·木材科学与工程 Wood Science and Engineering·

不同密度木基碳材料的制备及电磁屏蔽性能

魏敏，于凡钧，邱哲，肖泽芳，张天鹏*，谢延军
（东北林业大学 材料科学与工程学院，哈尔滨 150040）

摘　要：为应对当前日益严峻的电磁污染问题，选取泡桐、椴木和桉木3种密度差异显著的常见阔叶材，通过高温碳化工艺制备木基碳材料，系统对比3种木基碳材料的理化性质与电磁屏蔽性能之间的关系。结果表明，经碳化处理后，木材仍保留天然的骨架结构与多孔特征；碳化过程使原本绝缘的木材获得导电性能，所得木基碳材料的电导率达到3.08~3.53 S/cm；3种木基碳材料的总屏蔽效能均达到20 dB以上，达到商业应用的基本要求。3种木材因微观结构与密度的差异，展现出不同的电磁屏蔽性能优势。其中密度最低的泡桐基碳以吸收损耗为主导，适用于绿色屏蔽应用；密度中等的椴木基碳则在吸收与反射之间取得平衡，表现出相对均衡的屏蔽性能；而密度最高的桉木基碳屏蔽效能最高，但反射损耗较强。研究结果揭示密度差异如何通过影响碳化后导电网络的连续性与孔隙结构，进而实现电导损耗与多重反射损耗的协同作用机制，为高性能木基碳电磁屏蔽复合材料的开发提供试验依据和理论参考。

关键词：木基碳材料；碳化；电磁屏蔽；密度；多孔结构
中图分类号：S781.69　　**文献标识码：**A　　**DOI：**10.7525/j.issn.1006-8023.2026.05.011

Preparation and Study of Electromagnetic Shielding Properties of Wood-Based Carbon Materials with Different Densities

WEI Min, YU Fanjun, QIU Zhe, XIAO Zefang, ZHANG Tianpeng*, XIE Yanjun
(College of Material Science and Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, 150040, China)

Abstract: To address the increasingly severe problem of electromagnetic pollution, three common broadleaf woods with significantly different densities-paulownia, basswood, and eucalyptus-were selected. Wood-based carbon materials were prepared using a high-temperature carbonization process, and the relationship between the physicochemical properties and electromagnetic shielding performance of these three materials was systematically compared. The results indicated that after carbonization, the wood retained its natural skeletal structure and porous characteristics; the carbonization process conferred electrical conductivity to the originally insulating wood, with the resulting wood-based carbon materials exhibiting a conductivity of 3.08-3.53 $S \cdot cm^{-1}$. The total shielding efficiency of all three wood-based carbon materials exceeded 20 dB, meeting the basic requirements for commercial applications. Due to differences in microstructure and density, the three wood types exhibited distinct advantages in electromagnetic shielding performance. Among them, the paulownia-based carbon, with the lowest density, was dominated by absorption loss and was suitable for green shielding applications; the basswood-based carbon, with medium density, struck a balance between absorption and reflection, demonstrating relatively balanced shielding performance; while the eucalyptus-based carbon, with the highest density, exhibited the highest shielding efficiency but had relatively strong reflection loss. This study reveals the mechanism by which density differences influence the continuity and pore structure of the conductive network after carbonization, thereby achieving the synergistic interaction between conductive loss and multiple reflection loss. It provides experimental evidence and theoretical references for the development of high-performance wood-based carbon electromagnetic shielding composites.

Keywords: Wood-based carbon materials; carbonization; electromagnetic shielding; density; porous structure

收稿日期：2026-04-13
基金项目：国家重点研发计划项目(2023YFD2201402)；黑龙江省博士后科研启动金项目(LBH-Z24004)。
第一作者简介：魏敏，硕士研究生。研究方向为木材改性。E-mail：weimin-ann@qq. com
***通信作者：**张天鹏，博士，教授。研究方向为木质功能改良及功能化。E-mail：zhangtp@nefu. edu. cn
引文格式：魏敏，于凡钧，邱哲，等. 不同密度木基碳材料的制备及电磁屏蔽性能[J]. 森林工程，2026，42(5)：998-1010.
Wei Min, Yu Fanjun, Qiu Zhe, et al. Preparation and study of electromagnetic shielding properties of wood-based carbon materials with different densities[J]. Forest Engineering, 2026, 42(5): 998-1010.

0　引言

现代电子通信技术的飞速发展引发了电磁污染问题,不仅干扰电子设备运行,还可能对人体健康构成潜在威胁[1-3]。电磁屏蔽材料成为解决电磁干扰及电磁污染问题的关键途径[4]。木材凭借独特的各向异性多孔结构与可再生优势,在电磁屏蔽领域展现出广阔的应用前景。与传统金属基及聚合物基材料不同,木基碳材料不仅具备优异的电磁屏蔽性能,还具有轻质、易加工、成本低廉和环境友好等特点,契合国家绿色发展的战略方向[5-6]。

木材是一种具有多层级且各向异性结构的天然聚合物,具备从微米级到纳米级的多级孔道结构[7-9]。木材主要由纤维素、半纤维素及木质素三大有机组分构成[10],含碳量高,经碳化处理后,非碳元素(氢、氧)以挥发性气体形式脱除,碳原子重组成 sp^2 杂化石墨微晶结构,形成三维导电网络,使绝缘的原始木材转变为具有导电性能的木基碳材料,从而获得电导损耗能力。特殊的多孔构造使入射电磁波在材料内部发生多重反射与吸收,实现对电磁波的有效衰减[11]。Dai 等[12]通过对碳化轻木进行结构优化,利用其天然多孔特性与所构建的交联导电网络的协同作用,有效增强了电磁屏蔽性能,在保持低密度的同时实现了达 77 dB 的高屏蔽效能,为木材生物质资源的高价值利用提供了新思路。然而,目前木基碳材料的电磁屏蔽性能受木材固有属性的显著影响,不同树种在密度、微观结构等方面存在较大差异,这些因素对电磁屏蔽性能的影响规律仍有待系统研究[13]。

本研究选取泡桐、椴木和桉木 3 种密度差异显著的阔叶材为原料,通过碳化工艺制备木基碳材料。泡桐密度最低、结构疏松多孔;椴木居中;桉木密度最高、细胞壁厚且结构紧密,三者形成从低到高的梯度密度分布。通过系统表征材料的微观形貌、化学结构、导电及电磁屏蔽性能,结合木材固有特性与分级多孔结构,旨在揭示木材密度及结构对木基碳材料电磁屏蔽性能的影响机制,重点探讨密度差异如何调控电导率与孔隙特征,进而影响电导损耗与多重反射损耗的协同作用。本研究为理解木材密度与电磁屏蔽性能之间的构效关系提供试验依据,并为设计高性能木基碳屏蔽材料提供理论参考。

1　材料与方法

1.1　试验材料与设备

1.1.1　试验材料

选取泡桐(*Paulownia fortunei*)、椴木(*Tilia* spp.)和桉木(*Eucalyptus* spp.)3 种木材,密度分别为 0.25~0.35、0.40~0.50、0.55~0.65 g/cm^3。木材经平衡处理后含水率为 10.0%~12.0%,加工成尺寸为 48 mm×41 mm×5 mm(长×宽×厚)的木片。

1.1.2　试验设备

切片机(SM2010 r,上海徕卡显微系统有限公司),电热鼓风干燥箱(DGG-9053A,上海森信实验仪器有限公司);扫描电子显微镜(EM-30 Plus,韩国 COXEM 公司);电子天平(SQP,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司);管式炉(OYS-1200C,合肥微元素实验室设备有限公司);拉曼光谱仪(Renishaw in Via,英国雷尼绍公司);X 射线衍射仪(X'Pert 3 Powder,荷兰马尔文帕纳科公司);全自动比表面积及孔隙度分析仪(Micromeritics 3Flex,美国麦克仪器公司);四探针粉末电阻率测试仪(ST2742B,中国);矢量网络分析仪(Agilent N5247A,美国是德科技公司)。

1.2　木材碳化处理

将泡桐、椴木和桉木加工成规定尺寸的木片后,置于 103 ℃电热鼓风干燥箱中干燥 12 h 以去除结合水,使样品达到绝干状态(含水率约等于 0%),旨在防止碳化升温过程中残余水分快速汽化导致木材开裂。随后用上下两块石墨板夹持固定并放入管式炉中进行碳化处理。石墨板在碳化工艺过程中仅作为支撑和固定夹具,用于防止木片在高温下发生翘曲变形,确保其平整度。石墨板并未参与化学反应,也未作为导电涂层的碳源。

