一种新型抑制剂在铜硫浮选分离中的选择性抑制机理研究*

鲁路林[1],付晓坤[1],陈玉贞[1],张行荣[1],陈建华[2]

(1.青岛科技大学 化工学院, 山东 青岛市 266042;
2.广西大学 化学化工学院, 广西 南宁 530004)

摘要:针对铜硫浮选分离过程中采用石灰抑制剂存在的管道堵塞和环境污染等问题,开发了一种新型抑制剂PN用于铜硫分离。通过系统试验对PN抑制剂在浮选过程中的选择性抑制性能和吸附机理进行了研究。结果表明:PN抑制剂对黄铁矿具有良好的选择性抑制作用,而对黄铜矿几乎无影响;人工混合矿分离试验结果表明,在低碱条件下(pH=8),PN抑制剂用量为5 mg/L时实现了最佳的黄铁矿和黄铜矿分离效果,可获得铜品位为31.3%,铜回收率为92.9%的铜精矿;接触角测量结果表明,PN抑制剂可选择性增强黄铁矿表面的亲水性能;PN处理前后黄铁矿的微观形貌特征与元素含量变化分析进一步证实,PN抑制剂在黄铁矿表面发生了物理吸附,可实现对黄铁矿的选择性抑制。研究结果表明,PN抑制剂具有在铜硫分离中替代石灰的应用潜力。

关键词:新型抑制剂;黄铁矿;黄铜矿;铜硫浮选分离;作用机理

中图分类号:TD952 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)06-0247-08

Selective Inhibition Mechanism of a New Inhibitor in Copper Sulfur Flotation Separation

LU Lulin[1], *FU Xiaokun*[1], *CHEN Yuzhen*[1], *ZHANG Xingrong*[1], *CHEN Jianhua*[2]

(1.College of Chemical Engineering, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao, Shandong 266042, China;
2.School of Chemistry and Chemical Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

Abstract: A new inhibitor PN has been developed for copper sulfur flotation separation to address issues such as pipeline blockage and environmental pollution caused by the use of lime inhibitors. The selective inhibition performance and adsorption mechanism of PN inhibitor in flotation process were studied through systematic tests. The results indicate that PN inhibitor has a good selective inhibitory effect on pyrite, but has almost no effect on chalcopyrite. The results of the artificial mixed ore separation test show that under low alkali conditions (pH=8), the optimal separation effect of pyrite and chalcopyrite can be achieved when the dosage of PN inhibitor is 5 mg/L, and a copper concentrate with a copper grade of 31.3% and a copper recovery rate of 92.9% can be obtained. The contact angle measurement results indicate that PN inhibitor can selectively enhance the hydrophilic properties of pyrite surface. The analysis of the microstructure characteristics and elemental content changes of pyrite before and after PN treatment further confirms that PN inhibitor undergo physical adsorption on the surface of pyrite, which can achieve selective inhibition of pyrite. The research results prove that PN inhibitors has the potential to replace lime in copper sulfur separation.

Key words: New inhibitor, Pyrite, Chalcopyrite, Copper sulfur flotation separation, Action mechanism

0 引言

铜是一种重要的有色金属,广泛应用于交通运输、建筑和国防等领域[1]。然而,我国铜资源相对贫乏,《中国矿产资源报告》(2023)显示,截至2022年底,我国铜矿储量为4 077.18万t,但仅占全球铜资源总量的3%[2]。而且,我国铜资源以低品位矿为主,富铜矿占比不足20%,总体上呈现出规模小、贫矿多、伴生资源占比大等特点[3]。近年来,新能源产业发展为铜资源带来新的增量需求,预计2035年前

* **收稿日期**:2024-08-25
基金项目:山东省泰山学者青年专家项目(tsqn202312202);国家自然科学基金面上项目(51974030)
作者简介:鲁路林(1998—),女,安徽宿州人,硕士研究生,研究方向为浮选药剂研发。E-mail:3562810899@qq.com
通信作者:张行荣(1984—),男,山东济南人,博士,教授,主要从事浮选药剂开发、矿产资源加工利用、亲疏水材料等研究。E-mail:zhxr1984@126.com

