

# 绿色气相缓蚀剂的复配及其缓蚀性能研究

钟道灿<sup>1</sup>, 卢立新<sup>1,2\*</sup>, 叶桓<sup>1</sup>, 潘暉<sup>1</sup>

(1. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122;

2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

**摘要:** **目的** 为解决单组分绿色气相缓蚀剂缓蚀性能差的问题, 复配一种绿色复合气相缓蚀剂, 探究其对碳钢和黄铜金属试样的缓蚀作用。 **方法** 采用腐蚀质量损失、接触角、电化学等试验测试分析复合气相缓蚀剂对碳钢、黄铜的缓蚀效果与成膜耐久性。 **结果** 复合气相缓蚀剂对 10 号钢、H62 黄铜的缓蚀效率分别为 84.71%、91.67%, 缓蚀性能显著优于单组分气相缓蚀剂; 复合气相缓蚀剂在 10 号钢、H62 黄铜表面均形成了缓蚀膜, H62 黄铜表面形成的缓蚀膜较 10 号钢的更具耐久性。 **结论** 与单组分气相缓蚀剂相比, 该复合气相缓蚀剂对碳钢、黄铜均具备良好的缓蚀作用, 为绿色气相缓蚀剂的防锈包装应用提供支撑。

**关键词:** 绿色; 气相缓蚀剂; 吸附; 预膜

中图分类号: TB485.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)17-0284-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.17.035

## Compound of Green Volatile Corrosion Inhibitor and Its Corrosion Inhibition Performance

ZHONG Dao-can<sup>1</sup>, LU Li-xin<sup>1,2\*</sup>, YE Huan<sup>1</sup>, PAN Liao<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Jiangsu Wuxi 214122, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment Technology, Jiangsu Wuxi 214122, China)

**ABSTRACT:** The work aims to compound a green composite volatile corrosion inhibitor and explore its corrosion inhibition effect on carbon steel and brass metal samples in order to solve the problem of poor corrosion inhibition performance of one-component green volatile corrosion inhibitor. The corrosion inhibition effect and film forming durability of composite volatile phase corrosion inhibitor on carbon steel and brass were tested and analyzed by corrosion weight loss, contact angle and electrochemical tests. The corrosion inhibition efficiency of the composite volatile corrosion inhibitor for No. 10 steel and H62 brass was 84.71% and 91.67% respectively, and the corrosion inhibition performance was significantly better than that of the single-component volatile corrosion inhibitor. The composite volatile corrosion inhibitor formed a corrosion inhibitor film on the surface of No. 10 steel and H62 brass, and the corrosion inhibitor film formed on the surface of H62 brass was more durable than that of No. 10 steel. Compared with single-component volatile corrosion inhibitor, the composite volatile corrosion inhibitor has good corrosion inhibition effect on carbon steel and brass, providing support for the application of green volatile corrosion inhibitor in antirust packaging.

**KEY WORDS:** green; volatile corrosion inhibitor; adsorbent; prefilm

金属材料在日常使用过程中会与大气环境发生化学或电化学反应造成大气腐蚀, 导致金属结构的潜

在破坏, 并造成重大的经济损失。有关数据显示, 多数发达国家每年由于金属腐蚀会造成 3%~4% 的经

济损失<sup>[1]</sup>。气相缓蚀剂及其防锈包装是防止金属锈蚀的有效手段之一, 其具有一定的饱和蒸气压, 常温下可以挥发出缓蚀性气体, 通过扩散、吸附到金属表面, 从而有效保护金属, 防止其发生大气腐蚀<sup>[2]</sup>。单一组分气相缓蚀剂的使用通常难以满足对多种金属的防护作用, 甚至还会加速其他金属的腐蚀, 具有一定的局限性。多种气相缓蚀剂复配使用, 可发挥缓蚀剂组分之间的协同作用, 具有更加优异的缓蚀性能, 达到通用性目的<sup>[3]</sup>。

