



某钨钼矿石钼、钨分选试验研究

唐双华, 周玉才, 赵 航, 赵 强, 马钟琛, 李 啸

(中冶长天国际工程有限责任公司, 湖南 长沙 410205)

摘要: 某钨钼矿石中金属硫化物主要为黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂、辉钼矿、闪锌矿和方铅矿等, 金属氧化物主要为黑钨矿和褐铁矿, 脉石矿物主要为石英、长石、云母、闪石、黄玉、绿泥石等。辉钼矿和黑钨矿是考虑回收的目的矿物。钼矿物主要以辉钼矿等硫化矿物形式存在, 分布率为 97.02%; 钨主要以黑钨矿的形式存在, 分布率高达 90.34%。为实现钨钼矿石钼、钨的高效分选, 文章进行浮选和重选试验研究。结果表明: 对于 Mo 品位为 0.16%、 WO_3 品位为 0.35% 的钨钼矿石, 采用“一粗一扫”六精浮选选钼的工艺流程, 闭路试验可获得钼精矿产率 0.323%, Mo 品位 46.670%、回收率 94.330% 的分选指标; 钼尾矿采用“一粗一中一精”摇床重选选钨的工艺流程, 最终可获得钨精矿产率 0.548%, WO_3 品位 55.360%、回收率 86.713% 的分选指标。本文成果可为该类型钨钼矿石分选提供技术依据。

关键词: 钨钼矿石; 浮选选钼; 重选选钨

中图分类号: TD91

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)11-0011-09

doi:10.13402/j.gcjs.2025.11.133

Experimental study on separation of molybdenum and tungsten from a tungsten and molybdenum ore

TANG Shuanghua, ZHOU Yucai, ZHAO Hang, ZHAO Qiang, MA Zhongchen, LI Xiao

(Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China)

Abstract: In a tungsten and molybdenum mine located in Inner Mongolia, the primary metal sulfides include pyrite, pyrrhotite, arsenopyrite, molybdenite, sphalerite, and galena. The main metal oxide minerals found are wolframite and limonite, while the predominant gangue minerals consist of quartz, feldspar, mica, amphibole, topaz, and chlorite. Molybdenite and wolframite are the target minerals recovered in the experiment. Molybdenum minerals mainly exist in the form of sulfide minerals such as molybdenite, and the distribution rate is 97.02%. Tungsten mainly exists in the form of wolframite, with a distribution rate of 90.34%. To achieve high efficiency separation of molybdenum and tungsten from tungsten and molybdenum ore, flotation and gravity experiments separation were carried out. The findings indicate that in a closed-circuit test for molybdenum flotation of tungsten and molybdenum ore with a Mo grade of 0.16% and a WO_3 grade of 0.35%, the separation index achieved for molybdenum fine ore is 0.323%, with a Mo grade of 46.670% and a recovery rate of 94.330%. The re-separation of molybdenum tailings through coarse, medium, and selection shaking tables in the tungsten separation process resulted in a final yield of tungsten fine minerals at 0.548%, with a WO_3 grade of 55.360% and a recovery rate of 86.713% based on technical indicators. The results can provide technical basis for the separation of tungsten and molybdenum ore.

Key words: tungsten and molybdenum ore; molybdenum flotation separation; tungsten gravity separation

钼(Mo)和钨(W)是我国重要的战略性金属资源^[1-2]。我国钼资源总储量居世界第二位, 分布

收稿日期: 2024-12-23

基金项目: 国家应急管理部重点研发计划资助项目(2024YFB2908800)

作者简介: 唐双华(1982—), 女, 高级工程师, 从事选矿技术与选矿工程设计等工作。

广泛,但钼金属资源禀赋差,嵌布粒度微细,品位较低;辉钼矿(MoS_2)是钼金属资源的主要矿物,工业利用价值高,辉钼矿的选矿回收手段以浮选为主^[3-5]。钨作为我国优势矿产资源,在世界钨资源供需方面一直处于主导地位;黑钨矿是钨金属资源的主要矿物,黑钨矿的选矿回收手段以重选为主^[6-8]。因此,合理回收辉钼矿和黑钨矿对国民经济和工艺技术的发展具有重要意义。

目前关于钨钼矿的选别,国内学者已经开展了部分研究,主要采用浮选和重选的方法。张怀岳等^[9]针对西藏某钨钼品位低、矿物共生密切的钨钼矿,采用钼硫等可浮—钼硫分离—浮选脱硫—脱硫尾矿浮选收钨的工艺流程,可获得 Mo 品位 50.02%、回收率 77.33% 的钼精矿, WO_3 品位 65.06%、回收率 76.35% 的钨精矿。刘永祥等^[10]采用浮选—重选联合工艺从内蒙古某钨钼矿石中分选钼精矿及钨精矿,得到的钼精矿回收率 88.89%,钼品位 50.24%;钨精矿回收率 81.87%,钨品位 52.88%。方道城^[11]针对江西某钨钼矿,采用浮选工艺对该钨矿中的钨、钼进行回收,可获得钼品位 43.13%、钼回收率 50.65% 的钼精矿和钨品位 60.08%、钨回收率 81.28% 的钨精矿。

