文章编号:1673-0291(2015)03-0095-06 DOI:10.11860/j.issn.1673-0291.2015.03.016

多层吸波材料的优化设计模型

魏永生[1,2],郭玉宝[2],赵新生[1],王芳辉[3],朱红[3]
(1.江苏师范大学 物理与电子工程学院,江苏 徐州 221116;2.北京交通大学 理学院,北京 100044;
3.北京化工大学 理学院,北京 100029)

摘 要:通过优化设计,建立了多层吸波材料的理论模型.研究结果表明,多层吸波材料的最大吸收反射率与材料厚度的成单调递增关系,同时频宽却向低频方向发生偏移;反射损失(RL)<-10dB的频宽随着厚度增加而减小;双层吸波材料的吸波频率范围比单层吸波材料的宽,三层吸波材料的吸波频宽进一步增大,且在C波段和Ku波段有最大反射损失吸收峰.各单层吸波材料具有不同的电损耗和磁损耗性能,经过优化设计复合后,多层吸波材料中各层吸波材料的优异性能的合理叠加使吸波频宽增大.模型的计算结果与实验测定结果的吻合度很好.

关键词:吸波材料;优化设计;模型;实验验证
中图分类号:V257 **文献标志码**:A

Optimization model for designing multilayer absorbing material

WEI Yongsheng[1,2], *GUO Yubao*[2], *ZHAO Xinsheng*[1], *WANG Fanghui*[3], *ZHU Hong*[3]
(1. School of physics and electronic engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou Jiangsu 221116, China;
2. School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
3. School of Science, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: A theoretical model of multi-layer absorbing material is established for optimal design of multilayer structure of the absorbing material according to the working mechanism of the absorbing material. The results indicate that the maximum absorption reflectance and bandwidth are closely related with thickness of absorbing material both for single and multi-layer absorbing material. The maximum absorption reflectance increases and offsets to low frequency with the thickness increases. The bandwidth of Reflection Loss (RL)<-10dB decreases in that case. Absorbing frequency range of absorbing material in double layer is larger than that in single layer. Absorbing frequency range of absorbing material increase more in three layer of absorbing material, and the biggest loss reflected absorption peaks appeared two in C band and Ku band compared with one in single and double layer. This is because single absorbing materials have different frequency band of electric loss and magnetic loss. Frequency band of electric loss and magnetic loss of three layers absorbing material stack and interact with each other when single layer absorbing material compound together. Each layer of absorbing material excellent performance can be effective and reasonable stack when multilayer microwave absorbing materials compound together through the optimized design. Therefore, absorbing bandwidth increases in this case. The model results have very good alignment with experimental determination results.

Key words: absorbing material; optimization design; model; experimental verification

收稿日期:2014-12-17
基金项目:国家自然科学基金资助项目(21376113);江苏省自然科学青年基金项目资助(BK20140232);国防基础科研计划项目资助(A1420110023);江苏师范大学博士学位教师科研支持项目(13XLR019)
作者简介:魏永生(1984-),男,江苏睢宁人,博士,副教授,研究方向为新能源材料.**email**:weiys@jsnu.edu.cn.

吸波材料是实现隐身效果的关键,在军事领域具有很好的应用前景,早在第二次世界大战期间首次发现隐身材料[1-2].

由吸波原理可知,吸波材料的种类主要有两种类型,即磁损耗型和电损耗型.磁损耗型材料通过磁滞损耗、畴壁共振以及后效损耗等机制吸收、衰减电磁波,材料的复磁导率对吸波效率起主要作用.电损耗型材料是通过与电场的相互作用进行吸收电磁波,材料的介电常数在吸波效率中起主导作用.单一组分的吸波材料一般只具有电损或磁损一种机制,很难集两种功能于一体,无法满足实际应用的要求.因此,使用双层或多层吸波材料将具有单一电损或磁损功能的吸波材料复合在一起,提高吸波性能[3-5],是目前该领域研究的热点之一.

