

赞比亚某金矿选矿工艺试验研究

李卫, 焦芬*, 王旭, 张政权, 覃文庆
(中南大学 资源加工与生物工程学院, 长沙 410083)

摘要: 根据赞比亚某金矿的矿石特点, 对其进行了单一浮选、尼尔森重选和摇床重选-浮选联合3种工艺对比试验, 考察了磨矿细度、捕收剂和给矿量等因素对选矿效率的影响。结果表明, 摇床重选-浮选联合工艺具有最佳回收效率。在磨矿细度为-0.074 mm占73.65%及优选药剂用量条件下, 经过两次摇床重选, 重选尾矿再经一粗两扫两精, 中矿循序返回闭路流程, 可得金品位为66.40 g/t、金回收率为90.52%的综合金精矿, 可作为矿山选矿工艺技术依据。

关键词: 选矿工程; 金矿; 浮选; 重选

中图分类号: TD922; TD923 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2019)01-0030-07

Experimental Study on Mineral Processing Technology for a Gold Ore from Zambia

LI Wei, JIAO Fen*, WANG Xu, ZHANG Zhengquan, QIN Wenqing

(School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: According to the characteristics of a gold ore from Zambia, a single flotation, Knelson concentration, shaking table-flotation combined process experiments were carried out, the effects of grinding fineness, collector and feeding amount on the beneficiation efficiency were investigated. The results show that the maximum recovery efficiency is obtained by the shaking table-flotation combined process. Under the condition that the grinding fineness is -0.074 mm accounting for 73.65% and the optimum dosage, through a closed-circuit test of two steps of shaking table, one roughing, two cleaning, two scavenging and intermediate mineral sequence returned processing, the Au concentration of the comprehensive gold concentrate is 66.40 g/t and the Au recovery rate is 90.52%. The research results can be used as a technical basis for mine beneficiation process.

Key words: mineral dressing; gold ore; flotation; gravity concentration

截止2016年, 中国已经成为世界上最大的黄金生产国和黄金消费国^[1]。但是, 目前国内黄金资源存在着金矿床规模不大、品位不高、总量有限等问题, 国内黄金资源已难以满足日益增长的黄金需求。因此, 一方面, 对低品位金矿石以及二次含金资源中金的回收利用研究日益受到重视^[2-5]; 另一方面, 在“一带一路”大战略的推动下, 国内黄金企业纷纷将目光投向海外待开发的黄金矿山^[6]。

针对不同的金矿石类型, 通常采取不同的提金工艺和设备。浮选法处理脉金矿石, 适于处理中、

细粒嵌布的或与有色金属伴生的金矿; 粗粒单体金宜采用重选或混汞法回收; 微细粒金及含泥、氧化程度高的复杂金矿多用化学提金法处理; 尼尔森选矿机是回收微细粒金的有效设备, 具有富集比高, 设备占地小, 生产成本低等优点; 摇床重选是处理砂金矿石最常用的工艺之一, 工艺投资少, 见效快, 成本低, 对环境污染程度小^[7-12]。本文根据矿石特点, 拟通过浮选、尼尔森重选和摇床重选-浮选联合3种不同工艺的对比研究, 为赞比亚某金矿选择合适的选矿工艺。

收稿日期: 2018-08-20

第一作者: 李卫, 男, 硕士研究生, 研究方向: 矿物加工工程。E-mail: 583036357@qq.com

*通讯作者: 焦芬, 女, 博士, 副教授, 研究方向: 矿物加工工程。E-mail: jfen0601@126.com

1 实验部分

1.1 试验矿样

试验矿样取自赞比亚某金矿，对其进行原矿性质分析。矿石多元素化学分析结果见表 1，矿石金物相分析结果见表 2，矿石 X 射线衍射半定量分析结果见图 1。

表 1 矿石多元素化学分析结果

Tab.1 Results of multi-element analysis of raw ore

元素	Au	As	S	Fe
含量	15.96 g/t	6.50%	7.91%	15.44%
元素	Cu	Pb	Zn	Sb
含量	0.05%	0.42%	0.33%	0.12%

