

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2024.02.011

低品位金矿工艺矿物学特征和金回收

杨政国^{1,2}

(1. 紫金矿业集团股份有限公司, 福建 龙岩 364200;

2. 西藏巨龙铜业有限公司, 西藏 拉萨 857000)

摘 要: 云南某低品位金矿含 Au 0.69 g/t, 富集难度大。采用化学分析、XRD 分析、光学显微镜和扫描电镜等分析手段对该矿石进行了工艺矿物学特征分析, 并分别采用浮选、摇床重选和氰化浸出三种方法处理该金矿, 探索最佳处理工艺。结果表明, 该低品位金矿石 Au 品位为 0.69 g/t, 伴生有益元素银的品位低, 银不具有综合回收利用价值, 有害元素 As 含量较高(0.16%); 矿石主要结构构造为自形-半自形-它形粒状结构、斑状结构、微晶结构等结构构造; 矿石中主要硫化矿物为黄铁矿、黄铜矿、方铅矿和闪锌矿, 嵌布粒度较细, 其他主要脉石矿物为石英、方解石、绿泥石和高岭土等; 矿石中的金主要赋存在铜铅锌硫化矿物中, 嵌布粒度细, 且大部分以类质同象形式存在; 三种选别方法相比较, 浮选法的效果最好。在此基础上, 系统研究了工艺参数条件如磨矿细度、抑制剂、分散剂、活化剂和捕收剂等对金回收的影响, 并进行了开路和闭路试验。结果表明: 在磨矿细度—0.074 mm 占比 80.60%、水玻璃 1 000 g/t、石灰 1 000 g/t、硫酸铜 200 g/t、丁基黄药 100 g/t、丁基铵黑药 50 g/t、松醇油 30 g/t 的最佳工艺参数条件下, 采用一次粗选、三次精选、三次扫选的混合浮选工艺流程, 最终可获得金品位 17.70 g/t、金回收率 71.87% 的金精矿, 金回收效果好。

关键词: 低品位金矿; 浮选; 工艺矿物学; 摇床重选; 氰化浸出

中图分类号: TD952

文献标志码: A

文章编号: 1005-7854(2024)02-0225-10

Process mineralogy characteristics and gold recovery of low grade gold ore

YANG Zhengguo^{1,2}

(1. Zijin Mining Group Co. Ltd., Longyan 364200, Fujian, China;

2. Tibet Julong Copper Co. Ltd., Lhasa 857000, Tibet, China)

Abstract: A low-grade gold deposit in Yunnan contains Au 0.69 g/t, which is difficult to enrich. The process mineralogy characteristics of the ore were analyzed by means of chemical analysis, XRD analysis, optical microscope and scanning electron microscope. The gold mine was treated by flotation, shaking table gravity separation and cyanidation leaching respectively to explore the best treatment process. The results show that the grade of Au in the low-grade gold ore is 0.69 g/t, the grade of associated beneficial element silver is low, silver does not have comprehensive recycling value, and the content of harmful element As is high (0.16%). The main structure of the ore is a self-shaped-semi-self-shaped granular structure, porphyritic structure, microcrystalline structure, and other structural structures. The main sulfide minerals in the ore are pyrite, chalcopyrite, galenite and sphalerite, and the disseminated particle size is fine. Other main gangue minerals are quartz, calcite, chlorite and kaolin. The gold in the ore mainly occurs in copper-lead-zinc sulfide minerals, with fine disseminated particle size, and most of them exist in the form of isomorphism. Compared with the three separation methods, the flotation method has the best effect. On this basis, the effects of process parameters such as grinding fineness, inhibitors, dispersants, activators and collectors on gold recovery were systematically studied, and open-circuit and closed-circuit tests were carried out. The results show that under the optimum process parameters of grinding fineness of —0.074 mm accounting 80.60%, water glass of 1 000 g/t, lime of 1 000 g/t, copper sulfate of 200 g/t, butyl xanthate of 100 g/t, butyl ammonium aerofloat of 50 g/t and pine oil of 30 g/t, the gold concentrate with the grade of 17.70 g/t and gold recovery of 71.87% can be obtained by using the mixed flotation process of one roughing, three cleaning and three scavenging, besides the gold recovery effect is good.

Key words: low grade gold ore; flotation; process mineralogy; shaker reselection; cyanide leaching

收稿日期: 2023-08-22

作者简介: 杨政国, 学士, 助理工程师, 主要从事有色金属选矿技术研究。E-mail: 15695903010@163.com

当今世界黄金在经济发展中发挥着重要作用, 其生产和储备仍是衡量一个国家综合国力的重要标

志^[1]。随着金矿的大规模开采,矿石品质不断降低,易选冶的金矿资源日趋减少,导致后续回收难度增大。目前我国现已探明的黄金地质储量中有1/4属于难处理金矿资源,难处理金矿石已经成为黄金工业的主要资源^[2]。针对难处理金矿石的浮选回收工艺研究对我国黄金生产和储备具有重要意义。

目前对金矿的选别方式主要有重选法、浮选法和化学浸出法^[3]。本文以云南某低品位金矿为研究对象,通过对该矿进行工艺矿物学研究,探究该矿的工艺矿物学特征和金的赋存状态,并探索研究摇床重选、浮选和氰化浸出三种方法处理该矿的效果,寻找处理该矿的最佳工艺及工艺条件,为低品位金矿资源的开发和综合利用提供参考。

1 矿石性质

1.1 化学成分

原矿来源于云南某金矿床,主要化学成分见表1。其主要结构构造为自形-半自形-它形粒状结构、斑状结构、微晶结构等结构构造。原矿中,主要硫化矿物为黄铁矿、黄铜矿、方铅矿和闪锌矿,嵌布粒度较细,其他主要脉石矿物为石英、方解石、绿泥石和高岭土等。由表1可知,矿石中具有可回收利用价值的元素为Au,品位为0.69 g/t,伴生有益元素银品位低,银不具有综合回收利用价值,有害元素As含量为0.16%,采用浮选时可能会影响金精矿的质量^[4]。