将多层吸波材料(RAMs)看作是一个平面层系[6],其吸波性能主要取决于反射系数[7-8].目前,关于吸波材料吸波性能的优化设计主要针对同类吸波材料或采取一种优化设计方法,对双层结构[9-10]和多层结构[11-12]吸波材料的研究鲜有报道.李承祖等[13]研究了单层和多层结构电磁波吸收材料电磁参数优化设计,通过增加材料的厚度降低对材料电磁性质参数的要求,并得到宽带高吸收性能.王相元等[14]研究了微波吸收材料的计算机辅助设计,从多种材料中选择最佳材料组合,以提高微波吸收性能.肖高智等[15]研制出薄壁型结构吸波材料,用 CAD 方法对多层结构材料进行设计,研究频率对多层吸波材料的影响规律.詹国栋等[16-17]设计了双层微波吸收涂层,研究发现吸波性能明显优于单层,带宽亦有所增加.金崇君等[18]研究薄隐身涂层中的电磁波传输特性及优化设计原则,并研制出低磁损耗高电损耗的复合材料.杨华军等[19]利用强扰动理论得到电磁参数的复数型积分方程组,用 Fortran 进行迭代求解法纤维布层板吸波材料的等效电磁参数.袁杰等[20-21]开发多层吸波材料计算机辅助设计系统,借助单纯形法对多层吸波材料参数进行优选、分层组配和性能预报.

众多文献从某一角度研究多层吸波材料与单层吸波材料的性能对比、材料厚度对吸波性能的影响、影响吸波性能的参数及其筛选,但是对多层吸波材料的优缺点和作用机理缺乏全面分析,在多层材料的筛选方法和原则方面研究较少[11-17].本文作者以反射损失为优化目标,基于吸波过程和材料涂层间的作用建立多层吸波材料理论模型,并通过实验结果来验证理论模型的准确性.

1 模型的建立

1.1 多层吸波材料的物理模型

电磁波与多层吸波材料之间的吸收和损耗机制较为复杂,影响多层吸波材料性能的因素主要有各层材料的磁性和介电参数、材料厚度,以及材料的排列顺序[20-21].设计吸波材料时,一方面需要提高介质对电磁波的吸收,另一方面需要考虑材料电磁参量之间的匹配度.计算机辅助设计可以为实验制备高性能多层吸波材料提供理论依据和支持[22].

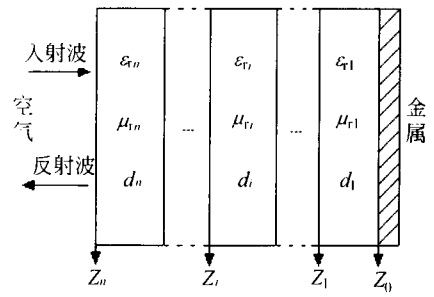


图 1 多层吸波材料的示意图

Fig. 1 Diagram of n- deck microwave absorbing material

为了拓宽吸波材料的频带,我们设计多层结构吸波材料,电磁参数在入射波方向上呈现梯度变化.在阻抗匹配原则指导下,减小不同电磁参数层间的界面反射,从而使得多层吸波材料具有宽频、高强度吸收和较大入射角度的特性.多层吸波材料的结构示意图如图 1 所示.

在多层吸波材料中,第一层与金属面接触,向外为多层材料,最外层与空气接触.参数 ε_{ri}、μ_{ri} 和 d_i 分别为第 i 层吸波材料的相对介电常数、相对磁导率和厚度;Z_i 为第 i 层吸波材料与第 $i+1$ 层吸波材料界面处的波阻抗.

1.2 模型的优化设计

设有一束单位振幅的电磁波垂直入射到多层吸波材料体上,则在吸收层中产生一系列沿正向传播的电磁波和沿反方向传播的反射波,如图 1 所示.根据 Kraus 的传输线阻抗转换方程[23],第 i 层波阻抗为

$$Z_i = \eta_i\left[\frac{Z_{i-1} + \eta_i \tanh(\gamma_i d_i)}{\eta_i + Z_{i-1}\tanh(\gamma_i d_i)}\right] \tag{1}$$

其中 Z_{i-1} 为第 i 层吸波材料与第 $i-1$ 层吸波材料界面处的波阻抗.

