

生物质衍生多孔碳基吸波材料的吸波机理

武志红¹, 李嘉仪¹, 李 鹏², 齐 珺², 常吉进¹, 牛 丹¹, 任安文¹

(1. 西安建筑科技大学材料科学与工程学院, 西安 710055; 2. 陕西华秦科技实业股份有限公司, 西安 710119)

摘 要: 电磁波技术快速发展带来便利, 也带来了电磁污染和健康威胁, 发展电磁波吸收材料对国家或人民的生存发展至关重要。生物质多孔碳材料由于其超低的密度、大的比表面积、丰富的来源和优异的介电损耗能力, 在电磁波吸收方面显示出巨大的潜力。然而, 人们通过改变生物质碳基复合材料的结构和成分调控其吸波性能的同时, 对于生物质多孔碳材料的吸波机理的关注较为片面, 尚未形成较为完整的体系。文章总结了近几年以生物质多孔碳作为吸波材料的吸波机理, 包括阻抗匹配、界面极化、多次反射与散射、网络结构的导电性、孔隙尺寸调控吸波性能以及磁性介质/生物质衍生多孔碳材料的吸波机理; 提出了在解释吸波性能方面的几个困惑和需要进一步解决的问题; 同时还在生物质多孔碳材料吸波机理的基础上提出了改善生物质多孔碳材料电磁吸收性能的有前景的理论方法。该总结为生物质多孔碳吸波材料的研究, 在理论方面提供较为完善的参考。

关键词: 生物质; 多孔碳; 微波吸收材料; 吸波机理; 有效吸收带宽; 反射损耗

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 0454-5648(2025)01-0161-12

网络出版时间: 2024-11-22



当今, 电磁波技术快速发展, 在给人们带来便利的同时也不可避免的带来电磁污染^[1-3]。首先, 电子设备的电磁波互相干扰^[4]; 其次, 电磁波污染严重的环境会引发白血病、癌症、肿瘤^[5]等灾难性疾病; 此外, 通过降低雷达信号的反射来增加军事装备的“隐身性”是各国在军事领域面临的最重要的问题之一。因此, 设计和开发电磁波吸收材料(EAMs)对于人类生存和国家安全显得尤为重要。随着技术的发展, 越来越多的电磁波吸收材料被人类所开发, 为了跟上技术发展的步伐, 人们对电磁波吸收材料的使用提出了越来越高的要求, 包括重量轻、匹配厚度薄、机械和化学性能稳定、吸收频带宽和吸收效率高等方面。

碳材料由于具有高介电损耗、低密度和优异的化学稳定性而具有广阔的应用前景^[6]。尽管这类材料表现出较为优异的微波吸收能力, 但其一方面受限于复杂的制备工艺^[7], 另一方面其昂贵的前驱体给环境和社会带来了二次危害。因此, 寻找合适的前驱体材料尤为重要。生物质作为一种丰富的可再生资源, 利用其制备的碳材料具有天然的多孔结构

和化学丰富性, 为吸波材料的设计和制备提供了独特的优势^[8]。研究表明, 多孔碳结构不仅能够提供较大的比表面积, 还能够通过调控孔隙结构实现对不同波长电磁波的高效吸收^[9], 最重要的是, 多孔结构可以改善吸波材料的阻抗匹配^[10]。因此, 生物质衍生多孔碳基材料是理想的吸波材料。

目前已有多种类型的生物质衍生多孔碳基吸波材料得到研究, 在此基础上, 研究人员通过改变复合材料的结构和成分尝试调节其吸波性能, 但对于生物质衍生多孔碳基吸波材料的吸波机理的关注较为片面, 未形成较为完整的体系进行说明。基于上述情况, 本文试图对生物质衍生多孔碳基吸波材料的吸波机理进行一次较为全面的阐述, 期望能在后续的研究和实际应用中, 提供理论上的指导意义。

理论上, 电磁波与材料相互作用时, 入射波有 3 种表现形式: 反射、吸收和透射^[11]。对于吸波材料而言, 应尽可能使入射波进入材料内部, 进而通过衰减转化成其他形式的能量。因此, 吸波材料应具备的 2 个基本条件是: 1) 入射电磁波最大限度地进入材料内部, 而不是在其表面就被反射, 即满足阻

收稿日期: 2024-08-19。 修订日期: 2024-09-14。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51974218); 广东省大尺寸陶瓷薄板企业重点实验室开放课题(KFKT2023002); 山西舜王建筑工程有限公司横向项目(20230460); 西安建筑科技大学基础研究基金(JC1406)。

第一作者: 武志红(1974—), 男, 博士, 副教授。

Received date: 2024-08-19. Revised date: 2024-09-14.

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

E-mail: zhihong@xauat.edu.cn

抗匹配; 2) 进入材料内部的电磁波尽可能全部衰减掉, 即满足必要的衰减机制。

1 阻抗匹配

理想的吸波材料应使反射回来的电磁波能量最小, 反射损耗(RL)用来表示材料对电磁波的吸收能力^[12]。根据传输线理论, 可以推导出 RL 的计算公式^[13–14]:

$$RL(\text{dB}) = 20 \lg \left| \frac{z_{\text{in}} - z_0}{z_{\text{in}} + z_0} \right| \quad (1)$$

$$z_{\text{in}} = z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r} \tanh[j(\frac{2\pi f d}{c}) \sqrt{\mu_r \epsilon_r}]} \quad (2)$$

其中: z_0 为常数, 代表自由空间的输入阻抗(377Ω); z_{in} 为吸波材料的输入阻抗; ϵ_r 和 μ_r 分别为复介电常数和复磁导率; c 为光速; f 为微波频率; d 为厚度。因此, 要使 RL 的绝对值最大, z_{in} 和 z_0 在理想条件下应该相等, 由式(2)可知, 应尽可能满足 $\sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} = 1$

即 ϵ_r 和 μ_r 的值越接近, 电磁波的反射越少, 反射损耗越大^[15]。如果对输入阻抗 z_{in} 进行归一化处理, 定义归一化输入阻抗为 $Z_{\text{in}} = z_{\text{in}}/z_0$, 即 $|Z_{\text{in}} - 1| \rightarrow 0$, 这就是所谓的阻抗匹配。

除上述描述方法外, 最近研究人员提出利用 delta 函数来评估电磁波吸收材料阻抗匹配程度^[16], 具体表达如式(3)所示:

$$\Delta = |\sinh^2(kfd) - M| \quad (3)$$

其中: k 和 M 由相对复介电常数和相对复磁导率确定。研究表明, 较小的 Δ 值或较大的接近于零的 ($\Delta < 0.4$) 区域代表良好的阻抗匹配。

阻抗匹配在生物质衍生多孔碳基吸波材料中至关重要。相应的, Lu 等^[17]设计了一种磁性钴纳米颗粒嵌入的多孔碳骨架(MEHs), 该骨架来源于经济生物质。实验中根据六水合硝酸钴含量的变化(0、0.05、0.30、0.50、1.00 g), 多孔碳骨架分别标记为样品 S-0, 样品 S-0.05, 样品 S-0.3, 样品 S-0.5 和样品 S-1.0, 相较于其它样品, 样品 S-1.0 的吸波性能降低的主要原因是阻抗匹配较差。如前所述, $|Z_{\text{in}} - 1|$ 越接近于 0, 表明阻抗匹配性能越好^[9], 对应较好吸波特性。文中具体通过计算 $|Z_{\text{in}} - 1|$ 到零平面的体积占有率($V_{|Z_{\text{in}} - 1|}$)来表征材料的阻抗匹配, 通过计算, $V_{|Z_{\text{in}} - 1|}$ 值从样品 S-0.05 到样品 S-0.5 逐渐减小, 说明阻抗匹配得到了优化; 样品 S-1.0 的阻抗匹配性能恶化, 主要原因是过高的 Co 量会导致多孔结构的

坍塌, 使样品 S-1.0 的比表面积降低; 其次, 样品 S-1.0 表面较高的电导率易形成趋肤效应, 进而影响材料的阻抗匹配, 这是导致电磁波吸收性能恶化的主要原因。在这项工作中可以看出, 设计吸波材料时, 关注其阻抗匹配至关重要。

