

甘肃某金矿浮选正交试验研究

荀婧雯¹, 王宇斌¹, 雷大士¹, 卫亚儒²

(1. 西安建筑科技大学 资源工程学院, 西安 710055; 2. 西北有色地质矿业集团, 西安 710054)

摘 要: 采用正交试验的方法对甘肃某金矿浮选过程中粗选作业的磨矿细度、2[#]油用量、黄药用量、硫化钠用量以及硫酸铜用量对回收率的影响进行了研究。结果表明, 2[#]油用量和硫化钠用量为影响金回收率的显著因素。粗选最优条件为: 磨矿细度为-74 μm 含量为 55%、2[#]油用量为 14 g/t、黄药用量为 28 g/t、硫化钠用量为 100 g/t、硫酸铜用量为 15 g/t。在此条件下, 经一粗一精两扫的闭路试验, 可得到回收率为 89.87%, 品位为 42.0 g/t 的金精矿。

关键词: 金矿; 浮选; 正交试验; 影响因素

中图分类号: TD953; TD982 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2020)04-0056-05

Research on Orthogonal Test of Flotation of a Gold Ore in Gansu

XUN Jing-wen¹, WANG Yu-bin¹, LEI Da-shi¹, WEI Ya-ru²

(1. College of Materials and Mineral Resources, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. Northwest Nonferrous Geology and Mining Group Co. Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: The influence of grinding fineness, the amount of 2[#] oil, the amount of xanthate, the amount of sodium sulfide and the amount of copper sulfate on the flotation recovery rate of a gold ore in Gansu were investigated by orthogonal experiment method. The results showed that the amount of 2[#] oil and the amount of sodium sulfide were significant factors affecting the recovery of gold. The optimal conditions for roughing were: grinding fineness of -74 μm content accounted for 55%, 2[#] oil of 14 g/t, xanthate of 28 g/t, sodium sulfide of 100 g/t and copper sulfate of 15 g/t. The recovery rate of gold concentration was 89.87% and the grade was 42.0 g/t under the optimal conditions.

Key words: gold; flotation; orthogonal test; influencing factor

随着全球优质金矿资源的开发, 金矿资源开采品位和品质呈逐渐下降的趋势^[1]。在我国低品位金矿、难选金矿和多金属难选金矿已成为重点开发资源^[2-3]。目前, 常用的金矿选别方法主要有重选、浮选、氰化法等。但重选多用于原矿品位较高且易单体解离的含金矿石, 而传统浮选工艺则普遍存在着药剂用量大和尾水处理成本高等缺点, 可能会对矿山环境造成污染, 不利于可持续发展^[4]。因此, 如何在不影响选矿指标的前提下减少浮选过程中的药剂用量, 并降低其潜在的环境问题至关重要。此外, 已有金矿的浮选研究多使用单因素试验方法, 该方

法不能完全揭示工艺因素对金矿浮选指标的影响, 而正交试验则是一种高效经济的试验设计方法, 不仅可以合理安排试验减少试验次数, 同时还可以利用方差分析对试验结果进行更加直观的分析比对, 故在选矿试验研究中逐渐得到了应用^[5-7]。

甘肃某金矿选厂采用两粗-两精-一扫的浮选流程, 在磨矿细度-74 μm 含量为 65%, 石灰、硫酸铜和丁基黄药的用量分别为 1000 g/t、200 g/t 和 40 g/t 的条件下, 可获得回收率为 90.26%, 品位为 37.52 g/t 的金精矿。为进一步优化其药剂制度、减少环境污染同时实现高效浮选, 本研究采用五因素四水平的

收稿日期: 2019-10-04

基金项目: 陕西省自然科学基金(2019JQ-545); 陕西省重点研发计划(2018GY-088)

第一作者: 荀婧雯, 女, 硕士研究生, 研究方向: 矿物高效分选。E-mail: xunjingwen@foxmail.com

*通讯作者: 王宇斌, 男, 教授, 研究方向: 矿物材料综合利用。E-mail: wywywyb@xauat.edu.cn

正交方法进行浮选试验，并对试验结果进行极差分析和方差分析，为改善该金矿的选别指标提供参考。

1 试验

1.1 试验原料

甘肃某金矿矿石构造主要为块状构造、千枚状构造、星散状-星点状构造，部分矿石为稀疏浸染状、浸染状-稠密浸染状构造，少量为团状、脉状等构造。其脉石矿物主要为石英、绢云母、白云石、方解石、长石等，金属矿物主要为闪锌矿、方铅矿和黄铜矿等，贵金属矿物主要为自然金。载金矿物黄铁矿的粒度以大于 0.08 mm 为主，该粒级含量占比为 67.49%。为确定矿石中主要有用元素种类及含量，对试样进行了化学多元素分析和原矿中金的物相分析，结果列于表 1 和表 2。

