

doi:10.3969/j.issn.1671-9492.2024.04.010

# 江西某微细粒选钨尾砂回收铜资源试验研究

余策恩<sup>1</sup>, 胡海祥<sup>2</sup>, 李瑞光<sup>1</sup>, 杨博皓<sup>1</sup>

(1. 江西理工大学 资源与环境工程学院, 江西 赣州 341000;

2. 赣南科技学院 科技处, 江西 赣州 341000)

**摘要:** 钨矿开采导致选钨尾砂长期堆存会产生社会安全和生态环境问题, 开展选钨尾砂资源回收利用具有重要现实意义。江西某钨选厂开采钨矿预计产生选钨尾砂超 9 万 t, 对选厂现场尾砂和堆存尾砂采用一粗一扫两精浮选流程回收铜资源, 针对选钨尾砂, 进行了酯类药剂用量、捕收剂种类、捕收剂用量等条件试验, 在此基础上进行了闭路试验。结果表明, 现场尾砂可获得铜品位为 21.145%、回收率为 65.970% 的铜精矿, 堆存尾砂仅获得铜品位为 12.512%、回收率为 12.099% 的铜精矿; 以现场尾砂作为载体介质, 对堆存尾砂进行载体浮选试验研究, 最终获得铜品位 13.520%、回收率 49.123% 的铜精矿。该工艺流程简单可行, 选矿指标良好, 可为选厂解决选钨尾砂长期堆存的问题, 提高选厂经济效益。

**关键词:** 选钨尾砂; 铜浮选; 载体浮选

中图分类号: TD952

文献标志码: A

文章编号: 1671-9492(2024)04-0091-07

## Experimental Study on Recovery of Copper Resource from Micro-fine Particle Tailings in Jiangxi

YU Ce'en<sup>1</sup>, HU Haixiang<sup>2</sup>, LI Ruiguang<sup>1</sup>, YANG Bohao<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China;

2. Department of Science and Technology, Gannan University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

**Abstract:** Long term storage of tungsten tailings can cause social safety and ecological environmental issues, and the utilization of tungsten tailings is of great practical significance. A tungsten concentrator in Jiangxi province is expected to produce over 90 000 tons of tungsten tailings during the mining process. The on-site tailings and stockpiled tailings of the concentrator are processed through a flotation procedure of one roughing, two cleanings, and one scavenging to recover copper resources. For the tungsten tailings, ester dosage, collector type, collector dosage and other conditions have been tested, and on this basis, locked-cycle tests were carried out. The results showed that on-site tailings can obtain copper concentrate with copper grade of 21.145% and copper recovery of 65.970% can be obtained. However, from the stockpiled tailings one can only obtain a copper concentrate with copper grade of 12.512% and copper recovery of 12.099%. Then, carrier flotation experiments were conducted on the stacked tailings using the on-site tailings as the carrier medium, and the results showed that a copper concentrate with copper grade of 13.520% and copper recovery of 49.123% can be obtained. This process flow is simple and feasible, with good beneficiation indicators, which can solve the problem of long-term storage of tungsten tailings for beneficiation plants and improve their economic benefits.

**Key words:** tungsten tailings; copper flotation; carrier flotation

收稿日期: 2023-04-21

基金项目: 江西省自然科学基金资助项目(20202BAB204014), 赣州市重点研发计划项目(赣市科发[2019]60号)

作者简介: 余策恩(2000—), 男, 江西九江人, 硕士研究生, 主要从事矿物加工理论与工艺研究。

通信作者: 胡海祥(1979—), 男, 江西乐平人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事磨矿分级理论与装备、矿物加工与岩矿测试等研究。

钨是一种高密度、高熔点的稀有金属,广泛应用于冶金、化工、机械、能源、医药等领域,是我国重要的战略资源之一<sup>[1-3]</sup>。随着经济发展,钨矿资源需求量逐年递增,因此需要大量开采钨矿。开采钨矿必然会产生大量选钨尾砂,而尾砂长期堆存不仅会影响选厂的可持续发展,而且会破坏区域生态环境,造成巨大的生态环境问题<sup>[4-5]</sup>,因此,对选钨尾砂中的有价元素进行回收利用具有深远的现实意义。

