

doi: 10. 20242/j. issn. 2097-5384. 2025. 03. 012

## 低品位高含泥铜钼矿混合浮选试验研究

杨婉婷<sup>1,2</sup>, 蓝卓越<sup>1,2,3</sup>, 简胜<sup>4</sup>, 谢峰<sup>4</sup>, 李云川<sup>1,2</sup>, 李雄<sup>1,2</sup>

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093;

2. 省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 昆明 650093;

3. 金属矿尾矿资源绿色综合利用国家地方联合工程研究中心, 昆明 650093;

4. 昆明冶金研究院有限公司, 昆明 650093)

**摘要:**以普朗铜矿的低品位斑岩型硫化铜钼矿为研究对象, 针对其原矿品位低、含泥量高、矿物成分复杂和嵌布粒度细等问题, 在工艺矿物学研究的基础上, 考察了磨矿细度、pH值、抑制剂种类及用量、捕收剂种类及用量和起泡剂MIBC用量对铜钼混合浮选的影响。最终确定了粗选条件: 磨矿细度为 $-0.074$  mm占65%, pH值为10, 水玻璃用量150 g/t, 捕收剂组合MCO+煤油(20+60) g/t, 起泡剂MIBC用量50 g/t。此条件下, 获得的铜钼混合粗精矿铜品位为6.77%, 回收率为74.61%, 钼品位为0.40%, 回收率为75.94%。进一步通过对比粗精矿再磨位置、再磨细度及闭路浮选流程, 最终确定粗精矿直接再磨至 $-0.038$  mm占90%, 采用粗磨-粗精再磨-一粗两精三扫-中矿混合返回粗选的闭路浮选流程, 获得的铜钼混合精矿铜品位为23.32%, 总回收率为80.50%, 钼品位为1.20%, 总回收率为74.56%。该研究成果为低品位高含泥铜钼矿资源的开发利用提供了参考。

**关键词:** 铜钼混合浮选; 低品位; 高含泥; 药剂制度; 流程结构

中图分类号: TD925

文献标志码: A

文章编号: 2097-5384(2025)03-0441-11

## Experimental Study on Mixed Flotation of Low-grade Copper-Molybdenum Ore with High Mud Content

YANG Wanting<sup>1,2</sup>, LAN Zhuoyue<sup>1,2,3</sup>, JIAN Sheng<sup>4</sup>, XIE Feng<sup>4</sup>, LI Yunchuan<sup>1,2</sup>, LI Xiong<sup>1,2</sup>

(1. College of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. State Key Laboratory of Clean Utilization of Complex Nonferrous Metal Resources, Kunming 650093, China;

3. National and Local Joint Engineering Research Center for Green Comprehensive Utilization of Metal Mine Tailings Resources, Kunming 650093, China;

4. Kunming Metallurgical Research Institute, Kunming 650093, China)

**Abstract:** In this paper, aiming at the problems of low grade of raw ore, high mud content, complex mineral composition and fine distribution size, the low-grade porphyry copper and molybdenum sulfide ore of Pulang Copper Mine was studied. Based on the process mineralogy study, the effects of grinding fineness, pH value, type and dosage of inhibitor, type and dosage of collector and dosage of foaming agent MIBC on the mixed flotation of copper and molybdenum were investigated. Finally, the roughing conditions were determined: grinding fineness was  $-0.074$  mm accounted for 65%, pH value was 10, water glass dosage was 150 g/t, the dosages of collector combination MCO and kerosene were 20 and 60 g/t, foaming agent MIBC dosage was 50 g/t. Under these conditions, the obtained copper-molybdenum mixed rough concentrate had a copper

收稿日期: 2024-06-25

基金项目: 云南省科技厅科技计划项目(202202AB080012)

Fund: Supported by Science and Technology Project of Science and Technology Department of Yunnan Province (202202AB080012)

作者简介: 杨婉婷(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为矿产资源综合利用、浮选理论与工艺。

通信作者: 蓝卓越(1967—), 博士, 教授, 研究方向为资源综合利用、浮选理论与工艺、矿产资源综合利用。

引用格式: 杨婉婷, 蓝卓越, 简胜, 等. 低品位高含泥铜钼矿混合浮选试验研究[J]. 有色金属(中英文), 2025, 15(3): 441-451.

YANG Wanting, LAN Zhuoyue, JIAN Sheng, et al. Experimental Study on Mixed Flotation of Low-grade Copper-Molybdenum Ore with High Mud Content[J]. Nonferrous Metals, 2025, 15(3): 441-451.

grade of 6.77%, a copper recovery rate of 74.61%, a molybdenum grade of 0.40% and a molybdenum recovery rate of 75.94%. By comparing the regrinding position, regrinding fineness and closed-circuit flotation process, it was determined that 90% of the coarse concentrate was re-ground directly to  $-0.038$  mm, and the closed-circuit flotation process of coarse grinding-coarse refining re-grinding-one rough, two fine, three sweeping-medium ore mixture and back roughing was adopted. The copper grade of the copper-molybdenum mixed concentrate was 23.32%, and the total recovery rate was 80.50%. The molybdenum grade was 1.20% and the total recovery rate was 74.56%. The research results provide a reference for developing and utilizing low-grade and high-mud copper-molybdenum ore resources.

**Key words:** copper-molybdenum mixed flotation; low grade; high mud content; pharmaceutical system; process structure

铜、钼是我国重要的战略资源,是国民经济发展的主要支撑。以铜为主伴生有钼的斑岩型硫化铜钼矿是生产铜金属和钼金属最主要的来源之一<sup>[1-2]</sup>。共生或伴生于铜矿中的钼具有较好的回收价值,但受矿物间致密共生、矿物组成复杂、嵌布粒度不均及可浮性差异不显著等因素影响,铜、钼高效富集及分离难度较大,在低品位多金属铜钼矿分选过程中尤为突出<sup>[3-5]</sup>。因此,如何高效回收低品位铜钼矿石中的铜钼矿物是开发利用该类矿石资源的关键<sup>[6]</sup>。

云南香格里拉普朗铜矿属于典型的斑岩型硫化铜钼矿,由于现场使用自然崩落法进行开采,随着开采力度的增加,地表塌陷区的面积逐渐增大。矿石在开采过程中混入大量冰碛物,原矿品位逐年降低,且含铜钼矿物嵌布粒度较细,导致精矿品位和回收率显著下降<sup>[7]</sup>,大量有用矿物以微细粒的形式流失。该铜钼矿还含有大量斜长石、钾长石、绢云母、绿泥石等易泥化脉石,由于冰碛物长期受风吹日晒雨淋的影响,致使大量脉石矿物出现风化、蚀变等变化<sup>[8-10]</sup>,导致脉石矿物在后续磨矿阶段出现泥化现象恶化浮选环境。

