

# 基于自然和模拟热带海洋大气环境中 涂层性能变化的对比研究

李茜<sup>1</sup>, 胡涛<sup>1</sup>, 孙茂钧<sup>1</sup>, 王玲<sup>1</sup>, 牟献良<sup>1</sup>, 李昊瑜<sup>1</sup>, 何德洪<sup>2</sup>,  
任雁<sup>3</sup>, 任京<sup>4</sup>, 肖林林<sup>3</sup>, 杨立昆<sup>4</sup>

(1.西南技术工程研究所, 重庆 400039; 2.重庆江津大气环境材料腐蚀国家野外科学观测研究站, 重庆 402260; 3.北京北方车辆集团有限公司, 北京 100072; 4.中国北方工业有限公司, 北京 100053)

**摘要:** **目的** 研究涂层在自然环境试验和实验室模拟环境试验下性能的变化情况, 通过再现涂层在自然环境下的环境效应和损伤过程, 进而验证该模拟热带海洋大气环境试验方法的合理性。**方法** 根据涂层在舰船、舰载机等装备上热带海洋大气实际服役环境的分析, 通过对热带海洋大气环境温度、湿度、盐雾、太阳辐射环境因素的组合, 综合设计模拟热带海洋大气环境试验方法的试验流程, 开展3种涂层在海南万宁为期1a和实验室总周期为7循环的对比试验。**结果** 3种涂层在自然环境试验和实验室模拟环境试验后, 随着试验时间的延长, 其性能变化趋势相似, 失光率和色差增大, 附着力明显降低, 交流阻抗值减小。红外光谱分析显示, 老化机理均未出现明显变化, 以光泽和色差为基准的平均秩相关系数为0.87, 为极强相关。**结论** 本模拟热带海洋大气环境试验方法设计合理, 具有良好的模拟性。

**关键词:** 涂层; 热带海洋大气; 自然暴露; 实验室模拟; 腐蚀行为; 相关性

中图分类号: TJ07 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2023)11-0149-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.11.019

## Comparative Study on Coating Performance Changes in Natural and Simulated Tropical Marine Atmospheric Environments

LI Qian<sup>1</sup>, HU Tao<sup>1</sup>, SUN Mao-jun<sup>1</sup>, WANG Ling<sup>1</sup>, MOUXian-liang<sup>1</sup>, LI Hao-yu<sup>1</sup>, HE De-hong<sup>2</sup>,  
REN Yan<sup>3</sup>, REN Jing<sup>4</sup>, XIAO Lin-lin<sup>3</sup>, YANG Li-kun<sup>4</sup>

(1. Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China; 2. Jiangjin Atmospheric Material Corrosion Field National Observation and Research Station, Chongqing 402260, China; 3. Beijing North Vehicle Group Corporation, Beijing 100072, China; 4. China North Industries Corp. Beijing 100053, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the performance changes of coatings in natural and simulated tropical marine atmospheric environments, to verify the rationality of the method for simulating marine atmospheric environment by reproducing the environmental effects and damage processes of coatings in natural environments. Based on the analysis of the coating on ships, carrier based aircraft, and other equipment in the tropical ocean atmosphere, and in combination with environmental factors such as temperature, humidity, salt mist, and solar radiation in the tropical marine atmosphere, a comprehensive experimental process

收稿日期: 2023-05-05; 修订日期: 2023-06-13

Received: 2023-05-05; Revised: 2023-06-13

引文格式: 李茜, 胡涛, 孙茂钧, 等. 基于自然和模拟热带海洋大气环境中涂层性能变化的对比研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(11): 149-157.  
LI Qian, HU Tao, SUN Mao-jun, et al. Comparative Study on Coating Performance Changes in Natural and Simulated Tropical Marine Atmospheric Environments[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(11): 149-157.

was designed to simulate the tropical ocean atmosphere environment in the laboratory. A comparative test of three coatings in Wanning, Hainan for a period of one year and a total laboratory cycle of seven cycles was conducted. According to the test of three coatings in the natural environment and the simulated environment in laboratory, the performance changes of coatings showed a similar trend. The loss of light and color difference increased, the adhesion significantly decreased, and the AC impedance value decreased. The infrared spectroscopy analysis showed no significant change in the aging mechanism. The average rank correlation coefficient based on gloss and color difference was 0.87, which is highly correlated. The experimental method for simulating tropical marine atmospheric environment is reasonable in design and has good simulation performance.

**KEY WORDS:** coating; tropical marine atmosphere; natural exposure; laboratory simulation; corrosion behavior; correlation

涂层作为各类装备材料的保护层,某些关键部位的耐腐蚀能力可能直接或间接影响装备的耐蚀性<sup>[1-3]</sup>。通常热带海洋大气环境具有高温、高湿、高盐雾和强太阳辐射的特点,对服役于该环境的装备则提出了更高的环境适应性要求<sup>[4-7]</sup>。然而,通过自然环境试验的方法来评估涂层的环境适应性,一般需要的周期较长,很难满足工程研制需求,而通过实验室模拟环境试验,可在较短时间内评估涂层几年甚至几十年的性能。因此,需提前建立涂层室内加速腐蚀试验结果与自然暴露腐蚀结果的相关性<sup>[8-12]</sup>。

刘成臣等<sup>[13-15]</sup>通过对5种飞机表面涂层自然和实验室的相关性研究,获得平均秩相关系数为0.96的极强相关性,为后续环境试验的研究提供了支撑依据。卞贵学等<sup>[16]</sup>研究了飞机结构模拟试件2周期加速腐蚀试验与2a自然暴露试验的相关性,其色差和光泽变化规律一致,疲劳寿命在 $t$ 检验下无显著差异,表明了模拟加速试验能较好地模拟飞机实际服役环境对试件产生的影响。曹真等<sup>[17]</sup>开展了直升机新老2种复合材料有机涂层8个周期的加速环境试验和2a的自然环境试验对比研究,通过对涂层防腐性能的考核验证,为海军直升机防腐和优化改进提供了支撑。张蕾等<sup>[18]</sup>通过编制加速环境谱,进一步开展了某飞机关键结构的防护涂层腐蚀行为研究,为外场的使用维护等提出了科学合理的意见建议。现有关于涂层相关性的研究大多基于外场自然环境试验结果,开展实验室模拟环境试验,以腐蚀程度影响性能指标退化为主

