

# Carbon Nanotube Carbon Fiber Composites Study on the Performance of EMC

Yan Liu<sup>1</sup>, Fuqiang Wang<sup>1,2</sup>, Peng Liu<sup>1</sup>, Jiandong Zhang<sup>1</sup>, Xiaowen Zhao<sup>1</sup>, Qinglin Su<sup>1</sup>,  
Donghong Wang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>No. 33 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Taiyuan Shanxi

<sup>2</sup>Key Laboratory of the Technology of Electromagnetic Protection, Taiyuan Shanxi

Email: shedleaf@163.com

Received: May 11<sup>th</sup>, 2018; accepted: May 25<sup>th</sup>, 2018; published: Jun. 6<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

The electromagnetic shielding body of carbon fiber composites was prepared by using T700 carbon fiber as reinforced material and epoxy resin as matrix material. Carbon nanotubes/epoxy resin absorbents were prepared by dispersing carbon nanotubes in epoxy resin. A carbon fiber composite material was prepared by spraying the absorbing agent on the interface of carbon fiber electromagnetic shielding. The absorbing properties, mechanical properties, shielding properties and micro morphology of the composite were studied. The results show that carbon nanotube/carbon fiber composites with good absorbing properties, mechanical properties and shielding properties can be obtained by controlling the ratio of carbon nanotube and epoxy resin, the electromagnetic compatibility of the composites can be achieved by the carbon fiber composites. When carbon nanotube/epoxy resin = 6:100, carbon fiber thickness is 2 mm (0.25 mm per layer of carbon fiber cloth), the composite material is within the range of 8~12 GHz, the reflectance is less than -10 dB, and the peak value is -16.2 dB (9.98 GHz). The tensile strength is 878 MPa and the shielding effectiveness is 75~112 dB (100 kHz~18 GHz).

## Keywords

Carbon Fiber, Composite Materials, Electromagnetic Compatibility, Microwave Absorbing Properties, Carbon Nanotubes

---

# 基于碳纳米管 - 碳纤维复合材料电磁兼容性能的研究

刘艳<sup>1</sup>, 王富强<sup>1,2</sup>, 刘鹏<sup>1</sup>, 张建东<sup>1</sup>, 赵小文<sup>1</sup>, 苏青林<sup>1</sup>, 王东红<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国电子科技集团公司第三十三研究所, 山西 太原

文章引用: 刘艳, 王富强, 刘鹏, 张建东, 赵小文, 苏青林, 王东红. 基于碳纳米管 - 碳纤维复合材料电磁兼容性能的研究[J]. 材料科学, 2018, 8(6): 650-656. DOI: 10.12677/ms.2018.86077

<sup>2</sup>电磁防护技术山西省重点实验室, 山西 太原  
Email: shedleaf@163.com

收稿日期: 2018年5月11日; 录用日期: 2018年5月25日; 发布日期: 2018年6月6日

## 摘要

以T700碳纤维为增强材料, 环氧树脂为基体材料, 制备了碳纤维复合材料电磁屏蔽体, 将碳纳米管分散于环氧树脂中制得碳纳米管/环氧树脂吸波剂, 把制得吸波剂喷涂到碳纤维电磁屏蔽体界面上, 制得碳纳米管-碳纤维复合材料, 该复合材料具有电磁兼容的性能, 之后研究了它的吸波性能、力学性能、屏蔽性能以及微观形貌等。结果表明: 通过控制碳纳米管/环氧树脂的比例、碳纤维的厚度可获得良好的吸波性能、力学性能、屏蔽性能的碳纳米管-碳纤维复合材料, 以期实现复合材料的电磁兼容性。当碳纳米管/环氧树脂 = 6:100, 碳纤维厚度为2 mm时(碳纤维布每层为0.25 mm)时, 复合材料在8~12 GHz范围内, 反射率  $\leq -10$  dB, 峰值-16.2 dB (9.98 GHz)。拉伸强度878 MPa, 屏蔽效能50~70 dB (100 kHz~18 GHz)。

