

碳钢用双吗啉甲基脲基复配气相缓蚀剂及其缓蚀性能

闫丽艳¹, 丁瑶¹, 李文强², 詹天荣^{1,2*}

(1. 青岛科技大学 化学与分子工程学院, 山东 青岛 266042;

2. 青岛鑫盈鑫包装材料有限公司, 山东 青岛 266042)

摘要: **目的** 制备一种用于碳钢保护的绿色高效复配气相缓蚀剂。**方法** 以双吗啉甲基脲、尿素、十二烷基磺酸钠为三因素, 采用 45[#]钢为研究对象, 通过极化曲线和电化学阻抗实验确定三水平, 设计 L9(3³) 正交实验, 筛选出最优配方并制成气相防锈纸, 采用 X 射线光电子能谱和接触角测量研究复方 VCI 在碳钢表面的吸附情况。**结果** 筛选出了最佳的三元配方: 3 g/L 双吗啉甲基脲+2 g/L 尿素+0.25 g/L 十二烷基磺酸钠; 以此为基础制成防锈纸, 其挂片实验的缓蚀效率高达 94.05%。经该防锈纸防护的金属表面接触角与被原纸保护的金属表面接触角相比增大了约 11°, 呈现出更高的疏水性。**结论** 以最优气相缓蚀剂配方为基础制成的气相防锈纸具有明显的气相防锈保护作用。

关键词: 气相缓蚀剂; 金属腐蚀; 正交实验; 复配; 电化学

中图分类号: TB485.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)17-0276-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.17.034

Bis-morpholiumomethyl-urea Compound Vapor Corrosion Inhibitor and Its Corrosion Inhibition Performance for Carbon Steel

YAN Li-yan¹, DING Yao¹, LI Wen-qiang², ZHAN Tian-rong^{1,2*}

(1. College of Chemistry and Molecular Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Shandong Qingdao 266042, China; 2. Qingdao Xinyingxin Packaging Materials Co., Ltd., Shandong Qingdao 266042, China)

ABSTRACT: The work aims to prepare a green and efficient compound vapor corrosion inhibitor for protection of carbon steel. 45[#] steel was used as the experimental object, and bis-morpholiumomethyl-urea, urea, and sodium dodecyl sulfonate were used as the compound components. Through polarization curve and electrochemical impedance experiment, three levels were determined and L9(3³) orthogonal experiment was designed, and the best formula was screened, according to which the vapor antirust paper was made. Then, the adsorption of compound VCI on carbon steel surface was studied by X-ray photoelectron spectroscopy and contact angle measurement. The best ternary formula was selected: 3 g/L bis-morpholiumomethyl-urea + 2 g/L urea + 0.25 g/L sodium lauryl sulfonate. Based on this, the antirust paper was made, and its corrosion inhibition efficiency was as high as 94.05%. The contact angle of the metal surface protected by the antirust paper increased by about 11° compared with that of the metal surface protected by the base paper, showing higher hydrophobicity. The vapor antirust paper based on the optimal vapor corrosion inhibitor formula has obvious vapor antirust protection.

KEY WORDS: vapor corrosion inhibitor (VCI); metal corrosion; orthogonal experiment; compound; electrochemical test

金属制品在加工运输过程中易受电化学腐蚀, 提高金属防锈包装技术对减少经济损失和资源浪费有

重要的意义^[1]。气相缓蚀剂 (Vapor Corrosion Inhibitor, VCI) 可以挥发并作用于环境介质和金属表面,

减轻或延缓被保护金属的腐蚀, 制成的防锈纸、防锈膜等使用方便, 适用于结构复杂的金属制品的包装。近年来, 气相缓蚀剂引起了人们的极大关注^[2-3], 研制绿色环保的防锈包装产品是未来发展的方向^[4]。以吗啉衍生物为主要成分的 VCI 低毒高效, 已在船舶、精密刀具、电厂锅炉维修、汽车配件等领域推广应用, 并取得了良好效果^[5-6]。本研究通过正交实验, 优化出双吗啉甲基脲 (Bis-Morpholiumomethyl-Urea, BMMU)、尿素、十二烷基磺酸钠 (Sodium Laurylsulfonate, SLS) 三元复配的最佳配方, 并以此为基础制成气相防锈纸。通过接触角测量、X 射线光电子能谱 (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS) 等方法对其在碳钢表面的吸附保护机理进行研究。

1 实验

1.1 材料与仪器

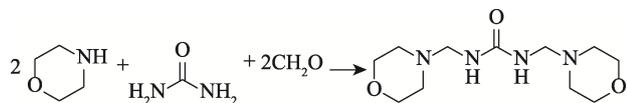
实验用金属为 45# 钢 (质量分数: C ≤ 0.488, Si ≤ 0.247, P ≤ 0.020, S ≤ 0.002, Al ≤ 0.014, Mn ≤ 0.060, Cr ≤ 0.010, Ni ≤ 0.010, Cu ≤ 0.010, 余量为 Fe)。挂片实验样品尺寸为 25 mm × 50 mm × 10 mm; 电化学实验工作电极尺寸为 10 mm × 10 mm × 10 mm; 环氧树脂封装, 裸露工作表面尺寸为 1 cm × 1 cm。均用砂纸逐级打磨至 2 000 目。

