

一种船舶用钢预膜缓蚀剂的研究

陈宇^{1a,1b,2}, 陈鑫卉^{1b}, 朱本峰^{1b}, 刘元伟³, 张昭^{1b}

(1.浙江大学 a.航空航天学院; b.化学系, 杭州 310027;
2.杭州央力科技有限公司, 杭州 310027; 3.滨州学院 化学工程系, 山东 滨州 256600)

摘要: 目的 研究 CP-CI021 海水介质预膜缓蚀剂的缓蚀行为及复配工艺。方法 主要采用失重法和电化学阻抗谱(EIS)研究 CP-CI021 对 Q235 碳钢在海水介质中的缓蚀行为, 并优化出预膜缓蚀剂最佳复配工艺。结果 CP-CI021 预膜缓蚀剂具有优异的缓蚀性能, 经预膜处理的 Q235 碳钢测试的 EIS 阻抗模值增大了 2 个数量级。结论 得到了预膜缓蚀剂的最佳复配工艺, 有机膦 PHA 质量浓度为 7.3 g/L, 助剂 A 质量浓度为 3 g/L, 助剂 B 质量浓度为 5 g/L, 缓蚀效率高达 98.4%。

关键词: 船舶; 预膜缓蚀剂; 电化学阻抗

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2016.04.003

中图分类号: TJ04; TG172.5 文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2016)04-0015-07

Pre-filmed Inhibitor for Steel in Ship

CHEN Yu^{1a,1b,2}, CHEN Xin-hui^{1b}, ZHU Ben-feng^{1b}, LIU Yuan-wei³, ZHANG Zhao^{1b}

(1.Zhejiang University, a.School of Aeronautics and Astronautics;

b.Department of Chemistry, Hangzhou 310027, China;

2.Hangzhou Core Power Technology Co., Ltd, Hangzhou 310027, China;

3.Department of Chemical Engineering, Binzhou University, Binzhou 256600, China)

ABSTRACT: Objective To study the inhibition behavior and the optimal composition of CP-CI021 pre-filmed inhibitor for Q235 steel in seawater. **Methods** The inhibition behavior of CP-CI021 for Q235 steel in seawater and the optimal composition were investigated with weight loss method and electrochemical impedance spectroscopy. **Results** The CP-CI021 pre-filmed inhibitor had excellent inhibition property, and the EIS impedance modulus of pre-filmed Q235 steel increased by 2 orders of magnitude compared to the Q235 steel without pre-filming. **Conclusion** The optimal composition of CP-CI021 pre-filmed inhibitor was: PHA, 7.3 g/L, assistant A, 3 g/L, assistant B, 5 g/L, and the inhibition efficiency reached 98.4%.

KEY WORDS: ship; pre-filmed inhibitor; electrochemical impedance spectroscopy

海洋环境的高湿度、高盐浓度, 导致船舶金属材料的腐蚀相当严重。缓蚀剂是在腐蚀介质中添加

少量即可显著降低金属材料腐蚀速率的物质^[1-6], 可以有效地延长船舶在海洋环境的使用寿命, 降低

收稿日期: 2016-03-28; 修订日期: 2016-04-10

Received: 2016-03-28; Revised: 2016-04-10

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(21403194)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (21403194)

作者简介: 陈宇(1986—), 男, 湖北人, 博士, 主要研究方向为材料腐蚀与防护。

Biography: CHEN Yu(1986—), Male, from Hubei, Ph.D., Research focus: corrosion and protection of materials.

通讯作者: 张昭(1968—), 男, 湖南人, 博士, 教授, 主要研究方向为电化学与功能材料。

Corresponding author: ZHANG Zhao(1968—), Male, from Hunan, Ph.D., Professor, Research focus: electrochemistry and functional materials.

