

## 外贴 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CNTs}$ 杂化碳纳米纸的碳纳米管 复合材料吸波性能

卢少微, 李倩, 雄需海, 马克明, 许卫凯, 贾彩霞

(沈阳航空航天大学 辽宁省光纤传感工程技术研究中心, 沈阳 110136)

**摘要:** 通过对  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米粒子接枝碳纳米管的单分散水溶液真空吸滤制备出一种新型的杂化碳纳米纸, 它与树脂浸润良好, 可以与复合材料一体成型。分别借助 FE-SEM、EDS、BJH 法和振动样品磁强计表征杂化碳纳米纸及其复合材料的微观形貌、元素组成、平均孔径分布和磁性能。在 8.2~18 GHz 频段内利用波导法测量碳纳米管共混复合材料和外贴杂化碳纳米纸/碳纳米管共混复合材料的电磁参数和吸波反射率。研究表明: 外贴一层杂化碳纳米纸(厚 0.1 mm)后, 碳纳米管共混复合材料的磁损耗明显增加, 在 8.2~18 GHz 微波频段内吸波反射率基本上全部小于 -10 dB(频宽大于 9.7 GHz), 在 15.42 GHz 位置, 反射损耗峰达 -43.18 dB, 远优于碳纳米管共混复合材料。

**关键词:**  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  接枝碳纳米管; 杂化碳纳米纸; 碳纳米管复合材料; 电磁参数; 反射率

中图分类号: TB33; V218 文献标识码: A

## Microwave Absorbing Properties of CNTs Composites Attached with $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CNTs}$ Hybrid Buckypaper

LU Shao-Wei, LI Qian, XIONG Xu-Hai, MA Ke-Ming, XU Wei-Kai, JIA Cai-Xia

(Centre of Optical fiber sensing engineering technology of liaoning province, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

**Abstract:** A naval hybrid buckypaper was fabricated by vacuum filtration method with monodispersed solution of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  decorated carbon nanotubes (CNTs), which was easy to be infiltrated by resin and can be co-cured with polymer composites. The morphology, element composition, pore size distribution, and magnetic of hybrid buckypaper were characterized by field-emission scanning electron microscope (FE-SEM), energy dispersive spectrometer (EDS), Barret-Joyner-Halenda (BJH) and vibrating sample magnetometer. The electromagnetic parameters of CNTs composite and hybrid buckypaper attached CNTs composite were investigated in the frequency range of 8.2–18 GHz with wave guide method and the reflection loss can be calculated. The hybrid buckypaper with only absorbing thickness of 0.1 mm attached CNTs composite possesses much broader absorbing bandwidth and larger reflectivity than those of CNTs composite, nearly all of which reflectivity is below -10 dB in frequency range of 8.2–18 GHz and the minimum value is -43.18 dB at 15.42 GHz.

**Key words:**  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /decorated CNTs; hybrid buckypaper; CNTs composite; electromagnetic parameter; reflection loss

碳纳米管自从 1991 年被发现以来, 以其优良的 电学、磁学和力学等性能而引起国内外广泛关注<sup>[1]</sup>,

收稿日期: 2014-04-15; 收到修改稿日期: 2014-06-16

基金项目: 国防基础科研项目(A352001106); 辽宁省海内外十百千高端人才; 辽宁省高等学校攀登学者支持计划 Defense Industrial Technology Development Program of China (A352001106); "Ten Baiqian" Top Talent Program at Home and Abroad of Liaoning; Liaoning Province Climbing Scholars Support Plan

通讯作者: 卢少微(1973-), 男, 博士, 教授. E-mail: lushaowei\_2005@163.com

并且碳纳米管拥有特殊螺旋结构和手征特性,使其具有独特的电磁性能<sup>[2-3]</sup>。但碳纳米管是一种电损耗型材料,其磁损耗角非常低,难以满足吸收频带宽,吸收强度大等吸波材料实际应用要求<sup>[4]</sup>。为了同时提高材料的介电损耗和磁损耗,研究者将磁性吸波粒子包覆到碳纳米管外部或者将其填充到碳纳米管内部形成复合磁性粒子,以提高磁损耗及微波吸收性能<sup>[5-8]</sup>。

传统碳纳米管吸波复合材料是将碳纳米管与聚合物直接共混法制备而得到的<sup>[9-10]</sup>,但是碳纳米管具有巨大的比表面积,它的添加会增加树脂的粘度,造成复合材料成型困难,从而影响复合材料的力学性能。因此为了保证复合材料的成型工艺,碳纳米管加入量一般较小,复合材料结构的导电和介电损耗有限,无法满足复合材料的吸波性能要求。

