

基于工艺矿物学分析提高金浮选尾矿选矿回收率的研究

吉 强^{1,2}, 李光胜^{1,2}, 朱幸福^{1,2}, 高腾跃^{1,2}

(1. 山东黄金矿业科技有限公司选冶实验室分公司, 山东 莱州 261441; 2. 山东黄金矿业科技有限公司, 济南 250000)

摘 要: 某金矿浮选尾矿金品位偏高, 具有回收价值, 对该样品开展了工艺矿物分析和选矿试验研究。工艺矿物学分析表明, 尾矿中金矿物主要以三种形态存在, 分别为难解离金矿物、易解离金矿物、单体易回收金矿物, 后两种金矿物回收较为容易。试验结果表明, 将其磨矿细度(-200目含量)提高到60%, 浮选时间延长7 min, 尾矿金品位降低至0.18 g/t, 通过将磨矿细度(-200目含量)提高到80%, 尼尔森重选也可将尾矿金品位降低到0.17 g/t, 为现场制定改造方案提供技术支持。

关键词: 工艺矿物学; 金尾矿; 浮选; 重选

中图分类号: TD954 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2023)03-0031-04

Study on improving floatation tailings of a gold mineral recovery based on process mineralogy analysis

Ji Qiang^{1,2}, Li Guangsheng^{1,2}, Zhu Xingfu^{1,2}, Gao Tengyue^{1,2}

(1. Metallurgical Laboratory Branch of Shandong Gold Mining Technology Co. Ltd., Laizhou, 261400, Shandong, China;

2. Shandong Gold Mining Technology Co. Ltd., Jinan 250000, China)

Abstract: The floatation tailings of a gold mine have a high grade and recovery value. The process mineral analysis and test research were carried out in order to provide guidance for proposing a better recovery scheme. Process mineralical analysis shows that the gold mineral in tailings mainly exists in three forms, namely, refractory dissociable mineral, easily dissociable mineral and monomer mineral. The latter two forms are relatively easy to be recovered. The dressing test of grinding fineness and floatation time for the tailings sample shows that by increasing the grinding fineness (-200-mesh content) to 60% and extending the floatation time by 7 min, the tailings grade can be reduced to 0.18g/t. Increasing the grinding fineness (-200-mesh content) to 80% and using Nielsen method can also reduce the tailings grade to 0.17 g/t. This study will provide the technical support for the renovation plan of the production line.

Key words: process mineralogy; tailing of gold mine; floatation; gravimetric concentration

随着黄金资源的不断开发, 高品位优质资源所占比例越来越小, 入选金品位不断降低, 选矿行业的粗放式发展已经不能满足时代要求, 难选冶、低品位等复杂的矿产资源越来越受到重视。在资源有限的情况下, 如何通过合理的选矿工艺加强对金矿资源中金的回收, 确保将井下开采的矿石“吃干榨净”, 最大限度地提高选矿回收率成为当前的研究热点^[1-2]。

当前, 可开采矿山资源有限, 从尾矿中进一步回收金已经成为各矿山新的利润增长点^[3-4]。山东某金矿浮选尾矿金品位较高, 具有一定回收价值。为探索降低尾矿品位的可行性方法, 针对性制定回收方案, 采用扫描电镜、BPMA^[5-7]等研究手段, 查明尾矿样品中金矿物的解离特征及主要赋存状态等指标, 在工艺矿物学分析结果指导下, 对其中易回收金矿物开展了针对性的选矿试验研究。

收稿日期: 2022-09-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51734005)

第一作者: 吉 强, 男, 硕士, 工程师; 研究方向: 选矿工艺研发; E-mail: jiqiang223@163.com

1 样品性质

1.1 成分分析

浮选尾矿样品取自山东某金矿选矿厂的生产现场，其成分分析结果如表 1 所列，其中金品位采用活性炭吸附原子吸收分光光度法测定，银品位采用原子吸收分光光度法测定。根据表 1 结果，样品中具有回收价值的元素为金，含量为 0.42 g/t。

表 1 样品成分分析结果

Tab.1 Results of the multielement analysis of the sample /%							
元素	Au*	Ag*	Cu	Pb	Zn	Fe	S
品位	0.42	0.91	0.046	0.016	0.017	2.39	0.10
元素	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	
品位	74.95	9.46	0.67	1.60	1.32	3.79	

