

## 甘肃某含砷锑难处理金矿选矿试验研究

赵福财<sup>1</sup>, 栾东武<sup>1</sup>, 丁雨波<sup>2</sup>, 李玉玺<sup>1</sup>, 桑胜华<sup>2</sup>, 马鹏程<sup>1\*</sup>

(1. 山东国环固废创新科技中心有限公司; 2. 甘肃招金贵金属冶炼有限公司)

**摘要:**针对甘肃某含砷锑难处理金矿现场浮选过程中选别指标低的问题,开展了矿石工艺矿物学研究。在此基础上,进行了重选、浮选、中矿再磨再选、尾矿氰化浸出等试验研究,最终形成了尼尔森重选—中矿再磨再选—尾矿氰化浸出的联合工艺流程。采用该流程,精矿金品位可达50.05 g/t,金综合回收率可达93.89%。较单一浮选工艺流程,该联合工艺流程的金回收率提高30个百分点以上,为现场工艺流程改造提供了可行的技术方案。

**关键词:**含砷;含锑;难处理金矿;氰化浸出;尼尔森重选

中图分类号:TD953

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2024)06-0045-05

doi:10.11792/hj20240610

## 引言

随着金矿资源不断开发,易选金矿逐渐枯竭,复杂难处理金矿成为选矿研究的重点<sup>[1-3]</sup>。其中,高硫、高砷、粒度过细、嵌布关系复杂等因素成为制约黄金资源有效回收的技术难题<sup>[4-5]</sup>。针对此类矿石,若采用常规浮选工艺回收其中金矿物,选别指标较低且砷含量高;若采用氰化浸出工艺提金,由于粒度过细、毒砂包裹金含量较高等,金浸出率较低<sup>[6-10]</sup>。甘肃某含砷锑难处理金矿属于卡林型金矿,含砷0.87%、含锑0.45%,金矿物大多呈微细粒包裹金形式存在,选别难度较大,现场采用浮选工艺进行回收,回收率仅60%左右,采取多种措施均难以提高选别指标。为解决这一技术难题,充分利用该矿石资源,进行了选矿试验研究,为选矿厂生产工艺流程改造提供可行的技术方案。

## 1 矿石性质

## 1.1 化学分析

矿石化学成分分析结果见表1。由表1可知:矿石中具有回收价值的金属元素主要为金,金品位为5.92 g/t;伴生有价金属元素为银、锑,银品位为4.24 g/t、锑品位为0.45%;有害元素为砷,占0.87%;碳主要以碳酸盐形式存在。

## 1.2 物相分析

矿石中金物相分析结果见表2。由表2可知:矿石中67.57%的金矿物以裸露及半裸露金形式存在,23.98%的金矿物呈微细粒包裹体或次显微金形式

表1 矿石化学成分分析结果

Table 1 Analysis results of chemical composition of ores

成分	Au <sup>1)</sup>	Ag <sup>2)</sup>	S	As	Sb	Cu	Pb	Zn	P
w/%	5.92	4.24	1.20	0.87	0.45	0.01	0.011	0.017	0.048
成分	Fe	Mn	C	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
w/%	3.11	0.05	1.84	56.82	11.19	5.48	2.45	2.53	0.30

注:1)w(Au)/(g·t<sup>-1</sup>); 2)w(Ag)/(g·t<sup>-1</sup>)。

表2 金物相分析结果

Table 2 Analysis results of gold phase

相别	w(Au)/(g·t <sup>-1</sup> )	分布率/%
裸露及半裸露金	4.00	67.57
硫化矿物包裹金	1.42	23.98
其他矿物包裹金	0.50	8.45
总金	5.92	100.00

