

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2011.04.020

多层雷达波段吸波涂层的研究现状及展望

李斌玲¹, 谢国治¹, 宋晓龙¹, 陈宇¹, 张豹山², 唐东明², 杨焱², 陆怀先²

(1. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 210098 ; 2. 南京大学电子科学与工程学院, 江苏 南京 210093)

摘要 : 从多层吸波涂层的反射率计算及优化设计 2 个方面介绍了多层吸波材料理论的研究进展 ; 从阻抗匹配型和阻抗更迭型 2 个设计方向概括了国内外多层吸波材料研究的主要试验成果 , 指出了多层吸波涂层研究当前存在的问题和今后的发展方向 , 如涂层厚、质量大等问题以及吸波材料发展的复合化、智能化的发展趋势 , 对多层吸波涂层的发展前景进行了展望。

关键词 : 吸波材料 ; 多层结构 ; 反射系数 ; 优化设计

中图分类号 : V218 文献标志码 : A 文章编号 : 1000-1980(2011)04-0464-06

现代战争中 , 武器装备的隐身化能打破现有的攻防格局 , 提高武器的生存能力和作战效能^[1]。雷达隐身技术是众多隐身技术中研究最早和发展最快的现代隐身技术。提高雷达隐身技术的途径主要有 2 种 (a)对武器进行外形改造 (b)采用雷达吸波材料。其中 , 吸波材料的设计制造难度较小 , 成本较低 , 成为当前隐身技术的研究热点。理想的吸波材料应具有厚度薄、质量轻、吸收频带宽、吸波能力强 (薄、轻、宽、强) 等特点。而单一的吸波结构存在着电磁参数可调范围小、吸收频带窄等问题 , 不能满足隐身技术对涂层质轻频宽的要求。多层雷达吸波材料的可设计自由度大、面密度较低 , 能有效改善吸波效果和展宽频带 , 具有广阔的应用前景。对多层涂层的研究现主要集中于基础理论和计算机模拟计算方面^[2] , 而基于理论研究所制备的涂层 , 其厚度一般都在几 mm 以上 , 不宜作为涂敷性吸波涂层来应用^[3]。

本文通过对多层吸波结构理论和试验研究成果的分析和讨论 , 进一步研究了多层吸波材料的吸波特性 , 并对多层吸波材料的发展前景进行了展望。

1 多层吸波材料的理论设计

多层吸波材料的吸波机制较单层吸波材料复杂 , 从理论出发进行材料的优化设计 , 可以缩短研制周期 , 提高试验效率。目前对吸波材料的理论研究较多集中于多层吸波材料反射率的推导计算及吸波材料的优化设计。

1.1 多层吸波材料反射系数的理论推导

多层吸波涂层的反射系数由各层磁导率、介电常数和厚度等参数决定 , 计算比单层结构要复杂得多。近年来 , 多层材料反射系数求解方法的研究取得了很多成果 , 出现了一些新的求解方法 , 主要有等效传输线法、跟踪算法、递推公式和射线分析法等 , 但每一种方法都有各自的优点及局限性^[4-5]。

1.1.1 等效传输线法

等效传输线法是目前应用最广的一种多层材料反射系数求解方法。该方法利用传输线理论导出多层涂层反射系数 , 其优点是计算简洁。对于 n 层吸波材料 , 由等效传输线法可求得 k 层和 $k-1$ 层界面处的吸波输入阻抗 , 即

$$Z_{in}(k) = Z_c'(k) \frac{Z_{in}(k-1) + Z_c'(k) \tanh \gamma(k) d(k)}{Z_c'(k) + Z_{in}(k-1) \tanh \gamma(k) d(k)} \quad (1)$$

式中 : $Z_c'(k)$ —— k 层的特征阻抗 ; $Z_{in}(k)$, $Z_{in}(k+1)$ —— k 层和 $k+1$ 层的输入阻抗 ; $d(k)$ —— k 层的厚度 ; $\gamma(k)$ —— k 层的复传播系数。

