

余波, 李箫宁, 赵浩, 等. 市政污泥热解残渣理化性能与利用潜势分析[J]. 净水技术, 2024, 43(6): 112-119.
YU B, LI X N, ZHAO H, et al. Physical and chemical properties for municipal and analysis of utilization potential sludge pyrolysis residues[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(6): 112-119.

市政污泥热解残渣理化性能与利用潜势分析

余波^{1,2}, 李箫宁^{1,2,*}, 赵浩^{1,2}, 严寒^{1,2}, 沈鹏飞^{2,3}, 万丽^{1,2}

(1. 中铁水务集团有限公司, 陕西西安 710000; 2. 中国铁工投资建设集团有限公司, 北京 101300; 3. 中国中铁生态环境专业研发中心, 上海 200331)

摘要 污泥热解残渣作为污泥处理产物, 具有丰富的硅、铝、铁等化合物, 是一种潜在的可回收利用资源。文章以污泥热解残渣为原料, 通过物理、化学相结合方法制备了多孔沸石和聚合氯化铝铁, 并探究其污水处理性能。试验结果表明, 污泥残渣通过水热法合成的沸石表现出典型的多孔结构, 在常温下对水中亚甲基蓝的吸附最大可达 31 mg/g。同时, 通过酸浸和聚合反应合成的聚合氯化铝铁对污水厂污水显示出优异的除磷效果, 处理后出水总磷可稳定达到《陕西省黄河流域污水综合排放标准》标准。文章通过合成沸石、絮凝剂实现了污泥的无害化和高效化处置, 为污泥残渣的资源化应用提供了一条路径。

关键词 污泥残渣 沸石 聚合氯化铝铁 资源化利用 水处理

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2024)06-0112-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.06.013

Physical and Chemical Properties and Analysis of Utilization Potential for Municipal Sludge Pyrolysis Residues

YU Bo^{1,2}, LI Xiaoning^{1,2,*}, ZHAO Hao^{1,2}, YAN Han^{1,2}, SHEN Pengfei^{2,3}, WAN Li^{1,2}

(1. China Railway Water Group Co., Ltd., Xi'an 710000, China;

2. China Tiegong Investment & Construction Group Co., Ltd., Beijing 101300, China;

3. Eco-Environmental Research and Development Center of China Railway Group, Shanghai 200331, China)

Abstract Sludge pyrolysis residue, a byproduct of sludge treatment, possesses significant potential as a recyclable resource owing to its abundant silicon, aluminum, iron and other compounds. Porous zeolite and polyaluminum ferric chloride (PAFC) were prepared from sludge pyrolysis residue by the combination of physical and chemical methods, and their treatment properties were investigated. The results showed that the zeolite synthesized by hydrothermal method showed a typical porous structure, and the maximum adsorption of methylene blue could reach 31 mg/g at room temperature. Meanwhile, the PAFC was synthesized via acid leaching and polymerization techniques. As expected, the prepared PAFC showed an excellent removal effect for phosphorus from wastewater treatment plant. Furthermore, the total phosphorus of the effluent could well meet the standards of *Integrated Wastewater Discharge Standard of Yellow River Basin in Shaanxi Province*. It is expected that the strategy can provide a sustainable path for the resource utilization of sludge residue.

Keywords sludge residue zeolite polyaluminum ferric chloride (PAFC) resource utilization water treatment

市政污泥作为城镇污水处理厂副产物, 每年产量已超过 6 000 万 t (含水率为 80%), 且每年以约

10% 的速度快速增长^[1-2]。由于污泥主要含有有机物、病原微生物和重金属等, 若不合理处置将对生态环境和人类健康带来严重威胁^[3-4]。为解决这一问题, 我国已出台一系列相关政策, 加快实现污泥的无害化、稳定化、减量化和资源化处置。《“十四五”城镇污水处理及资源化利用发展规划》中明确指出, 到 2035 年全面实现污泥的无害化处置, 不断推进污

[收稿日期] 2023-10-20

[作者简介] 余波 (1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事水处理设计及研发工作, E-mail: yubo20209@126.com。

[通信作者] 李箫宁 (1991—), 女, 博士, 研究方向为水污染控制, E-mail: lixiaoning92@163.com。

泥的资源化利用^[5]。

目前,我国污泥主要通过填埋、焚烧和热解等技术进行处理处置^[6-7]。其中,污泥经过热解处置后可有效降低 80%~90% 的污泥量,但仍有 10%~20% 的残渣产生^[8]。目前,污泥残渣的最终处置方式主要为填埋,但是填埋不仅占用了大量土地,同时可能会对环境带来潜在的二次污染^[9-10]。因此,寻找一种切实有效的无害化、高效化处置方式是非常必要的。研究发现,污泥经热解后产生的剩余残渣中含有丰富的 Si、Al、Fe 等氧化物,其组成成分与粉煤灰和黏土相似,显示出可二次利用的潜能。通过对污泥残渣的资源化利用不仅可以实现将污泥变废为宝,同时可加快污泥的闭环处置。

