

选矿工艺

某金矿快速浮选工艺试验研究

Experimental Study on Rapid Flotation Process of a Certain Gold Mine

王亚运, 康金星, 姜志学, 刘志国, 王鑫(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

摘要:本文以某金矿为研究对象,针对不同浮选工艺对有效回收金的问题,重点研究了快速浮选工艺和常规浮选工艺对有效回收金的影响。采用快速浮选工艺流程可获得金品位为 74.01 g/t、回收率为 87.12% 的快速浮选金精矿 1,和金品位为 81.42 g/t、回收率为 9.63% 的浮选金精矿 2,总精矿金品位为 74.69 g/t、金回收率 96.75%;采用常规浮选工艺流程可获得金品位为 80.06 g/t、回收率为 95.83% 的金精矿。快速浮选工艺有利于提高金的回收率,常规浮选工艺获得的金精矿品质较好。本研究对于有效回收金提供了不同的思路,提高了金回收率,该为同类型金矿有效开发回收提供重要技术支持。

关键词:金矿;快速浮选;常规浮选;有效回收

中图分类号: TD971 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2025)03-0083-08

Abstract: Taking a certain gold mine as the research object, this paper focuses on the impact of different flotation processes on the effective recovery of gold. The focus of this study is on the effects of rapid flotation processes and conventional flotation processes on the effective recovery of gold. By using the rapid flotation process, a gold grade of 74.01 g/t with a recovery rate of 87.12% can be obtained from the rapid flotation gold concentrate 1, and a gold grade of 81.42 g/t with a recovery rate of 9.63% can be obtained from the flotation gold concentrate 2. The total gold grade of the concentrate is 74.69 g/t with a gold recovery rate of 96.75%. By using the conventional flotation process, a gold concentrate with a gold grade of 80.06 g/t and a recovery rate of 95.83% can be obtained. This study provides different ideas for effective gold recovery, improves the gold recovery rate, and provides important technical support for the effective development and recovery of similar gold mines.

Key words: gold mines; rapid flotation; conventional flotation; effective recycling

1 前言

金资源是一种重要的战略资源,具有金融、货币、商品的属性。金广泛应用于通信、电子工业、仪器仪表制造、医疗、航天等行业,在经济发展中有着十分重要的作用^[1-3]。世界上金矿资源分布不均匀,主要分布在非洲、美洲和大洋洲。我国金矿资源规模较小,主要以中小型为主,金矿资源种类不多,近年来,随着金矿资源不断开发,低品位难处理金矿资源占比逐渐增大,因此,科学合理的选矿方法及工艺流程对金的回收尤为重要^[4-7]。金矿石回收工艺主要有重选、浮选、氰化浸出及其联合工艺等。其中,浮选是应用广泛且有效的金矿石回收工艺,通过捕收可浮性较好的载金矿物实现对金的回收^[8-10]。

本文以山东某金矿为研究对象,通过研究磨矿细度、调整剂种类及用量、捕收剂种类及用量、浮选时间等对金回收的影响,重点考察快速浮选工艺与常规浮选工艺的选别指标。

2 矿石性质

该金矿矿样化学多元素分析结果见表 1,金物相分析结果见表 2。

由表 1 可知,矿石中金含量为 3.78 g/t,为主要回收有价金属,银含量为 4.01 g/t,为伴生回收有价金属,其他有价金属元素因含量较低,综合利用的价值不大。杂质组分主要为 SiO₂ 和 Al₂O₃。由表 2 可知,金主要以裸露金的形式存在,其次是硫化物包裹金,二者合计分布率达 96.56%,硅酸盐包裹金占比为 3.44%。

矿石的矿物组成及相对含量见表 3。

由表 3 可知,矿石中金属硫化矿物为黄铁矿。脉石矿物主要为石英、云母、长石等,少量方解石、绿泥石、白云石等。

[作者简介] 王亚运(1990—),男,山东菏泽人,高级工程师,从事有色金属选矿技术研究工作。

[引用格式] 王亚运,康金星,姜志学,等.某金矿快速浮选工艺试验研究[J].中国矿山工程,2025,54(3):83-90.

表1 矿样化学多元素结果

元素	Au*	Ag*	S	Fe	Cu	Pb	Zn	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	C
含量/%	3.78	4.01	1.94	2.51	0.035	0.031	0.032	58.59	15.76	4.62	0.98	5.57	3.22	0.25

注*: Au、Ag单位为g/t。

表2 矿石中金的化学物相分析结果

相别	裸露金	硫化物包裹金	硅酸盐包裹金	合计
金含量/g·t ⁻¹	3.45	0.20	0.13	3.78
分布率/%	91.27	5.29	3.44	100.00

表3 矿石的矿物组成及相对含量

矿物名称	含量/%	矿物名称	含量/%
黄铁矿	3.55	钠长石	15.80
黄铜矿	0.10	方解石	1.71
方铅矿	0.03	白云石	0.50
闪锌矿	0.04	绿泥石	0.46
磁铁矿	0.65	金红石	0.10
石英	33.10	锆石	0.09
白云母	23.40	重晶石	0.06
正长石	20.10	其它	0.31
		合计	100.00