表1 金矿石的主要化学成分

Table 1 Main chemical compositions of gold ore

/%

成分	Au ^①	Ag ^①	TFe	S	As	SiO ₂
含量	0.69	1.42	3.49	4.16	0.16	43.83
成分	MgO	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
含量	1.74	9.19	14.73	1.28	1.03	0.07

注:①单位为g/t。

1.2 矿石中金的嵌布特征

采用化学物相分析、磨制光薄片镜下观察、扫描电镜能谱分析和人工重砂分析等分析该金矿的物相和金的嵌布和赋存特征。结果显示,金主要赋存在硫化物中,占比高达79.71%,在闪锌矿中有明显富集现象,其次为黄铜矿,在黄铁矿中的较少。原矿中金的化学物相分析结果见表2,XRD分析结果如图1所示,显微镜分析结果如图2所示。

表2 原矿中金的化学物相分析结果

Table 2 Chemical phase analysis results of gold in raw ore

物相	含量/(g·t ⁻¹)	占有率/%
硅酸盐中的金	0.06	8.70
连生体金、单体自然金中金	0.02	2.90
铜铅锌硫化物中的金	0.51	73.91
碳酸盐中的金	0.04	5.80
氧化铁中的金	0.02	2.90
黄铁矿中的金	0.04	5.80
总金	0.69	100.0

