

简单一步法制备低频高性能椰壳基碳吸波材料

娄宸瑞, 潘虹, 徐丽慧, 李倩, 王渝申, 吴袁浩, 周治翔

(上海工程技术大学纺织服装学院, 上海 201620)

摘要:近年来,随着电磁波技术的应用,电磁污染日益加剧,吸波材料受到广泛关注。本工作以农业废弃物—椰壳为原料,利用碳酸钙(CaCO_3)和氢氧化钾(KOH)的协同造孔能力,经过简单一步炭化法制备了具有丰富孔隙结构和良好吸波性能的椰壳多孔碳(CSPC)。碳酸钙在高温下分解为氧化钙,作为硬模板,构筑出丰富的孔道结构,氢氧化钾的活化作用进一步增强微孔和介孔的形成。探讨了双活化剂比例对多孔碳结构和性能的影响,结果显示,活化剂(CaCO_3 :KOH)比例为1:1条件下,700 °C炭化2 h制备的多孔碳CSPC-1的比表面积为1 089.185 m^2/g ,有丰富发达的孔隙结构,当样品厚度为5 mm、测试频率为5.12 GHz时,反射损耗最小值(RL_{\min})为-45.79 dB,表现出优异的吸波效果。采用简单一步活化炭化法成功制备了性能良好的吸波材料,为高性能吸波材料的制备提供了理论指导,也为椰壳等农副产品的高附加值利用提供了新的思路。

关键词:电磁波吸收;生物质材料;多孔碳;双活化剂

中图分类号:TB34 文献标志码:A 文章编号:0454-5648(2026)04-1370-11

网络出版时间:2026-01-26



随着时代的发展和科技的进步,电磁波应用成为现代社会进步不可或缺的一部分,与此同时其造成的电磁污染也日益严重。严重的电磁污染不仅会给国家安全带来隐患,也会在日常生活中影响人体健康^[1]。因此,研究如何减少电磁污染十分必要,电磁波吸收材料应运而生。理想的吸波材料应具备“轻、薄、宽、强”的特性,这就需要材料具有薄厚度、低重量、宽有效吸收带宽(EAB)以及高反射损耗(RL)^[2]。然而,传统的电磁波吸收材料,如陶瓷、过渡金属及其氧化物受到堆积密度高、化学稳定性和机械性能差的限制^[3]。因此,新型吸波材料成为当前研究重点。其中,碳基复合材料,如碳纳米颗粒、电/磁性颗粒@C分层吸收剂、MOF衍生的多孔碳等,虽具有强电磁波吸收性能,但由于其纳米特性,在复杂结构设计中难以分散且制备过程过于复杂,极大地限制了其实际应用^[4]。

近年来,生物质作为碳源逐渐受到重视。生物质独特的天然微孔结构能在炭化后形成具有高比表面积的分层多孔碳,增强吸波性能^[5],再加上其天

然、易获得的特点,使其作为电磁波吸收原材料有巨大的应用潜力。Fang等^[6]在保留棉纤维内部中空结构的同时,用 $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 作为磁粒源合成棉基电磁波吸收剂,制得PCMT/Co和CMT/Co两种材料。其中,在1.4 mm的匹配厚度下,PCMT/Co的RL为-36.8dB,有效衰减带宽(EAB, $\text{RL} < -10$ dB)为6.7 GHz,而CMT/Co的反射损耗最小值(RL_{\min})达到-31.2 dB, EAB为5.5 GHz; Liu等^[7]以华南地区一种常见的水生植物为原料制备生物质吸波材料,其中700 °C制备的样品在匹配厚度为2 mm、测试频率为11.9 GHz时,有最小反射损耗,其值为-26.0 dB,600 °C制备的样品EAB为4.6 GHz(11.6~16.2 GHz); Gong等^[8]采用硝酸铁溶液处理,在杏仁壳中添加了铁基和铁氧体类物质,所制的吸波材料在热处理温度为1000 °C时, RL_{\min} 为-37.9dB, EAB为7.04 GHz。

椰壳是木质素生物质,含有更高的芳香环结构比例,相比其他生物质,椰壳具有较高的碳含量和多层网络输水结构,炭化后有利于多层孔道结构的形成,而丰富的孔道结构则有利于电磁波的反射和散

收稿日期:2025-09-04。 修订日期:2025-11-06。

基金项目:国家先进印染技术创新中心科研基金项目(2022GCJJ22);上海市自然科学基金项目面上项目(21ZR1426200);上海高校特聘教授岗位计划资助。

第一作者:娄宸瑞(2005—),男,本科生。

通信作者:潘虹(1984—),女,博士,副教授。

Received date: 2025-09-04. Revised date: 2025-11-06.

First author: LOU Chenrui (2005-), male, Undergraduate.

E-mail: 091823111@sues.edu.cn

Correspondent author: PAN Hong (1984-), female, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: crfpanhong@163.com

射^[9]。并且椰壳储量丰富，将其回收制备吸波材料有助于解决电磁污染问题。Huang 等^[10]以椰壳为碳源，将 TiP_2O_7 加载到椰壳衍生碳上，通过溶胶-凝胶工艺和后续热处理获得 $\text{TiP}_2\text{O}_7/\text{C}$ 复合材料，厚度为 2 mm 的 $\text{TiP}_2\text{O}_7/\text{C}$ 复合材料在 15.8 GHz 频率下的 RL_{\min} 为 -32.4dB，有效吸收带宽为 6 GHz；Mishra 等^[11]用经丙酮-甲醇处理的椰壳与环氧树脂复合后进行超声处理，制得的吸波材料在 10 GHz 频率下 RL_{\min} 为 -23.5dB。综上所述，获得较好吸波效果的椰壳基碳吸波材料需要经过较为复杂的加工处理工艺，如何通过简单的工艺获得高效能的吸波材料是目前学者持续关注的问题。

本工作以椰壳为碳源，充分利用椰壳本身的多层网络结构和高碳含量的特点，以氢氧化钾、碳酸钙作为双活化剂，采用简单一步炭化法制备具有高吸波性能的椰壳基碳吸波材料，考察了活化剂的比例对多孔碳材料结构和性能的影响。碳酸钙在高温下分解为氧化钙并且释放二氧化碳，氧化钙颗粒作为硬模板，二氧化碳气体由于扩散作用作为软模板。除此之外，氢氧化钾的活化作用与钾离子掺杂共同作用，协同造就复杂的孔隙结构，这种结构能在提高电磁波吸收性能方面发挥关键作用。双活化剂方法为制备具有复杂三维微/介孔结构的多孔碳材料提供了新的思路。得益于简单的制备特性和椰壳本身的废弃物利用、低成本的特点，采用简单一步炭化法制备出比表面积高、孔容大且孔道结构丰富的材料，为电磁波吸收材料的设计开发提供广泛的思路。

1 实验

1.1 实验材料

椰子壳购自海南文昌琼达椰壳加工有限公司，氢氧化钾(KOH)、碳酸钙(CaCO_3)、盐酸(HCl)、石蜡($\text{C}_{25}\text{H}_{52}$)均购自上海泰坦科技股份有限公司。

1.2 制备多孔碳

将椰子壳加工成 1~2 cm 的小块清洗后，在 80 °C 烘干 24 h，然后用研磨机打磨成椰壳粉，用筛网(筛孔 250~300 μm)过筛。将椰壳粉与碳酸钙和氢氧化钾混合(椰壳粉：碳酸钙：氢氧化钾的质量比分别为 1:1:0.5、1:1:1、1:1:2、1:1:3)，在研磨机中打磨均匀，并干燥处理得到碱化椰壳粉。然后，将碱化椰壳粉放入管式炉中，充满 N_2 后，在 700 °C 炭化 2 h。所得产物用盐酸中和后磁力搅拌 12 h，之后用去离子水洗涤至中性，然后在 80 °C 下

