



PAN/ZIF-8 纳米复合材料的制备及其吸附性能研究

马 腾^{1a}, 岑柳莎², 姚 媛^{1b}, 桂昊初^{1a}, 刘国金^{1a}, 雷彩虹^{1a}, 朱海霖^{1a}

(1. 浙江理工大学, a. 纺织科学与工程学院; b. 图书馆, 杭州 310018; 2. 浙江省现代纺织技术创新中心, 绍兴 312000)

摘 要: 为高效处理高盐印染废水, 同时规避二次污染风险, 以静电纺丝法制备的聚丙烯腈(PAN)纳米纤维为基底, 经 NaOH 碱性水解在纤维表面引入羧基官能团, 再通过原位生长法负载沸石咪唑酯骨架-8(ZIF-8)晶体, 构建 PAN/ZIF-8 纳米复合材料; 系统探究前驱体 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 浓度对 PAN/ZIF-8 纳米复合材料形貌、力学性能及有机染料吸附性能的影响规律。结果表明: 当 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 浓度为 100 mmol/L 时, PAN/ZIF-8 纳米复合材料的杨氏模量和韧度分别达到 227.00 MPa、3.12 MJ/m³, 力学性能优异; PAN/ZIF-8 纳米复合材料对甲基蓝、罗丹明 B 等多种有机染料均表现出优良的吸附效果, 其中对甲基蓝的吸附效率高达 98.3%, 吸附容量达 673.0 mg/g; 在模拟高盐水体及实际印染废水体系中, 该复合材料的吸附效率均维持在 92.0% 以上。PAN/ZIF-8 纳米复合材料的吸附过程以化学吸附为主, 物理吸附为辅, 实现了对甲基蓝的高效靶向去除。该研究可为新型 MOFs 基柔性吸附材料的制备及其在复杂高盐废水体系中的实际应用提供技术支撑。

关键词: 聚丙烯腈; 原位生长; 沸石咪唑酯骨架-8; 纳米纤维; 吸附; 印染废水; 染料

中图分类号: TS171

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2026) 09-0616-13

引文格式: 马腾, 岑柳莎, 姚媛, 等. PAN/ZIF-8 纳米复合材料的制备及其吸附性能研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2026, 55(5): 616-628.

Reference Format: MA Teng, CEN Liusha, YAO Yuan, et al. Fabrication and adsorption properties of PAN/ZIF-8 nanofiber composites[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2026, 55(5): 616-628.

Fabrication and adsorption properties of PAN/ZIF-8 nanofiber composites

MA Teng^{1a}, CEN Liusha², YAO Yuan^{1b}, GUI Haoren^{1a}, LIU Guojin^{1a}, LEI Caihong^{1a}, ZHU Hailin^{1a}

(1a. College of Textile Science and Engineering; 1b. Library, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Zhejiang Provincial Innovation Center of Advanced Textile Technology, Shaoxing 312000, China)

Abstract: To efficiently treat high-salinity printing and dyeing wastewater while avoiding secondary pollution, polyacrylonitrile (PAN) nanofibers prepared by electrospinning were used as the substrate. Carboxyl groups were introduced onto the fiber surfaces through NaOH alkaline hydrolysis, followed by the construction of PAN/ZIF-8 nanocomposites via the *in situ* growth of zeolitic imidazolate framework-8 (ZIF-8) crystals. The effects of precursor $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ concentration on the morphology, mechanical properties, and organic dye adsorption performance of the PAN/ZIF-8 nanocomposites were systematically investigated. The results showed that when the $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ concentration was 100 mmol/L, the Young's modulus and toughness of the PAN/ZIF-8 nanocomposites reached 227.00 MPa and 3.12 MJ/m³, respectively, demonstrating excellent mechanical properties. The PAN/ZIF-8 nanocomposites exhibited outstanding adsorption effects on various organic dyes such as methyl blue and rhodamine B, with the

收稿日期: 2026-01-14 网络出版日期: 2026-05-08

基金项目: 中央财政引导地方科技发展资金(2024ZY01039)

作者简介: 马 腾(2002—), 男, 安徽宿州人, 硕士研究生, 主要从事有机废水处理方面的研究。

通信作者: 朱海霖, E-mail: zh hailin@163.com

adsorption efficiency for methyl blue reaching 98.3% and the adsorption capacity reaching 673.0 mg/g. In simulated high-salinity water and actual printing and dyeing wastewater systems, the adsorption efficiency remained above 92.0%. The adsorption process of PAN/ZIF-8 nanocomposites was dominated by chemisorption, synergized with physical interactions, achieving efficient and targeted removal of methyl blue. This study provides technical support for the preparation of novel MOFs-based flexible adsorbent materials and their practical application in complex high-salinity wastewater systems.

Key words: polyacrylonitrile; *in situ* growth; zeolitic imidazolate framework-8; nanofiber; adsorption; dyeing wastewater; dye

0 引言

印染行业是纺织工业的重要组成部分,其生产废水具有污染物成分复杂、含盐量高且生物降解困难等典型特征。印染废水中的人工合成有机染料具有一定生物毒性,易在水体中累积,若处理不当,不仅会破坏水体生态平衡,还会通过食物链传递危害人类健康^[1]。吸附法因操作简便、处理高效等优势,被广泛应用于印染废水处理,但常规吸附材料(如活性炭、石墨烯等)普遍存在吸附容量有限、高盐体系适应性差、再生性能不佳等局限,难以满足高盐印染废水深度处理的需求,因此开发兼具高吸附容量、强环境耐受性及优异循环稳定性的新型吸附材料,是当前环境工程领域的研究热点^[2-3]。

在众多吸附材料中,沸石咪唑酯骨架-8(Zeolitic imidazolate framework-8, ZIF-8)因具备高比表面积、可调控的孔道结构及出色的化学稳定性,在染料吸附分离领域展现出巨大的应用潜力^[4-5]。然而,单一 ZIF-8 粉末在水处理时易团聚,影响吸附效果,且与水体分离困难,导致回收成本较高^[6]。将 ZIF-8 与纳米纤维复合,可通过纳米纤维的三维多孔结构抑制 ZIF-8 颗粒团聚,并提升复合材料的力学性能与分离便利性,实现吸附性能、力学性能及可持续性能的优势互补。其中,聚丙烯腈(Polyacrylonitrile, PAN)纳米纤维因性价比高、力学稳定性优良、易进行功能化改性等特点,常被用作功能复合材料的理想基底^[7-8]。值得注意的是,ZIF-8 与 PAN 纳米纤维的复合工艺对复合材料性能至关重要,原位生长法能促使 ZIF-8 晶体在纤维表面牢固、均匀成核,有效避免传统物理共混法中颗粒易脱落和团聚的缺陷,是 ZIF-8 负载的优选方案。Lou 等^[9]以环保且低成本的壳聚糖多糖(CP)为基材,通过原位生长法将 ZIF-8 负载于其上,构建了易于分离的 ZIF-8/CP 复合材料,并将其应用于去除水中的孔雀石绿(MG),展现出较高的吸附能力。涂燕红等^[10]以水葫芦为原料,采用原位生长法成功制备了 ZIF-8/生

物炭(ZIF-8/BC)复合材料,该材料在罗丹明 B 染料去除过程中展现出优异性能,有效解决常规复合方法中 ZIF-8 颗粒与载体结合松散等问题。然而,目前关于 ZIF-8 纤维复合材料在成分复杂、离子强度高的高盐印染废水体系中的吸附性能与稳定性能研究仍相对不足。

本文采用静电纺丝法制备 PAN 纳米纤维,并通过 NaOH 水解对其进行羧酸化改性处理;以 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 和 2-MI 作为原料,甲醇作为溶剂,采用原位生长法在 PAN 纤维表面负载 ZIF-8,通过调控 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 溶液浓度调节成核和生长过程,提高 ZIF-8 层的负载率和复合材料的吸附性能;测定材料对甲基蓝等有机染料的吸附效率和吸附容量,评价其吸附性能,分析 PAN/ZIF-8 的力学性能、高盐水体环境下的吸附性能、循环稳定性以及在实际废水处理中的应用潜力;最后结合吸附热力学和动力学分析,阐明其对甲基蓝的吸附作用机制,以期新型金属有机框架(Metal organic frameworks, MOFs)基柔性吸附材料的制备及其在复杂高盐废水处理中的实际应用提供技术支撑。