## 关键词

碳纤维, 复合材料, 电磁兼容, 吸波性能, 碳纳米管

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

碳纳米管(CNT)是最具代表性的纳米材料。碳纳米管不仅有极高的机械强度和韧性、优异的导电性能和优良的热传导性能, 还具有优良的吸波性能, 同时具有质量轻、兼容性好、吸波频带宽等特点, 是继传统吸波材料(电阻型吸波材料、电介质型吸波材料、磁介质型吸波材料)后新一代最具发展潜力的吸波材料[1] [2] [3]。

目前在电磁波防护复合材料方面广泛应用的导电纤维主要有: 导电碳纤维、镀金属石墨纤维等[4] [5] [6]。其中碳纤维是一种新型高强度、高模量碳素材料, 具有密度小、质轻、耐环境性能好、热膨胀系数低、阻燃性能良好、易形成导电网络等优点。同时由碳纤维制备的电磁防护复合材料功能设计性强、系统集成度高、复杂结构件成型简单、力学性能好、便于批量生产, 是电磁防护复合材料的一个重要发展方向。

但是目前碳纤维电磁防护复合材料电磁屏蔽原理是反射电磁波, 不利于解决电磁波引起的电磁干扰和电磁兼容问题, 甚至会使电磁干扰问题更为严重, 因此, 急需开发出价格适中、工艺简单、兼具电磁屏蔽、吸波功能的电磁防护碳纤维复合材料[7]。

本文重点研究以 T700 碳纤维经表面处理后的导电碳纤维增强环氧树脂基体, 并以碳纳米管/环氧树脂为吸波体, 碳纤维复合材料为屏蔽体, 制备具有吸波屏蔽功能的碳纳米管-碳纤维复合材料, 以期实现电磁屏蔽和吸波兼容的统一。

## 2. 实验部分

### 2.1. 原材料

碳纤维, 3K, T700, 吉林石化碳纤维厂; 902 型环氧乙烯基酯树脂, 济南易盛树脂有限公司; 通用型过氧化甲乙酮, 江阴市前进化工有限公司; 过氧化苯甲酰, 泰州市海翔化工有限公司。

### 2.2. 试验仪器设备及测试标准

试件压制: 热压罐; 工作介质: 空气, 最高工作温度: 400℃, 储罐压力: 3 MPa, 规格: 1000 × 2000 mm; 力学性能测试: INSTRON3342 型电子万能试验机; 碳纳米管微观形貌观察: TEM 日立公司 H-600 (2)型透射电镜; 碳纳米管在环氧树脂中的微观形貌观察: AMRAY-1000B 扫描电子显微镜; 吸波性能: 测试方法 GJB 2038A-2011, 频率范围: 2~18 GHz, 样片尺寸: 180 mm × 180 mm × 2 mm; 电磁屏蔽性能: 测试方法 SJ 20524-1995, 频率范围: 10 kHz~18 GHz, 样品尺寸 300 mm × 300 mm × 2 mm。其中电磁屏蔽性能测试仪器, 如表 1 所示: 频谱分析仪: MS2726C; 信号发生器: HMC-T2240; 函数发生器: 33250A; 双脊喇叭天线: SAS; 双脊喇叭天线: SAS; 频谱分析仪: MS2726C)。

### 2.3. 碳纳米管 - 碳纤维复合材料的制备

将碳纤维布按尺寸裁剪, 把裁好的碳纤维布放入模具中, 涂刷环氧树脂; 使得环氧树脂浸渍于碳纤维布中, 然后将模具放入热压罐中, 设置参数: 抽真空度为 99%, 固化温度为 150℃, 压力为 300 MPa, 固化时间为 2 h。将成型好的碳纤维复合材料修整边缘待测。