近年来,卢少微等<sup>[11-12]</sup>利用碳纳米纸与复合材料一体成型的方法解决了复合材料内部碳纳米管和其他纳米粒子添加的技术问题。碳纳米纸是由碳纳米管靠分子间范德华力相互作用而形成的三维网状结构,主要利用碳纳米管单分散水溶液真空吸滤法制备<sup>[13-16]</sup>,具有优异的电导率和吸波性能,但纯碳纳米纸的磁损耗及阻抗匹配能力有限。为此本工作利用原位化学沉淀法在碳纳米管(CNTs)表面接枝 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 纳米粒子,然后利用真空吸滤法制备出 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CNTs}$ 杂化碳纳米纸,并与CNTs复合材料一体成型,利用波导法研究外贴 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CNTs}$ 杂化碳纳米纸对CNTs复合材料的电磁参数、吸波反射率及吸波机理的影响规律。

## 1 实验方法

### 1.1 原材料

多壁碳纳米管(外径 8~15 nm、长度 50  $\mu\text{m}$ ,纯度 98%)由中国科学院成都有机化学所提供;曲拉通(TX-100)由天津阿法埃莎公司提供;玻璃纤维面密度为 200  $\text{g}/\text{m}^2$ ,由南京玻璃纤维研究设计院提供;E-51 环氧树脂由南通星辰合成材料有限公司提供;2-乙基-4-甲基咪唑由天津宁平化学公司提供;树脂:固化剂用量比为 2:1。

### 1.2 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CNTs}$ 杂化碳纳米纸及复合材料制备

通过化学沉淀法<sup>[17]</sup>制备 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 接枝CNTs:先将 0.4146 g CNTs 和 1 g PVP 分散到 100 mL 去离子水中,超声分散 1.5 h(99 W, 40 kHz);然后将 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (0.4206 g)和 $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  (0.1776 g)加入到CNTs水溶液中搅拌 25 min,混合溶液超声(99 W, 40 kHz)处

理 1.5 h,在超声过程中逐滴加入 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (25%),控制 pH 值在 11~12 之间,然后搅拌混合溶液 1 h (30 $^\circ\text{C}$ ),反应结束后用磁铁收集沉淀物( $\text{Fe}_3\text{O}_4$  接枝 CNTs),清洗后烘干真空 48 h(50 $^\circ\text{C}$ )备用。

将 500 mg CNTs 与 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 接枝CNTs加入到 800 mL 浓度为 1wt%曲拉通(TX-100)去离子水溶液中,搅拌 2 h,超声分散 1 h(99 W, 40 kHz);然后利用真空吸滤装置(过滤膜是孔径为 0.45  $\mu\text{m}$  的混纤膜)抽滤混合均匀的溶液得到 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CNTs}$ 杂化碳纳米纸;最后将杂化碳纳米纸与混纤膜一同放入烘箱(80 $^\circ\text{C}$ )保温烘干(3 h),取出后直接剥离混纤膜得到 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CNTs}$ 杂化碳纳米纸如图 1 所示,性能参数见表 1。

称取 10 g 环氧 E-51 树脂和 100 mg CNTs,将CNTs混入树脂中,用丙酮稀释后在常温下机械搅拌 2 h,对稀释后的树脂超声(60 $^\circ\text{C}$ )处理 1 h(99 W, 40 kHz)后,加入 0.3 g 固化剂(2-乙基-4-甲基咪唑),搅拌 1 h,混合均匀。将杂化碳纳米纸铺放在铝合金模具最底层,然后依次铺放玻璃纤维布,用毛刷浸润树脂,共铺放 9 层玻璃纤维布,最后真空袋法在 0.69 MPa 压力下固化成型,固化温度 80 $^\circ\text{C}$ 固化 2 h, 120 $^\circ\text{C}$ 固化 1 h,分别制备外贴杂化碳纳米纸的CNTs复合材料(简称杂化碳纳米纸/CNTs 复合材料)和CNTs 复合材料。

