

引用:力国民,李泽宇,高洁,等. 利用废弃电蚊香片制备 $\text{Fe}_x\text{O}_y/\text{C}$ 复合微波吸收材料[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2026, 39(2):263-273.

Citation: LI Guomin, LI Zeyu, GAO Jie, LIANG Liping. Preparation of $\text{Fe}_x\text{O}_y/\text{C}$ composite microwave absorbing materials from discarded vaporizing mats[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2026, 39(2):263-273.

文章编号 1672-6634(2026)02-0263-11

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2025100004

利用废弃电蚊香片制备 $\text{Fe}_x\text{O}_y/\text{C}$ 复合微波吸收材料

力国民,李泽宇,高洁,梁丽萍

(太原科技大学 材料科学与工程学院,山西 太原 030024)

摘要 生物质碳因其环境友好、成本低廉和导电性良好等优点,成为研究热点。以废弃电蚊香片为主要原料,通过高温焙烧和引入磁性组分(Fe_xO_y),制备了 $\text{Fe}_x\text{O}_y/\text{C}$ 复合吸波材料。研究发现,负载 Fe_xO_y 后, $\text{Fe}_x\text{O}_y/\text{C}$ 复合材料的吸波性能显著提升。其中,FVM-0.6-600 在 1.5 mm 涂层厚度下的最小反射损耗($\text{RL}_{\min}$)值达到 -19.2 dB,有效吸收带宽(EAB)为 5.3 GHz;FVM-0.6-800 在 2 mm 涂层厚度下的 $\text{RL}_{\min}$ 值为 -25.6 dB, EAB 为 4.5 GHz。该研究实现了废弃电蚊香片的高值化和资源化利用,具有广阔的应用前景。

关键词 废弃电蚊香片; $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Fe}/\text{C}$ 复合材料;微波吸收

中图分类号 TB34

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Preparation of $\text{Fe}_x\text{O}_y/\text{C}$ composite microwave absorbing materials from discarded vaporizing mats

LI Guomin, LI Zeyu, GAO Jie, LIANG Liping

(School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract Biomass-derived carbon has become a research hotspot due to its environmental friendliness, low cost, and good electrical conductivity. This study utilized discarded vaporizing mats as the primary raw material to prepare $\text{Fe}_x\text{O}_y/\text{C}$ composite microwave absorbing materials through high-temperature calcination and the introduction of a magnetic component (Fe_xO_y). The research found that after loading the Fe_xO_y component, the microwave absorption performance of the material was significantly enhanced. Among the samples, FVM-0.6-600 achieved a minimum reflection loss ($\text{RL}_{\min}$) of -19.2 dB with a coating thickness of 1.5 mm, and an effective absorption bandwidth (EAB) of 5.3 GHz; FVM-0.6-800 achieved a $\text{RL}_{\min}$ of -25.6 dB with a coating thickness of 2 mm, and an EAB of 4.5 GHz; This study demonstrates a high-value and resourceful approach to utilizing discarded vaporizing mats, showing broad application prospects.

Keywords waste vaporizing mats; $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Fe}/\text{C}$ composite material; microwave absorbing

0 引言

随着信息技术的飞速发展,无线通信设备和电子产品的使用在现代社会被广泛应用,在带来便利的同时,也引发了严重的电磁污染问题^[1]。过量的电磁辐射一方面会引起电子设备间的相互干扰,影响精密仪器

收稿日期:2025-10-17

基金项目:国家自然科学基金项目(52572138,51802212);中央引导地方科技发展资金项目(YDZJSX2024D057)资助

通信作者:力国民,男,汉族,博士,副教授,研究方向:陶瓷复合微波吸收材料,E-mail: ligm@tyust.edu.cn.

的正常工作,降低系统可靠性;另一方面,长期暴露在电磁环境中会危害人体健康,例如,高强度电磁辐射可导致严重烧伤或其他与热相关的损伤,而长期暴露于低强度电磁辐射会导致睡眠障碍,并对神经系统产生有害影响^[2]。因此,如何有效减弱电磁辐射对人类生活环境的负面影响,已经成为材料科学和电磁防护领域亟待解决的重要课题。在此背景下,开发高效、轻质且环保的微波吸收材料,成为缓解电磁污染的关键途径之一^[3]。

电磁波吸收材料可以通过吸收大部分电磁波,并将其转化为其他形式的能量并耗散掉,从而解决电磁污染问题^[4]。吸波材料的损耗能力主要取决于其介电与磁损耗特性。由于单一损耗机制难以满足理想吸波材料的要求,近年来研究人员将介电组分与磁性组分复合,以实现协同损耗。其中,碳材料因质量轻、密度低、比表面积大及优异的介电损耗能力,被视为极具应用潜力的介电组分^[5]。例如,Cheng 等人^[6]采用单步微波辅助水热法合成了 NiS_2/rGO 复合材料。研究发现, NiS_2 均匀负载在 rGO 表面能够有效改善阻抗匹配并增强介电损耗能力。在涂层厚度为 1.6 mm 时,最小反射损耗($\text{RL}_{\min}$)为 -33.7 dB,EAB 为 4.3 GHz。Li 等人^[7]通过一步水热反应结合热处理的方法,在碳纳米管(CNTs)表面原位生长多孔 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}$ 核壳纳米棒,成功构建了导电网络与多界面极化结构。研究表明,该复合材料主要依靠介电损耗机制实现微波吸收,在 2.0 mm 涂层厚度下, $\text{RL}_{\min}$ 为 -37.5 dB,EAB 超过 3.0 GHz;在 1.5 mm 涂层厚度下, $\text{RL}_{\min}$ 达到 -35.7 dB。尽管石墨烯和 CNTs 等碳材料性能优异,但普遍存在着成本高、工艺复杂等问题,限制了大规模应用。

因此,如何在保持高性能的同时,实现碳基材料的低成本与易制备,成为微波吸收材料领域的重要研究方向。基于此,价格低廉、可再生的生物质炭逐渐成为吸波材料的重要选择^[8-9]。作为环境友好的可再生资源,其多孔结构与可调介电性能为吸波材料的开发提供了新思路,在不同的领域引发广泛研究^[10]。例如,陈等人^[11]将玉米秸秆为碳源、氯化铁为铁源,采用浸泡热解法制备复合吸波材料,涂层厚度为 3.5 mm, $\text{RL}_{\min}$ 为 -30.0 dB,EAB 为 4.17 GHz。苗等人^[12]以生物质废料梧桐絮为原料,采用绿色环保的浸渍碳化工工艺,通过原位生长法来制备镍/梧桐絮衍生炭(Ni/PBDC)复合吸波材料,对应的涂层厚度为 1.4 mm 的 Ni/PBDC 复合吸波材料的 $\text{RL}_{\min}$ 为 -40 dB,EAB 为 4.16 GHz。Su 等人^[13]以木耳为生物质碳前驱体,通过浸渍硝酸铁并高温碳化制备了 $\text{Fe}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{生物质碳}$ 复合材料。研究表明,经 800 °C 碳化厚度为 2.06 mm 的样品表现出最佳吸收性能: $\text{RL}_{\min}$ 为 -30.4 dB,EAB 为 2.45 GHz。

