

海洋大气环境车辆腐蚀防护技术与试验验证

赵永涛¹, 张亚如², 王志浩¹

(1.中国人民解放军 92228 部队, 北京 100072; 2.上海仪耐新材料科技有限公司, 上海 201702)

摘要: **目的** 验证和对比在高温、高湿、高盐雾的南方海洋大气环境下的车辆腐蚀防护技术。**方法** 针对高温、高湿、高盐雾环境下的车辆腐蚀问题, 通过实验室模拟海洋大气环境开展典型腐蚀防护技术措施的试验验证工作, 进行试验数据检测和分析, 评价腐蚀防护技术的腐蚀防护效果。**结果** 石墨烯重防腐体系样板在盐雾、老化试验 3 000 h 后, 漆膜表面无脱落、起泡, 且盐雾、老化试验前后附着力均大于 8 MPa, 判定该防腐体系在高温、高湿、高盐、高温环境下的防腐年限为 15~25 a。改性聚氨酯三防漆涂层电路板样板在盐雾、腐蚀、冷热冲击、霉菌试验后, 表面均未产生白斑、锈迹等, 通过附着力对比证明其结合强度较好。通过对疏水涂层样板盐雾试验前后的附着力进行测试对比, 证明疏水涂层在高盐、高温、高湿环境下对光学镜片的结合强度较好, 盐雾、霉菌试验后, 涂层样板表面均未产生白斑、锈迹等。**结论** 通过模拟海洋大气环境, 对车身金属、电气设备和光学器件的腐蚀技术进行验证, 证明石墨烯重防腐体系适用于车身防腐, 改性聚氨酯三防漆适用于电气设备防腐, 疏水层适用于光学器件防护, 后续可为典型腐蚀防护技术在车辆上的应用提供技术支撑。

关键词: 海洋大气环境; 腐蚀防护; 车辆; 试验验证; 石墨烯; 改性聚氨酯; 疏水涂层

中图分类号: TG174.4

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2025)05-0111-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.05.015

Corrosion Protection Technology and Experimental Verification for Vehicles in Marine Atmospheric Environment

ZHAO Yongtao¹, ZHANG Yaru², WANG Zhihao¹

(1. The 92228th Unit of PLA, Beijing 100072, China; 2. Shanghai Yinai New Materials Technology Co., Ltd., Shanghai 201702, China)

ABSTRACT: The work aims to validate and compare vehicle corrosion protection technologies in high-temperature, high-humidity, and high-salt-spray environments typical of southern marine atmospheres. To address vehicle corrosion issues in high-temperature, high-humidity, and high-salt-spray environments, laboratory simulations of marine atmospheric conditions were conducted to test and validate typical corrosion protection measures. Experimental data were collected and analyzed to evaluate the effectiveness of corrosion protection technologies. The graphene-based heavy-duty anti-corrosion system showed no coating peeling or blistering after 3 000 hours of salt spray and aging tests. The adhesion strength before and after the tests remained above 8 MPa, indicating that this anti-corrosion system could provide protection for approximately 15-25 years in high-humidity, high-salt, and high-temperature environments. The modified polyurethane conformal coating on circuit board

收稿日期: 2025-02-23; 修订日期: 2025-03-31

Received: 2025-02-23; Revised: 2025-03-31

引文格式: 赵永涛, 张亚如, 王志浩. 海洋大气环境车辆腐蚀防护技术与试验验证[J]. 装备环境工程, 2025, 22(5): 111-118.

ZHAO Yongtao, ZHANG Yaru, WANG Zhihao. Corrosion Protection Technology and Experimental Verification for Vehicles in Marine Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(5): 111-118.

samples exhibited no white spots, rust, or other defects after salt spray, corrosion, thermal shock, and mold tests. The adhesion of hydrophobic coating samples before and after the salt spray test was tested and compared, indicating that the hydrophobic coating samples had strong adhesion to optical lenses before and after salt spray tests, and had good bonding strength in high-salt, high-temperature, and high-humidity environments. No white spots or rust were observed on the coating surface after salt spray and mold tests. By simulating marine atmospheric conditions, the corrosion protection technologies for vehicle body metals, electrical equipment, and optical devices were validated. It is proved that the graphene-based heavy-duty anti-corrosion system is suitable for vehicle body protection, the modified polyurethane conformal coating is effective for electrical equipment protection, and the hydrophobic coating is ideal for optical device protection. These findings provide technical support for the application of typical corrosion protection technologies in vehicles.

