doi: 10.20239/j.issn.1671-9492.2026.09.011

DZT调控尾矿库回水用于白钨加温精选中的试验研究

冷相超[1,2],焦 芬[1]

(1. 中南大学 资源加工与生物学院,长沙 410083;
2. 洛阳豫鹭矿业有限责任公司,河南 洛阳 471500)

摘 要:针对白钨加温精选作业直接使用尾矿库回水调浆引发的泡沫发虚及严重机械夹带问题,以河南某大型白钨选厂尾矿库回水及现场白钨粗精矿为研究对象,考察石灰基调整剂DZT在全回水浮选工艺中的应用效果。尾矿库回水呈强碱性,含有高浓度硅酸根、COD以及微细悬浮固体,回水中硅酸根干扰油酸钙胶体选择性吸附、微细悬浮物破坏泡沫结构、含钙矿物发生表面转化、残留有机药剂不断累积,多重因素协同造成浮选选择性恶化。本文系统考察DZT用量、添加方式及添加节点对浮选行为的影响,并在浮选柱系统开展一粗三扫两精闭路验证试验。结果表明,在浮选浓度为27%的条件下,加温脱药后的调浆阶段添加80 g/t DZT,能够彻底消除非选择性矿化现象,恢复气泡对白钨矿的选择性附着能力;若在加温前或加温过程添加DZT,则会造成浮选指标大幅恶化。闭路试验条件下,全回水体系获得精矿WO_3品位31.50%、回收率93.80%,相较于清水浮选(WO_3品位26.69%、回收率92.77%)分别提高4.81和1.03个百分点。同时DZT-回水体系对黄铁矿表现出显著抑制效果,精矿硫含量由清水浮选的7.48%降至0.61%。该技术为白钨加温精选作业实现尾矿库回水完全替代清水提供可靠支撑,对推动钨矿选矿清洁生产具有重要意义。

关键词:白钨矿;尾矿库回水;加温精选;DZT;机械夹带

中图分类号:TD923;TD926.5 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-9492(2026)09-0098-09

Experimental Study on Lime-based Regulator DZT for Scheelite Heated Cleaning Flotation Using Full Tailings Pond Recycled Water

Leng Xiangchao[1,2], Jiao Fen[1]

(1. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. Luoyang Yulu Tungsten Mining Co., Ltd., Luoyang 471500, Henan, China)

Abstract: Aiming at the problems of froth loosening and severe mechanical entrainment caused by directly using tailings-pond recycled water for pulp conditioning in scheelite heated cleaning flotation, this paper investigates the application performance of lime-based regulator DZT in the full-recycled-water flotation process, taking tailings-pond recycled water and on-site scheelite rough concentrate from a large-scale scheelite concentrator in Henan Province as research objects. The tailings-pond recycled water is strongly alkaline and contains high-concentration silicate radicals, COD and fine suspended solids. Multiple factors jointly lead to the deterioration of flotation selectivity: silicate radicals interfere with the selective adsorption of calcium oleate colloids, fine suspended solids destroy froth structure, surface transformation takes place on calcium-bearing minerals, and residual organic reagents keep accumulating. In this paper, the effects of DZT dosage, addition method and addition point on flotation behavior are systematically investigated, and locked-cycle verification tests with the flowsheet of one-roughing, three-scavengings and two-cleanings are carried out in a flotation column system. The results show that under the flotation concentration of 27%, adding 80 g/t DZT at the pulping stage after heating and reagent-removal can completely eliminate non-

收稿日期:2026-06-30
基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2025JJ60283)
作者简介:冷相超(1988—),男,河南浚县人,学士,工程师,主要从事超低品位白钨矿综合回收研究。

selective mineralization and restore the selective attachment capacity of bubbles to scheelite. By contrast, adding DZT before or during heating will result in sharp deterioration of flotation indexes. Under locked-cycle test conditions, the full-recycled-water system obtains concentrate with WO_3 grade of 31.50% and WO_3 recovery of 93.80%, which are 4.81 and 1.03 percentage points higher than those of fresh-water flotation (WO_3 grade 26.69%, WO_3 recovery 92.77%), respectively. Meanwhile, the DZT-recycled-water system presents remarkable depression effect on pyrite, and the sulfur content in concentrate decreases from 7.48% in fresh-water flotation to 0.61%. This technology provides reliable support for the complete replacement of fresh water by tailings-pond recycled water in scheelite heated cleaning flotation, and is of great significance for promoting cleaner production of tungsten ore beneficiation.

