

我国东南沿海车辆装备涂层环境试验设计

徐安桃^{1a}, 魏骏逸^{1b}, 刘福成², 乔渊博^{1b}, 周慧^{1b}, 李锡栋^{1b}

(1.陆军军事交通学院, a 投送装备保障系, b 学员五大队, 天津 300161;
2.72630 部队, 济南 250200)

摘要: **目的** 研究我国东南沿海环境对我军车辆装备涂层的影响。**方法** 根据近海试验场所提供的温湿度、氯离子浓度、辐照总量等相关数据, 当量转化为光照、温度、湿度、化学介质四种环境因子, 依据 GJB 150A—2009《军用装备实验室环境试验方法》裁剪制定了依次进行湿热辐照试验、中性盐雾试验和酸性盐雾试验的实验室模拟方法。**结果** 相同试片在实验室模拟环境与实际环境中表现出的电化学特征较为一致。**结论** 该试验设计能较好模拟当地实际环境影响, 为在该地区服役的车辆装备有机涂层的使用寿命预测、涂层防护与防腐蚀保养等技术研究提供了重要依据。

关键词: 车辆装备; 有机涂层; 辐照试验; 盐雾试验

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.04.020

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2019)04-0109-04

Environmental Test Design of Vehicle Equipment Coating in Southeast Coast of China

XU An-tao^{1a}, WEI Jun-yi^{1b}, LIU Fu-cheng², QIAO Yuan-bo^{1b}, ZHOU Hui^{1b}, LI Xi-dong^{1b}

(1. a Delivery Equipment Support Department, b. Fifth Team of Cadets, Army Military Transportation University, Tianjin 300161, China; 2. Unit 72630, Jinan 250200, China)

ABSTRACT: Objective To study impacts of southeast coastal environment of China on coating of military vehicles. **Methods** Relevant data such as temperature, humidity, chloride ion concentration, and total irradiation provided by offshore test sites were converted to specific values of light, temperature, humidity, and chemical medium. According to the GJB 150A-2009 Military Equipment Laboratory Environmental Test Method, the whole test was cropped to carry out wet heat radiation test, neutral salt spray test, and acid salt spray test. **Results** The result of the electrochemical characteristics in the laboratory simulation environment was consistent with the result in the actual environment. **Conclusion** The design simulates the actual environmental impact of the local area quite well and provides an important basis for life prediction of organic coatings, coating protection, and anti-erosion in the region.

KEY WORDS: vehicle equipment; organic coating; irradiation test; salt spray test

涂层防护是目前军用车辆装备应用最普遍的防护技术^[1-2]。涂层的失效不但影响装备的外观, 而且影响装备的性能, 甚至影响了装备遂行军事任务。为了研究涂层腐蚀行为, 人们通常采用自然环境试验与人工加速试验两种方法。自然环境试验是在典型自然环境条件下, 考察研究环境对涂层的影响, 其结果相

对客观, 但试验周期过长。人工加速试验就是通过多功能气候实验室人为地控制某一种或几种因素来模拟自然气候环境, 使试件加速腐蚀的一种试验方法, 具有周期短、控制严格、成本和复杂程度低、结果可靠等优点^[3]。文中针对我国东南沿海地区环境特点, 提取了相关环境因子, 设计了实验室可行的人工加速

试验方法, 来研究军用车辆涂层在该环境下的腐蚀行为。

1 东南沿海地区环境分析

东南沿海地区气候类型属于亚热带季风气候, 具有高温、高湿、高辐照、高盐雾等突出的海洋性气候特点。考虑到海南岛的气候具有代表性, 以位于海南万宁的试验场为例, 具体分析我国东南沿海地区环境的各类因素。

1.1 光照

光照中的紫外线具有较高的能量, 是破坏有机涂层聚合物化学键的主要因素。同时在大气中氧气的催化作用下, 涂层产生显著的光分解与光氧化作用, 涂层聚合物主链断裂, 产生过氧化物以及亲水性小分子, 导致涂层的老化与失效^[4-5]。东南沿海地区普遍纬度较低, 日照时间长、强度高。据统计, 万宁地区全年日照时数平均为 2454 h, 辐射总量平均为 4826 MJ/m², 光照强度大于绝大部分内地城市。

