

基于金矿岩芯的自动工艺矿物学

蔡明明¹, 李光胜¹, 朱幸福¹, 徐超¹, 孙琪伟², 王楠²

(1. 山东黄金矿业科技有限公司选冶实验室分公司, 山东 烟台 261441; 2. 山东黄金矿业(莱州)有限公司三山岛金矿, 山东 烟台 261442)

摘要: 这是一篇工艺矿物学领域的论文。山东某石英脉型金矿, 金品位 2.51 g/t。为对该矿床的进一步开发及选矿工艺研究, 对该矿物开展了工艺矿物学研究。本次研究涉及的技术方法包括多元素化学分析、化学物相分析、光学显微镜鉴定、X 射线衍射(XRD)分析、矿物自动定量分析(BPMA)、扫描电镜-能谱仪(SEM-EDS)分析等。结果表明: (1) 矿石中金矿物绝大多数为银金矿, 偶见微量的金银矿和自然金; (2) 矿石中金矿物与黄铁矿等硫化物的嵌布关系十分密切, 黄铁矿是金矿物的最主要的载体矿物, 矿石中单体及裸露金的占有率为 58.96%, 黄铁矿等硫化物中包裹金的占有率为 39.84%, 脉石矿物中包裹金的占有率为 1.20%; (3) 矿石中金矿物粒度分布不均匀, 整体粒度较细, 矿石中可见粒度+0.020 mm 的金矿物颗粒, 其占有率为 22.08%, -0.020 mm 的金矿物占有率为 77.92%, 其中-0.005 mm 的微粒金矿物占有率为 24.83%, -0.001 mm 的亚微米级微细粒金矿物占有率为 0.35%。

关键词: 岩芯金矿; 黄铁矿; 银金矿; 工艺矿物学; 嵌布特征; 赋存状态

doi:[10.3969/j.issn.1000-6532.2024.03.027](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6532.2024.03.027)

中图分类号: TD912 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2024) 03-0174-05

引用格式: 蔡明明, 李光胜, 朱幸福, 等. 基于金矿岩芯的自动工艺矿物学[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(3): 174-178.

CAI Mingming, LI Guangsheng, ZHU Xingfu, et al. Automatic process mineralogy based on gold ore core[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(3): 174-178.

矿石的工艺矿物学研究是矿产资源评价、选冶加工的基础^[1-4]。可获得矿石工艺性质和选矿过程产品的矿物特征参数(金矿矿物组成、金的化学物相状态、金的嵌布特征、嵌布粒度和单体解离度^[5]等)的变化规律, 为制定合理的选矿工艺流程以及优化选矿生产工艺提供理论依据^[6],

自动工艺矿物学的出现为物质组分特征及赋存状态研究^[7-10]等变得更加精准、高效。

1 化学分析

矿石试样化学多元素分析结果见表 1, 金物相分析结果见表 2。

表 1 矿石试样化学多元素分析结果/%
Table 1 Chemical multi-element analysis results of ore samples

| Au* | Ag* | Cu | Pb | Zn | Fe | S | WO ₃ | Sb | As | Co |
|------------------|------------------|--------------------------------|-------|-------|------|-------------------|------------------|-------|--------|--------|
| 2.51 | 7.4 | 0.016 | 0.049 | 0.034 | 5.76 | 4.79 | <0.01 | <0.01 | <0.001 | <0.005 |
| SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P | C | |
| 69.74 | 0.145 | 10.54 | 0.13 | 0.66 | 0.73 | 0.090 | 3.79 | 0.042 | 0.53 | |

*单位为 g/t

收稿日期: 2022-08-31

基金项目: 矿治过程自动控制技术国家重点实验室基金(BGRIMM-KZSKL-2019-01)

作者简介: 蔡明明(1985-), 男, 工程师, 从事选冶技术及工艺矿物学研究与应用。

表2 矿石中金的化学物相分析结果

Table 2 Chemical phase analysis results of gold in ores

| 名称 | 裸露金 | 硫化物包裹金 | 脉石矿物包裹金 | 合计 |
|----------|-------|--------|---------|--------|
| 含量/(g/t) | 1.48 | 1.00 | 0.03 | 2.51 |
| 分布率/% | 58.96 | 39.84 | 1.20 | 100.00 |