的定性对比试验结果来分析。通过以不同装备用涂层为研究对象的相关性研究,主要建立了室内加速试验与自然环境试验的相关性和等效性<sup>[19-22]</sup>,为装备用涂层的环境适应性、涂层体系的优化改进以及新工艺的筛选等提供了研究基础和技术支撑。然而,当前对相关性的研究依然很难全面有效地定量反映实验室模拟环境试验与自然环境试验之间的相关性,对于实验室模拟环境试验方法的建立也没有形成相对完善的方法。

因此,本文以舰船、舰载机等装备用防护涂层工艺为研究对象,依托热带海洋环境中的实际监测数据,通过涂层的实际使用环境分析设计了多环境因素的模拟热带海洋大气环境试验方法,开展了3种涂层试样自然环境试验和实验室模拟热带海洋大气环境试验。通过涂层在不同条件试验后的表观性能、附着力等变化分析,研究了2种环境试验的相关性,进而证实了模拟海洋大气环境试验方法的合理性,丰富和完善了模拟热带海洋大气环境的实验室加速试验方法,为后续研究和开展热带海洋大气环境试验提供了基础和依据。

## 1 试验

### 1.1 试样

本试验中共包含了3种涂层试样,其详细信息见表1。

表1 试验样品信息  
Tab.1 Sample information

序号	材料及工艺	规格/mm	编号	涂层厚度/ $\mu\text{m}$	生产厂家
1	纳米底漆+聚硅氧烷面漆		4号涂层	340 $\pm$ 25	中科院宁波材料技术与工程研究所
2	丙烯酸纳米漆(底面合一)	150 $\times$ 80 $\times$ 2.5	9号涂层	155 $\pm$ 25	厦门昕钢科技有限公司
3	环氧富锌底漆+天冬聚脲面漆		10号涂层	250 $\pm$ 10	上海亘多材料科技有限公司

### 1.2 自然环境试验

在海南万宁试验站开展户外暴露试验,试验方式参照GJB/T 8893.2—2017《军用装备自然环境试验方法 第2部分:户外大气自然环境试验》<sup>[23]</sup>,如图1所示。试验周期为1a,定期对试验试样的光泽、色

差和附着力等性能进行检测。

### 1.3 多因素模拟海洋大气环境试验

根据对涂层在舰船、舰载机等装备上的实际使用环境分析,结合热带海洋环境特征和主要环境因素,设计了涂层在实验室模拟热带海洋大气环境中的试



图 1 自然环境户外暴露试验  
Fig.1 Outdoor exposure test in natural environment

验方法, 试验流程如图 2 所示。其中, 试验每循环 1 次共 16 d。该方法主要涉及了氙灯试验、湿热试验和盐雾试验, 其中氙灯试验和盐雾试验分别采用 GB 1865《2009 色漆和清漆 人工气候老化和人工辐射曝露滤过的氙弧辐射》和 GJB 150.11A—2009《军用装备实验室环境试验方法第 11 部分: 盐雾试验》, 湿热试验中温湿度参数量值的确定采用海南万宁试验站实测数据进行环境当量转化, 试验参数详见图 3。

### 1.4 检测项目及方法

涂层样品的检测项目包括色差、光泽、附着力、阻抗和红外光谱等, 检测项目、检测标准及检测仪器见表 2。

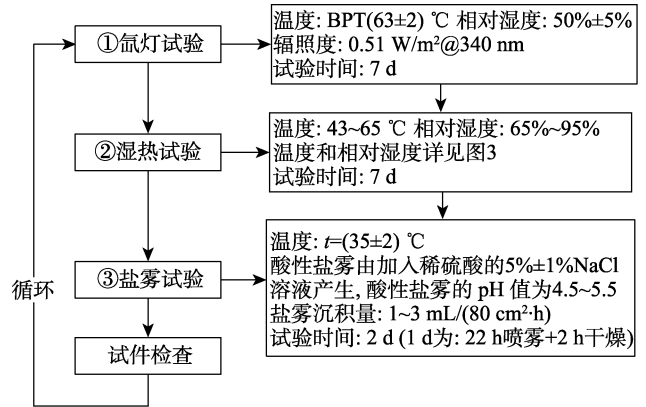


图 2 涂层模拟热带海洋大气环境试验流程  
Fig.2 Test profile for simulating tropical marine atmospheric environment with coatings

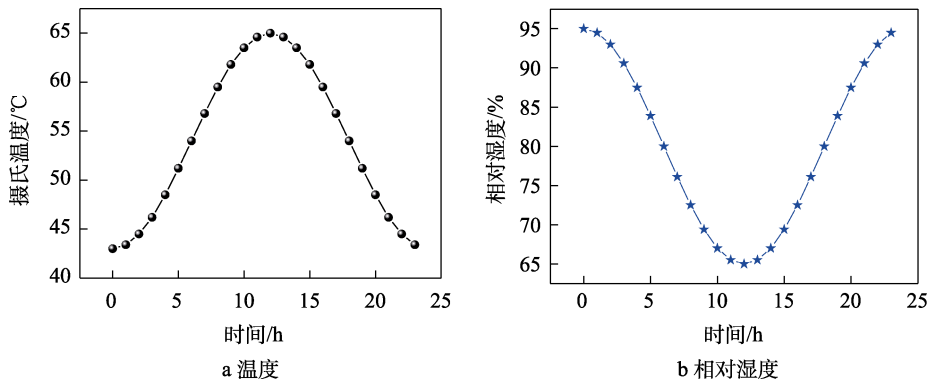


图 3 户外等环境当量加速试验单次循环剖面示意图  
Fig.3 Schematic diagram of single cycle profile for equivalent acceleration test in outdoor environment:  
a) temperature; b) relative humidity

表 2 检测项目、检测标准和检测仪器  
Tab.2 Inspection items, standards, and instruments

序号	检测此项目	检测标准	检测仪器
1	色差	GB/T 11186.2—1989	BYK 色差仪
2	光泽	GB/T 9754—2007	BYK 光泽计
3	附着力	GB/T 5210—2006	PosiTest AT-A 拉开法附着力试验仪
4	电化学阻抗	—	LG-CT2.0 型便携式涂层耐蚀性快速检测仪
5	红外光谱	GB/T 6040—2012	IS50 傅里叶红外光谱仪

