

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2021.05.009

某复杂含银硫化铜矿综合回收试验研究

王刚¹ 张斌¹ 于云龙¹ 曹欢²

(1. 金诚信矿业管理股份有限公司, 北京 100176;

2. 西安西北有色地质研究院, 西安 710054)

摘要: 对某复杂含银硫化铜矿进行工艺矿物学分析, 研究发现矿石中的有价元素主要有 Cu、Ag、S, 含量分别为 0.81%、7.03 g/t、4.28%, 主要的金属矿物有磁黄铁矿、黄铜矿、方铅矿和黄铁矿, 黄铜矿大部分与磁黄铁矿共生, 方铅矿主要与黄铜矿共生, 且部分被黄铜矿包裹, 银矿物则共生于此些金属矿物之间。粒度大于 0.075 mm 的含铜矿物超过 88%, 其中 96.83% 的铜以硫化矿形式存在。在此基础上, 采用优先选铜—抑铅浮铜—尾矿选硫的工艺, 最终获得两种精矿, 铜精矿中 Cu、Ag、S 的品位分别为 25.24%、140.06 g/t、34.69%, 回收率分别为 92.95%、60.39%、24.48%, 硫精矿中 S 的品位为 45.18%、回收率为 55.53%, 实现了矿石中有价元素的综合回收。

关键词: 含银硫化铜矿; 优先浮铜; 尾矿选硫; 综合回收

中图分类号: TD923

文献标志码: A

文章编号: 1005-7854(2021)05-0046-09

Experimental study on comprehensive recovery of a complex silver bearing copper sulfide ore

WANG Gang¹ ZHANG Bin¹ YU Yun-long¹ CAO Huan²

(1. JCHX Mine Management Co. Ltd., Beijing 100176, China;

2. Xi'an Northwest Geological Institute Company of Nonferrous Metals Co. Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: Through process mineralogy analysis of a complex silver bearing copper sulfide ore, it is found that the valuable elements in the ore are mainly Cu, Ag, S, with contents of 0.81%, 7.03 g/t and 4.28%, respectively. The main metallic minerals in ores are pyrrhotite, chalcopyrite, galena and pyrite. Chalcopyrite is mostly associated with pyrrhotite, galena is mainly associated with chalcopyrite and partly encased in chalcopyrite, and silver minerals are associated with these metallic minerals. More than 88% of the copper ore has a particle size greater than 0.075 mm, of which 96.83% copper exists in the form of sulfide ore. Based on this, the ores was used by the technological process of preferential flotation of copper, lead depression and copper flotation and sulphur flotation from tailings. Finally, a total of 2 concentrate products were obtained. The average grades of Cu, Ag and S in the copper concentrate were 25.24%, 140.06 g/t and 34.69%, respectively, and the recovery rates were 92.95%, 60.39% and 24.48%, respectively. The average grade of S in the sulphur concentrate was 45.18% and the recovery rate was 55.53%, realizing the effective enrichment of all valuable elements in the silver bearing copper sulfide ore.

Key words: silver bearing copper sulfide ore; preferential flotation of copper; sulphur flotation from tailings; comprehensive recovery

收稿日期: 2020-10-15

第一作者: 王刚, 硕士, 主要从事稀贵金属提取分离研究和矿山设计工作。E-mail: 877412101@qq.com

我国是世界铜资源消费大国^[1,2], 与经济快速发展带来的对铜资源的巨大需求相比, 我国铜后备储量严重不足, 因此加强铜矿资源选别技术与探讨, 对铜矿资源的深化利用与保护具有重大意义^[3,4]。

常见的铜矿资源主要以硫化铜矿为主^[5,6]，这类矿石中常伴生有其它类型的硫化矿和有价值元素，目前针对这类矿石主要回收其中的硫化铜矿，导致其它含硫矿石和其中伴生的有价值元素废弃在尾矿中，造成有用矿物的极大浪费^[7]。同时，这类含硫高的尾矿随意排放，会产生大量的酸性废水和重金属离子，对土地资源产生严重污染^[8-10]。因此，选择合适的选矿工艺提高复杂硫化铜矿的资源利用率，减少尾矿的排放，减少对环境的污染将有重要的意义。

本文针对某复杂含银硫化铜矿，采用优先选铜—抑铅浮铜—尾矿选硫的工艺，通过单因素条件

试验和闭路试验，确定了最佳的工艺条件，实现了矿石中有价元素的综合回收。

1 工艺矿物学分析

选矿试验所用的样品由地质专业人员采取，将取得的样品经破碎机破碎至 2 mm 以下后进行混匀缩分，然后装袋冷藏后使用。对试验矿样分别进行了化学多元素分析、偏光显微镜分析、原矿筛分分析和物相分析，其中化学多元素分析结果如表 1 所示，偏光显微镜分析的矿石矿物组成及其嵌布状态结果如图 1(a、b、c、d)所示，粒度筛析结果如表 2所示，物相分析结果如表 3 所示。

表 1 化学多元素分析结果

Table 1 Percentage concentrations of multi-element minerals							/%
成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	TFe	As	S
含量	57.00	12.00	3.00	2.00	8.71	<0.000 8	4.28
成分	Mn	Cu	Zn	Pb	Au ¹⁾	Ag ¹⁾	
含量	0.10	0.81	0.07	0.15	0.028	7.03	

