

引用本文: 龚山豪, 麻嘉鑫, 贾兰, 王丕. 基于柱[5]芳烃和聚乙烯醇交联聚合物的染料吸附性能研究 [J]. 离子交换与吸附, 2026, 42(3): 183-190.

Citation: GONG Shan-hao, MA Jia-xin, JIA Lan, WANG Pi. Dye Adsorption Properties of Pillar[5]Arene-Polyvinyl Alcohol Crosslinked Polymers [J]. Ion Exchange and Adsorption, 2026, 42(3): 183-190.

文章编号: 1001-5493(2026)03-0183-08

DOI: 10.16026/j.cnki.iea.2026030183

基于柱[5]芳烃和聚乙烯醇交联聚合物的染料吸附性能研究*

龚山豪¹, 麻嘉鑫², 贾兰^{1**}, 王丕^{1**}

(¹太原理工大学材料科学与工程学院, 太原 030024; ²山西大学大型科学仪器中心, 太原 030006)

摘要: 将羧基柱[5]芳烃与聚乙烯醇(PVA)通过酯化反应构筑了三维交联网络结构的吸附剂CP[5]-PVA。该材料对刚果红(CR)染料和中性红(NR)染料具有快速高效的吸附效果: 对CR染料的吸附效率在30 min内达到96.85%, 对NR染料的吸附效率在45 min内达到99.92%。CP[5]-PVA对CR和NR的吸附过程符合准二级动力学模型和Langmuir等温吸附模型, 最大吸附量分别为258.40 mg/g和125.16 mg/g。

关键词: 柱[5]芳烃, 聚乙烯醇, 三维交联网络, 染料吸附

中图分类号: O647.3 **文献标志码:** A

1 前言

工业化和城市化进程的持续推进不可避免地会产生各类污染物, 其中有机染料成分复杂且色度高, 主要包括活性染料、酸性染料、分散染料等^[1]。全球每年仅印染行业排放的含染料废水就高达数百亿吨^[2-4]。传统有机染料的处理方法包括物理吸附法、化学氧化法和生物降解法等, 但这些方法存在效率相对较低、成本高、反应条件严苛以及可回收性有限等问题, 因此开发更加高效、环保的吸附剂迫在眉睫^[5-6]。

超分子材料是基于分子间非共价相互作用^[7] (如氢键、 π - π 堆积、静电作用、范德华力等) 自组装形成的一类材料, 通过改变分子结构或修饰功能基团可调控其性能, 在去除水中有机染料方面有着独特优势: 首先, 超分子主体自身的结构特点可使其与目标染料客体分子形成特异性的主客体复合物, 实现对特定染料的选择性去除; 其次, 超分子材料往往可以通过简单修饰增加与染料分子的结合位点, 从而提

高吸附容量和吸附效率。最重要的是, 基于非共价键作用的超分子材料在一定条件下可实现可逆解离, 从而实现材料的再生和循环利用。聚乙烯醇(PVA)分子中的羟基是活性的反应位点, 可以有效交联多种基团, 自身的线性聚合物链结构也为三维网络结构的交联提供结构基础。柱芳烃是一种新颖的大环化合物, 以独特的柱状结构和富 π 电子空腔为显著特征。柱芳烃因其制备简便、修饰灵活、柱状结构对称以及主客体性质丰富等特点而备受瞩目, 其中柱[5]芳烃更是得到了一系列的研究探索。

本文将羧基修饰的柱[5]芳烃与PVA经过简单的酯化反应制备了三维网状结构的聚合物材料CP[5]-PVA。通过核磁氢谱证实了材料的成功合成, 同时使用扫描电子显微镜表征了材料的微观形貌。材料的吸附能力通过吸附实验进行验证: 对于材料的动力学实验, 采用准一级动力学模型和准二级动力学模型进行对比, 表明材料的吸附过程以化学吸附为主导, 并通过Weber-Morris颗粒内扩散模型研究了其分阶段的

* 收稿日期: 2025-05-12

作者简介: 龚山豪 (2000—), 男, 硕士研究生。

**通信作者: 贾兰, E-mail: jialan@tyut.edu.cn; 王丕, E-mail: wangpi@tyut.edu.cn。

吸附过程；对于材料的热力学实验，采用Langmuir和Freundlich等温吸附模型研究了材料在均一表面上的单分子层吸附过程。通过连续多次的吸附和解吸附实验验证了材料的高效可循环使用性能，材料具有良好的应用前景。

