

贵州某黄金选矿厂弱酸性浮选工业试验

谢雄辉¹, 余力^{2*}, 江旭²

(1. 紫金矿业集团股份有限公司, 福建 上杭 364200; 2. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093)

摘要: 贵州某金矿含金 4.3 g/t, 金主要赋存在黄铁矿中, 矿石含碳较高, 属难选难冶型金矿。为实现该金矿资源的高效利用, 采用热压预氧化打开矿石中金包裹, 提高金的浸出率, 同时将原有的碱性浮选工艺调整为弱酸性浮选。采用“二粗二精四扫”的选矿流程, 进行工业试验。通过条件试验确定磨矿细度及各作业的药剂用量, 最终获得金精矿金品位 19.34 g/t, 回收率 88.25%。与原工艺相比, 弱酸性浮选可以利用废酸, 节约碱性调节剂的使用。

关键词: 有色金属冶金; 弱酸性浮选; 金矿; 黄铁矿; 工业试验

中图分类号: TD952 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2018)02-0029-05

Commercial Application Test of Weak Acid Flotation Process on a Gold Ore in Guizhou Province

XIE Xionghui¹, YU Li^{2*}, JIANG Xu²

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

2. Faculty of Land and Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: A commercial application test of the weak acid flotation process was conducted on a gold ore from Guizhou Province. The ore has a gold content of 4.3 g/t and gold is mainly present in pyrite, but a high carbon content makes it difficult to be separated and extracted. The ore was first treated by the pre-oxidation under heat and pressure to expose the gold encapsulated inside the mineral, and then the weak acid flotation process was applied to extract the gold-containing sulphide ore. Under the given conditions of the fineness of the ore and the dosage of the flotation chemicals, a final gold grade of 19.34 g/t was achieved with a recovery of 88.25%, after two roughing and two cleaning and four scavenging operation. Different from the previous alkaline flotation process, the waste acid can be recycled during the weak acid flotation.

Key words: nonferrous metallurgy; weak acid flotation; gold ore; pyrite; industrial test

金作为一种稀贵金属, 具有保值、避险等功能, 可作为国家货币储备, 稳定的黄金产量对国家金融的稳定性具有重要意义^[1-3]。我国的金矿资源储量丰富, 截至 2016 年底, 我国金矿查明资源储量达到 12167 t^[4-5], 仅次于美国, 位居世界第二位^[6]。目前, 中国已经成为全球第一大黄金生产国、第一大黄金消费国、第一大黄金加工国、第一大黄金进口国^[7-9]。

贵州某金矿为难处理的碳酸盐岩型微细粒浸染状卡林型金矿, 原采用碳酸钠为 pH 调整剂, 在碱

性条件下进行浮选。但近年来引进热压预氧化处理工艺, 通过破坏黄铁矿包裹体强化金的浸出。过程中由于硫的氧化会产生大量酸液, 这部分酸液处理难度较大。为节省成本, 提高企业经济效益, 将碱性浮选工艺调整为弱酸性浮选, 一方面为废酸找到出路, 另一方面取消浮选过程使用的碳酸钠和水玻璃, 以节省药剂成本。本文对弱酸性浮选的工艺条件进行工业试验研究。

收稿日期: 2017-11-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51764021)。

第一作者: 谢雄辉, 男, 职称: 地质工程师, 研究方向: 资源综合利用与开发。E-mail: kmluqj@sina.com

*通讯作者: 余力, 男, 博士研究生, 研究方向: 资源综合利用与环保。E-mail: 1191308577@qq.com

1 试验部分

1.1 试验矿样

原矿工艺矿物学研究表明, 矿石中有价元素为金, 金品位为 4.30 g/t, 有害元素为砷、碳, 其含量分别为 0.14%、7.46%。矿石主要组成矿物为方解石、白云石、绢云母、玉髓、黄铁矿、石英、毒砂等。金主要呈显微可见自然金颗粒, 粒径在 14~0.2 μm 右, 多数在 6~0.4 μm 之间(如图 1 所示)。矿石中的金矿物以自然金为主, 少量的银金矿, 主要包裹在黄铁矿、毒砂等金属硫化物中(如图 2 所示), 占金总含量的 84.30%, 游离金占 8.10%, 另有部分微细粒金包裹在硅酸盐及碳酸盐中, 分别占金总含量的 2.5%、5.1%。

