

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2022.02.015

## 从富硒茶叶中提取碳钢酸洗缓蚀剂

郝鑫铭, 廖欣怡, 周晓荣\*, 廖瑞一苏, 肖雅馨, 顾源, 宋垚

(武汉轻工大学 化学与环境工程学院, 湖北 武汉 430023)

**摘要:** 采用水浸提取法制备含有富硒茶叶提取物(SeTE)的溶液。通过失重法、电化学法研究了在  $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  HCl 溶液中加入 SeTE 后碳钢材料的腐蚀规律, 分析 SeTE 的缓蚀效率和缓蚀机理。研究表明:  $25^\circ\text{C}$  时, 当干富硒茶叶与  $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  HCl 溶液的质量体积比为  $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  时, SeTE 的缓蚀效率达到 96 %。SeTE 的缓蚀效率随温度的升高而降低, 在  $55^\circ\text{C}$  时保持在 80 % 左右。SeTE 在碳钢表面的吸附行为符合 Langmuir 吸附模型, 使碳钢在 HCl 溶液中腐蚀过程的表现活化能增大, 属于混合型缓蚀剂。

**关键词:** 富硒茶叶; 碳钢; 缓蚀剂; 电化学

**中图分类号:** TG174.42

**文献标识码:** A

## Acid Corrosion Inhibitor for Carbon Steel Extracted from Se-Rich Tea Leaves

HAO Xinming, LIAO Xinyi, ZHOU Xiaorong\*, LIAO Ruiyisu, XIAO Yaxin,

GU Yuan, SONG Yao

(College of Chemical and Environmental Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

**Abstract:** A simple water extraction method was applied to produce solution containing Se-rich tea leaves extract (SeTE). In this paper, the inhibition efficiency and mechanism of SeTE on carbon steel in  $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  HCl solution were studied by weight loss method and electrochemical tests. The results showed that when the concentration, defined by the mass to volume ratio of dry Se-rich tea leaves to the  $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  HCl solution, reached  $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , the corrosion inhibition efficiency of SeTE was more than 96 % at  $25^\circ\text{C}$ . It was also suggested that the corrosion inhibition efficiency of SeTE decreased with raising temperature, and declined to about 80 % at  $55^\circ\text{C}$ . The adsorption of SeTE on the surface of carbon steel conformed to the Langmuir adsorption model, which increased the apparent activation energy of corrosion reaction of carbon steel in HCl solution. And SeTE was a mixed-type corrosion inhibitor for carbon steel.

**Keywords:** Se-rich tea leaves; carbon steel; corrosion inhibitor; electrochemistry

随着人们对环保和安全认识的逐渐提高, 各国均限制有毒、污染环境的缓蚀剂的应用, 开发环境友好型的缓蚀剂成为近年来的研究热点<sup>[1]</sup>。从天然植

物中提取物质并用作缓蚀剂, 是目前开发新型绿色缓蚀剂的途径之一<sup>[2]</sup>。具有价格低廉、毒性小或是没有毒性, 可以直接排放的缓蚀剂备受研究者的青

收稿日期: 2020-10-16

修回日期: 2021-01-11

作者简介: 郝鑫铭(2000—), 女, 本科在读

通信作者: 周晓荣(1977—), 女, 博士研究生, 副教授, email: zxrwhpu@163.com

基金项目: 2020 年校立大学生科研项目; 湖北省自然科学基金项目(2020CFB777)

睐。目前已经有将大蒜、竹叶、柚子皮、薄荷叶等提取物应用于开发绿色缓蚀剂的研究报道<sup>[3-6]</sup>。中国作为传统的产茶大国,产量一直排名世界第一,占40%左右,其中绿茶的比例超过60%。在中国有近20个省份均有产茶工业,湖北省排名第5。恩施州富硒绿茶名列湖北十大名茶排行榜,来源丰富。绿茶有抗氧化、抗衰老的功效,富硒绿茶更被认为是可增强这些功效的精品,且目前尚未有应用于缓蚀剂研究的报道。本研究选择本省出产的富硒绿茶,采用简单的水浸提取法制备用于HCl溶液中碳钢的缓蚀剂,并对其吸附行为和机理进行了分析。

## 1 实验

### 1.1 试剂及仪器

采用茶叶为富硒绿茶(宣恩县宝泰贡茶有限公司)。主要使用的化学试剂有无水乙醇和浓盐酸,均为国产分析纯试剂。配制溶液均使用去离子水。使用Q235型碳钢标准腐蚀试片(腐蚀面积为12 cm<sup>2</sup>)作为测定对象。