本文以污泥残渣为原材料,通过水热法合成多孔沸石,并探究其对水中染料的去除性能。此外,利用污泥残渣中的有价金属 Al 和 Fe,通过酸浸及聚合反应合成了聚合氯化铝铁,并与市售液体聚合氯化铝(PAC)进行对比试验,以探究其对污水的絮凝除磷效果。该研究以期通过合成水处理药剂为污泥的彻底资源化应用提供一条可持续发展道路。

1 材料和方法

1.1 试验药品与器材

试验药品:盐酸(分析纯)、碳酸钠(分析纯)、铝酸钠(分析纯)、氢氧化钠(分析纯)、亚甲基蓝、污泥热解残渣(来自陕西省某污泥处置项目,工艺为“两段式干化+热解气化”,含水率约为 20%);试验用水均为去离子水。

试验器材:pH 计,CT-4 型恒温磁力搅拌器,METTLER AE 200 分析天平,鼓风干燥箱,离心机,紫外可见光分光光度计(T6 新世纪)。

1.2 试验方法

(1) 预处理

取干化热解后的市政污泥残渣(含水率 $\leq 20\%$)置于鼓风干燥箱中干燥 2 h。随后,将上述市政污泥残渣进行研磨,过筛后得到粉末状污泥残渣、备用。

(2) 合成沸石

①沸石合成试验

根据已发表文献^[11]进行沸石的合成。首先,以固液比为 1:4 的条件将预处理后的污泥热解残渣加入 NaOH 溶液(2 mol/L)中,并在常温下连续搅拌 1 h。然后,将混合液转入 100 mL 聚四氟乙烯水热

合成反应釜中,在 100 ℃下连续反应 48 h,放至常温后取出。最后,将反应产物用去离子水洗涤至中性后过滤、烘干即可获得合成沸石。

②吸附试验

称取 0.1 g 合成沸石加入含有 50 mL 亚甲基蓝溶液(20 mg/L)的硬质塑料管中混合并放置恒温水浴振荡器中常温振荡 2 h。待振荡结束后,取上清液过滤、稀释后测定溶液中剩余亚甲基蓝溶液的浓度,并按照公式计算相应的吸附效率(R)和吸附容量(Q_e)。同时考察合成沸石在不同时间(1~120 min)和不同亚甲基蓝初始质量浓度(5~100 mg/L)条件下的吸附性能。

吸附效率和吸附容量计算如式(1)~式(2)^[12]。

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

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (2)$$

其中: C_0 ——亚甲基蓝溶液的初始质量浓度,mg/L;

C_e ——亚甲基蓝溶液的平衡质量浓度,mg/L;

Q_e ——吸附容量,mg/g;

V ——投加亚甲基蓝溶液的体积,L;

m ——合成沸石的质量,g。

通过准一级和准二级动力学模型分析合成沸石对亚甲基蓝的吸附机制,如式(3)~式(4)^[13]。

准一级动力学模型如式(3)。

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (3)$$

准二级动力学模型如式(4)。

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

其中: q_e ——合成沸石在平衡状态下对亚甲基蓝的吸附容量,mg/g;

q_t —— t 时刻下合成沸石对亚甲基蓝的吸附容量,mg/g;

t ——合成沸石对亚甲基蓝的吸附时间,min;

k_1 ——准一级动力学模型常数,min⁻¹;

k_2 ——准二级动力学模型常数,g/(mg·min)。

(3) 合成絮凝剂

① 酸浸及聚合试验

按固液比为 6 mL/g 的条件称取一定量的污泥残渣与盐酸溶液 (20%) 混合并置于单口烧瓶中, 120 ℃ 下加热回流并搅拌 5 h, 待反应结束后即可得到氯化铝铁初级液。随后, 在上述溶液中加入铝酸钠溶液并在一定温度下进行聚合, 反应结束后即可获得红褐色的聚合氯化铝铁溶液。

② 水处理试验

本试验以陕西省西安市某污水处理厂进水为处理目标。取 1 L 污水厂进水加入烧杯中, 分别加入不同体积的污泥残渣浸出液、市售 PAC 和自制絮凝剂液体进行搅拌, 反应结束后静置 30 min, 取上清液测定水样中剩余磷含量, 并根据式 (5) 计算除磷效率 (P_E)。

$$P_E = \frac{P_0 - P_e}{P_0} \times 100\% \quad (5)$$

其中: P_0 ——原始水样中含磷质量浓度, mg/L;

P_e ——水样经过絮凝处理后的剩余磷质量浓度, mg/L。

(4) 表征测试

本文利用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP) 和 X 射线荧光光谱仪 (XRF) 对污泥热解残渣进行主要组分分析; 通过 X 射线衍射仪 (XRD) 和扫描电子显微镜 (SEM) 对污泥残渣和合成沸石等材料进行物相和样品形貌结构分析。