本研究的原矿石中钼和钨质量分数均较高,钼主要赋存于辉钼矿中,钨主要赋存于黑钨矿中。根据钼和钨的赋存矿物,辉钼矿具有良好的天然可浮性,适宜采用浮选方法进行分选回收;黑钨矿密度大,适宜采用重选方法予以回收^[12-13]。另外,钨钼矿石获得钼精矿和钨精矿的富集比与选矿比很高,且黑钨矿性脆,首先适宜在粗磨条件下进行钼和钨的分选,保证钼钨的回收率;然后针对钼和钨的粗精矿再进行(再磨)分选提质,这样可节省磨矿能耗,达到经济高效的选分目标。结合当前辉钼矿

和黑钨矿分选工艺的发展及应用^[14-15],本试验预采用煤油捕收剂浮选回收辉钼矿,摇床重选回收黑钨矿,确定最佳的钼、钨分选工艺流程和浮钼药剂制度,以期达到较为理想的钼钨回收指标。

1 试验材料

1.1 矿石化学成分

钨钼矿石 X 荧光光谱半定量和化学元素分析结果如表 1、2 所示。由表 1、2 可知:钨钼矿石试样中主要包含 Mo、W、Cu、Fe、Zn、S 等元素。其中,矿样中 Mo 质量分数为 0.16%, WO_3 质量分数为 0.35%,其余元素质量分数均较低。该矿样中的钼和钨具有综合回收利用价值。

1.2 矿石矿物成分

钨钼矿石中主要矿物成分分析结果如表 3 所示。矿样中金属硫化物质量分数仅为 2.19%,其中黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂质量分数为 1.65%,辉钼矿质量分数为 0.26%、闪锌矿和方铅矿质量分数为 0.18%,黄铜矿质量分数为 0.09%。金属氧化物质量分数为 1.41%,其中黑钨矿质量分数为 0.46%、褐铁矿质量分数为 0.8%。脉石矿物质量分数约为 96%,以石英、长石为主(约为 68%),其次为云母类矿物质量分数约为 18%,闪石、黄玉质量分数分别约为 6%、2%,其它如绿泥石、碳酸盐、磷灰石等质量分数约为 2%。

钨钼矿石中钼和钨物相分析结果表 4、5 所示。钼矿物主要以硫化矿物形式存在,分布率为 97.02%。钨主要以黑钨矿的形式存在,分布率高达 90.34%,白钨矿和钨华较少,分别为 5.47% 和 1.97%,其他矿物中分布率为 2.22%。

1.3 主要金属矿物 SEM-EDS 分析

辉钼矿的 SEM-EDS 分析结果如图 1 所示。钼

表 1 矿样 X 荧光光谱半定量分析结果(质量分数)

Fe_2O_3	TiO_2	SiO_2	MgO	CaO	Al_2O_3	P_2O_5	SO_3	MnO
4.14	0.277	70.43	1.33	3.82	13.90	0.070	0.52	0.149
WO_3	K_2O	MoO_3	ZnO	Na_2O	CuO	SrO	Rb_2O	F
0.283	4.43	0.186	0.096	0.110	0.089	0.0125	0.0484	0.143

表 2 矿样主要元素化学成分分析结果(质量分数)

Mo	WO_3	Zn	Cu	TFe	S
0.16	0.35	0.038	0.035	2.78	0.14

表 3 矿样矿物成分分析结果(质量分数) %

矿物组	矿物名称	相对质量分数
金属硫化矿物	辉钼矿	0.26
	方铅矿	0.07
	闪锌矿	0.11
	黄铜矿	0.09
	辉铋矿	0.01
	毒砂	0.30
	黄铁矿	0.91
	磁黄铁矿	0.44
	小计	2.19
金属氧化物	黑钨矿	0.46
	磁铁矿	0.03
	菱铁矿	0.02
	褐铁矿	0.80
	铁矾	0.04
	钛铁矿	0.06
	小计	1.41
硅酸盐矿物	石英	33.08
	长石	35.06
	铁云母	4.50
	白云母	8.28
	黑云母	5.37
	绿泥石	0.97
	闪石	5.60
	黄玉	2.06
	小计	94.92
碳酸盐及氟化盐	方解石	0.24
	白云石	0.01
	萤石	1.06
	小计	1.31
副矿物	金红石	0.06
	榍石	0.05
	锆石	0.03
	磷灰石	0.03
	独居石	0.01
	小计	0.18
	合计	100.00

表 4 钼物相分析结果 %

项 目	氧化钼中钼	硫化钼中钼	相和
Mo 质量分数	0.004 8	0.156 4	0.161 2
金属分布率	2.980 0	97.020 0	100.000 0

硫化矿以辉钼矿为主，平均 Mo 质量分数为 57.77%，根据元素质量分数平均值计算其化学式为 $\text{Mo}_{0.91}\text{S}_2$ ，与理论化学式比较，Mo 质量分数稍低。辉钼矿多为自形~半自形片状，常形成簇状或束状集合体分布，粒度相差悬殊，部分辉钼矿已完全单体解离[图 1(b)]，部分仍包裹于脉石中，或沿脉石裂隙充填分布[图 1(c)]。

黑钨矿的 SEM-EDS 分析结果如图 2 所示。钨矿物以黑钨矿为主，黑钨矿平均 W 质量分数为 63.53%，Fe 质量分数为 14.40%、Mn 质量分数为 4.92%。矿石中黑钨矿多为自形板状颗粒[图 2(b)]，矿样中大多已单体解离，分布在各个粒级。