表 2 矿石金物相分析结果

Tab.2 Phase composition of gold in raw ore

相态	原生及自然金	硫化物中	氧化物中	其他	总金
含量/(g/t)	10.82	3.32	1.67	0.11	15.92
分布率/%	67.96	20.86	10.49	0.69	100.00

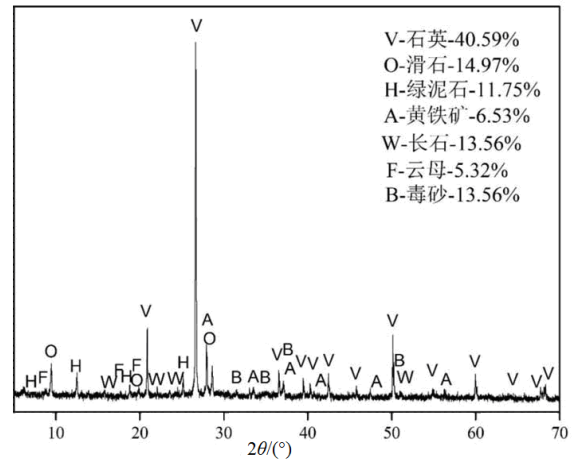
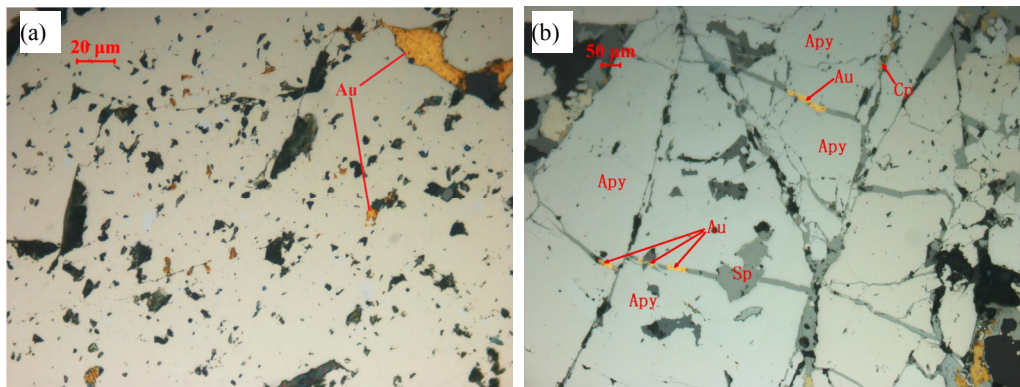


图 1 矿石 X 射线衍射半定量分析图谱

Fig.1 X-ray diffraction spectra for raw ore

由表 1 可见，矿样中可回收的主要有价元素为金，金品位高达 15.96 g/t。由表 2 可见，矿样中金主要以原生及自然金形式存在。由图 1 可见，矿石中的主要金属矿物为毒砂和黄铁矿，脉石矿物主要有石英、滑石、绿泥石、长石和云母等。为进一步明确矿样性质，对其进行工艺矿物学研究，所得显微图片如图 2 所示。



(a). 黄铁矿中的包裹金(Inclusive gold distributed in pyrite); (b). 毒砂颗粒间的粒间金(Intergranular gold distributed between arsenopyrite particles)

图 2 金矿物嵌布特征 Fig.2 Dissemination characteristics of gold minerals

由图 2 可见，矿石中的金主要以自然金和银金矿的形式存在，载金矿物主要为黄铁矿、毒砂、其次为闪锌矿、方铅矿和脆硫锑铅矿及部分脉石矿物。金与黄铁矿关系密切(见图 2(a))，常被黄铁矿包裹、或分布于黄铁矿裂隙和孔洞中。毒砂是矿石中重要的载金矿物(见图 2(b))，分布于毒砂颗粒之间和与毒砂连生的金颗粒较多，偶见金被毒砂完全包裹。金在其他少量的硫化矿中也有分布。另有一些金以