*注：Au、Ag 品位单位为 g/t，本文下同。

1.2 粒级分布

为研究该尾矿样品磨矿细度及其中金的分布情况，对该尾矿样品进行粒级和金分布率分析，结果列于表 2。

表 2 粒级筛析和金分布率分析结果

Tab.2 Grticle screening and metal distribution						
粒级(目)	产率/%		Au 品位/(g/t)		Au 分布率/%	
	个别	累计	个别	累计	个别	累计
+50	7.46	7.46	1.56	1.56	26.42	26.42
-50+100	26.32	33.78	0.45	0.70	26.89	53.32
-100+200	23.54	57.32	0.20	0.49	10.69	64.01
-200+400	15.68	73.00	0.46	0.48	16.38	80.38
-400	27.00	100	0.32	0.44	19.62	100
合计	100	-	0.44	-	100	-

该尾矿样品筛析结果表明，-200 目含量为 42.68%，尾矿的细度较粗；+100 目金品位为 0.70 g/t，金分布率为 53.32%，可以看出粗粒级金品位较高。

1.3 工艺矿物学分析

利用扫描电镜、能谱、BPMA 对尾矿样品进行工艺矿物学分析，根据金矿物与其它矿物的嵌布关系解离情况及回收难度将金矿物的赋存状态分为以下三类：难解离金矿物、易解离金矿物、单体易回收金矿物。

1) 难解离金矿物。该部分金矿物被石英包裹，且金矿物粒径很细，一般小于 5 μm，在现有的磨矿条件下解离难度很大，造成该部分金矿物基本不能回收，属于难选冶范畴。

2) 易解离金矿物。该部分金矿物主要与石英、黄铁矿或铁的氧化物包裹共生，直接浮选回收的难度较大，但是该部分颗粒粒径较大，优化磨矿条件，适当提高磨矿细度可以实现金矿物和共生矿物的解离，有利于后续浮选回收。

3) 单体易回收金矿物。该部分矿物主要有两种形式：金矿物单体、金与黄铁矿共生矿物，在现有的工艺条件下都为易浮矿物，不应出现在尾矿中。

1.4 影响选别效果因素分析

通过工艺矿物学分析，金与黄铁矿共生含量为 17.34%，单体金含量为 29.07%，这部分金在浮选中应回收。现尾矿品位偏高，可能是浮选流程运行异常或浮选时间不足导致。另外，有部分金矿物包裹于脉石或铁的氧化物中，且嵌布粒度很细，含量为 25.11%，这部分金在浮选过程中很难回收，也是导致金流失的重要原因。金矿物中的包裹金含量较高，达到 45.30%，黄铁矿的解离度较低，适当增加磨矿细度，提高解离度可以提高这部分金的回收率。同时，可采用尼尔森重选工艺进一步强化回收。

2 选矿试验

2.1 选矿条件对浮选的影响

根据工艺矿物学分析结果，主要针对易解离金和单体易回收金，开展试验研究，与其相关的主要因素是磨矿细度和浮选时间，因此分别研究这两种因素对尾矿中金回收效果的影响，为现场工艺优化调整提供参考。

2.1.1 磨矿细度

采用现场的浮选工艺条件，矿浆浓度为 35%，捕收剂采用丁基黄药，用量为 60 g/t，起泡剂为 2#油，开展不同磨矿细度的浮选对比试验，结果列于表 3。从表 3 数据可以看出，在现场磨矿细度条件下，金回收率只有 26.40%，随磨矿细度增加浮选金回收率明显提升，磨矿细度(-200 目)为 60.0%时，金回收率变化趋于平缓，可达到 50.0%以上，且精矿金品位相对较高，达到 11.25 g/t。可以确定在现场的磨矿细度条件下，目标矿物解离度较低，影响了金的有效回收。

表 3 尾矿浮选试验结果

Tab.3 Results of the tailings flotation test				
-200 目 含量/%	产品	产率/%	金品位 (g/t)	金回收 率/%
42.7 (原细度)	精矿	1.99	5.30	26.40
	中矿	0.98	3.27	8.02
	尾矿	97.03	0.27	65.58
	合计	100	0.40	100
50.0	精矿	1.82	9.69	40.99
	中矿	1.11	3.63	9.37
	尾矿	97.07	0.22	49.64
	合计	100	0.43	100
60.0	精矿	1.89	11.25	50.57
	中矿	1.01	3.27	7.86
	尾矿	97.10	0.18	41.57
	合计	100	0.42	100
70.0	精矿	2.02	10.70	52.21
	中矿	1.10	3.01	8.00
	尾矿	96.88	0.17	39.79
	合计	100	0.41	100

