

植物油基高硫聚合物的制备及其 Hg^{2+} 吸附性能

孙晓迪¹, 马 诚^{1*}, 赵凯强², 王 晨², 杨 超²

(1. 辽宁石油化工大学石油化工学院, 辽宁 抚顺 113001;

2. 中石化(大连)石油化工研究院有限公司, 辽宁 大连 116045)

摘要:采用逆硫化法,以硫磺、植物油和三烯丙基胺等为原料,制备多孔高硫聚合物吸附剂(SOT)用于去除水中 Hg^{2+} 。通过傅里叶变换红外光谱(FT-IR)、扫描电子显微镜(SEM)、热重分析(TG)、X射线衍射(XRD)及比表面积与孔径分析(BET)等材料进行了系统表征,并探究了吸附剂投加量、溶液pH、温度及 Hg^{2+} 初始浓度对吸附性能的影响。在最优条件(Hg^{2+} 质量浓度50 mg/L、吸附时间12 h、温度30℃、pH≈5、SOT投加量>0.3 g)下,吸附效率达98%以上。该吸附过程符合Langmuir模型和准二级动力学模型,表明其以单层化学吸附为主。SOT具有制备简单、成本低廉、适用pH范围宽(2~8)、适用温度范围广(30~50℃)以及良好的重复使用性(5次循环后效率>50%)等优势,有良好的应用前景。

关键词:硫磺;植物油;吸附剂; Hg^{2+}

中图分类号: O632; X703

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)08-0117-07

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.08.021

Preparation of vegetable oil-based high-sulfur polymer and Hg^{2+} adsorption performance

SUN Xiao-di¹, MA Cheng^{1*}, ZHAO Kai-qiang², WANG Chen², YANG Chao²

(1. School of Petrochemical Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun 113001, China;

2. Sinopec (Dalian) Research Institute of Petroleum and Petrochemicals Co., Ltd., Dalian 116045, China)

Abstract: A porous high-sulfur polymer adsorbent (SOT) was synthesized via inverse vulcanization using sulfur, vegetable oil, and triallylamine as raw materials for the removal of Hg^{2+} from water. The materials were characterized by Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR), scanning electron microscopy (SEM), thermogravimetric analysis (TG), X-ray diffraction (XRD), and Brunauer-Emmett-Teller (BET) specific surface area and pore size analysis. The adsorption performance was systematically investigated under key parameters including adsorbent dosage, solution pH, temperature, and initial Hg^{2+} concentration. Under optimal conditions (50 mg/L Hg^{2+} , 12 h, 30℃, pH≈5), an adsorption efficiency exceeding 98% was achieved with an SOT dosage above 0.3 g. The adsorption, well-described by the Langmuir and pseudo-second-order models, indicates a monolayer chemical mechanism. Moreover, the SOT adsorbent exhibits a simple synthesis, low cost, wide operational pH (2–8) and temperature (30–50℃) ranges, and robust reusability (>50% efficiency after 5 cycles), demonstrating significant application potential for Hg^{2+} removal.

Key words: sulfur; vegetable oil; adsorbent; Hg^{2+}

重金属污染是当前全球面临的重大环境挑战之一^[1-3]。其中汞污染因其高毒性、易生物累积和难降解性,对生态系统与人类健康构成严重威胁^[4]。尤其是工业废水中汞离子的高效去除尤为迫切^[5-6]。传统吸附材料普遍存在制备过程复杂、成本较高、适用范围小以及再生循环性能不佳等问题,限制了其在实际废水处理中的大规模应用^[7-9]。近年来,逆硫化技术迅速发展,该技术通过将过量硫磺与不饱和化合物共聚,合成含硫量高的功能性聚合物;其凭借硫原子与汞之间的强亲和性,成为汞污染治理领域的新兴材料方向^[10-11]。且该技术契合绿色化学理念,合成共聚物时无需溶剂,环境友好性突

出^[12]。植物油作为来源广泛的可再生资源,其不饱和和脂肪酸结构可与硫磺发生自由基聚合,构建稳定的高硫聚合物网络。目前,已有研究以植物油、硫磺为原料,通过逆硫化法制备高硫聚合物用于汞离子吸附,但因植物油中双键含量有限,导致共聚物交联密度偏低,不仅造成硫磺在聚合物中残留,并且使得材料网络结构松散,易于坍塌,宏观表现为材料易碎^[13]。

为解决上述问题,本研究引入少量三烯丙基胺作为交联剂;其分子含3个双键,可补充逆硫化反应所需的不饱和位点,促进与多硫链的充分反应,提升硫磺利用率,又能构建更均匀的聚合物骨架,以改善材料易碎性;同时引入氯化钠作为致孔剂,提升材料

收稿日期:2025-10-11;修回日期:2026-05-28

基金项目:功能性高硫聚合物合成基础研究(224072)

作者简介:孙晓迪(2000-),女,硕士生,研究方向为高硫聚合物的合成,sunxiaodi163@163.com;马诚(1982-),男,博士,教授,研究方向为高分子材料,通讯联系人,kkmc2002@163.com。

比表面积^[14]。该方法原料来源广泛、成本低廉、环境友好,且合成过程简便、周期短,具备规模化生产的潜力。

本文考察了溶液 pH、汞离子初始浓度、温度和吸附剂投加量等因素对吸附效果的影响,并分别采用 Langmuir 和 Freundlich 等温线模型对吸附过程进行拟合分析,以揭示其吸附机制^[15]。此外,通过拟合准一级和准二级动力学模型,探究汞的去除动力学行为^[16]。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

