雷达吸波涂层海洋大气环境适用性试验研究

宿兴涛, 孙敬哲, 朱晓蕾

(北京应用气象研究所,北京 100029)

摘要:目的分析一种雷达吸波隐身涂层在海洋大气自然环境下性能的变化规律。方法 对 12 个月不同阶段涂层的常规物理性能和电性能进行检测,其中常规物理性能包括宏观形貌、金相形貌、微观性能、附着力、抗冲击强度和红外光谱。结果 从宏观形貌看,涂层明度和色差值呈上升趋势,12 个月明度增加 1.22,色差值增加 2.91,颜色向绿色和蓝色发展,失光率先增大、后减小,最大失光率为 9 个月时的 34%。涂层附着力和试验时间呈现非线性关系,6 个月时,附着力降低了 18%,12 个月时增大了 24%。涂层在 2~18 GHz的频率范围内,吸波曲线大体呈"U"形,最低反射率随时间向低频方向偏移。涂层金相形貌、微观性能、抗冲击强度和红外光谱特征总体变化不明显。结论 在 1 a 内,自然海洋大气环境对雷达吸波隐身涂层常规物理性能和电性能产生了一定影响,但在试验时间相对较短情况下,海洋大气环境对涂层老化的影响作用尚未充分显示,需要结合更长周期的试验数据进一步分析。

关键词: 隐身涂层; 雷达吸波; 制备; 物理性能; 电性能; 海洋大气环境

中图分类号: TJ05; TJ06 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2023)02-0017-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.02.003

Experimental Study on Applicability of Radar Absorbing Coating to Marine Atmospheric Environment

SU Xing-tao, SUN Jing-zhe, ZHU Xiao-lei

(Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the change rule of radar absorbing stealth coating in marine atmospheric environment. The conventional physical properties and electrical properties of the coating at different stages within 12 months were examined, including macroscopic morphology, metallographic morphology, microscopic properties, adhesion, impact strength and infrared spectrum. In terms of macroscopic morphology, the brightness and chromatic aberration of the coating increased. The brightness increased by 1.22 and the chromatic aberration increased by 2.91 within 12 months and the color turned green and blue. The loss of light firstly increased and then decreased, with the maximum value of 34% in the 9th month. The adhesion of the coating was nonlinear with the test time, and decreased by 18% in the 6th month and increased by 24% in the 12th month. The radar wave absorption curve was approximately in the shape of "U" within the frequency of 2-18 GHz, and the lowest reflectivity shifted to the low frequency direction with time. The overall change of metallographic morphology, microscopic properties, impact

收稿日期: 2022-04-29; 修订日期: 2022-07-01

Received: 2022-04-29; **Revised:** 2022-07-01

基金项目: 国防科技基础加强计划 (2021-JCJQ-JJ-1058)

Fund: National Defense Science and Technology Foundation Strentthening Program (2021-JCJQ-JJ-1058)

作者简介:宿兴涛(1984—),男,博士,高级工程师,主要研究方向为大气环境仿真。

Biography: SU Xing-tao (1984-), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: atmospheric environment simulation.

引文格式:宿兴涛,孙敬哲,朱晓蕾.雷达吸波涂层海洋大气环境适用性试验研究[J].装备环境工程,2023,20(2):017-025.

SU Xing-tao, SUN Jing-zhe, ZHU Xiao-lei. Experimental Study on Applicability of Radar Absorbing Coating to Marine Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(2): 017-025.

strength and infrared spectrum characteristics of the coating was not clear. Within 1 a, the natural marine atmospheric environment has a certain effect on the conventional physical and electrical properties of radar absorbing stealth coating. However, under the condition of relatively short test time, the effect of marine atmospheric environment on coating aging has not been fully demonstrated, which needs to be further analyzed in combination with longer-term test data.

KEY WORDS: stealth coating; radar absorbing; preparation; physical properties; electrical properties; marine atmospheric environment

隐身技术能够显著提高国防体系中军事目标的 生存能力、武器系统的突防和纵深打击能力,各国均 十分重视此项技术。在目前看来,隐身涂层、结构隐 身材料和外形技术是实现隐身的3项主要技术措施[1]。 其中, 隐身涂层具有高性能、易施工、低成本、不受 目标外形限制等特点,是目前应用最广、发展最好、 最为有效的隐身技术手段[2],是隐身技术中的重要支 撑。随着隐身技术以及民用物联网电磁干扰/屏蔽[3]、 红外能量辐射控制[4]等技术的发展, 隐身涂层材料的 重要性日益受到社会关注,国内外普遍重视对隐身材 料的研发和应用。目前已服役战机如美国F-22和F-35 战机、俄罗斯苏-57战机及我国 J-20战机,均在机体 表面涂覆有大量隐身涂层[5],俄罗斯地面装备如"阿 玛塔"主战坦克、T-72主战坦克、BMP-2和BMP-1KSh 步兵战车等也已开展大量涂装试验。随着探测技术的 迅速发展,单一频段的隐身已经不能够满足需求,隐 身涂层正向雷达波、红外线、可见光等多频谱隐身 方向发展[2,5]。根据涉及的频谱,包括微波、红外、 光、声等,相对应隐身涂层材料也分为雷达隐身涂 层材料、红外隐身涂层材料、可见光及声隐身涂层 材料等[2,6]。

