

生物质衍生碳基复合吸波材料的研究进展

武志红¹, 姚 程¹, 蒙真真¹, 王 耀¹, 郭鑫玉¹, 周华凤², 王宇斌³(1. 西安建筑科技大学材料科学与工程学院, 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学化学与化工学院, 西安 710055;
3. 西安建筑科技大学资源工程学院, 西安 710055)

摘 要: 为了满足军事国防领域对隐身技术的需求, 解决 5G 时代广泛的电磁污染问题, 各类型的碳基吸波材料异军突起。生物质衍生碳基材料相比传统碳基吸波材料, 不仅提高了吸波性能, 还具有轻质、低成本和可持续的优势。简要叙述了生物质碳材料的合成方法, 系统地介绍了可食用和非食用 2 种生物质衍生材料在碳基复合吸波材料制备中的应用, 综述了近年来生物质衍生碳基复合材料在吸波领域的最新研究进展。重点分析了不同生物质衍生碳基复合材料的微观结构、微波吸收性能的差异, 并概述了不同生物质衍生碳基复合材料吸波机理, 最后讨论了具有高效微波吸收性能的生物质碳基复合吸波材料所面临的挑战, 展望了其未来发展的方向。为从事生物质衍生吸波材料的科研工作者提供了较为全面的理论和应用知识背景, 并有望进一步推进生物质衍生碳基复合吸波材料的发展及应用。

关键词: 生物质衍生碳; 轻质吸波材料; 碳基复合材料; 微波吸收

中图分类号: TM25 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)07-2056-11

网络出版时间: 2022-05-31

Research Progress on Biomass-Derived Carbonaceous Composite
Microwave Absorbing MaterialsWU Zhihong¹, YAO Cheng¹, MENG Zhenzhen¹, WANG Yao¹, GUO Xinyu¹, Zhou Huafeng², WANG Yubin³

(1. College of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

3. School of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: With the rapid development of absorbing materials due to the demand for stealth technology in the military and national defense field and the increasingly serious electromagnetic pollution in life, various types of absorbing materials emerge. Compared with the conventional carbonaceous absorbing materials, biomass-derived carbonaceous materials improve the absorbing performance due to their advantages like light weight, low cost and sustainability. This review briefly represented the synthesis methods of biomass carbon materials, systematically introduced the application of edible and non-edible biomass derived materials in the preparation of carbonaceous composite absorbing materials, and described recent work on the biomass-derived carbonaceous materials. Recent research progress on the composite materials in the field of wave absorption was given. The differences in the microstructure and microwave absorption properties of different biomass-derived carbonaceous composites were mainly analyzed, and the microwave absorption mechanism of different biomass-derived carbonaceous composites was summarized. The current challenge and the directional perspective of biomass-derived carbonaceous composites absorbing materials with efficient microwave absorption properties were discussed. This review provides a comprehensive theoretical and applied knowledge background for the investigation of biomass-derived absorbing materials, which can promote the development and application of biomass-derived carbon-based composite absorbing materials.

Keywords: biomass-derived carbon; lightweight absorbing material; carbon composite; microwave absorption电磁干扰、电磁污染和电磁辐射, 是电子通信技术飞速发展所带来的主要问题^[1-3]。应用电磁波吸

收材料, 将有害的电磁波转化为其他形式能量, 是消除电磁波污染的一种实用并且有效的方法。铁氧

收稿日期: 2021-12-14。 修订日期: 2022-01-13。

基金项目: 国家自然科学基金(51974218); 西安建筑科技大学基础研究基金(JC1496); 陕西省社会发展科技攻关项目(2016SF-426)。

第一作者: 武志红(1974—), 男, 副教授。

Received date: 2021-12-14. Revised date: 2022-01-13.

First author: WU Zhihong (1974—), male, Associate Professor.

E-mail: zhihong@xauat.edu.cn

体^[4]、金属粉末^[5]以及合金^[6]等传统微波吸收材料虽然具有较强的吸波能力, 却存在稳定性差、密度大、填充率高和在基体中分散性差等缺点^[7]。

碳基介电损耗材料(如碳纳米管^[8]、石墨烯^[9]、碳纤维^[10]等)具有高的导电性、低的密度, 而且耐酸碱的腐蚀, 被认为是一种有前景的微波吸收材料, 然而碳材料的高导电性容易导致阻抗失配, 影响微波吸收性能, 因此通常与磁损耗材料进行复合的方法来改善^[11-12]。Zhang 等^[13]制备的 CNTs/Fe₃O₄/PANI 复合材料, 具有优异的微波吸收性能, 在 12.9 GHz 时的最小反射损耗可达 -48 dB。Feng 等^[14]制备了具有分级结构的 ZnFe₂O₄@SiO₂@RGO 核-壳纳米复合材料, 利用介电损耗和磁损耗的协同作用以及 3 种组分间的界面极化和弛豫效应, 有效提高了复合材料吸波性能, 复合材料在 13.9 GHz, 厚度为 2.8 mm 时, 最小反射损耗可达 -43.9 dB, 有效吸收带宽达 6 GHz。若将其与磁性材料进行复合, 能有效增强介电损耗和磁损耗的协同作用, 提高吸波性能。

高性能微波吸波材料应具备厚度薄、重量轻、吸收频带宽、吸收能力强、成本低等特点。研究表明^[15-17], 多孔结构可增大材料的比表面积, 增加入射电磁波的传输路径, 有效衰减和吸收电磁波, 构建具有多孔结构的碳基复合材料, 是获得高性能吸波材料的有效途径。多孔材料中的微孔和纳米孔还可以看作一种由空气和固体共同组成的介质, 在降低材料密度的同时, 可以有效调节介电常数, 提高阻抗匹配^[18-19], 从而制备轻质高性能的碳基微波吸收材料。

目前多孔碳基材料前驱体中, 生物质材料作为一种环境友好、可再生、储量丰富的碳源材料而备受关注^[20-22]。用于吸波领域的生物质材料主要来自于树木、农作物、水生植被、甲壳类生物以及相应的废弃物和残骸^[23]。对生物质废弃材料的利用, 可以实现废物资源化, 从而赋予材料新的价值。此外, 这些生物质材料一般具有天然的、形式多样的微纳米多孔结构, 如木材呈现出有序的孔隙结构, 棉纤维天然的中空纤维结构, 荷叶的正面疏水和背面亲水结构^[24-26], 均是人工合成难以实现的, 而这些结构对于拓宽吸波频带, 提高吸波性能都有重要的利用价值。因此, 这些生物质材料都可以作为碳基多孔复合材料的前驱体, 解决碳源成本过高、制备过程复杂的问题。鉴于目前生物质衍生碳吸波材料的研究文献虽然众多, 但少有对其形貌、结构、性能及吸波机理等进行分类总结的。本文就生物质衍生

碳基复合吸波材料的最新研究成果进行了综述, 按可食用和非食用生物材料进行分类, 详细总结和阐述了不同种类生物质衍生碳基复合材料的吸波机理, 同时对基于生物质衍生碳基的多元复合吸波材料的研究进展进行总结, 为后续开发新型生物质衍生碳基复合材料提供了参考。

1 生物质衍生碳基复合吸波材料

生物质衍生的碳基复合吸波材料的制备工艺相对简单, 通常采用在惰性气体保护、无氧环境或还原性气氛如 H₂ 条件下, 高温热解生物质前驱体来制备生物质碳。高温热解一般分为 3 个阶段: 初始阶段主要是水分的排除和 C—OH、C—O—C、C—H 等基团的分解, 质量下降; 第 2 阶段发生碳氢化合物与碳化产物的分离, 多孔结构的形成, 外形不变, 体积减小; 第 3 阶段为保温阶段, 使生物质前驱体充分转化为生物质碳材料^[27]。高温热解条件如温度^[28]、气氛^[29]、时间^[30]等, 对碳基复合吸波材料的性能也有一定影响。热解后, 可以保存生物质材料原有的特殊孔隙结构, 促进气-固界面极化, 进入材料的电磁波会被反射到不同尺寸的孔隙, 从而得到有效衰减^[31]。此外, 在高温热解过程中, 生物质特有的杂原子可以得到保留, 从而作为微波衰减的极化中心, 提高介电损耗^[32]。

