

研究论文

木棉衍生碳纤维的制备及其吸波性能研究

邓 涵^{1,2}, 李 光^{1,2,*}

(1. 东华大学 先进纤维材料全国重点实验室, 上海 201620; 2. 东华大学 材料科学与工程学院, 上海 201620)

摘要:随着现代电子信息技术与军事隐身技术的快速发展,电磁污染和雷达探测威胁日益严重,开发高效、轻质、宽频的电磁波吸收材料已成为材料科学领域的研究热点之一。利用生物质材料制备吸波剂,不仅可以发挥其独特的形貌优势,还符合绿色与循环经济的发展理念。本文以木棉纤维(kapok fiber, KF)为原料,通过直接碳化制备了具有中空结构的木棉基碳纤维(carbonized kapok fiber, CKF),研究了碳化温度和吸波剂质量分数对电磁参数及吸波性能的影响,并通过与实心结构的浆粕基碳纤维进行对比,验证了中空结构可通过多次反射电磁波及增加电磁波干涉损耗概率,显著增强材料对电磁波的衰减能力。结果表明:当CKF质量分数为7%、材料厚度为2 mm时,有效吸波频带(反射损耗小于-10 dB)达到5.1 GHz;当材料厚度为2.5 mm时,最低反射损耗达到-33.7 dB,其吸波性能优于浆粕衍生的实心碳纤维。

关键词:木棉纤维;吸波性能;碳化;中空结构

中图分类号:TB34

文献标志码:A

DOI: 10.3724/jfmd.2512097

CSTR: 32180.14.jfmd.2512097

Preparation of kapok-derived carbon fiber and its microwave absorption performance

DENG Han^{1,2}, LI Guang^{1,2,*}

(1. State Key Laboratory of Advanced Fiber Materials, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. College of Materials Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: The rapid advancement of modern electronic information technology and military stealth technology has led to increasing concerns regarding electromagnetic pollution and radar detection threats. Consequently, the development of high-efficiency, lightweight, and wide-band electromagnetic wave absorbing materials has emerged as a significant research focus within materials science. Absorbers derived from biomass materials not only leverage the unique morphological characteristics of these materials but also align with the principles of green and circular economic development. In this study, kapok fiber (KF) was utilized as the raw material to prepare carbonized kapok fiber (CKF) with a hollow

收稿日期: 2025-12-09; 修订日期: 2026-01-30

作者简介: 邓 涵(2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为吸波复合材料(E-mail: denghan98@126.com)

通信作者: 李 光(1962—), 女, 教授, 研究方向为纤维及高分子材料、纳米碳纤维复合/杂化材料、新型电化学储能材料和技术(E-mail: lig@dhu.edu.cn)

structure through direct carbonization. The effects of carbonization temperature and absorber concentration on electromagnetic parameters and absorption performance were systematically investigated. By comparing the hollow structure of CKF with the solid structure of pulp-based carbon fiber, it was demonstrated that the hollow structure enhances electromagnetic wave attenuation through multiple reflections and increases the likelihood of electromagnetic wave interference loss. When the CKF mass fraction was 7% and the material thickness was 2 mm, the effective absorption frequency band (reflection loss less than -10 dB) reached 5.1 GHz; when the thickness was 2.5 mm, the lowest reflection loss achieving -33.7 dB. These results indicate superior absorption performance compared to solid carbon fiber derived from pulp.

Key words: kapok fiber; microwave absorption performance; direct carbonization; hollow structure

0 引言

在现代军事科技快速发展的背景下, 战场“透明度”已成为决定胜负的关键因素之一。雷达作为远程探测、目标指示与火控的核心手段, 其性能直接影响作战体系的生存能力和打击能力^[1]。因此, 如何最大限度地降低军事装备(如战机、舰艇、导弹、装甲车辆等)的雷达可探测性, 即实现雷达隐身, 已成为世界各国国防科技领域竞相追逐的战略制高点^[2]。在这一背景下, 吸波材料作为实现隐身技术的物质基础与关键途径, 其重要性与地位日益凸显。

吸波材料的核心价值在于其能够通过电磁损耗机制, 将入射的雷达波能量转化为热能或其他形式的能量加以耗散, 从而显著缩减装备的雷达散射截面积^[2]。吸波材料对电磁波的衰减主要通过介电损耗和磁损耗两种方式来实现^[3]。碳材料(如碳纤维、石墨烯等)可通过导电损耗和极化弛豫消耗电磁能, 是典型的介电损耗型吸波剂。然而, 单一的介电损耗材料的性能往往因阻抗匹配不佳而受到限制。因此, 将介电材料与磁性组分(如羰基铁、铁氧体等)复合, 通过协同损耗机制来优化整体吸波性能, 已成为当前的研究趋势。本文聚焦于通过调控介电材料自身的微观结构(如构建中空通道)来同时优化其阻抗匹配与衰减能力。研究表明, 碳材料的形态和尺寸均会影响其吸波性能。例如, 班国东等^[4]使用长度为 1~5 mm 的碳纤维作为吸波剂制备吸波复合材料, 发现纤维长度为 3 mm 时材料性能最优。Li 等^[5]研究了纳米碳纤维吸波复合材料的性能与其形貌及结构的关系, 发现纳米碳纤维内部的孔结构能够进一步增强对电磁波的衰减, 复合材料表现出更低的反射损耗和更宽的吸收

频带。他们认为, 这与孔结构提供了更多反射面并增加了电磁波干涉损耗有关。与碳吸波剂相比, 磁性吸波剂往往密度较大, 不利于吸波复合材料向轻薄化方向的发展, 因此磁性吸波剂与电介质类吸波剂复合使用逐渐成为趋势。Zeng 等^[6]制备了多组分异质结构复合材料, 通过磁损耗与介电损耗的协同, 在毫米波等高频波段实现了高效吸收。

利用生物质前驱体开发碳基吸波材料, 符合绿色可持续发展的理念。目前已有不少源于生物质的碳材料被制备和研究^[7], 其中一些研究将生物质碳作为吸波剂进行了探索。Dou 等^[8]以废弃花生壳为前驱体, 通过两步碳化-活化工艺制备了具有高比表面积($1037.589 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)和复杂孔结构的多孔碳材料, 其独特的导电网络有效促进了电磁波的多重反射, 在 2.5 mm 厚度下实现了 -42.38 dB 的优异反射损耗。Shafi 等^[9]则利用废弃绿茶渣制备了微孔碳材料, 通过系统调控孔隙结构优化了材料的介电性能, 在 2.2 mm 厚度下获得了 -47.60 dB 的最小反射损耗和 4.88 GHz 的有效吸收带宽。这些研究表明, 天然生物质材料经简单的碳化/活化工艺即可转化为具有三维多孔网络的高性能碳基吸波剂, 其优异的吸波性能主要归因于多级孔结构对阻抗匹配的优化以及对电磁波多重散射和介电损耗的增强作用。此外, 花生壳、茶叶渣等农业/食品废弃物的高值化利用, 也为开发低成本、环保型微波吸收材料提供了可行路径。

