

碳纤维含量对导电涂层雷达波反射特性的影响研究

牛飞龙, 王琪, 李惠子, 张天才, 王永凤

(西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: **目的** 获得不同碳纤维含量导电涂层对雷达波反射特性的影响规律, 实现假目标雷达波反射特性控制。**方法** 选择碳纤维粉为导电功能填料, 丙烯酸聚氨酯树脂为粘结剂, 制得碳纤维质量分数为 0%~20% 的导电涂料。研究碳纤维含量对涂层试板雷达波反射特性、涂层表面电阻率的影响, 并在聚氨酯泡沫圆锥体构件模型上进行了试验验证。**结果** 碳纤维质量分数从 0% 增加 4% 时, 涂层表面电阻率从 $2.40 \times 10^{11} \Omega$ 迅速降低至 $1.80 \times 10^3 \Omega$, 雷达散射截面积 (RCS) 从 -3.07 dBsm 急剧增大至 10.54 dBsm; 增大到 10% 时, 涂层表面电阻率呈波动缓慢下降的趋势, RCS 缓慢增大至 11.05 dBsm; 继续增至 20% 时, 涂层表面电阻率和 RCS 均变化很小。构件模型雷达波反射特性测试表明, 碳纤维质量分数达 10% 时, 聚氨酯泡沫圆锥体模型的表面电阻率为 $6.29 \times 10^2 \Omega$, $0^\circ \sim 360^\circ$ RCS 达 -7.12 dBsm, 与贴铝膜诱饵的 RCS (-6.48 dBsm) 接近。**结论** 碳纤维含量对涂层表面电阻率和雷达波反射特性的影响显著, 在 4%~10% 为宜, 在此范围内, 涂层表面电阻率明显降低, 呈现明显的金属化特征, 雷达波反射特性与金属材料接近。

关键词: 假目标; 导电涂层; 表面电阻率; 雷达波反射特性

中图分类号: TH117.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)08-0184-04

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.08.030

Radar Reflections Influence Study of Different Carbon Fiber Content for Conductive Coating

NIU Fei-long, WANG Qi, LI Hui-zi, ZHANG Tian-cai, WANG Yong-feng

(Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: The work aims to achieve the radar reflection influence regularity of different carbon fiber content coating, and realize controlling of radar reflections properties on fake target. A series of conductive coatings with different carbon fiber mass percent for 0%~20% have been prepared by using carbon fiber powder as conductive filler and acrylic polyurethane as binder. The effect of different carbon fiber content coating for coating surface resistivity and radar reflections property of test piece has been studied, and tested on the PU foam conical modeling. The coating surface resistivity reduced quickly from $2.40 \times 10^{11} \Omega$ to $1.80 \times 10^3 \Omega$, and the RCS increased from -3.07 dBsm to 10.54 dBsm when the carbon fiber mass percent increased from 0% to 4%; the coating surface resistivity has reduced slowly when the carbon fiber mass percent increased to 10%, and the RCS increased to 11.05 dBsm; the coating surface resistivity and RCS showed little change when the carbon fiber mass percent increased continue to 20%. The radar reflections testing results of structure modeling showed that bait RCS was closing between it coated by conductive coating and pasted by aluminum film when the carbon fiber mass percent was 10%. The coating surface

收稿日期: 2017-01-20; 修订日期: 2017-03-12

Received: 2017-01-20; Revised: 2017-03-12

基金项目: 装备预研基金 (6140239010103, 9140A10031715BQ19140)

Fund: Equipment Development Fund (6140239010103, 9140A10031715BQ19140)

通讯作者: 张天才 (1979—), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为功能材料。

Corresponding author: ZHANG Tian-cai (1979—), Male, Master, Researcher, Research focus: function material.

resistivity and RCS was effected by the content of carbon fiber, and the best range of carbon fiber mass percent in coating was 4%~10%. In this range, the surface resistivity of coating reduced obviously, the coating showed metallic character, and the radar reflection property was closed to metal.

KEY WORDS: fake target; conductive coating; surface resistivity; radar reflection property

采用模拟装备特征的假目标, 是欺骗、迷惑敌方侦察与攻击, 掩护隐蔽真目标、减少真目标损失的有效技术手段, 在现代战场中广泛应用。目前, 战场采用的仿形假目标大多采用充气橡胶模型或玻璃钢复合材料制备, 对雷达波透过率高, 与真实目标差异较大, 在现代光电多模光电侦察打击手段下, 很容易被区分识别, 严重影响了其作战效能的发挥^[1-2]。因此对假目标进行表面金属化处理, 模拟真目标雷达反射特性, 是发挥假目标战场功能的关键。

