doi:10.3969/j.issn.1671-9492.2023.01.008

国外某金矿矿石选矿试验研究

丁 辉[1],涂 宾[2],张馨爻[2],迟晓鹏[2],衷水平[2]

(1. 山东鑫海矿业技术装备股份有限公司,山东 烟台 265500;
2. 福州大学 紫金地质与矿业学院,福州 350108)

摘 要:国外某金矿石金品位 4.59 g/t,银含量为 1.8 g/t。金矿物赋存状态较好,裸露程度较高,含有较多的颗粒金。采用重选工艺可以保证颗粒金的回收,获得金品位较高的重选精矿直接进入冶炼。在矿石性质基础上,对本矿石进行了重选—重选尾矿浸出和重选—浮选—浮选精矿浸出工艺两种工艺方案的对比试验,结果表明,重选—重选尾矿浸出的工艺方案选别效果更为理想。在磨矿细度为 −0.074 mm 占 85.0%的条件下,重选获得的精矿金品位为 865.61 g/t、金回收率为 45.35%,尾矿金品位降至 2.51 g/t;固定矿浆浓度 40%、石灰用量 4 kg/t、氰化钠用量 3 kg/t、氰化时间 48 h,对重选尾矿进行氰化浸出,金浸出率达到 86.06%,重选—重选尾矿浸出工艺金综合回收率为 92.38%。研究结果将为该矿石的工艺设计提供依据,指导实际生产。

关键词:金矿;重选;氰化浸出

中图分类号:TD953;TD922 **文献标志码**:A 文章编号:1671-9492(2023)01-0046-05

Experimental Study on Beneficiation of a Foreign Gold Ore

DING Hui[1], *TU Bin*[2], *ZHANG Xinyao*[2], *CHI Xiaopeng*[2], *ZHONG Shuiping*[2]

(*1. Shandong Xinhai Mining Technology Equipment Co., Ltd., Yantai 265500, Shandong, China;*
2. School of Zijin Geology and Mining, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: The gold grade of a foreign gold ore was 4.59 g/t, and the silver content was 1.8 g/t. The occurrence of gold minerals was better, the degree of exposure was higher, and there were more granular gold. The gravity concentration process can ensure the recovery of the granular gold and obtain the gravity concentration concentrate with higher gold grade to be directly smelted. On the basis of the ore properties, the comparative test of the two process schemes of gravity separation-gravity separation tailings leaching and gravity separation-flotation-flotation concentrate leaching was carried out. The results showed that the selection of gravity separation-gravity separation tailings leaching process scheme was more ideal. When the grinding fineness was −0.074 mm accounting for 85%, gold grade of the concentrate was 865.61 g/t, gold recovery was 45.35%, and gold grade of the tailings was reduced to 2.51 g/t. Under the conditions of pulp density of 40%, lime dosage of 4 kg/t, sodium cyanide dosage of 3 kg/t and cyanidation time of 48 h, gold leaching rate of the gravity tailings reached 86.06%, and the comprehensive gold recovery was 92.38%. The results will provide the basis for the process design of the ore and guide the actual production.

Key words: gold ore; gravity separation; cyanide leaching

随着全球金矿资源减少,如何高效地回收和利用黄金资源成为一个日益严重的问题。目前,金矿的选别方法主要有浮选法[1]、重选法[2]、全泥氰化浸出法[3]、浮选—浸出法[4]、重选—浮选法[5]等。国外某金矿石中含金矿物可分为两类:自然金和银金矿,其中含量较高的为自然金,约占 67.9%。该金矿石赋存状态较好且裸露程度较高,比较容易富集,除了含金矿物有部分微细粒金以包裹或者裂隙形式与黄

收稿日期:2021-11-29
基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFF0217100);国家自然科学基金资助项目(51874101)
作者简介:丁 辉(1975-),男,陕西眉县人,学士,中级工程师,主要从事矿物加工工程设计等工作。
通信作者:迟晓鹏(1978-),男,山东蓬莱人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事有色金属选矿工艺、选矿药剂及固体废弃物处理等方向的研究工作。

铁矿、石英紧密相连,对回收会有一定影响。本文将通过系统的选矿试验确定合理的工艺流程,为建厂提供技术支撑和设计依据。

1　矿石性质

1.1　主要化学成分及矿物组成分析

矿石金品位为 4.59 g/t,银含量为 1.8 g/t。矿石类型为含金多金属硫化物矿石,金属矿物主要有黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、磁铁矿、闪锌矿、方铅矿、赤铁矿等。矿物颗粒相对较粗,呈星点状分散在矿石中;脉石矿物有石英、斜长石、白云母、黑云母以及少量的绢云母、绿泥石等。矿石主要化学成分分析结果见表 1,矿物组成分析结果见表 2。由表 1 可知,矿石中可回收的主要组分为金,铜、锌、硫、铁等组分含量很低,没有达到回收利用标准。

