

磷酸酯基咪唑啉化合物的合成及其在 HCl 水溶液中的腐蚀抑制机理

郭文姝^{1,2}, 程丽华¹, 丛玉凤², 党迎喜¹, 张梓铭¹, 陈威华¹

(1. 广东石油化工学院 化学工程学院, 广东 茂名 525000;

2. 辽宁石油化工大学 石油化工学院, 辽宁 抚顺 113001)

摘要: **目的** 通过三乙烯四胺和苯甲酸合成 IMBT, 再利用 IMBT、 H_3PO_3 和甲醛经过曼尼希反应制得 IMBTM, 并探究其对碳钢在 HCl 水溶液中的缓蚀作用。**方法** 采用动态失重法、电化学技术以及热力学等方法研究缓蚀剂 IMBT 和 IMBTM 在 60 °C、1 mol/L 的盐酸溶液中对 10[#] 碳钢的缓蚀性能和吸附规律。**结果** 利用 IR 对产物进行表征, 均得到了产物特征峰。在动态失重试验中, IMBT 和 IMBTM 两种缓蚀剂的质量浓度为 3 g/L 时, 碳钢的腐蚀速率分别为 3.92、2.94 g/(m²·h), 缓蚀剂的缓蚀率分别为 79.65 % 和 84.75 %。极化曲线试验表明随着两种缓蚀剂浓度增加, 腐蚀电位正移, 阳极电流密度下降明显。交流阻抗的测试显示随着两种缓蚀剂浓度增大, 容抗弧半径逐渐增大, 且在相同浓度下, 添加 IMBTM 时的容抗弧半径更大。另外, 随着缓蚀剂浓度的增加, 拟合参数 R_{ct} 增大、 C_{dl} 减小, 证明缓蚀剂在金属表面取代了水, 并吸附成膜。研究等温吸附模型, 发现数据带入 Langmuir 等温吸附方程后, 表现出了很好的线性关系。**结论** 在 1 mol/L HCl 溶液中, IMBT 和 IMBTM 对 10[#] 碳钢均有缓蚀作用, 且 IMBTM 的缓蚀作用较高。两种缓蚀剂均属于阳极型缓蚀剂, 对阳极的缓蚀作用较高。且两种化合物在 10[#] 碳钢表面上的吸附过程为自发放热过程, 其吸附规律遵循 Langmuir 等温吸附式, 属于单分子层吸附。

关键词: 磷酸酯基咪唑啉化合物; HCl 腐蚀; 缓蚀剂; 曼尼希反应; 10[#] 碳钢; 缓蚀性能; 吸附规律

中图分类号: TG174.42 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2018)05-0188-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.05.029

Synthesis of Phosphate-based Imidazoline Compound and Its Corrosion Inhibition Mechanism in HCl Aqueous Solution

GUO Wen-shu^{1,2}, CHENG Li-hua¹, CONG Yu-feng², DANG Ying-xi¹,
ZHANG Zi-ming¹, CHEN Wei-hua¹

(1. School of Chemical Engineering, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming 525000, China;

2. School of Petrochemical Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China)

ABSTRACT: The work aims to synthesize IMBT by triethylenetetramine and benzoic acid and then to prepare IMBTM by IMBT, H_3PO_3 and formaldehyde through Mannich reaction. The corrosion inhibition of carbon steel in HCl solution was investigated. Dynamic weight loss method, electrochemical technique and thermodynamic method were used to study corrosion

收稿日期: 2018-01-30; 修订日期: 2018-03-15

Received: 2018-01-30; Revised: 2018-03-15

作者简介: 郭文姝 (1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向为缓蚀剂的性能研究。

Biography: GUO Wen-shu (1991—), Female, Graduate student, Research focus: the performance study of corrosion inhibitor.

通讯作者: 程丽华 (1965—), 女, 硕士, 教授, 主要研究方向为石油化工污水控制及清洁生产。

Corresponding author: CHENG Li-hua (1965—), Female, Master, Professor, Research focus: petrochemical wastewater control and cleaning production.