表4 2~0 mm综合样中可见金矿物的产出状态统计结果

产出状态	共生矿物	占有率/%	回收特性	
单体	—	13.15		
毗邻连生、裂隙或粒间	与黄铁矿连生	19.33	33.20	
	与方铅矿连生	0.72		
	与硫化物连生	黄铁矿孔隙和裂隙	30.77	
	黄铁矿与黄铜矿粒间	6.69	47.85	
	黄铁矿与石英粒间	10.39		
与脉石连生	与石英连生	0.88	3.43	
	与长石连生	0.78		
	与白云母连生	1.77		
包裹	硫化物包裹	黄铁矿包裹	12.90	
	脉石包裹	石英包裹	1.29	
	长石包裹	1.33	2.62	
合计	—	100.00	100.00	

锑银矿虽然与脉石矿物共生较为密切,但大部分嵌布于脉石裂隙或孔隙,磨矿时大部分可单体解离而进入浮选精矿。碲银矿与黄铁矿共生关系较为密切,主要呈微细粒与黄铁矿连生或包裹于其中。锑银矿及碲银矿嵌布粒度均较细,通常小于0.015 mm,碲银矿粒度稍粗锑银矿。

从表4统计结果可知,矿石中易浮金的占有率为93.95%,易浸金的占有率为84.48%。不易浮选或难浮金主要指与石英、长石、云母等连生或包裹于其中的金矿物。不易浸出或难浸金主要指包裹于黄铁矿或脉石矿物中的金矿物。

通过显微镜及扫描电镜考查,矿石中可见金矿物主要为银金矿,矿石中金矿物粒度以细粒和微粒为主,其次为中粒,有时可见粗粒金,金矿物的粒度分布矿石中重要矿物的粒度特性。矿石中黄铁矿是金的主要载体矿物,金矿物主要嵌布于黄铁矿裂隙或孔隙,其次嵌布于黄铁矿粒间或黄铁矿与黄铜矿、石英、钾长石等矿物粒间,具体如图1所示。

矿石中银矿物主要为锑银矿,其次为碲银矿。锑银矿部分呈细粒、微粒单体产出,单体解离度为30.30%,其次与长石、石英、云母等脉石矿物连生或包裹于其中产出,少量与黄铁矿连生或包裹于其中。

黄铁矿是矿石中最主要的硫化矿物,也是金的主要载体矿物,黄铁矿中金主要以裂隙金、孔隙金或粒间金形式产出(图2),少量以包裹金形式存在。黄铁矿主要呈自形-半自形晶粒状或粒状集合体产出,在矿石中多呈团块状、脉状或浸染状分布于石英、长石、云母等脉石矿物粒间,粒度整体较粗,少量

