

doi:10.3969/j.issn.1671-9492.2024.03.010

某高砷高硫复杂难处理金矿选冶工艺研究

周光浪,段胜红

(云南黄金矿业集团股份有限公司,昆明 650200)

摘要:为有效回收某高砷高硫复杂难处理金矿中的金,对该矿石开展了工艺矿物学分析,以及浮选、焙烧、氰化浸出等试验研究。结果表明,矿石中的金以硅酸盐包裹金为主,裸露金分布较少,黄铁矿、毒砂是主要的载金矿物,且整体粒度较细,多呈包裹体形式被脉石矿物紧密包裹。若采用常规的全泥氰化工艺,即使在磨矿细度为 -0.038 mm 占95%的条件下,金的浸出率也仅为18%左右,很难对矿石中的金进行有效回收。结合矿石的性质和金的嵌布特性分析,采用了优先浮选黄铁矿、毒砂等载金矿物的方法,从而来实现有效富集和回收矿石中的金,同时为改善浮选过程中细泥和脉石带来的影响,及强化对金的选别,采用了水玻璃+六偏磷酸钠的组合作为抑制剂,硫酸铜+硝酸铅的组合作为活化剂,丁基黄药+丁铵黑药的组合作为捕收剂。通过强化浮选过程中组合药剂的选择和使用,矿石采用浮选的工艺可获得金品位为 21.05 g/t 、金回收率为92.58%的金精矿。为了进一步有效解决所得金精矿品位低、有害元素砷含量高的问题,对金精矿进行了焙烧预处理。金精矿通过焙烧除杂后,使其包裹体结构被破坏,包裹金被裸露,然后对所得焙砂再采用氰化浸出的工艺来回收其中的金,金的浸出率可达89.93%。最终矿石在“浮选—焙烧—水洗—氰化”的联合工艺下,可使矿石中的金得到较好回收。

关键词:高砷;高硫;难处理金矿;全泥氰化浸出;焙烧

中图分类号:TD953

文献标志码:A

文章编号:1671-9492(2024)03-0083-08

Study on Beneficiation and Metallurgy Process of a High Arsenic and High Sulfur Complex Refractory Gold Ore

ZHOU Guanglang, DUAN Shenghong

(Yunnan Gold Mining Group Co., Ltd., Kunming 650200, China)

Abstract: In order to effectively recover gold from a complex gold ore with high arsenic and sulfur content, process mineralogical analysis, flotation, roasting, cyanide leaching and other experimental studies were carried out. The results showed that the gold in the ore is mainly silicate wrapped gold, and the proportion of bare gold is less. Pyrite and arsenopyrite were the main gold carrying minerals, and the overall particle size was relatively fine, and most of the gold grains were tightly wrapped by gangue minerals in the form of inclusions. If the conventional all sliming cyanidation process was adopted, even if the grinding fineness is -0.038 mm accounting for 95%, the leaching rate of gold was only about 18%, which made it difficult to effectively recover gold from the ore. Combined with the analysis of ore properties and gold dissemination characteristics, the method of preferential flotation of gold-bearing minerals such as pyrite and arsenopyrite was adopted to achieve effective enrichment and recovery of gold in the ore. At the same time, in order to improve the impact of fine mud and gangue in the flotation process and strengthen the separation of gold, the combination of sodium silicate + sodium hexametaphosphate was used as an inhibitor, the combination of copper sulfate + lead nitrate was used as an activator, and the combination of butyl xanthate + ammonium bulyl dithiophosphate was used as a collector. By strengthening the selection and use of combined reagents in the flotation process, the gold concentrate with a gold grade of 21.05 g/t and a gold recovery of 92.58% can be obtained by the flotation process. In order to further effectively solve the problems of low grade and high content of harmful element arsenic in the obtained gold concentrate, roasting pretreatment was carried out on the gold concentrate. After the gold concentrate was roasted to remove impurities, its inclusion structure was destroyed, and the wrapped gold was exposed. Then the gold in the calcine was recovered

收稿日期:2023-01-27

基金项目:云南省重点研发计划项目(2018IB028)

作者简介:周光浪(1987—),男,云南昭通人,学士,工程师,主要从事多金属矿综合利用选矿管理和技术研究工作。

by cyanide leaching process, and the gold leaching rate can reach 89.93%. Under the combined process of “flotation - roasting - water washing - cyanidation”, the gold in the ore can be recovered better.

