

# 雷达吸波涂层腐蚀失效对雷达隐身性能的影响

李希<sup>1</sup>, 张天才<sup>1</sup>, 陈庆昌<sup>2</sup>, 蒋和跃<sup>3</sup>, 李忠盛<sup>1</sup>, 王忠维<sup>4</sup>, 魏文政<sup>1</sup>

(1.西南技术工程研究所, 重庆 400039; 2.北京特种车辆研究所, 北京 100000;  
3.陆军装备部驻重庆地区第六军事代表室, 重庆 400042; 4.重庆理工大学, 重庆 400054)

**摘要:** **目的** 研究腐蚀失效后的吸波涂层与雷达隐身性能的变化规律。**方法** 制备 7 块吸波涂层样品, 分别进行 0、24、48、96、240、480、840 h 的中性盐雾试验。通过 X 射线能谱仪和扫描电子显微镜、电化学工作站分别对试验后的样品组成成分和微观形貌、电化学阻抗谱进行表征。利用矢量网络分析仪对盐雾试验后的样品在 8~18 GHz 频率范围内的雷达波反射率进行测试。**结果** 吸波涂层在试验 96、240 h 后出现局部小范围点蚀现象, 480、840 h 时出现大面积点蚀现象。同时, 吸收剂形貌也发生改变, 涂层氧含量增加, 说明涂层中吸收剂被渗入的腐蚀介质腐蚀氧化。通过等效电路图拟合交流阻抗谱数据结果, 认为样品腐蚀失效经历了 3 个阶段, 840 h 盐雾试验后, 样品膜值较试验前原始样品 (0 h) 已下降 69.7%, 说明涂层防护性能得到极大破坏。0 h 样品雷达波反射率均值为 -4.27, 4 dB 带宽实现了 70.07%, 840 h 样品反射率均值为 -4.71, 4 dB 带宽达到了 87.53%, 整个试验过程反射率测试结果的均值相差不到 0.5 dB, 说明雷达隐身性能并没有下降。**结论** 在一定时间阶段内, 雷达吸波涂层中吸收剂被氧化腐蚀, 并不会导致雷达隐身性能下降。

**关键词:** 雷达吸波涂层; 吸收剂腐蚀失效; 电化学阻抗谱; 雷达波反射率; 电磁参数; 阻抗匹配

**中图分类号:** TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)05-0313-09

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.05.031

## Effect of Corrosion Failure of Radar Absorbing Coating on Radar Stealth Performance

LI Xi<sup>1</sup>, ZHANG Tian-cai<sup>1</sup>, CHEN Qing-cang<sup>2</sup>, JIANG He-yue<sup>3</sup>, LI Zhong-sheng<sup>1</sup>,  
WANG Zhong-wei<sup>4</sup>, WEI Wen-zheng<sup>1</sup>

(1. Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China; 2. Beijing Special Vehicles Institute, Beijing 100000, China; 3. The Sixth Military Representative Office of the Army Equipment Department in Chongqing, Chongqing 400042, China; 4. Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

**ABSTRACT:** For equipment serving in harsh tropical marine seawater/atmospheric corrosive environments, studying the variation law of stealth performance of radar absorbing coatings in corrosive environment, and revealing the mechanism of coating corrosion failure on radar stealth performance are of great benefit to extend the service life of absorbing coatings, ensure stable and reliable absorbing performance, formulate scientific and reasonable maintenance plans, and reduce maintenance costs. The work aims to study the variation law of absorbing coatings after corrosion failure and the stealth performance of radar.

Firstly, 7 Q235 steel plates with a size of 120 mm×50 mm×2 mm were prepared. After sandblasting, a strontium chrome

收稿日期: 2022-04-02; 修订日期: 2022-06-14

Received: 2022-04-02; Revised: 2022-06-14

作者简介: 李希 (1984—), 女, 硕士。

**Biography:** LI Xi (1984-), Female, Master.

引文格式: 李希, 张天才, 陈庆昌, 等. 雷达吸波涂层腐蚀失效对雷达隐身性能的影响[J]. 表面技术, 2023, 52(5): 313-321.

LI Xi, ZHANG Tian-cai, CHEN Qing-cang, et al. Effect of Corrosion Failure of Radar Absorbing Coating on Radar Stealth Performance[J]. Surface Technology, 2023, 52(5): 313-321.

yellow primer layer with a thickness of  $(30 \pm 2)$   $\mu\text{m}$  was sprayed. After cured at  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  for half an hour, the radar absorbing coating with a thickness of  $(0.58 \pm 0.05)$  mm was sprayed. After cured at  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  for 2 h, the 7 parallel samples were completed. Then, neutral salt spray test was carried out for 0 h (original samples not subject to salt spray test), 24 h, 48 h, 96 h, 240 h, 480 h and 840 h, and the composition and microstructure of the samples after the test were characterized with X-ray energy dispersive spectrometer and scanning electron microscope. Gmary Reference 3000 electrochemical workstation was used to perform electrochemical AC impedance spectroscopy test on the samples after salt spray test, and the equivalent circuit diagram was introduced to describe and fit the AC impedance data to further analyze the failure mechanism of the coating. The Agilent E8363C vector network analyzer was used to connect the terminal open circuit test fixture, and the 8-18 GHz radar wave reflectivity test was carried out on the samples after the test.

After 96 h and 240 h salt spray test, there was visible local small-scale pitting corrosion on the absorbing coating, and after 480 h and 840 h, the corrosion phenomenon was obviously serious and large-area pitting corrosion occurred. At the same time, the morphology of the absorbent also changed, and the oxygen content of the coating increased, indicating that the absorbent in the coating was corroded and oxidized by the corrosive medium infiltrated. By fitting the results of the AC impedance spectrum data with the equivalent circuit diagram, it was found that the corrosion failure of the samples went through three stages. The first was the stage of rapid decline in the corrosion protection performance of the coating from 0 to 48 h. The corrosion medium penetrated from the coating surface to the entire coating. The second was the fluctuation stage of the protective performance of the coating from 48 to 480 h. The oxidation product was a substance with high resistance and low capacitance, which restored the resistance value of the coating to a certain extent. The third was the stage of further rapid decline of the protective performance of the coating from 480 to 840 h. At this stage, the deeper layer of the absorbent was corroded and oxidized. The final test result indicated that the film value dropped by 69.72% compared with that before the test, indicating that the protective performance of the coating was significantly damaged. However, the average reflectivity of the radar wave of the 0 h sample was  $-4.27$  and the 4 dB bandwidth was 70.07%, while the average reflectivity of the 840 h sample was  $-4.71$ , and the 4 dB bandwidth was 87.53%. The average difference of the reflectivity test results during the whole test process was less than 0.5 dB, indicating that the radar stealth performance did not decline.

