雷达吸波材料在军品隐身防护包装中的应用探讨

尹恩强，刘兴海，黎厚斌
（武汉大学，武汉 430079）

摘要：分析了当代军品包装中隐身防护的重要性，介绍了目前在隐身包装中占据主导地位的雷达吸波材料（RAM）的机理和主要技术种类，并对涂覆型吸波材料的制备方法和国内外的研究进展进行了综述，认为未来军品隐身包装防护材料应具有防雷达、光学、热红外侦察等多频谱且智能化综合隐身性能。

关键词：军品包装；隐身技术；雷达吸波材料
中图分类号：TB484；TJ765.5　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-3563(2011)23-0161-05

On Application of Radar Absorbing Materials in Military Stealthy Packaging

YIN En-qiang, *LIU Xing-hai*, *LI Hou-bin*
(Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: The importance of stealth protection in modern military packaging was analyzed. The mechanisms of radar absorbing materials (RAM) and main types of technology were introduced. The preparation of absorbing material coating and its progress in domestic and abroad were summarized. It was put forward that the stealthy packaging material for our military equipment should have good optical, radar, and IR stealth performance, multi-spectrum, intelligent as well as other good integrated stealth performance.

Key words: military packaging; stealth technology; radar absorbing material

目前，大部分军品包装仅对装备和物资在运输、贮存过程中的损坏因素加以防护，这只是传统意义上的军品包装，没有顾及战场隐身。为了不断满足军事斗争的需要，军品包装应与军事装备同步发展，使装备和物资具备防侦视探测功能，能隐身生存、隐身机动，从而完成保障任务[1]。目前，在战场中对目标的命中率几乎由目标被发现的概率所决定，目标被发现就等于被消灭。为了改变这种态势，包括美、俄、日、法等军事强国在内的很多国家，采用了很多先进技术，其中隐身技术是其最有效的手段之一，受到了世界各国的高度重视[2]。大力开发军品隐身包装，已成为世界各国共识，并投入了大量人力、物力和财力进行技术开发研究。

军品隐身包装作为一项高新军事技术，它主要通过降低武器装备的雷达、红外、声频以及其他光、电、磁等特征信号，使得武器装备等军品以及军事目标难以被发现、跟踪、识别和攻击，它可以有效地提高武器装备的突防性能和生存能力。由于雷达侦察是目前世界上用得最多、最有效的侦察手段之一，因此雷达隐身技术自然也就成为一种最重要的隐身技术，实现雷达隐身技术的途径主要有 2 条：一是通过改变目标的外形设计尽量降低雷达散射截面[3]；二是在雷达探测目标上应用雷达吸波材料（Radar absorbing materials，RAM），简称为雷达吸波材料技术。其中外形隐身技术难度大，成本高，容易使目标的结构性能劣化，而雷达吸波材料技术相对简单，设计难度低，因此成为隐身技术中的研究热点[4]。

1　雷达吸波材料机理

雷达吸波材料能够通过自身吸收作用减小目标雷达散射截面，其基本原理是通过电损耗、介电损耗或磁损耗等作用，将投射到它表面的雷达电磁波能量通过材料的介质损耗转化为热能或其它形式的能量而消耗掉。根据耗损作用不同，将雷达吸波材料分为电阻损耗型、介电耗损型和磁损耗型 3 类。碳化硅、

收稿日期：2011-07-08
作者简介：尹恩强（1984—），男，河南信阳人，硕士，武汉大学实验员，主要从事军品包装材料研究。

石墨等属于电阻型吸波材料,电磁能主要衰减在材料电阻上;钛酸钡之类属于电介质型吸波材料,其机理为介质极化驰豫损耗;磁介质型吸波材料的损耗机理主要归结为铁磁共振吸收,这类材料有铁氧体、碳基铁等。吸波材料一般由基体材料(或粘结剂)与吸收介质(吸收剂)复合而成,吸波材料要吸收电磁波必须满足以下 2 个基本条件[5]:电磁波入射到材料表面能最大限度地进入材料内部(匹配特性);电磁波进入材料内部能迅速地几乎全部衰减掉(衰减特性)。