Key words: high arsenic; high sulfur; refractory gold ore; full slime cyanidation leaching; roasting

随着易处理金矿资源的不断减少,针对复杂难处理金矿资源的高效开发利用也逐渐受到各界的高度重视。由于该类型矿石中金的嵌布粒度较细,特别是以包裹体形式赋存的微粒金,在常规磨矿过程中很难被有效解离,以及存在含碳、砷、硫较高等诸多问题,要有效回收其中的金仍存在许多技术难题。目前主要采用焙烧氧化法、氯化法、加压氧化法、细菌氧化法、化学氧化法等技术进行预处理^[1-2],由于各矿石的组成成分差异较大,单一的预处理工艺也存在诸多不足,根据矿石性质特征,选择合理、高效的联合选矿工艺提高金的回收率也是一个重要的研究方向。

本文针对某高砷高硫复杂难处理金矿石,开展了矿石工艺矿物学研究,结果表明,矿石中的金以硅酸盐包裹金为主,裸露金分布较少,黄铁矿、毒砂为主要的载金矿物,整体粒度较细,多呈包裹体形式被脉石矿物紧密包裹。为提高对金的有效回收,结合矿石嵌布特征,优先采用浮选工艺^[3-5],使 90% 以上

的金富集在金精矿中,从而预先脱除大部分脉石,为后续进一步处理创造有利条件。然后再对金精矿进行焙烧脱硫除杂预处理,以破坏其包裹体结构,使矿石能形成疏松多孔的结构和金裸露^[6-8],此时再采用氰化法去回收焙砂中的金,最终经过浮选—焙烧—氰化的联合工艺流程,矿石中的金得到较好回收。试验结果可以为复杂难处理金矿资源的综合利用提供借鉴和参考。

1 矿石性质

1.1 矿石主要化学成分分析

矿石中的主要金属矿物为黄铁矿和毒砂,其次为褐铁矿和钛铁矿。脉石矿物主要为石英、绢云母,其次为白云石、铁白云石、方解石、高岭石等。有价元素主要为 Au,含量为 2.32 g/t;有害元素主要为 As,含量为 0.85%;矿石中 S 含量较高,达 6.84%。矿石主要化学成分分析结果见表 1。

表 1 矿石主要化学成分分析结果

Table 1 Results of main chemical composition Analysis of the ore

/%

组分	Au ¹⁾	Ag ¹⁾	Cu	Pb	As	Zn	S
含量	2.32	0.22	0.015	0.009	0.85	0.02	6.84
组分	Fe	C	P	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃
含量	7.30	2.35	0.35	45.33	5.81	2.72	10.54

注:1)单位为 g/t,下同。

1.2 矿石中主要组分的化学物相分析

对矿石中金、碳、砷进行物相分析发现,矿石中的金主要以硅酸盐包裹金为主,其次为裸露金和铁

氧化物包裹金;碳主要以无机碳为主,石墨和有机碳的含量较少;砷主要分布在硫化物中。金、碳、砷的化学物相分析结果分别见表 2~4。

表 2 矿石中金的化学物相分析结果

Table 2 Results of chemical phase analysis of gold in the ore

/%

金相别	裸露金	碳酸盐包裹金	硫化物包裹金	氧化铁包裹金	硅酸盐包裹金	合计
含量 ¹⁾	0.26	0.021	0.005	0.21	1.82	2.32
占有率	11.23	0.92	0.22	9.07	78.58	100.0

表 3 矿石中碳的化学物相分析结果

Table 3 Results of chemical phase analysis of carbon in the ore

/%

碳相别	有机碳	无机碳	石墨	合计
含量	0.04	2.22	0.081	2.34
占有率	1.71	94.83	3.46	100.0

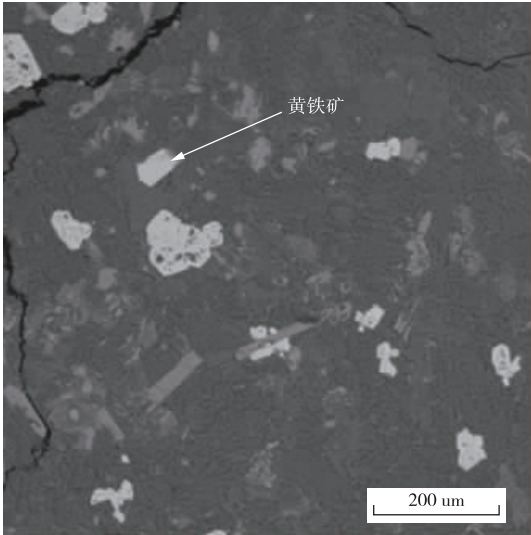
表 4 矿石中砷的化学物相分析结果

Table 4 Results of chemical phase analysis of arsenic in the ore

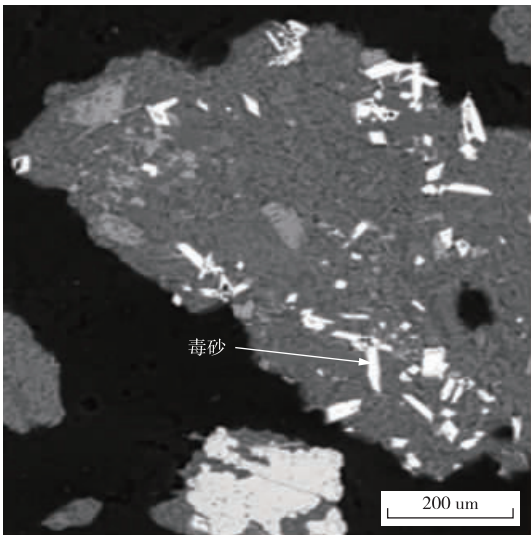
/%

砷相别	氧化物中砷	硫化物中砷	合计
含量	0.015	0.835	0.85
占有率	1.76	98.24	100.0

矿石中金的主要载体矿物是黄铁矿和毒砂,嵌布粒度极细,主要呈微粒分布,部分微粒金矿物被包裹在黄铁矿、毒砂中。黄铁矿和毒砂多呈浸染状分布,大部分黄铁矿与脉石矿物紧密共生,被脉石矿物紧密包裹;毒砂粒度极细,也多被脉石矿物包裹,如图 1 所示。