收稿日期 : 2010-07-29

基金项目 : 河海大学中央基础科研业务费 (B1020154) ; 总装备部预研项目

作者简介 : 李斌玲 (1989—) , 女 , 福建宁德人 , 本科在读 , 材料科学与工程专业。E-mail : fjlbinling@163.com

按式(1)迭代计算得到自由空间界面处的输入阻抗 $Z_{in}(k) (k=1, 2, \dots, n)$ 将 $Z_{in}(k)$ 代入反射率计算公式即可求得反射系数^[4]. 反射率 R 的计算公式为

$$R = 20\lg \left| \frac{Z_{in}(1) - Z_{in}(n)}{Z_{in}(1) + Z_{in}(n)} \right| \tag{2}$$

1.1.2 跟踪算法

跟踪算法是一种新型的优化设计方法. 其基本原理是模拟入射电磁波在吸波体中的传播过程, 即在电磁波发生反射、折射后, 对反射波和折射波进行跟踪, 反复计算跟踪电磁波的吸收情况, 直到电磁波全部损耗殆尽或射出吸波体外, 对射出吸波体外的电磁波求和即得反射波强度. 利用计算机进行数值计算并配合适当的优化方案, 能够较为快速、精确地对候选材料进行方案组配、性能预报和评价^[6-7].

1.2 多层吸波材料的优化设计

因为多层吸波材料的吸波性能与各层的磁导率、介电常数、厚度等参数有关, 所以在材料性能指标已知的情况下, 通过优化处理就能使设计更有效率^[7]. 在吸波材料优化设计中, 运用系统方法将宏观、微观材料科学的基本理论、试验数据与结构材料的优化设计策略相结合, 寻求新型吸波结构材料的突破口, 可使所设计的吸波材料性能达到最佳效果^[8-10]. 优化设计的主要内容是吸波机制分析、计算模型构建、目标函数构造及优化方法选取等^[8].

常用的优化方法有遗传算法、模拟退火法、频带法、单纯形法、粒群算法等. 每一种优化方法都有各自的优势, 但也存在一些不足. 比如: 单纯形法对初始值有较大的依赖性, 往往只能提供局部最优解; 模拟退火法虽不再依赖初始值, 但其运算效率不高; 粒群算法具有智能特征, 但存在着稳定性有待进一步提高以及如何有效降低运算风险等问题. 遗传算法是研究得较多且较为成熟的一种方法, 它具有稳健、高效、无需求等特点, 适合于处理多层吸波材料优化这类多目标复杂系统的设计问题, 因此在多层吸波材料的优化设计中得到广泛应用和持续发展^[9].

2 多层吸波材料的研究现状

吸波材料的多层设计可分为阻抗渐变型和阻抗型更迭结构设计 2 种^[11]. 具有阻抗渐变结构的多层吸波体, 随着磁损耗介质含量的变化, 多层涂层结构的层间阻抗呈渐变式变化, 在各涂层之间、表层与空气之间达到最大可能的阻抗匹配, 使空间入射来的电磁波尽可能地进入吸波材料而被损耗吸收. 薄层材料设计多采用阻抗更迭结构(又称陷阱型), 即在高介电常数、高磁导率的损耗层之间加入无损耗的低介电常数层, 在损耗层之间形成多次反射和多次吸收, 从而提高吸收率和展宽频带.

从多层吸波材料的研究结果^[12]来看, 3 层结构比双层结构的吸波性能要好, 4 层结构以上的吸波性能改善较少且工艺较复杂.