In the 0-840 h salt spray test, the absorbents were corroded and oxidized, but the stealth performance of radar absorbing coatings did not still decrease. In a certain period of time, the absorbents in radar absorbing coating are oxidized and corroded, which does not lead to the decline of radar stealth performance. The general understandings of scholars have been broken through by the test result. The effect law and the action mechanism of coating corrosion failure on the radar stealth performance have been intensively studied.

**KEY WORDS:** radar absorbing coating; corrosion failure of absorbent; electrochemical AC impedance spectroscopy; radar wave reflectivity; electromagnetic parameters; impedance matching

现代装备为防打击,提高自身战场生存能力,多采用目标特征信号抑制手段,其中为装备涂装雷达吸波涂层是对抗雷达探测的有效隐身技术手段之一<sup>[1]</sup>。吸波涂料是一种功能复合涂料,以树脂为基料,把吸收剂和其他附加成分分散加入其中而制成。其中吸收剂是决定涂料吸波性能的关键组分,多由铁基吸收剂构成<sup>[2-5]</sup>。因此,服役于恶劣热带海洋海水/大气腐蚀环境时,吸波涂层的耐腐蚀性能是极大制约因素<sup>[6-7]</sup>。

考核评估雷达隐身性能随腐蚀环境的变化规律,揭示涂层腐蚀失效对雷达隐身性能的作用机制,将对海军/岛礁装备延长吸波涂层使用寿命、保障吸波性能稳定可靠、制定科学合理的维修保养方案、降低维护成本等大有裨益<sup>[8-10]</sup>。卢桃丽等<sup>[11]</sup>对吸波涂层进行了盐雾试验,研究发现,铁磁性吸收剂腐蚀氧化,导致涂层磁导率和磁损耗下降,阻抗匹配衰减,吸波性

能随着腐蚀屏蔽性能降低而减弱。汪晓芹等<sup>[12]</sup>采用聚苯胺包覆羰基铁粉,研究发现,改性后的吸收剂,显著降低了涂层被腐蚀氧化的速度,微波吸收效果更强,得出涂层吸波性能随着防腐蚀能力的改善而提升的结论。周莉等<sup>[13]</sup>利用腐蚀法,在以羰基铁粉为吸收剂的吸波涂层表面制备了羰基铁粉氧化物,研究发现,随着氧化涂层厚度的增加,涂层在 8~18 GHz 频率吸波性能减弱,反射损耗增量值约为 2 dB。由此可见,学者一般得出吸波涂层吸波性能随吸收剂腐蚀氧化而显著下降的变化规律。

本文将对制备的吸波涂层开展中性盐雾试验,测试结果显示,铁磁吸收剂氧化后,吸波涂层雷达波反射率并没有下降,该结果打破了常规认识。针对吸波涂层腐蚀失效与吸波性能变化的影响关系,进行了影响规律与作用机理的深入研究。

## 1 试验

### 1.1 材料

试验所用材料有: 镉铬黄底漆及配套固化剂和稀释剂; 吸波涂料原漆及配套固化剂和稀释剂。以上材料均由西南技术工程研究所生产提供。

### 1.2 雷达吸波涂层的制备

为考核吸波涂层腐蚀失效后对雷达隐身性能的影响规律与机制, 特制备 7 块雷达吸波涂层平行样品。首先, 对 7 块 Q235 钢板 (规格尺寸为  $120\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ ) 进行吹砂处理; 然后将镉铬黄底漆均匀喷涂于钢板的正面、背面及棱边, 厚度控制在  $(30 \pm 2)\text{ }\mu\text{m}$ ,  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  固化  $30\text{ min}$ ; 最后, 将吸波涂料均匀喷涂在 7 块涂层试板正面, 厚度控制在  $(0.58 \pm 0.05)\text{ mm}$ ,  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  固化  $2\text{ h}$ , 雷达吸波涂层样品制备完成。

### 1.3 中性盐雾试验

为模拟海洋大气腐蚀环境, 通过实验室加速涂层腐蚀失效行为发生, 对吸波涂层样品进行中性盐雾试验。试验参照 GB/T 10125—2012《人造气氛腐蚀试验 盐雾试样》进行, 试验溶液为  $3.5\%\text{NaCl}$ , 试验温度保持在  $(25 \pm 5)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。7 块样品盐雾试验时间分别为 0 (即原始试样)、24、48、96、240、480、840 h。

### 1.4 电化学阻抗谱测试

样品经过盐雾试验后, 立即取出进行交流阻抗测试。设备使用 Gmary Reference 3000 电化学工作站, 采用三电极体系, 测试介质为  $3.5\%\text{NaCl}$  水溶液, 测试温度为  $(25 \pm 3)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。参考 ISO 16773.2—2016 进行电化学阻抗谱测试, 数据分析参照 ISO 16773.3—2016 进行。样品浸泡区为试样中间部位直径  $10\text{ mm}$  的圆形区域, 测试面积为  $3.14\text{ cm}^2$ 。测试时, 首先进行时长为  $1\text{ }800\text{ s}$  的开路电位测量, 随后以稳定后的开路电位数值进行恒电位交流阻抗谱测试, 测试频率范围为  $10^5 \sim 10^{-2}\text{ Hz}$ , 扰动信号为  $20\text{ mV}$ , 信号采集率为 5 points/decade。

### 1.5 雷达波反射率测试

为研究吸波涂层盐雾试验后的吸波性能, 开展了雷达波反射率测试<sup>[14-16]</sup>。使用 Agilent E8363C 矢量网络分析仪连接终端开路测试夹具, 参照 SJ/T 10142—91《电介质材料微波复介电常数测试方法——同轴线终端开路法》中的开路同轴探头, 采用开路同轴探头直接贴在涂层表面进行测试。对吸波涂层 7 块样品分别进行  $8 \sim 18\text{ GHz}$  雷达波反射率测试。

