

功能化施氏矿物的合成及其对铜(II)-乙二胺-硫代硫酸盐浸金液中砷吸附性能的研究^①

李娇¹, 杨仁聪¹, 张弛¹, 李鑫容², 字富庭¹

(1.昆明理工大学 理学院, 云南 昆明 650500; 2.昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要:以十四烷基三甲基溴化铵(TTAB)改性施氏矿物(Sch)制备吸附剂TTAB@Sch,应用该吸附剂从铜(II)-乙二胺-硫代硫酸盐浸金液中吸附砷,研究了Cu²⁺浓度、乙二胺浓度、S₂O₃²⁻浓度、溶液pH值、初始砷质量浓度对TTAB@Sch吸附砷的影响。结果表明,FeSO₄·7H₂O、KMnO₄、TTAB用量分别为10、1、2 g/L时,所制备的吸附剂TTAB@Sch具有较佳的吸附性能;铜(II)-乙二胺-硫代硫酸盐浸金液中Cu²⁺浓度5 mmol/L、乙二胺浓度12.5 mmol/L、初始砷质量浓度12.29 mg/L、pH=10时,TTAB@Sch对浸金液中砷的吸附率达87.2%。FT-IR和XPS分析结果表明砷可能通过Fe—O—As的形式吸附在TTAB@Sch上。

关键词:施氏矿物; 吸附; 硫代硫酸盐; 浸金; 砷

中图分类号: TF111

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.03.023

文章编号: 0253-6099(2025)03-0136-06

Synthesis of Functionalized Schwertmanite and Its Adsorption Behavior of Arsenic from Leaching Solution of Gold with Copper(II)-Ethylenediamine-Thiosulfate

LI Jiao¹, YANG Rencong¹, ZHANG Chi¹, LI Xinrong², ZI Futing¹

(1. Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, Yunnan, China; 2. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China)

Abstract: As for the leaching solution of gold with copper(II)-ethylenediamine-thiosulfate, an adsorbent (TTAB@Sch) was prepared by modifying schwertmannite (Sch) with tetradecyltrimethylammonium bromide (TTAB), and applied to adsorb arsenic therein. The effects of Cu²⁺ concentration, ethylenediamine concentration, S₂O₃²⁻ concentration, solution pH and initial arsenic mass concentration on the adsorption of arsenic by TTAB@Sch were explored. The results show that with the addition of FeSO₄·7H₂O, KMnO₄ and TTAB at amounts of 10, 1 and 2 g/L respectively, the prepared TTAB@Sch exhibits optimal adsorption behavior. As for the leaching solution with Cu²⁺ concentration of 5 mmol/L, ethylenediamine concentration of 12.5 mmol/L, initial arsenic mass concentration of 12.29 mg/L, and pH of 10, the adsorption rate of arsenic therein by TTAB@Sch can reach 87.2%. Furthermore, FT-IR and XPS analyses indicated that arsenic was likely adsorbed on TTAB@Sch by forming Fe—O—As.

Key words: schwertmannite; adsorption; thiosulfate; gold leaching; arsenic

铜(II)-乙二胺-硫代硫酸盐浸金技术因浸金速率快、试剂成本低、环境友好的优点而备受关注,适合处理砷黄铁矿和黄铁矿等复杂金矿。含金砷黄铁矿是一种含砷硫化物的伴生难处理金矿^[1],其浸出液中的砷不仅会影响金属的提取,还会给环境和生物体带来威胁^[2]。现有的砷处理技术主要包括吸附法^[3]、膜分离

法^[4]、生物法^[5]、氧化法^[6]、沉淀法^[7]等。这些方法中,吸附法具有操作简单、成本低、吸附容量高、吸附剂可循环利用等优点,是一种较为理想的砷处理技术。

施氏矿物(Sch)是一种高铁硫酸盐矿物,因其独特的结构而具有较大的表面积和较高的吸附能力^[8]。施氏矿物可在弱碱性条件下保持较高的砷吸附率,通

① 收稿日期: 2024-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(52264031)