主要材料: 吗啉 (C₄H₉NO), 分析纯; 甲醛 (HCHO) 水溶液, 分析纯; 尿素 (CH₄N₂O), 分析纯; 十二烷基磺酸钠 (C₁₂H₂₅SO₃Na), 分析纯; 硫酸钠 (Na₂SO₄), 分析纯。以上试剂均购买于国药集团化学试剂有限公司。

主要仪器: CHI-660e 电化学工作站, 上海辰华仪器有限公司; RY-1G 熔点仪, 天津光学仪器厂; OCA 视频光学接触角测试仪, 德国 Dataphysics 公司; K-Alpha X 射线光电子能谱仪, 赛默飞世尔科技有限公司。

1.2 BMMU 的合成

本实验中吗啉、甲醛、尿素的物质的量之比为 2 : 2 : 1。量取 51.50 mL 吗啉与无水乙醇混合均匀, 置于三口烧瓶后取甲醛溶液缓慢滴加, 充分搅拌 1 h 后加入尿素。回流反应 8 h 后冷却, 大量白色晶体析出, 过滤洗涤干燥^[7]。反应过程如下:



1.3 密闭空间挥发减量实验

分别称取 3 种缓蚀剂粉末各 2 g, 均匀平铺在玻璃表面皿中, 在 50 °C 下恒温干燥 72 h, 每 24 h 称量一次。记录并计算质量损失率, 平行 3 次。

1.4 电化学实验

采用三电极体系进行单因素单水平实验: 参比电极为饱和甘汞电极, 辅助电极为碳棒, 工作电极为 45# 钢。以添加不同浓度缓蚀剂的硫酸钠溶液 ($\omega=7.1\%$) 为电解质。

动电位极化曲线测量前先测试开路电位, 稳定时间为 30 min、扫描速率为 1 mV/s、扫描范围为开路电位 ±250 mV。VCI 的缓蚀效率 (η_i) 通过式 (1) 计算。

$$\eta_i = \frac{I_{\text{corr}0} - I_{\text{corr}}}{I_{\text{corr}0}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $I_{\text{corr}0}$ 为没有添加 VCI 时的腐蚀电流密度, A/cm²; I_{corr} 为添加 VCI 时的腐蚀电流密度, A/cm²。

电化学阻抗谱测试: 以稳定的开路电位为初始电压, 振幅为 5 mV, 扫描频率范围为 10⁵ ~ 10⁻² Hz。不添加和添加 VCI 的拟合电路如图 1 所示, 其中, R_s 为溶液电阻; R_{ct} 为双电层中的电荷转移电阻; W_s 为扩散电阻。使用恒定相位元件 (Q) 代替双层电容 (C_{dl})。此处认为 Q_{ct} 和 R_{ct} 是在同一个位置产生的, 因此是并联的状态。加入 VCI 后, 如图 1b 所示, VCI 分子吸附在工作电极表面形成保护膜, 在拟合电路中形成新的元件, Q_f 为新相双电层电容保护膜生成的, R_f 为膜电阻。

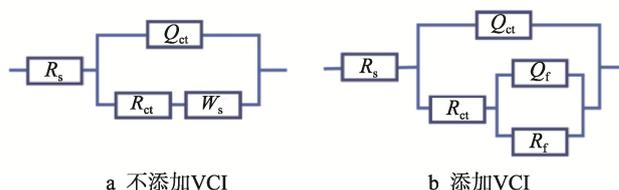


图 1 拟合等效电路

Fig.1 Fitting equivalent circuit

VCI 的缓蚀效率通过式 (2) 计算。

$$\eta_R = \frac{R_p - R_{p0}}{R_p} \times 100\% \quad (2)$$

式中: R_p 和 R_{p0} 分别为添加和不添加 VCI 时工作电极的极化电阻, 分别是相应的电荷转移电阻 R_{ct} 和膜电阻 R_f 的和^[8]。

1.5 挂片实验

本实验采用试管溶液法^[9-10]。

VCI 粉: 在规格为 30 mm × 200 mm 的玻璃试管中倒入一定量去离子水 (空白组) 和不同浓度的 VCI 水溶液, 在正上方悬挂碳钢试样, 用橡胶塞塞住管口, 然后放入 50 °C 的烘箱中, 加热 8 h 后自然冷却 16 h, 以 24 h 为一周期, 持续 7 个周期。

VCI 纸: 将原纸裁剪成 120 mm × 150 mm 的尺寸, 在 VCI 溶液中充分浸没 20 min, 自然晾干制得气相防锈纸。将制成的气相防锈纸和原纸分别折叠卷成圆

筒贴入试管壁, 不与水接触。

记录实验前金属试样及实验后去除铁锈后的质量变化情况, 根据式(3)计算 η , 平行实验3次。

$$\eta = \frac{\Delta m_0 - \Delta m}{\Delta m_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: Δm_0 为未添加 VCI 的金属试片实验后改变的质量, g; Δm 为添加了 VCI 的金属试片 7 个周期结束后改变的质量, g。

