doi: 10.20239/j.issn.1671-9492.2026.09.010

# 新疆某微细粒难选金矿石选冶联合工艺试验研究

杨枝露[1],任浏祎[2],胡馨文[1],苟俊豪[1]
(1. 新疆有色金属研究所有限公司,乌鲁木齐 830026;
2. 武汉理工大学 资源与环境工程学院,武汉 430070)

**摘 要**:针对新疆某微细粒难选金矿存在金嵌布粒度细、包裹金占比高、泥质脉石矿物含量高,采用单一选矿工艺金回收效果差的技术难题,本文开展系统的工艺矿物学分析,厘清制约金回收的关键矿物学因素,开展多方案选矿工艺对比试验及关键工艺参数优化研究。工艺矿物学分析结果表明,该矿石中金矿物以微细粒嵌布为主要特征,10 μm以下微细粒金占比为35.03%;19.62%的金赋存于铁氧化物及脉石矿物内部,常规磨矿条件下难以实现有效解离回收;矿石中云母、绿泥石等易泥化脉石矿物总含量高达45.03%,分选过程易产生大量矿泥,恶化浮选矿浆环境,进一步降低金的回收效率。矿石化学物相显示,61.39%金为裸露-半裸露自然金,剩余金多以硫化物、铁氧化物、脉石包裹形式存在。单一浮选、全泥浸出、尼尔森重选工艺均难以取得满意的回收指标。通过多流程对比,优选尼尔森重选—全泥浸出联合工艺,依次对重选离心$G$值、浸金剂类型、药剂用量、浸出时间、矿浆浸出浓度开展单因素条件试验,确定最佳工艺参数:磨矿细度-0.074 mm占90%、重选重力60 G、阿希提金剂用量3 000 g/t、浸出浓度30%、浸出时间24 h。全流程试验结果表明,在原矿金品位1.60 g/t的条件下,该联合工艺金总回收率可达到91.40%,显著优于各类单一工艺。研究证实,重选预回收粗粒金、浸出回收微细粒及包裹金具备良好协同效应,可有效解决该微细粒难选金矿的回收难题,可为国内同类型金矿资源的高效开发利用提供技术参考。

**关键词**:微细粒难选金矿;工艺矿物学;包裹金;尼尔森重选;全泥浸出;选冶联合工艺;金回收率
**中图分类号**:TD953 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-9492(2026)09-0090-08

## Experimental Study on Combined Beneficiation and Metallurgical Process of a Fine-Grained Refractory Gold Ore in Xinjiang

Yang Zhilu[1], Ren Liuyi[2], Hu Xinwen[1], Gou Junhao[1]
(1. Xinjiang Research Institute of Non-ferrous Metals Co., Ltd., Urumqi 830026, China;
2. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract**: A fine-grained refractory gold ore in Xinjiang is characterized by fine disseminated gold, high proportion of encapsulated gold and high content of argillaceous gangue minerals, leading to poor gold recovery when adopting single beneficiation processes. In this paper, systematic process mineralogy analysis was carried out to identify the key mineralogical factors restricting gold recovery. Comparative tests of different beneficiation schemes and optimization of key technical parameters were performed. Process mineralogy results show that gold minerals are mainly fine-grained disseminated, and fine gold particles less than 10 μm account for 35.03%. A total of 19.62% of gold is encapsulated in iron oxides and gangue minerals, which cannot be effectively dissociated under conventional grinding conditions. The total content of sliming-prone gangue minerals such as mica and chlorite reaches 45.03%. Massive slimes generated in separation process will deteriorate flotation pulp environment and further reduce gold recovery. According to gold phase analysis, 61.39% of gold occurs as exposed and semi-exposed native gold, while the rest is encapsulated in sulfides, iron oxides and gangue minerals. Single flotation, whole-ore leaching and Knelson gravity separation cannot obtain satisfactory separation indexes. After process comparison, the Knelson gravity separation-whole-ore leaching combined process was selected. Single-factor tests were conducted

**收稿日期**:2026-07-18
**基金项目**:新疆维吾尔自治区2024年第三批“天山英才”培养计划项目(2024TSYCJC0011)
**作者简介**:杨枝露(1983—),女,河南镇平人,硕士,高级工程师,主要从事矿产资源综合开发利用方向研究。
**通信作者**:任浏祎(1983—),女,河南周口人,博士,教授,博士生导师,主要从事复杂微细粒矿物分选研究。

on gravity $G$ value, leaching reagent type, reagent dosage, leaching time and pulp density. The optimal parameters are determined as follows: grinding fineness of 90% passing −0.074 mm, gravity intensity of 60 G for gravity separation, Ashi gold leaching reagent dosage of 3 000 g/t, pulp density of 30%, and leaching time of 24 h. Full-process test results demonstrate that the total gold recovery reaches 91.40% at run-of-mine gold grade of 1.60 g/t, obviously superior to single processes. The study verifies the good synergistic effect of pre-recovering coarse-grained gold by gravity separation and extracting fine-grained and encapsulated gold by leaching. It can solve the recovery difficulty of this fine-grained refractory gold ore and provide technical reference for efficient exploitation of similar domestic gold ore resources.

