内蒙古某黝铜矿型铜银多金属硫化矿浮选试验研究*

施雨航，王帅，宋宝旭，黄恩铭，马芳源，南楠

（辽宁科技大学 矿业工程学院， 辽宁 鞍山市 114001）

摘要：以内蒙古某铜银多金属硫化矿为研究对象，进行工艺矿物学分析和浮选试验研究。矿石性质研究结果表明，原矿中除了少量黄铜矿、闪锌矿与方铅矿以外，铜银主要以银黝铜矿形式存在。浮选试验研究表明，首先采用铜银混合浮选流程，实现铜银矿物与闪锌矿的分离，其次对混合浮选精矿进行再磨浮选，实现铜银与方铅矿的分离，最终确定了铜银混合浮选—混浮精矿再磨—铜银浮选精选的工艺流程。闭路试验获得了铜品位为18.98%、回收率为80.98%，银品位为10 521.88 g/t、回收率为89.81%的铜银精矿，浮选尾矿给入后续的铅锌分离作业，实现了铜银矿产资源的高效综合利用。

关键词：浮选；黝铜矿；铜银多金属硫化矿；品位；回收率

中图分类号：TD952 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2025)03-0253-08

Experimental Study on Flotation of a Tetrahedrite-Type Copper-Silver Polymetallic Sulfide Ore in Inner Mongolia

SHI Yuhang, *WANG Shuai*, *SONG Baoxu*, *HUANG Enming*, *MA Fangyuan*, *NAN Nan*

(School of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan, Liaoning 114001, China)

Abstract: Taking a copper-silver polymetallic sulfide ore in Inner Mongolia as the research object, the process mineralogy analysis and flotation tests were carried out. The research results of ore properties show that except for a small amount of chalcopyrite, sphalerite and galena in the raw ore, copper and silver mainly exist in the form of silver tetrahedrite. The flotation tests show that, firstly, the copper-silver mixed flotation process is used to realize the separation of copper-silver minerals and sphalerite. Secondly, the mixed flotation concentrate is reground and floated to realize the separation of copper-silver and galena. Finally, the process flow of copper-silver mixed flotation-regrinding of mixed flotation concentrate-copper-silver flotation concentration is determined. The copper-silver concentrate with copper grade of 18.98%, copper recovery rate of 80.98%, silver grade of 10 521.88 g/t and silver recovery rate of 89.81% is obtained by closed-circuit test. By feeding the flotation tailings into the subsequent lead-zinc separation operation, the efficient comprehensive utilization of copper-silver mineral resources has been realized.

Key words: Flotation, Tetrahedrite, Copper-silver polymetallic sulfide ore, Grade, Recovery rate

0 引言

铜是重要的有色金属原料，在电气、国防、机械化工及农业等领域应用广泛，与人类社会的发展密切相关[1]。银是重要的贵金属，不仅具备金融储备职能，还以其独特的物理和化学性质成为国家经济发展、现代化工业以及人民生活中不可或缺的重要材料[2]。

我国独立银矿床较少，主要以共伴生元素富集在有色金属硫化矿中。近年来，在内蒙古发现大量的含银多金属硫化矿床，是我国拥有银矿床最多的省份。在矿石类型方面，银属铜型离子，亲硫，极化能力强，主要以类质同象的形式赋存在黝铜矿中，含银黝铜矿是内蒙古银矿产资源的重要类型[3]。

银黝铜矿作为同时含有铜和银的有价矿物，综合利用价值巨大，由于其可浮性较好，主要采用浮选法回收。针对银黝铜矿整体嵌布粒度较微细且不均匀等问题，往往需要更细的磨矿细度，而精矿中的铜银品位普遍较低，铅锌含量也严重超标[4]。近年来，一些选矿工作者加强了对有色金属矿中银、铜回收

* **收稿日期**：2024-04-05

基金项目：辽宁科技大学博士启动基金项目(601010337)

作者简介：施雨航(1999—)，男，江苏盐城人，硕士研究生，主要研究方向为稀有及贵金属矿产资源综合利用。E-mail：1824833527@qq.com

通信作者：宋宝旭(1987—)，男，辽宁鞍山人，博士，副教授，主要研究方向为稀有及贵金属矿产资源综合利用。E-mail：songbaoxu@ustl.edu.cn

利用的研究,开展了大量试验工作,并取得了一系列的研究成果[5]。

以内蒙古某黝铜矿型铜银多金属硫化矿为研究对象,在矿石性质研究基础上,开展了浮选试验研究,最终采用铜银混合浮选-混浮精矿再磨-铜银浮选精选的工艺流程,实现了铜银矿产资源的高效综合利用。

1 试验样品和方法

1.1 试验样品

试验样品取自内蒙古某铜银多金属硫化矿床,主要元素分析结果见表1。由表1可知,原矿银品位高达125 g/t,达到了银矿独立开采标准,铜品位为0.27%,达到了银矿共伴生组开采标准,是伴生铜的银矿石[6]。