多层材料中的参数本征阻抗为

$$\eta_i = \eta_0\sqrt{\frac{\mu_{ri}}{\varepsilon_{ri}}} \tag{2}$$

其中

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = \sqrt{\frac{1}{1}} = 1 \tag{3}$$

$\mu_0 = 1$ 为自由空间磁导率,$\varepsilon_0 = 1$ 为介电常数.

第 i 层材料复传播常数 γ_i 为

$$\gamma_i = \frac{\mathrm{j}2\pi f}{c}\sqrt{\mu_{ri}\varepsilon_{ri}} \tag{4}$$

式中:c 为光速;f 为入射电磁波频率;j 为虚数单位.

第 i 层材料的相对磁导率为

$$\mu_{ri} = \mu'_{ri} - j\mu''_{ri} \tag{5}$$

第 i 层材料的相对介电常数为

$$\varepsilon_{ri} = \varepsilon'_{ri} - j\varepsilon''_{ri} \tag{6}$$

因为第 1 层表面金属导体的 $Z_0 = 0$,根据公式(1)可求出 Z_i,$1 \leqslant i \leqslant n$.

于是,空气与多层吸波材料界面的反射系数为

$$R = \frac{Z_n - 1}{Z_n + 1} \tag{7}$$

反射损失 RL 为

$$\mathrm{RL} = 20\lg | R | \tag{8}$$

$|R|$ 为反射系数 R 的模.

根据以上分析,我们得到以反射损失为目标函数(RL 的最小值),以式(1)~式(8)为限制条件的多层复合吸波材料优化模型:

$$\min \quad \mathrm{RL} = 20\lg | R |$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} R = \dfrac{Z_n - 1}{Z_n + 1} \\ Z_i = \eta_i\left[\dfrac{Z_{i-1} + \eta_i \tanh(\gamma_i d_i)}{\eta_i + Z_{i-1}\tanh(\gamma_i d_i)}\right] \\ \eta_i = \eta_0\sqrt{\dfrac{\mu_{ri}}{\varepsilon_{ri}}} \\ \eta_0 = \sqrt{\dfrac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \\ \gamma_i = \dfrac{\mathrm{j}2\pi f}{c}\sqrt{\mu_{ri}\varepsilon_{ri}} \\ \mu_{ri} = \mu'_{ri} - \mathrm{j}\mu''_{ri} \\ \varepsilon_{ri} = \varepsilon'_{ri} - \mathrm{j}\varepsilon''_{ri} \\ f \in (2,18) \\ 1 \leqslant i \leqslant n \end{cases} \tag{9}$$

2　模拟计算方法

根据上述模型,可以求解多层复合吸波材料达到最佳吸波性能时的材料组合方案.每一层吸波材料都有 6 个独立变量,即相对介电常数的实部 ε_r' 与虚部 ε_r'',相对磁导率的实部 μ_r' 与虚部 μ_r'',吸波层厚度 d 以及入射电磁波频率 f.根据公式(8),依次输入在特定频率下每层的 μ_r'、μ_r'、ε_r'、ε_r'和 d 的相应数值,即可计算出每层吸波材料在该频率下的反射损失.根据公式(1)可求出多层吸波材料反射损失随入射频率的变化曲线.

假定每层材料的厚度 d 在规定的有效范围内变化,则不同的厚度给出不同的反射损失,由此可求出反射损失的最小值,以及反射损失小于 -10 dB 时候的频宽.最后,比较不同厚度材料的最优反射损失和频宽最大值情况下的厚度组合.

