

环境试验与观测

环氧云铁/丙烯酸涂层户外暴露试验与实验室
综合加速试验的相关性研究李迪凡¹, 向江涛¹, 龙仕腾^{1,2}, 王晓辉¹, 陈源¹, 李景育¹,
李鸿飞¹, 陈星昊¹, 刘群¹, 杨昊雨¹(1.西南技术工程研究所, 重庆 400050; 2.海南万宁大气环境材料腐蚀
国家野外科学观测研究站, 海南 万宁 571522)

摘要: **目的** 研究有机涂层在拉萨试验站户外暴露试验与多因素综合高原高寒气候环境模拟加速试验条件下的相关性。**方法** 以环氧云铁/丙烯酸有机涂层为研究对象, 通过开展户外暴露试验和实验室综合模拟加速试验, 利用光泽计和色差仪等分析设备, 获得用于表征涂层老化性能的色差和失光率变化规律, 比较涂层体系在2种试验条件下老化程度。采用ATR-FTIR、EIS等方法研究涂层分子结构变化和不同环境条件对涂层防腐性能的影响, 并分析涂层的降解机理。采用Spearman秩相关系数(ρ)法计算涂层体系在2种环境下的相关性。**结果** 与户外暴露试验12个月相比, 综合模拟加速试验60 d, 环氧云铁/丙烯酸有机涂层的色差和失光率基本一致, 其色差的相关性为0.771 4, 失光率的相关性为0.828 6。**结论** 与拉萨试验站户外暴露试验相比较, 环氧云铁/丙烯酸涂层体系在综合加速试验后的色差、失光率、红外光谱、电化学阻抗等关键性能参数变化趋势基本一致, 老化机理基本相同。多因素综合高原高寒气候环境模拟加速试验装置能够综合模拟高原高寒气候环境下阳辐射、气压、温度和湿度等环境因素, 具有较好的模拟性和相关性。

关键词: 环氧云铁/丙烯酸涂层; 户外暴露试验; 综合加速试验; 相关性; 色差; 失光率; 电化学阻抗

中图分类号: TH117.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)11-0142-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.11.018

Correlation between Outdoor Exposure Test and Laboratory Comprehensive
Accelerated Test of Epoxy Micaceous Iron/Acrylic CoatingLI Di-fan¹, XIANG Jiang-tao¹, LONG Shi-teng^{1,2}, WANG Xiao-hui¹, CHEN Yuan¹, LI Jing-yu¹,
LI Hong-fei¹, CHEN Xing-hao¹, LIU Qun¹, YANG Hao-yu¹(1. Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400050, China; 2. Hainan Wanning National Observation
and Research Station for Corrosion of Materials in Atmospheric Environment, Hainan Wanning 571522, China)

ABSTRACT: The work aims to study the correlation of organic coatings under the conditions of outdoor exposure test at Lhasa Test Station and multi-factor comprehensive plateau cold climate environment simulation accelerated test. Taking the epoxy micaceous iron/acrylic coating as the research object, through the outdoor exposure test and the laboratory comprehensive simula-

收稿日期: 2023-05-15; 修订日期: 2023-06-29

Received: 2023-05-15; Revised: 2023-06-29

引文格式: 李迪凡, 向江涛, 龙仕腾, 等. 环氧云铁/丙烯酸涂层户外暴露试验与实验室综合加速试验的相关性研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(11): 142-148.

LI Di-fan, XIANG Jiang-tao, LONG Shi-teng, et al. Correlation between Outdoor Exposure Test and Laboratory Comprehensive Accelerated Test of Epoxy Micaceous Iron/Acrylic Coating[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(11): 142-148.

tion accelerated test, analysis devices such as the glossmeter and colorimeter were used to obtain the change rules of color difference and loss of light to characterize the aging performance of the coating, and the aging degree of the coating system under the two test conditions was compared; ATR-FTIR, EIS and other methods were used to study the effect of the change of the molecular structure of the coating and different environmental conditions on the corrosion resistance of the coating, and the degradation mechanism of the coating was analyzed; The correlation of the coating system in two environments was calculated by the Spearman rank correlation coefficient (rhos) method. Compared with the outdoor exposure test for 12 months, the color difference and light loss rate of the epoxy micaceous iron/acrylic coating were basically the same after the comprehensive simulated accelerated test for 60 days. The correlation between the color difference and the light loss rate was 0.771 4 and 0.828 6. Compared with the outdoor exposure test at Lhasa Test Station, the change trend of key performance parameters such as color difference, loss of light, infrared spectrum, electrochemical impedance, etc. of the epoxy micaceous iron/acrylic coating system after the comprehensive accelerated test is basically the same, and the aging mechanism is basically the same. The multi-factor comprehensive plateau cold climate environment simulation accelerated test device can comprehensively simulate the environmental factors such as solar radiation, air pressure, temperature and humidity under the plateau cold climate environment. It has good simulation and correlation.

