

# 山西某蚀变斑岩型金矿选矿试验研究

赵汝全<sup>1,2,3</sup>, 魏转花<sup>2,3</sup>, 吴维新<sup>1,2,3</sup>, 周利华<sup>2,3</sup>, 梁治安<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>紫金矿业集团股份有限公司, 福建 龙岩

<sup>2</sup>低品位难处理黄金资源综合利用国家重点实验室, 福建 龙岩

<sup>3</sup>厦门紫金矿冶技术有限公司, 福建 厦门

收稿日期: 2022年9月20日; 录用日期: 2022年10月19日; 发布日期: 2022年10月26日

## 摘要

山西某蚀变斑岩型金矿中矿石原矿含金1.10 g/t, 金矿物嵌布粒度较细, 主要与长石、石英、菱锰矿等脉石矿物紧密嵌生, 需将脉石矿物中的金解离或暴露出来, 才可将其与黄铁矿一起浮选回收。针对该矿石特点, 通过组合捕收剂戊基黄药 + 丁铵黑药的协同效应, 采用“一粗两精两扫”的工艺流程, 最终获得含金49.70 g/t, 回收率为85.92%的浮选金精矿, 尾矿金品位降低至0.15 g/t, 指标优良。

## 关键词

斑岩型金矿, 石英脉型金矿, 低品位, 嵌布粒度细

# Experimental Study on Beneficiation of an Altered Porphyry Gold Deposit in Shanxi

Ruquan Zhao<sup>1,2,3</sup>, Zhuanhua Wei<sup>2,3</sup>, Weixin Wu<sup>1,2,3</sup>, Lihua Zhou<sup>2,3</sup>, Zhian Liang<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Zijin Mining Group Co., Ltd., Longyan Fujian

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Low-Grade Refractory Gold Resources, Longyan Fujian

<sup>3</sup>Xiamen Zijin Mining & Metallurgy Technology Co., Ltd., Xiamen Fujian

Received: Sep. 20<sup>th</sup>, 2022; accepted: Oct. 19<sup>th</sup>, 2022; published: Oct. 26<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

The ore in an altered porphyry gold deposit in Shanxi contains 1.10 g/t gold. The gold minerals have fine grain size and are closely embedded with gangue minerals such as feldspar, quartz and rhodochrosite. The gold is dissociated or exposed before it can be floated and recovered together with pyrite. According to the characteristics of the ore, by combining the synergistic effect of the collector amyl xanthate and ammonium butyl dithiophosphate, the principle process of one cobbing and two cleans are adopted, and finally the gold grade of flotation concentrate is 49.70 g/t, and the recovery is 85.92%. The gold grade of tailings reduced to 0.15 g/t. These are excellent indicators.

文章引用: 赵汝全, 魏转花, 吴维新, 周利华, 梁治安. 山西某蚀变斑岩型金矿选矿试验研究[J]. 矿山工程, 2022, 10(4): 429-436. DOI: 10.12677/me.2022.104048

## Keywords

Porphyry Gold Deposit, Quartz Vein Type Gold Deposit, Low-Grade, Fine Dissemination Size

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

黄金是人类最早利用的金属之一，对人类文明的发展具有不可磨灭的影响，对人类经济、政治、文化起着至关重要的作用。人们最开始只是因为它耀眼的光芒把它作为财富的象征，但随着社会的发展，开始被广泛应用于电子、航空、化工、医疗等方方面面[1] [2] [3]。黄金是世界各国重要的战略储备资源，但随着金矿资源的大量开采，我国的金矿开采逐渐由以前的易采选金矿转向低品位难处理金矿[4] [5] [6]。我国主要的金矿工业类型是石英脉型金矿，该类型具有矿石成分简单，嵌布粒度细，金矿物多为自然金和银金矿等特点，其矿石成分主要为石英，同时含有少量金属硫化物，以黄铁矿为主[6] [7] [8] [9]。

