

doi:10.3969/j.issn.1671-9492.2024.12.009

西藏某斑岩型铜矿石浮选回收试验研究

杨延宙¹, 郭万中¹, 加永泽仁¹, 王立刚², 王鹏程¹, 吴明海¹, 赖春华³

(1. 西藏玉龙铜业股份有限公司, 西藏 昌都 854000;

2. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160;

3. 青海省高原矿物加工工程与综合利用重点实验室, 西宁 810063)

摘要: 西藏某斑岩型铜矿石中 Cu、Mo 品位分别为 0.73%、0.044%，主要可回收金属矿物为辉铜矿、黄铜矿和辉钼矿，脉石矿物主要为石英、方解石、石榴子石等。随着矿产资源的不断开采和岩层分布变化，矿石种类日益繁多，矿物间交代嵌布关系复杂，采用原有的选矿工艺难以获得较好的选矿指标，为有效回收矿石中的铜和钼，针对矿石性质，采用混合浮选工艺开展浮选试验。通过条件试验确定适宜的磨矿细度为 -0.074 mm 占 65%，等可浮粗选捕收剂 BK404C 和 BK345 总用量为 32 g/t，强化粗选捕收剂 BK404B 和 BK404C 总用量为 28 g/t，石灰用量 2 000 g/t。在此基础上，采用“一次等可浮粗选、一次等可浮精选、一次强化粗选、两次强化精选、两次扫选”的闭路浮选工艺流程，最终可获得 Cu 品位 23.27%、Cu 回收率 87.14%、Mo 品位 1.34%、Mo 回收率 82.24% 的铜钼混合精矿，较好地实现了斑岩型铜矿石中有价金属的综合回收。

关键词: 斑岩型铜矿石; 混合浮选; 新型捕收剂

中图分类号: TD952; TD923

文献标志码: A

文章编号: 1671-9492(2024)12-0091-06

Experimental Study on Flotation Recovery of a Porphyry Copper Ore in Tibet

YANG Yanzhou¹, GUO Wanzhong¹, JIAYONG Zeren¹, WANG Ligang², WANG Pengcheng¹,WU Minghai¹, LAI Chunhua³

(1. Tibet Yulong Copper Co., Ltd., Changdu 854000, Tibet, China;

2. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China;

3. Qinghai Key Laboratory of Plateau Mineral Processing Engineering and Comprehensive Utilization, Xining 810063, China)

Abstract: The grade of Cu and Mo in a porphyry copper ore in Tibet is 0.73% and 0.044%, respectively. The main recoverable metal minerals are chalcocite, chalcopyrite and molybdenite, and the gangue minerals are quartz, calcite and garnet. With the continuous exploitation of mineral resources and the change of rock distribution, the variety of ore type is increasing, and the metasomatic dissemination relationship between minerals is complex, so it is difficult to obtain better beneficiation indexes by using the original beneficiation process. In order to effectively recover copper and molybdenum from the ore, according to the properties of the raw ore, the flotation test was carried out by using the bulk flotation process. Through the condition test, it was determined that the suitable grinding fineness was -0.074 mm accounting for 65%, the total dosage of BK404C and BK345 for iso-flotability roughing was 32 g/t, the total dosage of BK404B and BK404C for intensified roughing was 28 g/t, and the dosage of lime was 2 000 g/t. On this basis, a locked-cycle flotation flowsheet of one iso-flotability roughing, one iso-flotability cleaning, one intensified roughing, two intensified cleanings and two scavengings was adopted, and finally copper-molybdenum bulk concentrate with Cu grade of 23.27% and Cu recovery of 87.14%, Mo grade of 1.34% and Mo recovery of 82.24% was obtained. The comprehensive recovery of valuable metals from porphyry copper ore has been realized.