硫磺(≥99.95%),天津市大茂化学试剂厂;三烯丙基胺(99%),上海麦克林生化科技有限公司;硝酸汞(≥95%)、氯化钠、氢氧化钠,上海阿拉丁化

学公司;植物油为市售菜籽油。

UVmini-1240 型紫外-可见分光光度计;FA2004 型分析天平;THZ-312 型台式恒温振荡器;DF-101S 集热式恒温加热磁力搅拌器;DHG-9070A 型电热鼓风干燥箱;D2004W 型电动搅拌机。

1.2 SOT 的制备

采用逆硫化法制备高硫聚合物的步骤如下:

(1)将硫磺粉加热至 140℃ 熔化,缓慢加入植物油、少量三烯丙基胺,升温至 180℃ 反应 2 h 左右,溶液由橙色逐渐变为棕黑色;(2)加入氯化钠继续搅拌,待混合物变为棕色粘稠状后停止加热,冷却后得固体;(3)将所得固体研磨成颗粒,随后用蒸馏水多次洗涤以去除氯化钠,经 12 h 干燥后过筛,获得柔软橡胶状的产品即为高硫聚合物吸附剂(SOT),反应路径如图 1 所示。

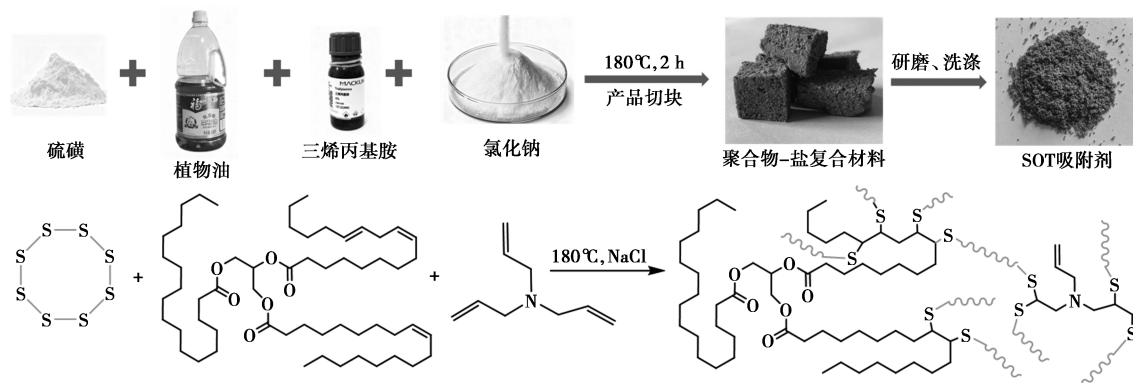


图 1 SOT 反应路径

1.3 SOT 的表征

采用傅里叶变换红外光谱(FT-IR)、粉末 X 射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)、氮气吸附-脱附(BET)、热重分析(TGA)及差示扫描量热法(DSC)分别对材料的官能团、晶体结构、微观形貌、比表面积及热稳定性进行了表征。

1.4 吸附性能测试

将 1 000 mg/L 的 Hg^{2+} 储备液稀释至所需浓度,量取 10 mL 的 Hg^{2+} 溶液置于锥形瓶中,加入一定量 SOT,在 150 r/min 振荡条件下反应至设定时间。反应结束后,将混合液过滤,取滤液经罗丹明 B 显色后,在最大吸收波长 498 nm 下使用紫外-可见分光光度法测定其中 Hg^{2+} 的残留浓度。每个方案进行 3 组平行实验,最终实验结果取平均值。

吸附量 q 计算公式如式(1)所示。

$$q = [(C_0 - C_e)V]/m \quad (1)$$

吸附效率 η 计算公式如式(2)所示。

$$\eta = [(C_0 - C_e)/C_0] \times 100\% \quad (2)$$

其中, q 为单位质量吸附剂吸附 Hg^{2+} 的质量,mg/g; C_0 为 Hg^{2+} 的初始浓度,mg/L; C_e 为 Hg^{2+} 经吸附后的平衡浓度,mg/L; V 为溶液体积,L; m 为吸附剂的质量,g; η 为吸附效率。

1.5 吸附等温模型

吸附等温模型是研究吸附过程的重要理论工具,可定量描述吸附质在吸附剂表面与液相中的平衡关系。采用 Langmuir 和 Freundlich 两种经典模型对 SOT 吸附 Hg^{2+} 的过程进行分析。

Langmuir 模型假设吸附表面均一、吸附位点能量相同、仅形成单分子层,其表达式如式(3)所示。

$$C_e/q_e = 1/q_m K_L + C_e/q_m \quad (3)$$

其中, C_e 为平衡 Hg^{2+} 浓度,mg/L; q_e 为平衡吸附量,mg/g; K_L 为 Langmuir 吸附常数,L/mg; q_m 为最大吸附量,mg/g。

Freundlich 模型适用于非均相表面吸附,允许存在多分子层吸附且无饱和极限,其表达式如式(4)所示。

$$\ln q_e = \ln K_f + (1/n) \ln C_e \quad (4)$$

以上方程中, C_e 为平衡 Hg^{2+} 浓度, mg/L ; q_e 为平衡吸附量, mg/g ; K_f 、 n 为 Freundlich 吸附常数。

1.6 动力学模型

吸附动力学模型是研究吸附过程动态行为的重要工具,能够揭示吸附质在液相中的迁移转化规律以及吸附材料的吸附速率机制。选用准一级和准二级动力学模型,分析 SOT 对水相 Hg^{2+} 的吸附动力学特征。

准一级动力学模型假设吸附受扩散控制,速率与 $(q_e - q_t)$ 成正比,表达式如式(5)所示。

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (5)$$

其中, q_t 为 t 时刻吸附剂对 Hg^{2+} 的吸附量, mg/g ; q_e 为平衡吸附量, mg/g ; k_1 为准一级动力学吸附速率常数, min^{-1} ; t 为吸附反应时间, min 。