维护成本。有机缓蚀剂分子结构中的 N, O, S 和 P 等杂原子含有孤对电子,能与金属的 d 轨道结合形成配位键,增强了缓蚀剂与金属表面的相互作用,因而具有优异的缓蚀性能^[7-9]。在工业应用中,由于单一缓蚀剂缓蚀效果通常并不理想,常常将两种或多种化合物复配使用,以提高缓蚀效率^[10-12]。文中将分别含 P 和含 N 的缓蚀剂复配,研制出一种环境友好、用量小、性能优良的海水介质预膜缓蚀剂。

1 实验

1.1 试验材料

试验材料为长方体 Q235 碳钢,规格为 50 mm×25 mm×5 mm。预膜处理前,Q235 碳钢均经 320#, 500#, 800#和 1200#砂纸打磨,丙酮擦洗除油,二次蒸馏水冲洗干净后,以 N₂ 吹干置于干燥器内备用。

缓蚀剂主剂 PHA 制备方法为:在三口烧瓶中加入一定量 40%的乙醛酸,将三氯化磷缓慢滴加到烧瓶中,开启磁力搅拌,待 HCl 挥发完全后,将温度升至 50 °C 并在此温度条件下恒温反应,以柱层色谱检测反应的进程。复配缓蚀剂配制:主剂 PHA 为 5.5 ~ 8.2 g/L,复配助剂 A 为 1.0 ~ 4.0 g/L,复配助剂 B 为 3.0 ~ 6.0 g/L。

1.2 试验介质和装置

试验中采用模拟海水作为腐蚀介质,具体配方:KCl 0.819 g/L, MgCl₂ 5.415 g/L, CaCl₂ 1.809 g/L, Na₂SO₄ 4.620 g/L, NaHCO₃ 1.495 g/L, NaCl 24.125 g/L。CP-CI021 缓蚀剂预膜试验与失重法测试均采用图 1 装置进行。其中,缓蚀剂预膜时,分

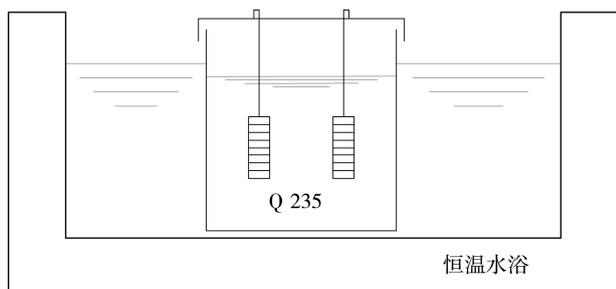


图 1 失重法评价装置

Fig.1 Schematically illustration of device used for weight loss tests

别改变主剂、助剂 A 和助剂 B 的浓度,优化预膜缓蚀剂复配工艺,预膜温度为恒温 40 °C,预膜时间为 36 h。经预膜前处理的 Q235 挂片浸泡于模拟海水介质中,失重测试时间为 48 h,温度为 60 °C。电化学评价方法采用的装置如图 2 所示。

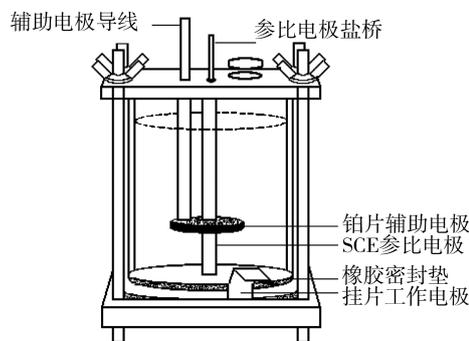


图 2 电化学评价装置

Fig.2 Device for coating evaluation at static state

1.3 失重测试

失重法是非常经典的方法,可以直接得出金属在腐蚀介质中因腐蚀而减少的质量,通过它可以计算出在试验时间内的平均腐蚀速率,然后计算缓蚀剂的缓蚀效率或抑制系数,从而评定缓蚀剂的缓蚀性能。失重法中的缓蚀效率以式(1)计算得到^[13]:

$$IF = \frac{m_{\text{blank}} - m_{\text{inhi}}}{m_{\text{blank}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_{blank} 为测试挂片未进行任何预膜处理时的质量损失量; m_{inhi} 为测试挂片进行预膜处理后的质量损失量。

1.4 电化学测试

电化学交流阻抗测试采用常规的三电极体系,其中工作电极为未经预膜和经预膜缓蚀剂前处理的 Q235 钢片,辅助电极为大面积铂片,参比电极为饱和甘汞电极,施加扰动信号为 5 mV,测试频率区间为 100 kHz ~ 10 mHz。测试结果通过 Z-view 软件进行拟合,可以得到双电导电容 C_{dl} ,电荷转移电阻 R_{ct} 等相关物理参数,从而表征预膜缓蚀剂的缓蚀效率^[14-16]。计算公式为:

$$IF = \frac{R_{ct,\text{inhi}} - R_{ct,\text{blank}}}{R_{ct,\text{inhi}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $R_{ct,\text{blank}}$ 为未进行预膜处理的挂片经电化学阻抗谱测试得到的电荷转移电阻; $R_{ct,\text{inhi}}$ 为进行预膜处理后的电荷转移电阻。

