



黄钾铁矾对 Mo(VI) 的吸附行为和机理研究

陈 波^{1,2}, 梁朝丽¹, 王 锋^{1,2}, 蔡平雄^{1,2}

(1. 北部湾大学石油与化工学院, 广西钦州 535000;

2. 广西绿色化工新材料与安全技术重点实验室, 广西钦州 535000)

[摘要] 钼广泛分布于天然矿山中,且主要以钼酸盐[Mo(VI)]的形式存在。钼资源的快速消耗,可能会增加含钼工业废水的排放并引起严重的环境问题。采用水热法合成黄钾铁矾矿物并用于去除模拟废水中的 Mo(VI),利用 XRD 表征了矿物材料的理化性质,基于静态吸附实验研究了吸附时间、Mo(VI) 初始浓度、初始 pH、吸附剂投加量和不同共存离子对黄钾铁矾吸附 Mo(VI) 行为的影响,并结合黄钾铁矾吸附 Mo(VI) 前后 FT-IR 官能团变化结果,揭示黄钾铁矾对 Mo(VI) 的吸附动力学特征和吸附机理。结果表明:黄钾铁矾对 Mo(VI) 的吸附过程符合准二级动力学模型和 Langmuir 模型,吸附速率受化学过程主导且为单分子层吸附;随着 pH 的上升,黄钾铁矾去质子化能力增强,对 Mo(VI) 的吸附量减小;吸附剂投加量在 0.8 g/L 时达到吸附饱和,继续增加黄钾铁矾投加量并不能增加 Mo(VI) 的去除率;共存阴离子的加入会与 Mo(VI) 竞争矿物表面的吸附位点,对吸附起抑制作用;黄钾铁矾对 Mo(VI) 的吸附过程中—OH 起了关键作用,吸附机制主要为静电吸附和外络络合吸附的协同作用。

[关键词] 黄钾铁矾;钼酸盐;吸附;吸附机理;重金属废水

[中图分类号] X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2023)02-0082-07

Adsorption behavior and mechanism of jarosite for Mo(VI)

CHEN Bo^{1,2}, LIANG Chaoli¹, WANG Feng^{1,2}, CAI Pingxiong^{1,2}

(1. College of Petroleum and Chemical Engineering, Beibu Gulf University, Qinzhou 535000, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Green Chemical Materials and Safety Technology, Qinzhou 535000, China)

Abstract: Molybdenum is widely distributed in natural mines, primarily as molybdate [Mo(VI)]. With the rapid depletion of molybdenum resources, the discharge of molybdenum-containing industrial effluents will possibly increase, causing serious environmental problems. Jarosite was synthesized by hydrothermal method and applied to remove Mo(VI) from simulated wastewater. XRD was used to determine the mineral material's physicochemical properties. Moreover, the effects of adsorption time, initial concentration of Mo(VI), initial pH, adsorbent dosage, and different coexisting ions on the adsorption behavior were also investigated based on batch experiments. Combined with the change characteristics of functional groups of FT-IR before and after Mo(VI) adsorption by jarosite, the kinetic characteristics and adsorption mechanism of jarosite on Mo(VI) were investigated. The results showed that the adsorption process of jarosite on Mo(VI) met the pseudo-second-order kinetics and the Langmuir model. The adsorption rate was dominated by a chemical process and was a monolayer adsorption. With the increase of pH, the deprotonation ability of jarosite increased, and the adsorption capacity of Mo(VI) decreased. The adsorption saturation was reached at 0.8 g/L, and the increase of the adsorption effect was limited when the adsorbent dosage continued. The addition of coexisting ions competed with Mo(VI) for adsorption sites on mineral surfaces and inhibited adsorption. The hydroxyl groups played a key role in the adsorption of Mo(VI) by jarosite, and the adsorption of Mo(VI) by jarosite was mainly a synergistic mechanism of electrostatic adsorption and outer ring complexation adsorption.

[基金项目] 广西自然科学基金项目(2020GXNSFBA297128);广西科技基地和人才专项(桂科 AD20238041);广西自然科学基金联合培育项目(2019GXNSFAA245016)

Key words: jarosite; molybdate; adsorption; adsorption mechanism; heavy metal wastewater

许多工业废水会对环境造成严重的重金属污染,特别是来自矿物加工、金属电镀、电气电子和化学工业的废水^[1-2]。钼(Mo)作为一类过渡重金属元素,主要以六价氧化态的钼酸盐(MoO_4^{2-})形式存在,对人类和动物生理过程中的酶及其功能至关重要^[3],摄入较高含量的钼可能会导致一系列健康问题,如贫血、甲状腺功能减退、骨骼和关节畸形、生长迟缓和不育等,世界卫生组织建议饮用水中的钼质量浓度不应超过 $70 \mu\text{g/L}$ ^[4]。钼广泛存在于各种天然矿山中,因具有高熔点、高强度、高导热性和良好的耐腐蚀性等特点,被广泛用于半导体制造和光电子工业^[5]。钼资源的快速消耗可能会增加钼排放到水环境中的风险,造成严重的环境污染。因此,有效去除废水中的Mo(VI)是环境保护的重要议题。

