

甘蔗渣生物炭/地质聚合物复合微球的制备 及其对染料去除的研究^①

齐文康¹, 张馨怡¹, 杨语桐¹, 黄春杰¹, 薛兴勇¹, 苏俏俏¹, 韩要丛¹, 莫文旭¹, 许煜坤¹, 莫林强²

(1.广西民族大学 化学化工学院, 广西多糖材料与改性重点实验室, 广西 南宁 530006; 2.广西交通职业技术学院, 广西 南宁 530023)

摘要: 将甘蔗渣于惰性气氛下煅烧得到甘蔗渣生物炭, 将生物炭与偏高岭土混合, 选择水玻璃为激发剂, 采用悬浮固化法制备了甘蔗渣生物炭/地质聚合物复合微球(BGM), 通过 XRD、FT-IR、BET 和 XPS 对 BGM 微观结构进行了表征, 并研究了 BGM 对结晶紫(CV)和亚甲基蓝(MB)的吸附性能。结果表明, 生物炭的引入有利于提高偏高岭土地质聚合物微球的吸附性能, BGM 对这 2 种染料的吸附过程符合拟二级动力学模型, BGM-20 对 CV 和 MB 理论最大吸附量分别为 138.031、79.128 mg/g, 吸附过程可用 Langmuir 方程进行描述。动态吸附实验发现 BGM 对 CV 和 MB 的耗尽时间均超过 8 500 min, BGM 可作为固定床吸附介质材料用于处理染料废水。

关键词: 甘蔗渣; 偏高岭土; 生物炭; 地质聚合物; 吸附剂; 染料废水; 废水处理

中图分类号: TQ424; X703; TB334

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.02.029

文章编号: 0253-6099(2025)02-0162-07

Preparation of Sugarcane Bagasse Biochar/Geopolymer Composite Microspheres for Dye Removal

QI Wenkang¹, ZHANG Xinyi¹, YANG Yutong¹, HUANG Chunjie¹, XUE Xingyong¹, SU Qiaoqiao¹,

HAN Yaocong¹, MO Wenxu¹, XU Yukun¹, MO Linqiang²

(1. Guangxi Key Laboratory of Polysaccharide Materials and Modification, School of Chemistry and Chemical Engineering, Guangxi Minzu University, Nanning 530006, Guangxi, China; 2. Guangxi Vocational and Technical College of Communications, Nanning 530023, Guangxi, China)

Abstract: Bagasse was calcined under an inert atmosphere to produce biochar, which was then mixed with metakaolin and taken to prepare sugarcane bagasse biochar/geopolymer composite microspheres (BGM) by using sodium silicate as an activator. The microstructure of BGM was characterized by XRD, FTIR, BET and XPS, and its adsorption performance for crystal violet (CV) and methylene blue (MB) was also investigated. Results show that the introduction of biochar can enhance the adsorption capacity of metakaolin-based geopolymer microspheres. The adsorption processes of BGM for both dyes follow the pseudo-second order kinetic model. BGM-20 can have theoretically maximum adsorption capacities of 138.031 mg/g for CV and 79.128 mg/g for MB, which can be well-described by the Langmuir isotherm model. Dynamic adsorption experiments revealed that the time required for adsorption of CV and MB by BGM to reach exhaustion exceeded 8 500 min, indicating that BGM can be taken as a fixed-bed adsorption medium material for dye wastewater treatment.

Key words: sugarcane bagasse; metakaolin; biochar; geopolymer; adsorbent; dye wastewater; wastewater treatment

地质聚合物是一种低成本环保型无机聚合物材料, 一般由碱在近室温下激发偏高岭土、矿渣、粉煤灰

等无定形铝硅酸盐原料缩聚/聚合而成^[1-2]。地质聚合物微球材料强度高, 微球直径和孔径易于调控^[3], 适

① 收稿日期: 2024-10-22

基金项目: 广西民族大学科研基金(引进人才科研启动项目 2020KJQD08); 广西民族大学自治区级大学生创新创业训练计划项目(S202310608238); 国家自然科学基金(52302019); 2023年度广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2023KY1153)

作者简介: 齐文康(1999—), 男, 山东东营人, 硕士研究生, 主要研究方向为地质聚合物吸附材料。E-mail: 1005233056@qq.com

通信作者: 薛兴勇(1985—), 男, 贵州遵义人, 博士, 副教授, 主要研究方向为地质聚合物功能材料。E-mail: 315254042@qq.com

合固定床动态吸附^[4-5],同样适用于负载其他吸附剂^[6-7]。普通生物炭在应用过程中普遍存在循环再生难、大规模固定床应用难等问题。本文将生物炭与偏高岭土地质聚合物复合制备新型复合微球吸附材料,解决生物炭传统应用问题,并系统研究了生物炭-偏高岭土地质聚合物复合微球(BGM)的结构及其对染料结晶紫(CV)和亚甲基蓝(MB)的吸附性能。

