

# 铁镍磁性涂层碳纤维软磁性能及电磁屏蔽效能的研究

王畅<sup>1,2</sup>, 纪长松<sup>3</sup>, 岳建岭<sup>1,2</sup>, 黄小忠<sup>1,2</sup>, 杜作娟<sup>1,2</sup>, 唐秀之<sup>1,2</sup>

(1.中南大学, 长沙 410012; 2.新型特种纤维及其复合材料湖南省重点实验室, 长沙 410006;  
3.中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

**摘要:** **目的** 制备兼具良好电磁屏蔽效能和软磁性能的新型屏蔽材料。**方法** 采用化学镀的方法在碳纤维表面制备 FeNi 合金涂层和 Ni 涂层。运用 SEM、EDS、XRD 分析涂层碳纤维的形貌、成分和镀层结构。通过 VSM 研究其软磁性能。采用万用表测量其电阻并计算电导率。利用网络矢量分析仪测量其电磁参数并计算其电磁屏蔽效能, 进而对 FeNi 合金涂层碳纤维和 Ni 涂层碳纤维的上述性能进行对比。**结果** 金属镀层均匀且晶粒细小。FeNi 合金涂层碳纤维的矫顽力为 29.25 Oe, 饱和磁化强度为 25.61 emu/g。在 7.92~18 GHz 频率范围内, FeNi 合金涂层碳纤维的电磁屏蔽效能均在 30 dB 以上, 峰值为 40.79 dB。**结论** 金属涂层能使碳纤维具有软磁性能, 并能有效地调整其电磁参数, 进而显著提高其电磁屏蔽效能。与 Ni 涂层碳纤维相比, FeNi 合金涂层碳纤维的上述性能更加优异。该研究为兼具良好电磁屏蔽效能和软磁性能的新型屏蔽材料的制备提供了新方案。

**关键词:** FeNi 合金涂层; Ni 涂层; 碳纤维; 电磁屏蔽效能; 软磁性能; 化学镀

**中图分类号:** TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)06-0174-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.06.025

## Soft Magnetic Properties and Electromagnetic Shielding Effectiveness of Magnetic FeNi Coated Carbon Fibers

WANG Chang<sup>1,2</sup>, JI Chang-song<sup>3</sup>, YUE Jian-ling<sup>1,2</sup>, HUANG Xiao-zhong<sup>1,2</sup>,  
DU Zuo-juan<sup>1,2</sup>, TANG Xiu-zhi<sup>1,2</sup>

(1. Central South University, Changsha 410012, China; 2. Hunan Key laboratory of Advanced Fibers and Composites, Changsha 410006, China; 3. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

**ABSTRACT:** The work aims to prepare a new shielding material exhibiting excellent electromagnetic shielding effectiveness and soft magnetic properties. Electroless plating was adopted to prepare FeNi alloy coating and Ni coating on the surface of carbon fiber. Microstructure, composition and plating structure of the carbon fibers were analyzed using SEM, EDS and XRD.

收稿日期: 2017-12-11; 修订日期: 2018-02-25

Received: 2017-12-11; Revised: 2018-02-25

基金项目: 湖南省科技计划项目 (2015TP1007); 国家自然科学基金项目 (51201187)

**Fund:** Supported by Science and Technology Plan Project of Hunan Province (2015TP1007); National Natural Science Foundation of China (51201187)

作者简介: 王畅 (1992—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为材料表面改性。

**Biography:** WANG Chang (1992—), Female, Master, Research focus: material surface modification.

通讯作者: 岳建岭 (1979—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为纳米结构材料和材料表面改性。

**Corresponding author:** YUE Jian-ling (1979—), Male, Doctor, Professor, Research focus: nanostructured materials and material surface modification.

The soft magnetic properties were also investigated with VSM. Resistance was measured with a multimeter, and conductivity was calculated. Moreover, electromagnetic parameters were also measured with a network vector analyzer, and electromagnetic shielding effectiveness was calculated. Above-mentioned properties of FeNi coated carbon fiber and Ni coated carbon fiber were compared. Metal coating was uniform and grains were fine. Coercivity of FeNi coated carbon fiber was 29.25 Oe, and saturation magnetization was 25.61 emu/g. Value of electromagnetic shielding effectiveness of FeNi coated carbon fiber was over 30 dB in the frequency range of 7.92~18 GHz, and the maximum value was 40.79 dB. The metal coating endowed carbon fibers with soft magnetic properties, adjusted electromagnetic parameters effectively, and further improved the electromagnetic shielding effectiveness significantly. Compared with Ni-coated carbon fibers, the above-mentioned properties of FeNi coated carbon were better. The study has provided a new scheme for preparing a novel shielding material exhibiting excellent electromagnetic shielding effectiveness and soft magnetic properties.

