

碱浸和污泥强化对钢渣陶粒 除磷效果的影响

唐 婧*, 罗胜元

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院, 辽宁 沈阳 110000)

摘 要:为提高钢渣除磷效果,采用碱浸预处理,并添加污泥强化的制备碱浸钢渣-蒙脱土-污泥复合钢渣陶粒,与钢渣-蒙脱土-可溶性淀粉复合陶粒进行对比研究,探讨强化后钢渣陶粒的除磷性能和除磷机理,考察含磷溶液中磷的去除。结果表明,两种钢渣陶粒的最大除磷率均可达到 93%,磷酸盐浓度为 1 mg/L 时,碱浸-污泥强化钢渣陶粒的最佳投加量为 0.5 g,显著低于未强化钢渣陶粒(1 g)。扫描电镜显示碱浸-污泥强化钢渣陶粒孔隙更为密集。X 射线衍射表明两种陶粒内含多种金属盐,可与水样中磷酸根离子发生反应将其去除。两种陶粒对 Langmuir 吸附等温方程拟合度最高,碱浸-污泥强化钢渣陶粒吸附饱和时,最大吸附量(39.18 mg/g)高于未强化钢渣陶粒(19.18 mg/g)。两种陶粒对准二级动力学模型的拟合度高于准一级动力学模型,表明两种陶粒对磷吸附属于单分子层吸附,以化学吸附为主。

关键词:钢渣陶粒;除磷;碱浸;污泥强化

中图分类号:X757,X703

文献标志码:A

文章编号:1004-7638(2024)01-0096-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2024.01.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Effect of alkali leaching and sludge strengthening on phosphorus removal of steel slag ceramics

Tang Jing*, Luo Shengyuan

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110000, Liaoning, China)

Abstract: In order to improve the phosphorus removal effect of steel slag, alkali leaching pretreatment was used and residual sludge was added to strengthen the preparation of alkali leaching slag-montmorillonite-sludge composite steel slag ceramic particles. The phosphorus removal performance and mechanism of enhanced steel slag ceramic particles were discussed, and the removal of phosphorus-containing wastewater was investigated. The results showed that the maximum phosphorus removal rate of the two kinds of steel slag ceramics could reach 93%. When the phosphate concentration was 1 mg/L, the optimal dosage of alkali impregnation-sludge enhanced steel slag ceramics was 0.5 g, which was significantly lower than that of unstrengthened steel slag ceramics (1 g). Scanning electron microscopy (SEM) analysis showed that the pores of alkali impregnation-sludge enhanced steel slag ceramics were denser. X-ray diffraction (XRD) characterization showed that the two ceramics contained a variety of metal salts, which could be removed by reacting with phosphate ions in the water samples. The two kinds of ceramics have the highest fitting degree to Langmuir adsorption isothermal equation, and the maximum

收稿日期:2023-10-26

基金项目:辽宁省教育厅重点攻关项目(LJKZZ20220081)。

作者简介:唐婧,1980年出生,女,黑龙江哈尔滨市人,博士,教授,通讯作者,研究方向为污水处理, E-mail: fairy_ben@163.com。

adsorption capacity of alkali impregnated sludge strengthened steel slag ceramics is higher than that of unstrengthened steel slag ceramics (Q_{\max} : 39.18 > 19.18 mg). The fit degree of the two models is higher than that of the quasi-first order kinetic model, which indicates that the adsorption of phosphorus by the two kinds of ceramics belongs to monolayer adsorption and is mainly chemisorption.

Key words: steel slag, phosphorus removal, alkaline leaching, sludge

0 引言

磷能够促进藻类和其他水生植物大量生长繁殖^[1],是导致水体富营养化的主要因素,控制水中磷的含量可以有效避免水体富营养化^[2]。在常见除磷方法中,吸附法因为具有成本低、稳定性好、无二次污染等优点而受到越来越广泛的关注^[3]。目前常用的吸附除磷材料主要有 3 大类:聚合物类吸附剂、硅酸盐类吸附剂和固体废弃物类吸附剂^[4]。其中固体废弃物如粉煤灰^[5]、牡蛎壳^[6]、钢渣^[7]等在有效去除水体中磷的同时降低了除磷成本,逐渐成为研究的热点^[8]。

钢渣是一种比表面积大、化学活性高的工业副产物^[9],具有一定的吸附除磷性能,且不易造成二次污染^[10]。单一钢渣作为吸附剂时,比表面积、金属离子分布等因素会影响其除磷效果,使其难以在实际中应用^[11]。通过酸改性、热改性等处理可以有效提高钢渣的吸附性能^[12],但在酸改性过程中,部分可溶性氧化物会与酸反应进入到浸出液中,使浸出液处理困难^[13];热改性所需能耗较高,一定程度上增加了成本。碱浸法是一种新兴的吸附材料改性方法,张健^[14]等采用 NaOH 溶液对市售 ZSM-5 沸石分子筛进行改性,30 °C 下碱改性分子筛最大吸附容量为 54.64 mg/g,是未改性分子筛的 1.6 倍。Majid A F A^[15]等发现高岭土经碱活化后,对利福平的最大吸附容量为 8.295 mg/g,与原高岭土(5.931 mg/g)相比明显提高。然而,目前对钢渣进行碱改性的研究还较少。