Wen 等^[18]将废咖啡渣转化为多孔 C/Fe 杂化物(WCG), 并进一步探索了其在宽带和高效微波吸收方面的潜力。样品 WCG-20-750[加入 20% (质量分数)的 $\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2)_3$ 催化剂并在 750°C 碳化]具有多孔结构, 最高碳收率为 55.45% (质量分数)。此外, 样品 WCG-20-750 制备的 C/Fe 杂化物具有优异的微波吸收性能。研究表明, 样品 WCG-0-750 的 Z 值分别约为 0.4 和 1.4~1.6, 由于磁性物质的加入, 样品 WCG-20-750 的 Z 值更接近于 1, 具有最佳的阻抗匹配, 证明电磁波更容易进入材料内部而被衰减。在厚度为 3.0 mm 时, 最小反射损耗可达 -52.86 dB, 有效吸收带宽为 6.40 GHz。表 1 为关注阻抗匹配的生物质衍生多孔碳基复合材料在 2~18 GHz 微波吸收方面的最新研究进展。

表 1 关注阻抗匹配的生物质衍生多孔碳基复合材料在 2~18 GHz 微波吸收方面的最新研究进展

Table 1 Latest research progress on microwave absorption of impedance-matched biomass-derived porous carbon-based composite materials in the range of 2 to 18 GHz

Biomass precursor	Z_{in}	EAB/GHz	RL _{min} /dB	d_m /mm	Ref.
Cotton	0.90–1.10	4.4	-60.0	1.65	[19]
Spinach	0.70	7.3	-62.2	2.71	[20]
Shaddock peel	0.75–1.25	5.8	-29.5	1.70	[21]
Waxberry	0.30–0.50	8.0–40.0	-74.8		[22]
Chitosan	1.00–1.40	X-band	-68.8	5.10	[23]

Z_{in} is normalized input impedance; EAB: Effective absorption bandwidth;

RL_{min}: Minimum reflection loss; d_m : Matching thickness.

2 衰减机制

要实现高的吸收性能, 除了必要的阻抗匹配条件外, 吸波材料的强吸收也是必须强调的另一个重要因素, 衡量吸波材料强吸收的另一指标是衰减常数 α 。 α 越大代表越多的电磁波转化为其他形式的能量被耗散, 即该材料的吸波性能越优异。根据电磁衰减机理, 电磁波吸收材料可以分为磁损耗和介电损耗两类。

磁损耗是指在外加磁场作用下, 材料中的磁性组分对电磁波的耗散而导致的能量损失, 具体来说, 是利用材料的磁化和退磁效应将电磁能转化为热能而产生的能量耗散^[24]。磁损耗通常用复磁导率表

示, 复磁导率由实部和虚部组成, 其中实部表示材料对电磁波的储存能力, 虚部表示材料对电磁波的耗散能力。磁损耗材料主要通过磁滞损耗、畴壁共振损耗、涡流损耗和自然谐振损耗衰减微波能量^[25], 磁滞损耗在弱磁场下可以忽略不计, 畴壁共振损耗通常发生在 MHz 频率范围内, 因此, 在微波频段内, 磁损耗主要指自然谐振损耗和涡流损耗^[26-27]。通过涡流常数(C_0)可评价磁损耗中的主导损耗机制, 一般而言, 若 C_0 在测试频率范围内保持不变, 则涡流损耗将是引起磁损耗的唯一原因。

介电损耗是指在外加电场作用下, 材料中的介电成分对电磁波的耗散而导致的能量损失, 当材料中的极化强度跟不上微波信号的频率时, 就会产生介电损耗^[28]。介电损耗通常用复介电常数来表示, 其中实部(ϵ')表示材料对电磁波的储存能力, 虚部(ϵ'')表示材料对电磁波的耗散能力。介电损耗由导电损耗和极化损耗组成^[29], 对于导电损耗材料, 由于材料的高导电性, 它主要通过将电磁波能量转化为热量来衰减入射微波, 虽然导电损耗对电磁衰减起着关键作用, 但过高的电导率会在介质中引起涡流, 并导致强烈的反射效应, 从而削弱吸收^[30]。对于碳材料而言, 导电损耗在介电损耗中占主导地位。极化损耗包括离子极化、电子极化、偶极子极化和界面极化, 离子极化和电子极化通常发生在频率较高的区域, 偶极子极化是指在外加电场作用下, 材料内部的偶极子在电场的作用下发生定向排列, 但在高频交变电场下, 偶极子不能足够快地重新排列以响应外加电场, 产生偶极子极化, 因此 ϵ' 和 ϵ'' 会开始减小并产生典型的频散行为^[31], 界面极化和相关的弛豫总是出现在非均匀系统中, 界面处空间电荷的积累和不均匀分布将产生一个宏观的电力矩, 可以有效地消耗入射的电磁能量^[32]。弛豫过程可以用 1 个 Cole-Cole 半圆来描述, 这个半圆可以根据 Debye 偶极弛豫来推导, ϵ'' 和 ϵ' 之间的关系描述为^[33]:

$$(\epsilon' - \epsilon_\infty)^2 + (\epsilon'')^2 = (\epsilon_s - \epsilon_\infty)^2 \quad (4)$$

其中: ϵ_s 为静态介电常数; ϵ_∞ 为高频极限下的相对介电常数。如果存在 1 个极化弛豫过程, 则 ϵ'' 对 ϵ' 的曲线将是 1 个半圆, 也称为 Cole-Cole 半圆。

如上所述, 阻抗匹配和衰减机制是吸波材料的基本吸波原理。阻抗匹配机制较为简单, 即尽量使材料的特性阻抗与空气的特性阻抗接近, 但衰减机制包含较多, 例如导电损耗、极化损耗、磁损耗等, 因此, 调控材料的吸波性能以制备性能优异的吸波

材料可重点关注材料的衰减机制, 但要想实现高效吸收, 关注材料的阻抗匹配特性是前提。生物质衍生多孔碳基吸波材料作为一种新型的碳基材料, 其生物质源的应用实现了环保、低成本的要求, 多孔结构在关注阻抗匹配的前提下, 在衰减机制中也做了较多的贡献, 例如, 多孔结构改善了界面极化、多次反射与散射和网络结构的导电性等。

2.1 界面极化

生物质衍生多孔碳基吸波材料的界面极化是指外加磁场在其表面与外部介质相互作用时, 材料内部产生的电荷分布现象。这种现象主要源于多孔碳基吸波材料的特殊结构和表面官能团的极性性质。多孔结构提供了大量微观孔隙, 而表面官能团则赋予材料一定的极性。当这种材料受到外部电场或电磁波作用时, 表面官能团和孔隙结构导致了电荷的非均匀分布, 形成界面极化。界面极化的结果是在材料表面形成电荷极性分布, 从而引发电场效应, 这种电场效应对电磁波有着显著的吸收作用, 尤其在微波和毫米波频段。

Qiu 等^[34]采用核桃壳制备了纳米多孔生物质碳材料, 其经 600 °C 活化 2 h 后, 获得了天然孔径约为 5~10 μm 的多孔碳结构, SEM 照片如图 1a 所示。采用 KOH 对核桃壳进行活化, 则熔融的 KOH 产生足够的刻蚀效果, 形成大量尺寸为几十纳米的介孔, 从而产生了更大的比表面积(736.2 m^2/g)和更丰富的界面。研究表明, 巨大的表面和界面不仅影响了材料的介电常数, 而且在外加电磁场下产生了界面极化和空间电荷极化, 这对微波吸收是非常有利的。材料在 8.88 GHz 处反射损耗最大为 -42.4 dB, 有效吸收带宽为 1.76 GHz, 对应厚度为 2 mm。相比之下, 如图 1b 和图 1c 所示, 非活化样品的比表面积为 435.3 m^2/g , 这一对比凸显了微孔和纳米孔在改善多孔碳材料介电损耗性能方面的作用。对于 ZnCl_2 活化的核桃壳衍生多孔碳中也发现了类似的结果。Wang 等^[35]的研究表明, 用 10 g ZnCl_2 在 600 °C 活化 2 h 后, 产物具有多孔结构, 比表面积为 481.7 m^2/g , 总体积为 0.234 6 cm^3/g 。巨大的比表面积和界面, 以及活化过程中产生的缺陷, 赋予了多孔碳在 2.5 mm 的匹配厚度下宽达 7.2 GHz 的有效吸收带宽。

