

doi: 10.3969/j.issn.2095-1744.2020.03.015

新型连续型离心选矿机回收钨细泥的工艺研究

周贺鹏^{1,2}, 张永兵¹, 周晓文^{1,2}, 雷梅芬³, 耿亮¹, 杨志兆¹

- (1. 江西理工大学资源与环境工程学院, 江西赣州 341000;
2. 江西省矿业工程重点实验室, 江西赣州 341000;
3. 赣州金环磁选设备有限公司, 江西赣州 341000)

摘要:江西某钨选矿厂所属钨细泥成分复杂,生产的钨精矿品位较低,无法直接利用。针对该钨细泥粒度微细, -0.038 mm 粒级 WO_3 含量高达 61.07%, 粒度分布较宽, 黑白钨共生的特点, 研发了 LL 立式连续型离心选矿机, 开发了“预先浮选脱硫—浮选预富集脱除粗粒脉石—立式连续型离心选矿机精选分离”浮选重选联合新工艺, 并获得了 WO_3 品位 31.64%、回收率 84.67% 的钨精矿, 实现了钨细泥的高效回收。自主研发的新型连续型离心选矿机对钨细泥具有良好的分选效果, 可实现与浮选作业连续组网工作, 有利于生产应用。

关键词:钨细泥; 离心选矿机; 浮重联合流程; 新工艺

中图分类号:TD922; TD952

文献标志码:A

文章编号:2095-1744(2020)03-0094-07

Study on the Technology of Recovery Tungsten Slime by a New Continuous Centrifugal Concentrator

ZHOU Hepeng^{1,2}, ZHANG Yongbing¹, ZHOU Xiaowen^{1,2}, LEI Meifen³,
GENG Liang¹, YANG Zhizhao¹

- (1. Faculty of Resource and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;
2. Jiangxi Key Laboratory of Mining Engineering, Ganzhou 341000, China;
3. SLon Magnetic Separator Ltd., Ganzhou 341000, China)

Abstract: The composition of the tungsten slime from a tungsten concentrator in Jiangxi Province is complex, and the produced tungsten concentrate is of low grade and cannot be used directly. In view of the characteristics of fine particle size, 61.07% of WO_3 present in the -0.038 mm fraction, wide particle size distribution and associated wolframite and scheelite for the tungsten slime, a new FLOTATION-GRAVITY combined process of pre-flotation of sulfide minerals- WO_3 bearing minerals slime flotation to remove gangue-vertical continuous centrifuge concentrator cleaning was developed, and tungsten concentrates with WO_3 grade of 31.64% at 84.67% WO_3 recovery were obtained. The independent developed LL vertical continuous centrifugal concentrator has good separation effect on tungsten slime and works well combined with flotation circuit.

Key words: tungsten slime; centrifugal concentrator; flotation-gravity combined process; new process

收稿日期: 2019-04-13

基金项目: 赣州市科技重点研发计划项目

Foud: Supported by The Key R&D Program of Ganzhou, China (Sciences and Technologies)

作者简介: 周贺鹏(1985—), 男, 副教授, 博士, 主要从事微细粒矿物分选理论与工艺等方面研究。

引用格式: 周贺鹏, 张永兵, 周晓文, 等. 新型连续型离心选矿机回收钨细泥的工艺研究[J]. 有色金属工程, 2020, 10(3): 94-100.

ZHOU Hepeng, ZHANG Yongbing, ZHOU Xiaowen, et al. Study on new technology for improving the quality of a complex tungsten slime concentrate in Jiangxi Province[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(3): 94-100.

钨因其熔点高、密度大、导热导电性好、化学性质稳定等性质,在电子、硬质合金、国防军工等领域广泛应用^[1],钨资源的保护与高效开发战略意义重大。我国钨资源储量丰富,主要以黑钨矿、白钨矿等矿物形式赋存,但钨矿石性脆、嵌布粒度细,钨矿山每年产生大量钨细泥^[2],因矿物组成复杂、粒度微细、矿物表面不饱和键较多等原因^[3]一直难以高效利用而大量流失。

为实现其资源化利用,国内外学者开展大量研究并提出“聚团浮选”、“絮凝浮选”、“微泡浮选”等理论^[4],开发“重选—浮选—磁选”等联合选矿工艺^[5],发明“离心选矿机”、“悬振锥面选矿机”等设备^[6],使微细粒钨资源回收现状得到一定改善。