入射电磁波遇到吸波材料时分别被反射、吸收和透过,为了达到良好的吸波效果,应尽可能地减少反射波,电磁波与吸波材料作用的示意图见图 1[6]。

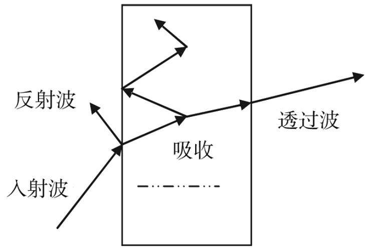

图 1 电磁波与吸波材料作用的示意图

Fig.1 Schematic diagram of the function of EM wave and radar absorbing material

微波技术中的基本参数为阻抗 z 和传播常数 k,可用介电常数 ε 和磁导参数 μ 来表达,因此,研究物质介电常数与磁导率频率特性、实部和虚部的关系是研究雷达吸波材料(RAM)性能的基础,要满足第 1 个条件,电磁波在介质中的传播系数为[7]:

$$\varepsilon=\varepsilon'-i\varepsilon'' \tag{1}$$

$$\mu=\mu'-i\mu'' \tag{2}$$

式中:ε'为吸波材料在电磁场作用下产生极化的变量;μ'为吸波材料在电磁场作用下产生磁化程度的变量;ε''为电偶极矩的损耗量度;μ''为磁偶极矩的损耗量度。

$$k=\frac{2\pi f}{c\sqrt{\mu\varepsilon}}=k'-k'' \tag{3}$$

式中:k''为电磁波衰减系数。

电磁波经吸波材料吸收后的能量损失为[8]:

$$Q(x)=\frac{E_m^2k''}{|z|\cos(\varphi)\mathrm{e}^{-2k''x}} \tag{4}$$

$$z=z_0\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\quad(z_0=120\pi) \tag{5}$$

由此可知,当材料的 ε''和 μ''很大时 k 才很大,才能有效吸收电磁波,若满足第 2 个条件,在阻抗为 z_0 的自由空间中的雷达波,投射到阻抗为 z 的介电表面或磁性表面产生部分反射的系数为[9]:

$$R=\frac{1-\dfrac{z}{z_0}}{1+\dfrac{z}{z_0}} \tag{6}$$

式中:$z=\sqrt{\mu_r/\varepsilon_r}$;$z_0=\sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$。

若不发生反射时,则:$\sqrt{\mu_r/\varepsilon_r}=\sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$。

综上所述,仅当 ε''和 μ''很大,且$\sqrt{\mu_r/\varepsilon_r}=\sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$时,吸收材料对雷达波的吸收效果最好[10]。

2 雷达吸波材料技术种类

雷达吸波材料是实现军品隐身包装的重要手段,将雷达吸波材料涂覆或以其它方式应用于军品包装中,是未来军品隐身包装的主要发展趋势。雷达吸波材料的吸波性能取决于吸收剂的损耗吸收能力,因此吸收剂的研究一直是吸波材料的研究重点[11],按吸收剂材料种类的不同,雷达吸波材料主要分为以下几种。

1) 纳米吸波材料。纳米材料是指粒度分布在 1～100 nm 之间的超细材料,由于纳米微粒尺寸远小于雷达波长,因此纳米粒子对雷达波的透过率比常规材料要大得多,这就大大减少了波的反射率,纳米 Fe_3O_4 则是一种非常好的磁损耗吸波材料。目前国内外的研究集中在如何通过复合提高其吸波性能并降低材料的重量。蒋立勇等人的研究证明了以纳米 SiC 粉末和纳米 Fe_3O_4 粉末制成的复合吸波涂层,对 8～18 GHz 雷达波具有较好的吸收效果,整体小于－10 dB 的带宽接近 4.2 GHz,吸收峰值为－15.3 dB,同时其具有较小的面密度和厚度,是一种较好的新一代吸波材料[12],纳米 SiC 粉末形貌见图 2,不同掺入比率纳米 Fe_3O_4 对 8～18 GHz 雷达波吸收效果见图 3。

