doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2026.01.008
引用格式：杨政国. 西藏某氧化-原生混合型难选铜钼矿浮选工艺优化[J]. 矿冶，2026，35(1)：52-58.
YANG Zhengguo. Optimization of flotation process for a refractory mixed oxide-primary copper-molybdenum ore in Xizang[J]. Mining and Metallurgy, 2026, 35(1): 52-58.

西藏某氧化-原生混合型难选铜钼矿浮选工艺优化

杨政国[1,2]
（1. 紫金矿业集团股份有限公司，福建 龙岩 364200；
2. 西藏翔龙矿业有限公司，西藏 日喀则市 857000）

摘 要：西藏某难选铜钼矿由表层氧化矿与内部原生矿组成，矿石整体铜、钼品位偏低。其中，含钼矿物嵌布粒度微细，表层氧化矿铜氧化率较高，导致资源综合回收难度较大。针对该矿石性质及开采规划，探索了分选表层氧化矿与内部原生矿的选矿工艺。结合类似矿山经验、青藏高原地区政策要求及系统选矿试验数据，最终推荐采用配矿方案（控制铜品位约0.40%、氧化率约10%），并确立“硫化调浆—铜钼混浮—再磨分离”的浮选工艺流程。试验结果表明，该工艺可有效分选出合格的铜精矿与钼精矿。铜精矿中铜品位高于25%、钼品位低于0.1%，铜回收率超过89%；钼精矿中铜品位低于1%、钼品位高于45%，钼回收率达到90%以上。本研究实现了该难选铜钼矿资源的有效综合回收，可为同类矿山资源的开发利用提供技术参考。

关键词：难选铜钼矿；混合矿浮选；硫化调浆；再磨分离；微细粒辉钼矿回收
中图分类号：TD952 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-7854（2026）01-0052-07

Optimization of flotation process for a refractory mixed oxide-primary copper-molybdenum ore in Xizang

YANG Zhengguo[1,2]
(1. Zijin Mining Group Co., Ltd., Longyan 364200, Fujian, China;
2. Xizang Xianglong Mining Co., Ltd., Shigatse City 857000, Xizang, China)

Abstract: A refractory copper-molybdenum ore in Xizang consists of surface oxide ore and internal primary ore, with overall low grades of copper and molybdenum. The molybdenum-bearing minerals exhibit fine dissemination, and the surface oxide ore has a high copper oxidation rate, leading to significant challenges in comprehensive resource recovery. Addressing the ore characteristics and mining plan, this study explored beneficiation processes for separating the surface oxide ore and the internal primary ore. Based on experiences from similar mines, regional policy requirements on the Qinghai-Xizang Plateau, and systematic beneficiation test data, a blending strategy was finally recommended (controlling copper grade at approximately 0.40% and oxidation rate at about 10%). A flotation process of "sulfidizing conditioning–bulk copper-molybdenum flotation–regrinding separation" was established. Test results show that this process can effectively separate qualified copper concentrate and molybdenum concentrate. The copper concentrate contains over 25% copper and less than 0.1% molybdenum, with a copper recovery exceeding 89%. The molybdenum concentrate contains less than 1% copper and over 45% molybdenum, with a molybdenum recovery above 90%. This study achieved effective comprehensive recovery of this refractory copper-molybdenum resource, providing technical reference for the development and utilization of similar ore resources.

Key words: refractory copper-molybdenum ore; mixed ore flotation; sulfidizing conditioning; regrinding separation; fine-grained molybdenite recovery

收稿日期：2024-12-10
第一作者：杨政国，工程师，主要从事有色金属矿选矿研究。E-mail：313957363@qq.com

铜、钼作为性能优异的有色金属，在电气、能源、航空航天、机械制造等领域具有重要应用[1,2]。近年来，随着新能源汽车产业的高速发展和航空航天领域的持续突破，铜、钼金属的市场需求稳步提升[3-5]。铜、钼资源主要来自矿产，需经过选矿、冶金等工艺提取。当前，国内外处理伴生铜钼矿的主流浮选工艺主要包括优先浮选、部分优先—混合浮选以及混合浮选—分离三种[6,7]。然而，随着资源开采不断深入，铜钼矿石逐渐呈现出品位低、嵌布粒度细、氧化率高等特点，选别回收难度日益增大。