将配好的碳纳米管/环氧树脂装入储胶罐, 调试喷枪速度后, 把待喷物喷涂到所制镀镍碳纤维复合材料的表面上, 经固化后待测。

## 3. 结果与分析

### 3.1. 碳纳米管/环氧树脂对吸波体的影响

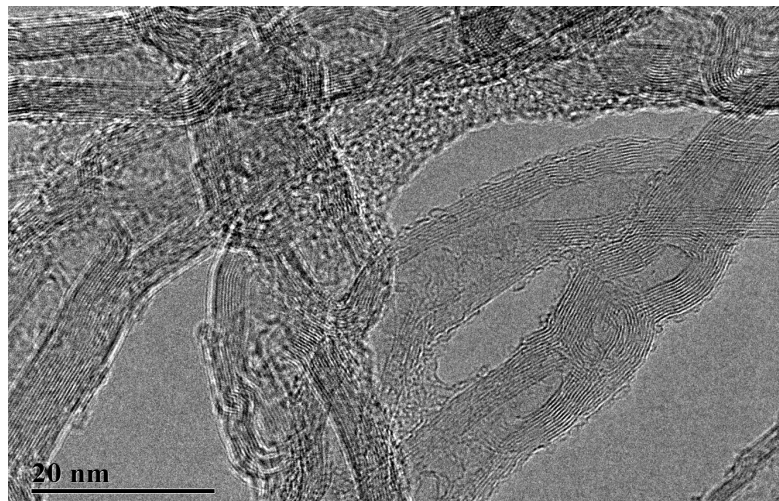
对于碳纳米管而言, 由于碳链上的电子都垂直于碳纳米管表面, 微波电场使正负电荷沿着相反方向移动, 在碳纳米管材料的表面形成电偶极子, 产生极化电流, 电磁波的能量转换为其他形式的能量, 同时, 这些偶极子和微波场相互作用导致晶格振动以发热的形式引起微波损失, 由于各碳管间的距离较大, 管间难以形成偶极子, 但在两管或多管的交叉处, 却容易形成偶极子, 参加对电磁波的吸收, 这也解释碳纳米管对微波的反射系数与碳管的排列有关[8] [9], 如图 1 所示。

为了观察碳纳米管在环氧树脂中的分散情况, 对其进行扫描电镜测试(如图 2 所示), 从图 2 中可以看出, 直径约 10~20 nm 的长碳纳米管分散在环氧树脂中, 相互之间无规则缠绕形成 50~500 nm 的环氧树脂

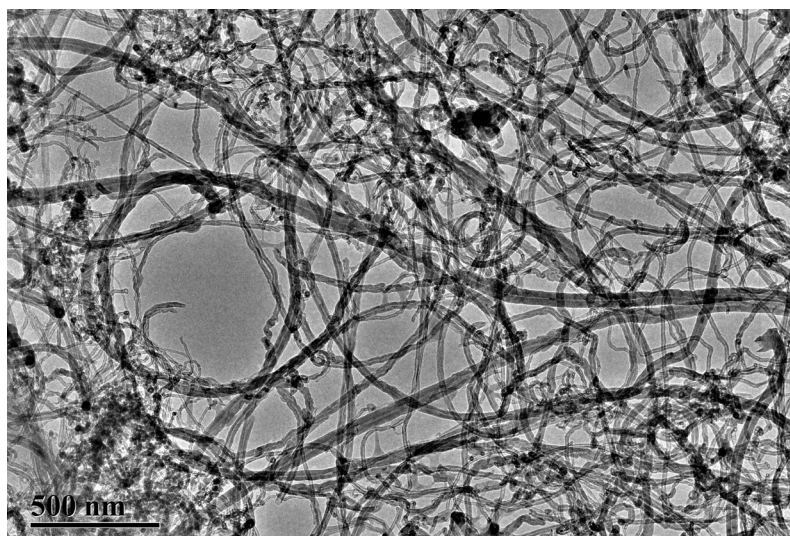
Table 1. Electromagnetic shielding test instrument