**Key words:** fine-grained refractory gold ore; process mineralogy; encapsulated gold; Knelson gravity separation; whole-ore leaching; combined beneficiation-metallurgical process; gold recovery

黄金兼具金融、货币、商品三大属性[1-2]，在现代经济体系中占据重要地位[3]。凭借独特的理化性能，黄金及其合金广泛应用于化工、金融、航空航天等诸多领域，是我国重要的战略性矿产资源[4-5]。随着易处理金矿资源不断消耗，复杂难处理微细粒金矿的开发利用愈发受到行业重视[6-7]。微细粒难选金矿普遍存在金嵌布粒度微细、大量金以包裹体形式赋存于脉石或金属矿物内部等特点[8]。矿石磨矿过程中，金矿物实现单体解离与脉石矿物泥化现象相互制约，进一步增大金的回收难度[9]。对于该类矿石，单一浮选、直接浸出等工艺往往难以实现金的高效回收。

新疆某金矿属于典型的微细粒难选石英脉型金矿。前期探索发现，采用传统单一选矿工艺处理该矿石，金回收指标不理想，制约了该矿床资源的开发利用。该矿金矿物嵌布粒度细，部分金被铁氧化物、硅酸盐脉石矿物包裹，同时矿石含有大量云母、绿泥石等易泥化矿物，矿泥易干扰分选过程。为提升金的综合回收率，本文结合矿石系统的工艺矿物学特征，开展不同选冶流程对比试验，对关键工艺参数进行优化，筛选适配该矿石的联合选冶工艺，以期获得良好选别指标，同时为同类型微细粒难选金矿资源开发提供参考。

## 1　矿石性质

### 1.1　矿石主要化学成分分析

矿石主要化学成分分析结果见表1。由表1可知，矿石中金品位1.60 g/t，为主要有价元素；伴生银、铜、铅、锌等金属元素品位较低，达不到综合回收要求。有害元素砷含量低，但碳含量高达1.06%，会对金精矿产品质量造成不利影响。矿石中$SiO_2$、$Al_2O_3$、$K_2O$总含量达到75.72%，说明脉石矿物以石英、硅酸盐类矿物为主；CaO含量为7.89%，表明矿石中存在一定量碳酸盐矿物。

### 1.2　矿石中金化学物相分析

矿石金的化学物相分析结果见表2。由表2可以看出，矿石中裸露-半裸露自然金占比较高，金分布率为61.39%；硫化物包裹金分布率为18.99%，铁氧化物包裹金分布率为8.22%，脉石矿物包裹金分布率为11.40%。

### 1.3　矿石矿物组成及含量

矿石矿物组成及相对含量分析结果见表3。由表3可知，矿石中金属矿物总含量为2.54%，其中硫

**表1　矿石主要化学成分分析结果**

**Table 1　Results of chemical composition analysis of the ore**　/%

| 成分 | Au[1)] | TFe | $Al_2O_3$ | CaO | $K_2O$ | $Na_2O$ | MgO | Zn |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 含量 | 1.60 | 6.34 | 14.44 | 7.89 | 6.28 | 1.66 | 4.48 | 0.008 |
| 成分 | Ag[1)] | $SiO_2$ | Cu | As | C | S | Sb | Pb |
| 含量 | 1.00 | 55.00 | 0.012 | 0.013 | 1.06 | 0.90 | <0.001 | <0.001 |

注：1)单位为g/t，下同。

**表2　矿石金化学物相分析结果**

**Table 2　Results of gold chemical phase analysis of the ore**　/%

| 金相别 | 裸露和半裸露自然金 | 碳酸盐包裹金 | 硫化物包裹金 | 褐铁矿包裹金 | 石英和硅酸盐包裹金 | 合计 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 含量[1)] | 0.97 | 0.09 | 0.30 | 0.13 | 0.09 | 1.58 |
| 分布率 | 61.39 | 5.70 | 18.99 | 8.22 | 5.70 | 100.0 |

