

# 以中空多孔碳纤维为主体的轻质吸波材料吸波性能研究

谢 炜, 程海峰, 楚增勇, 陈朝辉, 周永江

(国防科技大学 新型陶瓷纤维及其复合材料国防科技重点实验室, 长沙 410073)

**摘要:** 根据阻抗匹配原理和电磁波传播规律, 以中空多孔聚丙烯腈(PAN)碳纤维为主要吸收剂, 分别添加以炭黑、碳纤维和羰基铁粉为吸收剂的匹配层, 制备了双层轻质雷达吸波材料, 并考察了其吸波性能. 结果表明, 双层结构设计和不同吸收剂的复合对提高材料的吸波性能起着重要的作用. 以羰基铁粉作吸收剂的匹配层比以炭黑和碳纤维作吸收剂的匹配层对提高以中空多孔碳纤维吸波材料的吸波性能更为显著. 所制备的材料在厚度为 2.90mm, 密度为  $1.28\text{g}/\text{cm}^3$  时, 在 4~18GHz 频率范围内反射率  $\leq -8\text{dB}$  的带宽为 11.42GHz, 反射率  $\leq -10\text{dB}$  的带宽为 10.90GHz.

**关键词:** 中空多孔碳纤维; 吸波材料; 吸波性能

中图分类号: TB34

文献标识码: A

## Radar Absorbing Properties of Light Radar Absorbing Materials Based on Hollow-porous Carbon Fibers

XIE Wei, CHENG Hai-Feng, CHU Zeng-Yong, CHEN Zhao-Hui, ZHOU Yong-Jiang

(Key Lab of Advanced Ceramic Fibers & Composites, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** A kind of lightweight and wideband radar absorbing materials were prepared based on resistance matching principles and electromagnetic wave propagation laws. These materials consist of two-layers, one made of PAN-derived hollow-porous carbon fibers contributing to the low density, and the other made of carbon blacks, short carbon fibers or carbonyl iron powders acting as the matching layer. Their radar absorbing properties investigated show that the introduction of the matching layer, as well as the properties of the matching layer, plays an important role in improving the absorbing properties of the materials. Carbonyl iron powders are more suitable for the matching layer than the other two as the radar absorbing properties concerned. Thus obtained material has a bandwidth of 11.42GHz under  $-8\text{dB}$ , and a bandwidth of 10.90GHz under  $-10\text{dB}$  in the range of 4~18GHz, provided that the thickness and the density are 2.90mm and  $1.28\text{g}/\text{cm}^3$ , respectively.

**Key words:** hollow-porous carbon fibers; radar absorbing materials; radar absorbing properties

中空多孔碳纤维是一种新型的碳材料. 以聚丙烯腈为代表的活性中空多孔碳纤维, 因其制备方便, 成本低廉, 产品性能好, 易于规模化生产而得到研究者的极大关注. 由于其中空多孔且比表面积大的特点, 研究者们对中空多孔碳纤维的吸附性能及储氢性能进行了广泛的研究<sup>[1-4]</sup>.

制备高性能轻量化吸波材料是吸波材料的一个发展趋势, 吸波材料的轻量化必须以轻质吸收剂的发展为技术基础<sup>[5,6]</sup>. 根据中空多孔碳纤维的结构特点, 其表观密度与常规碳纤维相比, 密度大大降低. 前期

我们对中空多孔碳纤维作雷达波吸收材料进行了初步研究, 发现中空多孔碳纤维可作为一种轻质电损耗雷达波吸收剂来使用<sup>[7,8]</sup>. 吸波材料的吸波性能主要由吸收剂来提供. 为了提高吸波材料的吸波性能, 一方面可通过工艺来调节吸收剂的性能, 另一方面, 还可以辅助其它材料设计技术来提高其吸波性能, 如分层、分块设计, 频率选择表面复合技术<sup>[9-15]</sup>.

本工作根据阻抗匹配原理和电磁波传播规律, 以自制中空多孔碳纤维为主体, 分别采用电损耗和磁损耗吸收剂为匹配层, 制备了双层轻质吸波材料, 并对

其在 4 ~ 18GHz 范围内的吸波性能进行了研究.