粒状、不规则状分布于石英等脉石矿物中。矿石中的金主要为显微金，金颗粒粗细不均，5~10 μm 大小的金颗粒在矿石中分布较多。

1.2 试验方法

根据原矿性质可知，赞比亚某金矿属于高硫高砷难处理金矿。但考虑到当地工业水平落后等条件限制，选用工艺简单、成本低廉的方法最大限度回收金，然后在后续工艺中脱除硫砷是本试验研究的

关键所在。因此,采取单一浮选、尼尔森重选和摇床重选-浮选联合3种工艺进行对比试验。

1.3 试验设备与药剂

试验所用设备包括 XMQ-240×90 锥形球磨机、XFG 型挂槽浮选机、LY2100/1050 摇床、KC-MD3 尼尔森选矿机等。试验所用药剂主要有分析纯的硫酸铜,工业级的水玻璃、丁黄药、丁铵黑药和2号油等。

2 结果与讨论

2.1 单一浮选流程试验

分别考察磨矿细度、捕收剂用量和捕收剂配比因素对金回收指标的影响。

2.1.1 浮选磨矿细度

试验在水玻璃 2000 g/t、硫酸铜 100 g/t、丁黄药 120 g/t、2号油 50 g/t 条件下,进行一次粗选,结果如图3所示。

由图3可知,随着磨矿细度增加,浮选粗精矿金品位总体呈先升高后降低的趋势,金回收率逐渐升高,当细度达到73.65%后,金回收率基本保持稳定。因此,确定浮选较佳磨矿细度为-0.074 mm 占73.65%。

2.1.2 浮选捕收剂用量

在磨矿细度为-0.074 mm 占73.65%、水玻璃 2000 g/t、硫酸铜 100 g/t、2号油 50 g/t 条件下,改变捕收剂丁黄药用量进行一次粗选,结果见图4。

由图4可知,随着丁黄药用量的增大,浮选粗精矿金品位和金回收率均呈先升高后降低的趋势,当用量为180 g/t时,金品位和金回收率均最高。

2.1.3 浮选捕收剂配比

在磨矿细度为-0.074 mm 占73.65%、水玻璃 2000 g/t、硫酸铜 100 g/t、2号油 50 g/t 条件下,控制丁黄药+丁铵黑药总用量为180 g/t,改变丁黄药和丁铵黑药的比例进行一次粗选,结果见图5。

由图5可知,随着丁铵黑药用量的增大,浮选粗精矿金品位和金回收率都逐渐升高;当丁黄药:丁铵黑药配比低于1:1后,泡沫发黏,夹带严重,浮选指标变差。丁黄药1:1配合丁铵黑药使用时,精矿金品位为36.81 g/t,金回收率为84.23%,指标较好。

