新疆某低品位微细粒铜钼矿选矿试验研究*

江旭[1,2]，李杰[1,2]，刘峰[3]，陈巧妹[1,2]，李昭旺[1,2]

（1.长沙矿山研究院有限责任公司， 湖南 长沙 410012；
2.湖南省矿山固废综合利用工程技术研究中心， 湖南 长沙 410012；
3.洛阳有色矿业集团嵩县矿业有限公司， 河南 洛阳市 471000）

摘要：针对新疆某斑岩型铜钼矿品位低、嵌布粒度细、铜钼分离困难等问题，对该矿石进行了矿石性质和选矿工艺试验研究，确定了“铜钼混浮-精矿再磨-铜钼分离”的原则工艺流程，通过单因素条件试验，确定了各浮选作业的关键技术参数，并在此基础上进行了全流程闭路试验。结果表明：阶段磨矿阶段选别可有效调控目的矿物解离度，并避免易泥化脉石矿物的过磨，“一粗三精两扫”铜钼混浮、“一粗七精一扫”铜钼分离全流程闭路试验获得了Cu品位为23.58%、含Mo 0.046%、Cu回收率为82.97%的铜精矿和Mo品位为34.21%、含Cu 0.96%、Mo回收率为66.38%的钼精矿，实现了铜与钼的有效分离回收。研究结果为该铜钼矿产资源的高效开发与综合利用提供了技术依据。

关键词：铜钼矿石；混合浮选；铜钼分离；阶磨阶选

中图分类号：TD95；TD923 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2025)06-0263-09

Experimental Study on Mineral Processing of a Low-Grade Fine Grained Copper-Molybdenum Ore in Xinjiang

JIANG Xu[1,2], *LI Jie*[1,2], *LIU Feng*[3], *CHEN Qiaomei*[1,2], *LI Zhaowang*[1,2]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.Hunan Province Engineering Technology Research Center of Mining Solid Waste Comprehensive Utilization, Changsha, Hunan 410012, China;
3 Luoyang Nonferrous Mining Group Songxian Mining Co., Ltd., Luoyang, Henan 471000, China)

Abstract: In response to the problems of low grade, fine embedded particle size, and difficulty in separating copper and molybdenum in a certain porphyry copper-molybdenum ore in Xinjiang, a principle process flow of “copper-molybdenum mixed flotation, concentrate regrinding and copper-molybdenum separation” was determined. Through single-factor condition tests, the key technical parameters of each flotation operation were optimized, and on this basis, a whole process closed-circuit test was conducted. The results show that the stage grinding and stage separation can effectively control the degree of dissociation of the target minerals and avoid the overgrinding of the easily mudded gangue minerals. The copper concentrate with Cu grade of 23.58%, Mo content of 0.046% and Cu recovery of 82.97%, as well as the molybdenum concentrate with Mo grade of 34.21%, Cu content of 0.96% and Mo recovery of 66.38% are obtained by the whole process closed-circuit test of copper-molybdenum mixed flotation with one roughing, three cleaning and two scavenging and copper-molybdenum separation with one roughing, seven cleaning and one scavenging. Effective separation and recovery of copper and molybdenum have been realized. The research results can provide a technical basis for the efficient development and comprehensive utilization of the copper-molybdenum mineral resources.

Key words: Copper molybdenum ore, Mixed flotation, Copper-molybdenum separation, Stage grinding and stage selection

0 引言

铜、钼作为我国重要的战略金属，被广泛应用于多个领域，是促进我国经济社会发展不可或缺的重要矿产资源[1-3]。我国铜钼硫化矿资源相对丰富，但普遍存在品位低，嵌布粒度细且矿物组成复杂等特点，因此，高效地回收利用低品位铜钼硫化矿对实现资源的综合利用具有重要意义[4-5]。目前，处理低品位铜钼硫化矿常用的选别方法为混合浮选法，即采用硫化矿捕收剂将铜钼一起捕收，再通过“抑铜浮

* **收稿日期**：2024-07-17
基金项目：中国五矿科技专项计划项目(2022ZXB04-4)
作者简介：江旭(1993—)，男，江苏徐州人，工程师，主要从事有色金属矿选矿技术研究。E-mail：572799454@qq.com

钼”工艺对铜钼混合精矿进行浮选分离。该方法在兼顾铜钼回收率的同时,又要考虑两者的有效分离,以实现资源的最大化回收,所以合理的选矿工艺及高效的铜矿物抑制剂对铜钼的回收和分离极为关键[6-9]。针对某低品位斑岩铜钼矿,周峰等[10]进行了系统的选矿试验研究,通过混合浮选的工艺流程,采用新型抑制剂 BK510 抑制含量较高的次生铜,取得了较好的分离效果,实验室闭路试验获得了铜品位 24.61%、铜回收率 89.25%的铜精矿和钼品位 46.21%、钼回收率 84.01%的钼精矿。陈磊等[11]针对陕西某低品位铜钼矿嵌布粒度细、矿物组成复杂等问题,进行了选矿试验研究,通过“铜钼混浮-铜钼分离”的工艺流程,采用硫化钠抑制铜矿物,最终闭路试验获得了铜品位 18.82%、铜回收率 85.35%的铜精矿和钼品位 47.14%、钼回收率 79.24%的钼精矿,选别效果较为理想。为从黑龙江某大型选厂铜钼混合精矿中回收高品质钼精矿,解明亮等[12]对该混合精矿进行了工艺矿物学和选矿试验研究,发现混合精矿中铜钼金属矿物嵌布粒度细是导致分离困难的主要原因,通过采用精矿再磨的方法,控制再磨细度为-0.045 mm 占 75.43%,以巯基乙酸钠作为铜矿物抑制剂,闭路试验获得了钼品位为 51.08%、钼回收率为 86.28%的高品质钼精矿。

