新型矿泥抑制剂在国外某铜钼矿浮选中的应用研究*

张慧[1],周浩[2],韩远燕[2],刘佳燕[2],方佳浚[2]

(1.中冶集团铜锌有限公司, 北京 100101;
2.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012)

摘要:巴基斯坦某铜钼矿主要有价元素为铜、钼、金、银,原矿含铜0.55%,含钼0.01%,伴生金、银分别为0.1 g/t和1.15 g/t。矿石中绢云母、绿泥石等易泥化脉石矿物含量较高,导致铜精矿品位不高。为解决上述问题,开发新型抑制剂CD-B抑制泥化脉石矿物,采用"粗磨—三次粗选抛尾—粗精矿再磨再选"的工艺流程,可获得铜品位为26.76%、钼品位为0.451%的铜钼混合精矿,铜回收率为94.49%,钼回收率为77.48%;铜钼混合精矿中含金2.06 g/t、含银32.66 g/t,金回收率为40.17%,银回收率为55.38%,选矿指标良好。新型抑制剂CD-B为小分子有机物,零毒性,零污染,药剂单耗低,属于高效绿色环保药剂。与常规药剂水玻璃相比,采用CD-B可大幅提高铜精矿的品位,CD-B单耗是水玻璃的1/15,便于采购、储存和使用。

关键词:泥质脉石;铜钼矿;浮选;伴生金属

中图分类号:TD952 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)07-0266-07

Study on the Application of a New-Type Slime Inhibitor in Flotation of a Copper-Molybdenum Ore Abroad

ZHANG Hui[1], *ZHOU Hao*[2], *HAN Yuanyan*[2], *LIU Jiayan*[2], *FANG Jiajun*[2]

(1.MCC Tongsin Resources Co., Ltd., Beijing 100101, China;
2.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: The main valuable elements of a copper-molybdenum ore in Pakistan are copper, molybdenum, gold and silver, with copper content of 0.55% and molybdenum content of 0.01% in the raw ore. The contents of associated gold and silver are 0.1 g/t and 1.15 g/t respectively. The content of easily mudding gangue minerals such as sericite and chlorite in the ore is high, resulting in a low grade of copper concentrate. In order to solve the above problems, a new-type inhibitor CD-B was developed to inhibit mudding gangue minerals. The process flow of "rough grinding, three-stage roughing with tailings discharge, rough concentrate regrinding and recleaning" was adopted. A copper-molybdenum mixed concentrate with a copper grade of 26.76% and a molybdenum grade of 0.451% can be obtained. The copper recovery rate is 94.49% and the molybdenum recovery rate is 77.48%. The copper-molybdenum mixed concentrate contains 2.06 g/t gold and 32.66 g/t silver, with gold recovery at 40.17% and silver recovery at 55.38%, demonstrating good beneficiation indicators. The new-type inhibitor CD-B is a small-molecule organic compound, featuring zero toxicity, zero pollution, low reagent consumption, and belongs to a high-efficiency green environmental protection reagent. Compared with the conventional reagent of sodium silicate, CD-B can significantly improve the grade of copper concentrate. The consumption of CD-B is only 1/15 of that of sodium silicate, making it convenient for procurement, storage and use.

Key words: Argillaceous gangue, Copper-molybdenum ore, Flotation, Associated metal

0 引言

铜是需求量仅次于铝的第二大有色金属,由于其优异的导电性、导热性、耐腐蚀性、延展性,在军工、电力、通信、机械等行业应用广泛[1-3]。同时,铜被认为是实现低碳未来的17种关键金属材料之一,低碳技术比传统的化石燃料技术需要消耗更多的铜,因此,铜的需求量将持续增长[4-6]。多数铜金属

* **收稿日期**:2024-07-11
基金项目:中国五矿科技专项计划项目(2022ZXB04-4)
作者简介:张慧(1983—),男,河南浚县人,硕士,工程师,主要从事矿山管理、资源开发相关工作。E-mail:zhanghui1@mcc-mining.com
通信作者:韩远燕(1984—),女,湖北襄阳人,硕士,高级工程师,主要从事有色金属选矿工艺及药剂研发工作。E-mail:hanyuanyan@126.com

来源于自然界中的硫化铜矿物[7-8],在其选矿过程中,通常要考虑伴生金属的综合回收,如钼、金、银等[9-11],实现矿产资源"吃干榨净"的理念。同时,降低精矿中杂质组分的含量、降低冶炼过程中的能源消耗,是行业绿色健康发展的重要保障。因此,研究硫化铜矿高效选矿具有重要意义。

