

辉钼矿氧压水浸氧化规律及其动力学研究

姜丽帅, 蔺月萌, 韩百岁, 李潇煜, 徐文涛, 谢昊宇

(辽宁科技大学 矿业工程学院, 辽宁 鞍山 101145)

摘要:研究了采用氧压水浸法浸出辉钼矿中的钼,考察了矿石粒度、氧分压、温度、搅拌速度对辉钼矿氧化的影响,探讨了氧化产物在固、液两相中的分配规律。结果表明:矿石粒度的减小,以及氧分压、温度、搅拌速度的提高均可促进辉钼矿氧化;氧化产物首先进入液相,当液相中 MoO_4^{2-} 达到饱和后,氧化产物会以 MoO_3 形式进入渣相;辉钼矿氧压水浸过程中钼的氧化过程可用未反应核收缩模型描述,反应速率受混合控制模型控制,表观活化能为 40.55 kJ/mol。

关键词:辉钼矿;氧压;钼;氧化;水浸;动力学;规律

中图分类号:TF803.21;TF841.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2617(2024)01-0047-06

DOI:10.13355/j.cnki.sfyj.2024.01.008

钼是一种重要的战略金属资源,具有优异的理化性能,广泛应用于钢铁合金、航空航天、电子器件及催化剂领域^[1-4]。钼主要来源于辉钼矿,而辉钼矿通常与黄铜矿伴生,以斑岩型铜钼矿形式存在。

黄铜矿和辉钼矿均属于酸难溶性矿物,化学性质极其稳定,需添加 HNO_3 、 MnO_2 、 NaClO_2 等较强氧化剂,浸出条件也很苛刻;另外,二者可浮性接近,难以通过浮选完全分离铜钼^[5]。目前,浸出黄铜矿的方法主要包括酸浸、氨浸、等离子液体浸出、生物浸出等^[6]。酸浸复杂黄铜矿,铜浸出率可达 82.36%,但需加入较强氧化剂^[7];氨浸通常会产生钝化层,影响铜的浸出^[8];采用等离子液体浸出法,铜浸出效果较好,但浸出剂价格昂贵,生产成本较高^[9];生物浸出法绿色环保,但浸出效率较低^[10]。浸出辉钼矿的方法主要有酸浸、氧压氨浸、碱浸及电解浸出等^[11-15],这些方法对钼的氧化浸出效果均较好,但浸出条件苛刻,氧化剂用量较大,能耗较高。

在常压下浸出黄铜矿和辉钼矿,处理效率较低,浸出剂用量较大,生产成本较高,易造成环境污染^[16]。而采用氧压水浸法浸出黄铜矿,铜浸出

率可达 95%以上,且设备腐蚀较小,生产成本较低;工艺流程较短^[17-18]。有研究表明,氧压水浸辉钼矿的铜浸出率较高,钼的氧化产物主要有 MoO_4^{2-} 和 MoO_3 。钼氧化产物是以离子形式进入液相,还是以固体形式留在渣相是铜钼分离的关键^[18],但目前相关研究报道却较少。因此,试验针对辉钼矿纯矿物(MoS_2 纯度为 95%),研究了其在氧压水浸条件下的氧化规律,考察了矿石粒度、氧分压、温度、搅拌速度对钼浸出率及转化率的影响,并通过 XRD 和 SEM 对浸出渣物相和形态进行表征,探讨了辉钼矿氧化反应动力学,以求通过控制浸出条件来控制辉钼矿的氧化程度,进而调控钼氧化产物在固、液两相的分配。

1 试验原料、试剂与仪器

1.1 试验原料

辉钼矿纯矿物:取自云南某钼矿,矿石经破磨筛分,得到 $-150 \sim +75 \mu\text{m}$ 、 $-75 \sim +47 \mu\text{m}$ 、 $-47 \mu\text{m}$ 3 个粒级的样品,主要化学成分分析结果见表 1, XRD 图谱如图 1 所示。可以看出,主要元素为 Mo、S,质量分数分别为 56.75%、38.25%,此外还含有少量 Si、O。