Key words: porphyry type copper-molybdenum ore; bulk flotation; new collector

收稿日期: 2024-05-30

基金项目: 青海省矿物加工工程与综合利用重点实验室开放基金资助项目(2022-ZJ-Y09)

作者简介: 杨延宙(1991—), 男, 青海西宁人, 学士, 工程师, 主要从事有色金属选矿工艺及浮选药剂研究。

通信作者: 郭万中(1996—), 男, 青海海东人, 硕士, 工程师, 主要从事选矿工艺研究与应用。

铜、钼广泛应用于冶金、机械制造、化工及航空航天等领域,因而铜钼矿石资源在金属矿产资源中占比越来越大^[1]。常见铜钼矿石中的铜矿物主要是黄铜矿及辉铜矿,钼矿物主要是辉钼矿,浮选成了回收铜钼矿物最常见的选矿方法^[2]。硫化铜、钼矿物不仅都有良好的可浮性,且对于铜钼矿物嵌布粒度较复杂的矿石,选择合理的选矿工艺流程尤为重要^[3]。

西藏某斑岩型铜矿地处青藏高原腹地,矿区海拔在4 500 m左右,开发环境差,直到21世纪初才开始开发,经过数年的开采利用,现已成为我国重要的产铜基地^[4-6]。目前,随着矿产资源的不断开采和岩层分布变化,矿石种类日益繁多,矿物间交代嵌布关系较为复杂,采用原有的选矿工艺难以获得较好的选矿指标^[7],为进一步高效回收铜钼矿石中的有用

元素和提高资源利用率,针对斑岩型铜矿石,在详细的工艺矿物学基础上,开展了选矿试验研究,最终获得了较好的选矿指标,为铜钼矿石资源的高效综合利用提供了一定的技术支撑^[8]。

1 矿石性质

1.1 矿石化学组成及物相分析

对矿石进行化学多元素及铜、钼物相分析,分析结果分别见表1~3。由表1~3可知,矿石中主要有价金属为铜和钼,其中铜含量为0.73%,钼含量为0.044%。此外,含铁1.57%,含硫0.83%;主要脉石矿物为SiO₂,含量为71.11%,其次为Al₂O₃和CaO,其含量分别为13.87%和1.51%。矿石中铜、钼主要以硫化物的形式存在,分布率分别为91.78%和95.91%。

表1 矿石化学多元素分析结果

Table 1 Results of chemical multi-element analysis of the ore

/%

组分	Cu	Mo	Pb	Zn	P	Al ₂ O ₃	MgO
含量	0.73	0.044	0.012	0.035	0.071	13.87	0.64
组分	Fe	SiO ₂	S	CaO	Na ₂ O	C	As
含量	1.57	71.11	0.83	1.51	0.72	0.26	0.024

表2 矿石铜物相分析结果

Table 2 Results of copper phase analysis of the ore

/%

铜相别	含量	分布率
氧化铜中铜	0.06	8.22
硫化铜中铜	0.67	91.78
总铜	0.73	100.0

表3 矿石钼物相分析结果

Table 3 Results of molybdenum phase analysis of the ore

/%

钼相别	含量	分布率
氧化钼	0.001 8	4.09
硫化钼	0.042 2	95.91
总钼	0.044	100.0

1.2 矿石矿物组成及含量

矿石矿物组成及相对含量见表4。由表4可知,矿石的矿物组成较为复杂,有价矿物组分含量相对较低。有价铜矿物主要为辉铜矿和黄铜矿,另有少量铜蓝和硫砷铜矿;有价钼矿物为辉钼矿;脉石矿物种类较多,主要为石英,其次为方解石和石榴子石,另有少量高岭石、钾长石、钠长石、白云母、绿帘石、绿泥石等。

表4 矿石矿物组成及相对含量

Table 4 Mineral composition and relative content of the ore

/%

矿物名称	含量	矿物名称	含量
石英	38.10	绿帘石	0.29
钾长石	16.74	铁橄榄石	0.27
高岭石	13.67	透辉石	0.16
绢云母	11.29	普通辉石	0.14
钠长石	8.87	金红石	0.14
方解石	2.88	铁闪石	0.12
白云母	2.07	铜蓝	0.10
石榴子石	1.08	辉钼矿	0.08
黑云母	0.92	重晶石	0.07
黄铁矿	0.58	硫砷铜矿	0.06
褐铁矿	0.43	磷灰石	0.05
辉铜矿	0.42	磁黄铁矿	0.04
金云母	0.41	榍石	0.02
黄铜矿	0.36	锆石	0.02
斜绿泥石	0.34	其他	0.28

