

海水淡化装置内舱碳钢防护涂层寿命预测研究

张黎黎¹, 王跃平¹, 陈凯锋^{1,2}, 查小琴^{3,4}, 王晶晶^{1,2},
张心悦¹, 梁宇^{1,2}, 亓海霞^{1,2}

(1.中国船舶重工集团公司第七二五研究所 厦门分部, 福建 厦门 361101; 2.海洋腐蚀与防护重点实验室, 山东 青岛 266101; 3.中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471023;
4.河南省船舶及海工装备结构材料技术与应用重点实验室, 河南 洛阳 471023)

摘要: **目的** 获得海水淡化装置内舱碳钢防护涂层的耐热老化寿命。**方法** 通过调整设备的温度及压力, 模拟低温多效蒸发器半浸区工作环境, 进行为期 20 个月的浸泡加速试验。以涂层的附着力随老化时间的变化情况、涂层颜色变化情况、涂层浸泡前后微观形貌和阻抗值为评判依据, 在老化经验公式的基础上进行外推计算, 进行涂层热老化寿命预测。**结果** 该涂料在该区域经过 20 个月的挂片试验, 涂层表面均未出现起泡、锈蚀、开裂、脱落等失效现象; 表面色差变化趋势相对稳定; 干态附着力为 10.9 MPa, 经过 20 个月的测试, 附着力为 8.95 MPa; 0.01 Hz 低频阻抗 ($|Z|_{0.01 \text{ Hz}}$) 条件下, 其电化学交流阻抗值由浸泡前的 $1.8 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 下降为浸泡后的 $7.9 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。涂层阻抗的数量级虽有所下降, 但仍然具有较高的阻抗值, 具有较好的保护性能。经过老化经验公式进行外推计算, 预测海水淡化装置内舱碳钢防护涂层的热老化寿命为 13.33 年。**结论** 海水淡化装置内舱防护涂料具有长寿命热老化重防腐作用。

关键词: 海水淡化; 模拟加速试验; 防腐涂层; 寿命预测

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.12.019

中图分类号: TQ637.2 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2020)12-0119-07

Life Prediction of Carbon Steel Protective Coating in Inner Compartment of Seawater Desalination Plant

ZHANG Li-li¹, WANG Yue-ping¹, CHEN Kai-feng^{1,2}, ZHA Xiao-qin^{3,4}, WANG Jing-jing^{1,2},
ZHANG Xin-yue¹, LIANG Yu^{1,2}, QI Hai-xia^{1,2}

(1. Xiamen Branch of Luoyang Ship Material research Institute, Xiamen 361101, China; 2. Science and Technology on Marine Corrosion and Protection Laboratory, Qingdao 266101, China; 3. Luoyang Ship Material research Institute, Luoyang 471023, China; 4. Henan Key Laboratory of Technology and Application of Structural Materials for Ships and Marine Equipment, Luoyang 471023, China)

ABSTRACT: The work aims to obtain the heat-resistant aging life of the carbon steel protective coating in the inner compart-

收稿日期: 2020-04-26; 修订日期: 2020-06-10

Received: 2020-04-26; Revised: 2020-06-10

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0401205)

Fund: National Key Research and Development Project (2016YFC0401205)

作者简介: 张黎黎 (1982—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为腐蚀防护涂料。

Biography: ZHANG Li-li (1982—), Female, Master, Engineer, Research focus: corrosion protection coating.

通讯作者: 陈凯锋 (1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为防腐及特种功能涂料。

Corresponding author: CHEN Kai-feng (1981—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: anticorrosion and Special functional coatings.

ment of seawater desalination plant. The temperature and pressure of the equipment were adjusted to simulate the working environment of the low-temperature multi-effect evaporator. Soaking acceleration test of 20 months was conducted. The thermal aging life of the coating was predicted by extrapolating the empirical formula on the basis of the change of coating adhesion with aging time, the change of coating color, the change of coating morphology before and after soaking, and the coating impedance value. The failure phenomena such as blister, rust, cracking and peeling were not found on the coating surface after 20 months of hanging test. The variation trend of color difference of coating surface was relatively stable. The dry adhesion of the coating was 10.9 MPa, and the adhesion was 8.95 MPa after 20 months of test. Under 0.01 Hz low frequency impedance ($|Z|_{0.01 \text{ Hz}}$), its electrochemical impedance value changed from $1.8 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ to $7.9 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$. The order of magnitude of coating impedance was decreased, but was still within the scope of effective protection. The thermal aging life of carbon steel protective coating in the inner compartment of seawater desalination plant was predicted to be 13.33 years by extrapolating the aging empirical formula. The interior protective coating of seawater desalination plant has the function of long life thermal aging and anti-corrosion.

