宽频磁性碳基复合吸波材料的制备及性能研究

刘志龙,赵云敏,刘渊,唐伟琦,胡剑巧,王莉红

(云南大学 材料与能源学院,昆明 650504)

摘要:目的 以可再生的生物质作为碳源,通过添加氯化钠作为活化剂,制备一种具有优良性能的吸波 材料。方法 用一步热解法制备磁性碳基复合吸波材料,用 X 射线衍射仪(XRD)、扫描电镜(SEM)、 氮吸附比表面与孔径分布仪(BET)、超导量子干涉仪(SQUID)等对其物相、形貌、磁性能等进行表 征,用矢量网络分析仪(VNA)测试其电磁参数。结果 不同组分的复合材料均具有宽频的微波吸收性 能,表现出对生物质用量一定范围内的不敏感特性。生物质用量分别为 0.8、1.0、1.5 和 2.0 g 时,制备 的不同磁性生物质碳复合材料在填充量(质量分数)为 30%时,有效吸收带宽分别达到 5.7、6.2、5.8 和 5.9 GHz。结论 吸波性能对生物质用量一定范围内的不敏感特性,可以避免生物质由于产地、季节等的 不同对吸波性能造成影响,同时也有利于制备工艺的实际操作,提高了吸波性能实验结果的稳定性。 关键词:吸波材料;生物质碳;宽频微波吸收;介电损耗;阻抗匹配 中图分类号:TB332 文献标识码:A 文章编号:1001-3563(2023)09-0091-08 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.09.011

Preparation and Properties of Broadband Magnetic Carbon-based Microwave Absorption Composite

LIU Zhi-long, ZHAO Yun-min, LIU Yuan, TANG Wei-qi, HU Jian-qiao, WANG Li-hong

(School of Materials and Energy, Yunnan University, Kunming 650504, China)

ABSTRACT: The work aims to prepare a magnetic carbon-based composite with broadband microwave absorption properties by using biomass as carbon and adding sodium chloride as active agent. Magnetic carbon-based microwave absorption composite was successfully prepared by one-step pyrolysis method, and its phase, morphology and magnetic property were characterized by XRD, SEM, BET and SQUID. Then, the electromagnetic parameters were tested by VNA. The composites with different components all had broadband microwave absorption properties, and the microwave absorption properties were insensitive to the dosage of biomass in a certain range. When the dosages of biomass were 0.8, 1.0, 1.5 and 2.0 g, the different magnetic biomass carbon-based composites showed the effective absorption bandwidth (EABW) of 5.7, 6.2, 5.8 and 5.9 GHz under 30 wt.% filler loading. The insensitivity of microwave absorption properties to dosages of biomass can avoid the impact of biomass on the microwave absorption properties due to its different origins and growth cycles. In addition, it is beneficial to practical operation of preparation process, and improves the stability of the microwave absorption properties.

KEY WORDS: absorption materials; biomass carbon; broadband microwave absorption; dielectric loss; impedance matching

收稿日期: 2023-03-06

基金项目:国家自然科学基金(22265031);云南省科技厅面上项目(202001BB050055);云南大学大学生创新创业训练 项目(202204005) 作者简介:刘志龙(2001—),男,硕士生。 通信作者:王莉红(1978—),女,博士。

面对日益增长的电磁污染和国防隐身材料的需 求,设计具有强吸收、宽频带、薄厚度和轻质量的吸 波材料具有重大意义[1-3]。磁性铁氧体是常用的吸波 材料之一,但存在密度大、涂敷厚度厚和阻抗匹配差 等不足,将其与碳材料复合是改进其吸波性能的重要 方法之一[4-6]。一方面虽然磁性材料和碳材料的复合对 改善阻抗匹配差、密度大、涂敷厚度厚等方面有显著作 用,但常常使用较昂贵的碳纳米管^[7-9]、石墨烯^[10-12]和 不利于环境的甲醛、苯酚等合成有机聚合物做碳源, 使用复杂的制备过程制备磁性碳基复合材料[13-14]。另 一方面,由于碳纳米管、石墨烯的介电常数较高,促使 磁性碳基复合材料的吸波性能强烈依赖于它们组分含 量。当这些碳材料组分含量略有增加或减少时,微波吸 收性能显著降低,不利于提高复合材料吸波性能实验结 果的稳定性,同时也不利于制备的实际操作。