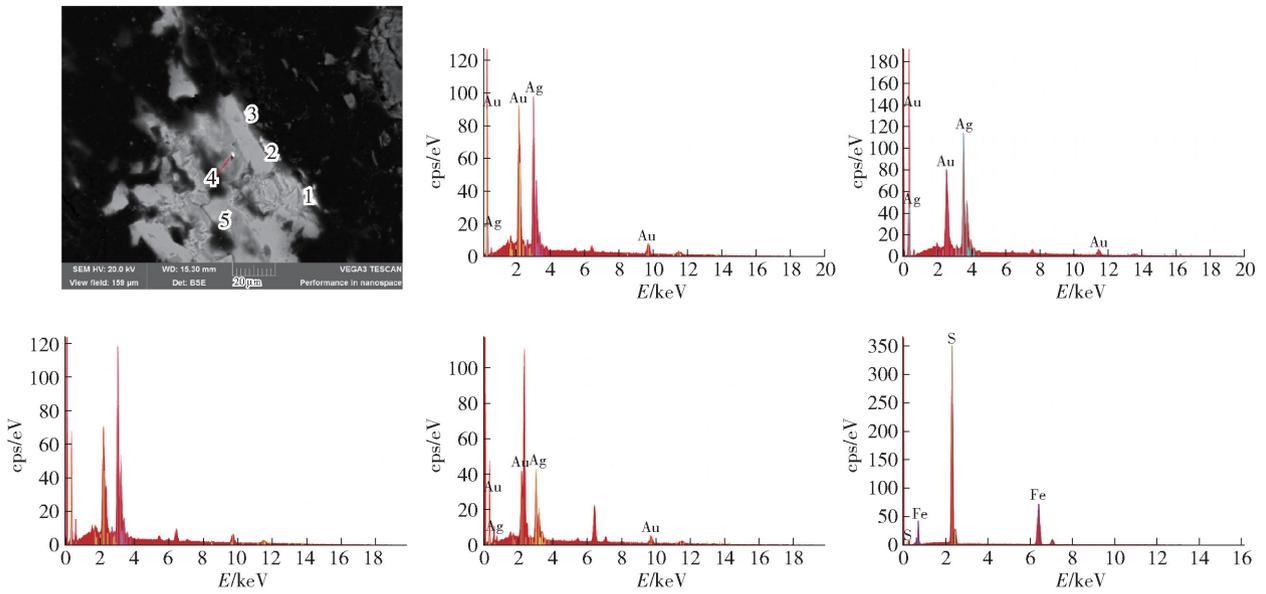


图1 金银矿(1,2,3)及银金矿(4)与黄铁矿(5)连生背散射电子及X射线能谱图

呈细粒或微粒包裹于石英、长石及云母中。黄铁矿与其他硫化矿物的共伴生关系均不甚密切,有时可见黄铁矿与黄铜矿、磁黄铁矿呈简单的毗邻或包裹关系产出。偶尔可见与闪锌矿、方铅矿共生在一起。黄铁矿嵌布粒度以粗、中粒为主,较集中分布于0.03 ~ 1.0 mm。