新疆某低品位铜钼矿含铜 0.34%、含钼 0.017 5%,矿物嵌布粒度较细,为获得合格的铜精矿和钼精矿产品,对该矿石进行了工艺矿物学和选矿试验研究,并通过“铜钼混浮-精矿再磨-铜钼分离”的工艺流程,取得了较好的浮选指标。研究结果为低品位且嵌布粒度细小的铜钼矿选别及分离提供了新的技术方法。

1 矿石性质

1.1 主要化学成分和矿物含量

矿石的化学多元素分析结果见表 1,主要矿物含量分析结果见表 2。

表 1 矿石的化学多元素分析结果

Table 1 Chemical multi-element analysis results of ore %

Cu	Mo	Al_2O_3	SiO_2	S	CaO
0.34	0.017 5	15.48	59.80	0.87	4.28
Fe	K_2O	MgO	Na_2O	Zn	P
4.00	1.69	2.40	3.61	0.263	0.093
C	Mn	As*	Ag*	Au*	
0.15	0.065	1.06	3.66	<0.10	

注:* 表示单位为 g/t。

表 2 矿石的主要矿物含量

Table 2 The content of the main minerals in the ore %

黄铜矿	辉铜矿	黝铜矿	斑铜矿	辉钼矿	磁铁矿
0.6	0.035	0.08	0.04	0.028	1.29
黄铁矿	斜长石	石英	绿泥石	黑云母	钠长石
1.12	40.77	23.43	7.38	5.33	4.32
白云母	绢云母	辉沸石-浊沸石	正长石	铁阳起石	方解石
3.88	2.55	2.85	1.82	1.13	0.98

分析结果表明,矿石中可供选矿富集回收的元素主要为铜和钼,含量分别为 0.34%和 0.017 5%,其他有价金属元素含量相对较低;金属矿物主要为黄铁矿和黄铜矿,少量黝铜矿、辉铜矿和辉钼矿等,其中黄铁矿是选矿富集回收铜钼时需要除去的主要金属矿物,脉石矿物主要有斜长石、石英、云母和绿泥石,以及少量钠长石、辉沸石-浊沸石等。

1.2 铜、钼物相分析

矿石的铜物相分析结果见表 3,钼物相分析结果见表 4。物相分析结果表明,铜主要以原生硫化铜形式存在,次生硫化铜次之,少量以结合铜和自由氧化铜形式存在,钼主要以辉钼矿的形式存在。

表 3 铜物相分析结果

Table 3 Results of copper phase analysis %

物相	含量	分布率
原生硫化铜	0.207	60.88
次生硫化铜	0.087	25.59
自由氧化铜	0.016	4.71
结合氧化铜	0.030	8.82
总铜	0.340	100.00

表 4 钼物相分析结果

Table 4 Results of molybdenum phase analysis %

物相	含量	分布率
硫化钼	0.016 9	96.57
氧化钼	0.000 6	3.43
总钼	0.017 5	100.00

1.3 铜、钼矿物嵌布特征

矿石中,铜矿物种类较为复杂,以黄铜矿为主,大部分微细粒黄铜矿呈稀疏浸染状嵌布在脉石矿物中,小部分黄铜矿沿黄铁矿边缘、裂隙、孔洞充填交代,形成包含结构、交代残余结构,微量黄铜矿与磁铁矿、闪锌矿、辉钼矿等连生,整体而言,矿石中黄铜矿嵌布粒度小,需细磨方可将黄铜矿从黄铁矿或脉石矿物中解离出来。矿石中辉钼矿整体粒径小,主

要处于0.01～0.052 mm之间,大部分辉钼矿不均匀分布在脉石矿物中,局部可见钼矿物以集合体形式分布,与脉石矿物关系密切,小部分辉钼矿与黄铜矿、黄铁矿等紧密镶嵌。

综合分析,影响该铜钼矿资源高效回收利用的关键在于矿石中两种主要有价金属铜和钼的高效富集和有效分离,其难点在于:

(1) 铜赋存在多种铜矿物中,次生硫化铜含量低且嵌布粒度细小,不利于铜矿物的选别和铜钼分离;

(2) 矿石中含一定量的黑云母、白云母、绢云母、绿泥石、辉沸石-浊沸石,这些矿物易磨易泥化,恶化浮选环境,对精矿品位和回收率将产生一定影响;