低品位斑岩型铜钼矿采用的浮选方法主要有三种工艺:优先浮选<sup>[11]</sup>、等可浮浮选<sup>[12]</sup>和混合浮选再分离<sup>[13]</sup>。对低品位铜钼矿石,混合浮选再分离工艺的应用最广<sup>[14]</sup>。本文以普朗铜矿为研究对象,针对低品位高含泥铜钼矿混合浮选进行深入研究,在工艺矿物学研究的基础上考察磨矿细度、pH、抑制剂种类及用量、捕收剂种类及用量、起泡剂MIBC用量、粗精矿再磨位置及再磨细度和闭路浮选试验方案对铜钼混合浮选的影响,实现铜钼矿的有效回收,对我国铜钼矿资源开发利用具有指导意义。

## 1 矿石性质

### 1.1 矿石的化学成分分析

采用X-荧光光谱对矿石中元素的含量进行半定量分析,分析结果见表1。对矿石进行了化学多元素分析,分析结果见表2。结果表明,矿石中目的元素Cu的含量为0.30%,其他元素主要为S、Fe、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O、CaO、MgO,含量分别为0.76%、2.81%、63.66%、13.68%、3.64%、3.05%、2.17%、1.24%,另有少量Mo、TiO<sub>2</sub>等。

表1 矿石X-射线荧光光谱分析结果

Element	Si	Al	Fe	K	Na	Ca	Mg
Content	25	8	2	2	2	2	2
Element	Mn	S	Ti	Cu	P	Pb	Zn
Content	0.02	0.4	0.4	0.3	0.2	0.003	0.01
Element	Zr	Sr	Rb	Ba	Ca	Cr	Mo
Content	0.01	0.04	0.003	0.02	0.002	0.01	0.003

表2 矿石化学多元素分析结果

Element	Cu	Mo	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe	K <sub>2</sub> O
Content	0.3	0.015	63.66	14.35	2.81	3.64
Element	S	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	
Content	0.76	3.05	2.17	1.24	0.83	

## 1.2 矿物的组成及含量

使用MLA对矿石中的矿物颗粒进行了分析和统计,以确定其矿物组成。矿物的组成见图1(a),由图1(a)可知,矿物中硫化物占2.3%,硅酸盐占65.5%,氧化物占29.8%,碳酸盐占1.3%,磷酸盐占1.1%。由图1(b)可知硫化物主要为黄铜矿,由

图1(c)可知脉石矿物主要以石英、斜长石、钾长石、白云母、黑云母为主,约占85%,而斜长石、钾长石、绢云母、绿泥石等易泥化脉石可能在磨矿过程中产生较多矿泥恶化浮选环境,故在磨矿细度和调整剂的选择上需注意,从而减少矿泥对铜钼混合浮选的影响。

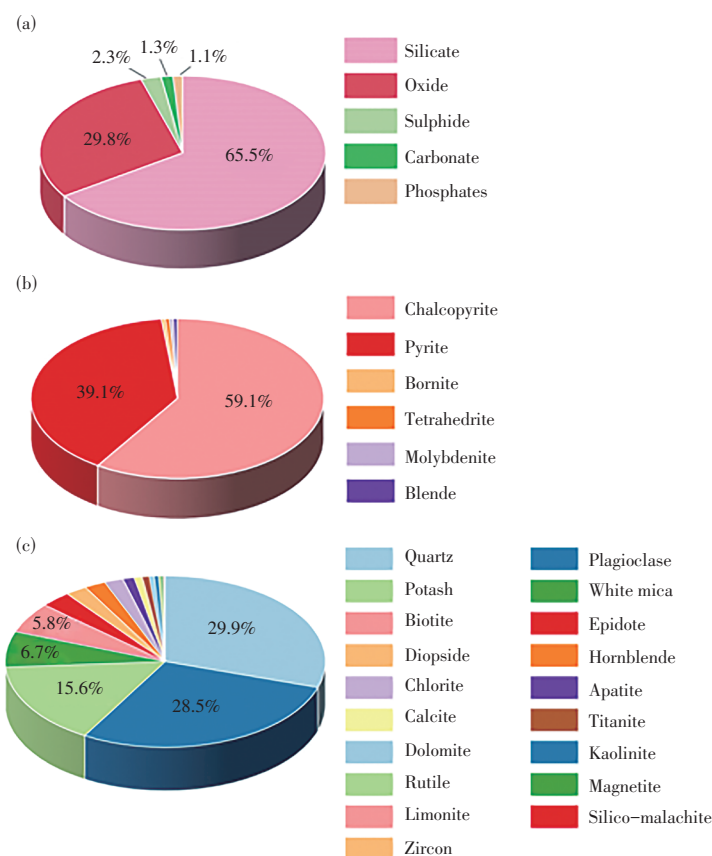


图1 矿物的组成及含量: (a) 矿物组成; (b) 硫化矿组成及含量; (c) 脉石矿物组成及含量

Fig. 1 Composition and content of minerals: (a) Mineral composition; (b) Composition and content of sulfide ore; (c) Composition and content of gangue mineral

## 1.3 主要矿物的嵌布特征

由图2(a)、(b)可知,黄铜矿呈它形粒状,嵌布粒度较细,集合体分布于脉石矿物颗粒之间,或沿矿石裂隙浸染状集中分布;黄铜矿与黄铁矿及斑铜矿、辉铜矿、黝铜矿等次生铜矿物有部分连生或交代现象,黄铜矿与黄铁矿有相互交生、相互包裹现象,斑铜矿、辉铜矿、黝铜矿主要沿黄铜矿边缘及裂隙进行交代,其中斑铜矿交代现象明显,部分黄铜矿呈残余状于斑铜矿中;大多数黄铜矿分布于石英、长石颗粒之间,少数黄铜矿呈短细脉状嵌布于片状云母解离缝中。

由图2(c)、(d)所示,辉钼矿呈片状、扭曲状,多以集合体形式产出,集合体呈枝状,主要与长石、

云母等连生。

由图2(e)、(f)所示,脉石矿物以石英、斜长石、钾长石、白云母、黑云母为主,除石英外,其余矿物均遭受风化蚀变,其中,斑晶成分和基质成分中的斜长石、钾长石均遭受风化蚀变,绢云母化、钠黝帘石化、褐色黏土化,完全蚀变为绢云母等黏土矿物、黝帘石、斜黝帘石、绿帘石的微细粒混合物,致其表面浑浊,蚀变矿物为显微鳞片状或泥晶状,粒度小于0.004 mm。因此,矿石蚀变过程本身产生了较多黏土矿物或泥质矿物,同时也导致矿石致密性和硬度降低。这个可能是导致矿石在磨矿过程中产生较多泥质的原因之一。

