

山东某低品位金矿工艺矿物学

石宝宝¹, 杨晓峰², 翟存楼¹, 刘瑶瑶²

(1. 山东黄金金创集团有限公司, 山东 蓬莱 265600;
2. 黑龙江科技大学矿业工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150000)

摘要: 山东某地金矿平均含 Au 0.8~1.0 g/t, 属低品位金矿。由于矿石含金较低, 为降低选矿成本, 有效回收有价金属, 对矿石进行详细的工艺矿物学研究。研究发现, 该矿石自然类型为石英黄铁矿脉, 工业类型为中硫金矿石。矿石中金属矿物主要为硫化物, 以黄铁矿为主, 次为方铅矿、闪锌矿, 含少量黄铜矿等, 非金属矿物主要为石英、绢云母等。矿石中黄铁矿粒度较粗, 方铅矿、闪锌矿、黄铜矿等粒度较细, 黄铁矿、方铅矿等与金关系较密切, 是金的主要载体矿物。自然金主要为细粒金, 多呈包裹体分布。根据工艺矿物学研究结果, 建议采用“重选+浮选”工艺流程, 不但取得较高的精矿指标, 且降低了选矿成本。

关键词: 低品位金矿; 工艺矿物学; 赋存状态; 嵌布粒度

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.06.031

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2022) 06-0184-05

随着高品位易选矿石储量逐年下降, 低品位难选矿的有效利用亟待解决^[1]。掌握低品位矿石的结构与构造、目的矿物嵌布粒度、嵌布特征、赋存状态, 以及主要脉石矿物的基本特征, 不但能为选矿厂设计提供重要依据, 还能有效控制选矿成本^[2-5]。本次工艺矿物学研究所用矿样来自于山

东省, 研究成果可为选矿工艺实验、选矿厂设计提供技术依据。

1 矿石的化学成份

1.1 多元素分析

原矿多元素分析结果见表 1。

表 1 原矿多元素分析结果/%

Table 1 Analysis results of chemical multielement of the ore

Au*	Ag*	Pb	Zn	Cu	TFe	S	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	As*
0.92	4.90	0.24	0.23	0.18	14.83	6.03	57.42	2.5	6.42	1.05	0.46	0.10	1.08

*单位为 g/t。

从表 1 可以看出原矿含金 0.92 g/t, 品位较低, 伴生的 Cu、Pb、Zn、Ag 等无回收价值, 脉石矿物以 SiO₂ 为主, 毒砂等有害物质含量较低。

1.2 原矿矿物组成分析

矿石矿物组成及相对含量统计见表 2。

由表 2 可见, 矿石主要金属矿物为黄铁矿, 少量方铅矿和闪锌矿, 脉石矿物以石英、绢云母为主。原矿矿物组分相对简单, 有利于有价元素

的回收。

表 2 矿物组成及相对含量统计

Table 2 Phase analysis of mineral composition

名称	黄铁矿	方铅矿	闪锌矿	黄铜矿
相对含量/%	25.78	1.35	1.00	0.20
名称	石英	绢云母	其他	合计
相对含量/%	57.42	11.10	3.15	100.00

收稿日期: 2020-10-23

作者简介: 石宝宝 (1992-), 助理工程师, 主要研究方向为贵金属选冶工艺。

通信作者: 杨晓峰 (1982-), 博士, 副教授, 主要研究方向为金属矿选矿工艺与理论。

1.3 原矿金、铁物相分析

原矿金物相分析结果见表3，铁物相分析结果见表4。

从表3中可以看出，矿石中的金主要以硫化物、氧化物包裹金、自然金存在。表4列出了铁的物相分析结果，矿石中的铁以多种形式存在，主要为硫化铁、赤、褐铁矿、碳酸铁等。

表3 原矿金物相分析结果
Table 3 Phase analysis of gold sample

名称	自然金	硫化物包裹金	氧化物包裹金	合计
含量/(g·t ⁻¹)	0.17	0.46	0.29	0.92
占有率/%	18.48	50.00	31.52	100.00

表4 原矿铁物相分析结果
Table 4 Phase analysis of iron ore sample

名称	磁性铁	硫化铁	赤铁矿	其他铁	全铁
含量/%	0.30	7.29	2.80	2.49	12.88
占有率/%	2.33	56.60	21.74	19.33	100.00

结合原矿多元素分析和金的物相分析结果，黄铁矿应为金的主要载体，可采用浮选对其进行回收，但是矿石中31.52%的金呈氧化物包裹体形式，可浮性较差，若采用单一浮选流程必将造成回收率指标欠佳。因此，应结合后续的矿物嵌布特征分析结果，合理设计金的选别工艺。