Key words: scheelite; tailings pond recycled water; heated cleaning flotation; DZT; mechanical entrainment

白钨矿是我国重要的战略钨资源，常与萤石、方解石等含钙脉石及黄铁矿伴生。我国白钨矿储量丰富但品位偏低，选矿难度较大[1]。工业上普遍采用“常温粗选—加温精选”工艺，其中加温精选通过添加大量水玻璃，在70～90 ℃条件下强化脉石矿物抑制，是提纯的关键环节，作业新水消耗量大。

随着环保法规趋严，选厂新水取用受限，选矿行业水资源循环利用率仍有较大提升空间[2]。实现工艺回水循环利用已成为白钨选矿企业的核心需求。工业实践[3]表明，矿山废水经适当处理后回用于白钨浮选，可在工业规模上实现新水节约。

“高碱石灰法”是典型白钨浮选工艺，粗选段加入石灰和碳酸钠调整矿浆，再加入抑制剂和捕收剂。该方法在低品位白钨矿常温浮选中得到应用，粗选闭路试验和常温精选试验可获得分选产品[4]。此外，采用湿法冶金废酸处理回水中的硅酸盐，对白钨浮选指标具有改善作用[5]。

尾矿库回水直接用于加温精选调浆时，常出现泡沫稳定性差、气泡兼并严重、大量微细粒被机械夹带进入泡沫产品等问题。从晶体化学角度看，白钨矿与方解石、萤石表面均存在Ca^{2+}活性位点，晶体结构和表面化学性质高度相似，白钨矿Ca—O键离子键分数较高，解离时Ca—O键优先断裂；方解石(104)面及萤石(111)面同样以Ca—X离子键为主[6]。这种表面性质的相似性，是白钨矿与含钙脉石浮选分离困难的根本原因。此外，白钨矿性脆，磨矿中易过粉碎产生大量微细粒，进一步增加了分离难度[7]。已有研究指出，含钙矿物表面性质的高度相似性是制约白钨矿与方解石、萤石高效分离的关键因素[8]。

含钙矿物浮选过程中表面溶出的Ca^{2+}与油酸阴离子反应生成油酸钙胶体，碱性条件下(pH≈12)，油酸钙胶体是矿浆中捕收剂的主要作用组分[9-10]。但尾矿库回水中大量残留的硅酸根和水玻璃会干扰油酸钙胶体的选择性吸附，使矿物表面发生复杂的转化反应。同时，随回水循环使用，残留有机药剂不断累积，进一步加剧了泡沫异常与选择性下降[11]。此外，回水中微细粒固体悬浮物也严重恶化浮选过程，悬浮物表面吸附了残留浮选药剂，呈现强负电荷，直接调浆时不仅与阴离子捕收剂竞争吸附，还会覆盖气泡表面、破坏泡沫正常结构，导致大量微细粒脉石通过非选择性机械夹带进入泡沫产品[12-14]。化学干扰、药剂累积与物理夹带的多因素协同，构成了尾矿库回水直接回用引发浮选恶化的原因。

现有回水调控手段多采用酸类药剂预处理回水，虽可一定程度改善浮选指标，但硫酸属于危险管控化学品，存在硫酸盐累积、设备腐蚀等工业应用短板，仅能够改变水体pH，无法从矿物界面调控角度解决回水带来的分选干扰。针对上述技术瓶颈，本文以石灰基调整剂DZT为调控药剂，不预先处理回水，直接在调浆环节调控矿浆界面化学，系统研究药剂用量、添加方式、添加节点对白钨加温精选全回水浮选行为的影响，开展闭路浮选柱验证试验，并结合溶液化学揭示DZT的作用机理，为尾矿库回水完全替代加温精选清水提供试验依据与理论支撑。

1　试验材料与方法

1.1　试验样品

试验矿样取自河南某白钨矿选厂常温粗选产出的白钨粗精矿，主要化学成分分析结果见表1，主要矿物组成分析结果见表2。由表1、2结果可知，该白钨粗精矿WO_3品位为0.558%，脉石矿物主要为方解石、萤石、石英、金云母、硅灰石等含钙脉石与硅质脉石，含钙脉石矿物(方解石＋萤石)总占比达到51.9%。

表1 试验矿样主要化学成分分析结果

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

成分	CaO	SiO_2	CaF_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	P_2O_5	MgO
含量	43.25	18.95	16.67	2.84	2.02	5.15	3.47
成分	TiO_2	K_2O	Na_2O	S	WO_3	MoO_3	其他
含量	1.37	1.05	1.30	1.53	0.558	0.139	1.703

表2 试验矿样主要矿物组成分析结果

Table 2 Results of main mineral composition analysis and relative content of of the ore sample /%

矿物名称	方解石	萤石	石英	金云母	铁铝酸钙矿石	硅灰石	绿泥石	氟磷灰石
含量	39.5	12.4	8.0	10.6	3.5	9.4	4.3	12.4

1.2 试验用水

清水取自选厂生产清水管道,作为试验参照;尾矿库回水取自尾矿库溢流井。清水和尾矿库回水水质分析结果见表3。由表3可知,尾矿库回水呈强碱性(pH=11.97),含有高浓度硅酸根(250.8 mg/L)与COD(162 mg/L);回水中微细粒固体悬浮物粒度细小,表面吸附残留浮选药剂,碱性环境下高度分散,难以自然沉降[13-14]。