1 实验部分

1.1 实验材料

聚丙烯腈(PAN, $M_w = 150000$)、盐酸(HCl, 分析纯)、罗丹明 B(RhB, $M_w = 479.01$)、刚果红(CR, 98%)、无水氯化钙(CaCl_2 , 94%)和氯化钾(KCl, 99.5%)均购自上海麦克林生化科技股份有限公司;N,N-二甲基甲酰胺(DMF, 99.5%)购自杭州高晶精细化工有限公司;六水合硝酸锌($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 分析纯)购自中国上海的国药集团化学试剂有限公司;甲基蓝(MB, $M_w = 799.80$)、2-甲基咪唑(2-MI, 99%)、氢氧化钠(NaOH, 96%)、甲醇(CH_3OH , 分析纯)、无水硫酸钠(Na_2SO_4 , AR, 99%)、硝酸钠(NaNO_3 , AR, 99%)均购自上海阿拉丁试剂有限公司;氯化钠(NaCl, 分析纯, AR)购自

无锡市展望化工试剂有限公司;实验中使用的印染废水由宁波鹰星针纺有限公司提供;去离子水(电导率 18 MΩ·cm)实验室自制。

1.2 实验方法

1.2.1 PAN 纳米纤维的制备

采用静电纺丝法制备 PAN 纳米纤维,具体步骤如下:将 2 g PAN 粉末溶解于 18 g DMF 中,搅拌均匀后得到质量分数为 10% 的纺丝液;在 23 kV 电压条件下进行静电纺丝,设定针尖与接收器间距为 15 cm,纺丝流速为 1.5 mL/h,纺丝持续 4 h,将所得 PAN 取出,置于 60 ℃ 真空烘箱中干燥 8 h,以去除体系中残留的 DMF 溶剂,获得 PAN 纳米纤维基底材料。

1.2.2 PAN/ZIF-8 纳米复合材料的制备

采用碱性水解结合原位生长法构建 PAN/ZIF-8 纳米复合材料,其制备流程如图 1 所示,具体步骤如

下:将 PAN 浸入 1 mol/L NaOH 溶液中,在 60 ℃ 下恒温浸渍 3 h,进行 PAN 表面水解羧酸化改性;PAN 经羧酸化处理后,用去离子水反复冲洗直至表面 pH 值接近 7,将其置于 60 ℃ 真空烘箱中 12 h 至完全干燥,获得水解后的 PAN 纤维,记作 H-PAN。设定 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 溶液与 2-MI 溶液的浓度比为 1:4,将 0.030 g 的 H-PAN 样品在室温下分别浸入 25、50、75、100 mmol/L 和 125 mmol/L 的 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 溶液中浸渍 6 h,并分别转移至对应浓度为 100、200、300、400 mmol/L 和 500 mmol/L 的 2-MI 溶液中浸泡 12 h。制备所得的样品用甲醇洗涤 3 次,以去除残留单体及杂质,获得 PAN/ZIF-8 纳米复合材料,根据所用 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 溶液的浓度,将样品记作 PAN/ZIF-8- n ($n=25, 50, 75, 100, 125$)。

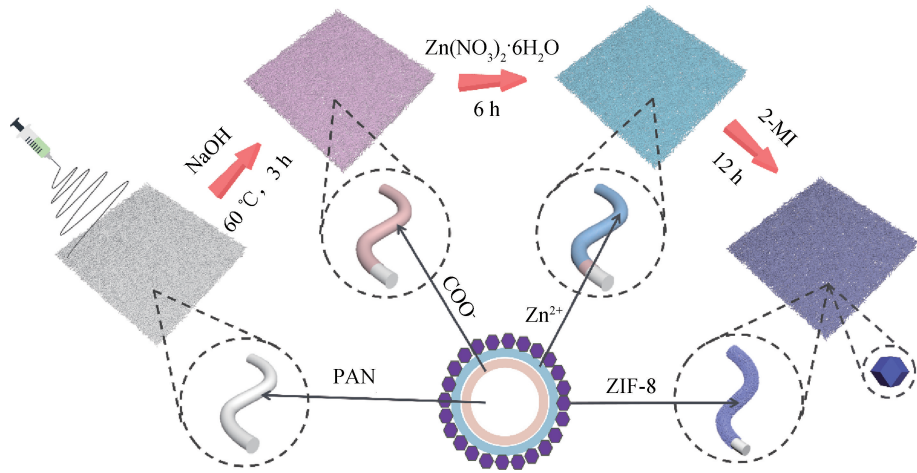


图 1 PAN/ZIF-8 制备流程图

1.3 材料表征

1.3.1 ZIF-8、PAN、H-PAN 和 PAN/ZIF-8- n 的形貌表征

采用 ULTRA55 型场发射扫描电子显微镜 (FESEM, 德国蔡司光学仪器有限公司) 对 ZIF-8、PAN、H-PAN 以及 PAN/ZIF-8- n 系列样品的表面形貌特征进行观察对比。所有测试样品在表征前均进行 Au 溅射涂层处理。

1.3.2 ZIF-8、PAN、H-PAN 以及 PAN/ZIF-8- n 的元素组成表征

采用 ULTRA55 型场发射扫描电子显微镜中配备的能谱仪 (EDS, 德国蔡司光学仪器有限公司), 在 10 kV 测试电压下, 对 ZIF-8、PAN、H-PAN 以及 PAN/ZIF-8- n 系列样品的元素组成及质量分数进行测试分析。

1.3.3 ZIF-8、PAN、H-PAN 以及 PAN/ZIF-8- n 的化学结构表征

采用 Nicolet 5700 型傅里叶红外光谱仪 (FTIR, 德国 Bruker-AXS 公司) 对 ZIF-8、PAN、H-PAN 以及 PAN/ZIF-8- n 系列样品的化学结构进行表征分析。ZIF-8 粉末样品采用溴化钾压片法制样, 采用 FTIR 对其特征官能团进行测试, 设定扫描范围为 4000~500 cm^{-1} 。

1.3.4 ZIF-8、PAN、H-PAN 以及 PAN/ZIF-8- n 的晶体结构表征

采用 D8 Discovery 型 X 射线衍射仪 (XRD, 德国 Bruker-AXS 公司) 对 ZIF-8、PAN、H-PAN 以及 PAN/ZIF-8- n 系列样品的晶体结构进行测定, 分析各样品衍射峰的特征变化。测试参数设定如下: 衍射角 (2θ) 范围为 5°~40°, 扫描速度为 5 (°)/min, 扫

描电压为 40 kV, 电流为 40 mA。

1.4 性能测试

1.4.1 PAN 和 PAN/ZIF-8-*n* 的力学性能测试

采用 YS-9009B 型电子万能材料试验机(西安研硕仪器设备有限公司), 通过条样法对 PAN 和 PAN/ZIF-8-*n* 系列样品的力学性能进行测试, 依据等速伸长(CRE)原理测定样品的断裂伸长率和拉伸强度。测试前, 将样品裁剪成长为 40 mm、宽为 10 mm 的条状试样, 设定试验机夹具间隙为 2 cm, 拉伸速率为 50 mm/min。为降低实验误差, 每种样品均平行测试 5 次, 取其平均值作为最终的力学性能数据。

1.4.2 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 溶液浓度对吸附性能的影响测试

采用 Cary-60 紫外-可见分光光度计(美国 Agilent 公司)测量其吸光度, 配制不同质量浓度梯度的甲基蓝溶液, 通过拟合标准曲线确定吸光度与溶液浓度的线性关系, 再将样品测试所得吸光度值代入标准曲线, 计算得到对应溶液浓度。测试在 20 °C、pH 值为 7 的条件下进行, 取 0.030 g PAN/ZIF-8-*n* 系列样品, 分别浸入 50 mL 质量浓度 100 mg/L 和 50 mL 质量浓度 500 mg/L 的甲基蓝溶液中, 吸附初期于 5、10、20 min 和 30 min 时各取样 3 mL, 30 min 后每隔 10 min 取样 3 mL, 直至体系达到吸附平衡。然后使用式(1)—(2)计算吸附效率和吸附容量:

$$\eta/\% = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

$$Q_t = \frac{C_0 - C_t}{m} \times V \quad (2)$$

其中: V 为溶液的体积, mL; C_0 为溶液初始质量浓度, mg/L; C_t 为吸附时间为 t 时溶液的质量浓度, mg/L; η 为吸附效率, %; Q_t 为吸附时间为 t 时的吸附容量, mg/g; m 为吸附测试中使用样品的质量, mg。