山西某蚀变斑岩型金矿是具有代表性的石英脉型金矿床，其原矿金品位为 1.10 g/t，金矿物主要以含银自然金形式赋存，外形呈圆粒状或者不规则粒状分散于脉石矿物中，矿石中金矿物分布较集中，主要表现为几粒至几十粒的集群呈现；少量金矿物呈粒状包裹于黄铁矿中或呈短脉状、不规则状分布于黄铁矿粒间。针对该矿石特点，通过调整捕收剂种类以及配比，促进组合药剂的协同效应，采用“一粗两精两扫”的工艺流程，在对现场流程改动较小的情况下，不仅提高了生产现场金的回收率，同时降低了生产成本，为该类型金矿石的高效节能综合利用提供了一定的参考和指导。

## 2. 矿石性质

该矿石属于斑岩型金矿，原矿化学多元素分析及原矿矿物组成及含量见表 1、表 2，金物相分析见表 3。

Table 1. Multi-element chemical analysis of run-of-mine ore/%

表 1. 原矿化学多元素分析/%

元素	Au*	Ag*	S	Fe	As	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
含量	1.10	6.37	0.72	1.03	<0.02	80.80	7.17	0.89	0.18	0.09	4.87

注：带\*单位为 g/t。

Table 2. Mineral composition of run-of-mine ore/%

表 2. 原矿矿物组成及含量/%

矿物名称	含量	矿物名称	含量	矿物名称	含量
黄铁矿	1.19	磁铁矿	0.06	斜长石	0.01
黄铜矿	0.02	白云石	0.03	方解石	0.67
闪锌矿	0.1	铁菱锰矿	0.58	石英	65.31
方铅矿	0.01	白(绢)云母	6.45	高岭石	0.09
赤褐铁矿	0.35	黑云母	0.47	自然金	微量
钛铁矿	0.07	钠长石	0.05	银金矿	微量

**Table 3.** Phase analysis of gold/%  
**表 3.** 金物相分析结果/%

金相	单体金、连体金	硫化物中金	氧化物中金	硅酸盐中金	总金
含量(g/t)	0.95	0.04	0.03	0.08	1.10
分布率	86.61	3.94	2.36	7.09	100.00

由原矿化学多元素分析、原矿矿物组成及含量以及金化学物相诊断分析结果可以看出,山西某蚀变斑岩型金矿床中黄铁矿是其主要金属矿物,另外含有少量的闪锌矿、褐铁矿以及黄铜矿等。造岩矿物主要是石英、长石以及云母等。对于该矿床而言重点关注金矿物的综合回收率利用。同过原矿矿物组成鉴定发现,原矿中的金矿物主要是自然金,其次为银金矿,原矿化学物相诊断可知,原矿中金主要以单体金、连体金(即解离或暴露的自然金)的形式存在,原矿含金 1.10 g/t。

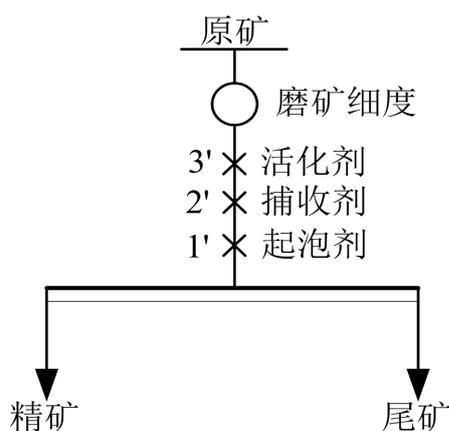
### 3. 试验矿样与药剂

将试验所需矿样经中碎颚式破碎机和辊式破碎机破碎,筛分至 2 mm 全部过筛、用堆锥法进行缩分取样,原矿样送检分析,试验样定量装袋备用。试验选用的选矿药剂主要有  $\text{CuSO}_4$ 、丁基黄药、丁铵黑药、戊基黄药、2<sup>#</sup>油、Y89 等,所有选矿药剂均为工业级,选矿试验用水为普通自来水,试验过程中所用磨矿设备为 XMQ-240×200 型棒磨机、浮选设备为 XFD 系列浮选机。