赋存于硫化矿物中,8.45%的金矿物呈微细粒包裹体形式赋存于褐铁矿、石英及其他脉石矿物中。

## 2 主要矿物嵌布特征

## 2.1 黄铁矿

黄铁矿是矿石中主要金属矿物之一,也是金的主要载体矿物之一。矿石中黄铁矿主要呈半自形或其他形晶粒状结构嵌布于脉石矿物中,以中细粒为主,通常集中分布在0.020~0.147 mm,少部分黄铁矿呈粗粒自形晶粒状结构产出,偶见呈微细粒集合体形式嵌布于脉石矿物中。与毒砂、白铁矿密切共生,常以连晶集合体形式产出,部分黄铁矿边缘被褐铁矿交代产出。黄铁矿嵌布特征见图1。

收稿日期:2024-02-03; 修回日期:2024-04-08

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1902003)

作者简介:赵福财(1986—),男,工程师,从事矿物加工资源综合利用工作;E-mail:57089133@qq.com

\*通信作者:马鹏程(1983—),男,高级工程师,从事冶金资源综合利用工作;E-mail:124692329@qq.com

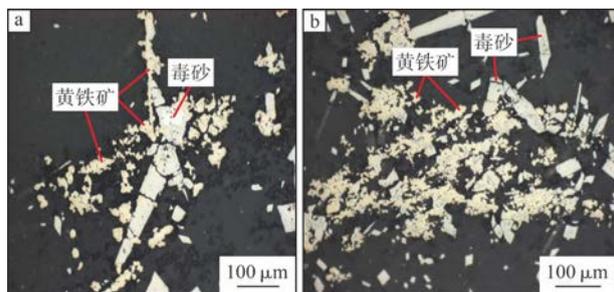


图1 黄铁矿嵌布特征

Fig. 1 Characteristics of pyrite dissemination

## 2.2 毒砂

毒砂是矿石中主要金属矿物之一,也是金的主要载体矿物之一。矿石中毒砂主要呈自形或半自形晶粒状结构嵌布于脉石矿物中,以细粒为主,通常集中分布在0.010~0.074 mm。大部分毒砂呈粗粒自形晶粒状结构产出,部分呈微细粒浸染于脉石矿物中,少量与黄铁矿共生关系较为密切,常以集合体形式产出,与辉锑矿共生关系不甚密切,微量呈细粒包裹于辉锑矿中,偶见毒砂被褐铁矿交代产出。毒砂嵌布特征见图2。

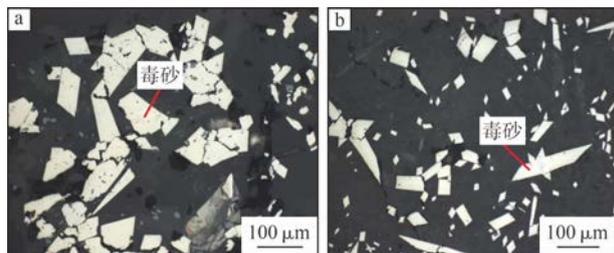


图2 毒砂嵌布特征

Fig. 2 Characteristics of arsenopyrite dissemination

## 2.3 辉锑矿

辉锑矿是矿石中锑矿物的主要存在形式,也是载金矿物之一。辉锑矿主要呈他形晶粒状结构、不规则状嵌布于脉石矿物中,以中粗粒为主,粒度通常分布在0.043~0.833 mm。部分辉锑矿嵌布粒度很粗,颗粒边缘不规整,与脉石矿物呈犬牙交错形式产出,有时可见粗粒辉锑矿中存在石英等脉石矿物包裹体,这些包裹体在一定程度上细化了辉锑矿的工艺粒度,少量辉锑矿呈微细粒浸染于脉石矿物中,磨矿时不易单体解离。由于大部分辉锑矿与黄铁矿、毒砂等硫化矿物共生关系不密切,故锑与砷、硫之间易于分离,少部分辉锑矿中可见毒砂包裹体,有时可见辉锑矿呈细脉状沿闪锌矿裂隙或边缘产出。辉锑矿嵌布特征见图3。