**KEY WORDS:** FeNi coated carbon fibers; Ni coated carbon fibers; electromagnetic shielding effectiveness; soft-magnetic properties; electroless plating method

现代电子科技的高速发展使得无线设备的应用日益广泛,随之带来的电磁辐射问题也日渐严重。电磁干扰会使电子元器件产生误动和图像障碍等问题,影响电子设备的正常使用<sup>[1,2]</sup>。碳纤维具有高强度、低密度等优势,在新型电磁屏蔽材料的导电填料领域有巨大的应用潜力<sup>[3]</sup>,但其电磁参数较低、电磁屏蔽性能不好<sup>[4]</sup>。同时电子元件的小型化和轻量化趋势对材料的多功能化也提出了更高要求,越来越多的电磁屏蔽材料被要求兼具软磁性能,从而能够实现磁电转换功能<sup>[5]</sup>。

金属 Ni 具有优异的耐腐蚀性和耐热性,已有研究表明:镀镍碳纤维电阻率仅为原碳纤维的 1/54,用其制备的复合材料具有较好的电磁屏蔽效能<sup>[1,4,6]</sup>。金属 Fe 耐热性好,并且广泛用于制备各种软磁材料<sup>[7,8]</sup>。相比于单质 Ni, FeNi 合金的成本低,饱和磁化强度高,矫顽力低<sup>[9]</sup>,且磁导率较高,对电磁波的吸收衰减较好<sup>[10]</sup>。化学镀因涂层均匀性好、成本低等优势在涂层制备方面得到了广泛应用<sup>[11]</sup>。本文采用化学镀的方法获得了结合良好的 FeNi 合金涂层碳纤维和 Ni 涂层碳纤维,进而对其形貌、成分、结构、软磁性能、电导率和电磁参数进行表征,并计算其电磁屏蔽效能。同时首次对 FeNi 合金涂层碳纤维和 Ni 涂层碳纤维的电磁性能进行较全面的对比,可为之后实验和工程制造中材料选择提供依据,同时为兼具良好电磁屏蔽效能和软磁性能的新型屏蔽材料的制备提供了新方案。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 FeNi 合金涂层碳纤维的制备

纤维预处理:将连续碳纤维(日本东丽 T300-3K,直径 7 μm)置于管式炉中,在 N<sub>2</sub> 氛围下 500 °C 高温

热处理 1 h 后置于丙酮中超声洗涤,以去除其表面的有机粘结剂和杂质。之后将其放入烘箱中,在 50 °C 下干燥 30 min。

粗化:将预处理后的碳纤维浸入由过硫酸铵 [(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>] 与浓硫酸配制成的粗化液中,室温搅拌 20 min,使碳纤维表面呈现微观的粗糙,以增大金属镀层与碳纤维之间的结合力。

敏化活化:敏化液为一定浓度的氯化亚锡 (SnCl<sub>2</sub>) 与浓盐酸的混合液,活化液为一定浓度的氯化钯 (PdCl<sub>2</sub>) 与浓盐酸的混合液。将粗化后的碳纤维依次浸入敏化液和活化液中,分别室温搅拌 5 min。

化学镀:镀液组分为硫酸镍 (NiSO<sub>4</sub>·6H<sub>2</sub>O)、硫酸亚铁铵 [(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>Fe(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O]、次亚磷酸钠 (NaH<sub>2</sub>PO<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O)、硫酸铵 [(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>]、酒石酸钾钠 (KNaC<sub>4</sub>H<sub>4</sub>O<sub>6</sub>·H<sub>2</sub>O) 和氨水 (NH<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O)。纤维表面镀 FeNi 时,硫酸亚铁铵的浓度为硫酸镍浓度的 6 倍。镀液 pH 控制为 9.0。化学镀在 75 °C 水浴锅中进行,时间为 1 h。

### 1.2 分析与表征

采用 JSM-6490LV 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察涂层碳纤维的表面形貌及涂层厚度。采用 NEPTUNE TEXS HP 型能谱波谱仪 (EDS) 测定镀层成分含量。采用 D8 Advance 型 X-射线衍射仪 (XRD) 测定样品的晶粒结构、采用 Lake Shore VSM 7307 型震动样品磁强计 (VSM) 测定样品的磁滞回线。采用五位半可编程数字万用表测定单根纤维的电阻,每个样品随机选取 50 根测量,取均值。并按式 (1) 计算单根纤维的电导率。

$$\sigma = 1/\rho \quad (1)$$

式 (1) 中,  $\sigma$  为电导率,单位为 S/m;  $\rho$  为单根纤维的电阻率,单位为  $\Omega \cdot m$ ,由式 (2) 计算得到。

$$\rho = \frac{\pi(r+h)^2 R}{l} \tag{2}$$

式(2)中,  $R$  为单根纤维的电阻均值, 由测量得到, 单位为  $\Omega$ ;  $r$  为原碳纤维半径, 其值为  $3.5 \times 10^{-6}$  m;  $h$  为涂层厚度, 单位为 m;  $l$  为纤维长度, 其值为 0.01 m;  $\pi$  取 3.14。