我国铜资源消耗将保持增长态势,2035—2050 年需求将维持高位。但由于国内铜资源基础薄弱,供应能力受限,铜资源供应仍将主要依靠国外进口[4]。

我国的铜矿资源以硫化铜矿为主,铜硫共生是硫化铜矿石中常见的矿石类型[5]。矿石目标矿物中,硫化铁与硫化铜两者具有相近的天然可浮性[6],加之矿石中矿物嵌布关系复杂,导致铜硫选择性浮选分离困难。抑硫浮铜的优先浮选工艺[7]是选别致密块状铜硫矿石的主要方法。传统工艺中,黄铁矿和黄铜矿的分离主要是向矿浆中加入大量石灰,调节矿浆至高碱性环境从而对黄铁矿进行抑制。但过量石灰易导致管道堵塞、废水污染环境等问题[8-10]。为解决上述问题的同时实现铜硫高效分离,很多学者对黄铁矿抑制剂进行了大量研究,其中低碱条件下有效抑制黄铁矿是研究的重要方向[11]。已有研究表明,部分有机抑制剂可以在低碱条件下实现铜硫分离,包括纤维素类[12]、多糖类[13]、有机酸类[14]、木质素磺酸盐类聚合物[15]等。但是这些抑制剂选择性较差,用量大时可能导致矿物整体被抑制,实际应用受限[16]。因此,本文开发了一种新型黄铁矿抑制剂 PN,通过浮选试验、接触角测量、紫外吸附量测量、扫描电镜-能谱(SEM-EDS)分析、红外光谱(FTIR)分析和 X 射线光电子能谱(XPS)分析探究了 PN 抑制剂对黄铁矿浮选行为及其作用机理,通过优化浮选药剂制度,取得了较好的选别指标,实现了低碱条件下铜硫高效分离。

1 试验设计

1.1 试验药品

抑制剂 PN 为实验室自制的一种新型硫抑制剂,属于有机大分子化合物,含多个羧基、羟基以及氨基;试验所用的捕收剂为市售丁基黄原酸钠(简称丁黄),纯度不低于 85.0%;起泡剂则采用分析纯甲基异丁基甲醇(MIBC);pH 调整剂选用工业级石灰。

1.2 试验仪器设备

PN 抑制剂制备过程中所用到的仪器包括恒温加热磁力搅拌器、电热恒温水浴锅以及电动搅拌器;浮选试验使用的主要仪器为充气挂槽浮选机(型号 XFGCⅡ),矿浆 pH 采用酸度计测定;此外,采用超声波清洗器(型号 KS5200E)清洗矿物表面,采用紫外分光光度计(型号 UV1800PC)测试药剂在矿物表面的吸附量。

1.3 试验方法

1.3.1 纯矿物浮选试验

浮选试验固定转速为 1 758 r/min,浮选槽体积为 30 mL。试验前,将 2 g 黄铁矿或黄铜矿(粒径为 38～74 μm)在超声浴中预处理 5 min,然后将样品送入浮选槽,用石灰水溶液调节矿浆 pH。搅拌 3 min 后,加入 PN 抑制剂。搅拌 3 min 后,再加入一定量的捕收剂和起泡剂,再搅拌 3 min,然后刮泡浮选 5 min,收集精矿(泡沫产物)和尾矿进行干燥称重并计算回收率。根据元素分析试验结果,计算人工混合矿浮选回收率。浮选试验流程如图 1 所示。回收率计算公式如下。

$$\varepsilon_{pm}=\frac{m_f}{m_f+m_t}\times 100\% \tag{1}$$

$$\varepsilon_{p/c}=\frac{m_f\times\beta_1}{m_f\times\beta_1+m_t\times\beta_2}\times 100\% \tag{2}$$

式中:ε_{pm}为黄铁矿或黄铜矿纯矿物的回收率,%;m_f、m_t分别为精矿和尾矿质量,g;$\varepsilon_{p/c}$为人工混合矿物分离时精矿中黄铜矿的回收率,%;β_1、β_2 分别为精矿和尾矿中黄铜矿的品位,%。

根据上式进行计算,所得回收率为 3 次独立浮选试验结果的平均值[17]。

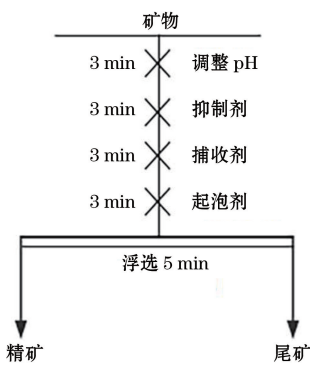


图 1 浮选试验流程

Fig.1 The flotation test process

1.3.2 接触角测量

矿物的浮选性能与表面的润湿性密切相关,因此,本研究对不同 PN 抑制剂剂量处理下的黄铁矿和黄铜矿的疏水性进行测量。试验前,对黄铜矿和黄铁矿样品进行浮选药剂吸附处理:首先将 2 g 矿物与 30 mL 去离子水置于 50 mL 烧杯中,超声预处理 5 min,使用磁力搅拌器进行搅拌,转速为 1 200 r/min;然后加入 PN 抑制剂,继续搅拌 10 min 后过滤,用去离子水洗涤 3 次,并于 50 ℃以下烘干。将干燥后的样品压制成光滑薄片,用于接触角测量。每次测量重复 3 次,测试结果取平均值[18-19]。

1.3.3 吸附量测试

采用紫外可见分光光度计测定了 PN 抑制剂在黄铁矿表面的吸附量。试验过程如下:将 1.0 g 矿

物样品与 20 mL 去离子水混合在 50 mL 烧杯中,超声预处理 5 min,使用磁力搅拌器进行搅拌,转速为 1 200 r/min;调节浮选矿浆至预期 pH 并稳定 2 min,然后向浮选矿浆中加入不同用量的 PN,搅拌 5 min;吸附完成后,取上清液在 2 000 r/min 条件下离心 1 h;将离心后的样品静置 2 h,取 3 mL 上清液进行吸附量测试[20-21]。