在氮气气氛下,以 2 ℃/min 加热至 260 ℃,保温 1 h,这一阶段主要发生木材组分中半纤维素的初步热解及木质素的部分玻璃化转变与侧链断裂,同时起到缓慢排出挥发性气体、稳定木材骨架结构的作用,防止后续升温导致的剧烈热解对多孔结构造成破坏。然后以 2 ℃/min 的升温速度将木片加热到 500 ℃,保温 1 h;再以 5 ℃/min 的升温速度加热至 800 ℃,保温 2 h,促使碳结构重排与石墨化,形成稳定的三维导电网络;最后随炉自然冷却至室温,即可制得不同种类的木基碳材料。按照木材种类对碳材料进行命名,分别为泡桐基碳、椴木基碳和桉木基碳。木基碳材料的制备流程,见图 1。

1.3　表征方法

1.3.1　扫描电子显微镜技术

采用扫描电子显微镜(scanning electron microscope,SEM)对所制备的木基碳材料的微观形貌进行表征,观察前需使用离子溅射仪对样品表面进行喷金处理来增强导电性。

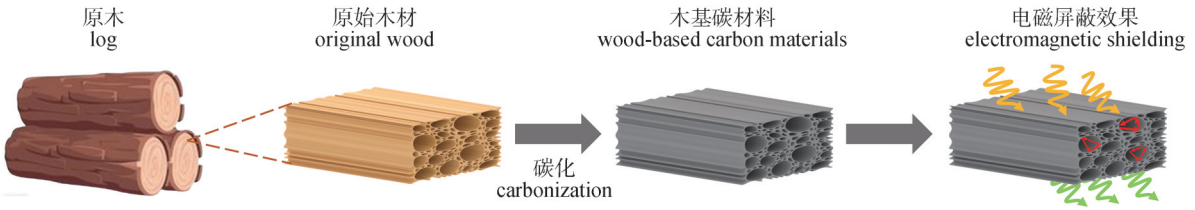


图1 木基碳电磁屏蔽材料的制备流程

Fig. 1 Preparation process of wood-based carbon electromagnetic shielding materials

1.3.2 X射线衍射技术

使用X射线衍射仪(X-ray diffraction,XRD)对木基碳材料的物相组成和晶体结构进行分析。测试采用Cu靶(Kα辐射,λ=0.154 06 nm),扫描角度范围设置为5°~80°,扫描速度为10°/min。测试前需将样品研磨成均匀的粉末。

1.3.3 拉曼光谱测试

采用拉曼光谱仪(Raman spectrometer)(激发波长:532 nm)对木基碳材料的结构特性及石墨化程度进行分析。测试前需将所有样品研磨成细腻粉末。

1.3.4 氮气恒温吸脱附测试

采用全自动比表面积及孔隙度分析仪对木基碳材料的孔隙结构特征进行表征,测定样品在77 K液氮环境下的氮气吸附-脱附等温线。

1.3.5 热重分析仪测试

采用TGA 4000型热重分析仪研究3种木材的热解行为。称取8~10 mg的木粉样品,在氮气气氛下以10 ℃/min的升温速率从30 ℃连续加热至800 ℃。

1.3.6 电导率测试

采用四探针粉末电阻率测试仪对木基碳材料的导电性能进行精确测量。每个样品均在相同的环境条件下进行多次测量,并取算术平均值作为最终的电导率值。

1.3.7 电磁屏蔽性能测试技术

使用矢量网络分析仪和矩形波导法,在X波段(8.2~12.4 GHz)测试木基碳材料的电磁屏蔽性能。测试前进行标准校准以消除系统误差,采集散射参数(scattering parameter,式中记为S),计算总电磁屏蔽效能(total shielding effectiveness,式中记为S_{ET})、吸收损耗(reflection shielding effectiveness,式中记为S_{EA})及反射损耗(absorption shielding effectiveness,式中记为S_{ER}),系统评估材料的电磁波衰减能力及屏蔽机制。基于传输线理论[14],屏蔽材料对电磁波的衰减主要来源于反射损耗、吸收损耗及多重反射损耗,常用电磁屏蔽效能(shielding effectiveness,dB,式中记为S_E)表征材料对入射电磁波能量的衰减能力。根据能量守恒,入射到屏蔽材料表面的电磁波应满足如下公式

$$R + A + T = 1。 \tag{1}$$

式中:R、A和T分别为反射率、吸收率与透射率。

为更直观地表示屏蔽能力,可计算屏蔽效率(S_{EP},%),即以百分比表示的阻挡波的能力,公式为

$$S_{EP} = 100 - \left(\frac{1}{10^{\frac{S_E}{10}}}\right) \times 100。 \tag{2}$$

考虑到屏蔽效能受材料的密度和厚度影响,这两者也正是实现轻量化电磁屏蔽的关键,为公平比较不同材料,将SET值按厚度(t)和密度(ρ)进行归一化处理,得到绝对屏蔽效能指标$S_{SE/t}$[15],公式为

$$S_{SE/t} = S_{ET}/(t \times \rho)。 \tag{3}$$

趋肤深度(δ)是表征材料电磁屏蔽性能的重要物理参数,定义为电磁波在材料内部传播时功率衰减至表面处的1/e(约36.8%)时所对应的穿透深度[16-17]。可以直观反映材料对电磁波的吸收衰减效率,公式为

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}}。 \tag{4}$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r。 \tag{5}$$

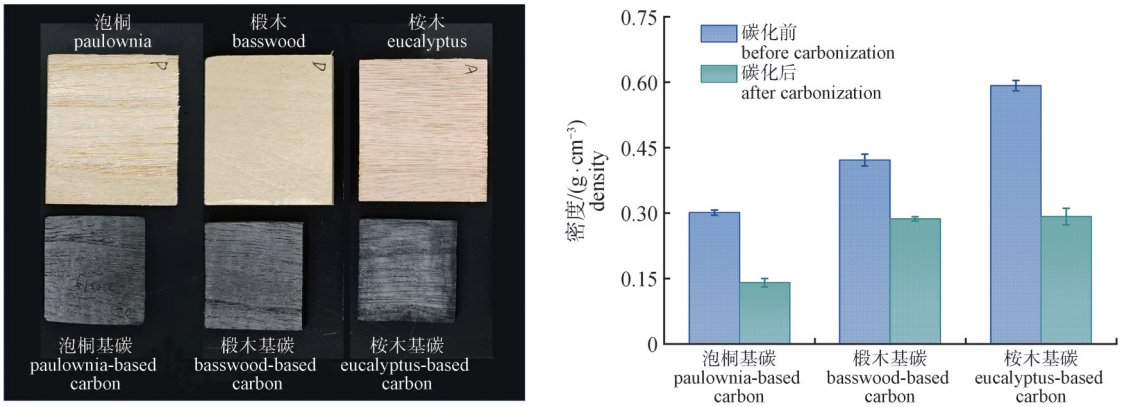
$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}。 \tag{6}$$

式中:f为频率;μ为磁导率;μ_r为相对磁导率;σ为电导率,S/m;μ_0为真空磁导率,H/m。

2 结果与讨论

2.1 木材碳化前后的密度变化分析

图2(a)为泡桐、椴木、桉木3种原始木片与对应碳化后木基碳材料的宏观形貌对比图,可见经800 ℃高温碳化处理后,各样品均发生显著收缩,原始木材发生热解转变为碳基材料。图2(b)为3种材料碳化前后的密度变化规律。结果表明,碳化处理后3种木材的密度均显著下降。碳化前,泡桐、椴木、桉木的原始密度分别为0.300、0.420、0.590 g/cm^3,该差异与不同木材自身的微观孔隙结构与组分特性密切相关。经800 ℃高温碳化后,三者密度依次降至0.140、0.285、0.290 g/cm^3,密度降幅显著。这一变化主要是由于碳化过程中木材组分发生热解,水分、焦油等挥发性物质大量逸出,同时高温诱导木材发生体积收缩,最终形成轻质多孔的碳骨架结构[18]。



(a) 3种木基碳材料碳化前后宏观形貌变化
(a) macroscopic morphology changes before and after carbonization

