

研究论文

北方沿海工业大气环境下动车组涂层多因子耦合加速老化试验与寿命预测

王睿¹, 赵民¹, 葛向阳¹, 孙晓光^{1*}, 赵梓恒², 于浩², 舒雨心², 肖葵^{2*}

摘要 针对北方沿海工业大气环境中动车组水性涂层易老化失效、传统单一加速试验评价精度不足,且缺乏多因子耦合等效加速评价方法的问题,以青岛 C4 级(高腐蚀性)污染海洋大气为典型场景,通过环境因子监测明确核心腐蚀要素,基于总焓等效与污染物离子折算原理,设计盐雾-湿热-干燥-紫外耦合的环境谱加速试验;系统测试涂层厚度、光泽度、色差、附着力及电化学阻抗等性能,结合 Pearson 相关性分析构建多指标综合指数寿命预测模型,揭示涂层老化规律并预测服役寿命。加速试验中涂层呈现光泽度下降、附着力渐进衰减、低频阻抗缓慢降低的演化规律;所建线性综合指数模型预测相对误差 $\leq 10\%$,沿海地区动车组车外自干涂层预测寿命为 10~13 年。本研究构建的等效加速评价方法兼顾加速性与相关性,可为沿海工业大气环境下动车组涂层选型、工艺优化及全生命周期管理提供技术支撑。

关键词 沿海环境;动车组涂层;环境谱;等效加速评价;寿命预测

中国沿海工业带是动车组高密度运营区域,该区域属于典型海洋大气污染环境,兼具海洋大气高盐雾与工业污染高酸性气体的双重特征,叠加高温高湿、干湿交替、强紫外辐照,构成轨道交通装备服役的严苛腐蚀场景^[1-3]。动车组广泛应用的铝合金表面涂层结构,在长期服役中易出现失光、粉化、鼓泡、剥离、基体锈蚀等失效问题^[4-6]。针对高速列车用环氧底漆和聚氨酯面漆的研究表明,湿热、紫外及盐雾环境会引起涂层吸水、树脂老化、界面结合力下降及电化学阻抗降低等现象,从而削弱涂层长期防护能力^[7-8],为进一步提升中国动车组列车在复杂服役环境下的可

靠性与稳定性,产品设计时应充分考虑其应用环境,并采取合适的方法进行可靠性评估^[9-11]。

涂装作为金属防腐常用且经济的方式之一,是绝大多数轨道交通设备防腐和装饰的首选。近些年,轨道交通车辆涂装广泛采用水性涂料,涂层应用于车体外表面,直接接触阳光、雨水、风沙等腐蚀介质,可靠性将直接影响产品的外观质量和防护寿命^[12-15]。同时,水性环氧、水性聚氨酯及其复合改性涂层因低挥发性有机化合物排放和良好的防腐潜力,已成为绿色重防腐涂层的重要发展方向^[16-17],特别是在沿海地区,由于海洋大气中氯离子浓度高,腐蚀问题尤为突出,而在工业区,二氧化硫等污染物的排放加剧了腐蚀过程。动车组涂层的老化问题是一个极具挑战性的技术问题,因为它不仅直接影响着动车组长期稳定

1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 青岛 266111

2. 北京科技大学新材料技术研究院, 北京 100083

收稿日期: 2026-04-23; 修回日期: 2026-05-26

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2025KJHZ030)

作者简介: 王睿, 工程师, 研究方向为车辆涂层防护, 电子信箱: 982442672@qq.com; 孙晓光(通信作者), 工程师, 研究方向为车辆涂层防护, 电子信箱: sunx_sf@123.com; 肖葵(共同通信作者), 研究员, 研究方向为金属腐蚀与防护, 电子信箱: xiaokui@ustb.edu.cn

引用格式: 王睿, 赵民, 葛向阳, 等. 北方沿海工业大气环境下动车组涂层多因子耦合加速老化试验与寿命预测[J]. 科技导报, 2026, 44(16): 147-157;

doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2026.04.00085

运行的可靠性和安全性,还关系到动车组的使用寿命和维护成本。

因此,对水性涂层在工业污染海洋大气服役环境中的可靠性评估尤为重要^[18]。目前针对轨道交通涂层老化行为的研究,多采用中性盐雾、湿热或人工气候等单因素加速试验开展性能评价^[19-23]。例如,NaCl溶液浸泡、湿热老化和人工紫外老化常被用于研究有机涂层的吸水扩散、屏蔽性能衰减和界面失效过程^[24-26],该类方法虽能够在一定程度上反映涂层耐腐蚀性能,但实际沿海服役环境中,涂层往往同时受到盐雾沉积、高湿热循环、紫外辐照及污染物沉积等多因素耦合作用,其失效机理具有显著协同性。因此,单一环境因子难以真实表征动车组涂层在复杂海洋工业大气中的长期服役行为。此外,现有研究更多关注某一性能指标(如盐雾时间、附着力或阻抗变化)的衰减规律,对于室内加速结果与户外实际服役寿命之间的定量映射关系研究仍相对不足,虽然近年来已有研究开始采用电化学阻抗、物理性能衰减及机器学习方法开展有机涂层寿命预测,但针对实际海洋工业大气环境中多环境因子耦合作用下的等效加速谱设计及服役寿命映射仍有待完善^[27]。

基于此,本文以青岛典型C4级海洋工业大气环境为对象,结合气象参数统计、总焓等效及污染物离子折算原理,构建盐雾-湿热-干燥-紫外多因子耦合环境谱,并基于综合性能指数建立寿命预测模型,以期实现动车组水性涂层室内加速试验与实际服役寿

命之间的关联评价。

1 环境谱加速实验理论基础及青岛地区环境谱设计

北方沿海工业环境是诱发动车组涂层老化的典型工况之一。本研究选取青岛(依据GB/T 19292标准所划分的大气腐蚀等级,其中C4属于高腐蚀性^[28])作为典型服役区域,通过调研其全年气象数据,确定涂层在实际服役中受紫外辐照、高湿热、干湿交替以及大气污染物(氯盐、硫酸盐)的耦合作用。基于此,本研究选取盐雾、湿热、干燥及紫外辐照作为核心试验模块,通过“温湿度等当量原则”与“电化学折算原理”构建加速老化与腐蚀谱。