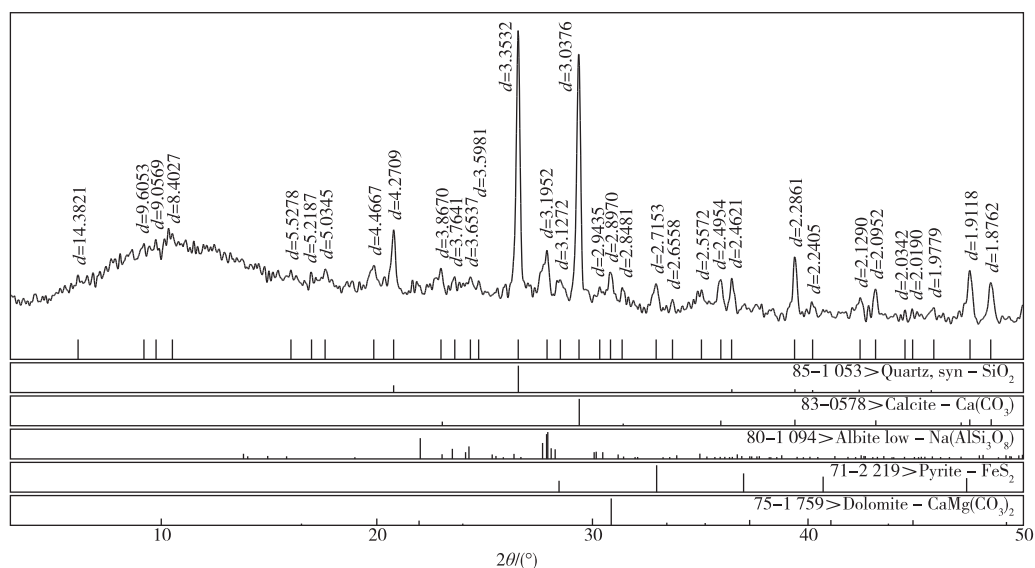


图1 金矿的XRD图谱

Fig. 1 XRD pattern of raw ore

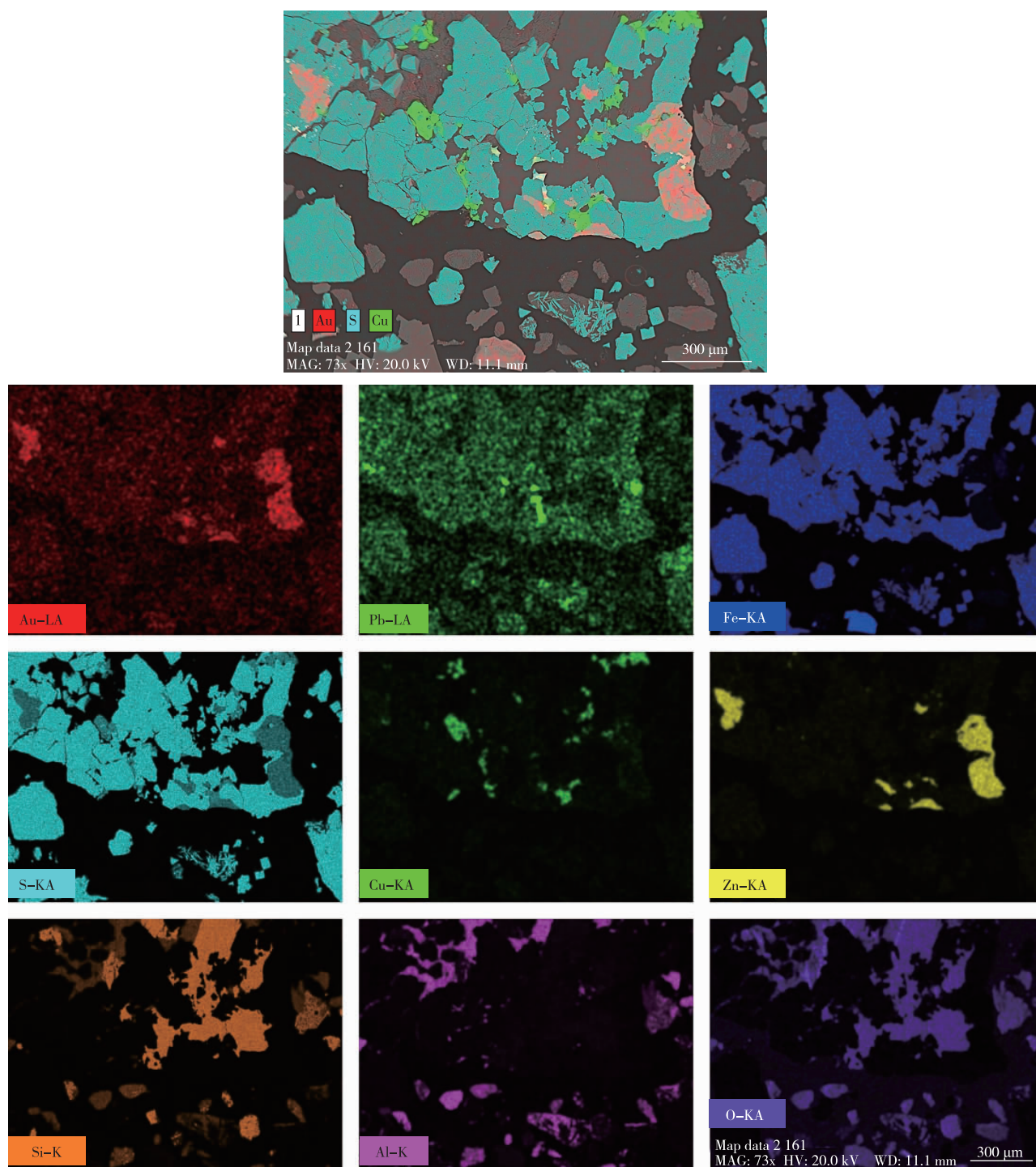


图2 金矿的光学显微镜照片和扫描电镜元素面分布照片

Fig. 2 Optical microscope photos and scanning electron microscope element distribution photos of gold ore

2 试验结果与讨论

2.1 低品位金矿处理工艺比较

2.1.1 浮选

由于矿样中的金主要赋存在铜铅锌硫化矿物

中，因此使用硫酸铜为活化剂活化硫化物，尽可能将硫化物浮出，同时进行精选作业，初步掌握金的回收情况和富集难易程度。但金在硫化矿物中的嵌布粒度较细，预计需要较细的磨矿细度^[5]。浮选探索试验流程见图3，结果见表3。

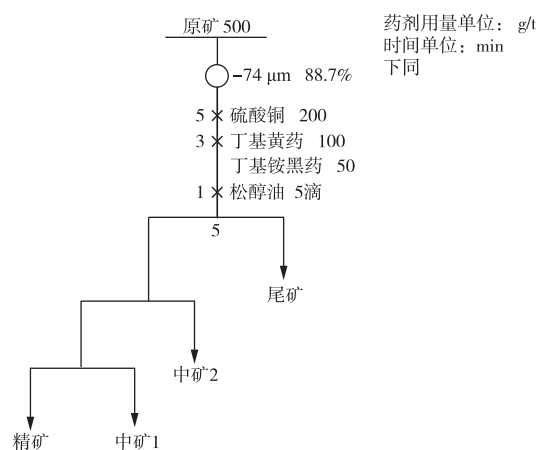


图3 浮选试验流程

Fig. 3 Flowsheet of flotation test

由表3可知，一次粗选金的回收率约74%，通过两次精选后可获得含金11.12 g/t的金精矿，

金的富集比较小，金精矿品位较低。

2.1.2 摇床重选

重选法选金具有无环境污染且成本低的好处^[6]。为此将原矿研磨至-0.074 mm占比76%，并对其开展摇床重选试验研究，试验流程见图4，结果见表4。

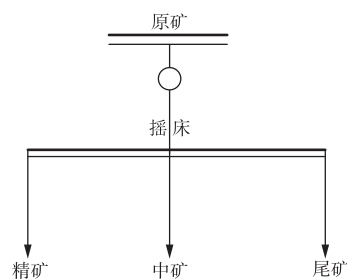


图4 摇床重选试验流程

Fig. 4 Flowsheet of gravity separation concentrate by shaker

表3 浮选试验探索性试验结果

Table 3 Results of exploratory test

产物	产率/%	品位/(g·t ⁻¹)	回收率/%
精矿	3.90	11.12	65.71
中矿1	1.72	1.12	2.92
中矿2	7.34	0.57	6.34
尾矿	87.04	0.19	25.03
原矿	100.0	0.66	100.0

表4 摇床重选探索性试验结果

Table 4 Results of gravity separation concentrate by shaker

产物	质量/g	产率/%	品位/(g·t ⁻¹)	回收率/%
精矿	38.8	7.76	5.27	60.14
中矿	112.4	22.48	0.34	11.24
尾矿	453.6	90.72	0.21	28.62
原矿	500.0	100.0	0.68	100.0

由表4可知，采用摇床重选产率大，但获得的精矿品位较低，仅有5.27 g/t，摇床重选对金的回收富集效果不明显。

2.1.3 氰化浸出

虽然氰化物有剧毒，但仍是目前最适合从矿石中提金的化学试剂^[7]。为此，设定浸出矿浆浓度为30%，pH值保持在11，氰化钠用量为1 kg/t，浸出时间为24 h，进行不同磨矿细度下的氰化浸出试验。试验流程见图5，试验结果见表5。

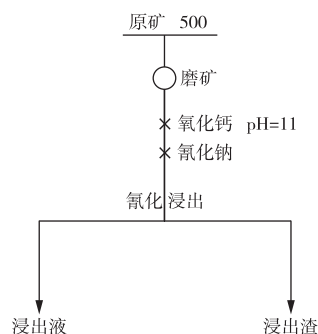


图5 氰化浸出试验流程

Fig 5 Flowsheet of cyanide leaching test

表 5 不同磨矿细度下氰化浸出试验结果
Table 5 Cyanide leaching results under different grinding fineness