2.1 阻抗匹配型多层吸波材料

阻抗匹配设计可以使得材料的表面输入阻抗和自由空间的波阻抗匹配起来, 使入射电磁波能最大限度地进入材料内部并被吸收掉^[13]. 多层匹配涂层吸波材料可以通过改变各层的厚度、复介电常数、复磁导率等参数, 控制各层吸收剂的种类、比例等, 进而调整各涂层的输入阻抗, 实现阻抗匹配, 以获得良好的吸波性能. 国外多层匹配的研究较多. 日本电气公司研制的双层吸波材料的吸收层由铁氧体粉末和黄铜短纤维、环氧树脂组成, 变换层由铁氧体和环氧树脂组成^[12]. 与单一吸收层相比, X 波段 $R < -20$ dB 的带宽从 0.5 GHz 增加到 4 GHz, 提高了 8 倍. Kim 等^[14]用化学镀的工艺在空心陶瓷基体上沉积了 Co 和 $Co-Fe$ 薄膜, 制备的吸波剂不仅具有很低的密度, 还具有很强的吸波能力. 通过调整薄膜中 Co 含量可改变吸波剂的吸收峰和频谱效应, 其涂层的厚度为 1.5 mm 时, 最大吸收位于 10.1 GHz 处, R 约为 -18.2 dB.

关于多层匹配, 国内相关的研究也很多. 沈国柱等^[15]研制的外层为碳纤维复合材料、内层为 M 型铁氧体复合材料的双层吸波材料, 当层厚为 1.5 和 0.5 mm 的双层复合材料时, R 在 -10.0 dB 以下的有效带宽覆盖了整个 Ku 波段, 最大吸收值位于 15.3 GHz 处, R 约为 -23.0 dB. 如图 1 所示. 图中: f 为电磁波频率; M 代表 M 型铁氧体复合材料; C 表示 0.2% 短切碳纤维复合材料; M 0.5 C 1.5 表示内层 M 厚度为 0.5 mm、外层 C 厚度为 1.5 mm 的双层复合材料, 其余类推.

将金属粉、铜纤维及铁氧体 3 种材料复合(铜纤维与铁氧体组成底层, 不同比例的金属粉、铁氧体组成面

层),可制备出双层结构玻璃纤维增强塑料复合吸波材料^[16].有关研究发现,金属粉适度的表面氧化可以降低相对电导率,有利于提高复合材料的吸波性能.娄明连等^[17]用3种不同磁导率 μ_i 的铁氧体复合电波吸收材料制成双层结构电波吸收体,7~12 GHz频段的吸收量-频率曲线(A-f曲线)与单层基本相似,存在2个吸收峰,但第2吸收峰移向高频,A由20 dB增至37 dB.在吸收介质层与反射板之间以及2个介质层之间涂以介电型介质膜,使第1吸收峰移向高频,A分别增至29 dB和27 dB.马成勇等^[13]依据阻抗匹配原理,将羰基铁粉和电损耗介质相结合,通过改变各层中磁损耗介质的含量,制备出一种3层雷达吸收涂层,显著提高了吸波力.该涂层厚度为1.20 mm,面密度为2.80 kg/m²时,涂层在8~18 GHz频段范围内反射率小于-10 dB的带宽达6.0 GHz,且涂层在X和Ku波段的整体吸波性能得到改善.

吕艳红^[18]采用等离子喷涂工艺制备纳米复合镍粉/羰基铁粉双层雷达吸波涂层,并研究了涂层的吸波性能.结果表明:涂层中低频段的吸波性能明显增强,涂层厚度为1 mm时,吸波曲线在6~18 GHz频段内的反射率低于-5 dB,吸收峰值达到-17.96 dB.高永芳等^[19]采用制备一定电导率的导电非磁性纤维作为吸收剂,与非导电纤维的均匀混合设计了具有阻抗渐变结构的双层吸波材料,且吸波纤维 μm 级的直径尺寸使该材料具有较低的界面反射和较高的电损耗角.研究表明:吸波层中导电纤维的占空比为某一定值时,吸波效果最好,最大吸收峰值在13.6 GHz($R = -26.165 \text{ dB}$)处, $R < -10 \text{ dB}$ 的频宽为8.285 GHz,导电纤维的占空比太大或太小均会降低吸波效果.