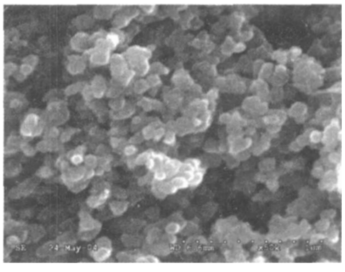

图 2 纳米 SiC 粉末形貌

Fig.2 Appearances of nano-SiC power

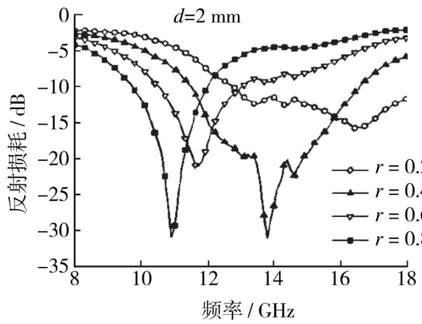

图 3　纳米 Fe_3O_4 对 8～18 GHz 雷达的吸收效果

Fig. 3 Absorbing effect of nano-Fe_3O_4 within 8～18 GHz

2) 导电高分子吸波材料。导电高分子吸波材料是利用某些具有共轭 π 电子体系的高分子聚合物的线形或平面形构型与高分子电荷转移络合物的作用，实现阻抗匹配和电磁损耗，从而吸收雷达波。导电高分子具有密度低、结构多样化、可分子设计、电磁参量可调等独特的优点。Pant 等人发现可将导电高聚物与无机磁损耗物质复合来提高导电高聚物的磁损耗性能，可使其兼具电损耗与磁损耗的性能，扩大吸收频带[13]。

3) 等离子吸波材料。等离子体隐身技术是指利用等离子体回避探测系统的一种技术。在低温下，通过电源以高频和高压的形式提供的高能量，产生间隙放电、沿面放电等形式，将气体介质激活、电离形成等离子体，按其热容量大小可分为能等离子体、热等离子体和低温等离子体。目前，国外主要应用低温等离子体进行飞行器的隐身研究[14]。

4) 磁性吸波材料。其吸收机理是自然共振，已经成功地应用于隐身技术。该种材料吸收频带较宽，但是厚度恶化、重量较大。铁氧体材料是研究得比较多也较成熟的磁性吸波材料，目前的研究主要是六角铁氧体[15]。

5) 手征吸波材料。手征材料是指物体与其镜像不存在几何对称性，而且不能使用任何方法使物体与镜像相重合的材料，它能够减少入射电磁波的反射，并能吸收电磁波，和其它吸波材料相比有 2 大优势：一是易于实现阻抗匹配；二是易于实现宽频吸收[16]。

3　吸波材料制备方法与研究进展

雷达隐身吸波涂料正向涂层薄、质量轻、频带宽和吸波性能强的方向发展[17]。雷达波吸收涂料是以高分子溶液或乳液为基料，把吸波剂和其他附加成分散于其中制成的。基体树脂可以采用环氧、异氰酸酯、双马来酰亚胺、聚酰亚胺、聚醚酰亚胺等树脂，但基体树脂吸波能力有限，目前的研究主要集中在吸波剂的研究和开发上[18]。吸收型涂层可以是单层、双层或多层。单层吸波涂层对米波、分米波的吸收是有效的，见图 4。为了使隐身涂层能够达到最佳的阻抗匹配，在实际中常采用多层结构设计[19]，见图 5，其阻抗变化是一个渐进的过程，使得入射的电磁波产生较少的反射而逐渐被涂层完全吸收或衰减掉[20]。