目前, 商业应用的气相防锈产品配方成分是以胺的无机酸盐或有机酸盐为主, 如亚硝酸二环己胺、芳香族胺类化合物等, 毒性较大, 并且在生产使用过程中易被人吸入体内造成更大的危害<sup>[4]</sup>。当今, 随着绿色环保、可持续发展战略的实施, 高效、低毒甚至无毒的气相缓蚀剂的研制成为趋势<sup>[5]</sup>。但低毒、无毒类的气相缓蚀剂的防锈效果通常较差, 如苯甲酸钠和苯并三氮唑单独作为气相缓蚀剂使用时, 缓蚀率不高, 难以起到对金属试样的保护<sup>[6]</sup>, 需要利用复配之间的协同作用提高其缓蚀能力。为此, 绿色气相缓蚀剂的复配成为研究重点。赵艳东等<sup>[7]</sup>采用苯并三氮唑、碘化钾、钨酸钠等缓蚀剂制备了一种碳钢防锈气相防锈纸, 质量损失法测定其缓蚀效率为 91.07%。钱静等<sup>[8]</sup>将二甲基咪唑与尿素、硅酸钠等缓蚀剂多组分复配, 确定优化的配方, 并通过试验验证其缓蚀效果。梁爽等<sup>[9]</sup>选用苯甲酸钠、葡萄糖酸钠、植酸和柠檬酸钠为复配缓蚀剂, 制备了一种碳钢气相防锈纸, 对 A3 钢的缓蚀率达到 94.36%, 对 45# 钢的缓蚀率达 94.47%。赫晓秀的<sup>[10]</sup>基于聚天冬氨酸复配了一种气相防锈涂料, 并制成气相防锈纸, 对碳钢的缓蚀效率为 88.57%。张恒等<sup>[5]</sup>采用苯甲酸钠、乌洛托品等复配了一种气相缓蚀剂, 可以作为亚硝酸钠系防锈剂替代产品。

本文选用绿色无毒的磷酸钠、葡萄糖酸钠、乌洛托品、苯并三氮唑复配了一种通用性的气相缓蚀剂, 试验测定分析其对钢和黄铜试样防锈效果。应用接触角、电化学手段对复合气相缓蚀剂在金属试样表面的成膜耐久性进行探讨。

## 1 试验

### 1.1 材料与仪器

试验材料为 10 号钢、H62 黄铜, 试样尺寸为 50 mm×25 mm×2.5 mm。电化学试验中使用试样尺寸为 10 mm×10 mm×2.5 mm, 并用密封胶封装, 使其工作面积为 10 mm×10 mm。试验前试样分别用 240#、400#、600# 砂纸逐级打磨, 除去斑痕和毛刺, 后用无水乙醇擦洗 3 遍, 热风吹干后称量, 置于干燥器中待用。

主要试剂: 磷酸钠、葡萄糖酸钠、乌洛托品、苯并三氮唑, 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; 复

合气相缓蚀剂是磷酸钠、葡萄糖酸钠、乌洛托品、苯并三氮唑按照一定比例复配而成。

试验用主要仪器设备见表 1。

表 1 试验用主要仪器设备  
Tab.1 Main instruments and equipment for test

仪器名称	型号	生产厂家
电化学工作站	CHI660	上海辰华仪器有限公司
接触角测试仪	DCAT21	德国 Dataphysics 公司
数显电子天平	XPR226DRQ/AC	美国 Mettler toledo 公司
电热恒温水浴锅	DK-S22	上海精宏实验设备有限公司
鼓风干燥箱	DHG-9036A	上海精宏试验设备有限公司

## 1.2 方法

### 1.2.1 腐蚀质量损失试验

在 50 mL 小烧杯中加入 1 g 气相缓蚀剂, 置于 500 mL 烧杯中, 向 500 mL 烧杯中加入 30 mL 蒸馏水。将 10 号钢与 H62 黄铜利用绝缘胶带固定在烧杯正上方(如图 1 所示), 并将烧杯密封。将烧杯放在 50 °C 的水浴锅中加热 8 h, 自然冷却 16 h, 试验周期为 1 d。试验结束后, 先将试样用丙酮除胶, 然后用酸洗液去除腐蚀产物, 并用乙醇冲洗, 进行干燥、称量, 利用式(1)、式(2)计算气相缓蚀剂的缓蚀效率。