综上所述,尽管已经有大量关于生物质炭复合材料的报道,但到目前为止,以废弃电蚊香片为碳源制备吸波材料的研究尚未见报道。因此,本研究以废弃电蚊香片为原料,探索废弃电蚊香片制备 $\text{Fe}_x\text{O}_y/\text{C}$ 复合吸波材料的可行性,并建立其组成、结构与性能之间的构效关系,为废弃生物质的低值化利用及低成本吸波材料的开发提供参考。

1 实验部分

1.1 样品制备

废弃电蚊香片经裁剪处理成细小片段,随后采用去离子水进行彻底清洗,置于 80 °C 烘箱内干燥 24 h,其元素组成及含量见表 1。取处理后的废弃电蚊香片 60 g,在室温条件下置于浓度为 0.6 mol/L $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ (购自国药化学试剂有限公司)溶液中充分浸渍 8 h。随后过滤去除残留液,将所得固体再次置于 80 °C 烘箱中干燥处理 24 h,经研磨得到褐色的粉末。最后置于管式炉内,在氩气环境不同温度(500、600、700、800 和 900 °C)下焙烧 2 h,冷却至室温后得到黑色 $\text{Fe}_x\text{O}_y/\text{C}$ 复合材料。将复合物标记为 FVM-C-T,其中 C 为 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 溶液的浓度,T 为焙烧温度。

1.2 样品表征

采用 X 射线粉末衍射仪(XRD)分析复合材料物相组成;采用激光拉曼光谱仪(Raman)揭示样品中碳中的缺陷;最后,利用扫描电子显微镜(SEM)并搭配能谱仪(EDS)对样品的微观形貌及元素分布进行分析。

表 1 废弃电蚊香片元素组成

Tab. 1 Elemental composition of discarded vaporizing mats

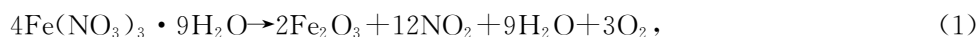
元素	C	H	O	N	P	其他
质量分数/%	43.27	4.51	45.86	0.95	2.23	3.18

在电磁参数测量与吸波特性和研究中,将样本与石蜡以 3 : 7 的质量比混合,使用模具制备出内径和外径分别为 3.04 和 7.00 mm 的同轴环形测试样品。并利用矢量网络分析仪对所得样品进行测试,从而获得复介电常数和复磁导率(2~18 GHz)变化曲线。

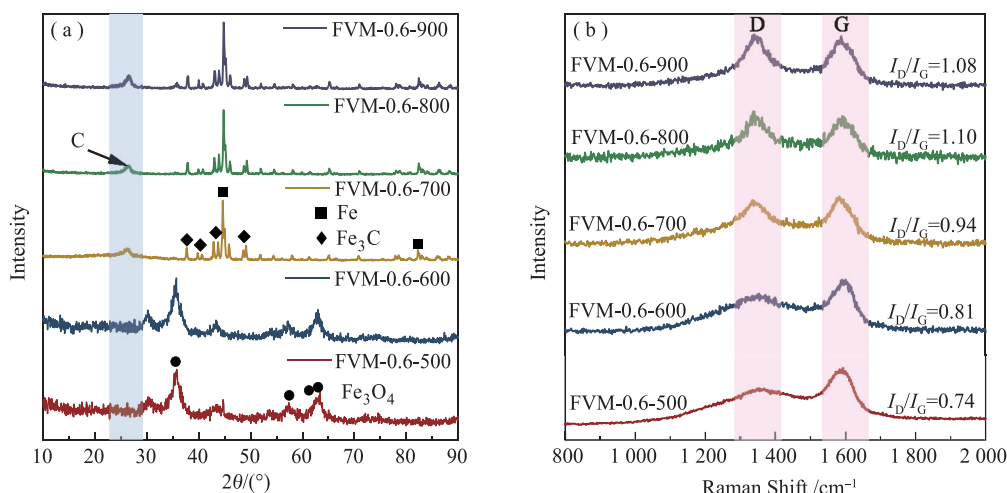
2 结果与讨论

2.1 物相组成与微观结构分析

图 1(a)为样品 FVM-0.6- T ($T=500\sim 900\text{ }^\circ\text{C}$) 的 XRD 图谱,在焙烧温度为 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 时,在 $2\theta=30.16^\circ$ 、 35.52° 和 62.70° 处可以观察到 Fe_3O_4 (JCPDS No. 88-0315) 的 (220)、(311) 和 (440) 晶面,表明前驱体中的 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 通过加热分解生成的 Fe_2O_3 负载到废弃电蚊香片中,后经过碳热还原反应生成 Fe_3O_4 。而 Fe_3O_4 衍射峰在 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 时较 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 更为尖锐,归因于碳热还原反应过程温度的升高使得 Fe_3O_4 晶粒快速生长。反应过程为



随着焙烧温度升高至 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 时,在 $2\theta=44.70^\circ$ 、 65.02° 和 82.36° 处观察到 Fe 的衍射峰(JCPDS No. 87-0721),分别对应 (110)、(200) 和 (211) 晶面,而 Fe_3O_4 的特征衍射峰消失,说明 Fe 是由 Fe_3O_4 经过碳热还原反应生成。在 $700\sim 900\text{ }^\circ\text{C}$ 的焙烧温度下,在 $2\theta=42.87^\circ$ 、 43.73° 和 45.00° 处还出现了 Fe_3C (JCPDS No. 77-0255) 的衍射峰,分别对应于 (211)、(102) 和 (031) 晶面,而 Fe_3C 是 Fe 纳米颗粒与碳在二者界面发生固相反应的结果^[14]。反应过程为