表3 矿石中矿物组成及相对含量

Table 3 Mineral composition and relative content of the ore /%

| 矿物名称 | 相对含量 | 矿物名称 | 相对含量 |
|---|---|---|---|
| 黄铁矿 | 2.10 | 石英 | 40.52 |
| 黄铜矿 | 0.02 | 长石 | 11.08 |
| 闪锌矿 | 0.01 | 云母 | 23.15 |
| 赤褐铁矿 | 0.17 | 绿泥石 | 1.19 |
| 菱铁矿 | 0.24 | 微晶集合体 | 13.89 |
| 榍石 | 0.01 | 帘石 | 0.29 |
| 金红石 | 0.13 | 高岭土 | 0.01 |
| 磷灰石 | 0.26 | 方解石 | 0.59 |
| 锆石 | 0.02 | 白云石 | 6.20 |
| 独居石 | 微量 | 石膏 | 0.12 |

注:微晶集合体主要由石英、云母、碳酸盐微晶组成。

化物2.13%,氧化物0.41%。硫化物以黄铁矿为主,含量为2.10%,还含有微量黄铜矿、闪锌矿,黄铁矿是矿石中硫元素的主要载体;金属氧化物主要为赤褐铁矿、菱铁矿。脉石矿物占97.46%,主要为石英、长石、云母,三者合计约88%,另含少量绿泥石、帘石、高岭土、磷灰石、金红石等矿物。

### 1.4 金矿物特性分析

为查明金矿物嵌布粒度以及金矿物与其他矿物之间的共生依存关系,利用MLA软件对原矿样品进行金矿物嵌布粒度与共生关系分析,结果见表4、5。

由表4可知,矿石金矿物粒度偏细,以细粒-微细粒嵌布为特征,10 μm以下微细粒金占比35.03%。

由表5可知,50.16%的金矿物已实现单体解离;32.12%的金赋存在黄铁矿等硫化物中;3.94%的金分布于赤褐铁矿、菱铁矿;13.79%的金赋存于脉石矿物内。

### 1.5 影响金回收的矿物学因素

制约该矿石金回收的矿物学因素主要包含以下三方面。

1)金赋存状态的影响。裸露-半裸露自然金、硫化物包裹金适合浮选回收;赋存于脉石矿物内部的包裹金常规浮选难以回收。铁氧化物易发生泥化,因此铁氧化物包裹金同样属于难回收组分。赋存在赤褐铁矿、菱铁矿及脉石矿物中的金是造成金损失的主要来源,需要通过细磨使金矿物解离或形成富连生体,以此提升金回收率。

2)金嵌布粒度的影响。矿石中存在占比35.03%的小于10 μm微细粒金;即便进行细磨,该部分金也难以形成单体或者毗连型连生体,分选过程中易随脉石进入尾矿,造成金损失[10]。

3)泥质脉石矿物的影响。矿石含有大量含钙、镁、铝的易泥化、易浮脉石矿物,云母、方解石、白云石、高岭石、绿泥石以及微晶集合体总含量高达45.03%。磨矿过程中这类矿物易产生原生、次生矿泥,恶化浮选矿浆环境,干扰金矿物分选回收[11]。

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 选矿原则流程

根据矿石性质,制约金回收的矿物学因素主要包括金的赋存状态、金嵌布粒度以及泥质脉石矿物。该矿石属于石英脉型金矿,金矿物以裂隙金、粒间金为主,与硫化物关系密切,适合直接氰化浸出或者浮选回收,可辅以重选回收矿石中存在的粗粒金[12]。因此,需要适配合理的回收工艺并优化关键参数,减弱矿石固有属性对选矿指标带来的不利影响。结合金的赋存特征,为使赋存于赤褐铁矿、菱铁矿以及脉石矿物中的金矿物解离或半解离形成富连生体,试验确定磨矿细度为-0.074 mm占90%,分别进行单一浮选、单一全泥浸出、单一重选、重选—浮选联合、重选—全泥浸出联合工艺对比试验。

#### 2.1.1 单一浮选工艺

采用常规浮选工艺回收矿石中的单体金与硫化物包裹金,试验流程见图1,试验结果见表6。由表6可知,一次粗选可获得金品位10.84 g/t、回收率83.89%的金粗精矿;经过一段扫选作业后,尾矿金品位为0.25 g/t,尾矿中金损失率为13.05%

表4 矿石中金矿物的嵌布粒度特征

Table 4 Disseminated size characteristics of gold minerals in the ore

| 粒级/μm | <1 | 1~2 | 2~5 | 5~10 | 10~20 | >20 | 合计 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 分布率/% | 1.99 | 3.93 | 14.51 | 14.60 | 27.56 | 37.41 | 100.0 |

表5 金矿物颗粒与载体矿物依存关系

Table 5 Dependence relationship between gold particles and host minerals /%

| 载体矿物 | 单体 | 硫化物 | 赤褐铁矿、菱铁矿 | 脉石 | 合计 |
|---|---|---|---|---|---|
| 分布率 | 50.16 | 32.12 | 3.94 | 13.79 | 100.0 |