1.1 环境特征分析与数据收集

为了精准还原青岛地区的气象特征,本研究依托气象数据库,提取了青岛市2023年全年8760h的逐时气象数据(包含温度、相对湿度、降雨量及紫外辐照度)。

统计结果表明,青岛地区年平均温度为13.98℃,平均相对湿度为74.33%,年均紫外辐射总量为77122.80W·h/m²。环境污染物方面,依据《2023中国生态环境状况公报》,青岛市年均降雨pH值≥5.6,年均硫酸盐沉积率为6.8mg/(m²·d),氯盐沉积率为16.1mg/(m²·d)。具体腐蚀性环境因子分类统计结果如表1所示。

表1 腐蚀性环境因子汇总

温度/ ℃	相对湿度/ %	潮湿空气 时间/h	降雨凝露 时间/h	干燥空气 时间/h	硫酸盐沉积率/ (mg·m ⁻² ·d ⁻¹)	氯盐沉积率/ (mg·m ⁻² ·d ⁻¹)	紫外辐照/ (W·h·m ⁻²)
13.98	74.33	1660	392	6708	6.8	16.1	77122.80

1.2 腐蚀加速等当量与电化学折算原理

腐蚀谱的设计核心在于保证实验室加速环境与真实服役环境对材料造成的损伤等效。本研究结合热力学焓值与电化学动力学原理进行时间与周期的折算。

1) 温湿度等当量原则。等当量原则指出,在气压一定的情况下,空气的破坏能量由其总焓(能量总含量)决定。当环境从一种温湿度状态转移至另一种状态时,若保持总焓不变,则材料所受的侵蚀总能量相

同。根据空气焓湿图^[29-34],可计算出任一温湿度条件下的空气焓值 H (单位:kJ/kg)。实际服役环境总焓与加速环境总焓的关系可等效为

$$H \times t = H' \times t' \tag{1}$$

式中, t 和 t' 分别为自然环境和加速环境中的暴露时间,s。

2) 污染物腐蚀加速折算。对于金属及其表面涂层缺陷处的电化学腐蚀,在特定时间(t_1 至 t_2)内,腐蚀损伤等效于法拉第电量 Q

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} I dt \tag{2}$$

式中, I 为服役环境中的自然腐蚀电流。

在实验室加速选定的试验谱下, 其加速腐蚀电量 Q' 为

$$Q' = \int_{t_1'}^{t_2'} I' dt \tag{3}$$

式中, I' 为加速条件下的腐蚀电流密度。

根据腐蚀损伤等量原则 ($Q = Q'$), 在工程应用中近似视 I 与 I' 为常数, 引入加速折算系数 $\alpha = I'/I$, 则加速试验时间为 $t' = t/\alpha$ 。本研究依据青岛环境沉积物测定结果, 确定盐雾介质为含有 3.5%NaCl 与 0.1% Na₂SO₄ 的混合溶液 (pH 值=6)。参考既往研究的离子

腐蚀当量折算, 3.5%NaCl 的折算系数为 8.264, 0.1% Na₂SO₄ 的折算系数为 1.575。因此, 该混合溶液的综合加速系数 α 为 9.839 (即加速环境中作用 1 h 等效于纯水腐蚀环境下作用 9.839 h)。

1.3 加速试验周期与模块时间确立

为确立单次循环中各模块的时间配比, 本研究依据 8760 h 的气象数据进行了工况划分: 将降雨及凝露时段归入“盐雾模块”, 相对湿度 $70\% \leq RH < 100\%$ 时段归入“湿热模块”, $RH < 70\%$ 归入“干燥模块”。通过全年时间占比折算至单日 (24 h) 循环中, 得到各模块的时间分配权重为: 湿热占 19%, 盐雾占 4%, 干燥占 77%。由此确立的单日加速腐蚀模块参数如表 2 所示。

表 2 单日加速腐蚀模块参数

试验模块	试验温度/℃	相对湿度/%	设定时间/h	腐蚀介质浓度/%	单模块试验焓值/(kJ·kg ⁻¹)
盐雾	40	—	1	3.5NaCl+0.1Na ₂ SO ₄	3640.34
湿热	40	90	5	—	1280.23
干燥	40	<30	18	—	—

经计算, 在 24 h 单次加速循环中, 湿热焓值与盐雾焓值的总和为 4920.58 kJ/kg。根据前述全年数据测算, 青岛地区年有效腐蚀总焓值为 84566.60 kJ/kg。因此, 模拟青岛地区 1 年服役期的所需循环次数 $N = 84566.60/4920.58 \approx 17$ 次。

1.4 紫外老化加速当量计算

为模拟沿海强紫外环境下动车组涂层高分子链段的光致降解过程, 本研究采用紫外老化试验箱开展加速试验。设定试验箱内辐照强度为 60 W/m² (波长范围 300~400 nm), 并利用黑板温度计将试样表面温度控制在 60℃。

在确定室内外等效加速倍率时, 本研究综合考虑了光照强度与温度效应的协同作用。根据有机材料降解的阿伦尼乌斯 (Arrhenius) 经验准则, 温度是加速化学反应速率的核心因子。本研究参照“每升高 8 K, 材料降解速度倍增 (即服役寿命减半)”的经验公式进行计算。经气象数据统计, 青岛地区户外暴露期间涂层表面的年均温度为 20.37℃。

基于上述温度修正因子及辐照强度等价原理, 加速倍率 A 的计算模型如下

$$A = \frac{W_1}{W_2} \times 2^{\frac{T_1 - T_2}{8}} \tag{4}$$

式中, W_1 为室内辐照功率, W_2 为实际辐照度, T_1 为黑板温度, T_2 为青岛日照平均温度。

结合青岛地区户外累计日照辐射数据, 计算得出在当前试验设定条件下的综合加速比达 30.99。由此折算, 模拟青岛户外暴晒 1 年 (初始累计时间约为 1285.38 h) 所需的室内等效加速老化时间为 41.48 h。具体的折算参数汇总见表 3。