准二级动力学模型基于化学吸附机制,认为吸附受表面化学反应控制,吸附容量与吸附剂表面有效活性位点数量呈正相关,表达式为:

$$t/q_t = 1/k_2 q_e^2 + t/q_e \quad (6)$$

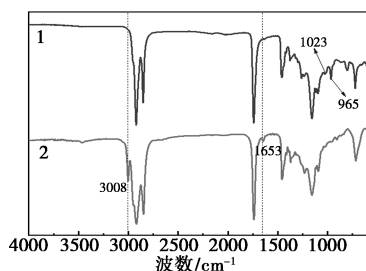
其中, q_t 为 t 时刻吸附剂对 Hg^{2+} 的吸附量, mg/g ; q_e 为平衡吸附量, mg/g ; k_2 为准二级动力学吸附速率常数, $\text{g}/(\text{mg} \cdot \text{min})$; t 为吸附反应时间, min 。

2 结果与讨论

2.1 SOT 的表征

2.1.1 SOT 的 FT-IR 分析

图2为植物油与SOT的FT-IR光谱图。植物油在 1653 cm^{-1} 和 3008 cm^{-1} 处的吸收峰分别归属于 $\text{C}=\text{C}$ 键及 $=\text{C}-\text{H}$ 键的伸缩振动,而SOT的光谱中这2个特征峰消失,表明植物油中的碳碳双键参与了化学反应^[17]。同时,在 1640 cm^{-1} 处未观察到三烯丙基胺的 $\text{C}=\text{C}$ 键的特征吸收峰,说明其烯丙基双键也已参与反应;在 1023 cm^{-1} 处出现了 $\text{C}-\text{N}$ 键伸缩振动吸收峰,并伴随 965 cm^{-1} 处 $\text{C}-\text{S}$ 键特征吸收^[18],共同证明三烯丙基胺通过双键有效嵌入聚合物骨架,形成更致密的交联网络。

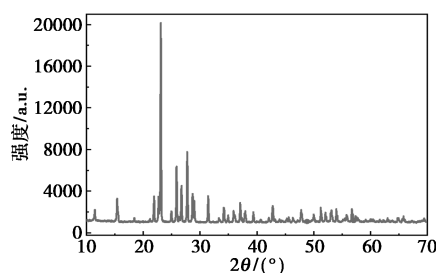


1—SOT; 2—菜籽油

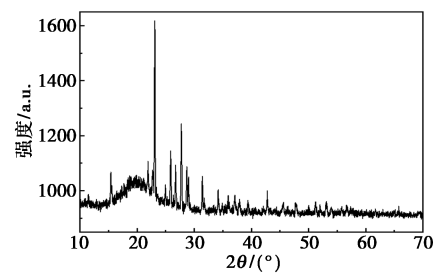
图2 SOT 的红外光谱图

2.1.2 SOT 的 XRD 分析

图3为硫磺及SOT的XRD曲线图。单质硫在 $2\theta=23^\circ$ 附近出现一个尖锐的衍射峰,该峰对应晶态 $\alpha\text{-S}_8$ 的结晶相。而SOT的XRD图谱中,该衍射峰强度显著降低,表明材料整体已转变为非晶态结构,结晶度明显下降^[19]。这说明在逆硫化反应过程中,硫的八元环晶体结构遭到破坏,成功发生开环反应并嵌入到聚合物骨架之中。SOT图谱中在 $2\theta=20^\circ$ 附近出现的宽弥散峰进一步证实了聚合物结构的形成。



(a) 硫

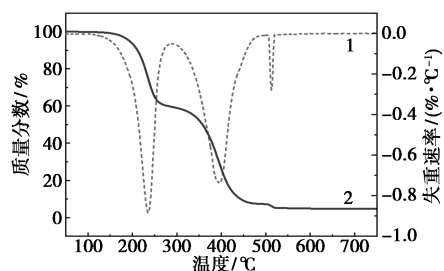


(b) SOT

图3 XRD 曲线

2.1.3 SOT 的 TGA/DSC 分析

为了探究SOT的热稳定性能,对其进行TGA/DSC表征。TGA曲线(图4)显示出2个明显的失重台阶:第1个台阶出现在 200°C 左右,对应于多硫化物结构的分解;第2个失重台阶出现在约 300°C ,归因于聚合物中植物油的热分解。另外,在 500°C 左右的一个小的失重台阶可能是市售植物油中的添加剂的分解。由此可知,在SOT低于 200°C 的温度下可保持良好的热稳定性^[20]。DSC(图5)曲线在



1—DTG; 2—TG

图4 SOT 的热失重曲线

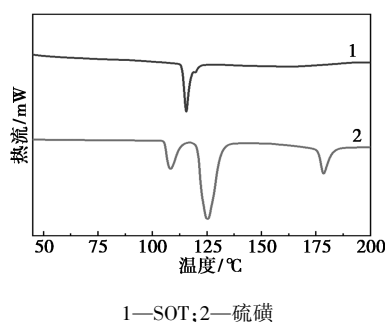


图 5 硫和 SOT 的 DSC 曲线

100~150℃范围内出现的吸热峰对应硫从正交晶态转变为单斜晶态,然后熔化并转化为液态硫,该吸热峰强度较弱,说明游离硫残留量很少^[21]。

2.1.4 SOT 的 SEM 分析

SOT 的 SEM 图像(图 6)显示,材料表面呈不规则形态,整体具备粗糙多孔特征。该形貌可提升材料比表面积,并为 Hg^{2+} 提供更多的吸附位点和扩散通道。Mapping 结果表明,硫与氮元素在 SOT 中均匀分布,证实三烯丙基胺已成功参与聚合反应,下方存在小范围富硫区域,推测为聚合物内部残留的少量游离硫,与 DSC 中的结果相互印证。

