

新型黄铜矿抑制剂 GX3 对铜钼浮选分离的影响及机理

徐文涛, 蔺月萌, 韩百岁, 谢昊宇

(辽宁科技大学矿业工程学院, 辽宁 鞍山 101145)

摘要: 针对传统黄铜矿抑制剂存在的污染环境和药剂消耗量大等问题, 开发新的抑制剂以实现铜钼有效分离具有重要意义。研究了一种新型黄铜矿抑制剂 GX3, 通过单矿物与人工混合矿浮选实验, 讨论了新型抑制剂 GX3 对 Cu、Mo 分离效果的影响, 探究有无 PAX、抑制剂浓度和 pH 值对黄铜矿和辉钼矿可浮性及铜钼分离性能的影响, 采用接触角、Zeta 电位、红外光谱、X 射线光电子能谱等分析抑制剂与矿物间的作用机理。浮选结果表明: 当 PAX 浓度为 10 mg/L 时, 在 pH 值为 8~12 范围和煤油浓度为 20 mg/L 的条件下, GX3 浓度 500 mg/L 时, 黄铜矿的回收率降至 20%, 而辉钼矿上浮回收率达 87%, 进而实现铜钼的高效分离。机理研究表明: GX3 可以氧化黄铜矿表面生成亲水的氧化物与氢氧化物, 使黄铜矿受到抑制, 而对辉钼矿的疏水性和表面性质几乎没有影响, 从而实现铜钼的有效浮选分离。

关键词: 黄铜矿; 辉钼矿; 铜钼分离; 抑制剂; 机理

doi:10.12476/kczhly.202403050087

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2025) 04-0091-09

引用格式: 徐文涛, 蔺月萌, 韩百岁, 等. 新型黄铜矿抑制剂 GX3 对铜钼浮选分离的影响及机理[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(4): 91-99.

XU Wentao, LIN Yuemeng, HAN Baisui, et al. Effect and mechanism of new chalcopyrite depressant gx3 on flotation separation of copper and molybdenum[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(4): 91-99.

铜、钼是中国重要的战略资源和建设现代国防的重要基础材料, 被广泛应用于工业、医学、化工等多个领域^[1-3]。钼和铜主要来源于斑岩型铜钼矿石^[4], 主要以黄铜矿和辉钼矿的形式存在^[5], 且铜常与钼共伴生。目前, 铜钼矿普遍采用浮选工艺, 即通过“混合浮选”得到铜钼混合精矿, 再利用“铜钼混合精矿分离”工艺最终得到高品质铜精矿和钼精矿^[6]。然而, 由于黄铜矿和辉钼矿可浮性接近^[7], 常需加入抑制剂以扩大两者的可浮性差异, 从而实现铜钼有效分离, 其中黄铜矿抑制剂是铜钼浮选分离的关键。因此如何研究高效、低毒和环境友好型的黄铜矿抑制剂具有重要意义。

常见的传统无机抑制剂包括氰化物、硫化物

和诺克斯药剂等^[8], 但氰化物具有剧毒, 影响人类健康和环境; 硫化钠和硫氢化钠容易获得、选别效果好, 但可能会将硫化氢释放到大气中, 从而对健康造成危害; 诺克斯药剂具有用量少和反应快的优点, 但其含有的砷和磷会污染铜钼精矿, 且在制备时会产生 H_2S 气体, 极易对人体和环境产生有害影响。此外, 通常需要大量与高质量的试剂才能实现高效分离, 导致成本高, 选择性差。在目前大力推行环保理念的大背景下, 因其存在损害人体健康和污染环境等问题, 其发展受到了一定的限制。另一方面, 巯基类、硫脲类和磺酸类等有机抑制剂, 虽然具有来源广泛、成本低等优势, 但由于其分离效果和条件等问题^[9], 目

收稿日期: 2024-03-05

基金项目: 2021 年度优秀青年人才项目 (2021YQ05); 省教育厅项目 (JYTMS20230953)

作者简介: 徐文涛 (1999-), 男, 硕士研究生。

通信作者: 韩百岁 (1987-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事硫化矿浮选等方向。

前尚未在工业中大规模应用。所以组合抑制剂的出现,在一定程度上弥补了这两种抑制剂各自的不足,且充分发挥了各组成药剂之间的协同效应,实现了较好的铜钼分离指标。

鉴于此,在查阅文献的基础上,本实验合成了新型无机抑制剂 GX3 作为黄铜矿抑制剂,开展单矿物和人工混合矿实验,通过接触角、Zeta 电位、红外光谱、X 射线光电子能谱等分析抑制剂与矿物间的作用机理。

1 实验

本实验中所用黄铜矿、辉钼矿均来自中国云南某矿山,将两种矿物经破碎、磨矿和筛分处理后,得到 74~38 μm 粒级样品。两种矿物 XRD 谱见图 1,结果表明,黄铜矿和辉钼矿矿样纯度较高,其主要成分是 CuFeS_2 和 MoS_2 ,其纯度分别为 95% 和 96%。

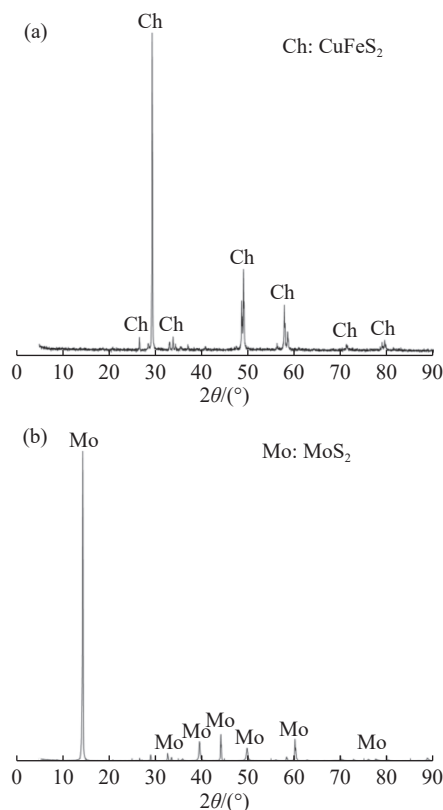


图 1 (a) 黄铜矿和 (b) 辉钼矿的纯矿物 XRD
Fig.1 XRD patterns of pure minerals of (a) chalcopyrite and (b) molybdenite