## 4. 试验结果与分析

### 4.1. 磨矿细度对金浮选指标的影响

磨矿细度直接影响有价矿物的解离度,山西某蚀变斑岩型金矿石中的金主要以含银自然金形式赋存,少量为银金矿,且多数呈粒状或不规则形状嵌布于黄铁矿、长石、石英等矿物中,嵌布粒度细小,绝大部分在 10  $\mu\text{m}$  以下,需要较高的磨矿细度才可以使得金矿物裸露。但过高的磨矿细度必然导致过度磨矿和大量矿泥的产生,而矿泥的产生又将会严重恶化浮选效果,同时矿泥还会与有价矿物竞争吸附浮选药剂,导致药剂单耗增加,进而增加选矿成本。反之磨矿细度不足则会导致有价矿物没有得到充分的解离,造成含金矿物与脉石矿物难以得到有效分选。故此磨矿细度是影响浮选指标的重要因素之一。初步拟定活化剂  $\text{CuSO}_4$  用量为 170 g/t,捕收剂戊基黄药 + 丁铵黑药用量为(34 + 17) g/t,起泡剂 2<sup>#</sup>油用量为 33 g/t 的条件下,考察了不同磨矿细度对金浮选指标的影响[10],试验流程如图 1,试验结果见图 2。



**Figure 1.** Rough selection test flow  
**图 1.** 粗选试验流程

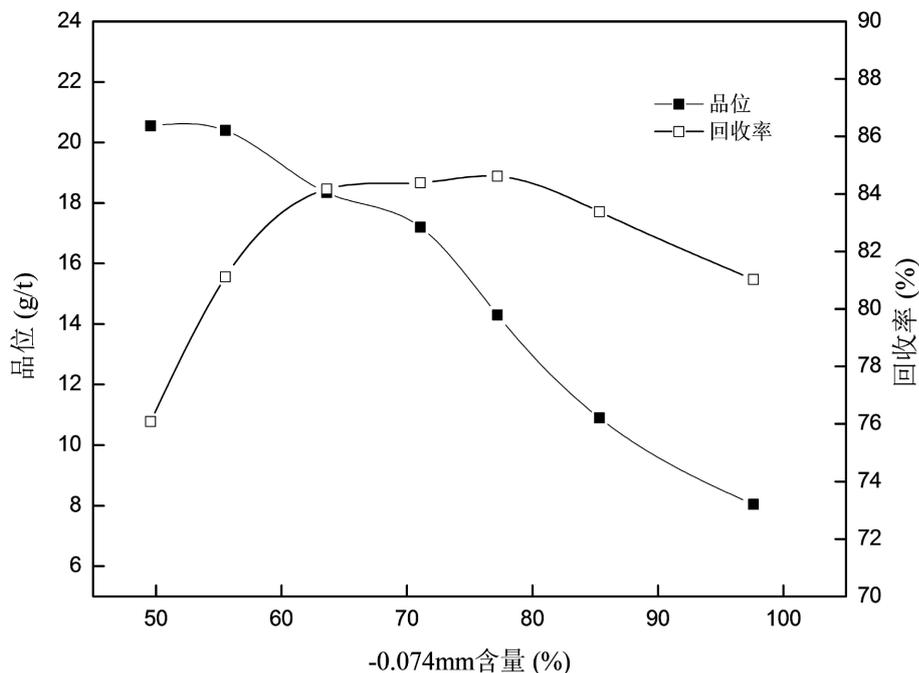


Figure 2. Influence of grinding fineness on gold flotation index  
 图 2. 磨矿细度对金浮选指标的影响

由图 2 试验结果分析发现, 随着磨矿细度的不断提高, 粗精矿金品位不断下降, 金回收率先上升后平稳最后下降, 当磨矿细度达到 $-74\ \mu\text{m}$  含量占 63.61%时, 继续提高磨矿细度不仅没有进一步提高金回收率, 反而使得金回收率下降。综合考虑粗精矿品位和回收率, 初步选用磨矿细度为 $-74\ \mu\text{m}$  占 63.61%, 此时粗精矿含金 18.34 g/t, 粗精矿金回收率为 84.61%。