表 3 青岛地区紫外老化室内外等效折算参数汇总

初始时间/h	当地年日照 平均温度/℃	表面温度/℃	加速比	加速时间/h
1285.38	20.37	60	30.99	41.48

1.5 各模块试验条件确定

青岛模拟腐蚀谱中设计 17 d, 共 17 个日历循环, 每 1 日历循环中包括盐雾、干燥和湿热模块。每一循环中各模块的试验时间如下 (图 1)。

盐雾试验: 试验时间为 1 h, 试验溶液为 pH 值=6 的 3.5%NaCl 溶液和 0.1% 的 Na₂SO₄ 溶液, 试验温度为 40℃。

干燥试验: 干燥试验时间为 9 h, 干燥时控制试验温度 $T=40℃$, 相对湿度 $\leq 30\%$ 。

湿热试验: 湿热试验时间为 5 h, 湿热试验设置温

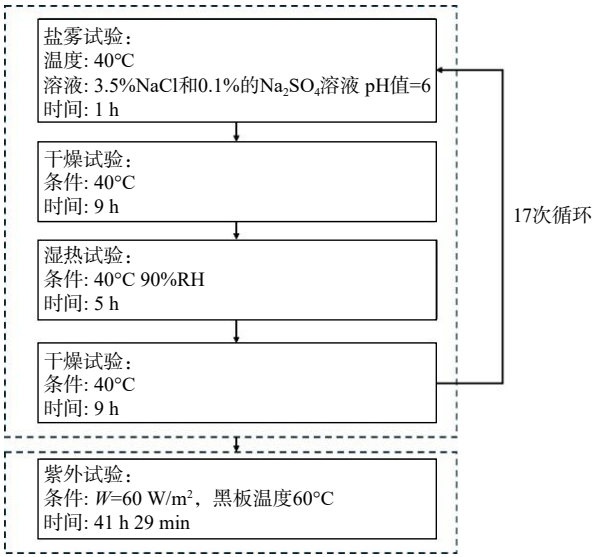


图1 循环环境谱

度 $T=40^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 $=90\%$ 。
干燥试验: 干燥试验时间为 9 h，干燥时控制试验温度 $T=40^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 $\leq 30\%$ 。

2 实验材料及方法

2.1 实验材料

本实验所用基材为 6061 铝合金，试样尺寸为 150 mm×70 mm，采用多层复合车外自干涂层体系，包含环氧底漆、不饱和和聚酯中涂漆、聚氨酯实色面漆、聚氨酯底色漆-1580 以及聚氨酯清漆，各涂层的成分、厚度及干燥工艺如表 4 所示。涂层总体系采用 $\geq 15^{\circ}\text{C}$ 环境下自然干燥 16 h 的成膜方式，各涂层干膜厚度分别为：环氧底漆 $(75\pm 15)\mu\text{m}$ ，不饱和和聚酯中涂漆 $(55\pm 15)\mu\text{m}$ ，聚氨酯实色面漆 $(45\pm 15)\mu\text{m}$ ，聚氨酯底色漆-1580 为 $(25\pm 10)\mu\text{m}$ ，聚氨酯清漆 $(75\pm 15)\mu\text{m}$ 。

2.2 电化学极化曲线测试

用 VersaSTAT3F 电化学工作站，标准的三电极

体系配置：饱和甘汞电极(SCE)作为参比电极，铂片作为辅助电极，工作电极采用暴露面积为 0.785 cm 的待测样品。电解质溶液为表 2 所示混合盐溶液。在测试开始之前，记录了开路电位(open-circuit potential)，并让系统稳定 30 min，随后在稳定的开路电位下进行电化学阻抗谱(electrochemical impedance spectroscopy)测试，设定条件是频率范围 $10^5\sim 10^{-2}\text{ Hz}$ 之间，正弦激励信号的幅值为 10 mV。

2.3 涂层老化性能测试

各试验周期对试样开展厚度、光泽度、色差、附着力及电化学性能测试，测试方法如下。

- 1) 厚度: 采用德国尼克斯 QNIX4500 涂层测厚仪，记录初始厚度，各周期后复测；于试样 1/4、1/2、3/4 位置测试，取平均值为结果。
- 2) 光泽度: 使用 3 nh 光泽度测试仪对所有试样进行 60°光泽度测试，记录初始 60°光泽度数据；在每个试验周期结束后再次对样品进行厚度测试，以此评估涂层在不同周期中的变化情况。光泽度测试时，分别在每片样品的 1/4、1/2、3/4 位置进行 60°光泽度测试。测得的 3 个位置数据取其平均值，作为该样品的平均 60°光泽度结果。
- 3) 色差: 使用 3 nh 色差测试仪对所有试样进行三色值(L 、 a 、 b)测试，记录其初始三色值(L 、 a 、 b)。随后，在每个试验周期结束后对样品再次进行三色值(L^* 、 a^* 、 b^*)测试，以评估涂层在不同周期中的变化情况。三色值测试时，分别在每片样品的 1/4、1/2、3/4 位置进行三色值测试。测得的 3 个位置数据取其平均值，作为该样品的平均三色值结果。
- 4) 附着力: 依据 ASTM D7234-22 标准及 ISO 4624:2016《涂层附着力拉拔试验法》，使用附着力拉拔仪对所有试样进行附着力测试，记录其初始附着力数据。随后，在每个试验周期结束后对样品再次进行附着力测量，通过拉拔最大拉力计算附着力值，以此

表 4 实验所用基材及涂层

基材种类	试样尺寸/(mm×mm)	涂层种类名称	涂层组合	成分	厚度/ μm	干燥方式
6061 铝合金	150×70	车外自干涂层	底漆	环氧底漆	75±15	$\geq 15^{\circ}\text{C}$ 条件下自然干燥 16 h
			中涂漆	不饱和和聚酯	55±15	
			实色面漆	聚氨酯	45±15	
			底色漆-1580	聚氨酯	25±10	
			清漆	聚氨酯	75±15	

