

以芳纶III纤维为载体通过一步法制备PPy-Fe₃O₄/F3产物及其吸波性能研究

王 哲*, 胡书春, 王 冬, 郭美玲, 钟 琦, 陈旭阳, 冯燕琪

成都工业学院材料与环境工程学院, 四川 成都

收稿日期: 2026年1月6日; 录用日期: 2026年1月29日; 发布日期: 2026年2月10日

摘 要

以芳纶III纤维(F3)为载体, 采用一步制备法和原位合成法分别制备出PPy-Fe₃O₄/F3和PPy/F3产物, 对比研究了PPy/F3和PPy-Fe₃O₄/F3产物的宏观性状、微观结构与形貌, 最后对两种产物的电磁学和吸波性能进行了深入研究。结果表明: 相对于原料F3纤维, PPy/F3和PPy-Fe₃O₄/F3产物的电导率提高了15数量级, 且介电损耗能力、磁损耗能力以及阻抗匹配效果得到了显著提升, 其中, PPy-Fe₃O₄/F3产物的吸波性能最为优异, 在厚度为4 mm, 频率为11.4 GHz时, 其最优吸波效果可达-23.5 dB, 对应的有效吸收频宽为3.1 GHz。

关键词

一步法, 吸波性能, 聚吡咯, 四氧化三铁, 芳纶III纤维

Preparation of PPy-Fe₃O₄/F3 Composite via One-Step Method Using Aramid-III Fiber as Carrier and Investigation of Its Microwave Absorption Performance

Zhe Wang*, Shuchun Hu, Dong Wang, Meiling Guo, Qi Zhong, Xuyang Chen, Yanqi Feng

Materials Science and Environmental Engineering College, Chengdu Technological University, Chengdu Sichuan

Received: January 6, 2026; accepted: January 29, 2026; published: February 10, 2026

*通讯作者。

文章引用: 王哲, 胡书春, 王冬, 郭美玲, 钟琦, 陈旭阳, 冯燕琪. 以芳纶 III 纤维为载体通过一步法制备 PPy-Fe₃O₄/F3 产物及其吸波性能研究[J]. 材料科学, 2026, 16(2): 153-164. DOI: 10.12677/ms.2026.162034

Abstract

Using aramid III fiber (F3) as the carrier, PPy-Fe₃O₄/F3 and PPy/F3 products were prepared by one-step preparation method and *in-situ* synthesis method respectively. The macroscopic properties, microstructures and morphologies of PPy/F3 and PPy-Fe₃O₄/F3 products were compared and studied. Finally, the electromagnetic and wave absorption properties of the two products were deeply studied. The results show that compared with the raw material F3 fiber, the electrical conductivity of PPy/F3 and PPy-Fe₃O₄/F3 products has increased by 15 orders of magnitude, and the dielectric loss ability, magnetic loss ability and impedance matching effect have been significantly improved. Among them, the PPy-Fe₃O₄/F3 product has the best wave absorption performance. When the thickness is 4 mm and the frequency is 11.4 GHz, its optimal wave absorption effect can reach -23.5 dB, and the corresponding effective absorption bandwidth is 3.1 GHz.

Keywords

One-Step Method, Wave Absorption Performance, Polypyrrole, Ferric Oxide, Aramid III Fiber

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着信息技术的迅猛发展,以无线通信设备为代表的电子产品得到大规模普及应用,但这也同时带来了日益严重的电磁污染问题[1][2]。吸波材料是一种可以减少电磁波反射和传输的材料,在当今的军事领域,随着无线电与雷达技术的不断进步,使得航空飞行器等军事作战武器在现代战场上的生存能力与突防效能受到显著削弱,因此研发高性能的吸波材料已成为一项迫切需求,现如今除了要求其具有强吸收效能外,也应具备轻质、制备简便和力学性能优异的特点[3]-[5]。近年来,在轻质吸波材料领域,聚吡咯(PPy)因制备简便、导电性好、质量轻和耐腐蚀等优点,受到了学者的广泛关注与深入研究[6]。然而,单组分的聚吡咯仅存在导电损耗机制,阻抗匹配性能较差和吸收频带窄的问题,无法满足高性能吸波材料的要求,因此研究人员将研究重点放在聚吡咯与磁性材料复合制备上[7][8]。在磁性材料中,最具代表性的就是四氧化三铁(Fe₃O₄),因其成本低、优异的磁性能被广泛熟知。聚吡咯与磁性粒子四氧化三铁的协同作用,使得吸波材料兼具电损耗与磁损耗特性,改善了材料的原有的吸波性能,能够实现对电磁波的高效吸收与衰减[9]-[11]。Yang 等[12]通过简单的化学氧化聚合结合溶剂热法制备了 PPy/Fe₃O₄ 平面微螺旋吸波材料。PPy 平面螺旋结构与 Fe₃O₄ 纳米粒子的结合不仅形成了极佳的阻抗匹配和电/磁耦合效应,而且调节了导电损耗/极化损耗的平衡,有着优异的吸波性能。李凯楠[13]采用共沉淀法与原位聚合法制备出系列 PPy/Fe₃O₄/F3 复合吸波材料,结果表面 PPy/Fe₃O₄/F3 具有较 PPy/F3 产物更优的吸波性能,其最小反射损耗在 18.0 GHz 处达到-27.1 dB,有效吸收宽带为 12.2~18.0 GHz,相应的厚度为 2.4 mm。

虽然 PPy/Fe₃O₄ 复合吸波材料有着优异的吸波性能,但也存在制备方法繁琐和力学性能不足的缺点,限制了其在航空飞行器等军事作战武器领域的应用。基于此,研究人员开展了聚吡咯基电磁防护织物的研究工作,以提升其力学性能。于志财等[14]利用 Fe₃O₄ 纳米分散液对棉织物浸轧,首先获得了 Fe₃O₄ 棉磁性复合织物,然后将此作为基底材料,采用原位聚合法制备出了磁性 Fe₃O₄/聚吡咯/棉电磁屏蔽复合织物,当吡咯单体摩尔浓度为 0.60 mol/L 时,该复合材料具有最佳电磁屏蔽性能,在 30~500 MHz 内电磁

屏蔽效能值可达 15 dB。相对于棉纤维, 芳纶III纤维(F3)具有更为优异的综合性能, 其拉伸强度可达 4.5 GPa, 弹性模量可达 130 GPa [15] [16]。基于 F3 优异的力学性能, 采用一步制备法, 将聚吡咯与 Fe_3O_4 粒子一次性合成在纤维表面, 不仅可以简化制备流程缩短时间, 而且有可能获得兼具优异吸波性能和突出机械力学性能的结构功能一体化复合型吸波材料。

2. 实验

2.1. 实验原料

芳纶III纤维(F3), 中蓝晨光化工研究设计院有限公司; 吡咯(化学纯), 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 对甲苯磺酸(PTSA)、三氯化铁($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)、氨水($\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)、硅烷偶联剂(KH550)、无水乙醇均为分析纯, 成都科龙化工试剂厂; 石蜡(工业级), 国药集团化学试剂有限公司; 蒸馏水, 实验室自制。