收稿日期:2023-08-20

基金项目:辽宁科技大学优秀人才项目(2021YQ05)。

第一作者简介:姜丽帅(1998—),男,硕士研究生,主要研究方向为硫化矿湿法冶金。

通信作者简介:韩百岁(1987—),男,博士,副教授,主要研究方向为硫化矿湿法冶金。E-mail:baisui.han@ustl.edu.cn。

表1 辉钼矿的主要化学成分 %

Mo	S	Si	O
56.75	38.25	2.33	2.67

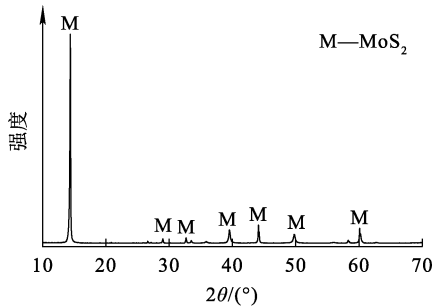


图1 辉钼矿的XRD图谱

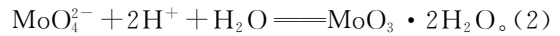
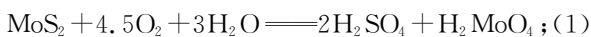
1.2 试剂与仪器

去离子水(实验室自制),钼标准溶液(国标, 1 000 μg/mL, 国药集团化学试剂有限公司), NaOH(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司)。

500 mL 高温高压反应釜(AB-500 型, 上海莱北科学仪器有限公司), 电感耦合等离子发射光谱仪(ICP-OES, PQ LC-Plasma Quant MS 型, 德国耶拿分析仪器有限公司), 扫描电子显微镜(Sigma 500 型, 德国蔡司公司), X 射线衍射仪(XRD, ADVANCE 型, 德国布鲁克公司), 实验室纯水机(Spring-R10 型, 厦门锐思捷水纯化技术有限公司), 电子天平(LQ-C20002 型, 昆山优客科维特电子科技有限公司), 真空抽滤机(SHB-III 型, 北京科伟永兴仪器有限公司)。

1.3 试验原理与方法

辉钼矿中的钼主要以 MoS₂ 形式存在, 氧化浸出开始阶段, 钼主要转变为 MoO₄²⁻ 进入溶液, 当辉钼矿浸出率达一定程度时, MoO₄²⁻ 转变为 MoO₃ 进入浸出渣中。主要化学反应方程式^[19-20]如下:



试验在反应釜中进行, 将矿样与去离子水按质量比 1 : 40 混合并配成矿浆; 将矿浆加入到反应釜中, 密封, 加热至设定温度后通过氧气罐通入氧气加压; 反应一定时间后, 用真空抽滤机过滤; 浸出渣在烘箱中烘干, 取一定量浸出渣及过量的 2 mol/L NaOH 溶液, 在温度 100 °C、搅拌速度 600 r/min 条件下反应 1 h, 得碱浸出渣与碱浸出液。用 ICP 测定浸出液与碱浸出液中钼浓度, 计算钼浸出率、转化率及氧化率, 计算公式为

$$r_m = \frac{\rho_1 V w_1}{m w} \times 100\%. (3)$$

式中: r_m —钼浸出率, %; ρ_1 —浸出液中 MoO₄²⁻ 质量浓度, mg/L; w_1 —MoO₄²⁻ 中钼元素质量分数, %; V —浸出液体积, L; w —矿物中钼品位, %; m —浸出前矿物质量, mg。

$$r_z = \frac{\rho_2 V w_2}{m w} \times 100\%. (4)$$

式中: r_z —钼转化率, %; ρ_2 —碱浸出液中 MoO₄²⁻ 质量浓度, mg/L; w_2 —MoO₄²⁻ 中钼元素质量分数, %; V —碱浸出液体积, L; w —矿物中钼品位, %; m —浸出前矿物质量, mg。

