

## 伊春辉钼矿浮选工艺优化试验研究

刘佳, 李解, 李保卫, 曹钊, 康德伟, 张伟

(内蒙古科技大学 内蒙古自治区白云鄂博矿多金属资源综合利用重点实验室, 内蒙古 包头 014010)

**摘要:**针对伊春低品位辉钼矿,采用浮选工艺获得高品位钼精矿。采用单因素试验方法,重点考察了药剂制度(pH值、混合抑制剂用量、捕收剂用量、起泡剂用量)及物理因素(磨矿粒度、温度、浮选转速、充气量、刮泡时间)对浮选指标的综合影响。单因素试验结果表明,当矿浆浓度为45%时,该辉钼矿浮选的最佳工艺条件为:温度20℃、pH值8.7,混合抑制剂用量600 g/t,捕收剂用量115 g/t,起泡剂用量60 g/t,磨矿粒度为-74 μm占70.93%,浮选转速2000 r/min,充气量0.3 m<sup>3</sup>/h,刮泡时间8 min;此条件下经“一粗一扫”工艺,可获得钼品位2.81%、回收率为94.62%的粗钼精矿。基于此优化条件,采用“一粗六精一扫”的开路试验流程,可获得品位为45.68%、回收率为31.75%的钼精矿,而采用“一粗六精一扫、中矿顺序返回”的闭路试验流程,最终可获得品位为40.32%、回收率为93.28%的钼精矿。

**关键词:**辉钼矿;浮选;优化

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2017.06.011

中图分类号:TD952 文献标志码:A 文章编号:1000-6532(2017)06-0050-07

截止2012年底,中国钼矿查明资源储量2708.23万t<sup>[1]</sup>。主要集中在陕西、河南、辽宁、吉林、浙江等5省,占全国查明资源量的59%<sup>[2]</sup>。中国钼资源储量以原生钼矿为主,原矿品位低,钼的工业品位在0.1%~0.2%之间。本文研究的某辉钼矿品位为0.82%。钼矿的选矿方法主要是浮选法,回收的主要钼矿物是辉钼矿。辉钼矿晶体呈六方层状或板状结构,由沿层间范氏键的S-Mo-S结构和层内极性共价键S-Mo形成的,层与层间的结合力很弱,而层内的共价键结合力甚强,所以辉钼矿极易沿结构层间解裂呈片状或板状产出,这是辉钼矿天然可浮性良好的原因<sup>[2]</sup>。目前辉钼矿的研究院主要是从浮选工艺和药剂制度相关方面进行的。张晓平等采用新型调整剂TZ-10和捕收剂TM-8,通过一次粗选,四次精选,两次再磨的开路试验流程,使钼得到了有效回收,获得钼精矿含钼43.21%、钼回收率69.51%的技术指标<sup>[3]</sup>;苏建芳等采用煤油作为含钼矿物捕收剂,BK204作为起泡剂,BK510作为钼精选

作业脉石矿物的抑制剂,通过试验室小型闭路试验,获得钼精矿品位52.23%、钼回收率90.30%的选别指标<sup>[4]</sup>;曹亮采用水玻璃为调整剂,煤油为捕收剂,经一次粗选、一次扫选和三次精选,可获得钼精矿品位45.25%、钼回收率为93.56%的钼精矿<sup>[5]</sup>;白丽梅等经过一次粗选、三次扫选、三次精选的闭路流程试验,可以获得品位53.18%、回收率为95.76%的钼精矿<sup>[6]</sup>。

上述研究主要是从选矿工艺和药剂制度方面进行,选别指标均能满足工业生产的要求。除了选矿工艺制度外,药剂制度与设备技术参数等也是影响浮选的重要因素<sup>[7]</sup>。目前辉钼矿浮选药剂主要为煤油、黄药等捕收剂与抑制剂水玻璃。配合合理的工艺制度,调整物理因素(磨矿细度、调浆转速、浮选转速与充气量)来提高浮选指标,也是极具潜力的技术路线<sup>[8]</sup>。浮选过程中药剂用量、浮选时间的改变;磨矿粒度的确定主要取决于矿物与脉石单体解离度,但是过细的磨矿粒度会导致浮选失去选择

收稿日期:2016-03-25

基金项目:内蒙古自然科学基金项目(2015MS0559,2014MS0521),内蒙古科技厅重大专项(白云鄂博高值综合利用的基础及关键技术研究)。

作者简介:刘佳(1985-),男,硕士研究生,研究方向为资源综合利用。

通讯作者:李解(1972-),女,副教授,博士,主要研究方向为微波冶金及资源综合利用。

性;而调浆过程和浮选过程中的搅拌转速以及充气量会影响矿物颗粒的碰撞及脱附概率<sup>[9]</sup>。因此,浮选是一个多因素综合作用的过程,应考虑各方面的因素,优化整体试验流程<sup>[10]</sup>。本文采用单因素试验的方法,研究浮选钼矿的多因素协同作用过程,重点考察混合抑制剂和捕收剂 K64,及物理因素对辉钼矿浮选指标的综合影响,确定最佳的浮选试验条件,为辉钼矿的浮选工艺提供理论指导。