### 1.3 性能表征

利用场发射扫描电镜(FESEM, Hitachi S-420)观

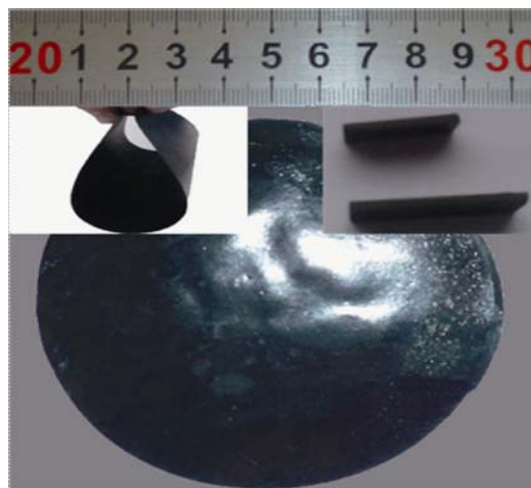


图 1 杂化碳纳米纸及其复合材料

Fig. 1 Hybrid BP and hybrid BP composites

表 1 杂化碳纳米纸基本参数

Table 1 Basic parameters of hybrid buckypaper

	Weight /mg	Radius /mm	Thickness /mm	Conductivity /( $\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ )
Hybrid BP	549.2	50	0.1	19.76

察杂化碳纳米纸及复合材料的微观形貌; 利用 BJH (Barret-Joyner-Halenda)法(Micromeritics autopore 9520 system)测量碳纳米纸的孔径分布; 利用四探针电阻测量仪(RTS-8 广州四探针科技)测量碳纳米纸的电阻; 利用 Agilent 8720 ET 矢量网络分析仪在 8.2~12.4 GHz(X 波段)和 12.4~18 GHz(Ku 波段)频率范围内, 使用波导法测试杂化碳纳米纸/CNTs 复合材料和 CNTs 复合材料的电磁参数, 复合材料样品如图 1 插图所示, 尺寸分别为  $15.8\text{ mm} \times 7.8\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ (Ku 波段)和  $22.86\text{ mm} \times 10.16\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ (X 波段)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 杂化碳纳米纸(复合材料)基本性能研究

由图 2(a)可见杂化碳纳米纸结构中 CNTs 相互交织成孔径分布均匀的三维网络结构, 其直径大约在 10~30 nm 之间, 磁性纳米粒子均匀包覆在 CNTs 表面, 没有出现团聚。图 2(a)插图 EDS 分析显示杂化碳纳米纸中存在 Fe 和 O 元素, 计算 Fe 和 O 的原子数比为 3:4, 可以进一步确认包覆在 CNTs 表面的磁性纳米粒子为  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 。图 2(b)采用 BJH 法测量得

到的杂化碳纳米纸的平均孔径为 28.64 nm, 大部分孔径分布在 5~45 nm 之间, 少量孔径位于 5 nm 以下和 45 nm 以上, 属于典型的介孔材料, 比表面积达  $108.86\text{ m}^2/\text{g}$ , 孔径分布的均匀性保证了碳纳米纸与树脂的浸润性和成型工艺性(如图 2(c), (d)所示), 而大比表面积可以避免作为  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁性纳米粒子载体时的团聚问题。图 2(c)杂化碳纳米纸/CNTs 复合材料中碳纳米纸三维网络结构的空隙完全被树脂浸润, 由图 2(d)可见杂化碳纳米纸与树脂界面结合较好。

杂化碳纳米纸的磁滞曲线见图 3, 其饱和磁化强度达  $72.88\text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ , 其磁性能的提高主要是由接枝在碳纳米管侧壁的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米粒子产生的, 同时杂化碳纳米纸既没有矫顽力( $H_C$ ), 也没有剩磁( $B_r$ ), 表明其具有超顺磁性<sup>[18]</sup>。

### 2.2 (杂化碳纳米纸)CNTs 复合材料电磁参数

根据传输线理论, 当电磁波射入吸波材料时, 一部分会射入材料中, 另一部分则被反射。在理想状态下, 当吸波材料的输入阻抗与自由空间阻抗相匹配时, 入射的电磁波将全部进入材料而无反射。换句话说, 电磁波必须在宽频范围内满足等式  $\varepsilon = \mu$ , 介电损耗  $\tan \delta_\varepsilon = \varepsilon''/\varepsilon'$  和磁损耗  $\tan \delta_\mu =$

