导电涂料在复合材料雷达目标特性控制中的应用研究

张天才[1]，王永凤[1]，冯利军[1]，张 凯[2]，邓爱明[1]，陈 亮[1]，王运奇[3]
(1.中国兵器工业第五九研究所，重庆 400039；2.中国工程物理研究院，绵阳 621900；3.66184 部队，保定 074200)

摘要：以水性聚氨酯为粘结剂，短切碳纤维为导电填料，制备了系列不同电阻率的导电涂料，研究了导电涂料中碳纤维对表面电阻率、雷达波透过率及 RCS 的影响，并通过调节涂层碳纤维含量实现了对复合材料外形伪装诱饵 RCS 的控制。实验结果表明，导电涂料具有优异的雷达波反射特性，可应用于装备伪装领域假目标 RCS 控制、复合材料包装箱电磁屏蔽以及装备防静电包装。

关键词：导电涂料；复合材料；透波材料；RCS 控制
中图分类号：TB484.3；TB487 **文献标识码**：A **文章编号**：1001-3563(2012)03-0142-04

Applied Research of Conductive Coating in Composite Radar Target Characteristics Control

ZHANG Tian-cai[1], *WANG Yong-feng*[1], *FENG Li-jun*[1], *ZHANG Kai*[2], *DENG Ai-ming*[1], *CHEN Liang*[1], *WANG Yun-qi*[2]
(1. No. 59 Research Institute of China Ordnance Industry, Chongqing 400039, China; 2. China Academy of Engineering Physiscs, Mianyang 621900, China; 3. 66184 Troops, Baoding 074200, China)

Abstract: A series of conductive coatings with different resistivity were synthesized by using waterborne polyurethane as binder and chopped carbon fiber as conductive filler. The effect of carbon fiber in conductive coating on surface resistivity, radar transmission, and RCS was studied. By adjusting the content of carbon fiber, the RCS of shape camouflage bait can be controlled. The results showed that conductive coating has excellent radar reflection characteristics, and can be used in controlling fake target RCS in equipment camouflage field, electromagnetic shielding in composite materials packing box, and anti-electrostatic packaging needs of equipment.

Key words: conductive coating; composite material; wave-transparent material; RCS control

树脂基复合材料具有质轻、比强度高、耐腐蚀、耐老化、高性价比、成型工艺简便等优点，在假目标伪装、装备包装箱以及导弹、火箭炮壳体上有广泛的应用。由于传统的树脂基复合材料介电常数小，属于绝缘材料，透波率较高，存在以下问题：在装备假目标伪装领域，与真实金属目标雷达目标特性相差较大，容易被敌方雷达识别，达不到“隐真示假”的目的；在装备包装箱中，复合材料的透波性能导致了包装箱内武器的雷达信号特征几乎完全暴露于探测仪器中，其雷达散射截面往往比包装箱本身的雷达散射截面要大得多，在集结阵地堆放或调动运输过程中易于被识别发现[1]；在导弹、火箭炮壳体应用中，当电磁波穿透武器系统的敏感器件时，极易使指挥控制系统失效或指令错误，或使火工品、弹药、电爆装置、电子引信等在电磁能量的作用下发生燃烧爆炸，严重影响武器装备的安全和使用性能[2]，因此，对树脂基复合材料进行表面处理，使其具有金属的导电性和微波不透过性，是复合材料在军事领域应用过程中的研究重点。

导电涂料具有成本低、导电性好、应用方便等特点，是实现复合材料表面金属化的一种有效技术途径。常用的导电涂料主要是以复合法制得的，一般由合成树脂、导电填料和溶剂配制而成，将其涂覆于基

收稿日期：2011-07-08
基金项目：国家自然科学基金委员会－中国工程物理研究院联合基金资助项目
作者简介：张天才(1979－)，男，重庆人，中国兵器工业第五九研究所高级工程师，主要从事特种功能材料技术研究。

材表面形成一层固化膜,从而产生导电效果。在导电涂料中,导电性填料一般是金、银、铜、镍等金属粉末和炭黑、石墨等非金属粉末以及导电纤维类。金粉的导电性最高,化学稳定性好,但价格昂贵,以致使用受到限制;银粉的导电性也很优良,价格较金粉低,配胶后易沉淀,有"迁移"现象,应用较为普遍;铜、镍的性能与银相近,价格比银低得多,但易氧化,导电性不稳定,耐久性差;炭黑、石墨粉末作为导电填料,其分散性好,价格低廉,但导电性较差;碳纤维、金属纤维等导电性较好,分散较为困难,应用不便,但纤维在涂料中添加量小,解决好施工工艺性,则具有较好的应用前景[3]。以水性聚氨酯为粘结剂,短切碳纤维为导电填料,制备不同电阻率的导电涂料,研究碳纤维含量对涂层表面电阻率、雷达波透过率及 RCS 的影响,实现对复合材料外形伪装诱饵 RCS 的控制。