通过上述矿石性质分析可知,若采用细磨后直接氰化浸出的方法回收金,金浸出率会不理想;若采用浮选一氰化浸出方法回收金,首先浮选过程中会损失其他矿物包裹金及部分裸露及半裸露金,其次氰化浸出前要进行预处理,否则即使细磨,呈微细粒包裹体

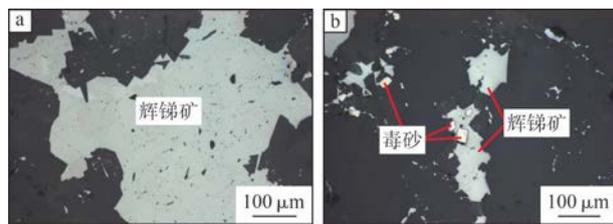


图3 辉锑矿嵌布特征

Fig. 3 Characteristics of stibnite dissemination

或次显微金形式赋存于硫化矿物中的金仍很难浸出。综上所述,对该矿石采用单一选矿方法难以取得理想的选矿指标。

## 3 选矿试验研究

### 3.1 尼尔森重选试验

为了评估重选回收部分粗粒金的可行性,进行了不同磨矿细度下尼尔森重选试验。试验流程见图4,试验结果见表3。由表3可知:采用尼尔森重选试验所得粗精矿金品位均在1 000 g/t以上,回收率也可达20%以上,充分说明采用尼尔森重选试验可以回收部分粗粒金。

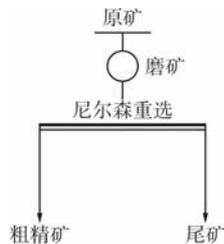


图4 尼尔森重选试验流程

Fig. 4 Flow chart of Nelson gravity separation test

表3 尼尔森重选试验结果

Table 3 Test results of Nelson gravity separation

$w$ (磨矿细度 -0.074 mm)/%	产物	产率/%	金品位/ ( $g \cdot t^{-1}$ )	回收率/%
65	粗精矿	0.12	1 084.00	21.45
	尾矿	99.88	4.77	78.55
	原矿	100.00	6.07	100.00
75	粗精矿	0.13	1 067.00	22.77
	尾矿	99.87	4.71	77.23
	原矿	100.00	6.09	100.00
85	粗精矿	0.13	1 102.00	23.65
	尾矿	99.87	4.63	76.35
	原矿	100.00	6.06	100.00
95	粗精矿	0.11	1 098.00	19.96
	尾矿	99.89	4.85	80.04
	原矿	100.00	6.05	100.00