KEY WORDS: epoxy micaceous iron/acrylic coating; outdoor exposure test; comprehensive accelerated test; correlation; color difference; loss of light rate; electrochemical impedance

环氧云铁/丙烯酸涂层具有优异的防腐性和耐性能, 广泛应用于兵器、电子、航空、船舶等装备上, 已从传统的装饰和防腐功能向隐身等功能发展。装备等产品在长期服役过程中, 有机涂层在温度、湿度、太阳辐射尤其是紫外辐射等因素的作用下, 会发生老化, 使其物理和化学性能下降, 导致涂层失效, 影响装备外观的同时, 也影响装备的功能和性能。

目前, 评价涂层体系耐老化性能的方法主要有自然环境试验和实验室加速试验 2 种。其中, 自然环境试验能够真实地反映涂层体系的老化性能, 但由于试验周期较长, 难以满足材料/产品研制、生产和应用的要求, 目前广泛采用实验室加速试验方法来评价涂层体系的老化性能。加速试验大都是参照美军标准, 依次按照湿热暴露试验、紫外照射试验、热冲击试验、低温疲劳试验和盐雾试验的顺序开展, 采用的也是美军制定的涂层加速试验环境谱 (CASS 谱)。实际上, 美军主要针对的是在亚热带沿海地区服役的装备, 而国内外对于在高原高寒地区服役的装备涂层体系老化过程、老化机制等研究较少。向江涛等^[1]应用低气压环境综合加速试验技术评价了聚氨酯涂层的环境适应性。卢言利^[2]以有机涂层为研究对象, 分析了高原环境因素对有机涂层性能的影响和老化机理。王晶晶等^[3]研究了实验室加速条件和厦门自然暴露条件下碳纤维/环氧树脂基复合材料实验室模拟加速腐蚀与自然大气腐蚀之间的相关性。张三平等^[4]通过室内加速腐蚀和海洋大气暴露腐蚀试验, 对醇酸漆、氯化橡胶漆、氯磺化聚乙烯漆、环氧漆等常用防蚀涂层体系的防护性能进行了研究, 发现了对于不同涂层室内加速腐蚀的破坏形式和程度与户外暴露结果的差异。由于我国高原高寒地区具有重要的战略地位, 具有低气压、高太阳辐射、高紫外线、大温差、低温、低湿等

气候特征, 这些特征极易使涂层发生如变色、粉化、龟裂甚至大面积脱落等现象, 影响装备外观、战备性能甚至使用寿命, 给装备使用和维护带来极大不便, 不仅费时费力, 而且还造成极大的经济浪费。基于此, 开展以环氧云铁/丙烯酸典型军用涂层为对象, 研究其在高原高寒气候环境下的老化规律, 构建户外暴露试验和实验室加速实验之间的相关性具有重要意义, 同时也可对涂层体系的精准寿命评价和涂层老化机理研究等提供理论支撑。

本文在分析典型高原高寒气候环境拉萨试验站气候特点的基础上, 同步开展拉萨户外自然环境暴露试验和实验室多因素综合高原高寒气候环境模拟加速试验, 对比分析了 2 种条件下环氧云铁/丙烯酸涂层的光泽、色差和电化学阻抗等特征因素的变化规律, 探究户外环境暴露试验和实验室内加速试验之间的相关性, 支撑涂层体系的老化失效机理和寿命预测研究。

1 试验

1.1 样品

试验样品尺寸为 150 mm×50 mm×1 mm, 样品基材为 Q235 钢板。试验涂层为环氧云铁底漆+丙烯酸面漆, 颜色为海灰色, 涂层平均厚度为 100~110 μm。

1.2 仪器与设备

针对有机涂层的特征性能, 每个试验周期完成后, 主要对丙烯酸面漆试验样品的光泽度、色差、电化学交流阻抗 (EIS) 和红外性能等进行测试, 测试所用的仪器与设备及参考标准见表 1。

利用相关仪器对样品的性能进行检测, 利用色差

表 1 涂层性能测试项目、标准及相关设备
Tab.1 Coating performance test items, standards and related equipment

Test items	Reference standards	Equipment and instruments	Model
Glossiness	GB/T 9754—2007	Glossmeter	BYK 4430
Color	GB 11186.2—1989	Colormeter	BYK A6801
Infrared spectrum	GB/T 21186—2007	Fourier transform infrared spectrometer	Thermo SCIENTIFIC-IS50
Electrochemical impedance spectroscopy	ISO 16773-2: 2016	Electrochemical workstation	M2273

