秘鲁某选铁尾矿铜铅锌再选试验研究*

苗梁[1]，李振宇[1]，侯凯[2]

（1.西北矿冶研究院， 甘肃 白银市 730900；
2.太原理工大学 矿业工程学院， 山西 太原 030024）

摘要：秘鲁某选铁尾矿含有铜、铅、锌等有价金属，该尾矿铜品位为0.38%，主要以原生硫化铜和次生硫化铜的形态存在；铅品位为0.79%，主要赋存于硫化物和碳酸盐矿物中；锌品位为2.68%，主要赋存于硫化物中；硫品位为8.45%，主要以硫化物的形式存在。采用“铜铅锌部分混浮-铜与铅锌分离-铅锌等可浮再分离”工艺流程进行浮选药剂种类优化试验，确定混浮粗选作业采用石灰+CL合剂作为调整剂、丁基黄药+酯-112作为捕收起泡剂，铜与锌分离作业采用硫化钠+焦亚硫酸钠抑制剂体系，铅锌等可浮再分离作业采用25#黑药作为捕收起泡剂。基于全流程浮选开路试验结果和中矿循环方案设计了闭路浮选试验。结果表明：铜精矿铜品位为22.03%、铜回收率为64.93%；锌精矿锌品位为47.12%、锌回收率为72.00%；铅锌精矿铅品位为21.65%、锌品位为25.13%，铅回收率为58.84%、锌回收率为19.95%。

关键词：浮选药剂；铁铜铅锌硫化矿；组合抑制剂；捕收起泡剂；选矿指标

中图分类号：TD952 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2025)09-0259-09

Study on Copper Lead Zinc Re-Selection Test of Iron Tailings in Peru

MIAO Liang[1], *LI Zhenyu*[1], *HOU Kai*[2]

(1.Northwest Research Institute of Mining and Metallurgy, Baiyin, Gansu 730900, China;
2.College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract: An iron tailings in Peru contain valuable metals such as copper, lead and zinc. The copper grade of the tailings is 0.38%, which mainly existing in the form of primary copper sulfide and secondary copper sulfide. The lead grade is 0.79%, mainly occurring in sulfide and carbonate minerals. The zinc grade is 2.68%, mainly occurring in sulfides. The sulfur grade is 8.45%, mainly existing in the form of sulfides. The optimization test of flotation reagent type was carried out by using the process flow of “copper-lead-zinc partially mixed floating, copper and lead-zinc separation, lead-zinc and other floating re-separation”. In the mixed flotation roughing operation, lime+CL agent was used as the regulator, butyl xanthate+ester-112 was used as the collecting foaming agent. Sodium sulfide+sodium bisulfite inhibitor system was used in the separation of copper-zinc, and 25# black powder was used as the collecting foaming agent in the floating and re-separation operation of lead-zinc. A closed-circuit flotation test was designed based on the open-circuit test results of the whole process flotation and the middlings circulation scheme. The results show that the copper grade of the copper concentrate is 22.03%, and the copper recovery rate is 64.93%. The zinc grade of zinc concentrate is 47.12%, and the zinc recovery rate is 72.00%. The lead grade of lead-zinc concentrate is 21.65%, the zinc grade is 25.13%, the lead recovery rate is 58.84%, and the zinc recovery rate is 19.95%.

Key words: Flotation reagent, Iron-copper-lead-zinc sulfide ore, Combined inhibitor, Collecting foaming agent, Beneficiation index

0 引言

在全球化经济快速发展的背景下，金属矿资源不仅是现代工业不可或缺的基石，也是国家经济建设和国防安全的战略资源[1-2]，被广泛应用于能源、信息技术、基础设施建设、机械制造及日常生活等领域[3]。从国内资源分布特点来看，我国虽然拥有较为丰富的铜、铅、锌及铁矿资源，但空间分布极不均衡，且矿石

* **收稿日期**：2024-10-21
作者简介：苗梁(1986—)，男，甘肃白银人，高级工程师，主要从事选矿药剂及选矿流程研发推广工作。E-mail:1106413470@qq.com
通信作者：侯凯(1990—)，男，山西平遥人，博士，副研究员，主要从事矿物加工和矿物材料方面的研究。E-mail:kaihou2015@163.com

品位普遍较低,共伴生矿多,单一矿少,开发难度较大[4-5]。资源分布不均和资源品质的差异性使得国内金属矿产资源的开发利用面临资源配置难、选冶难度大、资源利用率低、开发成本高、环境风险加剧等诸多困境[6-8]。为缓解国内资源供需矛盾,保障国家经济安全,通过引入印尼[9]、马亚西亚[10]、秘鲁等国的优质金属矿产资源,有效弥补了国内资源短板[11-12]。

为实现秘鲁某选铁尾矿中铜、铅、锌等有价组分的高效综合回收,本研究针对选厂当前铜锌分选工艺系统开展了浮选药剂适应性优化试验,解决生产中存在的技术难题,以稳定生产技术指标并提升产品质量。

1 矿石性质

1.1 化学分析

选铁尾矿的化学多元素分析结果见表 1。

表 1 原矿化学多元素分析结果

Table 1 Results of chemical multi-element analysis of raw ore %

Fe	Cu	Pb	Zn	S	P	Co	Mo	Ni
18.85	0.38	0.79	2.68	8.45	0.15	0.04	0.01	0.07
SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	Ti	Mn	烧失量
34.79	3.97	8.13	10.33	0.52	0.35	0.09	0.11	10.11