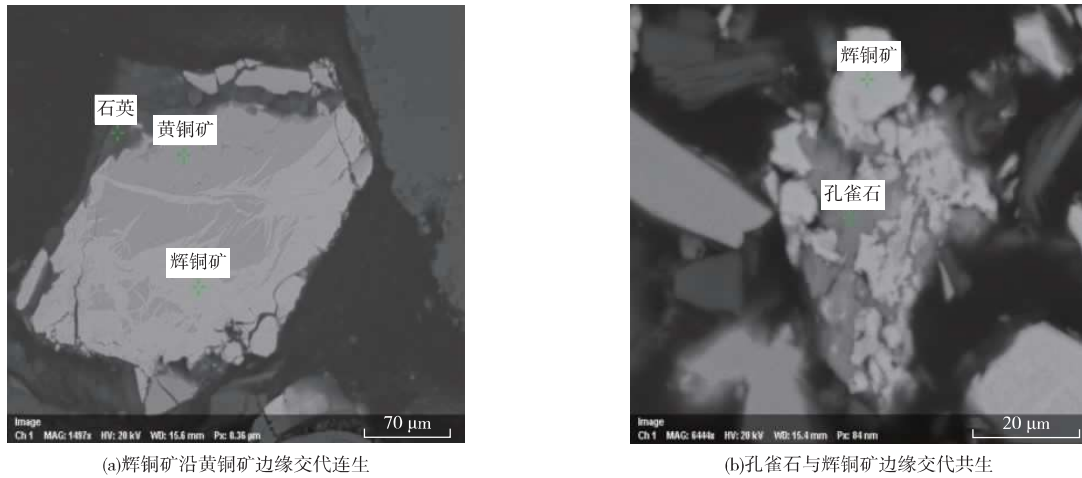
1.3 矿石主要矿物嵌布特征

1.3.1 铜矿物嵌布特征

铜矿物主要是硫化铜矿物和氧化铜矿物,其中硫化铜矿物主要为黄铜矿、辉铜矿、蓝辉铜矿,少量

的斑铜矿、铜蓝、黝铜矿、硫砷铜矿;氧化铜矿物包括硅孔雀石、孔雀石、铜铁矿、赤铜矿,硅孔雀石主要呈

不规则状、脉状与脉石、硫化铜矿物、铜铁矿紧密共生(图1)。



(a)辉铜矿沿黄铜矿边缘交代连生

(b)孔雀石与辉铜矿边缘交代共生

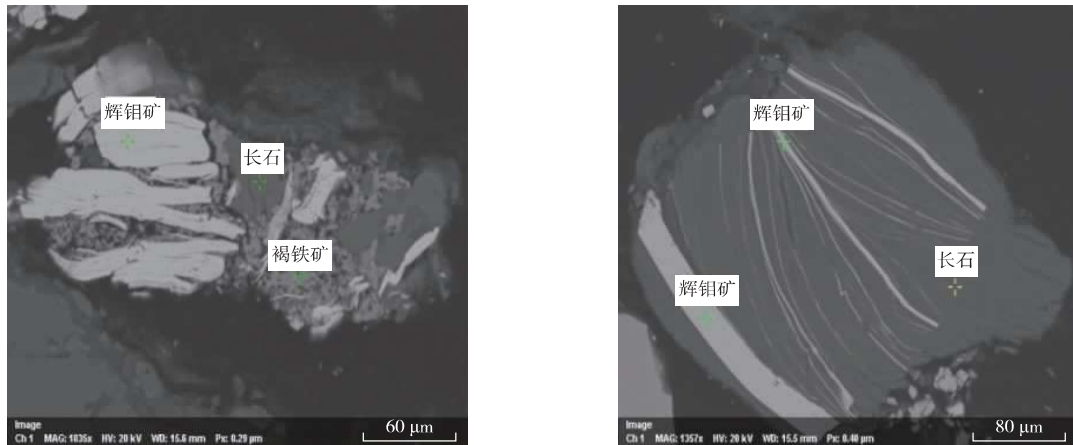
图1 铜矿物嵌布特征

Fig. 1 Embedded characteristics of copper minerals

1.3.2 钼矿物嵌布特征

钼矿物主要是辉钼矿,辉钼矿常呈片状、弯曲片状的单体形式存在,少量与脉石矿物及铜矿物边缘

连生、或呈片状穿插在云母裂隙中,也可见褐铁矿穿插在辉钼矿裂隙中(图2)。



(a)辉钼矿与黄铜矿、长石紧密共生

(b)辉钼矿呈片状沿长石层间穿插

图2 钼矿物嵌布特征

Fig. 2 Embedded characteristics of molybdenum minerals

2 试验结果与分析

2.1 粗选磨矿细度试验

磨矿是浮选前极其重要的作业,磨矿细度的选择决定了铜钼矿石与脉石矿物是否充分单体解离^[9-10],采用两段粗选试验流程,探索了粗选磨矿细度对铜钼选别指标的影响,试验结果见图3。由图3可知,随着磨矿细度的增加,铜钼回收率呈现出先增加后减小的趋势,当磨矿细度-0.074 mm占65%时,铜钼回收率较佳。因此,确定磨矿细度为-0.074 mm占65%进行后续试验。

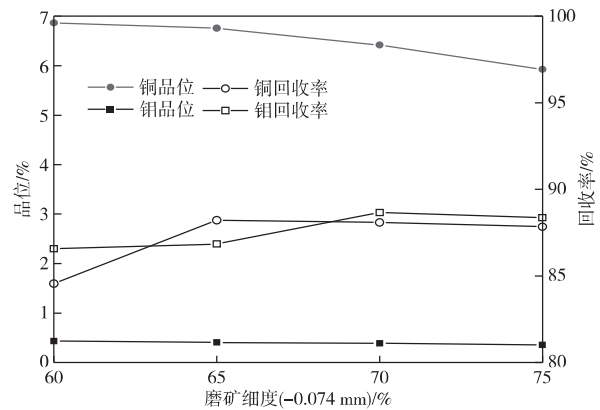


图3 磨矿细度试验结果

Fig. 3 Results of grinding fineness tests

2.2 粗选捕收剂种类试验

固定磨矿细度为-0.074 mm 占 65%、起泡剂 BK201 用量为 21 g/t、pH 调整剂石灰用量为 1 000 g/t,选择 BK404C、硫脲、BK345、BK404B、Z-200、BK316 作为铜钼混合浮选捕收剂,固定用量为 32 g/t,进行粗选捕收剂种类对比试验,试验流程见图 4,试验结果见表 5。