KEY WORDS: marine atmospheric environment; corrosion protection; vehicles; experimental verification; graphene; modified polyurethane; hydrophobic coating

腐蚀是降低车辆使用寿命的最重要的因素，锈穿、断裂、斑蚀、起泡、剥落和断裂等不仅使车辆的某些功能丧失，引起交通事故，还会使车辆的美观性受到不同程度的破坏，失去价值。车辆大多结构复杂，车体材料种类繁多，除了钢铁、合金外，还有众多的非金属材料，如橡胶、塑料等，还包括特殊的光学器件，在贮存和使用过程中存在不同程度的腐蚀和老化现象^[1-2]。南方海域常年处于高温高湿状态，年平均气温为 28~30℃，夏季地表温度高达 60℃；雨量充

沛，年降水量 2 800 mm 以上，全年平均相对湿度均在金属腐蚀临界湿度的 70% 以上；空气中的盐雾质量浓度在 0.3~1.5 mg/m³，是大陆沿海地区的 1.5 倍^[3]，南方典型海洋大气环境数据见表 1。南方海洋大气环境对车辆的危害严重，不仅会导致外观破坏、零部件尺寸减小、机械强度降低、原有功能丧失、使用寿命缩短，有些零部件甚至会出现裂纹或脆性断裂而造成严重事故，严重影响车辆设施的完好率和使用维护能力^[4-7]。

表 1 南方典型海洋大气环境数据

Tab.1 Data of typical marine atmospheric environments in the south

平均温度/℃	相对湿度/%	湿润时间/ (h·a ⁻¹)	降雨量/ (mm·a ⁻¹)	日照时间/ (h·a ⁻¹)	Cl ⁻ 沉积率/ (mg·100 ⁻¹ ·cm ⁻² ·d ⁻¹)	SO ₂ 沉积率/ (mg·100 ⁻¹ ·cm ⁻² ·d ⁻¹)
27.8	82	5 600	2 814	2 697	1.78	<0.001

本文结合南方大气环境车辆的腐蚀情况，选择新型先进腐蚀防护技术，针对车辆不同部位（如车身金属、电气设备、光学器件）的腐蚀提出对应的防护措施，通过模拟南方大气环境试验，验证腐蚀防护技术的可行性。文中涂层厚度、附着力试验及磨损试验条件均为恒温恒湿试验室环境。根据表 1 典型环境数据，为模拟南方海洋大气环境，设置试验条件：温度为(35±2)℃、湿度为(80±5)%。

1 车身金属

1.1 车身腐蚀现状

车辆暴露在潮湿的空气里，强紫外线照射，表面是最容易受到侵蚀的部位，尤其车门面板和框架在近地面区，受到路面沙石冲击和盐水飞溅的影响，腐蚀最为严重。车身车门面板是暴露在潮湿的海洋大气环境下，且地处热带，特别在车辆行驶过程中，底部要遭受砂石等对其的冲击磨损，因此对车身车门面板的防腐技术，既要能较好地防止海洋大气的腐蚀，也

要具有较好的耐磨性^[8-11]。此外，车身车门面板要遭受强紫外线的照射，防腐的涂层体系还要具有较强的耐紫外线的照射^[12]。基于此，车身金属防腐防护涂层要求有较好的附着力，整体有较好的耐潮湿海洋大气腐蚀的性能。

1.2 车身腐蚀防护技术选择

重防腐涂料是防腐涂料中最重要的组成部分，其中石墨烯重防腐涂层体系是近十几年发展起来的一种重防腐涂料，研究石墨烯对金属腐蚀的保护作用成为了涂料领域技术研发的一个重要方向。石墨烯防腐涂料是在现有环氧类防腐涂料基础上开发的。由于石墨烯本身是黑色，添加后会改变漆膜的颜色，一般是将石墨烯作为功能填料添加到底漆和中间漆中，利用石墨烯导电的特性，可以制备环氧石墨烯底漆。利用石墨烯层状阻隔性能，可以制备环氧石墨烯阻隔中间漆。与传统涂层相比，石墨烯材料的加入改变了腐蚀介质与金属表面的扩散路径，具有较好的耐蚀性能，涂层与基体间的结合强度较高，能满足在海洋潮湿大气环境下使用的要求^[13-14]。

1.3 石墨烯防腐体系腐蚀试验验证

盐雾试验和人工加速老化试验,是在实验室中快速评价漆膜防腐性能的一种方法。2种方法可以迅速对比评价涂层体系的防腐性能和耐老化性能,并对涂层的筛选具有重要参考意义^[15-16]。样板在盐雾试验环境(5%NaCl溶液,35℃,RH为100%)下1d,对应在大气腐蚀环境下30d,涂层实际服役时间是盐雾时间的30倍,盐雾可以30倍加速评价漆膜的防护寿命。老化试验和盐雾试验一样,也可以通过紫外光(波长为310nm)约30倍加速评价面漆的耐老化性能。根据JT/T 722—2008《公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》对桥梁钢结构防护年限、涂装寿命和涂层体系保护年限的判定规定,设计盐雾试验和人工老化试验时间为3000h。

以08A1钢作为车身金属试验的样本,样本数量为12个。通过加速模拟南方海洋大气环境,进行3000h的耐盐雾试验及老化试验,测试试验前后样板的附着力,以验证涂敷防腐技术措施后样板的老化腐蚀情况。

海洋大气环境中盐雾弥漫,车身金属部件由于盐雾在表面沉积雾化,易产生盐雾附着。分别对石墨烯重防腐涂层后的样板进行盐雾、老化试验3000h,以判定该涂层是否可适应海洋大气环境。经盐雾、老化试验3000h后,其漆膜均未发生脱落、起泡、开裂等现象,试验后样板如图1所示。

