

# 珍珠-链结构型 PCN/SiO<sub>2</sub> 复合纳米纤维的构筑及 高效电磁波吸收性能研究

黄俊, 邓小妹, 宋福生, 曾小军\*

(景德镇陶瓷大学材料科学与工程学院/国家日用及建筑陶瓷工程技术研究中心, 江西 景德镇 333400)

**摘要:** PAN 基纳米纤维作为一维纳米碳材料, 具有高长径比、优异介电性能和低密度等特性, 在电磁波 (EMW) 吸收领域备受关注。然而, PAN 纳米纤维的高导电性和单一组分, 导致其阻抗不匹配和电磁波衰减能力差, 从而限制了其应用。为解决这一问题, 通过引入零维的 SiO<sub>2</sub> 纳米球, 构建一种独特的一维 PCN/SiO<sub>2</sub> 珍珠-链结构复合纳米纤维。均匀的零维 SiO<sub>2</sub> 纳米球通过静电纺丝锚定在直径均匀的 PCN 纳米纤维中, 形成周期性电磁损耗单元, 增加了异质界面的数量, 导致极化弛豫作用增强。由于透波材料 SiO<sub>2</sub> 的低介电常数特性, 复合材料的阻抗匹配性能得到显著改善。此外, 电磁波在 PCN/SiO<sub>2</sub> 复合纳米纤维上的多次反射和散射进一步增加了电磁波能量的损耗。通过调控 SiO<sub>2</sub> 纳米球的含量可调节 PCN/SiO<sub>2</sub> 复合纳米纤维的介电损耗特性, 可促进其在低、中、高频段下都发挥出高效的吸波特性。实验结果表明, PCN/SiO<sub>2</sub> 复合纳米纤维在 7.2 GHz 频率下, 实现了 -56.14 dB 的反射损耗 ( $R_1$ ), 并在 2.3 mm 的匹配厚度下 EAB 值达到 5.52 GHz, 证明该复合纳米纤维具有良好的电磁波吸收性能和相对较宽的有效吸收带宽。PCN/SiO<sub>2</sub> 复合纳米纤维表现出柔韧、轻质和自支撑特性, 是一种潜在的多功能 EMW 吸收材料。(专精特新·电磁波吸收与屏蔽用新型材料的研究进展专辑十二之九)

**关键词:** PAN/SiO<sub>2</sub>; 纳米纤维; 静电纺丝; 介电损耗; 阻抗匹配; 珍珠-链结构; 有效吸收带宽; 电磁波吸收

中图分类号: O441.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-9981(2025)01-0098-09

**引文格式:** 黄俊, 邓小妹, 宋福生, 等. 珍珠-链结构型 PCN/SiO<sub>2</sub> 复合纳米纤维的构筑及高效电磁波吸收性能研究[J]. 材料研究与应用, 2025, 19(1): 98-106.

HUANG Jun, DENG Xiaomei, SONG Fusheng, et al. Construction of Pearl-Chain Structured PCN/SiO<sub>2</sub> Composite Nanofibers and Study of Their Efficient Electromagnetic Wave Absorption Performance[J]. Materials Research and Application, 2025, 19(1): 98-106.

## 0 引言

随着电子设备和无线通信技术的快速发展, 电磁波在日常生活中的应用日益广泛。尽管科技进步为人类带来了诸多便利, 但随之而来的电磁辐射和污染问题也日益严峻, 不仅对人类健康构成潜在威胁, 还可能干扰精密电子设备的正常运行<sup>[1-2]</sup>。因此, 研发高效能的电磁波 (EMW) 吸收剂具有重要的现实意义。目前, 磁性金属和金属氧化物因其优异的 EMW 吸收性能而备受关注<sup>[3]</sup>。然而, 如何设计并制备出兼具“薄的匹配厚度、小的质量密度、宽的有效吸收带宽、强的吸收能力”于一体的 EMW 吸收剂, 仍然是一个亟待解决的挑战。

一维材料因其高纵横比和轻质特性在电磁波吸收领域受到广泛关注<sup>[4]</sup>。在形成一维材料 (线、带、棒、管等) 的诸多方法中<sup>[5-7]</sup>, 静电纺丝是一种相对简便的工艺, 其可以将低维材料转化为高维材料<sup>[8]</sup>, 并在赋予它们稳定性的同时与其他材料结合。这种工艺相较其他方法成本低、可操作性强且兼容性好。目前, 由于静电纺丝制备技术的简单方便性和良好成型性, 并基于随后的热处理辅助, 一维 SiC 纳米纤维的制备已取得显著进展<sup>[4]</sup>。聚丙烯腈 (PAN) 是一种常用的纺丝基材, 其纺丝产物具有良好的电性能和稳定的纤维结构<sup>[9]</sup>。然而, 纯 PAN 纤维因为组分单一和导电性高而表现出阻抗匹配差和损耗能力低, 不利于吸收 EMW<sup>[10]</sup>。

收稿日期: 2024-09-01

基金项目: 江西省自然科学基金项目 (20224BAB214021); 国家日用及建筑陶瓷工程技术研究中心开放课题基金项目 (GXZX2302); 景德镇市陶瓷产业重大产学研协同攻关和成果转化专项项目 (2023ZDGG002)

作者简介: 黄俊, 硕士研究生, 研究方向为电磁功能材料。E-mail: huangjun20010714@163.com。

通信作者: 曾小军, 博士, 教授, 研究方向为电磁功能材料和能源催化材料。E-mail: zengxiaojun@jcu.edu.cn。

研究人员发现,通过将介电常数高的基体材料与介质材料或磁性材料进行复合,并对其进行精细的结构设计,可显著改善阻抗匹配特性和提升电磁衰减能力,从而提高EMW吸收性能<sup>[11]</sup>。Pan等<sup>[12]</sup>将磁性纳米链引入高介电常数的MXene中,通过磁损耗和介电损耗的协同效应获得了良好的EMW吸收性能。优化复合材料的结构,如珠链结构和空心结构,也有利于提高EMW吸收性能。Li等<sup>[13]</sup>将类似海胆的NiCo<sub>2</sub>S<sub>4</sub>与MXene薄片结合,增强了界面极化,促进了材料内部EMW的多重反射。在厚度为1.82 mm时,MXene/NiCo<sub>2</sub>S<sub>4</sub>的吸收强度为-52.00 dB。这些独特的微观结构产生了更多的非均质界面,增加了界面极化损耗,建立了三维导电网络,从而增加了导电损耗。因此,探索独特的一维PAN复合纤维材料是获得高性能EMW吸收材料的一种途径。

