

引用格式: 郭威, 李毓陵, 李光. 木棉基碳纤维的制备及其吸波性能[J]. 中国材料进展, 2025, 44(8): 761-769.

GUO W, LI Y L, LI G. Preparation and Absorption Performance of Carbonized Kapok Fibers[J]. Materials China, 2025, 44(8): 761-769.

木棉基碳纤维的制备及其吸波性能

郭威¹, 李毓陵², 李光¹

(1. 东华大学材料科学与工程学院, 上海 201620)

(2. 东华大学纺织科学与工程学院, 上海 201620)

摘要: 以具有中空结构的天然木棉纤维为碳前驱体, 采用直接碳化法制得木棉基碳纤维, 并将其作为吸波剂制备吸波复合材料。通过对比具有中空结构的木棉基碳纤维和实心结构棉花基碳纤维作为吸波剂时复合材料的吸波性能, 证明了含有中空结构的碳纤维能增强对电磁波的衰减; 以在不同碳化温度下制得的木棉基碳纤维为吸波剂, 以不同添加量与石蜡复合制得复合材料, 发现用碳化温度为 1000 °C 制备的木棉基碳纤维作为吸波剂, 质量分数为 7%、吸波复合材料厚度 2 mm 时, 复合材料表现出优良的吸波性能: 最低反射损耗达 -32.7 dB, 有效频带宽度达 5.1 GHz。木棉基碳纤维不但依靠其中实体碳通过介电损耗吸收电磁波, 而且其中空结构引发了大量界面极化和干涉相消, 实现多种机制共同衰减电磁波。木棉基碳纤维是一种有潜力的吸波剂, 有望在拓宽吸波频带、吸波材料轻量化方面发挥作用。

关键词: 木棉基碳纤维; 吸波剂; 复合材料; 反射损耗; 吸波机理

中图分类号: TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2025)08-0761-09

Preparation and Absorption Performance of Carbonized Kapok Fibers

GUO Wei¹, LI Yuling², LI Guang¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

(2. College of Textile Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: Natural kapok fibers with hollow structures were employed as carbon precursors, and carbonized kapok fibers (CKF) were prepared through a direct carbonization method. These CKF were subsequently utilized as absorbents to fabricate absorbent composites, simultaneously comparing the absorbent performance of composites containing hollow-structured CKF and solid-structured cotton-based carbon fibers as absorbents. It was demonstrated that carbon fibers with hollow morphology enhance electromagnetic wave attenuation. Furthermore, the absorbent properties of composites filled with CKF carbonized at different temperatures under different mass fractions were investigated. When the CKF carbonized at 1000 °C was used, and with a 7wt% absorbent addition, composite plates with a thickness of 2 mm exhibited excellent absorbent performance, achieving a minimum reflection loss of -32.7 dB and an effective bandwidth of 5.1 GHz. CKFs not only rely on their solid carbon content for electromagnetic wave absorption through dielectric loss, but also benefit from the abundant interface polarization and interference cancellation induced by their hollow structure, enabling multiple mechanisms for electromagnetic wave attenuation. CKFs show significant potential as absorbents and are poised to play a role in expanding the absorption bandwidth and reducing the weight of absorbent materials.

Key words: carbonized kapok fibers; microwave absorbent; composites; reflection loss; microwave absorbing mechanism

1 前言

作为信号传输媒介, 电磁波在信息获取、目标侦测、武器制导、电子对抗与攻防等领域发挥着关键作用, 然而因电磁辐射导致武器装备信息泄露而失去信息主动权的风险也大大增加。因此, 实现武器装备对电磁波隐身具有重要价值。吸波材料是实现装备隐身的基础, 吸收

收稿日期: 2023-09-25 修回日期: 2024-02-22

第一作者: 郭威, 男, 1998年生, 硕士研究生

通讯作者: 李光, 女, 1962年生, 教授, 博士生导师,

Email: lig@dhu.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202309025

能力强、有效频带宽、质量轻、厚度薄则是吸波材料研究的重要方向^[1, 2]。

吸波材料通常是由吸波剂与树脂共混而成的具有吸波性能的复合材料。碳材料是常用的吸波剂,包括碳黑、碳纳米管、石墨烯、碳纤维等^[3-6],碳材料的电导率、形貌、尺寸、在树脂中添加量等都会影响所制备的吸波材料的性能。其中一维碳纤维由于更易形成感应微电流网络,被认为是具有潜力的复合材料吸波剂^[7-10]。但以常规结构和尺寸的碳纤维作为吸波填充剂时,复合材料吸波性能难以满足应用需求,已有研究表明,将平均直径 7 μm 、长度 4 mm 的短切碳纤维以 0.5% 比例(质量分数,下同)添加到聚酰亚胺树脂中,制备的单层复合材料板在厚度为 3 mm 时的最低反射损耗(reflection loss, RL)值为 -14.39 dB,有效频带宽仅为 1.43 GHz^[11]。改变碳纤维长度可以调节复合材料的介电常数:班国东等^[12]的研究表明当碳纤维长度在 1~5 mm 范围,随着碳纤维长度的增加,吸波复合材料介电常数呈现先增大后减小的趋势,在碳纤维长度为 3 mm 时达到最高的介电常数值。此外,通过结构设计改变碳纤维形貌,对提升复合材料吸波性能具有很大贡献:曹奇益等^[13]以生物质茶叶废料为碳前驱体制成了螺旋结构碳纤维,以 10% 填充量与石蜡共混制备吸波材料,吸波材料厚度为 3.53 mm 时有最低 RL 值,可达 -38.18 dB,RL 低于 -10 dB 的频带宽度可达 4.8 GHz;Li 等^[14]研究了多孔碳纤维与纳米碳纤维分别作为吸波剂时复合材料的吸波性能,结果表明填充剂质量分数相同的情况下,含多孔碳纤维的复合材料的吸波性能远高于纳米碳纤维复合材料:在多孔碳纤维填充比例为 6% 条件下,最低 RL 可达 -31 dB,而 RL 低于 -5 dB 频段范围达 4.2 GHz,覆盖全 X 波段,证明多孔结构可以提升材料吸波性能。