## 2 结果与分析

### 2.1 表观形貌对比分析

3 种涂层在自然环境试验和实验室模拟环境试验后的表观形貌如图 4~6 所示。结果表明, 2 种环境试验后的涂层, 其表观均出现了不同程度的变化, 主要表现为涂层表面颜色变淡, 光泽变暗, 粗糙度增大,

实验室模拟环境试验后的部分试样沿着封边部位出现了明显的腐蚀破坏。对比在自然环境试验和实验室模拟环境试验后的 3 种涂层表观形貌不难发现, 自然环境试验后的涂层表面附着了较多的灰尘、杂质等, 表面清洁度整体较差, 仅颜色和光泽有明显变化, 封边部位暂未出现明显的飞边、起翘乃至脱落现象。对比自然环境试验后的涂层, 实验室模拟环境试验后的试样表面同样出现了颜色变淡、光泽变暗现象, 变化

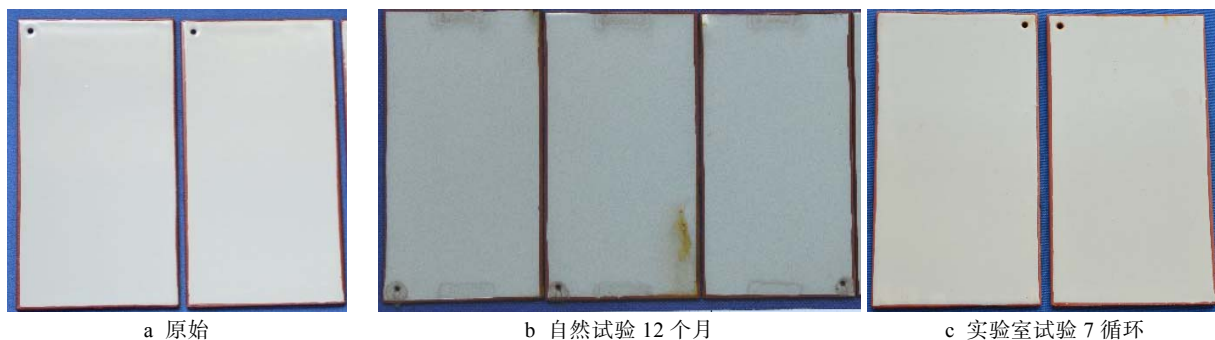


图 4 不同试验条件下 4 号涂层的表观变化情况

Fig.4 Apparent changes of No. 4 coating under different test conditions: a) original; b) 12 months of natural test; c) 7 cycles of laboratory test

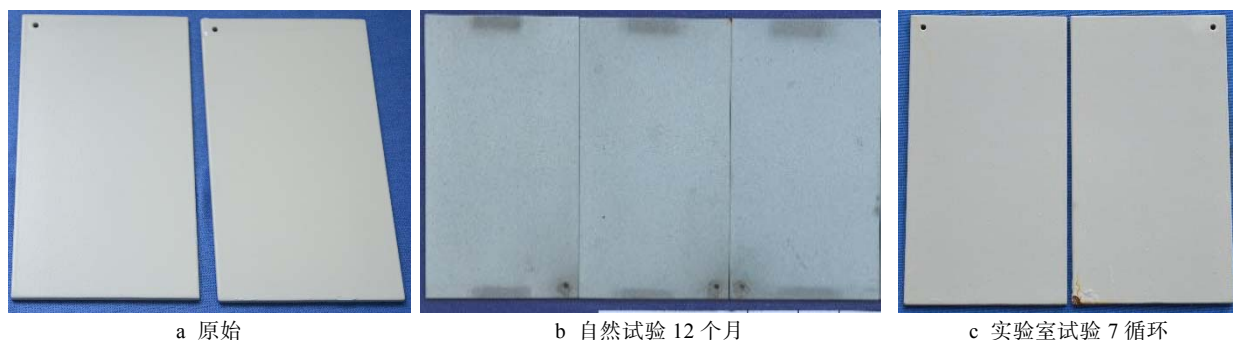


图 5 不同试验条件下 9 号涂层的表观变化情况

Fig.5 Apparent changes of No. 9 coating under different test conditions: a) original; b) 12 months of natural test; c) 7 cycles of laboratory test

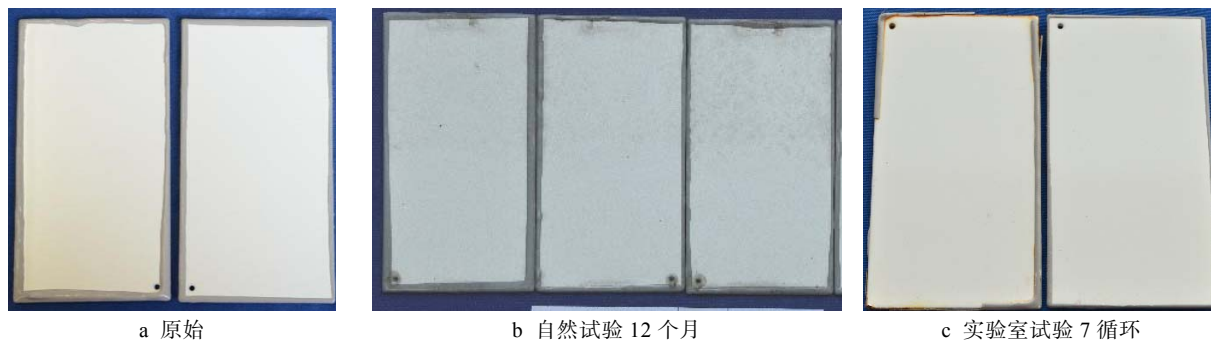


图 6 不同试验条件下 10 号涂层的表观变化情况

Fig.6 Apparent changes of No. 10 coating under different test conditions: a) original; b) 12 months of natural test; c) 7 cycles of laboratory test

程度较自然环境试验后的弱，且在实验室模拟环境试验后期，部分涂层出现了封边破坏甚至脱落现象。空气中的盐雾颗粒、水汽等沿着受损的封边部位进入涂层，在温差和太阳辐射的共同作用下，使得涂层基材发生破坏，长久作用下进一步造成涂层表面发生破坏。其中，涂层表面颜色明显变淡以 9 号涂层在自然环境试验后的变化最为明显，受热带海洋大气温湿度、盐雾、太阳辐射等多环境因素的影响，在试验过程中，涂层颜色由深灰色逐渐演变为浅灰白色，原来光滑的表面逐渐粗糙。在实验室试验后期，沿着 9 号涂层的棱角这些薄弱部位出现了明显的涂层起泡、裂纹、剥落，甚至出现了涂层基材的腐蚀生锈，褐色的