3　模型结果及实验验证

3.1　单层吸波材料

单层吸波材料是由物理和化学性质均一的材料组成,本文的单层吸波材料是以镀钴碳纳米管构成,根据反射率公式[24]计算出不同厚度情况下单层吸波材料的反射损失理论结果,并与实验测试结果进行对比分析.

$$\mathrm{RL} = 20\lg\left|\frac{Z_{in} - 1}{Z_{in} + 1}\right| \tag{10}$$

其中

$$Z_{in} = \left(\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}\right)^{1/2}\tanh\left[\mathrm{j}\left(\frac{2\pi fd}{c}\right)(\mu_r\varepsilon_r)^{1/2}\right] \tag{11}$$

表 1　不同厚度吸波材料性能理论值

Tab.1　Theoretical performance values of absorbing material

厚度/mm	吸收峰/GHz	最大反射损失/dB	带宽(RL< -10 dB)/GHz
6	17.4	-16.880 2	—
7	14.6	-23.457 9	1.601 3
8	12.6	-28.593 9	1.309 0
9	13.0	-30.727 4	1.251 7
10	9.6	-21.437 0	1.013 4

表 1 所示的是匹配厚度分别为 6、7、8、9、10 mm 时,吸波材料吸收峰、最大反射损失的理论计算值.图 2 给出了不同厚度吸波材料的吸波性能数值模拟结果.从图中可以看出,随着匹配厚度的增大,反射损失峰向低频方向偏移,同时反射损失小于 -10 dB 时的频宽变小.图 3 给出了不同厚度单层镀钴碳纳米管(吸波材料)的反射损失实验测试结果.随着厚度的变化,镀钴碳纳米管的最大反射损失峰逐渐增大,最大反射损失频率随着厚度的增大向低频偏移.因此,实验测试结果与模型计算结果基本一致.从图 2 与图 3 结果的对比可以发现,材料厚度的增加使吸波材料的最大反射损失增大,使最大反射损失峰向低频偏移,并使 RL< -10dB 的频宽变窄.对于单层吸波材料,实验结果与模型结果十分吻合.

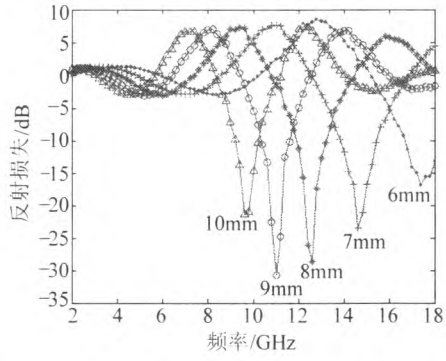


图2 不同厚度吸波材料吸波性能的数值模拟结果

Fig.2 Simulation performance results of absorbing material different thicknesses

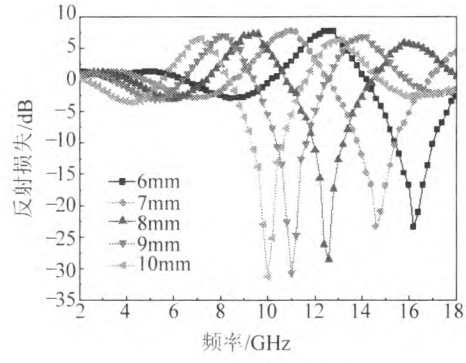


图3 不同厚度吸波材料吸波性能的实验测试结果

Fig.3 Experimental performance results of with absorbing material with different thicknesses

3.2 双层吸波材料

双层吸波材料的第一层(面层，d =3.0 mm)含40%(质量分数)羰基铁粉和60%环氧树脂，第二层(底层，d =1.0 mm)含5%碳纳米管和95%环氧树脂.吸波材料的模型模拟验证结果和实验测试结果如图4所示.可以看出，根据模型计算结果吸收带宽、吸收峰值及其对应频率、吸波性能与频率的变化关系，与实验结果一致.同时，双层吸波材料在RL<－10dB的频宽比单层吸波材料的大，其吸波频率范围比各单层吸波材料拓宽了[25].单层吸波材料羰基铁粉和碳纳米管在不同频率有吸收峰和吸波频宽，双层复合后两种吸波材料的电损和磁损性能因电阻抗和磁阻抗的叠加和相互影响使得吸波性能发生变化.模拟结果与实验结果之间存在微小偏差，其原因可能是由于电磁参数测量误差或者制备过程中产生的结构参数(如各层的厚度、吸波剂含量，材料表面平整度等)不同而导致.