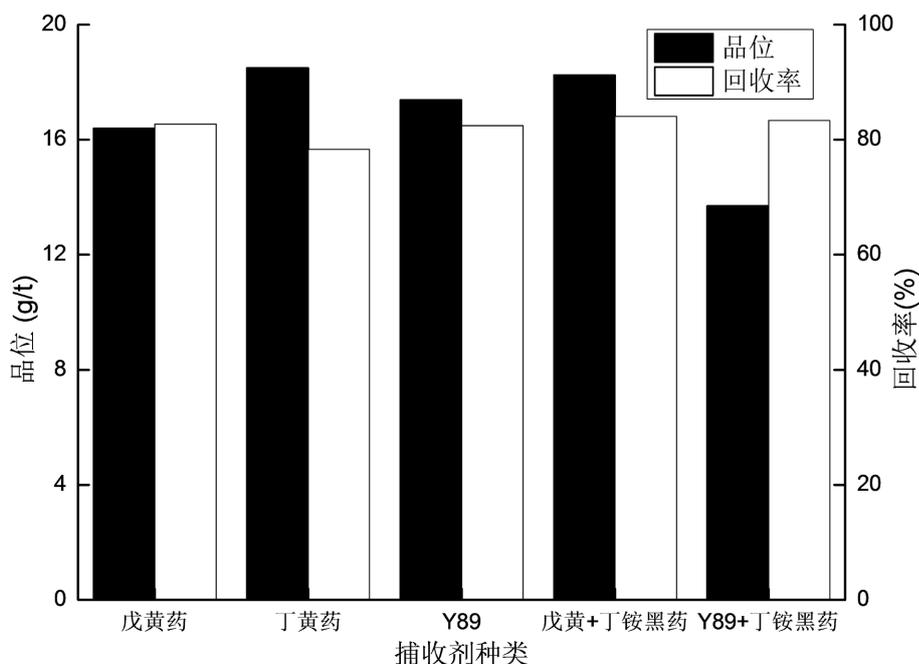


Figure 3. The effect of collector type on gold flotation index  
 图 3. 捕收剂种类对金浮选指标的影响

## 4.2. 捕收剂种类对金浮选指标的影响

在固定磨矿细度为 $-74\ \mu\text{m}$ 占63.61%，活化剂 $\text{CuSO}_4$ 用量为170 g/t，捕收剂用量为51 g/t，起泡剂 $2^\#$ 油用量为33 g/t的条件下，考察了戊基黄药、丁基黄药、Y89、戊基黄药 + 丁铵黑药、Y89 + 丁铵黑药五种不同捕收剂对金浮选指标的影响，试验流程如图1，试验结果见图3。

由图3可知，粗选采用戊基黄药、丁基黄药、Y89、戊基黄药 + 丁铵黑药、Y89 + 丁铵黑药为捕收剂时，粗精矿金品位基本接近，但戊基黄药 + 丁铵黑药组合捕收剂回收率最高。综合考虑粗精矿品位和回收率，初步确定捕收剂为戊基黄药 + 丁铵黑药，此时粗精矿含金18.25 g/t，粗精矿金回收率为84.03%，浮选效果较好。

## 4.3. 捕收剂用量对金浮选指标的影响

捕收剂用量的多少直接影响金的浮选效果，捕收剂超量或欠药均不利用有价矿物的回收，捕收剂超量会影响精矿品位，而欠药则会导致有价矿物的损失。在固定磨矿细度为 $-74\ \mu\text{m}$ 占63.61%，活化剂 $\text{CuSO}_4$ 用量为170 g/t，起泡剂 $2^\#$ 油用量为33 g/t，组合捕收剂为戊基黄药+丁铵黑药的条件下，考察了不同捕收剂用量对金浮选指标的影响，试验流程如图1，试验结果见图4。