$$r_y = r_m + r_z, (5)$$

式中, r_y —钼氧化率, %。

2 试验结果与讨论

2.1 各因素对钼氧化行为的影响

2.1.1 矿石粒度对钼氧化行为的影响

矿石粒度是影响氧化浸出率的重要因素, 矿石粒度越小, 其比表面积越大, 与溶液中的溶解氧接触概率越大, 越有利于矿石中的钼快速浸出及转化。在温度 170 °C、氧分压 0.8 MPa、搅拌速度 600 r/min 条件下, 矿石粒度对钼浸出率及转化率的影响试验结果如图 2 所示。

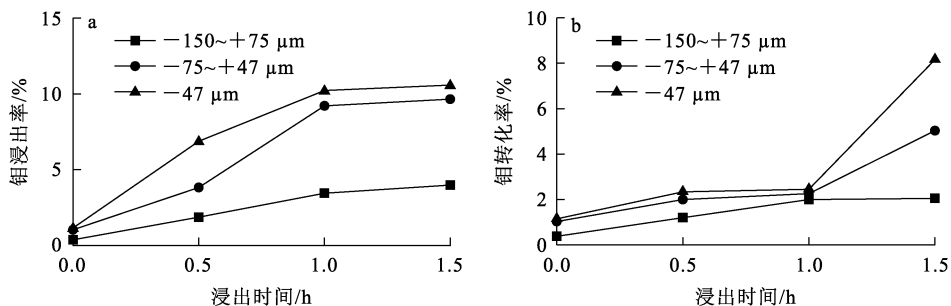


图2 矿石粒度对钼浸出率(a)及转化率(b)的影响

由图 2 看出:随矿石粒级减小,钼浸出率提高;粒级由 $-150\sim+75\ \mu\text{m}$ 减至 $-75\sim+47\ \mu\text{m}$ 、浸出 1.5 h 后,钼浸出率可由 2.5% 升至 9%,若粒级减小至 $-47\ \mu\text{m}$,钼浸出率基本稳定在 10% 左右。说明浸出 1.5 h 时, MoO_4^{2-} 浓度已达到饱和,辉钼矿转化率开始明显提高。这是因为减小矿石粒级有利于辉钼矿氧化分解。但粒级过小会增加磨矿成本,综合考虑,选择矿石粒级为 $-47\ \mu\text{m}$ 进行

后续试验。

2.1.2 氧分压对钼氧化行为的影响

氧气作为浸出体系中氧化分解辉钼矿的唯一氧化剂,其在体系中的含量对氧化分解过程作用明显,即氧分压是影响辉钼矿氧化浸出速率的重要因素之一。在温度 $170\ \text{℃}$ 、矿石粒级 $-47\ \mu\text{m}$ 、搅拌速度 $600\ \text{r/min}$ 条件下,氧分压对钼浸出率及转化率的影响试验结果如图 3 所示。

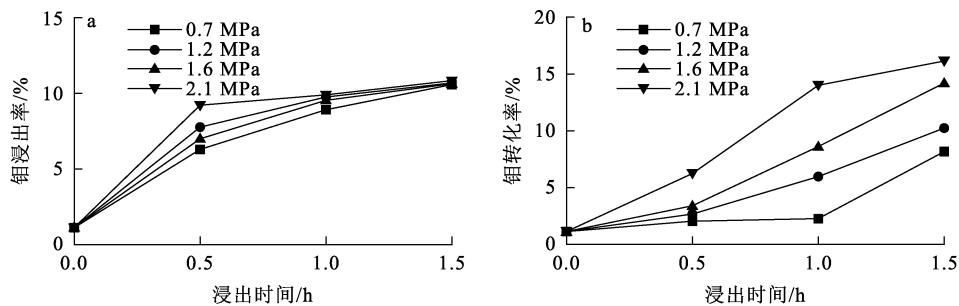


图 3 氧分压对钼浸出率(a)及转化率(b)的影响

由图 3 看出:反应初期,氧分压越高,钼浸出率上升趋势越明显,之后随反应进行,氧分压对钼浸出率影响不明显。这是因为初始氧分压越高,单位体积内的溶解氧越多,氧气与矿石的接触概率越大,有利于钼浸出速率提升;但当溶液中 MoO_4^{2-} 达到饱和时,钼浸出率趋于稳定,转化率开始明显提升。增加氧气分压虽有利于辉钼矿氧化,

