丁基黄药在金表面氧化还原的电化学动力学研究*

程琍琍[1,2],何王旗[2],王任杰[3],文儒景[3],钟健[3]

(1.江西理工大学 宜春江理锂电新能源产业研究院, 江西 宜春市 336099;
2.江西理工大学 冶金工程学院, 江西 赣州市 341000;
3.宜春市吉马实业有限公司, 江西 宜春市 336099)

摘要:为阐明碱性条件下丁基黄药(KBX)与金矿物相互作用的电化学机制,为含金硫化矿碱性浮选工艺优化提供理论支撑,采用单向伏安法、Tafel极化曲线法和恒电流阶跃技术,系统研究pH=9.18条件下金电极在丁基黄药溶液中的界面电化学行为。结果表明:KBX在金电极上的氧化反应呈现电化学-传质混合控制特征,氧化产物为二聚物X_2,正向反应速率常数为1.524 cm/s;金电极与KBX系统的相互作用随捕收剂浓度的升高而增强,丁基黄药在金表面的化学吸附是反应速率的关键控制步骤;磨矿细度、搅拌强度等工艺参数显著影响捕收剂与矿物的作用效率;恒电流阶跃技术测得金电极表面还原的交换电流密度为0.075 A/m^2,与Tafel法腐蚀电流密度高度吻合,验证了结果的可靠性。

关键词:自然金;丁基黄药;氧化还原;电化学;动力学

中图分类号:TD923 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)06-0272-07

Electrochemical Kinetics Study on the Oxidation-Reduction of Butyl Xanthate on Gold Surface

Cheng Lili[1,2], *He Wangqi*[2], *Wang Renjie*[3], *Wen Rujing*[3], *Zhong Jian*[3]

(1.Yichun Lithium New Energy Industry Research Institute,
Jiangxi University of Science and Technology, Yichun, Jiangxi 336099, China;
2.School of Metallurgical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China;
3.Yichun Jima Industrial Co., Ltd., Yichun, Jiangxi 336099, China)

Abstract: To elucidate the electrochemical mechanism of the interaction between butyl xanthate(KBX) and gold minerals under alkaline conditions, and to provide theoretical support for the optimization of alkaline flotation processes for gold-bearing sulfide ores, unidirectional voltammetry, Tafel polarization curve method, and galvanostatic step technique were employed to systematically investigate the interfacial electrochemical behavior of a gold electrode in butyl xanthate solution at pH=9.18.The results indicate that the oxidation reaction of KBX on the gold electrode exhibits mixed electrochemical-mass transfer control characteristics. The oxidation product is the dimer X_2, and the forward reaction rate constant is 1.524 cm/s. The interaction between the gold electrode and the KBX system intensifies with increasing collector concentration. The chemisorption of butyl xanthate on the gold surface constitutes the critical rate-controlling step of the reaction. Process parameters such as grinding fineness and stirring intensity significantly affect the interaction efficiency between the collector and the mineral. The exchange current density for the reduction on the gold electrode surface, measured by the galvanostatic step technique, is 0.075 A/m^2, which is in high agreement with the corrosion current density obtained from the Tafel method, thereby verifying the reliability of the results.

Key words: Natural gold, Butyl xanthate, Oxidation-reduction, Electrochemistry, Kinetics

0 引言

黄金在世界经济、金融中的地位举足轻重。2024年受地缘政治与汇率波动影响,全球各央行持续增持黄金,年度净购规模再创历史新高[1]。黄金除作为金融储备外,广泛应用于半导体、航天材料、

* **收稿日期**:2025-06-28
基金项目:江西理工大学校企合作技术服务资助项目(JLYC-KJ-2023-04);江西理工大学大学生创新创业训练计划资助项目(DC202410407126)
作者简介:程琍琍(1983—),女,江西抚州人,博士,讲师,主要从事硫化矿电化学浮选等方面的研究。E-mail:chenglili2000@163.com

生物医药等高端领域,市场需求攀升。黄金资源作为一种经济战略资源,其产能与储备直接决定国家经济实力与国际金融话语权。

我国黄金资源开发进入提质转型期,中国黄金协会发布的数据(2024)表明,国内易选金矿占比不超过40%,剩余资源以低品位难处理的金矿石为主,普遍具有难选难冶、品位偏低的特征[2]。

