复合材料学报 第17卷 第1期 2月 2000年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Vol 17 No. 1 February 2000

文章编号: 1000-3851(2000)01-0028-04

利用碳纤维毡制备结构吸波材料的研究

黄 远 李家俊 马铁军 王玉林 师春生
(天津大学 材料学院, 天津 300072)

摘 要: 将经过表面处理的碳纤维毡和环氧树脂复合, 加入碳黑、金属粉末、铁氧体等填料制备出一种新型结构吸波材料。该材料面密度小于5.2 kg/m^2。在8～18 GHz波段最大反射衰减为-13.37 dB, 反射率小于-10 dB的频率带宽接近于雷达工作的全频带, 达到了实用水平。采用电磁散射理论对材料的吸收机理进行了探讨。

关键词: 结构吸波材料; 碳纤维毡; 立状碳纤维绒毛; 金属颗粒; 瑞利散射
中图分类号: TB332 **文献标识码**: A

STUDY ON THE STRUCTURAL MICROWAVE ABSORBING MATERIAL MADE WITH CARBON-FELT

HUANG Yuan LI Ja-jun MA Tie-jun WANG Yu-lin SHI Chun-sheng
(School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: By adding carbon black, ferrite and metal powders, polyacrylonitrile (PAN) based carbon fiber-felts and epoxy resin were used to make a new kind of structural material for the application of radar microwave absorption. The material with area density of 5.2 kg/m^2 achieved maximum absorbing value of -13.37 dB, and minimum value of -10 dB over the whole frequency range (8～18 GHz). The absorbing mechanisms were discussed using theory of electromagnetic scattering.

Key words: structural microwave absorbing material; carbon fiber-felt; standing carbon fiber-fine hair; metal powder; Rayleigh scattering

碳纤维在结构吸波材料中被大量使用, 但常用碳纤维本身并不吸收入射电磁波, 必须生产出特殊截面形状或特殊电性能的碳纤维, 才能利用其本身来吸收电磁波[1], 这就增加了材料的成本和工艺的复杂性。天津大学材料学院曾经利用镀镍碳纤维毡和环氧树脂复合制备出较高性能的吸波材料, 但有效带宽只有3.8 GHz, 中高频吸收水平不理想[2]。近年来金属颗粒也被用于吸波材料, 如超细金属粉末、磁性金属粉末。本研究则是从电磁波散射理论出发, 利用廉价的碳纤维毡、普通金属颗粒和树脂复合制备结构吸波材料, 达到降低材料的成本以及工艺的复杂性同时又获得理想吸收效果的目的。考虑到细长圆柱体对微波的瑞利散射效应, 本研究对三维网状结构的碳纤维毡进行某种处理, 在碳纤维毡表面获得一层立状绒毛, 再和环氧树脂、金属颗粒以及吸收剂复合制备结构吸波材料。

1 实验方法

实验采用碳纤维毡为吉林碳素股份有限公司生产的聚丙烯腈基碳纤维毡。所使用的铁氧体为南京电子部十四所生产的六角晶系铁氧体。环氧树脂为无锡树脂厂生产的凤凰牌环氧树脂, 牌号为601。固化剂为天津延安化工厂生产的低分子量聚酰胺。采用的金属粉末为化学试剂型。玻璃布为天津玻璃纤维总厂生产的无碱玻璃纤维布。

本实验中所设计的吸波材料为三层结构: 透波层、吸波层和反射层。透波层用玻璃纤维布和环氧树脂复合, 加入适量的碳黑; 吸波层用碳纤维毡和环氧树脂复合, 加入适量的金属粉末和铁氧体。反射层为铝箔。为考察金属粉末、铁氧体、碳黑、碳毡等对复合材料吸波性能的综合影响, 我们设计了一组试样, 透波层和吸波层的组成见表1。

收稿日期: 1998-07-13; **收修改稿日期**: 1998-10-26
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (54973007)
作者介绍: 黄远(1970), 男, 博士研究生, 研究方向为新材料及材料显微结构与相变

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　各试样透波层和吸波层的组成及成型工艺

Table 1　Components and processing of absorbing materials

试样	透波层	吸波层			成型工艺
	碳黑量/wt%	金属粉末量/wt%	铁氧体量/wt%	碳纤维毡是否带立状绒毛	是否整体化压制
1#	8	0	15	否	否
2#	8	3	15	不加碳纤维毡	否
3#	8	3	0	否	否
4#	1.5	3	15	否	否
5#	8	3	15	否	否
6#	8	3	15	是	是