注：1)单位为 g/t，下同

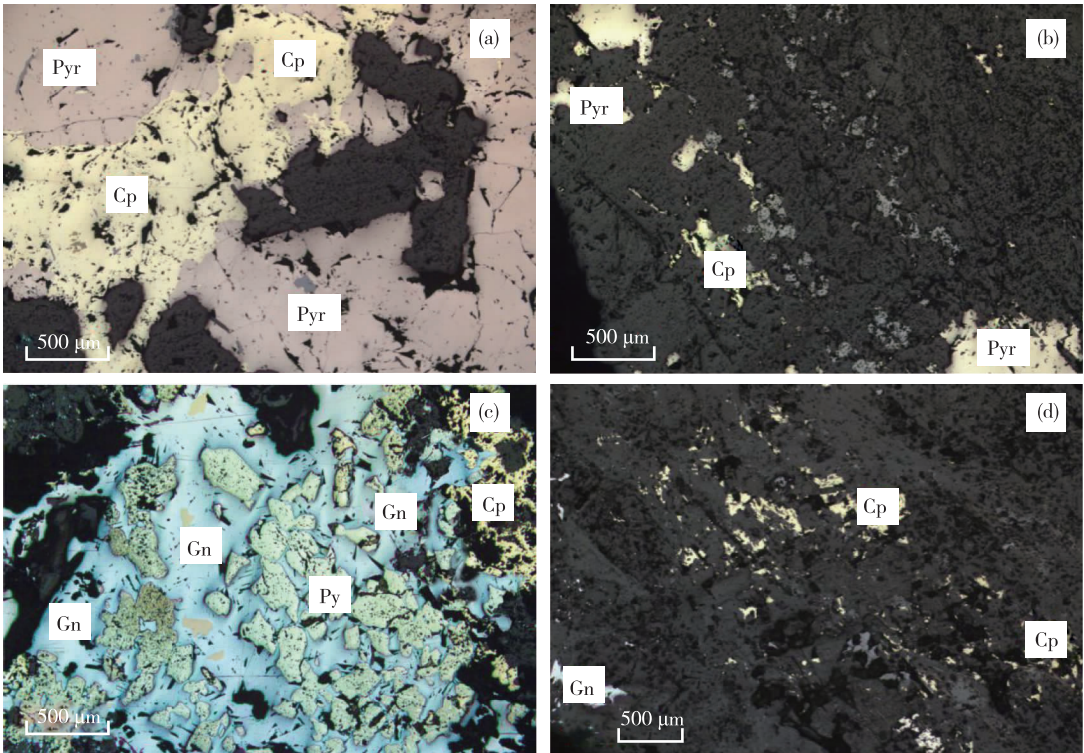


图 1 矿石连生关系：(a)黄铜矿与磁黄铁矿连生在一起；(b)黄铜矿、雌黄铁矿呈星散状、断续带状分布；(c)方铅矿中包裹有黄铁矿、黄铜矿呈团块状分布；(d)黄铜矿、方铅矿呈稀疏浸染状分布
(Pyr—雌黄铁矿，Cp—黄铜矿，Py—黄铁矿，Gn—方铅矿)

Fig. 1 Ore Association; (a)Chalcopyrite is associated with pyrrhotite; (b)chalcopyrite and pyrrhotite are scattered and intermittently striped; (c)pyrite and chalcopyrite are encased in galena and present crumbly structure; (d)chalcopyrite and galena are sparsely impregnated(Pyr—pyrrhotite, Cp—chalcopyrite, Py—pyrite, Gn—galena)

表 2 原矿筛分分析结果

Table 2 Results of ore screening analysis

粒级/mm	产率/%	品位/%		分布率/%	
		Cu	Ag ¹⁾	Cu	Ag
+0.90	8.70	0.44	2.36	4.73	2.92
-0.90+0.45	33.94	0.56	5.89	23.46	28.44
-0.45+0.28	16.72	1.21	10.71	24.98	25.47
-0.28+0.154	11.40	1.56	10.95	21.96	17.76
-0.154+0.075	11.0	0.95	6.66	12.90	10.42
-0.075	18.24	0.53	5.78	11.98	14.99
合计	100.0	0.81	7.03	100.0	100.0

表 3 铜物相分析结果

Table 3 Results of copper phase analysis

/%

相别	硫化铜	氧化铜	结合铜	总铜
含量	0.785	0.019	0.007	0.811
分布率	96.83	2.36	0.81	100.0

由表 1 可知, 矿石中有价元素主要有 Cu、S 和 Ag, 其含量分别为 0.81%、4.28% 和 7.03 g/t, 其他元素含量都较低, 不具有回收价值。

由图 1 可知, 矿石结构主要为鳞片粒状变晶结构, 构造主要为块状和片状。磁黄铁矿、黄铜矿、方铅矿和黄铁矿是矿石中主要的金属矿物, 石英和云母是最主要的脉石矿物。其中磁黄铁矿粒度约 0.15~1.80 mm, 半自形—它形粒状, 与黄铜矿呈共生关系; 黄铜矿粒度约 0.07~0.92 mm, 它形粒状, 大部分与磁黄铁矿共伴生在一起, 少量呈星散状分布于非金属矿物间。方铅矿粒度大小约 0.07~0.46 mm, 它形粒状, 与黄铜矿关系密切, 部分被黄铜矿包裹, 银矿物则共伴生于这些矿物之中, 该类型矿石属于复杂含银硫化铜矿。