(a)黄铁矿被脉石矿物包裹



(b)毒砂被脉石矿物包裹

图 1 黄铁矿、毒砂嵌布特征
Fig. 1 Disseminated characteristics of pyrite and arsenopyrite

2 试验结果与讨论

2.1 直接氰化浸出探索试验

为探索矿石直接氰化浸出时金的回收情况,在磨矿细度分别为-0.074 mm 占 90%、-0.038 mm 占 95%,氰化钠单耗为 5 kg/t、浸出时间为 48 h 的

条件下,开展了氰化浸出探索试验,试验结果见图 2。从图 2 可以看出,即使在磨矿细度为-0.038 mm 占 95%的条件下,金的浸出率仅有 18%左右,表明在细磨条件下也很难使包裹体的载金矿物有效解离,采用直接氰化浸出工艺很难对矿石中的金进行有效回收。

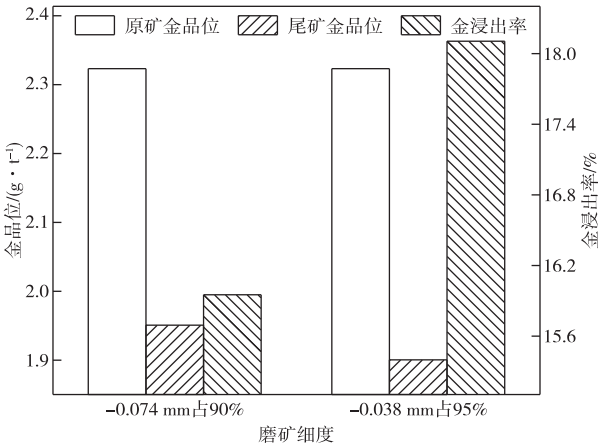


图 2 直接氰化浸出探索试验结果
Fig. 2 Results of exploratory tests direct cyanide leaching

2.2 浮选试验

根据矿石性质和金的嵌布特性,考虑优先浮选黄铁矿、毒砂等载金矿物,从而实现富集和回收矿石中的金,为尽可能提高金的回收率,开展了磨矿细度、药剂制度等条件试验^[9-10]。

2.2.1 磨矿细度试验

由于矿石中裸露金占比较少,载金矿物多以包裹体的形式存在,为使载金矿物尽可能单体解离,给浮选创造有利条件,以硫酸铜+硝酸铅的组合作活化剂、丁基黄药+丁胺黑药的组合作捕收剂,进行了磨矿细度试验,试验流程见图 3,试验结果见图 4。

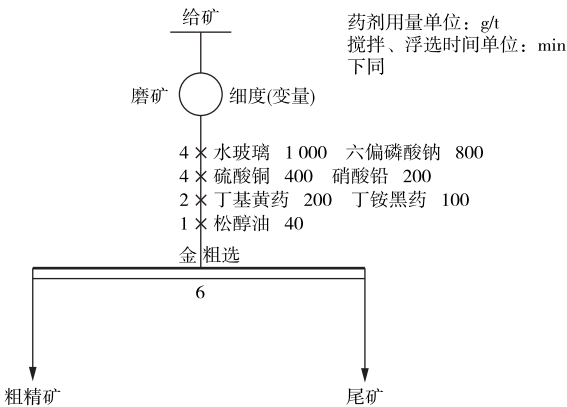


图 3 磨矿细度试验流程图
Fig. 3 Flowsheet of grinding fineness test

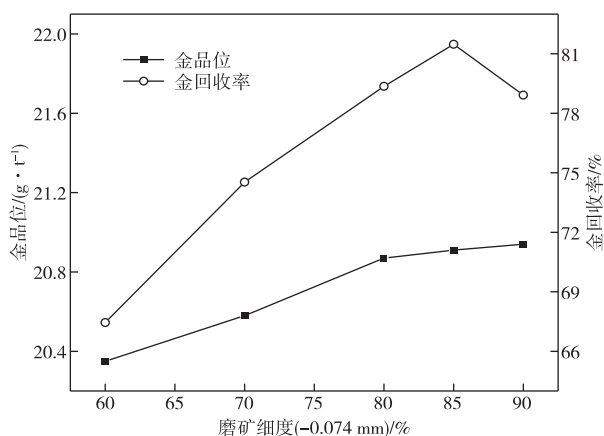


图4 磨矿细度试验结果

Fig. 4 Results of grinding fineness tests

从图4可以看出,当磨矿细度高于-0.074 mm占85%,金的回收率降低,说明提高磨矿细度会增加矿浆中泥的含量,恶化浮选环境,降低选矿指标。综合考虑,矿石浮选的磨矿细度选择-0.074 mm的含量占85%较适宜。

