doi: 10. 20239/j. issn. 1671-9492. 2026. 08. 014

柿竹园Ⅱ矿带高石榴石型低品位黑白钨矿高效回收试验研究

唐雪峰,陈　雯,赵洪冬,李　爽,周智彬
(长沙矿冶研究院有限责任公司,长沙 410012)

摘　要: 柿竹园Ⅱ矿带钨多金属矿原矿WO_3品位仅0. 10%,钨矿物以白钨矿为主、伴生少量细粒黑钨矿,脉石中石榴石占比近60%,萤石含量达到19. 10%,含钙脉石与钨矿物浮选性质相近,采用常规分选工艺钨回收指标偏低。针对矿石特性,本文以硫化矿浮选尾矿为给矿,采用水玻璃-硫酸铝复配盐化水玻璃作为含钙脉石选择性抑制剂、硝酸铅为钨矿物活化剂、新型螯合剂CYW-30作为黑白钨浮选捕收剂,进行混合浮选试验。条件试验确定最优工艺参数:磨矿细度-0. 075 mm占80%;粗选盐化水玻璃(水玻璃:硫酸铝=2:1)用量900 g/t、硝酸铅用量800 g/t、CYW-30用量800 g/t;四段精选分段添加盐化水玻璃60、45、30、30 g/t。闭路浮选试验结果表明,最终获得的钨精矿产率为0. 35%,WO_3品位23. 96%、WO_3综合回收率84. 03%,实现了低品位石榴石型黑白钨矿的高效富集回收,可为柿竹园同类型低品位钨矿的开发提供工艺参考。

关键词: 低品位钨矿;黑钨矿;白钨矿;石榴石;混合浮选;盐化水玻璃;含钙脉石选择性抑制;工业化适配
中图分类号: TD952;TD923　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1671-9492(2026)08-0159-08

Experimental Study on Efficient Recovery of Low-grade Wolframite-Scheelite Ore with High Garnet Content from No. Ⅱ Ore Belt of Shizhuyuan Deposit

Tang Xuefeng, Chen Wen, Zhao Hongdong, Li Shuang, Zhou Zhibin
(Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co. , Ltd. , Changsha 410012, China)

Abstract: The raw tungsten polymetallic ore from the No. Ⅱ ore belt of the Shizhuyuan Deposit has a WO_3 grade of merely 0. 10%. Tungsten minerals are dominated by scheelite associated with a small quantity of fine-grained wolframite. Garnet accounts for nearly 60% of gangue minerals, and fluorite content reaches 19. 10%. Calcium-bearing gangue minerals share similar flotation behaviors with tungsten minerals, resulting in poor tungsten recovery indicators when conventional separation processes are adopted. In view of the ore characteristics, bulk flotation tests were conducted using sulfide flotation tailings as feed. Salinized water glass was adopted as the selective depressant for calcium-bearing gangue, lead nitrate as the activator for tungsten minerals, and the novel chelating agent CYW-30 as the collector for both scheelite and wolframite. Conditional tests confirmed the optimal process parameters: the grinding fineness with the -0. 075 mm fraction accounting for 80%; the dosage of salinized water glass (mass ratio of water glass to aluminum sulfate=2:1) is 900 g/t, lead nitrate 800 g/t and CYW-30 800 g/t in rough flotation; salinized water glass was added separately at 60, 45, 30 and 30 g/t in four-stage cleaning flotation. Closed-circuit flotation test results show that the final tungsten concentrate has a yield of 0. 35%, a WO_3 grade of 23. 96% and a total WO_3 recovery of 84. 03%. This study realizes efficient enrichment and recovery of low-grade garnet-type mixed wolframite-scheelite ore, can offer process references for the exploitation of similar low-grade tungsten ores in the Shizhuyuan mining area.

Key words: low-grade tungsten ore; wolframite; scheelite; garnet; bulk flotation; salinized water glass; selective depression of calcium gangue; industrial adaptability

---

收稿日期: 2026-07-11
基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC2904203);中国五矿集团矿产资源高效利用专项(M2024ZC07)
作者简介: 唐雪峰(1976-),男,湖南东安人,硕士,正高级工程师,主要从事复杂难选多金属矿选矿技术研究及药剂开发。
通信作者: 陈　雯(1965-),女,四川安岳人,博士,中国五矿集团首席科学家,正高级工程师,主要从事复杂难选矿产资源高效利用研究。

0 引言

钨是硬质合金、航空航天、国防军工领域不可或缺的战略稀有金属,行业内常将其称作“工业的牙齿”[1],全球关键矿产保供体系中钨资源具备极高战略价值。我国是全球钨资源储量与钨制品供给核心国家,但国内钨矿床普遍存在“品位低、嵌布粒度细、多金属共生复杂”的资源禀赋特点[2-4],分选难度普遍偏高。