江西某钨选厂采用重选工艺选别原矿,破碎磨矿程度较大,矿石粒度微细,导致大量铜资源废弃在选钨尾砂中,经取样查明选钨尾砂中 Cu 品位达到 0.12%。本文针对选钨尾砂回收铜资源进行了详细的可选性试验研究,以期解决该选厂选钨尾砂长期堆存的问题,同时提高资源利用率,对该类选钨尾砂资源综合回收利用具有借鉴意义。

## 1 矿石性质

试验矿样为江西某钨选厂经重选工艺(跳汰—摇床—毛毯等工序)选别黑钨矿后产生的尾砂。选钨尾砂包括现场尾砂和堆存尾砂两种,其中现场尾砂是指经重选后立即干排出的尾砂;堆存尾砂指在尾矿库长期堆存的尾砂。现场尾砂化学组成分析结果见表 1,堆存尾砂化学元素分析结果见表 2,现场尾砂矿物组成及含量分析结果见表 3。工艺矿物学结果表明,选钨尾砂中主要金属矿物为黄铜矿、白钨矿、黑钨矿、辉钼矿,非金属矿物主要为石英、云母、绿泥石、长石等。选钨尾砂中可综合回收的有价矿物为黄铜矿,现场尾砂中铜主要以硫化铜形式存在,堆存尾砂中铜主要以氧化铜形式存在。

表 1 现场尾砂化学组成分析结果

Table 1 Results of chemical composition analysis of the on-site tailings

/%

组分	Cu	WO <sub>3</sub>	Mo	Zn	SiO <sub>2</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O
含量	0.120	0.350	0.027	0.035	64.84	2.620	3.510
组分	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Fe	MnO	Pb	Bi	S
含量	0.590	0.500	5.270	0.160	0.003	0.047	0.380
组分	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CO <sub>2</sub>	F	H <sub>2</sub> O	
含量	2.620	13.860	0.100	0.560	1.050	2.530	

表 2 堆存尾砂化学元素分析结果

Table 2 Results of chemical element of the stockpiled tailings

/%

组分	Cu	WO <sub>3</sub>	Al	Zn	SiO <sub>2</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O
含量	0.210	0.320	5.000	0.050	63.240	2.120	3.110
组分	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Fe	MnO	Pb	Bi	S
含量	0.880	0.500	2.990	0.160	0.005	0.010	0.270

表 3 现场尾砂矿物组成及含量分析结果

Table 3 Results of mineral composition and content of the on-site tailings

/%

矿物名称	黄铜矿	斑铜矿	白钨矿	黑钨矿	闪锌矿	辉钼矿	黄铁矿
含量	0.592	0.048	0.122	0.337	0.066	0.045	0.121
矿物名称	磁黄铁矿	石英	长石	云母	绿泥石	萤石	其他
含量	0.110	42.093	8.069	32.24	8.195	1.598	6.364

## 2 选矿试验

### 2.1 现场尾砂浮铜试验

现场尾砂浮铜采用一粗一扫两精作业,试验流程见图 1。

#### 2.1.1 粗选条件试验

##### 2.1.1.1 酯类药剂 Z-200 用量试验

固定黄药类捕收剂异戊基黄药用量为 25.00 g/t,起泡剂 MIBC 用量为 20.00 g/t,进行了酯类药剂 Z-200 用量试验,条件试验流程见图 2,试验结果

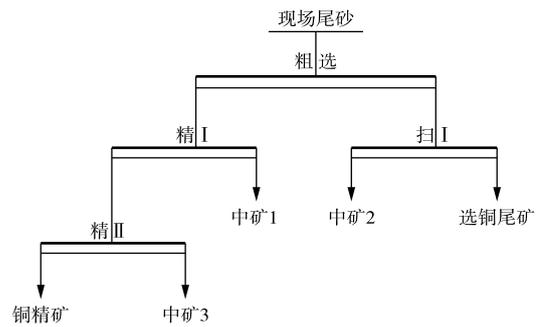


图 1 浮铜试验流程

Fig. 1 Flowsheet of copper flotation tests

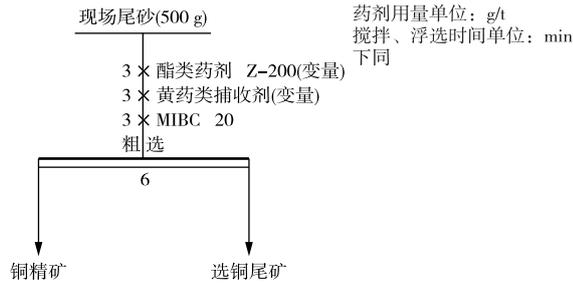


图2 条件试验流程

Fig. 2 Flowsheet of conditional tests

图3。由图3可知,当Z-200用量逐渐增加时,铜品位逐渐下降,铜回收率逐渐增加;当Z-200用量为25.00 g/t时,铜回收率增加幅度较小。综合考虑,确定Z-200的合适用量为25.00 g/t,此时可得到铜品位3.06%、回收率75.53%的铜粗精矿。