2 矿石的结构与构造

2.1 矿石结构

矿石结构主要为自形-半自形晶粒状结构、他形粒状结构、包含结构、交代港湾结构。其中黄铁矿等金属矿物呈自形-半自形晶粒状分布，闪锌矿、方铅矿、黄铜矿等呈他形粒状分布，方铅矿、闪锌矿交代黄铁矿、毒砂呈港湾状分布，黄铁矿包含于闪锌矿中，黄铜矿呈乳滴状分布闪锌矿中，为固溶体分离形成。

2.2 矿石构造

矿石中金属矿物主要呈浸染状构造、脉状构造。

3 矿石矿物的嵌布特征

3.1 主要金属矿物

黄铁矿：是矿石中分布最多的金属矿物，自形-半自形晶粒状为主，少数呈他形粒状分布，少量呈脉状分布。与黄铜矿、闪锌矿、方铅矿等嵌布在一起，并被其交代呈港湾状。有的黄铁矿由

于受力被压碎，发育裂隙，有的细粒黄铁矿中包含于闪锌矿或方铅矿中。黄铁矿粒度粗细不等，粒径多为(0.2~2 mm)。见图1、2。

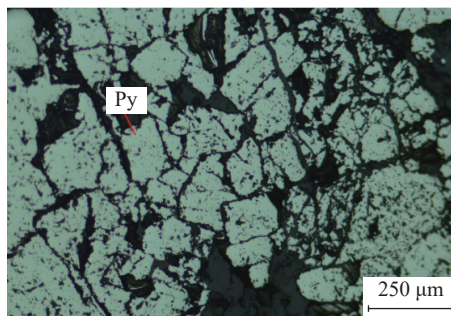


图1 黄铁矿呈自形-半自形粒状分布
Fig.1 Euhedral-subhedral pyrite

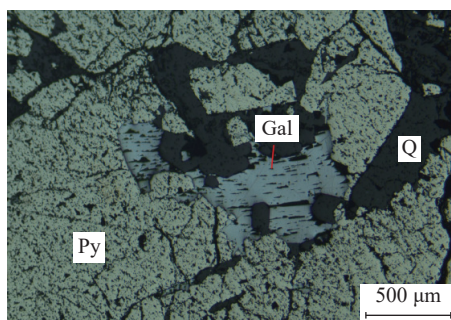


图2 黄铁矿被方铅矿交代呈港湾状
Fig.2 Harbor morphology pyrite metasomatism of galena

方铅矿：亮白色反射色，均质性，表面具擦痕。他形粒状分布于石英晶隙或与黄铁矿、闪锌矿等嵌布在一起，有的交代黄铁矿呈港湾状，分布不均匀，粒度粗细不等，粒径多为(0.1~2 mm)，分布不均匀。见图3、4。

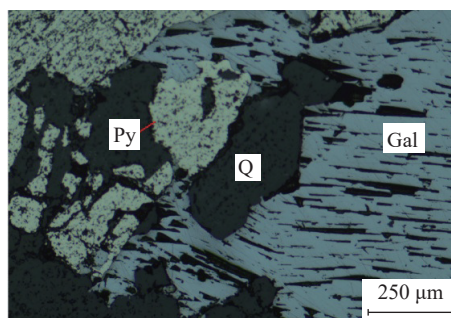


图3 方铅矿嵌布于石英、黄铁矿粒间
Fig.3 Galena disseminate with pyrite and silica

闪锌矿：他形粒状分布脉石粒间，或与黄铁矿、方铅矿、黄铜矿嵌布在一起，有的闪锌矿有乳滴状黄铜矿，为固溶体分离形成，粒度粗细不等，粒径多为(0.01~0.3 mm)，不均匀分布。见图4、5。