* wt% 系与环氧树脂量相比较而言

制备工艺分为两种, 第一种是吸波层和透波层分别压制成型, 然后进行粘接; 第二种是整体压制, 吸波层和透波层同时在模具中固化成型, 起模后即可获得结构吸波材料。制备时先将碳纤维毡进行处理使之表面产生一层立状碳纤维绒毛, 碳纤维立状绒毛形态见图 2(b) 和图 3。成型设备为自制的热模压机和成型模具。复合材料在温度为 80℃左右, 压力为 10MPa 时固化 3 小时。

吸波性能测试采用反射率弓形测试系统测试, 在北京航空材料研究院进行, 扫频范围 8～18 GHz, 最大动态衰减为 40 dB[3]。

2　结果与讨论

试样 1# 至 6# 的吸波性能测试结果如图 1 所示。技术数据总结如表 2 所示。

表 2　各试样的技术数据

Table 2　The properties of absorbing materials

试样	吸收峰值/dB	有效带宽*/GHz	峰值点/GHz	厚度/mm
1#	-11.79	1.2	18	8
2#	-14.26	1.7	14.6	8
3#	-3.2	0	9	7.6
4#	-7.89	0	9.2	7.5
5#	-13.14	5.8	14.2	6.8
6#	-13.37	8～18	16.75	5.1

* 有效带宽是指对雷达波反射率低于-10 dB (吸收雷达波功率 90%) 的频率区间宽度

加入乙炔碳黑的透波层起的作用如同微波传输线中的阻抗变换器, 使吸波材料的表面输入波阻抗和自由空间的波阻抗匹配起来, 同时减少层与层之间的寄生反射[4]。透波层中的碳黑含量不能少于一定的值。4# 试样的测试结果说明了这一点。

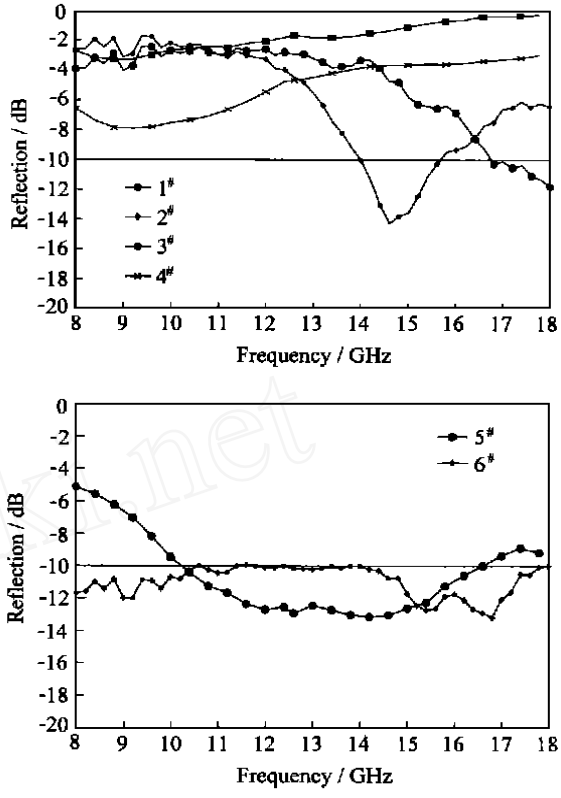


图 1　试样吸波性能测试曲线

Fig. 1　The reflection of absorbing materials including 1#～6#

尽管 1# 试样的最大反射率低于-10 dB, 但有效带宽只有 1.2 GHz, 这意味着金属颗粒是不可缺少的。2# 试样的最大反射率为-14.26 dB, 有效带宽为 1.7 GHz, 表明碳纤维毡也是不可缺少的。铁氧体是吸收剂, 它主要以自然共振的机制来吸收雷达波。3# 试样吸波层中未加入铁氧体, 吸收水平很低, 说明材料吸波层中必须加入铁氧体吸收剂。

5#～6# 试样的测试结果表明二者具有良好的吸波性能。其中, 采用带立状绒毛的碳纤维毡和整体压制成型的 6# 试样碳纤维毡比采用不带立状绒毛的 5# 试样有着更好的吸波性能, 其有效带宽接近全频带 (单从这一点来看, 这种材料已经接近实用化), 这意味着金属粉末和带立状绒毛碳纤维毡以及整体压制成型工艺对提高吸波性能作出了重要的贡献。