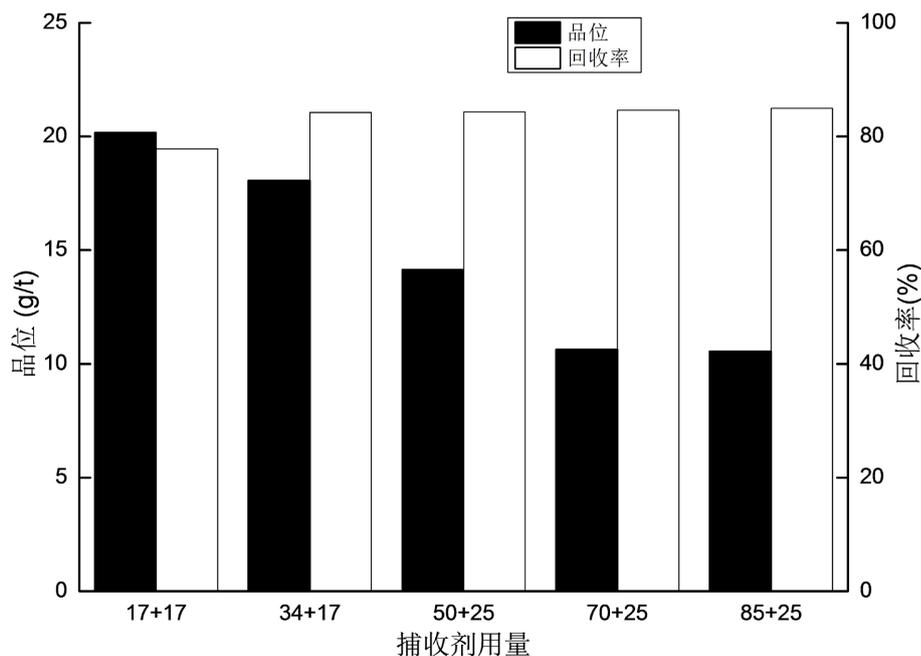


Figure 4. Effect of collector dosage on gold flotation index

图4. 捕收剂用量对金浮选指标的影响

由图4可知，随着组合捕收剂戊基黄药 + 丁铵黑药用量的增大，金回收率也随之缓慢增加，当合捕收剂用量为34 g/t + 17 g/t时，金回收率开始趋于稳定，上升缓慢，而此时金品位开始急剧下降。综合考虑，初步确定捕收剂戊基黄药 + 丁铵黑药用量为34 g/t + 17 g/t，此时粗精矿含金18.06 g/t，粗精矿金回收率为84.24%，浮选效果良好。

## 4.4. 活化剂种类对金浮选指标的影响

由原矿岩矿鉴定分析发现，矿石中金的载体矿物主要是长石、铁菱锰矿、石英等脉石矿物，其次是黄铁矿，考察了不同种类的活化剂对金的载体矿物的活化效果。在固定磨矿细度为 $-74\ \mu\text{m}$ 占63.61%，

活化剂用量为 170 g/t, 捕收剂戊基黄药 + 丁铵黑药用量为(34 + 17) g/t, 起泡剂 2<sup>#</sup>油用量为 33 g/t 的条件下, 考察了不同活化剂种类对金浮选指标的影响, 试验流程如图 1, 试验结果见图 5。