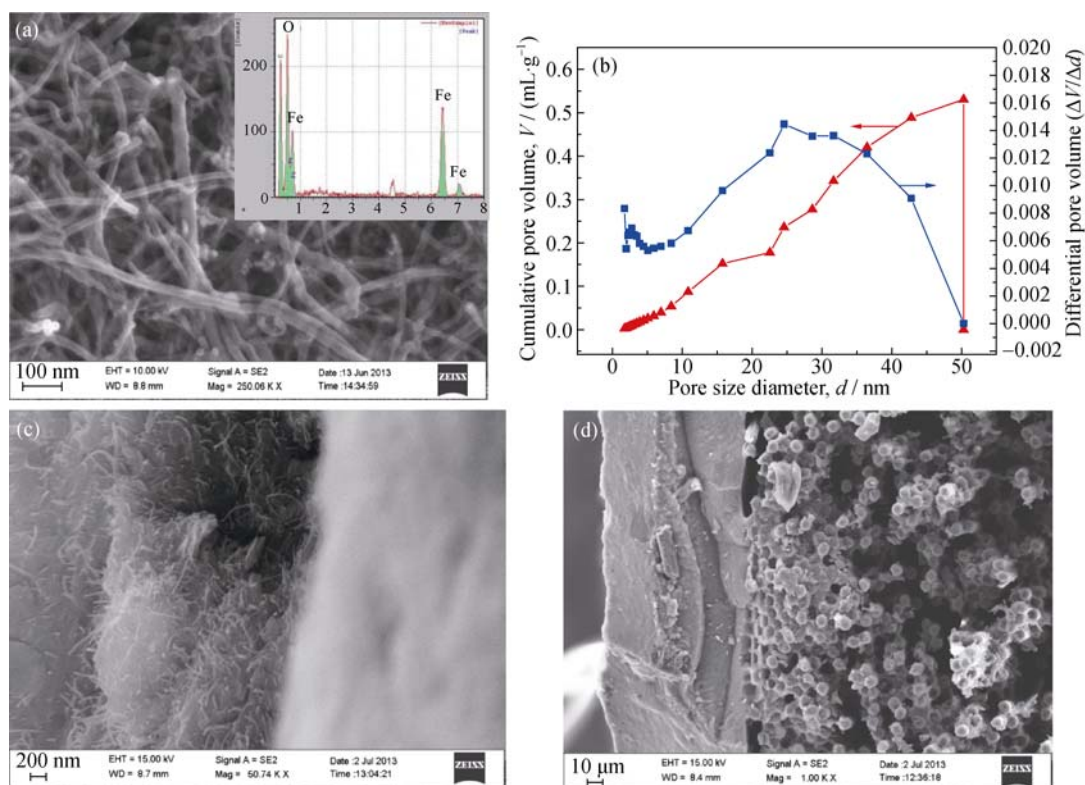


图 2 杂化碳纳米纸 SEM 照片(a), 杂化碳纳米纸平均孔径分布(b), 杂化碳纳米纸复合材料断面 SEM 照片(c, d)  
Fig. 2 SEM images of hybrid BP (a), distribution of pore size diameter for hybrid BP (b), SEM images of hybrid BP/composite (c, d)



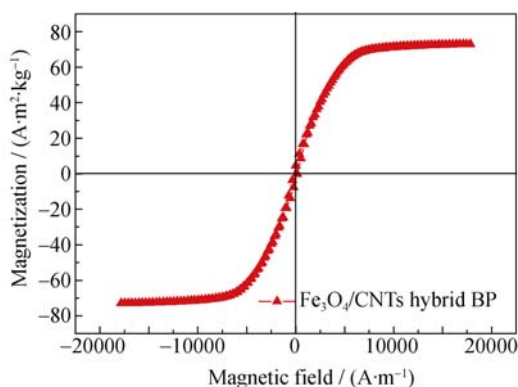


图 3 杂化碳纳米纸的磁滞曲线  
Fig. 3 Hysteresis loops of hybrid buckypaper

$\mu''/\mu'$  越接近, 才能保证电磁波进入吸波层并最终在其中损耗。

由图 4(a)可见在 8.2~18 GHz 频率范围内, 杂化 BP/CNTs 复合材料  $\epsilon'$  值位于 2.5~7.5 之间, CNTs 复合材料  $\epsilon'$  值位于 6~8 之间, 杂化碳纳米纸/CNTs 复合材料的  $\epsilon'$  均低于 CNTs 复合材料, 且  $\epsilon'$  总体都呈现随频率增大而降低的趋势。由图 4(b)可见在 8.2~12.4 GHz 范围内, 杂化碳纳米纸/CNTs 复合材料  $\epsilon''$  明显高于 CNTs 复合材料, 在 12.4~15.2 GHz 和 15.9~18 GHz 频率范围内杂化碳纳米纸/CNTs 复

