

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2022.02.005

河北承德某金矿选矿试验研究

曹月明^{1,2} 郝悠酉³ 张凯熙^{1,2} 葛阳阳^{1,2}

- (1. 河北省地质实验测试中心, 河北 保定 071052;
2. 河北省矿产资源与生态环境监测重点实验室, 河北 保定 071052;
3. 中国铁道科学研究院集团有限公司, 北京 100081)

摘要: 河北承德某含黄铁矿石英脉型金矿石, 金品位为 10.4 g/t, 黄铁矿是主要的载金矿物, 金的散布粒度大小不等。经过探索试验确定该矿石适宜采用单一浮选工艺流程, 选矿试验结果表明: 在磨矿细度—0.074 mm 含量占 59.44% 条件下, 以碳酸钠为 pH 值调整剂、丁基黄药为捕收剂, 经一次粗选、一次精选、两次扫选, 可获得精矿金品位 179.21 g/t、回收率 96.47%, 尾矿金品位 0.39 g/t, 实现了该金矿资源的高效利用。

关键词: 金矿; 石英脉型; 黄铁矿; 浮选

中图分类号: TD923; TD952 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-7854(2022)02-0029-06

Experimental study on beneficiation of a gold ore in Hebei Chengde

CAO Yue-ming^{1,2} HAO You-you³ ZHANG Kai-xi^{1,2} GE Yang-yang^{1,2}

- (1. Hebei Research Center for Geoanalysis, Baoding 071052, Hebei, China;
2. Key Laboratory of Mineral Resources and Ecological Environment Monitoring, Baoding 071052, Hebei, China;
3. China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The quartz vein type gold ore from Hebei Chengde contains 10.4 g/t gold. Pyrite is the main gold-bearing mineral, and the dissemination size of gold is different. It is confirmed that the ore is suitable to adopt single flotation process through exploration test. The results of beneficiation test show that: with the grinding fineness is 59.44%—0.074 mm, using sodium carbonate as pH regulator and butyl xanthate as collector, the gold concentrate with gold grade of 179.21 g/t, gold recovery of 96.47% and the tailings with gold grade of 0.39 g/t were obtained through one stage of roughing, one stage of cleaning and two stages of scavenging. The process realized the high efficiency utilization of the gold resource.

Key words: gold; quartz vein type; pyrite; floatation

河北省金矿保有资源储量 261.34 t, 居全国第 17 位, 主要分布在承德、唐山、张家口等地, 主要矿石类型有石英脉型和蚀变岩型。石英脉型金矿主要由石英组成, 金属矿物主要为硫化矿, 其中黄铁矿是最主要的硫化矿物, 金主要以裸露、半裸露金为主, 与黄铁矿的共生关系极为密切。石英脉型金

矿选别方法一般采用浮选法、重选法、化学浸出法。对于含粗粒金的矿石多采用重选法、混汞法回收或重选—浮选、重选—浸出联合工艺流程^[1-6]; 对于细粒金的提取多采用化学浸出法, 化学浸出法工艺成熟、提取率高、对矿石适应性强^[7-9]; 对于硫化物含金石英脉型矿石, 多采用浮选法回收, 金回收率高^[10-12]。

河北承德某金矿矿石金品位 10 g/t 左右, 矿石类型为含黄铁矿石英脉型金矿石。通过对该金矿石的工艺矿物学和选矿试验研究, 确定了适宜的选矿工艺流程, 为该金矿的地质评价提供技术依据。

收稿日期: 2021-04-23

第一作者: 曹月明, 工程师, 硕士研究生, 主要从事选冶试验、矿产综合利用及材料物理性能测试工作。

E-mail: caoyueming_happy@163.com

1 矿石性质

1.1 多元素分析

该矿石为含黄铁石英脉型金矿石，多元素分析结果见表 1。

表 1 矿石多元素分析结果

组分	Au ¹⁾	Ag ¹⁾	Cu	Zn	Pb	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
含量	10.40	2.80	0.04	<0.01	<0.01	68.51	3.20	2.45	2.35
组分	K ₂ O	Na ₂ O	S	P	TFe	As	C	Ni	—
含量	3.62	0.47	2.32	0.074	4.79	0.001	0.53	0.005	—