2 结果与讨论

2.1 PHA 浓度的影响

采用不同浓度的主剂 PHA 预膜的 Q235 碳钢的质量增加结果见表 1。依预膜结果可知：逐渐增大 PHA 浓度（由 5.5 g/L 增大至 7.3 g/L）时，经预膜前处理的 Q235 挂片质量随之缓慢增大；当 PHA 质量浓度由 7.3 g/L 增大至 8.2 g/L 时，预膜处理的 Q235 钢的质量反而减小。可能原因是当加入量较少时，由于 PHA 分子结构中的 P 原子存在孤对电子，可与碳钢形成螯合物保护膜，从而增加 Q235 碳钢的质量；当加入量过多时，由于 PHA 为强酸性物质，不仅不能形成有效的保护膜，反而造成 Q235 碳钢的酸腐蚀，引起 Q235 碳钢质量减小。因此，Q235 碳钢预膜时，PHA 质量浓度宜选为 7.3 g/L。

表 1 PHA 浓度对 Q235 钢预膜质量增加量的影响
Table 1 Effect of PHA concentration on weight gain of pre-filming of Q235 steel

PHA 质量浓度/(g·L ⁻¹)	预膜前质量/g	预膜后质量/g	预膜质量增量/g
5.5	18.2289	18.2395	0.0106
6.4	18.6497	18.6611	0.0114
7.3	18.7608	18.7743	0.0135
8.2	19.0018	18.9931	-0.0087

经不同 PHA 浓度预膜前处理的 Q235 碳钢进行腐蚀质量损失试验，结果见表 2。由结果可知：经预膜前处理后，Q235 碳钢浸泡于海水介质中仍然会发生腐蚀。随着预膜 PHA 质量浓度由 5.5 g/L 增大至 7.3 g/L 时，经预膜处理的 Q235 钢在模拟海水介质中腐蚀质量损失量减小。缓蚀效率逐渐增大，且均高达 90%以上。当 PHA 质量浓度为 7.3 g/L 时，缓蚀效率最高可达 98.4%。

表 2 不同浓度的 PHA 预膜的 Q235 碳钢的腐蚀失重测试结果

Table 2 Weight loss of Q235 steel pre-filming with different concentrations of PHA

PHA 质量浓度/(g·L ⁻¹)	腐蚀前质量/g	腐蚀后质量/g	腐蚀质量损失量/g	缓蚀效率/%
空白	20.0261	20.0135	0.0126	—
5.5	18.2395	18.2384	0.0011	91.2
6.4	18.6611	18.6604	0.0007	94.4
7.3	18.7743	18.7741	0.0002	98.4

采用不同浓度的主剂 PHA 预膜的 Q235 碳钢在模拟海水介质中的电化学阻抗谱如图 3 所示。可以看出，未经预膜和经不同浓度 PHA 预膜前处理的 EIS 谱图均为一个时间常数^[17]，预膜后的弧半径明显增大，表明预膜挂片耐蚀性更好^[18]。EIS 谱图采用如图 4 所示的等效电路^[19-20]，通过 Z-view 软件拟合得到的相关物理量参数见表 5。其中 R_s 为溶液电阻， C_{dl} 表示双电层电容， R_{ct} 为电荷转移电阻。