从表2可以看出，矿石中金主要以裸露金形式存在，其分布率为58.96%；其次为硫化物包裹金，其分布率为39.84%；另有少量脉石矿物包裹金，其分布率为1.20%。

2 X射线衍射分析

样品的X射线衍射(XRD)分析结果见图1。分析结果显示，矿样中的矿物主要有石英、云母、黄铁矿等。

[XL-ZHY.raw]

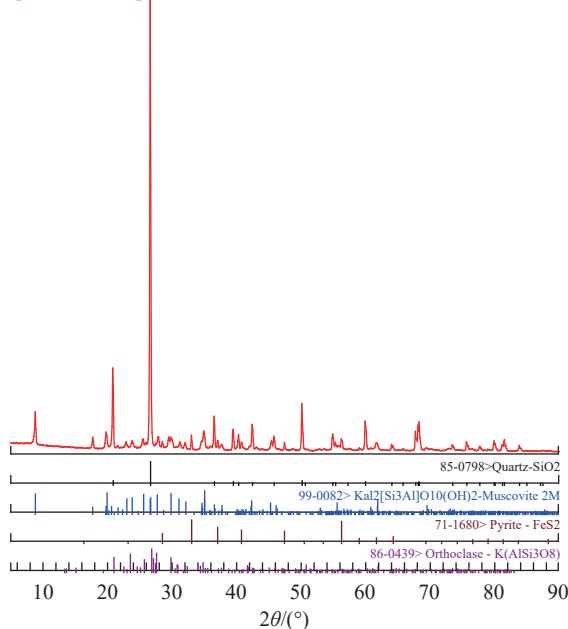


图1 矿石样品XRD
Fig.1 XRD pattern of ore samples

3 矿物定量分析

利用矿物自动定量分析系统(BPMA)，结合光学显微镜鉴定、X射线衍射(XRD)分析、扫描电镜-能谱仪(SEM-EDS)等多种仪器、方法，得到矿石的矿物组成及矿物定量结果，详见表3。

矿石中金矿物主要为银金矿，偶见微量的金银矿和自然金；矿石中金属硫化物主要为黄铁矿，含有少量的黄铜矿、方铅矿和微量的闪锌矿、铁闪锌矿等，偶见微量的毒砂等；此外，样

表3 矿石的矿物组成及相对含量

Table 3 Mineral composition and relative content of ores

| 序号 | 矿物名称 | 矿物量/% | 序号 | 矿物名称 | 矿物量/% |
|----|----------|-------|----|------|-------|
| 1 | 黄铁矿 | 11.92 | 13 | 磷灰石 | 0.22 |
| 2 | 磁铁矿 | 1.94 | 14 | 石榴石 | 0.17 |
| 3 | 黄铜矿 | 0.06 | 15 | 绿帘石 | 0.11 |
| 4 | 方铅矿 | 0.05 | 16 | 金红石 | 0.09 |
| 5 | 闪锌矿、铁闪锌矿 | 0.03 | 17 | 绿泥石 | 0.07 |
| 6 | 石英 | 54.10 | 18 | 普通辉石 | 0.07 |
| 7 | 绢云母 | 19.48 | 19 | 黑云母 | 0.05 |
| 8 | 钾长石 | 8.57 | 20 | 天青石 | 0.02 |
| 9 | 铁白云石 | 1.33 | 21 | 独居石 | 0.01 |
| 10 | 菱铁矿 | 0.81 | 22 | 方解石 | 0.01 |
| 11 | 斜长石 | 0.54 | 23 | 重晶石 | 0.01 |
| 12 | 角闪石 | 0.27 | 24 | 其他 | 0.07 |