实验所用 pH 值调整剂为氢氧化钠 (NaOH) 与盐酸 (HCl),捕收剂为煤油、戊基黄药 (PAX),起泡剂为甲基异丁基甲醇 (MIBC),

且均为分析纯级(纯度>99%),实验过程中所用的水均为去离子水,抑制剂为自配的新型抑制剂 GX3,主要为硫代硫酸盐,与标准黄铜矿抑制剂 Na_2S (95% 纯度) 相比, GX3 具有低成本、高溶解度的特点。

2 实验方法

2.1 单矿物浮选实验

单矿物浮选实验在 CANSCI 型哈利蒙德管和 DXY-C2 磁力搅拌机(转速为 750 r/min)组合而成的设备上,进行,实验流程见图 2。称取 2.0 g 粒级 -74+38 μm 矿样于 100 mL 烧杯中,加入 30 mL 蒸馏水,于 TQ-100MV 型超声波振荡器中处理 1 min,取出烧杯静置 30 s 后除去上清液,为了控制矿物表面特性,再加入由 KNO_3 和去离子水配制成的背景溶液并定容至 50 mL。用稀 HCl 或者 NaOH 溶液调节矿浆 pH 值至 6~10,依次加入抑制剂、捕收剂和起泡剂,时间间隔为 1~5 min。最后将浮选产品烘干、称重,并计算回收率,计算公式见式 1.1。

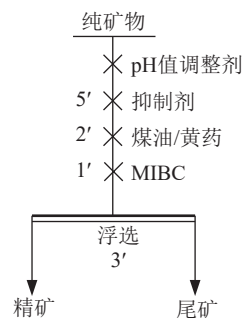


图 2 浮选实验的流程和条件
Fig.2 Flowsheet and condition of flotation tests

$$F = \frac{m_1}{m_1 + m_2} 100\% \quad (1)$$

式中 F ——浮选回收率, %;

m_1 ——浮选泡沫的重量, kg;

m_2 ——浮选管底物的重量, kg。

2.2 人工混合矿浮选实验

为了更深入验证 GX3 对黄铜矿与辉钼矿的浮选行为影响,进行人工混合矿浮选分离实验。查文献知^[10],每次称取 2.0 g -74+38 μm 粒级人工混合矿(黄铜矿和辉钼矿的质量比为 3:1)于浮选管中,按照实验条件依次加入相应的浮选药剂,浮选时间为 3 min。浮选结束后,所得泡沫产品为钼精矿,浮选管内产品为铜精矿;最终产品经过

滤、烘干和称重后，结合铜、钼的化验分析计算出铜精矿和钼精矿的回收率。

2.3 接触角测试

将制好的黄铜矿或辉钼矿测试样品放入烧杯中，加入一定量的去离子水置于磁力搅拌器上搅拌。调节到所需 pH 值后加入一定浓度的抑制剂溶液并搅拌 5 min，而后将悬浮液过滤，并用真空干燥箱（25℃）中干燥 12 h 后得到样品，最后把干燥后的样品用压片机进行压片。将压好的样品放于接触角测量仪的载物台上，调节好位置参数后使用微量注射器挤出小气泡使其附着在矿样下表面，待其稳定后冻结图像使用接触角测量仪（JC2000C 型）测量接触角。

2.4 Zeta 电位测试

取 0.4 g 黄铜矿或辉钼矿样品（-38 μm）于 50 mL 烧杯中并加入一定量的去离子水，在超声波清洗器中分散 2 min。而后加入一定浓度的抑制剂溶液，在磁力搅拌器上用 NaOH 或 HCl 溶液调节所需悬浮液 pH 值，静置 20 min 后取 1 mL 上层清液于 Zeta 电位仪（BcNano 90 Zeta 型）上进行测量。

2.5 红外光谱 (FTIR) 测试

取 1 g 粒级为 -38 μm 的黄铜矿或辉钼矿样品放入 100 mL 的烧杯中，并在该烧杯中加入 30 mL 去离子水，将其放入超声波清洗器中分散 2 min。而后加入一定浓度的抑制剂溶液，用 NaOH 或稀 HCl 溶液调节悬浮液所需 pH 值并在磁力搅拌器上搅拌 30 min，接着将悬浮液过滤，并在真空干燥箱（25℃）干燥样品，最后使用红外光谱仪（Thermo Electron corporation Vertex 70v 型）上测试样品并记录数据。

2.6 X 射线能谱 (XPS) 测试

取 1 g 黄铜矿或辉钼矿样品（-38 μm）放入 100 mL 的烧杯中并加入 30 mL 去离子水，在超声波清洗器中分散 2 min。而后加入一定浓度的抑制剂溶液，在磁力搅拌器上搅拌的同时用 NaOH 或稀 HCl 溶液调节所需悬浮液 pH 值，30 min 后将悬浮液过滤，并把过滤后的样品放入真空干燥箱（25℃）干燥。最后使用 X 射线能谱（Thermo Fisher Scientific K-Alpha 型）测试样品并得 XPS 的全谱和窄谱数据。使用 Advantage 软件 (Thermo Fisher Science) 对 XPS 谱图进行分峰拟合，同时，对所得数据都进行 C1s (284.8 eV) 校准。