磨矿细度 -0.074 mm 占比/%	浸渣金品位/ (g · t ⁻¹)	金浸出率/%
75	0.61	11.59
85	0.58	15.94
95	0.56	18.84

由表 5 可知, 当磨矿细度 -0.074 mm 占比为 75%~95% 时, 金浸出率均没有超过 20%, 说明采用氰化浸出工艺难以回收金。

对比上述三种处理工艺可以看出, 浮选法对金的选别效果最好, 因此, 采用浮选法处理该低品位金矿并系统研究浮选工艺参数条件对金回收的影响。

2.2 浮选工艺参数对金回收的影响

由于矿样中的金主要赋存在铜铅锌硫化矿物中, 而黄铁矿含金较少, 为了提高金精矿品位, 采用石灰作为黄铁矿抑制剂来降低精矿中黄铁矿含量。矿样中含有绿泥石、高岭土等易泥化矿物, 对原矿进行细磨容易导致矿浆含泥量大, 恶化金的富集效果, 采用添加水玻璃等分散剂方式降低矿泥的影响^[8]。混合用药往往有助于金的回收, 采用丁基黄药和丁基铵黑药混合捕收剂^[9]。磨矿过程发现, 原矿黏性较大, 所需磨矿浓度比一般矿石要低, 为此试验磨矿浓度设定为 50%。条件试验原则流程见图 6。

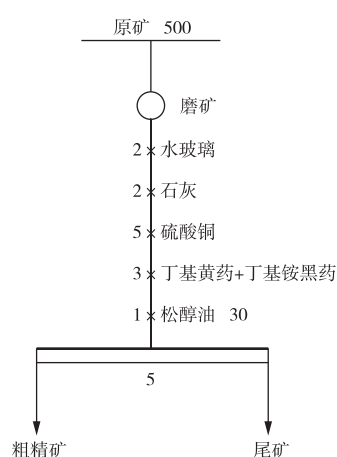


图 6 浮选条件试验原则流程

Fig. 6 Flowsheet of flotation condition test

2.2.1 磨矿细度的影响

磨矿可使目的矿物与脉石矿物充分分离, 但

又不能过磨, 过磨会造成矿浆泥化严重及不必要的能源消耗。由于目的矿物嵌布粒度细, 所以需要细磨才能使有用矿物单体解离^[10]。通过控制磨矿时间控制磨矿细度, 在基本流程和初始条件不变的条件下, 根据粗选精矿产品的品位及回收率确定最佳磨矿细度。固定石灰用量 1 000 g/t、水玻璃用量 500 g/t、硫酸铜用量 200 g/t、丁基铵黑药用量 50 g/t、丁基黄药用量 100 g/t、松醇油用量 30 g/t, 研究磨矿细度对金回收的影响。试验原则流程见图 6, 试验结果如图 7 所示。

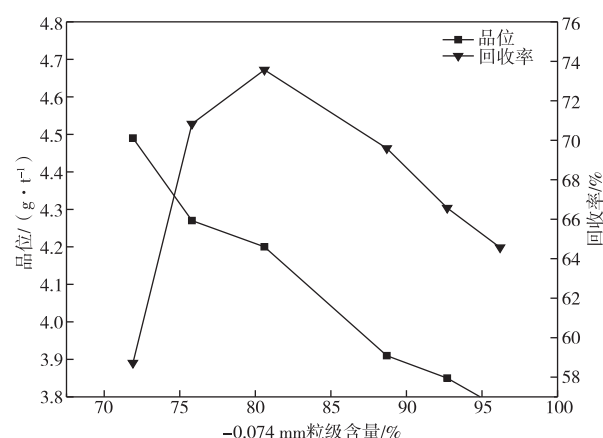


图 7 磨矿细度对金回收的影响

Fig. 7 Effects of grinding fineness on gold recovery

从图 7 可以看出, 随着磨矿细度的增加, 精矿品位逐渐降低, 回收率呈现先增加后降低的趋势。当磨矿细度 -0.074 mm 占比为 80.60% 时, 粗精矿金品位达到 4.2 g/t, 金回收率达到 73.57%。进一步增加磨矿细度, 精矿回收率和品位均明显下降, 这主要是因为磨矿时间过长, 矿泥含量的增加恶化了浮选指标^[11], 后续条件试验磨矿细度选择为 -0.074 mm 占比为 80.60%。

2.2.2 石灰用量的影响

抑制剂石灰用量对铜铅锌硫化矿的可浮性以及黄铁矿的抑制均有影响。通过添加石灰来降低产品中黄铁矿的含量, 从而进一步提高金精矿的品位。试验原则流程见图 6。设定磨矿细度 -0.074 mm 占比 80.60%, 固定水玻璃用量 500 g/t、硫酸铜用量 200 g/t、丁基铵黑药用量 50 g/t、丁基黄药用量 100 g/t、松醇油用量 30 g/t, 改变石灰用量, 研究石灰用量对金回收的影响, 试验结果如图 8 所示。