评估涂层在不同周期中的界面结合力变化。附着力测试时,分别在3片样品的避开边缘的位置进行测试,每片样品选择的测试点间距 $\geq$ 夹具直径2倍,测得的3个位置数据取其平均值,作为该样品的平均附着力结果。测试过程需遵循规范操作:先对锭子和涂层进行预处理,按1:1比例调配双组分AB胶并均匀涂布于锭子底部,控制胶层厚度在50~100 μm ,将锭子贴合至涂层表面并清理溢胶,待胶水固化24 h后沿锭子边缘切割涂层至基底,再进行拉脱试验,控制拉拔速率为1 MPa/s,待锭子断裂后记录数据。

2.4 寿命评估模型建立方法

使用附着力拉拔仪、3 nh 色差仪、QNIX4500 测厚仪等设备,获取各试验周期涂层的附着力、色差、低频阻抗模值($|Z|_{0.01 \text{ Hz}}$)、失光率等核心指标数据。基于数据构建寿命评估模型,具体步骤如下。

1) 综合指数方法构建:先对各指标进行归一化处理,再通过 Pearson 相关性分析确定各指标权重,计算涂层老化综合指数。

2) 以综合指数为因变量,试验周期(年)为自变量,可结合涂层失效机理,选用线性拟合或二次多项式拟合建立寿命预测模型。通过 Origin 软件拟合数据,输出拟合方程、相关系数及方差分析结果,确保 $R^2 \geq 0.9$ 以保证模型显著性。

3) 模型验证:选取户外暴露试验数据(如青岛1年暴露试样的综合指数)代入模型,计算预测值与实际测试值的相对误差;若误差 $\leq 10\%$,则模型有效;若误差超出范围,调整指标权重或拟合方法(如改用指数拟合),重新验证直至满足精度要求,最终确定适用于目标环境的涂层寿命预测模型。

3 结果与分析

3.1 宏观形貌

图2为涂层的宏观形貌照片,0—8周期的涂层表面始终保持完整,无鼓泡、开裂、腐蚀斑点等明显失效痕迹。这一结果表明,在基于青岛大气环境的温湿度、含 SO_2 和 H_2S 等污染物及紫外辐照特征涉及的加速环境中,涂层能有效抵御腐蚀介质侵蚀,表面结构稳定性良好,这初步验证了该涂层在青岛环境下的防护可靠性。

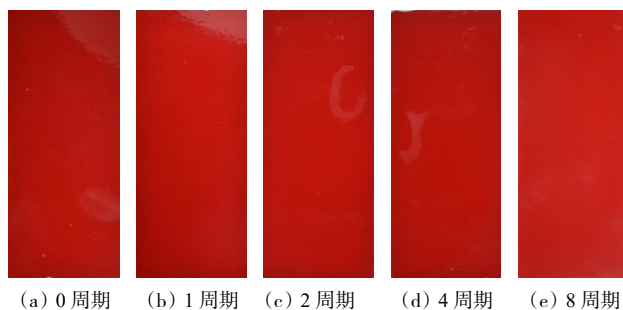


图2 车外自干涂层青岛室内加速试验不同周期的宏观形态

3.2 厚度

图3为涂层的厚度变化,涂层平均厚度在测试周期内呈现波动变化特征:初始状态(0周期)厚度均值约为230 μm ,在历经8个周期的测试条件下,该涂层在宏观尺度上并未表现出持续性的沉积增厚或剥离减薄趋势,其厚度指标在系统误差允许范围($\pm 15\%$)内维持相对稳定。

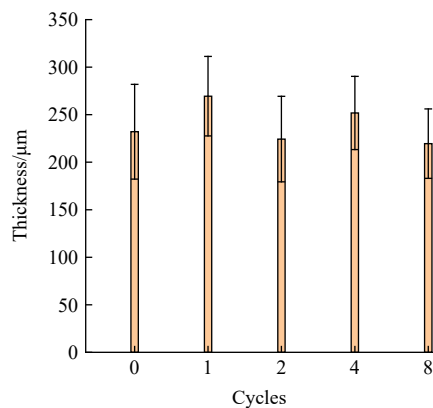


图3 车外自干涂层青岛室内加速试验不同周期的厚度变化

3.3 光泽度和色差

经过8个周期的加速试验,涂层的光泽度出现了下降,失光率达到43.78%(图4(a))。这种现象可能与涂层表面的腐蚀或物理老化过程有关。随着时间的推移,涂层表面可能受到环境因素如紫外线辐射、湿度、温度变化以及污染物的侵蚀,导致涂层表面发生微观结构变化或局部损伤,从而降低了表面的光泽度。涂层的光泽度下降可能意味着其表面保护功能有所减弱,尽管没有出现明显的腐蚀产物或涂层剥离,但光泽度的变化仍然是涂层性能老化的一个指示。这种变化也可能是涂层与环境中污染物反应后,表面发生氧化或形成了不规则的微观结构所导致^[35]。

涂层相对于初始样品存在色差,且随试验周期延长,色差有扩大的趋势,增大到8.03(图4(b))。色差

可能与涂层表面发生了某种程度的氧化反应(受湿度、温度、紫外线照射等影响)有关。这些变化可能导致涂层的表面颜色发生变化,例如氧化物的形成或涂层成分的变化,从而显著改变其外观^[36-37]。

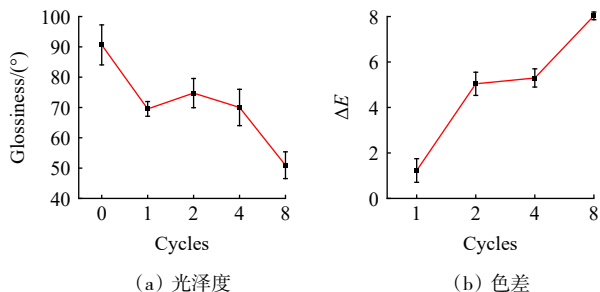


图4 车外自干涂层青岛室内加速试验不同周期的光泽度和色差

3.4 附着力

图5为不同周期试样的附着力变化图。0周期涂层的附着力为4.67 MPa。经过1、2、4、8个周期的试验后,涂层的附着力分别为3.650、3.310、3.245、2.025 MPa,呈现逐渐降低的趋势。这一变化说明环境谱加速试验在湿热、盐雾、紫外交替过程中,已对涂层与基材的界面结合力造成渐进式破坏,可能是水汽渗透至界面形成微小间隙,或污染物侵蚀导致界面黏结作用减弱,整体结合强度随试验周期逐步衰减。