由表 1 可知,选铁尾矿矿石中主要有价元素为铁、铜、铅和锌,铁品位为 18.85%,铜品位为 0.38%,铅品位为 0.79%,锌品位为 2.68%。除上述元素外,其他金属元素的含量均较低,不具备显著的回收经济效益。值得注意的是,矿石中有害组分磷、硫等的含量较高,这些杂质的存在可能会对后续精矿产品的品质产生不利影响。因此,在选矿工艺流程及冶炼加工环节,需采取针对性技术措施对有害组分进行控制或去除。此外,矿石的主要脉石组成为 SiO_2,这是矿石中常见的非金属矿物。

1.2 物相分析

原矿中铁、硫、铜、铅、锌的物相分析结果见表 2 至表 6。

表 2 原矿铁物相分析结果

Table 2 Phase analysis results of iron in raw ore %

相别	含量	占有率
磁性铁	1.44	7.64
赤、褐铁矿	3.64	19.31
硫化物	6.27	33.26
碳酸盐	1.88	9.97
硅酸盐	5.62	29.82
合计	18.85	100.00

表 3 原矿硫物相分析结果

Table 3 Plase analysis results of sulfur in raw ore %

相别	含量	占有率
硫化物	8.11	95.98
硫酸盐	0.13	1.53
元素硫	0.21	2.49
合计	8.45	100.00

表 4 原矿铜物相分析结果

Table 4 Plase analysis results of copper in raw ore %

相别	含量	占有率
原生硫化铜	0.28	73.68
次生硫化铜	0.07	18.42
氧化铜	0.03	7.90
合计	0.38	100.00

表 5 原矿铅物相分析结果

Table 5 Plase analysis results of lead in raw ore %

相别	含量	占有率
碳酸盐	0.220	27.85
硫化物	0.480	60.76
硫酸盐	0.022	2.78
铅铁矾	0.068	8.61
合计	0.790	100.00

表 6 原矿锌物相分析结果

Table 6 Plase analysis results of zinc in raw ore %

相别	含量	占有率
硫化物	2.38	88.81
氧化物	0.30	11.19
锌铁尖晶石	微量	—
合计	2.68	100.00

由表 2 可知,原矿中铁主要赋存于硫化物和硅酸盐矿物中,其占比分别为 33.26%和 29.82%,显著优于其他铁矿物;其次为赤、褐铁矿,其占比为 19.31%;磁性铁和碳酸盐中铁的分布比例较低。

由表 3 可知,原矿中硫元素几乎全部以硫化物的形式存在,占比高达 95.98%。因此,在选矿工艺中需特别关注硫化物对铜、铅、锌等精矿产品质量的影响,并选用高效抑制剂和捕收剂优化分离效果。

由表 4 可知,原矿中的铜元素主要以原生硫化铜和次生硫化铜的形态存在,其占比分别为 73.68%和 18.42%,是铜回收的主要矿物相;氧化铜的占比较低,仅为 7.90%。

由表 5 可知,原矿中铅主要赋存于硫化物和碳酸盐矿物中,其占比分别为 60.76%和 27.85%,是铅回收的主要矿物相。

由表 6 可知,原矿中锌主要赋存于硫化物中,其占比高达 88.81%,即硫化锌矿物是锌回收的主要来源;其他形态的锌含量相对较低,对整体回收策略影响有限。

2 混浮药剂优化试验研究

以选厂当前铜锌分离采用的浮选药剂与国内外常用的铜锌分离浮选药剂为基础,重点开展了铜锌混浮粗选调整剂和捕收起泡剂、铜锌分离作业抑制剂、铅浮选捕收起泡剂等药剂的种类优化试验研究。

2.1 混浮粗选调整剂种类优化试验

因原矿硫铁矿含量较高,铜铅锌混合浮选实际为部分混浮,调整剂的选择重点在于抑制硫铁矿物,实现伴生铜铅锌与硫的分离。硫铁矿常用抑制剂有石灰、漂白粉、石灰+有机抑制剂、石灰+无机抑制剂等[13]。固定活化剂和捕收起泡剂种类及用量,控制矿浆 pH 为 10.5,进行铜锌混浮粗选调整剂种类优化试验。工艺流程及条件如图 1 所示,试验结果见表 7。

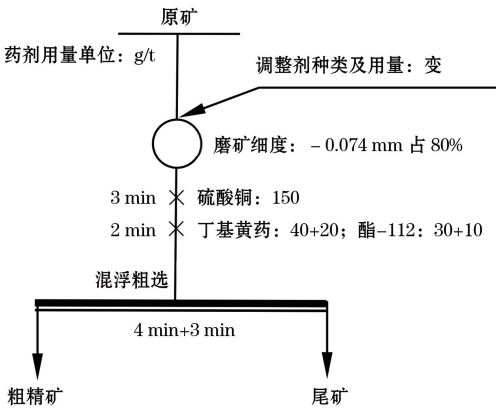


图 1 混浮粗选调整剂种类优化试验工艺流程及条件

Fig.1 Process flow and conditions of regulator types optimization test of mixed flotation roughing selection

表 7 混浮粗选调整剂种类优化试验结果

Table 7 Results of regulator types optimization test of mixed flotation roughing selection

