巯基类捕收剂在黄铜矿与黄铁矿浮选分离中的作用机理*

黄玉娇[1,2],顾恒光[1,2],张汉泉[1,2]

(1.武汉工程大学 资源与安全工程学院, 湖北 武汉 430074;
2.磷矿及其共伴生资源绿色高效开发利用全国重点实验室, 湖北 武汉 430073)

摘要:针对黄铜矿与黄铁矿浮选分离效率低的问题,提出在浮选中使用新型巯基类捕收剂930药剂,通过傅里叶变换红外光谱分析揭示其选择性吸附机制,并结合矿物浮选试验验证其效能。试验结果表明,使用在巯基类捕收剂的基础上进行官能团结构重组得到的新型环保型高效捕收剂930药剂,对比传统捕收剂乙基黄药、丁基黄药,可使铜精矿回收率分别提高12.27%、4.77%,硫精矿回收率分别提高13.84%、1.99%,同时可使硫精矿的硫品位分别提高了3.37%、3.00%。新型930捕收剂的使用,优化了铜硫分离选择性,为硫化矿浮选分离提供了兼具高选择性与环境友好特性的新型药剂方案,对降低冶炼成本及减少碱性废水排放具有重要意义。

关键词:黄铜矿;黄铁矿;浮选;巯基类捕收剂

中图分类号:TD923.13;TD952 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)03-0273-08

Action Mechanism of Thiol Collectors in the Flotation Separation of Chalcopyrite and Pyrite

HUANG Yujiao[1,2], *GU Hengguang*[1,2], *ZHANG Hanquan*[1,2]

(1.School of Resources & Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;
2.State Key Laboratory of Green and Efficient Development of Phosphorus Rock and Its Associated Resources, Wuhan, Hubei 430073, China)

Abstract: To address the low flotation separation efficiency of chalcopyrite and pyrite, a novel thiol collector (930 agent) was adopted in flotation tests. Its selective adsorption mechanism was revealed by Fourier transform infrared spectroscopy analysis, and its effectiveness was verified through mineral flotation tests. The test results show that the novel environment-friendly and high-efficiency collector 930 agent, obtained by functional group structure reconstruction based on thiol collectors, increases the copper recovery of concentrate by 12.27% and 4.77%, the sulfur recovery of concentrate by 13.84% and 1.99%, and raises the sulfur grade of sulfur concentrate by 3.37% and 3.00% respectively, compared with the traditional collectors ethyl xanthate and butyl xanthate. The use of the new 930 collector optimizes the selectivity of copper-sulfur separation, provides a novel agent scheme with high selectivity and environmental friendliness for sulfide ore flotation separation, and is of great significance for reducing smelting costs and alkaline wastewater discharge.

Key words: Chalcopyrite, Pyrite, Flotation, Thiol collector

0 引言

黄铜矿($CuFeS_2$)与黄铁矿(FeS_2)作为重要的硫化矿物资源,在有色金属冶炼与硫酸工业中具有不可替代的战略地位。据统计,全球约75%的铜金属源自黄铜矿选冶[1],而黄铁矿则是硫酸生产的主要硫源,其年处理量超过2亿t[2]。然而,二者的紧密共生特性导致选矿分离效率低下,据中国有色金属工业协会2022年数据显示,典型斑岩型铜矿中黄铜矿与黄铁矿的嵌布粒度常低于10 μm,矿物表面电化学性质相近(Zeta电位差值不足15 mV),致使常规浮选体系下二者选择性分离效率不足60%[3]。如何实现二者的高效分选,已成为提升资源利用率与降低冶炼成本的关键技术瓶颈。

* **收稿日期**:2025-03-19
作者简介:黄玉娇(2000—),女,贵州毕节人,硕士研究生,主要从事复杂金属矿选冶技术研究。E-mail:2474871085@qq.com
通信作者:张汉泉(1971—),男,湖北黄冈人,博士,教授,主要从事复杂金属矿选冶技术研究。E-mail:13477022296@139.com

李生鹏等[4]系统研究了浮选药剂、pH 等因素对低品位铜矿浮选效果的影响,并采用“铜硫混合浮选-混合粗精矿再磨-抑硫浮铜”工艺进行了试验,获得了良好的浮选分离试验指标。汪晓春等[5]采用低碱度铜硫混合浮选原则工艺流程,实施局部低碱度浮选,取得了较好的经济效益和社会效益。张洋等[6]开发了一种新型黄铁矿抑制剂 BY,在闭路试验粗选中 pH 可由 12 降低至 9.7,可实现低碱环境中铜硫的高效分离。兰健[7]用新型抑制剂 LJ 代替石灰进行铜硫分离浮选试验,结果表明,采用新型抑制剂 LJ,在自然矿浆 pH 条件下,经一粗二精二扫闭路试验,获得的铜精矿铜品位远高于原石灰高碱工艺的铜精矿铜品位;王智聪等[8]研究了 HS-1 在铜硫分离中的作用机理,试验结果表明,HS-1 可以选择性抑制黄铁矿,实现低碱条件下的铜硫分离。