1.4.3 不同染料对吸附性能的影响测试

测试在 20 °C、pH 值为 7 的条件下进行, 取 0.030 g PAN/ZIF-8 样品分别置于 50 mL 质量浓度 100 mg/L 的甲基蓝、罗丹明 B、刚果红三种有机染料溶液中。吸附初期于 5、10、20 min 和 30 min 时各取样 3 mL, 30 min 后每隔 10 min 取样 3 mL, 直至体系达到吸附平衡; 将所取样品溶液采用紫外-可见分光光度计测定吸光度, 结合标准曲线计算溶液浓度, 求得样品对 3 种染料的吸附效率与吸附容量。

1.4.4 溶液初始质量浓度对吸附性能的影响测试

测试在 20 °C、pH 值为 7 的条件下进行, 取 0.030 g PAN/ZIF-8 样品分别置于 50 mL 质量浓度为 100、200、300、400 mg/L 和 500 mg/L 的甲基蓝溶液中, 吸附初期于 5、10、20 min 和 30 min 时各取样 3 mL, 30 min 后每隔 10 min 取样 3 mL, 直至体系达到吸附平衡; 对所取样品溶液测定吸光度, 结合标准曲线计算溶液浓度, 计算样品的吸附效率与吸附容量。

1.4.5 溶液 pH 值对吸附性能的影响测试

吸附实验在 20 °C 的条件下进行, 取 50 mL 质量浓度 100 mg/L 的甲基蓝溶液置于烧杯中, 采用 100 mmol/L 的 HCl 和 NaOH 溶液调节染液 pH 值, 分别控制为 3、5、7、9 和 11。随后取 0.030 g PAN/ZIF-8 样品, 分别放入上述不同 pH 值的甲基蓝溶液中进行吸附实验。待吸附过程达到平衡以后, 取 3 mL 溶液测定吸光度, 结合标准曲线计算溶液浓度, 计算样品的吸附效率与吸附容量。

1.4.6 溶液温度对吸附性能的影响测试

取 50 mL 质量浓度为 400 mg/L、pH 值为 7 的甲基蓝溶液置于不同烧杯中, 将装有染液的烧杯分别置于设定温度(15、25、35 °C 和 45 °C)的恒温水浴锅中进行吸附实验。随后取 0.030 g PAN/ZIF-8 样品, 分别放入上述不同温度的甲基蓝溶液中进行吸附实验。待吸附过程达到平衡以后, 取 3 mL 溶液测定吸光度, 结合标准曲线计算溶液浓度, 计算样品的吸附效率与吸附容量。

1.4.7 不同盐离子环境对吸附性能的影响测试

吸附测试在 20 °C、pH 值为 7 的条件下进行, 选取印染废水中 3 种常见阳离子(Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+})和 3 种常见阴离子(Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-}), 开展不同离子干扰下吸附性能影响的测试。探讨阳离子干扰时, 分别将 0.127 g NaCl、0.139 g CaCl_2 、0.095 g KCl 与 50 mL 质量浓度 100 mg/L 的甲基蓝溶液混合搅拌至完全溶解; 探讨阴离子干扰时, 分别将 0.165 g NaCl、0.137 g NaNO_3 、0.148 g Na_2SO_4 与 50 mL 质量浓度 100 mg/L 的甲基蓝溶液混合搅拌至完全溶解, 阳离子浓度控制为 500 mg/L, 阴离子浓度控制为 1000 mg/L。同时, 探究 0.030 g PAN/ZIF-8 样品在印染废水配制的 50 mL 质量浓度 100 mg/L 甲基蓝溶液中的吸附性能。上述所有吸附实验待达到吸附平衡后, 各取 3 mL 溶液测定吸光度, 结合标准曲线计算溶液浓度, 计算样品的吸附效率与吸附容量。

1. 4. 8 循环次数对吸附性能的影响测试

循环吸附性能测试在 20 ℃, pH 值为 7 的条件下进行, 配制 50 mL 质量浓度 100 mg/L 的甲基蓝溶液, 取 0.030 g PAN/ZIF-8 样品放入溶液中开展循环吸附实验, 待单次吸附过程达到平衡以后, 取 3 mL 溶液测定吸光度, 计算吸附效率与吸附容量, 单次吸附完成后, 将样品放入乙醇溶液中超声震荡解吸处理, 上述吸附-解吸过程依次重复 5 次, 考察 PAN/ZIF-8 样品的循环使用性能。

1. 4. 9 吸附热力学测试

为了进一步明确吸附反应类型、揭示吸附机理, 对 PAN/ZIF-8 吸附热力学特性进行探究。选取 15 ℃ (288 K)、25 ℃ (298 K)、35 ℃ (308 K) 和 45 ℃ (318 K) 等 4 个温度, 开展吸附热力学实验。根据吉布斯自由能公式(式(3)), 结合式(4)–(5), 计算吸附热力学函数相关参数^[11]:

$$\Delta G^\theta = \Delta H^\theta - T\Delta S^\theta \tag{3}$$

$$\ln K_d = \frac{\Delta S^\theta}{R} - \frac{\Delta H^\theta}{RT} \tag{4}$$

$$K_d = \frac{Q_e}{C_e} \tag{5}$$

其中: K_d 为吸附热力学平衡常数; ΔS^θ 为熵变, J/(K·mol); ΔH^θ 为焓变, kJ/mol; ΔG^θ 为吉布斯自由能变, kJ/mol; R 为气体摩尔常数, 8.314 J/(K·mol); Q_e 为吸附平衡时的吸附容量, mg/g; C_e 为吸附平衡时溶液的质量浓度, mg/L; T 为温度, K。

1. 4. 10 吸附动力学测试

为进一步探究 PAN/ZIF-8 对甲基蓝的吸附机理, 在 20 ℃、pH 值为 7 且甲基蓝溶液质量浓度为 100 mg/L 的条件下, 采用准一级动力学模型和准二级动力学模型对吸附动力学数据进行拟合分析, 明确吸附过程的动力学特征及速率控制步骤。准一级动力学模型和准二级动力学模型可用式(6)和式(7)表示:

$$\ln(Q_e - Q_t) = \ln Q_e - k_1 t \tag{6}$$

$$\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{k_2 Q_e^2} + \frac{t}{Q_e} \tag{7}$$

其中: t 为吸附时间, min; k_1 为一级动力学模型方程中的速率常数, min⁻¹; k_2 为二级动力学模型方程中的速率常数, g/(mg·min)。

2 结果与讨论

2. 1 ZIF-8、PAN、H-PAN 以及 PAN/ZIF-8-*n* 的形貌与元素组成分析

图 2(a) 为 ZIF-8 的 FESEM 图像, 其形貌呈近

似各向同性的六边形, 这是典型的正十二面体结构^[12], 该六边形表面光滑, 边缘清晰, 可观察到层状结构。图 2(b)–(c) 对比了碱性水解前后 PAN 的形貌, 从图中可以看出: 水解前纤维尺寸均匀, 表面局部存在的鳞片状结构主要归因于纺丝过程中溶剂的快速挥发; 水解处理后, 纤维主体形态未发生明显改变, 维持了良好的结构稳定性。图 2(d)–(h) 展示了不同 Zn(NO₃)₂·6H₂O 溶液浓度下 PAN/ZIF-8 复合材料的微观形貌演变, 从图中可以看出: 当 Zn(NO₃)₂·6H₂O 溶液浓度较低 (25、50 mmol/L) 时, 因纤维表面吸附的 Zn²⁺ 含量不足, ZIF-8 的成核与生长动力学受到抑制, 导致晶体负载量低且尺寸偏小; 随着 Zn(NO₃)₂·6H₂O 溶液浓度逐渐升高, ZIF-8 的负载量显著增加; 当溶液浓度达到 100 mmol/L 时, 原位生长效果达到最佳, ZIF-8 晶体在纤维表面分布均匀, 且呈现规整的正十二面体形貌; 当浓度升至 125 mmol/L 时, 过高的 Zn(NO₃)₂·6H₂O 溶液浓度导致 ZIF-8 颗粒在纤维表面发生严重团聚, 形成大尺寸团块, 这种现象堵塞了纤维间的孔隙, 降低了材料的有效比表面积, 对后续的吸附性能产生不利影响。