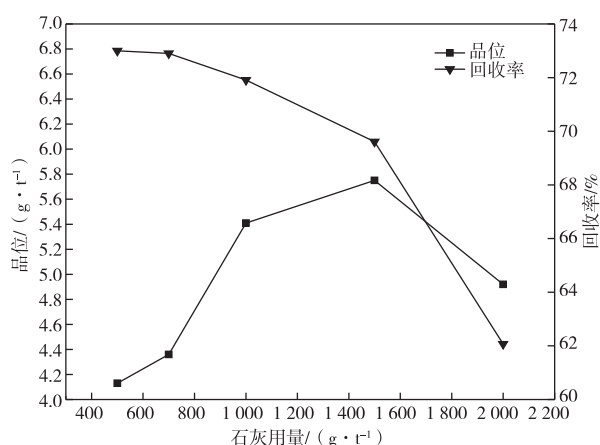


图8 石灰用量对金回收的影响

Fig. 8 Effects of lime consumption on gold recovery

从图8可以看出,随着石灰用量的增加,金粗精矿中的金品位有所提高,而金回收率下降明显,从73.00%下降至62.07%。为尽可能提高粗精矿金品位,同时确保较高的金回收率的情况下,将石灰用量确定为1500 g/t,此时对应的金粗精矿中金品位5.75 g/t,金回收率为69.61%。

2.2.3 水玻璃用量的影响

水玻璃是浮选金的分散剂,他的作用是为了阻止细矿粒聚集,使各矿物处于分散状态。由于矿样中含有绿泥石、高岭土等易泥化矿物,在磨矿过程中易造成矿泥含量增加,导致矿浆泥化,给金的富集造成困难。为此,通过添加水玻璃来降低矿泥的影响^[12]。试验流程原则见图6,设定磨矿细度-0.074 mm 占比80.60%,固定石灰用量1500 g/t、硫酸铜用量200 g/t、丁基铵黑药用量50 g/t、丁基黄药用量100 g/t、松醇油用量30 g/t,改变水玻璃用量,研究水玻璃用量对金回收的影响,试验结果如图9所示。

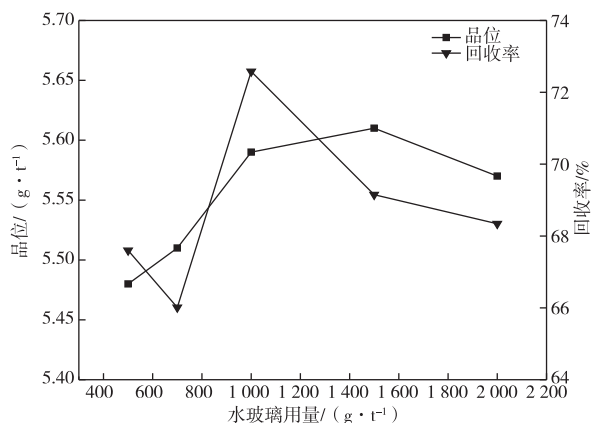


图9 水玻璃用量对金回收的影响

Fig. 9 Effects of water glass consumption on gold recovery

从图9可以看出,水玻璃对提高精矿品位有少许作用,对金的回收率影响较明显,当水玻璃用量为1000 g/t时浮选指标最好,此时粗选精矿品位达到5.59 g/t,回收率达到72.58%,后续试验选择分散剂水玻璃用量为1000 g/t。

2.2.4 硫酸铜用量的影响

硫酸铜是常用的硫化矿活化剂,常在使用黄药或者黑药作为捕收剂时发挥活化闪锌矿、黄铁矿的作用,通过铜离子与其表面金属离子交换吸附,提高表面的疏水性^[13,14]。设定磨矿细度-0.074 mm 占比80.60%,固定石灰用量1500 g/t、水玻璃用量1000 g/t、丁基铵黑药用量50 g/t、丁基黄药用量100 g/t、松醇油用量30 g/t,改变硫酸铜用量,研究硫酸铜用量对金回收的影响。试验原则流程见图6,试验结果如图10所示。

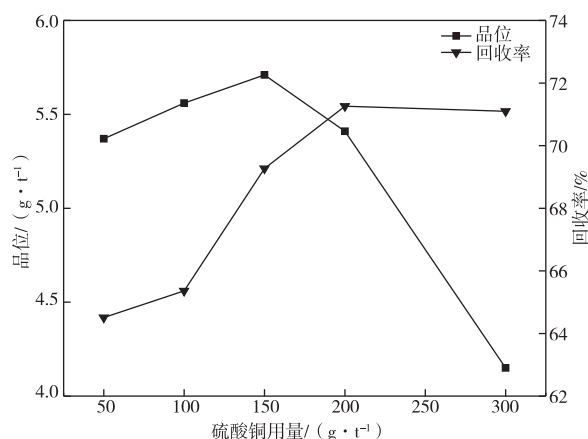


图10 硫酸铜用量对金回收的影响

Fig. 10 Effects of copper sulfate consumption on gold recovery

从图10可以看出,硫酸铜能够有效提高精矿的回收率,当其用量为200 g/t时,金回收率达到71.26%,金品位达到5.41 g/t,但继续增加硫酸铜用量,金品位迅速下降,因此,硫酸铜用量以200 g/t为宜。

2.2.5 捕收剂用量的影响

黄药和黑药是硫化矿浮选常用的捕收剂,其组合使用时效果往往更佳,试验采用丁基黄药和丁基铵黑药组合捕收剂,并研究药剂用量对金回收率的影响^[15]。设定磨矿细度-0.074 mm 占比为80.60%,固定石灰用量1500 g/t、水玻璃用量1000 g/t、硫酸铜用量200 g/t、松醇油用量30 g/t,仅改变丁基黄药和丁基铵黑药的用量,开展单因素条件试验。试验原则流程见图6,试验结