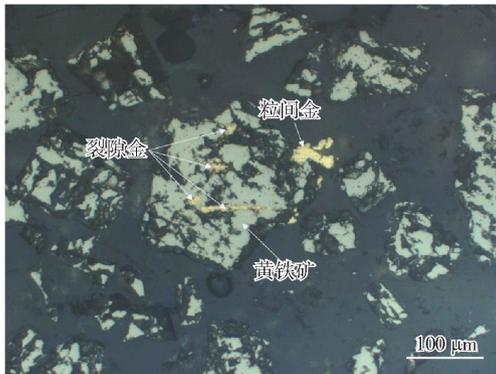


图2 金银矿呈中细粒嵌布于黄铁矿裂隙及粒间显微镜反光

3 试验结果与讨论

3.1 磨矿细度试验

以丁基黄药为捕收剂,2号油为起泡剂,进行磨矿细度试验,考察磨矿细度对金回收的影响。试验流程如图3所示,结果如图4所示。

试验结果表明,随着磨矿细度的增加,精矿中金的回收率均逐渐增加,当磨矿细度超过-0.074 mm占60%后,精矿中金回收率变化较小。因此,选择

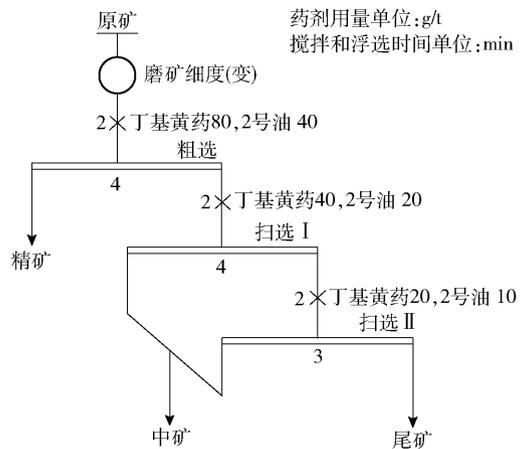


图3 磨矿细度试验流程

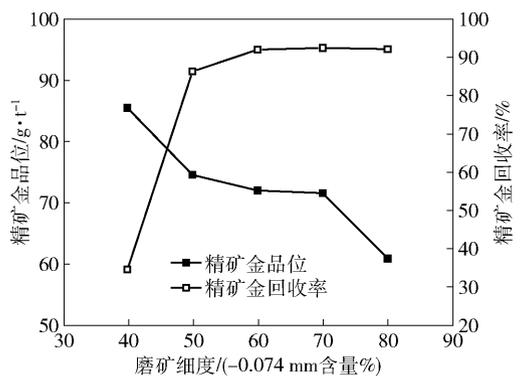


图4 磨矿细度试验结果

磨矿细度以-0.074 mm占60%。

3.2 调整剂种类试验

采用-0.074 mm占60%的磨矿细度,以丁基

黄药为捕收剂,2号油为起泡剂,进行粗选调整剂种类试验,考察调整剂种类对金回收的影响。试验流程如图5所示,结果如图6所示。

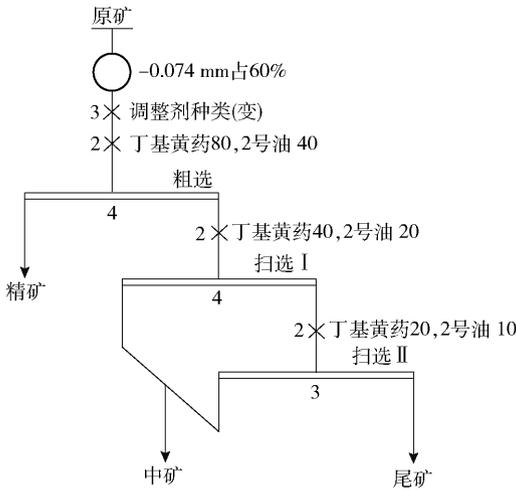


图5 调整剂种类试验流程

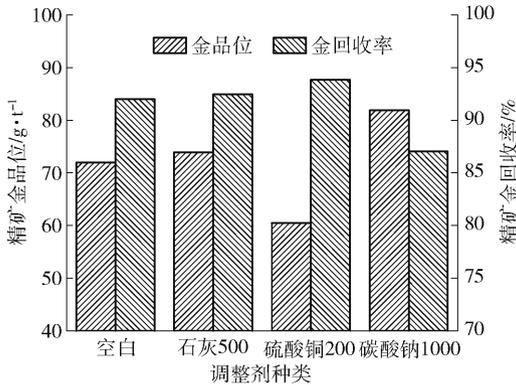


图6 调整剂种类试验结果

试验结果表明,添加适量的硫酸铜,可提高粗精矿中金的回收率。添加硫酸铜后,粗精矿品位从72 g/t降低至60 g/t,通过精选,精矿品位是可以满足销售需求的。因此,建议粗选作业添加硫酸铜。