## 2 结果及分析

### 2.1 宏观形貌

吸波涂层样品盐雾试验 0、24、48 h 后, 外观无明显变化, 涂层完好无锈蚀现象发生; 96、240 h 开始出现轻微点蚀; 480、840 h 已经出现大量的点蚀。随着试验时间的延长, 腐蚀加剧, 如图 1 所示。

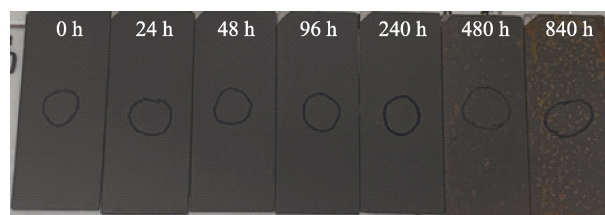


图 1 吸波涂层外观

Fig.1 Macroscopic morphology of the absorbing coatings

### 2.2 形貌及成分

为了进一步分析吸波涂层的表面形貌与成分随盐雾试验的变化, 对样品进行了 SEM 和 EDS 测试。从图 2 可见, 0 h 样品树脂完整, 填料包覆其中, 并且形状结构完整; 240 h 样品表面出现蚀坑, 腐蚀产物隆起于涂层表面, 蚀坑内部分填料已腐蚀、结构疏松; 480 h 样品蚀坑部位腐蚀产物更密集, 表面隆起更多, 蚀坑附近填料已基本完全腐蚀; 840 h 样品表面已由腐蚀产物全覆盖, 形成大面积点蚀, 填料完全氧化变质, 结构松散。

从表 1 可见, 吸波涂层表面主要构成元素为 C、O、Fe。0~480 h 试验后, 元素含量比例基本稳定, C 原子分数保持在 70% 左右, O 原子分数维持在 10%, Fe 原子分数基本在 20% 波动。直至 840 h 后, 元素比例明显改变, 氧元素急剧上升至 45.42%, C 元素降低至 32.94%, Fe 元素基本维持不变, 说明涂层内的含铁填料与渗透入涂层内部的腐蚀因子 (水、氧) 反应, 生成了  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 腐蚀产物的生成也导致了单位面积内涂层有机成分 C 元素的相对减少。

结合形貌与成分可发现, 吸波涂层内有含铁填料, 腐蚀产物的生成是填料氧化生成  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  的结果。随着盐雾时间的延长, 腐蚀急剧加重, 由最初的小面积局部氧化点蚀转变为涂层填料的大规模腐蚀变质。

### 2.3 电化学阻抗谱

样品的交流阻抗测试结果如图 3 所示。在未进行盐雾试样前 (0 h), 从 Bode 图上看,  $\lg Z$  对  $\lg f$  曲线在高频至中频区间呈现直线关系, 但在低频区逐渐下移。相位角显示了类似的规律, 即在高中频区间内接近  $-90^{\circ}$ 。随着频率向低频区移动, 相位角随之下降, 涂层总体还是呈现大电阻、小电容的特征。

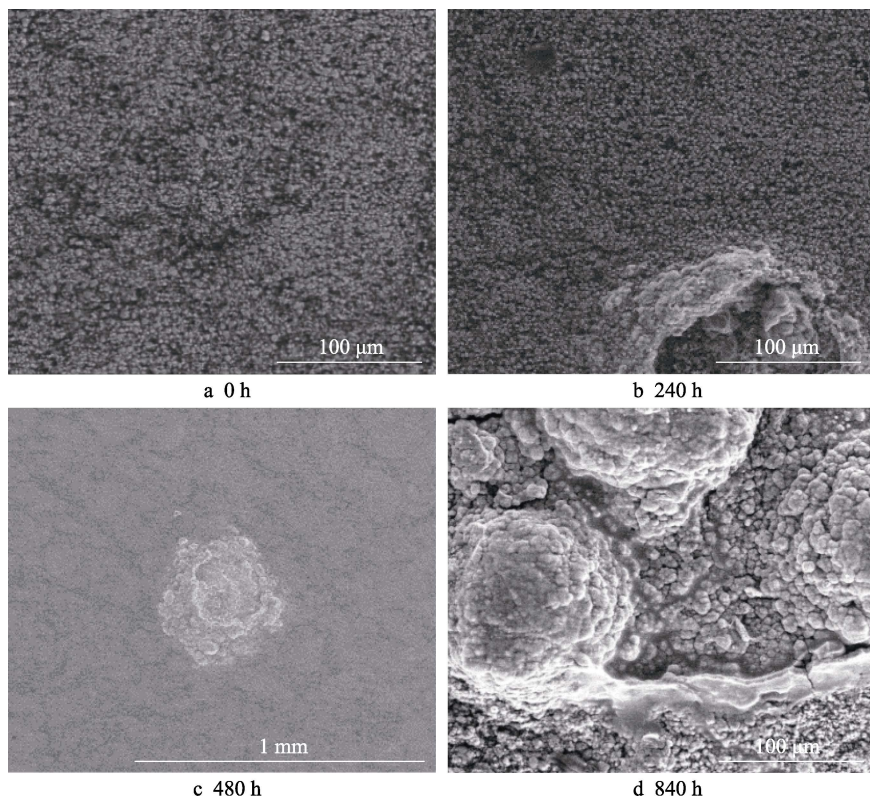


图 2 吸波涂层 SEM 形貌

Fig.2 SEM morphology of the absorbing coatings

表 1 吸波涂层元素含量的能谱分析结果  
Tab.1 Spectrum analysis results of element contents in the absorbing coatings

Test time/h	at. %			
	C	O	Fe	Cr
0	70.59	11.05	18.36	—
24	70.06	11.07	19.57	0.30
48	70.04	9.88	20.08	—
96	70.66	9.60	19.75	—
240	71.16	10.61	18.23	—
480	70.97	8.09	20.94	—
840	32.94	45.42	21.64	—

随着盐雾试验的进行, Bode 图中低频区膜值下降,  $\lg Z$  对  $\lg f$  图斜率减小, 相位角向低频方向移动, 而 Nyquist 图中的容抗弧直径也在缩小。这说明涂层电阻性质在减弱, 而电容性质在增强, 这同样是由腐蚀性电解质溶液的渗入所致, 也意味着涂层的腐蚀保护性能随着盐雾试验的延长在逐渐减弱。涂层的最终膜值为  $2.25 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}^2$ , 膜值下降率为 69.72%。