由表 2 和表 3 可知, 有 88.02% 的 Cu 和 85.01% 的 Ag 分布粒度在 0.075 mm 以上的矿石中, 同时有 96.83% 的 Cu 以硫化矿形式存在, 仅有 2.36% 的氧化铜和 0.81% 的结合铜, 这种赋存状态对铜和银的回收是有利的。

针对这类矿石, 通常采用铜硫混合浮选—铜硫分离或优先选铜—尾矿选硫的工艺流程^[11-13], 由于矿石中的硫主要赋存在磁黄铁矿和黄铜矿中, 两者关系密切, 采用铜硫混合浮选—铜硫分离选矿工艺会导致硫精矿中铜含量很高, 不利于铜的回收, 因此本次试验采用优先浮铜—尾矿选硫的工艺。同时, 由于该矿石中方铅矿与黄铜矿关系密切, 在优先选铜的过程中, 会导致大量的方铅矿进入到铜精矿中, 而须在精选段使用铅抑制剂, 抑制铅的浮选以提高铜精矿的品位, 因此本次试验采用优先选铜—抑铅浮铜—尾矿选硫的工艺流程, 实现复杂含

银硫化铜矿中 Cu、S、Ag 的综合回收。

2 试验结果与讨论

2.1 磨矿细度对优先选铜结果的影响

浮选过程必须使含铜矿物单体解离, 才能实现铜的回收, 因此考察了磨矿细度对铜回收率的影响。试验条件: 石灰用量 1 000 g/t (pH=8)、组合捕收剂 (丁基黄药: 乙硫氮 = 1:1) 40 g/t、BK204 20 g/t, 试验流程如图 2 所示, 结果如图 3 所示。

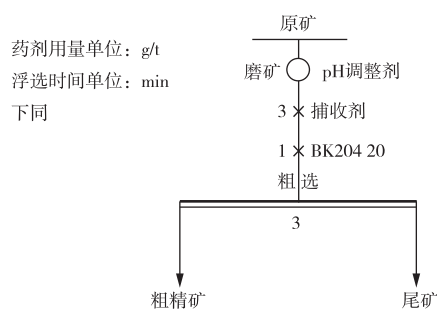


图 2 优先选铜单因素条件试验流程

Fig. 2 Flowsheet of the preferential flotation copper single factor condition test

由图 3 可知, 随着磨矿细度增加, 粗精矿中铜品位及回收率先上升后下降, 这可能是因为随着磨矿细度的增加, 有价矿物的单体解离程度增加, 使其回收率和品位都有增加, 但继续增加磨矿细度, 导致有价矿物泥化^[14,15], 增加了矿物的分选难度, 使得粗精矿的品位逐渐降低, 其中在 -0.074 mm 含量为 70% 时品位和回收率指标均较好, 故选择磨矿细度为 -0.074 mm 占 70%, 此时粗精矿中铜

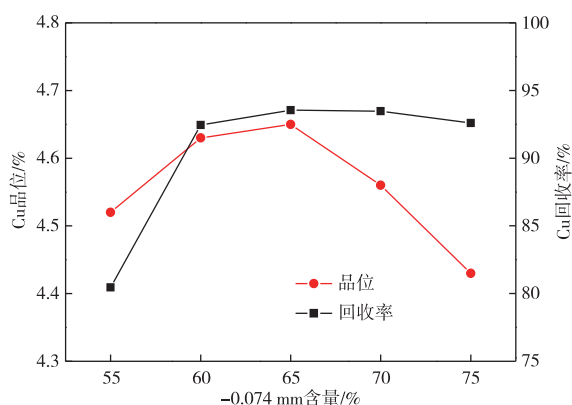


图3 磨矿细度对铜浮选的影响

Fig. 3 Effects of grinding fineness on Cu flotation

的品位为 4.56%，回收率为 93.72%。

2.2 矿浆 pH 值对优先选铜结果的影响

CaO 是常用的 pH 调整剂，同时也是黄铁矿的抑制剂^[16]。由于矿石中含有一定量的黄铁矿，CaO 的使用可抑制黄铁矿的浮选，从而实现铜与硫的分离，这对于后续硫的回收是有利的，因此本次的 pH 调整剂采用 CaO。同时，合适的矿浆 pH 值有利于提高捕收剂的性能^[17]，增加铜的回收率，因此试验考察了 pH 值对铜回收率的影响。试验条件：磨矿细度—0.074 mm 占 70%、组合捕收剂（丁基黄药：乙硫氮 = 1：1）40 g/t、BK204：20 g/t，矿浆 pH 值可变，试验流程如图 2 所示，结果如图 4 所示。

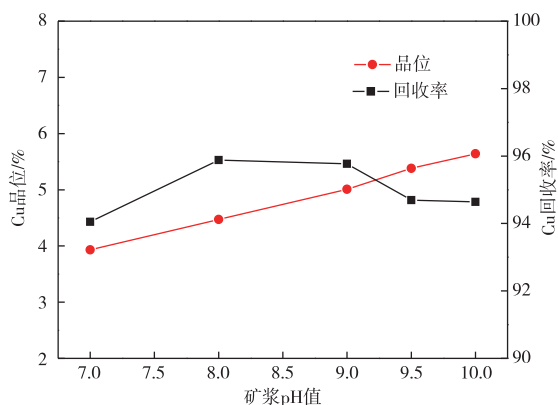


图4 矿浆 pH 值对铜浮选的影响

Fig. 4 Effects of pulp pH value on Cu flotation

由图 4 可知，随着矿浆 pH 值的增加，即 CaO 用量的增加，精矿中铜的品位逐渐升高，但铜的回收率先升高后逐渐降低，这是因为 CaO 对黄铁矿的抑制作用，降低了粗精矿中黄铁矿的含量，但过量的 CaO 将导致与黄铁矿关系密切的黄铜矿受到一定的抑制，从而使铜的回收率降低。其中在矿浆 pH=9