在众多生物质中, 木棉纤维展现出独特的应用潜力。木棉纤维天然具备的高中空度($>80\%$)与微米级管径, 是许多人造工艺难以复制的精细结构。高中空度使木棉纤维具有极低的密度, 约为 0.29

$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ^[10],且碳化后中空结构仍然保留,这不仅能有效降低材料密度、优化阻抗匹配,更能通过多次内反射显著延长电磁波传输路径,为设计轻质、高效的吸波剂提供了理想模板。本文以自然生长的木棉作为碳前驱体制备中空碳纤维,并将其作为吸波剂来制备吸波复合材料;通过与浆粕基实心结构碳纤维对比,探究碳纤维的中空结构对增强电磁波衰减的作用。本研究不仅证实了木棉这一特定生物物质作为高效吸波前驱体的可行性,更重要的是阐明了一种普适性策略:利用和复制生物物质独特的天然中空结构,可直接制备出具有优异阻抗匹配与衰减特性的吸波材料,为开发下一代“绿色、高效、低成本”的吸波材料提供了新的设计思路与材料平台。

1 实验部分

1.1 实验材料

木棉纤维由中国科学院昆明植物研究所提供,采自云南省红河县;浆粕纤维(pulp fiber, PF)来自造纸废弃物;其他为常规药品和试剂。

1.2 木棉基碳纤维的制备

木棉原纤维经去籽后用去离子水反复清洗以去除表面杂质,随后于烘箱中彻底干燥。称取1 g处理后的纤维,置于管式炉中,在氮气保护下,以 $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率升温至目标温度(800 $^{\circ}\text{C}$ 、1000 $^{\circ}\text{C}$ 、1200 $^{\circ}\text{C}$),并在该温度下恒温热处理1 h,最终随炉冷却至室温,获得系列木棉基碳纤维(carbonized kapok fiber, CKF- T , T 代表碳化温度)。使用相同工艺制备系列浆粕基碳纤维(carbonized pulp fiber, CPF- T)作为对比样。

1.3 木棉基碳纤维吸波复合材料的制备

为测试电磁参数,将不同质量分数(5%、7%、9%)的CKF和CPF吸波剂与固体石蜡基体在研钵中充分研磨,以确保填料均匀分散。随后,使用专用模具将混合物压制成型,得到符合同轴测试标准(内径3.04 mm,外径7.00 mm)的环状试样,其厚度控制在2~3 mm范围内,以满足矢量网络分析仪的测试要求。

1.4 分析与测试

采用场发射扫描电子显微镜(field emission scanning electron microscope, FESEM, JEOL JSM-7500F)观察木棉基碳纤维的微观形貌和结构特征;采用X射线衍射(X-ray diffraction, XRD, Bruker D8 Advance)分析样品的晶体结构,辐射源为Cu K α ,波长为0.15418 nm,电压为40 kV,电流为40 mA,扫描范围为 $10^{\circ}\sim 80^{\circ}$;采用拉曼光谱仪表征样品的石墨化程度,激发波长为532 nm,激光功率为软件显示最大值的5%(相对强度),扫描范围为 $1000\sim 2000\text{ cm}^{-1}$;采用X射线光电子能谱(X-ray photoelectron spectroscopy, XPS, Escalab 250Xi)分析材料的元素组成、含量及化学键,X射线源为Al K α (光子能量为1486.6 eV),结合能以C 1s(284.8 eV)为标准进行校准;采用四探针法(Keithley 4200A-SCS)在室温下对压制成圆片状的碳纤维/石蜡复合材料进行体电导率表征;采用矢量网络分析仪(Keysight N5227B)通过同轴法测试样品在2~18 GHz频率范围内的复介电常数($\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$)和复磁导率($\mu_r = \mu' - j\mu''$)。

2 结果与讨论

2.1 木棉基碳纤维的形貌和结构

图1(a)所示的SEM形貌分析表明,原始木棉纤维(kapok fiber, KF)呈现出规整的中空管状结构,直径约为10~20 μm 。经高温碳化处理后,所得CKF样品基本保留了前驱体的中空骨架结构,如图1(b)所示,碳纤维直径为10~15 μm 。但在碳化过程中,纤维出现一定程度的收缩、断裂以及表面褶皱化现象,如图1(c)所示,这主要归因于高温过程中非碳元素的脱除与碳骨架的重排。作为对比,浆粕纤维呈现实心结构,如图1(d)所示,其碳化后仍保持纤维形貌。CPF纤维直径为7~12 μm ,外观与木棉纤维碳化后的形貌相似,如图1(e)~(f)所示,但显著区别在于CPF为实心结构。

对CKF进行XPS分析,全谱如图2(a)所示,可以看出,CKF的主要组成元素为C和O。C 1s谱的分峰拟合结果如图2(b)所示,在284.8 eV和286.0~287.0 eV处显示出两个主要特征峰,分别对应于—C=C—键和—C—O—/—C=O键的信号^[11]。

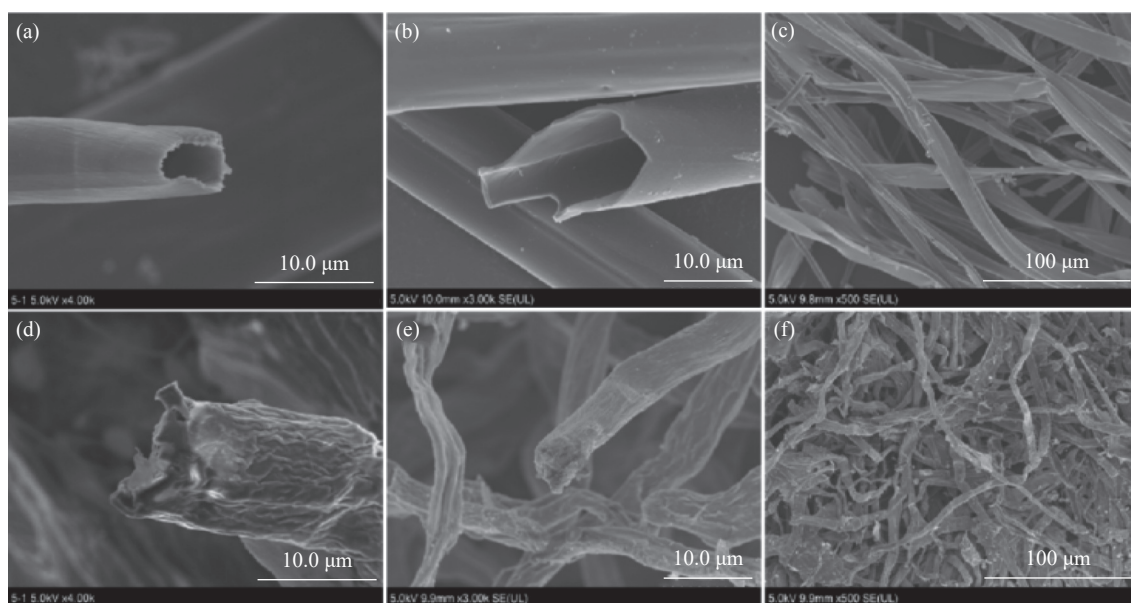


图1 KF和PF及其碳化后CKF和CPF的SEM形貌图。(a)KF的截面形貌;CKF的(b)截面形貌及(c)表面形貌;(d)PF的截面形貌;CPF的(e)截面形貌及(f)表面形貌