锈迹沿着涂层表面的裂纹逐渐扩展，进一步扩大腐蚀范围。

## 2.2 色差和失光率对比分析

3 种涂层在自然环境试验和实验室模拟环境试验后的色差和失光率变化情况如图 7~12 所示。整体来看，随着试验时间的延长，3 种涂层试样的失光率和色差均呈增大趋势，受涂层表面状态的影响，失光率和色差存在一定的起伏波动。其中以 4 号涂层的失光率变化最为明显，截至试验结束，该种涂层在实验室模拟环境试验 7 循环后的失光率达到了近 50%。根据 GB/T 1766—2008 中失光率的等级划分<sup>[24]</sup>，

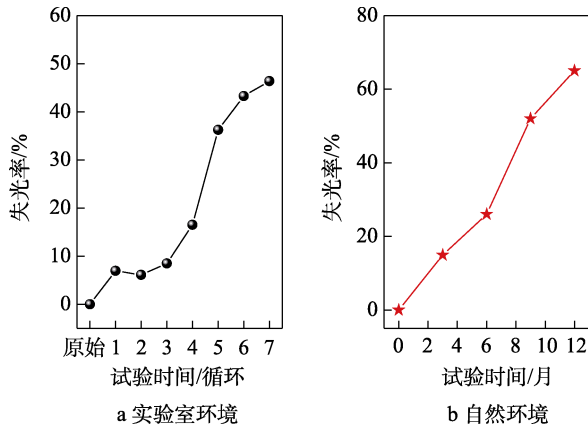


图 7 不同试验条件下 4 号涂层的失光率变化  
Fig.7 Changes in the loss of light of No. 4 coating under different test conditions

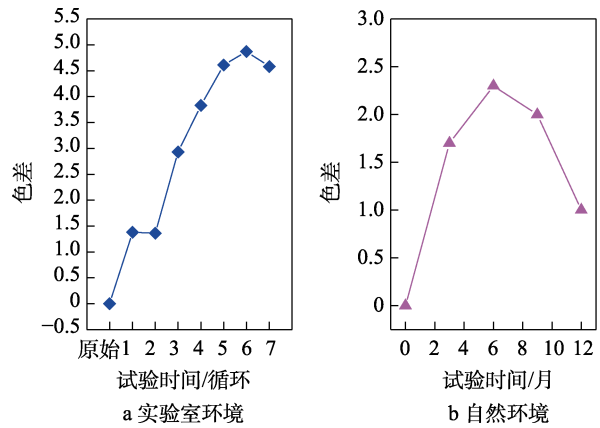


图 8 不同试验条件下 4 号涂层的色差变化  
Fig.8 Color difference changes of No. 4 coating under different test conditions

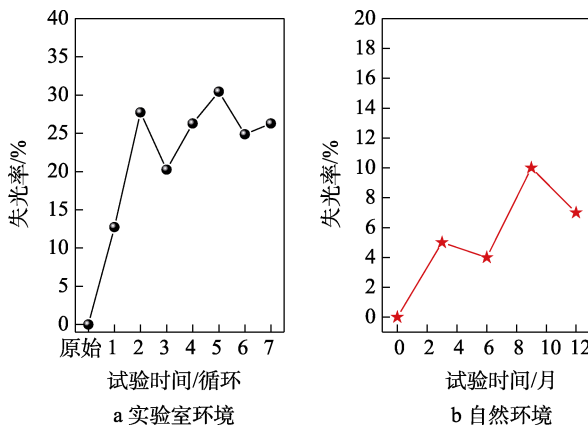


图 9 不同试验条件下 9 号涂层的失光率变化  
Fig.9 Changes in the loss of light of No. 9 coating under different test conditions

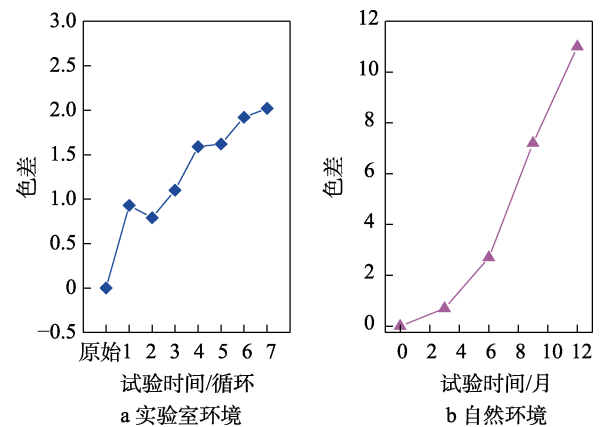


图 10 不同试验条件下 9 号涂层的色差变化  
Fig.10 Color difference changes of No. 9 coating under different test conditions

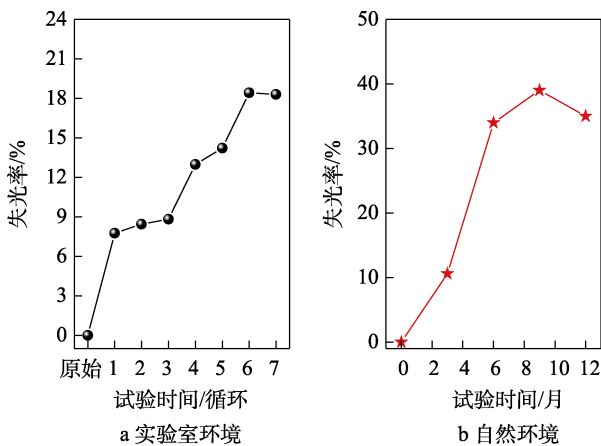


图 11 不同试验条件下 10 号涂层的失光率变化  
Fig.11 Changes in the loss of light of No. 10 coating under different test conditions

