

文章编号: 1000-324X(2006)06-1449-05

多层复合吸波材料的制备及其吸波性能

何燕飞, 龚荣洲, 李享成, 王 鲜, 何华辉

(华中科技大学电子科学与技术系, 武汉 430074)

摘 要: 根据电磁波传播规律, 设计了具有阻抗渐变结构的三层平板吸波体. 面层由二氧化钛材料组成, 易于实现与空气波阻抗匹配, 且起到一保护屏作用; 底层为强磁损耗体, 由铁、钴等原料, 经球磨而制得的磁性微粉, 形成对电磁波强大的损耗; 中间层为过渡层, 构成从面层、中间层、底层的阻抗渐变结构. 采用磁性微粉与碳纤维按一定比例混合, 因而还具有一定的电磁损耗能力. 实验结果表明, 三层吸波体反射率在 -8dB 以下 ($(8\sim 18)\text{GHz}$), 拉伸强度 10.8MPa , 剥离强度 75.2 N/cm , 满足一定的工程应用.

关 键 词: 阻抗匹配; 磁性微粉; 反射率; 拉伸强度

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A

1 引言

在寻求高效损耗吸波材料的同时, 特殊的结构形式设计会大大提高吸波体的吸收率. 如采用含电路模拟结构吸波复合材料, 在提高吸波性能的同时, 力学性能也有一定的提高, 有利于实现吸波复合材料的吸波 / 承载一体化^[1]. 赵东林等人^[2]将碳纳米管与羰基铁粉复合, 通过改变组分比例来改变吸波材料的 ϵ 和 μ , 实现对不同波段电磁波吸收的调控. 而多层结构吸波体, 结合计算机技术进行辅助设计, 如普遍常用的遗传算法, 实现各层材料电磁参量及厚度的最佳配比, 促进了吸波材料向“薄、宽、轻、强”等多目标的发展^[3].

要实现良好的吸波, 必须具备两个条件^[4]: (1) 入射来的电磁波要尽可能多地进入吸波材料而不被反射; (2) 材料要能将电磁波损耗吸收掉. 因此, 具有阻抗渐变结构的多层吸波体, 通过阻抗匹配层的匹配作用, 使空间入射来的电磁波尽可能多地进入吸波材料而被损耗吸收.

研究表明^[5], 导电衬底薄层吸波材料能量密度分布如下: 越靠近衬底, 电场能量密度 (W_e) 越低, 而磁场能量密度 (W_m) 越高. 因此, 底层采用强磁损耗吸收剂, 中间层采用兼具电磁损耗的材料, 面层为透波层, 可望组成性能良好的三层吸波材料.

本文采用磁性微粉与介电材料相结合, 制备了具有阻抗渐变结构的三层吸波体, 并对其在微波范围内的吸波性能与力学性能进行了研究.

收稿日期: 2005-12-07, 收到修改稿日期: 2006-02-21

基金项目: 国防预研重点项目

作者简介: 何燕飞 (1972-), 男, 博士, 讲师. E-mail: hyf1203@163.com

2 实验内容

2.1 三层结构

带导电衬底三层结构吸波体示意图如图 1 所示. 当电磁波垂直入射, 其功率反射系数 R 用分贝表示为^[6]

$$R = 201g \left| \frac{Z_{in} - Z_o}{Z_{in} + Z_o} \right| \quad (1)$$

$$Z_{in} = Z_3 \frac{Z_{in2} + Z_3 th(j\omega d_3 \sqrt{\mu_{r3}\epsilon_{r3}}/c)}{Z_3 + Z_{in2} th(j\omega d_3 \sqrt{\mu_{r3}\epsilon_{r3}}/c)} \quad (2)$$

$$Z_{in2} = Z_2 \frac{Z_{in1} + Z_2 th(j\omega d_2 \sqrt{\mu_{r2}\epsilon_{r2}}/c)}{Z_2 + Z_{in1} th(j\omega d_2 \sqrt{\mu_{r2}\epsilon_{r2}}/c)} \quad (3)$$

