

# 曼尼希碱缓蚀剂在盐酸中对 N80 钢缓蚀性能

杨秀芳, 唐敏敏, 马养民

(陕西科技大学化学与化工学院 教育部轻化工助剂化学与技术重点实验室, 西安 710021)

**摘 要:** 目的 制备一种新型曼尼希碱缓蚀剂并研究其性能。方法 利用失重法研究缓蚀剂缓蚀效率与缓蚀剂的质量浓度、盐酸质量分数、腐蚀温度、腐蚀时间的关系, 确定缓蚀剂的吸附曲线。通过动电位极化曲线法和交流阻抗法研究缓蚀剂的综合性质。利用扫描电镜观察腐蚀前后 N80 钢片的表面形态。结果 缓蚀剂缓蚀效率随缓蚀剂添加量的增大而增大, 随测试温度的升高而下降, 随盐酸质量分数的升高先增大后减小, 随腐蚀时间的延长先增大后减小。60 °C 时, 在质量分数为 15% 盐酸中浸入 4 h、缓蚀剂添加量在 1.0 g/L 的条件下, 缓蚀剂缓蚀效率为 99.18%, 腐蚀反应的活化能由 56.34 kJ/mol 提高到了 86.54 kJ/mol。缓蚀剂在 N80 钢表面符合 Langmuir 吸附模型, 吸附吉布斯自由能为 -29.94 kJ/mol。极化实验结果显示该缓蚀剂为以阴极抑制为主的混合型缓蚀剂。阻抗谱图显示添加缓蚀剂后, 阻抗明显增大。扫描电镜结果显示缓蚀剂有效抑制了盐酸对 N80 钢片的腐蚀。结论 所制备的缓蚀剂在质量分数为 15% 的盐酸中对 N80 钢片有良好的缓蚀效果。

**关键词:** 缓蚀剂; 曼尼希碱; 吸附; EIS; SEM; 缓蚀效率

**中图分类号:** TG174 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)01-0175-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.01.028

## Mannich Base as Corrosion Inhibitor for N80 Steel in HCl Solution

YANG Xiu-fang, TANG Min-min, MA Yang-min

(Key Laboratory of Auxiliary Chemistry & Technology for Chemical Industry, Ministry of Education, College of Chemistry and Chemical Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

**ABSTRACT:** The work aims to prepare a novel Mannich base inhibitor and study its performance. The relationship among corrosion efficiency of corrosion inhibitor and mass concentration of corrosion inhibitor, mass fraction of hydrochloric acid, corrosion temperature and corrosion duration was studied by weight loss method. Adsorption curve of the corrosion inhibitor was verified. Comprehensive properties of the corrosion inhibitor were studied by electrochemical impedance spectroscopy and scanning electron microscopy. The surface morphology of N80 sheet steel was observed by SEM. Efficiency of the inhibitor increased as addition of the inhibitor increased, decreased as temperature increased, increased firstly and then decreased as the HCl concentration and corrosion time increased. At 60 °C, the efficiency of corrosion inhibitor was 99.18 % provided that it was immersed in 15% HCl for 4 h and 1.0 g/L of inhibitor was added. The activation energy of corrosion reaction increased from 56.34 kJ/mol to 86.54 kJ/mol. The adsorption of inhibitor on N80 steel surface followed the Langmuir adsorption isotherm model. -29.94 kJ/mol of Gibbs free energy was absorbed. The obtained results of polarization experiment indicated that the inhibitor acted as a mixed-type inhibitor mainly featuring in cathodal depression. The SEM observations showed that the corrosion

收稿日期: 2016-07-15; 修订日期: 2016-12-16

Received: 2016-07-15; Revised: 2016-12-16

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室项目 (15JS012)

Fund: Supported by Key Laboratory of Shaanxi Province Education Department(15JS012)

作者简介: 杨秀芳 (1963—), 女, 教授, 主要研究方向为助剂化学。

Biography: YANG Xiu-fang(1963—), Female, Professor, Research focus: natural product chemistry.

inhibitor can inhibit corrosion of N80 sheet steel effectively. The inhibitor prepared provides good corrosion inhibition effects for N80 sheet steel in 15% HCl solution.

