

基于交替设计策略的多层介电/磁性纳米纤维膜吸波性能

王乐瑶^{1,2}, 袁野^{1,2}, 杨萱³, 王霄寒^{1,2}, 贾珍³,
王程浩³, 吴霄³, 李宜彬^{1,2}

(1. 北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100191; 2. 材料智能设计国家级重点实验室, 北京 102206; 3. 中国航空工业集团公司济南特种结构研究所, 济南 250023)

摘要: 高性能吸波材料需兼具介电损耗与磁损耗特性, 以实现电磁能量的高效协同耗散。然而, 单一组分材料往往难以同时满足“薄、轻、宽、强”的综合性能要求, 当前研究多集中于材料组分优化与微观结构调控, 而对宏观结构设计的系统性探索仍显不足。鉴于此, 本研究采用静电纺丝技术, 以介电型碳材料(石墨烯、MXene)与磁性纳米颗粒为原料, 分别制备介电型与磁性纳米纤维膜。基于多层交替结构设计策略, 将上述两种纤维膜组装成复合薄膜, 该薄膜表现出优异的电磁吸波性能。所构建的三层复合薄膜在匹配厚度为 3.9 mm 时, 最小反射损耗可达 -54 dB, 并在 4、6、8 GHz 三个频点处均表现出低雷达截面散射。同时, 该复合薄膜还具备良好的柔韧性、轻质化特性以及优异的隔热性能, 可贴合复杂曲面, 为航空航天隐身、精密电子器件及通信设备的高效、轻量化电磁波吸收提供了思路。本研究证实, 多层交替结构策略可有效调控电磁波传播路径与阻抗匹配, 是制备高性能微波吸收材料的有效途径之一。本文数据集可在 <https://doi.org/10.57760/sciencedb.011jp> 中访问获取。

关键词: 静电纺丝; 多层交替结构; 阻抗匹配; 介电损耗; 磁损耗

中图分类号: V259

文献标志码: A

文章编号:

Microwave Absorbing Properties of Multilayer Dielectric/Magnetic Nanofiber Composite Films through Alternating Design Strategy

WANG Leyao^{1,2}, YUAN Ye^{1,2}, YANG Xuan³, WANG Xiaohan^{1,2}, JIA Zhen³, WANG Chenghao³, WU Xiao³, LI Yibin^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. National Key Laboratory of Artificial Intelligence for Material Science, Beijing 102206, China; 3. AVIC Research Institute for Special Structures of Aeronautical Composite, Ji'nan 250023, China)

Abstract: High-performance microwave-absorbing materials require a synergy of dielectric and magnetic loss mechanisms to efficiently dissipate electromagnetic energy. However, single-component materials often fail to simultaneously meet the stringent requirements of "thin thickness, lightweight, broad bandwidth, and strong absorption." While extensive research has focused on compositional optimization and microstructural engineering, systematic exploration regarding macroscopic structural design remains relatively limited. Herein, dielectric nanofiber membranes containing carbon-based materials (graphene oxide(GO) and MXene) and magnetic nanofiber membranes incorporated with magnetic nanoparticles were individually fabricated *via* electrospinning. Subsequently, a multilayer alternating assembly strategy was employed to construct composite films with superior microwave absorption performance. The

收稿日期: 2026-06-23; 收到修改稿日期: 2026-09-09; 网上出版日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 浙江省尖兵领雁计划(2024SSYS0086) Key R&D Program of Zhejiang (2024SSYS0086)

作者简介: 王乐瑶(2002-), 女, 博士研究生. E-mail: wangleyao@buaa.edu.cn

WANG Leyao (2002-), female, PhD candidate. E-mail: wangleyao@buaa.edu.cn

通信作者: 李宜彬, 教授. E-mail: liyibin@buaa.edu.cn; 袁野, 副教授. E-mail: yuanyewins@hebut.edu.cn.

LI Yibin, professor. E-mail: liyibin@buaa.edu.cn; YUAN Ye, associate professor. E-mail: yuanyewins@hebut.edu.cn.

optimized three-layer composite film achieves a minimum reflection loss of -54 dB at a thickness of 3.9 mm, along with significantly reduced radar cross-section scattering at 4, 6, and 8 GHz. Furthermore, the composite film possesses desirable multifunctional features, including excellent flexibility, low density, and superior thermal insulation, enabling seamless conformity to complex curved surfaces. These attributes render it highly promising for lightweight and efficient electromagnetic protection in aerospace stealth technologies, precision electronics, and telecommunications. This work demonstrates that the multilayer alternating architecture effectively modulates electromagnetic wave propagation pathways and impedance matching, offering a robust design avenue for high-performance microwave absorbers.

Key words: electrospinning; multilayer alternating structure; impedance gradient design; dielectric loss; magnetic loss

随着第五代与第六代(5G/6G)移动通信技术的快速发展,高功率电磁设备的使用频率大幅增加^[1],由此引发的电磁辐射污染与电磁干扰问题已成为威胁人体健康、干扰精密电子设备的关键隐患^[2]。在此背景下,开发兼具“薄、轻、宽、强”特性的高效电磁波吸收材料,已成为材料科学与电磁学交叉领域的研究热点^[3]。在现有电磁损耗机制中,介电/磁性复合材料因能同时引入介电损耗与磁损耗,被广泛视为实现高性能吸波的有效途径。然而,传统介电/磁性复合材料制备工艺多依赖于简单的物理混合或随机共混,这种模式易导致纳米颗粒团聚或相分离,不仅削弱各组分原有的电磁损耗特性,还因局部导电通路的过早形成而导致阻抗失配^[4-5]。此外,由于缺乏宏观尺度的电磁空间设计,各向同性的共混结构无法在空间维度上对电磁波进行定向引导与逐层衰减,极大地限制了其对复杂电磁环境的主动适应能力^[6]。

为突破上述传统均匀共混体系的局限性,本研究提出了一种宏观“交替多层架构”设计策略,旨在从三维空间尺度主动调控电磁波的传播路径与能量衰减行为。前期研究中,类似的分层设计已展现出一定优势。Tong 等^[7]通过构筑 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{C}/\text{rGO}$ 多层膜,在 2.5 mm 匹配厚度下实现了 -48.5 dB 的强吸收,其阻抗梯度结构显著改善了阻抗匹配;Ge 等^[8]采用仿生层状复合设计,在 2.2 mm 匹配厚度下获得了 5.1 GHz 的有效吸收带宽,进一步验证了宏观结构调控对提升吸波性能的关键作用。在本研究中,我们将高电导损耗的介电层(基于石墨烯/MXene)与高磁导损耗的磁性层(基于铁/镍等纳米颗粒)进行空间隔离与交替层叠。这种宏观构型一方面能够使各组分在独立的单层膜中充分发挥其本征损耗性能,从根本上避免了直接混合带来的粒子团聚与相互干扰^[9];另一方面,空间上的分层排列可在多层异质界面处引入丰富的界面极化效应,在保障损耗能力的同时拓宽极化损耗的频带^[10]。

基于上述设计策略,本研究进一步采用 CST 电磁仿真,系统调节了介电/磁性单层膜的种类、层数和厚度比例,通过对内部电磁场分布与能流密度的可视化模拟,在实验基础上进一步优化了多层结构的电磁响应,实现了阻抗匹配与高损耗能力的协同。仿真结果表明,在 3.9 mm 总厚度下反射损耗达 -54 dB,且有效吸收带宽覆盖测试频段的 49%,该交替多层结构能有效引导电磁波逐层衰减,展现出优异的吸波性能。

1 实验方法

1.1 实验材料

单层氧化石墨烯水相分散液(15.5 g/mg, 购自杭州高烯科技有限公司); MXene(99%, 购自济南三川新材料科技有限公司), 直接使用, 未进一步纯化。

聚丙烯腈(PAN, $M_w=1.5\times10^5$); 聚乙烯吡咯烷酮(PVP, $M_w=1.3\times10^6$); 丙酮(纯度 $\geq 99.5\%$); *N,N*-二甲基甲酰胺(DMF, ACS 光谱级, $\geq 99.8\%$); 纳米镍粉(99.9%, 粒径 20~100 nm); 纳米铁粉(99.9%, 粒径 100 nm); 纳米氧化钴(Co_3O_4 , 99.5%, 粒径 50 nm); 纳米四氧化三铁(Fe_3O_4 , 99.5%, 粒径 50 nm)。高分子颗粒、溶剂及纳米氧化钴均购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司, 其余磁性颗粒均购自上海麦克林生化科技有限公司。所有试剂均直接使用, 未进一步纯化。