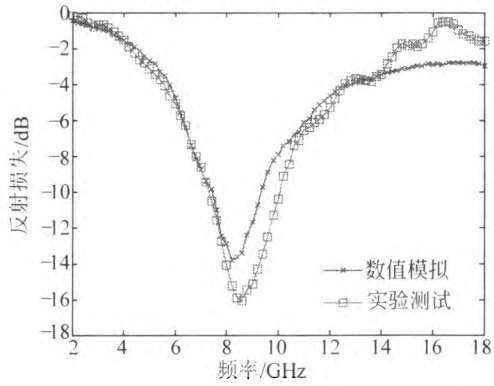


图4 双层吸波材料的模拟与实测反射率曲线

Fig.4 Measurement and simulation reflectivity curves of two layer structural absorbing material

3.3 三层吸波材料

吸波材料共有三层，第一层(面层，d =2.0 mm)是含40%(质量分数)羰基铁粉和60%环氧环氧树脂，第二层(夹心层，d =1.0 mm)是含5%(质量分数)碳纳米管和95%树脂的吸波层，第三层(底层，d =1.0 mm)是含55%(质量分数)环氧树脂和45%碳纳米管的吸波层.根据模型得到的反射率计算值和实测值如图5所示.

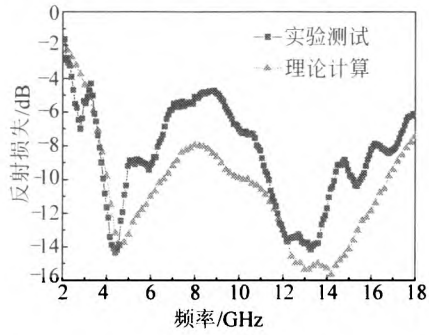


图5 三层吸波材料的模拟与实测反射率曲线

Fig.5 Simulation and measurement reflectivity curves of three layer structural absorbing material

从图5可见，宽频段三层结构吸波复合材料在2～18 GHz的雷达频率范围内，低于－5 dB的频宽达15.0 GHz，在C波段(4.6 GHz)和Ku波段(14.2 GHz)出现了两个吸收峰，峰值分别为－13.95 dB和－15.66 dB.其原因是，羰基铁/碳纳米管/环氧树脂复合后，各层材料间的结构发生改变，复合材料的电阻抗、磁阻抗也发生不同程度的变化，从而引起吸收峰偏移[25].宽频段羰基铁粉/碳纳米管/环氧树脂三层结构吸波复合材料在2～18 GHz的扫频范围内，复合材料的反射率在2.40～18.00 GHz范围内均低于－5 dB，频宽达15.60 GHz.其中在4.32 GHz(C波段)和12.20 GHz(Ku波段)出现了两个吸收峰，峰值分别为－11.08 dB和－10.71 dB.对比图5中的两个曲线可以看出，模型计算的结果与实测结果具有一致性.与双层吸波材料性能相比，三层吸波

材料出现了两个吸收峰,吸收频宽也大大增加.单层吸波材料具有不同的磁损和电损参数及性质,复合时环氧树脂的加入使材料结构的改变而引起电阻抗和磁阻抗有不同程度的改变,吸收电磁波的频率和强度也改变,其磁损和电损性质相互叠加并相互影响,形成新的磁损和电损性质[25].模型计算的结果与实测结果之间的误差的主要来源是电磁参数测量误差、实验制备过程中结构参数引起的.

4 结论

1)模型的计算结果与实验测定结果一致,其中吸波材料的厚度对多层结构吸波材料的最大吸收反射率和频宽影响显著.

2)单层吸波材料随着匹配厚度的增大,其反射损失峰向低频方向偏移;双层吸波材料的吸波频率范围比单层吸波材料的宽;三层吸波材料的吸波频宽进一步增大,且在C波段和Ku波段有最大反射损失吸收峰.优化设计复合后,多层吸波材料中各单层吸波材料的优异性能得以有效合理叠加.