为了进一步分析涂层的失效机制, 引入了等效电路图来描述和拟合交流阻抗数据<sup>[17]</sup>。本文中使用的等效电路如图 4 所示, 其中  $R_s$  代表溶液电阻,  $R_{\text{out}}$  和  $R_{\text{in}}$  分别代表涂层外层和涂层内层电阻。由于涂层表面的不均匀性, 因此引入常相位角元件 (CPE) 替代电容,  $\text{CPE}_{\text{out}}$  和  $\text{CPE}_{\text{in}}$  分别代表涂层外层和涂层内层

电容。结合图 3 可以看出, 该等效电路图显示了较好的拟合度。

经过拟合所得到的吸波涂层经过不同时间盐雾试验后各元件数值见表 2。其中,  $n$  为理想电容偏离系数 ( $0 \leq n \leq 1$ )。可以简单认为, 如果  $n$  越接近 1, CPE 元件性质越接近纯电容; 如果  $n$  越接近 0, CPE 元件性质越接近纯电阻。

结合图 3d 膜值变化和表 2 拟合结果, 可将样品 0~840 h 盐雾试验分为 3 个阶段。第 1 阶段为 0~48 h, 涂层腐蚀防护性能快速下降阶段, 膜值快速下降, 涂层外层电阻下降最为明显, 内层电阻在 24 h 时增加, 并导致膜值上升, 认为是平行样品间的差异带来的数据异样, 不做分析。第 1 阶段说明电解质溶液的快速渗透导致涂层防护性能下降, 并且涂层内外层电阻元件值均下降, 说明腐蚀介质已经渗透到了整个涂层。第 2 阶段为 48~480 h, 涂层防护性能波动阶段, 该阶段吸波层的含铁吸收剂与腐蚀介质氧化生成  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , 氧化产物是高电阻低电容的物质, 使涂层的电阻值得到一定回复。第 3 阶段为 480~840 h, 涂层防护性能进一步快速下降阶段, 随着电解质的不断渗透, 腐蚀反应的继续发生, 腐蚀产物的积累导致涂层膨胀树脂结构破坏, 使更多的吸收剂相互积聚, 腐蚀产物的结构也更疏松多孔, 这些因素都为电解质溶液在涂层内部的渗透扩散更为迅速容易创造条件, 说明该阶段已有更深层的吸收剂被腐蚀氧化。



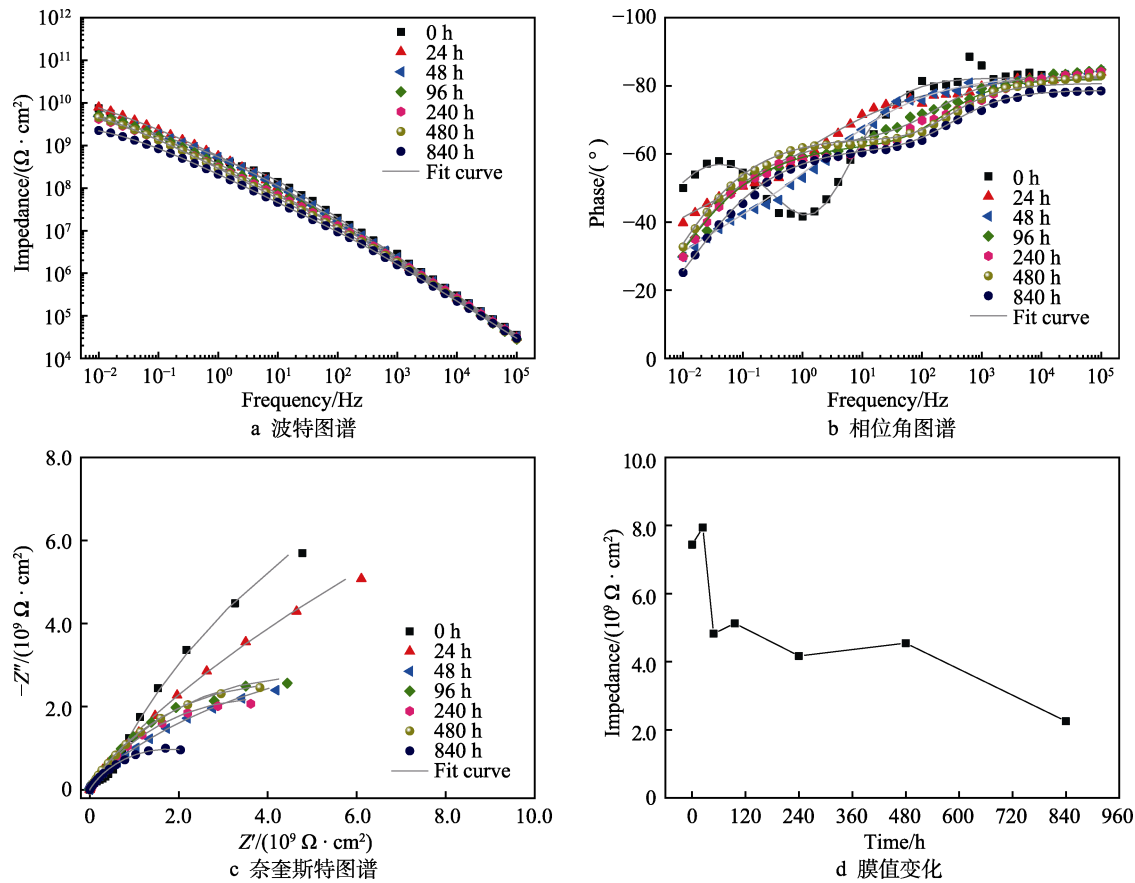


图 3 吸波涂层样品盐雾试验后的交流阻抗测试结果  
Fig.3 AC impedance detection results of the absorbing coatings after the salt spray test:  
a) Bode spectrum; b) phase-angle spectrum; c) Nyquist spectrum; d) film value change

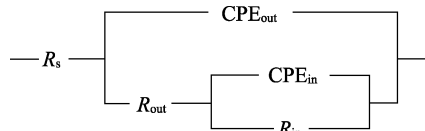


图 4 用于拟合交流阻抗谱数据的等效电路  
Fig.4 Equivalent circuit diagram for fitting  
AC impedance spectrums data