合材料的  $\epsilon''$  低于 CNTs 复合材料的  $\epsilon''$ 。对于杂化碳纳米纸/CNTs 复合材料而言, 较小的  $\epsilon'$  和  $\epsilon''$  有利于提高电磁波吸收性能, 当电磁波在  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /CNTs 杂化粒子间反射时, 在  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  与 CNTs 界面位置会产生杂化电容, 引起杂化碳纳米纸的介电松弛行为<sup>[19]</sup>, 对介电常数变化起决定作用, 介电常数实部主要代表极化能力, 介电常数虚部与材料介电损耗有关<sup>[20]</sup>, 本实验杂化碳纳米纸/CNTs 复合材料的介电损耗主要由界面极化和电极极化决定<sup>[21]</sup>。

由图 4(c)可见在 8.2~18 GHz 频段内, 杂化碳纳米纸/CNTs 复合材料的  $\mu'$  随频率的增大而降低, 从 20.78(8.2 GHz)降到 1.97(18 GHz), 而 CNTs 复合材料  $\mu'$  在 1.0 左右, 基本保持不变。图 4(d)杂化碳纳米纸/CNTs 复合材料具有较高的  $\mu''$  值, 它在 8.68 GHz 出现最大值 9.73, 在 16.9 GHz 为最小值 0.069; 而 CNTs 复合材料的  $\mu''$  基本接近 0。这是因为 CNTs 属于介电材料, 磁损耗很小, 接近于 0, 而杂化碳纳米纸中接枝的纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  是一种以磁损耗为主的材料, 因此杂化碳纳米纸具有优异的磁损耗特性。由于由磁性纳米粒子表面磁电极作用产生的消磁场对磁导率影响明显<sup>[22]</sup>, 提高磁导率有利于将电磁能转换为热能, 提高电磁波吸收能力。磁导率一般可利

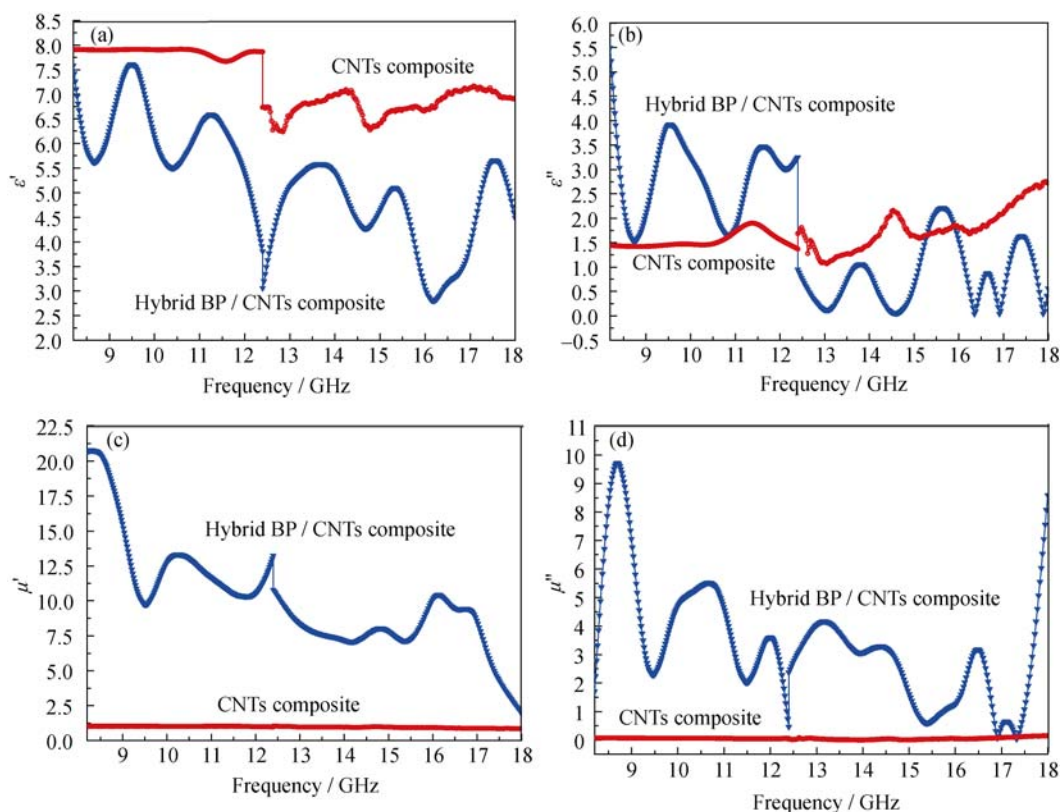


图 4 杂化碳纳米纸复合材料和 CNTs 复合材料的复介电常数和复磁导率  
Fig. 4 Complex permittivity and complex permeability of hybrid BP/CNTs composite and CNTs composite