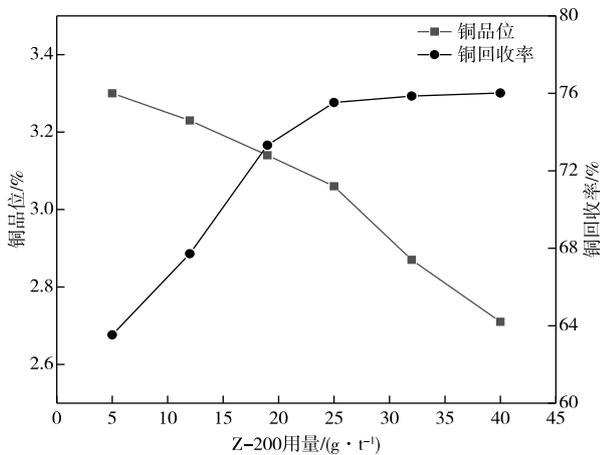


图3 Z-200用量试验结果

Fig. 3 Results of Z-200 dosage tests

2.1.1.2 黄药类捕收剂种类试验

在确定酯类药剂Z-200用量为25.00 g/t、黄药类捕收剂用量为25.00 g/t、起泡剂MIBC用量为20.00 g/t、组合黄药(异戊基+Y89或异丁基+Y89)配比为8:2的条件下,采用不同类型黄药捕收剂进行试验,试验结果见图4。由图4可知,采用单一黄药作为捕收剂时,铜回收率较低,而采用组合黄药作为捕收剂时效果均优于单一黄药,其中组合黄药异戊基+Y89(8:2)捕收效果最优,因此选择组合黄药异戊基+Y89(8:2)作为捕收剂,此时可得到铜品位3.37%、回收率78.13%的铜粗精矿。

2.1.1.3 黄药类捕收剂配比试验

在确定酯类药剂Z-200用量为25.00 g/t、起泡剂MIBC用量为20.00 g/t、组合黄药捕收剂异戊基+Y89总用量为25.00 g/t的条件下,采用不同

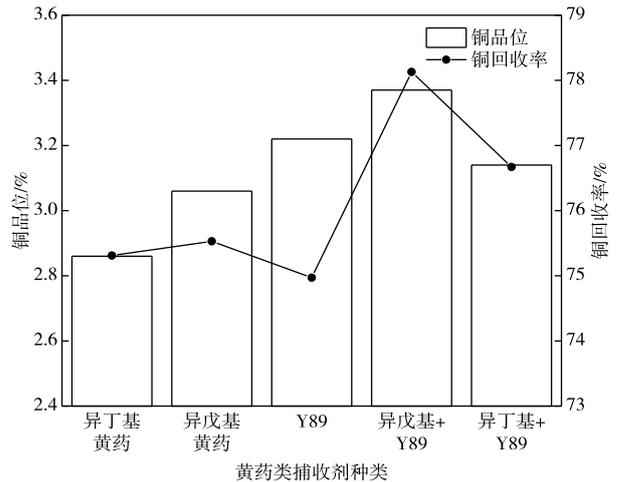


图4 黄药种类对比试验结果

Fig. 4 Comparison of xanthate type tests

配比的组合黄药进行试验,试验结果见图5。由图5可知,当Y89用量增加时,铜品位随之增加,而铜回收率不断下降,即异戊基黄药所占比例越大时,铜回收率越高。因粗选阶段的主要目标是提高回收率,所以选用异戊基黄药与Y89配比比例为9:1,此时铜回收率达到最优值,为79.42%。