2.2. PPy/F3 和 $\text{PPy-Fe}_3\text{O}_4/\text{F3}$ 产物的制备

2.2.1. PPy/F3 产物的制备过程

称取 0.4 g 处理干净的 F3 纤维(5 mm 左右短纤维), 将其加入到 180 mL 蒸馏水中, 充分搅拌至 F3 纤维分散均匀; 向体系中依次加入 0.06 mol/L (0.8 mL) Py 单体和浓度为 0.04 mol/L 的 PTSA 溶液, 然后缓慢磁力搅拌 40 min (25℃); 接着向混合液中滴加 20 mL 预先配制的 FeCl_3 水溶液(浓度为 0.02 mol/L), 滴速控制在 2 mL/min 左右; 滴加完毕后, 保持缓慢搅拌条件下反应 5 h, 然后对反应产物进行减压抽滤, 并用蒸馏水和无水乙醇交替清洗至洗涤液无色和澄清透明; 最后经烘干(55℃, 12 h)处理, 得到在 F3 纤维表面原位聚合有 PPy 的复合纤维产物, 记为 PPy/F3。

2.2.2. $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-PPy}/\text{F3}$ 产物一步法制备原理及过程

$\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-PPy}/\text{F3}$ 产物制备原理: 将一定量的 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 加入到溶液中, 一部分 Fe^{3+} 可以将 Py 单体氧化聚合成 PPy, 而 Fe^{3+} 被还原为 Fe^{2+} , 剩余没有参加反应的 Fe^{3+} 和还原成的 Fe^{2+} 在碱性环境下生成 Fe_3O_4 , 在整个反应过程中, Fe^{3+} 既做氧化剂又作反应物, 主要反应如(1)、(2)式:

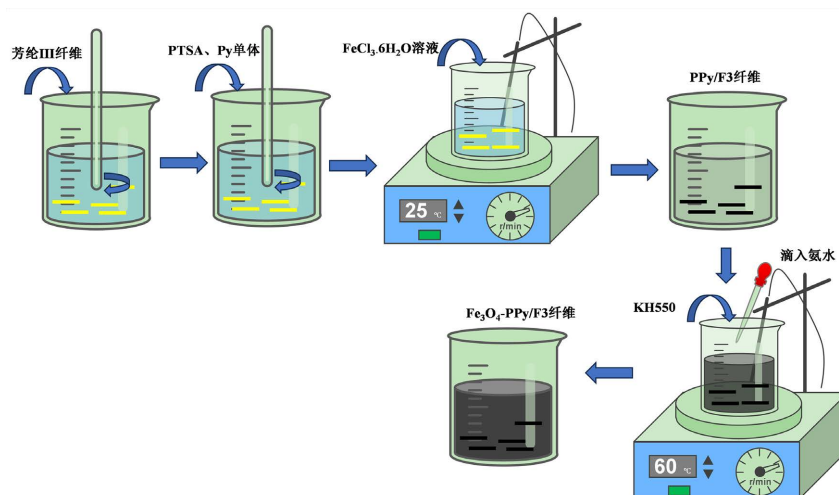
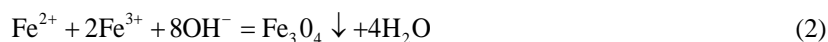


Figure 1. Schematic diagram of the preparation process of $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-PPy}/\text{F3}$ product

图 1. $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-PPy}/\text{F3}$ 产物制备流程示意图

Fe_3O_4 -PPy/F3 产物制备过程(图 1): 称取 0.4 g 处理干净的 F3 纤维(5 mm 左右短纤维), 将其加入到 150 mL 蒸馏水中, 充分搅拌至 F3 纤维分散均匀; 向体系中先后加入 0.5 mL 的 Py 单体和浓度为 0.04 mol/L 的 PTSA 溶液, 然后缓慢磁力搅拌 40 min (25℃); 接着向混合液中加入 FeCl_3 水溶液(4 g $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 溶于 30 mL 蒸馏水中) 30 mL, 滴速控制在 2 mL/min 左右; 滴加完毕后, 溶液中的 F3 纤维由黄色逐渐变为黑色, 保持缓慢搅拌条件下反应 5 h; 接着将上述溶液升温至 60℃, 加快磁力搅拌速度, 接着加入 20 mL 氨水, 滴速控制在 1 mL/min 左右, 滴加完毕后, 反应 1 h, 最后加入 4 mL 的 KH-550, 再升温至 70℃, 保温 1 h, 然后对反应产物进行减压抽滤, 并用蒸馏水和无水乙醇交替清洗至洗涤液无色和澄清透明, 最后经烘干(55℃, 12 h)处理, 得到在 F3 纤维表面分别合成有 PPy 和 Fe_3O_4 的复合产物, 记为 Fe_3O_4 -PPy/F3。

2.3. 产物表征与电磁学性能测试

用 ZV-E10L 型数码相机(索尼)对原料 F3 纤维和产物的外观性状进行拍摄, 并进一步用 HELIOS NanoLab 600i 型扫描电子显微镜(美国 FEI 公司, 工作电压 20 KV)进行微观形貌分析。

用 Nicolet 6700 型傅里叶红外光谱仪(美国热电尼高力公司)对产物进行化学基团分析, KBr 压片, 波数范围为 400~4000 cm^{-1} 。

用 Philips X, Pert PRO 型多晶 X 射线衍射仪(荷兰帕纳科公司)对原料 F3 纤维和产物做物相与结晶结构分析。辐射光源为 Cu-K α , 操作电压为 40 KV, 操作电流为 30 mA, 扫描角度范围为 10°~70°, 扫描速率为 5°/min。

将原料 F3 纤维和产物分别制成直径 1 cm 的圆片状样品, 然后用 RTS-9 型双电测四探针仪测试电导率。

将原料 F3 纤维和产物分别与石蜡按质量比 3:7 混合后, 放入专用模具中, 在 20 MPa 载荷下保压 2 min 得到产物的同轴环(其外径为 7 ± 0.02 mm, 内径为 3.04 ± 0.02 mm, 厚度为 4 mm 左右)。将制备得同轴环, 用 AV3672C 型微波一体化矢量网络分析仪(中国电子科技集团公司)测试在 8~12 GHz 范围内的复介电常数和复磁导率, 测试点数为 51 点。