将污泥作为吸附材料受到越来越多学者的关注^[16]。研究表明,污泥基活性炭中含有一定量的无机成分,可成为一种潜在的吸附位点促进吸附作用,另外污泥中丰富的有机质焙烧后形成气孔,可以使材料的孔隙率增大,提高吸附性能^[17]。陈永亮^[18]等通过真空热解方式制备的一种污泥-稻壳颗粒生物炭在投加量为 6 g/L、pH 为 8、吸附时间为 90 min、温度为 25 °C 的条件下,对溶液中阿莫西林的最大去除率为 7.98%。Xu^[19]等以 1:1 比例制备的污泥-壳聚糖吸附材料对 Cu²⁺的最大吸附容量为 114.6 mg/g,可有效去除重金属 Cu。

基于此,笔者采用碱浸预处理和污泥强化吸附制备复合钢渣陶粒,与钢渣-蒙脱土-可溶性淀粉复合陶粒比较,考察预处理和污泥对除磷性能的强化作用,通过扫描电镜和 X 射线衍射,吸附热力学和动力学分析,探讨碱浸钢渣-蒙脱土-污泥复合钢渣陶粒的除磷机理,以期增强除磷效果,拓展污泥的资源化利用途径。

1 试验部分

1.1 吸附材料的制备

1.1.1 钢渣-蒙脱土-可溶性淀粉复合陶粒制备

将钢渣粉碎后过筛,得到粒径大小约为 50 ~ 70 μm 的钢渣粉,用去离子水冲洗后置于 60 °C 烘箱中烘干 12 h,称取定量钢渣粉、粘合剂(蒙脱石)和造孔剂(可溶性淀粉),按比例 7:2:1 混合,加入占总质量 30% 的蒸馏水后充分搅拌,制作成粒径约 3 ~ 5 mm 小球,于自然条件下干燥。然后将小球于管式炉中以 950 °C 煅烧 30 min,待冷却后取出钢渣陶粒备用。

1.1.2 碱浸钢渣-蒙脱土-污泥复合钢渣陶粒制备

试验用污泥取自抚顺某污水处理厂二沉池,其中生活污水占 70%,工业污水占 30%,处理工艺为:SRB 法+多模式 A2/O 工艺。将污泥碾碎成粉末,用去离子水冲洗 3 ~ 4 次,80 °C 条件下置于烘箱中烘干 12 h,装袋密封。

将钢渣粉于 3 mol/L 氢氧化钠溶液中浸泡 12 h 后,用蒸馏水冲洗表面,80 °C 条件下置于烘箱烘干 12 h,将碱浸后钢渣粉、蒙脱石和污泥粉按比例 7:2:1 混合,加适量蒸馏水搅拌,制成粒径约 3 ~ 5 mm 的球状颗粒,将小球置于石英舟中,以 800 °C 在管式炉中煅烧 30 min,待其自然冷却后获得碱浸钢渣-蒙脱土-污泥复合钢渣陶粒。

1.2 吸附条件对除磷性能的影响

1.2.1 投加量

配置 1 mg/L 磷酸盐溶液,pH 值为中性。分别称取 0.3、0.5、1、1.3、1.5、2 g 的两种陶粒各投加于 100 mL 含磷水样中,在 25 °C 条件下于恒温震荡反应器中以 130 r/min 转速吸附反应 3 h,取上清液

过 0.45 μm 一次性针式滤膜后测定剩余磷含量, 计算除磷率。

1.2.2 pH

取 1 mg/L 磷酸盐溶液 100 mL, 用盐酸或氢氧化钠分别调节其 pH 值为 3、4、5、6、7、8、9、10、11, 各投加 1 g 钢渣-蒙脱土-可溶性淀粉复合陶粒, 以 25 $^{\circ}\text{C}$ 、130 r/min 转速转动反应 3 h, 取上清液进行剩余磷含量测定, 计算除磷率。再进行一组投加 1 g 碱浸钢渣-蒙脱土-污泥复合陶粒的试验, 保持其余操作不变。

1.2.3 吸附时间

在中性条件下, 称取两种陶粒各 1 g, 分别投加于 100 mL 浓度为 1 mg/L 磷溶液中, 塑封后放置于恒温震荡培养箱中, 设置条件为 25 $^{\circ}\text{C}$ 、130 r/min, 每隔一段时间 (0、10、20、30、40、50、60、120、180 min) 用一次性注射器进行上清液取样, 样液过 0.45 μm 滤膜后测得所剩余磷酸盐含量, 计算除磷率。

1.2.4 阴离子

取若干份 1 g 钢渣-蒙脱土-可溶性淀粉复合陶粒, 分别投加于 100 mL 浓度 1 mg/L KH_2PO_4 溶液、100 mL 的 KH_2PO_4 与 Na_2SO_4 混合溶液、100 mL 的 KH_2PO_4 与 NaCl 混合溶液、100 mL 的 KH_2PO_4 与 Na_2CO_3 混合溶液、100 mL 的 KH_2PO_4 与 NaHCO_3 混合溶液、100 mL 的 KH_2PO_4 与 NaNO_3 混合溶液 (Na_2SO_4 、 NaCl 、 Na_2CO_3 、 NaHCO_3 、 NaNO_3 质量浓度依次为 1、2、3、4、5 mg/L, KH_2PO_4 浓度为 1 mg/L), 再取 1 g 碱浸钢渣-蒙脱土-污泥复合陶粒, 重复上述操作。在 pH=7 的条件下, 以 130 r/min 转速转动 3 h, 取上清液进行剩余磷量的测定。