捕收剂的选择性吸附机制直接影响矿物表面疏水化程度,进而决定分选效率。传统黄药类捕收剂(如乙基黄药)虽对黄铁矿具有较强捕收能力,但其对黄铜矿的选择性系数较低[9],需配合高浓度石灰在高 pH 条件下抑制黄铁矿,导致工艺流程复杂且产生大量碱性废水。CHEN Songlin 等[10]选择 2-苯基咪唑啉(2-PI)作为一种新型捕收剂用于黄铜矿与黄铁矿的选择性浮选分离,浮选结果表明,使用 2-PI 处理后,黄铜矿的浮选回收率超过了 90%,而黄铁矿的浮选回收率则低于 10%,2-PI 在黄铜矿表面发生了化学吸附,而在黄铁矿表面没有明显的吸附现象。曹飞等[11]设计合成一种新型铜硫浮选分离捕收剂 IPDTC,FTIR、zeta 电位和 XPS 结果表明,IPDTC 通过形成 Cu—S—C 键在黄铜矿表面发生较强的吸附作用,但在黄铁矿表面的吸附作用较弱。常规药剂的选择性差,致使铜硫多金属浮选分离指标不理想[12]。

近年来的研究证实,具有双活性基团的捕收剂可协同调控矿物表面吸附强度与选择性[13]。例如,辛基异羟肟酸钠更易吸附在石英表面,且和调整剂(六偏磷酸钠、本质素磺酸钠)在岩石矿物表面的吸附为物理吸附[14];含氮杂环结构的捕收剂在黄铜矿表面形成单层化学吸附,而对黄铁矿则以物理吸附为主[15]。本研究聚焦巯基类新型捕收剂,通过傅里叶变换红外光谱分析,揭示其基团在黄铜矿和黄铁矿表面的螯合机制,为解决硫化矿浮选分离的难题提供新的药剂理论依据与技术路径。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

试验用的浮选矿物为程潮铁矿的磁选尾矿,图 1 为其 XRD 衍射图谱。

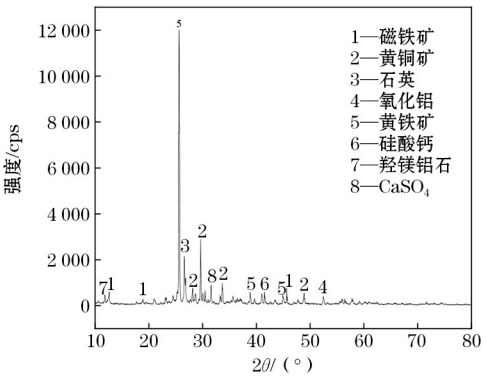


图 1 选铁尾矿 XRD 图谱

Fig.1 XRD pattern of iron tailings

由图 1 可知,选铁尾矿样中的 Cu、S 主要以黄铜矿和黄铁矿的形式存在,脉石矿物主要由石英、氧化铝、羟镁铝石、硅酸钙、硫酸钙和铁酸钙组成。

在纯矿物试验中,黄铜矿和黄铁矿样品粒径为 −0.038 mm。图 2 为其 XRD 射线衍射图,由图 2 可知,该黄铜矿和黄铁矿样品纯度较高,物相单一且无明显杂质。

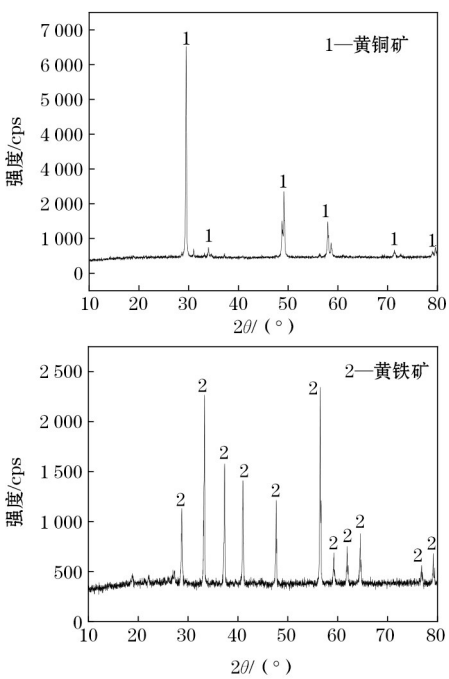


图 2 黄铜矿与黄铁矿纯矿物 XRD 衍射图

Fig.2 XRD diffraction patterns of pure chalcopyrite and pyrite minerals

采用化学滴定法对黄铜矿、黄铁矿纯矿物进行主要元素(如铁,铜,硫)含量分析,并结合 XRF 对其他元素进行多元素分析,结果见表 1 和表 2。黄铜矿中 Fe 含量为 29.59%,Cu 含量为 34.22%,S 含量为 34.54%。黄铁矿中 Fe 含量为 45.19%,Cu 含量为 0.08%,S 含量为 52.06%。主要杂质元素有 SiO_2、CaO、Al_2O_3、MgO、K_2O。