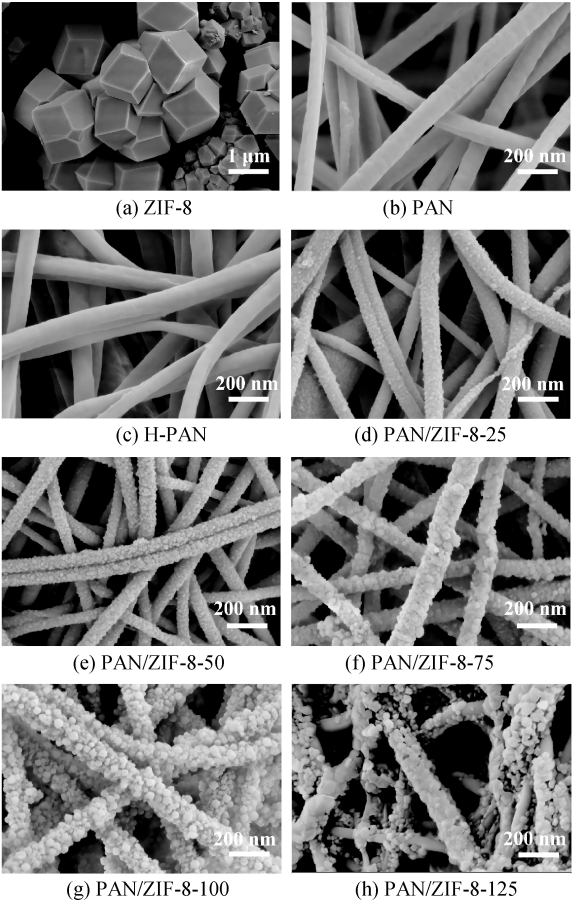


图 2 ZIF-8、PAN、H-PAN 和 PAN/ZIF-8-*n* 的 FESEM 图像

表 1 的元素定量分析结果进一步验证了原位生长过程。PAN 表面主要由 C、N 元素构成,水解后的 H-PAN 表面 O 元素占比有所增加,证实了羧基基团的成功引入。在 PAN/ZIF-8 表面检测到的 Zn 元素,为 ZIF-8 的成功负载提供了直接证据,且 Zn 元素的质量分数随 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 浓度的升高而呈正相关增长。

表 1 PAN、H-PAN、ZIF-8 和 PAN/ZIF-8- <i>n</i> 的元素含量 %				
样品	C	N	O	Zn
PAN	73.32	21.18	5.50	
H-PAN	74.31	18.33	7.36	
ZIF-8	41.28	23.85	4.25	30.61
PAN/ZIF-8-25	68.59	19.43	6.41	5.57
PAN/ZIF-8-50	67.93	18.62	6.42	7.03
PAN/ZIF-8-75	65.58	19.33	6.22	8.87
PAN/ZIF-8-100	62.97	20.07	6.00	10.96
PAN/ZIF-8-125	62.11	20.53	5.66	11.70

2.2 ZIF-8、PAN、H-PAN 以及 PAN/ZIF-8-*n* 的结构分析

图 3 为各样品 FTIR 与 XRD 的分析结果。由图 3(a) — (b) 可以看出: PAN 光谱中 2242 cm^{-1} 处的峰值对应 $\text{C}\equiv\text{N}$ 伸缩振动^[13-15], 是 PAN 的主要特征吸收峰, PAN/ZIF-8-*n* 样品在 1142 和 995 cm^{-1} 处的特征吸收峰对应 C—N 键的伸缩振动, 700 cm^{-1} 处的额外吸收峰归因于 C—H 和 N—H 的面外振动峰, 上述特征信号均与 ZIF-8 的咪唑环的特征吸收峰对应; 位于 428 cm^{-1} 处的吸收峰归因于 Zn—N 伸缩振动峰, 证明 ZIF-8 颗粒成功负载到 PAN 纤维上^[16-17], 且随着 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 溶液浓度增加, 428 cm^{-1} 处的吸收峰强度逐渐增强。

从图 3(c) — (d) 的 XRD 可以看出: PAN/ZIF-8-*n* 不同样品在 2θ 值为 7.3° 、 10.3° 、 12.7° 、 14.6° 、 16.4° 和 18.0° 处呈现清晰特征峰, 分别对应 ZIF-8 晶体的 (011)、(002)、(112)、(022)、(013) 晶面和 (222) 晶面^[18], 证实 ZIF-8 晶体已在 PAN 纳米纤维上成功生长。

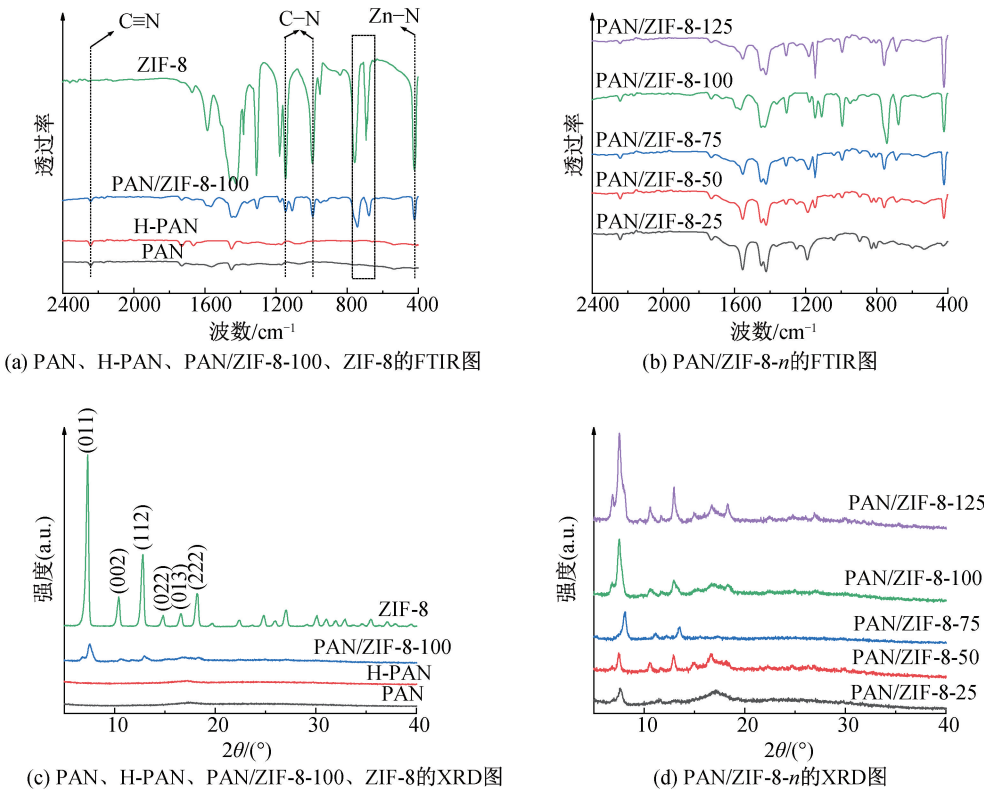


图 3 ZIF-8、PAN、H-PAN 和 PAN/ZIF-8-*n* 的 FTIR 和 XRD 图

2.3 PAN 和 PAN/ZIF-8-*n* 的力学性能分析

材料的宏观力学稳定性是评估其实际应用潜力的重要指标。图 4(a) 为 PAN 和 PAN/ZIF-8-*n* 的应力-应变曲线, 从图中可以看出: 纯 PAN 的拉伸强度仅 3.50 MPa , PAN/ZIF-8-100 的拉伸强度提升

至 7.94 MPa , 表明 ZIF-8 的原位生长提升了材料的抗拉性能, 这种力学强度的增强主要归因于 ZIF-8 刚性纳米颗粒在纤维网络中的物理交联与填充效应, 有效传递并分散了外部应力; 当负载量过高时 (如 125 mmol/L), 颗粒的严重团聚会导致局部应