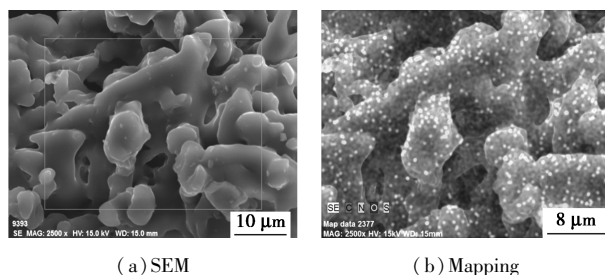


图 6 SOT 的 SEM 与 Mapping 图

2.1.5 SOT 的 BET 分析

在制备过程中预先引入的氯化钠致孔剂,使得材料在研磨时内部大孔孔壁发生撕裂,形成具有高比表面积的撕裂状多孔结构, SOT 孔结构数据(表 1)表明其比表面积达到 $4.4256 \text{ m}^2/\text{g}$,总孔容为 $0.0049 \text{ cm}^3/\text{g}$,平均孔径为 4.4288 nm 。图 7 所示的 SOT 孔径分布可知,其孔径主要集中在 2 nm 左右,说明材料中存在大量介孔结构。这类孔道不仅能够提供更多的吸附活性位点,也有利于 Hg^{2+} 的传输与扩散。

表 1 SOT 的孔隙结构参数

	比表面/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	总孔体积/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	平均孔径/ nm
SOT	4.4256	0.0049	4.4288

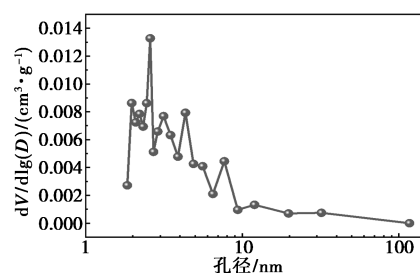
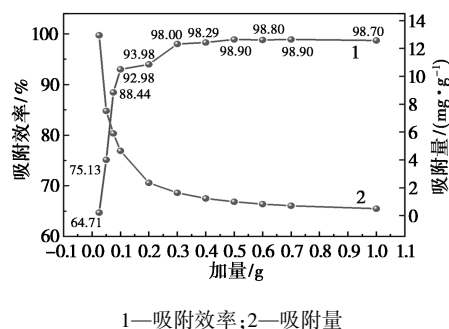


图 7 SOT 的孔径分布图

2.2 SOT 对水中 Hg^{2+} 的吸附性能研究

2.2.1 SOT 的加量对水中 Hg^{2+} 吸附性能的影响

在吸附温度为 30°C 、初始浓度为 50 mg/L 、 $\text{pH} \approx 5$ 和吸附时间 12 h 条件下, SOT 用量对水中 Hg^{2+} 吸附效率及吸附量的影响如图 8 所示。结果表明,在吸附剂用量为 $0.025 \sim 1.0 \text{ g}$ 的范围内,随吸附剂用量的增加,其对 Hg^{2+} 吸附效率呈现先上升后趋于平稳趋势,最大吸附效率可达到 98.9% ; 吸附容量随着 SOT 投加量的增加逐渐减小至平稳,这是由于随 SOT 投加量增大,单位质量 SOT 所吸附的 Hg^{2+} 减少,吸附剂活性位点不饱和程度增加,吸附容量减小。当吸附剂用量为 0.3 g 时, Hg^{2+} 的吸附效率即可达 98% ; 继续增加用量,效率提升幅度显著减小。基于吸附性能与经济成本的综合考虑,最终确定 0.3 g 为适宜吸附剂用量。

图 8 SOT 的用量对水中 Hg^{2+} 吸附效果的影响

2.2.2 pH 对水中 Hg^{2+} 的吸附性能的影响

溶液 pH 通过影响 Hg^{2+} 的存在形态及 SOT 表面官能团的质子化程度,进而影响 SOT 对 Hg^{2+} 的吸附行为。在吸附剂投加量为 0.3 g 、温度为 30°C 、吸附时间 12 h 及 Hg^{2+} 初始浓度 50 mg/L 的条件下,考察了 pH 对吸附效率的影响。如图 9 所示,吸附效率随 pH 升高呈现先增大后减小的趋势,并于 $\text{pH} \approx 5$ 时达到最大值 98% ,此为最优吸附条件,后续实验也选择 pH 为 5 的溶液开展;同时 SOT 对 Hg^{2+} 的吸附性能受 pH 变化的影响较小,表明所制备的材料可在较宽的 pH ($3 \sim 7$) 范围内使用。具体来看,在较

低 pH 区域($\text{pH} < 3$), 高浓度 H^+ 会与 Hg^{2+} 竞争吸附剂表面的活性位点, 抑制吸附反应。当 pH 升至 3~5 范围内, H^+ 竞争减弱, SOT 表面含硫、氮等官能团逐步去质子化, 增强了与 Hg^{2+} 的配位能力, 吸附效率显著提升。当 $\text{pH} > 5$ 时, Hg^{2+} 发生水解生成 $\text{Hg}(\text{OH})_2$ 沉淀 ($K_{\text{sp}, \text{Hg}(\text{OH})_2} = 3.0 \times 10^{-25}$), 溶液中游离 Hg^{2+} 浓度下降, 导致效率降低^[22]。