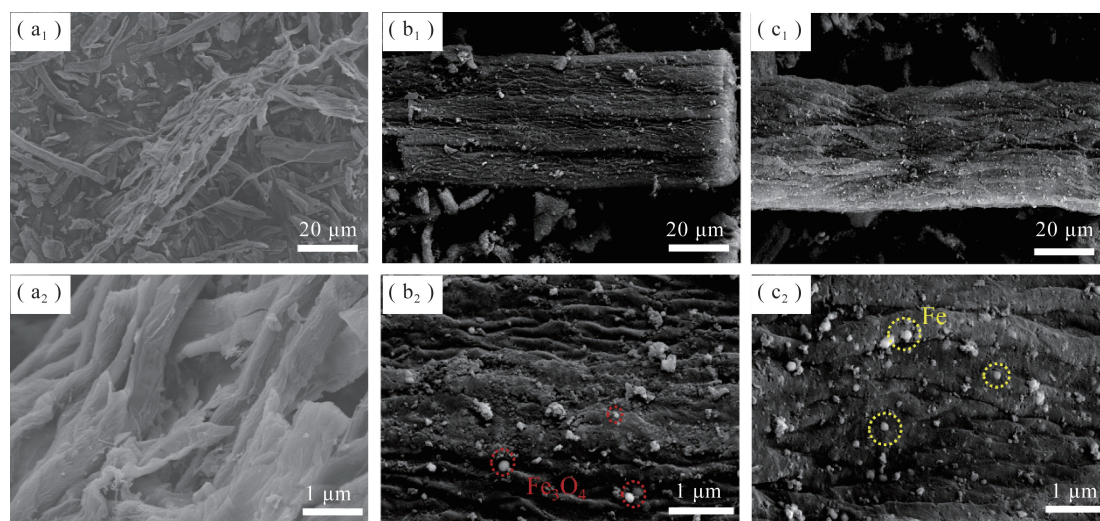
注:(a) XRD 图谱;(b) Raman 光谱图。

图 1 样品的 XRD 图谱和 Raman 光谱图

Fig. 1 XRD patterns and Raman spectra of samples

图 1(b)为 FVM-0.6- T ($T=500\sim 900\text{ }^\circ\text{C}$) 复合材料的 Raman 光谱图。碳基材料大约在 1340 和 1590 cm^{-1} 附近显示出两个明显的特征峰,分别对应于 D 带和 G 带,峰的位置及强度常常受缺陷等各种因素影响。D 带反映的是石墨结构中的不完整性与无序性,而 G 带则与 sp^2 杂化碳原子的伸缩振动相关。碳材料的状态可通过 I_D/I_G 比值进行评估,该比值升高表明碳材料缺陷越多,无序度越高,同时反映出石墨化程度降低^[15]。当焙烧温度在 $600\sim 700\text{ }^\circ\text{C}$ 时, I_D/I_G 比值显著增大,根据碳材料石墨化的“三步模型”,该现象的出现归因于无定形碳向纳米晶石墨转变造成的^[16]。当焙烧温度从 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 上升到 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 时, I_D/I_G 比值同样大幅提高,说明碳的石墨化程度得以增强,同时 Fe 催化剂的促进下,碳结构的有序化进程被显著加速。此外,石墨化程度较高的碳与晶化程度较好的 Fe 可以构建起独特的导电网络从而引起电导损耗^[17]。

为进一步探究复合材料的微观结构,图2展示了 VM-900(在氩气气氛下,经 900 °C 热处理后的废弃电蚊香片)、FVM-0.6-600、FVM-0.6-800 的 SEM 图像。其中 VM-900 呈现出表面光滑的纤维状结构。相较于 VM-900, FVM-0.6-600 和 FVM-0.6-800 虽然保持了纤维结构,但表面变得较为粗糙,这使得磁性组分可以牢牢地负载在碳基体上。与未处理的废弃电蚊香片相比, FVM-0.6-600 和 FVM-0.6-800 基体表面明显镶嵌了磁性组分颗粒,由 XRD 可知,负载于 FVM-0.6-600 基体上的为 Fe_3O_4 , 负载于 FVM-0.6-800 基体上的为 Fe, 且随着碳热还原温度的升高,磁性颗粒尺寸逐渐变大。

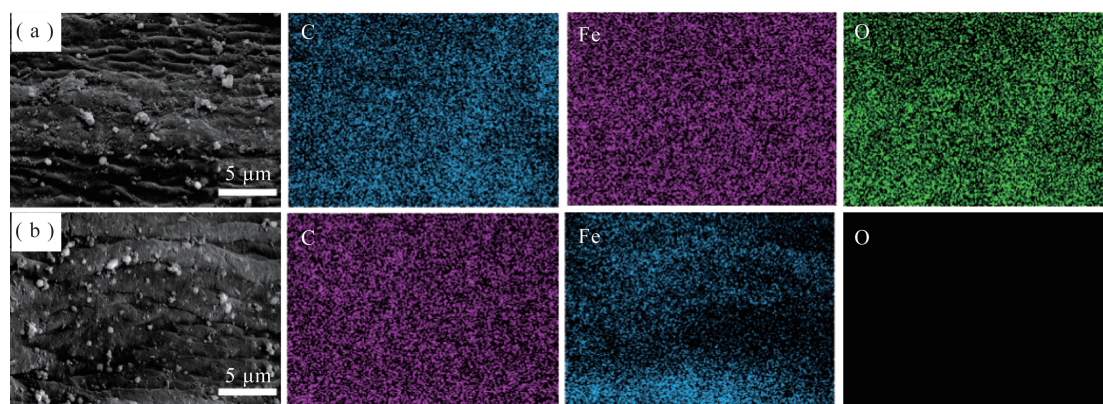


注:(a_1 , a_2) VM-900; (b_1 , b_2) FVM-0.6-600; (c_1 , c_2) FVM-0.6-800。

图2 样品的 SEM 图像

Fig. 2 SEM images of samples

图3为样品 FVM-0.6-600 和 FVM-0.6-800 的 EDS 照片,可以观察到样品中磁性组分均匀且大量分布在碳基体上。复合材料 FVM-0.6-600 和 VM-0.6-800 中的 Fe 元素质量分数分别为 37.62% 和 57.42%,这与 SEM 及 XRD 分析结果一致。



注:(a) FVM-0.6-600; (b) FVM-0.6-800。

图3 样品的 EDS 元素分布图

Fig. 3 EDS element distribution mapping of samples

2.2 微波吸收性能评价

微波吸收性能一般通过 $RL_{\min}$ 值进行评估。当 $RL_{\min}$ 值小于 -10 dB 时,表明该复合材料能够吸收 90% 以上的电磁波。同时将 RL 值小于 -10 dB 对应的频率范围定义为 EAB^[18]。依据传输线理论^[19],材料的吸波性能由阻抗匹配与衰减特性共同决定:良好的阻抗匹配确保电磁波能有效进入材料内部,而非在界面处被大量反射,优异的衰减特性保证电磁波被有效损耗^[20]。其计算公式如

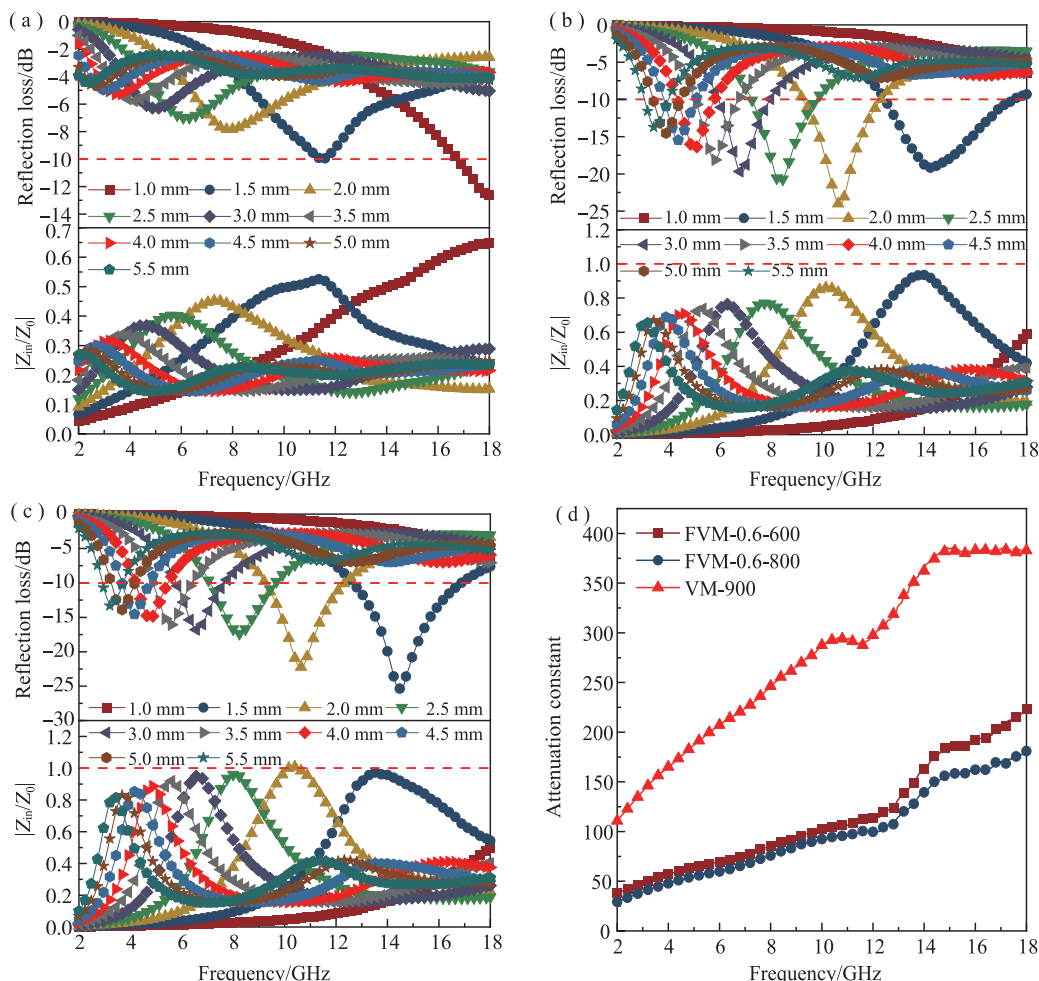
$$E = 20 \lg \left| \frac{Z_{\text{in}} - Z_0}{Z_{\text{in}} + Z_0} \right|, \quad (6)$$

