

钢渣-锰渣复合陶粒对 Cu^{2+} 的吸附机理研究

李子木, 李灿华, 查雨虹, 李明晖, 都 刚

(安徽工业大学冶金工程学院, 安徽马鞍山 243002)

[摘要] 制备了钢渣-锰渣复合陶粒, 研究其对含 Cu^{2+} 水溶液的吸附特性。考察了钢渣-锰渣复合陶粒的材料配比、实验温度、吸附时间、搅拌速度、 Cu^{2+} 初始质量浓度对吸附效果的影响, 研究了钢渣-锰渣复合陶粒吸附 Cu^{2+} 的等温模型和动力学模型。同时用 XRD、XRF、SEM、BET 对该复合陶粒进行表征, 讨论钢渣-锰渣复合陶粒对 Cu^{2+} 的吸附机理。结果表明, 复合陶粒中含有大量硅酸化合物和碱性氧化物, 同时具有较大的表面积, 水解后对 Cu^{2+} 有较强的吸附能力。钢渣、锰渣的最佳质量比为 5:5; 温度对 Cu^{2+} 的吸附过程影响较小。吸附过程中, 搅拌速度在 100~300 r/min 范围内时, 去除率随搅拌速度的增加而显著上升。平衡吸附时间为 30 min, 吸附效果最佳的 Cu^{2+} 初始质量浓度为 500 mg/L, 初始质量浓度超过 500 mg/L 后, Cu^{2+} 去除率随初始质量浓度的升高而显著下降。钢渣-锰渣复合陶粒对 Cu^{2+} 的吸附过程为单层吸附, 其吸附过程符合 Langmuir 等温吸附模型。吸附过程中理论最大饱和吸附量为 83.3 mg/g, 实际最大饱和吸附量为 80.69 mg/g。钢渣-锰渣复合陶粒吸附 Cu^{2+} 符合准二级动力学模型, 其吸附过程以化学吸附为主。

[关键词] 钢渣; 锰渣; Cu^{2+} ; 陶粒; 吸附

[中图分类号] X703; TQ424.24

[文献标识码] A

[文章编号] 1005-829X(2022)08-0113-07

Study on the adsorption mechanism of Cu^{2+} by steel slag-manganese slag composite ceramics

LI Zimu, LI Canhua, ZHA Yuhong, LI Minghui, DU Gang

(School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China)

Abstract: Steel slag-manganese slag composite ceramics were prepared to study the adsorption characteristics of Cu^{2+} containing aqueous solution. The effects of material ratio, experimental temperature, adsorption time, stirring speed and initial mass concentration of Cu^{2+} on the adsorption rate of steel slag-manganese slag composite ceramics were investigated, and the isothermal and kinetic models of Cu^{2+} adsorption by steel slag-manganese slag composite ceramics were studied. The composite ceramics were also characterized by XRD, XRF, SEM and BET, and the adsorption mechanism of Cu^{2+} on steel slag-manganese slag composite ceramics was discussed. The results showed that the composite ceramics contained a large number of silicate compounds and basic oxides, and also had a large surface area. After hydrolysis, the ceramics had a strong adsorption capacity for Cu^{2+} . The optimal mass ratio of steel slag and manganese slag was 5:5. The temperature has less influence on the adsorption process of Cu^{2+} . During the adsorption process, the removal rate increased significantly with the increase of stirring speed when the stirring speed was in the range of 100–300 r/min. The equilibrium adsorption time was 30 minutes, and the initial mass concentration of Cu^{2+} with the best adsorption effect was 500 mg/L. After the initial mass concentration exceeded 500 mg/L, the removal rate of Cu^{2+} decreased significantly with the increase of the initial mass concentration. The adsorption process of Cu^{2+} by steel slag-manganese slag composite ceramics was monolayer adsorption, and its adsorption process was in accordance with Langmuir isothermal adsorption model. The theoretical maximum saturated adsorption amount was 83.3 mg/g and the actual maximum saturated adsorption amount was 80.69 mg/g during the adsorption process. The adsorption of Cu^{2+} by steel slag-manganese slag composite ceramics was in accordance with the quasi-secondary kinetic model, and its

[基金项目] 区域创新体系建设-国家创新型县市(“百城百园”)示范项目(202107d0605)

adsorption process was mainly chemisorption.