西藏某难选铜钼矿由表层氧化矿和内部原生矿组成。其中，氧化矿铜含量较高，但氧化率亦高[8]，在西藏地区严格的环保政策下，不具备单独处理的经济与环境可行性；原生矿中铜、钼品位偏低，且辉钼矿嵌布粒度微细，选矿回收难度较大[9]。为实现该资源的综合回收，研究将氧化矿与原生矿按一定比例进行配矿，形成铜钼混合矿进行系统选矿试验[10]。试验重点围绕铜钼混选、铜钼再磨分离以及微细粒辉钼矿的高效回收展开。最终采用“硫化调浆—铜钼混浮—再磨分离”的浮选工艺流程，并配合矿冶科技集团有限公司研发的针对微细粒辉钼矿的特效捕收剂BK340，成功获得了合格的铜、钼精矿产品，为该类难处理铜钼矿的资源开发与利用提供了有益参考。

1 矿石性质

表层氧化矿与内部原生矿的多元素分析结果见表1，原生矿中铜品位为0.37%，伴生钼品位为0.023%；氧化矿中铜品位为0.72%，伴生钼含量为0.001%，可忽略不计。矿石中伴生金银含量较低，硫含量不足1%。

表1 矿石中多元素分析结果

Table 1 Results of multi-element analysis in ores /%

	成分	Cu	Mo	S	Pb	Zn	Fe	Au①	Ag①
原生矿	含量	0.37	0.023	0.46	<0.01	<0.01	1.18	<0.1	<1.0
	成分	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	As	P_2O_5
	含量	70.69	14.29	0.8	0.91	5.29	3.28	0.001 1	0.13
氧化矿	成分	Cu	Mo	S	Pb	Zn	Fe	Au*	Ag*
	含量	0.72	0.001	0.83	0.012	0.088	1.6	<0.1	<1.0
	成分	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	As	
	含量	67.72	14.33	0.8	0.55	4.82	3.22	0.001 1	

注：①单位为$g \cdot t^{-1}$。

对矿石的表层氧化矿与内部原生矿分别进行了铜、钼物相分析，结果见表2与表3。分析可知，原生矿中铜主要以硫化物形式存在，其中原生硫化铜占34.5%，次生硫化铜占62.8%，铜氧化率为2.7%；钼主要以硫化钼形式存在，占比96.49%。氧化矿中铜则主要以氧化物形式存在，氧化铜占比超过95%。由于氧化矿氧化率过高，单独浮选处理意义有限，且受西藏地区环境保护政策限制，无法通过湿法浸出工艺回收铜，因此考虑将氧化矿与原生矿按一定比例配制成混合矿进行选别[10]。结合国内同类选矿厂经验，

表2 铜的化学物相

Table 2 Chemical phase of copper /%

	相别	氧化铜	次生硫化铜	原生硫化铜	合计
原生矿	铜含量	0.01	0.233	0.128	0.371
	分布率	2.70	62.80	34.50	100.0
	相别	氧化铜	次生硫化铜	原生硫化铜	合计
氧化矿	铜含量	0.685	0.029	0.006	0.720
	占有率	95.14	4.03	0.83	100.0

表3 原生矿钼物相分析结果

Table 3 Chemical phase analysis result of molybdenum in primary ore /%

相别	氧化钼	硫化钼	合计
钼含量	0.000 8	0.022	0.022 8
分布率	3.51	96.49	100.0

按原生矿与氧化矿9∶1的比例进行配矿较为合理，所得混合矿铜品位为0.405%，氧化率为11.94%。后续试验将基于该混合矿开展。

2 试验结果与讨论

对混合矿开展铜钼混选粗选试验，以保障铜、钼的综合回收率。进行铜钼混合粗精矿的精选再磨细度试验，促进铜、钼矿物充分单体解离，为后续铜钼分离创造有利条件。开展铜钼混合精矿分离捕收剂的优化试验，在确保获得合格精矿产品的基础上，强化对微细粒辉钼矿的回收，从而提升整体选矿技术指标。