生物质材料作为绿色、廉价的碳质前驱体, 就其应用对象而言, 可以分为可食用前驱体和非食用前驱体。

1.1 可食用生物质衍生复合吸波材料

可食用生物质前驱体如水果、蔬菜、面粉、蛋类、菌类等。这类材料孔隙形状多样, 具有典型的多孔结构以及高的比表面积, 有利于入射电磁波的多重反射和散射, 相互搭接的多孔结构组成的三维连通网络可增强电导损耗, 有助于外加组分在多孔骨架上的均匀负载和分散, 改善了团聚现象^[27]。Sun 等^[33]将冷冻干燥的杨梅经过碳化及 KOH 活化工艺, 设计出杨梅衍生的梯度阻抗剖面(图 1), 在低频下实现了强的微波吸收, 有效解决了电磁损耗和阻抗匹配不平衡的问题。还有以淀粉为生物质碳源, 采用喷雾干燥和碳化的方法, 制备微米级固体碳球吸波材料, 解决了纳米级吸波材料分散性差的问题^[34]。磁性金属和合金的掺杂也有助于增强界面极化和磁损耗。Li 等^[35]在蛋清中掺杂 FeCoNi 合金, 而后进行高温热解处理, 蛋清中特有的 S 原子掺杂引起的介电损耗以及 FeCoNi 合金的磁损耗的协同作用, 改善了复合材料的阻抗匹配, 有效提高了微波衰减性能, 复合材料在 13.8 GHz、厚

度为 1 mm 时达到−47.09 dB 的最小反射损耗。也有些学者利用各种菌类制备生物质衍生复合材料^[36–37]。Liu 等^[37]以木耳为基体掺杂 Co 粒子, 采用浸渍和炭化工艺制备了分级多孔 C/Co 复合材料, 其独特的分级多孔结构为电磁波的传导提供了多重路径, 对吸波性能的提高有积极作用。表 1 总结了部分可食用生物

质衍生碳复合吸波材料的研究结果。对比其微波吸收性能可以看出, 不同可食用前驱体制备的生物质衍生碳基复合材料吸收带宽大多不同, 但都具有较强的反射损耗。可食用生物质衍生材料中富含多种微量元素和矿物组分, 有利于杂原子掺杂复合材料的制备, 有效增强极化损耗, 提高微波吸收性能。

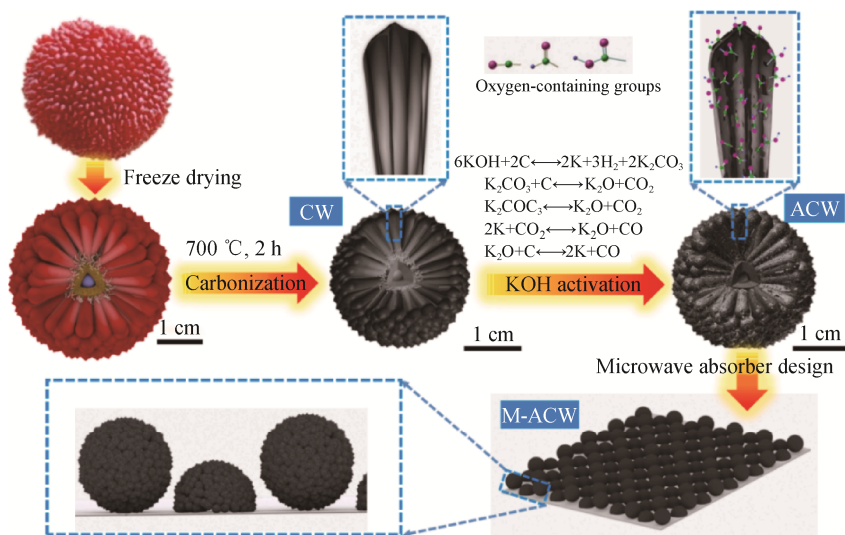


图 1 活化杨梅衍生碳基复合材料制备工艺示意图^[33]

Fig. 1 Schematic illustration of the process of activated wexberry-derived carbonaceous composite^[33]

表 1 可食用生物质衍生碳基复合吸波材料的微波吸收性能

Table 1 Microwave absorption performance of edible biomass-derived carbonaceous composites

Precursor material	Absorbers	Minimum RL (frequency, thickness)	Effective absorption bandwidth (EAB)	Ref.
Starch	Micron solid carbon spheres	−64.8 dB (9.02 GHz, 2.57 mm)	3.1 GHz	[34]
Egg-white	Carbon@FeCoNi	−47.09dB (13.8 GHz, 1 mm)	5.45 GHz	[35]
Netted Stinkhorn	Porous carbon@CuS	−61.5dB (7.8 GHz, 2.84 mm)	7.8 GHz	[36]
Agaric	Carbon/Co	−52.62dB (8.56 GHz, 2.8 mm)	5.44 GHz (11.84 GHz–17.28 GHz)	[37]
Rice	Carbon/Ni	−52dB (14.2 GHz, 1.7 mm)	5 GHz (13.0 GHz–18 GHz)	[38]

RL is used to evaluate the absorbing performance of composites; RL < −10 dB means that more than 90% of the electromagnetic energy is attenuated.

1.2 非食用生物质衍生碳复合吸波材料

多数非食用生物质废弃物的主要成分为木质纤维素^[39], 还有包括葡萄糖^[40]、壳聚糖^[41]、蝴蝶鳞片^[42]、松花粉^[43]等的其他生物质衍生材料, 这些材料均可以作为前驱体制备生物质衍生碳复合吸波材料。

1.2.1 木质纤维素衍生复合吸波材料 木质纤维素由 30%~50%(质量分数)纤维素、19%~45%半纤维素、15%~35%木质素 3 种多糖组成^[44], 农业副产物(秸秆、天然纤维如棉花和黄麻等)、林作物(如木材)及其残余物(树叶、果壳、果皮)都可以称作木质纤维素^[45], 它们由这些多糖一起构成异质体, 其组成和结构随生物质材料不同而变化, 从而影响吸波性能。

利用农业副产物衍生碳制备吸波材料也有大量研究, Aslam 等^[46]以秸秆为前驱体, 制备了活化生物质碳复合吸波材料。采用化学活化法, 通过改变

秸秆衍生碳材料的形貌, 调节生物质碳与石蜡复合材料的微波吸收性能。其高效微波吸收性能归因于秸秆衍生碳材料的高比表面积和孔隙引起的界面极化及电导损耗。棉花作为一种纤维素含量大于 90%的作物^[47], 具有典型的中空纤维状结构, 以棉花为前驱体既能保留其三维形貌, 又能获得分级多孔的结构。Wei 等^[48]以棉花为前驱体, 通过原位生成法合成了镍掺杂的棉花衍生生物质碳复合材料。经碳热还原后, 前驱体维持了原本的纤维形貌(图 2a), 放大后的图(图 2b)显示, 50~100 nm 的 Ni 纳米颗粒均匀地分散并嵌入碳基体中, 有利于电磁波的多重反射和散射以及充分的衰减, 样品的最小反射损耗达−40.5 dB。

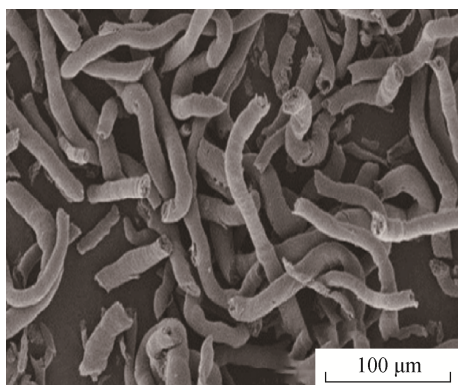
一些农业、生活残余物也可以用作生物质碳基复合材料的前驱体。Wang 等^[49]分别以玉米芯、甘