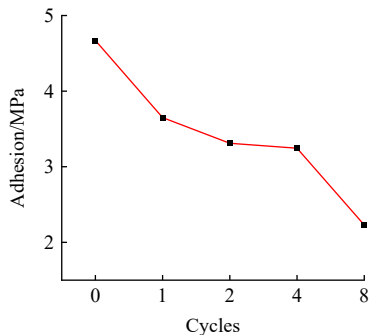


图5 青岛室内加速试验车外自干涂层附着力变化

3.5 电化学性能

车外自干涂层在环境谱加速试验4周期后,其容抗弧变小(图6(a)),这表明涂层的电化学阻抗有所下降。对于高分子树脂涂层而言,容抗弧的缩小意味着水分子、氧气以及侵蚀性离子(如 Cl^-)正通过涂层表面的微孔和缺陷逐渐向内部渗透。这一渗透过程导致涂层的吸水率上升、介电常数增大,进而引发涂层电阻的下降,涂层对铝合金基材的屏蔽保护作用开始减弱^[38]。

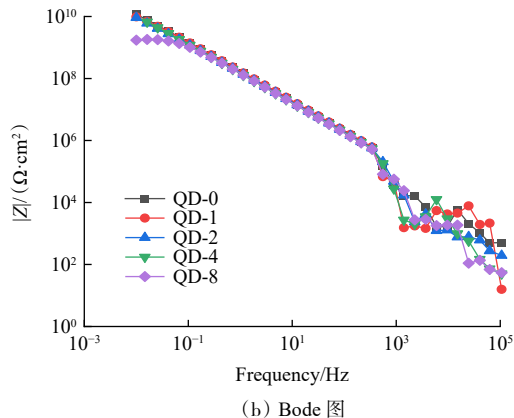
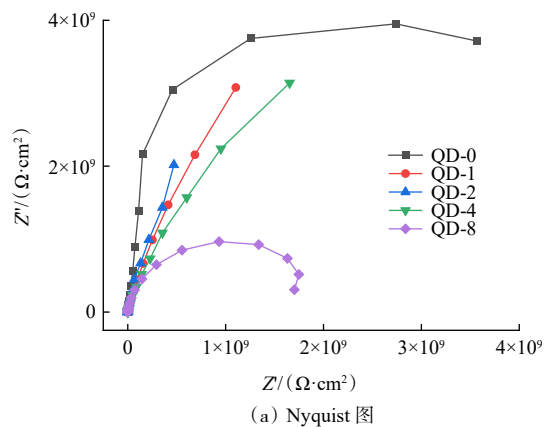


图6 青岛室内加速试验车外自干涂层

同时,图6(b)Bode图显示,车外自干涂层在环境谱加速试验4周期后,代表涂层物理阻挡性能的低频阻抗模值($|Z|_{0.01\text{ Hz}}$)也出现了下降。低频阻抗值的减小直观地反映了水汽和腐蚀性介质已在涂层内部发生扩散,增加了基材界面的渗透风险。但值得注意的是,其下降幅度较为平缓,低频阻抗模值依然维持在较高数量级,这表明电解质尚未在铝合金基底表面形成大面积的导电通路,涂层整体尚未发生严重失效,仍具有良好的防护效果^[39]。

3.6 青岛地区涂层服役寿命预测

相关分析是统计学中用于量化随机变量间关联特性的重要方法,其核心在于通过数学指标揭示变量间的协同变化规律。统计学的相关分析方法主要用于研究不同随机变量之间的相互关联特性。利用数据分析,能够判断不同数据集是否存在协同变化的规律,包括变化方向是否一致、关联强度如何等特征。本研究中将使用 Pearson 相关性分析方法对环境试验中涂层的老化程度和性能指标测试结果之间的相关系数进行定量计算和评价。

Pearson 相关系数^[40](r), 也被称作积差相关系数, 是用于衡量 2 个变量之间相关程度的统计学指标

$$r = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X - \bar{X})^2 \sum (Y - \bar{Y})^2}} = \frac{l_{XY}}{\sqrt{l_{XX}l_{YY}}} \quad (5)$$

式中, $l_{XX} = (X - \bar{X})^2 = \sum X^2 - (\sum X)^2/n$, 为 X 的离均差平方和; $l_{YY} = (Y - \bar{Y})^2 = \sum Y^2 - (\sum Y)^2/n$, 为 Y 的

离均差平方和; $l_{XY} = \sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y}) = \sum XY - (\sum X)(\sum Y)/n$, 为 X 与 Y 的离均差平方和。

本研究进行 4 周期环境试验, 对各周期测试的厚度变化、色差、失光率、附着力和低频阻抗模值数值作为相关系数计算的数据源, 表 5 和图 7 分别为各类涂层的主要因子测试结果汇总和老化性能指标 Pearson 相关系数的计算结果。

表 5 室内环境谱加速试验性能统计

Experiment period	Cycle	Change in thickness/ μm	Loss rate /%	ΔE	Adhesion change/MPa	$ Z _{0.01 \text{ Hz}}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$
0	0	0	0	0	0	1.17×10^{10}
1	1	37.39	23.30	1.22	-1.02	9.75×10^9
2	2	-7.74	17.55	4.81	-1.36	9.21×10^9
3	4	19.72	22.77	5.30	-1.425	6.71×10^9
4	8	-12.54	43.78	8.03	-2.645	9.30×10^8