1 实验

1.1 BGM 的制备

实验原料主要有:偏高岭土(MK),粒度 34~44 μm,巩义金澳耐材有限公司;甘蔗渣,广西远特农业科技有限公司;结晶紫(CV),分析纯,天津市大茂化学试剂厂;亚甲基蓝(MB),分析纯,广东光华科技股份有限公司;氢氧化钠,分析纯,国药集团化学试剂有限公司;二甲硅油,2 000CS,美国道康宁公司;水玻璃,工业级,蚌埠市精诚化工有限责任公司。去离子水为实验室制备。

BGM 的制备过程:向 50 g 水玻璃中加入 8.42 g 氢氧化钠,调节其模数至 1.3,在室温下自然冷却。将甘蔗渣置于管式炉中,向炉中通入一定流量的 N₂,于 N₂ 保护下缓慢升温至 300 °C,保温 1 h 得到生物炭(BC)。根据预定比例称取 BC 与 MK 置于烧杯中,随后加入 40 g 上述水玻璃及 16.87 g 去离子水,利用高速分散机对混合物进行高速搅拌,确保浆料均匀混合。将浆料缓慢滴入 80 °C 硅油中,滴入过程中维持搅拌。滴入完成后,继续搅拌 10 min,然后将混合物转移至 80 °C 烘箱中保温 12 h。固化后混合物经抽滤、洗涤、烘干得到固体样品,将样品放入管式炉, N₂ 氛围下在 400 °C 保温 4 h 后自然冷却,冷却后的样品用去离子水洗涤至 pH 值达中性,然后烘干处理得到 BGM 样品。实验中考察了 BC 添加量的影响,按 BC/(BC+MK) 质量分数分别为 0、10% 和 20% 制备复合微球,对应样品分别标记为 BGM-0、BGM-10、BGM-20。

1.2 BGM 表征方法

采用 Micromeritics ASAP 2460 全自动比表面及孔隙度分析仪(BET)测试 BGM 比表面积;采用 Thermo Scientific K-Alpha X 射线光电子能谱仪(XRD)观摩 BGM 微观晶体结构;采用 Nicoletis10 傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR)测试 BGM 表面官能团;采用 Carl Zeiss Supra-55-Sapphire 扫描电子显微镜(SEM、EDS)观摩 BGM 微观形貌,分析材料表面成分;采用 Cray 60 型紫外可见分光光度计测定溶液浓度。

1.3 BGM 吸附实验

在静态吸附实验中,系统考察了 BC 添加量、BGM

投入量、染料初始浓度以及吸附时间对 CV 和 MB 去除率的影响。实验操作如下:向 100 mL 一定浓度染料溶液中加入预定量 BGM,放入空气摇床,在 25 °C 恒温下以 250 r/min 速率振荡,一定时间后取上清液,采用紫外-可见分光光度计测试其吸光度,通过标准曲线换算得到染料浓度。采用吸附量和去除率表征 BGM 的吸附效果:

$$Q = \frac{(C_0 - C_1) \cdot V}{m} \quad (1)$$

$$R = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100\% \quad (2)$$

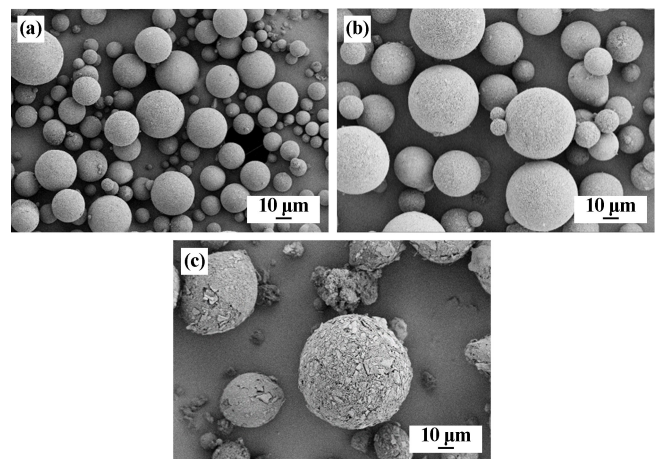
式中:Q 为吸附量,mg/g;R 为染料去除率,%;C₀ 为染料初始浓度,mg/L;C₁ 为吸附后染料浓度,mg/L;V 为染料体积,L;m 为吸附剂投入量,g。

2 实验结果与讨论

2.1 BGM 的表征

2.1.1 SEM 分析

图 1 展示了不同 BC 添加量下 BGM 吸附剂表面微观结构。由图 1 可见,BC 的加入对 MK 成球后微观结构和比表面积有较大影响。BGM-0 球形度很好,表面质地均匀;BGM-10 球形度无明显变化,部分 BC 被固化在微球表面,部分被包裹在地质聚合物微球当中;BGM-20 球形度受到一定影响,表面变得较为粗糙,可以清晰观察到大量 BC 被包覆到微球上。