已报道的中空结构的碳纤维一般基于聚丙烯腈原丝碳化制备^[14],从资源可再生的视角出发,若从自然生长的植物中获取原料,则无需中空聚丙烯腈原丝制备过程,提升可再生资源利用率并降低碳排放量。木棉纤维具有天然的中空结构,中空度超过 80%,纤维直径为 5~15 μm ^[8, 15, 16]。由于其独特中空结构,目前已经被开发用作水处理中的油吸附材料^[17]和吸声降噪材料^[18, 19]。但对于以木棉纤维作为碳前驱体制备碳纤维的研究相对较少,而将木棉基碳纤维(carbonized kapok fiber, CKF)作为吸波填充剂,探究中空结构对吸波性能的影响更是鲜有报道。本文以木棉纤维为碳前驱体,直接碳化得到 CKF,并将其作为吸波剂与石蜡复合制备复合材料,研究木棉碳化温度、添加量、中空结构对吸波性能的影响。

2 实验

2.1 实验材料

木棉纤维来自云南省红河县中国科学院昆明植物研究所;高纯 N_2 (>99.99%)和无水乙醇(>99.7%)购自国药集团化学试剂有限公司;实验中使用的所有化学试剂均为分析纯级别。

2.2 木棉基碳纤维制备

将木棉原纤维去籽,去离子水冲洗 3 遍以去除纤维上附着的杂质,烘箱干燥 2 h 后放入管式炉, N_2 氛围下以 5 $^\circ\text{C}/\text{min}$ 升温速率分别升温到 900, 1000 和 1100 $^\circ\text{C}$,保温 1 h,随后冷却至室温,称取样品。木棉纤维在此过程中转化为 CKF,对应样品记为 CKF-900、CKF-1000 和 CKF-1100。以棉花纤维为原料进行相同 1000 $^\circ\text{C}$ 碳化处理,得到棉花基碳纤维(carbonized cotton fiber, CCF),作为对比样,对应样品记为 CCF-1000。

2.3 木棉基碳纤维吸波复合材料的制备

按照吸波剂添加质量分数分别为 5%, 7% 和 9%,称取一定质量的 CKF 与固体石蜡均匀混合,制备吸波复合材料。用模具压制内径 3.04 mm、外径 7.00 mm、厚度 2~3 mm 的同轴环形试样,供电磁参数测试用。

2.4 分析与测试

用场发射扫描电子显微镜(FESEM, JEOL JSM-7500F)观察 CKF 的微观形貌和结构特征。用 X 射线衍射仪(XRD, Bruker D8 advance)分析样品成分、材料内部原子聚集态结构等信息。用 X 射线光电子能谱仪(XPS, PHI-5400)获得材料的元素组成和含量、化学状态、分子结构和化学键等信息。将拉曼光谱(INVIA, 532 nm 激光器)用于分子结构研究,获取分子振动、转动方面的信息。用矢量网络分析仪(安捷伦 HP8722ES 型)基于同轴法测试样品在 2~18 GHz 频率范围内的电磁参数。用四探针法电阻测试仪(Keithley 4200A-SCS)测定复合吸波材料电导率。

3 结果与讨论

3.1 木棉基碳纤维的形貌和结构

图 1 为木棉原纤维以及 CKF 的截面形貌和纤维形貌。对比发现,木棉纤维在碳化过程中出现一定程度的断裂,导致 CKF 的长度较于原纤维缩短,并伴随出现部分管道结构扭曲和表面褶皱,但整体仍然保留了中空管状结构,管直径在 5~15 μm 范围内。

由 XPS 图谱(图 2a)可知,CKF 主要由 C 和 O 元素构成,其 C 1s 分峰结果如图 2b 所示,在 284.60 和 285.87 eV 处有明显的特征峰,分别对应于 —C=C— 键

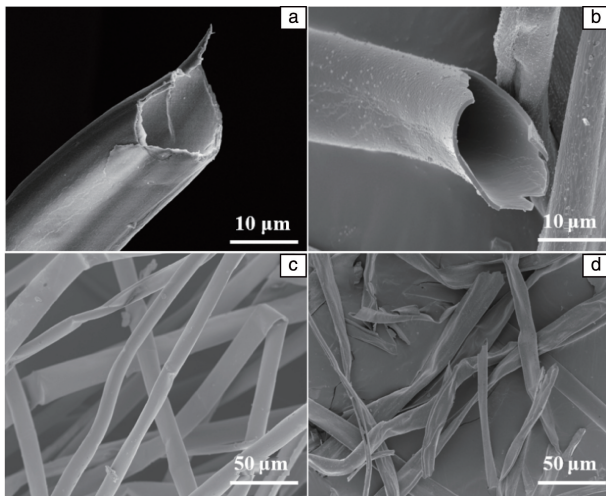


图 1 木棉纤维(a, c)和木棉基碳纤维(b, d)的形貌

Fig. 1 Morphologies of kapok fibers (a, c) and carbonized kapok fibers (CKF) (b, d)

和—C=O—键，表明碳化后木棉碳纤维表面 C 元素主要以碳碳双键、羰基碳形式存在^[20]。在木棉纤维 XRD 图谱(图 2c)中，在 16.1°和 21.9°出现衍射峰，分别对应其纤维组分中纤维素 I 典型的(110)和(002)晶面^[21]，而 CKF 的 XRD 图谱中原有纤维素组分的衍射峰减弱，转而在 22.6°和 43.5°附近出现新峰，分别对应无定型碳的(002)和(101)晶面，表明在升温过程中纤维素组分晶体结构被破坏并转化为无定型碳。

对比 CKF-900、CKF-1000 和 CKF-1100 拉曼光谱(图 2d)，发现均出现碳材料经典 D 峰(1358 cm⁻¹)和 G 峰(1580 cm⁻¹)。其中 D 峰代表石墨微晶缺陷、边缘等的无定型碳的存在；G 峰代表碳原子 sp² 杂化的面内伸缩振动，G 峰的形成说明 CKF 内部形成了石墨层状结构^[22]。D 峰和 G 峰的强度比值($R=I_D/I_G$)可以反映碳材料石墨化程度：随着纤维碳化温度升高，CKF 的 R 值从 0.78 先上升到 0.93 再上升到 0.95，说明石墨化程度随着温度升高而下降^[23]。可以归因于碳化过程中高温条件下纤维素晶体结构被破坏，并部分转化为无定型碳，降低了石墨化程度，这一趋势与 XRD 图谱分析相呼应。