1.2 样品制备

1.2.1 氧化石墨烯的制备

将单层氧化石墨烯水相分散液与水按一定比例稀释到 8 mg/g, 在搅拌机里混合搅拌 30 min, 再将混合浆料经微型螺杆泵加压分散到干燥室内, 待料液雾滴完全冷却凝固后, 转入冷冻干燥机内进行冷冻干燥。将制备好的氧化石墨烯粉末放入脱脂炉内, 加热到 400 °C 热处理 2 h 以去除残留分散剂, 即得

试验所用氧化石墨烯粉末。

1.2.2 氧化石墨烯纳米纤维膜的制备

介电/磁性纳米纤维膜的制备流程如图 1 所示。首先将一定量的聚丙烯腈粉末加入到 *N,N*-二甲基甲酰胺中, 室温搅拌 12 h 以上, 再加入一定比例的氧化石墨烯粉末, 磁力搅拌器搅拌 2 h 使其均匀悬浮, 即得纺丝前驱体溶液。

将纺丝前驱体溶液超声振荡 30 min 以去除气泡, 采用静电纺丝设备制备不同质量分数的石墨烯纳米纤维膜。纺丝参数如下: 纺丝电压为 15 kV, 推速为 0.7 mL/h, 转筒转速为 200 r/min, 温度设置为 30 °C, 湿度维持在 12% 左右, 采用硅油纸收丝, 针头至接收转筒的距离为 16 cm, 纺丝时间设置为 8、20 h。

1.2.3 MXene 纳米纤维膜的制备

将 DMF 与丙酮按体积比 1:1 混合搅拌 30 min, 加入 PVP 粉末, 在 40 °C 加热搅拌溶解。加入一定质量的 MXene 粉末, 磁力搅拌 5 h 使其分散均匀, 即为纺丝前驱体溶液。

超声振荡 30 min 去除气泡后进行纺丝: 纺丝电压为 15 kV, 推速为 1.0 mL/h, 转筒转速为 200 r/min, 温度设置为 30 °C, 湿度维持在 10% 左右, 采用硅油纸收丝, 针头至接收转筒的距离为 16 cm, 纺丝时间统一设置为 15 h。

1.2.4 磁性颗粒纳米纤维膜的制备

首先将一定量的聚丙烯腈粉末加入到 *N,N*-二甲基甲酰胺中, 室温搅拌 12 h 以上, 加入一定比例的磁性颗粒(纳米镍粉、纳米铁粉、纳米氧化钴、四氧化三铁), 机械搅拌 2 h 使其均匀悬浮, 即得纺丝前驱体溶液。

超声振荡 30 min 去除气泡后进行纺丝: 纺丝电压为 18 kV, 推速为 0.6 mL/h, 转筒转速为 200 r/min, 温度设置为 25 °C, 湿度维持在 12% 左右, 采用硅油纸收丝, 针头至接收转筒的距离为 14 cm, 纺丝时间统一设置为 18 h。

为方便表述, 将纳米纤维膜的添加物含量和样品编号分别列入表 S1 和表 S2。

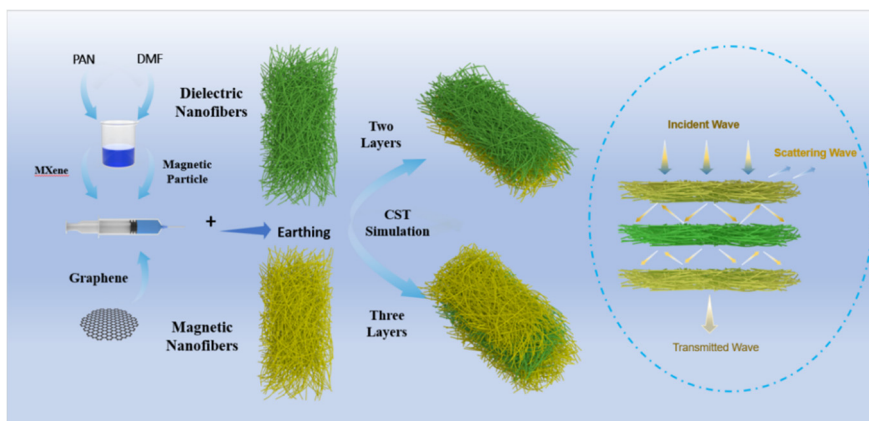


图 1 介电/磁性纤维膜制备流程图

Fig. 1 Preparation process of dielectric/magnetic nanofiber film

1.3 测试与表征

采用 X 射线衍射仪(Philips XL 30 型)分析纳米纤维膜的结构参数, 扫描范围为 10°~90°, 扫描速度为 6 (°)/min。采用场发射扫描电子显微镜(S4800 型, 日本日立公司生产, 加速电压为 10 kV)观察纳米纤维的表面形貌(所有样品均经喷金处理), 采用傅里叶变换红外光谱(TENSOR 27)表征复合纤维中的官能团和化学键, 样品与 KBr 混合压片, 测试范围 4000~550 cm⁻¹, 分辨率 4 cm⁻¹。利用 X 射线光电子能谱分析样品的价键结构。采用矢量网络分析仪(3672C-S 型)通过波导法测量复合材料在 3.90~5.99 GHz 和 5.38~8.20 GHz 两个频段的电磁参数。通过

接触角测试评估样品的疏水性能。

2 结果与讨论

2.1 形貌与表征

图 2 为 M-3 样品和 D-4 样品的 SEM 照片, 当磁性颗粒添加量为 50 mg/g、聚丙烯腈分子添加量为 100 mg/g 时(M-3, 图 2(a)), 所制备的纳米纤维圆滑平直, 磁性颗粒在聚合物包裹下分散良好, 未出现明显颗粒聚集。当增大磁性颗粒添加量并减少聚合物用量时(图 S1(a)), 相比于其他磁性颗粒添加量只有 50 mg/g 的纳米纤维, 纤维直径整体偏大, 磁性

颗粒因含量较高且具有磁性而发生部分团聚,但对整体形貌影响不大。相比于磁性纤维膜,添加碳材料的介电型纤维膜(图 2(b))的纤维直径明显更大。这是由于无机磁性纳米颗粒通常会增加溶液中的自由离子浓度,从而显著提高纺丝液的导电性。在静电纺丝过程中,溶液导电性越高,射流表面聚集的电荷就越多,较大的同种电荷排斥力会引发“射流不稳定性”及更强烈的电场拉伸作用,使射流溶液在固化前被极度拉细,最终获得直径极小的纤维,这一点从图 S1 中磁性纤维膜和介电纤维膜的对比也可看出。

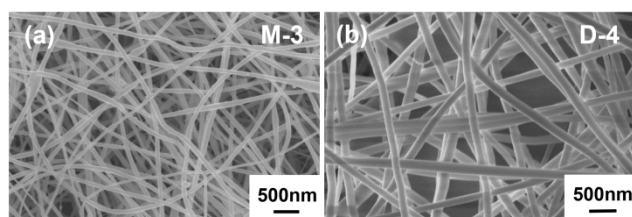


图 2 不同填料纤维膜的 SEM 照片

Fig. 2 SEM images of fiber films with different fillers
(a) M-3; (b) D-4;

微观上,添加 30 mg/g GO 的 PAN 复合纤维排列规整,直径分布均匀。氧化石墨烯颗粒较小,纺丝后完全包裹于聚合物丝内部,图 2(b)中并未观察到明显的石墨烯团聚。宏观上,随着介电碳材料添加量增加,产物纤维膜的颜色由灰白逐渐加深至深灰色甚至是黑色,表明纤维中石墨烯、MXene 的包裹率逐渐增加,从图 2 可以看出,添加氧化石墨烯、MXene 的纳米纤维直径分布均匀,但与纯 PAN 的纤维的平直取向不同,介电碳材料纳米纤维部分发生弯曲回环。这归因于添加碳材料加剧了“弯曲扰动”现象^[11]。在静电纺丝过程中,高压电场作用下,纺丝前驱体溶液在针尖处形成泰勒锥,锥体拉伸成射流,射流经短暂直线运动后沿螺旋轨迹运动并多次分级,介电碳材料的高导电性会加剧这一“弯曲扰

动”^[12]。同时,石墨烯粉末粒度小、比表面积大,其特殊的 π - π 共轭键和范德华瓦尔斯力会导致石墨烯片层容易发生聚集和堆叠^[13],当石墨烯添加量高于 30 mg/g 时,团聚严重,难以在溶液中均匀分散。