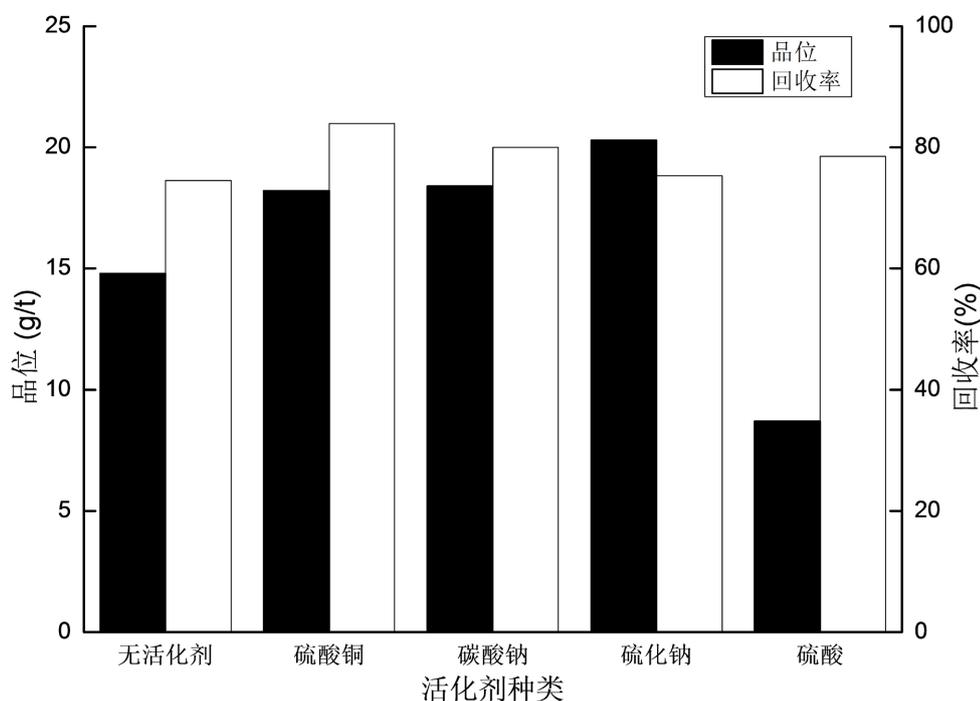


Figure 5. Effect of activator type on gold flotation index  
图 5. 活化剂种类对金浮选指标的影响

由图 5 可知, 采用  $\text{CuSO}_4$  为活化剂时, 能有效提高金的浮选回收率, 同时能获得较好的金品位, 而采用硫化钠为活化剂时, 虽然金品位较高, 但硫化钠具有一定的脱药效果, 导致金的浮选回收率大幅降低, 若要获得较好的金回收率需加大药剂用量, 不利于节约生产成本。综合考虑, 确定活化剂种类为  $\text{CuSO}_4$ , 此时金精矿品位为 18.20 g/t, 金精矿回收率为 83.92%, 浮选效果良好。

#### 4.5. $\text{CuSO}_4$ 用量对金浮选指标的影响

$\text{CuSO}_4$  对金矿物和载金的硫化物有较好的活化效果, 但当  $\text{CuSO}_4$  过量时, 具有一定的消泡作用, 容易消耗大量捕收剂和起泡剂, 增加生产成本。在固定磨矿细度为  $-74 \mu\text{m}$  占 63.61%,  $\text{CuSO}_4$  为活化剂, 捕收剂戊基黄药 + 丁铵黑药用量为(34 + 17) g/t, 起泡剂 2<sup>#</sup>油用量为 33 g/t 的条件下, 考察了  $\text{CuSO}_4$  用量对金浮选指标的影响, 试验流程如图 1, 试验结果见图 6。

由图 6 可知,  $\text{CuSO}_4$  的用量对金浮选指标影响较大, 随着  $\text{CuSO}_4$  用量逐渐增大, 金精矿的回收率也随之增大, 当  $\text{CuSO}_4$  用量达到 170 g/t 时, 金精矿的回收率达到最大值, 当  $\text{CuSO}_4$  用量继续增大时, 金品位逐渐下降。综合考虑, 确定  $\text{CuSO}_4$  用量为 170 g/t, 此时金精矿品位为 18.16 g/t, 金精矿回收率为 84.16%。