(3) 大部分黄铜矿和辉钼矿嵌布粒度细小、嵌布关系较为复杂,不利于精矿品位的提高,需增加再磨作业。

2 选矿试验研究

2.1 试验方案的确定

因为该矿石中的大部分黄铜矿和辉钼矿嵌布粒度细小、嵌布关系较为复杂,且矿石中含有一定量易浮易泥化脉石矿物,因此,选矿工艺既要尽量防止易泥化脉石矿物过磨,又要使嵌布粒度细小的铜矿物和辉钼矿充分解离。此外,黄铜矿和辉钼矿属于原生硫化矿,可浮性相近,为此,采用"铜钼混浮-精矿再磨-铜钼分离"的工艺流程进行选矿试验。

2.2 铜钼混浮条件试验

2.2.1 磨矿细度试验

磨矿细度试验的流程和药剂制度如图1所示,试验结果如图2所示。

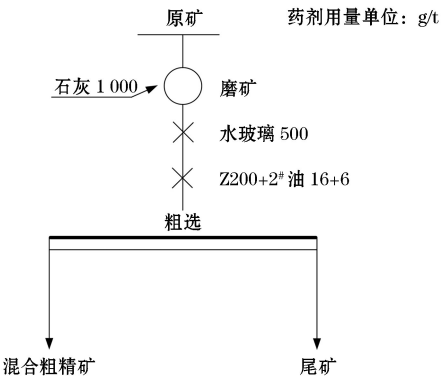


图1 磨矿细度试验流程

Fig.1 Process of grinding fineness test

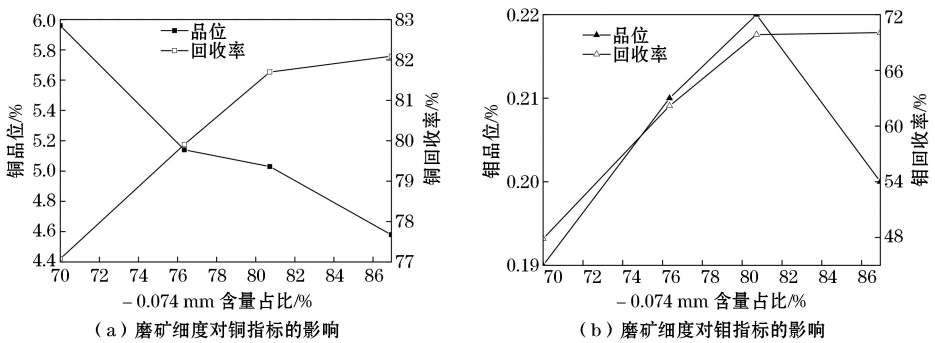


图2 磨矿细度试验结果

Fig.2 Results of grinding fineness test

由图2可知,随着磨矿细度的增加,铜、钼矿物逐步解离,回收率逐渐提高;继续增大磨矿细度,回收率波动不大,品位有所下降,说明过高的磨矿细度会造成泥质脉石矿物过磨,导致浮选过程中脉石矿物被泡沫夹带上浮,不利于粗精矿品位的提高。综合考虑,后续试验选取粗选磨矿细度为-0.074 mm占80.72%。

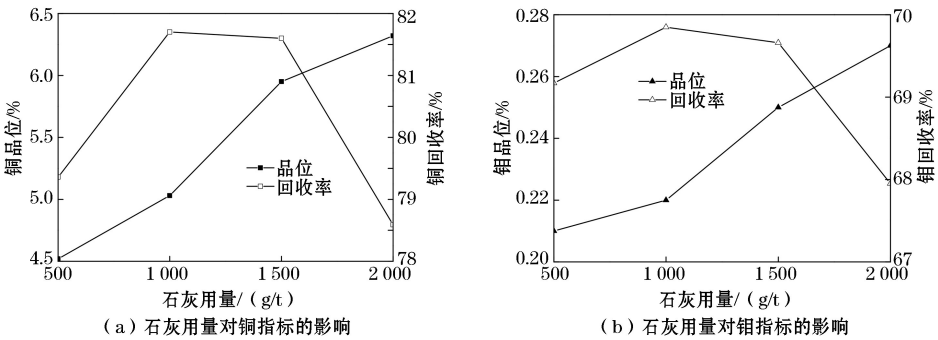
2.2.2 石灰用量试验

矿石中的黄铁矿是选矿富集回收铜钼时需要除去的主要金属矿物。石灰是铜浮选工艺中黄铁矿的有效抑制剂,同时能够消除矿浆中的某些难免离子,改善矿浆环境[13]。固定磨矿细度为-0.074 mm占80.72%,水玻璃用量为500 g/t,Z200用量为16 g/t,2号油用量为6 g/t,仅改变石灰用量进行浮选试验,试验流程如图1所示,试验结果如图3所示。

由图3可知,随着石灰用量的增加,黄铁矿得到了有效的抑制,粗精矿品位逐渐提高;继续增大石灰用量,回收率有所下降,说明过多的石灰对铜钼矿物也起到了一定的抑制作用,综合考虑,选取粗选石灰用量为1 500 g/t,此时矿浆的pH为9.5。