2.1　铜钼混合浮选粗选试验

混合矿的硫品位为0.46%，氧化率为11.94%。为此，分别开展pH值调整剂与硫化剂试验，以调节矿浆pH值、抑制含硫矿物并硫化氧化矿物；同时开展捕收剂试验，研发并筛选高效捕收剂，实现对混合矿中铜、钼的综合回收。铜钼混合浮选试验流程见图1。

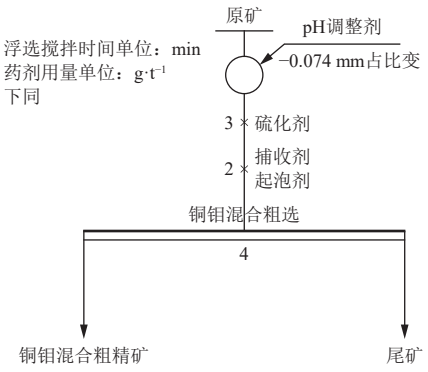


图1　铜钼混浮粗选试验流程图

Fig. 1　Flow chart of copper-molybdenum flotation rough separation test

2.1.1　粗选磨矿细度试验

试验考察了磨矿细度对粗选指标的影响，结果见图2。结果表明，当磨矿细度达到−0.074 mm粒级占75%时，铜回收率达到峰值，但与70%细度时的结果差异不大；占比超过75%后，铜回收率呈下降趋势，说明矿石较适宜的磨矿细度为−0.074 mm占70%，高于75%可能导致过磨。钼回收率在65%~70%内变化不大，但整体持续上升，表明钼矿物嵌布粒度极细，后续铜钼分离阶段需增加超细磨作业。

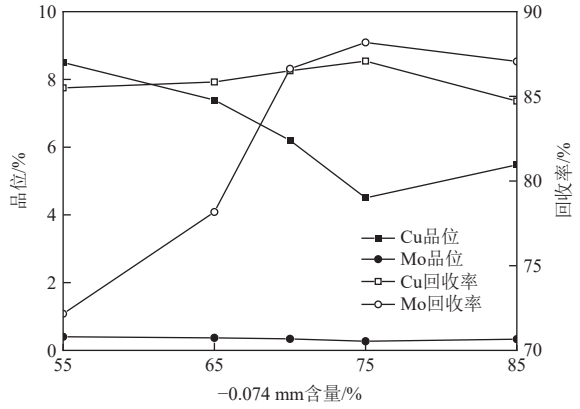


图2　粗选磨矿细度对浮选指标的影响

Fig. 2　Effects of roughing grinding fineness on flotation index

2.1.2　粗选pH值调整剂试验

混合矿含硫较低，需少量pH值调整剂进行调浆。试验以石灰为pH值调整剂，考察其用量对粗选指标的影响，结果见图3。结果表明，石灰用量超过1 000 g·t^{-1}后，铜回收率呈下降趋势；用量超过500 g·t^{-1}后，钼回收率亦开始下降。因此，石灰用量宜控制在500~1 000 g·t^{-1}，此时浮选效果较佳。