注：1)单位为 g/t，下同

1.2 矿石矿物组成

矿石中金属矿物较少，主要为黄铁矿，微量黄铜矿、白铁矿、方铅矿、磁黄铁矿、闪锌矿，偶见自然金；非金属矿物主要为石英，另有少量碳酸盐矿物、白云母等。

1.3 金的赋存状态

矿石中主要载金矿物为黄铁矿，黄铁矿多呈半自形-他形晶粒状，少见呈自形晶粒状，单颗粒大小多在 0.01~1.2 mm，少见小于 0.01 mm 或大于 1.2 mm 的颗粒，其集合体最大可达 10 mm，黄铁矿多呈不规则状集合体聚集在岩石局部，或呈脉状

由表 1 可知，矿石中有价元素主要为金，金品位为 10.40 g/t，伴生少量银、硫，其中 Ag 品位为 2.80 g/t，S 品位为 2.32 g/t，脉石组分主要为 SiO₂，其含量为 68.51%，有害元素砷、铅、碳含量较低。

集合体沿矿石裂隙分布，少见呈单颗粒浸染分布于脉石矿物间。次要载金矿物为黄铜矿和石英，黄铜矿呈他形晶粒状，石英多呈他形粒状，部分呈半自形-他形柱状，粒度多在 0.01~4 mm。矿石中自然金的主要赋存状态是粒间金，含量约为 69.25%，主要分布于黄铁矿间，少量分布于石英与黄铁矿、黄铜矿粒间，石英粒间；包裹金次之，含量约为 28.71%，主要包裹于黄铁矿和黄铜矿间；裂隙金相对最少，含量约为 2.04%。矿石中金的嵌布形态主要呈他形晶粒状、棒状、细脉状或不规则状，如表 2 所示，粒度大小多在 0.005~0.05 mm，少见粒度较大的自然金。

表 2 自然金粒度分布

金粒大小	极粗粒金	粗粒金	中粒金	细粒金	微细粒金	次显微金
粒级/mm	>0.3	0.3~0.074	0.074~0.037	0.037~0.01	0.01~0.0005	<0.0005
含量/%	0	2.81	15.32	61.18	13.22	7.47

2 选矿试验研究

2.1 探索试验

根据该矿石工艺矿物学特点，结合矿石化学分析结果可知，矿石中的主要金属矿物为黄铁矿，且是主要的载金矿物，其它有价元素含量低，没有利用价值，本次试验以金矿物为主要的回收成分。考虑该矿石中颗粒金的存在，且原矿磨矿后会有单体金解离，因此探索采用单一浮选和尼尔森重选+重选尾矿浮选联合流程对比试验，考查矿石中金的回收效果情况。

2.1.1 单一浮选

试验流程如图 1 所示，试验结果见表 3。

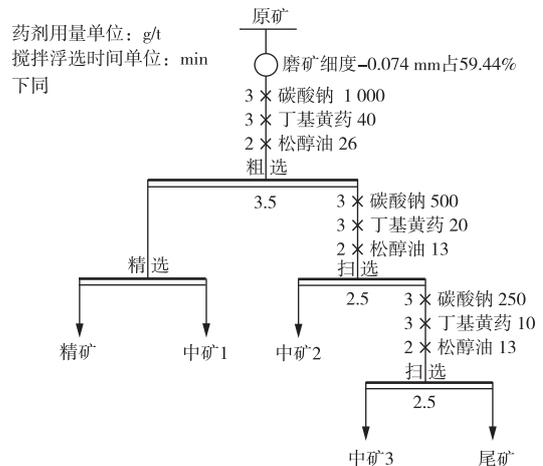


图 1 单一浮选试验流程

Fig. 1 Flowsheet of single flotation processes test

表 3 单一浮选流程试验结果

Table 3 Results of single flotation processes test

/%

产品名称	产率	金品位 ¹⁾	金回收率
精矿	5.00	186.65	88.20
中矿 1	1.83	24.10	4.17
中矿 2	0.97	36.80	3.37
中矿 3	0.62	19.50	1.14
尾矿	91.58	0.36	3.12
原矿	100.0	10.58	100.0

由表 3 可知，采用单一浮选试验流程可获得金品位为 186.65 g/t、回收率为 88.20% 的金精矿，尾矿金品位为 0.36 g/t、回收率为 3.12%。

