

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2024.04.009

卡林型金矿的高效分选回收

刘万峰 王雪文

(矿冶科技集团有限公司 矿物加工科学与技术国家重点实验室, 北京 102628)

摘要: 卡林型金矿浮选是选矿的难点之一,也是研究热点之一。某金矿属卡林型金矿,矿石性质复杂,金呈微细浸染嵌布,碳酸盐矿物、黏土矿物和碳质矿物含量高,载金矿物可浮性差,金的回收难度极大。从脉石矿泥含量大难以抑制、金呈微细浸染嵌布、载金矿物可浮性差异大等严重影响浮选指标的关键技术性难题出发,采用深度分散抑制—活化增效—分速浮选技术,并利用捕收剂的协同效应,有效降低了中矿循环负荷,实现了金矿物的高效分选回收。浮选闭路试验可获得金品位 $24.61 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ 、金回收率 80.42% 的金精矿。采用该工艺技术后无需预先脱除矿泥,解决了以往金精矿金品位和金回收率低的双难题,减化了作业流程,为解决呆滞的金矿资源回收提供了技术支持。

关键词: 卡林型金矿; 深度分散抑制; 活化增效; 分速浮选; 协同效应; 无需脱泥

中图分类号: TD953 **文献标志码:** B **文章编号:** 1005-7854(2024)04-0541-06

Efficient separation and recovery technology of a refractory Carlin-type gold ore

LIU Wanfeng WANG Xuewen

(State Key Laboratory of Mineral Processing, BGRIMM Technology Group, Beijing 102628, China)

Abstract: Carlin-type gold ore flotation is one of the difficulties in beneficiation and also one of the research hotspots. A certain gold deposit is of Carlin-type with complex ore properties and is disseminated in subsieve particles with high content of carbonate minerals, clay minerals and carbonaceous minerals. The gold-bearing minerals have poor floatability, making the recovery of gold extremely difficult. Starting from the key technical challenges that seriously affect flotation indicators, such as high content of gangue slime that is difficult to suppress, subsieve disseminated gold, and large differences in floatability of gold-bearing minerals, this study adopts deep dispersion depression-activation synergism-flotation at a different velocity and utilizes the synergistic effect of the collector to effectively reduce the circulating load of middling ore and realize efficient separation and recovery of gold minerals. A gold concentrate with a gold grade of $24.61 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ and a gold recovery rate of 80.42% could be obtained by the flotation closed-circuit test. After adopting this technology, there is no need to remove the slime beforehand, which solves both the problems of low gold grade and recovery in the past, reduces the operation process, and provides technical support for solving the recovery of sluggish gold resources.

Key words: Carlin-type gold ore; deep dispersion depression; activation synergism; flotation at different velocities; synergistic effect; without desliming

收稿日期: 2023-12-23

第一作者: 刘万峰, 硕士, 正高级工程师, 主要从事选矿工艺技术研究。E-mail: liu_wf@bgrimm.com

卡林型金矿是 20 世纪 60 年代初在美国西部内华达州的卡林镇发现而得名的, 一般产于沉积岩或火山岩中。卡林型金矿中的金呈微细粒浸染状赋存于硫化物或黏土矿物中, 卡林型金矿带以往的勘察

深度一般为 100~300 m, 属低品位、大吨位以沉积岩为容矿岩石的微细浸染型金矿^[1-3]。随着金价的不攀升, 以及黄金可采资源的不断减少, 难处理的卡林型金矿成为了国内外研究机构和专家学者研究的热点^[4,5]。我国该类型金矿主要分布在滇黔桂、川陕甘两个金三角内, 储量丰富。此类矿石含碳酸盐脉石、黏土类矿物较高, 且碳质矿物较多, 在磨矿过程中容易产生大量的次生矿泥, 矿泥会使已解离的含金矿物发生罩盖, 严重恶化浸出或浮选过程。贵州某金矿属于难处理的卡林型金矿, 在采用氰化法直接浸出时, 浸出率非常低, 仅 10% 左右, 不能有效回收矿石中的金; 而采用浮选时, 一般需在浮选前预先脱除矿泥, 然后再进行浮选, 浮选虽比直接氰化法回收效果好, 但精矿产率较大, 获得的金精矿品位及回收率也较低, 金品位在 10 g·t⁻¹ 左右, 金回收率在 20%~40%, 也不是很理想。为了在浮选回收该金矿资源上获得技术性突破, 在已有浮选技术的基础上, 针对该金矿黏土矿物和矿泥含量大难以抑制、金微细浸染嵌布、载金矿物可浮性差异大等严重影响浮选指标的关键技术性难题进行了详细的浮选试验研究。采用组合调整剂深度分散矿泥和抑制脉石, 采用硫酸铜强度活化载金矿物, 利用组合捕收剂的协同效应, 通过分速浮选技术回收矿石中的金, 即通过深度分