硫化铜钼矿的选矿通常采用浮选法。在浮选过程中,易泥化脉石矿物对浮选干扰较大,导致精矿品位低、含杂高。对于绢云母和绿泥石等含量较高的矿石的浮选,国内外通常采用水玻璃、六偏磷酸钠、羧甲基纤维素、腐殖酸钠、淀粉、糊精、硫酸铝、果胶[12]等抑制剂,其中常用抑制剂水玻璃、六偏磷酸钠和硫酸铝抑制能力较弱,用量较大,药剂成本高;羧甲基纤维素、腐殖酸钠、淀粉、果胶和糊精对绢云母、绿泥石的抑制能力强,但选择性差,对伴生金属钼的抑制能力也强,导致钼的回收率大幅降低。因此,研发抑制能力强、选择性好的泥化脉石矿物抑制剂是铜钼矿浮选的重点研究方向。

本文研发新型小分子有机抑制剂 CD-B,在确保铜钼金属的最大化回收的前提下,提高精矿品位,降低杂质含量,以获得优异的选矿指标,为该矿石及同类型复杂难选铜钼矿资源的开发利用提供理论依据。新型抑制剂 CD-B 为碳水化合物,分子量小,呈白色粉末,零毒性,零污染,单耗低,属于高效绿色环保药剂。

1 矿石性质

矿石样品取自巴基斯坦西部边陲俾路支省查盖地区 S2 矿体。原矿含铜 0.55%,含钼 0.01%,伴生金、银含量分别为 0.1 g/t 和 1.15 g/t,属于原生铜钼硫化矿。原矿中金属矿物含量低,以黄铁矿、黄铜矿为主,其次还含有少-微量赤铁矿、辉铜矿、斑铜矿、碲黝铜矿、铜蓝、辉钼矿等。原矿中铜矿物种类繁杂,主要为黄铜矿,还含有少量辉铜矿、斑铜矿、碲黝铜矿、铜蓝,结晶粒度为 0.014～0.3 mm。原矿中钼矿物主要是辉钼矿,结晶粒度为 0.01～0.074 mm。脉石矿物主要为石英、白云母、钠长石、正长石,其次是石英、绢云母、斜长石、金云母、绿泥石。

矿石中大于 0.037 mm 的铜矿物仅占 64.09%,大于 0.037 mm 的辉钼矿仅占 55.17%。铜矿物嵌布粒度细、微细粒薄片状云母和易泥化矿物绿泥石、绢云母含量高是影响精矿品位的主要因素。

原矿化学多元素分析结果见表 1,铜钼矿物相分析结果分别见表 2 和表 3,主要矿物的含量及铜钼矿物的嵌布粒度分析结果分别见表 4 和表 5。

表 1 原矿化学多元素分析

Table 1 Chemical multi-element analysis of raw ore %

Cu	Mo	Al_2O_3	SiO_2	S	CaO
0.55	0.01	14.72	64.04	2.06	0.84
TFe	K_2O	MgO	Na_2O	Ag*	Au*
2.58	5.18	1.78	1.36	1.15	0.10

注:标注"*"元素单位为 g/t,下同。

表 2 原矿铜物相分析结果

Table 2 Copper phase analysis results of raw ore %

铜相	含量	占有率
原生硫化铜	0.480	87.27
次生硫化铜	0.040	7.27
自由氧化铜	0.015	2.73
结合氧化铜	0.015	2.73
总铜	0.550	100.00

表 3 原矿钼物相分析结果

Table 3 Molybdenum phase analysis results of raw ore %

名称	含量	占有率
硫化钼	0.009 5	95.00
氧化钼	0.000 5	5.00
总钼	0.010 0	100.00

表 4 原矿主要矿物组成及含量

Table 4 Main mineral composition and content of raw ore %

黄铜矿	辉铜矿	斑铜矿(碲)黝铜矿	铜蓝	辉钼矿	黄铁矿	石英
1.39	0.02	0.14	0.01	0.063	2.69	38.02
白云母	钠长石	正长石	石英绢云母	金云母	赤、磁铁矿	斜长石
18.23	10.24	7.92	7.62	4.02	0.14	3.21
透辉石	绿泥石	金红石	磷灰石	硬石膏	锆石	
0.48	4.56	0.54	0.2	0.22	0.06	