时，粗精矿中铜回收率和品位指标较好，此时粗精矿中铜品位为 5.01%，回收率为 95.77%，故选择矿浆 pH 值为 9，此时 CaO 用量为 1 400 g/t。

2.3 捕收剂用量对优先选铜效果的影响

由于方铅矿与黄铜矿的关系密切，本次捕收剂选用对硫化矿捕收能力强的丁基黄药^[18]和对方铅矿捕收能力强的乙硫氮^[19]，共同促进含铜矿物的浮选，本次试验考察了组合捕收剂用量对铜浮选的影响。试验条件：磨矿细度—0.074 mm 占 70%、CaO 1 400 g/t (pH=9)、组合捕收剂（丁基黄药：乙硫氮 = 1：1）用量可变、BK204 30 g/t，试验流程如图 2 所示，结果如图 5 所示。

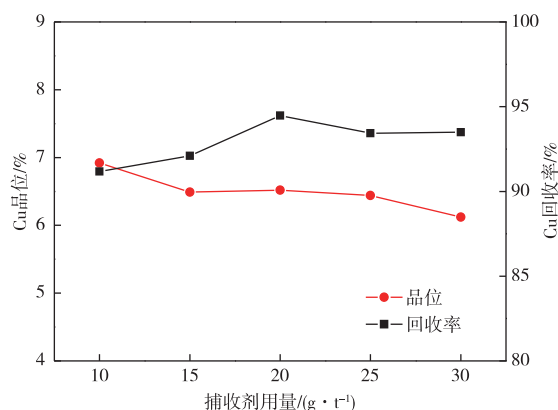


图5 捕收剂用量对铜浮选的影响

Fig. 5 Effects of collector dosage on Cu flotation

由图 5 可知，随着捕收剂用量的增加，精矿中铜的品位缓慢降低，但回收率逐渐增加后趋于平缓，这可能是因为过量的捕收剂导致其它硫化矿的回收。在组合捕收剂（丁基黄药 + 乙硫氮）用量为 20 g/t 时，粗精矿中铜的品位和回收率指标均较好，此时粗精矿中 Cu 品位为 6.72%，回收率为 94.48%，故适宜的组合捕收剂（丁基黄药：乙硫氮 = 1：1）用量为 20 g/t。

2.4 精矿再磨细度对抑铅浮铜结果的影响

在优先选铜阶段由于采用组合捕收剂（丁基黄药 + 乙硫氮），导致大量的含铅矿物进入铜精矿中，为了保证铜精矿的质量，需在精选段抑铅浮铜，因此在精选过程添加活性炭吸附组合捕收剂^[20]，避免粗选段添加的捕收药剂对精选段产生不利影响，同时精选段的捕收剂仅采用丁基黄药，以提高铜精矿的品位。为抑制铅的浮选，就需要合适的磨矿细度使关系密切的方铅矿和黄铜矿分离，实现黄铜矿的单体解离，因此考察了精矿再磨细度对抑铅浮铜结果的影响。试验条件：

抑制剂(水玻璃: Na_2SO_3 : 纤维素=2:2:1)用量 1 000 g/t, 丁基黄药 5 g/t、BK204 用量 5 g/t, 精矿再磨细度可变, 试验流程如图 6 所示, 结果如图 7 所示。

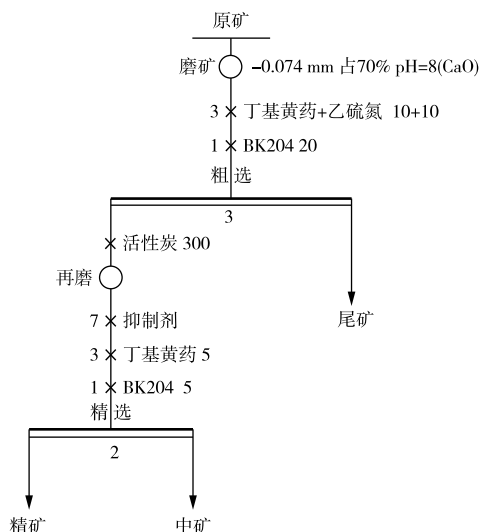


图 6 抑铅浮铜单因素条件试验流程

Fig. 6 Flowsheet of the lead depression and copper flotation single factor condition test

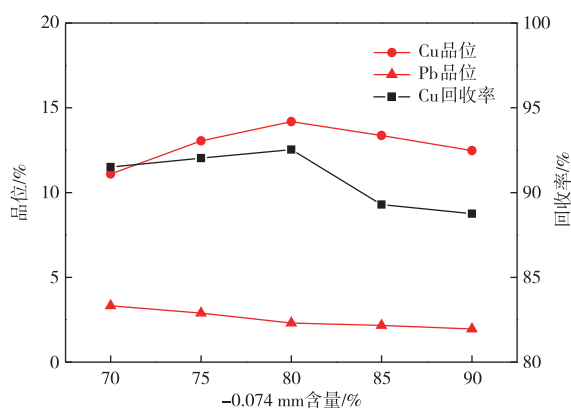


图 7 再磨细度对铜精选的影响

Fig. 7 Effects of regrinding fineness on copper separation

由图 7 可知, 随着精矿再磨细度的增加, 精矿中铅的含量也逐渐降低, 但过大的磨矿细度, 导致铜的品位和回收率也逐渐降低, 这是因为细度增加, 会使含铜矿物过磨, 对铜的回收不利。综合考虑, 再磨细度为 -0.074 mm 占 80% 时精矿中铜品位为 14.18%, 回收率为 92.53%, 选别效果较好, 此时精矿中铅品位为 2.305%。

