

树脂基 Fe 纳米粒子及碳纤维复合 吸波平板的制备与性能

Preparation and Performance of Resin-based Fe Nanoparticles/
Carbon Fibers Microwave Absorbing Composite Plates

周远良, 赛义德, 张 黎, 贾韦迪, 段玉平, 董星龙
(大连理工大学 材料科学与工程学院 三束材料改性教育部
重点实验室, 辽宁 大连 116024)

ZHOU Yuan-liang, SHAH Syed, ZHANG Li, MUHAMMAD Javid,
DUAN Yu-ping, DONG Xing-long
(Key Laboratory of Materials Modification by Laser, Ion and Electron
Beams (Ministry of Education), School of Materials Science and
Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024,
Liaoning, China)

摘要: 以 Fe 纳米粒子(Fe NPs)为吸波剂, 偶联剂 KH550 为表面改性剂, 碳纤维(CFs)作为增强及电磁波反射相, 环氧树脂(ER)作为基体, 制备多种吸波平板并对其综合性能及相关机制进行研究。结果表明: 平板的吸波性能随 Fe NPs 和 CFs 含量的增加而提高, 吸收剂浓度梯度分布有助于形成特定频段的共振吸收; 平板对电磁波损耗具有明显的各向异性, 表现为 CFs 垂直电磁波入射方向时性能优于平行情况, 当 Fe NPs 的含量为 30% (质量分数, 下同), CFs 为 5.52%, 板厚为 4.56mm 时, 最小反射损耗为 -26.8dB(4.9GHz); 同时, CFs 可改善平板的抗弯性能, 当 Fe NPs 为 30% 时, 弯曲强度相比于纯树脂时仅降低了 5.81%。

关键词: Fe 纳米粒子; 碳纤维; 环氧树脂; 浓度梯度; 微波吸收性能

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2016.000848

中图分类号: TB333 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2018)03-0041-07

Abstract: A series of Fe NPs/CFs/ER nanocomposite plates were prepared by using Fe nanoparticles as microwave absorbent, the surface modification of as-prepared Fe nanoparticles was carried out by using silane coupling agents (KH-550), carbon fibers were used to enhance the reflection of electromagnetic waves inside and mechanical properties. The results show that microwave absorption of nanocomposite plates increases with increasing of mass percentage of Fe nanoparticles and carbon fibers, their gradient concentration results in resonance phenomena in specific frequency region. The microwave absorption property is anisotropic, the properties of at the vertical direction of carbon fibers towards incident wave are better than the parallel case, the minimum reflectivity peak value of the nanocomposites with 30% (mass fraction, the same as below) of Fe NPs and 5.52% of CFs reaches -26.8dB at 4.9GHz with the matching thickness of 4.56mm. CFs can maintain the bending properties of nanocomposites effectively, the bending strength of the nanocomposite with 30% Fe NPs is just lower than that with 0% Fe NPs by 5.81%.

Key words: Fe nanoparticle; carbon fiber; epoxy resin; gradient concentration; microwave absorbing property

随着电子通讯技术的快速发展, 电磁波辐射导致了一系列的环境污染问题, 不但影响电子产品的正常工作, 而且还危及人们的身体健康。吸波材料能够有效吸收入射的电磁波并将电磁能转换成热能耗散掉,

或者通过干涉使电磁波消失, 因而引起了人们的普遍关注^[1-3]。与此同时, 吸波材料作为隐身技术的基础, 在国防安全方面也具有举足轻重的地位, 已经广泛应用于隐身飞机、微波通讯、监测、测量等军事设备

上^[4-7]。传统的吸波材料存在吸收频带窄、厚度大、密度大、强度小、热稳定性差等弊端,材料的纳米化、表面包覆、浓度梯度分布、多组分复合等措施可以有效解决上述问题,成为目前国内外研究的热点方向。由透波层、阻抗匹配层、吸收层以及反射背衬等多部分组成的阻抗渐变梯度复合吸波材料,即 Jaumann 吸收体^[8],引起了人们的重视。徐建国等^[9]以碳纳米管按不同比例填充到环氧树脂基体中,获得结构优化的介电组分梯度分布的多层吸波材料。刘志宾等^[10]将 M 玻璃纤维/环氧树脂复合材料置于复合材料前端,组合成了多层梯度复合材料,可有效改善电磁匹配,提高吸波性能。Chen 等^[11]通过在匹配层中添加不同含量的 SiO_2 以调节阻抗匹配条件,实现了一定浓度梯度下的最好吸波性能。