2.1.2 尼尔森重选+浮选联合流程

将配好的矿样，进行尼尔森重选+浮选联合流程试验，尼尔森重选条件为：磨矿细度-0.074 mm 含量占 59.44%，给矿速度为 1 kg/min，矿浆浓度为 50%，流态化水水量为 3.2 L/min，扩大重力倍数为 60 倍。试验流程见图 2，试验结果见表 4。

由表 4 可知，采用尼尔森重选+浮选联合流程，重选总精矿金品位为 273.65 g/t、回收率仅为 8.12%，浮选精矿金品位为 176.00 g/t、回收率为 81.68%，尾矿金品位为 0.38 g/t、回收率为 3.45%。

通过对比单一浮选和尼尔森重选+浮选联合流程获得的工艺指标发现，两者金精矿品位、回收率相近，说明增加尼尔森重选流程对矿石中金回收效果影响不大，考虑到投资及生产成本，可选择原矿

直接浮选。

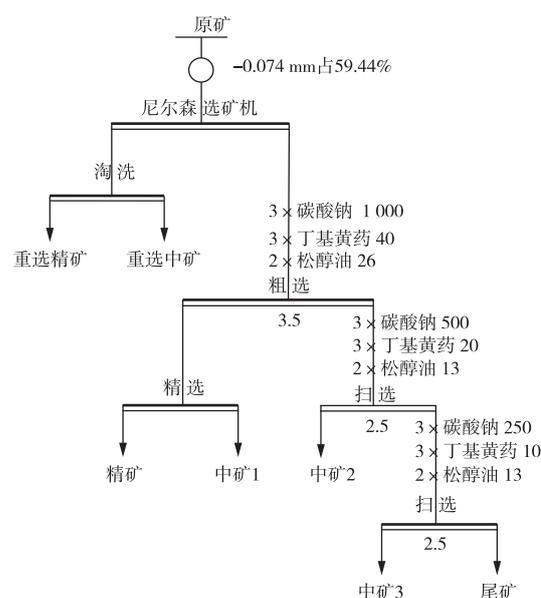


图 2 尼尔森重选+浮选流程试验

Fig. 2 Flowsheet of Nelson gravity separation combined with flotation processes test

表 4 尼尔森重选+浮选流程试验结果

Table 4 Results of Nelson gravity separation combined with flotation processes test

/%

产品名称	产率	金品位 ¹⁾	金回收率
重选精矿	0.16	441.00	6.98
重选中矿	0.14	82.40	1.14
重选总精矿	0.30	273.65	8.12
浮选精矿	4.69	176.00	81.68
中矿 1	2.19	15.20	3.29
中矿 2	0.74	36.50	2.67
中矿 3	0.52	15.30	0.79
尾矿	91.56	0.38	3.45
原矿	100.0	10.11	100.0

2.2 浮选条件试验

2.2.1 磨矿细度对浮选的影响

磨矿细度试验主要考查在不同磨矿细度的条件下对精矿品位、尾矿品位及回收率的影响。对原矿

进行磨矿细度试验，粗选碳酸钠用量为 1 000 g/t、丁基黄药用量 80 g/t、松醇油用量 26 g/t、扫选药剂用量减半，试验流程如图 3 所示，试验结果见图 4。