钼废水的处理方法主要有化学沉淀法、离子交换树脂法、吸附法、膜分离法和生物法^[6]。化学沉淀法通过向废水中投加化学沉淀剂,使钼离子与沉淀剂形成难溶性沉淀物,从而达到去除效果;但此方法易受pH影响,存在一定使用局限性^[7-8]。离子交换树脂属于高分子材料,含有大量离子交换基团,对去除重金属污染物具有选择作用,但吸附易饱和,只适合处理低浓度的钼废液^[9]。膜分离法具有低能耗、高效率、轻污染的优点,但制备成本较高、稳定性差和存在制膜污染等缺点,限制了其应用^[10]。生物法利用藻类、水生植物、菌类的表面官能团和废水中的钼发生物理化学反应,达到去除废水中钼的效果。于常武等^[11]利用生物藻吸附钼废水,但该方法应用条件较为苛刻,需要在低pH条件下进行,可能会对实际应用中的生产设备造成腐蚀。

吸附法由于具有操作简单、成本低和效率高等优点受到广泛关注。铁(氢)氧化物具有比表面积大、反应活性强和表面带可变电荷等特征,被认为是一种良好的吸附材料,广泛应用于工业废水的吸附处理中^[12]。其中,黄钾铁矾是一类典型的铁(羟基)硫酸盐次生矿物,广泛形成于富硫的酸性硫酸盐土和酸性矿山废水等自然环境中^[13]。黄钾铁矾矿物作为冶金工业的废弃物,在很长一段时间并未得到开发利用,直到近些年研究者们发现其表面具有丰富的 $\equiv\text{Fe}-\text{OH}$ 等官能团,能有效吸附含重金属元素的含氧阴离子,被视为一种良好的吸附材料并应用

于对含 AsO_4^{3-} 、 SbO_4^{2-} 和 CrO_4^{2-} 等废水的处理中^[14]。但是,目前鲜有黄钾铁矾去除废水中 MoO_4^{2-} 的报道。

本研究通过水热合成法合成了黄钾铁矾矿物,并研究了其对废水中Mo(VI)的吸附行为,考察了吸附动力学、吸附等温线,以及pH、投加量、共存离子等因素对吸附行为的影响;在此基础上,探讨了黄钾铁矾对Mo(VI)的吸附机理,以期钼污染废水的处理提供参考。

1 材料与方法

1.1 试剂与仪器

试剂: $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、 KOH 、 NaOH 、 HCl 、 NaNO_3 、 Na_2SO_4 、 KH_2PO_4 等,均为分析纯;实验用模拟含Mo(VI)废水由 $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 配制而成。

仪器:TD-3500 XRD衍射仪、FTIR-650型傅里叶变换红外光谱仪、722型可见分光光度计、DSZ-708型精密pH计、鼓风干燥机、恒温振荡器、精密电子分析天平、超纯水机、恒温数显水浴锅、低速离心机。

1.2 黄钾铁矾的制备

参考D. BARON等^[15]提出的水热合成法制备黄钾铁矾。将装有100 mL超纯水的锥形瓶置于水浴锅中加热至 95°C ,随后加入17.2 g $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 与5.6 g KOH ,用锡箔纸密封烧杯,恒温搅拌4 h;将矿物悬浮液静置冷却,通过“离心→去除上清液→加超纯水搅拌”操作将其洗涤多次后,高速离心去除上层溶液,将所得矿物在烘箱 40°C 下干燥24 h;经玛瑙研钵充分研磨后,过200目($75 \mu\text{m}$)筛,即得黄钾铁矾固体粉末。

1.3 吸附实验

1.3.1 吸附动力学实验

取200 mL 30 mg/L pH=5的Mo(VI)溶液,加入0.1 g黄钾铁矾,在 25°C 、180 r/min条件下,振荡3~1 680 min后,取样并测定溶液中剩余钼浓度。

1.3.2 吸附等温实验

配制25 mL的10~200 mg/L的Mo(VI)溶液,分别加入12.5 mg的黄钾铁矾,调节溶液pH为5,在 25°C 、180 r/min条件下振荡吸附24 h后,取样并测定吸附后钼浓度。

1.3.3 pH对吸附效果的影响

取25 mL 30 mg/L的Mo(VI)溶液,分别用 NaOH 和 HCl 调节溶液pH为2~10,添加12.5 mg黄钾铁矾,

在 25 °C、180 r/min 条件下振荡吸附 24 h 后测定吸附后钼浓度。

1.3.4 吸附剂投加量对吸附效果的影响

设定 Mo(VI) 初始质量浓度为 30 mg/L, 黄钾铁矾投加量分别为 0.2~4 g/L, 调节溶液 pH 为 5, 将溶液在 25 °C、180 r/min 条件下振荡吸附 24 h 后测定吸附后钼浓度。