## 1 试验部分

### 1.1 试验原料及设备

试验所用辉钼矿来自黑龙江伊春,原矿中 Mo 品位为 0.82%,原矿化学多项分析及钼物相组成结果分别见表 1、2。辉钼矿中的有价金属含量很低,钼矿氧化率很低,其中 96.7% 的钼主要以硫化矿形式存在。

表 1 辉钼矿化学成分/%

Table 1 Chemical ingredient of molybdenum ore

Mo	Cu	S	Fe	SiO <sub>2</sub>
0.82	0.024	0.38	1.56	69.32
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
11.13	3.53	0.64	4.57	3.26

表 2 钼的物相分析

Table 2 Analysis of molybdenum phase

相别	氧化钼中的钼	硫化钼中的钼	总量
含量/%	0.027	0.793	0.82
占有率/%	3.30	96.70	100.00

主要试验设备有:XMQ-Φ240×90 锥型球磨机;XFD-0.5/3 型单槽浮选机,pH 计。

表 3 单因素试验因素与水平

Table 3 Factors and levels of single factor test

水平	因素								
	-0.074 mm 含量/%	温度 /℃	pH 值	抑制剂用量 / (g·t <sup>-1</sup> )	捕收剂用量 / (g·t <sup>-1</sup> )	起泡剂用量 / (g·t <sup>-1</sup> )	浮选转速 / (r·min <sup>-1</sup> )	充气量 / (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	刮泡时间 /min
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	43.15	20	2.7	300	75	15	1000	0.1	2
2	55.39	30	4.7	600	115	30	1500	0.2	4
3	70.93	40	6.7	900	155	45	2000	0.3	6
4	78.94	50	8.7	1200	195	60	2500	0.4	8
5	88	60	10.7	1500	235	75	3000	0.5	10

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 单因素试验

根据简单对比的试验方法,寻找对精矿质量有

### 1.2 试验流程

将一定量的原矿细磨后配成浓度 45% 的矿浆,倒入浮选槽中,设定一定温度,分别加入混合抑制剂(水玻璃、六偏磷酸钠、淀粉)、pH 值调整剂、捕收剂(K64)、起泡剂(2<sup>#</sup>油),调整转速与充气量,进行浮选,收集浮选精矿和尾矿,过滤、烘干、称重、制样、化验分析。试验流程见图 1。

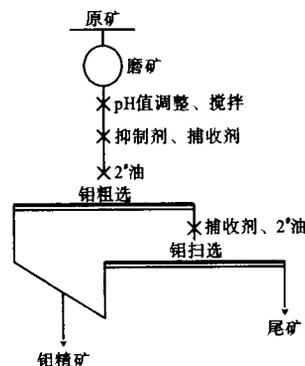


图 1 钼矿粗选流程

Fig. 1 The roughing flotation process of molybdenum ore

### 1.3 试验方法

按照单因素试验方法,将影响精矿浮选指标的因素(9个)及其水平(5个)见表 3。以浮选精矿的品位和回收率为考核指标,固定其他“因素”不变,选取其中一种“因素”,变换其多种“水平”,确定此因素下的较优“水平”;再固定此最优“水平”的“因素”,依此法逐一确定其他因素下的较优“水平”,将 9 个较优“水平”的因素汇总,得到较优方案。

影响的因素(磨矿粒度、温度、pH 值、混合抑制剂用量、捕收剂用量、起泡剂用量、浮选转速、充气量、刮泡时间)对浮选精矿指标(品位、回收率)的影响规律,确定较佳工艺。对应表 3 设计的因素及其水平,

将试验的设计与结果见表 4。

根据各个因素的水平对钼品位及回收率的影响情况,可选出较佳工艺条为: A<sub>3</sub>B<sub>1</sub>C<sub>5</sub>D<sub>2</sub>E<sub>2</sub>F<sub>4</sub>G<sub>3</sub>H<sub>3</sub>I<sub>4</sub>, 即:磨矿粒度为-0.074 mm70.93%、温度 20℃、矿浆 pH 值 8.7、混合抑制剂用量 600 g/t、捕收剂(K64)用量 115 g/t、起泡剂用量 60 g/t、浮选转速 2000 r/min、充气量 0.3 m<sup>3</sup>/h、刮泡时间 8 min。