对十六种纳米纤维膜进行晶体结构、官能团分析,测试得到的 XRD 与红外图谱结果如图 3 所示。图 3(a)中列入了八种介电纳米纤维膜的 XRD 图谱,前四种分别为不同氧化石墨烯含量与不同厚度的 PAN 复合纤维膜。 $2\theta=17^\circ$ 处衍射峰是 PAN 最主要的特征峰^[14],对应着(100)晶面; $2\theta=27^\circ$ 和 53° 附近衍射峰分别对应氧化石墨烯的(002)晶面和(004)晶面^[15],表明氧化石墨烯结构完整。本试验所用氧化石墨烯富含含氧基团,以 D-4 样品为例的 XPS 图谱如图 4 所示。图 4(d)中 O1s 精细图谱上有三处峰,其中 531.13、532.85 eV 分别对应 C-O 键、GO 中的含氧功能基团^[16];N 元素以 $C\equiv N$ 键形式存在于聚丙烯腈分子中,结合能为 398.45 eV^[17],说明纺丝过程中聚丙烯腈的高分子结构未发生改变。

图 3(b)为八种磁性纳米纤维膜的 XRD 图谱,所添加磁性金属颗粒及其氧化物均为典型的晶体结构,XRD 图谱中可以清晰检测到各物相的晶面衍射峰,M-8 的样品中,因 Fe_3O_4 的(311)衍射峰强度较大,PAN 的(100)晶面峰被掩盖,但红外光谱中仍可以检测出 PAN 的 $C\equiv N$ 键的伸缩振动峰(2242 cm^{-1})和 CH_2 键非对称伸缩振动峰(1448 、 2931 cm^{-1})。此外,图 3(c, d)中均存在位于 1729 cm^{-1} 的振动峰,归因于 PAN 中部分单体(如丙烯酸甲酯等)的 $C=O$ 键的伸缩振动峰,对应 XPS 图谱中 285.55 eV 处的 $C=O$ 峰。选取 M-8 分析其 XPS 图谱(图 4(g)), $Fe2p_{3/2}$ 和 $Fe2p_{1/2}$ 精细图谱的峰位分别为 710.2 和 724.3 eV。M-8 和 D-4 的 XRD 图谱和红外图谱中并未出现组分之外的其他杂峰,表明添加组分与聚合物之间并未发生反应。

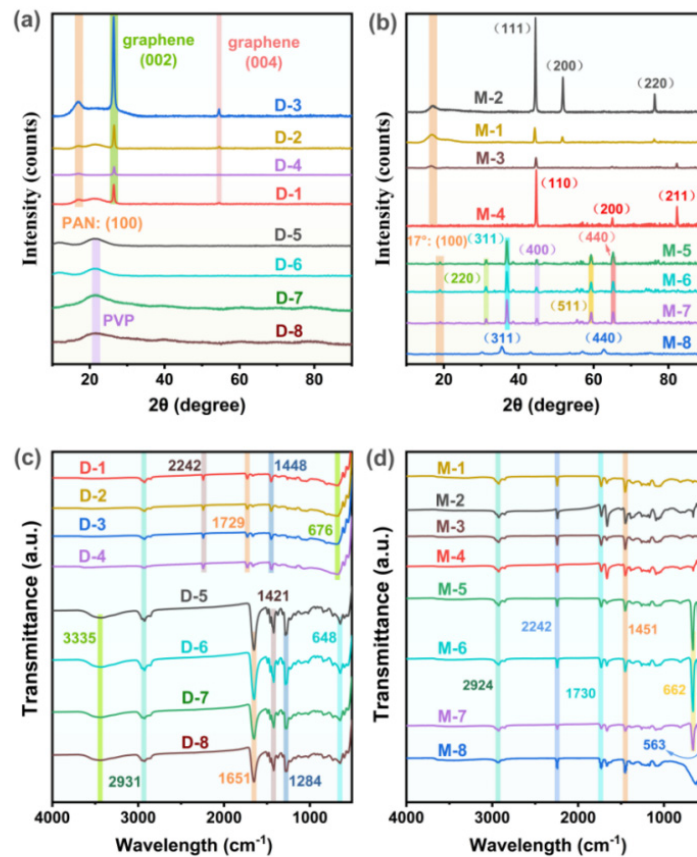


图 3 介电(a, c)和磁性(b, d)纳米纤维薄膜的 XRD 图谱(a,b)和红外光谱(c,d)

Fig. 3 XRD patterns(a, b) and infrared spectra(c, d) of dielectric nanofiber film(a, c) and dielectric nanofiber film(b, d)

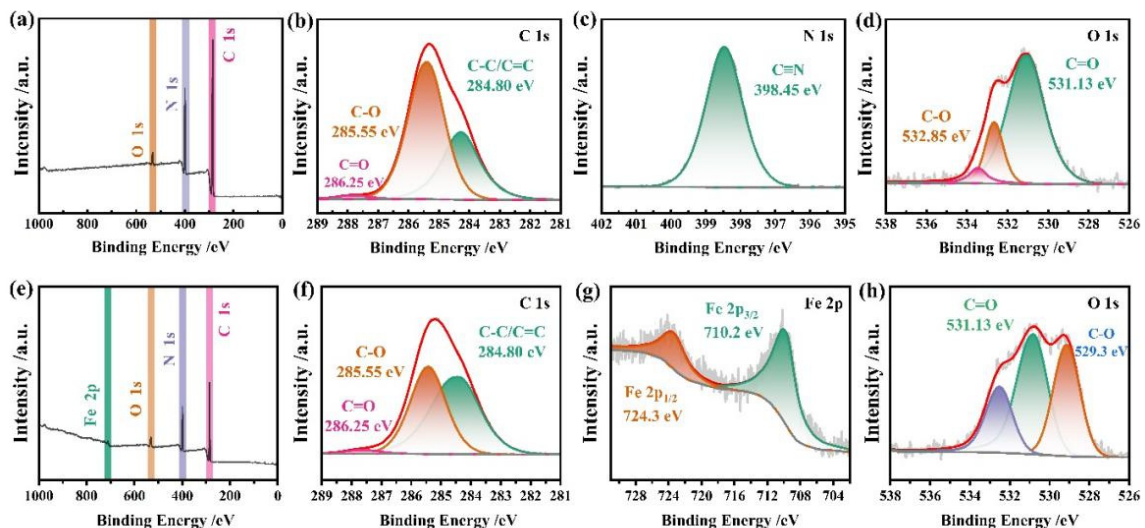


图 4 D-4 纤维膜(a~d)和 M-8 纤维膜(e~h)的 XPS 图谱

Fig. 4 XPS spectra of D-4 sample (a~d) and M-8 sample (e~h)

2.2 吸波性能

图 S2 和图 S3 为不同填料含量的介电/磁性纳米纤维膜的复介电常数和复磁导率随频率及填料含

量的变化关系。石墨烯本身具有非常好的导电性，高含量石墨烯有助于形成更多的导电通路^[13]，从而提高复合纳米纤维膜的电损耗。由图可知，石墨烯

含量从 10 mg/g 增加到 30 mg/g 时, ε'' 和 $\tan\delta$ 显著增大, 表明增大石墨烯含量对介电常数起积极作用。对比 D-2 和 D-3 的介电常数可以看出, 纺丝时间从 8 h 增大到 20 h 后, 纤维膜的介电常数明显增大, 纤维膜厚度正向影响纤维膜的介电常数。整体上看, 石墨烯纳米纤维膜的复介电常数大于 MXene 纳米纤维膜, 损耗性能优于 MXene。

无论是介电纤维膜样品还是磁性纤维膜, 在 5.38~8.20 GHz 频段内, ε' 值随频率增加而减小, 表明该频段内两种纤维膜均存在电导损耗, 这与所添加磁性颗粒具有一定的导电性有关。M-3 的 ε'' 在 3.90~5.99 GHz 频段表现出较强的频散效应, 归因于纳米铁粉优异的导电性^[18]。

在 5.38~8.20 GHz 频段内, 介电纤维膜的 ε' 随着频率的升高而降低, 表现出一定的弛豫行为。磁性纳米纤维膜样品的 ε' 和 ε'' 出现多处波动, 这是磁性颗粒中偶极极化、界面极化等效效应引起的共振特性, 有助于损耗电磁波^[19-21]。介电损耗正切值和磁损耗正切值是反映复合材料电损耗和磁损耗损耗的参数^[22]。本实验所用的氧化石墨烯和 MXene 均不具有磁性, 因此磁性纳米纤维膜的磁损耗正切值较高, 而介电颗粒和磁性颗粒之间的互补特性为二者的复合奠定了基础。

在电磁吸波材料研究中, 根据传输线理论, 通常采用反射损耗(RL)随频率的变化曲线来评估材料的电磁吸波性能^[23]。RL 值可通过公式(1, 2)计算:

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

$$RL(dB) = 20 \lg \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right| \quad (2)$$

其中, Z_{in} 和 Z_0 分别代表样品的输入阻抗与自由空间的特征阻抗; 参数 f 、 d 、 c 分别对应入射电磁波的频率、吸波体的物理厚度以及真空中光速, ε_r 、 μ_r 分别表示介电常数、磁导率。由公式(1)可知, 阻抗匹配特性与材料的复介电常数及复磁导率密切相关, 进而直接影响反射损耗值。只有当材料与自由空间之间的阻抗失配降至最低时^[24], 才能获得优异的电磁吸波性能, 从而确保更多入射电磁波进入材料内部而非在表面发生反射。