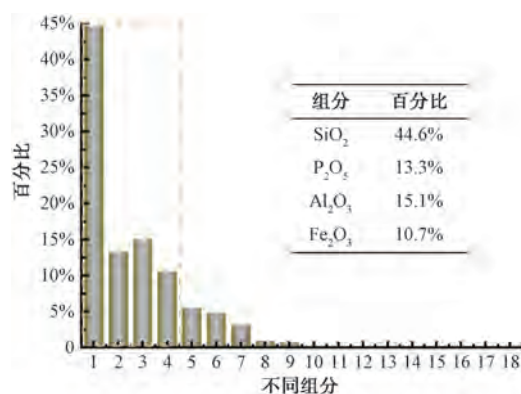
2 结果与讨论

2.1 污泥残渣表征分析

(1) 污泥热解残渣的化学组成成分

污泥残渣的理化性质和主要组分对其资源化应用起着至关重要的作用。如图 1 所示, 通过 XRF 表征分析, 可以发现污泥残渣中主要含有 SiO_2 、 P_2O_5 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 , 占比分别可达 44.6%、

13.3%、15.1% 和 10.7%。随后, 利用 ICP 对污泥残渣中 Si、Al 和 Fe 具体含量进行检测。通过检测, 该污泥残渣中 Si、Al 和 Fe 的质量分数分别可达 274 175.3、23 050.7 mg/kg 和 51 443.4 mg/kg, 这也进一步证明了污泥残渣中含有丰富的硅氧化物、铝氧化物和铁氧化物, 展现出较高的资源回收利用价值。



注: 横坐标 1~18 分别代表 SiO_2 、 P_2O_5 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、CaO、MgO、 K_2O 、 Na_2O 、 TiO_2 、 SO_3 、MnO、ZnO、CuO、 Cr_2O_3 、SrO、NiO、 Rb_2O 、 PbO 。

图 1 污泥热解残渣主要化学组成成分

Fig. 1 Main Chemical Composition of Sludge Pyrolysis Residue

(2) 污泥热解残渣浸出液毒性分析

在进行资源化利用时, 污泥残渣是否会对环境带来潜在的危害也是重点关注的问题。表 1 为污泥残渣的浸出液毒性检测结果。结果显示, 污泥残渣浸出液中的 Hg、As、Zn、Pb、Cd、Cr、Ni 和 Cu 含量远远低于《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》(GB 5085.3—2007) 和《污水综合排放标准》(GB 8978—1996) 的标准限值。结果进一步证明了污泥热解残渣在常规处理下不会对环境造成二次污染, 是一种理想的可再利用材料。

表 1 污泥热解残渣浸出液毒性检测结果

Tab. 1 Toxicity Results of Leachate from Sludge Pyrolysis Residue

项目	Hg	As	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni	Cu
质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.003	0.000 2	0.109	0.004 7	0.000 4	0.005	0.178	0.010
标准 I/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.1	5	100	5	1	15	3	100
标准 II/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.05	0.5	2.0	1.0	0.1	1.5	1	2.0

2.2 污泥残渣资源化应用

2.2.1 沸石合成及水处理应用

沸石作为一种多孔材料, 因其优异的吸附性、离

子交换性和耐酸耐热等性能, 被广泛用于污水处理^[14]。通过上述表征结果, 污泥热解残渣中富含 SiO_2 (34.43%) 和 Al_2O_3 (14.95%), 可有效替代常规

化学原料合成沸石,不仅节约了合成原料及成本,同时实现了污泥残渣的资源化利用。本文利用这一特性,以污泥残渣为原材料通过水热合成法合成沸石,并应用于废水的高效处理,以期达到以废治废的目的。

(1) 表征分析

通过 XRD、SEM 和比表面积(BET)检测方法对合成产物的理化特征进行了表征分析。首先,利用 XRD 对污泥残渣和合成样品的晶体结构进行表征分析。如图 2 所示,污泥残渣主要成分为石英相,同时还含有氧化铝相。对比发现,污泥残渣在经过水热碱溶后,其石英相和氧化铝相逐渐消失,并出现了新的特征峰。研究^[11]发现,合成样品中出现的新特征峰主要是水钙沸石(PDF#20-0452)和 NaP1 沸石(PDF#20-0452),这也证明了污泥残渣经水热反应后可成功合成沸石。

污泥热解残渣和合成沸石的 SEM 结果如图 3 所示。污泥热解残渣主要呈现颗粒分散状态,表面粗糙^[15]。经过水热反应后,合成样品出现较为均匀的球形结构^[16]。同时,合成样品较之原污泥残渣展现出较多的孔隙结构。上述结果也进一步证明了在水热合成阶段,通过添加 NaOH 可有效将污泥残渣中的 Si、Al 元素转化为可溶性硅铝酸盐,并逐渐形