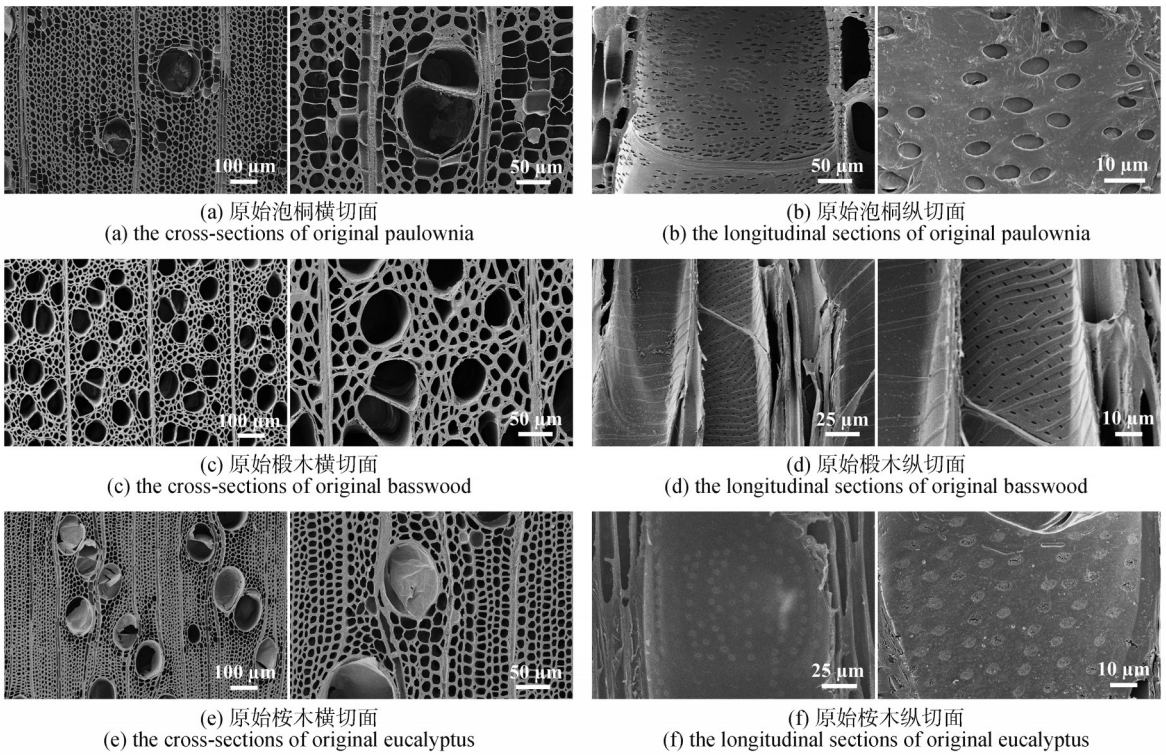
(b) 3种木基碳材料碳化前后密度变化
(b) density changes before and after carbonization

图2　3种木材碳化前后变化

Fig. 2　Changes of three wood species before and after carbonization

2.2　木材碳化前后的微观形貌分析

通过对泡桐、椴木和桉木碳化前后的扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)图像进行对比分析,探究3种木材在碳化前后微观结构的变化。图3和图4分别为3种木材碳化前、碳化后横切面与纵切面的微观结构。对比发现原始泡桐、椴木和桉木的微观构造差异显著,这本质上是由树种的遗传特性与材性等共同决定的,也是三者密度不同的主要原因。泡桐为阔叶半环孔材,图3(a)为泡桐的横切面SEM图像,可发现泡桐导管孔径差异明显,部分导管含侵填体,木射线呈同型单列与多列交替分布,轴向薄壁组织以两细胞束为主[19];图3(b)泡桐纵切面SEM图像表明导管为单穿孔,纹孔呈互列排列[20],正是这种疏松多孔的微观结构赋予了泡桐极低的密度。椴木为阔叶散孔材,其横切面以单管孔为主、偶见径列复管孔,管孔细小均匀且无明显的侵填体,见图3(c);图3(d)为椴木的导管为单穿孔,纹孔互列排列[21]。桉木同为阔叶散孔材,由图3(e)可看出,其横切面上细胞分布均匀,管孔呈斜向单管孔排列且含侵填体[22];图3(f)中桉木的纵切面



(a) 原始泡桐横切面
(a) the cross-sections of original paulownia

(b) 原始泡桐纵切面
(b) the longitudinal sections of original paulownia

(c) 原始椴木横切面
(c) the cross-sections of original basswood

(d) 原始椴木纵切面
(d) the longitudinal sections of original basswood

(e) 原始桉木横切面
(e) the cross-sections of original eucalyptus

(f) 原始桉木纵切面
(f) the longitudinal sections of original eucalyptus

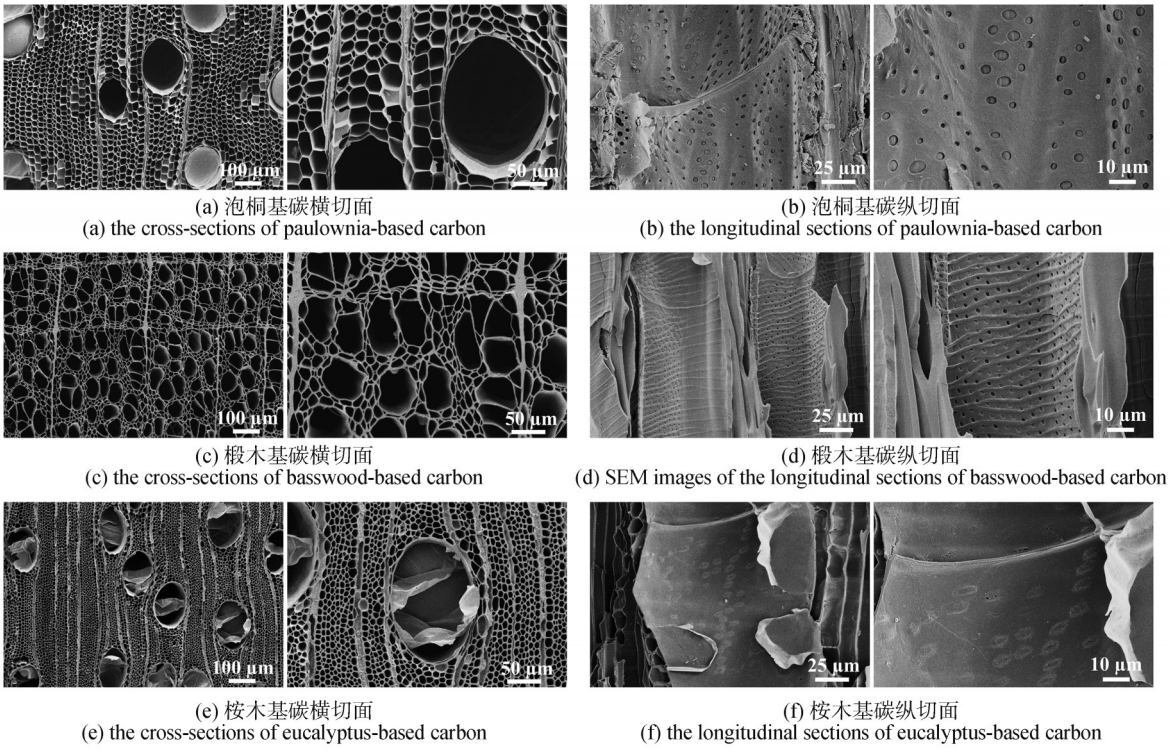
图3　原始泡桐、椴木、桉木的SEM图像

Fig. 3　SEM images of original paulownia, basswood and eucalyptus

可观察到导管纹孔为封闭型附物纹孔。与泡桐相比，可发现桉木的细胞壁更厚，导管内的侵填体丰富，结构更加紧密，因此密度相比泡桐更高。而椴木的细胞结构均匀，导管腔没有泡桐和桉木直径大，但是椴木导管的分布更加均匀，且细胞壁比泡桐更厚，因此椴木的密度处于泡桐与桉木之间。

图4是3种木材经800℃碳化后的SEM图像，由图4可知，碳化后木基碳材料仍完整保留了原始木材的微观结构特征，整体构型未发生明显变化，表明所选用的分段式升温碳化工艺未对木材骨架结构造成破坏。从横切面观察，木基碳材料的多孔结构得以维持，丰富的孔隙结构为电磁波的多重反射与能量耗散提供了有利条件，见图4(a)、图4(c)、图4(e)。对碳化前后细胞壁厚度进行分析，发现碳化后3种木材的细胞壁厚度均有所减薄，其中椴木的变化程度最为显著(图4(c))，这可能与椴木细胞壁在热解过程中组分损失比例较高有关。图4(b)、图4(d)、图4(f)纵切面SEM图像显示，木基碳材料保留了原有的导管结构，并在此基础上形成了层状与沟槽状的微观形貌。这种沿导管轴向排列的形貌特征有利于在材料内部形成连续的导电通路，为电子的传输提供了结构基础。当电磁波接触到这些导管结构时，部分电磁波因阻抗不匹配而在表面发生反射，其余进入材料内部的电磁波则在多孔结构内经历“反射—吸收—再反射”的重复衰减过程，从而被有效消耗，这种由天然木材分级多孔结构衍生出的多重反射损耗机制是木基碳材料具备电磁屏蔽性能的最显著优势之一[23]。进一步对比3种木基碳材料的结构特征可发现，泡桐基碳细胞壁薄、细胞腔大，整体结构疏松，孔隙率高，密度最低，推测这种结构有利于电磁波的深入渗透与内部多重反射；椴木基碳细胞结构相对均匀，孔隙大小中等，密度居中，表现出较为均衡的结构特征，有利于优化阻抗匹配，使入射电磁波在内部均匀分散并发生多重反射吸收；桉木基碳细胞壁厚，导管内侵填体丰富，质地紧实，密度最高，其致密的结构有利于形成连续的导电网络，从而提升电导损耗能力。3种木基碳材料均具有优异的多级孔隙结构和良好的可浸渍性，为功能材料的负载与填充提供了充足的空间，在制备木基碳复合材料方面具有良好的应用潜力。