随着装备使用服役,隐身材料等基础产品的环境 效应特性对装备的环境适应性和性能的发挥具有重 要影响,严重制约装备的作战能力[7-15]。包括美俄在 内的军事强国高度重视隐身涂层环境效应研究,认为 该项技术对隐身武器装备的作战效能,装备战斗力的 形成、维持与提高,甚至战争的胜负具有至关重要的 影响[4]。作为武器装备的重要质量特性之一, 隐身涂 层的环境适应性研究尤为重要[1]。目前,我国装备基 础产品的环境效应数据积累不足,特别是新型材料 (如隐身涂层材料)的环境效应数据严重匮乏。由于 未开展系统的环境试验考核与验证,这些新型材料在 预期服役环境中的劣化特征、规律等未能掌握, 难以 预判其在服役环境中的环境适应性,导致装备研制设 计面临环境效应数据支撑不足,严重制约了新型隐身 材料在装备中的应用。因此, 迫切需要开展新型隐身 材料的环境试验研究,掌握其环境效应数据,推动新 型隐身材料在装备中的应用,满足装备隐身性能发展 需求。本文针对我国东南沿海地区装备运用,制备一 种雷达吸波隐身涂层,研究海洋大气环境对隐身涂层 性能的影响,为装备部署运用提供数据和技术支撑。

1 样品制备

关于隐身涂层的制备已经开展了较多研究[16-20], 本文制作的雷达吸波涂层样品,选用碳纤维增强环氧 树脂基复合材料作为样品基材。将雷达吸收剂、环氧 树脂、偶联剂、固化剂等按相应比例或含量混合,搅 拌分散制成雷达吸波涂料。按照雷达吸波涂层的涂装 施工要求,在碳纤维增强环氧树脂基复合材料上涂覆 雷达吸波涂料,制备不少于20件满足性能指标要求 的雷达吸波涂层试验样品, 其尺寸规格为 300 mm× 300 mm。样品 P 的主要成分为片状铝粉、环氧树脂、 偶联剂、固化剂、有机黑色颜料, 样品 M 的主要成 分为片状铝粉、有机硅树脂、偶联剂、分散剂、流平 剂、无机粘结剂、无机黑色颜料。涂层样品四周边缘 采用硅橡胶进行封边。制备完成后,对雷达吸波涂层 样品进行合格检测。其中,常规物理性能包括外观、 光泽、色差、附着力、抗冲击强度、厚度和微观性能, 电性能包括红外反射率和雷达反射率。涂层厚度为 (0.5±0.1) mm, 频率范围为 8~18 GHz, 反射率小于 -5 dB, 附着力≥5 MPa。检查结果符合相关参考标 准,同时相关材料符合当前市场主流,具有较好的 代表性。

2 自然环境试验设计

海洋大气环境具有平均气温高、降水多、湿度大、 润湿时间长、日照时数高、太阳辐射强、盐雾浓度高 等特点,对装备表面隐身涂层腐蚀能力强[21-26]。选择 海南万宁试验站作为自然环境试验地点,该站属于典 型热带海洋大气环境,具有较好的代表性。参照 GJB 8893.1-2017《军用装备自然环境试验方法第1部分: 通用要求》和 GJB 8893.2-2017《军用装备自然环境 试验方法第2部分:户外暴露》,开展雷达涂层样品 的大气自然环境暴露试验,户外暴露试验面向赤道, 与水平面呈现 45°角。同时, 开展雷达涂层样品 0°和 45°不同暴露角度的考核对比试验,研究不同暴露角 度对涂层体系性能/功能的劣化特征及规律。样品试 验信息见表 1, 试验现场如图 1 所示。鉴于自然环境 试验时间还在开展过程中,本文选取已采集的第一年 海洋大气环境效应数据进行分析,研究对象为雷达吸 波涂层,重点分析其常规物理性能变化。

