

4-12-2023

## Atmospheric Corrosion Simulation of Air Conditioning Heat Exchanger in Service Under Marine Environment

Huang Peng

*State Key Laboratory of Environmental Adaptability for Industrial Products, China National Electric Apparatus Research Institute Co. , Ltd. , Guangzhou 510663, China;, penghuang@cei1958.com*

Jun Wang

*State Key Laboratory of Environmental Adaptability for Industrial Products, China National Electric Apparatus Research Institute Co. , Ltd. , Guangzhou 510663, China;*

Li Qi

*State Key Laboratory of Environmental Adaptability for Industrial Products, China National Electric Apparatus Research Institute Co. , Ltd. , Guangzhou 510663, China;*

Zhidong Wu

*State Key Laboratory of Environmental Adaptability for Industrial Products, China National Electric Apparatus Research Institute Co. , Ltd. , Guangzhou 510663, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Atmospheric Corrosion Simulation of Air Conditioning Heat Exchanger in Service Under Marine Environment

## Abstract

**Abstract:** Aiming at the performance degradation of air conditioner heat exchanger caused by serious corrosion under marine environment, an atmospheric corrosion simulation method is studied to analyze and predict the influence on corrosion conditions of marine environment and working condition of air conditioner heat exchanger. *From the acquisition of material parameters, the construction the model and the setting of boundary conditions, the atmospheric corrosion simulation process of air conditioner heat exchanger in service under marine environment is systematically introduced, and a method to verify the accuracy of the simulation model by using an artificially accelerated environmental test chamber is provided.* From the simulation results, the location and appearance of main corrosion of air conditioner heat exchanger is observed, the relevant corrosion data is obtaining and the main factors causing the corrosion of air conditioner heat exchanger and the related improvement methods are provided.

## Keywords

air conditioner heat exchanger, marine service environment, atmospheric corrosion simulation, couple corrosion simulation, comsol multiphysics(COMSOL)

## Recommended Citation

Huang Peng, Jun Wang, Li Qi, Zhidong Wu. Atmospheric Corrosion Simulation of Air Conditioning Heat Exchanger in Service Under Marine Environment[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(4): 899-905.

# 空调换热器在海洋环境条件下服役的大气腐蚀仿真

彭煌, 王俊, 祁黎, 吴志东

(中国电器科学研究院股份有限公司 工业产品环境适应性国家重点实验室, 广东 广州 510663)

**摘要:** 为解决海洋环境下空调换热器会发生严重腐蚀, 进而影响空调换热器的性能。提出一种大气腐蚀仿真方法来分析和预测海洋环境条件以及空调换热器的工况条件对其腐蚀状况的影响。从材料参数的获取、模型的创建、边界条件的设置, 介绍了空调换热器在海洋环境条件下服役的大气腐蚀仿真过程; 提供了利用人工加速环境试验箱来验证仿真模型准确度的方法。通过该仿真结果可观察到空调换热器主要发生腐蚀的位置及样貌, 获得相关腐蚀数据, 并且可分析出影响空调换热器腐蚀的主要因素以及改善方法。

**关键词:** 空调换热器; 海洋服役环境; 大气腐蚀仿真; 电偶腐蚀仿真; COMSOL(comsol multiphysics)

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2023)04-0899-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-1330

**引用格式:** 彭煌, 王俊, 祁黎, 等. 空调换热器在海洋环境条件下服役的大气腐蚀仿真[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(4): 899-905.

**Reference format:** Peng Huang, Wang Jun, Qi Li, et al. Atmospheric Corrosion Simulation of Air Conditioning Heat Exchanger in Service Under Marine Environment[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(4): 899-905.