上述研究表明,多层匹配涂层吸波材料的吸波性能明显高于单层材料,吸波频带更宽、吸波能力更强、涂层厚度更薄.多层匹配涂层吸波材料是一种很有发展前景的高性能吸波材料.而从目前的研究情况来看,大部分多层匹配吸波材料都是从理论和模拟角度来进行多层结构设计的,且对4层结构以上的吸波材料研究较少.

2.2 阻抗更迭型多层吸波材料

高磁导率金属材料一般具有高电导率,高频下易产生大涡流,对电磁波强反射而难以吸收.采用多层化设计,用绝缘介质层将高磁导率金属层间隔形成纳米多层膜复合结构,有可能获得高频下的高磁导率和大磁损耗^[20-21].Kumurdjian^[22]成功地运用真空沉积法制成超薄夹层结构粉碎而得到宽频吸波纳米级微屑,这种纳米微屑是由超薄不定形磁性薄层及绝缘层堆叠而成,磁性层厚度为3 nm,绝缘层厚度为5 nm的夹层结构具有很好的微波导率,在0.1~10 GHz的频带内,磁导率的实部和虚部均大于6,与黏结剂复合的吸波涂层在0.05~50 GHz频率范围内具有良好的吸波性能.国外学者利用溶胶-凝胶法制备了BaFe₁₂O₁₉/TiO₂替代式多层复合膜(NCMF),并对其微波吸收性能进行了研究^[23].NCMF的微波吸收性能极好,最大微波损失系数接近于-40 dB,损失系数在-10 dB以上的频率范围大于7 GHz,是理想的微波吸收材料.韩国科技研究所采用铁氧体-介电体层状结构,通过改变铁氧体中心频率,获得了比单独铁氧体大的衰减^[16].Giannakopoulou等^[24]利用大的磁损耗和介电损耗的物质设计了包括吸收层(吸收性能比单层涂层强)和损耗层的双层吸波涂层,这种双层结构吸波涂层的吸波性能明显地优于单层结构吸波涂层.

国内这方面的研究也较多.齐宇等^[11]采用3层陷阱结构设计,有效展宽了吸收频带.其中涂料底层设计选用89%羰基铁粉,中间层选用15%的空心玻璃微球,面层选用81%羰基铁粉.当该结构厚度为2.15 mm(底、中、面层厚度分别为0.6,1.1,0.45 mm),面密度为4.5 kg/m²时,吸收频率6~18 GHz范围内,材料的反射率不大于-10 dB,且该吸波涂料的耐环境性能优良.邓联文等^[25]研制了一种用于微波吸收的高磁损耗型纳米多层膜材料,该材料采用了软磁合金层CoFeZrNd和绝缘介质层SiO₂交替的周期结构.图2是根据谐振腔法测得的2~10 GHz处磁导率数据拟合而得的CoFeZrNd/SiO₂多层膜的微波磁谱.从图2可以看出,此多层膜的磁导率和磁损耗都出现了较大值,自然共振频率约为3 GHz,且在2 GHz处,磁导率实部 $\mu' = 121 \text{ H/m}$,磁导率虚部 $\mu'' = 147 \text{ H/m}$,表明了这类纳米多层膜在微波吸收领域应用的可能性.马强等^[26]采用直流/射频磁控溅射方法和不连续多层交替沉积工艺制备了CoFeB/MgO纳米磁性膜,并研究了微波频段下的电磁性能,

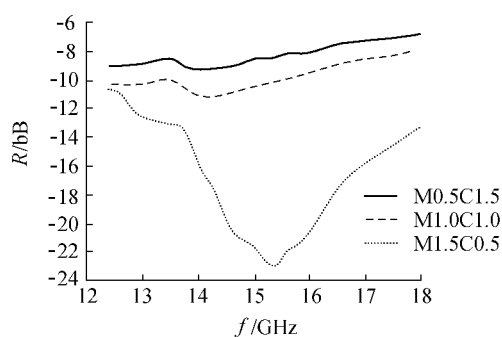


图1 双层铁氧体复合材料反射率变化曲线^[15]

Fig. 1 Reflectivity curves of double-layer ferrite composite materials^[15]