本文将具有低介电常数的SiO<sub>2</sub>纳米球与PAN静电纺丝纤维结合,以改善阻抗匹配特性和提升电磁损耗能力。通过静电纺丝构建了一种独特的一维纳米珍珠-链结构,有助于增强复合吸波剂的电磁波衰减能力和阻抗匹配特性。这项研究为设计高性能的一维介电型吸波剂提供了有效的策略。

## 1 实验部分

### 1.1 实验试剂和制备步骤

#### 1.1.1 实验药品

正硅酸四乙酯 (TEOS)、盐酸 (HCl, 36%—38%)、乙醇、NH<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O (28%)、二甲基甲酰胺 (DMF)、聚丙烯腈 (PAN) 均购自国药集团化学试剂有限公司。

#### 1.1.2 SiO<sub>2</sub>纳米球的制备

使用Stöber法合成尺寸均匀的SiO<sub>2</sub>纳米球<sup>[14]</sup>。将3.44 mL的TEOS加入16 mL去离子水和92 mL乙醇的混合溶液中,搅拌20 min后加入3 mL的NH<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O,继续搅拌2 h。离心收集产物,并用去离子水和乙醇分别离心洗涤产物数次,在真空干燥箱60 °C的条件下干燥过夜,得到SiO<sub>2</sub>纳米球。

#### 1.1.3 PCN/SiO<sub>2</sub>复合纳米纤维膜的制备

将0、100、150、200 mg的SiO<sub>2</sub>纳米球分别超声分散于2.5 mL DMF中,各加入200 mg PAN,在60 °C温度下搅拌5 h,得到均匀的PAN溶液(质量分数10%),分别命名为PAN、PAN/SiO<sub>2</sub>-0.50、PAN/SiO<sub>2</sub>-0.75、PAN/SiO<sub>2</sub>-1.00。将混合所得的前驱体溶液移入注射器中进行纺丝。电压为17 kV,进料

速率为1.5 mL h<sup>-1</sup>,收集器与不锈钢针之间的距离为18 cm。将得到的PAN/SiO<sub>2</sub>纤维膜在真空烘箱60 °C的条件下干燥过夜。将得到的纤维膜在空气中230 °C的条件下进行预氧化,以稳定电纺纤维,防止随后的高温热处理对纤维产生破坏。在氩气气氛中800 °C的条件下热处理,得到PCN、PCN/SiO<sub>2</sub>-0.50、PCN/SiO<sub>2</sub>-0.75、PCN/SiO<sub>2</sub>-1.00复合纳米纤维膜。静电纺丝法制备得到的PCN呈现出一维的纳米纤维, SiO<sub>2</sub>纳米球被嵌入PCN纳米纤维中形成具有周期单元的珍珠-链结构。PCN/SiO<sub>2</sub>复合纳米纤维的合成路线如图1所示。

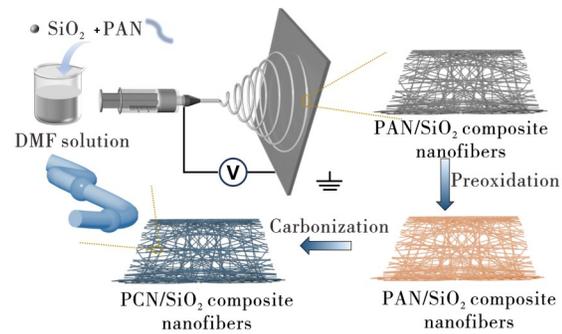


图1 PCN/SiO<sub>2</sub>复合纳米纤维的合成过程示意图

Figure 1 Schematic illustration of the formation for PCN/SiO<sub>2</sub> composite nanofibers

### 1.2 性能测试与表征

使用X射线衍射仪(XRD)(D8-Advance, Bruker, Germany)分析样品的结晶相,采用Cu K $\alpha$ 辐射源( $\lambda=0.154\ 06\ \text{nm}$ , 40 kV, 30 mA)。通过场发射扫描电子显微镜(FE-SEM, HITACHI SU8010, Japan)观察样品的微观结构。拉曼光谱用激光激发波长为532 nm的LabRAM HR800 (HORIBA)获得。

### 1.3 电磁参数测定

将吸波材料与石蜡按相同的质量比混合,将其压制,制备得到内径为3.04 mm、外径为7.00 mm、厚度为3.00 mm的吸波环。通过矢量网络分析仪(Ceyear, 3656D)来测量吸波环的电磁参数。吸波剂的EMW吸收特性通过反射损耗( $R_L$ )值进行评估。这些值可以根据电磁参数之间的关系通过式(1—2)计算得到<sup>[15]</sup>。

$$Z_{in} = Z_0 (\mu_r / \epsilon_r)^{1/2} \tanh[j(2\pi f d / c)(\mu_r \epsilon_r)^{1/2}] \quad (1)$$