2 实验部分

2.1 仪器和试剂

主要试剂：1,4-二甲氧基苯、多聚甲醛、三氟化硼乙醚、氯乙酸甲酯、硝酸铈铵 $(\text{NH}_4)_2\text{Ce}(\text{NO}_3)_6$ 、聚乙烯醇(98%醇解度)、N,N'-二环己基碳二亚胺(DCC)、4-二甲基氨基吡啶(DMAP)、连二亚硫酸钠 $(\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4)$ 、刚果红、中性红，购自阿达玛斯贝塔(上海)化学试剂有限公司；无水硫酸钠 (Na_2SO_4) 、碳酸钾 (K_2CO_3) 、盐酸溶液(1 mol/L)、氢氧化钠(NaOH)，购自天津大茂化学试剂厂；石油醚、二甲基亚砜(DMSO)、乙腈、乙酸乙酯(EtOAc)、1,2-二氯乙烷、无水乙醇 $(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH})$ 、二氯甲烷、正己烷、甲醇、氯仿，购自Greagent试剂公司。所用试剂均为分析纯。

主要仪器：核磁共振仪(Bruker Advanced DMX 600, 德国Bruker公司)、高分辨率液相色谱质谱仪(UPLC H-Class QDa, 美国沃特世公司)、扫描电子显微镜(SEM, GeminiSEM 360, 德国卡尔蔡司公司)、紫外-可见分光光度计(UV-1800, 日本岛津公司)。

2.2 羧基柱[5]芳烃(CP[5])的合成

化合物1参考文献[8-9]进行合成，如图1所示，具体方法为：(1)将1,4-二甲氧基苯(1.38 g, 10.00 mmol)与多聚甲醛(1.35 g, 15.00 mmol)加到1,2-二氯乙烷(300 mL)中，常温搅拌一段时间以促进原料溶解，随后加入催化剂三氟化硼乙醚，在常温环境下进行反应，薄层色谱(Thin Layer Chromatography, TLC)监测反应过程。反应结束后加水淬灭，经多次水洗后收集有机相，使用硅胶柱层析分离(石油醚/二氯甲烷=1:2 v/v)，得到白色粉末状固体化合物1。(2)将得到的白色粉末状固体(1.50 g, 2.00 mmol)溶于二氯甲烷(100 mL)中，加入 $(\text{NH}_4)_2\text{Ce}(\text{NO}_3)_6$ (2.2 g, 4 mmol)水溶液，室温下搅拌10 min，水洗(100 mL×3)，减压浓缩，残余物经柱层析(EtOAc/正己烷=1:9 v/v)得到红色的固体产物化合物2。(3)将红色固体产物(500 mg, 0.70 mmol)溶于 CH_2Cl_2 (30 mL)中，在50 mL的圆底烧瓶中搅拌，同时加入 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ (2.40 g, 13.9 mmol)水溶液。室温下搅拌12 h。用 CH_2Cl_2 (50 mL×3)萃取水层。合并的有机相用水(100 mL)、饱和氯化钠水溶液(100 mL)洗涤，用无水 Na_2SO_4 干燥。过滤减压除去溶剂后，得到白色固体化合物3。(4)将氯乙酸甲酯(2.59 g, 24.0 mmol)和 K_2CO_3 (6.62 g, 48.0 mmol)加入到化合物3的 CH_3CN (50 mL)溶液中。将混合物置于三颈烧瓶中，在氮气氛围下加热回流24 h。将