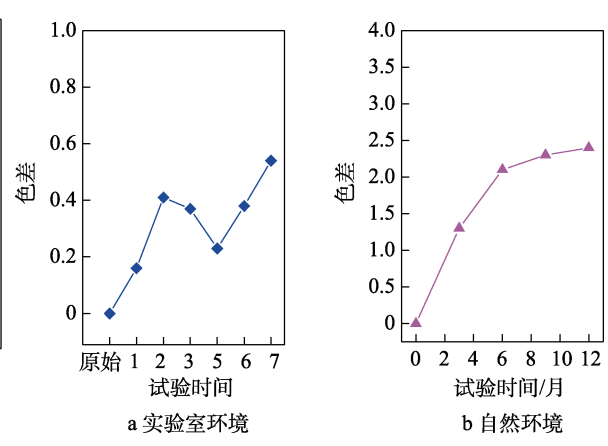


图 12 不同试验条件下 10 号涂层的色差变化  
Fig.12 Color difference changes of No. 10 coating under different test conditions

其表现为明显失光,失光程度达到了 3 级。在自然环境试验 9 个月后,4 号涂层的失光率也达到了近 50%,试验 12 个月后,其失光率将近 65%,表现为严重失光,失光程度更是达到了 4 级。10 号涂层在自然环境试验后,其失光率最高达到了 40%,失光

等级为 3 级,失光变化仅次于 4 号涂层,同期实验室模拟环境试验 7 循环后的 10 号涂层,其失光率近 18%,失光程度为 2 级。9 号涂层在自然环境试验后,色差变化值达到约 11,变色程度为较大变色,评定等级 4 级,为 3 种涂层中色差变化最明显。根据 3

种涂层在 2 种环境中试验后的色差对比分析不难发现，在自然环境试验 12 个月后，9 号涂层和 10 号涂层色差变化较实验室模拟环境试验 7 循环后更大，变化趋势相似，随着试验时间的延长，逐渐呈增大趋势。

### 2.3 附着力、阻抗和红外光谱对比分析

进一步测试了 3 种涂层在不同试验条件、试验时间后的附着力、电化学交流阻抗和红外光谱，分别如图 13~17 所示。结果表明，2 种环境试验后，随着试验时间的延长，其附着力均呈现下降趋势（见图 13）。其原因为不同涂层对海洋大气环境因素温度、湿度、盐雾以及太阳辐射的综合敏感性不同，在自然环境试验和实验室模拟环境试验后，涂层附着力变化呈现出一定的差异。对于自然环境试验，3 种涂层附着力的下降幅度均达到了 50% 以上，其中 10 号涂层的下降幅度更是达到了约 70%；对于实验室模拟环境试验，9 号涂层的附着力下降最为明显，其下降幅度几乎达到了 85% 以上。4 号涂层自然试验 12 个月与实验室模拟环境试验 7 循环后的附着力降低幅度较为一致；9 号涂层实验室模拟环境试验后的附着力下降幅度为自然环境试验后变化值的 2 倍；10 号涂层附着力变化情况与 9 号涂层相反，自然环境试验后的附着力降低了 60%，几乎为其实验室模拟环境试验后变化值的 2 倍。观察 3 种涂层的交流阻抗，其变化值均有下降趋势，但整体阻值依然保持在  $10^9 \Omega$  以上（见图 14），表明涂层整体的耐腐蚀性能良好。

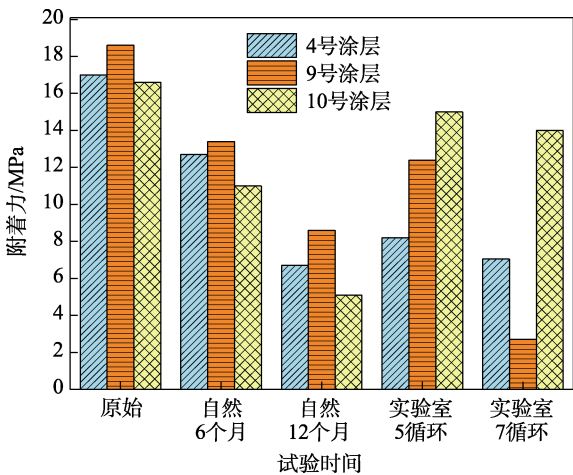


图 13 3 种涂层在不同试验条件下附着力的变化  
Fig.13 Changes in adhesion of three coatings under different test conditions

采用 IS50 傅利叶变换红外光谱仪测试了涂层在不同试验条件下的红外光谱，对比分析涂层有机官能团的变化情况，如图 15 所示。不同试验后，4 号（2 932.49、1 663.41、1 016.09  $\text{cm}^{-1}$  等）、9 号（2 928.98  $\text{cm}^{-1}$ 、1 756.66、1 375.96、1 210.84  $\text{cm}^{-1}$  等）和 10 号（2 926.91、

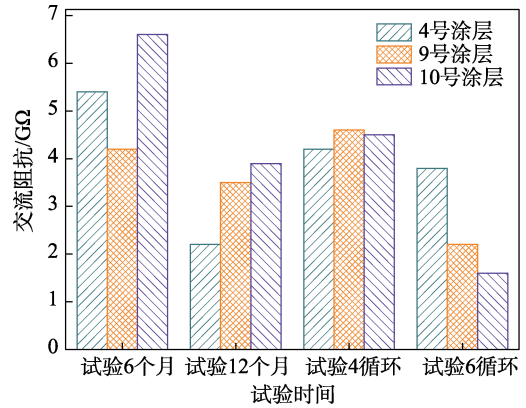


图 14 3 种涂层在不同试验条件下的交流阻抗  
Fig.14 AC impedance of three coatings under different test conditions