(a) BGM-0; (b) BGM-10; (c) BGM-20

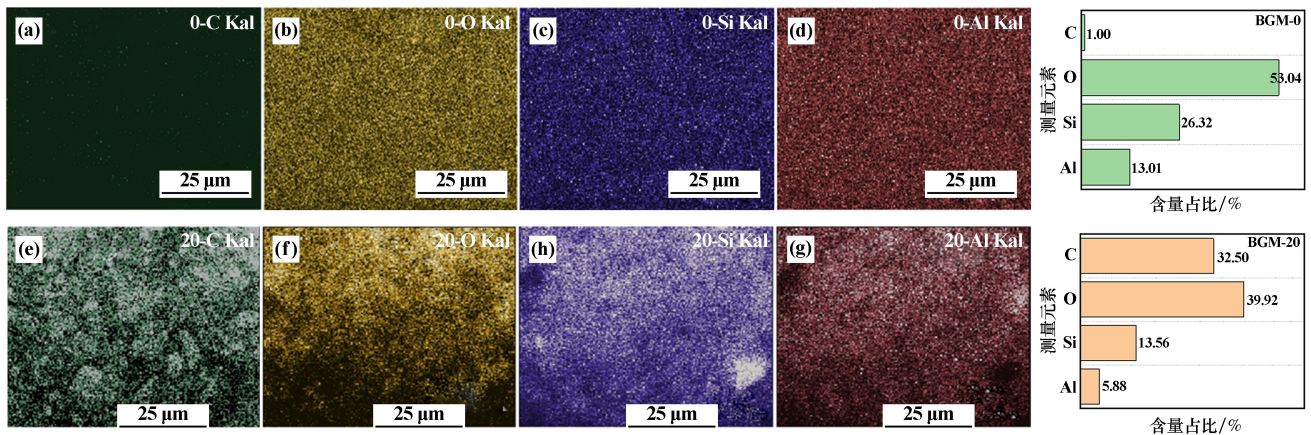
图 1 不同 BC 添加量下 BGM 的 SEM 照片

Fig.1 SEM images of BGM with different amounts of BC

图 2 为 BGM 样品表面 EDS 图谱。从图 2 可以看出,相对于 BGM-0,BGM-20 中 C 含量显著增加,进一步证实 BC 分散于地质聚合物微球当中。此复合方

法,BC添加量较少时,在不明显影响微球球形度时可增加材料比表面积,提供更多吸附位点。同时,相对于无

规则形状的BC材料,具有较好球形度的BGM复合材料更有利于应用到固定床吸附,拓展BC材料应用范围。



(a)~(d) BGM-0; (e)~(h) BGM-20

图2 BGM样品表面EDS图谱

Fig.2 EDS spectra of BGM sample surface

2.1.2 XRD分析

图3为不同样品XRD图谱。3种样品均为典型非晶结构^[8]。其中BC复合后对于地质聚合物在 $15^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 的宽驼峰性质^[9-10]没有实质影响。BC在悬浮固化过程中因为剪切力作用被地质聚合物颗粒包裹,只有部分呈现在BGM表面,因此BC在 $25^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 处的特征峰在BGM-20中强度变弱。

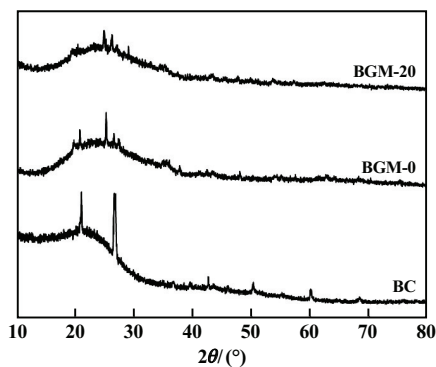


图3 不同样品X射线衍射图像

Fig.3 X-ray diffraction pattern of different products

2.1.3 FT-IR分析

图4为不同样品FT-IR谱图。3种材料在 $3\ 200\sim 3\ 600\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰由—OH伸缩振动引起^[11-12]。BC中 $2\ 923.5\text{ cm}^{-1}$ 左右处的弱吸收峰由—CH₃和—CH₂的对称与非对称伸缩振动引起^[13-14], $1\ 603.1\text{ cm}^{-1}$ 处出现吸收峰,表明BC中羰基与苯环共轭时,芳环特征峰可能分裂为环振吸收峰。 $2\ 360.7\text{ cm}^{-1}$ 处吸收峰为地质聚合物特征峰,属于Si—H伸缩振动, $1\ 650\text{ cm}^{-1}$ 处属

于—OH弯曲振动峰, $900\sim 1\ 200\text{ cm}^{-1}$ 处较宽吸收峰属于Al—O—Si弯曲振动峰,形成碱性铝硅酸盐网络^[15], $400\sim 800\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰由Si—O—A(A代表Si或Al)不对称拉伸振动产生^[16]。