散抑制—活化增效—分速浮选技术处理该矿, 获得了较理想的试验指标, 为解决呆滞的金矿资源回收提供了技术支持。

1 矿石性质

矿石样品采自贵州某矿山, 采用化学分析、X 射线衍射分析、光学显微镜分析、扫描电子显微镜分析等手段对矿样进行化学和矿物学分析。化学成分分析结果(表 1)表明, 矿样金品位为 3.59 g·t⁻¹, 为主要有用回收元素; 银为伴生有价元素, 品位为 2.36 g·t⁻¹, 可以综合回收; 其他元素暂无利用回收价值; 主要成岩成分为 SiO₂、CaO 和 Al₂O₃; C 含量相对较高, 为 2.85%; As、Sb 和其他有害元素含量较低。矿样化学成分见表 1。矿物学分析结果表明, 矿石中的主要金属矿物为胶黄铁矿、黄铁矿、赤铁矿、毒砂、闪锌矿和黄铜矿; 非金属矿物主要有石英、方解石、白云石、蒙脱石、石膏、高岭石和碳质泥质物。矿石中主要载金矿物为胶黄铁矿和黄铁矿。金以不可见金的形式包裹于载金矿物中。主要载金矿物胶黄铁矿和黄铁矿以细粒级嵌布为主, 只有在非常细的磨矿细度下才能实现单体解离, 而在这样的细度下矿石又很容易泥化。此外, 胶黄铁矿和黄铁矿具有不同的可浮性, 胶黄铁矿比黄铁矿难浮, 易损失于尾矿中。

表 1 矿石多元素化学分析结果

Table 1 Multi-element chemical analysis results of ore

/%

成分	Au ^①	Ag ^①	As	Sb	C	S	Zn
含量	3.59	2.36	0.051	0.022	2.85	3.95	0.023
成分	Pb	Fe	P	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
含量	0.015	4.35	0.027	73.10	2.77	10.14	0.097
成分	Cu	Ti	K ₂ O	Na ₂ O	Mn		
含量	0.048	0.36	0.26	0.078	0.11		

注: ①单位为 g·t⁻¹。

2 影响金回收的技术难点分析及解决措施

金主要呈不可见金包裹于载体矿物胶黄铁矿和黄铁矿中, 载金矿物可浮性差异大, 其中胶黄铁矿可浮性较差, 致使该部分含金矿物易损失于尾矿中; 载金矿物胶黄铁矿和黄铁矿以细粒嵌布为主, 实现单体解离较为困难; 易泥化脉石和易浮脉石矿物含量高, 严重干扰载金矿物的上浮和金精矿金品位的提高; 载金矿物较多, 单一捕收剂难于进行有效回收。以上诸多矿物学因素是造成金回收难度大

的主要原因。为实现载矿物金的有效回收, 针对以上各种影响金回收的因素采取了一系列的针对性技术措施, 具体为: 1) 通过加强对载金矿物的活化, 提高载金矿物的可浮性, 避免含金矿物在上浮过程中脱落造成的金损失; 2) 采用分速浮选技术解决载金矿物的可浮性差异大的技术难题; 3) 通过适当细磨的技术措施, 尽可能地提高载金矿物的单体解离度, 解决脉石矿物过度泥化对载金矿物分选的干扰问题; 4) 通过采用组合调整剂, 深度分散抑制脉石和矿泥, 改善载金矿物上浮氛围环境, 提高金精矿金品位; 5) 利用组合捕收剂的协同效应加强对不同载金矿物的捕收, 提高金的回收率。