20世纪90年代,科研院所联合矿山企业针对柿竹园Ⅲ矿带富钨多金属矿研发了“柿竹园法”,该工艺可同步回收黑钨矿、白钨矿、辉钼矿、辉铋矿与萤石,解决了复杂钨多金属矿综合利用难题,也成为矿区长期生产的核心工艺[5-7]。伴随矿山持续开采,Ⅲ矿带富矿储量逐步缩减,低品位、高石榴石脉石的Ⅱ矿带矿石具备大规模开发潜力,该矿带总储量约1.6亿t,但原矿钨品位偏低,钨矿物嵌布细、含钙脉石占比极高,直接套用现有柿竹园法分选指标较差。

后续行业在柿竹园法基础上开发无水玻璃浮钨工艺、Pb-BHA配位捕收剂体系等改良技术,一定程度上优化了黑白钨分选效果,但针对Ⅱ矿带高石榴石低品位钨矿的适配性仍存在短板[8-12]。现有研究多聚焦Ⅲ矿带富矿,针对Ⅱ矿带硫化矿浮选尾矿的黑白钨混合浮选系统性研究较少。基于此,本文以柿竹园Ⅱ矿带低品位钨多金属矿硫化矿混浮尾矿为研究对象,开展盐化水玻璃-硝酸铅-CYW-30药剂体系混合浮选试验,探索适配高石榴石脉石体系的钨高效回收工艺,为该类矿产资源规模化利用提供技术依据。同时结合矿物表面作用机理开展分析,对比传统抑制剂与盐化水玻璃对含钙脉石、钨矿物的选择性抑制差异。

1 矿样性质

1.1 矿样主要化学成分分析

试验矿样取自柿竹园Ⅱ矿带,对矿样主要化学成分进行了分析,分析结果见表1。由表1可知,矿样中可富集回收的有价组分主要为WO_3与CaF_2,其品位分别为0.10%和19.10%;伴生组分Sn、Mo、Bi含量分别为0.083%、0.015%、0.062%,微量铼Re含量为0.42 g/t,均具备综合回收潜力。有害杂质砷、铅含量极低,不会对钨精矿后续湿法、火法冶炼流程产生明显负面影响。

1.2 矿样中钨的化学物相分析

对矿样中主要金属钨的化学物相进行了分析,分析结果见表2。由表2可知,矿石中钨主要赋存于白钨矿中,WO_3分布率为88.00%;黑钨矿次之,分布率为10.00%;少量钨华中钨仅占2.00%,黑白钨中钨金属的分布率合计达到98.00%以上,因此钨的分选以浮选回收两类钨矿物为核心目标。钨华水溶性强、矿物表面无浮选活性,浮选过程几乎全部进入尾矿,无回收利用价值。

1.3 矿样中主要矿物组成

根据镜下鉴定,矿样中金属矿物钨以白钨矿为主,伴生少量黑钨矿;钼仅以辉钼矿单一矿物形式产出,铋矿物主要为辉铋矿,锡矿物则全部为锡石。金属硫化杂质以黄铁矿居多,同时含有微量黄铜矿、方铅矿、闪锌矿与磁黄铁矿;铁矿物主要为磁铁矿。非金属矿物中具备回收价值的矿物为萤石,脉石矿物主要为石榴石(钙铁榴石、钙铝榴石),其次为石英、长石;另有少量云母、辉石、角闪石、方解石、绿泥石、帘石、硅灰石、硬玉及磷灰石零星分布。矿样中主要矿物组成见表3。

矿样的XRD分析图谱见图1。由图1可知,图谱最强衍射峰均对应石榴石、萤石特征峰,石英、长石衍射峰强度偏弱,与表3分析结果匹配,印证了矿样中脉石以石榴石为主的矿物学特征。

1.4 矿样中主要矿物嵌布特征

钨矿物嵌布粒度区间集中在0.03~0.4 mm,部分微细颗粒粒径小于0.02 mm,整体属于不均匀中细粒嵌布。镜下观察可见,白钨矿多零散分布在石榴石、萤石、长石粒间,局部少量富集,矿物与脉石接触边界相对规整;黑钨矿常以微细不规则包裹体混杂生长在白钨矿内部,二者交生关系复杂,这也是细粒钨难以完全解离的关键原因(图2~4)。

表1 矿样主要化学成分分析结果

Table 1 Results of main chemical composition analysis of the ore sample /%

组分	WO_3	Sn	Mo	Bi	Cu	Pb	Zn	TFe
含量	0.10	0.083	0.015	0.062	0.004	0.017	0.016	6.96
组分	Re	CaF_2	BeO	Rb_2O	TiO_2	SiO_2	Al_2O_3	CaO
含量	0.42×10^{-4}	19.10	0.042	0.016	0.25	32.65	10.25	20.62
组分	$CaCO_3$	MgO	MnO	Na_2O	K_2O	As	S	P
含量	2.65	0.52	1.86	0.29	0.65	19.4×10^{-4}	0.13	0.024

表 2　矿样中钨的化学物相分析结果

Table 2　Results of tungsten chemical phase analysis of the ore sample　/%

钨相别	白钨矿中 WO_3	黑钨矿中 WO_3	钨华中 WO_3	合计
含量	0.088	0.010	0.002	0.10
分布率	88.00	10.00	2.00	100.0