## 2.4 雷达波反射率

不同盐雾试验时间后,测试吸波涂层 7 块平行样

品在 8~18 GHz 的雷达波反射率,结果见图 5 和表 3。可以看出,均值在-4.3 dB 上下波动,与未进行盐雾试验样品(0 h)对比,平均值最大差值也小于 0.5 dB;每块试样小于-4 dB 的带宽测试结果,与初始样最大带宽差值约为 17%。均值与带宽表现出最大差异性的均是 840 h 样品。从外观及膜值变化图明显可见,其腐蚀现象最为严重,因此说明吸波涂层在 840 h 盐雾试验周期内,明显的锈蚀也未影响涂层在 8~18 GHz 吸波性能的发挥。

表 2 样品在不同盐雾试验时间后的交流阻抗等效电路拟合结果  
Tab.2 Equivalent circuit fitting results of samples after different time of salt spray test

Test time/h	$R_{out}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$\text{CPE}_{out}/(\text{F} \cdot \text{cm}^{-2})$	$n_{out}$	$R_{in}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$\text{CPE}_{in}/(\text{F} \cdot \text{cm}^{-2})$	$n_{in}$
0	$4.27 \times 10^8$	$1.34 \times 10^{-10}$	0.92	$2.68 \times 10^{10}$	$8.93 \times 10^{-10}$	0.74
24	$6.68 \times 10^6$	$1.60 \times 10^{-10}$	0.91	$5.19 \times 10^{10}$	$4.11 \times 10^{-10}$	0.49
48	$1.02 \times 10^6$	$1.30 \times 10^{-10}$	0.92	$1.57 \times 10^{10}$	$5.38 \times 10^{-10}$	0.45
96	$2.83 \times 10^7$	$1.64 \times 10^{-10}$	0.92	$9.82 \times 10^9$	$6.25 \times 10^{-10}$	0.61
240	$2.23 \times 10^7$	$1.69 \times 10^{-10}$	0.91	$7.96 \times 10^9$	$7.69 \times 10^{-10}$	0.62
480	$1.92 \times 10^7$	$2.16 \times 10^{-10}$	0.90	$8.69 \times 10^9$	$7.42 \times 10^{-10}$	0.64
840	$1.42 \times 10^7$	$2.85 \times 10^{-10}$	0.88	$3.61 \times 10^9$	$1.12 \times 10^{-9}$	0.60

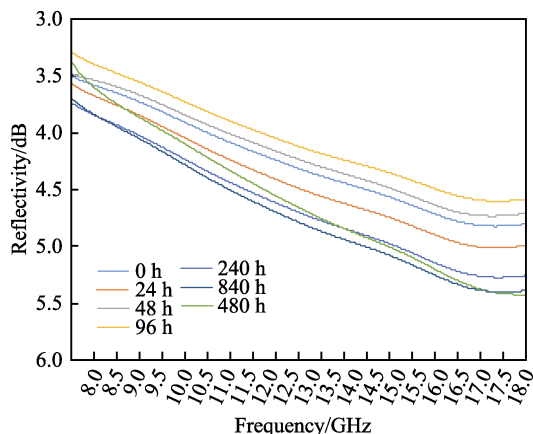


图5 吸波涂层样品不同盐雾试验时间  
反射率测试曲线

Fig.5 Reflectivity test curves of the absorbing coating  
samples after different time of salt spray test

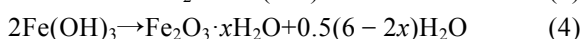
表3 吸波涂层样品不同盐雾试验时间反射率测试结果  
Tab.3 Reflectivity test results of the absorbing coating  
samples after different time of salt spray test

Test time/ h	Frequency/ GHz	Average/ dB	Bandwidth ( $<-4$ dB)/%
0	8~18	-4.27	70.07
24	8~18	-4.43	77.31
48	8~18	-4.19	65.84
96	8~18	-4.07	58.60
240	8~18	-4.64	86.28
480	8~18	-4.59	79.30
840	8~18	-4.71	87.53

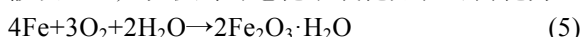
### 3 吸波涂层腐蚀失效对雷达隐身性能影响关系机理分析

吸波涂层的雷达隐身性能由2个基本条件决定：第一，电磁波入射到材料表面（表层）时，能够最大限度地使电磁波进入到材料内部，以减少电磁波的直接反射，即吸波涂层的匹配特性；第二，当电磁波一旦进入材料内部，并在内部传播，能够迅速地把它衰减掉，即吸波涂层的衰减特性<sup>[17]</sup>。

吸波涂层中吸收剂的腐蚀失效是影响涂层吸波性能的关键因素<sup>[18-19]</sup>。铁基吸收剂含有C等杂质，Fe与碳等在电解质溶液中可形成原电池，发生电化学腐蚀。吸波涂层中铁的电化学腐蚀方程为<sup>[20]</sup>：



假设  $x=1$ ，吸收剂的电化学反应可简化为：



铁基吸收剂的氧化，导致涂层中有效吸收剂含量

的减少，雷达吸波涂层的电磁参数发生改变<sup>[21]</sup>，电磁参数决定了吸波涂层的匹配特性与衰减特性。涂层原始样品配方设计其吸收剂质量浓度为涂层质量的85%，吸收剂腐蚀后，含量必然呈下降趋势。因此，分别按照吸收剂质量浓度为涂层质量的85%、80%、75%、70%、65%、60%制备样品，进行电磁参数测试，以此反映0~840 h盐雾试验后，涂层电磁参数的变化趋势。

根据微波理论，用衰减参数  $\alpha$  来表示单位长度上波的衰减量，其表示式为<sup>[17]</sup>：

$$\gamma = \alpha - j\beta = \frac{j\omega}{c} \sqrt{(\mu' - j\mu'')(\epsilon' - j\epsilon'')} \quad (6)$$

$$\alpha = \omega \sqrt{\mu' \epsilon'} \left\{ \frac{1}{2} \left[ \tan \delta_e \tan \delta_m - 1 + \sqrt{(1 + \tan^2 \delta_e)(1 + \tan^2 \delta_m)} \right] \right\}^{1/2} \quad (7)$$

其中：

$$\begin{cases} \tan \delta_e = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \\ \tan \delta_m = \frac{\mu''}{\mu'} \end{cases} \quad (8)$$

