

## 某难选金矿物工艺矿物学研究

蔡明明, 张文平, 徐超, 李光胜, 黄发波, 朱幸福

(山东黄金矿业科技有限公司选冶实验室分公司, 山东 烟台 261411)

**摘要:** 某金矿部分矿区属于蚀变型金矿, 含金蚀变带系由花岗岩热液蚀变而发生的绢云母、硅化、黄铁矿化组成。矿体大部分赋存在黄铁绢云岩内, 部分赋存在黄铁绢英岩化花岗岩内。利用光学显微镜、矿物分析系统(BPMA)、扫描电子显微镜及能谱对矿物进行工艺矿物学特性分析, 分析发现矿石中以硫化矿为主, 氧化带深度很浅。金品位 5.23 g/t, 主要金矿物有自然金、银金矿, 主要金属矿物为黄铁矿、磁黄铁矿、方铅矿、黄铜矿、闪锌矿等硫化矿和磁铁矿等氧化矿物, 脉石矿物主要有石英、绢云母、长石等。金的嵌布粒度较细, 全部分布在 37 μm 以下, 嵌布粒度较细。根据金矿物的赋存状态来看, 以单体形式存在和与黄铁矿共生的含金矿物含量 83.18%, 这部分金矿物易于回收; 与绢云母、石英和磁铁矿共生的含金矿物含量为 16.82%, 这部分是导致浮选过程中金回收率低的主要原因。

**关键词:** 蚀变型金矿; 工艺矿物学; 赋存状态; 嵌布粒度

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.05.033

中图分类号: TD912 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2022)05-0194-06

某金矿探明部分区内金品位含量较高, 达到 5.23 g/t, 但在实际生产过程中发现其金的浮选回收率较低, 仅在 80% 左右, 为查明目的矿物与主要脉石矿物的嵌布特征和解离特征等<sup>[1]</sup>, 探寻导致浮选回收率低的原因, 为确定该矿石的开发利用工艺<sup>[2]</sup>, 优化浮选工艺来回收矿石中的有价元素<sup>[3]</sup>进行了系统的工艺矿物学研究<sup>[4]</sup>, 为实验研究提供详细的工艺矿物学资料<sup>[5]</sup>, 查清了该矿物浮选过程中有价元素的流失状态和流失原因, 为正确有效地指导选矿流程、提高选矿指标和企业经济效益提供了理论依据<sup>[6]</sup>, 保证资源的高效回收<sup>[7]</sup>。

### 1 矿石性质

#### 1.1 化学分析

难选金矿物样品的多元素分析结果见表 1, 矿物组成及含量见表 2, 金物相结果见表 3。

表 1 难选金矿物样品的多元素分析结果/%

Table 1 Multi-element analysis results of refractory gold mineral samples

Au*	Ag*	Pb	Zn	Fe	Cu	S
5.23	19.25	0.15	0.13	18.26	0.11	12.31
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	
46.27	8.71	1.27	1.52	0.81	2.70	

\*单位为: g/t。

表 2 矿物组成及相对含量

Table 2 Mineral composition and relative content

矿物	含量/%	矿物	含量/%
黄铁矿	28.07	石英	28.43
磁黄铁矿	1.92	普通辉石	0.72
磁铁矿	2.46	方解石	0.96
水铝铁矿	1.31	云母	26.13
方铅矿	0.17	长石	5.71
黄铜矿	0.22	绿钠闪石	1.62
闪锌矿	0.19	整柱石	1.48
其他	0.21	其他	0.40
小计	34.55	小计	65.45
		合计	100.00

收稿日期: 2020-08-20; 改回日期: 2020-09-02

基金项目: 矿冶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, 学士, 工程师, 主要从事选矿研究与应用。

表3 Au物相分析结果

Table 3 Distribution results of Au in the samples

名称	自然金中金	银金矿中金	合计
含量/(g·t <sup>-1</sup> )	0.36	4.87	5.23
占有率/%	6.81	93.19	100.00

从表3可以看出，难选金矿物样品中的金主要分布在自然金、银金矿中，金的分配率分别为

6.81%、93.19%。

## 1.2 金矿物的粒度分析

难选金矿物样品中金矿物的解离特征见表4，粒度组成见表5。

从表4可以看出，难选金矿物样品中的金矿物单体解离度较低，仅为10.39%，另有6.69%的金矿物以富连生体（解离度在75%与100%之间部分）的形式存在。

表4 样品中金矿物的解离特征

Table 4 Dissociation characteristics of gold minerals in samples

解离度X	单体X=100%	75%≤X<100%	50%≤X<75%	25%≤X<50%	0<X<25%	包裹X=0	合计
金矿物	10.39	6.69	76.88	1.21	0.19	4.64	100.00