总体而言，对比3种原始木材的微观结构可以发现，泡桐与桉木均呈现出大直径导管与周边小孔径细胞交替分布的典型结构，其中泡桐细胞壁更薄、细胞腔更大，整体结构更疏松；而椴木的细胞大小整体更为均匀，结构分布相对均衡。经800 ℃高温碳化处理后，3种木基碳材料均完整保留了原始木材的微观结构与多级孔隙网络。丰富的孔隙结构为电磁波在材料内部



(a) 泡桐基碳横切面
(a) the cross-sections of paulownia-based carbon

(b) 泡桐基碳纵切面
(b) the longitudinal sections of paulownia-based carbon

(c) 椴木基碳横切面
(c) the cross-sections of basswood-based carbon

(d) 椴木基碳纵切面
(d) SEM images of the longitudinal sections of basswood-based carbon

(e) 桉木基碳横切面
(e) the cross-sections of eucalyptus-based carbon

(f) 桉木基碳纵切面
(f) the longitudinal sections of eucalyptus-based carbon

图4 泡桐基碳、椴木基碳、桉木基碳的SEM图像

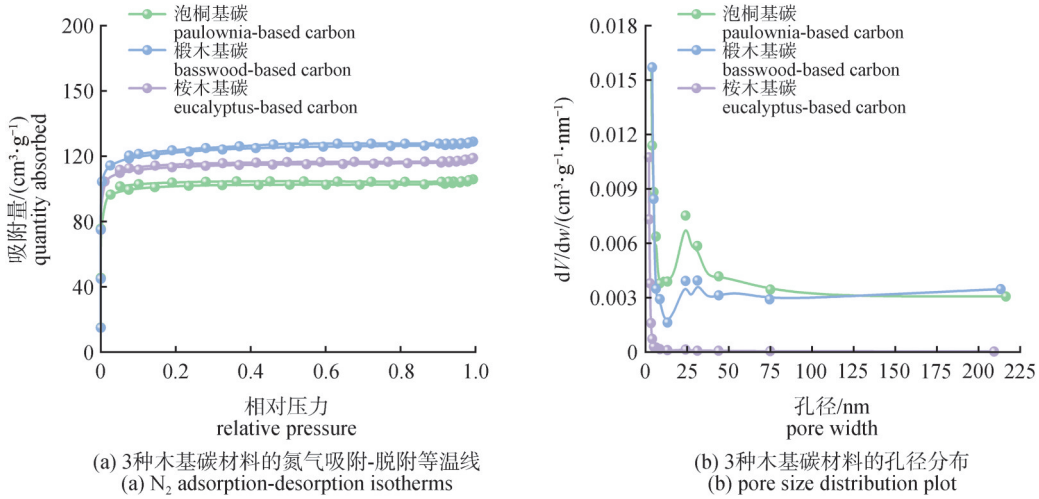
Fig. 4 SEM images of paulownia-based carbon, basswood-based carbon and eucalyptus-based carbon

的多重反射与能量耗散提供了有利的物理空间,从而赋予材料优异的电磁屏蔽性能。

2.3　木基碳材料的孔隙结构分析

图5为所制备木基碳材料的孔隙结构。3种纯木基碳的氮气吸附和脱附等温线均表现出典型的Ⅰ型吸附特征,见图5(a)。在较低的相对压力范围(0.0~0.1),吸附量迅速上升并偏向Y轴,表明材料与氮气有较强的相互作用力,并在一定的相对压力下吸附达到饱和状态。这种等温线类型通常反映微孔的吸附过程,表明样品中存在明显的微孔结构[24]。整体而言,吸附—脱附过程大体呈现S形等温曲线,与木材固有的孔隙结构特性相符。与原始木材相比,碳化处理后材料的比表面积及微孔/介孔数量显著增加。原始木材的微孔/介孔数量通常较少,主要来源于细胞壁表面的物理吸附;而碳化后微孔/介孔数量大幅提升。这一变化主要归因于以下3个方面:1)碳化过程中,纤维素、半纤维素和木质素热解释放出CO、CO_2、CH_4等气体,在细胞壁内部及表面"刻蚀"出大量纳米级孔隙;2)高温诱导的体积收缩导致细胞壁产生微裂纹;3)无定形碳区域与石墨微晶区域之间的界面形成了纳米尺度的孔隙。由此可见,碳化过程不仅保留了木材原有的宏观-微观多孔结构,还在纳米尺度上进一步丰富了孔隙体系[25-26]。

根据Barrett-Joyner-Halenda method(BJH)法测算,泡桐、椴木和桉木基碳的平均孔径分别集中在3.13、2.81、3.49 nm,均处于介孔范围(2~50 nm),见图5(b)。孔体积对孔宽求导(dV/dw)表示在某一孔径附近的孔体积分布密度,dV/dw越大,说明该孔径尺寸的孔隙数量越多或贡献的孔体积越大。结合木基碳材料横切面与纵切面的SEM图像分析可知,3种木基碳的孔隙结构主要以大孔为主。内部介孔结构的存在可能是木材经过高温碳化处理导致体积收缩,释放大量气体,木基碳的导管管壁形成许多裂缝和孔隙。其中椴木基碳具有更均匀的细胞结构及碳化过程中形成的丰富微孔;泡桐基碳的微孔比相对较低,主要是因为其大孔径导管占主导。



(a) 3种木基碳材料的氮气吸附-脱附等温线
(a) N_2 adsorption-desorption isotherms

(b) 3种木基碳材料的孔径分布
(b) pore size distribution plot

图5　3种木基碳材料孔隙特征

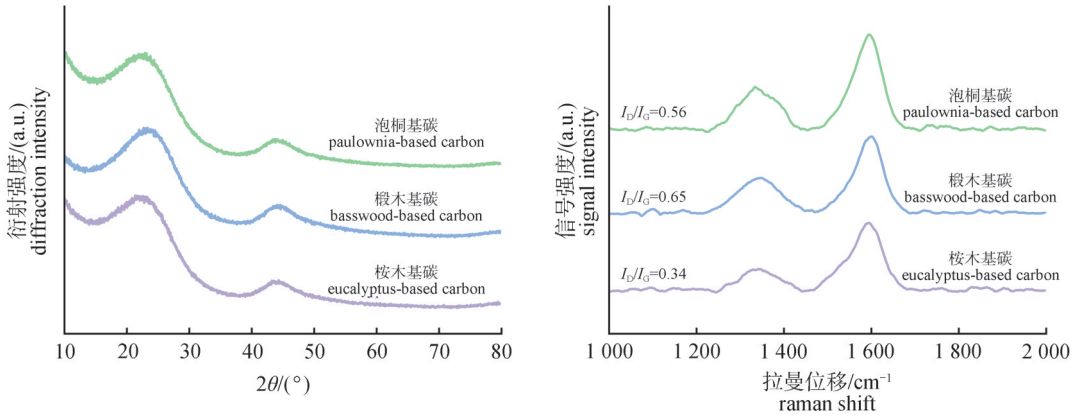
Fig. 5　Pore characteristics of three wood-based carbon materials

2.4　木基碳材料的结晶结构分析

3种木基碳材料的XRD谱图见图6(a)。样品均在24°附近出现典型的宽化衍射峰,对应于石墨微晶结构的(002)晶面[27],这表明木材中的纤维素、半纤维素及木质素等有机组分在高温碳化过程中形成了石墨微晶结构,具有一定有序度的碳层为材料导电性提供了结构基础。此外,样品在43°附近出现较弱的宽化衍射峰,对应于(100)晶面,进一步佐证了石墨微晶结构的形成。对比三者的衍射峰特征可见,(002)峰的峰位、半高宽与峰形均无明显差异,说明泡桐、椴木、桉木经过相同的碳化工艺处理后形成了结构相似的石墨微晶,所制备的碳材料在微晶有序度方面具有良好的一致性。

图6(b)为3种木基碳材料的Raman光谱图。所有样品均在1 340 cm^{-1}和1 590 cm^{-1}附近出现典型的D峰与G峰。其中,D峰反映碳骨架的缺陷与无序结构,G峰表征sp^2杂化的石墨化有序结构[28],这表明泡桐、椴木、桉木经碳化处理后,均成功形成了具备石墨微晶特征的碳基骨架结构。通常使用D峰与G峰的强度比(I_D/I_G)来评估碳材料的无序度或石墨化程度。I_D/I_G越

低，代表材料的石墨化有序度越高、缺陷越少。经计算，各样品的I_D/I_G由小到大依次为桉木基碳(0.34)、泡桐基碳(0.56)、椴木基碳(0.65)，表明桉木基碳的石墨化有序度最高，椴木基碳最低。这一差异主要源于原始木材的组分与微观结构的不同，其中桉木因密度较高、纤维结构相对致密，在高温碳化过程中更易发生有序化重排，从而形成缺陷更少、石墨化程度更高的碳骨架。