1.3.5 共存离子对吸附效果的影响

将 0、0.1、0.5 mol/L 的 NaNO_3 、 Na_2SO_4 、 KH_2PO_4 共存离子加入初始质量浓度为 30 mg/L 的 Mo(VI) 溶液中, 投加 0.5 g/L 的黄钾铁矾吸附剂, 调节溶液 pH 为 5, 在 25 °C、180 r/min 条件下振荡吸附 24 h 后测定溶液中的钼浓度。

1.4 表征与数据分析

分别采用 X 射线衍射仪(XRD)、傅里叶红外光谱仪(FT-IR)表征黄钾铁矾的晶体结构和表面基团; 采用《铝及铝合金化学分析方法 第 29 部分: 钼含量的测定 硫氰酸盐分光光度法》(GB/T 20975.29—2019)测定溶液中钼离子的浓度; 利用准一级动力学、准二级动力学和颗粒内扩散模型对吸附动力学实验数据进行拟合分析; 采用 Langmuir 和 Freundlich 等温吸附模型对等温吸附实验数据进行拟合分析; 使用 Jade 6 和 Excel 2017 进行数据分析, 并使用 Origin 2018 制图。

2 结果与讨论

2.1 黄钾铁矾的表征分析

黄钾铁矾的 XRD 见图 1。

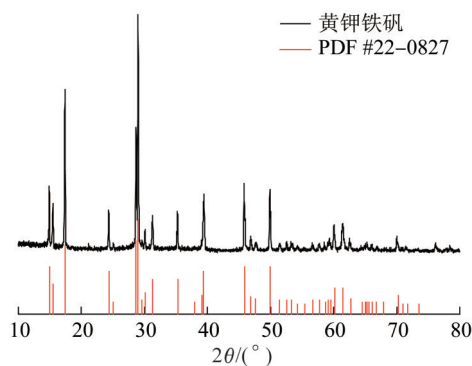


图 1 黄钾铁矾 XRD 分析

Fig. 1 XRD analysis of jarosite

图 1 的 XRD 结果表明, 实验合成的矿物的主衍射峰分别与黄钾铁矾标准卡片 PDF #22-0827 中的 17.408° 、 28.680° 、 28.966° 、 46.865° 、 49.931° 特征峰吻

合, 没有多余杂峰, 衍射峰毛刺不多且峰强较高, 说明合成的矿物是纯黄钾铁矾矿物并且晶型较好。

2.2 吸附动力学

图 2 展示了黄钾铁矾对 Mo(VI) 的吸附动力学。

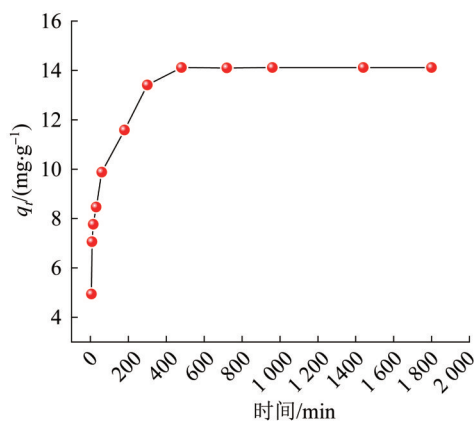


图 2 黄钾铁矾对 Mo(VI) 的吸附动力学曲线

Fig. 2 Adsorption kinetic curve of Mo(VI) by jarosite

由图 2 可知, 黄钾铁矾对 Mo(VI) 的吸附动力学曲线可以分为 3 个阶段: 快速吸附阶段、吸附渐缓阶段和吸附平衡阶段。反应最初 30 min 为快速吸附阶段, 30 min 时的吸附量可达平衡吸附量的 59.99%, 原因是反应初期黄钾铁矾表面的吸附位点多且未饱和, 吸附质 Mo(VI) 能快速占据黄钾铁矾表面的吸附位点; 随着吸附活性位点的逐渐饱和, 黄钾铁矾对 Mo(VI) 的吸附速率渐缓直至平衡。

采用准一级动力学、准二级动力学、颗粒内扩散模型对吸附动力学实验数据进行拟合, 结果见表 1。

由表 1 的拟合结果可知, 黄钾铁矾对 Mo(VI) 的吸附更符合准二级动力学模型, R^2 可达 0.999 7, 远优于准一级动力学模型, 表明黄钾铁矾对 Mo(VI) 的吸附受化学吸附主导, 吸附过程涉及吸附剂与吸附质之间的电子传递^[16]。颗粒内扩散模型可分为快速吸附阶段、吸附渐缓阶段和吸附平衡阶段, 快速吸附期 Mo(VI) 通过液膜快速吸附至黄钾铁矾表面, 扩散阻力小, 吸附率快; 吸附渐缓阶段和吸附平衡阶段, 由于黄钾铁矾外表面的活性位点逐渐吸附饱和, 此时 Mo(VI) 以颗粒内扩散为主, 扩散阻力增加, 吸附速率变小。颗粒内扩散模型的拟合直线并未通过原点, 说明颗粒内扩散不是吸附的关键控制步骤^[17]。