(1) 金赋存状态复杂:矿石平均品位小于3 g/t,金多以微细粒(<10 μm)及包体形式存在。

(2) 有害杂质干扰:砷、碳和铜等杂质显著抑制金的浸出效率。

(3) 尾矿回收难度大:传统选矿工艺导致尾矿中的金赋存状态重构,常规工艺的金回收率仅约50%。

上述问题是我国黄金选冶行业需要突破的核心技术瓶颈;新版《黄金工业污染防治技术政策》严格限制氰化物的使用[3],迫使黄金选冶行业研发环保型提金技术。因此,行业亟需推进选冶理论与工艺创新,积极研究并加快制定适合我国矿产资源特点的高效、绿色资源利用方法。

浮选是金-硫化矿共生体系的经典分选技术,在黄金提取领域应用广泛;统计显示,全球约75%以上的金矿选厂以浮选工艺为主,黄药类捕收剂是应用最为广泛的选金药剂[4-5]。现有研究多聚焦于黄药类捕收剂的分子结构-浮选性能构效关系及工业应用,但关于其电化学作用机制的系统研究仍较为薄弱。混合电位模型是硫化矿浮选电化学的核心理论框架,该模型阐述了矿浆电位对硫化矿和贵金属浮选的影响,并从热力学角度解释了硫化矿表面捕收剂的吸附形式[6]。Zhang Yan等[7]的研究表明,在-0.2~0.4 V(vs.SHE)电位区间内,金表面可形成稳定的双黄药吸附膜。但现有研究多聚焦于热力学平衡态分析,针对自然金表面的电化学动力学影响因素,包括电荷转移速率、界面双电层结构变化、吸附中间态等关键科学问题仍缺乏系统的理论支撑。因此,本研究以丁基黄药(KBX)与自然金为研究对象,通过单向伏安、Tafel参数、恒电流阶跃测定,系统研究丁基黄药在金表面吸附的电化学动力学过程及其作用机理,重点阐述丁基黄药在金表面的吸附动力学规律、速率控制步骤及其与浮选行为的关联机制,为研制新型高效金矿浮选药剂、优化工艺参数提供理论依据,助力难处理金矿资源的高效回收。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

采用三电极体系开展电化学测试,工作电极为高纯度金电极(Φ12 mm×2 mm,纯度99.99%),参比电极为Ag/AgCl电极,对电极为石墨棒。试验前采用分级打磨工艺对金电极进行表面处理:首先使用1 000目金相砂纸粗磨,再使用2 000目金相砂纸精抛,制备具有高活性的新鲜电极表面[8-9]。

试验试剂为丁基黄药(KBX,纯度99%)和Na_2SO_4支持电解质(0.10 mol/L),溶液采用蒸馏水配制,添加硼砂配制成pH=9.18的缓冲溶液。测试前向电解液中通入高纯氮气15 min以上,以去除溶解氧。

1.2 电化学测试

本试验采用美国的Princeton PARSTAT 2263型电化学分析系统进行数据采集,测试流程由配套POWERSUITE测试平台实现程序化控制。所有测得的电位均以标准氢电极(Standard Hydrogen Electrode, SHE)为基准进行标准化处理。单向伏安测试采用20 mV/s的扫描速率,Tafel曲线和恒电流阶跃试验以5 mV/s的扫描速率进行。

2 结果与讨论

2.1 丁基黄药在金电极界面氧化过程中的电子转移数及反应速率常数

以KBX氧化反应为研究对象,采用旋转圆盘电极测试,在pH=9.18、KBX浓度为1.00×10^{-4} mol/L的条件下进行试验,测得不同旋转速率下金电极表面KBX氧化的单向伏安曲线,反应呈现电化学-传质混合控制特征(见图1)。由图1可知,KBX氧化反应具有3个动力学特征:各个转速下均出现单一氧化峰,反应起始电位约0 mV,证实KBX在电极表面发生电化学氧化反应;电位在0~100 mV区间内,氧化电流几乎不受转速的影响,符合Butler-Volmer方程中电极表面电子转移速率所控制的过程;电位大于100 mV时,随着转速的增大,电流密度迅速增大,反应转为扩散传质控制,表明电极表面积的扩大影响了该反应产物的有效逸出,达到了加速传质控制阶段的目的。综上,KBX在金电极上的氧化反应受电化学步骤和传质步骤协同调控。

