云南某难选铜钼硫化矿浮选调控技术的试验研究①

杨斌[1,2]，肖世洁[1,3]，蒋丛国[2]，张曙光[1,3]，杨维江[2]，刘玫华[1,3]，胡龙臣[2]
（1.昆明冶金研究院有限公司，云南 昆明 650031；2.云南迪庆有色金属有限责任公司，云南 迪庆 674400；3.有色金属强化冶金新技术全国重点实验室，云南 昆明 650031）

摘　要：对云南某难选铜钼硫化矿进行系统工艺矿物学研究，基于此开发了新型捕收剂 KMC531，研究了 KMC531 对 Cu、Mo 捕收效果的影响。结果表明，在优化条件下，对铜品位 0.28%、钼品位 0.011%的原矿，闭路浮选试验获得了 Cu 品位 23.51%、Cu 回收率 82.86%，Mo 品位 0.92%、Mo 回收率 86.17%的铜钼混合精矿，实现了铜、钼高效富集。

关键词：捕收剂；浮选；铜钼混合精矿；硫化矿；KMC531；铜；钼；硫
中图分类号：TD923　　**文献标志码**：A　　doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.03.020
文章编号：0253-6099(2026)03-0151-05

Flotation Regulation Technology for Refractory Copper-Molybdenum Sulfide Ore in Yunnan

YANG Bin[1,2], XIAO Shijie[1,3], JIANG Congguo[2], ZHANG Shuguang[1,3],
YANG Weijiang[2], LIU Meihua[1,3], HU Longchen[2]
(1.*Kunming Metallurgical Research Institute Co., Ltd., Kunming* 650031, *Yunan*, *China*; 2.*Yunnan Diqing Non-ferrous Metal Co., Ltd., Diqing* 674400, *Yunnan*, *China*; 3.*State Key Laboratory of New Enhanced Metallurgical Technologies for Nonferrous Metals*, *Kunming* 650031, *Yunnan*, *China*)

Abstract: Systematic process mineralogy studies were conducted on a refractory copper-molybdenum polysulfide ore in Yunnan, and a new collector KMC531 was developed according to its properties. The effect of KMC531 on its collection performance in copper and molybdenum was clarified. The results show that under optimized conditions, a closed-circuit flotation test on the raw ore assaying 0.28% Cu and 0.011% Mo yielded a copper-molybdenum bulk concentrate grading 23.51% Cu and 0.92% Mo with recoveries of 82.86% Cu and 86.17% Mo, indicating efficient enrichment of copper and molybdenum.

Key words: collector; flotation; copper-molybdenum bulk concentrate; sulfide ore; KMC531; copper; molybdenum; sulphur

我国铜、钼资源较为丰富。据统计，世界上近 75%铜和 50%钼产自铜钼矿石[1-2]，但单一铜、钼矿石较少，铜和钼主要以伴生形式产于斑岩型铜钼矿石中[3]。斑岩型铜钼矿矿物组成较复杂，一般是铜、钼、硫三种矿物共生。工业上，大多数通过混合浮选获得铜钼混合精矿，再进行铜钼分离。混合浮选具有流程结构简单、药剂制度简单、易于操作控制等优点[4-6]，但混合浮选时需添加大量石灰用于抑制黄铁矿，导致矿浆 pH 值过高，辉钼矿同样受到抑制，使获得的铜钼混合精矿中铜与钼金属的富集比与回收率均不高[7]。研究人员对铜钼混合浮选药剂进行了大量研究并取得了一定的成果[8-11]。云南某难选铜钼多硫矿为典型的斑岩型铜钼矿，可回收的铜矿物种类多，既有原生硫化铜矿物又有次生硫化铜矿物。不同铜矿物浮选时所需的矿浆 pH 值、捕收剂种类等条件均不同[12]，且钼与铜品位均较低，导致铜钼分离存在一定困难。本文对该铜钼矿进行工艺矿物学研究，并在此基础上进行了选矿试验研究，研制了新型捕收剂 KMC531，采用混合

① 收稿日期：2026-01-05
基金项目：云南省人才与平台项目(202605AF350023)；云南省基础研究专项(202501BN070001-011)；云南省重大专项计划(202402AB080010)
作者简介：杨斌(1989—)，男，云南大理人，工程师，主要从事选矿技术研究。E-mail:18287752773@163.com
通信作者：肖世洁(1998—)，女，云南保山人，硕士，工程师，主要从事选矿技术研究。E-mail:1002641325@qq.com