表 5 铜矿物和辉钼矿的嵌布粒度分析结果

Table 5 Grain size analysis results of copper minerals and molybdenite %

粒径/mm	铜矿物		辉钼矿	
	分布率	累计分布率	分布率	累计分布率
+0.300 0	4.20	4.20	—	—
−0.300 0～+0.210 0	6.29	10.49	—	—
−0.210 0～+0.150 0	8.78	19.27	—	—
−0.150 0～+0.105 0	9.38	28.65	—	—
−0.105 0～+0.074 0	13.48	42.13	—	—
−0.074 0～+0.052 0	10.88	53.01	40.10	40.10
−0.052 0～+0.037 0	11.08	64.09	15.07	55.17
−0.037 0～+0.026 0	9.94	74.03	6.62	61.79

续表

粒径/mm	铜矿物		辉钼矿	
	分布率	累计分布率	分布率	累计分布率
−0.026 0～+0.019 0	9.79	83.82	7.12	68.91
−0.019 0～+0.014 0	7.04	90.86	11.92	80.83
−0.014 0～+0.010 0	4.45	95.31	8.08	88.91
−0.010 0～+0.005 0	2.49	97.80	3.89	92.80
−0.005 0～+0.004 5	1.24	99.04	3.21	96.01
−0.004 5～+0.003 0	0.56	99.60	2.21	98.22
−0.003 0～+0.002 0	0.21	99.81	0.85	99.07
−0.002 0～+0.001 5	0.10	99.91	0.44	99.51
−0.001 5～+0.001 0	0.09	100.00	0.49	100.00

2 试验结果及讨论

2.1 粗选磨矿细度试验

工艺矿物学研究表明,矿石中部分黄铜矿嵌布粒度小,以微细粒浸染状嵌布在脉石矿物中或充填在黄铁矿孔洞中的铜矿物以及沿脉石矿物解理分布的铜矿物解离难度较大,需细磨才能将黄铜矿从黄铁矿或脉石矿物中解离出来。矿石中白云母、绢云母、金云母、绿泥石等易泥化矿物或解理发育矿物含量较高、磨矿细度过细时,泥化程度高,恶化浮选矿浆环境,因此,该矿宜采用阶段磨矿、阶段选别工艺,第一阶段磨矿细度较为关键。

以石灰为黄铁矿抑制剂,Z-200 和乙基黄药为铜钼捕收剂,MIBC 为起泡剂,粗选时间为 3 min,磨矿细度试验流程和试验结果分别如图 1 和图 2 所示。

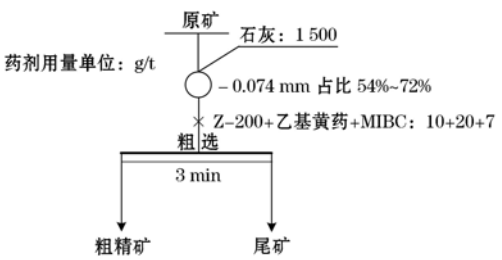


图 1 磨矿细度试验流程

Fig.1 Process of grinding fineness test

由图 2 可知,随着磨矿细度的增加,粗精矿中铜钼品位先增加后降低,铜钼的回收率呈持续增加的趋势。当磨矿细度从−0.074 mm 占比 66%增加至 72%时,铜的回收率仅提高了 0.15 个百分点,钼的回收率仅提高了 0.93 个百分点,综合考虑磨矿成本,确定第一段磨矿细度为−0.074 mm 占比 66%较适宜。

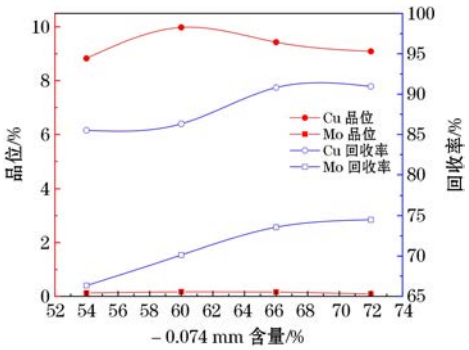


图 2 磨矿细度试验结果

Fig.2 Results of grinding fineness test

2.2 矿泥抑制剂种类试验

矿石中含有较多绢云母、金云母、绿泥石等易泥化矿物,这些矿物与铜矿物嵌布关系密切,需细磨才能实现铜矿物单体解离。但细磨会导致脉石矿物泥化严重,恶化浮选环境,导致精矿产品品位不达标[1,13-16]。