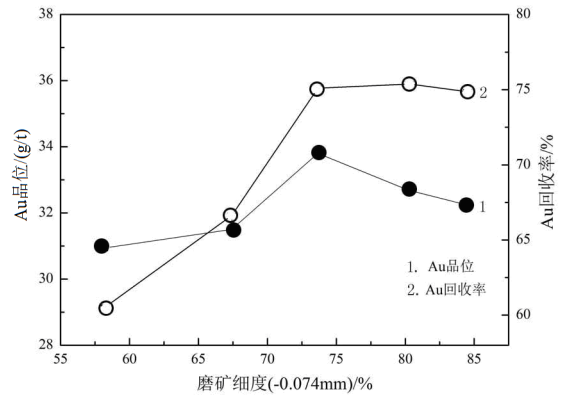


图3 浮选磨矿细度试验结果

Fig.3 Flotation test result of grinding fineness

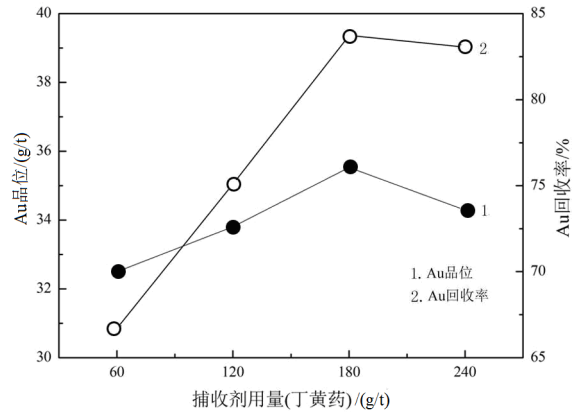


图4 浮选捕收剂用量试验结果

Fig.4 Flotation test result of collector dosage

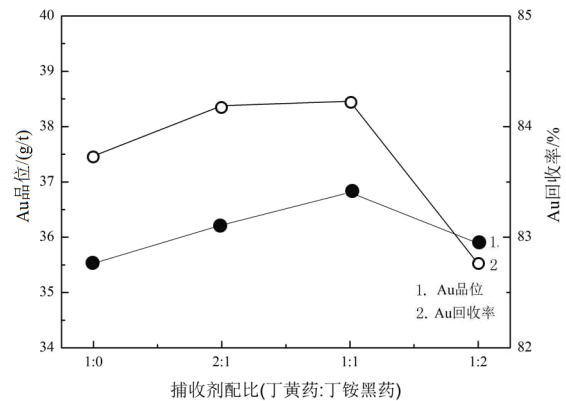


图5 浮选捕收剂配比试验结果

Fig.5 Flotation test result of collector ratio

2.2 尼尔森重选试验

考察磨矿细度和给矿量对金回收指标的影响。

2.2.1 磨矿细度

在给矿量为 1000 g, 重力为 60 G 的条件下进行尼尔森重选试验, 结果见图 6。

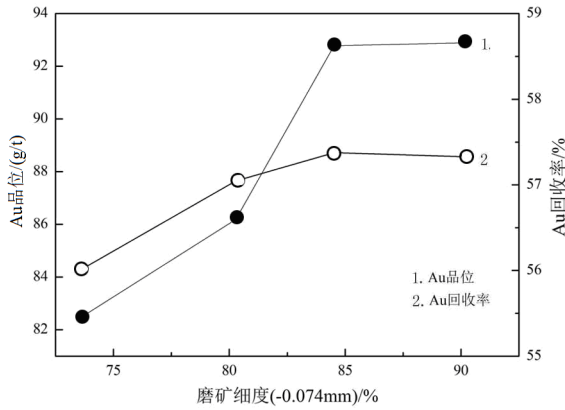


图 6 尼尔森重选磨矿细度试验结果

Fig.6 Knelson concentration test result of grinding fineness

由图 6 可知, 随着磨矿细度的增加, 尼尔森重选精矿金品位和回收率逐渐升高, 当细度达到 84.52%后, 金品位和回收率保持稳定。因此, 确定较佳磨矿细度为-0.074 mm 占 84.52%。

2.2.2 给矿量

试验在磨矿细度为-0.074 mm 占 84.52%, 重力为 60 G 的条件下进行, 结果见图 7。

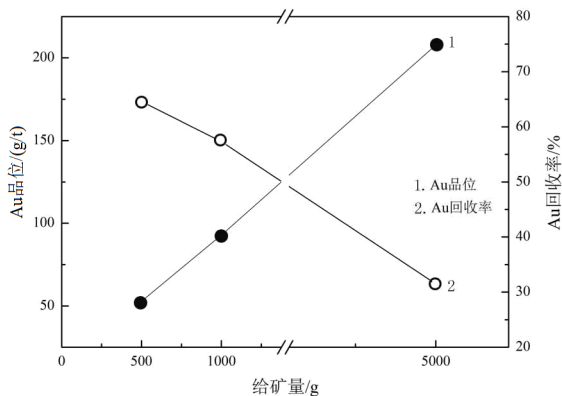


图 7 尼尔森重选给矿量试验结果

Fig.7 Knelson concentration test result of feeding amount

由图 7 可以看出, 随着给矿量的增加, 尼尔森重选精矿金品位逐渐升高, 金回收率逐渐降低。当给矿量为 1000 g 时, 精矿金品位为 92.78 g/t, 金回收率为 57.34%, 指标较好。

