

多吸附位点席夫碱缓蚀剂的合成及缓蚀效果

何毅^{1,2,3}, 周艳秋^{2,3}, 杨冉冉^{2,3}, 李玉彬^{2,3}, 王万清^{2,3}, 欧阳月^{2,3}, 裴璇^{2,3}

(1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室西南石油大学, 四川 成都 610500;

2. 西南石油大学化学化工学院, 四川 成都 610500;

3. 油气田应用化学省重点实验室, 四川 成都 610500)

摘要:以4-三氟甲基苯甲醛与乙二胺为原料,经 Schiff 反应合成了席夫碱化合物(BEA),反应条件:反应温度为 65℃, $n(\text{乙二胺}):n(\text{4-三氟甲基苯甲醛})=5:1$,反应时间为 6 h;BEA 与均苯三甲酰氯经酰胺化反应合成了多吸附位点席夫碱缓蚀剂(BTA),反应条件:反应温度为 50℃, $n(\text{BEA}):n(\text{均苯三甲酰氯})=3.3:1$,反应时间为 8 h。采用静态挂片失重法、电化学法和扫描电子显微镜(SEM)研究 BEA 和 BTA 对 P110 钢在 1 mol/L 盐酸中的缓蚀性能。失重法研究表明,当缓蚀剂质量浓度为 200 mg/L 时,BTA 缓蚀率达 99.39%,BEA 的缓蚀率仅 94.29%;等温吸附行为研究结果表明,缓蚀剂分子能自发地吸附于 P110 钢表面,满足 Langmuir 吸附模型;电化学法研究结果表明,BTA 属于阳极控制型,在金属表面形成保护膜,能有效抑制金属腐蚀。因此,多吸附位点缓蚀剂 BTA 缓蚀性能优于 BEA。

关键词:席夫碱;缓蚀剂;静态挂片失重;电化学;SEM

中图分类号: TG174.42

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2016)03-0062-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2016.03.015

Synthesis and performance evaluation of a new type of Schiff base corrosion inhibitor with multiple reaction centers for P110 steel

HE Yi^{1,2,3}, ZHOU Yan-qiu^{2,3}, YANG Ran-ran^{2,3}, LI Yu-bin^{2,3}, WANG Wan-qing^{2,3},
OU Yang-yue^{2,3}, PEI Xuan^{2,3}

(1. State Key Lab of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 3. Oil & Gas Field Applied Chemistry Key Laboratory of Sichuan Province, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: BEA is prepared from 4-(trifluoromethyl) benzaldehyde and ethanediamine through Schiff reaction at 65℃ for 6 hours with 5:1 molar ratio of ethanediamine and 4-(trifluoromethyl) benzaldehyde. Then, BEA and 1,3,5-benzenetricarbonyl trichloride are used to synthesize a new corrosion inhibitor with multiple reaction centers, named as BTA, at 50℃ for 8 hours with 3.3:1 molar ratio of BEA and 1,3,5-benzenetricarbonyl trichloride. Weight loss method, potentiodynamic polarization curves, electrochemical impedance spectroscopy and scanning electron microscopy (SEM) are used to study the inhibition performance of BTA for P110 steel in 1.0 mol/L HCl. The results of weight loss method show that BTA has more excellent inhibition efficiency than BEA. When the concentration is 200 mg/L, the inhibition efficiency can reach 99.39%, while BEA is only 94.29%. The isothermal adsorption result demonstrates that BTA molecules can spontaneously be adsorbed on P110 steel surface and the adsorption process follows Langmuir adsorption model. The results of electrochemical method indicate that BTA is an anodic type inhibitor, which can form protective layers on P110 steel surface and effectively inhibit its corrosion. All the results show that BTA is superior to BEA.