导电涂料具有一定的导电功能, 是一种实现非金属材料表面金属化的常用技术方法, 具有施工方便、不受结构形状影响、成本可控、导电性可调等优点^[3-4], 在假目标特性控制研究领域有着广泛的应用。常用导电涂料的功能填料主要有碳系、导电高分子、金属氧化物、金属系等。以石墨、碳纤维、炭黑等为填料的碳系导电涂料具有环境适应性好、价格低廉、质轻等优点, 因此人们对其的研究开发越来越重视^[3-5]。

本文选择丙烯酸聚氨酯树脂为涂层粘结剂, 以碳纤维粉为涂层导电功能填料, 制备不同碳纤维含量的导电涂料, 主要研究涂层中碳纤维的含量对涂层表面电阻率、雷达波反射特性的影响, 并在聚氨酯泡沫圆锥体构件模型上进行了验证。

1 实验

1.1 主要原材料

丙烯酸聚氨酯树脂 J587, 美国 JOHNSON 公司; 碳纤维粉 ($w_{\geq 96\%$, 市售); 脂肪族聚异氰酸酯, 法国 RHODIA 公司; 防沉剂 6900HV, 日本楠本化成; 分散剂 BYK-163, 德国毕克化学。其余助剂均为国产。

1.2 碳纤维导电涂料的制备

将丙烯酸聚氨酯树脂 J587、稀释剂加入容器中, 分散均匀后, 依次加入涂料防沉剂、消泡剂、分散剂、流平剂等助剂, 再用高速分散机分散均匀。按照比例称取碳纤维粉, 并缓慢加入到分散液中, 高速分散 30 min 以上, 直至碳纤维分散均匀, 制得碳纤维含量 (以质量分数计) 为 0%~20% 的导电涂料。

1.3 导电涂层的制备

按照比例将聚氨酯固化剂加入制备的导电涂料

中, 混合均匀后, 喷涂于聚氯乙烯塑料板上 (尺寸规格 180 mm×180 mm×2 mm)。常温放置 60 min 后, 于 80 °C 固化 6 h, 制得导电涂层, 涂层厚度约为 50~80 μm 。

在聚氨酯泡沫圆锥体 (尺寸规格 $\phi 300$ mm×500 mm) 表面喷涂导电涂料, 常温固化 24 h, 制得表面金属化处理构件。

1.4 性能测试

1) 表面电阻率。按 GB/T 1410—2006《固体绝缘材料体积电阻率和表面电阻率试验方法》的规定进行测试。试件的预处理条件为 (23±2) °C、RH(50±3)% 下 4h, 电化时间 1min, 测试电压 10V。

2) 导电涂层试板和构件 RCS 测试。按照 GJB 5022—2001《室内场缩比目标雷达散射截面测试方法》, 在紧缩场进行导电涂层试板和构件的 RCS 测试。

2 结果与讨论

2.1 碳纤维含量对导电涂层表面电阻率的影响

碳纤维含量为 0%~20% 的导电涂层表面电阻率测试结果见表 1 所示。涂层表面电阻率随碳纤维含量的变化趋势如图 1 所示。从表 1 和图 1 中可以看出, 涂层表面电阻率随涂层中碳纤维含量的增加而逐渐降低。涂层中不含碳纤维时, 表面电阻率为 $2.4 \times 10^{11} \Omega$; 添加碳纤维后, 涂层表面电阻率大幅降低, 含量为 20% 时降低到 $4.56 \times 10^2 \Omega$ 。涂层中碳纤维含量不大于 4% 时, 涂层的表面电阻率下降趋势较快; 当碳纤维含量在 4%~10% 之间时, 涂层的表面电阻率下降趋势变缓, 并在一定范围内波动, 这可能是由于涂层成膜时碳纤维分散不均匀, 局部未形成有效导电网络造成的; 当碳纤维含量大于 10% 时, 由于涂层中碳纤维含量较高, 碳纤维间彼此搭接连成完整的导电网络, 因此表面电阻率波动较小。

从高分子材料的导电机理分析^[6-10], 碳纤维导电涂层属于添加型导电材料, 涂层中碳纤维的含量对涂层电性能的影响符合“渗流作用”原理。对于外加导电功能填料的涂层而言, 导电粒子含量存在一个特定值, 当低于该值时, 导电功能填料完全被高分子粘结剂包裹, 导电功能填料彼此间绝缘, 无法形成导电通

道,从而涂层的电阻较高;当高于该值时,高分子粘 结剂不能完全包裹导电功能填料,导电功能填料彼此

表 1 不同碳纤维含量涂层表面电阻率

Tab.1 The coating surface resistivity of different carbon fiber content

编号	涂层中 CF 质量分数/%	表面电阻率 (SR) /Ω	编号	涂层中 CF 质量分数/%	表面电阻率 (SR) /Ω
1	20	4.56×10^2	9	6	1.62×10^3
2	18	4.70×10^2	10	5	4.23×10^3
3	15	6.88×10^2	11	4	1.80×10^3
4	13	6.44×10^2	12	3	5.23×10^3
5	10	6.29×10^2	13	2	6.73×10^4
6	9	1.14×10^3	14	1	1.71×10^5
7	8	1.56×10^3	15	0	2.40×10^{11}
8	7	2.99×10^3			