表1 吸附动力学拟合参数

Table 1 Fitting parameters of the adsorption kinetics			
拟合模型	方程	拟合结果	R^2
准一级动力学模型	$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t$	$k_1 = 0.008 \text{ min}^{-1}$; $q_e = 7.389 \text{ mg/g}$	0.991 2
准二级动力学模型	$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$	$k_2 = 0.004 \text{ g/(mg} \cdot \text{min)}$; $q_e = 14.292 \text{ mg/g}$	0.999 7
颗粒内扩散模型	$q_t = K_d t^{1/2} + C_i$	$k_{d1} = 1.604 \text{ mg/(g} \cdot \text{min}^{1/2})$; $C_1 = 1.807 5 \text{ mg/g}$	0.638 4
		$k_{d2} = 0.421 \text{ mg/(g} \cdot \text{min}^{1/2})$; $C_2 = 6.142 \text{ mg/g}$	0.985 4
		$k_{d3} = 0.019 \text{ mg/(g} \cdot \text{min}^{1/2})$; $C_3 = 13.429 \text{ mg/g}$	0.255 3

2.3 等温吸附

黄钾铁矾对Mo(VI)的等温吸附曲线见图3。

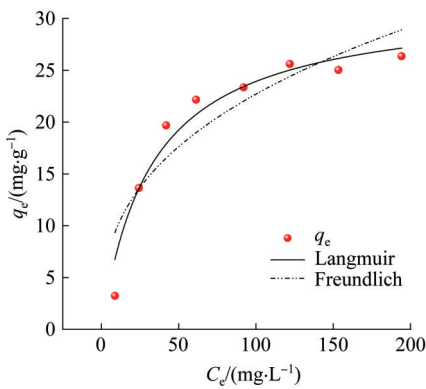


图3 黄钾铁矾对Mo(VI)的等温吸附曲线

Fig. 3 Isothermal adsorption curve of jarosite for Mo(VI)

利用Langmuir和Freundlich等温吸附模型对实验数据进行拟合,结果见表2。

表2 等温吸附模型拟合参数

Table 2 Fitting parameters of isothermal adsorption models			
拟合模型	方程	拟合结果	R^2
Langmuir	$Q_e = K_L Q_{\max} C_e / (1 + K_L C_e)$	$Q_{\max} = 32.797 6 \text{ mg/g}$; $K_L = 0.024 5 \text{ L/mg}$	0.952 5
Freundlich	$Q_e = K_F C_e^{1/n}$	$1/n = 0.394 1$; $K_F = 3.590 6$	0.813 4

由表2可知,Langmiur模型的 R^2 为0.952 5,高于Freundlich模型的 R^2 ,说明黄钾铁矾对Mo(VI)的吸附更符合Langmiur模型,主要为单分子层吸附^[18]。Freundlich模型中 K_F 和 n 是表示吸附剂吸附容量和吸附性能的参数,一般而言, K_F 越大,吸附效果越好; $1/n$ 反映了吸附剂的非线性度和吸附强度, $1/n$ 越小,吸附过程越容易发生,一般认为 $1/n$ 介于0.1~0.5易于吸附^[19]。本研究的Freundlich模型中 K_F 的值为3.590 6,