环境友好、来源广泛、价格低廉的生物质碳代替 碳纳米管、石墨烯或碳纤维做碳源,可以获得具有优 异吸波性能的磁性碳基复合吸波材料[15-17]。然而,由 于生物质的生长周期和产地的不同,即使同种生物 质,其结构和性质也会有轻微的不同,从而导致生物 质碳介电性能的不同,限制了其在电磁波吸收领域的 应用。本文利用低成本生物质木屑为碳源,通过使用 NaCl 作为模板和助熔剂,增加材料的微孔结构和降 低热解温度,减少生物质对复合材料吸波性能的影 响,从而获得具有优良吸波性能且实验结果稳定性较 好的磁性木屑生物质碳复合吸波材料。

1 实验

1.1 原料与设备

材料: 硝酸铁(Fe(NO3)3·9H2O)、氯化钠(NaCl), 均采自天津市致远化学试剂有限公司;木屑(杨木), 采自菏泽启林木业有限公司。

仪器: OTF-1200X 真空管式高温烧结炉, 合肥 科晶材料技术有限公司; DHG-9247 电热恒温干燥 箱,上海精宏实验设备有限公司; TTRIIIX 射线衍射 仪(XRD), 日本 Rigaku 公司; Quanta 200 扫描电子 显微镜 (SEM), 美国 FEI 公司; Invia 显微拉曼分析 仪(Raman), 英国雷尼绍公司; Quadrasorb-evo 比 表面积分析仪(BET),美国康塔仪器公司; MPMS (SQUID) XL-7 超导量子干涉仪,美国 Quantum Design 公司; N5244A 矢量网络分析仪 (VNA), 美国 安捷伦公司。

1.2 方法

1.2.1 磁性木屑生物质碳基复合材料的制备

木屑用去离子水洗涤去除表面灰尘及杂质,在 100 ℃干燥后与一定量的 Fe(NO3)3·9H2O 混合放入 250 mL的烧杯中,加入 80 mL 去离子水,使木屑被

铁盐溶液完全浸透。然后加入一定 NaCl 搅拌均匀, 静止放置 24 h。在 60 ℃下烘干混合物,研磨获得铁 盐修饰的木屑(Fe(NO3)3/Saw-dust)。将 Fe(NO3)3/ Saw-dust 放在管式气氛炉中, N2气氛下以 5 ℃/min 的升温速率加热至 600 ℃保温 2 h, 然后自然冷却至 室温。冷却后的样品用去离子水和乙醇洗涤几次,磁 性分离,直到检测不到 CL为止。磁性分离产物在 60 ℃下干燥 2 h 收集。根据投入生物质木屑的质量 (从 0.5 g 增大到 2.0 g),将获得的不同复合材料分 别命名为 SDBC--0.5、 SDBC--0.6、 SDBC--0.8、 SDBC-1.0、SDBC-1.2、SDBC-1.5 和 SDBC-2.0;将 纯木屑生物质碳命名为 SDBC。

1.2.2 材料的表征

通过 XRD 对产物晶体结构进行了表征,采用 Cu-Ka 辐射, λ=0.154 05 nm, 扫描速度为 10(°)/min, 步长为 0.01°; 通过 SEM 对产物的表面形貌进行了表 征,测试加速电压为 20~30 kV;产物碳的结晶性通 过显微拉曼光谱仪(Raman)进行表征,激发波长 λ=514.5 nm; 产物的比表面及孔径通过 BET 测试表 征,测试前产物在 300 ℃下脱气 3 h;利用超导量子 干涉仪室温下测试了产物的磁性能;材料的电磁参数 通过 VNA 测试。

1.3 电磁波吸收性能的计算

复合材料对电磁波的吸收性能依据传输线理论, 利用其电磁参数计算并用反射损耗(Reflection Loss, $R_{\rm L}$) 来表示, 如式(1)—(4) 所示。其中, $R_{\rm L} \leq -10$ dB 的吸收带宽称为有效吸收带宽(Effective Adsorption Bandwidth, EABW)。样品的电磁参数采用同轴传输 线法进行测试,以石蜡作为黏接剂,与质量分数为30% 的测试样品混合均匀后压制成测试试样,测试试样为同 心圆环,外环直径为7mm,内环直径为3.04mm,厚 度为2mm, 电磁波测试频宽度为2~18 GHz。

$$R_{\rm L} = 20 \log \left| \frac{Z_{\rm in} - Z_0}{Z_{\rm in} + Z_0} \right| \tag{1}$$

$$Z_{\rm in} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_{\rm r}}{\varepsilon_{\rm r}}} \tanh\left(j\frac{2\pi f d\sqrt{\mu_{\rm r}\varepsilon_{\rm r}}}{c}\right)$$
(2)

$$\varepsilon_{\rm r} = \varepsilon' - j\varepsilon'' \tag{3}$$
$$\mu = \mu' - j\mu'' \tag{4}$$