调整剂种类及用量/(g/t)	产品名称	产率/%	品位/%				回收率/%			
			Cu	Pb	Zn	S	Cu	Pb	Zn	S
石灰:6 000	粗精矿	30.63	1.10	1.95	8.28	16.82	88.26	76.58	94.63	60.90
	尾矿	69.37	0.06	0.26	0.21	4.77	11.74	23.43	5.37	39.10
石灰+漂白粉:5 000+1 000	粗精矿	13.76	2.27	3.78	16.21	22.73	82.20	66.68	83.23	36.97
	尾矿	86.24	0.08	0.30	0.52	6.18	17.80	33.32	16.77	63.03
石灰+腐殖酸钠:5 000+1 000	粗精矿	25.34	1.23	2.30	9.21	16.23	82.02	74.72	87.08	48.61
	尾矿	74.66	0.09	0.26	0.46	5.82	17.98	25.28	12.92	51.39
石灰+过硫酸钠:5 000+1 000	粗精矿	15.17	2.07	3.42	14.65	21.92	82.64	66.51	82.93	39.31
	尾矿	84.83	0.08	0.31	0.54	6.05	17.36	33.49	17.07	60.69
石灰+CL 合剂:6 000+1 000	粗精矿	21.47	1.57	2.80	11.82	17.22	88.71	77.07	94.69	43.70
	尾矿	78.53	0.05	0.23	0.18	6.07	11.30	22.93	5.31	56.30
	原矿	100.00	0.38	0.78	2.68	8.46	100.00	100.00	100.00	100.00

由表 7 可知,采用石灰分别与漂白粉、过硫酸钠或腐殖酸钠组合作为混浮粗选调整剂时,会对粗精矿铜、铅、锌的回收率产生不利影响,表明这些调整剂组合选矿效果不佳。相比之下,石灰与 CL 合剂组合相较于单一石灰调整剂具有以下优势:石灰+CL 合剂能够显著提升粗选作业泡沫的富集比,可有效促进目标矿物的集中与回收,提高粗精矿的铜、铅、锌的回收率;具备降低硫上浮至精矿中的能力,降低粗精矿的硫回收率,减少后续处理过程中的负担。

2.2 混浮粗选捕收起泡剂种类优化试验

混浮粗选捕收起泡剂种类优化试验工艺流程及条件如图 2 所示,试验结果见表 8。

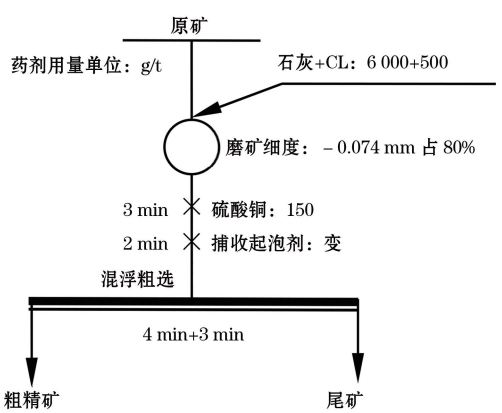


图 2 混浮粗选捕收起泡剂种类优化试验工艺流程及条件

Fig.2 Process flow and conditions of collection foaming agent types optimization test of mixed flotation roughing selection

表 8 铜锌混合粗选捕收起泡剂优化试验结果

Table 8 Results of collecting foaming agent types optimization test of mixed flotation roughing selection

捕收起泡剂种类及用量/(g/t)	产品名称	产率/%	品位/%				回收率/%			
			Cu	Pb	Zn	S	Cu	Pb	Zn	S
丁基黄药:40+20;酯-112:30+10	粗精矿	21.47	1.57	2.80	11.82	17.22	88.71	77.07	94.69	43.70
	尾矿	78.53	0.05	0.23	0.18	6.07	11.30	22.93	5.31	56.30
丁基黄药:40+20;2# 油:30+10	粗精矿	24.84	1.27	2.34	9.83	15.28	83.02	74.52	91.11	44.86
	尾矿	75.16	0.09	0.26	0.32	6.21	16.98	25.48	8.89	55.14
丁基黄药:40+20;Z-200:30+10	粗精矿	19.02	1.73	3.05	13.02	17.46	86.59	74.37	92.40	39.25
	尾矿	80.98	0.06	0.25	0.25	6.35	13.41	25.63	7.60	60.75
丁基黄药:40+20;酯-215:30+10	粗精矿	20.15	1.64	2.94	12.34	16.35	86.96	75.95	92.78	38.94
	尾 矿	79.85	0.06	0.23	0.24	6.47	13.04	24.05	7.22	61.06
	原矿	100.00	0.38	0.78	2.68	8.46	100.00	100.00	100.00	100.00

由表 8 可知,采用丁基黄药分别与 2# 油、Z-200 和酯-215 组合作为混浮粗选捕收起泡剂时,粗精矿铜、铅、锌的回收率均采用低于丁基黄药与酯-112 组合,且后者粗精矿产率也较高,表明丁基黄药与酯-112 组合作为捕收起泡剂在平衡回收率与产率方面具有一定优势。因此,原矿混合粗选作业中,适宜的捕收起泡剂种类为丁基黄药+酯-112,其对细粒级铜铅锌矿物具有较强的捕收能力和选择性,可以提高浮选过程的效率和精矿质量。