2.2.2 脉石矿物抑制剂种类及用量试验

为改善矿石经细磨后的浮选环境,同时加强对脉石矿物的抑制,减少泥化对浮选带来的不利影响,在矿石磨矿细度为-0.074 mm占85%的条件下,以抑制剂为变量,其余条件采用与磨矿细度试验相同的流程和参数,开展了抑制剂的种类和用量条件试验,试验结果分别见图5、6。

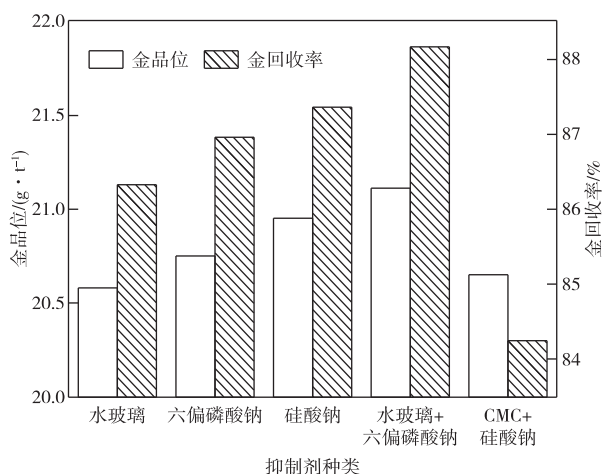


图5 脉石矿物抑制剂种类试验结果

Fig. 5 Results of gangue minerals depressant type and dosage of tests

从图5可以看出,使用抑制剂有助于进一步提高对金的回收,且采用水玻璃+六偏磷酸钠的组合作为抑制剂时对金的回收效果相对较好。

从图6可以看出,当水玻璃+六偏磷酸钠的组合用量大于1 000+800 g/t后,继续增加药剂的用

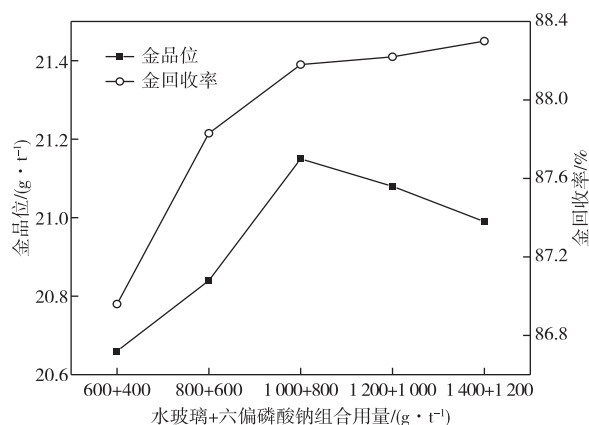


图6 水玻璃+六偏磷酸钠组合用量试验结果

Fig. 6 Results of combined dosage tests on sodium silicate and sodium hexametaphosphate

量对金的回收率影响较小,且药剂用量的进一步增加会使精矿中金的品位降低,综合考虑,水玻璃+六偏磷酸钠的组合用量选择1 000+800 g/t较适宜。

2.2.3 活化剂种类及用量试验

为探索使用活化剂对黄铁矿、毒砂等载金矿物的活化效果,以进一步提高对金的回收,在矿石磨矿细度为-0.074 mm占85%、抑制剂水玻璃+六偏磷酸钠的组合用量为1 000+800 g/t的条件下,以活化剂为变量,其余条件采用与磨矿细度试验相同的流程和参数,开展了活化剂种类和用量试验,试验结果分别见图7、图8。

