

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.12.007

废弃口罩/ZIF-8/离子液体复合材料的制备与介电性能

向萌¹, 潘倩¹, 杨洲¹, 戴飞炀², 戴仁兴³, 董爽⁴

[1. 江苏理工学院化学化工学院, 江苏常州 213001; 2. 大使涂料(安徽)有限公司, 安徽安庆 246002;
3. 江苏大使同丰涂料有限公司, 江苏常州 213012; 4. 常州工学院化工与材料学院, 江苏常州 213032]

摘要: 基于对废弃一次性口罩(FM)的高值化利用,通过在FM上原位负载沸石咪唑框架-8(ZIF-8)和离子液体(IL),成功制备出介电性能较高的FM/ZIF-8/IL复合材料,ZIF-8和IL在FM纤维表面形成了一维导电通道,从而增加材料的导电性能。电导率测试表明ZIF-8和IL的引入使复合材料的电导率增加了3个数量级,这是由于ZIF-8和IL之间异质界面数量增加,异质界面处的电子极化增强,导致分子极化弛豫。介电性能测试表明复合材料的介电实部和介电虚部均随着ZIF-8和IL含量的增加而增加,归因于ZIF-8和IL之间的界面极化提升了电荷存储能力。随着ZIF-8和IL含量的增加,FM/ZIF-8/IL复合材料的介电损耗变化较小,且呈现2个共振峰,表明存在通过极化过程实现的多极化弛豫现象,这有利于保持复合材料样品的低介电损耗能力。ZIF-8作为纳米支架,通过其自身界面以及吸附IL后形成的巨大界面,来引发和增强界面极化。IL作为可移动的离子源,通过其离子的迁移和界面积累以放大界面极化效应,并贡献一定的离子极化。最终,两者的协同作用能够在废弃口罩转化的聚合物基体中,构建一个极其高效的极化系统,从而制备出具有高介电常数、低损耗的先进介电复合材料,同时实现了废弃物的高附加值资源化利用。

关键词: 废弃口罩; ZIF-8; 离子液体; 电导率; 介电性能

中图分类号: TQ327.8X791 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)12-0051-07

Preparation and dielectric performance of ionic liquid composites with waste face masks and ZIF-8

XIANG Meng¹, PAN Qian¹, YANG Zhou¹, DAI Feiyang², DAI Renxing³, DONG Shuang⁴

[1. Department of Chemistry and Chemical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China; 2. Ambassador Coatings (Anhui) Co., Ltd., Anqing 246002, China; 3. Jiangsu Ambassador Tongfeng Coatings Co., Ltd., Changzhou 213012, China; 4. School of Chemical Engineering and Materials, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213032, China]

Abstract: Based on the high-value utilization of waste disposable mask (FM), the FM/zeolite imidazole framework-8 (ZIF-8)/ionic liquid (IL) composite materials with high dielectric properties was successfully prepared by in-situ loading ZIF-8 and IL on FM. One-dimensional conductive channel on the surface of FM fiber was formed with ZIF-8 and IL, thereby increasing the conductivity of the material. Conductivity tests reveal that the introductions of ZIF-8 and IL increase the composite material's conductivity by three orders of magnitude, this is because the number of heterogeneous interface between ZIF-8 and IL has increased, and the electron polarization at the heterogeneous interface has been enhanced, resulting in the relaxation of molecular polarization. The dielectric performance test indicates that both the dielectric real part and the dielectric imaginary part of the composite material increase with the increase of ZIF-8 and IL contents. This is attributed to the interface polarization between ZIF-8 and IL, which enhances the charge storage capacity. As the increases of ZIF-8 and IL content, the dielectric loss of FM/ZIF-8/IL composites exhibit minimal variation and display two resonance peaks, indicating the presence of multi-polarization relaxation phenomena achieved through polarization processes, which is beneficial for maintaining the low dielectric loss capability of the composite material. ZIF-8, acting as a nano-scaffold, induces and enhances interfacial polarization through its inherent interfaces and the extensive interfaces formed after IL adsorption. IL, as a mobile ion source, amplifies the interfacial polarization effect via the migration of its ions and

基金项目: 国家自然科学基金项目(22302019),常州市应用基础研究计划项目(CJ20241092),江苏理工学院横向基金项目(KYH25165)

通信作者: 董爽,副教授,主要研究方向为纳米材料与高分子材料

收稿日期: 2025-10-16

引用格式: 向萌,潘倩,杨洲,等.废弃口罩/ZIF-8/离子液体复合材料的制备与介电性能[J].工程塑料应用,2025,53(12):51-57.