蔗渣和柚子皮为前驱体制备了孔结构可控的纯生物质衍生碳材料,其内部的多孔结构增加了材料比表面积,增强了材料的微波耗散能力,在 14.1 GHz 下,生物质衍生碳与石蜡复合材料的最小反射损耗达 -47.0 dB。同样的,还有以松子壳为前驱体^[50],经过 KOH 活化-溶剂热-热处理,合成了松子壳衍生的生物质碳@Ni/C 复合材料,Ni/C 纳米球和 Ni 纳米颗粒均匀分布在花状多孔碳纳米片上,这种独特的三维结构为电磁波的反射和散射增加了传输路径,增强了电导损耗和界面极化,松子壳中的杂原子可以作为极化中心,引起偶极子极化,同时 Ni 的引入保证了磁损耗和介电损耗的协同作用。

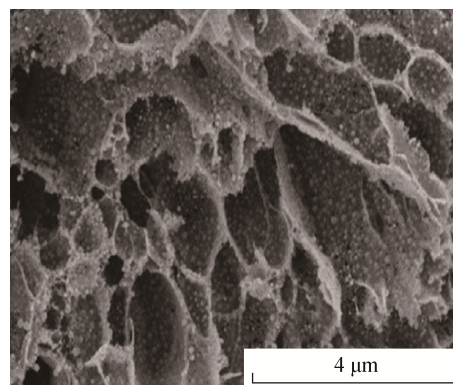
采用不同工艺,制备的复合材料形貌也各不相同。Hu 等^[51]采用水热-碳化法制备了木材衍生碳/MnO 纳米棒复合材料,结果表明,其高效的微波吸收性能归因于木材多孔碳的三维多孔结构引起的电导损耗,以及 MnO 纳米棒与基体的非均质界面引起的极化损耗的协同作用,木材衍生碳/MnO 纳米棒复合材料在 1.65 mm 的超薄厚度下达到 -58.5 dB 的最小反射损耗。Ji 等^[52]利用木材和磁性金属,采用碳化-水热-CoFe₂O₄ 原位还原法,合成了木材衍生生物质碳/CoFe 合金复合吸波材料,表现出与上述木材衍生碳/MnO 纳米棒复合材料不同的微观形貌。木材衍生生物质碳呈现出有序的孔结构,这表

明,处理方法不同,材料的微观形貌也不同。掺杂了 CoFe 合金以后,木材碳的壁变薄,这是由于 CoFe₂O₄ 的还原过程消耗了碳,但复合材料仍保留了原始木材碳的结构。其衰减能力和阻抗匹配的平衡,使复合材料具有优异的电磁波吸收能力,木材衍生碳/CoFe 复合材料在厚度为 2.2 mm 时,最小反射损耗可达 -54.4 dB。为开发低成本、轻量化、高性能的微波吸收材料提供了新的方法和思路。

独特的形态遗传材料^[53](MGMs),使得在微米尺度上构建特殊结构的生物质吸波材料成为可能,MGMs 的重点在于保持生物体本身形态结构的基础上,用所需的功能材料替代生物质材料的化学成分,从而赋予材料功能化应用,不破坏生物质原料的内在形态是设计 MGMs 的初衷。荷叶作为一种表面疏水,背面亲水,且具有不同孔径层次结构的 MGMs,可通过原位合成制备出荷叶衍生的梯度分级多孔碳/MoS₂ 复合材料,荷叶的表面结构使得 MoS₂ 具有不对称的形态,在荷叶正面,MoS₂ 均呈花状形态存在;而在背面,大部分 MoS₂ 表面呈片状,其余部分以半球形式存在。这种各向异性结构促进了界面极化,此外,复合材料中不同微米尺度的孔有利于入射电磁波的反射^[26],其优异的性能归功于电导损耗、极化损耗和阻抗匹配的协同作用。表 2 总结了木质纤维素衍生碳基复合材料的吸波性能,大部分复合材



(a) SEM image of cotton-derived fibrous carbon/Ni composite^[48]



(b) SEM image of cotton-derived porous carbon/Ni composite^[48]

图 2 棉花衍生碳/Ni 复合材料的 SEM 照片

Fig. 2 SEM images of cotton-derived carbon/Ni composite

表 2 木质纤维素衍生碳基复合材料的微波吸收性能

Table 2 Microwave absorption performance of lignocellulose-derived carbonaceous composites

Precursor material	Absorbers	Minimum RL (frequency, thickness)	Effective absorption bandwidth	Ref.
Wheat straw	Carbon foams	-37.0 dB (12.1 GHz, 1.8 mm)	8.8 GHz (7.2–16.0 GHz)	[46]
Fir wood	Carbon/CoFe	-54.4 dB (11.3 GHz, 2.2 mm)	2.6 GHz (9.7–12.3 GHz)	[52]
Pinecone	Porous carbon	-76.0 dB (15.4 GHz, 2.1 mm)	5.92 GHz (11.92–17.84 GHz)	[31]
Corn cob	Porous carbon sheets/Co nanofibers	-64.5 dB (13.76 GHz, 2.6 mm)	8.4 GHz (9.6–18.0 GHz)	[54]
Pomelo peel	Porous carbon nanosheets	-56.4 dB (13.5 GHz, 2.3 mm)	6.4 GHz (11.6–18.0 GHz)	[55]
Bamboo	Carbon/FeCo	-40.0 dB (14.1 GHz, 1.9 mm)	4.7 GHz (6.6–11.3 GHz)	[56]

料的有效吸收带宽均大于 4 GHz, 表明其具有较好的应用前景。

1.2.2 其他生物质衍生复合吸波材料 近年来, 其他性能优异的生物质衍生复合材料也得到了广泛的关注, 例如葡萄糖^[40]、壳聚糖^[41]、纤维素^[57]等, 这类原料很容易与其他离子复合, 制备低密度、高孔隙率的气凝胶, 在吸波领域具有很大的潜力。Tian 等^[41]以甲壳类动物(蟹、虾等)中提取的壳聚糖为前驱体, 使用冷冻铸造技术制备出具有分层结构的 N 掺杂碳气凝胶(图 3), 最小反射损耗达 -68.8 dB, 这归因于其分层多孔结构和壳聚糖中固有 N 掺杂之间的协同作用。在此基础上, Guo 等^[58]采用木质素磺酸盐作为 C 和 S 的前驱体, 制备了 MoO₂ 纳米粒子嵌入 S 掺杂碳层堆叠结构(图 4), 复合材料最小反射损耗达 -53.4 dB。要获得最佳的微波吸收性能, 往往需要较长的热处理温度和时间, Wang 等^[57]在此基础上利用 CNT/纤维素碳气凝胶的低温碳化技术, 制备了高效 CNT/纤维素衍生碳气凝胶吸波材料, 仅在 550 °C 碳化 2 h 得到的碳气凝胶最小反射损耗可达 -43.6 dB, 有效吸收带宽达 7.42 GHz。此外, 还

有研究人员以葡萄糖为前驱体制备碳气凝胶吸波材料, 因其生物相容性和丰富的特性^[40]。除气凝胶以外, 动物衍生碳基吸波材料也有研究。Saghatforoush 等^[59]提出了以蝴蝶翅膀为模板的分级光学结构在锂电池方面的应用, Peymanfar 等^[42]在这个基础上用六方相的 β -Co(OH)₂ 纳米颗粒包覆的蝴蝶鳞片衍生多孔碳(图 5a 和图 5b), 与聚丙烯腈复合后, 在 9.08 GHz 下样品最佳反射损耗为 -68.41 dB。这类结构的设计和杂原子的掺杂, 为利用常见生物化学材料制备高性能的微波吸收材料奠定了基础。