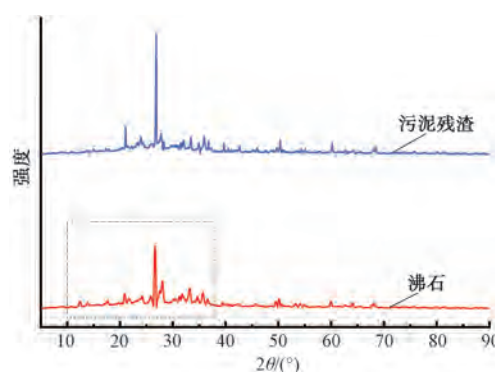
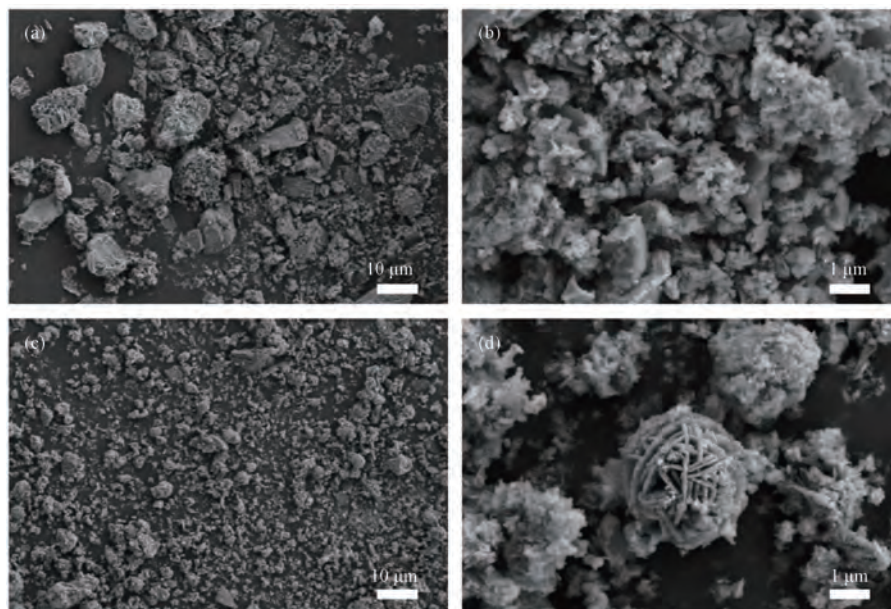


图 2 污泥热解残渣和合成沸石的 XRD 表征结果
Fig. 2 XRD Results of Sludge Pyrolysis Residue and Synthetic Zeolite

成沸石结构^[2]。此外,污泥残渣在经水热反应后比表面积由 $4.793 \text{ m}^2/\text{g}$ 增加到 $49.182 \text{ m}^2/\text{g}$,增加了约 9 倍,显示出巨大的水处理应用潜力。

(2) 应用

基于合成沸石优异的理化性能,对其进行废水应用处理。本文主要研究了合成沸石对水中染料的吸附性能。研究发现,污泥残渣对亚甲基蓝的吸附仅为 $4\sim 5 \text{ mg/g}$,展现出很低的吸附能力,经过水热反应后吸附性能有了明显提高。首先,考察了不同接触时间对合成沸石的吸附性能的影响。如图 4 (a) 所示,合成沸石对亚甲基蓝的吸附随着时间的



注:图 3(a)~图 3(b)为污泥热解残渣;图 3(c)~图 3(d)为合成沸石。

图 3 污泥热解残渣和合成沸石的 SEM

Fig. 3 SEM of Sludge Pyrolysis Residue and Synthetic Zeolite

增加也不断增加,并在约 90 min 后达到平稳状态,吸附效率约达 90%。在前 20 min 时,沸石具有较多的吸附位点,呈现快速吸附阶段,随着吸附位点被逐渐占据,吸附呈现缓慢并逐渐饱和状态。同时,可以发现随着亚甲基蓝初始浓度的增加,合成沸石的吸附容量也逐渐增加,最大吸附容量可达 31 mg/g,远远高于污泥残渣原料的吸附性能[图 4(b)],展现出了优异的吸附性能。

对相关数据进行动力学模型拟合,以进一步分析沸石对亚甲基蓝的吸附机理[图 4(c)~图 4(d)]。通过拟合计算,合成沸石对亚甲基蓝的吸附过程遵循准二级动力学模型($R^2=0.993$),说明合成沸石对亚甲基蓝的吸附主要以化学吸附为主(表 2)^[17-18]。上述结果也进一步说明污泥残渣可通过水热反应合成沸石,并展示出在废水处理领域的巨大潜力。

