

伊利石对钇离子的吸附行为研究^①

吴呈皓¹, 张臻悦^{1,2}, 池汝安^{1,2}, 陈文斗¹, 陈卓^{1,2}

(1. 武汉工程大学 资源与安全工程学院, 湖北 武汉 430073; 2. 绿色化工过程教育部重点实验室, 湖北 武汉 430073)

摘要: 以黏土矿物伊利石为吸附剂, 研究了伊利石吸附稀土浸出液中低浓度稀土离子过程中 Y^{3+} 初始浓度、吸附温度、溶液 pH 值、离子强度和反应时间对吸附的影响, 构建了伊利石对钇元素吸附的等温模型和反应动力学模型, 并分析了伊利石吸附钇元素的机理。结果表明: 伊利石对 Y^{3+} 具有优良的吸附性能, Y^{3+} 初始浓度增大、吸附温度升高、反应时间延长、溶液 pH 值升高, 伊利石对 Y^{3+} 的吸附量均增大; Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 的存在会抑制伊利石对 Y^{3+} 的吸附, 其影响程度从大到小依次为: $Al^{3+} > Mg^{2+} > Na^+$; 反应模型符合 Langmuir 吸附等温模型和准二级反应动力学模型; 吸附过程中发生离子交换, 属于化学吸附, 吸附反应速率由化学反应控制。

关键词: 风化壳淋积型稀土矿; 伊利石; 黏土矿物; 吸附; 化学反应; 稀土; 钇

中图分类号: O647

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2024.06.018

文章编号: 0253-6099(2024)06-0083-07

Investigation on Adsorption Behavior of Yttrium Ions by Illite

WU Chenghao¹, ZHANG Zhenyue^{1,2}, CHI Ru'an^{1,2}, CHEN Wendou¹, CHEN Zhuo^{1,2}

(1. School of Resources and Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, Hubei, China; 2. Key Laboratory of Green Chemical Process of Ministry of Education, Wuhan 430073, Hubei, China)

Abstract: Illite, a kind of clay mineral, was taken as an adsorbent in an experiment for low-concentration rare earth ions in rare earth leaching solution to explore effects of initial concentration of Y^{3+} , adsorption temperature, pH value of solution, ion concentration, and adsorption time on the adsorption behavior of illite. Then, based on the constructed isotherm model for adsorption of yttrium ions by illite and its reaction kinetic model, the mechanism for the adsorption of yttrium ion by illite was analyzed. Results show that illite has an excellent adsorption performance for Y^{3+} . With an increased initial concentration, higher temperature, prolonged time, and higher pH value of solution, the adsorption capacity of Y^{3+} for illite increases. It is found that the existence of Na^+ , Mg^{2+} and Al^{3+} can inhibit the adsorption of Y^{3+} by illite in the following descending order of importance: $Al^{3+} > Mg^{2+} > Na^+$. The adsorption reaction follows Langmuir isotherm model and pseudo-second-order reaction kinetic model. Ion exchange reaction takes place during the adsorption process, thus this adsorption process belongs to chemical adsorption, with adsorption rate controlled by chemical reaction.

Key words: weathered crust elution-deposited rare earth ore; illite; clay mineral; adsorption; chemical reaction; rare earth; yttrium

稀土是我国重要的金属矿产资源, 被广泛应用于核工业、电子机械、石油化工、航空航天、超导材料等领域^[1]。风化壳淋积型稀土矿作为全球重稀土的主要来源, 是全球重要的稀土资源类型之一^[2-3]。在稀土分离提取过程中会产生大量稀土废水, 这些低浓度(以 REO 计, 质量浓度 2~100 mg/L)稀土废水水量大, 不

易进行有效处理。对风化壳淋积型稀土矿山的低浓度稀土废水进行富集提取, 不仅能回收尾矿中的稀土资源、提高稀土尾矿利用率、实现不可再生资源的回收, 还可以减少废水带来的环境破坏和对矿区动、植物及人类的健康影响。目前, 从风化壳淋积型稀土矿低浓度稀土废水中回收稀土元素的方法^[4]主要包括反渗

① 收稿日期: 2024-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(92162109, 52222405, 52304293)

作者简介: 吴呈皓(1999—), 男, 浙江宁波人, 硕士研究生, 主要研究方向为稀土绿色提取。E-mail: thewch@163.com

通信作者: 陈卓(1993—), 男, 湖北武汉人, 讲师, 主要研究方向为矿物加工。E-mail: ml18086013859@163.com

透法、萃取法、离子交换法和吸附法。吸附法具有吸附材料价格低廉、操作简便、能耗低等优点,常用的吸附剂^[5-6]有生物质、复合多孔材料和黏土矿物等,其中黏土矿物是一种经济、环保、储量大的天然吸附材料,被广泛研究和应用^[7-9]。但黏土矿物作为吸附剂用于稀土矿山中低浓度稀土废水吸附回收的相关研究鲜见报道。

风化壳淋积型稀土矿主要集中在江西省龙南(高钇型)、信丰(中钇富钨型)、寻乌(富镧少钇型)等地^[10],且前两种矿型中都存在较高浓度的Y元素。本文以Y³⁺为研究对象,对黏土矿物伊利石吸附低浓度稀土溶液进行研究,通过单因素实验,并对吸附等温曲线进行拟合分析,建立吸附过程反应动力学模型,采用多种表征手段探究伊利石对Y³⁺的吸附行为特征,揭示其吸附机理。