XIANG Meng, PAN Qian, YANG Zhou, et al. Preparation and dielectric performance of ionic liquid composites with waste face masks and ZIF-8[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(12): 51-57.

the accumulation at the interface, and contributes to a certain degree of ion polarization. Ultimately, the synergistic effect of both components enables the construction of an extremely efficient polarization system within the polymer matrix derived from waste masks, resulting in the preparation of advanced dielectric composites with high permittivity and low loss. Simultaneously, this approach achieves high-value resource utilization of waste materials.

Keywords : waste face mask ; ZIF-8 ; ionic liquid ; conductivity ; dielectric performance

发展高效且稳定的储能技术,对调节能源供需关系、增强可再生能源系统的可靠性与运行灵活性具有关键作用^[1-2]。随着电子设备更新速度不断加快,大量依赖电介质材料的功能器件逐渐向可折叠、小型化等方向演进^[3],理想的电介质需兼具高介电常数、低介电损耗、优良的柔韧性以及较低的工艺成型温度^[4]。然而,在传统电容器制备过程中,无论是选用有机还是无机电介质,均难以同时满足上述全部要求。例如,以铁电陶瓷/晶体为代表的无机材料虽然介电常数较高,却普遍存在柔韧性差、加工温度高及成型工艺复杂等问题^[5];而高分子材料尽管柔韧易加工、可在低温下制备,但其介电常数往往偏低。相较之下,聚合物基介电复合材料通过将电增强相填充到柔性聚合物基体中,在保留有机电介质良好加工性能的基础上显著提高了介电常数,从而兼具优异的介电与力学特性,同时具备低密度、低成本及易加工等优势,因此在高储能密度介电电容器领域得到广泛应用,尤其契合当前发展趋势。Yuan等^[6]通过超薄膜叠加热压的方法制备了还原氧化石墨烯(rGO)纳米片,其在聚偏二氟乙烯(PVDF)基体中具有良好的分散性,当rGO质量分数为3%时,复合材料在1 kHz频率下的介电常数为39.4。Wang等^[7]将聚乙烯醇(PVA)接枝到氧化石墨烯(GO)表面,并将还原后的rGO填充到PVDF基体中,在渗流阈值附近,rGO/PVA/PVDF的介电损耗为0.5。

金属-有机框架材料(MOF)是由金属离子和有机配体通过共价键连接而成的纳米材料^[8]。其中,沸石咪唑框架-8(ZIF-8)作为一种典型的金属-有机框架MOF材料,其核心优势如下。(1)高比表面积与多孔结构。ZIF-8拥有巨大的比表面积和规整的纳米级孔隙^[9],这为界面极化提供了极大的空间^[10]。当复合材料置于电场下,载流子(如离子、电子)会被捕获在ZIF-8颗粒与聚合物基体的界面上^[11],形成大量的微观电容器,从而显著提升复合材料的介电常数^[12]。(2)纳米尺寸效应。纳米级的ZIF-8颗粒可以均匀分散在废弃口罩熔融后的聚合物纤维中,形成

大面积的界面区域。更多的界面意味着更强的界面极化效应。热稳定性和化学稳定性,ZIF-8具有良好的热稳定性,能够承受热压成型过程中的温度,不会分解。同时,其化学稳定性确保了它在加工过程中不会与聚合物基体或离子液体(IL)发生不必要的反应。(3)刚性结构。ZIF-8的刚性骨架可以作为增强填料,可在一定程度上改善复合材料的力学性能,或防止其因IL添加而过度软化。

IL是一种特殊的盐类,其独特之处在于它们在室温下呈现液态^[13],IL的独特优势如下。(1)高本征离子电导率。IL内部含有大量可移动的阳离子和阴离子^[14]。在交变电场下,这些离子会发生离子极化(长程迁移),诱导界面极化^[15]。离子液体中的自由离子在电场作用下会向界面(如ZIF-8表面、废弃口罩纤维表面)迁移并积累,极大地增强和丰富了界面极化效应^[16]。(2)良好的分散性和相容性。离子液体可以像“润滑剂”一样浸润ZIF-8粉末和废弃口罩纤维,有助于填料在基体中的分散,减少团聚,从而形成更均匀、更致密的介电网络。(3)低挥发性与高稳定性。IL具有极低的蒸汽压和高温分解温度,确保在热压过程中不会像水或普通溶剂那样挥发,能够稳定地存在于复合材料中。