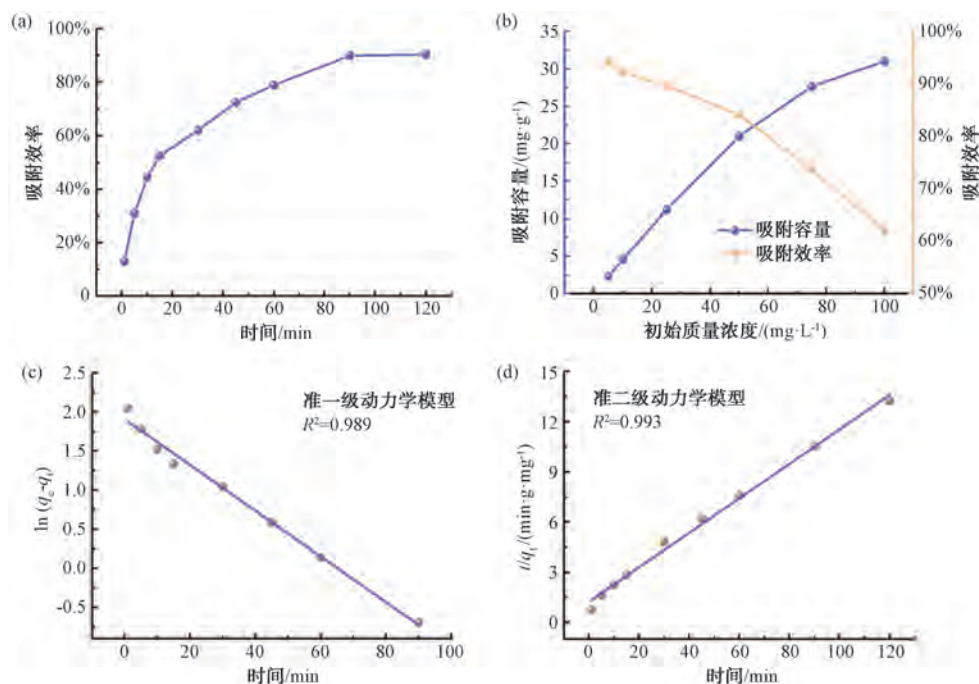


图 4 (a) 时间对沸石吸附效果的影响; (b) 不同初始浓度对沸石吸附效果的影响; (c) 准一级动力学模型和 (d) 准二级动力学模型

Fig. 4 (a) Adsorption Effect on Zeolite under Different Times; (b) Initial Concentrations; (c) Results of Pseudo-First-Order Kinetic Model; and (d) Pseudo-Second-Order Kinetic Model

表 2 沸石吸附亚甲基蓝的动力学参数

Tab. 2 Kinetic Parameters of Zeolite for Adsorption of Methylene Blue

参数	准一级动力学模型			准二级动力学模型		
	$q_e/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	k_1/min^{-1}	R^2	$q_e/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	$k_2/[\text{g}\cdot(\text{mg}\cdot\text{min})^{-1}]$	R^2
沸石	6.74	0.029	0.989	9.71	8.531×10^3	0.993

2.2.2 絮凝剂合成及水处理应用

此外,污泥热解残渣可利用其富含铝、铁氧化物这一特性合成水处理絮凝剂,通过絮凝、沉淀的作用实现对污水的净化^[19]。

(1) 合成絮凝剂表征分析

本文以污泥残渣为原料通过盐酸浸取获得含铝铁浸提液,随后添加铝酸钠在高温下聚合形成聚合氯化铝铁溶液。如图 5 所示,通过 SEM 观察污泥热

解残渣盐酸酸溶前后的表面形态的变化。可以清晰观察到污泥热解残渣在经过盐酸浸取以后,剩余污泥残渣表面呈现相对粗糙且多孔结构。上述结果也说明了污泥残渣通过酸浸可成功将部分矿物组分进行溶解,从而形成多孔结构,并获得含铝铁的初级溶液。经检测,污泥残渣提取液中 Al 和 Fe 的质量浓度分别可达 6 185.2 mg/L 和 6 415 mg/L,提取效率可达 80% 以上。