KEY WORDS: desalination; simulated accelerated test; anticorrosive coating; life prediction

目前我国海水淡化装置主要依靠进口不锈钢如 2205 不锈钢, 成本高昂。国内对海水淡化装置内舱漆的研究较少, 基本处于空白阶段。现阶段我国也正在开展进口海水淡化装置替代材料的研究, 如开展国产耐蚀钢、复合材料及重防腐涂料研究。若采用工作条件相对较为温和的在役低温多效蒸发器, 对于长寿命防护材料(如防腐寿命 10 年以上)一般很难在短期内评价出应用效果, 这对防护材料的工程化应用造成了技术壁垒。中船重工七二五所针对此现象研发了一种实验室模拟设备——模拟海水淡化装置内舱工作环境(简称海水淡化环境)实验装置(专利号: 201810970583.9), 该设备可模拟低温多效蒸发器全浸区、半浸区、蒸汽区、冷凝区、冲刷区五个部位的工作环境。为低温多效蒸发器内舱防护材料的筛选建立了良好的实验室加速模拟试验设备和试验方法, 既加快了试验速度, 又降低了被筛选防护材料影响现役低温多效蒸发器的风险。

海水淡化装置内舱防护涂料属于有机非金属材料, 其在制备、使用及储存过程中, 因高热、高湿、高盐雾、干湿交替及少量海沙冲击等环境因素而导致涂层发生老化、性能变差。涂层老化试验方法大致可分为两种: 一种为自然老化试验方法; 另一种为人工实验室加速老化试验方法。海水淡化装置内舱碳钢防护涂层根据其工作环境因素的影响, 主要还是较热的温度对其老化影响最大, 因此, 文中采用人工加热老化的方法对其涂层寿命进行研究^[1-8]。

笔者团队前期研究出了高屏蔽耐温酚醛环氧重防腐涂料, 该涂料具备良好的耐热、重防腐、强韧、高附着力、耐阴极剥离等综合性能^[7-10]。为加快该涂料在低温多效蒸发器内舱工程化应用速度, 文中以碳钢为基材, 表面涂覆以高屏蔽耐温酚醛环氧重防腐涂料为基础配方再加以改进获得的海水淡化装置内舱防护涂料制成实验样片, 将实验样片放置于模拟海水淡化环境实验装置内进行实验室模拟加速试验^[11-15]。

低温多效蒸发器共有 7 个效, 工作过程中, 蒸汽温度由第一效的 70 °C 左右下降到第七效的 45 °C 左右, 压力也由第一效的 70 kPa 左右下降到第七效的 60 kPa 左右。综合考虑涂层工作环境及低温多效蒸发器内舱结构及长寿命涂层测试时间长等特点, 采取模拟试验条件下的加速老化试验。实验温度为 80 °C, 压力为 65 kPa, 样片 2/3 浸泡在 7%NaCl 水溶液内, 1/3 暴露在水面外形成浓盐雾区域, 测试时间 20 个月。每两个月取 1 次样板, 对样板表面状态、色差及附着力进行观察和测试, 将该条件下的涂层浸泡时间与工作态内舱工作环境(对 7 个效的温度取平均值 56 °C、压力取 65 kPa)进行对比, 根据老化经验公式进行外推计算, 对海水淡化装置内舱碳钢防护涂层的工作寿命进行评估预测。模拟海水淡化环境实验装置结构如图 1 所示。

