

CTAB 调控多级孔煤矸石沸石的制备及罗丹明 B 的吸附性能研究

康建

宁夏理工学院 理学与化学工程学院，宁夏石嘴山，753000；

摘要：煤矸石目前其资源利用率较低，高值化利用水平仍有待提升。本论文以煤矸石为原料，十六烷基三甲基溴化铵（CTAB）作为介孔调控剂，通过水热合成制备微孔-介孔煤矸石沸石，探究 CTAB 添加量及吸附工艺参数对罗丹明 B（RhB）吸附性能的影响。结果表明：当各物质摩尔比为 SiO₂:Al₂O₃:Na₂O:CTAB:H₂O=2:1:5:0.07:184 时，平衡吸附量 q_e 为 4.07mg/g，去除率为 81.30%；以该最佳 CTAB 添加量制备的沸石进行单因素吸附试验，确定其对 RhB 的最佳吸附参数为：初始浓度 70mg/L、溶液 pH=7、吸附温度 50℃、吸附时间 100min、沸石投加量 0.2g/10mL，在此条件下，去除率提高至 90.3%，不过受初始浓度等参数变化影响，平衡吸附量下降至 3.2mg/g。本研究成果有望为煤矸石高值化利用提供新路径。

关键词：多级孔煤矸石沸石；吸附性能；罗丹明 B

DOI: 10.64216/3080-1508.25.12.059

煤矸石作为煤炭开采过程中的固体废物，随意堆放，不仅占用了宝贵的土地资源，还可能引发滑坡、泥石流等地质灾害。威胁着人类的健康和生存^[1]。沸石是一种多孔的硅铝酸盐材料，化学分子式为 Na₂₀·xAl₂O₃·ySiO₂·zH₂O。煤矸石的主要成分为高岭石，其中含有大量的硅铝酸盐，是合成沸石的理想原材料^[2]。传统水热合成法所合成的沸石大多属于微孔，微孔级沸石在吸附过程中吸附阻力过大，并且微孔对吸附平衡时饱和和吸附量较小，吸附性能降低，应用范围比较狭窄^[3]。本论文

通过添加少量的造孔剂。研究造孔剂添加量对沸石吸附性能的影响。利用煤矸石合成沸石，并将其应用于水处理领域，具有很好的工程应用前景与社会环境效益。

1 材料和方法

1.1 试验原料

煤矸石取自宁夏某选煤厂。样品经破碎和细磨，取 200 目筛下的粉末备用。采用 XRF 分析煤矸石的成分如表 1 所示。

表 1 煤矸石主要化学元素分析（%）

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MgO	SO ₃	MnO
烧前	47.852	22.012	5.141	2.484	1.959	0.863	0.58	0.115	0.059
成分	P ₂ O ₅	NaO	ZrO ₂	SrO	Rb ₂ O	ZnO	C		合计
烧前	0.059	0.04	0.013	0.01	0.008	0.007	18.8		100

煤矸石（GC）中含有大量 Si、Al、C 元素，含量分别为：47.852%、22.012% 和 18.8%，CG 中 $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Al}_2\text{O}_3) \approx 3.70$ 。

1.2 制备方法

（1）高温煅烧活化：在 800℃ 下对煤矸石进行 2h 高温煅烧处理，得到活化煤矸石（PCG）；（2）碱熔：Na₂O:SiO₂:Al₂O₃=5:2:1 的摩尔比补加 SiO₂ 和 Al₂O₃，混合后放入马弗炉中，700℃ 煅烧 3h。（3）水热合成：将碱熔渣细磨，按 Na₂O:SiO₂:Al₂O₃:CTAB:H₂O 的比例

为 5:2:1:x:184 的摩尔比加入 CTAB 和 H₂O，常温搅拌 4h，转移至水热反应釜中，在 180℃ 条件下恒温反应 8h。将沸石转移至离心管中，以 8000rpm 离心 5min；直至上清液 pH 值稳定在 7.5±0.3 范围内。将洗涤后的沸石在 120℃ 干燥，置于研钵中研磨约 5min。用于 RhB 吸附试验。