表 1 样品试验信息 Tab.1 Sample test information

| 涂层类型 | 样品 编号 | 试验 方式 | 暴露 角度 | 检测周期/ 月 |
|--------|----------|------------|-----------|------------------|
| 雷达吸波涂层 | L | 滨海户外 暴露 | 0° 45° | 6、12 3、6、9、12 |



a 45°暴露试验



b 0°暴露试验

图 1 试验现场

Fig.1 Test site: a) 45° exposure test; b) 0° exposure test

3 雷达吸波涂层性能变化

根据雷达吸波涂层主要功能作用、涂层样品常规 性能参数等,确定涂层性能检测项目及方法,见表 2。

表 2 检测项目与仪器 Tab.2 Test indicators and instruments

| 检测项目 | 检测仪器 |
|-------|--------------------------|
| 外观 | 目测或 10×放大镜 |
| 厚度 | Observer.A1m 金相显微镜 |
| 颜色 | BYK 色差仪 |
| 光泽 | BYK 光泽计 |
| 附着力 | PosiTest AT-A 拉开法附着力试验仪、 |
| 附有刀 | F107 漆膜划格器 |
| 红外光谱 | IS50 傅里叶红外光谱仪 |
| 微观性能 | JEOL JSM-7800F 场发射扫描电镜 |
| 抗冲击强度 | QI79-3KL 形漆膜冲击器 |
| 红外发射率 | Bruker Tensor27 傅里叶红外光谱仪 |
| 雷达反射率 | R&S ZNB20 矢量网络分析仪 |

3.1 宏观形貌

涂层户外 45°暴露 12 个月后, 宏观形貌变化不

大,表层防护面漆未发生开裂、起泡等现象,表观状态良好。光泽和色差检测结果分别见表 3。可以看出,随着试验时间延长,雷达涂层样品相对明度(ΔL^*)呈上升趋势,明度(L^*)有所提高,试验 12 个月, ΔL^* 为 1.22。明度是表示涂层对可见光反射能力大小的亮度,明度提高表示涂层对可见光反射能力大小的亮度,明度提高表示涂层对可见光的反射能力增大。相对红绿对比度(Δa^*)和相对黄蓝对比度(Δb^*)随着试验时间呈下降趋势,涂层样品颜色分别向绿色和蓝色发展。色差值(ΔE^*)随着试验时间呈上升趋势,由 3 个月的 0.96 升至 12 个月的 2.91。雷达吸波涂层的失光率随着试验时间延长先增大、后减小,检测到的最大失光率为自然环境试验 9 个月时的 34.0%,但光泽仅降低 3.2。

表 3 涂层样品户外暴露结果(45°)

Tab.3 Outdoor exposure result of coating samples (45°)

| 试验时 | | | 色 | 差 | | | | | 失光 |
|-----|-------|--------------|-------|--------------|-------|--------------|--------------|-----|-------|
| 间/月 | L^* | ΔL^* | a^* | Δa^* | b^* | Δb^* | ΔE^* | 光泽 | 率/% |
| 0 | 29.67 | 0.00 | -4.39 | 0.00 | 7.99 | 0.00 | 0 | 9.4 | 0 |
| 3 | 29.48 | -0.19 | -4.79 | -0.40 | 7.14 | -0.85 | 0.96 | 9.8 | - 4.3 |
| 6 | 30.22 | 0.55 | -4.83 | -0.44 | 6.44 | -1.55 | 1.71 | 8.1 | 13.8 |
| 9 | 30.63 | 0.96 | -5.42 | -1.03 | 5.88 | -2.11 | 2.54 | 6.2 | 34.0 |
| 12 | 30.89 | 1.22 | -5.95 | -1.56 | 5.86 | -2.13 | 2.91 | 8 | 14.9 |

通过目视和放大镜对涂层外观进行检测,依据GB/T1766—2008《色漆和清漆涂层老化的评级方法》对检测结果进行综合评级,结果见表4。可以看出,雷达吸波涂层自然环境试验9个月时,失光率最高,失光率为3级(明显失光),12个月后变色率为1级,即发生很轻微变色。综合所有单项等级评定,L涂层自然环境试验12个月后,综合等级为0级。

表 4 涂层样品户外暴露外观评级(45°)

Tab.4 Outdoor exposure appearance rating of coating samples (45°)

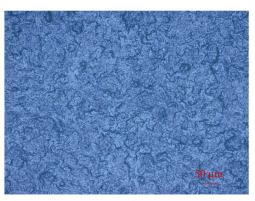
| 试验时 | 综合 | | 单项等级 | | | | | | |
|-----|----|----|------|----|----|----|----|----|--|
| 间/月 | 等级 | 失光 | 变色 | 粉化 | 开裂 | 起泡 | 长霉 | 剥落 | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 6 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 9 | 0 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 12 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |

3.2 微观形貌

3.2.1 金相形貌

涂层 45°户外暴露后表面的金相形貌如图 2 所示。涂层表层为单层防护面漆。根据金相形貌,自然环境试验 12 个月后,防护面漆未发现开裂、粉化等现象,虽然表层面漆呈现模糊趋势,但面漆整体仍较

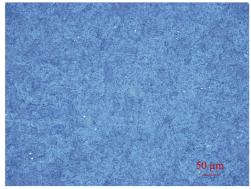
致密,且中间吸波功能层未出现裸露,样品表层面漆防护作用仍较好。选取涂层样板表面较为均匀的中间区域作为金相厚度试验部位,涂层表面为防护面漆,防护面漆未发生开裂、起泡、粉化等现象,对中间涂层起到很好的防护作用,雷达吸波功能层厚度没有出现减薄的现象。



a 0个月



b 6个月



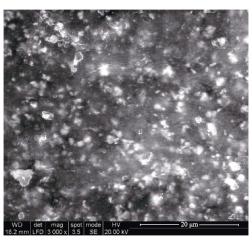
c 12个月

图 2 涂层样品户外暴露表面金相形貌(45°) Fig.2 Metallographic morphology of outdoor exposure surface of coating samples (45°): a) 0 month; b) 6 months; c) 12 months

