

# 碳纳米管/羰基铁复合材料电磁性能的研究

张存瑞, 米玉洁, 王 喆, 张小刚, 鞠军燕, 张贵恩

中国电子科技集团公司第三十三研究所, 山西 太原

收稿日期: 2022年3月11日; 录用日期: 2022年4月3日; 发布日期: 2022年4月29日

## 摘 要

以羰基铁粉和碳纳米管作为主吸收剂, 通过共混的方式制备出复合吸收剂, 并对制备产物的电磁特性和反射率进行了表征。实验结果证明: 通过共混的方式制备的吸收剂具备介电和磁损耗双复损耗特性, 通过对复合吸收剂的反射率的仿真模拟可以发现, 复合粉体的综合吸波性能优于单一吸收剂的吸波性能。本文同时对双复吸波材料的微波吸收机理进行了分析。

## 关键词

碳纳米管, 羰基铁, 电磁特性

# Study on the Carbon Nanotube/Carbonyl Iron Composites

Cunrui Zhang, Yujie Mi, Zhe Wang, Xiaogang Zhang, Junyan Ju, Gui'en Zhang

No. 33 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Taiyuan Shanxi

Received: Mar. 11<sup>th</sup>, 2022; accepted: Apr. 3<sup>rd</sup>, 2022; published: Apr. 29<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

The composite absorber was prepared by mixing carbonyl iron power and carbon nanotube as the main absorbent. The electromagnetic properties and reflectivity of the samples were characterized. The experimental results show that the composite absorber has the dual loss characteristics of dielectric and magnetic loss. Through the stimulate of the reflectivity of the samples, it can be found that the comprehensive microwave absorbing performance of the composite is better than that of the single absorber. Meanwhile, the microwave absorbing mechanism of composite is analyzed.

## Keywords

Carbon Nanotube, Carbonyl Iron Power, Electromagnetic Properties



## 1. 引言

随着微波毫米波技术以及其在雷达系统的应用与发展,电子系统与设备之间的电磁辐射带来的问题越来越严重,这不仅可能造成电子设备的误操作,更有甚者会使军用电子信息的泄露,同时会对人类的身心健康造成不可估计的危害。所以,研制质量轻、吸收效果好的吸波材料在军用电磁兼容以及隐身领域,以及民用电子兼容和医用保健等领域具有重要而深远的意义。吸波材料要达到较好的吸收效果,必须满足两个条件:一是满足阻抗匹配条件,也就是说尽量是入射电磁波最大限度的进入材料内部而不被散射;二是进入内部的电磁波能够最大限度的转化为热能或者其他形式的能量,也就是满足损耗条件[1]。

碳基材料由于本身具有电阻率低、质量轻以及比表面积大等物理特性被广泛应用于吸波材料与电磁防护领域[2] [3] [4]。但是碳基材料本身无磁性且其本身电阻率比较低,如果单独使用的化,难以解决阻抗匹配和吸收带宽差的问题。而以铁钴镍等羰基金属粉和金属氧化物吸波材料由于本身较强的磁滞损耗,一直是实用化吸波材料的首选,但是该类吸波材料存在耐腐蚀性差、耐高温特性差、密度大等问题,同时阻抗匹配水平低趋肤效应严重、阻抗匹配水平低趋肤效应严重等不足之处[5]。所以,将磁性材料与碳基材料进行复合制备双复介质吸波材料成为国内外研究的焦点。

碳纳米管/羰基铁复合材料可以通过对材料组分、复合方式等方法实现多重散射、导电损耗、磁损耗及界面极化等多种损耗机制的协调作用,通过复合可以实现材料的阻抗匹配和损耗设计,达到降低涡流效应的影响,制备厚度薄、频带宽、吸收强度大、稳定性好的吸波材料。本项目拟通过对碳纳米管/羰基铁复合材料吸波性能的研究,为研发一种新型轻质高效的复合吸收剂提供理论和试验依据。