### 3.2 磨矿细度试验

按照现场生产流程的药剂制度及浮选时间开展磨矿细度试验。试验流程见图5,试验结果见表4。

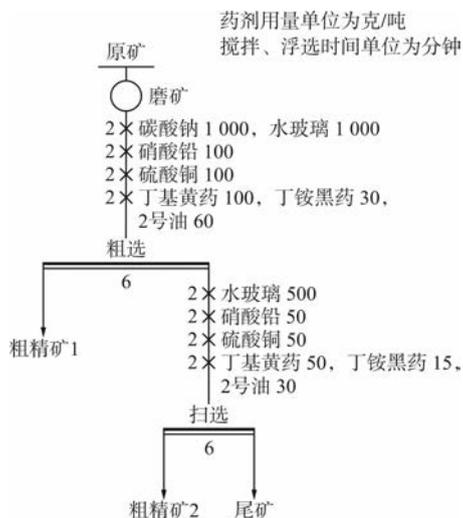


图5 磨矿细度试验流程

Fig.5 Flow chart of grinding fineness test

表4 磨矿细度试验结果

Table 4 Test results of grinding fineness

w(磨矿细度 -0.074 mm)/%	产物	产率/%	金品位/ (g·t <sup>-1</sup> )	回收率/ %
65	粗精矿1	7.91	45.24	60.28
	粗精矿2	5.97	13.25	13.32
	尾矿	86.12	1.82	26.40
	原矿	100.00	5.94	100.00
75	粗精矿1	8.25	44.97	62.75
	粗精矿2	5.56	14.65	13.78
	尾矿	86.19	1.61	23.47
85	粗精矿1	8.54	45.75	65.86
	粗精矿2	5.72	13.68	13.19
	尾矿	85.74	1.45	20.95
95	粗精矿1	7.84	47.74	62.67
	粗精矿2	5.28	11.94	10.56
	尾矿	86.88	1.84	26.77
	原矿	100.00	5.97	100.00

由表4可知:在试验磨矿细度范围内,随着磨矿细度增加,粗精矿1的回收率及产率呈现先上升后下降趋势,而尾矿金品位及回收率呈先下降后上升趋势。磨矿细度增加,使得目的矿物单体解离度增加,故尾矿金品位降低,粗精矿1产率和回收率均有所提升,但磨矿细度过细,泥化现象严重,选矿指标有所下降。综上所述,适宜的磨矿细度为-0.074 mm占85%。

### 3.3 中矿再磨细度试验

鉴于矿石中黄铁矿、毒砂、辉锑矿等载金矿物呈

微细粒包裹体形式存在,金嵌布粒度较细等矿石工艺矿物学特征,为进一步提高选矿工艺指标,开展中矿再磨细度试验研究。试验流程见图6,试验结果见表5。

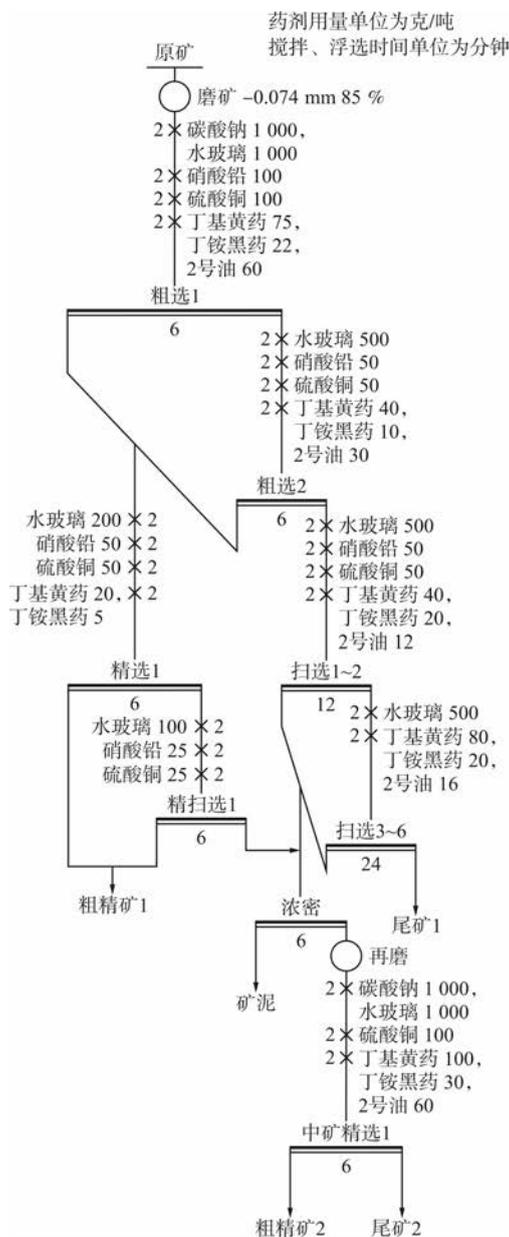


图6 中矿再磨细度试验流程

Fig.6 Flow chart of middlings regrinding fineness test

由表5可知:随着再磨细度的提高,粗精矿1、粗精矿2产率均增加,而尾矿1金品位呈先下降后上升趋势。综合考虑,适宜中矿再磨细度为-0.038 mm占90%。值得注意的是,中矿再磨之前浓密过程中,因矿浆沉降速度较慢,经过30 min沉降后,溢流液中仍含有占给矿量3%左右的矿泥,这部分矿泥金品位4.00 g/t左右,继续延长浓密时间效果不明显,故单独处理。