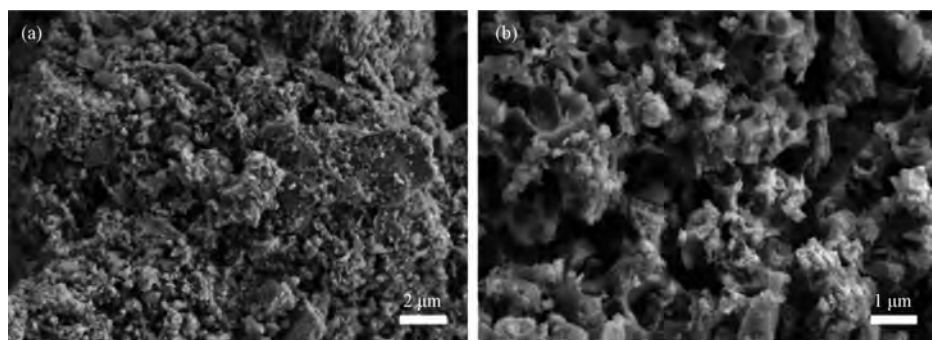


图5 污泥残渣酸提取前后的 SEM

Fig. 5 SEM Images of Sludge Residue before and after Acid Extraction

随后,在酸提取液中加入铝酸钠,一方面进行聚合反应,另一方面可有效增加絮凝剂中铝的含量,大大提高合成絮凝剂的除磷效果。对添加不同铝酸钠的聚合氯化铝铁进行絮凝除磷试验,以寻找最佳的合成条件。如图6所示,在投加量均为1 mL时,污泥残渣浸出液在未进行聚合时表现出仅20%的除磷效率,这一现象可能与浸出液未进行聚合且溶液中铝含量较低有关。在对浸出液进行聚合以后,合成絮凝剂的磷去除效果显著提高。在反应配料比为污泥残渣:铝酸钠=3~1.2:1.0(质量比)时,合成絮凝剂展现出56.3%~85.7%的除磷效果。继续增加铝酸钠投加量,在配料比为污泥残渣:铝酸钠=1.0:1.0(质量比)时除磷效果约为85%,没有明显的增加。这一现象可能是由于在合成过程中会由于酸溶液的含量一定,继续增加铝酸钠的投加量,并不能增加溶解铝的含量,使得除磷效果并没有显著增加;同时当加入过多的铝酸钠还会大大增加絮凝剂的生产成本。因此,本文选择配料比为1.2:1.0时为合成絮凝剂的最佳试验条件。经过酸浸取、聚合

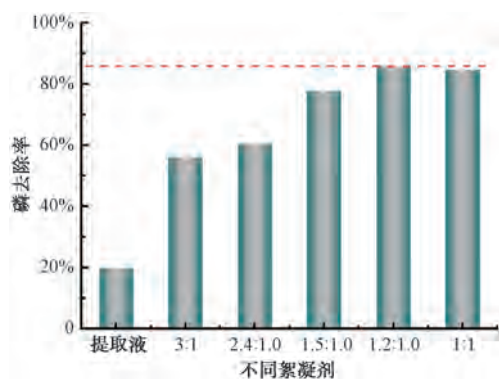
和蒸发后,合成聚合氯化铝铁溶液中Al质量浓度可达47 341.7 mg/L,有了显著增加。

(2) 污水处理

为了进一步分析自制絮凝剂的实际水处理效果,对西安市某污水处理厂进水进行除磷小试试验。分别取污泥残渣浸出液、合成絮凝剂和市售PAC进行对比试验。原水样取自陕西省西安市某污水处理厂进水,水样呈偏黄色。在加入0.05 mL浸出液、合成絮凝剂和市售液体PAC后,水样中出现微小的絮体,继续增加絮凝剂的投加量,水样中形成了颗粒清晰的矾花(图7)。同时,可以发现合成絮凝剂展现出与市售PAC相当的絮凝效果。在反应结束后,水样上清液呈现较透明状态,对比原水样有了很大的改观。

此外,通过对水样不同反应阶段的磷浓度进行检测,探究了絮凝剂的除磷效果。随着浸出液、合成絮凝剂和市售PAC药剂的添加,水厂的进水总磷浓度也逐渐降低[图8(a)]。其中,浸出液未进行聚合反应且铝含量较少等因素导致在添加0.15 mL以后显示出仅32.56%的去除效率。在污泥残渣与铝酸钠配料比为1.2:1.0时合成的絮凝剂,对污水中的磷显示出了优异的除磷性能,在添加0.085 mL药剂以后,处理后的水质中磷质量浓度可降至0.3 mg/L以下,达到《陕西省黄河流域污水综合排放标准》(DB 61/224—2018)出水磷标准。通过试验对比可以发现,污泥热解残渣合成的絮凝剂表现出与市售PAC相当的除磷效果。

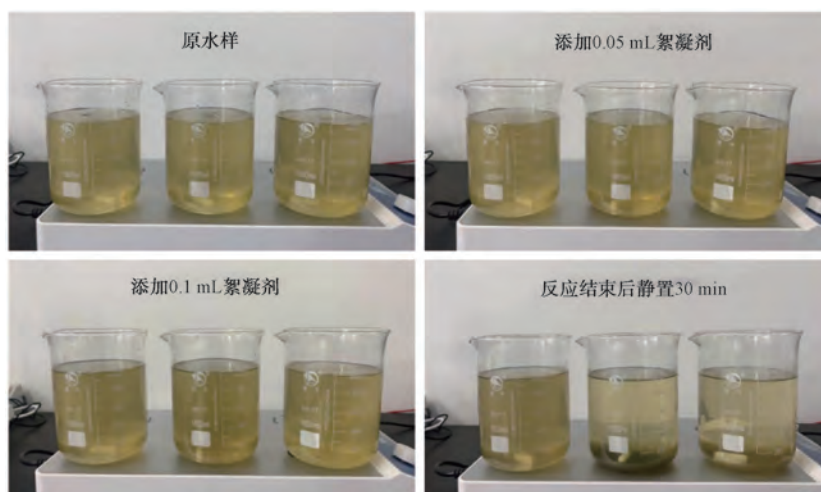
同时,利用自制絮凝剂对污水厂连续一周进水进行除磷试验测试,以验证其除磷效果的稳定性。如图8(b)所示,自制絮凝剂在进水较波动的情况下,仍然可保证水样在经过絮凝除磷以后总磷稳定