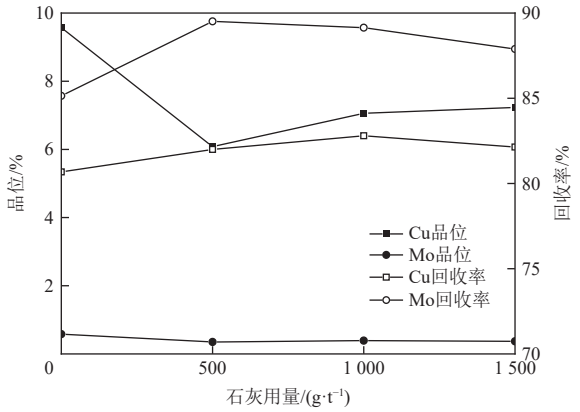


图3　粗选石灰用量对浮选指标的影响

Fig. 3　Effects of coarse lime dosage on flotation index

2.1.3　粗选硫化剂试验

混合矿氧化率为11.94%，需添加硫化剂进行硫化调浆，以促进氧化铜矿物的上浮[11]。试验采用硫氢化钠作为硫化剂，考察其用量对粗选指标的影响，结果见图4。结果表明，硫氢化钠用量超过300 g·t^{-1}后，铜回收率急剧下降；添加硫化剂后，钼回收率整体呈下降趋势，且在用量超过300 g·t^{-1}后下降尤为明显。因此，硫氢化钠用量宜定为300 g·t^{-1}，有利于铜的充分回收。

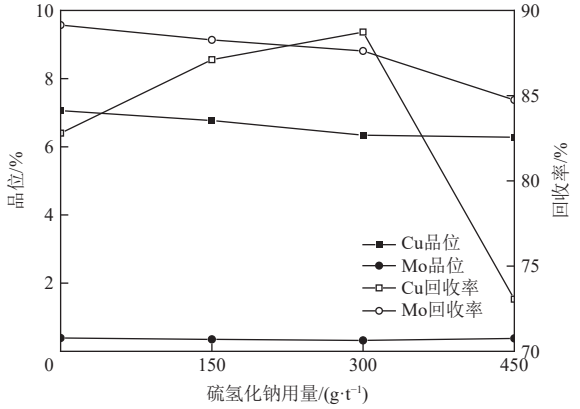


图4　粗选硫氢化钠用量对浮选指标的影响

Fig. 4　Effects of crude sodium hydrosulfide dosage on flotation index

2.1.4　粗选捕收剂试验

为综合回收混合矿中的铜、钼，分别开展了常规及特效铜钼捕收剂试验，考察不同捕收剂对粗选指标的影响，结果见表4，其中BK306为矿冶科技集团有限公司特效铜捕收剂，有强化铜捕收的效果，BK340为矿冶科技集团有限公司研发的特效钼捕收剂，可替代常规煤油、柴油等，强化在细粒辉钼矿表面的吸附捕收，且其闪点≥90 ℃，不属于矿山危化品。由表4可知，煤油对钼的选择性较好，在优先浮钼工艺中可考虑用作钼捕收剂；BK306对铜的捕收能力最强，粗精矿铜回收率达87.31%；BK340对钼的捕收效果较优，粗精矿钼回收率达91.42%。因此，确定以BK306为主捕收剂，BK340为辅助捕收剂，并分别开展用量试验。

表4　粗选捕收剂种类对试验指标的影响

Table 4　Effects of crude collector types on test indexes　/%

捕收剂种类	浮选指标			
	Cu品位	Mo品位	Cu回收率	Mo回收率
煤油	2.98	1.23	11.34	84.38
柴油	14.81	1.06	54.92	74.32
BK345A	12.03	1.01	50.91	79.46
PJ053	10.53	0.62	84.18	80.11
BK901B	10.18	0.58	82.53	88.56
BK306	4.28	0.24	87.31	84.22
BK340	7.79	0.60	59.29	91.41
丁基黄药	7.24	0.69	37.31	81.13

BK306用量试验结果见图5。由图5可知，随着BK306用量的增加，铜钼混合粗精矿中的铜和钼的回收率均逐渐增加，当BK306用量超过25 $g \cdot t^{-1}$后，铜和钼的回收率增幅减缓。因此，BK306用量应为25 $g \cdot t^{-1}$。