将不同碳化温度得到的 CKF 以 7% 添加量与石蜡复合制备吸波复合材料，得到的样品仍分别以吸波剂 CKF 的碳化温度为标记，记为 CKF-900、CKF-1000 和 CKF-1100。用四探针法测试其电导率，结果如图 2e 所示，可见电导率随着碳化温度升高呈下降趋势，可归因于温度升高使得基于纤维素结构转化的石墨化程度降低，与拉曼图谱结果相吻合。

3.2 木棉基碳纤维复合材料的电磁参数和吸波性能

电磁参数是反映复合材料吸波性能的重要参数^[24]。实际材料的介电常数和磁导率由于存在响应滞后，因此均以复数形式表示(复介电常数 $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$ 和复磁导率 $\mu = \mu' - j\mu''$)，其中实部 ϵ' 和 μ' 反映对电场能量和磁场能量的存储能力，虚部 ϵ'' 和 μ'' 反映对电场能量和磁场能量的损

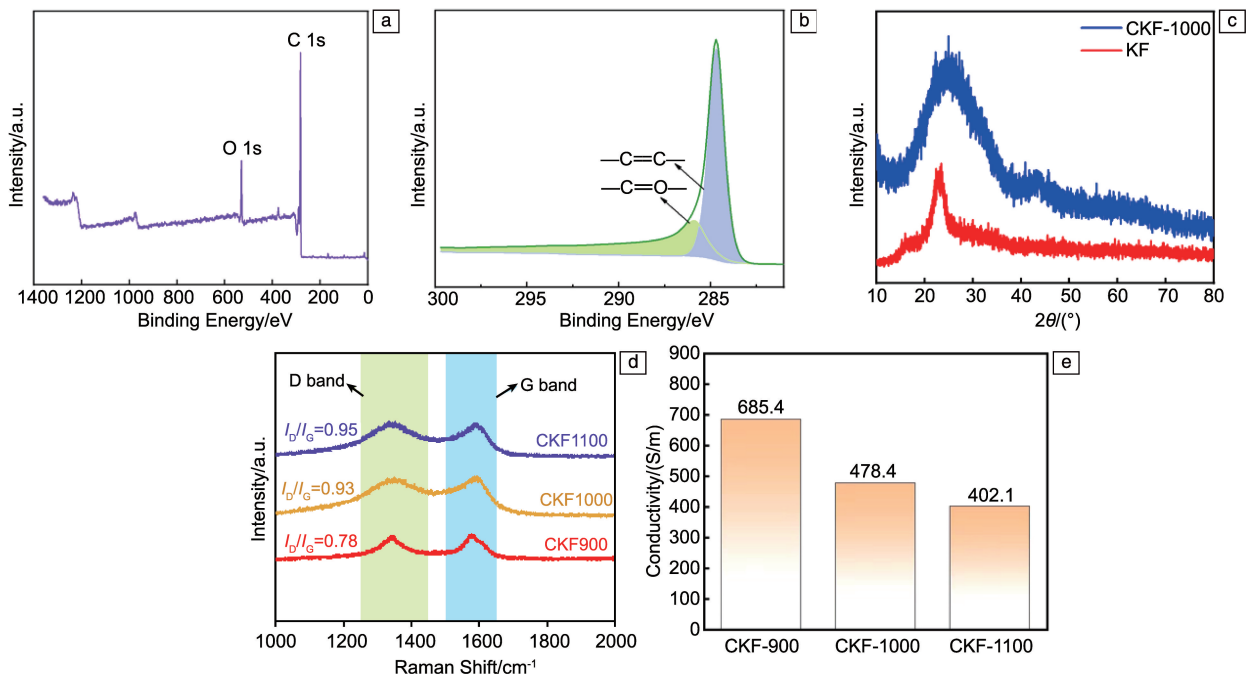


图 2 CKF-1000 的 XPS(a, b) 和 XRD 图谱(c)，不同碳化温度制备的 CKF 的 Raman 光谱(d) 及其吸波复合材料的电导率柱图(e)

Fig. 2 XPS spectrum (a, b) and XRD pattern (c) of CKF-1000, Raman spectra of CKFs carbonized at different temperatures (d) and conductivity column chart of their microwave absorbing composites (e)

耗能力^[25, 26]。由于 CKF 吸波复合材料无磁性(即 $\mu' = 1$, $\mu'' = 0$)，本研究只讨论介电常数变化。

为了探究中空结构对吸波性能的影响，本文以实心棉花基碳纤维作为对比组。如图 3 所示，木棉碳化所得碳纤维直径在 20~25 μm ，棉花碳化所得碳纤维直径在 10~20 μm ，具有良好的结构对比性。将 CKF-1000 与

CCF-1000 分别以 7% 的填充比与石蜡共混制备吸波复合材料，用同轴法测定 2~18 GHz 范围内复介电常数，结果如图 3c 和 3d 所示。可见，CKF-1000 吸波复合材料的复介电常数远远高于 CCF-1000 吸波复合材料，这主要归因于 CKF-1000 中空结构的存在引入了大量的界面极化，增强了对电磁波的极化能力和弛豫损耗能力。