Fe 纳米粒子(Fe NPs)具有较大的 Snoek 极限^[12]、高表面能、高磁导率等特点,可独自或与其他元素结合形成优异的吸波材料^[13-14]。碳纤维(CFs)由于拥有高弹性模量、低密度、高强度等性能一直是研究的热点^[15-18]。本工作以 Fe NPs 作为微波吸收剂,CFs 作为增强相,环氧树脂(ER)作为基体,制备了纳米复合平板吸波材料,讨论了复合结构中吸收剂浓度梯度分布、CFs 方向及其对电磁波反射等因素对吸波性能的影响机制,为功能/结构一体化纳米复合结构的制备及其优异吸波性能提供了重要的依据。

1 实验材料及方法

通过直流电弧氢等离子体法制备 Fe NPs^[13,19],硅烷偶联剂氨丙基三乙氧基硅烷(KH-550,上海萨恩化学技术有限公司)作为 Fe NPs 的表面改性剂^[20]。基体采用 ER 体系:双酚 A 型二缩水甘油醚 ER(沈阳正泰防腐材料有限公司),牌号为 E-51,环氧值在 0.48~0.54 范围内,平均值为 0.52,介电常数 $\epsilon_r \approx 3.7$ ^[21]。甲基六氢苯酐(上海精细化学品有限公司)和三苯基膦(天津市科密欧化学试剂有限公司)分别作为固化剂和促进剂^[22]。CFs 采用单向 CFs 织布(土耳其阿克萨公司),牌号 T400,支数 12K,单丝直径 $6.9 \mu\text{m}$,密度为 1.76g/cm^3 ,单层厚度为 0.203mm。

Fe NPs/CFs/ER 复合吸波平板的工艺流程如图 1 所示。

(1)制作内尺寸为 $20 \text{cm} \times 20 \text{cm}$ 的模具,利用水平尺调平并喷上油性脱模剂后放入加热箱预热至 110°C ; (2)按质量比为 100:80:1 称取 ER(E51)、固化剂(MeHHPA)和促进剂(PPh_3),将固化剂与 Fe NPs 混合,并在 $30 \sim 50^\circ\text{C}$ 下进行超声并机械搅拌

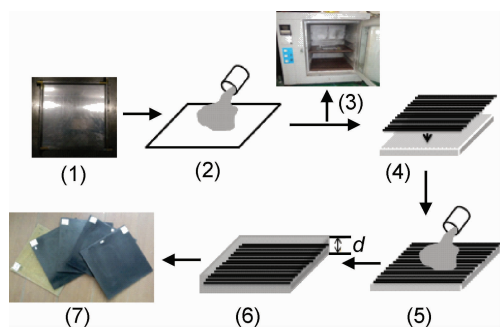


图 1 Fe 纳米粒子/碳纤维/环氧树脂复合吸波平板的制备工艺流程

Fig. 1 Flow chart for preparation of Fe NPs/CFs/ER composite plates

30min,加入促进剂后,在 $70 \sim 80^\circ\text{C}$ 下超声并机械搅拌 10min,迅速将混合液体倒入预热至 110°C 的模具中; (3)将第一层放置在加热炉中加热,固化工艺为 $110^\circ\text{C}/0.5\text{h} + 123^\circ\text{C}/1.5\text{h} + 134^\circ\text{C}/2\text{h}$; (4)在第一层固化 20min 后,按照预设方向铺设 CFs; (5)继续倒入第二层; (6)重新按照 $110^\circ\text{C}/0.5\text{h} + 123^\circ\text{C}/1.5\text{h} + 134^\circ\text{C}/2\text{h}$ 的工艺进行固化; (7)固化完成后取出平板,打磨飞边后待用。

对于无 CFs 添加的平板省略(4),(5),(6)所进行的铺设 CFs 步骤。

使用 XRD-6000 型 X 射线衍射仪进行物相和结构分析,Cu 靶 K_α ($\lambda = 0.154 \text{nm}$),管压为 50kV,扫描范围为 $30^\circ \sim 80^\circ$ 。使用 G20 S-Twin 型高分辨透射电镜进行微观形貌分析。使用 Nova NanoSEM 450 场发射扫描电子显微镜观察截面微观形貌。

利用 Agilent 8702B 矢量网络分析仪在 $2 \sim 18 \text{GHz}$ 范围内采用弓形法,对制备的 Fe NPs/CFs/ER 复合材料平板进行反射损耗测试。

2 结果与讨论

2.1 Fe NPs 结构和形貌

图 2(a)是 Fe NPs 的 XRD 图谱,三个衍射峰对应面心立方 $\alpha\text{-Fe}$ 相的(111),(200),(220)三个衍射峰。Fe NPs 钝化后形成的氧化层可以保护内部 Fe 核,使其不发生进一步氧化,达到稳定纳米粒子的作用。由于氧化物层厚度薄、晶粒程度低,在 XRD 中没有出现相应的衍射峰。图 2(b)为 Fe NPs 的电子显微照片,纳米粒子为球形,粒子表面存在氧化层,粒子之间存在局部连结。利用 KH550 对 Fe NPs 进行表面改性,以利于后续在 ER 基体中的进一步分散和填充^[21]。