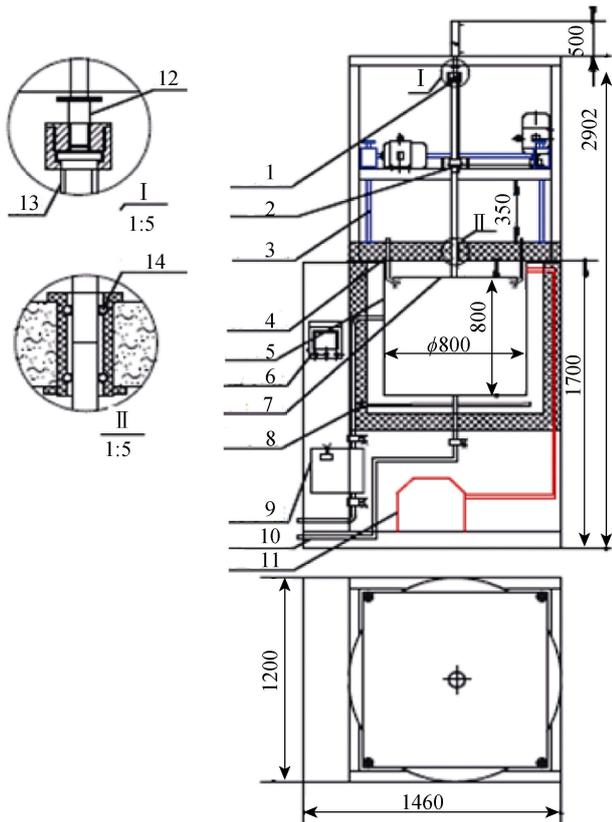
1 试验

1.1 海水淡化装置内舱碳钢防护涂层的制备

将碳钢板以喷砂除锈的方法进行表面处理, 使其达到 Sa2.5 级。将海水淡化装置内舱防护涂料甲、乙组分按照配比混合均匀, 熟化 20 min 后, 采用有气喷涂法将海水淡化装置内舱防护涂料均匀喷涂于碳钢板上。涂装两道, 每道间隔 24~48 h, 干膜总厚度为 $(400 \pm 50) \mu\text{m}$ 。涂层干燥后进行封边封孔处理, 室温下养护 7~14 d, 获得海水淡化装置内舱碳钢防护涂层样板。

1.2 实验室模拟加速试验条件下性能研究

将海水淡化装置内舱碳钢防护涂层样板放置于模拟海水淡化环境实验装置(图 1)内进行模拟加速试验。海水淡化装置内舱碳钢防护涂层样板测试前表面光滑平整, 无起泡、无开裂、无锈蚀等现象。试验温度为 80 °C, 压力为 65 kPa, 测试时间为 20 个月, 取



1.挂架升降系统；2.挂架转动系统；3.顶盖升降系统；4.喷雾系统；5.工作室；6.电控系统；7.试样挂架；8.加热系统；9.液位平衡系统；10.排水系统；11.真空系统；12.升降杆；13.旋转杆；14.O型密封圈

图 1 模拟海水淡化环境实验装置结构
Fig.1 Structure diagram of experimental device in simulated desalted marine environment

样间隔为 2 个月，每次取样对其涂层表面状态、色差、附着力等性能进行测试评价。其中涂层表面状态按 GB/T 1766—2008 进行测试；涂层热老化后的色差测试、计算方法及评级方法按 GB/T 1766—2008、GB/T 11186.2—1989 和 GB/T 11186.2—1989 进行；附着力

按 GB/T 5210—2006 进行测试；涂层电化学交流阻抗采用 AUTOLAB 电化学阻抗测试系统进行。测试频率范围为 0.01~100 kHz，正弦波信号振幅为 10 mV，开路电位下进行测量。三电极体系，涂层/Q235 钢为工作电极，有效面积为 12.6 cm²，对电极为不锈钢，参比电极为 Ag/AgCl 电极，测试介质为 3.5%NaCl 溶液，按照 ISO 16773-2—2016 进行测试。