3.3 调整剂用量试验

采用-0.074 mm占60%的磨矿细度,以硫酸铜为调整剂,以丁基黄药为捕收剂,2号油为起泡剂,进行粗选调整剂用量试验。试验流程如图7所示,结果如图8所示。

试验结果表明,随硫酸铜用量的增加,精矿中金的回收率逐渐增加,当硫酸铜用量超过200 g/t时,精矿中金的回收率变化不显著。因此,选择硫酸铜用量为200 g/t。

3.4 捕收剂种类试验

采用-0.074 mm占60%的磨矿细度,以硫酸

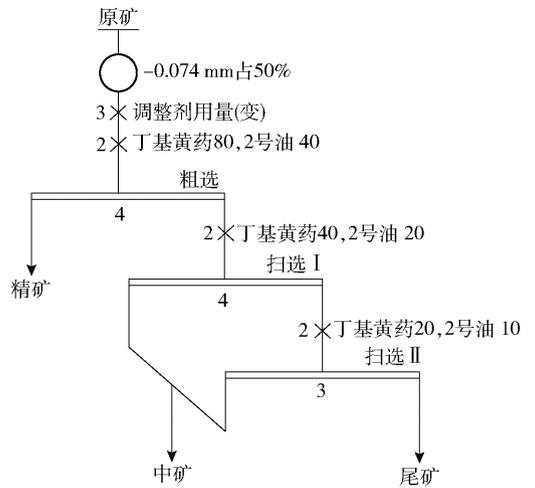


图7 调整剂用量试验流程

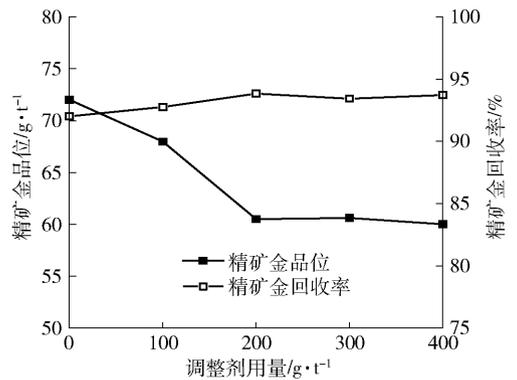


图8 调整剂用量试验结果

铜为调整剂,2号油为起泡剂,进行捕收剂种类试验。试验流程如图9所示,结果如图10所示。

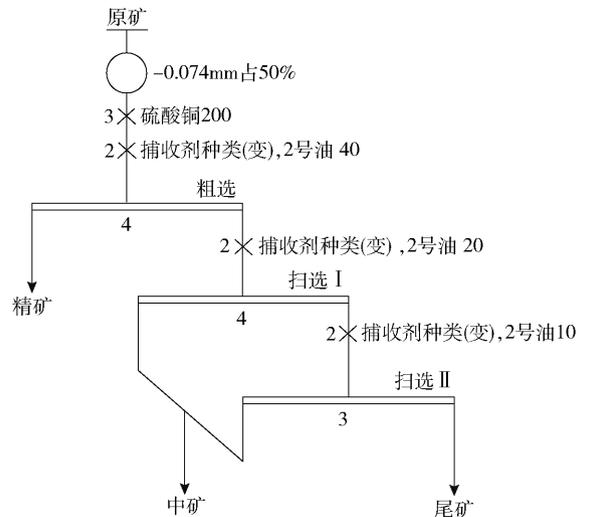


图9 捕收剂种类试验流程

试验结果表明,捕收剂为丁基黄药加丁铵黑药组合药剂时,精矿中金的回收率较高,此时精矿中金

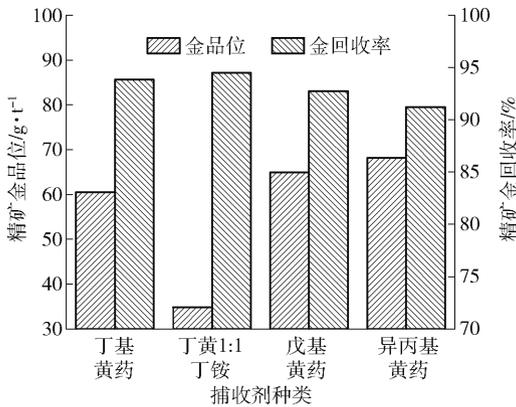


图10 捕收剂种类试验结果

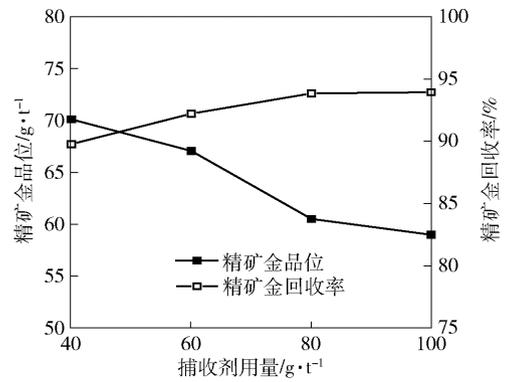


图12 捕收剂用量试验结果

品位较低;捕收剂为丁基黄药时,精矿金回收率与丁基黄药加丁铵黑药组合药剂时精矿的回收率差别不显著,此时,精矿金品位较高,综合考虑,选择药剂种类简单的丁基黄药为捕收剂。

3.5 捕收剂用量试验

采用-0.074 mm 占60%的磨矿细度,以硫酸铜为调整剂,丁基黄药为捕收剂,2号油为起泡剂,进行捕收剂用量试验。试验流程如图11所示,结果如图12所示。

结果见表5。

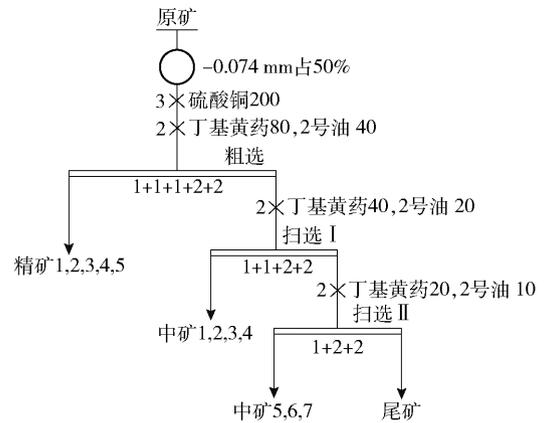


图13 浮选时间试验流程

表5 浮选时间试验结果

产品名称	产率/%	金品位/g·t ⁻¹	金回收率/%	金累积回收率/%
精矿 1	4.47	74.05	88.58	88.58
精矿 2	0.67	23.35	4.18	92.76
精矿 3	0.32	11.60	0.98	93.74
精矿 4	0.48	5.73	0.74	94.48
精矿 5	0.44	3.99	0.47	94.95
中矿 1	0.45	6.02	0.73	95.68
中矿 2	0.31	4.02	0.33	96.01
中矿 3	0.43	3.04	0.35	96.36
中矿 4	0.37	2.38	0.24	96.60
中矿 5	0.23	2.03	0.12	96.72
中矿 6	0.40	1.89	0.20	96.92
中矿 7	0.36	1.52	0.15	97.07
尾矿	91.07	0.12	2.93	100.00
原矿	100.00	3.73	100.00	

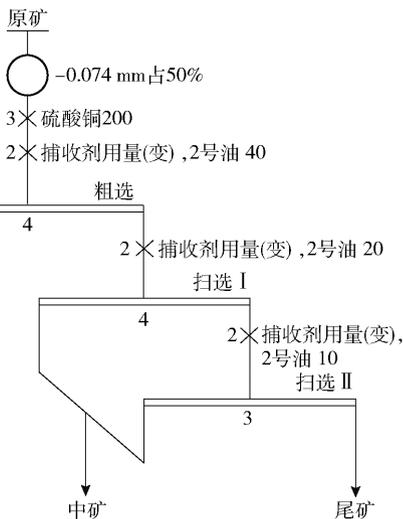


图11 捕收剂用量试验流程

试验结果表明,随着捕收剂用量的增加,精矿中金的回收率均逐渐增加,当捕收剂用量大于80 g/t时,精矿中金的回收率变化较小。因此,选择捕收剂用量为80 g/t。

3.6 浮选时间试验

采用-0.074 mm 占60%的磨矿细度,以硫酸铜为调整剂,丁基黄药为捕收剂,2号油为起泡剂,进行粗扫选浮选时间试验。试验流程如图13所示,

试验结果表明,粗选第1分钟的金回收率为

88.58%，第1分钟的回收率较高，具有快速浮选的可能性，后续分别进行快速浮选工艺和常规浮选工艺进行对比。根据浮选时间试验结果，常规浮选粗扫选的时间宜采用5+4+3 min，共计12 min即可。