浮选,获得合格的铜钼混合精矿。

1 试样性质

试样取自云南省迪庆州某选矿厂。试样主要化学多元素分析结果见表1,主要矿物组成见表2。试样中的有用组分为铜、钼,品位分别为0.28%、0.011%,硫品位为0.69%。试样中矿物组成较复杂,铜矿物主要为黄铜矿,其次是硫砷铜矿;钼矿物主要为辉钼矿;脉石矿物主要为钠长石,其次为石英和钾长石等。

表1 试样主要化学多元素分析结果(质量分数)

Table 1 Multi-elemental analysis of sample %

Cu	Mo	S	CaO	MgO	Al_2O_3
0.29	0.011	0.69	7.53	3.82	13.56
SiO_2	Fe	As	Au[1)]	Ag[1)]	
64.00	3.00	0.002 1	0.105	0.94	

1) 单位为 g/t。

表2 试样主要矿物组成(质量分数)

Table 2 Main mineral composition %

黄铜矿	硫砷铜矿	辉钼矿	黄铁矿	方铅矿	磁黄铁矿	褐铁矿
0.88	0.004	0.01	0.63	0.01	0.03	0.16
磁铁矿	金红石	石英	钾长石	钠长石	角闪石	绿帘石
0.02	0.29	20.96	11.33	40.54	1.18	3.06
黑云母	透闪石	绿泥石	白云母	磷灰石	方解石	白云石
5.11	7.18	2.39	2.54	1.10	1.15	0.03

试样铜化学物相分析结果见表3。铜主要赋存于原生硫化铜中,原生硫化铜与次生硫化铜中铜的分布率分别为82.76%与6.90%。

表3 铜化学物相分析结果

Table 3 Phase analysis of copper

相别	含量(质量分数)/%	分布率/%
游离氧化铜	0.01	3.44
结合氧化铜	0.02	6.90
次生硫化铜	0.02	6.90
原生硫化铜	0.24	82.76
合计	0.29	100.00

对矿石嵌布特征进行观察,并结合MLA分析,可以发现,矿石中黄铜矿嵌布特征主要可分为三类:① 黄铜矿常与钠长石、石英、钾长石等脉石矿物连生或分布于脉石矿物颗粒之间,少数黄铜矿包裹于脉石矿物中;② 部分黄铜矿与黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿等金属矿物连生;③ 部分黄铜矿与其他含铜硫化物关系密切,与硫砷铜矿、铜蓝、辉铜矿、斑铜矿连生,少数边缘分布有反应边状的辉铜矿。黄铜矿粒度多为0.005~0.3 mm。

2 试验方法及药剂

2.1 试验方法

该矿石中黄铜矿和辉钼矿嵌布粒度细小,共生关系较为紧密,同时原矿中的钼品位较低,含硫铁矿物较多。黄铜矿和辉钼矿均属原生硫化矿物,两者浮选性能相近,且黄铁矿含量较多。基于以上特点,选用铜钼混合浮选、粗精矿再磨-精选的工艺路线开展选矿研究。试验原则流程见图1。

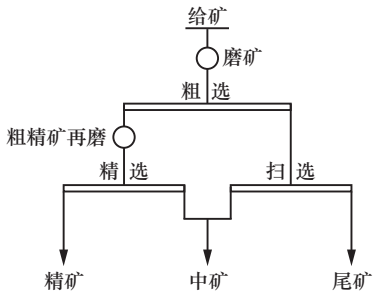


图1 试验原则流程

Fig. 1 Basic flowchart for test

2.2 试验药剂

试验药剂包括调整剂石灰(上海麦克林生化科技股份有限公司)、捕收剂Z-200(上海易恩化学技术有限公司)、捕收剂MCO(迪庆有色金属有限责任公司)以及捕收剂KMC430、KMC764、KMC531(昆明冶金研究院有限公司)等。