结果表明 通过调整 CoFeB 合金相和 MgO 介质相的相对含量可有效调控薄膜的微结构和电磁性能,并且可在 $\text{Co}_{64}\text{Fe}_{24}\text{B}_{12}$ (0.7 nm)/ MgO (0.4 nm) 薄膜中获得优良的微波软磁性能和高电阻率,其饱和磁化强度为 1.3 T,电阻率为 $3.4\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}$, μ' 和 μ'' 在 1.59 GHz 处均高于 240 H/m,并且在 0.9 ~ 2 GHz 宽频段范围内均大于 100 H/m. Chen 等^[27] 研制了以羰基铁粉和炭黑 (CI/CB) 作为吸收剂、环氧树脂 (ER) 作为基的厚度为 1.2 mm 的双层复合吸波涂层,并将 SiO_2 作为波传输材料加入匹配层,结果表明:在 2 ~ 18 GHz 范围内随着匹配层中 SiO_2 含量的增加,反射损耗增强;当达到质量浓度最优比例 ($\rho(\text{SiO}_2):\rho(\text{CI}):\rho(\text{ER})=2:5:1$) 时,反射率达到 -17.3 dB,有效吸收带宽(反射率小于 -4 dB)达到 5.7 GHz,而不添加 SiO_2 的复合膜的最小反射率为 -5.9 dB,有效吸收带宽(反射率小于 -4 dB)仅为 4.1 GHz.

2.3 新型多层复合吸波材料

近年来,国内外学者在研究改进传统吸波材料的同时,对新型多层吸波涂层进行了有益的探索并取得了一定的成果.目前研究较多的新型吸波材料主要有纳米吸波材料、导电高聚物吸波材料和手性吸波材料.其中纳米吸波材料是研究热点,有广阔的应用前景.

纳米吸波材料由于具有量子尺寸效应、宏观量子隧道效应和界面效应等,不仅磁损耗大,而且具有频带宽、质量轻和厚度薄等特点.国外在这方面的研究比较深入.美国明尼苏达采矿和制造公司在中空玻璃球(直径 $D=20\sim60\text{ nm}$) 表面利用溅射方法制备了多层纳米膜吸收剂,自内向外依次是中空玻璃球、损耗层和绝缘层.当这种吸收剂体积填充率为 60%、涂层厚度为 2.18 mm 时,垂直入射电磁波在 9.5 ~ 11.5 GHz 频率范围内反射率小于 -10 dB,在 7.5 ~ 20 GHz 频率范围内反射率小于 -5 dB.这种多层纳米颗粒膜吸收剂由于在每个单个粒子中引入了匹配设计,大大提高了吸波效率^[28].国外有关研究人员利用超声波将平均粒径 30 nm 的超细金属钴粉均匀分散到聚碳硅烷中,通过熔融纺丝以及不熔化处理和烧结,制备出了具有良好力学性能、电阻率连续可调的掺混型磁性 SiC 纤维^[29].这种纤维与环氧树脂复合制备的多层结构吸波材料具有良好的微波吸收特性. Zhu 等^[30] 利用热压烧结研制出的多层梯度碳纳米管/二氧化硅 (CNTs/SiO_2) 复合材料,梯度多层样品有较好的吸波能力,吸收率是单层样品的 1.5 倍.

3 结 论

多层吸波材料能有效地扩展吸收带宽,其吸波性能明显地优于单层吸波材料.各种方法导出的多层吸波涂层的反射系数与电磁参数的关系,为试验提供了理论指导,能使吸波材料优化设计、吸波性能达到最佳.

目前制备得到的多层材料存在涂层厚、质量大等问题,影响了武器装备的使用性能.因此,如何在保证涂层有较强的吸波能力的前提下,降低多层吸波材料的厚度是目前吸波材料研究领域的一个难点.近年来兴起的新型吸波材料,如改性的纳米多层膜吸波材料,对吸波效果有了很大的改善,并且实现了吸波材料的轻质高强目标,有很好的发展前景,有望实现吸波材料薄、轻、宽、强的总体目标.此外,笔者的研究发现了异质多层膜的电磁参量调控现象,掌握这种现象的形成机制有望在多层膜吸波材料上获得大的突破.