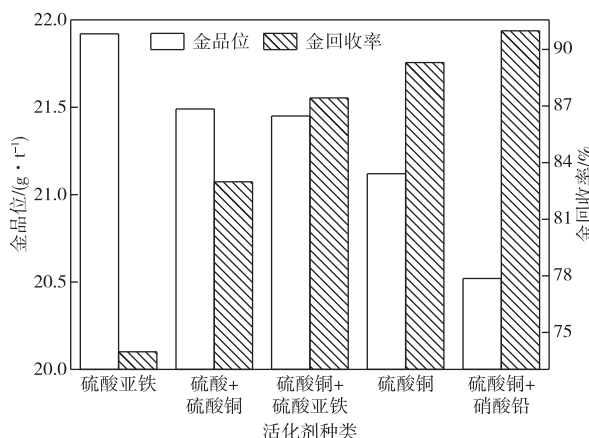


图7 活化剂种类试验结果

Fig. 7 Results of activator type tests

从图7可以看出,使用活化剂有助于进一步提高对金的回收,且采用硫酸铜+硝酸铅的组合作为活化剂时对金的回收效果相对较好。

从图8可以看出,硫酸铜+硝酸铅的组合用量配比为2:1时,对金的回收率指标相对较好,综合考虑,活化剂硫酸铜+硝酸铅的组合用量选择400+200 g/t较为适宜。

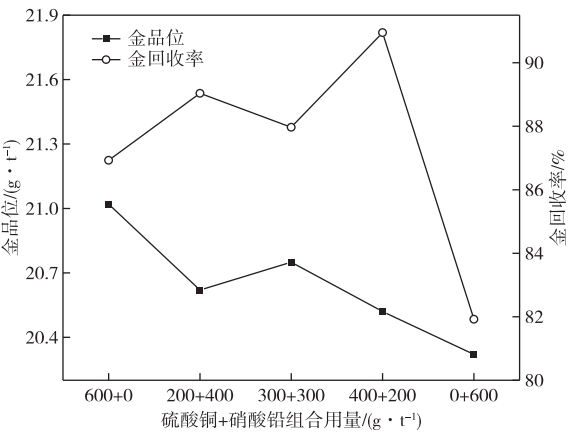


图 8 硫酸铜+硝酸铅的组合用量试验结果

Fig. 8 Results of copper sulfate and lead nitrate dosage tests

2.2.4 捕收剂种类及用量试验

为探索不同捕收剂对金的回收情况,以及捕收剂组合使用的协同作用效果,在矿石磨矿细度为-0.074 mm占85%、抑制剂水玻璃+六偏磷酸钠的组合用量为1 000+800 g/t、以及活化剂硫酸铜+硝酸铅的组合用量为400+200 g/t的条件下,以捕收剂为变量,其余条件采用与磨矿细度试验相同的流程和参数,开展了捕收剂的种类及用量试验,试验结果分别见图9、图10。

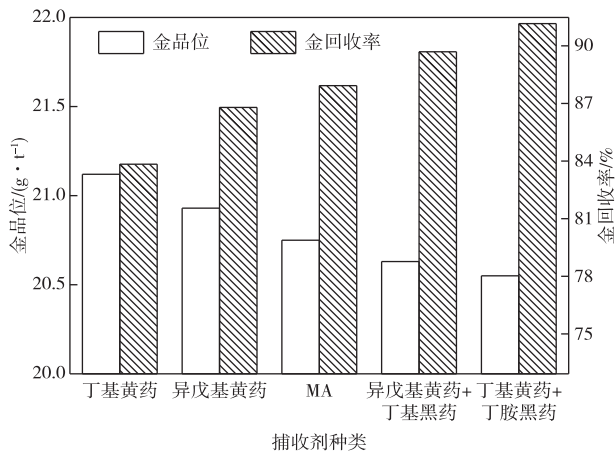


图 9 捕收剂种类试验结果

Fig. 9 Results of collector type tests

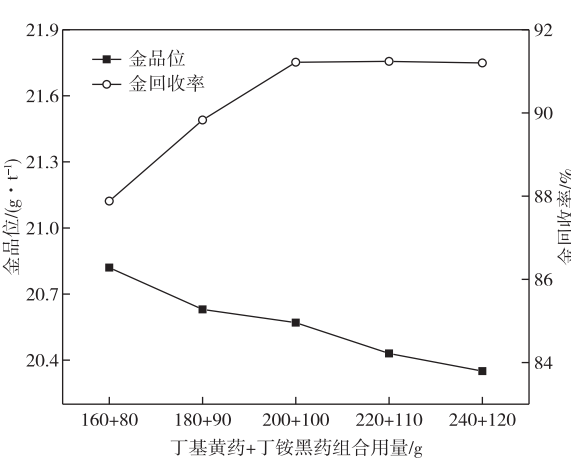


图 10 丁基黄药+丁铵黑药组合用量试验结果

Fig. 10 Test results of combined dosage of butyl xanthate and ammonium butyrate black

从图9可以看出,采用丁基黄药+丁铵黑药的组合作捕收剂时对金的回收效果相对较好。

从图10可以看出,丁基黄药+丁铵黑药的组合用量高于200+100 g/t时,继续增加药剂用量对金的回收率影响较小,综合考虑,捕收剂丁基黄药+丁铵黑药的组合用量选择200+100 g/t较为适宜。

2.2.5 闭路试验

根据条件试验确定的较佳工艺参数,开展了金的浮选闭路试验,试验流程见图11,试验结果见表5。从表5可以看出,采用浮选工艺最终可获得金品位为21.05 g/t、金回收率为92.58%的金精矿,金回收率较高,但金品位相对较低,且精矿中有害元素砷的含量较高,对精矿的质量有较大影响。

2.3 金精矿焙烧氰化试验

由于获得的金精矿产品中金品位较低,有害元素含量高,需要对金精矿开展进一步处理。根据金精矿的性质分析,金在黄铁矿和毒砂中多以包裹体的形式赋存,整体嵌布粒度较细,且毒砂解离度较低,多被脉石矿物包裹,在常规磨矿工艺下很难得到有效解离,同时有害元素砷较高。因此,需要对金精矿进行焙烧除杂,以破坏其包裹体结构,使金裸露后,再采用氰化浸出的工艺来回收其中的金^[11-12]。