Key words: steel slag; manganese slag; Cu^{2+} ; ceramsite; adsorption

水中超量的铜会影响水生动植物的生长,如被人体摄入会引发诸多疾病。重金属离子的治理方法包括化学沉淀法、生物膜法、吸附法、反渗透法等。其中吸附法的经济效益高,被认为是最具应用前景的技术。

钢渣的比表面积较大、化学活性高,且可水解生成水化硅酸钙,是一种良好吸附材料,可用于水处理领域^[1]。但多数研究未解决钢渣吸附后的固液分离问题。锰渣的比表面积大,曾越等^[2]将电解锰渣作为基料制备了方沸石吸附剂,其对 Pb^{2+} 的去除率高达 95.47%。鉴于钢渣具有高碱性可沉淀重金属离子的性能,而锰渣的比表面积较大,笔者制备了钢渣-锰渣复合陶粒吸附剂,研究其对 Cu^{2+} 的吸附特性。该复合陶粒既能释放 OH^- 固化重金属离子,又能实现固液分离,去除过程简易化且节约成本,以期达到固废资源化和处理铜污染的目的。

1 实验部分

1.1 材料与仪器

五水硫酸铜,纯度为 99.0%,分析纯。实验用水为去离子水。钢渣为中国柳钢集团的转炉钢渣,主要含有 Ca、Si、Fe 等元素。锰渣取自广西中信集团,主要含有 Si、Al、Fe 等元素。钢渣和锰渣的主要成分见表 1。

表 1 钢渣和锰渣的主要成分及质量分数

Table 1 Main components and mass fraction of steel slag and manganese slag

项目	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂
钢渣	42.59	17.05	16.33	10.78	5.83	2.55	1.81	1.76
锰渣	0.829	33.63	19.98	33.38	1.16	5.91	1.20	1.84

DHG-9425A 电热鼓风干燥机,上海一恒科学仪器有限公司;FA2004 型万分之一电子天平,上海舜宇恒平科学仪器有限公司;pHS-3E 型 pH 计,上海仪电科学仪器股份有限公司;JDIA-40 型圆盘造粒机,浙江正泰电器有限公司;SM-500 TEST MILL 型球磨机,DBS-300 型顶击式标准筛振筛机,无锡建仪仪器机械;B13-3 型智能恒温定时磁力搅拌器,上海司乐仪器有限公司;X 射线衍射仪,德国布鲁克公司。

1.2 实验方法

配制人工模拟含铜废水,改变实验条件,采用单因素控制法确定最佳实验条件。 Cu^{2+} 质量浓度采用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP)进行测定。

(1)吸附剂的制备。准备不同配比的原料[A,全钢渣;B1, $m(\text{钢渣}):m(\text{锰渣})=9:1$;B2, $m(\text{钢渣}):m(\text{锰渣})=8:2$;B3, $m(\text{钢渣}):m(\text{锰渣})=7:3$;B4, $m(\text{钢渣}):m(\text{锰渣})=6:4$;B5, $m(\text{钢渣}):m(\text{锰渣})=5:5$;B6, $m(\text{钢渣}):m(\text{锰渣})=4:6$;B7, $m(\text{钢渣}):m(\text{锰渣})=3:7$;B8, $m(\text{钢渣}):m(\text{锰渣})=2:8$;B9, $m(\text{钢渣}):m(\text{锰渣})=1:9$;C,全锰渣],用球磨机和标准筛振筛机将钢渣和锰渣磨成 $75\ \mu\text{m}$ (200 目),混匀,用圆盘造粒机制备陶粒。陶粒样品放入电热鼓风干燥机中烘干,筛选直径为 3~5 mm 的颗粒,得到吸附剂样品。