表 1. 电磁屏蔽测试仪器

名称	型号
频谱分析仪	MS2726C
信号发生器	HMC-T2240
函数发生器	33250A
双脊喇叭天线	SAS
双脊喇叭天线	SAS
频谱分析仪	MS2726C



**Figure 1.** Transmission electron microscope photographs of carbon nanotubes  
**图 1.** 碳纳米管透射电镜照片



**Figure 2.** Scanning electron microscope photographs of carbon nanotubes in epoxy resin  
**图 2.** 碳纳米管在环氧树脂中的扫描电镜照片

孔洞,表明成功制备了碳纳米管/环氧树脂吸波体。为了进一步验证碳纳米管/环氧树脂吸波体对碳纤维材料吸波性能的影响进行了吸波性能测试。

### 3.2. 吸波性能

吸波体厚度为 2 mm 不同比例(碳纳米管/环氧树脂为 5.5:100、6.0:100、6.5:100)碳纳米管的吸波性能,如图 3 所示。

从图 3 可以看出碳纤维含量为 5.5%时,复合材料 9.05~12.24 GHz 范围内反射率  $\leq -10$  dB,峰值为  $-11.28$  dB (10.17 GHz);当碳纳米管用量为 6%时,复合材料 8~13.45 GHz 范围内反射率为  $\leq -10$  dB,峰值为  $-16.20$  dB (9.98 GHz);当碳纳米管用量为 6.5%时复合材料 6.45~7.87 GHz 范围内反射率为  $\leq -10$  dB,峰值为  $-10.19$  dB (6.93 GHz),这是由于随着碳纳米管用量的增加,在复合材料内部形成了良好的阻抗匹配体系,吸波性能增加,若继续增加碳纳米管的用量,阻抗严重不匹配,吸波性能降低[10]。

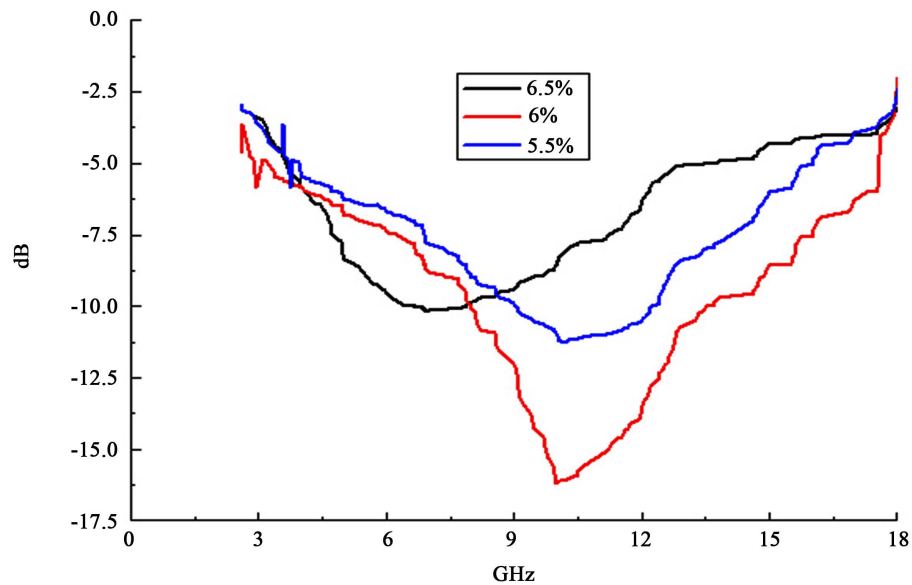


Figure 3. Absorption properties of carbon nanotubes with different proportions  
图 3. 不同比例碳纳米管的吸波性能