石墨烯重防腐体系涂敷厚度为301~349 μm (不同样板厚度因手工喷涂存在差异),通过拉拔测试,



a 盐雾试验3000h后



b 老化试验3000h后

图1 石墨烯重防腐体系盐雾老化试验后金属样板状态
Fig.1 Condition of metal sample coated with graphene-based heavy-duty anti-corrosion system after salt spray and aging tests: a) after 3000 hours of salt spray test; b) after 3000 hours of aging test

其附着力均在12MPa以上。为了保证样板涂层的完整性,盐雾老化试验前后样板附着力测试抽取不同的样板。盐雾试验后,附着力测试样板编号为1~4,老化试验后附着力测试样板编号为5~8,盐雾老化试验前附着力测试对照样板编号为9~12,具体试验数据如图2所示。将样板放入盐雾试验箱和老化试验箱中,每天查看样板状态并记录,测试3000h后样板的附着力均在8MPa以上,试验后涂层与样板的结合力仍然很好。

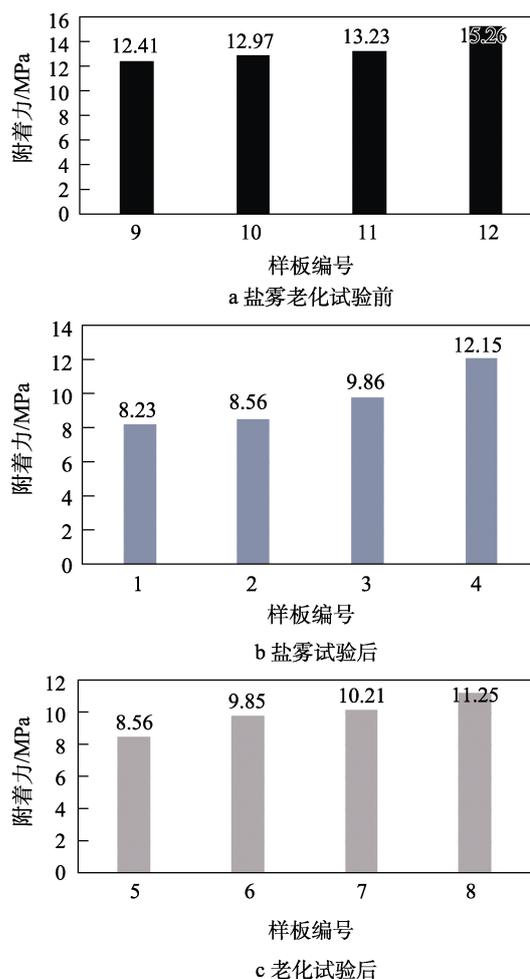


图2 石墨烯重防腐体系金属样板附着力

Fig.2 Adhesion strength of metal sample coated with graphene-based heavy-duty anti-corrosion system: a) before salt spray aging test; b) after salt spray test; c) after aging test

石墨烯重防腐体系样板盐雾、老化试验3000h后,漆膜表面无脱落、起泡,且盐雾、老化试验前后,附着力均大于8MPa,判定该防腐体系在高湿、高盐、高温环境下的防腐年限为15~25a。与传统重防腐相比,石墨烯重防腐体系降低了锌粉含量,石墨烯防腐底漆的致密性提高,可以抑制水和氯离子在涂层中的渗透速率^[17],盐雾、老化试验3000h后,漆膜表面无脱落、起泡,附着力强。根据行业经验模型时间等效性推算,若以C5-M环境年均腐蚀当量为基准(假

设自然环境中年等效盐雾暴露时间为 100~200 h), 则试验 3 000 h 可对应达到 15~30 a 的防腐年限。

2 电气设备

2.1 电气设备腐蚀现状

电气系统大部分处在车体内部, 它们的腐蚀有如下特点: 一是整体防腐蚀措施应用较少, 如车体内外电缆电路均无防渗漏保护; 二是维护保养不方便, 由于盐雾的弥漫, 电气部分零部件的各个表面均会附着一层水膜, 保养中不允许用淡水直接冲洗电气部分, 只能用布擦拭, 因而电气部分的腐蚀也比较严重; 三是腐蚀发生不易被发现, 但往往腐蚀破坏性很大, 因为这一部分的很多电路板都在盒子内, 平时保养难以发现, 一旦被腐蚀, 会造成系统瘫痪^[18-19]。基于此, 电气设备防腐保护层要具有很好的绝缘性能, 在线路板上能附着牢固, 能抗霉变等性能, 从而提高线路板的可靠性, 增加其安全系数, 并长期保证其使用寿命^[20-21]。

2.2 电气设备腐蚀防护技术选择

盐雾环境中, 电气设备的电路板表面覆盖 $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ 层状腐蚀产物, Cl^- 与 Cu 发生电偶腐蚀 ($\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^-$), 阳极溶解产生的金属离子在湿度作用下迁移形成枝晶, 叠加电解质液膜, 导致漏电流和短路。