(2)模拟水样的制备。称取 3.960 0 g 硫酸铜置于 1 000 mL 容量瓶中,用去离子水溶解后,再用去离子水稀释至刻度,摇匀,得到 1 000 mg/L Cu^{2+} 标准溶液作为贮备液。其他浓度 Cu^{2+} 溶液按比例即用即配。

2 结果与讨论

2.1 表征分析

2.1.1 XRD 表征

为确定钢渣、锰渣和复合陶粒(B1、B2)的结构组成,用 X 射线衍射仪进行分析,结果如图 1 所示。

由图 1(a)可见,钢渣的杂峰很多,说明其组成比较复杂,其中衍射峰较高的是硅酸化合物,这也与钢渣的 XRF 表征结果一致。锰渣的 XRD 谱图与钢渣相似,杂峰同样较多,说明锰渣成分也十分复杂,锰渣的物相中以石英和石膏为主。

A、B1、B2 陶粒吸附剂的 XRD 谱图大致相同,主要为硅酸盐类、水合磷酸盐类、水合硅酸盐类、石英和硅酸二钙等。硅酸二钙在 A 的物相中比较明显,说明在全钢渣陶粒中硅酸二钙未完全进行水化反应。加入锰渣后,陶粒中的硅酸二钙衍射峰完全消失,表明硅酸二钙已完全水化。物相中的硅酸盐类化合物,则是钢渣中的碱性氧化物水解形成的碱性环境,放出的热量使 Si—O 键断裂而形成。

表3 不同配比钢渣-锰渣复合陶粒对 Cu^{2+} 的吸附效果

Table 3 The effect of steel slag-manganese slag composite ceramics with different proportions on the adsorption of Cu^{2+}

$m(\text{钢渣}):m(\text{锰渣})$	剩余铜质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	去除率/%
10:0	77.03	84.59
9:1	15.7	96.86
8:2	76.14	84.77
7:3	53.91	89.22
6:4	32.68	93.46
5:5	14.75	97.05
4:6	53.49	89.30
3:7	106.49	78.70
2:8	178.2	64.36
1:9	318.27	36.35
0:10	470	6

由表3可见, $m(\text{钢渣}):m(\text{锰渣})=5:5$ 时, 钢渣-锰渣复合陶粒对 Cu^{2+} 的吸附效果最佳。通过加入一定量的锰渣可以提高钢渣的活性^[3], 增强钢渣-锰渣复合陶粒的吸附效果。在锰渣比例增加过程中, 前期去除率变化较小, $m(\text{钢渣}):m(\text{锰渣})$ 为 5:5 时吸附率达到最佳; 此后继续增加锰渣用量, 发现复合陶粒对 Cu^{2+} 的吸附效果有明显减弱趋势, 全锰渣陶粒对 Cu^{2+} 的去除率很小。由此推断, 复合陶粒对 Cu^{2+} 的吸附主要依靠钢渣水化形成的高碱性环境: 碱性环境下 Cu^{2+} 可形成 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 沉淀, 锰渣和钢渣在碱性环境下反应, 加速 C-S-H 凝胶(水化硅酸钙凝胶)、硅酸盐等水化物的产生, 水化物对铜进行吸附; 而较大的比表面积使陶粒有更多的吸附位点, 提高对 Cu^{2+} 的吸附能力。

2.3 吸附时间对 Cu^{2+} 去除效果的影响

在 8 份 100 mL Cu^{2+} 溶液(Cu^{2+} 初始质量浓度为 500 mg/L) 中分别加入 1.0 g 钢渣-锰渣复合陶粒 [$m(\text{钢渣}):m(\text{锰渣})=5:5$, 后续实验均采用该比例], 设置搅拌速度为 300 r/min、吸附温度为 25 $^{\circ}\text{C}$, 进行吸附实验。取样过 0.45 μm 水系滤膜, 用 ICP 测定滤液中的 Cu^{2+} , 考察吸附时间对 Cu^{2+} 去除效果的影响, 结果如表4所示。