property and adsorption rule of 10[#] carbon steel by corrosion inhibitors IMBT and IMBTM in 1 mol/L HCl at 60 °C. The products were characterized by IR. In the spectrum, the product characteristic peaks appeared. In the dynamic weightlessness test, when the concentration of two kinds of corrosion inhibitors were 3 g/L, the corrosion rate of steel was respectively 3.92 g/(m²·h) and 2.94 g/(m²·h) and the corrosion inhibition rate of corrosion inhibitors was 79.65 % and 84.75 % respectively. From polarization curve test, the corrosion potential of two corrosion inhibitors was moving forward as concentration increased and the anode current density decreased obviously. From test of AC impedance, with the increase of concentration, the radius of the resistance of two kinds of corrosion inhibitors increased gradually. At the same concentration, IMBTM had a larger arc radius. With the increase of concentration the increase of R_{ct} and the decrease of C_{dl} showed that the corrosion inhibitor replaced water and adsorbed into the film. Good linear relationship was found by studying an isothermal adsorption model and bringing data into Langmuir isothermal adsorption equation. IMBT and IMBTM have corrosion inhibition effects on 10[#] carbon steel in 1 mol/L HCl medium and the IMBTM has stronger inhibition effect. Both corrosion inhibitors are anode corrosion inhibitors and have high corrosion resistance to the anode. The adsorption of these two compounds on the surface of 10[#] carbon steel is spontaneous exothermic process and the adsorption rules are in accordance with the Langmuir isothermal adsorption which belongs to single molecular layer adsorption.

KEY WORDS: HCl corrosion; corrosion inhibitor; Mannich reaction; 10[#] carbon steel; corrosion inhibition; adsorption rule

缓蚀剂的合理添加可以有效预防石油产品在运输过程中对管线的腐蚀。其中,咪唑啉衍生物类缓蚀剂在酸性条件下具有高效的缓蚀能力,被广泛用于石油、天然气工业防腐蚀领域。有研究表明咪唑啉环具有 P- π 共轭特征,通过在咪唑啉环上引入烷基芳烃或烷基,可使其重叠集居数、Fe 原子吸附作用能以及双原子作用能增大,从而推测引入烷基或烷基芳烃会增大缓蚀性能。缓蚀率随取代基供电性的增强而增高,所以具有 P- π 共轭结构的咪唑啉衍生物引入供电子基团或芳烃后都能增强咪唑啉型化合物的缓蚀性能。Borghei 等^[1]合成了带有磷酸酯基的 BMIBMBPA 缓蚀剂,其在酸性介质中对碳钢的缓蚀率可达 70%以上。

本文选择苯甲酸和三乙烯四胺合成 IMBT 咪唑啉衍生物缓蚀剂,再与甲醛和次磷酸在酸性条件下合成 IMBTM 缓蚀剂,利用动态失重、极化曲线、EIS 等方法研究缓蚀剂 IMBT 和 IMBTM 在 10[#]碳钢表面的吸附行为和缓蚀作用规律。

1 实验

1.1 缓蚀剂的制备

在装有温度计、分水器、冷凝管及恒压漏斗的四口烧瓶中加入 0.4 mol 的苯甲酸,并加热至 160 °C 使其完全熔化,再缓慢滴加 0.44 mol 三乙烯四胺和 0.32 mol 二甲苯,于 165 °C 回流加热 3 h,再将温度升高至 230 °C,回流反应 4 h,结束反应,停止加热。在反应过程中从分水器中不断分出水来,并将二甲苯蒸出,得到产物 IMBT,反应过程见图 1。再通过曼尼希反应制备 IMBTM,首先取 0.0384 mol IMBT 同 8.2

mL H₃PO₃, 以及一定量稀盐酸,于 110 °C 下加热回流 2 h,再缓慢滴加 13.4 mL 甲醛,于 102 °C 下回流反应 1 h,再通过饱和食盐水和乙酸乙酯进行洗涤萃取,得到 IMBTM^[1],反应过程和机理分别见图 2 和图 3。

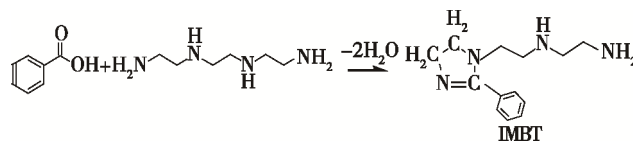


图 1 IMBT 咪唑啉衍生物的合成反应
Fig.1 Synthesis of IMBT imidazoline derivative

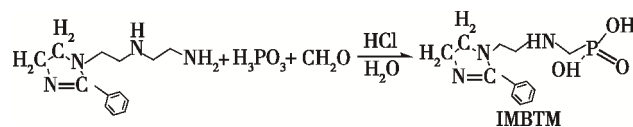


图 2 IMBTM 咪唑啉衍生物的合成反应
Fig.2 Synthesis of IMBTM imidazoline derivative

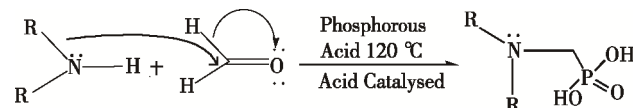


图 3 形成磷酸酯基团过程中电子运动情况解释图
Fig.3 Schematic representation of electron movement during formation of the phosphonate functional group