表 4 单因素试验结果

Table 4 The results of single factor test

试验安排	品位 /%	回收率 /%	较优方案
A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub> D <sub>2</sub> E <sub>3</sub> F <sub>3</sub> G <sub>3</sub> H <sub>4</sub> I <sub>5</sub>	7.83	58.06	
A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub> D <sub>2</sub> E <sub>3</sub> F <sub>3</sub> G <sub>3</sub> H <sub>4</sub> I <sub>5</sub>	4.32	79.66	
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub> D <sub>2</sub> E <sub>3</sub> F <sub>3</sub> G <sub>3</sub> H <sub>4</sub> I <sub>5</sub>	3.58	93.6	A <sub>3</sub>
A <sub>4</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub> D <sub>2</sub> E <sub>3</sub> F <sub>3</sub> G <sub>3</sub> H <sub>4</sub> I <sub>5</sub>	2.95	87.2	
A <sub>5</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub> D <sub>2</sub> E <sub>3</sub> F <sub>3</sub> G <sub>3</sub> H <sub>4</sub> I <sub>5</sub>	2.92	85.32	
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub> D <sub>2</sub> E <sub>3</sub> F <sub>3</sub> G <sub>3</sub> H <sub>4</sub> I <sub>5</sub>	2.82	93.68	
A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub> D <sub>2</sub> E <sub>3</sub> F <sub>3</sub> G <sub>3</sub> H <sub>4</sub> I <sub>5</sub>	2.81	93.42	
A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub> D <sub>2</sub> E <sub>3</sub> F <sub>3</sub> G <sub>3</sub> H <sub>4</sub> I <sub>5</sub>	2.79	93.23	B <sub>1</sub>
A <sub>3</sub> B <sub>4</sub> C <sub>3</sub> D <sub>2</sub> E <sub>3</sub> F <sub>3</sub> G <sub>3</sub> H <sub>4</sub> I <sub>5</sub>	2.82	93.57	
A <sub>3</sub> B <sub>5</sub> C <sub>3</sub> D <sub>2</sub> E <sub>3</sub> F <sub>3</sub> G <sub>3</sub> H <sub>4</sub> I <sub>5</sub>	2.93	93.11	
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub> D <sub>2</sub> E <sub>3</sub> F <sub>3</sub> G <sub>3</sub> H <sub>4</sub> I <sub>5</sub>	3.26	83.17	
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub> D <sub>2</sub> E <sub>3</sub> F <sub>3</sub> G <sub>3</sub> H <sub>4</sub> I <sub>5</sub>	3.14	83.78	
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub> D <sub>2</sub> E <sub>3</sub> F <sub>3</sub> G <sub>3</sub> H <sub>4</sub> I <sub>5</sub>	3.89	92.03	C <sub>5</sub>
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>5</sub> D <sub>2</sub> E <sub>3</sub> F <sub>3</sub> G <sub>3</sub> H <sub>4</sub> I <sub>5</sub>	3.15	94.65	
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>5</sub> D <sub>2</sub> E <sub>3</sub> F <sub>3</sub> G <sub>3</sub> H <sub>4</sub> I <sub>5</sub>	2.94	92.5	
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>5</sub> D <sub>1</sub> E <sub>3</sub> F <sub>3</sub> G <sub>3</sub> H <sub>4</sub> I <sub>5</sub>	3.09	87.12	
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>5</sub> D <sub>2</sub> E <sub>3</sub> F <sub>3</sub> G <sub>3</sub> H <sub>4</sub> I <sub>5</sub>	2.79	94.32	
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>5</sub> D <sub>3</sub> E <sub>3</sub> F <sub>3</sub> G <sub>3</sub> H <sub>4</sub> I <sub>5</sub>	2.91	91.38	D <sub>2</sub>
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>5</sub> D <sub>4</sub> E <sub>3</sub> F <sub>3</sub> G <sub>3</sub> H <sub>4</sub> I <sub>5</sub>	3.01	89.86	
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>5</sub> D <sub>5</sub> E <sub>3</sub> F <sub>3</sub> G <sub>3</sub> H <sub>4</sub> I <sub>5</sub>	3.14	89.53	
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>5</sub> D <sub>2</sub> E <sub>1</sub> F <sub>3</sub> G <sub>3</sub> H <sub>4</sub> I <sub>5</sub>	3.21	87.06	
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>5</sub> D <sub>2</sub> E <sub>2</sub> F <sub>3</sub> G <sub>3</sub> H <sub>4</sub> I <sub>5</sub>	2.83	95.03	
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>5</sub> D <sub>2</sub> E <sub>3</sub> F <sub>3</sub> G <sub>3</sub> H <sub>4</sub> I <sub>5</sub>	3.17	91.24	E <sub>2</sub>
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>5</sub> D <sub>2</sub> E <sub>4</sub> F <sub>3</sub> G <sub>3</sub> H <sub>4</sub> I <sub>5</sub>	3.14	88.53	
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>5</sub> D <sub>2</sub> E <sub>5</sub> F <sub>3</sub> G <sub>3</sub> H <sub>4</sub> I <sub>5</sub>	3.09	89.27	
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>5</sub> D <sub>2</sub> E <sub>2</sub> F <sub>1</sub> G <sub>3</sub> H <sub>4</sub> I <sub>5</sub>	3.45	86.5	
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>5</sub> D <sub>2</sub> E <sub>2</sub> F <sub>2</sub> G <sub>3</sub> H <sub>4</sub> I <sub>5</sub>	3.37	87.27	
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>5</sub> D <sub>2</sub> E <sub>2</sub> F <sub>3</sub> G <sub>3</sub> H <sub>4</sub> I <sub>5</sub>	3.27	87.88	F <sub>4</sub>
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>5</sub> D <sub>2</sub> E <sub>2</sub> F <sub>4</sub> G <sub>3</sub> H <sub>4</sub> I <sub>5</sub>	3.15	94.72	
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>5</sub> D <sub>2</sub> E <sub>2</sub> F <sub>5</sub> G <sub>3</sub> H <sub>4</sub> I <sub>5</sub>	3.24	91.71	
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>5</sub> D <sub>2</sub> E <sub>2</sub> F <sub>4</sub> G <sub>1</sub> H <sub>4</sub> I <sub>5</sub>	4.65	80.13	
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>5</sub> D <sub>2</sub> E <sub>2</sub> F <sub>4</sub> G <sub>2</sub> H <sub>4</sub> I <sub>5</sub>	3.78	90.17	
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>5</sub> D <sub>2</sub> E <sub>2</sub> F <sub>4</sub> G <sub>3</sub> H <sub>4</sub> I <sub>5</sub>	2.94	95.09	G <sub>3</sub>
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>5</sub> D <sub>2</sub> E <sub>2</sub> F <sub>4</sub> G <sub>4</sub> H <sub>4</sub> I <sub>5</sub>	2.53	89.14	
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>5</sub> D <sub>2</sub> E <sub>2</sub> F <sub>4</sub> G <sub>5</sub> H <sub>4</sub> I <sub>5</sub>	2.24	85.07	