## Atmospheric Corrosion Simulation of Air Conditioning Heat Exchanger in Service Under Marine Environment

Peng Huang, Wang Jun, Qi Li, Wu Zhidong

(State Key Laboratory of Environmental Adaptability for Industrial Products,  
China National Electric Apparatus Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** Aiming at the performance degradation of airconditioner heat exchanger caused by serious corrosion under marine environment, an atmospheric corrosion simulation method is studied to analyze and predict the influence on corrosion conditions of marine environment and working condition of air conditioner heat exchanger. *From the acquisition of material parameters, the construction the model and the setting of boundary conditions, the atmospheric corrosion simulation process of air conditioner heat exchanger in service under marine environment is systematically introduced, and a method to verify the accuracy of the simulation model by using an artificially accelerated environmental test chamber is provided.* From the simulation results, the location and appearance of main corrosion of air conditioner heat exchanger is observed, the relevant corrosion data is obtaining and the main factors causing the corrosion of air conditioner heat exchanger and the related improvement methods are provided.

**Keywords:** air conditioner heat exchanger; marine service environment; atmospheric corrosion simulation; couple corrosion simulation; comsol multiphysics(COMSOL)

收稿日期: 2021-12-22 修回日期: 2022-03-25

第一作者: 彭煌(1991-), 男, 工程师, 硕士生, 研究方向为机械设计与建模仿真。E-mail: penghuang@cei1958.com

## 0 引言

随着“十四五”海洋经济高质量发展战略的规划<sup>[1]</sup>,海岛微网、海上风电、海上光伏、港口桥梁等涉海设施建设正加快推进,近海或岛礁军事保障设施也逐步完善。在我国南海区域常年高温多雨<sup>[2]</sup>,盐雾浓度高,环境严酷,对涉海设施金属元件的腐蚀有着严重的影响<sup>[3]</sup>;同时,空调器又是南海区域不可或缺的民用电器,也是军事设施的重要保障条件<sup>[4]</sup>,换热器是当中最重要的部件之一,其腐蚀情况将影响空调器的性能<sup>[5]</sup>。目前,针对空调换热器的腐蚀研究较少,通过仿真技术来研究在南海环境条件下服役的空调换热器腐蚀情况更是屈指可数。因此,本文将介绍一种进行空调换热器大气腐蚀仿真的方法,希望通过仿真技术来分析空调换热器在海洋环境条件下服役的腐蚀状况。

## 1 技术原理

海洋环境条件下空调器中金属元器件发生的腐蚀主要为大气腐蚀,而换热器是由铜管与铝翅片搭接而成<sup>[6]</sup>,同时也会发生电偶腐蚀<sup>[7]</sup>。大气腐蚀的主要因素有大气的成分、温度和湿度,而在海洋大气中最主要的腐蚀介质成分是微小的盐粒及盐雾,这些盐分会随着风飘到空调器外机内部并沉积到换热器表面,盐的沉积数量取决于风浪条件,距离海平面的高度以及暴晒时间<sup>[8]</sup>。当这些盐分粘附在换热器表面后很容易在铜管或者翅片表面吸水而形成电解质液膜,从而使金属表面产生电化学腐蚀<sup>[9]</sup>。另外两个影响大气腐蚀的因素温度和湿度不止取决于大气环境的温湿度,还会受到空调器运行状态的影响,一个是空调器散热风扇产生的风,另一个是换热器中制冷剂的温度变化。因此,在进行空调换热器的大气腐蚀仿真时需要综合考虑这些影响因素<sup>[10]</sup>。

空调换热器的大气腐蚀仿真主要运用两大类公式模型,一是电极动力学公式模型,二是流

体热力学公式模型<sup>[11]</sup>。首先利用相关的流体热力学模型耦合流体以及热力学物理场,其中流场包括在空调器散热风扇作用下的外界湿空气流场以及空调换热器中制冷剂流场,热力学场主要为固体与流体的传热:制冷剂与铜管的传热、铜管与翅片的传热、湿空气与换热器的传热<sup>[12]</sup>。其次将流体热力学的多物理场模型与电化学腐蚀模型进行耦合,流体热力学场将直接影响电化学腐蚀仿真中的温度变化、湿度变化、盐粒子浓度变化。

## 2 数据准备

### 2.1 流体热力学数据

首先,通过气象站采集空调器外机所处户外环境的参数,如某南海环境条件的大气温度、周围的空气相对湿度、盐雾浓度等;通过压力传感器和温度传感器采集制冷剂流入空调换热器铜管的进口压力和进口温度;通过风速传感器采集空调外机散热风扇的风速。其次,在空调换热器多个合适的位置上布置温湿度采集点,收集足够的温湿度数据用于验证流体热力学多物理场仿真结果的准确度。