表5 样品中金矿物粒度分析

Table 5 Particle size analysis of gold minerals in samples

分级/μm	含量/%	累积量/%
中粒	-74+37	0
细粒	-37+10	55.76
微细	-10+5	84.05
	-5	100.00

从表5可以看出，难选金矿物样品中的金矿物粒径较细，平均粒径为11.05 μm，呈细粒-微细粒嵌布。

## 2 金矿物的嵌布特征

自然金、银金矿是样品中的主要含金矿物。能谱分析，含金矿物主要由Au、Ag元素组成。样品中部分含金能谱定量结果见表6。能谱定量结果表明，样品平均含Au 68.91%，Ag 31.09%。

含金矿物主要以单体和与黄铁矿等矿物连生的形式存在，部分与绢云母、磁铁矿等矿物连生。

含金矿物平均粒径为11.05 μm，最大颗粒粒径为21.41×11.19 μm。

表7是难选金矿物样品中含金矿物连生程度统计，该表统计了含金矿物在主要连生体矿物中的占比。

表6 样品中部分含金矿物能谱定量结果

Table 6 Quantitative results of energy spectrum of some gold-bearing minerals in the samples

序号	矿物名称	Au/%	Ag/%	分布特征
1	自然金	80.19	19.81	黄铁矿连生
2	自然金	81.52	18.48	黄铁矿连生
3	自然金	80.31	19.69	绢云母连生
4	银金矿	71.51	28.49	黄铁矿连生
5	银金矿	70.92	29.08	黄铁矿与石英晶间金
6	银金矿	63.07	36.93	磁铁矿连生
7	银金矿	72.53	27.47	绢云母连生
8	银金矿	70.06	29.94	磁铁矿连生
9	银金矿	74.18	25.82	黄铁矿连生
10	银金矿	66.34	33.66	黄铁矿包裹
11	银金矿	68.14	31.86	单体
12	银金矿	74.47	25.53	单体
13	银金矿	64.14	35.86	单体
14	银金矿	69.97	30.03	单体
15	银金矿	52.13	47.87	黄铁矿包裹
16	银金矿	67.04	32.96	黄铁矿连生
17	银金矿	65.42	34.58	石英包裹
18	银金矿	63.51	36.49	黄铁矿连生
19	银金矿	62.47	37.53	单体
20	银金矿	61.38	38.62	黄铁矿连生
21	银金矿	67.85	32.15	黄铁矿连生
平均		68.91	31.09	

表7 样品中主要含金矿物嵌布程度统计

Table 7 Statistics of the degree of embedment of the main gold-bearing minerals in the samples

矿物	单体/%	共生体/%				合计/%
		黄铁矿	绢云母	磁铁矿	石英	
含金矿物	10.39	72.79	4.75	6.92	5.15	100.00

从表 7 可以看出，含金矿物主要是以单体和与黄铁矿连生的形式存在为主，以单体形式存在的含金矿物，含量为 10.39%，与黄铁矿连生的含金矿物含量为 72.79%，与绢云母连生的含金矿物含量为 4.75%，与磁铁矿连生的含金矿物含量为 6.92%，与石英连生的含金矿物含量为 5.15%。

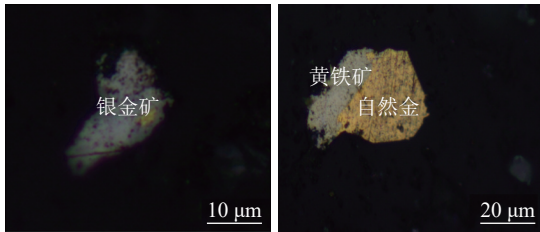


图 1 单体银金矿、自然金与黄铁矿连生  
Fig.1 Concatenation of single silver-gold deposits, natural gold and pyrite