1.5　矿样中钨矿物的单体解离情况

嵌布粒度测定结果表明，矿石中钨矿物具不均匀中细粒嵌布的特点。当粒级为+0.075 mm时，钨矿物单体正累积分布率为74.83%；当粒级为+0.037 mm时，钨矿物单体正累积分布率为

表 3　矿样中主要矿物组成及含量

Table 3　Main mineral composition and relative content of the ore sample　/%

矿物名称	萤石	白钨矿	黑钨矿	辉钼矿	辉铋矿	自然铋	辉铅铋矿	锡石	黄铜矿
含量	19.10	0.11	0.01	0.02	0.08	微量	微量	0.11	0.01
矿物名称	方铅矿	闪锌矿	黄铁矿	磁黄铁矿	磁铁矿	石英	长石	云母	石榴石
含量	0.01	0.03	0.17	0.01	0.37	5.38	7.22	1.13	59.96
矿物名称	辉石	闪石	方解石	绿泥石	帘石	硅灰石	硬玉	磷灰石	其他
含量	1.37	1.07	2.72	0.32	0.17	0.19	0.17	0.10	0.17

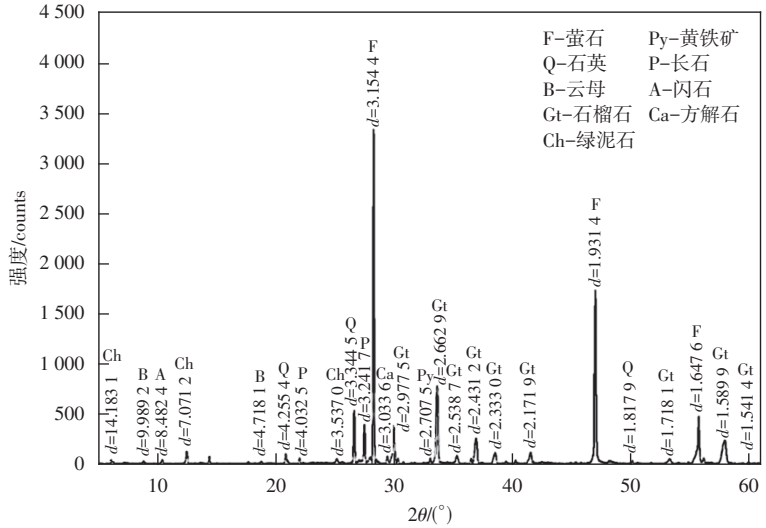
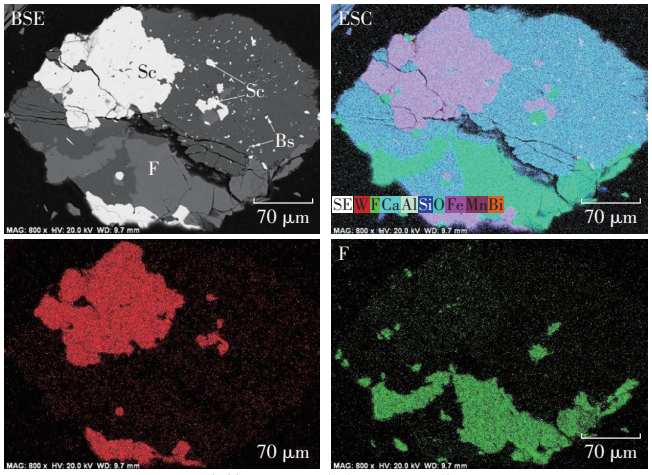


图 1　矿样 XRD 谱图

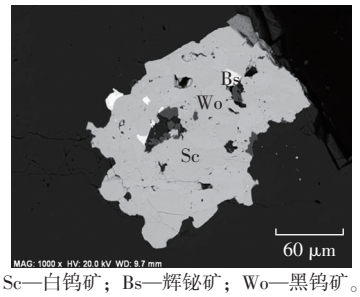
Fig. 1　XRD spectrum of the ore sample



Sc—白钨矿；Bs—辉铋矿；F—萤石。

图 2　不同粒级白钨矿嵌布于石榴石、萤石中的 SEM 图像：(a) BSE 背散射图；(b) 多元素叠加面扫图；(c) 钨元素面分布图；(d) 氟元素面分布图

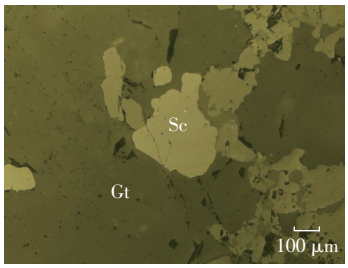
Fig. 2　SEM images of scheelite with different grain sizes embedded in garnet and fluorite: (a) BSE backscattered electron image; (b) Overlay elemental mapping; (c) Tungsten elemental mapping; (d) Fluorine elemental mapping