1.3 材料表征分析

采用场发射扫描电子显微镜 (SEM, Zeiss Sigma 300) 观察材料表面形貌; 采用 X 射线光电子能谱仪 (XPS, Thermo Fisher Scientific K-Alpha) 分析材料表面组成; 对两种钢渣基陶粒吸附前后的微观物貌、物质组成进行比较, 分析两种钢渣基陶粒吸附除磷机理。

1.4 等温吸附模型

取 10 份 1 g 钢渣-蒙脱土-可溶性淀粉复合陶粒分别投入 100 mL 浓度为 0.5、1、3、5、7、10、15、20、30、40、50 mg/L 的磷酸盐溶液中, 在 130 r/min、25 $^{\circ}\text{C}$ 下恒温震荡 180 min, 抽取上清液, 经 0.45 μm 滤膜过滤后测得磷酸盐含量, 计算磷酸盐去除率。将所得数据与 Freundlich 和 Langmuir 吸附模型拟合。取 10 份 1 g 碱浸钢渣-蒙脱土-污泥复合陶粒,

重复上述操作。

1.5 动力学吸附模型

将 1 g 钢渣-蒙脱土-可溶性淀粉复合陶粒投入 100 mL 磷浓度为 1 mg/L 的溶液中, 在室温 25 $^{\circ}\text{C}$ 、pH 中性条件下恒温震荡, 每隔一段时间 (0、10、20、30、40、50、60 min) 用一次性注射器抽取上清液, 经 0.45 μm 滤膜过滤后测得磷酸盐含量, 计算磷酸盐去除率。将所得数据与常规动力学模型准一级、准二级公式拟合。取 1 g 碱浸钢渣-蒙脱土-污泥复合陶粒重复上述操作。

2 结果与讨论

2.1 吸附条件对除磷性能的影响

2.1.1 投加量对除磷性能的影响

不同投加量的陶粒对磷的去除率如图 1 所示, 当其余反应条件恒定时, 随着两种陶粒投加量的增加, 磷酸盐的去除率有所加大。当水体磷酸盐浓度为 1 mg/L 时, 钢渣-蒙脱土-可溶性淀粉复合陶粒的最佳投加量为 1 g。对于碱浸钢渣-蒙脱土-污泥复合陶粒, 当投加量大于 0.5 g 时, 再加大吸附剂投加量, 磷酸盐去除率几乎没有上升。与钢渣-蒙脱土-可溶性淀粉复合陶粒相比, 在相同去除率条件下, 使用碱浸钢渣-蒙脱土-污泥复合陶粒大大降低了吸附剂的投加量。且使用固体废弃物污泥作为吸附材料能够减少对环境的污染, 有效提高资源利用率。

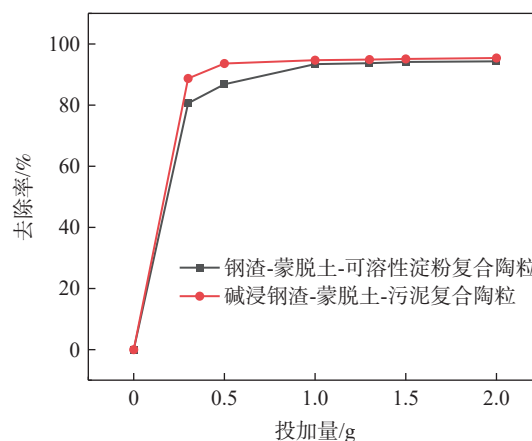


图 1 不同陶粒投加量对除磷效果的影响

Fig. 1 Effect of ceramite dosage on phosphorus removal

2.1.2 pH 对除磷性能的影响

在 pH 值处于 3~11 时, 两种陶粒对磷的去除率如图 2 所示, 碱浸钢渣-蒙脱土-污泥复合陶粒对磷酸盐的去除率略高。中性条件下两种陶粒的去除效果最好, 钢渣-蒙脱土-可溶性淀粉复合陶粒对磷酸盐的去除率为 93.4%, 碱浸钢渣-蒙脱土-污泥复

合陶粒对磷酸盐的去除率为 94.5%。两种陶粒在 pH=3 ~ 11 范围内均具有良好的除磷效果, 适用范围较广。

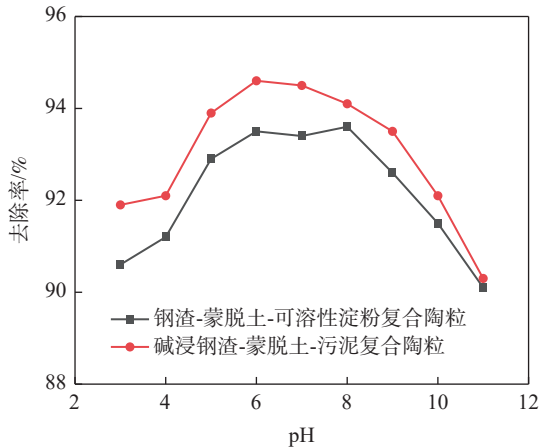


图 2 初始 pH 对两种复合陶粒除磷效果的影响
Fig. 2 Effect of initial pH on phosphorus removal for two kinds of composite ceramics