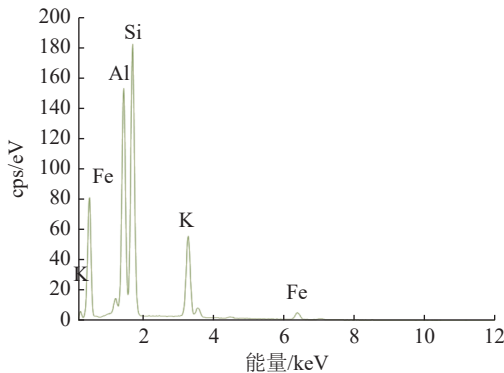
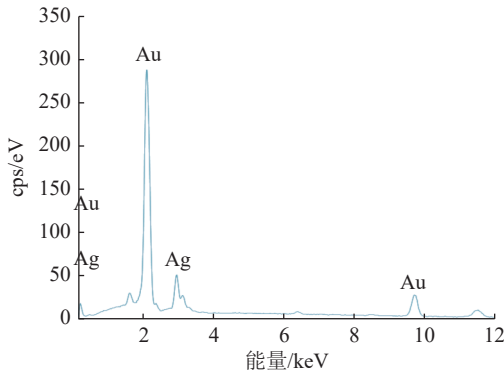
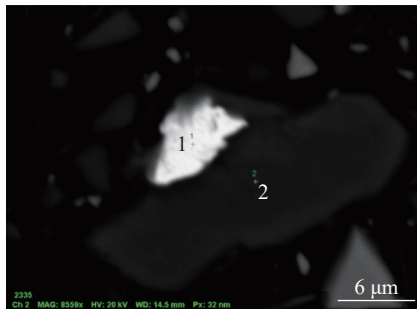


图 2 自然金 (点 1) 与绢云母 (点 2) 连生  
Fig.2 Natural gold (point 1) intergrown with sericite (point 2)

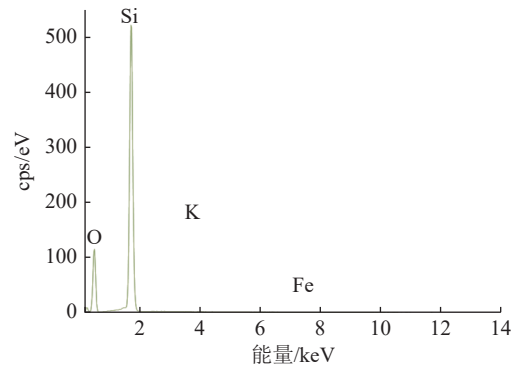
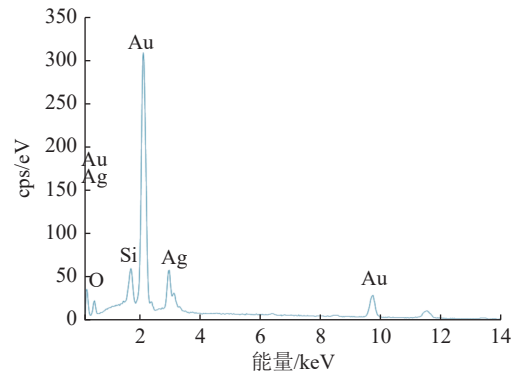
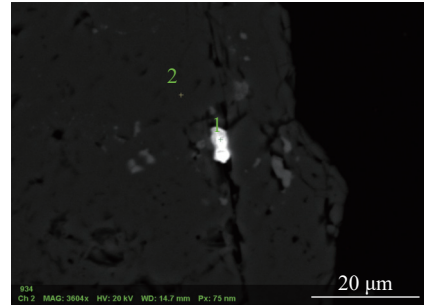


图 3 样品中银金矿 (点 1) 被石英 (点 2) 包裹  
Fig.3 Silver-gold ore (point 1) in the sample surrounded by quartz (point 2)

### 3 样品中黄铁矿的嵌布特征

样品中与金矿物共生矿物主要为黄铁矿，矿物量为 28.07%，与目标矿物嵌布比较密切。黄铁矿平均粒径为 57.39 μm，呈细粒嵌布。其具体粒度分布见表 8。

样品中的黄铁矿主要以单体形式存在，黄铁矿主要以单体和与磁黄铁矿、绢云母、石英等矿物连生形式存在，具体嵌布特征见表 9，单体解离的黄铁矿占 54.07%，富连生体占 30.93%（解离度=100% 的为单体解离，80%<解离度<100% 部分称富连生体）。其具体解离度分布见表 10。