由表 5 可知,当采用 BK404C 与 BK404B 时,铜钼回收率均较高,而 BK404C 对钼的回收效果较 BK404B 要佳,BK345 对铜的回收效果较差,但对钼的回收效果要强于其他捕收剂。因此,后续试验中等可浮粗选采用 BK404C 和 BK345 作铜钼的组合捕收剂,强化粗选采用捕收力强的 BK404B 和 BK404C 作铜的组合捕收剂。

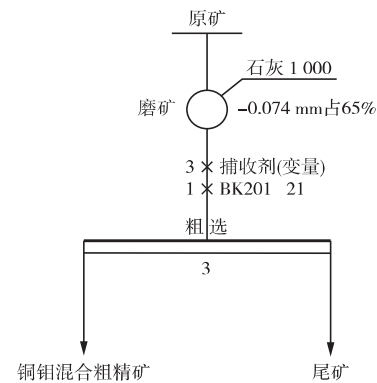


图 4 粗选捕收剂种类试验流程

Fig. 4 Flowsheet of roughing collector type tests

表 5 粗选捕收剂种类试验结果

Table 5 Results of roughing collector type tests

/%

捕收剂种类	产品名称	产率	品位		回收率	
			Cu	Mo	Cu	Mo
BK404C	铜钼混合粗精矿	4.31	14.43	0.91	85.53	86.63
	尾矿	95.69	0.11	0.01	14.47	13.37
	原矿	100.0	0.73	0.05	100.0	100.0
BK345	铜钼混合粗精矿	3.59	3.82	1.11	19.16	88.26
	尾矿	96.41	0.60	0.01	80.84	11.74
	原矿	100.0	0.72	0.05	100.0	100.0
BK404B	铜钼混合粗精矿	5.44	10.87	0.68	83.90	84.88
	尾矿	94.56	0.12	0.01	16.10	15.12
	原矿	100.0	0.70	0.04	100.0	100.0
Z-200	铜钼混合粗精矿	5.42	10.59	0.72	82.36	84.94
	尾矿	94.58	0.13	0.01	17.64	15.06
	原矿	100.0	0.70	0.05	100.0	100.0
BK316	铜钼混合粗精矿	4.38	13.57	0.84	82.70	84.27
	尾矿	95.62	0.13	0.01	17.30	15.73
	原矿	100.0	0.72	0.04	100.0	100.0