烘干 24 h，得到椰壳多孔炭。椰壳粉：碳酸钙：氢氧化钾的质量比为 1:1:0.5 的条件下得到的炭化产物命名为样品 CSPC-0.5。在相同的命名规则下，将不同的活化剂配比的椰壳多孔炭分别命名为样品 CSPC-0.5、样品 CSPC-1、样品 CSPC-2、样品 CSPC-3。另补充在 700 °C，炭化时间为 2 h，椰壳粉与氢氧化钾的质量比分别为 1:0.5、1:1、1:2、1:3 以及纯椰壳粉制备的 5 组碳材料对照组，分别命名为 CSPC-0.5'，CSPC-1'，CSPC-2'，CSPC-3'，CSPC-0。

1.3 样品表征

吸波性能和相关电磁参数通过矢量网络分析仪(中国电子科技集团公司第四十一研究所，型号 AV 3672B)在 2~18 GHz 范围内进行测试。拉曼光谱由拉曼光谱仪(日本 HORIBA Scientific 公司，型号 HR-800)测试样品的形态和结构。通过场发射扫描电子显微镜(ESEM，德国蔡司公司，JSM-7001F 型，电压 10 kV)观察样品的结构与形貌。通过 X 射线能谱仪(XRD，荷兰 Panalytical 分析仪器公司，X'Pert Pro 型)和 X 射线光电子谱仪(XPS，日本岛津公司，AXIS NOVA 型)分析样品的组成成分。

2 结果与讨论

2.1 形态和结构分析

图 1a 为样品 CSPC-0 的 SEM 照片，可以看出样品 CSPC-0 的孔隙稀少，以椰壳本身的微孔为主；加入等质量的氢氧化钾后，可以看出对椰壳碳的微孔结构有明显改善(图 1b)；再加入等质量的碳酸钙后，椰壳碳的表面孔隙分布更均匀，小孔隙和大孔隙并存，形成多级结构(图 1d)。对比图 1b 和图 1d 可以看出，相较于同时使用氢氧化钾和碳酸钙，样品 CSPC-1' 形成的孔隙过于单一，可以验证氢氧化钾和碳酸钙的协同造孔能力。

从图 1a~图 1f 来看，加入不同氢氧化钾比例的椰壳碳的表面，随着氢氧化钾的使用量增加，其形态逐渐从不规则孔隙变为更密集的蜂窝状结构，直至蜂窝状结构塌陷。其原因在于活化后的氢氧化钾其强腐蚀性会破坏碳骨架，形成密集蜂窝状微孔，当氢氧化钾的比例过高时，导致其腐蚀形成的微孔相互串联合并，最终塌陷成大孔径。

碳酸钙与氢氧化钾在炭化过程中通过以下机制协同造孔：氢氧化钾的加入中和并促进碳酸钙热分解，降低其分解温度，生成中间产物碳酸钾(K_2CO_3)和氢氧化钙 $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ 。随后，碳酸钾高温分解释放

二氧化碳，该气体在碳基质中扩散形成孔隙，并活化碳源以构建微孔和介孔。同时，氢氧化钙分解生成的氧化钙颗粒嵌入碳骨架，作为硬模板支撑孔道结构。高温下，氢氧化钾分解产生的活性氧物种(如 K_2O 与 OH^- 自由基)进一步氧化碳材料，增加孔隙数量并丰富微孔结构。此外，钾离子嵌入碳层，破坏石墨有序性，诱导结构缺陷，从而扩展微孔。最终，通过酸洗去除氧化钙等无机残留，留下由硬模

板塑造的孔道。综上，氧化钙为硬模板，二氧化碳气体作为软模板，氢氧化钾的活化、钾离子掺杂及其对碳酸钙分解的促进共同协作，构建出碳材料中复杂的三维多孔结构。

图 2a 和图 2b 为 77 K 温度下测试样品 CSPC-1 通过 BJH 算法得到的比表面积曲线和孔径分布图。样品 CSPC-1 的比表面积为 $1\ 089.185\text{m}^2/\text{g}$ ，微孔为 $0.395\text{cm}^3/\text{g}$ ，总孔体积为 $0.6367\text{cm}^3/\text{g}$ 。