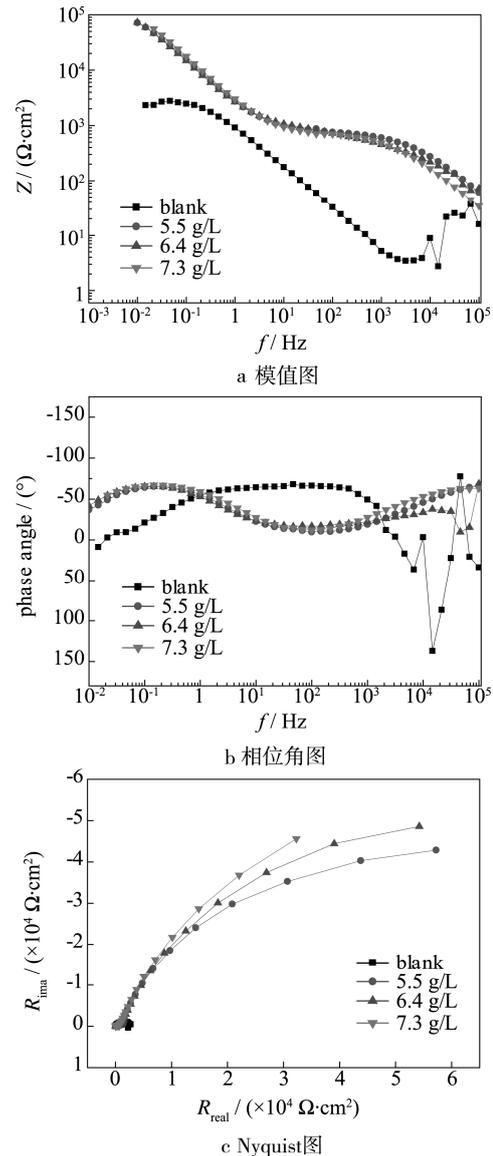


图 3 不同 PHA 浓度预膜后的电化学阻抗谱测试
Fig.3 EIS plots of Q235 pre-filmed with different concentrations of PHA



图 4 拟合 EIS 谱图的等效电路
Fig.4 EEC used for fitting EIS plots

表3 不同浓度的PHA预膜的Q235碳钢的电化学阻抗谱测试结果

Table 3 EIS results of Q235 steel pre-filming with different concentrations of PHA

PHA 质量浓度/(g·L ⁻¹)	C _{dl} /(μF·cm ⁻²)	R _{ct} /(Ω·cm ²)	缓蚀效率/%
空白	230	3 297	—
5.5	102.1	117 220	97.2
6.4	98.3	133 850	97.6
7.3	80.9	175 520	98.1

由表3可知,随着PHA的质量浓度由0增加至7.3 g/L,双电层电容逐渐减小,电荷转移电阻逐渐增大,由3297 Ω·cm²增大至175 520 Ω·cm²,提高了两个数量级,表明经预膜处理的Q235钢在海水介质中的耐蚀性能明显提高。当预膜PHA的质量浓度为7.3 g/L时,缓蚀效率最高可达98.1%,这与腐蚀失重测试的结果一致。

2.2 助剂A的影响

由表4预膜结果可知:随着助剂A的质量浓度由1 g/L增大至3 g/L时,预膜后Q235碳钢的质量增加量也由0.0047 g增大至0.0135 g;当助剂A的质量浓度由3 g/L增大至4 g/L时,预膜的质量增量变化不大。因此,当助剂A的质量浓度为3 g/L时,经此配方预膜的Q235碳钢增重最多,即保护性膜层更厚。

表4 助剂A浓度对Q235碳钢预膜的影响

Table 4 Effect of assistant A concentration on pre-filming of Q235 steel

助剂A 质量浓度/(g·L ⁻¹)	预膜前 质量/g	预膜后 质量/g	预膜 增重/g
1	20.3114	20.3161	0.0047
2	20.1954	20.2050	0.0096
3	18.7608	18.7743	0.0135
4	20.5455	20.5585	0.0130

同样采用失重法和电化学阻抗谱两种方法评价经不同助剂A浓度预膜的Q235碳钢在海水介质中的腐蚀行为,见表5。由结果可知:在海水介质中,随着预膜缓蚀剂中助剂A由1 g/L增大至3 g/L时,Q235碳钢的质量损失量逐渐减小,缓蚀效率逐渐增大。当助剂A由3 g/L增大至4 g/L时,经预膜的Q235碳钢腐蚀质量损失量相差不大,且缓蚀效率均达到95%以上。因此,预膜缓蚀剂中助剂