采用 AV3629 高性能微波一体化矢量网络分析仪, 利用同轴法测定纤维填充量为 40% 的纤维/石蜡复合样品的电磁参数, 并按公式(3) — (7) 计算其电磁屏蔽效能。

$$R = |S_{11}|^2 \tag{3}$$

$$T = |S_{21}|^2 \tag{4}$$

$$SE_{\text{ref}} = -10 \lg(1 - R) \tag{5}$$

$$SE_{\text{abs}} = -10 \lg(T / (1 - R)) \tag{6}$$

$$SE_{\text{total}} = SE_{\text{ref}} + SE_{\text{abs}} \tag{7}$$

其中,  $S_{11}$  和  $S_{21}$  分别为反射参数和透射参数, 由

测量得到;  $R$  和  $T$  分别为反射系数和透射系数;  $SE_{\text{ref}}$ 、 $SE_{\text{abs}}$  和  $SE_{\text{total}}$  分别为反射电磁屏蔽效能、吸收电磁屏蔽效能和总屏蔽效能, 单位均为 dB<sup>[12-13]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 FeNi 合金涂层碳纤维的形貌及成分分析

图 1 为原碳纤维和涂层碳纤维的 SEM 照片。由图可以看出, 纤维表面均匀镀上了一层金属层, 原碳纤维表面的沟壑变浅甚至消失, 金属层与碳纤维基体结合良好, 没有开裂剥落现象。分别随机取 10 根上述两种纤维, 在扫描显微镜下测量镀层厚度, 其值见表 1。可见镀层均匀性较好, 两者厚度均约为 350 nm, 差值不超过  $\pm 2.5\%$ 。

表 2 和表 3 分别为 FeNi 合金涂层碳纤维和 Ni 涂层碳纤维表面镀层的元素含量。FeNi 合金涂层碳

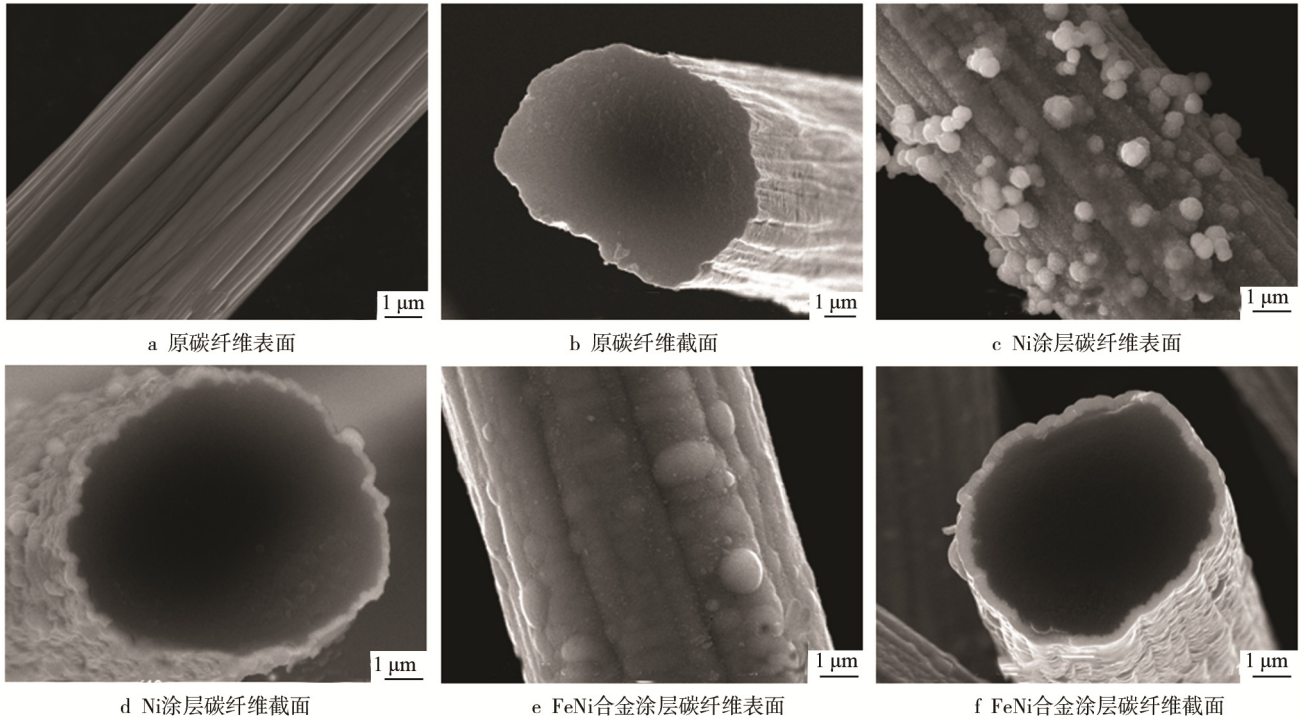


图 1 原碳纤维和涂层碳纤维的 SEM 扫描照片

Fig.1 SEM photographs of original carbon fiber and coated carbon fiber: surface of original carbon fiber (a), Ni coated carbon fiber (c) and FeNi coated carbon fiber (e) and cross section of original carbon fiber (b), Ni coated carbon fiber (d) and FeNi coated carbon fiber (f)