### 2.2 电化学腐蚀数据

首先,通过电化学实验测量出空调换热器铜管和铝翅片2种材料的极化曲线<sup>[13]</sup>,记录相关参数,如2种材料的平衡电位 $E_{Cu}$ 、 $E_{Al}$ ,2种材料的交换电流密度 $i_{0_{Cu}}$ 、 $i_{0_{Al}}$ ,两种材料的阳极Tafel斜率等电化学相关数据;通过粒子沉降传感器测量空调外机内部的盐粒子沉降量。其次,将已经在南海环境条件下运行一段时间的空调外机中的换热器铜管和翅片拆卸下来,在实验室中进行电化学实验,观察其表面的腐蚀形貌,测量并记录换热器铜管和翅片的腐蚀数据,如腐蚀速率、腐蚀产物等,用于验证电化学腐蚀仿真结果的准确度。

### 3 仿真过程

#### 3.1 创建模型

按照实际空调换热器铜管和翅片的尺寸, 利用 CAD 软件创建等比的空调换热器的三维模型, 如图 1 所示, 铜管制冷剂进口外径为 8 mm, 壁厚 0.8 mm; 铜管毛细出口端外径为 4 mm, 壁厚 0.8 mm; 单片翅片厚度为 0.5 mm, 间距为 1.5 mm; 铜管穿过翅片并与翅片无缝衔接。此时还需要构建一个虚拟的域作为仿真用的空气域(图 1 中未显示出来), 之后将创建好的三维模型导入多物理场仿真软件中进行下一步工作。

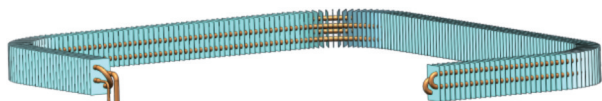


图 1 空调换热器模型(单层)

Fig. 1 Air conditioner heat exchanger model(single layer)

#### 3.2 参数条件

##### 3.2.1 材料参数

分别定义空调换热器中铜管和翅片的材料参数以及流体的材料参数, 其中包括金属材料的电导率  $\sigma$ 、不同材料的密度  $\rho$ 、导热系数  $k$ 、流体的动力粘度  $\mu$ 、恒压热容  $C_p$ 、比热率  $\gamma$ , 以及其他必要的材料参数。

##### 3.2.2 传热条件

利用热力学公式(1)定义固体和流体传热, 其中固体和流体的热力学参数都引用来自前一小节的材料参数定义, 温度的初始值为南海环境条件的大气温度  $T$ , 并定义湿空气热力学模型如式(2)所示; 定义制冷剂入口位置, 入口温度  $T_m$ , 入口压力  $P$ , 并定义制冷剂流出位置; 定义散热空气入口位置(翅片外侧)及其温度(与大气温度  $T$  相同), 并定义散热空气流出位置。

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为流体密度;  $C_p$  为流体恒压热容;  $T$  为温

度;  $k$  为流体导热系数;  $Q$  为单位体积的交换热量;  $\mathbf{u}$  为流体速度场。

$$c_v = c_v(T, P_A, x_{\text{vap}})$$

$$x_{\text{vap}} = \frac{M_v}{M_a} \cdot \frac{\Phi_w P_{\text{sat}}(T_{\Phi_w})}{P_{\Phi_w} - \Phi_w P_{\text{sat}}(T_{\Phi_w})}, \quad (2)$$

$$0 \leq \Phi_w \leq 1$$

式中:  $\Phi_w$  为相对湿度;  $c_v$  为流体恒容热容;  $x_{\text{vap}}$  为绝对湿度;  $M_v$  为水蒸气摩尔质量;  $M_a$  为干空气摩尔质量;  $P_A$  为流体压力;  $P_{\text{sat}}$  为饱和蒸汽压,  $T_{\Phi_w}$  为相对湿度的温度条件;  $P_{\Phi_w}$  为相对湿度的绝对压力条件。