1　试验

1.1　主要原材料

水性聚氨酯乳液(上海思盛化学),固含量为 30%,pH 值为 6;短切碳纤维(市售),碳质量分数≥96%,直径为 21 μm;高岭土、轻钙为市售产品;分散剂、消泡剂、成膜助剂等助剂均为国产。

1.2　导电涂料制备

将水性聚氨酯乳液加入分散桶中,向其中加入钛白粉、轻钙以及分散剂、成膜助剂、部分消泡剂和部分去离子水,用高速分散机分散均匀;再将碳纤维加入分散液中,搅拌时缓慢加入剩余的消泡剂和去离子水,分散 30 min 以上,直至纤维在分散液中均匀分布。导电涂料的基本配方见表 1。

表 1　导电涂料基本配方

Tab.1 The basic formula of conductive coating

序号	组分	质量分数/%
1	水性聚氨酯乳液	65～80
2	填料(钛白粉、轻钙)	4.5～5
3	碳纤维	0～10
4	成膜助剂	1～2
5	分散剂	1～2
6	消泡剂	1.5～2
7	去离子水	15～20

1.3　复合材料导电试板制备

将碳纤维质量分数为 0～10%的导电涂料喷涂于 180 mm×180 mm×2 mm 的玻璃纤维增强环氧树脂复合材料试板上,待实干后测试表面电阻率和 RCS。

根据复合材料试板 RCS 测试结果,选择电阻率适当的导电涂料涂装复合材料外形伪装诱饵,待实干后测试其 RCS。

1.4　性能测试

导电涂层的表面电阻率按 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进行测试。

复合材料试板及外形伪装诱饵在微波暗室参照 GJB 2038－1994 雷达吸波材料发射率测试方法进行测试。

2　结果与讨论

2.1　碳纤维含量对涂层表面电阻率的影响

以水性聚氨酯为粘结剂,短切碳纤维为导电填料,导电涂层中碳纤维质量分数为 0～10%,涂层的表面电阻率变化情况见图 1。

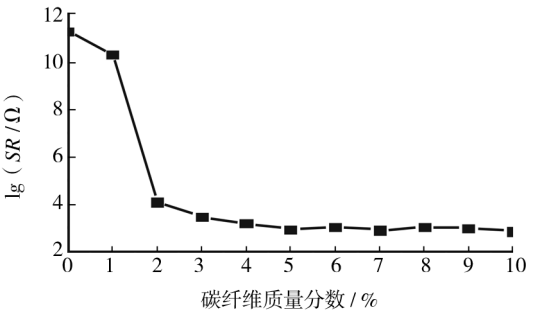

图 1　碳纤维质量分数对涂层表面电阻率的影响

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

图 1 中,纵坐标 lg(*SR*/Ω)为表面电阻率取对数。从图 1 中可以看出,导电涂层随着碳纤维质量分数的增加,表面电阻率逐渐降低,当纤维质量分数从 0 增加到 10%时,涂层的表面电阻从 2.01×10^{11} Ω 降低到 7.39×10^{2} Ω;当涂层中碳纤维质量分数低于 2%时,表面电阻率下降很快;碳纤维质量分数在 2%～10%时,表面电阻率下降趋缓。

在导电涂料涂层中,碳纤维含量对导电涂料导电性能的影响与"渗流作用"一致。只有当导电粒子的填充量达到某一特定值时,才能形成电流流经的通

道,涂层才具有导电性,此特定值称为渗流临界值。在导电填料含量低于渗流临界值时,载流子完全被绝缘性聚合物包附,无法形成电子流通的通道,此时涂层的电阻基本上是绝缘性聚合物的电阻[4-5];当导电填料的体积分数达到渗流临界值时,由于导电粒子相互接触而导通,涂层的电阻明显下降。在涂层中,当碳纤维的质量分数小于 2%时,碳纤维被聚合物包裹,不能形成导电通路,因此表面电阻率较高;当碳纤维质量分数大于 2%时,碳纤维之间形成导电通路,表面电阻率下降较快;当碳纤维添加的质量分数大于 10%时,对导电涂料的分散、施工及成膜性能产生不利影响。从涂层导电角度考虑,碳纤维质量分数在 2%～10%为宜。