江西某钨选矿厂所属钨细泥成分复杂、粒度微细,采用栉浮—浮选—细泥摇床工艺获得的钨精矿 WO_3 含量仅为 2.5%~8.0%,远低于冶炼要求,且大量钨资源以微细粒形态流失,因此借鉴前人研究成果,本文进行钨细泥高效分选新工艺、新设备研究,以强化微细粒钨资源与脉石矿物的分离、回收。

1 试样、设备及试验方案

1.1 试样性质

钨细泥试样来自江西安福大宇钨矿选矿厂,含 WO_3 0.53%,试样中金属矿物主要为黑钨矿、白钨矿,含有少量黄铜矿、辉铋矿、黄铁矿等金属硫化矿,脉石矿物主要为石英、方解石、长石、萤石、云母、绿帘石及绿泥石等,各矿物粒度微细,呈“中-细”形式分布。试样化学成分见表 1,钨矿物物相组成见表 2,粒度组成及金属分布见表 3。

表 1 钨细泥试样原矿多元素分析结果

Table 1 Multi-component analysis results of

tungsten slime samples

/%

Components	WO_3	Cu	Bi	Mo	Sn	S
Content	0.53	0.14	0.074	0.024	0.07	0.47
Components	Fe	Pb	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO
Content	3.87	0.013	80.32	2.83	7.31	1.22

表 2 钨矿物物相分析结果

Table 2 Phase analysis of tungsten minerals

/%

Phase	Wolframite	Scheelite	Tungstite	Total
Content	3.84	0.96	0.09	4.89
Distribution	78.53	19.63	1.84	100.0

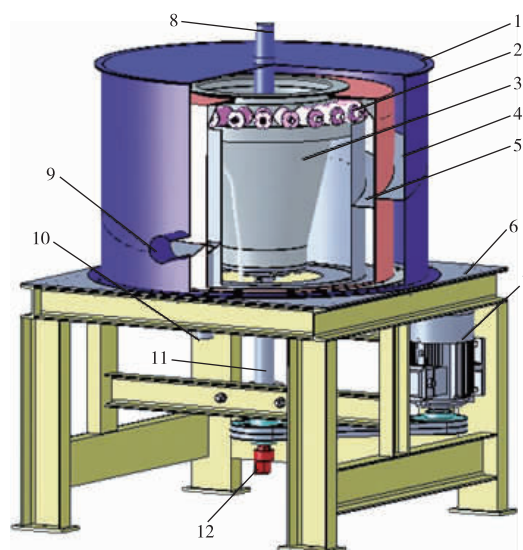
表 3 试样粒度及金属分布

Table 3 Particle size and metal distribution of the sample

Size/ μm	Yield/%		WO_3 grade/%	Distribution/%	
	Individual	Accumulated		Individual	Accumulated
+74	17.78	17.78	0.27	9.06	9.06
-74+45	13.31	31.09	0.46	11.55	20.61
-45+38	13.3	44.39	0.73	18.32	38.93
-38+19	18.64	63.03	0.85	29.89	68.82
-19+10	20.71	83.74	0.49	19.15	87.97
-10	16.26	100.0	0.39	12.03	100.0
Total	100.0		0.53	100.0	

1.2 试验设备

试验设备采用 XFG、XFD 型系列浮选机、LL-400 实验室型立式连续型离心选矿机(自主研发,结构见图 1)。



1-mechanical case;2-pneumatic pinch valve;3-drum;
4-tailings chute;5-concentrate chute;6-bracket;
7-motor;8-feeding pipe;9-tailings discharge port;
10-concentrate discharge port;11-rotating shaft;
12-rotating connection

图 1 离心选矿机模型

Fig. 1 Centrifugal concentrator model

1.3 试验方案

近年来针对不同性质钨细泥开发的如“高梯度预先富集—浮选回收”等联合工艺取得了较好的效果^[5]。针对该黑白钨共生钨细泥,高梯度磁选富集比虽高但不宜采用;该钨细泥粒度微细,粒级较宽,采用离心机预富集,难以兼顾富集比与 WO_3 回收率;因细泥吸附特性强烈、彼此互相罩盖团聚,各矿物表面性质差异降低并大量消耗药剂^[7],采用浮选工