2.2.3 水玻璃用量试验

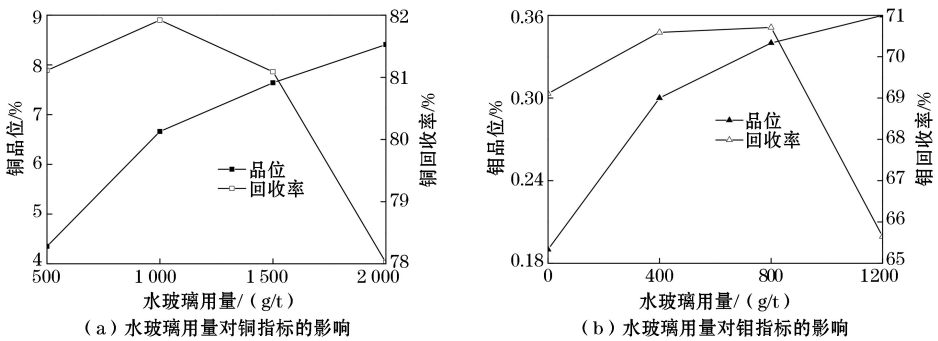
水玻璃是硅酸盐矿物的常用抑制剂,同时对矿泥也有一定的分散作用。固定磨矿细度为-0.074 mm 占 80.72%,石灰用量为 1 500 g/t,Z200 用量为 16 g/t,2 号油用量为 6 g/t,仅改变水玻璃用量进行试验,试验流程如图 1 所示,试验结果如图 4 所示。



(a) 石灰用量对铜指标的影响 (b) 石灰用量对钼指标的影响

图 3 石灰用量试验结果

Fig.3 Test results of lime dosage



(a) 水玻璃用量对铜指标的影响 (b) 水玻璃用量对钼指标的影响

图 4 水玻璃用量试验结果

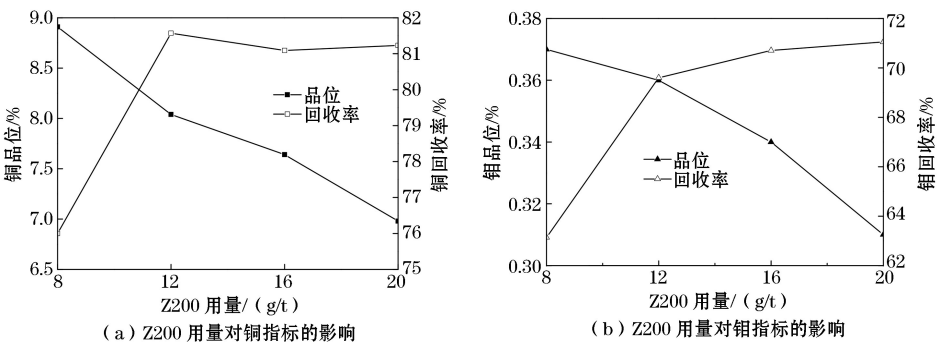
Fig.4 Test results of sodium silicate dosage

由图 4 可知,水玻璃用量过大时,粗精矿回收率显著降低,说明部分嵌布于硅酸盐脉石矿物中的铜、钼贫连生体得到了抑制,综合考虑,选取粗选水玻璃用量为 800 g/t。

2.2.4 捕收剂用量试验

硫氨酯类捕收剂对黄铜矿具有良好的选择性,同时具备一定的起泡性能。固定磨矿细度为-0.074 mm 占 80.72%,石灰用量为 1 500 g/t,水玻璃用量为 800 g/t,2 号油用量为 6 g/t,仅改变 Z200 用量进行试验,试验流程如图 1 所示,试验结果如图 5 所示。