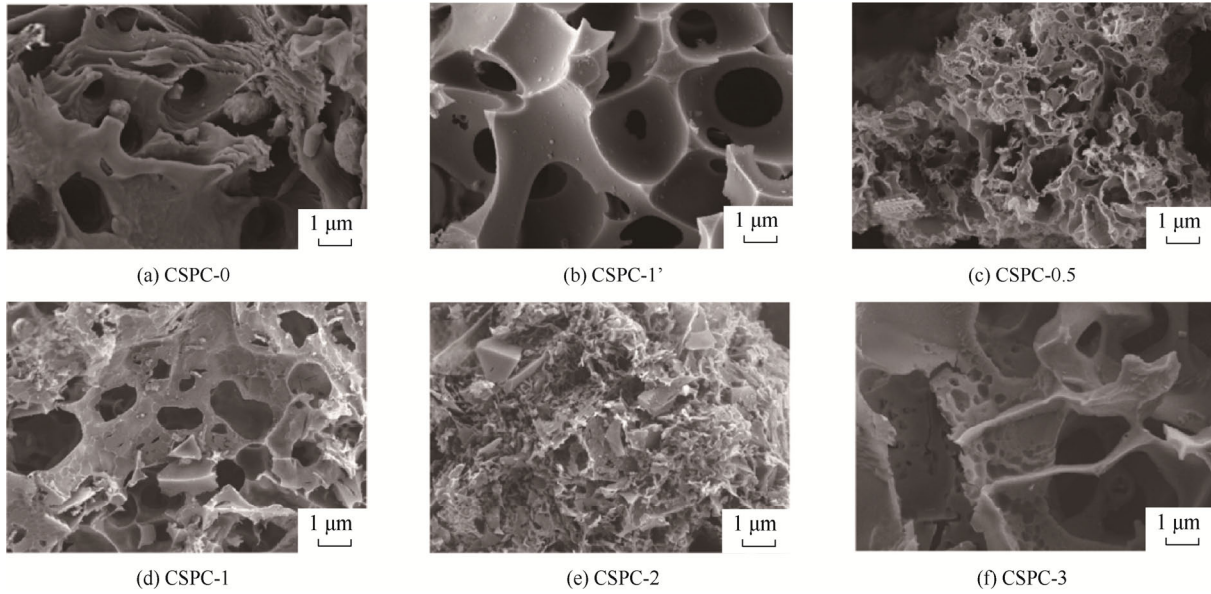


图 1 样品的 SEM 照片
Fig. 1 SEM images of the samples

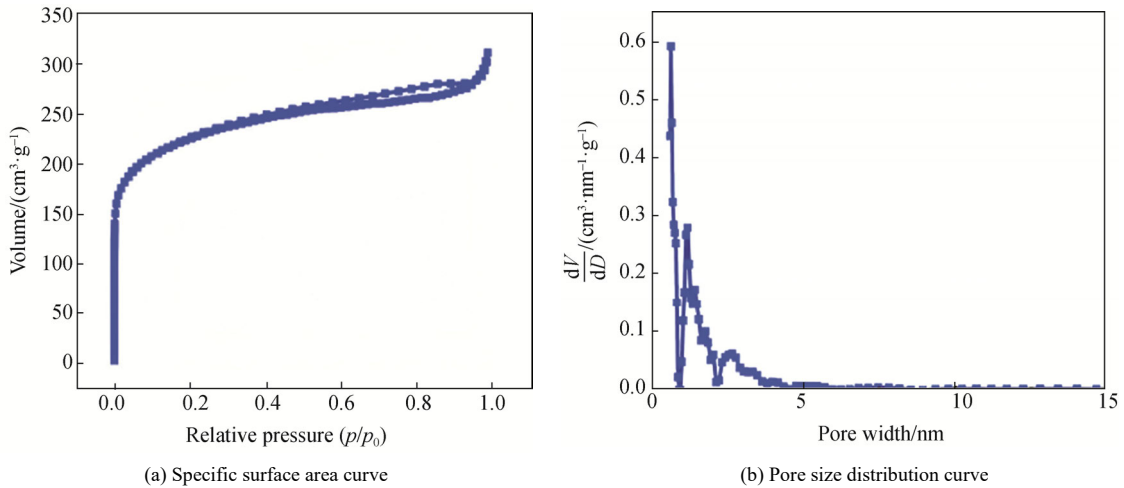


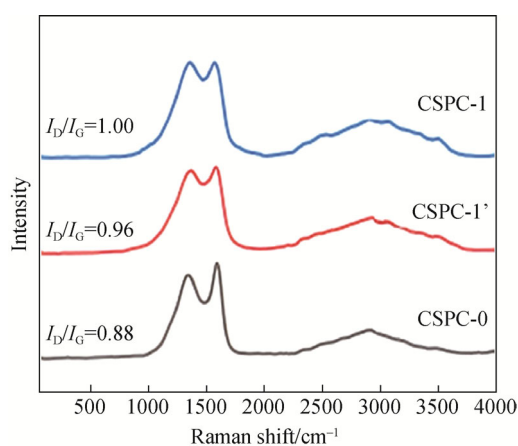
图 2 样品 CSPC-1 的 N_2 吸附-脱附等温线图
Fig. 2 N_2 adsorption-desorption isotherm of CSPC-1 sample

图 3a 为样品 CSPC-0、样品 CSPC-1'和样品 CSPC-1 的拉曼光谱。由图 3a 可见，椰壳多孔碳在 1350cm^{-1} 和 1580cm^{-1} 附近均有 D 和 G 峰的特征峰。样品 CSPC-0、样品 CSPC-1'和样品 CSPC-1 的 I_D/I_G 比分别为 0.88、0.96、1.00。结果表明，样品

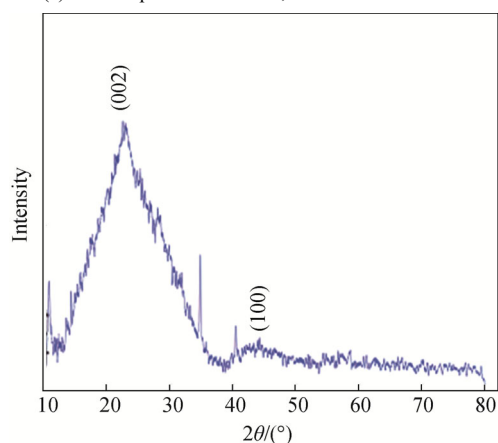
CSPC-1'和样品 CSPC-1 的石墨化程度差异不大，氢氧化钙的加入对于椰壳多孔碳的石墨化程度有更精细的调控作用，避免过度石墨化；相比于样品 CSPC-1'和样品 CSPC-1，样品 CSPC-0 的 I_D/I_G 更小，石墨化程度更好。结合图 3a 可知，样品 CSPC-1'

和样品 CSPC-1 的 D 峰相对较高, 表明其内部存在高度无序性, 并含有许多缺陷。这些缺陷是由氢氧化钾和碳酸钙生成的中间产物碳酸钾分解成的氧化钾和二氧化碳产生的^[12]。二氧化碳会与椰壳多孔碳反应生成孔隙结构, 产生新的表面缺陷和无序区域, 从而提高 I_D/I_G 的值^[13]。

图 3b 为样品 CSPC-1 的 XRD 谱。如图 3b 所示, 22° 和 $44^\circ(2\theta)$ 处的衍射峰分别对应石墨碳的(002)和(100)晶面^[14]。在 $2\theta=22^\circ$ 处的衍射峰宽而强, 属于无定形碳, 结合图 2a 和图 2b 的数据和图 1d 有更直观的表现。其他明显的衍射峰强度中等, 峰形相对尖锐, 宽而弥散, 主要归属于活化过程中产生的无机副产物。由此可知, 样品 CSPC-1 内部有较高的无序性且存在许多缺陷, 这与图 3a 中样品 CSPC-1 的拉曼光谱图结果相吻合。



(a) Raman spectra of CSPC-0, CSPC-1' and CSPC-1



(b) XRD pattern of CSPC-1

图 3 样品的拉曼光谱和 XRD 谱

Fig. 3 Raman spectra and XRD of the samples

图 4a 为样品 CSPC-1 的 XPS 光谱。由图 4a 可见, 284、400 eV 和 532 eV 处的特征峰表明样

品 CSPC-1 中含有碳、氮和氧 3 种元素。图 4b~图 4d 分别是 C 1s、N 1s 和 O 1s 光谱。由图 4b 可见, 在 284.8、286.6 eV 和 289.0 eV 处出现 3 个峰, 表明样品含有 C—C、C—O 和 O=C。在图 4c 中, N 1s 光谱在 402.1、400.0 eV 和 398.9 eV 处出现 3 个峰分别对应石墨氮、吡咯氮和吡啶氮。图 4d 表明, C—O 和 C=O 分别在 531.5 eV 和 534.0 eV 处有 2 个峰。

2.2 吸波性能分析

为了分析椰壳多孔碳的吸波性能, 将不同实验样品与石蜡混合(样品填充比例为 1:6), 然后利用模具压制成为内径为 3.04 mm、外径为 7 mm 的同心环, 利用矢量网络分析仪采用同轴法测量了不同样品的电磁参数^[15]。

2.2.1 活化剂比例对吸波性能的影响 图 5a~图 5c 为 700 °C 下, 不同活化剂比例的椰壳多孔碳的介电常数。图 5a 为介电常数的实部(ϵ')与频率的关系图。 ϵ' 表示材料存储电场能量的能力, 与极化程度有关^[16]。由图 5a 可见, 除了样品 CSPC-0 外, 样品 CSPC-0.5、样品 CSPC-1、样品 CSPC-2、样品 CSPC-3 和样品 CSPC-1' 的 ϵ' 随着测试频率的增大而逐渐减小。并且样品 CSPC-0.5、样品 CSPC-1、样品 CSPC-2、样品 CSPC-3 的 ϵ' 在相同的测试频率下十分接近, 样品 CSPC-1' 的 ϵ' 除了在 11~14 GHz 内都大于其他样品。图 5b 为介电常数的虚部(ϵ'')与频率的关系图, 其趋势与图 5a 基本一致, 值得注意的是样品 CSPC-0.5、样品 CSPC-1、样品 CSPC-2、样品 CSPC-3 出现了比较明显的共振峰, 这可能是极化弛豫导致的。从图 5a 和图 5b 来看, 碳酸钙对椰壳多孔碳的介电常数的影响十分明显。

图 5c 为介电损耗的正切值($\tan \theta$)与测试频率的关系图。总体来看, 除样品 CSPC-0 外, 其余样品的 $\tan \theta$ 值基本在 0.4~1.0 之间浮动, 并且整体在低频和高频都有较为明显的峰值。

影响吸波性能的关键因素有 2 个, 一个是衰减性能, 另一个是阻抗匹配(Z)^[17]。

图 5d 为样品 CSPC-0.5、样品 CSPC-1、样品 CSPC-2、样品 CSPC-3、样品 CSPC-1' 和样品 CSPC-0 的衰减系数图。由图 5d 可见, 氢氧化钾的加入对衰减系数(α)有明显的影响, 在 2~4 GHz 范围内, 碳酸钙的加入有利于优化衰减系数。