表1 矿石主要化学多元素含量

Table 1 Content of main chemical multi-element of ore %

Ag*	Cu	Zn	Pb	S
125	0.27	1.15	0.14	3.25
Fe	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3
6.36	67.12	0.29	0.33	14.12

注:* 表示Ag的单位为g/t。

1.2 矿石矿物组成及含量

为了进一步查明矿石中的主要矿物类型和含量,采用高级矿物鉴定和表征系统(AMICS)进行测定,矿物组成测定结果见表2。由表2可知,除了有以硫锑铜银矿、螺状硫银矿为主的独立银矿物以外,仍含有大量以黝铜矿为载体的含银矿物,既有本身已进入黝铜矿晶格、以化学负载形式形成的银黝铜矿[7],也有以分散吸附态赋存在黝铜矿中、以物理负载形式存在的含银黝铜矿,两者的回收优劣会直接影响银和铜的回收率。在选矿回收过程中,需关注以方铅矿和闪锌矿为主的铅锌矿物的走向,降低对铜银指标的影响,并实现综合利用[8]。

表2 矿石矿物组成及含量

Table 2 Minerals composition and content of ore %

银黝铜矿	含银黝铜矿	硫锑铜银矿	螺状硫银矿	黝铜矿	黄铜矿	黄铁矿	闪锌矿
0.25	0.34	微量	微量	0.36	0.04	3.90	2.05
石英	长石	绢云母	黑云母	次透辉石	电气石	钙铝榴石	方铅矿
49.16	3.10	11.01	0.08	0.03	23.67	0.11	0.12
高岭土	榍石	锆石	磷灰石	绿泥石	方解石	其他	合计
1.75	0.01	0.32	0.04	1.19	0.03	0.40	100.00

试样中铜银主要赋存在银黝铜矿中,银黝铜矿的结晶粒度与连生情况是影响铜银精矿质量的重要因素。对样品中主要矿物的嵌布粒度进行了测定,测定结果如图1所示。由图1可知,闪锌矿的嵌布粒度集中在+0.074 mm粒级,整体嵌布粒度较粗,相对易解离。方铅矿嵌布粒度主要集中在-0.043 mm粒级,整体嵌布粒度较细,相对难解离。而以黝铜矿为载体的含银矿物嵌布粒度较分散,需要在磨矿过程中密切关注其解离情况,最大限度防止过磨情况的发生[9]。

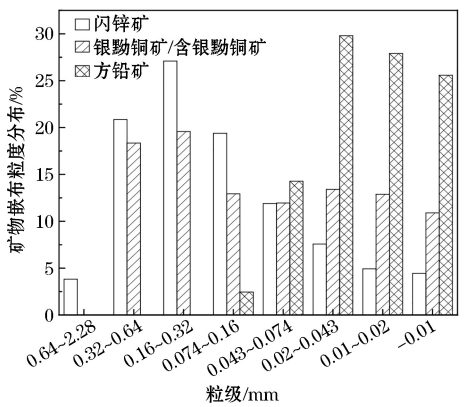


图1 主要矿物嵌布粒度测定结果(-2 mm)

Fig.1 Determination results of disseminated grain size of main mineral (-2 mm)

对铜、银的赋存状态进行了查定,查定结果见表3。由表3可知,铜主要赋存在黝铜矿和黄铜矿中,两者的回收优劣直接决定了铜回收率的高低;银主要赋存于独立银矿物和黝铜矿中[10],高效回收含银矿物是回收的关键。

表3 铜、银在矿石中的赋存状态

Table 3 Occurrence state of copper and silver in ore

矿物	矿物含量/%	元素含量		占有率/%	
		Cu/%	Ag/(g/t)	Cu	Ag
独立银矿物(不含银黝铜矿)	—	—	—	—	54.71
黄铜矿	0.04	34.44	—	5.09	—
银黝铜矿	0.61	36.55	7323.00	82.31	35.74
闪锌矿	2.05	0.19	250.33	1.44	4.11
方铅矿	0.12	—	1302.55	—	1.25
黄铁矿	3.90	0.06	57.01	0.86	1.78
脉石矿物	92.99	0.03	3.25	10.30	2.41
其他	0.29	—	—	—	—
合计	100.00	0.27	125.00	100.00	100.00

1.3 试验方法

浮选试验每次取矿样500 g,经实验室磨机磨矿

后,在XFD型1.5 L浮选机中浮选,试验用水为自来水,对浮选泡沫产品和槽内产品分别进行过滤、烘干、称重、制样、化验后,计算产率和回收率。试验采用"一粗一扫"的流程结构,考察磨矿细度、锌抑制剂、捕收剂种类及用量对指标的影响,确定最佳的药剂制度和工艺流程,并在此基础上进行了全流程闭路试验。