主要使用的仪器为:电子天平(AR224CN,奥豪斯仪器有限公司),电热恒温干燥箱(DUG-9147A,上海精宏实验设备有限公司),电化学工作站(CHI604E,上海辰华仪器有限公司),恒温水浴锅(HH-2,江苏省金坛市荣华仪器制造有限公司)。

### 1.2 碳钢腐蚀试片的预处理

先采用600~1000#金相砂纸依次对碳钢片进行打磨。然后,将打磨过的碳钢片分别用蒸馏水、无水乙醇清洗干净,置于玻璃干燥器中干燥2 h,用分析天平称重,记下碳钢片的初始质量( $m_0$ )。最后,将预处理后的碳钢片保存在干燥器中备用。

### 1.3 缓蚀剂的制备

采用水浸提取法。称取5 g干燥富硒绿茶,置于150 mL锥形瓶中,加入100 mL去离子水,密封。浸泡提取24 h,过滤,即得缓蚀剂原始溶液,浓度 $c$ 记为50 g·L<sup>-1</sup>。

### 1.4 腐蚀溶液制备

用缓蚀剂原始溶液和浓盐酸(12 mol·L<sup>-1</sup>)、去离子水配制不同缓蚀剂浓度的腐蚀溶液,盐酸浓度固定为1 mol·L<sup>-1</sup>。

### 1.5 缓蚀效率测试

#### 1.5.1 失重法

恒定在25 ℃,进行全浸没实验,腐蚀时间设定

为24 h。腐蚀后,取出碳钢片,观察并记录碳钢片表面的腐蚀情况,随后用软毛刷去除腐蚀产物,用纯水、乙醇依次清洗,晾干后在干燥器中干燥2 h,进行称重,记录数据,并利用公式(1)进行缓蚀效率计算<sup>[7]</sup>:

$$\eta = \frac{\Delta W_0 - \Delta W}{\Delta W_0} \times 100 \quad (1)$$

式中: $\eta$ 为缓蚀效率,%; $\Delta W_0$ 为不含缓蚀剂的碳钢片的平均失重,mg; $\Delta W$ 为含不同缓蚀剂时的碳钢片的平均失重,mg。

用公式(2)计算碳钢片的腐蚀速率:

$$v' = \frac{\Delta W}{A_s \times t} \quad (2)$$

式中: $v'$ 为含缓蚀剂时碳钢片的腐蚀速率,g·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>; $\Delta W$ 为含缓蚀剂的碳钢片的平均失重,mg; $A_s$ 为碳钢片的腐蚀表面积,m<sup>2</sup>; $t$ 为腐蚀时间,h。当公式(2)中用 $\Delta W_0$ 计算时,得 $v'_0$ ,即不含缓蚀剂时碳钢片的腐蚀速率。

#### 1.5.2 电化学交流阻抗法

恒温25 ℃,预先在三电极电解池中注入适量的腐蚀溶液,以经过预处理的碳钢电极(0.5 cm<sup>2</sup>)作为工作电极,铂片电极为对电极,用饱和甘汞电极为参比电极,进行电化学交流阻抗谱测试。测试开路电位(OCV)直至达到稳态(3 min内电极电位的变化不超过1 mV)。在EIS(Electrochemical Impedance Spectroscopy)模式下,在OCV±5 mV的范围内,0.001~100 kHz之间进行测试。使用Zview软件根据等效电路模型进行拟合,以得到极化电阻值( $R_{ct}$ ),根据公式(3)计算缓蚀效率。

$$IE = \frac{(R_{ct} - R_{ct}^0)}{R_{ct}} \times 100 \quad (3)$$

式中:IE(inhibition efficiency)为缓蚀效率,%; $R_{ct}$ 为加入缓蚀剂后的电荷转移电阻, $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ; $R_{ct}^0$ 为不加入缓蚀剂后的电荷转移电阻, $\Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

#### 1.5.3 极化曲线法

采用恒温25 ℃,在三电极电解池中,以经过预处理的碳钢电极(面积为0.5 cm<sup>2</sup>)作为工作电极,铂片电极作为对电极,用饱和甘汞电极为参比电极,以5 mV·s<sup>-1</sup>的扫描速率对碳钢电极在OCV±200 mV的范围内进行稳态极化曲线测试。用电化学工作站自带软件进行Tafel拟合,得到电化学腐蚀参数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 失重法测试缓蚀效率