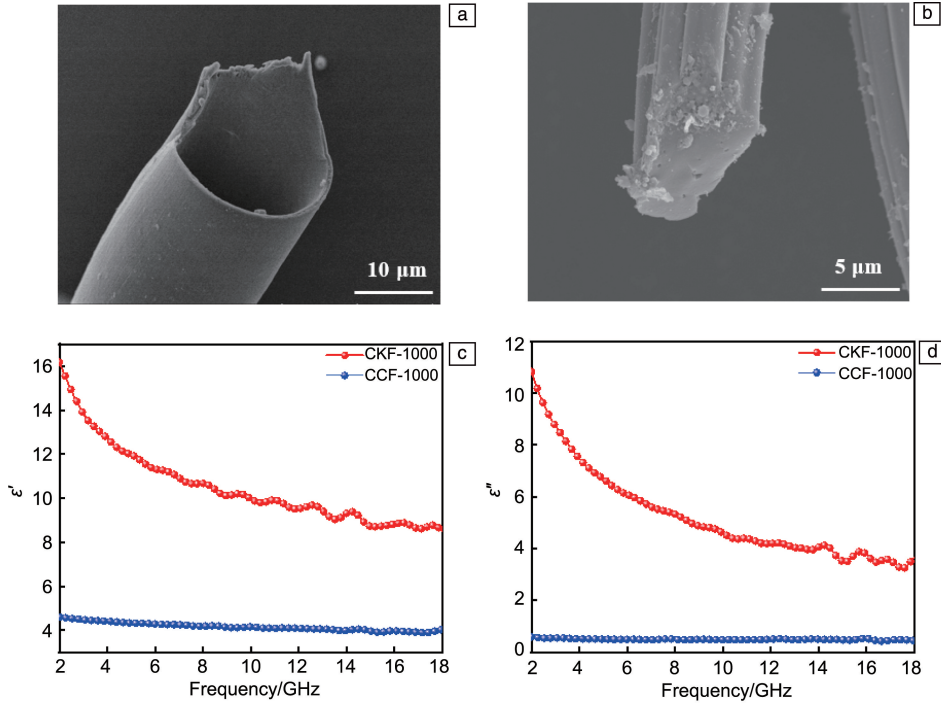


图 3 CKF-1000 (a) 与 CCF-1000 (b) 截面形貌及其作为吸波剂制备复合材料的复介电常数 (c, d)

Fig. 3 Cross-sectional morphologies of CKF-1000 (a) and CCF-1000 (b) and the complex permittivity of their microwave absorbing composites (c, d)

由电磁参数计算材料吸波性能，通常采用理想金属板上涂覆单层均质吸波材料这一被普遍接受的单层板模型。利用传输线理论对金属板上具有一定厚度的单层吸波材料按式(1)进行阻抗 Z 计算，通过阻抗值按照式(2)计算出对于垂直入射电磁波的 RL 值：

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh \left[j \left(\frac{2\pi f d}{c} \right) \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \right] \quad (1)$$

$$\text{RL} = 10 \log(R) = 20 \log \left[\frac{Z-1}{Z+1} \right] \quad (2)$$

式中， f 、 d 和 c 分别表示入射电磁波的频率、单层板材料厚度和光速 (3×10^8 m/s)； ϵ_r 和 μ_r 分别表示吸波材料复介电常数和复磁导率。通常认为 RL 低于 -10 dB (入射电磁波衰减达到 90%) 是有效吸收的基本要求，该区域被定义为有效吸收频带 (effective absorbing band, EAB)。图 4 为利用传输线理论计算的以 CKF-1000 和 CCF-1000 为吸波剂 (相同添加量 7%) 时两组样品在 2~18 GHz 频率范围内 RL 值变化曲线。

对比图 4a 和 4b 可知，CKF-1000 吸波复合材料具有更低的 RL：在厚度为 1.6 mm 条件下，频率为 16.4 GHz 处有最低反射损耗 (RL_{min})，约为 -43 dB；而 CCF-1000 在所有厚度范围的 RL_{min} 仅为 -5.6 dB。CKF-1000 最宽有效频带 (EAB_{max}) 在 1.6 mm 厚度时达到 5.1 GHz (12.4~17.5 GHz)，而 CCF-1000 在 2~18 GHz 内不具有有效吸波频段。实验证明，中空结构的存在使得碳纤维吸波性能大大提升。

3.3 木棉纤维碳化温度对吸波性能的影响

为探究纤维碳化温度对吸波性能的影响，在吸波剂填充比 7% 条件下，分别以 CKF-900、CKF-1000 和 CKF-1100 为吸波剂制备复合材料，各样品复介电常数在 2~18 GHz 范围内的变化如图 5 所示，随着碳化温度升高，复介电常数实部和虚部均呈现出下降趋势，这归因于升高温度使得碳化后纤维素组分中大量结晶结构转化为无定型结构，对应形成更多无序碳^[28]，导致石墨化程度下降，电偶极子数降低，而低电偶极子数使得在交变电场

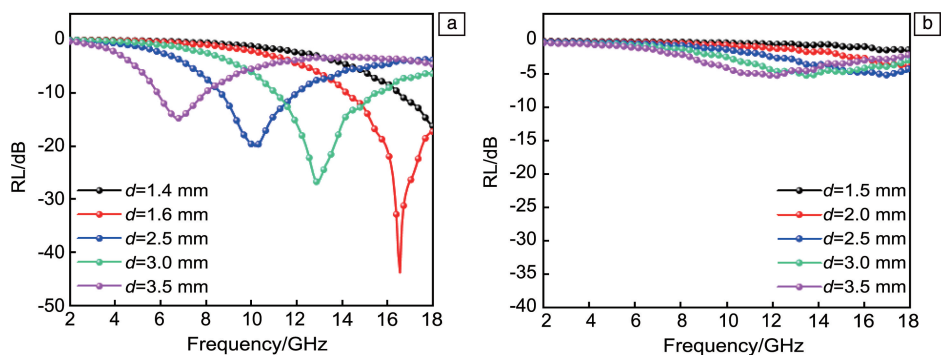


图 4 吸波复合材料反射损耗随频率变化：(a) CKF-1000，(b) CCF-1000

Fig. 4 Variations of reflection loss of microwave absorbing composites with frequency: (a) CKF-1000 based composite, (b) CCF-1000 based composite

作用下产生的微电流强度下降，导电损耗随之降低。此外，图 5c 的介电损耗角正切曲线显示，在 8~10 GHz 和 14~16 GHz 频段均出现微小振幅变化，可能归因于材料在交变电磁场下出现偶极子极化和界面极化^[29]。

为了进一步阐明碳化温度对电磁波损耗方式和能力的影响，引入德拜偶极弛豫模型，作出样品的 Cole-Cole 曲线^[30]。如图 6 所示，3 组样品的 Cole-Cole 曲线中均出现多个半圆，每一个半圆对应着一个德拜偶极弛豫过程^[31]。CKF-1100 则出现最多最强的扭曲半圆，表明拥