3 铜铅锌分离浮选药剂优化试验

3.1 铜与铅锌分离抑制剂优化试验

以铜铅锌混合精矿为研究对象,在采用活性炭+再磨脱药基础上,进行铜与铅锌分离抑制剂种类优化试验。铅锌抑制剂可分为无机和有机两大类[14-15],其中无机抑制剂分为还原性药剂(如亚硫酸钠、硫化钠、硫代硫酸钠等)和氧化性药剂(如过硫酸铵、硫酸亚铁、高锰酸钾等);有机抑制剂主要为小分子有机物。目前,铜与铅锌分离工艺中最常用的抑制剂为硫化钠+硫酸盐或亚硫酸以及无机盐+有机小分子。

铜与铅锌分离抑制剂种类优化试验工艺流程及条件如图 3 所示,重点对比了硫化钠+焦亚硫酸钠、硫化钠+硫酸锌+亚硫酸钠、硫化钠+亚硫酸、硫化钠+T29(小分子有机抑制剂)对铜与铅锌分离效果的影响,试验结果见表 9。

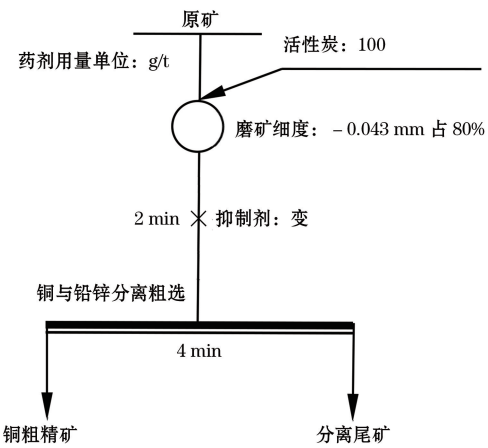


图 3 铜与铅锌分离药剂种类优化试验工艺流程及条件

Fig.3 Process flow and conditions of optimization test of copper and lead-zinc separation reagent types

表 9 铜与铅锌分离药剂种类优化试验结果

Table 9 Results of optimization test of copper and lead-zinc separation reagent types

药剂种类及用量/(g/t)	产品名称	产率/%	品位/%			回收率/%		
			Cu	Pb	Zn	Cu	Pb	Zn
硫化钠+焦亚硫酸钠:150+1 200	铜粗精矿	22.75	13.21	4.42	7.58	80.14	14.08	5.47
	分离尾矿	77.25	0.96	7.94	38.61	19.86	85.92	94.53
硫化钠+亚硫酸钠+硫酸锌:150+1 200+1 200	铜粗精矿	31.65	9.84	7.65	14.76	83.05	33.91	14.81
	分离尾矿	68.35	0.93	6.90	39.32	16.95	66.09	85.19
硫化钠+亚硫酸:150+1 000	铜粗精矿	19.83	15.13	4.73	7.68	80.01	13.14	4.83
	分离尾矿	80.17	0.94	7.74	37.45	19.99	86.86	95.17
硫化钠+T29:150+400	铜粗精矿	27.82	10.32	6.26	12.67	76.56	24.39	11.17
	分离尾矿	72.18	1.22	7.48	38.83	23.44	75.61	88.83
	给矿	100.00	3.75	7.14	31.55	100.00	100.00	100.00

由表 9 可知,采用硫化钠+亚硫酸钠+硫酸锌作为铜与铅锌分离抑制剂时,铜回收率较高,但铜粗精矿中铅锌含量明显增加,分选指标最差;硫化钠+T29 抑制剂分选效果也偏差。与硫化钠+焦亚硫酸钠相比,采用硫化钠+亚硫酸作为抑制剂时,铜粗精矿铜品位更高,铜回收率略低,且铅锌含量与采用硫化钠+焦亚硫酸时相近。但亚硫酸生产过程中存在环境污染问题,且其为酸性液体,不利于运输和使用[16]。综上所述,给矿铜与铅锌分离作业中适宜的抑制剂为硫化钠+焦亚硫酸钠。

3.2 铅锌等可浮再分离捕收起泡剂种类优化试验

以铜与铅锌分离扫选底流为给矿,铅锌等可浮再分离捕收剂种类及用量优化试验工艺流程及条件如图 4 所示,试验结果见表 10。

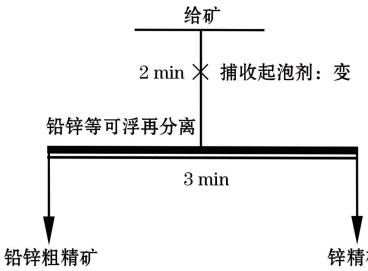


图 4 铅锌等可浮再分离捕收剂起泡种类优化试验工艺流程及条件

Fig.4 Process flow and conditions of collecting foaming agent types optimization test of lead-zinc iso-flotability flotation and separation

表 10 铅锌等可浮再分离捕收起泡剂种类优化试验结果

Table 10 Results of collecting foaming agent types optimization test of lead-zinc iso-flotability flotation and separation