涂层工作寿命外推计算数据处理依据有机高分子材料寿命估算经验公式（90 °C 以下工作（或较长时间储存）的有机聚合物材料，温度每提高 8 °C，材料寿命减半）推算^[16-21]，老化试验的时间和温度公式为：

$$t=2^n \cdot t' \tag{1}$$

$$\theta=\theta_0+8n \tag{2}$$

式中： t 为工作（长贮）时间，月； t' 为老化时间，月； n 为提高温度 8 °C 的倍数； θ_0 为工作（长贮）温度，°C； θ 为老化温度，°C。

2 结果及分析

2.1 实验室加速试验前后涂层表面形貌

样板试验前后涂层的表面形貌如图 2 所示。经过 20 个月的测试，样板表面未见明显变化，无起泡、无开裂、无脱落、无锈蚀等，涂层具有较好的保护性能。

2.2 实验室加速试验过程中样板色差性能测试

样板测试前后涂层表面色差变化情况如图 3 所示。依据 GB/T 1766—2008，通过图 3 可以看出，海水淡化装置内舱碳钢防护涂层经过 20 个月的测试，从第 2 个月开始，样板颜色色差即为 4。接下来涂层色差缓慢增大，但整体趋势较为平稳，整体色差变化



图 2 涂层样板测试前后表面状态

Fig.2 Coating sample before and after testing the surface state: a) before test; b) after test

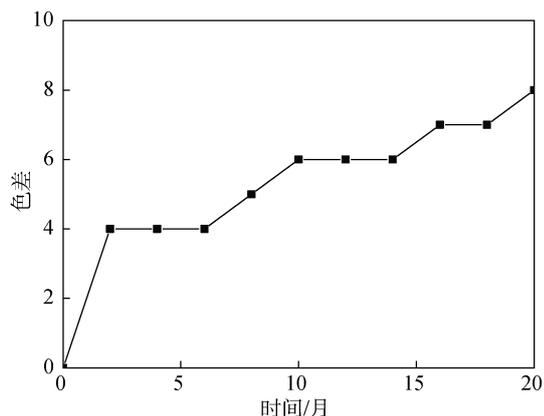


图3 涂层测试期间色差变化

Fig.3 Color variation during coating test

由2级转为3级,即色差由轻微变色进行到明显变色。这主要是由于最初的样板颜色为铝红色,经过20个

月的热盐水浸泡,涂层发生明显的热老化现象,树脂发生轻微黄变,而一部分填料在热作用下发生氧化,从而导致涂层色差增大。

2.3 实验室加速试验前后附着力性能测试

依据 GB/T 5210—2006 对涂层样板进行附着力测试,所得附着力数据见表1。通过表1可以看出,涂层附着力由干态附着力的 10.9 MPa 最后降为 8.95 MPa,其中第2—10个月的附着力均大于初始样板附着力。这主要是由于酚醛改性环氧树脂具有微弱的热固化作用,涂层在热海水浸泡过程中进一步增强了树脂与固化剂之间的交联度,从而导致涂层附着力稍有增大。第20个月具有较高的附着力,为 8.95 MPa,说明该涂层附着力在测试过程中均为有效附着,涂层仍具有较好的防腐能力。

表1 涂层测试期间附着力变化
Tab.1 Changes in adhesion during coating test

MPa

时间/月	附着力					平均值
	测试点 1	测试点 2	测试点 3	测试点 4	测试点 5	
0	10.88	12.85	10.56	9.16	10.93	10.9
2	10.63	15.02	13.35	13.02	10.93	12.88
4	10.39	13.87	13.21	10.25	10.24	11.88
6	13.03	11.24	11.73	12.36	11.78	12.03
8	12.18	10.43	12.29	10.24	11.28	11.28
10	11.91	10.75	11.72	12.35	12.81	11.91
12	10.17	11.54	11.08	10.13	10.71	10.73
14	11.62	10.39	10.22	11.45	10.72	10.88
16	11.01	10.61	9.75	8.77	8.62	9.75
18	7.69	8.77	9.86	7.99	9.45	8.75
20	7.61	8.88	10.21	8.31	9.74	8.95

2.4 涂层微观性能表征结果

2.4.1 三维视频测试结果

采用三维视频对试验前后涂层微观形貌进行观察,所得结果如图4所示。通过图4a、b可以看出,测试前涂层表面棱角鲜明,测试后涂层表面较为平整。三维视频测试前后拟合对比表明,相同角度下,测试前涂层表面的沟壑多于测试后,再次证明测试后涂层较为平整。将测试前后两张图片进行等高线叠加,发现测试后样板图片仅能部分与测试前样板图片重合,图片中浅色区域为测试前图片。三维视频测试结果表明,涂层经过20个月的80℃浓海水浸泡后,表面更加平整。