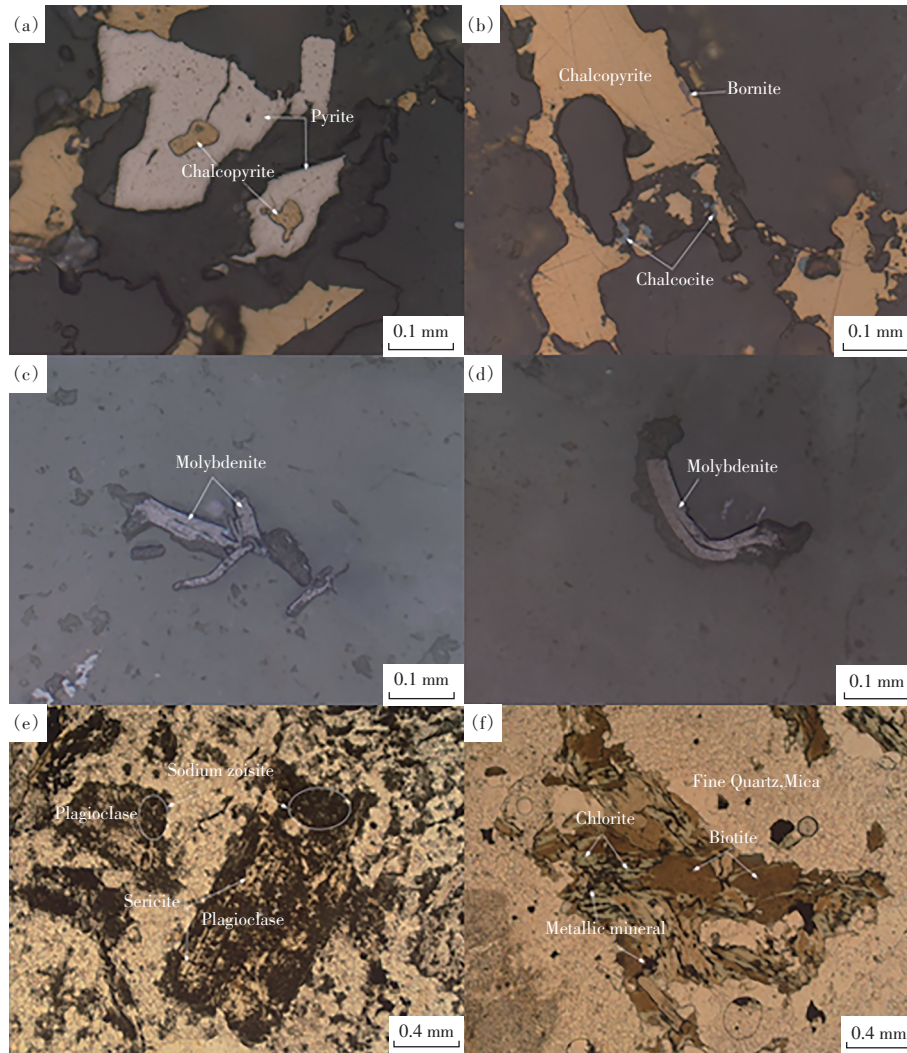


图2 主要矿物嵌布特征:(a)黄铜矿与黄铁矿连生;(b)黄铜矿与黝铜矿连生;(c)辉钼矿,集体呈枝状;(d)片状辉钼矿呈扭曲状;(e)斜长石绢云母化、钠黝帘石化;(f)片状黑云母部分蚀变为绿泥石

Fig. 2 Major mineral distribution characteristics: (a) Chalcopyrite is associated with pyrite; (b) Chalcopyrite is associated with tetrahedrite; (c) Molybdenite, aggregate dendritic; (d) Flake molybdenite is twisted; (e) Plagioclase sericitization, sodium zoisitization; (f) Partial erosion of sheet biotite into chlorite

## 2 材料与方 法

### 2.1 试验药剂

试验药剂为分析纯,主要包括调整剂石灰( $\text{CaO}$ )、水玻璃( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )、六偏磷酸钠( $\text{Na}_6[(\text{PO}_3)_6]$ )、单宁酸( $\text{C}_{76}\text{H}_{52}\text{O}_{46}$ )、糊精( $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n \cdot x\text{H}_2\text{O}$ )、淀粉( $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$ )、羧甲基纤维素(CMC)、硅酸铝盐( $\text{Al}_2\text{H}_6\text{O}_9\text{Si}_3$ );捕收剂黄药( $\text{C}_3\text{H}_5\text{OS}_2\text{Na}$ )、黑药( $\text{C}_4\text{H}_9\text{Na}$ )、煤油( $\text{C}_{15}\text{H}_{32}$ )、乙硫氮( $\text{C}_5\text{H}_{10}\text{NNaS}_2$ )、YK-111、YX-9013、YK-9016和MCO;起泡剂为甲基异丁基甲醇(MIBC)。上述药剂MCO、YK-111、YX-9013和YK-9016购于上海汇菲化

工有限公司,其余药剂均购于上海阿拉丁生化科技有限公司。

### 2.2 研究方法

采用单因素实验法对该矿石进行浮选试验,主要考察磨矿细度、石灰用量、抑制剂种类及用量、捕收剂种类及用量以及起泡剂用量等条件对铜钼矿浮选的影响。浮选矿浆浓度为33%,采用石灰调节pH值,抑制剂和捕收剂作用时间为3 min,起泡剂作用时间为2 min,刮泡时间为3 min,对浮选铜钼混合精矿和尾矿进行过滤、烘干,分析品位,计算回收率。具体浮选流程见图3。

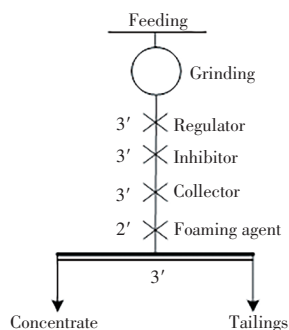


图 3 浮选试验流程

Fig. 3 Flotation test flow

### 3 低品位高含泥铜钼矿浮选试验研究

#### 3.1 铜钼混浮粗选条件试验

##### 3.1.1 磨矿细度对铜钼矿的影响

##### 3.1.1.1 磨矿细度条件试验研究

试验流程如图 3 所示,考察磨矿细度对铜钼矿浮选的影响,固定 pH 值为 10,水玻璃用量 300 g/t,捕收剂 MCO+煤油(30+30) g/t, MIBC 用量 30 g/t,结果如图 4 所示。