3 试验结果与讨论

3.1 磨矿细度试验

磨矿细度对浮选效果有较大影响,也决定了选矿的主要成本[13]。按照图2所示流程,进行了磨矿细度试验,结果见图3。从图3可以看出,增加磨矿细度,能够在一定程度上提高铜和钼金属品位与回收率,但磨矿细度太细,铜与钼品位及回收率均呈下降趋势,其中回收率的下降趋势更明显。这是由于出现过磨,产生泥化现象[13],影响矿物浮选。在选矿过程中,磨矿的能耗最高。综合考虑,选择磨矿细度-0.074 mm粒级占63%,在保证较高回收率的同时尽量降低磨矿能耗,此时精矿中铜、钼品位分别为10.77%、0.35%,铜、钼回收率分别为78.98%、79.69%。在此条件下,黄铜矿与辉钼矿单体解离较为理想。若想获得更高的回收率,还需对药剂制度进行优化。

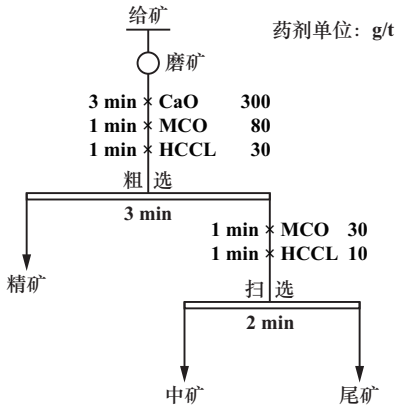


图 2　磨矿细度试验流程

Fig. 2　Grinding fineness test flowchart

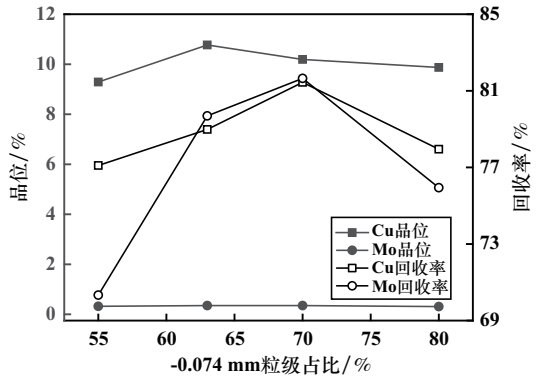


图 3　磨矿细度试验结果

Fig. 3　Grinding fineness test results

对−0.074 mm 粒级占 63%的磨矿产品进行了粒度筛析,结果如表 4 所示。从表 4 可以看出,磨矿产品中,铜和钼均主要分布在+74 μm 和−10 μm 粒级中。

表 4　−0.074 mm 粒级占 63%磨矿产品粒度筛析结果

Table 4　Sieve analysis of grinding product at size of −0.074 mm 63%

粒径/μm	产率/%	品位/%		分布率/%	
		Cu	Mo	Cu	Mo
+74	37.09	0.18	0.009 3	22.75	34.46
−74+52	2.78	0.98	0.014	9.26	3.87
−52+47	7.74	0.43	0.008 3	11.35	6.42
−47+32	11.57	0.35	0.009	13.80	10.40
−32+20	12.33	0.34	0.011	14.29	13.55
−20+10	3.92	0.32	0.011	4.27	4.31
−10	24.57	0.29	0.011	24.28	26.99
合计	100.00	0.29	0.010	100.00	100.00

3.2　捕收剂种类及用量试验

该铜钼矿石中,铜矿物以原生硫化铜矿物为主,造成浮选矿浆中含有大量铜离子,使黄铁矿得到活化而上浮[14]。在铜钼混合浮选过程中,钼金属具有较好的可浮性,捕收剂需要对黄铜矿具有更好的选择性,才能实现铜、钼矿物与硫矿物的分离。

为了提高铜钼混合精矿中的 Cu 品位,进行了新型铜捕收剂的遴选试验。试验流程同图 2,其中磨矿细度为−0.074 mm 粒级占 63%,捕收剂用量均为粗选 80 g/t、扫选 30 g/t,捕收剂种类试验结果见表 5。从表 5 可以看出,KMC531 对黄铜矿捕收效果较好,仅一次粗选,便能将精矿中 Cu 品位提高到 9.59%,且铜、钼回收率都保持在较高水平。选择 KMC531 作为铜钼混合浮选的铜捕收剂。