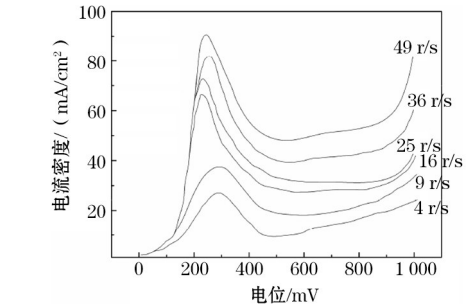


图 1 不同旋转速率下金电极表面 KBX 氧化的单向伏安曲线

Fig.1 Unidirectional voltammetric curves of KBX oxidation on gold electrode surface at different rotation rates

根据 Levich 理论,旋转圆盘电极极限扩散电流密度与转速的定量关系可用式(1)表示[10],式(2)为式(1)的倒数形式。

$$I=\frac{nFcD^{2/3}f^{1/2}}{1.61\mu^{1/6}} \tag{1}$$

$$\frac{1}{I}=\frac{1}{nFck}+\frac{1.61\mu^{1/6}}{nFcD^{2/3}f^{1/2}} \tag{2}$$

式中:I 为极限扩散电流密度,mA/cm²;n 为电极反应得失的电子数;k 为正反应速率常数,cm/s;c 为反应物的起始浓度,mol/L;μ 为溶液动力黏度,水溶液通常取 10^{-2} cm²/s;f 为转速;D 为离子扩散系数,cm²/s;F 为法拉第常数。

由式(1)可知,电流密度与 $f^{1/2}$ 呈线性关系($R^2>0.99$),表明高过电位下反应为扩散传质控制。动力学控制机制转变表明,KBX 氧化过程中既有电化学,又有扩散的电化学过程存在,其机理为:随着过电位的增大,界面反应速率增加,界面反应被提高到支配作用,当超过临界电位后,控制机制将发生显著转变,体相中 KBX 向电极表面的扩散成为控制主导区。综上,KBX 的氧化动力学特性直接决定其电化学氧化效率及产物的选择性。工业生产中可协同调控黄药类捕收剂的电极电位和搅拌强度,以达到改善和提高 KBX 电化学氧化效率的目的。

各旋转速率下伏安曲线均呈现单一氧化峰,100 mV 附近发生快速氧化并形成极限扩散电流平台。热力学计算表明,该氧化峰起始氧化电位与丁基黄药氧化成二聚物的平衡电位高度吻合[11]。据此可从热力学判定,丁基黄药在金电极表面的氧化产物为丁基黄原酸盐的二聚物,反应如式(3)所示。

$$\begin{cases}2X^- \rightarrow X_2+2e\\ E=-0.128-0.059\lg[X^-]\end{cases} \tag{3}$$

式中:X^- 为黄原酸根离子,带负电荷;X_2 为黄原酸根的二聚物;e 为电子,表示反应中电子的转移;E 为电极电位;$[X^-]$ 代表黄原酸根离子的浓度,mol/L。

将图 1 所得极限电流密度的倒数 I^{-1} 与转速的负二分之一次方 $f^{-1/2}$ 进行拟合,拟合曲线如图 2 所示。

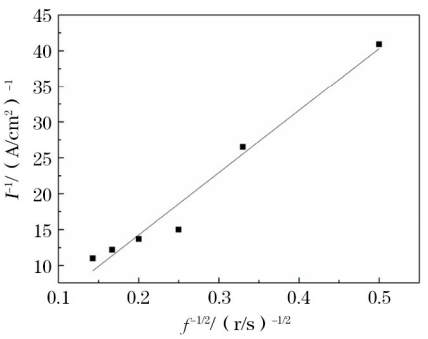


图 2 金电极与 KBX 作用 I^{-1} 与 $f^{-1/2}$ 的拟合曲线

Fig.2 Fitting curve of I^{-1} and $f^{-1/2}$ for the interaction between gold electrode and KBX