图 6 为样品的阻抗匹配图。阻抗匹配(Z)表示电磁波是进入材料内部还是在表面被反射, 通常而言, $|Z|$ 越接近 1, 则电磁波的吸收效果越好^[18]。

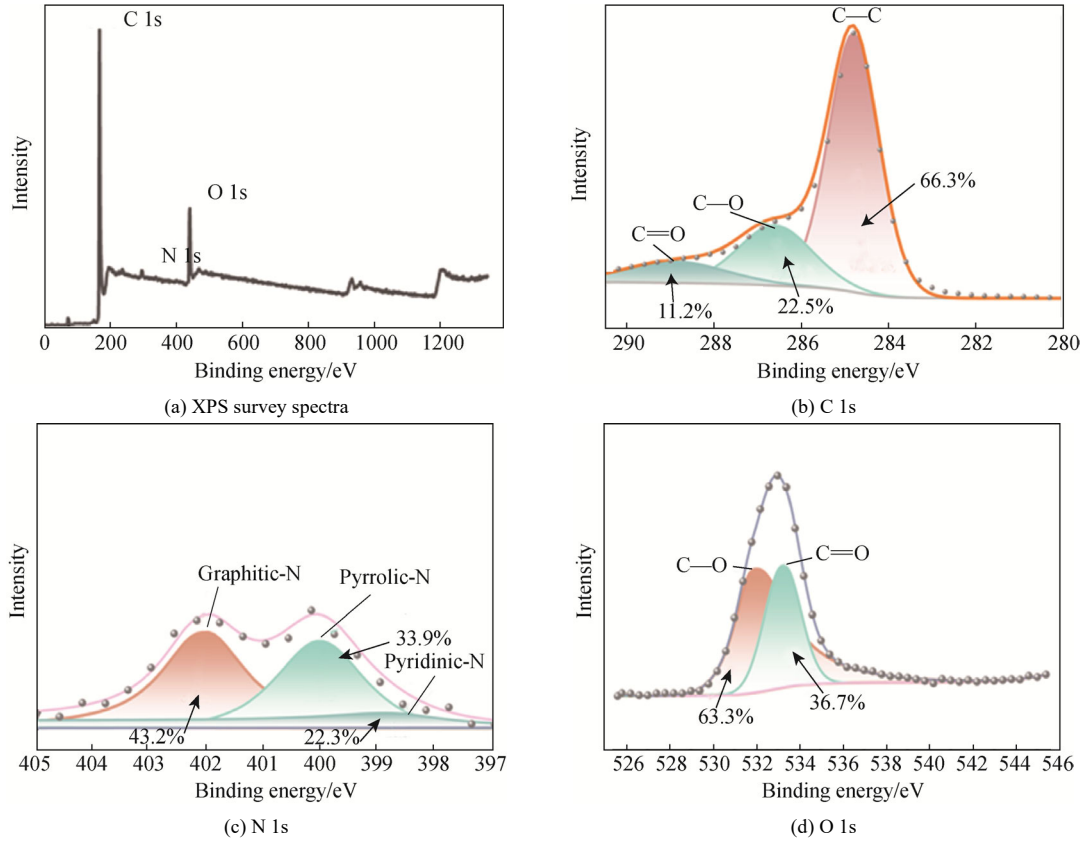


图4 样品 CSPC-1 的 XPS 光谱
Fig. 4 XPS spectra of the CSPC-1 sample

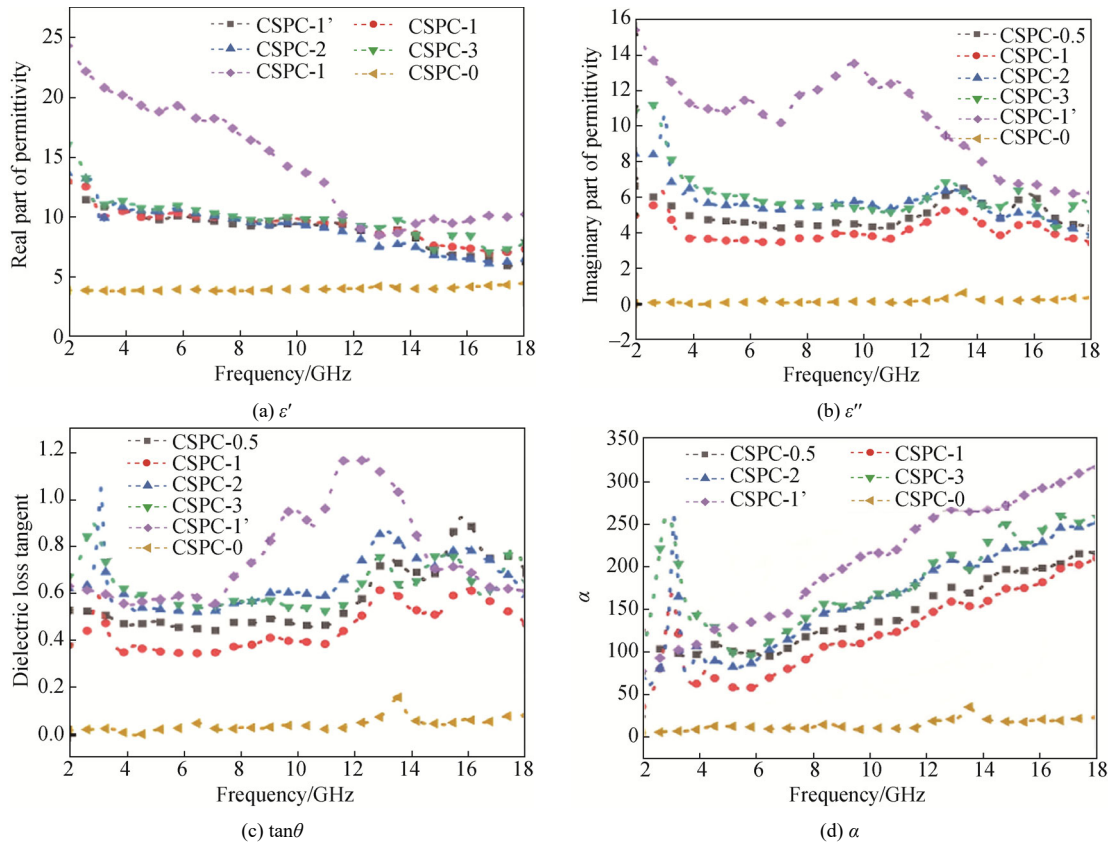


图5 样品的 ϵ' 、 ϵ'' 、 $\tan\theta$ 和衰减系数图

Fig. 5 Real part of permittivity (ϵ'), imaginary part of permittivity (ϵ''), dielectric loss tangent ($\tan\theta$) and attenuation coefficients (α)