用磁滞损耗、磁畴共振和自然共振来解释<sup>[23]</sup>, 磁滞损耗通常位于 MHz 位置, 磁畴共振通常发生在 2~5 GHz, 本实验可排除这两个因素, 所以自然共振是杂化碳纳米纸/CNTs 复合材料的主要磁损耗机理。

为了更好地研究复合材料的吸波机理, 分析介电损耗( $\tan \delta_e = \epsilon''/\epsilon'$ )和磁损耗( $\tan \delta_\mu = \mu''/\mu'$ )十分关键。由图 5(a)所示, 在 8.2~18 GHz 频率范围内, 杂化碳纳米纸/CNTs 复合材料的介电损耗值在 0~0.85 之间, CNTs 复合材料的介电损耗值在 0.16~0.39 之间, 其中在 8.2~12.4 GHz 和 15.17~16.18 GHz 频率范围内, 杂化碳纳米纸/CNTs 复合材料的介电损耗值高于 CNTs 复合材料。由图 5(b)所示, 在 8.2~17.58 GHz 频率范围内, 杂化碳纳米纸/CNTs 复合材料的磁损耗值位于 0.1~0.5 范围内, CNTs 复合材料的磁损耗为 0.1 左右, 杂化碳纳米纸/CNTs 复合材料的磁损耗明显高于 CNTs 复合材料。杂化碳纳米纸/CNTs 复合材料的高磁导率主要是由  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  粒子/CNTs/树脂三维杂化微结构引起的, 并且适量  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  会使杂化碳纳米纸/CNTs 复合材料的电损耗更加接近于磁损耗, 从而满足阻抗

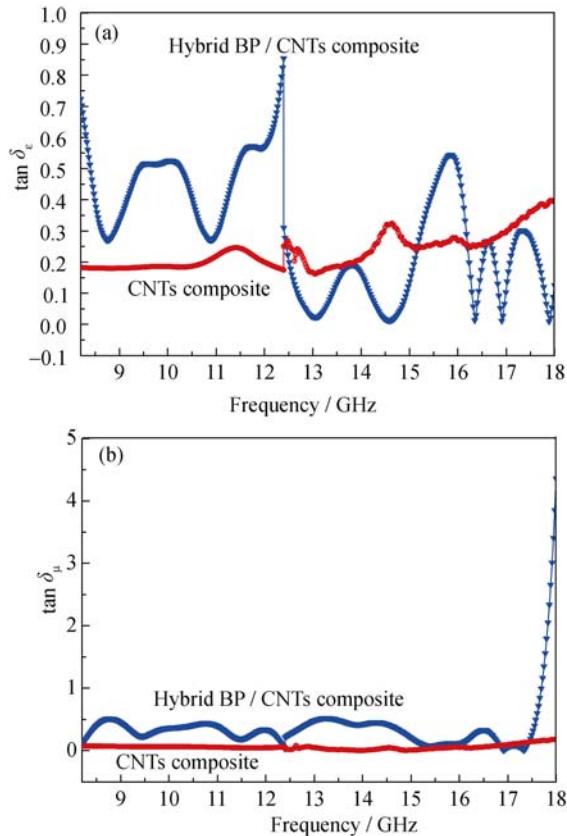


图 5 杂化碳纳米纸复合材料和 CNTs 复合材料的介电损耗(a)和磁损耗(b)

Fig. 5 Dielectric loss  $\tan \delta_e$  (a) and magnetic loss  $\tan \delta_\mu$  (b) for hybrid BP/CNTs composite and CNTs composite

匹配关系。

## 2.3 复合材料吸波性能

根据传输线理论, 单层复合材料的反射损耗可由下式进行粗略计算:

$$RL(\text{dB}) = 20 \lg \left| \frac{Z_{\text{in}} - Z_0}{Z_{\text{in}} + Z_0} \right| \quad (1)$$