注:图中比例为污泥残渣和铝酸钠质量比。

图6 除磷试验结果

Fig. 6 Experimental Results of Phosphorus Removal



注:左为浸出液,中为合成絮凝剂,右为市售液体PAC。

图7 不同样品的絮凝处理试验

Fig. 7 Flocculation Experiments of Different Samples

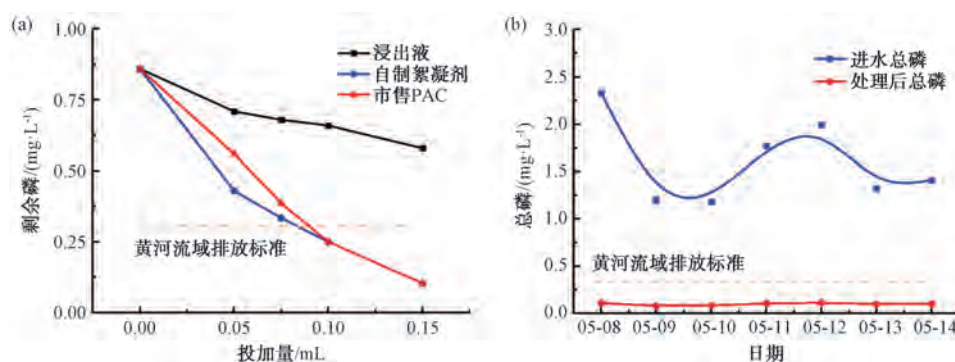


图8 (a)污泥残渣浸出液、自制絮凝剂和市售PAC的除磷效果;(b)自制絮凝剂对一周内污水厂进水的除磷效果

Fig. 8 (a) Phosphorus Removal Effect of Leachate, Self-Made Flocculant and Commercial PAC;

(b) Effect of Self-Made Flocculant on Phosphorus Removal in WWTP within One Week

在 0.3 mg/L 以下,这也进一步证实了该絮凝剂具备可用于污水厂进行絮凝除磷的潜力。

综上所述,利用污泥残渣富含 Si、Al、Fe 等氧化物这一特性,通过物理化学反应不仅可成功制备多孔沸石,而且可合成高性能聚合氯化铝铁,并在污废水的处理方面显示出了巨大的潜力。

3 结论

(1)污泥热解残渣在 100 °C、2 mol/L 的 NaOH 下水热处理 48 h 后合成了多孔沸石,对亚甲基蓝的最大吸附量可达 31 mg/g;通过动力学模型分析,沸石对亚甲基蓝的吸附主要是化学吸附。

(2)在液固比为 6 mL/g、浸出温度为 120 °C 和浸出时间为 5 h 的条件下,污泥热解残渣中的 Al、Fe 浸出率可达 80%。利用酸浸液通过聚合反应合成

的聚合氯化铝铁表现出优异的除磷性能,处理后水质可以达到《陕西省黄河流域污水综合排放标准》(DB 61/224—2018)排放标准。同时,合成的絮凝剂在污水厂进水总磷波动情况下,投加后仍可保证出水水质稳定达标。

污泥热解残渣的资源化应用不仅有效解决了污泥最终处置问题,实现将污泥变废为宝,同时为水处理提供了一种潜在的高效水处理药剂,达到以废治废的目的。

参考文献

- [1] 王毅斌,冯敬武,谭厚章,等. 市政污泥热化学处置中磷元素形态转变与回收利用研究进展[J]. 化工进展, 2023, 42 (2): 985-999.