3)吸波材料的电、磁损耗,电磁波在各层材料界面处的反射和透射、反射波与入射波的叠加,以及不同层间的反射波与透射波的叠加均对多层吸波材料的吸波性能产生一定作用和影响.

4)多层吸波材料具有各单层吸波材料在电损和磁损相互叠加和相互作用的复合性能,增加了复合材料的吸收频宽和吸收峰的数目,拓展了吸波材料的使用频带范围.

5)以最大反射损失为目标的多层结构吸波材料模型,可以用于优化设计多层吸波材料结构和性能预测,适应于各层材料性质均匀的复合材料.今后,我们将对各层吸波材料不均匀分布和层间效应的影响作进一步的研究和探索.

参考文献(References):

[1] 王军,陈革,王应德,等.具有雷达吸波功能的碳化硅纤维的制备[J].材料研究学报,2000,14(4):363-366.
WANG Jun, CHEN Ge, WANG Yingde, et al. Preparation of shaped silicon carbide fibers with radar-absorbing function[J]. Chinese journal of material research, 2000, 14(4):363-366. (in Chinese)

[2] 马科峰,张广成,刘良威.夹层结构复合材料的吸波隐身技术研究进展[J].材料开发与应用,2010, 25(6):53-57.
MA Kefeng, ZHANG Guangcheng, LIU Liangwei. Research progress of Technology for Sandwich Structural Absorbing Stealthy Composite Materials[J]. Development and Application of Materials, 2010, 25(6):53-57. (in Chinese)

[3] Zhu H, Zhang L, Zhang L, et al. Electromagnetic absorption properties of Sn-filled multi-walled carbon nanotubes synthesized by pyrolyzing[J]. Materials Letters, 2010, 64(3):227-230.

[4] Alba J, Ramis J, Arenas J P. An inverse method to obtain porosity, fibre diameter and density of fibrous sound absorbing materials[J]. Archives of Acoustics, 2011, 36(3):561-574.

[5] 缪晨,娄国伟,李兴国.3 mm涂层隐身材料的天线温度模型[J].红外与毫米波学报,2004, 23(3):221-224.
MIAO Chen, LOU Guowei, LI Xingguo. Antenna temperature model of 3mm coating stealth material[J]. Journal of Infrared and Millimeter Wave, 2004, 23(3):221-224. (in Chinese)

[6] Peng Z H, Cao M S. Strong fluctuation theory for effective electromagnetic parameters of fiber fabric radar absorbing materials[J]. Materials and Design, 2004, 25(5):379-384.

[7] Stonier R A. Stealth aircraft & technology from world war Ⅱ to the Gulf, Part Ⅰ[J]. SAMPE Journal, 1991, 27(4): 9-17.

[8] Stonier R A. Stealth aircraft & technology from world war Ⅱ to the Gulf, Part Ⅱ[J]. SAMPE Journal, 1991, 27(5):9-18.

[9] 王翠平,娄明连.双层结构磁介质电波吸收材料的研究[J].安徽大学学报:自然科学版,2005,29(1):40-43.
WANG Cuiping, LOU Minglian. Research on the double-layer structure magnetic mediums EM wave absorption materials[J]. Journal of Anhui University: Natural Science Edition, 2005, 29(1):40-43. (in Chinese)

[10] Meshram M R, Agrawal N K, Sinha B. Characterization of M-type barium hexagonal ferrite based wide band microwave absorber[J]. J Magn Mater, 2004, 271:207-214.

[11] 陈兴,李相银,徐林华.遗传算法设计多层微波吸收材料的结构[J].物理与工程, 2008,18(2):24-27.
CHEN Xing, LI Xiangyin, XU Linhua. The structure of multi-layered microwave absorbing materials designed by genetic algorithms[J]. Physics and Engineering, 2008, 18(2):24-27. (in Chinese)

[12] Kim K Y, Kim W S, Hong S Y. A study on the behavior of laminated electro-magnetic wave absorber[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1993, 29(3): 2134-2138.