3 试验结果与讨论

3.1 磨矿细度对金回收的影响

金矿物嵌布粒度细是卡林型金矿中金难于回收的重要因素之一，合理的磨矿细度至关重要，磨矿细度过粗，金及载金矿物不能有效解离，反之，过细容易导致矿石泥化严重，难于分散和抑制，造成细粒金损失增加。磨矿细度对金回收的影响试验流程见图 1，试验结果如图 2 所示。从图 2 可以看出，适当细磨可显著提高金的回收率，当磨矿细度 $-74 \mu\text{m}$ 粒级占比为 95% 时，金的回收效果最优，继续增加磨矿细度，金品位和回收率反而出现明显下降现象。这是因为，磨矿细度过大，矿石粒度过细会发生严重的泥化现象，使浮选氛围恶化，金品位和回收率降低。

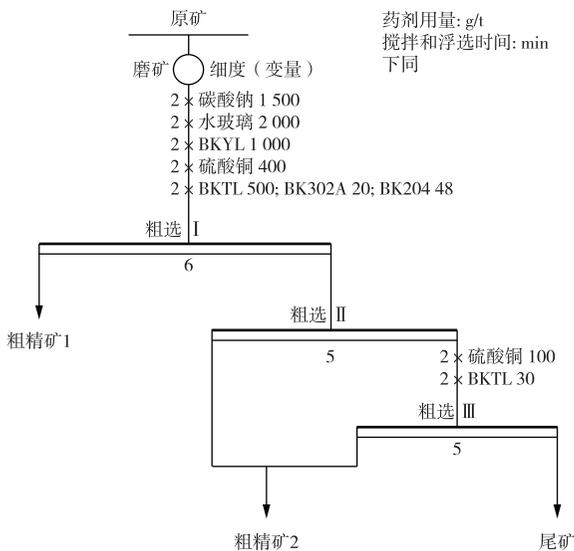


图 1 磨矿细度对金回收影响试验流程

Fig. 1 Test flowsheet of the effect of grinding fineness on gold recovery

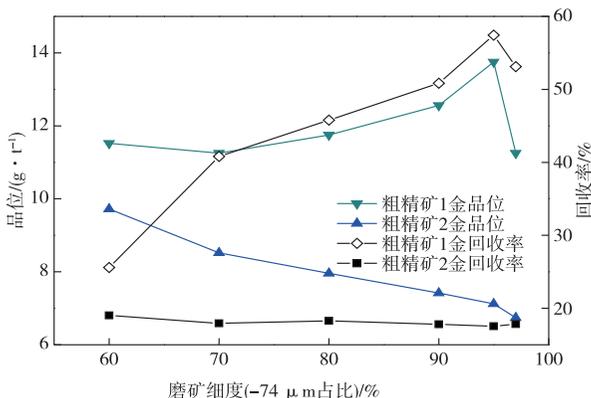


图 2 磨矿细度对金回收的影响

Fig. 2 Effects of grinding fineness on gold recovery

3.2 碳酸钠用量对金回收的影响

在含金黄铁矿浮选时，碳酸钠除作 pH 值调整剂外，还是矿泥的分散剂，可减弱或消除矿泥对浮选的不良影响。而且，碳酸钠还是黄铁矿活化剂，可对黄铁矿表面的氧化产物有一定的清洗作用，可消除钙离子等对黄铁矿的影响，使黄铁矿的可浮性增强，减少细泥夹带金损失，从而达到提高金回收率的目的^[6]。但当碳酸钠用量不足时，部分载金矿物黄铁矿得不到充分活化，精矿品位和回收率偏低，而用量过大时，又会使黄铁矿受到抑制，导致金回收率降低^[7]。图 3 为碳酸钠用量试验研究结果。从图 3 可以看出，随着碳酸钠用量的增加，金品位和金回收率均升高，而当碳酸钠用量增加到 $1500 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ 后，继续增加碳酸钠用量，金回收率开始降低。因此，最佳碳酸钠用量为 $1500 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ 。