作者简介: 李娇(2000—),女,云南宣威人,硕士研究生,主要研究方向为化学分离与富集。E-mail: 3415719716@qq.com

通信作者: 字富庭(1978—),男,云南临沧人,博士,教授,主要研究方向为化学分离与富集。E-mail: 345992103@qq.com

过 SO_4^{2-} 和 $-\text{OH}$ 的离子交换以及和 Fe 的配位作用实现吸附^[9],可有效去除砷。本文利用十四烷基三甲基溴化铵(TTAB)改性施氏矿物得到 TTAB@Sch 吸附材料,用于硫代硫酸盐浸金溶液中砷的吸附,研究了 Cu^{2+} 浓度、乙二胺浓度、 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 浓度、溶液 pH 值、初始砷质量浓度对 TTAB@Sch 吸附砷的影响,最后通过 XPS 表征和 FT-IR 表征对 TTAB@Sch 吸附砷的机理进行探究。

1 实验材料与方法

1.1 实验试剂

实验试剂包括盐酸、硫酸、硫代硫酸钠($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)、五水硫酸铜、30%过氧化氢、乙二胺、硫酸亚铁($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)、钼酸铵、高锰酸钾、十二烷基三甲基溴化铵(DTAB)、十四烷基三甲基溴化铵(TTAB)、十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)、十八烷基三甲基溴化铵(OTAB)、L-抗坏血酸,均为分析纯。

1.2 溶液配制

1) 含砷溶液配制:称取 5 g 烘干后的砷黄铁矿,加入 800 mL 去离子水,用氢氧化钠调节溶液 $\text{pH}=10$,机械搅拌 48 h,过滤后将滤液静置。

2) 硫代硫酸钠含砷溶液配制:根据实验需要,计算所需硫代硫酸钠的质量,将其溶解在去离子水中,然后转移至容量瓶中,再加入一定量的含砷溶液,定容摇匀。

1.3 功能化施氏矿物的制备

按 10 g/L 向 250 mL 去离子水中加入 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$,待其完全溶解后,再向盛有 FeSO_4 溶液的锥形瓶中缓慢加入质量浓度 1 g/L 的 KMnO_4 溶液,最后加入 2 g/L 十四烷基三甲基溴化铵溶液,混合摇匀,在 30 °C 下搅拌 12 h。将上述过程得到的物质抽滤,用无水乙醇反复清洗,置于烘箱中 60 °C 烘 12 h,即得到目标产物 TTAB@Sch。

1.4 TTAB@Sch 对铜(II)-乙二胺-硫代硫酸盐溶液中砷的吸附

根据实验需要,称取适量五水硫酸铜置于烧杯中,加入一定量去离子水溶解,然后加入一定量的乙二胺溶液(质量分数为 99%)中,再加入适量硫代硫酸钠含砷溶液,最后调节混合溶液 pH 值至 10,称取 0.02 g 用 0.105 mm 筛子筛分后的 TTAB@Sch,加入装有 100 mL 铜(II)-乙二胺-硫代硫酸盐含砷溶液中,在室温下搅拌 4 h。

1.5 砷的测定方法

采用分光光度法测定吸附前后溶液中的砷,计算吸附剂对砷的吸附率及吸附剂吸附量:

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

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

式中: η 为吸附率,%; Q_e 为吸附量,mg/g; C_0 和 C_e 分别为吸附前后溶液砷的质量浓度,mg/L; V 为含砷溶液的体积,mL; m 为吸附剂的质量,g。

2 实验结果与讨论

2.1 改性剂种类对砷吸附的影响

单一施氏矿物对砷的吸附率一般,可通过改性方法来提高施氏矿物的吸附率。表面活性剂是一种两亲物质,可以改变施氏矿物表面化学性质,增加孔隙结构,提升吸附率。不同改性剂改性后施氏矿物对砷的吸附率见图 1。从图 1 看出,单一施氏矿物对砷的吸附率较低,改性后的施氏矿物对砷的吸附率均大幅提升,吸附率高低顺序如下:TTAB@Sch>CTAB@Sch>DTAB@Sch>OTAB@Sch,TTAB@Sch 对砷的吸附率最高。当改性剂的碳链长度大于 C_{14} 时,吸附率降低,可能原因是碳链越长,空间位阻越大,不利于季铵基团对砷酸根离子(亚砷酸根离子)的静电吸引,导致吸附率降低。