在另一项研究中, Lou 等^[36]以天然杨树刨花为碳源制备了 Fe_3O_4 /木材复合材料。煅烧前, 材料仅在 17.80 GHz 处出现 -10.13 dB 的反射损耗峰。煅烧后, 研究结果显示材料具有更高的微波吸收性能, 在 10.52 GHz 处的吸收峰为 -26.72 dB, 匹配厚度为

3.15 mm, 有效吸波带宽(EAB)的范围从 5.07 GHz 到 18.00 GHz, 覆盖范围为 12.93 GHz。优异的微波吸收性能中, 磁损耗虽然起了作用, 但因于不同界面之间产生的多重极化也不容忽视。在复合材料的内部, 附着的 Fe_3C 和碳基体之间以及 Fe_3C 和 Fe_3O_4 颗粒之间存在大量的表面和界面, 对 $\text{Fe}_3\text{C}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{C}$ 复合材料的吸波性能有很大贡献。

通过提高生物质衍生多孔碳基吸波材料的比表面积可以带来额外的界面极化, 进而提高材料的吸波性能, 但不能一味的追求高比表面积, 过高的比表面积会使材料发生阻抗失配等问题, 因此, 探寻吸波材料合适的比表面积仍是一大挑战, 其次怎样通过调控多孔结构来优化生物质衍生多孔碳基吸波材料的界面极化效应, 仍需进行进一步的探索。

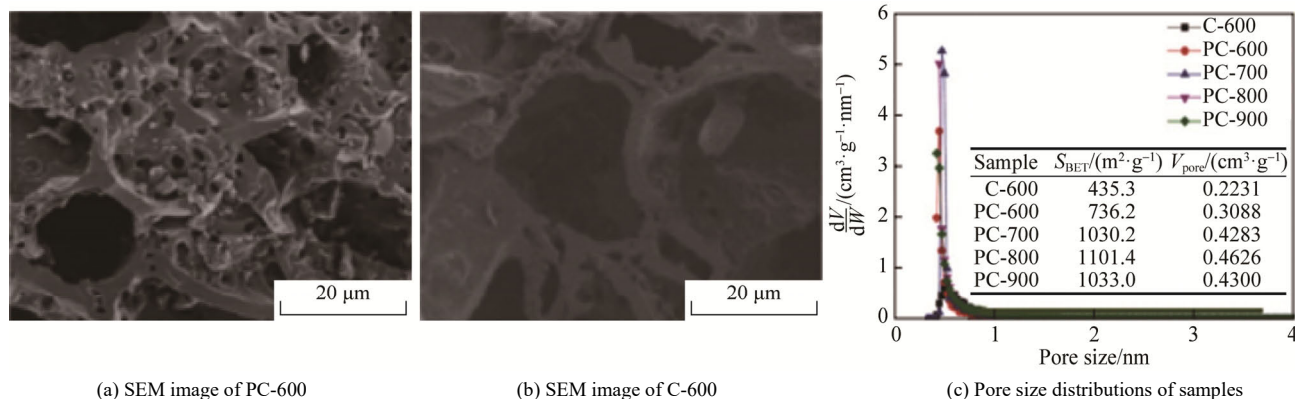


图1 核桃壳衍生碳活化前(C-600)与活化后(PC-600)的SEM照片和孔径分布^[34]

Fig. 1 SEM photos and pore size distribution of walnut shell derived carbon before activation (C-600) and after activation (PC-600)^[34]

2.2 偶极子极化

偶极子极化原理是指这些多孔结构中存在的偶极子分子或原子, 它们在外加电场作用下会发生偶极矩翻转, 从而吸收电磁波能量。简单来说, 当电磁波通过生物质衍生多孔碳基吸波材料时, 材料内部的偶极子分子或原子会对电场产生响应, 从而消耗电磁波的能量, 减弱或阻止其传播。

Mou 等^[37]以生物质椰壳为碳源, 制备了具有优异电磁波吸收性能的生物质衍生硼碳氮(BCN)纳米

片, 并探究了椰壳碳含量对其性能的影响, 如图2所示。所制备的生物质衍生硼碳氮纳米片的 C—N、C—B 和其他缺陷组成的混配配合物可以等效为电偶极子, 提供偶极子极化以增加介电弛豫。同时, 生物质衍生硼碳氮样品中存在多个 Cole-Cole 半圆, 表明存在多个极化弛豫过程, 这是由丰富的偶极子极化引起的。结果表明, 材料在 5.2 GHz 处获得最小反射损耗值为-54.24 dB, EAB 达到 4.16 GHz, 匹配厚度为 1.4 mm。

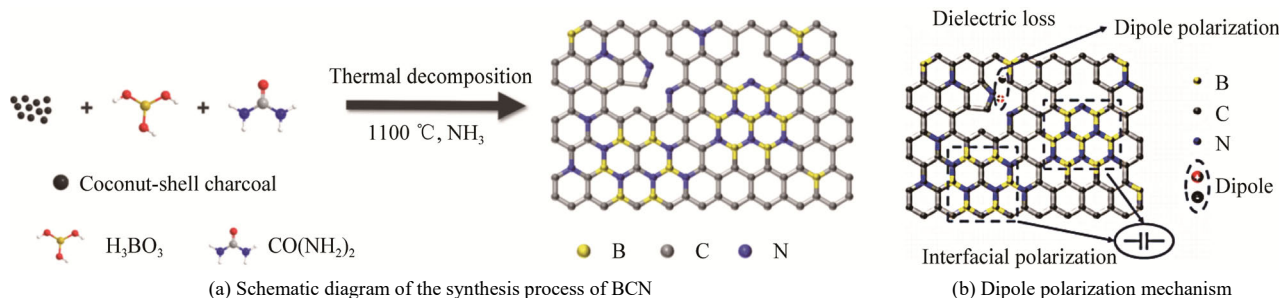
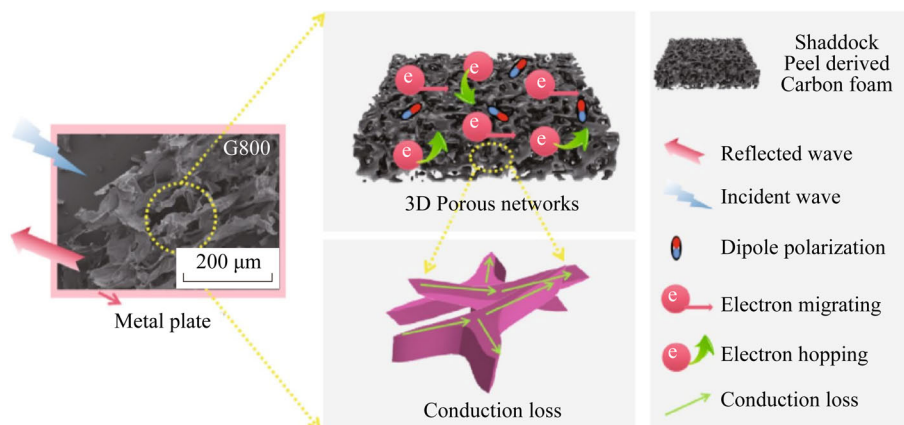


图2 生物质衍生硼碳氮(BCN)纳米片的制备过程及微波吸收机理^[37]

Fig. 2 Preparation process and microwave absorption mechanism of biomass-derived boron carbonitride (BCN) nanosheets^[37]