表 3 列举出了一些其他特殊材料衍生的生物质碳基复合吸波材料, 吸收性能的优劣取决于复合材料中生物质的类型及组分。由以上研究可知, 生物质材料是可再生的、储量丰富的、价格低廉的碳质前驱体, 相应的生物质衍生碳基复合吸波材料特有的孔隙尺寸和三维互联的网络结构对界面极化和电导损耗均有较大影响, 并进一步增强了电磁波的多重反射和散射。虽然这些材料都具备较好的吸波性能, 但在较薄的匹配厚度制备较宽 EAB 的材料, 仍是当前需要突破的难题。

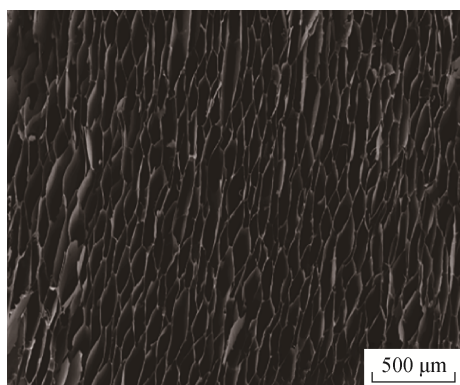


图 3 壳聚糖衍生的 N 掺杂碳气凝胶的 SEM 照片^[41]
Fig. 3 SEM image of N-doped chitosan-derived carbon aerogels^[41]

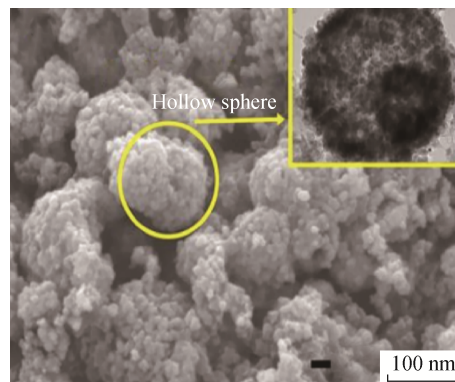
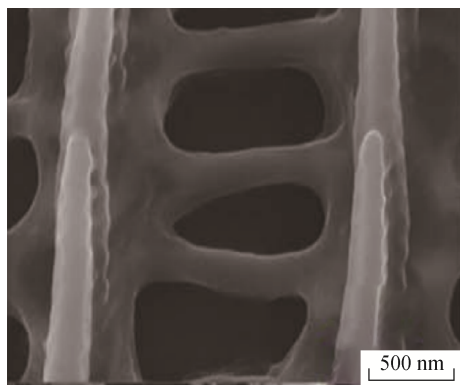
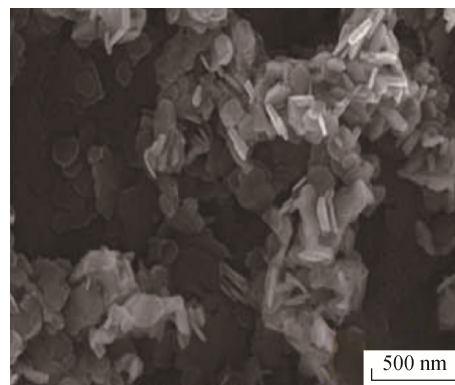


图 4 MoO₂ 纳米颗粒修饰 S-掺杂碳层复合材料 SEM 照片^[58]
Fig. 4 SEM image of sulfur-doped carbon layer decorated with MoO₂ nanoparticles composite^[58]



(a) SEM image of butterfly wing scales-derived carbon^[42]



(b) SEM image of butterfly wing scales-derived carbon/ β -Co(OH)₂ composite^[42]

图 5 蝴蝶鳞片衍生碳和蝴蝶鳞片衍生碳/ β -Co(OH)₂ 复合材料 SEM 照片

Fig. 5 SEM images of butterfly wing scales-derived carbon and butterfly wing scales-derived carbon/ β -Co(OH)₂ composite

表 3 其他生物质衍生碳基复合吸波材料的微波吸收性能

Table 3 Microwave absorption performance of other biomass-derived carbonaceous composites

Precursor material	Absorbers	Minimum RL (frequency, thickness)	Effective absorption bandwidth (EAB)	Ref.
Chitosan	N-doped carbon/ Fe_3O_4	-68.8 dB (10.05 GHz, 5.1 mm)	4GHz (8.0 GHz–12.0 GHz)	[41]
Lignosulfonate	MoO_2 /S-doped carbon	-53.4 dB (15.52 GHz, 1.7 mm)	4.63GHz (7.8GHz–12.7GHz)	[58]
Glucose	WS_2 @carbon	-51.40 dB (5.52 GHz, 4.5 mm)	3.92 GHz	[40]
Butterfly wing scales	Carbon/ β - $\text{Co}(\text{OH})_2$ /PAN	-68.41 dB (9.08 GHz, 3.0 mm)	7.97 GHz	[42]
Cellulose	CNT/cellulose aerogel	-43.6 dB	7.42 GHz	[57]

2 生物质衍生碳基复合材料吸波机理

阻抗匹配和电磁衰减能力是衡量吸波材料吸收性能的基本准则, 衰减能力差会导致较差的微波吸收性能; 低的阻抗匹配会导致电磁波在材料表面的反射, 不利于微波吸收^[60–62]。理想的吸波材料应具有较强的衰减能力和最佳的阻抗匹配^[63]。

对生物质衍生碳材料进行结构的设计, 或与低维介电材料、过渡金属硫化物等非磁性材料以及 Fe、Co、Ni 或其合金等磁性材料的复合可以有效解决衰减机制单一、阻抗匹配差的问题。常见的衰减机理有介电损耗和磁损耗, 介电损耗包括电导损耗、界面极化、偶极子极化等; 磁损耗包括磁滞损耗、畴壁共振、涡流损耗、自然共振和交换共振等^[64]。

Zhang 等^[65]以孔雀羽毛为前驱体制备了碳质光子晶体(CPCs), 其吸波机理就利用了由电导损耗、界面极化、偶极子极化主导的介电损耗, 如图 6a 所示, 电导损耗归因于 CPCs 的高导电性, CPCs/石蜡界分布的不均匀电荷和材料特有的光子结构引入的缺陷则促进了界面极化和偶极极化。以长裙竹荪为前驱体制备的多孔碳/非磁性空心 CuS 微花复合材料^[36], 吸波机理如图 6b 所示。首先, 由于其独特的微结构, 延长了电磁波的传输路径, 电磁波在复合材料中经多次反射和散射被耗散。其次, 三维多孔碳构建的互联导电网络可以通过电子跃迁产生高浓度微电流, 使复合材料具有理想的电导损耗, 此外, 低电导率的 CuS 相当于绝缘体, 阻止微电流的传输, 当电流通过 CuS 粒子时, 会消耗电能。第三, 复合材料中丰富的 Cu 空位以及多孔碳中含氧官能团($\text{C}=\text{O}$ 和 $\text{C}=\text{O}$ 键)和碳缺陷可以作为极化中心, 在交变电磁场中产生偶极极化弛豫。最后, CuS 微花与多孔碳的复合促进了异质界面的形成, 有助于界面极化。图 6c 为鱼鳞衍生核-壳磁性 $\text{Co}@\text{Co}_3\text{O}_4/\text{C}$ 复合材料的吸波机理图^[66], 多孔碳骨架形成的电导损耗, 丰富的界面产生的界面极化以及 $\text{Co}@\text{Co}_3\text{O}_4$ 纳米颗粒提供的磁损耗三者的协同作用, 使复合材料具有良好的阻抗匹配和介质损