3. 结果与讨论

3.1. 产物宏观性状与微观形貌分析

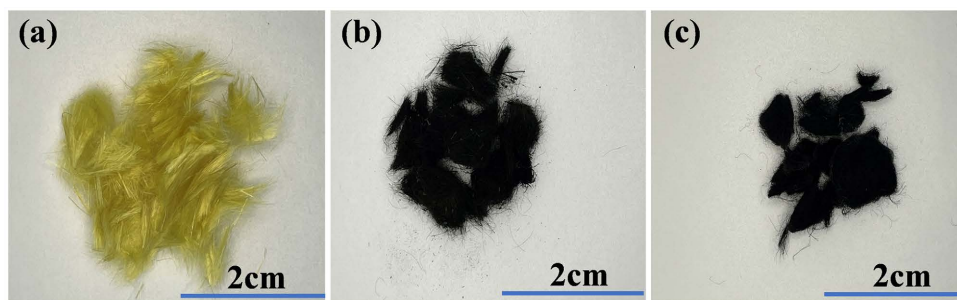


Figure 2. Digital images of raw material F3 fibers (a), product PPy/F3 (b) and PPy- Fe_3O_4 /F3 (c)
图 2. 原料 F3 纤维 (a)及产物 PPy/F3 (b)和 PPy- Fe_3O_4 /F3 (c)的数码图片

图 2(a)~(c)分别是原料 F3 纤维和 PPy/F3、 Fe_3O_4 -PPy/F3 产物的数码图片。从图 2 中可以看出, 原料 F3 纤维外观呈黄色, 蓬松堆积状态(如图 2(a)所示), 而改性产物 PPy/F3 和 Fe_3O_4 -PPy/F3 的堆积状态较原料 F3 纤维致密, 外观呈黑色, 分别如图 2(b)和图 2(c)所示。以上结果表明: PPy/F3 和 Fe_3O_4 -PPy/F3 产物的堆积密度高于原料 F3 纤维, 这可能是因为 F3 纤维表面负载吸波剂颗粒后, 提升了改性纤维之间的吸

附能力,从而使纤维之间发生团聚现象。另一方面,PPy/F3 产物外观呈黑色,由于通过原位聚合法合成的 PPy 产物呈黑色[17],因此暗示 PPy 颗粒负载与纤维表面,并对 F3 纤维骨架形成了致密包裹;Fe₃O₄-PPy/F3 产物外观也呈黑色并且纤维之间团聚现象尤为明显,说明采用一步制备工艺,负载与 F3 纤维骨架表面的吸波剂量可能大于 PPy/F3,并且也对 F3 纤维形成了致密包裹。图 2 给出的原料 F3 纤维和 PPy/F3、Fe₃O₄-PPy/F3 产物的 SEM 图也进一步支持该结论。

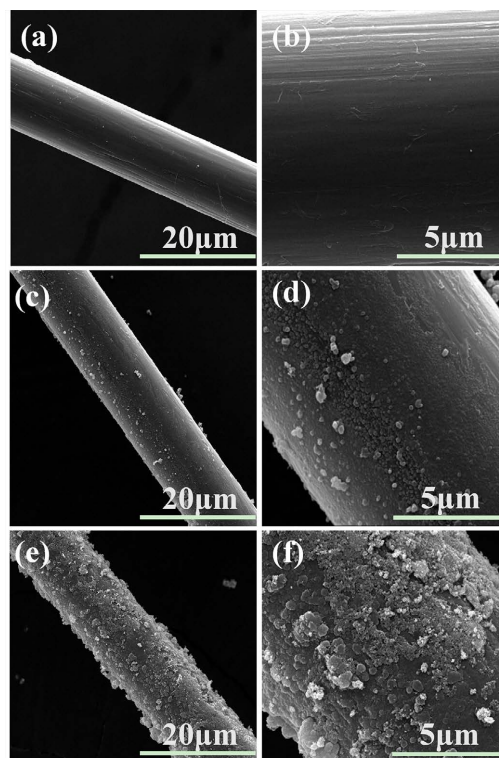


Figure 3. SEM images of raw material F3 fibers (a, b), product PPy/F3 (c, d) and PPy-Fe₃O₄/F3 (e, f)

图 3. 原料 F3 纤维((a, b)及产物 PPy/F3 (c, d)和 PPy-Fe₃O₄/F3 (e, f)的 SEM 图

图 3(a)~(f)是原料 F3 纤维和 PPy/F3、Fe₃O₄-PPy/F3 产物的 SEM 图。从原料 F3 纤维的 SEM 图可见,无论是低倍 SEM 照片(如图 3(a)所示)还是高倍 SEM 照片(如图 3(b)所示),都清楚地显示原料 F3 纤维表面是光洁的。PPy/F3、Fe₃O₄-PPy/F3 产物的 SEM 图(分别如图 3(c)、图 3(d)和图 3(e)、图 3(f)所示)则显示,产物仍呈纤维状,并且被致密的膜层物质包裹,后续 FT-IR 分析结果证明其为 PPy 和 Fe₃O₄。在两种产物中,PPy/F3 产物无论是低倍还是高倍 SEM 照片,膜层光滑致密,颗粒细小均匀;而 Fe₃O₄-PPy/F3 产物的 SEM 照片,纤维表面膜层粗糙,颗粒较大,这与 Fe₃O₄ 负载与纤维表面有很大关系。

3.2. 产物红外光谱分析

图 4 是 PPy/F3 与 PPy-Fe₃O₄/F3 产物的 FT-IR 图。从图中可以看出,两种产物在 1640 cm⁻¹ 处对应为酰胺基团中的 C=O 键的伸缩振动(酰胺 I 谱带),1305 cm⁻¹ 处对应 C-N 伸缩和 N-H 弯曲(酰胺 III 谱带),1035 cm⁻¹ 处对应 N-H 面内弯曲振动(苯环),966 cm⁻¹ 处对应苯环上 C-H 的面外弯曲振动,以上为 F3 纤维的特征吸收峰[18] [19];在 1548 cm⁻¹ 处对应醌型结构的 C=C 伸缩振动[20],1481 cm⁻¹ 和 1470 cm⁻¹ 对应于吡咯环的 C=C 伸缩振动,1400 cm⁻¹ 处对应吡咯环和苯环 C=C 的特征吸收峰,1187 cm⁻¹ 处 C-N⁺ 的伸缩振动[21] [22],1035 cm⁻¹ 处是 N-H 的面内弯曲振动,910 cm⁻¹ 和 782 cm⁻¹ 对应吡咯环上 C-H 的面外

弯曲振动[23], 以上均为 PPy 特征衍射峰, 说明 PPy 负载与 F3 纤维表面; 在 PPy-Fe₃O₄/F3 产物谱图中, 566 cm⁻¹ 处是 Fe₃O₄ 的 Fe-O 伸缩振动峰[24], 说明采用一步制备法, Fe₃O₄ 粒子包裹在了纤维表面。