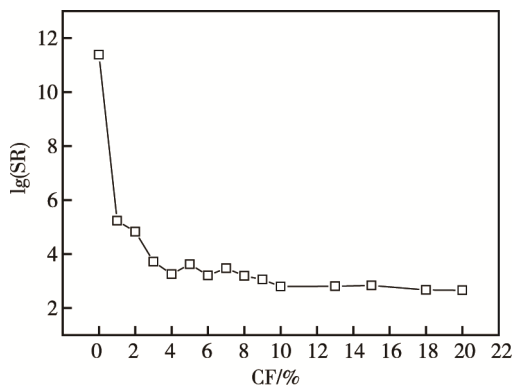


图 1 涂层表面电阻率随不同碳纤维含量的变化趋势

Fig.1 The coating surface resistivity changed-trend of different carbon fiber content

接触而形成导电网络,从而涂层的电阻显著降低。该特定值称为导电涂层的渗流临界值^[3]。在碳纤维涂层中,当碳纤维的含量在 0%~4%范围内增大时,碳纤维被聚合物完全包裹,纤维间逐渐形成了局部的导电网络通路,此时涂层表面电阻率下降很快;当碳纤维含量大于 4%时,碳纤维之间彼此接触,形成了较为完善的导电通路,此时表面电阻率变化不大;当碳纤维含量大于 10%时,碳纤维之间形成了完善的导电通路,此时涂层的电阻率基本不变。但是,碳纤维含量增加会对涂料分散、施工以及成膜的物理机械性能产生不利影响。从涂层导电性、施工及涂层理化性能考虑,涂层中碳纤维含量在 4%~10%为宜。

2.2 碳纤维含量对雷达波反射特性的影响

测试涂层试板的雷达散射截面积 RCS,以此评价涂层试板的雷达波反射特性,测试频率为 10 GHz。不同碳纤维含量的涂层试板的测试结果如图 2 所示。

一般认为,涂层的雷达波反射特性与其表面电阻率直接相关,表面电阻率越低,雷达波反射越强^[3]。由图 2 可知,涂层的 RCS 受碳纤维含量的影响较大,其值随碳纤维含量的增加而增大。当涂层中未添加碳纤维时,试板的 RCS 为 -3.07 dBsm;当涂层中碳纤

维含量增加到 4%时,试板的 RCS 为 10.54 dBsm;当

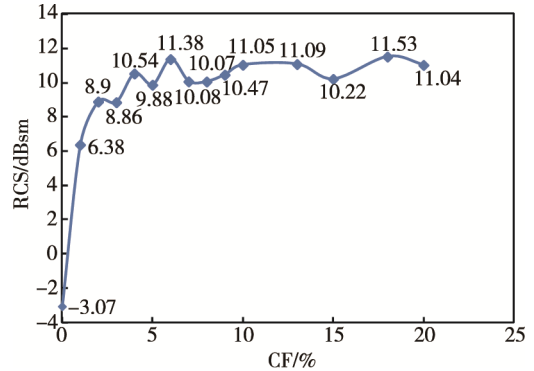


图 2 涂层试板 RCS 随碳纤维含量的变化趋势

Fig.2 The RCS changed-trend of different carbon fiber content for test piece

涂层中碳纤维含量增加到 10%时,试板的 RCS 为 11.05 dBsm;继续增加涂层中碳纤维含量到 20%时,试板的 RCS 为 11.04dBsm。从以上数据可以看出,涂层的雷达波反射特性可以通过改变碳纤维含量来进行调节。当碳纤维含量由 0 增加到 4%,试板的 RCS 值急剧上升;当碳纤维含量大于 4%时,试板的 RCS 值趋于平缓,基本在 11 dBsm 左右波动,此时试板的 RCS 与同尺寸金属板的 RCS (11.2 dBsm) 比较接近。

2.3 导电涂层对构件模型雷达波反射特性的影响

为验证碳纤维导电涂料在构件上的应用效果,将碳纤维含量为 1%、5%和 10%的导电涂层分别喷涂于尺寸为 $\phi 300 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 的聚氨酯泡沫圆锥体上,测试 10 GHz 下 $0^\circ \sim 360^\circ$ 角域的 RCS 值。同时对比测试了聚氨酯泡沫绝缘体构件模型和贴铝膜的全导电构件模型,不同模型 RCS 测试结果对比如表 2 所示。

从表 2 可以看出,采用导电涂料处理后,构件目标的 RCS 均值均有显著变化,并且随着构件表面涂层碳纤维含量的增加,诱饵目标的 RCS 值逐渐增大,表明构件对雷达波的反射逐渐增强。当碳纤维含量由