### 3.3. 碳纤维复合材料厚度对屏蔽体的影响

#### 3.3.1. 电磁屏蔽原理分析

按照 Schelkunoff 电磁屏蔽理论, 屏蔽效果( $SE$ )是电磁波能量的吸收损失( $A$ )、内部反射损失( $B$ )与表面的反射损失( $R$ )的和。当  $A$  在 10 dB 以上时  $B$  可忽略不计, 可简化为  $SE$  等于  $R$  与  $A$  的和。在一定的条件下可按下式计算[11]

$$SE = 50 + 10 \lg(\rho_B f) + 1.7t\sqrt{f/\rho_B}$$

式中:  $f$ ——电磁波频率, Hz;

$t$ ——厚度, mm;

$\rho_B$ ——体积电阻率,  $\Omega \cdot \text{cm}$ 。

当电磁波的频率一定时, 屏蔽效果随着电阻率的降低而增加。换言之, 屏蔽效果随着屏蔽材料导电率的增加而增加。因此, 屏蔽材料的研究是设法提高材料的导电率。一般的屏蔽要求  $SE$  在 30~40 dB, 即屏蔽材料的体积电阻率在  $1 \Omega \cdot \text{cm}$  以下。碳纤维应用研究的主要目的是通过不同的复合材料工艺使碳纤维在基体中形成导电网络, 提高碳纤维复合材料的导电率, 同时可增加力学性能。因此, 通过设计碳纤维的可厚度实现复合材料的电磁屏蔽性能以及力学性能。

#### 3.3.2. 力学性能

不同厚度的碳纤维复合材料力学性能如表 2。

从表 2 可以看出, 随着碳纤维厚度的增加复合材料的拉伸强度在增加[12], 厚度为 3 mm 时拉伸强度增加的比较缓慢, 这是由于在实际的热压成型过程中, 随着碳纤维厚度的增加, 碳纤维成型过程存在一定的缺陷, 导致复合材料的力学性能增加的比较缓慢, 与 3 mm 的样品相比, 2 mm 的样品力学性能仅仅差了 0.3%。

#### 3.3.3. 电磁屏蔽性能

不同厚度复合材料的电磁屏蔽性能如表 3。

**Table 2.** Influence of different thickness on mechanical properties of composite materials**表 2.** 不同厚度对复合材料力学性能的影响

厚度(mm)	拉伸强度(MPa)
1	453
2	898
3	901

**Table 3.** Effect of different thickness on electromagnetic shielding effectiveness of composite materials**表 3.** 不同厚度对复合材料电磁屏蔽效能的影响

厚度(mm)	100 kHz	10 MHz	450 MHz	1 GHz	10 GHz	18 GHz
1	28 dB	35 dB	40 dB	37 dB	45 dB	35 dB
2	50 dB	65 dB	68 dB	70 dB	67 dB	53 dB
3	45 dB	53 dB	62 dB	59 dB	63 dB	49 dB

从表 3 可以看出, 当碳纤维的厚度为 2 mm 时, 复合材料的电磁屏蔽性能 100 kHz~18 GHz 较好, 从电磁屏蔽原理可知随着厚度的增加屏蔽效能会增加, 但是从实际测试中厚度 2 mm 比厚度 3 mm 的复合材料电磁屏蔽效能要好, 这是由于随着厚度的增加, 碳纤维复合材料成型过程存在一定的缺陷, 导致碳纤维导电网格的不连续, 导电率下降, 从而使得复合材料的电磁屏蔽效能下降, 最终影响整体材料的电磁兼容性[13]。综合考虑力学性能和电磁兼容性能, 碳纤维材料和碳纳米管/环氧树脂吸波剂均为 2 mm 时, 样品具有最好的电磁兼容性能和较好的力学性能(较 3 mm 样品力学性能仅差 0.3%)。