2 试验结果与讨论

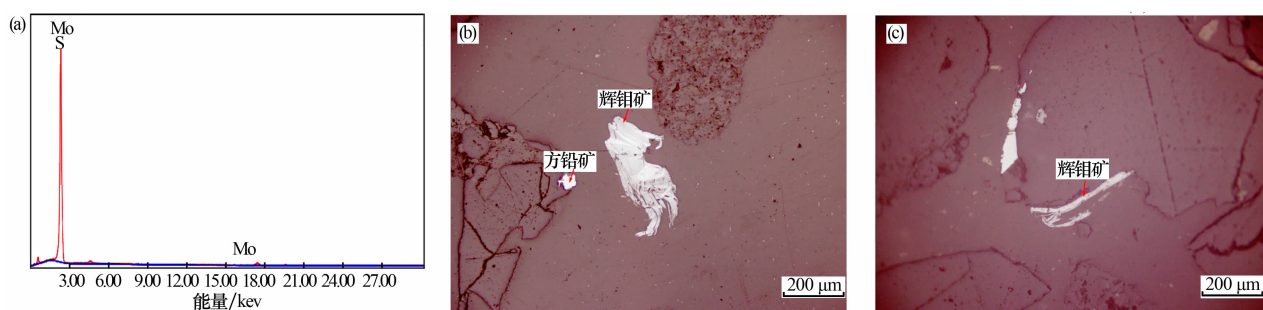
根据矿石性质分析结果，原矿石中钼和钨质量分数均较高，Mo 品位为 0.16%， WO_3 品位为 0.35%，钼主要赋存于辉钼矿中，钨主要赋存于黑钨矿中。辉钼矿具有良好的天然可浮性，适宜采用浮选方法进行分选回收；黑钨矿密度大，适宜采用重选方法予以回收。另外，钨钼矿石获得钼精矿和钨精矿的富集比与选矿比很高，且黑钨矿性脆，首先适宜在粗磨条件下进行钼和钨的分选，保证钼钨的回收率；然后针对钼和钨的粗精矿再进行(再磨)分选提质，可节省磨矿能耗，达到经济高效的分选目标。基于此，考虑采用煤油捕收剂浮选回收辉钼矿，摇床重选回收黑钨矿，详细研究磨矿细度、药剂用量和流程结构等因素对钨钼矿石中钼钨分选指标的影响。

2.1 钨钼矿石选钼试验研究

试验采用浮选工艺，以煤油为捕收剂，2 号油

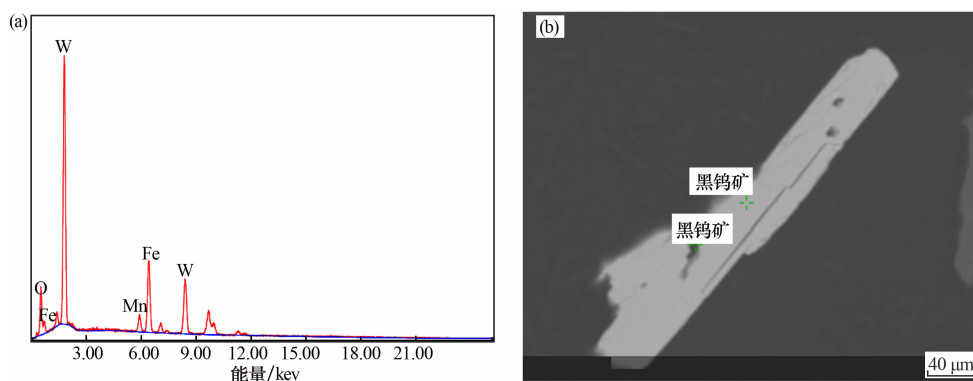
表 5 钨物相分析结果 %

相 名	黑钨矿	白钨矿	钨华	其它矿物	相和
WO_3 质量分数	0.317	0.019 2	0.006 9	0.007 8	0.350 9
金属分布率	90.340	5.470 0	1.970 0	2.220 0	100.000 0



(a) 辉钼矿 X-ray 谱图; (b) 辉钼矿集合体已单体解离颗粒; (c) 细长片状辉钼矿沿脉石矿物边缘充填分布

图 1 辉钼矿的 SEM-EDS 分析



(a) 黑钨矿 X-ray 谱图; (b) 条状的黑钨矿单体解离颗粒

图 2 黑钨矿的 SEM-EDS 分析

为起泡剂, 考查磨矿细度、调整剂用量、捕收剂用量等因素对钨钼矿中钼浮选效果的影响, 试验流程如图 3 所示。

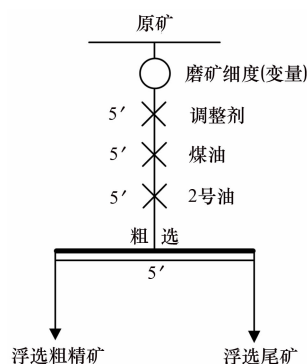
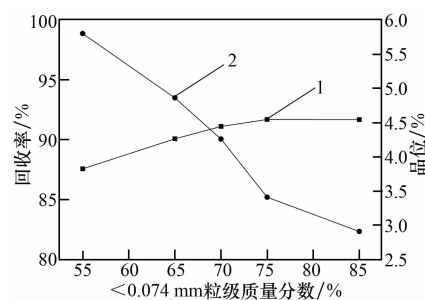