表 1　矿石主要化学成分分析结果

Table 1　Analysis results of main chemical composition of ore　/%

化学成分	Au[1)]	Ag[1)]	Cu	Pb	Zn	S	TFe
含量	4.59	1.8	<0.01	0.02	0.02	0.96	4.54
化学成分	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	TiO_2	As	
含量	66.10	13.46	2.22	3.76	0.72	0.11	

注:1)单位为 g/t,下同

表 2　矿物组成分析结果

Table 2　Mineral composition analysis results　/%

矿物名称	相对含量	矿物名称	相对含量
黄铁矿	2.5	石英	64
黄铜矿	0.4	白云母	12
磁铁矿	0.7	黑云母	5
磁黄铁矿	1	斜长石	10
闪锌矿	0.1	绢云母	2
方铅矿	0.5	绿泥石	1
赤铁矿	0.5		
毒砂	0.3		

1.2　含金矿物嵌布特征

矿石中金矿物主要为自然金,约占 67.9%;次为银金矿,约占 32.1%。金矿物嵌布状态分析结果见表 3。由表 3 可知,金主要以单体金、裂隙金、连生金、包裹金等形式存在,载金矿物主要为黄铁矿、石英、黄铜矿、赤铁矿等。

1.3　含金矿物粒度分布特征

矿石中金的粒度分布特征见表 4。由表 4 可知,单体金粒度相对较大,以中粗粒为主;连生金的粒度以中细粒为主;裂隙金和包裹金的粒度偏细,多以微细粒为主。总体而言,含金矿物的赋存状态较好,裸露程度较高,微细粒金多以包裹或者裂隙的形式与黄铁矿、石英关系密切,这部分金对回收会有一定影响。

表 3　金矿物嵌布状态分析结果

Table 3　Analysis results of gold mineral dissemination state　/%

金嵌布状态		含量	小计
单体金		21.4	21.4
连生金	与黄铁矿连生	25	35.7
	与石英连生	7.1	
	与赤铁矿连生	3.6	
裂隙金	黄铁矿裂隙金	10.7	28.5
	黄铜矿裂隙金	3.6	
	赤铁矿裂隙金	7.1	
	石英裂隙金	7.1	
包裹金	石英包裹金	10.7	14.3
	黄铁矿包裹金	3.6	
合计			100.0

表 4　矿石中金的粒度分布

Table 4　Particle size distribution of gold in the ore　/%

粒级/μm	金的状态及含量				金在各粒级分布率
	单体金	连生金	裂隙金	包裹金	
−100+73	66.66	-	-	-	14.29
−73+37	16.67	30	12.5	-	17.86
−37+10	16.67	60	25.0	50.0	39.29
−10	-	10	62.5	50.0	28.56
合计	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

2　选矿试验研究

考虑矿石中含有颗粒金,确定采用重选工艺流程,可以保证颗粒金的回收。试验对比了重选—重选尾矿浸出、重选—浮选—浮选精矿浸出两种工艺流程对金的回收效果,以此确定最佳选矿工艺流程。

2.1　重选—重选尾矿浸出工艺试验

固定试验条件:矿浆浓度 40%、矿浆 pH 值 10~11、石灰用量 4 kg/t、氰化钠用量 3 kg/t、氰化时间 48 h,进行了重选—重选尾矿浸出工艺试验,试验流程见图 1,试验结果见表 5。由表 5 可知,当磨矿细度为−0.074 mm 占 85%,经过重选作业后,重选尾矿直接氰化浸出,金的综合回收率(重选精矿回收率+48 h 氰化浸出率)达到 92.61%,回收效果良好。

2.2　重选—浮选—浮选精矿浸出工艺试验

2.2.1　重选—浮选试验

重选—浮选试验流程见图 2,试验结果见表 6。由表 6 可以看出,当磨矿细度为−0.074 mm 占 70% 时,重选可以获得产率为 0.25%,金品位 831.45 g/t、金回收率为 45.33%的重选精矿。重选尾矿经一粗一扫一精的浮选作业,可获得产率为 6.11%,金品位为 27.70 g/t、金回收率为 36.91%的浮选精矿。