1 实验

1.1 实验原料

实验选用的主要吸收剂为 PAN 基中空多孔碳纤维,其制备方法可参见文献[2,4,7,8]. 实验以碳化温度 800 和 900℃ 的中空多孔碳纤维为主要吸收剂,选用纳米乙炔炭黑和短切碳纤维以及羰基铁粉作为匹配层的吸收剂,上述吸收剂除中空多孔碳纤维以外,均从市面上购买所得,其微观结构分别如图 1 所示.

1.2 材料制备

为了保持中空多孔碳纤维的形貌,实验采用模压方法来制备含中空多孔碳纤维的吸波材料,树脂采用环氧,并加相应的固化剂. 匹配层的吸收剂则在开放式双辊炼胶机中,将吸收剂、PVC 及相应的助剂按一定比例混合,在一定条件下混炼. 上述材料均做成 180mm × 180mm 样品,如表 1 所示.

1.3 吸波性能测试

在 Agilent8720ET 矢量网络分析仪上采用自由空间法<sup>[16,17]</sup>测试了样品在 4 ~ 18GHz 范围内的反射率,并对相应的电磁参数结果进行反演计算.

2 结果与讨论

实验选用碳化温度为 800 和 900℃ 制备的中空多孔碳纤维作为吸波材料的主体吸收剂. 表 1 中所对应材料的厚度和密度结果及其相应的 ≤ -8dB 反射率和最低反射率如表 2 所示.

表 1 雷达吸波材料的组成  
Table 1 Constitution of radar absorbing materials

Samples	Layer 1	Layer 2	Layer 3
1#	Hollow-porous carbon fiber carbonized at 900℃	Metal	
2#	Hollow-porous carbon fiber carbonized at 800℃	Metal	
3#	Carbonyl iron powder	Metal	
4#	Carbon black	Metal	
5#	Short carbon fiber	Metal	
6#	Carbon black	1#	Metal
7#	Short carbon fiber	1#	Metal
8#	Carbonyl iron powder	1#	Metal
9#	Carbon black	2#	Metal
10#	Short carbon fiber	2#	Metal
11#	Carbonyl iron powder	2#	Metal