仪和光泽计对涂层样品的颜色和光泽度进行测试，并参照 GB/T 1766—2008 和 GB 11186.3—1989 等标准对涂层样品的光泽度和颜色数据进行计算，得到涂层的失光率和色差。通过 iS50 型傅里叶变换红外光谱仪（ATR-FTIR）分析该有机涂层化学结构变化情况。采用 M2273 型电化学工作站对涂层样品的电化学阻抗（EIS）进行测试，获到其阻抗谱^[5-6]。

1.3 方法

1.3.1 户外暴露试验

户外暴露试验在选择在拉萨试验站进行，该站属于典型高原高寒气候环境，平均温度低，紫外辐射量大，气压低，环境条件非常严酷（见表 2），特别适合开展有机涂层等高分子材料的自然环境试验。试验执行标准分别为 GB/T 9276—1996《涂层自然气候暴露试验方法》和 WJ 2155—1993《兵器产品自然环境

试验方法 大气暴露试验的一般要求》。试验样品架放置于户外，朝南 45°角，无背板暴露，试验样品投试如图 1 所示。试验总时间为 12 个月，取样周期分别为 1、2、3、6、9、12 个月，共计 6 个周期^[7-8]。



图 1 涂层试验样品户外暴露试验投试图
Fig.1 Outdoor exposure test of coating test sample

表 2 拉萨试验站环境基本情况
Tab.2 Basic environmental information of Lhasa Test Station

Climate type	Altitude/m	Average temperature/℃	Average humidity/%	Annual sunshine hours/h	Annual total irradiation amount/(MJ·m ⁻²)	Annual rainfall/mm
Warm temperate humid plateau atmospheric climate	3 685	4.5	55	3 100	7 598	581

1.3.2 多因素综合高原高寒气候环境模拟加速试验

在收集我国典型高原高寒地区气候环境因素数据和装备失效案例的基础上，分析和确定了影响装备环境适应性的主要因素，形成装备任务的环境剖面。构建了具有良好加速性和相关性的加速试验谱，能同时施加辐照度、气压、温度、湿度和风速等 5 种环境因素。研制了多因素综合高原高寒气候环境模拟加速试验装置，该装置结构如图 2 所示，涂层样品的加速试验如图 3 所示^[9]。

通过分析拉萨试验站气候特征，可知如下特点：日照时间长、紫外线强特点，年平均年总辐射为 7 598 MJ/m²；气候寒冷，大气温度低，某年的月平均气温最高值为 18.0℃，最低值为-2.1℃，平均值为 8.8℃；气候干燥，降水量少，某年的月平均相对湿度年平均值为 38%，最高为 66%，最低为 16%；气压低，某年的月平均气压年平均值为 65.0 kPa，最高值为 65.4 kPa，最低值为 64.4 kPa；风速分布范围广，某年

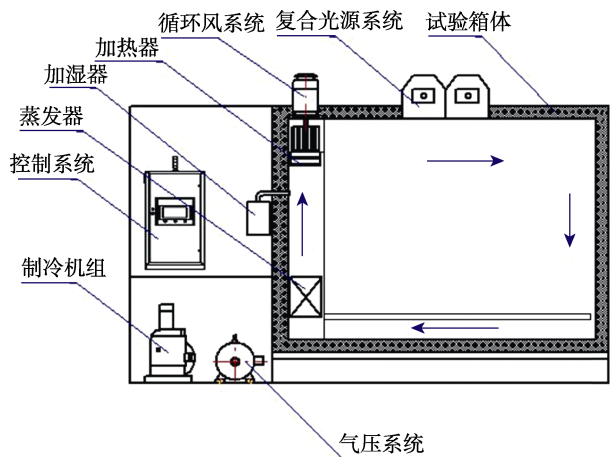


图 2 试验装置结构
Fig.2 Structural diagram of test device

的月风速最大值为 3.3 m/s，最小值为 1.8 m/s，平均值为 2.5 m/s。通过明确试验谱的模拟性、加速性和相关性原则的基础上，确定光辐照度、温度、湿度等环境