1.6 气相缓蚀能力测试

参考 GB/T 35491—2017 对所制得的 VCI 防锈纸进行气相缓蚀能力 (Vapor Phase Corrosion Inhibition Ability, VIA) 测试。

1.7 碳钢表面分析

1.7.1 接触角测试

VCI 防锈纸和原纸分别包裹金属试片于 50 °C 的密闭环境下放置 72 h 后取出, 测量金属表面的接触角。

1.7.2 XPS

在 50 °C 密闭环境中使用 VCI 防锈纸对 45# 钢试片预膜 72 h, 通过 XPS 分析金属表面组成成分和元素化学状态。

2 结果与讨论

2.1 BMMU 分析

合成的 BMMU 为白色固体, 测得熔点为 164 ~ 165 °C, 其红外光谱、核磁共振氢谱、质谱分析如下: 红外光谱 (KBr, 3 322.73 ($\nu_{\text{-NH-}}$), 2 812.83 ~ 2 835.81 ($\nu_{\text{-CH}_2\text{-}}$), 1 629.09 ($\nu_{\text{-CO-}}$), 1 580.27 ($\delta_{\text{-NH-}}$) cm^{-1}), 波数为 800 ~ 1 100 cm^{-1} 的吸收峰是咪啉基团的特征峰, 如图 2 所示; 核磁共振谱 $^1\text{H NMR}$ (500 MHz, D_2O): δ 4.00 (s, 4H, 2 \times N-CH₂-N), 3.75 (t, 8H, 4 \times N-CH₂), 2.59 (t, 8H, 4 \times O-CH₂); 质谱测试 (M+H) 的相对分子质量为 259.1768, 与目标物 (BMMU+H) 的相对分子

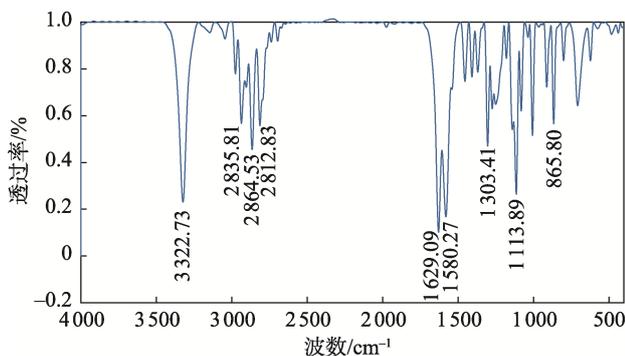


图 2 BMMU 的红外谱图
Fig.2 Infrared spectra of BMMU

质量相符。故分析确认所合成的产物含有咪啉单元, 认为成功合成了 BMMU。

2.2 密闭挥发减量实验

VCI 的挥发性是评价其实用价值高低的重要标准, 决定了其诱导性、持久性和有效作用距离。VCI 挥发性太大, VCI 会在短期内耗损殆尽, 不利于金属的长期保护; 挥发较慢的 VCI 在短期内虽然不会起到良好的保护作用, 但留存时间长, 能够长期保护。VCI 的挥发性大小可以用质量损失率来反映。如表 1 所示, BMMU 挥发性相对较高, 72 h 时的质量损失率达到了 3.28%, 表明其可在短期内挥发到金属表面吸附成膜, 快速发挥其保护作用。SLS 和尿素的挥发性相对较低, 质量损失率分别为 0.31% 和 0.41%, 可以作为配伍成分延长缓蚀周期。

表 1 VCI 随时间变化不同的质量损失率
Tab.1 Weight loss rates of VCI in different periods

VCI	质量损失率/%		
	24 h	48 h	72 h
BMMU	1.63	2.15	3.28
尿素	0.17	0.27	0.31
SLS	0.13	0.31	0.41

2.2 电化学实验

2.2.1 BMMU 的单因素水平选择

一方面, BMMU 挥发水解后带多个正电荷中心, 提高了其在金属表面的吸附能力; 另一方面, BMMU 分子体积较大, 吸附后具有较大的覆盖面积, 可发生较大的电阻阻滞电化学腐蚀反应。如图 3a 所示, 添加了 BMMU 溶液的半圆弧直径大于空白溶液的半圆直径, 说明电极表面上形成了吸附膜保护, 电子转移困难, 提高了耐腐蚀性。电化学参数如表 2 所示, 一定浓度范围内, 添加了 BMMU 与未添加 BMMU 的相比, 电阻值变大, 缓蚀效率提高, 质量浓度为 2、3 和 4 g/L 时的缓蚀效率分别为 67.32%、82.02%、78.69%。图 3b 显示, 随着 BMMU 浓度的增加, 腐蚀电位向阴极移动, 斜率变大, 腐蚀电流密度降低, 耐腐蚀性提高, 质量浓度为 2、3 和 4 g/L 时的缓蚀效率分别为 66.16%、66.57%、65.99%。综上所述, 选择 BMMU 的因素水平为 2、3 和 4 g/L。