Fig. 1 SEM morphologies of KF and PF and their carbonized products CKF and CPF. (a) Cross-section morphology of KF; (b) cross-section morphology and (c) surface morphology of CKF; (d) cross-section morphology of PF; (e) cross-section morphology and (f) surface morphology of CPF

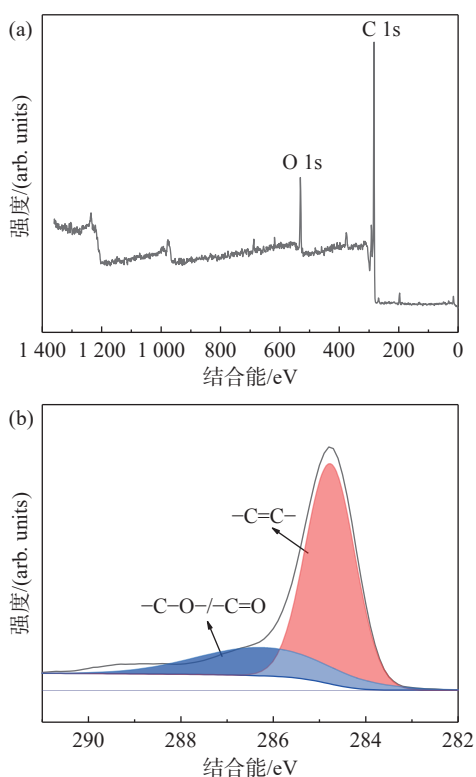


图2 CKF的XPS图。(a)全谱图;(b)C 1s的分峰图

Fig. 2 XPS spectra of CKF. (a) Survey spectra; (b) C 1s spectra

该结果表明,碳化后纤维表面的碳原子主要以共轭

双键结构存在,同时伴有少量含氧官能团。这是由于纤维素在高温碳化过程中,氢、氧等杂原子剧烈脱除,以 H_2 、 CO 、 CO_2 等小分子形式逸出^[12]。与此同时,纤维素原有的聚集态结构被破坏,形成了具有一定石墨化程度的碳聚集体结构。从图3(a)的XRD图可以看出,经过 $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 碳化处理的CKF和CPF纤维在 23° 和 43° 附近均出现衍射峰。尽管衍射峰强度较低,但仍可证明石墨化结构的存在,两个衍射峰分别对应石墨晶体的(002)和(100)晶面。此外,纤维素在衍射角 $2\theta=16^\circ$ 和 21° 处的固有衍射峰消失^[13]。如图3(b)所示, 1345 cm^{-1} 和 1591 cm^{-1} 处的特征峰分别归属于D峰和G峰。D峰表征碳材料中的结构缺陷和无序相(无定形碳),而G峰则反映碳原子 sp^2 杂化的面内振动,是石墨晶格结构的特征峰^[14]。二者的强度比(I_D/I_G ,其中 I_D 为D峰强度、 I_G 为G峰强度)是衡量石墨化程度的关键参数,其值越小,材料的石墨化程度越高。 I_D/I_G 值从CKF-1000的0.94略微下降至CKF-1200的0.92,表明较高的碳化温度促进了碳骨架从无序向有序的转变,即石墨化程度有所提升。这一现象符合高温下 sp^2 碳域生长的普遍规律。

碳材料的导电性能受其石墨化程度显著影响,

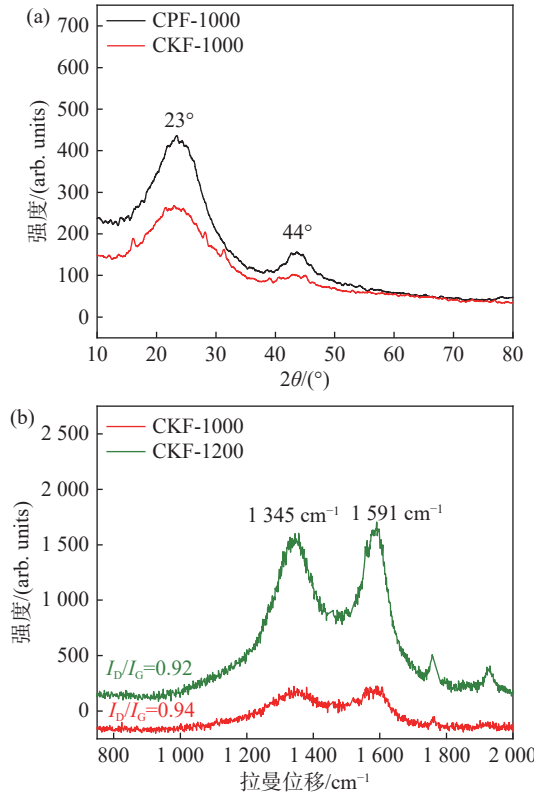


图3 样品的(a)XRD图和(b)拉曼光谱图

Fig. 3 (a) XRD pattern and (b) Raman spectrum of the samples

二者通常呈正相关,即石墨化程度提升时,电导率也相应增大。本研究将不同碳化温度下制备的CKF以15%的质量分数与石蜡混合,制成实心圆片,并采用四探针法测试圆片的电导率。结果显示,CKF-1000的电导率为 $4.25 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$,而CKF-1200的电导率为 $21.7 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ 。由此可见,CKF的电导率随着碳化温度的升高而增加,这与高温碳化过程中石墨化程度的提升一致。然而,对于吸波剂而言,碳材料的电导率并非越高越好。当材料电导率过高时,电磁波易在表层发生反射,难以渗入材料内部被进一步耗散,这对目标物的隐身性能不利。只有适中的电导率才能满足材料表面与空间对电磁波传输的阻抗匹配需求。因此,在制备CKF时,碳化温度是一个需要优化的关键条件。

2.2 CKF与CPF作为吸波剂的复合材料电磁参数和吸波性能

作为反映吸波性能的关键参数^[15],材料的相对介电常数与磁导率因具有响应滞后特性,通常以复数形式表示为 $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$ 和 $\mu = \mu' - j\mu''$,其中实部