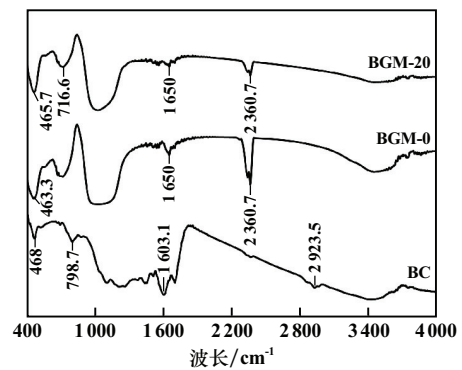
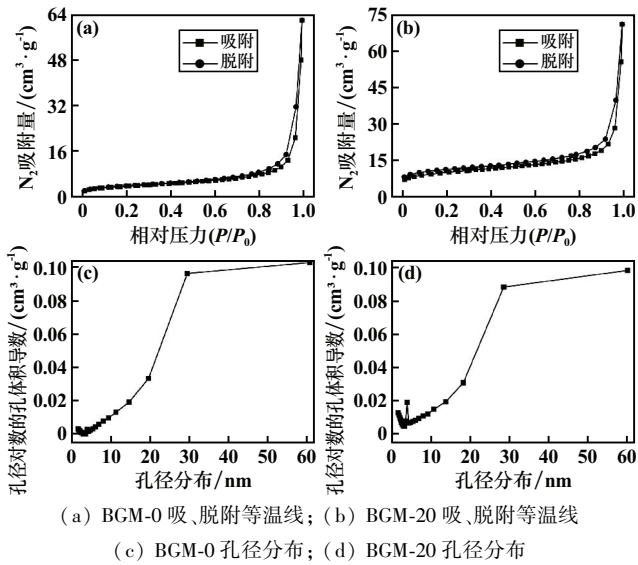


图4 不同样品红外光谱图

Fig.4 Infrared spectra of different samples

2.1.4 BET分析

不同样品的N₂吸、脱附等温线及孔径分布见图5。由图5可知,BGM-20吸、脱附等温线属于Ⅲ和Ⅳ型吸、脱附等温线^[17],表明吸附剂在材料表面发生了多层吸附,且在吸附过程中,吸附质分子之间的相互作用力明显大于其与吸附剂之间的相互作用力。孔径分布显示,BGM-20孔径范围主要集中于10 nm左右,可能由于在热解阶段,热解使得气体从原料内部向外部瞬间膨胀,使部分微孔孔径继续增大,并发生进一步反应,生成介孔和大孔。BGM-20在负载BC之后,相较于BGM-0比表面积大幅提升,孔体积得到明显提高,介孔居多,与吸、脱附等温线结论一致。



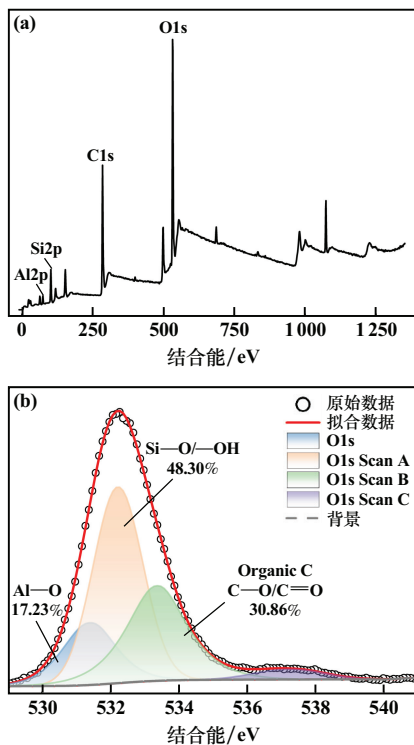
(a) BGM-0 吸、脱附等温线; (b) BGM-20 吸、脱附等温线
(c) BGM-0 孔径分布; (d) BGM-20 孔径分布

图 5 不同样品的 N₂ 吸、脱附等温线及孔径分布

Fig.5 N₂ adsorption and desorption isotherms and pore size distribution of different samples

2.1.5 XPS 分析

图 6 为 BGM-20 的 XPS 谱图。为进一步探索 BGM-20 中各元素存在形式,对其 XPS 谱图进行分峰拟合。从图 6(a)可以看出,BGM-20 中检测到的主要元素为 C、O、Si、Al。O 元素是生物炭-地质聚合物结构中重要元素之一,对 O 进行了 XPS 精细谱表征,如图 6(b)所示,



(a) 全谱; (b) O1s 精细谱

图 6 BGM-20 的 XPS 谱图

Fig.6 XPS spectra of BGM-20

在结合能 531.5、532.5 eV 处光电子峰分别对应 Al—O 与 Si—O 四面体结构^[18-19]。地质聚合物成分中铝硅含量是一定的,因此在 532.5 eV 处光电子峰还代表—OH 基团,BGM 制备过程中有大量 OH⁻,产生了 Si—OH 键^[20]。Si—OH 基团是地质聚合物中的碱基单元中的基本单元,而地质聚合物中 Al 一般以 Al—OH 形式存在于[AlO₄]⁻四面体中,因此碱基单元会与 OH—Al 进一步反应生成 Si—O—Al^[21]。