有更丰富的弛豫损耗，可以归因于升温过程中碳材料产生更多结构缺陷。Cole-Cole 曲线线性部分可以反映材料导电损耗的强度，线性部分越长导电损耗越强。对比发现 CKF-900 具有最强的导电损耗，这与图 2d 拉曼光谱中 CKF-900 具有较高的石墨化程度这一结论相验证。可以得出结论：随着木棉纤维碳化温度升高，其复合吸波材料的导电损耗降低，而介电弛豫损耗增强。因此，要获得具有优良吸波性能的 CKF，需要对纤维碳化温度进行优化。

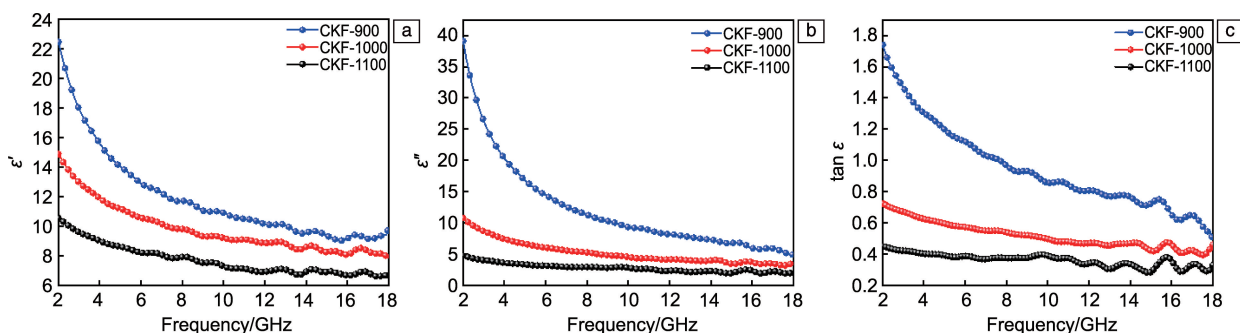


图 5 含不同吸波剂的吸波复合材料的复介电常数的实部(a)和虚部(b)以及损耗角正切曲线(c)

Fig. 5 Complex permittivity of microwave absorbing composites containing different microwave absorber: (a) real part of complex permittivity, (b) imaginary part of complex permittivity, (c) tangent of loss angle

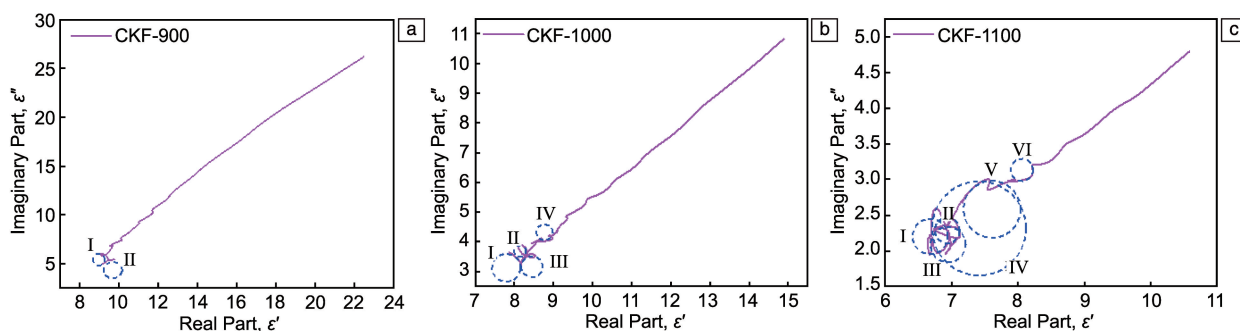


图 6 CKF 吸波复合材料的 Cole-Cole 曲线

Fig. 6 Cole-Cole curves of microwave absorbing composites with 7wt% CKF

吸波材料获得优异吸波性能有两个关键因素：界面处的阻抗 (Z_i) 匹配性能和内部对电磁波的衰减能力 (α)。材料界面阻抗 Z_i 可以由式 (3) 计算，越接近 1 则说明阻抗匹配性能越好，在界面处越多电磁波被吸收^[32, 33]：

$$Z_i = \sqrt{\sqrt{\mu''^2 + \mu'^2} / \sqrt{\varepsilon''^2 + \varepsilon'^2}} \quad (3)$$

衰减损耗可以由式 (4) 计算，其值越大说明吸波材料内部对电磁波的衰减能力越强^[34, 35]：

$$\alpha = \frac{\pi f \sqrt{2}}{c} \times \sqrt{(\mu''\varepsilon'' - \mu'\varepsilon') + \sqrt{(\mu''\varepsilon'' - \mu'\varepsilon')^2 + (\mu''\varepsilon'' + \mu'\varepsilon')^2}} \quad (4)$$

为进一步分析碳化温度对吸波材料阻抗匹配性与衰减能力的影响，通过式 (3) 和式 (4) 计算 3 组样品在 2~18 GHz 频率范围内的 α 与 Z_i 值。如图 7 所示， Z_i 随着碳

化温度升高而升高，而 α 呈现随碳化温度升高而降低的趋势，与吸波材料电导率变化呈现相同趋势。

为对比 CKF-900、CKF-1000 和 CKF-1100 作为吸波剂的吸波性能，利用传输线理论计算 3 组样品在 2~18 GHz 频率范围内不同厚度下的 RL，并绘制 RL 随频率变化的曲线(图 8)。可以看出，CKF-1000 对应的吸波复合材料在 3 个样品中具有最低 RL_{\min} ，在厚度为 1.64 mm 下，频率为 16.2 GHz 处， RL_{\min} 达 -51.1 dB；CKF-1100 在厚度为 3.5 mm，频率为 7.5 GHz 处， RL_{\min} 为 -38 dB；而 CKF-900 在厚度 2.5 mm 下， RL_{\min} 仅为 -11.5 dB。在复合吸波材料厚度 2 mm 条件下，CKF-1000 同时达到 EAB_{\max} ，为 5.1 GHz(12.4~17.5 GHz)；而同样厚度条件下，CKF-1100 的 EAB_{\max} 为 4.3 GHz(12.2~16.5 GHz)，CKF-900 则几乎不具备有效频带。综合对比复合材料厚度、 RL_{\min} 和 EAB_{\max} ，可以发现以 CKF-1000 为吸波剂制备的复合材料具有最优吸波性能。