由表4可见, 钢渣-锰渣复合陶粒对 Cu^{2+} 的吸附分为 3 个阶段。初始阶段, 钢渣-锰渣复合陶粒对 Cu^{2+} 的吸附量明显增加, 这是由于实验初期复合陶粒表面存在大量吸附点, 大量游离 Cu^{2+} 扩散到固相-液相界面, 与陶粒表面的吸附点结合, 实验中有少量白色絮状物生成。随着时间延长, 白色絮状物变多, 溶液中剩余 Cu^{2+} 较少, 陶粒表面的有效吸附

表4 吸附时间对钢渣-锰渣复合陶粒吸附 Cu^{2+} 效果的影响

Table 4 The effect of adsorption time on the adsorption of Cu^{2+} by steel slag-manganese slag composite ceramics

吸附时间/min	剩余铜质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	去除率/%
1	356.55	29
3	314.46	37
6	238.14	52
10	135.28	73
15	70.1	86
20	36.4	93
25	24.86	95
30	0.11	100
35	0.02	100

点被游离 Cu^{2+} 大量占用, Cu^{2+} 由复合陶粒表层扩散到内部, 此阶段吸附速率较缓慢。30 min 时复合陶粒基本将 Cu^{2+} 吸附完全, 达到平衡状态。该变化趋势与相似类型的钢渣复合陶粒大致一致^[4]。

2.4 温度对 Cu^{2+} 去除效果的影响

在 Cu^{2+} 初始质量浓度为 500 mg/L、 Cu^{2+} 溶液体积为 100 mL、钢渣-锰渣复合陶粒投加量为 1.0 g、搅拌速度为 300 r/min 的条件下, 在不同反应温度下恒温搅拌, 吸附 30 min, 取样静置后过 0.45 μm 水系滤膜, 测定滤液中的 Cu^{2+} , 考察温度对 Cu^{2+} 去除率的影响, 结果如表5所示。

表5 温度对钢渣-锰渣复合陶粒吸附 Cu^{2+} 的影响

Table 5 The effect of reaction temperature on the adsorption of Cu^{2+} by steel slag-manganese slag composite ceramics

温度/ $^{\circ}\text{C}$	剩余铜质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	去除率/%
25	4.773	99.04
35	0.588	99.88
45	0.422	99.91
50	0.364	99.93
60	0.112	99.98
65	0.149	99.97

由表5可知, 温度对钢渣-锰渣复合陶粒吸附 Cu^{2+} 的效果基本没有影响, 去除率基本保持在 99% 以上。从剩余铜质量浓度的变化情况来看, 开始阶段剩余 Cu^{2+} 有一定变化, 但可忽略不计。判断钢渣-锰渣复合陶粒吸附 Cu^{2+} 的过程对温度有较强的适应性, 且吸附效果极佳。

2.5 搅拌速度对 Cu^{2+} 去除效果的影响

搅拌速度影响复合陶粒的水解, 以及 Cu^{2+} 与复合陶粒的接触, 是吸附实验的关键因素之一。在 8 份初始质量浓度为 500 mg/L 的 100 mL Cu^{2+} 溶液中

分别投加 1.0 g 钢渣-锰渣复合陶粒,室温下以不同搅拌速度进行吸附,30 min 后取样过 0.45 μm 水系滤膜,测定滤液中的 Cu^{2+} ,结果见表 6。

表 6 搅拌速度对钢渣-锰渣复合陶粒吸附 Cu^{2+} 的影响

Table 6 The effect of stirring speed on the adsorption of Cu^{2+} by steel slag-manganese slag composite ceramicsite

搅拌速度/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	剩余铜质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	去除率/%
100	193.2	61.36
150	101.81	79.64
200	53.65	89.27
250	25.91	94.82
300	0.21	99.96
350	0.10	99.98
400	0.01	100
450	0.005	100