2 结果与讨论

2.1 铜银与锌的分选

2.1.1 原矿磨矿细度条件试验结果分析

有用矿物单体解离是矿石有效分选的先决条件,未完全解离或者过分解离[11],会增加浮选难度。磨矿细度对选别指标有决定性的影响[12],首先对矿石进行磨矿细度试验研究,产品磨矿细度以−0.074 mm质量百分比表示,分析不同磨矿细度条件下精矿产品铜品位和回收率、银品位和回收率的变化,结果如图2所示。由图2可知,随着磨矿细度的增加,铜品位和回收率、银品位和回收率均呈现增加的趋势,当磨矿细度大于65%时,铜品位和回收率、银品位和回收率有所减少。综上,磨矿细度宜选择−0.074 mm占65%。

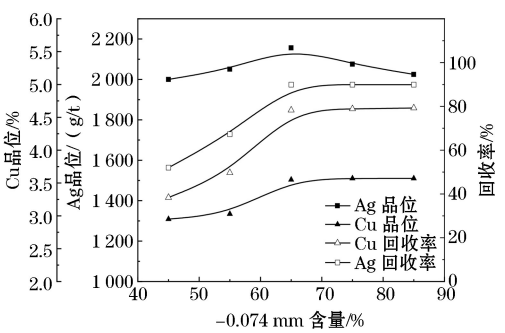


图2 原矿磨矿细度条件试验结果

Fig.2 Results of raw ore grinding fineness test

2.1.2 锌抑制剂种类及用量试验结果分析

该矿石中锌矿物主要是以闪锌矿为主,含量高达2.05%。有效的分选决定了铜银粗精矿产品的质量,在磨矿细度−0.074 mm占65%、丁铵黑药用量为60 g/t的条件下进行抑制剂种类及用量的试验研究[13],结果如图3所示。由图3可知,随着石灰+硫酸锌的用量由1 500 g/t(m_1∶m_2=0∶1 500,m_1为石灰,m_2为硫酸锌)增加到9 500 g/t(m_1∶m_2=16∶3),铜银精矿的回收率呈下降趋势。李志婷等[14]认为过量的石灰会导致矿浆中羟基钙化合物在细微粒单体银黝铜矿表面聚集或吸附,对上浮产生不利影响。随着碳酸钠+硫酸锌的用量由0增加到2 000 g/t(m_3∶m_2=1∶1,m_3为硫酸钠),银品位和铜品位呈上升趋势,锌品位和回收率明显降低,碳酸钠+硫酸锌的用量由2 000 g/t(m_3∶m_2=1∶1)增加到4 000 g/t(m_3∶m_2=1∶1)时,银品位和铜品位呈下降趋势。综上,后续试验选用碳酸钠+硫酸锌用量为2 000 g/t(m_3∶m_2=1∶1)。

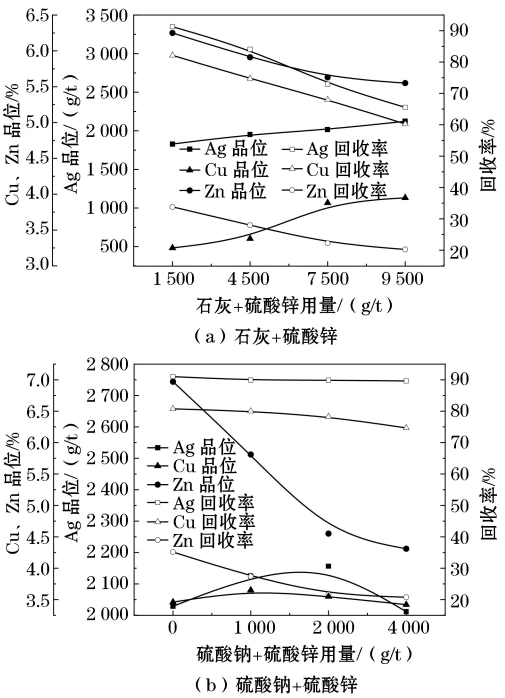


图3 锌抑制剂种类及用量试验结果

Fig.3 Results of types and dosages test of zinc inhibitors

2.1.3 铜银捕收剂种类及用量试验结果分析

丁铵黑药与Z-200对铜银矿物均具有相对较好的选择性捕收效果,是铜银矿物常用的选择性捕收剂[15]。基于此,分别考查丁铵黑药、Z-200、丁铵黑药+Z-200对铜银回收指标的影响。试验采用"一粗一扫"的流程结构,固定磨矿细度为−0.074 mm占65%,锌抑制剂选择硫酸锌+碳酸钠,固定其用量为2 000 g/t,扫选用量为粗选的四分之一,试验结果如图4所示。由图4可知,在同等药剂用量条件下,对铜银矿物的捕收效果中,丁铵黑药用量为60 g/t时,铜和银的回收率呈上升趋势,品位均呈缓慢下降趋势,当丁铵黑药用量从60 g/t增加到120 g/t时,铜和银的回收率并未发生显著变化,品位呈下降趋势。而Z-200和丁铵黑药+Z-200组合均不能得到优良试验指标。因此,后续试验选用丁铵黑药用量为60 g/t。