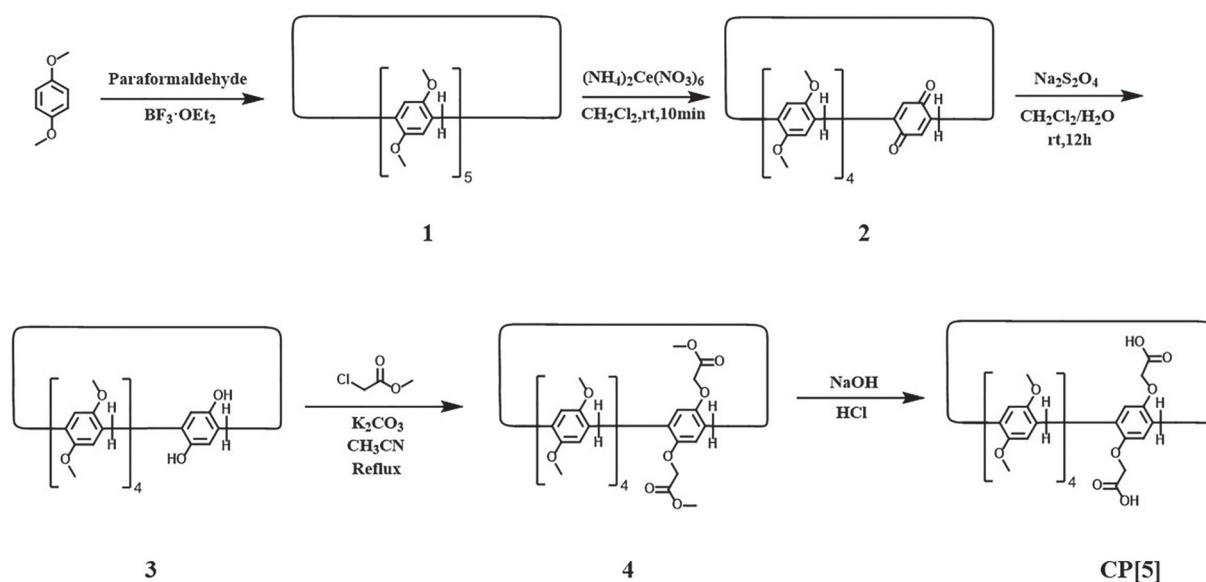


图1 CP[5]的合成路线。

Figure 1 Synthetic route of CP[5].

冷却的反应混合物过滤并用氯仿洗涤。将滤液在真空下蒸发, 并通过在甲醇和氯仿的混合物中结晶纯化残余物。通过过滤收集产物4, 用甲醇洗涤, 并在真空下干燥。(5) 将化合物4 (1.73 g, 2.00 mmol) 溶于 C_2H_5OH (120 mL) 的溶液用 40%NaOH 水溶液 (120 mL) 回流处理 12 h, 将混合物减压浓缩, 用水 (20 mL) 稀释, 并用 HCl 酸化。过滤收集沉淀产物, 用水洗涤, 真空干燥, 得到白色固体 CP[5]。

2.3 CP[5]-PVA 聚合物的合成

CP[5]-PVA 合成路线^[1]如图 2 所示: 将 CP[5] (0.210 g, 0.250 mmol) 和 0.200 g PVA 分散于 DMSO

(10.0 mL) 中, 在氮气保护下搅拌加热至 80 °C 并保持 1 h。然后加入 DCC (0.930 g, 4.50 mmol) 和 DMAP (0.0680 g, 0.550 mmol) 的 DMSO (10 mL) 溶液, 将所得混合物在 80 °C 下搅拌 3 d。反应混合物过滤, 固体经反复抽滤并用水洗涤, 得到 CP[5]-PVA。

2.4 吸附实验

2.4.1 浓度标准曲线的测定

分别配制一系列不同浓度的刚果红 (CR) 和中性红 (NR) 染料标准溶液, 使用紫外-可见分光光度计测量其吸光度, 以吸光度为纵坐标、浓度为横坐标, 拟合得到 2 种染料的浓度标准曲线。

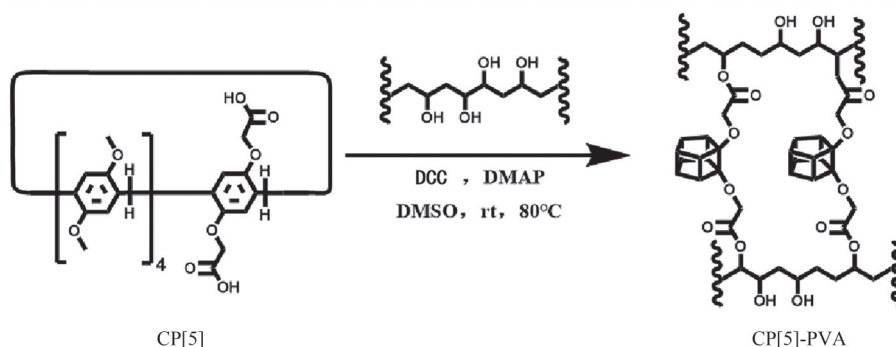


图2 CP[5]-PVA 的合成路线。

Figure 2 Synthetic route of CP[5]-PVA.