$$R_L = 20 \log_{10} |(Z_{in} - Z_0) / (Z_{in} + Z_0)| \quad (2)$$

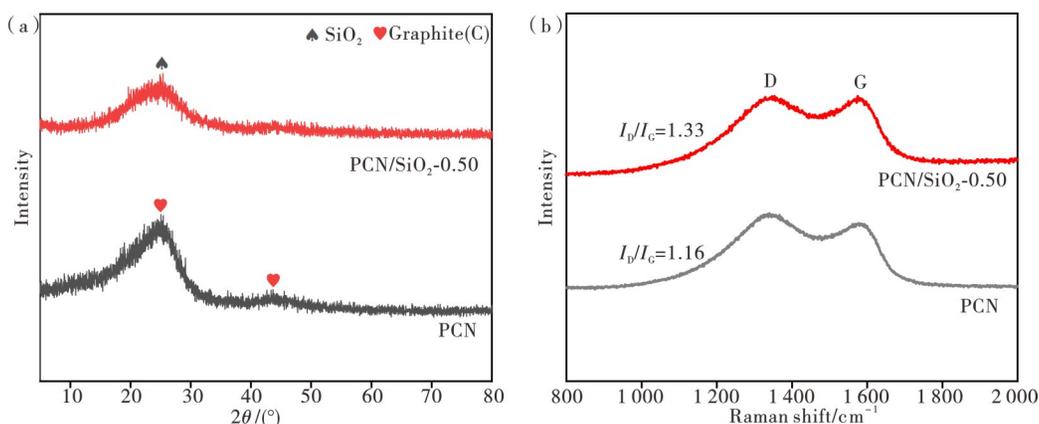
式中, $Z_{in}$ 和 $Z_0$ 分别为输入的阻抗和自由空间的阻抗, $c$ 、 $d$ 和 $f$ 分别为光速、吸波剂厚度和电磁波频率。

## 2 结果与讨论

### 2.1 PCN/SiO<sub>2</sub>复合纳米纤维的物相和元素组成

图2(a)为PCN和PCN/SiO<sub>2</sub>-0.50复合纳米纤维的XRD图谱。纯PAN纤维煅烧后获得的PCN在24.8°和43.5°处出现了两个宽峰,分别与石墨化碳的(001)和(002)晶面匹配良好(JCPDS No. 89-8491)。在PCN/SiO<sub>2</sub>-0.50复合纳米纤维的XRD图谱中,24.4°处的宽衍射峰是非晶态SiO<sub>2</sub>的特征峰。这两种样品物相的衍射峰所在角度相似,且无其他

杂质峰。PCN和PCN/SiO<sub>2</sub>-0.50复合纳米纤维的拉曼光谱如图2(b)所示。1354 cm<sup>-1</sup>处的D峰代表拓扑缺陷和有序碳,而1588 cm<sup>-1</sup>处的G峰对应C原子(石墨化碳)sp<sup>2</sup>轨道平面内拉伸振动的杂化<sup>[16]</sup>。通过将D带和G带之间的强度进行对比,可用于评估材料的相对石墨化程度<sup>[17]</sup>。PCN和PCN/SiO<sub>2</sub>-0.50的I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub>值分别为1.16、1.33。这一结果表明,纯PCN纳米纤维的石墨化程度相对较高,而SiO<sub>2</sub>的引入促进了缺陷碳的形成,这与上述XRD结果一致。



(a)—XRD;(b)—拉曼光谱。

(a)—XRD patterns; (b)—Raman spectra.

图2 PCN和PCN/SiO<sub>2</sub>-0.50的XRD图谱和拉曼光谱

Figure 2 XRD patterns and Raman spectra of PCN and PCN/SiO<sub>2</sub>-0.50

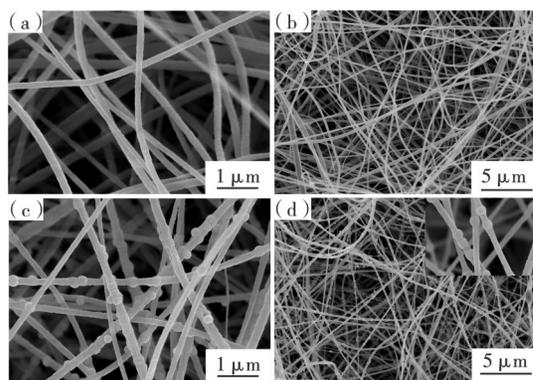
### 2.2 PCN/SiO<sub>2</sub>复合纳米纤维的微观结构

图3为PCN和PCN/SiO<sub>2</sub>-0.50的FE-SEM图。从图3可见,纯PCN纳米纤维显示出尺寸均匀的1D纳米纤维结构,纤维直径约为200 nm,这些纳米纤维交联形成3D网络结构,从而促进入射EMW的多重反射和散射<sup>[18]</sup>。在PCN纤维中添加SiO<sub>2</sub>纳米球

后,3D网络结构没有显著变化。SiO<sub>2</sub>的加入与PCN纳米纤维形成周期性单元结构的珍珠-链结构,SiO<sub>2</sub>均匀的嵌入PCN中。这些周期性的单元结构和3D网络结构可以较大程度的衰减电磁波,实现优异的电磁波吸收性能。