$$Z_{in1} = Z_1 th(j\omega d_1 \sqrt{\mu_{r1}\epsilon_{r1}}/c) \quad (4)$$

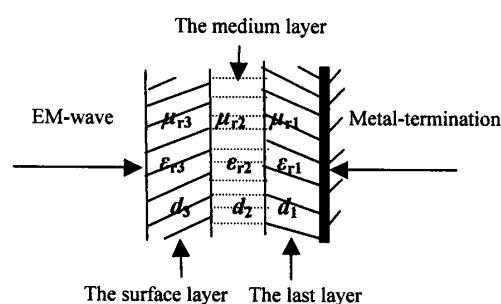


图 1 三层吸波体结构示意图

Fig. 1 Structure of three-layer absorber

式中 Z_{in} 、 Z_{in2} 、 Z_{in1} 分别为从吸波体表面 (即面层表面)、中间层表面、底层表面看进去的垂直输入阻抗, Z_o 、 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 分别为自由空间、底层、中间层、面层特征阻抗. μ_r 、 ϵ_r 、 d 分别为相对磁导率、相对介电常数、厚度; ω 、 c 对应于电磁波角频率和真空中光速.

2.2 材料选取

各层材料组成与厚度如表 1 所示. 磁性微粉 (MMP) 为本实验室生产, 型号为 HG6y3, 采用铁、钴等原料经高能球磨制得. 纳米二氧化钛 (TiO_2) 与毛球状碳纤维 (cf) 从市场上购买, 无需提纯. 氢化丁腈橡胶 (HNBR) 来自于日本, 具有一定的机械强度、物理化学性能稳定、附着力耐候性强、耐热性高 (可达 175°C) 等特点.

表 1 材料组成与厚度

Table 1 Materials composition and layer-thickness

	The surface layer		The medium layer			The last layer	
Materials components	TiO_2	HNBR	MMP	cf	HNBR	MMP	HNBR
Weight proportion/wt%	15	85	40	10	50	75	25
Thickness/mm	0.2		0.4			0.4	

2.3 试样制备

将各层相应材料按上述配比, 在塑炼机上充分塑炼, 待混合均匀后, 制取在 X 波段和 Ku 波段波导测试样品, 测量电磁参量. 将各层材料按表 1 厚度制成平板, 层叠后放入平板硫化机进行硫化. 硫化条件: 在温度 165°C 下硫化 15min 后, 在 150°C 硫化 240min, 取出后切成规格为 $180\text{mm} \times 180\text{mm} \times 1\text{mm}$ 的平板样品, 测量反射率. 将硫化平板切成规格为 $25.4\text{mm} \times 304.8\text{mm} \times 1\text{mm}$ 的矩形样品, 测量剥离强度. 将硫化平板用铡刀榨取如图 2 所示的

哑铃状样品, 测量拉伸强度.

2.4 性能测试

按照 GJB2038-94 采用微波矢量网络分析法测定各层复合材料在 X 波段和 Ku 波段的复介电常数和复磁导率; 按照 GJB2038-94 测试吸波材料的电磁波反射率; 按照 ASTM D1876-72(T- 剥离实验) 测量硫化平板剥离强度; 按 GB/T 528-92 标准测量拉伸强度, 拉伸速度为 500mm/min, 拉伸强度计算公式为^[7]:

$$p = \frac{F}{b \times d}$$

式中 F 为试样在中部附近被拉断时的最大拉力, $b \times d$ 为试样被拉断部位的截面积.

3 实验结果

三层吸波体各层吸波材料电磁参量测量结果如图 3~5 所示, 各层材料的介电常数和磁导率均有随频率升高而下降的趋势. 从面层、中间层到底层, 介电常数和磁导率的值依次增加, 呈现出电磁参量渐变结构.

