

# 废玻璃制备方沸石用于吸附废水中的重金属研究

柏静<sup>1</sup>, 钟海滢<sup>2</sup>, 郭建宁<sup>2</sup>, 容俊琪<sup>3</sup>, JEAN-BAPTISTE MAWULE DASSEKPO<sup>4\*</sup>

(1. 澳门科技大学可持续发展研究所, 澳门 999078; 2. 深圳信息职业技术学院交通与环境学院, 广东 深圳 518172; 3. 哈尔滨工业大学(深圳)土木与环境工程学院, 广东 深圳 518055; 4. 深圳信息职业技术学院滨海土木工程技术研究所, 广东 深圳 518172)

**摘要:**以废玻璃为原材料, 采用水热合成法制备方沸石, 探究其对废水中  $Pb^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$  和  $Cu^{2+}$  的吸附性能。通过批次实验系统考察了多种物理化学因素(pH、温度、接触时间等)对吸附量的影响。结果表明, 初始 pH 对吸附量的影响较为显著, 而温度变化对平衡吸附量的影响较小。确定了方沸石吸附  $Pb^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$  和  $Cu^{2+}$  的最佳工艺参数。利用 Langmuir 等温线模型对方沸石吸附水中的  $Pb^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$  和  $Cu^{2+}$  过程进行拟合, 结果表明, 该吸附过程是均质单分子层吸附, 且吸附动力学特征更符合准二级动力学方程, 证实了该吸附过程主要通过离子交换、化学吸附和表面络合作用实现。为废玻璃的资源化利用及废水中重金属的去除提供了一种低成本、高效率的方法。

**关键词:**废玻璃; 方沸石; 废水; 重金属; 吸附性能

中图分类号: TH3

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2024)S2-0134-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.S2.025

## Synthesis of analcime zeolite from spent glass and study its performance in adsorbing heavy metals from wastewater

BAI Jing<sup>1</sup>, ZHONG Hai-ying<sup>2</sup>, GUO Jian-ning<sup>2</sup>, IONG Chon-kei<sup>3</sup>,  
JEAN-BAPTISTE MAWULE DASSEKPO<sup>4\*</sup>

(1. The Institute for Sustainable Development, Macau University of Science and Technology, Macau 999078, China; 2. Institute of Traffic and Environment, Shenzhen Institute of Information Technology, Shenzhen 518172, China; 3. School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China; 4. Institute of Technology for Marine Civil Engineering, Shenzhen Institute of Information Technology, Shenzhen 518172, China)

**Abstract:** Pure analcime zeolite is successfully synthesized from spent glass via a hydrothermal method, and its adsorption capacity on heavy metals such as  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  and  $Cu^{2+}$  from wastewater is studied. The impacts of pH value, conditioning temperature and contact duration on the adsorption amount are investigated through batch experiment. It is found that the initial pH has a significant impact on the adsorption capacity, while the temperature has a small influence on the equilibrium adsorption capacity. Accordingly, the optimal process parameters for the adsorption of  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  and  $Cu^{2+}$  by analcime zeolite are obtained, and their adsorption process is fitted by means of Langmuir isotherm model. It is verified that the adsorption process belongs to homogeneous monolayer adsorption, the adsorption kinetic characteristics fits the quasi-secondary kinetic equation better, confirming that the process is mainly realized through ion exchange, chemical adsorption and surface complexing. This study provides a low-cost and high-efficiency method for the re-utilization of spent glass and the removal of heavy metals in wastewater.

**Key words:** spent glass; analcime zeolite; wastewater; heavy metals; adsorption performance

水是人类赖以生存和社会发展所必需的自然资源之一<sup>[1]</sup>, 随着工业化进程的加速, 多种重金属污染物已被检测到存在于水体中<sup>[2]</sup>, 排放量大且难以处理的重金属废水成为全球面临的一大环境挑战, 其中铅(Pb)、镉(Cd)、铜(Cu)是较为常见且危害性高的重金属元素, 因其持久性和生物富集性, 对生态

系统和人类健康造成了严重威胁<sup>[3]</sup>。因此, 开发高效、经济的技术以去除废水中重金属污染成为环境治理和水资源管理的重要课题。

传统的重金属废水的处理方法包括沉淀法<sup>[4]</sup>、生物修复法<sup>[5]</sup>、离子交换和吸附法<sup>[6]</sup>。其中, 吸附法由于操作流程简便、能耗较低及成本低廉而被认