(a) 3种木基碳材料的XRD图谱
(a) XRD patterns of three wood-based carbon materials

(b) 3种木基碳材料的拉曼光谱图
(b) raman spectra of three wood-based carbon materials

图6 3种木基碳材料的结晶结构分析

Fig. 6 Crystal structure analysis of three wood-based carbon materials

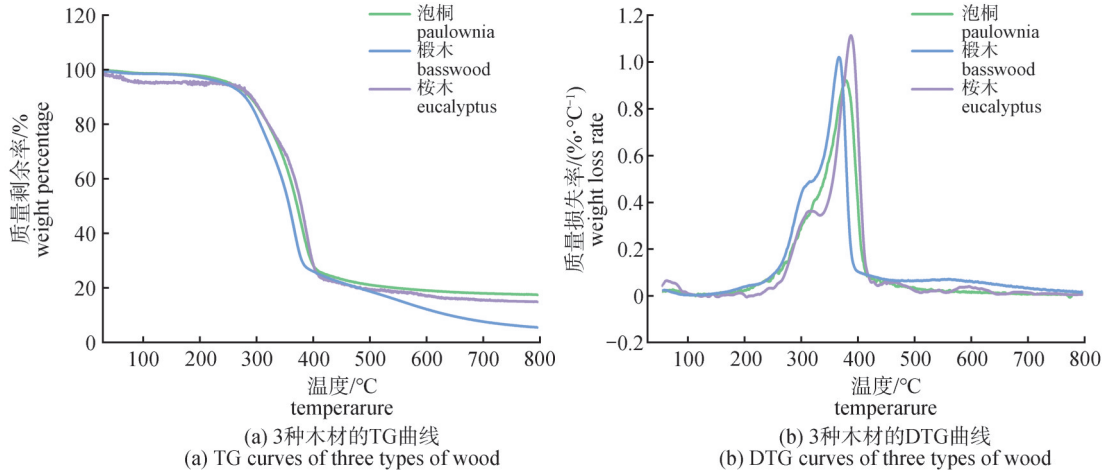
2.5 木材碳化的热解行为分析

为比较泡桐、椴木及桉木在碳化过程中的热分解行为，进行了热重分析。表1列出了相应热分解特征参数，图7为3种木材热解过程中质量和温度关系曲线。由图7(a)可知，三者的热分解过程均呈现阶段性特征，100 ℃以下主要为木材吸收热量和水分蒸发；100~350 ℃对应半纤维素与纤维素的快速热解炭化；350 ℃以上为木炭燃烧和残炭氧化阶段[29]。尽管热解趋势相似，主要失重区间均集中在300~400 ℃，但特征参数存在差异。泡桐的热分解起始温度($T_{5\%}$)为256.03 ℃，对应于半纤维素侧链基团的初始断裂，而桉木与椴木的$T_{5\%}$分别较泡桐提前15.48 ℃和10.11 ℃，表明两者的半纤维素热稳定性更低。泡桐的热分解半程温度($T_{50\%}$)为372.86 ℃，反映纤维素与木质素共同主导的分解阶段；桉木的$T_{50\%}$较泡桐延后7.42 ℃，说明其纤维素结晶区更完整或木质素质量分数较高，延缓了整体热失重进程；椴木的$T_{50\%}$为358.82 ℃，这与较低的木质素质量分数及纤维素在较低温度区间快速解聚有关。比较最大热解速率温度，见图7(b)，泡桐的最大热解速率温度(T_{max})为378.93 ℃，桉木的T_{max}较泡桐延后9.62 ℃，这可能归因于木质素结构中芳香环取代基团的热稳定性较高；椴木的T_{max}较泡桐提前11.67 ℃，进一步印证其纤维素组分可能更易在较低温度下发生解聚。综合$T_{5\%}$、$T_{50\%}$及T_{max} 3个特征温度，3种木材在氮气气氛下的热稳定性由大到小排序为桉木、泡桐、椴木。400 ℃后木材的热分解速率逐渐减小，木炭以小分子气体(如CO、CO_2、CH_4等)的形式脱除氧和氢，经过进一步芳构化，最终在800 ℃时形成稳定残炭[30]。在800 ℃下，泡桐、桉木与椴木的质量剩余率(残炭率)分别为17.42%、14.86%和5.43%，残余质量(残炭量)与木材中木质素质量分数呈正相关：木质素富含芳香环结构，热解过程中缩合形成高度交联的炭层，其成炭率远高于纤维素和半纤维素[31]。3种木材残炭率的差异可能与其组分构成有关：泡桐中难热解组分(如木质素)的相对质量分数较高，故残炭率最高；而椴木中易热解组分(如纤维素)占比较高，残炭率偏低。结合密度分析可知，泡桐的原始密度虽然最低，但残炭率反而最高，这表明残炭率并不直接决定最终木基碳材料的密度，原始木材的孔隙率等其他因素对最终密度的影响可能更为显著。

表1 3种木材的热重分析结果

Tab. 1 Thermogravimetric analysis results of three types of wood

组别 type	$T_{5\%}$/℃	$T_{50\%}$/℃	T_{max}/℃	残余质量分数/% residual weight fraction
泡桐 Paulownia	256.03	372.86	378.93	17.42
椴木 Basswood	245.92	358.82	367.26	5.43
桉木 Eucalyptus	240.55	380.28	388.55	14.86



(a) 3种木材的TG曲线　(b) 3种木材的DTG曲线
(a) TG curves of three types of wood　(b) DTG curves of three types of wood

图7　3种木材的热重分析

Fig. 7　Thermogravimetric analysis curves of three types of wood

2.6　木基碳材料的导电性能分析

图8为3种木基碳材料的电导率数据。材料的电导率会直接影响到其导电损耗强度。原始木材为绝缘体,经800 ℃碳化后转化为具备导电性能的木基碳材料。这一导电性转变与碳化过程中木材化学结构的变化密切相关,在800 ℃高温及氮气惰性气氛下,管式炉提供了无氧环境,使木材发生热解炭化。木材中的纤维素、木质素等有机大分子发生脱羟基和脱羧基反应,氢和氧被移除;剩余的碳原子重新排列,形成具有石墨微晶结构的无定形碳。在这一结构中,碳原子以sp^2杂化形式键合,形成离域π键,π电子可在碳层间自由移动,从而形成导电通路。这类似于有机聚合物经热处理转化为碳材料的石墨化过程。得益于碳化过程中形成的sp^2杂化碳骨架及内部连通的微观网络结构,电子传输获得了有效通路[32]。3种材料的电导率为泡桐基碳(3.08 S/cm)最小、椴木基碳(3.51 S/cm)和桉木基碳(3.53 S/cm)相同。结合密度与微观结构分析,电导率变化与木材密度呈一定的正相关关系。桉木基碳和椴木基碳密度较高,单位体积内含碳量更丰富,导电网络更致密,电子传输效率更高;泡桐基碳密度较低,孔隙结构相对疏松,碳骨架连续性稍弱,电导率偏低。进一步结合热重分析中的残炭率数据可知,椴木的残炭率最低(5.43%),但其电导率(3.51 S/cm)与桉木基碳相当;泡桐的残炭率最高(17.42%),电导率却最低(3.08 S/cm)。这表明,材料的导电性能不仅取决于碳总量,更取决于碳骨架的空间连通性与石墨化有序度。

2.7　木基碳材料的电磁屏蔽性能分析

图9为3种木基碳材料在X波段(8.2~12.4 GHz)的电磁屏蔽性能测试结果。在该频段内,泡桐基碳与椴木基碳的S_{ET}整体较为稳定,适合宽频段稳定的电磁

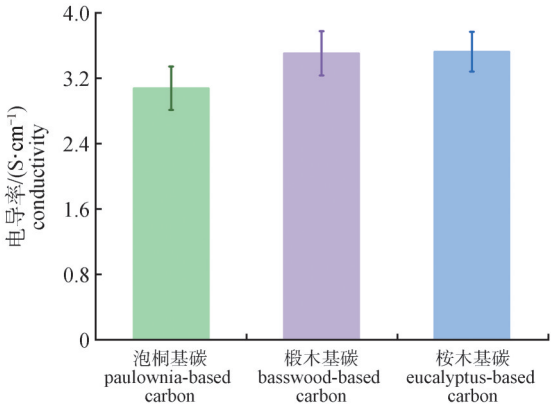


图8　3种木基碳材料的电导率

Fig. 8　Electrical conductivity of three wood-based carbon materials

屏蔽需求;桉木基碳的S_{ET}随频率波动相对明显,见图9(a),这可能与其较高的电导率导致趋肤深度对频率变化更敏感,以及致密导电网络与特定频率电磁波发生阻抗匹配有关。泡桐基碳、椴木基碳和桉木基碳的平均S_{ET}分别为26.22、24.50、28.98 dB,见图9(b),均高于20 dB的商业应用基本要求[33]。其中,桉木基碳最高,主要源于其高电导率带来的高导电损耗。泡桐基碳次之,虽然其电导率最低,但丰富的多孔结构增强了内部多重反射损耗,使电磁波在材料内部得到有效耗散。椴木基碳相对最低,这可能与其细胞分布均匀、电磁波传播路径较为稳定有关。3种材料的屏蔽效率均超过99.6%,见图9(c),意味着透过材料的电磁波不足0.4%。从表2列出的3种木基碳材料与其他文献报道的木基碳复合材料的电磁干扰屏蔽性能对比数据可以看出,尽管本研究所制备的3种木基碳材料均已达到一般商业应用对电磁屏蔽性能的基本要求,但面向