1.3.4 红外光谱分析

对 PN 以及 PN 处理前后的黄铁矿进行红外光谱分析。样品制备过程为:将 2 g 矿物样品(黄铁矿)和 30 mL 去离子水置于 50 mL 烧杯中,药剂的添加方法与浮选试验流程一致;试剂与矿物相互作用后,将样品过滤干燥,取 1%(质量分数)的矿物样品与光谱级 KBr 混合压片。采用 Nicolet IS10 傅里叶变换红外光谱仪在 4 000～400 cm^{-1} 波数范围内进行测试,所有测试均在室温(25±1 ℃)条件下进行[22-23]。

1.3.5 XPS 光谱测试

采用 XPS 分析 PN 抑制剂处理前后黄铁矿样品的表面化学状态。待测样品制备过程:将 2 g 黄铁矿和 30 mL 的去离子水加入 50 mL 烧杯中,超声预处理 5 min;加入 5 mg/L 的 PN 抑制剂作用 15 min,过滤干燥后制样。能谱扫描范围为 0～1 400 eV,标定能量为 100 eV,步长为 1.0 eV。采用 Avantage 软件处理数据,以 C 1s 峰(284.8 eV)作为基准进行结合能校正[24-25]。

1.3.6 SEM-EDS 分析

采用扫描电镜(SEM)结合能谱分析(EDS)研究 PN 处理前后黄铁矿表面微观形貌及元素组成变化。将 2.0 g 矿物与 30 mL 去离子水置于 50 mL 烧杯中,超声预处理 5 min,加入 PN 抑制剂后用磁力搅拌器搅拌 15 min 使其充分反应,过滤后真空干燥 24 h。将矿物粉末均匀粘附在导电黏合剂上制成样品,并在 SEM 测试之前进行喷金处理。

2 结果与讨论

2.1 浮选试验

2.1.1 单矿物浮选试验

由于黄铜矿和黄铁矿具有极相似的天然可浮性,在自然状态下二者很难分离,通常在低碱条件下选择性抑制黄铁矿来浮选黄铜矿。以 PN 为抑制剂,丁黄(用量为 30 mg/L)为捕收剂、MIBC(用量为 10 mg/L)为起泡剂,研究了抑制剂用量对黄铁矿、黄铜矿浮选回收率的影响,试验结果见图 2。

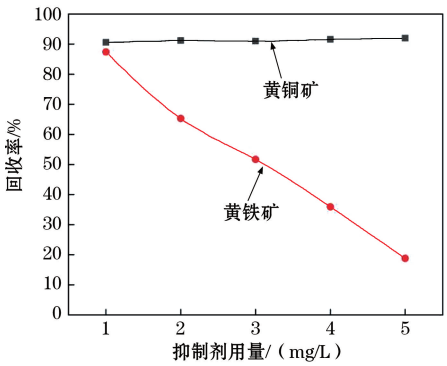


图 2 PN 抑制剂用量对黄铁矿和黄铜矿浮选回收率的影响

Fig.2 Effect of the dosage of PN inhibitor on flotation recovery rates of pyrite and chalcopyrite

由图 2 可以看出,当 PN 抑制剂用量较低时(1 mg/L),抑制作用并不明显。随着抑制剂用量的增加,黄铁矿的回收率逐渐降低,但黄铜矿的回收率几乎无变化,这说明 PN 抑制剂可以对黄铁矿进行选择性抑制。当 PN 抑制剂用量达 5 mg/L 时,黄铁矿的回收率下降到 20%以下,而黄铜矿的回收率在 90%以上。由此可见,在一定的用量下,PN 抑制剂对黄铁矿的抑制有明显的选择性,能够用于黄铁矿和黄铜矿的分离。

在浮选过程中,矿浆 pH 是一个重要参数。本文研究了 PN 抑制剂用量为 5 mg/L 条件下,矿浆 pH 对黄铁矿和黄铜矿可浮性的影响。选用氧化钙调节矿浆 pH,试验结果如图 3 所示。由图 3 可以看出,在整个测试范围内,PN 抑制剂对黄铜矿的抑制效果不明显,对黄铁矿的抑制效果较好,黄铁矿的回收率维持在 20%左右。pH 为 8 时,黄铁矿和黄铜矿回收率差值较大,因此选择 pH 为 8 作为混合矿分离的最佳 pH。