试验安排	品位 /%	回收率 /%	较优方案
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>5</sub> D <sub>2</sub> E <sub>2</sub> F <sub>4</sub> G <sub>3</sub> H <sub>1</sub> I <sub>5</sub>	2.93	86.61	
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>5</sub> D <sub>2</sub> E <sub>2</sub> F <sub>4</sub> G <sub>3</sub> H <sub>2</sub> I <sub>5</sub>	2.81	94	
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>5</sub> D <sub>2</sub> E <sub>2</sub> F <sub>4</sub> G <sub>3</sub> H <sub>3</sub> I <sub>5</sub>	2.59	95.20	H <sub>3</sub>
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>5</sub> D <sub>2</sub> E <sub>2</sub> F <sub>4</sub> G <sub>3</sub> H <sub>4</sub> I <sub>5</sub>	2.35	89.64	
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>5</sub> D <sub>2</sub> E <sub>2</sub> F <sub>4</sub> G <sub>3</sub> H <sub>5</sub> I <sub>5</sub>	2.31	89.13	
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>5</sub> D <sub>2</sub> E <sub>2</sub> F <sub>4</sub> G <sub>3</sub> H <sub>3</sub> I <sub>1</sub>	6.12	83.96	
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>5</sub> D <sub>2</sub> E <sub>2</sub> F <sub>4</sub> G <sub>3</sub> H <sub>3</sub> I <sub>2</sub>	3.47	87.22	
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>5</sub> D <sub>2</sub> E <sub>2</sub> F <sub>4</sub> G <sub>3</sub> H <sub>3</sub> I <sub>3</sub>	2.82	90.03	I <sub>4</sub>
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>5</sub> D <sub>2</sub> E <sub>2</sub> F <sub>4</sub> G <sub>3</sub> H <sub>3</sub> I <sub>4</sub>	2.75	94.71	
A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>5</sub> D <sub>2</sub> E <sub>2</sub> F <sub>4</sub> G <sub>3</sub> H <sub>3</sub> I <sub>5</sub>	2.48	91.46	

2.2 各因素对浮选指标的影响分析

2.2.1 磨矿粒度试验

固定试验条件:矿浆浓度 45%、温度 18℃、pH=6.7、混合抑制剂用量 600 g/t、捕收剂(K64) 155 g/t、起泡剂 2#油 45 g/t、浮选转速 2000 r/min、充气量 0.4 m<sup>3</sup>/h、刮泡时间 10 min、改变磨矿细度(-0.074 mm 含量),探索粒度变化对浮选指标的影响见图 2。