说明黄钾铁矾对Mo(VI)的吸附效果较好; $1/n$ 为0.394 1,说明溶液中的Mo(VI)易被黄钾铁矾吸附。

2.4 pH对吸附效果的影响

pH会影响吸附剂的表面电荷和吸附质在水体中的存在形态,进而影响吸附剂对吸附质的吸附效果^[20]。pH对黄钾铁矾吸附Mo(VI)效果的影响见图4。

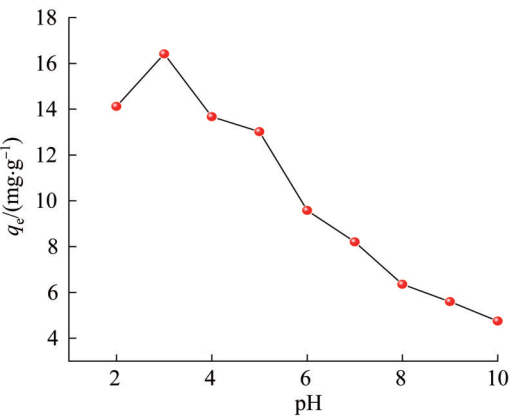


图4 pH对黄钾铁矾吸附Mo(VI)的影响

Fig. 4 Effect of pH on the adsorption of Mo(VI) by jarosite

从pH与Mo(VI)吸附量间的关系看(图4),在 $3 < \text{pH} < 5$ 时,随着pH降低,黄钾铁矾对Mo(VI)的吸附量快速上升, $\text{pH} < 3$ 时吸附量略微降低;而在 $\text{pH} > 5$ 时,随着pH增加,黄钾铁矾对Mo(VI)的吸附量呈快速下降趋势,pH从5增加到10时,吸附量由13.017 mg/g降至4.751 mg/g,降低了63.5%。这是因为黄钾铁矾的零点电荷(pH_{pzc})在 $\text{pH} = 5.6$ 左右^[21],当 $\text{pH} < \text{pH}_{\text{pzc}}$ 时,黄钾铁矾矿物表面发生质子化,表面带正电荷,有利于对带负电的含氧阴离子 MoO_4^{2-} 的吸附;而在 $\text{pH} < 3$ 的强酸环境下,部分钼会以 MoO_2^{2+} 的形式存在^[22],对带正电荷的吸附剂产生排斥作用,从而造成吸附量降低;在 $\text{pH} > 5.6$ 时,黄钾铁矾表面发生去质子化,表面 OH^- 含量逐渐增

多, 将和 MoO_4^{2-} 竞争吸附位点, 导致吸附量降低。pH 与 Mo(VI) 吸附量之间的关系说明静电吸附是黄钾铁矾吸附 Mo(VI) 的重要机制。

2.5 吸附剂投加量对吸附效果的影响

吸附剂投加量对黄钾铁矾吸附 Mo(VI) 效果的影响见图 5。

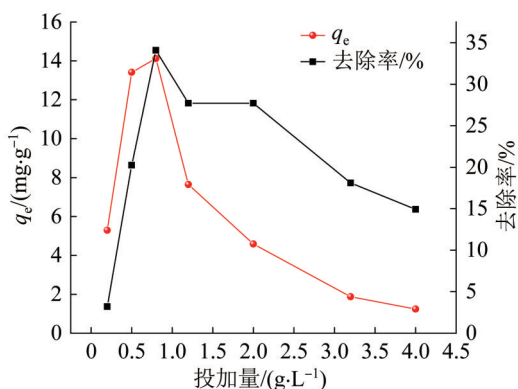


图5 吸附剂投加量对黄钾铁矾吸附 Mo(VI) 的影响

Fig. 5 Effect of adsorbent dosage on the adsorption of Mo(VI) by jarosite

由图 5 可知, 黄钾铁矾投加量从 0.2 g/L 增加至 0.8 g/L 时, Mo(VI) 去除率由 3.19% 快速升高至 34.09%。这是因为随着吸附剂黄钾铁矾投加量增加, 黄钾铁矾表面的吸附位点也相应增多, Mo(VI) 与吸附位点的接触几率增大, 有利于促进 Mo(VI) 的去除。而当黄钾铁矾投加量从 0.8 g/L 增加至 4.0 g/L 时, Mo(VI) 去除率呈缓慢降低趋势, 而吸附量呈快速下降趋势, 说明黄钾铁矾投加量在 0.8 g/L 时达到吸附饱和, 继续增加黄钾铁矾投加量并不能增加 Mo(VI) 的去除率。这是因为黄钾铁矾作为纳米矿物, 投加量增加可能会造成纳米颗粒团聚, 造成暴露的吸附位点不足而导致去除率降低; 同时随着固液比增加, 吸附剂数量增加, 但溶液中的吸附质 Mo(VI) 的数量是不变的, 故单位吸附量会快速降低。

2.6 共存离子对吸附效果的影响

共存离子对黄钾铁矾吸附 Mo(VI) 效果的影响见图 6。

由图 6 可知, 随 SO_4^{2-} 、 PO_4^{3-} 、 NO_3^- 共存阴离子的加入, 黄钾铁矾对 Mo(VI) 的吸附量都有不同程度的降低, 说明共存离子的存在对黄钾铁矾吸附 Mo(VI) 起抑制作用。一般而言, 吸附行为不受离子强度影响或吸附量与离子强度呈正相关主要受内层络合机制控制, 而吸附量与离子强度呈负相关表明吸附过程主要受静电

