

# 山东某金矿工艺矿物学及选矿影响因素研究

王艺竹<sup>1</sup>, 王佳怡<sup>1</sup>, 向泽慧<sup>1</sup>, 南楠<sup>1\*</sup>, 董鸿良<sup>2</sup>, 宋宝旭<sup>1</sup>

(1. 辽宁科技大学矿业工程学院; 2. 山东烟台鑫泰黄金矿业有限责任公司)

**摘要:**山东某金矿金品位为 1.4 g/t, 属于低品位金矿。为有效回收该金矿中有价金属, 对矿石进行工艺矿物学研究。研究表明, 矿石中部分金矿物以自然金形式存在, 部分金矿物以黄铁矿等硫化矿物为载体的包裹金形式存在。其中, 以磁黄铁矿为载体的金矿物, 由于单体解离度较低, 天然可浮性较差, 难以通过浮选回收, 是导致金矿物损失的主要原因。实现以磁黄铁矿为载体的金矿物综合利用, 有助于进一步提高金回收率, 对该金矿进行浮选和尾矿磁选联合试验。试验结果表明: 增加磨矿细度, 可有效提高有用矿物单体解离度; 浮选试验可将浮选尾矿中金、硫品位分别降低至 0.35 g/t、0.48%; 尾矿磁选作业可以将尾矿中金、硫品位分别降低至 0.14 g/t 和 0.20%。研究结果可为同类型金矿床的开发和利用提供借鉴。

**关键词:**金矿; 工艺矿物学; 磨矿细度; 浮选; 磁黄铁矿; 磁选

中图分类号: TD952

文献标志码: A

文章编号: 1001-1277(2024)02-0033-04

doi:10.11792/hj20240207

## 引言

黄金是人类最早利用的金属之一, 在中国的文化历史中有着重要的地位, 早在商代时期, 就已经出现了象形文字“金”<sup>[1-2]</sup>。进入现代以后, 黄金不仅是国家重要的战略资源和储备资产, 同时也广泛应用于电子信息、新材料及航天航空等高新科技领域<sup>[3-4]</sup>。中国黄金资源分布十分广泛, 从地区来看, 山东省的黄金资源最为丰富<sup>[5]</sup>; 从金矿资源特点来看, 以岩金为主, 难选冶金矿占比较高。因此, 如何实现难处理金矿中金矿物的高效、绿色、低成本回收已成为黄金行业的重大难题<sup>[6-10]</sup>。

随着易选金矿资源的不断消耗, 对以“贫、细、杂”为特征的难选金矿资源的利用逐步增多。现有选矿厂生产流程是否能够满足难选金矿的选别要求, 已逐步成为黄金矿山企业普遍关注的问题<sup>[11-15]</sup>。基于此, 本研究选择山东某金矿为研究对象, 通过对选矿厂原矿、金精矿、尾矿开展工艺矿物学研究, 基本查明了金矿物在生产过程中的走向, 并分析了各因素对选别指标的影响。研究结果不仅为选矿厂生产流程改造提供科学依据, 也为同类型金矿床的开发利用提供借鉴。

## 1 试验方法

试验样品为山东某金矿, 金品位为 1.4 g/t。为

了查明金矿物的走向, 科学评价金回收水平, 分别选取原矿、金精矿和尾矿为试验样品。为保证测试效率和准确性, 对各试验样品进行制备。制备步骤如下: 取 10 g 粒度为 0.037 ~ 0.074 mm 的试验样品, 用环氧树脂和固化剂充分混匀固化、抛光, 然后进行喷碳处理, 以确保试验样品表面导电性。

试验仪器为德国蔡司 ZEISS Sigma 500 型矿物自动分析系统, 仪器控制和图像采集采用 SEM Control 和 AMICS Investigator 软件。在将试验样品放大 200 ~ 300 倍的前提下, 用 X 射线(BSE、XBSE 模式)进行测试。测量精度为每个像素 0.56 μm, 探针电流为 10 nA, 总电子束加速电压为 2 kV。以环氧树脂为背景(BSE 灰度值 < 35), 以金属为上限(BSE 灰度值 > 255), 设置 BSE 图像灰度级校准, 测试数据由 AMICS Process 软件处理。

## 2 工艺矿物学分析

### 2.1 矿物组成

采用矿物自动分析系统(AMICS)对该金矿中矿物相对含量进行分析, 结果见表 1。

由表 1 可知: 该金矿中主要金属硫化矿物为黄铁矿、磁黄铁矿, 少量方铅矿、闪锌矿等; 金属氧化物主要为磁铁矿; 金矿物主要为自然金; 脉石矿物主要为石英、方解石、角闪石、钠长石、正长石等。

