

## 云南某含银铜铅混合精矿分离试验研究

杨绍晶, 刘全军\*, 罗 帅

(昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093)

**摘要:** 云南某铜铅混合精矿含 Cu 8.14%、Pb 38.57%、Ag 251.62 g/t, 对其进行浮选试验研究铜铅的分离。通过条件试验, 确定在磨矿细度为-200 目含量为 93.85%的情况下, 抑制剂 CMC+亚硫酸钠用量选择 1000 g/t, 捕收剂 Z-200 用量选择 10 g/t。采用“抑铅浮铜”一粗三精一扫的闭路试验流程, 获得铜品位 24.73%、回收率 87.24%、含铅品位 6.23%的铜精矿; 铅品位 62.71%、回收率 84.48%, 含铜 0.86%的铅精矿。银在铜铅精矿中进一步富集的总回收率为 73.04%, 实现了该铜铅混合精矿的分离及银的进一步富集。

**关键词:** 多金属硫化矿; 铜铅分离; 抑铅浮铜; 抑制剂; 浮选

**中图分类号:** TF832 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2019)02-0019-07

### Experimental Study on Separation of a Silver-Bearing Cu-Pb Mixed Concentrate in Yunnan

YANG Shaojing, LIU Quanjun\*, LUO Shuai

(Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract:** A mixture of copper and lead in Yunnan contains 8.14% of Cu, 38.57% of Pb and 251.62 g/t of Ag. Flotation experiments were carried out to study the separation of copper and lead. Through the condition test, it was determined that for the concentrate at a grinding fineness of -200 mesh and a content of 93.85%, the ideal dosage of CMC + sodium sulfite as the inhibitor and Z-200 as the collector was 1000 and 10 g/t, respectively. By using the closed circuit test flow of "suppressing lead floating copper", a copper concentrate and a lead concentrate were separated out from the silver-bearing Cu-Pb mixed concentrate. The copper concentrate had a copper grade of 24.73% with a recovery of 87.24% and lead content had been reduced to 6.23%. The lead concentrate contained 62.71% Pb and 0.86% Cu with a lead recovery of 84.48%. A total recovery of silver could be up to 73.04% after a further enrichment process. These results indicate that the separation of the copper-lead mixed concentrate and the further enrichment of silver has been realized in the present study.

**Key words:** polymetallic sulfide ore; copper-lead separation; lead-free copper float; inhibitor; flotation

我国铜资源储量较多, 其总保有储量居世界第7位。在我国有色金属材料中, 铜的消费仅次于铝<sup>[1]</sup>。而铅则是矿业开发产业链中不可或缺的一种重要有色金属, 其在国民经济建设中的地位日趋重要, 被广泛应用于电气、机械、化工、冶金、医药、军工等领域<sup>[2]</sup>。我国是世界上铅资源比较丰富的国家之

一, 储量位于澳大利亚之后美国之前, 居世界第二位<sup>[3]</sup>。

云南某铜铅矿石的主要构造为碎裂岩化和稀疏浸染状, 选矿的目的矿物均为硫化物。黄铜矿、方铅矿、闪锌矿和黄铁矿的关系均较为密切, 大多相互镶嵌连生, 部分相互包裹, 粒度在细粒-粗粒范围,

收稿日期: 2018-11-26

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目(编号: 51764021)。

第一作者: 杨绍晶, 男, 硕士研究生, 研究方向: 资源综合利用与开发。E-mail: 317905202@163.com

\*通讯作者: 刘全军, 男, 教授, 研究方向: 资源综合利用与开发。E-mail: kmliuqj@sina.com

不利于铜和铅的分离。铜主要以独立矿物的形式赋存在黄铜矿中；铅主要以独立矿物的形式赋存在方铅矿中，银伴生于硫化矿物中，可通过载体浮选的方式进行回收<sup>[4-5]</sup>。

根据矿石性质，采用铜铅混浮的流程获得品位较高的铜铅混合精矿。铜铅矿物表面性质相近以及难免离子(矿物在水中受到氧化和水化作用，导致矿物晶格内部键能削弱、破坏，从而使表面一些离子溶解下来。这些离子与水中固有的离子，如  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $HCO_3^-$  等，统称为难免离子)对浮选的干扰导致铜铅分离难度较大。为获得高质量的铜铅精矿产品，同时对伴生其中的银进一步富集，对铜铅混合精矿进行浮选分离试验研究。