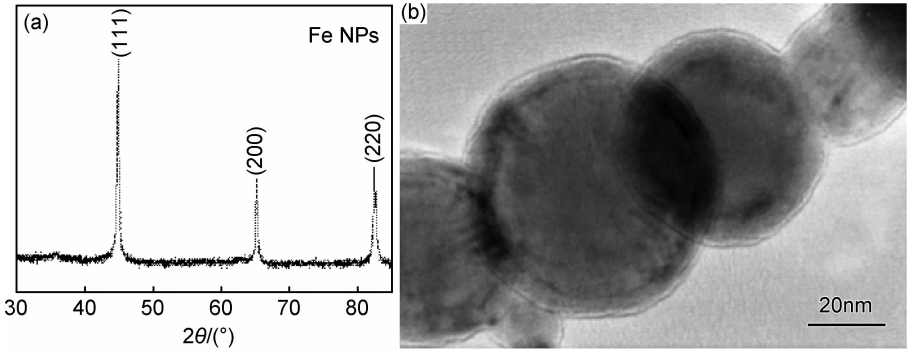


图 2 Fe 纳米粒子的微观特征 (a)XRD 图谱;(b)TEM 透射电镜图
Fig. 2 Microstructure characterizations of Fe NPs (a)XRD pattern;(b)TEM image

2.2 Fe NPs/CFs/ER 复合材料微观结构

图 3 是 Fe NPs 为 20%(质量分数,下同),CFs 为 2.76%单向排布时的电子探针(EPMA)元素分析及截面图。其中图 3(a)为截面扫描电镜图,图 3(b)为 Fe, C 元素分布,图 3(c),(d)为图 3(a)中的 c,d 区域放大部分,分别为复合材料中 CFs 处和无 CFs 处部分。从图 3(b)中可以看出 Fe 元素从平板上表面到下表面呈现明显的梯度分布,这主要是其在 ER 固化过程中受到重力驱使导致的;同时,C 元素不仅来源于 ER 基体,也来自于 CFs,在布置 CFs 的地方出现碳含量的

峰值。从图 3(c)中可以看到,CFs 分布均匀并与 ER 基体结合良好,作为增强相将有助于提高复合材料的力学性能,同时发挥反射相作用。从图 3(d)中可以看出此处 Fe NPs 在 ER 基体中混合均匀,两者接触连续性良好。

2.3 Fe NPs/CFs/ER 复合材料微波吸收性能

2.3.1 Fe NPs 含量及浓度分布对吸波性能的影响

复合吸波平板中,吸波剂 Fe NPs 以单一浓度和非单一浓度分布时,吸波能具有明显差异。从图 4(a)可以看出,纯 ER 平板在整个频段内没有出现反

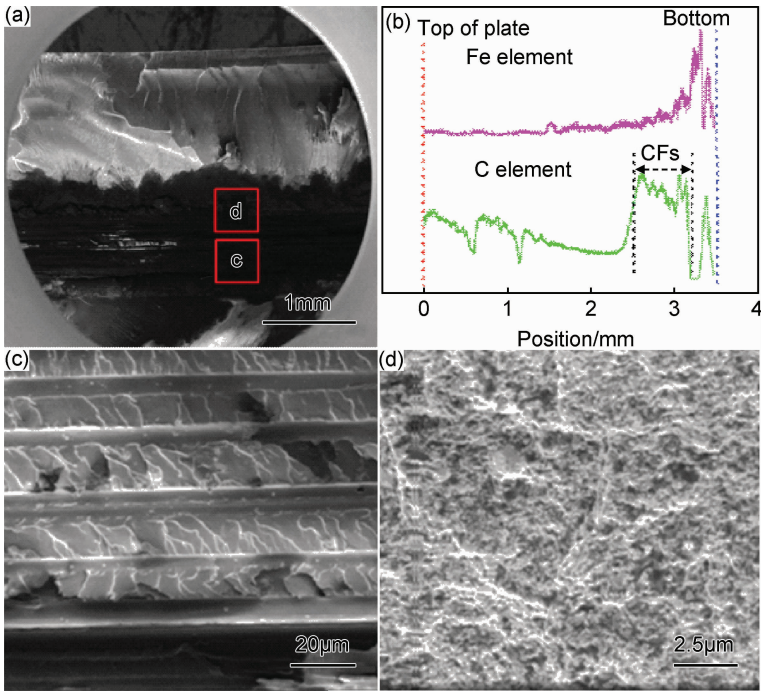


图 3 Fe NPs/CFs/ER 复合材料的电子探针(EPMA)元素分析及截面图
(a)截面 SEM 图;(b)Fe,C 元素分布;(c)图(a)中的 c 区域放大部分;(d)图(a)中的 d 区域放大部分
Fig. 3 SEM image and EPMA results of Fe NPs/CFs/ER composite (a)SEM image of cross section of composite;
(b)Fe/C element distribution;(c),(d)enlargement of areas c and d in fig. (a)