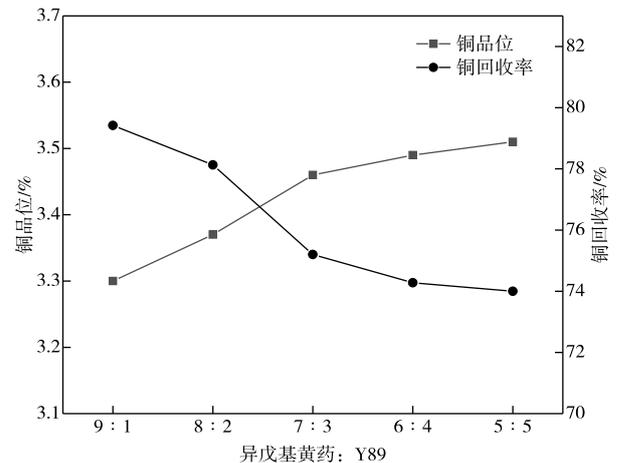


图5 组合黄药配比试验结果

Fig. 5 Results of combined xanthate ratio tests

2.1.1.4 黄药类捕收剂用量试验

在酯类药剂Z-200用量为25.00 g/t、起泡剂MIBC用量为20.00 g/t、组合黄药捕收剂异戊基+Y89(9:1)的条件下,进行黄药类捕收剂用量试验,试验结果见图6。由图6可知,当组合黄药总用量逐渐增加时,铜品位逐渐下降,铜回收率逐渐增加,当总用量增加至25.00 g/t时,铜回收率增加趋势开始变得缓慢,但铜品位剧烈下降。综合考虑,选择组合黄药用量为25.00 g/t,此时可得到铜品位为3.30%、回收率为79.42%的铜粗精矿。

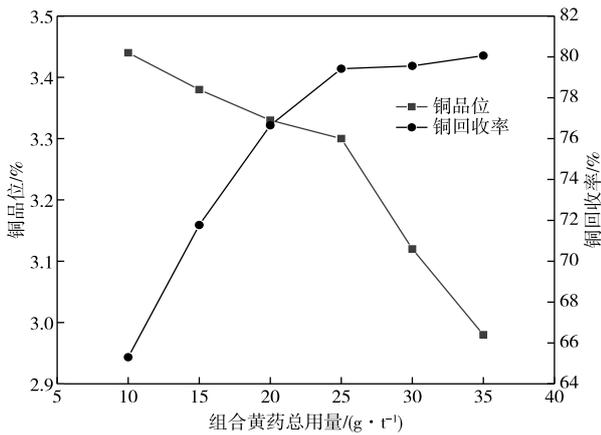


图6 组合黄药捕收剂总用量试验结果

Fig. 6 Results of combined xanthate dosage tests

2.1.2 扫选条件试验

在组合黄药捕收剂异戊基+Y89(9:1),总用量为12.50 g/t,起泡剂MIBC用量为10.00 g/t的条件下,进行Z-200用量试验,试验结果见图7。由图7可知,随Z-200用量增加,铜品位逐渐上升,铜回收率逐渐下降,为兼顾铜品位及回收率,当Z-200用量等于10.00 g/t时,指标较好,即铜品位为1.58%、回收率为16.43%。因此扫选段Z-200最佳用量采用10.00 g/t。

2.1.3 浮选铜闭路试验

通过上述药剂的条件试验,拟采用“一粗两精

一扫”、中矿循序返回的工艺流程开展闭路试验,试验流程见图8,试验结果见表4。由表4可知,现场尾砂在最优药剂制度下进行“一粗两精一扫”流程试验可获得铜品位为21.145%、回收率为65.970%的铜精矿。

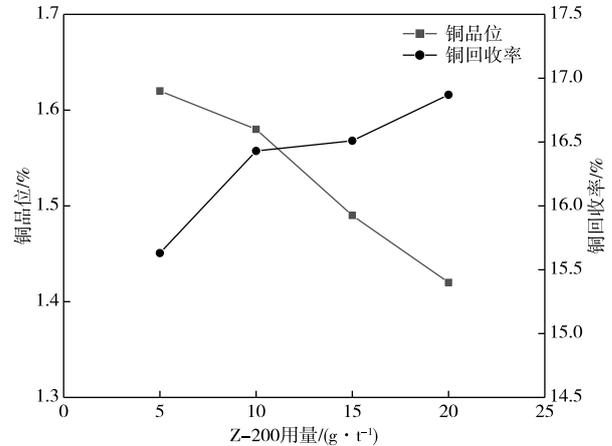


图7 Z-200用量试验结果

Fig. 7 Results of Z-200 dosage tests

表4 现场尾砂浮选闭路结果

Table 4 Results of the locked-cycle tests on the on-site tailings flotation /%

产品名称	产率	铜品位	铜回收率
铜精矿	0.374	21.145	65.970
选铜尾矿	99.626	0.041	34.030
现场尾砂	100.0	0.120	100.0