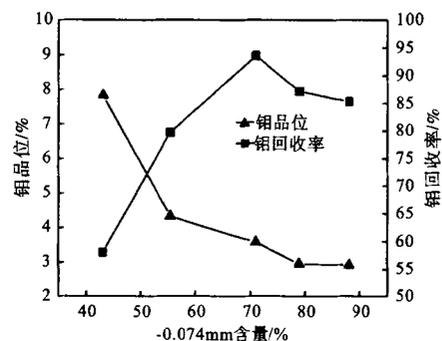


图 2 不同磨矿细度下的浮选指标

Fig. 2 The flotation results of different grinding size

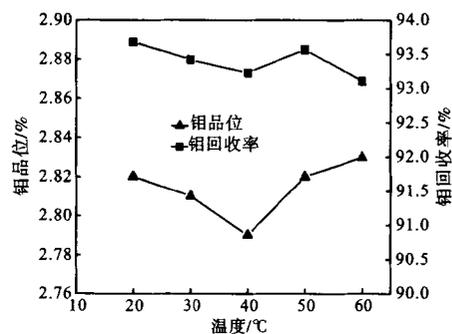


图 3 不同温度下的浮选指标

Fig. 3 The flotation results of different temperature

从图 2 分析可知,随着磨矿粒度的增加,钼精矿品位不断下降,因为矿石中有一小部分钼矿完全以钼华的形式存在,具有很好的可浮性,所以在磨矿细

度较小的时候,少部分完全单体解离的钼矿很容易被浮选,大量未单体分离的较粗矿物颗粒难以被捕收,此时钼精矿的品位较高,但是钼精矿回收率很低。随着磨矿细度的增加,钼精矿的回收率先增加随后降低,因为合适的磨矿细度能增加药剂的捕收能力,但是过细的粒度会导致泥化严重,泥化部分覆盖在已经单体解离的辉钼矿颗粒表面,虽然细粒表面能大,吸附浮选药剂能力强,但选择性较差,加大药剂消耗的同时造成钼精矿品位和回收率降低。综合考虑选择磨矿细度-0.074 mm 70.93%,钼精矿品位和回收率较好。

### 2.2.2 浮选温度试验

温度对钼矿的浮选有影响<sup>[11]</sup>。选定磨矿细度-0.074 mm 70.93%,其他条件不变,只改变矿浆温度。试验结果见图 3,温度试验通过恒温智能控制加热器进行辅助加热,无加热条件时矿浆的温度为 20℃。试验结果表明,随着温度的升高,钼的品位和回收率并没有明显的提高,综合考虑选择 20℃ 为较佳浮选温度。

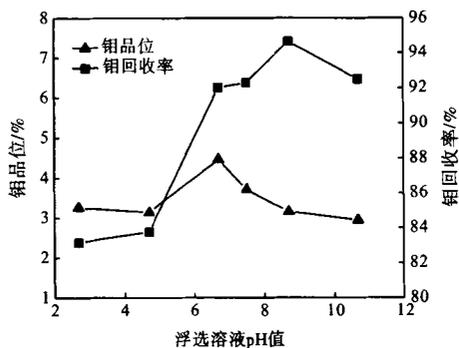


图 4 不同 PH 值下的浮选指标

Fig. 4 The flotation results of different pH value

### 2.2.3 pH 值调整试验

在固定磨矿细度-0.074 mm 70.93%,矿浆温度 20℃后,其他试验条件不变,只改变 pH 值,试验结果见图 4,pH 值在 2.7~8.7 时,钼精矿回收率逐渐升高,在 8.7~10.7 阶段时,钼精矿的回收率逐渐降低。这是因为 pH 值的大小会影响矿物的表面电性及药剂的性能,当矿浆的 pH 值低于矿物的零电点时,矿物表面荷正电,反之荷负电<sup>[12]</sup>。试验结果表明 pH 值在 8.7 时捕收剂的捕收性能最佳,能够有效保证浮选指标。由于自然状态下矿浆的 pH 值为 6.7,因此需要加入 pH 值调整剂,即 pH 值为 8.7 时较为适宜。

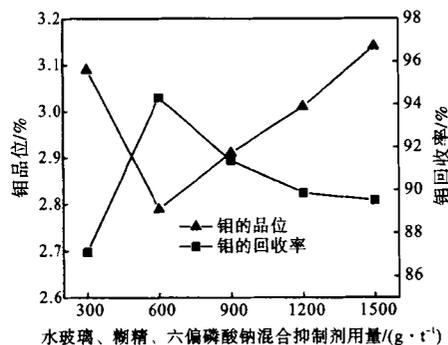


图 5 不同混合抑制剂用量下的浮选指标

Fig. 5 The flotation results of different mixed inhibitor dosage

### 2.2.4 混合抑制剂用量试验

固定磨矿细度-0.074 mm 70.93%,矿浆温度 20℃,pH 值为 8.7,其他条件不变,只改变混合抑制剂(水玻璃、六偏磷酸钠、淀粉以一定比例混合而成)用量,试验结果见图 5,综合可考虑混合抑制剂用量 600 g/t,钼的回收效果较佳。

### 2.2.5 捕收剂用量试验

固定磨矿细度-0.074 mm 70.93%,矿浆温度 20℃,矿浆 pH=8.7,混合抑制剂用量 600 g/t,其他条件不变,只改变捕收剂(K64)的用量,试验结果见图 6,试验结果表明随着 K64 用量的增加钼回收率先增加然后降低,综合考虑 K64 用量 115 g/t 比较适宜。