$$Z = |Z_{\text{in}}/Z_0| = |(\mu_r/\epsilon_r)^{1/2} \tanh[j(2\pi fd/c)(\epsilon_r\mu_r)^{1/2}]|, \quad (7)$$

$$Z_{\text{in}} = Z_0(\mu_r/\epsilon_r)^{1/2} \tanh[j(2\pi fd/c)(\epsilon_r\mu_r)^{1/2}], \quad (8)$$

$$\alpha = (\frac{\sqrt{2}\pi f}{c}) \sqrt{(\mu''\epsilon'' - \mu'\epsilon') + \sqrt{(\mu''\epsilon'' - \mu'\epsilon')^2 + (\epsilon'\mu'' + \epsilon''\mu')^2}}, \quad (9)$$

式中 E 为 RL 值; Z 为归一化阻抗因子; Z_{in} 为电磁波垂直射入材料的输入阻抗; Z_0 为自由空间内的阻抗; d 为材料的涂层厚度; f 为电磁波频率; ϵ_r 为复介电常数; μ_r 为复磁导率; μ' 为复磁导率实部; μ'' 为复磁导率虚部; ϵ' 为复介电常数实部; ϵ'' 为复介电常数虚部; α 为衰减常数; c 为真空中的光速。



注: (a) VM-900; (b) FVM-0.6-600; (c) FVM-0.6-800 的 RL 曲线、阻抗匹配特性曲线和 (d) 衰减常数曲线。

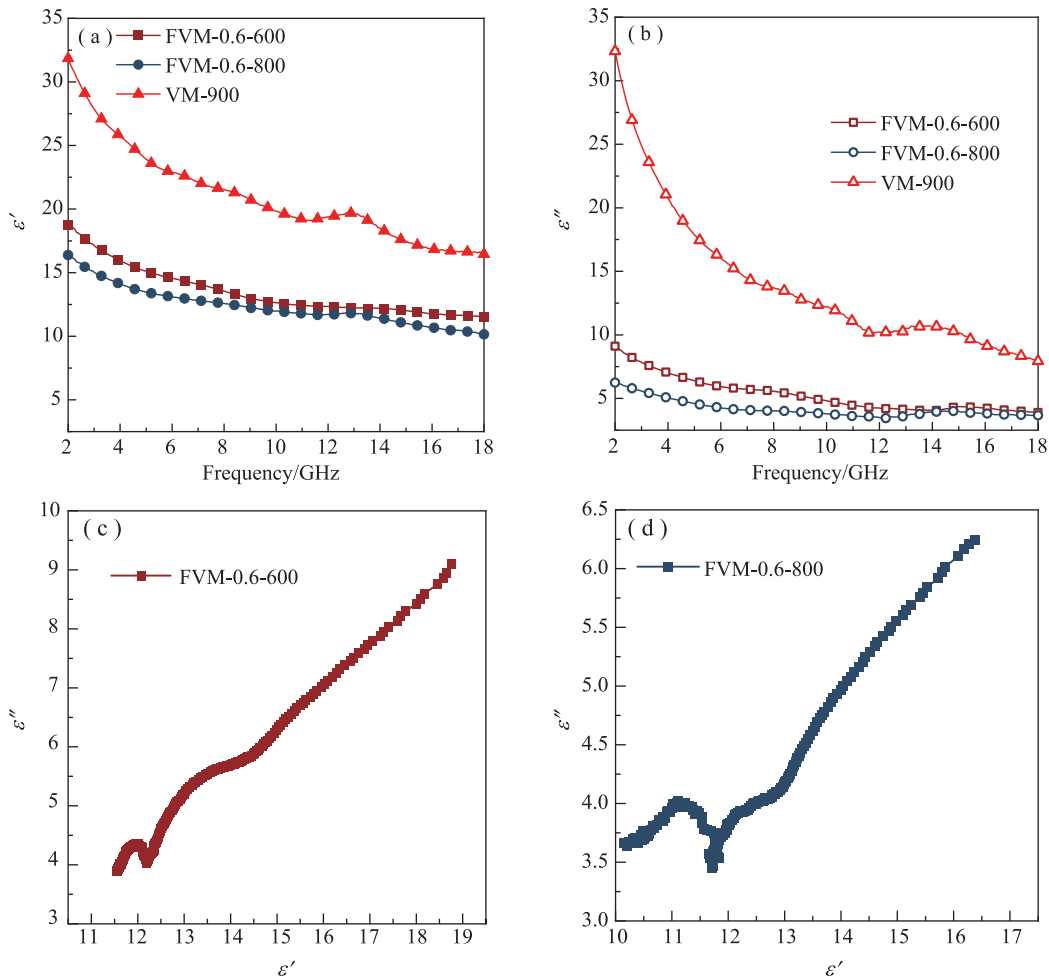
图4 样品的微波吸收性能

Fig. 4 Microwave absorption performance of samples

图4(a~c)上半幅为 VM-900、FVM-0.6-600 和 FVM-0.6-800 在 2~18 GHz 范围内的反射损耗曲线。由图可知, VM-900 具有较差的微波吸收性能, 仅在涂层厚度为 1.0 mm 时, RL_{min} 值小于 -10 dB, 而 FVM-0.6-600 在涂层厚度为 1.5 mm 时, RL_{min} 为 -19.2 dB, EAB 为 5.3 GHz, FVM-0.6-800 在涂层厚度为 1.5 mm 时, RL_{min} 达到 -25.6 dB, EAB 为 4.5 GHz, 说明经过负载磁性组分后, 得到的 FVM 复合材料吸波性能显著提升。