采用了整体压制成型来提高其吸波性能的原因在于, 根据假想吸波材料模型进行数值计算, 采用整体压制工艺, 减少各层的厚度, 就有可能在某种成分配比下 (只能是在某种成分配比下, 在别的成分配比下不一定), 大幅度提高材料一定频带上的吸收水

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

平[4]。实验表明,在本研究采用的成分配比下采用整体压制成型确对提高吸波性能有帮助。下面讨论金属粉末和带立状绒毛的碳纤维毡对材料吸波性能的贡献。

3 理论分析

可以认为 5#、6# 试样吸波性能提高的原因可以认为是来自金属粉末颗粒、以及上面的立状绒毛对电磁波的散射效应,由此产生的散射波被加入的铁氧体等吸收剂吸收。这种散射效应由于不均匀区域的尺寸小于入射波的波长应该是物理上所说的瑞利散射[5]效应(Rayleigh Scattering)。

如果将颗粒粒子可分为球形粒子、非球形粒子、有限长圆柱体三类,那么球形粒子、非球形粒子对应着吸波材料中的金属粉末颗粒和铁氧体颗粒,有限长圆柱体对应着碳纤维毡的立状绒毛。

当散射粒子的几何尺寸大小远小于波长时,可采用 Rayleigh 近似[6]: (1) 不考虑散射粒子各体积元素散射的相位干涉; (2) 不考虑粒子内部场的变化。基于 Rayleigh 近似,我们可以得到单个散射粒子的散射振幅函数。

定义水平和垂直极化矢量分别为 $\hat{h}$, $\hat{v}$ 传播波矢为 $\bar{k}$,若用球坐标 $f(\hat{\theta}\hat{\varphi}\hat{r})$ 来表示,则

$$\hat{v} = \hat{\theta} \quad \hat{h} = \hat{\varphi} \quad \bar{k} = \hat{r}$$

(1) 球形粒子的散射振幅函数为 $f_{pq}(\theta_s, \phi_s, \theta_i, \phi_i)$[6],其中 $p, q = h, v, s$ 代表散射场,i 代表入射场。

$$f_{pq}(\theta_s, \phi_s, \theta_i, \phi_i) \propto k^2 \times a^3 \tag{1}$$

$$\text{波矢} \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{2}$$

可见散射场与 k^2a^3 成正比,因而散射强度与 k^4a^6 成正比,其中 a 为颗粒尺寸,λ 为入射波的波长。

(2) 非球形粒子的散射振幅函数[6]

$$f_{pq}(\theta_s, \phi_s, \theta_i, \phi_i) \propto \frac{k^2}{4\pi} v_0 \tag{3}$$

其中,v_0 为颗粒体积。

瑞利散射的特点是散射分布很广,散射几乎是各向同性的。

(3) 对于有限长圆柱体[6],假设其为竖立有限长圆柱体,长为 $2h$,半径为 a,$h \gg a$,此时可假定柱体的内场与无限长圆柱体的内场相等,然后求解无限长柱体内场的波动方程,最后可得到以下结论:

(1) 向后散射时,去极化的散射振幅函数为零;

(2) 当 $hk \gg 1$ 时,散射将在围绕和柱体轴成 θ_i 角的锥体上传播。$f_{pq}(\theta_s, \phi_s, \theta_i, \phi_i)$ 和 h^2k 有关。

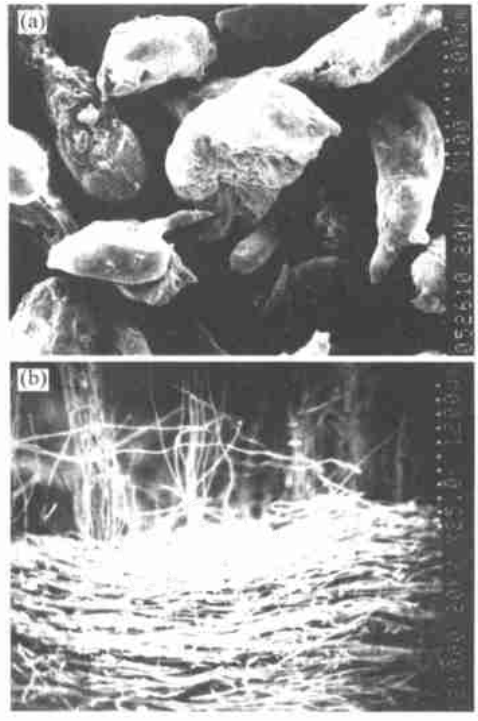
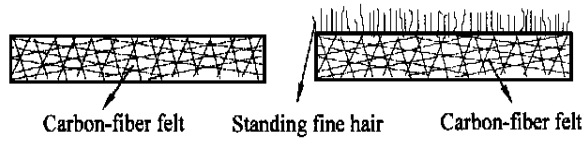