由表 6 可知,搅拌速度为 100~300 r/min 时,钢渣-锰渣复合陶粒的吸附效果随搅拌速度的增加而快速增大。原因在于搅拌速度加快可增大 Cu^{2+} 与复合陶粒的接触面积,在较高浓度的 Cu^{2+} 环境下,复合陶粒表面有更多结合位点参与吸附。同时,加快搅拌速度可加速复合陶粒的水解,生成大量 C-S-H 凝胶和 $\text{OH}^{-[5]}$,提高对 Cu^{2+} 的去除率。当搅拌速度增至 300 r/min 以上时,溶液中的 Cu^{2+} 基本被吸附完全。实验确定最佳搅拌速度为 300 r/min 。

2.6 初始质量浓度对 Cu^{2+} 去除效果的影响

室温下,在 7 份 100 mL、初始质量浓度不同的 Cu^{2+} 溶液中分别投加 1.0 g 钢渣-锰渣复合陶粒,300 r/min 搅拌速度下搅拌 30 min,取样过 0.45 μm 水系滤膜,测定滤液中的 Cu^{2+} ,结果见表 7。

表 7 初始质量浓度对钢渣-锰渣复合陶粒吸附 Cu^{2+} 的影响

Table 7 The effect of initial mass concentration on the adsorption of Cu^{2+} by steel slag-manganese slag composite ceramicsite

初始质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	剩余铜质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	去除率/%
200	0.23	100
300	0.24	100
400	2.21	99
500	2.51	99
600	29.82	95
700	55.28	92
800	80.96	90

如表 7 所示,随着 Cu^{2+} 初始质量浓度的增加,钢渣-锰渣复合陶粒的去除率呈下降趋势。这是由于 Cu^{2+} 在稀释溶液中的迁移率高,去除率更高。随着 Cu^{2+} 质量浓度的增加,陶粒的吸附趋于饱和, Cu^{2+} 去

除率降低。可见,在钢渣-锰渣复合陶粒投加量为 1.0 g 的条件下, Cu^{2+} 初始质量浓度为 500 mg/L 时陶粒趋于吸附饱和状态。

2.7 钢渣-锰渣复合陶粒对 Cu^{2+} 的吸附机理

(1) 等温吸附。等温条件下,吸附达到平衡时吸附量与 Cu^{2+} 质量浓度之间的曲线即陶粒与 Cu^{2+} 的等温吸附曲线。等温吸附线可反映吸附剂的吸附性能,用于描述固体在溶液中的吸附现象^[6]。常温下,将 1.0 g 钢渣-锰渣复合陶粒放入 100 mL 不同初始质量浓度 (200、300、400、500、600、700、800、900、1 000 mg/L) 的 Cu^{2+} 溶液中,设置搅拌速度为 300 r/min ,吸附时间 1 h,得到钢渣-锰渣复合陶粒的等温吸附曲线如图 4 所示。

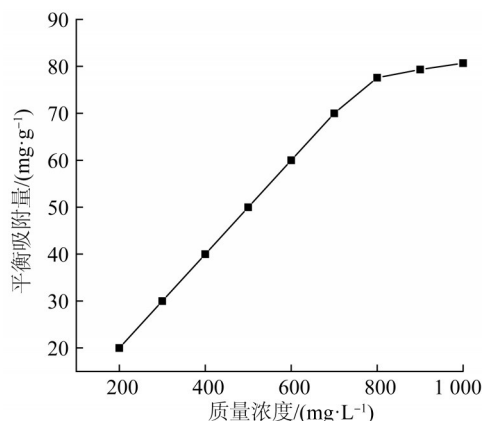


图 4 Cu^{2+} 的等温吸附曲线

Fig. 4 Cu^{2+} adsorption isotherm curve

图 4 中, Cu^{2+} 初始质量浓度为 200~700 mg/L 时,随着 Cu^{2+} 的增加,陶粒的平衡吸附量上升,其与初始质量浓度基本呈线性关系。此阶段的陶粒表面吸附位点充足,能够完全吸附溶液中的 Cu^{2+} ; Cu^{2+} 初始质量浓度达到 800 mg/L 后,陶粒的平衡吸附量逐渐趋于稳定,吸附趋于饱和状态。