品中还存在少量的磁铁矿、菱铁矿等。矿石中脉石矿物主要为石英，其次为绢云母和钾长石，含少量的铁白云石和微量的斜长石、角闪石、绿帘石、绿泥石、磷灰石、金红石等。

4 矿石的结构和构造

矿石构造主要发育浸染状构造、脉状构造和网脉状构造等。矿石结构类型主要有晶粒结构(图2a, 2b)、压碎结构(图2c)、填隙结构、包含结构(图2d)等。

5 金矿物嵌布特征

矿石中的金矿物主要为银金矿，偶见微量的金银矿和自然金。

矿样中金矿物粒度不均，整体粒度较细，从亚微米级到20 μm以上的金颗粒均有产出。

就金矿物颗粒与载体矿物的关系而言，矿石中的金矿物与黄铁矿的关系最为密切。利用矿物自动定量分析系统(BPMA)和扫描电镜-能谱(SEM-EDS)对矿物系统的研究。结果显示，矿石中的金矿物主要为微细粒状包裹金，主要被黄铁矿包裹，偶见极其微量的闪锌矿、黄铜矿等其他硫化物包裹金和绢云母等脉石矿物包裹金；其次为裂隙金，主要嵌布于黄铁矿颗粒的裂隙/孔隙中；少量粒间金，嵌布于黄铁矿-黄铜矿/方铅矿/闪锌矿等硫化物粒间、黄铁矿-石英粒间、黄铁矿-菱铁矿粒间或石英-菱铁矿粒间。此外，还存在少量连生金和单体金。典型的金矿物嵌布特征见图3、4及表4。