其中吸波材料的输入阻抗  $Z_{\text{in}}$  为:

$$Z_{\text{in}} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh \left( j \cdot \frac{2\pi f d}{c} \sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r} \right) \quad (2)$$

式中;  $Z_0$  为自由空间的特性阻抗;  $\mu_r$  ( $\mu_r = \mu' - j\mu''$ ) 和  $\epsilon_r$  ( $\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$ ) 分别是吸波材料的复磁导率和复介电常数;  $f$  是微波频率;  $d$  是吸波材料的厚度;  $j$  为虚数单位,  $j^2 = -1$ ;  $c$  是光速。

根据等式(1)和(2), 吸波反射率是  $\epsilon'$ 、 $\epsilon''$ 、 $\mu'$ 、 $\mu''$ 、 $f$  和  $d$  等 6 个参数的函数: 通过对(1)和(2)式求解可计算不同频率时的吸波反射率。由图 6 可见, 在 8.2~18 GHz 频率范围内, 杂化碳纳米纸/CNTs 复合材料的反射率均小于 CNTs 复合材料, 其中杂化碳纳米纸/CNTs 复合材料的吸波反射率基本上全部小于 -10 dB (频宽达 9.7 GHz), 在 15.42 GHz 位置出现反射损耗峰 (-43.18 dB), 而 CNTs 复合材料仅在 9~10 GHz 频率范围内吸波反射率小于 -10 dB, 其最大吸波反射率为 -10.17 dB, 吸波能力完全小于杂化碳纳米纸/CNTs 复合材料。上述结果表明通过在 CNTs 复合材料表面外贴一层 0.1 mm 厚的  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CNTs}$  杂化碳纳米纸, 复合材料在 8.2~18 GHz 频率范围内取得了优异的吸波性能 ( $R < -10$  dB, 15.42 位置反射峰 -43.18 dB)。

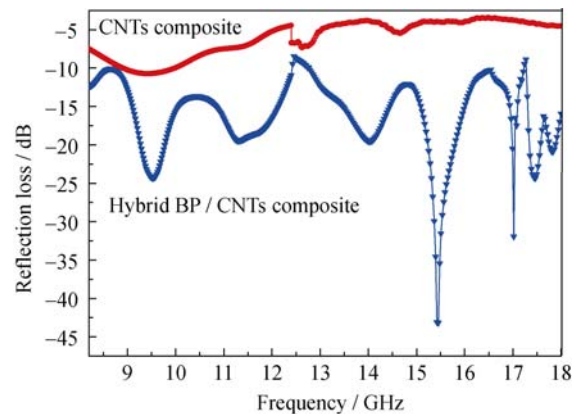


图 6 杂化碳纳米纸/CNTs 复合材料和 CNTs 复合材料的计算吸波损耗

Fig. 6 Calculated reflection loss of hybrid BP/CNTs composite and CNTs composite

### 3 结论

采用  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  接枝碳纳米管单分散水溶液真空吸滤制备的杂化碳纳米纸孔径分布均匀(平均孔径 28.64 nm), 比表面积达  $108.86 \text{ m}^2/\text{g}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米粒子均匀分布于碳纳米管表面, 无团聚问题, 其饱和磁化度达  $72.88 \text{ Am}^2/\text{kg}$ , 具有优异的磁性能, 同时可与复合材料一体成型。与碳纳米管共混复合材料相比, 外贴一层杂化碳纳米纸(厚度 0.1 mm)的 CNTs 复合材料磁损耗明显增强, 在 8.2~18 GHz 频率范围内吸波反射率基本上全部小于 -10 dB(频宽达 9.7 GHz), 在 15.42 GHz 位置最小反射损耗峰为 -43.18 dB, 吸波性能增加明显, 有望应用于隐身复合材料。