1.3 试验药剂

DZT:石灰基复合调整剂,主要有效成分为氧化钙,复配少量功能性助剂,试验时配制成质量分数2%的清水溶液。

水玻璃:工业级,模数2.0。

1.4 检测分析方法

WO_3、S元素含量采用X射线荧光光谱仪(XRF)测定;水样浊度、悬浮物、总硬度、COD、硅酸根参照矿山水质相关国家标准开展检测。

1.5 试验设备与流程

采用XFD型实验室单槽浮选机(槽体容积1.0 L)。试验操作流程:白钨粗精矿置于水浴锅升温至60 ℃,加入水玻璃,继续升温至90 ℃并保温30 min;调节矿浆浓度至27%后进行精选,充气1 min,浮选2 min;每组条件试验重复3次,取平均值。开路试验流程见图1,闭路试验流程见图2。

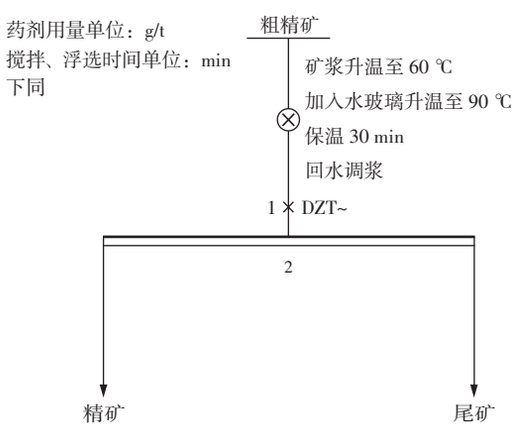


图1 开路试验流程

Fig. 1 Flowsheet of the open-circuit tests

2 选矿试验与结果讨论

2.1 回水直接回用对加温精选浮选的恶化规律

不同比例回水回用对精选指标的影响见图3。由图3可知,未处理回水直接用于精选调浆时,泡沫稳定性差、气泡兼并现象严重。随着回水占比升高,浮选指标急剧恶化;当回水比例≥40%时,WO_3回收率降至35%以下;当回水比例达到80%时,泡沫裹挟大量细泥,分选基本失效;当回水比例为40%~60%,精矿WO_3品位短暂升高至28%~29%,但回收率大幅下降至28%~34%,说明回水恶化浮选是非选择性机械夹带和选择性捕收相互竞争共同导致。

回水中微细悬浮物表面吸附残留油酸钠、硅酸钠,在较宽pH区间带负电[13-14]。回水直接调浆,带负电悬浮物一方面与油酸根发生竞争吸附消耗捕收剂;另一方面覆盖气泡表面,破坏泡沫正常结构。

在回水占比20%的低比例条件下,体系少量Ca^{2+}与残留捕收剂会带来短暂活化效果;含钙矿物溶出Ca^{2+}和油酸根生成油酸钙胶体,其捕收能力强

表3 尾矿库回水水质分析结果

Table 3 Results of backwater quality analysis of tailings pond

用水类型	浊度	悬浮物/(mg·L^{-1})	pH	总硬度/(mg·L^{-1})	COD/(mg·L^{-1})	硅酸根/(mg·L^{-1})
清水	3	1	7.54	28	9	21.36
尾矿库回水	55	62	11.97	42	162	250.8