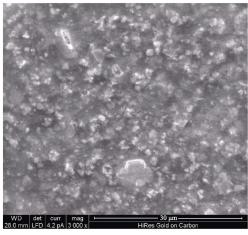
3.2.2 化学成分

涂层表面、截面微观形貌以及截面元素分析结果如图 3—6 所示。可以看出,试验 12 个月后,涂层表面仍比较致密。原始表层防护面漆主要含大量的 C和 O元素和少量的 Si和 Zn元素;雷达吸波功能层主

要含大量的 Fe(其质量分数为 53.9%~84.1%)、C(其质量分数为 12.3%~36.7%)以及少量的 O和 Si元素;中间层主要是雷达吸收剂、环氧树脂、偶联剂和固化剂等;底漆为锌黄底漆,主要含 C和 O元素(见表 5)。



a 20 µm



 $b~30~\mu m$

图 3 涂层样品试验 12 个月后的表面形貌 Fig.3 Surface morphology of coating samples after 12 months of test

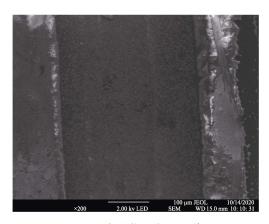


图 4 涂层截面微观形貌 Fig.4 Cross-section microscopic morphology of coating samples

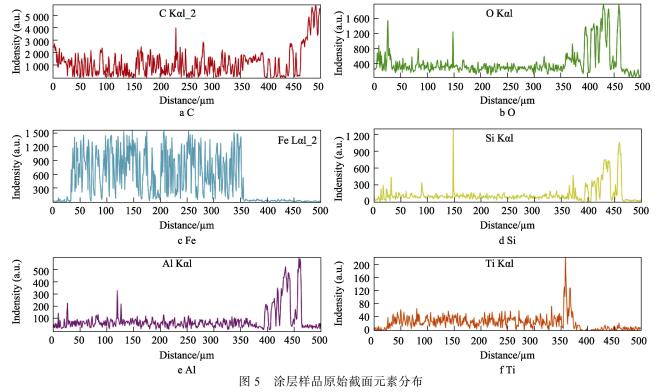


Fig.5 Element distribution of original cross section of coating samples

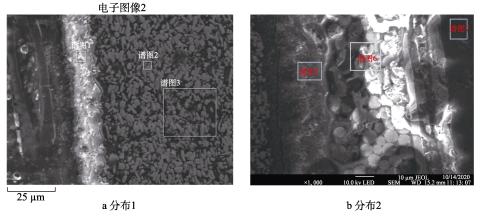


图 6 涂层样品原始截面元素分布

Fig.6 Element distribution of original cross section of coating samples: a) distribution 1; b) distribution 2

表 5 涂层样品原始能谱分析结果(质量分数)
Tab.5 Original energy spectrum analysis results of coating samples (mass fraction)

| | | | | | | | | | | % |
|------|------|------|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | C | О | Si | Zn | Fe | Al | Ba | Mg | S | Cl |
| 谱图 1 | 61.7 | 33.7 | 2.5 | 2.1 | _ | _ | _ | _ | _ | |
| 谱图 2 | 12.3 | 3.1 | 0.4 | _ | 84.1 | _ | _ | _ | _ | _ |
| 谱图 3 | 36.7 | 7.8 | 0.7 | _ | 53.9 | 0.8 | _ | _ | _ | _ |
| 谱图 5 | 66.0 | 29.5 | 1.2 | _ | _ | _ | 1.3 | 1.2 | 0.7 | _ |
| 谱图 6 | 52.1 | 37.5 | 5.3 | _ | _ | 3.1 | _ | 1.8 | _ | 0.2 |
| 谱图 7 | 99.3 | _ | _ | — | _ | _ | — | _ | _ | 0.7 |

3.3 附着力

雷达吸波涂层样品基体为碳纤维增强环氧树脂

基复合材料。为提高吸波功能层(厚度为 500 μm)与基体的结合力,基体表面均匀涂覆均匀的锌黄底漆(40 μm)。涂层厚度大于 250 μm,依据 GB/T 5210—2006《色漆和清漆拉开法附着力试验》中的拉开法测试其附着力。一般而言,附着力随暴露时间延长呈下降趋势,但在试验周期、试验环境等多种因素影响下,也可能呈现波动变化。自然环境试验 6 个月时,涂层附着力降低 18%,而试验 12 个月时,附着力却增大24%,雷达吸波涂层附着力和自然环境试验时间呈现非线性关系(见表 6)。