Sc—白钨矿；Bs—辉铋矿；Wo—黑钨矿。

图3 黑钨矿与白钨矿紧密共生嵌布SEM图像

Fig. 3 SEM image of closely intergrown wolframite and scheelite



Sc—白钨矿；Gt—石榴石。

图4 微细粒钨矿物包裹于石榴石中的SEM图像

Fig. 4 SEM images of micro-fine tungsten minerals encapsulated in garnet

88.62%。由于钨矿物性脆，特别是白钨矿的粒状自形晶的矿物特征，均有利于磨矿过程中钨矿物的解离。

选择合适的磨矿细度使矿石中绝大部分钨矿物得到有效解离是选矿获得较为理想技术指标的必要条件，不同磨矿细度原矿中钨矿物的解离度测定结果见表4。表4结果表明，在原矿磨矿细度 −0.075 mm 占80%时，钨矿物的解离度为88.63%。

2 试验方案

根据矿石性质，确定原矿弱磁选—硫化矿浮选—黑白钨混合浮选的技术路线(图5)，具体工序分为三段。

1)原矿弱磁选：原矿磨矿后采用2 000 Gs弱磁选脱除磁铁矿与具有强磁性的磁黄铁矿，消除其对黑白钨混浮的影响，产出弱磁尾矿。

2)硫化矿浮选：弱磁尾矿采用一粗三精两扫硫化矿混合浮选，以乙硫氮＋丁基黄药为捕收剂，预先回收辉钼矿、辉铋矿、黄铁矿等硫化矿，为黑白钨混浮创造良好的入浮条件。

3)黑白钨混合浮选：以盐化水玻璃抑制石榴石、萤石等含钙脉石，硝酸铅活化黑白钨矿物表面，搭配新型螯合捕收剂CYW-30实现两类钨矿同步上浮，经多段精选提升钨精矿WO_3品位。

矿样分选难点在于石榴石、萤石均为含钙矿物，表面浮选活性与白钨矿高度接近，常规水玻璃选择性差，极易出现脉石大量上浮、精矿品位不达标的问题。因此本次试验核心优化方向为改性抑制剂、钨矿物活化体系与螯合捕收剂配比，依托上述三段式流程开展系统条件试验，确定适配高石榴石低品位钨矿的浮选药剂制度。试验同步设置空白对照组(仅普通水玻璃)，横向对比验证盐化水玻璃的选择性抑制优势。

3 试验结果与讨论

3.1 粗选磨矿细度试验

磨矿细度直接决定钨矿物单体解离程度，同时会改变矿浆细泥含量，二者共同影响钨浮选分选指标。针对硫化矿浮选尾矿，采用一粗四精开路浮选流程考察不同磨矿细度的分选效果。固定药剂用量：粗选盐化水玻璃(水玻璃∶硫酸铝＝2∶1)用量900 g/t、硝酸铅用量1 000 g/t、CYW-30用量800 g/t、BK205用量6 g/t，四段精选盐化水玻璃用量均为160 g/t，试验结果见图6。

由图6可知，当磨矿细度为 −0.075 mm 占70%时，大量钨矿物仍与石榴石连生，难以上浮，钨粗精矿WO_3回收率仅72.20%；当磨矿细度提高至 −0.075 mm 占80%，钨矿物解离度提升至88.63%，钨精矿WO_3品位、回收率同步上涨，WO_3回收率达到75.79%；继续提高磨矿细度至 −0.075 mm 占85%，钨矿物解离度进一步提升，虽然钨精矿WO_3回收率仍有一定幅度的提高，但钨精矿WO_3品位下降幅度较大。原因可能是矿样中方解石、绿泥石极易过磨产

表4 不同磨矿细度产品钨矿物的解离度

Table 4 Dissociation degree of the tungsten minerals under different grinding fineness /%

磨矿细度(−0.075 mm占比)	单体	连生体			
		≥3/4	>1/2~3/4	>1/4~1/2	≤1/4
75	83.69	9.77	2.28	2.00	2.26
80	88.63	7.01	1.18	1.22	1.96
85	92.54	4.09	0.61	1.10	1.66