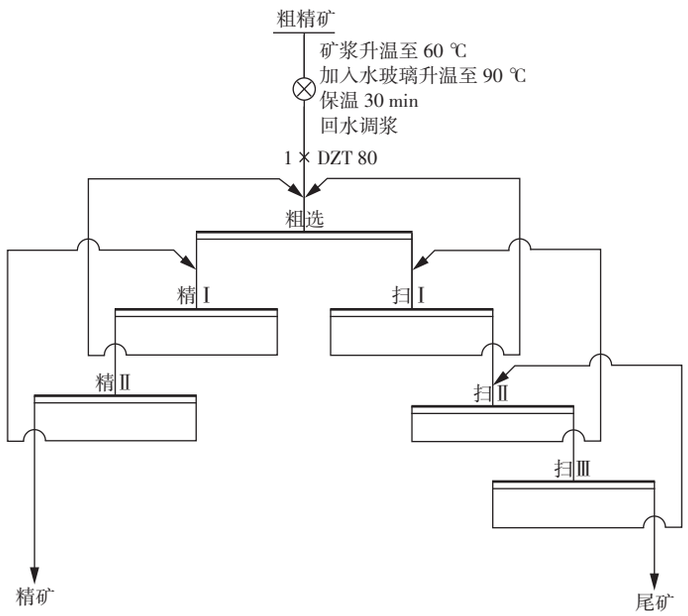


图 2　闭路试验流程

Fig. 2　Flowsheet of the locked-cycle tests

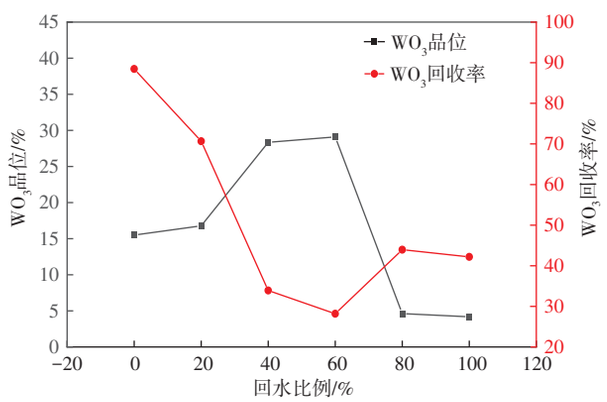


图 3　不同比例回水对精选指标的影响

Fig. 3　Effects of different proportions of backwater on cleaner indexes

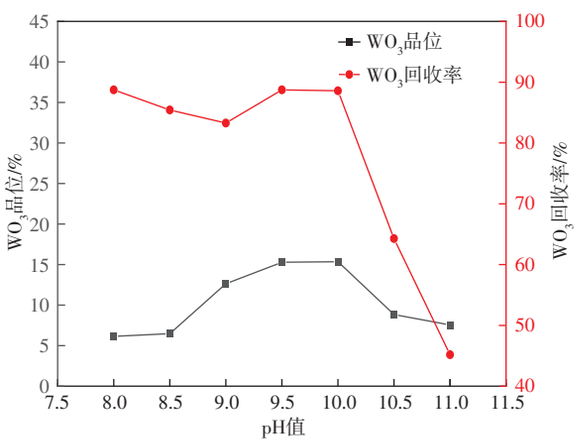


图 4　硫酸处理回水 pH 值对精选指标的影响

Fig. 4　Effects of pH value of return water from sulfuric acid treatment on cleaner indexes

于油酸钠[9-10]。但回水占比继续升高，高浓度硅酸根(250.8 mg/L)起主导负面作用：硅酸根与Ca^{2+}生成硅酸钙沉淀，消耗活化钙离子；硅酸胶体在矿物表面形成亲水覆盖层，抑制捕收剂选择性吸附，已有研究证实去除回水中硅酸盐可明显改善白钨浮选效果[15]。

2.2　硫酸调节回水 pH 浮选探索试验

采用硫酸将尾矿库回水调节至不同pH值，全部回水参与调浆、矿浆浓度为27%，考察回水pH值对精选指标的影响，试验结果见图4。由图4可知，硫酸调pH值至9.5～10.0，浮选回收率可提升至88%左右。但由于硫酸属于危险管控化学品，工业应用风险高；该方式仅改善水体pH值，无法消除残留有机药剂、硅酸根的持续干扰，还会造成体系硫酸盐累积，带来设备腐蚀与后续环保隐患[16]，仅做实验室探索，不适合工业大规模应用。

2.3　DZT 用量对全回水浮选行为的影响

在矿浆浓度为27%的条件下，进行DZT用量试验，试验结果见图5。由图5可知，当DZT用量由0提升至80 g/t，浮选回收率提升54.4个百分点，精矿WO_3品位提升8.81个百分点；当DZT用量继续增大至120～160 g/t，浮选指标出现回落，存在明显的最佳用量区间，确定80 g/t为适宜药剂用量。适宜用量下DZT电离释放Ca^{2+}、OH^-，中和硅酸根的不利影

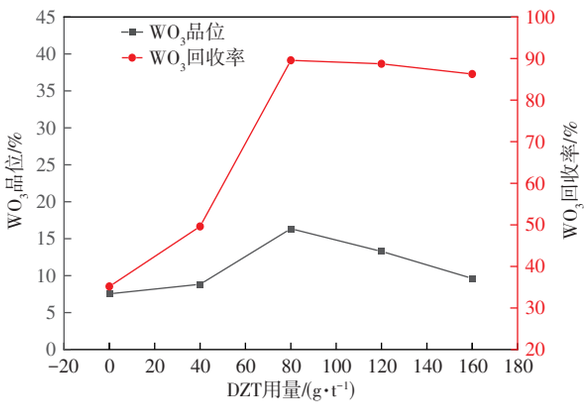


图 5 DZT 用量对回水浮选行为的影响

Fig. 5 Effects of DZT dosage on backwater flotation behavior

响，同时 Ca^{2+} 选择性吸附于脉石表面增强脉石亲水性；当 DZT 添加过量时，Ca^{2+} 在矿物表面过度生成氢氧化钙亲水覆盖层，对白钨矿上浮产生抑制作用。

2.4 DZT 添加方式与添加节点的优化

2.4.1 添加方式

固定 DZT 用量 80 g/t，对比干粉直接添加、清水配制成溶液添加、回水配制成溶液添加三种添加方式，试验结果见图 6。由图 6 可知，三种方式浮选指标相差不大，DZT 发挥作用依靠矿浆内电离产生 Ca^{2+} 与 OH^- 的化学效应，和药剂物理添加形态关联性弱，工业现场可根据实际条件灵活选择添加形式。