参考文献:

[1] 邢丽英.隐身材料[M].北京:化学工业出版社,2004.
[2] 曹茂盛,房晓勇.多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 Mao-sheng, FANG Xiao-yong. Intelligent computer-aided design for multi-coating layer absorber[J]. Journal of Yanshan University, 2001, 25(1):9-13. (in Chinese))
[3] 张海丰.多层吸波材料吸波特性的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2003.
[4] 王晨,顾家琳,康飞宇.吸波材料理论设计的研究进展[J].材料导报,2009(5):5-8.(WANG Chen, GU Jia-lin, KANG Fei-yu. Research progress in theoretical designs of microwave absorbing materials[J]. Materials Review, 2009(5):5-8. (in Chinese))
[5] 夏新仁,邓发升.多层 RAC 特性分析[J].上海航天,2008(4):11-14,64.(XIA Xin-ren, DENG Fa-sheng. Character analysis of

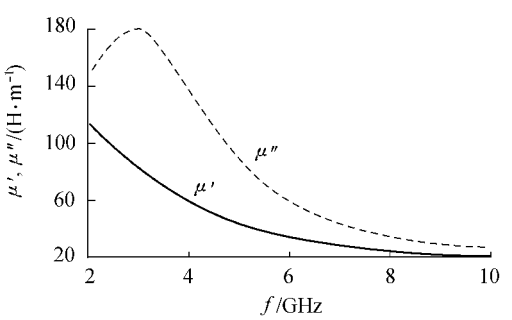


图 2 CoFeZrNd/SiO₂ 多层膜的微波磁谱^[25]
Fig. 2 Microwave permeability spectra of CoFeZrNd/SiO₂ multi-layer film^[25]