表 1 黄铜矿纯矿物多元素分析结果

Table 1 Results of multiple elements analysis of pure chalcopyrite mineral %

Fe	Cu	S	SiO_2	Al_2O_3	MgO	CaO	K_2O
29.59	34.22	34.54	0.395	0.115	0.125	0.201	0.019

表 2 黄铁矿纯矿物多元素分析结果

Table 2 Results of multiple elements analysis of pure of pyrite mineral %

Fe	Cu	S	SiO_2	Al_2O_3	MgO	CaO	K_2O
45.19	0.08	52.06	0.825	0.330	0.076	0.042	0.049

两种矿样的物相分析结果表明,黄铜矿纯矿物的纯度约 96.36%,说明矿石中黄铜矿为主要含铜矿物,含少量氧化铜杂质;黄铁矿纯矿物的纯度约 95.78%,硫化物的硫占比高,存在少量硫酸盐及磁性硫杂质。

1.2 试验方法

1.2.1 浮选试验

使用选铁尾矿实际矿物进行捕收剂试验,控制浮选试验矿浆质量浓度在 33%~35%。磨矿细度 −0.074 mm 占 64.8%,浮选机转速设定为 1 600 r/min,起泡剂 2# 油用量为 60 g/t。作用时间及浮选时间设置为 3 min,收集泡沫产品,对精矿、中矿和尾矿产品分别进行过滤、烘干和称重。计算其浮选回收率,并对产品进行化验分析。试验流程如图 3 所示。

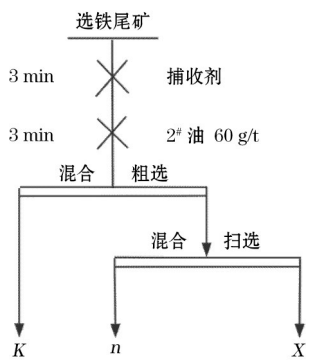


图 3 不同种类捕收剂浮选试验流程

Fig.3 Flow chart of flotation tests with different types of collectors

1.2.2 矿物表面对药剂吸附量分析

将黄铜矿与黄铁矿依次用 0.1 mol/L 的 HCl 溶液及超纯水清洗 3 次,去除表面氧化层,50 ℃条件下真空干燥后备用。配制 4 g/L XX-1 溶液,经过稀释后,取 100 mL 溶液与 0.01 g 矿物样品于烧杯中搅拌吸附 3 min。之后对混合液进行水系过滤,得到其滤液。在特征吸收峰处,以空白缓冲液为参比,使用紫外可见分光光度计,测定上清液吸光度(A)。根据标准曲线(浓度范围 0~20 mg/L,$R^2>0.999$),计算残余药剂浓度(C_e),吸附量(Q_e)按如下公式计算:

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

式中:C_0 为初始浓度,mg/L;V 为溶液体积,L;m 为矿物质量,g。

1.2.3 傅里叶红外光谱分析

将吸附药剂后的黄铜矿和黄铁矿分别进行冻干处理,以防止其药剂发生氧化。采用 FTIR 光谱仪,累加扫描 32 次,以纯 KBr 为背景扣除干扰。识别药剂特征官能团:黄药类 C═S 键(1 050~1 100 cm^{-1}),硫脲类 N—H 伸缩振动(3 300 cm^{-1}),对比吸附前后峰位偏移及强度变化。若矿物表面出现药剂特征峰且发生位移(如 C═S 键移至 1 085 cm^{-1}),表明发生了化学吸附;若峰形展宽但无位移,则为物理吸附。

2 结果与讨论

2.1 浮选试验结果分析

乙基黄药和丁基黄药是两类重要的黄原酸盐类硫化矿捕收剂,广泛应用于金属硫化矿(如黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等)的浮选分离。两者主要区别在于烷基链长度,导致其捕收性能、选择性和应用场景存在差异。捕收剂 930 是在烃基羟肟基盐捕收剂的基础上进行官能团结构重组得到的新型环保型高效捕收剂,为黄药代替品,对硫化铜、铅、锌具有较强的捕收能力。

考察不同捕收剂种类对矿物浮选的影响,起泡剂 2# 油用量为 60 g/t。使用的药剂有:乙基黄药、丁基黄药、930 药剂,其用量均为 100 g/t,试验结果如图 4 所示。

由图 4 可以看出,当 3 种捕收剂用量相同时,使用捕收剂 930 的浮选试验结果较好,相比于常规捕收剂乙基黄药和丁基黄药,其铜精矿回收率分别提高 12.27%、4.77%,硫精矿回收率分别提高 13.84%、1.99%;而其硫精矿硫品位相较于乙基黄药和丁基黄药也分别提高了 3.37%、3%。