Key words: Schiff base; corrosion inhibitor; weight loss; electrochemistry; SEM

席夫碱是 1864 年 Schiff 首先合成并提出的,因其含有富电子的芳香环或电负性较大的 N 原子,属于 sp^2 杂化,具有孤对电子,通过配位键与金属离子形成稳定的配合物^[1-2],故有较好的缓蚀性能。

近年研究表明,多吸附位点缓蚀剂能更牢固地吸附于金属表面^[3-4],有效抑制金属腐蚀;故研究新颖的多吸附位点缓蚀剂很重要。

笔者合成了一种新型多吸附位点席夫碱缓蚀剂,经静态挂片失重法、电化学法和 SEM 评价了该

缓蚀剂对 P110 钢在 1 mol/L 盐酸中抗腐蚀的影响。

1 实验部分

1.1 主要仪器和试剂

主要仪器: ABJ220-4M 电子天平,济南隆润电源设备有限公司生产; DZF-6020 真空干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司生产; 旋蒸蒸发器,巩义市英峪高科仪器厂生产; HH-4 数显恒温水浴锅,常州丹瑞实验仪器设备有限公司生产; CS310 电化学工作

站,武汉科思特仪器有限公司生产;JSM-7500F型扫描电子显微镜,日本电子生产。

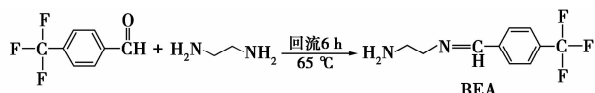
主要试剂:乙二胺、 K_2CO_3 、浓盐酸、无水乙醇、丙酮、石油醚,分析纯,均为成都市科龙化学试剂厂生产;4-三氟甲基苯甲醛、均苯三甲酰氯,分析纯,均为上海阿拉丁生化科技股份有限公司生产。

1.2 多吸附位点缓蚀剂的合成

1.2.1 BEA的合成

在装有回流冷凝管、温度计和磁子的三口烧瓶中加入 0.86 g 乙二胺和 30 mL $CHCl_3$,再加入 0.8 g K_2CO_3 ,加热至 $40^\circ C$,搅拌下经恒压加料器向反应器缓慢滴加 0.53 g 4-三氟甲基苯甲醛,加热至 $65^\circ C$ 回流反应 6 h 后,将深棕色透明溶液旋蒸,得粗产品;用二氯甲烷与甲醇体积比为 1:10 的混合溶剂将其重结晶得 BEA。

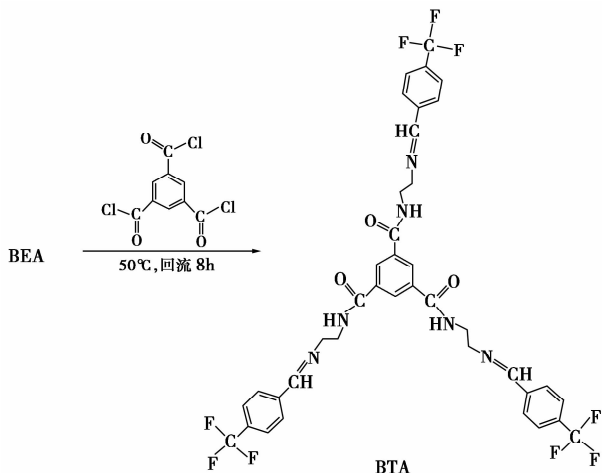
经查阅文献[5-8]确定最佳反应条件:最佳反应温度为 $65^\circ C$,反应物配比 $n(\text{乙二胺}):n(4\text{-三氟甲基苯甲醛})=5:1$,反应时间为 6 h。反应式为:



1.2.2 BTA的合成

在装有回流冷凝管、温度计和磁子的三口烧瓶中加入 0.51 g BEA 和 30 mL CH_2Cl_2 ,再加入 0.7 g K_2CO_3 ,加热至 $35^\circ C$,搅拌下经恒压加料器向反应器缓慢滴加 0.22 g 均苯三甲酰氯,加热至 $50^\circ C$ 回流反应 8 h 后,将乳黄色溶液旋蒸、干燥得 BTA。

反应条件:反应温度为 $50^\circ C$,反应物配比 $n(\text{BEA}):n(\text{均苯三甲酰氯})=3.3:1$,反应时间为 8 h。反应式为:



1.3 缓蚀剂性能测试方法

采用 P110 钢,其化学成分(质量分数,%)为 C 0.26, Si 0.19, Mn 1.37, P 0.004, S 0.004, Cr 0.148,

Ni 0.028, Cu 0.019, Mo 0.013, V 0.006, Al 0.062。测试前,碳钢表面经 400、800、1200 目砂纸逐级打磨,并抛光呈镜面,经丙酮和石油醚依次清洗后,冷风吹干称量,放入干燥器待用。