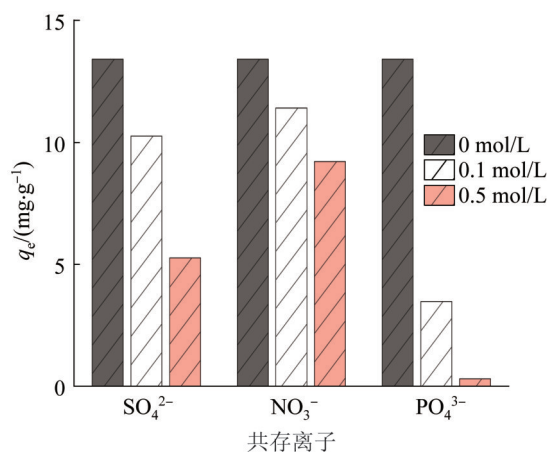


图6 共存离子对黄钾铁矾吸附 Mo(VI) 的影响

Fig. 6 Effect of coexisting ions on the adsorption of Mo(VI) by jarosite

作用控制, 形成的是不稳定的外层络合物^[23]。因此, 黄钾铁矾对 Mo(VI) 的吸附过程主要受静电作用控制, 这与 pH 对吸附行为的影响相吻合。3 种共存阴离子对吸附的抑制强度表现为 $\text{PO}_4^{3-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$, 这是因为 NO_3^- 的加入能和黄钾铁矾形成外层络合物^[24], 与 MoO_4^{2-} 产生竞争吸附; PO_4^{3-} 和 SO_4^{2-} 与 MoO_4^{2-} 具有相似的结构, 将与 MoO_4^{2-} 竞争矿物表面的吸附位点, 同时 PO_4^{3-} 和 SO_4^{2-} 还能占据黄钾铁矾的晶格位置发生类质同象作用, 从而降低黄钾铁矾对 Mo(VI) 的吸附效果。此外, 磷酸盐与铁(氢)氧化物的吸附黏力较硫酸盐大, 带负电荷的磷酸盐能通过内圈络合的方式与黄钾铁矾矿物结合^[25], 很大程度上降低了黄钾铁矾矿物表面的电荷, 增大了矿物与 MoO_4^{2-} 之间的静电斥力, 因而较低浓度的 PO_4^{3-} 就能大幅降低黄钾铁矾对 Mo(VI) 的吸附量。

2.7 吸附机理

图 7 为黄钾铁矾吸附 Mo(VI) 前后的红外光谱对比图。

根据图 7, 467 cm^{-1} 和 500 cm^{-1} 处的吸收峰为 FeO_6 八面体结构的特征峰^[14], 1 001 cm^{-1} 处的特征峰是由 O—H 官能团的变形伸缩振动产生, 1 187 cm^{-1} 和 1 084 cm^{-1} 处的吸收峰对应 SO_4^{2-} 的反对称伸缩振动^[26], 水分子变形产生的 H—O—H 伸缩振动峰位于 1 652 cm^{-1} 附近, 3 390 cm^{-1} 处的峰是 O—H 的伸缩振动特征峰^[27], 这些与文献报道的黄钾铁矾特征峰一致。对比黄钾铁矾吸附 Mo(VI) 前后的 FT-IR 可知, 吸附后位于 1 652 cm^{-1} 处的 H—O—H 伸缩振动特征峰略微增强并向低波数段偏移。因此, —OH 可能在黄钾铁矾对 MoO_4^{2-} 的吸附过程中起了关键作用。结合前文分析可知, 在

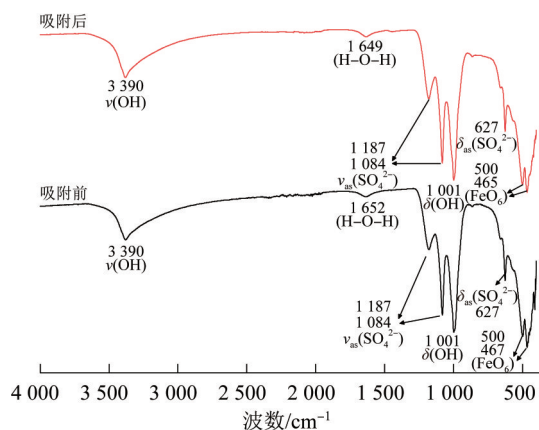


图7 黄钾铁矾吸附Mo(VI)前后FT-IR对比图

Fig. 7 Comparison of FT-IR before and after Mo(VI) adsorption by jarosite

pH < p_{H_{pzc}} (5.6)时,—OH官能团容易发生质子化形成带正电荷的—OH²⁺,所以MoO₄²⁻与黄钾铁矾表面的—OH可由静电作用引发外圈络合作用^[28-29],吸附过程存在共享电子对或电子传递的化学过程,这与吸附动力学模型分析中吸附过程受化学作用主导的结论一致。综合吸附动力学、等温吸附和pH、共存离子对吸附的影响实验结果可知,黄钾铁矾对Mo(VI)的吸附机制主要为静电吸附和外圈络合吸附的协同作用。

3 结论

(1)准二级动力学模型和Langmuir等温吸附模型能更好地模拟黄钾铁矾对Mo(VI)的吸附过程,黄钾铁矾对Mo(VI)的吸附是单分子层吸附,吸附速率受化学过程主导。