2.3 摇床重选-浮选联合流程试验

分别考察磨矿细度和捕收剂用量对金回收指标的影响, 试验流程见图 8。

2.3.1 摇床重选磨矿细度试验

摇床重选磨矿细度试验流程见图 8, 捕收剂为丁黄药 75 g/t+丁铵黑药 75 g/t, 试验结果见表 3。

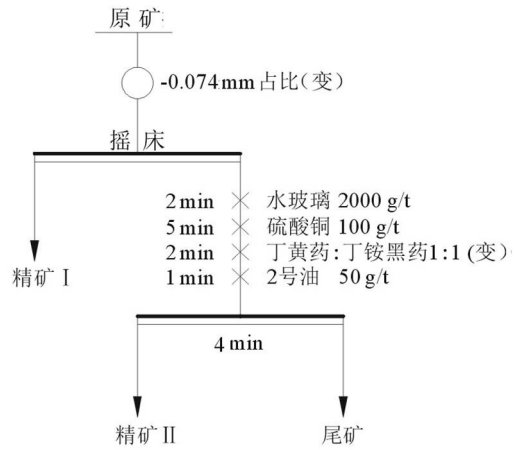


图 8 摇床重选-浮选联合试验流程图

Fig.8 Flowchart of shaking table-flotation combined process test

表 3 摇床重选磨矿细度试验结果

Tab.3 Shaking table test result of grinding fineness

-0.074mm/%	产品名称	产率/%	金品位/(g/t)	金回收率/%
67.42	精矿 I	32.12	37.25	74.83
	精矿 II	16.55	13.56	14.03
	精矿 I+精矿 II	48.67	29.19	88.86
	尾矿	51.33	3.47	11.14
	原矿	100.00	15.99	85.97
73.65	精矿 I	30.89	40.35	78.00
	精矿 II	15.33	14.23	13.65
	精矿 I+精矿 II	46.22	31.69	91.65
	尾矿	53.78	2.48	8.35
	原矿	100.00	15.98	86.35
80.28	精矿 I	30.12	40.66	76.69
	精矿 II	15.45	13.88	13.43
	精矿 I+精矿 II	45.57	31.58	90.11
	尾矿	54.43	2.90	9.89
	原矿	100.00	15.97	86.57
84.52	精矿 I	29.33	41.88	76.87
	精矿 II	16.24	13.45	13.67
	精矿 I+精矿 II	45.57	31.75	90.54
	尾矿	54.43	2.78	9.46
	原矿	100.00	15.98	86.33

由表 3 可知,随着磨矿细度的增加,精矿 I 产率逐渐降低,金品位逐渐升高,精矿 II 指标差别不大,精矿 I+精矿 II 金品位和回收率先逐渐升高,细度达到 73.65%后,金品位和回收率略有降低。因此,确定较佳磨矿细度为-0.074 mm 占 73.65%。

2.3.2 浮选捕收剂用量试验

浮选捕收剂用量试验流程见图 8,磨矿细度为 -0.074 mm 占 73.65%,结果见表 4。

由表 4 可知,精矿 I 指标稳定,随着捕收剂用量的加大,精矿 II 产率逐渐增大,金品位和回收率呈先升高后降低的趋势。当捕收剂用量为丁黄药 75 g/t+丁铵黑药 75 g/t时,精矿 I+精矿 II 金品位为 31.69 g/t,金回收率为 91.65%,指标较好。

2.4 摇床重选-浮选联合流程开路试验

根据工艺对比试验可知,摇床重选-浮选联合工艺可以最大限度保证金的回收,且工艺指标较佳,故采用摇床重选-浮选联合流程进行开路试验。试验流程见图 9,试验结果见表 5。

由表 5 可知,在磨矿细度为-0.074 mm 占 73.65%的条件下,经过两次摇床重选,可得到金品位为 91.24 g/t,金回收率为 61.57%的精矿 I;摇床尾矿再经过一粗两扫两精浮选,可得到金品位为 46.15g/t,金回收率为 23.86%的精矿 II。