WANG Y B, FENG J W, TAN H Z, et al. Research progress on

- phosphorus speciation transformation and recovery during thermal chemical conversion of municipal sewage sludge [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2023, 42(2): 985-999.
- [2] 殷厚民. 污泥基炭沸石制备方法及其生成机制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- YIN H M. Synthesis of zeolite-activated carbon composite from sewage sludge and its formation mechanisms [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.
- [3] 周吉奎, 刘勇, 刘牡丹, 等. 市政污泥中重金属赋存状态及生物有效性[J]. *有色金属科学与工程*, 2017, 8(3): 99-102.
- ZHOU J K, LIU Y, LIU M D, et al. Study on occurrence state and bioavailability of heavy metals in municipal sludge [J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2017, 8(3): 99-102.
- [4] 付杰, 邱春生, 王晨晨, 等. 污泥热水解处理过程重金属的迁移转化与风险评估[J]. *化工进展*, 2022, 41(4): 2216-2225.
- FU J, QIU C S, WANG C C, et al. Migration, transformation and risk assessment of heavy metals in municipal sludge treated by thermal hydrolysis [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2022, 41(4): 2216-2225.
- [5] 戴晓虎, 侯立安, 章林伟, 等. 我国城镇污泥安全处置与资源化研究[J]. *中国工程科学*, 2022, 24(5): 145-153.
- DAI X H, HOU L A, ZHANG L W, et al. Safe disposal and resource recovery of urban sewage sludge in China [J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(5): 145-153.
- [6] 谭学军, 王磊. 我国重点流域典型污水厂污泥处理处置方式调研与分析[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(14): 1-8.
- TAN X J, WANG L. Investigation and analysis on the treatment and disposal methods of typical sewage treatment plant sludge in China's key river basins [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(14): 1-8.
- [7] 陆大川, 顾卫华, 赵静, 等. 城市污泥热解影响因素分析及残渣资源化研究进展[J]. *无机盐工业*, 2023, 55(5): 8-15.
- LU D C, GU W H, ZHAO J, et al. Research progress of influencing factors of pyrolysis of municipal sludge and residue recycling [J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2023, 55(5): 8-15.
- [8] 王艳语, 苗俊艳, 侯翠红, 等. 城市污泥热解及其固体残渣资源化利用[J]. *化工矿物与加工*, 2020, 49(12): 41-45.
- WANG Y Y, MIAO J Y, HOU C H, et al. Pyrolysis of municipal sludge and utilization of its solid residues [J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2020, 49(12): 41-45.
- [9] LU J X, ZHOU Y, HE P, et al. Sustainable reuse of waste glass and incinerated sewage sludge ash in insulating building products: Functional and durability assessment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 236: 117635. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.117635.
- [10] 杭世珺, 关春雨, 戴晓虎, 等. 污泥水泥窑协同处置现状与展望(上)[J]. *给水排水*, 2019, 55(4): 39-43, 49.
- HANG S J, GUAN C Y, DAI X H, et al. Status and prospect of sludge co-processing in cement kiln (Part 1) [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2019, 55(4): 39-43, 49.
- [11] 陈小亮, 谷麟, 王艳, 等. 污泥焚烧残渣水热合成 NaP1 型沸石和水钙沸石的性质研究[J]. *环境化学*, 2011, 30(12): 2092-2098.
- CHEN X L, GU L, WANG Y, et al. Hydrothermal synthesis and characterization of NaP1 zeolite and gismondine from sludge incineration ash [J]. *Environmental Chemistry*, 2011, 30(12): 2092-2098.
- [12] 雋茂玲, 吴敏. 污泥生物炭对重金属 Cd^{2+} 的吸附效果及作用机理[J]. *水污染及处理*, 2022, 10(2): 65-74.
- JUN M L, WU M. Adsorption effect and mechanism of sludge biochar on heavy metal Cd^{2+} [J]. *Water Pollution and Treatment*, 2022, 10(2): 65-74.
- [13] SENGUTTUVAN S, JANAKI V, SENTHILKUMAR P, et al. Polypyrrole/zeolite composite-A nanoadsorbent for reactive dyes removal from synthetic solution [J]. *Chemosphere*, 2022, 287: 132164. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.132164.
- [14] RAD L R, ANBIA M. Zeolite-based composites for the adsorption of toxic matters from water: A review [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(5): 106088. DOI: 10.1016/J.JECE.2021.106088.
- [15] 李彦龙. 污泥两步热处理过程重金属迁移转化与吸附行为研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- LI Y L. Migration, transformation and adsorption of heavy metals in two-step thermal treatment process of sludge [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [16] 宋学锋, 陆伟宁. 转化方式对粉煤灰地聚物原位转化沸石及其 Pb^{2+} 吸附性能的影响[J]. *材料导报*, 2023, 37(6): 236-242.
- SONG X F, LU W N. Influence of conversion method on in-situ conversion of fly ash geopolymer to zeolite and its Pb^{2+} adsorption performance [J]. *Materials Reports*, 2023, 37(6): 236-242.
- [17] 郭文宁, 杨艳玲, 孙瑜, 等. 粉煤灰基沸石对亚甲基蓝染料的吸附性能研究[J]. *陕西科技大学学报*, 2023, 41(4): 15-26.
- GUO W N, YANG Y L, SUN Y, et al. Study on the adsorption properties of different zeolites synthesized from fly ash for methylene blue dye [J]. *Journal of Shaanxi University of Science & Technology*, 2023, 41(4): 15-26.
- [18] KIWAAN H A, MOHAMED F S, EL-GHAMAZ N A, et al. Experimental and electrical studies of Na-X zeolite for the adsorption of different dyes [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2021, 332: 115877. DOI: 10.1016/j.molliq.2021.115877.
- [19] 季斌, 秦慧, 陈威, 等. 铁盐应用于污水协同除磷研究进展[J]. *水处理技术*, 2018, 44(2): 11-14.
- Ji B, Qin H, Chen W, et al. Research progress on phosphorus synergetic removal by ferric salt in wastewater [J]. *Technology of Water Treatment*, 2018, 44(2): 11-14.