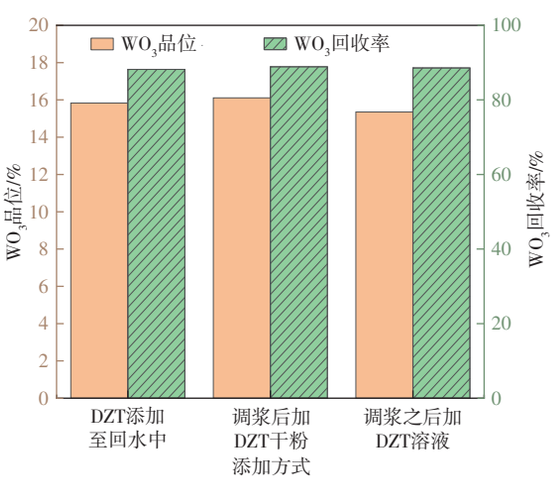


图 6 DZT 添加方式对精选指标的影响

Fig. 6 Effects of DZT addition method on cleaner indexes

2.4.2 添加节点

考察加温前、加温过程中、加温脱药后调浆前三个添加节点进行对比，试验结果见图 7。由图 7 可知，加温前添加 DZT，WO_3 回收率仅 13.28%；加温过程中添加，WO_3 回收率为 40.90%，浮选指标显著恶化。推测在 90 ℃加温条件下，水玻璃在含钙矿物表面存在吸附-解吸动态平衡，加温阶段加入 DZT 会促使体系生成难以解吸的亲水覆盖层，抑制白钨矿上浮[17]。因此，最佳添加节点为加温脱药完成后的调浆阶段。

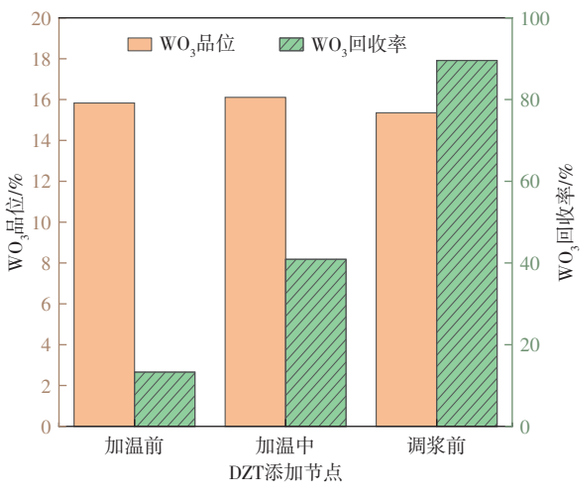


图 7 DZT 添加节点对精选指标的影响

Fig. 7 Effects of DZT adding nodes on cleaner indexes

2.5 DZT 对黄铁矿的抑制作用

白钨粗精矿伴生黄铁矿，黄铁矿上浮进入精矿会直接降低钨精矿产品品质。以精矿硫含量、硫回收率作为评价指标，考察 DZT 用量对黄铁矿浮选行为的影响，试验结果见图 8。由图 8 可知，清水浮选条件下精矿硫含量为 3.50%；当 DZT 用量为 80 g/t 时，精

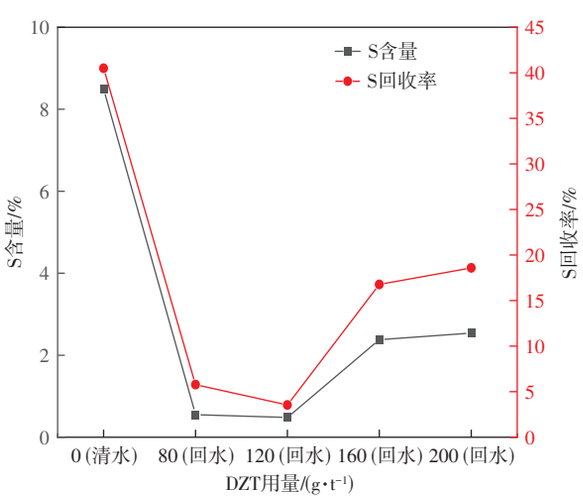


图 8 不同 DZT 用量下精矿硫含量变化

Fig. 8 Change of sulfur content in the concentrate under different DZT dosage

矿硫含量下降至0.55%；当DZT用量提升至120 g/t时，硫含量进一步下降至0.48%。当DZT用量超过160 g/t时，DZT对黄铁矿抑制效果减弱；当DZT用量为160 g/t时，精矿硫含量回升至2.38%，当其用量为200 g/t时，精矿硫含量达到2.54%。其原因为过量OH^-造成黄铁矿表面羟基化，黄铁矿可浮性重新提高[18]。

综合考虑，DZT的适宜用量为80～120 g/t，该用量对黄铁矿具备稳定抑制效果。作用机理为碱性环境中Ca^{2+}在黄铁矿表面生成$CaSO_4$或者$Ca(OH)_2$亲水薄膜，阻碍捕收剂吸附；药剂过量会削弱抑制作用，工业应用需要严格控制药剂添加量。