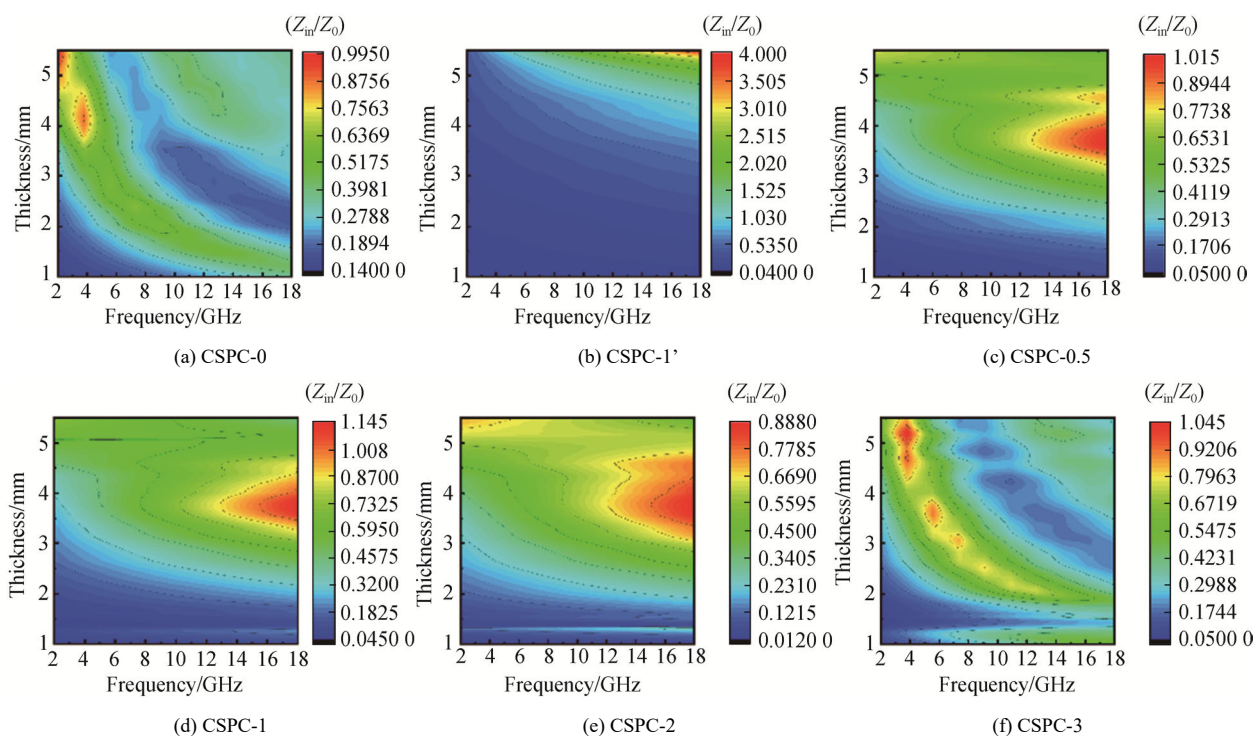


图 6 样品的阻抗匹配图

Fig. 6 Impedance matching diagram of the sample

从图 6 可见, 阻抗匹配在 2~18 GHz 有较为明显的提升, 这可能是氢氧化钾的活化效果。并且碳酸钙在优化阻抗匹配方面有较明显作用, 其原因可能是碳酸钙与碳基体间的界面形成大量偶极子, 产生弛豫极化^[19]。样品 CSPC-2 的阻抗匹配与样品 CSPC-1 相差不大, 但样品 CSPC-3 的阻抗匹配与样品 CSPC-1 相比有明显提升, 其 Z 值更接近 1, 原因可能与活化剂配比相关。由于活化剂用量逐渐加大, 椰壳出现的孔隙逐渐增大且生成的多孔碳的缺陷会逐渐增多, 最终导致孔道塌缩^[20]。高比例的活化剂会导致孔径变大, 电磁波的反射损失逐渐减小, 吸波效果减弱。

理想的吸波材料应该具有最佳的阻抗匹配和较好的衰减系数^[21]。综合来看, 相比于样品 CSPC-0.5、样品 CSPC-2、样品 CSPC-3, 样品 CSPC-1 的阻抗匹配大部分处于 1 附近, 对于吸波材料来说, 其阻抗匹配较好, 能使更多的入射波能进入到材料中, 实现多重吸收。

图 7 为 700 °C 下, 不同活化剂比例的椰壳多孔碳的反射损耗平面图。一般情况下, 当 RL 值小于 -10 dB 时, 表示 90% 以上的电磁波被吸收, 说明其具有吸波效果。

图 8 为 700 °C 下, 不同活化剂比例的椰壳多孔

碳的反射损耗 3D 图。

由图 7a 和图 8a 可见, 样品 CSPC-0 的最小反射损耗大于 -10dB, 不具有吸波效果。根据图 7b、图 8b 可以看出, 样品 CSPC-1' 在样品厚度为 1.5 mm 时, 有着最宽有效吸收带宽和最小反射损耗, 有效带宽为 3.68 GHz, 在测试频率为 14.4 GHz 时, 反射损耗最小值(RL_{\min})为 -18.754dB。由图 7d 和图 8d 可见, 样品 CSPC-1 的厚度为 2.0mm 时有最宽的有效带宽, 其值为 4.64 GHz, 在测试频率为 13.36 GHz 时, 其反射损耗最小值(RL_{\min})为 -35.91dB; 当样品匹配厚度为 5 mm, 测试频率为 5.12 Hz 时, 有最小的反射损耗, 反射损耗最小值(RL_{\min})为 -45.79dB, 有效吸收带宽为 0.88 GHz。

图 9a~图 9f 分别为样品 CSPC-0.5、样品 CSPC-1、样品 CSPC-2、样品 CSPC-3、样品 CSPC-1' 和样品 CSPC-0 的 Cole-Cole 半圆图。Cole-Cole 半圆图能进一步分析椰壳多孔碳的损耗机制, 在 Cole-Cole 曲线中每一个半圆对应一次共振峰, 对应一个极化弛豫过程^[22]。由图 9e 和图 9f 可见, 样品 CSPC-1' 和样品 CSPC-0 的 Cole-Cole 曲线出现半圆弧, 表明存在强界面极化损耗, 并且样品 CSPC-1' 的尾部存在向上倾斜的直线, 表明其还存在电导损耗^[23]。由图 9a~图 9d