2.2.2 尿素的单因素水平选择

与空白相比, 尿素的加入提高了金属氧化过程的活化能。如图 4a 所示, 与不添加尿素的体系相比, 添加尿素后的阻抗弧增大, 在质量浓度大于 3 g/L 后弧半径降低。这可能是随着尿素的继续加入, 缓蚀剂在碳钢表面形成的膜的构型及成分不稳定, 所以缓蚀效率降

低。不同浓度尿素溶液中碳钢的极化曲线如图 4b 所示, 阳极极化曲线极化率增加, 腐蚀电位向正方向移动, 腐蚀电流减小。总体来说, 尿素抑制了碳钢阳极溶解的过程^[10], 属于阳极型缓蚀剂。结合公式求得其在不同质量

浓度下的缓蚀效率(表 3), 与质量浓度 5 g/L 相比, 质量浓度 1、2、3 和 4 g/L 的缓蚀效率相对较高。由于阳极型缓蚀剂添加不足时会增加点蚀的危险, 故综合考虑选择质量浓度 2、3 和 4 g/L 作为尿素的因素水平。

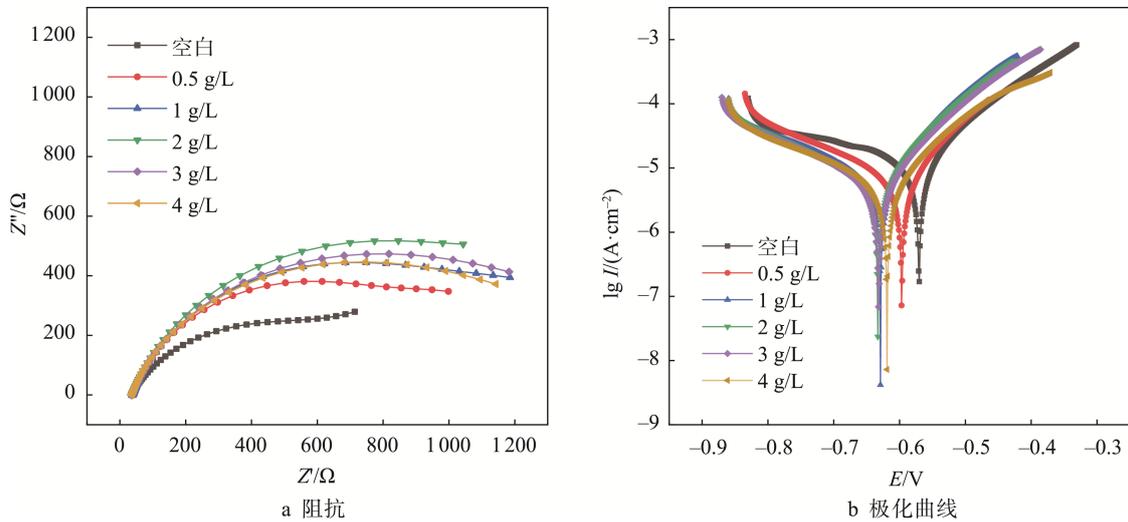


图 3 45#钢在电解质中添加不同浓度 BMMU 的电化学测试结果

Fig.3 Electrochemical test results of 45# steel in electrolytes with different concentrations of BMMU

表 2 45#钢在电解质中添加不同浓度 BMMU 的电化学参数

Tab.2 Electrochemical parameters of 45# steel in electrolytes with different concentrations of BMMU

质量浓度/(g·L ⁻¹)	E_{corr}/V	$I_{corr}/(\mu A \cdot cm^{-2})$	$R_p/(\Omega \cdot cm^{-2})$	$\eta_I/\%$	$\eta_R/\%$
0	-0.570	19.320	670.73		
0.5	-0.597	8.142	1 328.50	57.78	49.51
1	-0.628	7.443	1 726.30	61.40	61.15
2	-0.633	6.524	2 052.70	66.16	67.32
3	-0.632	6.445	3 862.59	66.57	82.64
4	-0.619	6.557	3 147.77	65.99	78.69