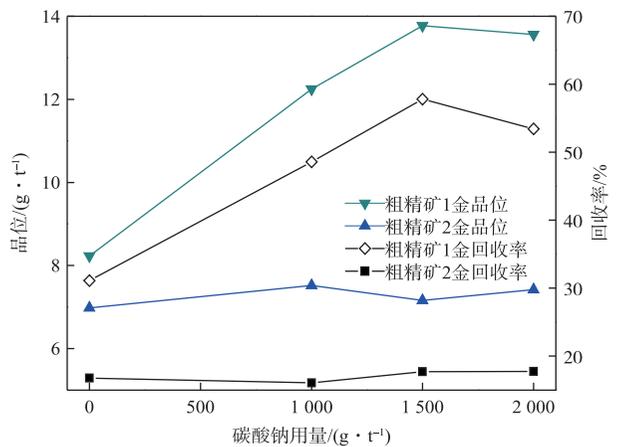


图 3 碳酸钠用量对金回收的影响

Fig. 3 Effects of sodium carbonate dosage on gold recovery

3.3 水玻璃用量对金回收的影响

水玻璃可作石英、硅酸盐、铝硅酸盐和碳酸盐类脉石的抑制剂，同时还是矿泥的分散剂^[2]。该卡林型金矿中脉石矿物以石英、铝硅酸盐、方解石和黏土矿物为主，因此在试验过程中可添加适量水玻璃来分散和抑制脉石矿物，提高分选指标。图 4 为水玻璃用量对金回收影响试验结果。从图 4 可以看出，适量添加水玻璃后，显著加强了对脉石矿物和矿泥的分散和抑制，改善了浮选氛围，当添加 $2000 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ 水玻璃可大幅度提高金的回收率(提高 16.33 个百分点)，但继续增加水玻璃用量，金回收率呈降低趋势，因此，最佳水玻璃用量以 $2000 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ 为宜。

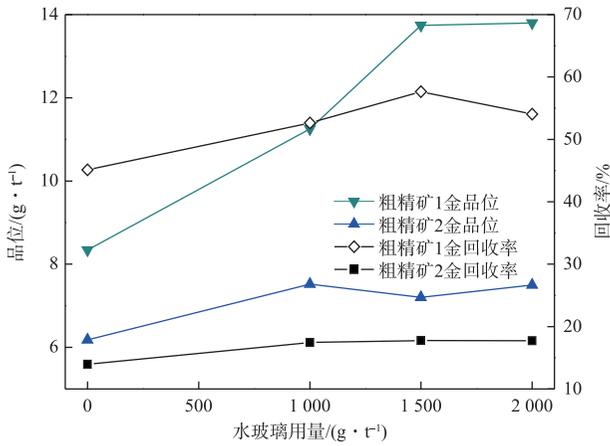


图4 水玻璃用量对金回收的影响

Fig. 4 Effects of sodium silicate dosage on gold recovery

3.4 抑制剂 BKYL 用量对金回收的影响

KBYL 是一种含有大量羟基和羧基的有机大分子抑制剂，对碳质脉石和泥质脉石以及含钙矿物具有良好的抑制作用。本文试验中，BKYL 对碳质脉石、泥质脉石和方解石具有良好的抑制作用，可有效提高捕收剂对金矿物的选择性，提高金的品位和回收率。抑制剂 BKYL 用量对金回收的影响试验结果如图 5 所示。从图 5 可以看出，当 BKYL 添加量为 1 000 g·t⁻¹ 时，金回收率较未添加时提高 9.04 个百分点，并且金品位提高显著，大幅度降低了易浮脉石的上浮量，而继续增加 BKYL 用量，金的回收率呈降低趋势。因此最佳 BKYL 用量以 1 000 g·t⁻¹ 为宜。