2.4.2 动力学实验

在 20 mL 浓度为 $50.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的染料溶液中加入 20.0 mg 样品粉末, 搅拌下开始吸附。在不同时间点抽取溶液, 经 $0.220 \mu\text{m}$ 无机滤膜过滤后测量吸光度, 对照标准曲线计算染料浓度, 进行动力学模拟。

2.4.3 等温吸附实验

将 5.00 mg 样品粉末与 5.00 mL 不同浓度的染料溶液混合, 搅拌吸附 48 h 以达到平衡状态, 使用注射器抽取溶液, 经 $0.220 \mu\text{m}$ 无机滤膜过滤后测量吸光度, 计算平衡吸附量, 模拟吸附等温线。

2.5 吸附数据分析方法

2.5.1 吸附效率

染料的吸附效率 (R) 通过式 (1) 进行计算^[10]:

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

式中: C_0 为染料的初始浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; C_t 为 t 时刻染料的剩余浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2.5.2 吸附量 (q_t 和 q_e)

t 时刻吸附剂对染料的吸附量 (q_t) 和吸附平衡时吸附剂对染料的吸附量 (q_e) 通过式 (2) 和式 (3) 进行计算^[11]:

$$q_t = \frac{C_0 - C_t}{C_A} \quad (2)$$

$$q_e = \frac{C_0 - C_e}{C_A} \quad (3)$$

式中: q_t 为 t 时刻吸附剂对染料的吸附量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; q_e 为吸附平衡后吸附剂对染料的吸附量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; C_e 为平衡时刻染料的剩余浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; C_A 为吸附剂的浓度, 本实验中吸附剂的初始浓度为 $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2.5.3 吸附动力学模型

选取准一级动力学模型、准二级动力学模型和 Weber-Morris 颗粒内扩散模型来研究吸附过程中的速率控制步骤, 揭示吸附量随吸附时间的变化规律。模型的表达式如式 (4)~(6)^[12]:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (4)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{t}{q_e} + \frac{1}{k_2 q_e^2} \quad (5)$$

$$q_t = k_{WM} t^{\frac{1}{2}} + C \quad (6)$$

式中: k_1 为准一级动力学模型的速率常数, min^{-1} ; k_2 为准二级动力学模型的速率常数, $\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$; k_{WM} 为 Weber-Morris 颗粒内扩散模型的速率常数, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1/2}$; C 为与边界层厚度相关的常数。

2.5.4 吸附热力学模型

选取 Langmuir 和 Freundlich 等温吸附模型研究吸附过程中吸附质与吸附剂之间的相互作用机制。模型的表达式如式 (7)~(8)^[11-12]:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{C_e}{q_m} \quad (7)$$

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (8)$$

式中: q_m 为理论最大吸附量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; K_L 为 Langmuir 常数, $\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$; K_F 为 Freundlich 常数, $\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$; n 为与吸附强度有关的参数。

3 结果与讨论

3.1 核磁分析

图 3 为 CP[5]、PVA 和酯化后 CP[5]-PVA 的核磁氢谱。CP[5]-PVA 中保留了 PVA 和 CP[5] 烷基链的特征峰, 同时在 13.0 ppm 处的羧基特征峰消失, 表明酯化反应已成功进行。

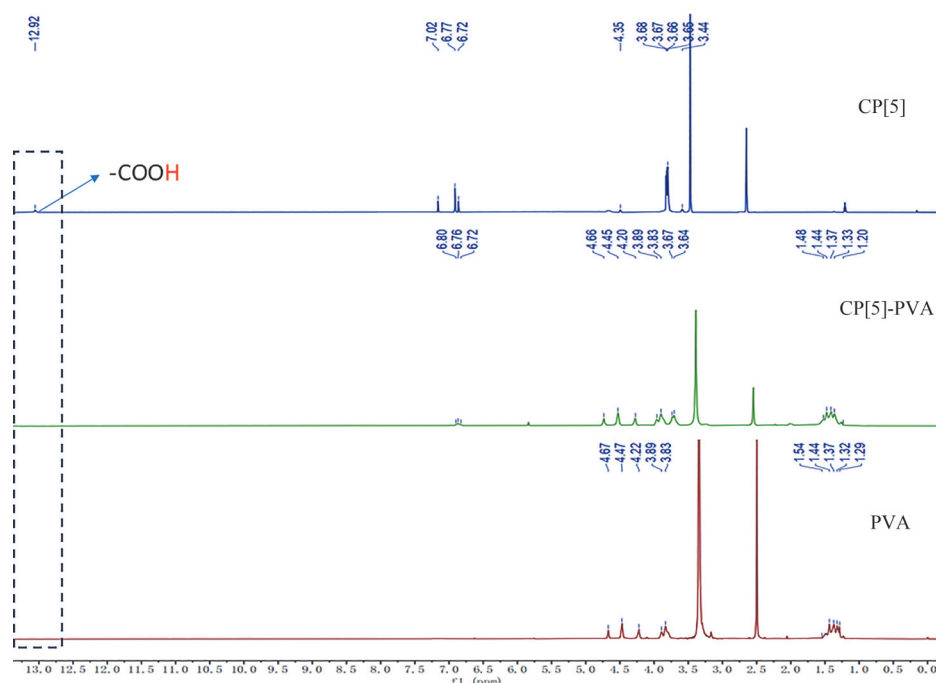


图3 CP[5]、CP[5]-PVA 和 PVA 的核磁氢谱。

Figure 3 ^1H NMR spectra of CP[5], CP[5]-PVA, and PVA.