采用 Langmuir 等温吸附模型^[7]和 Freundlich 等温吸附模型^[8]对吸附过程进行分析。拟合后得到 Cu^{2+} 的 Langmuir 等温吸附模型和 Freundlich 等温吸附模型,如图 5 所示。拟合参数见表 8。

由表 8 可见,Langmuir 等温模型和 Freundlich 等温模型拟合的相关系数 R^2 分别为 0.99、0.46,钢渣-锰渣复合陶粒对 Cu^{2+} 的吸附更符合 Langmuir 吸附模型,即复合陶粒对 Cu^{2+} 的吸附属于单分子层吸附。在考察的初始质量浓度范围内 R_L 均介于

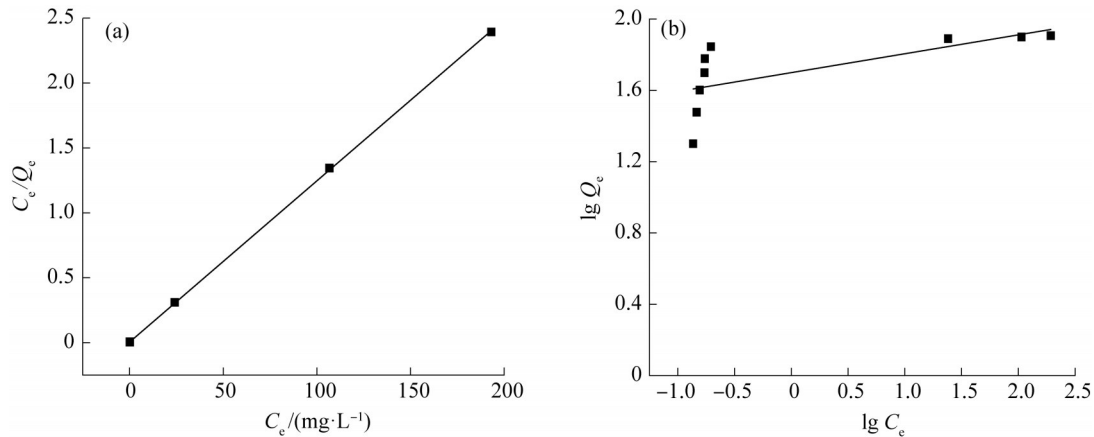


图5 Langmuir等温吸附方程(a)和Freundlich等温吸附方程(b)

Fig. 5 Langmuir isotherm adsorption equation (a) and Freundlich isotherm adsorption equation (b)

表8 等温吸附方程中的参数

Table 8 Parameters in isothermal adsorption equation

等温吸附模型	参数	数值
Langmuir等温吸附模型	$K_L/(L \cdot mg^{-1})$	2.80
	$q_{max}/(mg \cdot g^{-1})$	83.3
	R^2	0.99
Freundlich等温吸附模型	$K_F/[mg \cdot g^{-1} \cdot (L \cdot mg^{-1})^{\frac{1}{n}}]$	50.07
	n	9.44
	R^2	0.46

0~1,说明该体系对整体吸附行为有促进作用。由Langmuir等温吸附模型计算出陶粒对 Cu^{2+} 的理论饱和吸附量 q_{max} 为83.3 mg/g,与实际饱和吸附量80.69 mg/g相符合,表明钢渣-锰渣复合陶粒对水

中 Cu^{2+} 的吸附过程与Langmuir等温模型的单层吸附一致。

(2)吸附动力学方程。通过对吸附动力学模型的拟合可判断吸附反应机理,并得到相关动力学参数^[9]。

常温下向8份500 mg/L含 Cu^{2+} 溶液中分别加入1.0 g钢渣-锰渣复合陶粒,搅拌速度为300 r/min,进行吸附实验,吸附时间取1、3、6、10、15、20、25、30 min,过0.45 μm 水系滤膜,测定滤液中的 Cu^{2+} 质量浓度,分别用准一级反应动力学模型和准二级反应动力学模型对动力学数据进行拟合,拟合曲线见图6,拟合相关动力学参数见表9。