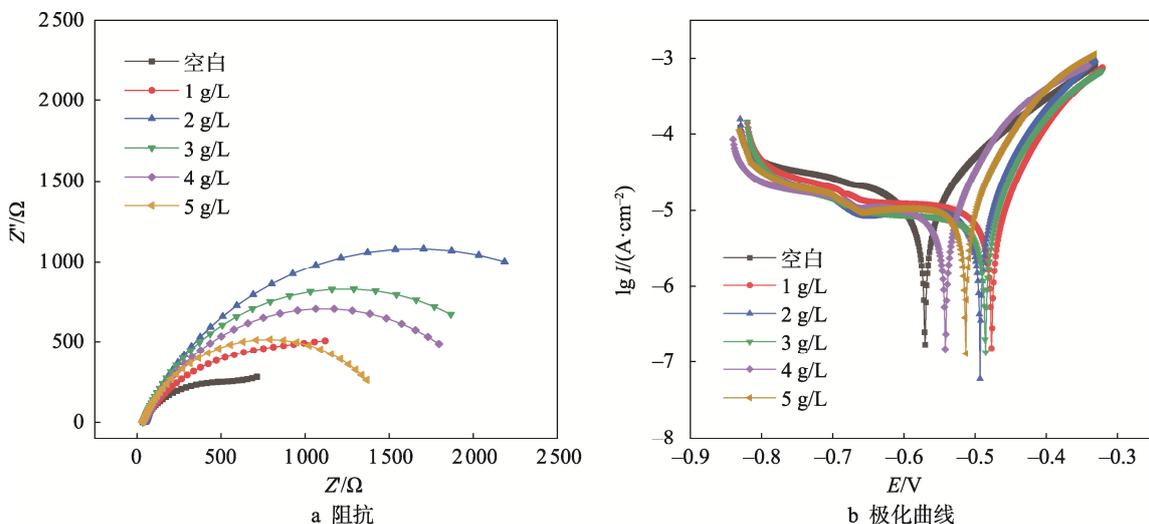


图 4 45#钢在电解质中添加不同浓度尿素的电化学测试结果

Fig.4 Electrochemical test results of 45# steel in electrolytes with different concentrations of urea

表 3 45#钢在电解质中添加不同浓度尿素的电化学参数
Tab.3 Electrochemical parameters of 45# steel in electrolytes with different concentrations of urea

质量浓度/(g·L ⁻¹)	E_{corr}/V	$I_{corr}/(\mu A \cdot cm^{-2})$	$R_p/(\Omega \cdot cm^{-2})$	$\eta_I/\%$	$\eta_R/\%$
0	-0.570	19.320	670.73		
1	-0.475	10.670	2 413.00	44.77	72.20
2	-0.493	9.707	3 258.11	49.76	79.41
3	-0.483	8.314	2 429.48	56.97	72.39
4	-0.543	10.200	2 150.03	47.20	68.80
5	-0.513	11.480	1 496.75	40.58	55.19

2.2.3 SLS 的单因素水平选择

SLS 是含有氮、硫的阴离子表面活性剂,非极性基团吸附在金属表面改变金属表面的电荷状态和界面性质,形成一层疏水性保护膜,成为腐蚀反应过程中防止物质扩散的屏障,通过抑制腐蚀反应降低腐蚀速率。由图 5a 和表 4 可知,与空白相比,添加 SLS 后,弧半径增大,极化电阻增加,腐蚀电位正向移动,腐蚀电流密度降低,腐蚀反应被抑制,SLS 质量浓度为 0.15、0.20、0.25 g/L 时的缓蚀效率分别为 69.70%、73.05%、72.56%。由极化曲线计算可知,SLS 的质量浓度为 0.20、0.25 和 0.30 g/L 时的缓蚀效率大,整体变化趋势与阻抗谱结果相似,但 SLS 质量浓度太大不易溶解,故 SLS 的因素水平取 0.15、0.20、0.25 g/L。

2.2.4 三因素三水平正交复配实验

通过单因素实验确定了三组分的三水平,基于此本实验以 BMMU 为因素 A、尿素为因素 B、SLS 为因素 C 设计了 L9(3³)实验表(表 5),并以此表中的配方进行挂片实验。图 6 为实验结束后的光学照片,不同的 VCI 配方组与空白对照相比腐蚀程度均有不同程度的降低,相应的缓蚀效率如表 5 所示。通过对表 5 中的缓蚀效率进行极差分析所得的 K 值可知,最优水平为 A₂B₁C₃,即最优比例为 m(BMMU):m(尿素):m(SLS)=3:2:0.25。以此比例制成最优配方组对应的挂片实验如图 6 中 10 号所示,该金属制品与空白对照组相比几乎无锈,缓蚀效率为 94.05%,显示该最优配方具有优异的气相防锈性能。

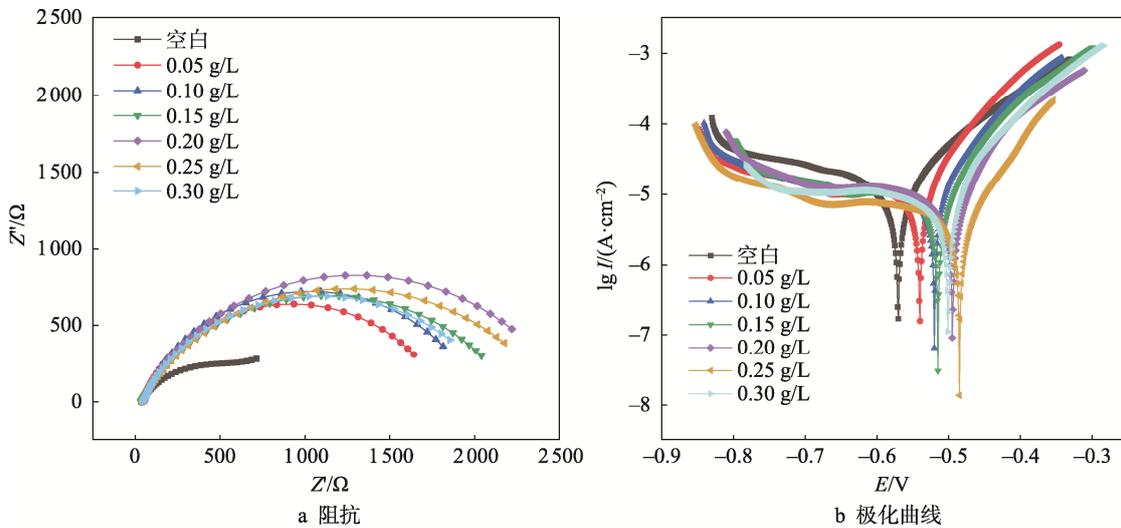


图 5 45#钢在电解质中添加不同浓度 SLS 的电化学测试结果
Fig.5 Electrochemical test results of 45# steel in electrolytes with different concentrations of SLS