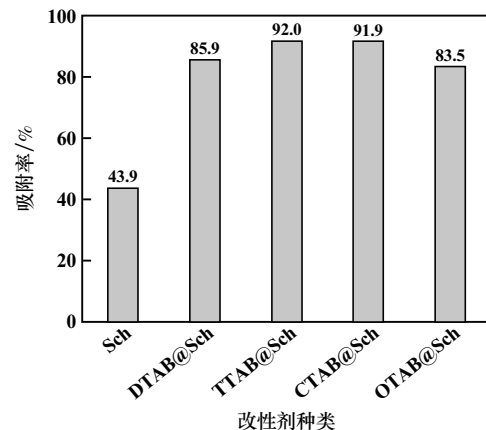


图 1 不同改性剂改性后施氏矿物对砷的吸附率

Fig. 1 Adsorption rate of arsenic by different modified schwertmanite

2.2 TTAB@Sch 合成条件优化

通过单因素实验探究了 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 用量、 KMnO_4 用量、改性剂用量、改性温度、改性时间等合成条件对 TTAB@Sch 吸附砷的影响,以此优化材料合成条件。其中,TTAB@Sch 对砷的吸附条件为:溶液体积 200 mL,砷初始质量浓度 16 mg/L、 $\text{pH}=10$ 。

2.2.1 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 用量对 TTAB@Sch 吸附砷的影响

$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 是施氏矿物中铁的来源,其用量对

TTAB@Sch 吸附砷的效果有直接影响。 KMnO_4 、TTAB 用量分别为 2、10 g/L,反应温度 30 ℃,搅拌速度 300 r/min,反应时间 12 h,加入不同量的 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$,制备得到不同含铁量的 TTAB@Sch 吸附材料,其对吸附砷的影响见图 2。由图 2 可知, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 用量 0~10 g/L 范围内时,TTAB@Sch 对砷的吸附率逐渐增加,在这一区间内, Fe^{2+} 逐渐被氧化形成施氏矿物,TTAB@Sch 的吸附性能提高;此后随着 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 用量增加,吸附率呈现微降趋势,原因可能是过量的 Fe^{2+} 覆盖在施氏矿物表面掩盖了砷的吸附位点或者过量 Fe^{2+} 的存在导致部分施氏矿物向针铁矿转化^[10],降低了吸附率。后续实验固定 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 用量为 10 g/L。

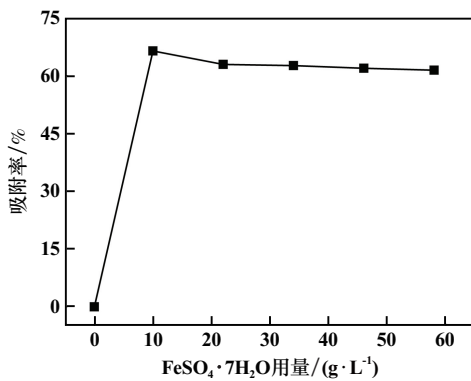


图 2 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 用量对 TTAB@Sch 吸附砷的影响
Fig.2 Effect of $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ dosage on arsenic adsorption by TTAB@Sch

2.2.2 KMnO_4 用量对 TTAB@Sch 吸附砷的影响

KMnO_4 是将 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} 的氧化剂,其用量决定能否合成施氏矿物。 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 用量 10 g/L,其他条件不变, KMnO_4 用量对合成的 TTAB@Sch 吸附砷的影响如图 3 所示。从图 3 可以看出,随着 KMnO_4 用量增加,TTAB@Sch 对砷的吸附率呈现先增加后减小的趋势, KMnO_4 用量 0~1 g/L 时,吸附率逐渐增加,原

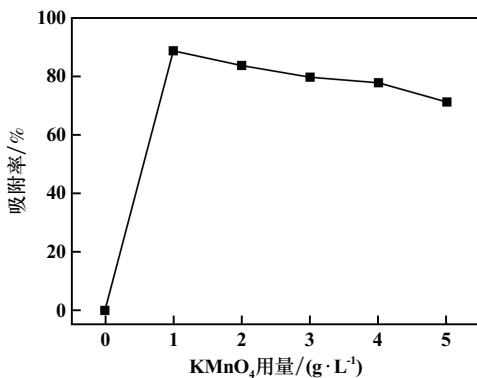


图 3 KMnO_4 用量对 TTAB@Sch 吸附砷的影响
Fig.3 Effect of KMnO_4 dosage on arsenic adsorption by TTAB@Sch