2.1.3 吸附时间对除磷性能的影响

吸附时间对陶粒除磷性能的影响如图 3 所示, 在吸附时间 60 min 之前, 两种陶粒对磷酸盐的去除率随时间延长迅速增加, 60 min 之后增速较缓。这可能是由于吸附初期陶粒表面吸附位点较多, 与磷溶液接触能较快吸附溶液中的磷离子, 随着时间延长, 陶粒表面与水中的磷酸根离子已经充分接触, 表面吸附位点部分被占据, 吸附除磷率增加缓慢^[20]。

2.1.4 不同阴离子对除磷性能的影响

不同浓度阴离子对两种陶粒除磷效果的影响如图 4 所示, 大多数阴离子与磷酸根离子存在竞争关系。陶粒表面中钙离子易与碳酸根离子形成碳酸钙沉淀, 导致磷酸根去除率下降。除此之外, 硫酸根的存在也对两种陶粒的除磷率有明显影响, 可能是硫酸根离子会与磷酸根离子竞争两陶粒表面的吸附位点, 从而导致磷去除率下降。但即使水样内存在对陶粒除磷效果影响最大的碳酸根离子, 也可以维持磷去除率在 89% 以上。两种陶粒吸附剂均可以在水样存在不同阴离子的情况下, 对磷酸盐进行良好的吸附去除^[21]。

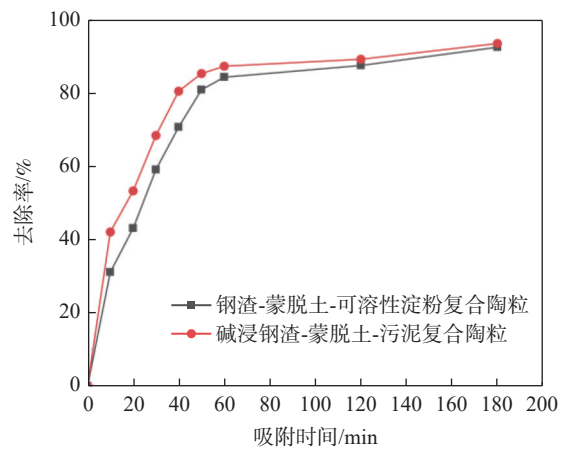
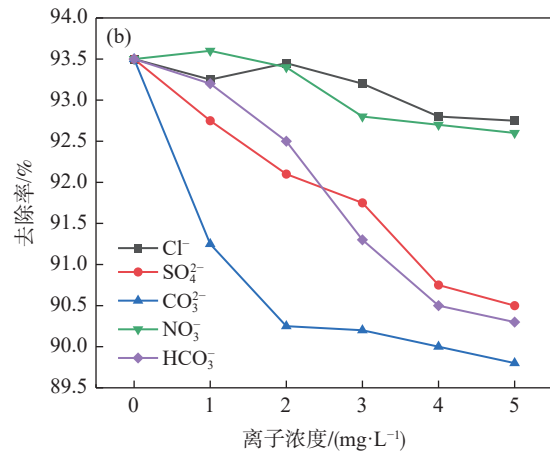
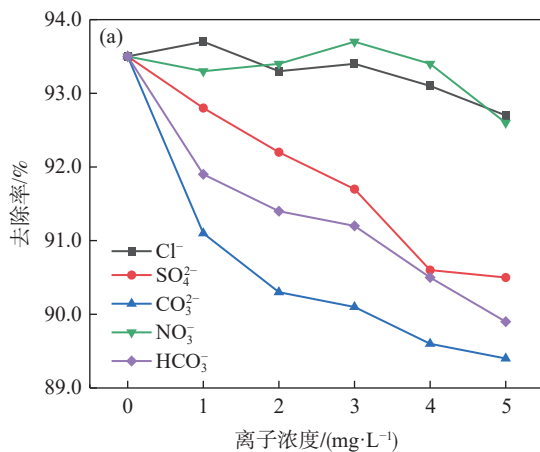


图 3 吸附时间对陶粒除磷性能的影响
Fig. 3 Influence of adsorption time on phosphorus removal rate for ceramides



(a) 钢渣-蒙脱土-可溶性淀粉复合陶粒; (b) 碱浸钢渣-蒙脱土-污泥复合陶粒

图 4 不同浓度阴离子对不同复合陶粒除磷效果的影响

Fig. 4 Influence of different concentrations of anions on phosphorus removal for different composite ceramics

2.2 材料表征分析

2.2.1 X 射线衍射分析

利用 X 射线衍射技术对两种复合陶粒吸附前后物像组成进行分析, 对比吸附前后元素变化, 以推

测其吸附除磷机理。两种钢渣陶粒的 XRD 元素分析如图 5 所示。由图 5 可知, 两种陶粒内含多种金属盐, 可与水样中磷酸根离子发生反应将其去除。陶粒吸附后存在明显的磷酸钙的特征衍射峰, 说明

有磷酸钙生成。碱浸钢渣-蒙脱土-污泥复合陶粒中物质成分更多。这可能是由于该陶粒经污泥强化制备,而污泥所含较多的二氧化硅、氧化钙等在高温下会产生硅酸钙($2\theta=30.04^\circ$)等化合物,丰富了陶粒的物质组成,增加吸附位点^[22]。另外相关研究表明,经热改性后,钢渣内部的主要矿物硅酸二钙、硅酸三钙可转换为硅酸钙和氢氧化钙,高碱度的硅酸钙易释放钙离子,且硅酸钙有利于激发磷酸钙在其表面富集沉淀。