虚部; µ'和 µ"分别为复磁导率的实部和虚部。

2 结果与分析

2.1 结构分析

С

木屑生物质碳及其复合材料的物相结构及形态

分别用 XRD 和 Raman 进行表征,结果如图 1 所示。 图 1a 显示木屑用量 0.5 g 时,获得复合材料的物相为 单一相 Fe₃O₄(JCPDS 89–0688),随木屑用量的增加, 出现了 FeO(JCPDS 74–1886)和 Fe 单质(JCPDS 87–0721)相。原因主要是随木屑用量的增加,部分 的 Fe₃O₄ 被还原。Raman 光谱显示(图 1b)由缺陷 和无序诱导产生的 D–band(~1 360 cm⁻¹处)清晰 可见,表明磁性木屑生物碳复合材料中的碳结晶度 较低,存在较多的缺陷,对复合材料的极化作用具有 促进作用。

2.2 微观结构和形貌分析

木屑生物质碳及其复合材料的 SEM 如图 2 所示。 从图 2a 和 b 可以看出,木屑生物碳呈现多孔形态,表 面凸凹不平有蠕虫状孔洞。图 2c—f 显示含铁纳米颗粒 较好地负载在 SDBC 上。其比表面积、粒径分布等相 关信息如表 1 所示。复合材料随着木屑用量的增加,比 表面和总孔体积逐渐增加,平均孔径逐渐减小。其主要 原因是 SDBC 的含量低时,含铁纳米粒子的含量则相 对较高,微孔及介孔被大量含铁纳米粒子占据,导致材 料比表面积减少,而平均孔径增大。总体来看,材料具 有较丰富的多孔结构。

2.3 磁性能分析

材料的磁性能对改善材料的阻抗匹配、提升其吸波 性能具有显著作用。室温下对复合材料的磁性能进行了测 试,磁滞回线如图 3 所示。复合材料均呈现一定磁性能, 且磁性能随木屑用量的增加而减少,复合材料 SDBC-0.5 具有比较大的比饱和磁化强度(64.0 A·m²/kg)。图 3 中插 图是复合材料在较弱场强(-3.2×10⁵ ~ 3.2×10⁵ A/m)围 成的磁滞回线放大图。从图 3 中可以看出,复合材料 SDBC-0.5 的磁滞回线围成的面积较大,即相较于其 他复合材料,它的磁损耗能力相对较强,复合材料均 具有一定的磁损耗。



图 1 XRD 和 Raman 图谱 Fig.1 Spectra of XRD and Raman



图 2 SDBC 及其复合材料的 SEM Fig.2 SEM images of SDBC and composites

表 1 SDBC 及其复合材料的比表面积、总孔体积及平均孔径 Tab.1 Specific surface area, total pore volume and average pore size of SDBC and composites

样品	比表面积/ (m ² ·g ⁻¹)	总孔体积/ (cm ³ ·g ⁻¹)	平均孔径/nm
SDBC	499.067	0.215	1.718
SDBC-2.0	390.356	0.206	2.063
SDBC-1.5	181.111	0.136	2.955
SDBC-1.0	180.424	0.133	2.999

2.4 电磁性能分析

材料的电磁性能是决定其吸波性能的关键因素,木 屑生物质碳及其复合材料的电磁性能如图 4a—d 所示。 从图 4a 和图 4b 可以看出,木屑生物质碳及其复合材料 具有明显频散现象,随着频率的增大, ɛ'和 ɛ"逐渐减小。 负载了磁性纳米粒子后,除样品 SDBC-0.5 外,复合材 料 ɛ'和 ɛ"的值均变大且随木屑用量的增加而增加。其主 要原因可能是木屑用量较小时,形成的界面较少,随着 生物质用量的增加,纳米粒子与多孔 SDBC 复合后形成 了较多的界面,从而增强了材料的介电极化能力。图 4c 和图 4d 显示 SDBC 与其复合材料的磁导率变化趋势一 致,负载了磁性纳米粒子后,复合材料的μ"值增大。值 得注意的是,木屑用量从 0.5 g 增加到 2.0 g,除样品 SDCB-0.5 外,其他复合材料的复介电常数和磁导率的变 化范围并不大。材料的吸波性能主要由材料的电磁参数 ε' 、 ε'' 、 μ' 和 μ'' 所决定,较小的变化范围,会使不同复合材 料的吸波性能较接近,使吸波性能表现出对木屑用量一定 范围内的不敏感。材料的介电损耗正切 tan $\delta_{\varepsilon}(\varepsilon''/\varepsilon')$ 和磁 损耗正切 tan $\delta_{\mu}(\mu''/\mu')$ 随频率变化曲线见图 4e—f。从图