#### 4.6. 实验室小型闭路试验

在条件试验的基础上综合考虑金浮选的最佳药剂制度及参数, 进行实验室小型闭路试验。试验流程如图 7, 试验结果见表 4。

由实验室小型闭路试验结果可知, 最终可获得产率 1.81%, 含金 49.70 g/t, 金回收率 85.92% 的金精

矿，与山西某金矿生产现场工艺指标相比，金精矿品位和回收率均得到了明显的提升，同时简单的工艺流程和药剂制度也为现场生产管理带来便利。

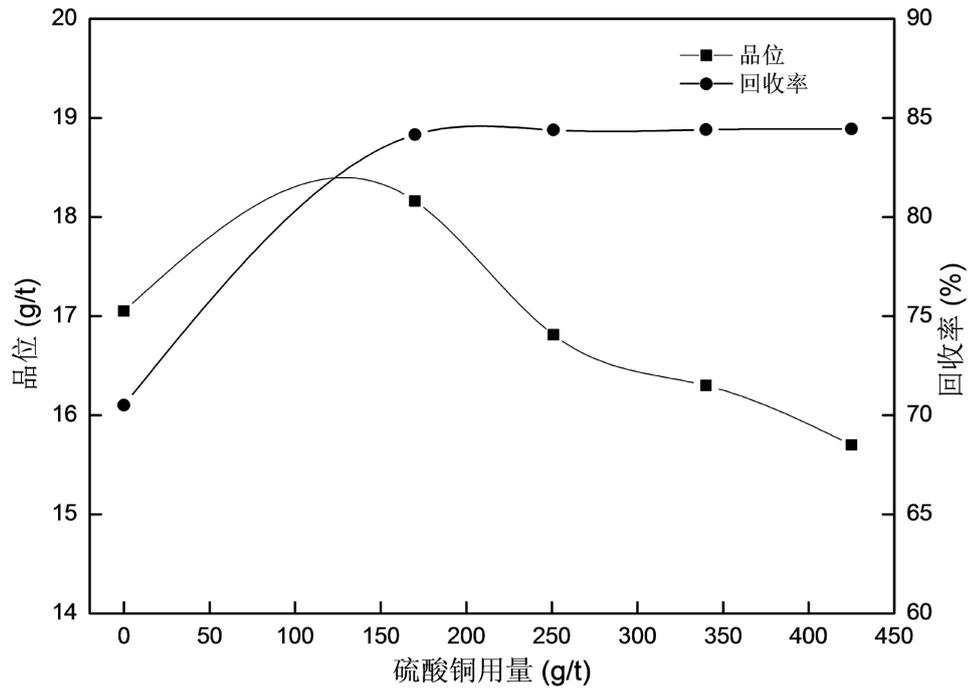


Figure 6. Effect of  $\text{CuSO}_4$  dosage on gold flotation index

图 6.  $\text{CuSO}_4$  用量对金浮选指标的影响

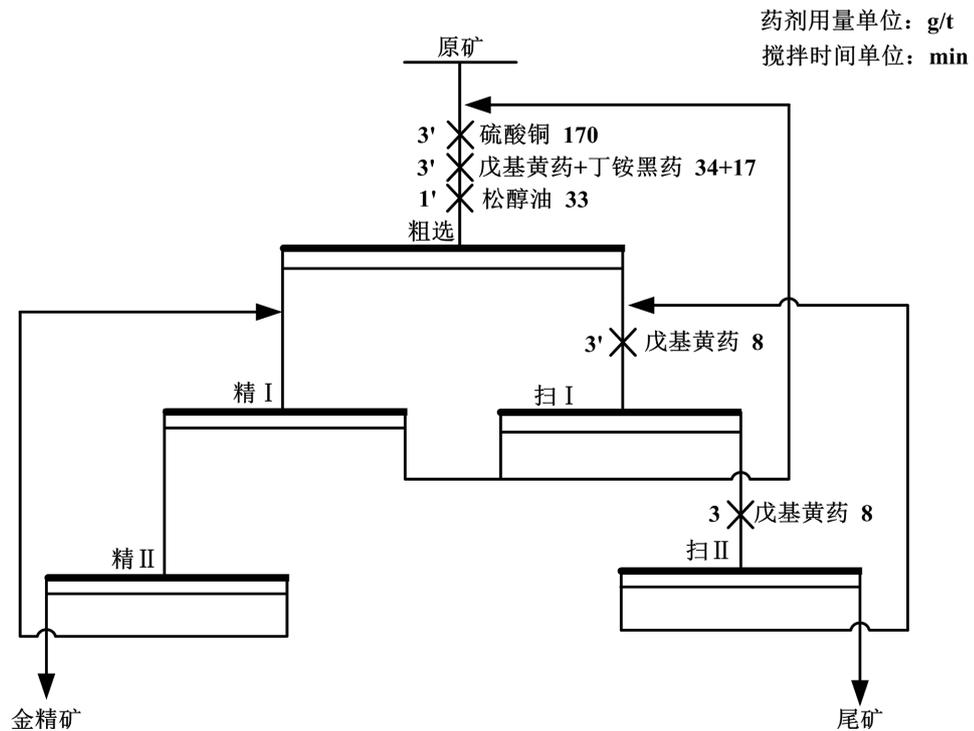


Figure 7. Process flow of closed circuit test

图 7. 闭路试验工艺流程

**Table 4.** Closed circuit test results/%  
**表 4.** 闭路试验结果/%

产品名称	产率	$\beta_{\text{Au}}$	$\epsilon_{\text{Au}}$
金精矿	1.81	49.70	85.92
尾矿	98.19	0.15	14.08
原矿	100.00	1.05	100.00

注：金的品位单位为 g/t。

## 5. 结论

1) 山西某金矿属于典型的蚀变斑岩型低品位金矿床，矿石中可供选矿回收的主要有价元素是金，其含量为 1.10 g/t，金矿物主要以含银自然金，其次为银金矿形式赋存。

2) 该矿石中金属矿物主要是黄铁矿，少量褐铁矿、闪锌矿及微量方铅矿、黄铜矿、黝铜矿等。脉石矿物主要是石英，其次为长石、白(绢)云母，少量铁菱锰矿、方解石等。矿样中的金主要以微细粒单体金、连体金(即解离或暴露的自然金)的形式存在。