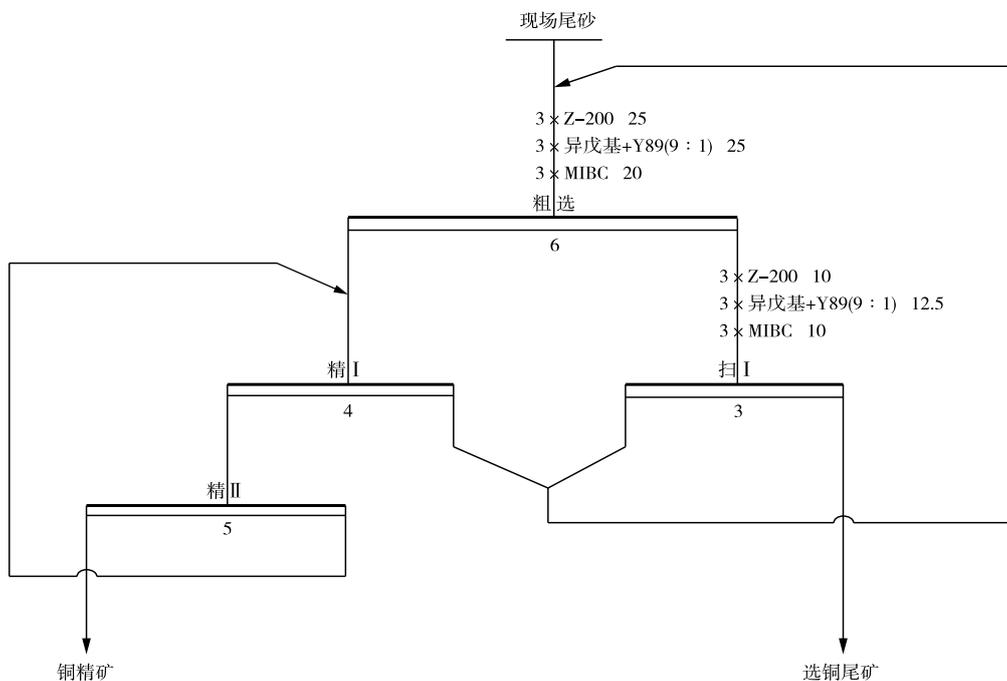


图8 现场尾砂浮选闭路试验流程

Fig. 8 Flowsheet of the locked-cycle tests on on-site tailings flotation

## 2.2 堆存尾砂浮选铜试验

### 2.2.1 最优条件浮选铜试验

采用现场尾砂粗选最优药剂制度进行堆存尾砂浮选铜粗选试验,仅获得铜品位 1.04%、回收率 25.13%的粗精矿。相比现场尾砂同条件下获得的铜浮选指标(铜品位 3.30%、回收率 79.42%),堆存尾砂选别指标较差,原因是堆存尾砂存放在尾砂库若干年,硫化铜矿物受空气氧化和风力侵蚀等影响,使得选别现场尾砂的最优药剂制度不适合选别堆存尾砂。

采用现场尾砂闭路浮选铜最优药剂制度(图 8)进行堆存尾砂浮选铜闭路试验,试验结果见表 5。由表 5 可知,堆存尾砂采用常规浮选获得铜指标极低,在现场尾砂最优药剂制度条件下仅获得铜品位 12.512%、回收率 12.099%的铜精矿。

表 5 堆存尾砂浮选闭路试验结果

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

产品名称	产率	铜品位	铜回收率
铜精矿	0.203	12.512	12.099
选铜尾矿	99.797	0.185	97.901
堆存尾砂	100.0	0.21	100.0