由图 5 可知,随着 Z200 用量的增加,粗精矿回收率先增大后趋于平稳,品位逐渐降低,综合考虑,选取粗选 Z200 用量为 12 g/t。



(a) Z200 用量对铜指标的影响 (b) Z200 用量对钼指标的影响

图 5 Z200 用量试验结果

Fig.5 Test results of Z200 dosage

2.2.5 铜钼混浮闭路试验

在上述条件试验结果的基础上,进行“一粗二扫三精”的混浮闭路试验,试验流程如图 6 所示,试验结果见表 5。

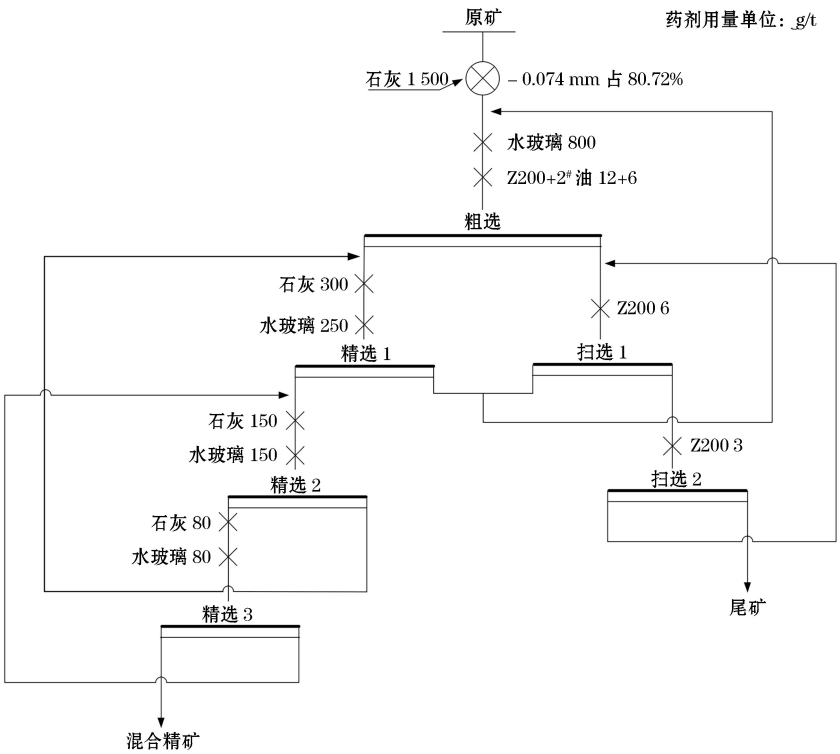


图 6 混浮闭路试验流程

Fig.6 Closed-circuit test process of mixed flotation

表 5 混浮闭路试验结果

Table 5 Results of mixed flotation test

产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
		Cu	Mo	Cu	Mo
混合精矿	1.23	23.39	1.010 0	83.57	70.36
尾矿	98.77	0.057	0.005 3	16.43	29.64
合计	100.00	0.345	0.017 7	100.00	100.00

试验结果表明,在磨矿细度为-0.074 mm 占 80.72%,石灰用量为 1 500 g/t,水玻璃用量为 800 g/t,Z200 用量为 12 g/t,2 号油用量为 6 g/t 的条件下,混浮闭路试验可获得产率为 1.23%,铜品位为 23.39%、铜回收率 83.57%,钼品位为 1.01%、钼回收率为 70.36%的混合精矿。

2.3 铜钼分离条件试验

实际生产过程中,一般采用“抑铜浮钼”的工艺对铜钼混合精矿进行浮选分离,相较于“抑钼浮铜”工艺,该方法在工艺和铜抑制剂方面较为成熟,且分选效率高[14]。

2.3.1 再磨细度试验

原矿中铜矿物和辉钼矿嵌布粒度细,且部分辉钼矿与黄铜矿紧密镶嵌,欲获得高品位铜钼精矿产品,需要对混合精矿进行再磨。此外,采用再磨工艺能起到较好的脱药效果,配合活性炭的使用可有效脱除混合精矿表面的残留药剂,大大降低了后续作业铜钼分离的压力。

在固定硫化用量为 40 kg/t、煤油用量为 0.15 kg/t、甲基异丁基甲醇(MIBC)用量为 0.05 kg/t 的条件下仅改变再磨细度进行试验,试验结果如图 7 所示。

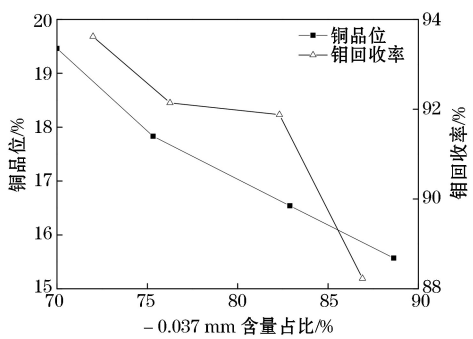


图 7 再磨细度试验结果

Fig.7 Results of regrinding fineness test

由图 7 可知,提高再磨细度可有效降低钼粗精矿的铜品位,但钼的回收率也整体呈下降趋势,考虑到后续试验还可通过增加扫选作业来提高选钼指标,综合分析,选取再磨细度为−0.037 mm 含量占 82.89%。

2.3.2 铜抑制剂种类试验

黄铜矿的抑制剂主要分为无机抑制剂和有机抑制剂两大类,无机抑制剂包括硫化物、氰化物和诺克斯等,有机抑制剂包括巯基类、硫脲类和黄原酸类等[15-16]。固定再磨细度为−0.037 mm 含量占 82.89%,活性炭用量为 3 kg/t,煤油用量为 150 g/t,MIBC 用量为 50 g/t,仅改变铜抑制剂种类进行试验,试验结果见表 6。

表 6 铜抑制剂种类试验结果

Table 6 Test results of copper inhibitor types

铜抑制剂种类与用量	产品名称	产率/%	品位/%		回收率%	
			Cu	Mo	Cu	Mo
亚硫酸钠 40 kg/t	钼粗精矿	19.85	19.86	4.810	17.15	92.70
	铜粗精矿	80.15	23.75	0.094	82.85	7.30
	混合精矿	100.00	22.98	1.030	100.00	100.00
硫化钠 40 kg/t	钼粗精矿	13.54	16.54	6.650	9.72	91.88
	铜粗精矿	86.46	24.06	0.092	90.28	8.12
	混合精矿	100.00	23.04	0.980	100.00	100.00
硫化钠+巯基乙酸钠 (30+10) kg/t	钼粗精矿	14.89	17.03	6.360	11.04	91.94
	铜粗精矿	85.11	24.01	0.098	88.96	8.06
	混合精矿	100.00	22.97	1.030	100.00	100.00
硫代硫酸钠 40 kg/t	钼粗精矿	22.73	19.47	4.130	19.17	92.95
	铜粗精矿	77.27	24.15	0.092	80.83	7.05
	混合精矿	100.00	23.09	1.010	100.00	100.00