表 2 3 种木基碳材料与其他报道木基碳复合材料的电磁干扰屏蔽性能比较

Tab. 2 Comparison of EMI shielding performance of three wood-based carbon materials with other reported wood-based carbon composites

屏蔽材料 EMI shielding materials	厚度/mm thickness	密度/(g·cm^{-3}) density	屏蔽效能/dB S_E	绝对屏蔽效能/(dB·cm^2·g^{-1}) $S_{SE/t}$	电导率/(S·cm^{-1}) conductivity
CWF/EP/Co film[32]	0.2		73	15833.3	105
CW/Ni-0[37]	—	0.080	76.4	—	—
CWF/ZIF-8[15]	—	0.29	46	11330.04	58
FeNi-SnOx/CW[38]	2	—	59.2	—	4.373
FeCo@WCA[39]	—	—	60	4539.4	3.704
泡桐基碳 Paulownia-based carbon	3.87	0.140	26.22	427.9	3.08
椴木基碳 Basswood-based carbon	3.39	0.285	24.50	251.4	3.51
桉木基碳 Eucalyptus-based carbon	3.98	0.290	28.98	248.93	3.53

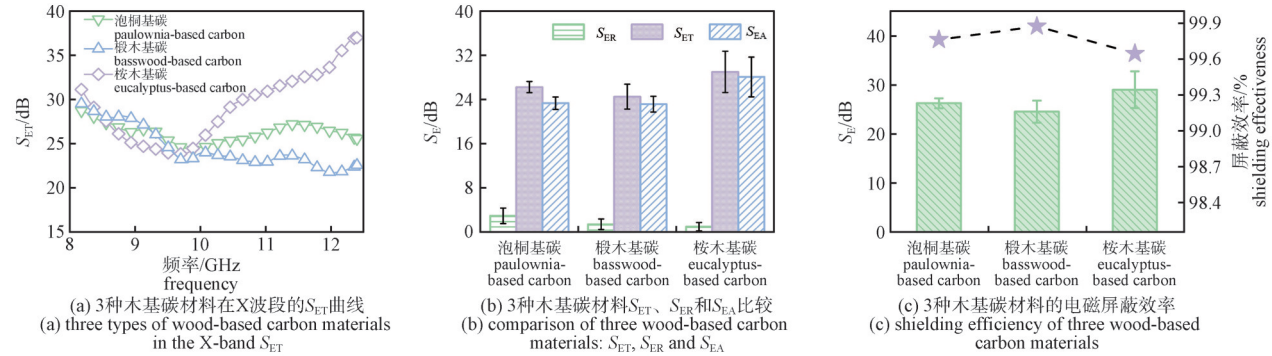
5G 通信、航空航天、精密仪器等高端应用领域，其屏蔽性能仍有进一步提升的空间。总体而言，3 种材料均展现出良好的实际应用潜力，后续可通过负载功能材料等策略，进一步优化其电磁屏蔽性能。

系统对比了 3 种木基碳材料的平均透射系数（T）、吸收系数（A）与反射系数（R）。在判断电磁屏蔽机制时，通常通过比较 R 与 A 的数值。若 R 明显高于 A，说明电磁波主要在材料表面被反射，反射损耗起主导作用；反之，若 A 高于 R，则电磁波更多进入材料内部并被吸收，吸收损耗占主导[34]。由图 9(d)可知，除泡桐基碳外，桉木与椴木基碳的 R 均高于 A，表明后两者的屏蔽机制以反射损耗为主。反射损耗与材料电导率呈正相关，桉木基碳与椴木基碳的电导率相近，且均高于泡桐基碳，因此泡桐基碳的反射系数较低、吸收系数相对较高，这一特性使泡桐基碳在开发绿色电磁屏蔽材料方面具有更明显的优势。

样品的厚度与密度会影响电磁屏蔽性能，试验中常用绝对屏蔽效能（$S_{SE/t}$）来综合评估材料的 EMI 屏蔽能力[35]。图 9(e)对比了 3 种木基碳材料的 $S_{SE/t}$，其中泡桐基碳最高，达到 480 dB·cm^2/g，表现出良好的轻质高效屏蔽特性。这主要得益于泡桐基碳密度最低，同时具备中等的电磁屏蔽效能。趋肤深度 δ 越小，表明材料在较薄厚度下即可实现对电磁波的有效衰减[36]。图 9(f)为 3 种木基碳的 δ 在全频段内差异不大，均在 1.4 mm 左右，说明 3 种木基碳均可在较薄厚度下实现有效的电磁屏蔽。

综合来看，3 种木基碳材料因自身结构与导电特性的差异，展现出不同的电磁屏蔽性能。泡桐基碳密度最低，凭借丰富的多级孔隙结构，在较低电导率下即可实现轻质高效的屏蔽效果，具有制备低反射损耗型绿色电磁屏蔽材料的潜力。椴木基碳的细胞分布均匀，密度与电导率等参数处于中等水平，整体性能表现相对均衡。桉木基碳的密度与电导率最高，孔隙网络致密，表现出最佳的电磁屏蔽效能；但高电导率易导致高反射特性，可能引发二次污染问题。因此，可根据实际应用需求灵活选择不同木材制备木基碳电磁屏蔽材料。

通过实物演示试验来直观评估 3 种木基碳材料的实际屏蔽性能。基于特斯拉线圈搭建的实物演示试验装置见图 10(a)，对应的电路原理图见图 10(b)，B 为电池（Battery），提供直流电源；C 为电容器（Capacitor）；R_1 为电阻器 1 号（Resistor 1）；L_1 为电感器 1 号（Inductor 1），即线圈或变压器初级绕组；L_2 为电感器 2 号（Inductor 2），即线圈或变压器次级绕组；BG 为半导体管（Transistor），这里用 BG 表示三极管；BD139 为功率三极管，常用于放大和开关电路。。该装置由 4.5 V 直流电源、1 μF 滤波电容、100 kΩ 限流电阻、2 匝初级线圈、350 匝次级线圈及 BD139 型功率三极管构成，通过自激振荡产生高频高压电磁场，以发光二极管的点亮状态作为电磁信号传输的可视化指示。闭合开关后，发光二极管正常发光，将泡桐、桉木、椴木 3 种空白木片分别置于线圈与二极管之间时，二极管仍保持点亮，见图 10(c)，表明未经处理的天然木材无电磁屏蔽能力，电磁信号可完整穿透；而将泡桐基碳、桉木基碳、椴木基碳 3 种木基碳材料插入同一位置后，二极管即刻熄灭，见图 10(d)，直观证实木基碳材料可有效阻隔电磁信号的传输。实物演示结果表明，空白木片无屏蔽能力，3 种木基碳材料均能有效阻隔电磁信号，直观验证了碳化处理赋予材料实用的电磁屏蔽性能。



(a) 3种木基碳材料在X波段的S_{ET}曲线
(a) three types of wood-based carbon materials in the X-band S_{ET}

(b) 3种木基碳材料S_{ET}、S_{ER}和S_{EA}比较
(b) comparison of three wood-based carbon materials: S_{ET}, S_{ER} and S_{EA}

(c) 3种木基碳材料的电磁屏蔽效率
(c) shielding efficiency of three wood-based carbon materials

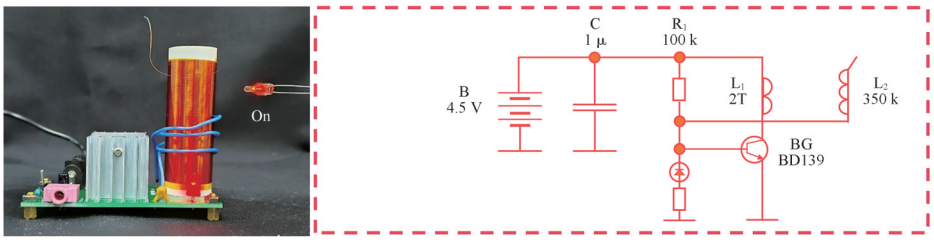
(d) 3种木基碳材料的反射、吸收和透射系数
(d) R, A and T coefficients of three wood-based carbon materials