表 5 金浮选闭路试验结果

Table5 Results of gold flotation closed-circuit tests

产品名称	产率	金品位 ¹⁾	金回收率
金精矿	10.20	21.05	92.58
尾矿	89.80	0.19	7.42
原矿	100.0	2.32	100.0

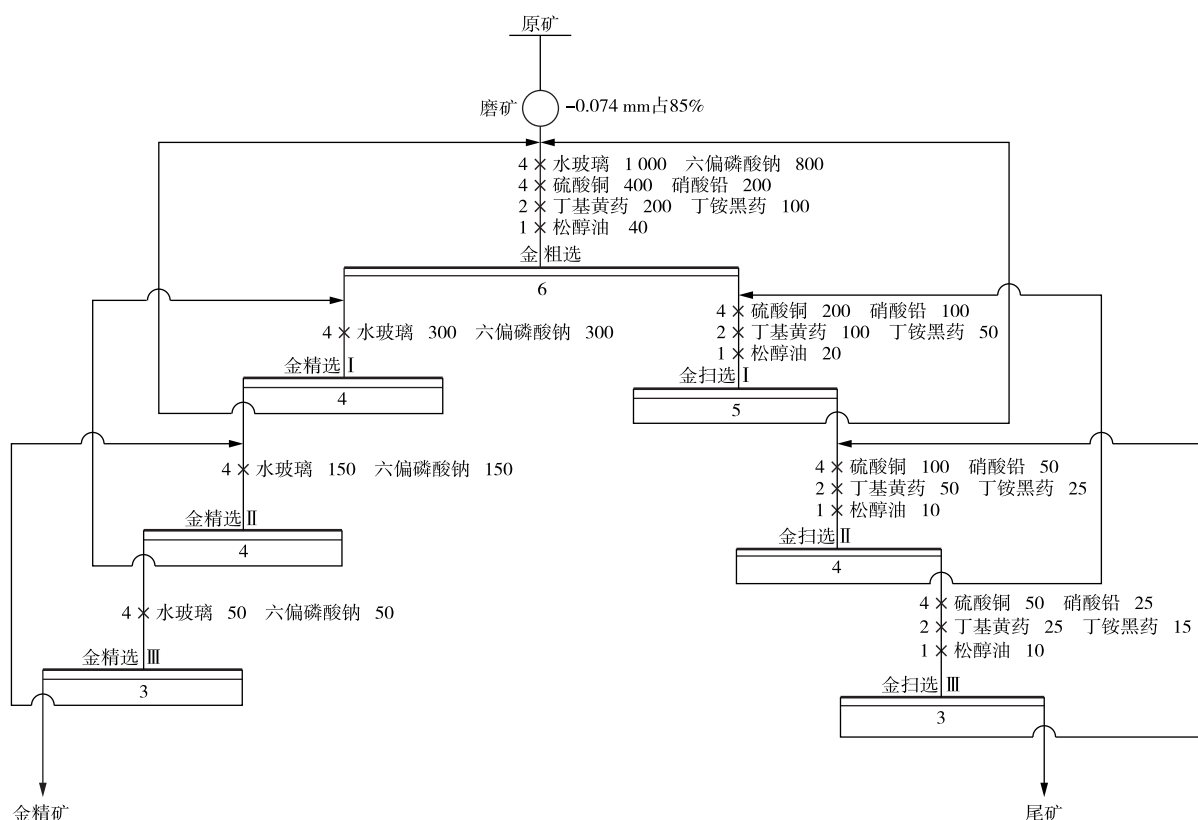


图 11 金浮选闭路试验工艺流程

Fig. 11 Flowsheet of gold flotation locked-cycle tests

2.3.1 焙烧温度试验

焙烧过程中温度过低或过高会造成矿石欠烧或过烧,从而影响对金的有效回收和杂质元素的脱除,为选择适宜的焙烧温度,在焙烧时间为 2 h、浸出液固比为 2 : 1、氰化钠单耗为 3 kg/t、浸出时间为 48 h 的条件下,开展了焙烧温度条件试验,为降低氰化作业中石灰、氰化钠用量,并对所得的焙砂进行了水洗预处理,试验结果见图 12。

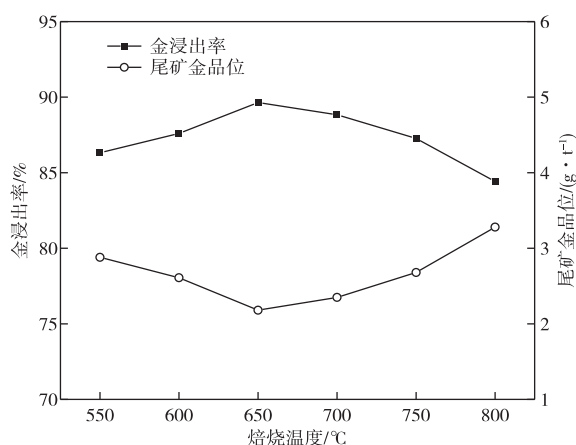


图 12 焙烧温度对金浸出的影响情况

Fig. 12 Effect of roasting temperature on gold leaching

从图 12 可以看出,当焙烧温度高于 650 ℃ 后,继续提高焙烧温度,金的浸出率降低,这主要是由于温度过高会造成焙砂中的金被二次包裹所致,综合考虑,焙烧温度选择 650 ℃ 较适宜。