力集中,易引发纤维脆性断裂。从图 4(b)的杨氏模量和韧度曲线图可以看出: PAN/ZIF-8-100 的杨氏模量和韧度分别达到了 227.00 MPa 和 3.12 MJ/

m³。图 4(c)的承重测试显示,宽度仅为 1 cm 的样品即可稳定承载 200 g 砝码,证明其具备满足实际水处理工程环境所需的机械强度。

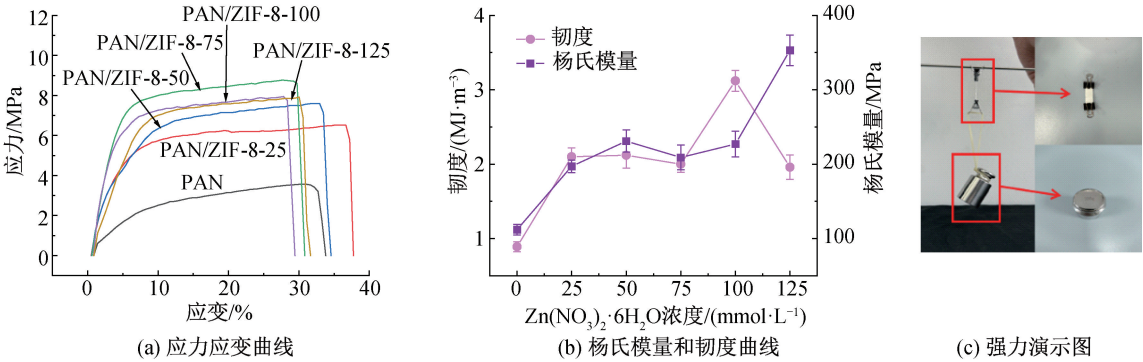


图 4 PAN 和 PAN/ZIF-8-*n* 的力学性能图

2.4 PAN/ZIF-8 的吸附性能分析

2.4.1 Zn(NO₃)₂·6H₂O 溶液浓度对吸附性能的影响分析

在较低质量浓度(100 mg/L)的甲基蓝溶液中,各复合材料组均表现出接近 100.0%的吸附效率,未能充分体现出材料吸附容量的上限差异(见图 5(a)—(b))。因此,进一步引入高质量浓度(500 mg/L)甲基蓝溶液进行深度评估,结果如图 5(c)—(d)所示,从图中可以看出:随着 Zn(NO₃)₂·6H₂O

溶液浓度的增大,材料的吸附效率与饱和吸附容量呈上升趋势;当 Zn(NO₃)₂·6H₂O 溶液浓度达到 100 mmol/L 时,PAN/ZIF-8-100 在 500 mg/L 甲基蓝体系中的吸附效率仍保持在 80.8%,对应吸附容量达到 673.0 mg/g;当 Zn(NO₃)₂·6H₂O 溶液浓度进一步升至 125 mmol/L 时,吸附效能开始出现衰退,这主要归因于过量 ZIF-8 晶体的团聚效应削减了暴露的有效吸附位点。基于综合性能考量,后续研究均优选 PAN/ZIF-8-100 作为目标吸附材料。

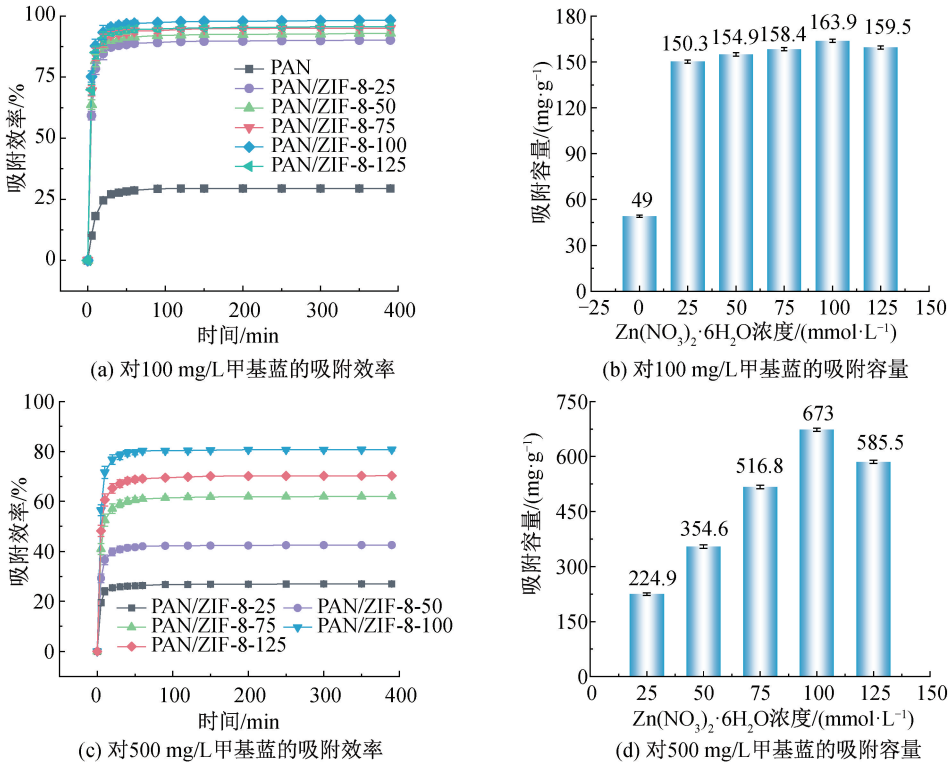


图 5 PAN 和 PAN/ZIF-8-*n* 对甲基蓝的吸附性能图

2.4.2 染料种类对吸附性能的影响分析

为评估材料的广谱性与选择性,分别考察了其

对三苯甲烷类(甲基蓝)、氧杂蒽类(罗丹明 B)和双偶氮类(刚果红)染料的吸附效能,结果如图 6 所示。

从图中可以看出:达到吸附平衡时,PAN/ZIF-8-100 对 3 种染料的吸附效率差异显著,分别为 98.3%、38.1%和 9.9%。这种特异性的吸附选择行为由染料的分子构型与静电属性共同决定,甲基蓝与刚果红同属阴离子染料,但刚果红(双偶氮结构)分子链较长且骨架呈现高度刚性,由此产生的空间位阻效应阻碍了其 ZIF-8 表面微孔及缺陷位点的有效接触^[19]。甲基蓝分子结构中带有负电荷的磺酸基

($-\text{SO}_3^-$)不仅能与 ZIF-8 表面的正电位点(Zn^{2+})产生静电吸引,还能形成牢固的配位键^[20]。对于阳离子染料罗丹明 B 而言,尽管与 ZIF-8 之间存在同种电荷排斥,但分子间的 π - π 堆积与路易斯酸碱作用部分克服了一些静电排斥的阻力,因此仍表现出一定的吸附容量^[21]。鉴于该复合材料对甲基蓝展现出优异的吸附选择性,本文选取甲基蓝作为目标污染物开展后续探究。

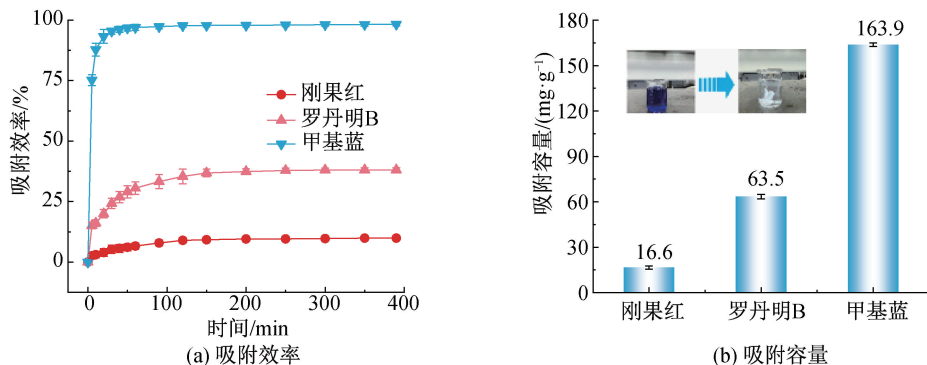


图 6 PAN/ZIF-8-100 对不同染料的吸附性能图

2.4.3 染料初始质量浓度对吸附性能的影响分析

PAN/ZIF-8-100 对不同初始质量浓度的甲基蓝溶液的吸附效率与吸附容量如图 7 所示。从图中可以看出:当甲基蓝溶液的初始质量浓度为 100 mg/L 时,其吸附效率达到 98.3%;当溶液初始质量浓度增加至 500 mg/L,受限于活性吸附位点的饱和,最终吸附效率降至 80.8%。吸附容量整体呈上升趋势,随着溶液初始质量浓度进一步升高,增速逐渐放缓,这表明材料表面的活性吸附位点

已被大量占据并趋于饱和;吸附效率随质量浓度的升高而降低,该现象归因于污染物分子数量增长快于可用吸附位点数,单位体积溶液中剩余浓度占比升高。从吸附容量角度,随着染料初始质量浓度的提升,PAN/ZIF-8-100 对应的容量大幅提升,最高可达 673.0 mg/g,该数值约为 100 mg/L 浓度下材料吸附容量的 4 倍,证实了 PAN/ZIF-8-100 复合材料在高质量浓度有机染料废水处理领域的优势。