耗特性, 从而具有优异的吸波性能。

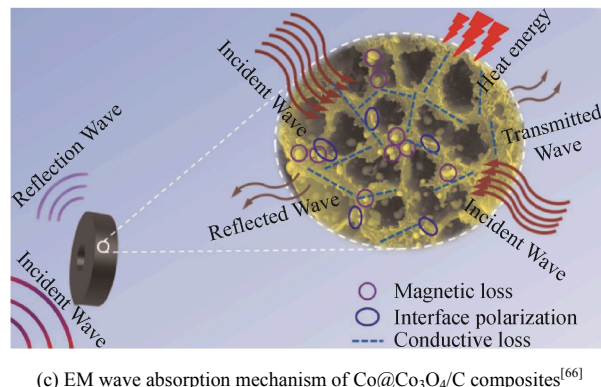
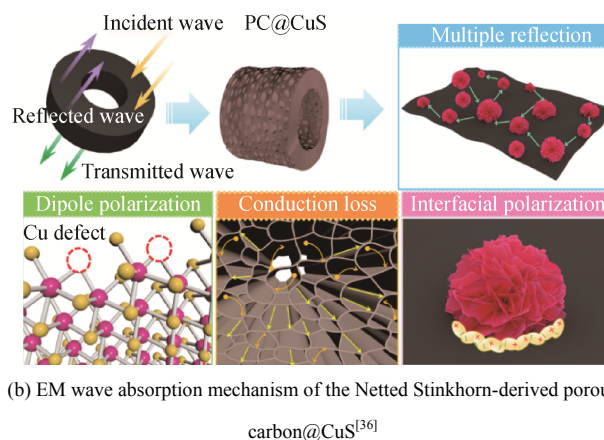
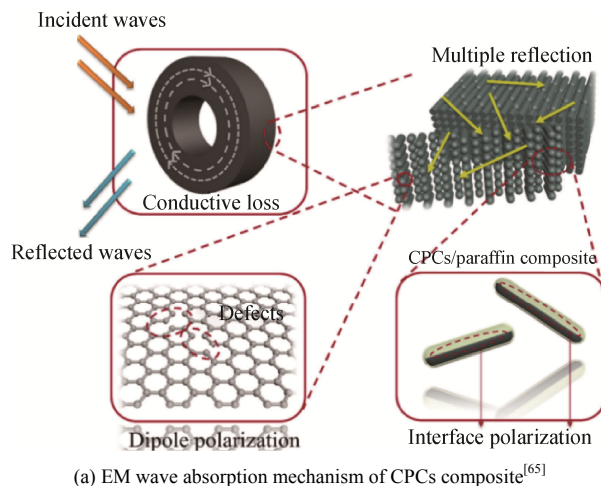


图 6 不同损耗机制的复合材料微波吸收机理示意图
Fig. 6 EM wave absorption mechanism of composite materials with different loss mechanisms

根据以上 3 类生物质衍生碳复合非磁性、磁性吸波材料的机理分析可知, 其吸波机理在具有相同点的同时, 也具有各自的电磁损耗特征。由于其均含有生物质多孔碳材料, 所以具备多孔材料相应的吸波性能和吸波机理。根据 Maxwell–Garnett 理论^[67], 孔隙结构的存在可以降低有效介电常数, 提高阻抗匹配。当入射波到达吸波材料表面时, 生物质衍生碳材料特有的空心通道和大的纳米孔赋予材料良好的阻抗匹配特性, 允许更多更宽频率的电磁波进入吸波材料, 产生多重反射和散射。此外, 生物质衍生碳材料中的固有的形貌结构增大了比表面积, 在介质内部构建丰富的气–固界面, 当电磁波反射到界面上时, 大量电荷积聚, 形成强烈的空间电荷极化, 增强了材料的微波衰减性能, 引入的碳缺陷和生物质碳材料特有的杂原子可以作为极化中心, 破坏碳原子本身的 sp^2 杂化, 增强碳晶格的点缺陷和无序结构, 从而促进偶极极化, 显著影响生物质碳基复合材料的微波衰减特性^[68]; 最后, 三维碳骨架可以产生导电网络, 有利于电子跃迁, 从而增强了材料的电导损耗^[69]。与非磁性材料复合时, 可以增加复合材料中的非均质界面, 从而增强界面极化, 另外, 非磁性材料也可以调节生物质碳过高的电导率, 改善阻抗匹配。与磁性材料复合, 有助于介电损耗和磁损耗的协同作用, 磁损耗通常是由于共振损耗和涡流损耗引起的^[70]。涡流损耗是指在电磁场的磁性部分诱发的感应电流所造成的能量损耗, 可以用以下公式来判断^[71]:

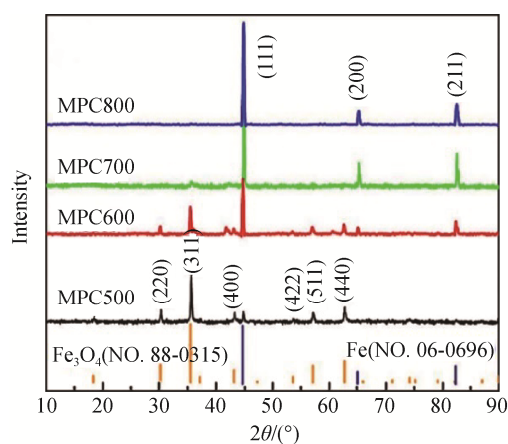
$$C_0 = \mu''(\mu')^{-2} f^{-1} \quad (1)$$

其中: μ' 和 μ'' 分别为磁导率实部和虚部; f 为频率。当 C_0 值不随频率变化时, 涡流损耗占磁损耗的主导, 否则为自然共振及交换共振占主导^[72], 大量研究表明, 低频和低频区域的磁损耗通常分别与自然共振 $[(2\sim 9)\text{ GHz}]$ 和交换共振 $[(14\sim 18)\text{ GHz}]$ 有关^[73–75]。

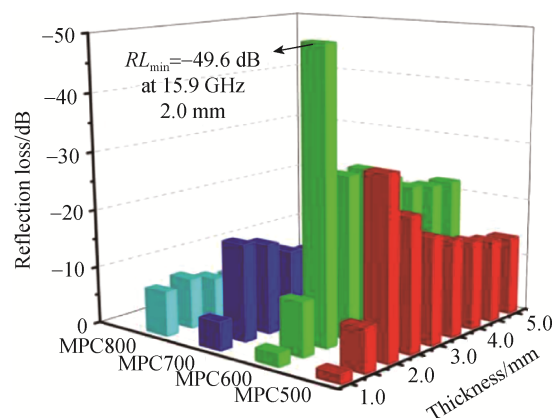
3 基于生物质衍生碳的多元复合吸波材料研究探索

近年来, 可食用的或者非食用的生物质衍生碳基复合材料, 在微波吸收领域都取得了很大的进展, 为了进一步增强电磁吸收性能, 基于生物质衍生碳材料的多元复合材料得到了广泛的研究^[76–78]。Wang 等^[79]提出以丝瓜海绵为前驱体复合 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, 在不同的热处理温度下制备含不同磁性粒子的分级多孔碳复合材料。从图 7a XRD 谱可以看出, 500 °C 时获得的是由 Fe_3O_4 和 C 组成的二元复合材料, 700 °C 和

800 °C 获得的样品 MPC700 和 MPC800 是由 Fe 和 C 组成的二元复合材料, 而 MPC600 为典型多孔碳/ Fe_3O_4 @Fe 三元复合材料, 其三维多孔结构、丰富的界面和引入磁性组分三者的协同作用, 赋予了 MPC600 优异的电磁损耗特性, 在 2.0 mm 的厚度下, 最小反射损耗达 -49.6 dB, 有效吸收带宽达 5.0 GHz。Zhang 等^[80]通过静电自组装法将花朵状 2DMoS_2 @ Fe_3O_4 构成的 0D 纳米球锚定在香蒲衍生 1D 碳微管上, 成功合成了 1 种新型的 1D 异质结构杂化材料, 2DMoS_2 @ Fe_3O_4 均匀分布于空心碳微管表面, 碳基体的高导电性有助于电子的快速运输, 而 2DMoS_2 @ Fe_3O_4 表面不但减少了微波的反射, 还为电磁波的多重反射和散射提供非均质界面, 材料分别在 2.09 mm 和 2.30 mm 的厚度达到了 -62 dB 的最小反射损耗和 6.8 GHz 的有效吸收带宽。表 4 总结对比了一元、二元及多元生物质衍生复合吸波材料