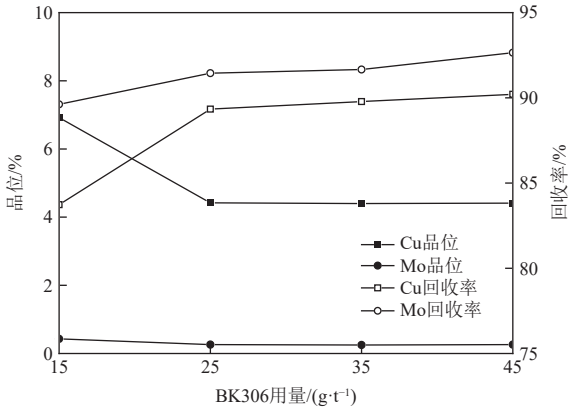


图5　粗选BK306用量对浮选指标的影响

Fig. 5　Effects of crude BK306 dosage on flotation index

BK340用量试验结果见图6。从图6可以看出，随着BK340用量的增加，铜钼混合粗精矿中铜和钼的回收率先上升后下降：用量超过35 $g \cdot t^{-1}$后，铜回收率开始下降；超过45 $g \cdot t^{-1}$后，钼回收率亦呈下降趋势。因此，BK340用量宜定为35 $g \cdot t^{-1}$。

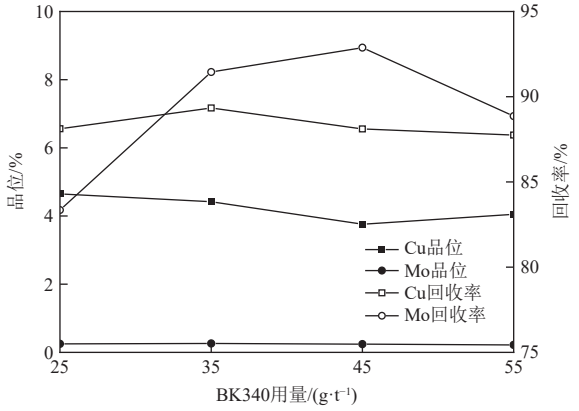


图6　粗选BK340用量对浮选指标的影响

Fig. 6　Effects of crude BK340 dosage on flotation index

2.2　铜钼混合粗精矿精选再磨细度试验

磨矿细度试验表明，在磨矿细度−0.074 mm粒级占比60%~85%时，钼回收率随细度提高持续上升，说明钼矿物嵌布粒度极细。铜钼分离前需对混合精矿进行再磨，一方面可擦洗脱药，另一方面能进一步使钼矿物单体解离，利于铜钼分离。为使铜钼混合粗精矿中的铜、钼充分单体解离，开展了精选再磨细度试验，流程见图7，结果见图8。从图8可以看出，随着再磨细度的增加，铜钼混合精矿中铜和钼的品位及作业回收率均呈现先升后降的趋势。综合考量，