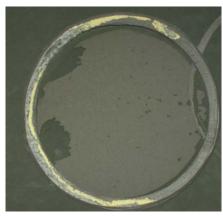
涂层附着力检测结果表明,附着力破坏方式包含基材 100%内聚破坏、面漆与中间漆内聚破坏、面漆 内聚破坏 3 种破坏方式(见图 7),但以基材 100% 内聚破坏为主,表明雷达吸波涂层本身的凝聚力大于 涂层与基体之间的附着力。随着自然环境试验时间延长,涂层附着力破坏方式逐渐由基材 100%内聚破坏向涂层破坏转变,表明自然环境对雷达涂层破坏方式的影响逐渐显著。

表 6 涂层样品附着力测试结果 Tab.6 Adhesion test results of coating samples

| 试验时间/月 | 附着力/MPa | 破坏形式 | | | | | |
|--------|---------|------------------|--|--|--|--|--|
| | | 基材内聚破坏 100% | | | | | |
| 0 | 13.4 | 涂层与基材间破坏约50%, | | | | | |
| | | 基材内聚破坏约 50% | | | | | |
| 3 | 10.7 | 基材内聚破坏 100% | | | | | |
| 6 | 11 | 基材内聚破坏 100% | | | | | |
| | 11 | 面漆与中间漆内聚破坏 100% | | | | | |
| | | 基材内聚破坏 100% | | | | | |
| 9 | 12.1 | 面漆内聚破坏约30%,面漆与 | | | | | |
| | | 中间漆破坏约 70% | | | | | |
| | | 基材内聚破坏 100% | | | | | |
| 12 | 16.6 | 面漆内聚破坏约 20%, 面漆与 | | | | | |
| | | 中间漆破坏约 80% | | | | | |



a 中间漆与底漆内聚破坏 100%



b 面漆与中间漆内聚破坏 100%

图 7 涂层样品拉开法测附着力破坏形式

Fig.7 Failure mode of adhesion of coating samples measured by pulling method: a) 100% cohesion failure of intermediate paint and primer; b) 100% cohesion failure of finish paint and intermediate paint

拉开法测涂层附着力的测试结果较为复杂,其影响因素较多。附着力大小与被测样品制备关系很大,如试样制备粘接、表面打磨、胶的用量、固化时间以及压重物的多少等诸多因素。在进行附着力测试时,拉脱可能是涂层间凝聚性和涂层与基体的附着性拉脱共存,实际获得的附着力平均值并不仅仅是涂层与基体之间纯真的附着力值。另外,隐身涂层附着力大小与取样环境的相对湿度也有一定关系,湿度大小与附着力大小呈负相关,湿度小,附着力大。根据万宁站在不同月份其相对湿度有所区别,对附着力的影响也不同。

综合以上因素,附着力值并不是单纯受自然环境 因素影响的测试数据。随着时间延长,附着力值有所 波动,但涂层与基体的附着力是保证涂层满足力学、 物理和化学等使用性能的基本前提,其附着力值和附 着力破坏方式的变化规律可作为是评价涂层质量的 指标。

3.4 抗冲击强度

涂层试验 0~12 个月的抗冲击强度结果见表 7。 采用固定高度为 50 cm 的重锤落于涂层后用显微镜 观察,表层防护面漆未发现开裂、起皱及剥落等现象, 表层防护面漆和吸波功能层无分层脱落现象,涂层与 基体结合紧密。雷达涂层试验 0~12 个月后, 抗冲击 强度仍为 50 cm,该雷达涂层在高温、高湿、高太阳 辐射、高盐雾作用海洋大气环境下, 试验 12 个月后, 其漆膜耐冲击性较好。一方面,雷达吸波涂层本身性 能较好,涂层厚度较宽(中间吸波层厚度为 500 μm), 使应力集中得到缓和,不会发生因涂层与基体膨胀差 而造成的涂层剥落现象,涂层附着力较好(10.7~ 16.6 MPa),涂层与基体附着力和涂层间凝聚力高, 在高速率的重力冲击下也不易导致雷达吸波涂层剥 落开裂;另一方面,自然环境试验时间相对较短,环 境因素(太阳辐射、温度、湿度、降水等)对涂层老 化影响作用尚未充分显示出来。

表 7 涂层样品冲击强度 Tab.7 Impact strength of coating samples

| 试验时间/月 | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 |
|---------|----|----|----|----|----|
| 冲击强度/cm | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |

3.5 红外光谱

采用傅里叶红外光谱仪检测雷达吸波涂层样品表层(防护面漆)基团的变化。将试验前的样品原始谱图与经过试验后的谱图进行比较,通过谱图中特征基团特征峰频率的变化或强度的改变等,判别物质结构的变化。涂层原始和试验 6、12 个月后的红外反射光谱图见图 8。与原始谱图进行对比可以看出,雷达防护面漆主要特征吸收峰的强度、位置、