2.5 抑制剂用量对铜铅浮选的影响

常用铅抑制剂^[21,22]有水玻璃、 Na_2SO_3 和 CMC, 其中水玻璃^[23]水解的 HSiO_3^- 和 H_2SiO_3 会吸附在脉石矿物表面, 抑制脉石矿物的浮选;

Na_2SO_3 水解的 H_2SO_3 可在方铅矿表面生成亲水层, 阻碍捕收剂在方铅矿表面的吸附^[24]; CMC 分子中的羧基会吸附在方铅矿表面, 降低了方铅矿的可浮性^[25], 三者混合使用共同抑制脉石矿物和方铅矿的回收, 提高精矿中铜的品位。本次试验进行了组合抑制剂用量对铜铅浮选的影响, 试验条件: 精矿再磨细度 -0.074 mm 含量 80%、抑制剂(水玻璃: Na_2SO_3 : CMC=2:2:1)用量可变、丁基黄药 5 g/t、BK204 5 g/t, 试验流程如图 6 所示, 结果如图 8 所示。

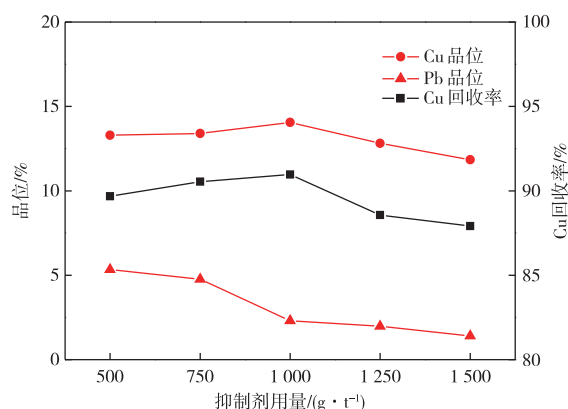


图 8 抑制剂用量对铜精选的影响

Fig. 8 Effects of inhibitor dosage on copper concentrate separation

由图 8 可知, 随着抑制剂用量的增加, 粗精矿中铅的品位逐渐降低, 铜的品位和回收率也逐渐增加, 在抑制剂用量为 1 000 g/t 时, 选矿指标较好; 然而继续增加抑制剂用量, 铜的品位和回收率反而有所降低, 这是因为过高的抑制剂用量, 会使得其它含铜硫化矿受到抑制^[24], 所以适宜的组抑制剂用量(水玻璃: Na_2SO_3 : CMC=2:2:1)为 1 000 g/t, 此时铜精矿中铜的回收率为 90.96%, 铜、铅的品位分别为 14.05% 和 2.31%。

2.6 丁基黄药用量对尾矿选硫结果的影响

在尾矿选硫过程, 由于粗选段铜的回收率已达到 92% 以上, 扫选意义不大, 故本次试验未进行铜扫选作业。为提高硫精矿的品质, 本次浮选试验将矿浆 pH 值调节至酸性, 以抑制杂质元素的浮选^[26], 降低硫精矿中杂质元素的含量。同时捕收剂的使用对硫的浮选至关重要, 本次试验采用常用的硫捕收剂丁基黄药, 并考察了丁基黄药用量对尾矿选硫结果的影响。试验条件: 矿浆 pH=6 (硫酸), BK204 10 g/t, 捕收剂用量可变。试验流程如图 9 所示, 结果如图 10 所示。

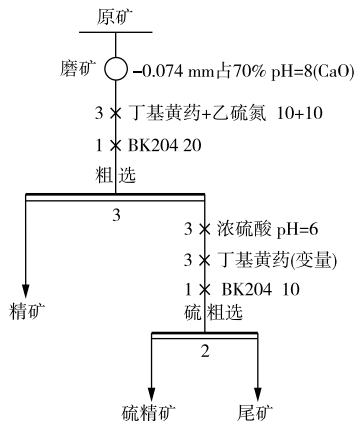


图 9 尾矿选硫单因素条件试验流程

Fig. 9 Flowsheet of the sulphur flotation from tailings single factor condition test

由图 10 可知，在矿浆 pH 值为 6 时，使用捕收剂丁基黄药能明显提高精矿中硫的品位和回收率，且随着丁基黄药用量的逐渐增加，S 的回收率也逐渐升高后趋于稳定，但过高的丁基黄药使用量，会导致其它矿物也被浮选到硫精矿中，使得精矿中硫的品位有所降低，故合适的丁基黄药用量为 10 g/t，此时精矿中硫的品位为 21.39%，回收率为 42.26%。