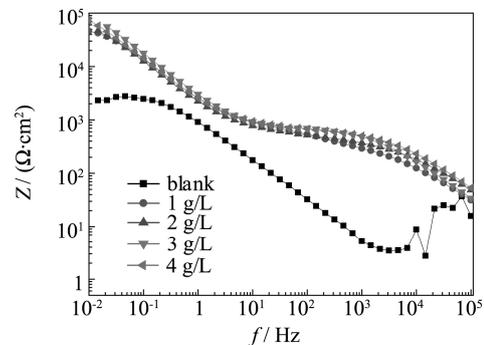
A的最佳质量为3 g/L。

表5 不同浓度的助剂A预膜的Q235碳钢的腐蚀质量损失量测试结果

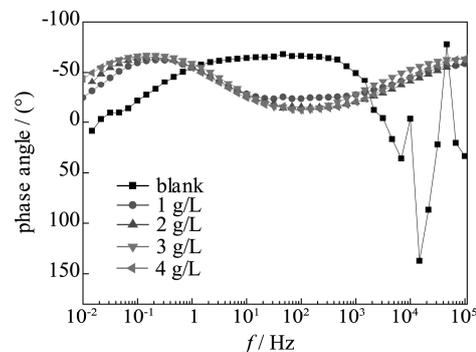
Table 5 Weight loss of Q235 steel pre-filming with different concentrations of assistant A

助剂A 质量浓度/(g·L ⁻¹)	腐蚀前 质量/g	腐蚀后 质量/g	腐蚀质量 损失/g	缓蚀 效率/%
空白	20.0261	20.0135	0.0126	—
1	20.3337	20.3314	0.0023	81.7
2	20.3054	20.3038	0.0016	87.3
3	18.7743	18.7741	0.0002	98.4
4	20.1519	20.1514	0.0005	96.1

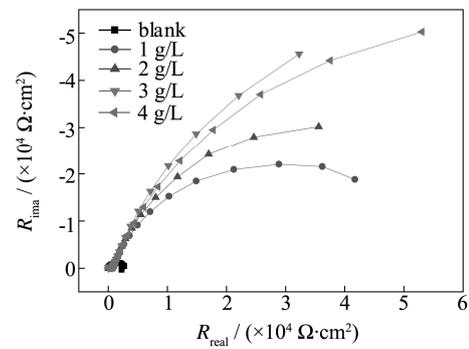
不同浓度的助剂A预膜后进行的电化学阻抗谱测试结果如图5所示。对比空白试样与经不同浓度



a 模值图



b 相位角图



c Nyquist图

图5 不同助剂A浓度预膜后的电化学阻抗谱测试
Fig.5 EIS plots of Q235 pre-filmed with different concentrations of assistant A

剂 A 预膜的 EIS 图可知，预膜后的 EIS 图弧半径明显增大，即电荷转移电阻增大，表明预膜后 Q235 碳钢挂片的耐蚀性更好。EIS 图经拟合得到的相关物理参数数值见表 6，随着助剂 A 由 1 g/L 增加至 3 g/L，双电层电容逐渐减小，电荷转移电阻由 $3297 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 逐渐增大至 $175\,520 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ，缓蚀效率最高可达 98.1%。当继续增加预膜缓蚀剂助剂 A 至 4 g/L 时，电荷转移电阻稍微减小。因此，预膜缓蚀剂中助剂 A 的最佳质量浓度为 3 g/L。

表 6 不同浓度的助剂 A 预膜的 Q235 碳钢的电化学阻抗谱测试结果

Table 6 EIS results of Q235 steel pre-filming with different concentrations of assistant A

助剂 A 质量浓度/(g·L ⁻¹)	C _{dl} /(μF·cm ⁻²)	R _{ct} /(Ω·cm ²)	缓蚀效率/%
空白	230	3 297	—
1	97.9	58 779	94.4
2	112.1	85 453	96.1
3	80.9	175 520	98.1
4	100	140 470	97.6

2.3 助剂 B 的影响

不同助剂 B 含量对 Q235 碳钢预膜增重的实验结果见表 7，可以看出，随着助剂 B 质量浓度由 3 g/L 逐渐增大至 5 g/L，Q235 碳钢预膜的质量增量也越来越大，由 0.0094 g 增大至 0.0135 g；继续增大助剂 B 浓度时，预膜的质量增量并没有继续增加，且预膜缓蚀剂出现稍微浑浊，可能是由于助剂 B 为长链有机胺，在水溶液中的溶解性不高，因此后续腐蚀试验中未对助剂 B 浓度为 5 g/L 时进行评价。