4D

形状变化均不明显,表明雷达吸波涂层防护面漆自然环境试验 12 个月后,物质结构未发生显著变化。雷达吸波涂层特征吸收峰有: 2 922.59、1 717.36、1 540.53、1 449.67、1 147.87、796.22、614.27、441.31、405.78 cm⁻¹。

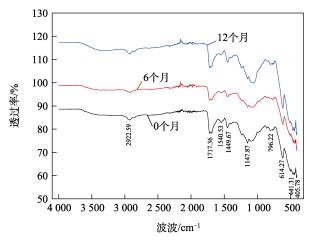


图 8 涂层样品红外光谱 Fig.8 Infrared spectrum of coating samples

3.6 电性能

涂层的雷达吸波曲线如图9所示,涂层在2~18 GHz 波段内的反射率平均值见表8。可见,试验0~9个月的吸波曲线均呈"U"形,随着频率增大,雷达涂层反射率均先减小、后增大。8~18 GHz 波段内,雷达反射率均小于-6.0 dB。试验12个月,涂层样品的吸波曲线先减小、后保持稳定。在高频段8~18 GHz内,呈现波浪形,反射率基本保持不变,该波段吸波效果较好。试验0~12个月,最低反射率点基本保持在8~12 GHz,随着试验时间延长,最低反射率频点向低频方向偏移。根据已有经验,设定的合格带宽设定为≤-5 dB,合格带宽整体随试验时间的延长而变宽。试验12个月后,合格带宽最大,为11.56 dB。最小反射率随着试验时间的延长上下波动,试验6个月时,样品反射率最小,为-8.66 dB(见表9和图10)。

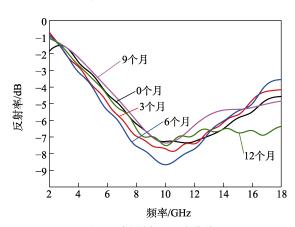


图 9 涂层样品吸波曲线 Fig.9 Wave absorption curves of coating sample

表 8 涂层样品不同频段的平均反射率

Tab.8 Average reflectivity of coating samples in different frequency bands

| | | | | | uБ | | | |
|-----------------|--------|------|------|------|------|--|--|--|
| 频率波段/GHz | 试验周期/月 | | | | | | | |
| 频率放权/GHZ | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 | | | |
| 2~4(S波段) | -1.8 | -1.8 | -1.9 | -1.6 | -1.8 | | | |
| 4~8 (C 波段) | -4.3 | -4.9 | -5.3 | -4.1 | -4.5 | | | |
| 8~12(X波段) | -7.1 | -7.5 | -8.2 | -6.9 | -7.1 | | | |
| 12~18 (Ku 波段) | -5.9 | -5.5 | -5.4 | -5.4 | -6.6 | | | |
| 8~18 | -6.4 | -6.3 | -6.5 | -6.0 | -6.8 | | | |

表 9 涂层样品雷达最小反射率和合格带宽 Tab.9 Minimum radar reflectivity and qualified bandwidth of coating samples

| 试验周期/月 | 带宽/dB | 频率/GHz | 反射率/dB |
|--------|-------|--------|--------|
| 0 | 9.84 | 11.40 | -7.35 |
| 3 | 9.72 | 10.52 | -7.86 |
| 6 | 10.32 | 10.00 | -8.66 |
| 9 | 10.04 | 10.04 | -7.36 |
| 12 | 11.56 | 10.04 | -7.51 |

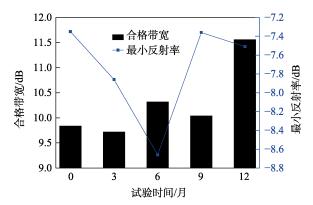


图 10 涂层样品的合格带宽和最小反射率 Fig.10 Qualified bandwidth and minimum radar reflectivity of coating samples

4 结果分析

通过分析雷达吸波涂层海洋大气环境试验第一年的性能变化情况,分析得到以下变化规律:

- 1)从宏观形貌看,涂层明度呈上升趋势,12个月共增加1.22。颜色向绿色和蓝色发展。色差值随着试验时间呈上升趋势,由3个月时的0.96升至12个月的2.91。失光率先增大、后减小,最大失光率为9个月时的34%,但光泽降低很少。外观综合评级等级为0级。
- 2)从微观形貌看,金相形貌方面,虽然涂层表层面漆呈现模糊趋势,但整体仍较致密,未发现开裂、粉化等现象,雷达吸波功能层厚度未减薄。化学成分方面,涂层防护面漆以 C 和 O 为主,功能层以 Fe 和 C 为主,中间层主要是雷达吸收剂、环氧树脂、偶联