### 2.2.2 $\text{Na}_2\text{S}$ 活化条件试验

$\text{Na}_2\text{S}$  既是有色金属氧化矿的活化剂,也是硫化矿的抑制剂<sup>[6-7]</sup>。在最优药剂制度条件下,对堆存尾砂采用不同  $\text{Na}_2\text{S}$  用量进行对比试验,试验结果见图 9。由图 9 可知,当  $\text{Na}_2\text{S}$  用量大于 200 g/t 时,铜回收率剧烈下降,其原因是  $\text{Na}_2\text{S}$  用量过多时, $\text{Na}_2\text{S}$  大量水解产生的  $\text{HS}^-$  使得硫化矿表面吸附的黄药发生脱附, $\text{HS}^-$  占据在矿物表面增加矿物亲水性,从而起到抑制作用。当  $\text{Na}_2\text{S}$  合适用量为 200.00 g/t 时,

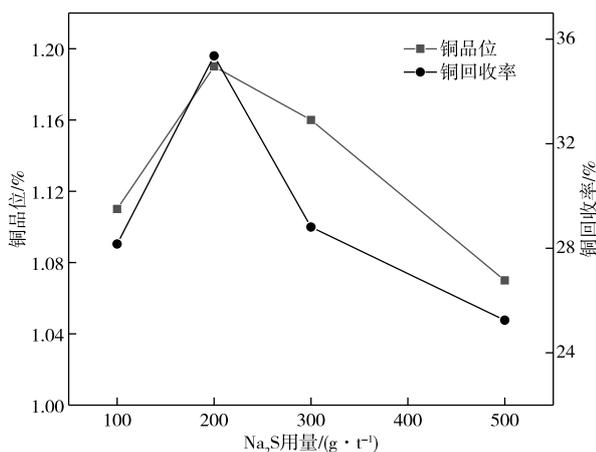


图 9  $\text{Na}_2\text{S}$  用量试验结果

Fig. 9 Results of  $\text{Na}_2\text{S}$  dosage tests

铜回收率最高,为 35.36%。因此  $\text{Na}_2\text{S}$  用量采用 200 g/t。

### 2.3 堆存尾砂载体浮选铜试验

对堆存尾砂进行  $\text{Na}_2\text{S}$  活化试验发现,加入  $\text{Na}_2\text{S}$  使铜粗精矿回收率提高了 10.23 个百分点,但选别指标依然较差,传统浮选工艺很难对铜进行选别回收。载体浮选是利用粗粒颗粒矿物作为载体,背负细粒颗粒矿物,从而提高回收率的方法,是选别难选微细粒矿物的有效手段<sup>[8]</sup>。因此,试验采用同类载体浮选工艺,即在合适的条件下以现场尾砂作为载体介质,提高回收指标。

#### 2.3.1 载体浮选条件试验

##### 2.3.1.1 载体介质粒度试验

在堆存尾砂与载体介质比例为 4 : 6,  $\text{Na}_2\text{S}$  用量 200 g/t, 酯类药剂 Z-200 用量为 25 g/t, 组合黄药捕收剂异戊基 + Y89 (9 : 1) 总用量 25 g/t, 起泡剂 MIBC 用量 20 g/t, 搅拌强度为浮选机转速 1 992 r/min 的条件下,载体介质为现场尾砂全粒级、+0.074、-0.074+0.045、-0.045+0.038 mm 时进行载体介质粒度对比试验,试验结果见图 10。由图 10 可知,载体粒度为 -0.045+0.038 mm 时,铜回收指标最低,这是受载体粒度较细,所携带的气泡较小,致使铜矿物在其表面黏附不稳定造成的。当载体介质粒度为 -0.074+0.045 mm 时,铜回收指标最优,即铜品位为 1.48%、回收率为 55.92%。因此,载体介质粒度选用现场尾砂 -0.074+0.045 mm 粒级。