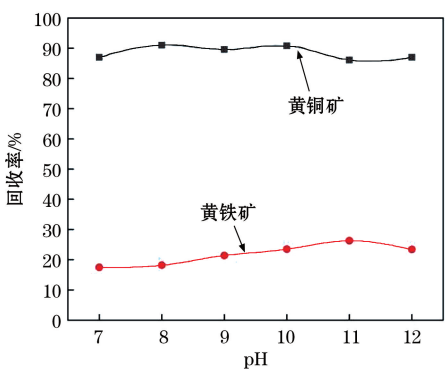


图 3 pH 对黄铁矿和黄铜矿浮选回收率的影响

Fig.3 Effect of pH on the flotation recovery rates of pyrite and chalcopyrite

综上,在不同抑制剂用量和矿浆 pH 条件下,研究了 PN 抑制剂对两种矿物可浮性的影响。结果表明:黄铁矿可浮性随着 PN 抑制剂用量的增大而降

低,而黄铜矿的浮选回收率基本保持不变。在抑制剂用量为 5 mg/L 的条件下,黄铁矿抑制剂效果即可达到最佳;在低碱条件下(pH=8),该抑制剂对黄铁矿具有较好的选择性抑制作用。

2.1.2 人工混合矿物浮选试验

将 1 g 黄铜矿和 1 g 黄铁矿进行混合得到人工混合矿物,在不同抑制剂用量下对黄铜矿产率、Cu 回收率和 Cu 品位进行分析。固定矿浆 pH 为 8,捕收剂用量为 30 mg/L,起泡剂用量为 10 mg/L,试验结果如图 4 和图 5 所示。

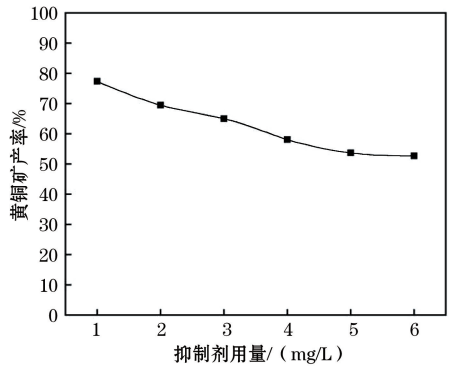


图 4 PN 抑制剂用量对人工混合矿物浮选分离的影响

Fig.4 Effect of the dosage of PN inhibitor on flotation separation of artificially mixed minerals

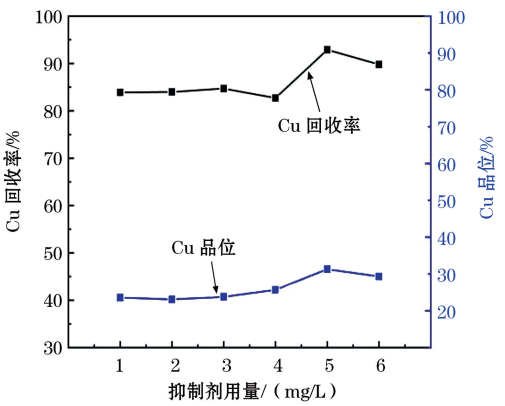


图 5 不同抑制剂用量下人工混合矿物浮选结果

Fig.5 Flotation results of artificially mixed minerals under different inhibitor dosages

从图 4 可以看出,随着抑制剂用量的增加,黄铜矿产率呈现出先下降后趋于平稳的趋势。当抑制剂用量为 5 mg/L 时,产率约为 50%。由图 5 可知,随着抑制剂用量的增大,Cu 品位总体呈现出增大的趋势,在抑制剂用量为 5 mg/L 时,Cu 品位达到 31.3%,Cu 回收率为 92.9%,分离效果最佳。

2.2 接触角测量

不同 PN 抑制剂用量下黄铁矿和黄铜矿的接触角如图 6 所示。

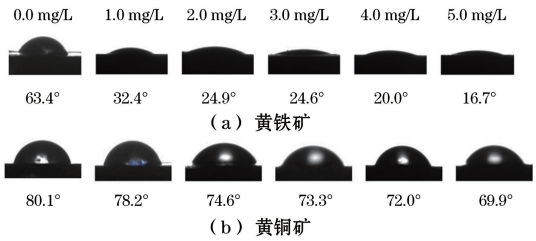


图 6 PN 抑制剂用量对矿物表面接触角的影响

Fig.6 Effect of the dosage of PN inhibitor on mineral surface contact angle

由图 6(a)可知,不加抑制剂的黄铁矿表面的接触角为 63.4°,这说明黄铁矿具有一定的天然亲水性。随着 PN 用量增加,黄铁矿的接触角逐渐减小,当 PN 浓度为 5 mg/L 时,黄铁矿接触角降低至 16.7°。在此条件下,黄铁矿具有较强的亲水性,使其很难从矿浆中浮出,浮选性能受到抑制,这与单矿物浮选试验结果一致。由图 6(b)可知,黄铜矿的接触角同样随 PN 抑制剂用量的增加而减小,但与黄铁矿相比,黄铜矿的接触角变化并不明显。这说明经 PN 抑制剂处理后,两种矿物的亲水性均发生变化,且黄铁矿的接触角明显小于黄铜矿,进而说明 PN 抑制剂更易吸附于黄铁矿表面,从而为黄铁矿和黄铜矿的选择性浮选分离创造了有利条件。