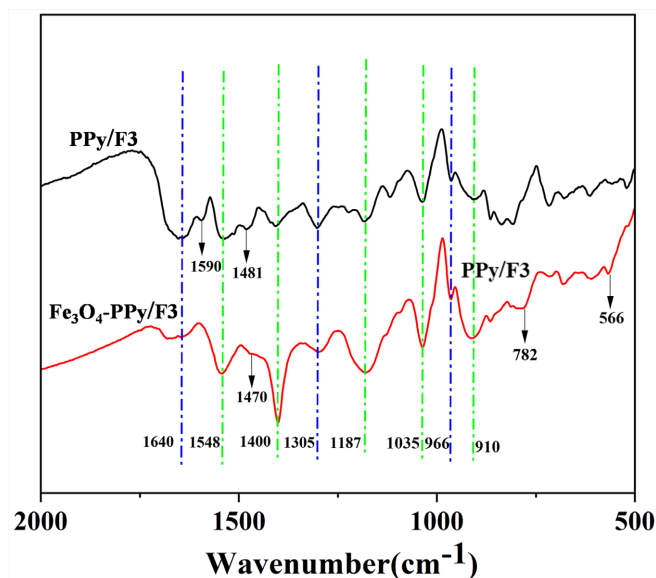


Figure 4. FT-IR spectra of products PPy/F3 and PPy-Fe₃O₄/F3

图 4. PPy/F3 和 PPy-Fe₃O₄/F3 产物的 FT-IR 图

3.3. 产物 XRD 分析

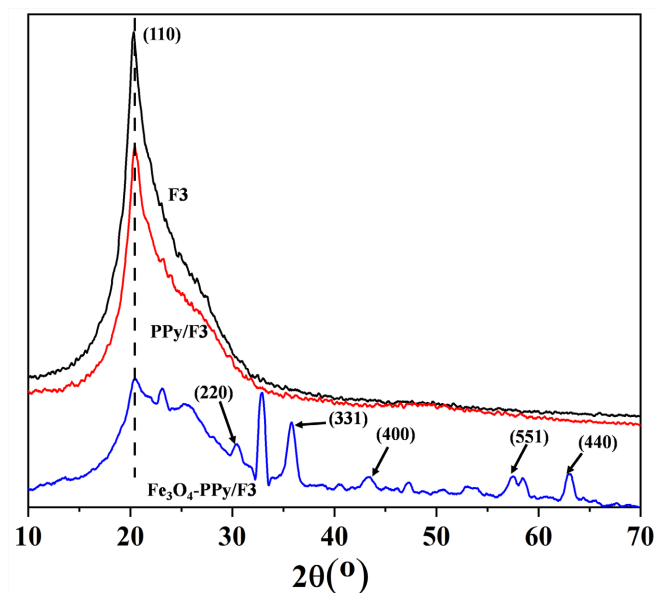


Figure 5. XRD patterns of raw material F3 fibers, product PPy/F3 and PPy-Fe₃O₄/F3

图 5. 原料 F3 纤维及产物 PPy/F3 和 PPy-Fe₃O₄/F3 的 XRD 图

图 5 是原料 F3 纤维和 PPy/F3、PPy-Fe₃O₄/F3 产物的 XRD 图。从图 5 可以看出, 原料 F3 纤维在 $2\theta = 20.5^\circ$ 有一个尖峰, 对应于 F3 纤维特征衍射峰(110)晶面, 且此峰强度大, 峰形窄, 保持这较高的结晶度[25]; PPy/F3 产物在 $22^\circ \sim 24.5^\circ$ 区间现出宽而弥散的衍射峰, 这是 PPy 无定型结构的显著特征, 并且也保

持着较高的结晶度,由此推断原位聚合法和沉积过程不会对 F3 纤维的晶体结构产生明显影响,这有益于保持产物优异的机械力学性能[6]; PPy-Fe₃O₄/F3 产物同时保留原料 F3 纤维的晶体衍射峰特征并叠加 PPy 宽化的衍射峰,表明 PPy 与原料 F3 纤维成功复合,在 PPy-Fe₃O₄/F3 产物谱图中,出现了一系列尖锐、狭窄的衍射峰,这些尖锐衍射峰在 2θ 为 20.5°、30.80°、35.80°、43.40°、57.28°、63.25° 出的 6 个峰分别对应于 Fe₃O₄ 立方结构晶型中的(110)、(220)、(311)、(400)、(511)、(440)晶面(JCPDS NO. 19-0629),所有出现的峰都与 Fe₃O₄ 相符,没有观察到明显的杂质峰(如 α -Fe₂O₃ 的峰),表明合成的 Fe₃O₄ 晶相纯度较高,结合图 2-SEM 表面形貌分析图可知,Fe₃O₄ 成功包覆与 PPy/F3 表面[10] [26]。

3.4. 产物电磁分析

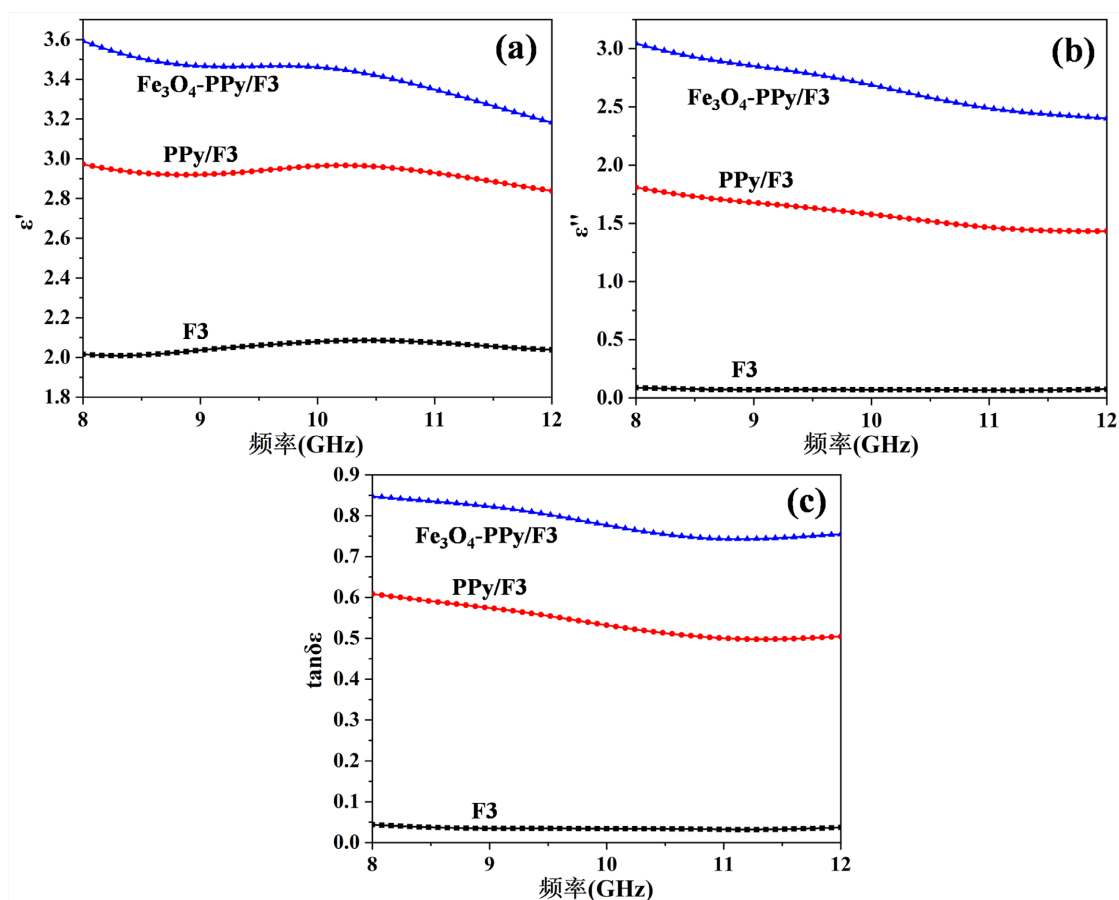


Figure 6. ϵ' - f curves, ϵ'' - f curves and $\tan \delta$ - f curves of raw material F3 fibers, product PPy/F3 and PPy-Fe₃O₄/F3