Gu 等^[21]利用新鲜的柚子皮制备碳气凝胶。如图3所示, 首先, 原料柚子皮中水升华后留下的大量空穴可以增加偶极子的数量, 增强偶极子极化。此外, 样品 G800 (800 °C 退火 2 h) 和样品 G900 在偶极子极化的作用下, 其 ϵ_r -f 曲线在 X 和 Ku 波段出现了几个剧烈的波动, 表现为出色的介电

衰减能力。通过对其吸波机理的具体分析来看, 由偶极子迁移和外电场的相容性引起的强偶极子极化机制和弛豫机制增强其介电损耗性能。结果表明, 柚子皮基碳气凝胶在 X 波段的最小反射损耗值为-29.50 dB, 匹配厚度为 1.7 mm 时, EAB 为 5.80 GHz。

图 3 三维柚子皮衍生碳气凝胶的微波吸收机理^[21]Fig. 3 Microwave absorption mechanism of three-dimensional pomelo peel-derived carbon aerogels^[21]

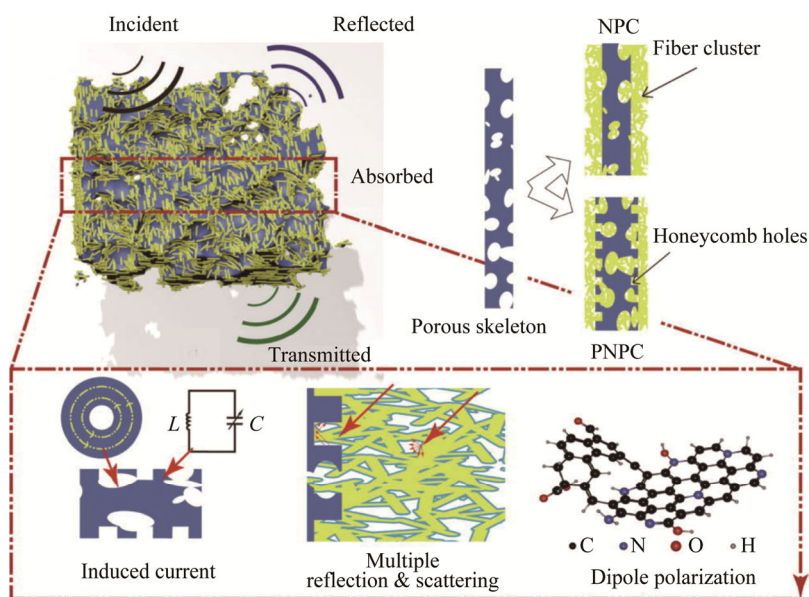
生物质衍生多孔碳基吸波材料的偶极子极化原理在实际应用中可能会面临一些问题。一方面是在低频段的电磁波吸收能力较差,这是因为在低频下,材料内部的偶极子分子或原子的响应速度与电磁波的变化同步进行,减少了损耗,导致吸波效果减弱。此外,材料的制备工艺和结构设计也会影响其偶极子极化效果,不同的制备条件可能会导致偶极子极化效果的差异。另外,材料的稳定性也是需要考虑的问题,特别是在复杂环境或长期使用条件下,材料的性能是否能够稳定保持也是一个挑战。

2.3 多次反射与散射

生物质衍生多孔碳基吸波材料的多次反射与散射效应是指当电磁波进入材料后,会在不同孔隙之间发生多次反射,增加了电磁波在材料中的

传输路径,从而提高了能量的吸收。此外,多孔结构还会导致电磁波的散射,使其在材料内部发生方向的变化。多次反射和散射效应的引入,不仅增加了电磁波与吸波材料之间相互作用的路径,还扩大了吸波材料的有效吸收截面,提高材料的电磁波吸收性能。

吸波材料的多次反射与散射可以发生在多孔、中空、蛋壳等结构中,例如, Liu 等^[38]以鸡蛋清为原料制备了氮原位掺杂多孔碳(NPCs)和碳酸钾修饰的多孔碳(PNPCs),多孔碳的独特形貌继承自蛋白质,包括纤维状团簇、蜂窝状孔洞和多孔骨架。如图 4 所示,多重反射和散射发生在纤维状团簇、蜂窝孔和碳骨架的多重结构中,扩展了电磁波的传播路径,并使电磁波能量得到充分衰减,进而提高材料的吸波性能。

图 4 鸡蛋清衍生 N 掺杂多孔碳的微波吸收机理^[38]Fig. 4 Microwave absorption mechanism of egg white derived N-doped porous carbon^[38]

2.4 网络结构的导电性

生物质衍生多孔碳基吸波材料的网络结构导电性是指材料内部具有连通的碳网络，形成了高度导电的路径。生物质衍生多孔碳基吸波材料独特的多孔结构和碳网络在微观尺度上形成了导电通道，网络结构的导电性源于碳的优良导电性质，其次，多孔结构中的碳骨架允许电子在材料内部快速传输，形成了一种连续、高效的导电路径。这种导电性质使得材料能够有效地吸收电磁波能量，并将其转化为热能，增强其吸波性能。

多孔碳在满足轻质的前提下，通过形成网络结构进而成为良好的载体。例如，Wang 等^[39]利用芦苇花制备高比表面积($1\,712.6\text{ m}^2/\text{g}$)的双峰多孔碳(BPC)材料。多孔碳材料作为良好的硫载体，可以有效地弥补中间电化学反应产物的导电性差这一缺点，具体来说，该材料优异的电化学性能主要归因于特殊的双峰多孔结构。其次，Tian 等^[23]以壳聚糖为前驱体，在 Ar 环境下合成了 N 掺杂碳气凝胶(CCA)，通过调节前驱体浓度(1%~4%，质量分数)和碳化/冷冻温度(650、680、700 °C/20、60、196 °C)提高微波吸收能力。研究表明，最佳碳化温度为 680 °C，XPS 结果证实了 O 和 N 的存在。如图 5 所示，由分层可持续结构构建的 N 掺杂轻量级 3D 导电网络显示出 -68.8 dB 的 RL 值和整个 X 波段的有效带宽，匹配厚度为 5.1 mm。优异的微波吸收性能表明异质原子、缺陷和异质界面在调节极化损耗方面发挥了重要作用，更重要的是，材料形成的导电网络和共轭结构调节了所制备样品的电导损耗能力。

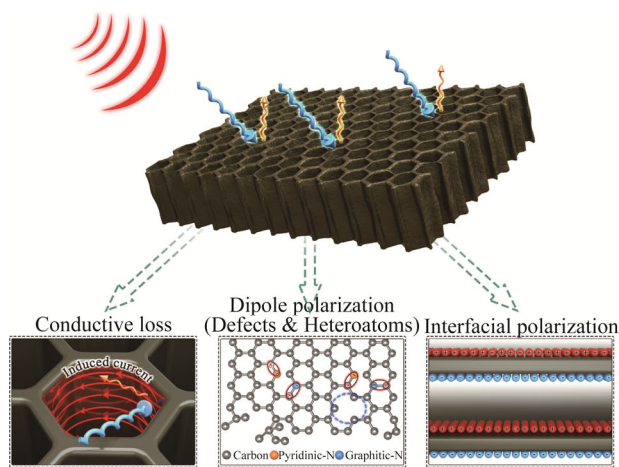


图 5 壳聚糖衍生碳气凝胶的微波吸收机理^[23]

Fig. 5 Microwave absorption mechanism of chitosan-derived carbon aerogels^[23]

生物质衍生多孔碳基吸波材料的网络结构在其电导损耗方面有显著的优势，可以为材料带来优异的吸波性能，但仍存在制备难度较大、稳定性较差等问题，其次不同的合成条件和原材料可能导致结构的变化，影响导电网络的性能。因此，仍需研究人员进行进一步的探索。