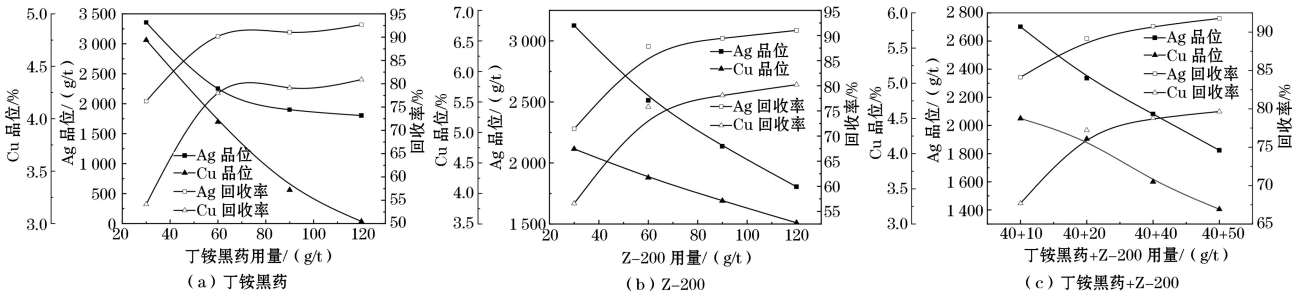


图 4 捕收剂种类及用量试验结果

Fig.4 Results of type and dosage test of collector

2.1.4 铜银与锌的分选闭路试验

根据磨矿细度、抑制剂种类及用量和捕收剂种类及用量浮选条件试验确定的最佳操作参数,进行铜银与锌分选的闭路试验,试验采用"一粗两扫两精"的流程结构[16],结果见表 4。由表 4 可知,铜银粗精矿的银品位为 3 866.12 g/t,达到产品要求,但铜品位为 6.9%,并未达到产品要求,后续如何提高铜银粗精矿中的铜品位是浮选试验的关键。

表 4 铜银与锌的分选闭路试验结果

Table 4 Results of separation closed-circuit test of copper-silver and zinc

产品名称	产率/%	品位/%				回收率/%			
		Ag*	Cu	Zn	Pb	Ag	Cu	Zn	Pb
铜银粗精矿	3.02	3 866.12	6.90	7.24	3.99	93.41	83.32	19.18	86.15
浮选尾矿	96.98	8.50	0.04	0.95	0.02	6.59	16.68	80.82	13.85
原矿	100.00	125.00	0.25	1.14	0.14	100.00	100.00	100.00	100.00

注:* 表示 Ag 的单位为 g/t。

2.2 铜银粗精矿的精选

为了查明铜银粗精矿铜品位低的原因,对铜银粗精矿中的铜矿物嵌布特征进行了分析,如图 5 所示。由图 5 可知,铜银粗精矿中的黝铜矿与方铅矿和闪锌矿存在较为复杂的连生关系[17],特别是方铅矿,不仅嵌布粒度主要集中在 −0.043 mm 粒级,而且与黝铜矿紧密连生[18]。

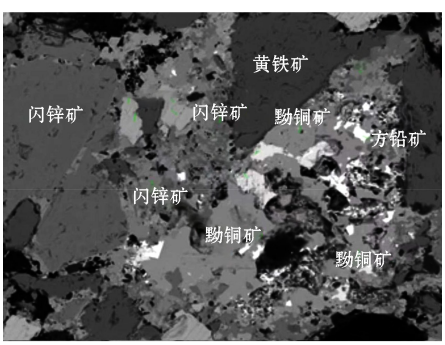


图 5 铜银粗精矿中黝铜矿的嵌布特征

Fig.5 Embedding characteristics of tetrahedrite in copper-silver rough concentrate

2.2.1 再磨磨矿细度试验结果分析

嵌布特征研究结果表明,导致铜精矿品位较低的主要原因是存在大量的方铅矿和闪锌矿与黝铜矿紧密连生[19]。因此对铜银粗精矿进行了再磨磨矿细度试验,产品磨矿细度用 −0.043 mm 质量百分比表示,考察不同磨矿细度条件下,精矿产品铜品位和回收率的变化,结果如图 6 所示。由图 6 可知,随着磨矿细度的增加,铜和银的回收率呈上升趋势,当 −0.043 mm 质量百分比大于 80%时,回收率趋于稳定,主要是因为方铅矿和闪锌矿的嵌布粒度细[20]。综上,磨矿细度宜选择 −0.043 mm 占 80%。