电子线路的防腐蚀技术最常用的就是三防漆涂料, 其中改性聚氨酯三防漆不含芳香族溶剂 (甲苯、二甲苯等), 气味小, 漆膜光亮, 附着力好, 耐磨、耐化学性能优异, 可耐高低温、湿热、盐雾。改性聚氨酯三防漆通过氨基甲酸酯链段的高交联密度, 形成致密且连续的防护膜 (厚度通常为 25~75 μm), 显著降低孔隙率 (孔径 $< 0.1 \mu\text{m}$), 阻隔水分子、氧气、 Cl^- 等腐蚀介质的渗透。通过添加纳米填料 (如 SiO_2), 进一步延长腐蚀介质的扩散路径, 降低渗透速率。涂层通过化学惰性, 阻断金属表面氧化反应 (如 $\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^-$), 减少导电性腐蚀产物 (如 $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$) 的生成, 降低短路风险。改性聚氨酯涂层通过疏水性和抗菌添加剂抑制霉菌在潮湿环境中的生长, 保护电路板免受生物腐蚀。其防潮性优于有机硅三防漆, 柔韧性优于丙烯酸类和环氧类, 涂覆设备要求低于聚对二甲苯类。改性聚氨酯三防漆一次涂覆干膜厚度可实现 80~250 μm , 可完全取代二次涂覆, 针对高防腐领域具有良好的防护作用^[22-24]。

2.3 改性聚氨酯三防漆腐蚀试验验证

针对电气设备在高湿、高盐大气环境下工作的特点, 使用改性聚氨酯三防漆在电气设备表面形成一层

干性的薄膜, 保护电气设备不受湿气和腐蚀性介质的影响, 验证经过涂层处理防护的电气设备是否能达到在高温、高盐、高湿海洋环境下使用的性能要求。据此要求涂层在电气设备表面具有很好的附着强度和绝缘性, 耐候性模拟设置盐雾、低温到高温环境和霉菌试验测试。

针对电气设备, 选择 PCB 印刷电路板为试验件, 数量为 13 件 (其中空白样件 1 个, 试验件 12 个)。涂敷改性聚氨酯三防漆进行耐盐雾、耐冷热冲击和耐霉菌试验, 对比盐雾试验前后样板的附着力, 以验证其防腐效果。

2.3.1 冷热冲击试验

冷热冲击试验旨在验证涂层在高低温环境中涂层是否出现白斑、起泡、针孔、裂缝、细裂纹、起皱、脱落、分离等表现现象。试验条件为 25~70 $^{\circ}\text{C}$, 进行 100 次温度循环试验后, 涂层未出现白斑、起泡、针孔、裂缝、细裂纹、起皱、脱落、分离等表现现象, 如图 3 所示。

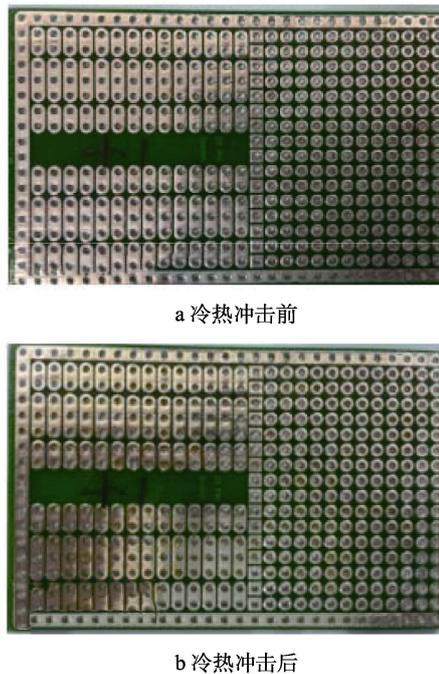


图 3 电路板冷热冲击试验前后对比
Fig.3 Comparison of circuit board before and after thermal shock test: a) before thermal shock; b) after thermal shock

2.3.2 盐雾试验

为了验证涂敷防腐技术后电气设备在海洋大气环境中的耐盐雾性能, 模拟海洋大气环境, 循环 2 个周期, 并做空白试样进行对比。样品放置盐雾箱 96 h 后, 改性聚氨酯三防漆涂敷样板表面漆膜表面未出现起泡、脱落、分离等现象 (如图 4 所示), 空白样板表面出现了白斑堆积情况 (如图 5 所示)。

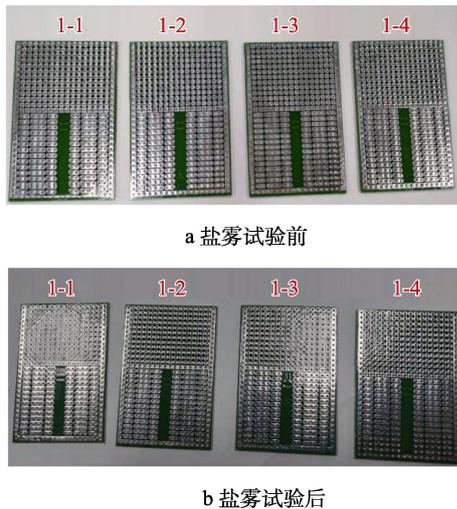


图 4 电路板盐雾试验前后对比

Fig.4 Comparison of circuit board before and after salt spray test: a) before salt spray test; b) after salt spray test