3.7 精选条件试验

采用-0.074 mm占50%的磨矿细度，以硫酸铜为调整剂，丁基黄药为捕收剂，2号油为起泡剂，进行精选条件试验。试验流程如图14所示，结果见表6。

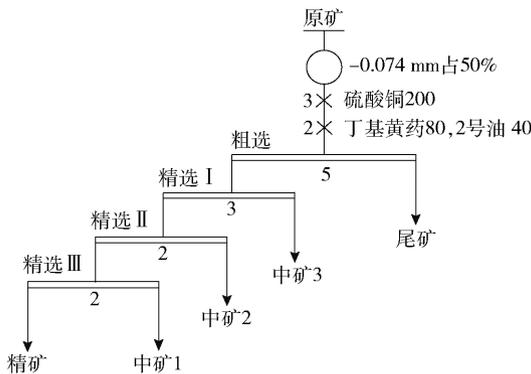


图14 精选条件试验流程

表6 精选条件试验结果

精选次数	产品名称	产率/%	金品位/g·t ⁻¹	金回收率/%
一次	精矿	3.92	86.57	89.91
	中矿3	1.98	8.26	4.35
	尾矿	94.10	0.23	5.74
	原矿	100.00	3.77	100.00
两次	精矿	3.13	98.10	81.28
	中矿2	0.79	2.24	8.63
	中矿3	1.98	0.64	4.35
	尾矿	94.10	0.23	5.74
三次	原矿	100.00	3.77	100.00
	精矿	2.49	102.65	67.71
	中矿1	0.64	80.34	13.57
	中矿2	0.79	41.10	8.63
	中矿3	1.98	8.26	4.35
	尾矿	94.10	0.23	5.74

试验结果表明，增加精选次数有利于提高精矿中金品位，由精选一次增加至精选两次，精矿金品位由86.57 g/t增加至98.10 g/t；由精选两次增加至精选三次，精矿金品位由98.10 g/t增加至102.65 g/t。通过两次精选，金精矿品位有较大提升，第三次精选

金精矿品位提升不明显，金精矿的回收率降低较多，因此，选取粗精矿精选次数为两次。

3.8 全流程闭路试验

1) 快速浮选全流程闭路试验

浮选时间试验结果表明，浮选第1分钟的金粗精矿品位为74.05 g/t，回收率为88.58%，考虑将第1分钟泡沫作为快速浮选精矿，因此，开展快速浮选流程试验，磨矿细度为-0.074 mm占60%，硫酸铜为调整剂，丁基黄药为捕收剂，2号油为起泡剂，浮选浓度为30.5%，试验流程如图15所示，试验结果见表7。

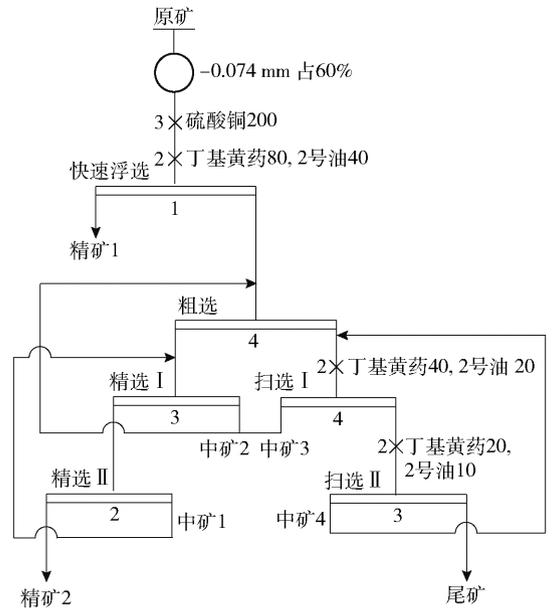


图15 快速浮选闭路试验流程

表7 快速浮选闭路试验结果

产品名称	产率/%	品位/g·t ⁻¹		回收率/%	
		金	银	金	银
金精矿1	4.48	74.01	71.52	87.12	77.98
金精矿2	0.45	81.42	80.67	9.63	8.83
总精矿	4.93	74.69	72.36	96.75	86.81
尾矿	95.07	0.13	0.57	3.25	13.19
原矿	100.00	3.81	4.11	100.00	100.00

快速浮选全流程闭路试验结果表明，该金矿采用快速浮选工艺流程可获得金品位为74.01 g/t、回收率为87.12%，银品位为71.52 g/t、回收率为77.98%的快速浮选金精矿1，和金品位为81.42 g/t、回收率为9.63%，银品位为80.67 g/t、回收率为8.83%的浮选金精矿2。总精矿金品位为

74.69 g/t、金回收率 96.75%，银品位 72.36 g/t、银回收率 86.81%。

2) 常规浮选全流程闭路试验

在磨矿细度为 -0.074 mm 占 60% 的条件下,采用硫酸铜为调整剂,丁基黄药为捕收剂,2号油为起泡剂,开展全流程闭路试验,浮选浓度为 30.5% 的全流程闭路试验流程如图 16 所示,结果见表 8。