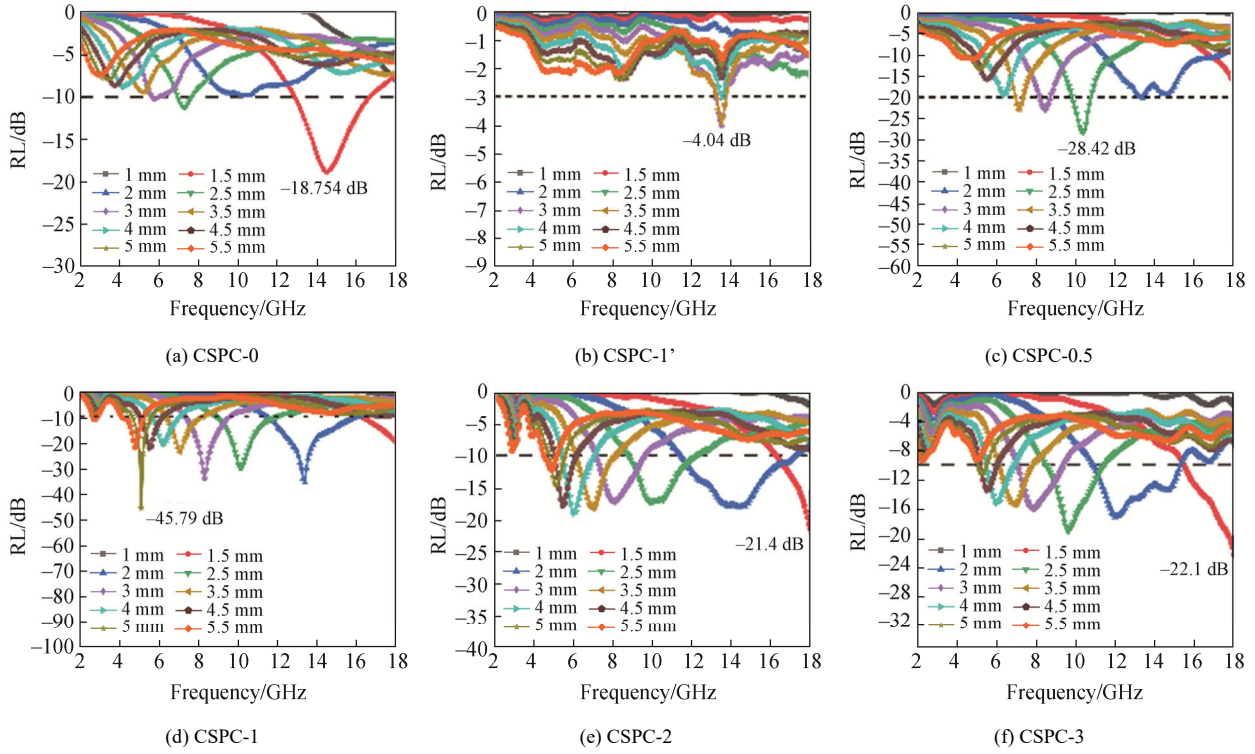


图 7 反射损耗平面图

Fig. 7 Reflection loss plane diagrams

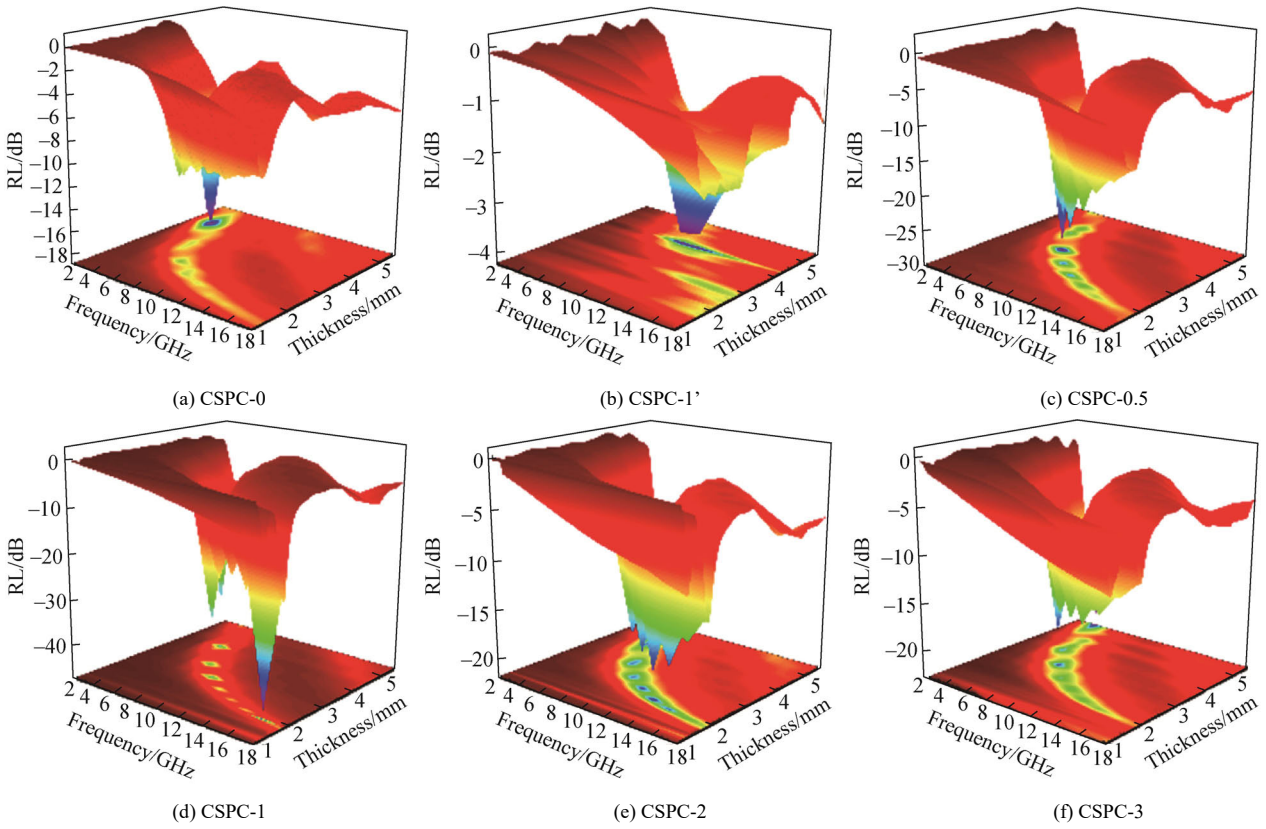


图 8 样品的反射损耗 3D 图

Fig. 8 3D reflection loss maps of samples

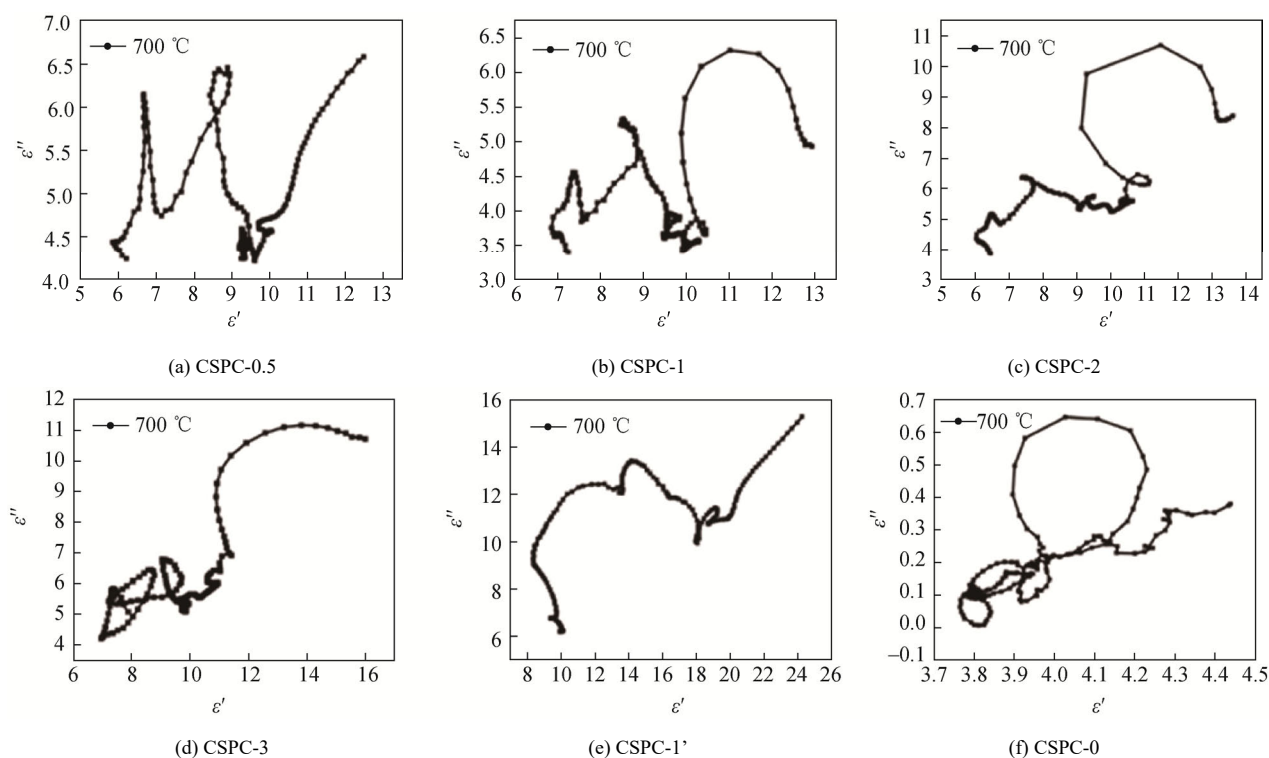


图 9 具有不同活化剂比例的样品的 Cole-Cole 半圆图

Fig. 9 Cole-Cole semicircle plots of samples under different activator ratios

表 1 生物质基吸波材料的微波吸收性能

Table 1 Microwave absorption performance of biomass based absorbing materials

Biomass species	RL_{\min}/dB	EAB/GHz	Matching thickness/mm	Ref.
Shaddock peel	-29.50	5.80	1.70	[24]
Hull of water chestnut	-31.02	6.00	1.90	[25]
Loofah	-42.77	5.00	1.49	[26]
Agaric	-30.41	2.45	2.06	[27]
Cocoonut shell	-45.79	0.88	5.00	This work

可见，在活化剂配比小于 1:1 时，椰壳多孔碳的损耗以电导损耗为主；当配比大于等于 1:1 时，椰壳多孔碳的损耗以偶极极化和界面极化为主。

2.2.2 椰壳多孔碳的电磁波吸收机理 椰壳多孔碳的电磁波吸收机理具体如图 10 所示。

首先，由图 10 可见，在氢氧化钾和碳酸钙的协同造孔作用下，能够形成更好的多孔结构，促使电磁波在材料内部发生多次反射与漫反射，从而显著增强椰壳多孔碳对电磁波的吸收效果^[29]。然后，椰壳在高温炭化过程中产生了一些破损和缺陷，导致极化弛豫现象的产生。同时，多孔结构增加了多孔碳与空气的接触，大量电荷聚集在界面交界处，导致界面极化增强^[30]，在界面处聚集的电荷会产生感应电流，导致部分电磁波能量转化为热能而耗散。