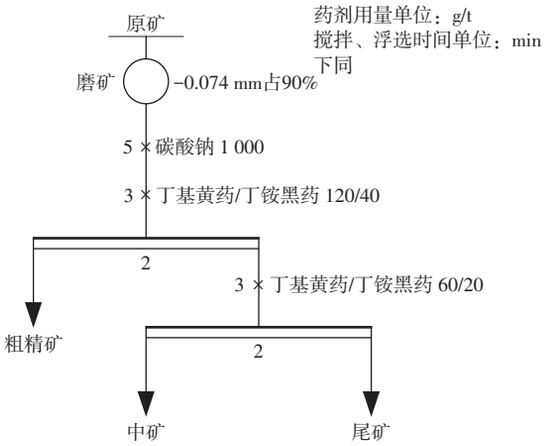



**图 1　单一浮选试验流程**

**Fig. 1　Flowsheet of single flotation tests**

**表 6　单一浮选试验结果**

**Table 6　Results of single flotation tests**　/%

| 产品名称 | 产率 | Au品位[1)] | Au回收率 |
|---|---|---|---|
| 粗精矿 | 12.34 | 10.84 | 83.89 |
| 中矿 | 4.43 | 1.10 | 3.06 |
| 尾矿 | 83.23 | 0.25 | 13.05 |
| 原矿 | 100.0 | 1.59 | 100.0 |

2.1.2　单一全泥浸出工艺

采用全泥浸出工艺回收矿石中的单体金及铁氧化物包裹金，试验条件：浸出浓度30%、浸出时间24 h、药剂单耗3 000 g/t、pH=10～11，试验流程见图2，试验结果见表7。由表7可知，全泥浸出工艺金浸出率为86.76%，浸渣金品位为0.21 g/t，金损失率13.24%。

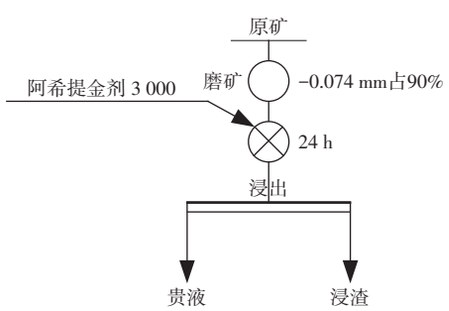



**图 2　单一全泥浸出试验流程**

**Fig. 2　Flowsheet of single whole-ore leaching tests**

2.1.3　单一重选工艺

尼尔森离心重选是贵金属分选的常用手段，凭借对高密度矿物高效富集的优势，能够回收细、微细粒金[13]，因此，开展单一重选工艺探索试验。结合金赋存特征，固定磨矿细度为-0.074 mm占90%进行重选作业。试验流程见图3，试验结果见表8。

**表 7　单一全泥浸出试验结果**

**Table 7　Results of single whole-ore leaching tests**

| 浸金剂种类 | 原矿品位[1)] | 浸渣品位[1)] | 浸液品位/(mg·L$^{-1}$) | 浸出率/% |
|---|---|---|---|---|
| 阿希提金剂 | 1.59 | 0.21 | 0.59 | 86.76 |

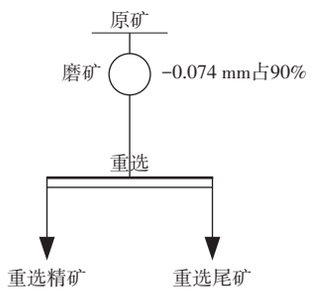



**图 3　单一重选试验流程**

**Fig. 3　Flowsheet of single gravity tests**

**表 8　单一重选试验结果**

**Table 8　Results of single gravity tests**　/%

| 产品名称 | 产率 | Au品位[1)] | Au回收率 |
|---|---|---|---|
| 重选精矿 | 1.71 | 54.78 | 57.31 |
| 重选尾矿 | 98.29 | 0.71 | 42.69 |
| 原矿 | 100.0 | 1.63 | 100.0 |

由表8可知，重选可获得金品位54.78 g/t、回收率57.31%的重选金精矿，但重选尾矿金品位为0.71 g/t，仅依靠单一重选无法实现金的高效回收。因此，以重选尾矿为对象，进行了重选—浮选、重选—全泥浸出联合工艺试验。