表 1 原矿多元素分析

Tab.1 Multi-elementary analysis results of ore

成分	Au	Ag	S	MgO	SiO ₂
含量	2.12 g/t	1.30 g/t	2.31%	3.36%	55.77%
成分	Al ₂ O ₃	CaO	TFe	K ₂ O	烧失量
含量	12.65%	2.84%	6.40%	2.78%	7.70%

表 2 原矿金物相分析结果

Tab.2 Gold phase analysis results of ore

相别	含量/(g/t)	占有率/%
裸露金及半裸露金	1.32	64.41
硫化物包裹金	0.33	16.10
赤褐铁矿包裹金	0.14	6.78
碳酸盐包裹金	0.12	5.93
硅酸盐包裹金	0.14	6.78
相和	2.05	100

由表 1 可知，原矿中主要元素有 Au、Ag、S、MgO 和 SiO₂ 等，其中金元素含量为 2.12 g/t，银元素含量为 1.30 g/t，硫元素含量为 2.31%，烧失量含量为 7.70%。由表 2 结果可知，金主要以裸露金及半裸露金和硫化物包裹金的形式存在，其占有率分别为 64.41%和 16.10%，两相占有率总和为 80.51%。由于赤褐铁矿包裹金、碳酸盐包裹金和硅酸盐包裹金等包裹金难以采用浮选回收，故预计金的理论回收率可以达到 80%左右。试验所用试剂 2[#]油、黄药、硫化钠以及硫酸铜均为市售工业试剂。

1.2 试验设计

参考已有研究并结合理论分析，选取磨矿细度、2[#]油、黄药用量、硫化钠用量及硫酸铜用量等 5 个主要因素进行粗选试验。试验采用五因素四水平的正交方法，正交因素及对应水平如表 3 所示。

表 3 正交试验各因素水平及用量表

Tab.3 Factors and levels of orthogonal experiment

因素	水平			
	1	2	3	4
A 磨矿细度-74 μm 含量/%	55	65	75	85
B 2 [#] 油用量/(g/t)	10	12	14	16
C 黄药用量/(g/t)	15	22	28	35
D 硫化钠用量/(g/t)	60	80	100	120
E 硫酸铜用量/(g/t)	0	15	30	45

1.3 试验方法

浮选试验在 3.0 L 的 FGC 型挂槽式浮选机(武汉洛克粉磨设备制造有限公司)内进行，浮选试验时称取 1000 g 磨至设定的细度的原矿，将矿浆置入浮选机后依次加入硫化钠、硫酸铜、黄药和 2[#]油并分别调浆 3 min，在浮选机叶轮转速为 1800 r/min 的条件下浮选 7 min，浮选试验条件见表 3 和表 4，待浮选结束后分别将泡沫产品和槽内产品烘干、称重并制样化验，最后计算回收率。

2 结果与讨论

2.1 正交试验结果

正交试验结果如表 4 所列。由表 4 可知，试验 3 所得金回收率最高，达到了 84.83%，13[#]试验所得金回收率最低，为 64.11%。3[#]、4[#]、7[#]、8[#]、10[#]、11[#]、15[#]和 16[#]试验的回收率均在 80%以上，2[#]、5[#]、6[#]、9[#]、12[#]和 14[#]试验的回收率在 75%左右，而 1[#]和 13[#]试验的回收率低于 66%，所有试验结果金回收率的平均值为 77.76%。

2.2 极差分析

试验用五因素四水平的正交方法，每个因素的每个水平都参与 4 次试验，故试验所取得金回收率各水平 4 次之和为 R 值，各水平 R 平均值(R_{Ave})的最大值与最小值之差为极差值(ΔR_{Ave})_{max}。极差分析结果列于表 5。为直观显示各个因素水平变化对金回收率的影响趋势，将表 2 和表 5 数据合绘图对比，如图 1 所示。