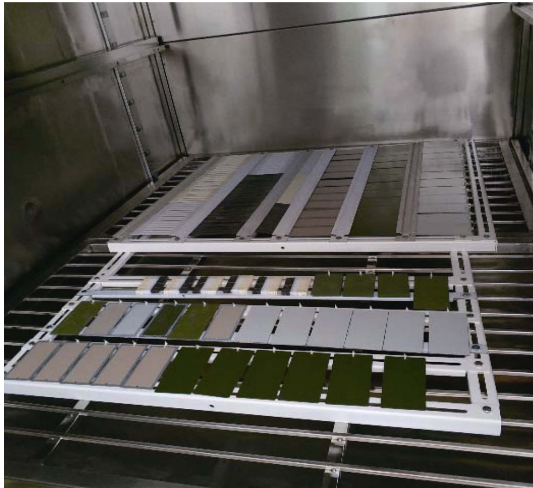


图 3 涂层试验样品加速试验
Fig.3 Accelerated test diagram of coating test sample

因素的量值水平试验时间, 形成了模拟高原高寒地区户外的加速试验谱, 每个试验周期为 240 min, 如图 4 所示。多因素综合高原高寒气候环境模拟加速试验检测周期为 5、10、15、30、45、60 d。

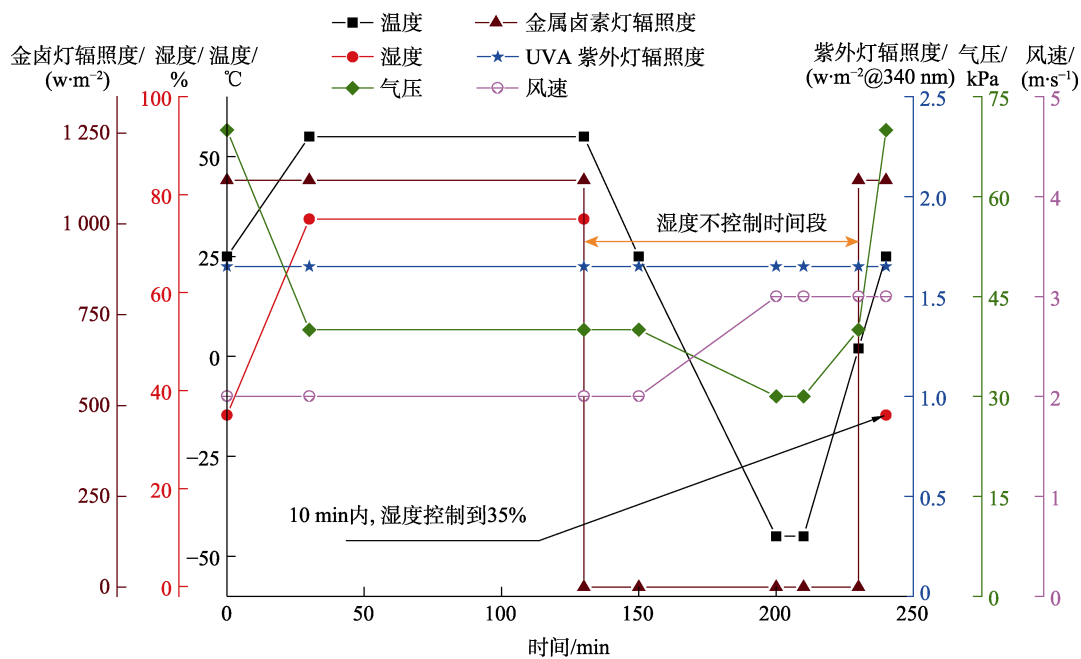


图 4 综合模拟加速试验谱
Fig.4 Comprehensive simulated accelerated test spectra

2.2 失光率变化规律分析

按相应标准对环氧云铁/丙烯酸涂层在 2 种试验环境后, 测定 60°镜面光泽度, 并计算失光率, 其失光率变化规律如图 6 所示。可以看出, 在试验前 4 个周期, 涂层试验样品失光率变化相对平缓, 随后显著提升。其原因是试验前期受涂层后固化的影响, 虽然失光率在增加, 但相对缓慢, 但后期涂层在紫外线等环境因素的综合影响下, 使光降解加剧, 涂层表面破损较为严重, 失光率变化加快。环氧云铁/丙烯酸涂

2 结果与讨论

2.1 色差变化规律分析

按指定检测周期对试验样品的色差进行测试, 并参照相应标准对户外暴露试验和加速试验后的色差进行计算, 其色差变化规律如图 5 所示。可以看出, 涂层样品试验初期, 色差变化非常显著, 随着试验时间的延长, 涂层样品在 2 种环境条件下的色差变化仍然不断增加, 其主要原因是涂层中颜料在环境因素的作用下不断发生物理化学变化。特别是波长为 209~400 nm 的紫外光线, 由于在高原高寒地区的辐射比例显著高于其他地区, 同时紫外光线具有波长短能量高的特点, 极易破坏有机涂层中的 C—H、C—O、C—C 等化学键, 使涂层中树脂的高分子链不断被降解和交联, 降低涂层的内聚力, 使颜料颗粒与树脂逐步分离, 粉化现象加剧, 导致涂层样品的色差不断增大, 加速涂层体系的破坏过程。从图 5 中可以看出, 该涂层样品色差的变化规律基本一致, 说明涂层在自然环境试验和综合加速试验色差的变化规律具有很好的相关性^[10-11]。