$$v = \frac{m_0 - m_1}{At} \quad (1)$$

式中:  $m_0$  为金属试样初始质量;  $m_1$  为酸洗后对金属试样质量;  $A$  为金属块面积;  $t$  为时间。

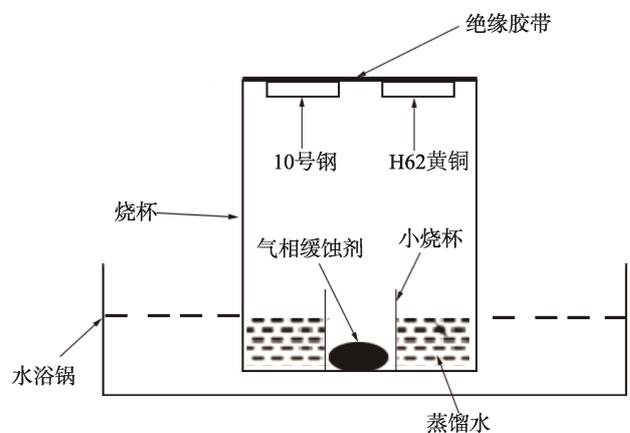


图 1 腐蚀质量损失试验装置  
Fig.1 Corrosion weight loss test device

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

式中： $\eta$ 为缓蚀效率； $v_0$ 为金属在无缓蚀剂系统中的腐蚀速率， $g/(m^2 \cdot h)$ ； $v$ 为金属在有缓蚀剂系统中的腐蚀速率， $g/(m^2 \cdot h)$ 。

### 1.2.2 密闭挥发减量试验

挥发性能是气相缓蚀剂的一个重要指标，通过密闭空间挥发减量试验间接考察缓蚀剂的挥发性能。称取碾钵碾磨均匀的气相缓蚀剂粉末各 2 g，均匀平铺在直径为 10 cm 的玻璃培养皿上。放入 50 °C 鼓风干燥箱中加热挥发，连续加热 72 h。每 24 h 称取一次质量，计算气相缓蚀剂的质量损失率。

### 1.2.3 金属试样的预膜

在 250 mL 烧杯中加入 1 g 复合气相缓蚀剂，将金属试样悬挂在烧杯中，并用封箱胶带将烧杯密封，将装置置于 50 °C 的鼓风干燥箱中，预膜处理 2 d。

### 1.2.4 接触角表征

采用接触角测试仪对预膜前后的金属试样进行接触角测试，以判断金属试样表面亲水性的变化。

### 1.2.5 电化学试验

动电位极化曲线和阻抗通过电化学工作站进行测试，三电极作为测试体系。其中饱和甘汞电极为参比电极，Pt 电极为辅助电极，工作电极分别为预膜后的 10 号钢电极与 H62 黄铜电极。电解质溶液为质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液，动电位极化曲线测量的扫描范围为 -250~+250 mV，扫描速率为 0.167 mV/s。电化学阻抗（EIS）的频率测试范围为  $10^5 \sim 10^{-2}$  Hz<sup>[11]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 气相缓蚀剂缓蚀效果分析

不同气相缓蚀剂的缓蚀效率见表 2。结果表明，磷酸钠、葡萄糖酸钠、乌洛托品、苯并三氮唑 4 种气相缓蚀剂在单独使用时，对 10 号钢的缓蚀作用较低，其中乌洛托品缓蚀效率最高，但仅为 25.62%。苯并三氮唑对 H62 黄铜防锈效果最好，缓蚀效率为 89.44%，但对 10 号钢的缓蚀效率仅有 20.66%，表明 4 种气相缓蚀剂在单独使用时，不能同时对 10 号钢与 H62 黄铜产生良好的缓蚀作用。复合气相缓蚀剂对 10 号钢缓蚀效率达到了 84.71%，对 H62 黄铜缓蚀效率达到了 91.67%，说明 4 种缓蚀剂复配后，各个缓蚀剂组分之间产生了协同作用，对 10 号钢与 H62 黄铜的缓蚀效率均优于单一组分。