### 参考文献:

- [1] LIJIMA S. Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, 1991, **354**: 56–58.
- [2] TONG G X, WU W H, HUA Q, *et al.* Enhanced electromagnetic characteristics of carbon nanotubes/carbonyl iron powders complex absorbers in 2–18 GHz ranges. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, **509**(2): 451–456.
- [3] SUI J H, ZHANG C. Microwave absorption and catalytic activity of carbon nanotubes decorated with cobalt nanoparticles. *Materials Letters*, 2012, **75**(15): 158–160.
- [4] ZHU H, Yu L F, LIN H Y, *et al.* Study on the microwave absorbing property of composite material containing carbon nanotubes with Ni coating. *Journal of Functional Materials*, 2007, **38**(7): 1213–1216.
- [5] SHEN Z M, ZHAO D L. Study on the microwave absorbing property of composite material containing carbon nanotubes with Ni coating. *New Carbon Materials*, 2001, **16**(1): 1–4.
- [6] LIU Y, JIANG W, Li S, *et al.* Electrostatic self-assembly of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles on carbon nanotubes. *Applied Surface Science*, 2009, **255**(18): 7999–8002.
- [7] WANG X Z, ZHAO Z B, QU J Y, *et al.* Fabrication and characterization of magnetic  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -CNT composites. *Journal Physical Chemical Phys. Solids*, 2010, **71**(4): 673–676.
- [8] JIANG F J, PU H T, YANG I L, *et al.* Preparation and properties of soft magnetic composites based on  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  coated carbon nanotubes. *New Carbon Materials*, 2007, **24**(4): 371–374.
- [9] JIANG M J, DANG Z M, Bozlar M, *et al.* Broad frequency dielectric behavior in multiwalled carbon nanotube/rubber nanocomposites. *Journal of Applied Physics*, 2009, **106**(8): 1–6.
- [10] LI Y, CHEN C X. Multiband microwave absorption films based on defective multiwalled carbon nanotubes added carbonyl iron/acrylic resin. *Physica*, 2009, **404**(8–11): 1343–1346.
- [11] LU SHAOWEI, ZENG XIANJUN, NIE PENG, *et al.* Electromagnetic and microwave absorbing performance of ultra-thin Fe attached carbon nanotube hybrid buckypaper. *Functional Materials Letters*, 2014, **7**(2): 1–4.
- [12] LU SHAOWEI, XU WEIKAI, XIONG XUHAU, *et al.* Preparation, magnetism and microwave absorption performance of ultra-thin  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /carbon nanotube sandwich buckypaper. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, **606**: 171–176.
- [13] DU C S, PAN N. Supercapacitors using carbon nanotubes films by electrophoretic deposition. *Power Sources*, 2006, **160**(2): 1487–1494.
- [14] MAHAJAN S V, HASAN S A, CHO J, *et al.* Carbon nanotube-nanocrystal heterostructures fabricated by electrophoretic deposition. *Nanotechnology*, 2008, **19**(19): 1–8.
- [15] DHARP P, Li Z L, NAGARAJAIAH S, *et al.* Nanotube film based on single-wall carbon nanotubes for strain sensors. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2004, **15**(3): 379–382.
- [16] WU Z C, CHEN Z H, DU X, *et al.* Transparent, conductive carbon nanotube films. *Science*, 2004, **305**(12): 73–76.
- [17] ZHAO C Y, ZHANG A B, ZHENG Y P, *et al.* Electromagnetic and microwave-absorbing properties of magnetite decorated multiwalled carbon nanotubes prepared with poly(N-vinyl-2-pyrrolidone). *Materials Research Bulletin*, 2012, **47** (2): 217–221.
- [18] LI G X, GUO Y X, SUN X, *et al.* Synthesis and microwave absorbing properties of FeNi alloy incorporated ordered mesoporous carbon-silica nanocomposite. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2012, **73**(11): 1268–1273.
- [19] TANG X, HU K. Preparation and electromagnetic wave absorption properties of Fe-doped zinc oxide coated barium ferrite composites. *Materials Science and Engineering*, 2007, **139**(2/3): 119–123.
- [20] FANG Z G, LI C S, SUN J Y, *et al.* The electromagnetic characteristics of carbon foams. *Carbon*, 2007, **45**(15): 2873–2879.
- [21] Dakin T W. Conduction and polarization mechanisms and trends in dielectric. *Electrical Insulation Magazine*, 2006, **22**(5): 11–28.
- [22] YANG Y, Li Z W, NEO C P, *et al.* Model design on calculations of microwave permeability and permittivity of Fe/SiO<sub>2</sub> particles with core/shell structure. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2014, **75**(2): 230–235.
- [23] XI L, WANG Z, ZUO Y L, *et al.* The enhanced microwave absorption property of  $\text{COFe}_2\text{O}_4$  nanoparticles coated with a  $\text{CO}_3\text{Fe}$ -CO nanoshell by thermal reduction. *Nanotechnology*, 2011, **22**(4): 1–6.