

防腐蚀型宽频带雷达吸波涂料研究

齐宇, 何山, 史有强

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: 通过雷达吸波涂料的电性能设计、吸收剂优选以及实际配方验证, 最终制备了高性能防腐蚀型双层复合结构宽频雷达吸波涂料。该涂料厚度为 1.7mm, 面密度为 $4.0\text{kg}/\text{m}^2$ 时, 雷达波频率在 8~18GHz 时反射率小于 -11.0dB。高低温、耐海水、耐湿热等耐环境性能试验后, 涂层外观、反射率和附着力无明显变化, 说明其耐环境性能优良。

关键词: 舰船装备; 防腐蚀吸收剂; 环境试验

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2014.5.012

中图分类号: TN804

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2014)05-0075-06

隐身技术始于第二次世界大战, 起源德国, 发展于美国, 在英、法、日、俄等发达国家得到了进一步发展应用, 对于提高现代兵器的突防能力与生存能力发挥着重要作用, 引起世界各军事大国的高度重视。隐身技术可分为光学隐身技术、红外隐身技术、激光隐身技术、雷达隐身技术等, 而雷达隐身技术是隐身技术重点和难点。雷达隐身技术是通过减弱、抑制、偏转目标的雷达回波强度或减小雷达散射截面积(RCS), 来降低敌方雷达对目标的发现概率, 其中能够实现雷达隐身技术重大突破的途径主要是发展高效的雷达吸波涂料^[1]。

雷达吸波涂料现阶段广泛使用在舰船装备上, 该涂层一般由树脂基体(胶黏剂)、吸收剂以及各种助剂组成。其中吸收剂是主体, 决定了涂层吸波性能的好坏; 树脂基体是基材, 决定了吸收剂的加入量、吸收性能的强弱、涂层性能的好坏; 各类助剂起辅助作用, 虽然用量较小, 但必不可少, 它决定了涂层的质量, 而且对吸收剂的加入量也有影响^[2]。因为舰船用雷达吸波涂料中吸收剂大部分都是易生锈腐蚀, 虽然雷达吸波涂层外有防腐蚀面漆保护, 但是受舰船工作环境影响, 涂层在海面上高盐雾、高湿度的环境中表面稍有划痕或者碰撞若不及时修补, 则涂层表面会逐渐腐蚀, 进一步出现“流黄水”的严重腐蚀现象。这样不仅严重影响舰船外观, 而且重要的是破坏了舰船的隐身性能, 给其本身带来极大的

危险。

目前国内外研究的防腐蚀雷达吸波涂料主要有碳黑雷达吸波涂料、铁氧体雷达吸波涂料和纳米复合雷达吸波涂料。纳米复合雷达吸波涂料在国内正处于基础研究阶段, 距离工程化应用还有较大差距, 国内目前可以实现工程化应用的防腐吸收剂主要有铁氧体和碳黑。使用碳黑做为吸收剂最大的缺点是吸波性能差, 无法达到舰船装备的要求。铁氧体吸收剂是目前应用比较成熟的吸收剂, 应用十分广泛。其吸波性能来源于其既具有亚铁磁性又有介电性能。其相对磁导率和相对电导率均呈复数形式(一般称此类物质为双复介质), 它既能产生介电损耗又能产生磁致损耗, 吸波性能优良^[3-5]。但是国内外现阶段研究的铁氧体雷达吸波涂料的主要缺点是吸收频段较窄, 涂层面密度较重。为了达到舰船使用雷达吸波涂料实用宽频带吸收的要求, 同时又受材料的限制雷达吸波涂层不能太薄。到目前为止, 国内^[6,7]在防腐蚀型雷达吸波涂料方面也有一定研究, 但大都存在吸波带宽较窄、雷达吸波涂层较厚、环境稳定性差等问题, 并且还没有铁氧体单独做为吸收剂的薄层雷达吸波涂层具有宽频吸波性能的报道。