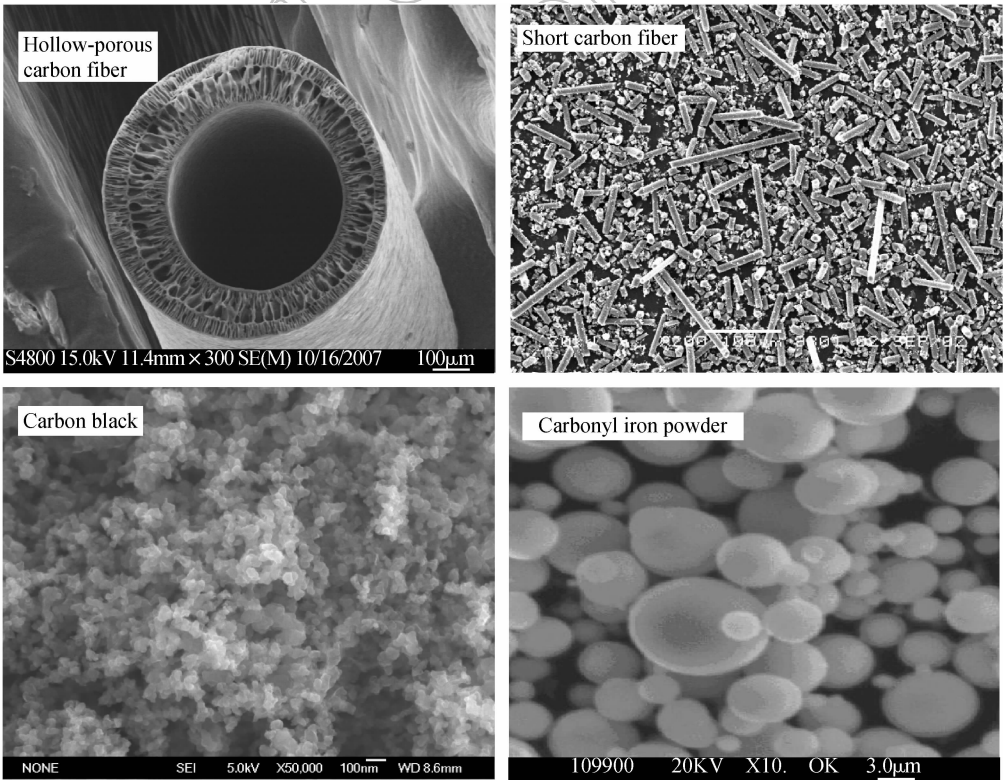


图 1 所采用的吸收剂微观结构  
Fig. 1 SEM photos of employed absorbents

表 2 雷达吸波材料的性能  
Table 2 Properties of radar absorbing materials

Samples	Bandwidth under - 8dB/GHz	The lowest reflectivity(dB) and its corresponding frequency/GHz	Thickness /mm	Density /(g · cm <sup>-3</sup> )
1#	0	-6.14,8.00	2.18	1.03
2#	4.40	-8.87,9.75	2.68	1.03
3#	0	-2.29,18.00	0.22	4.36
4#	0	-	0.36	1.18
5#	0	-	0.36	1.17
6#	0	-7.08,8.00	2.54	1.05
7#	0	-6.83,8.00	2.54	1.05
8#	11.18	-13.29,18.00	2.40	1.33
9#	10.60	-10.45,9.80	3.04	1.04
10#	10.26	-9.72,9.85	3.04	1.04
11#	11.42	-15.53,8.90	2.90	1.28

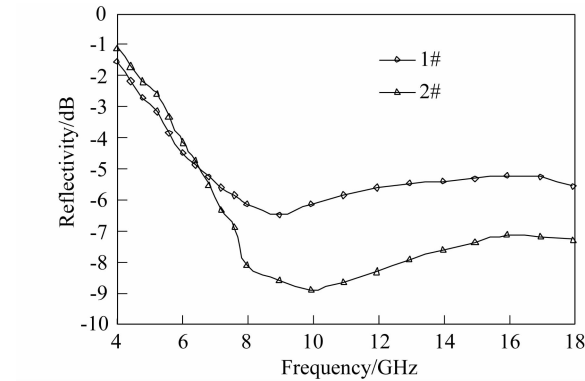


图 2 1#和 2#样品的吸波曲线  
Fig.2 Reflectivity curves of samples 1# and 2#

图 2 为 1#和 2#样品在 4 ~ 18GHz 频率范围内的反射率结果. 从图可以看出, 1#样品低于 - 8dB 的反射率带宽为 0GHz, 低于 - 5dB 的带宽为 11.42GHz. 2#样品低于 - 8dB 的反射率带宽为 4.40GHz, 低于 - 5dB 的带宽为 11.40GHz. 二者反射率差别最为明显的是在 7 ~ 18GHz, 最多可达 2.70dB.

通过上述反射率反演计算得到的 1#和 2#样品介电常数结果如图 3 所示. 当以碳化温度 900℃ 的中空多孔碳纤维为吸收剂时, 其介电常数的实部和虚部在 4GHz 处分别为 25.52 和 24.24, 而以碳化温度为 800℃ 的中空多孔碳纤维为吸收剂的对应值则为 14.02 和 9.94, 二者的介电常数都具有较好的频散效应. 从图 2 和 3 中还可以看出, 碳化温度越高, 相同体积含量下的纤维在低频下反射率降低, 这说明升高碳化温度有利于低频吸波性能的提高, 而要改善 8 ~ 18GHz 范围的吸波性能, 则可以通过降低吸收剂的碳化温度或降低吸收剂的体积分数来实现.