艺,精选难以高效分离。因此确定采用“预先浮选脱硫—浮选预富集脱除粗粒脉石—立式连续型离心选矿机精选分离”工艺。

2 试验结果与讨论

2.1 钨细泥浮选脱硫试验

该钨细泥有金属硫化矿伴生,若不预先脱除,则影响钨精矿质量。基于硫化矿疏水性好,且该类矿物捕收剂烃链短、对钨矿物捕收能力弱,因此试验采用异戊基黄药,以“一次粗选一次精选一次扫选”的闭路流程脱硫并获得了较好效果,Cu、Mo、Bi、S脱除率均达80%以上, WO_3 仅损失2.19%。

2.2 钨细泥浮选条件试验

2.2.1 捕收剂种类试验

大量实践证明—COOH、—AsO(OH)₂、—CONHOH等官能团可与钨矿表面暴露的Fe、Mn、Ca发生强烈的化学吸附^[1],该类药剂对钨矿物捕收能力较强。为确定最佳捕收剂种类,试验固定水玻璃用量1250 g/t、氟硅酸钠用量250 g/t、硝酸铅用量400 g/t、捕收剂用量600 g/t,考察了捕收剂种类对浮选指标的影响,试验结果见表4。

表4 捕收剂种类试验结果

Table 4 Results of collector type tests /%			
Collector Type	Yield	WO_3 grade	WO_3 recovery
GYB	5.93	6.23	71.21
Oxidized paraffin soap	9.74	4.34	82.84
Benzyl arsine acid	5.30	5.78	55.72
Benzohydroxamic acid	5.07	7.12	66.90
Oxyparaffin soap + Benzohydroxamic acid(1:1)	8.14	5.75	88.25
Oxyparaffin soap + GYB(1:1)	8.68	5.15	87.62

由表4可见,因苯甲羟肟酸与黑钨矿表面Mn、Fe生成五元环金属螯合物^[8],而石英等脉石表面无该药剂吸附位点,其具有较高选择性;羧酸根与钨矿表面锰、铁、钙离子吸附强烈,与方解石、萤石等矿物表面钙离子亦会络合^[9],因此其捕收能力较强而选择性较差。羧酸与羟肟酸混合捕收剂GYB精矿 WO_3 品位与回收率均较好,可见二者协同效应较好,与组合捕收剂试验结果一致,因此确定最佳捕收剂种类为“氧化石蜡皂+苯甲羟肟酸”组合。

2.2.2 捕收剂用量试验

捕收剂浓度过高,则脉石矿物大量疏水上浮,影响矿物分离,用量较低则钨矿物(特别是晶面不规则的颗粒)难以吸附足够的药剂,影响资源回收。为此考察了捕收剂用量对钨细泥浮选指标的影响,试验

结果见图2。

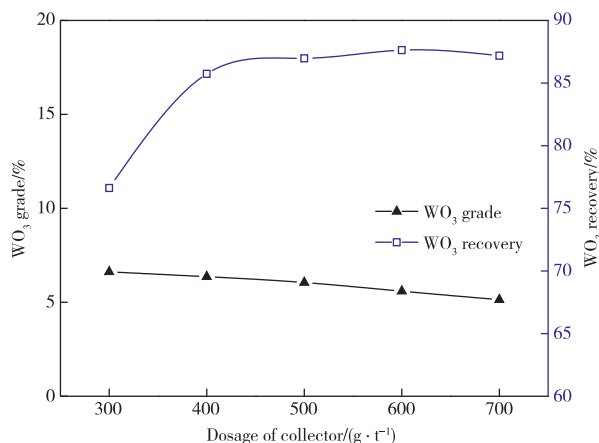


图2 捕收剂用量试验结果

Fig. 2 Results of collector dosage tests

由图2可见,随捕收剂用量升高,脉石矿物大量药剂上浮,分离效果降低;钨矿物药剂吸附量增加,回收率快速上升,当其表面吸附接近饱和时, WO_3 回收率趋于平稳,因此确定捕收剂最佳用量为500 g/t。

2.2.3 捕收剂配比试验

捕收剂种类试验结果表明,苯甲羟肟酸、氧化石蜡皂混合使用协同效果良好,钨精矿品位与回收率均有所提高,且配比不同,效果各异。为此考察捕收剂配比对浮选指标的影响,试验结果见图3。