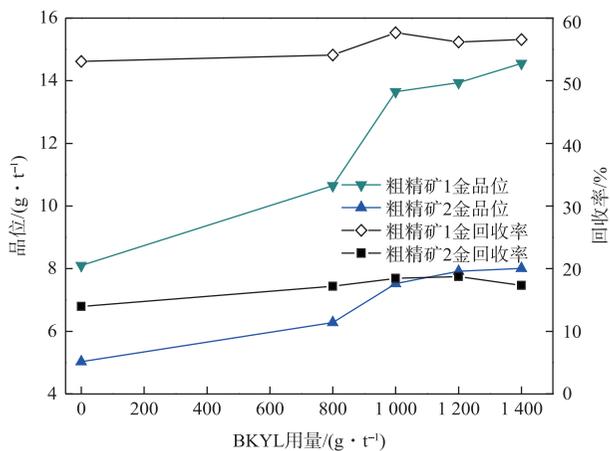


图5 BKYL 用量对金回收的影响

Fig. 5 Effects of BKYL dosage on gold recovery

3.5 硫酸铜用量对金回收的影响

黄铁矿是金的主要载体矿物，而硫酸铜可活化黄铁矿，促进捕收剂对黄铁矿的捕收作用，从而提高金的回收率^[8]。由于试验用矿石中部分黄铁矿以

胶黄铁矿形式存在，可浮性较差，因此硫酸铜的活化作用尤为关键。硫酸铜用量对金回收的影响试验结果如图 6 所示。从图 6 可以看出，硫酸铜用量对金的回收影响较大，只有在较高用量条件下，才能保证金具有较高的品位和回收率，当硫酸铜用量达到 800 g·t⁻¹ 后继续增加硫酸铜用量，金回收率增加不明显，而金品位开始降低。因此，确定硫酸铜最佳用量为 800 g·t⁻¹。

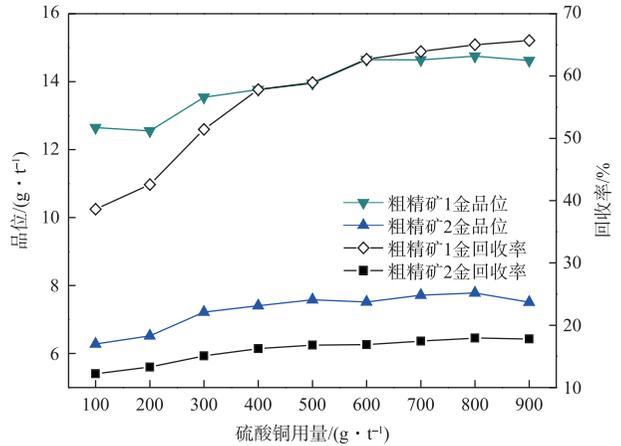


图6 硫酸铜用量对金回收的影响

Fig. 6 Effects of copper sulphate dosage on gold recovery

3.6 捕收剂 BKTL 用量对金回收的影响

矿石中胶黄铁矿的存在使金的回收难度加大，需采用捕收力较强的捕收剂来加强对载金矿物捕收，试验采用巯基类捕收剂 BKTL 回收金。捕收剂 BKTL 用量对金回收的影响试验结果如图 7 所示。从图 7 可以看出，随着捕收剂 BKTL 用量的增加，金的回收率升高，但当用量达到 500 g·t⁻¹ 后继续增加 BKTL 用量，金的回收率增加不显著。因此确定捕收剂 BKTL 的最佳用量为 500 g·t⁻¹。

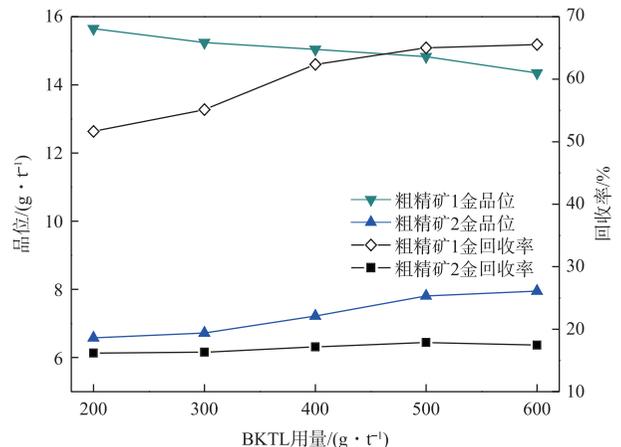


图7 BKTL 用量对金回收的影响

Fig. 7 Effects of BKTL dosage on gold recovery

3.7 BK302A 用量对金回收的影响

根据实践经验，浮选回收金时，酯类捕收剂 BK302A 作辅助捕收剂可增强对载金矿物的捕收效果，提高金的回收率。辅助捕收剂 BK302A 对金回收的影响试验结果如图 8 所示。从图 8 可以看出，