图 6. 原料 F3 纤维及产物 PPy/F3 和 PPy-Fe₃O₄/F3 的 ϵ' - f 曲线、 ϵ'' - f 曲线、 $\tan \delta$ - f 曲线

图 6 是原料 F3 纤维和 PPy/F3、PPy-Fe₃O₄/F3 产物在 8~12 GHz 范围内介电常数实部(ϵ')、虚部(ϵ'')和介电损耗角正切值($\tan \delta = \epsilon''/\epsilon'$)随频率(f)的变化曲线图。由图(a)可知,原料 F3 纤维的介电常数实部在 2.0~2.09 之间,而 PPy/F3、PPy-Fe₃O₄/F3 产物介电常数实部分别在 2.83~3.0 和 3.2~3.6 之间;由图(b)可知,原料 F3 纤维的 ϵ'' 在 0.07 上下,而 PPy/F3、PPy-Fe₃O₄/F3 产物 ϵ'' 分别在 1.43~1.80 和 2.4~3.04 之间,与原料 F3 纤维相比较,在 F3 纤维表面合成上 PPy 和 Fe₃O₄ 后, ϵ' 和 ϵ'' 都有一定程度增大,说明导电高聚物 PPy 和 Fe₃O₄ 负载与纤维表面使得 F3 纤维的介电损耗性能得到提升;由图(c)可知,原料 F3 纤维的损耗角正切值在 0.03 上下,不具备介电损耗能力,而 PPy/F3、PPy-Fe₃O₄/F3 产物 $\tan \delta$ 分别在 0.50~0.61 和

0.74~0.85 之间,与原料 F3 纤维相比,PPy/F3、PPy-Fe₃O₄/F3 产物的 $\tan\delta\epsilon$ 在整个频率范围内(8~12 GHz),都表现出优于原料 F3 纤维,表明两种产物较原料 F3 纤维呈现更为优异的介电损耗能力,其中 PPy-Fe₃O₄/F3 产物表现出最为优异的介电损耗能力。

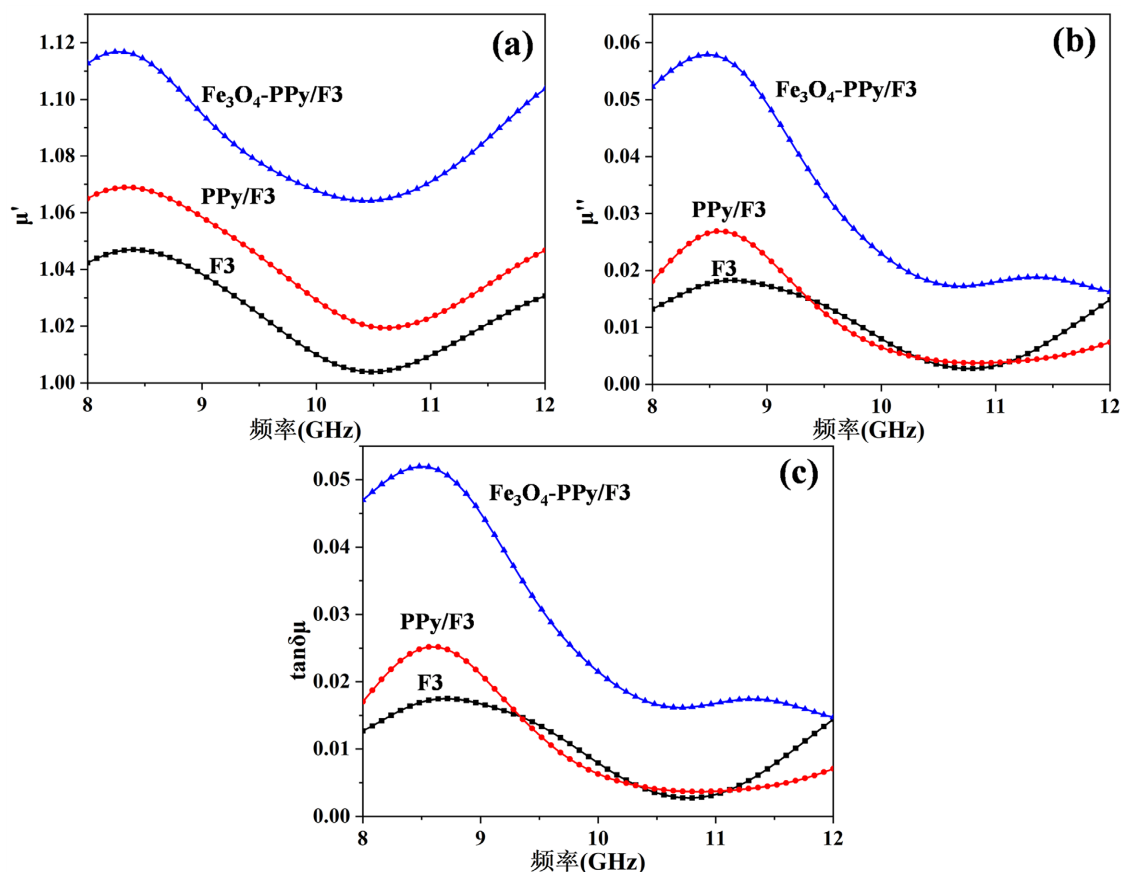


Figure 7. μ' - f curves, μ'' - f curves and $\tan\delta\mu$ - f curves of raw material F3 fibers, product PPy/F3 and PPy-Fe₃O₄/F3
图 7. 原料 F3 纤维及产物 PPy/F3 和 PPy-Fe₃O₄/F3 的 μ' - f 曲线、 μ'' - f 曲线、 $\tan\delta\mu$ - f 曲线