表 7 助剂 B 浓度对 Q235 碳钢预膜的影响

Table 7 Effect of assistant B concentration on pre-filming of Q235 steel

助剂 B 质量浓度/(g·L ⁻¹)	预膜前质量/g	预膜后质量/g	预膜增重/g
3	20.9236	20.9330	0.0094
4	20.2241	20.2359	0.0118
5	18.7608	18.7743	0.0135
6	20.0243	20.0369	0.0126

不同浓度助剂 B 预膜的 Q235 碳钢在海水介质中的腐蚀质量损失测试结果见表 8，表明随着助剂 B 质量浓度由 3 g/L 增大至 5 g/L 时，经预膜缓蚀剂前处理的 Q235 挂片的腐蚀质量损失量逐渐减小，当助剂 B 质量浓度为 5 g/L 时，质量损失量最

小，具有最大缓蚀效率 98.4%。

表 8 不同浓度的助剂 B 预膜的 Q235 碳钢的腐蚀质量损失测试结果

Table 8 Weight loss of Q235 steel pre-filming with different concentrations of assistant B

助剂 B 质量浓度/(g·L ⁻¹)	腐蚀前质量/g	腐蚀后质量/g	腐蚀失重/g	缓蚀效率/%
空白	20.0261	20.0135	0.0126	—
3	20.0243	20.0229	0.0014	88.9
4	18.3259	18.3250	0.0009	92.9
5	18.7743	18.7741	0.0002	98.4

不同浓度的助剂 B 预膜后进行的电化学阻抗谱测试结果如图 6 所示。由 EIS 图对比可知，预膜后

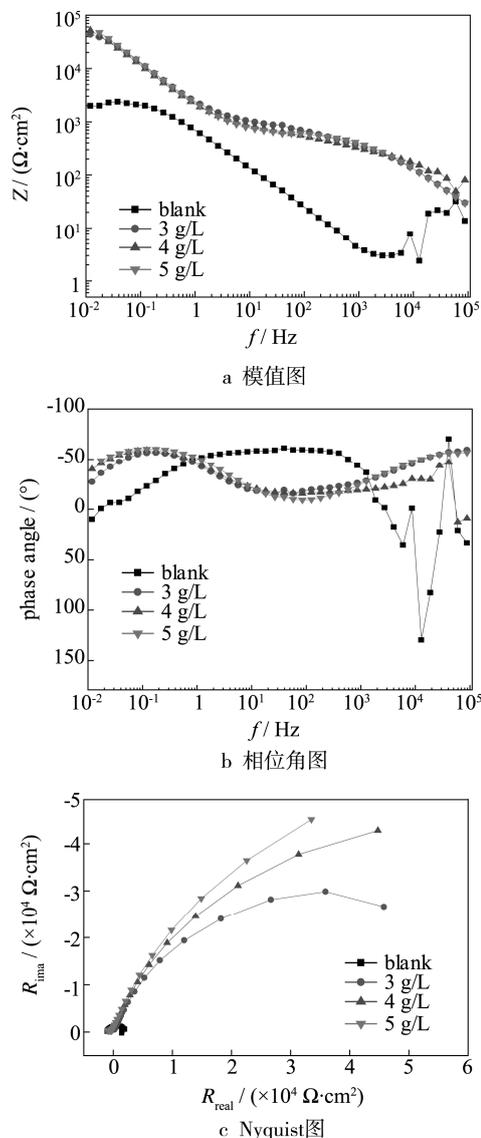


图 6 不同助剂 B 浓度预膜后的电化学阻抗谱测试 Fig.6 EIS plots of Q235 pre-filmed with different concentrations of assistant B

的 EIS 图弧半径明显增大，即电荷转移电阻增大，

表明预膜后 Q235 碳钢挂片的耐蚀性更好。EIS 图经拟合得到的相关物理参数数值见表 9, 随着助剂 B 由 3 g/L 增加至 5 g/L, 电荷转移电阻由 84 361 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ 逐渐增大至 175 520 $\Omega \cdot \text{cm}^2$, 缓蚀效率最高可达 98.1%。因此, 预膜缓蚀剂中助剂 B 的最佳质量浓度为 5 g/L。