捕收起泡剂种类及用量/(g/t)	产品名称	产率/%	品位/%			回收率/%		
			Cu	Pb	Zn	Cu	Pb	Zn
丁基黄药+酯-112:2.5+2.5	铅锌粗精矿	37.84	1.27	15.54	31.83	52.24	73.14	30.22
	锌精矿	62.16	0.71	3.47	44.75	47.76	26.86	69.78
25# 黑药:5	铅锌粗精矿	40.05	1.18	16.05	28.08	50.82	80.05	28.22
	锌精矿	59.95	0.76	2.67	47.71	49.18	19.95	71.78
SN-9:5	铅锌粗精矿	25.43	1.47	18.16	29.83	39.77	57.58	19.05
	锌精矿	74.57	0.76	4.56	43.24	60.23	42.42	80.95
丁基黄药+2# 油:2.5+2.5	铅锌粗精矿	33.45	1.33	16.92	32.76	48.36	70.22	27.52
	锌精矿	66.55	0.71	3.61	43.37	51.64	29.78	72.48
	给矿	100.00	0.92	8.06	39.82	100.00	100.00	100.00

由表 10 可知,在铜与铅锌分离后的弱酸性至中性介质条件下,对比 4 种捕收起泡剂对铅锌等可浮再分离效果的影响,可以得出 25# 黑药对铅的选择性和捕收能力较强,铅锌粗精矿的铅回收率最高。综上所述,原矿铜与铅锌分离后铅锌等可浮再分离作业适宜的捕收起泡剂为 25# 黑药。

4 原矿全流程浮选试验

基于混浮粗选、铜铅锌分离浮选药剂种类优化试验,通过条件试验确定了各浮选药剂用量。全流程开路试验工艺流程及条件如图 5 所示,试验结果见表 11。

表 11 开路试验结果

Table 11 Results of open-circuit test

产品名称	产率/%	品位/%				回收率/%			
		Cu	Pb	Zn	S	Cu	Pb	Zn	S
铜精矿	0.72	24.16	2.25	3.45	29.54	47.01	2.08	0.93	2.51
中矿 1	0.25	7.82	4.62	6.23	30.55	5.28	1.48	0.59	0.90
中矿 2	0.63	2.73	6.82	12.78	30.76	4.65	5.51	3.03	2.29
中矿 3	0.23	2.43	5.32	11.04	30.21	1.51	1.57	0.95	0.82
铅锌精矿	1.04	1.38	22.15	24.16	27.78	3.88	29.53	9.45	3.42
中矿 4	0.37	1.07	13.21	29.16	28.93	1.07	6.27	4.06	1.27
中矿 5	0.68	0.92	7.54	33.45	29.43	1.69	6.57	8.55	2.37
中矿 6	0.31	0.79	5.37	36.75	30.27	0.66	2.13	4.28	1.11
锌精矿	2.82	0.74	2.54	48.85	30.45	5.64	9.18	51.79	10.15
中矿 7	1.56	1.19	1.56	4.37	18.45	5.02	3.12	2.56	3.40
中矿 8	2.78	0.58	0.93	2.67	12.34	4.36	3.31	2.79	4.05
中矿 9	10.12	0.23	0.47	1.53	9.38	6.29	6.10	5.82	11.22
中矿 10	2.23	0.29	0.51	1.27	9.54	1.75	1.46	1.06	2.51
尾矿	76.26	0.05	0.22	0.14	5.99	11.19	21.69	4.14	53.98
原矿	100.00	0.37	0.78	2.66	8.46	100.00	100.00	100.00	100.00