RL 值越小表示材料对电磁波的吸收能力越强: 当 $RL < -10$ dB 时, 意味着 90% 的电磁波被吸收^[25]。利用 MATLAB 计算介电纳米纤维膜和磁性纤维膜的反射损耗值, 推算不同匹配厚度(0~5 mm)和频率下的 RL 值, 并绘制成 3D 等高线图, 如图 S4、S5

所示。对于单层纤维膜, RL 达到 -10 dB 的样品不足半数, 吸波优势并不明显, 单一介电或磁性颗粒因阻抗匹配较差, 即使有较高的介电常数或磁导率, 其 RL 仍较低, 因此考虑多层复合以获得最佳吸波性能。

使用三维电磁仿真软件 CST Studio Suite(2022 版)对介电纤维膜和磁性纤维膜的反射率进行仿真模拟。为了减小计算量, 在 CST 中构建了 80 mm×80 mm 的周期性模型, 模拟仿真对象为薄膜型样品, 可视为平板样件。在 CST 软件中, 无限大平面周期结构与实际尺寸建模的全波仿真结果一致。图 5 是通过 CST 软件模拟计算的双层、三层纳米纤维膜反射率仿真结果。

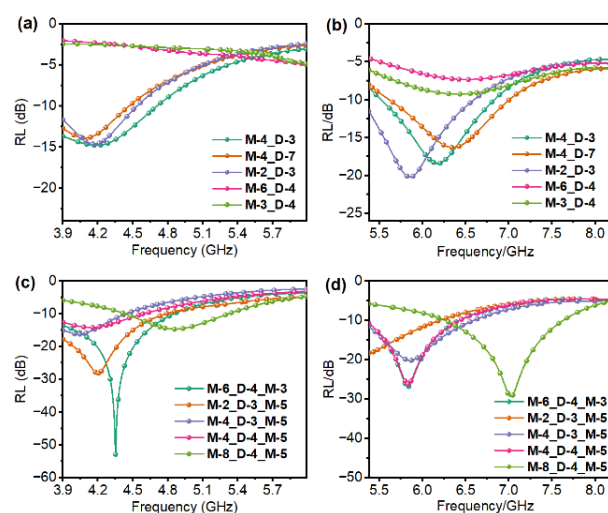


图 5 双层(a, b)和三层(c, d)纤维膜的反射损耗仿真图

Fig. 5 Simulation diagram of RL of double-layer fiber film(a, b) and three layers of fiber film(c, d)

(a, c) 3.90~5.99 GHz and (b, d) 5.38~8.20 GHz

在单层纳米纤维膜的仿真计算中, 2 mm 匹配厚度下, M-6 在 5.38~8.20 GHz 频段达到最佳: -14.3 dB, 但有效吸收带宽($RL < -10$ dB 的频率范围)仅为 0.4 dB, 远低于电磁吸波要求。增大样品仿真厚度至 4 mm, 最佳 RL 向低频移动至 7.60 GHz 处, 但 RL_{min} 增大, 为 -13.5 dB, 有效吸收带宽有所增加, 但仍小于 1 GHz, 仅占所测两个频段范围(3.90~5.99 GHz、5.38~8.20 GHz) 的 18%。

将一层介电纳米纤维膜和一层磁性纳米纤维膜复合后进行仿真, 通过多次仿真迭代优化层厚, 结果如图5所示。双层复合计算下, M-4和 D-3双层样品(介电纤维膜为电磁波入射面)的吸波性能最佳, RL_{min} 达到了 -18 dB, 有效吸收带宽增加一倍以上, 此时, 介电纤维膜层厚为 1.8 mm, 磁性纤维膜层厚

为2.3 mm。为进一步提升吸波性能,设置三层复合结构。图5(c-d)为M-6、D-4、M-3三层复合下的反射率仿真结果,氧化钴纤维膜为电磁波入射面。相比于双层复合,三层纳米纤维膜最小反射损耗对应的

为了评估多层纤维膜在实际远场条件下的电磁吸波性能,采用CST软件模拟其雷达散射截面(RCS)。RCS值通常用于表征目标对雷达波的散射强度,其值越低,目标被雷达探测到的概率越小。图6为样品的RCS仿真结果,仿真时,将纤维膜平板模型贴附于PEC板表面,模拟其在4、6、8 GHz下的RCS散射3D图。同时,绘制双层样品和三层样品在三个频点、方位角 $-60^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 范围内的RCS二维曲线(图7(a~c)),并计算相对于纯PEC板的RCS的缩减值并绘制直方图(图7(d~e))。从图7(a~c)可知,三层纤维膜的电磁吸波性能优于双层纤维膜,在各个频点处均可有效减少电磁波散射,在较高频点处RCS散射更少。经计算统计,双层结构纤维膜的衰减值在4 GHz处仅为0.250 dB(m²),而重新设计结构后,三层结构纤维膜的衰减值增大到5.875 dB(m²),8 GHz处的衰减值也有所增大,同时,从直方图中(图7(d~e))可以看出,两种结构下,纤维膜均在6 GHz处取得较小的RCS值。

匹配厚度降至3.9 mm(层厚均分),性能优于双层纤维膜。在3.90~5.99 GHz频段,在4.3 GHz处的RL达到-54 dB;在5.38~8.20 GHz频段,在5.80 GHz处RL达到-27 dB,有效吸收带宽占所测试频率范围的49%。

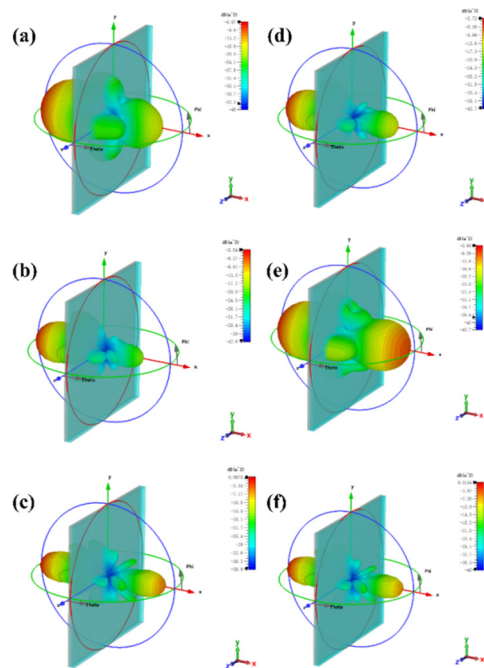


图 6 (a~c)双层纤维膜和(d~f)三层纤维膜在三个频点处的RCS 散射 3D 图

Fig.6 RCS simulation results at 4, 6, 8 GHz frequency points for double-layer fiber film (a~c) and three layers of fiber film (d~f)

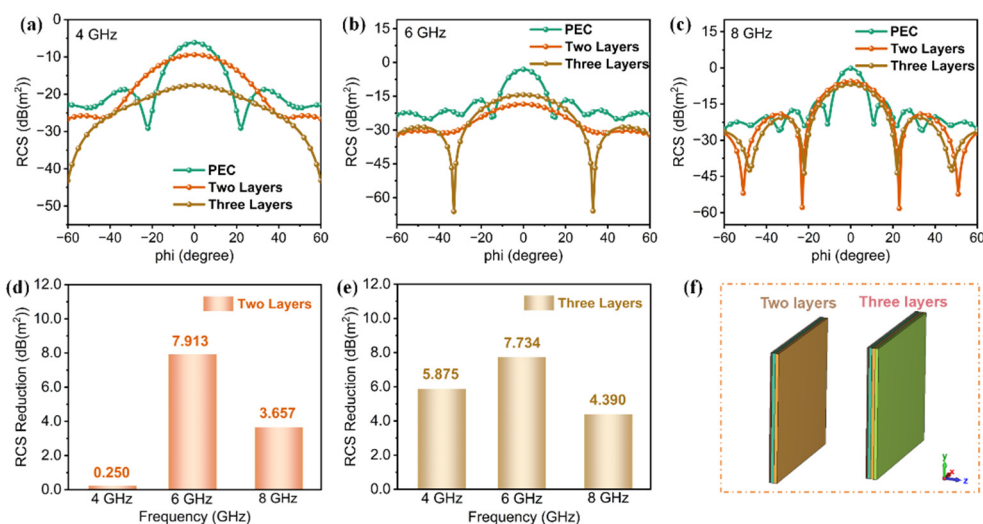


图 7 样品与 PEC 在(a) 4 GHz、(b) 6 GHz 和(c) 8 GHz 下的 RCS 曲线; (d)双层纤维膜和(e)三层纤维膜在不同频点下的RCS 缩减量; (f) CST 软件中的 RCS 仿真模型