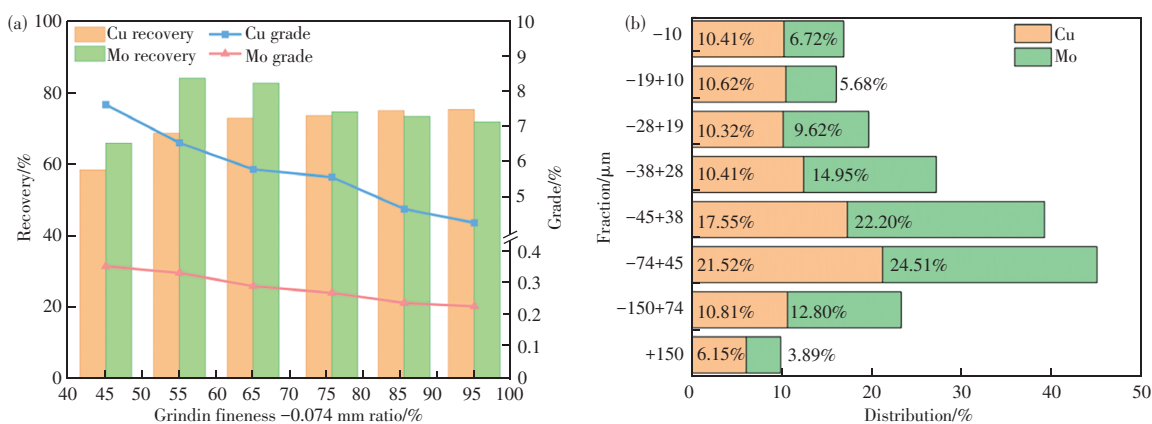


图 4 磨矿细度对铜钼矿的影响

Fig. 4 Influence of grinding fineness on copper and molybdenum ore: (a)The effect of grinding fineness on copper and molybdenum mixing flotation; (b)Grinding fineness-0.074 mm accounts for 65% of raw ore particle size distribution

由图 4(a)可知,随着 -0.074 mm 粒级含量的增大,铜钼混合精矿的品位均下降,铜的回收率逐渐增加,而钼的回收率在 -0.074 mm 占比为 55.33% 达到最大值 83.97%。为防止浮选过程中脉石矿物泥化恶化浮选环境,综合考虑在 -0.074 mm 占比为 65% 的条件下进行浮选。

##### 3.1.1.2 磨矿产品粒级分布

为掌握磨矿产品的粒级分布,在磨矿细度为 -0.074 mm 占 65% 时进行粒度分析,确定各粒级矿石中铜和钼的分布率,结果见图 4(b)。由图 4(b)可知,在磨矿细度为 -0.074 mm 占 65% 的条件下,铜在 +150  $\mu\text{m}$  占比为 6.15%, -28  $\mu\text{m}$  的占比为 31.36%,钼在 +150  $\mu\text{m}$  占比为 3.89%, -28  $\mu\text{m}$  的占比为 22.02%,说明易选粒级占比约 62.5%。

##### 3.1.2 pH 条件试验研究

试验流程如图 3 所示,考察 pH 对铜钼矿浮选的影响,固定磨矿细度 -0.074 mm 为 65%,水玻璃用量 300 g/t,捕收剂 MCO+煤油(30+30) g/t, MIBC 用量 30 g/t,结果如图 5 所示。

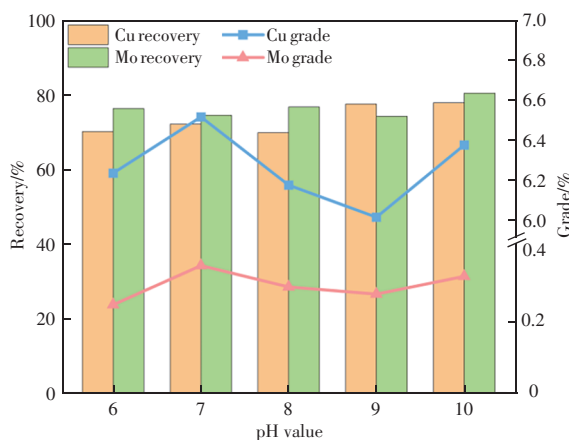


图 5 pH 值对铜钼混浮的影响

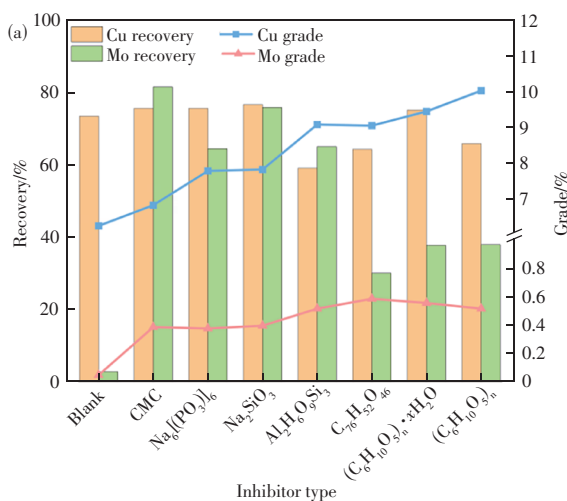
Fig. 5 Effect of pH on the mixing flotation of copper and molybdenum

由图 5 可知,当 pH 值增加至 10 时,铜钼混合精矿的回收率最高,铜钼混合精矿中铜的品位为 6.38%,回收率为 77.98%,钼的品位为 0.33%,回收率为 80.59%,综合考虑在 pH 值为 10 的条件下进行浮选。

### 3.1.3 抑制剂条件试验研究

#### 3.1.3.1 抑制剂种类对铜钼混浮的影响

试验流程如图3所示,考察抑制剂种类对铜钼矿浮选的影响,固定磨矿细度 $-0.074\text{ mm}$ 为65%,抑制剂用量300 g/t,捕收剂MCO+煤油(30+30) g/t, MIBC用量30 g/t,结果如图6所示。



由图6(a)可知,使用水玻璃,六偏磷酸钠和CMC时铜钼混合精矿的回收率均比较高,而使用水玻璃时在保证铜钼的回收率的同时品位也较好,铜钼混合精矿中铜的品位为7.82%,回收率为76.73%,钼的品位为0.40%,回收率为75.94%。综合考虑选用水玻璃作为抑制剂。

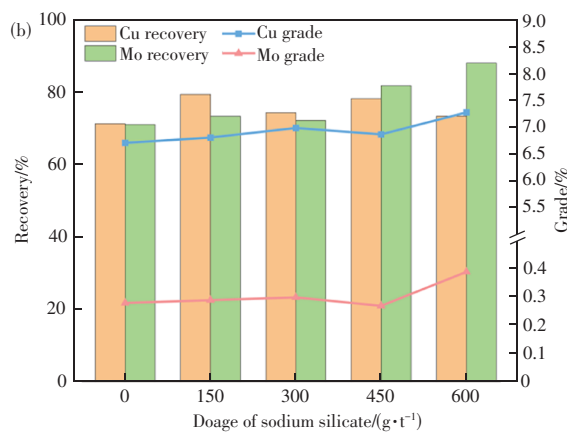


图6 抑制剂种类及用量对铜钼混浮的影响:(a)抑制剂种类;(b)水玻璃用量

Fig. 6 Effect of inhibitor type and dosage on copper-molybdenum mixing flotation: (a) inhibitor types; (b) Dosage of  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$