层失光率变化规律基本相同, 说明涂层在自然环境试验和综合加速试验失光率的变化规律具有很好的相关性^[12-13]。

2.3 红外光谱分析

涂层原始样品、拉萨户外暴露 12 个月后试验样品和多因素综合模拟加速试验 60 d 后试验样品的傅里叶红外光谱如图 7 所示。该涂层样品的主要特征峰为 1 022、1 455、1 519、1 728 cm⁻¹, 在拉萨户外暴露试验和多因素综合模拟加速试验后, 各特征峰位

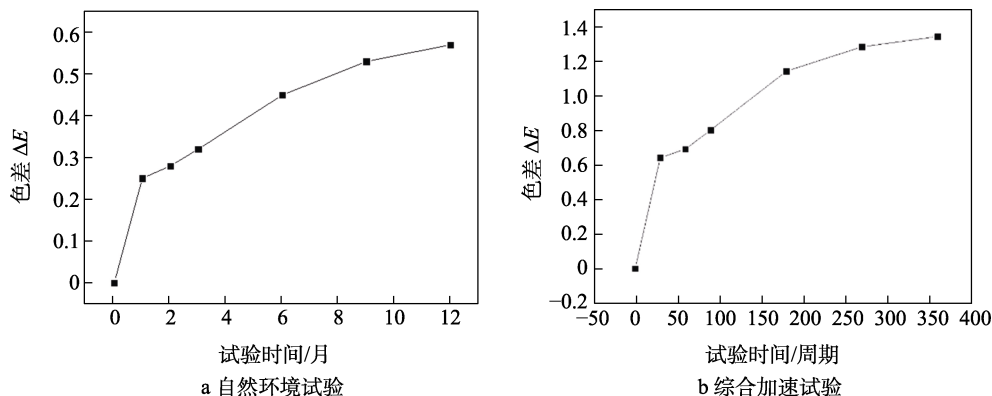


图 5 环氧云铁/丙烯酸涂层两种环境试验后色差的变化规律

Fig.5 Change rule of color difference of epoxy micaceous iron/acrylic coating after two environmental tests:

a) natural environment test; b) comprehensive accelerated test

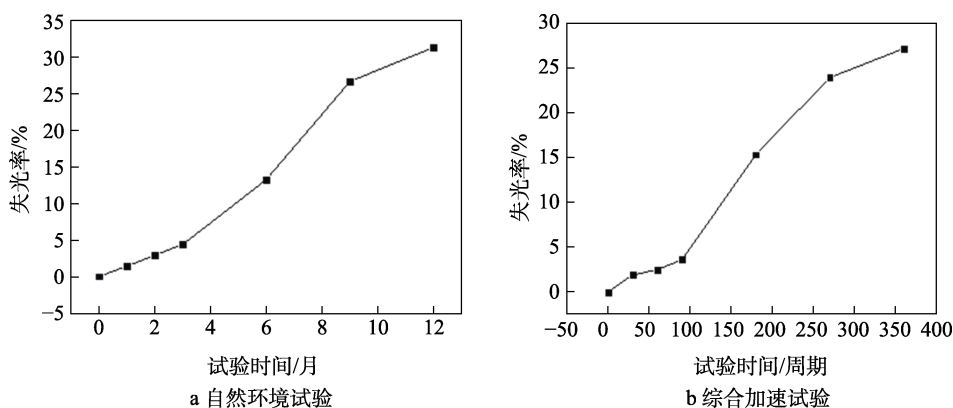


图 6 环氧云铁/丙烯酸涂层两种环境试验后失光率的变化规律

Fig.6 Change rule of light loss rate of epoxy micaceous iron/acrylic coatings after two environmental tests:

a) natural environment test; b) comprehensive accelerated test

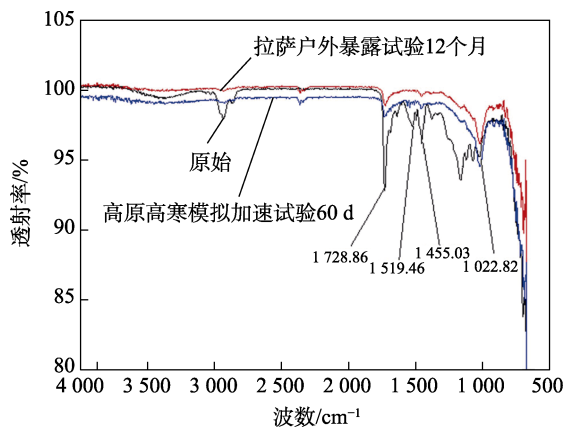


图 7 环氧云铁/丙烯酸涂层两种环境试验后的红外谱图

Fig.7 Infrared spectra of epoxy micaceous iron/acrylic coatings after two environmental tests