近年来,COVID-19疫情在全球范围内肆虐,由聚丙烯无纺布制成的一次性医用口罩在阻断病毒传播方面发挥了重要作用。但随之而来的大量废弃一次性口罩(FM),引发了严重的医疗垃圾污染问题,处理需要占用大量公共资源。为响应可持续发展的需求,必须采用对环境影响较低的方法对资源进行再利用。基于此,本文以废弃的一次性聚丙烯口罩为基底材料,以六水合硝酸锌 $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ 为金属前躯体,以2-甲基咪唑为有机配体,通过在FM上原位负载ZIF-8和IL,制备了高介电性能的复合材料FM/ZIF-8/IL,进一步考察了复合材料结构与介电性能之间的关系。所制备的FM/ZIF-8/IL复合材料在静电电容器、嵌入式电容与电子封装、介电弹性体驱动器、电磁干扰屏蔽与吸波、能量收集(摩擦纳米发电机)、固态电池等领域具有一定的应用

前景。

1 实验部分

1.1 主要原材料

一次性口罩:聚丙烯(PP)材质,河南省超亚医疗器械有限公司;

1-丁基-3-甲基咪唑六氟磷酸盐:化学纯,上海麦克林生化科技股份有限公司;

Zn(NO₃)₂·6H₂O,2-甲基咪唑:化学纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

1.2 主要仪器及设备

超声波清洗仪:120 W,东森仪器有限公司;

台式高速离心机:TG16-WS,湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;

平板硫化机:XH406B,广东锡华机械有限公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:Nicolet iS5,上海戈翔仪器有限公司;

介电性能测试仪:SY-5001,圣殷科技(江苏)有限公司;

场发射扫描电子显微镜(FESEM):SIGMA500,德国蔡司公司;

热重(TG)分析仪:TG 209F1,德国得利时公司;

X射线衍射(XRD)仪:D/Max 2500,日本Rigaku株式会社;

X射线光电子能谱仪(XPS):K-Alpha,美国赛默飞世尔科技公司。

1.3 FM/ZIF-8/IL复合材料的制备

称取1.3 g 2-甲基咪唑作为有机配体,用量筒称取40 mL蒸馏水加入50 mL小烧杯中,超声搅拌5 min使其均匀分散,标记为A溶液。称取0.2 g IL,加入A溶液中,超声搅拌5 min使其分散均匀。称取0.595 g Zn(NO₃)₂·6H₂O作为金属前驱体,用量筒称取40 mL蒸馏水加入100 mL大烧杯中,超声搅拌5 min使其均匀分散,分散均匀后标记为B溶液。去掉一次性口罩上的挂耳和鼻梁条,用剪刀剪下适当大小的罩体放在培养皿中。将剪好的罩体放入B溶液中,将其在B溶液中浸泡5 min,使罩体与B烧杯中的溶液充分接触。罩体与B溶液反应完全后,将对应的A烧杯中的溶液迅速倒入B烧杯中,室温静置4 h。将罩体夹出放置在培养皿中,用蒸馏水清洗3次,放入60 °C烘箱中干燥4 h,放入平板硫化机中在170 °C下热压10 min,得到FM/ZIF-8/IL复合材

料。根据ZIF-8和IL的添加量,复合材料样品分别记作FM/1.0%ZIF-8/0.1%IL, FM/2.0%ZIF-8/0.2%IL, FM/3.0%ZIF-8/0.3%IL (ZIF-8和IL添加量均为质量分数)。为便于对比,另将未加工的原始口罩标记为Original FM,与复合材料样品一起测试。