由图 2 可知,I^{-1} 与 $f^{-1/2}$ 呈线性关系且纵坐标的截距非零,表明金电极表面 KBX 氧化反应不可逆[10],通过线性拟合分析可知直线斜率为 86.89。由式(2)可知,斜率表达式为 $1.61\mu^{1/6}/(nFcD^{2/3})$,黄药在中碱性条件下的扩散系数 D 为 1.09×10^{-6} cm²/s[9],计算得 $n=1.66$;热力学理论表明,KBX 在金表面的反应电子数应为整数[12]。故判定 KBX 在金表面的氧化未遵循双电子转移机制,取 $n=2$。实测值与理论值的偏差源于电位区间内存在的副反应,如氢氧根离子的竞争吸附阻碍 KBX 的氧化,影响电子转移效率,最终导致实测电子数偏离理论值。同时,溶液 pH、电极表面状态及电位扫描速率等因素也会影响反应动力学。综上,KBX 在金电极表面的氧化遵循双电子转移机制,但由于副反应的干扰,导致试验测得的电子数略低于理论值。

线性拟合得到的截距为 3.14,结合 n 值可得到 KBX 氧化正向反应速率常数为 1.524 cm/s,表明该反应电荷传递动力学速率较快。该动力学参数可为界面反应机理研究提供支撑,有助于阐明浮选时丁基黄药在金表面的氧化机理,推动理论计算和试验表征相结合,改善浮选条件,为实际浮选工艺优化提供理论指导。

2.2 丁基黄药在金电极表面的腐蚀过程动力学

循环伏安数据结果证实,丁基黄药在金电极氧化涉及双电子转移过程,存在两种反应机制[13]。

第一种反应路径:

$$\begin{cases} Au+X^- \rightarrow Au\cdots X_{ads}+e \\ Au\cdots X_{ads}+Au\cdots X_{ads} \rightarrow Au\cdots X_2 \end{cases} \quad (4)$$

第二种反应路径:

$$\begin{cases} Au+X^- \rightarrow Au\cdots X_{ads}+e \\ Au\cdots X_{ads}+X^- \rightarrow Au\cdots X_2+e \end{cases} \quad (5)$$

式中:Au 为金电极;$Au\cdots X_{ads}$为黄原酸根离子(X^-)吸附在金表面形成的中间态,其中"…"表示弱相互作用;$Au\cdots X_2$ 为两个吸附的黄原酸根离子通过相互作用形成的二聚物。

金电极在 pH=9.18 时,不同浓度的 KBX 溶液中测得的 Tafel 曲线如图 3 所示。对图 3 阳极极化曲线的 Tafel 区进行线性拟合,得出 Tafel 斜率(见表 1)。R_w 和 $R_{p'}$ 分别表示水体系和捕收剂体系中矿物的极化阻抗,腐蚀电位 E_{corr}、腐蚀电流密度 I_{corr}、Tafel 斜率和极化阻抗 R_p 直接由 PowerSuit 软件拟合给出,相关数据见表 1。

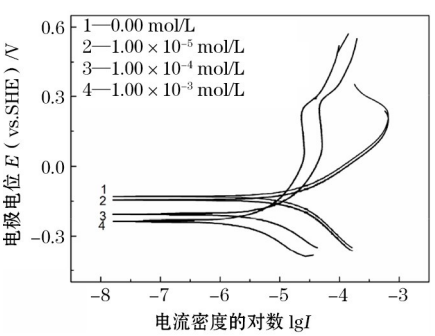


图 3 金电极在不同浓度的 KBX 溶液中的 Tafel 曲线

Fig.3 Tafel curves of gold electrode in KBX solutions with different concentrations

表 1 不同浓度的 KBX 溶液中金电极的 Tafel 参数

Table 1 Tafel parameters of gold electrode in KBX solutions with different concentrations

浓度 c/(mol/L)	Tafel 斜率	极化阻抗 R_p/kΩ	腐蚀电位 E_{corr}/mV	腐蚀电流密度 I_{corr}/(A/m²)
0.00	63.26	8.508	−134.5	0.316
1.00×10^{-5}	61.45	10.77	−183.4	0.252
1.00×10^{-4}	120.07	12.98	−208.8	0.079
1.00×10^{-3}	116.78	13.52	−243.8	0.032