置相同,强度虽有一定程度的减弱,但图谱变化趋势一致。各特征峰的吸收强度基本相近,可见拉萨户外暴露试验样品和多因素综合模拟加速试验样品的涂层降解机制基本一致,主要是由于在试验过程中高强度光照造成涂层成分部分破坏所致。户外暴露 12 个月与模拟加速试验 60 d 的涂层腐蚀老化效果相当,表明该涂层样品经自然环境试验和多因素综合模拟加

速试验后的老化机理基本相同^[14-15]。

2.4 电化学阻抗谱分析

电化学阻抗谱能够有效表征涂层防护性能的优劣,环氧云铁/丙烯酸有机涂层在拉萨户外暴露及加速试验后的阻抗谱如图 8 所示。为了保证测试结果的准确性,本次测试了 5 组平行试样,从图 8 可以看出,阻抗谱基本呈线性,其量值与趋势变化基本一致,表明该有机涂层的保护性能尚无明显变化,对基材仍有良好的保护作用,自然环境试验和多因素综合高原高寒气候模拟加速试验后的老化机理基本相同^[16-20]。

2.5 相关性分析

2.5.1 失效模式分析

通过上述分析可知,环氧云铁/丙烯酸有机涂层经拉萨暴露试验和多因素综合高原高寒气候模拟加速试验后,有机涂层体系的色差、失光率和特征吸收峰变化规律变化基本相同,表明其失效模式和失效机理基本一致。

2.5.2 秩相关系数计算

涂层的色差和失光率能有效反应涂层的腐蚀特

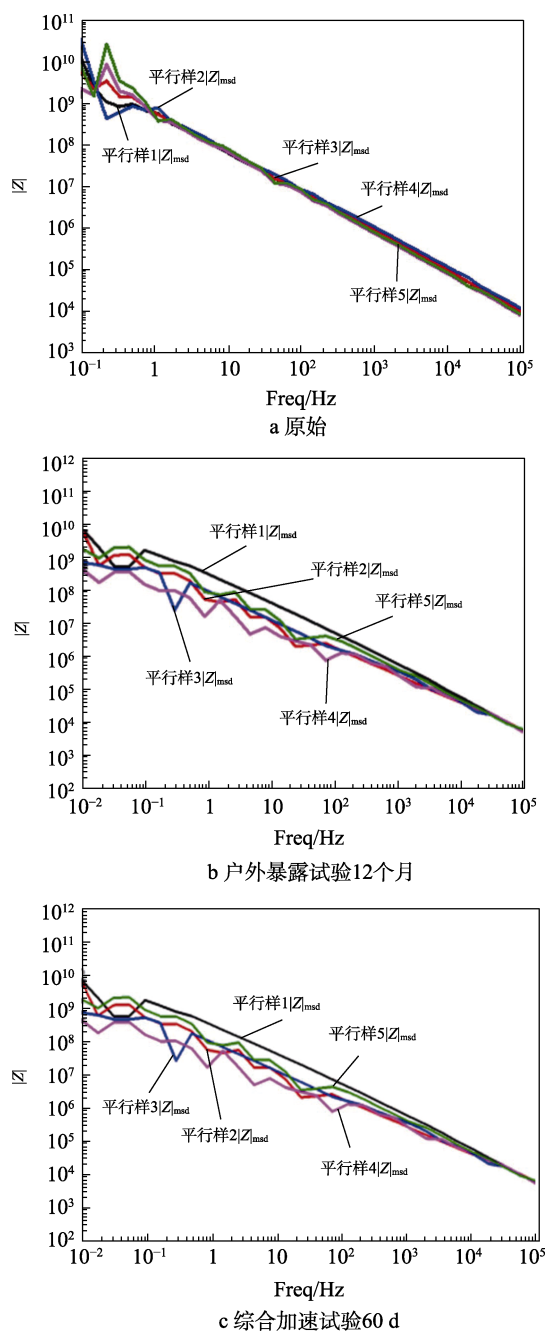


图 8 环氧云铁/丙烯酸涂层在 2 种环境试验后的电化学阻抗谱

Fig.8 Electrochemical impedance spectra of epoxy micaceous iron/acrylic coatings after two environmental tests: a) original; b) outdoor exposure for 12 months; c) comprehensive accelerated test for 60 days