1.3 标准曲线的绘制

配制浓度分别为 0mg/L、2.0mg/L、4.0mg/L、6.0mg/L、8.0mg/L 的 RhB 标准溶液。在最大吸收波长 554nm 下测

定吸光度值 A，绘制标准曲线如图 2 所示：

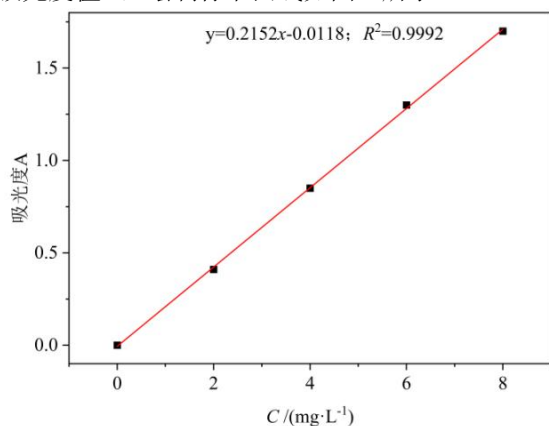


图 1 RhB 标准曲线

2 结果与讨论

2.1 CTAB 添加量对煤矸石沸石结构及吸附性能的影响

按照 SiO₂:Al₂O₃:Na₂O:CTAB:H₂O 的比例为 2:1:5:x:184；其中 x 为 0.01、0.03、0.05、0.07、0.09 制备沸石。沸石对 RhB 的吸附量和去除率如图 2 所示：

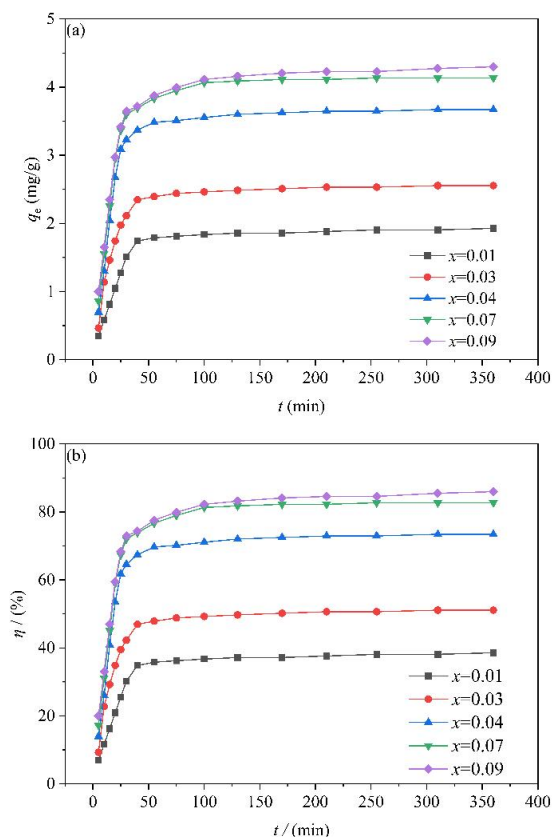


图 2 不同比例 CTAB 下 RhB 的吸附量和去除率

随着 CTAB 比例的增加，沸石对 RhB 的吸附量和去除率增加，沸石比表面和孔径增大，沸石对 RhB 的吸附

性能提高。当 CTAB 添加比例 0.07 时，所制备的沸石几乎在所有的检测点都接近于最大值^[3]。

2.3 煤矸石沸石对罗丹明 B 的吸附性能研究

2.3.1 吸附时间

移取 50mg/L RhB 溶液 10mL 于锥形瓶中，加入 0.1g 沸石。在不同时刻移取 1mL 上清液，同时补充 1mL H₂O 维持体系体积恒定。沸石对 RhB 的吸附性能如图 3 所示。

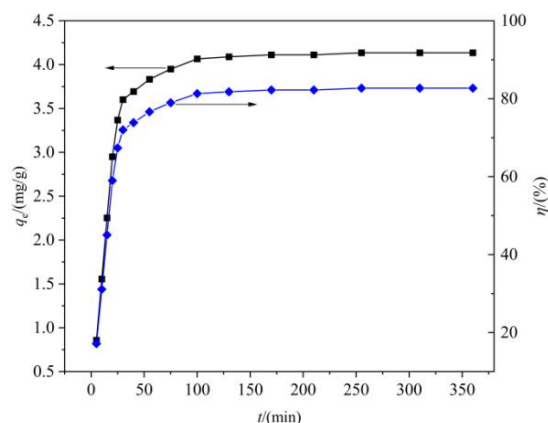


图 3 不同吸附时间对 RhB 的吸附量和去除率

在初始阶段 (0~30min)，沸石表面吸附位点较多，RhB 无需竞争即可快速被吸附；此阶段体系传质阻力较小，吸附量与去除率均呈现快速上升趋势。在中期阶段 (30~60min) 随着吸附时间延长，沸石表面的吸附位点逐渐被 RhB 占据，未被吸附的 RhB 需通过竞争才能结合剩余吸附位点，导致吸附量的上升速率明显减缓^[5]。当吸附时间 100min 时，沸石对 RhB 的吸附-解吸过程达到动态平衡状态，吸附量稳定在 4.07mg/g，去除率为 81.3%。后续实验选取 100min 作为吸附时间。