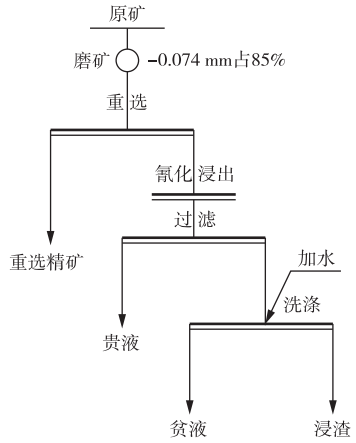

图 1 重选—重选尾矿浸出试验流程

Fig. 1 Flowsheet of gravity separation-gravity separation tailings leaching tests

表 5 重选—重选尾矿浸出试验结果

Table 5 Results of gravity separation-gravity separation tailings leaching tests /%

工艺流程	产品名称	产率	Au 品位[1)]	Au 回收率
重选	重选精矿	0.25	835.57	45.48
	重选尾矿	99.75	2.51	54.52
	原矿	100.0	4.59	100.0
重选尾矿氰化浸出	浸出原矿	99.75	2.51	100.0
	48 h 浸渣		0.35	86.45

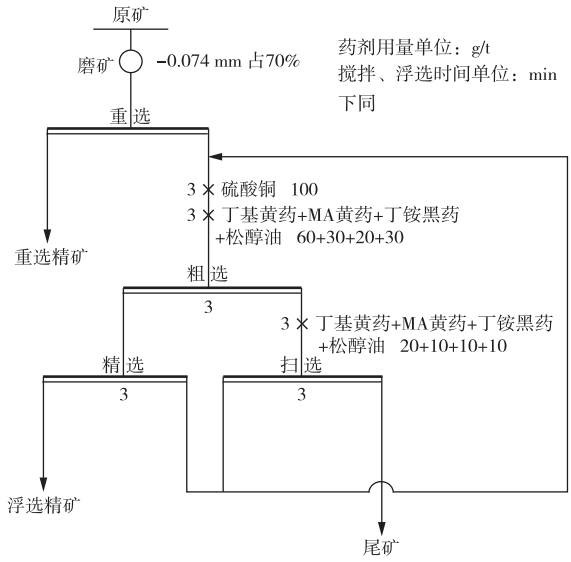

图 2 重选—浮选试验流程

Fig. 2 Flowsheet of gravity separation-flotation tests

表 6 重选—浮选试验结果

Table 6 Results of gravity separation-flotation tests /%

产品名称	产率	Au 品位[1)]	Au 回收率
重选精矿	0.25	831.45	45.33
浮选精矿	6.11	27.70	36.91
尾矿	93.64	0.87	17.76
原矿	100.0	4.59	100.0

2.2.2 浮选精矿直接氰化浸出试验

固定试验条件：矿浆浓度 33%、矿浆 pH 值 10～11、石灰用量 15 kg/t、氰化钠用量 2.5 kg/t、氰化时间分别为 24、48、72 h，对浮选精矿进行了直接氰化浸出试验，试验流程见图 3，试验结果见表 7。由表 7 可知，当浮选精矿再磨细度为-0.038 mm 占 90.8% 时，金的浸出率随着浸出时间的延长而增加。

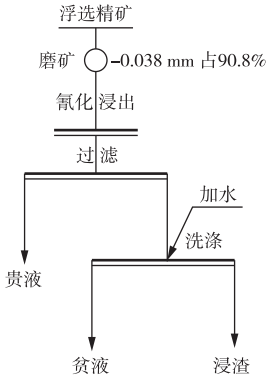

图 3 浮选精矿直接氰化浸出试验流程

Fig. 3 Flowsheet of direct cyanide leaching tests on flotation concentrate

表 7 浮选精矿直接氰化浸出试验试验结果

Table 7 Results of direct cyanide leaching tests on flotation concentrate

氰化时间/h	浮选精矿 Au 品位[1)]	浸渣 Au 品位[1)]	Au 浸出率/%
24	27.7	1.41	94.91
48	27.7	1.27	95.42
72	27.7	1.11	95.99

重选—浮选—浮选精矿浸出工艺，当原矿磨至 −0.074 mm 占 70%，经过重选—重选尾矿浮选，获得的浮选金精矿进行氰化浸出回收金，金的浸出率随着浸出时间的延长而增加。但在浮选作业中，浮选尾矿金“跑高”，影响了金的回收率。原因主要是矿石中裂隙金、包裹金含量较高，分别为 28.5%、14.3%，且裂隙金和包裹金的粒度偏细，多以微细粒为主。当浮选精矿浸出时间为 48 h 时，重选—浮选—浮选精矿浸出工艺金的综合回收率(重选精矿回收率＋48 h 浮选精矿氰化浸出率)为 80.55%，远低于重选—重选尾矿浸出工艺。因此，推荐采用重选—重选尾矿浸出工艺对该矿石中的金进行回收。