原矿化学多元素分析结果如表 1 所列, 金物相分析结果列于表 2。分析结果表明, 金主要以硫化物包裹金形式存在, 占有率达 84.30%; 矿石中硫化物主要是黄铁矿, 其次毒砂。单体游离金占 8.1%。

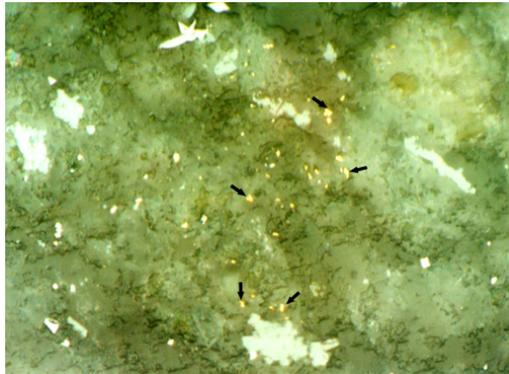


图 1 呈尘点状析出的金

Fig.1 Gold particles precipitated in the ore

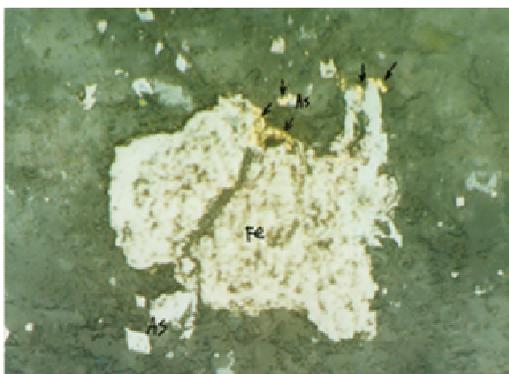


图 2 与黄铁矿(Fe)、毒砂(自形晶、As)嵌连的金(5粒, 箭头)

Fig.2 Gold (5grains, arrows) embedded in pyrite(Fe), arsenopyrite (self-crystal, As)

表 1 原矿化学分析结果

Tab.1 Analysis results of the chemical elements of the ore

元素	Au	Al ₂ O ₃	Pb	S	Fe	Zn	C
含量/%	4.30 g/t	<0.01	<0.05	1.00	2.99	0.099	7.46
元素	Mn	Cu	SiO ₂	CaO	MgO	As	
含量/%	0.15	0.016	8.78	24.60	13.90	0.14	

表 2 金物相分析结果

Tab.2 Analysis results of the gold phase

物相	游离金	碳酸盐包裹金	硫化物包裹金	硅酸盐及其它包裹金	合计
Au/(g/t)	0.35	0.22	3.62	0.11	4.30
占有率(%)	8.10	5.10	84.30	2.50	100

1.2 试验工艺设备

试验采用两段磨矿, 旋流器分级, 两次粗选、两次精选、四次扫选工业试验流程。所用设备列于表 3, 各作业设备联系图如图 3 所示。

表 3 主体设备表

Tab.3 Main equipment list

设备	类型(型号)	数量	电机型号
一段球磨机	溢流型球磨机(MQCY2.7×4.0)	1	TDMK400
二段球磨机	溢流型球磨机(MQCY2.7×3.6)	1	TDMK400
旋流器组-一段	水力旋流器组(FX500-PUX4)	2	—
旋流器组-二段	水力旋流器组(FX250-PUX6)	4	—
搅拌桶	搅拌桶(CP3000×3000 mm)	1	Y200LI-6
粗选 1	机械搅拌式浮选机(BF-10)	2	Y225M-8
粗选 2	机械搅拌式浮选机(BF-10)	5	Y225M-8
扫选 1	机械搅拌式浮选机(BF-10)	5	Y225M-8
扫选 2	机械搅拌式浮选机(BF-10)	5	Y225M-8
扫选 3	机械搅拌式浮选机(BF-10)	4	Y225M-8
扫选 4	机械搅拌式浮选机(BF-10)	4	Y225M-8
精选 1	机械搅拌式浮选机(BF-4)	3	Y200L2-6
精选 2	机械搅拌式浮选机(BF-4)	2	Y200L2-6