### 2.2 密闭挥发减量试验

饱和蒸汽压的大小是评价气相缓蚀剂的一个重要指标，蒸汽压大的气相缓蚀剂挥发性较快，能快

速扩散到金属表面，与金属发生相互作用，抑制了金属的早期腐蚀。蒸汽压小的气相缓蚀剂挥发缓慢，但挥发时间长久，具有长期防护效果<sup>[12]</sup>。气相缓蚀剂复配时应考虑蒸汽压大小相结合的原则，由表 3 密闭挥发减量试验结果可知，在这几种气相缓蚀剂中，苯并三氮唑质量损失率较大，挥发性较快，属于短效性缓蚀剂。磷酸钠、葡萄糖酸钠与乌洛托品质量损失率低，挥发性较慢，属于长效性气相缓蚀剂。故该复合气相缓蚀剂中既包含长效性缓蚀剂，也包含短效性缓蚀剂，复合气相缓蚀剂的质量损失率低于苯并三氮唑的，挥发率适中，因此配方选择合理。

表 2 不同气相缓蚀剂的缓蚀效率  
Tab.2 Inhibition efficiency of different volatile corrosion inhibitors

气相缓蚀剂名称	缓蚀效率/%	
	10 号钢	H62 黄铜
磷酸钠	21.90	55.56
葡萄糖酸钠	17.36	24.44
乌洛托品	25.62	12.22
苯并三氮唑	20.66	89.44
复合气相缓蚀剂	84.71	91.67

表 3 不同气相缓蚀剂密闭挥发减量试验结果  
Tab.3 Test results of sealed volatilization loss of different volatile corrosion inhibitors

气相缓蚀剂名称	质量损失率/%		
	24 h	48 h	72 h
磷酸钠	0.12	0.25	0.37
葡萄糖酸钠	0.35	0.78	1.03
乌洛托品	0.4	1.25	2.25
苯并三氮唑	1.67	3.21	6.01
复合气相缓蚀剂	0.62	1.73	2.64

### 2.3 接触角测量

接触角通常用于表征液体在材料表面的润湿性，金属试样预膜前后的接触角如图 2 所示。结果表明，经过复合气相缓蚀剂的预膜后，10 号钢的接触角由 59.49° 增至 74.23°。H62 黄铜的接触角由 77.71° 增至 87.37°，金属试样表面接触角增大，说明气相缓蚀剂吸附在金属试样表面，形成了一层保护膜。使得水蒸气难以在金属表面润湿，金属表面更难形成液膜，从而减缓了金属试样在大气中的腐蚀速率<sup>[13]</sup>。

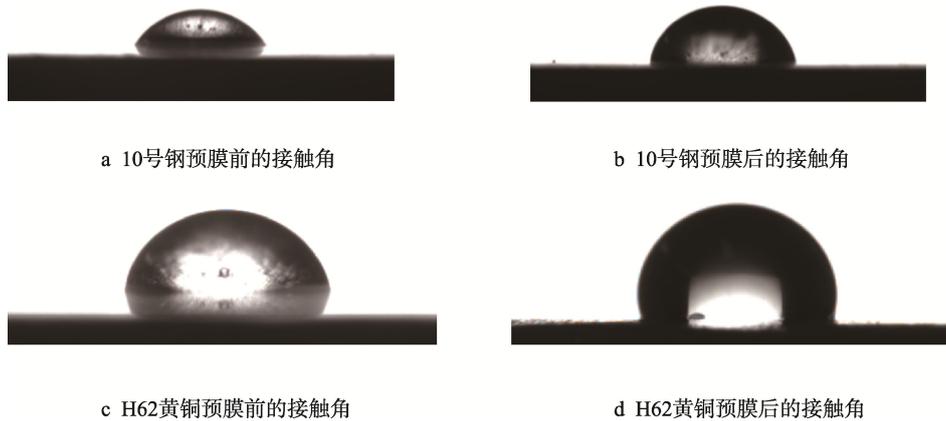


图 2 不同金属试样表面预膜前后的接触角  
Fig.2 Contact angles on different metal samples before and after prefilming