射损耗;当 Fe NPs 含量为 10% 时,同样没有出现吸收现象;当含量增加到 20% 时,从 8GHz 开始出现微弱吸收,并随频率提高而增强,但始终低于-2dB;质量分数增至 30% 后,从 6GHz 开始出现明显吸收,在 17.4GHz 时出现最大值,达到接近-10dB 的反射损

耗;含量继续增加至 40% 后,吸收效果出现波动,但并未得到明显提高。以上结果表明,吸波剂 Fe NPs 以单一浓度分布时,仅提高其含量,虽然在高频段吸波性能有所改善,但仍不能达到理想的微波吸收效果。

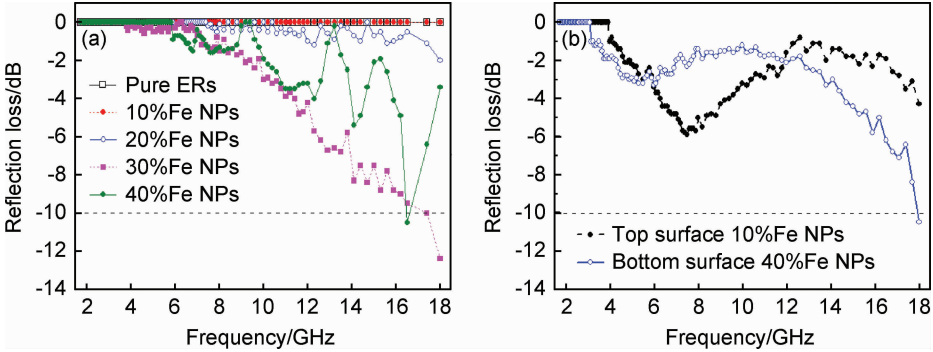


图 4 不同 Fe NPs 含量与浓度分布的反射损耗随频率变化曲线 (a)单一浓度分布($d=2\text{mm}$); (b)非单一浓度($d=4, 35\text{mm}$)

Fig. 4 Reflection losses versus frequency for different contents and concentration distributions of Fe nanoparticles (a)uniform distribution ($d=2\text{mm}$); (b)ununiform distribution($d=4, 35\text{mm}$)

图 4(b)中非单一浓度分布的 Fe NPs/ER 平板出现明显的共振现象,当电磁波由低浓度 Fe NPs 的上层面入射时反射损耗峰为-5.9dB(7.5GHz),由高浓度的下层面入射时为-3.3dB(6GHz),即表现为当电磁波从不同浓度面入射时,吸收状况出现明显差异,由高浓度面入射时吸收峰向低频方向移动。吸收剂浓度梯度的形成有助于吸波性能的改善,但在整个微波频段内依然低于-10dB。根据共振频率的计算公式^[23]:

$$f_{mnl} = \frac{c \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2}}{2\pi \sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (1)$$

式中: a, b, d 分别为吸波平板的长、宽、厚; m, n, l 分别为在 x, y, z 三个方向上驻波振动模式的变化数目; f 为共振频率; c 为光速; μ_r, ϵ_r 分别为相对磁导率和介电常数。考虑平板形状,公式可简化为:

$$f_{mnl} = \frac{c \sqrt{\left(\frac{l\pi}{d}\right)^2}}{2\pi \sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (2)$$

利用式(2),可以计算共振处复合材料的相对电磁参数乘积。根据图 4(b)的结果,2 个共振峰对应的 $\mu_r \epsilon_r$ 分别为 21.14(7.5GHz,低浓度面入射电磁波)和 33.03(6GHz,高浓度面入射电磁波)。因此当复合材料厚度确定时,以上结果提供了发生共振现象时电磁参数乘积的参考范围,其值越大共振频率越接近于低频。

以上结果充分表明,吸波剂 Fe NPs 浓度分布在

一定范围内(Fe NPs 含量低于 40%),无论是以单一或非单一浓度均匀分布于 ER 基体中,对电磁波的损耗程度有限。加入增强及反射相 CFs,可以明显提高基体的吸波性能。