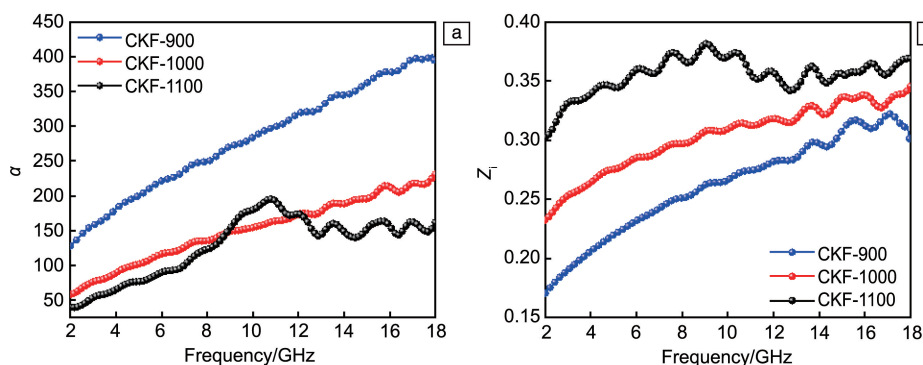


图 7 不同吸波剂对应吸波复合材料的衰减损耗(a)和界面阻抗(b)

Fig. 7 Attenuation loss(a) and interface impedance (b) of microwave absorbing composites with different kinds of CKF

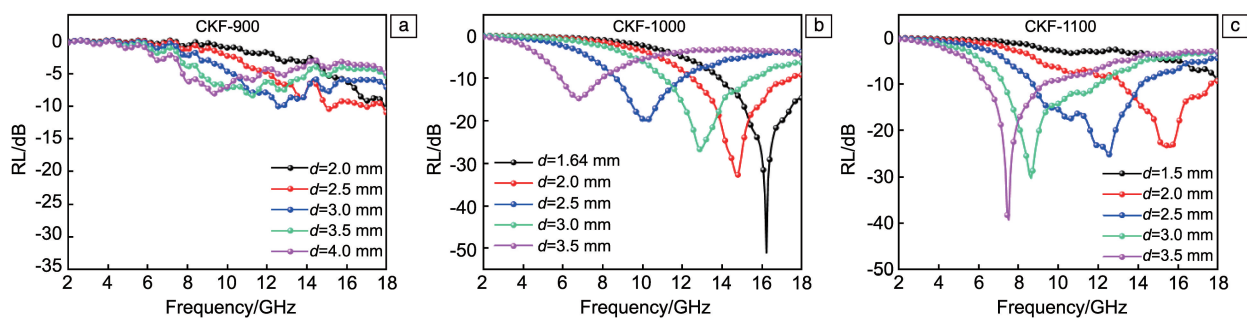


图 8 含不同吸波剂的吸波复合材料的反射损耗随频率的变化曲线

Fig. 8 Variations of reflection loss with frequency of microwave absorbing composites with different kinds of CKF

综合来看，虽然用 CKF-900 制备的吸波复合材料具有最强的电磁波衰减能力 (α 最大)，但因其导电性优异会使得交变电磁场下吸波材料表面形成感应微电流，导致电磁波大量在表面反射，造成阻抗失配 (Z_i 值最小)；CKF-1100 具有最优的阻抗匹配性，但低电导率导致其对电磁波衰减能力较弱；而 CKF-1000 兼具适配的阻抗和优

良的衰减损耗，因此具有最优的综合吸波性能，也就是说 1000 °C 是制备具有优良吸波性能的 CKF 的最佳碳化温度。

3.4 吸波剂填充量对吸波性能的影响

为探究 CKF 填充量对复合材料吸波性能的影响，以碳化温度 1000 °C 条件下制得的 CKF-1000 为吸波剂，按

吸波剂填充量 5%、7% 和 9% 制备复合材料, 分别记为 CKF-5%、CKF-7%、CKF-9%, 测量样品在 2~18 GHz 范围内复介电常数的变化, 结果如图 9 所示。随着 CKF 填充量升高, 复介电常数实部和虚部均升高, 这可以归因

于碳纤维含量增加使得偶极子数目增加, 在交变电磁场下获得更高的极化能力, 此外电偶极子含量增加使得在交变电场作用下会形成更强的微电流, 使得导电损耗增强。

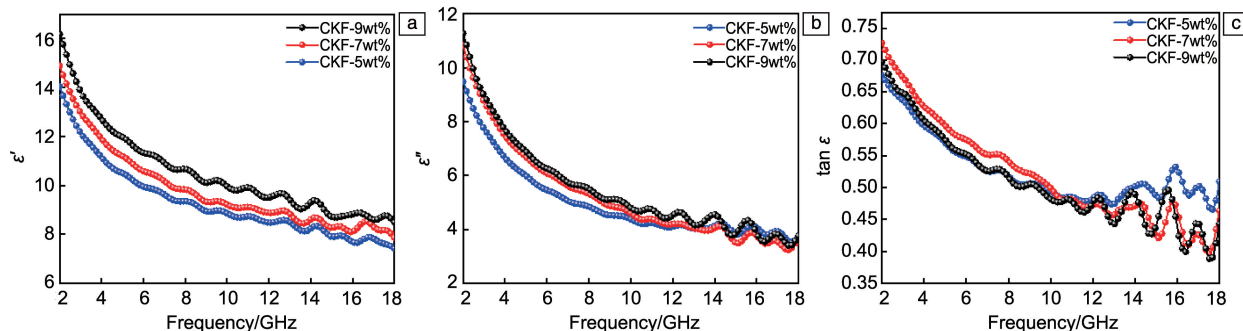


图 9 添加不同含量 CKF-1000 纤维的复合吸波材料的复介电常数的 (a) 实部和 (b) 虚部及损耗角正切 (c)

Fig. 9 Complex permittivity of microwave absorbing composites with different additions of CKF-1000: (a) real part of complex permittivity, (b) imaginary part of complex permittivity, (c) tangent of loss angle