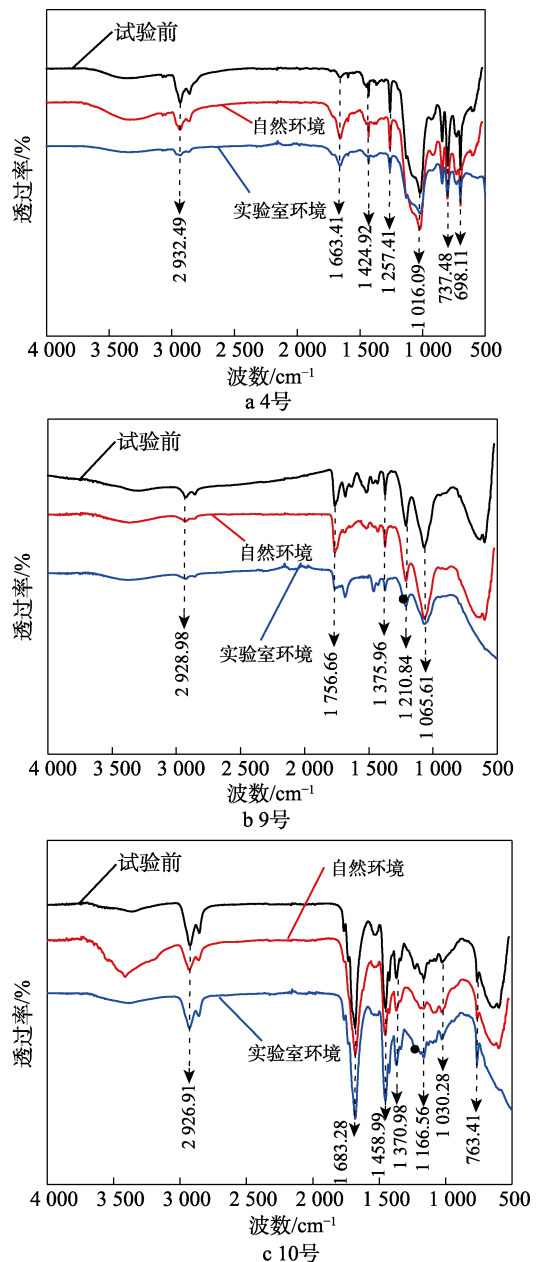


图 15 不同试验条件下不同涂层的红外光谱  
Fig.15 Infrared spectra of different coatings under different test conditions

1 683.28、1 458.99  $\text{cm}^{-1}$  等) 涂层样品特征吸收峰的强度、位置以及形状变化均不明显, 涂层中的化学键虽有部分的轻微破坏, 但整体来说涂层中的成膜物质仍然具有良好的耐蚀性<sup>[25]</sup>。因此分析认为, 在自然环境试验和实验室模拟环境试验后的 3 种涂层, 其老化机理基本一致, 该实验室模拟热带海洋大气环境试验方法的模拟性较好。

## 2.4 秩相关性评价

涂层的相关性评价一般从模拟性、加速性和重现性等方便来开展, 其中的评价方法主要为定性评价和定量评价。通常定量评价使用秩相关系数法和灰色关联分析法, 而秩相关系数法主要适用于参试样品经 2 种试验方法。因此, 本文采用 Spearman 秩相关系数 ( $r_s$ ) 法来评价涂层在自然环境试验和实验室模拟环境试验条件下性能变化趋势的一致性, 选取涂层试验后的失光率和色差进行相关性分析, 见式 (1)、(2)。

$$d_i = x_i - y_i \quad (1)$$

$$r = 1 - 6 \sum_{i=1}^n d_i^2 / (n^3 - n) \quad (2)$$

式中:  $d_i$  为秩差;  $x_i$  为自然环境试验后测得的性能数据的秩;  $y_i$  为实验室模拟加速试验后测得的性能数据的秩;  $n$  为参比试样组数。 $r_s \leq 1$ , 越接近 1 说明相关性越好<sup>[26]</sup>。

### 2.4.1 失光率相关性评价

$X_0$  为自然环境试验后涂层的失光率,  $X_{01} \sim X_{03}$  分别为 4 号、9 号和 10 号涂层自然环境试验后的失光率,  $Y_0$  为开展实验室模拟环境试验后的失光率,  $Y_{01} \sim Y_{03}$  分别为实验室模拟环境试验后 4 号、9 号和 10 号涂层的失光率。

自然环境试验:

$$X_0 = \begin{pmatrix} X_{01} \\ X_{02} \\ X_{03} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 14.9 & 26 & 52 & 65 \\ 0 & 5 & 4 & 10 & 7 \\ 0 & 10.6 & 34 & 39 & 35 \end{pmatrix}$$

实验室模拟环境试验:

$$Y_0 = \begin{pmatrix} Y_{01} \\ Y_{02} \\ Y_{03} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 6.93 & 16.51 & 36.24 & 46.37 \\ 0 & 12.73 & 20.23 & 30.44 & 26.28 \\ 0 & 7.76 & 8.82 & 14.22 & 18.42 \end{pmatrix}$$

自然环境试验的秩序数:

$$x_0 = \begin{pmatrix} x_{01} \\ x_{02} \\ x_{03} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 3 & 2 & 5 & 4 \\ 1 & 2 & 3 & 5 & 4 \end{pmatrix}$$

实验室模拟环境试验的秩序数:

$$y_0 = \begin{pmatrix} y_{01} \\ y_{02} \\ y_{03} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 2 & 3 & 5 & 4 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{pmatrix}$$

通过 3 种涂层在实验室和自然失光率的秩序数,

计算相关系数  $R$  为:

$$R = \begin{pmatrix} 1.00 \\ 0.90 \\ 0.90 \end{pmatrix}$$

以失光率为基准, 其平均秩相关系数为 0.93, 为极强相关。

### 2.4.2 色差相关性评价

$X_1$  为自然环境试验后涂层的色差,  $X_{11} \sim X_{13}$  分别为 4 号、9 号和 10 号涂层自然环境试验后的色差,  $Y_1$  为开展实验室模拟试验后的色差,  $Y_{11} \sim Y_{13}$  分别为实验室模拟试验后 4 号、9 号和 10 号涂层的色差。

自然环境试验:

$$X_1 = \begin{pmatrix} X_{11} \\ X_{12} \\ X_{13} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1.7 & 2.3 & 2 & 1 \\ 0 & 0.7 & 2.7 & 7.2 & 11 \\ 0 & 1.3 & 2.1 & 2.3 & 2.4 \end{pmatrix}$$

实验室模拟环境试验:

$$Y_1 = \begin{pmatrix} Y_{11} \\ Y_{12} \\ Y_{13} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1.38 & 3.83 & 4.87 & 4.58 \\ 0 & 0.93 & 1.1 & 1.62 & 2.02 \\ 0 & 0.16 & 0.37 & 0.23 & 0.54 \end{pmatrix}$$

自然环境试验的秩序数:

$$x_1 = \begin{pmatrix} x_{11} \\ x_{12} \\ x_{13} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 5 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{pmatrix}$$

实验室模拟环境试验的秩序数:

$$y_1 = \begin{pmatrix} y_{11} \\ y_{12} \\ y_{13} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 5 & 4 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 2 & 4 & 3 & 5 \end{pmatrix}$$