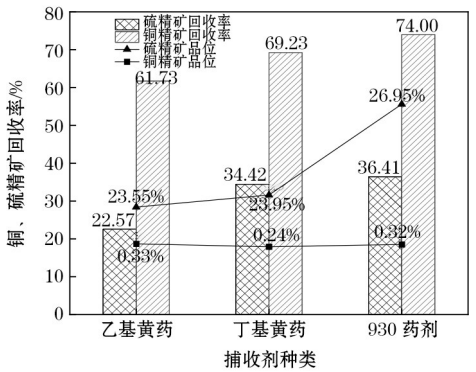


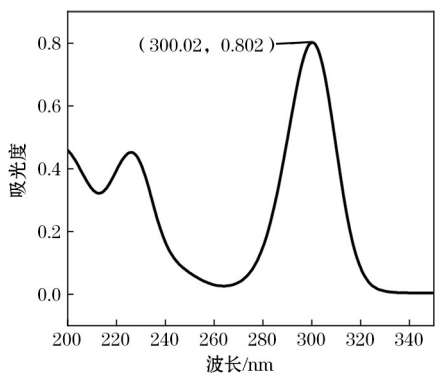
图 4 不同种类捕收剂浮选试验结果

Fig.4 Results of flotation test with different types of collectors

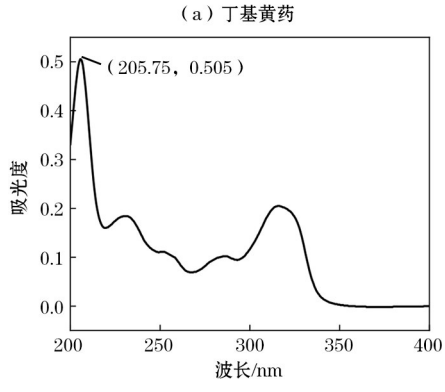
根据试验结果,在相同用量下,丁基黄药的效果优于乙基黄药。巯基类 930 捕收剂对程潮选铁尾矿的浮选优于乙基黄药和丁基黄药,可以在保持精矿品位不变甚至提升的情况下,提高铜、硫的回收率。

2.2 浮选药剂在矿物表面的吸附

采用紫外-可见分光光度计对丁基黄药和 930 药剂进行分析,首先通过全波长扫描确定丁基黄药和 930 药剂最大吸收波长分为 300.02 nm 和 205.75 nm,如图 5 所示。



(a) 丁基黄药

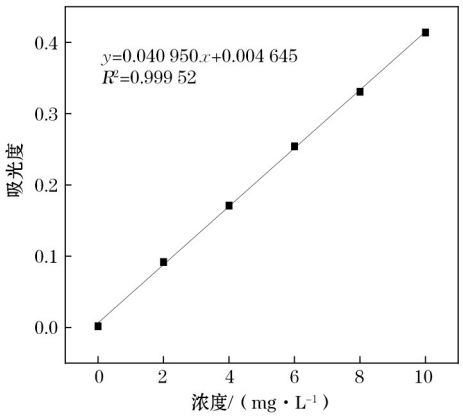


(b) 930 药剂

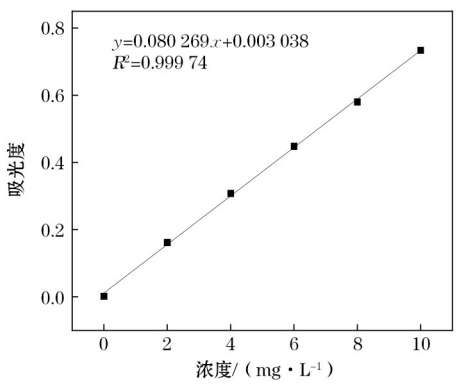
图 5 丁基黄药与 930 药剂紫外可见光波长扫描结果

Fig.5 Ultraviolet-visible light wavelength scanning results of butyl xanthate and 930 agent

浓度-吸光度标准曲线如图 6 所示,丁基黄药、930 药剂的线性回归系数 R^2 分别为 0.999 52、0.999 74,表明该方法具有优异的定量可靠性。



(a) 丁基黄药



(b) 930 药剂

图 6 丁基黄药与 930 药剂紫外可见光标准曲线

Fig.6 Ultraviolet-visible light standard curves of butyl xanthate and 930 agent

2.2.1 不同捕收剂种类的影响

使用紫外可见分光光度计检测黄铜矿和黄铁矿对不同浓度的药剂吸附量。具体过程为:配置浓度为 2,4,6,8,10 mg/L 的丁基黄药溶液 100 mL 和 930 药剂溶液 100 mL,检测其吸光度;分别称取 0.01 g 黄铜矿及黄铁矿纯矿物,加入药剂中。之后开启搅拌,搅拌后水系过滤,测定滤液的吸光度。试验结果如图 7 所示。