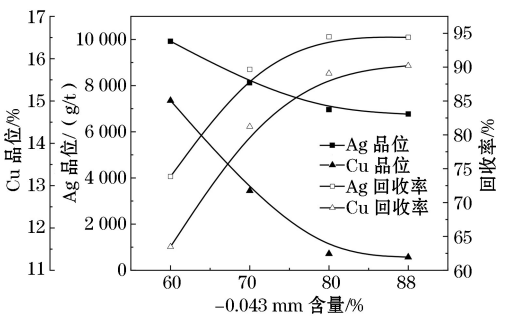


图 6 再磨磨矿细度试验结果

Fig.6 Results of regrinding fineness test

2.2.2 锌抑制剂种类及用量试验结果分析

由于交互影响的存在[21],随着磨矿细度的变化,抑制剂种类及用量存在相应的差异,为高效抑制微细粒的铅锌矿物,分别选择石灰和硫化钠做锌抑制剂,考查不同用量对铜银回收指标的影响。

试验采用“一粗一扫”的流程结构,再磨磨矿细度为-0.043 mm 占 80%,丁铵黑药用量为 60 g/t,结果如图 7 所示。

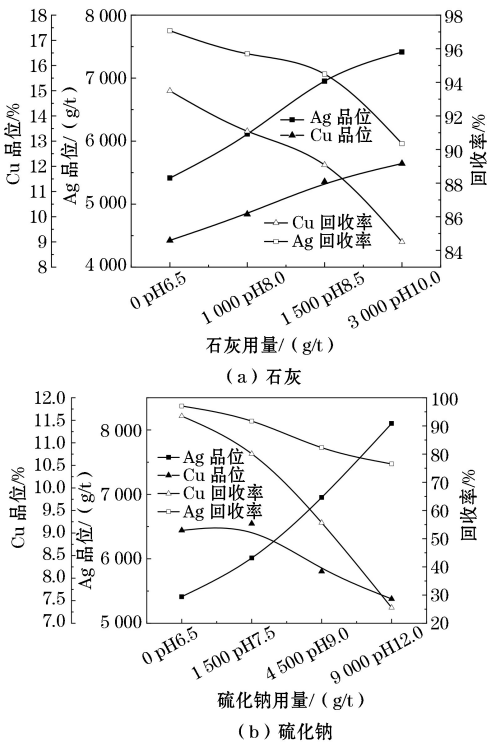


图 7 锌抑制剂种类及用量试验结果

Fig.7 Results of type and dosage test of zinc inhibitors

由图 7(a)可知,随着石灰用量由 0 增加到1 500 g/t,铜和银的品位不断提高,回收率下降则无显著变化。当石灰用量由 1 500 g/t 增加到 3 000 g/t 时,铜和银的回收率快速下降。表明过量的石灰导致矿浆中大量羟基钙化合物在微细粒单体银黝铜矿表面聚集或吸附,对上浮产生不利影响[22]。由图7(b)可知,随着硫化钠用量由 0 到9 000 g/t,铜和银的回收率快速下降,硫化钠用量越大,回收率下降越多,这说明硫化钠对该矿中的铜、银矿物有明显的抑制作用,添加硫化钠对铜和银的回收不利[23]。综上,后续试验选用石灰用量为1 500 g/t。

2.2.3 丁铵黑药用量试验结果分析

在再磨磨矿细度为-0.043 mm 占 80%、抑制剂石灰质量为 1 500 g/t、矿浆 pH 为 8.5、不添加活化剂的条件下,采用“一粗一扫”的流程结构,研究捕收剂丁铵黑药用量在 30~120 g/t 范围内对浮选指标的影响[24],试验结果如图 8 所示。

由图 8 可知,随着捕收剂丁铵黑药用量的增加,浮选精矿的铜银品位呈下降趋势,回收率总体呈上升趋势,在捕收剂用量为 60 g/t 时,得到银品位为 6 958.58 g/t,铜品位为 11.39%,银回收率为 93.69%,铜回收率 87.85%的分选指标。综合考虑药剂用量及生产指标,选用捕收剂丁铵黑药用量为 60 g/t。

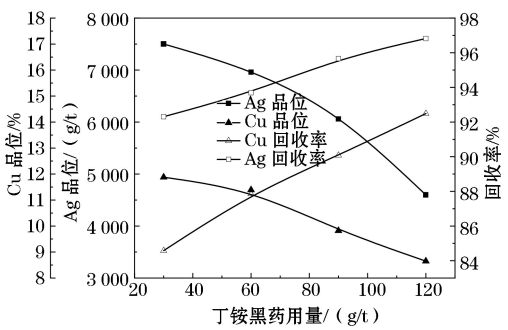


图 8 丁铵黑药用量试验结果

Fig.8 Results of dosage test of ammonium butyl aerofloat

2.2.4 铜银粗精矿精选闭路试验

在条件试验基础上,进行了铜银粗精矿精选闭路试验,试验采用“一粗两扫三精”的流程结构,再磨磨矿细度为-0.043 mm 占 80%,锌抑制剂选择石灰,粗选固定其用量为 1 500 g/t,捕收剂选择丁铵黑药,粗选固定其用量为 60 g/t,扫选用量为粗选的四分之一,试验结果见表 5。