表 4 45#钢在电解质中添加不同浓度 SLS 的电化学参数
Tab.4 Electrochemical parameters of 45# steel in electrolytes with different concentrations of SLS

质量浓度/(g·L ⁻¹)	E_{corr}/V	$I_{corr}/(\mu A \cdot cm^{-2})$	$R_p/(\Omega \cdot cm^{-2})$	$\eta_I/\%$	$\eta_R/\%$
0	-0.570	19.320	670.73		
0.05	-0.541	14.190	1 786.19	26.55	62.45
0.10	-0.522	14.110	1 977.65	26.97	66.09
0.15	-0.515	10.790	2 213.82	44.15	69.70
0.20	-0.495	8.500	2 537.92	56.00	73.57
0.25	-0.484	4.679	2 444.26	75.78	72.56
0.30	-0.501	8.522	2 123.53	55.89	68.42

表 5 三因素三水平正交实验及结果
Tab.5 Orthogonal experiments and results of L9(3³)

序号	BMMU/(g·L ⁻¹)	尿素/(g·L ⁻¹)	SLS/(g·L ⁻¹)	η/%
1	2	2	0.15	66.61
2	2	3	0.20	83.03
3	2	4	0.25	88.41
4	3	2	0.20	83.56
5	3	3	0.25	83.79
6	3	4	0.15	71.58
7	4	2	0.25	90.96
8	4	3	0.15	64.89
9	4	4	0.20	75.13
K ₁	0.79	0.80	0.68	
K ₂	0.80	0.77	0.81	
K ₃	0.77	0.78	0.88	
优水平	A ₂	B ₁	C ₃	
优组合		A ₂ B ₁ C ₃		

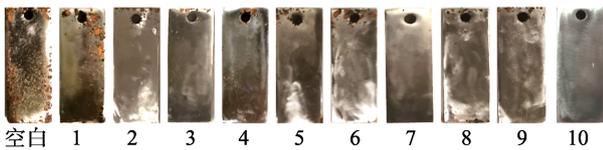


图 6 不同序号配方的光学照片
Fig.6 Optical photographs of different formulations
注: 10 号为最优配比的图片。

2.3 VIA 实验结果

经过 VIA 试验后, 结果如图 7 所示, 空白组出现大面积锈蚀, 防锈等级为 3 级, 表明本次实验有效; 而 3 组 VCI 平行样几乎无锈, 表明所制 VCI 防锈纸

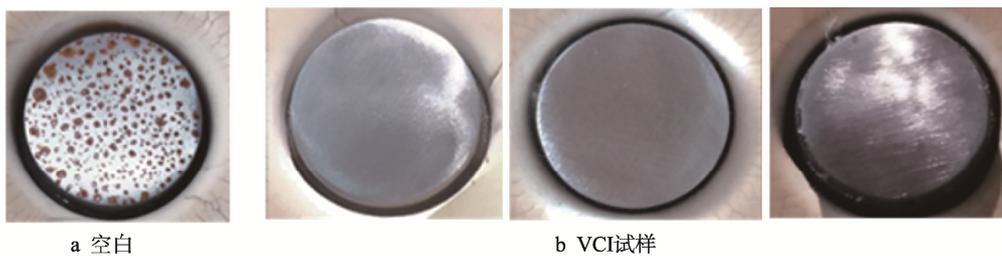


图 7 VIA 实验结果
Fig.7 Experimental result of VIA

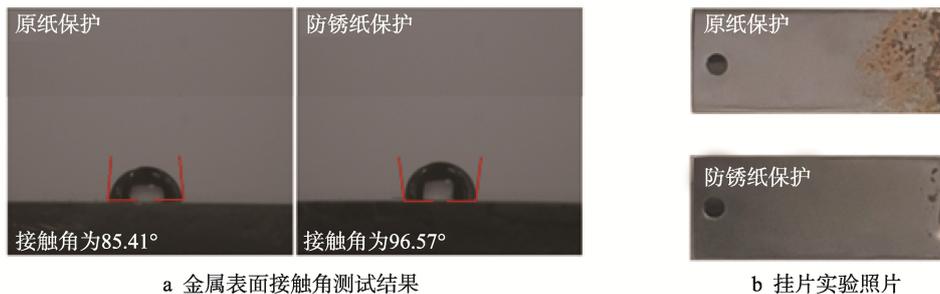


图 8 金属不经过和经过气相防锈纸保护的防锈效果对比
Fig.8 Comparison of rust prevention effects of metals without and with vapor antirust paper