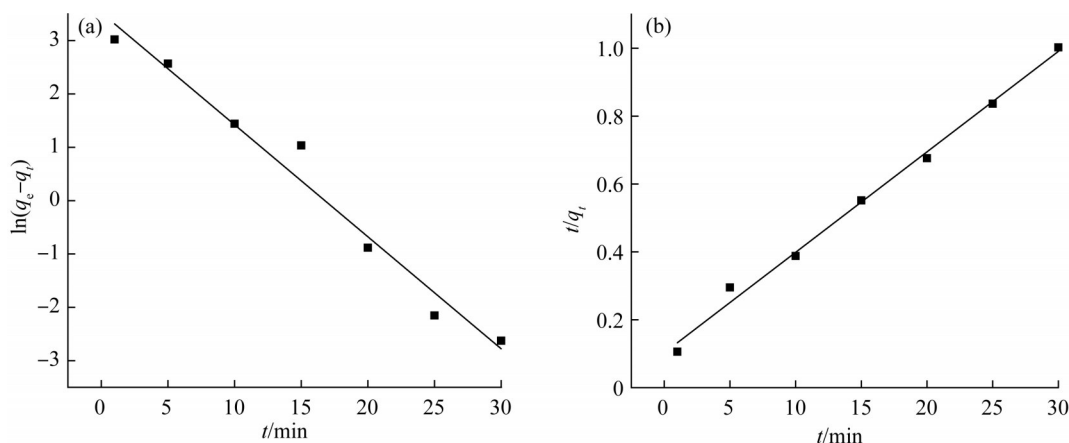


图6 准一级动力学模型(a)和准二级动力学模型(b)拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves of quasi-first-order kinetic model (a) and quasi-second-order kinetic model (b)

由表9可知,2种模型的相关系数都很高,且得出的平衡吸附量相差不大。与准一级动力学模型相比,准二级动力学模型的相关系数更高,拟合的曲线

效果更好,说明复合陶粒在吸附过程中以化学吸附为主,物理吸附为辅。钢渣-锰渣复合陶粒对 Cu^{2+} 的吸附动力学可近似用准二级动力学模型描述。

表9 动力学模型参数

Table 9 Parameters in the kinetic model		
项目	参数	数值
准一级动力学模型	k_1/min^{-1}	0.21
	$q_e/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	33.93
	R^2	0.97
准二级动力学模型	$k_2/(\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1})$	0.01
	$q_e/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	33.78
	R^2	0.99

2.8 吸附剂浸出毒性研究

为验证钢渣-锰渣复合陶粒作为水处理吸附剂的可行性,通过 TCLP 法对陶粒进行检测。分别称取 2 g A、B1、B2 陶粒样品,置于 500 mL 容量瓶中,加入 40 mL 重金属浸提液,设置温度为 30 ℃左右,在翻转式振荡机上连续振荡 18 h;使用针筒式过滤器,过滤滤膜孔隙为 0.45 μm,用浓硝酸溶液调节滤液 pH 在 2 以下,4 ℃下保存,用 ICP 检测滤液中的重金属离子含量,结果如表 10 所示。

表10 吸附剂浸出重金属含量

Table 10 Heavy metal content by TCLP method mg/L					
项目	Cr	Hg	Cu	Zn	Pb
A	nd	nd	nd	nd	nd
B1	0.008 3	nd	0.000 20	nd	nd
B2	0.020	nd	nd	nd	nd
标准阈值	10	0.05	50	50	3

注:nd 代表未检测到。

由表 10 可见,钢渣-锰渣复合陶粒浸出的重金属含量均远远低于标准阈值,可作为吸附剂吸附水中的 Cu²⁺。

3 结论

(1)*m*(钢渣):*m*(锰渣)为 5:5 时制备的钢渣-锰渣复合陶粒吸附 Cu²⁺ 的效果最佳。复合陶粒吸附 Cu²⁺ 对温度有良好的适应性;实验条件下吸附 30 min,复合陶粒能达到吸附平衡;搅拌速度为 300 r/min 吸附可达到最佳状态;Cu²⁺ 初始质量浓度为 500 mg/L 时,复合陶粒吸附 Cu²⁺ 的去除率理论上能达到 99% 以上。