表 5 铜银粗精矿精选闭路试验结果

Table 5 Results of closed-circuit test for selection of copper-silver rough concentrate cleaning

产品名称	作业产率/%	品位/%				作业回收率/%			
		Ag*	Cu	Zn	Pb	Ag	Cu	Zn	Pb
铜银精矿	35.43	10 521.88	18.98	4.93	3.97	96.17	97.20	24.14	35.26
精选尾矿	64.57	214.06	0.30	8.50	4.00	3.83	2.80	75.86	64.74
给矿	100.00	3 866.12	6.90	7.24	3.99	100.00	100.00	100.00	100.00

注:* 表示 Ag 的单位为 g/t。

由表 5 可知,获得了银品位为 10 521.88 g/t、铜品位为 18.98%的铜银精矿,均达到了铜银产品要求,实现了铜银资源的高效综合利用[25]。

2.3 综合试验指标

最终确定的全工艺流程如图 9 所示,综合试验指标见表 6。

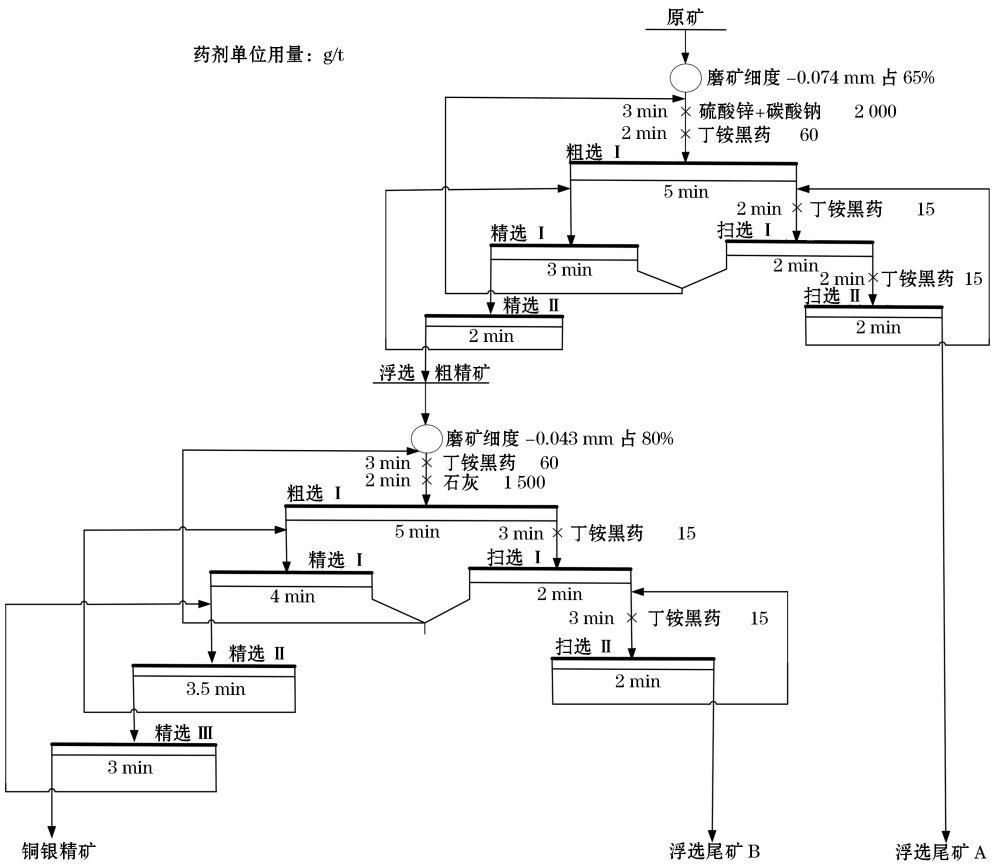


图 9 最终确定的全工艺流程

Fig.9 The final determined whole process flow

表 6 全工艺流程综合试验指标

Table 6 Comprehensive test indexes for the whole process flow

产品名称	产率/%	品位/%				作业回收率/%			
		Ag*	Cu	Zn	Pb	Ag	Cu	Zn	Pb
铜银精矿	1.07	10 521.88	18.98	4.93	3.97	89.81	80.98	4.62	30.30
浮选尾矿 A	96.98	8.50	0.04	0.95	0.02	6.59	16.68	80.82	13.85
浮选尾矿 B	1.95	230.00	0.30	8.50	4.00	3.59	2.34	14.56	55.85
尾矿(A+B)	98.93	12.87	0.05	1.10	0.10	10.19	19.02	95.38	69.66
给矿	100.00	125.00	0.25	1.14	0.14	100.00	100.00	100.00	100.00