2.3.2 溶液 pH 值

采用盐酸或氢氧化钠溶液调节吸附体系的 pH 值分别为 1、3、5、7、9、11、13；不同 pH 值下，沸石对 RhB 的吸附量与去除率如图 4 所示。

当 pH 为 1~7 时，沸石对 RhB 的吸附量和去除率整体水平较低，但随着 pH 的增大而升高，当 pH=7 时吸附率达到最高点。说明在酸性条件时，由于溶液中存在大量的 H⁺ 占据了沸石表面的吸附活性点，同时中和沸石层间的部分负电荷，导致整体吸附率较低。当 pH 为 7~13 时，吸附率几乎没有变化。这是因为随着 pH 增大，溶液中的 OH⁻ 增多，而 RhB 属于阳离子染料，其很容易与溶液中 OH⁻ 作用，导致的 RhB 的正电性降低，沸石中的

负电荷对 RhB 的静电作用降低^[6]。所以最佳 pH=7, 此时吸附量为 4.07 mg/g; 去除率为 81.3%。

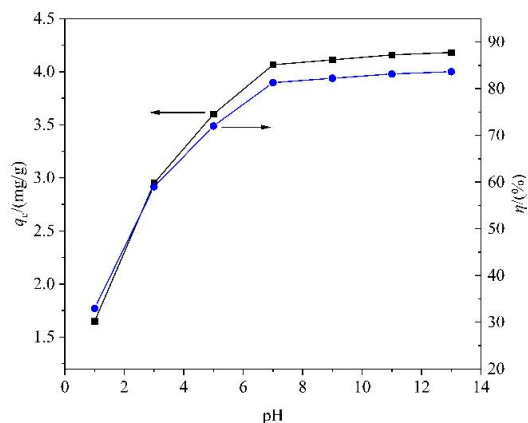


图 4 不同 pH 值下 RhB 的吸附量和去除率

2.3.3 吸附温度

其他吸附条件不变, 设置吸附温度分别为 25℃、30℃、40℃、50℃、60℃、70℃、80℃, 吸附结果见图 5。

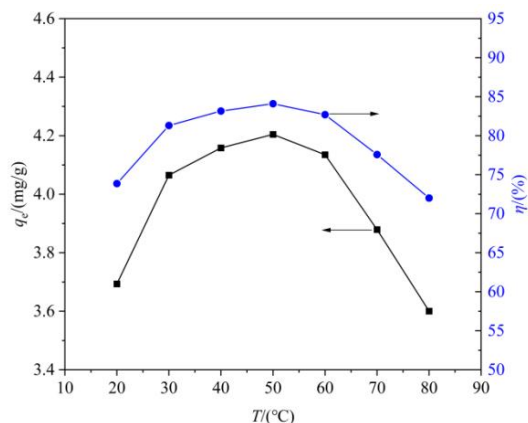


图 5 不同温度下 RhB 的吸附量和去除率

当温度低于 50℃时, 随着温度的升高沸石对 RhB 的去除率迅速升高, RhB 的吸附量和去除率受温度的影响比较大。温度升高, RhB 在沸石分子的外部表面及内部孔内的扩散增强, 故适当地升高温度有利于吸附的进行。温度高于 50℃时, 随着温度的升高去除率缓慢下降, 这是因为当温度较高时, 沸石的脱附速率增加, 导致吸附容量下降, 使其对染料分子的吸附率降低^[7]。选择适宜的吸附温度为 50℃。

2.3.4 初始浓度

RhB 初始浓度分别为 10mg/L、30mg/L、50mg/L、70mg/L、100mg/L; 不同初始浓度下, 沸石对 RhB 的吸附量与去除率的影响如图 6 所示。

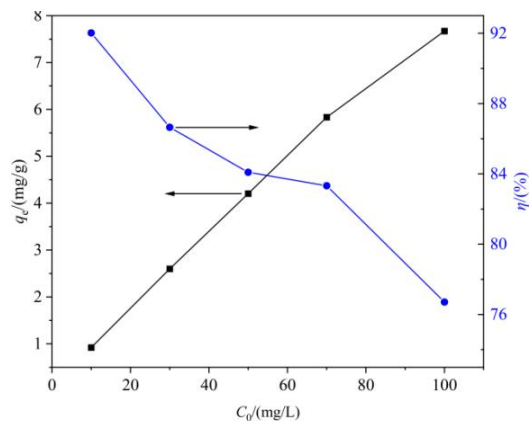


图 6 不同初始浓度下 RhB 的吸附量和去除率

当 RhB 的初始浓度处于 10mg/L-100mg/L 区间时, 吸附量呈线性增长, 去除率呈快速下降; 其中, 当初始浓度为 70mg/L 时, 吸附量为 5.6 mg/g; 去除率为 81.3%。当初始浓度超过 70mg/L 时, 去除率快速降低, 这是因为在此浓度下, 溶液中染料分子的浓度与沸石孔道内的扩散阻力形成平衡, 且溶液中阳离子浓度适中, 使得静电吸引力与空间位阻达成最佳平衡状态^[8]。后续初始浓度为 70mg/L。