由图 7 可知,致使黄铜矿对两种药剂的吸附量均显著高于黄铁矿。其原因是黄铜矿表面活性位点(如 Cu^{2+})更多,而黄铁矿表面氧化层阻碍了药剂吸附。

黄铜矿对丁基黄药的吸附量(0.758～0.871 mg/L)普遍高于 930 药剂(0.377～1.190 mg/L),低浓度下差异更显著。而黄铁矿对 930 药剂的吸附量(0.186～1.037 mg/L)显著高于丁基黄药(0.126～0.356 mg/L),且 930 药剂在中高浓度下吸附增速

更快。丁基黄药可能与黄铜矿表面 Cu^{2+} 的配位能力更强,而 930 药剂对黄铁矿表面 Fe^{2+} 的亲和力更高,说明 930 药剂对黄铁矿的选择性更强,而黄铜矿对丁基黄药吸附量的增多,阻碍了后续分离浮选中的黄铜矿对选铜捕收剂的吸附。

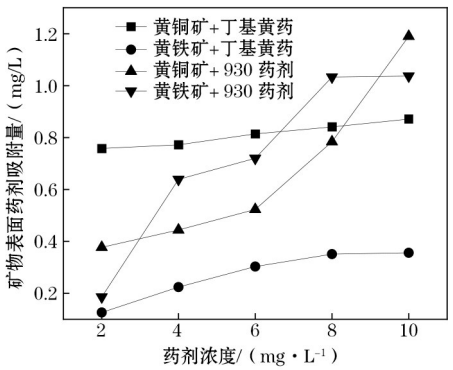


图 7 黄铜矿及黄铁矿表面对不同浓度药剂的吸附量

Fig.7 Adsorption quantity of agents with different concentrations on the surfaces of chalcopyrite and pyrite

2.2.2 活性炭对药剂降解的影响

在混合浮选过程中若添加过量的黄药类捕收剂,会降低分离浮选的效率。而活性炭可吸附矿浆中游离的捕收剂分子,在分离浮选前,混合浮选后添加活性炭,可避免对黄铁矿的过度活化,从而增强铜硫分离的选择性,并且清除腐殖酸,恢复黄铜矿可浮性,吸附 Fe^{3+},减少黄铁矿的活化。

活性炭吸附法是利用其吸附性将水中的选硫捕收剂及其他药剂吸附去除。具体过程为,称取 0.005 g 活性炭,将其加入浓度为 10 mg/L 的 100 mL 丁基黄药和 930 药剂溶液中,然后开始搅拌。根据搅拌的不同时间,测定滤液的吸光度,以此来探究活性炭吸附时间对药剂浓度的影响,试验结果如图 8 所示。

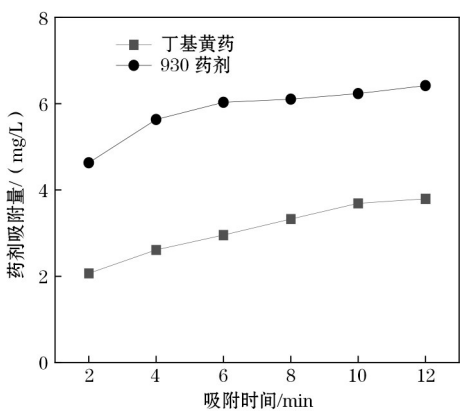


图 8 活性炭吸附时间对药剂浓度的影响

Fig.8 Influence of the adsorption time of activated carbon on the concentration of the agent

由图 8 可知,活性炭对丁基黄药和 930 药剂的吸附量随着时间的增加而增加,但逐渐趋于平缓。活性炭对于 930 药剂的吸附速率更快,更早进入平衡阶段。活性炭对 930 药剂在 12 min 时的吸附量(6.335 mg/L)是丁基黄药(3.735 mg/L)的 1.7 倍,表明活性炭对 930 药剂的吸附容量更高。

综上所述,活性炭对 930 药剂的吸附表现出快速、高容量的特性,适合高效去除。而对丁基黄药的吸附受分子尺寸与极性限制,需针对性优化工艺参数或材料改性。

2.3 傅里叶红外光谱分析

傅里叶变换红外光谱(FTIR)作为表面化学表征的关键技术,可通过官能团振动特征解析药剂-矿物作用机制。本研究针对 930 药剂在两类矿物表面的吸附行为开展 FTIR 分析,重点揭示其基团与 Cu^{2+} 和 Fe^{3+} 的配位模式差异,旨在为选择性捕收剂分子设计及铜硫清洁分选工艺优化提供理论支撑[8]。

2.3.1 活性炭吸附药剂红外光谱分析

配制浓度为 4 g/L 的 930 药剂溶液,向其中加入 0.3 g 的活性炭,搅拌 3 min,然后进行抽滤冻干处理,对其进行红外光谱分析,结果如图 9 所示。