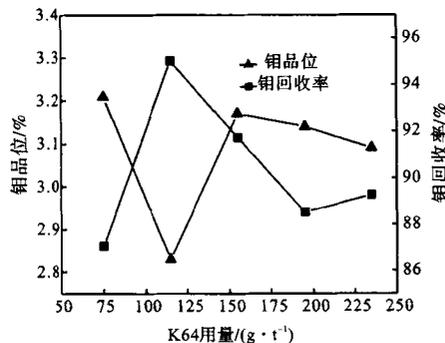


图 6 不同捕收剂用量下的浮选指标

Fig. 6 The flotation results of different collector dosage

K64 是一种非极性捕收剂,是由 C-H 原子通过共价键结合而成的饱和化合物,其与水相互作用时自由能较大,从而疏水引力亦较大,因此呈现出较强的疏水性。适当调整 pH 值至 8.7,可以实现辉钼矿与脉石矿物的有效分离。使用适量的捕收剂可以增

强矿物的可浮性,然而捕收剂用量过大,则不仅造成浮选成本的增加及环境的污染,也会影响辉钼矿的有效捕收。

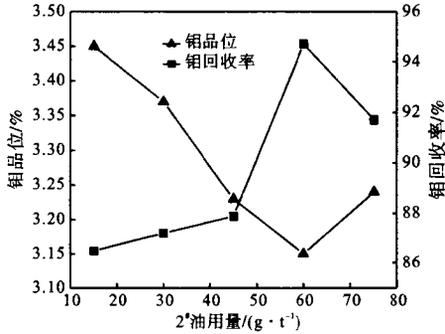


图7 不同起泡剂用量下的浮选指标

Fig. 7 The flotation results of different frother dosage

### 2.2.6 起泡剂 2#油用量试验

固定磨矿细度-0.074 mm 70.93%, 矿浆温度 20℃, 矿浆 pH=8.7, 混合抑制剂用量 600 g/t, 捕收剂用量 115 g/t, 其他条件不变, 只改变 2#油用量, 2#油用量试验结果见图 7, 结果表明, 随着 2#油用量的增加, 钼的回收率先增加然后降低, 钼品位在 2#油用量 60 g/t 时最低, 但此用量下钼的回收率最高, 综合考虑起泡剂的用量为 60 g/t 为较佳。

由于浮选一介速率常数与气泡表面积通量  $S_b$  成正比, 而气泡表面积通量与气泡尺寸成反比<sup>[13]</sup>。气泡尺寸决定于阻止气泡兼并的起泡剂种类和用量<sup>[13]</sup>。适量的 2#油用量可以形成稳定的泡沫, 然而过量的 2#油用量会夹带大量的脉石矿物, 不仅造成浮选成本的增加及环境污染, 也会影响辉钼矿的浮选指标。

### 2.2.7 浮选转速试验

固定磨矿细度-0.074 mm 70.93%, 矿浆温度 20℃, 矿浆 pH=8.7, 混合抑制剂用量 600 g/t, 捕收剂用量 115 g/t, 2#油用量 60 g/t, 其他条件不变, 只改变浮选转速, 浮选转速试验结果见图 8, 结果表明随着浮选转速的提高, 钼回收率先增加随后降低, 钼品位持续降低。

这是因为随着浮选转速的增加, 一方面增加了矿物颗粒与气泡的碰撞黏附, 但同时也会增加矿物颗粒尤其是粗颗粒的脱附概率<sup>[14]</sup>。当浮选转速较低时, 捕收剂与矿物颗粒的吸附作用减弱。当浮选转速增大时, 强烈的机械搅拌会引起严重的机械夹

带, 导致钼精矿的品位回收率降低。综合考虑浮选转速设定为 2000 r/min 较为适宜。

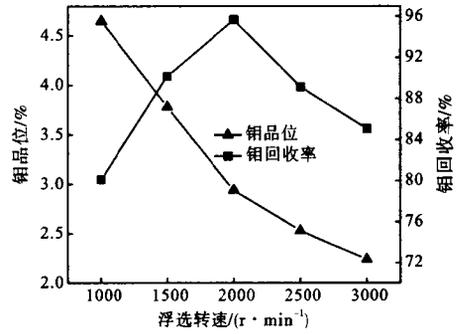


图8 不同浮选转速下的浮选指标

Fig. 8 The flotation results of different flotation speed

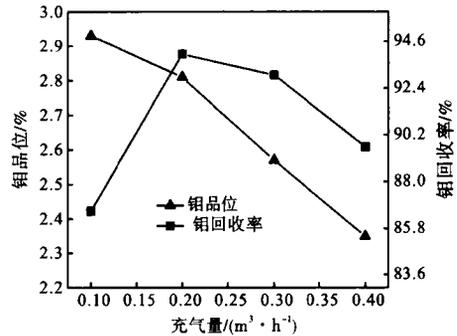


图9 不同充气量下的浮选指标

Fig. 9 The flotation results of different inflating volume

### 2.2.8 充气量试验

固定磨矿细度-0.074 mm 70.93%, 矿浆温度 20℃, 矿浆 pH=8.7, 混合抑制剂用量 600 g/t, 捕收剂用量 115 g/t, 2#油用量 60 g/t, 浮选转速 2000 r/min, 其他条件不变, 只改变充气量, 试验结果见图 9, 结果表明充气量在阶段时, 钼的回收率不断提高, 在 0.2~0.3 m³/h 阶段时, 钼的回收率变化平缓, 在 0.3~0.4 m³/h 阶段时, 钼回收率逐渐降低, 钼品位随着充气量的加大逐渐降低。