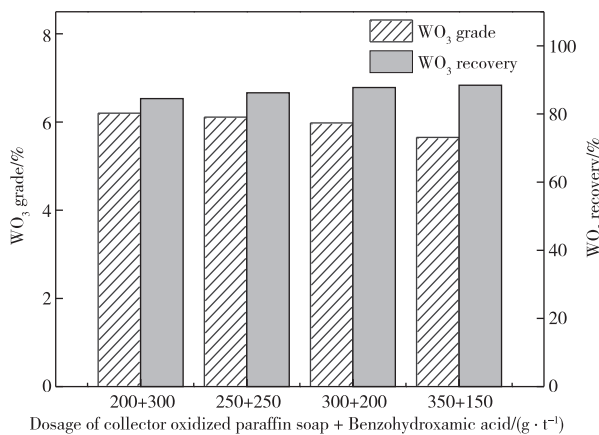


图3 捕收剂配比试验结果

Fig. 3 Results of collector ratio tests

由图3可见,随苯甲羟肟酸比例降低、氧化石蜡皂用量增加,组合捕收剂选择性降低、捕收能力增强,由试验结果确定苯甲羟肟酸与氧化石蜡皂比例为3:2为宜。

2.2.4 抑制剂用量试验

钨矿浮选常用的水玻璃在矿浆中的电离组分

HSiO_3^- 、 H_2SiO_3 及胶态 SiO_2 易吸附于成分相似的硅酸盐矿物表面,使之亲水、颗粒间静电斥力增强^[10],是良好的抑制剂与分散剂。氟硅酸钠因优先解吸脉石矿物表面铝、钙、镁金属油酸盐,而对铁、锰等金属油酸盐影响较小^[11],选择性抑制效果更强。针对该钨细泥粒度微细、脉石含量高特点,开展了“水玻璃+氟硅酸钠”用量的二因素三水平正交试验,试验安排见表5,试验结果见表6。

表5 二因素三水平正交试验各水平取值
Table 5 Values of each level in two-factor and three-level orthogonal test

Factor	B ₁ :Low Level	B ₂ :Medium Level	B ₃ :High Level
A ₁ :Dosage of Water glass/(g·t ⁻¹)	1 000	1 250	1 500
A ₂ :Dosage of sodium fluosilicate/(g·t ⁻¹)	250	500	750

表6 二因素三水平正交试验结果

Table 6 Two-factor and three-level orthogonal test results

Test serial number	Yeild	WO ₃ grade/%	WO ₃ recovery/%
A ₁ B ₁	8.35	5.57	88.28
A ₁ B ₂	7.47	6.09	86.79
A ₁ B ₃	6.75	6.43	82.19
A ₂ B ₁	7.89	5.90	87.45
A ₂ B ₂	7.33	6.15	85.59
A ₂ B ₃	7.15	6.21	83.76
A ₃ B ₁	7.80	5.81	85.89
A ₃ B ₂	6.82	6.40	83.13
A ₃ B ₃	5.93	7.02	78.16

由表6可见,随因素A₁、A₂用量水平的提高,钨精矿品位均有所提升,回收率有所降低。因氟硅酸钠选择性抑制效果较强,同时其电离的 $[\text{SiF}_6]^{2-}$ 抑制作用更强,因素A₂用量水平对WO₃品位的影响更明显,综合考虑“水玻璃+氟硅酸钠”用量1 000+500 g/t最佳。

2.3 浮选粗精矿离心精选试验

因浮选粗精矿细泥含量高等原因,采用浮选进行精选作业难以获得高品位钨精矿。鉴于粗选作业使钨矿物与粗粒级脉石获得了较好的分离,粗精矿产品主要为钨矿物及微细粒脉石矿物,因此采用离心重选进行精选作业。

2.3.1 转筒锥角试验

自主开发的LL系列离心选矿机^[12],通过立置转筒、内置精矿富集槽、气动夹管阀控制精矿排矿等系列措施实现了高效、连续生产。传统离心选矿机为高效分选黄金等比重差异大、粒度较粗矿石设置

的大锥角,难以适应粒度微细、比重差异略小矿物^[13],LL型设计系列不同锥角离心转筒以提高分离效率。试验固定转筒转速500 r/min、给矿浓度10%、给矿体积速率25 L/min、富集时间15 s,考察转筒锥角对分离效果影响,试验结果见图4。