2.3.2 CFs 排布方向及含量对吸波性能的影响

(1)CFs 方向对吸波性能的影响

CFs 作为一维结构,具有对电磁波响应的各向异性行为。电磁波在其传播方向的垂直平面上具有电场和磁场分量,考虑到反射损耗测试中复合材料的 CFs 排布方向与电磁波入射方向之间的关系,可以分为如图 5 所示的两种情况:一种是两者垂直,此时 CFs 方向与电场分量平行(图 5(a)),另外一种两者平行,此时 CFs 方向与电场分量垂直(图 5(b))。

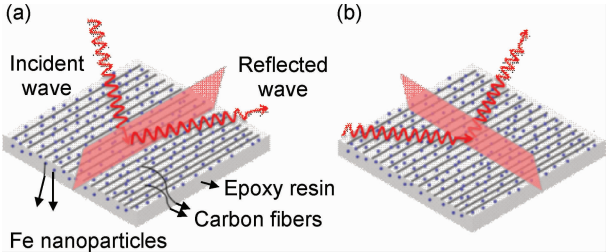


图 5 CFs 方向与电磁波方向之间的关系 (a)垂直;(b)平行

Fig. 5 Measurement manners for the directions of CFs and incident wave (a) vertical;(b) parallel

图 6 所示为不含 Fe NPs 时 CFs/ER 复合材料的反射损耗图,可以看出 CFs 作为吸收剂单独存在 ER

基体中也具有一定的吸波性能,但对电磁波响应存在各向异性,当 CFs 束平行于入射电磁波方向时,吸波性能随着频率的增加而增加,最小反射损耗为 -3.8dB (18GHz),当碳纤维束垂直于入射电磁波方向时,出现共振吸收峰,最小反射损耗为 -7.3dB (9.4GHz)。

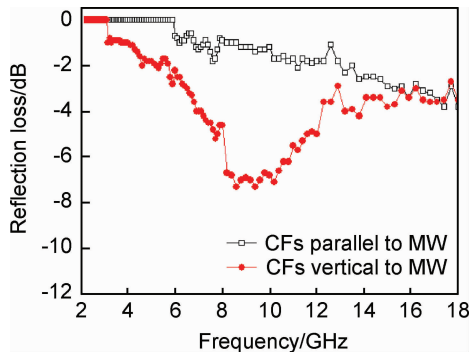


图 6 CFs/ER 复合材料的反射损耗随频率变化曲线

Fig. 6 Reflection losses *versus* frequency for CFs/ER composites

为了探究 Fe NPs 与 CFs 的相互作用,在 ER 基体中,以 Fe NPs 含量为 30%作为考察体系,CFs 含量为 2.76%(单层 CFs),对 CFs 方向垂直或平行于电磁波入射方向两种情况进行了反射损耗测试,结果如图 7 所示,可以看出:添加纳米粒子后,复合材料的吸波性能明显提升,当 CFs 方向平行于电磁波入射方向时,吸波性能较差,与无 CFs 的均质平板性能相似;当 CFs 方向垂直于电磁波入射方向时,吸波性能得到极大提高,在 6GHz 处出现共振,吸波性能达到 -19.1dB 。这种由于 CFs 排布带来的各向异性吸波

性能,表明当 CFs 与电磁波的电场分量垂直时,不能引起极化和对电磁波的反射,因此不能促进 Fe NPs 的多重吸收,吸波性能达不到 -10dB 要求;当 CFs 方向与电磁波电场分量平行时,与天线的极化特性一致^[24],CFs 产生了强极化,并对电磁波产生强反射,为 Fe NPs 的多重吸收创造了条件,引起特定频率下的共振行为。根据共振频率的计算公式(式(2)),平板厚度 $a=4.22\text{mm}$,得到 $\mu_r\epsilon_r=35.10$ (6GHz)。

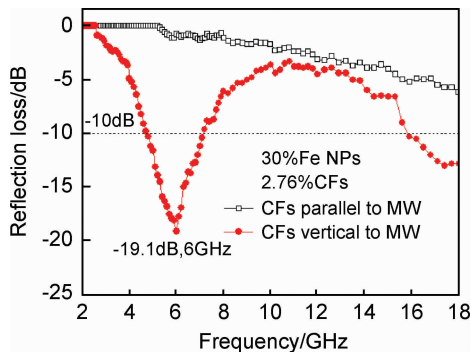


图 7 电磁波不同入射方向的反射损耗随频率变化曲线

Fig. 7 Reflection losses *versus* frequency for different incident directions of microwave

(2)CFs 含量对吸波性能的影响

为了进一步考察 CFs 含量对吸波性能的影响,在上述复合材料平板(30% Fe NPs, 2.76% CFs)基础上,CFs 层厚度不变,成倍减少或增加 CFs 含量(排列密度),另外制得两种复合材料平板(1.38% CFs, 5.52% CFs),其示意图如图 8 所示,测得 CFs 垂直于电磁波入射方向时的反射损耗,结果如图 9 所示。