2.3 重选—重选尾矿浸出工艺条件试验

2.3.1 磨矿细度试验

为了保证氰化浸出获得较高的指标，需研究入选物料的细度对试验的影响。固定矿浆浓度 40%、石灰用量 4 kg/t(pH＝10～11)、氰化钠用量 3 kg/t、浸出时间 24 h，考察磨矿细度对金浸出率的影响，磨矿细

度低容易出现沉槽,为防止沉槽,氰化的最小磨矿细度不应小于－0.074 mm 占 80%。试验流程同图 1,试验结果见表 8。由表 8 可知,当磨矿细度增加时,重选精矿产率降低,金回收率升高,重选尾矿金浸出率并没有明显变化,但金综合回收率随磨矿细度变化不大。综合考虑,磨矿细度确定为－0.074 mm 占 85%。

表 8　磨矿细度试验结果

Table 8　Test results of grinding fineness　/%

磨矿细度(－0.074 mm)	产品名称	产率	Au 品位[1)]	Au 回收率	总回收率
80	重选精矿	0.29	709.77	44.97	91.98
	重选尾矿	99.71	2.53	55.07	
	浸出渣		0.37	14.64	
85	重选精矿	0.24	865.61	45.35	92.38
	重选尾矿	99.76	2.51	54.65	
	浸出渣		0.35	13.94	
90	重选精矿	0.22	946.94	45.41	92.39
	重选尾矿	99.78	2.51	54.59	
	浸出渣		0.35	13.94	

2.3.2　氰化钠用量试验

矿浆中的氰化物浓度和氧的浓度是影响金溶解速率的两个主要因素。固定其他氰化浸出条件不变,考察了氰化钠用量对金浸出率的影响。试验流程见图 4,试验结果见表 9。由表 9 可知,随着氰化钠用量增加,金的浸出率增加。当氰化钠的用量为 3 kg/t 时,金的浸出率为 86.06%,当氰化钠的用量继续增加,金的浸出率变化不大。为节约生产成本,试验确定氰化钠的用量为 3 kg/t。

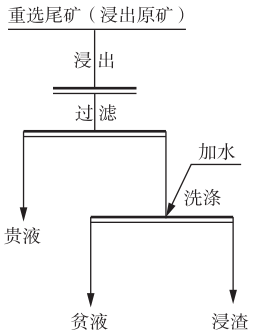

图 4　重选尾矿浸出试验流程

Fig. 4　Flowsheet of of gravity separation tailings leaching tests

表 9　氰化钠用量试验结果

Table 9　Results of sodium cyanide dosage tests

氰化钠用量/(kg·t^{-1})	浸出给矿 Au 品位[1)]	浸渣 Au 品位[1)]	Au 浸出率/%
1.5	2.51	0.48	80.88
2	2.51	0.39	84.45
3	2.51	0.35	86.06
4	2.51	0.34	86.45

2.3.3　氰化浸出时间试验

固定其他氰化浸出条件不变,考察了氰化浸出时间对金浸出率的影响。试验流程同图 2,试验结果见表 10。由表 10 可以看出,当氰化时间增加时,金的浸出率不断提高。当浸出时间为 24 h 时,金的浸出率为 86.06%,当浸出时间继续增加,金的浸出率变化不大。综合考虑,确定氰化时间为 24 h。

表 10　氰化浸出时间试验结果

Table 10　Results of cyanide leaching time tests

氰化时间/h	浸出给矿 Au 品位[1)]	浸渣 Au 品位[1)]	Au 浸出率/%
16	2.51	0.39	84.46
24	2.51	0.35	86.06
48	2.51	0.34	86.45

2.3.4　综合条件试验

按照上述各项条件试验确定的最佳条件进行综合试验,以验证试验指标的稳定性。试验流程同图 1,试验结果见表 11。由表 11 可知,平行试验中金的综合回收率分别为 92.38%和 92.40%,结果表明试验指标稳定、可靠。

表 11　综合条件试验结果

Table 11　Results of comprehensive condition tests　/%

平行试验	工艺流程	产品名称	产率	Au 品位[1)]	Au 回收率
A	重选	重选精矿	0.24	865.61	45.35
		重选尾矿	99.76	2.51	54.65
		原矿	100.0	4.58	100.0
	氰化浸出	浸出给矿	99.76	2.51	100.0
		24 h 浸渣		0.35	13.94
B	重选	重选精矿	0.25	835.57	45.48
		重选尾矿	99.75	2.51	54.52
		原矿	100.0	4.59	100.0
	氰化浸出	浸出给矿	99.75	2.51	100.0
		24 h 浸渣		0.35	13.94

