极化曲线法一致。



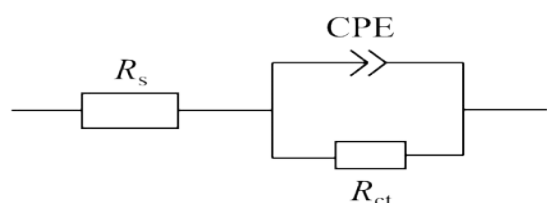


图7 交流阻抗谱的拟合等效电路图

Fig.7 The fitted equivalent circuit diagram of EIS

## 2.5 缓蚀机理分析

通过在酪氨酸分子中引入疏水碳链而合成的酪

氨酸衍生物的缓蚀效果优异,其缓蚀率明显高于酪氨酸。引入的碳链长度为6个C,既能起到保护金属的作用,也不会由于碳链太长而降低溶解度。图8为酪氨酸衍生物在碳钢表面的吸附模型示意图。酪氨酸衍生物分子中,以负电性N、O、S等原子为中心的极性基团以及电子云密度较大的苯环可与Fe原子的空3d轨道作用,吸附于碳钢表面,而非极性碳链位于离开金属的方向,在碳钢表面形成疏水性保护膜,可以抵抗电荷的移动,从而抑制腐蚀<sup>[5]</sup>。

表2 交流阻抗谱的电化学拟合参数

Tab.2 Electrochemical fitted parameters of EIS

$c/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$R_s/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$	$R_{ct}/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$	CPE		$\eta_R/\%$
			$Y_o/(\mu\Omega^{-1}\cdot\text{S}^n\cdot\text{cm}^{-2})$	$n$	
0	2.98	13.24	281.3	0.85896	0
50	2.04	331.30	59.9	0.83253	96.00
100	1.03	741.40	35.0	0.82413	98.21
200	0.85	1095.00	37.8	0.77310	98.79
300	0.51	1208.00	54.4	0.72303	98.90
500	1.28	1240.00	59.4	0.81013	98.93

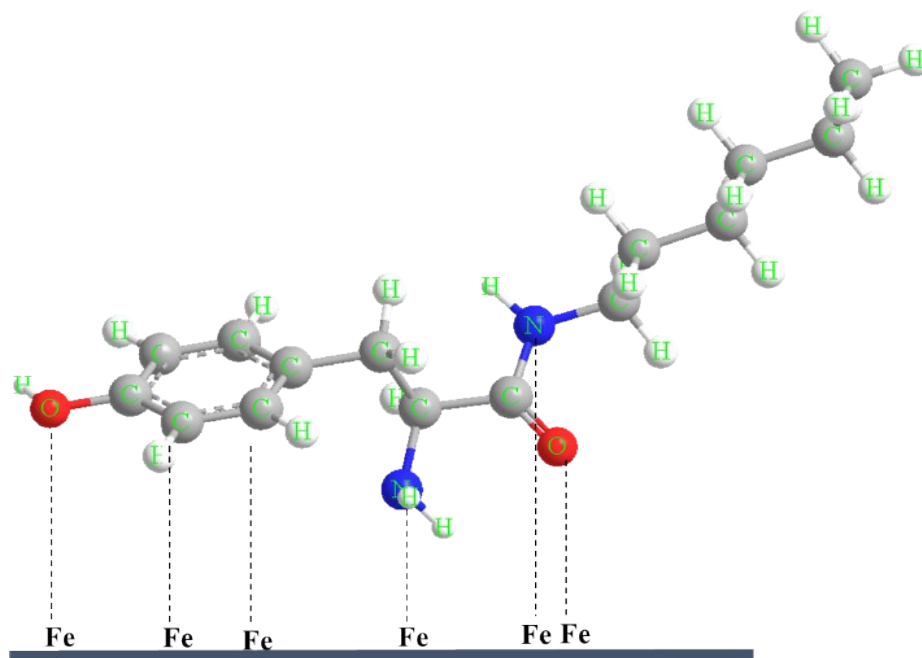


图8 酪氨酸衍生物在碳钢表面吸附示意图

Fig.8 Schematic diagram of adsorption of tyrosine derivative on carbon steel

## 3 结论

(1)以酪氨酸和己胺为原料,通过在酪氨酸分子上引入了己基疏水链,成功合成了酪氨酸衍生物缓

蚀剂。在相同浓度下,酪氨酸衍生物的缓蚀率明显高于酪氨酸。失重法表明:在  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$   $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{H}_2\text{SO}_4$  中,当酪氨酸衍生物缓蚀剂使用浓度为  $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,对 Q235 钢的缓蚀率可达到 93.88 %,

之后随着浓度的增加缓蚀率趋于平缓,说明酪氨酸衍生物缓蚀剂在 Q235 钢表面吸附达到饱和。

(2)极化曲线法和交流阻抗法的结果与失重法一致。酪氨酸衍生物的缓蚀效果优异,在使用浓度  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,缓蚀率即在 90 % 以上。极化曲线表明:酪氨酸衍生物是能同时抑制阴极和阳极反应的混合抑制型缓蚀剂。交流阻抗表明:电荷转移电阻随缓蚀剂浓度的增加而增加,酪氨酸衍生物分子在碳钢表面形成了保护层,缓蚀剂浓度越大,保护层越稳定和致密。