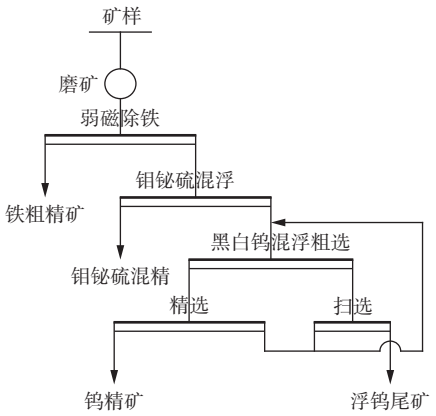


图5　黑白钨混合浮选选矿技术路线

Fig. 5　Technical roadmap for bulk flotation of scheelite and wolframite

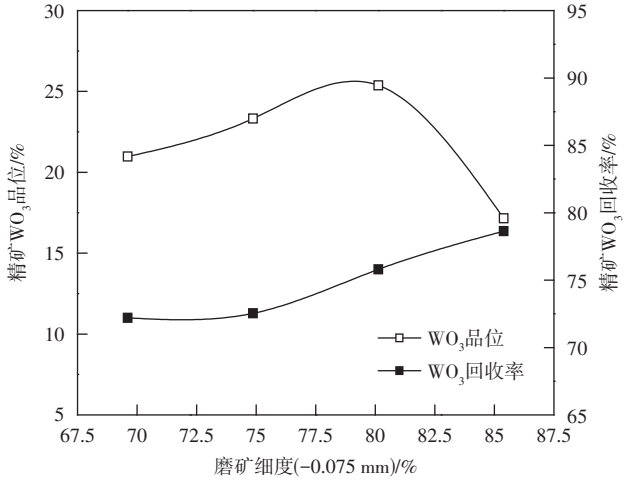


图6　磨矿细度试验结果

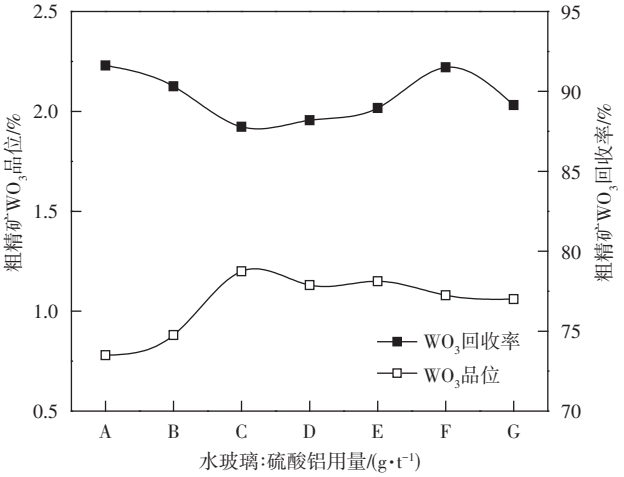
Fig. 6　Results of grinding fineness tests

生微细泥，细泥大量夹带进入精矿，直接造成钨精矿WO_3品位大幅下滑。综合考虑，确定适宜的磨矿细度为－0.075 mm占80%。

3.2　粗选水玻璃与硫酸铝配比及用量试验

盐化水玻璃依靠硫酸铝改性提升对含钙脉石的选择性，为考察水玻璃与硫酸铝配比及药剂用量变化对钨浮选指标的影响情况，针对硫化矿浮选尾矿，采用一次粗选作业，进行了水玻璃与硫酸铝的配比及用量试验，固定粗选硝酸铅用量为1 000 g/t、捕收剂CYW-30用量为800 g/t、BK205用量为6 g/t，试验结果见图7。

由图7可知，在抑制剂用量基本一致的条件下，随着抑制剂中水玻璃与硫酸铝配比的增加，钨粗选分选效率提高。当水玻璃∶硫酸铝为2∶1，总用量为900 g/t时，钨粗精矿产率为8.82%，WO_3品位为1.08%、WO_3回收率为91.50%，继续增加盐化水玻璃用量，粗精矿WO_3回收率下降幅度较大。综合考虑，钨粗选抑制剂水玻璃与硫酸铝配比确定为2∶1、盐化



A—350∶350=1∶1；B—500∶375=1.33∶1；C—600∶450=1.33∶1；D—525∶350=1.5∶1；E—600∶400=1.5∶1；F—600∶300=2∶1；G—700∶350=2∶1。

图7　水玻璃与硫酸铝配比试验结果

Fig. 7　Results of mass ratio of water glass to aluminum sulfate tests

水玻璃用量为900 g/t较为适宜。

3.3　粗选硝酸铅用量试验

羟肟酸类捕收剂无法直接稳定吸附在黑白钨矿物表面，硝酸铅解离产生的Pb^{2+}可分别与黑钨矿表面Mn、Fe活性位点、白钨矿表面Ca位点结合，搭建捕收剂吸附桥梁，实现两种钨矿物同步活化[3]。为考察活化剂$Pb(NO_3)_2$用量对钨粗选指标的影响，固定盐化水玻璃用量900 g/t、CYW-30用量800 g/t、BK205用量6 g/t，采用一次粗选作业，进行了浮钨粗选$Pb(NO_3)_2$用量试验，试验结果见图8。

由图8可知，随着$Pb(NO_3)_2$用量增加，钨粗精矿WO_3回收率指标呈上升趋势，钨粗精矿WO_3品位呈降低趋势。当$Pb(NO_3)_2$用量从600 g/t增至800 g/t时，钨矿物表面活性位点被充分覆盖，钨粗精矿WO_3回收率从88.63%上升至91.26%；继续增加$Pb(NO_3)_2$