### 2.3 PCN/SiO<sub>2</sub>复合纳米纤维的EMW吸收性能

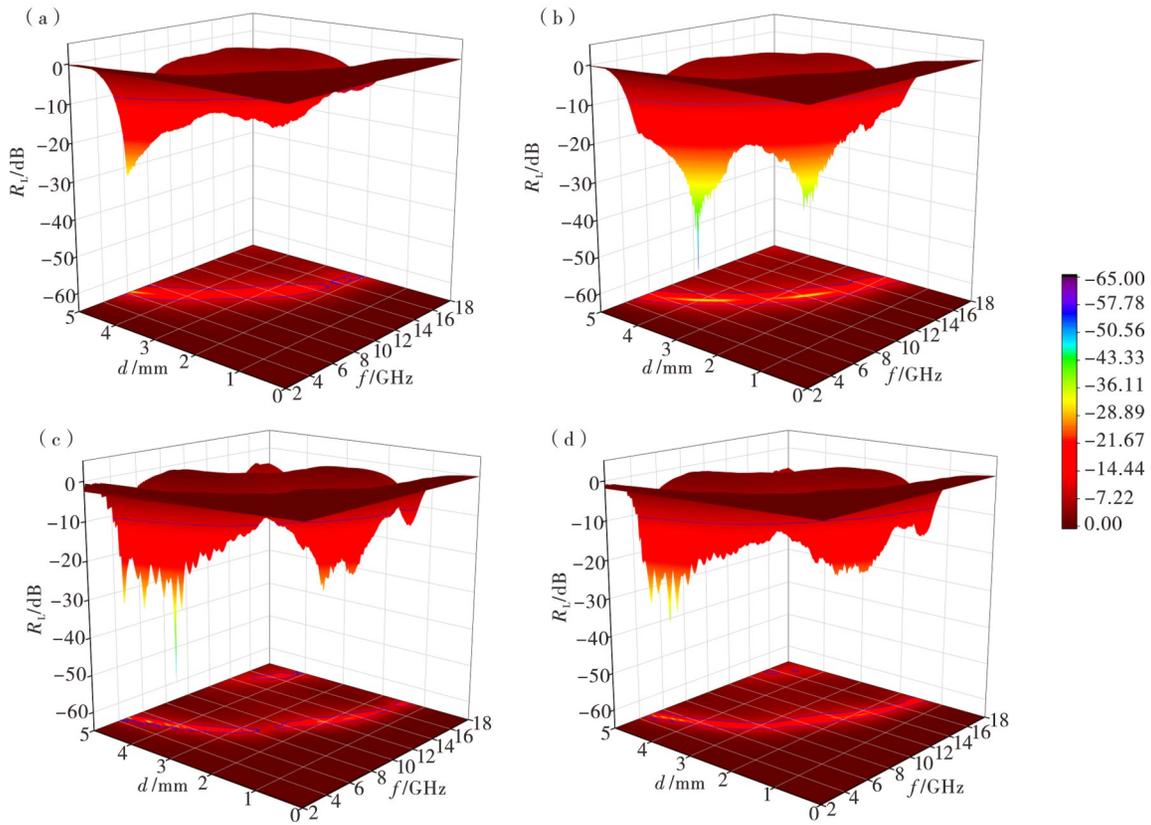
PCN/SiO<sub>2</sub>复合纳米纤维的EMW吸收特性可以通过样品的反射损耗( $R_L$ ),匹配厚度( $d$ )和有效吸收带宽(EAB)的值进行衡量。图4—6为4种样品(PCN、PCN/SiO<sub>2</sub>-0.50、PCN/SiO<sub>2</sub>-0.75和PCN/SiO<sub>2</sub>-1.00)的3D  $R_L$ 、2D  $R_L$ 和Z值。从图4和图5可见,纯PCN纳米纤维由于良好的导电性和独特的3D网络结构, $R_L$ 值达到-22.65 dB,能够对进入的EMW进行90%以上的吸收<sup>[19-20]</sup>。但由于单一的损耗机制,纯PCN难以进行较强的电磁波吸收。PCN/SiO<sub>2</sub>-0.50、PCN/SiO<sub>2</sub>-0.75和PCN/SiO<sub>2</sub>-1.00纳米纤维的 $R_L$ 值均优于纯PCN的 $R_L$ 值,能够对进入的EMW进行99%以上的吸收。PCN/SiO<sub>2</sub>样品的吸收性能相较纯PCN有较大幅度的提升,表



(a—b)—PCN;(c—d)—PCN/SiO<sub>2</sub>-0.50。

图3 不同样品的FE-SEM图

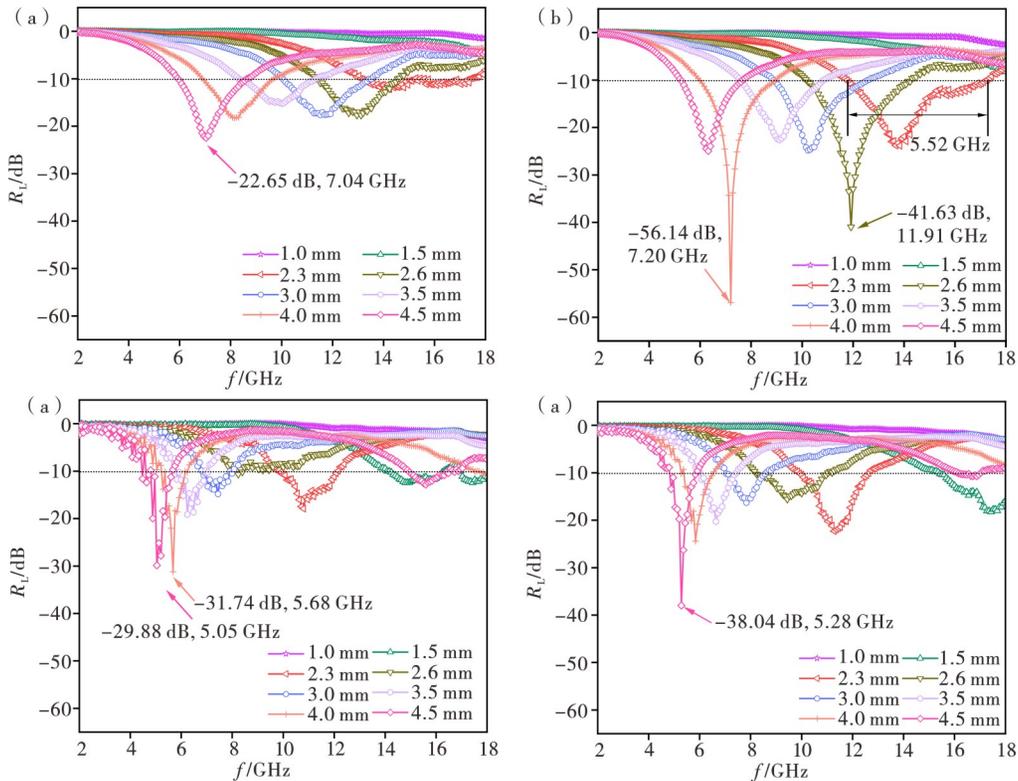
Figure 3 FE-SEM images of different samples



(a)—PCN;(b)—PCN/SiO<sub>2</sub>-0.50;(c)—PCN/SiO<sub>2</sub>-0.75;(d)—PCN/SiO<sub>2</sub>-1.00。

图4 不同样品  $R_L$  值的三维图

Figure 4 3D  $R_L$  values of different samples



(a)—PCN;(b)—PCN/SiO<sub>2</sub>-0.50;(c)—PCN/SiO<sub>2</sub>-0.75;(d)—PCN/SiO<sub>2</sub>-1.00。