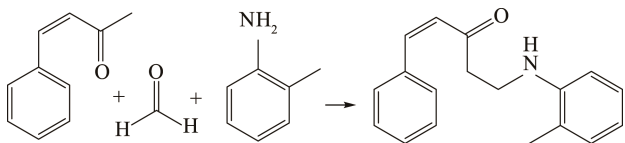
**KEY WORDS:** corrosion inhibitor; Mannich base; adsorption; EIS; SEM; corrosion inhibition efficiency

金属的腐蚀问题已经成为一个重大的社会问题, 不仅造成了大量的经济损失, 更带来了巨大的安全隐患<sup>[1-3]</sup>。添加缓蚀剂法具有设备简单、操作灵活、使用方便、用量小、效率高等特点, 被广泛使用<sup>[4-6]</sup>, 大部分性能优良的缓蚀剂都含有氮、氧、硫、磷、芳香环及含氮的杂环<sup>[7]</sup>。曼尼希碱中含有氮、氧等杂原子和不饱和键, 研究表明曼尼希碱具有良好的缓蚀效果<sup>[8-10]</sup>, 是一种典型的吸附型缓蚀剂<sup>[11]</sup>。目前所使用的缓蚀剂大都具有使用量大, 适用温度低, 制备过程复杂、条件苛刻的缺点。文中采用一锅法在较为温和的条件下制备了一种新型高效的曼尼希碱缓蚀剂, 研究其综合性能。

## 1 实验

### 1.1 曼尼希碱缓蚀剂的制备

将甲醛、邻甲苯胺、苯叉丙酮按物质的量为 1.2:1:1 的比例依次加入反应容器, 升温至 60 ℃, 回流反应 5 h, 得到棕红色透明液体, 制备曼尼希碱缓蚀剂<sup>[12-13]</sup>。反应方程式如下:



### 1.2 性能测试

#### 1.2.1 失重测试

在 60 ℃下, 将 N80 钢片(40 mm×13 mm×2 mm), 依次在 400#, 800#, 1500# 砂纸上逐级打磨, 经过丙酮、无水乙醇清洗后, 干燥备用。N80 钢片中, C, Si, Mn, P, S, Al, Cr, Ni, V 的质量分数分别为 0.32%, 0.30%, 1.65%, 0.2%, 0.09%, 0.02%, 0.15%, 0.012%, 0.12%。失重测量前准确称量试片(精确至 0.0001 g), 将试片置于含有不同质量浓度缓蚀剂的质量分数为 15% 的 HCl 溶液中, 浸泡 4 h。将钢片取出, 用丙酮、无水乙醇反复清洗, 精确称量, 并按以下公式计算腐蚀速率和缓蚀效率:

$$v = \frac{\Delta m}{st} \quad (1)$$

式中:  $S$  为试片表面积 ( $\text{m}^2$ );  $t$  为腐蚀时间 ( $\text{h}$ );  $\Delta m$  为腐蚀前后质量差 ( $\text{g}$ )。

$$\eta = \frac{v_0 - v_1}{v_0} \quad (2)$$

式中:  $v_0$ ,  $v_1$  分别为空白溶液和添加缓蚀剂的溶液中钢片的腐蚀速率 ( $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ );  $\eta$  为缓蚀效率。

#### 1.2.2 电化学测试

在 25 ℃下, 实验采用三电极体系, N80 钢片为工作电极 (13 mm×8 mm)、铂电极 (10 mm×10 mm) 为对电极, 饱和甘汞电极为参比电极。测试前将工作电极浸泡在腐蚀液中, 测量开路电位, 当测得的路点变化在 5 min 内小于 2 mV 时, 认为体系达到稳定状态。动电位极化曲线扫描电位范围为 -250 ~ 250 mV (相对开路电位) 扫描速度为 1 mV/s。交流阻抗谱测试的扰动电位为 5 mV, 频率范围设定为 0.1 ~ 100 000 Hz。

#### 1.2.3 扫描电镜实验

试样前处理步骤与失重实验一致, 将 N80 (40 mm×13 mm×2 mm) 钢片在腐蚀液中浸泡 1 h 后, 无水乙醇冲洗干燥, 进行 SEM 测试。

## 2 结果与讨论

### 2.1 失重分析

#### 2.1.1 腐蚀温度的影响

缓蚀剂在金属表面吸附过程中, 温度是一个非常重要的动力学参数。为了研究温度对缓蚀剂缓蚀效率的影响, 在 40 ℃到 80 ℃之间, 以 10 ℃为梯度设置实验。在缓蚀剂质量浓度为 3 g/L、浸入时间为 4 h、盐酸质量分数为 15% 条件下, 测试温度对缓蚀效率及腐蚀速率的影响见图 1。从图 1 看出, 测试温度在 40 ~ 60 ℃时, 缓蚀剂缓蚀效率在 99% 以上, 当温度大于 60 ℃时缓蚀效率明显下降, 当温度在大于 70 ℃时, 缓蚀剂效率低于 99%。这是由于在 40 ~ 60 ℃之间时, 虽然随温度的升高腐蚀反应速率增大, 但是缓蚀剂的吸附能力也在增大, 且缓蚀剂吸附能力增大占据主要因素。当温度大于 60 ℃时, 腐蚀反应速率急速增大, 大量的金属离子在金属表面生成, 加速进入溶液中。使缓蚀剂分子难以在金属表面形成稳定吸附膜, 腐蚀速率加快, 这使得 60 ℃后缓蚀效率明显下降。