为对比 CKF-5%、CKF-7% 和 CKF-9% 填充量的复合吸波材料的吸波性能, 由介电常数计算 3 个样品在 2~18 GHz 频率范围内不同厚度下的 RL 值, 并绘制 RL 随频率变化的曲线, 如图 10 所示。可见在 7% 填充量时吸波复合材料在 3 个样品中具有最低 RL_{\min} , 在厚度为 1.64 mm、频率为 16.2 GHz 时, RL_{\min} 达 -51.1 dB; 在 5% 填充量、在厚度为 1.60 mm、频率为 17.7 GHz 时, RL_{\min} 为 -32.1 dB; 在 9% 填充量、在厚度为 1.50 mm、

频率为 17.5 GHz 时, RL_{\min} 为 -35.2 dB。在复合吸波材料厚度 2 mm 条件下, 在 7% 填充量时, 同时也具有最宽的 EAB, 达到 5.1 GHz (12.4~17.5 GHz), 而同样厚度条件下, CKF-5% 的 EAB_{\max} 为 4.90 GHz (11.4~16.3 GHz), CKF-9% 的 EAB_{\max} 为 4.60 GHz (10.4~15.0 GHz)。综合对比复合材料厚度、 RL_{\min} 和 EAB_{\max} , 在 7% 填充量时吸波复合材料具有最优吸波性能。

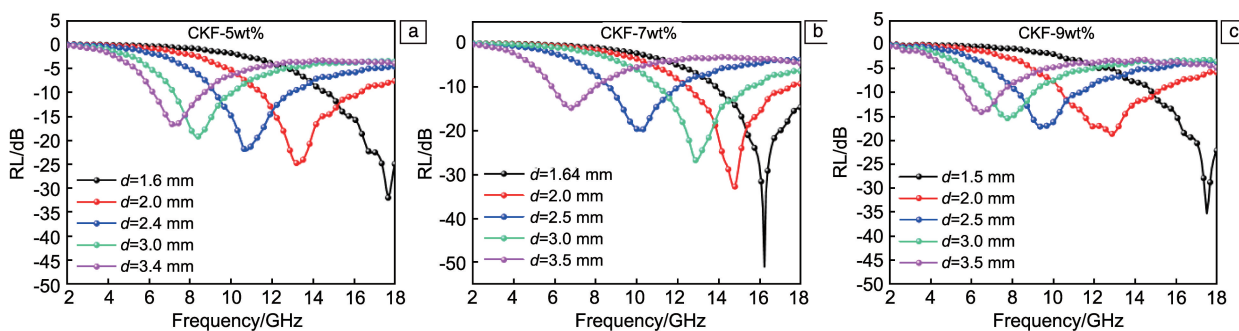


图 10 添加不同含量 CKF-1000 纤维的复合吸波材料的反射损耗随频率的变化曲线

Fig. 10 Variations of reflection loss with frequency of microwave absorbing composites with different addition of CKF-1000

由上文分析可知, 导电损耗为 CKF 对电磁波的主要损耗机制, 碳组分增加虽然会提升吸波材料导电能力, 但也会导致阻抗失配; 但碳组分含量低会导致对电磁波的衰减不足。CKF-7% 吸波复合材料具有最适配的阻抗和优异的衰减损耗, 在阻抗和衰减损耗之间达到平衡, 因此获得相对优异的吸波性能。

此外, 发现当使用 CKF 作吸波剂时, 无论碳化温度和添加量是否变化, 有效吸波频带随着复合材料厚度增

加均呈现向低频处偏移的趋势。这一现象可以用四分之一波长干涉相消理论解释: 当吸波材料厚度为入射电磁波波长四分之一时, 电磁波在材料表面初次反射和在金属底板处二次反射所产生的电磁波相位差为 180° , 此时两束波会发生干涉相消, 使得电磁能衰减^[36]。具体表达式如式(5):

$$d = \frac{ic}{4f\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} (i = 1, 3, 5 \dots) \quad (5)$$

随着厚度 d 增加, RL_{\min} 对应的特定频率(f_m)减小, 相应地, 有效频带会向低频处偏移。

3.5 木棉基碳纤维的吸波机理

以 CKF 为吸波剂的吸波复合材料展现出优异的吸波性能, 主要归因于以下几种机制(如图 11 所示): ① 木棉纤维碳化后形成一维导电管状结构, 在交变电磁场作用下在内外表面形成微电流网络, 将电磁能转化为热能

耗散。② 中空结构提供了大量空气-碳材料异质界面, 大大提升了在交变电磁场作用下的极化程度, 引发极化弛豫损耗。③ 管状结构通过增强电磁波在内部的反射, 延长了电磁波在吸波材料内部的传递路径, 引发更多传播损耗^[14, 37]。④ 电磁波在管内传播时被管壁反射, 与在金属底板反射的电磁波更容易满足四分之一波长奇数倍的相位差, 通过干涉相消衰减电磁波。

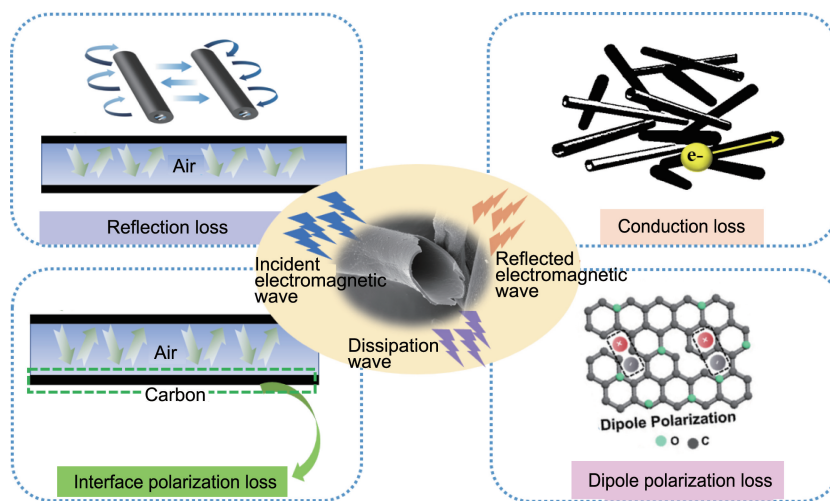


图 11 木棉基碳纤维吸波机理示意图

Fig. 11 Schematic illustration of microwave absorbing mechanism of CKF

4 结 论

(1) 以木棉纤维为碳前驱体, 经过高温碳化制得具有中空结构的木棉基碳纤维, 相比于实心结构棉花基碳纤维, 木棉基碳纤维表现出优良的吸波性能。

(2) 碳化温度通过影响木棉基碳纤维的电导率和介电损耗, 从而影响吸波性能, 从电磁波损耗和阻抗适配两方面考虑, 1000 °C 是最优的碳化温度。

(3) 在碳化温度 1000 °C 下得到的木棉基碳纤维填充质量分数 7% 时, 复合材料板在 2 mm 时, 有效吸波频带宽达 5.1 GHz, 最低反射损耗为 -32.7 dB。