2.7 闭路浮选试验

在上述试验的基础上，为验证工艺条件的可靠性，进行了浮选闭路试验。试验流程如图 11 所示，结果如表 4 所示，精矿化学多元素分析结果如表 5

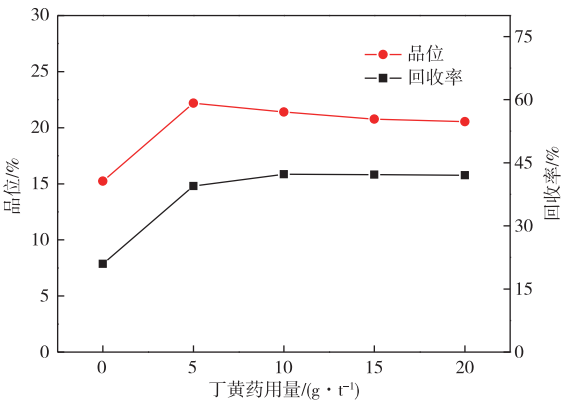


图 10 丁基黄药用量对硫浮选的影响

Fig. 10 Effects of butyl xanthate dosage on sulfur flotation

和表 6 所示。

由表 4、表 5 和表 6 可知，针对某复杂含银硫化铜矿采用预先选铜—抑铅浮铜—尾矿选硫的工艺流程，共获得两种精矿：1) 铜精矿，Cu、Ag、S 的品位分别为 25.24%、140.08g/t、34.69%，回收率分别为 92.95%、60.39%和 24.48%；2) 硫精矿，S 的品位为 45.18%，回收率为 55.53%，铜精矿和硫精矿中杂质元素的含量也较低，铜精矿符合国家二等级标准(YS/T 318—2007)^[27]，硫精矿符合国家优-I 等级标准(HG/T 2786—1996)^[28]，选矿指标较好，最终实现了矿石中有价元素 Cu、Ag、S 的综合回收。

表 4 闭路浮选试验结果

Table 4 Results of a closed-circuit flotation test

产品名称	产率	品位			回收率		
		Cu	S	Ag ¹⁾	Cu	S	Ag
铜精矿	3.02	25.24	34.69	140.08	92.95	24.48	60.39
硫精矿	5.26	0.39	45.18	8.97	2.50	55.53	6.73
尾矿	91.72	0.04	0.93	2.51	4.55	19.99	32.88

表 5 铜精矿化学多元素分析结果

Table 5 Percentage concentrations of Cu concentrate multi-element minerals

元素	Cu	Ag ¹⁾	Pb	S	Zn	Bi	As	MgO	Sb
含量	25.24	140.08	3.371	34.69	0.56	0.12	0.127	1.72	0.13

表 6 硫精矿化学多元素分析结果

Table 6 Percentage concentrations of S concentrate multi-element minerals

元素	S	Ag ¹⁾	TFe	Cu	Pb	F	As	C	Zn	SiO ₂
含量	45.18	8.97	36.40	0.39	0.28	0.013	0.027	0.94	0.12	7.05