收稿日期: 2023-10-12; 修回日期: 2023-11-08

基金项目: 辽宁科技大学大学生创新创业训练计划(X202310146113)

作者简介: 王艺竹(2003—), 女, 大学本科, 研究方向为矿产资源综合利用、浮选理论与药剂研发; E-mail: wangyizhu@163.com

\*通信作者: 南楠(1986—), 女, 讲师, 博士, 研究方向为矿产资源综合利用、浮选理论与药剂研发; E-mail: nannan\_neu@163.com

表1 矿物相对含量分析结果

Table 1 Analysis results of relative mineral content

矿物名称	相对含量/%	矿物名称	相对含量/%
黄铁矿	2.24	正长石	11.96
方铅矿	0.15	绿泥石	1.55
磁黄铁矿	0.53	方解石	7.14
黄铜矿	0.07	钠长石	12.57
磁铁矿	0.43	石英	25.69
闪锌矿	0.01	角闪石	11.16
银金矿	微量	楣石	0.45
自然金	少量	铁紫苏辉石	0.76
载银方铅矿	微量	黑云母	3.66
钙铁辉石	1.50	橄欖石	0.25
铁硅灰石	0.16	伊利石	2.82
绿帘石	1.34	拉长石	2.25
斜绿泥石	4.07	钙镁闪石	0.26
白云石	5.68		

表2 主要矿物嵌布粒度分析结果

Table 2 Analysis results of the particle size dissemination of major minerals

粒级/mm	分布率/%		
	黄铁矿	石英	磁黄铁矿
+0.250		1.35	
-0.250 ~ +0.150		10.23	
-0.150 ~ +0.100	4.24	11.09	
-0.100 ~ +0.074	14.82	14.77	4.64
-0.074 ~ +0.043	19.51	21.96	18.09
-0.043 ~ +0.020	25.79	20.20	25.31
-0.020 ~ +0.010	17.83	11.49	27.15
-0.010	17.81	8.91	24.81
合计	100.00	100.00	100.00

其中,粒度为 $-0.020$  mm占35.64%,属于微细粒嵌布。石英嵌布粒度主要为 $-0.100$  mm,其中粒度为 $-0.043$  mm占40.60%。磁黄铁矿嵌布粒度主要为 $-0.043$  mm,以微细粒形式与黄铁矿紧密嵌布,构成以黄铁矿为主的集合体。

## 2.2 主要载金矿物嵌布粒度

对该金矿中主要载金矿物(黄铁矿、石英和磁黄铁矿)的嵌布粒度进行分析,结果见表2。

由表2可知:黄铁矿嵌布粒度主要为 $-0.074$  mm。

## 2.3 金矿物嵌布状态

对该金矿中金矿物的嵌布状态进行分析,结果见表3。

表3 金矿物嵌布状态分析结果

Table 3 Analysis results of the dissemination state of gold minerals

嵌布状态	金品位/ ( $g \cdot t^{-1}$ )	原矿/%		金精矿/%		尾矿/%	
		相对含量	分布率	相对含量	分布率	相对含量	分布率
自然金			54.73		63.63		0.55
铜铅锌等硫化矿物包裹金	37.25	0.23	6.09	5.61	5.35	0.04	8.14
黄铁矿包裹金	18.33	2.24	29.57	64.53	30.29	0.20	20.04
磁黄铁矿包裹金	10.31	0.53	3.88	2.34	0.62	0.47	26.48
氧化铁矿包裹金	0.05	0.43	0.02	0.24	0	0.39	0.11
脉石矿物连生金	0.50	7.14	2.54	5.96	0.08	7.18	19.62
其他	0.05	89.43	3.17	21.32	0.03	91.72	25.06
合计		100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

由表3可知:原矿中金矿物主要以自然金形式存在,金分布率为54.73%。此外,铜铅锌等硫化矿、黄铁矿、磁黄铁矿也是金的主要载体矿物,金分布率分别为6.09%、29.57%、3.88%。上述几种矿物的回收指标将直接决定金矿物的回收效果。脉石矿物中,以方解石为载体的金矿物金品位为0.50 g/t,高于以石英等硅酸盐矿物为载体的金矿物金品位。