3 结果与分析

3.1 单矿物浮选实验

在矿浆 pH 值为 8，煤油浓度为 20 mg/L，MIBC 浓度为 10 mg/L 的条件下，随着 GX3 浓度的增加，黄铜矿回收率由 90% 逐渐下降到 20% 左右，而辉钼矿回收率基本保持不变。说明 GX3 能够有选择性的抑制黄铜矿。

由图 3 可以看出，在矿浆 pH 值为 8，煤油浓度为 20 mg/L，PAX 浓度为 10 mg/L 和 MIBC 浓度为 10 mg/L 的条件下，加入 10 mg/L 的 PAX 后，随着 GX3 浓度的不断增加，黄铜矿的回收率大幅度下降，当 GX3 浓度为 500 mg/L 时，黄铜矿的回收率降至 20% 左右。而随着 GX3 浓度的增加，辉钼矿的回收率并未发生明显变化，始终保持在 90% 左右。结果表明在 PAX 存在的条件下，GX3 依然可以选择性抑制黄铜矿浮选辉钼矿，扩大二者的回收率差距。

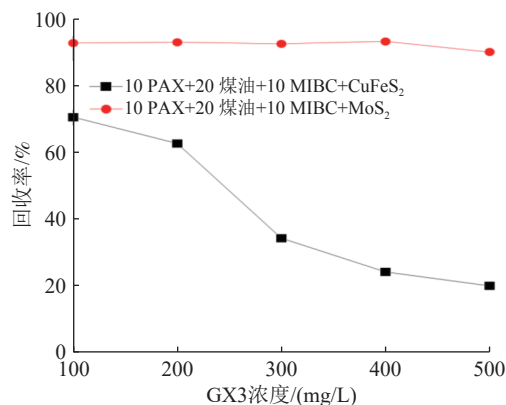


图3 不同 GX3 浓度对黄铜矿与辉钼矿浮选行为的影响结果

Fig.3 Effect of different GX3 concentrations on flotation behavior of chalcopyrite and molybdenite

图 4 可知，在黄铜矿抑制剂 GX3 浓度为 50 mg/L、煤油浓度为 20 mg/L 和 MIBC 浓度为 10 mg/L 的条件下，GX3 抑制剂对黄铜矿回收率并未因为矿浆 pH 值变化受到明显影响，而辉钼矿在碱性环境中回收率大幅度降低，可见在辉钼矿 GX3 抑制剂浮选体系中，矿浆 pH 值对其浮选回收率产生消极影响。在 pH 值等于 8 时，黄铜矿和辉钼矿的回收率的差值最大，在此 pH 值下能进行铜钼的有效分离。

3.2 人工混合矿浮选实验

为了更深入验证 GX3 对黄铜矿与辉钼矿的浮选行为影响，进行人工混合矿浮选分离实验。在

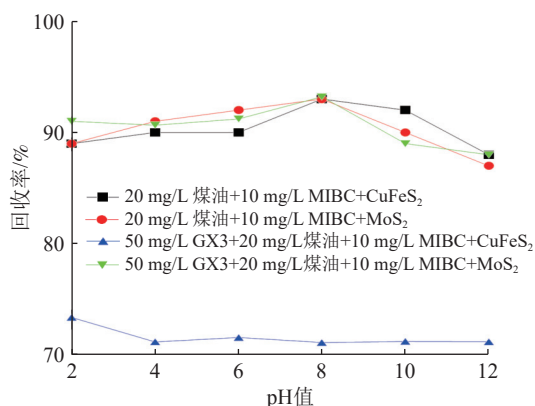


图4 矿浆 pH 值对黄铜矿与辉钼矿回收率的影响结果
Fig.4 Effect of pulp pH value on recovery of chalcopyrite and molybdenite

pH 值为 10, 煤油浓度为 20 mg/L, MIBC 浓度为 10 mg/L 的条件下, 随着 GX3 浓度从 0 增加到 300 mg/L 黄铜矿的回收率从 90% 迅速下降至 20% 左右, 随后趋于稳定。而辉钼矿的回收率虽略有下降, 但仍维持在 90% 左右。当 GX3 浓度高于 300 mg/L 时, 黄铜矿和辉钼矿之间的回收率的差值达到 70% 以上, 说明 GX3 对黄铜矿和辉钼矿具有较好的选择抑制性, 能成功实现铜钼有效分离。

由图 5 可知, 在 pH 值为 10, 煤油浓度为 20 mg/L, PAX 浓度为 10 mg/L 和 MIBC 浓度为 10 mg/L 的条件下, 可以看到随着 GX3 浓度从 0 增加到 600 mg/L, 黄铜矿的回收率不断下降到 20%, 然后趋于稳定, 而辉钼矿的回收率虽略有下降, 但其始终维持在 90% 以上。说明即使在 PAX 存在下, GX3 对黄铜矿仍然具有良好的抑制作用。

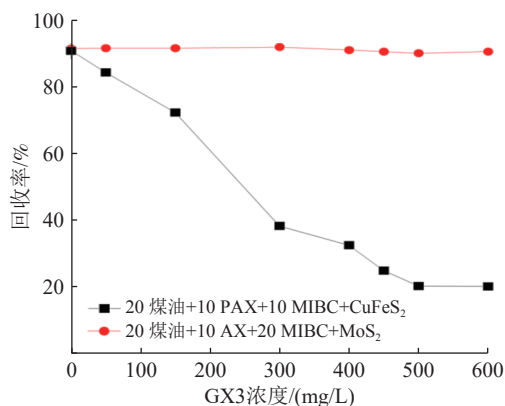


图5 GX3 浓度对黄铜矿与辉钼矿回收率的影响结果
Fig.5 Effect of GX3 concentration on chalcopyrite and molybdenite recovery

由图 6 可知, 在 GX3 抑制剂 300 mg/L, 煤油添加浓度为 20 mg/L 和 MIBC 添加浓度为 10 mg/L 的条件下, 未加入 GX3 时, 黄铜矿与辉钼矿回收