多元损耗机制共同作用使得椰壳多孔碳具有良好的电磁波吸收效果。

与生物质基吸波材料，如 Fang 等^[6]制备的棉基电磁波吸收剂，Liu 等^[7]制备的水生植物基吸波材料，Gong 等^[8]制备的杏仁壳基吸波材料，和 Huang 等^[10]与 Mishra 等^[11]的椰壳基材料相比，由一步炭化法制备的样品 CSPC-1 借助碳酸钙和氢氧化钾双活化剂的协同造孔优势，在 700 °C 时氢氧化钾促进碳酸钙热分解，生成的中间产物会分解成作为硬模板的氧化钙和软模板的二氧化碳，除此之外，氢氧化钾的活化作用与钾离子的掺杂，协同构建出复杂的三维多孔结构。因此，CSPC-1 在较低频区域的反射损耗最小值(RL_{\min})均优于其他的材料，且一步炭化法相比于复合金属磁性物质的制备工艺更加简单。

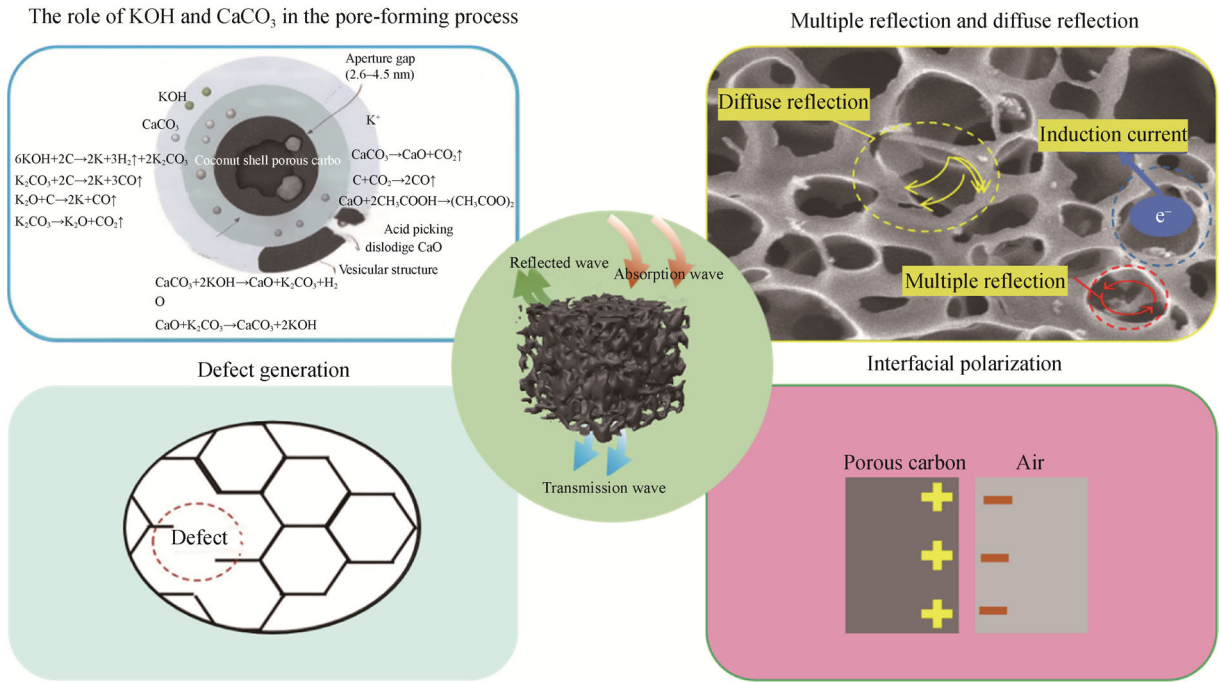


图 10 椰壳多孔碳的电磁波吸收机理
Fig. 10 Microwave absorption mechanism of coconut shell porous carbon

3 结论

经过简单的一步炭化法配合双活化剂活化法成功制备了具有良好吸波性能的椰壳多孔碳材料。通过改变氢氧化钾和碳酸钙的配比，改变椰壳多孔碳的孔隙结构，从而得到不同吸波效果的椰壳多孔碳。其中吸波效果最好的椰壳多孔碳，其炭化温度为 700 °C、椰壳粉：碳酸钙：氢氧化钾质量比为 1 : 1 : 1，当样品厚度为 5.0 mm、测试频率为 5.12 GHz 时，反射损耗最小值(RL_{min})为-45.79 dB。采用储量丰富的椰壳废弃物，简单的一步炭化法即可获得具有强吸波效果的吸波材料，为高性能吸波材料的制备提供了理论指导，大大拓宽了生物质吸波材料的应用前景。

参考文献:

[1] SHI Y X, LIANG B Q, GAO H, et al. Research progress on spherical carbon-based electromagnetic wave absorbing composites[J]. Carbon, 2024, 227: 119244.
 [2] LI W Y, GAO M Y, MIAO Y, et al. Recent progress in increasing the electromagnetic wave absorption of carbon-based materials[J]. New Carbon Mater, 2023, 38(1): 111–125.
 [3] ZHAO Y P, ZHANG H, YANG X, et al. *In situ* construction of hierarchical core-shell Fe₃O₄@C nanoparticles-helical carbon nanocoil hybrid composites for highly efficient electromagnetic wave absorption[J]. Carbon, 2021, 171: 395–408.

[4] 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.
 [5] WANG Y J, XU H, ZHENG Y N, et al. NiFe-PBA/biomass-derived carbon lightweight composites with excellent electromagnetic wave absorption capacity[J]. Compos Commun, 2025, 57: 102500.
 [6] FANG J Y, LI P, LIU Y D, et al. Cobalt magnetic particles and carbon composite microtubes as high-performance electromagnetic wave absorbers[J]. J Mater Chem C, 2021, 9(7): 2474–2482.
 [7] LIU Y Y, DENG Y F, XIE A M, et al. Biomass-based carbon materials derived from *Cyperus malaccensis* Lam. var. *brevifolius* Bockl. with efficient microwave absorption performance[J]. J Mater Sci Mater Electron, 2021, 32(21): 26202–26212.
 [8] GONG X B, LIU Q L, ZHAO W, et al. Almond C/Fe₃O₄ composite material based on biomass porous carbon structure with high-efficiency microwave absorbing properties[J]. J Mater Sci Mater Electron, 2022, 33(16): 13166–13179.
 [9] 武志红, 任安文, 刘一军, 等. 生物质衍生碳基复合吸波材料的分类、吸波机制与研究进展[J]. 复合材料学报, 2024, 41(8): 3910–3934. WU Zhihong, REN Anwen, LIU Yijun, et al. Acta Mater Compos Sin, 2024, 41(8): 3910–3934.
 [10] HUANG Q, BAO C Z, WANG Q Y, et al. Tuning the microwave absorption capacity of TiP₂O₇ by composited with biomass carbon[J]. Appl Surf Sci, 2020, 515: 145974.
 [11] MISHRA S P, NATH G, MISHRA P. Ultrasonically synthesized dielectric microwave absorbing material from coconut coir dust[J]. Waste Biomass Valorization, 2020, 11(4): 1481–1490.
 [12] WU Z H, CHANG J J, GUO X Y, et al. Honeycomb-like bamboo powders-derived porous carbon with low filler loading, high-performance microwave absorption[J]. Carbon, 2023, 215: 118415.
 [13] ZHANG C, JI Y, LI C C, et al. The application of biochar for CO₂