2.3.2 焙烧时间试验

焙烧时间也是影响焙砂质量的关键因素,为考查焙烧时间对金浸出的影响情况,开展了焙烧时间条件试验,试验结果见图 13。从图 13 可以看出,当焙烧时间高于 1.5 h 后,继续延长焙烧时间,金的浸

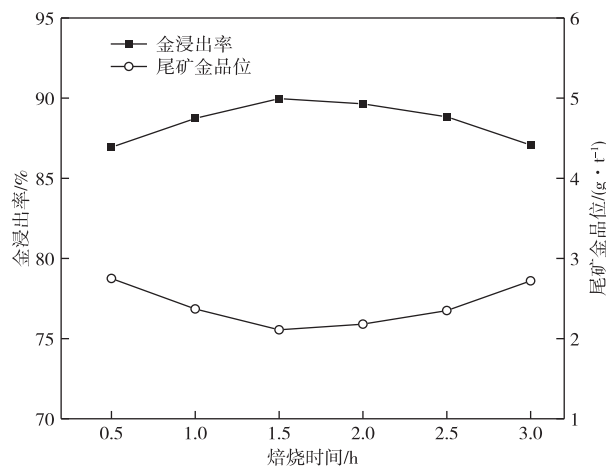


图 13 焙烧时间对金浸出的影响情况

Fig. 13 Effect of roasting time on gold leaching

出率呈降低趋势。综合考虑,焙烧的时间选择 1.5 h 较适宜。

2.3.3 浸出药剂种类及用量试验

针对金的浸出常采用氰化钠作浸出剂,但氰化钠为剧毒物质,为探索低毒类浸出药剂对金的浸出情况,开展了浸出剂的种类及用量试验,试验结果见图 14。

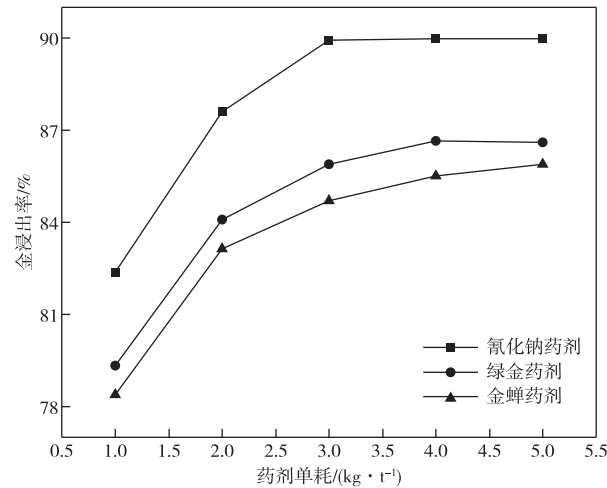


图 14 金浸出剂种类及用量试验结果

Fig. 14 Results of gold leaching reagent type and dosage tests

从图 14 可以看出,绿金和金蝉类的浸出剂对金的浸出率还是低于氰化钠,针对此矿石,选择氰化钠作浸出剂对金的浸出效果相对较好,且当氰化钠的用量高于 3 kg/t 后,继续增加药剂的用量,金的浸出率变化较小,综合考虑,氰化钠的单耗选择 3 kg/t 较适宜。

2.3.4 浸出时间试验

为考查浸出过程中浸出时间对金浸出的影响情况,开展了浸出时间条件试验,试验结果见图 15。

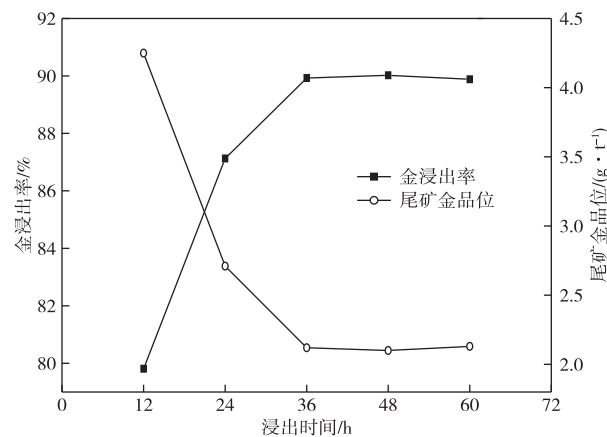


图 15 金浸出时间条件试验结果

Fig. 15 Results of gold leaching time tests

从图 15 可以看出,矿石的浸出速率相对较快,当浸出时间高于 36 h 后,金的浸出率基本趋于稳定,综合考虑,氰化浸出的时间选择 36 h 较适宜。

2.3.5 综合条件试验

金精矿采用“焙烧—水洗—氰化浸出”的工艺流程,在焙烧温度为 650 ℃、焙烧时间为 1.5 h、浸出液固比为 2 : 1、氰化钠单耗为 3 kg/t、浸出时间为 36 h、pH 值为 11 的条件下,开展了综合条件试验,试验结果见表 6。