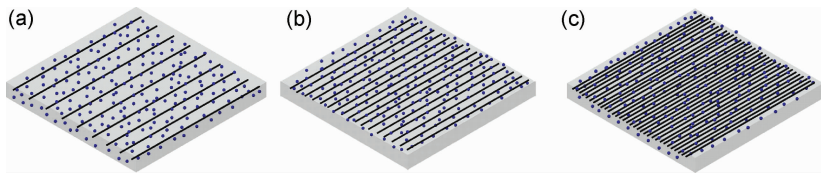


图 8 不同含量 CFs 的 Fe NPs/CFs/ER 复合材料示意图 (a)1.38%;(b)2.76%;(c)5.52%

Fig. 8 Fe NPs/CFs/ER composites with different contents of CFs (a)1.38%;(b)2.76%;(c)5.52%

从图 9 中发现,增加 CFs 含量可以进一步提高复合材料平板的吸波性能,促进共振吸收,共振频率向低频移动。这一结果为实现低频吸波性能的提高提供了有价值的参考和努力方向。随着 CFs 含量的提高(1.38%, 2.76%, 5.52%),共振吸收及频率分别为 -12.2dB (6GHz), -19.1dB (6GHz), -26.8dB (4.9GHz)。利用实测的反射损耗值,计算得到发生共振吸收时相对电磁参数乘积 $\mu_r\epsilon_r$ 分别为 38.10 ($d=$

4.05mm), 35.10 ($d=4.22\text{mm}$), 45.07 ($d=4.56\text{mm}$)。这是由于提高了 CFs 层的排列密度后,首先 CFs 排列更紧密,此时当电磁波入射至 CFs 表面时,将在 CFs 表面产生涡流,并随频率的增加而向表面集中,即为趋肤效应,当排列密度增加后,CFs 导电性增强,趋肤效应越明显,此时产生了较大的涡流损耗,增强了自身对电磁波的吸收,另外 CFs 束的增多也带来了更多的相位相消现象,电磁波在纤维束间的散射使得入射和反

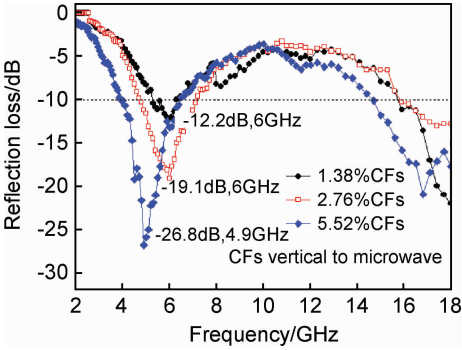


图 9 不同含量 CFs 复合材料的反射损耗
随频率变化曲线

Fig. 9 Reflection losses *versus* frequency for the composites
with different contents of CFs

射波由于相差 180°而相互抵消,减少了对电磁波的反射,最后由于 CFs 导电性良好,纤维束增多后将发生对电磁波的部分反射,这也给其临近的 Fe NPs 吸收剂多次吸收的机会。综上所述,含 CFs 的纳米复合板的吸波性能随 CFs 含量的增加而提高。

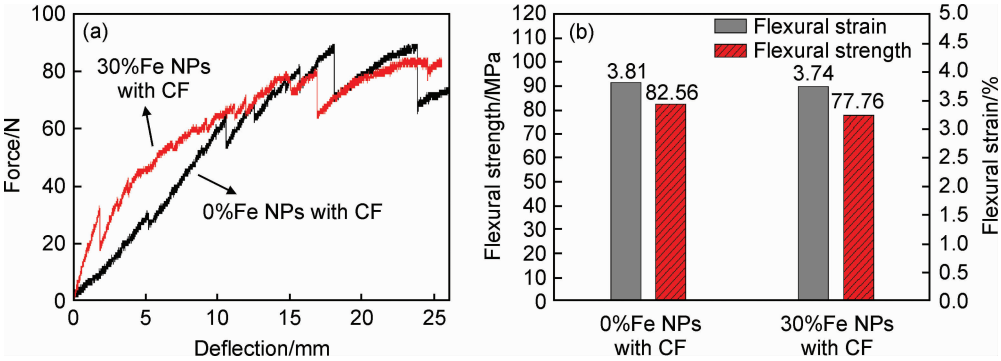


图 10 Fe NPs 含量分别为 0% 和 30% 时复合平板的力学性能 (a)应力-应变曲线;(b)弯曲强度与应变数值
Fig. 10 Mechanical properties of composite plates with 0% and 30% Fe NPs, respectively
(a)stress-strain curve;(b)values of flexural strength and flexural strain