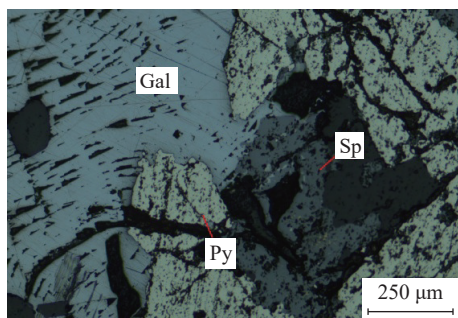


图 4 方铅矿嵌布于闪锌矿、黄铁矿粒间
Fig.4 Galena disseminate with pyrite and sphalerite

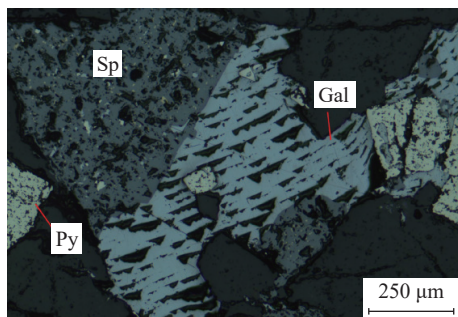


图 5 闪锌矿与方铅矿嵌布在一起
Fig.5 Sphalerite disseminate with galena

黄铜矿：他形粒状分布脉石粒间，或与黄铁矿、闪锌矿等嵌布在一起，有的包裹于黄铁矿中，粒径多为 (0.01~0.3 mm)，少量呈乳滴状分布闪锌矿中，分布不均匀。见图 6、7。

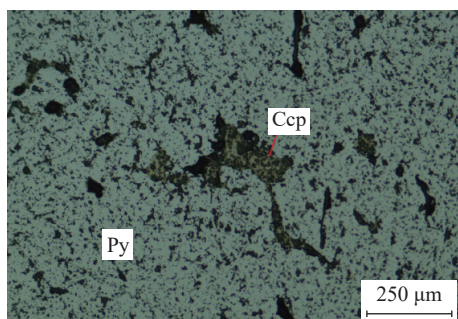


图 6 黄铜矿分布黄铁矿粒间
Fig.6 Chalcopyrite particle distribution with pyrite

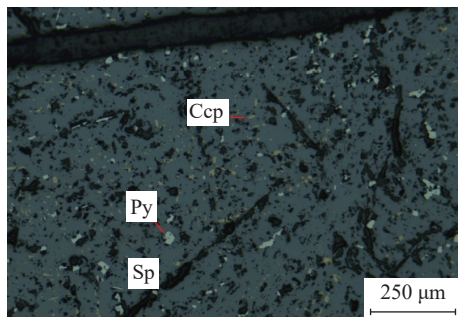


图 7 黄铜矿呈乳滴状分布闪锌矿中
Fig.7 Opalescent chalcopyrite in sphalerite

3.2 主要非金属矿物

石英：他形粒状或柱状分布，与绢云母、黄铁矿分布在一起粒径 (0.3~2 mm)，表面干净。见图 8、9。

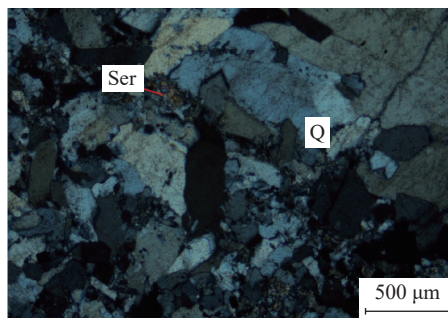


图 8 石英呈他形粒状分布
Fig.8 Allotriomorphic granular silica

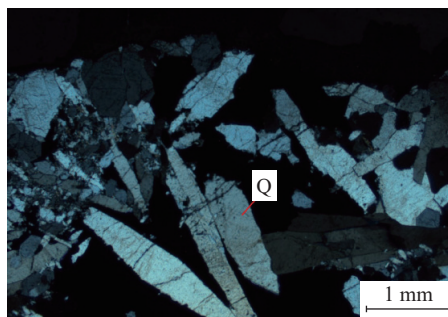


图 9 石英呈柱状分布
Fig.9 Columnar distribution of silica

绢云母：鳞片状集合体分布，与石英分布在一起，见图 10。

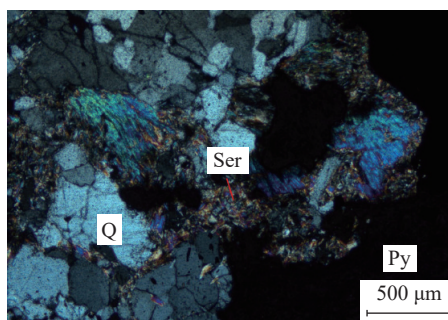


图 10 绢云母呈鳞片状集合体分布石英粒间
Fig.10 Sericite scaly aggregate distribution in silica

4 主要矿物粒度特性

4.1 金属矿物粒度特性

对主要金属矿物分别进行粒度测定，其结果见表 5。对原矿中主要金属矿物进行粒度分析，目的是探索磨矿细度、分离方式等。从表 5 中可以看出，矿石中黄铁矿、方铅矿等硫化矿粒度较