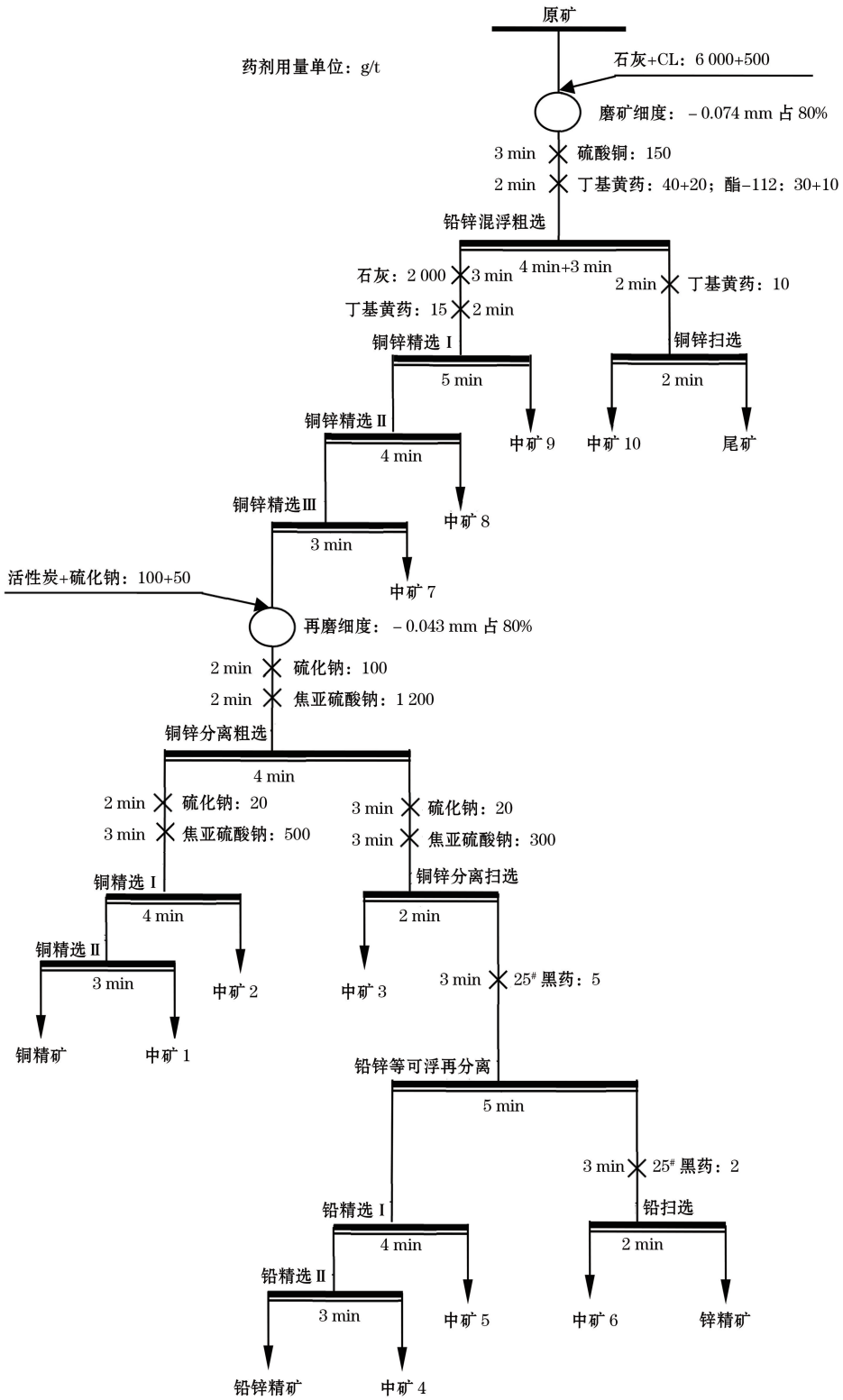


图 5 全流程开路试验工艺流程及条件

Fig.5 Process flow and conditions of full process open circuit test

根据全流程开路试验中各中矿的铜、铅、锌品位数据，对中矿循环路径进行配置：(1) 将铜精选Ⅱ作业获得的中矿 1 给入铜精选Ⅰ作业；(2) 铜精选Ⅰ作业获得的中矿 2 和铜锌分离扫选作业获得的中矿 3 共同给入铜锌分离粗选作业；(3) 铅精选Ⅱ作业获得的中矿 4 给入铅精选Ⅰ作业；(4) 铅精选Ⅰ作

业获得的中矿 5 和铅扫选作业获得的中矿 6 共同给入铅锌等可浮再分离作业;(5) 铜锌精选Ⅲ作业获得的中矿 7 给入铜锌精选Ⅱ作业;(6) 铜锌精选Ⅱ作业获得的中矿 8 给入铜锌混精Ⅰ作业;(7) 铜锌混精Ⅰ作业获得的中矿 9 和铜锌扫选作业获得的中矿 10 共同给入铜锌混浮粗选作业。中矿循环方案通过多级回流循环处理,能最大限度地回收矿石中的有用成分,减少矿物在分选过程中的损失,提高资源利用率。