### 3.4 浮选闭路试验

在磨矿细度-0.074 mm占85%、中矿再磨细度-0.038 mm占90%条件下,开展尼尔森重选-浮选

表5 中矿再磨细度试验结果

Table 5 Test results of middlings regrinding fineness

w(再磨细度 -0.038 mm)/%	产物	产率/%	金品位/(g·t <sup>-1</sup> )	回收率/%
78(未再磨)	粗精矿1	13.69	34.56	77.81
	粗精矿2	1.30	30.28	6.47
	矿泥	2.86	4.10	1.93
	尾矿1	4.25	3.97	2.77
	尾矿2	77.90	0.86	11.02
	原矿	100.00	6.08	100.00
85	粗精矿1	13.71	34.95	77.57
	粗精矿2	1.30	32.82	7.05
	矿泥	2.93	4.02	1.95
	尾矿1	4.02	3.49	2.32
	尾矿2	78.04	0.86	11.11
	原矿	100.00	6.06	100.00
90	粗精矿1	13.72	34.68	77.70
	粗精矿2	1.52	32.27	8.01
	矿泥	2.85	4.00	1.86
	尾矿1	4.27	2.36	1.65
	尾矿2	77.64	0.85	10.78
	原矿	100.00	6.12	100.00
95	粗精矿1	13.84	34.09	77.18
	粗精矿2	1.52	31.36	7.80
	矿泥	2.90	4.15	1.97
	尾矿1	4.12	3.54	2.39
	尾矿2	77.62	0.84	10.66
	原矿	100.00	6.11	100.00