2.4.2 扫描电镜测试结果

采用扫描电镜对测试前后涂层表面及横截面进行观察,所得结果如图5所示。通过图5可以看出,测试前,涂层内部较为致密,片状填料分布均匀;

测试后,涂层内部稍为松散,且一部分片状填料消失,颗粒状物质有所增加。这进一步解释了三维视频所表现出的测试后涂层表面棱角消失,涂层表面变得更加平滑的现象。整体而言,涂层内部仅发生局部氧化,未发现通透性孔隙,说明涂层仍具有一定的防腐性能。

2.4.3 电化学测试结果

按照 ISO16773-2—2016,对海水淡化装置内舱碳钢防护涂层进行了测试前后电化学交流阻抗性能测试,实验结果如图6所示。由交流阻抗值测试结果经 Nova 软件计算可得模拟等效电路和电化学参数,所得结果见图7和表2。可以看出,浸泡前,涂层 0.01 Hz 处的阻抗值在 $1.8 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 以上,曲线光滑,说明涂层主要是作为屏蔽层,能有效阻碍腐蚀介质进入涂层内部,避免了其与基体的直接接触,使基体得到较好的保护。80℃海水浸泡20个月后,涂层电化学交流阻抗值达到 $7.9 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 以上,交流阻抗值曲

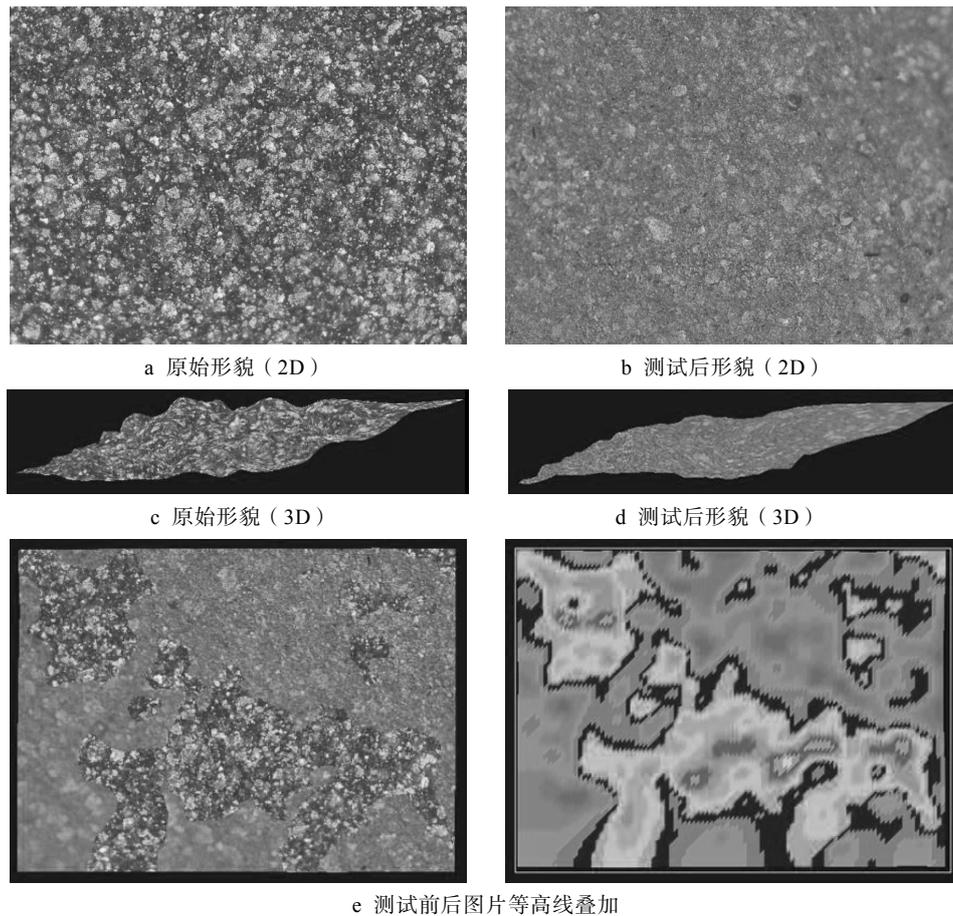


图 4 涂层测试前后三维视频图片

Fig.4 3D video pictures before and after coating test: a) the original morphology (2D); b) post-test morphology (2D); c) the original morphology (3D); d) post-test morphology (3D); e) test before and after the image contour line overlay