2.3 等可浮粗选捕收剂用量试验

固定磨矿细度为-0.074 mm 占 65%、起泡剂 BK201 用量为 21 g/t、pH 调整剂石灰用量为 1 000 g/t,选择 BK404C+ BK345 作为等可浮粗选捕收剂,确定其用量分别为 24、28、32、36、40 g/t,进行等可浮粗选捕收剂用量试验,试验流程见图 5,试验结果见图 6。

由图 6 可知,随着捕收剂用量增加,铜钼混合精矿中铜、钼品位逐渐降低,铜、钼回收率呈现出先增加后趋于平稳的趋势。因此,确定等可浮粗选捕收剂用量为 32 g/t 进行后续试验。

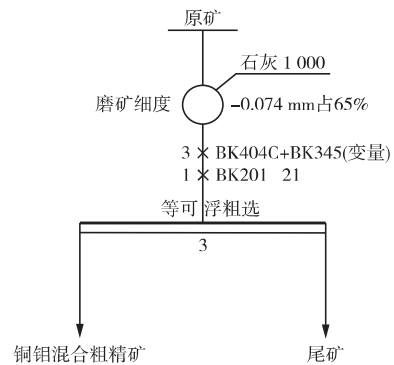


图 5 等可浮粗选捕收剂用量试验流程

Fig. 5 Flowsheet of iso-flotability roughing collector dosage tests

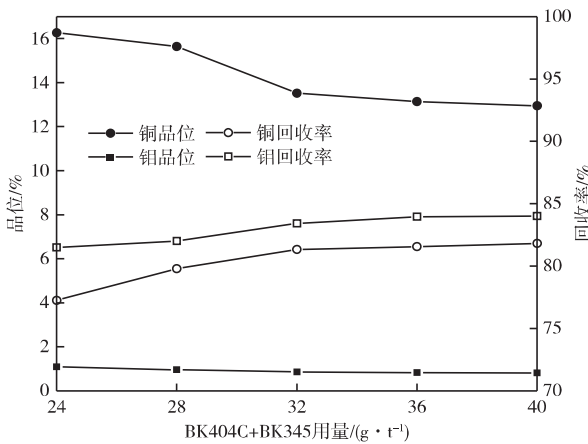


图6 等可浮粗选捕收剂用量试验结果

Fig. 6 Results of iso-flotability roughing collector dosage tests

2.4 强化粗选捕收剂用量试验

固定磨矿细度为-0.074 mm占65%、起泡剂BK201用量为28 g/t、pH调整剂石灰用量为1 000 g/t,等可浮粗选捕收剂BK404C+BK345用量为32 g/t,选择BK404B+BK404C作为强化浮选粗选捕收剂,确定其用量分别为20、24、28、32 g/t,进行强化粗选捕收剂用量试验,试验流程见图7,试验结果见图8。