1.2 缓蚀剂的表征

利用 IR 对合成的缓蚀剂 IMBT 和 IMBTM 结构进行表征,以确定产物的合成情况。

动态失重测试试片选用 10[#]碳钢,尺寸为 50 mm×25 mm×2 mm,在其一端距边线 10 mm 处钻孔。

将其打磨后用滤纸擦净,再用无水乙醇除水、丙酮除油,干燥后进行称重。向已配好的 1 mol/L HCl 溶液中分别加入两种缓蚀剂,配成缓蚀剂质量浓度不同(1、2、3 g/L)的实验溶液,用搅拌器将其均匀混合。

每组实验放三个平行试片到事先预温 60 °C、装有实验溶液的旋转挂片机内,设置好转速,反应 4 h,将试片取出,并用配好的 10% HCl+1% 六亚甲基四胺洗液进行清洗以去除腐蚀物^[2],再用去离子水冲洗,最后用无水乙醇、丙酮浸泡 3 min,干燥并称重。

电化学测试采用三电极体系,饱和甘汞电极作为参比电极,10[#]碳钢作为工作电极,Pt 电极作为辅助电极。用砂纸逐级打磨工作电极,并用无水乙醇去水、丙酮去油,干燥。将三电极装置连接好,待开路电位稳定后^[3],进行极化曲线测试。极化曲线的扫描范围为相对开路电位±150 mV,扫描速率为 0.5 mV/s。交流阻抗的测试扫描频率范围为 10 mHz~100 kHz^[4-5],交流激励信号幅值为 5 mV,以工作站自带拟合软件进行拟合。

通过 SEM-EDS 分析试片表面腐蚀形貌和缓蚀剂在金属表面的吸附情况。

2 结果与讨论

2.1 结构分析

图 4 为 IMBT 和 IMBTM 的红外光谱图。由图可

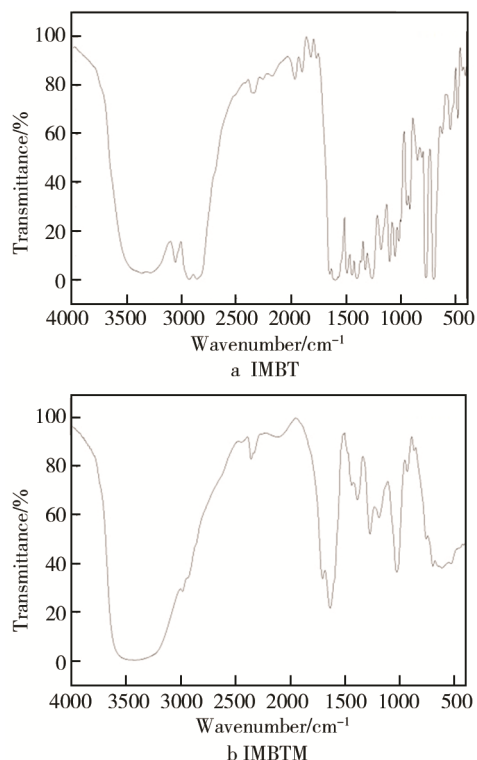


图 4 IMBT 和 IMBTM 的红外光谱图
Fig.4 IR spectra of IMBT and IMBTM

知,IMBT 红外光谱中的 1601.09 cm⁻¹ 处为 C=N 吸收峰,这一吸收峰为 IMBT 的特征峰,表明成功合成了 IMBT;1105.27 cm⁻¹ 处为 C—N 的吸收峰;3363.37 cm⁻¹ 处为 N—H 的伸缩振动吸收峰;774.46 cm⁻¹ 处为苯环上邻接 H 的吸收峰;2932.07 cm⁻¹ 处为饱和 C—H 的吸收峰。IMBTM 红外光谱中的 1640.09 cm⁻¹ 处是 C=N 的伸缩振动吸收峰;1194.17 cm⁻¹ 处是 C—N 的吸收峰;3416.74 cm⁻¹ 处是 N—H 的振动吸收峰;特征官能团—PH₂O₃ 的吸收峰出现在 1277.63 cm⁻¹ 处。