根据阿伦尼乌斯公式, 腐蚀速率的自然对数

( $\ln v$ ) 与  $1/T$  成如下关系<sup>[14]</sup>:

$$\ln v = \frac{-E_a}{RT} + \ln A \quad (3)$$

式中:  $v$  为腐蚀速率 [ $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ];  $E_a$  为活化能 ( $\text{kJ}/\text{mol}$ );  $T$  为温度 ( $\text{K}$ );  $A$  为指前因子。

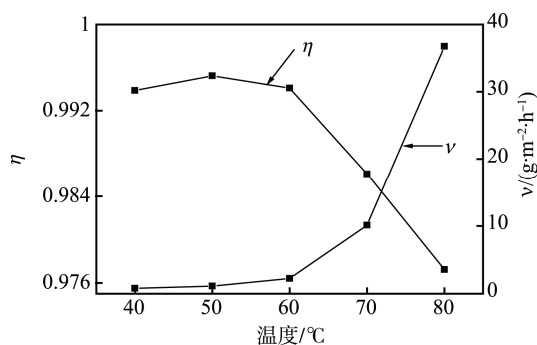


图 1 温度对缓蚀效率及腐蚀速率的影响

Fig.1 Effect of temperature on inhibition efficiency and rate

阿伦尼乌斯的线性拟合见图 2, 由图 2 可知, 添加缓蚀剂后, 金属腐蚀速率大大降低, 且直线斜率略有增加, 这是由于缓蚀剂在金属表面的吸附也受到温度的影响。

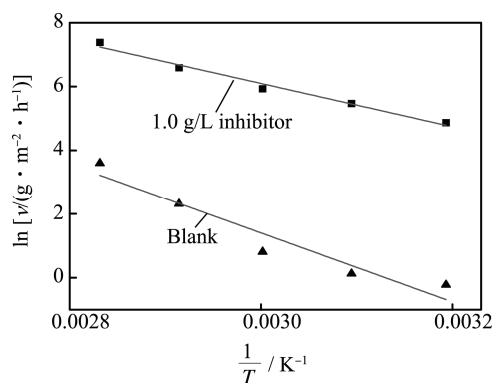


图 2 阿伦尼乌斯的线性拟合

Fig.2 Arrhenius plots and transition state plots

当不添加缓蚀剂时, 线性相关系数为 0.9790,  $E_a$  为 56.34  $\text{kJ}/\text{mol}$ , 当添加的缓蚀剂浓度为 1.0  $\text{g}/\text{L}$  时, 线性相关系数为 0.9109,  $E_a$  为 86.54  $\text{kJ}/\text{mol}$ 。由此看出, 所有的线性相关系数都在 0.9 以上, 添加了缓蚀剂后,  $E_a$  数值明显增大, 这是由于缓蚀剂分子在 N80 钢片表面吸附, 提高了腐蚀反应的活化能, 进而抑制了介质对金属的腐蚀。

### 2.1.2 腐蚀时间的影响

缓蚀效率随时间的变化是评价缓蚀剂吸附稳定性的另一个重要因素。为研究腐蚀速率随浸入时间的变化, 缓蚀剂质量浓度为 1.0  $\text{g}/\text{L}$ 、盐酸质量分数为 15%、测试温度为 60  $^{\circ}\text{C}$  条件下, 在浸入时间为 0.5 ~ 16 h 间设置实验。缓蚀剂缓蚀效率随时间的变化趋势见图 3。从图 3 可以看出, 腐蚀时间在 0.5 ~ 16 h 之间时, 缓蚀剂缓蚀效率都在 98% 以上。当浸入时间在

0 ~ 7 h 时, 缓蚀效率随浸入时间的延长而增大, 在浸入时间为 7 h 时, 缓蚀效率达到最大, 浸入时间超过 7 h 时, 缓蚀效率反而随着时间的延长迅速下降。这是由于随着时间的延长, 溶液中  $\text{Fe}^{3+}$  的浓度增大, 会加快金属表面的氧化过程, 形成循环, 进一步加快腐蚀速率<sup>[15]</sup>。