图 3 钨钼矿选钼试验流程

2.1.1 磨矿细度条件试验

在煤油捕收剂用量为 150 g/t、2 号油起泡剂用量为 50 g/t 条件下, 考查磨矿细度对钼浮选效果的影响, 磨矿细度分别选取 <0.074 mm 粒级质量分数为 55%、65%、70%、75% 和 85%, 试验结果如图 4 所示。

由图 4 可知, 随着磨矿细度的增加, 浮选粗精矿 Mo 品位不断降低, 浮选粗精矿 Mo 回收率先增加后趋于稳定。在磨矿细度 <0.074 mm 粒级质



1—Mo 回收率; 2—Mo 品位。

图 4 磨矿细度对钼浮选指标的影响

量分数为 65% 时, 浮选粗精矿 Mo 品位较高, 为 4.86%, Mo 回收率为 90.078%; 继续增加磨矿细度, 浮选粗精矿产率增大, Mo 品位快速降低, Mo 回收率增加缓慢。因此, 钼粗选选择磨矿细度为 <0.074 mm 粒级质量分数 65% 较为适宜。

2.1.2 氧化钙和碳酸钠用量条件试验

碳酸钠具有调节矿浆 pH 值和分散作用, 氧化钙具有调节矿浆 pH 值和抑制黄铁矿作用。因此, 在磨矿细度 <0.074 mm 粒级质量分数 65%、煤油捕收剂用量为 150 g/t、2 号油起泡剂用量为 50 g/t 条件下, 考查氧化钙和碳酸钠用量对钼浮选效果的影响, 用量选择 0、500、1 000、2 000 g/t, 试验结果如图 5 所示。

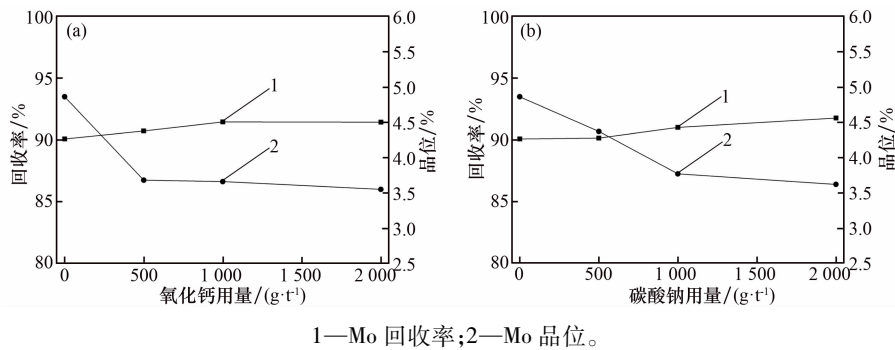


图 5 氧化钙和碳酸钠用量对钼浮选指标的影响

由图 5(a)可知,随着氧化钙用量的增加,浮选粗精矿产率逐渐增大,Mo 品位不断降低,浮选粗精矿 Mo 回收率基本维持在 90% 左右。氧化钙的添加未能有效提高浮选分离指标。由图 5(b)可知,随着碳酸钠用量的增加,浮选粗精矿产率逐渐增大,Mo 品位不断降低,浮选粗精矿 Mo 回收率增幅较小。试验过程中发现,添加氧化钙和碳酸钠药剂后粗选泡沫量明显增大,碱性环境增强了煤油捕收剂和 2#油起泡剂浮选体系的泡沫性能,脉石的泡沫夹带量增大,导致粗精矿产率增大,Mo 品位降低。因此,钼粗选过程中不添加氧化钙和碳酸钠。

2.1.3 煤油用量条件试验

在磨矿细度 <0.074 mm 粒级质量分数 65%、2 号油起泡剂用量为 50 g/t 条件下,考查煤油用量对钼浮选效果的影响,煤油用量分别选取 30、60、90、120、150 g/t。试验结果如图 6 所示。

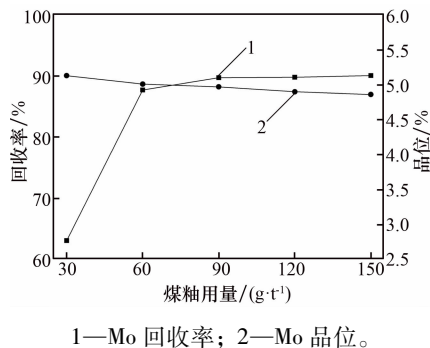


图 6 煤油用量对钼浮选指标的影响

由图 6 可知,随着煤油用量的增加,浮选粗精矿产率逐渐增大,Mo 品位逐渐降低,浮选粗精矿 Mo 回收率先快速增大后趋于稳定。在煤油用量为 30 g/t 时,浮选粗精矿 Mo 品位为 5.130%, Mo 回收率仅为 63.048%,煤油用量低捕收能力不足,导致 Mo 回收率较低;在煤油用量为 90 g/t 时,浮

选粗精矿 Mo 品位为 4.970%、Mo 回收率为 89.739%;继续增加煤油用量,浮选粗精矿 Mo 品位和回收率增幅有限。因此,钼粗选选择煤油用量 90 g/t 较为合适。