2.1.4　重选—浮选联合工艺

采用重选—浮选联合工艺回收粗颗粒金、单体金以及硫化物包裹金，试验流程见图4，试验结果见表9。

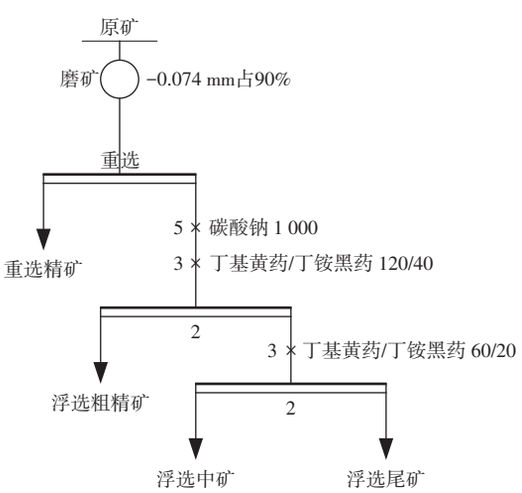



**图 4　重选—浮选联合工艺试验流程**

**Fig. 4　Flowsheet of gravity-flotation combined process tests**

表9 重选—浮选联合工艺试验结果

Table 9 Results of gravity-flotation combined process tests /%

| 产品名称 | 产率 | Au品位[1)] | Au回收率 |
|---|---|---|---|
| 重选精矿 | 1.71 | 54.78 | 58.94 |
| 浮选粗精矿 | 3.22 | 11.50 | 23.30 |
| 浮选中矿 | 5.01 | 1.32 | 4.16 |
| 浮选尾矿 | 90.06 | 0.24 | 13.60 |
| 原矿 | 100.0 | 1.59 | 100.0 |

由表9可知，重选—浮选联合工艺浮选尾矿金品位0.24 g/t，金损失率13.60%。该工艺虽可回收部分重选尾矿中的金，但整体选矿指标和单一浮选工艺相近。

2.1.5 重选—全泥浸出联合工艺

采用重选—全泥浸出联合工艺回收粗颗粒金、单体金以及铁氧化物包裹金，试验流程见图5，试验结果见表10。

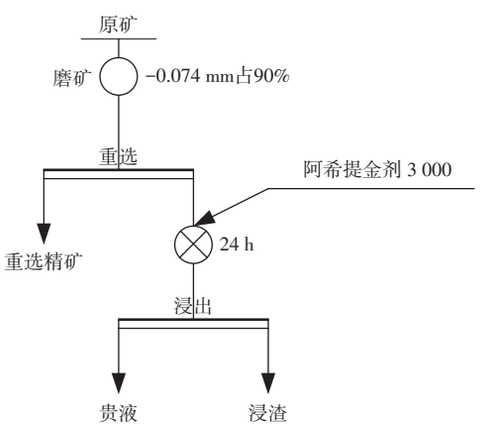



图5 重选—全泥浸出联合工艺试验流程

Fig. 5 Flowsheet of gravity-whole-ore leaching combined process tests

表10 重选—全泥浸出联合工艺试验结果

Table 10 Results of gravity-whole-ore leaching combined process tests /%

| 产品名称 | 产率 | Au品位[1)] | Au回收率 |
|---|---|---|---|
| 重选精矿 | 1.71 | 54.78 | 57.80 |
| 贵液 | — | 0.23[2)] | 32.50 |
| 浸渣 | 98.29 | 0.16 | 9.70 |
| 原矿 | 100.0 | 1.62 | 100.0 |

注：2)单位为mg/L，下同。

由表10可知，重选—全泥浸出联合工艺浸渣金品位为0.16 g/t，浸渣金损失率为9.70%，重选与全泥浸出的协同回收效果优于各单一工艺。因此，确定重选—全泥浸出为本矿石的原则工艺流程。

## 2.2 重选—全泥浸出联合工艺试验

### 2.2.1 重选作业段*G*值试验

固定流态化水量3.5 L/min、磨矿细度-0.074 mm占90%，进行离心重选重力*G*值条件试验，考察重力*G*值对金回收效果的影响，试验流程同图5，试验结果见图6。由图6可知，当重力*G*值由40提升至60时，重选精矿金品位与回收率逐步升高；继续增大*G*值，重选精矿金品位、回收率基本保持稳定。因此，选取重力*G*值为60条件下得到的重选尾矿进行后续全泥浸出条件试验。