表 4 浮选捕收剂用量试验结果

Tab.4 Flotation test result of collector dosage

捕收剂/ (g/t)	产品名称	产率/ %	金品位/ (g/t)	金回收 率/%
丁黄药 60+ 丁铵黑药 60	精矿 I	30.92	40.19	77.86
	精矿 II	13.55	13.26	11.26
	精矿 I+精矿 II	44.47	31.98	89.12
	尾矿	55.53	3.13	10.88
	原矿	100.00	15.96	88.74
丁黄药 75+ 丁铵黑药 75	精矿 I	30.89	40.35	78.00
	精矿 II	15.33	14.23	13.65
	精矿 I+精矿 II	46.22	31.69	91.65
	尾矿	53.78	2.48	8.35
	原矿	100.00	15.98	86.35
丁黄药 90+ 丁铵黑药 90	精矿 I	30.73	40.47	77.97
	精矿 II	16.55	12.56	13.03
	精矿 I+精矿 II	47.28	30.70	91.00
	尾矿	52.72	2.72	9.00
	原矿	100.00	15.95	86.97

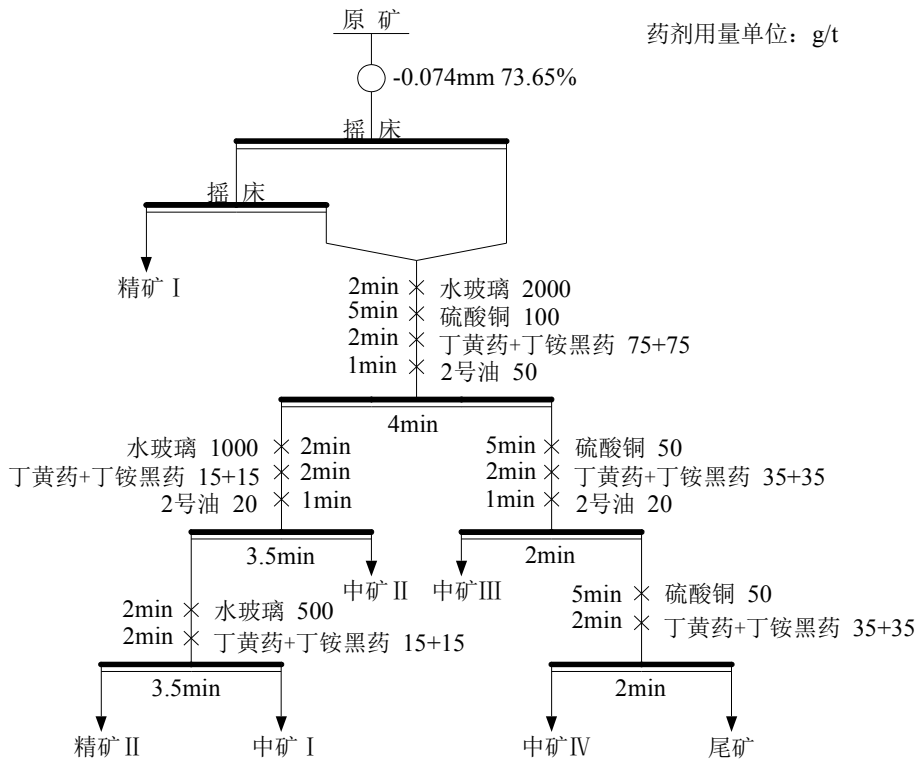


图 9 摇床重选-浮选联合开路试验流程图

Fig.9 Opened-circuit flowchart of shaking table-flotation combined process

表 5 摇床重选-浮选联合开路试验结果

Tab.5 Opened-circuit test result of shaking table-flotation combined process

产品名称	产率/%	金品位/(g/t)	金回收率/%
精矿 I	10.77	91.24	61.57
精矿 II	8.25	46.15	23.86
中矿 I	4.35	28.45	7.75
中矿 II	2.97	7.09	1.32
中矿 III	5.98	5.05	1.89
中矿 IV	4.92	2.85	0.88
尾矿	62.76	0.69	2.73
原矿	100.00	15.96	100.00

2.5 摇床重选-浮选联合流程闭路试验

在开路试验的基础上进行摇床重选-浮选联合流程闭路试验, 试验流程见图 10, 试验结果见表 6。

由表 6 可知, 在磨矿细度为-0.074 mm 占 73.65% 的条件下, 经过两次摇床重选, 可得到金品位为 91.27 g/t, 金回收率为 60.12% 的精矿 I; 摇床尾矿再经过一粗两扫两精浮选, 中矿循序返回, 可得到金品位为 43.15 g/t, 金回收率为 30.40% 的精矿 II; 合并精矿 I 和精矿 II 得到综合金精矿, 金品位为 66.40 g/t, 金回收率为 90.52%。