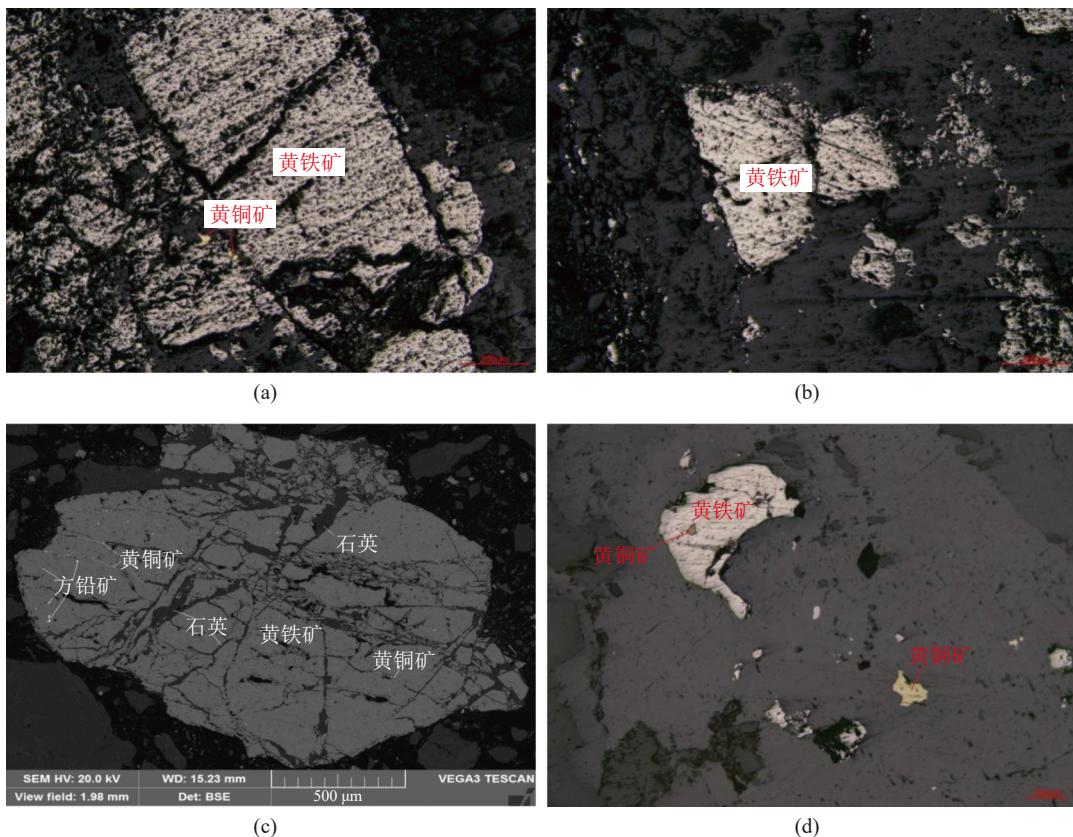


图2 矿石结构显微特征
Fig.2 Microscopic characteristics of the ore structure

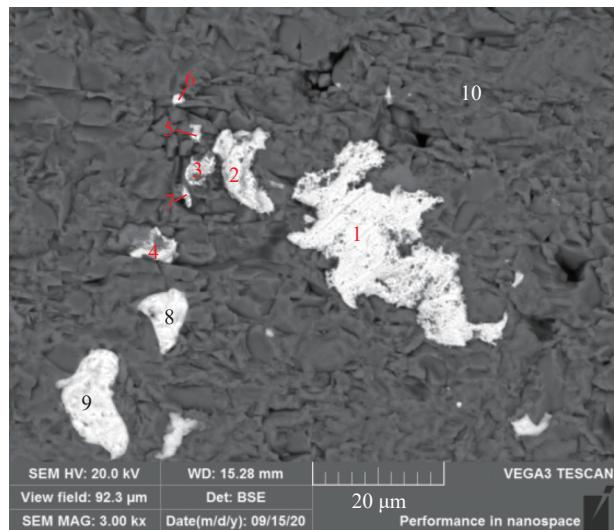


图3 粒度大小不一的金矿物包裹在黄铁矿颗粒中
Fig.3 Gold minerals with different particle sizes wrapped in pyrite particles

6 金矿物的嵌布粒度

矿石中金矿物的嵌布粒度统计结果见表5。结果显示，矿石中金矿物粒度分布不均匀，整体粒度较细，矿石中可见粒度+0.020 mm 的金矿物颗

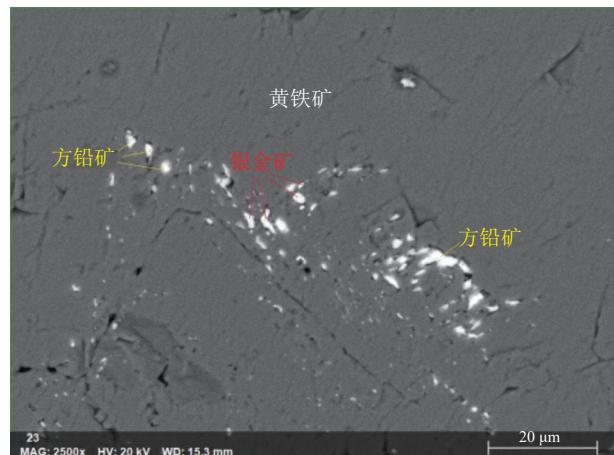


图4 微细粒金矿物（银金矿）和微细粒方铅矿呈微细粒浸染状，包裹在黄铁矿颗粒中
Fig.4 Fine grained gold mineral (silver gold deposit) and fine grained galena in fine-disseminated shape and wrapped in pyrite particles

粒，其占有率为 22.08%，-0.020 mm 的金矿物占有率为 77.92%，其中-0.005 mm 的微粒金矿物占有率为 24.83%，-0.001 mm 的亚微米级微细粒金矿物占有率为 0.34%。

从不同形式产出金的粒度分布来看，包裹金

表4 矿石中金矿物的产出状态/%

Table 4 Output status of gold minerals in ores

| 金与载体矿物之间 的关系 | 金矿物嵌布特征 | 占有率 | 合计 |
|-----------------|--------------------------|-------|-------|
| 包裹金 | 被黄铁矿包裹 | 64.25 | 64.79 |
| | 被闪锌矿包裹 | 0.46 | |
| | 被黄铜矿包裹 | 0.01 | |
| | 被绢云母包裹 | 0.07 | |
| 裂隙金 | 嵌布于黄铁矿裂隙/孔隙中 | 14.70 | 14.70 |
| 粒间金 | 嵌布于黄铁矿与黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等硫化物粒间 | 1.82 | 6.40 |
| | 嵌布于黄铁矿与石英粒间 | 2.49 | |
| | 嵌布于石英与菱铁矿粒间 | 1.39 | |
| | 嵌布于黄铁矿与菱铁矿粒间 | 0.70 | |
| 连生金 | 与黄铁矿连生 | 10.95 | 10.99 |
| | 与黄铜矿连生 | 0.04 | |
| 单体金 | — | 3.12 | 3.12 |