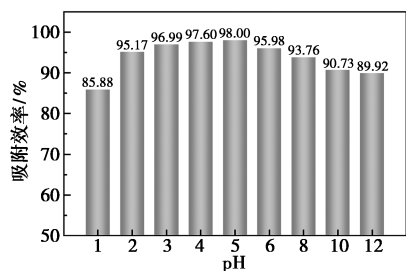


图 9 pH 对水中 Hg^{2+} 吸附效果的影响

2.2.3 温度对水中 Hg^{2+} 的吸附性能的影响

在 SOT 投加量为 0.3 g、溶液 $\text{pH} \approx 5$ 、吸附时间为 12 h 的条件下, 不同温度 (30、35、40、45、50℃) 对 Hg^{2+} 吸附效率的影响如图 10 所示。结果表明, 在 50 mg/L 初始浓度下, SOT 对 Hg^{2+} 的吸附效率均随温度升高呈现缓慢上升趋势。这表明升温加剧了分子热运动, 促进了 Hg^{2+} 与 SOT 表面富硫官能团之间的碰撞传质, 从而增强了吸附效果^[23]。上述结果表明, SOT 对 Hg^{2+} 的吸附性能受温度变化的影响较小, 表现出良好的热稳定性与较宽的适用温度范围。考虑到在 30℃ 时 SOT 已具备良好的吸附效率, 继续升高温度使吸附效果增幅有限, 综合考虑实验操作的简便性和能源消耗的经济性, 最终选择 30℃ 作为标准吸附温度进行实验。

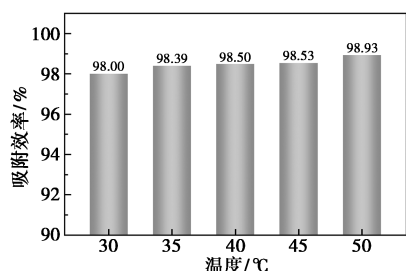


图 10 温度对水中 Hg^{2+} 吸附效果的影响

2.2.4 时间对水中 Hg^{2+} 的吸附性能的影响

吸附时间对 SOT 吸附 Hg^{2+} 的影响如图 11 所示。在初始阶段 (1~5 h), Hg^{2+} 的去除率从 59.18% 迅速提高至 92.11%; 5 h 后去除速率显著减缓, 12 h 后趋于平衡, 达到最大吸附效率 98.18%。这种现象可归因于材料表面初始具有丰富的活性位点对吸

附的促进作用, 随着吸附进行, 活性位点逐渐饱和, 延长吸附时间对去除率提升不再显著。综合考虑吸附效果与反应效率, 确定最佳吸附时间为 12 h。

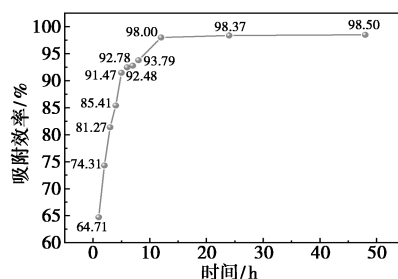
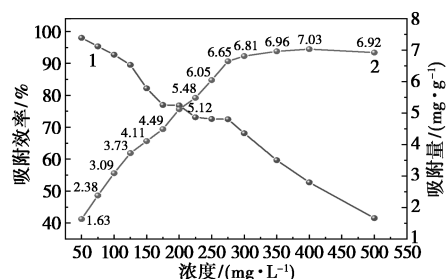


图 11 吸附时间对水中 Hg^{2+} 吸附效果的影响

2.2.5 溶液初始浓度对水中 Hg^{2+} 的吸附性能的影响

图 12 展示了在 SOT 投加量为 0.3 g、溶液 $\text{pH} \approx 5$ 、吸附时间 12 h 及温度 30℃ 的实验条件下, Hg^{2+} 初始浓度对吸附性能的影响。结果显示, 在 50~275 mg/L 浓度区间内, 吸附量随 Hg^{2+} 初始浓度的升高呈线性增长趋势; 当浓度超过 275 mg/L 后, 吸附量的增长速率减缓, 并在 400 mg/L 时达到峰值, 最大吸附量为 7.03 mg/g。与此同时, 随着 Hg^{2+} 初始浓度的不断增加, 吸附效率持续下降。该现象可通过吸附动力学与热力学的竞争机制进行解释: 在较低初始浓度范围内, 较大的浓度梯度强化了传质驱动力, 促使吸附量迅速上升; 而当初始浓度超过 400 mg/L 后, 吸附剂表面的活性位点逐渐趋于饱和, 吸附过程接近平衡状态。此时即便溶液中 Hg^{2+} 浓度进一步增加, 吸附量亦不再显著增长, 最终趋于饱和。



1—吸附效率; 2—吸附量

图 12 溶液初始浓度对水中 Hg^{2+} 吸附效果的影响

2.2.6 重复利用性分析

吸附材料的可重复使用性是评估其实际应用价值与经济效益的关键指标。为考察 SOT 的再生性能, 本研究对其进行了 5 次连续的吸附-解吸循环实验 (图 13)。每次吸附饱和后, 使用质量分数为 5% 的盐酸在常温下解吸 12 h, 随后将材料洗涤至滤

液 pH 呈中性、烘干并用于下一轮吸附。结果表明, 尽管吸附性能随循环次数的增加呈下降趋势, 但经历 5 次循环后, SOT 对 Hg^{2+} 的去除率仍保持在 50% 以上。这证明了材料具备良好的结构稳定性与再生能力, 展现出优异的可重复使用性, 在含汞废水处理中具有实际应用潜力。

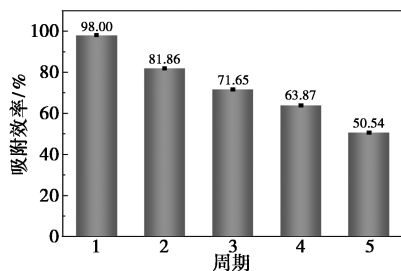
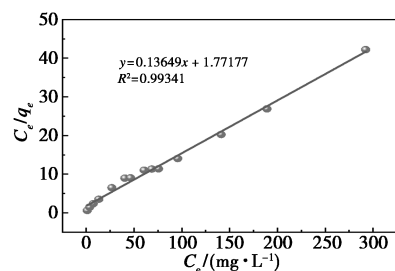