表 4 正交试验安排及试验结果表

Tab.4 The design and results of orthogonal experiment

编号	水平					金回收率 (<i>R</i>)/%
	A	B	C	D	E	
1 [#]	1	1	1	1	1	65.58
2 [#]	1	2	2	2	2	75.88
3 [#]	1	3	3	3	3	84.83
4 [#]	1	4	4	4	4	83.44
5 [#]	2	1	2	3	4	70.65
6 [#]	2	2	1	4	3	77.90
7 [#]	2	3	4	1	2	82.80
8 [#]	2	4	3	2	1	80.25
9 [#]	3	1	3	4	2	75.63
10 [#]	3	2	4	3	1	82.61
11 [#]	3	3	1	2	4	80.10
12 [#]	3	4	2	1	3	76.74
13 [#]	4	1	4	2	3	64.11
14 [#]	4	2	3	1	4	77.37
15 [#]	4	3	2	4	1	82.03
16 [#]	4	4	1	3	2	84.22

表 5 各因素对金回收率影响的极差分析结果

Tab.5 Results of range analysis of various factors on the impact of the gold recovery

因素	<i>R</i> _{Ave} /%				(Δ <i>R</i> _{Ave}) _{max} /%
	水平 1	水平 2	水平 3	水平 4	
A	77.43	77.9	78.77	76.93	1.84
B	68.99	78.44	82.44	81.16	13.45
C	76.95	76.32	79.52	78.24	3.2
D	75.62	75.08	80.58	79.75	5.49
E	77.62	79.63	75.9	77.89	3.74

由表 5 可知, 5 个因素的极差分别为 1.84%、13.45%、3.20%、5.49%和 3.74%。因素 B 极差值最大为 13.45%, 对金回收率的影响较大, 为显著影响因素, 因素 C、因素 D 和因素 E 的极差值次之, 为较显著影响因素, 因素 A 的极差值最小, 为不显著影响因素。

由图 1 可知, 随着磨矿细度-74 μm 含量的增加金的回收率先增大后减小(图 1(A)), 但其总体变化幅度较小为 1.84%, 说明磨矿细度对金的回收率影响较小。金的回收率随着 2[#]油用量的增加逐渐增加(图 1(B)), 其总体变化幅度达到了 13.45%, 由此可知 2[#]油用量对金回收率的影响较大。金的回收率随