为解决宽频强吸收与涂层厚度的矛盾, 本研究设计了双层结构雷达吸波涂层; 又由于低频电磁波比高频电磁波有更好的穿透性, 故一般将低频性能良好的涂层作为最底层; 而表层涂料直接与空气接触, 形成空气与吸波介质界面。因此, 设计表层材料阻抗近似于空气阻抗(377Ω), 尽量减少表层反射。另外, 采用频率选择界面或者半反射界面, 可以拓展频宽增强吸收, 提高涂层性能^[8]。

收稿日期: 2014-02-18; 修订日期: 2014-07-20

通讯作者: 齐宇(1983—), 男, 工程师, 主要从事高分子材料研究工作, (E-mail) qiyu_1998@sohu.com。

1 设计原理与试验方法

1.1 雷达吸波涂料的吸波原理及结构设计

雷达吸波涂层的吸收效果通常是以反射率的大小来表示,反射率越小,吸波效果越好^[7-9]。对于单层雷达吸波涂料,假定底板金属是理想导体,根据传输线理论,空气与雷达吸波涂料界面处的输入阻抗及雷达吸波涂料的反射率可表示为:

$$Z_i = (\mu_r / \varepsilon_r)^{1/2} \tanh[j(2\pi d / \lambda) (\mu_r \cdot \varepsilon_r)^{1/2}] \quad (1)$$

$$R = 20 \lg \frac{Z_i - Z_0}{Z_i + Z_0} \quad (2)$$

式中: Z_i 为传输线的特性阻抗, μ_r 为雷达吸波涂料的复磁导率(即 $\mu_r = \mu' - j\mu''$), ε_r 为雷达吸波涂料的复介电常数(即 $\varepsilon_r = \varepsilon' - j\varepsilon''$), d 为雷达吸波涂料的厚度, λ 为自由空间中电磁波的波长, R 为雷达吸波涂料的反射率; Z_0 为空气的特性阻抗。

由式(1)、式(2)可知,雷达吸波涂料的吸波效果与材料的复磁导率、复介电常数、厚度和电磁波的波长有关。采用单层材料很难达到宽频高吸波的目的^[10-12]。因此,可考虑使用复合吸收剂和双层结构来解决这个问题。采用双层结构设计后,其可变参量增多,也就更容易达到可调参数的控制,可在厚度尽可能小的情况下达到宽频吸波的效果,随后对几种吸收剂进行电磁参数的测量以了解 μ_r 和 ε_r ,然后再合理进行电性能设计。

1.2 测试方法及原料

A) 原材料

铁氧体铁粉,牌号 A, B;多羟基支化聚酯,牌号 MX-2325;甲苯二异氰酸酯,牌号 TDI;环氧树脂,牌号 0199;助剂;有机溶剂。

B) 测试方法

电磁参数测量:把吸收剂和低介电常数物质(如石蜡)混合一起应用“波导法”使用 HP8722ES 矢量网络分析仪对吸收剂进行电磁参数测量,即得到吸收剂的电磁参数 ε' 、 ε'' 、 μ' 和 μ'' 。

反射率测量:把雷达吸波涂料涂敷在铝制平板上待涂层完全固化后应用“弓形法”使用 HP8757E 标量网络分析仪对雷达吸波涂层进行反射率测量。

面密度测量:首先在试验前用天平称量试板的重量,待涂层完全固化后称量已涂敷涂料的试板重量,用两者的质量差除以试板的面积即得到涂料的面密度。

C) 反射率试样制备方法

准备 180mm × 180mm × (3 ~ 5) mm 的铝制平板,根据双层复合雷达吸波涂料各层材料与厚度的设计,将制成的雷达吸波涂料搅拌均匀,然后分别按方案设计的厚度要求涂底、面层涂料在平板上。待涂层完全固化后按照 GJB 2038—1994 测试方法测量涂层反射率。

2 结果与讨论

2.1 电性能设计

因为根据以上提到的材料吸波原理可知吸收剂的电磁参数 ε' 、 ε'' 、 μ' 和 μ'' 对材料的吸波性能起到关键的作用^[13-16],因此首先在电性能研究之前对 A, B 两种吸收剂进行电磁参数的测量,这样可以根据电磁参数的结果优化选择对电性能的设计有较大的帮助。