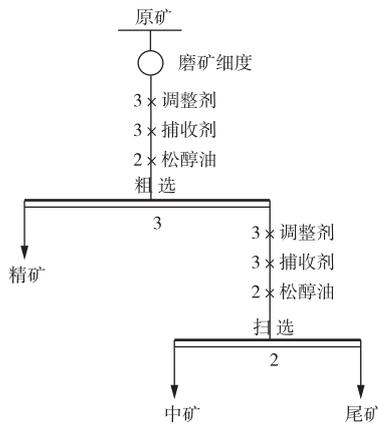


图 3 条件试验流程

Fig. 3 Flowsheet of condition experiments

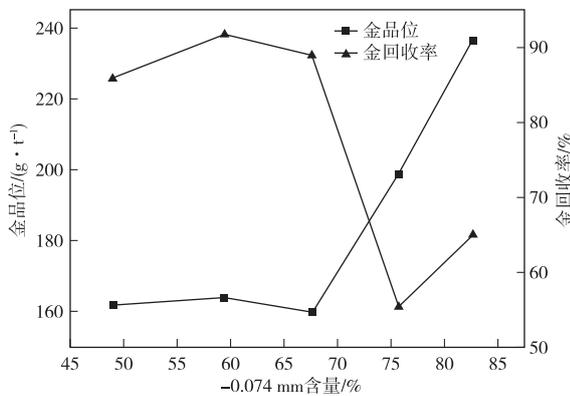


图 4 磨矿细度试验结果

Fig. 4 Results of grinding fineness test

由图 4 可以看出，当磨矿细度 -0.074 mm 含量超过 67.65% 时，精矿 Au 回收率下降明显。这是因为当磨矿细度过细时，矿浆中产生大量矿泥，严重影响了矿化泡沫的形成，部分有用矿物损失在尾矿中从而导致回收率降低。当磨矿细度 -0.074 mm 含量 59.44% 时，粗精矿金品位为 164.05 g/t、回收率为 91.83%，粗精矿的金品位和回收率指标较好，因此确定磨矿细度为 -0.074 mm 含量为 59.44%。

2.2.2 pH 值调整剂种类对浮选的影响

黄铁矿为矿石中主要载金矿物，矿浆 pH 值是影响黄铁矿可浮性的重要因素，浮选时一般选择石灰和碳酸钠作为 pH 值调整剂，因此分别对石灰和碳酸钠进行试验。试验条件为：磨矿细度 -0.074 mm 含量为 59.44%，粗选丁基黄药用量 80 g/t、松醇油用量 26 g/t、扫选药剂用量减半，试验流程如图 3 所示，结果见表 5。

由表 5 可知，在用量相同的情况下，采用碳酸钠作 pH 值调整剂可获得金品位为 164.05 g/t、回收率为 91.83% 的粗精矿，采用石灰作 pH 值调整剂虽然粗精矿品位较高，但严重影响金的回收率。浮选硫化物时适宜的 pH 值为 9~10^[3]，试验过程中发现以碳酸钠为 pH 值调整剂时矿浆的 pH 值为 9.4，且试验过程中产生的矿化泡沫也较好，因此确定 pH 值调整剂为碳酸钠。

表 5 pH 值调整剂种类对比试验结果

Table 5 Results of pH value regulator types comparison test

pH 值调整剂		产率	金品位 ¹⁾	金回收率
种类	用量 ¹⁾			
碳酸钠	1 000	5.96	164.05	91.83
石灰	1 000	1.92	259.16	45.69

2.2.3 碳酸钠用量对浮选的影响

对碳酸钠用量进行试验，试验条件为：磨矿细度 -0.074 mm 含量为 59.44%，粗选丁基黄药用量 80 g/t、松醇油用量 26 g/t、扫选药剂用量减半，试验流程如图 3 所示，试验结果见图 5。

由图 5 可知，随着碳酸钠用量的增加，粗精矿金的品位和回收率逐渐提高，当碳酸钠用量大于 1 000 g/t 时，粗精矿金品位和回收率均有不同程度的降低。综合考虑，确定碳酸钠用量 1 000 g/t，此时可获得粗精矿金品位为 164.05 g/t、回收率为 91.96% 的选别指标。

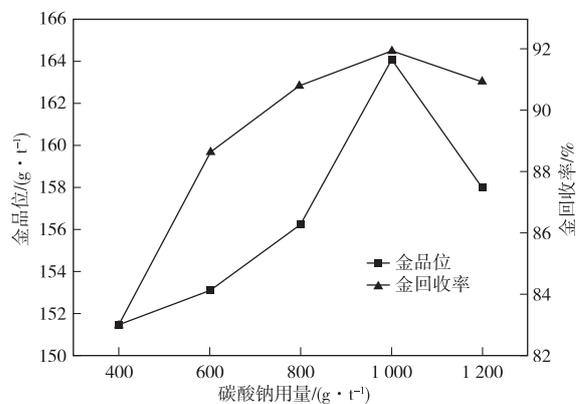


图 5 碳酸钠用量试验结果

Fig. 5 Results of Na₂CO₃ dosage

2.2.4 捕收剂种类对浮选的影响

浮选黄铁矿的常用捕收剂为黄药和黑药，丁基铵黑药捕收力稍比黄药弱，但对硫的选择性好，选贵金属矿金和银时，常用它与丁基黄药组合捕收矿浆中的

细粒单体金、银^[12]。在磨矿细度—0.074 mm 含量为 59.44%，粗选碳酸钠用量 1 000 g/t、松醇油用量 26 g/t 条件下开展捕收剂种类对比试验，试验流程如图 3 所示，试验结果见表 6。