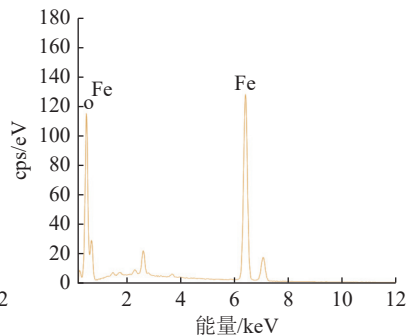
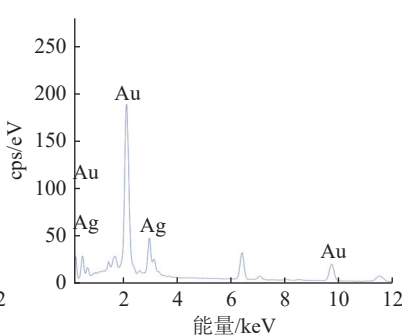
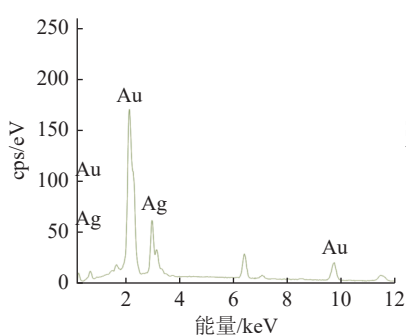
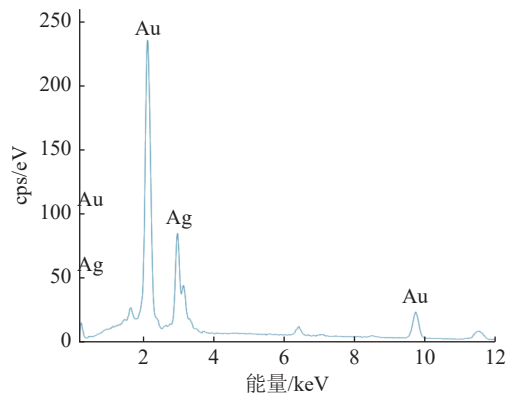
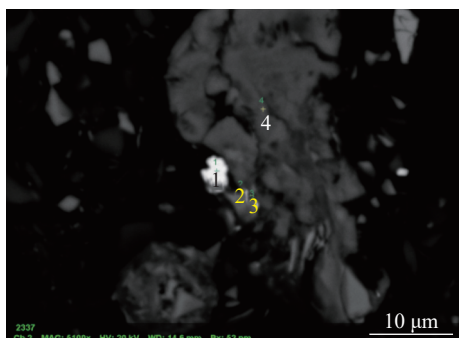


图4 样品中银金矿(点1、2、3)与磁铁矿(点4)连生  
Fig.4 Silver-gold ore (points 1, 2, 3) intergrown with magnetite (point 4) in the samples

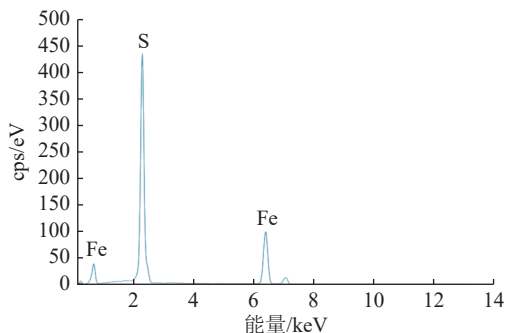
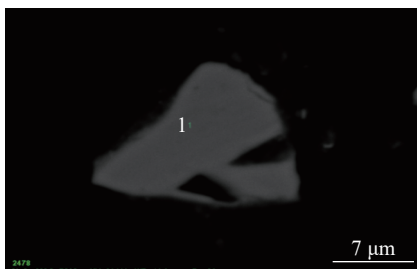


图5 单体黄铁矿(点1)  
Fig.5 Monomer pyrite (point 1)

表8 黄铁矿矿物粒度分布情况

Table 8 Particle size distribution of pyrite minerals

粒度/ $\mu\text{m}$	含量/%	正累积/%
+147	0.00	0.00
-147+74	11.11	11.11
-74+38	32.31	43.42
-38+20	19.41	62.83
-20+15	14.50	77.33
-15+10	10.41	87.74
-10+5	10.40	98.14
-5	1.86	100.00