吸收剂的电磁参数见表 1 ~ 表 4。

表 1 80% A 吸收剂电磁参数

Table 1 Electromagnetic parameters of 80% A absorbent

Frequency/GHz	ε'	ε''	μ'	μ''
2.0	2.91	0	1.86	0.60
6.0	5.90	0	1.80	0.67
8.0	6.03	0.04	1.36	0.89
12.0	6.01	0.04	0.88	0.62
18.0	6.17	0.26	0.72	0.16

表 2 82% A 吸收剂电磁参数

Table 2 Electromagnetic parameters of 82% A absorbent

Frequency/GHz	ε'	ε''	μ'	μ''
2.0	2.93	0	1.91	0.62
6.0	5.99	0	1.95	0.71
8.0	6.11	0.05	1.48	0.96
12.0	6.21	0.04	0.91	0.78
18.0	6.33	0.31	0.83	0.21

表 3 78% A 吸收剂电磁参数

Table 3 Electromagnetic parameters of 78% A absorbent

Frequency/GHz	ε'	ε''	μ'	μ''
2.0	2.88	0	1.86	0.58
6.0	5.88	0	1.77	0.63
8.0	6.05	0.04	1.39	0.91
12.0	5.86	0.04	0.81	0.55
18.0	6.01	0.21	0.68	0.15

表 4 75% B 吸收剂电磁参数

Table 4 75% B absorbent electromagnetic parameters

Frequency/GHz	ϵ'	ϵ''	μ'	μ''
2.00	13.54	2.12	1.64	0.47
6.00	11.24	3.10	1.37	0.65
8.00	10.76	3.31	1.11	0.62
12.00	9.66	3.29	0.82	0.47
18.00	8.71	2.97	0.80	0.10

用雷达吸波涂料电设计软件,经过方案优化得出设计结果见图 1 ~ 图 3。对应的方案见表 5。

比较图 1 ~ 图 3 可知,当底层为 80% A 面层为 75% B 时,材料的反射率吸收频段较宽,即在 8 ~ 18GHz 频率范围内反射率均接近 -10dB,性能优于底层为 82% A 和底层为 78% A 的反射率,故以底层为 80% A 面层为 75% B 展开试验研究。

表 5 材料各层厚度设计方案

Table 5 Each layer design scheme of material thickness

NO.	Bottom-layer A		Surface-layer B	
	Mass fraction of absorbent /%	Thickness/mm	Mass fraction of absorbent /%	Thickness/mm
1	80	1.40	75	0.30
2	82	1.30	75	0.35
3	78	1.50	75	0.40

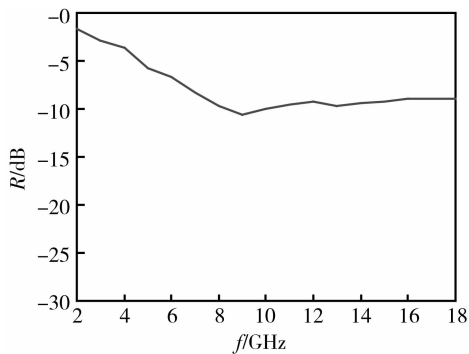


图 1 底层 80% A 面层为 75% B 时的电性能设计曲线
Fig. 1 Electrical properties design curve of the 80% A bottom and 75% B surface

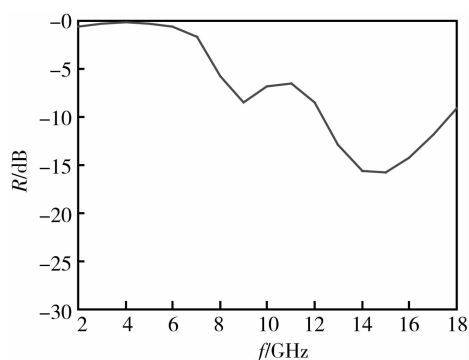


图 3 底层 78% A 面层为 75% B 时的电性能设计曲线
Fig. 3 Electrical properties design curve of the 78% A bottom and 75% B surface