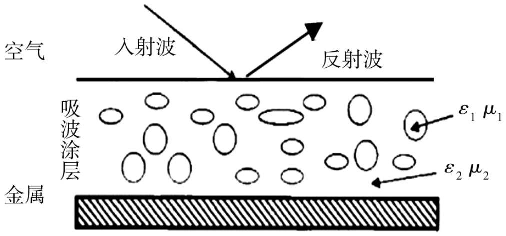

图 4　单层雷达隐身涂层结构

Fig. 4 Schematic diagram of single layer radar stealthy coating

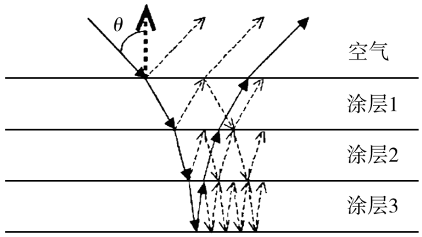

图 5　多层涂层电磁波传播示意图

Fig. 5 Schematic diagram of electromagnetic wave propagation with multi-layer coating

目前雷达吸波材料主要采用涂层方法应用于军品隐身包装中，涂层的制备方法主要有物理涂覆法、化学镀法、热喷涂法、溶胶-凝胶法[21]。

Kim 等人采用化学镀法制备的吸波涂层，最大反射率达到－20 dB[22]，涂层是在粒径为 70 μm 的中空陶瓷微球上镀覆 Co-Fe 合金制备的。Cecilia 对采用大气等离子喷涂所制备 3 种基体的复合涂层研究发现，铁电基体与半导体或介电体的混合具有较高的磁损耗，是制备吸波涂层较为有效的途径[23]。何艳峰等人以涂覆工艺制备了不同磁性微粉含量和厚度的涂层，其在 2.6～18 GHz 频段内反射率低于－5 dB[24]。

邹艳红等人在铝板上涂刷羟基铁和环氧树脂涂料

后，并覆盖一层铜导线和SRR结构材料，复合吸波涂层在4～9 GHz频段内反射率低于－5 dB[25]。周彦等人制备了3层ZnO纳米聚合物梯度涂层，由外及内其含量分别为5%，10%和15%，在4.8～18 GHz波段范围内反射率低于－10 dB[26]。马成勇等人以电介质材料B为电损耗吸收剂，羟基铁粉A为磁损耗吸收剂，制备了厚度为1.2 mm的3层吸波涂层，其在8～18 GHz频段范围内反射率小于－10 dB[27]。

李国显等人研究了以石墨烯和Fe_3O_4粒子以质量比10∶1复合得到的吸波剂材料，匹配厚度在2～2.5 mm变化时，反射损耗小于－20 dB的频率覆盖6.2～9.3 GHz，调节Fe_3O_4粒子的相对含量，复合材料的反射损耗最小可以达到－49.7 dB[28]。

Bi Hui等人在碳微线圈表面镀镍，其复磁导率实部、虚部及磁损耗角明显增大，说明其由介电损耗转变为介电损耗和磁损耗[29]。Zhao等人在多壁碳纳米管上沉积Co-Fe合金，包覆Co-Fe合金的多壁碳纳米管与未镀合金相比，具有较好的电磁波吸收效果[30]。Qiu等人采用溶胶-凝胶法制备了$BaFe_{12}O_{19}$和TiO_2复合纳米薄膜，其最大吸收为40 dB[31]。

综上所述，雷达吸波材料应用于军品隐身包装中，其物理涂覆法、化学镀法、热喷涂法、溶胶-凝胶法等4种制备包装涂层的方法各有利弊，其优缺点见表1。

表1 雷达吸波材料涂层制备方法与优缺点对比

Tab.1 Comparison of advantages and disadvantages between different preparation methods of radar absorbing materials