1.3 试验方案

为确定最佳浮选工艺和药剂制度, 通过条件试验对工业生产中矿石的磨矿细度、酸液用量、硫酸铜用量、丁胺黑药用量、丁基黄药用量的最佳值进行确定; 酸液、丁胺黑药仅加入粗选作业; 硫酸铜、丁基黄药加入粗选及扫选作业, 用量自粗二作业之后依次减半。试验采用一天三班制, 每班 8 h, 矿石日处理量控制在 950~1050 t, 每班取原矿、精矿、尾矿样测定金含量, 每次试验进行 3 天, 以 6 个班试验结果的加权平均值为最终试验结果。

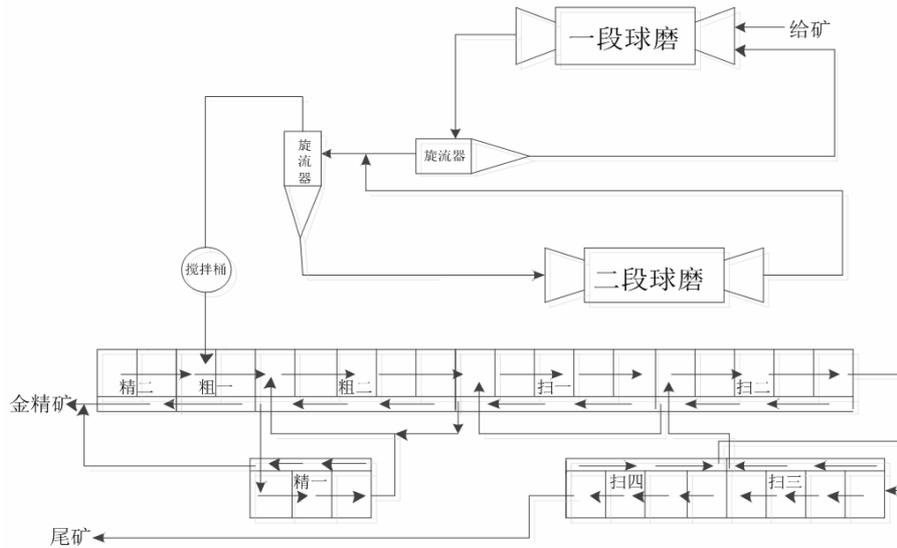


图 3 设备联系图 Fig.3 Equipment flow chart

2 结果与讨论

2.1 磨矿细度

该金矿嵌布粒度较细，但磨矿产品细度过高，会产生大量矿泥，恶化浮选环境。为确定最佳的浮选磨矿细度，进行磨矿细度试验。通过改变磨机前后给水量控制磨矿作业浓度、磨矿时间、旋流器作业浓度来调整磨矿细度，粗一药剂用量为酸液 10 g/t、硫酸铜 200 g/t、丁胺黑药 25 g/t、丁基黄药 80 g/t；粗二药剂用量为酸液 30 g/t、硫酸铜 400 g/t、丁胺黑药 50 g/t、丁基黄药 120 g/t，矿石处理量以 1000 t/天计，根据精矿产品金品位和回收率确定最佳的磨矿细度。由表 4 结果可知，随着磨矿细度的增加，矿石单体解离越充分，精矿产品金品位提高，回收率也有所增加，当磨矿细度为-200 目含量占 90%时，获得精矿品位为 15.35 g/t，回收率为 81.34%，达到最佳，因此确定磨矿产品细度为-200 目含量占 90%。