1.3.1 静态挂片失重法

参照 SY/T 5405—1996^[9]测定缓蚀剂 BEA 和 BTA 的常压静态腐蚀速率及缓蚀率;在 $60^\circ C$ 下,将待用的试片静态悬挂于加有不同浓度缓蚀剂的 1 mol/L 盐酸中浸泡 48 h,试片取出后经去离子水、无水乙醇清洗,冷风吹干称量。

1.3.2 电化学法

使用传统的三电极体系,参比电极为饱和甘汞电极(SEC,饱和 KCl 溶液),辅助电极为铂电极,工作电极为 P110 试片,工作面积为 1 cm^2 ,其余部分用环氧树脂封固。将工作电极浸于 $60^\circ C$ 盐酸中 30 min,待体系稳定后进行测试。动电位极化曲线扫描速率为 1 mV/s ,扫描范围: $-250 \sim +500\text{ mV}$;电化学阻抗的扫描频率为 $10^{-2} \sim 10^5\text{ Hz}$,交流信号的振幅为 10 mV。

1.3.3 SEM 检测

将试片分别放入未加和加有缓蚀剂的 1 mol/L 盐酸中,在 $60^\circ C$ 下恒温放置 48 h,取出后用蒸馏水冲洗,干燥;用 JSM-7500F 型扫描电子显微镜观察试片表面腐蚀形貌。

2 结论与分析

2.1 BEA 的结构表征

由 BEA 的 $^1\text{H NMR}$ 谱图可知, BEA 的分子结构是正确的;其理论相对分子质量为 216.2,由 BEA 的质谱图可得其相对分子质量为 217.2,与理论相对分子质量相吻合。

2.2 静态挂片失重法

2.2.1 BTA 浓度对缓蚀效果的影响

在 $60^\circ C$ 下测定不同浓度缓蚀剂在 1 mol/L 盐酸中对试片的缓蚀效果。腐蚀速率和缓蚀率 η_w 的计算式分别为^[10]:

$$CR = (87\ 600 \times \Delta m) / (S \times t \times D)$$

$$\eta_w / \% = [(CR^0 - CR) / CR^0] \times 100$$

式中: Δm 为试片的失重量, g; S 为试片的表面积, cm^2 ; t 为腐蚀时间, h; D 为钢片的密度, g/cm^3 ; CR^0 、 CR 分别是未加和加有缓蚀剂时钢片的腐蚀速率, mm/a 。

P110 钢在添加不同浓度缓蚀剂的 1 mol/L 盐酸中的失重实验数据如表 1 所示。由表 1 可知,随着

缓蚀剂质量浓度的增加, P110 钢的腐蚀速率逐渐减小, 当缓蚀剂质量浓度为 200 mg/L 时, BTA 的缓蚀率达 99.39%, BEA 仅 94.29%, 说明多吸附位点 BTA 的缓蚀效果优于 BEA。其原因是: ①随着缓蚀剂质量浓度的增加, 其在金属表面形成的吸附膜越致密且稳定, 能阻隔酸液与钢铁表面接触; ②多吸附位点缓蚀剂更易吸附于金属表面, 不易脱附, 能隔离酸液与金属表面接触, 更有效地抑制金属腐蚀。

表 1 P110 钢在添加不同浓度缓蚀剂的 1 mol/L 盐酸中的失重实验数据

缓蚀剂	质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	失重/ g	θ	CR/ (mm·a ⁻¹)	$\eta_w/\%$
—	0	1.95	—	68.98	—
BEA	25	0.26	0.867	8.84	87.19
BEA	50	0.22	0.887	7.52	89.10
BEA	100	0.18	0.908	6.20	91.01
BEA	150	0.13	0.933	4.54	93.41
BEA	200	0.12	0.939	3.94	94.29
BTA	25	0.07	0.964	2.47	96.42
BTA	50	0.06	0.969	1.99	97.12
BTA	100	0.05	0.974	1.75	97.47
BTA	150	0.02	0.990	0.74	98.93
BTA	200	0.01	0.995	0.42	99.39