表 6 捕收剂种类对比试验结果

Table 6 Comparison results of the type and dosage of collector

/%

捕收剂种类及用量 ¹⁾	产率	金品位 ¹⁾	金回收率
丁基黄药 80	5.96	164.05	91.83
丁基铵黑药 20 丁基黄药 60	4.23	167.21	68.67
丁基铵黑药 40 丁基黄药 40	4.02	171.26	66.33
丁基铵黑药 60 丁基黄药 20	3.34	173.22	54.79
丁基铵黑药 80	3.01	183.11	51.95

由表 6 可知，采用混合捕收剂时，随着丁基铵黑药用量增加，获得的粗精矿金品位逐渐增大，但金回收率逐渐降低。单独采用丁基黄药可获得粗精矿金品位 164.05 g/t、回收率为 91.83% 的选别指标，为保证金回收率指标，确定采用丁基黄药为捕收剂。

2.2.5 丁基黄药用量对浮选的影响

在磨矿细度—0.074 mm 含量为 59.44%，粗选碳酸钠用量 1 000 g/t、松醇油用量 26 g/t 条件下开展丁基黄药用量试验，试验流程如图 3 所示，试验结果见表 7。

表 7 丁基黄药用量试验结果

Table 7 Results of butyl xanthate dosage

/%

丁基黄药用量 ¹⁾	产率	金品位 ¹⁾	金回收率
20	6.05	153.84	88.25
40	6.22	157.00	91.16
60	6.20	159.31	90.77
80	6.06	164.05	91.96

由表 7 可知，随着丁基黄药用量的增加，粗精矿金品位逐渐增大，回收率呈上升趋势，当丁基黄药用量大于 40 g/t 后，回收率变化较小，综合考虑确定丁基黄药用量为 40 g/t，此时可获得粗精矿金品位 157.00 g/t、回收率 91.16% 的选别指标。

2.3 浮选闭路流程试验

在条件试验基础上进行了浮选闭路试验。考虑到该矿石磨矿时易泥化，为了保证金精矿质量，闭路试验添加了水玻璃作为矿浆分散剂。试验流程及条件见图 6，试验结果见表 8。

由表 8 可知，闭路流程试验采用“一次粗选、一次精选、两次扫选”的工艺，丁基黄药作捕收剂、水玻璃作矿浆分散剂、松油醇作捕收剂，可获得金品位 179.21 g/t、金回收率 96.47% 的金精矿，尾矿金品位 0.39 g/t，试验指标较好。

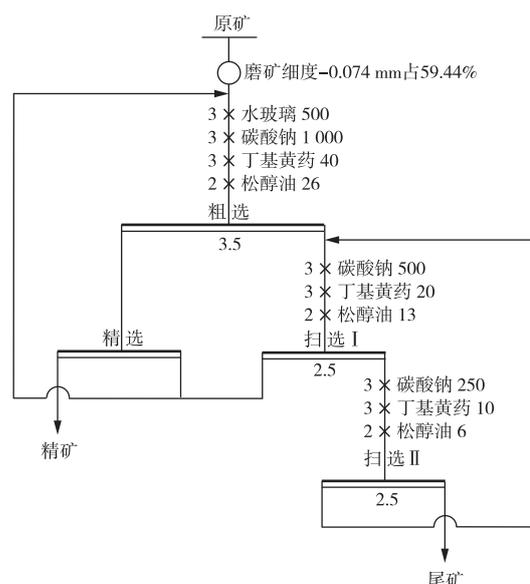


图 6 闭路试验流程

Fig. 6 Flowsheet of closed circuit experiment

表 8 浮选闭路试验结果

Table 8 Results of closed circuit experiment /%

产品名称	产率	金品位 ^D	金回收率
精 矿	5.62	179.21	96.47
尾 矿	94.38	0.39	3.53
原 矿	100.0	10.43	100.0

3 结论

1)河北承德某金矿石为含金黄铁石英脉型，金品位为 10.4 g/t。矿石中金属矿物较少，主要为黄铁矿，微量黄铜矿、白铁矿、方铅矿、磁黄铁矿、闪锌矿，偶见自然金；非金属矿物主要为石英，另有少量碳酸盐矿物、白云母等。