2.2 碳纤维质量分数对复合材料试板雷达波反射特性的影响

制备碳纤维质量分数为 0～10%的复合材料导电涂层试板,试板规格为 180 mm×180 mm,导电涂层厚度为 50～100 μm,待实干后,在微波暗室测试雷达波反射特性(雷达散射截面积:RCS),测试频率为 10 GHz;然后以金属板为参照物,将导电涂层试板的 RCS 值换算为雷达波透过率(T),则碳纤维含量与导电涂层试板 RCS 和雷达波透过率的关系见图 2。

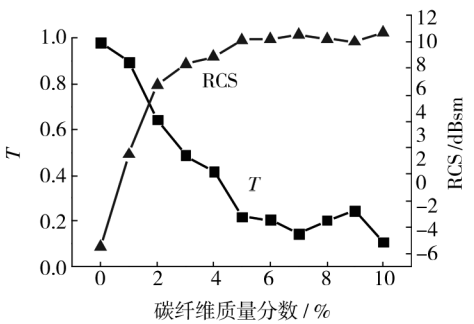

图 2 涂层试板 RCS 和雷达波透过率与碳纤维质量分数的关系

Fig. 2 The relationship between RCS of coated test panels, radar wave transmittance and carbon fiber content

从图 2 中可用看出,涂层中不含碳纤维时,RCS 为−5.49 dBsm,雷达波透过率为 98%;碳纤维质量分数为 1%时,RCS 为 1.49 dBsm,雷达波透过率为 89%;碳纤维质量分数增加到 5%时,RCS 为 10.13 dBsm,雷达波透过率为 21%;当碳纤维质量分数增加到 10%时,RCS 增加到 10.7 dBsm,雷达波透过率为 10%,与金属板的 RCS(11.2 dBsm)比较接近,因此,通过控制碳纤维含量,试板的 RCS 值可以在−5.49～10.70 dBsm 之间调节。涂层的表面电阻率与其雷达波反射特性直接相关,表面电阻率越低,雷达波反射越强,从图 2 中可以看出这个趋势,随着导电涂层中碳纤维的增加,表面电阻率逐渐降低,而 RCS 逐渐增大。碳纤维质量分数由 0 增加到 5%时,RCS、雷达波透过率变化剧烈;当碳纤维质量分数大于 5%时,其变化趋于平缓,这与表面电阻率的变化趋势不一样,电阻率在纤维质量分数大于 2%时,变化趋于平缓。

2.3 导电涂料对复合材料壳体 RCS 的影响

外形伪装诱饵采用环氧树脂基复合材料制备,属于透波材料,RCS 极低,与真实金属目标的 RCS 相差较大,很容易被敌方雷达区别,很难实现伪装自己、迷惑敌人的目标。从前面的试验结果可以看出,采用不同导电涂料对透波复合材料进行处理,可增大目标的 RCS,并可通过调节碳纤维在导电涂层中的含量,控制目标的 RCS,这为伪装诱饵雷达目标特性设计提供了技术途径。

采用碳纤维质量分数 1%,5%和 10%的导电涂料对复合材料外形伪装诱饵进行处理,并对其 RCS 进行测试,在 10 GHz 频率下,0°,90°,180°RCS 及(0～360°)RCS 均值见图 3。

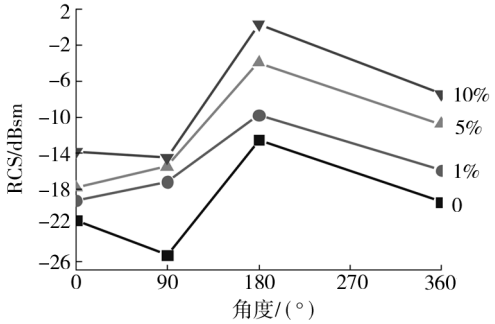

图 3 导电涂层对外形伪装诱饵 RCS 的影响

Fig. 3 The impact of conductive coating on RCS of a shape camouflage bait

从图 3 中可以看出,采用导电涂料处理后,外形伪装诱饵在 0°,90°,180° RCS 及 0°～360°RCS 均值均有显著变化。当纤维质量分数由 0 增加到 10%时,0° RCS 由−21.42 dBsm 增大到−13.8 dBsm,90° RCS 由−25.31 dBsm 增大到−14.46 dBsm,180° RCS 由−12.49 dBsm 增大到 0.35 dBsm,0°～360°RCS 由−19.35 dBsm 增大到−7.38 dBsm,与原金属目标的 RCS 接近,达到了迷惑敌方雷达的目的。