收稿日期: 2024-04-06; 修回日期: 2024-08-13

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(52108233)

作者简介: 柏静(1993-), 女, 博士生, 研究方向为固体废物资源化工艺及其环境影响评价, jessiebai0564@163.com; JEAN-BAPTISTE MAWULE DASSEKPO(1986-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为绿色零排放建筑材料、高性能混凝土材料、海洋淤泥、废玻璃及多种建筑固废资源化利用等, 通讯联系人, dassekpo.jb@szit.edu.cn。

为是处理重金属废水的有效方法之一,其核心是选择一种高效、耐用、廉价及能耗低的吸附剂<sup>[7]</sup>。方沸石作为一种具有独特微观结构和良好吸附性能的天然或合成材料,其通道和孔隙能够高效地吸附和固定分子或离子,已被广泛用作重金属废水的吸附剂<sup>[8]</sup>。然而,由于天然方沸石的吸附容量有限,而改性方沸石材料制备过程耗时较长、成本较高,限制了其在废水处理领域中的应用<sup>[9]</sup>。

近年来,利用废弃物制备吸附材料已成为环境治理领域的研究热点,不仅有助于减轻废弃物对环境的污染,还能降低吸附材料制备的成本。2021年中国产生了约为2 275万t的废玻璃<sup>[10]</sup>,其中大约有1 005万t的废玻璃通过回炉再生及建筑材料骨料等回收方式得以再利用<sup>[11]</sup>,但受限于成本及技术条件<sup>[12]</sup>,这些应用领域未能充分发挥废玻璃的利用价值。当前,废玻璃回收的比例仍然较低,大量废玻璃未能得到有效处理,造成严重的资源浪费和环境污染。废玻璃作为一种含有高纯度二氧化硅的硅酸盐材料,利用废玻璃作为合成沸石等聚合物的优质前体材料具有巨大的潜力<sup>[13]</sup>。

基于此,笔者通过调整化学配比及应用水热合成法,以废玻璃为原料制备方沸石,并评估了其在水中 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 和 $\text{Cu}^{2+}$ 的吸附性能。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料和仪器

材料:所用废玻璃采集自校园内的分类垃圾站,经清洗、破碎和筛选后获得粒径为50~100  $\mu\text{m}$ 的玻璃粉末。盐酸( $\text{HCl}$ )、氢氧化钠( $\text{NaOH}$ )以及1 000 mg/L的铅离子( $\text{Pb}^{2+}$ )、1 000 mg/L的镉离子( $\text{Cd}^{2+}$ )和1 000 mg/L的铜离子( $\text{Cu}^{2+}$ )标准溶液,所有化学试剂均为分析纯,实验期间所用水均为去离子水。

仪器:电热恒温干燥箱、电子分析天平、数显大容量振荡器、磁力搅拌器、800E台式低速离心机、pH计、恒温振荡仪、循环水式多用真空泵、通风柜、场发射扫描电镜、透射电子显微镜、X射线衍射仪、粒径分析仪、电感耦合等离子体质谱分析仪等。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 方沸石的制备

采用低成本的水热合成法,以微米玻璃粉为原料制备方沸石晶体,具体过程如下:

(1)原料准备:将废玻璃回收并用洗涤剂清洗干净,通过机械破碎成玻璃碎片,利用球磨机粉磨,

用实验室自动筛分仪对玻璃粉进行筛分,筛选出50  $\mu\text{m}$ 的废玻璃粉末。

(2)水热反应:将筛选后的玻璃粉与2 mol/L  $\text{NaOH}$ 溶液置于水热反应釜中,在150 $^{\circ}\text{C}$ 下反应3 h。

(3)后处理:反应完成后,对所得固体产物进行洗涤、抽滤、干燥,用玛瑙研钵将方沸石晶体研磨至均匀粉末,过筛保存。

该过程不同于传统高成本的合成方法制备方沸石,而是将废玻璃粉体经水热分解过程制备成品,具有成本低、操作简便的特点。

#### 1.2.2 表征方法

利用X射线荧光光谱分析(XRF)仪进行化学成分分析;利用X射线衍射仪(XRD, Bruker D8 Advance型)测试样品的物相组成;利用热场发射扫描电子显微镜(SEM, ZEISS-Gemini 300)观察样品的表面形貌,并用其配备的能谱仪(EDS, Oxford Instruments X-MaxN)对样品进行微区元素分析。