## 2.4 主要载金矿物单体解离度

采用矿物自动分析系统(AMICS)对该金矿中主

要载金矿物的单体解离度进行分析,结果见表4。

由表4可知:在磨矿细度为 $-0.250$  mm占49.63%时,黄铁矿(见图1)单体解离度仅为39.06%。因此,需要进行磨矿才能进一步提高单体解离度。方铅矿和黄铜矿的单体解离度不足30%,与黄铁矿嵌布紧密。因此,是否采用浮选法回收金矿物取决于黄铁矿的浮选效果。另外,磁黄铁矿的单体解离度为36.94%,同样需要进行磨矿,因此是否采用磁选或其他方法回收金矿物主要取决于磁黄铁矿的回收效果。脉石矿物石英和方解石单体解离度分别

表4 主要载金矿物单体解离度  
Table 4 Monomer dissociation degree of major gold-bearing minerals %

解离度级别	分布率					
	黄铁矿	方铅矿	磁黄铁矿	黄铜矿	石英	方解石
0 < x ≤ 10	26.64	44.24	42.98	48.62	11.59	25.45
10 < x ≤ 20	10.22	14.67	15.11	6.90	13.91	15.44
20 < x ≤ 30	15.52	8.20	3.13	3.70	14.73	10.40
30 < x ≤ 40	4.11	4.68	0.67	2.17	9.30	7.77
40 < x ≤ 50	12.82	3.33	1.78	1.62	18.73	8.21
50 < x ≤ 60	5.75	3.72	6.55	1.11	6.82	5.93
60 < x ≤ 70	2.08	3.54	0.02	4.10	6.32	6.04
70 < x ≤ 80	4.63	3.69	0.30	1.62	3.88	3.82
80 < x ≤ 90	2.46	2.94	11.65	1.73	6.48	10.87
90 < x < 100	14.96	0.45	16.83	17.40	7.91	4.45
100	0.82	10.52	0.97	11.03	0.35	1.63
平均值	39.06	22.14	36.94	29.84	42.16	37.75

为42.16%和37.75%，主要与黄铁矿呈连生体或包裹体形式存在。

### 2.5 主要矿物走向分析

采用矿物自动分析系统(AMICS),对原矿、金精矿、尾矿中金矿物的走向进行了分析,结果见表5。

由表5可知:从磁黄铁矿中回收的金精矿回收率仅14.19%,说明磁黄铁矿可浮性较差,导致部分金矿物损失在尾矿中,因此需要进一步加强对磁黄铁矿的回收,这有助于提高金回收率。

### 3 分选工艺探究

工艺矿物学研究结果表明:选矿厂现有流程存在目的矿物解离度低和载金矿物磁黄铁矿中金回收率低的问题。为解决上述问题,基于选矿厂现有工艺流程,进行了浮选和尾矿磁选联合试验,考察磨矿细度对浮选指标的影响。试验流程见图2,试验用球磨机钢球配比见表6,试验结果见表7。

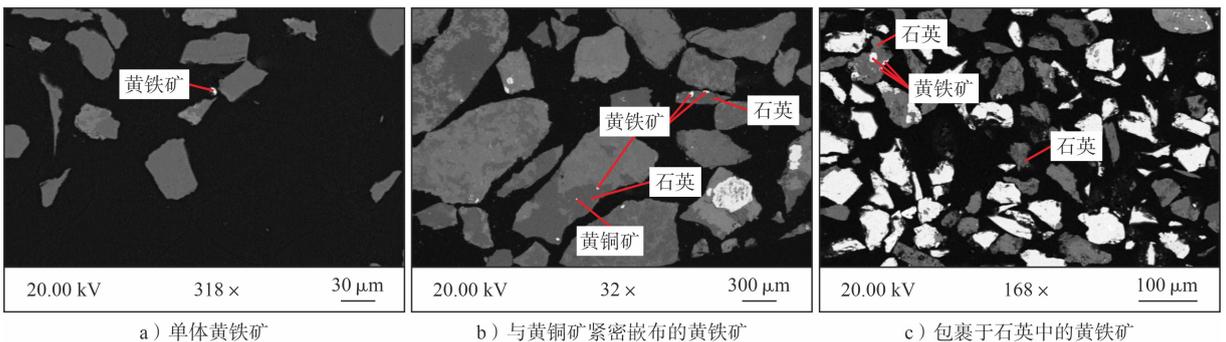


图1 扫描电镜能谱成分分析

Fig.1 Composition analysis by scanning electron microscopy

表5 金矿物走向分析

Table 5 Analysis of the trend of gold minerals

产物	产率/ %	相对含量/%			金回收率/%		
		黄铁矿	磁黄铁矿	石英	黄铁矿	磁黄铁矿	石英
金精矿	3.17	64.53	2.34	3.86	91.37	14.19	0.48
尾矿	96.83	0.20	0.47	26.38	8.53	85.81	99.52
原矿	100.00	2.24	0.53	25.66	100.00	100.00	100.00