由图 3、表 1 可知,丁基黄药在浓度为 1.00×10^{-5} mol/L 时,Tafel 曲线无显著变化,表明该浓度下丁基黄药对金的捕收能力较弱[14]。但浓度达到 1.00×10^{-4} mol/L 以上时,E_{corr} 和 I_{corr} 随之降低,阳极区 200 mV 处出现特征氧化峰,该氧化峰与图 1 单向伏安曲线的氧化峰结果高度对应,证实此时金电极表面产生出相应的反应产物。同时,极化阻抗增大,其原因是该浓度的丁基黄药在金电极表面形成疏水性的亚铜黄原酸二聚体(X_2)覆盖层对金电极起到钝化作用,从而使金电极表面的阻抗增大[15],表明金电极和 KBX 之间的相互作用随浓度升高而增大。当 KBX 浓度为 1.00×10^{-4} mol/L 时,金电极表面的腐蚀电流密度为 0.079 A/m²,此时的腐蚀电流密度接近于交换电流密度值,金电极表面电化学反应达到了平衡状态[16]。该临界浓度可为浮选工艺提供指导,兼顾了捕收效果与药剂经济性。综上,金电极与 KBX 呈现显著的浓度依赖性。随着 KBX 浓度升高,其在金表面的吸附量增大,浮选体系中疏水产物生成量增加,进而增强矿物表面疏水性并提升可浮性。实际生产中需精准控制 KBX 用量,在保证金浮选回收效果的同时,实现金回收率提升与药剂成本降低的协同优化。

从图 1 单向伏安测试结果可知,电位处于 0~100 mV 时,反应受电化学步骤控制。电流密度随电位变化呈现明显的指数关系,并未出现典型的扩散平台区。当捕收剂浓度为 1.00×10^{-4} mol/L 时,试验测得 Tafel 斜率为 120.07,根据相关的动力学计算结果[9],当公式(4)作为速率控制步骤时,其 Tafel 斜率为 $2.303RT/(nF)$,计算结果为 120,二者数据高度吻合,证实丁基黄药在金表面的氧化遵循第一种反应路径,且化学吸附过程构成了公式(4)所示的速度控制步骤。

动力学分析表明,丁基黄药在金属电极表面的化学吸附过程为反应速率控制步骤,其吸附效率主要受三类关键参数调控:

(1) 溶液中丁基黄药阴离子与电极表面的碰撞频率决定吸附概率,且该参数与溶液浓度、搅拌强度呈正相关;

(2) 体系温度通过 Arrhenius 方程显著调控反应速率常数,温度每升高 10℃,反应速率可提高 2~3 倍;

(3) 电极表面活性中心浓度决定最大吸附量,高表面能的表面缺陷位、台阶边缘等为主要吸附活性位。

上述关键参数均与磨矿强度、搅拌条件密切相关,磨矿细度直接影响矿物表面活性位点的暴露程度,较细的磨矿粒度能产生更多新鲜表面和缺陷位;

而搅拌强度则通过改变固液传质效率和颗粒碰撞能量来影响吸附动力学。由此可见,调控磨矿细度和搅拌强度可实现捕收剂与矿物表面的相互作用效率精准优化。

2.3 金电极上丁基黄药生成产物的稳定特性

单向伏安测试结果(见图 1)表明,恒电流极化条件下,若仅考虑扩散引起的浓度变化,在控制电迁移和对流干扰的试验条件下,KBX 在 Au(111)晶面电催化氧化生成 X_2 的过程中表现出显著的不可逆性,其反应物消耗动力学可由以下定量模型[17]描述:

$$\eta=2.303RT\lg(i_c/i_0)/\alpha nF-2.303RT\lg[1-(t/\tau)1/2]/\alpha nF \quad (6)$$

式中:R 为气体常数;η 为产物还原时反应过电位;T 为反应时的温度;i_c为阶跃电流密度;i_0为交换电流密度;τ 为反应的过渡时间;t 为反应时间;α 为反应的传递系数。