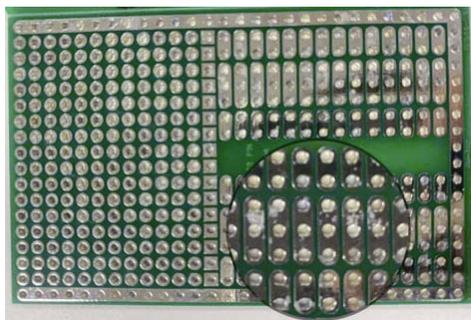


图 5 电路板空白样盐雾试验后

Fig.5 Blank circuit board sample after salt spray test

2.3.3 霉菌试验

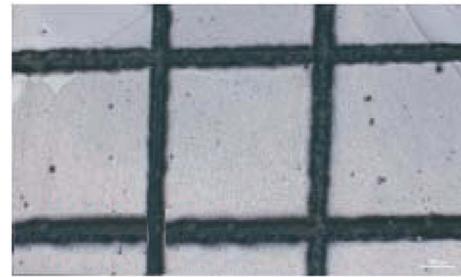
在潮湿环境下, 电气设备容易滋生大量霉菌, 对改性聚氨酯三防漆样板进行霉菌试验。根据 GJB 150.10A—2009《军用装备实验室环境试验方法—霉菌试验》, 在室温下目视检查, 样板表面均无霉菌生长, 长霉等级为 0 级。

2.3.4 盐雾前后附着力对比试验

样板改性聚氨酯涂层厚 $95.8 \mu\text{m}$, 为了保证样板涂层的完整性, 盐雾试验前后样板附着力测试抽取不同的样板。使用百格刀对样板表面进行十字交叉划格, 测试盐雾试验前的附着力为 0 级, 盐雾试验 2 个周期后, 进行划格测试其附着力, 仍为 0 级, 如图 6 所示。

2.3.5 试验结论

改性聚氨酯三防漆涂层电路板样板在盐雾、腐蚀、冷热冲击、霉菌试验后, 样板表面均未产生白斑、锈迹等。盐雾、腐蚀试验前后的附着力测试对比说明, 在高盐、高温、高湿环境下, 对电路板的结合强度较好, 可作为高盐、高温、高湿环境下电气设备的防腐技术。



a 盐雾试验前



b 盐雾试验后

图 6 电路板盐雾试验前后附着力对比

Fig.6 Comparison of adhesion strength of circuit board before and after the salt spray test: a) before salt spray test; b) after salt spray test

3 光学器件

3.1 光学器件腐蚀现状

光学设备主要有望远镜、瞄准设备、红外热成像仪、光学遥感等, 这类设备具有很高的光学性能, 因此镜片表面一般都涂有高分子材料膜, 以提高透光率、降低色散等。在潮湿环境下, 高分子材料膜容易滋生大量霉菌, 导致光学设备性能降低, 甚至失效。

3.2 光学器件腐蚀防护技术选择

通过对国内外防腐蚀技术的分析, 针对光学设备霉变问题, 研究霉变的原因及霉菌生存条件, 筛选并研究相应的霉菌抑制剂进行保护, 如疏水涂层, 可以有效阻止霉菌在望远镜、红外装置等镜片上滋生。

采用 PDMS 和 TiO_2 微米/纳米结构的协同效应制备的机械和化学稳定性优异的疏水涂层, 其表面具有高透明度和优异的疏水性。其在拥有自清洁能力的同时, 还呈现出良好的显示效果, 被广泛地应用于挡风玻璃、太阳能电池板和交通指示器等领域^[25]。

3.3 疏水涂层腐蚀试验验证

针对光学器件在高盐高湿环境下使用的性能要求, 疏水涂层防护在保证防腐、防尘、防霉等防护性能的同时, 需要尽量减少其对可见度的影响, 并要保证涂层在光学镜片表面具有很好的附着强度。因此, 耐候性模拟设置盐雾和霉菌试验测试, 对比盐雾试验前后样板附着力, 以验证其防腐效果。

针对光学器件，试验件采用高清光学镀膜镜片（高倍防水镜片，厚度为 5 mm，直径为 5 cm），涂敷疏水涂层进行盐雾、霉菌试验，对比盐雾试验前后样板的附着力，以验证其防腐效果。