即使在现场磨矿细度条件下，尾矿直接浮选可得到精矿品位为 5.30 g/t，精矿回收率为 26.40%，说明现场的浮选工艺也存在浮选时间不足的现象。因此，在磨矿细度(-200 目)为 60.0%条件下进一步开展浮选时间试验，确定所需浮选时间。

2.1.2 浮选时间

在磨矿细度为 60.0%条件下，开展了一次粗选两次扫选的浮选试验，浮选时间分别为 4、3、2 min，考察浮选时间对金品位和回收率的影响，结果列于表 4。

表 4 浮选时间试验结果

Tab.4 Test results for different flotation time								
产品	浮选时间 /min		产率/%		金品位/(g/t)		回收率/%	
	个别	累计	个别	累计	个别	累计	个别	累计
产品 1	4	4	1.91	100	11.22	0.42	51.02	100
产品 2	3	7	1.00	98.09	3.30	0.21	7.86	48.98
产品 3	2	9	0.56	97.09	1.24	0.18	1.65	41.12
尾矿			96.53	96.53	0.17	0.17	39.47	39.47

从表 4 数据可以看出，随着浮选时间延长，金累计回收率逐渐提高，当累计浮选时间达到 7 min 时，其提高速度已经很慢，幅度已经很小，因此确定浮选时间为 7 min，此时尾矿品位为 0.18 g/t。

2.1.3 闭路试验

为确保浮选试验结果可靠性，正确反映真实的浮选效果，在磨矿细度(-200 目)为 60.0%条件下，开展一粗一扫的浮选闭路试验^[8]，研究在闭路浮选试验条件下，金的回收情况。试验流程及条件如图 1 所示。

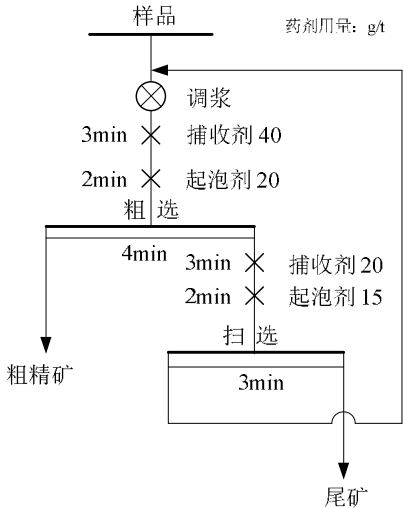


图 1 闭路浮选试验流程

Fig.1 Closed-circuit flotation

通过延长浮选时间可使尾矿中的金得到进一步回收，在磨矿细度(-200 目)为 60.0%，浮选时间 7 min 条件下，开展闭路浮选试验，得到的精矿金品位为 10.53 g/t，尾矿金品位 0.19 g/t，金回收率 56.84%。

2.2 重选试验

根据工艺矿物学分析结果，该尾矿样品中存在部分单体金矿物且粒径较大，考虑存在重选回收的可能性，为此对该尾矿样品进行尼尔森重选^[9-10]试验研究。尼尔森选矿机操作条件，重力 60 G；流态化水量 3.2 L/min；给矿量 1000 g/min。重选流程见图 2，结果列于表 5。

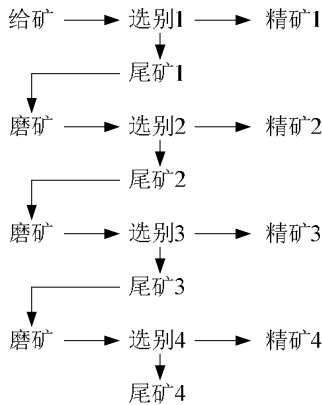


图 2 尼尔森重选试验流程 Fig.2 Nielsen gravity separation

表 5 尼尔森重选试验结果

Tab.5 Results of the Nielsen tests

-200 目/%	产品	产率/%	品位/(g/t)	回收率/%
42.0	精矿 1	0.42	9.60	9.50
	尾矿 1	99.58	0.38	90.50
50.0	精矿 2	0.42	20.85	20.70
	尾矿 2	99.17	0.30	69.80
65.0	精矿 3	0.41	17.70	17.23
	尾矿 3	98.76	0.22	52.57
80.0	精矿 4	0.33	15.26	12.06
	尾矿 4	98.43	0.17	40.51
给矿(原矿)		100	0.42	100
尼尔森精矿		1.57	15.88	59.49