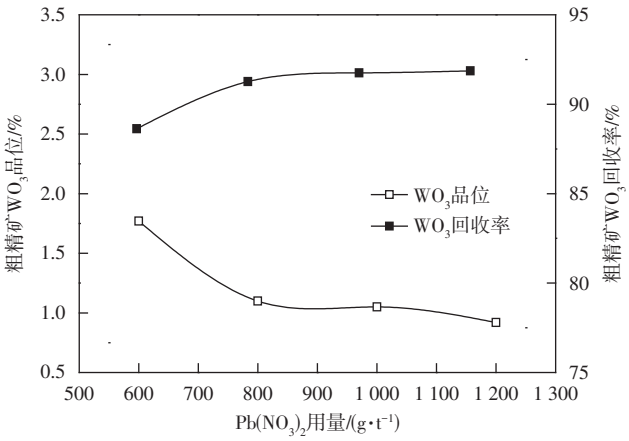


图8　$Pb(NO_3)_2$用量试验结果

Fig. 8　Results of $Pb(NO_3)_2$ dosage tests

用量至1 000 g/t，泡沫明显发黏，细泥大量夹杂上浮，钨粗精矿WO_3品位持续降低，而WO_3回收率提升幅度不足1个百分点，药剂消耗大幅增加。综合考虑，确定粗选硝酸铅适宜用量为800 g/t。

3.4 浮钨粗选捕收剂用量试验

CYW-30属于羟肟酸基螯合捕收剂，相较于传统BHA，耐钙离子、细泥干扰能力更强，适宜用于该高含钙脉石矿物，为考察捕收剂CYW-30用量对钨粗选指标的影响，固定盐化水玻璃用量900 g/t、硝酸铅用量800 g/t，采用一次粗选作业，进行了CYW-30用量试验，试验结果见图9。

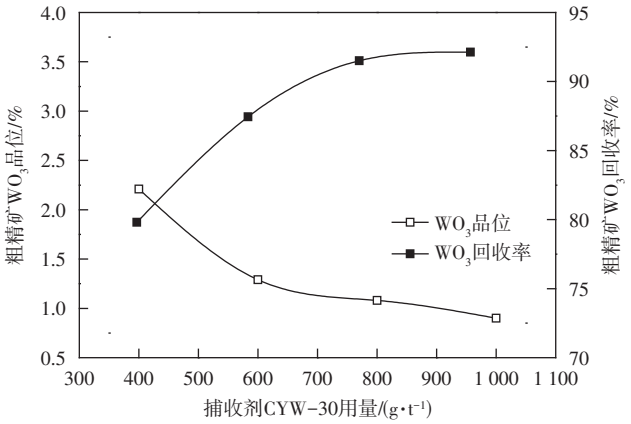


图9 捕收剂CYW-30用量试验结果

Fig. 9 Results of collector CYW-30 dosage tests

由图9可知，随着捕收剂CYW-30用量增加，钨粗精矿WO_3回收率呈上升趋势，WO_3品位呈降低趋势。当CYW-30用量由400 g/t提高至800 g/t时，钨矿物表面捕收剂吸附量持续提升，钨粗精矿WO_3回收率由79.80%提高至91.50%；当CYW-30用量超过800 g/t后，脉石上浮量增加，精矿品位持续降低，回收率提升幅度极小。综合考虑，CYW-30用量确定为800 g/t较为适宜。

3.5 钨精选抑制剂盐化水玻璃用量试验

粗选得到的钨粗精矿夹杂大量含钙脉石，需分段添加盐化水玻璃强化脉石抑制、提升精矿品位，采用一粗四精流程进行精选抑制剂盐化水玻璃用量试验，粗选药剂参数：盐化水玻璃用量900 g/t、$Pb(NO_3)_2$用量800 g/t、CYW-30用量800g/t、BK205用量6 g/t，精选抑制剂用量试验结果见图10。

由图10可知，随着四段精选盐化水玻璃用量增加，石榴石、萤石逐步被抑制，钨精矿WO_3品位持续升高，但抑制剂会对微细粒钨矿物产生弱抑制效应，钨金属流失同步加剧。分段添加60、45、30、30 g/t的盐化水玻璃时，钨精矿WO_3品位为27.45%、回收率为70.20%；若继续提高每段抑制剂用量，细粒钨损失显著加大。综合考虑，确定四段精选抑制剂的用量分别为60、45、30、30 g/t。