率在 pH=2~12 时均在 90% 以上, 二者难以分离。表明未加入 GX3 的条件下, 矿浆 pH 值对黄铜矿和辉钼矿的回收率基本未产生影响。加入 GX3 后, 黄铜矿回收率在 pH 值为 2~12 范围内先从 90% 下降至 29%, 而后从 29% 下降至 20% 左右, 最后趋于稳定。辉钼矿回收率在 pH=6~12 范围内先略有升高至 91.68%, 而后缓慢降至 86% 左右。尤其在 pH 值为 10 时黄铜矿和辉钼矿回收率的差值较大, 铜钼被有效分离。结果表明矿浆 pH 值为 6~12 时有利于实现铜钼分离。

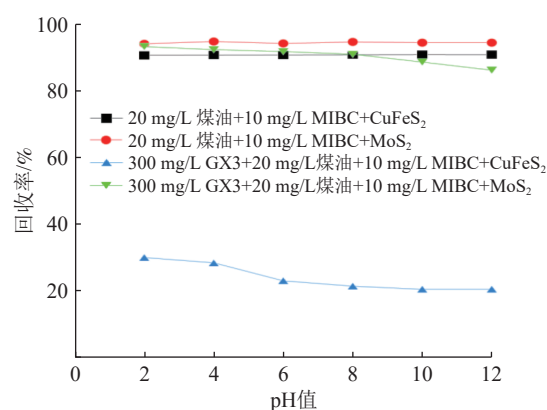


图6 pH 值对黄铜矿与辉钼矿回收率的影响结果
Fig.6 Effect of pH value on chalcopyrite and molybdenite recovery

4 浮选分离机理分析

4.1 接触角分析

由图 7 可知, 随着 GX3 浓度的增加黄铜矿表面接触角急剧变小, 而辉钼矿的表面接触角发生了轻微下降。其中, GX3 浓度为 400 mg/L 时, 两者接触角的差值较大, 与浮选结果一致。

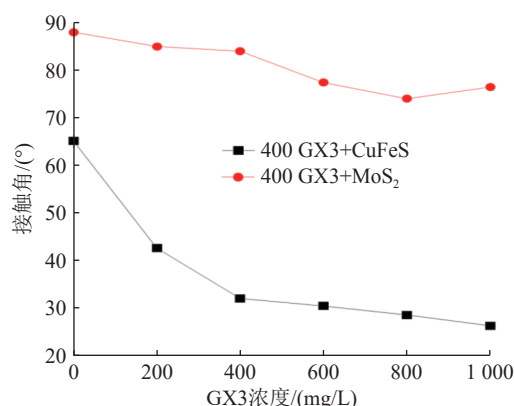


图7 GX3 抑制剂与黄铜矿和辉钼矿接触角关系的结果
Fig.7 Results of the contact angle relationship between GX3 inhibitors and chalcopyrite and molybdenite

4.2 Zeta 电位分析

经 GX3 处理前后黄铜矿和辉钼矿的 Zeta 电位结果见图 8。由于 OH⁻ 的含量不断升高使其由原来的扩散层压缩到致密层^[11]，未加入 GX3 的情况下，原始黄铜矿的 Zeta 电位在整个 pH 值范围内随着 pH 值的升高而不断降低。与原始黄铜矿 Zeta 电位下降原因不同的是，原始辉钼矿 Zeta 电位更负，这由于其在氧化水解过程中产生了带负电荷的物质（如：HMoO₄⁻ 和 MoO₄²⁻）。此外，在本研究中，黄铜矿的等电点（IEP）约为 5，与前人报道相近^[6-8,10-11]。因为 GX3 在矿浆中溶解并产生带负电荷 -COO⁻ 和 -CSS⁻ 基团吸附在矿物表面，黄铜矿经 GX3 处理后 Zeta 电位变得更负。结果说明 GX3 可能通过化学吸附的方式吸附在黄铜矿表面，进而对其起到抑制作用。相对于辉钼矿而言，该矿经 GX3 处理后 Zeta 电位仅发生轻微下降，说明 GX3 对辉钼矿的影响不大。

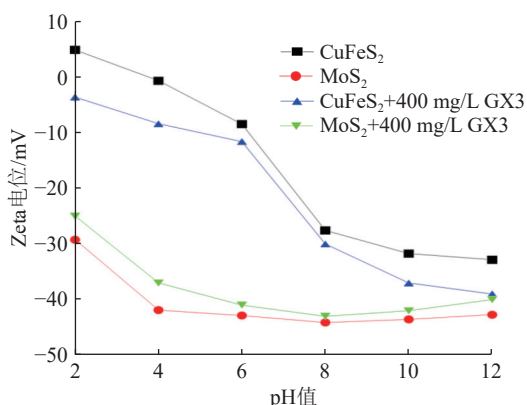


图 8 黄铜矿和辉钼矿的 Zeta 电位

Fig.8 Zeta potential plots of chalcopyrite and molybdenite

4.3 红外光谱分析

采用 FTIR 光谱法对 GX3、黄铜矿、辉钼矿与 GX3 作用前后进行了表征。见图 9 (a)，在 GX3 谱峰中出现了 1 137.24 cm⁻¹（强吸收峰）、1 003.50 cm⁻¹ 和 611.38 cm⁻¹（中等吸收峰）等特征峰，分别归属于 HSO₄⁻、SO₃²⁻ 和 SO₄²⁻。与原始黄铜矿谱图相比，在加入 GX3 后，位于 1 010.77 cm⁻¹ 处的吸收特征峰明显变得更为尖锐，可能是 GX3 中 HSO₄⁻（1 003.50 cm⁻¹）与黄铜矿发生了作用所导致。同时，在 607.45 cm⁻¹ 出现属于 S₂O₂²⁻ 的新的吸收峰。结果表明 GX3 可能与黄铜矿发生了化学作用。见图 9 (b)，辉钼矿与 GX3 作用前后的红外光谱未发生明显变化，表明 GX3 可能不与辉钼矿作用。