0 增加到 10%时, 聚氨酯泡沫圆锥体模型的表面电阻率由 $2.40\times10^{11}\,\Omega$ 降低到 $6.29\times10^2\,\Omega$, $0^\circ\sim360^\circ$ RCS 由

表 2 聚氨酯泡沫圆锥体模型的 RCS 测试值
Tab.2 The RCS testing values of PU foam conical modeling

目标序号	构件表面处理	$0^\circ\sim360^\circ$ RCS 均值/dBsm
1 [#]	不含碳纤维涂层	-20.02
2 [#]	含1%碳纤维涂层	-15.87
3 [#]	含5%碳纤维涂层	-10.74
4 [#]	含10%碳纤维涂层	-7.12
5 [#]	贴铝膜	-6.48

-20.02 dBsm 增大到-7.12 dBsm, 与贴铝膜诱饵的 RCS (-6.48 dBsm) 接近, 这与导电涂层在试板上的雷达波反射规律一致。

3 结论

1) 涂层的表面电阻率与涂层中碳纤维的含量密切相关, 并呈现明显的“渗流”现象。当碳纤维含量达到“渗流”临界值时, 表面电阻率明显降低。

2) 涂层中碳纤维的含量对涂层试板及构件的雷达波反射特性的影响显著。随着碳纤维含量的增加, 涂层的 RCS 逐渐增大。导电涂层在碳纤维含量大于 4%时呈现明显的金属化特征, 此时其雷达波反射特性与金属材料接近。

参考文献:

[1] 江利锋. 红外隐真与示假中的若干热物理问题研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.
JIANG Li-feng. Study on Some Thermophysical Problems in infrared Stealth and Decoy[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009

[2] 吕晓红. 国外伪装技术发展现状及其趋势[J]. 飞航导弹, 1996(5): 1-7.
LV Xiao-hong. Research Situation and Development Trend of Foreign Camouflage Technology[J]. Aerodynamic Missile Journal, 1996(5):1-7.

[3] 张天才, 王永凤, 冯立军, 等. 导电涂料在复合材料雷

达目标特性控制中的应用研究[J]. 包装工程, 2012, 33(3): 142-145.
ZHANG Tian-cai, WANG Yong-feng, FENG Li-jun, et al. Applied Research of Conductive Coatingin Composite Radar Target Characteristics Control[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(3): 142-145.

[4] 陈亮. 碳纤维/丙烯酸聚氨酯导电涂料制备及其性能研究[J]. 表面技术, 2016, 45(8): 110-114.
CHEN Liang. Preparation and Property of Carbon Fiber/Polyurethane Acrylate Conductive Coating[J]. Surface Technology, 45(8): 110-114.

[5] 丛晓民, 王鹏, 杜志明. 水性丙烯酸/石墨导电涂料[J]. 涂料工业, 2004, 34(6): 20-23.
CONG Xiao-min, WANG Peng, DU Zhi-ming. Waterborne Acrylic/Graphite Conductive Coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2004, 34(6): 20-23.

[6] 赵择聊, 陈小立. 高分子材料导电和抗静电技术及应用[M]. 北京: 中国纺织工业出版社, 2006.
ZHAO Ze-liao, CHEN Xiao-li.The Application of Conductive and Antistatic Polymeric Materials[M]. Beijing: China Textile Industry Press,2006

[7] 杨超, 王云普, 郭金山, 等. 水性叔氟/碳纤维导电涂料的研究[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2007, 5(6): 59-62.
YANG Chao, WANG Yun-pu, GUO Jin-shan, et al. Studies on Waterborne Tertiary-Fluoro/Carbon Fiber Conductive Coatings[J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2007, 5(6): 59-62.

[8] 刘国杰. 特种功能性涂料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
LIU Guo-jie. Special Functional Coatings[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.

[9] 杨超, 王云普, 郭金山, 等. 膨胀石墨/叔氟乳液复合导电涂料的研究[J]. 现代涂料与涂装, 2008, 11(5): 12-14.
YANG Chao, WANG Yun-pu, GUO Jin-shan, et al. Study on Expansible Graphite/Tert-fluoro Emulsion Hybrid Conductive Coatings[J]. Modern Paint and Finishing, 2008, 11(5): 12-14.

[10] 杨超, 王云普, 邢兰莹, 等. 炭系填料/水性叔氟导电涂料的性能研究[J]. 现代涂料与涂装, 2008, 11(7): 24-26.
YANG Chao, WANG Yun-pu, XING Lan-ying, et al. Study on the Performances of Carbon Fillings Contained Waterborne Tert-fluoro Electroconductive Coatings[J]. Modern Paint and Finishing, 2008, 11(7): 24-26.