3.2 SEM分析和BET分析

CP[5] 和 CP[5]-PVA 的微观形貌通过 SEM 进行观察, 结果如图 4(a)~(b) 所示。交联后的 CP[5]-PVA 呈现三维网络结构。在 77 K 下, 通过 N_2 吸附-脱附测试研究 CP[5] 和 CP[5]-PVA 的孔隙结构性质。如表 1 所示, CP[5]-PVA 的比表面积为 $31.163 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 大于 CP[5] 的 $16.701 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 这可能是因为交联程度的增加促进了多孔结构的形成。同时从孔尺寸和孔体积的对比来看, 交联后的 CP[5]-PVA 具有更优异的孔隙性质, 为其在吸附领域的应用提供了支持。

3.3 CP[5]-PVA 材料的吸附性能分析

3.3.1 染料的浓度标准曲线

CR 和 NR 的浓度标准曲线如图 5 所示, 吸光度 A 和浓度 C 之间存在良好的线性关系。以吸光度为纵坐标、浓度为横坐标进行线性拟合, 得到 NR 的线性方程为 $A=0.7838C-0.14873$, 相关系数 $R^2=0.9940$, CR 的线性方程为 $A=9.02786 \times 10^{-4}C+1.03571 \times 10^{-5}$, 相关系数 $R^2=1.000$ 。

3.3.2 CP[5]-PVA 的吸附能力分析

图 6 (a) 为 CP[5]-PVA 对染料的吸附效率随时间变化曲线。吸附初期, 材料表面存在大量吸附位点, 且染料初始浓度较高, 吸附快速发

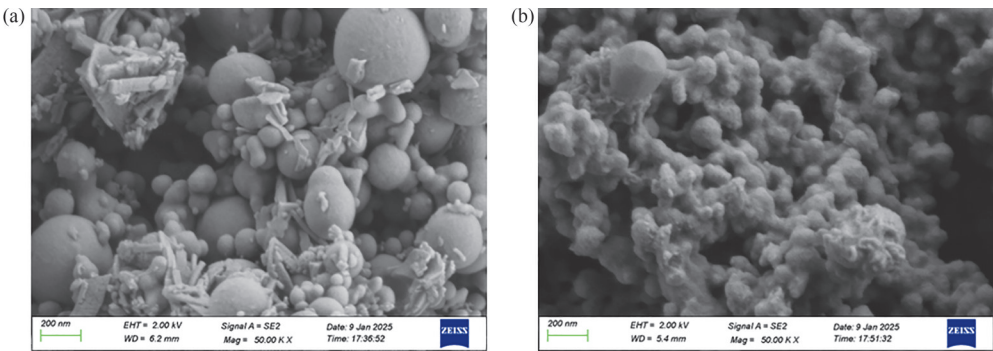


图4 SEM图: (a) CP[5]; (b) CP[5]-PVA。
Figure 4 SEM images: (a) CP[5]; (b) CP[5]-PVA.

表1 CP[5]和CP[5]-PVA 的孔隙特征参数。
Table 1 Pore characteristics of CP[5] and CP[5]-PVA.

样品	比表面积 ($\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)	孔径 (nm)	总孔容 ($\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$)
CP[5]	16.701	13.494	0.062
CP[5]-PVA	31.163	15.260	2.281