1 原料性质及实验方法

1.1 原料性质

实验所用伊利石为河北承德某-0.074 mm 粒级伊利石粉,其X射线衍射图谱如图1所示。由图1可以看出:伊利石纯度较高,晶体结构为2M1型;原料中含有少量石英和钠长石杂质。

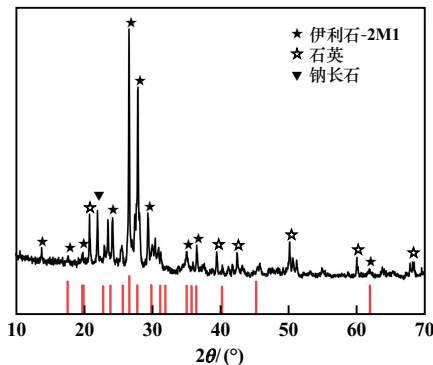


图1 伊利石 X 射线衍射图谱

吸附剂的吸附能力受溶液 pH 值的影响,溶液 pH 值的变化会影响官能团的质子化作用和去质子化作用,还会改变吸附剂表面电荷结构^[11]。因此可以使用 Zeta 电位和零电点(PZC)来评估吸附剂的吸附能力。采用 Zetasizer Nano-ZEN3600(Malvern, UK)测定分析伊利石 Zeta 电位,结果如图2所示。随着伊利石分散溶液 pH 值升高,Zeta 电位先快速下降、再缓慢下降、然后再次快速下降。伊利石 PZC 在 pH=1.8 附近,pH>1.8 时,伊利石表面带负电荷,这为带正电的阳离子如 Y³⁺ 等与伊利石结合提供了驱动力^[4],更利于 Y³⁺ 吸附在带负电荷的伊利石表面。同时也说明伊利石吸附 Y³⁺ 过程中静电力会产生关键作用。

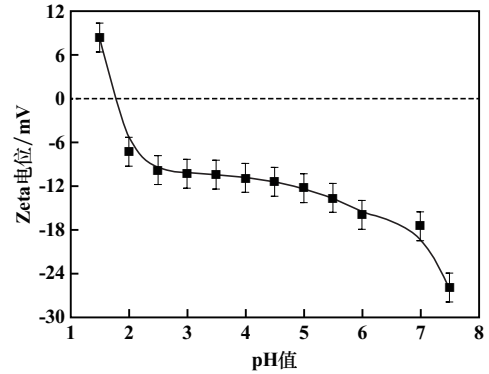


图2 伊利石 Zeta 电位随 pH 值的变化

采用 ASAP-2460(Micromeritics, Atlanta, USA) 系统测定伊利石比表面积和孔径。液氮温度为-195.8 °C,故在-197 °C 下测定氮气吸附脱附等温线,并采用 Brunauer-Emmett-Teller 方法计算伊利石比表面积,测试结果如图3所示,伊利石比表面积、孔容积和平均孔径数据详见表1。由图3可以看出:脱附等温线在吸附等温线上方,表现为 IV 型吸附等温线;脱附有滞后现象,出现明显的回滞环,是伊利石作为介孔材料的显著特征之一^[12],这与伊利石中的介孔发生了毛细冷凝^[8]有关。由图3和表1可知,孔径介于 2~50 nm 之间,表明伊利石内部为介孔结构,具有较大的比表面积,孔容积和平均孔径相对较小。

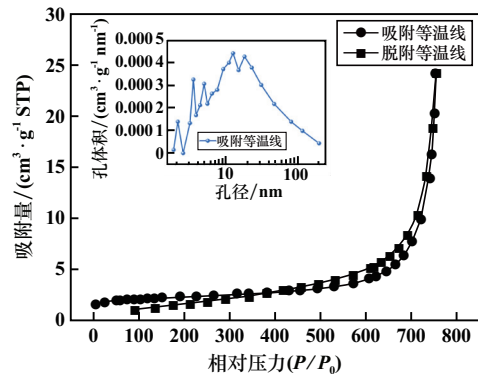


图3 伊利石的吸附脱附等温线

表1 伊利石比表面积、孔容积和平均孔径

比表面积/(m ² ·g ⁻¹)	孔容积/(cm ³ ·g ⁻¹)	平均孔径/nm
6.54	0.037 3	23.16

1.2 实验方法

1.2.1 静态吸附实验

静态吸附实验中,依次改变 Y³⁺ 初始浓度、吸附温度、pH 值及离子强度,探究单因素对伊利石吸附 Y³⁺ 的影响。实验步骤为:取 Y³⁺ 溶液 25 mL 于 50 mL 离心管中,加入预处理后的伊利石 0.25 g,密封放置在恒

温振荡仪中振荡 12 h,转速 180 r/min;振荡完成后取出,通过高速离心机对离心管进行固相和液相分离,转速 8 000 r/min,离心 15 min;取出上清液,使用 PinAAcle 900T(PerkinElmer, USA) 原子吸收光谱仪测定 Y^{3+} 浓度,计算吸附量和吸附效率:

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{M} \quad (1)$$

$$E = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (2)$$

式中: Q_e 为伊利石对 Y^{3+} 的平衡吸附量, $\mu\text{mol/g}$; C_0 为 Y^{3+} 初始浓度, $\mu\text{mol/L}$; C_e 为达到吸附平衡时溶液中 Y^{3+} 浓度, $\mu\text{mol/L}$; M 为伊利石质量, g ; V 为溶液体积, L ; E 为吸附效率, %。

1.2.2 吸附动力学实验

配制浓度 2 000 $\mu\text{mol/L}$ 的 Y^{3+} 溶液 250 mL,倒入 500 mL 锥形瓶中,加入伊利石 0.25 g;将锥形瓶置于 25 $^{\circ}\text{C}$ 恒温振荡仪中,在设定间隔时间后取 5 mL 上清液,通过高速离心机进行离心处理,转速 8 000 r/min,离心时间 5 min,使固、液两相分离。取分离后上清液测定 Y^{3+} 浓度。

1.3 吸附机理分析与表征方法

25 $^{\circ}\text{C}$ 、固液比 10 g/L、 Y^{3+} 初始浓度 2 000 $\mu\text{mol/L}$ 条件下振荡吸附 12 h,转速为 180 r/min,完成振荡后抽滤、烘干,得到吸附后伊利石样品。使用 GeminiSEM 300 (ZEISS, Germany) 场发射扫描电镜及能谱 (FESEM/EDS) 和 Nicolet 6700 (Thermo, USA) 红外光谱 (FTIR) 对吸附前、后伊利石样品进行表征分析。

2 实验结果及讨论

2.1 Y^{3+} 在伊利石表面的吸附特性

2.1.1 Y^{3+} 初始浓度对伊利石吸附 Y^{3+} 的影响

25 $^{\circ}\text{C}$ 、固液比 10 g/L 时, Y^{3+} 初始浓度对伊利石吸附 Y^{3+} 的影响如图 4 所示。由图 4 可以看出, Y^{3+} 初始浓度不断增大的过程中,伊利石对 Y^{3+} 的平衡吸附量先逐渐上升。此时,伊利石表面存在大量空余吸附位点,并且浓度梯度作为传质驱动力能克服固液相间的传质阻力^[7],吸附量逐渐增大。随后伊利石对 Y^{3+} 的平衡吸附量上升趋势变缓,在 Y^{3+} 初始浓度 2 000 $\mu\text{mol/L}$ 时,平衡吸附量趋于稳定,为 68.9 $\mu\text{mol/g}$,此时伊利石表面的空余吸附位点被完全占据。固液比 10 g/L 时,伊利石表面的吸附位点是有限的,伊利石对 Y^{3+} 的吸附效率随着初始浓度升高而下降。初始浓度 500 $\mu\text{mol/L}$ 时吸附效率为 96.2%。

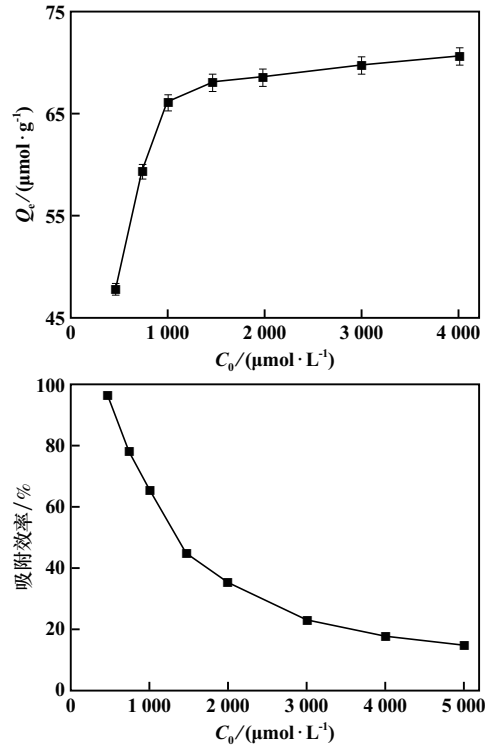


图 4 Y^{3+} 初始浓度对伊利石吸附 Y^{3+} 的影响

2.1.2 吸附温度对吸附量的影响

吸附温度是影响伊利石对 Y^{3+} 平衡吸附量和吸附效率的重要因素,也是判定吸附过程吸热或放热的显著标志。固液比 10 g/L 时,不同 Y^{3+} 初始浓度下吸附温度对伊利石吸附 Y^{3+} 的影响如图 5 所示。伊利石对 Y^{3+} 的平衡吸附量随着吸附温度升高而增大,吸附温度从 15 $^{\circ}\text{C}$ 升高至 55 $^{\circ}\text{C}$,初始浓度 500 $\mu\text{mol/L}$ 和 5 000 $\mu\text{mol/L}$ 时的平衡吸附量分别从 44.9 $\mu\text{mol/g}$ 和 49.5 $\mu\text{mol/g}$ 增加至 64.7 $\mu\text{mol/g}$ 和 113.7 $\mu\text{mol/g}$,说明 Y^{3+} 在伊利石上的吸附过程是吸热反应,升高温度有利于吸附过程的进行。升高温度有助于增加 Y^{3+} 的活化数, Y^{3+} 更容易克服吸附活化势垒,更多的 Y^{3+} 可以占据伊利石表面吸附空位,低初始浓度溶液能更早到达吸附平衡点。