2.3 吸附量测定

PN 抑制剂在黄铁矿表面的吸附量随其用量的变化如图 7 所示。试验结果表明,随着 PN 抑制剂用量的增加,其在黄铁矿表面的吸附量逐渐增大,当抑制剂用量达到 5 mg/L 时,PN 抑制剂在黄铁矿表面的吸附量基本达到平衡,此时,PN 抑制剂在黄铁矿表面的吸附量为 0.046 mg/g。继续增加抑制剂用量,其在黄铁矿表面的吸附量基本不再变化,说明此时吸附量已经达到饱和。

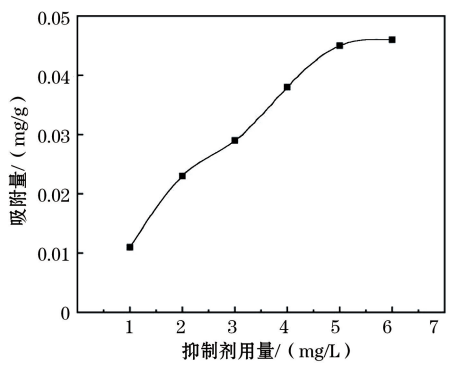


图 7 PN 抑制剂在黄铁矿表面吸附量随用量的变化

Fig.7 Variation of the adsorption capacity of PN inhibitor on pyrite surface with its dosage

2.4　红外光谱分析

为了进一步研究 PN 抑制剂在黄铁矿表面的作用机理，当抑制剂用量为 5 mg/L 的条件下，对 PN 抑制剂、PN 处理前后的黄铁矿红外光谱图进行了对比分析，如图 8 所示。

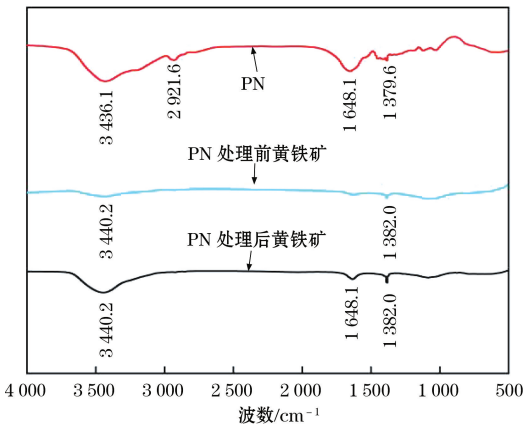


图 8　红外光谱图

Fig.8　Infrared spectrogram

根据红外光谱手册可知[26-27]，1 648.1 cm^{-1} 为羰基（C═O）伸缩振动，2 921.6 cm^{-1} 为—CH_2 伸缩振动，3 436.1 cm^{-1} 出现了 N—H 伸缩振动锋。PN 处理前黄铁矿的红外光谱特征峰分别出现在 3 440.2 cm^{-1}、1 382.0 cm^{-1} 处，与文献[19]结果一致。PN 处理后的黄铁矿红外光谱图显示出与 PN 抑制剂类似的特征吸收带，其中 1 648.1 cm^{-1} 处出现了抑制剂 PN 的羰基（C═O）特征吸收峰，证实了抑制剂的成功吸附。此外，谱图中未出现新的特征峰，表明 PN 抑制剂主要通过物理吸附作用的形式附着于黄铁矿表面。

2.5　XPS 光谱分析

表 1 为 PN 处理前后黄铁矿的 XPS 分析结果，由表 1 可知，PN 抑制剂处理前后黄铁矿表面的原子浓度变化不大。与处理前相比，PN 处理后的黄铁矿 S 2p 的相对原子浓度下降了 2.71 个百分点，这表明黄铁矿表面被抑制剂所覆盖；同时，N 1s 的相对原子浓度增加了 0.45 个百分点，这是由 PN 抑制剂中的 N 元素所引起的，表明 PN 抑制剂已经吸附于黄铁矿表面。

表 1　PN 处理前后黄铁矿的 XPS 分析结果

Table 1　XPS analysis results of pyrite before and after PN treatment　%

样品	Fe 2p	S 2p	C 1s	N 1s	O 1s
PN 处理前黄铁矿	13.38	31.65	24.43	4.47	26.08
PN 处理后黄铁矿	13.04	28.94	24.54	4.92	28.57

图 9(a)为 PN 抑制剂处理前后黄铁矿的 XPS 谱图，从图中可以看出，与处理前相比，PN 抑制剂处理后的黄铁矿表面没有出现新的元素峰，峰强度变化不大，主要元素的结合能也没有发生变化。进一步分析表明，PN 处理前后的黄铁矿的 Fe 2p、S 2p、O 1s 谱图基本一致，结合能未发生明显偏移。上述结果表明，PN 抑制剂主要以物理吸附的形式作用于黄铁矿表面，这与红外光谱分析结果一致。