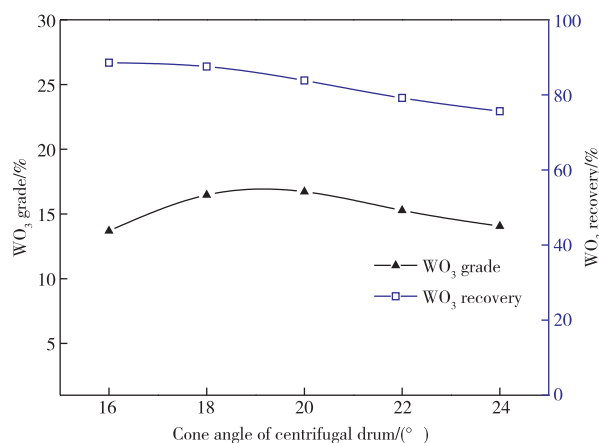


图4 离心转筒锥角试验结果

Fig. 4 Cone angle test results of centrifugal drum

由图4可见,离心转筒锥角较大时,矿粒所受离心合力急剧降低,微细粒矿物难以有效分层富集,同时切向薄流膜速度增大,大量矿物被快速旋出,致使富集比与回收率均较低^[14],因此小转筒锥角更适合钨细泥分选。但转筒锥角过小,切向力小于重力,难以形成切向薄流膜,各矿物干涉沉降,形成紧实的沉积层,难以分离。因此最佳转筒锥角为18°。

2.3.2 转筒转速试验

矿物在立式离心机中的沉降分层由离心力、重力、离心力场浮力、阻力及附加质量力等影响^[15],而转筒转速直接影响离心力、离心力场浮力、阻力及附加质量力大小,进而影响矿物分层,为此考察了转筒转速对分离效果的影响,试验结果见图5。

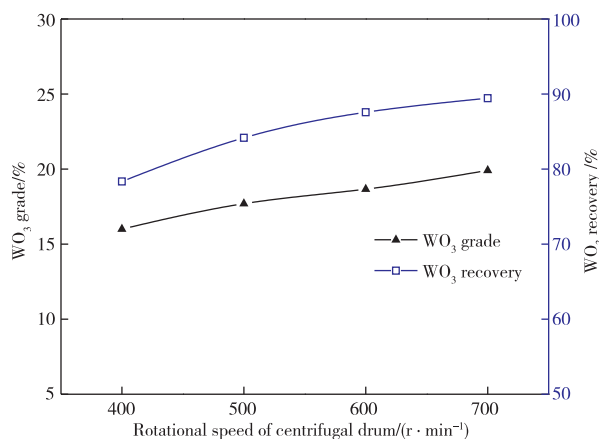


图5 离心转筒转速试验结果

Fig. 5 Test results of centrifugal drum speed

由图5可见,随离心转筒转速的提高,矿物受离心场离心力增加,同时粗粒脉石受离心场浮力增加,矿物分层效果改善,钨精矿富集比及回收率均显著提高,因此转速为700 r/min最佳。