图4(a~c)下半幅为阻抗匹配特性参数随频率的变化曲线, 在 RL_{min} 对应频率下, FVM-0.6-600 和 FVM-0.6-800 呈现的 Z 值均趋近于 1, 表明二者均实现良好的阻抗匹配。如图4(d)所示, VM-900 的衰减常数值超过了 FVM-0.6-600 和 FVM-0.6-800。然而, 在吸波性能方面, FVM-0.6-600 与 FVM-0.6-800 却展现出更加优异的性能。上述结果意味着 FVM-0.6-600 和 FVM-0.6-800 的阻抗匹配特性优于 VM-900, 即吸波效果受阻抗匹配特性和衰减特性两个关键因素协同影响^[14]。

为了进一步探究 $\text{Fe}_x\text{O}_y/\text{C}$ 复合材料的微波吸收机制,对样品的相对复介电常数曲线($\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$)和相对复磁导率曲线($\mu_r = \mu' - j\mu''$)随频率的变化规律进行了分析。其中,实部(ϵ' 、 μ')代表了材料储存电能和磁能的能力,而虚部(ϵ'' 、 μ'')则反映了材料损耗电能和磁能的能力^[21]。



注:(a) 实部;(b) 虚部;和 (c, d) Cole-Cole 曲线。

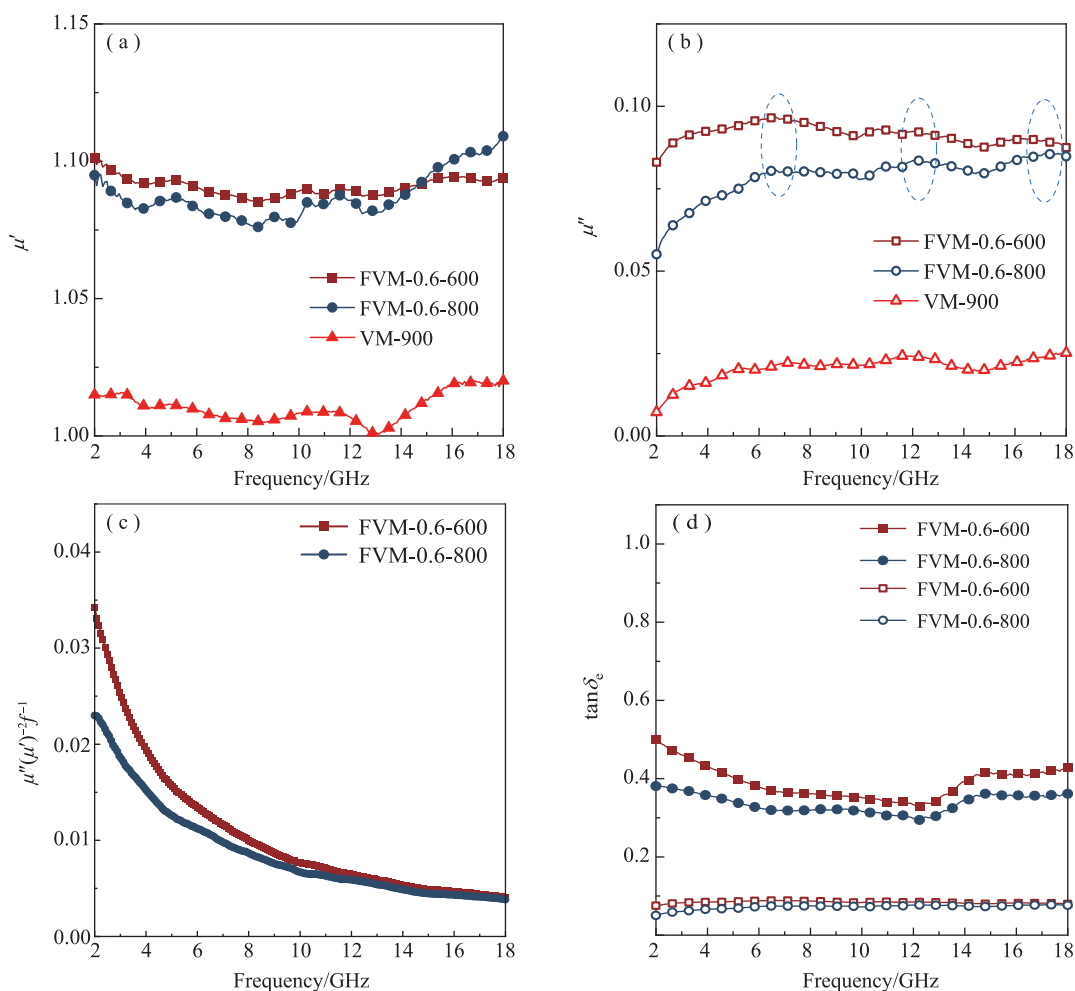
图5 样品的相对复介电常数曲线和 Cole-Cole 曲线

Fig. 5 Complex permittivity curves and Cole-Cole curves of samples

图 5(a)和图 5(b)为样品相对复介电常数实部和虚部随频率变化的曲线。VM-900 的 ϵ' 值和 ϵ'' 值远高于 FVM-0.6-600 和 FVM-0.6-800,因此磁性成分的加入对复合材料在电能的耗散与储存方面的性能产生了削弱效应,并且 FVM-0.6-600 和 FVM-0.6-800 的 ϵ' 值和 ϵ'' 值呈现出相似的下降趋势,并伴有明显的“频散现象”,表明样品中存在偶极子极化弛豫。伴随着频率的递增,FVM-0.6-600 与 FVM-0.6-800 的 ϵ' 与 ϵ'' 值在降低过程中伴有细微的振荡现象。根据自由电子理论: $\epsilon'' = 1/(2\pi\rho f\epsilon_0)$ 可知,较高的 ϵ'' 值意味着电导率较高,其有助于导电损耗能力的提升。这是因为随着碳热还原温度的升高, Fe_3O_4 逐渐被还原为 Fe,复合材料中碳的相对含量持续降低,所以 FVM-0.6-800 的 ϵ' 值和 ϵ'' 值略小于 FVM-0.6-600。图 5(c)和(d)展示了 FVM 样品的 $\epsilon' - \epsilon''$ (Cole-Cole) 曲线,图中的半圆代表 Debye 弛豫过程,观察分析可得,FVM-0.6-600 在 11.9 和 13.5 GHz 的频率下,FVM-0.6-800 在 11.1 和 12.4 GHz 的频率下,分别呈现两个 Cole-Cole 半圆形,该现象暗示了样品内部存在两个甚至多个不同的 Debye 极化弛豫过程。碳基体中的缺陷作为偶极子极化中心,磁性组分与碳基体之间的界面也可以增强极化损耗^[22]。此外,两个样品在高频区均出现了明显的线性拖尾,进一步说明其具有较好的电导损耗^[23]。

图 6 展示了三个样品相对复磁导率($\mu_r = \mu' - j\mu''$)的变化规律,VM-900 的 μ' 值和 μ'' 值明显低于 FVM-0.6-600 和 FVM-0.6-800,且两个样品的 μ' 值和 μ'' 值差距并不大,样品在磁性组分负载后的磁损耗能力明显增强。另外,FVM-0.6-600 和 FVM-0.6-800 的 μ' 值和 μ'' 值在 6.9、12.1 和 17.2 GHz 处出现共振峰。材料