2.2.2 扫描电子显微镜分析

两种陶粒吸附前后的电镜照片如图6所示。

两种陶粒吸附前皆具有表面粗糙、孔隙结构明显等特点。相较钢渣-蒙脱土-可溶性淀粉复合陶粒,碱浸钢渣-蒙脱土-污泥复合钢渣陶粒孔隙更为明显,这是因为碱可以去除钢渣内部的杂质,暴露其微孔结构^[23]。同时污泥中的有机质在高温焙烧下被分解产生大量气体,气体逸出也会增大材料的孔隙率^[24]。吸附后两种钢渣陶粒表面孔隙明显减少,结合XRD分析可知,陶粒中的多种金属盐等与磷酸根发生反应,生成的磷酸钙等物质覆盖于陶粒表面。因此,吸附后陶粒表面较吸附前平整光滑,且出现不规则的沉积附着物。

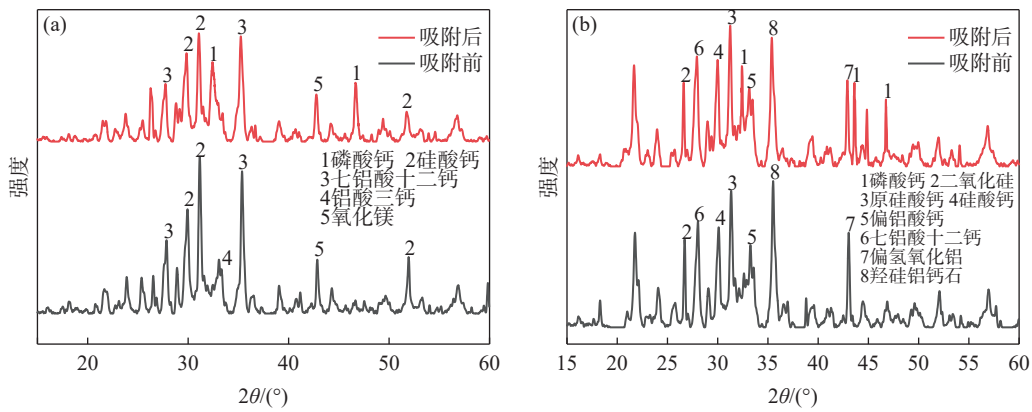


图5 钢渣-蒙脱土-可溶性淀粉复合陶粒 (a) 和碱浸钢渣-蒙脱土-污泥复合陶粒 (b) 吸附前后 XRD 分析

Fig. 5 XRD analysis of steel slag-montmorillonite-soluble starch composite ceramide (a) and alkali impregnated steel slag-montmorillonite-sludge composite ceramide (b) before and after adsorption

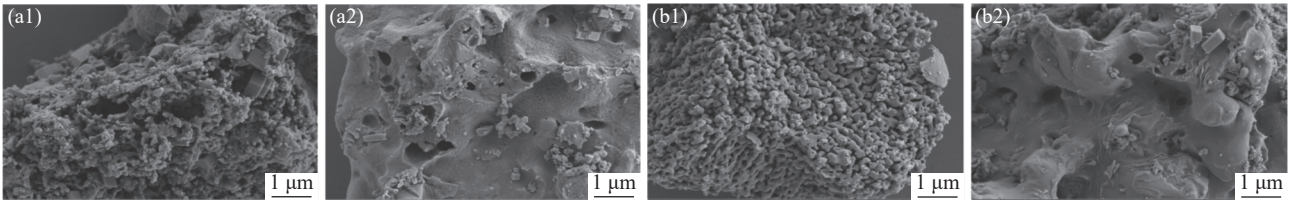


图6 钢渣-蒙脱土-可溶性淀粉复合陶粒吸附前(a1)后(a2)和碱浸钢渣-蒙脱土-污泥复合陶粒吸附前(b1)后(b2)扫描电镜

Fig. 6 SEM images of steel slag-montmorillonite-soluble starch composite ceramsite before (a1) and after (a2) and alkali-impregnated steel slag-montmorillonite-sludge composite ceramsite before (b1) and after (b2) adsorption

2.3 等温吸附模型

磷平衡浓度-平衡吸附量趋势如图7所示,两种陶粒的吸附趋势大体相似,刚开始时两种陶粒平衡时的吸附量相差不大,随着磷酸盐浓度的增加,碱浸钢渣-蒙脱土-污泥复合陶粒吸附平衡时的吸附量超过钢渣-蒙脱土-可溶性淀粉复合陶粒,这可能是由于磷浓度低时,两种陶粒表面均有充分的吸附位点,二者吸附能力相当,随着磷酸盐浓度的提升,水中活跃的磷酸根离子增加,钢渣-蒙脱土-可溶性淀粉复合陶粒表面的吸附位点不足,而碱浸钢渣-蒙脱土-污泥复合陶粒可为磷酸根离子提供更多的吸附位点。

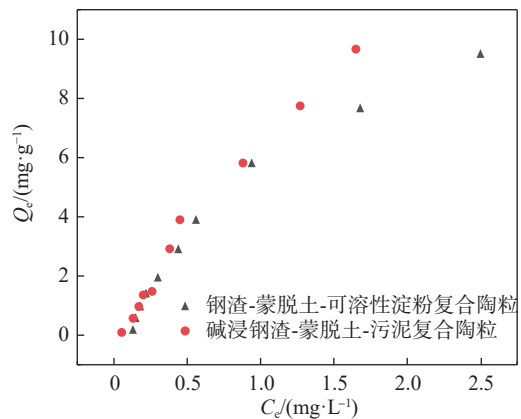


图7 磷平衡浓度-平衡吸附量趋势

Fig. 7 Trend diagram of phosphorus equilibrium concentration-equilibrium adsorption capacity