图5 不同样品  $R_L$  值的二维图

Figure 5 2D  $R_L$  values of different samples

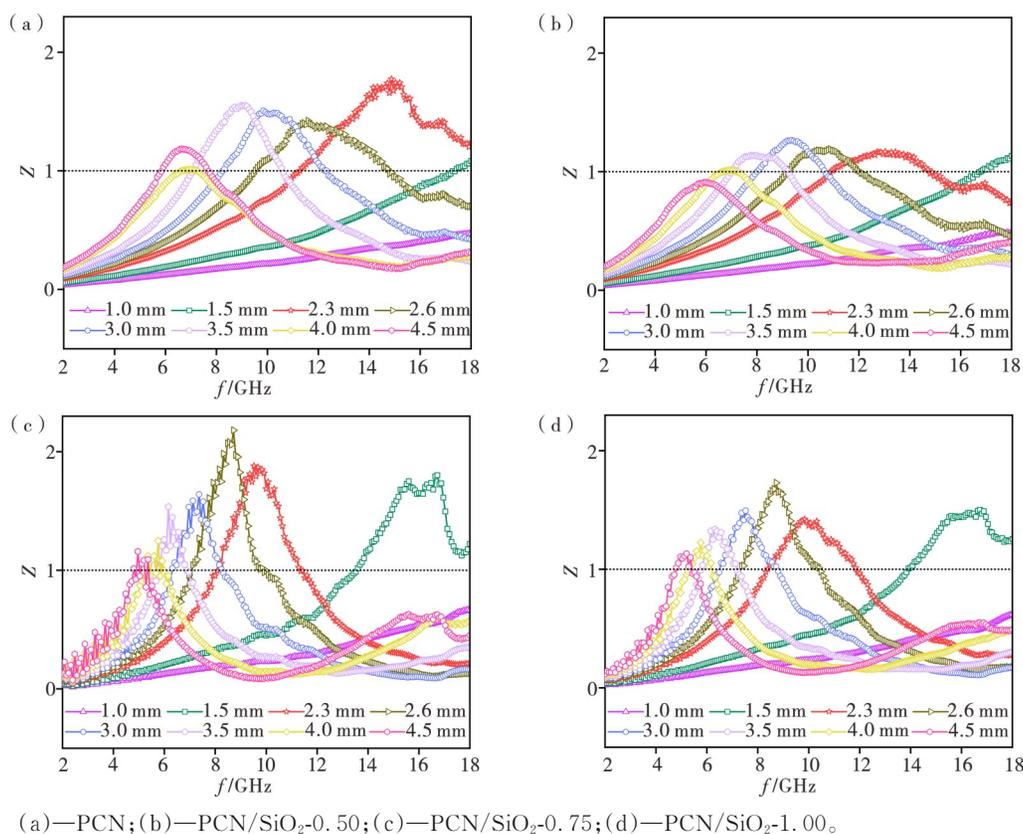


图6 不同样品Z值图

Figure 6 Z values of different samples

明将  $\text{SiO}_2$  纳米球均匀的嵌入 PCN 纳米纤维上可以增强对 EMW 有效吸收。值得注意的是,通过调控 PAN 纺丝溶液中  $\text{SiO}_2$  的含量,可以对其吸波性能进一步的调节。加入 100 mg  $\text{SiO}_2$  所形成的 PCN/ $\text{SiO}_2$ -0.50 复合纳米纤维具有优异的 EMW 吸收性能,其在 7.2 GHz 处的反射损耗高达  $-56.14$  dB,能够对进入的 EMW 进行 99.999% 以上的吸收,且其在 2.3 mm 处出现宽达 5.52 GHz 的有效吸收带宽(11.79—17.31 GHz)。而随着  $\text{SiO}_2$  含量的上升,PCN 纳米纤维的 EMW 吸收性能呈现先上升后下降的趋势。这表明通过调控  $\text{SiO}_2$  含量可实现对 PCN/ $\text{SiO}_2$  复合纳米纤维电磁波吸收性能的精确调控。另外,材料的阻抗匹配( $Z=(\mu_r/\epsilon_r)^{1/2}\tanh[j(2\pi fd/c)(\mu_r\epsilon_r)^{1/2}]$ )是决定吸波剂性能的关键因素之一。从图 6 可见,PCN/ $\text{SiO}_2$ -0.50 复合纳米纤维在最小反射损耗值对应的频率下,其 Z 值接近于 1。表明该复合材料具有适当的阻抗匹配特性,电磁波通过该样品时基本没有反射,大部分能够进入材料内部。综上所述,PCN/ $\text{SiO}_2$ -0.50 复合纤维在中低、中、高频段下都表现出优异的吸波特性。这表明了介电材料可以发挥出良好的阻抗匹配和较好的协同效应,从而实现高效的电磁波吸收特性。

吸波剂的特性与其电磁参数有关<sup>[21-23]</sup>。其中,介电常数和磁导率的实部与 EMW 能量的存储有关,而介电常数和磁导率的虚部与 EMW 能量的耗散能力有关<sup>[24-25]</sup>。PCN 和  $\text{SiO}_2$  是典型的介电材料。通常,为了实现优异的电磁衰减特性,相对过高或过低的介电常数是不利于电磁波吸收的。图 7 为 PCN 和 PCN/ $\text{SiO}_2$  的复介电常数的频率相关性。从图 7(a-b)可见,随着频率的不断增加,所有材料的介电常数逐渐减小,这种现象可以归因于频率色散行为。并且,在高频段下可以观察到曲线具有明显的波动,这表明极化损耗的存在。在 PCN、PCN/ $\text{SiO}_2$ -0.50、PCN/ $\text{SiO}_2$ -0.75 和 PCN/ $\text{SiO}_2$ -1.00 样品中,PCN 具有最低的复介电常数。通过静电纺丝法将  $\text{SiO}_2$  纳米球均匀的嵌入 PCN 纳米纤维上能够适当的提高复介电常数,从而提升材料储存和耗散 EMW 的能力,促进电磁波吸收。从图 7(c)可见,PCN/ $\text{SiO}_2$ -0.50 复合纳米纤维  $\tan \delta_e$  值最大,说明其介电损耗能力较强。衰减常数  $\alpha$  是评判材料对 EMW 损耗能力的另一个标准。从图 7(d)可见,PCN/ $\text{SiO}_2$ -0.50 在样品中具有最大的  $\alpha$  值,证明 PCN/ $\text{SiO}_2$ -0.50 有着优异的电磁损耗能力。这与上述  $\tan \delta_e$  值所显示的结果一致。