具有一定防锈能力。

2.4 对碳钢的表面分析

2.4.1 接触角测试及挂片实验

VCI 从纸上挥发到金属表面形成保护膜, 提高了金属表面的疏水性, 从根本上抑制了金属表面薄层液膜的形成, 从而阻碍了腐蚀离子的侵蚀, 降低了金属的电化学腐蚀。图 8a 为 45# 钢在原纸和所制 VCI 防锈纸预膜 72 h 后的接触角大小。原纸保护的金属试片接触角为 85.41°, 而 VCI 防锈纸保护的金属试片表面的接触角增加到了 96.57°, 疏水性明显提高。由图 8b 可见, 挂片实验后有 VCI 防锈纸保护的试片与原纸保护的试片相比腐蚀程度大幅减小。该结果表明, 最优配方在 VCI 防锈纸领域具有一定的应用前景。

图 9 为金属试片经过所制 VCI 防锈纸预膜后的 XPS 谱图。图 9a Fe 2p_{3/2} 光谱中有 2 个峰, 其中 710.08 eV 的峰归属为铁氧化物 (Fe₃O₄), 706.54 eV 的峰归属为 Fe^[11], 这可能是由于预膜后 VCI 膜虽然覆盖在金属表面, 但少量裸露的部分仍被氧化。图 9b 中 O 1s 光谱的 529.80 eV 峰可能与 Fe₃O₄ 的 O 原子有关, 531.80 eV 处的峰可归属于羰基 O 原子^[12], 这可能是由 VCI 中尿素和 BMMU 组分吸附在了金属表面导致的。该结论也可由 C 1s 光谱进一步证实。图 9c 中 284.91 eV 处出现的强峰来自于 C—H 或 C—C 键^[13], 286.15 eV 处的峰值与 C—O 键和 C—N 键有关^[14], 而 288.42 eV 的峰表明了 C=O 的存在。图 9d 中 N 1s 光谱 400.4 eV 的峰对应于与 Fe 表面相互作用的 N 原子^[15], 399.74 eV 的峰对应于 C—N 键^[14], 而 C—N 键存在于尿素和 BMMU 分子中。综上所述, XPS 结果证实了该复配 VCI 通过预膜吸附在了碳钢表面。