Fig. 7 RCS curves of samples and PEC at (a) 4 GHz, (b) 6 GHz and (c) 8 GHz; RCS reduction of (d) double-layer fiber film and (e) three layers of fiber film; (f) RCS simulation models of CST software

该复合材料对电磁波的高效衰减是介电损耗、磁损耗以及宏观多层结构协同作用的结果,其吸波机理如图 8 所示。在吸波材料设计中,提高电导率可增强电场和磁场产生的电流和涡流^[26],有利于增加电导损耗,从而衰减更多的入射电磁波^[27]。然而,电导率过高时,电磁波入射到材料表面易产生强反射甚至趋肤效应,不利于微波的衰减,这也是单层纳米纤维膜吸波效果较差的根本原因^[28]。磁性金属微粉因具有高饱和磁化强度、良好的温度稳定性及低成本等优点,在电磁波吸收领域得到广泛使用,但单层使用时损耗机制单一,反射率仍然无法满足吸波要求。

为了克服单一组分设计的局限性并解决阻抗匹配与高性能吸波之间的矛盾,本研究采用静电纺丝技术构筑了多层介电/磁性纳米纤维复合膜,静电纺丝赋予纳米纤维膜较大的比表面积与丰富的多孔结构^[24, 29-30],当电磁波入射时,多层交替堆叠的纤维网络在材料内部引发多次反射与散射,延长了电磁波的传输路径,促进了电磁波吸收。在该结构中,磁性功能组分(铁、钴、镍及其合金的金属微粉)主要以弛豫损耗和涡流损耗两种机制吸收和衰减入射微波^[9, 31-32];而石墨烯、MXene的晶格缺陷及异质界面引发的偶极极化与界面极化进一步强化了介电损耗,赋予材料较强的微波衰减能力。通过多层异质结构的设计以及组分载量的精确调控,该复合纤维膜在阻抗匹配、电导损耗、介电极化与磁损耗之间达到最佳平衡,最终实现对入射微波的高效衰减。实验表明,当磁性纤维膜中磁性颗粒含量增至100 mg/g时,磁性颗粒在纤维膜内发生聚集团聚,整体吸波性能大幅下降,后续应用时要严格控制纳米纤维膜的上限含量。

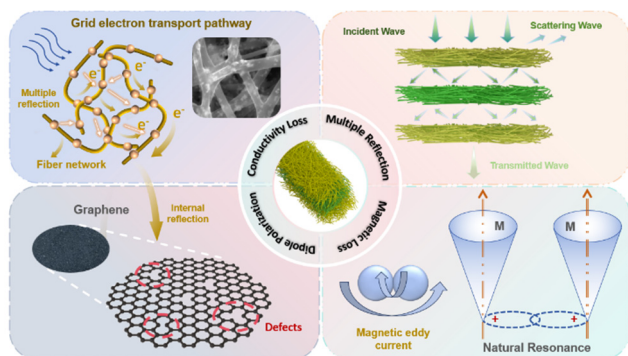


图 8 微波吸收机理示意图

Fig. 8 Schematic illustration of the microwave absorption mechanisms

本次制备的两种纤维膜在多层复合时取得良好

吸波性能和优异的功能特性(如图 9所示)。将纤维膜放置在恒温手掌(37.5 °C)上,利用红外相机拍摄了其热成像图,从图 9 可以看出,介电纳米纤维膜和磁性纳米纤维膜的温度分别稳定在 27 °C和 29 °C,与手部的温差分别为10 °C和8 °C,明显低于手掌温度,表明实验制作的样品具有良好的隔热性,可在一定程度上实现热红外隐身,降低目标被探测概率。同时,所制备的纳米纤维膜密度低、质量轻,可轻松放置在花朵上(图 9(i))且花瓣不产生任何形变。图9(m~n)展示出纤维膜优异的柔韧性,可以大角度弯曲并绕玻璃棒两周。

接触角是衡量液体对固体表面润湿性能的重要参数,也可以反映材料的表面特性^[33-34]。若润湿角<90°,则固体表面是亲水性的,即液体较易润湿固体,其角越小,表示润湿性越好;若润湿角>90°,则固体表面是疏水性的,即液体不容易润湿固体,容易在表面上移动。利用接触角测量仪测试纤维膜的接触角,磁性纤维膜接触角达到 120°,表现出优异的疏水特性。

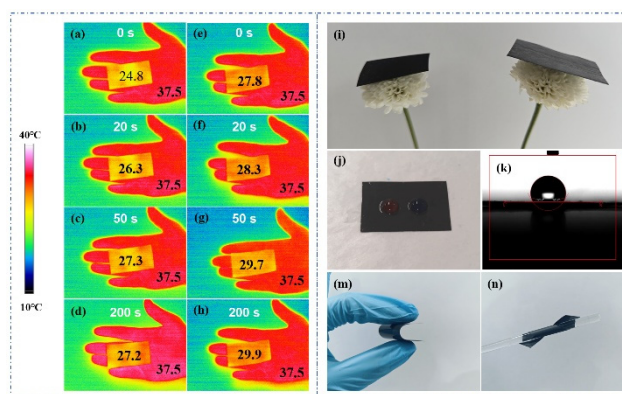


图 9 纳米纤维膜的多功能特性

Fig. 9 Multifunctional Properties of Nanofiber Membranes

Infrared thermal imaging changes of dielectric nanofiber films (a-d) and magnetic nanofiber film (e-h); (i) Optical photographs of dielectric/magnetic fiber films; (j-k) Water contact Angle of D-4; (l) Absorption mechanism diagram; (m-n) nanofiber membrane bending diagram

3 结论

本研究将介电材料与磁性颗粒作为功能填料引入聚丙烯腈与聚乙烯吡咯烷酮聚合物基体中,通过静电纺丝技术成功制备了柔软且具有延展性的介电/磁性纳米纤维薄膜,并系统评估了不同结构配置的电磁吸波性能。单层纳米纤维薄膜中,样品 M-6 在 5.38~8.20 GHz 频段、厚度为 2 mm 时获得最佳反射损耗-14.3 dB,有效吸收带宽仅为 0.4 GHz。双层薄膜结构中, M-4 与 D-3 复合薄膜的反射损耗提升

至-18 dB,有效吸收带宽扩大一倍。三层复合薄膜结构(M-6、D-4、M-3)在总厚度为 3.9 mm 时获得-54 dB 的反射损耗,有效吸收带宽覆盖测试频段的 49%,为先进隐身结构的设计提供了重要参考。

除电磁性能外,此类静电纺纳米纤维薄膜还具有低密度、轻质、强柔韧性和优异疏水性等特性。综合而言,三层纳米复合纤维薄膜在微波吸收综合性能上显著优于单层及双层结构,且具备优异的柔韧性与耐候疏水性,可贴合复杂曲面,可为航空航天隐身、精密电子器件及通信设备的高效、轻量化电磁波吸收提供了思路。

补充材料

本文相关补充材料可登录<https://doi.org/10.15541/jim20260272>查看。

数据可用性声明

本文的关联数据可以在科学数据银行<https://doi.org/10.57760/sciencedb.011jp>中获取。

参考文献:

- [1] WU L H, LIU J, LIU X, *et al.* Microwave-absorbing foams with adjustable absorption frequency and structural coloration. *Nano Letters*, 2024, **24(11)**: 3369.
- [2] WANG X H, YUAN Y, SUN X X, *et al.* Lightweight, flexible, and thermal insulating carbon/SiO₂@CNTs composite aerogel for high-efficiency microwave absorption. *Small*, 2024, **20(30)**: 2311657.
- [3] LIU X X, QIAN Y, YU L, *et al.* Regulating local coordination environment of single-atom co absorbers for dielectric-magnetic dual loss modulation. *Advanced Materials*, 2026, **38(25)**: e72966.
- [4] LIU X, SI Z K, QIAN Y X, *et al.* Gradient-nested organic/inorganic aerogels achieve high mechanical strength and feedback-tunable microwave absorption. *Research*, 2026, **9**: 1074.
- [5] LIU J, WU L H, ZHAO J C, *et al.* Constructing multi-interfaced and vacancy-rich Cu_{1.8}S/rGO/Oleylamine composites toward anti-biofouling microwave absorption. *Small*, 2025, **21(17)**: 2412835.
- [6] CHEN F, ZHANG S S, GUO R D, *et al.* 1D magnetic nitrogen doped carbon-based fibers derived from NiFe Prussian blue analogues embedded polyacrylonitrile via electrospinning with tunable microwave absorption. *Composites Part B: Engineering*, 2021, **224**: 109161.
- [7] TONG Z Y, LIAO Z J, LIU Y Y, *et al.* Hierarchical Fe₃O₄/Fe@C@MoS₂ core-shell nanofibers for efficient microwave absorption. *Carbon*, 2021, **179**: 646.
- [8] GE C Q, DONG H Y, LI Z H, *et al.* Bioinspired 3D printed metamaterial for wideband microwave absorption and aerodynamic efficiency. *Composites Science and Technology*, 2024, **257**: 110846.
- [9] WANG W, ZHANG H, ZHAO Y Z, *et al.* A novel MOF-driven self-decomposition strategy for CoO@N/C-Co/Ni-NiCo₂O₄ multi-heterostructure composite as high-performance electromagnetic wave absorbing materials. *Chemical Engineering Journal*, 2021, **426**: 131667.
- [10] LIU T, HUANG L, WANG X H, *et al.* A strong insulating, compressible Nd₂O₃@CNFs WPU foam for robust electromagnetic wave absorption. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, **975**: 172983.
- [11] YU S W, WANG C C, CHEN Z Z, *et al.* Additive manufacturing of broadband electromagnetic wave absorbing materials: polymer-derived SiC/Si₃N₄ composites with triply periodic minimal surface meta-structure. *Chemical Engineering Journal*, 2024, **483**: 149185.
- [12] MENG Y X, ZHANG Z, WANG X, *et al.* Flexible, superhydrophobic, and self-cleaning rGO/LDH/PPy-modified fabric for full X-band electromagnetic wave absorption. *Composites Part B: Engineering*, 2024, **282**: 111572.
- [13] KIM T, LEE J, LEE K, *et al.* Magnetic and dispersible Fe-CoNi-graphene film produced without heat treatment for electromagnetic wave absorption. *Chemical Engineering Journal*, 2019, **361**: 1182.
- [14] DENG Y, YANG M H, LIU Q X, *et al.* Biologically inspired nanoporous PAN/PMMA/ β -CD carbon fibers for efficient microwave absorption. *ACS Applied Nano Materials*, 2024, **7(3)**: 3199.
- [15] LUO J H, LI X P, YAN W X, *et al.* RGO supported bimetallic MOFs-derived Co/MnO/porous carbon composite toward broadband electromagnetic wave absorption. *Carbon*, 2023, **205**: 552.
- [16] YADAV R S, KUŘITKA I. Recent advances on outstanding microwave absorption and electromagnetic interference shielding nanocomposites of ZnO semiconductor. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2024, **326**: 103137.
- [17] DONG C L, LI D C, WANG H Y, *et al.* CoSe₂@polythiophene core-shell composites with enhanced interfacial polarization for high-performance broadband electromagnetic absorption. *Carbon*, 2023, **215**: 118459.
- [18] MOHAN V B, BROWN R, JAYARAMAN K, *et al.* Characterisation of reduced graphene oxide: effects of reduction variables on electrical conductivity. *Materials Science and Engineering: B*, 2015, **193**: 49.
- [19] YANG Y L, SONG C Y, PEI R, *et al.* Design, characteri-

zation and fabrication of a flexible broadband metamaterial absorber based on textile. *Additive Manufacturing*, 2023, **69**: 103537.

[20] QIN M, ZHANG L M, WU H J. Dielectric loss mechanism in electromagnetic wave absorbing materials. *Advanced Science*, 2022, **9(10)**: e2105553.

[21] ZHOU R, WANG Y S, LIU Z Y, *et al.* Digital light processing 3d-printed ceramic metamaterials for electromagnetic wave absorption. *Nano-Micro Letters*, 2022, **14(1)**: 122.

[22] DONG S, ZHANG W Z, ZHANG X H, *et al.* Designable synthesis of core-shell SiC_w@C heterostructures with thickness-dependent electromagnetic wave absorption between the whole X-band and Ku-band. *Chemical Engineering Journal*, 2018, **354**: 767.

[23] ZHOU G X, YANG L J, LU Y, *et al.* Enhancing electromagnetic properties in nickel hydroxide modified graphene composites via secondary reactions for improving multi-polarization electromagnetic absorption efficiency. *Journal of Materials Science & Technology*, 2025, **205**: 221.

[24] FU K L, ZHAO J B, LIU F, *et al.* Enhanced electromagnetic wave absorption of nitrogen-doped reduced graphene oxide aerogels with LaFeO₃ cluster modifications. *Carbon*, 2023, **210**: 118071.

[25] HAO Q J, SCHOSSIG J, DAVIDE T, *et al.* Gravity-driven ultrahigh-speed electrospinning for the production of ethyl cellulose fibers with tunable porosity for oil absorption. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2025, **13(1)**: 507.

[26] MONTOLIO S, ABARCA G, PORCAR R, *et al.* Hierarchically structured polymeric ionic liquids and polyvinylpyrrolidone mat-fibers fabricated by electrospinning. *Journal of Materials Chemistry A*, 2017, **5(20)**: 9733.

[27] XU J, ZHANG X, ZHAO Z B, *et al.* Lightweight, fire-retardant, and anti-compressed honeycombed-like carbon aerogels for thermal management and high-efficiency electromagnetic absorbing properties. *Small*, 2021, **17(33)**: 2102032.

[28] LIU Y L, WANG F Y, WANG Y H, *et al.* A combined engineering of hollow and core-shell structures for C@MoS₂ microcapsules toward high-efficiency electromagnetic absorption. *Composites Part B: Engineering*, 2024, **273**: 111244.

[29] XIANG Z, SONG Y M, XIONG J, *et al.* Enhanced electromagnetic wave absorption of nanoporous Fe₃O₄ @ carbon composites derived from metal-organic frameworks. *Carbon*, 2019, **142**: 20.

[30] TIAN Q, WU N, WANG B, *et al.* Fabrication of hollow SiC ultrafine fibers by single-nozzle electrospinning for high-temperature thermal insulation application. *Materials Letters*, 2019, **239**: 109.

[31] ZHANG S Y, TAO J L, SUN R, *et al.* Achieving ultra-broadband electromagnetic absorption of Ag regulated hollow Ag/CuO@CuS through balancing conduction loss and impedance matching. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, **144**: 81.

[32] XIANG Z C, SONG Z, WANG T S, *et al.* Bead-like flexible ZIF-67-derived Co@Carbon composite nanofibre mat for wide-band microwave absorption in C-band. *Carbon*, 2024, **216**: 118573.

[33] ZHANG B J, TONG Z W, WANG X, *et al.* Zirconium-modified hierarchical porous SiC-based nanofibrous aerogel with efficient electromagnetic waves absorption and thermal insulation properties. *Journal of the European Ceramic Society*, 2025, **45(1)**: 116808.

[34] ZHENG S N, ZENG Z H, QIAO J, *et al.* Facile preparation of C/MnO/Co nanocomposite fibers for high-performance microwave absorption. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2022, **155**: 106814.

补充材料

基于交替设计策略的多层介电/磁性纳米纤维膜吸波性能研究

王乐瑶^{1,2}, 袁 野^{1,2,*}, 杨 萱³, 王霄寒^{1,2}, 贾 珍³,
王程浩³, 吴 霄³, 李宜彬^{1,2,*}

(1. 北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100191; 2. 材料智能设计国家级重点实验室, 北京 102206; 3. 中国航空工业集团公司济南特种结构研究所, 济南 250023)

表 S1 磁性纳米纤维膜样品具体信息

Table S1 Magnetic nanofiber film samples information

Fibrous membrane nomenclature	Magnetic particle	Magnetic particle content, $M_1/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	PAN content, $M_3/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	Spinning time, T/h
M-1	Ni	50	100	18
M-2	Ni	100	80	18
M-3	Fe	50	100	18
M-4	Fe	100	80	18
M-5	Co ₃ O ₄	50	100	18
M-6	Co ₃ O ₄	50	80	18
M-7	Co ₃ O ₄	100	80	18
M-8	Fe ₃ O ₄	50	100	18

表 S2 介电纳米纤维膜样品具体信息

Table S2 Dielectric nanofiber film samples information

Fibrous membrane nomenclature	Carbon material	Carbon material content, $M_2/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	Polymer content, $M_4/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	Spinning time, T/h
D-1	graphene	10	100	8
D-2	graphene	10	80	8
D-3	graphene	10	80	20
D-4	graphene	30	80	20
D-5	MXene	5	80	15
D-6	MXene	10	100	15
D-7	MXene	15	100	15
D-8	MXene	20	100	15