3) 通过实验室小型闭路试验，最终可获得产率 1.81%，含金 49.70 g/t，金回收率 85.92%的金精矿，与山西某金矿生产现场工艺指标相比，金精矿品位和回收率均得到了明显的提升，增加了经济效益，为斑岩型低品位金矿的综合开发利用提供了依据。同时简单的工艺流程和药剂制度也为现场生产管理带来便利。

## 参考文献

- [1] 田润青, 刘云华, 田民民, 等. 陕西某微细粒浸染型金矿选矿试验研究[J]. 黄金科学技术, 2016, 24(6): 102-106.
- [2] 陈晓芳. 高硫含砷难选金矿石选矿工艺研究[D]: [硕士学位论文]. 赣州: 江西理工大学, 2012.
- [3] 王灿荣. 贵州某难选卡林型金矿浮选试验[J]. 现代矿业, 2018(5): 78-83.
- [4] 姚兰星, 王毓华, 何建璋, 等. 某高砷含碳低品位难选金矿浮选试验研究[J]. 矿冶工程, 2018, 38(2): 38-42.
- [5] 宋学文, 朱加乾, 陈波. 福建川石金矿浮选试验研究及生产实践[J]. 有色金属(选矿部分), 2017(5): 23-27+63.
- [6] 潘高产, 周菁, 朱一民, 等. 微细粒石英脉型金矿浮选试验研究[J]. 湖南有色金属, 2011, 27(1): 1-4+33.
- [7] 雷大星, 张耀平, 刘星, 等. 广东某低品位金矿选矿优化试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2016, 36(12): 19-23.
- [8] 廖德华, 王毓华. 某低品位贫硫化物石英脉型金矿选矿试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2016(1): 36-39.
- [9] 徐其红, 何小民, 鲁军, 等. 某金矿选矿工艺研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2015(3): 40-43.
- [10] 夏国进. 某卡林型低品位难选金矿浮选试验[J]. 现代矿业, 2019(3): 128-131+135.