图 2 金属颗粒(a) 碳毡(带立状绒毛)(b) 的微观形貌图(SEM)

Fig. 2 The morphology of metal powders (a) and carbon-fiber (PAN) felt with standing fine hair (b)



(a) Carbon-fiber felt (b) Carbon-fiber felt with standing fine hair

图 3 碳纤维毡形貌示意图

Fig. 3 Carbon-fiber (PAN) felt being used in absorbing materials

根据图 2(a),金属粉末颗粒直径最大为 10^{-4}m 左右,而雷达波(8~18 GHz)的波长为 3.75×10^{-2} ~ 1.67×10^{-2}m,材料所使用的金属粉末尺寸比波长小得多,此时金属粉末将产生瑞利散射,各向同性且分布很广的瑞利散射使得入射电磁波能在各个方向上被吸收剂(六角铁氧体)均匀吸收;根据(1)、(2)、(3)式,散射强度和金属颗粒尺寸有关,$\propto k^4a^6$ 或 $\propto \left(\frac{k^2}{4\pi}v_0\right)^2$ 其中 $v_0 \propto a^3$, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$,这种相乘的关系表明可利用金属粉末颗粒尺寸对各种波长进行调谐,使得不同的波长的散射场强度基本一致,从而拓宽了吸收频带,所以在 5#、6# 试样中加入金属粉末

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

后, 吸收水平、有效频带宽有了很大的提高; 3# 试样(吸波层中只加入了金属粉末颗粒和碳纤维毡)的吸收率随频率的增加急剧减少, 原因在于根据离散散射粒子和连续随机介质波解析理论中的强起伏理论计算的结果, 离散散射粒子向后散射系数随频率增大而增大[6]。

从图 2(b)上来看, 碳纤维的直径约为 1.5×10^{-5}m, 即使是多根碳纤维簇集在一起, 直径也是非常小的, 而立状绒毛有将近 $1/3\times10^{-2}$m 长, 符合 $h\gg a$ 条件, 因此向后散射振幅函数、强度可近似认为是零, 向后散射为零将大大减少电磁波的反射强度。经计算 $hk\approx2.1$, 这个值大于 1, 根据前面所述, 散射波将在围绕和圆柱体轴成一定角的锥体上传播, 也就是认为散射在围绕和立状绒毛轴成一定角的锥体上传播, 由于立状绒毛密布在整个碳纤维毡上面(立状碳纤维绒毛在雷达波照射下就如同卫星地理环境微波遥感中卫星微波照射下的地球森林植被), 同时立状绒毛之间是大量的损耗介质, 使得入射电磁波被大量损耗; 由于散射强度和 h^2k 有关, 立状绒毛长度 h 有长有短(和雷达波波长处于一个数量级上), 所以立状绒毛对雷达波能起调谐作用, 从而能拓宽吸收频带宽度, 这是 6# 试样吸收性能大大提高的重要原因。

4　结　论

将碳纤维毡和环氧树脂复合, 同时添加碳黑、金属粉末、铁氧体能够制备出高性能的结构吸波材料。碳纤维毡的表面形貌对材料的吸波性能有重要影响。碳纤维毡表面的立状绒毛及添加的金属粉末颗粒对入射电磁波产生的瑞利散射对提高材料的吸波性能作出了重要贡献。另外, 采用整体压制的方法减少结构吸波材料的各层厚度, 有助于提高材料的吸波性能。

参　考　文　献

[1] 赵稼祥. 碳纤维及其复合材料的新进展[J]. 新型碳材料, 1991, (3, 4): 20.

[2] 曾祥云. 镀镍碳毡复合材料的微波吸收特性[J]. 材料研究学报, 1998, 12(2): 53.

[3] 中华人民共和国国家军用标准[S]. GJB 2038—94.

[4] 黄　远. 新型雷达吸波复合材料的制备研究[D]. 天津: 天津大学研究生院, 1998. 26.

[5] [苏]亚沃尔斯基 B M, 杰特拉夫 A A 著. 物理学手册[M]. 北京: 科学出版社, 1986. 692.

[6] 金亚秋. 电磁散射和热辐射的遥感理论[M]. 北京: 科学出版社, 1993. 3～6; 11; 160～165.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net