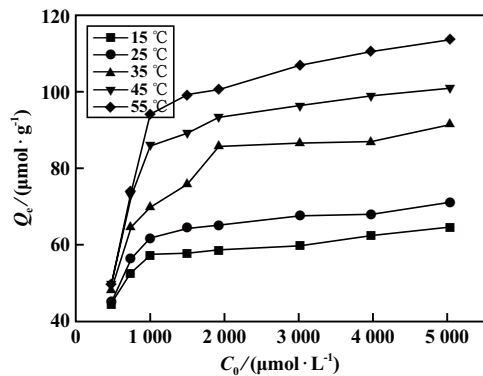


图 5 不同 Y^{3+} 初始浓度下吸附温度对伊利石吸附 Y^{3+} 的影响

2.1.3 离子强度与 pH 值对伊利石吸附 Y^{3+} 的影响

研究溶液离子强度与 pH 值对吸附过程的影响有助于进一步探明 Y^{3+} 在伊利石上的吸附机理及伊利石在不同离子种类和不同离子强度影响下的吸附性能。以离子强度分别为 0.01 mol/L 和 0.1 mol/L 的 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 为背景溶液,在 Y^{3+} 初始浓度 2 000 $\mu\text{mol/L}$ 、固液比 10 g/L、室温 25 $^{\circ}\text{C}$ 条件下进行吸附实验,同时进行空白对照组试验,结果如图 6 所示。在吸附过程中,不同价态离子及不同离子强度会使伊利石对 Y^{3+} 的吸附量产生不同程度的降低^[13]。 Na 、 Mg 离子的存在对伊利石吸附 Y^{3+} 的影响较小,其中在离子强度 0.01 mol/L 时伊利石对 Y^{3+} 吸附量相比空白组分别下降 1.9% 和 9.5%,离子强度 0.1 mol/L 时吸附量相比空白组分别下降 13.4% 和 47.9%。而 Al^{3+} 的存在使得 Y^{3+} 在伊利石上完全不被吸附。可以看出,不同离子对伊利石吸附 Y^{3+} 的影响程度从大到小为: $Al^{3+} > Mg^{2+} > Na^+$,原因是背景溶液中的 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 与 Y^{3+} 发生竞争吸附,抢占伊利石表面的吸附活性位点,导致 Y^{3+} 不能完全或无法与伊利石表面吸附位点结合。 Na 、 Mg 、 Al 的电负性依次增强, Al^{3+} 吸引电子能力更强,更易于与伊利石表面羟基络合。因此在实际处理稀土废水中 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 杂质对伊利石吸附 Y^{3+} 有较大影响。

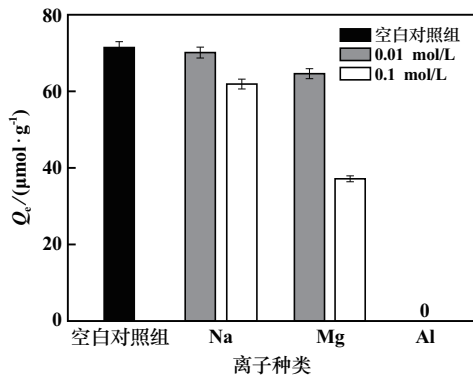


图 6 不同 Y^{3+} 初始浓度下不同离子对伊利石吸附 Y^{3+} 的影响

研究了 Na^+ 和 Mg^{2+} 在不同离子强度和溶液 pH 值条件下对伊利石吸附 Y^{3+} 的影响,结果如图 7 所示。由图 7 可知,pH=3~7 范围内,离子强度从 0.01 mol/L 增大到 0.1 mol/L,伊利石对 Y^{3+} 的吸附量减小。低离子强度下, Y^{3+} 能占据更多的吸附位点。同时,pH=3~7 时,伊利石对 Y^{3+} 的吸附量会随着 pH 值增大而增大,这是因为在低 pH 值条件下,溶液中含有大量 H^+ ,游离在溶液中的 H^+ 会竞争伊利石上的吸附位点,导致 Y^{3+} 在伊利石上的吸附量降低。

2.1.4 等温吸附模型

Langmuir 等温吸附模型常用来描述有均匀分布吸

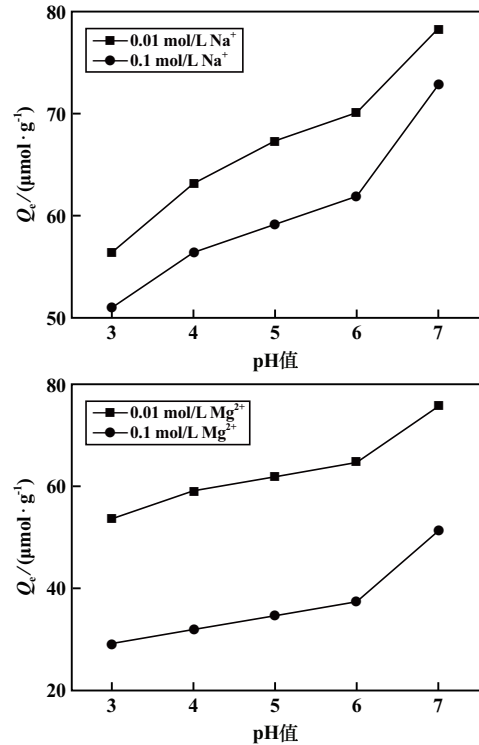


图 7 离子强度及 pH 值对伊利石吸附 Y^{3+} 的影响

附位点的吸附质在被吸附分子间没有相互作用力的条件下单分子层均匀吸附的过程,其表达式为:

$$\frac{C_e}{Q_e} = \frac{C_e}{Q_m} + \frac{1}{K_L Q_m} \quad (3)$$

式中: Q_e 为平衡吸附量, $\mu\text{mol/g}$; C_e 为平衡时的溶液浓度, $\mu\text{mol/L}$; Q_m 为吸附剂对吸附质的饱和吸附量, $\mu\text{mol/g}$; K_L 为 Langmuir 等温吸附模型常数, $L/\mu\text{mol}$ 。

Freundlich 等温吸附模型经实验规律与经验得出,常用来描述非均质表面且表面吸附位点具有不同吸附能的吸附行为规律,其表达式为:

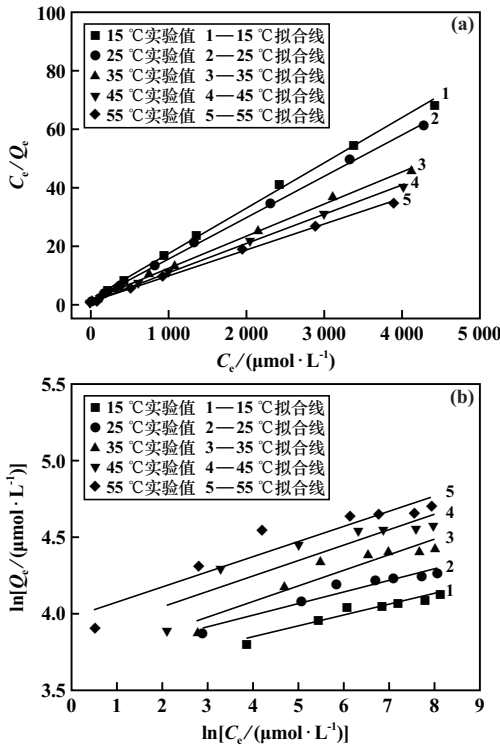
$$\ln Q_e = \frac{1}{n} \ln C_e + \ln K_F \quad (4)$$

式中: K_F 为 Freundlich 等温吸附模型常数, $L/\mu\text{mol}$; n 为非均质性因数。

将伊利石吸附 Y^{3+} 的实验数据对这两种等温吸附模型进行拟合,结果见图 8,并根据实验数据计算 Langmuir 等温吸附模型和 Freundlich 等温吸附模型的相关系数,结果见表 2。

通过图 8 和表 2 可知,各温度条件下,伊利石吸附 Y^{3+} 的 Langmuir 等温吸附模型相关系数 R^2 均达到 0.998 以上,高于 Freundlich 等温吸附模型的拟合相关系数,伊利石对 Y^{3+} 的吸附过程更符合 Langmuir 等温吸附模型,说明 Y^{3+} 在伊利石上的吸附是单分子层吸附^[14],吸附质间没有相互作用,吸附能力由伊利石表

面的吸附位点、数量和结合方式决定。由表 2 可以看到,25 ℃ 时,伊利石对 Y^{3+} 的最大吸附量为 70.871 7 $\mu\text{mol/g}$,表明伊利石是一种吸附回收稀土废水中稀土元素的优良吸附剂。



(a) Langmuir 等温吸附模型; (b) Freundlich 等温吸附模型

图 8 伊利石吸附 Y^{3+} 的 Langmuir 和 Freundlich 等温吸附模型拟合结果

表 2 伊利石吸附 Y^{3+} 的 Langmuir 和 Freundlich 等温吸附模型拟合参数

T/ ℃	Langmuir 模型			Freundlich 模型		
	$Q_m/(\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1})$	$K_L/(\text{L}\cdot\mu\text{mol}^{-1})$	R^2	$1/n$	$K_F/(\text{L}\cdot\mu\text{mol}^{-1})$	R^2
15	62.266 5	0.019 7	0.998 8	0.070 9	35.347 2	0.914 9
25	70.871 7	0.035 5	0.999 8	0.074 9	39.988 8	0.912 0
35	83.125 5	0.040 7	0.999 8	0.101 4	39.199 3	0.858 1
45	96.899 2	0.059 8	0.999 8	0.101 4	46.379 1	0.790 2
55	109.289 6	0.046 5	0.998 7	0.099 2	53.137 3	0.871 9