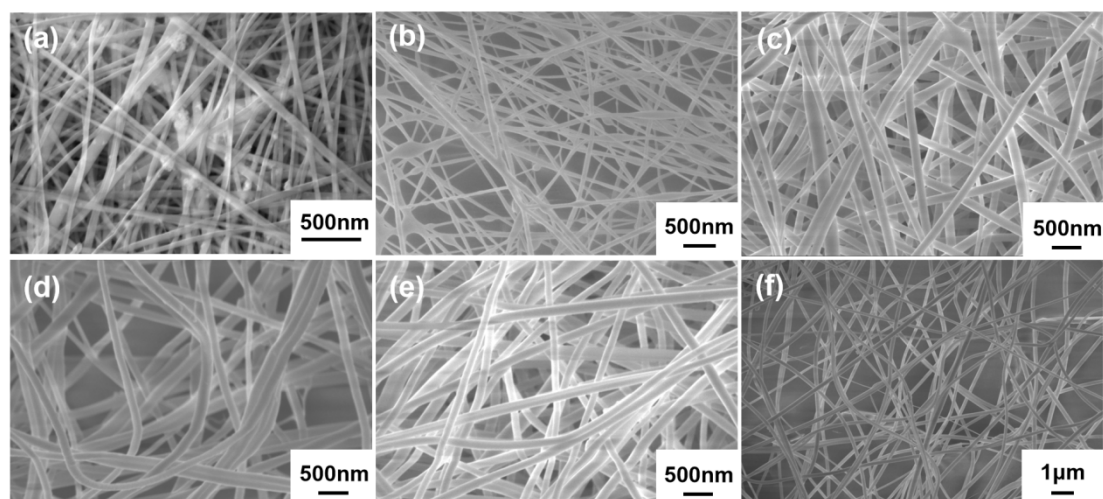


图 S1 不同样品的 SEM 照片

Fig. S1 SEM images of fiber films with different fillers
(a) M-4; (b) M-6; (c) M-8; (d) D-3; (e) D-6; (f) D-8

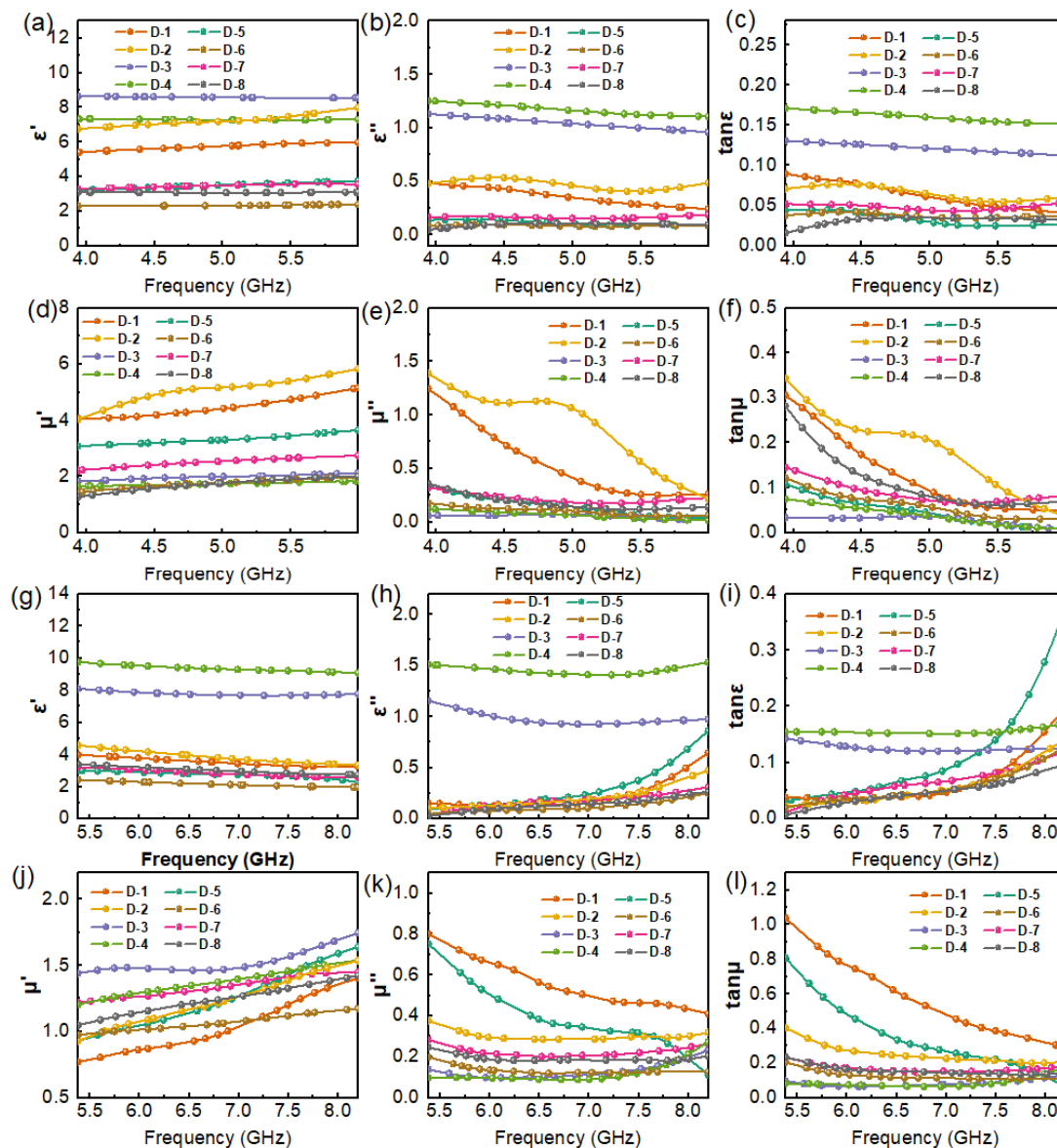


图 S2 介电纳米纤维膜的电磁参数曲线图

Fig. S2 Electromagnetic parameter curves of the dielectric nanofiber membrane

(a) Real part of the dielectric constant; (b) imaginary part of the dielectric constant; (c) dielectric loss tangent value; (d) the real part of the permeability; (e) the virtual part of permeability; (f) tangent value of magnetic loss in the 3.90–5.99 GHz; (g) the real part of the dielectric constant; (h) imaginary part of the dielectric constant; (i) dielectric loss tangent value; (j) the real part of the permeability; (k) the virtual part of permeability; (l) tangent value of magnetic loss in the 5.38–8.20 GHz