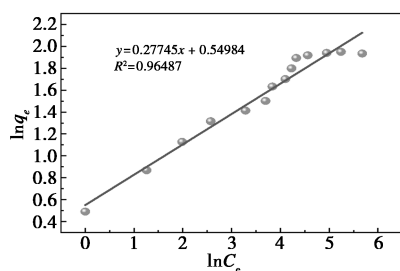
图 13 不同循环次数下对 Hg^{2+} 的吸附效率

2.3 Hg^{2+} 吸附等温线拟合

通过绘制 C_e/q_e 与 C_e 以及 $\ln q_e$ 与 $\ln C_e$ 的关系曲线, 获得了 SOT 吸附 Hg^{2+} 的 Langmuir 和 Freundlich 吸附等温线 (图 14), 相关拟合参数详见表 2。相应的拟合方程分别为 $y = 0.13649x + 1.77177$ 和 $y = 0.27745x + 0.54984$ 。基于 Langmuir 模型计算得到的饱和吸附量为 7.32 mg/g, 与实验测定值 7.03 mg/g 较为接近。数据分析表明, Langmuir 模型的相关系数 R^2 高于 Freundlich 模型, 同时该模型的决定系数接近 1, 说明前者能更准确地描述该材料对汞离子的吸附行为, 表明 Hg^{2+} 在 SOT 表面的吸附遵循单分子层覆盖机制。另外, Freundlich 模型拟合参数 $1/n$ 为 0.28 ($0.1 < 1/n < 0.5$), 表明吸附反应易于进



(a) Langmuir 吸附等温线



(b) Freundlich 吸附等温线

图 14 吸附等温模型

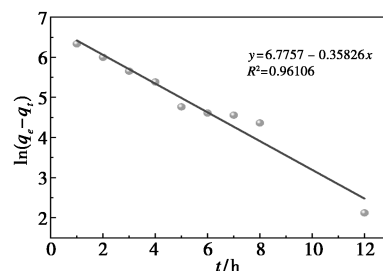
表 2 2 种吸附等温线参数

Langmuir 模型			Freundlich 模型		
$q_m / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$K_L / (\text{L} \cdot \text{mg}^{-1})$	R^2	n	K_f	R^2
7.32	0.0770	0.9934	3.6042	1.4946	0.9649

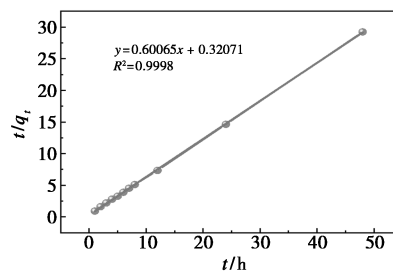
行。该值小于 1, 说明 SOT 对所研究浓度范围内的 Hg^{2+} 具有良好的吸附适用性^[24]。

2.4 Hg^{2+} 吸附动力学拟合

本研究分别采用准一级和准二级动力学模型对 SOT 吸附水体中汞离子的过程进行非线性拟合, 拟合曲线见图 15。通过解析曲线斜率和截距等特征参数, 得到动力学参数于表 3。准一级动力学方程为 $y = 6.7757 - 0.35826x$, 准二级动力学方程为 $y = 0.60065x + 0.32071$ 。准二级模型的 R^2 值高于准一级模型, 且接近 1, 同时, 其理论平衡吸附量 (1.66 mg/g) 与实验测定值 (1.64 mg/g) 接近。因此, 该吸附过程更符合准二级动力学模型, 表明其以化学吸附机制为主^[25]。



(a) 准一级动力学方程拟合结果



(b) 准二级动力学方程拟合结果

图 15 吸附动力学模型

表 3 2 种动力学模型参数

准一级			准二级		
$q_m / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$k_1 / (\text{min}^{-1})$	R^2	$q_m / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$K_2 / (\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$	R^2
875.7	0.3583	0.9611	1.6648	1.1570	0.9998

2.5 SOT 吸附水中 Hg^{2+} 后的表征

对吸附 Hg^{2+} 后的 SOT 进行 EDS 扫描分析 (图 16), 结果显示 S 与 Hg 的质量百分比分别为

26.76%和3.92%,证实该处为 Hg^{2+} 富集区域。此外,材料整体形貌未发生明显改变,表明 SOT 在吸附过程中结构稳定,未因 Hg^{2+} 的负载而遭到破坏,具有良好的结构稳定性。图 17 为吸附 Hg^{2+} 后的元素 Mapping 图,结果表明硫与汞在空间分布上高度重合,呈现出明显的共定位特征,进一步说明含硫官能团在汞吸附过程中起关键作用。