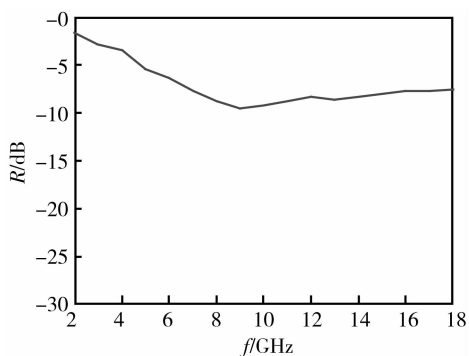


图 2 底层 82% A 面层为 75% B 时的电性能设计曲线
Fig. 2 Electrical properties design curve of the 82% A bottom and 75% B surface

表 6 双层复合雷达吸波涂料各层材料与厚度

Table 6 Materials and paint layers thick of multi-absorbing composite

Project	Bottom-layer	Surface-layer
Material	80% A	75% B
Thickness	1.4mm	0.3mm

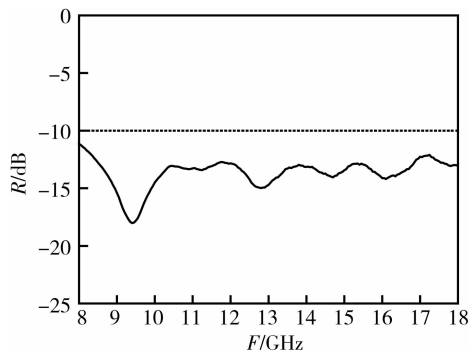


图 4 双层复合雷达吸波涂料反射率特性曲线
Fig. 4 Frequency characteristic curve of multi-absorbing composite coatings

2.2 防腐蚀型雷达吸波涂料实际反射率试验结果

通过对以上电性能设计软件设计的优化方案验证得到实际的雷达吸波涂层电性能反射率曲线,试验方案见表 6,测量反射率曲线见图 4 所示。

当厚度为 1.7mm, 面密度为 $4.0\text{kg}/\text{m}^2$ 时, 雷达波频率在 8~18GHz 时反射率小于 -11.0dB 。反射率曲线见图 4。

2.3 防腐蚀雷达吸波涂料耐环境性能试验结果与分析

为满足现实的海洋环境使用要求, 防腐蚀雷达

吸波涂层进行了耐高低温、耐人造海水、耐湿热、耐盐雾、人工加速老化试验。环境试验试板表面涂覆氯化橡胶船壳漆。

耐高低温试验根据 GJB150.5—1986 进行试验前后对比如图 5 所示。

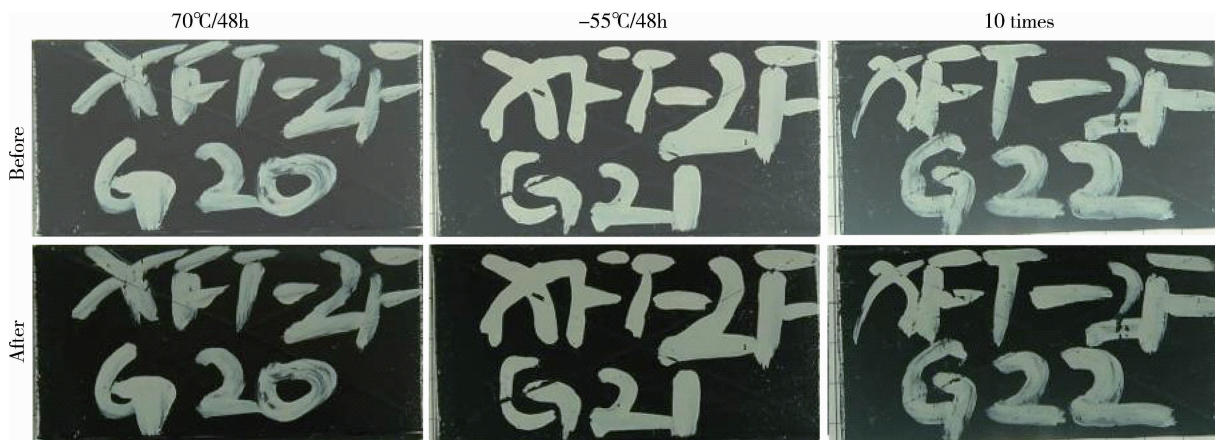


图 5 高低温试验前后涂层外观

Fig. 5 The appearance of the coating before and after high and low temperature tests