表 5　铜捕收剂种类试验结果

Table 5　Test results of copper collector type

捕收剂种类	产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
			Cu	Mo	Cu	Mo
Z−200	精矿	2.54	8.16	0.23	75.47	67.39
	中矿	1.04	2.12	0.040	8.03	4.80
	尾矿	96.42	0.047	0.002 5	16.50	27.81
	给矿	100.00	0.27	0.008 7	100.00	100.00
KMC430	精矿	3.22	6.14	0.23	75.25	79.95
	中矿	1.10	1.65	0.021	6.91	2.49
	尾矿	95.68	0.049	0.001 7	17.84	17.56
	给矿	100.00	0.26	0.009 3	100.00	100.00
KMC764	精矿	3.06	6.86	0.21	75.86	78.20
	中矿	1.24	1.45	0.021	6.50	3.17
	尾矿	95.70	0.051	0.001 6	17.64	18.63
	给矿	100.00	0.28	0.008 2	100.00	100.00
MCO	精矿	3.44	6.35	0.19	78.11	81.30
	中矿	1.58	1.05	0.017	5.93	3.34
	尾矿	94.98	0.047	0.001 3	15.96	15.36
	给矿	100.00	0.28	0.008 0	100.00	100.00
KMC531	精矿	2.38	9.59	0.28	77.72	80.89
	中矿	0.90	1.79	0.046	5.48	5.02
	尾矿	96.72	0.051	0.001 2	16.80	14.09
	给矿	100.00	0.29	0.008 2	100.00	100.00

在相同试验条件下,进行了 KMC531 用量试验,结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,随着KMC531用量增

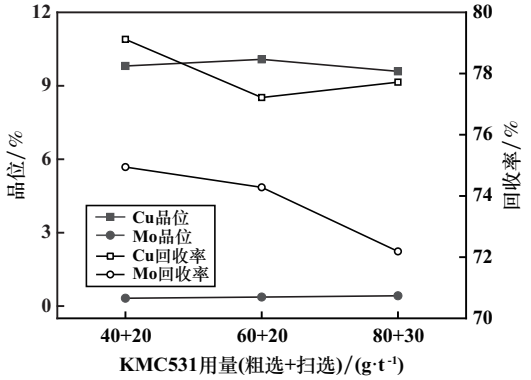


图 4　KMC531 用量试验结果

Fig. 4　Test result of KMC531 dosage

加,Cu、Mo 品位及回收率变化较小。考虑到矿物品位与回收率的平衡性以及药剂成本,选择 KMC531 粗选+扫选用量为(40+20) g/t,此时 Cu、Mo 品位分别为 9.81%、0.32%,相应回收率分别为 79.12%、74.94%,Cu 与 Mo 回收率与品位均处于较高水平。

3.3 柴油用量试验

在铜钼混合浮选过程中,新型捕收剂 KMC531 对铜矿物的捕收能力较好,但对钼矿物的捕收能力较弱。于是加入柴油作为钼捕收剂,以提高铜钼混合精矿中钼的品位与回收率。按照图 2 所示流程,在磨矿细度 -0.074 mm 粒级占 63%,捕收剂 KMC531 粗选用量 40 g/t、扫选用量 20 g/t 条件下,进行了柴油用量试验,结果如图 5 所示。KMC531 用量一定时,增加柴油作为钼捕收剂,在柴油粗选+扫选用量(20+10) g/t 条件下,Mo 品位 0.32%,Mo 回收率为 81.28%,Mo 回收率大幅提升且 Mo 品位不受影响。继续增加柴油用量,Mo 品位及回收率变化不明显,但铜回收率会下降。综合考虑,适宜的柴油用量为(20+10) g/t。