#### 3.1.3.2 水玻璃用量对铜钼混浮的影响

试验流程如图3所示,考察水玻璃用量对铜钼矿浮选的影响,固定磨矿细度 $-0.074\text{ mm}$ 为65%,pH值为10,捕收剂MCO+煤油(30+30) g/t, MIBC用量30 g/t,结果如图6(b)所示。

由图6(b)可知,随着水玻璃用量的增加,铜钼混精铜的回收率在150 g/t是达到最大值,而钼的回收率则随着水玻璃的用量提高,当水玻璃用量为150 g/t时铜钼混合精矿中铜的品位为6.99%,回收率为79.57%,钼的品位为0.3%,回收率为72.36%。综合考虑水玻璃用量选用150 g/t。

#### 3.1.4 捕收剂种类及用量试验研究

##### 3.1.4.1 单一药剂和组合药剂对比试验

通过查阅文献,在现有的商业药剂的基础上进行单一药剂和组合药剂的对比试验,试验流程如图3所示,考察单一药剂和组合药剂对铜钼矿浮选的影响,固定磨矿细度 $-0.074\text{ mm}$ 为65%,pH值为10,水玻璃用量为150 g/t,捕收剂用量为60 g/t, MIBC用量30 g/t,结果如图7(a)、(d)所示。

由图7(a)可知,黑药和MCO对铜钼混精都具有较高的品位和回收率,黑药作用下铜钼混合精矿中铜的品位为6.18%,回收率为79.47%,钼的品位为0.27%,回收率为69.44%,MCO作用下铜钼混合精矿中铜的品位为6.24%,回收率为76.80%,钼的品位为0.38%,回收率为66.84%,黑药对铜具有良好的选择性,但对钼的选择较差,而MCO对铜钼都具有较高的选择性。

由图7(b)试验结果可知,组合药剂黄药+乙硫氮和MCO+煤油对铜钼矿浮选的品位和回收率都具有良好的效果,黄药+乙硫氮组合药剂作用下铜钼混合精矿中铜的品位为7.11%,回收率为79.46%,钼的品位为0.37%,回收率为76.66%,MCO+煤油组合药剂作用下铜钼混合精矿中铜的品位为7.66%,回收率为77.31%,钼的品位为0.43%,回收率为88.88%,而MCO+煤油的组合对铜钼的选择性更好,尤其是对钼的捕收效果远远高于黄药+乙硫氮的捕收效果,钼的回收率提高12.22%,且考虑后续的铜钼分离浮选,故综合考虑选用组合捕收剂MCO+煤油进行铜钼矿的浮选。

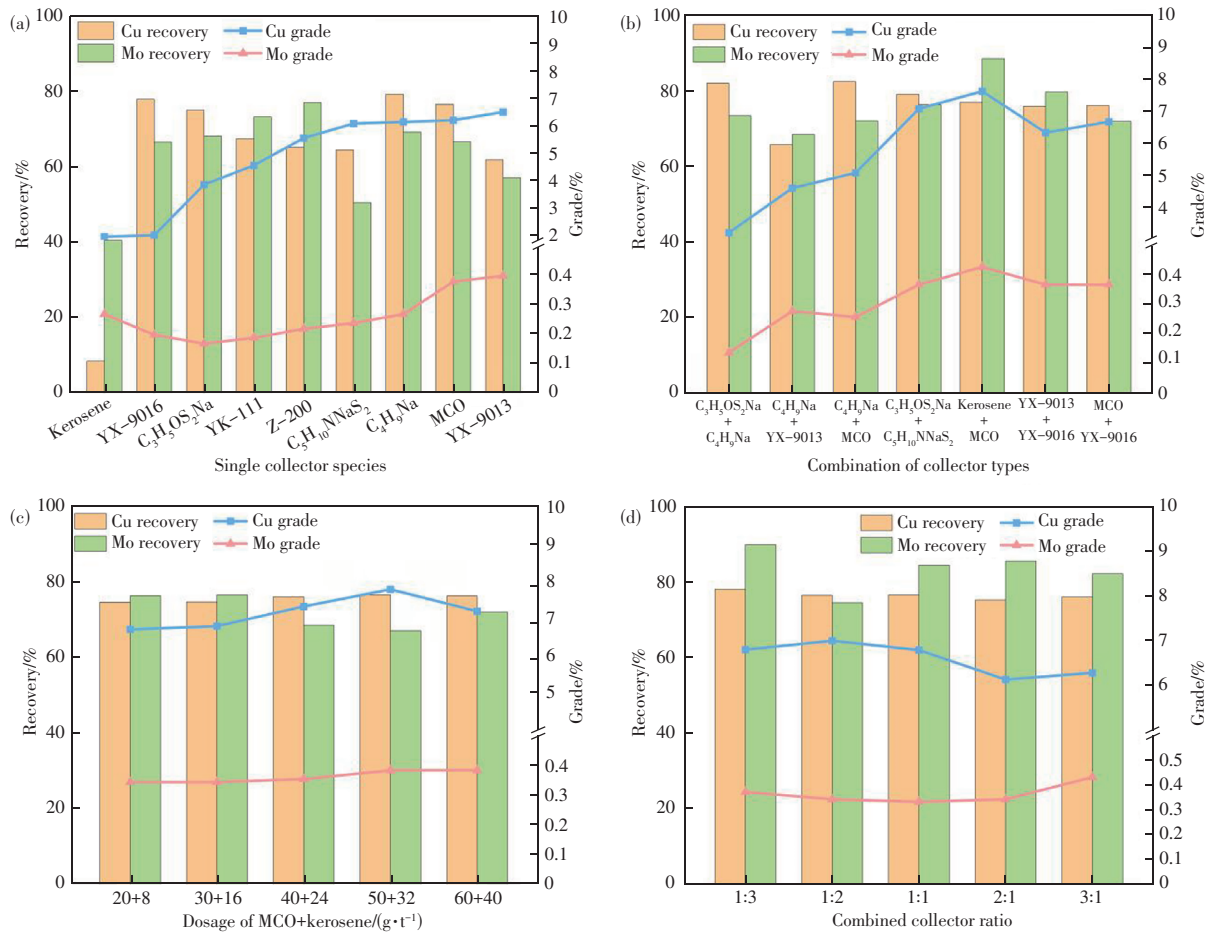


图 7 捕收剂对铜钼混浮的影响：(a) 单一捕收剂；(b) 组合捕收剂；(c) MCO+煤油用量；(d) 组合捕收剂配

Fig. 7 Effect of the collector on copper and molybdenum mixing flotation: (a) Single collector; (b) Combined collectors; (c) Dosage of MCO+kerosene; (d) Ratio of combined collector