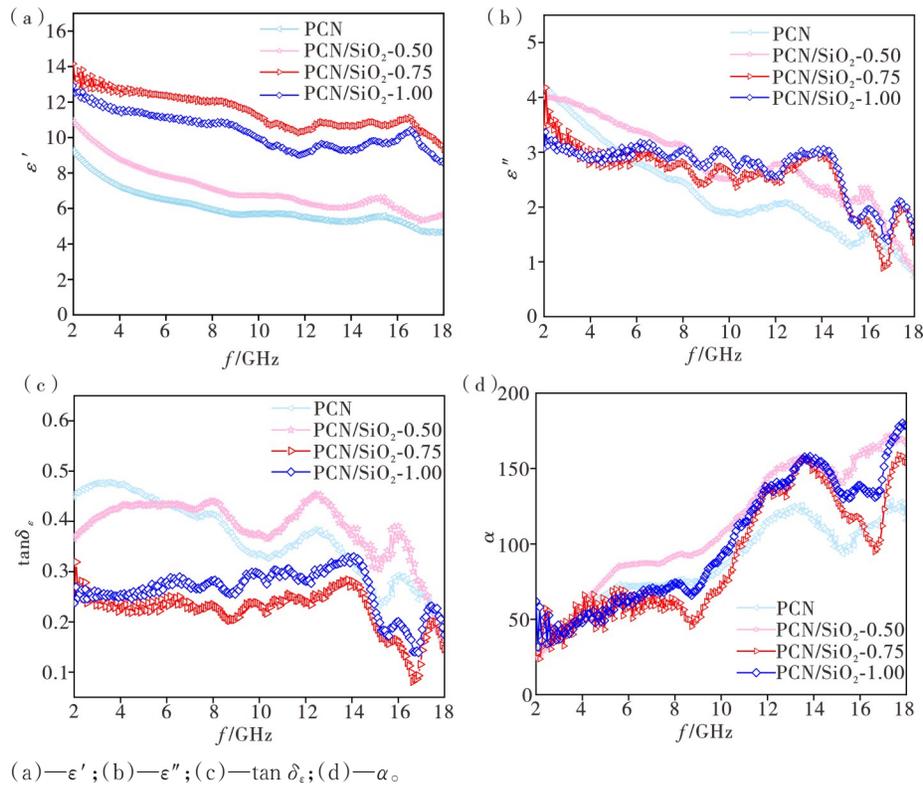
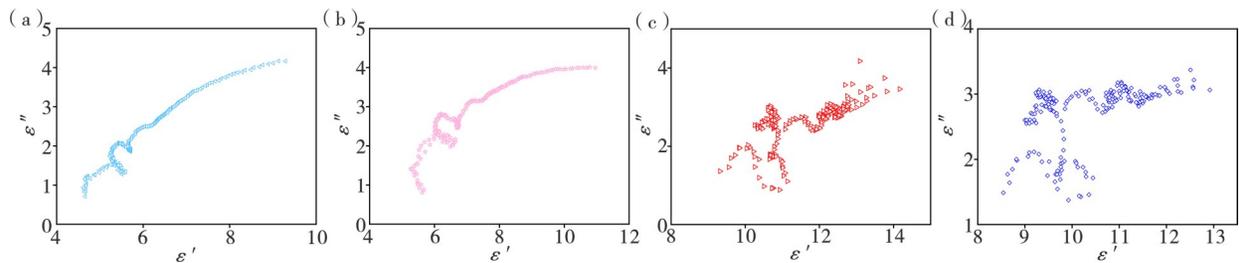


图7 不同样品的复介电常数的频率相关性

Figure 7 Frequency dependence of complex permittivity of different samples

图8为PCN和PCN/SiO<sub>2</sub>样品的Cole-Cole曲线。根据德拜弛豫理论 $(\epsilon' - \epsilon_\infty)^2 + (\epsilon'')^2 = (\epsilon_s - \epsilon_\infty)^2$ ,介电常数实部和虚部之间的关系与介电弛豫有关<sup>[26]</sup>。材料的电磁波吸收机理可以用德拜介电弛豫模型来进行描述:如果Cole-Cole曲线是一个向下开口的半圆,则表明材料中存在极化弛豫过程;如果Cole-Cole曲线具有细长的尾部,则表明传导损耗主导介电损耗<sup>[27]</sup>。从图8可见,纯PCN纳米纤维的Cole-Cole曲线具有较细长的尾部,主要是传导损耗发挥作用。由于煅烧过程中纤维存在一定的缺陷,因此,极化弛豫也存在一定的作用。随着嵌入PCN

纤维中SiO<sub>2</sub>纳米球含量的增加,Cole-Cole半圆数量增加,极化弛豫起主导作用。PCN/SiO<sub>2</sub>-0.50样品的传导损耗和极化弛豫具有较长的尾部和较多的Cole-Cole半圆,表明其具备较强的极化损耗能力和传导损耗能力,这可以增强EMW吸收性能。综上所述,一方面,在PCN纳米纤维上嵌入SiO<sub>2</sub>纳米球会对PCN/SiO<sub>2</sub>样品的介电损耗能力进行调控。另一方面,合成的PCN/SiO<sub>2</sub>珍珠-链结构具有良好的阻抗匹配特性和优异的衰减能力。因此,PCN/SiO<sub>2</sub>复合纳米纤维表现出优异的EMW吸收特性。



(a)—PCN; (b)—PCN/SiO<sub>2</sub>-0.50; (c)—PCN/SiO<sub>2</sub>-0.75; (d)—PCN/SiO<sub>2</sub>-1.00。

图8 不同样品的 $\epsilon'$ - $\epsilon''$ 曲线

Figure 8 The  $\epsilon'$ - $\epsilon''$  curves of different samples

图9为PCN/SiO<sub>2</sub>纳米纤维的EMW吸收机制示意图。复合纳米纤维具有良好的阻抗匹配特性,有利于电磁波的射入,防止电磁波在材料表面的反射。当电磁波进入样品后,可以在一维纳米纤维组成的三维网络中进行多重反射和散射,从而延长入射波的传输途径,促进能量的耗散。PCN/SiO<sub>2</sub>复合纳米纤维由于碳基材料良好的导电性,形成了良好的导电网络,从而诱导电子的传导运输。SiO<sub>2</sub>纳