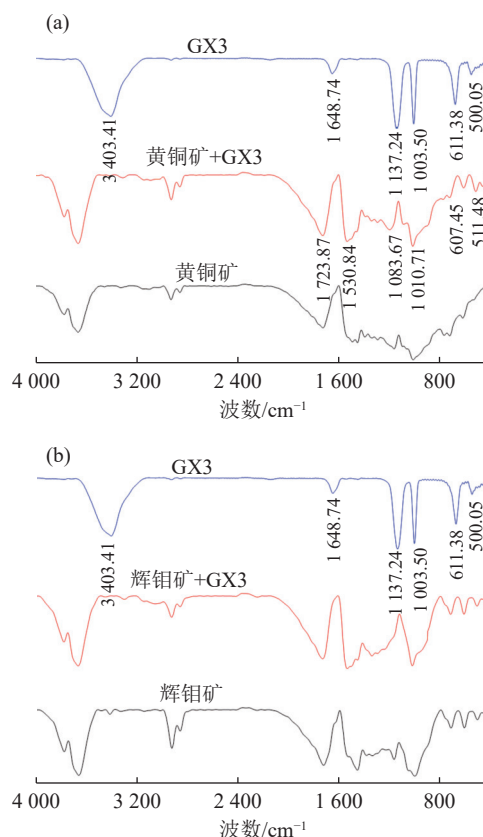


图 9 GX3 处理前后黄铜矿 (a) 与辉钼矿 (b) 的红外光谱

Fig.9 Infrared spectra of (a) chalcopyrite and (b) molybdenite before and after treatment GX3

4.4 XPS 分析

GX3 处理黄铜矿前后的 C 1s 窄谱见图 10。未经处理的黄铜矿 C 1s 峰分别位于 284.80 eV (C-C 或 C-H)、286.38 eV (C-OH 或 C-O-C) 和 289.08 eV (C-O)^[12]。GX3 的 C 1s 谱可用 3 个峰拟合，中心位于 284.80、286.20 与 288.88 eV 的峰分别表示 C-C 或 C-H、C-O 和 C=O 基团^[12-13]。经 GX3 处理后黄铜矿的 C 1s 谱峰包括 284.80 eV (C-C 或 C-H)、285.92 eV (C-O 或 C-S) 和 288.93 eV (C=O 或 C=S) 等三种组分。其中，属于 C-O 或 C-S 峰偏移了 0.28 eV，说明了 C-O 或 C-S 可能参与了与黄铜矿的络合反应。

图 11 为经 GX3 处理前后黄铜矿的 Cu 2p 谱。位于 932.25 和 935.24 eV 的谱峰分别对应于 CuFeS₂ 和 Cu(OH)₂^[14]。加入 GX3 后，CuFeS₂ 和 Cu(OH)₂ 所对应的峰分别向小偏移了 0.46 与 1.76 eV。其结合能的降低表面 Cu²⁺ 从 GX3 中获得电子，也进一步表明了 Cu²⁺ 可能与黄铜矿发生了较强的化学相互作用。

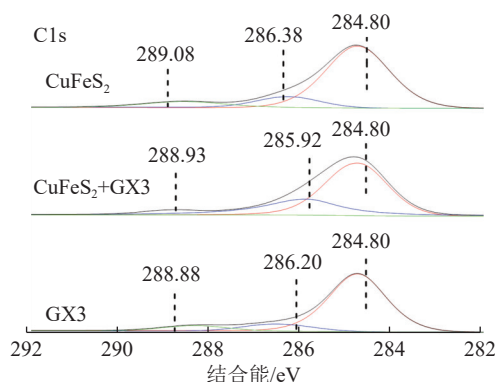


图 10 黄铜矿与 GX3 C 1s 谱

Fig.10 Chalcopyrite with GX3 C 1s spectra

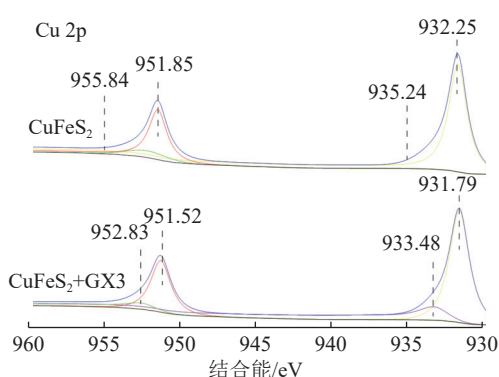


图 11 黄铜矿与 GX3 Cu 2p 谱

Fig.11 Chalcopyrite with GX3 Cu 2p spectrum

Fe 2p 谱图见图 12。峰值为 711.35 eV 的峰可归属为 FeOOH^[15-17]，该峰的出现表明黄铜矿表面被氧化。峰值为 708.71 和 713.12 eV 的峰分别对应着 CuFeS₂ 和 Fe₂(SO₄)₃，与文献报道一致^[18]。另外，在检测其他铁的种类中发现，除了氧化铁之外，还有与 S 元素成键的 FeS₂ (707.61 eV)，加入 GX3 后，Fe 2p 谱没有发生偏移。结果表明 GX3 对黄铜矿表面的 Fe 原子的影响较弱。因此，Fe 原子可能未参与 GX3 与黄铜矿间的反应。