在分选过程中, 随着充气量的增大, 泡沫数量亦增加, 钼精矿的品位逐渐降低, 回收率逐渐升高。因为充气量直接影响槽内气体的分散程度, 从而提高了矿物颗粒与泡沫的碰撞几率, 使矿物颗粒更容易浮出, 从而提高了钼精矿的回收率, 但由于脉石矿物的机械夹带, 影响钼精矿品位降低。综合考虑钼精矿品位和回收率, 充气量应为 0.3 m³/h。

2.2.9 刮泡时间试验

上述试验均选定后,改变刮泡时间,根据图 10 所示,随着刮泡时间的增加钼精矿的品位不断降低,回收率先升高后降低。

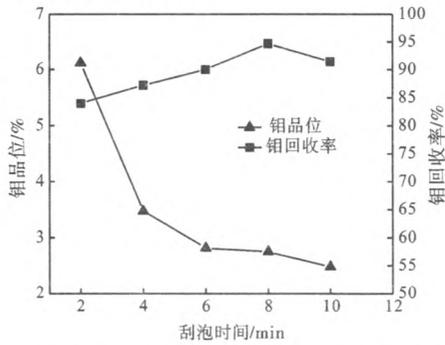


图 10 不同刮泡时间下的浮选指标

Fig. 10 The flotation results of different scraping time

因为在刮泡工作刚开始时,泡沫层稳定,脉石矿物机械夹带不严重,此时钼精矿品位较高,但是回收率偏低。随着刮泡时间的增加,刮跑量也逐渐增加,然而泡沫的稳定性能逐渐降低,会产生严重的脉石矿物机械夹带现象,从而引起钼精矿回收率的降低。综合考虑选择刮泡时间为 8 min,钼精矿品位 2.75%、回收率 94.71% 最为适宜。

3 开路试验

经过“一粗六精一扫”的开路流程试验,可以得到产率 0.57%、品位 45.68%,回收率 31.75% 的钼精矿,试验结果见表 5。

表 5 开路试验结果

Table 5 The results of open-circuit test

产品名称	产率/%	品位/%	回收率/%
钼精矿	0.57	45.68	31.75
中矿 1	13.54	0.49	8.05
中矿 2	1.32	1.15	1.85
中矿 3	8.11	2.08	20.57
中矿 4	1.84	4.84	10.85
中矿 5	1.27	7.56	11.70
中矿 6	0.35	9.88	4.22
中矿 7	0.39	13.29	6.31
尾矿	72.61	0.053	4.68
合计	100.00	0.82	100.00

4 闭路试验

在开路试验的基础上进行了闭路试验,试验流程及药剂制度见图 11。该闭路流程试验结果见表

6。

表 6 闭路试验结果

Table 6 The results of closed-circuit test

产品名称	品位/%	回收率/%
精矿	40.32	93.28
尾矿	0.058	6.72
原矿	0.82	100.00

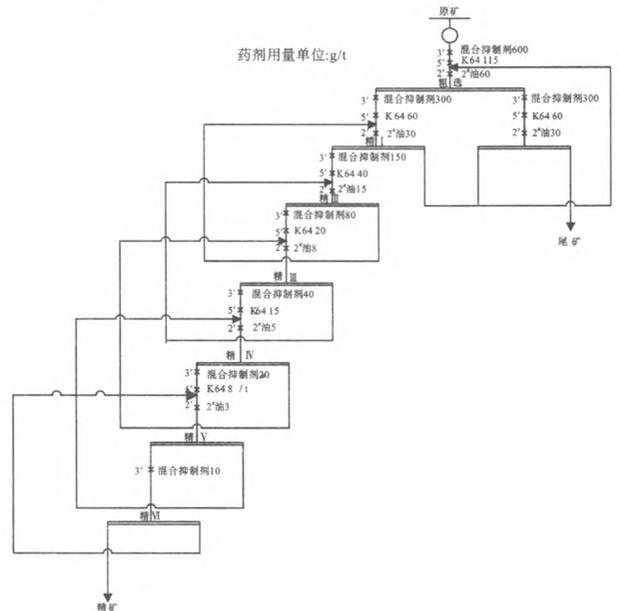


图 11 闭路试验流程

Fig. 11 The closed-circuit test flow of flotation

5 结 论

(1)单因素试验表明,在矿浆浓度为 45% 的条件下,此辉钼矿浮选的最佳浮选条件为:温度为 20℃、pH 值为 8.7、混合抑制剂用量为 600 g/t、捕收剂(K64)用量为 115 g/t、起泡剂(2#油)用量为 60 g/t、磨矿粒度为-74 μm 70.93%。浮选转速为 2000 r/min,充气量为 0.3 m<sup>3</sup>/h,刮泡时间为 8 min;此条件下经“一粗一扫”工艺,可获得钼品位 2.81%、回收率为 94.62% 的粗钼精矿。