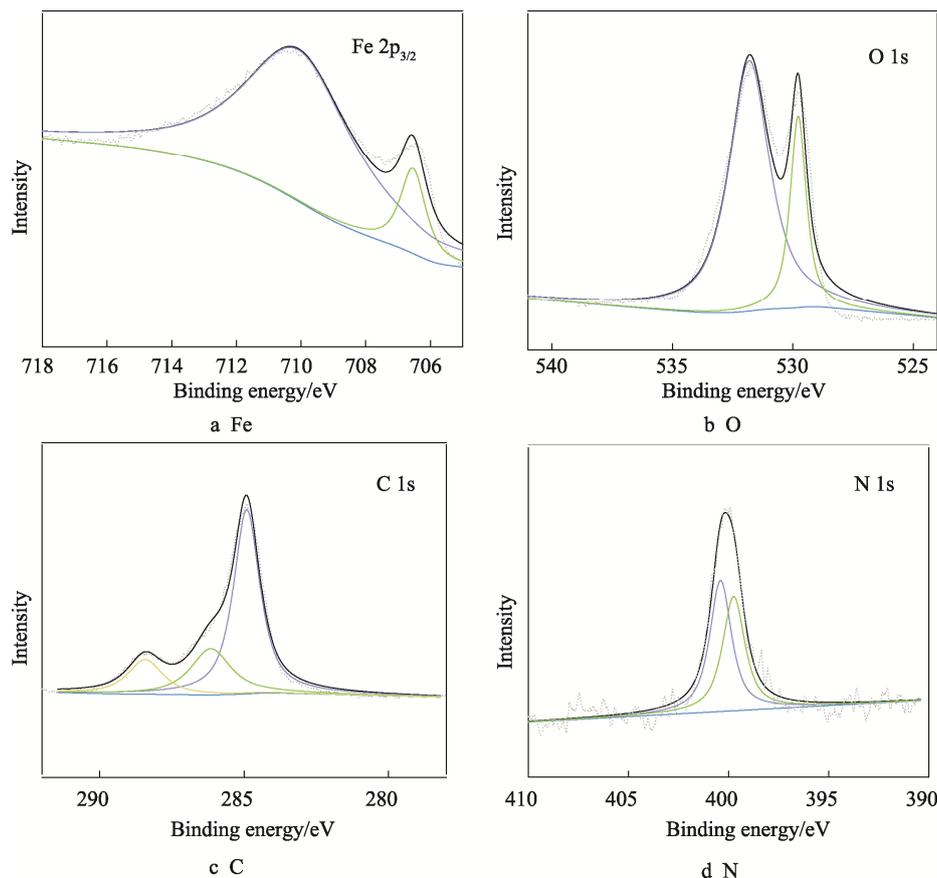


图9 预膜后不同元素的XPS谱图
Fig.9 XPS spectra of different elements after prefilming

3 结语

电化学实验和挂片实验证明BMMU、尿素和SLS对45#钢均有一定的缓蚀性能。正交实验筛选出了最优的VCI配方为3 g/L BMMU+2 g/L 尿素+0.25 g/L SLS。XPS和接触角测试证明,制成的VCI防锈纸在金属表面形成了有效的吸附保护层。配方中未使用含亚硝基的胺和亚硝酸盐,对研发基于绿色VCI的环保包装材料具有重要的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 中科院海洋研究所. “我国腐蚀状况及控制战略研究”重大咨询项目顺利结题并对外发布成果[J]. 表面工程与再制造, 2017, 17(5): 62.
Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences. The major consulting project "Research on China's Corrosion Status and Control Strategy" was successfully concluded and the results were released to the public[J]. Surface Engineering & Remanufacturing, 2017, 17(5): 62.
- [2] VIGDOROVICH V, KNYAZEVA L, ZAZULYA A, et al. Use of the IFKhaN Type of Volatile Inhibitors for Protection of Steel Equipment in the Atmosphere of the Livestock Premises[J]. Russian Agricultural Sciences, 2017, 43(2): 190-193.
- [3] ZHANG Hong-liang, MA Teng-fei, GAO Li-xin, et al. Vapor Phase Assembly of Urea -A mine Compounds and Their Protection Against the Atmospheric Corrosion of Carbon Steel[J]. Journal of Coatings Technology and Research, 2020, 17(5): 503-515.
- [4] WANG Xin-wei, REN Jie, LI Zheng-lin, et al. Research Progress of Vapor Phase Corrosion Inhibitors in Marine Environment[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2022, 29(59): 88432-88439.
- [5] 袁宏强, 杜冠乐, 张颖, 等. 吗啉类气相缓蚀剂的合成及在渤海油田的应用[J]. 山东化工, 2019, 48(9): 159-160.
YUAN Hong-qiang, DU Guan-le, ZHANG Ying, et al. Synthesis of Morpholine Gas Phase Inhibitor and Its Application in Bohai Oil Field[J]. Shandong Chemical Industry, 2019, 48(9): 159-160.
- [6] VALDEZ S B, WIENER M, CHENG N, et al. Technological Applications of Volatile Corrosion Inhibitors[J]. Corrosion Reviews, 2018, 36(3): 227-238.

- [7] 张大全, 高立新, 陆柱. 吗啉类齐聚型气相防锈剂的制备及防锈效果[J]. 精细化工, 2000, 17(6): 366-368.
ZHANG Da-quan, GAO Li-xin, LU Zhu. Preparation of Oligomeric Morpholinium Type Vapor Phase Inhibitor and Its Vapor Rustproof Effects[J]. Fine Chemicals, 2000, 17(6): 366-368.
- [8] LIU Hong-wei, GU Ting-yue, LYU Ya-lin, et al. Corrosion Inhibition and Anti-Bacterial Efficacy of Benzalkonium Chloride in Artificial CO₂-Saturated Oilfield Produced Water[J]. Corrosion Science, 2017, 114: 102-111.
- [9] 梁爽, 宋海燕, 王立军. 碳钢用绿色复配气相缓蚀剂的制备[J]. 包装工程, 2021, 42(17): 132-141.
LIANG Shuang, SONG Hai-yan, WANG Li-jun. Preparation and Research of Green Compound Gas Phase Corrosion Inhibitor for Carbon Steel[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(17): 132-141.
- [10] 王刚. 碳钢用复合型气相缓蚀剂的缓蚀性能及机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2022.
WANG Gang. Study on the Corrosion Inhibition Performance and Mechanism of Compound Vapor Phase Inhibitor for Carbon Steel[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2022.
- [11] 余迪. 碳钢气相缓蚀剂配方设计及性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2021.
YU Di. Formulation Design and Performance Research of Volatile Inhibitor for Carbon Steel[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2021.
- [12] LI Z, YUAN X, SUN M, et al. Rhamnolipid as an Eco-Friendly Corrosion Inhibitor for Microbiologically Influenced Corrosion[J]. Corrosion Science, 2022, 204: 110390.
- [13] CHAI Chun-xiao, XU Yan-hua, SHI Shu-chen, et al. Functional Polyaspartic Acid Derivatives as Eco-Friendly Corrosion Inhibitors for Mild Steel in 0.5 M H₂SO₄ Solution[J]. RSC Advances, 2018, 8(44): 24970-24981.
- [14] GUPTA R K, MALVIYA M, VERMA C, et al. Pyridine-Based Functionalized Graphene Oxides as a New Class of Corrosion Inhibitors for Mild Steel: An Experimental and DFT Approach[J]. RSC Advances, 2017, 7(62): 39063-39074.
- [15] ZHANG Da-quan, AN Zhong-xun, PAN Qing-yi, et al. Volatile Corrosion Inhibitor Film Formation on Carbon Steel Surface and Its Inhibition Effect on the Atmospheric Corrosion of Carbon Steel[J]. Applied Surface Science, 2006, 253(3): 1343-1348.

责任编辑: 曾钰婵