在 pH=9.18、$[X^-]=1.00\times10^{-4}$ mol/L 的电解质溶液中,于 0.217 V 恒电位下在金电极表面生成 X_2,再切换至 $i=5$ A/m^2 恒电流还原,测得还原电位-时间曲线,如图 4 所示。试验采用先恒电位氧化,再恒电流还原的阶跃法。

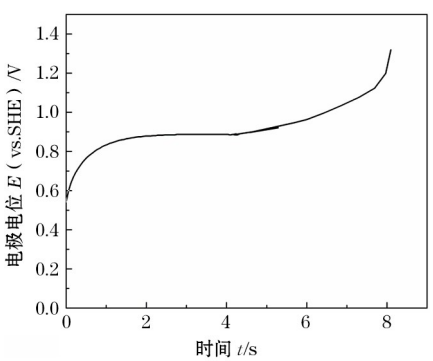


图 4 金电极恒电流阶跃电位与时间的关系

Fig.4 Relationship between potential and time for gold electrode under galvanostatic step polarization

由图 4 可知,反应过渡时间 $t\approx8$ s。结合图 2 与单向伏安分析式(3)计算可得,当 pH=9.18、$[X^-]=1.00\times10^{-4}$ mol/L 时,电解质溶液中生成 X_2 反应的热力学平衡电位 $\varphi=108.8$ mV,0~8 s 间任一时刻下的电位值为 φ_t,可求得反应的过电位 η_c;将图 4 曲线转换为 $\eta_c\sim\lg[1-(t/\tau)^{0.5}]$的关系曲线,结果如图 5 所示,拟合后二者呈现良好的线性关系。

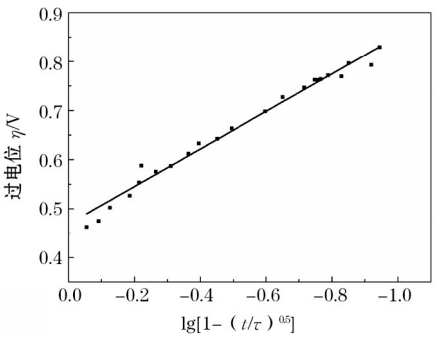


图 5 金电极恒电流阶跃时 $\eta_c\sim\lg[1-(t/\tau)^{0.5}]$关系曲线

Fig.5 The η_c-$\lg[1-(t/\tau)^{0.5}]$ relationship curve for gold electrode during galvanostatic step polarization

由图 5 线性拟合结果并结合式(6),可得 X_2 还原反应动力学方程为:

$$\eta=0.468\ 74-0.382\ 52\ \lg[1-(t/\tau)^{0.5}] \quad (7)$$

代入式(6)和式(7)中的已知参数 R、T、F、i_c、t 等,计算可得金电极表面 X_2 的交换电流密度 $i_0=0.075$ A/m^2,该结果与 Tafel 法测得的腐蚀电流密度高度吻合。通过构建该电化学动力学模型,量化了 i_0和 α 等参数,阐明了碱性介质中 X_2 的吸附稳定性机制,可定量描述 X_2 在金电极界面沉积过程中过电位 $\eta(t)$的时变特性,所得动力学参数可精确测定 $X^-\rightarrow X_2$ 氧化反应的转化速率[18]。该方程及相关参数可为黄药体系中硫化矿物浮选分离提供电化学理论支撑[19]。

当反应时间为 0 s 时,X_2 在金电极表面还原时的过电位为 492 mV,而电化学计算的常见势垒区间为 300~500 mV[20],该体系在初始阶段表现出较高的过电势特征,其交换电流密度仅为 0.075 A/m^2,证实了在中碱性条件下,反应产物 X_2 在金基底表面具有显著的吸附稳定性,导致电极/溶液界面的电荷转移过程受到显著抑制[21]。

上述电化学结果表明,在 pH=9.18 条件下,KBX 的电化学行为与浮选体系高度吻合[22-23]。由此可知,当 pH 达到 9.18 时,KBX 对金表现出优异的捕收性能,其内在机制也可由电化学规律解释:X_2 在金表面形成稳定的吸附层与长效的疏水层,从而保证了气泡-矿物颗粒的黏附作用。