## 1 试验部分

### 1.1 矿石工艺矿物学性质

试验所用的矿样为铜铅混合浮选得到的铜铅粗精矿产品，经筛分分析磨矿细度为 80.54%。混合精矿多元素分析见表 1，X 射线衍射(XRD)图谱见图 1，铜、铅物相分析结果见表 2 和表 3。通过对铜铅混合精矿的工艺矿物学研究，混合精矿中有价元素的品位为 Cu 8.14%、Pb 38.57%、Zn 2.31%。其中元素铜、铅具有回收利用价值。根据表 1 可知，有害元素砷含量低，对提高铜精矿和铅精矿产品的质量无较大危害<sup>[6]</sup>。锌含量相对较低，没有达到多金属综合利用的边界品位，暂时不考虑回收。综合混合精矿的 XRD 分析结果和铜、铅的物相分析结果可知，铜几乎全部以硫化铜形式存在，具有较好的可浮性；铅大部分以方铅矿形式存在，少数以铅矾存在。其中主要的矿石矿物为黄铜矿和方铅矿，掺杂少量脉石矿物为方解石、石英和白云石等。银物相见表 4，大部分银以硫化物包裹银的形式存在于黄铜矿与方铅矿中，可以考虑以铜铅矿富集伴生的银。

### 1.2 试验材料与方案

#### 1.2.1 试剂

重铬酸钾(工业级，郑州科奇化工产品有限公司)，羧甲基纤维素(工业级，偃师市华杰助剂厂)，腐殖酸钠(工业级、济南裕沅生物科技有限公司)， $Na_2SO_3$ (分析纯，天津振泰化工有限公司)， $KMnO_4$ (工业级、河南子敬环保材料有限公司)，Z-200(乙硫氮，工业级，烟台惠通选矿药剂有限公司)，松醇油(2<sup>#</sup>油，工业级，寿光市科德化工有限公司)。

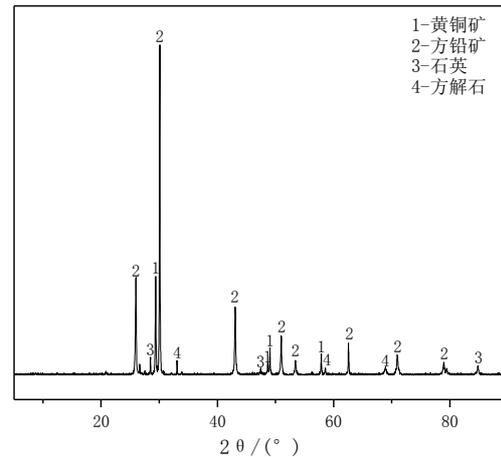


图 1 混合精矿 XRD 图谱

Fig.1 XRD patterns of the mixed concentrate

表 1 混合精矿多元素分析结果

Table.1 Multi-element analysis results of mixed concentrate

元素	Cu	Pb	Zn	S	Fe	SiO <sub>2</sub>
含量(%)	8.14	38.57	0.31	18.38	7.46	1.28
元素	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	As	Au/(g/t)	Ag/(g/t)
含量(%)	1.46	1.12	0.99	0.1	<0.1	251.62

表 2 铜物相分析结果

Tab.2 Results of physical phase analysis of Cu

物相	胆矾	游离氧化铜	结合氧化铜	硫化铜及其他	合计
含量/%	0.05	0.02	0.11	7.96	8.14
比例/%	0.61	0.25	1.35	97.79	100.00

表 3 铅物相分析结果

Tab.3 Results of physical phase analysis of Pb

物相	铅矾	白铅矿	方铅矿	铅铁矾及其他	合计
含量/%	1.63	0.68	35.84	0.42	38.57
比例/%	4.22	1.76	92.92	1.1	100

表 4 银物相分析结果

Tab.4 Results of physical phase analysis of Ag

物相	氧化银	裸露硫化银	硫化物包裹银	硅酸盐包裹银	合计
含量/(g/t)	1.86	20.43	228.24	1.08	251.62
比例/%	0.74	8.12	90.71	0.43	100