耐 70°C 高温 48h 后材料外观无变化, 如图 5 中 G20; 耐 -55°C 低温 48h 后材料外观无变化, 如图 5 中 G21; 70°C 至 -55°C 温度交变试验, 保温时间 1h, 温度转换时间 10min, 循环 10 个周期后材料外观无变化, 如图 5 中 G22 (上侧为试验前, 下侧为试验后); 试验前涂层的附着力为 5.35MPa , 试验后涂层的附着力为 5.29MPa , 试验前后的反射率见图 6。

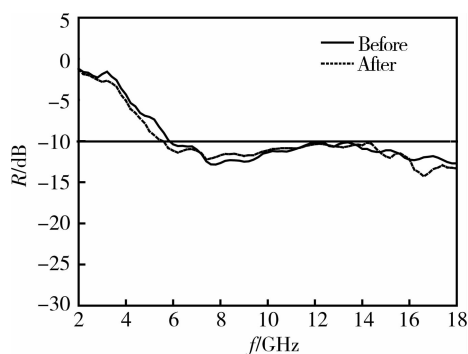


图 6 高低温试验前后复合雷达吸波涂层反射率

Fig. 6 Composite radar absorbing coating reflectivity before and after high and low temperature tests

耐海水试验采用青岛海域实际海水。在海水中浸泡 2000h 后, 反射率无明显变化, 涂层表面生锈腐蚀现象, 试验前涂层的附着力为 5.56MPa , 试验后涂层的附着力为 5.41MPa , 见图 7。

耐湿热性能按 GJB150.9—1986 测定, 5 个周期 (1 个周期为 24h) 后, 外观无变化, 反射率满足要

求, 试验前涂层的附着力为 4.89MPa , 试验后涂层的附着力为 4.77MPa , 如图 8 所示。

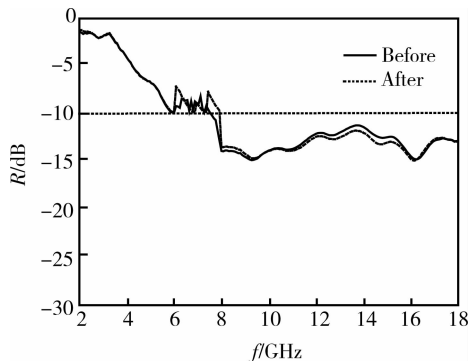


图 7 耐人造海水浸泡试验前后雷达吸波涂层反射率
Fig. 7 Radar absorbing coating reflectivity before and after resistant artificial seawater immersion test

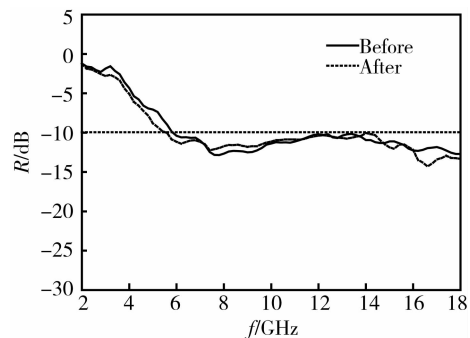


图 8 雷达吸波涂层湿热试验前后反射率
Fig. 8 Radar absorbing coating reflectivity before and after the hot and humid test

(4) 盐雾试验

按 GB/T1771—1991 进行耐盐雾 2000h 后, 涂层不起泡、不开裂、不脱落, 反射率满足要求, 试验前涂层的附着力为 5.93MPa, 试验后涂层的附着力为 5.88MPa, 具体的电性能如图 9 所示。