2.1.4 钼精选再磨细度条件试验

在确定钼粗选条件的基础上,为了提高钼精矿的品位指标,进行精选再磨细度试验,与此同时添加氧化钙加强对黄铁矿抑制。试验流程如图 7 所示,试验结果如表 6 所示。

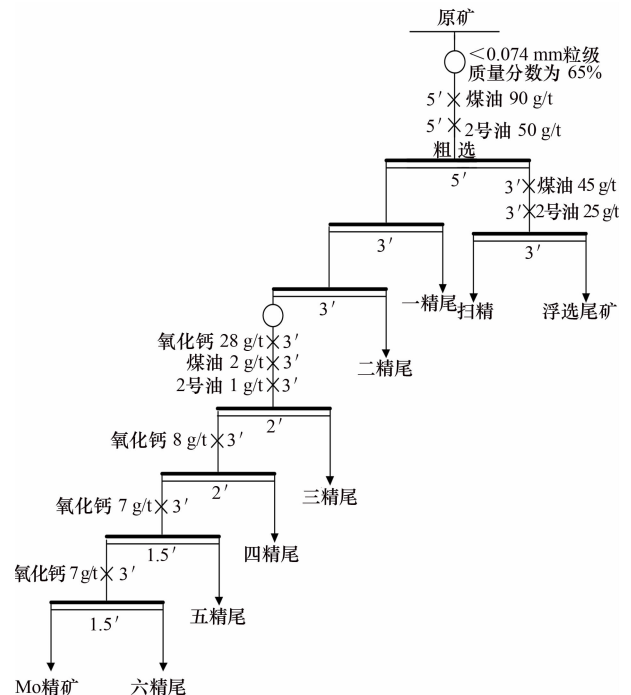


图 7 钼精选再磨细度试验流程

由表 6 试验结果可知,钼精选时添加氧化钙有助于抑制黄铁矿,钼精矿 Mo 品位得到明显提高,不再磨情况下经 6 次精选可获得 Mo 品位 45.69%、回收率 67.270% 的分选指标。随着精选

表 6 钼精选再磨细度试验结果

再磨细度	样品名称	产率/%	Mo 品位/%	Mo 回收率/%
不再磨(<0.074 mm 粒级质量分数为 65%) 加氧化钙	Mo 精矿	0.237	45.690	67.270
	六精尾	0.029	19.613	3.482
	五精尾	0.057	8.740	3.109
	四精尾	0.227	3.034	4.271
	三精尾	0.443	1.712	4.714
	二精尾	0.703	0.934	4.078
	一精尾	1.964	0.428	5.223
	扫精	1.821	0.367	4.152
	浮选尾矿	94.520	0.0063	3.700
	合计	100.000	0.161	100.000
再磨细度(<0.074 mm 粒级质量分数为 78.82%)加氧化钙	Mo 精矿	0.222	47.850	66.157
	六精尾	0.028	18.857	3.259
	五精尾	0.062	8.560	3.272
	四精尾	0.237	3.228	4.753
	三精尾	0.453	1.753	4.932
	二精尾	0.789	0.947	4.645
	一精尾	1.902	0.425	5.023
	扫精	1.837	0.368	4.201
	浮选尾矿	94.471	0.0064	3.757
	合计	100.000	0.161	100.000
再磨细度(<0.074 mm 粒级质量分数为 86.74%)加氧化钙	Mo 精矿	0.211	48.452	64.840
	六精尾	0.031	18.148	3.515
	五精尾	0.065	8.619	3.539
	四精尾	0.239	3.223	4.887
	三精尾	0.464	1.745	5.125
	二精尾	0.789	0.987	4.933
	一精尾	1.901	0.426	5.130
	扫精	1.803	0.373	4.259
	浮选尾矿	94.497	0.0063	3.771
	合计	100.000	0.158	100.000

再磨细度的增加，钼精矿品位逐渐增大，但回收率逐渐降低。当精矿Ⅱ再磨细度为<0.074 mm 粒级质量分数 78.82% 时，6 次精选获得的钼精矿中 Mo 品位为 47.850%、回收率 66.157%；当精矿Ⅱ再磨细度为<0.074 mm 粒级质量分数 86.74% 时，6 次精选获得的钼精矿 Mo 品位为 48.452%、回收率 64.840%。综合试验结果可得，钼精选再磨细度选择<0.074 mm 粒级质量分数 78.82% 较为适宜。

2.1.5 钼浮选闭路试验

在条件试验的基础上，针对钨钼矿石钼浮选

进行了闭路试验。试验流程如图 8 所示，试验结果如表 7 所示。

表 7 钼浮选闭路试验结果

样品名称	产率/%	MO 品位/%	Mo 回收率/%
Mo 精矿	0.323	46.670	94.330
浮选尾矿	99.677	0.009	5.670
合计	100.000	0.160	100.000