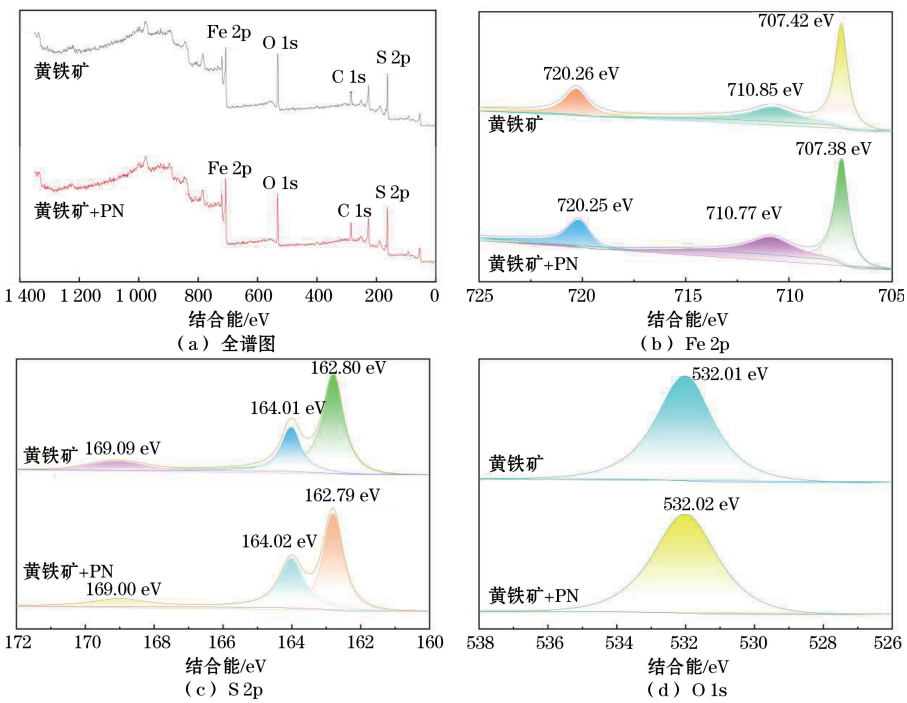
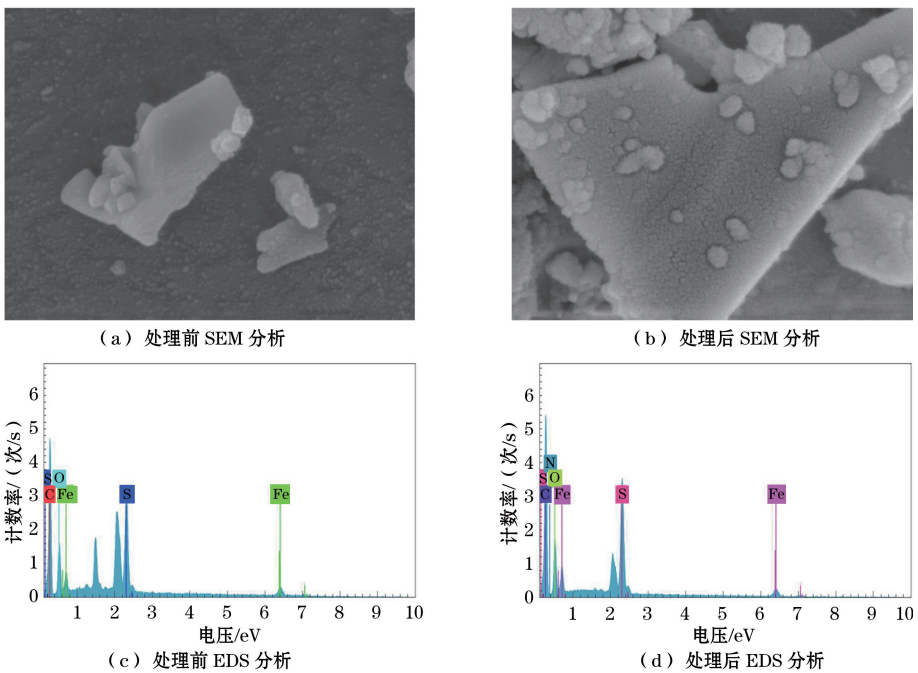


图 9　PN 处理前后黄铁矿 XPS 谱图

Fig.9　XPS spectragrams of pyrite before and after PN treatment

2.6 SEM-EDS 分析

图 10 为 PN 处理前后黄铁矿 SEM-EDS 分析结果,表 2 为 PN 处理前后黄铁矿表面元素含量的变化。由 SEM 分析可知,PN 处理前的黄铁矿表面附着少量矿物颗粒,表面相对光滑;PN 处理后的黄铁矿表面出现大量颗粒附着物,显著增加了矿物表面粗糙度。由 EDS 分析可知,PN 处理前后的黄铁矿表面元素含量出现了明显的变化。与处理前相比,PN 处理后的黄铁矿 C 含量由 6.61%提高到 9.06%,O 含量由 2.87%提高到 3.84%,N 含量由 0.38%提高到 1.09%,S 含量由 34.91%降低至 32.53%。这些形貌特征和元素含量的变化证实了 PN 抑制剂在黄铁矿表面的成功吸附,可实现对黄铁矿的选择性抑制。