表 6 中的试验结果表明,用亚硫酸钠和硫代硫酸钠作为铜的抑制剂时,钼粗精矿中钼的回收率较高,但钼粗精矿中铜钼互含严重,说明硫酸盐类抑制剂在烃油类对矿物捕收效果上的影响较小,对黄铜矿的抑制能力较弱;硫化钠和巯基乙酸钠对黄铜矿的抑制效果较好,相对于组合抑制剂,硫化钠单独使用时产率更低一些,且回收率不受影响,说明硫化钠对黄铜矿的选择性抑制能力更好,综合考虑,选取硫化钠作铜钼分离的黄铜矿有效抑制剂。

2.3.3 硫化钠用量试验

固定再磨细度为−0.037 mm 含量占 82.89%,活性炭用量为 3 kg/t,煤油用量为 150 g/t,MIBC 用量为 50 g/t,仅改变硫化钠用量进行试验,试验结果如图 8 所示。由图 8 可知,随着硫化钠用量的增加,钼粗精矿的铜品位先降低后趋于稳定,钼回收率呈下降的趋势,综合考虑,选取硫化钠用量为 50 kg/t。

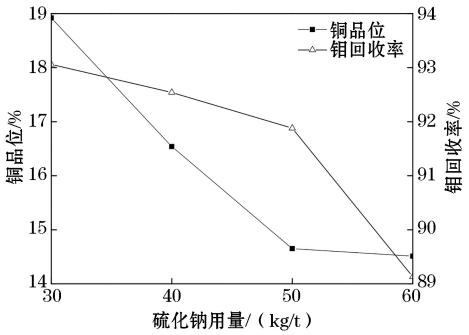


图 8 硫化钠用量试验结果

Fig.8 Test results of sodium sulphide dosage

2.3.4 煤油用量试验

烃油类是辉钼矿的常用捕收剂,包括煤油、柴油等[17]。本试验以煤油作为选钼捕收剂,固定再磨细度为−0.037 mm 含量占 82.89%,活性炭用量为 3 kg/t,硫化钠用量为 50 kg/t,MIBC 用量为 50 g/t,仅改变煤油用量进行试验,试验结果如图 9 所示。由图 9 可知,随着煤油用量的增加,钼粗精矿中钼的回收率先升高后趋于稳定,说明钼已基本选别干净。此外,煤油具有一定的消泡能力,若继续增大煤油用量,需要另外补加 20～30 g/t 的起泡剂。综合考虑,选取煤油用量为 120 g/t。

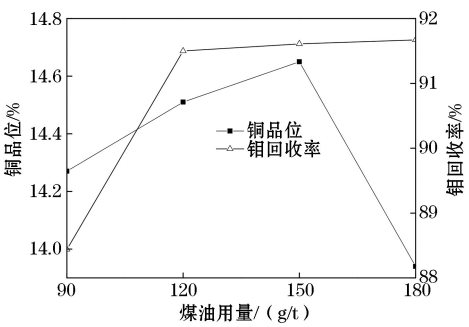


图 9 煤油用量试验结果

Fig.9 Test results of kerosene dosage

2.4 全流程闭路试验

在混浮闭路试验和铜钼分离条件试验的基础上进行了全流程闭路试验,试验流程和药剂制度如图 10 所示,试验结果见表 7。

试验数据表明,采用“铜钼混浮-再磨提高品位-铜钼分离”浮选工艺的全流程闭路试验获得了两种精矿:铜品位为 23.58%、含 Mo 0.046%、铜回收率为 82.97%的铜精矿;钼品位为 34.21%、含 Cu 0.96%、钼回收率为 66.38%的钼精矿。该工艺可实现铜矿物与钼矿物的有效分离。