通过 3 种涂层在实验室和自然失光率的秩序数, 计算相关系数  $R$  为:

$$R = \begin{pmatrix} 0.50 \\ 1.00 \\ 0.90 \end{pmatrix}$$

以色差为基准, 其平均秩相关系数为 0.80, 为极强相关。

综上试验结果分析不难得出, 以光泽和色差 2 项为基准的平均秩相关系数为 0.87。通过本实验室模拟热带海洋大气环境试验方法试验后的涂层, 基本可重现在自然环境试验后的环境效应, 具体详见表 3。3 种涂层在实验室模拟环境试验和自然环境试验后的表现、附着力和交流阻抗等性能变化较为一致, 涂层的失光率、色差的平均秩相关性较好, 除 4 号涂层的色差相关性外, 均表现为极强相关。根据涂层光泽和色差的平均秩相关系数为 0.87 也可说明, 通过该实验室模拟热带海洋大气环境试验, 比较真实地反映了服役环境对涂层的性能退化影响情况, 进而也证实了该模拟热带海洋大气环境试验方法的可行性和合理性。

表3 试验结果对比分析  
Tab.3 Comparative analysis of test results

序号	试验试样	自然环境试验结果	实验室模拟试验结果	失光率秩相关系数	色差秩相关系数	模拟性
1	4号	涂层表面颜色变淡, 光泽变暗;	涂层表面颜色变淡, 光泽变暗;	1.00	0.50	良
2	9号	暗; 失光率和色差均逐渐增大; 涂层附着力减小; 交流阻抗有降低趋势; 红外光谱暂无明显变化	失光率和色差均逐渐增大; 涂层附着力减小; 交流阻抗有降低趋势; 红外光谱暂无明显变化; 部分涂层出现腐蚀破坏象	0.90	1.00	好
3	10号	暗; 失光率和色差均逐渐增大; 涂层附着力减小; 交流阻抗有降低趋势; 红外光谱暂无明显变化	失光率和色差均逐渐增大; 涂层附着力减小; 交流阻抗有降低趋势; 红外光谱暂无明显变化; 部分涂层出现腐蚀破坏象	0.90	0.90	好

备注: 模拟性根据表现、附着力等试验结果和秩相关试验结果来进行综合评判。

### 3 结论

1) 自然环境试验和实验室模拟环境试验后, 3种涂层均发生了不同程度的腐蚀老化, 并随着试验时间的延长, 失光率和色差增大, 附着力明显降低, 交流阻抗减小。红外光谱分析结果表明, 其老化机理均未出现明显变化。

2) 本实验室模拟热带海洋大气环境试验方法具有良好的模拟性, 在环境损伤失效机制基本一致的前提下, 可再现涂层热带海洋大气环境下的环境效应或损伤过程。

3) 为了更好地对比研究涂层在自然环境和模拟热带海洋大气环境下的性能变化, 对于光泽、色差等较为敏感的涂层, 建议优先选用本实验室模拟热带海洋大气环境试验方法。

#### 参考文献:

- [1] 李世平, 魏广平. 飞机涂层老化模式及日历寿命预测[J]. 环境技术, 2017, 35(1): 24-26.  
LI Shi-ping, WEI Guang-ping. A Model of Aging and Review of Calendar Life for Aircraft Coating[J]. Environmental Technology, 2017, 35(1): 24-26.
- [2] 张丹峰, 王玉刚, 谭晓明. 航空聚氨酯涂层老化分析[J]. 环境技术, 2016, 34(5): 38-40.  
ZHANG Dan-feng, WANG Yu-gang, TAN Xiao-ming. Research on Aging Mechanism of Polyurethane Topcoat Applied in Aircraft[J]. Environmental Technology, 2016, 34(5): 38-40.
- [3] 孙志华, 汤智慧, 李斌. 海洋环境服役飞机的全面腐蚀控制[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 35-39.  
SUN Zhi-hua, TANG Zhi-hui, LI Bin. Comprehensive Corrosion Control of Naval Aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 35-39.
- [4] 李亮, 曹京宜, 李旭, 等. 海洋环境设备涂层老化和失效的影响因素研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(2): 97-103.  
LI Liang, CAO Jing-yi, LI Xu, et al. Influencing Factors of Aging and Failure of Ocean Equipment Coatings[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(2): 97-103.
- [5] 韩德盛, 李获. LY12 铝合金在海洋大气环境下加速腐蚀试验和外场暴露试验的相关性[J]. 腐蚀与防护, 2008, 29(3): 119-120.  
HAN De-sheng, LI Di. Correlation Study of Accelerated Corrosion Testing and Outfield Testing of Aluminum Alloy[J]. Corrosion & Protection, 2008, 29(3): 119-120.
- [6] 李茜, 陈星昊, 胡涛, 等. 某机载印制电路板在模拟海洋大气环境中腐蚀行为[J]. 海军航空大学学报, 2022, 37(6): 486-494.  
LI Qian, CHEN Xing-hao, HU Tao, et al. Corrosion Behavior of an Airborne PCB in Simulated Marine Atmospheric Environment[J]. Journal of Naval Aviation University, 2022, 37(6): 486-494.
- [7] 李茜, 李景育, 陈星昊, 等. 电连接器的概述和研究现状分析[J]. 环境技术, 2021, 39(6): 115-119.  
LI Qian, LI Jing-yu, CHEN Xing-hao, et al. The Overview and Research Status Analysis of Electrical Connectors[J]. Environmental Technology, 2021, 39(6): 115-119.
- [8] 骆晨, 孙志华, 汤智慧, 等. 防护性有机涂层失效研究的发展趋势[J]. 装备环境工程, 2017, 14(8): 50-54.  
LUO Chen, SUN Zhi-hua, TANG Zhi-hui, et al. Development Trend of the Research on Failure Analysis of Protective Organic Coatings[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(8): 50-54.
- [9] 易平, 何建新, 杨秀清, 等. 3种高分子材料自然环境多角度暴露对比试验[J]. 表面技术, 2007, 36(2): 18-20.  
YI Ping, HE Jian-xin, YANG Xiu-qing, et al. Natural Environmental Multi-Angle Exposure Contrast Test about Three Kinds of Polymer Materials[J]. Surface Technology, 2007, 36(2): 18-20.
- [10] 刘文珽, 李玉海, 陈群志, 等. 飞机结构腐蚀部位涂层加速试验环境谱研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(1): 109-112.  
LIU Wen-ting, LI Yu-hai, CHEN Qun-zhi, et al. Accelerated Corrosion Environmental Spectrums for Testing Surface Coatings of Critical Areas of Flight Aircraft Structures[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(1): 109-112.
- [11] 金涛, 何卫平, 廖圣智, 等. 2024-T62 铝合金涂层外场腐蚀环境下电化学性能研究[J]. 装备环境工程, 2016, 13(1): 8-13.  
JIN Tao, HE Wei-ping, LIAO Sheng-zhi, et al. Electro-