与虚部分别表征材料存储和损耗电磁能的能力^[16]。本体系统中所用碳材料的 $\mu' = 1$ 、 $\mu'' = 0$,因此仅讨论复介电常数。图4展示了CKF-1000与CPF-1000以5%、7%、9%的质量分数制备的复合材料在2~18 GHz频率范围内的相对复介电常数(ε' 、 ε'')测试结果。可以看出,随着CKF质量分数的增加, ε' 和 ε'' 值均显著上升。 ε' 的提升表明材料存储电场能的能力增强,这主要归因于碳纤维填充量的增加:一方面增大了碳纤维与石蜡基体之间的界面面积,增强了界面极化效应;另一方面促进了材料内部导电网络的形成,提升了等效介电常数实部。同时, ε'' 的增加直接反映了损耗能力的增强,因为导电填料在交变电场下形成了更致密的导电网络,通过导电损耗将更多电磁能转化为焦耳热。在相同吸波剂质量分数下,以CKF-1000为吸波剂的样品,其相对复介电常数及损耗角正切值均高于以CPF-1000为吸波剂的样品。这一性能提升主要得益于CKF独特的中空结构,该结构使界面极化中心增多,从而显著增强了材料的极化及弛豫损耗能力。

为准确评估吸波材料在真实应用场景(即覆盖在金属衬底上)中的性能,本研究基于传输线理论构建了“自由空间-吸波层-理想导体”模型。该模型的核心在于通过输入材料的复电磁参数(ε_r 、 μ_r)计算其输入阻抗(Z_{in}),并结合式(1)和式(2)求解反射损耗值(R)^[17]:

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \tanh \left[j \left(\frac{2\pi f d}{c} \right) \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} \right] \quad (1)$$

$$R = 20 \log_{10} |\Gamma| = 20 \log_{10} \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right| \quad (2)$$

式中, Z_0 为特性阻抗, f 为入射电磁波频率, d 为吸波层厚度, c 为光速。

吸波性能的有效性通常以 $R \leq -10 \text{ dB}$ (对应电磁波能量衰减90%)为评判标准,低于该阈值的频段范围被定义为有效吸收频带(B)。基于CKF-1000与CPF-1000在吸波剂质量分数为7%时测得的电磁参数,本研究计算了两种材料在2~18 GHz范围内不同匹配厚度下的反射损耗谱图,并进一步分析了其频率响应特性,结果如图5所示。

吸波性能模拟结果(图5)清晰地展示了中空结构的优势。在相近厚度下,CKF-1000在11.3 GHz下的最低反射损耗(R_{min})为 -33.7 dB ,显著优于实心结构的CPF-1000。这一性能差异可归因于

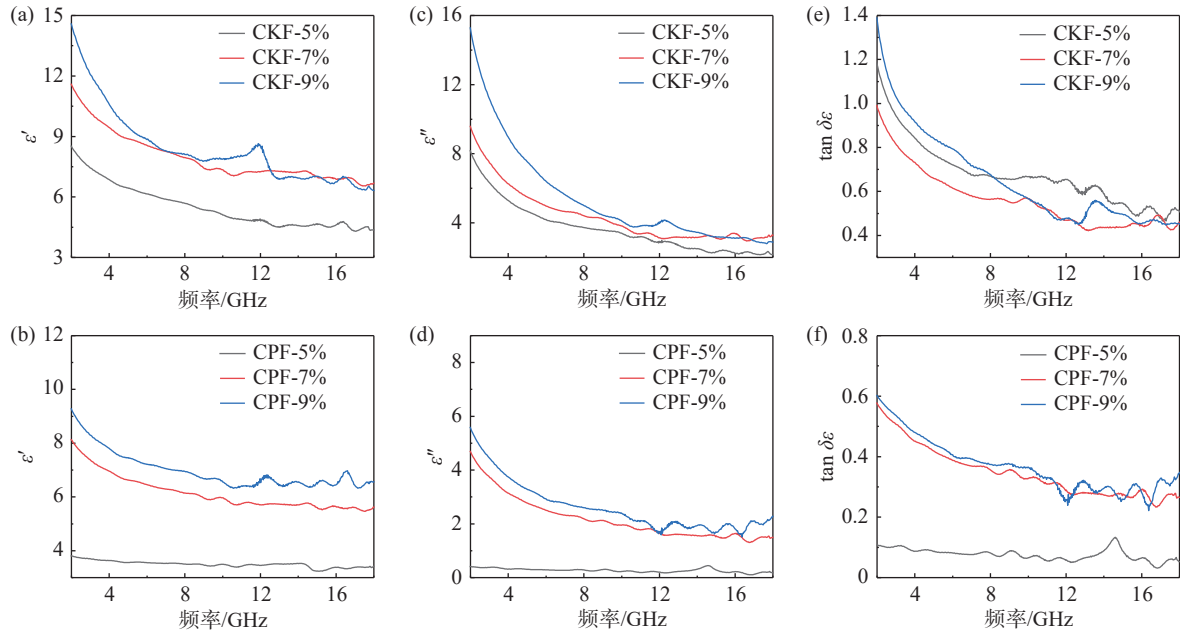


图4 不同吸波剂质量分数下 CKF-1000 与 CPF-1000 复合材料的介电性能。(a)~(b)相对复介电常数实部; (c)~(d)相对复介电常数虚部; (e)~(f)损耗角正切

Fig. 4 Dielectric properties of CKF-1000 and CPF-1000 composites at different absorber mass fractions. (a) - (b) Real part of relative complex permittivity; (c) - (d) imaginary part of relative complex permittivity; (e) - (f) loss tangent

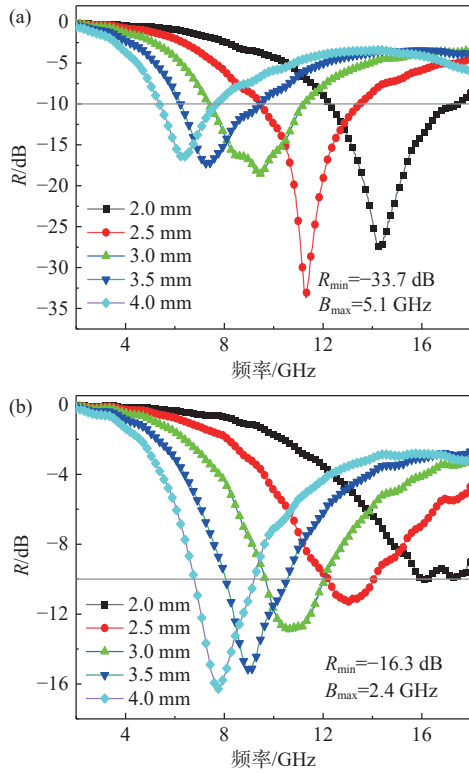


图5 反射损耗随厚度与频率的变化。(a) CKF-1000 (质量分数 7%); (b) CPF-1000 (质量分数 7%)

Fig. 5 The reflection loss with thickness and frequency. (a) CKF-1000 (7% mass fraction); (b) CPF-1000 (7% mass fraction)