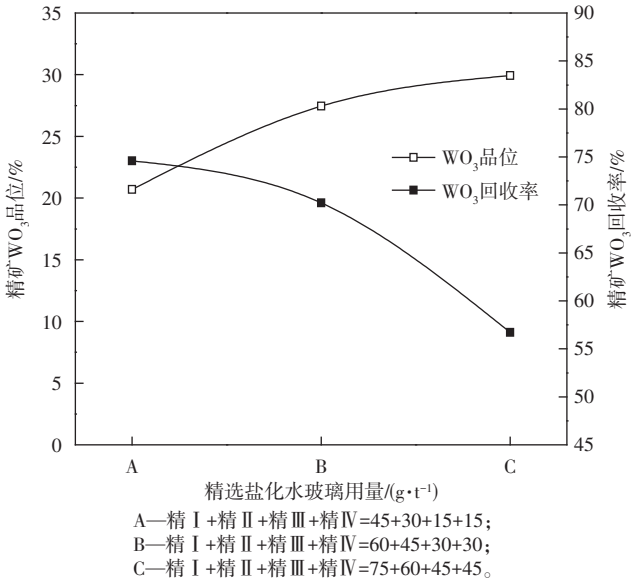


图10 精选盐化水玻璃用量试验结果

Fig. 10 Results of cleaning saltified water glass dosage tests

3.6 闭路试验

在条件试验及浮选开路试验基础上，进行了黑白钨混浮闭路试验，试验流程见图11，试验结果见表5。

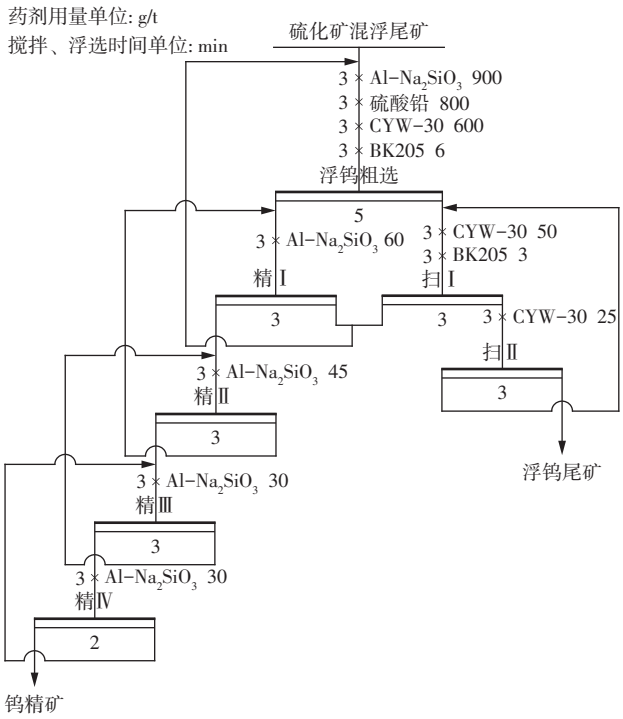


图11 黑白钨混浮闭路试验流程

Fig. 11 Flowsheet of the bulk flotation locked-cycle tests

表5　黑白钨混浮闭路流程试验结果

Table 5　Results of the bulk flotation locked-cycle tests　/%

产品名称	作业产率	WO_3品位	WO_3作业回收率
钨精矿	0.35	23.96	84.03
浮钨尾矿	99.65	0.016	15.97
给矿	100.0	0.10	100.0

由表5可知，以盐化水玻璃为脉石矿物选择性抑制剂、硝酸铅为活化剂、CYW-30为浮钨螯合捕收剂，实现了柿竹园Ⅱ矿带石榴石型黑白钨矿的同步高效浮选回收，浮钨闭路流程试验获得了作业产率0.35%、WO_3品位23.96%、WO_3作业回收率84.03%的钨精矿。

4　结论

1）柿竹园Ⅱ矿带试验矿样WO_3品位仅0.10%，钨资源88.00%赋存于白钨矿、10.00%赋存于细粒黑钨矿；脉石矿物石榴石占59.96%、萤石占19.10%，大量含钙脉石与钨矿物浮选行为相近，是该低品位钨矿分选难度大的根本矿物学因素。

2）开发水玻璃与硫酸铝2∶1复配的盐化水玻璃选择性抑制剂体系，复配生成的聚合硅酸铝胶体可优先覆盖石榴石、萤石表面钙活性位点，在弱化钨矿物抑制作用的基础上高效分离含钙脉石，有效解决单一水玻璃浮选选择性不足的行业难题。

3）采用硝酸铅活化剂协同CYW-30新型螯合捕收剂，实现白钨矿与黑钨矿同步回收；在较优磨矿细度及四段精选分段给药制度下，闭路浮选试验得到作业产率0.35%、WO_3品位23.96%、WO_3作业回收率84.03%的钨精矿，可为柿竹园同类高石榴石型低品位黑白钨混合矿开发提供完整工艺技术支撑。

4）本研究仅回收硫化矿浮选尾矿中的钨组分，矿石伴生萤石、锡等仍具备很高的综合回收价值，后续可开展浮钨尾矿有机组分综合回收试验，构建多金属全组分回收工艺。

参考文献

[1] 李仲泽. 中国钨产业高质量发展的思考[J]. 中国钨业，2021，36(5)：1-10.
Li Zhongze. Revisiting the high-quality development of China tungsten industry[J]. China Tungsten Industry，2021，36(5)：1-10.

[2] 崔祖霞. 我国战略性矿产资源保供形势分析与思考[J]. 中国矿业，2023，32(7)：10-14.
Cui Zuxia. Analysis and reflection on the situation of strategic mineral resources conservation in China[J]. China Mining Magazine，2023，32(7)：10-14.

[3] 张婷，邱廷省，李平，等. 预选抛尾技术在钨选矿中应用的研究进展[J]. 矿产综合利用，2025，46(5)：86-94.
Zhang Ting，Qiu Tingsheng，Li Ping，et al. Research progress on the application of preconcentration tailings discarding technology in tungsten beneficiation[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources，2025，46(5)：86-94.