粗，可在较粗的磨矿细度下实现矿物的单体解离。

表5 主要金属矿物粒度分析结果
Table 5 Metallic mineral grain size analysis

粒径区间/mm	黄铁矿	方铅矿	闪锌矿
+0.1	76.34	41.78	40.28
-0.1+0.074	10.15	27.62	28.55
-0.074+0.053	8.20	16.23	16.02
-0.053+0.037	4.02	8.22	8.45
-0.037+0.01	1.21	4.15	6.42
-0.01	0.08	0.20	0.28
合计	100.00	100.00	100.00

4.2 自然金粒度特性

光片中镜下共见到4粒金矿物，为自然金，其形态、粒度及赋存状态见表6。从表6的光片分析结果中可以看出，金赋存在硫化矿、石英间隙以及黄铁矿的包裹体中，且呈细粒分布，见图11、12。后续可选性实验过程中应注意该部分金的回收，避免其损失在尾矿中。

表6 光片中明金粒度分析结果
Table 6 Gold grain size analysis in light section

粒径/mm	形态	赋存状态
0.031×0.013	麦粒状	黄铁矿包裹体
0.019×0.010	麦粒状	黄铁矿包裹体
0.019×0.010	角砾状	黄铁矿与方铅矿晶隙
0.017×0.009	枝杈状	石英间隙

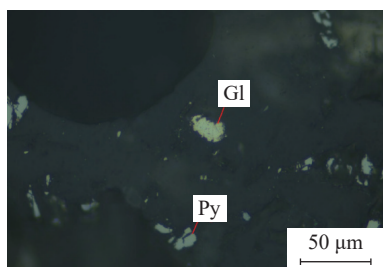


图11 呈单体的自然金
Fig.11 Monomer natural gold

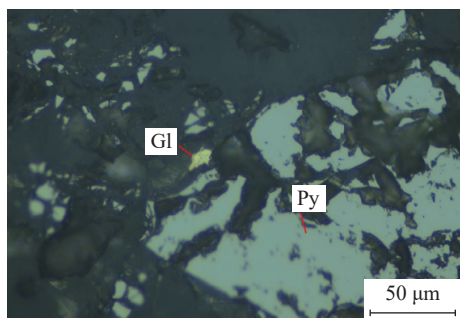


图12 与黄铁矿连生的金
Fig.12 Gold attach with pyrite

5 重选工艺流程探索实验

工艺矿物学研究发现，金在矿石中分布较为广泛，主要以自然金、硫化物包裹体、氧化物包裹体形式存在，自然金、硫化物包裹体可浮性较好，可采用浮选工艺回收。氧化物包裹体可浮性较差，浮选难以回收。而矿石中主要脉石矿物为石英等硅酸盐矿物，与自然金、金属硫化矿比重差较大，且硫化矿单体粒度较粗，可考虑用重选工艺回收。探索性试验考查了矿砂摇床、螺旋溜槽、悬震锥面选矿机、尼尔森离心机四种类型重选设备对金矿预富集效果，实验细度均为-0.074 mm 50%。实验结果见表7。

表7 重选设备实验结果
Table 7 Test results of gravity separation equipment

重选设备	产率/%	品位/(g·t ⁻¹)	回收率/%
矿砂摇床	1.28	22.45	47.33
螺旋溜槽	1.02	25.21	38.84
悬震锥面选矿机	1.25	28.28	44.14
尼尔森离心机	2.05	23.63	60.38

从表7实验结果中可以看出，4种重选设备中尼尔森离心机选别指标最好，可获得含Au 23.63 g/t，回收率60.38%的重选精矿。离心机试验相关参数为：给矿速度为3.5 kg/min，反向冲洗水压为0.04 MPa，流态化水量为4 kg/min，扩大重力倍数为80 G。

尼尔森离心机获得较好的精矿指标是因为其是一种基于离心力场、借助高速旋转离心作用产生高倍“强化重力”的特性，在高倍的强化离心力场内，不同密度矿物所受的重力差被放大，从而实现矿物颗粒按密度分选^[6-7]。