2.2 酸液用量

热压系统产生的酸液能清洗黄铁矿表面，具有活化黄铁矿的效果，但该酸液成分复杂，含有大量的 Fe²⁺、Fe³⁺离子，会对黄铁矿有抑制作用。通过酸液用量试验确定酸液的最佳用量，控制磨矿产品细度为-200 目含量为 90%，酸液用量为变量，其余药剂制度与磨矿细度试验相同，试验结果见表 5。

由表 5 可知，热压系统产生的废酸加入浮选作业，可在一定程度上活化黄铁矿，增加金的回收率。但用量过大，酸液中的杂质离子会对黄铁矿产生抑制作用，综合考虑，确定酸液用量为粗一 20 L/t，粗二 60 L/t。

表 4 磨矿细度(-200 目比例)试验结果

Tab.4 Test results for grinding fineness (ratio of -200 mesh)

磨矿细度/%	产物	产率/%	金品位/(g/t)	金回收率/%	矿石处理量/t
80	精矿	21.43	15.05	73.14	2014
	尾矿	78.57	1.51	26.86	
	合计	100	4.41	100	
85	精矿	22.91	15.15	77.65	1986
	尾矿	77.09	1.30	22.35	
	合计	100	4.47	100	
90	精矿	22.94	15.35	81.34	2001
	尾矿	77.06	1.05	18.66	
	合计	100	4.33	100	
92	精矿	21.19	15.31	79.51	2012
	尾矿	78.81	1.06	20.49	
	合计	100	4.08	100	
95	精矿	21.54	15.27	78.87	1995
	尾矿	78.46	1.12	21.13	
	合计	100	4.17	100	

表 5 酸液用量试验结果

Tab.5 Test results for the acid dosage

硫酸用量/(L/t)	产物	产率/%	金品位/(g/t)	金回收率/%	矿石处理量/t
0	精矿	24.03	14.16	80.25	1989
	尾矿	75.97	1.10	19.75	
	合计	100	4.24	100	

续表 5 (Tab. 5 continued)

硫酸用量/(L/t)	产物	产率/%	金品位/(g/t)	金回收率/%	矿石处理量/t
粗一: 10 粗二: 30	精矿	22.94	15.35	81.34	2019
	尾矿	77.06	1.05	18.66	
	合计	100	4.33	100	
粗一: 20 粗二: 60	精矿	22.33	16.31	84.51	1997
	尾矿	77.67	0.86	15.49	
	合计	100	4.31	100	
粗一: 30 粗二: 90	精矿	23.99	14.67	81.47	2023
	尾矿	76.01	1.05	18.53	
	合计	100	4.32	100	
粗一: 40 粗二: 120	精矿	23.02	14.53	79.26	1991
	尾矿	76.98	1.14	20.74	
	合计	100	4.22	100	

2.3 硫酸铜用量

硫酸铜作为一种常用的硫化矿活化剂,能活化黄铁矿,促进捕收剂在黄铁矿表面的吸附,进而扩大有用矿物与脉石矿物之间的可浮性差异。但硫酸铜价格较高,使用量过大会增加选矿成本。通过硫酸铜用量试验,确定最佳的硫酸铜用量。以硫酸铜用量为变量,其余药剂制度与酸液用量试验相同。硫酸铜用量试验结果见表 6。由表 6 可知,采用硫酸铜作为黄铁矿的活化剂可强化捕收剂对黄铁矿的回收,精矿金回收率明显上升。但硫酸铜用量过大时,精矿回收率增加不明显,综合考虑经济成本等因素,确定硫酸铜用量为粗一 300 g/t,粗二 600 g/t。

2.4 丁胺黑药用量

丁胺黑药是一种硫化矿捕收剂,浮选中可强化金的回收,同时还兼具一定的起泡效果。但用量过大时,会导致矿浆泡沫发粘,降低药剂的选择性,恶化浮选环境。通过丁胺黑药用量试验,确定最佳丁胺黑药用量。以丁胺黑药用量为变量,其余药剂制度与硫酸铜用量试验相同。试验结果见表 7。