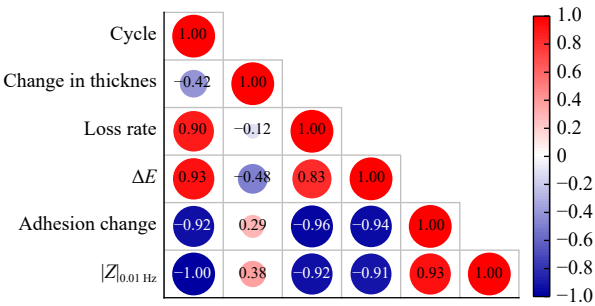


图 7 涂层不同指标相关性分析结果

为统一不同性能指标的量纲, 并建立可用于寿命评价的失效判据, 本文将失光率、色差、附着力变化率及低频阻抗模值分别作为表征涂层老化程度的关键指标。失光率的失效阈值取 25%, 色差的失效阈值取 10, 附着力变化率的失效阈值取 80%; 低频阻抗模量采用 $|Z|_{0.01 \text{ Hz}}=10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 作为涂层防护性能失效判据。上述阈值综合考虑了相关标准、涂层防护机理及工程应用要求, 能够较为客观地表征涂层防护性能。

将各个主要因子进行 Pearson 相关分析得到相关系数 r 值后, 根据公式对 r 进行归一化处理, 以确定各个主要因子对涂层寿命影响的权重 R , 如式(6)所示, 并以此建立涂层性能退化与主要腐蚀影响因素关联关系

$$R = \frac{r_x}{r_1 + r_2 + \cdots + r_x + \cdots + r_n} \quad (6)$$

式中, R 为某种主要因子对涂层寿命影响的权重值, r_x 为某种主要因子的相关系数。如阻抗模值的影响

因子系数为

$$R_z = \frac{r_z}{r_F + r_E + r_S + r_Z} \quad (7)$$

计算得到不同因子的归一后影响因子见表 6。

表 6 相关系数及影响因子计算结果

	失光率	色差	附着力变化	低频阻抗模值
r	0.90	0.93	0.93	0.99
R	0.240	0.248	0.248	0.264

对车外自干涂层每周周期色差、失光率、附着力及低频阻抗模值各周期测试结果进行归一化处理, 乘以各性能相应的影响因子系数, 得到涂层各周期的综合指数。各周期失光率分别记为 s_0, s_1, s_2, s_4 , 失效指标值对应的失光率记为 s_5 , 失光率归一化计算公式为

$$S_x = \frac{s_4 - s_x}{s_4 - s_0} \quad (8)$$

各周期涂层色差变化分别记为 e_0, e_1, e_2, e_4 , 失效指标值对应的色差变化记为 e_5 , 色差变化率归一化计算公式为

$$E_x = \frac{e_4 - e_x}{e_4 - e_0} \quad (9)$$

各周期涂层附着力变化分别记为 f_0, f_1, f_2, f_4 , 失效指标值对应的附着力变化记为 f_5 , 附着力变化率归一化计算公式为

$$F_x = \frac{f_4 - f_x}{f_4 - f_0} \quad (10)$$

各周期低频阻抗模值分别记为 z_0, z_1, z_2, z_4 , 失效

指标值对应的低频阻抗模值记为 Z_5 。低频阻抗模值归一化计算公式为

$$Z_x = \frac{z_4 - z_x}{z_4 - z_0}$$

(11)

将车外自干涂层各周期的失光率、色差、附着力变化及低频阻抗模值分别乘以对应影响因子系数后进行加权求和,即可得到各周期综合指数 N 。综合指数越接近 1,表示涂层状态越接近初始完好状态;综合指数持续下降,则说明涂层退化程度不断加深。各周期综合指数的计算公式为

$$R_x = H_x \times R_H + E_x \times R_E + Z_x \times R_Z$$

(12)

得到各涂层的综合指数见表 7。

表 7 室内加速试验综合指数计算结果

Cycle	Composite Index
0	1.00
1	0.77
2	0.75
4	0.63
8	0.30

图 8 为涂层老化规律拟合曲线,综合指数随服役时间呈单调下降趋势,并在所考察区间内表现出近似线性变化特征。考虑到试验数据点较少,若采用高阶模型容易引入过拟合,因此本文采用线性回归模型对综合指数与时间的关系进行拟合。该模型具有形式简洁、参数可解释性强、外推稳定性较好的优点,适用于涂层中后期退化规律的寿命预测。基于测试阻抗数据,选取线性模型作为预测模型,其数学表达式为

$$N = at + b$$

(13)

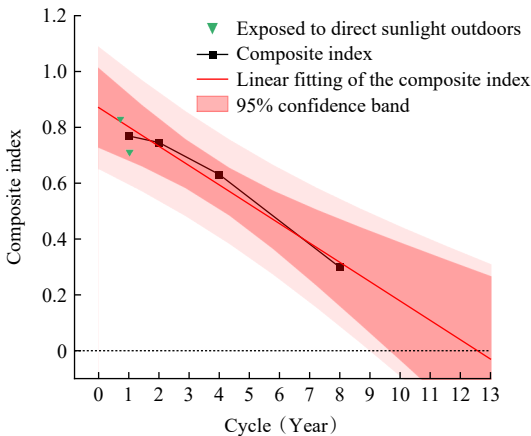


图 8 涂层老化规律拟合曲线

拟合结果表明,综合指数 N 与时间 t 满足线性关系 $N=at+b$,其中 a 为负值,说明涂层性能随时间增加持续衰减。将拟合直线与失效阈值对应的综合指数水平相交,即可反推出涂层的预测寿命。拟合参数 A、B 的标准误差较小(表 8), F 值较高且 P 值 <0.05 (表 9),说明线性模型具有显著性和统计可靠性,能够用于青岛地区涂层服役寿命的预测分析。

表 8 涂层老化模式拟合曲线的参数

Parameters	Value	Standard error
A	0.87081	0.03314
B	-0.06929	0.00719

表 9 涂层老化规律拟合曲线方差分析

Data and processing	DF	Sum of squares	Mean square	F value	Probability>F
Model	1	0.13801	0.13801	92.88213	0.0106
Error	2	0.00297	0.00149		
In total	3	0.14098			