2.3.3 给矿浓度试验

给矿浓度影响着矿物颗粒所受重力场浮力、离心力场浮力、阻力大小,转速一定时,浓度越高,则浮力、干涉影响越大,因此考察了给矿浓度对分离效果的影响,试验结果见图6。

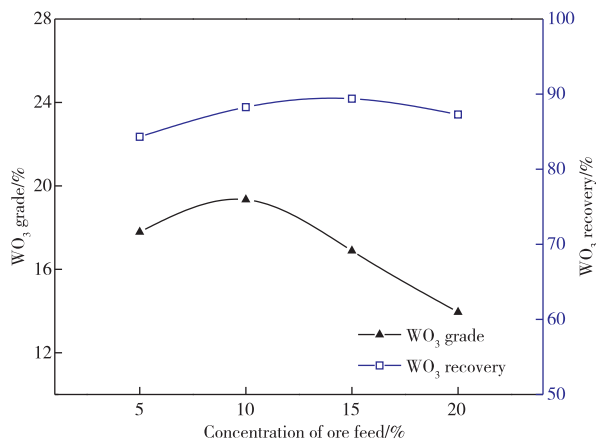


图6 给矿浓度试验结果

Fig. 6 Test results of feed concentration

由图6可见,随给矿浓度的增加,矿物颗粒离心力场下合力降低,但钨矿物与脉石矿物沉降加速度差异先增加后降低,因此富集比先升高后降低,当给矿浓度为10%时,效果最佳。

2.3.4 给矿体积速率试验

给矿速率影响切向薄流膜厚度,进而影响颗粒沉降、富集时间、分层效果,为此考察了给矿体积速率对分离效果的影响,试验结果见图7。

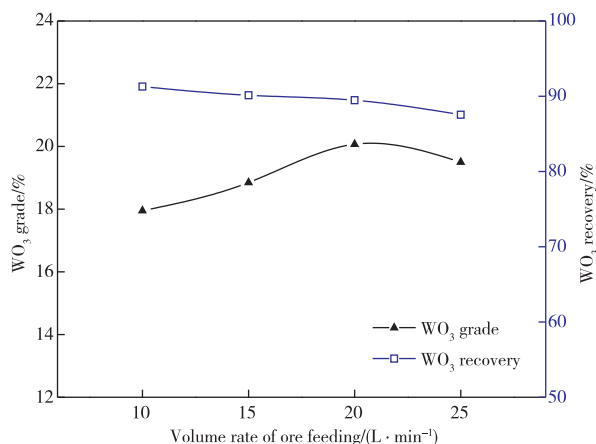


图7 给矿体积速率试验结果

Fig. 7 Results of feed volume rate tests for

由图7可见,因给矿体积速率提高,切向薄流膜厚度增加,扩大了钨矿物与脉石矿物沉降速度差异,提高了钨精矿的富集比,但矿物沉降时间延长,部分微细粒钨矿物未完成沉降分层即被旋出,WO₃回收率降低,因此给矿体积速率20 L/min为宜。

2.3.5 富集时间试验

LL型离心选矿机精矿排矿由电磁换向阀控制气动夹管阀完成^[14-15],富集时间可人工设置。因离心转筒精矿富集槽容量有限,若富集时间过长,易使槽内过满且大量微细粒钨矿物随切向薄流膜旋出,为此考察了富集时间对分离效果的影响,试验结果见图8。

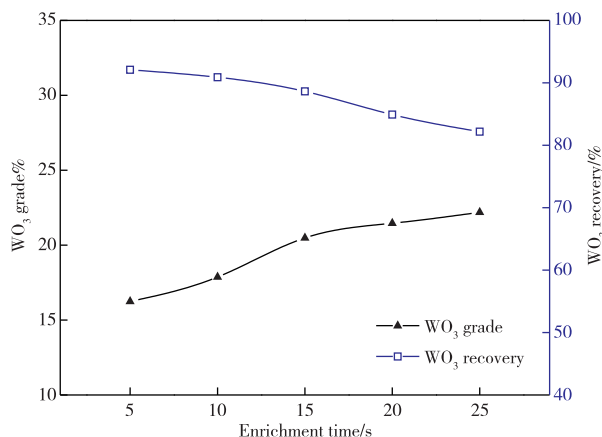


图8 富集时间试验结果

Fig. 8 Results of enrichment time tests

由图8可见,随富集时间的延长,部分微细粒钨矿物及脉石随切向薄流膜旋出,钨精矿富集比逐渐上升,WO₃回收率逐渐降低,当富集时间为15 s时,指标最佳。

2.4 浮选粗精矿离心精选Ⅱ条件试验

由钨细泥浮选条件试验可见,LL型立式离心选矿机分选效果较好,但钨精矿品位仍略低,因此开展了精选Ⅱ条件试验。结果表明,在18°锥角离心转筒转速800 r/min、给矿浓度5%、给矿体积速率25 L/min、富集时间20 s的条件下,可获得含WO₃ 36.45%、作业回收率85.40%、富集比为1.78的良好指标。