在含有不同浓度  $c$  的富硒茶叶提取物(SeTE)的  $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  HCl 溶液中测试了碳钢试片的腐蚀失重,根据公式(1)计算出缓蚀效率( $\eta$ ),如图 1 所示。随着  $c$  的增加,SeTE 的缓蚀效率增大, $c$  为  $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  时的缓蚀效率已经超过 80 %。 $c$  大于  $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  以后,缓蚀效率随浓度的增加的变化率逐步减小。当  $c$  大于  $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  时,缓蚀效率基本不变,维持在 96 % 左右。测试结果表明,SeTE 对 Q235 型碳钢具有优良的缓蚀性能。

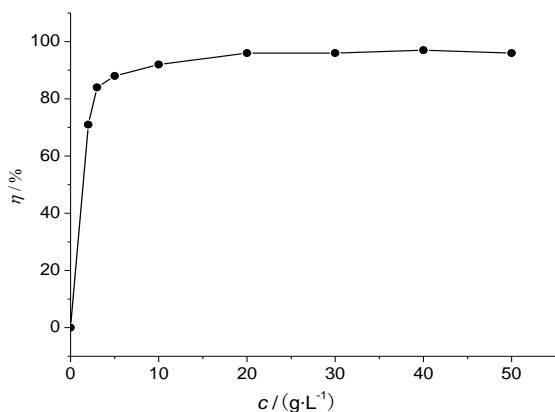


图 1 SeTE 的缓蚀效率与浓度的关系图

Fig.1 The relationship of corrosion inhibition efficiency of SeTE and concentration

### 2.2 SeTE 缓蚀作用的热力学分析

缓蚀剂通常是吸附在金属的表面形成吸附层,从而起到抑制腐蚀的作用。通过对缓蚀剂的吸附行为进行热力学分析,可以获得吸附热力学参数,帮助研究者理解缓蚀规律。目前用于研究缓蚀剂的吸附行为的有 Langmuir、Freundlich、Temkin 三种等温吸附模型。将图 1 中的数据代入这三个公式进行拟合,发现符合 Langmuir 吸附模型<sup>[5]</sup>,如公式(4)所示。

$$\frac{c}{\theta} = \frac{1}{K_{\text{ads}}} + c \quad (4)$$

式中: $c$  为缓蚀剂浓度,  $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $\theta$  为表面覆盖度,按公式(5)计算; $K$  为吸附平衡常数,  $\text{L} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

$$\theta = \frac{\Delta W_0 - \Delta W}{\Delta W_0 - \Delta W_{\text{min}}} \quad (5)$$

式中: $\Delta W_{\text{min}}$  为失重测试中的最小失重, mg; 其余的

同公式(1)。

根据 Langmuir 吸附公式做图 2, 拟合公式为:  $c/\theta = 0.5709 + 0.9902c$ , 线性相关系数  $R$  为 0.9999。斜率为 0.9902, 接近于 1。计算得平衡常数  $K_{\text{ads}}$  为  $1.7262 \text{ L} \cdot \text{g}^{-1}$ 。根据公式  $\Delta G_{\text{ads}} = -2.303RT \lg(55.5K_{\text{ads}})$  计算出该吸附过程的吉布斯自由能变化值  $\Delta G_{\text{ads}}$  为  $-11.306 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ , 其绝对值小于  $20 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ , 表明富硒茶叶提取物在碳钢表面的吸附以物理吸附为主<sup>[5]</sup>, 缓蚀剂组分的分子与碳钢表面原子之间以分子间作用力黏附在一起。