3 结构及成分调控

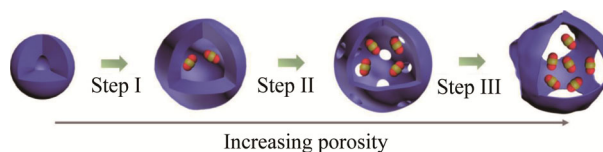
3.1 孔隙尺寸调控

生物质衍生多孔碳基材料通常具有复杂的孔隙结构，包括微米级和纳米级孔隙，孔隙尺寸的调控对于电磁波吸收性能至关重要。在多孔结构中，不同尺寸的孔隙可以与不同频率的电磁波相互作用，通过合理设计和调控孔隙尺寸，可以实现对特定频率范围内电磁波的高效吸收。纳米级孔隙通过减少材料的有效极化能力、增加界面效应和限制载流子迁移等方式，显著降低材料的介电常数。微米级孔隙的尺寸通常与某些电磁波的波长相近，当电磁波入射到具有微米级孔隙的材料表面时，这些孔隙会作为散射中心，导致电磁波在孔隙内多次反射和散射，扩展了电磁波的传输路径，提高电磁波衰减能力。因此，调控生物质衍生多孔碳基吸波材料的孔隙结构是一种有效的手段，可用于定制化吸波材料，满足对不同频率范围内电磁波吸收的需求。

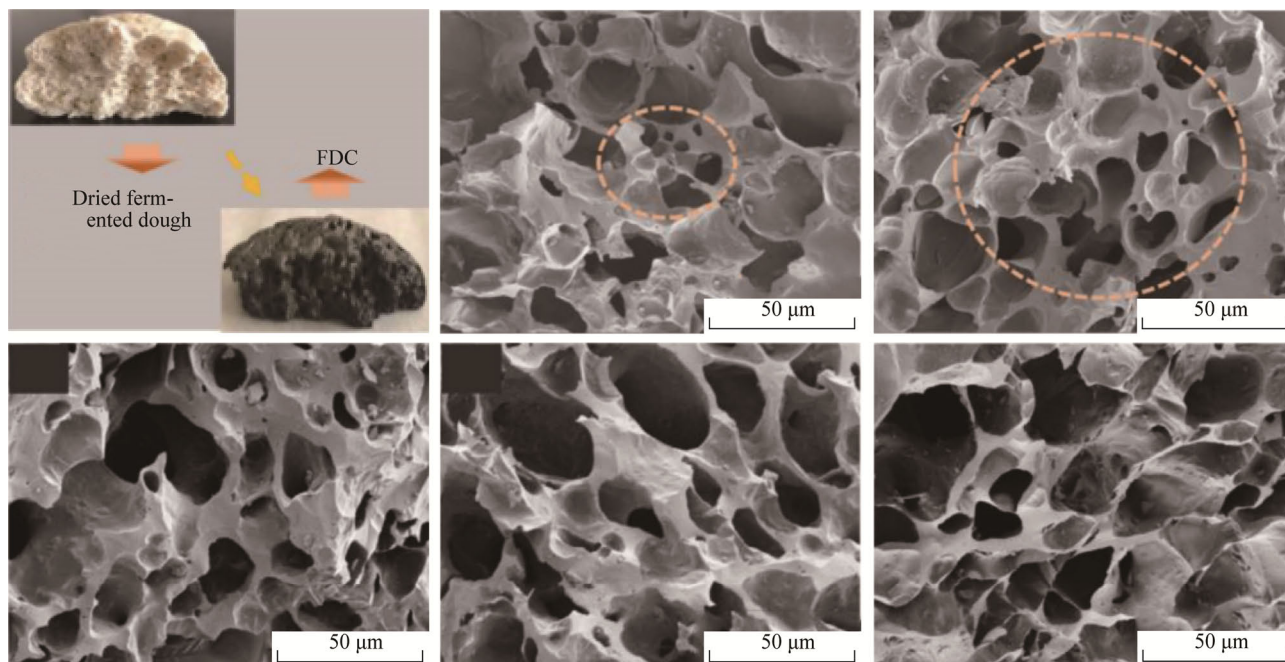
通过调整孔径的均匀程度可以调控材料的吸波性能。例如，Zhang 等^[40]利用虾壳制备的多孔材料，通过改变反应条件显示出不同的孔隙，具有多层孔隙的虾壳经过热解活化后，其孔隙结构更加有序均匀，具有良好的吸波性能，通过改变 KOH 的用量，可以同步调整孔的大小和分布，从 50 nm 到 2.39 μm 。结果表明，最佳样品(标记为 HPC-1)具有良好的衰减常数和阻抗匹配。具体分析，HPC-1 具有均匀的孔径和相对适中的比表面积，从而使材料具有丰富的极化和弛豫，增强了电磁波的吸收，当孔径过大或比表面积过高时，吸波性能下降。在多孔材料孔径均匀的基础上，还可以通过调整平均孔径的大小来提高材料的吸波性能。例如，Zhao 等^[41]以小麦粉面团为原料，采用简易生物质发酵法合成了一系列具有不同孔结构的分级多孔碳材料。如图 6 所示，通过逐渐增加发酵时间，贝壳状空腔逐渐演变为微米级的大孔通道，且孔的数量和尺寸同步增加，其中样品 F15 (发酵时间: 15 min)的平均孔径为 2.99 nm，样品 F30 为 3.32 nm，样品 F50 为 3.38 nm，样品 F70 为 3.44 nm，样品 F90 为 4.07 nm。研究表明，材料的吸波性能随着发酵时

间的增加而增加, 在发酵时间为 50 min 时达到最大值, 然后随着发酵时间的增加而降低, 这是由于衰减常数和阻抗匹配之间的权衡导致的。结果表明, 对应 $RL_{\min}$ 的匹配厚度从样品 F15 的 4.95 mm 逐渐减小到

样品 F70 的 1.35 mm, 通过对比发现, 样品 F50 在 2.50 mm 处实现了 -52.0 dB 的强吸收, 仅在 1.55 mm 处实现了 4.6 GHz 的有效吸收带宽。这项工作有助于更深刻地理解孔结构对材料介电性能的影响。



(a) Evolution mechanism of pore structure in fermented dough



(b) Schematic diagrams of dough before and after carbonization and SEM images of dough with different fermentation times

图 6 发酵面团衍生碳(FDC)的微观结构^[41]

Fig. 6 Microstructure diagram of fermented dough derived carbon (FDC)^[41]

一般而言, 研究人员通过最小反射损耗和有效吸收带宽来评价吸波材料的性能, 随着科技的进步, 人们追求通过调控吸波材料的孔径使其对不同波段的电磁波进行吸收。因此, 怎样调整吸波材料的孔径使其对不同波段的电磁波进行吸收仍是一大挑战。

3.2 磁性组分掺杂

前期研究人员对生物质衍生多孔碳基吸波材料进行了大量研究, 研究结果表明, 传统的碳基材料由于具有较高的介电损耗和轻质等特点, 对电磁波吸收领域贡献较大, 但存在致命的缺陷, 即过高的介电损耗与较低的磁损耗会形成阻抗失配, 使电磁波还未进入材料就在其表面进行反射, 吸收效率大打折扣。因此, 引入磁性组分不仅可以使材料形成良好的阻抗匹配, 其次还能给材料带来更多的界面,

形成界面极化。目前已经报道了不同类型的磁性介质/生物质衍生多孔碳材料, 包括磁性金属和金属氧化物。相关研究表明, 非磁性生物质衍生多孔碳基吸波材料的吸波机理如上所述, 因此, 该部分仅对磁性介质/生物质衍生多孔碳基吸波材料的吸波机理进行描述。

作为典型的磁性金属, Fe、Co、Ni 及其氧化物常被用作磁性介质材料, 以优化生物质衍生碳基复合材料的阻抗匹配性能、界面极化性能和磁导率, 微波吸收能力相较于纯碳有显著的增强。表 2 总结了具有优异微波吸收性能的典型磁性金属/生物质衍生多孔碳基复合材料。Zhao 等^[42]以大米为生物质源, 六水合氯化镍为镍源, 制备表面有 Ni 颗粒修饰的磁性多孔 Ni/C 复合材料。其中 Ni 纳米颗粒会产生磁响应, 且随着 Ni 含量的增加, 材料的饱和磁化