2.2 失重分析

失重法计算缓蚀率和腐蚀速率的公式为(1—3)。

$$\eta_1 = \frac{100 \times (\Delta m_0 - \Delta m_i)}{\Delta m_0} \quad (1)$$

$$V_i = \frac{10^6 \times \Delta m_i}{A_i \times \Delta t} \quad (2)$$

$$V = \frac{V_1 + V_2 + V_3}{3} \quad (3)$$

式中: η_1 为缓蚀率,%; Δm_0 为未添加缓蚀剂时试片的质量损失,g; Δm_i 为添加缓蚀剂时试片的质量损失,g; V_i 为单片腐蚀速率,g/(m²·h); A_i 为试片表面积,mm²; Δt 为反应时间,h; V 为平均腐蚀速率,g/(m²·h)。

在(60±1) °C、600 r/min 下,以动态失重法测试缓蚀剂 IMBT 和 IMBTM 在 1 mol/L HCl 中经 4 h 后对 10[#] 碳钢的缓蚀性能,结果如表 1 所示。加入缓蚀剂后,金属的质量损失显著减少,当 IMBTM 和 IMBT 的质量浓度为 3 g/L 时,缓蚀效果较为显著,碳钢腐蚀速率分别为 2.94、3.92 g/(m²·h),缓蚀剂的缓蚀率分别达到 84.75% 和 79.65%。在动态情况下,金属表面质地疏松的腐蚀物极易被冲刷掉,表面状态与在静态情况下有极大差异,缓蚀剂的吸附行为和防腐性能必然发生极大变化。在动态情况下,缓蚀剂在腐蚀介质中分布更加均一,在金属表面极易因冲刷而发生脱附。

表 1 试片在含不同缓蚀剂实验溶液中的腐蚀数据
Tab.1 Corrosion data of samples in test solutions with different inhibitors

Inhibitor	$\Delta m_i/g$	$\Delta t/h$	A_i/mm^2	$V/(g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1})$	$\eta_1/\%$
Blank	0.2157	4	2800	19.26	
IMBTM	0.0329	4	2800	2.94	84.75
IMBT	0.0439	4	2800	3.92	79.65

2.3 电化学分析

电化学法计算缓蚀率和腐蚀速率的计算公式为式(4—5)。

$$\eta_2 = \left(1 - \frac{I_{corr}}{I_{corr}^{corr}}\right) \times 100\% \quad (4)$$

$$Corrosion = \frac{3270 \times J_{corr} \times M}{\rho \times n} \quad (5)$$

式中：Corrosion 表示腐蚀速率，mm/a； η_2 为电化学方法测得的缓蚀率； I'_{corr} 为加入缓蚀剂后的腐蚀电流，A； I_{corr} 为未加缓蚀剂的腐蚀电流，A； J_{corr} 为腐蚀电流密度，A/cm²； M 为物质的摩尔质量，g/mol； ρ 为材料密度，g/cm³； n 为电荷转移量。

图 5 为 10[#]碳钢在含不同缓蚀剂的 1 mol/L HCl 溶液中的极化曲线，表 2 是相关电化学参数。由图 5 和表 2 可知，随着缓蚀剂的加入，阳极腐蚀电流密度逐渐降低，腐蚀电位 E_{corr} 则逐渐向正方向移动，阳极腐蚀过程受到的抑制作用不断增加，表明这两种缓蚀剂均属于阳极型缓蚀剂。这主要是由于缓蚀剂的作用形式发生变化，改变了金属表面的电荷分布和表面状态^[6]。缓蚀剂对阳极的作用强于阴极使腐蚀电位发生正移，且随着缓蚀剂浓度增加，阳极极化作用逐渐增强，阳极极化曲线呈现不同特征。首先是 Tafel 线性区，缓蚀剂开始发挥缓蚀作用；之后进入阳极电流密度随电位增大而迅速增加的阶段，该阶段缓蚀剂可能发生了阳极脱附。该现象一方面是由于分子热运动；另一方面是由于阳极极化程度较高时，电极表面吸附的缓蚀剂在一定牵引力下发生脱附，使金属暴露在腐蚀介质中，发生溶解，且阳极溶解电流密度越大，作用越强。极化曲线法得到的结果同失重法所得结果相同。