##### 3.2.3 流体条件

根据雷诺数计算 2 个流场的雷诺数:

$$Re = \rho v L / \mu \quad (3)$$

式中:  $\rho$  为流体材料密度;  $v$  为流场特征速度;  $L$  为流场特征长度;  $\mu$  为流体动力粘性系数。

制冷剂密度  $\rho = 1\ 038.7\ \text{kg/m}^3$ , 流场特征速度(即制冷剂流速)  $v = 30\ \text{m/s}$ , 流场特征长度(即铜管内径)  $L = 6\ \text{mm}$ , 流体动力粘性系数(即制冷剂动力粘性)  $\mu = 124.5\ \text{Pa} \cdot \text{s}$ , 可得流场雷诺数  $Re$  计算结果为 1.502。

空气密度  $\rho = 1.205\ \text{kg/m}^3$ , 流场特征速度(即散热风扇风速)  $v = 2\ \text{m/s}$ , 流场特征长度(即翅片间距)  $L = 15\ \text{mm}$ , 流体动力粘性系数(即空气动力粘性)  $\mu = 1.8 \times 10^{-5}\ \text{Pa} \cdot \text{s}$ , 可得流场雷诺数  $Re$  计算结果为 2 008.3。

由于 2 个流体域的雷诺数均小于 2 300, 因此, 利用流体力学式(4)定义仿真中的 2 个层流模型, 其中一个是定义制冷剂在铜管中的进出口位置及进口压力  $P$ , 出口压力为 1 个标准大气压, 另一个是定义空气在散热风扇作用下的流动规律, 包括进出口的位置, 空气域的进口位置为翅片外侧, 出口位置为翅片内侧, 进口的风速  $v_{\text{in}}$ , 出口压力为 1 个标准大气压。另外, 还需利用式(5)定义空气中的水分输送条件, 其中湿空气的扩散系数为  $2.6 \times 10^{-5}\ \text{m}^2/\text{s}$ <sup>[14]</sup>, 初始相对湿度为实际测量空气相

对湿度RH，定义潮湿表面为整个空调换热器的外表面。

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot [-\rho\mathbf{t} + \boldsymbol{\kappa}] + \mathbf{F} \quad (4)$$

式中： $\boldsymbol{\kappa}$ 为黏性力场； $\mathbf{t}$ 为流量； $\mathbf{F}$ 为外力场。

$$M_v \mathbf{u} \cdot \nabla c_v - \nabla \cdot M_v D \nabla c_v = G \quad (5)$$

式中： $D$ 为扩散系数。

### 3.2.4 电化学反应

首先是定义电化学反应的电解质，边界为分布在空调换热器整个外表面；电解质厚度为 $d_f^{[15]}$ ，mm；盐溶液浓度为 $c_{\text{NaCl}}^{[15]}$ ， $\text{kmol/m}^3$ ；电解质电导率为 $\sigma_f^{[15]}$ ，S/m。

$$d_f = T_F / (58.5 \cdot c_{\text{NaCl}}) \quad (6)$$

式中： $T_F$ 为盐粒子沉积量。

$$c_{\text{NaCl}} = 2.37 \times 10^{-4} \cdot T_C \cdot \text{RH}_C - 0.2273 \cdot \text{RH}_C - 0.0237 \cdot T_C + 22.37 \quad (7)$$

式中： $T_C$ 为前述流体热力学场耦合得到的空调换热器表面温度； $\text{RH}_C$ 为前述流体热力学场耦合得到的相对湿度。

$$\sigma_f = -287264 \cdot \text{RH}_C + 683394 \cdot \text{RH}_C^2 - 811693 \cdot \text{RH}_C^3 + 481365 \cdot \text{RH}_C^4 - 114051 \cdot \text{RH}_C^5 + 48250.2 \quad (8)$$

其次是定义电极表面，这里包括2种材料的电极表面：①铜管上的电极反应；②铝翅片上的电极反应。利用前述实验获得的电化学反应数据，可定义电极动力学参数，包括阳极和阴极的交换电流密度，Tafel斜率以及极限电流密度 $i$ ， $\text{A/m}^2$ ：

$$i = 4 \cdot F_{\text{con}} \cdot D_{\text{O}_2} \cdot O_{\text{sol}} / d_f \quad (9)$$