提高钼转化率,但考虑到压强过高对设备的要求很高,因此,选择氧气分压为 $1.7\ \text{MPa}$ 进行后续试验。

2.1.3 温度对钼氧化行为的影响

在矿石粒级 $-47\ \mu\text{m}$ 、氧分压 $1.7\ \text{MPa}$ 、搅拌速度 $600\ \text{r/min}$ 条件下,温度对钼浸出率及转化率的影响试验结果如图 4 所示。

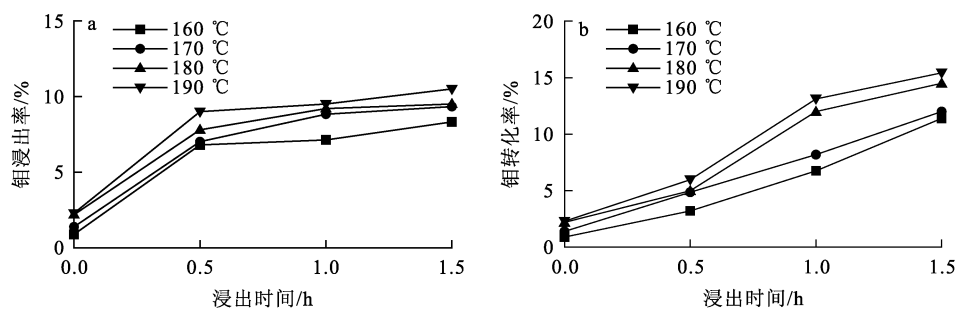


图 4 温度对钼浸出率(a)及转化率(b)的影响

由图 4(a)看出:浸出 0.5 h 后,随浸出时间延长,钼浸出率提高幅度减小;随温度升高,钼浸出率提高,这是因为随温度升高,溶液黏度下降,有利于传质, MoO_4^{2-} 溶解性提高,有利于钼的浸出。由图 4(b)看出:温度为 $190\ \text{℃}$ 时,固相中钼转化

率从 0.5 h 的 5.5% 升至 1.5 h 的 16.5%,而液相中的钼基本保持不变,说明随反应进行,新生成的 MoO_4^{2-} 逐渐结晶析出,以 MoO_3 形式留在浸出渣中^[13]。综合考虑,选择在 $180\ \text{℃}$ 温度下进行后续试验。

2.1.4 搅拌速度对钼氧化行为的影响

增大搅拌速度有利于矿物颗粒在浸出体系中的悬浮及浸出产物的扩散。在温度 180 °C、矿石粒级 -47 μm、氧分压 1.7 MPa 条件下,搅拌速度对钼浸出率及转化率的影响试验结果如图 5 所示。可以看出:随搅拌速度增大,辉钼矿浸出率提高;浸出 1.5 h,钼浸出率达接近 10%;相同浸出

时间下,随搅拌速度增大,钼转化率提高。这是因为搅拌速度较小时,增大搅拌速度有利于产物扩散,使反应速度加快。随反应时间延长,反应逐渐趋于平衡,此时继续增大搅拌速度有越来越多 MoO_4^{2-} 结晶析出,并转变为 MoO_3 进入渣相。但考虑到搅拌速度过大时,能耗加大,生产成本增加,因此,确定适宜搅拌速度为 600 r/min。