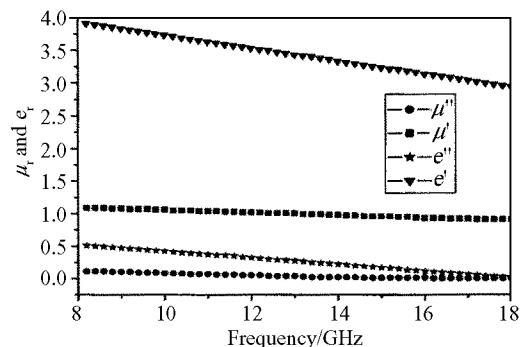


图 3 面层复合材料电磁参量与频率的关系

Fig. 3 Dependence of electromagnetic parameters on frequency for the surface layer

将各层材料电磁参量测量结果及相应厚度代入公式 (1)~(4), 运用计算机编程计算, 得到 (8~18)GHz 频率范围内三层吸波体的电磁波反射率 (如图 6).

采用以矢量网络分析仪为基础构成的吸波材料反射率测试系统 (弓形法), 测试条件: 电磁波垂直入射, 发射天线距被测样品 2m. 测得三层吸波体电磁波反射率如图 6 所示.

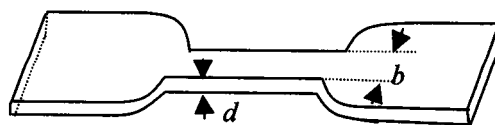


图 2 拉伸强度测试样品示意图

Fig. 2 Geometry of testing samples for tensile strength

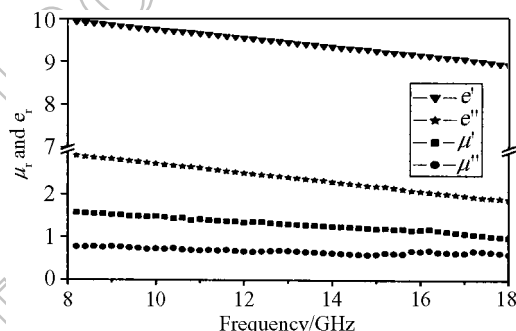


图 4 中间层复合材料电磁参量与频率的关系

Fig. 4 Dependence of electromagnetic parameters on frequency for the medium layer

表 2 样品剥离强度与拉伸强度

Table 2 Peeling strength and tensile strength of samples

Number	1	2	3	Average value
Peeling strength/ $\text{N} \cdot \text{cm}^{-1}$	72.5	75.8	77.2	75.2
Tensile strength/MPa	10.7	11.5	10.1	10.8

剥离强度与拉伸强度测量结果如表 2 所示. 制取相同规格的三个试样, 分别测量三次, 取其算术平均值作为该样品测量值.

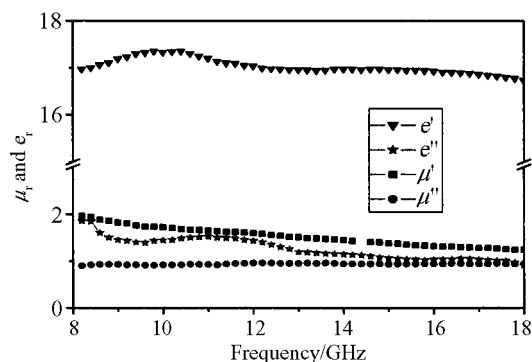


图 5 底层复合材料电磁参量与频率的关系
Fig. 5 Dependence of electromagnetic parameters on frequency for the last layer

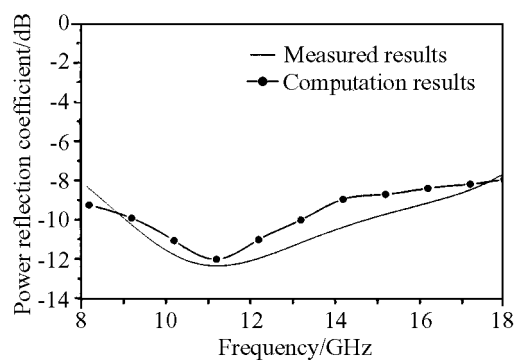


图 6 功率反射系数与频率关系
Fig. 6 Dependence of power reflection coefficient on frequency

4 分析与讨论

采用以二氧化钛为原料构成的匹配层(面层), 实现了与自由空间波阻抗相匹配, 使入射来的电磁波大部分进入吸波材料而被损耗. 同时, 面层材料具有耐磨、抗拉等特点, 起到又一保护屏的作用.