由表 7 可知，钼浮选闭路试验最终可获得钼精矿产率 0.323%，Mo 品位 46.670%、回收率 94.330% 的技术指标，分选效果较为理想。

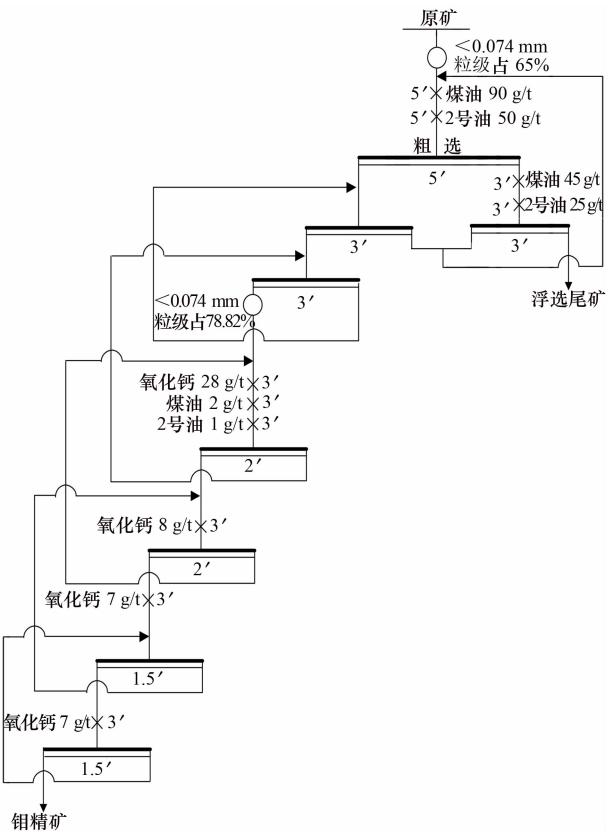


图 8 钼浮选闭路试验流程

2.2 钨钼矿石选钨试验研究

2.2.1 磨矿细度条件试验

黑钨矿物密度大，可通过摇床重选实现与脉石矿物得分离和富集。本试验以粗选浮钼尾矿为研究对象，考查磨矿细度对黑钨矿重选富集效果的影响，磨矿细度分别选取 $<0.074\text{ mm}$ 粒级质量分数为 55%、65%、70%、75% 和 85%。试验流程如图 9 所示，试验结果如表 8 所示。

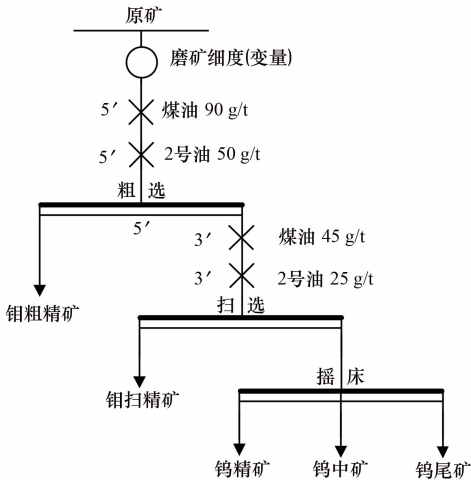


图 9 钨钼矿摇床重选试验流程

表 8 钨钼矿摇床重选试验结果

磨矿细度 ($<0.074\text{ mm}$ 粒级质量 分数/%)	样品 名称	作业产 率/%	WO ₃ 品位/%	WO ₃ 作业 回收率/%
55	精矿	2.41	11.815	79.66
	中矿	15.38	0.275	11.83
	尾矿	82.21	0.037	8.51
	合计	100.00	0.357	100.00
65	精矿	1.89	15.086	81.47
	中矿	12.34	0.296	10.44
	尾矿	85.77	0.033	8.09
	合计	100.00	0.350	100.00
70	精矿	1.75	16.412	82.18
	中矿	9.89	0.308	8.72
	尾矿	88.36	0.036	9.10
	合计	100.00	0.349	100.00
75	精矿	1.70	17.386	81.64
	中矿	9.53	0.334	8.79
	尾矿	88.77	0.039	9.56
	合计	100.00	0.362	100.00
85	精矿	1.52	18.512	80.39
	中矿	8.88	0.340	8.61
	尾矿	89.60	0.043	10.99
	合计	100.00	0.350	100.00

由表 8 可知，随着磨矿细度的增加，重选精矿作业产率逐渐降低，精矿 WO_3 品位逐渐增大，在磨矿细度 $<0.074\text{ mm}$ 粒级质量分数为 55% ~ 85% 范围内，精矿 WO_3 回收率可达到 80% ~ 82%。在前续选钼最佳磨矿细度条件下（ $<0.074\text{ mm}$ 粒级质量分数 65%），重选精矿 WO_3 品位为 15.086%、回收率为 81.47%，重选中矿 WO_3 品位为 0.296%、回收率为 10.44%，尾矿中 WO_3 品位为 0.033%、回收率仅为 8.09%。因此，后续试验选择磨矿细度为 $<0.074\text{ mm}$ 粒级质量分数 65% 较为适宜。

2.2.2 钨重选开路试验

在钨重选磨矿细度试验基础上，进行了钨钼矿石钨重选开路试验。试验流程如图 10 所示，试验结果如表 9 所示。

由表 9 可知，钨重选开路试验最终可获得钨粗精矿作业产率为 0.45%， WO_3 品位为 56.27%、作业回收率为 73.04% 的技术指标；尾矿的作业产率为 93.71%，