表9 主要矿物嵌布特征

Table 9 Distribution characteristics of main minerals

矿物名称	单体/%	共生体/%		合计/%
		金属硫化物	其他脉石矿物	
黄铁矿	54.07	6.64	39.29	100.00

表10 主要矿物解离分析

Table 10 Dissociation analysis of main minerals

矿物名称	目标矿物占比/%					
	0 < X ≤ 10	10 < X ≤ 20	20 < X ≤ 30	30 < X ≤ 40	40 < X ≤ 50	50 < X ≤ 60
黄铁矿	0.76	0.76	0.96	2.05	1.89	2.26
矿物名称	目标矿物占比/%					合计
	60 < X ≤ 70	70 < X ≤ 80	80 < X ≤ 90	90 < X < 100	100	
黄铁矿	2.79	3.53	6.88	24.05	54.07	100.00

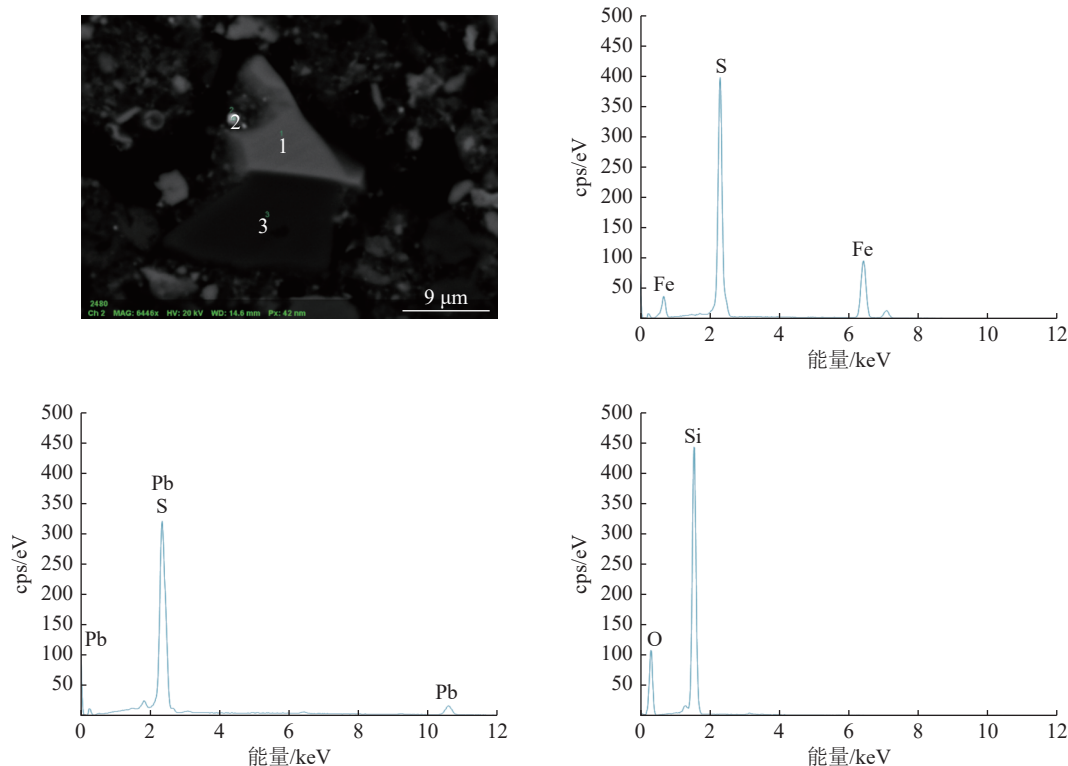


图6 黄铁矿(点1)与石英(点3)、方铅矿(点2)连生  
Fig.6 Connected pyrite (point 1), quartz (point 3), and galena (point 2)

## 4 结论

(1) 难选金矿物样品中主要含金矿物有自然金、银金矿, 含金量分别为 6.81%、93.19%; 另有黄铁矿、磁黄铁矿、磁铁矿、水钼铁矿及少量的方铅矿、闪锌矿、黄铜矿等金属矿物; 脉石矿物主要由石英、云母、长石、方解石、普通辉石、绿钠闪石、整柱石等矿物组成。