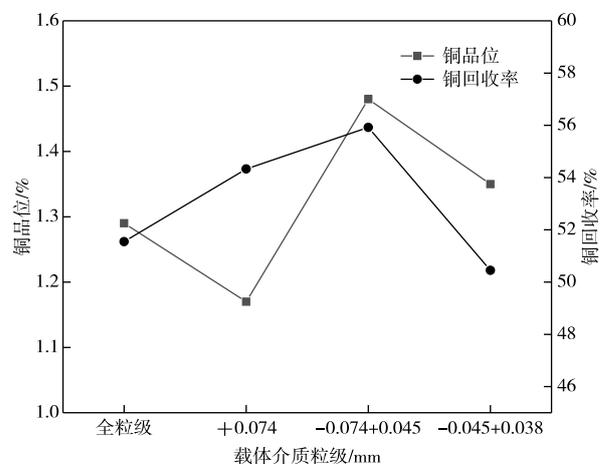


图 10 载体介质粒度对比试验结果

Fig. 10 Results of comparison tests on carrier medium particle size

##### 2.3.1.2 载体介质配比试验

在载体介质为现场尾砂 -0.074+0.045 mm 粒级、 $\text{Na}_2\text{S}$  用量 200 g/t、酯类药剂 Z-200 用量为

25 g/t、组合黄药捕收剂异戊基+Y89(9:1)用量为25 g/t、起泡剂MIBC用量为20 g/t、搅拌强度为浮选机转速1992 r/min的条件下,堆存尾砂与载体介质比例为8:2、6:4、5:5、4:6时进行载体配对比试验,试验结果见图11。由图11可知,铜回收率指标随着载体介质占比的增加而增加,当堆存尾砂:载体介质为4:6时达到最优值,即铜品位为1.48%、回收率为55.92%。故堆存尾砂与载体介质配比采用4:6。

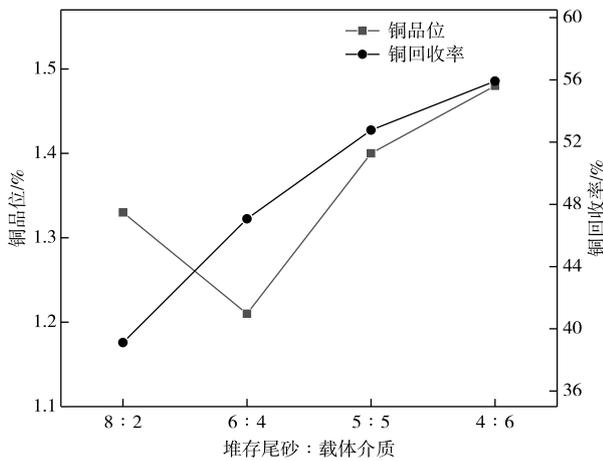


图 11 载体配比试验结果

Fig. 11 Results of carrier medium ratio tests

2.3.1.3 载体搅拌强度试验

在载体介质为现场尾砂为-0.074+0.045 mm 粒级,堆存尾砂与载体介质比例为4:6,Na<sub>2</sub>S用量200 g/t,酯类药剂Z-200用量为25 g/t,组合黄药捕收剂异戊基+Y89(9:1)用量为25 g/t,起泡剂MIBC用量为20 g/t的条件下,浮选机转速采用1892、1992、2092、2192、2292、2392 r/min时进行搅拌强度对比试验,结果见图12。由图12可知,增加一定搅拌强度可以有效提高铜回收率,当浮选机转速为2192 r/min时,铜回收指标最优,此时铜品位为1.66%、回收率达到57.28%。因此,搅拌强度采用浮选机转速为2192 r/min。

2.3.2 载体浮选铜闭路试验

载体浮选开路条件试验获得最优条件:载体介质为现场尾砂-0.074+0.045 mm 粒级,堆存尾砂与载体介质比例为4:6,Na<sub>2</sub>S用量200 g/t,酯类药剂Z-200用量为25 g/t,组合黄药异戊基+Y89(9:1)用量25 g/t,起泡剂MIBC用量20 g/t,浮选机转速采用2192 r/min,采用一粗两精一扫、中矿循序返回的工艺流程,试验结果见表6。由表6可知,通过“一

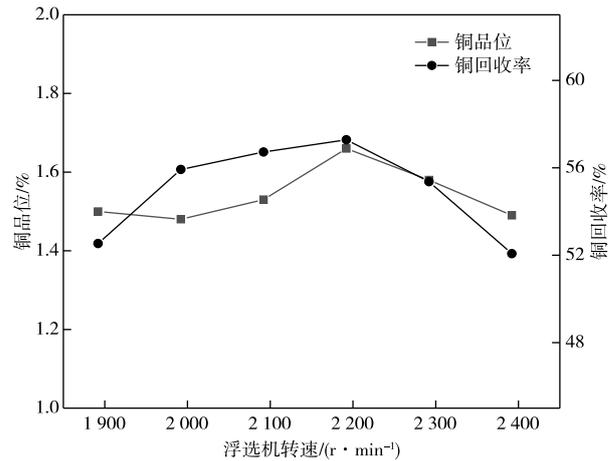


图 12 搅拌强度对比试验结果

Fig. 12 Results of agitation intensity comparison tests

粗两精一扫”闭路流程,获得铜精矿铜品位为13.520%、回收率达到49.123%,证明载体浮选工艺对堆存尾砂浮选铜具有一定效果。

表 6 载体浮选闭路试验结果

Table 6 Results of the locked-cycle tests on

the carrier flotation /%

产品名称	产率	铜品位	铜回收率
铜精矿	0.476	13.520	49.123
选铜尾矿	99.524	0.067	50.877
堆存尾砂+载体介质	100.0	0.131	100.0