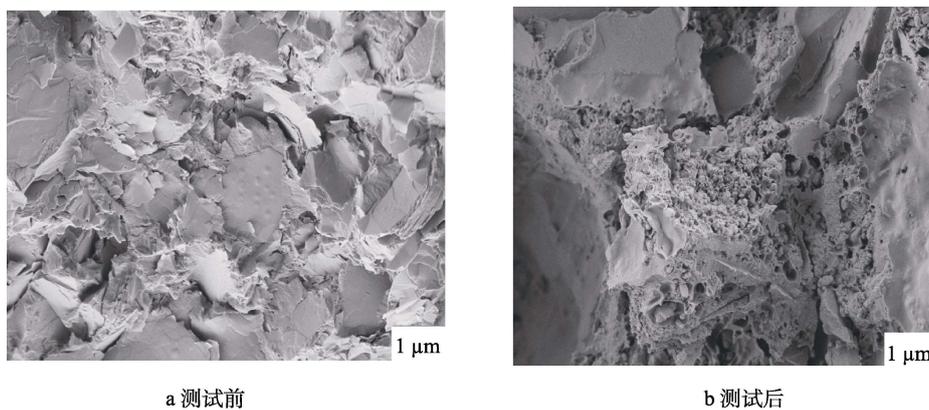


图 5 涂层测试前后扫描电镜图片

Fig.5 SEM images before and after coating test: a) before test; b) after test

线光滑表现为一个小半径的 1/4 圆，交流阻抗值达到 $10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 以上，涂层仍具有良好的防腐性能。

2.5 涂层耐热寿命预测结果

根据涂层测试期间涂层表面状态、色差、附着力变化情况、三维视频、扫描电镜及电化学交流阻抗值的测试结果，可以证明在 80°C 、 65 kPa 条件下 20 个月的测试，涂层样板是有效的，海水淡化装置内舱碳

钢防护涂层耐热老化时间将远大于 20 个月。由此可见，海水淡化装置内舱碳钢防护涂层在 $80^\circ\text{C}/20$ 月的热环境下性能是可靠的。利用经验公式对其工作寿命进行外推预算，计算出海水淡化装置内舱碳钢防护涂层在工作温度 (56°C) 的工作时间约为 13.33 年。以 20 个月试验结果进行估算预测，该防腐涂料体系在工作温度 (56°C) 的条件下预计使用寿命可以达到 13 年。

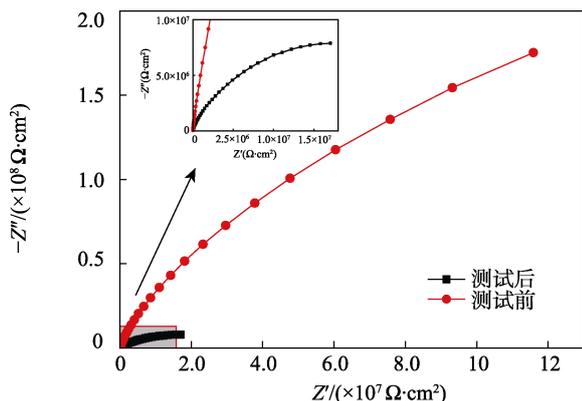


图6 涂层浸泡前后电化学交流阻抗测试结果
Fig.6 Test results of electrochemical ac impedance before and after coating soaking

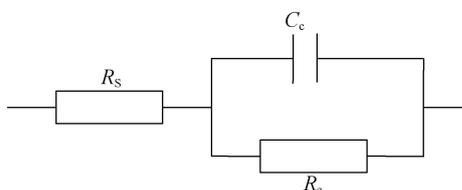


图7 电化学交流阻抗测试模拟等效电路
Fig.7 Equivalent circuit diagram of electrochemical AC impedance test simulation