4e—f可以看出,相较于 SDBC,除复合材料 SDBC-0.5 外,在高频区,其他复合材料的介电损耗能力增加,且 具有较高的木屑用量的复合材料的介电损耗能力也较 高,而磁损耗能力则较低。





2.5 吸波性能分析

木屑生物质碳及其复合材料的吸波性能随频率和 匹配厚度的变化曲线如图 5 所示。从图 5 可以看出,木 屑生物质碳负载了磁性纳米粒子后,吸波性能得到明显 改善,木屑用量从 0.8 g 增加到 2.0 g 时,获得的不同组 分的复合材料均具有较好的吸波性能。复合材料 SDBC-1.0 在匹配厚度为 2.7 mm 时,*R*_{L(min)}值为-30.2 dB, EABW 值达到 6.2 GHz。尽管随木屑用量增加,获得 的复合材料 SDBC-1.5 和 SDBC-2.0 由于介电性能增



图 4 SDBC 及其复合材料的电磁性能 Fig.4 Electromagnetic properties of SDBC and composites

加,所以反射增加,吸波性能下降,但二者在匹配厚 度为 2~5 mm 时, *R*_{L(min)}值仍均低于-10 dB,且当匹 配厚度为 2.2 mm 时, EABW 仍可达 5.8 GHz。因此, 通过调节铁源与木屑质量的比例,可以获得具有 EABW 宽和匹配厚度薄的良好性能的磁性木屑碳基复合吸波 材料。复合材料的吸波性能随生物质用量(一定范围 内)变化不明显,表现出对生物质用量不敏感的特性。

2.6 损耗机制分析

吸波材料应尽可能地在较宽频率范围内保持 ε_r 与 μ_r 相接近,使样品的归一化阻抗匹配特性 Z(Z_{in}/Z_0) 值接近于 1,达到理论上的阻抗匹配。样品 SDBC 及 其复合材料不同厚度下归一化输入阻抗 Z 如图 6 所 示。从图 6 可以看出,SDBC 及 SDBC-0.5 的归一化 输入阻抗数值与数值 1 偏离较多,匹配性较差,与它 们对应的微波吸收性能相一致。复合材料 SDBC-0.8 和 SDBC-1.2 的归一化输入阻抗数值分别集中在 0.8~1.4 和 0.6~1.1 内,与数值 1 接近程度的频率范 围较宽,尤其是在薄匹配厚度和高频条件下,与它们 的吸波性能也均吻合。总之,SDBC 与磁性纳米粒子 复合后,复合材料的阻抗匹配特性均得到较大的改 善,从而提高了其吸波性能。



图 6 SDBC 及其复合材料的归一化输入阻抗 Fig.6 Normalized input impedance of SDBC and composites

依据式(5)计算拟合了 SDBC 及其复合材料的 衰减常数随频率的变化曲线,结果如图 7 所示。复合 材料的衰减常数均随频率的增大而增大。SDBC 及 SDBC-0.5 的衰减常数主要集中在 10~50,低于其他 复合材料,在 2~18 GHz 频率范围内衰减能力较差。 尽管 SDBC-1.5 和 SDBC-2.0 比 SDBC-0.8 和 SDBC-1.0 的衰减能力较强,但吸波性能却稍弱于二 者。这主要因为材料的吸波性能是由衰减常数和阻抗 匹配共同决定,其吸波性能需要结合它们的阻抗匹配 特性综合分析。

$$\alpha = \frac{2\pi f d}{c} \times \sqrt{\mu'' \varepsilon'' - \mu' \varepsilon' + \sqrt{(\mu'' \varepsilon'' - \mu' \varepsilon')^2 + (\mu' \varepsilon'' - \mu'' \varepsilon')^2}}$$
(5)