图 7 是原料 F3 纤维和 PPy/F3、PPy-Fe₃O₄/F3 产物在 8~12 GHz 范围内磁导率实部(μ')、虚部(μ'')和磁损耗角正切值($\tan\delta\mu = \mu''/\mu'$)随频率(f)的变化曲线图。由图 7 可知,原料 F3 纤维的 μ' 在 1.01~1.05 之间, μ'' 与 $\tan\delta\mu$ 近乎为 0,表明其不具备磁损耗能力;在两种产物中,PPy/F3 的 μ' 、 μ'' 较 F3 纤维一定程度增大,但其 $\tan\delta\mu$ 仅在 0.003~0.025 之间,表明 PPy 合成在纤维表面,并未赋予产物明显的磁损耗能力,这与 PPy 是非磁性物质有很大关系,而 PPy-Fe₃O₄/F3 产物在整个频率范围内(8~12 GHz), μ' 、 μ'' 和 $\tan\delta\mu$ 较 F3 纤维和 PPy/F3 都增大,说明其具有较好的磁损耗能力,有利于提升产物对电磁波的吸收能力。

吸波材料的目标是减少材料表面反射和提高电磁波吸收率,这主要取决于其阻抗匹配特性和电磁波的衰减能力[4]。理想的吸波材料需要输入阻抗与自由空间阻抗相匹配,当 Z 值等于 1 时, $Z_{in} = Z_0$, 系统完美达到阻抗匹配状态,此时入射电磁波可完全进入材料内部,这也是电磁波能够显著衰减的前提。在实际情况中, Z 值在 0.9~1.1 之间,就可认为输入的阻抗接近自由空间阻抗,电磁波在材料表面反射较少,电磁波很容易进入材料内部[27]。图 8(a)是原料 F3 纤维和 PPy/F3、PPy-Fe₃O₄/F3 产物在 8~12 GHz 范围内的阻抗匹配图。从图中可以看出,原料 F3 纤维整体阻抗匹配偏离 1 较远,表面其阻抗匹配较差,大部分电磁波反射回自由空间中,无法有效进入材料内部,无法实现对电磁波的能量损耗;而 PPy/F3、PPy-

$\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{F3}$ 产物的阻抗匹配值在整个频段范围内都接近于 1 附近, 其中 $\text{PPy}-\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{F3}$ 的阻抗匹配值几乎与 1 持平, 进而能够使大部分电磁波有效进入材料内部, 表面其具有优异的阻抗匹配特性。

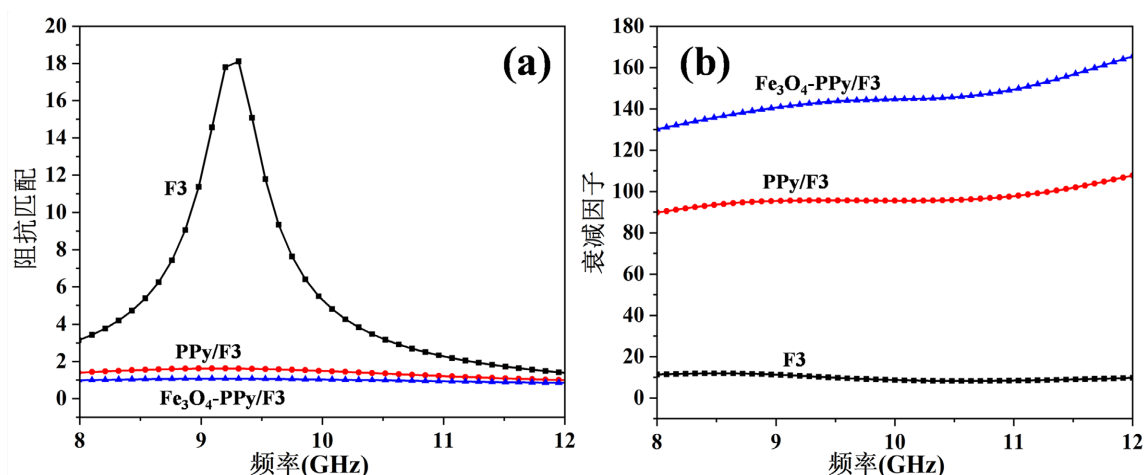


Figure 8. Impedance matching (a) and attenuation constant (b) plots of raw material F3 fibers and composite fiber products PPy/F3 and PPy- $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{F3}$

图 8. 原料 F3 纤维及复合纤维产物 PPy/F3 和 PPy- $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{F3}$ 的阻抗匹配(a)和衰减因子(b)图

衰减因子(α)描述了材料通过介电损耗和磁损耗对电磁波衰减和耗散的能力, α 值越大, 才能使进入的电磁波迅速被吸收[4]。图 8(b)是原料 F3 纤维和 PPy/F3、PPy- $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{F3}$ 产物在 8~12 GHz 范围内的衰减因子图。从图中可以看出, 原料 F3 纤维的 α 在整个频段范围内, 在 10 上下稳定徘徊, 而 PPy/F3、PPy- $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{F3}$ 产物的 α , 明显优于原料 F3 纤维; PPy/F3 产物的 α 在 90~107.8 之间, PPy- $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{F3}$ 产物的 α 在 130~165 之间, 特别是 PPy- $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{F3}$ 的 α 数值是最高的, 表面其对电磁波具有更强的损耗能力。此外, PPy/F3、PPy- $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{F3}$ 产物的衰减因子随频率的升高而增大, 这主要是由于电磁波频率升高时, PPy 导电网络中自由电荷随电场加速移动, 焦耳热损耗增加[28]; 另一方面, 频率升高使界面极化效应增强, 电荷弛豫过程滞后于电场变化, 能量以热形式耗散, 从而显著提升衰减因子[29]。因此, 综合考虑衰减能力和阻抗匹配特性, PPy- $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{F3}$ 产物展现出优异的吸波性能。

3.5. 产物吸波性能分析

一般情况下, 反射损耗值 $R_L \leq -10$ dB (即表示 90% 的电磁波被损耗吸收) 就可以满足实际应用, 因此把 $R_L \leq -10$ dB 带宽称为有效吸收带宽。图 9 是原料 F3 纤维和 PPy/F3、PPy- $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{F3}$ 产物的反射损耗值 R_L 随电磁波频率(8~12 GHz)和材料厚度 d (1~5.5 mm) 而变化的三维色图。从图中可以看出, 在所研究的频率和厚度范围内, 原料 F3 纤维无法获得优于 -10 dB 的吸波效果; PPy/F3 产物在厚度为 4.5 mm, 频率为 11.1 GHz, 其最优吸波效果可达 -17.8 dB, 对应的有效吸收频宽为 2.8 GHz (9.2~12 GHz); PPy- $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{F3}$ 产物在厚度为 4 mm, 频率为 11.4 GHz, 其最优吸波效果可达 -23.5 dB, 对应的有效吸收频宽为 3.1 GHz (8.9~12 GHz)。由此可知, 相对于原料 F3 纤维, 在纤维表面合成 PPy 和 Fe_3O_4 使得产物的吸波性能得到显著提升, 其中 PPy- $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{F3}$ 产物吸波性能最为优异, 有效吸收频宽也是最宽的, 这与阻抗匹配和衰减常数的分析研究结果具有一致性。PPy/F3、PPy- $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{F3}$ 产物的吸波性能极大提升主要与电导率的增大和丰富的异质界面以及多层结构有关。依据电导率的测试结果, 原料 F3 纤维是 1.60×10^{-16} S/cm, PPy/F3 产物是 0.50 S/cm, PPy- $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{F3}$ 产物是 0.75 S/cm, 其中原料 F3 纤维处于绝缘材料范围, 而两种产物的电导率相对于 F3 纤维提升了 15 个数量级, 其中 PPy- $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{F3}$ 产物电导率最大, 这显著提升了产物的介