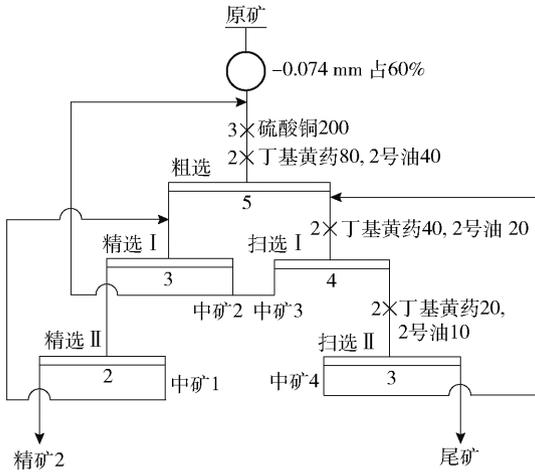


图 16 常规浮选闭路试验流程

表 8 常规浮选闭路试验结果

产品名称	产率/%	品位/g·t ⁻¹		回收率/%	
		金	银	金	银
精矿	4.39	80.06	80.29	95.83	85.80
尾矿	95.61	0.16	0.61	4.17	14.20
原矿	100.00	3.67	4.11	100.00	100.00

常规浮选闭路试验结果表明,采用“一粗、两扫、两精”的浮选工艺流程可获得金品位为 80.06 g/t、回收率为 95.83%,银品位为 80.29 g/t、回收率为 85.80% 的金精矿。

综合比较快速浮选工艺流程和常规浮选工艺流程,快速浮选流程获得的金精矿品位有一定程度降低,回收率有一定程度提升。如果可以接受精矿品位适当降低,则可以采用快速浮选流程产出品;如要求较高的精矿品位,则采用常规浮选流程。可根据实际情况选择不同的工艺流程。

3.9 回水比例试验

收集全流程闭路试验尾矿的滤液,静置 24 h,分别按 60%, 80%, 100% 的回水比例配制成试验用水,用于磨矿及粗、扫选作业进行回水试验,考察回水对浮选指标的影响。试验流程如图 17 所示,试验结果见表 9。

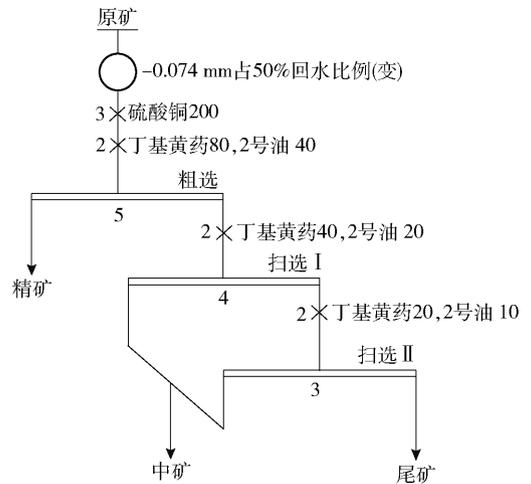


图 17 浮选回水试验流程

表 9 浮选回水试验结果

回水比例/%	产品名称	产率/%	金品位/g·t ⁻¹	金回收率/%
0	精矿	5.80	60.51	93.84
	中矿	1.35	8.80	3.18
	尾矿	92.85	0.12	2.98
60	原矿	100.00	3.74	100.00
	精矿	6.59	52.50	93.41
	中矿	3.01	4.50	3.66
80	尾矿	90.40	0.12	2.93
	原矿	100.00	3.70	100.00
	精矿	6.89	50.08	93.96
100	中矿	2.67	4.25	3.09
	尾矿	90.44	0.12	2.95
	原矿	100.00	3.67	100.00
100	精矿	6.94	49.90	93.97
	中矿	2.63	4.32	3.08
	尾矿	90.43	0.12	2.95
100	原矿	100.00	3.68	100.00

试验结果表明,随着回水所占比例的增加,精矿中金的回收率基本没有变化,说明在试验室条件下,回水对浮选指标无显著影响。

4 产品镜下检查

4.1 浮选精矿

快速浮选精矿 1 和精矿 2 中金矿物均以银金矿为主,其次为金银矿及自然金。金矿物主要以单体形式或以黄铁矿为载体产出,其次与方铅矿或黄铜矿等硫化矿物连生产出,有时可见与脉石连生产出。

浮选金精矿中黄铁矿主要呈中、细粒单体产出,粒度多小于0.15 mm,单体解离充分,有时与黄铜矿、方铅矿或闪锌矿等连生,有时与脉石连生。金精矿中金矿物、硫化矿物及脉石矿物的产出形式如图18、图19所示。