表 1 FeNi 合金涂层碳纤维和 Ni 涂层碳纤维的涂层厚度分布  
Tab.1 Coating thickness distribution of FeNi coated carbon fiber and Ni coated carbon fiber

Sample	Coating thickness/nm									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ni coated carbon fiber	355	358	347	352	343	351	350	345	349	350
FeNi coated carbon fiber	346	343	349	350	355	357	352	351	349	348

纤维镀层中 P:Fe:Ni (质量比) 为 4:19:77, Ni 的含量是 Fe 的 4 倍, 由此可知, Ni 的沉积速率远高于 Fe。Ni 涂层碳纤维镀层中各成分的质量比 P:Ni 为 5:95。镀层中的金属为屏蔽材料的有效成分, 两种涂层碳纤维镀层中金属含量均很高。

表 2 FeNi 合金涂层碳纤维镀层中元素含量  
Tab.2 Element content in FeNi coated carbon fiber plating

Element	P	Fe	Ni
Wt/%	4.39	19.12	76.49

表 3 Ni 涂层碳纤维镀层中元素含量  
Tab.3 Element content in Ni coated carbon fiber plating

Element	P	Ni
Wt/%	5.27	94.73

2.2 FeNi 合金涂层碳纤维的结构分析

图 2 为原始碳纤维、Ni 涂层碳纤维与 FeNi 合金涂层碳纤维的 XRD 图谱。由图可见, 原始碳纤维在  $2\theta=25^\circ$  出现一个馒头峰, 表明碳纤维由非晶态碳构成。当碳纤维表面镀上 Ni 或 FeNi 后, 碳纤维馒头峰的位置不变, 但强度明显降低。其中, Ni 涂层碳纤维在  $2\theta=44.6^\circ$  和  $2\theta=51.8^\circ$  处各有一个衍射峰出现, 分别对应于镍的 (111) 和 (200) 晶面。相比之下, FeNi

合金涂层碳纤维在  $2\theta=44.2^\circ$  的 (111) 晶面衍射峰强度显著降低, 并且宽化, 表明 Fe 的加入增加了基体 Ni 的晶格缺陷, 从而导致形成的 FeNi 合金涂层晶格完整性相对较差。另外, 两种涂层碳纤维的衍射峰均为宽峰, 说明涂层晶粒较细。

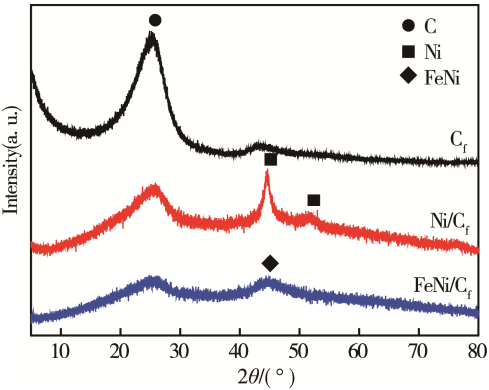


图 2 涂层碳纤维的 XRD 谱图  
Fig.2 XRD pattern of coated carbon fibers

2.3 FeNi 合金涂层碳纤维的软磁性能分析

碳纤维本身没有磁性, 并不是软磁材料, 在其表面镀上铁、镍等磁性金属后, 可使其具有优异的软磁性能。图 3 为 Ni 涂层碳纤维和 FeNi 合金涂层碳纤维的磁滞回线, 磁滞回线细长, 说明软磁性能优异。