的磁损耗机制主要包括畴壁谐振损耗、磁滞损耗、涡流损耗、自然共振和交换共振^[24]。在低频 MHz 范围内,普遍存在畴壁谐振损耗与磁滞损耗,在常规情况下,自然共振现象倾向于在低频区域频繁出现,交换共振则普遍出现在中高频区域,涡流损耗、自然共振和交换共振通常采用 $C_0[\mu''(\mu')^{-2}f^{-1}]$ 值与频率的关系来判断,若 C_0 值不随频率变化而变化说明材料的磁损耗来源于涡流损耗,反之来源于其他两种损耗^[25]。如图 6(c)所示, FVM-0.6-600 和 FVM-0.6-800 的 C_0 曲线随频率变化显著,由此推断,在 7.9 GHz 处出现的共振峰应归因于自然共振所引起的损耗,而在 12.1 和 17.2 GHz 的出现的共振峰则属于交换共振所导致的损耗。如图 6(d)所示 FVM-0.6-600 和 FVM-0.6-800 的介电损耗角正切($\tan \delta_e$)值高于磁损耗角正切($\tan \delta_m$)值,这与其他碳基复合材料的研究结果一致。



注: (a) 实部; (b) 虚部; (c) $\mu''(\mu')^{-2}f^{-1}$ 曲线; (d) 损耗正切值曲线。

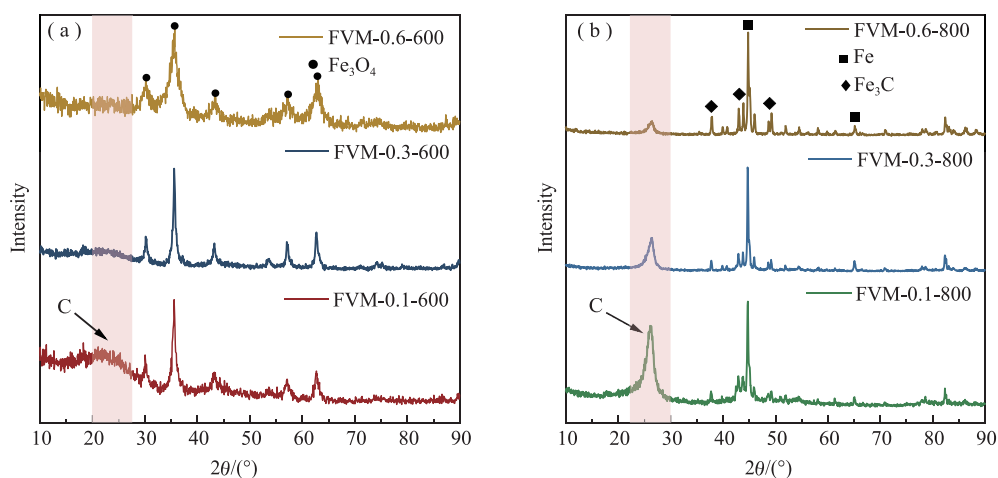
图 6 样品的相对复磁导率曲线

Fig. 6 Relative complex permeability curves of samples

2.3 磁性组分负载量对吸波性能的影响

固定碳热还原反应温度为 600 °C 和 800 °C (磁性组分为 Fe_3O_4 、Fe), 通过调整前驱体溶液浓度, 进一步分析磁性组分负载量变化对吸波性能的影响。如图 7 所示, 发现随着 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 溶液浓度的增加, 样品中的物相基本一致, 说明前驱体溶液浓度的改变, 对 FVM 复合材料的组成没有影响。

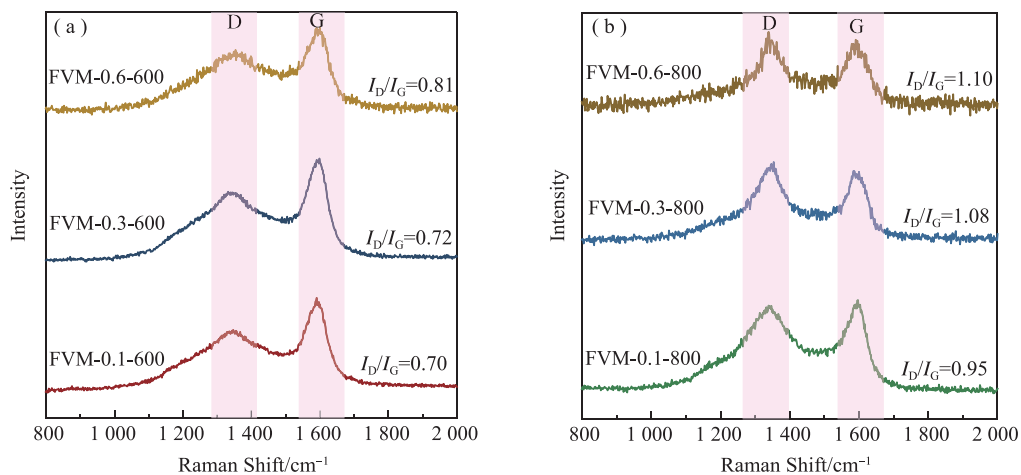
图 8 为不同样品的 Raman 图谱, 发现随着前驱体溶液浓度的增加, FVM-C-600 和 FVM-C-800 的 I_D/I_G 值都在逐渐增大, 这归因于无定形碳向纳米晶石墨转变并伴随碳热还原反应消耗了更多的碳源, 导致石墨化程度有所降低。进一步, 根据图 9 中 FVM-C-600 和 FVM-C-800 ($C=0.1, 0.3$ 和 0.6) 的 SEM 照片可知, 随着前驱体溶液浓度的增加, 碳基体上负载的磁性组分显著增多, 且均匀分散在基体中。