图 6 为等效电路图。其中， R_f 为吸附电阻， R_{ct} 为电荷转移电阻， R_s 为溶液电阻， C_f 为膜电容， C_{dl} 为双电层电容^[7-9]。图 7 为 10[#]碳钢在含不同缓蚀剂的 1 mol/L HCl 溶液中的阻抗图。在 1 mol/L HCl 溶液中加入两种缓蚀剂后，容抗弧半径增加， R_{ct} 增大， C_{dl} 减小，改变了电极表面的电化学过程，10[#]碳钢的腐蚀反应阻力明显增大。这是由于缓蚀剂在金属表面逐渐吸附，覆盖率增加，缓蚀剂在金属表面覆盖率的变化与分子取向有关^[10-11]。如图 8 所示，当缓蚀剂浓度较低时，缓蚀剂分子以平卧形式吸附于金属表面；当缓蚀剂浓度较高时，缓蚀剂分子逐渐在金属表面富集，而在分子间斥力和外加空间位阻作用下，缓蚀剂分子较倾向于垂直金属表面发生吸附，覆盖程度降低，金属表面发生暴露，腐蚀程度增加。

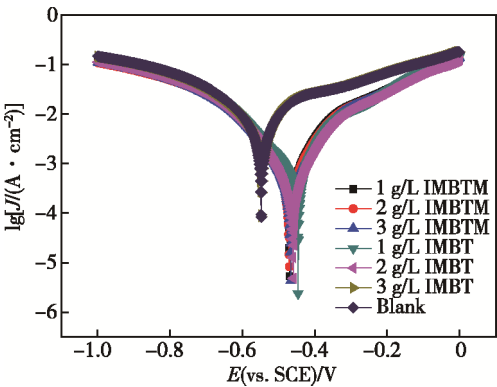


图 5 10[#]钢在含不同缓蚀剂情况下的极化曲线
Fig.5 Polarization curve of 10[#] steel in different inhibitors

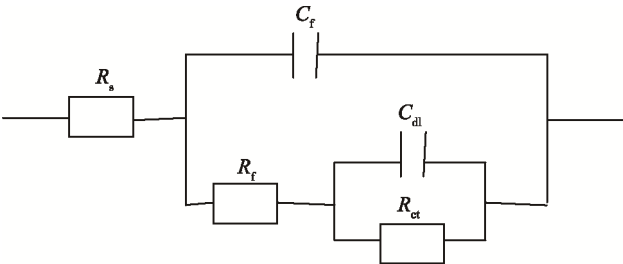


图 6 工作电极在试验介质中的电化学阻抗谱等效电路图
Fig.6 Equivalent circuits of EIS of working electrode in test solution

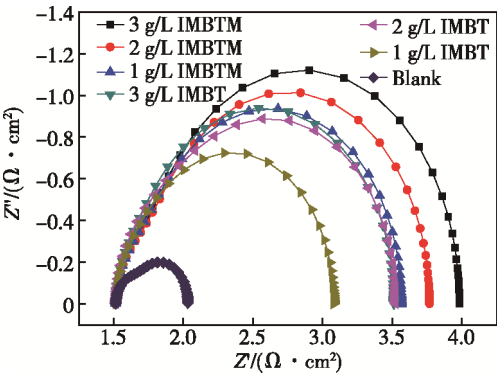
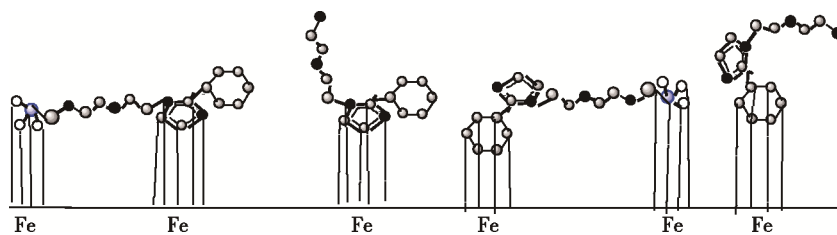


图 7 工作电极在 60 °C 含不同缓蚀剂实验溶液中的电化学阻抗谱
Fig.7 EIS of working electrode in test solutions with different inhibitors at 60 °C