电损耗能力,有助于将电磁能转化热能或者其他形式能量。其次,F3纤维与PPy、 Fe_3O_4 之间丰富的异质界面以及多层结构形成的异质介质界面,产生的界面极化效应也对电磁波有衰减作用。其中,PPy- Fe_3O_4 /F3产物的吸波性能最为优异,除了与其最大电导率有关外,还与 Fe_3O_4 的引入不仅使产物拥有磁损耗能力,也提高了其介电损耗能力,增强了对电磁波的衰减,而且F3纤维与PPy、 Fe_3O_4 与PPy之间丰富的异质界面以及多层结构,有利于界面极化的发生,也对电磁波有一定的衰减作用,最终导致PPy- Fe_3O_4 /F3产物拥有最为优异的吸波性能。

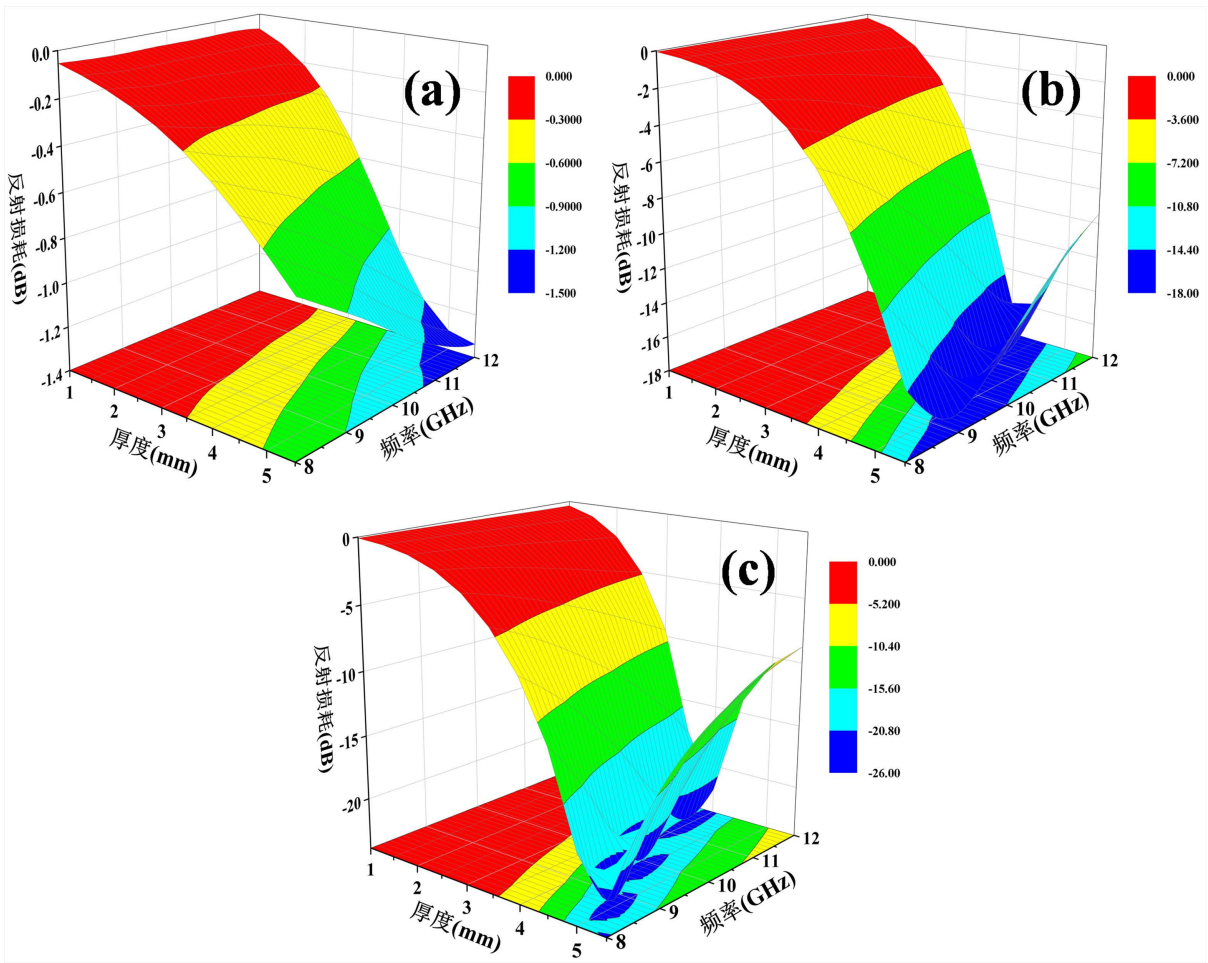


Figure 9. 3D color maps of reflection loss for raw material F3 fibers (a), product PPy/F3 (b) and PPy- Fe_3O_4 /F3 (c)

图 9. 原料 F3 纤维(a)及产物 PPy/F3 (b)、PPy- Fe_3O_4 /F3 (c)的反射损耗三维色图

4. 结论

采用一步制备法将具有介电损耗能力的导电 PPy 和磁损耗能力的 Fe_3O_4 分别合成在了 F3 纤维表面,并对纤维进行了致密包裹。PPy- Fe_3O_4 /F3 产物表现出最佳的阻抗匹配特性和电磁波衰减能力,有着最优的吸波性能,在厚度为 4 mm,频率为 11.4 GHz 时,其最优吸波效果可达-23.5 dB,对应的有效吸收频宽为 3.1 GHz (8.9~12 GHz)。