2.2.2 等温吸附行为研究

对缓蚀剂 BEA 和 BTA 在钢表面上的吸附行为进行了研究, 表面覆盖度为^[11]:

$$\theta = [(\Delta m_0 - \Delta m) / \Delta m_0] \times 100$$

式中: Δm_0 、 Δm 分别为未加和加有缓蚀剂时挂片的失重量, g。

实验表明, 在 60℃ 时, 缓蚀剂在钢表面的吸附符合 Langmuir 吸附等温式^[12]:

$$C_i / \theta = 1 / K_{ads} + C_i$$

式中: C_i 是缓蚀剂的质量浓度, mg/L; K_{ads} 是吸附平衡常数。结果如图 1 所示。

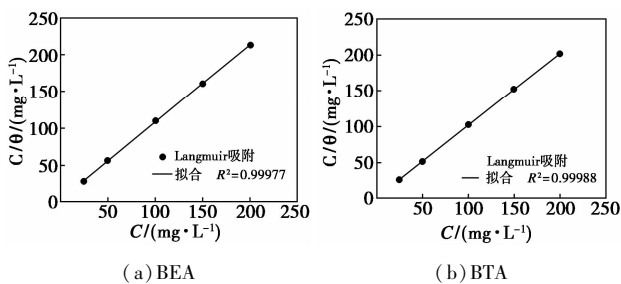


图 1 1 mol/L 盐酸中 BEA 和 BTA 在 P110 钢表面 Langmuir 吸附曲线

由图 1 可知, BEA 和 BTA 的 R^2 均超过 0.99, 表

明其在钢表面的吸附均满足 Langmuir 吸附模型, 可与金属表面形成致密的单分子吸附层; BTA 的斜率更接近 1, 说明 BTA 更易吸附于金属表面, 更有效地保护金属。

BEA 的 $1/K_{ads} = 3.61813 \text{ kg/L}$, 即 $K_{ads} = 2.76 \times 10^5 \text{ L/kg}$; BTA 的 $1/K_{ads} = 1.58445 \text{ kg/L}$, 即 $K_{ads} = 6.31 \times 10^5 \text{ L/kg}$ 。吉布斯自由能计算式为^[13]:

$$\Delta G_{ads}^0 = -RT \ln(55.5 K_{ads})$$

式中: R 为气体常数, $8.314 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$; T 为温度, K; 55.5 为水分子的浓度, mol/L。

BEA 的 $\Delta G_{ads}^0 = -45.8 \text{ kJ/mol}$, BTA 的 $\Delta G_{ads}^0 = -48.1 \text{ kJ/mol}$, 当 $\Delta G_{ads}^0 < -40 \text{ kJ/mol}$, 说明缓蚀剂在金属表面的吸附是化学吸附^[14], 与金属表面形成作用力较强的共价键, 达到较好的缓蚀效果; $\Delta G_{ads}^0 < 0$, 说明缓蚀剂在金属表面的吸附过程是自发的。

2.3 极化曲线测定

试片在不同质量浓度 BEA 和 BTA 的 1 mol/L 的盐酸中的极化曲线如图 2 所示, 采用 Tafel 传统方法拟合极化曲线, 曲线拟合参数如表 2 所示。缓蚀率 η_p 为^[15]:

$$\eta_p / \% = [(i^0 - i) / i^0] \times 100$$

式中: i^0 、 i 分别是未加与添加缓蚀剂时的腐蚀电流密度, mA/cm^2 。

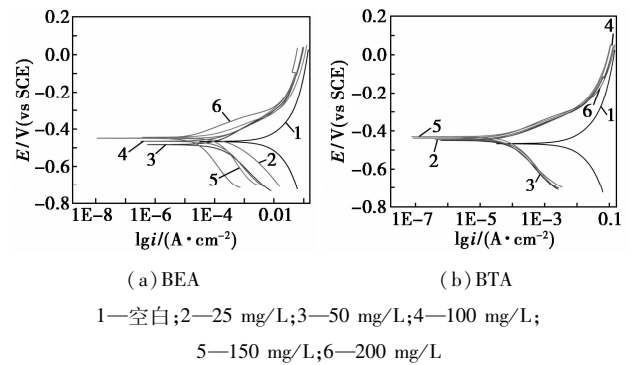


图 2 P110 钢在含有不同质量浓度 BEA 和 BTA 的 1 mol/L 盐酸中的极化曲线 (60℃)

由图 2 可知, 随着 BTA 质量浓度的增加, 阴极和阳极的曲线均向低电流方向移动, 腐蚀电流明显降低。由表 2 可知, BEA 和 BTA 的 β_a 均减小, β_c 均增大, 说明 BEA 和 BTA 均为阳极控制型缓蚀剂; 当缓蚀剂质量浓度为 200 mg/L 时, 多吸附位点 BTA 的缓蚀率达 99.62%, BEA 仅 98.90%, 说明 BTA 具有较好的缓蚀效果, 验证了多吸附位点缓蚀剂更易吸附于金属表面, 使金属抗腐蚀性能较好, 与失重法结果一致。