3.3.1 表面张力

为了验证 PDMS 和 TiO₂ 微米/纳米结构的协同效应疏水涂层的稳定性，测试其在不同介质下的接触角（如图 7 所示），并计算表面张力，结果见表 2。



图 7 表面张力测试
Fig.7 Surface tension test

表 2 疏水涂层表面张力
Tab.2 Surface tension of hydrophobic coatings

样板名称	接触角/(°)			表面张力/ (mN·m ⁻¹)
	水	甘油	乙二醇	
光学-疏水涂层	88.4	75.2	58.7	31.3

3.3.2 盐雾试验

为了验证涂敷防腐技术后的光学器件在海洋大气环境中的耐盐雾性能，模拟海洋大气环境，循环 2 个周期，并做空白试样对比。样品放置盐雾箱 96 h 后，样板表面漆膜表面未出现起泡、脱落、分离等现象，如图 8 所示。

3.3.3 霉菌试验

在潮湿环境下，高分子材料膜容易滋生大量霉菌，这是导致光学设备性能降低甚至失效的主要原因。对疏水涂层样板进行霉菌试验，以验证疏水涂层和超疏水涂层可避免霉菌滋生。根据 GJB 150.10A—

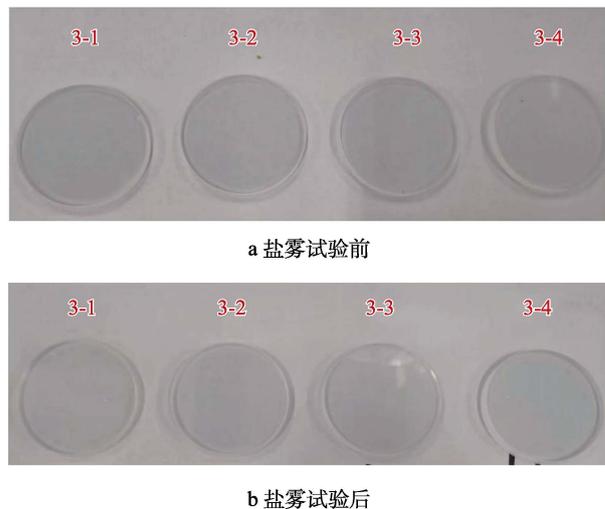


图 8 光学镜片盐雾试验前后对比

Fig.8 Comparison of optical lens before and after the salt spray test: a) before salt spray test; b) after salt spray test

2009《军用装备实验室环境试验方法—霉菌试验》，在室温下目视检查，样板表面均无霉菌生长，长霉等级为 0 级，如图 9 所示。

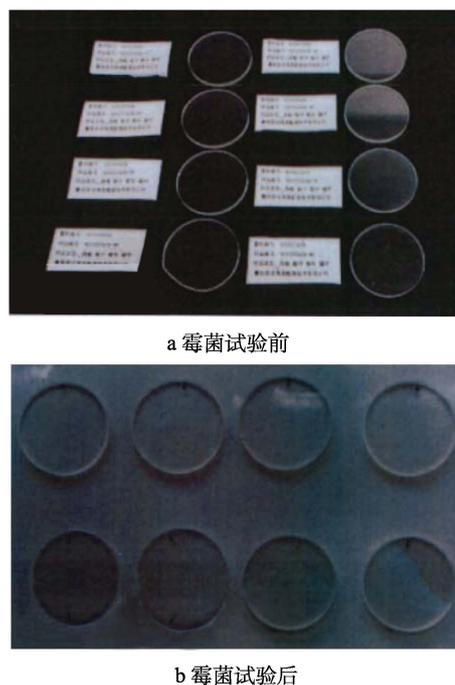


图 9 光学镜片霉菌试验前后对比

Fig.9 Comparison of optical lens before and after the mold test: a) before mold test; b) after mold test

3.3.4 盐雾前后附着力对比试验

样板疏水涂层厚 2.96 μm，为了保证样板涂层的完整性，盐雾试验前后抽取不同的样板，进行附着力测试。使用百格刀对样板表面呈十字交叉划格，测试盐雾试验前的附着力为 0 级，盐雾试验 2 个周期后，进行划格测其附着力，仍为 0 级，如图 10 所示。

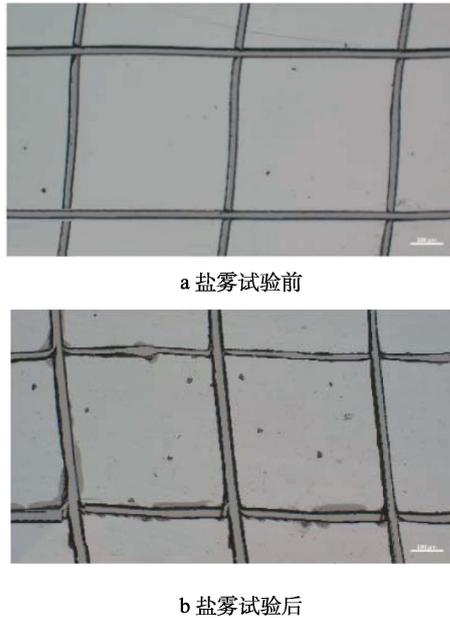


图10 光学镜片盐雾试验前后附着力对比
Fig.10 Comparison of adhesion strength of optical lens before and after the salt spray test: a) before salt spray test; b) after salt spray test