果如图 11 所示。

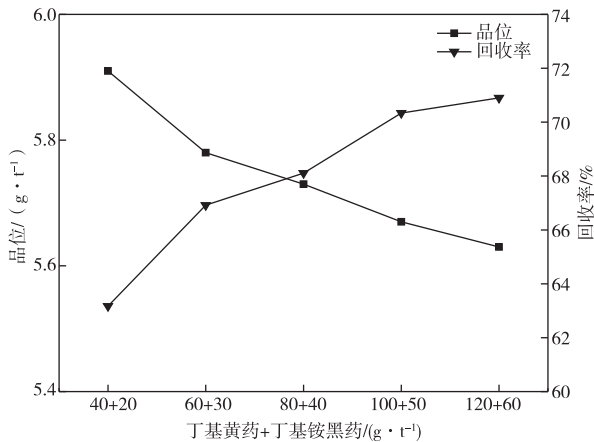


图 11 捕收剂用量对金回收的影响

Fig. 11 Effects of collector consumption on gold recovery

从图 11 可以看出,捕收剂用量的增加可以适当提高金的回收率,但也会增加精矿产率,从而降低精矿品位,当丁基黄药和丁基胺黑药用量分别为 100 g/t 和 50 g/t 时,对应粗选精矿品位达到 5.67 g/t,回收率达到 70.34%,综合浮选指标最佳,因此后续选择捕收剂组合用量为丁基黄药 100 g/t、丁基胺黑药 50 g/t。

2.2.6 煤油用量的影响

煤油在微细粒金矿浮选过程中往往具有较好的效果^[16]。为此考察煤油对浮选指标的影响,药剂添加地点方式为直接添加到球磨机。试验流程见图 12,试验结果如图 13 所示。

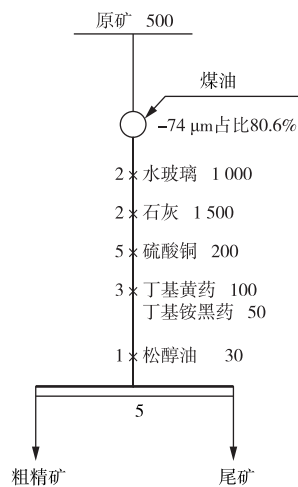


图 12 煤油用量条件试验流程

Fig. 12 Flowsheet of kerosene consumption condition test

从图 13 可以看出,随着煤油用量的增加,金的品位和回收率波动非常小,这样的波动主要是由

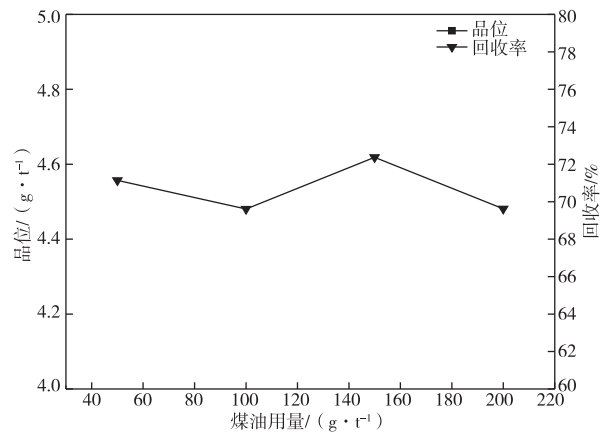


图 13 煤油用量对金回收的影响

Fig. 13 Effects of kerosene consumption on gold recovery

于产率变化引起的。因此,可以认为煤油对该矿样金的回收影响较小。

2.3 浮选开路试验及闭路试验

2.3.1 开路试验

根据单因素条件试验结果,在最优磨矿细度和药剂用量下,按照一次粗选、三次精选、四次扫选(“一粗三精四扫”)流程进行开路试验。开路试验流程见图 14,试验结果见表 6。

表 6 低品位金矿浮选开路流程试验结果

Table 6 The results of open circuit test

产物	产率/%	品位/(g·t ⁻¹)	回收率/%
精矿 ^a	2.26	20.2	63.41
中矿 1	0.62	4.3	3.70
中矿 2	0.78	3.79	4.11
中矿 3	1.92	1.65	4.40
中矿 4	1.98	3.21	8.83
中矿 5	2.04	0.88	2.49
中矿 6	1.60	0.28	0.62
中矿 7	1.42	0.13	0.26
尾矿 ^a	88.80	0.11	12.19
原矿 ^a	100.0	0.72	100.0

由表 6 可知,经过三次精选后,金精矿金品位达到 20.2 g/t,无需再增加精选次数,而且,第四次扫选精矿(中矿 7)中金的品位仅为 0.13 g/t,作业回收率也只有 0.26%,该作业不需要保留。为此,最终确定采用一次粗选、三次扫选、三次精选、中矿依次返回工艺流程开展闭路试验。

2.3.2 闭路试验

闭路试验流程及药剂制度见图 15,试验结果见表 7。由表 7 可知,原矿经“一粗三精三扫”流程得到了金精矿金品位 17.70 g/t,金回收率 71.87%,可实现对金的有效富集回收。