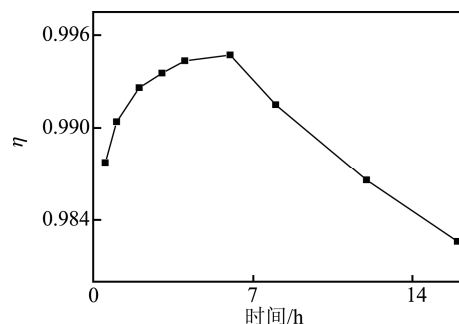


图 3 缓蚀效率与浸入时间的关系

Fig.3 Relationship between inhibition efficiency and immersion time

### 2.1.3 HCl 浓度的影响

盐酸的质量分数对腐蚀速率有着明显的影响, 进而会影响到缓蚀剂的缓蚀效率。为了研究盐酸的质量分数对缓蚀效率的影响。在缓蚀剂质量浓度为 1.0  $\text{g}/\text{L}$ , 浸入时间为 4 h, 腐蚀温度为 60  $^{\circ}\text{C}$  条件下, 在盐酸质量分数为 5% ~ 20% 间, 设置实验。缓蚀效率与盐酸质量分数的关系结果见图 4, 由图 4 可知, 在盐酸质量分数为 5% ~ 15% 时, 缓蚀效率逐渐升高, 盐酸质量分数大于 15% 时缓蚀效率下降。

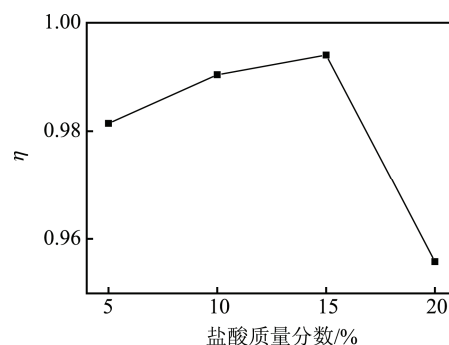


图 4 缓蚀效率与盐酸质量分数的关系

Fig.4 Relationship between concentration of HCl and inhibition efficiency

为了定量研究盐酸浓度对腐蚀速率的影响, 假设腐蚀速率和盐酸浓度符合如下表达式<sup>[16]</sup>:

$$\ln v = \ln k + Bc \quad (4)$$

式中:  $c$  为缓蚀剂浓度 ( $\text{g}/\text{L}$ );  $B$  为反应常数。

不同情况下  $\ln v$  与盐酸质量分数的关系见图 5。从图 5 可以看出, 不添加缓蚀剂时  $\ln v$  与盐酸的质量分数成线性关系, 在缓蚀剂添加量为 1.0  $\text{g}/\text{L}$ , 盐酸质量分数在 5% ~ 15% 之间时,  $\ln v$  与盐酸质量分数成线性关系, 而且在  $a-b$  段斜率低于不加缓蚀剂直线的斜

率,这是由于随着盐酸质量分数的增加,曼尼希碱在盐酸溶液中的分散度增加,使缓蚀剂易于在金属表面吸附,这与图4的结果一致。在盐酸质量分数大于15%时,腐蚀速率迅速加快,线性相关度下降,这是由于随着腐蚀速率的加快,金属离子在金属表面生成的速度加快,进而加快了金属离子向溶液中扩散的速度,使缓蚀剂分子在金属表面难以形成完整吸附膜,导致腐蚀速率快速升高,缓蚀效率下降。

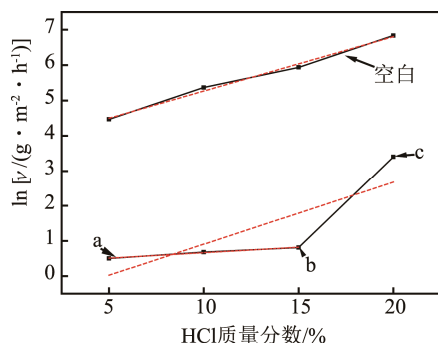


图5 HCl质量分数与腐蚀速率的关系

Fig.5 Relationship between concentration of HCl and  $\ln v$

### 2.1.4 缓蚀剂质量浓度的影响

在60℃下,质量分数为15%的HCl溶液中,N80钢片缓蚀剂浓度和缓蚀效率见图6。从图6可知,所制备的曼尼希碱缓蚀剂能显著的抑制盐酸对N80钢片的腐蚀,且随着缓蚀剂质量浓度的增大,缓蚀效率逐渐升高,在缓蚀剂质量浓度增大到4.0 g/L后,继续增加缓蚀剂浓度,缓蚀效率基本不变。在缓蚀剂质量浓度为4.0 g/L时,缓蚀效率为99.49%。而且在缓蚀剂质量浓度为1.0 g/L时,缓蚀剂效率就已经达到99.18%。

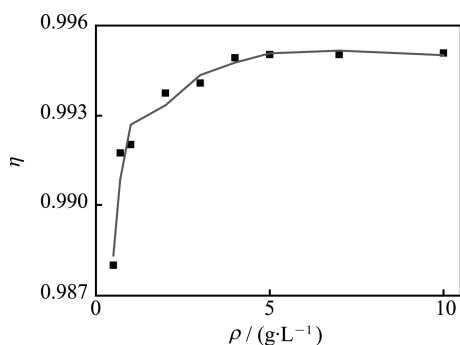


图6 缓蚀剂质量浓度与缓蚀效率的关系曲线

Fig.6 Relationship between the concentration of inhibitor and inhibitive efficiency