2.2 BGM 对 CV 和 MB 的吸附性能

2.2.1 BC 添加量对 CV 和 MB 去除效果的影响

溶液体积 100 mL, CV 质量浓度 100 mg/L, MB 质量浓度 50 mg/L, 溶液中吸附剂添加量 100 mg, 吸附时间 24 h, 不同吸附剂对 CV 和 MB 的吸附效果如图 7 所示。由图 7 可以看出, 没有复合 BC 的地质聚合物微球 BGM-0 吸能力最弱; 随着 BC 添加量增加, 吸附效果逐渐提升; 且不同吸附剂对 CV 的吸附效果均优于对 MB 的吸附效果。从图 1 可知, BC 添加量达到 20% 以后, BGM 球形结构基本保留, 前期研究中发现当 BC 添加量提升至 30% 以后, BGM 不能较好保持球形形貌, 因此后续实验以 BGM-20 为吸附剂。

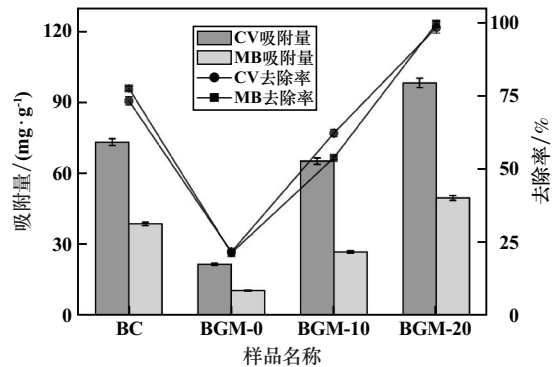


图 7 不同吸附剂对 CV 和 MB 的吸附效果

Fig.7 Removal effect of CV and MB by different adsorbents

2.2.2 BGM-20 添加量对 CV 和 MB 去除效果的影响

其他条件不变,研究了 BGM-20 添加量对 CV 和 MB 吸附效果的影响,如图 8 所示。染料去除率随着 BGM-20 添加量增加而增加,但饱和吸附量逐渐降低。低添加量 (50 mg) 时,吸附剂对 CV 吸附量可达 139.58 mg/g,去除率为 70% 左右,而对 MB 吸附量为 84.61 mg/g, BGM-20 对 CV 吸附效果优于对 MB 的去除效果。综合考虑吸附剂对二者的吸附量和去除率,添加量均选择 75 mg 进行后续实验。

2.2.3 不同 pH 值下 BGM-20 对 CV 和 MB 去除效果的影响

其他条件不变, BGM-20 添加量 75 mg (即 750 mg/L),

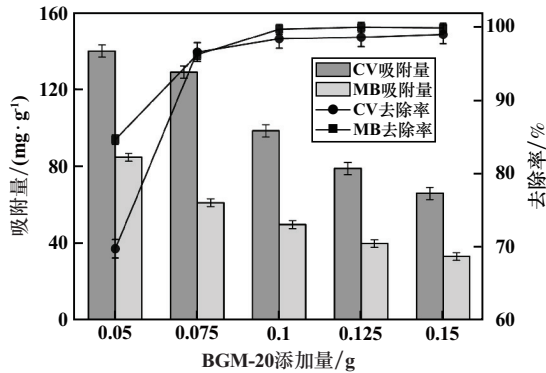


图8 BGM-20 添加量的吸附效果

Fig. 8 Adsorption effect of BGM-20 with different dosage

不同 pH 值下 BMG-20 对 CV 和 MB 吸附效果如图 9 所示。BMG-20 对 2 种染料的吸附量和去除率首先均随着 pH 值增加缓慢增大, pH 值较低时, 溶液中的 H^+ 会抑制吸附剂对染料的去除效果, 多余质子 (H^+) 与染料分子竞争微球材料吸附位点, 并且还会发生静电排斥, 导致吸附能力差, 随着 pH 值增加到中性时, 排除 H^+ 干扰, 吸附效果增强; pH > 7 后, BGM-20 对染料的吸附量及去除率变化不大。后续选择 pH = 7 进行实验。