1.4 测试与表征

采用FTIR仪对FM/ZIF-8/IL复合材料进行结构表征,扫描波长在4 000~500 cm⁻¹之间,分辨率为4 cm⁻¹。

采用XRD仪对FM/ZIF-8/IL复合材料进行XRD表征。测试条件为:设定衍射角范围5°~80°,扫描速率为5°/min。

采用XPS探索复合材料的成分,工作电压为12 kV,工作电流为20 mA,探测器能量为0.1 eV。

采用TG分析仪对复合材料进行TG分析,氮气气氛,从30 °C升温至800 °C,升温速率为10 °C/min。

采用数字源表和高阻仪分析复合材料的电导率变化情况。当试样的电导率高于1×10⁻⁶ S/cm时采用数字源表,当试样的电导率低于1×10⁻⁶ S/cm时采用高阻仪。

采用介电性能测试仪检测复合材料的电磁屏蔽效能,频率范围为10⁻¹~10⁷ Hz。

采用FESEM对复合材料的形貌进行表征,电压为5 kV。

2 结果与讨论

2.1 FM/ZIF-8/IL的结构表征

2.1.1 FTIR分析

图1为Original FM和FM/ZIF-8/IL的FTIR谱图。由图1可见,Original FM样品显示出PP在1 456 cm⁻¹对应于—CH₃的不对称变形振动峰,1 376 cm⁻¹处对应于—CH₃的对称变形振动峰。对于FM/ZIF-8/IL样品,发现了3 136 cm⁻¹处对应于ZIF-8中2-甲基咪唑的C—H的振动峰,1 586 cm⁻¹对

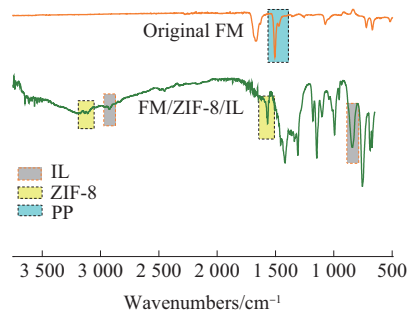


图1 Original FM及FM/ZIF-8/IL复合材料的FTIR谱图

Fig. 1 FTIR spectra of original FM and FM/ZIF-8/IL composite

应于ZIF-8中2-甲基咪唑的C=N伸缩振动峰、IL中的P—F的伸缩振动峰和 $2\ 923\ \text{cm}^{-1}$ 处对应于IL中侧链烷基C—H的伸缩振动吸收峰,共同表明了ZIF-8和IL有效地负载到FM中。

2.1.2 XRD分析

Original FM和FM/ZIF-8/IL复合材料的XRD分析如图2所示。由图2可见,Original FM样品在 $2\theta=14.4^\circ, 17.2^\circ, 18.9^\circ, 21.3^\circ, 22.2^\circ$ 和 29.0° 处具有 α 型晶体的峰,对应于PP的(110), (040), (130), (131), (041)和(111)晶面。当ZIF-8和IL引入FM时,FM/ZIF-8/IL样品表现出位于 $7.3^\circ, 10.6^\circ, 12.8^\circ, 14.8^\circ, 16.6^\circ$ 和 18.1° 的弱峰,分别属于ZIF-8的(011), (002), (112), (022), (013)和(222)晶面。同时PP的结晶峰峰强减小,归因于IL的引入破坏了PP晶区的规整性。IL的加入使得复合材料XRD曲线中不定形区域增加,峰形变缓,这表明IL的加入降低了复合材料的结晶度,有利于电子的流动。

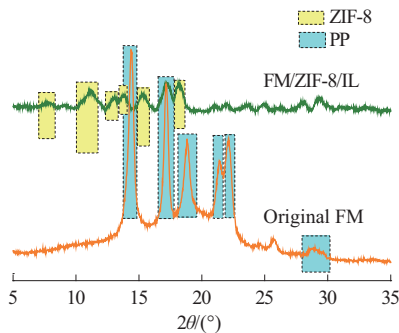


图2 Original FM及FM/ZIF-8/IL复合材料的XRD曲线

Fig. 2 XRD curves of original FM and FM/ZIF-8/IL composite

2.1.3 TG分析

Original FM和FM/ZIF-8/IL样品的TG分析如图3所示。由图3可见,Original FM的降解仅有一个阶段,位于 $250\sim 500\ ^\circ\text{C}$,对应PP分子链骨架的裂解。对于FM/ZIF-8/IL, $210\sim 440\ ^\circ\text{C}$ 的第一个降解阶

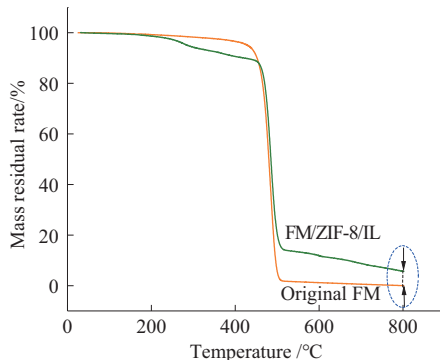


图3 Original FM及FM/ZIF-8/IL复合材料的TG曲线

Fig. 3 TG curves of original FM and FM/ZIF-8/IL composite

段是由于IL的分解, $450\sim 510\ ^\circ\text{C}$ 的第二个降解阶段是由于配体分子的分解导致ZIF-8骨架的分解,最终的残余质量分数提高到5.63%,这是由于Zn原子的热稳定性。