3 结论

1)在粗选段Z-200用量25 g/t,组合黄药捕收剂异戊基黄药+Y89黄药,配比为9:1,用量为25 g/t,扫选段酯类药剂用量10 g/t,组合黄药捕收剂与起泡剂分别为粗选段用量1/2的条件下,采用“一粗两精一扫”、中矿循序返回闭路流程,可得到铜品位为21.145%、回收率为65.970%的铜精矿。

2)采用传统浮选方法难以回收堆存尾砂中的铜资源,最优条件下仅可获得铜品位12.512%、回收率12.099%的铜精矿。

3)载体浮选可有效回收堆存尾砂中的铜资源。在Na<sub>2</sub>S最优用量200 g/t,其他药剂制度为现场尾砂浮选铜闭路药剂制度,载体介质为现场尾砂-0.074+0.045 mm 粒级,堆存尾砂与载体介质配比为4:6,浮选机转速取2192 r/min,经“一粗两精一扫”闭路流程可获得铜品位13.520%、回收率49.123%的铜精矿,较好地实现了该选钨尾砂中铜资源的回收利用。

(下转第123页)

- [19] ANNA W, KATARZYNA C, DARIA P, et al. Application of response surface methodology and artificial neural network methods in modelling and optimization of biosorption process [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 160: 150-160.
- [20] 王勇, 李伟光, 宿程远, 等. 响应曲面法优化均相 Fenton 深度处理皮革废水[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(10): 2408-2414.
- WANG Yong, LI Weiguang, SU Chengyuan, et al. Treatment of leather wastewater by response surface method[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 32(10): 2408-2414.

(本文编辑 汪东芳)

## (上接第 96 页)

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 姚艳清, 胡真, 李汉文, 等. 某钨铜多金属共生矿资源综合利用研究[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2021(3): 69-74, 142.
- YAO Yanqing, HU Zhen, LI Hanwen, et al. Study on comprehensive utilization of tungsten-copper polymetallic ore resources [J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2021(3): 69-74, 142.
- [3] 刘娟红, 周在波. 细粒级金属尾砂的综合利用及在矿山充填中存在的问题和对策[J]. *金属矿山*, 2022, 53(7): 240-249.
- LIU Juanhong, ZHOU Zaibo. Comprehensive utilization of ultra-fine metal tailings and its problems and countermeasures in the application of backfill materials[J]. *Metal Mine*, 2022, 53(7): 240-249.
- [4] ZHU Y, GUO B, ZUO W R, et al. Effect of sintering temperature on structure and properties of porous ceramics from tungsten ore tailings [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2022, 287(8): 126315. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2022.126315.
- [5] 李天霞, 张晓峰, 张适合, 等. 河北某铜尾矿综合回收铜的选矿试验研究[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2019(2): 17-22.
- LI Tianxia, ZHANG Xiaofeng, ZHANG Shihe, et al. Experimental study on mineral processing of comprehensive recovery of copper from a copper tailings in Hebei province [J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2019(2): 17-22.
- [6] 杨虎. 硫化钠强化回收次生斑铜矿的浮选试验及作用机理研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.
- YANG Hu. Flotation experiment and mechanism study on sodium sulfide enhanced recovery of secondary bornite[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022.
- [7] 邱廷省, 丁声强, 张宝红, 等. 硫化钠在浮选中的应用技术现状[J]. *有色金属科学与工程*, 2012, 3(6): 39-43.
- QIU Tingsheng, DING Shengqiang, ZHANG Baohong, et al. Application situation of sodium sulfide in the flotation[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2012, 3(6): 39-43.
- [8] 陈文胜, 付君浩, 韩海生, 等. 微细粒矿物分选技术研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2020, 40(4): 134-145.
- CHEN Wensheng, FU Junhao, HAN Haisheng, et al. Advance in the separation of ultrafine minerals [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2020, 40(4): 134-145.

(本文编辑 刘水红)