米球与PCN纤维之间形成丰富的异质界面,导致在该界面处积累了大量的电荷。所以,空间电荷的不均匀分布可促使其重新分布,形成局部电场,引发界面极化的产生。并且,由于热处理过程促使纤维中形成一定的缺陷,从而引起偶极极化。综上所述,良好的阻抗匹配特性、优异的介电损耗和3D网络结构引发的EMW多重反射和散射是PCN/SiO<sub>2</sub>复合纳米纤维实现优异EMW吸收性能的主要机制。

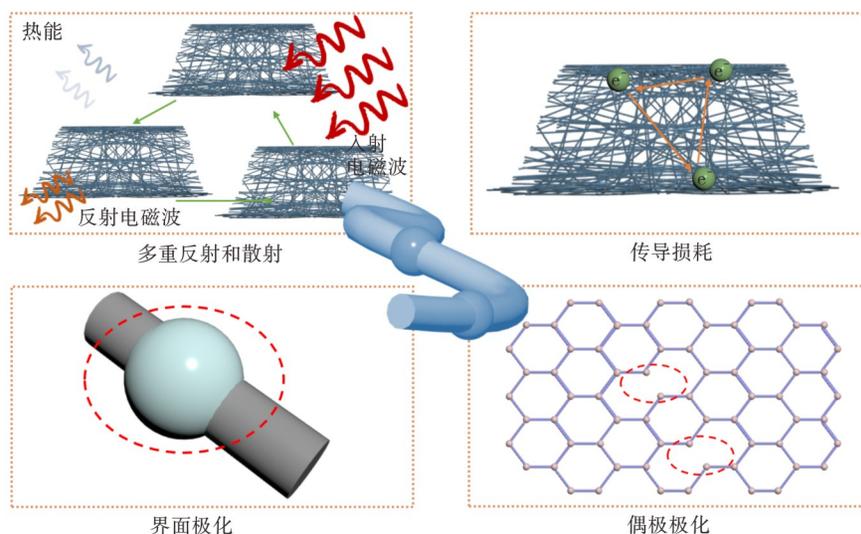


图9 PCN/SiO<sub>2</sub>复合纳米纤维的EMW吸收机制示意图

Figure 9 Schematic diagram of EMW absorption mechanisms for PCN/SiO<sub>2</sub> composite nanofibers

### 3 结论

本文通过简单的静电纺丝工艺成功合成了结构独特的一维PCN/SiO<sub>2</sub>复合纳米纤维。通过改变加入SiO<sub>2</sub>纳米球的含量可以调控复合纳米纤维的介电特性,从而实现杰出的电磁损耗能力和匹配的阻抗特性。在电磁波多重反射和散射、极化损耗、传导损耗等多种电磁波吸收机制的综合作用下,PCN/SiO<sub>2</sub>复合纳米纤维表现出优异的吸波特性,在中低频7.2 GHz处具有高达-56.14 dB的反射损耗值。同时在2.3 mm的匹配厚度下,表现出宽达5.52 GHz的有效吸收带宽(11.79—17.31 GHz)。此项工作揭示了吸波剂组分控制对介电损耗的调控机制,为设计轻质、宽频的和高性能一维介电型吸波材料提供了新策略。

### 参考文献:

[1] CHE R, PENG L, DUAN X, et al. Microwave absorption enhancement and complex permittivity and

permeability of Fe encapsulated within carbon nanotubes [J]. *Advance Materials*, 2004, 16: 401-405.

[2] QIAN J, MA D, ZHOU X, et al. Synthesis of SiOC@C ceramic nanospheres with tunable electromagnetic wave absorption performance [J]. *Journal of Advanced Ceramics*, 2024, 13: 1394-1408.

[3] YANG J, WANG H, ZHANG Y, et al. Layered structural PBAT composite foams for efficient electromagnetic interference shielding [J]. *Nano-Micro Letters*, 2024, 16: 31.

[4] 邓小妹, 蒋肖, 黄俊, 等. 一维碳化硅纳米材料的制备及其电磁波吸收应用进展 [J/OL]. *聊城大学学报(自然科学版)*, 2024, 1-17 [2024-12-04]. <https://doi.org/10.19728/j.issn1672-6634.2024070017>.

[5] ZHANG C, YU S. Nanoparticles meet electrospinning: Recent advances and future prospects [J]. *Chemical Society Reviews*, 2014, 43: 4423-4448.

[6] LIANG H, LIU S, YU S. Controlled synthesis of one-dimensional inorganic nanostructures using pre-existing one-dimensional nanostructures as templates [J].