表 6 金精矿综合条件试验结果

Table 6 Results of comprehensive conditions tests

产品名称	金品位 ¹⁾	金浸出率/%
氰化尾矿	2.12	89.93
给矿(金精矿)	21.05	

从表 6 可以看出,浮选金精矿采用“焙烧—水洗—氰化浸出”的工艺,金的浸出率可达 89.93%,从而使金得到较好的回收。

3 结论

1)该矿石属于高砷高硫难处理金矿石,有价元素主要为 Au,含量为 2.32 g/t;有害元素主要为 As,含量为 0.85%,石墨和有机碳的含量较少。矿石中的主要金属矿物为黄铁矿和毒砂,也是金的主要载体矿物。黄铁矿和毒砂多呈浸染状分布,大部分黄铁矿与脉石矿物紧密共生,被脉石矿物紧密包裹,使其充分解离的难度较大。

2)试验结果表明,矿石采用直接氰化工艺对金的浸出率极低,而采用浮选工艺,通过组合药剂的优化使用,对矿泥进行有效抑制、载金矿物的活化和捕收后,可获得金品位为 21.05 g/t、金回收率为 92.58%的金精矿,从而使矿石中的金得到较好的富集和回收。

3)浮选金精矿采用“焙烧—水洗—氰化浸出”工艺处理后,金的浸出率可达 89.93%,可有效解决金精矿品位低、有害元素含量高的问题,最终使矿石中的金得到有效回收。

参考文献

[1] 李俊萌. 难处理金矿石预处理工艺及其选择[J]. 有色金属(选矿部分),2002(5):16-23,11.
LI Junmeng. Pretreatment process and selection of refractory gold ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2002(5):16-23,11.
[2] 孙留根,袁朝新,王云,等. 难处理金矿提金的现状及发展趋势[J]. 有色金属(冶炼部分),2015(4):38-43.
SUN Liugen, YUAN Chaoxin, WANG Yun, et al. Status and development of gold extraction from

- refractory gold ore[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2015(4):38-43.
- [3] 张文杰,朱辉,谢贤,等. 某含硫高碳难处理金矿工艺研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2022(3):34-40.
ZHANG Wenjie, ZHU Hui, XIE Xian, et al. Study on the technology of a sulphur-containing high-carbon refractory gold mine[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2022(3):34-40.
- [4] 何晋勇. 广宁黄泥坑金矿金赋存状态及综合回收工艺[J]. 有色金属(选矿部分), 2022(1):7-13.
HE Jinyong. Study on gold occurrence and comprehensive recovery technology in Huangnikeng Gold Mine, Guangning[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2022(1):7-13.
- [5] 杜淑华,潘邦龙,夏亮,等. 某高硫含砷碳低品位难处理金矿选矿试验研究[J]. 金属矿山, 2020, 49(11):90-94.
DU Shuhua, PAN Banglong, XIA Liang, et al. Experimental study on beneficiation of arsenic/carbon-bearing refractory of low-grade gold ore containing high sulfur[J]. Metal Mine, 2020, 49(11):90-94.
- [6] 张建涛,程垚,陈帅,等. 脱除某难处理金矿中砷和硫的研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2014(5):12-16.
ZHANG Jiantao, CHENG Yao, CHEN Shuai, et al. Study on removal of arsenic and sulfur from refractory gold ore [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2014(5):12-16.
- [7] 王国强,罗思岗,胡杨甲,等. 选冶联合工艺综合回收金的试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2021(5):49-53.
WANG Guoqiang, LUO Sigang, HU Yangjia, et al. Experimental study on the comprehensive recovery of gold by the flotation and metallurgy[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2021(5):49-53.
- [8] 张伟晓,闫娟沙,张济文. 国外某含砷难处理金矿提金工艺试验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(4):56-59.
ZHANG Weixiao, LYU Juansha, ZHANG Jiwen. Technological test on abroad arsenic bearing refractory gold mine [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2019(4):56-59.
- [9] 赵艳宾,刘璇遥,于鸿宾,等. 某微细粒含砷含碳难处理金矿浮选试验研究[J]. 矿冶, 2019, 28(5):32-37.
ZHAO Yanbin, LIU Xuanyao, YU Hongbin, et al. Study on flotation test of a tiny refractory gold ore containing arsenic and carbon[J]. Mining and Metallurgy, 2019, 28(5):32-37.
- [10] 姜亚雄,黄丽娟,朱坤,等. 云南某复杂难处理金矿工艺指标优化试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2018(3):42-46.
JIANG Yaxiong, HUANG Lijuan, ZHU Kun, et al. Research on the technology and indicators optimizing of the refractory gold ore in Yunnan[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2018(3):42-46.
- [11] 王瑞祥,曾斌,余攀,等. 含多金属复杂金精矿焙烧预处理-提取金、银、铜研究[J]. 稀有金属, 2014, 38(1):86-92.
WANG Ruixiang, ZENG Bin, YU Pan, et al. Roasting pretreatment of poly-metallic and complex gold concentrate to extract gold, silver and copper [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2014, 38(1):86-92.
- [12] 贺秀珍,钟清慎,马玉天,等. 复杂金精矿矿物特性及焙烧预处理工艺研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2014(8):38-41.
HE Xiuzhen, ZHONG Qingshen, MA Yutian, et al. Study of mineral characteristics and roasting pretreatment technology of complex gold concentrate[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2014(8):38-41.

(本文编辑 刘水红)