为降低泥化脉石矿物对浮选产生的影响,本文设计采用“粗磨—三次粗选抛尾”的工艺流程。因铜钼矿物的嵌布粒度较细,要获得高品质的铜精矿产品,粗精矿仍需再磨再选。为实现粗精矿再磨后有价金属与脉石矿物的高效分离,根据粗精矿中上浮脉石矿物的性质,针对性地研发了泥质脉石抑制剂 CD-B,成功实现了目的矿物与泥质脉石的高效分离,矿泥抑制剂种类试验流程如图 3 所示,试验结果见表 6。

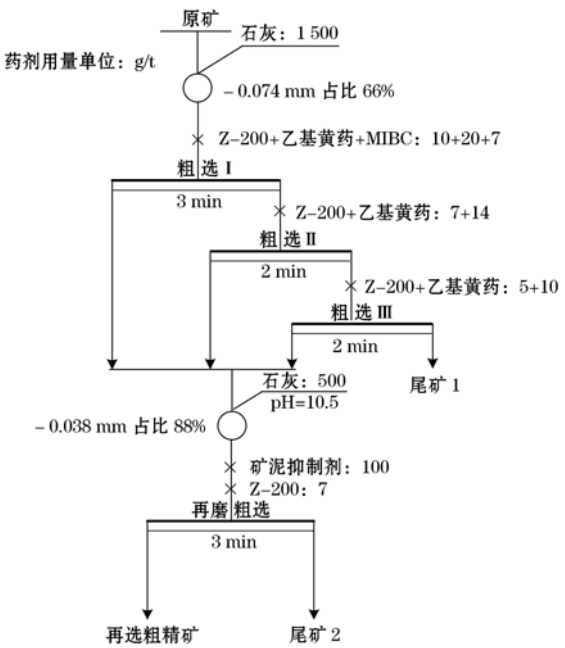


图 3 矿泥抑制剂种类试验流程

Fig.3 Process of mine mud inhibitor types test

表 6 矿泥抑制剂种类试验结果

Table 6 Results of mine mud inhibitor types test

抑制剂种类	产品	产率/%	品位/%				回收率/%			
			Cu	Mo	Au*	Ag*	Cu	Mo	Au	Ag
无抑制剂	再选粗精矿	5.61	9.430	0.161 0	0.67	10.35	94.39	78.50	38.35	50.43
	尾矿 1	86.79	0.024	0.002 5	0.06	0.52	3.73	18.86	53.12	39.21
	尾矿 2	7.60	0.140	0.004 0	0.11	1.57	1.90	2.64	8.53	10.36
	原矿	100.00	0.560	0.012 0	0.10	1.15	100.00	100.00	100.00	100.00
水玻璃	再选粗精矿	5.17	10.210	0.173 0	0.74	11.21	94.54	78.49	38.58	50.12
	尾矿 1	86.79	0.024	0.002 5	0.06	0.52	3.73	19.04	52.50	39.03
	尾矿 2	8.04	0.120	0.003 5	0.11	1.56	1.73	2.47	8.92	10.85
	原矿	100.00	0.558	0.011 0	0.10	1.16	100.00	100.00	100.00	100.00
六偏磷酸钠	再选粗精矿	5.06	10.450	0.177 0	0.72	11.40	94.12	78.71	37.07	49.86
	尾矿 1	86.79	0.024	0.002 5	0.06	0.52	3.70	19.07	52.98	39.01
	尾矿 2	8.15	0.150	0.003 1	0.12	1.58	2.18	2.22	9.95	11.13
	原矿	100.00	0.562	0.011 0	0.10	1.16	100.00	100.00	100.00	100.00
CMC	再选粗精矿	5.23	10.070	0.172 0	0.75	11.09	94.27	78.66	38.58	50.25
	尾矿 1	86.79	0.024	0.002 5	0.06	0.52	3.73	18.97	51.22	39.10
	尾矿 2	7.98	0.140	0.003 4	0.13	1.54	2.00	2.37	10.20	10.65
	原矿	100.00	0.559	0.011 0	0.10	1.15	100.00	100.00	100.00	100.00
CD-B	再选粗精矿	4.35	12.170	0.204 0	0.88	13.01	94.54	78.46	38.24	49.02
	尾矿 1	86.79	0.024	0.002 5	0.06	0.52	3.72	19.19	52.02	39.09
	尾矿 2	8.86	0.110	0.003 0	0.11	1.55	1.74	2.35	9.74	11.89
	原矿	100.00	0.560	0.011 0	0.10	1.15	100.00	100.00	100.00	100.00