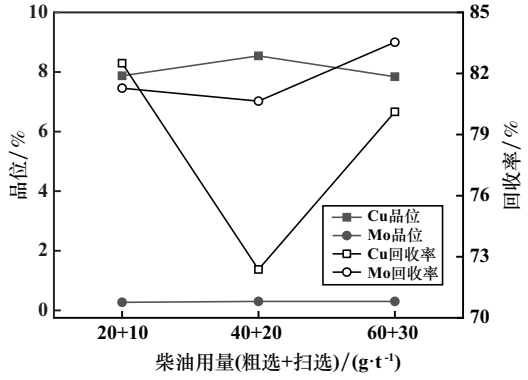


图 5 柴油用量试验结果

Fig. 5 Test results of diesel fuel consumption

3.4 闭路试验

为了验证 KMC531+柴油的新型药剂制度对云南某铜钼硫化矿石的捕收效果,进行了一粗二精二扫铜钼混合浮选闭路试验,试验结果如表 6 所示,闭路试验流程见图 6。使用新的药剂制度,闭路试验获得了 Cu、Mo 品位分别为 23.51%、0.92%,对应回收率分别为 82.86%、86.17%的铜钼混合精矿。与选矿厂一粗二精三扫的闭路生产指标相比,Cu、Mo 品位分别提高了 3.16、0.27 百分点,对应回收率分别提高了 2.19、4.25 百分点。可以看出,通过简化流程、选择新药剂制度,实现了铜、钼的有效富集,铜钼混合精矿品位与回收率均有了较大提升。

表 6 新药剂制度闭路试验结果

Table 6 Results of closed-circuit test with new reagent regime

产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
		Cu	Mo	Cu	Mo
铜钼混合精矿	1.07	23.51	0.92	82.86	86.17
尾矿	98.93	0.053	0.001 6	19.14	13.83
原矿	100.00	0.27	0.011 4	100.00	100.00

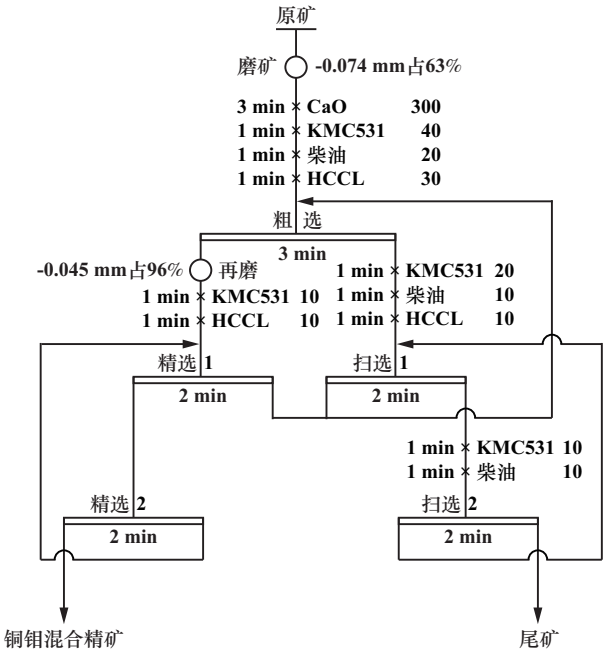


图 6 新药剂制度闭路试验流程

Fig. 6 Flowchart of closed-circuit test with new reagent regime

4 结论

1) 云南某铜钼矿石中铜品位为 0.28%,钼品位为 0.011%,硫品位为 0.69%,矿物硫含量较高,矿物组成复杂,各矿物间嵌布关系紧密,属于难选铜钼硫多金属矿物。

2) 在工艺矿物学研究基础上,确定适宜的磨矿细度和药剂制度。在磨矿细度-0.074 mm 粒级占 63%,以 KMC531+柴油为捕收剂,采用一粗二精二扫混合浮选,闭路试验可获得产率 1.07%,Cu、Mo 品位分别为 23.51%、0.92%,相应回收率分别为 82.86%、86.17%的铜钼混合精矿,铜、钼得到有效富集。试验对原选矿厂工艺流程进行了简化,对药剂制度进行了优化,降低了药剂用量,取得了良好的浮选指标。

参考文献(References):

[1] 刘鑫鑫,章晓林,许兴隆. 辉钼矿浮选中铜铅抑制剂及其抑制机理研究进展[J]. 化工矿物与加工, 2024,53(6):65-75.
LIU Xinxin, ZHANG Xiaolin, XU Xinglong. Research progress of copper lead depressants and their inhibition mechanism in molybdenite flotation[J]. Industrial Minerals & Processing, 2024,53(6):65-75.

[2] 马英强,张书超,吴双桥,等. 福建某低品位铜钼矿工艺矿物学研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2018,46(5):739-742.
MA Yingqiang, ZHANG Shuchao, WU Shuangqiao, et al. Process mineralogy research on the low grade copper-molybdenum ore in Fujian Province[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2018,46(5):739-742.