1.2.2 试验设备

XMQ-350×160 锥形球磨机(石城县浩鑫矿山机械制造厂), XFD 系列挂槽浮选机(长沙市秋龙仪器设备有限公司)、FA1104B 电子精密天平(上海康路仪器设备有限公司)、ZL-φ260/φ200 盘式真空过滤机(江西省威尔国际矿业装备有限公司)、QDO-1602 D 型恒温干燥箱(东莞市全壹检测设备有限公司)。

1.2.3 浮选试验

由矿石性质研究可知, 该矿石的重点是铜、铅精矿产品, 而难点在于铜、铅硫化矿石的抑制与活化。为确定最佳的混合浮选工艺及药剂制度, 通过一系列条件试验, 旨在寻求最佳的铜铅分离试验方案, 以实现该混合精矿的最大经济价值。

试验以选厂混合浮选生产的铜铅混合精矿为对象。在浮选试验之前对精矿进行再磨处理使磨矿细度变为-200 目含量占 93.85%, 目的是为了脱去矿物表面的药剂, 并增加矿物的新鲜表面, 使得药剂更好的作用于矿物表面上。试验对影响铜铅分离的抑制剂组合种类和用量以及铜的特定捕收剂的用量条件进行了探索, 最终获得了能实现铜铅分离的选矿药剂制度及工艺流程。

1.2.4 测定和计算

产品中铜、铅和银的含量测定通过委托专业分析测试机构完成。试验结果中产率根据产品质量与原矿质量的比值决定, 回收率根据产率和品位所计算的金属量推导而来。

2 结果与讨论

2.1 铜铅分离抑制剂种类探索试验

常见的铜铅分离抑制剂有: 重铬酸钾、腐殖酸钠、亚硫酸钠和 CMC(羧甲基纤维素钠盐)等<sup>[7]</sup>。为确定最佳的铜铅分离抑制剂种类, 采用常用的铜铅分离抑制剂进行抑制剂种类探索试验。试验抑制剂为等量配比, 用量为 500 g/t, 捕收剂 Z-200 用量为 10 g/t, 2<sup>#</sup>油用量为 20 g/t。条件试验的流程图如图 2 所示, 试验结果列于表 5。

从表 5 中可以看出, CMC+腐殖酸钠+高锰酸钾和亚硫酸钠+淀粉+硫化钠抑制作用不如重铬酸钾和 CMC+亚硫酸钠的分离效果明显。当加入 CMC+亚硫酸钠组合或单一重铬酸钾时相对于其它两组抑制剂时, 铜精矿中的铅含量明显降低且得到了较高的铜品位, 分离效果都比较理想; 但是重铬酸钾药剂具有剧毒而且对环境有危害<sup>[8]</sup>。综合考虑使用 CMC+亚硫酸钠的组合作为抑制剂。

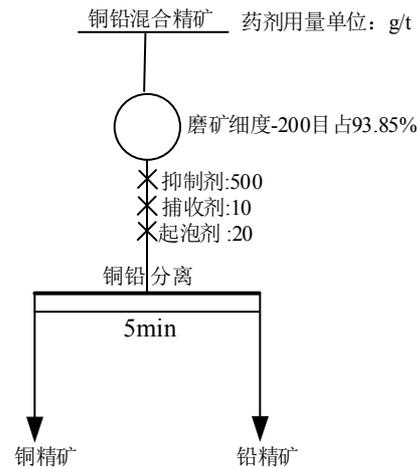


图 2 条件探索试验流程

Fig.2 Conditional exploration test process

表 5 抑制剂种类探索试验结果

Tab.5 Test results of the inhibitor species

抑制剂种类	产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
			Cu	Pb	Cu	Pb
亚硫酸钠	铜精矿	38.22	12.83	35.99	60.24	35.66
	+淀粉 铅精矿	61.78	5.24	40.17	39.76	64.34
	合计	100.00	8.14	38.57	100.00	100.00
CMC+亚硫酸钠	铜精矿	44.23	14.73	22.36	80.24	25.66
	铅精矿	55.77	2.88	51.39	19.76	74.34
	合计	100.00	8.12	38.55	100.00	100.00
重铬酸钾	铜精矿	47.85	13.93	20.76	81.58	25.79
	铅精矿	52.15	2.89	54.80	18.42	74.21
	合计	100.00	8.17	38.51	100.00	100.00
CMC	铜精矿	50.92	11.46	21.50	72.58	28.46
	+腐殖酸钠 铅精矿	49.08	4.49	56.06	27.42	71.54
	+高锰酸钾 合计	100.00	8.04	38.46	100.00	100.00