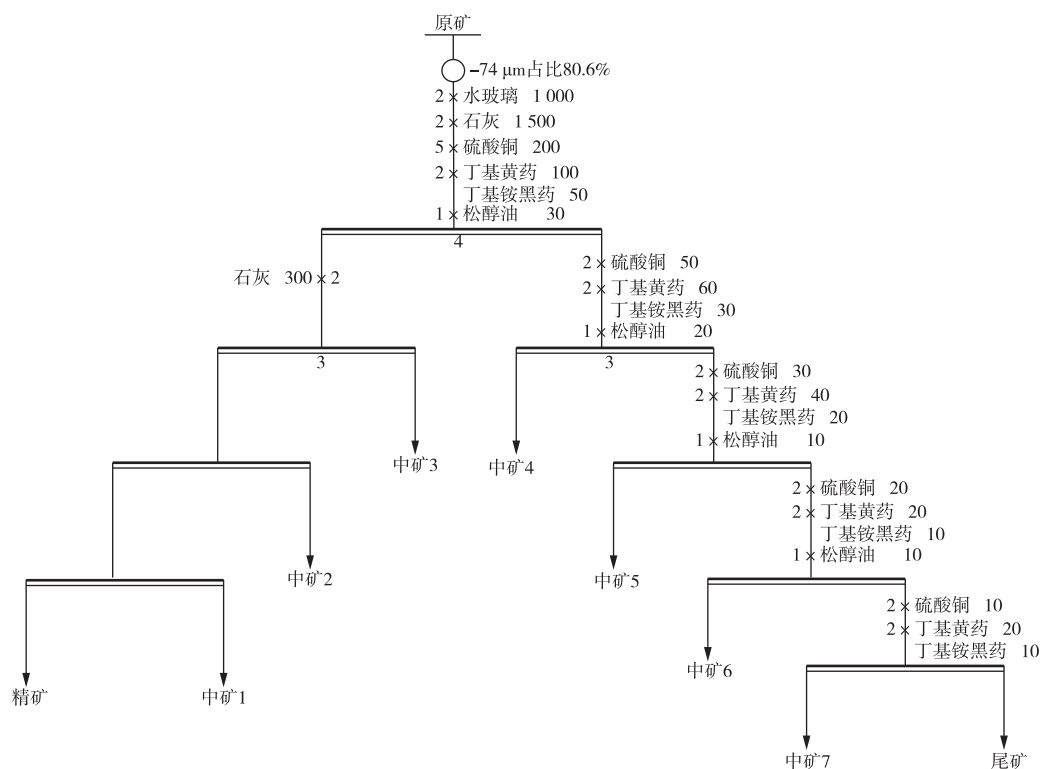


图 14 低品位金矿浮选开路试验流程

Fig. 14 Flowsheet of open circuit

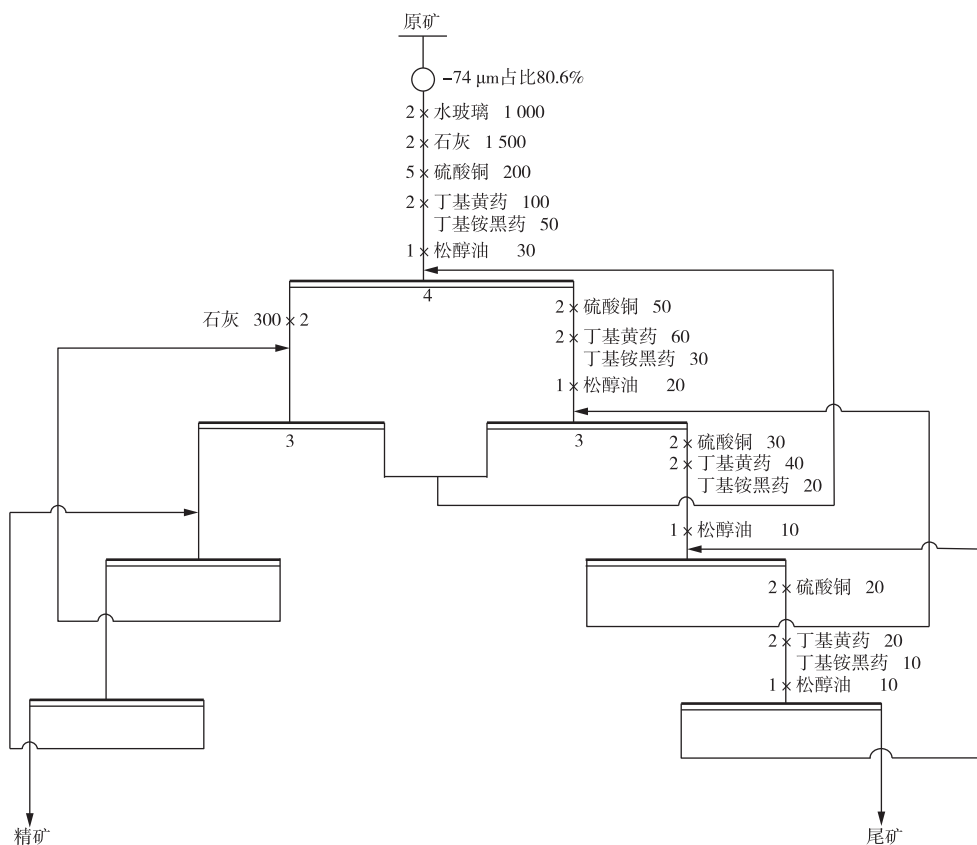


图 15 低品位金矿浮选闭路试验流程

Fig. 15 Flowsheet of closed circuit

表 7 闭路流程试验结果

Table 7 The results of closed circuit test

产物	产率/%	品位/(g·t ⁻¹)	回收率/%
精矿	2.68	17.70	71.87
尾矿	97.32	0.20	28.13
原矿	100.0	0.66	100.0

3 结论

1) 云南某低品位金矿原矿所含主要有用矿物为黄铁矿、黄铜矿、方铅矿和闪锌矿等硫化物，主要脉石矿物为石英和方解石。原矿中 69.23% 的金嵌布在铜铅锌硫化物中，且以类质同象的形式存在。

2) 浮选、重选以及氰化浸出三种方法相比较，浮选法最适宜处理该低品位金矿，浮选时将硫化矿物作为目的矿物进行金的选别作业。

3) 经一次粗选、三次精选、三次扫选的闭路流程，该低品位金矿可在磨矿细度—0.074 mm 占比 80.60% 时，以石灰为黄铁矿抑制剂、水玻璃为分散剂、硫酸铜为活化剂、丁基黄药+丁基铵黑药为组合捕收剂、松醇油为起泡剂进行浮选，闭路试验可获得含金 17.70 g/t、金回收率 71.87% 的金精矿，金回收效果较好。

参考文献

- [1] 闫刚. 某金矿石浮选与重选试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(12): 139-143.
YAN G. Experimental research on flotation and gravity separation of gold ore[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(12): 139-143.
- [2] 康建雄, 周跃, 吕中海, 等. 含砷金矿浮选研究现状与展望[J]. 四川有色金属, 2008(3): 2-5.
KANG J X, ZHOU Y, LV Z H, et al. The research situation and prospects of floatation of arsenic dcontaining gold dres [J]. Sichuan Nonferrous Metals, 2008(3): 2-5.
- [3] 罗政. 国外某金矿选矿工艺优化试验研究[J]. 现代矿业, 2021, 37(7): 107-111.
LUO Z. Study on optimization of mineral processing technology of a gold mine abroad [J]. Modern Mining, 2021, 37(7): 107-111.
- [4] 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 Y B, LIU X Y, YU H B, 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.