实现复合材料结构功能一体化的需求。

3 结论

- (1)Fe NPs/ER 复合材料的吸波性能随 Fe NPs 含量的增加而提高,当含量为 30%时,在高于 17.4GHz 的频率范围内反射损耗小于-10dB;当 Fe NPs 含量由高到低梯度分布时,可形成特定频段内的共振吸收。
- (2)单向 CFs 布对电磁波的响应存在各向异性,表现为 CFs 垂直于电磁波入射方向时吸波性能优于平行情况,共振吸收峰向低频方向移动,当 Fe NPs 含量为 30%,CFs 含量为 5.52%,厚度为 4.56mm 时,4.9GHz 处最小反射损耗为-26.8dB。
- (3)CFs 可改善 Fe NPs 对复合材料弯曲性能的不

2.4 Fe NPs/CFs/ER 复合材料力学性能

在 Fe NPs/CFs/ER 复合材料中,CFs 不仅可以作为电阻型吸收剂吸收电磁波,还可以作为电磁波反射相,创造 Fe NPs 多次吸收电磁波的机会,另外,CFs 优异的力学性能可使复合材料实现结构功能的一体化。

本课题组前期工作中,当 Fe NPs 含量超过 20%后,引入了更多的气泡和缺陷,ER 基体不再连续,因此复合材料的弯曲强度随着 Fe NPs 的含量的增加而降低,当 Fe NPs 含量添加量为 30%时,弯曲强度比纯树脂材料降低了 51.63%^[25]。

图 10 为 Fe NPs 含量为 0%和 30%时复合平板的力学性能图谱。从图 10(a)应力-应变曲线可以看出,存在单向 CFs 时,当 Fe NPs 含量增至 30%后,平板的弯曲强度由 82.56MPa 降至 77.76MPa,仅降低了 5.81%,相比于无 CFs 的 51.63%,变化较小,且计算得到二者的弯曲应变如图 10(b)所示,二者变化不大,因此可得出结论,在纳米复合材料中,CFs 的引入可有效改善 FeNPs 对复合材料弯曲性能的不利影响,从而

- 利影响,Fe NPs 含量为 30%时,弯曲强度由不含 Fe NPs 时的 82.56MPa 降至 77.76MPa,仅降低了 5.81%。
- (4)Fe NPs/CFs/ER 复合材料实现了结构/功能一体化目的,通过控制吸收剂浓度及其分布、CFs 的含量及排布方向等因素,可有效提高纳米复合材料吸波性能。

参考文献

[1] TYAGIV K, LO S L. Microwave irradiation: a sustainable way for sludge treatment and resource recovery[J]. Renewable Sustainable Energy Reviews, 2013, 18: 288-305.

[2] MA J J, ZHAN M S, WANG K. Ultralight weight silver nanowires hybrid polyimide composite foams for high-performance electromagnetic interference shielding[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7: 563-576.