- Advance Materials, 2010, 22: 3925-3937.
- [7] XUE J, WU T, DAI Y, et al. Electrospinning and electrospun nanofibers: Methods, materials, and applications [J]. Chemical Reviews, 2019, 119: 5298-5415.
- [8] YAO Y, WANG C, NA J, et al. Macroscopic MOF architectures: Effective strategies for practical application in water treatment [J]. Small, 2022, 18: 2104387.
- [9] KOPEC M, LAMSON M, YUAN R, et al. Polyacrylonitrile-derived nanostructured carbon materials [J]. Progress in Polymer Science, 2019, 92: 89-134.
- [10] LI C, QIAN X, HAO M, et al. Outstanding electromagnetic wave absorption performance of polyacrylonitrile-based ultrahigh modulus carbon fibers decorated with CoZn-bimetallic ZIFs [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 950: 169912.
- [11] 黄惠中, 李博, 赵超, 等. CoZn@NC与CuS的强耦合界面构建及其超薄电磁波吸收[J]. 陶瓷学报, 2024, 45(1): 89-96.
- [12] PAN F, YU L, XIANG Z, et al. Improved synergistic effect for achieving ultrathin microwave absorber of 1D Co nanochains/2D carbide MXene nanocomposite [J]. Carbon, 2021, 170: 506-515.
- [13] LI X, YIN S, CAI L, et al. Sea-urchin-like NiCo<sub>2</sub>S<sub>4</sub> modified MXene hybrids with enhanced microwave absorption performance [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 454: 140127.
- [14] MU G, MU D, WU B, et al. Microsphere-like SiO<sub>2</sub>/MXene hybrid material enabling high performance anode for lithium ion batteries [J]. Small, 2020, 16: 1905430.
- [15] 刘学斌, 林志强, 万艳君, 等. 低反射MXene基电磁屏蔽材料的研究进展 [J]. 材料研究与应用, 2023, 17: 412-426.
- [16] HU Z, LI Z, XIA Z, et al. PECVD-derived graphene nanowall/lithium composite anodes towards highly stable lithium metal batteries [J]. Energy Storage Mater, 2019, 22: 29-39.
- [17] NAN H, LUO F, JIA H, et al. Balancing between polarization and conduction loss toward strong electromagnetic wave absorption of hard carbon particles with morphology heterogeneity [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14: 19836-19846.
- [18] ZENG X, JIANG X, NING Y, et al. Construction of dual heterogeneous interface between zigzag-like Mo-MXene nanofibers and small CoNi@NC nanoparticles for electromagnetic wave absorption [J]. Journal of Advanced Ceramics, 2023, 12: 1562-1576.
- [19] ZENG X, LI E, XIA G, et al. Silica-based ceramics toward electromagnetic microwave absorption [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2021, 41: 7381-7403.
- [20] ZHAO C, ZENG X, HUANG J, et al. MXene-derived titanate heterojunctions with lightweight and heat-resistant properties for electromagnetic wave absorption [J]. Carbon, 2024, 228: 119422.
- [21] ZENG X, JIANG X, NING Y, et al. Constructing built-in electric fields with semiconductor junctions and schottky junctions based on Mo-MXene/Mo-metal sulfides for electromagnetic response [J]. Nano-Micro Letters, 2024, 16: 213.
- [22] ZENG X, ZHAO C, JIANG X, et al. Functional tailoring of multi-dimensional pure MXene nanostructures for significantly accelerated electromagnetic wave absorption [J]. Small, 2023, 19: 2303393.
- [23] ZENG X, ZHAO C, YIN Y, et al. Construction of NiCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanosheets-covered Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene heterostructure for remarkable electromagnetic microwave absorption [J]. Carbon, 2022, 193: 26-34.
- [24] ZENG X, NIE T, ZHAO C, et al. In situ exsolution-prepared solid-solution-type sulfides with intracrystal polarization for efficient and selective absorption of low-frequency electromagnetic wave [J]. Advanced Science, 2024: 2403723.
- [25] NING Y, JIANG X, HUANG J, et al. Trimetallic MOFs derived NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/MoNi<sub>4</sub>-NC Schottky heterojunctions with abundant defects and dielectric-magnetic coupling for electromagnetic response [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2025, 213, 1-13.
- [26] 蒋肖, 李博, 何邦, 等. Cu<sub>x</sub>S<sub>y</sub>-MoS<sub>2</sub>异质结构的介电损耗调控及其高效电磁波吸收 [J]. 人工晶体学报, 2024, 53: 276-285.
- [27] HUANG H, LI B, ZHAO C, et al. Construction of strong coupling interface between CoZn@NC and CuS for ultrathin electromagnetic wave absorption [J]. Journal of Ceramics, 2024, 45: 89-96.

## Construction of Pearl-Chain Structured PCN/SiO<sub>2</sub> Composite Nanofibers and Study of Their Efficient Electromagnetic Wave Absorption Performance

HUANG Jun, DENG Xiaomei, SONG Fusheng, ZENG Xiaojun\*

(National Engineering Research Center for Domestic & Building Ceramics/ School of Materials Science and Engineering, Jingdezhen Ceramic University, Jingdezhen 333400, China)

**Abstract:** PAN-based nanofibers, as one-dimensional carbon materials, have attracted widespread attention in the field of electromagnetic wave (EMW) absorption due to their high aspect ratio, excellent dielectric properties, and low density. However, due to the high conductivity and single component presence of PAN nanofibers, their electromagnetic wave absorption performance is not outstanding. It exhibits impedance mismatch and poor electromagnetic wave attenuation capability. This article introduces zero dimensional SiO<sub>2</sub> nanospheres to construct a unique one-dimensional PCN/SiO<sub>2</sub> pearl chain composite nanofiber, achieving matched impedance characteristics and excellent EMW attenuation capability. Uniform zero dimensional SiO<sub>2</sub> nanospheres are anchored in PCN nanofibers with uniform diameter through electrospinning, forming periodic electromagnetic loss units. This increases the number of heterogeneous interfaces, leading to enhanced polarization relaxation. Due to the presence of SiO<sub>2</sub>, a low dielectric constant transparent material, the impedance matching characteristics have been improved. In addition, the incident electromagnetic waves on PCN/SiO<sub>2</sub> composite nanofibers increase the reflection and scattering of the incident electromagnetic waves, promoting the loss of electromagnetic wave energy. It is worth noting that by controlling the content of SiO<sub>2</sub> nanospheres added to regulate their dielectric loss characteristics, PCN/SiO<sub>2</sub> composite nanofibers can be promoted to exhibit efficient absorption properties in low, medium, and high frequency bands. Experimental data shows that PCN/SiO<sub>2</sub> composite nanofibers exhibit a reflection loss ( $R_l$ ) of  $-56.14$  dB at mid to low frequencies of 7.2 GHz, demonstrating excellent electromagnetic wave absorption performance. Moreover, the composite nanofibers also have a relatively wide effective absorption bandwidth (EAB). At a matching thickness of 2.3 mm, the EAB value reaches 5.52 GHz. PCN/SiO<sub>2</sub> composite nanofibers exhibit flexibility, lightweight, and self-supporting properties, making them a potential multifunctional EMW absorbing material.

**Keywords:** PAN/SiO<sub>2</sub>; Nanofibers; Electrospinning; Dielectric loss; Impedance matching; Pearl-chain structure; Effective absorption bandwidth; Electromagnetic wave absorption

(学术编辑:常成)