采用 Langmuir 模型(式(1))和 Freundlich 模型(式(2))分别对该试验数据进行拟合。两种钢渣陶

粒的等温吸附方程拟合结果与相关参数如表 1 所示。

表 1 两种钢渣陶粒的等温吸附方程拟合结果与相关参数

Table 1 Isothermal adsorption equation fitting results and related parameters of two kinds of steel slag ceramides

材料	温度/℃	Langmuir模型			Freundlich模型		
		$Q_{max}/(L \cdot mg^{-1})$	$k_L/(L \cdot mg^{-1})$	R^2	$k_F/(mg^{1-n} \cdot g^{-1} \cdot L^{-n})$	$\frac{1}{n}$	R^2
钢渣-蒙脱土-可溶性淀粉复合陶粒	20	19.18	0.40	0.984	5.07	-0.74	0.961
碱浸钢渣-蒙脱土-污泥复合陶粒	20	39.18	0.20	0.987	6.31	-0.81	0.983

$$Q_e = Q_{max} k_L C_e / (1 + k_L C_e) \quad (1)$$

$$Q_e = k_F C_e^{1/n} \quad (2)$$

式中, Q_e 为平衡吸附量, mg/g; Q_{max} 为最大理论吸附量, mg/g; C_e 为吸附平衡时的总磷质量浓度, mg/L; k_L 为 Langmuir 常数, L/mg; k_F 为 Freundlich 常数, $mg^{1-1/n} \cdot L^{1/n}/g$; n 为非线性因子。

由 R^2 的大小可知, Langmuir 模型更适于描述陶粒吸附除磷过程, 说明钢渣对磷的吸附属于单分子层均匀吸附。根据 Langmuir 吸附等温方程计算可知, 碱浸钢渣-蒙脱土-污泥复合陶粒吸附饱和时最大吸附量 (39.18 mg/g) 大于钢渣-蒙脱土-可溶性淀粉复合陶粒 (19.18 mg/g), 这表明碱浸钢渣-蒙脱土-污泥复合陶粒较钢渣-蒙脱土-可溶性淀粉复合陶粒有更强的磷吸附能力^[25], 分析认为前者的孔隙更加密集, 对磷的负载量更大^[26]。且碱浸后, 氧化硅、氧化铝等组分在钢渣表面生成-Si-OH、-Al-OH 等能够与磷酸盐发生络合反应的活性基团, 从而加大吸附量^[27]。

2.4 动力学吸附模型

两种钢渣基陶粒吸附平衡时的吸附量随时间变化趋势如图 8 所示, 两种陶粒吸附量随吸附时长的变化趋势大体一致, 皆是随反应时长增加, 曲线斜率由大变小, 最终达到吸附平衡。

采用伪一级动力学模型(式(3))和伪二级动力学模型(式(4))对吸附过程进行拟合, 两种陶粒的动力学吸附方程拟合结果与相关参数见表 2。

$$\ln(Q_e - Q_t) = \ln Q_e - k_1 t \quad (3)$$

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

式中, t 为吸附时间, min; Q_t 为 t 时的吸附量, mg/g; Q_e 为吸附平衡时的吸附量, mg/g; k_1 为准一级动力学模型吸附速率常数, min^{-1} ; k_2 为准二级动力学模型吸附速率常数, $mg/(g \cdot min)$ 。

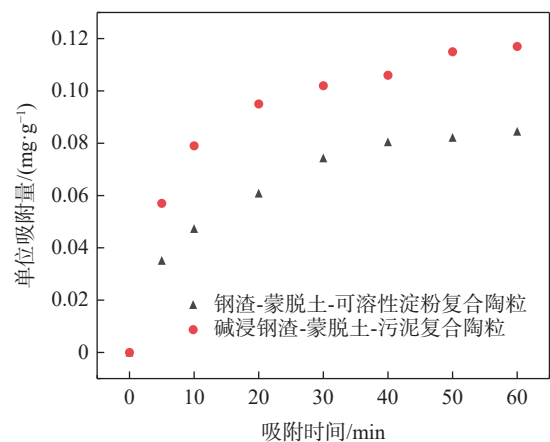


图 8 两种陶粒吸附时长-吸附量趋势
Fig. 8 Trend diagram of adsorption duration and adsorption capacity of two kinds of ceramides

表 2 两种陶粒的动力学吸附方程拟合结果与相关参数

Table 2 Fitting results of kinetic adsorption equations and related parameters of the two ceramides

材料	准一级动力学模型			准二级动力学模型		
	$Q_e/(mg \cdot g^{-1})$	k_1/min^{-1}	R^2	$Q_e/(mg \cdot g^{-1})$	$k_2/[mg \cdot (g \cdot min)^{-1}]$	R^2
钢渣-蒙脱土-可溶性淀粉复合陶粒	0.086	0.065	0.984	0.108	0.615	0.994
碱浸钢渣-蒙脱土-污泥复合陶粒	0.11	0.13	0.979	0.101	1.206	0.994