#### 4. 结论

1) 作为一种新型的电磁防护复合材料, 碳纳米管 - 镀镍碳纤维复合材料具有良好的力学性能、电磁屏蔽性能、吸波性能。

2) 首先以环氧树脂为基体材, 碳纤维为增强材料制备了纤维复合材料屏蔽体, 其次以碳纳米管/环氧树脂制备了吸波体, 将制得的吸波体喷涂到屏蔽体界面上, 制得碳纳米管 - 镀镍碳纤维电磁防护复合材料; 当碳纳米管/环氧树脂 = 6:100, 碳纤维厚度为 2 mm 时(碳纤维布每层为 0.25 mm)时, 复合材料在 8~12 GHz 范围内, 反射率  $\leq -10$  dB, 峰值 -16.2 dB (9.98 GHz)。拉伸强度 878 MPa; 屏蔽效能 50~70 dB (100 kHz~18 GHz)。有利于解决电磁波引起的电磁干扰和电磁兼容问题。

3) 电磁防护复合材料的力学性能和电磁性能均与碳纤维的各向异性有关, 所以在设计、制作电磁防护复合材料结构器件时要注意铺层的顺序、方向以及碳纤维之间的间隙。

#### 基金项目

技术推动项目, 中国网安创新基金项目。

#### 参考文献

- [1] Kim, M.S., Kim, H.K. and Byun, S.W. (2002) PET Fabric/Polypyrrole Composite with High Electrical Conductivity for EMI Shielding. *Synthetic Metals*, **126**, 233-239. [https://doi.org/10.1016/S0379-6779\(01\)00562-8](https://doi.org/10.1016/S0379-6779(01)00562-8)
- [2] 陈平, 陈辉, 等. 碳纤维复合材料发动机壳体用韧性环氧树脂基体的研究[J]. 复合材料学报, 2002, 19(2): 24 -27.
- [3] 何芳, 万怡灶, 黄远, 李浩, 王玉林. ABS/镀镍碳纤维复合材料电磁屏蔽特性研究[J]. 工程塑料应用, 2007, 35(7): 21-24.
- [4] Cedeño, A.J. and Vázquez-Torres H. (2005) Kinetic Study of the Effect of Poly(Phenyl Sulfone) on the Curing of an

Epoxy/Amine Resin by Conventional and by Temperature Modulated Differential Scanning Calorimetry. *Polymer International*, **54**, 1141 -1152.

- [5] Ebbesen, T.W., Lezec, H.J., Hiura, H., *et al.* (1996) Electrical Conductivity of Individual Carbon. *Nature*, **382**, 54-56. <https://doi.org/10.1038/382054a0>
- [6] 曹茂盛, 高正娟, 朱静. CNTs/Polyester 复合材料的微波吸收特性研究[J]. 材料工程, 2003(2): 34-36.
- [7] 何芳, 万怡灶, 黄远, 李皓, 王玉林. ABS/镀镍碳纤维复合材料电磁屏蔽特性研究[J]. 工程塑料应用, 2007, 35(5): 21-24.
- [8] Falvo, M.R., Clary, G. and Helser, A. (1999) Nanomanipulation Experiments Exploring Frictional and Mechanical Properties of Carbon Nanotubes. *Microscopy and Microanalysis*, **4**, 504. <https://doi.org/10.1017/S1431927698980485>
- [9] 张增富, 罗国华, 范壮军. 不同结构碳纳米管的电磁波吸收性能研究[J]. 物理化学学报, 2006, 22(3): 296-300.
- [10] Zhang, Y.F., Qi, L., Liu, H. and He, J. (2008) Effect of Interface Strength on Macro Toughness of Fiber Reinforce Composite. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni: Natural Science*, **47**, 139-143.
- [11] 贺福, 王茂章. 碳纤维及复合材料[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 289.
- [12] 靳武刚, 高建军, 等. 碳纤维复合材料弯曲撑杆成型工艺技术[J]. 电子机械工程, 2003, 19(3): 62-63.
- [13] 汝强, 胡社军, 等. 电磁屏蔽理论及屏蔽材料的制备[J]. 包装工程, 2004, 25(5): 21-23.

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7613, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ms@hanspub.org](mailto:ms@hanspub.org)