基于对复合材料电磁参数、损耗正切值及吸波性 能等的分析讨论,可以得出它们对电磁波的损耗以介 电损耗为主,磁损耗为辅。对介电损耗为主的吸波材 料而言,德拜极化弛豫是一种重要的损耗机制,按照 德拜理论, $\varepsilon'-\varepsilon$ "的变化曲线呈现半圆模式,每种半圆 代表一种极化类型。依据式(6)拟合了 SDBC 及其 复合材料的 $\varepsilon'-\varepsilon$ "的变化曲线,结果如图 8 所示。从 图 8 可以看出, $\varepsilon'-\varepsilon$ "的变化曲线中均存在至少 2 个不 规则的半圆,说明 SDBC 及其复合材料至少存在 2 种介电弛豫过程,具有多重介电损耗机制。复合材料 SDBC-0.5 由于生物质用量最少,具有最大的磁性能, 所以极化强度较小,介电常数也较小,在 ε'-ε"曲线 中呈现出半圆的半径小;反之复合材料 SDBC-2.0 半 圆环半径较大,呈现出较强的极化能力。无定形碳表 面缺陷引起的空间电荷极化,多孔大比表面积和多物 相引起的界面极化,以及纳米粒子固有极矩引起的偶 极子极化共同作用造成了材料的介电损耗。

$$\left(\varepsilon' - \frac{\varepsilon_{\rm s} + \varepsilon_{\rm s}}{2}\right)^2 + \left(\varepsilon''\right)^2 = \left(\frac{\varepsilon_{\rm s} - \varepsilon_{\rm s}}{2}\right)^2 \tag{6}$$

式中: & 和 & 分别为静态介电常数和高频介电常数。



图 7 SDBC 及其复合材料的衰减常数 Fig.7 Attenuation constant of SDBC and composites



图 8 SDBC 及其复合材料的 ε'对 ε"的变化曲线 Fig.8 Relationship curves between ε' and ε" of SDBC and composites

材料的磁损耗主要由磁滞损耗、涡流损耗、共振 弛豫等引起,磁滞损耗在弱磁场下损耗甚微,可以忽 略。对于涡流损耗,可以通过式 $\mu''(\mu')^{-2}f^{1}=2\pi\mu_{0}\sigma d^{2}/3$ 来确定。如果材料的磁损耗仅有涡流损耗,则当频率 发生变化时, $\mu''(\mu')^{-2}f^{1}$ 的值应为常数。图 9 描述了 $\mu''(\mu')^{-2}f^{1}$ 随频率变化曲线。SDBC 由于没有磁性, $\mu''(\mu')^{-2}f^{1}$ 的值在 3~18 GHz 内,几乎没有明显变化。 复合材料的 $\mu''(\mu')^{-2}f^{1}$ 值在低频段主要呈现随频率增 加而逐渐减小的趋势,高于 12 GHz 之后, $\mu''(\mu')^{-2}f^{1}$ 值随频率变化基本保持不变。因此,可以判断复合材 料磁损耗以涡流损耗为主,除了涡流损耗外,低频区 还存在有其他磁损耗方式。



随频率变化曲线 Fig.9 Change curve of $\mu''(\mu')^{-2}f^{-1}$ with frequency of SDBC and composites

3 结语

本研究以 NaCl 为添加剂,采用硝酸铁预先修饰 木屑,在 600 ℃下一步热解法制备了磁性碳基复合材 料。当木屑用量为 0.8~2.0 g 时,所得复合材料均表现 出宽频带吸收特性。当薄匹配厚度为 2.7 mm 和填充率 为 30%时,复合材料 DSBC-1.0 的 EABW 达 6.2 GHz。 复合材料的宽频吸收特性可归因于其优异的阻抗匹 配、多极化弛豫和多孔结构造成的多次反射和散射等 因素。复合材料吸收性能对木屑用量在 0.8~2.0 g 表 现的不敏感特性,避免或减弱了由于时间周期和产地 等对其结构和性能的影响,从而减弱了其对微波吸收 性能的影响,有利于制备工艺的实际操作和吸波性能 实验结果稳定性的提高。

参考文献:

 HUANG Xin-meng, LIU Xue-hua, ZHANG Yan, et al. Construction of NiCeO_x Nanosheets-Skeleton Cross-Linked by Carbon Nanotubes Networks for Efficient Electromagnetic Wave Absorption[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2023, 147: 16-25.