式中： $F_{\text{con}}$ 为法拉第常数； $O_{\text{sol}}$ 为氧溶解度； $D_{\text{O}_2}$ 为氧扩散系数。

氧溶解度为 $O_{\text{sol}}^{[15]}$ ， $\text{cm}^3/\text{dm}^3$ ：

$$O_{\text{sol}} = -173.4292 + 249.6339 \times (T_C^{-1} \times 10^{-2}) + 143.3843 \times \ln(T_C \cdot 10^{-2}) - 21.88492 \times (T_C \times 10^{-2}) + S(-0.033096 + 0.0014259 \times T_C \times 10^{-2} - 0.0017 \times T_C^2 \times 10^{-4}) \quad (10)$$

式中： $S$ 为溶液盐含量， $S = c_{\text{NaCl}} \times 58.5 / \rho$ 。

氧扩散系数为 $D_{\text{O}_2}^{[15]}$ ， $\text{m}^2/\text{s}$ ：

$$D_{\text{O}_2} = (-1.464 \times 10^{-4} \times c_{\text{NaCl}} + 2.0511) \times 10^{-9} \quad (11)$$

### 3.2.5 边界条件

以海南某地的年平均温湿度和盐沉积量，以及实验场测得的空调器服役参数作为初始边界条件进行稳态仿真，具体参数设置如表1所示。

表1 仿真输入参数

Table 1 Parameters for simulation	
参数	数值
外界大气温度/°C	25
外界大气湿度	0.85
盐沉降量/( $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ )	50
空调运行平均风速/(m/s)	2
制冷剂进入铜管温度/°C	70
制冷剂进入铜管压力/MPa	1.3

### 3.3 仿真结果

设置完所有边界条件之后，根据需求进行仿真求解，如果是要研究某一特定时间和环境条件下空调换热器的大气腐蚀仿真，就采用稳态仿真求解器，所有预定义初始条件参数都为常数；如果是要研究一段时间范围内随环境条件变化情况下空调换热器的大气腐蚀仿真，就采用瞬态仿真求解器，所有预定义初始条件参数都为随时间变化的函数。

空调换热器的流体热力学仿真结果，包括图2所示的固体和流体的温度场分布，图3所示的换热器表面的相对湿度场分布等；电化学反应仿真结果，包括图4所示的空调换热器表面液膜的电解质电位分布，图5所示的空调换热器的腐蚀区域与腐蚀样貌以及相应腐蚀电流密度分布云图等。

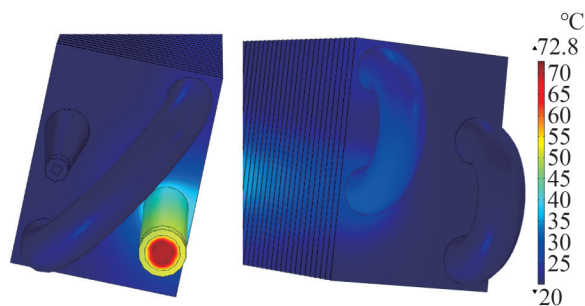


图2 空调换热器温度场的仿真结果

Fig. 2 Simulation results of temperature field of air conditioning heat exchanger

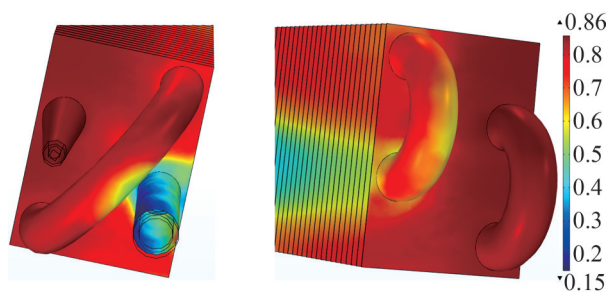


图3 空调换热器相对湿度场的仿真结果  
Fig. 3 Simulation results of relative humidity field of air conditioning heat exchanger