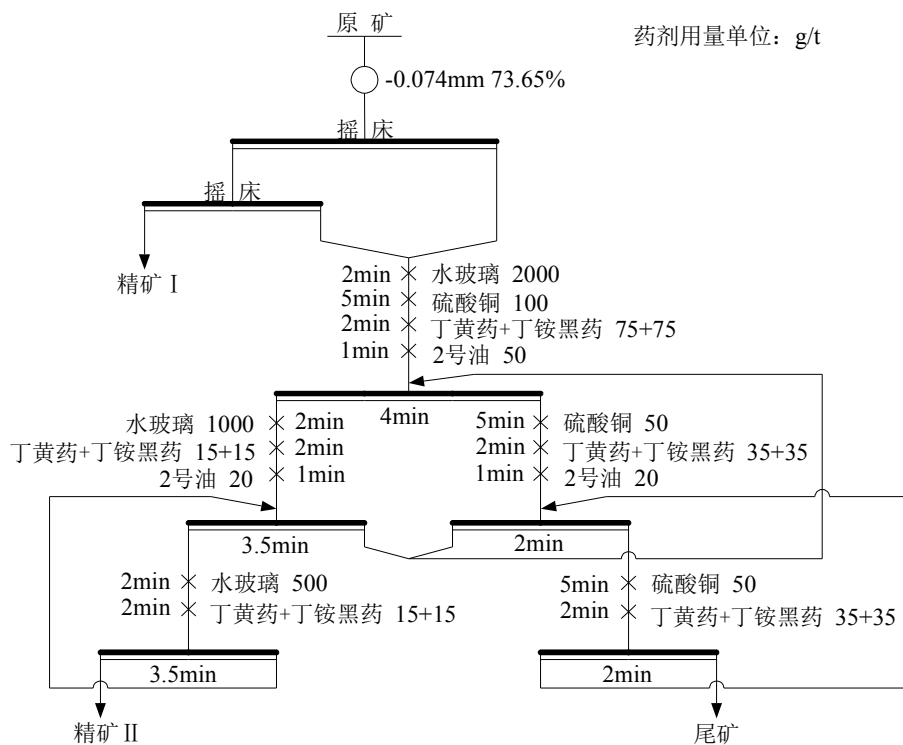


图 10 摇床重选-浮选联合闭路试验流程图

Fig.10 Closed-circuit flowchart of shaking table-flotation combined process

表 6 摇床重选-浮选联合闭路试验结果

Tab.6 Closed-circuit test result of shaking table-flotation combined process

产品名称	产率/%	金品位/(g/t)	金回收率/%
精矿 I	10.52	91.27	60.12
精矿 II	11.25	43.15	30.40
精矿 I+精矿 II	21.77	66.40	90.52
尾矿	78.23	1.94	9.48
原矿	100.00	15.97	100.00

3 结论

1) 赞比亚某金矿中的金主要以自然金和银金矿的形式存在, 载金矿物主要为黄铁矿和毒砂, 属高硫高砷难处理金矿; 矿石中的金主要为显微金, 金颗粒粗细不均, 5~10 μm 大小的金颗粒在矿石中分布较多。

2) 根据原矿性质, 采用单一浮选、尼尔森重选、

摇床重选-浮选联合3种工艺进行对比试验。单一浮选工艺试验表明磨矿细度为-0.074 mm占73.65%、捕收剂为丁黄药90 g/t+丁铵黑药90 g/t时浮选效果较好,但总体指标一般。采用尼尔森重选,磨矿细度为-0.074 mm占84.52%、给矿量为1000 g时,可得到较高品位的金精矿,但金回收率较低。摇床重选-浮选联合工艺可以最大程度回收金,工艺指标较好,更适合作为该金矿的选矿工艺。