2.3.5　无氰浸出剂浸出试验

随着人们对环保问题关注度的提高,氰化物在黄金浸出的应用越来越严格[6-8]。在其他氰化浸出条件不变的情况下,采用无氰浸出剂鑫福瑞 1#代替氰化钠进行浸出试验,考察无氰浸出剂对金浸出率的影响,试验流程同图 1。结果表明,在鑫福瑞 1#用量为 6 kg/t、浸出给矿金品位为 2.51 g/t 的条件下,金的浸出率为 85.26%,重选—尾矿无氰浸出试验中金的总回收率为 89.90%。

3　结论

1)国外某金矿石中含金矿物有自然金和银金矿,以自然金为主,约占 67.9%;次为银金矿,约占 32.1%。原矿金品位为 4.59 g/t,含银 1.8 g/t。金矿

物嵌布状态有单体金、裂隙金、连生金、包裹金,其中以裂隙金和连生金为主,单体金次之,包裹金最少。

2)由于矿石中裂隙金、包裹金含量较高,分别为28.5%、14.3%,且裂隙金和包裹金的粒度偏细,多以微细粒为主,使浮选尾矿金"跑高",影响了金的回收率。重选—浮选—浮选精矿浸出工艺金的综合回收率偏低,为80.54%,说明浮选工艺对金不能有效地回收。

3)重选—重选尾矿浸出工艺试验结果表明,原矿磨至-0.074 mm 占 85%,经重选—重选尾矿直接氰化浸出,在矿浆浓度 40%,石灰用量 4 kg/t,氰化钠用量 3 kg/t,浸出时间为 24 h 的条件下,金的综合回收率达到 92.38%。

4)重选尾矿采用无氰浸出剂进行了浸出试验,金的浸出效果略低于氰化钠,但是浸出剂的消耗量比氰化钠多一倍,为 6 kg/t。综合考虑成本及环保问题,推荐采用重选—重选尾矿浸出工艺。

参考文献

[1] 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 Minghui, GAO Qifang, YIN Fuxing, et al. Experimental research on the mineral processing process in a gold mine of Yunnan[J]. Gold,2019,40(1):54-58.

[2] 李仕亮,杨令恩,杜玉艳,等.某金矿磨矿分级回路中重选流程结构研究与实践[J].有色金属(选矿部分),2021(5):98-102.
LI Shiliang,YANG Lingen,DU Yuyan,et al. Research and practice of gravity separation process structure in grinding and classification circuit of a gold mine[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2021(5):98-102.

[3] 孙腾飞,范喜杰,孔汇贤,等.甘肃某低硫化物金矿选矿试验研究[J].有色金属(选矿部分),2022(6):72-76.
SUN Tengfei, FAN Xijie, KONG Huixian, et al. Experimental study on beneficiation of a low sulfide gold mine in Gansu[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2022(6):72-76.

[4] 朱国庆,杜淑华,夏亮,等.国外某含蛇纹石绿泥石微细粒难选金矿石选矿试验[J].金属矿山,2021,50(5):115-119.
ZHU Guoqing, DU Shuhua, XIA Liang, et al. Experiment study on mineral processing of a microfine particle refractory gold deposit abroad containing serpentine and chlorite[J]. Metal Mine,2021,50(5):115-119.

[5] 亓传铎.某金矿氧化矿石可选性试验研究[J].黄金,2021,42(9):90-94.
QI Chuanduo. Experimental study on the separability of an oxide ore from a gold mine[J]. Gold,2021,42(9):90-94.

[6] 郭玉武,张宇,朱恩领,等.内蒙古某微细粒浸染型金矿选矿工艺研究[J].有色金属(选矿部分),2015(4):46-50.
GUO Yuwu,ZHANG Yu,ZHU Enling,et al. Research on mineral processing technology of micrograined-disseminated gold ore in Inner Mongolia[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2015(4):46-50.

[7] 惠学德,王海东,梁泽来.某难处理金矿石提金工艺试验研究[J].有色金属(选矿部分),2011(2):22-26.
HUI Xuede,WANG Haidong,LIANG Zelai. Experimental study of gold extraction process for a refractory gold ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2011(2):22-26.

[8] 朱昌河,明平田,方宏树,等.青海某金矿浮选尾矿环保提金试验研究及实践[J].矿产综合利用,2016(4):85-89.
ZHU Changhe,MING Pingtian,FANG Hongshu,et al. Research and practice on mineral environmental processing technologies for a gold flotation tailings from Qinghai province [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2016(4):85-89.

(本文编辑 刘水红)