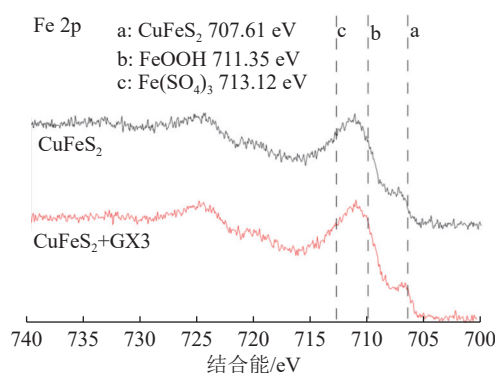


图 12 黄铜矿与 GX3 Fe 2p 谱

Fig.12 Chalcopyrite and GX3 Fe 2p spectra

GX3 和黄铜矿的高分辨率 S 2p 谱见图 13。位于 161.12 eV 的峰是属于黄铜矿晶体结构中完全配位的硫原子。其余三个峰依次归属于二硫化物(S₂²⁻)、多硫化物(S_n^{2-/S}⁰)和硫酸盐(SO₄²⁻)，与前人报道一致^[19]。GX3 的 S 2p 谱可以拟合成两个双峰，其中 S 2p_{3/2} 分裂峰的位置分别在 161.97 和 168.00 eV。在 pH 值为 10 的 GX3 溶液中得到的黄铜矿的 S 2p 光谱可以拟合成 160.92、162.16、164.34、163.22、168.30 和 169.35 eV，其中前三个峰与最后一个峰具有原始黄铜矿位置的特征^[10]。剩余的 163.22 和 168.30 eV 可能属于吸附 GX3 中的 -S- 和 SO₄²⁻ 所提供。此外，黄铜矿表面的 -S- 和 SO₄²⁻ 的结合能相较于 GX3 的 -S- 和 SO₄²⁻ 的结合能分别增大了 1.25 eV 和 0.30 eV，表明了 GX3 吸附后 S 原子的电子密度降低，可能是由于 -S- 和 SO₄²⁻ 对 Cu 离子贡献了电子。

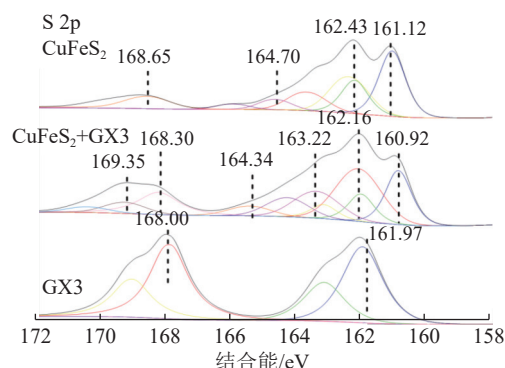


图 13 黄铜矿与 GX3 S 2p 谱

Fig.13 Chalcopyrite and GX3 S 2p spectrum

GX3 处理前后辉钼矿的 Mo 3d 窄谱见图 14。辉钼矿的 Mo 3d 可分为 4 部分，分别为 S 2s(226.83 eV)、Mo⁴⁺3d_{5/2}(229.62 eV)、Mo⁴⁺3d_{3/2}(232.76 eV)和 MoS₃(235.40 eV)^[20]。加入 GX3 后，辉钼矿的 Mo 3d 结合能并未发生明显偏移。结果表明，GX3 可

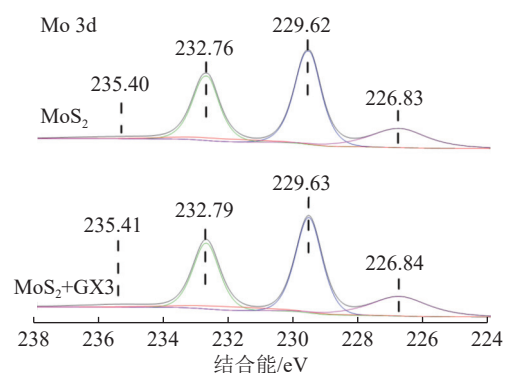


图 14 辉钼矿与 GX3 Mo 3d 谱

Fig.14 Molybdenite and GX3 Mo 3d spectra

能不与辉钼矿中 Mo 原子相互作用。

辉钼矿的 S 2p 图见图 15。位于 162.50 eV (S 2p_{3/2}) 和 163.69 eV (S 2p_{1/2}) 的峰属于原始 MoS₂ 中的 S。经 GX3 处理后, 辉钼矿的 S 2p_{3/2} 和 S 2p_{1/2} 峰的强度和结合能的位置均未发生明显改变, 表明 GX3 对辉钼矿几乎未产生影响。

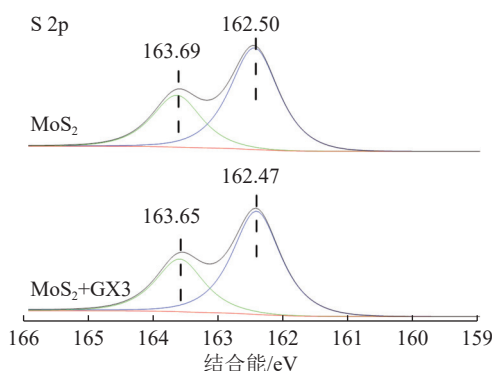


图 15 辉钼矿与 GX3 S 2p 谱
Fig.15 Molybdenite and GX3 S 2p spectra

5 结 论

(1) GX3 可以显著降低黄铜矿的可浮性, 而对辉钼矿几乎不产生影响, 从而能够实现铜钼的有效分离。

(2) 当 PAX 浓度为 10 mg/L 时, 在 pH 值为 8~12 范围和煤油浓度为 20 mg/L 的条件下, GX3 浓度为 500 mg/L 时, 可使黄铜矿的回收率降至 20% 左右, 而辉钼矿回收率仍保持在 87% 以上, 实现铜钼分离。

(3) GX3 药剂通过化学吸附的方式吸附在黄铜矿表面, 易于与黄铜矿表面的 Cu 等点位发生相互作用, 黄铜矿物表面生成亲水金属氢氧化物和金属硫酸盐, 如 CuO、Cu(OH)₂、FeOOH、Fe₂(SO₄)₃ 等, 导致了黄铜矿的 Zeta 电位显著降低, 改变了黄铜矿表面的疏水性, 使接触角显著降低, 从而降低了黄铜矿的可浮性。

(4) GX3 药剂处理前后, 辉钼矿的接触角和 Zeta 电位基本未发生改变, 红外光谱和 XPS 测试结果表明未与辉钼矿发生化学反应, 通过氢键和静电作用而产生的物理吸附吸附在辉钼矿表面, 基本未影响辉钼矿的可浮性。

参考文献:

[1] 关智文, 杨丙桥, 胡杨甲. 一种新型辉钼矿抑制剂及其

在铜钼浮选分离中的机理研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2022(5):171-176.