2.1.4 XPS分析

通过XPS研究了FM/ZIF-8/IL的化学组成,如图4a所示。全谱分析表明,样品由C, N, Zn, P和F这5种元素组成,其中C元素主要来自FM, Zn元素

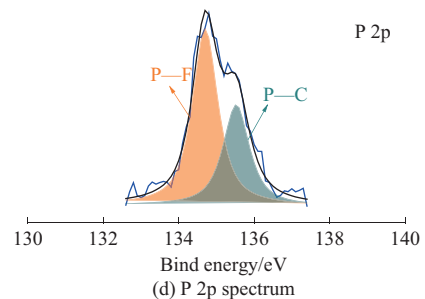
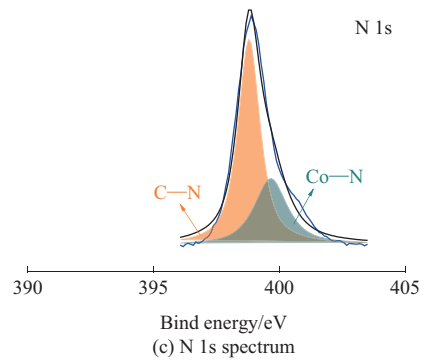
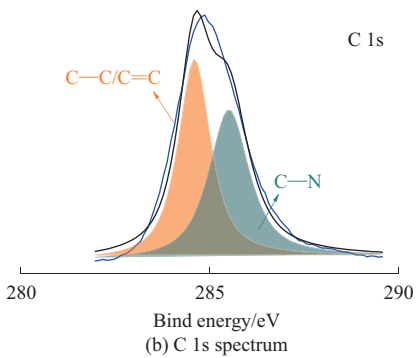
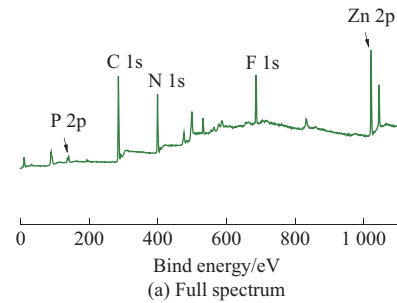


图4 FM/ZIF-8/IL复合材料的XPS谱图

Fig. 4 XPS spectra of FM/ZIF-8/IL composite

来自FM表面ZIF-8的引入,P和F元素来自FM表面IL的引入。如图4b所示,FM/ZIF-8/IL的C 1s谱可分为C—C/C=C和C—N这两个组分。如图4c所示,FM/ZIF-8/IL的N 1s谱可分为C—N和Zn—N。如图4d所示,FM/ZIF-8/IL的P 2p谱可分为P—F和P—C。上述分析表明ZIF-8和IL已成功引入FM表面。

2.1.5 SEM表征

利用SEM观察了Original FM和FM/ZIF-8/IL复合材料的微观形貌。在图5a中,Original FM纤维呈无序分布,纤维交错但不紧密排列,且存在许多间隙。纤维表面比较光滑。如图5b所示,引入ZIF-8和IL后,FM/ZIF-8/IL的表面粗糙度显著增加。样品的EDS能谱分析结果清楚显示了FM/ZIF-8/IL主要含有C元素(来自FM),Zn和N元素(来自ZIF-8),F和P元素(来自IL),进一步证实了ZIF-8和IL均匀分散在FM纤维表面。ZIF-8和IL在FM纤维表面形成了一维导电通道,从而增加材料的导电性能。