(a) 处理前 SEM 分析 (b) 处理后 SEM 分析

(c) 处理前 EDS 分析 (d) 处理后 EDS 分析

图 10 PN 处理前后黄铁矿 SME-EDS 分析

Fig.10 SEM-EDS analysis of the pyrite before and after PN treatment

表 2 PN 处理前后黄铁矿表面元素含量

Table 2 Element content of the pyrite surface before and after PN treatment %

样品	Fe	S	C	N	O
PN 处理前黄铁矿	34.54	34.91	6.61	0.38	2.87
PN 处理后黄铁矿	33.66	32.53	9.06	1.09	3.84

3 结论

本文研究了 PN 抑制剂对黄铁矿的浮选抑制性能和吸附机理,根据试验结果和分析可以得出以下结论。

(1) 单一纯矿物浮选试验结果表明,PN 抑制剂对黄铁矿的抑制作用较强,对黄铜矿抑制作用不明显。当 PN 用量为 5.0 mg/L 时,黄铁矿回收率低于 20%,黄铜矿回收率在 90%以上,可以实现黄铁矿和黄铜矿的有效分离。人工混合矿物浮选分离试验结果表明,在 pH=8、丁黄用量为 30 mg/L、MIBC 用量为 10 mg/L、PN 抑制剂用量为 5 mg/L 的条件下,人工混合矿物浮选分离得到铜品位为 31.3%,铜回收率为 92.9%的铜精矿,分离效果良好。

(2) 接触角测量结果表明,PN 抑制剂可以增强黄铁矿表面的亲水性,而对黄铜矿的亲水性影响较小,从而实现选择性抑制黄铁矿。吸附量测试结果进一步证实了 PN 抑制剂能够选择性吸附于黄铁矿表面,其饱和吸附量可达 0.046 mg/g。

(3) 红外光谱和 XPS 分析结果表明,PN 抑制剂主要以物理吸附形式吸附于黄铁矿表面。SEM-EDS 分析显示,PN 处理后的黄铁矿表面附着物大量增加,且 C、N、O 元素含量明显上升。以上分析测试结果均证明 PN 抑制剂已经成功吸附于黄铁矿表面,PN 可以作为黄铁矿选择性抑制剂,实现铜硫高效分离。

参考文献(References):

[1] 魏明辉.我国铜资源开发利用现状及可持续发展策略[J].现代矿业,2023,39(10):9-12.

WEI Minghui. Development utilization status and sustainable development strategy of copper resources in China[J]. Modern Mining,2023,39(10):9-12.

[2] 中华人民共和国自然资源部.中国矿产资源报告(2023)[R].北京:地质出版社,2023.
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. China mineral resources (2023)[R]. Beijing: Geological Publishing House,2023.

[3] 宁继来.典型氧化铜矿物热活化硫化:浮选基础理论研究[D].昆明:昆明理工大学,2021.
NING Jilai. Typical thermally activated sulfurization of copper oxide minerals: research on basic theory of flotation[D]. Kunming:Kunming University of Science and Technology,2021.

[4] 胡岳华.矿物浮选[M].长沙:中南大学出版社,2014.
HU Yuehua. Mineral flotation[M]. Changsha: Central South University Press,2014.

[5] 纪慧超.高硫铜矿高效分选技术研究[D].昆明:昆明理工大学,2020.
JI Huichao. Research on high-efficiency separation technology of high-sulfur copper ore[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2020.

[6] 李悦,谢贤,李加文,等.铜硫浮选分离技术与药剂研究进展[J].化工矿物与加工,2024(1):1-12.
LI Yue, XIE Xian, LI Jiawen, et al. Research progress of copper-sulfur flotation separation technology and reagents[J]. Industrial Minerals & Processing,2024(1):1-12.

[7] 朱照照,金末梅.某铜硫矿选矿试验研究[J].内蒙古科技与经济,2017(14):56-57.
ZHU Zhaozhao, JIN Momei. Experimental study on beneficiation of a certain copper-sulfur ore[J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy,2017(14):56-57.

[8] 谭欣,刘书杰,肖巧斌.铜硫无碱等可浮工艺分选秘鲁某铁多金属矿深部矿石[J].有色金属(选矿部分),2022(3):55-65.
TAN Xin, LIU Shujie, XIAO Qiaobin. Separation of Cu-S alkali-free iso-flotation process on deep ore in an iron polymetallic deposit in Peru[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2022(3):55-65.