2.2 铜铅分离抑制剂用量探索试验

为确定铜铅分离抑制剂的最佳用量, 进行铜铅分离抑制剂用量试验。抑制剂确定为 CMC+亚硫酸钠。其余浮选条件与铜铅分离抑制剂种类试验相同的情况下, 按图 2 的流程进行条件试验, 试验结果见表 6。

从表 6 可知, 随着 CMC+亚硫酸钠用量的增加, 铜精矿中铜的回收率先增加后降低, 铅精矿中的铅回收率也是先增加后降低; 当抑制剂 CMC+亚硫酸钠用量为 1000 g/t 时效果最佳, 此时铜精矿中铜品位为 13.64%、回收率为 81.06%, 铅品位为 19.31%、回收率为 24.86%。综合考虑, 确定铜铅分离抑制剂 CMC+亚硫酸钠用量为 1000 g/t。

表6 CMC+亚硫酸钠用量试验结果

Tab.6 Dosage test results of CMC + sodium sulfite

抑制剂 用量/(g/t)	产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
			Cu	Pb	Cu	Pb
500	铜精矿	56.40	11.58	16.03	80.24	23.44
	铅精矿	43.60	3.69	67.73	19.76	76.56
	合计	100.00	8.14	38.57	100.00	100.00
1000	铜精矿	48.79	13.64	19.31	81.06	24.86
	铅精矿	51.21	3.04	55.60	18.94	75.14
	合计	100.00	8.21	37.89	100.00	100.00
1500	铜精矿	51.69	12.26	17.27	77.56	23.18
	铅精矿	48.31	3.79	61.23	22.44	76.82
	合计	100.00	8.17	38.51	100.00	100.00
2000	铜精矿	53.42	11.63	15.52	75.31	22.16
	铅精矿	46.58	4.37	62.54	24.69	77.84
	合计	100.00	8.25	37.42	100.00	100.00

### 2.3 铜铅分离捕收剂种类探索试验

按照条件试验逐一调优原则,确定了抑制剂的种类和用量,即CMC+亚硫酸钠的用量为1000 g/t。试验对象是混合浮选精矿,由于进行了再磨;对矿物表面产生了明显脱药效果,因此需要重新加入一定量的捕收剂<sup>[9-10]</sup>。进行铜铅分离捕收剂种类试验,探索最适宜铜铅分离的捕收剂。查阅相关文献,选取了丁基黄药、Z-200、乙基黄药、乙硫氮4种常见的捕收剂进行条件试验,试验流程参照图2,试验条件抑制剂用量为CMC+亚硫酸钠1000 g/t,捕收剂用量10 g/t,起泡剂2#油用量20 g/t,结果见表7。

表7 捕收剂种类用量试验结果

Tab.7 Type and dosage test results of the collector

捕收剂 种类	产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
			Cu	Pb	Cu	Pb
丁基黄药	铜精矿	53.50	12.52	27.74	81.88	38.58
	铅精矿	46.50	3.19	50.80	18.12	61.42
	合计	100.00	8.18	38.46	100.00	100.00
Z-200	铜精矿	44.30	15.84	18.76	85.47	21.75
	铅精矿	55.70	2.14	53.69	14.53	78.25
	合计	100.00	8.21	38.22	100.00	100.00
乙基黄药	铜精矿	46.31	13.93	19.01	78.48	22.79
	铅精矿	53.69	3.29	55.55	21.52	77.21
	合计	100.00	8.22	38.63	100.00	100.00
乙硫氮	铜精矿	48.43	13.88	18.15	82.58	23.79
	铅精矿	51.57	2.75	54.60	17.42	76.21
	合计	100.00	8.14	36.95	100.00	100.00

由表7可见,Z-200对铜的选择性捕收效果非常明显,铜精矿中铅的含量明显降低,铅精矿中铅的品位也明显提高。其它的3种捕收剂中,丁基黄药的选择性较差,铜精矿中铅含量较高;乙基黄药和乙硫氮效果相近,但是铜铅回收率不如Z-200效果理想。对比试验数据,确定捕收剂为Z-200。