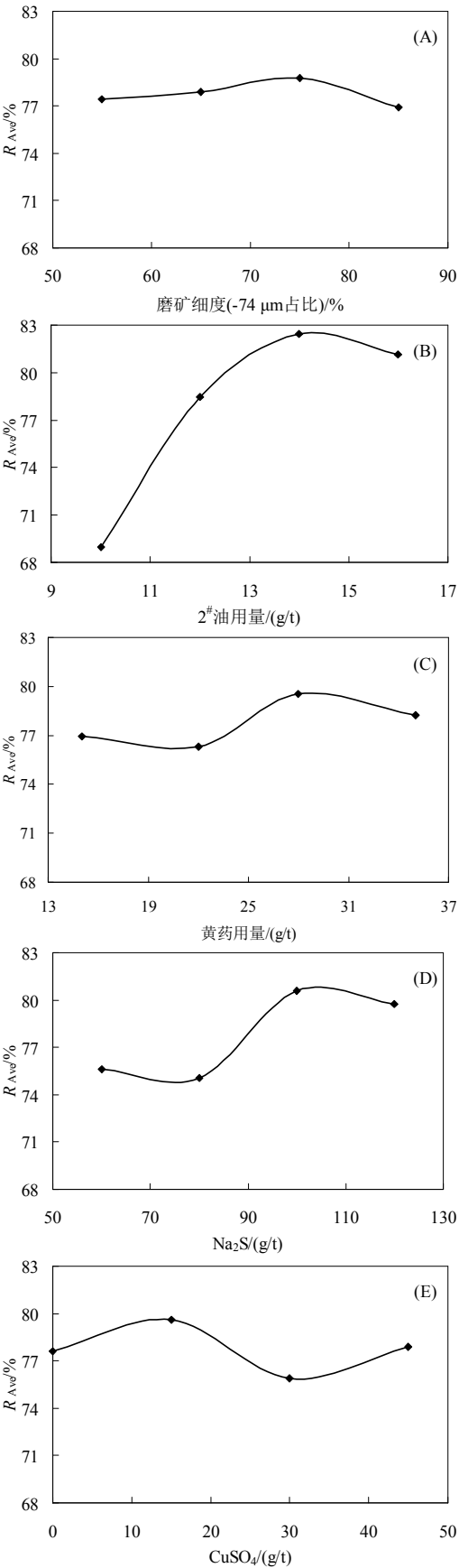


图 1 因素水平对金回收率的影响

Fig.1 Effect of factor level on the recovery rate of gold

黄药用量的增大先增大后减小(图 1(C)), 而其总体变化幅度为 3.20%, 表明黄药用量对金回收率有一定影响, 但影响不大。金的回收率随硫化钠用量的增加先增大后减小(图 1(D)), 而其总体变化幅度相对较大, 为 5.49%, 说明硫化钠用量对金回收率影响较为显著。当硫酸铜用量从 0 g/t 增加到 15 g/t 时, 金的回收率增加了 2.01 个百分点 (图 1(E)), 当硫酸铜用量进一步增加至 30 g/t 时, 金回收率减小至 75.90%, 其总体变化幅度为 3.74%, 这说明硫酸铜用量对金回收率影响不大。

2.3 方差分析

为了进一步确定影响金回收率的主要因素, 对试验结果进行了方差分析。为了提高分析精确度, 将 A 磨矿细度和误差的均方合并为误差项。方差分析结果列于表 6。

表 6 各因素对金回收率影响的方差分析结果
Tab.6 Results of variance analysis of various factors on the impact of the recovery rate of gold

方差来源	离差	自由度	均方离差	<i>F</i>	显著性	最优水平
B	443.1614	3	147.7205	60.50	*	3
D	94.50545	3	31.50182	12.90	*	3
E	28.07379	3	9.357940	3.83	-	-
C	24.19610	3	8.065367	3.30	-	-
A	7.325523	3	2.441841	-	-	-
误差总和	597.2623	15		$F_{0.01}(3,3)=29.46$ $F_{0.05}(3,3)=9.01$		

由表 6 可知, 在选定的工艺条件范围内, 对金回收率影响因素的显著性依次为 B(2[#]油用量)、D(硫化钠用量)、E(硫酸铜用量)、C(黄药用量)和 A(磨矿细度)。2[#]油用量是影响金回收率的最显著因素, 硫化钠用量是次显著因素, 其他因素对金回收率的影响较小。这与极差分析结果基本一致。由于 2[#]油用量和硫化钠用量对金回收率影响较为显著, 为保证金的回收率以及各项指标, 故二者皆选用 3 水平, 即 B₃ 和 D₃ 为最佳条件。E 因素、C 因素和 A 因素可选取 E₁(E₂、E₃、E₄)、C₁(C₂、C₃、C₄)和 A₁(A₂、A₃、A₄)。综合考虑经济原因和生产指标, 该金矿电化浮选粗选的最佳条件为: 原矿细磨至-74 μm 55%、2[#]油用量为 14 g/t、黄药用量为 28 g/t、硫化钠用量为 100 g/t、硫酸铜用量为 15 g/t。2[#]油用量和硫化钠用量为影响金回收率的显著因素的原因, 原因在于硫化钠既可以在矿浆中发生化学反应电离出的 HS⁻和 S²⁻离子, 进而在载金矿物黄铁矿表面生成

硫单质并覆盖在其表面增加疏水性^[8-9], 还可以减少捕收剂和活化剂的用量, 这就需要矿浆中有足够的起泡剂来保证三相矿化泡沫的稳定性以加强浮选效果, 改善浮选指标。

2.4 闭路试验

综合考虑经济成本和选别指标等因素, 在正交试验的基础上, 进行了闭路试验, 试验流程如图 2 所示。

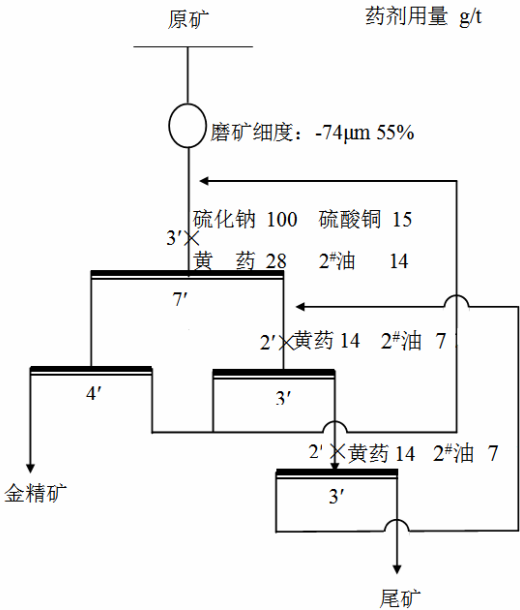


图 2 闭路试验流程

Fig.2 Process chart of closed circuit test

采用闭路试验流程, 通过一粗一精两扫流程的闭路试验, 可获得品位为 42.0 g/t, 回收率为 89.87%, 产率为 4.44% 的金精矿, 而尾矿产率为 95.56%, 品位则降至 0.22 g/t。与现场的生产条件及作业指标相比, 该流程在适当粗磨的前提下可大幅降低石灰、黄药、2[#]油和硫酸铜的用量, 同时在金回收率基本不变的前提下, 可使金精矿品位提高 4.48 g/t, 提质增效效果明显。