征, 本文应用 Spearman 秩相关系数 (rho_s) 法, 计算了拉萨户外暴露试验与综合模拟加速试验涂层体系的色差和失光率的秩相关系数。

设 X_i 、 Y_i 分别为自然环境试验与室内模拟加速试验后测得的性能数据, x_i 、 y_i 分别为 X_i 、 Y_i 的秩, d_i 为秩差。

第 1 步: 确定母系列和子系列。拉萨户外暴露试验结束后涂层色差数据 $X_0=(0.25, 0.28, 0.32, 0.45, 0.53, 0.57)$, 综合模拟加速试验结束后色差数据

$Y_0=(0.64, 0.69, 0.80, 1.14, 1.28, 1.34)$ 。

第 2 步: 数据排序。分别将 X_0 和 Y_0 数据中每个数据按大小统一排序, 每个数据对应的顺序为 $x_0=(6, 5, 4, 3, 2, 1)$, $y_0=(6, 5, 4, 3, 2, 1)$

第 3 步: 计算秩差, 见式 (1)。

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

第 4 步: 计算秩相关系数, 见式 (2)。

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

式中: n 为参比试样组数。通过求解得到 $r_s=0.7714$ 。

环氧云铁/丙烯酸涂层体系的色差、失光率在综合模拟加速试验与拉萨户外暴露试验后的秩相关系数分别为 0.7714、0.8286。多因素综合高原高寒气候环境模拟加速试验相对拉萨户外暴露试验有机涂层的失效模式基本相同, 有机涂层的秩相关系数均大于 0.7。

3 结论

1) 研制的多因素综合高原高寒气候环境模拟加速试验装置能够有效综合模拟高原高寒气候环境下太阳辐射、气压、温度和湿度等多种环境因素。

2) 设计的综合模拟试验谱综合考虑了温度、湿度、光照等主要环境因素作用, 并将气候环境转化为具体试验指标值, 再现装备的服役环境条件, 具有较好的模拟性。

3) 试验结果表明, 与拉萨试验站户外暴露试验相比较, 环氧云铁/丙烯酸涂层体系在综合加速试验后的色差、失光率、红外光谱、电化学阻抗等关键性能参数变化趋势基本一致, 试验结果吻合度较高, 老化机理相同。

4) 通过计算分析, 户外暴露试验与综合模拟加速试验之间具有很好的相关性, 环氧云铁/丙烯酸涂层的色差和失光率的秩相关系数不低于 0.77, 确定了加速试验 60 d 当量自然环境试验 1 a 的加速性。

参考文献:

- [1] 向江涛, 杨小奎, 杨晓然, 等. 低气压环境综合加速试验技术在聚氨酯涂层快速评价中的应用[J]. 装备环境工程, 2021, 18(12): 128-133.
XIANG Jiang-tao, YANG Xiao-kui, YANG Xiao-ran, et al. Application of Comprehensive Accelerated Test Technology in Rapid Evaluation of Polyurethane Coating in Low Pressure Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(12): 128-133.
- [2] 卢言利. 有机涂层高原环境影响参数分析及老化机理研究[J]. 涂料工业, 2012, 42(4): 12-16.
LU Yan-li. Ageing Mechanisms and Influencing Factors