(4) 木棉基碳纤维中空结构的存 在不但提供了更多的极化中心, 使吸波材料在交变电磁场作用下形成更强的极化弛豫损耗, 而且改变了电磁波的传输路径, 增大了通过干涉相消耗散电磁波的概率, 有效提升了材料吸波性能。

参考文献 References

[1] LI W, SHI J, ZHAO Y, *et al.* ACS Sustainable Chemistry & Engineering[J], 2020, 8(4): 1831-1839.
[2] 刘晓明, 华宇晨, 傅远翔, 等. 中国材料进展[J], 2023, 42(9): 685-698.

LIU X M, HUA Y C, FU Y X, *et al.* Materials China[J], 2023, 42(9): 685-698.
[3] KIM J, KIM G, KIM S Y, *et al.* Composites Part B: Engineering [J], 2021, 221: 109010.
[4] WU F, LIU Z, XIU T, *et al.* Composites Part B: Engineering[J], 2021, 215: 108814.
[5] SUN Z, YAN Z, YUE K, *et al.* Composites Part B: Engineering [J], 2020, 196: 108132.
[6] PANG H, ABDALLA A M, SAHU R P, *et al.* Journal of Materials Science[J], 2018, 53(24): 16288-16302.
[7] DING C, SHAO C, WU S, *et al.* Carbon[J], 2023, 213: 213-226.
[8] SUN J, WU Z, MA C, *et al.* Journal of Materials Chemistry A[J], 2021, 9(24): 13822-13850.
[9] KHARISSOVA O V, IBARRA TORRES C E, GONZÁLEZ L T, *et al.* Industrial & Engineering Chemistry Research [J], 2019, 58 (36): 16258-16286.
[10] WANG A, WANG W, LONG C, *et al.* Journal of Materials Chemistry C[J], 2014, 2(19): 3769-3776.
[11] 王辉, 魏霖涛. 科学技术创新[J], 2022(25): 17-20.
WANG H, WEI L T. Scientific and Technological Innovation [J], 2022(25): 17-20.
[12] 班国东, 刘朝辉, 叶圣天, 等. 表面技术[J], 2017, 46(4): 205-211.

- BAN G D, LIU Z H, YE S T, *et al.* Surface Technology[J], 2017, 46(4): 205-211.
- [13] 曹奇益, 刘兴龙, 祝淑媛, 等. 安徽工程大学学报[J], 2021, 36(2): 8-18.
- CAO Q Y, LIU X L, ZHU S Y, *et al.* Journal of Anhui Polytechnic University[J], 2021, 36(2): 8-18.
- [14] LI G, XIE T, YANG S, *et al.* The Journal of Physical Chemistry C [J], 2012, 116(16): 9196-9201.
- [15] ZHENG Y, WANG J, WANG A. Cellulose[J], 2021, 28(9): 5269-5292.
- [16] LIU Y, WANG J, ZHENG Y, *et al.* Chemical Engineering Journal [J], 2012, 184: 248-255.
- [17] CHEN L, YUAN H, CHEN S, *et al.* ACS Applied Materials & Interfaces[J], 2021, 13(26): 31226-31235.
- [18] ZHENG Y, WANG J, ZHU Y, *et al.* Journal of Environmental Sciences[J], 2015, 27: 21-32.
- [19] XIANG H F, DONG W, LIU H C, *et al.* Chinese Journal of Polymer Science[J], 2013, 31(3): 521-529.
- [20] SUN J, LEI E, MA C, *et al.* Electrochimica Acta[J], 2019, 300: 225-234.
- [21] SUN J, LI W, LEI E, *et al.* Journal of Power Sources[J], 2019, 438: 227030.
- [22] WANG Y, ZHU L, ZHU F, *et al.* Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers[J], 2017, 78: 351-358.
- [23] QUAN B, SHI W, ONG S J H, *et al.* Advanced Functional Materials[J], 2019, 29(28): 1901236.
- [24] XU X, RAN F, FAN Z, *et al.* ACS Applied Materials & Interfaces [J], 2020, 12(15): 17870-17880.
- [25] WU F, LIU Z, WANG J, *et al.* Chemical Engineering Journal[J], 2021, 422: 130591.
- [26] EBRAHIMI-TAZANGI F, HEKMATARA S H, SEYED-YAZDI J. Journal of Alloys and Compounds[J], 2021, 854: 157213.
- [27] LIANG L L, LIU Z, XIE L J, *et al.* Carbon[J], 2021, 171: 142-153.
- [28] CHENG J, CAI L, SHI Y, *et al.* Chemical Engineering Journal[J], 2022, 431: 134284.
- [29] SONG N N, YANG H T, LIU H L, *et al.* Scientific Reports [J], 2013, 3: 3161.
- [30] COLE K S, COLE R H. The Journal of Chemical Physics[J], 1941, 9(4): 341-351.
- [31] ZHANG X, CAI L, XIANG Z, *et al.* Carbon[J], 2021, 184: 514-525.
- [32] XU D, LIU J, CHEN P, *et al.* Journal of Materials Chemistry C[J], 2019, 7(13): 3869-3880.
- [33] CHEN J, ZHENG J, WANG F, *et al.* Carbon [J], 2021, 174: 509-517.
- [34] DERAKHSHANI M, TAHERI-NASSAJ E, JAZIREHPOUR M, *et al.* Journal of Alloys and Compounds[J], 2021, 886: 161195.
- [35] PARK J H, RO J C, SUH S J. Materials Research Bulletin [J], 2022, 145: 111513.
- [36] LIU P, ZHU C, GAO S, *et al.* Carbon[J], 2020, 163: 348-359.
- [37] SHAO R, WANG F, YANG S, *et al.* Materials [J], 2022, 15(20): 7273-7288.