根据全流程开路试验结果和中矿循环方案,设计闭路浮选试验,工艺流程及条件如图 6 所示,试验结果见表 12。

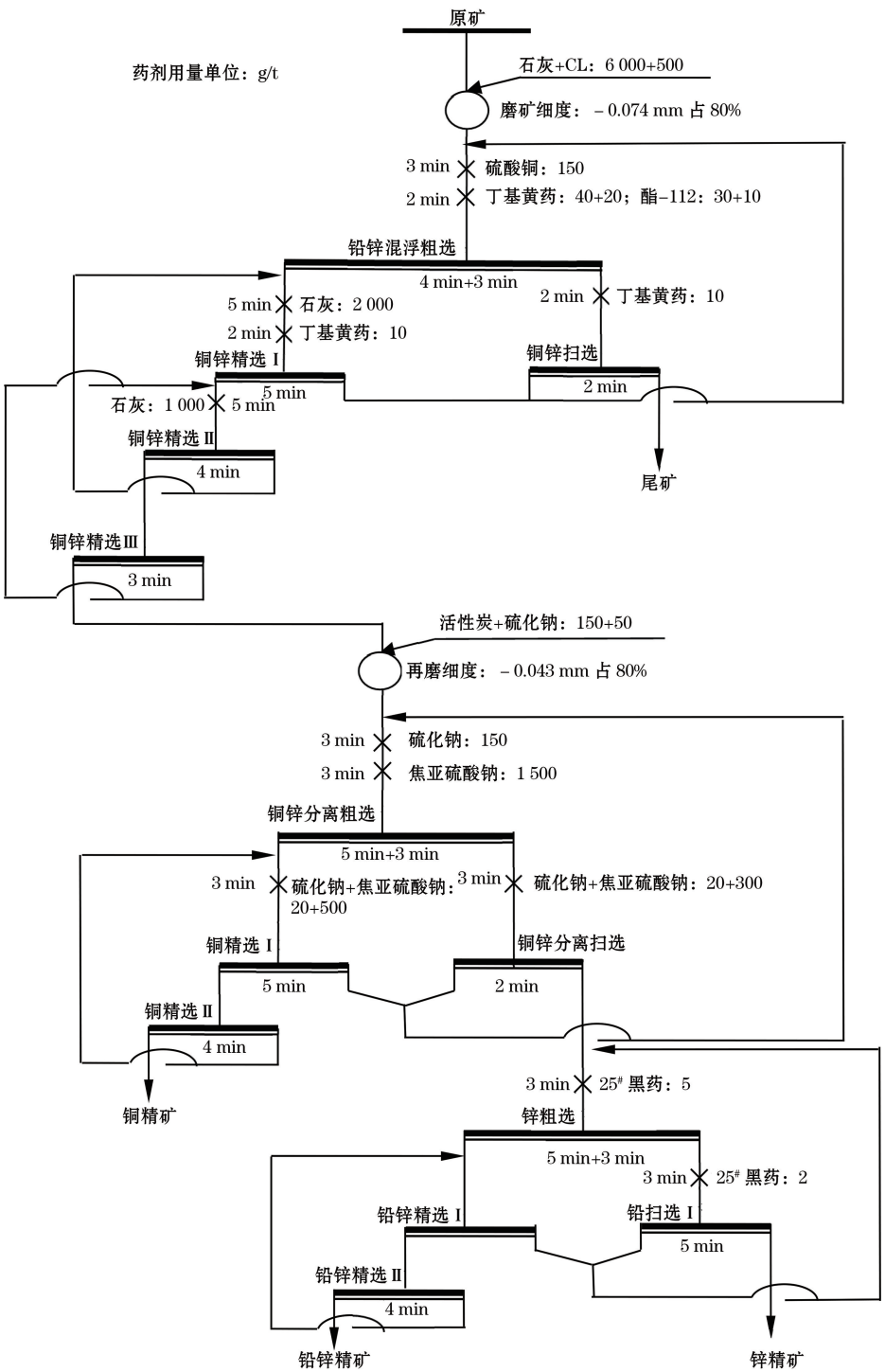


图 6 原矿浮选药剂优化闭路试验工艺流程及条件

Fig.6 Process flow and conditions of closed-circuit test of flotation reagents optimization in raw ore

表 12 原矿浮选药剂优化闭路试验结果

Table 12 Results of closed-circuit test of flotation reagents optimization in raw ore

产品名称	产率/%	品位/%				回收率/%			
		Cu	Pb	Zn	S	Cu	Pb	Zn	S
铜精矿	1.12	22.03	3.27	4.12	35.15	64.93	4.70	1.74	4.65
铅锌精矿	2.12	2.16	21.65	25.13	28.13	12.05	58.84	19.95	7.05
锌精矿	4.08	0.74	1.08	47.12	29.85	7.95	5.65	72.00	14.40
尾矿	92.68	0.06	0.26	0.18	6.75	15.07	30.81	6.31	73.90
原矿	100.00	0.38	0.78	2.67	8.46	100.00	100.00	100.00	100.00

由表 12 可知,采用“铜铅锌混浮-铜与铅锌分离-铅锌等可浮再分离”工艺进行闭路浮选试验,获得以下技术指标:铜精矿铜品位为 22.03%、铜回收率为 64.93%、含铅 3.27%、含锌 4.12%;锌精矿锌品位为 47.12%、锌回收率为 72.00%、含铜 0.74%、含铅 1.08%;铅锌精矿铅品位为 21.65%、锌品位为 25.13%,铅回收率为 58.84%、锌回收率为 19.95%。闭路试验获得的铜精矿、锌精矿、铅锌精矿中有价元素品位和回收率指标较好,验证了该工艺在提高有价金属回收率和资源利用率方面的有效性。研究成果可为同类复杂多金属矿的选别提供技术参考。

5 结论

(1) 选厂现有浮选药剂对原矿的适应性较强,通过在混浮粗选作业中增加调整剂 CL 合剂,可在提高粗精矿的铜、铅、锌回收率的同时降低硫回收率;在混浮粗选作业采用丁基黄药+酯-112 作为捕收起泡剂,其对细粒级铜铅锌矿物具有较强的捕收能力和选择性;铜与锌锌分离作业中,硫化钠+焦亚硫酸钠抑制剂体系的铜与铅锌分离选矿指标相比于其他抑制剂较好,且具有环保性优势;铅锌等可浮再分离作业采用 25# 黑药作为捕收起泡剂,铅锌粗精矿的铅回收率较高。

(2) 基于混浮粗选、铜铅锌分离浮选药剂种类优化试验,设计了全流程浮选开路试验,并根据试验结果制定了中矿循环方案。采用“铜铅锌混浮-铜与铅锌分离-铅锌等可浮再分离”工艺进行闭路浮选试验。结果表明:铜精矿铜品位为 22.03%、铜回收率为 64.93%;锌精矿锌品位为 47.12%、锌回收率为 72.00%;铅锌精矿铅品位为 21.65%、锌品位为 25.13%,铅回收率为 58.84%、锌回收率为 19.95%。

参考文献(References):

[1] 朱永光,张伍丰,王迪,等.中国铜资源产业链供应链韧性评价[J].资源科学,2023,45(9):1761-1777.
ZHU Yongguang, ZHANG Wufeng, WANG Di, et al. Resilience evaluation of China's copper resources industrial chain and supply chain[J]. Resources Science,2023,45(9):1761-1777.

[2] 刘鹏,刘磊,田馨,等.我国铁尾矿工艺矿物学特性及其资源化技术研究进展[J].矿产保护与利用,2022,42(3):169-178.
LIU Peng, LIU Lei, TIAN Xin, et al. Reviews of the process mineralogy characteristics and comprehensive utilization technology of iron ore tailings in China[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2022,42(3):169-178.