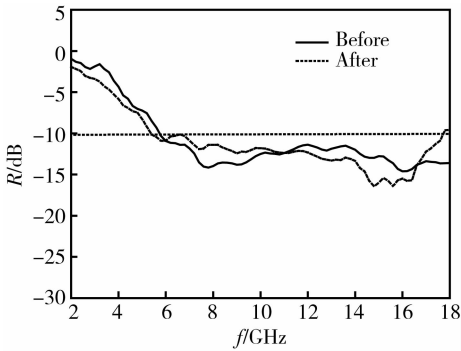


图9 雷达吸波涂层盐雾试验前后反射率

Fig.9 Radar absorbing coating salt spray test before and after the reflectivity

(5) 人工加速老化试验

按 GB1865—1989 进行人工加速老化 2000h 后, 涂层外观无明显变化, 反射率满足要求, 试验前涂层的附着力为 5.16MPa, 试验后涂层的附着力为 4.29MPa, 具体的反射率如图 10 所示。

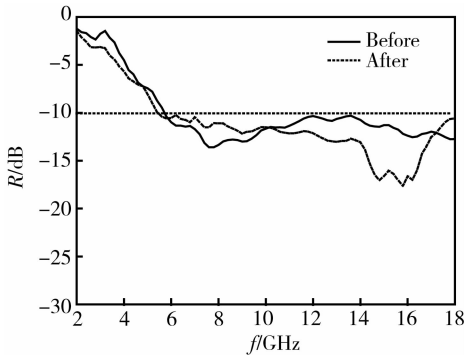


图10 雷达吸波涂层人工加速老化试验前后反射率

Fig.10 The reflectivity of Radar absorbing coating before and after accelerated aging tests

3 结论

(1) 通过对两种优良吸收剂的电磁参数 ε' , ε'' , μ' 和 μ'' 的测试, 并利用雷达吸波涂料电设计软件的模拟, 最终优选了底层为 80% A 吸收剂面层为 75% B 吸收剂的双层复合雷达吸波涂料。

(2) 该双层复合结构设计有效拓宽了雷达吸波涂层的吸收频带, 在 8 ~ 18GHz 频率范围内反射率

不大于 -10dB, 而厚度只有 1.7mm, 面密度为 4.0kg/m²。

(3) 研制的防腐蚀雷达吸波涂料通过高低温、耐海水、耐湿热等耐环境性能试验后, 涂层外观、反射率和附着力无明显变化, 说明其耐环境性能优良。

参考文献:

- [1] 张政权, 李铁虎, 经德齐. 雷达吸波涂料的研究现状及其进展[J]. 材料导报, 2007, 21(1): 307-309. (ZHANG Z Q, LI T H, JING D Q. Present status and perspectives of the radar absorbing material[J]. Materials Review, 2007, 21(1): 307-309.)
- [2] 王结良, 黄英, 梁国正, 等. 雷达吸波涂层用材料的研究进展[J]. 现代涂料与涂装, 2003, 02: 28. (WANG J L, HUANG Y, LIANG G Z, et al. Progress in the study of radar absorbing coating materials [J]. Modern Paint Finishing, 2007, 21(1): 307-309.)
- [3] HAN SHINCHO, SUNG SOOKIN. M-Haxaferrites with planar magnetic anisotropy and their application to high frequency microwave absorbers. IEEE Transactions On Magnetics, 1993, 35(5): 3151.
- [4] SUGIMOTO S, OKAYAMA L, KONDO S, et al. Barium m-type ferrite as an electromagnetic microwave absorber in the GHz range[J]. Mater Trans JIM, 1998, 39(10): 1080.
- [5] NEDKOV I, PETKOVA, KAZPOV V. Microwave absorption on Sc and Co-Ni substituted Ba-haxaferrite powders [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1990, 26(5): 1483.
- [6] 徐国亮, 罗洁, 刘波, 等. 碳团簇型雷达隐身涂料环境稳定性研究[J]. 原子与分子物理学报, 2003, 20(1): 103-106. (XU G L, LUO J, LIU B, et al. The study on environmental stabilization about antiradar coating of carbon cluster-like material [J]. Journal of Atomic and Molecular Physics, 2003, 20(1): 103-106.
- [7] 何山, 熊克敏. 潜艇雷达隐身用雷达吸波涂料研究[J]. 航空材料学报, 1994, 14(1): 43-48. (HE S, XIONG K M. Study on antiradar coating for the submarine stealth [J]. Journal of aeronautical materials, 1994, 14(1): 43-48.
- [8] 周志彪, 郭志猛, 毛卫民, 等. 复合型雷达吸波涂料[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(8): 766-769. (ZHOU Z B, GUO Z M, MAO W M, et al. A composite radar absorbing material [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 28(8): 766-769.
- [9] 吴晓光. 国外微波吸收材料. 长沙: 国防科技大学出版社, 1992.