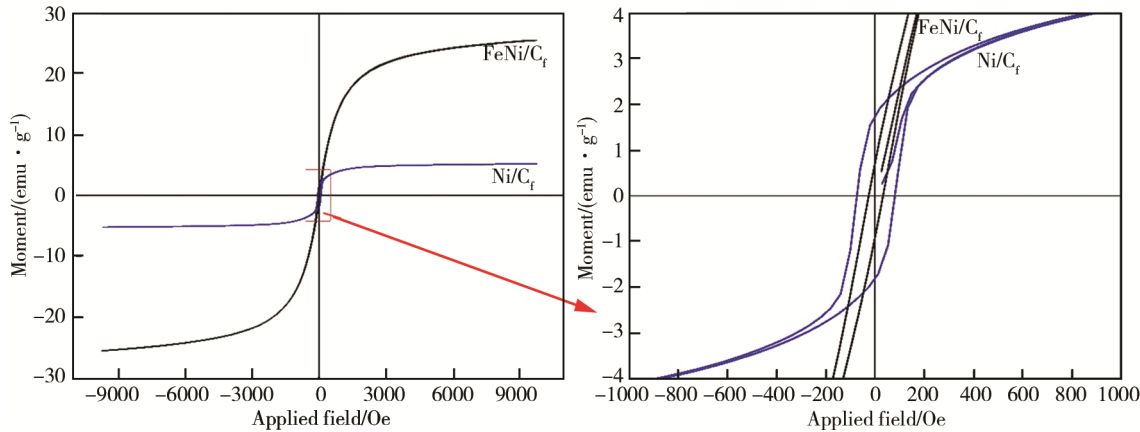


图 3 两种涂层碳纤维的磁滞回线  
Fig.3 Hysteresis loops of coated carbon fibers

表 4 为 Ni 涂层碳纤维和 FeNi 合金涂层碳纤维的饱和磁化强度、剩磁强度和矫顽力数据。由表可知, FeNi 合金涂层碳纤维与 Ni 涂层碳纤维均具有较好的软磁性能, 但前者软磁性能更加优异。FeNi 合金涂层碳纤维的饱和磁化强度约为 Ni 涂层碳纤维的 5 倍, 表明前者储磁能力较好, 而剩磁强度和矫顽力远低于后者, 说明前者更易退磁。通常软磁材料的矫顽力和饱和磁化强度受其成分的影响较大。在 FeNi 合金涂层碳纤维中, 由于 Fe 的引入显著降低了材料的磁晶各向异性常数  $K_1$  和磁致伸缩系数  $\lambda_s$ , 从而降低了矫

顽力, 同时提高了材料的饱和磁化强度<sup>[14]</sup>, 因此相比于纯 Ni 涂层, FeNi 合金涂层碳纤维具有更好的软磁性能。

表 4 两种涂层碳纤维的软磁参数数据  
Tab.4 Soft magnetic parameters of two coated carbon fibers

Sample	Saturation magnetization/( $\text{emu} \cdot \text{g}^{-1}$ )	Residual magnetization/( $\text{emu} \cdot \text{g}^{-1}$ )	Coercivity/Oe
Ni coated carbon fiber	5.23	1.76	78.63
FeNi coated carbon fiber	25.61	0.81	29.25



## 2.4 FeNi 涂层碳纤维的电导率分析

图4为单根原碳纤维、FeNi涂层碳纤维和Ni涂层碳纤维电导率的对比图。由图可知,在表面镀上金属涂层后,纤维的电导率明显上升,其中FeNi涂层碳纤维的电导率升高更为显著。根据能带模型和跳跃模型理论,原碳纤维中的导带仅存在于原子有序排列的局部区域,其电导率的产生是由于电子克服势垒,在不同区域间的导带上跃迁,而金属内电子可沿连续导带自由迁移,因此在其表面镀金属层后,电导率增加<sup>[15]</sup>。电导率的升高对碳纤维的屏蔽效能具有非常重要的意义,电导率越大,其电磁屏蔽效能越好。

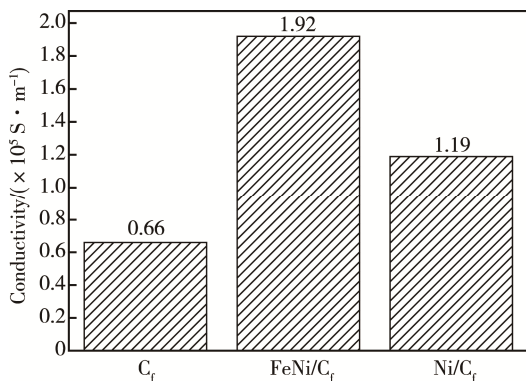


图4 单根纤维电导率的对比

Fig.4 Conductivity comparison of single fiber

## 2.5 FeNi 合金涂层碳纤维的电磁屏蔽效能分析

电磁参数是反映材料电磁屏蔽效能的重要参数。图5为2~18 GHz频率范围内,各纤维的复介电常数随频率的变化曲线,图中FeNi合金涂层碳纤维的复介电常数始终低于Ni涂层碳纤维,随着频率的增加,两者逐渐接近。介电常数虚部反映了材料的电损耗,前者的电损耗始终低于后者。一般而言,复介电常数实部 $\epsilon'$ 主要由直流电导效应和界面极化决定<sup>[16]</sup>,如果将涂层碳纤维复合体系视为平行电阻-电容电路体系,则直流电导效应主导的 $\epsilon'$ 在频率-介电损耗对数图上为近似的直线,界面极化主导的 $\epsilon''$ 为起伏的曲线<sup>[17]</sup>。图6为对数坐标下( $\log$ - $\log$ )介电常数虚部对频率的依赖关系,由此可知,FeNi合金涂层碳纤维 $\epsilon''$ 的变化主要缘于涂层与碳纤维之间的界面极化,而Ni涂层碳纤维则是直流电导效应占据主导,两者产生区别的原因在于FeNi合金与碳纤维间电导率的差值更大,传导电流更为不均等,易在界面处富集电子<sup>[15]</sup>。