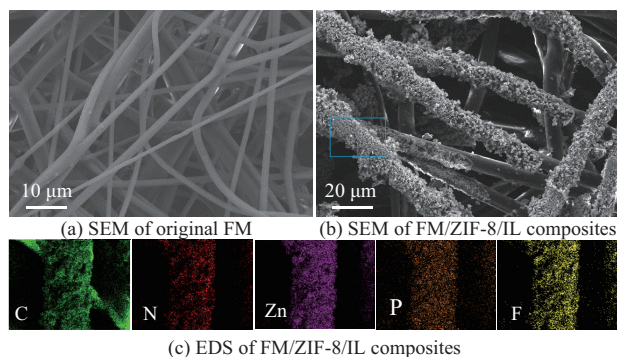


图5 Original FM和FM/ZIF-8/IL复合材料SEM照片及EDS能谱图
Fig. 5 SEM photos and EDS spectra of original FM and FM/ZIF-8/IL composite

2.2 FM/ZIF-8/IL的性能研究

2.2.1 导电性能

电导率与介电性能密切相关,在一定范围内,电导率越高,介电虚部越高。Original FM及FM/ZIF-8/IL复合材料的电导率如图6所示。由图6可见,Original FM的电导率低于 10^{12} S/m,处于绝缘状态。FM/1.0%ZIF-8/0.1%IL的电导率为 8×10^{-3} S/m,表明在ZIF-8和IL引入之后,复合材料已具有一定的导电性能。随着FM上的ZIF-8和IL含量的增加,复合材料的导电性能得到一定的提升,最终当ZIF-8和IL的质量分数分别为3.0%和0.3%时,复合材料的电导率进一步增加至3.9 S/m,这是由于ZIF-8和IL之间异质界面数量增加,异质界面处的电子

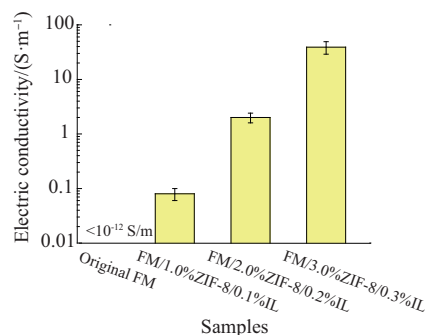


图6 Original FM及FM/ZIF-8/IL复合材料的电导率

Fig. 6 Electric conductivity of original FM and FM/ZIF-8/IL composite

极化增强,导致分子极化弛豫。丰富的异质界面扩展了载流子的传递路径,从而增加了复合材料的导电性能。

2.2.2 介电性能

Original FM及FM/ZIF-8/IL复合材料的介电性能如图7所示。由图7可见,材料的复介电常数由

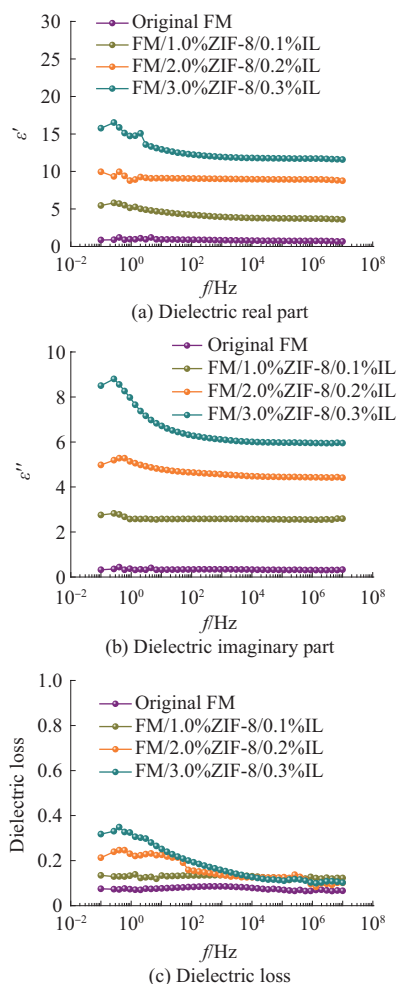


图7 Original FM及FM/ZIF-8/IL复合材料的介电性能

Fig. 7 Dielectric properties of original FM and FM/ZIF-8/IL composites

实部和虚部组成。从图7a可以看出,Original FM的介电实部 ϵ' 平均值为0.93,当引入ZIF-8和IL之后,FM/1.0%ZIF-8/0.1%IL的介电实部平均值提升至3.88,表明复合材料已具有一定的电荷存储性能。最终当ZIF-8和IL质量分数分别为3.0%和0.3%时,复合材料的介电实部平均值进一步增加至12.6,这是由于ZIF-8和IL之间的界面极化提升了电荷存储能力。从图7b可以看出,随着ZIF-8和IL含量的增加,FM/ZIF-8/IL的介电虚部 ϵ'' 也相应增加,最终提升至6.24。由图7c介电损耗可见,随着ZIF-8和IL含量的增加,FM/ZIF-8/IL复合材料的介电损耗变化较小,且呈现2个共振峰,表明存在通过极化过程实现的多极化弛豫现象,这将有利于保持复合材料样品的低介电损耗能力。