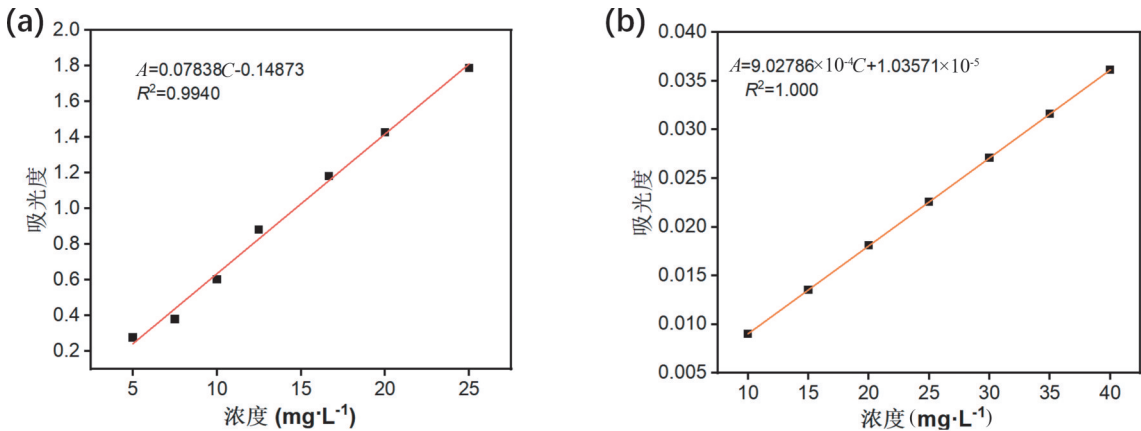


图5 染料的浓度标准曲线图: (a) NR; (b) CR。
Figure 5 Standard curves of dye concentration: (a) NR; (b) CR.

生, 吸附效率迅速增加。随后, CP[5]-PVA 表面的吸附位点逐渐被染料占据, 伴随染料浓度下降, 染料分子与位点结合的概率下降, 吸附效率逐渐减缓, 最终达到平衡状态, 此时 CP[5]-PVA 对染料的吸附能力达到饱和。CR 在 30 min 内可达到 96.85% 左右的吸附平衡, NR 在 45 min 内可达到 99.92% 左右的吸附平衡。

3.3.3 CP[5]-PVA 的吸附动力学分析

CP[5]-PVA 对染料的吸附动力学曲线如图 6(b)~(d) 所示。对比准一级动力学模型和准二级动力学模型的拟合结果, 发现准二级动力学模型能更好地描述 CP[5]-PVA 对染料的吸附过程, 对 CR 和 NR 吸附的 R^2 均达到 0.999, 见表 2。表明在吸附过程中, 化学吸附起到了主导作用。

Weber-Morris 颗粒内扩散模型拟合结果显示: 第一阶段斜率陡峭, 反映了快速的边界层扩散过程, 即染料分子从溶液传输至 CP[5]-PVA 的外表面边界层; 第二个阶段对应染料分子向 CP[5]-PVA 内部孔隙的缓慢扩散。

3.3.4 CP[5]-PVA 的吸附等温线分析

使用 Langmuir 模型和 Freundlich 模型对吸附过程进行拟合, 结果如图 6(e)~(f) 所示。Langmuir 模型的 R^2 (0.978 和 0.989) 高于 Freundlich 模型的 R^2 (0.937 和 0.973)。因此, Langmuir 模型可以更好地描述该吸附行为, 表明吸附发生在均一表面上, 形成单分子层吸附。Langmuir 模型拟合得到 CR 和 NR 的最大吸附量分别为 258.40 mg/g 和 125.16 mg/g。