- multi-layer radar absorbing coat[J]. Aerospace Shanghai 2008(4):11-14. 64.(in Chinese))
- [6] CAO Mao-sheng, ZHU Jing, YUAN Jie, et al. Computation design and performance prediction towards a multi-layer microwave absorber[J]. Materials & Design 2002, 23(6):557-564.
- [7] 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.(PENG Zhi-hui, CAO Mao-sheng, YUAN Jie, et al. Progress in design theory and methods research on radar absorbing materials[J]. Journal of Aeronautical Material 2003, 23(3):58-63.(in Chinese))
- [8] 贾杰, 谢宇, 李明俊, 等. 飞行器隐身结构材料优化设计与分析[J]. 航空科学技术, 2010(2):44-46.(JIA Jie, XIE Yu, LI Ming-jun, et al. Design optimization and analysis of stealth structural materials[J]. Aeronautical Science and Technology, 2010(2):44-46.(in Chinese))
- [9] 汪忠柱, 吴先良, 沙威. 基于加速遗传算法的多层微波吸收材料的优化设计[J]. 磁性材料及器件, 2009, 40(1):28-31, 34.(WANG Zhong-zhu, WU Xian-liang, SHA Wei. Optimized design for multi-layer microwave absorbing materials based on accelerating genetic algorithm[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices 2009, 40(1):28-31, 34.(in Chinese))
- [10] 苏东林, 齐万泉, 张伟, 等. 基于遗传进化算法反演吸波结构电磁参数[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(1):71-74.(SU Dong-lin, QI Wan-quan, ZHANG Wei, et al. Getting parameters of absorbing structure based on genetic evolutionary algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics 2008, 34(1):71-74.(in Chinese))
- [11] 齐宇, 黄大庆, 何山. 多层复合吸波涂料设计与试验研究[J]. 航空材料学报, 2010, 30(2):89-93.(QI Yu, HUANG Da-qing, HE shan. Design of multi-absorbing composite coatings and thereof[J]. Journal of Aeronautical Materials 2010, 30(2):89-93.(in Chinese))
- [12] 胡传娥. 隐身涂层技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [13] 马成勇, 程海峰, 唐耿平, 等. 三层雷达吸波涂层的吸波性能研究[J]. 材料工程, 2008(1):11-13.(MA Cheng-yong, CHENG Hai-feng, TANG Geng-ping, et al. Research on absorbing properties of triple-layer radar absorbing coatings[J]. Journal of Material Engineering 2008(1):11-13.(in Chinese))
- [14] KIM S S, KIM S T, AHN J M, et al. Magnetic and microwave absorbing properties of Co-Fe thin films plated on hollow ceramic microspheres of low density[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 2004, 271(1):39-45.
- [15] 沈国柱, 徐政, 张先如, 等. 铁氧体和碳纤维双层复合材料吸波性能研究[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2008, 36(3):379-382, 401.(SHEN Guo-zhu, XU Zheng, ZHANG Xian-ru, et al. Microwave absorbing properties of double-layer composites based on M-type ferrite and carbon fiber[J]. Journal of Tongji University: Natural Science 2008, 36(3):379-382, 401.(in Chinese))
- [16] 谭业发, 李丽光, 李文远. 国内电磁波吸收材料研究进展[J]. 新材料产业, 2006(11):34-37.(TAN Ye-fa, LI Li-guang, LI Wen-yuan. Domestic research development on microwave absorbing materials[J]. Advanced Materials Industry, 2006(11):34-37.(in Chinese))
- [17] 娄明连, 阚涛. 铁氧体多层结构电波吸收体的研究[J]. 安徽大学学报:自然科学版, 1999, 23(2):34-38.(LOU Min-lian, KAN Tao. Research on the multilayer ferrite EM wave absorption material[J]. Journal of Anhui University: Natural Science Edition, 1999, 23(2):34-38.(in Chinese))
- [18] 吕艳红. 纳米复合双层雷达吸波涂层研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2010, 33(1):98-100.(LV Yan-hong. Study on the double-layer radar absorbing coating[J]. Ordnance Material Science and Engineering 2010, 33(1):98-100.(in Chinese))
- [19] 高永芳, 时家明. 一种双层吸波材料的制备与吸波特性研究[J]. 表面技术, 2010, 39(2):93-95.(GAO Yong-fang, SHI Jia-ming. Design and research on absorbing properties of a kind of double-layer absorbing material[J]. Surface Technology 2010, 39(2):93-95.(in Chinese))
- [20] GRIMES C A. EMI shielding characteristics of permalloy multiplayer thin films[J]. IEEE Transactions on Magnetic, 1994(5):210-220.
- [21] KORENIVSKI V. Magnetic films for GHz application[J]. Journal of Applied Physics, 1997, 81(8):1024-1026.
- [22] KUMURDIJIAN P. High frequency electromagnetic radiation absorbent coating comprising a binder and chips obtained from a laminate of alternating amorphous magnetic films and electrically insulating France 9140046[P]. 1991-07-01.
- [23] 廖际常. BaFe₁₂O₁₉/TiO₂ 替代式多层纳米复合膜的微波吸收性能[J]. 稀有金属快报, 2008, 27(2):43-44.(LIAO Ji-chang. Microwave absorbing properties of BaFe₁₂O₁₉/TiO₂ substitutional nano-multilayer film[J]. Rare Metals Letters, 2008, 27(2):43-44.(in Chinese))
- [24] GIANNAKOPOULOU T, OIKONOMOU A. Double-layer microwave absorbers based on materials with large magnetic and dielectric losses[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 2004, 271(2/3):224-229.
- [25] 邓联文, 江建军, 冯则坤, 等. 高磁损耗型纳米多层膜研究[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2004, 32(11):51-53.(DENG Lian-wen, JIANG Jian-jun, FENG Ze-kun, et al. High magnetic loss nano-multilayer film for control of EMI[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition 2004, 32(11):51-53.(in Chinese))