1.2 温度

温度直接影响着化学反应速率, 从而影响涂层腐蚀的电化学过程。与此同时, 冷热交替还易造成涂层与基体金属的脱粘、开裂、脱落等现象的发生^[6]。由于纬度低, 东南沿海地区全年平均气温约 22~26 ℃。数据显示, 海南万宁试验场年平均温度为 24.6 ℃, 高于大部分内地城市。

1.3 湿度

当涂层暴露于空气中时, 空气中水分子会吸附在涂层表面, 并通过涂层的各种缺陷(孔隙、夹杂、裂纹等)进入涂层内部, 使涂层产生膨胀形变。这种变化会导致涂层应力分布改变, 最终导致应力裂纹、涂层脱落等^[7]。同时, 水分作为腐蚀介质的有效溶剂, 也加速了涂层腐蚀老化的进程。我国东南沿海地区, 年均降水量为 1500~2000 mm, 万宁试验场测得的年均降水量为 1942 mm。

1.4 化学介质

酸性物质、碱性物质、各类盐的电解质、醇类、酮类、脂类、醚类等化学物质均会对涂层腐蚀产生一定影响。沿海环境中, 影响较大的化学介质主要为 Cl⁻和酸性物质(NO_x、SO₂)溶于水形成的酸雨。据统计, 海南酸雨率约为 7.7%, 万宁试验场测得 Cl⁻的质量浓度为 4.5 mg/(100 cm²·d)。这些化学物质在大气中主要以中性盐雾和酸性盐雾的形式存在, 可以通过盐雾含量和盐雾沉降量两个参数来描述。

2 实验室人工加速环境试验设计

根据我军车辆装备的实际服役环境, 结合涂层材料对腐蚀因素的敏感程度, 参考美军 CASS 盐雾加速试验标准, 依照 GJB 150A—2009 《军用装备实验室环境试验方法》分别裁剪出了湿热辐射、中性盐雾和酸性盐雾三种环境因子, 并依次作用于待测试片上, 从而模拟出实际环境效果。

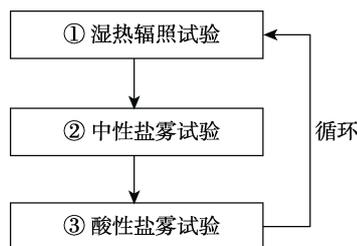


图1 人工加速环境试验流程

2.1 湿热辐照试验方案

湿热辐照试验通过实验室 LZW-050A 型紫外光耐候气候试验箱进行。根据 GJB 150.9A—2009 《第 7 部分: 太阳辐射试验》相关要求, 太阳辐射试验应注意确定日循环、试验持续时间、相对湿度、光谱分布、温度等试验参数。其中温度的设置并不是试验站所测得的气温, 而应该指实际环境中涂层表面在阳光下曝晒稳定之后所测得的温度。万宁地处热带季风气候区, 与美军 CASS 谱所设置的沿海地区温湿度基本相似。根据万宁地区平均气温 24.6 ℃, 经对比后可直接选取 CASS 谱中的温湿度条件: 温度设置为 43 ℃, 相对湿度为 95%。

万宁试验站全年辐照总量约 4826 MJ/m², 试验箱标准辐照强度一般设置为 $E=(60\pm 10) \text{ W/m}^2$ 。刘文珽等人^[8]计算出了广州地区紫外线全年辐照量为 4580.3 MJ/m², 军用车辆关键部位每年接受的紫外线辐照量为 5.18 MJ/m²。通过以上数据, 可以按照全年比例计算得到涂层接收的紫外辐照量为:

$$Q = \frac{4826}{4580.3} \times 5.18 = 5.46 \text{ MJ/m}^2 \quad (1)$$

由此可以得出一个周期(相当于实际环境一年)的辐照时间为:

$$t = \frac{Q \times 10^6}{E \times 3600} \approx 25 \text{ h} \quad (2)$$

因此, 湿热辐照试验条件确定如下: 试验时间为每周期 25 h, 相对湿度为 95%, 紫外辐照强度 $E=(60\pm 10) \text{ W/m}^2$, 温度为 43 ℃。