2.1.5 吸附动力学

反应时间对伊利石吸附 Y^{3+} 的影响如图 9 所示。吸附过程中,伊利石对 Y^{3+} 的吸附量先经历快速上升阶段,此时在伊利石上存在大量空余吸附位点,表面带正电荷的 Y^{3+} 快速与伊利石表面带负电荷的离子结合,占据表面吸附空位;随后吸附量上升速度逐渐减慢,直至达到吸附平衡。

吸附反应动力学不仅能描述吸附剂吸附溶质的速

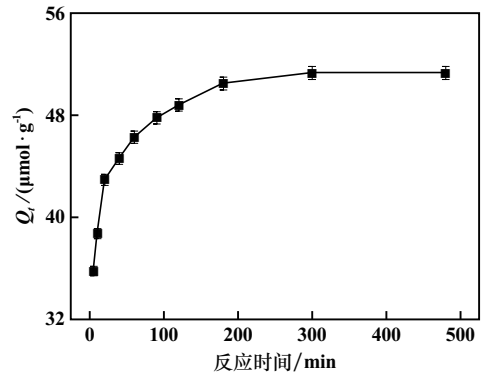


图 9 反应时间对伊利石吸附 Y^{3+} 的影响

率,也是定量研究吸附机理、分析吸附速率控制的重要手段。常见的吸附反应动力学模型主要有以下 4 种:

准一级动力学模型:

$$\ln(Q_e - Q_t) = \ln Q_e - k_1 t \quad (5)$$

式中: Q_t 为 t 时刻伊利石对 Y^{3+} 的吸附量, $\mu\text{mol/g}$; k_1 为准一级反应动力学速率常数, min^{-1} 。

准二级动力学模型:

$$\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{k_2 Q_e^2} + \frac{t}{Q_e} \quad (6)$$

式中 k_2 为准二级反应动力学速率常数, $\text{g}/(\mu\text{mol}\cdot\text{min})$ 。

颗粒内扩散模型:

$$Q_t = C + k_{id} \sqrt{t} \quad (7)$$

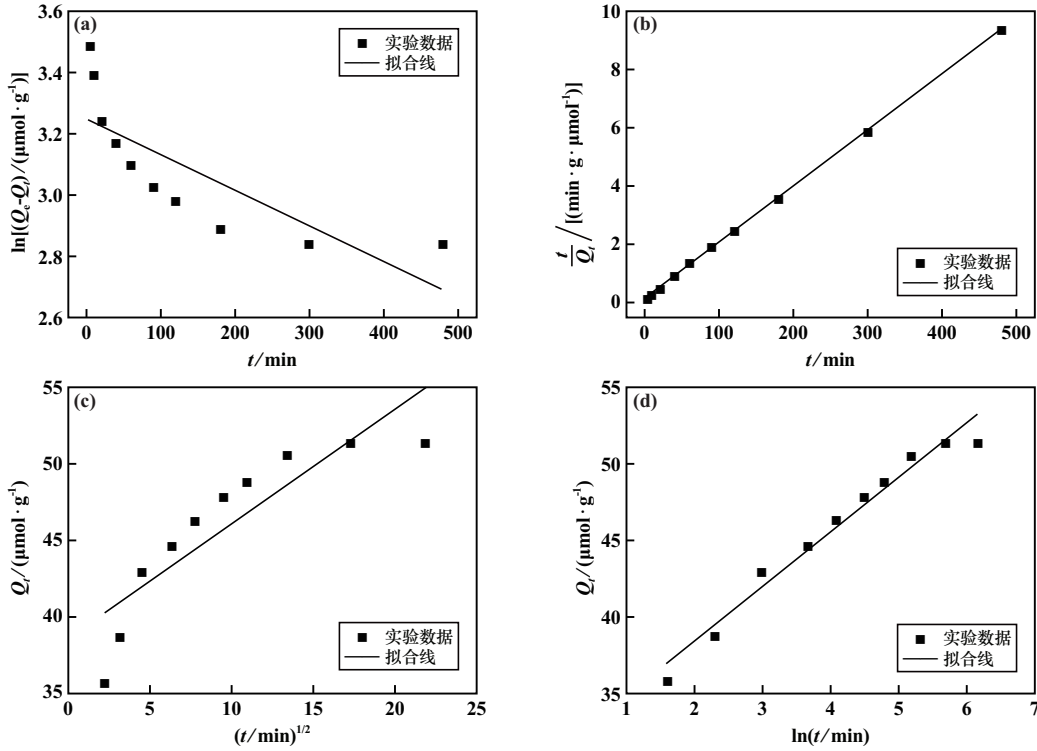
式中: k_{id} 为内扩散速率常数, $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{min}^{1/2})$; C 为扩散速率常数。

Elovich 模型:

$$Q_t = \frac{1}{\alpha} \ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\alpha} \ln t \quad (8)$$

式中: α 为初始吸附效率常数; β 为化学吸附活化能相关参数。

为进一步探究 Y^{3+} 在伊利石表面的吸附特性,采用以上 4 种反应动力学模型讨论 Y^{3+} 在伊利石表面的吸附控制机理,并对吸附反应过程中得到的实验数据进行拟合,拟合结果如图 10 所示,反应动力学模型相关参数如表 3 所示。由图 10 可以看出, Y^{3+} 在伊利石上的吸附过程与准二级反应动力学模型较为吻合。由表 3 可以看到:准二级反应动力学模型的拟合相关系数 $R^2=0.999$,比其他 3 种反应动力学模型更高;准二级反应动力学模型拟合所得平衡吸附量 Q_e 与实验所得数据一致性更好。表明 Y^{3+} 在伊利石上的吸附反应为化学吸附, Y^{3+} 在伊利石表面发生了离子交换,吸附速率受化学吸附机理控制。