从表 5 数据可以看出,该浮选尾矿的尼尔森重选精矿产率为 1.57%,金品位为 15.88 g/t,金回收率为 59.59%,磨矿细度达到-200 目含量 80.0%时,浮选尾矿品位由 0.42 g/t 降到 0.17 g/t,说明尼尔森重选对尾矿中金的回收效果较好。在现场的磨矿细度条件下,重选回收率只有 9.50%,磨矿至-200 目 50%时,重选累计回收率为 30.20%,提高磨矿细度可大幅提高金的重选回收率。

3 结 论

- 1) 工艺矿物学结果表明,浮选尾矿金品位为 0.42 g/t,主要包括难解离金、易解离金、单体易回收金三类,-200 目含量 42.68%,粗粒级金品位较高。
- 2) 浮选试验结果表明,延长浮选时间,增加磨矿细度可以提高选矿回收率;重选对尾矿中金的回收效果较好。因尾矿样品中存在部分金矿物与赤铁矿等铁的氧化物共生,在延长浮选时间、增加磨矿细度仍然无法达到理想指标时,可考虑在尾矿增加重选,对尾矿中的金进行进一步回收。

参考文献:

[1] 杨文寿. 某含铜金银多金属硫化矿尾矿资源综合利用试验研究[J]. 矿冶工程, 2022, 42(3): 84-87.
YANG W S. Comprehensive utilization of mineral resources from tailings of copper-gold-silver sulfide polymetallic ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022, 42(3): 84-87.

[2] 杨振兴. 难处理金矿石选冶技术现状及发展方向[J]. 黄金, 2002, 23(7): 31-34.
YANG Z X. The status quo of treating refractory gold ores[J]. Gold, 2002, 23(7): 31-34.

[3] 宋超, 陈小辉, 张晗, 等. 某金矿尾矿综合回收试验研

究[J]. 黄金, 2022, 43(7): 80-83.
SONG C, CHEN X H, ZHANG H, et al. Experimental research on comprehensive recovery of tailings from a gold mine[J]. Gold, 2022, 43(7): 80-83.

[4] 张金矿, 李荣改, 来佳仪, 等. 河南某金矿尾矿再选工艺对比分析[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(5): 141-145.
ZHANG J K, LI R G, LAI J Y, et al. Comparative analysis on tailings re-concentration process of a gold mine in Henan province[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(5): 141-145.

[5] 张松. 工艺矿物学在矿物加工中的应用及发展趋势[J]. 科学技术创新, 2017(20): 103-104.
ZHANG S. Application and development trend of process mineralogy in mineral processing[J]. Scientific and Technological Innovation, 2017(20): 103-104.

[6] 刘璐, 王守敬, 卞孝东. 灵宝某金矿石工艺矿物学研究[J]. 金属矿山, 2017(11): 112-115.
LIU L, WANG S J, BIAN X D. Study on process mineralogy of a gold ore from Lingbao[J]. Metal Mine, 2017(11): 112-115.

[7] 徐超, 蔡明明, 张文平, 等. 基于工艺矿物学分析的含碲金矿石碱浸预处理效果研究[J]. 矿产综合利用, 2022, 4(3): 7-9.
XU C, CAI M M, ZHANG W P, et al. Study on the effect of alkaline leaching pretreatment of tellurium-bearing gold ore based on process mineralogy[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022, 4(3): 7-9.

[8] 吴金鑫, 赵涛, 张月, 等. 浅谈室内小型浮选闭路试验操作中几点技巧[J]. 中国钼业, 2018, 42(4): 36-38.
WU J X, ZHAO T, ZHANG Y, et al. Brief discussion on some techniques in the operation of indoor small flotation closed circuit test[J]. China Molybdenum Industry, 2018, 42(4): 36-38.

[9] 刘坤, 王婷霞, 李健民. 肃北某金矿浮选尾矿尼尔森重选实验[J]. 矿产综合利用, 2022, 8(4): 17-20.
LIU K, WANG T X, LI J M. Experimental research on Nelson gravity separation from a gold mine flotation tailings in Subei[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022, 8(4): 17-20.

[10] 康维刚, 陈京玉. 老挝某金矿石重选-环保药剂浸金研究[J]. 贵金属, 2022, 43(1): 61-66.
KANG W G, CHEN J Y. Study on gravity separation and environmental friendly agent leaching of a gold ore in Laos[J]. Precious Metals, 2022, 43(1): 61-66.