使用青岛户外暴露试验 6 个月、1 年后的车外自干涂层试样性能数据进行验证,性能测试结果如表 10 所示。

表 10 青岛污染海洋大气环境户外暴露试验涂层数据均值汇总

Performance indicator	Half a year	Standard deviation	One year	Standard deviation
Thickness/ μm	261.00	33.61	238.40	33.84
ΔE	1.55	1.84	6.31	0.36
Glossiness/ $(^\circ)$	69.53	2.42	64.50	4.90
Adhesion/MPa	3.76	—	3.15	—
$ Z _{0.01\text{ Hz}}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	1.09×10^{10}	—	1.08×10^{10}	—

实际服役 6 个月的涂层的综合指数计算结果为 0.82,图 8 中绿色点为实际服役代表点(0.5, 0.82),实际服役 1 年的测试得到的综合指数计算结果为 0.69,实际服役 6 个月、1 年的综合指数均在室内加速综合指数拟合曲线的置信区间范围内(表 11)。综上所述,本研究所设计的多因子耦合室内加速环境谱,能够有效模拟青岛沿海大气的真实涂层损伤历程,通过综合指数进行寿命预测的方式可在一定程度上为动车组涂层寿命预测提供数据支撑。

表 11 室外加速试验综合指数计算结果

Cycle	0.5	1
Composite Index	0.82	0.69

4 结论

本研究北方沿海工业大气环境下轨道车辆用水性涂层的可靠性评价,通过环境参数监测、环境谱设计与室内加速试验,结合寿命预测模型构建,系统探究了涂层在 C4 腐蚀等级环境中的服役规律与失效机制,主要结论如下。

1) 通过对青岛地区的环境监测,明确了青岛地区腐蚀等级与核心驱动因素——青岛以“湿热+盐雾+紫外”为主,为环境谱设计提供了精准依据。基于温湿度等当量关系、污染物离子折算系数及紫外谱设计原理,17 个腐蚀循环,加速倍率控制在不超过 20 倍,环境谱设计实现“加速性”与“相关性”统一。

2) 动车组车外自干涂层在室内环境谱加速试验与青岛户外暴露试验的性能变化分析表明,涂层性能衰减呈现显著环境依赖性,涂层主要表现为光泽度下降、轻微失粘,低频阻抗模值长期维持在 $10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 以上;这一规律为沿海大气环境地区轨道车辆涂层选型提供了直接指导。

3) 基于 Pearson 相关性分析确定各指标权重,构建的综合指数模型,经户外暴露数据验证,预测相对误差 $\leq 10\%$ 。该模型可定量预测北方沿海工业大气环境下涂层服役寿命,涂层预测寿命达 10~13 年,为轨道车辆涂层维护提供了技术支撑。

参考文献 (References)

[1] 王瑾璐,王若钦,李妍,等. 面向高速动车组的水性涂料应用关键技术研究[J]. 中国涂料, 2026, 41(2): 59–65,76.

[2] Yang D, Zhu W, Li J, et al. Research on application of water-based paint on high-speed train[J]. Modern Finishing, 2020, 23(9): 54–57.

[3] 白凤祥,韩连山,郭泽方,等. 动车组用低表面能水性丙烯酸聚氨酯自洁涂料技术研究[J]. 涂层与防护, 2023, 44(10): 22–26.

[4] Bagherzadeh M R, Daneshvar A, Shariatpanahi H. Novel water-based nanosiloxane epoxy coating for corrosion protec-

tion of carbon steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2012, 206(8/9): 2057–2063.

[5] 杨松柏. 高速铁路动车组用涂料的需求[J]. 中国涂料, 2019, 34(5): 5–8.

[6] Yin C H, Huang Y S, Liu C, et al. Impedance-based multi-parameter evaluation of waterborne eco-coatings under wet-heat aging[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2025, 20(11): 101188.

[7] Li L, Li S W, Shi H W, et al. Corrosion behavior and hydrothermal aging mechanism of epoxy primer on Al-alloy for high-speed train[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2025, 45(3): 757–764.

[8] Li C L, Shi H W, Liang G P, et al. Corrosion resistance and aging mechanism of polyurethane topcoat for high-speed train[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2023, 43(6): 1383–1391.

[9] Liu Y X, Sun Z, He D Y, et al. Corrosion behavior of 7A52 aluminum alloy plasma arc welding joint in simulated marine atmosphere environment[J]. Advanced Materials Research, 2022, 1170: 39–48.

[10] Jorbandian A, Ashori A, Jonoobi M. High-performance and sustainable clear water-based coatings for outdoor wood protection: A review[J]. Progress in Organic Coatings, 2025, 208: 109452.

[11] Xiong L L, Liu K, Liu C P, et al. Amino-functionalized $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ durable superhydrophobic composite coating: Structure design and anticorrosion property[J]. Surface and Coatings Technology, 2025, 518: 132920.

[12] Yeh J M, Yao C T, Hsieh C F, et al. Preparation, characterization and electrochemical corrosion studies on environmentally friendly waterborne polyurethane/Na⁺-MMT clay nanocomposite coatings[J]. European Polymer Journal, 2008, 44(10): 3046–3056.

[13] Monetta T, Acquesta A, Carangelo A, et al. Considering the effect of graphene loading in water-based epoxy coatings[J]. Journal of Coatings Technology and Research, 2018, 15(5): 923–931.

[14] Schutt J B. Alkali-metal silicate binders and methods of manufacture: US4162169[P]. 1979–07–24. Washington, D. C. : United States Patent and Trademark Office.

[15] Deyá C, Blustein G, del Amo B, et al. Evaluation of eco-friendly anticorrosive pigments for paints in service conditions[J]. Progress in Organic Coatings, 2010, 69(1): 1–6.