以炭黑、碳纤维和羰基铁粉为吸收剂的贴片型吸波材料的反射率测试结果如图 4 所示. 从图可以看

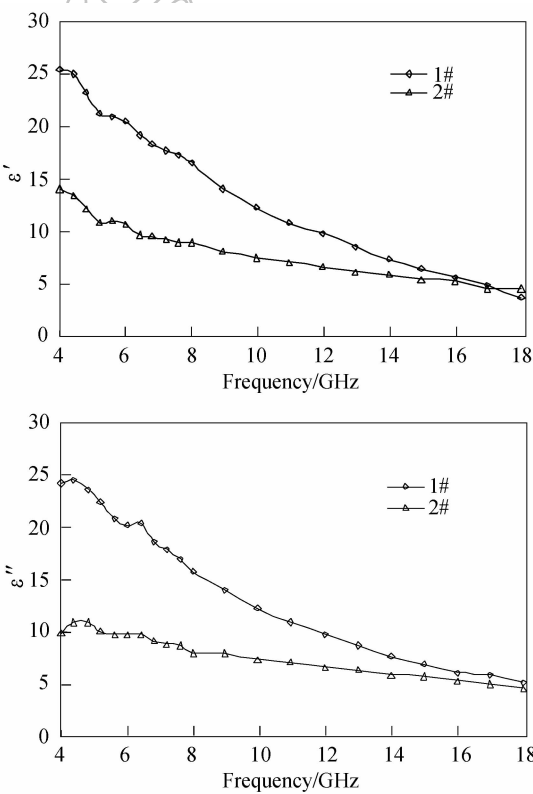


图 3 1#和 2#样品的介电常数与频率的关系  
Fig.3 Dependence of complex permittivity on frequency for samples 1# and 2#

出, 所用作匹配层的含炭黑和碳纤维的吸波材料无吸波效果, 含羰基铁粉的吸波材料吸波性能不强. 这是由于不同吸波材料的吸波性能与材料体积含量和厚度有关.

以上述贴片型吸波材料作匹配层, 中空多孔碳纤维吸波材料为吸收层所测试的反射率结果如图 5 所示. 当加上匹配层后, 材料的反射率发生了变化, 从图 5 可以看出, 当加上含炭黑和碳纤维的匹配层时, 反

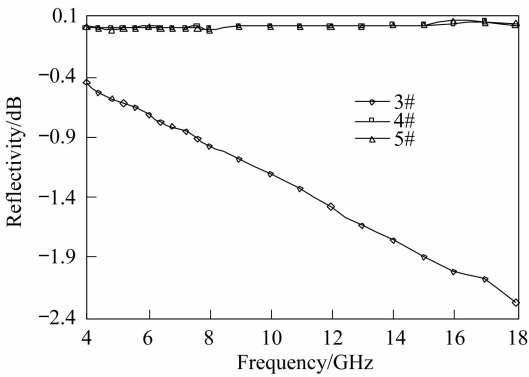


图 4 3#~5#样品的吸波曲线  
Fig. 4 Reflectivity curves of samples 3#, 4# and 5#

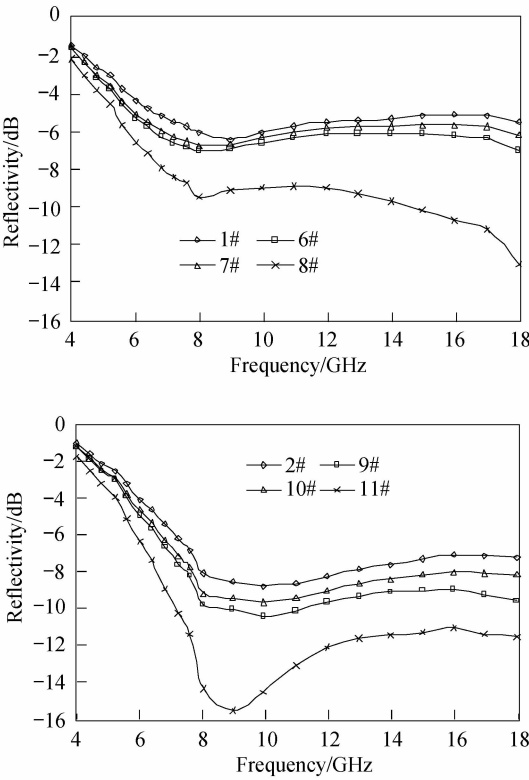


图 5 添加匹配层前后的样品吸波曲线  
Fig. 5 Reflectivity curves of samples before and after addition the matching layer

射率变化不明显,其中微小的变化可能在于材料厚度的改变,当加上含铁粉的匹配层时,反射率降低较多,其中 1#样品加上铁粉的匹配层后的低于-8dB 反射率带宽已达到 11.18GHz,而密度仅增加 0.33g/cm<sup>3</sup>; 2#样品加上含炭黑、碳纤维和铁粉的匹配层后的低于-8dB反射率带宽分别为 10.60、10.26 和11.42GHz,其中加含铁粉的匹配层的 11#样品的反射率在 8~18GHz范围内已全部低于-10dB.