WO₃ 品位为 0.032%、作业回收率仅为 8.73%。

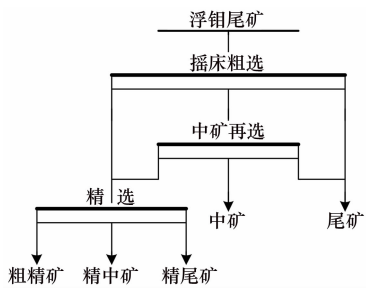


图 10 钨钼矿摇床重选开路试验流程

表 9 钨钼矿摇床重选开路试验结果

样品名称	作业产率/%	WO ₃ 品位/%	WO ₃ 作业回收率/%
粗精矿	0.45	56.270	73.04
精中矿	0.42	9.680	11.73
精尾矿	1.60	0.673	2.94
中矿	3.82	0.324	3.57
尾矿	93.71	0.032	8.73
合计	100.00	0.347	100.00

2.2.3 钨重选闭路试验

在钨重选开路试验基础上，以钼浮选闭路尾矿为研究对象，进行了钨钼矿石钨重选闭路试验。试验流程如图 11 所示，试验结果如表 10 所示。

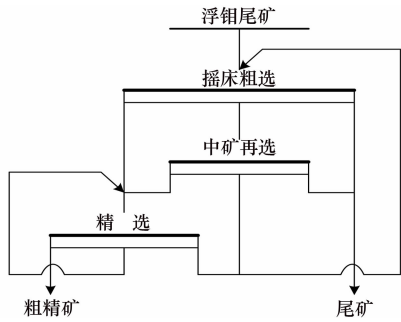


图 11 钨钼矿摇床重选闭路试验流程

表 10 钨钼矿摇床重选闭路试验结果

样品名称	产率/%	WO ₃ 品位/%	WO ₃ 回收率/%
粗精矿	0.55	55.36	87.21
尾矿	99.45	0.043	12.79
合计	100.00	0.349	100.00

由表 10 可知，钨重选闭路试验最终可获得钨粗精矿作业产率为 0.55%，WO₃ 品位为 55.36%、作业回收率为 87.21%的技术指标，分选效果较为理想。但是钨粗精矿中仍存有一定量杂质矿物，有待进一步提高 WO₃ 品位，提升钨精矿品质。

2.3 钨钼矿石钼钨分选数质量流程

根据钨钼矿石的钼浮选、钨重选试验研究，确定了其分选工艺流程。结合闭路试验结果，钼钨分选数质量流程如图 12 所示。

2.4 钨钼矿石钼钨分选尾矿分析

钨钼矿石钼钨分选尾矿的主要化学成分如表 11 所示。

表 11 矿样主要元素化学成分分析结果(质量分数) %

Mo	WO ₃	TFE	SO ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃
0.009	0.045	3.260	0.090	76.620	14.960

进一步对钨钼矿石钼钨分选尾矿进行沉降试验，沉降试验条件：沉降矿浆浓度为 20%，由沉降筒底至矿浆面高度为 172 mm。沉降试验结果表明，尾矿具有较好的沉降性能。最终压缩层底部矿浆浓度为 72.91%。

该尾矿中主要成分为硅铝化合物，其他成分质量分数较少，可以后续工程化应用，降低尾矿堆存压力。如在建材领域可作为硅酸盐水泥或陶粒的掺合料，利用其高硅铝特性替代部分传统原料；在矿山工程领域可通过优化配比用作胶结充填材料或路基填料，最终实现尾矿资源化利用与经济效益双赢。

3 结 论

(1) 钨钼矿石中钼和钨具有综合回收利用价值，Mo 质量分数为 0.16%，WO₃ 质量分数为 0.35%。矿石中的金属硫化物主要为辉钼矿、磁黄铁矿、黄铁矿、毒砂、闪锌矿、方铅矿等，金属氧化物主要为黑钨矿和褐铁矿，脉石矿物以石英、长石为主，其次为云母。其中，辉钼矿质量分数为 0.26%、黑钨矿质量分数为 0.46%。

(2) 钨钼矿石采用浮选选钼、摇床选钨技术方案实现了钼、钨分选与回收。钨钼矿石选钨最佳工艺参数为：粗选磨矿细度 < 0.074 mm 粒级质量分数 65.00%、煤油用量 90 g/t、起泡剂 2# 油用量 50 g/t；“一粗一扫六精”浮选工艺，精矿 II 再磨细度 < 0.074 mm 粒级质量分数为 78.82%、中矿顺序返回。钼浮选闭路试验可获得钼精矿产率 0.323%，Mo 品位 46.670%、回收率 94.330% 的分选指标。钼尾矿确定了“一粗一中一精”摇床重选的选钨工艺流程，最终可获得钨