式中： $\gamma$  为传播常数； $\beta$  为相位常数。对于有损材料的衰减吸收作用用传输系数  $T = e^{-\alpha z}$  表示，因此影响衰减的参量包括厚度  $Z$ 、衰减参数  $\alpha$  和频率。由式（7）和（8）可知， $\alpha$  是  $\epsilon'$ 、 $\mu'$ 、 $\tan \delta_e$ 、 $\tan \delta_m$  的单调增函数，并且在  $\epsilon'$  和  $\mu'$  足够大的基础上， $\epsilon''$  和  $\mu''$  越大越好。要获得大的  $\alpha$  值，则要求  $\epsilon'$ 、 $\mu'$ 、 $\tan \delta_e$ 、 $\tan \delta_m$ 、 $\epsilon''$ 、 $\mu''$  取值较大。由图6和图7可知，随着吸收剂质量分数由85%降至60%， $\epsilon'$ 、 $\tan \delta_e$ 、 $\tan \delta_m$ 、 $\epsilon''$ 、 $\mu''$  在8~18 GHz频段取值都规律地变小， $\epsilon'$  由约16.5降低至小于6， $\tan \delta_e$  的取值范围由0.06~0.10降低至0.01~0.03， $\tan \delta_m$  的取值范围由0.91~1.28降低至0.40~0.44， $\epsilon''$  的取值范围由0.97~1.70降低至0.05~0.16， $\mu''$  的取值范围由1.82~1.14降低至0.57~0.40。 $\mu'$  在8~14 GHz频段随着吸收剂浓度降低也规律地变小，从2.00~1.18降低至1.38~1.10；在14~18 GHz频段，6个样品的  $\mu'$  几乎重合，最大差值为0.09，说明样品间在该频段的值非常接近。因此，随着吸波涂层吸收剂浓度下降，衰减参数  $\alpha$  下降，最终导致涂层衰减特性的降低。

电磁波由自由空间入射到吸波体界面上时，一部分被反射，另一部分进入吸波体<sup>[22-24]</sup>。要提高材料的匹配特性，即满足材料对雷达波无反射，形成透波材料<sup>[25-27]</sup>。若电磁波从空气中入射进入同时存在介电和磁损耗的材料，其界面反射系数  $R'$  为<sup>[21,28-29]</sup>：

$$R' = \left[ \frac{\sqrt{\mu_r / \epsilon_r} - 1}{\sqrt{\mu_r / \epsilon_r} + 1} \right]^2 \quad (9)$$

因此，吸波材料阻抗匹配是满足相对介电常数与

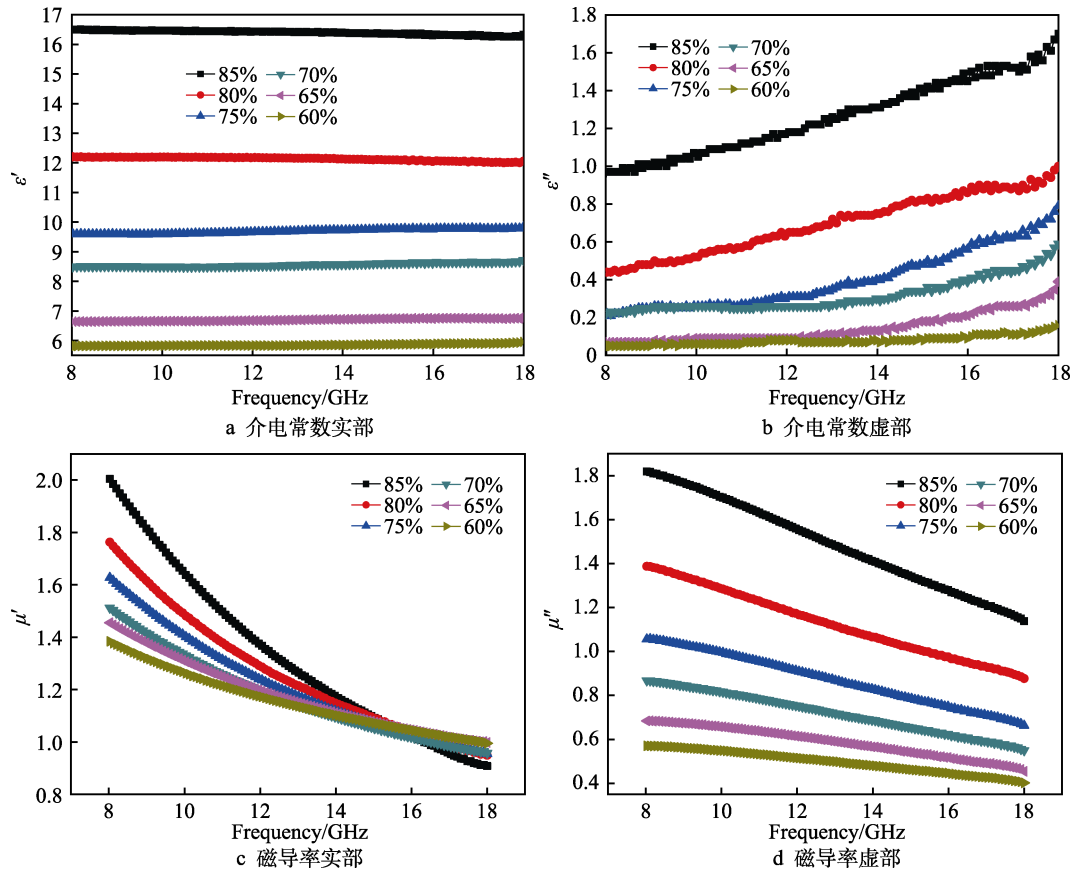


图 6 不同吸收剂浓度的涂层电磁参数

Fig.6 Electromagnetic parameters of coatings with different absorbent concentrations: a) real part of dielectric constant; b) imaginary part of dielectric constant; c) real part of complex permeability; d) imaginary part of complex permeability