- for Organic Coatings Used in Plateau Environment[J]. Paint & Coatings Industry, 2012, 42(4): 12-16.
- [3] 王晶晶, 董士刚, 叶美琪, 等. 环氧涂层室外暴晒和室内加速老化试验相关性研究[J]. 表面技术, 2006, 35(1): 36-39.
WANG Jing-jing, DONG Shi-gang, YE Mei-qi, et al. Correlation between Outdoor-Exposure and Indoor-Accelerated Ageing Test for Epoxy Coating[J]. Surface Technology, 2006, 35(1): 36-39.
- [4] 张三平, 萧以德, 朱华, 等. 涂层户外暴露与室内加速腐蚀试验相关性研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2000, 12(3): 157-159.
ZHANG San-ping, XIAO Yi-de, ZHU Hua, et al. Correlativity between Outdoor-Exposure and Indoor-Accelerated Corrosion Test for Coatings[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2000, 12(3): 157-159.
- [5] 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].
- [6] GB/T 11186.3—1989, 涂膜颜色的测量方法第三部分: 色差计算[S].
GB/T 11186.3—1989, Methods for Measuring the Colour of Paint Films Part 3: Calculation of Colour Differences[S].
- [7] GB/T 9276—1996, 涂层自然气候曝露试验方法[S].
GB/T 9276—1996, Methods of Exposure to Natural Weathering of Coating[S].
- [8] WJ 2155—1993, 兵器产品自然环境试验方法[S].
WJ 2155—1993, Natural Environment Test Methods of Ordnance Products Atmospheric Exposure Test[S].
- [9] 杨晓然, 彭小明, 杨小奎, 等. 多因素综合高原高寒气候环境模拟加速试验箱研制[J]. 装备环境工程, 2020, 17(7): 27-33.
YANG Xiao-ran, PENG Xiao-ming, YANG Xiao-kui, et al. Development of Multifactor Integrated Frigid Plateau Climate Simulation and Acceleration Test Chamber[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(7): 27-33.
- [10] 胡明涛, 鞠鹏飞, 左禹, 等. 模拟海洋大气环境下铝合金表面锌黄环氧底漆/丙烯酸聚氨酯面漆涂层体系失效过程研究[J]. 表面技术, 2018, 47(5): 57-62.
HU Ming-tao, JU Peng-fei, ZUO Yu, et al. Failure Process of Zinc Yellow Epoxy/Acrylic Polyurethane Composite Coating for Aluminum Alloy under Simulated Marine Environment[J]. Surface Technology, 2018, 47(5): 57-62.
- [11] KOCAEFE D, SAHA S. Comparison of the Protection Effectiveness of Acrylic Polyurethane Coatings Containing Bark Extracts on Three Heat-Treated North American Wood Species: Surface Degradation[J]. Applied Surface Science, 2012, 258(13): 5283-5290.
- [12] MERLATTI C, PERRIN F X, ARAGON E, et al. Natural and Artificial Weathering Characteristics of Stabilized Acrylic-Urethane Paints[J]. Polymer Degradation and Stability, 2008, 93(5): 896-903.
- [13] 邓洪达, 张三平, 杨丽霞. 不同地区大气曝晒对涂层耐腐蚀性能的影响 I. 丙烯酸聚氨酯涂层[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2007, 27(5): 274-278.
DENG Hong-da, ZHANG San-ping, YANG Li-xia. Anti-Corrosion Behavior of Coating Exposed in Different Regions I. acrylic/Polyurethane Coating[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2007, 27(5): 274-278.
- [14] 胡喜艳. 涂层防护体系加速腐蚀失效机制研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2015.
HU Xi-yan. Study on Accelerated Corrosion Failure Mechanism of Coating Protection System[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2015.
- [15] 白思洁, 鞠鹏飞, 赵旭辉, 等. 环氧富锌/聚氨酯涂层在3种不同加速腐蚀试验条件下的性能劣化过程与机制[J]. 材料保护, 2018, 51(11): 133-139.
BAI Si-jie, JU Peng-fei, ZHAO Xu-hui, et al. Aging Behavior and Mechanism of Zinc-Rich Epoxy/Polyurethane Coating System under Three Kinds of Artificially-Accelerated Conditions[J]. Materials Protection, 2018, 51(11): 133-139.
- [16] 庞然, 左禹, 唐聿明, 等. 环氧/氟碳复合涂层失效过程的电化学阻抗谱研究[J]. 物理化学学报, 2012, 28(5): 1146-1152.
PANG Ran, ZUO Yu, TANG Yu-ming, et al. Electrochemical Impedance Spectroscopy Study of Failure Process of an Epoxy/Fluorocarbon Coating System[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2012, 28(5): 1146-1152.
- [17] 张鉴清, 曹楚南. 电化学阻抗谱方法研究评价有机涂层[J]. 腐蚀与防护, 1998, 19(3): 99-104.
ZHANG Jian-qing, CAO Chu-nan. Study and Evaluation on Organic Coatings by Electrochemical Impedance Spectroscopy[J]. Corrosion & Protection, 1998, 19(3): 99-104.
- [18] ZHENG Tian-liang. Research on the Photoaging of Acrylic Polyurethane Coatings Using Electrochemical Impedance Spectroscopy[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 28(3): 714-718.
- [19] MCINTYRE J M, PHAM H Q. Electrochemical Impedance Spectroscopy; A Tool for Organic Coatings Optimizations[J]. Progress in Organic Coatings, 1996, 27(1/2/3/4): 201-207.
- [20] 曹楚南, 张鉴清. 电化学阻抗谱导论[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
CAO Chu-nan, ZHANG Jian-qing. An Introduction to Electrochemical Impedance Spectroscopy[M]. Beijing: Science Press, 2002.

责任编辑: 刘世忠