注: (a) FVM-C-600 ($C=0.1, 0.3, 0.6$); (b) FVM-C-800 ($C=0.1, 0.3, 0.6$)。

图7 样品的XRD图谱

Fig. 7 XRD patterns of samples



注: (a) FVM-C-600 ($C=0.1, 0.3, 0.6$); (b) FVM-C-800 ($C=0.1, 0.3, 0.6$)。

图8 样品的Raman图谱

Fig. 8 Raman spectra of samples

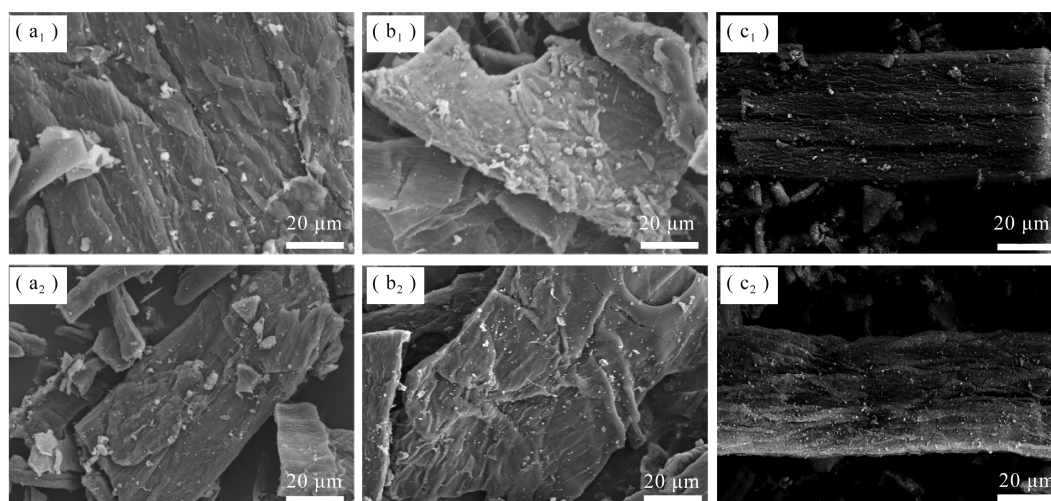
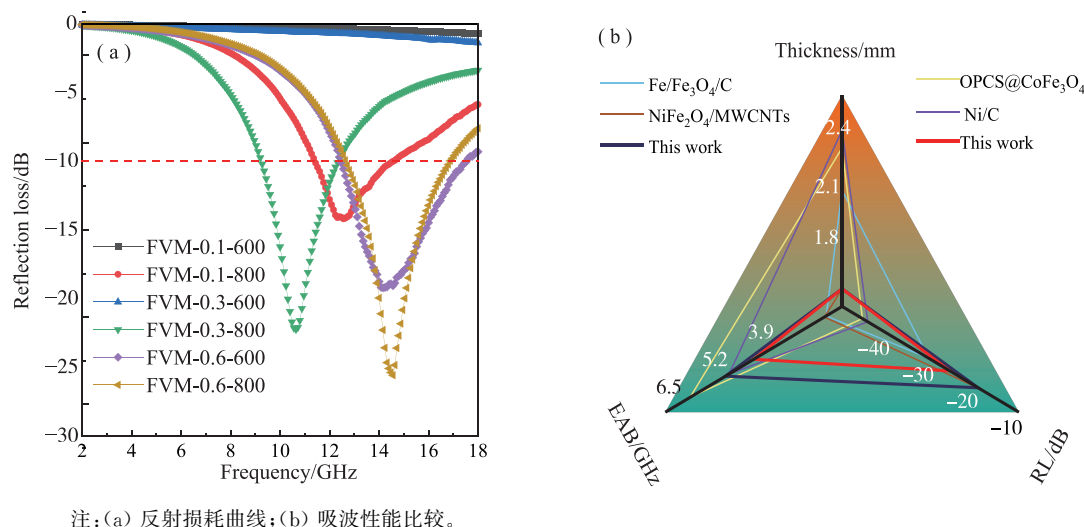


图9 样品的SEM图像

Fig. 9 SEM images of samples

图10(a)展示了FVM-C-600和FVM-C-800在1.5 mm涂层厚度下的反射损耗曲线,其中FVM-0.1-

600 并不具备吸波能力,而 FVM-0.6-600 的 $\text{RL}_{\min}$ 达到 -19.2 dB,对应的 EAB 达到 5.3 GHz, FVM-0.1-800 的 $\text{RL}_{\min}$ 达到 -14.2 dB,对应的 EAB 达到 3.1 GHz, FVM-0.3-800 的 $\text{RL}_{\min}$ 达到 -22.2 dB,对应的 EAB 达到 3.0 GHz, FVM-0.6-800 的 $\text{RL}_{\min}$ 达到 -25.6 dB 对应的 EAB 达到 4.5 GHz。说明磁性组分负载量的增加使复合材料的吸波性能更为优异。图 10(b) 将本研究的最佳性能与已报道的碳基复合材料的吸波性能进行了对比^[13,26-28]。结果表明,本研究采用的原材料以及制备工艺更加简洁且成本较低,这证实了通过调节磁性组分负载量可以优化生物质材料的吸波性能,为复合微波吸波材料的制备级生物质碳的资源化利用提供了一条实用路径。



注:(a) 反射损耗曲线;(b) 吸波性能比较。

图 10 样品的反射损耗曲线以及碳基复合材料的吸波性能的比较

Fig. 10 Reflection loss curves of samples and comparison of microwave absorption properties of carbon based composite materials

2.4 微波吸收机理

图 11 为 $\text{Fe}_x\text{O}_y/\text{C}$ 复合材料的微波吸收机制示意图。在碳热还原过程中,因消耗碳源产生了大量缺陷,这些缺陷形成了特定的偶极位点,导致偶极极化现象的产生,从而加速电磁波能量的消耗,进一步提升了材料对电磁波的消散能力^[29]。负载磁性组分后,石墨化碳与 Fe_3O_4 、Fe 协同构建起导电网络,有助于提升电子迁移和跃迁效率,显著增强了 FVM 复合材料的电导损耗。同时, Fe_3O_4 和 C、Fe/Fe₃C 和 C 之间形成的异质界面有助于增强复合材料的界面极化,也有益于极化损耗的增强。此外,磁性组分的磁损耗机制对电磁波的衰减是不容忽视的。最终,上述介电损耗与磁损耗的协同作用,进一步优化复合材料 FVM 的阻抗匹配,实现了微波吸收性能的提升。

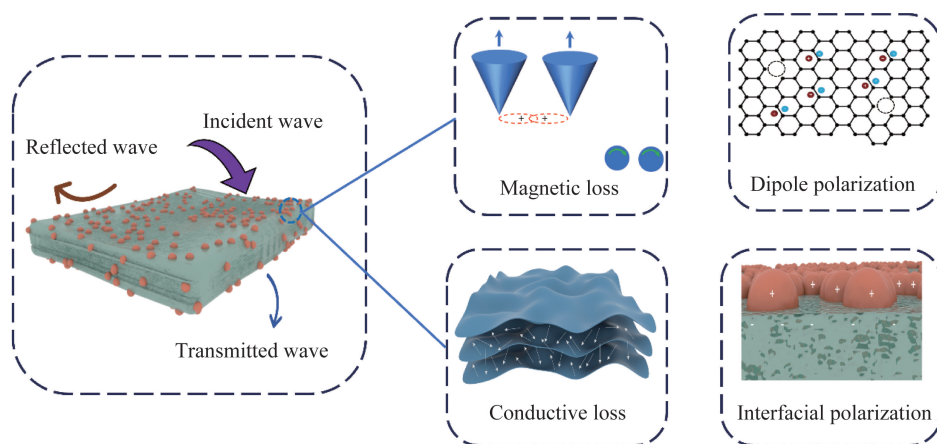


图 11 $\text{Fe}_x\text{O}_y/\text{C}$ 复合材料的微波吸收机理示意图

Fig. 11 Graphical representation of the microwave absorption concept in the $\text{Fe}_x\text{O}_y/\text{C}$ composite

3 结论

本研究以废弃电蚊香片为碳源,通过高温焙烧和引入磁性组分(Fe_xO_y),成功制备了 $\text{Fe}_x\text{O}_y/\text{C}$ 复合微波吸收材料。碳热还原反应形成富缺陷、部分石墨化的碳基结构,且磁性组分的引入显著改善了材料的阻抗匹配特性,使微波吸收性能较纯生物质碳有明显提升。其中,当焙烧温度为 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 时,FVM-0.6-600 的最小反射损耗 $\text{RL}_{\min}$ 值达到 -19.2 dB ,EAB 为 5.3 GHz ;当焙烧温度为 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 时,FVM-0.6-800 的 $\text{RL}_{\min}$ 值为 -25.6 dB ,EAB 为 4.5 GHz 。本研究为废弃电蚊香片资源的高值化利用及低成本吸波材料的设计提供了新思路。