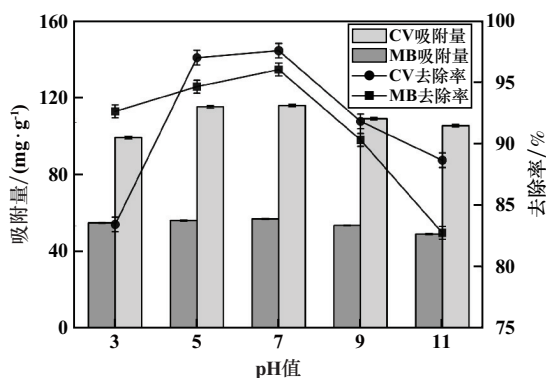


图9 不同 pH 值下的吸附效果

Fig. 9 Adsorption effect under different pH

2.2.4 吸附动力学

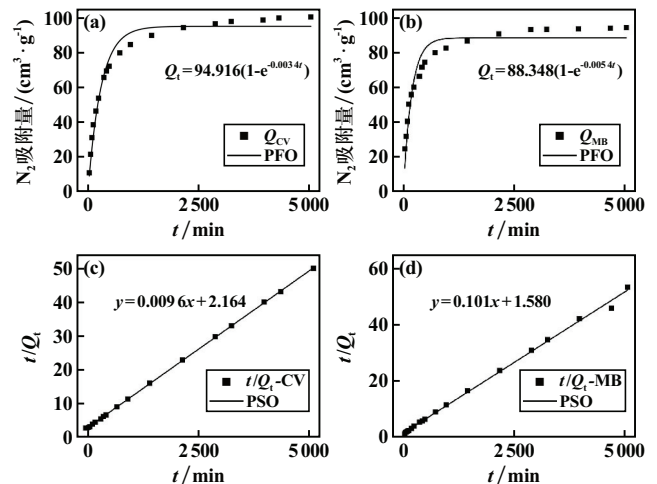
采用拟一级动力学 (Pseudo-first order model, PFO)、拟二级动力学 (Pseudo-second order model, PSO) 模型对吸附过程进行模拟。PFO 和 PSO 的表达式分别为:

$$Q_t = Q_e(1 - e^{-k_1 t}) \quad (3)$$

$$\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{k_2 Q_e^2} + \frac{t}{Q_e} \quad (4)$$

式中: Q_t 、 Q_e 分别为吸附时间 t 时和吸附平衡时的吸附量, mg/g ; k_1 为拟一级动力学模型吸附常数, min^{-1} ; k_2 为拟二级动力学模型吸附常数, $g/(mg \cdot min)$ 。

其他条件不变, 溶液 pH = 7, BGM-20 对 CV 和 MB 的吸附动力学曲线及拟一级和拟二级动力学模型拟合曲线如图 10 所示, BGM-20 吸附 CV 和 MB 拟一级、拟二级动力学模型拟合参数见表 1。



(a) CV 拟一级动力学模型曲线; (b) MB 拟一级动力学模型曲线;
(c) CV 拟二级动力学模型曲线; (d) MB 拟二级动力学模型曲线

图10 BGM-20 对 CV 和 MB 的吸附动力学曲线及拟一级和拟二级动力学模型拟合曲线

Fig. 10 Adsorption kinetics curve of CV and MB by BGM-20 and fitting curves of pseudo-first and pseudo-second order models

表1 BGM-20 吸附 CV 和 MB 拟一级、拟二级动力学模型拟合参数

Table 1 Fitting parameters of pseudo-first and pseudo-second order kinetic models for adsorption of CV and MB by BGM-20

染料	拟一级动力学			R^2	拟二级动力学		
	$Q_t/(mg \cdot g^{-1})$	$Q_e/(mg \cdot g^{-1})$	k_1/min^{-1}		$Q_e/(mg \cdot g^{-1})$	$k_2/(g \cdot mg^{-1} \cdot min^{-1})$	R^2
CV	102.29	94.92	0.003	0.971	104.49	0.000 04	0.999
MB	96.31	88.35	0.005	0.913	99.11	0.000 06	0.997

由图 10 和表 1 可以看出, 拟一级动力学模型的相关系数 R^2 显著低于拟二级动力学模型, 表明拟二级动力学模型能更准确描述吸附动力学, CV 和 MB 理论吸附量分别为 104.49 和 99.11 mg/g , 与实验测定值 102.29 和 96.31 mg/g 接近, BGM-20 对 CV 和 MB 的吸

附过程主要为化学吸附^[22]。

2.2.5 吸附等温线

为研究吸附平衡机理, 利用 Langmuir 和 Freundlich 等温模型对实验数据进行拟合。前者模拟了均匀单分子层吸附行为, 而后者描述非均匀多分子层吸附行为^[20]。

$$Q_e = \frac{Q_m \cdot k_L \cdot C_e}{1 + k_L \cdot C_e} \quad (5)$$

$$Q_e = k_F \cdot C_e^{-n} \quad (6)$$

式中: Q_m 为 BGM 对 CV 和 MB 最大吸附量, mg/g; k_L 为 Langmuir 常数; k_F 和 n 均为 Freundlich 常数。

吸附等温线模型拟合曲线见图 11, 相应拟合参数见表 2。当染料浓度 C_e 值较低时, BGM-20 吸附量迅速增加; 而 C_e 值较高时, BGM-20 吸附量增加速度缓慢, 最终达到吸附平衡。Langmuir 模型线性相关系数大于 Freundlich 模型, Langmuir 模型计算得出的最大吸附量 (Q_m) 与实验吸附平衡数据吻合度更高, BGM-20 对 CV 和 MB 理论最大吸附量分别为 138.031 和 79.128 mg/g。Langmuir 模型更适宜于描述染料分子在 BGM-20 上的吸