- (WU X G. Foreign microwave absorbing materials [M]. Changsha: National Defense University Press, 1992.
- [10] 柯林, 吕维尧. 微波工程基础. 北京: 人民邮电出版社, 1981.
- (KE L, LV W R. Microwave Engineering Fundamentals [M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 1981.
- [11] 陈曙, 史莹冰. 磁性纤维对常规隐身材料的掺杂研究 [J]. 航天电子对抗, 2001, (6): 46 - 48.
- (CHEN S, SHI Y B. Magnetic fiber doping research of conventional stealth materials [J]. Aerospace Electronic Warfare, 2001, (6): 46 - 48.
- [12] 朱洪立, 叶智书, 陈开来, 等. 宽频雷达吸波涂料研究 [J]. 工程塑料应用, 2006, 2(34): 14 - 16.
- (CHEN H L, YE Z S, CHEN K L, *et al.* Research on broadband radar absorbing materials [J]. Engineering Plastics Application, 2006, 2(34): 14 - 16.
- [13] 高正娟, 曹茂盛, 朱静. 复合雷达吸波涂料等效电磁参数计算的研究进展 [J]. 宇航材料工艺, 2004, (4): 12 - 15.
- (GAO Z J, CAO M S, ZHU J. Development in study of effective electromagnetic parameters of absorbing composite [J]. Aerospace Materials & Technology, 2004, (4): 12 - 15.
- [14] 彭智慧, 曹茂盛, 袁杰, 等. 雷达吸波涂料设计理论与方法研究进展 [J]. 航空材料学报, 2003, 23(3): 58 - 63.
- (PENG Z H, CAO M S, YUAN J, *et al.* Progress in design theory and methods research on radar absorbing materials [J]. Journal of aeronautical materials, 2003, 23(3): 58 - 63.
- [15] 张铁夫, 曹茂盛, 袁杰, 等. 多薄层涂覆雷达吸波涂料计算设计方法研究 [J]. 航空材料学报, 2001, 21(4): 46 - 49.
- (ZHANG T F, CAO M S, YUAN J, *et al.* The experimental principle of Nano Indenter II and its applications [J]. Journal of aeronautical materials, 2001, 21(4): 46 - 49.
- [16] 曹茂盛, 房晓勇. 多涂层吸波体的计算机智能化设计 [J]. 燕山大学学报, 2001, 25(1): 9 - 13.
- (CAO M S, FANG X Y. Intelligent computer-aided design for multi-coating layer absorber [J]. Journal of Yanshan University, 2001, 25(1): 9 - 13.

Anti-corrosion Type Radar Absorbing Coating

QI Yu¹, HE Shan¹, SHI You-qiang¹

(AVIC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: We prepared anti-corrosion type two-layer broadband radar absorbing coating, through electrical properties design of absorbing materials, optimal selection of absorbent and recipe verification. When this coating had a thickness of 1.7mm and surface density of 4.0kg/m², its reflectivity was less than 11.0dB in the range of 8 to 18GHz. After high/low temperature-resistant, seawater-resistant and damp and hot-resistant tests, no obvious changes appear from the coating, reflectivity and adhesive force. The study indicates that the absorbing coating is suitable in marine environment.

Key words: naval vessels; anti-corrosion absorbent; environmental test