- [2] LIU Xu-dong, HUANG Ying, DING Ling, et al. Synthesis of Covalently Bonded Reduced Graphene Oxide-Fe₃O₄ Nanocomposites for Efficient Electromagnetic Wave Absorption[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 72: 93-103.
- [3] 韩明睿,郑司南,李宾,等.可用于包装的纤维素基
 电磁屏蔽材料研究进展[J].包装工程,2022,43(23):
 9-17.

HAN Ming-rui, ZHENG Si-nan, LI Bin, et al. Research Progress on Cellulose-Based Electromagnetic Interference Shielding Materials for Packaging[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(23): 9-17.

- [4] ALMESSIERE M A, GÜNER S, SLIMANI Y, et al. Structural and Magnetic Properties of Co_{0.5}Ni_{0.5}Ga_{0.01} Gd_{0.01}Fe_{1.98}O₄/ZnFe₂O₄ Spinel Ferrite Nanocomposites: Comparative Study between Sol-Gel and Pulsed Laser Ablation in Liquid Approaches[J]. Nanomaterials, 2021, 11(9): 2461.
- [5] YAKOVENKO O, LAZARENKO O, MATZUI L L, et al. Effect of Ga Content on Magnetic Properties of BaFe_{12-x}GaxO₁₉/epoxy Composites[J]. Journal of Materials Science, 2020, 55(22): 9385-9395.
- [6] WANG De-dong, JIN Jie, GUO Yan, et al. Lightweight Waterproof Magnetic Carbon Foam for Multifunctional Electromagnetic Wave Absorbing Material[J]. Carbon, 2023, 202(1): 464-474.
- [7] WU Guang, HE Yu, ZHAN Hang, et al. A Novel Fe₃O₄/carbon Nanotube Composite Film with A Cratered Surface Structure for Effective Microwave Absorption[J]. Journal Materials Science: Materials in Electronics, 2020, 31(14): 11508-11519.
- [8] SHARMA S, LEE J, DANG T T, et al. Ultrathin Freestanding PDA-Doped rGO/MWCNT Composite Paper for Electromagnetic Interference Shielding Applications[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 430: 132808.
- [9] HE Xin, FENG Lei, SONG Hao-jie, et al. Vertically Aligned Carbon Nanotube@Graphene Paper/Polydimethylsilane Composites for Electromagnetic Interference Shielding and Flexible Joule Heating[J]. ACS Applied Nano Materials, 2022, 5(5): 6365-6375.
- [10] MENG Fan-bin, CHEN Yao, LIU Wei-hua, et al. Multi-functional RGO-Based Films with "Brick-Slurry" Structure: High-Efficiency Electromagnetic Shielding Performance, High Strength and Excellent Environ mental Adaptability[J]. Carbon, 2022, 200: 156-165.

- [11] LIU Meng-jia, LIU Yu-hang, GUO Hai-chang, et al. A facile Way to Enhance Microwave Absorption Properties of RGO and Fe₃O₄ Based Composites by Multi-layered Structure[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2021, 146: 106411.
- [12] MANNA R, SRIVASTAVA S K. Reduced Graphene Oxide/Fe₃O₄/Polyaniline Ternary Composites as a Superior Microwave Absorber in the Shielding of Electromagnetic Pollution[J]. ACS Omega, 2021, 6(13): 9164-9175.
- [13] DU Yun-chen, LIU Wen-wen, QIANG Rong, et al. Shell Thickness-Dependent Microwave Absorption of Core-Shell Fe₃O₄@C Composites[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(15): 12997-13006.
- [14] WU Cao, WANG Jing, ZHANG Xiao-hang, et al. Hollow Gradient-Structured Iron-Anchored Carbon Nanos-

pheres for Enhanced Electromagnetic Wave Absorption[J]. Nano-Micro Letters, 2022, 15(1): 7.

- [15] WANG Li-hong, GUAN Hong-tao, HU Jian-qiao, et al. Jute-Based Porous Biomass Carbon Composited by Fe₃O₄ Nanoparticles as An Excellent Microwave Absorber[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 803: 1119-1126.
- [16] YIN Peng-fei, ZHANG Li-min, WANG Jian, et al. Facile Preparation of Cotton Derived Carbon Fibers Loaded with Hollow Fe₃O₄ and CoFe NPs for Significant Low-Frequency Electromagnetic Absorption[J]. Powder Technology, 2021, 380: 134-142.
- [17] WANG Li-hong, GUAN Hong-tao, SU Shun-lin, et al. Magnetic FeO_x/biomass Carbon Composites with Broadband Microwave Absorption Properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 903: 163894.

责任编辑:曾钰婵