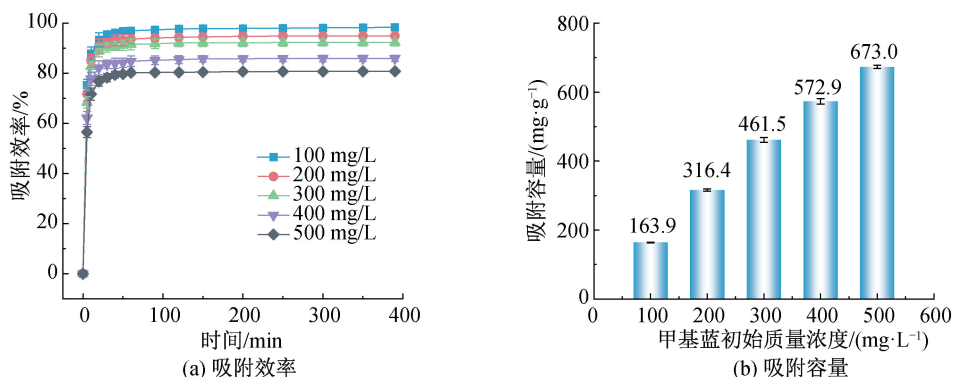


图 7 PAN/ZIF-8-100 对不同初始质量浓度甲基蓝的吸附性能图

表 2 为常规吸附材料与 PAN/ZIF-8-100 对甲基蓝吸附性能表现的对比,这说明 PAN/ZIF-8-100 对甲基蓝的吸附容量具有较大的优势。

2.4.4 溶液 pH 值及温度对吸附性能的影响分析

溶液 pH 值对 PAN/ZIF-8-100 吸附甲基蓝性能的影响如图 8(a)所示,从图中可以看出:随着 pH

值从 2 升高至 12,复合材料的吸附容量和吸附效率呈现先上升后下降的趋势。当 pH 值为 7 时,吸附性能达到最佳,吸附效率为 98.3%,吸附容量为 163.9 mg/g。在强酸性环境(pH 值为 3)下,吸附容量仅为 89.3 mg/g;其原因在于:一方面,体系中高浓度的 H^+ 会引发染料分子磺酸基团的质子化,削

弱了吸附剂与染料间的静电吸引力;另一方面,过低的 pH 值会直接攻击 ZIF-8 的配位键,导致局部晶体结构的坍塌与活性位点的不可逆丧失。而在强碱环境(pH 值为 11)中,吸附容量下降至 46.6 mg/g;上述现象归因于吸附剂表面官能团的去质子化,导致表面负电荷密度增加,静电排斥作用增强。此外,体系中大量游离的 OH⁻ 与阴离子染料分子在活性吸附位点上产生了竞争吸附^[25]。

为明确反映温度变量对吸附过程的影响,实验在初始质量浓度为 400 mg/L 的甲基蓝溶液中进行,结果如图 8(b)所示。从图 8(b)中可以看出:体系温度从 15 ℃升高至 45 ℃时,复合材料的吸附效率由 83.8%增至 96.2%,对应的吸附容量从 558.5 mg/g 提升至 640.7 mg/g。这种吸附性能随温度升高而增长的趋势,表明该吸附体系本质上是吸热过

程。复合材料对甲基蓝的捕获不仅包含静电吸引、氢键及 π - π 相互作用等非共价物理结合,还涉及 ZIF-8 表面位点与染料分子间的配位作用^[27]。由于化学键合的形成通常需要克服活化能,温度的提升能够为甲基蓝分子提供热动力学能量,从而在宏观上表现为吸附容量的提升。

表 2 不同吸附剂对甲基蓝的吸附容量		
吸附剂类型	吸附容量/(mg·g ⁻¹)	参考文献
石墨氧化物	170.1	[22]
物理混纺 PAN/ZIF-8	224.4	[23]
活性炭	250.0	[24]
HPP-NH ₃ ⁺	406.0	[25]
PVI-TFS	476.0	[26]
ZIF-8/NH ₂	537.4	[1]
原位生长 PAN/ZIF-8	673.0	本文

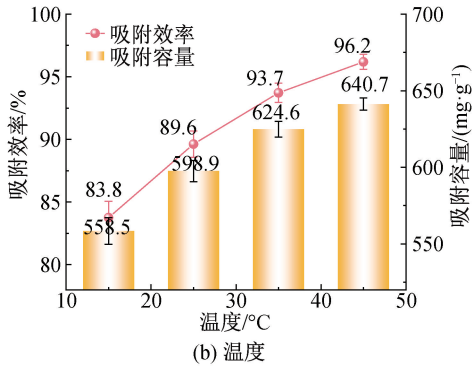
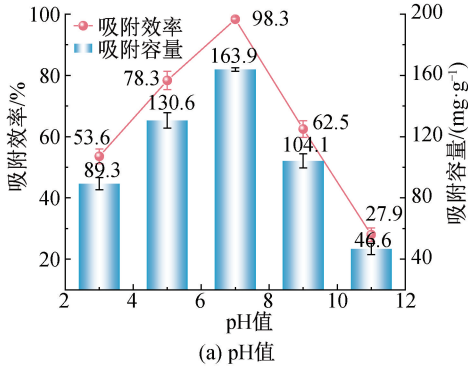


图 8 PAN/ZIF-8-100 在不同 pH 值及不同温度下对甲基蓝的吸附性能图

2.4.5 不同盐离子环境对吸附性能的影响分析

为验证该复合材料在实际工业化场景中的抗干扰能力,考察了共存无机离子对其吸附行为的影响,结果如图 9 所示。从图中可以看出:在各类高浓度背景盐离子(Na⁺、K⁺、Ca²⁺ 及 Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻) 共存体系下,材料对甲基蓝的吸附效率均稳定保持在 92%以上,在成分更为复杂的印染废水测试中,吸附效率达到 93.5%。通常高离子强度会引发较

为严重的静电屏蔽效应,削弱吸附剂与目标污染物间的静电引力。然而,PAN/ZIF-8-100 的吸附效能几乎未受影响,这表明尽管静电作用是吸附的驱动力之一,但体系中主导的相互作用(配位键)受盐度波动的影响较小^[28]。同时,ZIF-8 刚性的金属有机骨架在高盐环境中未发生结构坍塌,确保配位通道的通畅^[29]。该结果证实了 PAN/ZIF-8-100 在高盐废水深度净化领域具有工程应用价值。

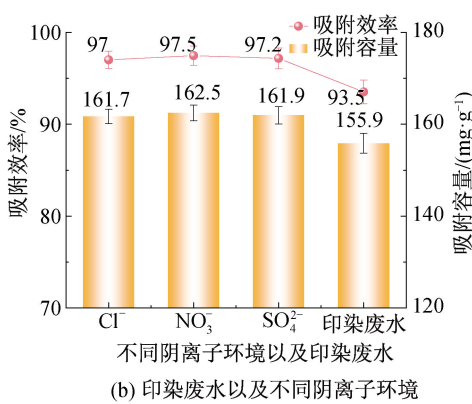
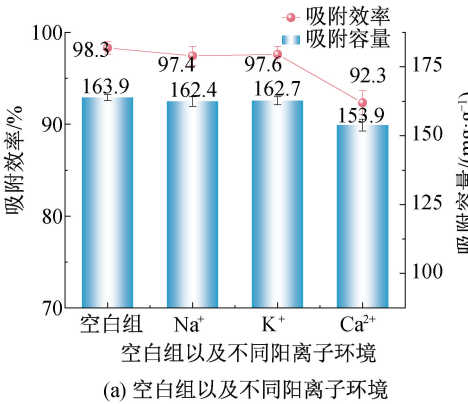


图 9 PAN/ZIF-8-100 在不同盐离子环境下对甲基蓝的吸附性能图

2.4.6 循环使用性能分析

材料的可再生性与循环寿命是衡量其经济效益的核心指标,图 10 的脱附-再生循环实验表明:历经 3 次循环后, PAN/ZIF-8-100 的吸附效率维持在 92.0% 以上;完成 5 次循环后,吸附效率仍高于 80.0%。吸附效率随循环次数轻微衰减,主要原因

有两点:一是部分染料分子深入 ZIF-8 微孔内部,发生了不可逆化学配位,常规洗脱剂难以将其彻底剥离,导致有效吸附位点永久性减少;二是高频次的震荡洗脱可能造成材料表面极少量 ZIF-8 颗粒的脱落。总体而言,该复合材料表现出了较为优异的结构稳定性和可重复利用性。