2)黄铁矿是主要的载金矿物，自然金嵌布状态以粒间金为主，包裹金次之，裂隙金相对最少。矿石中金的嵌布形态主要呈他形晶粒状、棒状、细脉状或不规则状，粒度大小多在 0.005~0.05 mm，少见粒度较大的自然金。

3)选矿试验结果表明：该矿石适宜采用单一浮选工艺流程。原矿经一段磨矿，磨矿细度-0.074 mm 占 59.44%，经一次粗选、一次精选、两次扫选，可获得精矿金品位 179.21 g/t、回收率 96.47%，尾矿金品位 0.39 g/t。

参考文献

[1] 吕良, 曹飞, 郭珍旭, 等. 国外某金矿石选矿试验研究[J]. 金属矿山, 2015(3): 100-103.
 LYU L, CAO F, GUO Z X, et al. Beneficiation research of a gold ore from abroad[J]. Metal Mine, 2015(3): 100-103.

[2] 张凯熙, 曹月明, 葛阳阳, 等. 河北某多金属金矿选矿试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2017(5): 28-31, 41.
 ZHANG K X, CAO Y M, GE Y Y, et al. Experimental research on mineral processing of a polymetallic gold ore in Hebei [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2017 (5): 28-31, 41.

[3] 唐平宇, 郭秀平, 王素, 等. 河北某难选金矿选矿试验研究[J]. 黄金, 2014, 35(6): 62-66.
 TANG P Y, GUO X P, WANG S, et al. Experimental research on one refractory gold ore in Hebei[J]. Gold, 2014, 35(6): 62-66.

[4] 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.
 LIAO D H, WANG Y H. Experimental study on a low-grade and poor-sulfide quartz vein type gold

ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2016(1): 36-39.

[5] 陈福林, 余新文, 杨晓军, 等. 某铜金矿选矿试验研究[J]. 矿产综合利用, 2010(6): 11-14.
 CHEN F L, YU X W, YANG X J, et al. Experimental research on mineral processing technology for separating a Cu-Au ore[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2010(6): 11-14.

[6] 应永朋, 苏世杰, 陈攀, 等. 青海某金矿石选矿工艺试验研究[J]. 黄金, 2020, 41(8): 67-70.
 YING Y P, SU S J, CHEN P, et al. Experimental study on the ore-dressing process for a gold ore in Qinghai[J]. Gold, 2020, 41(8): 67-70.

[7] 李鸿睿, 史文全, 田向盛. 甘肃某超大型金矿选矿试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2017(4): 44-47.
 LI H R, SHI W Q, TIAN X S. Experiment study mineral processing on a super-large gold deposit in Gansu [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2017(4): 44-47.

[8] 蔡旺, 舒超, 王昌良, 等. 四川某金矿选矿试验研究[J]. 矿产综合利用, 2018(3): 85-88.
 CAI W, SHU C, WANG C L, et al. Study on mineral processing for a gold mine in Sichuan[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2018(3): 85-88.

[9] 陶专, 万全礼, 刘旗, 等. 西藏尼木县普松金矿选矿试验研究[J]. 金属矿山, 2011(1): 78-80, 97.
 TAO Z, WAN Q L, LIU Q, et al. Experimental research on beneficiation of Pusong Gold Mine of Nyemo county, Tibet[J]. Metal Mine, 2011(1): 78-80, 97.

[10] 周涛, 黄国贤. 甘肃省礼县某金矿选矿试验研究[J]. 矿产综合利用, 2016(2): 42-45.
 ZHOU T, HUANG G X. Investigation on mineral processing of a gold ore from Lixian county of Gansu Province [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2016(2): 42-45.

[11] 唐应刚, 崔育涛. 小河口金矿矿石可选性试验研究[J]. 黄金, 2021, 42(2): 72-75.
 TANG Y G, CUI Y T. Experimental study on the ore separability of Xiaohekou Gold Mine[J]. Gold, 2021, 42(2): 72-75.

[12] 龚明辉, 高起方, 尹福兴, 等. 云南某金矿选矿工艺试验研究[J]. 黄金, 2019, 40(1): 54-58.
 GONG M H, GAO Q F, YIN F X, et al. Experimental research on the mineral processing process in a gold mine of Yunnan[J]. Gold, 2019, 40(1): 54-58.

(编辑: 汪东芳)