- chemical Property for 2024-T62 Aluminum Alloy Surface Protective Coating in the Presence of Outfield Corrosion[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2016, 13(1): 8-13.
- [12] 刘文琰, 贺小帆. 飞机结构腐蚀/老化控制与日历延寿技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.  
LIU Wen-ting, HE Xiao-fan. *Corrosion/Aging Control of Aircraft Structure and Calendar Life Extension Technology*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.
- [13] 刘成臣, 赵连红, 王浩伟. 飞机表面涂层海洋环境试验与实验室环境试验相关性研究[J]. *装备环境工程*, 2018, 15(6): 16-20.  
LIU Cheng-chen, ZHAO Lian-hong, WANG Hao-wei. *Correlation between Marine Atmospheric Environmental Test and Laboratory Environmental Test of Aircraft Surface Coating*[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2018, 15(6): 16-20.
- [14] 刘成臣, 王浩伟, 鲁国富, 等. 复合材料在海洋大气环境中的加速环境谱及当量化[J]. *腐蚀与防护*, 2014, 35(7): 692-696.  
LIU Cheng-chen, WANG Hao-wei, LU Guo-fu, et al. *Accelerated Corrosion Environment Spectrum and Equivalent Relation of Composite Materials in Ocean Atmospheric Environment*[J]. *Corrosion & Protection*, 2014, 35(7): 692-696.
- [15] 刘成臣, 王浩伟, 杨晓华. 不同材料在海洋大气环境下的加速环境谱研究[J]. *装备环境工程*, 2013, 10(2): 18-24.  
LIU Cheng-chen, WANG Hao-wei, YANG Xiao-hua. *Study of Accelerated Corrosion Test Environment Spectrum of Different Materials in Marine Atmospheric Environment*[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2013, 10(2): 18-24.
- [16] 卞贵学, 张杨广, 张勇, 等. 飞机某模拟涂装试样加速腐蚀与自然暴露的对比研究[J]. *装备环境工程*, 2020, 17(5): 25-32.  
BIAN Gui-xue, ZHANG Yang-guang, ZHANG Yong, et al. *Comparative Study on Accelerated Corrosion and Natural Exposure of Simulated Coated Specimen of Aircraft Structures*[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2020, 17(5): 25-32.
- [17] 曹真, 崔腾飞, 彭望舒, 等. 直升机复合材料有机涂层加速腐蚀试验考核与评价[J]. *环境技术*, 2019, 37(3): 134-140.  
CAO Zhen, CUI Teng-fei, PENG Wang-shu, et al. *Corrosion Test and Analysis of Organic Coating for Helicopter Composite Parts*[J]. *Environmental Technology*, 2019, 37(3): 134-140.
- [18] 张蕾, 陈群志, 王逾涯, 等. 某型飞机腐蚀关键结构含涂层模拟件腐蚀行为研究[J]. *装备环境工程*, 2014, 11(6): 45-49.  
ZHANG Lei, CHEN Qun-zhi, WANG Yu-ya, et al. *Research on the Corrosion Behavior of Simulated Samples with Coating for the Corrosion Critical Component on a Certain Type of Aircraft*[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2014, 11(6): 45-49.
- [19] 王振尧, 于国才, 韩薇. 钢的大气暴露腐蚀与室内模拟加速腐蚀的相关性[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2004, 16(2): 70-73.  
WANG Zhen-yao, YU Guo-cai, HAN Wei. *Investigation on Interrelation of Indoor Accelerated Corrosion and Atmospheric Exposure Corrosion of Steels*[J]. *Corrosion Science and Technology Protection*, 2004, 16(2): 70-73.
- [20] 张晓东, 陶友季, 王俊, 等. 海南自然暴晒试验与人工加速光老化试验的相关性研究[J]. *汽车工艺与材料*, 2012(9): 43-44.  
ZHANG Xiao-dong, TAO You-ji, WANG Jun, et al. *Correlation between Natural Exposure Test and Artificial Accelerated Photoaging Test in Hainan*[J]. *Automobile Technology & Material*, 2012(9): 43-44.
- [21] 张勇, 丁文勇, 陈跃良, 等. 有机涂层户外曝晒与加速试验对比研究[J]. *装备环境工程*, 2013, 10(2): 14-17.  
ZHANG Yong, DING Wen-yong, CHEN Yue-liang, et al. *Comparison Study on Outdoor Exposure and Accelerated Tests of Organic Coatings*[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2013, 10(2): 14-17.
- [22] 骆晨, 蔡健平, 许广兴, 等. 航空有机涂层在户内加速试验与户外暴露中的损伤等效关系[J]. *航空学报*, 2014, 35(6): 1750-1758.  
LUO Chen, CAI Jian-ping, XU Guang-xing, et al. *Equivalent Degradation of Aviation Organic Coating during Indoor Accelerated Testing and Outdoor Exposure*[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(6): 1750-1758.
- [23] GJB/T 8893.2—2017, 军用装备自然环境试验方法 第2部分: 户外大气自然环境试验[S].  
GJB/T 8893.2—2017, *Natural Environmental Test Methods for Military Materiel—Part 2: Outdoor Atmospheric Weathering Test*[S].
- [24] GB/T 1766—2008, 色漆和清漆 涂层老化的评级方法[S].  
GB/T 1766—2008, *Paints and Varnishes—Rating Schemes of Degradation of Coats*[S].
- [25] 王海荣, 张海信. 有机涂层在模拟海洋环境中的防腐性能研究[J]. *中国涂料*, 2018, 33(9): 25-30.  
WANG Hai-rong, ZHANG Hai-xin. *Study on the Corrosion Resistance of Organic Coatings in Simulated Marine Environment*[J]. *China Coatings*, 2018, 33(9): 25-30.
- [26] 宣卫芳. 装备与自然环境试验-提高篇[M]. 北京: 航空工业出版社, 2011: 167-174.  
XUAN Wei-fang. *Equipment and Natural Environment Test-Improvement*[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2011: 167-174.

责任编辑: 刘世忠