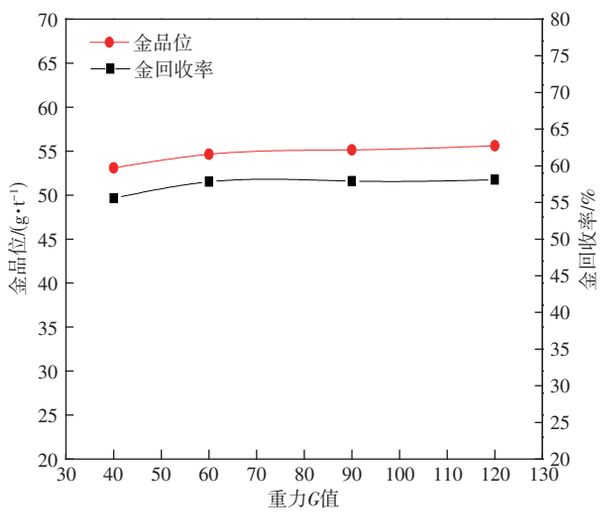



图6 重选*G*值试验结果

Fig. 6 Results of gravity *G* value tests

以重选尾矿为研究对象，开展系统全泥浸出条件试验，分别优化浸金剂用量、浸金剂种类、浸出时间、浸出浓度等关键参数，获得最优选矿指标。

### 2.2.2 全泥浸出作业段阿希提金剂用量试验

固定浸出浓度30%、浸出时间24 h、矿浆pH=10~11，设置2 000、3 000、4 000 g/t 3个药剂用量，进行阿希提金剂用量试验，试验流程同图5，试验结果见图7。由图7可知，当阿希提金剂用量为3 000 g/t时，金浸出率达到最高值；继续增加药剂用量，金浸出率提升幅度不明显。

### 2.2.3 全泥浸出作业段提金剂种类试验

金蝉、金石开、阿希提金剂、金喜为矿山常用浸金药剂。固定浸出浓度30%、浸出时间24 h、矿浆pH=10~11、浸金剂用量3 000 g/t，进行不同提金剂对比试验，试验流程同图5，试验结果见图8。由图8可知，阿希提金剂对重选尾矿中金矿物浸出效果最优。

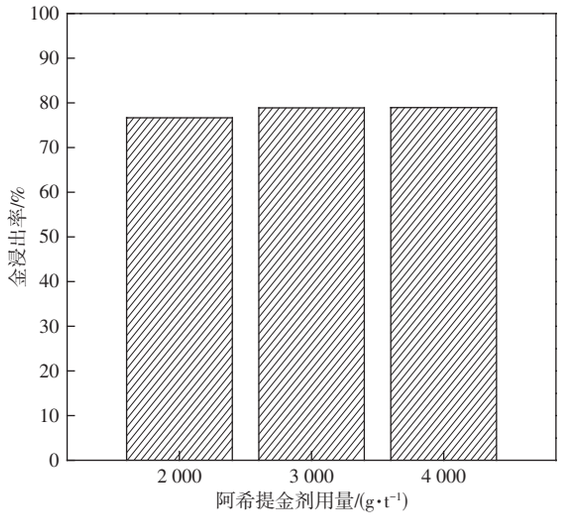



**图7　阿希提金剂用量试验结果**

**Fig. 7　Results of Ashi gold leaching reagent dosage tests**

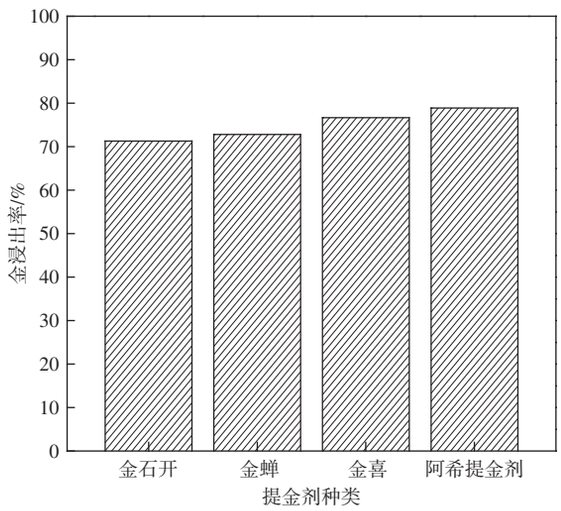



**图8　提金剂种类试验结果**

**Fig. 8　Results of gold leaching reagent type tests**

2.2.4　全泥浸出作业段浸出时间试验

固定浸出浓度30%、矿浆pH=10～11、阿希提金剂用量3 000 g/t，设置12、24 、36 h三个浸出时间进行试验，试验流程同图5，试验结果见图9。由图9可知，重选尾矿中金矿物在24 h即可实现较好浸出效果，进一步延长浸出时间，浸出率增幅很小。

2.2.5　全泥浸出作业段浸出浓度试验

固定浸出时间24 h、矿浆pH=10～11、阿希提金剂用量3 000 g/t，设置25%、30%、35%三个浸出浓度进行试验，试验流程同图5，试验结果见图10。由