## 2.4 复合气相缓蚀剂成膜耐久性分析

### 2.4.1 动电位极化曲线分析

金属试样预膜前后的极化曲线和电化学参数如图 3 和表 4 所示。经复合气相缓蚀剂预膜后的 10 号钢电极、自腐蚀电位、腐蚀电流密度与空白试样相比

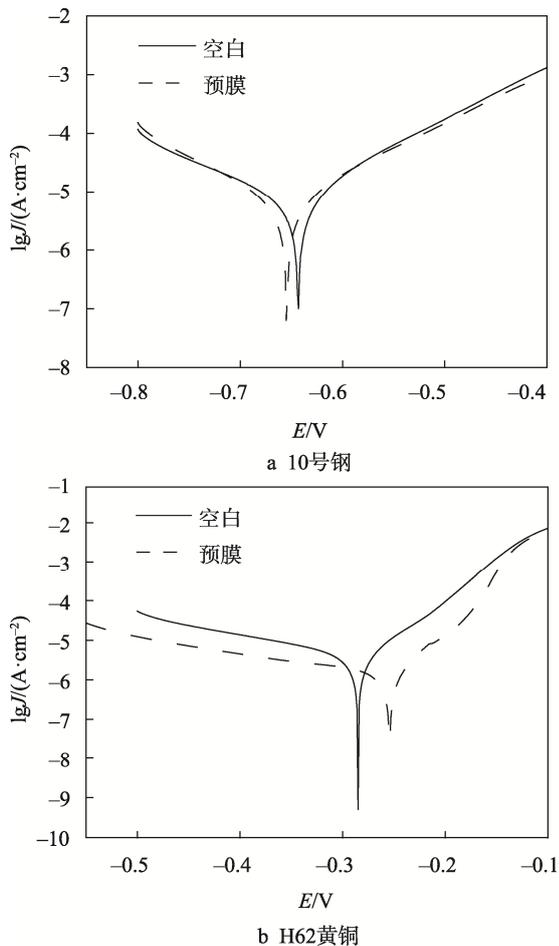


图 3 复合气相缓蚀剂预膜后的极化曲线  
Fig.3 Polarization curve of composite volatile corrosion inhibitor after prefilming

表 4 预膜后的极化曲线参数

Tab.4 Polarization curve parameters after prefilming

金属试样	条件	$E_{corr}/mV$	$I_{corr}/(\mu A \cdot cm^{-2})$
10 号钢	空白	-0.643	8.45
	预膜	-0.655	7.84
H62 黄铜	空白	-0.285	3.12
	预膜	-0.254	1.12

未发生显著变化,对阴极与阳极电流抑制作用也不显著。这可能是由于复合气相缓蚀剂对碳钢的成膜特性是以物理吸附为主<sup>[14]</sup>,耐久性差。当吸附膜浸入腐蚀介质 NaCl 溶液后,缓蚀剂膜被溶解破坏,导致与空白 10 号钢的极化曲线接近。H62 黄铜电极经过气相缓蚀剂预膜后,自腐蚀电位正移,腐蚀电流密度由  $3.12 \mu A/cm^2$  下降至  $1.12 \mu A/cm^2$ ,对阴阳极反应起到抑制作用。这可能是由于复合气相缓蚀剂中苯并三氮唑能够通过化学吸附作用在铜表面与一价铜离子形成不溶解的复合膜,不易被腐蚀介质溶解破坏、耐久性好,阻滞了外界侵蚀性腐蚀介质对黄铜的腐蚀<sup>[15]</sup>。

### 2.4.2 电化学阻抗曲线分析

图 4 为复合气相缓蚀剂预膜后的 Nyquist 谱。阻抗拟合采用 ZSimpWin 软件,图 5 为其等效电路图。其中,  $R_s$  代表溶液电阻;  $CPE_{dl}$  代表常相角元件,它可以被表述为:

$$Q = Y_0(j\omega)^n \quad (3)$$

式中:  $Y_0$  为导纳;  $j$  为虚根;  $\omega$  为角频率;  $n$  为指数项。

$R_{ct}$  为电荷转移电阻,  $W$  为 Warburg 电阻。由图 4 可知,预膜后的 10 号钢与空白 10 号钢的 Nyquist 谱仅包含 1 个容抗弧,说明其电极反应由 1 个时间常数控制。高频区的容抗弧反映了界面双电层和电荷转移电阻的弛豫过程,其半径则反映了电荷转移电阻  $R_{ct}$  的大小。 $R_{ct}$  值越大,碳钢腐蚀速率越小<sup>[16]</sup>。由表 5 拟合参数