因可能是施氏矿物随着 Fe^{2+} 的氧化逐渐形成,具备更好的砷吸附性能; KMnO_4 用量 1~5 g/L 时,TTAB@Sch 对砷吸附效果逐渐变差,原因可能是过量 K^+ 的存在导致施氏矿物向黄钾铁矾转化^[11],同时 KMnO_4 的还原产物 MnO_4^- 与砷形成竞争吸附,占据部分吸附位点,导致吸附率降低。后续实验控制 KMnO_4 用量为 1 g/L。

2.2.3 改性剂用量对 TTAB@Sch 吸附砷的影响

KMnO_4 用量 1 g/L,其他条件不变,改性剂 TTAB 用量对 TTAB@Sch 吸附砷的影响如图 4 所示。由图 4 可知,改变 TTAB 用量,吸附率基本在 97% 上下波动,原因可能是 TTAB 作为一种表面活性剂,主要作用是改变吸附剂表面化学性质,并通过季铵盐离子的静电吸引作用达到吸附效果,其用量对吸附率的影响并不大,考虑到成本问题,后续采用 2 g/L 的 TTAB 进行实验。

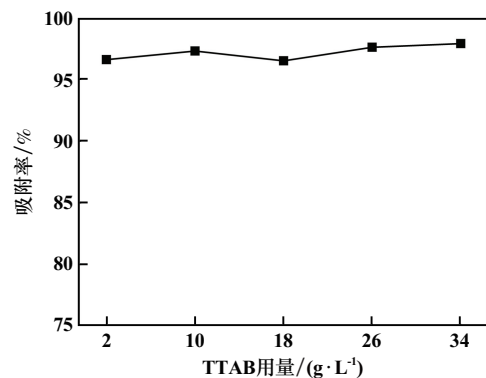


图 4 改性剂 TTAB 用量对 TTAB@Sch 吸附砷的影响
Fig.4 Effect of TTAB dosage on arsenic adsorption by TTAB@Sch

2.2.4 改性温度对 TTAB@Sch 吸附砷的影响

TTAB 用量 2 g/L,其他条件不变,改性温度对 TTAB@Sch 吸附砷的影响如图 5 所示。从图 5 可以看出,随着改性温度升高,TTAB@Sch 对砷的吸附率逐渐降低,这可能是在高温条件下施氏矿物会部分转化

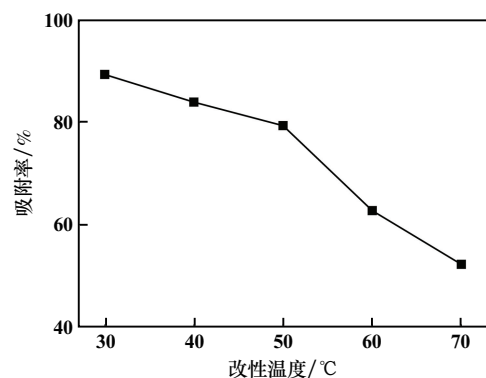


图 5 改性温度对 TTAB@Sch 吸附砷的影响
Fig.5 Effect of modification temperature on arsenic adsorption by TTAB@Sch

成针铁矿导致的^[10],且高温会使表面活性剂失活,从而进一步导致吸附率大幅度降低。因此,选择改性温度为 30 ℃。

2.2.5 改性时间对 TTAB@Sch 吸附砷的影响

改性温度 30 ℃,其他条件不变,改性时间对 TTAB@Sch 吸附砷的影响如图 6 所示。从图 6 可以看出,改性时间 3 h 获得的 TTAB@Sch 对砷具有较好的吸附性能;再延长改性时间,TTAB@Sch 对砷的吸附率总体呈下降趋势。因此,选择改性时间为 3 h。