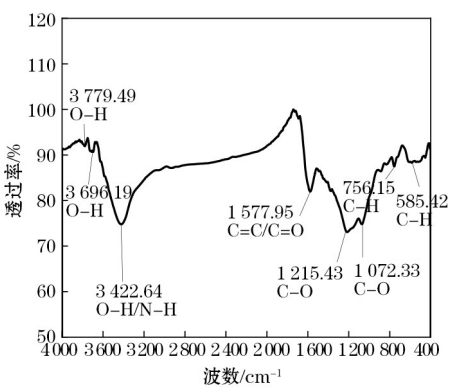


图 9 黄铁矿和黄铜矿红外光谱分析结果

Fig.9 Infrared spectroscopy analysis result of pyrite and chalcopyrite

活性炭的加入显著改变了 930 药剂的组成,具体表现为:疏水性成分被吸附,即炔基(原始 2 104 cm^{-1} 峰消失)、共轭羰基(1 633 cm^{-1} 峰消失)及部分含氧官能团被活性炭优先吸附,导致溶液中此类信号减弱或消失;亲水性成分被保留,游离羟基(3 779～3 696 cm^{-1})和部分羧酸基团(1 215～1 072 cm^{-1})仍存在于溶液中,可能与活性炭表面极性位点竞争吸附能力较弱有关。低波数区新出现的峰(756～585 cm^{-1})可能源于活性炭自身无机杂质

(如灰分中的 Si—O 或金属氧化物)。

2.3.2 矿物表面药剂吸附红外光谱分析

试验中所用新型选硫捕收剂为 930 药剂,对硫化铜、铅、锌具有较强的捕收能力,并对氧化铜、氧化铅也有一定的捕收能力。该药剂为深红色至棕红色液体,直接原液使用。

930 药剂的傅立叶红外光谱分析结果如图 10 所示,930 药剂在 3 330.58 cm^{-1} 处的宽峰可能源于 O—H 或 N—H 的伸缩振动(如羟基、氨基或酰胺基团),氢键作用可能导致峰形展宽和波数偏移;2 104.81 cm^{-1} 处的尖锐峰提示末端炔烃(C≡C)或腈基(C≡N)的存在;1 633.60 cm^{-1} 处的吸收峰与共轭双键(C═C)或羰基(C═O)的伸缩振动相关;1 386.89 cm^{-1} 可能对应甲基对称弯曲振动或硝基(NO_2)的对称伸缩模式;1 128.29 cm^{-1} 处的峰可归因于醚或酯的 C—O 伸缩振动;989.53 和 900.52 cm^{-1} 的吸收峰则与末端乙烯基的 C—H 面外弯曲振动有关;而 462.73 cm^{-1} 的低波数峰可能为无机成分(如 Si—O—Si 键)。

结合特征峰推测,药剂 930 可能为含羟基/氨基、炔基/腈基及共轭双键的有机化合物,并可能含有醚键和无机辅料。

(1) 黄铜矿。

配制浓度为 800 mg/L 的 930 药剂溶液,向其中加入分别 0.5 g 黄铜矿。搅拌 3 min 后,根据条件分别加入 0.1 g 活性炭,搅拌 3 min 后,对样品进行抽滤冻干处理。试验结果如图 10 所示。

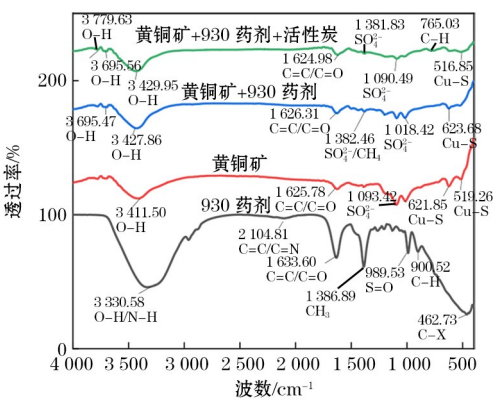


图 10 黄铜矿表面药剂吸附试验红外光谱分析结果

Fig.10 Infrared spectroscopy analysis results of the agent adsorption test on the surface of chalcopyrite

在图 10 中,黄铜矿的红外光谱显示其本体以硫化物(Fe—S/Cu—S)为主,但表面可能因氧化或吸附作用形成羟基(O—H)、硫酸盐(SO_4^{2-})及吸附水。低波数峰(<700 cm^{-1})为硫化物结构的特征振动,而中高波数峰提示氧化副产物或杂质的存在,如硫酸盐或硅酸盐。氢键结合的 O—H(吸附水或羟基)对比原始黄铜矿:峰位从 3411.5 cm^{-1} 向高频偏移,可能是因为活性炭与药剂竞争吸附所导致的吸附水的 H—O—H 弯曲振动或残留药剂的 C═O/C═C。对比吸附 930 药剂后的数据,峰位从 1 626.31 cm^{-1} 略微偏移,提示药剂吸附量减少,此外,可能是硫酸盐(SO_4^{2-})的对称伸缩振动或活性炭的 C—O 振动(醚/酯)。对比 930 药剂吸附后的峰,原 930 药剂的 1 194.97 cm^{-1}(磺酸基/磷酸酯)消失,这可能是因为活性炭吸附了药剂中的含硫/磷基团。