(a) 准一级动力学模型; (b) 准二级动力学模型; (c) 颗粒内扩散模型; (d) Elovich 模型

图 10 Y³⁺ 在伊利石上吸附的各动力学模型拟合结果

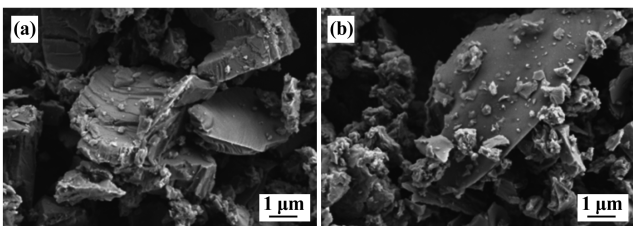
表 3 伊利石吸附 Y³⁺ 的各动力学模型拟合参数

准一级动力学模型拟合参数			准二级动力学模型拟合参数		
$Q_e/(\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1})$	$k_1(10^{-3})$	R^2	$Q_e/(\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1})$	$k_2(10^{-3})$	R^2
25.794	1.170	0.582	51.921	3.663	0.999
颗粒内扩散模型拟合参数			Elovich 模型拟合参数		
k_{id}	R^2		α	$\beta(10^3)$	R^2
0.742	0.751		0.279	21.768	0.965

2.2 吸附前后表征对比及分析

2.2.1 场发射扫描电镜及能谱分析

对伊利石吸附前后分别进行了 FE-SEM 表征,结果见图 11。可以看出,伊利石表面呈鳞片状堆叠式排布形貌,这大大增加了伊利石的表面积,为 Y³⁺ 与之接触并在其表面吸附提供了有利条件。此外,伊利石层与层之间紧密堆叠在一起,层间仅存在少量缝隙和较小的孔径和孔容积,这与图3及表1结果一致。通过对



(a) 吸附前; (b) 吸附后

图 11 伊利石吸附前后场发射扫描电镜样貌图

比伊利石吸附 Y³⁺ 前后的形貌发现,伊利石吸附 Y³⁺ 后表面变得较为光滑,说明伊利石表面已经吸附了 Y³⁺。

图 12 为伊利石吸附 Y³⁺ 后的能谱面分布扫描 (EDS-Mapping) 结果。Y³⁺ 在伊利石表面的分布可以通过图中亮度显示,亮度越高,说明 Y³⁺ 吸附量越多。从图 12 可以看出,Y³⁺ 已被吸附在伊利石表面。

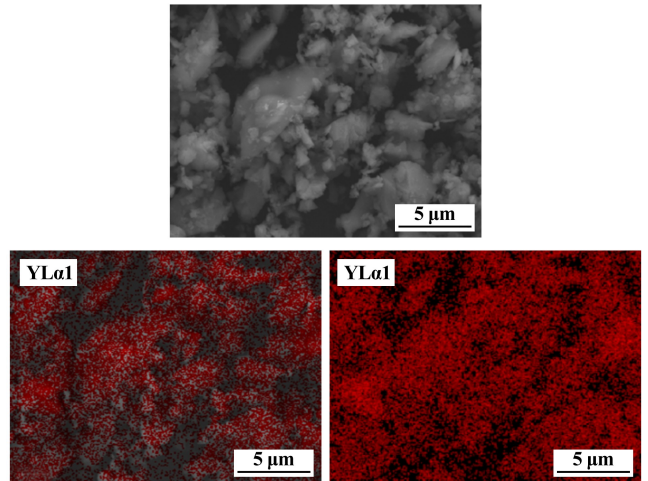


图 12 伊利石吸附 Y³⁺ 后 EDS-Mapping 图

2.2.2 红外光谱分析

伊利石吸附 Y³⁺ 前后的红外光谱图如图 13 所示。由图 13 可知,伊利石吸附 Y³⁺ 后红外光谱图的谱峰发

生明显变化和位移。伊利石中的—OH 波数^[15]由吸附 Y^{3+} 前的 3446.55 cm^{-1} 移至吸附后的 3429.20 cm^{-1} ,波数 3618.31 cm^{-1} 处的谱峰消失。—OH 峰发生红移,说明吸附过程中伊利石中部分—OH 中的 H^+ 被 Y^{3+} 取代^[15-16],吸附反应中发生离子交换,并有新的化学键生成,再次印证了该吸附反应属于化学吸附。