由表 6 可知,水玻璃、六偏磷酸钠、CMC 和 CD-B 对铜、钼、金和银回收率的影响较小,当抑制剂为 CD-B 时,粗精矿铜、钼、金和银的品位最高,因此 CD-B 为该矿石中泥质脉石矿物的有效抑制剂。

2.3 石灰用量试验

石灰是黄铁矿的常用抑制剂,具有价格低、抑制效果好及絮凝沉降快等特点,在各大选矿厂广泛应用[17-18],但石灰用量过大时,会导致矿浆 pH 过高,影响伴生金、银的回收[19-20],因此需要确定合适的石灰用量。石灰用量试验流程如图 4 所示,试验结果见表 7。

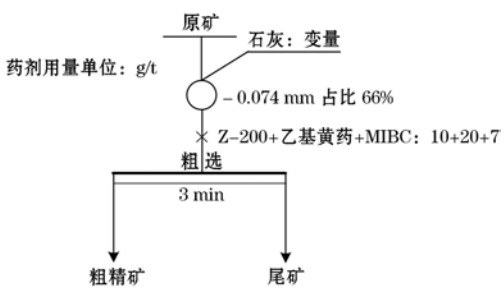


图 4 石灰用量试验流程

Fig.4 Process of lime dosage test

表 7 石灰用量试验结果

Table 7 Results of lime dosage test

石灰/(g/t)	pH	产品	产率/%	品位/%				回收率/%			
				Cu	Mo	Au*	Ag*	Cu	Mo	Au	Ag
500	7.5	粗精矿	4.68	9.750	0.170 0	0.71	10.73	82.66	69.87	31.73	43.65
		尾矿	95.32	0.100	0.003 6	0.08	0.68	17.34	30.13	68.27	56.35
		原矿	100.00	0.550	0.011 0	0.10	1.15	100.00	100.00	100.00	100.00
1 000	8.5	粗精矿	4.47	10.610	0.170 0	0.77	11.47	84.94	71.31	33.98	44.48
		尾矿	95.53	0.088	0.003 2	0.07	0.67	15.06	28.69	66.02	55.52
		原矿	100.00	0.560	0.011 0	0.10	1.15	100.00	100.00	100.00	100.00
1 500	9.0	粗精矿	4.42	11.520	0.170 0	0.78	11.68	90.80	73.05	34.01	45.01
		尾矿	95.58	0.054	0.002 9	0.07	0.66	9.20	26.95	65.99	54.99
		原矿	100.00	0.560	0.010 0	0.10	1.15	100.00	100.00	100.00	100.00
2 000	9.5	粗精矿	4.85	10.480	0.160 0	0.66	10.51	90.21	73.11	29.60	44.07
		尾矿	95.15	0.058	0.003 0	0.08	0.68	9.79	26.89	70.40	55.93
		原矿	100.00	0.560	0.011 0	0.11	1.16	100.00	100.00	100.00	100.00

由表 7 可知,随着石灰用量的增加,粗精矿中铜、金和银的品位和回收率均呈先升高后降低的趋势。石灰用量为 1 500 g/t 时,粗精矿中主要金属铜的品位和回收率达到最高,分别为 11.52%和90.80%,伴生金、银的回收率达到最高,分别为34.01%和45.01%。与石灰用量为 1 500 g/t 相比,石灰用量增加至 2 000 g/t 时,粗精矿中铜的品位降低了 1.04 个百分点,铜、金和银的回收率分别降低了 0.59 个百分点、4.41 个百分点和 0.94 个百分点,钼的回收率变化不大。综合考虑,确定石灰用量为 1 500 g/t。

2.4 不同抑制剂闭路试验

在条件试验的基础上,在 0.074 mm 占比 66%的粗磨细度下进行三次粗选抛尾,三次粗选以石灰为黄铁矿抑制剂,采用 Z-200 和乙基黄药组合捕收剂,利用多种药剂协同捕收,强化对铜钼矿物的回收,确保尾矿 1 中有价金属损失率处于较低水平。粗精矿经过再磨达到−0.038 mm 占比 88%,以石灰为黄铁矿抑制剂,利用 CD-B 强化对泥质脉石的抑制,Z-200 为捕收剂,进行“一粗三扫三精”的再磨再选闭路试验。闭路试验流程如图 5 所示,闭路试验结果见表 8。为便于比较,将采用水玻璃为泥质脉石矿物抑制剂的闭路试验结果也列于表 8 中。