### 2.4 铜铅分离捕收剂用量探索试验

Z-200是美国道化学公司开发的硫氨酯类捕收剂,其化学名称为O-异丙基-N-乙基硫代氨基甲酸酯。Z-200具有选择性好、捕收能力强、用量少等优点,是硫化铜矿浮选应用最广泛的捕收剂之一<sup>[6]</sup>。在混合浮选铜铅混合精矿再磨的条件下,会产生脱药效果。为确定铜铅分离中最佳的捕收剂用量,对铜铅分离中Z-200的用量进行考察,试验条件与捕收剂试验一致,试验流程按照图2流程进行,试验结果见表8。

表8 铜铅分离中Z-200用量试验结果

Tab.8 Test results of Z-200 dosage in copper and lead separation text

捕收剂 用量/(g/t)	产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
			Cu	Pb	Cu	Pb
0	铜精矿	37.61	15.78	19.56	72.12	19.05
	铅精矿	62.39	3.68	50.11	27.88	80.95
	合计	100.00	8.23	38.62	100.00	100.00
5	铜精矿	40.25	15.54	22.30	76.19	23.67
	铅精矿	59.75	3.27	48.44	23.81	76.33
	合计	100.00	8.21	37.92	100.00	100.00
10	铜精矿	43.93	15.24	22.90	80.28	26.28
	铅精矿	56.07	2.93	50.33	19.72	73.72
	合计	100.00	8.34	38.28	100.00	100.00
15	铜精矿	50.33	13.93	22.20	84.98	28.79
	铅精矿	49.67	2.49	55.64	15.02	71.21
	合计	100.00	8.25	38.81	100.00	100.00
20	铜精矿	54.60	12.93	22.07	85.58	31.29
	铅精矿	45.40	2.62	58.29	14.42	68.71
	合计	100.00	8.25	38.51	100.00	100.00

从表8可以看出,在捕收剂用量0~10 g/t范围内,在极其少量残留药剂的作用下,随着Z-200用量的增加铜精矿中铜的品位都有提升;但随着捕收剂用量的继续增大铜精矿中的铅品位和回收率都在一定程度上增加了,而且铅精矿的回收率随之降低。主要原因是因为捕收剂用量大之后,铜的特效捕收

剂也会逐渐丧失选择性，铅的抑制困难了，随之也把铅精矿浮出，最终影响铜铅分离效果。因此为得到最佳的效果，铜铅分离浮选时捕收剂 Z-200 的用量确定为 10 g/t。

### 3 全流程开路试验

在条件试验的基础上，已近确定了铜铅分离的

抑制剂、捕收剂种类以及具体药剂的用量。为进一步确定合适的精扫选次数和制定合理高效的闭路流程提供理论依据进行全流程开路试验。试验药剂制度为：抑制剂 CMC+亚硫酸钠 1000 g/t，捕收剂 Z-200 用量为 10 g/t，2#油用量 20 g/t；铅粗选活化剂硫酸铜用量 100 g/t，捕收剂丁黄用量 50 g/t。全流程开路试验流程见图 3，结果列于表 9。