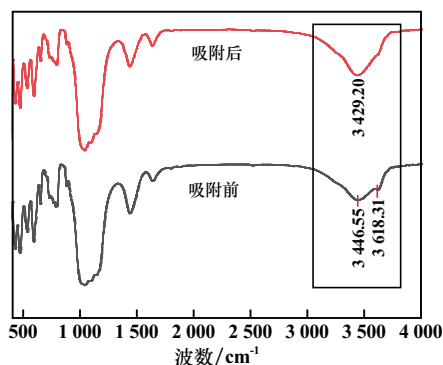


图 13 伊利石吸附 Y^{3+} 前后的红外光谱图

3 结论

通过静态动态吸附实验、拟合吸附等温模型、反应动力学模型和相应的表征分析对 Y^{3+} 在伊利石上的吸附行为进行研究,得到以下结论。

1) Zeta 电位和 BET 实验结果表明,伊利石表面具有大量负电位,为 Y^{3+} 与伊利石结合提供驱动力,且吸附能力随着 pH 值升高而增强;伊利石属于典型的介孔材料,孔比表面积为 $6.54\text{ m}^2/\text{g}$,孔容积和孔径分别为 $0.0373\text{ cm}^3/\text{g}$ 、 23.16 nm 。

2) 伊利石对 Y^{3+} 的吸附量受 Y^{3+} 初始浓度、吸附温度、离子强度和反应时间影响。随着 Y^{3+} 初始浓度和吸附温度升高,伊利石对 Y^{3+} 的吸附能力增强,该吸附反应为吸热反应。 Al^{3+} 的存在会导致 Y^{3+} 在伊利石表面不吸附,而 Na^+ 和 Mg^{2+} 对吸附量的影响较小。吸附反应符合 Langmuir 等温吸附模型和准二级反应动力学模型,是单层均匀化学吸附,吸附速率由化学反应机理控制。

3) 结合 FESEM、EDS 和 FTIR 分析结果可知,伊利石的鳞片式形貌使得其有较大的表面积,为 Y^{3+} 在伊利石表面吸附提供位点,使 Y^{3+} 均匀吸附在伊利石表面。 Y^{3+} 与—OH 中的 H^+ 发生离子交换,络合生成新化学键是主要的吸附反应。

参考文献:

[1] 李一农. 载体支撑纳米复合材料的制备及其对水中低浓度稀土回收性能研究[D]. 广州:华南理工大学, 2018.

- [2] SUN Z, ZHAO Y, YAN G, et al. A novel method for low-rank coal drying using steam transient flash evaporation[J]. Fuel, 2023, 354: 129238.
- [3] ZHANG Z, ZHOU C, CHEN W, et al. Effects of ammonium salts on rare earth leaching process of weathered crust elution-deposited rare earth ores[J]. Metals, 2023, 13(6): 1112.
- [4] GAO B, ZHANG D, LI Y. Synthesis and photoluminescence properties of novel Schiff base type polymer-rare earth complexes containing furfural-based bidentate Schiff base ligands[J]. Optical Materials, 2018, 77: 77-86.
- [5] AMBAYE T G, VACCABI M, CASTRO F D, et al. Emerging technologies for the recovery of rare earth elements (REEs) from the end-of-life electronic wastes: a review on progress, challenges, and perspectives[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27: 36052-36074.
- [6] HERMASSI M, GRANADOS M, VALDERRAMA C, et al. Recovery of rare earth elements from acidic mine waters by integration of a selective chelating ion-exchanger and a solvent impregnated resin[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(5): 105906.
- [7] 钟宜航,彭陈亮,王观石,等. 蒙脱石对 Y^{3+} 的吸附特性及机制研究[J]. 中国稀土学报, 2019(6): 713-723.
- [8] ALSHAMERI A, HE H, XIN C, et al. Understanding the role of natural clay minerals as effective adsorbents and alternative source of rare earth elements: adsorption operative parameters[J]. Hydrometallurgy, 2019, 185: 149-161.
- [9] TAMETA Y, TAMURA R, KZMURA M, et al. Effect of dissolved soil organic matter on cesium adsorption by zeolite and illite[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 289: 112477.
- [10] 池汝安,王淀佐. 稀土矿物加工[M]. 北京:科学出版社, 2014.
- [11] XIAO Y F, LAI F G, HUANG L, et al. Reduction leaching of rare earth from ion-adsorption type rare earths ore: II. compound leaching[J]. Hydrometallurgy, 2017, 173: 1-8.
- [12] ZHANG H, YUAN G, GUO H, et al. Preparation and characterization of mesoporous materials from low-grade palygorskite clay and its applied in composite phase change material[J]. The Journal of Energy Storage, 2021, 40: 102791.
- [13] 刘晓雯,邵明艳,徐绍辉,等. pH 值和阳离子对环丙沙星与土壤胶体共运移的影响[J]. 中国环境科学, 2023, 43(9): 4768-4779.
- [14] SHARMA P, JAIN R, PREMI A, et al. Linear and non-linear regression analysis for the sorption kinetics of tropaeoline 000 onto nano talc[J]. International Journal of Environmental & Analytical Chemistry, 2022, 102(9): 2152-2167.
- [15] 蔡伟海,左锐,刘月鹏,等. 伊利石对 Sr 的反应性吸附及机理表征[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(25): 11041-11047.
- [16] 邹志强,黄李金鸿,李新冬,等. 铜离子和铵离子在高岭石表面的吸附机理研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(4): 52-56.

引用本文: 吴呈皓,张臻悦,池汝安,等. 伊利石对钇离子的吸附行为研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44(6): 83-89.