剂和固化剂等,底漆主要含 C 和 O 元素。

- 3)从附着力看,涂层附着力和自然环境试验时间呈现非线性关系,6个月时附着力降低18%,试验12个月增大24%。附着力值并不单纯受自然环境因素影响,随时间延长,其值有所波动。
- 4) 从抗冲击强度和红外光谱看,12个月涂层抗冲击强度保持不变,防护面漆主要特征吸收峰的强度、位置、形状变化均不明显。
- 5)涂层在 2~18 GHz 的频率范围内, 其吸波曲线 大体呈"U"形。随着自然环境试验时间的延长, 雷 达吸波涂层的合格带宽(≤-5 dB)有所增大, 并且 最低反射率向低频方向偏移。

5 结语

为研究隐身涂层海洋大气环境效应,设计制作了一种雷达吸波涂层样品,并选择海南万宁试验站开展户外自然环境试验,重点分析了第一年涂层性能变化规律。根据分析结果,12个月自然环境试验时间相对较短,除红外形貌和附着力发生了一定变化,雷达吸波涂层金相形貌、微观性能、抗冲击强度、红外光谱等常规物理性能总体变化不明显。一方面,雷达吸波隐身涂层制作工艺较好;另一方面,在试验时间相对较短情况下,海洋大气环境对涂层老化影响作用尚未充分显示出来,尚需要结合更长的试验数据进一步分析。

参考文献:

- [1] 张洪彬, 闫杰, 王忠. 国内外隐身涂层环境适应性研究 发展现状[J]. 环境技术, 2011, 36(5): 33-37. ZHANG Hong-bin, YAN Jie, WANG Zhong. Research Status and Development of Environmental Worthiness of Stealth Coatings[J]. Environmental Technology, 2011, 36(5): 33-37.
- [2] 邓龙江, 周佩珩, 陆海鹏, 等. 多频谱隐身涂层材料研究进展[J]. 中国材料进展, 2013, 32(8): 449-462. DENG Long-jiang, ZHOU Pei-heng, LU Hai-peng, et al. Research Progress in Multispectral Stealth Coating Material[J]. Materials China, 2013, 32(8): 449-462.
- [3] ZENG Yi, YAN shuo qing, LI qi fan, et al. The Simulation of Soft Magnetic Materials' Shielding Characteristic in the near Field Communication System[J]. Advanced Materials Research, 2013, 668: 715-718.
- [4] MANARA J, REIDINGER M, RYDZEK M, et al. Polymer-Based Pigmented Coatings on Flexible Substrates with Spectrally Selective Characteristics to Improve the Thermal Properties[J]. Progress in Organic Coatings, 2011, 70(4): 199-204.
- [5] 张云鹏. 隐身涂层微波反射率现场检测技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.

- ZHANG Yun-peng. Research on Microwave Reflectivity In-Situ Test Technology of Stealth Coating[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [6] 乐洪宇. 红外隐身技术与隐身涂料的发展[J]. 战术导弹技术, 2011(5): 121-126.

 LE Hong-yu. Development of Infrared Stealth Technology and Stealth Coating[J]. Tactical Missile Technology, 2011(5): 121-126.
- [7] 庄海燕, 于海涛, 陈凯锋, 等. 雷达波隐身涂层设计对电性能的影响研究[J]. 材料开发与应用, 2011, 26(1): 11-14.

 ZHUANG Hai-yan, YU Hai-tao, CHEN Kai-feng, et al.
 The Impact of the Design on Electrical Performance of
- plication of Materials, 2011, 26(1): 11-14.
 [8] 邢孟达,赵宏杰,林海燕,等. 红外隐身涂层及对雷达吸波性能的影响[J]. 宇航材料工艺, 2015, 45(4): 51-53.
 XING Meng-da, ZHAO Hong-jie, LIN Hai-yan, et al. Infrared Stealth Coatings and Its Impact on Radar Absorb-

Radar Wave Stealth Coatings[J]. Development and Ap-

- ing[J]. Aerospace Materials & Technology, 2015, 45(4): 51-53.
 [9] 叶圣天, 刘朝辉, 贾艺凡, 等. 填料表面改性技术在红外隐身涂料中的应用[J]. 红外技术, 2015, 37(12):
 - 1058-1062.
 YE Sheng-tian, LIU Zhao-hui, JIA Yi-fan, et al. Research on Surface Modification of Fillers in Infrared Stealth Coatings[J]. Infrared Technology, 2015, 37(12): 1058-1062.
- [10] 李辉, 张天才, 李兵, 等. 装甲车辆典型强散射源雷达隐身涂料应用研究[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(1): 43-47.
 LI Hui, ZHANG Tian-cai, LI Bing, et al. Application Research on Radar Stealth Coating Materials for Typical Strong Scattering Sources of the Armored Vehicle[J].

Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016, 37(1):

- Fig. 13-47.

 11] 叶圣天,成声月,刘朝辉,等. 8~14 μm 波段水性红外隐身涂料研究[J]. 红外与激光工程,2016,45(2):79-84.

 YE Sheng-tian, CHENG Sheng-yue, LIU Zhao-hui, et al.