强度也在增加。一方面由于磁性组分会引起材料的自然共振和交换共振,另一方面,强烈的界面极化和互连的导电网络极大地促进了电磁能量的衰减。当 KOH 与 Ni^{2+} 处理的大米的质量比为 1:1 时,磁性碳在 2~18 GHz 的频率范围内显示出 -52 dB 的吸收峰,匹配厚度仅为 1.5~2.0 mm。除此之外,研究人员以废旧棉花为生物质源,硝酸镍溶液为镍源,通过简单的碳热还原过程,镍离子被还原为镍纳米颗粒,棉花被转化为碳^[43]。棉纤维中的多孔结构被证明来源于硝酸镍的热分解。由于材料在高频下具有涡流损耗,当制备的磁性多孔碳的填料含量为 10% (质量分数),吸波材料的匹配厚度为 1.9 mm 时,在 15.8 GHz 处的最小反射损耗达到 -40.5 dB,吸收带宽覆盖了 2~18 GHz 的频率范围。以棉花和稻壳为生物质前驱体的 Co/生物质衍生多孔碳基复合材料的微波吸收表现出相似的结果^[19,44],与纯生物质衍生多孔碳相比表现出优异的微波吸收性能。其他关于 Ni、Co、Fe 修饰的生物质衍生多孔碳基材料的研究表明,具有磁性金属颗粒的生物质衍生多孔碳基材料能够表现出优异的微波吸收性能。

将磁性金属粒子引入到生物质衍生多孔碳基体中,提高了复合材料的磁损耗,产生了多重损耗机制。优异的电磁波吸收性能归因于以下几点:首先,磁性金属粒子的自然共振、涡流共振和交换共振效应增加了吸波材料的磁损耗,优化了阻抗匹配性能;其次,均匀分散的磁性金属颗粒与多孔碳之间形成的大量异质界面增强了界面极化效应。

除磁性金属颗粒外,磁性金属氧化物是另一种潜在的微波吸收材料。 NiO 、 Fe_3O_4 和 Co_3O_4 等金属氧化物不仅有利于改善阻抗匹配,而且会增强极化和磁损耗能力。表 3 总结了具有优异微波吸收性能的典型磁性金属氧化物/生物质衍生多孔碳基复合材料。在众多金属氧化物种类中, Fe_3O_4 因其高化学稳定性、适中的饱和磁化强度和高热稳定性而受到特别关注^[45]。Wang 等^[46]以丝瓜络为碳源,制备了 Fe_3O_4 /生物质衍生多孔碳基复合材料。由于 KOH 在活化过程中的刻蚀作用,得到多孔结构碳材料,其中 Fe_3O_4 纳米颗粒被锚定在多孔网络的表面。多孔碳基体和 Fe_3O_4 纳米颗粒的协同效应极大地促进了电磁波的散射和多次反射。此外, Fe_3O_4 的引入带来了自然共振和涡流损耗,进一步增加了材料的微波吸收性能。结果表明, Fe_3O_4 /生物质衍生多孔碳基复合材料在厚度为 2 mm 时,在 17 GHz 处显示出 -32 dB 的最小吸收峰,EAB 为 4.4 GHz。其次,该

研究还表明,当煅烧温度进一步增加到 600 °C 时,由于碳基体对 Fe_3O_4 的还原,出现了 Fe 纳米颗粒,进一步增加了材料的磁损耗。同时,碳基体与 Fe 和 Fe_3O_4 之间的界面急剧增加,界面以及多孔结构产生的大比表面积为界面极化和空间电荷极化提供了大量的活性位点,这种极化在提高 Fe_3O_4 @Fe/C 复合材料的微波吸收中起着至关重要的作用。类似的结果在 Feng 等^[47]的研究中也有发现。

金属氧化物/生物质衍生多孔碳基吸波材料的吸波机理与磁性颗粒/生物质衍生多孔碳基吸波材料较为相似,带来额外的磁损耗和界面极化的同时,优化了阻抗匹配。但金属氧化物相较于磁性颗粒存在优势,研究人员可以通过改善金属氧化物/生物质衍生多孔碳基吸波材料的煅烧温度,使碳基体对金属氧化物进行还原,进而使材料中出现磁性颗粒来改善复合材料的吸波性能。磁性生物质衍生多孔碳基复合吸波材料由于其简单、低成本的合成方法和显著的电磁特性,可以作为高效微波吸收剂的一个有力候选者。然而,尽管在制备磁性生物质衍生多孔碳基复合吸波材料方面已经做出了许多努力,但不可避免的问题是,大多数磁性纳米颗粒容易聚集氧化,从而导致磁性和分散性的丧失。

表 2 磁性金属/生物质衍生多孔碳基复合材料在 2~18 GHz 微波吸收方面的最新研究进展

Table 2 Latest research progress on microwave absorption of magnetic metal/biomass-derived porous carbon-based composite materials in the range of 2 to 18 GHz

Biomass precursor	Combined absorbent	EAB/GHz	RL _{min} /dB	d _m /mm	Ref.
Cotton	Ni	7.1	-40.5	1.90	[43]
Cotton	Co	4.4	-51.2	1.65	[19]
Corn cob	Co	6.5	-64.5	2.60	[48]
Rice husk	Fe	3.6	-23.9	1.60	[44]
Rice	Ni	5.0	-52.0	1.68	[42]

表 3 磁性金属氧化物/生物质衍生多孔碳基复合材料在 2~18 GHz 微波吸收方面的最新研究进展

Table 3 Latest research progress on microwave absorption of magnetic metal oxides/biomass-derived porous carbon-based composite materials in the range of 2 to 18 GHz

Biomass precursor	Combined absorbent	EAB/GHz	RL _{min} /dB	d _m /mm	Ref.
Dopamine	Fe_3O_4	3.5	-50.8	1.50	[49]
Pine pollen	NiO	4.1	-50.9	2.80	[50]
Collagen fiber	Fe_3O_4	5.4	-36.0	2.00	[51]
Sisal fiber	Fe_3O_4	4.3	-48.6	2.50	[52]
Teak wood	MnO	4.7	-51.2	2.51	[53]

4 结论与展望

4.1 结论

本文对近年来具有代表性的生物质衍生多孔碳基吸波材料的吸波机理进行介绍和总结。

总体而言, 阻抗匹配和强衰减是吸波材料应遵循的基本机理。自由空间的阻抗与材料的输入阻抗越接近, 阻抗匹配程度越高, 进入材料的电磁波越多, 即满足阻抗匹配是吸波材料的前提条件。在阻抗匹配的基础上, 电磁波主要依靠各种衰减机制进行损耗或能量转化。根据衰减机理, 衰减机制主要分为介电损耗和磁损耗, 分别指在外加电场或磁场作用下, 材料中的介电或磁性成分对电磁波的耗散而导致的能量损失, 其他衰减机制的目的是改善材料的介电损耗或磁损耗, 进而优化材料的吸波性能。首先, 提高生物质衍生多孔碳基吸波材料的比表面积可以带来额外的界面极化, 改善材料的吸波性能; 其次, 多孔结构可以增加电磁波反射和散射, 扩大吸波材料的有效吸收截面, 提高电磁波吸收性能。再次, 生物质衍生多孔碳基材料通常具有微孔和介孔, 通过调整使孔隙的孔径更加均匀可以调控材料的吸波性能, 在此基础上, 还可以通过调整平均孔径的大小来提高材料的吸波性能。

此外, 单组分碳材料很难完全满足电磁波吸收材料的所有性能要求, 碳材料过高的介电损耗与较低的磁损耗造成阻抗失配。因此, 引入磁性组分不仅可以使材料形成良好的阻抗匹配, 带来更多的界面, 产生更多的界面极化, 还能给材料带来磁损耗, 提高吸波性能。

4.2 展望

尽管生物质衍生多孔碳基吸波材料在实验和理论已经取得了巨大的进步, 凭借其环保、可持续发展特性可进行广泛应用, 但仍存在一些困难和挑战。

1) 导电网络对生物质衍生多孔碳基材料的吸波性能贡献较大, 但仍存在制备难度较大、稳定性较差等问题。不同的合成条件和原材料可能导致结构的变化, 影响导电网络的性能。因此, 仍需研究人员进行进一步的探索。