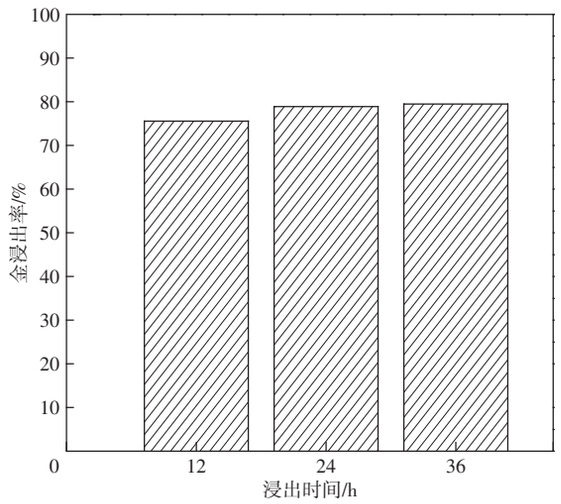



**图9　浸出时间试验结果**

**Fig. 9　Results of leaching time tests**

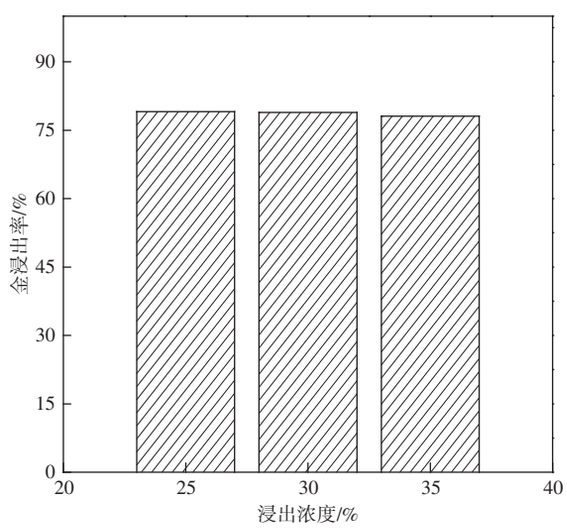



**图10　浸出浓度试验结果**

**Fig. 10　Results of leaching concentration tests**

图10可知，较低矿浆浓度有利于重选尾矿中金的浸出。综合考虑选矿生产成本与浸出效果，选择30%浸出浓度进行全流程试验。

### 2.3　重选—全泥浸出联合工艺全流程试验

在重选、全泥浸出单因素条件试验基础上，采用已确定的最优工艺参数进行重选—全泥浸出联合全流程验证试验，试验流程见图11，试验结果见表11。由表11可知，该联合工艺可得到金品位54.78 g/t、回收率58.50%的重选精矿；贵液品位为0.23 mg/L，浸出段金回收率为32.90%；金总回收率达到91.40%。

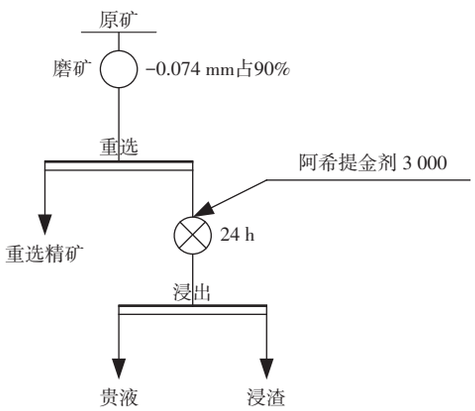



**图11 重选—全泥浸出联合工艺试验流程**

**Fig. 11 Flowsheet of gravity-whole-ore leaching combined process tests**

**表11 重选—全泥浸出联合工艺试验结果**

**Table 11 Results of gravity-whole ore leaching combined process tests** /%

| 产品名称 | 产率 | Au品位[1)] | Au回收率 |
|---|---|---|---|
| 重选精矿 | 1.71 | 54.78 | 58.50 |
| 贵液 | — | 0.23[2)] | 32.90 |
| 浸渣 | 98.29 | 0.14 | 8.60 |
| 原矿 | 100.0 | 1.60 | 100.0 |

## 3 结论

1)工艺矿物学研究结果表明,制约该矿石金回收的矿物学因素主要包括金的赋存状态、金嵌布粒度以及泥质脉石矿物。共有19.62%的金赋存于铁氧化物及脉石矿物中;矿石中10 μm以下的微细粒金占比35.03%;云母、绿泥石等易泥化脉石矿物总含量为45.03%,上述条件共同造成金回收难度增大。

2)开展多种选矿流程对比试验,结果表明,重选—全泥浸出联合工艺协同回收效果优于单一工艺及重选—浮选联合工艺。通过单因素条件试验优化关键参数,确定最优工艺条件:磨矿细度-0.074 mm占90%,重选离心重力60 G,阿希提金剂用量3 000 g/t,浸出浓度30%,浸出时间24 h。在该工艺条件下,可获得金品位54.78 g/t、回收率58.50%的重选金精矿,贵液金品位0.23 mg/L、浸出段金回收率32.90%,有效减弱矿石固有矿物学属性对选矿指标的不利影响。

3)采用尼尔森重选—全泥浸出联合工艺处理该矿石,当原矿金品位为1.60 g/t时,金总回收率达到91.40%,有效解决该微细粒难选金矿的回收难题,可为同类型金矿资源的高效开发利用提供技术依据。

参考文献

[1] 李文昌,李建威,谢桂青,等. 中国关键矿产现状、研究内容与资源战略分析[J]. 地学前缘,2022,29(1):1-13.
Li Wenchang, Li Jianwei, Xie Guiqing, et al. Critical minerals in China: current status, research focus and resource strategic analysis[J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(1): 1-13.