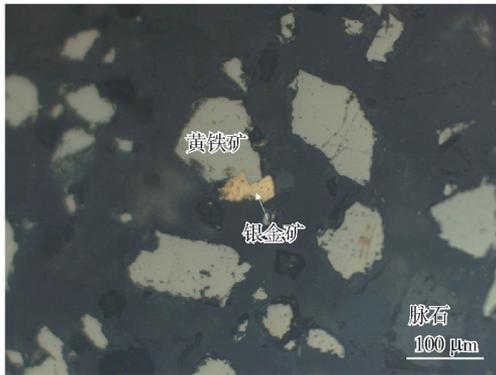


图18 银金矿与黄铁矿连生产出显微镜反光

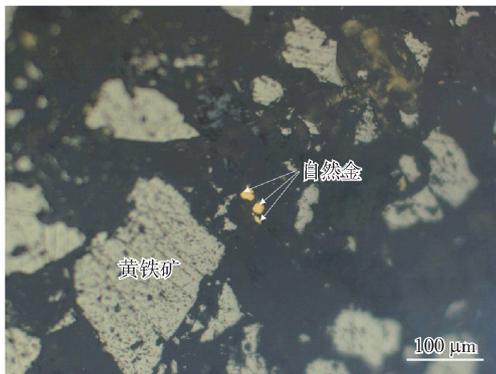


图19 自然金呈细粒单体产出显微镜反光

4.2 浮选尾矿

浮选尾矿中金矿物主要与脉石呈贫连生体或包裹于脉石中产出,少量随载体矿物黄铁矿等硫化矿物而损失,因此,尾矿中金的损失是合理的。尾矿中黄铁矿、黄铜矿、方铅矿等硫化矿物主要呈微细粒与脉石矿物呈贫连生体形式损失。尾矿中金矿物及硫化矿物的产出形式如图20所示。

5 结论

(1) 矿石中金含量为3.78 g/t,为主要回收有价金属,银含量为4.01 g/t,为伴生回收有价金属,其他有价金属元素因含量较低,综合利用的价值不大。矿石中金属硫化矿物为黄铁矿,脉石矿物主要为石英、云母、长石等。

(2) 金主要以裸露金的形式存在,其次是硫化物包裹金,二者合计分布率达96.56%,硅酸盐包裹

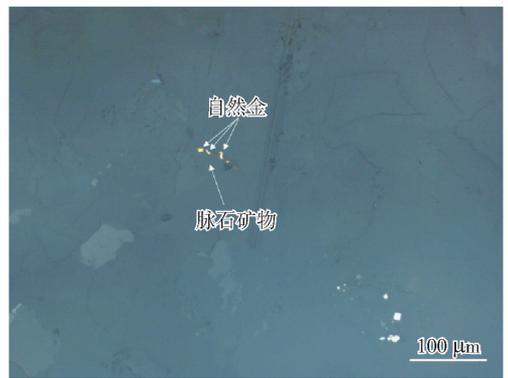


图20 自然金与脉石呈贫连生体产出显微镜反光

金占比为3.44%。

(3) 采用快速浮选工艺流程可获得金品位为74.01 g/t、回收率为87.12%快速浮选金精矿1,和金品位为81.42 g/t、回收率为9.63%浮选金精矿2,总精矿金品位为74.69 g/t、金回收率96.75%;采用常规浮选工艺流程可获得金品位为80.06 g/t、回收率为95.83%的金精矿。快速浮选工艺有利于提高金的回收率,常规浮选工艺获得的金精矿品质较好,可根据实际情况选择较为有利的浮选工艺流程。

[参考文献]

- [1] 张福良,方一平,李晓宇,等.新时期我国黄金资源战略价值浅析[J].中国矿业,2016,25(增刊1):1-4.
- [2] 王成龙,王士强,洪涛,等.我国金矿资源现状及其可持续发展研究[J].中国矿山工程,2017,12(6):42-45.
- [3] 倪曦,白海铃.中国金矿资源特征及成矿规律概要[J].找矿技术,2021(10):60-61.
- [4] 冯丹丹.2017年度全球黄金资源供需形势分析[J].矿产保护与利用,2019(1):150-154.
- [5] 许文力.浅谈我国金矿资源现状[J].世界有色金属,2017(9):134-135.
- [6] 邱曼,黄学雄,毛益林,等.我国金矿资源概况及选冶技术研究进展[J].矿产综合利用,2023(2):106-115.
- [7] 唐浪峰,陈晓芳,梁治安,等.某金矿快速浮选工艺与重-浮联合工艺对比试验研究[J].有色金属(选矿部分),2023(3):94-100.
- [8] 崔学奇,张耀军,吕宪俊,等.重选法回收某高碳质金矿石中金的试验研究[J].黄金,2007(1):40-42.
- [9] 陈广,羊坤,陈思竹,等.浮-重选联合流程选别金尾矿实验研究[J].矿产综合利用,2022(2):131-134.
- [10] 王振,邹旦,赵开乐,等.硫化型金矿浮选技术研究现状及进展[J].化工矿物与加工,2022(6):54-60.