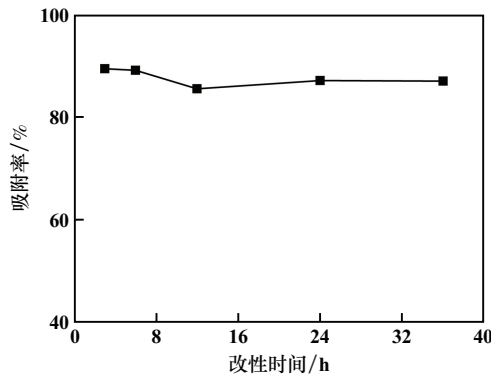


图 6 改性时间对 TTAB@Sch 吸附砷的影响

Fig.6 Effect of modification time on arsenic adsorption by TTAB@Sch

2.3 TTAB@Sch 对铜(II)-乙二胺-硫代硫酸盐溶液中砷的吸附研究

2.3.1 Cu^{2+} 浓度对 TTAB@Sch 吸附砷的影响

pH=10、溶液砷质量浓度 12.29 mg/L、乙二胺浓度 10.0 mmol/L、 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 浓度 0.1 mol/L,吸附剂投加量 0.2 g/L,在室温下以 300 r/min 搅拌 4 h,探究 Cu^{2+} 浓度对 TTAB@Sch 吸附砷的影响,结果如图 7 所示。从图 7 可以看出,随着 Cu^{2+} 浓度增加,TTAB@Sch 对砷的吸附率先增加后减小,在 Cu^{2+} 浓度 5.0 mmol/L 时,吸附率较高。原因可能是 Cu^{2+} 浓度 2.5~5.0 mmol/L

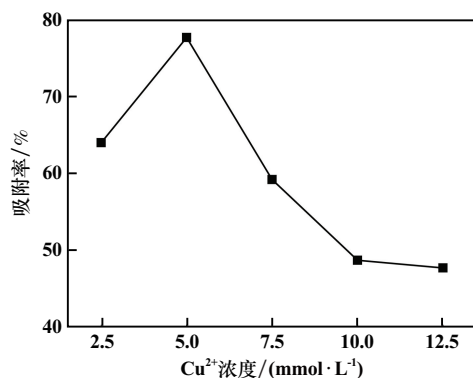


图 7 Cu^{2+} 浓度对 TTAB@Sch 吸附砷的影响

Fig.7 Effect of Cu^{2+} concentration on arsenic adsorption by TTAB@Sch

时, Cu^{2+} 能够稳定存在于浸金体系中; Cu^{2+} 浓度大于 5.0 mmol/L 时,浸金液中乙二胺不能保证 Cu^{2+} 以 $\text{Cu}(\text{en})_2^{2+}$ 的形式稳定存在,过量的 Cu^{2+} 在碱性浸金液中会转化成 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 沉淀,堵塞吸附剂的孔径或占据吸附剂表面吸附位点,从而使吸附剂的砷吸附性能降低。选择 Cu^{2+} 浓度为 5.0 mmol/L。

2.3.2 乙二胺浓度对 TTAB@Sch 吸附砷的影响

Cu^{2+} 浓度 5.0 mmol/L,其他条件不变,乙二胺浓度对 TTAB@Sch 吸附砷的影响如图 8 所示。从图 8 看出,随着乙二胺浓度增加,TTAB@Sch 对砷的吸附率先增加后减少,乙二胺浓度 5.0~12.5 mmol/L 时,能够稳定溶液中大量的 Cu^{2+} ,减少了 Cu^{2+} 与 TTAB@Sch 表面—OH 的络合,吸附率逐渐升高;乙二胺浓度大于 12.5 mmol/L 时,溶液碱性增强,吸附剂表面电荷由正电荷变为负电荷^[12],与溶液中的砷酸根负离子相斥,吸附率降低。选择乙二胺浓度为 12.5 mmol/L。

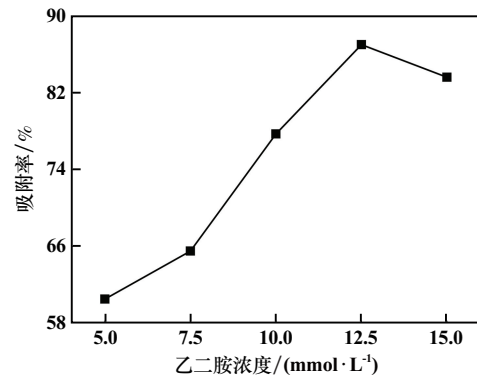


图 8 乙二胺浓度对 TTAB@Sch 吸附砷的影响

Fig.8 Effect of ethylenediamine concentration on arsenic adsorption by TTAB@Sch

2.3.3 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 浓度对 TTAB@Sch 吸附砷的影响

乙二胺浓度 12.5 mmol/L,其他条件不变, $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 浓度对 TTAB@Sch 吸附砷的影响如图 9 所示。从图 9 看出,在实验范围内,TTAB@Sch 对砷的吸附几乎不受 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 浓度的影响,不同 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 浓度下的吸附率均达到 84% 以上。选择 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 浓度为 0.10 mol/L。