CKF 独特的中空结构, 为电磁波提供了更长的传播路径和更多的界面极化位点。CKF-1000 的最宽有效频带 ($B_{\max}$) 在厚度为 2 mm 时达到 5.1 GHz (12.3~17.4 GHz), 而 CPF-1000 在厚度为 3.5 mm 时的 $B_{\max}$ 仅为 2.4 GHz (8.1~10.5 GHz)。研究表明, 具有中空结构的 CKF 表现出更优异的电磁波衰减能力, 具体表现为在材料厚度较小时, CKF 展现出更低的反射损耗和更宽的有效吸收频带。因此, 以下选择 CKF 作为吸波剂, 考察碳化温度对吸波性能的影响, 并对吸波剂质量分数进行优化。

2.3 碳化温度对木棉衍生碳纤维吸波性能的影响

如前文所述, 不同碳化温度下制得的木棉衍生碳电导率存在差异, 这种差异也会影响其吸波性能。在固定质量分数 7% 下, 通过对不同碳化温度样品 (CKF-800、CKF-1000、CKF-1200) 的测试发现, 其相对复介电常数的实部与虚部在 2~18 GHz 范围内均随温度升高而增大, 如图 6 所示。其中, 导电损耗的增强可归因于高温碳化提升了碳材料中自由载流子 (π 电子) 的浓度与迁移率, 进而在交变电场中产生更强的微电流响应 (焦耳热效应), 增强了导电损耗。图 6(c) 所示的介电损耗角正切在 12~16

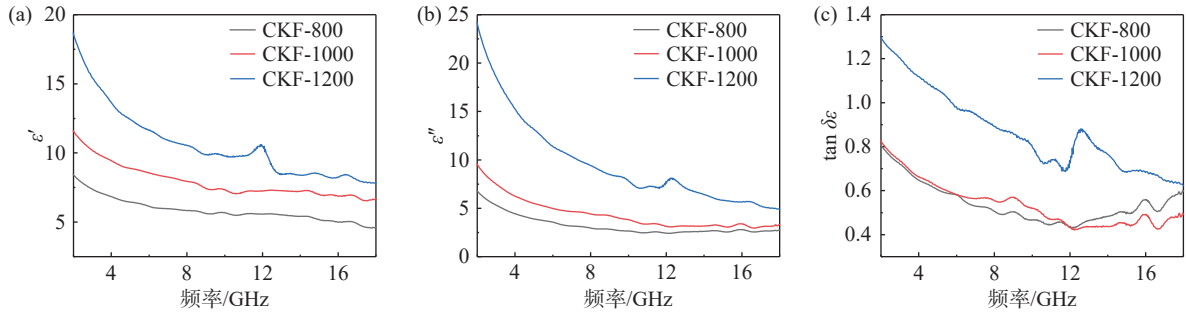


图 6 不同碳化温度下 CKF 复合材料的介电性能。(a)相对复介电常数实部;(b)相对复介电常数虚部;(c)损耗角正切

Fig. 6 Dielectric properties of CKF composites at different carbonization temperatures. (a) Real part of relative complex permittivity; (b) imaginary part of relative complex permittivity; (c) loss tangent

GHz 频段存在振幅波动,表明偶极子极化和界面极化对该频段的损耗有贡献^[18]。

介电弛豫行为是评估吸波材料损耗机制的重要依据。基于德拜理论,绘制出复合材料的 Cole-Cole 图^[19],如图 7 所示,其中 Cole-Cole 曲线以实部 ϵ' 为横坐标,虚部 ϵ'' 为纵坐标,用于描述和拟合弛豫过程。图中蓝色圆与曲线重合的部分表示扭曲的容抗弧。通过分析图中容抗弧的特征,可直观辨别并比较不同样品中由极化弛豫主导的介电损耗过程。如图 7 所示,所有样品均呈现出多个扭曲的容抗弧,表明存在多重德拜弛豫过程^[20]。值得注意的是,CKF-800 的曲线包含最多且最不规则

的半圆,说明其在测试频段内具有最为丰富的极化弛豫。这主要归因于相对较低的碳化温度保留了更多的结构缺陷和残余官能团,这些位置在电磁场作用下成为有效的极化中心,从而显著增强了介电损耗。材料的导电损耗强度可通过 Cole-Cole 曲线中线性部分的长度进行评估,该部分越长,导电损耗越强。对比 3 组样品的曲线可以发现,CKF-1200 的导电损耗最为显著。由此得出结论:过高的碳化温度在提升木棉基碳纤维导电损耗的同时,会削弱其介电弛豫损耗。因此,优化碳化温度是平衡这两种竞争机制、实现优异吸波性能的关键。

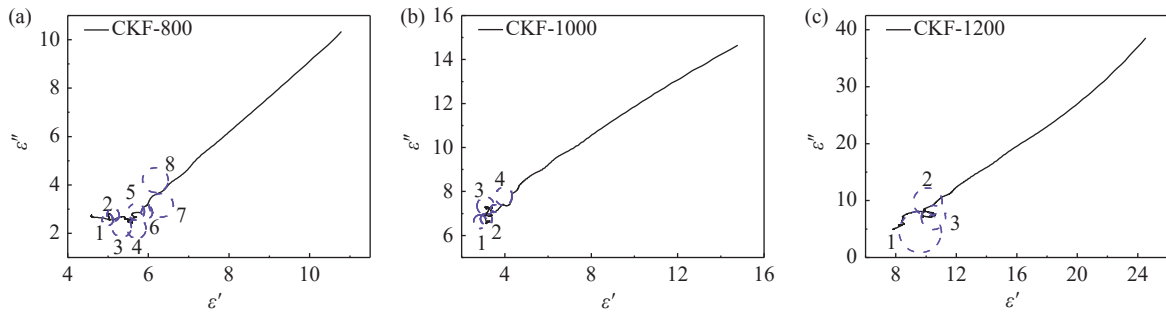


图 7 样品 Cole-Cole 曲线图。(a) CKF-800;(b) CKF-1000;(c) CKF-1200

Fig. 7 Cole-Cole plots of the samples. (a) CKF-800; (b) CKF-1000; (c) CKF-1200

材料优异的吸波性能主要取决于两个核心因素:一是材料表面的阻抗匹配特性,该特性决定了电磁波进入材料的效率;二是材料内部对电磁波的衰减能力。其中,阻抗匹配程度由阻抗匹配值 Z 来衡量,其值可通过式(3)计算^[21-22]:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu''^2 + \mu'^2}{\epsilon''^2 + \epsilon'^2}} \quad (3)$$

Z 越接近于 1,表明匹配效果越理想,界面对电磁波

的反射越小,从而被材料吸收的电磁波就越多。

材料对电磁波的衰减常数(α)可通过式(4)计算^[5, 23]:

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

其值与吸波性能呈正相关: α 值越大,表明材料内

部损耗机制越有效,衰减电磁波的能力越强。

通过式(3)和式(4)计算不同碳化温度样品在 2~18 GHz 范围内的 α 值与 Z 值,结果如图 8 所示。分析表明, Z 与碳化温度呈负相关,而 α 则与碳化温度呈正相关。 α 的增强与材料电导率的提升共同决定了复合材料最终的吸波性能。