由表 2 中 R^2 的大小可知, 两种陶粒对准二级动力学方程的拟合度更高, 且准二级动力学模型计算的理论平衡吸附量与图 8 中的实测平衡吸附量较为

接近, 因此两种陶粒对磷酸盐的吸附过程符合准二级动力学模型, 以化学吸附为主, 两种陶粒吸附过程不受液相吸附质浓度的影响, 仅与陶粒表面可利用

的吸附位点有关,通过吸附剂与吸附质之间共享电子或交换电子形成共价力而结合,或者通过离子交换作用结合,包含了外部液膜扩散、表面吸附和孔道内部扩散等吸附过程^[28]。

3 结论

1) 碱浸和污泥强化有效提升了陶粒对磷的吸附性能。试验条件下,当磷去除率达到 93% 时,钢渣-蒙脱土-可溶性淀粉复合陶粒投加量为 1 g,而碱浸钢渣-蒙脱土-污泥复合陶粒所需投加量为 0.5 g;在吸附进行 60 min 时,两种陶粒对磷的去除率即可达到 87%;水样中的碳酸根、硫酸根等阴离子对两种陶粒吸附除磷效果影响较小,两种陶粒的 pH 适用范围较广。

2) 两种陶粒对磷酸盐的吸附符合 Langmuir 等温吸附模型和准二级动力学模型,对磷的吸附属于单分子层均匀吸附,以化学吸附为主。经碱浸和污泥强化后,钢渣陶粒的孔隙更明显,且反应位点增多,其吸附饱和时最大吸附量达到 39.18 mg/g,比钢渣-蒙脱土-可溶性淀粉复合陶粒提高了 104%。

3) 利用钢渣制备吸附材料,并用污泥强化吸附性能,实现了废物资源化,减轻了环境压力。

4) 下步工作方向

目前试验针对的是配置的含磷溶液,而实际含磷废水成分复杂且含磷组分较多,因此将尝试增加磷的含量,进一步试验并将碱浸钢渣-蒙脱土-污泥复合陶粒应用于实际废水处理,考察复合陶粒的实际应用价值。

参考文献

- [1] Bai Caiyun, Zhang Chongmiao. Study on preparation of modified steel slag ceramsite and its phosphorus removal performance[J]. *Technology of Water Treatment*, 2020, 46(7): 63-66,71.
(白彩云, 张崇淼. 改性钢渣陶粒的制备及其除磷性能研究 [J]. *水处理技术*, 2020, 46(7): 63-66,71.)
- [2] Akindolie M S, Choi H J. Fe₁₂LaO₁₉ fabricated biochar for removal of phosphorus in water and exploration of its adsorption mechanism[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 329: 117053.
- [3] Li J, Huang H, Yu W, *et al.* A novel lanthanum carbonate for low-level phosphorus removal: Adsorption performance and mechanism[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 473: 145225.
- [4] Cui Wanying, Ai Hengyu, Zhang Shihao, *et al.* Research status on application of modified adsorbents in phosphorus removal from wastewater[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2020, 39(10): 17.
(崔婉莹, 艾恒雨, 张世豪, 等. 改性吸附剂去除废水中磷的应用研究进展 [J]. *化工进展*, 2020, 39(10): 17.)
- [5] Aigbe U O, Ukhurebor K E, Onyancha R B, *et al.* Fly ash-based adsorbent for adsorption of heavy metals and dyes from aqueous solution: a review[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 14: 2751-2774.
- [6] Meng Haoyan, Yang Mingfan, Luo Guozhi, *et al.* Adsorption performance and mechanism of magnetic modified oyster shell powder on phosphorus in water[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(2): 446-456.
(蒙浩焱, 杨名帆, 罗国芝, 等. 载铁牡蛎壳粉对水中磷的吸附性能及机理 [J]. *环境工程学报*, 2021, 15(2): 446-456.)
- [7] Liu Y, Liu X H, Wang H C, *et al.* Pyrite coupled with steel slag to enhance simultaneous nitrogen and phosphorus removal in constructed wetlands[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 470: 143944.
- [8] Lü Shuqing, Tian Shuangchao, Li Hechao, *et al.* Research status of phosphorus removal by solid waste adsorption[J]. *Industrial Water Treatment*, 2020, 40(5): 1-7.
(吕淑清, 田双超, 李鹤超, 等. 固体废弃物吸附除磷研究现状 [J]. *工业水处理*, 2020, 40(5): 1-7.)
- [9] Li Zimu, Li Canhua, Zha Yuhong, *et al.* Study on the adsorption mechanism of Cu²⁺ by steel slag-manganese slag composite ceramics[J]. *Industrial Water Treatment*, 2022, 42(8): 113-119.
(李子木, 李灿华, 查雨虹, 等. 钢渣-锰渣复合陶粒对 Cu²⁺ 的吸附机理研究 [J]. *工业水处理*, 2022, 42(8): 113-119.)
- [10] Wang Jiabin, Li Xing, Qiu Liping, *et al.* Preparation of non-sintering composite steel slag filter and its phosphorus adsorption characteristics[J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(11): 86-91.
(王嘉斌, 李星, 邱立平, 等. 免烧复合钢渣滤料的制备及其磷吸附特性 [J]. *中国给水排水*, 2019, 35(11): 86-91.)
- [11] Liu Xiao, Li Xuelian, Cao Guoping, *et al.* Adsorption effect of steel slag haydite on phosphorus in wastewater[J]. *Industrial Water Treatment*, 2014, 34(1): 18-21.
(刘晓, 李学莲, 曹国凭, 等. 钢渣陶粒对废水中磷的吸附特性 [J]. *工业水处理*, 2014, 34(1): 18-21.)
- [12] Pei Xuanyuan, Ren Hongyu, Ren Nanqi, *et al.* Review on the application of sludge derived biochar in the treatment of