2.2 中性盐雾试验方案

盐雾试验通过实验室 LYW-025 型盐雾腐蚀试验箱进行。万宁地区 Cl⁻质量浓度为 4.5 mg/(100 cm²·d),

由于试验场距离海岸 350 m，盐雾沉积速率比距离海岸 3 km 的三亚站高出一个数量级^[9]，因此该地区 Cl⁻ 质量浓度高于东南沿海地区平均的 Cl⁻ 质量浓度。根据 GJB 150.9A—2009《第 11 部分：盐雾试验》规定，参考美军 CASS 谱设定的盐雾环境参数，设计具体流程为：实验室作用周期为 96 h，其中包含 2 次 24 h“喷雾”阶段和 2 次 24 h“干燥”阶段。在“喷雾”阶段，采用 5% 中性 NaCl 溶液，温度为 (35±2) °C，相对湿度为 90%，沉降量保持在 1~3 mL/(80 cm²·h)；在“干燥”阶段，相对湿度≤50%，温度为(35±2) °C。

2.3 酸性盐雾试验方案

酸性盐雾试验同样采用质量分数为 5% 的 NaCl 溶液，加入浓硫酸调节 pH 至 3.5~4.5，其他相关参数的设置与中性盐雾试验相同。以海南平均酸雨率为 7.7%^[10]来计算，酸性盐雾试验的试验周期约为：

$$t = \frac{96 \times 7.7}{92.3} \approx 8 \text{ h} \quad (3)$$

2.4 试验整体方案

综上所述，试验的总体流程如图 2 所示。

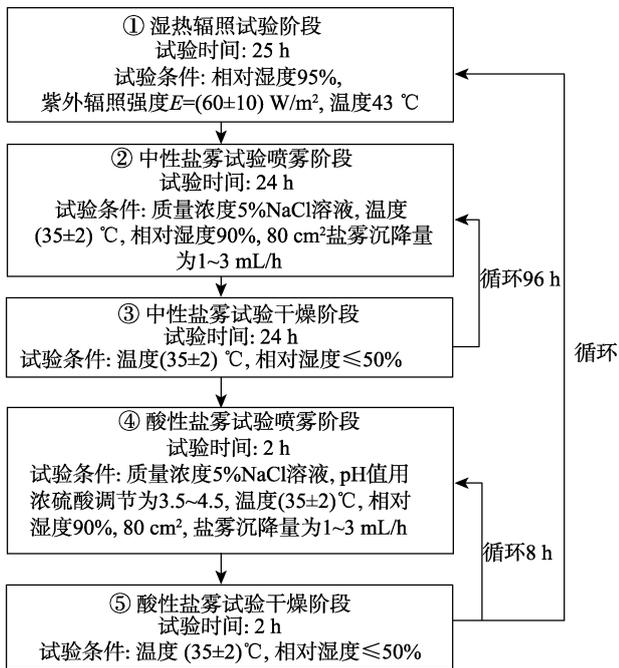


图 2 试验整体流程

3 实例验证

为了验证试验效果，选取了某型军用车辆涂层试片进行了上述实验室人工加速环境试验，并与万宁地区实际试验试片进行了对比。实际环境试片和实验室环境试片的 EIS 图如图 3 和图 4 所示。