表 2 极化曲线相关电化学参数
Tab.2 Electrochemical parameters of polarization curve

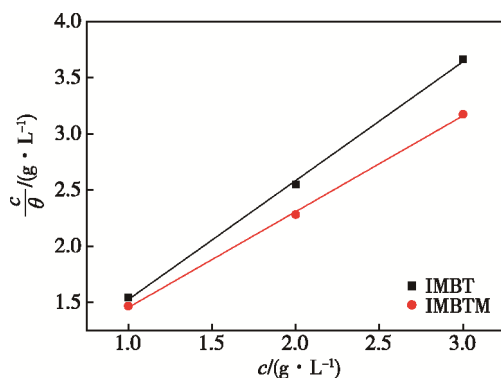
Inhibitor	$c/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	$J_{\text{corr}}/(\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2})$	$E_{\text{corr}}/\text{mV}$	R_p/Ω	$\beta_c/(\text{mV}\cdot\text{dec}^{-1})$	$\beta_a/(\text{mV}\cdot\text{dec}^{-1})$	Corrosion/ $(\text{mm}\cdot\text{a}^{-1})$	$\eta_2/\%$
IMBT	1	4.46	-564	15.4	594.7	675.4	51.8	68.12
	2	1.73	-497	31.9	811.5	765.5	20.1	87.64
	3	0.93	-479	49	947	967.5	10.8	93.37
IMBTM	1	1.19	-494	39.8	924	915.4	13.8	91.50
	2	1.05	-492	44	926.3	949.3	12.3	92.46
	2	0.76	-481	57.1	971.9	1022	8.88	94.54

图8 缓蚀剂IMBT和IMBTM在10[#]碳钢表面吸附机理Fig.8 Adsorption mechanism of IMBT and IMBTM on 10[#] carbon steel surface

为了研究IMBT和IMBTM在10[#]碳钢表面的吸附行为,根据 $\eta_2=\theta^{[12]}$,将表2中的缓蚀率 η_2 分别代入Temkin、Langmuir和Freudlich吸附等温方程式中,发现实验拟合结果作图符合Langmuir等温方程式。其中,Langmuir等温方程式为式(6)。

$$\frac{c}{\theta} = \frac{1}{K} + c \quad (6)$$

式中: c 为缓蚀剂浓度; θ 为缓蚀剂表面覆盖度; K 为吸附平衡常数。以 c/θ 为纵坐标,以 c 为横坐标作图,结果见图9。由图可见,相关系数 r 趋近于1,说明该缓蚀剂在10[#]碳钢表面的吸附规律符合Langmuir等温吸附方程。经计算可知, ΔG^0 为负值,说明缓蚀剂在金属表面进行自发吸附,并存在单层物理及化学混合吸附过程^[13],可以推测出当金属与酸性介质接触时,缓蚀剂可以在金属表面形成单分子吸附膜,并通过改变氢离子的氧化还原电位来达到缓蚀目的。

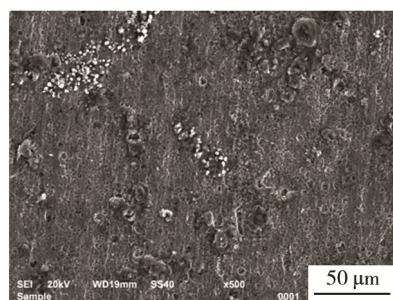
图9 10[#]钢在含有IMBT和IMBTM 1 mol/L HCl中的等温吸附图Fig.9 Adsorption isotherms for 10[#] steel in 1 mol/L HCl with IMBT and IMBTM

2.4 SEM-EDS分析

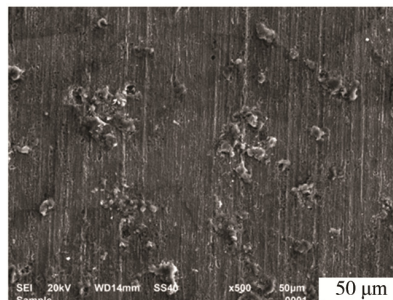
图10为在60℃、一定转速下,10[#]碳钢浸泡在含3 g/L的IMBT和IMBTM的1 mol/L HCl溶液中4 h的SEM图,实验前未经预膜处理。可见,1 mol/L HCl溶液中的10[#]碳钢表面有孔蚀和点蚀情况,而且均匀腐蚀严重。而在1 mol/L HCl溶液中加入缓蚀剂后,10[#]碳钢表面的均匀腐蚀程度降低,但仍有一定孔蚀与点蚀现象。这是因为分子在碳钢表面吸附,形成了有一定保护作用