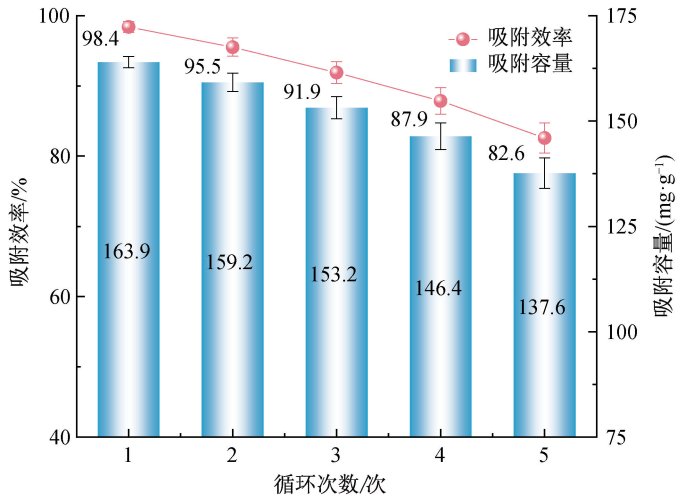


图 10 PAN/ZIF-8-100 对甲基蓝的吸附—解吸循环性能图

2.5 吸附机理分析

2.5.1 吸附热力学

为了深入探究吸附反应的本质与机理,对系统进行了热力学分析,基于不同温度下获取的实验数据,采用式(4)和式(5)进行了拟合与计算。PAN/ZIF-8-100 对甲基蓝的吸附热力学曲线如图 11 所示, ΔH^θ 和 ΔS^θ 值由图中热力学曲线的斜率和截距计算得出,利用吉布斯自由能公式计算出 ΔG^θ , 吸附热力学参数列于表 3。结合图表可知: ΔH^θ 值为正,反映了 PAN/ZIF-8 对甲基蓝吸附过程是一个吸热的过程。当 ΔH^θ 值低于 40.00 kJ/mol 时,物理吸附起主导作用,而当 ΔH^θ 值大于 40.00 kJ/mol 时,吸附过程以化学吸附为主^[30]。在本文中, ΔH^θ 值为 40.98 kJ/mol,这意味着 PAN/ZIF-8-100 对甲基蓝的吸附方式以化学吸附为主。 ΔS^θ 值为正,表明吸附过

程中固/液界面的混乱度增加^[31]。同时 ΔG^θ 值为负数,并且随着温度的升高而降低,表明 PAN/ZIF-8-100 对甲基蓝的吸附是自发的。

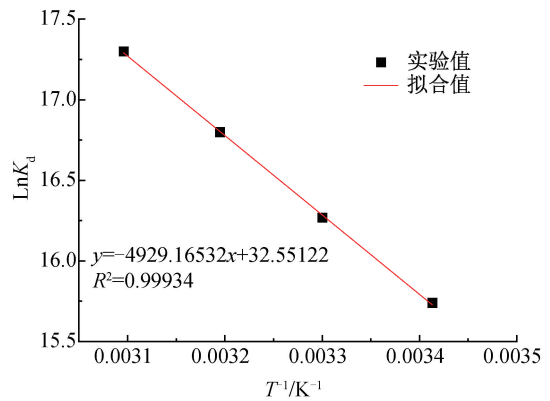


图 11 PAN/ZIF-8-100 吸附甲基蓝的吸附热力学拟合图

表 3 PAN/ZIF-8-100 吸附甲基蓝的吸附热力学参数

$\Delta H^\theta / (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	$\Delta S^\theta / (\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$\Delta G^\theta / (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$			
		288 K	298 K	308 K	318 K
40.98	270.62	-36.96	-39.66	-42.37	-45.08

2.5.2 吸附动力学

为进一步研究吸附过程的主导机理,对 PAN/ZIF-8-100 吸附甲基蓝的动力学进行分析,其动力学拟合图如图 12 所示,结合表 4 中动力学模型的相关性系数 R^2 值,准一级和准二级动力学模型的 R^2 分

别为 0.94339、0.99989,准二级模型拟合程度更高,表明整个吸附过程以化学吸附为主导,协同物理作用。

综合热力学及动力学分析结果, PAN/ZIF-8-100 对甲基蓝的吸附机理如图 13 所示, ZIF-8 表面暴露的 Zn^{2+} 位点与染料的一 SO_3^- 形成配位键^[26],

这是 PAN/ZIF-8-100 对甲基蓝具有高吸附容量的主要原因,在此主导机制下,协同了静电吸引、氢键

及 π - π 堆积等非共价相互作用,共同提升了材料的吸附效能。

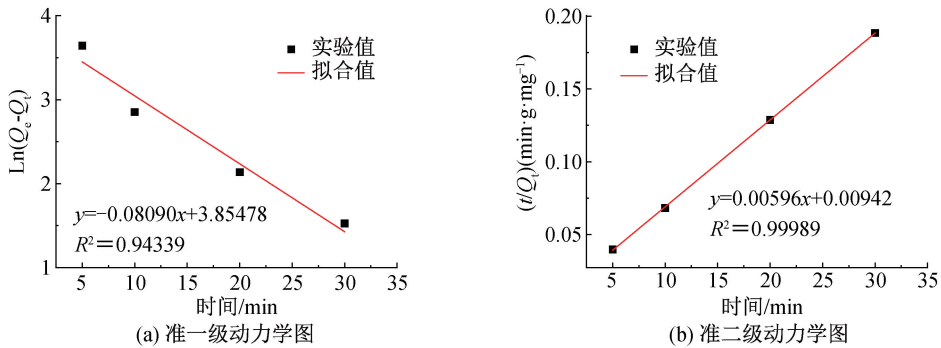


图 12 PAN/ZIF-8-100 吸附甲基蓝的吸附动力学拟合图

表 4 PAN/ZIF-8-100 吸附甲基蓝的准一级动力学模型和准二级动力学模型参数

$Q_e/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	准一级动力学模型参数		准二级动力学模型参数	
	$k_1/(\text{min}^{-1})$	R^2	$k_2/(\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1})$	R^2
163.9	0.08090	0.94339	0.00377	0.99989

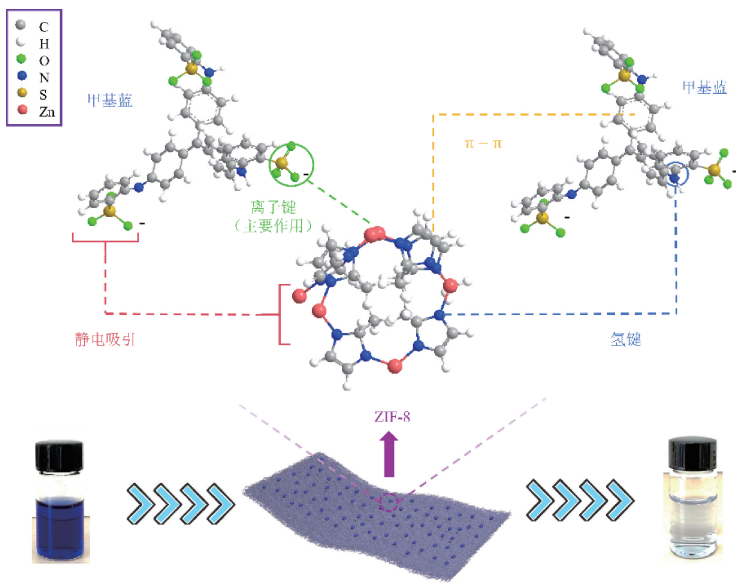


图 13 PAN/ZIF-8-100 吸附甲基蓝的吸附机理图

3 结 论

本文结合静电纺丝与原位生长技术,制备出 PAN/ZIF-8 纳米复合材料,实验系统探讨了 Zn (NO₃)₂ · 6H₂O 溶液浓度对 PAN/ZIF-8 性能的影响,探究了在最佳浓度下制备出的 PAN/ZIF-8 对不同有机染料的吸附效率和吸附容量,并深入讨论了不同条件对甲基蓝溶液吸附效率和吸附容量的影响,主要结论如下:

a) 在 ZIF-8 原位生长的过程中,Zn(NO₃)₂ ·

6H₂O 溶液的浓度为 100 mmol/L 时,吸附效率达到最优;在浓度为 100 mg/L 的甲基蓝溶液中,吸附效率从 29.5% 提升至 98.3%;在浓度为 500 mg/L 的甲基蓝溶液中,吸附平衡在 90 min 内实现,此时吸附效率为 80.8%,吸附容量为 673.0 mg/g。

b) PAN/ZIF-8-100 的力学性能满足实际应用需求。材料经 3 次脱附-再生循环后,吸附效率稳定在 92.0% 左右;5 次循环后仍高于 80.0%,展现出较为优良的循环使用性能;在不同阴阳离子干扰及实际印染废水环境下,仍能保持 90.0% 以上的吸附