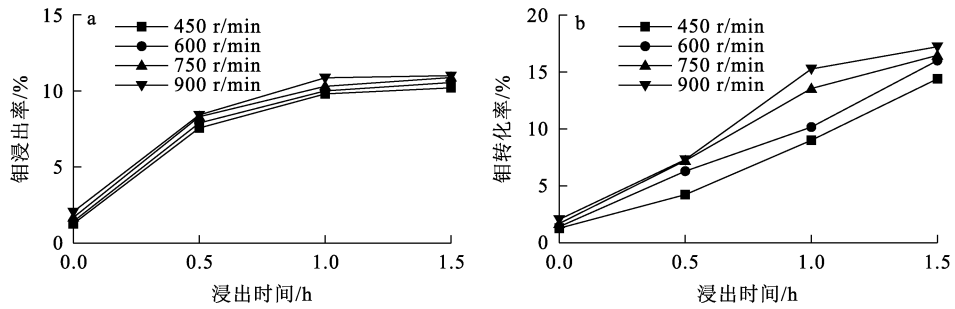


图 5 搅拌速度对钼浸出率(a)及转化率(b)的影响

根据单因素试验结果可知,矿石粒级的减小,氧分压、温度、搅拌速度的提高均会促进辉钼矿的氧化;氧化产物首先以 MoO_4^{2-} 形式进入液相,当 MoO_4^{2-} 浓度达到饱和后,辉钼矿继续被氧化的产物以 MoO_3 形式进入渣相。因此,可通过控制浸出条件来控制辉钼矿的氧化程度,进而调控钼氧化产物在固、液两相的分配。

MoO_3 形式存在,说明最终氧化产物为 MoO_3 。

2.2 浸出渣的表征

通过上述试验确定最优试验条件为:温度 180 °C、矿石粒级 -47 μm、氧分压 1.7 MPa、搅拌速度 600 r/min。该条件下所得浸出渣的物相和形貌分析结果分别如图 6、7 所示。

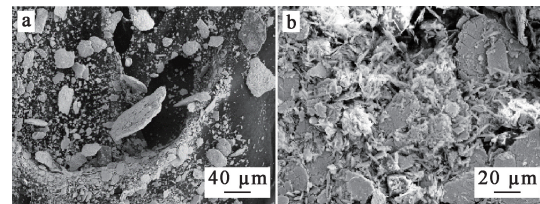


图 7 辉钼矿浸出前(a)、后(b)的 SEM 分析结果

由图 7 看出:辉钼矿为明显的层状结构,呈片状。浸出渣仍为层状结构,但边缘被破坏, MoO_3 以粒状存在于辉钼矿表面,说明辉钼矿结构较难破坏,生成物主要集中于矿物表面。

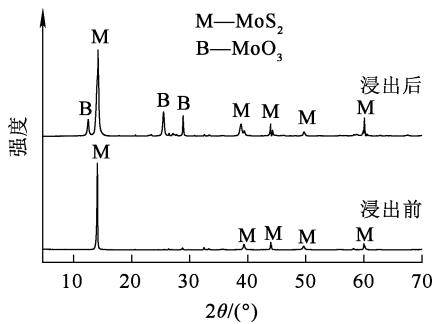


图 6 辉钼矿浸出前、后的 XRD 图谱

由图 6 看出:辉钼矿原矿物相主要为 MoS_2 ,纯度较高,而浸出渣中的钼主要以 MoS_2 和

2.3 辉钼矿的氧化动力学

辉钼矿的氧压水浸过程属于固-液反应,浸出动力学一般符合收缩核模型,反应过程如图 8 所示。可以看出:溶解氧与辉钼矿的反应界面不断向核心收缩,而反应产物 H_2MoO_4 、 MoO_3 附着在辉钼矿颗粒表面,该反应过程符合收缩核模型的假设,可用收缩核模型描述^[21]。

浸出过程中的氧化速率取决于氧化阻力最大的控制步骤,控制步骤主要分为内扩散控制、化学反应控制及混合控制,其反应动力学速率方程^[22-23]如下:

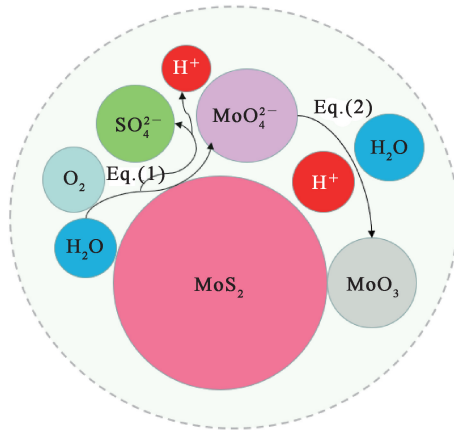


图 8 辉钼矿的氧化浸出过程示意

$$1 - \frac{2}{3}x - (1-x)^{\frac{2}{3}} = k_1 t; \quad (6)$$

$$1 - (1-x)^{\frac{1}{3}} = k_2 t; \quad (7)$$

$$\frac{1}{3} \ln(1-x) - 1 + (1-x)^{-\frac{1}{3}} = k_3 t. \quad (8)$$

式中: k_1 、 k_2 、 k_3 —内扩散控制、化学反应控制及混合控制模型的表观速率常数, min^{-1} ; x —钼氧化率, %; t —浸出时间, h。

最优试验条件下, 温度对钼氧化率的影响试验结果如图 9 所示, 用上述 3 种模型对试验数据进行回归和相关分析, 并采用式(6)~(8)计算不同温度下的拟合参数, 结果见表 2。

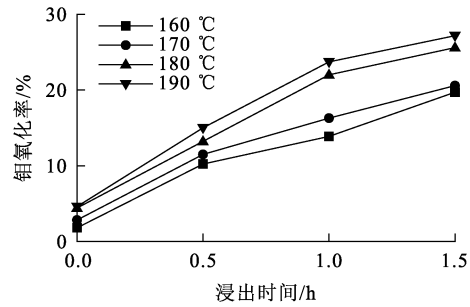


图 9 温度对钼氧化率的影响

表 2 不同温度下 3 种收缩核模型的拟合参数

温度/°C	化学反应控制模型		内扩散控制模型		混合控制模型	
	k_1	R^2	k_2	R^2	k_3	R^2
160	0.041 3	0.979 8	0.003 0	0.960 0	0.001 76	0.946 0
170	0.042 1	0.976 5	0.003 3	0.992 4	0.001 95	0.983 5
180	0.052 5	0.994 1	0.005 4	0.984 7	0.002 99	0.975 4
190	0.055 7	0.984 2	0.006 0	0.994 5	0.003 44	0.986 3

根据 Arrhenius 方程:

$$k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}}, \quad (9)$$

两端取对数可得

$$\ln k = -\frac{E_a}{RT} + \ln A. \quad (10)$$

式中: T —热力学温度, K; k —化学反应速率常数, min^{-1} ; A —频率因子, min^{-1} ; R —理想气体常数, 8.314 kJ/mol; E_a —表观活化能, kJ/mol。

结合表 2 所得 k_1 、 k_2 、 k_3 , 设 $y = \ln k$, 通过线性最小二乘法拟合 $\ln k-T^{-1}$ 的线性方程, 计算斜率并得 E_a , 结果如图 10 所示。由表 2、图 10 看出: 内扩散控制模型和化学反应控制模型相对较好, 推断辉钼矿氧压水浸过程可能受这 2 种模型控制; 但由于内扩散控制模型表观活化能一般应低于 13 kJ/mol, 化学反应控制模型表观活化能一般应高于 41.8 kJ/mol^[24], 试验所得内扩散控制

模型、化学反应控制模型表观活化能分别为 42.71、18.29 kJ/mol, 都不在参考范围内, 说明辉钼矿氧压水浸过程不适合用这 2 种模型描述; 而混合控制模型的相关系数比上述 2 种模型略低, 但均高于 0.94, 且表观活化能为 40.55 kJ/mol, 因此推断, 辉钼矿氧压水浸过程更适合用混合控制模型描述。