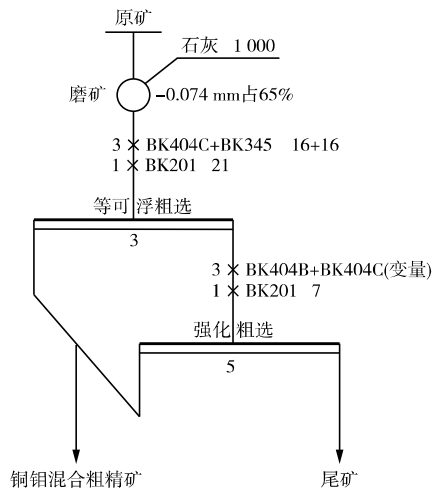


图7 强化粗选捕收剂用量试验流程

Fig. 7 Flowsheet of intensified roughing collector dosage tests

由图8可知,随着捕收剂用量增加,铜钼混合精矿中铜、钼品位逐渐降低,铜、钼回收率先增加后趋于稳定。因此,确定强化浮选粗选捕收剂用量为28 g/t进行后续试验。

2.5 强化粗选石灰用量试验

固定磨矿细度为-0.074 mm占65%、起泡剂BK201用量为28 g/t、pH调整剂石灰用量为

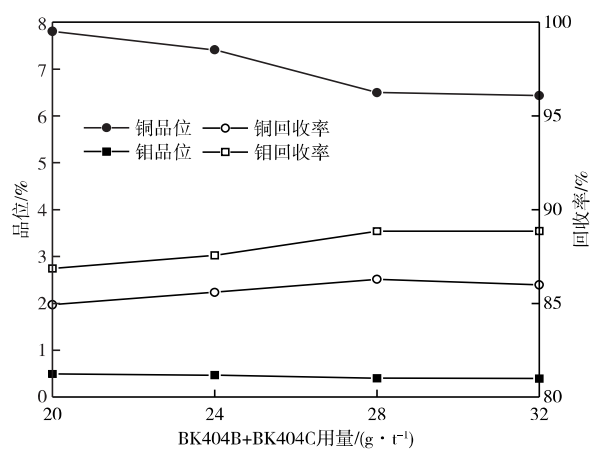


图8 强化粗选捕收剂用量试验结果

Fig. 8 Results of intensified roughing collector dosage tests

1 000 g/t,等可浮粗选捕收剂BK404C+BK345用量为32 g/t,强化粗选捕收剂BK404B+BK404C用量为28 g/t,选择石灰用量分别为1 000、2 000、3 000、4 000 g/t,进行强化粗选石灰用量试验,试验流程同图7,试验结果见图9。

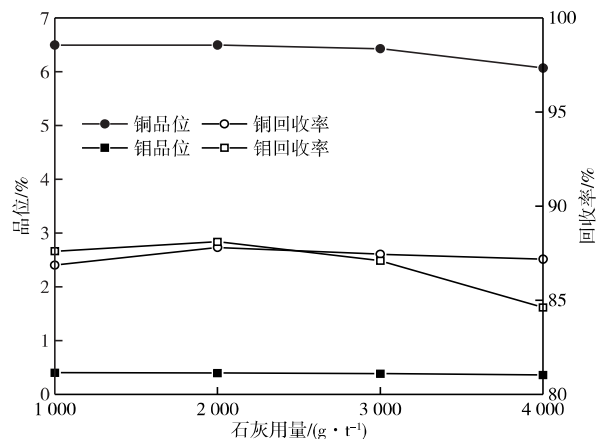


图9 强化粗选石灰用量试验结果

Fig. 9 Results of roughing lime dosage tests

由图9可知,随着石灰用量增加,铜钼混合精矿中铜、钼品位逐渐降低,铜、钼回收率先呈现出增加后减小的趋势。因此,确定石灰用量为2 000 g/t。

2.6 闭路试验

在条件试验的基础上,进行铜钼混合浮选的闭路试验,闭路试验流程见图10,试验结果见表6。由表6可知,采用一次等可浮粗选、一次等可浮精选、一次强化粗选、两次强化精选、两次扫选工艺流程,闭路试验可以获得Cu品位23.27%、Cu回收率87.14%、Mo品位1.34%、Mo回收率82.24%的铜钼混合粗精矿,有效回收了矿石中的铜和钼。

表6 闭路试验结果

Table 6 Results of the locked-cycle tests

/%

产品名称	产率	品位		回收率	
		Cu	Mo	Cu	Mo
铜钼混合精矿	2.72	23.27	1.340	87.14	82.24
尾矿	97.28	0.096	0.0081	12.86	17.76
原矿	100.0	0.73	0.044	100.0	100.0