2) 现有的制备工艺虽可以有效地形成或扩大孔隙结构, 但孔隙参数难以精确调节。同时, 探寻吸波材料合适的比表面积仍是一大挑战, 即怎样通过调控多孔结构来优化生物质衍生多孔碳基吸波材料的界面极化效应。因此, 需要开发和采用更多新

颖的制备方法来优化材料的多孔形态。

3) 对于磁性生物质衍生多孔碳基复合材料来说, 虽已经进行了大量研究来表征其优异的吸波性能, 但磁性组分中大多数磁性纳米颗粒容易聚集氧化, 从而导致磁性和分散性的丧失, 削弱材料的吸波性能。此外, 高温下由于居里温度的影响, 导致磁性消失也是一个重要的课题, 仍需进一步研究。

参考文献:

- [1] 李莹, 刘佳鑫, 王思佳, 等. 多功能镍/锌/氮掺杂多孔碳@还原氧化石墨烯纳米复合材料制备及其防腐吸波性能[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(6): 2040–2056.
LI Ying, LIU Jiaxin, WANG Sijia, et al. J Chin Ceram Soc, 2024, 52(6): 2040–2056..
- [2] HE Y F, LI X Y, LIU D D, et al. Tuning N-doping to balance conductivity and polarization relaxation: A strategy for converting SiO₂ from an electromagnetic wave-transmitting to absorbing material[J]. Appl Surf Sci, 2023, 639: 158151.
- [3] HU K X, WANG H H, ZHANG X, et al. Ultralight Ti₃C₂T_x MXene foam with superior microwave absorption performance[J]. Chem Eng J, 2021, 408: 127283.
- [4] YANG N, LUO Z X, WU G, et al. Superhydrophobic hierarchical hollow carbon microspheres for microwave-absorbing and self-cleaning two-in-one applications[J]. Chem Eng J, 2023, 454: 140132.
- [5] LIU P Z, GAO T D, HE W J, et al. Electrospinning of hierarchical carbon fibers with multi-dimensional magnetic configurations toward prominent microwave absorption[J]. Carbon, 2023, 202: 244–253.
- [6] 武志红, 姚程, 蒙真真, 等. 生物质衍生碳基复合吸波材料的研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(7): 2056–2066.
WU Zhihong, YAO Cheng, MENG Zhenzhen, et al. J Chin Ceram Soc, 2022, 50(7): 2056–2066.
- [7] LUO C J, TANG Y S, JIAO T, et al. High-temperature stable and metal-free electromagnetic wave-absorbing SiBCN ceramics derived from carbon-rich hyperbranched polyborosilazanes[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2018, 10(33): 28051–28061.
- [8] 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 Sustain Energy Rev, 2018, 92: 235–253.
- [9] XU H L, YIN X W, ZHU M, et al. Carbon hollow microspheres with a designable mesoporous shell for high-performance electromagnetic wave absorption[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2017, 9(7): 6332–6341.
- [10] LV H L, LIANG X H, JI G B, et al. Porous three-dimensional flower-like Co/CoO and its excellent electromagnetic absorption properties[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2015, 7(18): 9776–9783.
- [11] MA J R, WANG X X, CAO W Q, et al. A facile fabrication and highly tunable microwave absorption of 3D flower-like Co₃O₄-rGO hybrid-architectures[J]. Chem Eng J, 2018, 339: 487–498.
- [12] MENG F B, WANG H G, HUANG F, et al. Graphene-based microwave absorbing composites: A review and prospective[J]. Compos Part B Eng, 2018, 137: 260–277.
- [13] 俞婷友, 金丹, 尹洪峰, 等. SiC 纤维及其复合材料吸波性能研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(6): 2131–2147.

- YU Tingyou, JIN Dan, YIN Hongfeng, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2024, 52(6): 2131–2147.
- [14] ZHENG X L, FENG J, ZONG Y, et al. Hydrophobic graphene nanosheets decorated by monodispersed superparamagnetic Fe_3O_4 nanocrystals as synergistic electromagnetic wave absorbers[J]. *J Mater Chem C*, 2015, 3(17): 4452–4463.
- [15] SU Q M, ZHONG G, LI J, et al. Fabrication of $\text{Fe}/\text{Fe}_3\text{C}$ -functionalized carbon nanotubes and their electromagnetic and microwave absorbing properties[J]. *Appl Phys A*, 2012, 106(1): 59–65.
- [16] CHEN X T, WU Y, GU W H, et al. Research progress on nanostructure design and composition regulation of carbon spheres for the microwave absorption[J]. *Carbon*, 2022, 189: 617–633.
- [17] LU X K, LI X, ZHU W J, et al. Construction of embedded heterostructures in biomass-derived carbon frameworks for enhancing electromagnetic wave absorption[J]. *Carbon*, 2022, 191: 600–609.
- [18] WEN X, LI C, LIU H, et al. Green carbonization of waste coffee grounds into porous C/Fe hybrids for broadband and high-efficiency microwave absorption[J]. *J Mater Sci Technol*, 2024, 170: 1–10.
- [19] 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.
- [20] WU Z C, TIAN K, HUANG T, et al. Hierarchically porous carbons derived from biomasses with excellent microwave absorption performance[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2018, 10(13): 11108–11115.
- [21] GU W H, SHENG J Q, HUANG Q Q, et al. Environmentally friendly and multifunctional shaddock peel-based carbon aerogel for thermal-insulation and microwave absorption[J]. *Nanomicro Lett*, 2021, 13(1): 102.
- [22] SUN X X, YANG M L, YANG S, et al. Ultrabroad band microwave absorption of carbonized waxberry with hierarchical structure[J]. *Small*, 2019, 15(43): e1902974.
- [23] 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.
- [24] WANG L N, JIA X L, LI Y F, et al. Synthesis and microwave absorption property of flexible magnetic film based on graphene oxide/carbon nanotubes and Fe_3O_4 nanoparticles[J]. *J Mater Chem A*, 2014, 2(36): 14940–14946.
- [25] ESTEVEZ D, QIN F X, QUAN L, et al. Complementary design of nano-carbon/magnetic microwire hybrid fibers for tunable microwave absorption[J]. *Carbon*, 2018, 132: 486–494.
- [26] AHARONI A. Exchange resonance modes in a ferromagnetic sphere[J]. *J Appl Phys*, 1991, 69(11): 7762–7764.
- [27] LIU X G, OU Z Q, GENG D Y, et al. Influence of a graphite shell on the thermal and electromagnetic characteristics of FeNi nanoparticles[J]. *Carbon*, 2010, 48(3): 891–897.
- [28] NAQVI S T A, SINGH C, GODARA S K. Functionalization and synthesis of biomass and its composites as renewable, lightweight and eco-efficient microwave-absorbing materials: A review[J]. *J Alloys Compd*, 2023, 968: 171991.
- [29] WU H J, LAN D, LI B, et al. High-entropy alloy@air@Ni–NiO core-shell microspheres for electromagnetic absorption applications[J]. *Compos Part B Eng*, 2019, 179: 107524.
- [30] 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]. *Compos Part B Eng*, 2021, 207: 108562.
- [31] PHANG S W, HINO T, ABDULLAH M H, et al. Applications of polyaniline doubly doped with p-toluene sulphonic acid and dichloroacetic acid as microwave absorbing and shielding materials[J]. *Mater Chem Phys*, 2007, 104(2–3): 327–335.
- [32] QUAN B, LIANG X H, JI G B, et al. Dielectric polarization in electromagnetic wave absorption: Review and perspective[J]. *J Alloys Compd*, 2017, 728: 1065–1075.
- [33] COLE K S, COLE R H. Dispersion and absorption in dielectrics I. alternating current characteristics[J]. *J Chem Phys*, 1941, 9(4): 341–351.
- [34] QIU X, 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.
- [35] WANG L X, ZHOU P P, GUO Y, et al. The effect of ZnCl_2 activation on microwave absorbing performance in walnut shell-derived nano-porous carbon[J]. *RSC Adv*, 2019, 9(17): 9718–9728.
- [36] LOU Z C, YUAN C L, ZHANG Y, et al. Synthesis of porous carbon matrix with inlaid $\text{Fe}_3\text{C}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ micro-particles as an effective electromagnetic wave absorber from natural wood shavings[J]. *J Alloys Compd*, 2019, 775: 800–809.
- [37] MOU P P, ZHAO J C, WANG G Z, et al. BCN nanosheets derived from coconut shells with outstanding microwave absorption and thermal conductive properties[J]. *Chem Eng J*, 2022, 437: 135285.
- [38] LIU Z L, ZHAO X, XU L L, et al. A novel hierarchically lightweight porous carbon derived from egg white for strong microwave absorption[J]. *Engineering*, 2022, 18: 161–172.
- [39] WANG Z F, ZHANG X M, LIU X L, et al. High specific surface area bimodal porous carbon derived from biomass reed flowers for high performance lithium-sulfur batteries[J]. *J Colloid Interface Sci*, 2020, 569: 22–33.
- [40] ZHANG C, ZHAO K H, LI X A, et al. Natural iron embedded hierarchically porous carbon with thin-thickness and high-efficiency microwave absorption properties[J]. *RSC Adv*, 2020, 10(64): 38989–38999.
- [41] ZHAO H Q, YEOW SEOW J Z, CHENG Y, et al. Green synthesis of hierarchically porous carbons with tunable dielectric response for microwave absorption[J]. *Ceram Int*, 2020, 46(10): 15447–15455.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] FANG J Y, SHANG Y S, CHEN Z, et al. Rice husk-based hierarchically porous carbon and magnetic particles composites for highly efficient electromagnetic wave attenuation[J]. *J Mater Chem C*, 2017, 5(19): 4695–4705.
- [45] LIANG C B, SONG P, MA A J, et al. Highly oriented three-dimensional structures of Fe_3O_4 decorated CNTs/reduced graphene oxide foam/epoxy nanocomposites against electromagnetic pollution[J]. *Compos Sci Technol*, 2019, 181: 107683.
- [46] WANG H G, MENG F B, LI J Y, et al. Carbonized design of hierarchical porous carbon/ Fe_3O_4 @Fe derived from loofah sponge to achieve tunable high-performance microwave absorption[J]. *ACS Sustainable Chem Eng*, 2018, 6(9): 11801–11810.
- [47] FENG A L, JIA Z R, ZHAO Y, et al. Development of $\text{Fe}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ @C composite with excellent electromagnetic absorption performance[J]. *J*