根据图 3 的电磁参数结果,通过单层雷达吸波材料的反射率计算公式<sup>[8]</sup>计算了相同厚度下的以中空多孔碳纤维为主的吸波材料的反射率,并与添加了以

炭黑和碳纤维为吸收剂的匹配层的吸波性能进行了对比,如图 6 所示.

从图 6 可以看出,在相同的厚度下,添加匹配层的吸波材料的吸波性能较单一的吸收剂的吸波材料有了较大的改善.以中空多孔碳纤维为吸收剂的吸波材料在 3.04mm 的厚度下,最低反射率峰位在 7.98GHz处,反射率为-9.25dB,低于-8dB 反射率带宽为 2.15GHz,添加匹配层后低于-8dB 反射率带宽分别为 10.60 和 10.26GHz.

上述材料吸波性能的提高得益于材料的表面输入阻抗和自由空间的波阻抗相匹配,使入射电磁波能最大限度地进入材料内部被吸收掉.由传输线理论,多层吸波材料的输入阻抗依次为

$$Z_1 = \eta_1 \tanh(k_1 d_1) \tag{1}$$

$$Z_i = \eta_i \frac{Z_{i-1} + \eta_i \tanh(k_i d_i)}{\eta_i + Z_{i-1} \tanh(k_i d_i)} (i = 2, \cdots, n) \tag{2}$$

式中: $\eta_i$  为第  $i$  层的特性阻抗,且

$$\eta_i = \sqrt{\frac{\mu'_i - j\mu''_i}{\varepsilon'_i - j\varepsilon''_i}} \tag{3}$$

$k_i$  为通过第  $i$  层的波矢.当电磁波垂直入射时, $k_i$  为常数,可以表示为

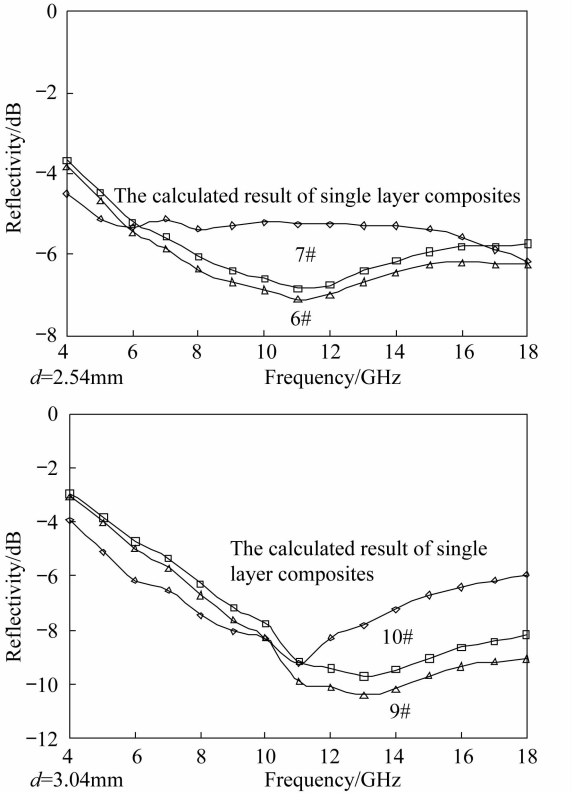


图 6 相同条件下单层中空多孔碳纤维吸波材料计算反射率与 6#、7#、9#和 10#样品比较  
Fig. 6 Comparison of the single hollow-porous carbon fiber composites and samples 6#, 7#, 9#, and 10# in the same conditions

$$k_i = \frac{j\omega}{c} \sqrt{\mu_i \varepsilon_i} \quad (4)$$

式中:  $c$  为光速,  $\omega$  为入射电磁波的角频率,  $\varepsilon_i = \varepsilon'_i - j\varepsilon''_i$ ,  $\mu_i = \mu'_i - j\mu''_i$ . 当电磁波入射到吸波材料时, 在空气与材料的分界面上, 有部分电磁波被吸波材料反射, 其反射系数为

$$R = \frac{Z_n - Z_0}{Z_n + Z_0} = \frac{Z_{nr} - 1}{Z_{nr} + 1} \quad (5)$$

其中  $Z_0$  为空气的特性阻抗,  $Z_{nr}$  为第  $n$  层的归一化输入阻抗.