#### 1.2.3 离子吸附实验

方沸石吸附 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 和 $\text{Cu}^{2+}$ 的实验方法如下:称取0.1 g方沸石样品于烧杯中,分别加入10 mL pH调节后的1 000 mg/L  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 和 $\text{Cu}^{2+}$ 溶液,置于磁力搅拌器中以300 r/min搅拌。反应后,取上层清液,用电感耦合等离子体质谱分析仪(ICP-MS)测定其上层清液中重金属离子的浓度,进而计算方沸石对重金属离子如 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 和 $\text{Cu}^{2+}$ 的吸附率 $Q(\%)$ 和吸附容量 $q(\text{mg/g})$ :

$$Q = [(C_0 - C)/C_0] \times 100\% \quad (1)$$

$$q = [(C_0 - C)V]/m \quad (2)$$

式中: $C_0$ 为溶液中 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 和 $\text{Cu}^{2+}$ 的初始质量浓度,mg/L; $C$ 为吸附后滤液中 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 和 $\text{Cu}^{2+}$ 的质量浓度,mg/L; $m$ 为吸附剂的质量,g; $V$ 为溶液的体积,mL。

## 2 结果与分析

### 2.1 成分分析

通过XRF和EDS对废玻璃的化学成分进行测定,如图1、表1所示。结果表明其主要成分为 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO}$ 。在本研究中,废玻璃作为硅源,在含有 $\text{NaOH}$ 的碱性溶液中发生反应。 $\text{NaOH}$ 溶液提供的碱性环境促进了废玻璃中的 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO}$ 等成分的溶解。在高温、高压条件下,溶液中的硅离子和铝离子逐渐结晶并沉淀下来形成方沸石晶体。此外,水分子在反应中既作溶剂促进了成分的溶解,又在晶体的形成和生长过程发挥了重要作用。

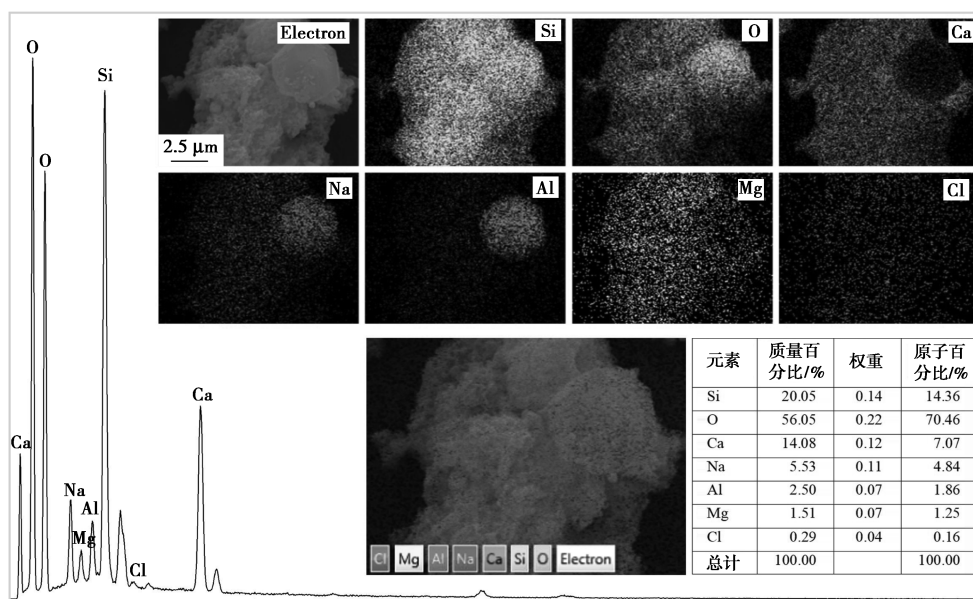


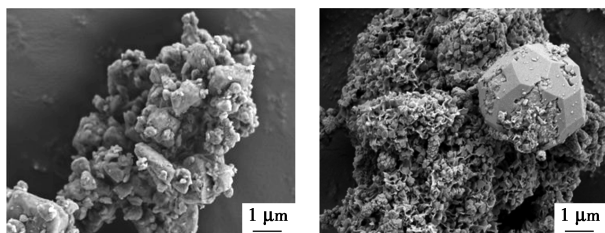
图 1 方沸石的 EDS 能谱

表 1 废玻璃粉各成分的质量分数

化学成分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
质量分数/%	69.43	2.03	15.35	0.13	0.47
化学成分	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	MgO	K <sub>2</sub> O
质量分数/%	9.27	0.07	0.01	1.69	0.68