 Water-Based Infrared Stealth Coating in 8-14 Mm Wavebands[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(2):
- [12] 徐记伟, 周军. 毫米波迷彩隐身涂层发射率分布数值 计算[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(3): 175-179. XU Ji-wei, ZHOU Jun. Numerical Calculation of Millimeter Wave Pattern Painting Stealthy Coat Emissivity[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(3): 175-179.

79-84.

- [13] 张晖, 贾齐, 冯进良, 等. 激光隐身涂料隐身效果检测系统[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2017, 40(3): 22-24.
 - ZHANG Hui, JIA Qi, FENG Jin-liang, et al. Simulation Experiment System on Evaluating Distortion Camouflage Effect of Laser Stealth Coating[J]. Journal of

- Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017, 40(3): 22-24.
- [14] 高豪廷. 含粒子的红外隐身涂层辐射特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
 - GAO Hao-ting. Study on Radiation Characteristics of Infrared Stealth Coating Containing Particles[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [15] 董海龙, 汪家春, 曾宇润, 等. 红外低发射率隐身涂层对太赫兹波的反射光谱研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(10): 3007-3012.
 - DONG Hai-long, WANG Jia-chun, ZENG Yu-run, et al. Reflection Spectrum Study of THz Wave by Infrared Low Emissivity Stealth Coating[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(10): 3007-3012.
- [16] 李凤雷,徐国跃,余慧娟,等. 红外隐身涂层的制备及 其与雷达吸波涂料的兼容性研究[J]. 红外技术, 2009, 31(7): 415-419.
 - LI Feng-lei, XU Guo-yue, YU Hui-juan, et al. Preparation of Infrared Camouflage Coatings and Its Compatibility Radar Absorbing Coatings[J]. Infrared Technology, 2009, 31(7): 415-419.
- [17] 邢孟达. 微波与红外隐身涂层的优化设计和制备[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
 - XING Meng-da. Optimized Design and Preparation of Radar and Infrared Stealthy Coating[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [18] 李文胜, 张琴, 付艳华, 等. 一种基于光子晶体结构的 军用车辆红外隐身涂层的设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(11): 3299-3303.
 - LI Wen-sheng, ZHANG Qin, FU Yan-hua, et al. Design of Infrared Stealth Coating of Military Vehicle Based on Photonic Crystal[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(11): 3299-3303.
- [19] 李叶. 红外/可见光复合隐身橡胶涂层材料的制备及性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2016.
 - LI Ye. Preparation and Properties Research of Infrared/Visible Light Composite Stealth Coating[D]. Taiyuan: North University of China, 2016.
- [20] 王真, 吴玉茵, 卜铁伟. 可见光-激光兼容隐身涂层的制备与性能研究[J]. 电镀与精饰, 2021, 43(3): 27-31. WANG Zhen, WU Yu-yin, BU Tie-wei. Preparation and Properties of Visible-Laser Compatible Stealth Coatings[J]. Plating and Finishing, 2021, 43(3): 27-31.
- [21] 罗来正, 肖勇, 苏艳, 等. 东南沿海气候条件对聚氨酯 涂层老化行为影响研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(6):

- 42-47.
- LUO Lai-zheng, XIAO Yong, SU Yan, et al. Effects of Southeast Coastal Atmospheric Environment on Aging Behavior of Polyurethane Coating[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(6): 42-47.
- [22] 彭京川, 郭赞洪, 杨晓然. 多因素综合海洋气候自然加速试验技术相关性和加速性验证[J]. 装备环境工程, 2016, 13(5): 98-104.
 - PENG Jing-chuan, GUO Zan-hong, YANG Xiao-ran. Relativity and Acceleration Verification of Multi-Factors Integrated Marine Climate Natural Accelerated Test Technologies[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(5): 98-104.
- [23] 彭京川, 胥泽奇, 张世艳, 等. 军用涂层海洋大气自然 环境试验方法与要求[J]. 装备环境工程, 2017, 14(6): 122-125
 - PENG Jing-chuan, XU Ze-qi, ZHANG Shi-yan, et al. Marine Atmosphere Natural Environment Test Methods and Requirements of Military Coatings[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(6): 122-125.
- [24] 马长李,马瑞萍,白云辉. 我国沿海地区大气环境特征及典型沿海地区大气腐蚀性研究[J]. 装备环境工程,2017,14(8):65-69.
 - MA Chang-li, MA Rui-ping, BAI Yun-hui. Characteristics of Atmospheric Environment in China's Coastal Areas and Atmospheric Corrosion in Typical Coastal Regions[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(8): 65-69.
- [25] 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.
- [26] 周阳红生, 王春川, 赵振峰, 等. 航空装备海洋大气综合环境试验方法研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(2): 86-90.
 - ZHOU Yang-hong-sheng, WANG Chun-chuan, ZHAO Zhen-feng, et al. Comprehensive Environmental Test Method for Aviation Equipment in Marine Atmosphere[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(2): 86-90.

责任编辑: 刘世忠