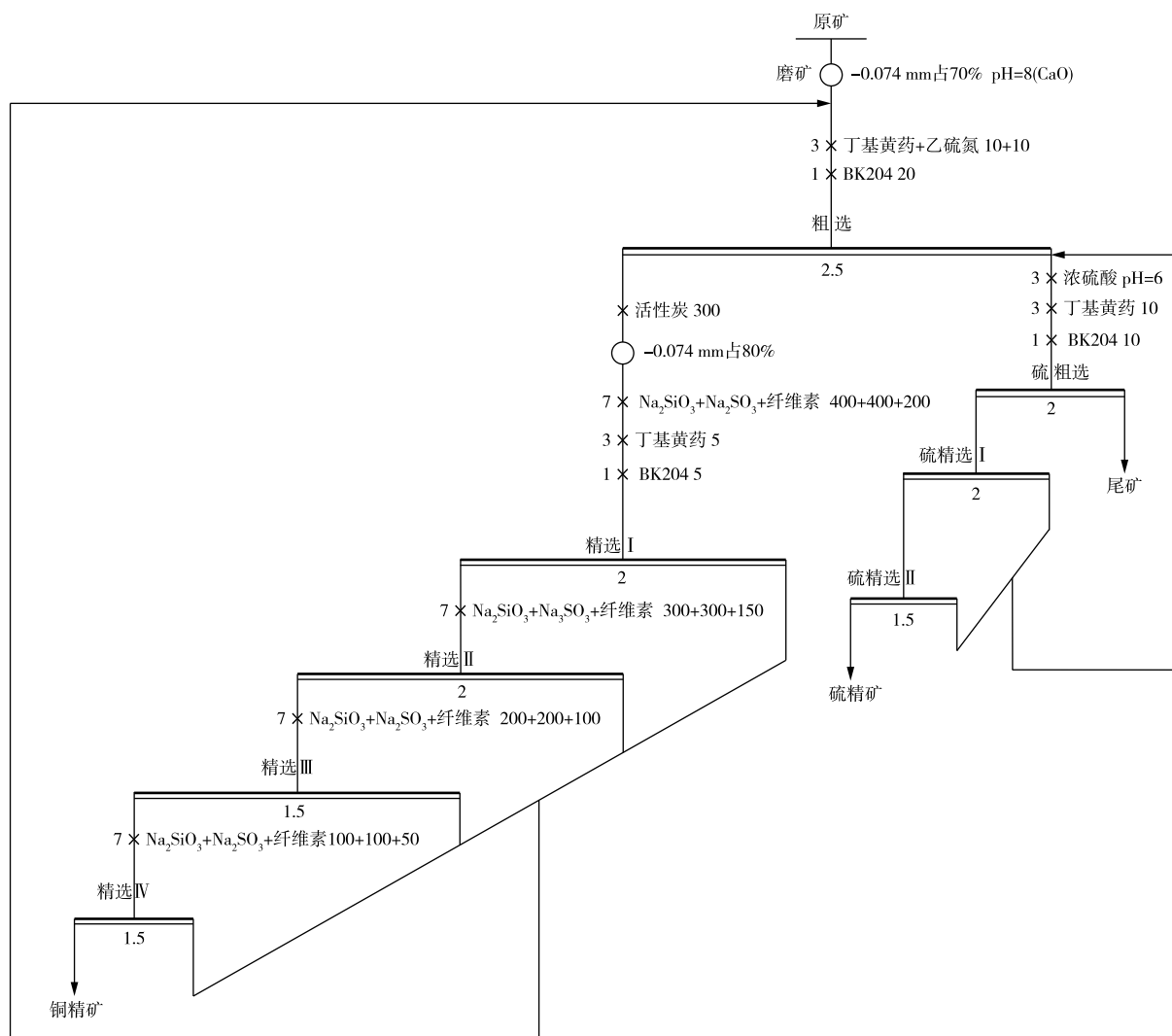


图 11 闭路浮选试验流程

Fig. 11 Flowsheet of a closed-circuit flotation test

3 结论

1) 某复杂含银硫化铜矿中有价元素主要有 Cu、S 和 Ag，含量分别为 0.81%、4.28% 和 7.03 g/t。磁黄铁矿、黄铜矿、方铅矿和黄铁矿是矿石中主要的金属矿物，黄铜矿大部分与磁黄铁矿共伴生在一起，少量呈星散状分布于非金属矿物粒间。方铅矿与黄铜矿关系密切，部分被黄铜矿包裹，银矿物则共伴生于这些矿物之中。有 88.02% 的 Cu 和 85.01% 的 Ag 分布在粒度 0.075 mm 以上的矿石中，同时有 96.83% 的 Cu 以硫化矿形式存在，仅有 2.36% 的氧化铜和 0.81% 的结合铜，这种赋存状态对铜和银的回收是有利的。

2) 采用组合捕收剂（丁基黄药+乙硫氮）可较好的回收矿石中含铜矿物，仅一段粗选铜的回收率即

可达到 92% 以上，无需进行扫选作业。在尾矿选硫过程，在酸性条件下，仅使用丁基黄药作为捕收剂，即可较好地实现硫的回收。

3) 针对这一复杂含银硫化铜矿采用预先选铜—抑铅浮铜—尾矿选硫工艺流程，共获得两种精矿：1) 铜精矿，Cu、Ag、S 的品位分别为 25.24%、140.08 g/t、34.69%，回收率分别为 92.95%、60.39% 和 24.48%；2) 硫精矿，S 的品位为 45.18%，回收率为 55.53%，铜精矿和硫精矿中杂质元素的含量也较低，铜精矿符合国家二等级标准（YS/T 318—2007），硫精矿符合优-I 等级标准（HG/T 2786—1996），选矿指标较好，最终实现了矿石中有价元素 Cu、Ag、S 的综合回收。

参考文献

[1] 曾涛. 中国铜资源供应安全预警研究[D]. 北京:

- 中国地质大学(北京), 2020.
- ZENG T. Research on safety early warning of copper resources supply in China [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2020.
- [2] 王俊博. 循环经济视角下的中国铜资源可供性结构研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- WANG J B. Availability analysis of China copper resources under the perspective of circular economy[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- [3] 王毓华, 邓海波. 铜矿选矿技术[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2012.
- WANG Y H, DENG H B. Copper ore processing technology [M]. Changsha: Central South University Press, 2012.
- [4] 周平, 唐金荣, 施俊法, 等. 铜资源现状与发展态势分析[J]. 岩石矿物学杂志, 2012, 31(5): 750-756.
- ZHOU P, TANG J R, SHI J F, et al. Analysis of status and development trend of copper resources[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2012, 31(5): 750-756.
- [5] 张强, 钟琼, 贾振宏, 等. 世界铜矿资源与矿山铜生产状况分析[J]. 矿产与地质, 2014, 28(2): 196-201.
- ZHANG Q, ZHONG Q, JIA Z H, et al. Analysis of copper production status of world copper resources and mine copper [J]. Mineral Resources and Geology, 2014, 28(2): 196-201.
- [6] 吴熙群, 胡志强, 王立刚, 等. 我国硫化铜矿选矿技术现状及进展[J]. 有色金属(选矿部分), 2019(5): 9-14.
- WU X Q, HU Z Q, WANG L G, et al. Development status of mineral processing technology on copper sulfide ore of china[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2019(5): 9-14.
- [7] 虎建宁, 韩彬. 某选矿厂铜粗精矿提铜除杂试验研究[J]. 矿冶, 2018, 27(2): 43-46, 62.
- HU J N, HAN B. Study on upgrading rough copper concentrate of a beneficiation plant[J]. Mining and Metallurgy, 2018, 27(2): 43-46, 62.
- [8] GAMBI C, CANALS M, CORINALDESI C, et al. Impact of historical sulfide mine tailings discharge on meiofaunal assemblages (Portmán Bay, Mediterranean Sea)[J]. Science of The Total Environment, 2020, 736(1/2): 139641. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139641.
- [9] SCHIPPERS A, KOCK D, SCHWARTZ M, et al. Geomicrobiological and geochemical investigation of a pyrrhotite-containing mine waste tailings dam near Selebi-Phikwe in Botswana [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2007, 92(2): 151-158.
- [10] 王琼, 王会平, 占幼鸿, 等. 硫化矿废石堆场酸性污染控制与生态修复工程技术应用研究 [C] //中国环境科学学会学术年会. 海口, 2016.
- WANG Q, WANG H P, ZHAN Y H, et al. Study on acid contamination control and ecological restoration engineering technology in sulphide ore dump [C] //Academic Annual Meeting of Chinese Society of Environmental Sciences. Haikou, 2016.
- [11] 赵迎锋, 王澜, 王礼平. 某选铁尾矿低碱度铜硫分离试验研究[J]. 铜业工程, 2019(2): 43-49.
- ZHAO Y F, WANG L, WANG L P. Experimental study on separation of copper and sulphur from iron ore tailings with low basicity [J]. Copper Engineering, 2019(2): 43-49.
- [12] 胡志凯, 于传兵, 周少珍, 等. 某铜硫多金属矿选矿试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2017(3): 7-10.
- HU Z K, YU C B, ZHOU S Z, et al. Experimental research on mineral processing of copper-sulfur polymetallic ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2017(3): 7-10.
- [13] 聂琦蔚, 阮华东. 江西某铜矿铜硫分离浮选试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(3): 29-32.
- NIE Q W, RUAN H D. Flotation test on copper and sulfur separation in a copper mine of Jiangxi province [J]. Mining Research and Development, 2019, 39(3): 29-32.
- [14] 孙传尧. 选矿工程师手册[M]. 冶金工业出版社, 2015.
- SUN C Y. Mineral processing engineers manual[M]. Metallurgical Industry Press, 2015.
- [15] 梁冰. 微细粒赤铁矿磨矿工艺优化研究[D]. 唐山: 河北联合大学, 2013.
- LIANG B. Fine particle hematite ore grinding process ptimization study [D]. Tangshan: Heibei United University, 2013.
- [16] 孔德翠, 张淑敏, 刘杰, 等. 某铁尾矿中含铜矿物的综合回收试验[J]. 现代矿业, 2019, 35(11): 1-3.
- KONG D C, ZHANG S M, LIU J, et al. Comprehensive recovery test of copper-bearing minerals in an iron tailings [J]. Modern Mining, 2019, 35(11): 1-3.
- [17] 王淀佐, 胡岳华. 浮选溶液化学[M]. 湖南科学技术出版社, 1987.

- WANG D Z, HU Y H. Flotation solution chemistry[M]. Hunan science & technology press, 1987.
- [18] GUO B, LIN X, BURGESS I J, et al. Electrochemical SHINERS investigation of the adsorption of butyl xanthate and 2-mercaptobenzothiazole on pyrite[J]. Applied Surface Science, 2020, 529: 1471118. DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.147118.
- [19] YANG W, WANG G, WANG Q, et al. Comprehensive recovery technology of Te, Au, and Ag from a telluride-type refractory gold mine[J]. Minerals, 2019, 9(10): 597.
- [20] 李飞. 微细粒银矿浮选试验及活性炭强化浮选机理[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- LI F. Flotation test of fine silver ore and mechanism of activated carbon enhanced flotation [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [21] 马明辉, 苏超, 贾晓东, 等. 铜铅混合精矿浮选分离抑制剂研究进展[J]. 有色金属(选矿部分), 2019(4): 94-98.
- MA M H, SU C, JIA X D, et al. Research progress on flotation separation depressants of copper-lead mixed concentrate [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2019 (4): 94-98.
- [22] 袁华玮. 临沧铜铅混合精矿浮选分离试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- YUAN H W. Experimental study on flotation separation of copper-lead mixed concentrate in Lincang [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [23] ZHANG Y, LIU R Q, SUN W, et al. Electrochemical mechanism and flotation of chalcopyrite and galena in the presence of sodium silicat and sodium sulfite [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(4): 1091-1101.
- [24] 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.
- JANG F. Study on the fundamental and application of flotation separation of copper-lead sulphide concentrate with sulfurous acid [D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [25] 杨超. 不同种类抑制剂对铜铅硫化矿分离浮选效果的影响研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
- YANG C. Study on influence of different depressants on the flotating separation efficiency of copper-lead sulphide ore [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018.
- [26] 于传兵, 王中明, 吴熙群, 等. 铜硫分离尾矿中黄铁矿活化的研究 [C] //中国有色金属学会第七届学术年会. 北京, 2008.
- YU C B, WANG Z M, WU X Q, et al. Study on the activation of pyrite in copper-sulfur separation tailings [C] //The 7th Annual Academic Meeting of China Nonferrous Metals Society. Beijing, 2008.
- [27] 全国有色金属标准化技术委员会. 铜精矿: YS/T 318—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007: 1-3.
- The national nonferrous metals standardization technical committee. Copper concentrate: YS/T 318—2007 [S]. Beijing: China Standard Press, 2007: 1-3.
- [28] 化学工业部化工矿山设计研究院. 硫铁矿和硫精矿: HG/T 2786—1996 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1997: 176-178.
- Ministry of Chemical Industry chemical mine Design and Research Institute. Pyrite and sulphur concentrate: HG/T 2786—1996 [S]. Beijing: China Standard Press, 1997: 176-178.