图7反映了2~18 GHz频率范围内各纤维的复磁导率与频率的关系。在该频率范围内,原碳纤维与Ni涂层碳纤维的复磁导率数值相近,实部均接近于1,说明其储磁能力较差;虚部接近于0,说明其几乎不存在磁损耗。在10 GHz后,Ni涂层碳纤维 $\mu''$ 略

有上升,磁损耗增大。其 $\epsilon$ 与 $\mu$ 数值相差很大,说明其阻抗匹配较差,对电磁波有较大的反射。对于FeNi合金涂层碳纤维,在低频频段(2~5.2 GHz),其复磁导率与前两者相差不大,5.2 GHz后,其磁导率实部迅速升高,9.42 GHz后虚部迅速升高,且远高于其余两种纤维,说明Fe的加入使得材料在中高频频段的

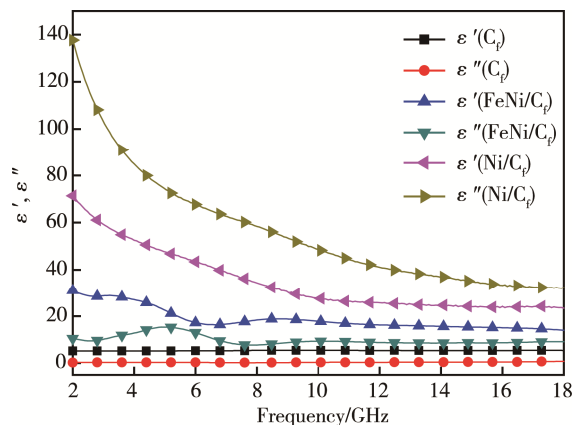


图5 纤维复介电常数随频率的变化曲线

Fig.5 Variation curves of complex permittivity of fibers with frequency

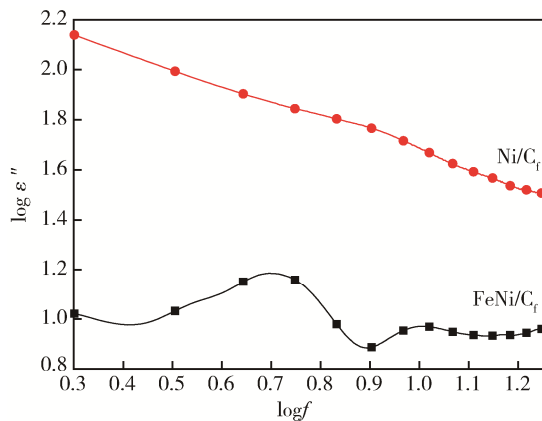


图6 涂层碳纤维 $\epsilon''$ 与频率的对数关系图

Fig.6 logarithmic relationship between  $\epsilon''$  of coated  $C_f$  and frequency

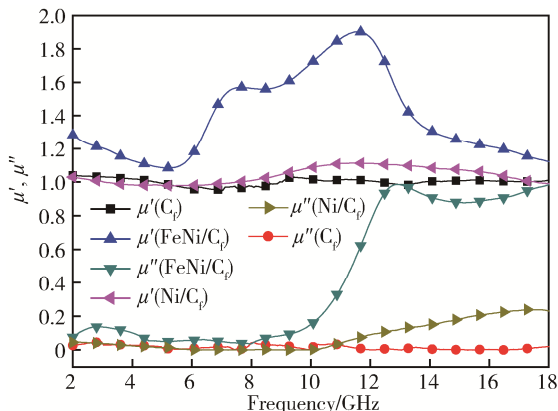


图7 纤维的复磁导率随频率的变化曲线

Fig.7 Variation curves of complex permeability of fibers with frequency

磁损耗大大提高。其介电常数与磁导率数值相近, 对电磁波的反射较小。磁导率的大小与材料的吸收屏蔽效能息息相关, 磁导率越大, 其吸收屏蔽效能越好<sup>[9]</sup>。