(e) 3种木基碳材料的绝对屏蔽效能
(e) $S_{SE/t}$ of three wood-based carbon materials

(f) 3种木基碳材料的趋肤深度
(f) skin depth of three wood-based carbon materials

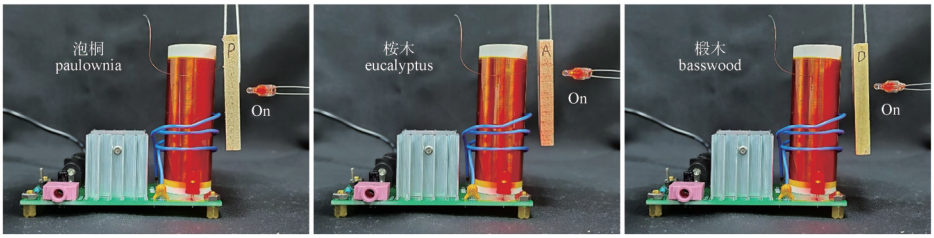
图9　3种木基碳材料的电磁屏蔽性能测试

Fig. 9　Electromagnetic shielding performance test of three wood-based carbon materials

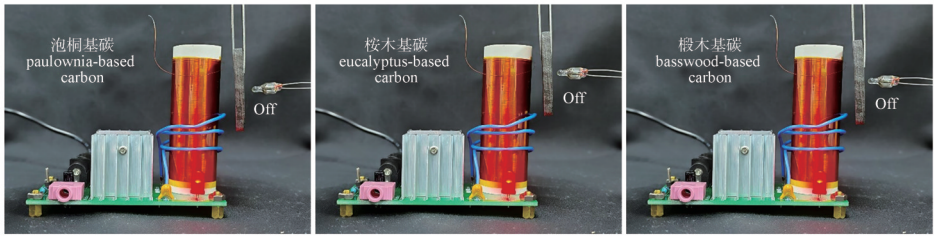


(a) 特斯拉线圈实物
(a) tesla coil experimental setup

(b) 特斯拉线圈电路
(b) tesla coil circuit schematic



(c) 泡桐、桉木、椴木空白木片电磁屏蔽性能测试实物
(c) raw wood chips of paulownia, eucalyptus, and basswood for EMI performance test



(d) 泡桐基碳、桉木基碳、椴木基碳电磁屏蔽性能测试实物
(d) paulownia-based carbon, eucalyptus -based carbon, and basswood-based carbon for EMI performance test

图10　电磁屏蔽性能测试实物

Fig. 10　Electromagnetic shielding performance test physical diagram

2.8 木基碳材料的电磁屏蔽机理分析

图11展示了木基碳材料的电磁屏蔽机制示意图。在800 ℃碳化过程中，木材中绝缘的共价键（C—C、C—O、C—H）发生断裂，氢、氧以小分子形式脱除。剩余碳原子经脱氢缩合与sp^2杂化重排，形成石墨微晶及离域大π键。π电子可在碳层内自由迁移，成为自由电子，从而使材料具备导电性。碳化后的木基碳骨架导电性能良好，内部富含自由电子，在电磁场作用下易产生感应电流，形成电导损耗[40]。木材本身具有天然的各向异性结构，当电磁波入射到导电的层状界面时，传播路径会发生偏折。此外，木材固有的分级多孔结构也延长了电磁波在材料内部的传输路径，使其在微孔和孔隙界面间反复反射与再吸收，从而实现电磁能量的逐层耗散。总体来看，在电导损耗与多重反射损耗的协同作用下，木基碳材料能够有效衰减电磁波。

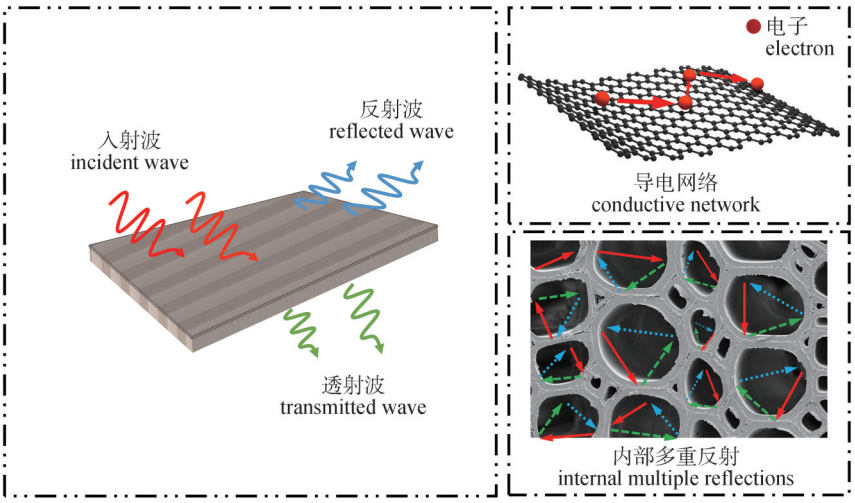


图11 木基碳材料的电磁屏蔽机理示意图

Fig. 11 Schematic diagram of electromagnetic shielding mechanism of wood-based carbon materials

基于上述机理，进一步分析3种木基碳材料因密度与孔道结构等不同而产生的电磁屏蔽性能差异。材料的孔道结构会直接影响其密度。从SEM图像可以观察到，密度最小的泡桐基碳具有最丰富的多级孔道结构，使得电磁波在泡桐基碳内部进行多重反射，增强了多重反射损耗，更多的电磁波在材料内部被吸收；反映在电磁屏蔽参数上，即吸收系数大于反射系数，有利于制备绿色电磁屏蔽材料。然而，低密度也会使得单位体积的碳容量低，导致电导率下降，从而使得导电损耗处于较低水平。在多重反射损耗与导电损耗的协同作用下，泡桐基碳处于中等的电磁屏蔽水平。桉木基碳具有最大的密度，碳化后单位体积的碳密度最高，电导率最高，相应的电导损耗处于较高水平。然而，高导电损耗会增大材料与空气之间的阻抗不匹配程度，更多的电磁波在材料表面发生二次反射，可能造成二次污染。因此，与泡桐基碳相比，桉木基碳具有更高的电磁屏蔽效能，但其反射率大于吸收率。在选取桉木基碳制备木基电磁屏蔽复合材料时，应将电导率控制在适当范围内，以免造成二次污染。椴木基碳的密度处于中间水平，SEM图像显示，其孔道结构相对泡桐基碳和桉木基碳更均匀，细胞孔径大小更集中、均匀，但细胞壁最薄，可能会导致电磁波在材料内部多重反射的程度降低，因此椴木基碳的电磁屏蔽效能处于中等水平。

3 结论

本研究以泡桐、椴木和桉木3种不同密度的阔叶材为原料，通过高温碳化处理制备了木基碳材料。木基碳材料继承了木材原有的分级多孔结构与自支撑骨架特征，为电磁波在材料内部的多重反射与散射损耗提供了物理基础。原始密度通过影响碳化后导电网络的连续性与含碳量分布，使电导率处于3.08~3.53 S/cm范围内。其中，泡桐因低密度、高孔隙显示出轻质高效的优势（$S_{SE/t}$=480 dB·cm²/g）；因为桉木具有高密度、高电导率，所以具有最高的电磁屏蔽性能（S_{ET}=28.98 dB）；椴木性能介于两者之间，表现均衡。碳化处理赋予材料导电性能，使其在电磁场作用下产生电导损耗，同时多孔结构引发多重反射损耗。在两种机制协同下，3种材料均表现出20 dB以上的电磁屏蔽效能，满足商业应用基本要求。

制得的3种木基碳材料展现出差异化屏蔽特性：泡桐基碳以吸收损耗为主，适用于低二次污染的绿色

屏蔽应用;椴木基碳吸收与反射贡献相对均衡;桉木基碳屏蔽效能最高,但反射损耗占比较高。需要指出的是,高温碳化后材料的力学性能下降,难以满足结构承载类应用。因此,将碳化木材与其他功能材料复合,制备兼具良好力学性能与优异电磁屏蔽性能的木基碳复合材料,是推动其实际应用的重要发展方向。

参 考 文 献

[1] Yin P F, Lan D, Lu C F, et al. Research progress of structural regulation and composition optimization to strengthen absorbing mechanism in emerging composites for efficient electromagnetic protection[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2025, 204: 204-223.

[2] Li D K, Chen H, Ferber J R, et al. Exposure to magnetic field non-ionizing radiation and the risk of miscarriage: A prospective cohort study [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 17541.

[3] Li B W, Zhang X Y, Qiao N, et al. A real-time working memory evaluation system for macaques in microwave fields[J]. Bioelectromagnetics, 2024, 45(7): 338-347.

[4] Khan I, Alshehri A, Wang P C, et al. Design and performance evaluation of a compact radiation absorber for 5G applications[J]. Frontiers in Materials, 2024, 11: 1428912.