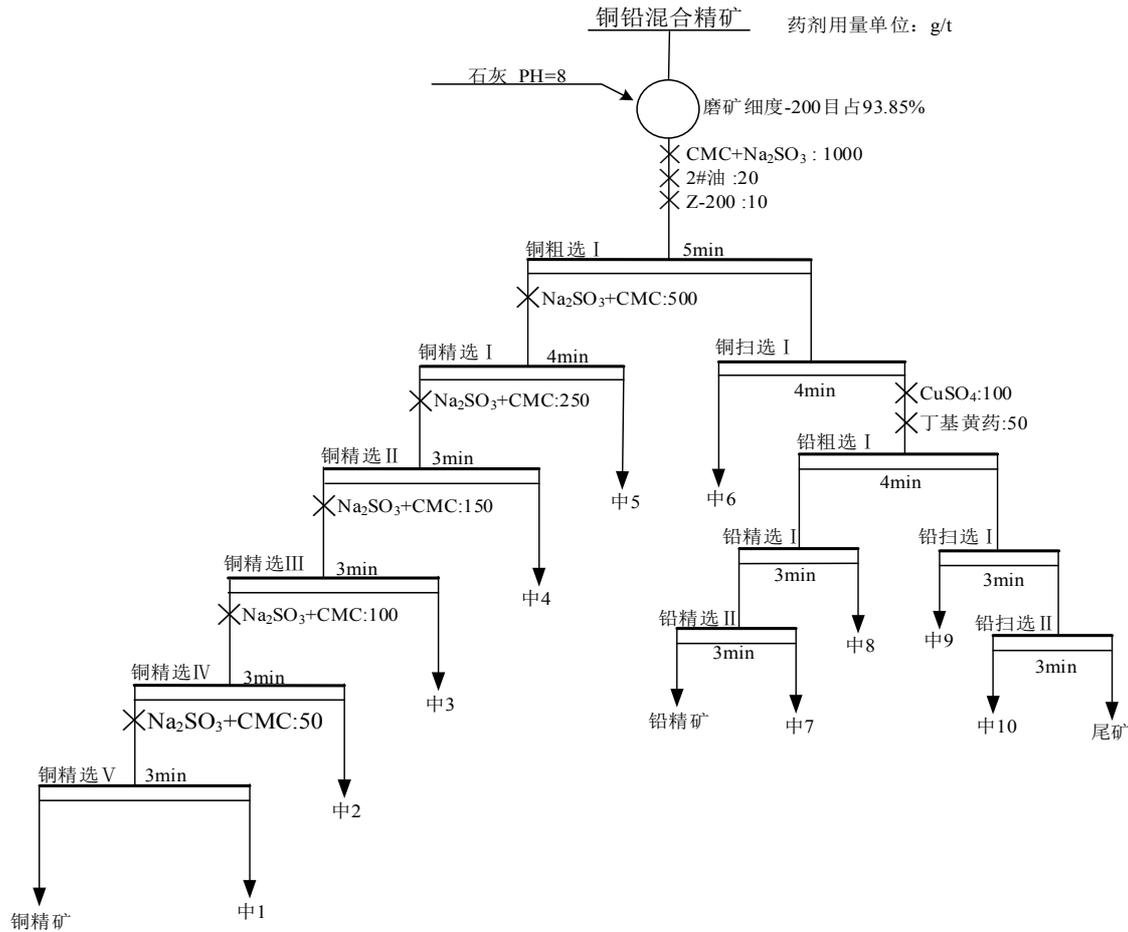


图 3 全开路试验流程

Fig.3 Full open circuit test procedure

表 9 全流程开路试验结果

Tab.9 Test results of full process open circuit text

产品名称	产率/%		品位/%				回收率/%			
	单个	累计	Cu		Pb		Cu		Pb	
			单个	累计	单个	累计	单个	累计	单个	累计
铜精矿	26.54	26.54	21.06	21.06	5.26	5.26	66.86	66.86	3.73	3.73
中 1	0.78	27.32	18.52	20.99	5.57	1.18	1.73	68.59	0.12	3.85
中 2	1.15	28.47	16.34	20.80	6.54	5.32	2.25	70.83	0.20	4.05
中 3	2.43	30.90	15.32	20.37	8.47	5.57	4.45	75.29	0.55	4.60
中 4	3.18	34.08	14.14	19.79	10.05	5.99	5.38	80.67	0.85	5.45
中 5	3.53	37.61	8.06	18.69	16.34	6.96	3.40	84.07	1.54	6.99
中 6	5.32	42.93	4.15	16.89	23.27	8.98	2.64	86.71	3.31	10.30

续表 9 (Tab.9 continued)

产品名称	产率/%		品位/%				回收率/%			
	单个	累计	Cu		Pb		Cu		Pb	
			单个	累计	单个	累计	单个	累计	单个	累计
中 7	0.49	43.42	1.13	16.71	24.82	9.16	0.07	86.78	0.33	10.63
中 8	1.54	44.96	1.30	16.18	20.34	9.54	0.24	87.02	0.84	11.46
中 9	2.33	47.29	0.81	15.42	19.45	10.03	0.23	87.24	1.21	12.67
中 10	0.77	48.06	0.57	15.18	15.44	10.12	0.05	87.29	0.32	12.99
铅精矿	44.71	92.77	2.16	8.91	71.95	39.92	11.55	98.85	85.97	98.96
尾矿	7.23	100.00	1.33	8.36	5.38	37.42	1.15	100.00	1.04	100.00
合计	100.00		8.36		37.42		100.00		100.00	