[3] 张楠.新能源产业发展背景下我国铜资源供需现状与趋势[J].中国矿业,2023,32(6):2-9.
ZHANG Nan. Analysis of supply and demand status and trend of copper resources in China under development background of new energy industry[J]. China Mining Magazine,2023,32(6):2-9.

[4] 文耀辉.陕西凤太矿田八方山铅锌铜多金属矿床深部找矿进展、成矿规律与找矿模式[J].矿产与地质,2023,37(6):1163-1170.
WEN Yaohui. Metallogenic regularity, prospecting model and deep exploration progress of Bafangshan Pb-Zn-Cu polymetallic deposit in Fengtai ore field, Shaanxi[J]. Mineral Resources and Geology,2023,37(6):1163-1170.

[5] 王海亮,姚灯磊,高春庆.藏中某铜锌铁多金属矿工艺矿物学研究[J].金属矿山,2022(11):134-140.
WANG Hailiang, YAO Denglei, GAO Chunqing. Study on process mineralogy of a Cu-Zn-Fe polymetallic ore in central Xizang[J]. Metal Mine,2022(11):134-140.

[6] 冯媛媛,张慧婷,王朝,等.内蒙古某硫化铜矿石浮选工艺矿物学研究[J].有色金属(选矿部分),2024(1):9-17+49.
FENG Yuanyuan, ZHANG Huiting, WANG Chao, et al. Mineralogical study on flotation process of a copper sulfide ore in Inner Mongolia[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2024(1):9-17+49.

[7] 李智伟,廖润鹏,张谦,等.云南兰坪氧化铅锌矿工艺矿物学研究[J].有色金属工程,2023,13(12):65-77+162.
LI Zhiwei, LIAO Runpeng, ZHANG Qian, et al. Processmineralogical research on the oxide-lead-zinc ore in Lanping, Yunnan Province[J]. Nonferrous Metals Engineering,2023,13(12):65-77+162.

[8] 朱智超,张少平,兰舟,等.海南某铁矿工艺矿物学特征及磁选工艺优化研究[J].矿业研究与开发,2024,44(1):197-201.
ZHU Zhichao, ZHANG Shaoping, LAN Zhou, et al. Study on process mineralogical characteristics and optimization of magnetic separation process of an iron ore mine in Hainan [J]. Mining Research and Development, 2024, 44(1): 197-201.

[9] 张文杰,叶晗晨,杜云鹏,等.印尼某褐铁型红土镍矿工艺矿物学及选矿工艺的研究[J].有色金属工程,2023,13(12):90-99.
ZHANG Wenjie, YE Hanchen, DU Yunpeng, et al. Research on process mineralogy and beneficiation technology of a limonite-type lateritic nickel ore in Indonesia [J]. Nonferrous Metals Engineering,2023,13(12):90-99.

[10] 张剑廷,李志明.马来西亚某褐铁矿石工艺矿物学研究[J].金属矿山,2022(8):146-150.
ZHANG Jianting, LI Zhiming. Research on process mineralogy of a limonite in Malaysia[J]. Metal Mine,2022(8):146-150.

[11] 李亮,陈洲,王帅,等.国外某赤铁矿工艺矿物学及选矿试验研究[J].矿业研究与开发,2023,43(11):202-207.
LI Liang, CHEN Zhou, WANG Shuai, et al. Study on process mineralogy and beneficiation test of a foreign hematite ore[J]. Mining Research and Development,2023,43(11):202-207.

[12] 李勇,罗星,卢美玲,等.浮选回收云南某铜冶炼渣中的铜[J].矿产与地质,2020,34(3):614-618.
LI Yong, LUO Xing, LU Meiling, et al. Flotation recovery of copper from a copper smelting slag in Yunnan[J]. Mineral Resources and Geology,2020,34(3):614-618.

[13] 张凛,骆洪振,王海亮,等.国外某高硫铁矿磁浮联合选矿工艺试验研究[J].矿业研究与开发,2024,44(11):261-267.
ZHANG Lin, LUO Hongzhen, WANG Hailiang, et al. Experimental study on magnetic flotation combined beneficiation process of a high sulfur iron mine abroad[J]. Mining Research and Development,2024,44(11):261-267.

[14] 尧章伟,方建军,代宗,等.闪锌矿抑制剂的作用机理及研究进展[J].矿冶,2018,27(4):16-21.
YAO Zhangwei, FANG Jianjun, DAI Zong, et al. Reaction mechanism and research progress of sphalerite depressants [J]. Mining and Metallurgy,2018,27(4):16-21.

[15] 梁溢强,毛明发,宋涛,等.新型抑制剂在某铅锌硫混合精矿浮选分离中的应用[J].矿产保护与利用,2020,40(5):109-115.
LIANG Yiqiang, MAO Mingfa, SONG Tao, et al. Application of a new depressant in the flotation separation of a lead-zinc-sulfur bulk concentrate [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2020,40(5):109-115.

[16] 江锋.亚硫酸浮选分离铜铅硫化混合精矿的基础及应用研究[D].长沙:中南大学,2014.
JIANG Feng. Study on the fundamental and application of flotation separation of copper-lead sulphide concentrate with sulfurous acid[D]. Changsha: Central South University, 2014.