从(1)~(5)式可以看出, 对于特定波段( $\omega$ 一定)的多层雷达吸波材料, 可以通过改变各层的厚度、介电常数及磁导率等参量调整材料的输入阻抗, 以获得良好的吸波性能. 如果调整上述参数, 以中空多孔碳纤维吸收剂为主体的吸波材料将获得更好的吸波效果, 后续工作还有很大的潜力.

此外, 不同吸收剂的多元复合增加了吸波材料的损耗机制, 特别是当以羰基铁粉吸收剂作匹配层时, 吸波材料由单一的电损耗吸收变为兼具电损耗和磁损耗的机制, 吸波效果更为明显. 同时还可以看出, 尽管添加磁损耗吸收剂会增加吸波材料的密度, 但是其吸波效果的提高能力优于添加电损耗吸收剂的材料. 如果对材料密度要求不高的话, 添加磁损耗吸收剂的多层结构设计应用将更为广泛.

### 3 结论

1) 制备了性能较好的轻质吸波材料, 在厚度为 2.90mm, 密度为 1.28 g/cm<sup>3</sup> 时, 其在 4~18GHz 频率范围内反射率  $\leq -8$ dB 的带宽为 11.42GHz, 反射率  $\leq -10$ dB 的带宽为 10.90GHz;

2) 以羰基铁粉作吸收剂的匹配层比以炭黑和碳

纤维作吸收剂的匹配层对提高以中空多孔碳纤维吸波材料的吸波性能更为显著.

### 参考文献:

- [1] Jiang L Y, Chung T S, Rajagopalan R. *Carbon*, 2007, **45**(1):166-172.
- [2] Sun J F, Wu G X, Wang Q R. *J. Mater. Sci.*, 2005, **40**(3):663-668.
- [3] Yang M C, Chou M T. *J. Membrane Sci.*, 1996, **116**(2):279-291.
- [4] 付正芳. 聚丙烯腈基活性中空碳纤维的制备及储氢性能的研究. 东华大学硕士论文, 2005.
- [5] Zabetakis D, Dinderman M, Schoen P. *Adv. Mater.*, 2005, **17**(6):734-738.
- [6] 孙晓刚. 新型碳材料, 2007, **22**(4):375-378.
- [7] Xie W, Cheng H F, Chu Z Y, et al. *J. Cent. South. Univ. Technol.*, 2007, **14**(s2):112-115.
- [8] 谢伟, 程海峰, 楚增勇, 等(XIE Wei, et al). 无机材料学报(*Journal of Inorganic Materials*), 2008, **23**(3):481-485.
- [9] 崔晓冬, 刘顺华, 管洪涛, 等. 材料科学与工程学报, 2006, **24**(5):725-729.
- [10] 何燕飞, 龚荣洲, 李亭成, 等(HE Yan-Fei, et al). 无机材料学报(*Journal of Inorganic Materials*), 2006, **21**(6):1449-1453.
- [11] 马成勇, 程海峰, 唐耿平, 等. 材料工程, 2008, (1):11-13.
- [12] 谢伟, 程海峰, 楚增勇, 等. 功能材料与器件学报, 2007, **13**(3):221-225.
- [13] Giannakopoulou T, Oikonomou A, Kordas G. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2004, **271**(2-3):224-229.
- [14] Luo F, Zhu D M, Zhou W C. *Ceramics International*, 2007, **33**(2):197-200.
- [15] Yanan Sha, Jose K A, Neo C P, et al. *Microw. Opt. Techn. Lett.*, 2002, **32**(4):245-249.
- [16] Seo Il Sung, Chin Woo Seok, Lee Dai Gil. *Compos. Struct.*, 2004, **66**(1-4):533-542.
- [17] 张伟, 苏东林. 复合材料学报, 2007, **24**(1):141-145.