(a) XRD patterns of all MPC composites^[79]



(b) Column chart of RL values for MPC composites with various carbonized temperatures^[79]

图 7 MPC 复合材料的 XRD 谱和 MPC 复合材料的反射损耗

Fig. 7 XRD patterns of MPC composites and RL values for MPC composites

的微波吸收性能，由表 4 可知，复合材料的性能因组分及微观结构的不同而有所变化，但总体上来说，

生物质衍生的碳基复合材料是高性能轻质微波吸收材料的优选前驱体。

表 4 一元、二元及多元生物质衍生碳基复合吸波材料的微波吸收性能

Table 4 Microwave absorption performance of one-element, two-element and multi-element biomass-derived carbonaceous composites

Precursor material	Absorbers	Minimum RL (frequency, thickness)	Effective absorption bandwidth (EAB)	Ref.
Rice husk	Carbon	-47.46 (9.796 GHz, 2.8 mm)	3.4 GHz (8.473–11.875 GHz)	[28]
Reed stalk	Carbon	-63.9 dB (10.8 GHz, 1.7 mm)	7.6 GHz (10.4–18.0 GHz)	[81]
Walnut shell	Carbon	-42.4dB (8.88 GHz, 2.0 mm)	2.24 GHz (10.48–12.72 GHz)	[7]
Peacock feathers	Carbonaceous photonic crystals	-57.9dB (7.3 GHz, 2.5 mm)	2.1 GHz (6.4–8.5 GHz)	[65]
Loofah sponge	Carbon/Fe ₃ O ₄ @Fe	-49.6dB (15.9 GHz, 2.0 mm)	5.0 GHz (13–18 GHz)	[79]
Fish scale	Carbon/Co@Co ₃ O ₄	-89.3dB (13.6 GHz, 2.4 mm)	6.08 GHz (11.92–18 GHz)	[66]
Cattail	MoS ₂ @Fe ₃ O ₄ /Carbon microtubes	-62 dB (16.0 GHz, 2.09 mm)	6.76 GHz (10.92–17.68 GHz)	[80]

4 结论与展望

生物质碳基材料因环境友好、可再生的特性而具有广阔的应用前景。按可食用与非食用的生物质前驱体进行了系统的分类，综述了 2 种来源的碳基复合材料的最新研究进展。无论是可食用或非食用的生物质衍生碳都可通过简单的热解过程，转化为生物质碳基体，形成三维碳骨架和多孔结构；这种结构能够容纳大量掺杂粒子，形成完整的耦合网络，有效解决粒子团聚的问题，促进电导损耗和界面极化。此外，生物质材料中特有的杂原子可以在热解过程中得以保留，从而作为极化位点与磁性材料复合，共同提高材料的吸波性能。虽然有些可食用生物质材料能够制备出吸波性能优异的生物质碳材料，但因其具有食用价值，不建议过多使用，而非食用生物质材料在取材和性能上都具有更天然的优势，且可实现节能减排和资源绿色应用，应是今后利用和发展的方向。

生物质材料种类丰富，组分复杂，且生物质材料可以同时作为碳基前驱体和多孔模板。适当的调整生物质碳基复合材料的形貌结构、组分可优化材料的电磁性能，然而，当前对生物质材料的结构设计和研究还处于初始阶段，多孔形貌结构设计对电磁特性的影响还需要进一步的探究，且在较薄的匹配厚度制备较宽 EAB 的材料，仍是当前需要突破的难题。另外，不同生物质衍生碳与磁性/非磁性材料复合的吸波机理还有待进一步系统研究。最后，生物质衍生碳与其他多元材料复合，在保持材料质轻、强吸波性能的同时，赋予材料自动调节功能，从而适应不同波段或频率的智能化高性能微波吸收材料也是未来发展的方向。

参考文献:

- [1] LI Y, LIU X F, NIE X Y, et al. Multifunctional organic-inorganic hybrid aerogel for self-cleaning, heat-insulating, and highly efficient microwave absorbing material[J]. *Adv Funct Mater*, 2019, 29(10): 1807624.
- [2] XIANG Z, SONG Y M, XIONG J, et al. Enhanced electromagnetic wave absorption of nanoporous Fe₃O₄@carbon composites derived from metal-organic frameworks[J]. *Carbon*, 2018, 142: 20–31.
- [3] DENG B W, XIANG Z, XIONG J, et al. Sandwich-like Fe&TiO₂@C nanocomposites derived from MXene/Fe-MOFs hybrids for electromagnetic absorption[J]. *Nanomicro Lett*, 2020, 12(1): 55.
- [4] BIBI M, ABBAS S M, AHMAD N, et al. Microwaves absorbing characteristics of metal ferrite/multiwall carbon nanotubes nanocomposites in X-band[J]. *Compos B Eng*, 2017, 114: 139–148.
- [5] WEN F S, ZHANG F, LIU Z Y. Investigation on microwave absorption properties for multiwalled carbon nanotubes/Fe/Co/Ni nanopowders as lightweight absorbers[J]. *J Phys Chem C*, 2011, 115(29): 14025–14030.
- [6] ZHAO B, ZHAO W Y, SHAO G, et al. Morphology-control synthesis of a core-shell structured NiCu alloy with tunable electromagnetic-wave absorption capabilities[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2015, 7(23): 12951–12960.
- [7] XU Q, WANG L X, ZHU H L, et al. Lightweight and efficient microwave absorbing materials based on walnut shell-derived nano-porous carbon[J]. *Nanoscale*, 2017, 9(22): 7408–7418.
- [8] VEJPRAVOVA J, PACAKOVA B, KALBAC M. Magnetic impurities in single-walled carbon nanotubes and graphene: a review[J]. *Analyst*, 2016, 141(9): 2639–2656.
- [9] QIAO J, ZHANG X, XU D M, et al. Design and synthesis of TiO₂/Co/carbon nanofibers with tunable and efficient electromagnetic absorption[J]. *Chem Eng J*, 2019, 380(17): 122591.
- [10] WEI Y S, YUE J L, TANG X Z, et al. Enhanced magnetic and microwave absorption properties of FeCo-SiO₂ nanogranular film functionalized carbon fibers fabricated with the radio frequency magnetron method[J]. *Appl Surf Sci*, 2018, 428: 296–303.
- [11] LIU Y, LAI J, SHI J F. Effects of the deposition temperature on the microwave-absorption performance of Fe/CNT composites[J]. *New*