[13] 李承祖,陈健华,赵风章.单层和多层结构电磁波吸收材料电磁参数的优化设计[J]. 宇航材料工艺, 1989(增1):85-91.
LI Chenzu, CHEN Jianhua, Zhao Fengzhang. Design op-

timization for electromagnetic parameters of single layer and multilayer structure absorbing materials aerospace materials & technology, 1989(S1):85－91.(in Chinese)

[14] 王相元,陆怀先,胡国有,等. 双层结构型微波吸收材料的计算机辅助设计[J]. 南京大学学报:自然科学版, 1989,25(2):261－266.
WANG Xiangyuan, LU Huaixian, HU Guoyou, et al. The computer aided design of double layered structure for microwave absorotion[J]. Journal of Nanjing University: Natural science edition, 1989, 25(2):261－266.(in Chinese)

[15] 肖高智,华宝家,杨建生.薄壁型结构吸波材料电结构设计研究[J]. 宇航材料工艺, 1992(3):29－34.
XIAO Gaozhi, HUA Baojia, YANG Jiansheng. Study on the electric design of thin walled structure microwave absorbing material[J]. Aerospace Materials & Technology, 1992(3):29－34.(in Chinese)

[16] 詹国栋,吴晓光,张以增. 双层微波吸收涂层的计算机辅助设计[J]. 宇航材料工艺,1993(6):37－40.
ZHAN Guodong, WU Xiaoguang, Zhang Yizeng. Computer-aided design for double-layered microwave absorbing coatings[J]. Aerospace Materials & Technology, 1993(6):37－40.(in Chinese)

[17] 吴松安, 余燕. 双层吸波材料的计算机辅助设计[J]. 湘潭矿业学院学报, 2000, 15(1):88－92.
WU Songan, YU Yan. The computer-aided design of the double-layer microwave absorption materials[J]. J Xiangtan Min Inst, 2000, 15(1):88－92.(in Chinese)

[18] 金崇君,秦汝虎,秦柏. 薄隐身涂层中的电磁波传输特性及优化设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1997, 29(5):54－57.
JIN Chongjun, QIN Ruhu, QIN Bai. Thin coated camouflage: energy propagation property of electromagnetic wave and optimum design[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1997, 29(5):54－57.(in Chinese)

[19] 杨华军,饶克谨,赵伯琳. 纤维布层板吸波材料的等效电磁参数[J]. 电子科技大学学报,1998(3):57－60.
YANG Huajun, RAO Kejin, ZHAO Bolin. Equivalent EM parameters of fiber cloth sheet absorbing material[J]. Journal of UEST of China, 1998(3):57－60.(in Chinese)

[20] 袁杰,王荣国,李颖慧,等. 多层吸波材料的计算机辅助优化设计[J].哈尔滨工程大学学报, 2000, 21(2):51－54.
YUAN Jie, WANG Rongguo, LI Yinghui, et al. Computer-aided optimization design for multilayer absorber [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2000, 21(2):51－54.(in Chinese)

[21] 肖钢. 多层吸波材料计算设计及优化研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2003.
XIAO Gang. Investigation to computation design and optimization for multilayered radar absorbing coatings[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2003.(in Chinese)

[22] 张跃,张雪明. 多目标规划方法在隐身涂层设计中的应用[J].宇航材料工艺, 2001(6):63－66.
ZHANG Yao, ZHANG Xueming. Application of multi objective optimization approach in the design of radar absorbent coating[J]. Aerospace Materials & Technology, 2001(6):63－66.(in Chinese)

[23] Kraus J D. Helical beam antennas for wide-band applications[J]. Proceedings of the IRE,1948, 36(10):1236－1242.

[24] Michielssen Y, Sager J M, Ranjithan S,et al. Design of lightweight, broad-band microwave absorbers using genetic algorithms[J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques,1993, 41:1024－1031.

[25] 廖宇涛. 碳纳米管复合材料的电磁参数与吸收电磁波性能的研究[D].广州:广东工业大学, 2006.
LIAO Yutao. Study the electromagnetic parameters and electro-magnetic wave absorption property of carbon nanotube composites[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2006.(in Chinese)