[9] 尚衍波,凌石生,王中明,等.抑制剂 BK506 在铜硫分离中的应用研究[J].有色金属(选矿部分),2022(1):134-137+141.
SHANG Yanbo, LING Shisheng, WANG Zhongming, et al. Study on application of depressant BK506 in Cu-S separation[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2022(1):134-137+141.

[10] 杨林,梁溢强,阚赛琼.新型黄铁矿抑制剂在铅硫分离中的试验研究[J].矿冶工程,2020,40(5):42-44+47.
YANG Lin, LIANG Yiqiang, KAN Saiqiong. Application of new pyrite depressant in pyrite-galena separation[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2020,40(5):42-44+47.

[11] BAI Xu, LIU Jian, WEN Shuming, et al. Selective separation of chalcopyrite and pyrite using a novel organic depressant at low alkalinity[J]. Minerals Engineering,2022,185:107677.

[12] FENG Bo, FENG Qiming, LU Yiping, et al. The effect of PAX/CMC addition order on chlorite/pyrite separation[J]. Minerals Engineering,2013,42:9-12.

[13] ZHANG Xiaolong, WANG Xun, LI Yanjun, et al. Adsorption mechanism of a new depressant on pyrite surfaces and its application to the selective separation of chalcopyrite from pyrite[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2021, 625:126892.

[14] HAN Guang, WEN Shuming, WANG Han, et al. Lactic acid as selective depressant for flotation separation of chalcopyrite from pyrite and its depression mechanism[J]. Journal of Molecular Liquids,2019,296:111774.

[15] MU Yunfan, PENG Yongjun, LAUTEN R A. The galvanic interaction between chalcopyrite and pyrite in the presence of lignosulfonate-based biopolymers and its effects on flotation performance[J]. Minerals Engineering,2018,122:91-98.

[16] 毕云霄,余攀,丁湛,等.黄铁矿浮选抑制剂的研究进展[J].矿产保护与利用,2020,40(4):157-166.
BI Yunxiao, YU Pan, DING Zhan, et al. The development of research on the pyrite flotation depressants[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2020,40(4):157-166.

[17] 杨波.闪锌矿与黄铁矿的交互作用及其对锌硫浮选分离的影响机理[D].昆明:昆明理工大学,2018.
YANG Bo. Interaction between sphalerite and pyrite and its effect on zinc-sulfur separation[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2018.

[18] 吴海祥.低碱度下黄铁矿与黄铜矿的浮选分离试验研究[D].昆明:昆明理工大学,2022.
WU Haixiang. Experimental study on flotation separation of pyrite and chalcopyrite under low alkalinity[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2022.

[19] WANG Xun, LIU Jie, ZHU Yimin, et al. Adsorption and depression mechanism of an eco-friendly depressant PCA onto chalcopyrite and pyrite for the efficiency flotation separation[J]. Colloids and Surfaces A:Physicochemical and Engineering Aspects,2021,620:126574.

[20] CAI Jinpeng, JIA Xiaodong, PEI Bin, et al. Separation of copper-sulfur using sodium polyacrylate as pyrite depressant in acidic pulp: floatability and adsorption studies[J]. Minerals Engineering,2022,188:107815.

[21] 张崇辉,何廷树,李慧,等.紫外光谱法研究黄药在黄铜矿表面的吸附热力学与动力学[J].光谱学与光谱分析,2019,39(10):3172-3178.
ZHANG Chonghui, HE Tingshu, LI Hui, et al. Adsorption thermodynamics and kinetics of xanthate at chalcopyrite surface based on ultraviolet spectrophotometry[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(10): 3172-3178.

[22] BAI Xu, LIU Jian, FENG Qicheng, et al. Study on selective adsorption of organic depressant on chalcopyrite and pyrite surfaces[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2021, 627: 127210.

[23] 胡阳.不同捕收剂体系中有机抑制剂对锂辉石及脉石矿物浮选行为影响研究[D].长沙:中南大学,2023.
HU Yang. Study on the influence of organic inhibitors in different collector systems on the flotation behavior of spodumene and gangue minerals[D]. Changsha: Central South University, 2023.

[24] KHOSO A S, HU Yuehua, LIU Runqing, et al. Selective depression of pyrite with a novel functionally modified biopolymer in a Cu-Fe flotation system[J]. Minerals Engineering, 2019, 135: 55-63.

[25] KHOSO A S, GAO Zhiyong, TIAN Mengjie, et al. The synergistic depression phenomenon of an organic and inorganic reagent on FeS_2 in Cu-S flotation scheme[J]. Journal of Molecular Liquids, 2019, 299: 112198.

[26] BAI Xu, LIU Jian, WEN Shuming, et al. Effect and mechanism of organic depressant on the hydrophobicity of chalcopyrite and pyrite under weakly alkaline environment[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 15: 4109-4116.

[27] 刘宏民.实用有机光谱解析[M].郑州:郑州大学出版社,2015.
LIU Hongmin. Practical spectral analysis for organic compounds[M]. Zhengzhou: Zhengzhou University Press, 2015.