- [5] SMALL G, MICHELMORE A, GRANO S. Size dependent gold deportment in the products of copper flotation and methods to increase gold recovery[J]. The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2003, 103(9): 573-579.
- [6] CHEN Q, YANG H Y, TONG L L, et al. Research and application of a Knelson concentrator: A review [J/OL]. Minerals Engineering, 2020, 152: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106339>.
- [7] BAS A D, KOC E, YAZICY E Y, et al. Treatment of copper-rich gold ore by cyanide leaching, ammonia pretreatment and ammoniacal cyanide leaching[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(2): 597-607.
- [8] 赵开乐, 闫武, 杨伟卫, 等. 抑制剂 EMY-01 在高黏土型黄铁矿浮选分离中的应用[J]. 金属矿山, 2021(7): 130-134.
ZHAO K L, YAN W, YANG W W, et al. Application of inhibitor EMY-01 on flotation separation of high clay type pyrite[J]. Metal Mine, 2021(7): 130-134.
- [9] 魏明安, 孙传尧. 硫化铜、铅矿物浮选分离研究现状及发展趋势[J]. 矿冶, 2008, 17(2): 6-16.
WEI M A, SUN C Y. Review and development tendency of the copper and lead sulfides flotation separations [J]. Mining and Metallurgy, 2008, 17(2): 6-16.
- [10] 王鹏程, 王帅, 包玉玲. 低品位铜镍矿石高效分选及综合回收试验研究[J]. 有色金属工程, 2021, 12(10): 92-99.
WANG P C, WANG S, BAO Y L. Experimental research on comprehensive recovery and high-efficiency separation of low-grade copper-nickel ore[J]. Nonferrous Metals, 2021, 12(10): 92-99.
- [11] ZHANG P Y, OU L M, ZENG L M, et al. MLA-based sphalerite flotation optimization: two-stage roughing[J]. Powder Technology, 2019, 343: 586-594.

(下转第 270 页)

- [10] 张耀阳, 李存兄, 张兆闫, 等. 铜冶炼烟尘与污酸协同浸出体系中铜砷浸出行为[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(3): 856-863.
ZHANG Y Y, LI C X, ZHANG Z Y, et al. Leaching behavior of copper and arsenic in collaborative leaching system of copper-smelting dust and waste acid [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(3): 856-863.
- [11] 祁聪海, 邓志敢, 陈先友, 等. 湿法炼锌铜砷渣加压浸铜及同步固砷[J]. 有色金属工程, 2023, 13(9): 71-78.
QI C H, DENG Z G, CHEN X Y, et al. Pressure leaching of copper and synchronous solidifying arsenic from copper-arsenic precipitation in zinc hydrometallurgy [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(9): 71-78.
- [12] 张俊, 李存兄, 魏昶, 等. 铜冶炼含砷废水水热臭葱石沉砷及亚稳态铁物相转化行为[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(9): 2053-2062.
ZHANG J, LI C X, WEI C, et al. Hydrothermal scorodite precipitation and conversion behavior of metastable iron phase from wastewater produced in copper smelting [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(9): 2053-2062.
- [13] KRAUSE E, ETTEL V A. Solubilities and stabilities of ferric arsenate compounds[J]. Hydrometallurgy, 1989, 22(3): 311-337.
- [14] LIU W F, FU X X, YANG T Z, et al. Oxidation leaching of copper smelting dust by controlling potential [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(9): 1854-1861.

(上接第 233 页)

- [12] 米文杰, 吴凯, 黄杰, 等. 青海某低品位铜钼硫化矿浮选分离试验[J]. 金属矿山, 2022(6): 102-106.
MI W J, WU K, HUANG J, et al. Study on flotation separation of a low grade copper-molybdenum sulphide ore[J]. Metal Mine, 2022(6): 102-106.
- [13] 顾幅华, 王淀佐. 硫酸铜活化闪锌矿的电化学机理[J]. 中南工业大学学报(自然科学版), 1999(4): 374-377.
GU G H, WANG D Z. Electrochemical mechanism on cupric sulphate activating sphalerite[J]. Journal of Central South University of Technology (Natural Science), 1999(4): 374-377.
- [14] 赵华伦, 余成, 李兵容, 等. 难选氧化铜矿浸出-沉淀-载体浮选法试验研究[J]. 现代矿业, 2010, 26(1): 52-54.
- ZHAO H L, YU C, LI B R, et al. Experimental study on one kind of refractory copper oxide ore by L-P-CF process[J]. Modern Mining, 2010, 26(1): 52-54.
- [15] 解志锋, 艾光华, 严华山, 等. 某高铁铜硫矿石的选矿试验工艺研究[J]. 有色金属科学与工程, 2014, 5(5): 135-140.
XIE Z F, AI G H, YAN H S, et al. Mineral processing technology of a high iron-Cu-S ore [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2014, 5(5): 135-140.
- [16] LEE S, GIBSON C, BORSCHNECK A, et al. Transformer oil vs. kerosene: Selective collectors for C-matter flotation from a double refractory gold ore[J/OL]. Minerals Engineering, 2023, 191: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107951>.