- Carbon Mater, 2020, 35(4): 428–435.
- [12] SU S H, YU J H, LIU X G, et al. Fe nanoparticles embedded in polyaniline-derived carbon fibers as broad bandwidth microwave absorbers for GHz electromagnetic wave[J]. Solid State Commun, 2021: 114400.
- [13] ZHANG D Q, YANG X Y, CHENG J Y, et al. Facile preparation, characterization, and highly effective microwave absorption performance of CNTs/Fe₃O₄/PANI nanocomposites[J]. J Nanomater, 2013(5): 134.
- [14] FENG J F, HOU Y H, WANG Y C, et al. Synthesis of hierarchical ZnFe₂O₄@SiO₂@RGO core-shell microspheres for enhanced electromagnetic wave absorption[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2017, 9(16): 14103–14111.
- [15] WU Z C, TIAN K T, HUANG T, et al. Hierarchically porous carbons derived from biomasses with excellent microwave absorption performance[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2018, 10(13): 11108.
- [16] LIU P B, GAO S, WANG Y, et al. Metal-organic polymer coordination materials derived Co/N-doped porous carbon composites for frequency-selective microwave absorption[J]. Compos B Eng, 2020, 202: 108406.
- [17] ZHANG Z, ZHAO H Q, GU W H, et al. A biomass derived porous carbon for broadband and lightweight microwave absorption[J]. Sci Rep, 2019, 9(1): 18617.
- [18] LIU Q L, ZHANG D, FAN T. T Electromagnetic wave absorption properties of porous carbon/Co nanocomposites[J]. Appl Phys Lett, 2008, 93(1): 401.
- [19] XU H L, YIN X W, LI M H, et al. Mesoporous carbon hollow microspheres with red blood cell like morphology for efficient microwave absorption at elevated temperature[J]. Carbon, 2018, 132: 343–351.
- [20] TANG Z E, LIM S, PANG Y L, et al. Synthesis of biomass as heterogeneous catalyst for application in biodiesel production: State of the art and fundamental review[J]. Renew Sust Energ Rev, 2018, 92: 235–253.
- [21] 武志红, 蒙真真, 邓悦, 等. 分级多孔碳复合吸波材料研究进展[J]. 硅酸盐学报[J]. 2021, 49(6): 1125–1134.
- WU Zhihong, MENG Zhenzhen, DENG Yue, et al. J Chin Ceram Soc, 2021, 49(6): 1125–1134.
- [22] XI J B, ZHOU E Z, LIU Y J, et al. Wood-based straightway channel structure for high performance microwave absorption[J]. Carbon, 2017, 124: 492–498.
- [23] LEI L J, WANG Y H, ZHANG Z X, et al. Transformations of biomass, its derivatives, and downstream chemicals over ceria catalysts[J]. ACS Catal, 2020, 10(15): 8788–8814.
- [24] XIONG Y, XU L L, YANG C X, et al. Implanting FeCo/C nanocages with tunable electromagnetic parameters in anisotropic wood carbon aerogels for efficient microwave absorption[J]. J Mater Chem A, 2020, 8(36): 18863–18871.
- [25] ZHAO H Q, CHENG Y, MA J N, et al. A sustainable route from biomass cotton to construct lightweight and high-performance microwave absorber[J]. Chem Eng J, 2018, 339: 432–441.
- [26] PAN F, LIU Z C, DENG B W, et al. Lotus leaf-derived gradient hierarchical porous C/MoS₂ morphology genetic composites with wideband and tunable electromagnetic absorption performance[J]. Nanomicro Lett, 2021, 13(1): 43.
- [27] CHENG Y, ZHAO H Q, LV H L, et al. Lightweight and flexible cotton aerogel composites for electromagnetic absorption and shielding applications[J]. Adv Electron Mater, 2019, 6(1): 1900796.
- [28] WU Z H, MENG Z Z, YAO C, et al. Rice husk derived hierarchical porous carbon with lightweight and efficient microwave absorption[J]. Mater Chem Phys, 2022, 275: 125246.
- [29] ZHANG H J, LI H L, LI X T, et al. Influence of pyrolyzing atmosphere on the catalytic activity and structure of Co-based catalysts for oxygen reduction reaction[J]. Electrochim Acta, 2014, 115: 1–9.
- [30] 丁丽丽. 生物质基碳材料的制备及性能研究[D]. 吉林: 吉林大学; 2014.
- DING Lili. Preparation and characterization of carbon materials produced from biomass (in Chinese, dissertation). Jilin: Jilin University, 2014.
- [31] ZHOU X F, JIA Z R, FENG A L, et al. Dependency of tunable electromagnetic wave absorption performance on morphology-controlled 3D porous carbon fabricated by biomass[J]. Compos Commun, 2020, 21(14): 100404.
- [32] GUO Z Z, REN P G, ZHANG F D, et al. Magnetic coupling N self-doped porous carbon derived from biomass with broad absorption bandwidth and high-efficiency microwave absorption[J]. J Colloid Interface Sci, 2022, 610: 1077–1087.
- [33] SUN X X, WANG Z, WANG S S, et al. Ultrabroad-band and low-frequency microwave absorption based on activated waxberry metamaterial[J]. Chem Eng J, 2021, 422: 130142.
- [34] NAN H Y, LUO F, JIA H Y, et al. The effect of temperature on structure and permittivity of carbon microspheres as efficient absorbent prepared by facile and large-scale method[J]. Carbon, 2021, 185: 650–659.
- [35] LI F Y, XIA H, NI Q Q. Egg-white-derived magnetic carbon flakes with enhanced microwave absorption properties[J]. Synth Met, 2021, 278(39): 116827.
- [36] ZHANG X, CAI L, XIANG Z, et al. Hollow CuS microflowers anchored porous carbon composites as lightweight and broadband microwave absorber with flame-retardant and thermal stealth functions[J]. Carbon, 2021, 184: 514–525.
- [37] LIU T S, LIU N, GAI L X, et al. Hierarchical carbonaceous composites with dispersed Co species prepared using the inherent nanostructural platform of biomass for enhanced microwave absorption[J]. Microporous Mesoporous Mater, 2020, 302: 110210.
- [38] ZHAO H Q, CHENG Y, LV H L, et al. A novel hierarchically porous magnetic carbon derived from biomass for strong lightweight microwave absorption[J]. Carbon, 2019, 142: 245–253.
- [39] QIANG R, FENG S B, CHEN Y, et al. Recent progress in biomass-derived carbonaceous composites for enhanced microwave absorption[J]. J Colloid Interface Sci, 2022, 606: 406–423.
- [40] HOU C X, CHENG J Y, ZHANG H B, et al. Biomass-derived carbon-coated WS₂ core-shell nanostructures with excellent electromagnetic absorption in C-band[J]. Appl Surf Sci, 2022, 577: 151939.
- [41] TIAN Y, ESTEVEZ D, WEI H J, et al. Chitosan-derived carbon