### 2.1.5 吸附等温线

吸附等温线可以提供缓蚀剂在金属表面吸附的基本信息。采用了多种吸附模型(Frumkin, Langmuir, Temkin, Freundlich, Bockris-Swinkels and Flory Huggins)来拟合实验数据。结果发现所制备的缓蚀剂在金属表面的吸附符合Langmuir吸附模型<sup>[17]</sup>:

$$\frac{\rho}{\theta} = \frac{1}{k} + \rho \quad (5)$$

式中:  $\rho$  是缓蚀剂的浓度(g/L);  $K$  是吸附速率常数(L/g);  $\theta$  是通过  $\eta$  计算出的表面覆盖率。

$\rho/\theta$  和  $\rho$  的关系直线见图7,相应的回归关系参数与阿伦尼乌斯的线性拟合的参数一致。线性相关系数  $r$  和斜率都与1非常接近。表明缓蚀剂在金属表面的吸附符合Langmuir吸附模型,为典型的单分子层吸附。

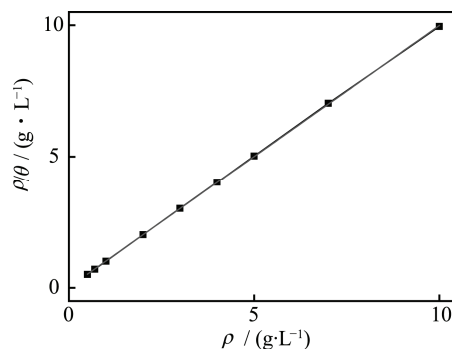


图7  $\rho$ 与 $\rho/\theta$ 的关系

Fig.7 Relationship between  $\rho$  and  $\rho/\theta$

吸附平衡常数与标准吸附自由能符合下面关系:

$$K = \frac{1}{1000} \exp\left(\frac{-\Delta G^0}{RT}\right) \quad (6)$$

式中:  $K$  为吸附平衡常数;  $\Delta G^0$  吉布斯自由能。

当温度为333.15 K时,线性相关系数为0.99,斜率为0.99,  $K$  为49.46 L/g,  $\Delta G^0$  为-29.94 kJ/mol,由于  $\Delta G^0$  为负值,说明缓蚀剂在金属表面的吸附是自发性的。

## 2.2 电化学测试

### 2.2.1 极化曲线

在质量分数为15%的盐酸溶液中添加不同浓度的缓蚀剂,其极化曲线见图8,相应的参数如腐蚀电位( $E_{\text{corr}}$ )和腐蚀电流密度( $J_{\text{corr}}$ )。从图8看出,加入缓蚀剂后,阴极和阳极极化曲线均向电流密度减小的方向移动,证明缓蚀剂对阴极析氢和阳极金属溶解反应均有抑制作用,由于阴极极化曲线基本平行,说明加入缓蚀剂后阴极反应机理并未改变,而且此过程是由活化能控制的。在阳极区,曲线的斜率较大,且曲线极化电位在-0.35 V附近时,曲线的斜率明显增大,这可能是由于随着极化电位的增大,使金属试片周围的电场加强,加快了试片表面的金属离子进入溶液中的速度,从而使缓蚀剂在金属表面的吸附速率小于其的脱附速率,导致钢片的进一步溶解。

当腐蚀电位差值大于85 mV时,为阴极型或阳极型缓蚀剂。当腐蚀电位差值小于85 mV时为混合型缓蚀剂<sup>[18]</sup>。动电位极化曲线参数见表1,由表1可



以看出,添加缓蚀剂前后腐蚀电位变化均小于 85 mV,且腐蚀电位向阴极方向移动,故所制备的缓蚀剂为以阴极抑制为主的混合型缓蚀剂。

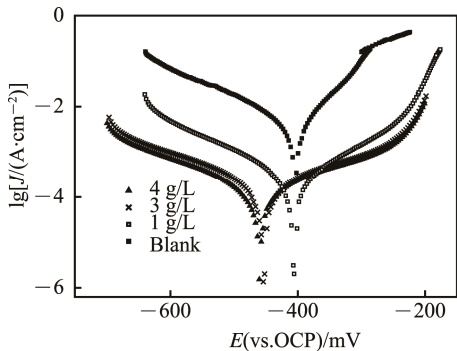


图 8 动电位极化曲线  
Fig.8 Potentiodynamic polarization curves

表 1 动电位极化曲线参数

Tab.1 Potentiodynamic polarization parameters

缓蚀剂质量浓度/(g·L <sup>-1</sup> )	$E_{\text{corr}}/\text{mV}$	$J_{\text{corr}}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$
Blank	-402.1	219
1	-406.7	2.01
2	-454.2	1.54
4	-460.4	1.35