(2)pH、共存离子都对黄钾铁矾吸附Mo(VI)的行为具有较大影响,pH主要影响黄钾铁矾的表面电荷以及Mo(VI)在溶液中的赋存形态,随pH上升,黄钾铁矾去质子化能力增强,对Mo(VI)的吸附量减小;共存离子通过竞争吸附位点、与黄钾铁矾发生外圈络合的方式对吸附起抑制作用。

(3)黄钾铁矾在投加量为0.8 g/L时达到吸附饱和,继续增加吸附剂投加量,并不能增加对Mo(VI)的去除率,且随着固液比的继续增加,单位吸附量会快速降低。黄钾铁矾对Mo(VI)的最大吸附容量可达32.797 6 mg/g。

(4)黄钾铁矾对Mo(VI)的吸附机制主要为静电吸附和外圈络合吸附的协同作用。黄钾铁矾是一种潜在的去除废水中钼的天然矿物材料。

参考文献

- [1] SHAN Weijun, FANG Dawei, ZHAO Ziyi, et al. Application of orange peel for adsorption separation of molybdenum (VI) from re-containing industrial effluent [J]. Biomass and Bioenergy, 2012, 37: 289-297.
- [2] 秦笑梅, 杨世豪, 王恒栋. 聚合物基复合材料去除水中重金属污染的研究进展[J]. 工业水处理, 2021, 41(11): 16-22.
QIN Xiaomei, YANG Shihao, WANG Hengdong. Research progress of polymer composites for the removal of heavy metal pollution in water [J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(11): 16-22.
- [3] BRION-ROBY R, GAGNON J, NOSRATI S, et al. Adsorption and desorption of molybdenum (VI) in contaminated water using a chitosan sorbent [J]. Journal of Water Process Engineering, 2018, 23: 13-19.
- [4] World Health Organization. Cadmium in drinking-water: Background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality [R]. Geneva: World Health Organization, 2009.
- [5] BEI H, SHIM S, GEORGE E P, et al. Compressive strengths of molybdenum alloy micro-pillars prepared using a new technique [J]. Scripta Materialia, 2007, 57(5): 397-400.
- [6] FU Fenglian, WANG Qi. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review [J]. Journal of Environmental Management, 2011, 92(3): 407-418.
- [7] 胡小芳, 丁卫, 张建国, 等. 化学沉淀法对水中钼、钴金属污染物的应急处理技术研究 [J]. 供水技术, 2010, 4(1): 21-24.
HU Xiaofang, DING Wei, ZHANG Jianguo, et al. Emergency treatment technology of molybdenum and cobalt contamination with chemical precipitation in water [J]. Water Technology, 2010, 4(1): 21-24.
- [8] 张彬彬, 王开春, 李学宇, 等. 混凝沉淀处理钼矿选矿废水的试验研究 [J]. 化工矿物与加工, 2015, 44(5): 21-23.
ZHANG Binbin, WANG Kaichun, LI Xuezi, et al. Experimental study on treatment of molybdenum ore processing wastewater by coagulation sedimentation [J]. Industrial Minerals & Processing, 2015, 44(5): 21-23.
- [9] BASHIR A, MALIK L A, AHAD S, et al. Removal of heavy metal ions from aqueous system by ion-exchange and biosorption methods [J]. Environmental Chemistry Letters, 2019, 17(2): 729-754.
- [10] 李梦阳, 张亚雷, 沈峥, 等. 含钼废水处理技术及其机理研究进展 [J]. 环境污染与防治, 2019, 41(1): 106-109.
LI Mengyang, ZHANG Yalei, SHEN Zheng, et al. Research progress of molybdenum-containing wastewater treatment technology and mechanisms [J]. Environmental Pollution & Control, 2019, 41(1): 106-109.
- [11] 于常武, 高超. 丝藻对含钼废水中MoO₄²⁻的吸附特性及机制研究 [J]. 环境污染与防治, 2015, 37(7): 55-60.
YU Changwu, GAO Chao. Performance and mechanism studies of adsorption molybdenum (MoO₄²⁻) from waste water by *Ulothrix* [J]. Environmental Pollution & Control, 2015, 37(7): 55-60.
- [12] 艾翠玲, 雷英杰, 张国春, 等. 纳米铁氧化物吸附处理重金属废