### 3.1.4.2 组合药剂用量试验

流程如图 3 所示，考察组合药剂用量对铜钼矿浮选的影响，固定磨矿细度  $-0.074 \text{ mm}$  为 65%，pH 值为 10，水玻璃用量为 150 g/t，MIBC 用量 30 g/t，结果见图 7(c) 所示。

由图 7(c) 试验结果可知，组合捕收剂 MCO+煤油的药剂总用量为 (50+32) g/t 时铜钼混合精矿中铜的品位为 7.82%，回收率为 78.20%，钼的品位为 0.39%，回收率为 78.00%，效果最好，故组合捕收剂 MCO+煤油的药剂总用量为 (50+32) g/t。

### 3.1.4.3 组合药剂配比试验

流程如图 3 所示，考察组合药剂配比对铜钼矿浮选的影响，固定磨矿细度  $-0.074 \text{ mm}$  为 65%，pH 值为 10，组合捕收剂 MCO+煤油总用量为 82 g/t，MIBC 用量为 30 g/t，结果如图 7(d) 所示。

由图 7(d) 试验结果可知，组合捕收剂 MCO+煤油的药剂配比为 1:3 时铜钼混合精矿中铜的品位为 6.83%，回收率为 78.55%，钼的品位为 0.38%，回收率为 90.39%，效果最好，故组合捕收剂 MCO+煤油的药剂配比为 1:3。

### 3.1.5 MIBC 用量试验研究

流程如图 3 所示，考察 MIBC 用量对铜钼矿浮选的影响，固定磨矿细度  $-0.074 \text{ mm}$  为 65%，pH 值为 10，抑制剂水玻璃用量为 150 g/t，组合捕收剂 MCO+煤油用量 (20+60) g/t，结果如图 8 所示。

由图 8 可知，随着 MIBC 用量的增加，铜钼混精铜钼的回收率都有较大幅度的提高，而品位也随之降低，当 MIBC 为 50 g/t 时，铜钼混合精矿中铜的品位为 6.77%，回收率为 74.61%，钼的品位为 0.40%，回收率为 75.94%。综合考虑 MIBC 用量选用 50 g/t。

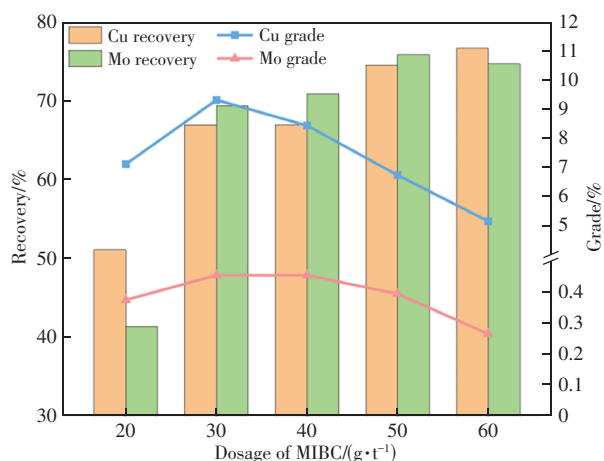


图8 MIBC用量对铜钼混浮的影响

Fig. 8 Influence of MIBC dosage on copper and molybdenum mixing flotation

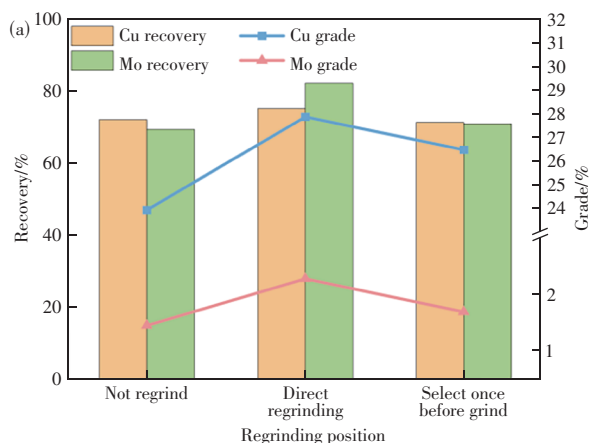


图9 铜钼混浮粗精再磨对铜钼混浮的影响:(a)再磨位置;(b)再磨细度

Fig. 9 Influence of coarse-fine regrinding on the mixing flotation of copper and molybdenum:

(a) Regrinding position; (b) Regrinding fineness

粗精矿再磨为直接再磨。

### 3.2.2 再磨细度研究

为了考察铜钼混浮精选时粗精矿再磨细度对铜钼精选的影响,试验以铜钼混浮一次粗选精矿为给矿进入直接再磨,以磨矿细度为变量,固定pH值为10,水玻璃用量为20 g/t, MIBC用量为10 g/t,通过粗磨-粗精再磨-粗两精的组合得到精选的铜钼混合精矿,试验结果见图9(b)。

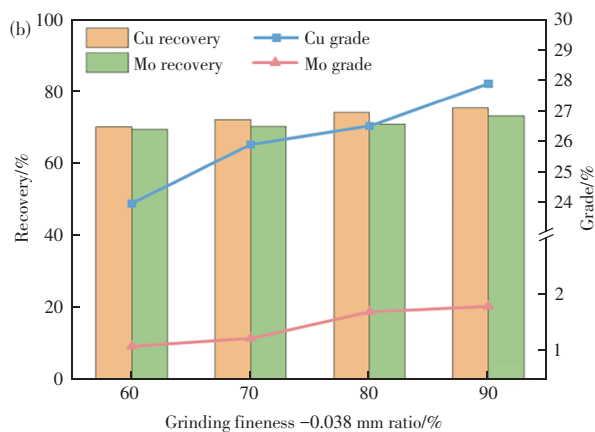
由图9(b)可知,粗精矿再磨的细度增加,铜钼混合精矿的品位增加,当再磨细度为-0.038 mm占90%时,铜钼混合精矿中铜的品位为27.89%,回收率为75.62%,钼的品位为1.81%,回收率为73.46%,故综合考虑再磨细度为-0.038 mm占90%。