底层由磁性微粉组成, 具有较大的磁导率和磁损耗, 是强磁损耗层. 根据导电衬底薄层吸波材料能量密度分布, 越靠近衬底, 电场能量密度越底, 磁场能量密度越高, 因而底层形成对电磁波强烈的损耗.

中间层由磁性微粉与碳纤维组成, 兼具磁损耗与电损耗, 构成从面层到底层的过渡结构. 碳纤维作为介电材料, 还可形成半波谐振子与入射电磁波谐振而产生谐振感应电流, 形成较大的损耗^[8].

三层吸波体功率反射系数测量结果表明, 在 (8~18)GHz 频率范围内, 反射率在 -8dB 以下. 理论计算与实测结果存在一定的偏差, 如图 6 所示, 主要来自于对各层材料不能获得要求的厚度控制, 以及各层材料实际配比存在偏离的缘故.

剥离强度测试表明, 三层吸波体层间粘合牢固; 拉伸强度测试表明, 三层吸波体具有能够抵抗拉伸破坏的极限能力.

5 结论

1. 由匹配层(面层)、过渡层(中间层)、强磁损耗层(底层)组成的三层吸波体, 在 (8~18)GHz 频率范围内, 反射率在 -8dB 以下, 面密度 3.21kg/m^2 , 厚度 1mm, 具有良好的吸波性能.

2. 匹配层的匹配作用, 使入射来的电磁波尽可能多地进入吸波材料而被损耗. 底层为强磁损耗层, 极大地耗散着电磁波能量. 中间层形成从面层到底层的过渡结构, 兼具电损耗与磁损耗.

3. 三层吸波体剥离强度 75.2N/cm , 层间粘合良好. 拉伸强度达到 10.8MPa , 具有优良的

抗拉伸破坏能力, 可满足一定的工程应用.

参考文献

- [1] 邢丽英, 蒋诗才, 李斌太. 复合材料学报, 2004, **21**(6): 27-33.
- [2] 赵东林, 沈曾民 (ZHAO Dong-Lin, *et al.*). 无机材料学报 (Journal of Inorganic Materials), 2005, **20**(3): 608-612.
- [3] 于晓凌. 层状各向同性与各向异性吸波材料设计与优化. 华中科技大学博士学位论文, 2002.
- [4] He Yanfei, Gong Rongzhou, Nie Yan, *et al.* *Journal of Applied Physics*, 2005, **98**(8): 084903-1.
- [5] 吴明忠. 多晶铁纤维吸波特性研究. 华中科技大学博士学位论文, 2000. 7-8.
- [6] Chung Yeon-Choon, Kim Byung-Wook, Park Dong-Chul. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2000, **36**(4): 1188.
- [7] 张殿荣, 辛振祥. 现代橡胶配方设计. 北京: 化学工业出版社, 2001. 24.
- [8] 邢丽英, 刘俊能, 任淑芬. 材料工程, 1998, **1**: 20.

Preparation and Microwave Absorbing Properties of Multi-layered Radar(Microwave) Absorbing Materials Composites

HE Yan-Fei, GONG Rong-Zhou, LI Xiang-Cheng, WANG Xian, HE Hua-Hui

(Department of Electronic Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Based on the electromagnetic wave propagation laws, a three-layered sheet radar (microwave) absorbing system with the impedance-graded structure was designed. The surface layer, composed of TiO_2 , easily realizes matching to the free space and protection from destroying. The last layer, made up of magnetic micropowder (MMP) ballmilled from Fe, Co, etc, has significant absorbing effects. The medium layer, comprised of MMP and carbon fibers, forms the impedance-graded structure from the surface to the last layer. The results of experimental measurement show that reflectivity for the three-layer absorber is below -8dB in the frequency range of (8-18)GHz. Tensile strength is 10.8MPa , and peeling strength is 75.2N/cm , satisfying the use of engineering.

Key words impedance matching; MMP; reflectivity; tensile strength