的膜,但保护膜在稳定性和均匀性上面有一定缺陷。

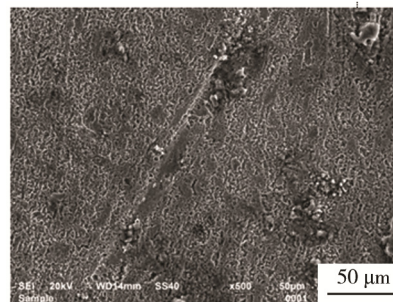
图11为试片在不同腐蚀溶液中腐蚀后的EDS分析。由图可知,缓蚀剂加入后,Fe、Cr、O的比例明显增加,说明腐蚀产物大多以Fe和Cr的氧化物为主。此外,元素分析发现的P、N是缓蚀剂所含的元素,而且在金属表面也发现了这些元素,所以可以大胆推测金属表面形成保护膜时,Fe和Cr的氧化物和缓蚀剂作用后可能形成了具有缓蚀作用的络合物,并沉积、吸附在金属表面,从而对金属基体起到保护作用^[14-15]。



a Blank



b IMBTM



c IMBT

图10 在试片中于(60±1)℃浸泡4 h后的扫描电镜图
Fig.10 SEM photograph of 10[#] steel after immersion in different test solutions for 4 h at (60±1)℃

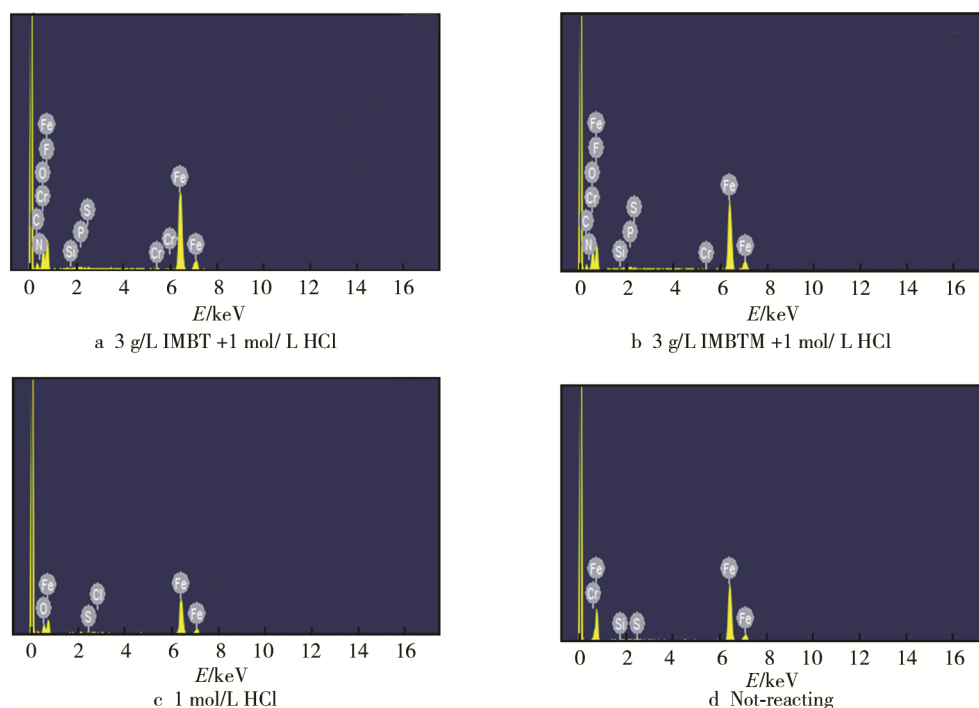


图 11 在 60 °C 腐蚀介质中 4 h 后的试片表面吸附膜和未试验试片的能谱
Fig.11 EDS analysis of surface adsorption film of samples after immersion in different test solutions for 4 h at 60 °C and untested samples

3 结论

1) 在 60 °C、一定流速下, IMBT 和 IMBTM 加入后, 金属的质量损失明显减少, 其对 10[#]碳钢在 1 mol/L HCl 溶液中均有缓蚀作用, 且 IMBTM 的缓蚀作用较好。

2) 两种缓蚀剂均属于阳极型缓蚀剂, 对阳极具有较好的缓蚀作用。

3) 两种化合物在 1 mol/L HCl 溶液中与 10[#]碳钢表面的吸附都遵循 Langmuir 等温吸附式, 吸附过程是自发放热反应, 属于单分子层吸附。

参考文献:

- [1] BORGHEI S, DEGHANIAN C, YAGHOUBI R, et al. Synthesis, Characterization and Electrochemical Performance of a New Imidazoline Derivative as an Environmentally Friendly Corrosion and Scale Inhibitor[J]. Research on Chemical Intermediates, 2016, 42(5): 4551-4568.
- [2] 江依义. 酸化缓蚀剂的合成及其缓蚀性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
JIANG Yi-yi. Study on the Synthesis and Corrosion Inhibition of Acidizing Inhibitor[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [3] NADRI R, ATTAR M M. Application of the Electrochemical Noise Method to Evaluate the Effectiveness of Modification of Zinc Phosphate Anticorrosion Pigment[J]. Corrosion Science, 2009, 51(8): 1671-1674.
- [4] 刘栓, 孙虎元, 孙立娟. pH 值和温度对镀锌钢在模拟锈层溶液中电化学腐蚀行为的影响[J]. 功能材料, 2013, 44(6): 858-861.
LIU Shuan, SUN Hu-yuan, SUN Li-juan. Effect of pH Value and Temperature on Electrochemical Corrosion Behavior of Galvanized Steel in Simulated Rust Layer[J]. Functional Materials, 2013, 44(6): 858-861.
- [5] 赵霞, 刘栓, 侯保荣. 改性纳米 ZrO₂/环氧涂层的耐蚀性能研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2014, 26(5): 436-440.
ZHAO Xia, LIU Shuan, HOU Bao-rong. Study on Corrosion Resistance of Modified Nano-ZrO₂/Epoxy Coatings[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2014, 26(5): 436-440.
- [6] 王永垒, 李海云, 方红霞, 等. 硫脲/硫氰酸钾复合缓蚀剂对 20 碳钢的缓蚀性能研究[J]. 应用化工, 2015(2): 258-260.
WANG Yong-lei, LI Hai-yun, FANG Hong-xia, et al. Study on the Corrosion Inhibition of 20 Carbon Steel by Potassium Thiourea/Thiocyanate[J]. Chemical Engineering, 2015(2): 258-260.
- [7] QURAISHIM A, SARDARR. Dithiazolidines—A New Class of Heterocyclic Inhibitors for Prevention of Mild Steel Corrosion in Hydrochloric Acid Solution[J]. Corrosion, 2002, 58(2): 102-107.
- [8] AI-MAYOUF A M, AI-AMEERY A K, AI-SUHYBANI A A. Inhibition of Type 304 Stainless Steel Corrosion in 2M Sulfuric Acid by Some Benzoazoles-time and Temperature Effects[J]. Corrosion, 2001, 57(7): 614-

- 620.
- [9] CAO Cun-an, ZHANG Jian-qing. An Introduction to Electrochemical Impedance Spectroscopy[M]. Beijing: Science Press, 2002: 20.
- [10] QIAN B, WANG J, ZHENG M, et al. Synergistic Effect of Polyaspartic Acid and Iodide Ion on Corrosion Inhibition of Mild Steel in H₂SO₄[J]. Corrosion Science, 2013, 75(7): 184-192.
- [11] 田小龙, 丁耀彬, 汤静芳, 等. 氨法脱硫液中 Q235 钢腐蚀复合缓蚀剂的开发[J]. 材料保护, 2014, 47(10): 54-57.
TIAN Xiao-long, DING Yao-bin, TANG Jing-fang, et al. Development of Q235 Steel Corrosion Compound Corrosion Inhibitor in Ammonia Desulphurization[J]. Material Protection, 2014, 47(10): 54-57.
- [12] 廖冬梅, 于萍, 罗运柏, 等. 苯并三氮唑及其甲基衍生物在去离子水中对铜的缓蚀作用[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2002, 22(6): 359-362.
- LIAO Dong-mei, YU Ping, LUO Yun-bai, et al. The Inhibition Effect of Benzotriazole and Methyl Derivatives on Copper in Deionized Water[J]. Journal of China Corrosion and Prevention, 2002, 22(6): 359-362.
- [13] FENGX J, SHIY L, AN H S. The Corrosion Inhibitor of Sesame Oil Imidazoline Preparation and Corrosion Inhibition of A30 Steel[J]. Chemistry, 2014, 77(11): 1103-1108.
- [14] HU Song-qing, JIA Xiao-lin, HU Jian-chun, et al. Quantum Chemical Analysis of the Molecular Structure and Corrosion Resistance of Imidazoline Corrosion Inhibitor[J]. Journal of China Petroleum University: Natural Science Edition, 2011, 35(1): 146-150.
- [15] ZHANG D Q, GAO L X, ZHOU G D. Self-assembled Urea-amine Compound as Vapor Phase Corrosion Inhibitor for Mild Steel[J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 204: 1646-1650.