3　结论

1）碳纤维含量与导电涂料的表面电阻率直接相关，通过调节碳纤维的含量可得到不同的表面电阻率。碳纤维添加量越高，导电性越好，但制备及施工难度大，涂膜质量差；碳纤维添加量小，涂膜质量好，但导电性能差，综合这 2 方面因素考虑，碳纤维含量在 2%～10%范围内为宜。

2）涂层中碳纤维含量对目标的 RCS 及雷达波透过率有较大影响，通过控制图层中碳纤维含量，试板的 RCS 值可以在－5.49～10.70 dBsm 之间调节，雷达波透过率可在 98%～10%之间调节。

3）导电涂料通过复合材料外形伪装诱饵上应用，可显著提高诱饵的 RCS，并与真实目标接近，具备较好的伪装效果，并可通过控制涂层中碳纤维含量，得到不同的 RCS 值，方便了伪装目标的 RCS 设计。

从实验结果可以看出，该导电涂料具有优异的雷达波反射特性，与金属接近，是一种优良电磁波屏蔽材料，可用于装备伪装领域假目标 RCS 控制、复合材料包装箱电磁屏蔽以及装备防静电包装。

参考文献：

[1] 吴健. 军用隐身包装箱设计构想[J]. 包装工程，2008，29(7)：88－90.
WU Jian. Conception of Stealthy Packaging Box Design for Munitions[J]. Packaging Engineering，2008，29(7)：88－90.

[2] 张天才，涂兴文，王信，等. 环氧树脂基复合材料表面金属化处理及其性能探讨[J]. 包装工程，2009，30(9)：64－66.
ZHANG Tian-cai，TU Xing-wen，WANG Xin，et al. On Metallized Treatment of Epoxy Resin Composites Surface and Its Performance[J]. Packaging Engineering，2009，30(9)：64－67

[3] 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.

[4] 杨超，王云普. 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. Research on Aqueous Tert-fluorine / carbon Fiber Conductive Coating[J]. Chemical Propellant and Polymer Materials，2007，5(6)：59－62.

[5] 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.

（上接第 116 页）

[3] Backlanbing，Lollby，百度 Robot，等. 百度百科表单[EB/OL]. (2010-07-08)[2010-07-31]. http://baike.baidu.com/view/296684.htm.
Backlanbing，Lollby，Baidu Robot etc. Baidu Encyclopedia Form[EB/OL]. (2010-07-08)[2010-07-31]. http://baike.baidu.com/view/296684.htm.

[4] 李炳芳，冒晓东. 网络印刷客户端色彩管理方法的研究[J]. 浙江科技学院学报，2010，22(4)：282－287.
LI Bing-fang，MAO Xiao-dong. Study on Customer-side Color Management Methods of Network Printing[J]. Journal of Zhejiang University of Science and Technology，2010，22(4)：282－287.

[5] 冒晓东，李炳芳. 印刷数字化工作流程中页面在线设计模块的研究[J]. 印刷与包装研究，2009(5)：28－31.
MAO Xiao-dong，LI Bing-fang. Study on Page On-line Design Module in Digital Print Workflow [J]. China Printing and Packaging Study，2009(5)：28－31.

[6] 李海滨，许南山. 基于高级搜索页面的动态表单搜索[J]. 计算机系统应用，2011(10)：180－183.
LI Hai-bin，XU Nan-shan. Advanced Search Page-Based Dynamic Form Search[J]. Computer Systems & Applications，2011(10)：180－183.

[7] 吴杰，唐正宁. 设备特征化过程中的三棱柱插值与多项式回归算法研究[J]. 包装工程，2011，32(3)：77－80.
WU Jie，TANG Zheng-ning. Research on Prism Interpolation and Polynomial Regression Algorithm in Equipment Characterization Process[J]. Packaging Engineering，2011，32(3)：77－80.

[8] 缪晓丽，唐正宁. 印刷品质量检测过程中的色空间转换方法研究[J]. 包装工程，2011，32(3)：71－73.
MIAO Xiao-li，TANG Zheng-ning. Development of Color Space Conversion Method for Printing Quality Inspection [J]. Packaging Engineering，2011，32(3)：71－73.