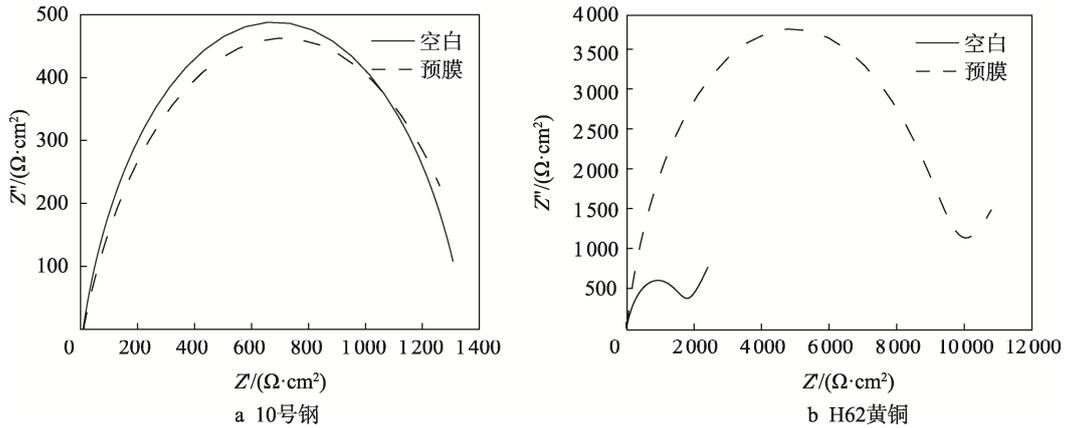


图4 复合气相缓蚀剂预膜后的 Nyquist 谱  
Fig.4 Nyquist spectra of composite volatile corrosion inhibitor after prefilming

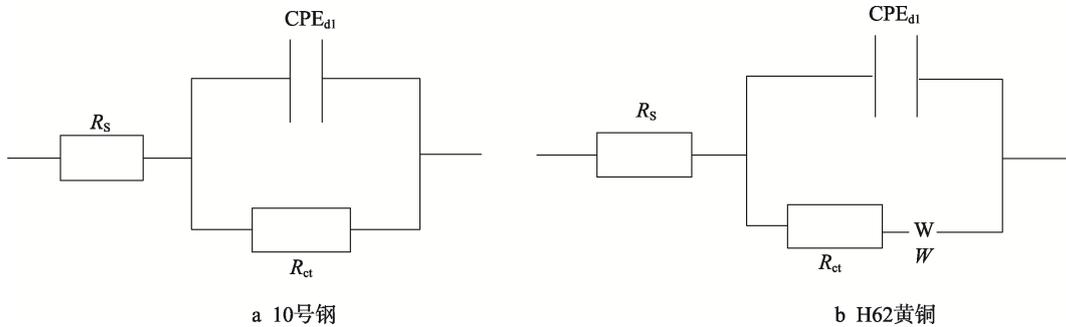


图5 不同金属试样的等效电路  
Fig.5 Equivalent circuits of different metal samples

表5 预膜后的电化学阻抗拟合参数  
Tab.5 Electrochemical impedance fitting parameters after prefilming

试样	处理条件	$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	CPE <sub>d1</sub> 元件		$R_{ct}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$W/(10^3 \text{ S} \cdot \text{s}^{0.5} \cdot \text{cm}^{-2})$
			$Y_0/(10^3 \mu\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-n})$	$n$		
10号钢	空白	9.87	0.45	0.80	1 344	—
	预膜	8.56	0.90	0.74	1 401	—
H62 黄铜	空白	10.84	0.045	0.84	1 694	3.33
	预膜	12.18	0.0052	0.84	9 555	1.095