- aerogels with multiscale features for efficient microwave absorption[J]. Chem Eng J, 2021, 421: 129781.
- [42] PEYMANFAR R, GHORBANIAN-GEZAFORODI S. Functionalized carbonized monarch butterfly wing scales (FCBW) ornamented by β -Co(OH)₂ nanoparticles: an investigation on its microwave, magnetic, and optical characteristics[J]. Nanotechnology, 2021, 32(19): 195201.
- [43] WANG H Y, WU X F, WANG Q Y, et al. NiO nanosheets on pine pollen-derived porous carbon: Construction of interface to enhance microwave absorption[J]. J Mater Sci Mater Electron, 2020, 27(3): 25656–25667.
- [44] HAGHIGHI MOOD S, HOSSEIN GOLFESHAN A, TABATABAEI M, et al. Lignocellulosic biomass to bioethanol, a comprehensive review with a focus on pretreatment[J]. Renew Sust Energ Rev, 2013, 27: 77–93.
- [45] 陈光, 陈四季, 唐珊珊, 等. 木质纤维素基生物质炭材料研究进展与展望. 吉林农业大学学报[J]. 2018, 40(4): 416–420.
- CHEN Guang, CHEN Siji, TANG Shanshan, et al. J Jilin Agricult Univ (in Chinese), 2018, 40(4): 416–420.
- [46] ASLAM M A, DING W, REHMAN S U, et al. Low cost 3D bio-carbon foams obtained from wheat straw with broadened bandwidth electromagnetic wave absorption performance[J]. Appl Surf Sci, 2021, 543: 148785.
- [47] SATYAMURTHY P, JAIN P, BALASUBRAMANYA R H, et al. Preparation and characterization of cellulose nanowhiskers from cotton fibres by controlled microbial hydrolysis[J]. Carbohydr Polym, 2011, 83(1): 122–129.
- [48] WEI Y, LIU H J, LIU S C, et al. Waste cotton-derived magnetic porous carbon for high-efficiency microwave absorption[J]. Compos Commun, 2018, 9: 70–75.
- [49] WANG S P, LI Q S, HU K, et al. A facile synthesis of bare biomass derived holey carbon absorbent for microwave absorption[J]. Appl Surf Sci, 2020, 544: 148891.
- [50] DI X C, WANG Y, LU Z, et al. Heterostructure design of Ni/C/porous carbon nanosheet composite for enhancing the electromagnetic wave absorption[J]. Carbon, 2021, 179: 566–578.
- [51] HU P T, DONG S, LI X T, et al. A low-cost strategy to synthesize MnO nanorods anchored on 3D biomass-derived carbon with superior microwave absorption properties[J]. J Mater Chem C, 2019, 7(30): 9219–9228.
- [52] JI C, LIU Y, XU J, et al. Enhanced microwave absorption properties of biomass-derived carbon decorated with transition metal alloy at improved graphitization degree[J]. J Alloys Compd, 2022, 890: 161834.
- [53] GU J J, WANG Z, SU H L, et al. Morphology genetic materials templated from nature species[J]. Mater China, 2015, 27(3): 464–478.
- [54] FAN Y Q, LI Y H, YAO Y L, et al. Hierarchically porous carbon sheets/Co nanofibers derived from corncobs for enhanced microwave absorbing properties[J]. Appl Surf Sci, 2020, 534: 147510.
- [55] ZHAO H Q, CHENG Y, ZHANG Z, et al. Biomass-derived graphene-like porous carbon nanosheets towards ultralight microwave absorption and excellent thermal infrared properties[J]. Carbon, 2021, 173: 501–511.
- [56] PANG X, YE L D, LI X J, et al. Magnetic core-shell structure *in-situ* encapsulated in bamboo-derived carbon skeleton for efficient microwave absorption[J]. J Alloys Compd, 2021, 888: 161510.
- [57] WANG Y Y, ZHOU Z H, ZHU J L, et al. Low-temperature carbonized carbon nanotube/cellulose aerogel for efficient microwave absorption [J]. Compos B Eng, 2021, 220: 108985.
- [58] GUO L, AN Q D, XIAO Z Y, et al. Constructing stacked structure of S-doped carbon layer encapsulated MoO₂ NPs with dominated dielectric loss for microwave absorption[J]. ACS Sustain Chem Eng, 2019, 7(7): 19546–19555.
- [59] SAGHATFOROUSH L A, SANATI S, HASANZADEH M. Synthesis, characterization and electrochemical properties of Co₃O₄ nanostructures by using cobalt hydroxide as a precursor[J]. Res Chem Intermed, 2015, 41(7): 4361–4372.
- [60] XU R X, XU D W, ZENG Z, et al. CoFe₂O₄/porous carbon nanosheet composites for broadband microwave absorption[J]. Chem Eng J, 2022, 427: 130796.
- [61] XIE S, JI Z J, ZHU L C, et al. Recent progress in electromagnetic wave absorption building materials[J]. J Build Eng, 2020, 27: 100963.
- [62] LIU W W, LI H, ZENG Q P, et al. Fabrication of ultralight three-dimensional graphene networks with strong electromagnetic wave absorption properties[J]. J Mater Chem A, 2015, 3(7): 3739–3747.
- [63] QIAO M T, LEI X F, MA Y, et al. Application of yolk-shell Fe₃O₄@N-doped carbon nanochains as highly effective microwave-absorption material[J]. Nano Res, 2018, 11(3): 1500–1519.
- [64] ZENG X J, CHENG X Y, YU R H, et al. Electromagnetic microwave absorption theory and recent achievements in microwave absorbers[J]. Carbon, 2020, 168: 606–623.
- [65] ZHANG Y, WANG B C, NIE A, et al. Carbonaceous photonic crystals prepared by high-temperature/hydrothermal carbonization as high-performance microwave absorbers[J]. J Mater Sci, 2019, 54(11): 14343–14353.
- [66] ZHOU X F, JIA Z R, FENG A L, et al. Construction of multiple electromagnetic loss mechanism for enhanced electromagnetic absorption performance of fish scale-derived biomass absorber[J]. Compos B Eng, 2020: 107980.
- [67] CHE R C, PENG L M, DUAN X F, et al. Microwave absorption enhancement and complex permittivity and permeability of Fe encapsulated within carbon nanotubes[J]. Adv Mater, 2004, 16(5): 401–405.
- [68] WU Z C, JIN C, YANG Z Q, et al. Integrating hierarchical interfacial polarization in yeast-derived Mo₂C/C nanoflower/microsphere nanoarchitecture for boosting microwave absorption performance[J]. Carbon, 2022, 189: 530–538.
- [69] LIU L Y, YANG S, HU H Y, et al. Lightweight and efficient microwave-absorbing materials based on loofah-sponge-derived hierarchically porous carbons[J]. ACS Sustain Chem Eng, 2019, 7(1): 1228–1238.
- [70] LIU W, TAN S J, YANG Z H, et al. Hollow graphite spheres embedded in porous amorphous carbon matrices as lightweight and low-frequency microwave absorbing material through modulating dielectric loss[J]. Carbon, 2018, 138: 143–153.
- [71] REHMAN S, WANG J M, LUO Q H, et al. Starfish-like C/CoNiO₂ heterostructure derived from ZIF-67 with tunable microwave

- absorption properties[J]. Chem Eng J, 2019, 373: 122–130.
- [72] GAO S, YANG S H, WANG H Y, et al. Excellent electromagnetic wave absorbing properties of two-dimensional carbon-based nanocomposite supported by transition metal carbides Fe_3C [J]. Carbon, 2020, 162: 438–444.
- [73] ZHU T, CHANG S C, SONG Y F, et al. Novel PVP-encapsulated $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{rGO}$ composites with controllable electromagnetic wave absorption performance[J]. Chem Eng J, 2019, 373: 755–766.
- [74] LIU P B, GAO S, WANG Y, et al. Core-shell $\text{CoNi}@$ Graphitic carbon decorated on B,N-Co doped hollow carbon polyhedrons toward lightweight and high-efficiency microwave attenuation[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2019, 11(28): 25624–25635.
- [75] WANG Y L, YANG S H, WANG H Y, et al. Hollow porous CoNi/C composite nanomaterials derived from MOFs for efficient and lightweight electromagnetic wave absorber[J]. Carbon, 2020, 167: 485–494.
- [76] GUAN H T, WANG H Y, ZHANG Y L, et al. Microwave absorption performance of $\text{Ni}(\text{OH})_2$ decorating biomass carbon composites from jackfruit peel[J]. Appl Surf Sci, 2018, 447: 261–268.
- [77] WU F, YANG K, LI Q, et al. Biomass-derived 3D magnetic porous carbon fibers with a helical/chiral structure toward superior microwave absorption[J]. Carbon, 2021, 173: 918–931.
- [78] WANG Y, GAO X, ZHOU H W, et al. Fabrication of biomass-derived carbon decorated with NiFe_2O_4 particles for broadband and strong microwave absorption[J]. Powder Technol, 2019, 345: 370–378.
- [79] WANG H G, MENG F B, LI J Y, et al. Carbonized design of hierarchical porous carbon/ $\text{Fe}_3\text{O}_4@$ Fe derived from loofah sponge to achieve tunable high-performance microwave absorption[J]. ACS Sustain Chem Eng, 2018, 6(9): 11801–11810.
- [80] ZHANG X, DONG Y Y, PAN F, et al. Electrostatic self-assembly construction of 2D MoS_2 wrapped hollow Fe_3O_4 nanoflowers@1D carbon tube hybrids for self-cleaning high-performance microwave absorbers[J]. Carbon, 2021, 177: 332–343.
- [81] YANG X, PANG X N, CAO M, et al. Efficient microwave absorption induced by hierarchical pores of reed-derived ultralight carbon materials[J]. Ind Crops Prod, 2021, 171: 113814.