2.2.2 交流阻抗谱分析

在质量分数为 15%的盐酸溶液中添加不同浓度的缓蚀剂,其电化学阻抗谱见图 9。在不同缓蚀剂浓度下的 Nyquist 曲线均表现为单一的容抗弧,该容抗弧以半椭圆形式存在,而不是理想的半圆结构,这可能与缓蚀剂分子在界面的吸附行为及 N80 钢片电极的物理化学性质有关<sup>[19]</sup>。容抗弧的大小反映了腐蚀反应所受到的阻力的的大小,弧的半径随着缓蚀剂添加量的增大而增大,说明随着缓蚀剂添加量的增大,腐蚀反应的阻力在加大。结合系统环境和谱图特征,空白溶液阻抗谱图拟合的等效电路见图 10a,添加缓蚀剂系统见图 10b,其中  $R_s$  为溶液电阻,  $R_{\text{ct}}$  为电荷转移电阻,  $R_f$  为电荷迁移电阻, CPE 为常相角元件。

根据由 Zsimpwin 拟合得到的  $C_{\text{dl}}$ ,  $Y_0$  及  $n$ ,由式(7)计算  $C_{\text{dl}}$ :

$$C_{\text{dl}} = (Y_0 R_{\text{ct}}^{1-n})^{1/n} \tag{7}$$

式中:  $Y_0$  为指数因子;  $n$  为弥散系数;  $C_{\text{dl}}$  为界面双电层电容;  $R_{\text{ct}}$  为电荷转移电阻。相关参数见表 2。

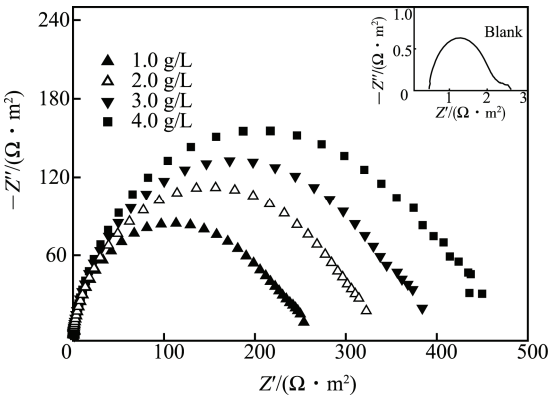


图 9 电化学阻抗谱  
Fig.9 Electrochemical impedance spectroscopy

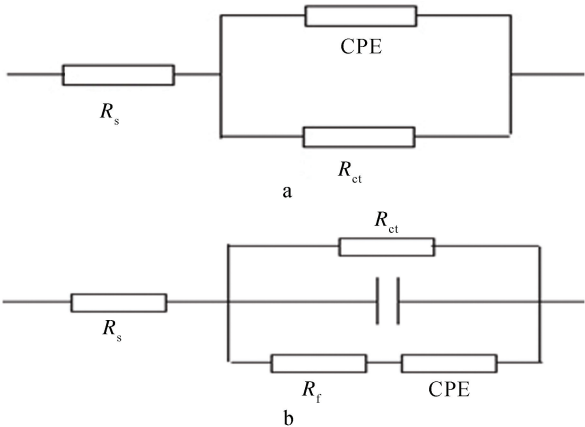


图 10 等效电路  
Fig.10 Equivalent circuit model

由表 2 可知,随着缓蚀剂添加量的增大  $R_{\text{ct}}$  逐渐变大,表明缓蚀剂分子在金属表面形成的吸附膜更加完整致密,  $C$  及  $C_{\text{dl}}$  逐渐减小是由于介电常数较小的缓蚀剂分子取代了介电常数大的水分子,使其容量变小。在添加缓蚀剂后,  $n$  明显增大这可能是由于添加缓蚀剂后,缓蚀速率大大降低使得表面粗糙度减小的结果。缓蚀剂浓度不同时  $n$  的变化不大,这是腐蚀作

表 2 Nyquist 图拟合后得到的电化学参数

Tab.2 Electrochemical parameters obtained from Nyquist plots

$\rho/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$R_s/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$	$R_{\text{ct}}/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$	$C/(\mu\text{F}\cdot\text{cm}^{-2})$	$R_f/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$	CPE		$C_{\text{dl}}/(\mu\text{F}\cdot\text{cm}^{-2})$	$\chi^2$
					$Y_0/(\times 10^5 \text{S}^n\cdot\Omega\cdot\text{cm}^{-2})$	$n$		
Blank	0.364	1.892	—	—	173.3	0.678	2713.8	$3.41\times 10^{-3}$
1	0.9017	247	60.71	3.19	28.17	0.741	620.6	$1.604\times 10^{-3}$
2	0.1665	324.5	55.8	3.38	25.82	0.744	577.9	$1.31\times 10^{-2}$
3	0.181	383.3	54.9	5.88	23.41	0.742	554.5	$1.52\times 10^{-2}$
4	0.859	455.5	28.43	4.25	15.91	0.746	328.1	$1.02\times 10^{-3}$