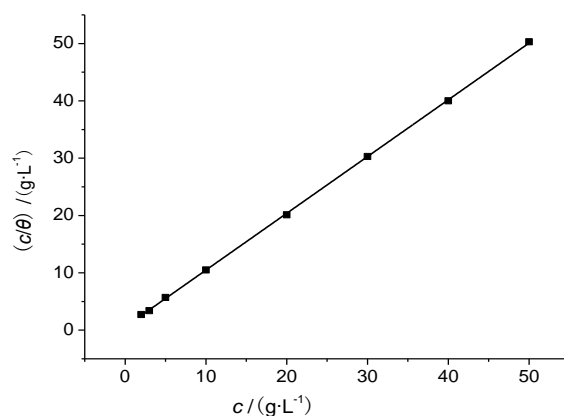


图 2 SeTE 的  $c/\theta$ - $c$  图

Fig.2 The  $c/\theta$ - $c$  relationship of SeTE

### 2.3 温度对 SeTE 缓蚀效率的影响

研究不同温度下缓蚀剂的缓蚀效率,有助于进一步理解缓蚀机理。在  $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  HCl 溶液中和  $c$  为  $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  HCl 溶液中的碳钢腐蚀失重数据如表 1 所示。可以看出,随着温度的升高,茶叶提取物的缓蚀效率降低,在  $55^\circ\text{C}$  ( $328 \text{ K}$ ) 时缓蚀效率降低至 80 % 左右。这表明随着温度的升高,提取物在碳钢表面的吸附量降低,符合物理吸附的规律。表 1 还列出了碳钢的腐蚀速率( $v_0'$ ,  $v'$ )。由表可知,随着温度的升高,碳钢的腐蚀速率增大,但相同温度条件下加入 SeTE 明显降低碳钢在  $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  HCl 溶液中的腐蚀速率。

### 2.4 SeTE 缓蚀作用的动力学分析

根据表 1 中不同温度条件下碳钢的腐蚀速率数据,绘制  $\ln v'$  与  $1000/T$  的关系图,如图 3 所示。图中曲线  $a$  为  $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  HCl 溶液,图中曲线  $b$  为含有 SeTE  $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  HCl 溶液。对图 3 进行线性拟合后,根据方程(6)进一步进行数据处理,通过斜

率( $-E_a/R$ )得到腐蚀反应的活化能动力学参数<sup>[5]</sup>。

$$\ln v' = -\frac{1000}{RT} \cdot E_a + \ln A \quad (6)$$

式中: $v'$ 为碳钢的腐蚀速率, $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ;  $E_a$ 为腐蚀反应活化能, $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ;  $A$ 为指前因子;  $T$ 为开尔文温度, $\text{K}$ ;  $R$ 为气体摩尔常数, $8.314\text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。

表1 碳钢在不含和含有SeTE的 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ HCl}$ 中的腐蚀参数

Tab.1 The corrosion parameters of carbon steel in  $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ HCl}$  with and without SeTE

$T/\text{K}$	$\Delta W_0(1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ HCl})/\text{mg}$	$\Delta W(10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\text{ SeTE}+1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ HCl})/\text{mg}$	$v_0'/(\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$	$v'/(\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$	$\eta/\%$
298	225.1	17.45	9.38	0.73	92.25
308	331.7	27.7	13.82	1.15	91.65
318	601.3	70.5	25.05	2.94	88.28
328	1005.7	199.65	41.90	8.32	80.15

根据图3拟合可得,在 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ HCl}$ 溶液中碳钢腐蚀反应的活化能为 $41.23\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ,在浓度 $c$ 为 $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的含有SeTE的 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ HCl}$ 溶液中碳钢腐蚀反应的活化能为 $66.67\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。表明SeTE吸附在碳钢表面的腐蚀活性位点上,加大了反应速度控制步骤的能垒,降低了腐蚀反应的总速率。

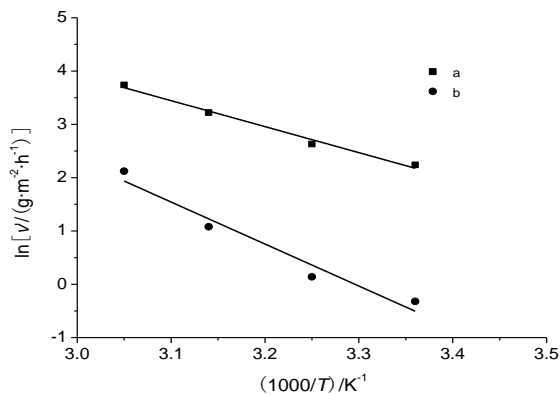


图3 碳钢在不含和含有SeTE的 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ HCl}$ 中的 $\ln v'-(1000/T)$ 图

Fig.3 The  $\ln v'-(1000/T)$  relation of carbon steel in  $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ HCl}$  with and without SeTE

## 2.5 极化曲线法测试SeTE的缓蚀效率

在缓蚀剂的研究中,极化曲线测试也是一种表征缓蚀性能的常用方法。通过对曲线的Tafel极化区进行线性拟合,可以得到腐蚀电化学参数,如自然腐蚀电位( $E_{\text{corr}}$ )、自然腐蚀电流密度( $J_{\text{corr}}$ )、阴极和阳