黄铜矿在加入活性炭吸附 930 药剂后的 1 194.97 cm^{-1}(磺酸基/磷酸酯)未出现,表明活性炭通过竞争吸附捕获了药剂中的极性基团;765.03 cm^{-1}(芳香环振动)和 3 779.63 cm^{-1}(活性炭羟基)提示活性炭参与吸附过程,其表面官能团占据黄铜矿的吸附位点。

综上所述,活性炭通过以下机制减少黄铜矿对药剂的吸附:

竞争吸附,活性炭的高比表面积和含氧基团优先吸附药剂中的极性基团(如磺酸基、磷酸酯);

位点屏蔽,活性炭颗粒覆盖黄铜矿表面,阻碍 930 药剂与矿物表面的直接接触;

物理拦截,活性炭吸附药剂分子,降低溶液中游离药剂浓度,减少其与黄铜矿的接触概率。

(2) 黄铁矿。

配制浓度为 800 mg/L 的 930 药剂溶液,向其中加入分别 0.5 g 黄铁矿。搅拌 3 min 后,根据条件分别加入 0.1 g 活性炭,搅拌 3 min 后,对样品进行抽滤冻干处理。试验结果如图 11 所示。

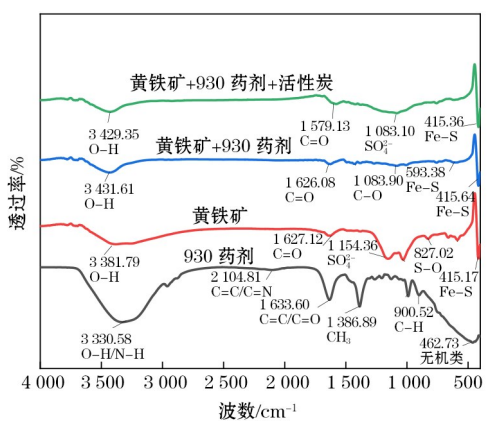


图 11 黄铁矿表面药剂吸附试验红外光谱分析结果

Fig.11 Infrared spectroscopy analysis results of the agent adsorption test on the surface of pyrite

在图 11 中,黄铁矿的红外光谱显示其主体为 Fe—S 键结构,但表面因氧化或环境吸附形成了羟基、硫酸盐及吸附水。中高波数峰(>800 cm^{-1})提示存在氧化副产物(如硫酸铁),而低波数峰(<700 cm^{-1})为硫化物晶格振动的特征。对比黄铜矿吸附 930 药剂后的峰,黄铜矿吸附 930 药剂后出现 3 431.61 cm^{-1},两者接近,但较原始黄铁矿(3 381.79 cm^{-1})向高频偏移,这可能是因为活性炭表面羟基参与竞争吸附;1 626.31 cm^{-1}(C═O/C═C)显著向低频偏移,提示活性炭吸附了药剂中的 C═O 基团,削弱了其与黄铁矿的键合;1 194.97 cm^{-1} 出现强磺酸基峰,而此处峰位向低频偏移且强度可能减弱,表明活性炭竞争吸附了磺酸基团。

黄铜矿吸附 930 药剂后的关键特征峰 1 194.97 cm^{-1}(磺酸基)和 1 626.31 cm^{-1}(C═O)未在活性炭存在时出现,表明活性炭通过竞争吸附捕获了药剂中的极性基团。并且在吸附 930 药剂后,1 194.97 cm^{-1} 峰完全消失,而黄铁矿的 1 083.10 cm^{-1} 峰可能为残留的硫酸盐或少量吸附的磺酸基,表明活性炭优先吸附了药剂中的磺酸基团。

3 结论

(1) 试验结果表明,乙基黄药、丁基黄药、930 选硫捕收剂 3 种药剂中,选硫捕收剂 930 对黄铁矿的选择性较好。

(2) 丁基黄药对黄铜矿的吸附量显著高于黄铁矿,主要是丁基黄药与黄铜矿表面 Cu^{2+} 形成稳定的配位键,而黄铁矿表面氧化层阻碍吸附。930 药剂对黄铁矿吸附量更高,其分子多与 Fe^{2+} 亲和力强,且高浓度下吸附增速更快,表明其对黄铁矿的选择性更强。

(3) 活性炭对 930 药剂的吸附量是丁基黄药的 1.7 倍,归因于其疏水性和多孔结构对 930 药剂非极性官能团(如炔基、共轭双键)的优先吸附。活性炭显著降低溶液中药剂的有效浓度,抑制矿物表面吸附。

(4) 黄铜矿、黄铁矿表面选择性吸附 930 药剂的极性基团(如羟基、氨基),活性炭优先清除疏水组分(炔基 C≡C 峰消失),有效降低了 930 药剂在溶液中的有效浓度,减少其在黄铜矿、黄铁矿表面的吸附。

(5) 新型药剂的开发与低碱工艺的推广为铜硫高效绿色分离提供了新路径,未来可以进一步探索组合抑制剂的协同效应,从而研发出更多实用型、经济型的新型药剂。

参考文献(References):

[1] U. S. Geological Survey. Mineral commodity summaries 2023:copper[R].Reston:USGS, 2023:144-149.