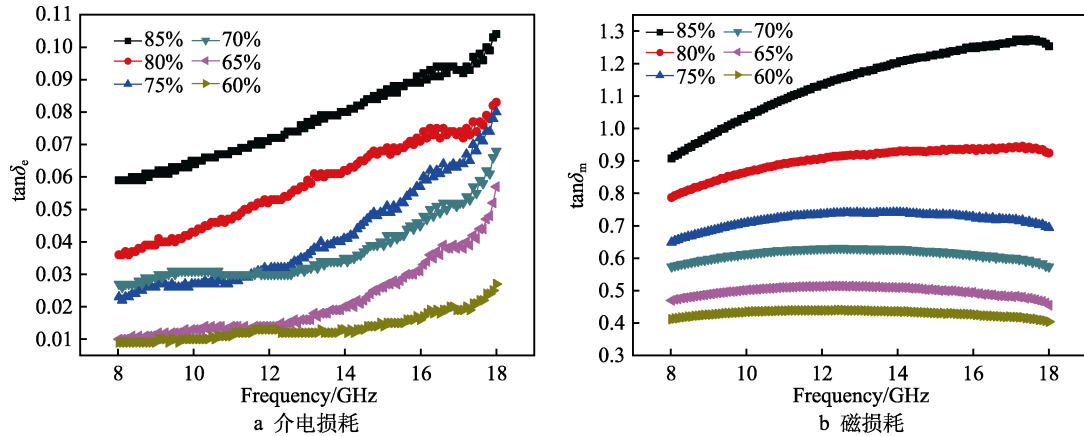


图 7 不同吸收剂浓度的涂层介电损耗和磁损耗

Fig.7 Dielectric loss and magnetic loss of coatings with different absorbent concentrations: a) dielectric loss; b) magnetic loss

相对磁导率的比值等于 1。现有材料的相对介电常数大于相对磁导率, 因此提高材料的磁导率或降低介电常数有利于减小材料的反射系数。

有损耗材料的相对介电常数和相对磁导率为:

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \varepsilon' - i\varepsilon'' \\ \mu_r = \mu' - i\mu'' \end{cases} \quad (10)$$

从图 6 可知, 吸波涂层吸收剂浓度减小,  $\varepsilon'$ 、 $\mu'$  快速下降, 代入式 (10) 可得, 吸波涂层介电常数降

低、磁导率提高。因此, 吸波涂层吸收剂氧化腐蚀后, 涂层界面反射系数减小, 最终提高了阻抗匹配, 即匹配特性。

根据传输线理论, 衬有金属背板的  $n$  层结构 (金属基材为 0 层, 最外层为第  $n$  层, 空气为第  $n+1$  层), 平板吸波材料可以用式 (11)、(12) 计算其雷达波反射率<sup>[30]</sup>。

$$R = 20 \lg E_i \quad (11)$$

其中:

$$E_i = \frac{\eta_i - \eta_{i+1} + E_{i-1}e^{-2\gamma_i d_i}}{\eta_i + \eta_{i+1} + \frac{\eta_i - \eta_{i+1}}{1 + \frac{\eta_i - \eta_{i+1}}{\eta_i + \eta_{i+1}} E_{i-1}e^{-2\gamma_i d_i}}} \quad (12)$$

式中:  $\eta_i = \sqrt{\frac{\mu_i}{\varepsilon_i}}$ ;  $\gamma_i = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_i \mu_i}$ ;  $\mu_i$ 、 $\varepsilon_i$ 、 $d_i$  分别

为第  $i$  层涂层的磁导率、介电常数、厚度。

从式 (11)、(12) 可知, 吸波涂层雷达波反射率是由吸波体电磁损耗与涂层阻抗匹配共同作用的结果<sup>[31]</sup>。在 0~840 h 盐雾试验中, 吸波涂层吸收剂的氧化腐蚀, 导致电磁损耗性能下降, 涂层界面阻抗匹配提高, 即衰减特性下降, 匹配特性提高, 吸波涂层反射率未发生明显下降是两者相互抵消带来的结果。

## 4 结论

1) 吸波涂层试样在盐雾试验后, 表面外观状态已有明显的锈蚀现象, 随盐雾时间的延长, 由局部点蚀到大面积点蚀现象产生。840 h 盐雾试验后, 腐蚀防护能力较试验前下降 69.72%。

2) 吸波涂层腐蚀失效经历了 3 个阶段: 第 1 阶段 (0~48 h) 为防护性能快速下降, 腐蚀介质从涂层表层渗透进里层; 第 2 阶段 (48~480 h) 为涂层防护性能波动阶段, 腐蚀产物能使涂层防护性能得到一定回复; 第 3 阶段 (480~840 h) 为涂层防护性能进一步快速下降, 该阶段已有更深层的吸收剂被腐蚀氧化。

3) 涂层吸收剂发生腐蚀失效行为, 但雷达波反射率均值差异小于 0.5 dB, 因此在 840 h 盐雾试验时间内, 吸收剂腐蚀氧化, 并没有导致涂层吸波性能下降。

4) 吸波涂层吸收剂腐蚀氧化, 会导致吸波体电磁损耗性能下降, 同时也降低了涂层界面反射系数, 从而提高了阻抗匹配。

5) 涂层吸波性能是由吸波体电磁损耗与涂层阻抗匹配共同作用的结果, 表面已产生锈蚀现象的吸波涂层雷达隐身性能未下降, 是 2 种作用相互抵消带来的结果。

## 参考文献:

- [1] LI Yong, YANG Hui-jing, HAO Xi-hong, et al. High-performance Ferroelectric Microwave Absorption Materials[J]. Surface Technology, 2020, 49(2): 41-55.
- [2] XU Yong-gang, YAN Zhen-qiang, ZHANG De-yuan. Microwave Absorbing Property of a Hybrid Absorbent with Carbonyl Irons Coating on the Graphite[J]. Applied Surface Science, 2015, 356: 1032-1038.
- [3] YAN Zhen-qiang, CAI Jun, XU Yong-gang, et al. Microwave Absorption Property of the Diatomite Coated by Fe-CoNiP Films[J]. Applied Surface Science, 2015, 346: 77-83.
- [4] ZHOU Ying-ying, XIE Hui, ZHOU Wan-cheng, et al. Enhanced Antioxidation and Microwave Absorbing Properties of SiO<sub>2</sub>-Coated Flaky Carbonyl Iron Particles[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2018, 446: 143-149.
- [5] LONG Chang, XU Bao-cai, HAN Chuan-zhou, et al. Flaky Core-Shell Particles of Iron@iron Oxides for Broadband Microwave Absorbers in S and C Bands[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 709: 735-741.
- [6] ZHAN Ying-qing, ZHANG Jie-ming, WAN Xin-yi, et al. Epoxy Composites Coating with Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Decorated Graphene Oxide: Modified Bio-Inspired Surface Chemistry, Synergistic Effect and Improved Anti-Corrosion Performance[J]. Applied Surface Science, 2018, 436: 756-767.
- [7] PARHIZKAR N, SHAHRABI T, RAMEZANZADEH B. A New Approach for Enhancement of the Corrosion Protection Properties and Interfacial Adhesion Bonds between the Epoxy Coating and Steel Substrate through Surface Treatment by Covalently Modified Amino Functionalized Graphene Oxide Film[J]. Corrosion Science, 2017, 123: 55-75.
- [8] 武恒洲. 耐海洋环境雷达吸波涂层研究及应用[J]. 飞机设计, 2018, 38(3): 69-72.
- [9] 殷宗莲, 周学梅, 王俊芳. 吸波涂层失效因素研究[J]. 表面技术, 2015, 44(7): 76-80.
- [10] 彭智慧, 曹茂盛, 袁杰, 等. 雷达吸波材料设计理论与方法研究进展[J]. 航空材料学报, 2003, 23(3): 58-63.
- [11] 卢桃丽, 范书亭, 卢琳, 等. FeSiAl 电磁屏蔽涂层的腐蚀行为对吸波性能的影响[J]. 工程科学学报, 2019, 41(10): 1324-1331.
- [12] 汪晓芹, 徐金鑫, 黄大庆, 等. 羰基铁粉@聚苯胺防腐吸波粉体的制备与性能[J]. 材料工程, 2014, 42(11): 90-96.
- [13] WANG Xiao-qin, XU Jin-xin, HUANG Da-qing, et al. Synthesis and Properties of CIP@PANI Composite Powders for Anticorrosion and Microwave-Absorbing Appli-