3 结论

(1) 伏安法测试结果表明,金电极与 KBX 的电化学反应机理会随着电位的变化出现改变。金电极

与KBX反应开始时的电位约为0 mV,在0～100 mV区间内为电化学控制;超过100 mV后变为扩散传质控制。KBX在金表面的氧化过程是双电子过程,氧化产物为二聚物X_2,正向反应速率常数为1.524 cm/s。

(2) Tafel测试表明,金电极与KBX系统的相互作用随捕收剂浓度的升高而增强。黄药类捕收剂在金电极表面的吸附过程是整个反应过程中的关键控制步骤,其反应动力学主要受分子碰撞频率、体系温度条件及表面活性位点密度的制约。磨矿细度与搅拌强度可直接影响上述三项关键参数,是间接调控捕收剂与金电极作用效率的重要手段。

(3) 在pH=9.18恒电流试验中,金电极表面X_2吸附的过电位η_c符合方程:$\eta=0.468\ 74-0.382\ 52\lg[1-(t/\tau)^{0.5}]$,交换电流密度$i_0=0.075\ A/m^2$,与Tafel所测腐蚀电流密度高度吻合。当反应时间为0 s时,X_2在金电极表面还原时的过电位为492 mV,该初始过电位值相对较大,而交换电流密度值相对较小,表明中碱条件下的产物X_2在金表面吸附牢固,较难还原,与实际浮选规律一致。

参考文献(References):

[1] 韦后明.贵州某复杂难选金矿选矿实验研究[J].矿产综合利用,2025,46(2):148-152.
Wei Houming. Experimental study on mineral processing of a complex refractory gold mine in Guizhou[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2025,46(2):148-152.

[2] 李卫,焦芬,王旭,等.赞比亚某金矿选矿工艺试验研究[J].贵金属,2019,40(1):30-36.
Li Wei, Jiao Fen, Wang Xu, et al. Experimental study on mineral processing technology for a gold ore from Zambia [J]. Precious Metals,2019,40(1):30-36.

[3] 王清萍,孙国平.难处理金矿的高效选矿技术探究[J].冶金与材料,2025,45(2):79-81.
Wang Qingping, Sun Guoping. Investigation of high-efficiency mineral processing techniques for refractory gold deposits[J]. Metallurgical and Materials,2025,45(2):79-81.

[4] 杨政国.低品位金矿工艺矿物学特征和金回收[J].矿冶,2024,33(2):225-233.
Yang Zhengguo. Process mineralogy characteristics and gold recovery of low grade gold ore[J]. Mining and Metallurgy, 2024,33(2):225-233.

[5] 赵海平,刘志伟,胡学平,等.黄铁矿和白云石浮选分离药剂研究进展[J].有色金属(选矿部分),2024(7):145-156.
Zhao Haiping, Liu Zhiwei, Hu Xueping, et al. Research progress in the flotation reagents for separation of pyrite and dolomite [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2024(7):145-156.

[6] Mikali Mohamed, Barbouchi Ahmed, Idouhli Rhizlane, et al. Electrochemical behavior of silver during cyanidation in the presence of sulfide minerals[J]. Chemical Papers,2023, 77(4):2103-2113.

[7] Zhang Yan, Wang Yue, Dong Yan, et al. Effect of acridine orange on improving the electrochemical performance of tyrosinase adsorbed sulfide minerals based catechol biosensor[J]. Chemistry Select,2023,8(2):e202202444.

[8] Le Guan, Li Wenjuan, Song Kun, et al. Electrochemical dissolution behavior of gold and its main coexistent sulfide minerals in acid thiocyanate solutions[J]. Rare Metals, 2022,41(1):254-261.

[9] 刘三军,覃文庆,孙伟,等.黄铁矿表面黄药氧化还原反应的电极过程动力学[J].中国有色金属学报,2013,23(4):1114-1118.
Liu Sanjun, Qin Wenqing, Sun Wei, et al. Electrode redox reaction kinetics of xanthate on pyrite surface[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(4): 1114-1118.

[10] Nicol Michael, Staunton William, Mcgrath Teresa. The role of oxidants in the intensive cyanidation of gold. Ⅱ. Sulfide mineral oxidation[J]. Hydrometallurgy,2024,228:106364.