[5] Zhang Z Y, Gong Z Q, Zheng Z K, et al. Construction and properties of epoxy resin-based conductive and thermally conductive composites with electromagnetic shielding function[J]. Polymer Composites, 2025, 46(S1): S856-S870.

[6] Li J, Peng W J, Fu Z J, et al. Achieving high electrical conductivity and excellent electromagnetic interference shielding in poly(lactic acid)/silver nanocomposites by constructing large-area silver nanoplates in polymer matrix [J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 171: 204-213.

[7] 李秀英,张镭,孟源,等. 柔性木质复合材料:从刚性到可扭转的制备策略与跨领域多功能应用[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(2): 1-14.
Li Xiuying, Zhang Lei, Meng Yuan, et al. Flexible wood composites: From rigidity to twistability via advanced fabrication for multidisciplinary applications[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(2): 1-14.

[8] Wei A Z, Wang C C, Hu C S, et al. Lightweight nano-metallized wood: Toward high-performance electromagnetic interference shielding with multifunctional attributes [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2025, 196: 109012.

[9] 李坚,甘文涛,陈志俊,等. 向新出发,木材科学前沿发展[J]. 森林工程, 2025, 41(1): 1-39.
Li Jian, Gan Wentao, Chen Zhijun, et al. Frontier advances in wood science towards a new departure[J]. Forest Engineering, 2025, 41(1): 1-39.

[10] 杨柳青,陈鹏宇,杨誉涵,等. 木材的“神奇变身术”——净化滤水器[J/OL]. 大学化学, 1-10[2026-03-04].
Yang Liuqing, Chen Pengyu, Yang Yuhan, et al. The “magic transformation” of wood into water purifier [J/OL]. University Chemistry, 1-10[2026-03-04].

[11] Wan X Y, Xia X J, Zhen Y Z, et al. Biomimetic MXene/wood hierarchical superamphiphobic films for solar-activated deicing and EMI shielding [J]. New Journal of Chemistry, 2025, 49(48): 20943-20953.

[12] Dai Z H, Hu C S, Wei Y Y, et al. Highly anisotropic carbonized wood as electronic materials for electromagnetic interference shielding and thermal management [J]. Advanced Electronic Materials, 2023, 9(7): 2300162.

[13] 林秀仪,戴振华,韦喻译,等. 木基电磁屏蔽/吸波材料研究进展[J]. 林业工程学报, 2024, 9(2): 14-22.
Lin Xiuyi, Dai Zhenhua, Wei Yuyi, et al. Research progress of wood-based electromagnetic interference shielding/wave absorbing materials[J]. Journal of Forestry Engineering, 2024, 9(2): 14-22.

[14] 刘康,腾清松,董武,等. 基于传输线理论的低压电力线载波通信信道建模研究[J]. 电工技术, 2025(21): 150-154.
Liu Kang, Teng Qingsong, Dong Wu, et al. Research on channel model of low voltage power line communication based on transmission line theory[J]. Electric Engineering, 2025(21): 150-154.

[15] Ma X F, Pan J J, Guo H T, et al. Ultrathin wood-derived conductive carbon composite film for electromagnetic shielding and electric heating management[J]. Advanced Functional Materials, 2023, 33(16): 2213431.

[16] Chung D D L. Materials for electromagnetic interference shielding[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2000, 9(3): 350-354.

[17] Zhang W B, Wei L F, Ma Z L, et al. Advances in waterborne polymer/carbon material composites for electromagnetic interference shielding [J]. Carbon, 2021, 177: 412-426.

[18] Zhang Y, Lu J Y, Yu J, et al. A controllable and fast carbonization strategy under air conditions and its application in electromagnetic interference (EMI) shielding[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2025, 192: 108764.

[19] 张勇. 微生物侵蚀对泡桐组分结构与热化学特性影响研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2024.
Zhang Yong. Effects of microbial erosion on composition and thermochemical properties of paulownia[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2024.

[20] 吴晓梅. 基于植酸协同绿色阻燃体系的泡桐木材高值

化利用研究[D]. 郑州:河南农业大学,2025.
Wu Xiaomei. Research on high-value utilization of paulownia wood based on phytic acid synergistic green flame retardant system[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2025.

[21] 管懿婷,张笑涵,杨昆,等. 椴木衍生炭负载Fe-N-C自支撑电极用于催化过氧化氢电还原反应的研究[J]. 科技通报,2025,41(9):50-57.
Guan Yiting, Zhang Xiaohan, Yang Kun, et al. Fe-N-C supported on basswood-derived carbon as a self-supporting electrode for electrochemical reduction of hydrogen peroxide[J]. Bulletin of Science and Technology, 2025, 41(9):50-57.

[22] 邓凤伟,林本平,刘永丰. 樟木、构木和桉木材性及硫酸盐法制浆性能对比研究[J]. 造纸装备及材料,2024,53(5):43-45.
Deng Fengwei, Lin Benping, Liu Yongfeng. Comparative study on wood properties and kraft pulping performance of camphorwood, paper mulberry wood and eucalyptus[J]. Papermaking Equipment & Materials, 2024, 53(5):43-45.

[23] Zhou M, Gu W H, Wang G H, et al. Sustainable wood-based composites for microwave absorption and electromagnetic interference shielding[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2020, 8(46):24267-24283.

[24] Zou J, Fan C Y, Jiang Y, et al. A preliminary study on assessing the brunauer-emmett-teller analysis for disordered carbonaceous materials[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2021, 327:111411.

[25] Yin J P, Song K L, Lu Y, et al. Comparison of changes in micropores and mesopores in the wood cell walls of sapwood and heartwood[J]. Wood Science and Technology, 2015, 49(5):987-1001.

[26] Zauer M, Prinz C, Adolphs J, et al. Sorption surfaces and energies of untreated and thermally modified wood evaluated by means of excess surface work (ESW)[J]. Wood Science and Technology, 2018, 52(4):957-969.

[27] Yoo S, Chung C C, Kelley S S, et al. Graphitization behavior of loblolly pine wood investigated by in situ high temperature X-ray diffraction[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6(7):9113-9119.

[28] Yamagishi T, Shibutani S, Suzuki H, et al. Raman characterization of layer of graphene-like structures in 3d-transition metal-loaded charcoal by comparison with X-ray diffraction data[J]. Wood Science and Technology, 2024, 58(4):1451-1471.

[29] 于凡钧. 碱木质素基复合改性剂提升杉木阻燃及尺寸稳定性能研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2025.
Yu Fanjun. Study on the improvement of flame retardancy and dimensional stability of Chinese fir with alkali lignin based composite modifier[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2025.

[30] Albert C M, Liew K C. A review on the role of thermogravimetric analysis in assessing thermal stability and degradation of wood[J]. Wood Science and Technology, 2025, 59(4):55.

[31] Shahbaz M, Alnouss A, Parthasarathy P, et al. Investigation of biomass components on the slow pyrolysis products yield using Aspen Plus for techno-economic analysis[J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2022, 12(3):669-681.

[32] Ma X F, Liu S Y, Luo H, et al. MOF@wood derived ultrathin carbon composite film for electromagnetic interference shielding with effective absorption and electrothermal management[J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34(4):2310126.

[33] Liu P B, He Z Z, Li X C, et al. Multifunctional hollow carbon microspheres enable superior electromagnetic wave response and corrosion barrier[J]. Advanced Materials, 2025, 37(35):2500646.

[34] Yan M Y, Pan Y L, He P, et al. Flexible hierarchical hollow SiC/SiOx Micro/nanofiber sponges for broadband electromagnetic wave absorption[J]. Advanced Fiber Materials, 2025, 7(3):853-863.

[35] He Y T, Zou Y J, Sun L X, et al. Multifunctional phase-change materials with Ni-MOF/MXene hierarchical network for thermal energy storage, photothermal conversion, and excellent electromagnetic shielding[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 119:116385.

[36] Zachariah S M, Grohens Y, Kalarikkal N, et al. Hybrid materials for electromagnetic shielding: A review[J]. Polymer Composites, 2022, 43(5):2507-2544.

[37] Dai Z H, Hu C S, Li Y J, et al. Carbonized wood/nickel nanoparticle composites with oriented channels for enhanced electromagnetic interference shielding[J]. ACS Applied Nano Materials, 2023, 6(14):13646-13655.

[38] Feng W Y, Chen C Z, Zhao J H, et al. Modification of carbonized lignocellulose framework with FeNi-SnOx heterojunctions for enhanced electromagnetic interference shielding[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 311:143970.

[39] Shen M X, Li X J, Qi J L, et al. Magnetic metal-loaded wood carbon aerogel composites for electromagnetic shielding and microwave absorption[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2025, 198:109070.

[40] Liu C, Han M R, Lin J P, et al. Wood biomass-derived carbon for high-performance electromagnetic wave absorbing and shielding[J]. Carbon, 2023, 208:255-276.