基金项目

成都工业院校级基金项目(2024ZRC018)。

参考文献

- [1] Wang, Z., Yang, T., Zhou, L., Hou, X., Fang, Z. and Hou, Y. (2025) Current Progress and Challenges of Electromagnetic Wave Absorbing Materials at High Temperature. *Advanced Science*, **12**, e04286. <https://doi.org/10.1002/advs.202504286>
- [2] 张晓晓, 吕双影, 李莹莹, 等. 碳纤维基磁性复合吸波材料研究进展[J]. 化工新型材料, 2025, 21(8): 1-7.
- [3] 董常熠, 于德梅. 聚吡咯纳米材料在电磁吸波领域的研究进展[J]. 化工新型材料, 2025, 53(5): 48-54.
- [4] Guan, C., Su, S., Wang, B., Zhong, J., Chen, J., Sun, F., *et al.* (2025) Electromagnetic Stealth Technology: A Review of Wave-Absorbing Structures. *Materials & Design*, **253**, Article ID: 113891. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.113891>
- [5] Xiang, H., Shi, Y., Yang, Q., Wang, X. and He, Y. (2024) Optimization Design of Honeycomb Absorbing Structure and Its Application in Aircraft Inlet Stealth. *Aerospace*, **11**, Article No. 796. <https://doi.org/10.3390/aerospace11100796>
- [6] Li, L., Zhang, X. and Wen, B. (2024) Fabrication of One-Dimensional Polypyrrole Nanochains for a High-Efficiency Electromagnetic Wave Absorber with a Low Filler Loading. *ACS Applied Polymer Materials*, **6**, 5653-5661. <https://doi.org/10.1021/acsapm.4c00269>
- [7] Dai, Y., Zhang, X., Wen, B. and Du, Q. (2022) Facile Synthesis of Polypyrrole Nanoparticles with Tunable Conductivity for Efficient Electromagnetic Wave Absorption and Shielding Performance. *CrystEngComm*, **24**, 3287-3296. <https://doi.org/10.1039/d2ce00206j>
- [8] Tian, X., Xu, X., Bo, G., Su, X., Yan, J. and Yan, Y. (2022) A 3D Flower-Like Fe₃O₄@ppy Composite with Core-Shell Heterostructure as a Lightweight and Efficient Microwave Absorbent. *Journal of Alloys and Compounds*, **923**, Article ID: 166416. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.166416>
- [9] 韩广兵, 李辉, 高成勇, 等. Fe₃O₄ 基电磁波吸收材料的研究进展[J]. 物理实验, 2024, 44(12): 1-12.
- [10] Liu, T., Zhang, N., Zhang, K., Wang, Y., Qi, Y. and Zong, M. (2022) Multi-Components Matching Manipulation of MXene/PPy@β₂-SiW₁₁Co/Fe₃O₄ Nanocomposites for Enhancing Electromagnetic Wave Absorption Performance. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **159**, Article ID: 107020. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.107020>
- [11] Cheng, S., Jia, R., Yin, B., Shang, W. and Liu, S. (2025) Controllable Fabrication of MnCo₂O₄@ Polypyrrole@ MXene Ternary Composites for Electromagnetic Wave Absorption. *Journal of Applied Polymer Science*, **142**, e56724. <https://doi.org/10.1002/app.56724>
- [12] Yang, X., Fan, B., Tang, X., Wang, J., Tong, G., Chen, D., *et al.* (2022) Interface Modulation of Chiral PPy/Fe₃O₄ Planar Microhelices to Achieve Electric/magnetic-Coupling and Wide-Band Microwave Absorption. *Chemical Engineering Journal*, **430**, Article ID: 132747. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132747>
- [13] 李凯楠. 对芳纶III纤维的原位负载改性及产物吸波性能研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- [14] 于志财, 何华玲, 王朝生, 等. Fe₃O₄ 与聚吡咯对棉织物的防电磁辐射整理及屏蔽效能研究[J]. 丝绸, 2018, 55(2): 19-24.
- [15] Liu, F., Li, F., Li, X., Tian, H. and Lei, X. (2024) Tensile and Interfacial Mechanical Properties for Single Aramid III Fibers under Dynamic Loading. *Polymers*, **16**, Article No. 804. <https://doi.org/10.3390/polym16060804>
- [16] Zhou, B., Wang, X., Wang, Z., Zhang, O., Jiang, Y. and Tan, L. (2024) Enhancement of Antimicrobial and UV Resistant Properties of Aramid III Fiber through Surface Coating. *Progress in Organic Coatings*, **189**, Article ID: 108317. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108317>
- [17] 李凯楠, 李晓冬, 胡书春, 等. 聚吡咯在芳纶III纤维表面的原位合成及产物吸波性能研究[J]. 化工新型材料, 2020, 48(8): 130-136.
- [18] Qi, G., Zhang, B. and Du, S. (2018) Assessment of F-III and F-12 Aramid Fiber/Epoxy Interfacial Adhesions Based on Fiber Bundle Specimens. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **112**, 549-557. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.06.001>
- [19] 孟凡瑞, 尹博雅, 罗雨轩, 等. 对位芳纶纤维增强聚氨酯改性环氧树脂复合材料的制备[J]. 纺织报告, 2025, 44(4): 4-8.
- [20] Islam, R., Sood, Y., Mudila, H., Ohlan, A. and Kumar, A. (2024) Microwave Absorbing Properties of Polypyrrole-Based 2D Nanocomposites. *Journal of Materials Chemistry A*, **12**, 31004-31027. <https://doi.org/10.1039/d4ta05676k>
- [21] 段浩杰. PPy/Fe₂O₃/棉柔性复合吸波材料的制备及其多功能性研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津工业大学, 2024.
- [22] Mao, D., Zhang, Z., Yang, M., Wang, Z., Yu, R. and Wang, D. (2023) Constructing BaTiO₃/TiO₂@polypyrrole Composites with Hollow Multishelled Structure for Enhanced Electromagnetic Wave Absorbing Properties. *International*

- Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, **30**, 581-590. <https://doi.org/10.1007/s12613-022-2556-7>
- [23] 邹薛佑, 焦馨宇, 刘元军. 樟脑磺酸掺杂聚吡咯的聚乙烯短丝土工布吸波材料制备[J]. 棉纺织技术, 2025, 23(6): 1-7.
- [24] Zhang, L., Liu, Y., Rehman, S.U., Wang, L., Chen, Y., *et al.* (2023) In Situ Synthesis of Fe₃O₄ Coated on Iron-Based Magnetic Microwave Absorbing Materials and the Influence of Oxide Magnetic Materials on Microwave Absorption Mechanism. *Ceramics International*, **49**, 12972-12979. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.12.170>
- [25] 张静, 秦鹏华, 杜志林, 等. 新型载银对位芳纶抗菌纤维的制备及其性能研究[J]. 化工新型材料, 2025, 27(9): 1-7.
- [26] Li, Y., Duan, Y. and Kang, X. (2021) Multi-Scale Integrated Design and Fabrication of Ultrathin Broadband Microwave Absorption Utilizing Carbon Fiber/Prussian Blue/Fe₃O₄-Based Lossy Lattice Metamaterial. *Journal of Materials Chemistry C*, **9**, 6316-6323. <https://doi.org/10.1039/d1tc00511a>
- [27] Chen, G., Li, Z., Zhang, L., Chang, Q., Chen, X., Fan, X., *et al.* (2024) Mechanisms, Design, and Fabrication Strategies for Emerging Electromagnetic Wave-Absorbing Materials. *Cell Reports Physical Science*, **5**, Article ID: 102097. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2024.102097>
- [28] 杨越, 朱曜峰. 核壳结构铁/碳化铁@碳@聚苯胺多相复合吸波材料的制备及吸波性能[J]. 浙江理工大学学报, 2023, 49(5): 550-559.
- [29] Shen, Y.Q., *et al.* (2024) Fabrication and Microwave Absorbing Properties of FeCoNiAl@ C/CCB/NR Absorbing Patches. *Journal of Functional Materials*, **55**, 9118-9126.