GUAN Z W, YANG B Q, HU Y J. A novel molybdenite depressant and its mechanism in flotation separation of copper and molybdenum[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2022(5):171-176.

[2] 张亮, 杨卉芃, 冯安生, 等. 全球钼矿资源现状及市场分析[J]. 矿产综合利用, 2019(3):11-16.

ZHANG L, YANG H P, FENG A S, et al. Study on general situation and analysis of supply and demand of global molybdenum resource[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(3):11-16.

[3] 朱欣然. 国内外钼资源供需形势分析[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(1):172-178.

ZHU X R. Analysis of supply and demand situation of molybdenum resources at home and abroad[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(1):172-178.

[4] 郭谨铭, 杨洪英, 孟晶, 等. 西藏甲玛铜钼矿浮选产品工艺矿物学[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2023, 44(8):1195-1200.

GUO J M, YANG H Y, MENG J, et al. Process mineralogy study on flotation products of copper-molybdenum ore in Jiama, Tibet[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science Edition, 2023, 44(8):1195-1200.

[5] 张汉鑫, 李慧, 梁精龙, 等. 稀有金属钼资源回收现状及进展[J]. 矿产综合利用, 2020(1):47-49.

ZHANG H X, LI H, LIANG J L, et al. Current status and progress of rare metal molybdenum resource recovery[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(1):47-49.

[6] 张磊, 戴惠新, 杜五星. 铜锌硫化矿分离工艺现状[J]. 矿产综合利用, 2019(1):1-5.

ZHANG L, DAI H X, DU W X. Research progress of copper-zinc sulfide ore separation technology[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(1):1-5.

[7] 赵开乐, 闫武, 刘飞燕, 等. 细粒嵌布硫化钼矿铜钼高效分离技术[J]. 矿产综合利用, 2021(2):1-7.

ZHAO K L, YAN W, LIU F Y, et al. High efficiency separation of chalcopyrite from a fine disseminated molybdenite[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(2):1-7.

[8] 陈桂泉, 杨若瑜, 吕向文, 等. KMD 系列铜抑制剂用于江西德兴铜矿铜钼分离[J/OL]. 矿产综合利用 (2023-11-13) [2024-03-05]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=fsvnL9wA1q3RQcJ4Qz6DV576EP1iM2w3lIIftX_VRSprNgY-LMsCSUS7xg8IYuVRk8bjt6Utb009n40234Kk7kVIPHyIbG9CD__Tqh7keKW9T1mZL0QkKXczC8ShM-gBbWrZj08W_

n0=&uniplatform=NZKPT&language=CHS.

CHEN G Q, YANG R Y, LYU X W, et al. KMD series copper depressant for the separation of copper and molybdenum in Jiangxi Dexing copper mine[J/OL]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources (2023-11-13) [2024-03-05]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=fsvnL9wA1q3RQcJ4Qz6DV576EP1iM2w3lIIftX_VRSprNgY-LMsCSUS7xg8IYuVRk8bjt6Utb009n40234Kk7kVIPHyIbG9CD__Tqh7keKW9T1mZL0QkKXczC8ShM-gBbWrZj08W_n0=&uniplatform=NZKPT&language=CHS.

[9] YANG B, YAN H, ZENG M, et al. Tiopronin as a novel copper depressant for the selective flotation separation of chalcopyrite and molybdenite[J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 266:118576.

[10] 焦跃旭, 姚新, 陈鹏, 等. 新型高效辉钼矿抑制剂及其作用机理研究[J]. *矿冶工程*, 2020, 40(6):30-33.

JIAO Y X, YAO X, CHEN P, et al. Depressing mechanism of a novel and efficient molybdenite depressant[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2020, 40(6):30-33.

[11] 张村. 硫化铜钼矿的新型抑制剂及其机理研究[D]. 赣州:江西理工大学, 2017.

ZHANG C. Research on the new inhibitor of sulfide copper-molybdenum mine and its mechanism[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2017.

[12] WANG C T, LIU R Q, WU M R, et al. Flotation separation of molybdenite from chalcopyrite using rhodanine-3-acetic acid as a novel and effective depressant[J]. *Minerals Engineering*, 2021, 162.

[13] YIN Z, SUN W, HU Y, et al. Utilization of acetic acid-[(Hydrazinylthioxomethyl)thio]-sodium as a novel selective depressant for chalcopyrite in the flotation separation of molybdenite[J]. *Separation and Purification Technology*, 2017, 179:248-256.

[14] 夏亮, 杜淑华, 朱国庆, 等. 安徽某含泥难选铜钼矿选矿实验[J]. *矿产综合利用*, 2019(3):44-47.

XIA L, DU S H, ZHU G Q, et al. Beneficiation of a refractory Cu-Mo ore containing high-content slimes in Anhui[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(3):44-47.

[15] 王忠锋. 河南某铜钼矿选矿试验研究[J]. *中国钼业*,

2018, 42(1):27-31.