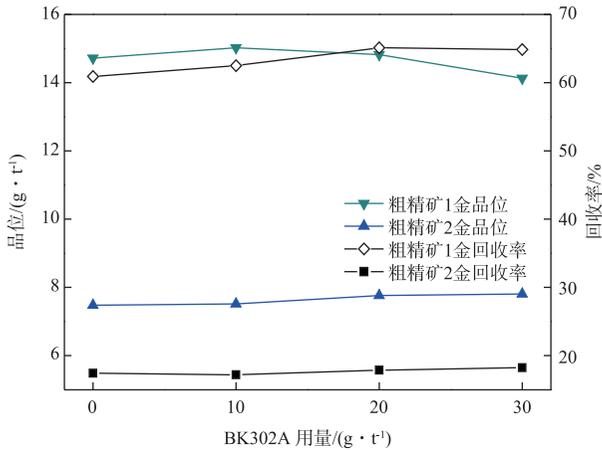


图 8 BK302A 用量对金回收的影响

Fig. 8 Effects of BK302A dosage on gold recovery

增加 BK302A 用量有助于金的回收，但当 BK302A 用量达到 20 g·t⁻¹ 后继续增加用量，金的回收率增加不显著。因此最佳 BK302A 用量以 20 g·t⁻¹ 为宜。

3.8 闭路试验

在条件试验的基础上，采用一次粗选精矿单独精选、二次粗选精矿与三次粗选精矿合并精选的分选工艺流程，进行了闭路试验，试验流程见图 9，试验结果见表 2。由表 2 可知，闭路试验可获得产率 11.78%、金品位 24.61 g·t⁻¹ 和回收率 80.42% 的金精矿的选矿指标。

表 2 闭路试验结果

产物名称	产率	金品位 ^①	金回收率
金精矿 1	8.42	27.75	64.84
金精矿 2	3.36	16.72	15.58
浮选金精矿	11.78	24.61	80.42
尾矿	88.22	0.80	19.58
原矿	100.0	3.60	100.0