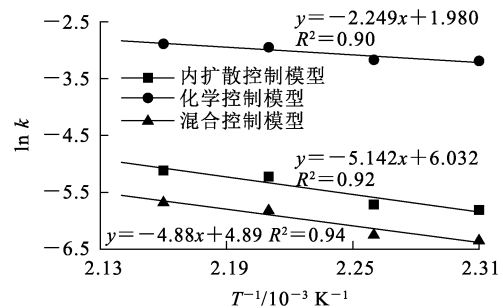


图 10 辉钼矿氧化浸出反应的 Arrhenius 曲线

3 结论

在氧压水浸条件下,辉钼矿中 MoS_2 先被氧气氧化为 MoO_4^{2-} 进入液相,随着氧化反应继续进行, MoO_4^{2-} 将转化为 MoO_3 进入渣相,并在 MoO_4^{2-} 浓度达到饱和时,钼浸出率基本保持不变,而转化率开始提升。钼氧化率是钼浸出率与钼转化率之和,随矿石粒级减小、氧分压增大、温度升高、搅拌速度提升而提高。辉钼矿的氧压水浸过程符合混合控制模型,反应活化能为 40.55 kJ/mol。

参考文献:

- [1] 李红. 解读钼金属深加工产品现状及具体技术应用[J]. 世界有色金属, 2019(8):163-164.
- [2] 雷锐. 钼金属深加工产品现状及技术应用分析[J]. 世界有色金属, 2018(19):288.
- [3] 牛浩. 钼金属深加工产业现状及发展建议[J]. 资源信息与工程, 2016, 31(5):95-96.
- [4] 高源, 于新刚. 辉钼矿深加工技术及产业分析[J]. 中国资源综合利用, 2014, 32(11):41-43.
- [5] YI G, MACHA E, VAN DYKE J, et al. Recent progress on research of molybdenite flotation: a review[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2021, 295. DOI: 10. 1016/j. cis. 2021. 102466.
- [6] REILLY I G, SCOTT D S. The leaching of a chalcopyrite concentrate in ammonia [J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1977, 55(5):527-533.
- [7] 李治明, 钟珊, 李育彪, 等. 亚氯酸钠氧化浸出黄铜矿研究[J]. 金属矿山, 2019(1):74-77.
- [8] 华晓鸣. 黄铜矿在氨性溶液中氧化浸出机理研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2019.
- [9] 胡均贤. 离子液体介质中氧化浸出黄铜矿的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- [10] 曾伟民. 黄铜矿生物浸出过程中钝化膜的形成机制及其消除方法探讨[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [11] GOK O, ANDERSON C G, CICEKLI G, et al. Leaching kinetics of copper from chalcopyrite concentrate in nitrous-sulfuric acid [J]. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2014, 50(1):399-413.
- [12] BABA A A, GHOSH M K, PRADHAN S R, et al. Characterization and kinetic study on ammonia leaching of complex copper ore[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(5):1587-1595.
- [13] KHOSHNEVISAN A, YOOZBASHIZADEH H, MOZAMMEL M, et al. Kinetics of pressure oxidative leaching of molybdenite concentrate by nitric acid [J]. *Hydrometallurgy*, 2012, 111: 52-57.
- [14] 程光荣, 马秀华, 王述吉, 等. 用压热浸出和溶剂萃取技术生产钼酸铵[J]. 湿法冶金, 1994, 13(3):27-32.
- [15] 贾丽娟. 辉钼矿超声电化学分解新工艺的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
- [16] GARLAPALLI R K, CHO E H, YANG R Y K. Leaching of chalcopyrite with sodium hypochlorite[J]. *Metallurgical and Materials Transactions; B*, 2010, 41(2):308-317.
- [17] 李超. 黄铜矿加压浸出行为研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
- [18] 付云枫. 氧压水浸法分解辉钼矿提取分离钼硫资源的应用基础研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院过程工程研究所), 2018.
- [19] 彭建蓉, 杨大锦, 陈加希, 等. 原生钼矿加压碱浸试验研究[J]. 稀有金属, 2007(增刊 1):110-113.
- [20] SUN H, LI G, YU J, et al. A novel simultaneous oxidizing-volatilizing process for efficient separation of pure MoO_3 from structure self-sustained molybdenite concentrate pellets[J]. *Powder Technology*, 2019, 345:338-345.
- [21] MESHARAM P, PANDEY B D, MANKHAND T R. Hydrometallurgical processing of spent lithium ion batteries (LIBs) in the presence of a reducing agent with emphasis on kinetics of leaching[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 281:418-427.
- [22] ZHANG X, CAO H, XIE Y, et al. A closed-loop process for recycling $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ from the cathode scraps of lithium-ion batteries: process optimization and kinetics analysis[J]. *Separation and Purification Technology*, 2015, 150:186-195.
- [23] 杨平, 唐施阳, 杨建英, 等. 镍钼矿氨性体系剪切强化浸出钼的宏观动力学研究[J]. 湿法冶金, 2023, 42(4): 372-379.
- [24] 马荣俊. 湿法冶金原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.