[26] 马强 ,江建军 ,别少伟 ,等 .CoFeB/MgO 不连续多层纳米软磁薄膜微波电磁特性[J].物理学报 ,2008 ,57(10) :6577-6581.(MA Qiang ,JIANG Jian-jun ,BIE Shao-wei ,et al. Electromagnetic and microwave properties of discontinuous CoFeB/MgO soft magnetic multilayer films[J]. Acta Physica Sinica ,2008 ,57(10) :6577-6581.(in Chinese))

[27] CHEN Li-yang ,DUAN Yu-ping ,LIU Li-dong ,et al. Influence of SiO₂ fillers on microwave absorption properties of carbonyl iron/carbon black double-layer coatings[J]. Materials & Design ,2011 ,32(2) :570-574.

[28] 谢俊磊 ,杜仕国 ,施冬梅 .新型雷达吸波材料研究进展[J].飞航导弹 ,2008(7) :58-61.(XIE Jun-lei ,DU Shi-guo ,SHI Dong-mei. Research progress on new radar absorbing materia[J]. Winged Missiles Journal ,2008(7) :58-61.(in Chinese))

[29] 唐恩凌 ,王崇 .纳米雷达隐身吸波材料[J].飞航导弹 ,2009(3) :57-60.(TANG En-ling ,WANG Chong. Nano radar absorbing materia[J]. Winged Missiles Journal ,2009(3) :57-60.(in Chinese))

[30] ZHU Yong ,CHEN Ming-xia ,PAN Yu-bai ,et al. Gradient multilayer structural design of CNTs/SiO₂ composites for improving microwave absorbing properties[J]. Materials & Design ,2011 ,32(5) :3013-3016.

Progress and prospect of multi-layer radar absorbing coatings

LI Bin-ling¹ , XIE Guo-zhi¹ , SONG Xiao-long¹ , CHEN Yu¹ , ZHANG Bao-shan² ,
TANG Dong-ming² , YANG Yi² , LU Huai-xian²

(1. College of Mechanics and Materials , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;
2. School of Electronic Science and Engineering , Nanjing University , Nanjing 210093 , China)

Abstract : The theoretical design of multi-layer absorbing materials was reviewed in terms of their reflectivity calculation and optimization design . The experimental achievements of multilayer absorbing materials were summarized based on the impedance matching and impedance supersession designs of multi-layer absorbing materials . The problems in present research , such as thick coating , and large mass , were pointed out . The use of composite and intelligent absorbing materials is the future development trend .

Key words : absorbing materials ; multi-layer structure ; reflection coefficient ; optimization design

《水利经济》征订启事

中国科技核心期刊 RCCSE 中国核心学术期刊
全国水利系统优秀期刊 全国农业系统优秀期刊

(邮发代号 28-252 ,CN32-1165/F ,双月刊)

《水利经济》是由河海大学与中国水利经济研究会共同主办的以技术性为主、兼顾学术性和管理性的科技期刊。《水利经济》1983 年创刊 ,是全国唯一的水利经济研究方面的专业性期刊。

主要刊登内容 :水经济学理论 ;水权、水市场与水价研究 ;水利工程建设中的经济效益、社会效益和环境效益评价与分析 ;水利工程经济评价和财务评价 ;水利工程资本运作与费用分摊研究 ;水利工程管理研究 ,以及水利事业和水利建设的管理体制体制改革研究 ;水库移民经济研究 ;农业经济与管理研究 ;生态与环境经济研究 ;生态建设领域中的水资源可持续发展研究等。

主要读者对象 :从事水经济、水利水电技术、经济管理、生态、环境、农业经济及管理工作的有关工程技术人员、科研人员、管理人员以及高等院校师生。

订阅办法 :读者可通过邮局订阅 ,也可直接向编辑部订阅 ,每期定价 6 元 ,全年 6 期共计 36 元。

编辑部地址 :南京市西康路 1 号 河海大学《水利经济》编辑部

邮政编码 210098 电话/传真 025-83786350 E-mail :jj@hhu.edu.cn

网址 :http://kkb.hhu.edu.cn/jj/index_jj.htm