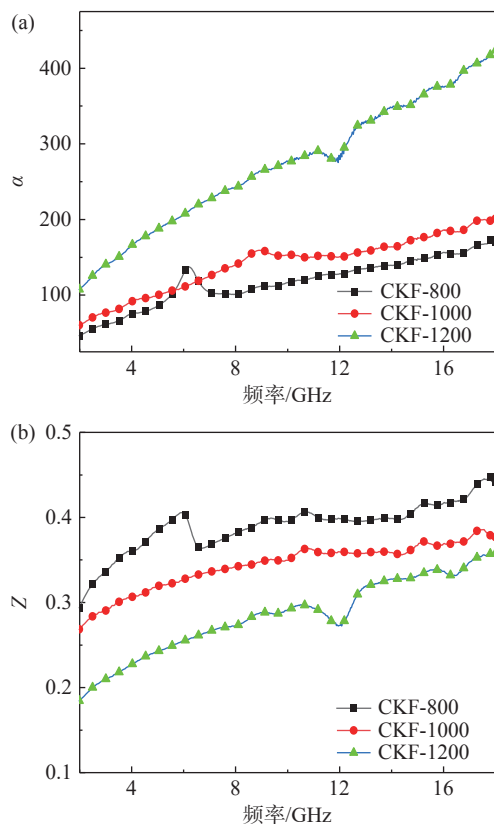


图 8 CKF-800、CKF-1000、CKF-1200 的 (a) 衰减损耗与 (b) 阻抗

Fig. 8 (a) The attenuation loss and (b) impedance matching of CKF-800, CKF-1000, and CKF-1200

图 9 展示了 3 种样品 (CKF-800、CKF-1000、

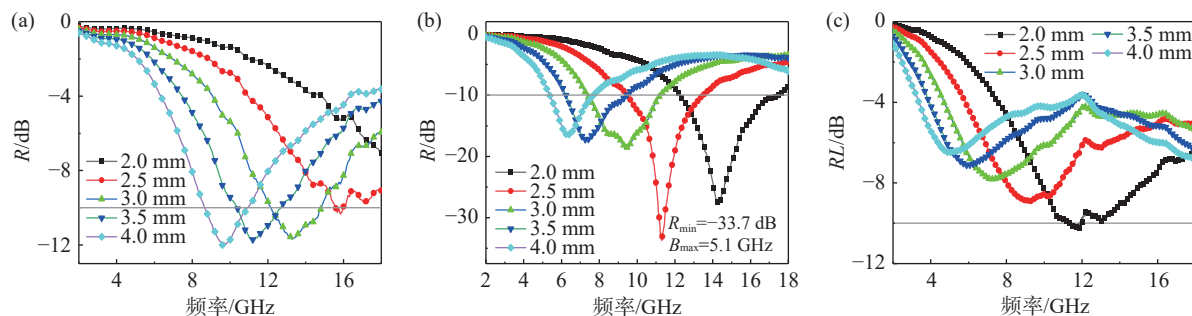


图 9 吸波复合材料的反射损耗。(a)CKF-800; (b)CKF-1000; (c)CKF-1200

Fig. 9 The reflection loss for microwave-absorbing composites. (a) CKF-800; (b) CKF-1000; (c) CKF-1200

CKF-1200) 基于传输线理论的反射损耗分析结果。结果表明,由 CKF-1000 制备的复合材料在所有样品中展现出最佳的电磁波吸收性能,其核心优势在于极低的反射损耗(厚度为 2.5 mm 时, $R_{\min} = -33.7$ dB, 11.3 GHz)以及在 2 mm 厚度下最宽的有效吸收带宽 ($B_{\max} = 5.1$ GHz, 12.3~17.4 GHz)。相比之下,在厚度为 2 mm 时, CKF-1200 ($R_{\min} = -10.3$ dB, $B_{\max} \approx 0.5$ GHz) 和 CKF-800 ($R_{\min} = -3.6$ dB, 几乎无有效带宽) 的性能均显著逊色于 CKF-1000。

不同碳化温度下 CKF 的吸波性能差异需综合考虑其阻抗匹配与衰减损耗。尽管 CKF-1200 具有最强的本征衰减能力,但其过高的电导率导致阻抗严重失配。相比之下,CKF-800 虽表现出优异的阻抗匹配特性,但因自身衰减能力不足而难以充分发挥性能。研究表明,在 1000 °C 的优化条件下,CKF-1000 成功实现了阻抗匹配与衰减损耗之间的最佳平衡,其电磁参数组合在 2~18 GHz 频段内表现出最优异的综合吸波性能,达到了强吸收与宽频带的统一。

2.4 吸波剂质量分数对吸波性能的影响

吸波剂使用量低、吸波频带宽、厚度薄是吸波复合材料“宽、轻、薄”发展方向的核心要求。基于课题组前期研究^[24-25],本文对 CKF 质量分数分别为 5%、7%、9% 的样品的吸波性能进行了分析。首先,通过相对复介电常数计算了 3 个样品在 2~18 GHz 频率范围内不同厚度下的 R 值,结果如图 10 所示。对比各样品的反射损耗曲线可见,CKF-5% 和 CKF-7% 对应的吸波复合材料具有相近的 $R_{\min}$,分别为 -34.9 dB 和 -33.7 dB。然而,CKF-5% 样品的 $R_{\min}$ 需在厚度为 3.5 mm 时才能达到 -34.9 dB,

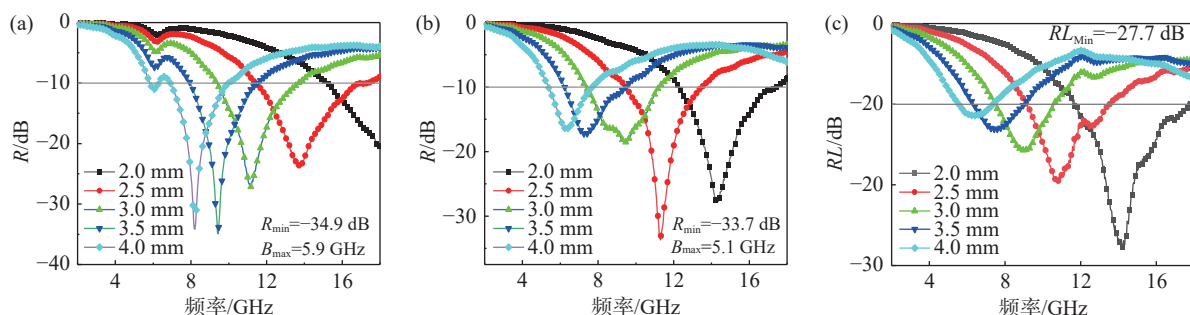


图 10 不同吸波剂质量分数下吸波复合材料的反射损耗。(a)CKF-5%; (b)CKF-7%; (c)CKF-9%

Fig. 10 Reflection loss of absorptive composites at different mass fractions of absorbers. (a) CKF-5%; (b) CKF-7%; (c) CKF-9%