- emerging contaminants in water environment[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 57(S2): 545–552.
(裴轩瑗, 任宏宇, 任南琪, 等. 污泥生物炭处理水环境新兴污染物研究进展 [J]. *给水排水*, 2021, 57(S2): 545–552.)
- [13] Wang Hongbin, Du Yanxia. Progress of application of acid modified fly ash in wastewater treatment[J]. *World Nonferrous Metals*, 2020(5): 204–205.
(王宏宾, 杜艳霞. 酸改性粉煤灰在废水处理中的应用研究进展 [J]. *世界有色金属*, 2020(5): 204–205.)
- [14] Zhang Jian, Wan Dongjin, Liu Yongde, *et al.* Alkali treatment of ZSM-5 molecular sieve and its adsorptive performance of Pb^{2+} from aqueous solution[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2015(4): 277–283.
(张健, 万东锦, 刘永德, 等. 碱改性 ZSM-5 沸石分子筛吸附去除水中 Pb^{2+} 的研究 [J]. *环境工程技术学报*, 2015(4): 277–283.)
- [15] Majid A F A, Dewi R, Shahri N N M, *et al.* Enhancing adsorption performance of alkali activated kaolinite in the removal of antibiotic rifampicin from aqueous solution[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023: 132209.
- [16] Cao Jun, Wang Ruochen, Zhu Hualun, *et al.* Effect of fenton pre-oxidation on the physicochemical properties of sludge-based biochar and its adsorption mechanisms for ammonia nitrogen removal[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(5): 110689.
- [17] Xin Wang, Song Yonghui, Zhang Yadi, *et al.* Research progress of preparation of sewage sludge-based carbonaceous adsorbents and their adsorption characteristics[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2017, 7(3): 306–317.
(辛旺, 宋永会, 张亚迪, 等. 污泥基碳吸附材料的制备及其吸附性能研究进展 [J]. *环境工程技术学报*, 2017, 7(3): 306–317.)
- [18] Chen Yongliang, Li Huimin, Shi Lei, *et al.* Adsorption of amoxicillin from water by sludge-rice husk pellet biochar[J]. *Technology of Water Treatment*, 2023, 49(10): 64–69.
(陈永亮, 李慧敏, 石磊, 等. 污泥-稻壳颗粒生物炭对水中阿莫西林的吸附 [J]. *水处理技术*, 2023, 49(10): 64–69.)
- [19] Xu K, Li L, Huang Z, *et al.* Efficient adsorption of heavy metals from wastewater on nanocomposite beads prepared by chitosan and paper sludge[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 846: 157399.
- [20] Qiao Yong. Study on dephosphorization of converter slag by leaching and removal of phosphorus from leach liquor[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
(焦勇. 转炉钢渣浸出脱磷及含磷浸出液吸附除磷研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2017.)
- [21] Zhu Dianmei, Shao Bolin, Zhong Keyi, *et al.* Adsorption performance of lanthanum-modified steel slag towards fluoride ion in water[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2023, 17(4): 1167–1176.
(朱殿梅, 邵波霖, 钟可意, 等. 镧改性钢渣对水中氟离子的吸附性能 [J]. *环境工程学报*, 2023, 17(4): 1167–1176.)
- [22] Ren Z, Liu Y, Yuan L, *et al.* Optimizing the content of nano-SiO₂, nano-TiO₂ and nano-CaCO₃ in portland cement paste by response surface methodology[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 35: 102073.
- [23] Wang F P, Liu T J, Cai S, *et al.* A review of modified steel slag application in catalytic pyrolysis, organic degradation, electrocatalysis, photocatalysis, transesterification and carbon capture and storage[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(10): 4539.
- [24] Chen Meiling, Yan Jiabao, Xie Pengkai, *et al.* Preparation and catalytic performance of steel-making slag and sludge ceramics catalyst[J]. *Journal of Wuhan University of Science and Technology*, 2019, 42(5): 349–353.
(陈美玲, 颜家保, 谢鹏凯, 等. 钢渣污泥陶粒催化剂的制备及其催化性能 [J]. *武汉科技大学学报*, 2019, 42(5): 349–353.)
- [25] Zhang Yun, Xiao Qing, Xu Shanni, *et al.* Adsorption studies on phosphate by amino-functionalized nano-size composite materials[J]. *Acta Chimica Sinica*, 2012, 17: 1839–1846.
(张蕴, 晓青, 许姗妮, 等. 氨基功能化纳米复合材料对磷酸盐的吸附研究 [J]. *化学学报*, 2012, 17: 1839–1846.)
- [26] An Q, Miao Y, Zhao B, *et al.* An alkali modified biochar for enhancing Mn^{2+} adsorption: Performance and chemical mechanism[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2020, 248: 122895.
- [27] Zhang X, Yu J, Jin B, *et al.* Experimental research on the gaseous $PbCl_2$ adsorption by thermal alkali modified coal fly ash[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(3): 107912.
- [28] Ouyang Jia. Preparation and adsorption experiment of phosphate removal ceramics[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
(欧阳嘉. 新型除磷填料的制备及吸附实验研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2017.)