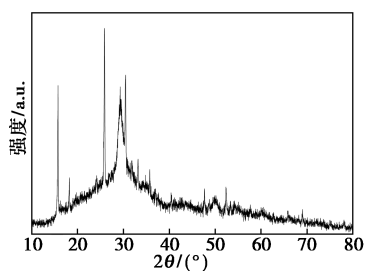
## 2.2 微观结构分析

通过 SEM 和 XRD 对废玻璃制备的方沸石进行微观结构分析,结果如图 2 所示。从图 2 中可以看出,方沸石的微观形貌显示出充足的孔隙结构,这些孔隙有利于重金属离子的快速传输和吸附。方沸石



(a) 玻璃粉 SEM 照片

(b) 方沸石 SEM 照片



(c) 方沸石的 XRD 图谱

图 2 废玻璃制备的方沸石的 SEM、XRD 图谱

晶体呈现出规则的四角三八面体晶型,由 4 个正四面体元素组成,具有 12 条边。这种晶型对方沸石结晶的稳定性和形态具有重要作用。此外,方沸石晶粒表现出整齐、完整的外观特征,说明方沸石在结晶过程中晶粒生长没有发生破坏或变形,展现了良好的形态特征。XRD 分析的半高宽度较小的特征峰表明,方沸石的晶体结晶度很高,即晶体结构完全、晶格长短一致,没有明显的杂质和缺陷形成。这种高结晶度是方沸石吸附和分离性能优异的基础,同时也能提高其稳定性和使用寿命。这些微观特征构成了方沸石作为一种重要吸附材料的物理基础。

## 2.3 吸附测试

### 2.3.1 pH 对吸附率的影响

溶液的 pH 是影响吸附材料性能的关键因素,其会改变吸附材料的表面电荷和质子化程度,进而影响模型离子在溶液中的存在形态,对重金属的吸附过程产生显著影响。考虑到当 pH 超过 8 时, Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 和 Cu<sup>2+</sup> 溶液会生成沉淀物,因此仅考察 pH 在 4~8 范围内对方沸石的吸附性能的影响。

按照 1.2.3 节的实验方法,分别取 1 000 mg/L 的 Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 和 Cu<sup>2+</sup> 溶液各 10 mL,加入 0.1 g 方沸石到烧杯中后,放到恒温振荡器中,于 25°C、300 r/min 下振荡 1 h。方沸石在不同 pH 条件下对 Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 和 Cu<sup>2+</sup> 的吸附效果如图 3 所示。从图 3 中可以看出,方沸石对 Pb<sup>2+</sup> 的吸附率随着溶液 pH 的升高而增大,在 pH = 8 时达到最大值,为 70.83 mg/g。而对 Cd<sup>2+</sup> 和 Cu<sup>2+</sup> 的吸附率在 pH = 6 时达到最大值,分

别为 53.23 mg/g 和 24.28 mg/g。

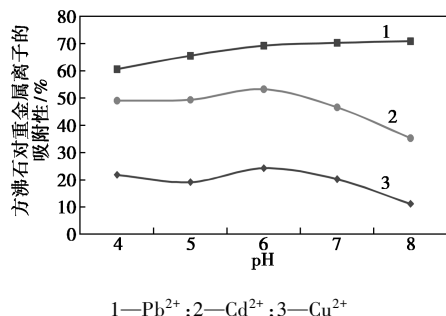


图3 pH对方沸石吸附 Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 和 Cu<sup>2+</sup> 的影响

### 2.3.2 温度对吸附率的影响

控制溶液的 pH 在 4.0~8.0 范围内,并在 20、25、30、35、40℃ 的不同温度条件下进行吸附重金属离子的实验,结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出,温度对方沸石吸附重金属离子的结果影响不大。表明在该温度范围内,方沸石对重金属离子的吸附性能并不受温度变化的显著影响。因此,在后续的实验中选择常温 25℃ 下进行,以保持结果的一致性并便于操作,从而控制其他变量,进而有效地研究方沸石对重金属离子的吸附行为。