由表 7 结果可知,增大丁胺黑药用量能促进金的回收。从试验现象来看,当丁胺黑药用量过大时,浮选泡沫发黏,部分细粒脉石进入精矿产品,综合考虑确定丁胺黑药用量为粗一 60 g/t,粗二 100 g/t。

2.5 丁基黄药用量

黄药可在硫化矿物表面发生化学反应形成难溶的金属黄原酸盐,吸附在矿物表面增强其疏水性。以丁基黄药用量为变量,其余药剂制度与丁胺黑药用量试验相同,结果见表 8。

表 6 硫酸铜用量试验结果

Tab.6 Test results for copper sulfate dosage

CuSO ₄ 用量/(g/t)	产物	产率/%	金品位/g/t	金回收率/%	矿石处理量/t
粗一: 100 粗二: 200	精矿	23.35	14.16	77.25	1985
	尾矿	76.65	1.27	22.75	
	合计	100	4.28	100	
粗一: 200 粗二: 400	精矿	22.33	16.31	84.51	2014
	尾矿	77.67	0.86	15.49	
	合计	100	4.31	100	
粗一: 300 粗二: 600	精矿	22.79	17.31	86.51	1986
	尾矿	77.21	0.80	13.49	
	合计	100	4.56	100	
粗一: 400 粗二: 800	精矿	22.67	16.67	86.47	2017
	尾矿	77.33	0.76	13.53	
	合计	100	4.37	100	
粗一: 500 粗二: 1000	精矿	23.88	15.53	86.26	1986
	尾矿	76.12	0.78	13.74	
	合计	100	4.30	100	

表 7 丁胺黑药用量试验结果

Tab.7 Test results for butylamine black drug dosage

丁胺用量/(g/t)	产物	产率/%	金品位/g/t	金回收率/%	矿石处理量/t
粗一: 15 粗二: 30	精矿	22.39	15.34	82.37	1996
	尾矿	77.61	0.95	17.63	
	合计	100	4.17	100	
粗一: 25 粗二: 50	精矿	21.54	17.31	86.51	2019
	尾矿	78.46	0.74	13.49	
	合计	100	4.31	100	
粗一: 40 粗二: 80	精矿	21.65	17.94	87.86	1989
	尾矿	78.35	0.68	12.14	
	合计	100	4.42	100	
粗一: 60 粗二: 100	精矿	19.80	19.34	88.25	2015
	尾矿	80.20	0.64	11.75	
	合计	100	4.34	100	
粗一: 80 粗二: 120	精矿	21.29	17.67	87.68	1986
	尾矿	78.71	0.67	12.32	
	合计	100	4.29	100	

由表 8 可知,随着丁基黄药用量的增加,精矿金回收率也增加,当丁基黄药粗一用量为 80 g/t,粗二用量为 120 g/t 时,浮选指标达到最佳。综合考虑,确定丁基黄药用量为粗一 80 g/t,粗二 120 g/t。

表8 丁基黄药用量试验结果

Tab.8 Test results for butylxanthate dosage

丁黄用量/(g/t)	产物	产率/%	金品位/(g/t)	金回收率/%	矿石处理量/t
粗一: 40	精矿	22.67	16.34	84.37	1985
	尾矿	77.33	0.89	15.63	
粗二: 60	合计	100	4.39	100	
粗一: 60	精矿	22.45	17.58	87.51	2014
	尾矿	77.55	0.73	12.49	
粗二: 90	合计	100	4.51	100	
粗一: 80	精矿	19.80	19.34	88.25	1996
	尾矿	80.20	0.64	11.75	
粗二: 120	合计	100	4.34	100	
粗一: 100	精矿	21.28	18.60	88.16	2001
	尾矿	78.72	0.68	11.84	
粗二: 150	合计	100	4.49	100	
粗一: 120	精矿	21.41	18.33	87.98	1998
	尾矿	78.59	0.68	12.02	
粗二: 180	合计	100	4.46	100	