6 金的可选性评价

(1) 原矿含金0.92 g/t，品位较低，伴生的Cu、Pb、Zn、Ag等无回收价值，脉石矿物是SiO₂和绢云母，矿物组成相对简单，对有价元素回收有利。

(2) 矿石中金主要呈硫化物、氧化物包裹体，金包裹体分配率占总量的81.52%，其余部分为自然金。

(3) 矿石中31.52%的金呈氧化物包裹体形式，可浮性较差，常规浮选较难回收。黄铁矿作为主要的载金矿物，单体粒度大于0.1 mm

73.34%，因此建议采用重选对上述载金矿物进行回收。

(4) 通过探索性试验发现，采用尼尔森离心机在给矿速度为 3.5 kg/min，反向冲洗水压 0.04 MPa，流态化水量 4 kg/min，扩大重力倍数为 80 G 的条件下，可获得含 Au 23.63 g/t，回收率 60.38% 的重选精矿。

(5) 结合工艺矿物学研究和重选探索性实验结果，建议采用尼尔森离心机重选+浮选的工艺流程对该矿石进行回收利用。

参考文献：

- [1] 蒋琳, 李阿俊. 内蒙古某含银铅锌矿工艺矿物学研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(1):94-97.
- JIANG L, LI A J. Study on process mineralogy for a silver-containing lead-zinc ore in Inner Mongolia[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(1):94-97.
- [2] 马驰, 于岸洲, 张颖新, 等. 国外某铁锰矿工艺矿物学研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(1):107-111.
- MA C, YU A Z, ZHANG Y X, et al. Study on process mineralogy of a foreign iron-manganese ore[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(1):107-111.
- [3] 惠博, 王越, 陈伟, 等. 贵州某铅锌矿工艺矿物学研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(1):103-106.
- HUI B, WANG Y, CHEN W, et al. Study on process mineralogy of a lead-zinc ore in Guizhou province[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(1):103-106.
- [4] 周利华, 陈晓芳, 苏妤芸. 山西某斑岩型金矿工艺矿物学特性[J]. *矿产综合利用*, 2020(3):143-147.
- ZHOU L H, CHEN X F, SU S Y. Technological and mineralogical characteristics of a porphyry gold deposit in Shanxi province[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(3):143-147.
- [5] 王伟之, 李学军, 陈丽平. 辽宁某铜铅锌多金属硫化矿工艺矿物学研究[J]. *金属矿山*, 2014 (2): 83-86.
- WANG W Z, LI X J, CHEN L P. Study on process mineralogy of a copper lead zinc polymetallic sulfide ore in Liaoning [J]. *Metal Mine*, 2014 (2): 83-86.
- [6] 李国旺. 离心选矿机选矿机在天马山黄金矿业应用的可能性[J]. *现代矿业*, 2015 (7), 229-230.
- LI G W. Possibility of the application of centrifugal concentrator in Tianmashan gold mining industry [J]. *Modern Mine*, 2015, (7), 229-230.
- [7] 黄业豪, 孙景敏, 李翠芬, 等. 内蒙古某金矿尼尔森重选试验研究[J]. *矿业研究与开发*, 2019(3): 75-78.
- HUANG Y H, SUN J M, LI C F, et al. Research on nielsen gravity concentration test of a gold mine in Inner Mongolia[J]. *Mining Research and Development*. 2019(3): 75-78.

Detailed Study on Technological Mineralogy of a Low Grade Gold Ore in Shandong

Shi Baobao¹, Yang Xiaofeng², Zhai Cunlou¹, Liu Yaoyao²

(1. Shandong Gold Jinchuang Group Co.Ltd, Penglai, Shandong, China; 2. School of Mining Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang, China)

Abstract: The gold mine in a certain place in Shandong contains 0.8~1.0 g/t Au on average, which is a low-grade gold mine. Because the ore contains low gold, in order to reduce the cost of beneficiation and effectively recover valuable metals, detailed process mineralogical research is carried out on the ore. The study found that the natural type of the ore is quartz pyrite veins, and the industrial type is medium-sulfur gold ore. The metal minerals in the ore are mainly sulfides, mainly pyrite, followed by galena, sphalerite, and a small amount of chalcopyrite. Non-metallic minerals are mainly quartz, sericite, etc. In the ore, the particle size of pyrite is relatively coarse, and the particle size of galena, sphalerite, chalcopyrite, etc. is relatively fine. Pyrite and galena are closely related to gold and are the main carrier minerals for gold. Natural gold is mainly fine-grained gold, mostly distributed in inclusions. According to the research results of process mineralogy, it is recommended to adopt the "gravity separation + flotation" process, which not only achieves higher concentrate indicators, but also reduces the cost of mineral processing.

Keywords: Low-grade gold ore; Technological mineralogy; Occurrence state; Dissemination size