注：* 表示 Ag 的单位为 g/t。

3 结论

(1) 矿石性质研究结果表明，原矿银品位高达 125 g/t，铜品位为 0.27%，是伴生铜的银矿石；除独立银矿物以外，银主要以黝铜矿为载体，银黝铜矿是主要的回收对象；相较于方铅矿和闪锌矿，银黝铜矿的整体嵌布粒度较微细且较分散，是选矿回收的主要难点。

(2) 铜银与锌的分选试验结果表明，在磨矿细度为－0.074 mm 占 65%时，选用硫酸锌＋碳酸钠作为组合锌抑制剂，选择丁铵黑药做捕收剂，采用“一粗两扫两精”的流程结构，获得了铜银混合粗精矿，实现了银黝铜矿与闪锌矿的高效分选。

(3) 铜银混合粗精矿精选试验结果表明，磨矿细度为－0.043 mm 占 80%时，选择石灰作为锌抑制剂，选择丁铵黑药做捕收剂，采用“一粗两扫三精”的流程结构，获得了铜银精矿，实现了银黝铜矿与方铅矿的高效分选。

(4) 最终确定了铜银混合浮选－混浮精矿再磨－铜银浮选精选的工艺流程，获得了铜品位为 18.98%、回收率为 80.98%，银品位为 10 521.88 g/t、回收率为 89.81%的铜银精矿，浮选尾矿给入后续的铅、锌回收作业，实现了铜银矿产资源的高效综合利用。

参考文献(References):

[1] 韦连军,陈燕清,雷满奇,等.广西铜铅锌复杂多金属矿浮选分离试验[J].矿冶,2023,32(5):31-38.
WEI Lianjun, CHEN Yanqing, LEI Manqi, et al. Experimental on flotation separation of a copper-lead-zinc complex polymetallic ore in Guangxi [J]. Mining and Metallurgy,2023,32(5):31-38.

[2] 肖军辉,吴强,王进明,等.低品位铜铅多金属硫化矿浮选分离试验研究[J].矿冶工程,2017,37(6):45-50.
XIAO Junhui, WU Qiang, WANG Jinming, et al. Flotation separation of lean copper-lead polymetallic sulfide ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2017,37(6):45-50.

[3] 周华荣,朱贤文,许永伟,等.内蒙古某铅锌硫化矿浮选试验研究[J].矿业研究与开发,2023,43(3):198-202.
ZHOU Huarong, ZHU Xianwen, XU Yongwei, et al. Experimental study on flotation of a lead-zinc sulfide ore in Inner Mongolia [J]. Mining Research and Development, 2023,43(3):198-202.

[4] 马英强,于翔州,罗进,等.次氯酸钠强化赤铜矿硫化浮选的影响及机理[J].金属矿山,2024(2):157-162.
MA Yingqiang, YU Xiangzhou, LUO Jin, et al. Effect and mechanism of sodium hypochlorite strengthening sulfuration flotation of cuprite[J]. Metal Mine,2024(2):157-162.

[5] 普仓风,赵继春,樊建云.某多金属硫化矿铜锌分离试验研究[J].有色金属(选矿部分),2012(1):22-24.
PU Cangeng, ZHAO Jichun, FAN Jianyun. Experimental study on the separation of copper and zinc for a polymetallic sulphide ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2012(1):22-24.

[6] 侯蕾,郭蔚,付元鹏,等.界面疏水改性强化废弃锂电材料浮选分离机制研究[J].矿业研究与开发,2023,43(12):199-205.
HOU Lei, GUO Wei, FU Yuanpeng, et al. Study on flotation separation mechanism of waste lithium electric materials enhanced by interfacial hydrophobic modification [J]. Mining Research and Development, 2023, 43(12): 199-205.

[7] 唐义胜,杨森,赵环帅.湖南三十六湾铅精矿提质降砷组合药剂浮选方法试验研究[J].矿业工程,2024,22(1):41-44+52.
TANG Yisheng, YANG Sen, ZHAO Huanshuai. Experimental study on flotation method of combined reagents for improving quality and reducing arsenic in lead concentrate in thirty-six bay, Hunan Province[J]. Mining Engineering,2024,22(1):41-44+52.

[8] 王靖,崔毅琦,张宇,等.无酸活化剂 SY-1 对含锡硫化矿浮选脱硫的试验研究[J].有色金属工程,2013(6):40-44.
WANG Jing, CUI Yiqi, ZHANG Yu, et al. Experimental study on flotation desulfurization of tin-containing sulfide ores by acid-free activator SY-1 [J]. Nonferrous Metals Engineering,2013(6):40-44.

[9] 郭灿,徐伟,田言,等.贵州某难选硅质胶磷矿正-反浮选试验研究[J].有色金属(选矿部分),2024(2):29-35.
GUO Can, XU Wei, TIAN Yan, et al. Experimental study on direct-reverse flotation of a refractory siliceous collophanite in Guizhou [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2024(2):29-35.