由表7可知:对于浮选作业而言,当磨矿细度-0.074mm占67%条件下,浮选尾矿金、硫品位分别为0.38g/t、0.58%;进一步增加磨矿细度至-0.074mm占80%,浮选尾矿金、硫品位可降低至0.35g/t、0.48%。对于浮选尾矿磁选作业而言,在磨矿细度-0.074mm占67%条件下,非磁性矿物金、硫品位分别可降低至0.15g/t、0.23%;进一步增加磨矿细度至-0.074mm占85%,非磁性矿物金、硫品位可降低至0.14g/t和0.20%,变化不明显。

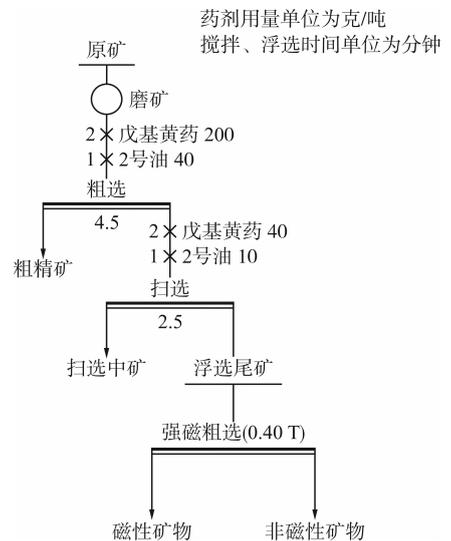


图2 磨矿细度试验流程

Fig.2 Grinding fineness test process

表6 球磨机钢球配比

Table 6 Steel ball parameters for ball mills

钢球直径/mm	质量/g	分布率/%
30	3 735.3	36.85
25	2 112.3	20.84
20	927.7	9.15
15	3 360.9	33.16
合计	10 136.2	100.00

表7 磨矿细度试验结果

Table 7 Grinding fineness test results

w(磨矿细度 -0.074 mm)/%	产物	产率/%	品位/%		回收率/%	
			Au <sup>1)</sup>	S	Au	S
67	粗精矿	6.71	17.81	18.12	74.75	65.40
	扫选中矿	1.81	3.12	6.25	3.52	6.07
	浮选尾矿	91.48	0.38	0.58	21.73	28.53
	磁性矿物	27.31	0.92	1.40	15.70	20.56
	非磁性矿物	64.17	0.15	0.23	6.02	7.97
	原矿	100.00	1.60	1.86	100.00	100.00
80	粗精矿	7.50	16.52	17.81	77.42	71.82
	扫选中矿	2.08	2.15	4.33	2.80	4.85
	浮选尾矿	90.42	0.35	0.48	19.78	23.33
	磁性矿物	24.80	0.90	1.20	13.95	16.00
	非磁性矿物	65.62	0.14	0.21	5.83	7.33
	原矿	100.00	1.60	1.86	100.00	100.00
85	粗精矿	7.70	16.11	17.64	77.51	73.04
	扫选中矿	1.86	2.33	4.12	2.70	4.11
	浮选尾矿	90.44	0.35	0.47	19.78	22.85
	磁性矿物	24.41	0.92	1.21	14.04	15.88
	非磁性矿物	66.03	0.14	0.20	5.75	6.97
	原矿	100.00	1.60	1.86	100.00	100.00

注:1)w(Au)/(g·t<sup>-1</sup>)。

## 4 结论

1) 矿石中主要金属硫化矿物为黄铁矿、磁黄铁矿,少量方铅矿、闪锌矿等;金属氧化物主要为磁铁矿;金矿物主要为自然金;脉石矿物主要为石英、方解石、角闪石、钠长石、正长石等。

2) 黄铁矿嵌布粒度主要为-0.074 mm。其中,

粒度为-0.020 mm占35.64%,属于微细粒嵌布。在磨矿细度为-0.250 mm占49.63%时,黄铁矿单体解离度为39.06%,天然可浮性较差,金回收率仅为14.19%。