## 2. 实验

### 2.1. 碳纳米管/羰基铁复合材料的制备

所用原料为:碳纳米管(中科院成都有机化学研究所生产,型号为:IMC6,粒径20~40 nm);羰基铁粉(江苏天一超细金属粉体有限公司,型号为YW-3)。将碳纳米管和羰基铁粉按照0.3:2.55、0.3:2.4的比例将碳纳米管粉末和羰基铁粉分别放到球磨罐中,按照料球比1:(14~16),球磨时间10 h,分别得到样品a、b。球磨后最后得到复合吸波材料样品。

### 2.2. 碳纳米管/羰基铁复合材料电磁参数环制备

将碳纳米管按照与石蜡的质量比为0.4:0.1, 0.45:0.05, 0.35:0.02的比例制备样品A、B、C,将羰基铁按照与石蜡的质量比为0.9:0.1, 0.85:0.15的比例制备样品D、E,将样品a、b与石蜡按照2.85:0.07, 2.7:0.1的比例制备样品F、G。上述样品在80℃保温半小时使石蜡融化,搅拌均匀,放到模具中,在2 MPa压力下制成内径为3.0 mm,外径为7.00 mm的样品,截取适当的长度打磨成厚度为2 mm样品。具体配比见下表1所示。

### 2.3. 性能测试

将制好的样品置于同轴线夹具内测试,获得S11、S12、S21和S22四个参数,利用AV3629型矢量网络分析仪(中国电科41所)自带的计算程序得到复合材料的电磁参数:介电常数实部、介电常数虚部、磁导率实部、磁导率虚部。测试之前,为了减少实验误差,使用专用的校准设备进行双端口校准。

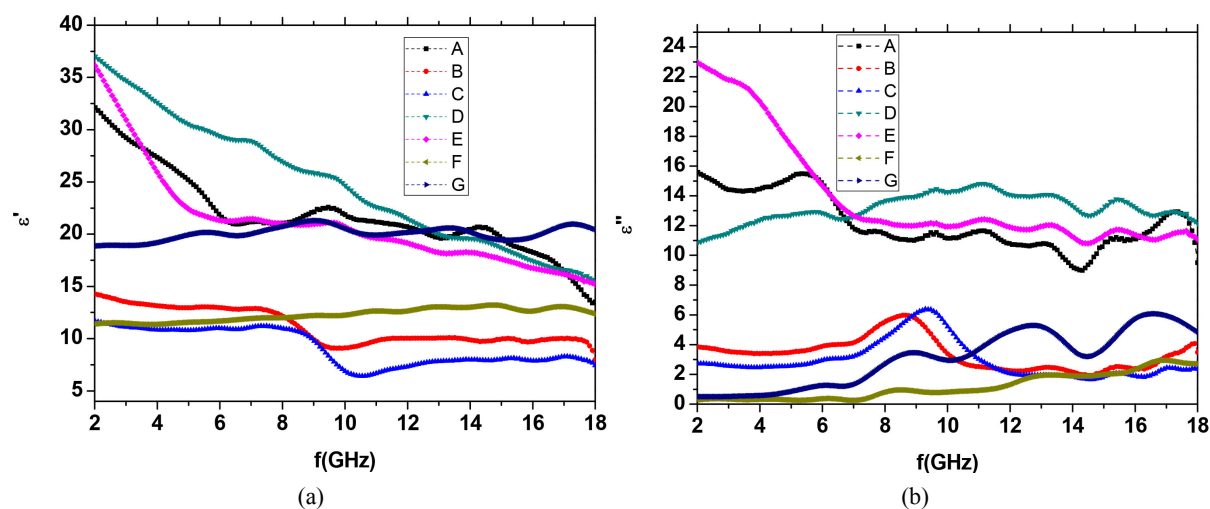
**Table 1.** The corresponding table of electromagnetic parameters sample number**表 1.** 电磁参数样品编号对应表