可知，预膜后的 10 号钢的  $R_{ct}$  值与空白试样的  $R_{ct}$  值相比，并未发生明显变化。说明 10 号钢表面形成的吸附膜脱离气相缓蚀剂气氛后被腐蚀介质溶解破坏，没有产生对 10 号钢腐蚀的抑制作用。这与极化曲线表现出来的数据有良好的一致性。预膜前后黄铜试样的 Nyquist 图在高频表现为一个容抗弧，在低频区为直线 (Warburg 阻抗)，表现出扩散特性。Warburg 阻抗的出现可能是由于可溶性铜化合物的传输或溶解氧的扩散<sup>[17]</sup>。预膜前后的阻抗图的形状并未发生变化，这表明气相缓蚀剂预膜后并未改变腐蚀机理<sup>[18]</sup>。预膜后其中高频区容抗弧半径增加，电荷转移电阻由  $1\ 694 \Omega \cdot \text{cm}^2$  增加到  $9\ 555 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ，腐蚀速率减小。这

表明复合气相缓蚀剂在 H62 黄铜试样表面具有较好的吸附成膜性和较好的缓蚀性能<sup>[19]</sup>。

### 2.4.3 质量损失试验

将预膜后的金属试样取出，在无气相缓蚀剂的条件下进行腐蚀质量损失试验，结果如表 6 所示。在脱离气相缓蚀剂气氛后，预膜后的 10 号钢腐蚀速率与空白试样的没有较大差别，说明形成的缓蚀膜易被腐蚀介质溶解破坏，耐久性差，失去了对 10 号钢的缓蚀作用。但在 H62 黄铜表面形成的缓蚀膜依然有良好的抗腐蚀能力，使 H62 黄铜腐蚀速率由  $0.046\ 4 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  下降至  $0.012\ 9 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ，缓蚀效率达 72.22%。这表明该缓蚀膜在黄铜表面耐久性好，脱离气相缓蚀剂气氛后，对

H62 黄铜依然有一定的防锈能力。该试验结果与极化以及阻抗曲线得出的结论有良好的一致性。

表 6 金属试样预膜后的缓蚀效率

Tab.6 Corrosion inhibition efficiency on metal sample after prefilming

金属试样	腐蚀速率/ ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ )		缓蚀效率/%
	空白	预膜	
10 号钢	0.620 5	0.598 8	3.50
H62 黄铜	0.046 4	0.012 9	72.22

### 3 结语

1) 复合气相缓蚀剂较单组分气相缓蚀剂使用时, 对碳钢和黄铜的缓蚀作用均有所提升, 对 10 号钢缓蚀效率达到 84.71%, H62 黄铜缓蚀效率达到 91.67%

2) 复合气相缓蚀剂在金属试样表面形成了一种缓蚀膜, 提高了金属试样的拒水性能。

3) 与碳钢试样相比, 复合气相缓蚀剂在黄铜试样表面成膜耐久性更好, 不易被腐蚀介质溶解破坏, 脱离气相缓蚀剂气氛后该复合气相缓蚀剂对黄铜试样还具备有一定的缓蚀能力。