3.3.5 试验结论

通过疏水涂层样板盐雾试验前后的附着力对比测试结果可知,说明疏水涂层在高盐、高温、高湿环境下,对光学镜片的结合强度较好。盐雾、霉菌试验后,涂层样板表面均未产生白斑、锈迹等,可作为高盐、高温、高湿环境下光学镜片的防腐技术。

4 结论

文中针对车辆车身、电气设备和光学器件的腐蚀现状进行了分析,通过模拟海洋大气环境,对不同部位的腐蚀技术进行验证,得出以下结论。

1) 对盐雾、老化试验 3 000 h 后的车身金属样板进行分析,漆膜表面无脱落、起泡等现象,且加速老化后涂层和样板的结合力强,说明石墨烯重防腐体系适用于高湿、高盐、高温环境下的车身金属防腐涂层,防腐年限为 15~25 a。

2) 对涂敷改性聚氨酯三防漆的电路板进行耐候性试验(冷热冲击、盐雾、霉菌试验)后,样板表面无霉菌、白点,涂层无脱落,结合力强,改性聚氨酯三防漆可适用于海洋大气环境下的电气设备腐蚀防护。

3) 疏水涂层表面张力小,稳定性强,盐雾、霉菌试验后,样板表面无霉菌、白点,涂层无脱落,可适用于海洋大气环境下光学器件的腐蚀防护。

参考文献:

[1] 宁小岳,张伟宏,吕玲芳,等. 浅谈整车防腐[J]. 现

代涂料与涂装, 2012, 15(9): 64-66.

NING X Y, ZHANG W H, LYU L F, et al. A Brief Talk on Whole Vehicle Anticorrosion[J]. Modern Paint & Finishing, 2012, 15(9): 64-66.

[2] 韩恩厚,陈建敏,宿彦京,等. 海洋工程材料和结构的腐蚀与防护[M]. 北京: 化学工业出版社, 2017.

HAN E H, CHEN J M, SU Y J. Corrosion and Protection for Marine, Offshore and Coastal Structures[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2017.

[3] 曾辉,李雄峰,屈洪刚. 南海方向海洋气候对防空武器系统性能的影响研究[J]. 地面防空武器, 2013, 44(2): 62-64.

LI L, SHUAI M R, LI H B, et al. Constitutive Model and Hot Working Parameters Optimization of 2209 Duplex Stainless Steel[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(8): 48-54.

[4] 向永华,王争荣,曹京宜,等. 岛礁装备设施腐蚀现状及腐蚀控制策略研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(11): 28-34.

XIANG Y H, WANG Z R, CAO J Y, et al. Study on Corrosion Status and Corrosion Control Strategy for Equipment and Facilities Serving on Islands and Reefs[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(11): 28-34.

[5] 黄云,胡其高,张硕云. 南海海洋环境对岛礁工程结构与设施影响研究[J]. 国防科技, 2018, 39(3): 50-63.

HUANG Y, HU Q G, ZHANG S Y. Research on the Marine Environmental Impact on Reef Structures Maintenance[J]. Defense Technology Review, 2018, 39(3): 50-63.

[6] 张春和,张大鹏,蔡志强. 沿海地区汽车腐蚀的原因与防护方法探析[J]. 腐蚀与防护, 2003, 24(12): 542-544.

ZHANG C H, ZHANG D P, CAI Z Q. An Analysis of the Cause of Corrosion of Vehicles and Its Protection Method in Wet Region along the Coast[J]. Corrosion & Protection, 2003, 24(12): 542-544.

[7] 彭文山,侯健,郭为民,等. 西沙海洋大气环境中典型材料腐蚀形貌识别[J]. 装备环境工程, 2019, 16(7): 1-7.

PENG W S, HOU J, GUO W M, et al. Corrosion Morphology Identification of Typical Materials in Xisha Marine Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(7): 1-7.

[8] 郭强. 热带岛礁大气环境车辆装备腐蚀规律与防护设计及控制措施[J]. 装备环境工程, 2023, 20(11): 121-132.

GUO Q. Corrosion Rule, Prevention Design and Control Countermeasures of Vehicle Equipment in Tropical Island-Reef Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(11): 121-132.

[9] 冯昌川,丰刚磊,宋庆源. 某汽车车身耐腐蚀性试验[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(4): 366-368.