[4] 黄伟生，唐雪峰，陈雯，等. 新型浮钨捕收剂CYW-29在柿竹园多金属矿的工业应用研究[J]. 矿冶工程，2019，39(3)：59-62，66.
Huang Weisheng，Tang Xuefeng，Chen Wen，et al. Industrial application of new collector CYW-29 in Shizhuyuan multi-metallic ore dressing plant[J]. Mining and Metallurgical Engineering，2019，39(3)：59-62，66.

[5] 孙传尧，程新朝，李长根. 钨铋钼萤石复杂多金属矿综合选矿新技术：柿竹园法[J]. 中国钨业，2004，19(5)：8-14.
Sun Chuanyao，Cheng Xinchao，Li Changgen. Shizhuyuan method：a new technology for comprehensive processing ofthe complex multi-metal ore containing W，Bi，Mo and fluorite[J]. China Tungsten Industry，2004，19(5)：8-14.

[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)：1-7，19.
Song Zhenguo，Sun Chuanyao，Wang Zhongming，et al. Current situation and prospects of China tungsten mineral processing technology[J]. Mining and Metallurgy，2011，20(1)：1-7，19.

[7] 刘鹏，郑小俊，周步蟾，等. 氧化铁负载影响钨在高岭石上的吸附[J]. 有色金属(选矿部分)，2025(4)：62-69.
Liu Peng，Zheng Xiaojun，Zhou Buchan，et al. The effects of iron oxide coating on adsorption of W on kaolinite[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)，2025(4)：62-69.

[8] 胡岳华，韩海生，田孟杰，等. 苯甲羟肟酸铅金属有机配合物在氧化矿浮选中的作用机理及其应用[J]. 矿产保护与利用，2018，38(1)：42-47，53.
Hu Yuehua，Han Haisheng，Tian Mengjie，et al. The application of metal-coordinated complexes in the flotation of oxide minerals and fundamental research of the adsorption mechanism[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources，2018，38(1)：42-47，53.

[9] 张烨，韩海生，孙伟，等. 基于新型配位捕收剂的黑白钨常温精选新工艺[J]. 中国钨业，2016，31(3)：19-26.
Zhang Ye，Han Haisheng，Sun Wei，et al. New concentration technology of wolframite and scheelite at the room temperature based on new ligand collector[J].

China Tungsten Industry, 2016, 31(3): 19-26.
[10] 卫召, 孙伟, 韩海生, 等. 钨矿浮选工艺进展与实践[J]. 金属矿山, 2021, 50(6): 60-72.
Wei Zhao, Sun Wei, Han Haisheng, et al. New technology and practice of tungsten ore flotation[J]. Metal Mine, 2021, 50(6): 60-72.
[11] 徐涛, 李军, 李振兴, 等. 湖南柿竹园钨锡异步浮选新工艺研究与实践[J]. 中国钨业, 2024, 39(1): 15-23.
Xu Tao, Li Jun, Li Zhenxing, et al. A new asynchronous flotation process for tungsten-tin in the Shizhuyuan polymetallic deposit, Hunan Province[J]. China Tungsten Industry, 2024, 39(1): 15-23.
[12] 樊晨宇, 任浏祎, 包申旭, 等. 云南某白钨尾矿回收萤石试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2025(7): 101-109.
Fan Chenyu, Ren Liuyi, Bao Shenxu, et al. Experimental study on recovery of fluorite from a scheelite tailings in Yunnan[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2025(7): 101-109.

(本文编辑 刘水红)

【缅怀寄语】

岁月无声，思念永存。转眼间，敬爱的孙传尧院士离开我们已一年有余。每当追忆这位我国选矿领域的杰出专家、学界楷模，我心中满是深切的缅怀与崇高的敬意。他是我国矿物加工领域的推动者与专业前辈，是我十分尊敬的学长，更是东北大学的骄傲。他毕生秉持严谨治学、求真务实的科学态度，更拥有奖掖后学、甘为人梯的崇高品格，为广大行业后辈树立了不朽的榜样。

孙院士一生深耕矿产资源科研前沿，长期专注复杂难选矿资源高效利用研究，在新疆可可托海、湖南柿竹园等重点矿产研究领域建树卓越。他将深厚的学术理论积淀与科研实践深度融合，攻克多项技术难题，为我国战略性矿产资源综合利用、选矿学科技术进步积淀了宝贵成果，以高尚的人格风骨培育了一代选矿科技工作者。

我曾在段希祥老师专著评审会议上，亲眼见证先生的质朴风范。时任专家组组长的他，主动带队从预定酒店搬至简陋的学校招待所。一句朴实的“能节约一点是一点”，尽显他体恤科研人员、珍惜科研经费的朴素作风，淳朴纯粹的处事态度令我深受感动、铭记于心。

斯人已逝，风范长存。为深切缅怀先贤、传承治学初心，我特意以孙院士长期深耕、潜心钻研的柿竹园多金属矿选矿领域为题撰文寄思。我将以孙院士为榜样，承袭他严谨求实、勇于创新、选矿报国的崇高精神，深耕以柿竹园为代表的复杂共生矿选矿领域，聚力提升关键矿产资源综合利用率，矢志为我国矿产资源安全与选矿事业发展贡献力量。

——陈 雯