极Tafel斜率( $b_c, b_a$ )等,计算出缓蚀效率并且分析缓蚀剂类型。在不含和含有SeTE( $c=10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ )的 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ HCl}$ 溶液中测试了稳态极化曲线,如图4所示。图中曲线 $a$ 为 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ HCl}$ 溶液,曲线 $b$ 为SeTE $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ HCl}$ 溶液。从图4拟合所得的腐蚀电化学参数列于表2中。可以看到,含有SeTE的 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ HCl}$ 溶液中,碳钢的自腐蚀电位正移了 $32\text{ mV}$ ,自腐蚀电流密度显著减小,计算所得缓蚀效率约为 $92\%$ ,与失重法测试结果一致。在添加SeTE的HCl溶液中,碳钢腐蚀的阴极和阳极Tafel斜率均发生了明显的变化,说明腐蚀反应的机理发生了变化,SeTE对腐蚀反应的阴极过程和阳极过程均有抑制作用,是一种混合型缓蚀剂<sup>[6]</sup>。

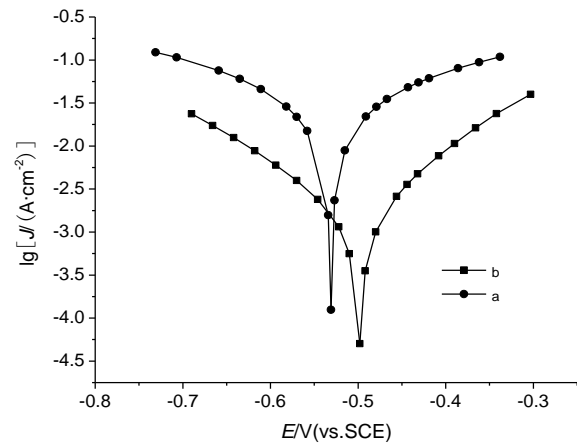


图4 碳钢在不含和含有SeTE的 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ HCl}$ 溶液中的极化曲线

Fig.4 The polarize curves of carbon steel in  $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ HCl}$  with and without SeTE

表2 碳钢在两种溶液中的腐蚀电化学参数

Tab.2 The electrochemical corrosion parameters of carbon steel in two different solutions

腐蚀溶液	$E_{\text{corr}}/\text{mV}$ (vs.SCE)	$J_{\text{corr}}/(\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2})$	$b_a/(\text{mV}\cdot\text{dec}^{-1})$	$b_c/(\text{mV}\cdot\text{dec}^{-1})$
$1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ HCl}$	-531	36.22	379	399
$10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\text{ SeTE}+$ $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ HCl}$	-499	2.794	194	175

## 2.6 电化学阻抗法测试SeTE缓蚀效率

在三电极电解池中测试了不含和含有SeTE( $c=10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ )的 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ HCl}$ 溶液中的电化学阻抗谱,如图5所示。图中曲线 $a$ 为 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ HCl}$ 溶液,曲线 $b$ 为SeTE $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ HCl}$ 溶液。用



Zview 软件对阻抗图谱进行拟合,等效电路如图 5 中的插图所示,拟合所得的电阻值列于表 3 中,其中  $R_s$  为溶液电阻值,  $R_{ct}$  为腐蚀反应极化电阻值。根据公式(3)计算,缓蚀效率约为 95 %,与失重法和极化曲线法测试结果基本一致。阻抗测试结果表明,SeTE 有效地抑制了碳钢与盐酸中的氢离子之间的电化学反应,  $R_{ct}$  值增大,对电子转移步骤有显著的影响,能够起到良好的缓蚀效果。

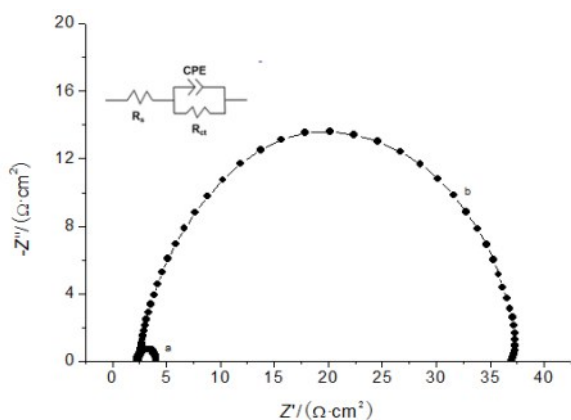


图 5 碳钢在不同腐蚀溶液中的阻抗谱图

Fig.5 The EIS curves of carbon steel in various aggressive solutions

表 3 碳钢在不同腐蚀溶液中的电化学阻抗参数

Tab.3 The EIS parameters of carbon steel in various aggressive solutions

腐蚀溶液	$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$R_{ct}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$
1 mol·L <sup>-1</sup> HCl	2.265	1.785
$c=10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 1 mol·L <sup>-1</sup> HCl	2.491	34.57