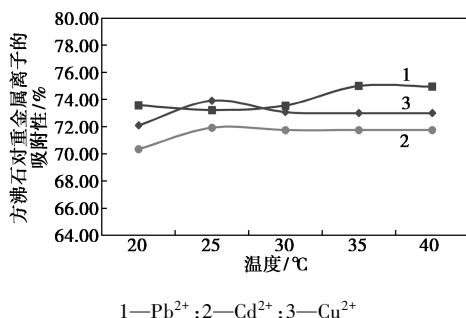


图4 温度对方沸石吸附 Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 和 Cu<sup>2+</sup> 的影响

### 2.3.3 时间对吸附率的影响

在方沸石吸附剂投加质量为 0.1 g、反应温度为 25℃、初始 pH 为 6 的条件下,研究了吸附时间对吸附效率的影响,实验结果如图 5 所示。从图 5 中可以看出,在吸附过程开始的前 60 min 内,Pb<sup>2+</sup> 和 Cu<sup>2+</sup> 的吸附速率较快,已基本达到平衡状态,而 Cd<sup>2+</sup> 的吸附达到平衡则需约 3 h。在达到吸附平衡时,Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 和 Cu<sup>2+</sup> 的平衡吸附量分别为 75.08、75.53 mg/g 和 74.05 mg/g。由此可见,方沸石吸附剂对 Cd<sup>2+</sup> 的吸附能力最强,Pb<sup>2+</sup> 次之,Cu<sup>2+</sup> 吸附能力相对较弱。同时,方沸石对这 3 类重金属离子的吸附过程较快,这与其他沸石类材料对重金属吸附方面的表现相似,表明方沸石具有较高的吸附性能,并可以作为一种有效的吸附材料用于废水中重金属离子如

Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 和 Cu<sup>2+</sup> 的去除。

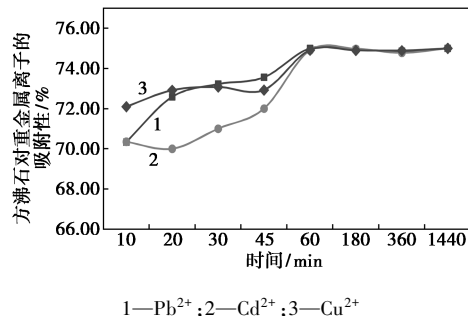


图5 吸附时间对方沸石吸附 Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 和 Cu<sup>2+</sup> 的影响

## 2.4 吸附行为分析

### 2.4.1 等温吸附模型

采用非线性 Langmuir 和 Freundlich 等温模型来拟合实验数据。Langmuir 模型是基于吸附质以单分子层的形式覆盖在吸附剂表面上的假设<sup>[14]</sup>,认为吸附剂表面上的吸附位点是均一的,并且吸附质分子之间不存在相互作用。模型的表达式为:

$$q_e = (bq_m\rho_e)/(1 + \rho_e) \quad (3)$$

$$R_L = 1/(1 + b\rho_0) \quad (4)$$

式中: $q_m$  为饱和吸附量; $b$  为 Langmuir 吸附常数; $q_e$  为平衡吸附量; $R_L$  是分离系数,反映吸附质与吸附剂之间的亲和力大小, $R_L > 1$  为非优惠吸附, $R_L = 1$  为线性吸附, $0 < R_L < 1$  为优惠吸附, $R_L = 0$  为不可逆吸附<sup>[15]</sup>。

Freundlich 模型则假设吸附表面是非均匀的,并且吸附质分子之间存在异质性相互作用,适用于多层吸附。Freundlich 模型的表达式为:

$$q_e = K_f\rho^{1/n} \quad (5)$$

式中: $K_f$  和  $n$  都是与吸附容量和强度有关的常数<sup>[16]</sup>。

通过对图 5 数据的拟合,与 Freundlich 等温线方程的拟合结果相比,Langmuir 吸附等温线方程对 3 种重金属吸附过程的拟合结果更为贴切,其  $R^2$  均在 0.99 以上。表明 Langmuir 吸附等温线方程更适合描述重金属离子 Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 和 Cu<sup>2+</sup> 在方沸石上的吸附过程。