3) 采用摇床重选-浮选联合工艺,在磨矿细度为-0.074 mm占73.65%的条件下,经过两次摇床重选,重选尾矿再经一粗两扫两精,粗选捕收剂为丁黄药75 g/t+丁铵黑药75 g/t,中矿循序返回闭路流程,可得金品位为66.40 g/t、金回收率为90.52%的综合金精矿,工艺指标较好,可为矿山开发提供合理可靠的选矿工艺技术依据。

参考文献:

- [1] 佚名.《中国黄金年鉴2016》发布[J]. 黄金, 2016, 37(8): 13.
Anon. "China Gold Yearbook" was released[J]. Gold, 2016, 37(8): 13.
- [2] 潘祖鸿, 皇甫明柱, 韩永群. 贵州某低品位金矿选矿试验[J]. 现代矿业, 2017(5): 141-144.
PAN Z H, HUANGFU M Z, HAN Y Q. Dressing experiment on a low grade gold ore from Guizhou[J]. Modern Mining, 2017(5): 141-144.
- [3] LI W J, SONG Y S, CHEN Y, et al. Beneficiation and leaching study of a muti-Au carrier and low grade refractory gold ore[C]// IOP Conference Series: Materials science and engineering, 2017: 231: 012169.
- [4] MANSUROV Y N, MIKLIN Y A, MIKLIN N A, et al. Methods and equipment for breaking down gold-containing concentrates from lean ores and mining industry waste[J]. Metallurgist, 2018, 62(1/2): 169-175.
- [5] 冉金城, 刘全军, 邱显扬, 等. 铜铅多金属硫化矿中伴生金的强化回收实验研究[J]. 贵金属, 2017, 38(2): 47-51.
RAN J C, LIU Q J, QIU X Y, et al. Experimental research on enhanced recovery of associated gold from a copper-lead multi-metal sulfide ore[J]. Precious metals, 2017, 38(2): 47-51.
- [6] 许凌霄, 王达, 许虹, 等. “一带一路”大战略推动下我国海外金矿投资策略[J]. 资源与产业, 2017(3): 17-23.
XU L X, WANG D, XU H, et al. China's overseas gold investment strategy under "One Belt and One Road"[J]. Resources and industries, 2017(3): 17-23.
- [7] 侯凯, 谢贤, 童雄, 等. 我国金矿床的工业类型及选矿研究方法[J]. 矿产综合利用, 2014(4): 9-15.
HOU K, XIE X, TONG X, et al. Review of the commercial types of gold deposits and their beneficiation methods at home[J]. Multipurpose utilization of mineral resources, 2014(4): 9-15.
- [8] 贾凤梅, 秦丽, 陈曦. 内蒙某金矿选矿工艺流程试验研究[J]. 矿产综合利用, 2017(2): 31-34.
JIA F M, QING L, CHEN X. Experimental study on mineral processing technology for a gold ore in Inner Mongolia[J]. Multipurpose utilization of mineral resources, 2017(2): 31-34.
- [9] 陈桥, 杨洪英, 陈贵民, 等. 尼尔森重选在我国石英脉型金矿选矿工艺中的应用[J]. 黄金科学技术, 2017, 25(5): 73-79.
CHEN Q, YANG H Y, CHEN G M, et al. Application of Knelson gravity concentration in quartz vein type gold beneficiation process in China[J]. Gold science and technology, 2017, 25(5): 73-79.
- [10] 谢建宏, 刘思伟, 李慧, 等. 加纳共和国某金矿选矿工艺流程试验研究[J]. 黄金, 2010, 31(5): 50-52.
XIE J H, LIU S W, LI H, et al. Experimental research on the ore processing flowsheet in a gold mine in Ghana Republic[J]. Gold, 2010, 31(5): 50-52.
- [11] EVDOKIMOV S I, EVDOKIMOV V S. Enhanced gold recovery based on joint ore and waste processing[J]. Journal of mining science, 2017, 53(2): 358-366.
- [12] ALEKSANDROVA T N, ROMASHEV A O, SEMENIKHIN D N. Mineral and technological aspects and promising methods for intensifying enrichment of sulfide gold-bearing ore[J]. Metallurgist, 2015, 59(3/4): 330-338.