2.3.5 吸附剂投加量

吸附剂投加量分别为 0.05g、0.1g、0.2g、0.3g、0.4g。不同投加量下, 沸石对 RhB 的吸附量与去除率的影响如图 7 所示。

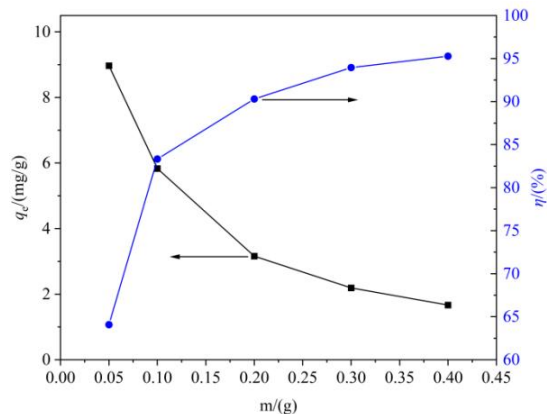


图 7 吸附剂投加量不同对 RhB 的吸附量和去除率

当吸附剂用量处于 0.05g-0.4g 时, RhB 的吸附量呈下降趋势, 而去除率呈上升趋势; 当用量为 0.20g 时, 吸附量为 3.2 mg/g; 去除率为 90.3%。沸石投加量增加时, 其总比表面积随之增大, 活性位点总量增多, 溶液中的 RhB 可更充分地占据活性位点, 因此去除率迅速上升; 当吸附剂投加量超过 0.2g 后, 会引发“位点冗余效应”, 导致活性位点利用率下降^[9]。综合考虑确定投

加量为 0.2g。

3 结论

当 SiO₂:Al₂O₃:Na₂O:CTAB:H₂O 为 2:1:5:0.07:184 时,平衡吸附量 q_e 为 4.07mg/g,去除率为 81.30%。初始浓度 70mg/L、溶液 pH=7、吸附温度 50℃、吸附时间 100min、沸石投加量为 0.2g/10mL,在此条件下,最大吸附量提升至 3.2mg/g,去除率稳定维持在 90.3%。

参考文献

- [1] 李亚清,宋沆,邓军,等.煤矸石固废资源化利用制备分子筛研究现状及进展[J].材料导报,2025,39(15):147-157.
- [2] WANG Q, XU W, CAI J, et al. Study on the Synthesis of LTA-Type Molecular Sieves from Coal Gangue and Aluminum Ash and Its Adsorption Properties towards Cu²⁺ [J]. Crystals, 2024, 14(4).
- [3] LIU Y, QIU X, FAN Y, et al. From natural clinoptilolite to hierarchical designed porous geopolymer-zeolite monoliths: Synthesis, characterization and formation mechanism [J]. Construction and Building Materials, 2023, 408.
- [4] ZHENG Y, ZHOU J, MA Z, et al. Preparation of a High-Silicon ZSM-5 Molecular Sieve Using Only Coal Gangue as the Silicon and Aluminum So

urces [J]. Materials, 2023, 16(12).

[5] 田芳.包头地区煤矸石合成 NaA 沸石及其对三苯甲烷类染料的吸附性能研究[D].内蒙古师范大学,2022. DOI:10.27230/d.cnki.gnmsu.2022.001161.

[6] 李永生,常娜,陈延信,等.煤矸石基多孔地质聚合物-沸石复合膜的制备及其分离性能[J].硅酸盐学报,2025,53(04):965-976. DOI:10.14062/j.issn.0454-5648.20240626.

[7] 柳丹丹,陈羽桥,秦世尧,等.煤矸石-赤泥基磁性沸石对印染有机污染物的吸附性能[J].环境工程学报,2025,19(03):671-683. DOI:CNKI:SUN:HJJZ.0.2025-03-017.

[8] 郭振坤,范雯阳,周珊,等.利用煤矸石制备 4A 分子筛及吸附性能的研究[J].无机盐工业,2017,49(02):78-81.

[9] 刘富平,刘宏芳,刘润龙,等.Pb(II)和 Cd(II)在人造沸石上竞争吸附位点的研究[J].太原科技大学学报,2024,45(02):182-186+192. DOI:CNKI:SUN:TYZX.0.2024-02-013.

作者简介:康健(1987.04—),男,汉族,重庆市忠县,宁夏理工学院,硕士研究生,讲师,主要研究方向:固废资源化利用。

项目基金:宁夏高等学校科学研究项目(NXLG2022155)。