- capture: Influence of biochar preparation and CO₂ capture reactors[J]. *Ind Eng Chem Res*, 2023, 62(42): 17168–17181.
- [14] FANG Y, WANG W J, WANG S, et al. A quantitative permittivity model for designing electromagnetic wave absorption materials with conduction loss: A case study with microwave-reduced graphene oxide[J]. *Chem Eng J*, 2022, 439: 135672.
- [15] QIAN C, WANG D, ZHAO W, et al. Smart shape memory composite foam enabled rapid and conformal manipulation of electromagnetic wave absorption performance[J]. *Mater Today Nano*, 2023, 23: 100354.
- [16] KREMER F, TRESS M. Dielectric spectroscopy: Yesterday, today and tomorrow[J]. *Appl Sci*, 2025, 15(13): 6954.
- [17] LIU Z C, PAN F, DENG B W, et al. Self-assembled MoS₂/3D worm-like expanded graphite hybrids for high-efficiency microwave absorption[J]. *Carbon*, 2021, 174: 59–69.
- [18] ZHANG Y H, MENG H J, SHI Y P, et al. TiN/Ni/C ternary composites with expanded heterogeneous interfaces for efficient microwave absorption[J]. *Compos Part B Eng*, 2020, 193: 108028.
- [19] LIU R, WANG J X, YANG W D. Hierarchical porous heteroatoms: Co-doped activated carbon synthesized from coconut shell and its application for supercapacitors[J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(19): 3504.
- [20] WANG H, ZHAO J R, WANG Z, et al. Construction of ZIF-67 derived multi-interfacial composites embedded in carbonized pomelo peel for enhanced microwave absorption with 8 wt% filler loading[J]. *J Alloys Compd*, 2024, 985: 174124.
- [21] 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
- [22] SATHISH KUMAR M, MANDHAKINI M, JEFERSON S, et al. Silane functionalized cardanol/calcium carbonate epoxy-reinforced polymer nanocomposites for sustainable microwave absorption applications[J]. *Polym Compos*, 2024, 45(15): 13924–13939.
- [23] GUO X Y, WU Z H, CHANG J J, et al. Preparation of high-performance bitumen carbon-based microwave absorbing materials from different coal bitumens toward efficient treatment of industrial waste bitumen[J]. *Sustain Mater Technol*, 2024, 40: e00966.
- [24] 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.
- [25] LIU P B, GAO S, ZHANG G Z, et al. Hollow engineering to Co@N-doped carbon nanocages *via* synergistic protecting-etching strategy for ultrahigh microwave absorption[J]. *Adv Funct Mater*, 2021, 31(27): 2102812.
- [26] FAN G H, SONG X T, ZHANG X P, et al. Biomass-derived ferrous magnetic carbon-based nanocomposites from loofah collaterals for excellent electromagnetic wave-absorbing materials[J]. *J Alloys Compd*, 2023, 969: 172384.
- [27] SU J B, YANG R, ZHANG P K, et al. Fe/Fe₃O₄/biomass carbon derived from agaric to achieve high-performance microwave absorption[J]. *Diam Relat Mater*, 2022, 129: 109386.
- [28] 武志红, 李嘉仪, 李鹏, 等. 生物质衍生多孔碳基吸波材料的吸波机理[J]. *硅酸盐学报*, 2025, 53(1): 161–172.
WU Zhihong, LI Jiayi, LI Peng, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2025, 53(1): 161–172.
- [29] HUANG Q Q, ZHAO Y, WU Y, et al. A dual-band transceiver with excellent heat insulation property for microwave absorption and low infrared emissivity compatibility[J]. *Chem Eng J*, 2022, 446: 137279.
- [30] WANG M, PAN H, XU L H, et al. Microwave-absorbed porous carbon was prepared from agricultural coconut shell waste by a simple one-step high temperature charring[J]. *Mater Sci Eng B*, 2024, 307: 117509.

作者贡献声明:

娄宸瑞: 设计实验方案, 设计论文框架、撰写论文;
潘虹: 提出研究方向, 技术支持与指导, 修改论文, 定稿;
徐丽慧: 提出研究方向, 技术支持与指导, 修改论文, 定稿;
李倩: 参与实验方案设计与论文撰写;
王渝申: 绘制图表、参与数据分析与论文撰写;
吴袁浩: 完善论文框架, 修订论文;
周治翔: 实验测试、参与数据分析。

Simple One-Step Preparation of Low-Frequency High-Performance Coconut Shell-Ased Carbon Wave-Absorbing Materials

LOU Chenrui, PAN Hong, XU Lihui, LI Qian, WANG Yushen, WU Yuanhao, ZHOU Zhixiang
(College of Textile and Clothing, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Extended Abstract

Introduction The issue of electromagnetic pollution has become increasingly severe with the development of the electronic communication technology. The excessive electromagnetic waves pose risks to the national security and the human health in daily life. Consequently, wave-absorbing materials have gradually garnered public attention. Biomass, with its inherent network structure, can be used to produce porous carbon for addressing electromagnetic pollution. Among various biomass sources, coconut shells are widely distributed in China and have long been treated as agricultural by-products or waste. Recycling and utilizing coconut shells to prepare wave-absorbing materials not only helps mitigate electromagnetic pollution but also offers a new approach for the high-value application of agricultural by-products such as coconut shells.

Methods The experimental materials included coconut shells purchased from Hainan Wenchang Coconut Shell Co., Ltd.. Potassium hydroxide (KOH), calcium carbonate (CaCO₃), hydrochloric acid (HCl), and paraffin wax (C₂₅H₅₂) purchased from Shanghai Titan Scientific Co., Ltd. The coconut shells were processed into 1–2 cm pieces, cleaned, and dried at 80 °C for 24 h. The dried pieces were then ground into powder using a pulverizer and sieved through a mesh with an aperture of 250–300 μm. The coconut shell powder

was mixed with CaCO_3 and KOH at mass ratios of 1.0 : 1.0 : 0.5, 1 : 1 : 1, 1 : 1 : 2, and 1 : 1 : 3, respectively. The mixtures were uniformly ground in a pulverizer to obtain alkalinized coconut shell powder, which was subsequently dried. The dried alkalinized powder was placed in a tube furnace, which was purged with nitrogen gas (N_2), and then carbonized at 700 °C for 2 h. The resulting product was neutralized with hydrochloric acid (HCl) under magnetic stirring for 12 h, washed with deionized water until neutral, and finally dried at 80 °C for 24 h, then the coconut shell-based porous carbon was obtained.

Results and discussion In this study, coconut shell was utilized as the carbon source, based on its inherent multi-level network structure and high carbon content. Using KOH and CaCO_3 as dual activators, a one-step carbonization method was employed to prepare coconut shell-based carbon wave-absorbing materials with superior microwave absorption performance. Compared to pure coconut shell carbon and coconut shell carbon activated solely with an equal mass of KOH, the sample prepared with dual activators exhibited more uniform surface pore distribution and hierarchical structure. This specific structure played a critical role in enhancing the electromagnetic wave absorption performance. Consequently, the dual-activator method offered a novel approach for preparing porous carbon materials with complex three-dimensional micro/mesoporous structures. At 700 °C, the gradual addition of activator resulted in enlarged pores and increased defects in the porous carbon structure, ultimately causing pore collapse. Higher activator concentrations led to larger pore diameters, which reduced electromagnetic wave reflection efficiency and consequently diminished microwave absorption performance.

Conclusions A coconut shell-based porous carbon material with excellent wave-absorbing performance was successfully prepared *via* a one-step carbonization method combined with a dual-activator (KOH and CaCO_3) activation process. By adjusting the mass ratios of KOH to CaCO_3 , the pore structure of the resulting carbon material was modulated, leading to varied electromagnetic wave absorption properties. The optimal absorption performance was achieved under the conditions of a carbonization temperature of 700 °C and a mass ratio of coconut shell powder : CaCO_3 : KOH = 1 : 1 : 1. The material obtained under these conditions exhibited a minimum reflection loss (RL_{min}) of -45.79 dB at a sample thickness of 5.0 mm and a frequency of 5.12 GHz. This study utilized a simple one-step carbonization process to produce effective wave-absorbing materials with abundant coconut shell waste, providing valuable theoretical guidance for the development of high-performance absorbers and significantly broadening the application prospects for biomass-derived wave-absorbing materials.

Keywords electromagnetic wave absorption; biomass material; porous carbon; dual activator