WANG Z F. An experimental study on ore beneficiation of a copper-molybdenum mine in Henan[J]. *China Molybdenum Industry*, 2018, 42(1):27-31.

[16] 修大伟, 李丽, 刘金浪. 钼精矿降铜应用实践[J]. *有色金属 (选矿部分)*, 2021(4):99-103.

XIU D W, LI L, LIU J L. Application practice of copper reduction in molybdenum concentrate[J]. *Nonferrous Metals(Mineral Processing Section)*, 2021(4):99-103.

[17] 周利华. 西藏某铜钼多金属矿浮选工艺流程优化实验研究[J/OL]. *矿产综合利用* (2023-11-13) [2024-03-05]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=fsvnL9wA1q0qUrlejk7CUx0j3E8r3X1GLJPEZggPY2QWHbKjZIEyJKREWKTdQIJzr6-nxqXyMdOFOqZUotCkCN-JITqiP8-j4E1qFC2sO-mgxtR0CNd_-s_YHbO-XMx65oNEjH5r8PQ=&uniplatform=NZKPT&language=CHS

ZHOU L H. Experimental study on flotation process optimization of a copper molybdenum polymetallic ore in Xizang[J/OL]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources* (2023-11-13) [2024-03-05]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=fsvnL9wA1q0qUrlejk7CUx0j3E8r3X1GLJPEZggPY2QWHbKjZIEyJKREWKTdQIJzr6-nxqXyMdOFOqZUotCkCN-JITqiP8-j4E1qFC2sO-mgxtR0CNd_-s_YHbO-XMx65oNEjH5r8PQ=&uniplatform=NZKPT&language=CHS

[18] Yin Z, Sun W, Hu Y, et al. Utilization of acetic acid-[(hydrazinylthioxomethyl)thio]-sodium as a novel selective depressant for chalcopyrite in the flotation separation of molybdenite[J]. *Separation & Purification Technology*, 2017, 179:248-256.

[19] 简胜, 胡岳华, 孙伟. 西藏某低品位铜钼矿选矿工艺[J]. *矿产综合利用*, 2019(5):32-36+16.

JIAN S, HU Y H, SUN W. Process of a low-grade mineral copper-molybdenum ore in Tibet[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(5):32-36+16.

[20] 严海. 铜钼浮选分离新型抑制剂及其机理研究[D]. 武汉:武汉工程大学, 2022.

YAN H. Study on the novel depressant of copper-molybdenum flotation separation and its mechanism[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2022.

Effect and Mechanism of New Chalcopyrite Depressant GX3 on Flotation Separation of Copper and Molybdenum

XU Wentao, LIN Yuemeng, HAN Baisui, XIE Haoyu

(School of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning,
Anshan, Liaoning 110451, China)

Abstract: In view of the problems of environmental pollution and large consumption of reagents in traditional chalcopyrite depressant, it is of great significance to develop new depressant to achieve effective separation of copper and molybdenum. A new type of depressant GX3 was studied. The effects of PAX, depressant concentration and pH value on the floatability of chalcopyrite and molybdenite and the separation performance of copper and molybdenum were investigated by single mineral and mixed mineral flotation tests. The mechanism of action between depressant and minerals was analyzed by contact angle, Zeta potential, infrared spectroscopy and X-ray photoelectron spectroscopy. The flotation results show that when the concentration of PAX is 10 mg/L, the recovery rate of chalcopyrite is reduced to 20% and the recovery rate of molybdenite is 87% when the concentration of GX3 is 500 mg/L at the condition of pH value 8 ~ 12 and kerosene concentration of 20 mg/L, thus achieving efficient separation of copper and molybdenum. The mechanism study shows that GX3 can oxidize the surface of chalcopyrite to form hydrophilic oxides and hydroxides, which inhibits chalcopyrite, but has little effect on the hydrophobicity and surface properties of molybdenite, thus achieving effective flotation separation of copper and molybdenum.

Keywords: chalcopyrite; molybdenite; Cu-Mo separation; depressant; mechanism

////////////////////////////////////
(上接第 82 页)

Metallogenic Regularity and Exploration Targets of Rutile Deposits in the Panxi-Huidong Area, Southwest China

JIA Zhiquan¹, YUE Xiangyuan², LIU Yifan², ZHENG Ke¹, LIU Xiang¹, JIANG Tianlong¹, HAO Jiao¹
(1.No.3 Geological Brigade of Sichuan Province, Chongzhou, Sichuan 611230, China; 2.Institute of
Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu,
Sichuan 610041, China)

Abstract: The Panxi-Huidong Area in China is a significant large-scale rutile ore cluster, whose metallogenic mechanisms and resource potential are crucial for ensuring the supply of strategic titanium resources. This study systematically reveals the geological characteristics and metallogenic patterns of rutile deposits through field geological surveys and petrographic studies, while proposing exploration strategies. Key findings include: (1) Ore bodies are strictly controlled by the metamorphic volcanic-sedimentary rocks of the lower Tiantang Formation (Pt₃t) in the pre-Sinian system, with sericite phyllite and chlorite-sericite phyllite as the main ore-bearing formations, derived from calc-alkaline volcanic tuff that provided the primary material source; (2) Rutile exhibits typical metamorphic differentiation characteristics, being directionally distributed along the (001) cleavage planes of micas; (3) The genesis of the deposits is attributed to a volcanic sedimentation-regional metamorphism superimposed type; (4) A "geochemical-geophysical" prospecting methodology is proposed, prioritizing hinge zones of composite anticlines, schistosity-dense zones, and CSAMT low-resistivity anomalies as key exploration targets. This research establishes a new paradigm for studying Precambrian titanium metallogenic systems on the western margin of the Yangtze Block and provides critical guidance for breakthroughs in deep mineral exploration.

Keywords: metallogenic regularity; prospecting direction; rutile; Huidong Area