而 CKF-7% 样品的 $R_{\min}$ 在厚度为 2.5 mm 时即可达到 -33.7 dB。因此, 添加质量分数为 7% 的 CKF 能够在更薄的厚度下实现优良的吸波性能。此外, 当 CKF 质量分数为 7% 且厚度为 2 mm 时, 样品表现出较宽的有效吸收频带, 为 5.1 GHz (12.3~17.4 GHz)。而 CKF-5% 样品在厚度为 2.5 mm 时具有最宽的有效吸收频带, 为 5.9 GHz (11.4~17.3 GHz)。相比之下, CKF-9% 样品在 2~4 mm 厚度范围内的吸波性能较差, 在厚度为 2 mm 时 $R_{\min}$ 仅为 -27.7 dB。

综合对比复合材料的最低反射损耗、厚度及有效吸收频带, CKF 的优化质量分数为 5%~7%。在此范围内制备的吸波复合材料具有最优的吸波性能。

由上文分析可知, 导电损耗是 CKF 对电磁波的主要损耗机制。尽管增加碳组分能够提升吸波材料的导电能力, 但也会导致阻抗失配; 而碳组分过低则会导致对电磁波的衰减不足。吸波剂质量分数的优化实验表明, 存在一个以 5%~7% 为中心的最佳质量分数窗口。在此窗口内, 复合材料能够同时维持适中的介电常数以保障良好的阻抗匹配, 并具备足够的导电网络密度以实现有效的电磁能损耗。偏离此窗口, 无论是因填料不足导致的衰减乏力, 还是因过量填充引发的界面反射加剧, 均会导致吸波性能下降。

此外, 反射损耗谱图模拟结果清晰地展示了吸波峰值频率随涂层厚度增加而向低频移动的规律。这一现象可根据四分之一波长干涉相消理论加以说明: 当吸波层的厚度等于入射电磁波波长的 $1/4$ 时, 从空气-材料界面反射的波与从材料-金属界面反射的波相位相反, 产生相消干涉, 从而使电磁能衰减, 并在该频率处出现吸收峰值^[26]。具体表达式如下:

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

式中, i 取奇数, 对应四分之一波长的奇数倍。随着 d 的增加, $R_{\min}$ 对应的特定频率 (f) 将降低, 同时有效吸收带宽整体向低频段移动。

2.5 木棉基碳纤维的吸波机制

木棉基中空碳纤维展现出卓越的电磁波吸收性能, 其物理本质在于一种由独特微观结构引导、多种损耗机制协同作用的“捕获-耗散”动态过程, 如图 11 所示。该过程并非依赖单一机理, 而是通过一系列物理效应实现对入射电磁波的高效衰减。

首先, 在波的导入阶段, 优异的表面阻抗匹配起到了关键作用。材料的表面阻抗经过设计与调控, 能够与自由空间的波阻抗 (约 377Ω) 实现良好匹配。这显著降低了波在空气-材料界面处的反射, 使得绝大部分入射电磁波能够穿透表面, 进入材料内部进行后续的能量转换, 而非在初始阶段即被反射逸散, 从而为高效吸收创造了必要条件。

随后, 在波的传播与捕获阶段, 纤维内部的管状结构发挥了决定性作用。电磁波进入纤维内部的中空通道后, 便在管壁之间经历反复的反射与散射。这种受限空间内的多重反射效应极大地延长了电磁波在吸波体内部的传播路径, 而路径的延长直接增加了电磁波的传播损耗^[27]。

在能量耗散的核心阶段, 导电损耗和介电极化损耗机制同时起作用: 由碳纤维构成的连续三维导电网络, 在交变电磁场下产生感应涡流。这些微电流在具有电阻特性的碳骨架中流动时, 依据焦耳定律将电磁能不可逆地转化为热能, 从而实现能量的耗散。与此同时, 木棉基中空碳纤维复杂的内壁结构引入了大量的异质界面 (如碳-空气界面、缺陷边

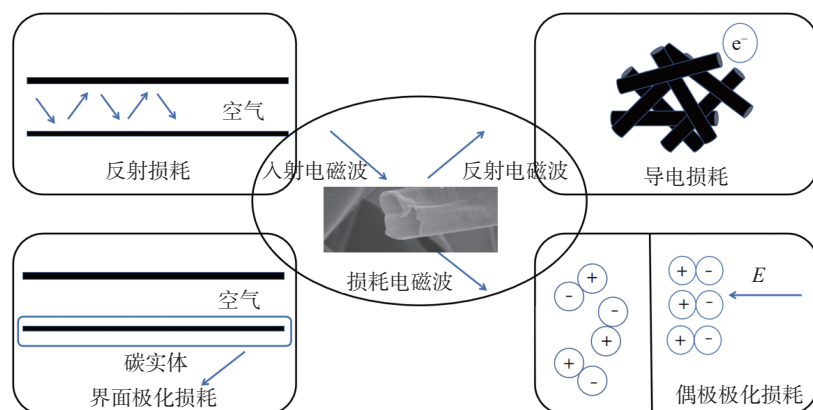


图 11 木棉基碳纤维吸波机理示意图

Fig. 11 Schematic diagram of the absorption mechanism of kapok-based carbon fiber

界、不同晶域间界面等)。在电磁场作用下,这些界面处累积的空间电荷无法迅速跟随外场变化,从而产生强烈的界面极化。这种极化弛豫过程需要消耗电磁能,成为除导电损耗外另一重要的衰减途径。中空结构所提供的大比表面积进一步增强了界面极化效应。

此外,结构设计带来了额外的增强效应。在纤维管道内历经多次反射而到达底部的电磁波,与从底层背板直接反射回的电磁波之间,会因传播路径差而产生特定的相位差。当这两部分波满足相位相反的条件时,便会发生相消干涉,从而导致残余能量的进一步抵消与衰减。这一结构干涉效应有助于拓宽有效吸收频带并提升特定频点的吸收强度。

3 结论

本研究以木棉纤维为原料制备碳纤维,探讨了碳纤维中空结构对吸波性能的提升作用,确定了最佳碳化条件与吸波剂的质量分数,并对吸波机理进行分析,得出以下主要结论:

(1)以天然木棉为前驱体,通过直接碳化可保留其天然中空纤维结构,同时赋予材料电磁波衰减功能。对比实心浆粕碳纤维,该中空结构展现出显著的吸波优势,其性能提升源于双重核心机制的协同作用:一是阻抗匹配优化,中空结构引入的空气层有效调节了材料等效复介电常数,降低了表面电磁波反射,使更多电磁波进入材料内部;二是内壁多重散射与干涉相消,入射波在中空腔体内发生反复反射、折射,延长了传播路径并增加损耗机会,同时反射波与透射波在特定相位下产生干涉相消,

实现高效能量耗散。这两种机制共同作用,实现了电磁波能量的高效转换与耗散。

(2)实验结果表明,1000 ℃ 为最佳碳化温度。在此温度下制备的材料在电磁损耗能力与阻抗匹配度之间达到了最优平衡。

(3)当木棉纤维碳化温度为 1000 ℃,并以质量分数 7% 的比例填充时,复合材料在厚度仅为 2.5 mm 的情况下表现出最优的综合吸波性能:最低反射损耗为 -33.7 dB;材料厚度为 2 mm 时有效吸收带宽达到 5.1 GHz。这充分体现了木棉衍生中空碳纤维在实现“薄层、宽频、强吸收”方面的潜力。