表2 电化学交流阻抗测试所得电化学参数
Tab.2 Electrochemical parameters obtained by electrochemical ac impedance test

序号	电化学参数	测试前	测试后
1	$R_c/M\Omega$	511	35.1
2	$C_c/nMho$	3.50	45.0

3 结论

1) 采用实验室加速模拟试验方法,增加了低温多效蒸发器内舱防护涂层筛选途径,既避免了防护涂层材料对现役低温多效蒸发器设备的损伤,又加快了低温多效蒸发器内舱防护涂层工程化应用的速度,且由于温度、压力等参数可调,因而又可以加快测试速度,因此可以认为本方法方便快捷、快速可靠。

2) 以老化经验公式对海水淡化装置内舱碳钢防护涂层寿命进行外推计算,同时以涂层表面状态、色差及附着力为评定依据,计算得出该涂层在工作温度下(56℃)的涂层防腐寿命为13.33年。

参考文献:

[1] 闫明久. 海水淡化及海水利用工程重防腐涂料[J]. 现代涂料与涂装, 2000, 12(2): 13-14.
YAN M J. Seawater Desalination and Seawater Utilization Project Heavy Anticorrosive Paint[J]. Modern Paints and Finishes. 2000, 12(2): 13-14.

[2] 牟献良, 田月娥, 汪学华. 碳钢和低合金钢模拟加速试验与大气腐蚀试验的相关性[J]. 环境技术, 2001(4): 15-18.
MOU X L, TIAN Y E, WANG X H. The Correlation between Simulated Accelerated Tests of Carbon Steel and Low Alloy Steel and Atmospheric Corrosion Tests[J]. Environmental Technology, 2001(4): 15-18.

[3] 王绍明, 张三平, 周学杰, 等. 模拟大气环境加速腐蚀试验的研究[C]// 第五届全国表面工程学术会议论文集. 西安: 中国机械工程学会, 2004.
WANG S M, ZHANG S P, ZHOU X J, et al. On Accelerated Corrosion Test in Simulated Atmospheric Environment[C]. Proceedings of The Fifth National Conference on Surface Engineering. Xi'an: Chinese Mechanical Engineering Society, 2004.

[4] 汤诚, 朱志录, 冯俊. 酚醛环氧防腐涂层的制备及性能研究[J]. 中国涂料, 2010, 25(7): 32-34.
TANG C, ZHU Z L, FENG J. Preparation and Properties of Phenolic Epoxy Anticorrosive Coating[J]. China coating, 2010, 25(7): 32-34.

[5] 张黎黎, 陈凯锋, 梁宇, 等. 高屏蔽耐温酚醛环氧重防腐涂层的制备及性能研究[J]. 涂料工业, 2020, 50(2): 38-42;
ZHANG L L, CHEN K F, LIANG Y, et al. Study on Preparation and Properties of High Shielding Temperature Resistant Phenolic Epoxy Heavy Anticorrosive Coating[J]. Coating Industry, 2020, 50(2): 38-42.

[6] 方健君, 於杰. 常温固化酚醛环氧涂层的研制[J]. 涂料工业, 2011, 41(11): 68-73.
FANG J J, YU J. Development of Room Temperature Curing Phenolic Epoxy Coating[J]. Coating Industry, 2011, 41(11): 68-73.

[7] 梁宇, 陈凯锋, 黄从树, 等. 石墨烯在功能涂料中的应用研究进展[J]. 装备环境工程, 2019, 16(8): 95-101.
LIANG Y, CHEN K F, HUANG C S, et al. Advances in The Application of Graphene in Functional Coatings[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(8): 95-101.

[8] 周晓红, 杨春雷. 散热器内防腐涂层的研制[J]. 中国涂料, 2015, 30(9): 46-50.
ZHOU X H, YANG C L. Development of Anticorrosive Coating on Radiator [J]. China coatings, 2015, 30(9): 46-50.