表 9 同浓度的助剂 B 预膜的 Q235 碳钢的电化学阻抗谱测试结果

Table 9 EIS results of Q235 steel pre-filming with different concentrations of assistant B

助剂 B 质量浓度/(g·L ⁻¹)	$C_{dl}/(\mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2})$	$R_{ct}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	缓蚀效率/%
空白	230	3 297	—
3	81.3	84 361	96.1
4	91.4	133 020	97.5
5	80.9	175 520	98.1

未经预膜和经过预膜前处理的 Q235 碳钢腐蚀后的表面形貌如图 7 所示。Q235 碳钢未经预膜直接浸泡于海水介质中, 静态放置 4 天后, 表面变暗, 且存在明显的腐蚀锈斑; 经预膜缓蚀剂预膜后, Q235 碳钢表面仍然十分光亮, 未见任何腐蚀产物, 表明预膜缓蚀剂性能优良, 对 Q235 碳钢在海水介质中具有良好的缓蚀效果。

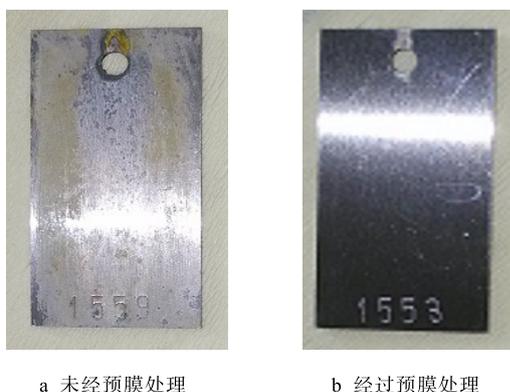


图 7 Q235 碳钢腐蚀后的表面形貌

Fig.7 Surface morphology of Q235 after corrosion in seawater

3 结语

文中首先采用失重法评价了 CP-CI021 海水介质预膜缓蚀剂对 Q235 碳钢的预膜行为, 同时结合电化学阻抗谱(EIS)研究了经 CP-CI021 预膜前处理的 Q235 碳钢在海水介质中的缓蚀行为, 由此优化得到最佳复配工艺: 有机磷 PHA 质量浓度为 7.3

g/L, 助剂 A 质量浓度为 3 g/L, 助剂 B 质量浓度为 5 g/L。在此条件下, 经预膜处理的 Q235 碳钢测试的 EIS 阻抗模值增大了两个数量级, 缓蚀效率高达 98.1%。CP-CI021 海水介质预膜缓蚀剂中的含 P, N 等有机物, 可以与 Fe 在空 d 轨道结合形成配位键, 从而在船舶钢表面形成一层致密的保护膜, 抑制海水介质的腐蚀。

参考文献:

- [1] 吴荫顺, 郑家桑. 电化学保护和缓蚀剂应用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
WU Yin-shun, ZHENG Jia-shen. Electrochemical Protection and Application Technique of Corrosion Inhibitor[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [2] 廉兵杰, 石泽民, 徐慧, 等. 唑类缓蚀剂在铜表面的吸附机理[J]. 表面技术, 2015, 44(12): 19—26.
LIAN Bing-jie, SHI Ze-min, XU Hui, et al. Adsorption Mechanism of Azole Corrosion Inhibitors on Cu Surface [J]. Surface Technology, 2015, 44(12): 19—26.
- [3] 刘启承, 吕堂满, 冯利军. IAA 在硫酸溶液中对碳钢的缓蚀性能研究[J]. 表面技术, 2015, 44(11): 97—103.
LIU Qi-cheng, LYU Tang-man, FENG Li-jun. IAA as Corrosion Inhibitor for Mild Steel in H₂SO₄ Solution[J]. Surface Technology, 2015, 44(11): 97—103.
- [4] 赵帅, 兰伟. 管道内防腐技术现状与研究进展[J]. 表面技术, 2015, 44(11): 112—118.
ZHAO Shuai, LAN Wei. Present Status and Research Progress of Anti-corrosion Technology in Pipeline[J]. Surface Technology, 2015, 44(11): 112—118.
- [5] 赵红冉, 周玉丰, 刘栓, 等. 2, 3-二巯基丁二酸对铜的缓蚀性能研究[J]. 表面技术, 2015, 44(10): 79—85.
ZHAO Hong-ran, ZHOU Yu-feng, LIU Shuan, et al. Corrosion Inhibition Performance of 2,3-dimercaptosuccinic Acid on Copper[J]. Surface Technology, 2015, 44(10): 79—85.
- [6] 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, 2015, 44(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, 2015, 44(4): 127—131.
- [7] BENTISS F, TRAISNEL M, LAGRENEE M. The Substituted 1, 3, 4-Oxadiazoles: A New Class of Corrosion Inhibitors of Mild Steel in Acidic Media[J]. Corrosion Science, 2000, 42: 127—146.
- [8] AZHAR M, MERNARI B, TRAISNEL M, et al. Corrosion Inhibition of Mild Steel by the New Class of Inhibitors [2, 5-bis(n-pyridyl)-1,3,4-thiadiazoles] in Acidic Media[J]. Corrosion Science, 2001, 43: 2229—2238.
- [9] Morad M S. An Electrochemical Study on the Inhibiting Action of Some Organic Phosphonium Compounds on the Corrosion of Mild Steel in Aerated Acid Solutions[J].