FENG C C, FENG G L, SONG Q Y. Corrosion Resis-

- tance Experiment of a Vehicle Body[J]. Corrosion & Protection, 2015, 36(4): 366-368.
- [10] 李冬梅, 王鹏. 汽车不同区域强化腐蚀试验研究[J]. 汽车工艺与材料, 2015(8): 51-53.
LI D M, WANG P. Experimental Study on Enhanced Corrosion in Different Areas of Automobile[J]. Automobile Technology & Material, 2015(8): 51-53.
- [11] 李海洪, 赵永韬, 王洪仁, 等. 海洋环境中渗锌层和锌铬涂层的耐蚀性研究[J]. 装备环境工程, 2006, 3(2): 14-16.
LI H H, ZHAO Y T, WANG H R, et al. Study on Corrosion Resistance of Sherardizing and Zinc-Chromium Coating in Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(2): 14-16.
- [12] 徐安桃, 李锡栋, 周慧. 岛屿环境下车辆金属材料的腐蚀及防护对策研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(7): 66-69.
XU A T, LI X D, ZHOU H. Corrosion and Protection of Vehicle Metals in Island Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(7): 66-69.
- [13] 吴俊雄, 文凤. 石墨烯涂料在岛礁环境车辆上的应用研究[J]. 中国涂料, 2019, 34(12): 38-44.
WU J X, WEN F. Research on the Application of Graphene Coatings on Vehicles in Island-Reef Environment[J]. China Coatings, 2019, 34(12): 38-44.
- [14] 顾林, 丁纪恒, 余海斌. 石墨烯用于金属腐蚀防护的研究[J]. 化学进展, 2016, 28(5): 737-743.
GU L, DING J H, YU H B. Research in Graphene-Based Anticorrosion Coatings[J]. Progress in Chemistry, 2016, 28(5): 737-743.
- [15] 赵朋飞, 苏晓庆, 吴俊升. 典型岛礁大气环境室内加速腐蚀试验谱研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(12): 14-21.
ZHAO P F, SU X Q, WU J S. Accelerated Corrosion Test Spectrum of Typical Reef Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(12): 14-21.
- [16] 杨宏波, 刘朝辉, 丁逸栋, 等. 金属表面耐高温防腐涂料的研究进展[J]. 表面技术, 2017, 46(3): 216-222.
YANG H B, LIU Z H, DING Y D, et al. Research Progress of High Temperature Resistant Anticorrosive Coatings on Metal Surface[J]. Surface Technology, 2017, 46(3): 216-222.
- [17] 王玉琼, 刘栓, 刘兆平, 等. 石墨烯掺杂水性环氧树脂的隔水和防护性能[J]. 电镀与涂饰, 2015, 34(6): 314-319.
WANG Y Q, LIU S, LIU Z P, et al. Water Isolation and Protective Performance of Waterborne Graphene-Doped Epoxy Coating[J]. Electroplating & Finishing, 2015, 34(6): 314-319.
- [18] 张友兰, 李树华. 海洋环境条件对机载电子设备的影响[C]// 1998 电子产品防护技术研讨会论文集. 庐山: 中国电子学会, 1998.
ZHANG Y L, LI S H. Effects of Marine Environmental Conditions on Airborne Electronics[C]// CLE Electronic Product Protection Technology 1998 Symposium Proceedings. Lushan: CLE, 1998.
- [19] 穆山, 李军念, 王玲. 海洋大气环境电子设备腐蚀控制技术[J]. 装备环境工程, 2012, 9(4): 59-63.
MU S, LI J N, WANG L. Corrosion Control Technology of Electronic Facility in Marine Atmosphere[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(4): 59-63.
- [20] 程玉峰, 杜元龙. 电子设备的大气腐蚀[J]. 材料保护, 1995, 28(12): 16-19.
CHENG Y F, DU Y L. Atmospheric Corrosion of Electronic Equipment[J]. Materials Protection, 1995, 28(12): 16-19.
- [21] 王玲, 赵全成, 杨万均. 海洋大气环境对铝合金电连接器壳体腐蚀及电气性能影响[J]. 装备环境工程, 2019, 16(5): 85-89.
WANG L, ZHAO Q C, YANG W J. Effects of Marine Atmospheric Environment on Corrosion and Electrical Performance of Aluminum Alloy Electrical Connector Shell[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(5): 85-89.
- [22] 郁大照, 张代国, 王琳, 等. 南海海洋环境下机载电子设备的腐蚀及外场防护对策[J]. 装备环境工程, 2019, 16(7): 8-12.
YU D Z, ZHANG D G, WANG L, et al. Corrosion of Airborne Electronic Equipment and Field Protection Measures in Marine Environment of South China Sea[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(7): 8-12.
- [23] 李亚起, 魏柳荷, 刘兴江, 等. 一种硅烷改性聚氨酯三防漆的研制与性能研究[J]. 聚氨酯工业, 2020, 35(3): 20-23.
LI Y Q, WEI L H, LIU X J, et al. Preparation and Properties of a Silylated Polyurethane Conformal Coating[J]. Polyurethane Industry, 2020, 35(3): 20-23.
- [24] 李远耀, 刘安军, 任天斌. 环保型聚氨酯三防漆的制备与性能研究[J]. 粘接, 2014, 41(5): 58-61.
LI Y Y, LIU A J, REN T B. On Synthesis and Properties of Environmental-Friendly PU Conformal Coating[J]. Adhesion, 2014, 41(5): 58-61.
- [25] 王政华, 张玲, 李春忠. 聚硅氧烷/纳米二氧化钛超疏水光催化复合涂层的制备和性能[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2024, 50(6): 823-831.
WANG Z H, ZHANG L, LI C Z. Preparation and Properties of Polysiloxane/Nano Titanium Dioxide Composite Coatings with Superwettability and Photocatalytic Activity[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2024, 50(6): 823-831.