2.5 钨细泥分选闭路流程试验

基于LL型离心选矿机连续工作,可较好的并入浮选作业流程,提高生产效率,因此离心重选作业中矿可顺序返回,闭路试验流程见图9,试验结果见表7。

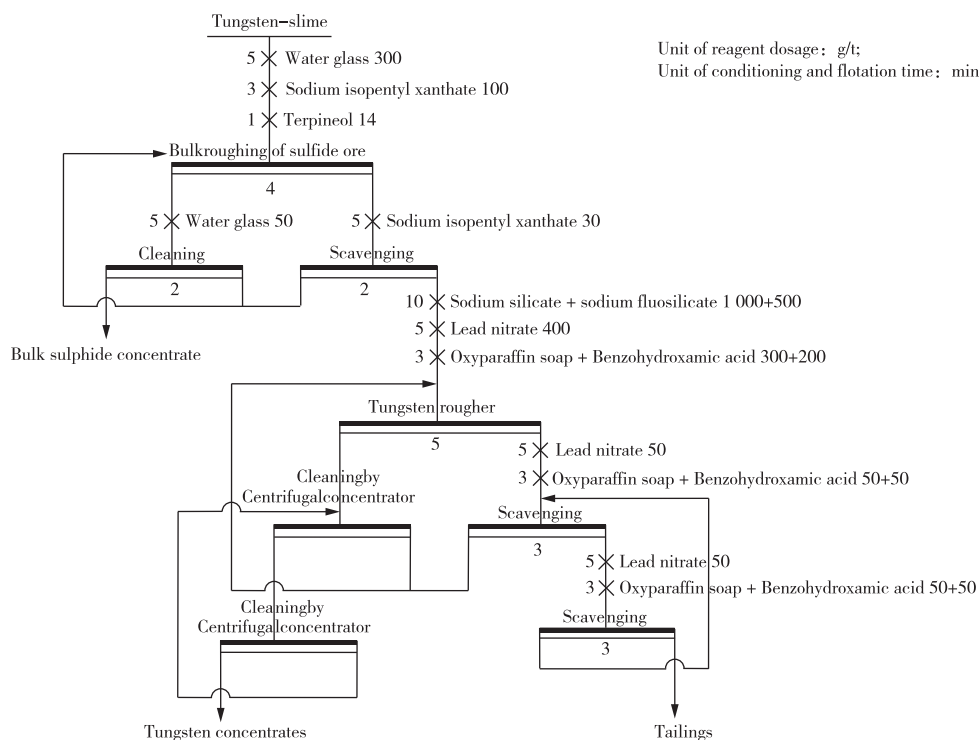


图 9 钨细泥分选闭路试验流程

Fig. 9 Closed-circuit test flowsheet for tungsten slime

表 7 钨细泥分选闭路流程试验结果

Table 7 Results of closed-circuit test for tungsten slime

Products	Yeild	Grade				Recovery					
		WO ₃	Cu	Mo	Bi	S	WO ₃	Cu	Mo	Bi	S
Bulk sulfide concentrate	2.07	0.56	5.88	3.22	0.86	18.61	2.19	86.92	91.32	84.32	81.97
Tungsten concentrates	1.42	31.64	0.105	0.131	0.032	0.374	84.67	1.06	2.54	2.13	1.13
Tailings	96.51	0.072	0.017	0.005	0.003	0.082	13.14	12.02	6.14	13.55	16.90
Tungsten slime	100.0	0.53	0.14	0.073	0.021	0.47	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

由表 7 可见,针对该钨细泥,LL 立式连续型选矿机分选效果良好,与浮选作业组网工作稳定,以“预先浮选脱硫—浮选预富集脱除粗粒脉石—立式连续型离心选矿机精选分离”新工艺,在钨细泥含 WO_3 0.53% 的情况下,获得了 WO_3 品位 31.64%、回收率 84.67%、金属硫化矿杂质含量较低的钨精矿,实现了钨细泥资源化利用。

3 结论

1) 该钨细泥成分复杂、粒度微细、粒度分布较宽、 -0.038 mm WO_3 含量高达 61.07% , 该黑白钨共生钨细泥采用传统“重、磁、浮”联合工艺难以获得理想的选别指标, 现场采用传统“拾浮-浮选-细泥摇床”工艺生产的钨精矿质量较差, 无法直接利用。

2)自主研发的 LL 型立式连续型离心选矿机针对该钨细泥可获得良好的分选指标,与浮选机组网工作效果较佳,可广泛应用于该类钨矿山。

3)开发的“预先浮选脱硫—浮选预富集脱除粗粒脉石—立式连续型离心选矿机精选分离”新工艺分选指标理想,在钨细泥含 WO_3 0.53%的情况下,可获得 WO_3 品位 31.64%、回收率 84.67%的钨精矿,实现了钨细泥资源化利用。

参考文献:

- [1] 罗礼英. 黑钨矿螯合类捕收剂的浮选性能评价[D]. 赣州: 江西理工大学, 2013.
LUO Liying. Flotation performance evaluation of chelating collectors for wolframite[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Technology, 2013.
- [2] 王明燕, 贾木欣, 肖仪武, 等. 中国钨矿资源现状及可持续发展对策[J]. 有色金属工程, 2014, 4(2): 76-80.
WANG Mingyan, JIA Muxin, XIAO Yiwu, et al. Present situation of tungsten resources in China and countermeasures for sustainable development[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2014, 4(2): 76-80.