- Corrosion Science, 2000, 42: 1307—1326.
- [10] 王丽荣, 张树芳, 庄晓娟. 海水中碳钢缓蚀剂的研究进展[J]. 内蒙古石油化工, 2008(1): 5—6.
WANG Li-rong, ZHANG Shu-fang, ZHUANG Xiao-juan, Progress of Corrosion Inhibitor for Carbon Steel in Seawater[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2008(1): 5—6.
- [11] 姜国杰, 杨勇进, 王强, 等. YTF-3 飞机硬膜缓蚀剂应用研究[J]. 装备环境工程, 2016, 13(1): 19—23.
JIANG Guo-jie, YANG Yong-jin, WANG Qiang, et al. Application Research on YTF-3 Aircraft Corrosion Inhibitor with Hard Film[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(1): 19—23.
- [12] 石志想, 何卫平. 飞机用缓蚀剂性能分析[J]. 装备环境工程, 2015, 12(3): 92—96.
SHI Zhi-xiang, HE Wei-ping. Analysis of Corrosion Inhibitors for Aircrafts[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(3): 92—96.
- [13] OBOT I B, OBI-EGBEDI N O. Adsorption Properties and Inhibition of Mild Steel Corrosion in Sulphuric Acid Solution by Ketoconazole: Experimental and Theoretical Investigation[J]. Corrosion Science, 2010, 52: 198—204.
- [14] CHEN Y, JIANG Y Y, CHEN H, et al. Corrosion Inhibition of Mild Steel in Acidic Medium by Linseed Oil Based Imidazoline[J]. Journal of the Oil Chemists Society, 2013, 90: 1387—1395.
- [15] ASHASSI-SORKHABI H, SHAABANI B, SEIFZADEH D. Corrosion Inhibition of Mild Steel by Some Schiff Base Compounds in Hydrochloric Acid[J]. Applied Surface Science, 2005, 239: 154—164.
- [16] AMAR H, BENZAKOUR J, DERJA A, et al. A Corrosion Inhibition Study of Iron by Phosphonic Acids in Sodium Chloride Solution[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2003, 558: 131—139.
- [17] CAMPESTRINI P, WESTING van E P M, WIT de J H W. Influence of Surface Preparation on Performance of Chromate Conversion Coatings on Alclad 2024 Aluminium Alloy: Part II: EIS Investigation[J]. Electrochimica Acta, 2001, 46: 2631—2647.
- [18] 江依义, 陈宇, 叶正扬, 等. 十七烯基咪唑啉的制备及其缓蚀性能评价[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2013, 33(4): 325—330.
JIANG Yi-yi, CHEN Yu, YE Zheng-yang, et al. Preparation and Evaluation of Corrosion Inhibition Performance of Alkenyl Imidazoline[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2013, 33(4): 325—330.
- [19] WEIJDE van der D H, WESTING van E P M, WIT de J H W. Electrochemical Techniques for Delamination Studies [J]. Corrosion Science, 1994, 36: 643—652.
- [20] MOHAMMED A A, KHALED K F, MOHSEN Q, et al. A Study of the Inhibition of Iron Corrosion in HCl Solutions by Some Amino Acids[J]. Corrosion Science, 2010, 52: 1684—1695.