### 参考文献

- [1] 侯保荣, 路东柱. 我国腐蚀成本及其防控策略[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(6): 601-609.
- [2] 姚乐, 姚艺, 刘美, 等. 金属材料的腐蚀与防腐的研究进展[J]. 应用化工, 2017, 46(8): 1613-1615, 1623.
- [3] 李芝华, 胡建康, 李彦博, 等.  $\text{Ce}^{3+}$  掺杂聚苯胺中空微球/环氧涂层防腐蚀研究[J]. 材料科学与工艺, 2018, 26(3): 23-30.
- [4] 马厚义, 崔聪颖, 陈婷. 金属腐蚀与防护简谈[J]. 电化学, 2011, 17(3): 288-291.
- [5] 张天胜, 张浩, 高红. 缓蚀剂[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [6] 高军林. 乌洛托品作为酸洗缓蚀剂的探讨[J]. 腐蚀与防护, 2009, 30(3): 182-183.
- [7] 肖金华, 赵晴, 王帅星, 等. 硫脲对非调质钢在 HCl 酸洗溶液中的缓蚀作用[J]. 表面技术, 2016, 45(6): 186-191.
- [8] 卢勇, 冯辉霞, 唐蓉萍. 喹啉及其衍生物在金属缓蚀剂方面的研究应用综述[J]. 塑料助剂, 2021, 147(3): 6-10.
- [9] Yadav M, Sarkar T K, Purkait T. Amino acid compounds as eco-friendly corrosion inhibitor for N80 steel in HCl solution: Electrochemical and theoretical approaches[J]. Journal of Molecular Liquids, 2015, 212: 731-738.
- [10] 周晓湘, 刘建平. 酸洗缓蚀剂的应用研究现状及发展趋势[J]. 工业水处理, 2002, 22(1): 16-18, 22.
- [11] 郑云香, 王向鹏, 宗丽娜. 天然多糖及衍生物在金属缓蚀剂中的研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(2): 221-231.
- [12] 张富, 李向红. 空心莲子草提取物对冷轧钢在 HCl 溶液中的缓蚀性能[J]. 腐蚀与防护, 2020, 41(7): 30-36.
- [13] 郭强强, 田会娟, 王丽红. 氨基酸复配酸洗缓蚀剂的研究[J]. 表面技术, 2016, 45(7): 46-50.
- [14] 张杰, 张鑫, 王翠, 等. 天然海水中氨基酸复合缓蚀剂对黄铜缓蚀性能的研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2017, 44(2): 26-34.
- [15] 黄文恒, 黄茜, 刘勇, 等. 硫酸介质中精氨酸复合缓蚀剂缓蚀效果的研究[J]. 电镀与精饰, 2018, 40(8): 6-10.
- [16] Mobin M, Parveen M, Rafiquee M Z A. Inhibition of mild steel corrosion using l-histidine and synergistic surfactants additives[J]. Journal of Materials Engineering&Performance, 2013, 22(2): 548-556.
- [17] Sanjoy S, Aditya S, Subhas G, et al. Amino acid and cin-namaldehyde conjugated Schiff bases as proficient corrosion inhibitors for mild steel in 1 M HCl at higher temperature and prolonged exposure: Detailed electrochemical, adsorption and theoretical study[J]. Journal of Molecular Liquids, 2021, 324: 115077.
- [18] Nassar M F, Taban T Z, Obaid R F, et al. Study to amino acid-based inhibitors as an effective anti-corrosion material[J]. Journal of Molecular Liquids, 2022, 360: 119449.
- [19] 郭强强, 翟江丽, 舒世立. 蛋氨酸衍生物的合成及其缓蚀性能研究[J]. 化学通报, 2019, 82(5): 476-479.
- [20] Zhang K, Yang W, Yin X et al. Amino acids modified konjac glucomannan as green corrosion inhibitors for mild steel in HCl solution[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 181: 191-199.
- [21] Zhang Q H, Hou B S, Li Y Y, et al. Two amino acid derivatives as high efficient green inhibitors for the corrosion of carbon steel in  $\text{CO}_2$ -saturated formation water[J]. Corrosion Science, 2021, 189: 109596.
- [22] 宋霞, 陈敏, 孙露. 二氯亚砷-甲醇溶液中合成氨基酸甲酯盐酸盐的研究[J]. 化学试剂, 2007(11): 687-688, 690.
- [23] Fu J J, Li S N, Cao L H, et al. l-Tryptophan as green corrosion inhibitor for low carbon steel in hydrochloric acid solution[J]. Journal of Materials Science, 2010, 45(4): 979-986.
- [24] Wang X, Yang H, Wang F. An investigation of benzimidazole derivative as corrosion inhibitor for mild steel in different concentration HCl solutions[J]. Corrosion Science, 2011, 53(1): 113-121.
- [25] Safak S, Duran B, Yurt A, et al. Schiff bases as corrosion inhibitor for aluminium in HCl solution[J]. Corrosion Science, 2012, 54: 251-259.
- [26] Behpour M, Ghoreishi S M, Mohammadi N, et al. Investigation of some Schiff base compounds containing disulfide bond as HCl corrosion inhibitors for mild steel[J]. Corrosion Science, 2010, 52(12): 4046-4057.