表 2 P110 钢在添加不同质量浓度缓蚀剂的 1 mol/L 盐酸溶液中的极化曲线拟合参数 (60℃)

缓蚀剂	C/ (mg·L ⁻¹)	E _{corr} / mV	i _{corr} / (mA·cm ⁻²)	β _a /(mV· dec ⁻¹)	β _c /(mV· dec ⁻¹)	η _p / %
—	Blank	-471.4	14.531	345.1	-376.4	—
BEA	25	-440.4	0.721	131.0	-198.2	95.04
BEA	50	-470.8	0.156	92.2	-161.3	98.93
BEA	100	-476.0	0.166	92.0	-169.9	98.86
BEA	150	-458.6	0.157	82.4	-223.7	98.82
BEA	200	-454.7	0.029	67.1	-218.9	98.90
BTA	25	-461.2	0.106	91.4	-195.3	99.27
BTA	50	-443.2	0.084	75.3	-194.4	99.42
BTA	100	-454.8	0.122	89.8	-206.2	99.16
BTA	150	-442.4	0.116	86.9	-213.1	99.19
BTA	200	-436.1	0.055	71.0	-157.8	99.62

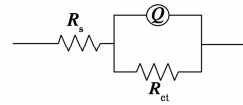


图 4 P110 钢在含有 BEA 或 BTA 的盐酸中测量电化学阻抗谱所采用的等效电路

由图 3(a)可知,在高频区仅有很小的半圆弧,说明空白电极表面几乎没有保护膜,腐蚀速率较大;由图 3(b)、图 3(c)可知,Nyquist 图呈半圆形的容抗弧,弧的圆点在横坐标上方,说明 P110 钢在盐酸中的腐蚀主要由电极和腐蚀介质界面上电荷转移过程控制^[17],随着缓蚀剂质量浓度的增加,容抗弧的近似直径变大,容抗弧直径对应于电极表面上电荷转移 R_{ct},即随着质量浓度增加,R_{ct}增大,说明缓蚀剂在电极表面形成吸附层,腐蚀速率减小。由表 3 得,BTA 最高缓蚀效率达 99.70%,BEA 仅 99.29%,说明了 BTA 能明显抑制 P110 钢在盐酸中的腐蚀。

2.4 电化学阻抗谱

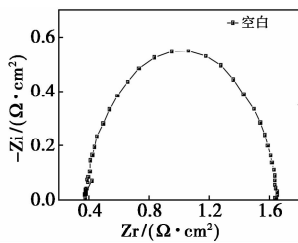
试片在加有不同质量浓度 BEA 和 BTA 的 1 mol/L 盐酸中的电化学阻抗谱图如图 3 所示;用 ZSimpWin 软件拟合阻抗数据(如表 3 所示),得等效电路图,如图 4 所示。其中 R_s 为溶液电阻,R_{ct} 是电荷转移电阻,Q 为常相位角元件。计算缓蚀率 η_z^[16]:

$$\eta_z/\% = [(R_{ct} - R_{ct}^0)/R_{ct}] \times 100$$

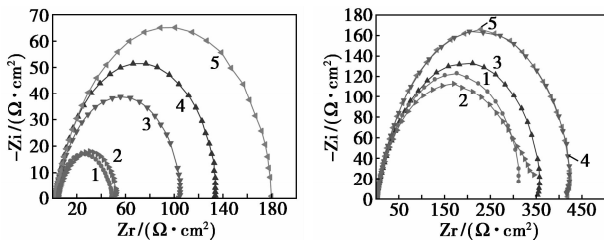
式中:R_{ct}⁰和 R_{ct} 分别为不加和添加缓蚀剂溶液中的电荷转移电阻,Ω·cm²。

表 3 P110 钢在添加不同质量浓度缓蚀剂的 1 mol/L 盐酸中的阻抗拟合参数 (60℃)