图 8 为原碳纤维和涂层碳纤维的电磁屏蔽效能随频率的变化。由图可知, 涂层后, 碳纤维的电磁屏蔽效能明显提高。在低频频段, FeNi 合金涂层碳纤维的电磁屏蔽效能低于 Ni 涂层碳纤维, 随着频率的增加, 前者的屏蔽效能迅速增加, 在 4.84 GHz 后超过后者, 并迅速拉开差距。9.6 GHz 后, 前者的屏蔽效能稳定于 40 dB 左右, 峰值为 40.79 dB, 在 7.92~18 GHz 宽频段内, 其电磁屏蔽效能均在 30 dB 以上。随着频率的增加, Ni 涂层碳纤维的电磁屏蔽效能增加缓慢。

图 9 为两种涂层碳纤维的反射电磁屏蔽效能和吸收电磁屏蔽效能随频率的变化图。图中显示, 在低频处, FeNi 合金涂层碳纤维的吸收屏蔽效能低于 Ni 涂层碳纤维, 而在之后相当宽的一个频段内, 前者均高于后者。这是因为 Fe 元素的添加使涂层碳纤维由单一的介电损耗转换为介电损耗和磁损耗双重机制

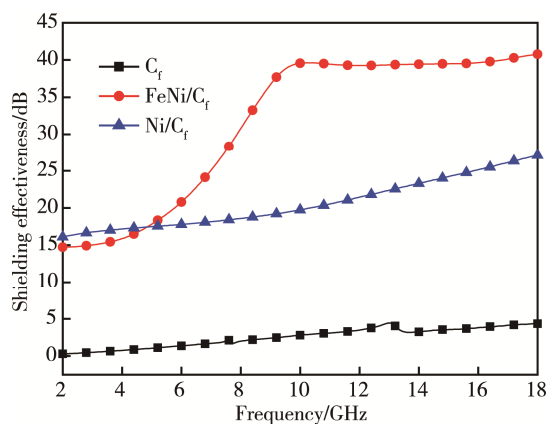


图 8 原碳纤维和涂层碳纤维的电磁屏蔽效能

Fig.8 Electromagnetic shielding efficiency of original carbonfibers and coated carbon fibers

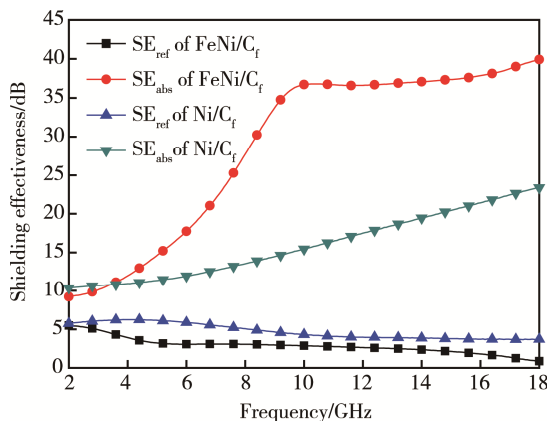


图 9 涂层碳纤维的吸收屏蔽效能和反射屏蔽效能

Fig.9 Absorption shielding effectiveness and reflective shielding effectiveness of coated carbon fibers

共同作用, 而磁损耗在电磁屏蔽中起主导作用。在低频频段, Ni 涂层碳纤维的电损耗远高于 FeNi 合金涂层碳纤维, 磁损耗相近, 因此前者吸收屏蔽效能高于后者。随着频率的增加, FeNi 合金涂层碳纤维的  $\mu''$  迅速升高, 因此吸收屏蔽效能大大提高。在 2~18 GHz 内, Ni 涂层碳纤维的反射屏蔽效能均高于 FeNi 合金涂层碳纤维, 因为前者阻抗匹配不好, 对电磁波反射较大。但两者的屏蔽机制主要是吸收屏蔽, 因此 FeNi 合金涂层的总电磁屏蔽效能优于 Ni 涂层碳纤维。

### 3 结论

1) 采用化学镀在碳纤维表面制备了 FeNi 涂层 (Fe 质量分数为 19%) 和 Ni 涂层, 涂层厚度约 350 nm, 与基体结合良好。

2) 金属涂层能使碳纤维具有软磁性能, 并能有效调整其电磁参数, 显著提高其电磁屏蔽效能。与 Ni 涂层碳纤维相比, FeNi 合金涂层碳纤维的上述性能更加优异。前者电磁屏蔽效能最大为 40.79 dB 且在 30 dB 以上的频宽超过 10 GHz。