注：①单位为 g·t⁻¹。

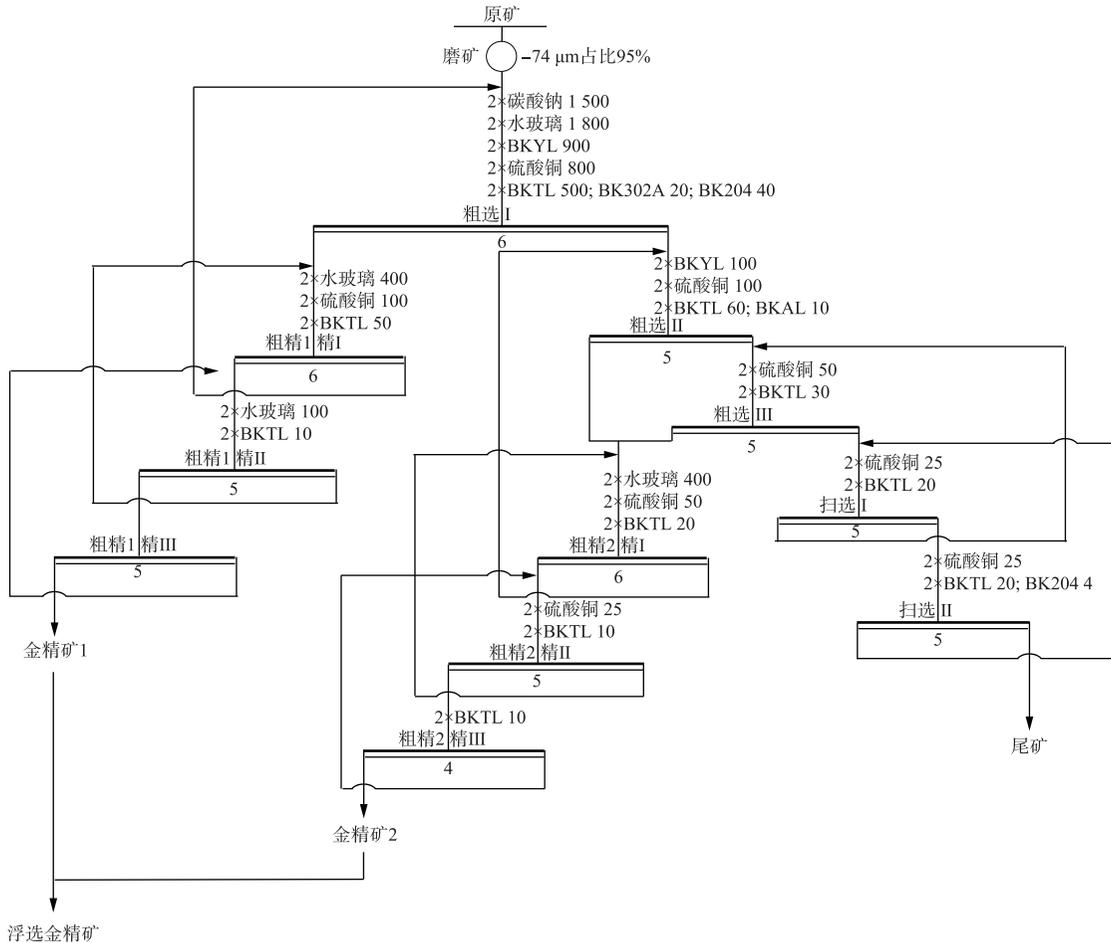


图 9 浮选闭路试验流程

Fig. 9 Flowsheet of the closed-circuit flotation test

4 结论

1) 试验用卡林型金矿金品位为 $3.59 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ ，银品位为 $2.36 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ ，金为主要回收元素，银为伴生有价元素，可以综合回收。

2) 该金矿矿石性质复杂，金呈微细浸染，黏土矿物和矿泥含量大，难以抑制，各载金矿物可浮性差异大，金回收难度大。

3) 采用深度分散抑制—活化增效—分速浮选技术，利用浮选药剂的协同效应，可实现技术突破，消除了矿泥和脉石对浮选作业的严重干扰，有效降低中矿循环负荷，实现金矿物的高效分选回收。采用该工艺闭路试验可获得金品位 $24.61 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ 、金回收率 80.42% 的金精矿，金回收效果好。

参考文献

- [1] 杨晓峰, 刘全军. 贵州某卡林型金矿选矿试验研究[J]. 矿冶, 2008, 17(3): 26-29.
YANG X F, LIU Q J. Experimental study on a Carlin-type gold ore in Guizhou [J]. Mining and Metallurgy, 2008, 17(3): 26-29.
- [2] 孙忠梅, 孙春宝, 甘永刚. 贵州某卡林型金矿浮选工艺研究[J]. 矿产综合利用, 2014(5): 34-37.
SUN Z M, SUN C B, GAN Y G. Study on flotation technology on Carlin-type gold ore in Guizhou [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2014(5): 34-37.
- [3] 宋龔, 刘全军, 常富强. 贵州某卡林型金矿选矿扩大试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2012(4): 37-40.
SONG Y, LIU Q J, CHANG F Q. Research on Guizhou Carlin-type gold deposit for simulating industrial test [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2012(4): 37-40.
- [4] 姜桂鹏, 刘新刚, 赵志强, 等. 甘肃某卡林型金矿提高回收率优化研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2018(4): 56-60, 88.
JIANG G P, LIU X G, ZHAO Z Q, et al. Study on the optimization of the recovery rate of a Carlin type gold mine in Gansu [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2018(4): 56-60, 88.
- [5] 万宏民, 孙欢, 王望泊, 等. 甘肃某卡林型金矿选矿试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2022(3): 81-86.
WAN H M, SUN H, WANG W B, et al. Experimental study on beneficiation of a Carlin-type gold ore in Gansu province [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2022(3): 81-86.
- [6] 金镜潭, 刘滨婵. 含金矿石浮选[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1994: 61-67.
JIN J T, LIU B C. Flotation of gold-bearing ores [M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 1994: 61-67.
- [7] 王学娟, 刘全军. 贵州水银洞低品位卡林型金矿矿石选矿试验[J]. 有色金属(选矿部分), 2007(5): 28-31.
WANG X J, LIU Q J. Experimental study on mineral processing of low-grade Carlin-type gold ore in Guizhou Shuiyidong [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2007(5): 28-31.
- [8] 王学娟, 刘全军. 贵州某卡林型金矿浮选优化试验研究[J]. 矿产综合利用, 2007(6): 3-6.
WANG X J, LIU Q J. Experimental research on optimization of processing parameters for flotation of a Carlin-type gold ore in Guizhou [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2007(6): 3-6.