- cation[J]. Journal of Materials Engineering, 2014, 42(11): 90-96.
- [13] 周莉, 柳汀, 郑典亮, 等. 选择表面工艺改性的 CIPs 涂层及其氧化物的吸波性能[J]. 材料工程, 2019, 47(9): 132-138.
- ZHOU Li, LIU Ting, ZHENG Dian-liang, et al. Absorbing Properties of CIPs Coatings and Oxides Modified by Selective Surface Technology[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(9): 132-138.
- [14] LIU Pan-bo, HUANG Ying, ZHANG Xiang. Superparamagnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanoparticles on Graphene-Polyaniline: Synthesis, Characterization and Their Excellent Electromagnetic Absorption Properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 596: 25-31.
- [15] LIU Pan-bo, HUANG Ying, YANG Yi-wen, et al. Sandwich Structures of graphene@Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@PANI Decorated with TiO<sub>2</sub> Nanosheets for Enhanced Electromagnetic Wave Absorption Properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 662: 63-68.
- [16] XU Jing-jing, WANG Kai, ZU Sheng-zhen, et al. Hierarchical Nanocomposites of Polyaniline Nanowire Arrays on Graphene Oxide Sheets with Synergistic Effect for Energy Storage[J]. ACS Nano, 2010, 4(9): 5019-5026.
- [17] 王连杰, 高焕方. 吸波涂料概述[J]. 表面技术, 2004, 33(6): 13-14.
- WANG Lian-jie, GAO Huan-fang. Summarization of Anti-radar Coatings[J]. Surface Technology, 2004, 33(6): 13-14.
- [18] 陶宇, 陶志萍. 雷达隐身技术的研究现状及其展望[J]. 材料导报, 2011, 25(11): 40-45.
- TAO Yu, TAO Zhi-ping. Present Status and Developing Prospect of Radar Stealth Technology[J]. Materials Review, 2011, 25(11): 40-45.
- [19] 龙昌. 羰基铁吸收剂电磁参数调控与面内复合扩展超材料吸波带宽研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
- LONG Chang. Research on Electromagnetic Parameters Modulation of Carbonyl Iron Absorbents and Bandwidth Extension of Metamaterial Absorbers by In-Plane Design[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.
- [20] 曹楚南. 腐蚀电化学原理[M]. 3 版. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- CAO Chu-nan. Principles of Electrochemistry of Corrosion[M]. 3rd Edition. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.
- [21] 刘祥萱, 王焯军, 崔虎. 雷达波吸收材料设计与特性分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2018: 25-28, 45-46.
- LIU Xiang-xuan, WANG Xuan-jun, CUI Hu. Design and Property Analysis of Radar Absorbing Materials[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2018: 25-28, 45-46.
- [22] 国爱丽. 高强水泥基复合材料雷达波吸收性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- GUO Ai-li. Research on Properties of Radar Wave Absorption of Cement-Based Composite Materials[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [23] 黄小忠, 冯春祥, 李效东, 等. 一种新型的 Ba-M 型铁氧体磁性涂层吸波碳纤维研制[J]. 新型炭材料, 1999, 14(4): 72-74.
- HUANG Xiao-zhong, FENG Chun-xiang, LI Xiao-dong, et al. Preparation of Carbon Fiber Coated with BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> by Sol Gel Technique[J]. New Carbon Materials, 1999, 14(4): 72-74.
- [24] BREGAR V B. Advantages of Ferromagnetic Nanoparticle Composites in Microwave Absorbers[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(3): 1679-1684.
- [25] 胡传炘. 隐身涂层技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 204-206.
- HU Chuan-xin. Stealth Coating Technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 204-206.
- [26] 马艺冰. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/rGO/PANI 复合粒子及其微波吸收涂层制备与性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2019.
- MA Yi-bing. Preparation and Properties of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/rGO/PANI Composite Particles and the Microwave Absorption Coatings[D]. Taiyuan: North University of China, 2019.
- [27] 姬金祖, 黄沛霖, 马云鹏. 隐身原理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2018: 70-75.
- Ji Jin-zu, HUANG Pei-lin, MA Yun-peng. Stealth Principle[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2018: 70-75.
- [28] 刘日杰. 聚苯胺基复合材料的防腐吸波性能研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2018.
- LIU Ri-jie. Study on Anti-Corrosion and Microwave Absorbing Properties of Polyaniline Matrix Composites[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2018.
- [29] 王博翀. 磁性金属微粉/粘合剂复合材料的吸波机理研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- WANG Bo-chong. Microwave Absorption Mechanism of Magnetic Metal Powder/Binder Composite[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011.
- [30] 穆永民. 新型纳米雷达吸波涂层的制备及其吸波性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- MU Yong-min. Preparation of Novel Nano-Radar Absorbing Coatings and Study on Their Absorbing Properties[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007.
- [31] 张玉龙, 李萍, 石磊. 隐身材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2018: 22-23.
- ZHANG Yu-long, LI Ping, SHI Lei. Stealth Materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2018: 22-23.

责任编辑: 刘世忠