#### 参考文献:

- [1] ANSARI F A, VERMA C, SIDDIQUI Y S, et al. Volatile Corrosion Inhibitors for Ferrous and Non-Ferrous Metals and Alloys: A Review[J]. International Journal of Corrosion and Scale Inhibition, 2018, 7(2): 126-150.
- [2] GONCHAROVA O A, LUCHKIN A Y, ANDREEV N N, et al. Chamber Protection of Copper from Atmospheric Corrosion by Compounds of Triazole Class[J]. Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces, 2020, 56(7): 1276-1284.
- [3] 张大全. 气相缓蚀剂的研究开发及应用中若干问题的探讨[J]. 上海电力学院学报, 2019, 35(1): 1-7.  
Zhang Da-quan. Key Issues Regarding Development of Volatile Corrosion Inhibitors and Their Application[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2019, 35(1): 1-7.
- [4] 黄颖为, 杨永莲. 碳钢用绿色高效气相缓蚀剂的复配研究[J]. 西安理工大学学报, 2017, 33(1): 93-95.  
HUANG Ying-wei, YANG Yong-lian. Study of the Compound of Green High Efficient Vapor Phase Corrosion Inhibitor for Carbon Steel[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2017, 33(1): 93-95.
- [5] 张恒, 张天. 环保型气相防锈剂的研制[J]. 河北工业科技, 2018, 35(2): 117-122.  
ZHANG Heng, ZHANG Tian. Preparation of Environment-Friendly Vapor Phase Inhibitor[J]. Hebei Journal of Industrial Science & Technology, 2018, 35(2): 117-122.
- [6] 滕飞, 胡钢. 几种气相缓蚀剂对铸铁材料的缓蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(8): 785-788.  
TENG Fei, HU Gang. Corrosion Inhibition of some Volatile Corrosion Inhibitors for Cast Iron[J]. Corrosion & Protection, 2014, 35(8): 785-788.
- [7] 赵艳东, 郝晓秀, 邢紫玉. 金属包装用气相防锈纸缓蚀性能研究[J]. 包装工程, 2019, 40(1): 128-132.  
ZHAO Yan-dong, HAO Xiao-xiu, XING Zi-yu. Corrosion Inhibition of Gaseous Phase Antirust Paper for Metal Packaging[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(1): 128-132.
- [8] 钱静, 李海清. 二甲咪唑气相缓蚀性能研究及缓蚀配方设计[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2013, 25(6): 456-462.  
QIAN Jing, LI Hai-qing. Performance of Vapor Phase Corrosion Inhibitor of Dimethyl Imidazole and Its Compound Design[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2013, 25(6): 456-462.
- [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] 郝晓秀, 赵艳东, 宋海燕. 基于聚天冬氨酸复配高效气相防锈纸缓蚀性能研究[J]. 数字印刷, 2019(Z1): 61-66.  
HAO Xiao-xiu, ZHAO Yan-dong, SONG Hai-yan. Study on the Corrosion Inhibition Performance of High Efficiency Vapor Phase Rust Prevention Paper Based on Polyaspartic Acid Complex[J]. Digital Printing, 2019(Z1): 61-66.
- [11] LAI Xin, HU Jian-feng, RUAN Tao, et al. Chitosan Derivative Corrosion Inhibitor for Aluminum Alloy in Sodium Chloride Solution: A Green Organic/Inorganic Hybrid[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 265: 118074.
- [12] KUZNETSOV Y I. Physico-Chemical Aspects of Protection of Metals by Organic Corrosion Inhibitors[J]. Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces

- es, 2015, 51(7): 1111-1121.
- [13] GANGOPADHYAY S, MAHANWAR P. Recent Developments in the Volatile Corrosion Inhibitor (VCI) Coatings for Metal: A Review[J]. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2018, 15(164): 789-807.
- [14] 魏刚, 杨民, 熊蓉春. 碳酸环己胺用于化工装备气相保护的研究[J]. *化工机械*, 2000, 27(4): 190.  
WEI Gang, YANG Min, XIONG Rong-chun. Study on Application of Cyclohexylamine Carbonate in Gas Phase Protection of Chemical Equipment[J]. *Chemical Engineering & Machinery*, 2000, 27(4): 190.
- [15] 丁艳梅, 许淳淳, 王菊琳. 复合气相缓蚀剂对纯铜缓蚀的研究[J]. *材料保护*, 2007, 40(3): 4-6.  
DING Yan-mei, XU Chun-chun, WANG Ju-lin. Investigation of the Inhibitive Mechanism of a Composite Volatile Corrosion Inhibitor for Copper[J]. *Materials Protection*, 2007, 40(3): 4-6.
- [16] SALINAS-SOLANO G, PORCAYO-CALDERON J, ESCALERA L M, et al. Development and Evaluation of a Green Corrosion Inhibitor Based on Rice Bran Oil Obtained from Agro-Industrial Waste[J]. *Industrial Crops and Products*, 2018, 119: 111-124.
- [17] CHEN Zhen-yu, HUANG Ling, ZHANG Guo-an, et al. Benzotriazole as a Volatile Corrosion Inhibitor during the Early Stage of Copper Corrosion under Adsorbed Thin Electrolyte Layers[J]. *Corrosion Science*, 2012, 65: 214-222.
- [18] SUN Zhi-peng, SINGH A, XU Xi-hua, et al. Inhibition Effect of Pomelo Peel Extract for N80 Steel in 3.5% NaCl Saturated with CO<sub>2</sub> Solution[J]. *Research on Chemical Intermediates*, 2017, 43(10): 6719-6736.
- [19] 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.

责任编辑: 曾钰婵