样品编号	样品份数(%)				
	碳纳米管	羰基铁	样品 a	样品 a	石蜡
A	20	0	0	0	80
B	10	0	0	0	90
C	5	0	0	0	95
D	0	90	0	0	10
E	0	85	0	0	15
F	0	0	2.4	0	97.6
G	0	0	3.6	0	96.4

### 3. 结果与讨论

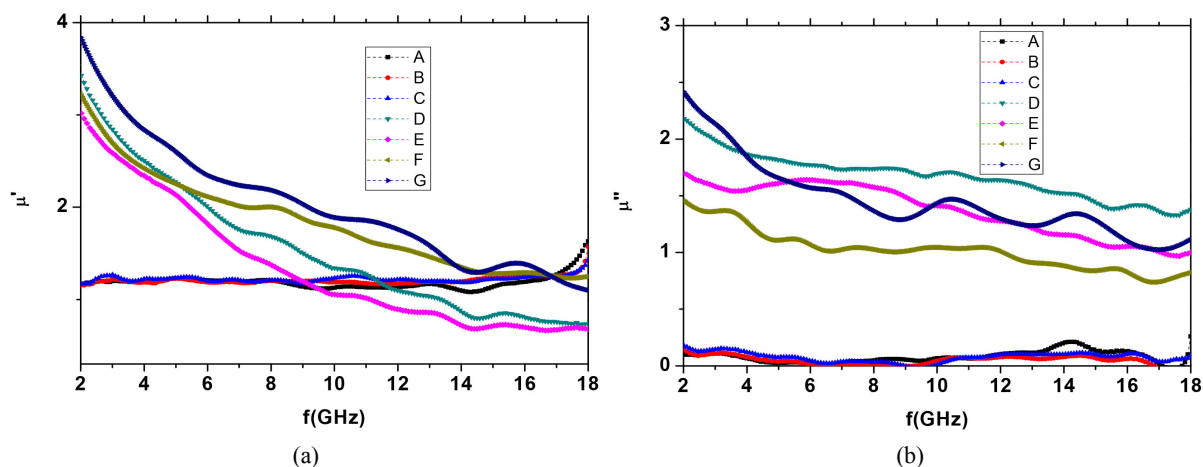
#### 3.1. 复合材料的电磁参数分析

图 1 为复合材料介电常数曲线, 由曲线可知碳纳米吸收剂和羰基铁单一吸收剂的介电常数随着含量的增加是整体增加的, 碳纳米材料的介电常数随着频率的变化变化较小, 羰基铁粉随着频率增加数值逐渐减小。对于复合材料来说, 其介电常数实部随着频率的变化比较小, 同时介电常数比较低, 有利于匹配条件的实现。碳纳米管吸波材料的介电常数虚部比较大, 复合材料介电常数虚部高于羰基铁粉的介电常数虚部。材料的介电常数虚部  $\varepsilon''$  和电导率  $\rho$  的关系为:  $\varepsilon'' = 1/2\pi\rho\varepsilon_0 f$ 。其中  $\varepsilon_0$  是真空介电常数,  $f$  为电磁波的频率。由上述公式可知,  $\varepsilon''$  越小, 表明材料的电阻率  $\rho$  越大。一般来说, 介电常数的实部主要与材料的极化有关, 介电常数的虚部代表了材料的介电损耗。在金属基材料内部, 通常包含两种极化机制: 空间电荷极化和偶极矩极化。在 CIP 表面存在较金属材料电阻高得多的碳纳米管, 能阻止其在石蜡中形成电导网络结构, 从而降低了空间电荷极化。弱的极化和高的电阻, 导致了低的介电常数虚部。



**Figure 1.** The graph of the dielectric constant of the composite material (a: The real part of complex permittivity; b: The imaginary part of complex permittivity)

**图 1.** 复合材料介电常数曲线图(a: 介电常数实部; b: 介电常数虚部)



**Figure 2.** The magnetic permeability curve of the composite material (a: The real part of complex permeability; b: The imaginary part of complex permeability)