2.6　全回水条件下闭路浮选验证试验

采用一粗三扫两精流程进行浮选闭路试验，试验结果见表4。由表4可知，全回水环境添加80 g/t DZT，精矿WO_3品位为31.50%、回收率为93.80%，与清水浮选相比，精矿WO_3品位提升4.81个百分点，回收率提升1.03个百分点；精矿硫含量由7.48%降至0.61%。DZT可以完全消除尾矿库回水回用带来的负面影响，全回水浮选综合指标优于清水浮选，同时实现钨精矿降硫。

3　作用机理与技术优势分析

3.1　回水恶化浮选的溶液化学机制

尾矿库回水直接调浆造成白钨加温精选浮选恶化，是多因素协同作用的结果，可以从溶液化学角度归纳为以下四点。

1）含钙矿物表面物质转化干扰捕收剂选择性吸附

白钨矿、萤石、方解石均属于含钙可溶性矿物，矿浆环境中会发生溶解-沉淀反应。回水pH值为11.97且含有大量碳酸根，热力学条件有利于萤石表面向方解石转化，造成不同含钙矿物表面性质趋同。捕收剂难以实现选择性识别，大量微细粒脉石通过非选择性机械夹带进入泡沫，出现泡沫发虚现象[19]。

2）高浓度硅酸根的负面作用

回水中硅酸根在强碱性条件下大量解离，一方面与油酸钙胶体竞争矿物表面吸附位点；另一方面在脉石矿物表面生成亲水硅酸盐薄膜，消耗体系有效捕收剂组分，削弱浮选分选效果[15]。

3）固体悬浮物竞争吸附与泡沫结构破坏

回水中微细固体悬浮物表面负载残留浮选药剂而带强负电。直接调浆时，悬浮物会与阴离子捕收剂竞争矿物表面活性位点；同时覆盖气泡表面，破坏气泡正常结构，造成气泡兼并、泡沫稳定性失控[12-14]。

4）回水中有机药剂累积效应

脂肪酸类捕收剂在尾矿库回水中不断循环富集，药剂浓度失衡，引发泡沫异常，进一步降低浮选选择性。

3.2　DZT改善浮选效果的作用机理

结合浮选试验现象与溶液化学理论，DZT改善全回水白钨加温精选浮选效果来自多重协同效应。

1）钙离子的澄清-活化双重效应

DZT电离释放出Ca^{2+}：一方面Ca^{2+}与回水中过量硅酸根反应生成硅酸钙沉淀，降低矿浆内游离硅酸根浓度，消除硅酸根对捕收剂吸附的干扰；另一方面Ca^{2+}与矿浆内油酸根生成油酸钙胶体，油酸钙胶体对白钨矿捕收性能优于单纯油酸根离子，提升对白钨矿的捕收选择性[9-10]，这也是全回水加DZT指标优于清水浮选的重要化学基础。

2）定向调控脉石矿物表面性质，拉大可浮性差异

碱性条件下，DZT解离产生的Ca^{2+}可选择性吸附于方解石、萤石等含钙脉石表面，改变矿物表面电性，促进硅酸根、水玻璃在脉石表面进一步吸附，强化脉石矿物的亲水性，扩大白钨矿与脉石矿物之间的可浮性差异。

3）对黄铁矿的选择性抑制

碱性环境中，Ca^{2+}可在黄铁矿表面生成亲水性硫酸钙或者氢氧化钙覆盖膜，阻碍捕收剂在黄铁矿表面吸附，实现对黄铁矿的抑制。但药剂过量时，过高的氢氧根会引起黄铁矿表面羟基化，黄铁矿可浮性回升，抑制效果减弱[17-18]。

4）基于浮选药剂界面组装理论

浮选药剂分子可通过范德华力、氢键、疏水力等弱相互作用形成胶束或半胶束结构，并在固/液界面及气/液界面发生特性吸附，产生协同效应[20]。溶液化学计算表明，当钙离子浓度高于10^{-6} mol/L时，碱

表4　闭路试验结果对比

Table 4　Comparison of the locked-cycle test results

用水类型	DZT用量/(g·t^{-1})	WO_3回收率/%	WO_3品位/%	S品位/%
清水	0	92.77	26.69	7.48
全回水	80	93.80	31.50	0.61

性条件下油酸钙胶体是矿浆中的主要作用组分，对白钨矿的捕收起主导作用[21-22]。油酸钙胶体对白钨矿和萤石的捕收能力优于油酸根离子，而对方解石的捕收能力较弱，组合捕收剂的协同吸附可显著提高浮选选择性[23]。此外，油酸钙胶体在白钨矿表面形成的吸附层更为致密，表面疏水化程度更高[24]。

5)对微细固体悬浮物的脱稳凝聚作用

回水中微细悬浮物携带硅酸根与残留油酸钠，是浮选干扰组分的载体。DZT电离产生的Ca^{2+}能够中和悬浮物表面负电荷，促使胶团脱稳凝聚沉降，去除悬浮物携带的残留药剂干扰。该推论由溶液化学分析得到，有待专门的沉降试验进一步佐证。