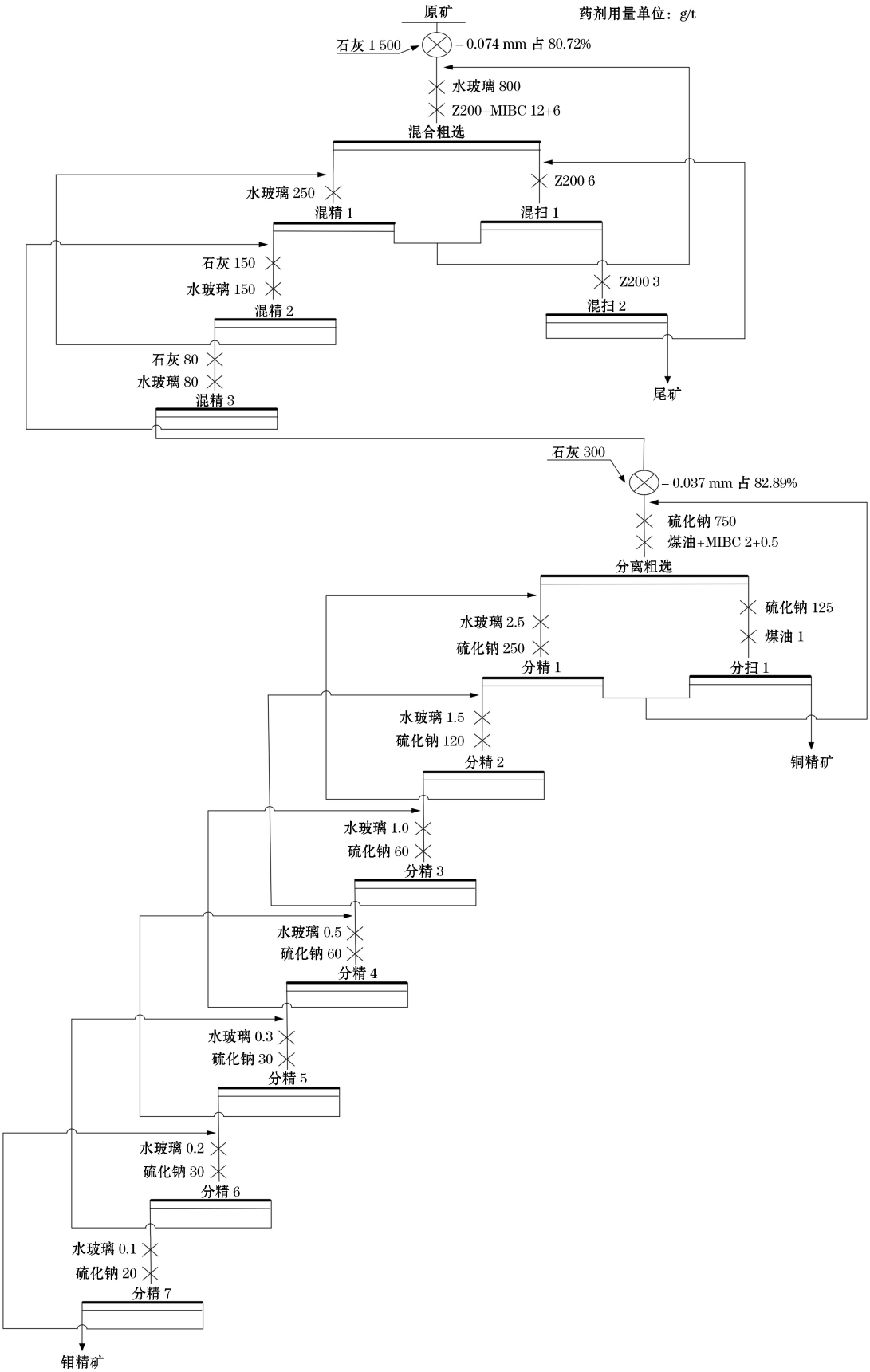


图 10　闭路试验流程

Fig.10　Process of closed-circuit test

表 7 闭路试验结果

Table 7 Results of closed-circuit test

产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
		Cu	Mo	Cu	Mo
铜精矿	1.21	23.580	0.046 0	82.97	3.18
钼精矿	0.03	0.960	34.210 0	0.09	66.38
尾矿	98.76	0.059	0.005 4	16.94	30.44
合计	100.00	0.344	0.017 5	100.00	100.00

3 结论

(1) 新疆某铜钼矿石中可供选矿富集回收的元素主要为铜和钼,含量分别为 0.34%和 0.017 5%。铜主要赋存在黄铜矿中,少量赋存在斑铜矿、辉铜矿、黝铜矿中;钼主要以辉钼矿的形式存在。矿石中黄铜矿和辉钼矿嵌布粒度细小,部分铜、钼矿物共生关系密切。脉石矿物主要有斜长石,石英、云母、绿泥石,以及少量钠长石、辉沸石-浊沸石等。

(2) 通过单因素条件试验,确定了各浮选作业的最佳技术参数:磨矿细度为-0.074 mm 含量占 80.72%,石灰用量为 1 500 g/t,水玻璃用量为 800 g/t,Z200 用量为 12 g/t,粗精矿再磨细度为-0.037 mm 含量占 82.89%,硫化钠用量为 50 kg/t,煤油用量为 120 g/t。

(3) 采用"铜钼混浮-再磨提高品位-铜钼分离"浮选工艺,通过全流程闭路试验获得了两种精矿:铜品位为 23.58%,含 Mo 0.046%,铜回收率为 82.97%的铜精矿;钼品位为 34.21%,含 Cu 0.96%,钼回收率为 66.38%的钼精矿。该浮选工艺可以实现铜与钼的有效分离,并且试验取得了较好的选别技术指标。

参考文献(References):

[1] 于俊杰.湖北某伴生铜钼矿低碱高效浮选工艺研究[D].长沙:中南大学,2022.
YU Junjie. Research on low-alkali and high-efficiency flotation process of an associated copper-molybdenum ore in Hubei[D]. Changsha: Central South University,2022.