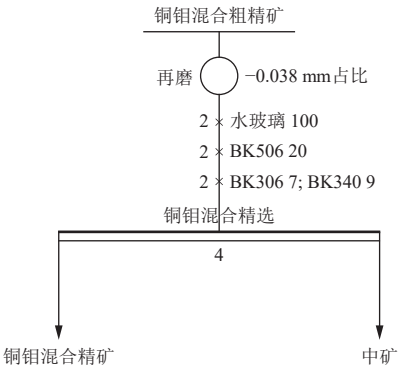


图7　铜钼混合粗精矿精选试验流程图

Fig. 7　Flowsheet of copper-molybdenum mixed coarse concentrate selection test

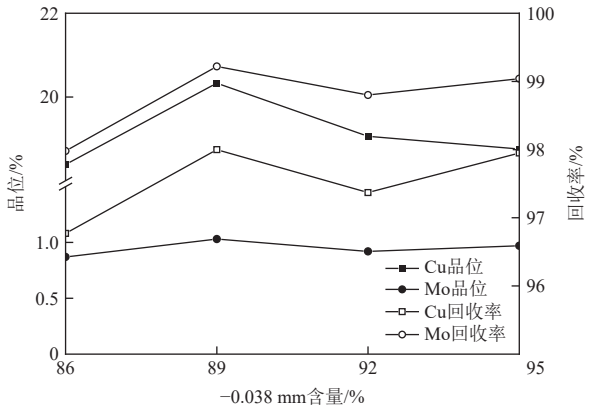


图8 精选再磨细度对浮选指标的影响

Fig. 8 Effects of fineness of selection and regrinding on flotation index

铜钼混合粗精矿精选再磨细度以−0.038 mm占89%左右为宜。

2.3 铜钼混合精矿分离捕收剂试验

再磨细度试验表明，铜钼混合精矿粒度较细。辉钼矿在细磨过程中会裂解出更多极性亲水的“棱面”，其表面能较高，不易吸附传统烃油类捕收剂[12]。因此，分离试验重点关注对微细粒辉钼矿的捕收，在获得合格精矿产品的同时提高钼回收率。为在分离过程中充分回收微细粒辉钼矿，开展了铜钼混合精矿分离捕收剂试验，流程见图9，结果见表5。由表5可知，采用BK340作为捕收剂时，钼粗精矿中钼的作业回收率最高，达96.22%，说明BK340能有效吸附于微细粒辉钼矿表面，强化对其的捕收。

2.4 全流程闭路试验

在上述试验基础上，开展全流程闭路试验，流程见图10，结果见表6。由表6可知，该混合矿采用“硫化调浆—铜钼混浮—再磨分离”工艺，全流程闭路试验获得了铜品位27.19%、铜回收率89.59%的铜精矿，以及钼品位48.41%、钼回收率90.05%的钼精矿，实现了该矿石资源的综合利用。

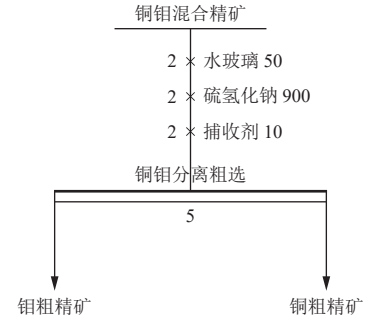


图9 铜钼混合精矿分离试验流程图

Fig. 9 Flowsheet of copper-molybdenum mixed concentrate separation test

表5 分离捕收剂种类对浮选指标的影响

Table 5 Effects of separation collector types on flotation indexes /%

捕收剂种类	钼粗精矿浮选指标			
	Cu品位	Mo品位	Cu回收率	Mo回收率
煤油	13.72	13.49	5.03	81.29
柴油	14.16	13.60	4.48	78.84
BK345A	13.57	10.52	6.09	87.81
PJ053	12.42	11.63	4.97	83.73
BK340	13.31	11.20	5.88	96.22

表6 全流程闭路试验结果

Table 6 Results of the whole process closed-circuit test /%

产品名称	产率	品位		回收率	
		Cu	Mo	Cu	Mo
钼精矿	0.04	0.23	48.41	0.02	90.05
铜精矿	1.33	27.19	0.080	89.59	4.93
尾矿Ⅱ	5.66	0.097	0.002 9	1.36	0.74
尾矿Ⅰ	92.97	0.039	0.001 0	9.03	4.28
原矿	100.0	0.40	0.022	100.0	100.0