## 3.2 铜钼混浮精选条件试验

### 3.2.1 再磨条件试验

为了考察铜钼混浮精选时粗精矿再磨对铜钼精选的影响,进行粗精矿再磨位置的对比试验研究,试验以铜钼混浮一次粗选精矿为给矿,固定再磨磨矿细度为-0.038 mm占比80%,pH值为10,水玻璃用量为20 g/t, MIBC用量为10 g/t,且用量逐级减半,通过粗磨-粗精再磨-粗两精的组合得到精选的铜钼混合精矿,试验结果见图9(a)。

由图9(a)可知,铜钼粗精矿再磨对提高铜钼混合精矿的品位和回收率均有较大提升,粗精矿直接再磨对比精选一次后再磨更有利于铜、钼的回收,铜钼混合精矿中铜的品位为27.91%,回收率为75.41%,钼的品位为2.3%,回收率为82.46%,故综合考虑



### 3.3 浮选开路试验

在上述的药剂制度的基础上,固定pH值为10,精选和扫选的药剂用量逐级减半进行粗磨-粗精再磨-粗两精三扫的开路浮选试验,试验原则流程图见图10,试验结果见表3。

由表3可知,开路试验获得铜钼混合精矿中铜的品位为27.91%,回收率为54.87%,钼的品位为2.30%,回收率为66.70%。经过粗精矿细磨和两段精选后,铜和钼品位明显升高,铜的品位从粗选试验的6.77%上升至27.91%,钼的品位从0.40%上升至2.30%。

### 3.4 浮选工艺闭路试验方案对比

进行两种铜钼混合浮选流程方案的闭路试验,试验流程分别见图11(a)、(b),两种闭路试验流程均

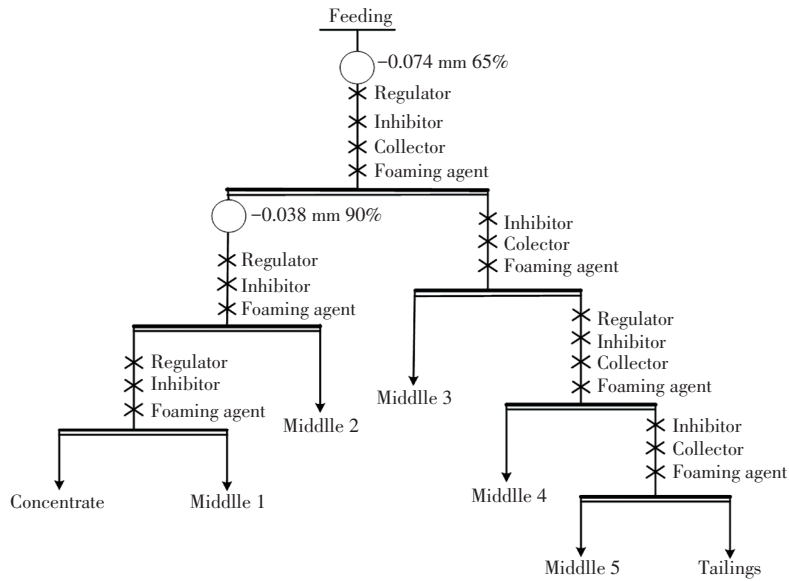


图 10 开路浮选试验流程图

Fig. 10 Open circuit test flow chart

表 3 开路浮选试验结果

Table 3 Open-circuit flotation test results

Test process	Product	Productivity/%	Copper grade/%	Copper recovery/%	Molybdenum grade/%	Molybdenum recovery/%
Open circuit test	Concentrate	0.58	27.91	54.87	2.30	66.70
	Middle 1	0.35	9.23	10.95	0.570	9.98
	Middle 2	2.46	1.15	9.59	0.047	5.78
	Middle 3	2.17	0.5	3.68	0.016 0	1.74
	Middle 4	1.82	0.28	1.73	0.005 7	0.52
	Middle 5	1.81	0.22	1.35	0.011 0	1.00
	Tailings	90.83	0.059	17.83	0.004 0	14.29
	Ore feeding	100.0	0.295	100.0	0.020	100.0

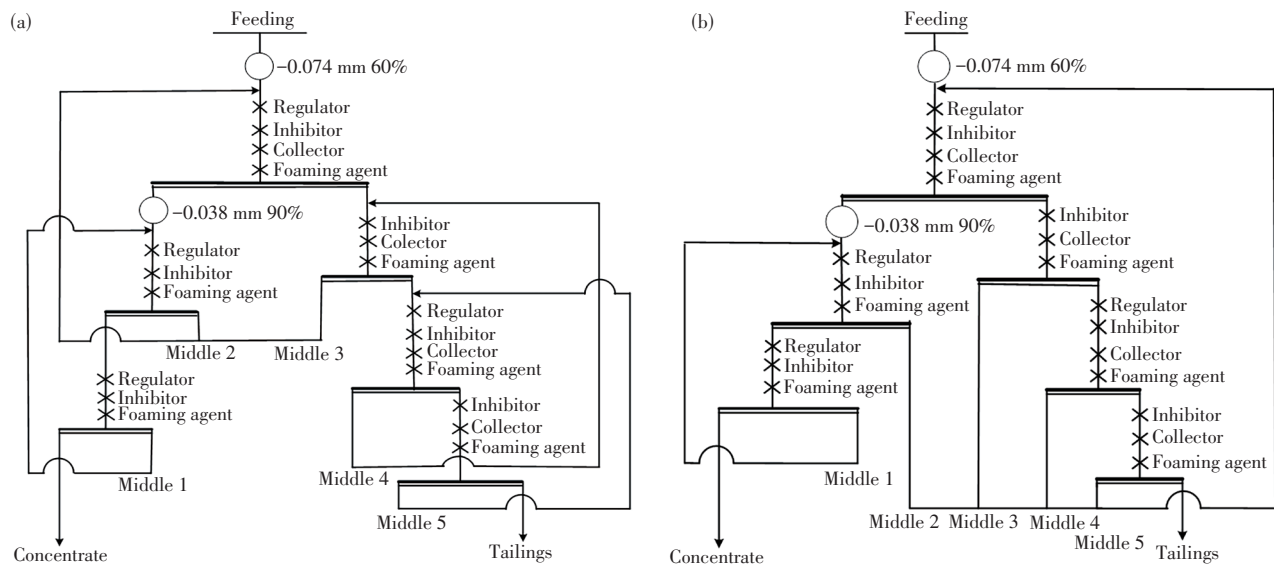


图 11 闭路浮选试验流程对比: (a) 流程方案一; (b) 流程方案二

Fig. 11 Comparison of closed-circuit flotation test flow: (a) Scheme I; (b) Scheme II