3 结论

(1)基于对FM的高值化利用,以FM为载体,通过在FM的PP纤维表面负载ZIF-8和IL,制备了具有介电功能的FM/ZIF-8/IL复合材料。通过FTIR, XRD, TG, XPS和SEM分析证实了ZIF-8和IL在FM的成功引入,并且均匀分布于PP纤维表面。

(2)电导率测试表明ZIF-8和IL的引入使复合材料的电导率增加了3个数量级。最终当ZIF-8和IL质量分数分别为3.0%和0.3%时,复合材料的电导率进一步增加至3.9 S/m,这是由于ZIF-8和IL之间异质界面数量增加,异质界面处的电子极化增强,导致分子极化弛豫。丰富的非均质界面扩展了载流子的传递路径,从而增加了复合材料的导电性能。

(3)介电性能测试表明复合材料的介电实部和介电虚部均随着ZIF-8和IL含量的增加而增加,归因于ZIF-8和IL之间的界面极化提升了电荷存储能力。随着ZIF-8和IL含量的增加,FM/ZIF-8/IL复合材料的介电损耗变化较小,且呈现2个共振峰,表明存在通过极化过程实现的多极化弛豫现象,这将有利于保持复合材料样品的低介电损耗能力。

参考文献

- [1] WANG K H, WANG Q, WANG T, et al. One stone, three birds: DOPO-based hollow polymer microspheres achieving superior flame retardancy, mechanical performance, and dielectric properties in high-performance epoxy composites[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 523. DOI:10.1016/j.cej.2025.168359.
- [2] LI Z, FEI F, MENG Z Z. Dielectric-loaded waveguide probe for microwave non-destructive evaluation of glass fibre-reinforced polymer composites[J]. *Composite Structures*, 2025, 372. DOI: 10.1016/j.compstruct.2025.119601.
- [3] DANILOV E A, ROMANOV N S, GUROVA E M, et al. Temperature dependencies of thermal properties of dielectric polymer composite materials based on hexagonal boron nitride and phenol-formaldehyde resin[J]. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2025, 16(5):1 313-1 323.
- [4] 同阳,武鑫雨,刘洋,等.基于表面改性MXene二维填料的铁电聚合物纳米复合材料电介质制备及其逾渗阈值/介电响应研究[J]. *材料导报*, 2025, 39(13):35-41.
TONG Yang, WU Xinyu, LIU Yang, et al. Preparation of polymer-based nanocomposites using surface modified MXene 2D fillers and their percolation threshold and dielectric response[J]. *Materials Reports*, 2025, 39(13):35-41.
- [5] 张营澳.热响应介电开关聚合物基复合材料的多尺度界面调控与性能研究[D].武汉:武汉纺织大学,2025.
ZHANG Yingao. Study on multi-scale interface control and properties of thermal response dielectric switch polymer matrix composites[D]. Wuhan:Wuhan Textile University, 2025.
- [6] YUAN Y X, TANG Y K, GAO Q M, et al. In situ reduction and self-alignment of reduced graphene oxide/poly(vinylidene fluoride) composite films: Toward high dielectric constant and suppressed loss[J]. *Journal of Molecular Structure*, 2022, 1267. DOI:10.1016/j.molstruc.2022.133656.
- [7] WANG D R, BAO Y R, ZHA J W, et al. Improved dielectric properties of nanocomposites based on poly(vinylidene fluoride) and poly(vinyl alcohol)-functionalized graphene[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2012, 4(11):6 273-6 279.
- [8] 武仕杰.基于MOF材料衍生的超级活性炭制备储能器件[D].长春:长春工业大学,2025.
WU Shijie. Preparation of energy storage devices based on MOF derived super activated carbon[D]. Changchun:Changchun University of Technology, 2025.
- [9] 赵利.ZIF-8/巴沙木衍生N掺杂生物炭强化电芬顿体系降解盐酸四环素的研究[D].成都:四川师范大学,2025.
ZHAO Li. Study on the enhanced electro Fenton system degradation of tetracycline hydrochloride using ZIF-8/Bashamu derived N-doped biochar[D]. Chengdu:Sichuan Normal University, 2025.
- [10] 孙宇豪.ZIF-8/Au/ZSM-5及其衍生催化剂的制备与催化性能的研究[D].烟台:烟台大学,2025.
SUN Yuhao Preparation and catalytic performance of ZIF-8/Au/ZSM-5 and its derived catalysts[D]. Yantai: Yantai University, 2025.
- [11] 张俊雄,张宇慧,沈静.ZIF-8及复合材料的合成与研究进展[J]. *辽宁化工*, 2025, 54(2):283-287.