2.3.4 溶液 pH 值对 TTAB@Sch 吸附砷的影响

$\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 浓度 0.1 mol/L,其他条件不变,溶液 pH 值对 TTAB@Sch 吸附砷的影响如图 10 所示。从图 10 看出,随着溶液 pH 值升高,TTAB@Sch 对砷的吸附率逐渐降低。pH=7 时吸附剂表面以正电荷为主^[12],与溶液中的砷酸根负离子通过静电吸引进行吸附;但随着溶液 pH 值升高,吸附剂表面以负电荷为主^[12],与溶液中的砷酸根负离子产生电荷排斥,且在较高的 pH 值条件下,溶液中的 OH^- 会与砷酸根离子竞争吸附位

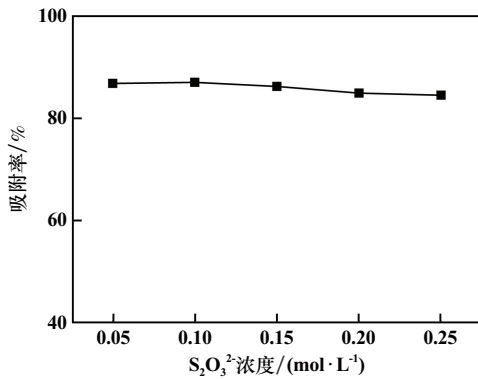
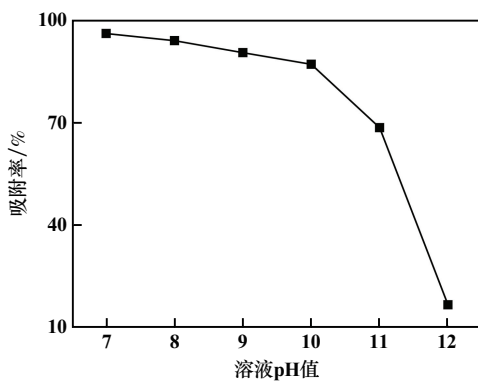
图9 $S_2O_3^{2-}$ 浓度对 TTAB@Sch 吸附砷的影响Fig. 9 Effect of $S_2O_3^{2-}$ concentration on arsenic adsorption by TTAB@Sch

图10 溶液 pH 值对 TTAB@Sch 吸附砷的影响

Fig. 10 Effect of solution pH on arsenic adsorption by TTAB@Sch

点,吸附率降低。考虑到实际浸金溶液 pH 值一般在 10 左右,故选择 pH 值为 10。

2.3.5 初始砷质量浓度对 TTAB@Sch 吸附砷的影响

溶液 pH = 10, 其他条件不变,溶液初始砷质量浓度对 TTAB@Sch 吸附砷的影响如图 11 所示。从图 11 看出,随着初始砷质量浓度增加,TTAB@Sch 对砷的吸附率逐渐降低,这是因为投入的 TTAB@Sch 量是固

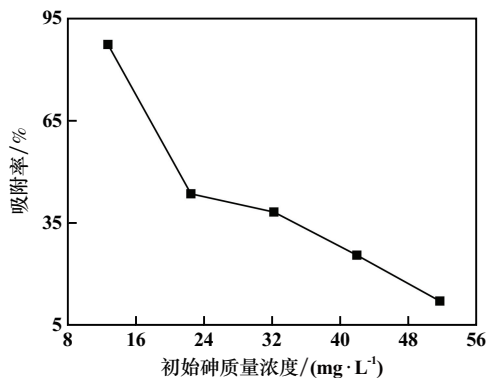


图11 初始砷质量浓度对 TTAB@Sch 吸附砷的影响

Fig. 11 Effect of initial arsenic concentration on arsenic adsorption by TTAB@Sch

定的,其表面吸附位点有限。当初始砷质量浓度为 12.29 mg/L 时,吸附率为 87.2%,此时吸附已达到平衡;再提高初始砷质量浓度,吸附剂无法再吸附溶液中其余砷,因此吸附率逐渐下降。