[9] 顾干城. 环氧酚醛树脂罐头内壁涂料[J]. 上海涂料, 1993, 31(4): 29-32.
GU G C. Epoxy Phenolic Resin Can Inner Wall Coating[J]. Shanghai Coatings, 1993, 31(4): 29-32.

[10] 穆振军, 杜敏. 天然海水中高效缓蚀剂对碳钢腐蚀作用的研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2005, 25(4): 205-208;
MU Z J, DU M. Study on Inhibition Effect of High Efficiency Corrosion Inhibitor on Carbon Steel in Natural Seawater [J]. Chinese Journal of Corrosion and Protection, 2005, 25 (4): 205-208.

- [11] 邹家素, 杜敏, 孙晖. 高温海水中复合缓蚀剂的缓蚀性能及缓蚀行为研究[J]. 中国海洋大学学报, 2010, 40(12): 115-120.
ZOU J S, DU M, SUN H. Study on Inhibition Performance and Inhibition Behavior of Complex Corrosion Inhibitor in High Temperature Seawater [J]. Journal of Ocean University of China, 2010, 40 (12): 115-120.
- [12] AKAWUT S, DAYAKAR P, WEITSMAN Y J. Effect of Sea Environment on Interfacial Delamination Behavior of Polymeric Sandwich Structures[J]. Composites Science and Technology. 2008, 69: 821-828.
- [13] TSUDA K. Behavior and Mechanisms of Degradation of Thermosetting Plastics in Liquid Environments[J]. Bulletin of the Japan Petroleum Institute, 2007, 50(5): 240-248.
- [14] 刘杨, 赵悦菊, 杜婧, 等. 一种改性石墨烯导热防腐涂层的制备及性能研究[C]// 第五届海洋材料与腐蚀防护大会暨海洋新材料及防护新技术展览会论文集. 珠海, 2018.
LIU Yang, ZHAO Yue-ju, Du Jing, et al. Preparation and Properties of a Modified Graphene Thermal Conductive Anticorrosive Coating[C]// Proceedings of the 5th Conference on Marine Materials and Corrosion Protection and Exhibition of New Marine Materials and Protection Technologies. Zhuhai, 2018.
- [15] 胡海涛, 杨勇新, 郭春红. 海水对树脂耐久性影响的分析[J]. 工业建筑, 2006, 36(8): 13-15.
HU H T, YANG Y X, GUO C H. Analysis on The Influence of Seawater on The Durability of Resin[J]. Industrial Construction, 2006, 36(8): 13-15.
- [16] 孙曼灵, 吴良义. 环氧树脂应用原理及技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 4-8.
SUN M L, WU L Y. Application of the Principles and Techniques of Epoxy Resin[M]. Beijing: China Machine Press, 2002: 4-8.
- [17] 区英鸿. 塑料手册[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1991: 1172-1175.
QU Y H. Handbook of Plastics[M]. Beijing: North Weapons Industry Press, 1991: 1172-1175.
- [18] 吕平, 李华灵, 黄微波. 有机防护涂层老化研究进展[J]. 材料导报, 2011, 25(13): 83-85.
LYU P, LI H L, HUANG W B. Research Progress of Organic Protective Coating Aging[J]. Materials Review, 2011, 25(13): 83-85.
- [19] 张家宜. 高分子材料老化寿命的评定方法[J]. 特种橡胶制品, 2011, 32(3): 61-64.
ZHANG J Y. Evaluation of Aging Life of Polymer Materials[J]. Special Rubber Products, 2011, 32(3): 61-64.
- [20] 严伟兴, 郑佩, 李晓奋, 等. TH-33 防热涂层热老化性能的研究[J]. 航天制造技术, 2013(6): 46-47.
YAN W X, ZHENG P, LI X F, et al. Study on Thermal Aging Performance of TH-33 Thermal Protection Coating[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2013(6): 46-47.
- [21] 黄伟, 仇君. 塑料自然老化力学性能的灰色预测[J]. 广西大学学报自然科学版, 2001, 26(4): 275-277.
HUANG W, QIU J. Grey Prediction of Mechanical Properties of Plastics with Natural Aging[J]. Journal of Natural science of Guangxi University, 2001, 26 (4): 275-277.