- Alloys Compd, 2018, 745: 547–554.
- [48] FAN Y Q, LI Y H, YAO Y L, et al. Hierarchically porous carbon sheets/Co nanofibers derived from corncofs for enhanced microwave absorbing properties[J]. Appl Surf Sci, 2020, 534: 147510.
- [49] GUO L, GAO S S, AN Q D, et al. Dopamine-derived cavities/Fe₃O₄ nanoparticles-encapsulated carbonaceous composites with self-generated three-dimensional network structure as an excellent microwave absorber[J]. RSC Adv, 2019, 9(2): 766–780.
- [50] 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, 2021, 32(21): 25656–25667.
- [51] WANG X L, HUANG X, CHEN Z R, et al. Ferromagnetic hierarchical carbon nanofiber bundles derived from natural collagen fibers: Truly lightweight and high-performance microwave absorption materials[J]. J Mater Chem C, 2015, 3(39): 10146–10153.
- [52] GUO L, AN Q D, XIAO Z Y, et al. Performance enhanced electromagnetic wave absorber from controllable modification of natural plant fiber[J]. RSC Adv, 2019, 9(29): 16690–16700.
- [53] DONG S, TANG W K, HU P T, et al. Achieving excellent electromagnetic wave absorption capabilities by construction of MnO nanorods on porous carbon composites derived from natural wood via a simple route[J]. ACS Sustainable Chem Eng, 2019, 7(13): 11795–11805.

Development on Wave Absorbing Mechanisms of Biomass-Derived Porous Carbon-Based Wave Absorbing Materials

WU Zhihong¹, LI Jiayi¹, LI Peng², QI Jun², CHANG Jijin¹, NIU Dan¹, REN Anwen¹

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

2. Shaanxi Huaqin Technology Industry Co., Ltd., Xi'an 710119, China)

Extended Abstract

The rapid development of electromagnetic wave technology brings a unprecedented convenience, but leads to some related concerns regarding electromagnetic pollution and associated health risks. Consequently, the development of electromagnetic wave absorption materials becomes crucial for ensuring both survival and safety. Biomass porous carbons (BPCs) can be used as highly promising materials for addressing these challenges due to their unique properties, including ultra-low density, large surface area, abundance of precursors, and exceptional dielectric loss capabilities, showcasing immense potential for electromagnetic wave absorption applications. However, manipulating the absorbing properties of biomass carbon-based composite materials through changes in structure and composition is restricted, and the absorption mechanisms of BPCs materials still remain unclear, due to the absence of a comprehensive framework.

In this review, the absorption mechanism of BPCs materials as absorbers is explored, including impedance matching, interface polarization, multiple reflection and scattering, conductivity of network structure, pore size control to optimize absorption performance, and unique absorption mechanism of magnetic media/ biomass-derived porous carbon materials. Also, several puzzles and unsolved problems of the absorption performance are emphasized, and a further research is needed to solve these uncertainties and deepen the understanding of the electromagnetic wave absorption capacity of BPCs.

In addition, this review proposes a promising theoretical method to enhance the electromagnetic absorption properties of BPCs materials, providing valuable insights and directions for future research work in this field. Despite the considerable progress made in both experimental and theoretical aspects of BPCs materials, some challenges persist. These include difficulties in synthesizing highly conductive networks, challenges in precisely controlling pore parameters, and issues related to the aggregation and oxidation of magnetic nanoparticles in magnetic BPC composites, all of which require further exploration and resolution.

Summary and Prospects The rapid development of electromagnetic wave technology leads to significant conveniences and also concerns electromagnetic pollution and associated health risks. Consequently, the development of electromagnetic wave absorption materials becomes crucial for ensuring survival and safety. Biomass porous carbons (BPCs) can be used as promising materials in this regard due to their unique properties such as ultra-low density, large surface area, abundance of precursors, and excellent dielectric loss capabilities, highlighting their enormous potential for electromagnetic wave absorption applications. However, despite a significant progress in manipulating the absorbing properties of biomass carbon-based composite materials, there is a fragmented understanding of the absorption mechanisms of BPCs materials, necessitating a more comprehensive framework. This review provides a thorough examination of the absorption mechanisms of BPCs materials, encompassing impedance matching, interface polarization, multiple reflections and scattering, the conductivity of network structures, control of pore size for optimizing absorption performance, and the distinctive absorption mechanisms of magnetic media/biomass-derived porous carbon materials. Furthermore, this review gives several challenges for a further exploration. One significant challenge is related to the contribution of conductive networks to the absorption performance of BPCs materials, with some aspects such as difficulties in preparation and poor stability. The precise control of pore parameters and exploration of suitable specific surface areas for optimal interface polarization effects

remain major challenges in material preparation methods. Moreover, the aggregation and oxidation of magnetic nanoparticles in magnetic BPC composites affect their absorption performance, necessitating a further research in this area. Although this review is based on theoretical summaries derived from laboratory results and does not delve into the synthesis processes of the materials, it offers a comprehensive elucidation of the absorption mechanisms of BPC-based absorbing materials. This review strives to guide future research and applications *via* providing insights into cost-effective and high-performance BPC-based absorption materials. Some studies need to contribute to the development of efficient and versatile absorption materials *via* addressing these challenges and advancing the understanding of BPCs' electromagnetic wave absorption capabilities, ultimately mitigating electromagnetic pollution and ensuring public health and safety.

Keywords biomass; porous carbon; microwave absorbing materials; absorption mechanism; effective absorption bandwidth; reflection loss