2.4 TTAB@Sch 吸附砷的机理分析

2.4.1 FT-IR 表征

图 12 为 TTAB@Sch 吸附砷前后的红外光谱图,对比吸附前后的光谱图可知,3 328、3 375 cm^{-1} 处的宽强峰是 O—H 的伸缩振动峰;位于 1 631、1 623 cm^{-1} 处的吸收峰可以归于 H—O—H;1 129、1 118、1 084、1 073 cm^{-1} 处的特征峰是 SO_4^{2-} 的三重简并不对称吸收峰;982、972 cm^{-1} 处的是 SO_4^{2-} 的分子内对称伸缩峰;608、614 cm^{-1} 处的是施氏矿物隧道内部 SO_4^{2-} 的振动峰^[12];700、702 cm^{-1} 处的是 Fe—O 键的吸收峰^[12]。值得注意的是,吸附后的红外光谱图在 831 cm^{-1} 处出现 Fe—O—As 的特征峰,表明浸出液中的砷可能是通过 Fe—O—As 的形式被吸附到 TTAB@Sch 表面。

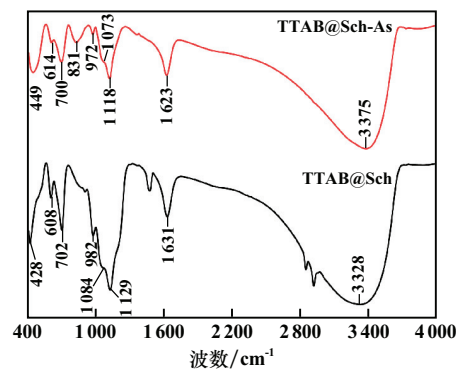


图12 TTAB@Sch 吸附砷前后的红外光谱图

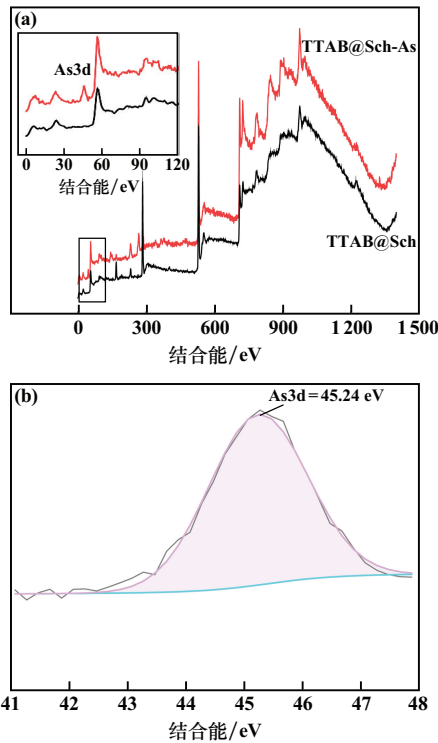
Fig. 12 Infrared spectral analysis before and after arsenic adsorption by TTAB@Sch

2.4.2 XPS 表征

为了进一步分析 TTAB@Sch 吸附砷的机理,对吸附前后的材料进行 XPS 表征,结果如图 13 所示。TTAB@Sch-As 的 XPS 光谱图中出现 As3d 轨道的峰,说明砷已经被吸附在 TTAB@Sch 上,在 45.24 eV 处出现归属于 As—O 键的特征峰。结合 FT-IR 分析可以推测,TTAB@Sch 吸附砷的机理可能是砷与 Fe—O 基团的键合。

3 结论

1) 在 200 mL 的去离子水中依次加入 10 g/L $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 、1 g/L $KMnO_4$ 、2 g/L TTAB, 30 $^{\circ}C$ 下搅拌 3 h 可以得到适用于从铜(II)-乙二胺-硫代硫酸盐浸金液中吸附砷的功能化施氏矿物吸附剂(TTAB@Sch)。



(a) 全谱图; (b) As3d 分谱图

图 13 TTAB@Sch 吸附砷的 XPS 全谱及 As3d 光谱分析

Fig. 13 XPS analysis and As3d spectral analysis of arsenic adsorption by TTAB@Sch