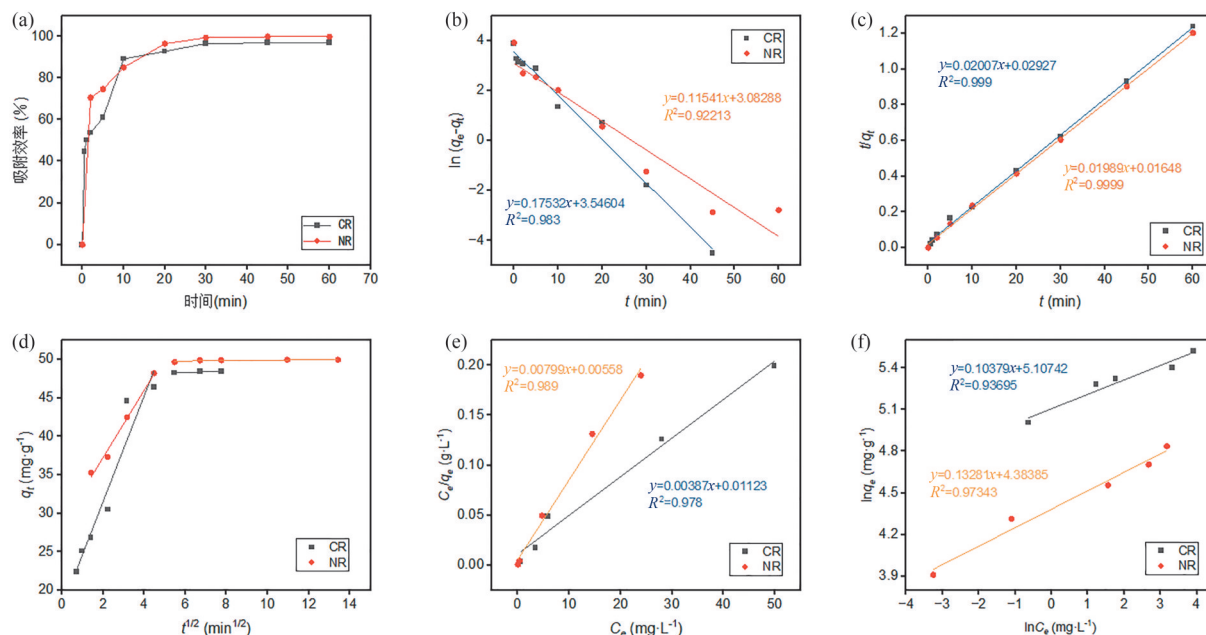


图6 吸附数据分析: (a) 染料吸附效率; (b) 准一级动力学模型拟合; (c) 准二级动力学模型拟合; (d) Weber-Morris 颗粒内扩散模型拟合; (e) Langmuir 模型拟合; (f) Freundlich 模型拟合。

Figure 6 Adsorption data analysis: (a) Dye adsorption efficiency; (b) Quasi-first-order model fitting; (c) Quasi-second-order model fitting; (d) Weber-Morris intragranular diffusion model fitting; (e) Langmuir model fitting; (f) Freundlich model fitting.

表2 各模型分析下决定系数 (R^2) 的对比。

Table 2 Comparison of R^2 under the analysis of each model.

	拟合模型	CR 染料	NR 染料
动力学模型	准一级动力学模型	0.983	0.922
	准二级动力学模型	0.999	0.999
热力学模型	Langmuir 等温吸附模型	0.978	0.989
	Freundlich 等温吸附模型	0.937	0.973

3.3.5 CP[5]-PVA 的循环使用性能

实验采用乙醇作为洗脱剂, 对 CP[5]-PVA 进行 5 次吸附-脱附循环实验, 结果如图 7 所示。经过 5 次吸附-脱附循环后, CP[5]-PVA 对 CR 的去除率从初始的 96.85% 下降至 92.54%, 对 NR 的去除率从初始的 99.92% 下降至 96.85%, 吸附效率下降不明显, 仍能保持较好的吸附性能, 表现出了良好的稳定性和可重复性。

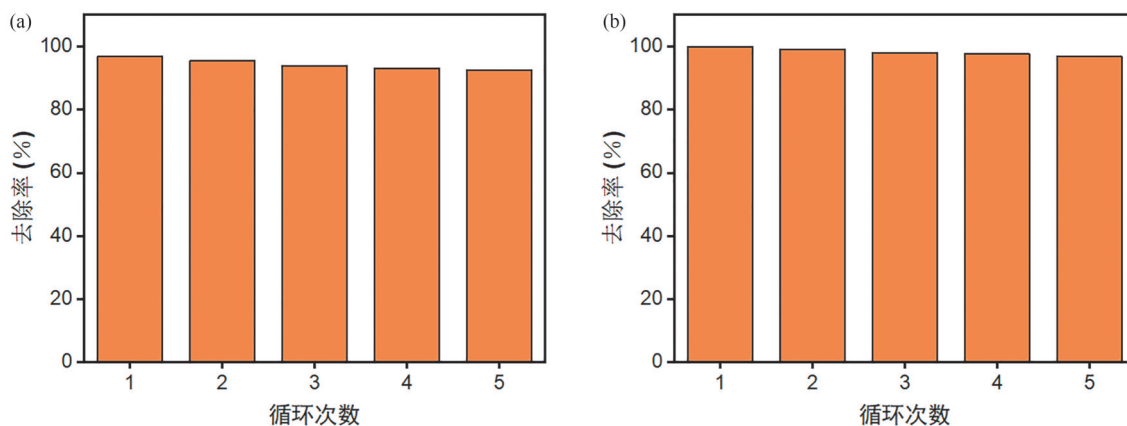


图7 CP[5]-PVA 吸附效率随循环周期的变化: (a) CR; (b) NR。

Figure 7 The adsorption efficiency of CP[5]-PVA varies with the cycle period: (a) CR; (b) NR.