### 2.4.2 吸附动力学分析

吸附动力学分析有助于了解吸附过程中吸附速率的快慢,并将接触时间作为变量。基于 Langmuir 模型的准一级动力学模型<sup>[17]</sup> 和准二级动力学模型<sup>[18]</sup> 对吸附剂的吸附动力学进行探索。准一级动力学模型基于 Langmuir 模型的假设,认为吸附反应速率与未被占据的吸附位点数成正比,其表达式为:

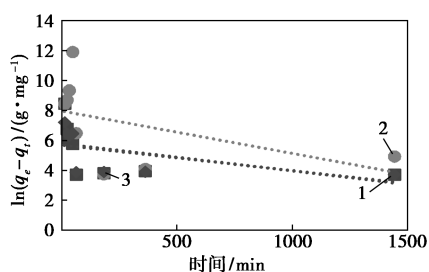
$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - (k_1/2.303)t \quad (6)$$

准二级动力学模型则假定吸附速率与未被占据的吸附位点数的平方成正比,表达式为:

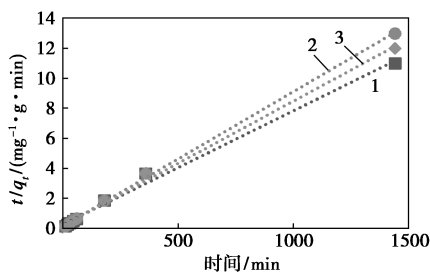
$$t/q_t = 1/(k_2 q_e^2) \cdot (t/q_e) \quad (7)$$

式中: $t$ 为吸附的时间, min; $q_e$ 和 $q_t$ 分别为吸附平衡和 $t$ 时刻的吸附量, mg/g; $k_1$ 为准一级动力学速率常数,  $\text{min}^{-1}$ ,用来表示吸附速率的快慢; $k_2$ 为准二级动力学速率常数,  $[\text{g}/(\text{mg} \cdot \text{min})]$ <sup>[19]</sup>;通过绘制 $\ln(q_e - q_t)$ 关于 $t$ 的图形获取 $k_1$ 和 $k_2$ 数值。通过绘制 $t/q_t$ 关于 $t$ 的图形获取 $q_e$ 数值。

将 1 000 mg/L 的  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$  和  $\text{Cu}^{2+}$  溶液各 10 mL 与 0.1 g 方沸石混合,于 25℃、pH = 6、300 r/min 的条件下进行振荡。通过对实验数据的拟合分析,准一级动力学模型和准二级模型拟合结果如图 6 所示。从图 6 中可以看出,准二级动力学模型与  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$  和  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附数据具有更高的相关性,相关系数  $R^2$  分别为 0.993 3、0.999 1 和 0.997 1,表明其能更准确地预测吸附行为。相较而言,准一级动力学模型的拟合度较低。由此验证,废玻璃制备的方沸石对这些金属离子的吸附是一个相对较慢而有序的过程,为化学吸附即化学反应在吸附过程中起到主导作用,与其他研究结果一致<sup>[20]</sup>。



(a) 准一级动力学拟合曲线



(b) 准二级动力学拟合曲线

1— $\text{Pb}^{2+}$ ; 2— $\text{Cd}^{2+}$ ; 3— $\text{Cu}^{2+}$

图 6 吸附动力学拟合结果

## 2.5 吸附机制分析

废玻璃作为一种丰富的硅酸盐资源 ( $\text{M}_x\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ , >80%, M 为 Na、Ca、K 等,  $x=1$  或 2), 具有显著的非晶态属性(约 100%)。将其作为原料制备方

沸石不仅是一种有效的资源化利用方式,而且提供了一种新型的重金属废水吸附材料。机械研磨过程使得玻璃粉达到微米尺度,增大了比表面积,为玻璃粉活化提供了条件。在强碱性环境中,玻璃粉的非晶态硅链发生断裂,化学本质上可行;同时,提高反应温度有助于加快反应动力学过程,促进方沸石晶体的快速形成。

方沸石对重金属离子的吸附主要通过以下机制实现:

(1) 离子交换机制:在方沸石晶体结构中, $\text{SiO}_4$  和  $\text{AlO}_4$  四面体通过氧原子相互连接形成具有特定孔道结构的骨架。方沸石表面的正电离子交换位点与重金属离子发生离子交换反应是吸附的主要机制。该过程主要通过静电作用和离子半径的适配实现。方沸石的骨架结构中含有可交换的阳离子,如  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ ,当方沸石暴露于含有重金属离子的溶液中,这些阳离子因电荷作用被溶液中的  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$  和  $\text{Cu}^{2+}$  离子替换。这种形成的  $\text{Pb}^{2+}$  方沸石复合物是稳定的,并且通过电荷中和和几何合适匹配的方式实现吸附。

(2) 化学吸附机制:重金属离子  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$  和  $\text{Cu}^{2+}$  与方沸石表面的羟基 ( $\text{OH}^-$ ) 和氧原子功能基团可以形成稳定的化学键,这种化学键通常是金属-氧键 (M—O) 或金属-羟基键 (M—OH),这些化学键的形成涉及电子的转移和配位作用,增强了重金属离子与方沸石之间的相互作用,使得化学吸附过程更加稳定和高效。

(3) 表面络合作用机制:羟基 ( $\text{OH}^-$ ) 含有孤对电子,作为含氧官能团可以与重金属离子通过氧原子形成配位键,并生成稳定的络合物,即金属-羟基络合物。如对于  $\text{Pb}^{2+}$ ,其可以接受 2 个羟基提供的电子,形成 1 个四面体构型的  $\text{Pb}(\text{OH})_2$ 。这种配位键的形成依赖于重金属离子的电子接受能力和羟基的电子给予能力,因此具有一定的选择性。吸附实验结果也表明,在既定条件下,方沸石对于  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附能力强于对  $\text{Pb}^{2+}$  或  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附能力,这与方沸石表面的羟基和不同重金属离子的络合作用有关。

## 3 结论

(1) 利用废玻璃水热合成方沸石并探究其吸附性能。实验结果表明,该方沸石对废水中  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$  和  $\text{Cu}^{2+}$  展现出显著的吸附效果,特别是对  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附效率最高,达到了 75.53 mg/g。

(2) 方沸石对  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$  和  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附过程表

明,该过程符合准二级动力学模型,吸附过程更偏向单分子层吸附的特征。吸附机制涉及离子交换、化学吸附和表面络合作用等机制。

(3) 尽管废玻璃制备方沸石为废水中重金属离子的去除提供了一种创新且可持续的解决方案,但研究仍存在一些局限性,如对吸附机理的深入理解不足,以及大规模应用中可能面临的如长期使用的稳定性、吸附容量的待提高以及经济性问题。此外,还需进一步评估该材料对其他潜在有害金属离子的吸附能力。