2) 在初始砷质量浓度为 12.29 mg/L 的铜(II)-乙二胺-硫代硫酸盐体系中,当 Cu^{2+} 浓度 5.0 mmol/L、乙二胺浓度 12.5 mmol/L、 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 浓度 0.1 mol/L、溶液 pH=10 时,TTAB@Sch 对砷的吸附率为 87.2%,且实验范围内 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 浓度不影响 TTAB@Sch 对砷的吸附率。

3) FT-IR 分析和 XPS 分析结果表明,铜(II)-乙二胺-硫代硫酸盐体系中的砷通过与 TTAB@Sch 表面的 Fe—O 基团键合达到吸附的目的。

参考文献(References):

- [1] TANG A N, WANG J, ZHANG Y S, et al. (Bio) dissolution of arsenopyrite coupled with multiple proportions of pyrite: Emphasis on the mobilization and existential state of arsenic[J]. *Chemosphere*, 2023, 321:138128.
- [2] 洪茂鑫,刘玉玲,杨宝军,等. 砷黄铁矿生物氧化影响因素及控制方法[J]. *生物学杂志*, 2024,41(3):52-60.
- HONG Maoxin, LIU Yuling, YANG Baojun, et al. Influencing factors and control methods of arsenopyrite bio-oxidation[J]. *Journal of Biology*, 2024,41(3):52-60.

- [3] DENG M, WU X D, ZHU A M, et al. Well-dispersed TiO_2 nanoparticles anchored on Fe_3O_4 magnetic nanosheets for efficient arsenic removal[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 237(5): 63-74.
- [4] MOREIRA V R, LEBRON Y A R, SANTOS L V S, et al. Arsenic contamination, effects and remediation techniques: A special look onto membrane separation processes[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 148:604-623.
- [5] KAMDE K, PANDEY R A, THUL S T, et al. Microbially assisted arsenic removal using *Acidithiobacillus ferrooxidans* mediated by iron oxidation[J]. *Environmental Technology & Innovation* 2018, 10:78-90.
- [6] LIANG C, ZHANG Q, XIA H Y, et al. Experimental study on arsenic removal from leaching solution of zinc oxide fume[J]. *JOM*, 2023, 75: 1603-1611.
- [7] PINISAKUL A, POLPRASERT C, PARKPIAN P, et al. Arsenic removal efficiency and mechanisms by electro-chemical precipitation process[J]. *Water Science Technology*, 2002, 46(9):247-254.
- [8] NAREN G, OHASHI H, BAI S Q, et al. Uptake mechanism of silicic acid by schwertmannite and its stabilization[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(6): 111136.
- [9] 罗灿钰,张琢,赵华甫. 施氏矿物的矿物学特征及其除砷研究进展[J]. *环境化学*, 2021, 40(11):3530-3543.
- LUO Canyu, ZHANG Zhuo, ZHAO Huaifu. The mineralogical characteristics of schwertmannite and its progress in arsenic removal[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(11):3530-3543.
- [10] HONG Y, FENG X H, ZHU M Q. Formation and transformation of schwertmannite through direct Fe^{3+} hydrolysis under various geochemical conditions[J]. *Environmental Science: Nano*, 2020, 7(8):2385-2398.
- [11] 钟萍丽,伍赠玲,季常青,等. 酸性矿山废水生物矿化源头控制技术进展[J]. *湿法冶金*, 2022, 41(4):289-294.
- ZHONG Pingli, WU Zengling, JI Changqing, et al. Research progress on source control technologies of biological mineralization for acid mine drainage[J]. *Hydrometallurgy of China*, 2022, 41(4): 289-294.
- [12] 许庆伟. 施氏矿物制备及其对 As(III) 的吸附性能和机理研究[D]. 呼和浩特:内蒙古大学, 2023.
- XU Qingwei. Study on preparation of schwertmannite and its adsorption properties and mechanism for As(III) [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2023.

引用本文:李娇,杨仁聪,张弛,等. 功能化施氏矿物的合成及其对铜(II)-乙二胺-硫代硫酸盐浸金液中砷吸附性能的研究[J]. *矿冶工程*, 2025, 45(3):136-141.

LI Jiao, YANG Rencong, ZHANG Chi, et al. Synthesis of functionalized schwertmannite and its adsorption behavior of arsenic from leaching solution of gold with copper(II)-ethylenediamine-thiosulfate[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2025, 45(3):136-141.