4 结 论

合成了一种具有三维交联结构的大环聚合

物材料 CP[5]-PVA, 对其进行了详细表征, 并研究了其对染料的吸附性能。核磁共振氢谱证实了材料的成功合成; SEM 表明了 PVA 的添加

增加了交联点, 形成了空间三维网状结构; BET 结果表明了比表面积的增加。吸附实验表明, CP[5]-PVA 的吸附过程符合准二级动力学模型和 Langmuir 等温吸附模型, 证实吸附过程是以化学吸附为主的单层吸附过程, 且对 CR 和 NR 的吸附效率均在 45 min 内超过

96.00%, 最大吸附量分别达 258.40 mg/g 和 125.16 mg/g, 而且通过连续吸附-脱附循环实验验证了 CP[5]-PVA 的稳定性和可重复性。这些性能预示着该材料在水处理等方面有着潜在的应用价值, 也为吸附材料的研究提供了思路和探索路径。

参考文献

- 1 Ji X F, Wu R T, Long L L, et al. Physical removal of anions from aqueous media by means of a macro-cycle-containing polymeric network [J]. *Journal of the American Chemical Society*, **2018**, 140(8): 2777-2780.
- 2 Ihsanullah I, Jamal A, Ilyas M, et al. Bioremediation of dyes: Current status and prospects [J]. *Journal of Water Process Engineering*, **2020**, 38: 101680.
- 3 Javaid R, Qazi U Y, Ikhlaq A, et al. Subcritical and supercritical water oxidation for dye decomposition [J]. *Journal of Environmental Management*, **2021**, 290(15): 112605.
- 4 Kaur R, Kaushal S, Singh P P. Efficient removal of Hg(II) ions from waste water by a new nano-composite poly-o-toluidine tin-zirconium(IV) molybdophosphate [J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, **2021**, 101(1): 1-16.
- 5 Vijwani H, Nadagouda M N, Namboodiri V, et al. Hierarchical hybrid carbon nano-structures as robust and reusable adsorbents: Kinetic studies with model dye compound [J]. *Chemical Engineering Journal*, **2015**, 268: 197-207.
- 6 Amirilargani M, Merlet R B, Hedayati P, et al. MIL-53(Al) and NH₂-MIL-53(Al) modified α -alumina membranes for efficient adsorption of dyes from organic solvents [J]. *Chemical Engineering Journal*, **2019**, 55 (28): 4119-4122.
- 7 Hart L R, Hunter J H, Nguyen N A, et al. Multivalency in healable supramolecular polymers: The effect of supramolecular cross-link density on the mechanical properties and healing of non-covalent polymer networks [J]. *Polymer Chemistry*, **2014**, 5(11): 3680-3688.
- 8 Wang P, Yao Y, Xue M. A novel fluorescent probe for detecting paraquat and cyanide in water based on pillar[5]arene/10-methylacridinium iodide molecular recognition [J]. *Chemical Communications*, **2014**, 50: 5064-5067.
- 9 Han C Y, Zhang Z B, Yu G C, et al. Syntheses of a pillar[4]arene[1]quinone and a difunctionalized pillar[5]arene by partial oxidation [J]. *Chemical Communications*, **2012**, 48: 9876-9878.
- 10 Zhang G, Lou X Y, Li M H, et al. A pillar[5]arene-based crosslinked polymer material for selective adsorption of organic dyes [J]. *Dyes and Pigments*, **2022**, 206: 110576.
- 11 Lv X Q, Xia D Y, Cheng Y J, et al. Supramolecular hyperbranched polymer gels based on pillar[5]arene and their applications in removal of micropollutants from water [J]. *Inorganic Chemistry Frontiers*, **2022**, 9(23): 6248-6257.
- 12 Ju H Q, Zhou X Q, Shi B B, et al. A pillar[5]arene-based hydrogel adsorbent in aqueous environments for organic micropollutants [J]. *Polymer Chemistry*, **2019**, 10(42): 5821-5828.

Dye Adsorption Properties of Pillar[5]Arene-Polyvinyl Alcohol Crosslinked Polymers

GONG Shan-hao¹, MA Jia-xin², JIA Lan^{1*}, WANG Pi^{1*}

(¹College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

²Scientific Instrument Center, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract The adsorbent of CP[5]-PVA was prepared by esterification of carboxyl pillar[5]arene and polyvinyl alcohol. It has a fast and efficient adsorption effect on congo red (CR) dye and neutral red (NR) dye, respectively. The adsorption efficiency of CR reached 96.85% in 30 min, and the adsorption efficiency of NR reached 99.92% in 45 min. The adsorption process of CP[5]-PVA on CR and NR dyes conformed to the quasi-second-order adsorption kinetic model and the Langmuir isothermal adsorption model, and the maximum adsorption capacity was 258.40 mg/g for CR and 125.16 mg/g for NR, respectively.

Keywords Pillar[5]arene, Polyvinyl alcohol, Three-dimensional cross-linked network, Dye adsorption

* Corresponding author: JIA Lan, E-mail: jialan@tyut.edu.cn; WANG Pi, E-mail: wangpi@tyut.edu.cn.