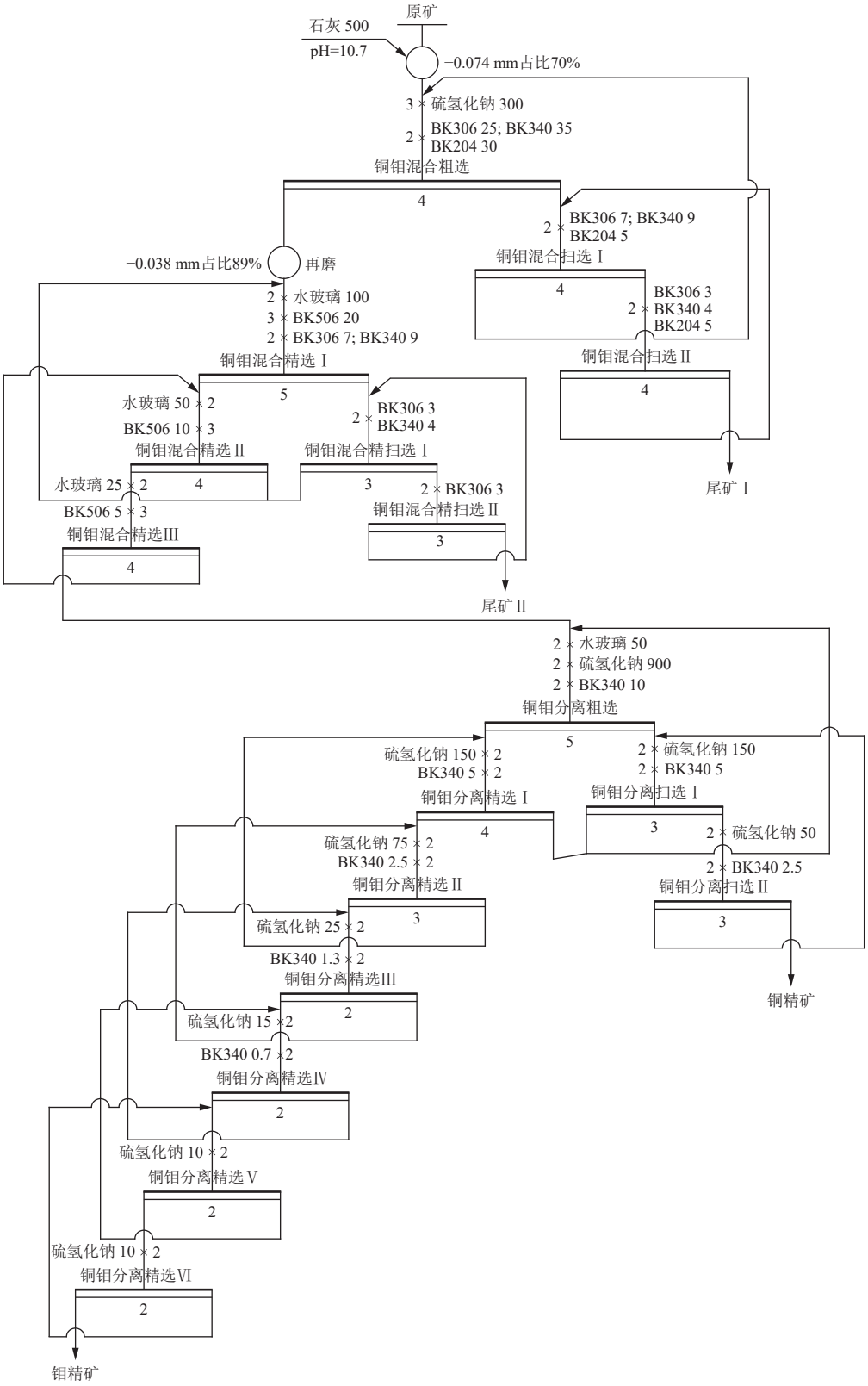


图 10　全流程闭路试验流程图

Fig. 10　Flowsheet of the whole process closed-circuit test

3 结论

1）西藏某难选铜钼矿由表层氧化矿与内部原生矿组成，其中氧化矿含铜0.72%，品位较高，但是氧化率达到95.14%，不易单独处理。该矿含钼矿物嵌布粒度微细，表层氧化矿铜氧化率较高，导致资源综合回收难度较大。

2）采用“硫化调浆—铜钼混浮—再磨分离”的工艺流程，结合硫氢化钠调浆促进氧化铜上浮、混合粗精矿再磨提升矿物解离度、以及特效捕收剂BK340（矿冶集团研发）强化微细粒辉钼矿回收等关键步骤，形成了系统化的高效分选技术路线。