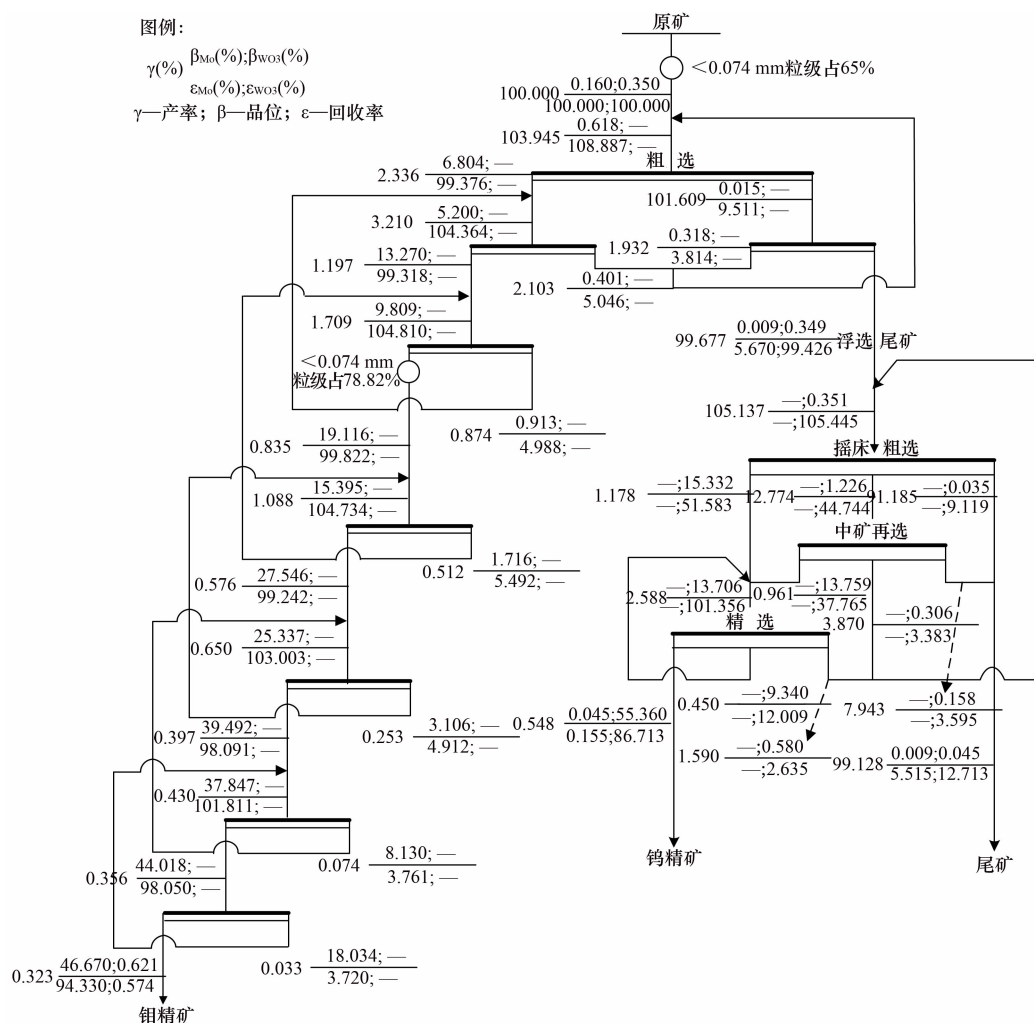


图 12 钨钼矿石钼钨分选数质量流程图

精矿产率 0.548%, WO_3 品位 55.360%、回收率 86.713% 的技术指标。

参考文献:

- [1] 谢光彩, 廖德华, 陈向, 等. 黑钨矿选矿技术研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2014, 32(5): 39–41.
- [2] 张亮, 杨卉芃, 冯安生, 等. 全球钼矿资源现状及市场分析[J]. 矿产综合利用, 2019(3): 11–16.
- [3] 杜科让. 我国钼矿资源开采利用现状及存在的问题分析[J]. 科技资讯, 2011(19): 148.
- [4] 谢小燕, 邱显杨, 罗传胜, 等. 辉钼矿可浮选性及其捕收剂的研究进展[J]. 中国钼业, 2013, 37(5): 29–32.
- [5] 张宝元, 钟宏. 辉钼矿的浮选及其捕收剂的研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2010(3): 51–54.
- [6] 宋振国, 孙传尧, 王中明, 等. 中国钨矿选矿工艺现状及展望[J]. 矿冶, 2011, 20(1): 1–7.
- [7] 罗先平, 路永森, 张建超, 等. 黑钨矿选矿工艺进展[J]. 金属矿山, 2011(12): 87–90.
- [8] 曹飞, 杨卉芃, 王威, 等. 全球钨矿资源概况及供需分析[J]. 矿产综合利用, 2018(2): 145–150.
- [9] 张怀岳, 蒋素芳. 西藏某难选钨钼矿选矿工艺研究[J]. 湖南有色金属, 2019, 35(3): 25–28; 55.
- [10] 刘永祥, 曹辉, 韩晓阳, 等. 内蒙古某低品位钨钼矿选矿工艺试验研究[J]. 湿法冶金, 2020, 39(6): 468–472.
- [11] 方道城. 江西某钨钼矿综合回收钨钼浮选工艺研究[J]. 现代矿业, 2023, 39(9): 165–168.
- [12] 刘辉. 江西钨矿细泥选矿技术发展与应用[J]. 中国钨业, 2002(5): 4.
- [13] 陆兆锋, 王沐芝, 杨晓龙, 等. 某大型钨钼矿选矿试验研究[J]. 黄金, 2024, 45(5): 44–49.
- [14] 刘栖巧, 车宇航, 陈伟, 等. 辉钼矿与滑石浮选药剂研究进展[J]. 金属矿山, 2024(2): 56–68.
- [15] 孟庆有, 袁致涛, 杨建超, 等. 微细粒黑钨矿疏水絮凝浮选中聚团形成机制[J]. 东北大学学报, 2023, 44(7): 1002–1008.