3 结论

对甘肃某金矿的浮选正交试验表明, 不同因素对其回收率的影响程度不同。2[#]油用量对金回收率的影响最大, 为显著影响因素, 硫化钠用量是次显著因素, 黄药用量、硫酸铜用量和磨矿粒度对金回收率的影响较小。最终确定的粗选条件为: 原矿细磨至-74 μm 占比为 55%、2[#]油用量为 14 g/t、黄药用量为 28 g/t、硫化钠用量为 100 g/t、硫酸铜用量

为 15 g/t。经一粗一精两扫的闭路试验,可得到回收率 89.87%,品位为 42.0 g/t 的金精矿。

参考文献:

- [1] 王修,王建平,陈洪,等.我国金矿资源形势分析及可持续发展对策[J].矿业研究与开发,2015,35(10): 99-103.
WANG X, WANG J P, CHEN H, et al. Situation analysis and sustainable development strategy of gold resources in China[J]. Mining Research and Development, 2015, 35(10): 99-103.
- [2] 刘秀,申高生.我国金矿地质现状、区域成矿及找矿[J].世界有色金属,2019(6): 97-98.
LIU X, SHENG G S. Current status of gold deposits in China, regional mineralization and prospecting[J]. World Nonferrous Metal, 2019(6): 97-98.
- [3] 卢杰,王建国,严松涛,等.我国西部金矿资源现状及发展对策[J].中国矿业,2015,24(10): 10-14.
LU J, WANG J G, YAN S T, et al. Analysis of the current situation and developmental countermeasures of gold resources in West China[J]. China Mining Magazine, 2015, 24(10): 10-14.
- [4] 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 L G, YUAN C X, WANG Y, et al. Status and development of gold extraction from refractory gold ore[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy Section), 2015(4): 38-43.
- [5] 王宇斌,文堪,雷大士,等.基于正交试验的某浸渣氧化铜粗选条件优化[J].矿产综合利用,2018(5): 58-62.
WANG Y B, WEN K, LIE D S, et al. Study on the comprehensive recovery of silver from a smelting slag by orthogonal test[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2018(5): 58-62.
- [6] 王宇斌,彭祥玉,李帅,等.基于正交试验法的某低品位氧化镍矿酸浸试验研究[J].有色金属工程,2017,7(3): 42-45.
WANG Y B, PENG X Y, LI S, et al. Study on the acid leaching tests of a low-grade nickel oxide ore using orthogonal method[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2017, 7(3): 42-45.
- [7] 王宇斌,彭祥玉,张小波,等.基于正交实验的红土镍矿酸浸条件优化[J].无机盐工业,2017,49(6): 29-32.
WANG Y B, PENG X Y, ZHANG X B, et al. Optimization of nickel laterite acid leaching conditions based on orthogonal experiment[J]. Inorganic Chemicals industry, 2017, 49(6): 29-32.
- [8] 郑昕,冯其明.金浮选的电化学原理及应用[J].矿冶工程,1995(4): 32-36.
ZHENG X, FENG Q M. Electrochemical principles of gold flotation and their applications[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 1995(4): 32-36.
- [9] 余胜利,王毓华,张英,等.某难选低品位金矿的选矿试验研究[J].有色金属(选矿部分),2013(2): 17-21.
YU S L, WANG Y H, ZHANG Y, et al. Beneficiation experimental study on a low-grade refractory gold ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2013(2): 17-21.

《贵金属》著作权使用声明

作者投稿如被接受在本刊发表,即代表作者同意将该论文的部分著作权转让给《贵金属》编辑部。

作者保证该论文为原创作品,无抄袭问题,不存在一稿多投,符合学术道德规范要求;作者承诺,论文不涉及泄密,符合所在工作单位保密要求。若发生侵权或泄密问题,责任由作者承担。

凡本刊登载的文章,将同时被中国知网、万方数据-数字化期刊群、维普中文科技期刊数据库和超星期刊域出版平台等以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播,供本刊授权和合作媒体使用。本刊支付的稿酬已包含作者著作权使用费。所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。如有异议,请在投稿时说明,以便另行处理。