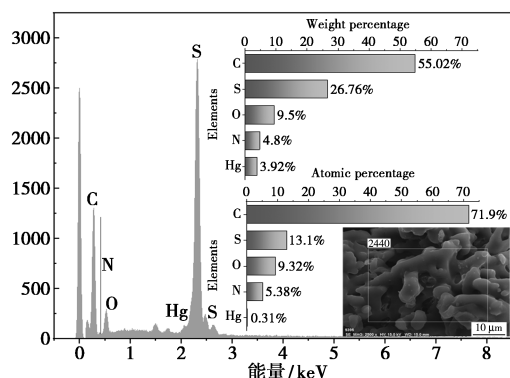


图 16 吸附 Hg^{2+} 后 SOT 的 EDS 图

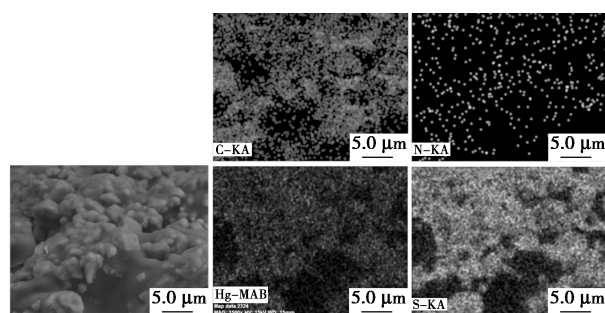


图 17 吸附 Hg^{2+} 后 SOT 的 Mapping 图

3 结论

(1)以硫磺、植物油和三烯丙基胺等为原料,采用逆硫化法成功合成了高硫聚合物 SOT,材料呈不规则多孔形貌且 200°C 以下热稳定。

(2)表征显示,SOT 为非晶态,硫、氮官能团均匀分布;吸附 Hg^{2+} 后形貌未破损,硫与汞空间高度共定位,证实含硫官能团是吸附关键位点。

(3)在 Hg^{2+} 离子质量浓度 50 mg/L 、吸附时间 12 h 、温度 30°C 和 $\text{pH}\approx 5$ 条件下 SOT 对水中 Hg^{2+} 吸附效率可达 98%,饱和吸附量为 7.32 mg/g ;且在 pH 为 $2\sim 8$ 、温度 $30\sim 50^{\circ}\text{C}$ 范围内吸附性能稳定,适用性强。

(4)吸附过程符合 Langmuir 等温线和准二级动力学模型,表明其主要为单分子层化学吸附机制。此外,SOT 具备良好的重复使用性能,5 次循环后吸附效率仍超 50%,具实际应用潜力。

参考文献

- [1] Jomova K, Alomar S Y, Nepovimova E, *et al.* Heavy metals: Toxicity and human health Effects [J]. Archives of Toxicology, 2024, 99 (1): 153–209.
- [2] Sharma A K, Sharma M, Sharma S, *et al.* A systematic review on assessment of heavy metals toxicity in freshwater fish species: Current scenario and remedial Approaches [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2024, 262: 107472.
- [3] Zheng F, Guo X, Guo B, *et al.* Risk assessments and health impacts of heavy metal Pollution [J]. Scientia Sinica Vitae, 2021, 51 (9): 1264–1273.
- [4] Rakitskii V N, Synitskaya T A, Skupnevskii S V. Current issues of environmental mercury pollution (review) [J]. Hygiene and Sanitation, 2020, 99 (5): 460–467.
- [5] Obrist D, Kirk J L, Zhang L, *et al.* A review of global environmental mercury processes in response to human and natural perturbations: Changes of emissions, climate, and land use [J]. Ambio, 2018, 47 (2): 116–140.
- [6] 刘翼翔. 电催化技术在工业废水重金属铅去除中的应用 [J]. 盐科学与化工, 2025, 54 (4): 35–39.
- [7] 王秋实, 贺军辉. 磁性硫化铜复合纳米材料的合成及其对水中汞离子的特异性吸附 [J]. 应用化学, 2020, 37 (11): 1316–1323.
- [8] Hu X S, Cao H R, He M, *et al.* Water-insoluble polyethyleneimine adsorbents for the high-efficiency removal of Hg^{2+} from aqueous Solution [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2024, 12 (33): 22262–22275.
- [9] 李诗宇, 阴永光, 史建波, 等. 共价有机框架在水中二价汞吸附去除中的应用 [J]. 化学进展, 2022, 34 (5): 1017–1025.
- [10] Nayeem A, Ali M F, Shariffuddin J H, *et al.* The recent development of inverse vulcanized polysulfide as an alternative adsorbent for heavy metal removal in Wastewater [J]. Environmental Research, 2023, 216: 114306.
- [11] Zhang B, Dodd L J, Yan P, *et al.* Mercury capture with an inverse vulcanized polymer formed from garlic oil, a bioderived Comonomer [J]. Reactive and Functional Polymers, 2021, 161: 104865.
- [12] Anastas P T, Kirchhoff M M. Origins, current status, and future challenges of green chemistry [J]. Accounts of Chemical Research, 2002, 35 (9): 686–694.
- [13] Tikoalu A D, Lundquist N A, Chalker J M. Mercury sorbents made by inverse vulcanization of sustainable triglycerides: The plant oil structure influences the rate of mercury removal from water [J]. Advanced Sustainable Systems, 2020, 4 (3): 1900111.
- [14] Wadi V S, Mittal H, Fosso-Kankeu E, *et al.* Mercury removal by porous sulfur copolymers: Adsorption isotherm and kinetics studies [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2020, 606: 125333.
- [15] Amna R, Ali K, Alhassan S M. Computational fluid dynamics analysis of mercury adsorption by inverse-vulcanized porous sulfur copolymers [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2023, 62 (31): 12277–12290.

(下转第 129 页)

影响和氧气浓度相关。在低浓度氧气下,适当提高温度会提高 N_2O 的转化率,而高浓度氧气的加入会表现出抑制作用且还会额外产生 NO_x 这一副产物。本研究通过以上实验为优化催化剂性能提供理论基础,为 N_2O 脱除催化剂的制备提供了新思路。