(下转第 66 页)

Synergistic Extraction and Separation of Trace Gold in Chloride System

ZHU Shan¹, LU Yangxiao¹, HU Jiugang², ZHANG Chenhu¹

(1. School of Chemistry and Materials Engineering, Liupanshui Normal University,
Liupanshui 553000, China;

2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The separation and enrichment of precious metal gold in chloride system with synergistic extraction system composed of DIBK(HA) and TBP(B) was studied. The effects of extraction system and composition, extraction time, extraction temperature, aqueous chloride ion concentration, and extraction ratio(V_O/V_A) on the separation performance of gold extraction was investigated, and the extraction mechanism was preliminarily explored by slope method. The results indicate that under the conditions of synergistic extraction system of TBP-DIBK, total extractant concentration of 1.5 mol/L, $n(\text{TBP}) : n(\text{DIBK}) = 1 : 4$, extraction time of 20 min, extraction temperature of 20 °C, $V_O/V_A = 2/1$, aqueous chloride ion concentration of 6 mol/L, the extraction rate of gold can reach 98.82%. The maximum gold/copper extraction separation coefficient is 1 189.05. Gradient method suggests that the composition of the extract may be $[\text{AuCl}_6 \cdot 3\text{A} \cdot \text{B}]$. The extraction chemical reaction formula can be rewritten as: $\text{Au}^{3+} + 6\text{Cl}^- + 3\text{HA} + \text{B} \longrightarrow [\text{AuCl}_6 \cdot 3\text{A} \cdot \text{B}] + 3\text{H}^+$.

Key words: acidic solution; diisobutyl ketone; tributyl phosphate; synergistic extraction;
trace precious metals; gold

~~~~~  
(上接第 52 页)

## Rule and Kinetics of Oxygen Pressure Water Leaching Oxidation of Molybdenite

JIANG Lishuai, LIN Yuemeng, HAN Baisui, LI Xiaoyu, XU Wentao, XIE Haoyu

(School of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning,  
Anshan 101145, China)

**Abstract:** The leaching of molybdenum from molybdenite by oxygen pressure water leaching method was studied. The effects of ore size, oxygen partial pressure, temperature and stirring speed on oxidation of molybdenite were investigated, and the distribution of oxidation products in solid and liquid phases was discussed. The results show that the oxidation of molybdenite can be promoted by the decrease of ore particle size and the increase of oxygen partial pressure, temperature and stirring speed. The oxidation products first enter the liquid phase. When the liquid phase is saturated with  $\text{MoO}_4^{2-}$ , the oxidation products will enter the slag phase in the form of  $\text{MoO}_3$ . The oxidation of molybdenum during oxygen pressure water leaching of molybdenite can be described by the unreacted nuclear shrinkage model. The reaction rate is controlled by the mixed control model, and the apparent activation energy is 40.55 kJ/mol.

**Key words:** molybdenite; oxygen pressure; molybdenum; oxidation; water leaching; kinetics; rule