6)优化泡沫结构，降低机械夹带

DZT消除矿浆中硅酸胶体与有机污染物的干扰，修复气泡表面吸附层结构，缓解气泡异常兼并，降低泡沫层含液率，减少微细脉石的水力机械夹带。

3.3 DZT与硫酸调浆工艺对比

硫酸调节回水pH属于对回水水体本体的被动改造；DZT并非预处理回水，而是直接介入矿浆界面化学反应，将回水中有害硅酸根等组分转化为沉淀，实现对回水有害组分的就地消解，契合绿色矿山发展理念。同时规避硫酸带来的危化品管控、硫酸盐累积、设备腐蚀等工业难题，更适用于白钨加温精选现场全回水工况。

3.4 技术经济意义与实践展望

DZT药剂工艺为白钨加温精选实现尾矿库回水完全替代清水提供可行技术路径。

经济效益层面：该工艺可削减新鲜水取水成本、降低尾矿废水处理费用，同时实现钨精矿品位与回收率同步提升、精矿降硫，直接提高企业生产收益。

环境效益层面：推动选矿废水减排乃至接近零排放，减轻矿山废水对外水环境的压力，对白钨选矿清洁生产具备示范价值。国内大量白钨选厂均面临回水回用难题，该工艺拥有较好推广前景。

本研究全部基于实验室小试完成，后续建议开展扩大试验与工业试验，进一步验证药剂在现场复杂波动水质条件下的工艺稳定性。

4 结论

1)尾矿库回水直接用于白钨加温精选调浆时，回水中高浓度硅酸根、微细悬浮物、含钙矿物表面转化以及循环累积的有机药剂多重因素协同，会造成泡沫发虚、微细粒严重机械夹带，浮选指标显著恶化。在矿浆浓度为27%的条件下，加温脱药后调浆阶段添加80 g/t DZT可消除非选择性矿化，恢复浮选正常状态；严禁在加温前或者加温过程中加入DZT，否则会造成白钨浮选回收率大幅下降。

2)一粗三扫两精闭路试验结果表明，全回水条件下添加80 g/t DZT，可获得精矿WO_3品位31.50%、回收率93.80%的选别指标，较清水浮选分别提升4.81、1.03个百分点；同时可有效抑制黄铁矿上浮，精矿硫含量由7.48%降至0.61%。综合考虑，DZT适宜用量为80～120 g/t；当DZT用量超过160 g/t后，对黄铁矿的抑制效果减弱。

3) DZT通过多重协同效应改善全回水浮选效果：沉淀消耗回水中游离硅酸根；生成选择性较好的油酸钙胶体；定向调控脉石矿物、黄铁矿表面润湿性；促使微细悬浮物脱稳凝聚；优化泡沫结构，降低微细粒脉石机械夹带。本机理主要基于浮选试验与溶液化学推导，后续可借助Zeta电位、红外光谱等微观表征手段进一步验证界面反应过程。

4)与硫酸调节pH值的处理方式相比，DZT直接调控矿浆界面，就地消解回水有害组分，规避硫酸带来的危化品管控、硫酸盐累积、设备腐蚀等问题。该工艺无需提前预处理尾矿回水，可实现尾矿库回水在白钨加温精选环节完全替代清水，对白钨选矿清洁生产具有实际应用价值。本研究仅完成实验室小试，后续需开展扩大及工业试验，考察水质波动条件下工艺运行稳定性。

参考文献

[1] 徐诗佟. 白钨矿与方解石、萤石常温浮选分离工艺及机理研究[D]. 赣州：江西理工大学，2025.
Xu Shitong. Study on separation process and mechanism of scheelite from calcite and fluorite by flotation at room temperature[D]. Ganzhou：Jiangxi University of Science and Technology，2025.

[2] 车文芳，候凯，闵湘川，等. 白钨矿资源开发利用现状及发展趋势[J]. 现代矿业，2025，41(3)：94-99.
Che Wenfang，Hou Kai，Min Xiangchuan，et al. Current status and development trend of scheelite resource development and utilization[J]. Modern Mining，2025，41(3)：94-99.

[3] Jing Gaogui，Wang Jianjun，Sun Wei，et al. Reuse of mine and ore washing wastewater in scheelite flotation process to save freshwater：lab to industrial scale[J]. Journal of Water Process Engineering，2023，53：103674. DOI：10.1016/j.jwpe.2023.103674.

[4] 刘红尾，许增光. 石灰法常温浮选低品位白钨矿的工艺研究[J]. 矿产综合利用，2013，34(2)：33-35，39.

Liu Hongwei, Xu Zengguang. Technical research on flotation of the low-grade scheelite at normal temperature by lime-based method[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2013, 34(2): 33-35, 39.

[5] Kang Jianhua, Chen Chen, Sun Wei, et al. A significant improvement of scheelite recovery using recycled flotation wastewater treated by hydrometallurgical waste acid[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 151: 419-426.

[6] 赵可可，戴惠新，龚志辉，等. 白钨矿浮选行为研究进展[J]. 有色金属(选矿部分), 2022(6): 155-164.
Zhao Keke, Dai Huixin, Gong Zhihui, et al. Research progress of scheelite flotation behavior[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2022(6): 155-164.