制备方法	技术步骤	主要优缺点
物理涂覆法	加入分散剂和粘结剂；使微粒或短纤维分散均匀，得到浆料；将浆料刷涂在基片上，形成涂层；在一定温度下烘干或烧结，反复数次，形成厚度可控的涂层。	工艺简单、涂层致密、涂层厚度可控制
化学镀法	在无电流通过时借助还原剂在同一溶液中发生氧化还原反应；使金属离子还原沉积在零件表面上	适用于大多数无机粉末和纤维芯材
热喷涂法	利用某种热源将涂层材料加热到熔融或半熔融状态；借助焰流或高速气体将其雾化；雾化后的粒子喷射到基体表面，沉积成有某种功能的涂层	涂层温度可控
溶胶-凝胶法	将金属有机或无机化合物制得溶胶；溶胶脱水，溶胶逐渐变粘稠，成为略显弹性的固体凝胶；将凝胶干燥、焙烧。	材料均匀度、纯度高，工艺简单，不需昂贵设备

4 展望与发展趋势

随着探测系统性能的提高和种类的增加，未来武器装备面临的战场威胁环境将更加恶劣，对隐身性能的要求也更高，相应地对目标雷达特征抑制的主要技术手段之一的雷达吸波材料就提出了更高的性能要求。为此，需要在大力挖掘当前各类吸波材料潜力的基础上，积极开展新材料、新概念、新机理、新技术途径的探索研究。传统吸波材料很难满足隐身材料“薄、轻、宽、强”的要求，等离子隐身技术、纳米吸收体、导电高聚物和手征材料等隐身技术与材料，由于其特殊的吸波性能将是今后研究发展的方向。同时，因为在现代战争中多种探测手段是同时运用的，即使对付单一探测或制导手段，由于对敌方探测手段的不可预知性，也要求自身具有多方面的隐身功能，即复合、多频谱隐身材料是军品隐身包装的发展方向；同时战场环境瞬时变幻，材料特征信息随环境改变而自动调整的智能隐身材料(是一个包括信息感知与获取、数据或图像处理、反馈控制技术以及材料技术的综合研究领域，包括智能变色、智能吸波等，如美国的变色龙漆，英国研究的智能雷达吸波材料的材料反射系数会随外界电厂的变化而快速变化)将是未来很长一段时间的研究重点。

参考文献：

[1] 郭宝华，马宏亮，陈兴刚. 军品隐身防护包装材料应用研究[J]. 包装工程，2005，26(6)：194－195.

[2] 何益艳. 吸收雷达波包装材料的研究进展[J]. 包装工程，2002，23(3)：92－98.

[3] 郭清泉，陈焕钦. 涂覆型军品隐身包装的研究现状及发展趋势[J]. 涂料工业，2003(6)：39－42.

[4] 李洪瑞，刘长华，朱守中. 雷达吸波材料技术研究综述[J]. 中国西部科技，2008，7(25)：6－16.

[5] 谢俊磊，杜仕国，施冬梅. 新型雷达吸波材料研究进展[J]. 工艺与材料，2008(7)：58－62.

[6] CAO Mg，SONG W，HOU Z，et al. The Effects of Temperature and Frequency on the Dielectric Properties，Electromagnetic Interference Shielding and Microwave-absorption of Short Carbon Fiber Silica Composites[J]. Carbon，2010，48(3)：788－790.

[7] 郭洪范，朱红，林海燕，等. 导电高分子在雷达吸波材料中的应用研究进展[J]. 化学工程师，2007，145(10)：27－

29.

[8] YOUJI K. Character Istics of a Broad Band and Thin Ferrite Absorbing Wall[C]. Proc IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility . Tokyo: IEEE Publication,1989:780－783.

[9] PETROV V M,GAGULIN V V. Microwave Absorbing materials[J]. Inorg Mater,2001,37(2):93－98.

[10] XIE W,CHENG H F,CHU Z Y,et al. Radar Absorbing Properties of Light Radar Absorbing Materials Based on Hollow-porous Carbon Fibers [J]. Inorg Mater,2009,24(2):320－324.

[11] DING C X,FAN C B,ZHANG L H,et al. Study on Synthesis of New-type Retinyl Schiff Base Salts and Microwave Absorbing Performance[J]. Tech Develop Chem Ind,2006,35(4):1－3.