(2) 含金矿物主要是以单体和与黄铁矿连生的形式存在为主, 以单体形式存在的含金矿物, 含量为 10.39%, 与黄铁矿连生的含金矿物含量为 72.79%, 与绢云母连生的含金矿物含量为 4.75%, 与磁铁矿连生的含金矿物含量为 6.92%, 与石英连生的含金矿物含量为 5.15%。

(3) 含金矿物平均粒径为 11.05 μm, 最大颗粒粒径为 21.41×11.19 μm, 主要呈细粒-微细粒级嵌布, 细粒金含量为 55.76%, 微细粒金含量为 45.24%。

(4) 通过对矿物工艺矿物学检测分析来看, 有 10.39% 的单体金矿物和 72.79% 的金矿物与黄铁矿共生, 这部分金矿物通过浮选是易回收的; 有 16.82% 的金矿物与脉石矿物和氧化物共生, 这

部分金矿物通过浮选极难回收, 是导致实际浮选过程中金回收率较低的主要原因。下一步可通过适当增加磨矿细度或磁浮联合选别工艺等实验探究, 以提高金的回收率。

## 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] 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.
- CHEN H J, ZHANG L, JIANG S G, et al. Research on the beneficiation process of a fine-grained refractory gold ore[J]. *Metal Mine*, 2018(7):131-134.
- [3] 杨耀辉, 惠博, 严伟平, 等. 攀西微细粒钛铁矿工艺矿物学研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(3):131-135.
- YANG Y H, HUI B, YAN W P, et al. Research on process mineralogy of fine ilmenite in Panxi area[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(3):131-135.
- [4] 陈智杰, 喻福涛, 高惠民, 等. 陕西某石墨矿工艺矿物学与

选矿研究[J]. *矿产综合利用*, 2019(1):66-69.

CHEN Z J, YU F T, GAO H M, et al. Research on process mineralogy and beneficiation of a graphite mine in Shaanxi[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(1):66-69.

[5] 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.

[6] 王广伟, 杨德明, 任琪, 等. 青海某金矿浮选尾矿工艺矿物

学研究[J]. *矿冶*, 2018(2):101-104.

WANG G W, YANG D M, REN Q, et al. Study on process mineralogy of flotation tailings of a gold mine in Qinghai[J]. *Mining and Metallurgy*, 2018(2):101-104.

[7] 邓元良, 明平田, 王广伟, 等. 某金精矿焙烧氧化-氰化尾矿工艺矿物学研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(4):121-125.

DENG Y L, MING P T, WANG G W, et al. Research on process mineralogy of roasting oxidation-cyanide tailings of a gold concentrate[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(4):121-125.

## Study on Process Mineralogy of a Refractory Gold Ore

Cai Mingming, Zhang Wenping, Xu Chao, Li Guangsheng, Huang Fabo, Zhu Xingfu  
(Metallurgical Laboratory Branch of Shandong Gold Mining Technology Co. Ltd., Yantai, Shandong, China)

**Abstract:** Part of a gold deposit belongs to altered type gold deposit. The gold bearing alteration zone is composed of sericite, silicification and pyritization caused by hydrothermal alteration of granite. Most of the ore bodies are hosted in pyrite sericite and some in pyrite sericite granite. Using optical microscope, mineral analysis system (BPMA), scanning electron microscope and energy spectrum, the process mineralogical characteristics of minerals were analyzed. It was found that sulfide ore was the main ore and the depth of oxidation zone was very shallow. The gold grade is 5.23 g/t. The main gold minerals are natural gold and silver gold. The main metal minerals are pyrite, pyrrhotite, galena, chalcopyrite, sphalerite and other sulfide minerals and magnetite and other oxide minerals. Gangue minerals mainly include quartz, sericite, feldspar, etc. The size of gold is fine, all of which are below 37  $\mu\text{m}$ . According to the occurrence state of gold minerals, the content of gold bearing minerals existing in monomer form and coexisting with pyrite is 83.18%, which is easy to recover; the content of gold minerals associated with sericite, quartz and magnetite is 16.82%, which is the main reason for the low gold recovery rate in flotation process.

**Keywords:** Altered gold deposit; Process mineralogy; Occurrence state; Disseminated grain size