药剂用量单位为克/吨  
搅拌、浮选时间单位为分钟

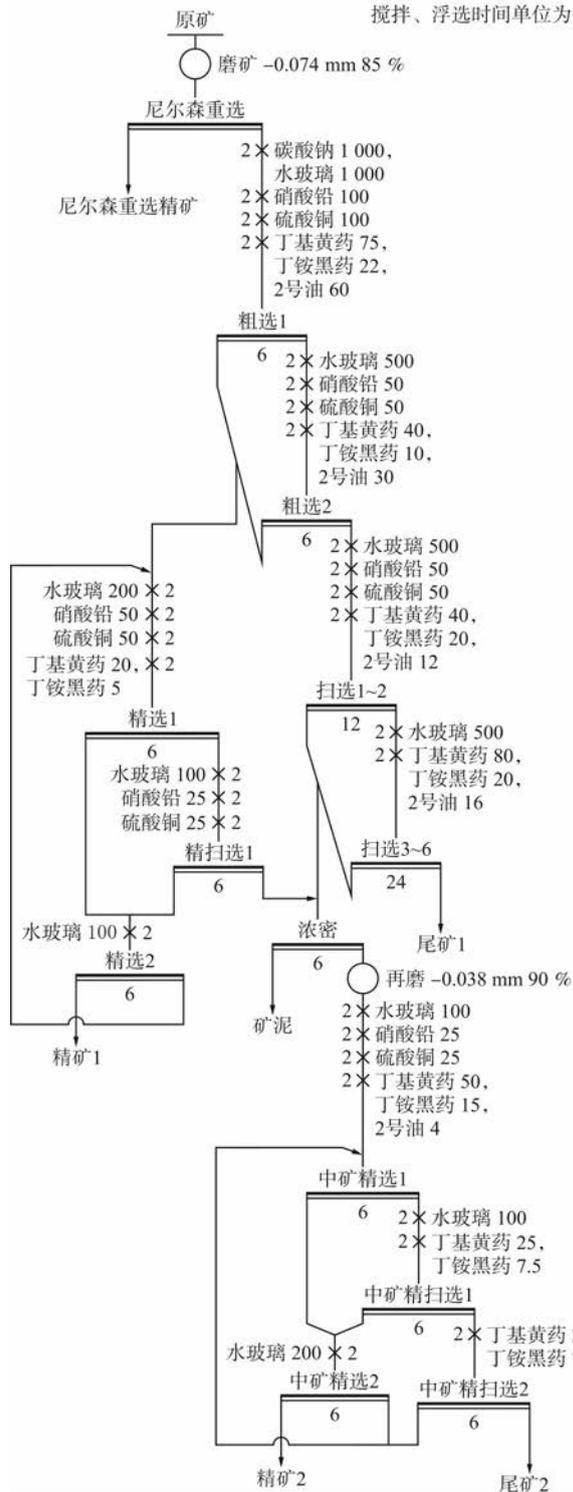


图7 尼尔森重选—浮选中矿再磨再选试验流程  
Fig. 7 Flow chart of Nelson gravity separation - flotation middlings regrinding and re-separation test

中矿再磨再选联合流程闭路试验研究,药剂制度及浮选时间按照现场生产工艺中实际参数。试验流程中,将尼尔森重选精矿、精矿1、精矿2、矿泥作为精矿,将尾矿1、尾矿2作为尾矿,试验流程见图7,试验结果见表6。

由表6可知:尼尔森重选—浮选中矿再磨再选试验可以获得精矿金品位50.05 g/t、回收率86.03%的选矿指标。该工艺与现场实际生产中两粗两扫两精的单一浮选工艺相比,虽然流程结构相对复杂,但回收率提高20多百分点,解决了实际生产中精矿金品位低、回收率低的技术难题。故最终推荐使用尼尔森重选—浮选中矿再磨再选联合流程。但是,尾矿金品位0.96 g/t,相对较高,此部分金可浮性较差,主要为包裹金、脉石矿物连生金等,通过浮选工艺较难回收,继续优化浮选工艺也不能明显提升这部分矿石选矿指标,故开展尾矿氰化浸出试验,以求进一步降低尾矿金品位,提高回收率。

### 3.5 尾矿氰化浸出试验

#### 3.5.1 浸出细度试验

通过单因素条件试验,确定最佳工艺参数为矿浆浓度33%,矿浆pH值11,氰化钠用量1 kg/t,浸出时间24 h,故在此条件下考察浸出细度对选矿指标的影响。试验结果见表7。由表7可知:继续增加尾矿

表6 尼尔森重选—浮选中矿再磨再选试验结果

Table 6 Test results of Nelson gravity separation - flotation middlings regrinding and re-separation

产物	产率/%	金品位/(g·t <sup>-1</sup> )	回收率/%
尼尔森重选精矿	0.13	1 102.00	23.38
精矿 1	4.90	60.38	48.29
精矿 2	2.45	30.91	12.37
矿泥	3.05	4.00	1.99
精矿	10.53	50.05	86.03
尾矿 1	78.47	0.82	10.50
尾矿 2	11.00	1.93	3.47
尾矿	89.47	0.96	13.97
原矿	100.00	6.13	100.00

浸出细度,金浸出率不再明显提高。因此,浮选尾矿可以直接开展氰化浸出试验,不必再进行磨矿。

表7 浸出细度试验结果

Table 7 Test results of leaching fineness

w(浸出细度-0.038 mm)/%	浸渣金品位/(g·t <sup>-1</sup> )	金浸出率/%
67(未磨)	0.43	55.21
75	0.42	56.25
85	0.44	54.17
95	0.42	56.25

### 3.5.2 验证试验

分别对现场实际生产所得尾矿和尼尔森重选—中矿再磨再选闭路试验尾矿进行氰化浸出验证试验。浸出条件:矿浆浓度 33%,矿浆 pH 值为 11,氰化钠用量 1 kg/t,浸出时间 24 h。试验结果见表 8。