附行为, 表明吸附过程遵循均匀单分子层吸附机制^[23]。

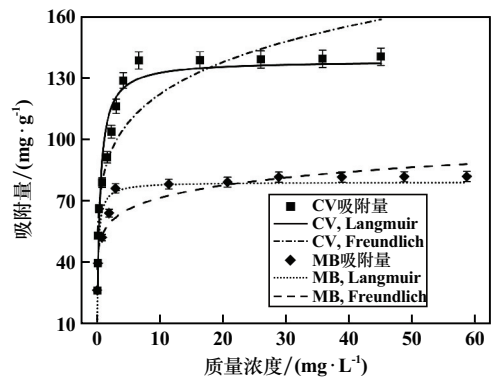


图 11 BGM-20 对 CV 和 MB 的吸附等温线模型拟合曲线
Fig. 11 Fitting curves of adsorption isotherm model of CV and MB by BGM-20

表 2 BGM-20 吸附 CV 和 MB 的 Langmuir 和 Freundlich 模型拟合参数

Table 2 Fitting parameters of Langmuir and Freundlich models for adsorption of CV and MB by BGM-20

染料	$Q_e / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	Langmuir 模型			Freundlich 模型		
		$Q_m / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$k_L / (\text{L} \cdot \text{mg}^{-1})$	R^2	$k_F / [(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}) \cdot n^{-1}]$	n	R^2
CV	139.979	138.031	2.237	0.951	81.852	0.173	0.833
MB	81.859	79.128	5.391	0.889	54.648	0.117	0.869

2.2.6 动态吸附

在动态吸附实验中, 研究了 BGM-20 吸附剂对 CV 和 MB 的固定床吸附。选择 2 个玻璃柱 (内径 0.03 m, 高 0.50 m), BGM-20 填充高度 0.02 m, CV 和 MB 进料溶液质量浓度分别为 10 和 5 mg/L, 以 1 mL/min 固定流速向上泵送通过 2 个吸附柱, 间隔一定时间采集样品, 直到 C_t/C_0 大于等于 0.9 (C_t 和 C_0 分别表示动态实验装置出口和入口的染料浓度)。动态吸附实验中 BGM-20 吸附 CV 和 MB 的穿透曲线如图 12 所示。动态实验结果表明, BGM-20 对 2 种有机染料均表现出优异的吸附效果, 有效工作时间长, 实验条件下 BGM-20 对 CV 和 MB 的耗尽时间均超过 8 500 min, 适合作为固定床介质材料用于处理染料废水。

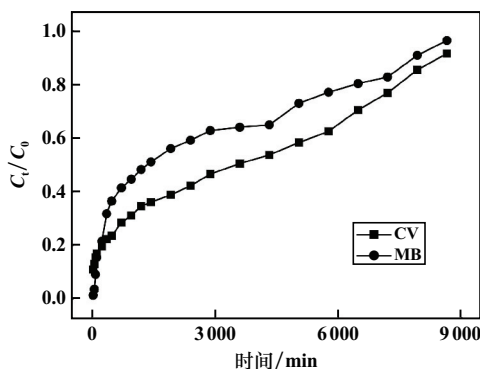


图 12 BGM-20 对 CV 和 MB 的动态吸附过程

Fig. 12 Dynamic adsorption process of CV and MB by BGM-20

3 结论

- 1) BC 添加量对复合微球形貌有一定影响, BGM-20 对染料 CV 和 MB 具有较好的吸附效果。
- 2) BGM-20 对 CV 和 MB 的理论最大吸附量分别为 138.031 和 79.128 mg/g。动力学研究结果表明, BGM-20 对这两种染料的吸附过程更符合拟二级动力学模型。等温吸附实验结果表明, 吸附过程可用 Langmuir 方程进行描述。
- 3) 动态吸附实验中, BGM-20 对 CV 和 MB 的耗尽时间均超过 8 500 min, BGM-20 适合作为固定床的吸附介质材料用于处理染料废水。

参考文献 (References):

[1] DAVIDOVITS J. Geopolymers and geopolymeric materials[J]. Journal of Thermal Analysis, 1989, 35(2): 429-441.

[2] TOME S, ETOH M, ETAME J, et al. Improved reactivity of volcanic ash using municipal solid incinerator fly ash for alkali-activated cement synthesis[J]. Waste and Biomass Valorization, 2020, 11(6): 3035-3044.

[3] NOVAIS M R, SEABRA M, LABRINCHA J. Porous geopolymer spheres as novel pH buffering materials[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 143: 1114-1122.