3）应用的特效捕收剂BK340，相比传统烃油类捕收剂能更有效地吸附于微细粒辉钼矿表面，配合优化工艺，最终可获得铜精矿（Cu品位27.19%、回收率89.59%）和钼精矿（Mo品位48.41%、回收率90.05%）的优良指标，实现了难选铜钼矿资源的有效综合利用。

参考文献

[1] 马茁卉，余良晖．我国铜资源形势、供矿能力分析及相关对策建议[J]. 中国国土资源经济，2010, 23(7): 27-28.
MA Z H, YU L H. Analysis of China's copper resource situation and policy adjustment research[J]. China's Mining Industry, 2010, 23(7): 27-28.

[2] 王修，刘冲昊，王安建，等．中国钼资源开发利用现状及未来需求预测[J]. 矿产综合利用，2024, 45(4): 69-75.
WANG X, LIU C H, WANG A J, et al. Current status and future demand forecast of molybdenum resource development and utilization in China[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(4): 69-75.

[3] 冯丹丹．全球钼资源供需形势分析与展望[J]. 国土资源情报，2020(10): 39-44.
FENG D D. Analysis and prospect of supply and demand situation of global molybdenum resources[J]. Natural Resources Information, 2020(10): 39-44.

[4] 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.

[5] 蒋炜，李伟，刘铁成，等．全球铜资源分布与价格影响因素分析[J]. 矿产勘查，2025, 16(1): 205-213.
JIANG W, LI W, LIU T C, et al. Global copper resource distribution and price influencing factors[J]. Mineral Exploration, 2025, 16(1): 205-213.

[6] 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 X F, LIU Y Y. Research status and progress of flotation of copper-molybdenum ore[J]. Mining and Metallurgy, 2021, 30(6): 42-47.

[7] 蒋馨瑶，鲁路林，付晓坤，等．铜钼分离抑制剂研究进展[J]. 有色金属（选矿部分），2024(10): 47-56.
JIANG X Y, LU L L, FU X K, et al. Research progress on Cu-Mo separation depressant[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2024(10): 47-56.

[8] 黄发兰．某典型氧化铜矿物浮选行为研究[J]. 有色金属（选矿部分），2024(7): 48-54.
HUANG F L. Study on flotation behavior of a typical copper oxide ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2024(7): 48-54.

[9] 宛鹤，何廷树，杨剑波，等．辉钼矿捕收剂的应用现状和发展趋势[J]. 矿山机械，2016, 44(12): 1-6.
WAN H, HE T S, YANG J B, et al. Application status and development tendency of molybdenite collector[J]. Mining Machinery, 2016, 44(12): 1-6.

[10] 杨延宙，郭万中，加永泽仁，等．西藏某斑岩型铜矿石浮选回收试验研究[J]. 有色金属（选矿部分），2024(12): 91-96.
YANG Y Z, GUO W Z, JIAYONG Z R, et al. Experimental study on flotation recovery of a porphyry copper ore in Xizang[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2024(12): 91-96.

[11] 杨凯志，李汉文，胡真，等．云南某低品位硫氧混合铜矿浮选试验研究[J]. 有色金属（选矿部分），2022(1): 47-53.
YANG K Z, LI H W, HU Z, et al. Experimental study on flotation of a low-grade sulfur-oxygen mixed copper ore in Yunnan[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2022(1): 47-53.

[12] 俞娟，杨洪英，柴双．辉钼矿浮选捕收剂的研究进展[C]// 中国有色金属学会第七届学术年会论文集．沈阳：东北大学材料与冶金学院，2008: 3.
YU J, YANG H Y, CHAI S. Research progress of molybdenite flotation collector[C]//Proceedings of the 7th Annual Conference of the Chinese Nonferrous Metals Society. Shenyang: School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, 2008: 3.