3) 金矿物主要以自然金形式存在,其次以黄铁矿等硫化矿为载体的包裹金形式存在。自然金浮选回收效果较好,尾矿中自然金分布率低于1%;以黄铁矿、铜铅锌等硫化矿为载体的包裹金回收效果较好,但以磁黄铁矿为载体的包裹金回收效果较差,能否采用磁选等方法进一步回收这部分金矿物值得关注。

4) 对于浮选作业而言,适宜磨矿细度为-0.074 mm占80%;对于尾矿磁选作业而言,在磨矿细度为-0.074 mm占67%条件下,可以较好回收磁性矿物。

### [参考文献]

- [1] 陈慧杰,张莉,蒋升国,等.某微细粒难选金矿石选矿工艺研究[J].金属矿山,2018(7):131-134.
- [2] 黄国芝.高碳含砷难选金矿的选矿工艺研究[D].南宁:广西大学,2015.
- [3] 孙景敏,黄业豪,王守敬,等.小秦岭地区某含钨碲金矿工艺矿物学及综合利用试验研究[J].矿产保护与利用,2018,38(4):74-78.
- [4] 张磊,郭学益,田庆华,等.难处理金矿预处理方法研究进展及工业应用[J].黄金,2021,42(6):60-68.
- [5] 汤亦婧,罗思岗,陆红羽.辽宁某金矿选矿试验研究[J].有色金属(选矿部分),2022(4):105-110.
- [6] 李臻灏,焦芬,吴奕彤,等.难处理金矿预处理及金回收技术进展[J].贵金属,2022,43(4):87-96.
- [7] 罗栋,王艳楠.我国金矿资源现状与找矿方向[J].资源与产业,2013,15(4):51-57.
- [8] 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.
- [9] 王作兴,曹学锋,王丽.湖南某金矿降低尾矿品位的选矿研究[J].矿产保护与利用,2012,33(2):23-26.
- [10] 王铜,于鸿宾,王艳,等.甘肃某金矿石工艺矿物学研究[J].黄金,2023,44(6):59-63.
- [11] 刘璐,郭俊刚,杨玉坤,等.豫西某金钨矿的工艺矿物学研究[J].矿产保护与利用,2018,38(6):77-80,86.
- [12] 邱显扬,梁冬云,洪秋阳,等.难处理金矿石的工艺矿物学及可选冶特性分析[J].贵金属,2020,41(2):36-44.
- [13] 蒲江东,王广伟,胡海平.关于黄金选矿的技术探讨[J].中国金属通报,2018(12):291-292.
- [14] 高洋.北衙黄金选矿厂流程考查和工艺优化试验研究[D].昆明:昆明理工大学,2018.
- [15] 雷大星,张耀平,刘星,等.广东某低品位金矿选矿优化试验研究[J].矿业研究与开发,2016,36(12):19-23.

## Study on process mineralogy and factors affecting mineral processing in a gold mine in Shandong Province

Wang Yizhu<sup>1</sup>, Wang Jiayi<sup>1</sup>, Xiang Zehui<sup>1</sup>, Nan Nan<sup>1</sup>, Dong Hongliang<sup>2</sup>, Song Baoxu<sup>1</sup>

(1. School of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning;

2. Shandong Yantai Xintai Gold Mining Industry Co., Ltd.)

**Abstract:** The gold grade of a gold ore in Shandong is 1.4 g/t, which belongs to low-grade gold ores. To recover valuable metals from the ore effectively, the process mineralogy of the ore was studied. The research results showed that some gold minerals in the ore existed in the form of native gold, while others existed in the form of encased gold with sulfide minerals such as pyrite. Among them, the gold minerals carried by pyrrhotite were the main reason for the loss of gold minerals due to their low monomer dissociation degree and poor natural floatability, which made them difficult to recover by flotation. Therefore, comprehensive utilization of gold minerals carried by magnetite could help improve the gold recovery rate. The flotation and tailings magnetic separation experiments were jointly conducted. The experimental results showed that increasing the grinding fineness can effectively improve the monomer dissociation degree of useful minerals; the flotation experiment can reduce the gold and sulfur grade in the flotation tailings to 0.35 g/t and 0.48%, respectively; the tailings magnetic separation operation can reduce the gold and sulfur grade in the tailings to 0.14 g/t and 0.20%, respectively. This research can provide references for the development and utilization of similar gold deposits.

**Keywords:** gold mine; process mineralogy; grinding fineness; flotation; pyrrhotite; magnetic separation