[7] 董留洋，乔丽东，申培伦，等. 微细粒白钨矿浮选工艺与药剂研究进展[J]. 有色金属(选矿部分), 2025(1): 48-55.
Dong Liuyang, Qiao Lidong, Shen Peilun, et al. Research progress of flotation technology and reagents for micro-fine scheelite[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2025(1): 48-55.

[8] Foucaud Y, Filippov L, Filippova I, et al. The challenge of tungsten skarn processing by froth flotation: a review[J]. Frontiers in Chemistry, 2020, 8: 230. DOI: 10. 3389/fchem. 2020. 00230.

[9] Sun Wenbo, Han Haisheng, Wang Ruolin, et al. Novel insights into the mechanism of lime method based on calcium dioleate and mineral surface transformation[J]. Journal of Central South University, 2023, 30(9): 2983-2992.

[10] 孙文娟，韩海生，王舰，等. 含钙矿物浮选过程中Ca-油酸胶体捕收剂的作用机理[J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(2): 1-7.
Sun Wenjuan, Han Haisheng, Wang Jian, et al. The action mechanism of Ca-oleate colloid collector during the flotation of calcium-containing minerals[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(2): 1-7.

[11] Yang Chao, Yang Lijing, Wang Zhen, et al. Revealing the synergistic mechanism of molybdenite (MoS_2) and scheelite ($CaWO_4$) during their catalytic ozonation process for degrading organic reagents in mineral processing wastewater[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2026, 729: 138863. DOI: 10. 1016/j. colsurfa. 2025. 138863.

[12] 张强，李明，王华. 复杂多金属矿浮选中机械夹带效应的控制[J]. 有色金属(选矿部分), 2024(2): 45-50.
Zhang Qiang, Li Ming, Wang Hua. Control of mechanical entrainment effect in flotation of complex polymetallic ores[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2024(2): 45-50.

[13] 陆红羽，刘润清，朱阳戈，等. 风化钨矿选矿废水回用对钨浮选影响研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2021(6): 151-160.
Lu Hongyu, Liu Runqing, Zhu Yangge, et al. Research on the influence of reuse of weathered tungsten wastewater on flotation[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2021(6): 151-160.

[14] 李洪强，宋少先，曾培，等. 浮选泡沫细粒脉石夹带与充气量的关系[J]. 金属矿山, 2016, 45(3): 67-72.
Li Hongqiang, Song Shaoxian, Zeng Pei, et al. Relationship between froth entrainment entrained by fine gangues and aeration rate[J]. Metal Mine, 2016, 45(3): 67-72.

[15] Kang Jianhua, Fan Ruiying, Hu Yuehua, et al. Silicate removal from recycled wastewater for the improvement of scheelite flotation performance[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 195: 280-288.

[16] 徐凤平，田建利，王晴红，等. 新田岭白钨矿选矿废水处理及回用试验研究[J]. 矿冶工程, 2020, 40(5): 45-47.
Xu Fengping, Tian Jianli, Wang Qinghong, et al. Treatment and reuse of wastewater from the flotation of xintianling scheelite[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020, 40(5): 45-47.

[17] 胡岳华，王淀佐. 浮选溶液化学[M]. 长沙：中南大学出版社, 2022.
Hu Yuehua, Wang Dianzuo. Solution chemistry of flotation[M]. Changsha: Central South University Press, 2022.

[18] 顾帼华，姜涛，朱德庆. 硫化矿浮选理论与实践[M]. 北京：冶金工业出版社, 2023.
Gu Guohua, Jiang Tao, Zhu Deqing. Theory and practice of sulfide ore flotation[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2023.

[19] 潘高产. 含钙矿物同步富集中高效减水剂抑制作用机理及应用研究[D]. 长沙：中南大学, 2022.
Pan Gaochan. Research on the depression mechanism and applications of superplasticizers in the simultaneous enrichment of calcium-bearing minerals[D]. Changsha: Central South University, 2022.

[20] 孙伟，王靖波，韩海生，等. 浮选药剂界面组装技术及其研究进展[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(3): 544-553.
Sun Wei, Wang Jingbo, Han Haisheng, et al. Advances in flotation reagent interfacial assembly technology[J]. Journal of China University of Mining & Technology,

2022,51(3):544-553.

[21] 孙文娟,韩海生,胡岳华,等. 金属离子配位调控分子组装浮选理论及其研究进展[J]. 中国有色金属学报,2020,30(4):927-941.
Sun Wenjuan, Han Haisheng, Hu Yuehua, et al. Flotation theory and research progress of metal ion coordination regulation molecule assembly[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(4): 927-941.

[22] 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.

[23] Xu Longhua, Tian Jia, Wu Houqin, et al. The flotation and adsorption of mixed collectors on oxide and silicate minerals[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2017, 250: 1-14.

[24] Han Haisheng, Hu Yuehua, Sun Wei, et al. Fatty acid flotation versus BHA flotation of tungsten minerals and their performance in flotation practice[J]. International Journal of Mineral Processing, 2017, 159: 22-29.

(本文编辑 刘水红)