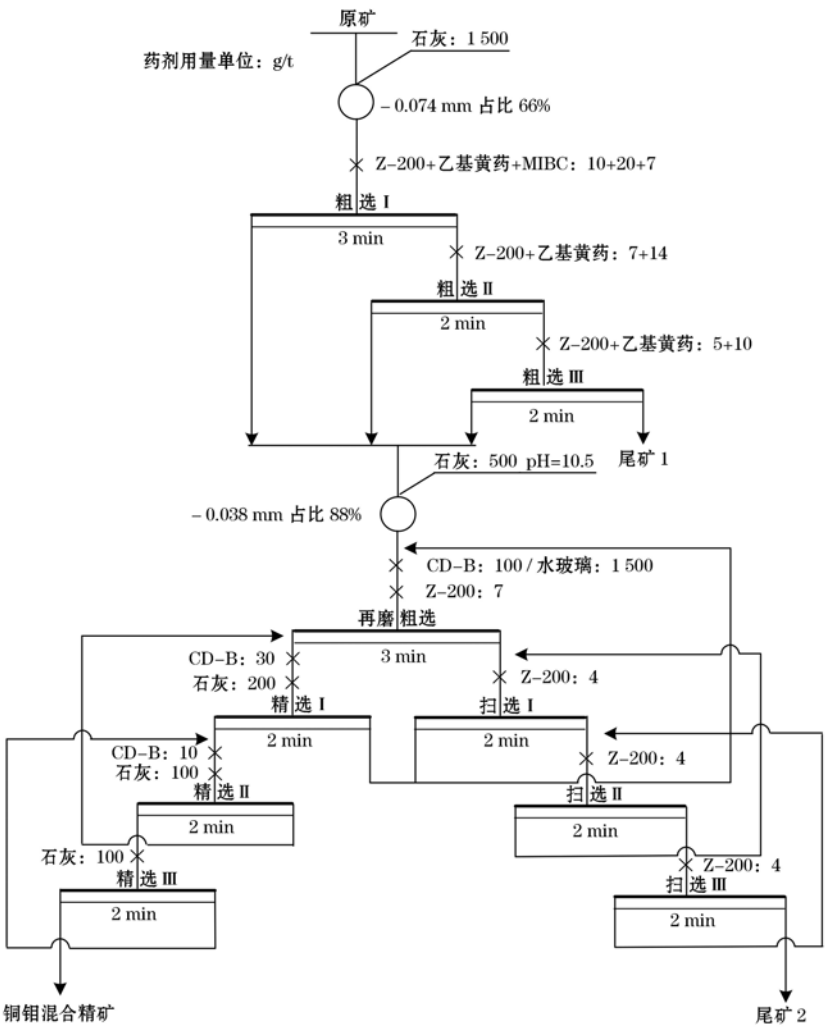


图 5 闭路试验流程

Fig.5 Process of closed circuit test

由表 8 可知,采用水玻璃为矿泥抑制剂,用量为 1 500 g/t 时,闭路试验所得铜钼混合精矿中铜品位仅为 17.70%,钼品位为 0.29%;而采用 CD-B 为矿泥抑制剂,用量为 100 g/t 时,闭路试验可获得产率为1.95%、铜品位为 26.76%的铜钼混合精矿,铜回收率为 94.49%,钼品位为 0.451%,钼回收率为 77.48%,铜钼混合精矿中金的含量为 2.06 g/t,金回收率为 40.17%,银的含量为 32.66 g/t,银回收率为

55.38%,铜钼混合精矿中铜品位远高于采用水玻璃为矿泥抑制剂时获得的精矿,且钼在混合精矿中富集比高,为后续铜钼分离试验提供条件,伴生金、银也得到了高效回收。CD-B 是该矿中脉石矿物的有效抑制剂,可大幅提高铜钼精矿的品位,药剂用量仅为 100 g/t,是水玻璃用量的 1/15。