[16] Alizadegan F, Eivaz Mohammadloo H, Mirabedini S M, et al. Preparation of self-healing water-based epoxy coatings containing microcapsules, treated CeO_2 particles and 8HQs corrosion inhibitor, and study of their anti-corrosion proper-

- ties[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2024, 195: 108660.
- [17] Lan Y X, Chen Y H, Chao Y L, et al. Green and heavy-duty anticorrosion coatings: Waterborne epoxy thermoset composites modified through variation of zinc dust loading and incorporation of amine-capped aniline trimer and graphene oxide[J]. *Polymers*, 2024, 16(9): 1252.
- [18] Martí M, Fabregat G, Azambuja D S, et al. Evaluation of an environmentally friendly anticorrosive pigment for alkyd primer[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2012, 73(4): 321–329.
- [19] Emira H S, Shakour A A, Abd El Rehim S S, et al. Evaluation of corrosion protection of carbon steel by anticorrosive paints[J]. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 2012, 59(5): 255–262.
- [20] Hajar H M, Ismail N, Zulkifli F, et al. Non-destructive tests on eco-friendly anti-corrosion paint[J]. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 2017, 11(3): 2825–2833.
- [21] Alipour F, Gharieh A, Behzadnasab M, et al. Eco-friendly AMPS-doped polyaniline/urethane-methacrylate coating as a corrosion protection coating: Electrochemical, surface, theoretical, and thermodynamic studies[J]. *Langmuir*, 2023, 39(14): 5115–5128.
- [22] Kada I, Trinh D, Mallarino S, et al. Effect of the organic coating thickness on water uptake measurements by EIS[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2024, 197: 108823.
- [23] Wang T C, Zhao D Y, Xiang X Y, et al. Degradation behavior of an epoxy corrosion-resistant coating in NaCl solution[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2024, 44(5): 1361–1369.
- [24] Chen W T, Ma L W, Li Y R, et al. Prediction of coating degradation based on "Environmental Factors-Physical Property-Corrosion Failure" two-stage machine learning[J]. *npj Materials Degradation*, 2025, 9: 67.
- [25] Hao P, Dun Y C, Gong J Y, et al. Research progress on protective performance evaluation and lifetime prediction of organic coatings[J]. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 2024, 71(6): 799–808.
- [26] Yu W J, Wang T C, Zhao D Y, et al. Lifetime prediction model for barrier-type corrosion-resistant coating[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2024, 44(6): 1617–1624.
- [27] Chandler K A, Kilculen M B. A review with particular reference to atmospheric condition in the United Kingdom[J]. *British Corrosion Journal*, 1974, 5: 24.
- [28] 国家市场监督管理总局、中国国家标准化管理委员会. 金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性 第1部分: 分类、测定和评估: GB/T 19292.1—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [29] 王华生, 张华, 刘志刚, 等. 定压湿空气焓湿图用作通用湿空气焓湿图的计算方法[J]. *流体机械*, 1996, 24(11): 58–60.
- [30] 卢勇, 张敏. 焓湿图(i-d图)中各状态参数的关系[J]. *无锡商业职业技术学院学报*, 2006, 6(6): 13–14.
- [31] 曾芬. 焓湿图的解读与应用[J]. *广东科技*, 2012, 21(11): 238–238, 255.
- [32] 卢勇, 周丽萍. 焓湿图上九个状态参数的关系[J]. *中国西部科技*, 2010, 9(24): 32–33.
- [33] 吴泽江. 空气处理过程焓湿计算表[J]. *暖通空调*, 2011, 41(2): 48–50.
- [34] 严家驊, 赵玉珍, 尚德敏. 湿空气的比相对湿度和通用焓湿图[J]. *工程热物理学报*, 198 (4): 319–325.
- [35] 刘文琰, 李玉海. 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.
- [36] Rashvand M, Ranjbar Z. Effect of nano-ZnO particles on the corrosion resistance of polyurethane-based waterborne coatings immersed in sodium chloride solution via EIS technique[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2013, 76(10): 1413–1417.
- [37] Deflorian F, Rossi S, Fedel M. Organic coatings degradation: Comparison between natural and artificial weathering[J]. *Corrosion Science*, 2008, 50(8): 2360–2366.
- [38] Zhu F, Persson D, Thierry D. Formation of corrosion products on open and confined metal surfaces exposed to periodic wet/dry conditions: A comparison between zinc and electrogalvanized steel[J]. *Corrosion*, 2001, 57(7): 582–590.
- [39] Skerry B S, Simpson C H. Corrosion and weathering of paints for atmospheric corrosion control[J]. *Corrosion*, 1993, 49(8): 663–674.
- [40] 宫彦双, 谷坛, 安超, 等. 基于Pearson相关系数的集输管道流动腐蚀主控因素分析[J]. *石油与天然气化工*, 2021, 50(2): 93–99.

Multi-factor coupled accelerated aging tests and life prediction of EMU coatings in northern coastal industrial atmospheric environments

WANG Rui¹, ZHAO Min¹, GE Xiangyang¹, SUN Xiaoguang^{1*}, ZHAO Ziheng², YU Hao², SHU Yuxin², XIAO Kui^{2*}

1. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111, China

2. Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

Abstract Addressing the issues of premature aging and failure in water-based coatings on electric multiple units within the industrial atmospheric environments of northern coastal regions—specifically the limitations of traditional, single-factor accelerated testing in terms of evaluation accuracy and the lack of multi-factor coupled equivalent accelerated evaluation methods—this study utilizes the C4-grade (highly corrosive) polluted marine atmosphere of Qingdao as a representative scenario. Through environmental factor monitoring, key corrosive elements were identified; subsequently, based on the principles of total enthalpy equivalence and pollutant ion conversion, a coupled environmental spectrum accelerated test—integrating salt spray, humid heat, drying, and UV exposure—was designed. The study systematically evaluated coating properties such as thickness, gloss, color difference, adhesion, and electrochemical impedance. By integrating Pearson correlation analysis, a multi-indicator comprehensive index model for service life prediction was constructed to elucidate coating aging mechanisms and forecast service life. During the accelerated testing, the coatings exhibited distinct evolutionary trends characterized by a decline in gloss, a gradual degradation of adhesion, and a slow decrease in low-frequency impedance. The developed linear comprehensive index model demonstrated a relative prediction error of $\leq 10\%$, forecasting a service life of 10 to 13 years for the exterior air-drying coatings on EMUs operating in coastal regions. The equivalent accelerated evaluation methodology established in this study effectively balances both acceleration efficiency and correlation accuracy, thereby providing robust technical support for coating selection, process optimization, and full-lifecycle management of EMU coatings in coastal atmospheric environments.

Keywords coastal environments; EMU coatings; environmental profile; accelerated aging evaluation; service life prediction ●



(责任编辑 王微)