[4] ZHANG L, FU F, TANG B. Adsorption and redox conversion behaviors of Cr(VI) on goethite/carbon microspheres and akageneite/carbon microspheres composites[J]. Chemical Engineering Journal,

- 2019,356:151-160.
- [5] NOVAIS M R, ASCENSÃO G, TOBALDI M D, et al. Biomass fly ash geopolymer monoliths for effective methylene blue removal from wastewaters[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018,171:783-794.
- [6] NOVAIS M R, CARVALHEIRAS J, SEABRA P M, et al. Red mud-based inorganic polymer spheres bulk-type adsorbents and pH regulators[J]. *Materials Today*, 2019,23:105-106.
- [7] NOVAIS M R, BURUBERRI L, SEABRA M, et al. Novel porous fly ash-containing geopolymers for pH buffering applications[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016,124:395-404.
- [8] LAMAS D G, NETO M O, KELLERMANN G, et al. 5: X-ray diffraction and scattering by nanomaterials[M]//ALESSANDRA L DA RÓZ, MARYSTELA FERREIRA, FABIO de LIMA LEITE. *Nanocharacterization Techniques*. Elsevier; c2017:111-182.
- [9] 邓穆玲,张扬,潘大卫,等. 碱刻蚀玄武岩纤维对地质聚合物基木材胶黏剂胶接性能的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2021,40(6):2062-2069.
- DENG Muling, ZHANG Yang, PAN Dawei, et al. Effect of alkali etching basalt fiber on bonding performance of geopolymer based wood adhesive[J]. *Silicate bulletin*, 2021,40(6):2062-2069.
- [10] WAN Q, RAO F, SONG S, et al. Geopolymerization reaction, microstructure and simulation of metakaolin-based geopolymers at extended Si/Al ratios[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2017,79:45-52.
- [11] 陈冬素,陈亮,阎丽. 枣树枝改性生物炭对水溶液中锌离子的吸附性能研究[J]. *矿冶工程*, 2024,44(3):130-134.
- CHEN Dongsu, CHEN Liang, YAN Li. Adsorption of zinc ions in aqueous solution by modified biochar from jujube branch[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2024,44(3):130-134.
- [12] 姚丽,钟盛文. 生物质吸附剂吸附回收硫脲废液中金的研究[J]. *矿冶工程*, 2024,44(4):223-228.
- YAO Li, ZHONG Shengwen. Adsorption and recovery of gold from waste thiourea liquid by biomass-based adsorbent[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2024,44(4):223-228.
- [13] DA O, CHEN Y, YAN J, et al. Activation mechanism of peroxymonosulfate by biochar for catalytic degradation of 1,4-dioxane: Important role of biochar defect structures[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019,370:614-624.
- [14] 郑庆福,王永和,孙月光,等. 不同物料和炭化方式制备生物炭结构性质的 FTIR 研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014,34(4):962-966.
- ZHENG Qingfu, WANG Yonghe, SUN Yueguang, et al. FTIR Study on the structure and properties of biochar prepared by different materials and carbonization methods[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014,34(4):962-966.
- [15] SHALBAFAN A, THOEMEN H. Geopolymer-bonded laminated veneer lumber as environmentally friendly and formaldehyde-free product; Effect of various additives on geopolymer binder features[J]. *Applied Sciences*, 2020,10(2):593.
- [16] EL-NAGGAR M, AMIN M. Impact of alkali cations on properties of metakaolin and metakaolin/slag geopolymers; Microstructures in relation to sorption of ¹³⁴Cs radionuclide[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018,344:913-924.
- [17] GINEYS M, BENOIT R, COHAUT N, et al. Behavior of activated carbon cloths used as electrode in electrochemical processes[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017,310:1-12.
- [18] BLACK L, GARBEV K, STEMMERMANN P, et al. Characterisation of crystalline C-S-H phases by X-ray photoelectron spectroscopy[J]. *Cement and Concrete Research*, 2003,33(6):899-911.
- [19] MANISH M, ARCHANA S, CHOUHAN R K, et al. Fly ash red mud geopolymer with improved mechanical strength[J]. *Cleaner Engineering and Technology*, 2021(4):100215.
- [20] YANG Z, HAO L, TAO M, et al. Understanding the changes in engineering behaviors and microstructure of FA-GBFS based geopolymer paste with addition of silica fume[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023,70:106450.
- [21] NAN Y, CHEN Y, YANG J, et al. Transformations of Na, Al, Si and Fe species in red mud during synthesis of one-part geopolymers[J]. *Cement and Concrete Research*, 2017,101:123-130.
- [22] WEI X, HUANG T, YANG J, et al. Green synthesis of hybrid graphene oxide/microcrystalline cellulose aerogels and their use as superabsorbents[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017,335(5):28-38.
- [23] 谢雪珍,胡杨玲,叶有明,等. MPTS 改性高岭土吸附剂的制备及其吸附性能研究[J]. *矿冶工程*, 2024,44(1):105-110.
- XIE Xuezheng, HU Yangling, YE Youming, et al. Preparation of MPTS-modified kaolin adsorbent and its adsorption properties[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2024,44(1):105-110.
- 引用本文: 齐文康,张馨怡,杨语桐,等. 甘蔗渣生物炭/地质聚合物复合微球的制备及其对染料去除的研究[J]. *矿冶工程*, 2025,45(2):162-168.
- QI Wenkang, ZHANG Xinyi, YANG Yutong, et al. Preparation of sugarcane bagasse biochar/geopolymer composite microspheres for dye removal[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2025,45(2):162-168.