[3] 郭玉武. 某高硫难选铜钼矿综合回收的选矿试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2018,38(1):43-48.
GUO Yuwu. Mineral processing experiment on comprehensive recovery of a refractory Cu-Mo ore with high sulpur[J]. Mining Research and Development, 2018,38(1):43-48.

[4] LIU G Y, ZHONG H, XIA L Y, et al. Improving copper flotation recovery from a refractory copper porphyry ore by using ethoxycarbonyl thiourea as a collector[J]. Minerals Engineering, 2011,24(8):817-824.

[5] 王景军,苗雨. 提高乌山混合段铜钼回收率的浮选试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2020(6):101-107.
WANG Jingjun, MIAO Yu. Experimental study on improving recovery of copper and molybdenum in Wushan mixing section by flotation[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2020(6):101-107.

[6] 车文芳,王丞,牛南南,等. 河南某难选铜、钼多金属矿新型药剂浮选试验研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(1):76-79.
CHE Wenfang, WANG Cheng, NIU Nannan, et al. New reagents for flotation of complex molybdenum-copper polymetallic ore in Henan Province[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(1):76-79.

[7] 林清泉,戴智飞,曾令明,等. 江西某难选铜钼矿浮选试验研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(2):73-76.
LIN Qingquan, DAI Zhifei, ZENG Lingming, et al. Experimental study on flotation of refractory copper-molybdenum ore from Jiangxi[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(2):73-76.

[8] 张锦仙,马原琳,杨林,等. 云南某难选氧硫混合铜矿石的新型药剂浮选试验研究[J]. 金属矿山, 2024(5):258-263.
ZHANG Jinxian, MA Yuanlin, YANG Lin, et al. Experimental study on new reagents flotation of a refractory oxygen-sulfur mixed copper ore in Yunnan[J]. Metal Mine, 2024(5):258-263.

[9] 李世男,鱼光辉,代献仁,等. Mirador 铜矿低碱度铜硫分离试验研究[J]. 现代矿业, 2023,39(3):168-170.
LI Shinan, YU Guanghui, DAI Xianren, et al. Study on low alkalinity copper and sulfur separation in Mirador copper mine[J]. Modern Mining, 2023,39(3):168-170.

[10] 尹政道,王涵,申培伦,等. 云南某铜炉渣中铜深度浮选回收试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2024(12):63-71.
YIN Zhengdao, WANG Han, SHEN Peilun, et al. Experimental study on deep flotation recovery of copper from copper slag in Yunnan[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2024(12):63-71.

[11] 朱月锋,高双龙,李春保,等. 云南某铜钼矿浮选药剂制度优化研究[J]. 中国矿业, 2018,27(3):132-137.
ZHU Yuefeng, GAO Shuanglong, LI Chunbao, et al. Optimization of flotation reagent system for a copper-molybdenum ore in Yunnan Province[J]. China Mining Magazine, 2018,27(3):132-137.

[12] 纪慧超,刘全军,江旭,等. 难选铜硫矿浮选试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2019(1):21-25.
JI Huichao, LIU Quanjun, JIANG Xu, et al. Experimental study on flotation of refractory copper sulfide ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2019(1):21-25.

[13] 郭谨铭,杨洪英,张仕奇,等. 西藏某铜钼混合精矿铜钼分离浮选[J]. 矿产综合利用, 2024,45(6):117-123.
GUO Jinming, YANG Hongying, ZHANG Shiqi, et al. Selective flotation of a copper-molybdenum bulk concentrate from Xizang[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024,45(6):117-123.

[14] 张曙光,简胜,唐鑫,等. 某含钼低品位硫化铜矿综合回收钼的选矿研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(1):48-51.
ZHANG Shuguang, JIAN Sheng, TANG Xin, et al. Comprehensive recovery of molybdenum resource from low-grade molybdenum-bearing copper sulfide ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(1):48-51.

引用本文:杨斌,肖世洁,蒋丛国,等. 云南某难选铜钼硫化矿浮选调控技术的试验研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(3):151-155.
YANG Bin, XIAO Shijie, JIANG Congguo, et al. Flotation regulation technology for refractory copper-molybdenum sulfide ore in Yunnan[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(3):151-155.