表8 验证试验结果

Table 8 Test results of verification

试验样品	尾矿金品位/(g·t <sup>-1</sup> )	浸渣金品位/(g·t <sup>-1</sup> )	金浸出率/%	相对原矿回收率/%
现场实际生产尾矿	1.31	0.69	47.33	6.52
闭路试验尾矿	0.96	0.42	56.25	7.86

由表 8 可知:氰化浸出能够有效降低尾矿金品位,但是现场实际生产尾矿金浸出率明显低于闭路试验尾矿金浸出率。这说明前段工艺磨矿细度影响后续氰化浸出指标。此外,氰化浸出工艺能够对尾矿中易泥化金、脉石矿物连生金进一步回收。若要提高矿石综合回收率,要在浮选阶段实现能收早收。

### 3.6 推荐工艺流程

通过尼尔森重选、中矿再磨再选、尾矿氰化浸出等试验研究,推荐尼尔森重选—中矿再磨再选—尾矿氰化浸出的联合工艺流程,金综合回收率可达 93.89%。尼尔森重选可回收矿石中粗粒金,解决现场实际生产尾矿含颗粒金的技术难题;中矿再磨可提高载金矿物解离度,提高精矿金品位和回收率,明显提高选矿指标;联合工艺可以获得金品位 50.05 g/t、回收率 86.03% 的工艺指标;尾矿氰化浸出工艺可对尾矿中易泥化金、脉石矿物连生金、解离度相对较低的金进行再次回收,可获得 7.86% 的回收率。

## 4 结论

1) 矿石金品位 5.92 g/t,含砷 0.87%,含锑 0.45%,金嵌布状态复杂,粒度较细,需细磨才能提高其解离度,单一选矿工艺难以获得理想选矿指标。

2) 尼尔森重选可回收矿石中粗粒金,解决现场实际生产尾矿含颗粒金的技术难题;中矿再磨可提高载金矿物解离度,提高精矿金品位和回收率,明显提高选矿指标。

3) 通过试验确定了该矿石采用尼尔森重选—中矿再磨再选—尾矿氰化浸出的联合工艺流程,综合回收率可达 93.89%,较现场单一浮选回收率提高 30 多百分点,获得了较好工艺指标,为现场工艺流程改造提供了可行的技术方案。

### [参考文献]

- [1] 罗增鑫.某微细粒浸染难选金矿石新工艺试验研究[J].有色金属科学与工程,2011,2(6):86-88.
- [2] 沈永宇.某复杂高砷多金属难选硫化矿石选矿试验研究[J].黄金,2020,41(7):62-67.
- [3] 陈薇,童雄.某难选金矿石的选矿试验研究[J].矿产综合利用,2008(3):16-17,34.
- [4] 刘淑杰,代淑娟,张作金,等.国内氰化法浸出金矿中金的研究进展[J].贵金属,2019,40(2):88-94.
- [5] 唐立靖,唐云,王燕南,等.微细浸染型金矿碱预处理—非氰化浸出研究[J].黄金科学技术,2015,23(5):94-98.
- [6] 石磊,李玺,王艳,等.甘肃某难选金矿石选矿工艺研究[J].黄金,2023,44(2):34-37.
- [7] 杨俊龙,郭艳华,郭海宁,等.碳酸盐型难选金矿石选矿工艺流程试验研究[J].有色金属(选矿部分),2020(1):42-47.
- [8] 王广伟,谢卓宏,蒲江东.某极难选金矿石工艺矿物学研究[J].矿产综合利用,2019(6):69-73.
- [9] 李明阳,陈泽,胡义明,等.辽宁某含碳难选金矿石浮选试验研究[J].现代矿业,2019,35(11):149-153.
- [10] 温建.贵州某低品位含碳难选冶金矿选矿工艺[J].矿产综合利用,2018(3):38-42.