(2)钢渣-锰渣复合陶粒吸附 Cu²⁺ 主要是由于复合陶粒中钢渣、锰渣水化产生的水解产物和钢渣水解释放的 OH⁻ 形成的高碱性环境。

(3)钢渣-锰渣复合陶粒吸附 Cu²⁺ 为单层吸附,符合 Langmuir 等温吸附模型,理论上最大饱和吸附量为 83.3 mg/g,实际饱和吸附量为 80.69 mg/g;钢渣-锰渣复合陶粒对 Cu²⁺ 的吸附过程符合准二级动力学模型。

参考文献

[1] 张龙强. 钢渣处理含铅、镉废水的性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
ZHANG Longqiang. Study on lead and cadmium removal from wastewater by steel slag[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015.

[2] 曾越, 李徐立, 陈宇驰, 等. 电解锰渣基方沸石的制备及其对 Pb²⁺ 的吸附性能[J]. 环境工程, 2020, 38(11): 175-179.
ZENG Yue, LI Xuli, CHEN Yuchi, et al. Preparation of analcite based on electrolytic manganese slag and study on its Pb²⁺ adsorption property[J]. Environmental Engineering, 2020, 38(11): 175-179.

[3] 韩毅, 周旻, 万沙, 等. 利用电解锰渣激发制备矿渣基胶凝材料的研究[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(1): 1-7.
HAN Yi, ZHOU Min, WAN Sha, et al. Research on preparation of slag based cementing materials by electrolytic manganese residue[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 42(1): 1-7.

[4] 王冰, 张宝焱. 钢渣复合陶粒的制备及去除水中铅的研究[J]. 辽宁化工, 2020, 49(3): 242-244.
WANG Bing, ZHANG Baohan. Study on preparation of steel slag composite ceramicsite and its adsorption performance for lead ions in wastewater[J]. Liaoning Chemical Industry, 2020, 49(3): 242-244.

[5] 朱李俊, 王文君, 金强. 用钢渣除去废水中的 Cr(Ⅲ) 和 Cr(Ⅵ) 试验[J]. 矿产综合利用, 2019(5): 98-101.
ZHU Lijun, WANG Wenjun, JIN Qiang. Removal of Cr(Ⅲ) and Cr(Ⅵ) in wastewater by steel slag[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(5): 98-101.

[6] 魏世勇. 几种吸附剂对氟的吸附特性的研究[J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 2008, 26(1): 81-84.
WEI Shiyong. Adsorption characters of fluoride by several absorbents[J]. Journal of Hubei Institute for Nationalities (Natural Science Edition), 2008, 26(1): 81-84.

[7] 王传岭, 于敏, 周子媚. 柚子皮生物炭对铜离子的吸附[J]. 山东化工, 2020, 49(19): 16-18.
WANG Chuanling, YU Min, ZHOU Zimei. Adsorption of copper ions by biochar of pomelo peel[J]. Shandong Chemical Industry, 2020, 49(19): 16-18.

[8] 余泽峰, 宋卫锋, 王超, 等. CTAB 改性地聚合物同时去除 Cu(Ⅱ) 和 Cr(VI)[J]. 环境科学学报, 2020, 40(3): 968-975.
YU Zefeng, SONG Weifeng, WANG Chao, et al. Simultaneous removal of Cu(Ⅱ) and Cr(VI) with CTAB modified geopolymers[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(3): 968-975.

[9] LIU Yu. New insights into pseudo-second-order kinetic equation for adsorption[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2008, 320(1/2/3): 275-278.

[作者简介] 李子木(1998—), 硕士研究生, E-mail: lizimu199803@163.com. 通讯作者: 李灿华, 博士, 教授, E-mail: licanhua1979@163.com.

[收稿日期] 2022-07-17(修改稿)