缓蚀剂	质量浓度/(mg·L ⁻¹)	R _{ct} / (Ω·cm ²)	Q		η _z /%
			Y ₀ /(Ω ⁻¹ · cm ⁻²) × 10 ⁶	n	
—	Blank	1.277 ± 0.009	100.6 ± 0.048	0.9024 ± 0.009	—
BEA	25	45.24 ± 0.006	159.3 ± 0.040	0.8000 ± 0.006	97.18
BEA	50	50.82 ± 0.010	184.4 ± 0.049	0.8000 ± 0.008	97.49
BEA	100	128.4 ± 0.010	91.47 ± 0.050	0.8000 ± 0.008	99.01
BEA	150	102.6 ± 0.012	97.99 ± 0.053	0.8000 ± 0.008	98.76
BEA	200	178.8 ± 0.018	100.2 ± 0.060	0.8000 ± 0.010	99.29
BTA	25	321.7 ± 0.021	104.8 ± 0.052	0.8000 ± 0.009	99.60
BTA	50	361.9 ± 0.022	81.7 ± 0.057	0.8000 ± 0.009	99.65
BTA	100	322.8 ± 0.022	99.81 ± 0.050	0.8000 ± 0.008	99.60
BTA	150	427.8 ± 0.012	86.63 ± 0.033	0.8000 ± 0.006	99.70
BTA	200	426.8 ± 0.019	71.97 ± 0.024	0.8000 ± 0.008	99.70



(a) 不含缓蚀剂



(b) BEA

(c) BTA

图 3 P110 钢在不含和含有不同质量浓度 BEA 和 BTA 的 1 mol/L 盐酸中的 Nyquist 图(60℃)

2.5 SEM 分析

SEM 分析是研究金属点蚀、条纹腐蚀等非均匀腐蚀的有效手段之一。P110 钢片的 SEM 形貌如图 5 所示。

由图 5 可知,空白的试片表面附着疏松状腐蚀膜和一些明显的腐蚀坑,甚至出现了裂纹,试片整体腐蚀较严重;加有 150 mg/L BEA 的试片表面粗糙,有腐蚀产物和腐蚀凹槽;加有 150 mg/L BTA 的试片表面光滑,有一层膜,阻隔酸液与其接触,未见明显的点蚀和条纹腐蚀,基本呈均匀腐蚀,表明了

BTA 在 P110 钢表面生成较完整的保护膜,抑制其在酸液中的腐蚀,尤其是点蚀,有效保护了试片;说明多吸附位点 BTA 的缓蚀性能优于 BEA。

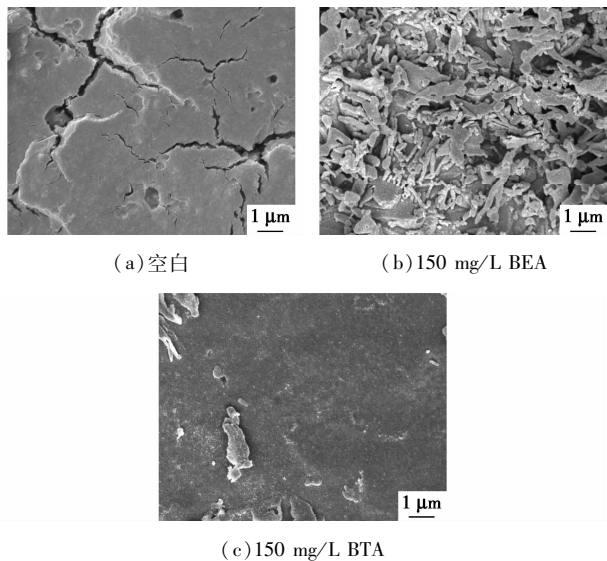


图5 P110 钢片的 SEM 形貌

3 结论

(1)通过 Schiff 反应和酰胺化反应合成了一种新型的多吸附位点席夫碱缓蚀剂 BTA,静态挂片失重法实验结果表明,随着缓蚀剂质量浓度的增加,P110 碳钢的腐蚀速度逐渐减小,当缓蚀剂质量浓度为 200 mg/L 时,BTA 的缓蚀率达 99.39%,BEA 仅 94.29%,说明了多吸附位点 BTA 能更有效地减缓盐酸对金属的腐蚀,从而保护金属。