[2] International Fertilizer Association. Sulfur market outlook 2022[R].Paris:IFA, 2022:15-18.

[3] 中国有色金属工业协会.中国铜矿资源开发技术白皮书[R].北京:冶金工业出版社,2022:34-37.
China Non-Ferrous Metals Industry Association. White waper on the development technology of copper ore resources in China [R]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2022:34-37.

[4] 李生鹏,谢海云,曾鹏,等.低品位难选铜矿铜硫高效浮选分离试验研究[J].有色金属(选矿部分),2025(1):88-96.
LI Shengpeng, XIE Haiyun, ZENG Peng, et al. Experimental study on high-efficiency flotation separation of copper and sulfur from a low-grade refractory copper ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2025(1):88-96.

[5] 汪晓春,刘道喜,孔艳珍,等.低碱度铜硫矿浮选生产实践研究[J].中国矿业,2023,32(7):165-172.
WANG Xiaocun, LIU Daoxi, SUN Yanzhen, et al. Research on flotation production practice of low alkalinity copper sulfide ore[J]. China Minning Magazine, 2023, 32(7):165-172.

[6] 张洋,席欣月.铜硫浮选分离工艺及药剂研究进展[J].黄金,2025,46(1):47-55.
ZHANG Yang, XI Xinyue. Research progress on copper-sulfur flotation separation process and reagents[J]. Gold, 2025,46(1):47-55.

[7] 兰健.铜硫浮选分离新型抑制剂 LJ 试验研究[J].现代矿业,2024,40(12):161-164.
LAN Jian. Experimental study on a new depressant LJ for flotation separation of Cu-S[J]. Modern Mining, 2024, 40(12):161-164.

[8] 王智聪,徐宝金,黄丽亚,等.抑制剂 HS-1 在铜硫分离中的作用机理研究[J].金属矿山,2024(8):106-111.
WANG Zhicong, XU Baojin, HUANG Liya, et al. Study on the action mechanism of inhibitor HS-1 in the separation of copper and sulfur[J]. Metal Mine,2024(8):106-111.

[9] GRANT A, BENZAAZOUA M, KONGOLO M, et al. Alternatives to xanthate collectors for the desulphurization of ores and tailings: pyrite surface chemistry[J]. Colloids and Surfaces A:Physicochemical and Engineering Aspects, 2019,577:333-346.

[10] CHEN Songlin, SHEN Zhihao, SONG Zhengyong, et al. Selective flotation separation of chalcopyrite from pyrite using 2-phenylimidazoline as a collector: flotation performance and surface adsorption mechanism[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering,2025,13(3):116200.

[11] 曹飞,孙德四,邱仙辉,等.新型铜硫浮选分离硫氨酯捕收剂的合成及吸附机理(英文)[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2022,32(8):2709-2718.
CAO Fei, SUN Desi, QIU Xianhui, et al. Synthesis of novel thionocarbamate for copper-sulfur flotation separation and its adsorption mechanism[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2022,32(8):2709-2718.

[12] 张礼,邹松,王长福.采用新型捕收剂 MOF-100 浮选回收某铁尾矿中辉钼矿的研究[J].矿业研究与开发,2024,44(10):265-270.
ZHANG Li, ZOU Song, WANG Changfu. A study on the efficient recovery of molybdenum from Iron tailings using a novel collector MOF-100 [J]. Mining Research and Development,2024,44(10):265-270.

[13] TANG Xiaoqin, CHEN Jianhua, CHEN Ye, et al. Application of quantum chemistry in the study of flotation reagents[J]. Minerals,2023,13(12):1487.

[14] 刘铭,阳华玲,王长福,等.新型萤石捕收剂 CYP-01 的浮选性能研究及应用[J].矿业研究与开发,2024,44(1):221-227.
LIU Ming, YANG Hualing, WANG Changfu, et al. Study on flotation performance and application of a new fluorite collector CYP-01.[J]. Mining Research and Development, 2024,44(1):221-227.

[15] 傅荔莹,刘广义,黄耀国,等.氮杂环硫酮类浮选捕收剂研究进展[J].金属矿山,2023(8):17-27.
FU Liying, LIU Guangyi, HUANG Yaoguo, et al. Research progress on azathione flotation collectors[J].Metal Mine,2023(8):17-27.