- 水的研究进展[J]. 化工环保, 2015, 35(6): 593-598.
- AI Cuiling, LEI Yingjie, ZHANG Guochun, et al. Research progresses on adsorption of heavy metals from wastewater using nano iron oxides[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2015, 35(6): 593-598.
- [13] 荀习颖, 陈炳辉, 曹丽娜, 等. 广东大宝山 AMD 中铁离子、次生矿物组合与重金属元素分布的关系探讨[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2020, 59(3): 12-22.
- GOU Xiyang, CHEN Binghui, CAO Lina, et al. The relationship among iron ion, secondary mineral assemblage and heavy metals distribution in the acid mine drainage(AMD) at Dabaoshan mine, Guangdong province[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2020, 59(3): 12-22.
- [14] ASTA M P, CAMA J, MARTÍNEZ M, et al. Arsenic removal by goethite and jarosite in acidic conditions and its environmental implications[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 171(1/2/3): 965-972.
- [15] BARON D, PALMER C D. Solubility of jarosite at 4-35 °C[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, 60(2): 185-195.
- [16] 周振扬, 杨驰浩, 尹微琴, 等. 氧化松木生物炭高效去除水中 Pb 及定量吸附机理[J]. 工业水处理, 2021, 41(7): 88-93.
- ZHOU Zhenyang, YANG Chihao, YIN Weiqin, et al. Efficient removal and quantitative adsorption mechanisms of Pb from water by oxidized pine biochars[J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(7): 88-93.
- [17] 胡玉瑛, 潘成, 郑晓环, 等. NiSiO@NiAlFe 对不同抗生素的吸附特性研究[J]. 工业水处理, 2021, 41(4): 56-61.
- HU Yuying, PAN Cheng, ZHENG Xiaohuan, et al. Study on the adsorption properties of NiSiO@NiAlFe to different antibiotics[J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(4): 56-61.
- [18] 张蕾, 刘雪岩, 姜晓庆, 等. 纳米 TiO₂ 对钼(VI)的吸附性能[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(2): 301-307.
- ZHANG Lei, LIU Xueyan, JIANG Xiaoqing, et al. Adsorption properties of nano-TiO₂ for Mo(VI)[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(2): 301-307.
- [19] 丁秘, 康文晶, 冯程龙, 等. 人工合成水铁矿对水中六价铬的吸附特征研究[J]. 工业水处理, 2017, 37(2): 29-33.
- DING Mi, KANG Wenjing, FENG Chenglong, et al. Research on the adsorption characteristics of synthetic ferrihydrite for hexavalent chromium in water[J]. Industrial Water Treatment, 2017, 37(2): 29-33.
- [20] 冯江涛, 王桢钰, 闫炫冶, 等. 吸附去除水体重金属离子的影响因素研究进展[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(2): 1-16.
- FENG Jiangtao, WANG Zhenyu, YAN Xuanye, et al. A review on factors influencing heavy metal ion removal by adsorption from water[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(2): 1-16.
- [21] XU Zhihui, LÜ Bo, WU Jingyu, et al. Reduction of Cr(VI) facilitated by biogenetic jarosite and analysis of its influencing factors with response surface methodology[J]. Materials Science and Engineering: C, 2013, 33(7): 3723-3729.
- [22] DODDIBA G, FUJITA T, KIKUCHI T, et al. Synthesis of iron-based adsorbents and their application in the adsorption of molybdenum ions in nitric acid solution[J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 166(2): 496-503.
- [23] 吴萍萍, 曾希柏, 李莲芳, 等. 离子强度和磷酸盐对铁铝矿物及土壤吸附 As(V) 的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(3): 498-503.
- WU Pingping, ZENG Xibai, LI Lianfang, et al. The effect of ionic strength and phosphate on As(V) adsorption on different iron/aluminum minerals and soils[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(3): 498-503.
- [24] GAO Yang, SHAO Zhenyi, XIAO Zhihai. U(VI) sorption on illite: Effect of pH, ionic strength, humic acid and temperature[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2015, 303(1): 867-876.
- [25] 王慧, 唐杉, 韩上, 等. 磷对镉离子在针铁矿及针铁矿-胡敏酸复合体表面吸附的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(5): 659-667.
- WANG Hui, TANG Shan, HAN Shang, et al. The cadmium adsorption on goethite and humic acid-coated goethite complexes under phosphate application[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(5): 659-667.
- [26] FORRAY F L, SMITH A M L, NAVROTSKY A, et al. Synthesis, characterization and thermochemistry of synthetic Pb-As, Pb-Cu and Pb-Zn jarosites[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 2014, 127: 107-119.
- [27] TANG Yuanjun, XIE Yingying, LU Guining, et al. Arsenic behavior during gallic acid-induced redox transformation of jarosite under acidic conditions[J]. Chemosphere, 2020, 255: 126938.
- [28] CHEN Youyuan, WANG Baoying, XIN Jia, et al. Adsorption behavior and mechanism of Cr(VI) by modified biochar derived from *Enteromorpha prolifera*[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 164: 440-447.
- [29] WANG Feng, ZHU Yongfeng, XU Hui, et al. Preparation of carboxymethyl cellulose-based macroporous adsorbent by eco-friendly Pickering-MIPs template for fast removal of Pb²⁺ and Cd²⁺[J]. Frontiers in Chemistry, 2019, 7: 603.
- 【作者简介】陈波(1985—), 博士, 副教授. E-mail: cbo-11@163.com. 通讯作者: 蔡平雄, 博士, 教授级高工. E-mail: pingxiongcai@bbg.edu.cn.
- 【收稿日期】2022-11-09(修改稿)