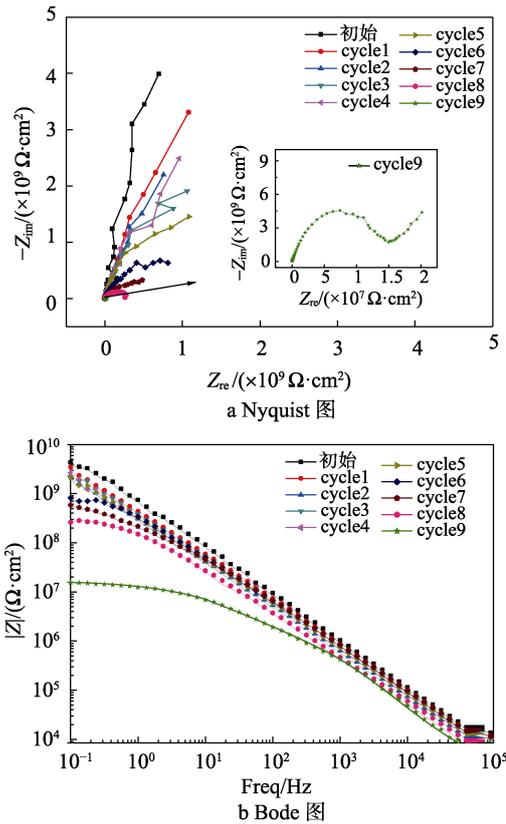


图 3 实际环境试片的 EIS 图

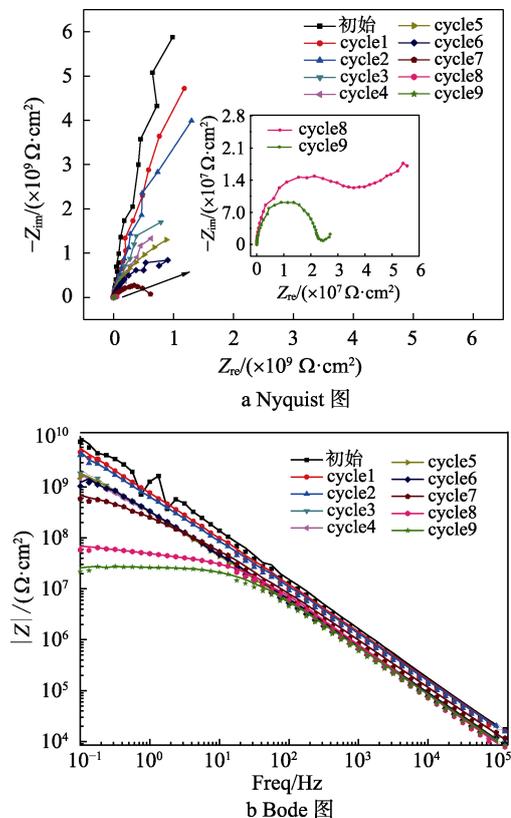


图 4 实验室环境试片的 EIS 图

对比两种环境的 Nyquist 图可以看出，容抗弧半径均有明显减小，且变化趋势极为相似，表示两种环

境中涂层电阻下降幅度比较接近。在 Bode 图中, 除第 8 周期外, 其余各个周期的低频阻抗模值 $|Z|_{0.1 \text{ Hz}}$ 均相近, 也表示了涂层防护性能下降程度基本能保持同步。根据对试片形貌的观察, 第 8 周期的不同可能主要由于实验室试片在该周期涂层脱落比较严重导致。

4 结语

1) 通过近海试验场所提供的数据转化而来的环境因子能较好地模拟当地实际环境影响, 相同试片在实验室模拟环境与实际环境中表现出的电化学特征较为一致, 为环境模拟实验提供了一种方法。

2) 文中的方案是以万宁试验场测得试验数据为例, 参考美军 CASS 谱设计而成。在用于其他地区时, 由于气候影响因素的复杂性, 其中数据并不够作为标准数据参考, 但能够为研究各类环境中的涂层腐蚀提供一种可行的方法与思路。

3) GJB 150A 作为我军现行武器装备环境试验的基本标准, 属于裁剪式标准, 标准中各项参数在运用到实际试验中时要灵活使用。在对环境资料充分研究的基础上, 对环境中的影响因素进行提取, 有针对性地设置试验环节, 不能生搬硬套, 同时注重结合实际环境对标准的使用进一步优化。

参考文献:

- [1] NGUYEN T N, HUBBARD J B, MCFADDEN G B. A Mathematical Model for the Cathodic Blistering of Organic Coating on Steel Immersed in Electrolytes[J]. J Coat Tech, 1991, 63(794): 43-52.
- [2] 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.
- [3] 姜慧, 刘奇东, 徐洁, 等. 海洋环境人工气候模拟加速试验设计[J]. 混凝土, 2013(11): 18-22.
- [4] 徐永祥, 严川伟, 丁杰, 等. 紫外光对涂层的老化作用[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2004, 24(3): 168-173.
- [5] 韩文礼, 徐忠苹, 王雪莹, 等. 紫外线对有机涂层的破坏机理及应对措施[J]. 石油工程建设, 2007, 33(2): 18-20.
- [6] 徐永祥. 大气环境中涂层失效和涂层下金属腐蚀机理的研究[D]. 沈阳: 中国科学院金属研究所, 2002.
- [7] 杨海, 陆卫中, 李京, 等. 水环境中防腐涂层失效机理研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2012, 24(6): 452-457.
- [8] 刘文珽, 李玉海, 等. 飞机结构日历寿命体系评定技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2004: 84-104.
- [9] 唐其环, 李军念, 代红. 万宁滨海与西沙群岛大气腐蚀性对比研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 1-4.
- [10] 海南省生态环境保护厅. 海南省环境状况公报: 2015年[R]. 海口: 海南省生态环境保护厅, 2015.