用使试片表面粗糙和缓蚀剂分子在表面吸附使试片表面光滑 2 种作用共同的结果。

### 2.3 扫描电镜实验

腐蚀前后 N80 钢片表面扫描电镜见图 11。图 11a 中, 试样打磨后, 表面较为平整, 有打磨过的痕迹;

图 11d 中, 在未添加缓蚀剂的 HCl (15%) 溶液中浸泡 1 h 后, 钢片严重腐蚀, 表面形貌完全消失; 图 11b 和图 11c 中, 钢片表面有腐蚀痕迹, 且腐蚀沿着钢片表面凹槽。这是由于静电作用, 金属表面凸起处电子富集, 易于发生阴极析氢反应, 阳极溶解反应主要发生在凹处。

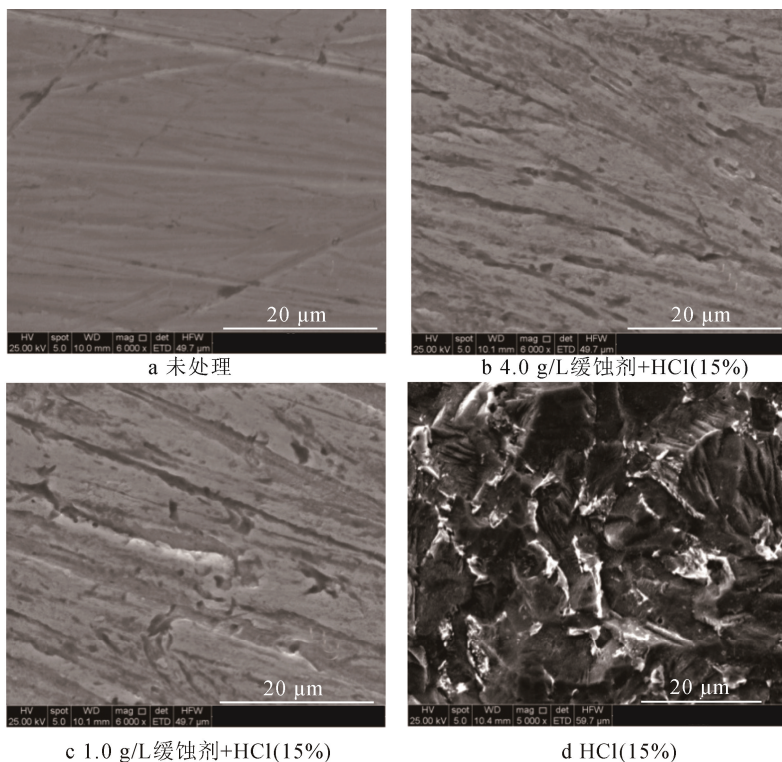


图 11 N80 钢片表面腐蚀形貌

Fig.11 Comparison of corrosion micrographs of carbon steel

## 3 结论

所制备的缓蚀剂是一种以阴极抑制为主的混合型缓蚀剂, 在金属表面吸附符合 Langmuir 吸附模型, 在 60 ℃, 添加量为 1.0 g/L, 盐酸质量分数为 15% 时, 缓蚀效率达到 99.18%, 有效的抑制了 N80 钢片的腐蚀。

#### 参考文献:

- [1] 彭玉田. 铝合金铬酸盐黄色转化膜[J]. 电镀与保护, 2008, 28(4): 44—45.  
PENG Yu-tian. Golden Yellow Chromate Conversion Coating of Aluminum Alloy[J]. Plating and Protection, 2008, 28(4): 44—45.
- [2] 宋阳, 牛守忠. 管道内腐蚀及控制方法[C]//中国国际腐蚀控制大会论文集, 2002.  
SONG Yang, NIU Shou-zhong. Corrosion and Controlling in Pipeline[C]//The Preceedings of International Corrosion Control Conference in China, 2002.
- [3] 李晓光, 钟飞. 管道外防腐卷材自动缠绕机的设计[J]. 包装工程, 2015, 36(1): 89—93.  
LI Xiao-guang, ZHONG Fei. Design of Automation Winding Machine for Anti-corrosion Coil on the External Surface of Pipeline[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(1): 89—93.
- [4] TRABANELLI G. Inhibitors-an Old Remedy for a New Challenge[J]. Corrosion, 1991, 47: 410—419.
- [5] 阚伟海, 陈莉荣, 姜庆宏, 等. 复合缓蚀剂对碳钢腐蚀率的影响研究[J]. 表面技术, 2014, 43(4): 127—131.  
KAN Wei-hai, CHEN Li-rong, JIANG Qing-hong, et al. Study on Effects of Composite Corrosion Inhibitor on the Corrosion Rate of Carbon Steel[J]. Surface Technology, 2014, 43(4): 127—131.
- [6] ALI S A, SAEED M T, RAHMAN S U. The Isoxazolidines: a New Class of Corrosion Inhibitors of Mild Steel in Acidic Medium[J]. Corrosion Science, 2003, 45: 253—266.
- [7] 曹毅, 芮玉兰, 黄开宏. HCl 溶液中氨基酸复合缓蚀剂对碳钢的缓蚀作用[J]. 表面技术, 2011, 40(5): 13—17.