由表 9 可以看出, 因为选铜流程的中 1、中 2 和铜尾矿“一粗两精两扫”的中 7、中 10 产率都太低, 所以没必要将铜、铅精矿品位提高来损失回收率。综合考虑增加流程带来的经济效益并不理想, 最终选择了选铜“一粗三精一扫”, 选铜尾矿“一粗一精一扫”的开路流程。

#### 4 闭路流程试验

为确定最终试验闭路流程, 根据条件试验及开路试验进行闭路试验, 选别流程和药剂制度如图 4 所示。铜铅混合精矿经过再磨至-200 目含量为 93.58%, 再经过选铜“一粗三精一扫”, 选铜尾矿

“一粗一精一扫”, 中矿循环返回的闭路流程, 结果列于表 10。

表 10 闭路试验结果

Tab.10 Test results of closed circuit

产品名称	产率	品位/%			回收率/%		
		Cu	Pb	Ag/g/t	Cu	Pb	Ag
铜精矿	34.45	18.68	6.96	538.67	77.35	6.21	73.07
铅精矿	58.78	3.14	61.29	108.58	22.18	93.28	25.13
尾矿	6.77	0.58	2.87	67.12	0.47	0.50	1.79
合计	100.00	8.32	38.62	253.95	100.00	100.00	100.00

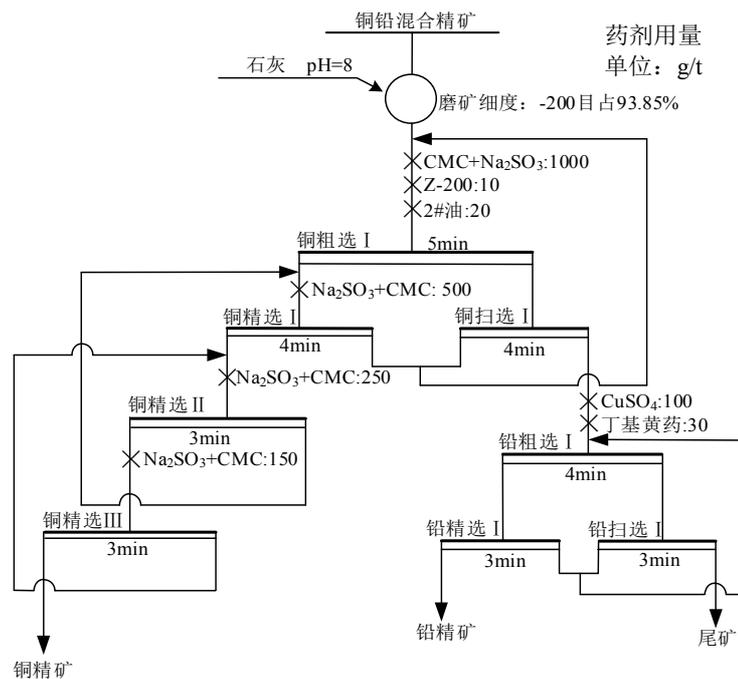


图 4 闭路试验流程

Fig.4 Closed circuit test process

由表 10 可知, 采用选铜“一粗三精一扫”, 选铜尾矿“一粗一精一扫”, 中矿循环返回的闭路流程。最终可获得品位 18.68%、回收率 77.35% 的合格铜精矿; 获得铅精矿的铅品位为 61.29%、铅回收率 93.28% 的铅精矿。同时经检测铜精矿中含银 538.67 g/t、铅精矿含银 108.58 g/t, 可以实现银的回收率达到 98.21%。

## 5 结论

1) 云南某铜铅矿经过混合浮选得到的铜铅混合精矿铜品位 8.14%, 铅品位 38.57%, 银品位 251.62 g/t, 该精矿主要有用矿物为黄铜矿和方铅矿, 其中银伴生在黄铜矿、方铅矿等硫化矿物中。