[2] 陈喜峰. 全球金矿资源分布特征、勘查开发格局及展望[J]. 中国矿业,2024,33(10):64-73.
Chen Xifeng. Distribution characteristics and exploration & development pattern of gold resources in global and its prospect[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(10): 64-73.

[3] 崔日成,杨洪英,陈森,等. 难处理金矿中伴生矿物对氰化浸出的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版),2011,32(9):1291-1294.
Cui Richeng, Yang Hongying, Chen Sen, et al. Effects of associated minerals on cyanide leaching of refractory gold ore[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2011, 32(9): 1291-1294.

[4] 卢意恺,陈伟华,柳林. 河南某微细粒复杂难选金矿回收金试验研究[J]. 有色金属(选矿部分),2024(9):49-56.
Lu Yikai, Chen Weihua, Liu Lin. Experimental study on gold recovery from a fine complex refractory gold ore in Henan[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2024(9): 49-56.

[5] 杨洪英,佟琳琳,牛会群. 难处理金矿预处理技术研究进展[J]. 中国有色金属学报,2022,32(7):2011-2028.
Yang Hongying, Tong Linlin, Niu Huiqun. Research progress on pretreatment technologies for refractory gold ores[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(7): 2011-2028.

[6] 周光浪,段胜红. 某高砷高硫复杂难处理金矿选冶工艺研究[J]. 有色金属(选矿部分),2024(3):83-90.
Zhou Guanglang, Duan Shenghong. Study on beneficiation and metallurgy process of a high arsenic and high sulfur complex refractory gold ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2024(3): 83-90.

[7] 吴凯,马英强,窦源东,等. 甘肃某金矿浮选药剂优化试验研究[J]. 有色金属(选矿部分),2024(2):98-103.
Wu Kai, Ma Yingqiang, Dou Yuandong, et al. Experimental study on flotation reagent optimization of a gold ore in Gansu[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2024(2): 98-103.

[8] 陆红羽,赵志强,罗思岗,等. 某微细粒复杂难选金矿选矿试验研究[J]. 有色金属(选矿部分),2024(12):72-83,147.

Lu Hongyu, Zhao Zhiqiang, Luo Sigang, et al. Experimental study on beneficiation of a micro-fine complex refractory gold ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2024(12): 72-83, 147.

[9] 温利刚，付强，贾木欣，等. 基于工艺矿物学自动分析系统的微细粒金矿物量化表征[J]. 有色金属工程，2022，12(11)：76-84.
Wen Ligang, Fu Qiang, Jia Muxin, et al. Quantitative investigation of fine-grained gold minerals by automated process mineralogy analyzing system[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(11): 76-84.

[10] 牛芳银，郭彩莲，宁新霞，等. 某难选金矿石选矿试验研究[J]. 矿冶工程，2024，44(5)：79-83.
Niu Fangyin, Guo Cailian, Ning Xinxia, et al. Beneficiation experiment of refractory gold ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024, 44(5): 79-83.

[11] 铁颖，熊召华，胡梦忠，等. 青海某微细粒浸染型难处理金矿石工艺矿物学研究[J]. 黄金，2022，43(4)：79-83.
Tie Ying, Xiong Zhaohua, Hu Mengzhong, et al. Process mineralogy of a microfine disseminated refractory gold ore from Qinghai[J]. Gold, 2022, 43(4): 79-83.

[12] 冯凯，肖仪武，李磊，等. 不同类型金矿成矿特征及其对选矿的影响[J]. 有色金属(选矿部分)，2025(6)：1-9.
Feng Kai, Xiao Yiwu, Li Lei, et al. Genetic characteristics of different types of gold ores and their influences on mineral beneficiation[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2025(6): 1-9.

[13] 陈桥，姬龙雪，董欣，等. 尼尔森选矿机富集机制对金矿分选效果的影响研究[J]. 黄金科学技术，2024，32(4)：685-693.
Chen Qiao, Ji Longxue, Dong Xin, et al. Study on the influence of concentration mechanism of knelson concentrator on the separation effect of gold ore[J]. Gold Science and Technology, 2024, 32(4): 685-693.

（本文编辑　刘水红）