- ZHANG Junxiong, ZHANG Yuhui, SHEN Jing. Synthesis and research progress of ZIF-8 and its composites[J]. Liaoning Chemical Industry, 2025, 54(2):283–287.
- [12] 范炳华, 张建军, 刘越, 等. ZIF-8 构建生物标志物传感器研究进展[J]. 生物化工, 2024, 10(3):226–228.
- FAN Binghua, ZHANG Jianjun, LIU Yue, et al. Recent developments in ZIF-8 for biomarker biosensor[J]. Biological Chemical Engineering, 2024, 10(3):226–228.
- [13] 刘艳荣, 张香平. 多学科交叉视角下的离子液体: 能源、环境与材料的协同创新[J]. 科学通报, 2025, 70(26):4 430–4 431.
- LIU Yanrong, ZHANG Xiangping. Ionic liquids from a multidisciplinary perspective: Collaborative innovation in energy, environment, and materials[J]. Chinese Science Bulletin, 2025, 70(26): 4 430–4 431.
- [14] 田银彩, 刘桂宙. 离子液体增容 PP/PA6 共混物[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(12):145–149.
- TIAN Yincui, LIU Guizhou. Compatibilization of PP/PA6 blends with ionic liquids[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(12):145–149.
- [15] 丁志琴. 咪唑六氟磷酸盐作为银镀层电接触润滑剂的润滑性与腐蚀性[D]. 西安: 西北大学, 2020.
- DING Zhiqin. Lubricity and corrosion of imidazolium hexafluorophosphate as a lubricant for silver coatings in electrical contacts [D]. Xi'an: Northwest University, 2020.
- [16] 于洁. 有机助剂对 3-甲基-1-丁基咪唑六氟磷酸盐中噻吩电聚合的影响研究[D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2020.
- YU Jie. Study on the effect of organic additives on the electro polymerization of thiophene in 3-methyl-1-butylimidazolium hexafluorophosphate[D]. Shenyang: Shenyang Normal University, 2020.

上接第 26 页

- [21] VYAZOVKIN S. Kissinger method in kinetics of materials: Things to beware and be aware of[J]. Molecules, 2020, 25(12). DOI:10.3390/molecules25122813.
- [22] VYAZOVKIN S. Activation energies and temperature dependencies of the rates of crystallization and melting of polymers[J]. Polymers, 2020, 12(5). DOI:10.3390/polym12051070.
- [23] FRIEDMAN H L. Kinetics of thermal degradation of char-forming plastics from thermogravimetry. Application to a phenolic plastic[J]. Journal of Polymer Science Part C: Polymer Symposia, 1964, 6(1):183–195.
- [24] VYAZOVKIN S. Modification of the integral isoconversional method to account for variation in the activation energy[J]. Journal of Computational Chemistry, 2001, 22(2):178–183.
- [25] FERREIRA C I, DAL CASTEL C, OVIEDO M A S, et al. Isothermal and non-isothermal crystallization kinetics of polypropylene/exfoliated graphite nanocomposites[J]. Thermochimica Acta, 2013, 553:40–48.
- [26] BOUKETTAYA S, AL SEDDIQUE W, ALAWAR A, et al. Cooling rate effects on the crystallization kinetics of polypropylene/date palm fiber composite materials[J]. Science and Engineering of Composite Materials, 2016, 23(5):523–533.
- [27] LI M, LI G, ZHANG Z S, et al. Enhanced β -crystallization in polypropylene random copolymer with a supported β -nucleating agent[J]. Thermochimica Acta, 2014, 598:36–44.
- [28] WANG J Y, JIA H B, TANG Y Y, et al. Thermal stability and non-isothermal crystallization kinetics of metallocene poly (ethylene-butene-hexene)/high fluid polypropylene copolymer blends[J]. Thermochimica Acta, 2017, 647:55–61.