3) 涂层碳纤维的屏蔽效能主要是吸收屏蔽效能, Fe 元素的添加大大提高了材料在中高频频段的吸收屏蔽效能, 从而提高了总屏蔽效能。

### 参考文献:

- [1] D'ALOIA A G, MARRA F, TAMBURRANO A, et al. Electromagnetic Absorbing Properties of Graphene-Polymer Composite Shields[J]. Carbon, 2014, 73(14): 175-184.
- [2] 马志梅, 马富花, 李继红, 等. 碳纳米管对金属网栅电磁屏蔽效能及可视性的影响[J]. 表面技术, 2014, 43(3): 101-104.  
MA Z M, MA F H, LI J H, et al. Influence of Carbon Nanotubes on the Shielding Effectiveness and Visibility of Metal Shield[J]. Surface Technology, 2014, 43 (3): 101-104.
- [3] 班国东, 刘朝辉, 叶圣天, 等. 碳纤维复合吸波材料的频散特性影响规律研究[J]. 表面技术, 2017, 46(4): 205-211.  
BAN G D, LIU C H, YE S T, et al. Influence Laws of Frequency Dispersion Characteristics of Carbon Fiber Composite Absorbing Material[J]. Surface Technology, 2017, 46(4): 205-211.
- [4] 闫丽丽, 乔妙杰, 雷忆三, 等. 化学镀镍碳纤维/环氧树脂复合材料电磁屏蔽性能[J]. 复合材料学报, 2013, 30(2): 44-49.  
YAN L L, QIAO M J, LEI Y S, et al. EMI Shielding Effectiveness of Electroless Nickel-plated Carbon Fibers/Epoxy Resin Composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(2): 44-49.

- [5] 刘君昌, 梅云辉, 陆国权. 电力电子中高频软磁材料的研究进展[J]. 材料工程, 2017, 45(5): 127-134.  
LIU J C, MEI Y H, LU G Q. Development of High-frequency Soft Magnetic Materials for Power Electronics[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(5): 127-134.
- [6] 王富强, 闫丽丽, 王东红, 等. 镀镍碳纤维复合材料的电磁脉冲屏蔽效能[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(7): 1-5.  
WANG F Q, YAN L L, WANG D H, et al. Electromagnetic Pulse Shielding Effectiveness of Nickel-plated Carbon Fiber Composites[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(7): 1-5.
- [7] ZHANG Z, LIU X, ZHANG H, et al. Electromagnetic and Microwave Absorption Properties of Carbon Fibers Coated with Carbonyl Iron[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2015, 26(9): 1-8.
- [8] ZHANG Y, GAN T, DONG J, et al. Enhanced Magnetoimpedance Effect of Carbon Fiber/Fe-based Alloy Coaxial Composite by Tensile Stress[J]. Carbon, 2015, 93: 451-457.
- [9] 姚明翠, 孙冠武, 王燕刚, 等. 磁性 FeNi 合金/石墨化介孔碳纳米复合材料的合成及其在染料吸附中的应用[J]. 上海有色金属, 2016, 37(1): 1-8.  
YAO M C, SUN G W, WANG Y G, et al. Synthesis of Magnetic FeNi Alloy/Graphitic Mesoporous Carbon Nanocomposites and Its Application in Dye Adsorption[J]. Shanghai Nonferrous Metals, 2016, 37(1): 1-8.
- [10] 朱国辉, 左遥远. 铁镍合金对复合电磁屏蔽材料性能的影响[J]. 功能材料, 2013, 44(12): 1686-1689.  
ZHU G H, ZUO Y Y. The Effect of Fe-Ni Alloy on the Shielding Efficiency of Electromagnetic Shielding Composites[J]. Journal of Functional Materials, 2013, 44(12): 1686-1689.
- [11] 曾文清, 曾为民, 高中正, 等. 碳纤维铁网催化法化学镀镍[J]. 表面技术, 2017, 46(6): 276-281.  
ZENG W Q, ZENG W M, GAO Z Z, et al. Electroless Nickel-plating on Carbon Fiber in Wire Mesh Catalyzing Method[J]. Surface Technology, 2017, 46(6): 276-281.
- [12] SHEN Bin, LI Yang, YI Da, et al. Microcellular Graphene Foam for Improved Broadband Electromagnetic Interference Shielding[J]. Carbon, 2016, 102: 154-160.
- [13] LI Yang, SHEN Bin, PEI Xue-liang, et al. Ultrathin Carbon Foams for Effective Electromagnetic Interference Shielding[J]. Carbon, 2016, 100: 375-385.
- [14] 严密, 彭晓领. 磁学基础与磁性材料[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 2006: 113-116.  
YAN M, PENG X L. Magnetic Foundation and Magnetic Material[M]. Zhejiang: Zhejiang University Press, 2006: 113-116.
- [15] 陈季丹, 刘子玉. 电介质物理学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982: 178-183.  
CHEN J D, LIU Z Y. Dielectric Physics[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1982: 178-183.
- [16] XI Y, BIN Y, CHIANG C K, et al. Dielectric Effects on Positive Temperature Coefficient of Polyethylene and Short Carbon Fibers[J]. Carbon, 2007, 45(6): 1302-1309.
- [17] ZHANG J, MINE M, ZHU D, et al. Electrical and Dielectric Behaviors and Their Origins in the Three-dimensional Polyvinyl Alcohol/MWCNT Composites with Low Percolation Threshold[J]. Carbon, 2009, 47(5): 1311-1220.