注：金矿物的嵌布特征和产出状态研究是对-2 mm样品分析完成的，故存在一部分连生金和单体金。

表5 矿石中金矿物的粒度统计结果
Table 5 Particle size statistics of gold minerals in ores

| 粒级 / μm | 金矿物 | | 包裹金 | | 粒间金 | | 裂隙金 | |
|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 含量 /% | 累计 /% | 含量 /% | 累计 /% | 含量 /% | 累计 /% | 含量 /% | 累计 /% |
| +20 | 22.08 | 22.08 | 34.07 | 34.07 | | | | |
| -20+15 | 10.06 | 32.14 | 15.52 | 49.59 | | | | |
| -15+10 | 19.89 | 52.03 | 25.92 | 75.51 | | | | |
| -10+5 | 23.14 | 75.17 | 8.88 | 84.39 | 62.95 | 62.95 | 49.89 | 49.89 |
| -5+4 | 9.96 | 85.13 | 7.17 | 91.56 | 15.21 | 78.16 | 10.51 | 60.40 |
| -4+3 | 6.79 | 91.92 | 3.86 | 95.42 | 13.68 | 91.84 | 14.63 | 75.03 |
| -3+2 | 5.78 | 97.70 | 3.07 | 98.49 | 5.89 | 97.73 | 17.58 | 92.61 |
| -2+1 | 1.96 | 99.66 | 1.27 | 99.76 | 1.51 | 99.24 | 6.42 | 99.02 |
| -1 | 0.34 | 100.00 | 0.24 | 100.00 | 0.76 | 100.00 | 0.98 | 100.00 |

注：金矿物*包括矿石中银金矿、金银矿、自然金等所有的金矿物。

整体粒度较细，从亚微米级到20 μm 以上的包裹金均有产出；粒间金和裂隙金的粒度基本上分布于-10 μm 。需要特别指出的是，包裹金中有24.49%分布于-0.010 mm，即使细磨也较难充分裸露出来。

7 矿石中金的赋存状态研究

金在不同矿物中的分布率见表6。结果显示，矿石中金的品位为2.51 g/t，绝大多数金主要以银金矿的形式存在，金在银金矿中的分布率为94.80%；其次分布在金银矿中，分布率约占

3.24%；微量分布在自然金中，分布率仅为1.96%。

表6 金在不同矿物中的分布率

| Table 6 | 金矿物含量 比值/% | 矿物中金的平均 含量/% | 金分布率/ % |
|---------|---------------|-----------------|------------|
| 银金矿 | 93.81 | 65.70 | 94.80 |
| 金银矿 | 4.67 | 45.05 | 3.24 |
| 自然金 | 1.52 | 83.91 | 1.96 |

8 结 论

(1) 矿石中Au的品位为2.51 g/t，是矿石中最主要的有价元素，其他伴生有价元素Cu、Pb、Zn等含量均较低。矿石中的金主要以银金矿、金银矿、自然金的形式存在。黄铁矿是金矿物的主要载体矿物，因此可通过浮选富集黄铁矿等硫化物的方式回来回收金。矿石中金矿物粒度分布不均匀，整体嵌布粒度较细，粒度大于20 μm 的金矿物颗粒占有率为22.08%；-5 μm 的微粒金占有率为24.83%，其中-1 μm 的亚微米级超细粒金占有率为0.34%。

(2) 矿石中最主要的硫化物为黄铁矿，含少量方铅矿和黄铜矿。粒度统计结果表明，矿石中黄铁矿的粒度较粗，易于解离；黄铜矿和方铅矿的粒度相对较细，不易于单体解离。

(3) 矿石中包裹金的占有率为64.79%，主要被黄铁矿包裹，偶见闪锌矿和黄铜矿包裹金，浮选富集黄铁矿等硫化物以后对粗精矿进行再磨，有利于提高金精矿品位，矿石中有少量的微粒金包裹于脉石矿物中，这部分金在回收过程中易损失于尾矿中，对金的回收率会造成一定的影响。

(4) 矿石中含有较多的绢云母等层状硅酸盐矿物，这些层状矿物的天然可浮性较好，且在磨矿过程容易泥化，会恶化选矿环境，影响选别指标，在选矿作业过程中要重点关注。

参考文献：

- [1] 梁晓, 胡瑞彪, 冯泽平. 广东某复杂难选难浸金矿工艺矿物学[J]. *矿产综合利用*, 2019(6):65-68.
LIANG X, HU R B, FENG Z P. Study on the technological mineralogy of a complex refractory gold ore in Guangdong[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(6):65-68.
- [2] 周利华, 陈晓芳, 苏好芸. 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 Y Y. Technological and mineralogical characteristics of a porphyry gold deposit in Shanxi Province[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(3):143-147.