[10] 宋宝旭,邱显扬,胡佛明,等.云南某含银铜矿伴生银矿物强化回收实验研究[J].贵金属,2018,39(3):47-50+58.
SONG Baoxu, QIU Xianyang, HU Foming, et al. Strengthening the recovery research on associated silver of a silver-bearing copper ore in Yunnan[J]. Precious Metals, 2018,39(3):47-50+58.

[11] 顾兆云,陈经华.国外某金矿浮选工艺试验研究[J].现代矿业,2024,40(1):144-147.
GU Zhaoyun, CHEN Jinghua. Experimental study on flotation process of a foreign gold mine[J]. Modern Mining, 2024,40(1):144-147.

[12] 温凯,陈建华.某含银复杂铜铅锌多金属硫化矿浮选试验[J].矿产综合利用,2019(6):28-32.
WEN Kai, CHEN Jianhua. Experimental study on flotation of copper, lead and zinc polymetallic sulfide ore containing silver[J] Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(6):28-32.

[13] 黄春源,陈小霞,张明.大冶铁矿强化混合浮选效果试验研究[J].当代化工研究,2024(2):11-13.
HUANG Chunyuan, CHEN Xiaoxia, ZHANG Ming. Experimental study on the effect of enhanced mixed flotation in Daye Iron Mine[J]. Modern Chemical Research,2024(2): 11-13.

[14] 李志婷,彭华锋,汪庶明,等.提升某高硫低铜品位铜硫矿铜浮选回收指标试验研究[J/OL].有色金属工程:1-13. https://link.cnki.net/urlid/10.1004.TF.20240322.1440.020.
LI Zhiting, PENG Huafeng, WANG Shuming, et al. Improving copper flotation recovery from a copper-sulfur ore with high sulfur and low copper[J/OL]. Nonferrous Metals Engineering:1-13. https://link.cnki.net/urlid/10.1004.TF.20240322.1440.020.

[15] TIU G, GHORBANI Y, JANSSON N, et al. Tracking silver in the Lappberget Zn-Pb-Ag-(Cu-Au) deposit, Garpenberg mine, Sweden: Towards a geometallurgical approach[J]. Minerals Engineering,2021,167:106889.

[16] 宋宝旭,邱显扬,冉金城,等.硫化矿浮选体系中辉银矿的浮选行为研究[J].贵金属,2018,39(2):24-28.
SONG Baoxu, QIU Xianyang, RAN Jincheng, et al. Behavior of argentite in the sulphide flotation system[J]. Precious Metals,2018,39(2):24-28.

[17] 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 Fubang, GUO Chaohua, TAO Hengchang. 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.

[18] OKTAY C. Effect of flotation and potassium hydroxide pretreatment of an antimonial refractory ore on the extraction of silver by cyanidation [J]. Minerals Engineering,2021,172(10):107171.

[19] 朱一民,周菁,张晓峰,等.内蒙古某难选铜锌硫化矿浮选分离试验研究[J].有色金属(选矿部分),2014(4):9-12.
ZHU Yimin, ZHOU Jing, ZHANG Xiaofeng, et al. Experimental study on flotation separation of a refractory copper-zinc sulfide ore in Inner Mongolia[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section),2014(4):9-12.

[20] 常征,熊馨,霸慧文.青海某含银低品位铜矿石选矿工艺试验研究[J].黄金,2022,43(9):60-64.
CHANG Zheng, XIONG Xin, BA Huiwen. Experimental study on beneficiation process of a low-grade copper ore containing silver from Qinghai[J]. Gold,2022,43(9):60-64.

[21] DONG Z L, JIANG T, XU B, et al. Density functional theory study on electronic structure of tetrahedrite and effect of natural impurities on its flotation property[J]. Minerals Engineering,2021,169(1/2/3):106980.

[22] 李光英.云南某低品位铜矿选矿生产工艺优化与实践[J].有色金属(选矿部分),2020(4):34-37.
LI Guangying. Study and practice on mineral processing technology of a low grade single copper mine in Yunnan[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2020(4):34-37.

[23] 张铃.低品位铜矿伴生金银高效回收工艺研究[D].昆明:昆明理工大学,2020.
ZHANG Ling. Study on efficient recovery process of gold and silver associated with low grade copper ore[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2020.

[24] 饶强坚.安庆某低品位铜矿石选矿试验[J].现代矿业,2016,32(9):90-93.
RAO Qiangjian. Beneficiation test of a low grade copper ore in Anqing[J]. Modern Mining,2016,32(9):90-93.

[25] XU B, WU J T, DONG Z L, et al. Flotation performance, structure-activity relationship and adsorption mechanism of a newly-synthesized collector for copper sulfide minerals in Gacun polymetallic ore[J]. Applied Surface Science,2021,551:149420.