[2] 方健.拉拉矿区难选含金硫化铜钼矿工艺矿物学特性及浮选优化试验研究[D].昆明:昆明理工大学,2021.
FANG Jian. Experimental study on the process mineralogical characteristics and flotation optimization of a refractory gold-bearing copper-molybdenum sulfide ore in Lala mining area [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2021.

[3] 苏拓宇,姜效军,张琦,等.芳香烃与磷化物协同分选低品位铜钼矿[J].矿业研究与开发,2022,42(1):47-52.
SU Tuoyu, JIANG Xiaojun, ZHANG Qi, et al. Separation of low-grade copper-molybdenum ore by the synergistic effect of aromatic hydrocarbons and phosphide[J]. Mining Research and Development,2022,42(1):47-52.

[4] 苗友清.新型回水处理剂降低脱泥钼损失率试验研究[J].矿业研究与开发,2023,43(6):202-205.
MIAO Youqing. Experimental study on reducing molybdenum loss from desliming with a new backwater treatment agent [J]. Mining Research and Development, 2023,43(6):202-205.

[5] 杨林,马原琳,梁溢强,等.新型捕收剂 KP16 浮选滇西铜铅多金属矿试验研究[J].矿业研究与开发,2023,43(1):184-188.
YANG Lin, MA Yuanlin, LIANG Yiqiang, et al. Study on the new collector KP16 in flotation test of the copper-lead polymetallic ore in western Yunnan [J]. Mining Research and Development,2023,43(1):184-188.

[6] 耿雷波,辛佳.平泉小寺沟钼矿选矿试验研究[J].矿业研究与开发,2022,42(6):44-48.
GENG Leibo, XIN Jia. Experimental study on mineral processing of Pingquan Xiaosigou Molybdenum Mine [J]. Mining Research and Development,2022,42(6):44-48.

[7] 赵宇航,吕晋芳,吴维明,等.铜钼矿浮选分离技术研究进展[J].矿产保护与利用,2022,42(5):169-178.
ZHAO Yuhang, LYU Jinfang, WU Weiming, et al. Research development of flotation separation between chalcopyrite and molybdenite [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2022,42(5):169-178.

[8] 席欣月.普朗含泥铜钼矿混合浮选试验研究及机理分析[D].昆明:昆明理工大学,2022.
XI Xinyue. Experimental study and mechanism analysis of mixed flotation of muddy copper-molybdenum ore in Pulang mining area[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2022.

[9] 李兆龙,杨晓峰,解明亮,等.黑龙江某低品位难选铜钼矿的综合利用[J].有色金属(选矿部分),2024(6):78-85.
LI Zhaolong, YANG Xiaofeng, XIE Mingliang, et al. Comprehensive utilization on a low-grade rebellious copper-molybdenum ore in Heilongjiang [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2024(6):78-85.

[10] 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(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(3):80-83.

[11] 陈磊,马亮.陕西某低品位铜钼矿选矿试验研究[J].铜业工程,2021(4):47-51.
CHEN Lei, MA Liang. Experimental study on mineral processing of a low copper-molybdenum ore in Shaanxi [J]. Copper Engineering,2021(4):47-51.

[12] 解明亮,孙乾予,王东东.从某铜钼混合精矿中回收高品质钼精矿的工艺试验研究[J].金属矿山,2023(12):117-122.
XIE Mingliang, SUN Qianyu, WANG Dongdong. Experimental study on recovery process of high quality molybdenum concentrate from copper-molybdenum mixed concentrate[J].Metal Mine,2023(12):117-122.

[13] 张村.硫化铜钼矿的新型抑制剂及其机理研究[D].赣州:江西理工大学,2017.
ZHANG Cun. Research on the new inhibitor of sulfidecopper-molybdenum mine and its mechanism[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2017.

[14] 严海.铜钼浮选分离新型抑制剂及其机理研究[D].武汉:武汉工程大学,2022.
YAN Hai. Study on the novel depressant of copper-molybdenum flotation separation and its mechanism[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology,2022.

[15] 王昊伟.云南香格里拉铜钼矿选矿试验研究[D].昆明:昆明理工大学,2017.
WANG Haowei. Experimental research on mineral processing for SHANGRI-LA copper molybdenum mine in Yunnan[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2017.

[16] 胡振,韩远燕,江旭,等.微细粒高碳铜铅混合精矿环保高效分离试验研究[J].矿业研究与开发,2024,44(7):246-250.
HU Zhen, HAN Yuanyan, JIANG Xu, et al. Experimental study on environmental protection and efficient separation of copper-lead mixed concentrate with fine-grained high-carbon[J]. Mining Research and Development,2024,44(7):246-250.

[17] 朱贤文,李世纯,王阳,等.青藏高原某斑岩型铜钼矿选矿试验[J].金属矿山,2020(2):71-76.
ZHU Xianwen, LI Shichun, WANG Yang, et al. Mineral processing test of a porphyry type copper-molybdenum ore in Tibetan Plateau[J].Metal Mine,2020(2):71-76.