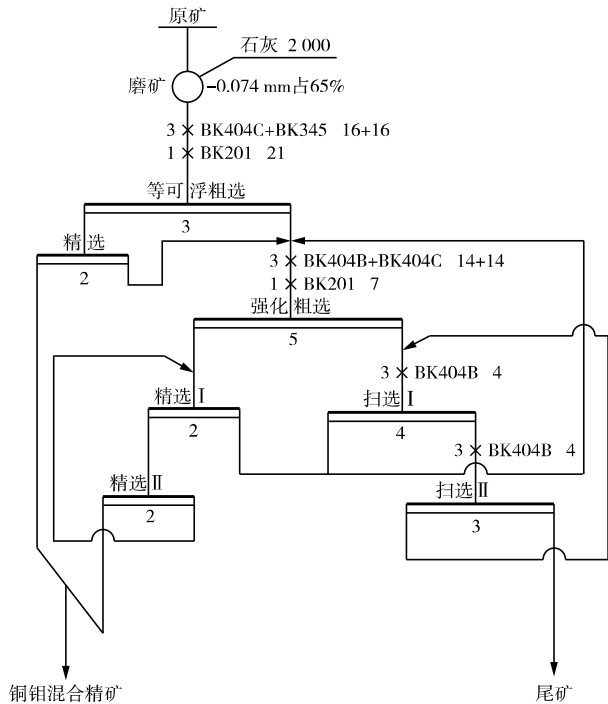


图10 闭路试验流程

Fig. 10 Flowsheet of the locked-cycle tests

3 结论

1) 该斑岩型铜钼矿石中主要有价金属为铜和钼,其中铜品位为 0.73%,钼品位为 0.044%。有价铜矿物主要为辉铜矿和黄铜矿,另有少量铜蓝和硫砷铜矿;有价钼矿物为辉钼矿;脉石矿物种类较多,主要为石英,其次为方解石和石榴子石,另有少量高岭石、钾长石、钠长石、白云母、绿帘石、绿泥石等;矿石中铜、钼主要以硫化物的形式存在,分布率分别为 91.78%和 95.91%。

2) 该斑岩型铜钼矿石中铜矿物主要是硫化铜矿物和氧化铜矿物,其中硫化铜矿物主要为黄铜矿、辉铜矿、蓝辉铜矿,少量的斑铜矿、铜蓝、黝铜矿、硫砷铜矿;氧化铜矿物主要为硅孔雀石、孔雀石、铜铁矿、赤铜矿。钼矿物主要是辉钼矿,辉钼矿常呈片状、弯曲片状的单体形式存在,少量与脉石矿物及铜矿物边缘连生、或呈片状穿插在云母裂隙中,也可见褐铁矿穿插在辉钼矿裂隙中。

3) 针对矿石性质,采用混合浮选工艺开展选矿

试验研究,在磨矿细度-0.074 mm占65%、等可浮粗选捕收剂 BK404C+BK345 用量为 32 g/t、强化粗选捕收剂 BK404B+BK404C 用量为 28 g/t、石灰用量 2000 g/t 的条件下,采用“一次等可浮粗选、一次等可浮精选、一次强化粗选、两次强化精选、两次扫选”的闭路浮选工艺流程,最终获得 Cu 品位 23.27%、Cu 回收率 87.14%、Mo 品位 1.34%、Mo 回收率 82.24%的铜钼混合精矿,有效回收了矿石中的铜和钼。

参考文献

[1] 张舒婷,孙春宝,李根壮,等. 西藏某低品位铜钼矿浮选流程对比[J]. 有色金属工程,2016,6(3):50-54.
ZHANG Shuting, SUN Chunbao, LI Genzhuang, et al. Comparison flotation tests with different processes of a low grade copper-molybdenum ore from Tibet [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2016, 6(3): 50-54.

[2] 王昊伟,周兴龙,徐翔,等. 云南某低品位铜钼矿选矿试验研究[J]. 矿产综合利用,2017(2):63-67
WANG Haowei, ZHOU Xinglong, XU Xiang, et al. Experimental study on beneficiation for a low-grade copper-molybdenum ore in Yunnan [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2017(2): 63-67.

[3] 周峰,孙春宝,刘洪均,等. 某低品位铜钼矿低碱度浮选工艺研究[J]. 金属矿山,2011,40(3):80-83.
ZHOU Feng, SUN Chunbao, LIU Hongjun, et al. Investigation on the low alkalinity flotation process for a low grade copper-molybdenum ore [J]. Metal Mine, 2011, 40(3): 80-83.

[4] 陈飞,江维,王立刚,等. 西藏玉龙铜矿铜钼矿选矿试验研究及应用[J]. 有色金属(选矿部分),2015(5):5-9.
CHEN Fei, JIANG Wei, WANG Ligang, et al. Research and application of beneficiation test of Yulong copper mine in Tibet [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2015(5): 5-9.

[5] 郭文鹏,陈飞,陈一锋,等. 玉龙铜矿 I 号矿体混合矿石选矿试验[J]. 金属矿山,2013,42(6):61-66.
GUO Wenpeng, CHEN Fei, CHEN Yifeng, et al. Beneficiation experiments of the mixed ore at No. I orebody of Yulong copper mine [J]. Metal Mine, 2013, 42(6): 61-66.

(下转第 102 页)