[12] 蒋立勇,穆永民,史林兴,等. 纳米雷达吸波材料的研究[J]. 中国科技论文在线,2007,2(4):281－283.

[13] 包蕾,姜继森. 磁性颗粒导电高分子纳米复合材料的研究进展[J]. 材料科学与工程学报,2005,23(6):924－928.

[14] 秦嵘,陈雷. 国外新型隐身材料的发展状况[J]. 宇航材料工艺,2007,30(4):17－l9.

[15] 张永祥,丁荣林,李韬,等. 六角型铁氧体吸波材料的研究[J]. 硅酸盐学报,1998,26(3):275－278.

[16] WATTS P C,HSU W K,BARNES A,et al. High Permittivity from Defective Multiwalled Carbon Nanotubes in the X-band [J]. Adv Mater,2003,15(7/8):600－603.

[17] 周亮,周万城,刘涛,等. 雷达吸波涂层制备技术的研究进展[J]. 材料导报,2011,3(25):10－14.

[18] MITRANO C, BALZANO A, BERTACCA M, et al. CFRP-based Broad-brand Radar Absorbing material[C]. 2008 IEEE Radar Conference . 2008: 1－6.

[19] LI Li-ming,XU Zheng. Physical Mechanisms of the Absorbing Function in Microwave Absorbing Material and its Composite Design [J]. Adv Ceram,2004,25(2):31－35.

[20] 简科. 雷达吸波材料的涂层结构设计[J]. 安全与电磁兼容,2009(3):72－75.

[21] LI Jin-lei,CHEN Kang-hua,FAN Ling-qiang,et al. Current Status and Developments in Radar Absorbing Materials [J]. J Funct. Mater,2005,36(8):11－16.

[22] KIM S S,KIM S T,AHN J M. Magnetic and Microwave Absorbing Properties of Co-Fe Thin Films Plated on Hollow Ceramic Microspheres of Low Density[J]. J Magn Mater, 2004, 271 (1): 39.

[23] CECILIA Bi,FABIO C,TEODORO V. Thermal Spraying and the Fabrication of Coatings with Tailored Electromagnetic Properties[J]. Inorg Chim Acta,2008,361(14－15):4071－4075.

[24] HE Y F,GONG R Z,NIE Y,et al. Optimization of Two-layer Electromagnetic Wave Absorbers Composed of Magnetic and Dielectric Materials in Gigahertz Frequency Band [J]. J Appl Phys,2005,98(8):49－53.

[25] ZOU Y H,JIANG L Y,WEN S C,et al. Enhancing and Tuning Absorption Properties of Microwave Absorbing Materials Using Meta-materials [J]. Appl Phys Lett, 2008,93(26):26－30.

[26] ZHOU Y,SHI X L,YUAN J,et al. Dielectric Response and Broadband Microwave Absorption Properties of Three-layer Graded ZnO Nanowhisker/Polyester Composites [J]. Chin Phys Lett,2007,24 (11):32－36.

[27] 马成勇,程海峰,唐耿平. 三层雷达吸波涂层的吸波性能研究[J]. 材料工程,2008(1):11－13.

[28] 李国显,王涛,薛海荣,等. 石墨烯/Fe_3O_4 复合材料的制备及电磁波吸收性能[J]. 航空学报,2011,32(07):1－7.

[29] HUI B,KAI-CHANG K,KOSTYA O,et al. Microstructure and Electromagnetic Characteristics of Ni Nanoparticle Film Coated Carbon Microcoils [J]. J Alloys Compd, 2009,478(1－2):796－798.

[30] ZHAO Y,ZHENG H,XUE Y,et al. Studies of Electromagnetic Properties of MWCNTs after Electroless Plating with Co-Fe Alloy [J]. Chin J Aeronaut,2010,23(3):377－379.

[31] QIU J X,LAN L Y,ZHANG H,et al. Microwave Absorption Properties of Nanocomposite Films of $BaFe_{12}O_{19}$ and TiO_2 Prepared by Sol-gel Method [J]. Mater Sci Eng B,2006,133(1－3):191.