参 考 文 献

- [1] WANG Q Q, NIU B, HAN Y H, et al. Nature-inspired 3D hierarchical structured “vine” for efficient microwave attenuation and electromagnetic energy conversion device[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 452: 139042.
- [2] WEI K X, SHI Y, TAN X, et al. Recent development of metal-organic frameworks and their composites in electromagnetic wave absorption and shielding applications[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2024, 332: 103271.
- [3] GUAN H T, WANG Q Y, WU X F, et al. Biomass derived porous carbon (BPC) and their composites as lightweight and efficient microwave absorption materials[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 207: 108562.
- [4] 邓小妹, 蒋肖, 黄俊, 等. 一维碳化硅纳米材料的制备及其电磁波吸收应用进展[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2025, 38(2): 232-250.
- [5] WEN L C, YAN Z K, ZHU Y J, et al. Recent progress on the electromagnetic wave absorption of one-dimensional carbon-based nanomaterials[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26: 2191-2218.
- [6] CHENG D C, XU J H, LIU C, et al. High microwave absorption performance of NiS_2/rGO nanocomposites with a thin thickness[J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2021, 157: 110222.
- [7] FU C, HE D W, WANG Y S, et al. Facile synthesis and microwave absorption performance of coated carbon nanotubes by porous Fe_3O_4 @C nanorods[J]. Synthetic Metals, 2019, 248: 76-80.
- [8] LI P, WAN K, CHEN H, et al. Value-added products from catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass and waste plastics over biochar-based catalyst: a state-of-the-art review[J]. Catalysts, 2022, 12(9): 1067.
- [9] KANT BHATIA S, PALAI A K, KUMAR A, et al. Trends in renewable energy production employing biomass-based biochar[J]. Bioresource Technology, 2021, 340: 125644.
- [10] NEGI P, CHHANTYAL A K, DIXIT A K, et al. Activated carbon derived from mango leaves as an enhanced microwave absorbing material[J]. Sustainable Materials and Technologies, 2021, 27: e00244.
- [11] CHEN G L, LIU J, LIU R Q. Preparation and wave-absorbing properties of low-cost Fe_3O_4 /corn straw core composite material[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2023, 34(9): 808.
- [12] 苗林, 孙可为, 尹洪峰, 等. 梧桐絮衍生的超薄磁性生物炭复合吸波材料[J]. 复合材料学报, 2025, 42(7): 3984-3997.
- [13] SU J B, YANG R, ZHANG P K, et al. $\text{Fe}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ /biomass carbon derived from agaric to achieve high-performance microwave absorption[J]. Diamond and Related Materials, 2022, 129: 109386.
- [14] YUAN L Y, ZHAO W X, MIAO Y K, et al. Constructing core-shell carbon fiber/polypyrrole/ CoFe_2O_4 nanocomposite with optimized conductive loss and polarization loss toward efficient electromagnetic absorption[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2024, 7(2): 70.
- [15] ZHU B S, LI Y Y, TIAN Y M, et al. Rational design of $\text{FeCo}/\text{C}/\text{FA}$ by recycling of fly ash for electromagnetic pollution[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2021, 627: 127127.
- [16] YUAN R C, GUO Y W, GURGAN I, et al. Raman spectroscopy analysis of disordered and amorphous carbon materials: a review of empirical correlations[J]. Carbon, 2025, 238: 120214.
- [17] YE X Y, TIAN J Y, CHEN P G, et al. Polypyrrole modified MIL-101-Fe-derived $\text{Fe}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ @C composites for high-performance microwave absorber[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 31: 2961-2971.
- [18] HOU Y X, JIA Z, ZHENG H L, et al. Synthesis of Co_3O_4 @C/ $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene composites for enhanced electromagnetic wave absorption[J]. Diamond and Related Materials, 2024, 150: 111692.
- [19] RAO L J, LI Z L, QIAN Y T, et al. Heterointerface engineering in porous microspheres for magnetic-dielectric balance to boost electromagnetic wave absorption[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 488: 150955.
- [20] WAN Y H, JING T, MA S W, et al. Ultra-wide microwave absorption with thin thickness in multi-layered Fe_3O_4 -coated FeSiCr com-

- posites[J]. *Applied Surface Science*, 2025, 687: 162303.
- [21] XU P, SHI J L, LI P, et al. Facile design and permittivity regulation of porous carbon and magnetic particles based composite nanofibers towards highly efficient electromagnetic wave absorption[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2024, 693: 133989.
- [22] HE X X, ZHOU J T, TAO J Q, et al. Preparation of porous CoNi/N-doped carbon microspheres based on magnetoelectric coupling strategy: a new choice against electromagnetic pollution[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2022, 626: 123-135.
- [23] 梁丽萍, 高旭洲, 高飞, 等. 基于煤加氢气化半焦制备 Ni/碳基复合吸波材料及组成优化[J]. *燃料化学学报*, 2022, 50(7): 896-903.
- [24] XIANG Z, HUANG C, SONG Y M, et al. Rational construction of hierarchical accordion-like Ni@porous carbon nanocomposites derived from metal-organic frameworks with enhanced microwave absorption[J]. *Carbon*, 2020, 167: 364-377.
- [25] 谢艳娇, 马晓, 包云凤, 等. $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$ /还原氧化石墨烯复合材料及其改性涂层的电磁吸波性能[J]. *复合材料学报*, 2025, 42(3): 1375-1386.
- [26] GUO L, HE Y S, CHEN D, et al. Hydrothermal synthesis and microwave absorption properties of nickel ferrite/multiwalled carbon nanotubes composites[J]. *Coatings*, 2021, 11(5): 534.
- [27] BAI L H, XING H L, CHEN W X, et al. Preparation of Ni/C composite microwave absorbers with high performance by controlling nickel source[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023, 656: 130483.
- [28] CUI J H, ZHAO D, ZHANG F C, et al. Preparation and wave-absorbing properties of OPCS@ CoFe_2O_4 core-shell structured wave-absorbing materials with multiple loss mechanisms[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2025, 36(9): 524.
- [29] 力国民, 高洁, 杜秀宁, 等. 基于玉米芯构筑 $\text{Fe}_x\text{O}_y/\text{C}$ 复合材料及吸波性能研究[J]. *燃料化学学报(中英文)*, 2025, 53(5): 771-783.

(责任编辑:蒲锡鹏)

(上接第 204 页)

- [21] LUO S, ZHANG L X, FAN Y S. Dynamic multi-objective scheduling for flexible job shop by deep reinforcement learning[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 159: 107489.
- [22] DOH H H, YU J M, KIM J S, et al. A priority scheduling approach for flexible job shops with multiple process plans[J]. *International Journal of Production Research*, 2013, 51(12): 3748-3764.
- [23] 刘东宁, 徐哲. 基于多优先规则启发式的分布式多项目随机调度[J]. *系统工程理论与实践*, 2021, 41(12): 3294-3303.
- [24] 王磊, 张贺, 刘毅, 等. 基于优先调度规则实时选择模型解决加工车间调度问题[J]. *机械制造*, 2022, 60(12): 81-86.
- [25] QIAO D, LI H L, HU J H. Research on flexible job shop scheduling problems based on deep reinforcement learning[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, 2825(1): 012005.

(责任编辑:刘庆松)