(2)采用“一粗一扫六精”的浮选开路试验流程,可以得到钼精矿品位 45.68%,回收率 31.75% 的选别指标,较“一粗一扫”工艺,钼精矿品位提高,但回收率降低。

(3)采用“一粗一扫六精、中矿返回”的闭路试验流程,获得了品位 40.32%、回收率 93.28% 的钼精矿,较开路试验流程,浮选钼精矿品位有所下降,但回收率大幅度提升。

## 参考文献:

- [1] 黄凡,王登红,王成辉,等. 中国钼矿资源特征及其成矿规律概要[J]. 地质学报,2014,88(12):2296-2314.
- [2] 汤雁斌. 国内外钼矿选矿技术进步与创新[J]. 铜业工程,2010(1):29-33.
- [3] 张晓平,陈文科,崔长征,等. 陕西某难选钼矿的浮选工艺研究[J]. 有色金属:选矿部分,2014(4):32-35.
- [4] 苏建芳,肖婉琴,王中明,等. 广东某钼矿浮选试验研究[J]. 有色金属:选矿部分,2014(5):35-38,80.
- [5] 曹亮. 一种钼矿石的浮选分离试验研究[D]. 沈阳:东北大学,2011.
- [6] 白丽梅,代淑娟,李萌,等. 蒙古国某地区辉钼矿选矿试验研究[J]. 中国矿业,2019,18(2):74-77.
- [7] 黄万抚,文金磊,陈园园,等. 我国稀土矿选矿药剂和工艺的研究现状及展望[J]. 有色金属科学与工程,2012,3(6):75-80,89.
- [8] 王毓华,胡岳华. 物理因素对铝土矿反浮选的影响[J]. 中国矿业,2002,11(6):38-40.
- [9] 黄根,周长春. 搅拌转速对低品位铝土矿浮选的影响[J]. 矿山机械,2013,41(1):87-90.
- [10] 李振,刘炯天,曹亦俊,等. 浮选过程搅拌调浆技术评述[J]. 金属矿山,2009,400(10):5-11.
- [11] 赵明林. 温度对辉钼矿浮选的影响及其改善的途径[J]. 国外金属矿选矿,1991(7、8):86-89.
- [12] 谢广元. 选矿学[M]. 江苏徐州:中国矿业大学出版社,2010:406.
- [13] F·麦罗,李长根,雨田. 浮选起泡剂的基本性质及其对浮选的影响[J]. 国外金属矿选矿,2007(4):31-35,25.
- [14] 韩华,李保卫,李解,等. 基于单因素试验的稀土尾矿浮选工艺优化[J]. 稀土,2016,37(1):61-67.
- [15] 李保卫,韩磊,李解,等. 褐铁矿微波还原焙烧-磁选单因素试验研究[J]. 矿冶工程,2015,35(5):99-102.
- [16] 孙传尧,印万忠. 硅酸盐矿物浮选原理[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [17] 王漪靖. 陕西某难选细粒钼资源综合回收试验研究[J]. 矿冶工程,2015,35(5):49-52.

## Flotation Process Optimization of Molybdenum Ore

Liu Jia, Li Jie, Li Baowei, Cao Zhao, Kang Dewei, Zhang Wei

(Key Laboratory of Integrated Exploitation of Bayan Obo Multi-Metal Resources,

Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** In this paper, the technology of flotation was adopted to obtain high-grade Mo concentrate from a low-grade molybdenum ore. By single factor test, the integrate effect of reagent system (pH value, mixed inhibitors dosage, collector dosage, blowing dosage) and physical factors (grind size, temperature, slurry concentration, flotation speed and inflating volume of flotation machine) on the flotation results were mainly investigated. The single factor test results showed that under the slurry concentration was 45%, the optimum conditions of flotation of molybdenite were temperature 20°C, pH value of 8.7, mixed inhibitor dosage of 600 g/t, collector dosage of 115 g/t, frother dosage of 60 g/t, the grinding size of -74 μm account for 70.93%, flotation speed of 2000 r/min and aeration quantity of 0.3 m<sup>3</sup>/h, blow bubble time of 8min; Under this condition, rough concentrate with grade of 45.68% and recovery of 31.75% were obtained by one rougher-one cleaning flotation. Under this condition, molybdenite concentrate with grade of 45.68% and recovery of 31.75% was obtained by the open-circuit experiment process of "one roughing-six scavenging-one cleaning", and molybdenite concentrate with grade of 40.32% and recovery of 93.28% was finally obtained by the closed-circuit test process of "one roughing-six scavenging-one cleaning and middles back to the flow-sheet".

**Keywords:** Molybdenite; Flotation; Optimization