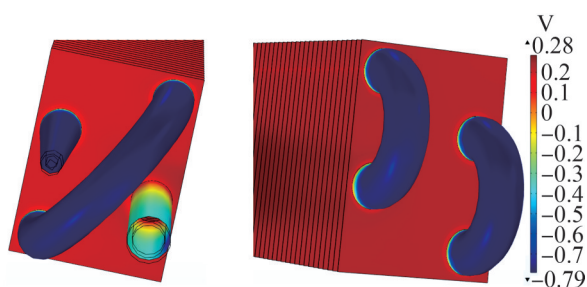


图4 空调换热器表面电解质电位分布仿真结果  
Fig. 4 Simulation results of electrolyte potential distribution on surface of air conditioning heat exchanger

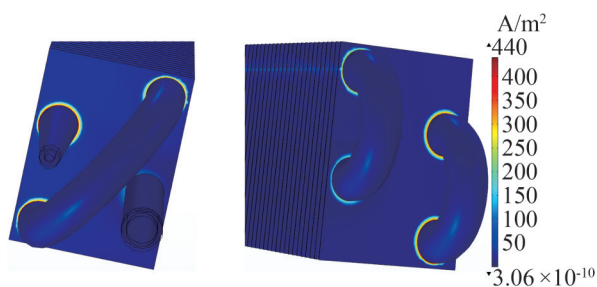


图5 空调换热器局部腐蚀电流密度仿真结果  
Fig. 5 Simulation results of local corrosion current density on surface of air conditioning heat exchanger

从仿真结果可以得到初步分析结果, 在空调换热器发生大气腐蚀时, 主要发生腐蚀的位置是翅片与铜管的结合处, 且翅片较铜管更容易发生腐蚀; 同时在湿度高温度低的区域, 即制冷剂经过减压降温后流经的区域腐蚀更为严重, 此处的温度约为 20.22°C, 相对湿度为 0.86, 铝材料腐蚀速率达到 6.944 g/(m<sup>2</sup>·a), 根据标准 ISO 9223-2012, 该区域环境腐蚀等级为 C5, 必须采用较为严格的防腐措施, 如涂覆防腐涂层。

## 4 验证实验

对于单一物理场(主要是温湿度场)的验证较为容易实现, 如图 6 所示在空调换热器的铜管和翅片多个位置上布置温湿度传感器点, 温度点包括制冷剂进出口位置、弯管位置、翅片上均匀分布的位置, 湿度点包括翅片内外侧各 3 个悬空点位。温度点测量采用 II 型精度的 T 型热电偶, 湿度测量采用 A 准精度的湿度计。同时将空调器放置在恒温恒湿环境箱中运行, 恒温恒湿环境箱设置的温湿度与仿真边界条件相同, 如表 1 所示, 监测每个温湿度点的数据并与仿真结果对比, 结果如表 2 所示, 可见温湿度场的仿真结果误差小于 5%。

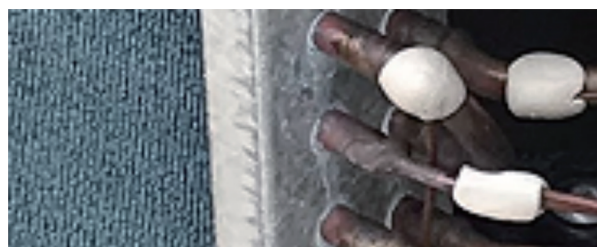


图6 空调换热器温湿度实测布点  
Fig. 6 Air conditioner heat exchanger temperature and humidity actual measurement layout

表2 温湿度实测与仿真结果对比  
Table 2 Comparison of actual and simulated temperature and humidity results

温度点位置	实测平均 温度°C/湿度	仿真平均 温度°C/湿度
铜管进口处	51.89/0.35	51.88/0.32
1#U型铜管处	34.01/0.67	33.95/0.65
2#U型铜管处	31.58/0.79	30.82/0.78
3#U型铜管处	25.08/0.80	24.67/0.81
铜管出口处	20.75/0.85	20.22/0.86