表 8 闭路试验结果

Table 8 Results of closed circuit test

抑制剂种类	抑制剂用量/(g/t)	产品	产率/%	品位/%				回收率/%			
				Cu	Mo	Au*	Ag*	Cu	Mo	Au	Ag
CD-B	100	铜钼精矿	1.95	26.760	0.451 0	2.060	32.66	94.49	77.48	40.17	55.38
		尾矿 1	87.53	0.023	0.002 5	0.060	0.52	3.64	19.27	52.52	39.58
		尾矿 2	10.52	0.098	0.003 5	0.070	0.55	1.87	3.25	7.31	5.04
		原矿	100.00	0.552	0.011 0	0.100	1.15	100.00	100.00	100.00	100.00
		尾矿合计	98.05	0.031	0.003 0	0.061	0.52	5.51	22.52	59.83	44.62
水玻璃	1 500	铜钼精矿	2.93	17.700	0.290 0	1.310	21.63	94.27	77.11	38.95	55.25
		尾矿 1	87.53	0.024	0.002 5	0.060	0.52	3.82	19.86	53.30	39.68
		尾矿 2	9.54	0.110	0.003 5	0.080	0.61	1.91	3.03	7.75	5.07
		原矿	100.00	0.550	0.011 0	0.100	1.15	100.00	100.00	100.00	100.00
		尾矿合计	97.07	0.032 5	0.003 0	0.062	0.53	5.73	22.89	61.05	44.75

3 结论

(1) 巴基斯坦某铜钼矿含铜 0.55%,含钼 0.01%,伴生金、银含量分别为 0.1 g/t 和 1.15 g/t,属于原生铜钼硫化矿。

(2) 原矿中铜矿物种类繁杂,主要为黄铜矿,还含有少量辉铜矿、斑铜矿、碲黝铜矿、铜蓝。部分硫化铜矿物和硫化钼矿物嵌布粒度较细,与脉石矿物和黄铁矿的共生关系复杂。铜矿物嵌布粒度细、微细粒薄片状云母和易泥化矿物绿泥石、绢云母含量高是影响精矿品位的主要因素。

(3) 根据矿石特点,设计采用“粗磨—三次粗选抛尾—粗精矿再磨再选”的工艺流程,减弱脉石细磨泥化对浮选的影响,三次粗选采用 Z-200 和乙基黄药组合捕收剂强化对铜钼矿物的捕收,粗精矿再磨再选采用 CD-B 强化对脉石矿物的抑制能力,全流程闭路试验获得产率为 1.95%、铜品位为 26.76%、铜回收率为 94.49%、钼品位为 0.451%、钼回收率为 77.48%、金含量为 2.06 g/t、金回收率为 40.17%、银含量为 32.66 g/t、银回收率为 55.38%的铜钼混合精矿产品,实现了铜钼及其伴生资源的高效回收,为新建选矿厂设计提供技术依据。

(4) 新型抑制剂 CD-B 为小分子有机物,零毒性,零污染,单耗低,属于高效绿色环保药剂。与常规药剂水玻璃相比,采用 CD-B 可大幅提高铜精矿的品位,且 CD-B 用量是水玻璃的 1/15,便于采购、储存和使用。

参考文献(References):

[1] 陈昌员.某高泥质铜矿选矿试验研究[J].矿业研究与开发,2022,42(6):49-53.
CHEN Changyuan. Experimental study on mineral processing of a high-pelitic copper ore[J]. Mining Research and Development,2022,42(6):49-53.

[2] 黄春海,胡新红,段瑶,等.湖南某高硫低品位铜矿选矿试验研究[J].矿冶工程,2021,41(3):72-74.
HUANG Chunhai, HU Xinhong, DUAN Yao, et al. Mineral processing technology for high-sulfur lean copper ore from Hunan[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(3):72-74.

[3] TRAN T Q, CHINNAPPAN A, LEE J K Y, et al. 3D printing of highly pure copper[J]. Metals,2019,9(7):756.

[4] MUHAMMAD B, PARK I, HORNN V, et al. The challenges and prospects of recovering fine copper sulfides from tailings using different flotation techniques: a review [J]. Minerals,2022,12(5):586.

[5] HUND K, PORTA D L, FABREGAS T P, et al. Minerals for climate action: the mineral intensity of the clean energy transition[R]. Washington: World Bank,2020.

[6] PARK I, KANAZAWA Y, SATO N, et al. Beneficiation of low-grade rare earth ore from Khalzan Buregtei deposit (Mongolia) by magnetic separation[J]. Minerals,2021,11 (12):1432.