采用粗磨-粗精再磨一粗两精三扫的混合浮选流程,而方案一的中矿采用逐级返回至上一级浮选,方案

二的中矿将中1的矿返回至上一级精选,中2至中5混合后返回至粗选,试验结果见表4。

表4 闭路浮选流程对比试验结果

Table 4 Comparative test results of closed-circuit flotation flow

Test process	Product	Productivity/%	Copper grade/%	Copper recovery/%	Molybdenum grade/%	Molybdenum recovery/%
Scheme I	Concentrate	1.42	21.40	70.23	0.58	63.35
	Tailings	96.75	0.077	19.92	0.005	36.65
	Ore feeding	100.0	0.30	100.0	0.013	100.0
Scheme II	Concentrate	0.93	23.32	80.50	1.20	74.56
	Tailings	99.07	0.053	19.50	0.004 0	25.44
	Ore feeding	100.0	0.27	100.0	0.015	100.0

由表4可知,采用方案一,将中矿逐级返回至上一级,会导致铜钼混合精矿的回收率和品位均大幅度降低,这一现象可能是因为原矿中含有大量易泥化脉石矿物恶化浮选环境造成,导致在返矿过程中铜钼的混合精矿中夹带脉石矿物,使混合精矿中回收率和品位大幅度的降低。当采用方案二,将中2至中5混合后均返回至粗选,铜钼混合精矿中的铜钼均得到较高的品位和回收率,混合精矿中铜的品位为23.32%,总回收率为80.50%,钼的品位为1.20%,总回收率为74.56%,故综合考虑浮选闭路采用粗磨-粗精再磨一粗两精三扫-中矿混合返回粗选的混合浮选选别流程。

## 4 结论

1) 普朗铜矿矿石中目的矿物以微细粒存在,含铜0.3%,含钼0.015%,脉石矿物主要为石英、长石、云母等,易泥化且有一定蚀变。

2) 通过工艺矿物学研究,确定了最佳浮选条件:磨矿细度-0.074 mm占65%,pH值10,水玻璃150 g/t,捕收剂MCO+煤油(20+60) g/t,起泡剂MIBC 50 g/t,获得的铜钼混合粗精矿铜品位6.77%,回收率74.61%,钼品位0.40%,回收率75.94%。

3) 通过优化浮选流程,确定粗精矿直接再磨至-0.038 mm占90%,采用闭路浮选流程,获得的铜钼混合精矿铜品位23.32%,总回收率80.50%,钼品位1.20%,总回收率74.56%。

## 参考文献

[1] 杨晓峰,刘瑶瑶.铜钼矿浮选研究现状与进展[J].矿冶,2021,30(6):42-47.  
YANG Xiaofeng, LIU Yaoyao. Research status and progress of flotation of copper and molybdenum ores [J]. Mining and Metallurgy, 2021, 30(6): 42-47.

[2] 周平,唐金荣,施俊法,等.铜资源现状与发展态势分析[J].岩石矿物学杂志,2012,31(5):750-756.  
ZHOU Ping, TANG Jinrong, SHI Junfa, et al. Current situation and development trend of copper resources [J]. Journal of Petromineralogy, 2012, 31(5): 750-756.

[3] 宋翔宇,张红涛,许来福,等.铜钼分离工艺的研究现状与展望[J].有色金属(选矿部分),2022(6):92-101.  
SONG Xiangyu, ZHANG Hongtao, XU Laifu, et al. Research status and prospect of copper-molybdenum separation process [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2022(6): 92-101.

[4] 孟奇,崔毅琦,童雄,等.铜钼分离技术现状与趋势[J].矿冶,2014,23(2):19-22,39.  
MENG Qi, CUI Yiqi, TONG Xiong, et al. Status and trend of Cu-Mo separation technology [J]. Mining and Metallurgy, 2014, 23(2): 19-22, 39.

[5] 张红英,刘进,徐少华,等.某低品位铜钼矿选矿工艺流程方案对比试验研究[J].有色金属(选矿部分),2021(2):88-92.  
ZHANG Hongying, LIU Jin, XU Shaohua, et al. Comparative experimental study on beneficiation process scheme of a low-grade copper-molybdenum mine [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2021(2): 88-92.

[6] 陈巧妹,王龙,姜楚灵,等.秘鲁某矽卡岩型难选铜钼矿石工艺矿物学研究[J].有色金属工程,2023,13(11):70-75.  
CHEN Qiaomei, WANG Long, JIANG Chuling, et al. Study on process mineralogy of a skarn-type refractory copper-molybdenum ore in Peru [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(11): 70-75.

[7] 张自江,李自刚,李辉.云南某含泥硫化铜矿选矿试验研究[J].世界有色金属,2019(21):37-39.  
ZHANG Zijiang, LI Zigang, LI Hui. Experimental study on beneficiation of a slime-bearing copper sulfide ore in Yunnan [J]. World Nonferrous Metals,

- 2019(21):37-39.
- [8] 杨柳毅.原生矿泥对云南某高铁泥化氧化锌矿浮选的影响[J].矿冶工程,2018,38(6):68-70.  
YANG Liuyi. Effect of primary slime on flotation of a high iron slime zinc oxide ore in Yunnan [J]. Mining and Metallurgy Engineering, 2018, 38(6):68-70.
- [9] 王普蓉,王举.云南某低品位高泥氧化锡矿石选矿试验[J].金属矿山,2020,49(7):83-88.  
WANG Purong, WANG Ju. Beneficiation test of a low-grade and high-mud tin oxide ore in Yunnan [J]. Metal Mine, 2020, 49(7):83-88.
- [10] 王普蓉,徐国印,兰焕然,等.云南某高泥难选氧化铜矿选矿工艺研究[J].矿业研究与开发,2020,40(6):136-139.  
WANG Purong, XU Guoyin, LAN Huanran, et al. Study on beneficiation process of a refractory oxidized copper ore with high mud in Yunnan [J]. Mining Research and Development, 2020, 40(6):136-139.
- [11] 俞娟.难选铜钼矿浮选分离基础及钼提取新工艺研究[D].沈阳:东北大学,2015.  
YU Juan. Research on flotation separation basis and new molybdenum extraction technology of refractory Cu-Mo ore [D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.
- [12] LIN Q Q, GU G H, WANG H, et al. Recovery of molybdenum and copper from porphyry ore via iso-flotability flotation [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27: 2260-2271.
- [13] 罗文.黑龙江某斑岩型铜钼矿浮选综合回收试验研究[D].武汉:武汉理工大学,2019.  
LUO Wen. Experimental study on comprehensive flotation recovery of a porphyry copper and molybdenum ore in Heilongjiang [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019.
- [14] 宋磊.铜钼硫复杂共生矿石选矿新工艺研究[J].有色金属(选矿部分),2012(2):35-38,50.  
SONG Lei. Research on new beneficiation technology of copper-molybden-sulfur complex symbiotic ore [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2012(2):35-38,50.