对于耦合了电化学腐蚀场的多物理场验证较为复杂, 首先需将空调器放置在综合环境实验箱进行人工加速盐雾腐蚀实验, 按照实验标准 GB/T 10125-2012, 将环境实验箱的温度设置为 35°C, 相对湿度设置为 0.95 以上, 盐沉降量设置为 1.25×10<sup>4</sup>mg/(m<sup>2</sup>·h), 经过 48、96、240、480、

1 000 h的加速实验之后,取出空调器拆下换热器部件,对换热器不同部位的翅片进行相关腐蚀参数的测量;另一方面,将同样的模拟环境条件参数作为边界条件输入到空调换热器的仿真中,根据前面章节的方法进行仿真求解得到腐蚀速率与时间48、96、240、480、1 000相乘可以得到腐蚀量的预测结果,表3为铜管进口处翅片的腐蚀实测与仿真结果数据的对比。

表3 铜管进口处翅片的腐蚀实测与仿真结果对比  
Table 3 Comparison of actual and simulated corrosion rate results

时间/h	人工加速实验/(g/m <sup>2</sup> )	仿真结果/(g/m <sup>2</sup> )
48	1.492	1.536
96	2.136	3.072
240	2.407	7.680
480	2.982	15.360
1 000	3.729	32.000

通过对比人工加速盐雾实验与仿真结果可知,最小误差为2.9%(48 h),最大误差为758%(1 000 h),即当人工加速实验时间较短时,其腐蚀实验的结果与仿真结果较为接近,而当实验时间增加时,仿真结果与其实验结果的误差很大。原因是目前的仿真还未考虑到腐蚀产物对腐蚀模型的影响,比如铝腐蚀产生的致密氧化膜会阻碍金属进一步腐蚀,因此,目前该空调换热器大气腐蚀仿真的方法更适用于研究产品腐蚀初期的情况。

## 5 结论

利用上述方法可以较好地实现空调换热器在海洋环境条件下服役的大气腐蚀仿真,该仿真模型充分考虑了影响海洋大气腐蚀的3个要素——温度、湿度、盐度,并且将决定这3个要素的多物理场进行全耦合,并进一步将物理场与电化学腐蚀模型相耦合,进而系统化地实现了工作状态下的空调换热器在腐蚀介质为盐粒子的环境中的大气腐蚀仿真。通过分析空调换热器的大气腐蚀仿真结果可知,不同的换热器材料和结构以及不同的环境条件对空调换热器腐蚀程度的影响,需

要对换热器的材料和结构或者环境条件做出如何调整才能减轻腐蚀程度,比如设计通风性能更好的换热器结构或者增加换热器局部的温度都可以改善换热器的抗腐蚀性能。该仿真方法还可以继续完善,比如考虑腐蚀产物对腐蚀过程的影响;其次是考虑空调换热器有了防腐涂层之后该如何进行大气腐蚀仿真,需要进一步耦合高分子材料老化模型,这将是空调换热器在南海环境下服役的大气腐蚀仿真研究重要而又复杂的下一阶段工作。

## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国中央人民政府. 中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议[N/OL]. 人民日报, 2020-11-04(1). [2021-08-10]. [http://www.gov.cn/zhengce/2020-11/03/content\\_5556991.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2020-11/03/content_5556991.htm).
- [2] 邢彩盈, 朱晶晶, 吴胜安. 南海区域热状况的气候变化特征分析[J]. 海洋预报, 2018, 35(6): 13-23.  
Xing Caiying, Zhu Jingjing, Wu Shengan. Climatic Change Characteristics of Thermal Condition in the South China Sea[J]. Marine Forecasts, 2018, 35(6): 13-23.
- [3] 金伟晨. 以南海环境为例的海洋环境下装备适应性研究[J]. 船舶物资与市场, 2018(5): 35-39.  
Jin Weichen. Research on Equipment Adaptability in Marine Environment[J]. Marine Equipment/Materials & Marketing, 2018(5): 35-39.
- [4] 《机电信息·中央空调市场》编辑部. 2020年度中国中央空调市场总结报告第四章区域市场分析[J]. 机电信息, 2021(4): 39-75.
- [5] 廖雄, 李泉明, 刘艳辉, 等. 中央空调冷凝器腐蚀失效分析与对策[J]. 能源与环境, 2010(5): 21-22.
- [6] 张卫星, 张学伟. 浅谈空调行业中铜铝换热器的腐蚀问题[J]. 制冷空调与电力机械, 2010, 31(1): 87-88, 92.  
Zhang Weixing, Zhang Xuewei. Observation on Corrosion Problems of Copper-aluminum Heat Exchanger in Air-conditioner[J]. Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery, 2010, 31(1): 87-88, 92.
- [7] 谭勇, 周彩元, 陈源, 等. 金属连接件大气腐蚀行为模拟仿真[J]. 环境技术, 2018(增1): 50-54.  
Tan Yong, Zhou Caiyuan, Chen Yuan, et al. Simulation of Atmospheric Corrosion Behavior of Metal Connectors[J]. Environmental Technology, 2018(S1): 50-54.
- [8] 林翠, 王凤平, 李晓刚. 大气腐蚀研究方法进展[J]. 中国



- 腐蚀与防护学报, 2004, 24(4): 249-256.
- Lin Cui, Wang Fengping, Li Xiaogang. The Progress of Research Methods on Atmospheric Corrosion[J]. Journal of Chinese Society For Corrosion and Protection, 2004, 24(4): 249-256.
- [9] 陈跃良, 黄海亮, 卞贵学, 等. 多电极偶接对金属大气腐蚀影响的试验与仿真[J]. 航空学报, 2018, 39(6): 210-220.  
Chen Yueliang, Huang Hailiang, Bian Guixue, et al. Test and Simulation of Multi-Electrode Coupling Effects on Atmospheric Corrosion of Metals[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 39(6): 210-220.
- [10] 李卫平, 刘慧丛, 陈海宁, 等. 基于COMSOL软件的腐蚀仿真实验教学方法[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(10): 82-85. DOI:10.19927/j.cnki.syyt.2021.10.016.  
Li Weiping, Liu Huicong, Chen Haining, et al. Method of Corrosion Simulation Experiment Teaching Based on COMSOL Software[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2021, 40(10): 82-85. DOI: 10. 19927/j.cnki.syyt.2021.10.016.
- [11] 靳永言. 汽车空调两器(冷凝器与蒸发器)与系统的建模与仿真[D]. 西安: 长安大学, 2019.  
Jin Yongyan. Modeling and Simulation of Heat Exchangers and Automotive Air Conditioning System [D]. Xi'an: Chang'an university, 2019.
- [12] 黄海亮, 陈跃良, 张勇, 等. 飞机多金属耦合在溶液状态与大气状态下的腐蚀行为对比及当量折算研究[J]. 材料导报, 2020, 34(4): 4118-4125.  
Huang Hailiang, Chen Yueliang, Zhang Yong, et al. Study on Comparison of Multi-metal Coupled Corrosion Behavior Under the State of Atmosphere and Solution and Equivalent Conversion Calculation[J]. Material Reports, 2020, 34(4): 4118-4125.
- [13] 覃奇贤, 刘淑兰. 电极的极化和极化曲线(II)—极化曲线[J]. 电镀与精饰, 2008, 30(7): 29-34.  
Qin Qixian, Liu Shulan. Polarization of Electrode and Polarization Curve(II)—Polarization Curve[J]. Plating & Finishing, 2008, 30(7): 29-34.
- [14] 蒋超. 水分扩散系数的估算及其可靠性分析[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.  
Jiang Chao. Estimation and Reliability Analysis of Moisture Diffusion Coefficient[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2014.
- [15] 汪洋, 陈川, 揭敢新, 等. 基于物质传递动力学模型的金属大气腐蚀速率预测算法: CN112735538A[P]. 2021-04-30.  
Wang Yang, Chen Chuan, Jie Ganxin, et al. Metal Atmospheric Corrosion Rate Prediction Algorithm Based on Mass Transfer Dynamics Model: CN112735538A[P]. 2021-04-30.