[11] 罗仙平,周贺鹏,程琍琍.难选铜镍硫化矿清洁选矿工艺及应用[M].北京:冶金工业出版社,2018.
Luo Xianping, Zhou Hepeng, Cheng Lili. Clean mineral processing technology and application for refractory copper-nickel sulfide ores [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2018.

[12] Li Weizhong, Qin Wenqing, Sun Wei, et al. Electrodeposition of dixanthogen (TETD) on pyrite surface[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2007,17:154-158.

[13] 覃文庆,姚国成,顾帼华,等.硫化矿物的浮选电化学与浮选行为[J].中国有色金属学报,2011,21(10):2669-2677.
Qin Wenqing, Yao Guocheng, Gu Guohua, et al. Electrochemistry of sulfide minerals and its floatability[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2011,21(10): 2669-2677.

[14] 程琍琍,李啊林,何勇,等.方铅矿与丁铵黑药作用的电化学反应机理及其浮选行为[J].中国矿业,2013,22(12):113-116.
Cheng Lili, Li Alin, He Yong, et al. The electrochemical mechanism and flotation behavior of galena in Ammonium butyldithiophosphate solution[J]. China Mining Magazine, 2013,22(12):113-116.

[15] 王国彬,蓝卓越,武立伟,等.方铅矿浮选及磨矿过程中电化学特征研究进展[J].中国有色金属学报,2022,32(5):1403-1417.
Wang Guobin, Lan Zhuoyue, Wu Liwei, et al. Research status on electrochemistry characteristic of galena in process of flotation and grinding:a review[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2022,32(5):1403-1417.

[16] Qin Wenqing, Li Quan, Qiu Guanzhou, et al. Electrochemical oxidation of pyrrhotute in aqueous solution [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2005,15(4):922-925.

[17] 于美,刘建华,李松梅,等.电化学测量技术与方法[M].北京:化学工业出版社,2020.
Yu Mei, Liu Jianhua, Li Songmei, et al. Electrochemical measurement techniques and methods[M]. Beijing:Chemical Industry Press,2020.

[18] 罗仙平,程琍琍.难选铜铅锌硫化矿电位调控优先浮选工艺[M].北京:冶金工业出版社,2017.
Luo Xianping, Cheng Lili. Priority flotation process for refractory copper-lead-zinc sulfide ores by potential control [M]. Beijing:Metallurgical Industry Press,2017.

[19] 黄晟.典型铜硫单矿物电化学浮选行为及实际矿石浮选研究[J].矿山机械,2023,51(12):39-45.
Huang Sheng. Study on electrochemical flotation behavior of typical copper-sulfur single minetals and actual ore flotation [J]. Mining & Processing Equipment,2023,51(12):39-45.

[20] 胡岳华,孙伟,王淀佐.硫化矿浮选电化学[M].北京:清华大学出版社,2009.
Hu Yuehua, Sun Wei, Wang Dianzuo. Flotation electrochemistry of sulfide minerals[M]. Beijing:Tsinghua University Press,2009.

[21] 程琍琍,李啊林,刘焕德,等.黄铜矿在乙氧羰基硫脲体系中的电极过程动力学[J].有色金属工程,2014,4(5):44-47.
Cheng Lili, Li Alin, Liu Huande, et al. Electrode process kinetics of chalcopyrite in the diethoxycarbonyl thiourea system [J].Nonferrous Metals Engineering,2014,4(5):44-47.

[22] 魏转花,岳涛,纪婉颖.蒙古某低品位铜金矿选矿工艺优化及尾矿综合回收铁试验研究[J].有色金属工程,2024,14(8):104-110.
Wei Zhuanhua, Yue Tao, Ji Wanying. Experimental study on beneficiation process optimization and comprehensive recovery of iron from tailings of a low grade copper-gold ore in Mongolia[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2024, 14 (8):104-110.

[23] 李健民,刘殿文,宋凯伟.某含碳含砷难处理金矿石选矿工艺研究[J].稀有金属,2016(10):1053-1059.
Li Jianmin, Liu Dianwen, Song Kaiwei. Mineral processing technology of a refractory gold ore bearing arsenic and organic carbon[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2016 (10):1053-1059.