(2)等温吸附行为研究表明,BTA 在 P110 钢表面的吸附符合 Langmuir 吸附等温式,且吸附过程是自发的化学吸附。

(3)电化学机理研究表明,BTA 是一种阳极控制型缓蚀剂;电化学阻抗谱图分析结果表明,随着缓蚀剂质量浓度的增加,缓蚀剂在 P110 钢表面形成明显的保护膜,有效隔离酸液与钢片接触,从而保护金属;说明多吸附位点缓蚀剂 BTA 具有优异的缓蚀性能。

(4)静态失重法、极化曲线和电化学阻抗谱 3 种测试方法得到的缓蚀效果具有较好的一致性。

参考文献

[1] UlyaKeles H, Mustafa K, Ilyas D. The inhibitive effect of 6-amino-m-cresol and its Schiff base on the corrosion of mild steel in 0.5 M HCl medium I [J]. Materials Chemistry and Physics, 2008, 112 (1):173 - 179.

[2] Yurt A, Ulutas S, Dal H. Electrochemical and theoretical investigation on the corrosion of aluminium in acidic solution containing some Schiff bases [J]. Applied Surface, 2006, 253:919 - 925.

[3] Solmaz R. Investigation of corrosion inhibition mechanism and stability of Vitamin B1 on mild steel in 0.5 M HCl solution [J]. Corrosion Science, 2014, 81:75 - 84.

[4] Olusegun K Abiola. Adsorption of 3-(4-amino-2-methyl-5-pyrimidyl methyl)-4-methyl thiazolium chloride on mild steel [J]. Corrosion Science, 2006, 48:3078 - 3090.

[5] 李克华, 张文杰. 新型席夫碱缓蚀剂的合成及性能研究 [J]. 化工技术与开发, 2015, 44(4):18 - 19.

[6] 李俊莉, 白方林, 卢永斌, 等. 新型席夫碱酸化缓蚀剂的合成及性能评价 [J]. 腐蚀与防护, 2012, 3(9):787 - 791.

[7] 李林峰, 诸林, 刘红, 等. 一种苯胺类席夫碱对 N80 钢在盐酸介质中的缓蚀性能 [J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(2):157 - 160.

[8] 李善建. 一种适于 P110 钢席夫碱盐酸酸化缓蚀剂的合成及应用性能评价 [J]. 精细石油化工, 2014, 31(3):68 - 71.

[9] 中国石油天然气总公司石油勘探开发科学研究院廊坊分院. SY/T 5405—1996. 酸化用缓蚀剂性能试验方法及评价指标 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1996 - 12 - 15.

[10] Liu F, Du M, Zhang J, *et al.* Electrochemical behavior of Q235 steel in saltwater saturated with carbon dioxide based on new imidazoline derivative inhibitor [J]. Corrosion Science, 2009, 51:102 - 109.

[11] Zhang F, Tang Y M, Cao Z Y, *et al.* Performance and theoretical study on corrosion inhibition of 2-(4-pyridyl)-benzimidazole for mild steel in hydrochloric acid I [J]. Corrosion Science, 2012, (61):1 - 9.

[12] Abiola O K, Otaigbe J O E. The effects of Phyllanthus amarus extract on corrosion and kinetics of corrosion process of aluminum in alkaline solution I [J]. Corrosion Science, 2009, (51):2790 - 2793.

[13] He X K, Jiang Y M, Li C, *et al.* Inhibition properties and adsorption behavior of imidazole and 2-phenyl-2-imidazoline on AA5052 in 1.0 M HCl solution I [J]. Corrosion Science, 2014, (83):124 - 136.

[14] Bouklah M, Hannouti B, Lagrene M. Thermodynamic properties of 2,5-bis(4-methoxyphenyl)-1,3,4-oxdiazole as a corrosion inhibitor for mild steel in normal sulfuric acid medium I [J]. Corrosion Science, 2006, (48):2831 - 2842.

[15] Ravichandran R, Nanjundan S, Rajendran N. Effect of benzotriazole derivatives on the corrosion of brass in NaCl solutions I [J]. Applied Surface Science, 2004, (236):241 - 250.

[16] Hegazy M A. A novel Schiff base-based cationic gemini surfactants: Synthesis and effect on corrosion inhibition of carbon steel in hydrochloric acid solution I [J]. Corrosion Science, 2009, (51):2610 - 2618.

[17] da Trindade L G, Gonçalves R S. Evidence of caffeine adsorption on a low-carbon steel surface in ethanol [J]. Corrosion Science, 2009, (51):1578 - 1583. ■