[3] 刘坤, 王婷霞, 李健民, 等. 天水某金矿工艺矿物学及选矿试验研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(5):101-104.

LIU K, WANG T X, LI J M, et al. Process mineralogy and mineral processing of a gold mine in Tianshui[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(5):101-104.

[4] 王越, 王婧, 李潇雨, 等. 川西某金矿工艺矿物学研究及对选矿工艺的影响[J]. *矿产综合利用*, 2021(4):206-210.

WANG Y, WANG J, LI X Y, et al. Process mineralogy study of the gold deposit in western Sichuan area and its influence on mineral Processing technology[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(4):206-210.

[5] 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. Process mineralogy of a gold ore from Lingbao[J]. *Metal Mining*, 2017(11):112-115.

[6] 王川. 工艺矿物学在新疆某铜矿浮选尾矿降尾工艺试验中的应用研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2021(4):13-17.

WANG C. Application of process mineralogy in the tailing

reduction process test of flotation tailings of a copper mine in Xinjiang[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2021(4):13-17.

[7] 吴师金, 刘庭忠. 新疆某白钨矿物质组分特征及赋存状态研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2020(6):8-13+18.

WU S J, LIU T Z. Characterization of the material components and the state of the scheelite ore in Xinjiang[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2020(6):8-13+18.

[8] 孙传尧. 选矿工程师手册: 第1册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2015.

SUN C Y. Handbook for mineral processing engineers: book 1[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2015.

[9] 肖仪武. 某铜锡多金属矿尾矿工艺矿物学研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2020(1):1-5.

XIAO Y W. Research on process mineralogy of tailings of a copper-tin polymetallic mine[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2020(1):1-5.

[10] 叶小璐. 工艺矿物学在选厂流程优化中的作用[J]. 有色金属(选矿部分), 2020(4):13-16+33.

YE X L. The role of process mineralogy in the optimization of beneficiation plant flow[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2020(4):13-16+33.

Automatic Process Mineralogy Based on Gold Ore Core

CAI Mingming¹, LI Guangsheng¹, ZHU Xingfu¹, XU Chao¹, SUN Qiwei², WANG Nan²

(1.Metallurgical Laboratory Branch of Shandong Gold Mining Technology Co., Ltd., Yantai 261441, Shandong, China; 2.Shandong Gold Mining (Laizhou) Co., Ltd., San Shandao Gold Mine, Yantai 261442, Shandong, China)

Abstract: This is an article in the field of process mineralogy. A quartz vein type gold deposit in Shandong has a gold grade of 2.51 g/t. In order to further develop the deposit and study the beneficiation process, the process mineralogy of the mineral was carried out. The technical methods involved in this study include multi-element chemical analysis, chemical phase analysis, optical microscope identification, X-ray diffraction (XRD) analysis, automatic quantitative mineral analysis (BPMA), scanning electron microscope energy spectrometer (SEM-EDS) analysis, etc. The results show that: (1) most of the gold minerals in the ore are silver-gold, and a small amounts of gold, silver and natural gold are occasionally found; (2) The embedding relationship between gold minerals and sulfides such as pyrite in the ore is very close. Pyrite is the main carrier mineral of gold minerals, and the proportion of single and exposed gold in the ore is high, which is 58.96%. The proportion of gold encapsulated in sulfides such as pyrite is 39.84%, and the proportion of gold encapsulated in gangue minerals is 1.20%; (3) The particle size distribution of gold minerals in the ore is uneven, and the overall particle size is relatively fine. Gold particles with a particle size larger than 0.020 mm can be seen in the ore, with an occupancy rate of 22.08%. Gold minerals with a particle size less than 0.020 mm have an occupancy rate of 77.92%, with an occupancy rate of 24.83% for micro gold minerals with a particle size less than 0.005 mm and 0.35% for sub micron sized gold minerals with a particle size less than 0.001 mm.

Keywords: Core gold; Pyrite; Silver gold deposit; Process mineralogy; Distribution characteristics; Occurrence state