**图 2.** 复合材料磁导率曲线图(a: 磁导率实部, b: 磁导率虚部)

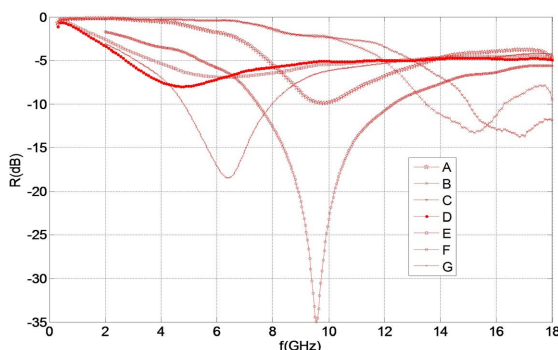
图 2 为复合材料磁导率曲线, 由曲线可知单一碳纳米吸收剂的磁导率实部虚部基本上接近 1 和 0。这主要是因为碳纳米吸收剂本身无磁性因此, 其磁导率虚部基本解决 0。而羰基铁分的磁导率比较大, 且随着含量的增加而增加。而复合材料的磁导率实部和虚部在碳基材料和磁性材料之间变化。根据有效介质理论, 复合材料的磁导率可以表示为:

$$\mu_{eff} = \mu_0 \frac{2\mu_0 + \mu_m + 2V_m(\mu_m - \mu_0)}{2\mu_0 + \mu_m - V_m(\mu_m - \mu_0)}$$

这里,  $\mu_0$  和  $\mu_m$  是磁性材料的起始磁导率,  $\mu_{eff}$  为复合材料的有效磁导率,  $V_m$  为磁性粒子的体积分数, 试验数据遵从有效介质理论。通过调节材料的配比可以对材料的磁导率进行调控, 以提高材料的磁损耗特性。

### 3.2. 复合材料反射率仿真分析

图 3 为复合材料的反射率仿真曲线, 仿真厚度为 1.5 mm, 由仿真结果可知, 复合材料的综合反射率比单一碳基吸收剂的好, 特别是 -10 dB 带宽, 通过实验可知, 通过对吸收剂的配比的调节可以提高材料的综合吸波效果, 同时材料兼具羰基铁粉的优良的吸波性能, 有具备碳基吸波材料的质量轻的优点, 是一种有前景的吸波材料。



**Figure 3.** Composite reflectivity curve

**图 3.** 复合材料反射率曲线

## 4. 结论

1) 采用羰基金属粉和碳纳米吸收剂物理共混的方式可以对材料的电磁参数进行调控, 以满足使用要求。

2) 通过对碳纳米吸收剂和羰基金属粉吸收剂的配比的调节可以提高材料的综合吸波效果, 同时材料兼具羰基铁粉的优良的吸波性能, 有具备碳基吸波材料的质量轻的优点, 是一种有前景的吸波材料。

## 参考文献

- [1] 刘顺华, 刘军民, 董星龙. 电磁屏蔽和吸波材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 315-320.
- [2] Liu, P.B., Zhang, Y.Q., Yan, J., et al. (2019) Synthesis of Lightweight N-Doped Graphene Foams with Open Reticular Structure for High-Efficiency Electromagnetic Wave Absorption. *Chemical Engineering Journal*, **368**, 285-298. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.02.193>
- [3] Huang, Y., Li, N., Ma, Y., et al. (2007) The Influence of Single-Walled Carbon Nanotube Structure on the Electromagnetic Interference Shielding Efficiency of Its Epoxy Composites. *Carbon*, **45**, 1614-1621. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2007.04.016>
- [4] Wu, Z., Tian, K., Huang, T., et al. (2018) Hierarchically Porous Carbons Derived from Biomasses with Excellent Microwave Absorption Performance. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **10**, 11108-11115. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b17264>
- [5] Kim, T., Lee, J., Lee, K., et al. (2019) Hierarchically Porous Carbons Derived from Biomasses with Excellent Microwave Absorption Performance. *Chemical Engineering Journal*, **361**, 1182-1189. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.12.172>