参考文献

- [1] Venterea R T, Maharjan B, Dolan M S J J O E Q. Fertilizer source and tillage effects on yield-scaled nitrous oxide emissions in a corn cropping system [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2011, 40 (5): 1521-1531.
- [2] 刘嘉欣, 陈彬, 段存存, 等. 基于 SD 模型的城市生活污水处理系统 N_2O 排放现状及预测 [J]. *环境科学学报*, 2024, 44 (12): 415-425.
- [3] Choi H M, Lee S J, Moon S H, *et al.* Comparison between unsupported mesoporous Co_3O_4 and supported Co_3O_4 on mesoporous silica as catalysts for N_2O decomposition [J]. *Catalysis Communications*, 2016, 82: 50-54.
- [4] 王涵啸. SCR 脱硝催化剂改性协同催化分解 N_2O 的实验研究 [D]. 北京: 华北电力大学 (北京), 2021.
- [5] 刘焱, 张荣兵, 陈操操, 等. 城镇污水处理厂典型处理工艺非二氧化碳温室气体排放特征及控排策略研究 [J]. *给水排水*, 2026, 62 (2): 31-38.
- [6] 陈标华, 田梦, 徐端年. 化工生产中温室气体 N_2O 排放与工业化减排技术 [J]. *环境工程*, 2023, 41 (10): 82-90.
- [7] 李香梅. 氧化亚氮减排技术的选择 [J]. *中氮肥*, 2010, (6): 28-30.
- [8] 于泳, 王亚涛. 己二酸尾气中 N_2O 处理技术进展 [J]. *工业催化*, 2016, 24 (7): 17-20.
- [9] 邵建军, 朱锡, 申文杰. Co_3O_4/CeO_2 的氧化还原性能及反应条件对其 CO 氧化活性的影响 [J]. *燃料化学学报*, 2012, 40 (1): 75-79.
- [10] 景艳丽, 黄晓昇, 唐忠诚, 等. NH_3 -SCR 高温烟气脱硝催化剂研究现状及进展 [J]. *分子催化*, 2026, 40 (2): 249-259.
- [11] 段玉梅, 张靖, 何云刚, 等. Sm 掺杂提高 Mn 基催化剂低温活性和抗水抗硫性 [J]. *现代化工*, 2026, 46 (2): 144-151.
- [12] 王倩. 高效铂基催化剂应用于低温氢气选择性还原 NO 的研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2019.
- [13] 郁苏俊. 低温脱硝 SCR 催化剂改性研究及工业应用进展 [J]. *化工管理*, 2025, (5): 62-65.
- [14] 康嘉霓, 邓双, 王海强, 等. 铈基催化剂用于 CO 选择性催化还原 NO_x 的研究进展 [J]. *化学研究与应用*, 2024, 36 (5): 942-954.
- [15] 张兴华, 王宽岭, 王学海, 等. 原位 DRIFTS 在 SCR 过渡金属催化剂研究中的应用进展 [J]. *化工环保*, 2023, 43 (5): 580-589.
- [16] Tan W, Liu A N, Xie S H, *et al.* Ce-Si mixed oxide: A high sulfur resistant catalyst in the NH_3 -SCR reaction through the mechanism-enhanced process [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55 (6): 4017-4026.
- [17] Li X, Li X S, Li J H, *et al.* Identification of the arsenic resistance on MoO_3 doped CeO_2/TiO_2 catalyst for selective catalytic reduction of NO_x with ammonia [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 318: 615-622.
- [18] 李想. 废旧脱硝催化剂中毒机制与再生技术研究 [D]. 北京: 清华大学, 2017.
- [19] 姚米航. 铈钛基氨气选择性催化还原 NO_x 催化剂的制备及其抗碱金属性能的研究 [D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2024.
- [20] Liu W J, Long Y F, Liu S N, *et al.* Promotional effect of Ce in NH_3 -SCO and NH_3 -SCR reactions over Cu-Ce/SCR catalysts [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2022, 107: 197-206.
- [21] 陈冠宜, 徐骏伟. 锡基钙钛矿水热合成及高温相变和表面活性位研究 [J]. *无机盐工业*, 2025, 57 (4): 37-44.
- [22] 孙世龙, 张国芳, 束俊, 等. 纳米 $Ce_{1-4x}(FeAlCoLa)_xO_{2-8}$ 固溶体微观光谱特征及氧化还原性能研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2024, 44 (7): 1883-1888. ■
- [16] Chakraborty V, Das P. Synthesis of Nano-silica-coated biochar from thermal conversion of sawdust and its application for Cr removal: Kinetic modelling using linear and nonlinear method and modelling using artificial neural network Analysis [J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2020, 13 (2): 821-831.
- [17] Ren Z, Jiang X, Liu L, *et al.* Modification of high-sulfur polymer using a mixture porogen and its application as advanced adsorbents for Au (Ⅲ) from wastewater [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2021, 328: 115437.
- [18] Ma Y, Shi C, Du J, *et al.* The key role of unsaturated olefin content on polysulfides prepared via inverse vulcanization of waste plant oils for mercury removal from wastewater [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, 31 (13): 19753-19763.
- [19] Ghumman A S M, Shamsuddin M R, Nasef M M, *et al.* Synthesis and characterization of sustainable inverse vulcanized copolymers from non-edible oil [J]. *Chemistry Select*, 2021, 6 (6): 1180-1190.
- [20] Valle S F, Giroto A S, Klaic R, *et al.* Sulfur fertilizer based on inverse vulcanization process with soybean oil [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2019, 162: 102-105.
- [21] Abbasi A, Yahya W Z N, Nasef M M, *et al.* Copolymerization of palm oil with sulfur using inverse vulcanization to boost the palm oil Industry [J]. *Polymers and Polymer Composites*, 2021, 29 (9): S1446-S1456.
- [22] Aboli E, Jafari D, Esmaili H. Heavy metal ions (lead, cobalt, and nickel) biosorption from aqueous solution onto activated carbon prepared from Citrus limetta Leaves [J]. *Carbon Letters*, 2020, 30 (6): 683-698.
- [23] 曹军, 陆毕帅, 吕向菲, 等. 高分子复合黄土吸附剂的制备及其吸附水体铅离子研究 [J]. *应用化工*, 2025, 54 (2): 409-421.
- [24] 李童, 汪黎东, 齐铁月. 焙烧态镁铁铝水滑石对脱硫酸水中硒的吸附研究 [J]. *现代化工*, 2025, 45 (2): 103-108.
- [25] Salcedo O D C, Vargas D P, Giraldo L, *et al.* Study of mercury [Hg (Ⅱ)] adsorption from aqueous solution on functionalized activated carbon [J]. *ACS Omega*, 2021, 6 (18): 11849-11856. ■

(上接第 123 页)