效率,证明其应用于高盐废水处理领域的可行性。

c)热力学研究显示,PAN/ZIF-8-100 对甲基蓝的吸附为吸热自发反应,吸附容量随着温度升高而增加;吸附动力学研究则显示,吸附过程符合准二级动力学模型,证明吸附过程以化学吸附为主,物理吸附为辅。

参考文献:

- [1] Awang Chee D N, Kamaludin N A, Soffian M S, et al. Revolutionizing dye adsorption: amino functionalized zeolitic imidazole framework-8 for effective methyl blue removal[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2025, 22(3): 1591-1608.
- [2] 附青山, 张磊, 张伟, 等. 金属-有机框架材料对废水中污染物的吸附研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(11): 11100-11110.
- [3] Peng Y, Pan T, Chen C, et al. In situ synthesis of NH_2 -MIL-53-Al/PAN nanofibers for removal Co (II) through an electrospinning process[J]. Langmuir, 2024, 40(5): 2567-2576.
- [4] Wu M, Chen X, Du J, et al. Derivative carbon particles with different sizes from ZIF-8 and their adsorption capacity for MB[J]. Journal of Materials Science, 2023, 58(6): 2552-2569.
- [5] 余典, 蔡蓓昀, 程海波, 等. 纳米材料 ZIF-8@TOCN 的制备及对罗丹明 B 的吸附[J]. 印染助剂, 2024, 41(5): 18-22.
- [6] Zhang T, Jin X, Owens G, et al. Remediation of malachite green in wastewater by ZIF-8@Fe/Ni nanoparticles based on adsorption and reduction[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2021, 594: 398-408.
- [7] 马彩霞, 白国涛, 刘贵, 等. PAN 纳米纤维膜可控制备及过滤性能[J]. 上海纺织科技, 2025, 53(12): 58-62.
- [8] Tang L, Wu Y, Lei Z, et al. Electrospun PAN membranes strengthened in situ-grown TiO_2 particles for high-performance lithium-ion batteries[J]. Ionics, 2023, 29(11): 4669-4679.
- [9] Lou J, Fu Q, Yu L, et al. In-situ growth of ZIF-8/CP with ultra-high adsorption capacity for removing malachite green from water[J]. Carbon Letters, 2023, 33(7): 2029-2039.
- [10] 涂燕红, 朱锦桥, 蔡悠悠, 等. ZIF-8/生物炭复合材料的制备及其对罗丹明 B 的吸附性能与机理研究[J/OL]. 环境科学学报, 2025-12-24. <https://doi.org/10.13671/j. hjkxxb. 2025. 0414>.
- [11] Mohy-Eldin M S, Elkady M F, Abu-Saied M A, et al. Removal of cadmium ions from synthetic aqueous solutions with a novel nanosulfonated poly(glycidyl methacrylate) cation exchanger: kinetic and equilibrium studies[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 118(6): 3111-3122.
- [12] Massoudinejad M, Mohammadi A, Sadeghi S, et al. Arsenic adsorption over dodecahedra ZIF-8 from solution aqueous: modelling, isotherms, kinetics and thermodynamics[J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 2022, 102(4): 855-871.
- [13] Zhang Z, Li X, Wang C, et al. Polyacrylonitrile and carbon nanofibers with controllable nanoporous structures by electrospinning[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2009, 294(10): 673-678.
- [14] Avila M, Burks T, Akhtar F, et al. Surface functionalized nanofibers for the removal of chromium(VI) from aqueous solutions[J]. Chemical Engineering Journal, 2014, 245: 201-209.
- [15] Zhang Z, Li X, Wang C, et al. ZnO hollow nanofibers: fabrication from facile single capillary electrospinning and applications in gas sensors[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2009, 113(45): 19397-19403.
- [16] Zhang Y, Jia Y, Hou L. Synthesis of zeolitic imidazolate framework-8 on polyester fiber for PM 2.5 removal[J]. RSC advances, 2018, 8(55): 31471-31477.
- [17] Wu C, Liu Q, Chen R, et al. Fabrication of ZIF-8@ SiO_2 micro/nano hierarchical superhydrophobic surface on AZ31 magnesium alloy with impressive corrosion resistance and abrasion resistance[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(12): 11106-11115.
- [18] Lee T H, Oh J Y, Hong S P, et al. ZIF-8 particle size effects on reverse osmosis performance of polyamide thin-film nanocomposite membranes: importance of particle deposition[J]. Journal of Membrane Science, 2019, 570/571: 23-33.
- [19] Guo X Z, Han S S, Yang J M, et al. Effect of synergistic interplay between surface charge, crystalline defects, and pore volume of MIL-100(Fe) on adsorption of aqueous organic dyes[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59(5): 2113-2122.
- [20] Feng Y, Li Y, Xu M, et al. Fast adsorption of methyl blue on zeolitic imidazolate framework-8 and its adsorption mechanism[J]. RSC Advances, 2016, 6(111): 109608-109612.
- [21] Chin M, Cisneros C, Araiza S M, et al. Rhodamine B degradation by nanosized zeolitic imidazolate framework-8 (ZIF-8)[J]. RSC Advances, 2018, 8(47): 26987-26997.
- [22] Yang B, Guo Y, Zhang S, et al. Synthesis of graphene by microwave irradiation for dye adsorption[J]. RSC Advances, 2014, 4(110): 64771-64780.
- [23] Wang X, Zhang J, Jiang J, et al. Preparation of bead-like PAN/ZIF-8 nanofiber membrane for methyl blue adsorption by one-step electrospinning[J]. Materials Letters, 2023, 338: 134057.
- [24] Zabanitout A, Stavropoulos G, Skoulou V. Activated carbon from olive kernels in a two-stage process: industrial improvement[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(2): 320-326.
- [25] Qin Y, Wang L, Zhao C, et al. Ammonium-functionalized hollow polymer particles As a pH-responsive adsorbent for selective removal of acid dye[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(26): 16690-16698.
- [26] Mi H, Jiang Z, Kong J. Hydrophobic poly(ionic liquid) for highly effective separation of methyl blue and chromium ions

from water[J]. Polymers, 2013, 5(4): 1203-1214.

[27] Fan W, Zhang X. Polydopamine modified coconut shell biochar decorated with ZIF-8 for improved adsorption of malachite green and rhodamine B from aqueous solution [J]. Environmental Research, 2025, 269: 120933.

[28] Deng Q, Zhang Y, Liao X, et al. Synthesis of ZIF-8/GO for the removal of Congo red from wastewater with a high salt concentration [J]. ChemistrySelect, 2025, 10 (1): e202403550.

[29] Lal S, Singh P, Singhal A, et al. Advances in metal-organic frameworks for water remediation applications [J]. RSC Advances, 2024, 14(5): 3413-3446.

[30] Fan S, Wang Y, Wang Z, et al. Removal of methylene blue from aqueous solution by sewage sludge-derived biochar: adsorption kinetics, equilibrium, thermodynamics and mechanism [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2017, 5(1): 601-611.

[31] Tang X, Zhang Q, Liu Z, et al. Removal of Cu(II) by loofah fibers as a natural and low-cost adsorbent from aqueous solutions [J]. Journal of Molecular Liquids, 2014, 199: 401-407.

团队介绍

朱海霖学术团队专注于高分子膜材料与 MOFs 材料的研究,致力于通过材料创新推动环境治理的发展。团队有副教授 2 名,硕士研究生 50 余名,指导学生获得国家级奖项 4 项、省部级奖项 20 余项。朱海霖于 2011 年 6 月获博士学位,自 2005 年 3 月至今在浙江理工大学任教;主持国家自然科学基金 1 项、省部级基金 2 项及企业横向项目 10 余项,参与多项国家重点研发计划、国家支撑计划、863 计划项目,发表 SCI 论文 30 余篇,获授权发明专利 20 余项,获得国家科技进步奖二等奖 1 项、浙江省技术发明一等奖 1 项。近期,团队在纳米复合材料应用方面取得突破性进展,开发出用于高效分离与有机污染物(如抗生素、染料等)吸附的新型纳米复合材料,展现出良好的环境治理及工业应用潜力。

(责任编辑:张会巍)