在上述优化条件下, 获得产率为 19.80% 的金精矿, 其金品位为 19.34 g/t, 回收率为 88.25%。

3 结论

1) 贵州某金矿原矿含金 4.3 g/t, 金主要赋存与黄铁矿、毒砂中, 脉石矿物主要为方解石、白云母, 金的选别过程采用载体浮选的方式, 通过浮选黄铁矿、毒砂等硫化矿物对金进行富集。

2) 在原有选矿车间对影响浮选指标的主要因素进行条件试验, 确定工艺最佳条件为磨矿细度为 -200 目含量为 90%, 粗一药剂用量为酸液 20 g/t、硫酸铜 300 g/t、丁胺黑药 60 g/t、丁基黄药 80 g/t; 粗二药剂用量为酸液 60 g/t、硫酸铜 600 g/t、丁胺黑药 100 g/t、丁基黄药 120 g/t, 矿石处理量以 1000 t/天计。

3) 弱酸性试验结果表明: 采用热压系统产生的废酸作为 pH 调整剂, 将原碱性浮选工艺改为弱酸性浮选工艺, 经条件试验对作业参数进行改进后可获得金品位 19.34 g/t, 回收率 88.25% 的金精矿产品, 节省了浮选过程中的作业成本, 为废酸的处理找到了出路。

参考文献:

[1] 王学娟. 贵州卡林型金矿选矿新技术研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2007.

- WANG X J. Research on new technology of beneficiation of Carlin-type gold deposit in Guizhou[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2007.
- [2] LINDSTRÖM E B, ÅKE SANDSTRÖM, SUNDKVIST J E. A sequential two-step process using moderately and extremely thermophilic cultures for biooxidation of refractory gold concentrates[J]. Hydrometallurgy, 2003, 71(1/2): 21-30.
- [3] 余力, 刘全军, 宋建文, 等. 云南某铜矿石浮选试验[J]. 金属矿山, 2015(12): 75-78.
- YU L, LIU Q J, SONG J W, et al. Flotation test of a copper ore in Yunnan[J]. Metal mine, 2015(12): 75-78.
- [4] 张金萍. 我国金矿查明资源储量约 1.22 万吨[N]. 中国国土资源报, 2017-08-31(1).
- ZHANG J P. China's gold reserves of about 12200 tons of proven reserves [N]. China land and resources newspaper, 2017-08-31(1).
- [5] KARIMI P, ABDOLLAHI H, AMINI A, et al. Cyanidation of gold ores containing copper, silver, lead, arsenic and antimony[J]. International journal of mineral processing, 2010, 95(1): 68-77.
- [6] 巫汉泉. 含炭质金银多金属硫化矿的浮选[J]. 矿产综合利用, 1981(Z1): 59-62.
- WU H Q. Flotation of carbonaceous gold-silver polymetallic ores[J]. Comprehensive utilization of mineral resources, 1981(Z1): 59-62.
- [7] 杜飞飞, 杨志军, 郭存丰. 某金矿浮选试验研究[J]. 现代矿业, 2012, 27(1): 30-34.
- DU F F, YANG Z J, GUO C F. Research on flotation experiment of a gold mine [J]. Modern mining, 2012, 27(1): 30-34.
- [8] NANTHAKUMAR B, PICKLES C A, KELEBEK S. Microwave pretreatment of a double refractory gold ore[J]. Minerals engineering, 2007, 20(11): 1109-1119.
- [9] 余力, 刘全军, 袁华玮, 等. 铜铅混合精矿浮选分离工艺研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2017, 42(1): 26-33.
- YU L, LIU Q J, YUAN H W, et al. Study on flotation separation technology of copper-lead mixed concentrate [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural science edition), 2017, 42(1): 26-33.
- [10] ELLIS S, SENANAYAKE G. The effects of dissolved oxygen and cyanide dosage on gold extraction from a pyrrhotite-rich ore[J]. Hydrometallurgy, 2004, 72(1): 39-50.