参考文献:

- [1] Skolnik M I. 雷达手册 [M]. 南京电子技术研究所,译. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2010: 1-50.
Skolnik M I. Radar handbook[M]. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, translated. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 1-50.
- [2] Knott E F, Shaeffer J F, Tuley M T. 雷达散射截面: 预估、测量和减缩 [M]. 阮颖铮, 陈海, 韩晓英, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 1988: 156-160.
Knott E F, Shaeffer J F, Tuley M T. Radar cross-section: estimation, measurement, and reduction [M]. Ruan Yingzheng, Chen Hai, Han Xiaoying, et al, translated. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1988: 156-160.
- [3] 袁宇洋. 电磁波吸波材料吸波原理、制备技术及发展方向 [J]. 功能材料与器件学报, 2024, 30(2): 53-65.
Yuan Yuyang. Absorbing principle, preparation technology and development direction of electromagnetic wave absorbing

- materials[J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2024, 30(2): 53-65.
- [4] 班国东, 刘朝辉, 叶圣天, 等. 碳纤维复合吸波材料的频散特性影响规律研究 [J]. *表面技术*, 2017, 46(4): 205-211.
Ban Guodong, Liu Zhaohui, Ye Shengtian, et al. Influence laws of frequency dispersion characteristics of carbon fiber composite absorbing material[J]. *Surface Technology*, 2017, 46(4): 205-211.
- [5] Li Guang, Xie Tianshi, Yang Shenglin, et al. Microwave absorption enhancement of porous carbon fibers compared with carbon nanofibers[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2012, 116(16): 9196-9201.
- [6] Zeng Xiaojun, Cheng Xiaoyu, Yu Ronghai, et al. Electromagnetic microwave absorption theory and recent achievements in microwave absorbers[J]. *Carbon*, 2020, 168: 606-623.
- [7] 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. Classification, absorbing mechanism and research progress of biomass-derived carbon-based composite absorbing materials[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(8): 3910-3934.
- [8] Dou Meiran, Xu Lihui, Pan Hong, et al. Preparation of high performance microwave absorbing materials based on waste peanut shells[J]. *Physica Scripta*, 2024, 99(12): 125985.
- [9] Shafi S, Qamar T H, Hassan S U, et al. Tea waste biomass-derived microporous carbon for improved microwave absorption[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2024, 35: 2171.
- [10] 胡真迎, 丁颖, 杨欢斌, 等. 木棉纤维的性能及应用 [J]. *上海工程技术大学学报*, 2008, 22(3): 202-205.
Hu Zhenying, Ding Ying, Yang Huanbin, et al. Performance and application of kapok fiber[J]. *Journal of Shanghai University of Engineering Science*, 2008, 22(3): 202-205.
- [11] Sun Jiaming, Lei E, Ma Chunhui, et al. Fabrication of three-dimensional microtubular kapok fiber carbon aerogel/RuO₂ composites for supercapacitors[J]. *Electrochimica Acta*, 2019, 300: 225-234.
- [12] Zickler G A, Smarsly B, Gierlinger N, et al. A reconsideration of the relationship between the crystallite size La of carbons determined by X-ray diffraction and Raman spectroscopy[J]. *Carbon*, 2006, 44(15): 3239-3246.
- [13] Kryeziu K. Carbonaceous monoliths properties[D]. Mulhouse: Université de Haute-Alsace, 2022: 109-111.
- [14] Wang Ya, Zhu Lin, Zhu Fangyan, et al. Removal of organic solvents/oils using carbon aerogels derived from waste durian shell[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2017, 78: 351-358.
- [15] Xu Xueqing, Ran Feitian, Fan Zhimin, et al. Bimetallic metal-organic framework-derived pomegranate-like nanoclusters coupled with CoNi-doped graphene for strong wideband microwave absorption[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(15): 17870-17880.
- [16] Wu Fei, Liu Zihao, Wang Jiqi, et al. Template-free self-assembly of MXene and CoNi-bimetal MOF into intertwined one-dimensional heterostructure and its microwave absorbing properties[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 422: 130591.
- [17] Van Vleck J H. Concerning the theory of ferromagnetic resonance absorption[J]. *Physical Review*, 1950, 78(3): 266-274.
- [18] Wing Z N, Wang B, Halloran J W. Permittivity of porous titanate dielectrics[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2006, 89(12): 3696-3700.
- [19] Han Meikang, Yin Xiaowei, Hou Zexin, et al. Flexible and thermostable graphene/SiC nanowire foam composites with tunable electromagnetic wave absorption properties[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(13): 11803-11810.
- [20] Cheng Yan, Cao Jieming, Li Yong, et al. The outside-in approach to construct Fe₃O₄ nanocrystals/mesoporous carbon hollow spheres core-shell hybrids toward microwave absorption[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018, 6(1): 1427-1435.
- [21] Maxwell Garnett J C. Colours in metal glasses, in metallic films and in metallic solutions. —II.[J]. *Proceedings of the Royal Society A*, 1905, 76(511): 370-373.
- [22] Gao Shengshuai, Zhou Nan, An Qingda, et al. Facile solvothermal synthesis of novel hetero-structured CoNi-CuO composites with excellent microwave absorption performance[J]. *RSC Advances*, 2017, 7: 43689-43699.
- [23] Cai Haodong, Guo Jian, Hu Haobin, et al. Carbon nanotube/FeNi₃ nanoparticle composites for electromagnetic wave absorption[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2024,

- 7(10): 11302-11312.
- [24] 邵蕊. 吸波防弹复合材料的制备以及性能研究 [D]. 上海: 东华大学, 2023: 1-20.
- Shao Rui. Preparation of microwave absorption & bulletproof composites and the study of their performance[D]. Shanghai: Donghua University, 2023: 1-20.
- [25] 郭威. 木棉基碳纤维复合材料的构筑及其吸波性能研究 [D]. 上海: 东华大学, 2024: 1-20.
- Guo Wei. Construction of kapok-based carbon fiber composite system and study of its absorbent material performance[D]. Shanghai: Donghua University, 2024: 1-20.
- [26] Guo Yan, Wang Dedong, Wang Jingwen, et al. Hierarchical HCF@NC/Co derived from hollow loofah fiber anchored with metal-organic frameworks for highly efficient microwave absorption[J]. [ACS Applied Materials & Interfaces](#), 2022, 14(1): 2038-2050.
- [27] Du Juan, Liu Lei, Hu Zepeng, et al. Raw-cotton-derived N-doped carbon fiber aerogel as an efficient electrode for electrochemical capacitors[J]. [ACS Sustainable Chemistry & Engineering](#), 2018, 6(3): 4008-4015.