### 参考文献

- [1] 安志英,孙才志,郝帅.我国东北生态系统服务供需匹配关系——基于水-能源-粮食纽带视角[J].生态学报,2024,44(10):4170-4186.
- [2] 覃红茹.工业废水中重金属离子的处理技术研究[J].广东化工,2023,50(15):134-136,141.
- [3] 许长新,田贵良.社会水资源利用的投入产出研究[J].财经研究,2006,(12):16-24.
- [4] 樊小磊,詹作泰,高柏,等.重金属废水处理技术研究进展[J].中国有色冶金,2023,52(4):112-127.
- [5] 冯振武,路殿坤,邹小平,等.废触媒浸出液中铁镍合金的电沉积[J].有色金属(冶炼部分),2022,(8):92-97.
- [6] 袁冬梅,魏萍.环境监测实验室废水处理及污染防治初探[J].清洗世界,2024,40(2):141-143.
- [7] Şen A, Pereira H, Olivella M A, et al. Heavy metals removal in aqueous environments using bark as a biosorbent [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2015, 12(1): 391-404.
- [8] 陈方明,李海波,黄江英,等.多孔方沸石球的除氟及再生机理[J].环境工程学报,2014,8(3):857-863.
- [9] 周娟苹,历新宇,杨旭,等.化学改性沸石对重金属离子去除的研究进展[J].硅酸盐通报,2021,40(9):2978-2988.
- [10] 刘可欣,崔燕,罗岩,等.我国废玻璃回收行业发展现状及趋势分析[J].中国资源综合利用,2023,41(2):109-112,120.
- [11] 刘月雷,张治博,李碧雄,等.废玻璃建材资源化利用研究进展[J].混凝土世界,2022,(9):86-90.
- [12] 蔡新江,戴朝炜,邵永健,等.再生玻璃作为辅助胶凝材料制备ECC的力学及变形性能[J].硅酸盐通报,2020,39(9):2739-2744.
- [13] 王彬宇,李莉,李菁,等.用工业固体废料合成沸石分子筛的研究进展[J].高等学校化学学报,2021,42(1):40-59.
- [14] 郭丹丹,翟小伟.改性生物炭对Pb<sup>2+</sup>和Cd<sup>2+</sup>吸附性能及机理研究[J].应用化工,2023,52(3):769-774.
- [15] Chi K L, Hui H B, Chin H N. Application of zeolite-activated carbon macrocomposite for the adsorption of acid orange 7: Isotherm, kinetic and thermodynamic studies [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2013, 20(10): 7243-7255.
- [16] Hu C, Zheng Z H, Huang M Y, et al. Adsorption characterization of Cu(II) and Cd(II) by a magnetite-chitosan composite: Kinetic, thermodynamic and equilibrium studies [J]. Polymers, 2023, 15(12): 2710.
- [17] Usman M I, Muhammad S V, Sagheer A O. Adsorptive removal of heavy metals from aqueous solutions: Progress of adsorbents development and their effectiveness [J]. Environmental Research, 2024, 251(P1): 118562.
- [18] Nilchi A, Saberi R, Moradi M, et al. Adsorption of cesium on copper hexacyanoferrate-PAN composite ion exchanger from aqueous solution [J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 172(1): 572-580.
- [19] 高艳,马明硕.稻壳基活性炭的制备及其孔隙结构分析[J].化工技术与开发,2021,50(3):18-21.
- [20] Abdelkader B N, Bentouami A, Derriche Z, et al. Synthesis and characterization of Mg-Fe layer double hydroxides and its application on adsorption of Orange G from aqueous solution [J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 169(1): 231-238. ■
- [9] Shen Q, Zhang C, Tahir M F, et al. Numbering-up strategies of micro-chemical process: Uniformity of distribution of multiphase flow in parallel microchannels [J]. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2018, 132: 148-159.
- [10] Abate A R, Weitz D A. Faster multiple emulsification with drop splitting [J]. Lab on a Chip, 2011, 11(11): 1911-1915.
- [11] Jeong H H, Issadore D, Lee D. Recent developments in scale-up of microfluidic emulsion generation via parallelization [J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2016, 33(6): 1757-1766.
- [12] Kim C M, Kim G M. Fabrication of 512-channel geometrical passive breakup device for high-throughput microdroplet production [J]. Micromachines, 2019, 10(10): 709.
- [13] Link D R, Anna S L, Weitz D A, et al. Geometrically mediated breakup of drops in microfluidic devices [J]. Physical Review Letters, 2004, 92(5): 054503.
- [14] Zhang J, Shu S, Guan X, et al. Lattice Boltzmann simulation of drop splitting in a fractal tree-like microchannel [J]. Chemical Engineering Science, 2022, 252: 117277.
- [15] Vigogne M, Neuendorf T A, Bernhardt R, et al. Combining parallelized emulsion formation and sequential droplet splitting for large-scale polymer microgel production [J]. Journal of Polymer Science, 2023, 61(16): 1902-1911.
- [16] Chen Y, Gao W, Zhang C, et al. Three-dimensional splitting microfluidics [J]. Lab on a Chip, 2016, 16(8): 1332-1339.
- [17] Unger M A, Chou H P, Thorsen T, et al. Monolithic microfabricated valves and pumps by multilayer soft lithography [J]. 2000, 288(5463): 113-116.
- [18] Bardin D, Kendall M R, Dayton P A, et al. Parallel generation of uniform fine droplets at hundreds of kilohertz in a flow-focusing module [J]. Biomicrofluidics, 2013, 7(3): 034112.
- [19] Trantidou T, Elani Y, Parsons E, et al. Hydrophilic surface modification of PDMS for droplet microfluidics using a simple, quick, and robust method via PVA deposition [J]. Microsystems & Nanoengineering, 2017, 3(1): 16091. ■

(上接第133页)