2) 通过条件试验, 确定磨矿细度为-200 目含量为 93.85%, 抑制剂 CMC+亚硫酸钠用量为 1000 g/t, 捕收剂 Z-200 用量为 10 g/t, 同时确定了选铜“一粗三精一扫”, 选铜尾矿“一粗一精一扫”, 中矿循环返回的闭路流程。

3) 根据闭路试验结果, 获得铜精矿铜品位 18.68%、回收率 77.35%, 含银 538.67 g/t, 铅精矿铅品位 61.29%、回收率 93.28%, 含银 108.58 g/t。通过试验结果分析确定了最佳的选别方案, 同时使用了环境友好型药剂, 降低了选矿过程对环境的污染及选别成本。

## 参考文献:

- [1] 毛富邦, 郭超华, 陶恒畅. 内蒙古某铅锌矿石铜铅分离试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2018(5): 36-42.  
MAO F B, GUO C H, TAO H C. Experimental study on the separation of copper and lead from a lead-zinc ore in inner mongolia[J]. Nonferrous metals (Mineral processing section), 2018(5): 36-42.
- [2] 刘守信, 师伟红. 某铜铅混合精矿浮选分离试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2008(5): 11-13.  
LIU S X, SHI W H. Experimental study on flotation separation of a copper-lead mixed concentrate[J]. Non-ferrous metals (Mineral processing), 2008(5): 11-13.
- [3] 郎淳慧, 邢洪波, 韩治纬. 某铜铅混合精矿铜铅分离试验研究[J]. 黄金, 2015, 36(2): 69-72.  
LANG C H, XING H B, HAN Z W. Experimental study on separation of copper and lead from a copper-lead mixed concentrate[J]. Gold, 2015, 36(2): 69-72.
- [4] 叶峰宏, 刘全军, 邓荣东, 等. 铜铅混合精矿的分离试验研究[J]. 矿冶, 2012(4): 46-49.  
YE F H, LIU Q J, DENG R D, et al. Experimental study on separation of copper-lead mixed concentrate[J]. Mining and metallurgy, 2012 (4): 46 -49.
- [5] 骆任, 韦华祖, 魏党生, 等. 四川某铜铅混合精矿铜铅浮选分离试验研究[J]. 湖南有色金属, 2013, 29(1): 10-13.  
LUO R, WEI H Z, WEI D S, et al. Experimental study on flotation separation of copper and lead from a copper-lead mixed concentrate in Sichuan[J]. Hunan nonferrous metals, 2013, 29 (1): 10-13.
- [6] 朱厚生. Z-200 捕收剂在多宝山铜业选矿厂生产应用实践[J]. 有色金属(选矿部分), 2018(4): 82-84.  
ZHU H S. Production and application of Z-200 collector in Duobaoshan copper concentrator[J]. Non-ferrous metals (Mineral processing), 2018 (4): 82-84.
- [7] 姜亚雄, 谢海云, 刘畅, 等. 铜铅硫化矿混合精矿浮选分离研究现状[J]. 矿冶, 2012, 21(2): 37-41.  
JIANG Y X, XIE H Y, LIU C, et al. Research status of flotation separation of copper-lead sulphide ore mixed concentrate[J]. Mining and metallurgy, 2012, 21(2): 37-41.
- [8] 张晶, 王少东, 乔吉波, 等. 某铜铅锌矿清洁浮选技术研究[J]. 矿冶工程, 2008(6): 49-52.  
ZHANG J, WANG S D, QIAO J B, et al. Study on clean flotation technology of a copper-lead-zinc mine[J]. Mining and metallurgical engineering, 2008(6): 49-52.
- [9] 谢志锋, 邱延省, 尹艳芬, 等. 江西某铜铅混合精矿浮选分离试验研究[J]. 矿冶工程, 2015, 35(6): 46-48.  
XIE Z F, QIU Y S, YIN Y F, et al. Experimental study on flotation separation of a copper-lead mixed concentrate in Jiangxi province[J]. Mining and metallurgical engineering, 2015, 35(6): 46-48.
- [10] 魏明安, 孙传尧. 硫化铜、铅矿物浮选分离研究现状及发展趋势[J]. 矿冶工程, 2008(2): 6-16  
WEI M A, SUN C Y. Research status and development trend of flotation separation of copper sulfide and lead minerals[J]. Mining and metallurgical engineering, 2008(2): 6-16.