- [3] MIETTINEN T, ROLSTON J, FORNASIERO D. The limits of fine particle flotation[J]. *Minerals Engineering*, 2010, 23(5): 420-437.
- [4] SADOWSKI Z, POLOWCZYK I. Agglomerate flotation of fine oxide particles[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2004, 74(1-4): 85-90.
- [5] 黄万抚, 张小冬. 钨矿细泥选矿工艺发展[J]. *有色金属科学与工程*, 2013(5): 54-57.
HUANG Wanfu, ZHANG Xiaodong. Development of mineral processing technologies of fine tungsten slime[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2013(5): 54-57.
- [6] 罗仙平, 闵世珍, 缪建成. 离心选矿装备技术研究进展[J]. *矿山机械*, 2013, 41(9): 1-8.
LUO Xianping, MIN Shizhen, MIAO Jiancheng. Study on progress in centrifugal concentration equipment and technology[J]. *Mining & Processing Equipment*, 2013, 41(9): 1-8.
- [7] WANG B, PENG Y, VINK S. Diagnosis of the surface chemistry effects on fine coal flotation using saline water[J]. *Energy & Fuels*, 2013, 27(8): 4869-4874.
- [8] 高玉德, 邱显扬, 冯其明, 等. 羟肟酸类捕收剂性质及浮选钨矿物特性[J]. *中国钨业*, 2012, 27(2): 10-14.
GAO Yude, QIU Xianyang, FENG Qiming, et al. Property and surface chemistry of hydroxamic acids using as collectors in tungsten minerals flotation[J]. *China Tungsten Industry*, 2012, 27(2): 10-14.
- [9] 李天光, 邱显扬, 周晓彤. 白钨矿浮选药剂研究现状[J]. *材料研究与应用*, 2018, 12(1): 8-12.
LI Tianguang, QIU Xianyang, ZHOU Xiaotong. Research status of scheelite flotation reagents [J]. *Material Research and Application*, 2018, 12(1): 8-12.
- [10] 印万忠, 吕振福, 韩跃新, 等. 改性水玻璃在萤石矿浮选中的应用及抑制机理[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2009, 30(2): 287-290.
YIN Wanzhong, LYU Zhenfu, HAN Yuexin, et al. Application of NSOH in fluorite ore flotation and its depressing mechanism[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2009, 30(2): 287-290.
- [11] BERGER G S, BULATOVA E V. Mechanism of the activating and depressing effects of sodium fluosilicate in the flotation of minerals by oleate soap[J]. *Soviet Mining*, 1969, 5(4): 452-456.
- [12] 罗仙平, 周贺鹏, 闵世珍, 等. 一种离心选矿装置: CN201420673599. 0[P]. 2015-05-13.
LUO Xianping, ZHOU Hepeng, MIN Shizhen, et al. A centrifugal beneficiation device: CN201420673599. 0[P]. 2015-05-13.
- [13] 罗仙平, 周贺鹏, 闵世珍, 等. 一种离心选矿装置及其选矿方法: CN201410635494. 0[P]. 2015-03-25.
LUO Xianping, ZHOU Hepeng, MIN Shizhen, et al. A centrifugal beneficiation device and its beneficiation method: CN201410635494. 0[P]. 2015-03-25.
- [14] 王 纯. 立式离心选矿机流场和离心锥动力学研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2014.
WANG Chun. Research on dynamics of flow field and centrifugal cone of verticle centrifugal concentrator[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Technology, 2014.
- [15] 肖洪力. 基于 CFD-DEM 的立式离心分选参数匹配与实验研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2018.
XIAO Hongli. Parameter matching and experimental study on vertical centrifugal separation based on CFD-DEM[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Technology, 2018.