### 3 结论

(1)用简单的水浸提取法制备含有 SeTE 的溶液,可用作 1 mol·L<sup>-1</sup> HCl 溶液中碳钢材料的绿色缓蚀剂。在 25 ℃,当  $c$  达到 20 g·L<sup>-1</sup> 时,SeTE 的缓蚀效率达到 96 %。

(2)失重法、极化曲线法和电化学阻抗法测试 SeTE 在  $c$  为 10 g·L<sup>-1</sup> 时的 1 mol·L<sup>-1</sup> HCl 溶液中对碳钢的缓蚀效率,结果均表明,25 ℃ 时其缓蚀效率达到 92 %。

(3)根据吸附热力学和动力学分析可知,本研究中的提取物 SeTE 在碳钢表面主要发生物理吸附,使腐蚀反应的表现活化能增大。根据拟合得到的电化

学腐蚀参数可知,提取物属于混合型缓蚀剂,对腐蚀的阴极和阳极过程均有抑制作用。

### 参考文献

- [1] Zafari S, Sarabi A A, Movassagh B. A novel green corrosion inhibitor based on task-specific benzimidazolium ionic liquid for carbon steel in HCl [J]. Corrosion Engineering Science and Technology, 2020, 55(7): 589-601.
- [2] 冯丽娟, 李法君, 郑兴荣, 等. 绿色植物缓蚀剂的发展与展望[J]. 北方园艺, 2018, (18): 157-164.  
Feng L J, Li F J, Zheng X R, et al. Review on plant extract as green corrosion inhibitor [J]. Northern Horticulture, 2018, (18): 157-164 (in Chinese).
- [3] 龚敏, 蒋伟, 曾宪光, 等. 从大蒜中提取酸洗缓蚀剂[J]. 清洗世界, 2007, 23(8): 1-5.  
Gong M, Jiang W, Zeng X G, et al. Acid corrosion inhibitor picked from garlic [J]. Cleaning World, 2007, 23(8): 1-5 (in Chinese).
- [4] 李向红, 付惠, 王毕辉, 等. 紫竹竹叶提取物作为盐酸中锌的缓蚀剂的研究[J]. 云南化工, 2010, 37(3): 9-12.  
Li X H, Fu H, Wang B H, et al. Phyllostachys Nigra Munro leaves extract as corrosion inhibitor for zinc in hydrochloric acid solution [J]. Yunnan Chemical Technology, 2010, 37(3): 9-12 (in Chinese).
- [5] 胡思行, 和鹏竹, 周晓荣. 柚子皮提取物对热轧碳钢在 HCl 溶液中的缓蚀作用研究[J]. 表面技术, 2012, 41(6): 30-32+87.  
Hu S H, He P Z, Zhou X R. Corrosion inhibition of grapefruit skin extract for hot rolled carbon steel in HCl solution [J]. Surface Technology, 2012, 41(6): 30-32+87 (in Chinese).
- [6] 周晓荣, 田径, 姚小虎, 等. 薄荷叶缓蚀剂对热轧碳钢的缓蚀作用 [J]. 材料保护, 2014, 47(3): 16-19+69.  
Zhou X R, Tian J, Yao X H, et al. Corrosion inhibition performance of extract of mint leaves for hot-rolled carbon steel [J]. Materials Protection, 2014, 47(3): 16-19+69 (in Chinese).
- [7] 刘智超, 王星, 王震, 等. HCl 溶液中吐温-40 对热轧碳钢缓蚀作用的研究 [J]. 电镀与精饰, 2013, 35(9): 1-4+17.  
Liu Z C, Wang X, Wang Z, et al. Corrosion inhibition of Tween-40 on hot rolled carbon steel in hydrochloric acid solution [J]. Plating & Finishing, 2013, 35(9): 1-4+17 (in Chinese).