[7] 聂琦蔚,阮华东.江西某铜矿铜硫分离浮选试验研究[J].矿业研究与开发,2019,39(3):29-32.
NIE Qiwei, RUAN Huadong. Flotation test on copper and sulfur separation in a copper mine of Jiangxi province[J]. Mining Research and Development,2019,39(3):29-32.

[8] 祁梦瑶,彭伟军,曹亦俊,等.硫化铜钼矿浮选分离抑制剂研究进展[J].金属矿山,2023(8):1-16.
QI Mengyao, PENG Weijun, CAO Yijun, et al. Research progress of flotation separation depressants for copper-molybdenum sulfide ore[J]. Metal Mine,2023(8):1-16.

[9] 谭欣,王中明,刘书杰,等.提高某高硫铜矿石伴生金银指标的试验研究[J].有色金属(选矿部分),2018(2):20-26+30.

TAN Xin, WANG Zhongming, LIU Shujie, et al. Experiment on improving associated gold and silver recoveries of a high-sulfur copper ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2018(2):20-26+30.

[10] 陈勇.青海铁矿伴生金银铜的综合回收[J].矿产综合利用,2022(4):12-16+20.
CHEN Yong. Study on comprehensive recovery of gold, silver and copper associated with iron ore in Qinghai[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2022(4):12-16+20.

[11] 邱廷省,董浩,严华山,等.某含金银铜硫矿石的低碱铜硫分离与伴生金银综合回收[J].有色金属科学与工程,2021,12(5):81-88.
QIU Tingsheng, DONG Hao, YAN Huashan, et al. Separation of low alkali copper and sulfur and comprehensive recovery of associated gold and silver from a gold, silver, copper and sulfur ore[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2021, 12(5):81-88.

[12] 杨元良,李先富,王驰源.四川某矿区低品位铜镍矿石选矿试验研究[J].世界有色金属,2023(2):56-58.
YANG Yuanliang, LI Xianfu, WANG Chiyuan. Experimental study on beneficiation of low-grade copper-nickel ore from a mining area in Sichuan[J]. World Nonferrous Metals,2023(2):56-58.

[13] JELDRES R I, URIBE L, CISTERNAS L A, et al. The effect of clay minerals on the process of flotation of copper ores:a critical review[J]. Applied Clay Science, 2019, 170:57-69.

[14] 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 research on mineral processing of a muddy copper sulfide ore in Yunnan[J]. World Nonferrous Metals,2019(21):37-39.

[15] 陈旭波,田祎兰,胡志强.某高泥高硫硫化铜矿选矿试验研究[J].中国矿业,2017,26(增刊2):348-351.
CHEN Xubo, TIAN Yilan, HU Zhiqiang. Experimental study on the high-mud and high-sulfur copper sulfide ore[J]. China Mining Magazine,2017,26(Suppl.2):348-351.

[16] GU G H, ZHU R F, CHEN Z X. Structural modification of cellulose to enhance the flotation efficiency of fine copper oxide ore [J]. Physicochemical Problems of Mineral Processing,2019,55(1):58-69.

[17] 赵连兵,先永骏,文书明,等.黄铁矿的抑制及活化分选研究进展[J].矿产保护与利用,2020,40(2):74-81.
ZHAO Lianbing, XIAN Yongjun, WEN Shuming, et al. Research development of depression and activation separation of pyrite[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2020,40(2):74-81.

[18] 程倩,王明,万宏民,等.某低品位铅锌矿选矿工艺研究[J].矿产综合利用,2021(1):65-71.
CHENG Qian, WANG Ming, WAN Hongmin, et al. Study on mineral processing technology for a low-grade lead-zinc ore[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2021(1):65-71.

[19] 崔春利,张锦瑞,赵礼兵,等.青海某铜矿选矿工艺优化试验[J].矿业研究与开发,2019,39(3):20-24.
CUI Chunli, ZHANG Jinrui, ZHAO Libing, et al. Optimization experiment on benefication process of a copper mine in Qinghai[J]. Mining Research and Development, 2019,39(3):20-24.

[20] 杨子轩,谢贤,童雄,等.石灰在浮选过程中的作用[J].矿产综合利用,2015(2):17-21.
YANG Zixuan, XIE Xian, TONG Xiong, et al. Research on the effect of lime in flotation process[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2015(2):17-21.