[3] WANG G Z, GAO Z, TANG S M, et al. Microwave absorption

- properties of carbon nanocoils coated with highly controlled magnetic materials by atomic layer deposition[J]. ACS Nano, 2012, 6:11009-11017.
- [4] 刘渊, 刘祥军, 王瑄军. 铁氧体基核壳结构复合吸波材料研究进展[J]. 材料工程, 2014(7):98-106.
LIU Y, LIU X X, WANG X J. Research progress in ferrite based core-shell structured composites microwave absorb materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2014(7):98-106.
- [5] 冯永宝, 唐传明, 丘泰. $\text{Fe}_{85}\text{Si}_{9.6}\text{Al}_{5.4}$ 合金的制备、表征及其低频吸波性能[J]. 材料工程, 2014(2):1-6.
FENG Y B, TANG C M, QIU T. Preparation, characterization and microwave absorbing properties of $\text{Fe}_{85}\text{Si}_{9.6}\text{Al}_{5.4}$ alloys in the low frequency range[J]. Journal of Materials Engineering, 2014(2):1-6.
- [6] ZHANG W Q, ZHANG D Y. EM-wave absorption properties of hollow spiral iron particles[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2015, 396:169-171.
- [7] 刘顺华, 刘军民, 董星龙. 电磁波屏蔽及吸波材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
LIU S H, LIU J M, DONG X L. Electromagnetic shielding and absorbing materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [8] CHERAKU D R, RAO G S. Estimation of reflectivity and shielding effectiveness of three layered laminate electromagnetic shield at X-band[J]. Progress in Electromagnetics Research B, 2010, 20(20): 205-223.
- [9] 徐建国, 李万富, 黄长庆. 基于遗传算法的介电梯度碳纳米管/环氧树脂吸波材料优化设计[J]. 功能材料, 2010, 41(增刊 1): 155-158.
XU J G, LI W F, HUANG C Q. Permittivity-grads wave-absorbing carbon nanotubes/epoxy resin composites optimization by genetic algorithm[J]. Functional Materials, 2010, 41(Suppl 1): 155-158.
- [10] 刘志宾, 朱正吼, 徐雪娇, 等. 铁氧体 $\text{Ba}(\text{Zn}_{0.65}\text{Co}_{0.35})\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ /环氧树脂复合材料板吸波性能与优化[J]. 功能材料, 2011, 42(1): 124-127.
LIU Z B, ZHU Z H, XU X J, et al. The absorbing properties and optimization of the $\text{Ba}(\text{Zn}_{0.65}\text{Co}_{0.35})\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ powders/M-glass fibers/epoxy composites panels[J]. Functional Materials, 2011, 42(1): 124-127.
- [11] CHEN L Y, DUAN Y P, LIU L D, et al. Influence of SiO_2 fillers on microwave absorption properties of carbonyl iron/carbon black double-layer coatings[J]. Materials & Design, 2011, 32(2): 570-574.
- [12] SNOEK J L. New developments in ferro-magnetic materials[M]. Amsterdam: Elsevier, 1947.
- [13] LU B, DONG X L, HUANG H, et al. Microwave absorption properties of the core/shell-type iron and nickel nanoparticles[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2008, 320(6):1106-1111.
- [14] LU B, HUANG H, DONG X L, et al. Influence of alloy components on electromagnetic characteristics of core/shell-type Fe-Ni nanoparticles[J]. Journal of Applied Physics, 2008, 104(11):114313.
- [15] FAN Y Z, YANG H B, LIU X Z, et al. Preparation and study on radar absorbing materials of nickel-coated carbon fiber and flake graphite[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 461(1/2): 490-494.
- [16] LI W W, LIU L, ZHONG C, et al. Effect of carbon fiber surface treatment on Cu electrodeposition: the electrochemical behavior and the morphology of Cu deposits[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509(8): 3532-3536.
- [17] GUO H, HUANG Y D, MENG L H, et al. Interface property of carbon fibers/epoxy resin composite improved by hydrogen peroxide in supercritical water[J]. Materials Letters, 2009, 63(17): 1531-1534.
- [18] 刘新, 王荣国, 刘文博, 等. 异形截面碳纤维复合材料的吸波性能[J]. 复合材料学报, 2009, 26(2):94-100.
LIU X, WANG R G, LIU W B, et al. Microwave absorbing properties of composites reinforced by irregular carbon fiber[J]. 2009, 26(2):94-100.
- [19] 董星龙, 孙维民, 王维, 等. 一种自动控制直流电弧金属纳米粉生产设备及方法: CN200410021190.1[P]. 2005-01-05.
DONG X L, SUN W M, WANG W, et al. Equipment and method for producing metal nanometer power by automatic control DC electric arc: CN200410021190.1[P]. 2005-01-05.
- [20] 王永辉. 树脂基纤维/铁纳米吸波复合材料的性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
WANG Y H. Properties of fibers/iron nanoparticles electromagnetic wave absorbing composites based on epoxy resin[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [21] 赵红振, 齐暑华, 周文英, 等. 透波复合材料树脂基体的研究进展[J]. 工程塑料应用, 2005, 33(12):65-67.
ZHAO H Z, QI S H, ZHOU W Y, et al. Research progress on resin matrix for wave-transparent composites[J]. Engineering Plastics Application, 2005, 33(12):65-67.
- [22] SHAH A, DING A, WANG Y H, et al. Enhanced microwave absorption by arrayed carbon fibers and gradient dispersion of Fe nanoparticles in epoxy resin composites[J]. Carbon, 2016, 96: 987-997.
- [23] POZAR D M. Microwave engineering[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2012.
- [24] 郭伟凯, 李家俊, 赵乃勤, 等. 微量 CFs 平行排布吸波材料结构模型[J]. 兵器材料科学与工程, 2004, 27(4):36-39.
GUO W K, LI J J, ZHAO N Q, et al. Model of microwave absorbing materials based on parallel-arranged carbon fiber[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2004, 27(4):36-39.
- [25] 石梦诗. 铁纳米粒子/环氧树脂复合材料的制备及性能分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
SHI M S. The fabrication and properties of Fe/epoxy nanocomposites[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.

基金项目: 国家自然科学基金(51271044, 51331006, 51171033)

收稿日期: 2016-07-13; 修订日期: 2017-11-28

通讯作者: 董星龙(1965—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为纳米复合材料的制备与性能, 联系地址: 辽宁省大连市甘井子区大连理工大学三束材料改性教育部重点实验室(116024), E-mail: dongxl@dlut.edu.cn

(本文责编: 解 宏)