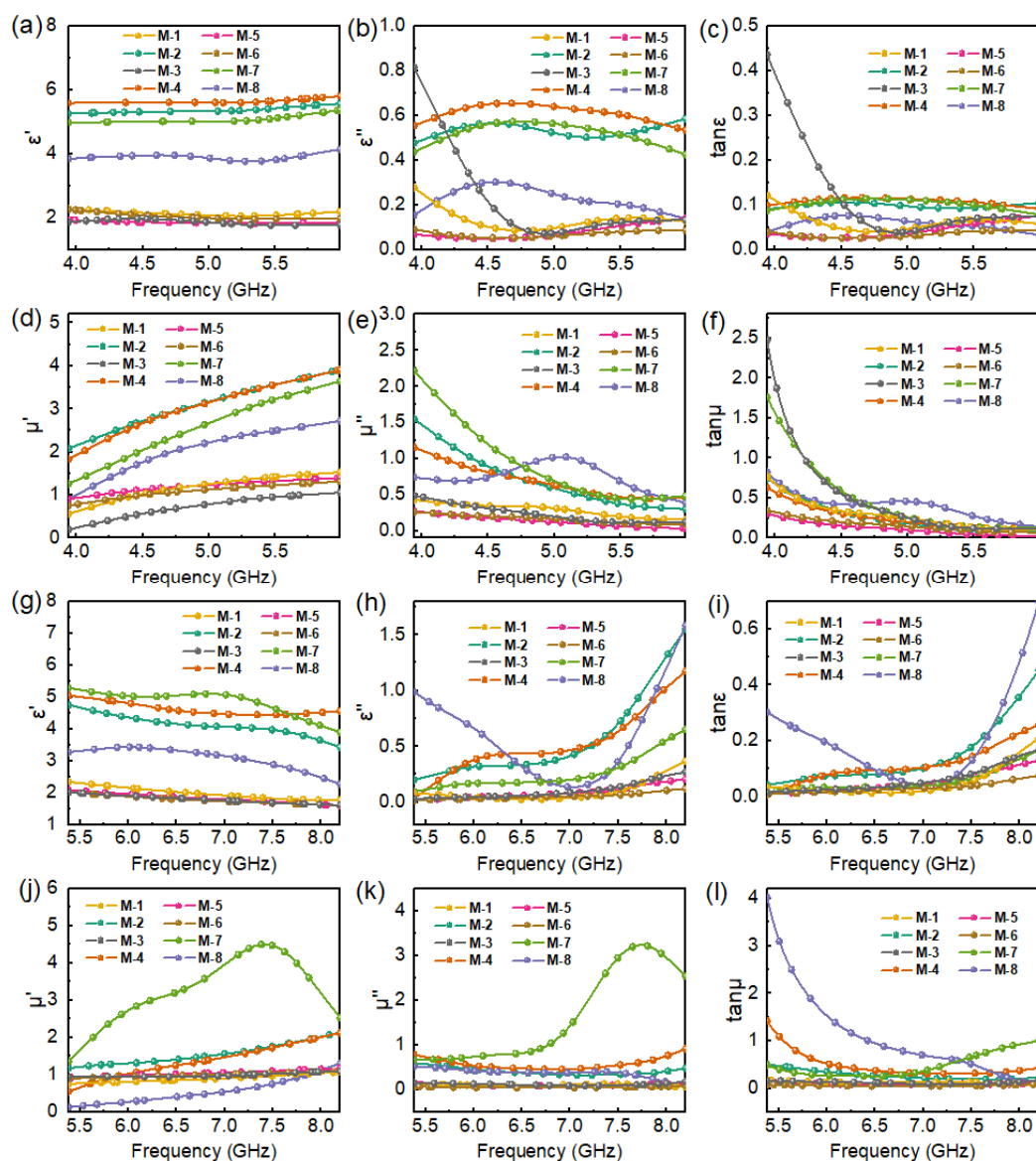


图 S3 磁性纳米纤维膜的电磁参数曲线图

Fig. S3 Electromagnetic parameter curves of the magnetic nanofiber membrane

(a) the real part of the dielectric constant; (b) imaginary part of the dielectric constant; (c) dielectric loss tangent value; (d) the real part of the permeability; (e) the virtual part of permeability; (f) tangent value of magnetic loss in the 3.90-5.99 GHz; (g) the real part of the dielectric constant; (h) imaginary part of the dielectric constant; (i) dielectric loss tangent value; (j) the real part of the permeability; (k) the virtual part of permeability; (l) tangent value of magnetic loss in the 5.38-8.20 GHz

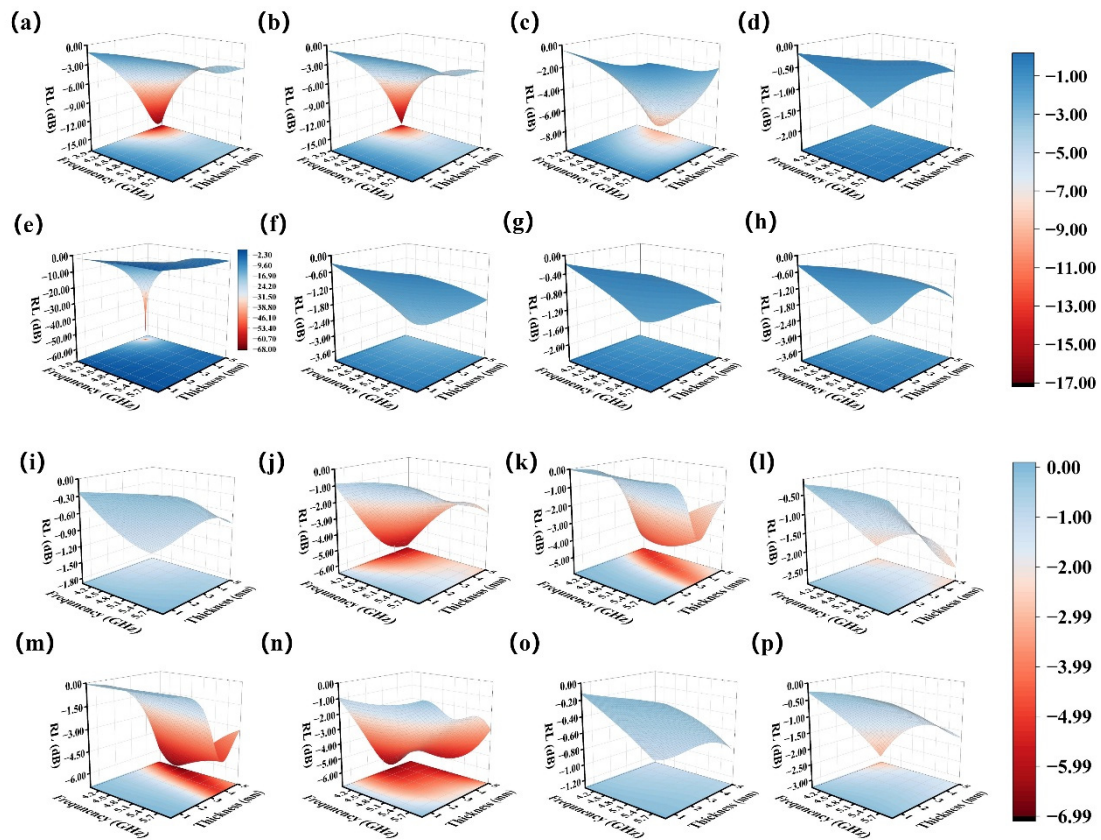


图 S4 纳米纤维膜在 3.90~5.99 GHz 频段内的三维反射损耗图

Fig. S4 3D RL plots of the nanofiber membrane in the 3.90–5.99 GHz frequency range

(a) M-2; (b) M-4; (c) M-8; (d) M-5; (e) M-7; (f) M-1; (g) M-6; (h) M-3; (i) D-5; (j) D-1; (k) D-3; (l) D-7; (m) D-4; (n) D-2; (o) D-6; (p) D-8

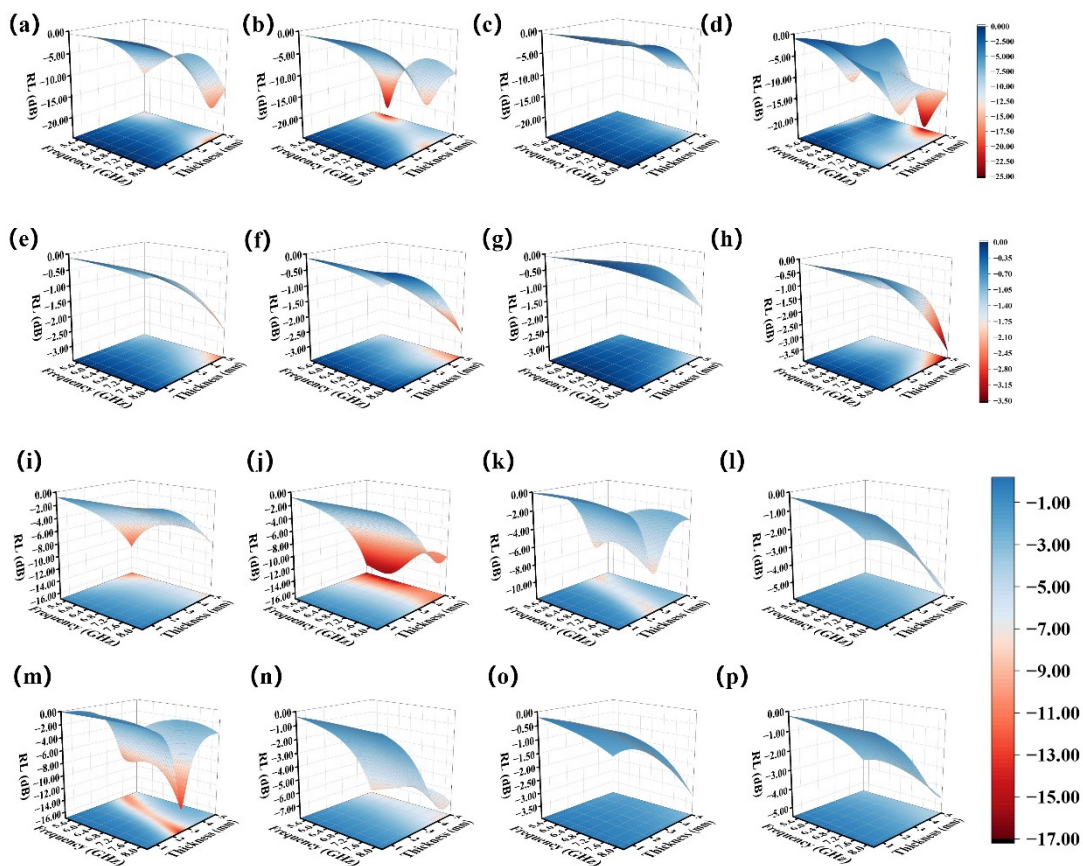


图 S5 纳米纤维膜在 5.38~8.20 GHz 频段内的三维反射损耗图

Fig. S5 3D RL plots of the nanofiber membrane in the 5.38–8.20 GHz frequency range

(a) M-2; (b) M-4; (c) M-8; (d) M-7; (e) M-5; (f) M-1; (g) M-6; (h) M-3; (i) D-5; (j) D-1; (k) D-3; (l) D-7; (m) D-4; (n) D-2; (o) D-6; (p) D-8 in the 5.38–8.2 GHz