- CAO Yi, RUI Yu-lan, HUANG Kai-hong. Inhibition Performances of Compound of Amino Acid Inhibitors for Carbon Steel in HCl Solution[J]. Surface Technology, 2011, 40(5): 13—17.
- [8] ELEWADY G Y, MOTAF A H. Ketonic Secondary Mannich Base as Corrosion Inhibitors for Aluminium[J]. Desalination, 2009, 247: 573—582.
- [9] AHAMAD I, PRASAD R, QURAISHI M A. Adsorption and Inhibitive Properties of Some New Mannich Base of Isatin Derivatives On Corrosion of Mild Steel in Acidic Media[J]. Corrosion Science, 2010, 52(4): 1472—1481.
- [10] 罗滕, 马喜平, 韩洁, 等. 新型曼尼希碱缓蚀剂 HBBJ-1 的研制[J]. 应用化工, 2010, 39(12): 1897—1904.
- LUO Ying, MA Xi-ping, HAN Jie, et al. Research on New Mannich Base Corrosion Inhibitor HBBJ-1[J]. Applied Chemical Industry, 2010, 39(12): 1897—1904.
- [11] 李克华, 陈洁, 王任芳, 等. 曼尼希碱缓蚀剂 CJ 的合成及其性能[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(11): 1113—1115.
- LI Ke-hua, CHEN Jie, WANG Ren-fang, et al. Synthesis and Properties of CJ Mannich Base as a Corrosion Inhibitor[J]. Corrosion & Protection, 2014, 35(11): 1113—1115.
- [12] 王招娣, 司云森, 于强, 等. 酸性介质中曼尼希碱与 KCl 复配对 A3 钢的缓蚀性能研究[J]. 表面技术, 2010, 39(6): 44—50.
- WANG Zhao-di, SI Yun-sen, YU Qiang, et al. The Inhibitive Effect of a Mannich Corrosion Inhibitor and KCl Formulation on the Corrosion of A3 Steel in Acid Medium[J]. Surface Technology, 2010, 39(6): 44—50.
- [13] FERREIRA E S, GIACOMELLI F C, SPINELLI A. Evaluation of the Inhibitor Effect of Lascorbic Acid on the Corrosion of Mild Steel[J]. Materials Chemistry and Physics, 2004, 83(1): 129—134.
- [14] LI Xiang-hong, DENG Shu-duan, FU Hui. Inhibition of the Corrosion of Steel in HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Solutions by Bamboo Leaf Extract[J]. Corrosion Science, 2012, 62: 163—175.
- [15] 肖茜, 吕战鹏, 陈俊劫, 等. 三价铁离子对低合金钢在硼酸溶液中腐蚀的影响[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(9): 840—845.
- XIAO Qian, LYU Zhan-peng, CHEN Jun-jie, et al. Influence of Ferric Ions on Corrosion Behavior of A508III Low Steel in Boric Acid Solution[J]. Corrosion & Protection, 2015, 36(2): 840—845.
- [16] CANO E, POLO J L, IGLESIA A L, et al. A Study on the Adsorption of Benzotriazole on Copper in Hydrochloric Acid Using the Inflection Point of the Isotherm[J]. Adsorption, 2004, 10: 219—225.
- [17] LI Xiang-hong, XIE Xiao-guang. Inhibition Effect of Pyrimidine Derivatives on the Corrosion of Steel in Hydrochloric Acid Solution[J]. Wuli Huaxue Xuebao, 2013, 29: 1221—1231.
- [18] CHANDRA B V, QURAISHI M A, AMBRISH S. 2-Aminobenzene-1,3-Dicarbonitriles as Green Corrosion Inhibitor for Mild Steel in 1 M HCl: Electrochemical, Thermodynamic, Surface and Quantum Chemical Investigation[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2015, 229—239.
- [19] 曾敏, 陈小红, 曹彪, 等. 一种微弧氧化逆变焊接电源控制系统[J]. 华南理工大学学报, 2009, 37(2): 40—43.
- ZENG Min, CHEN Xiao-hong, CAO Biao, et al. Control System of Micro-arc Oxidation Inverter Power Supply[J]. Journal of South China University of Technology, 2009, 37(2): 40—43.