

广东某复杂难选难浸金矿工艺矿物学研究

梁晓, 胡瑞彪, 冯泽平

(长沙有色冶金设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410010)

摘要: 针对广东某复杂难选金矿石进行了工艺矿物学研究。结果表明: 该含金矿石中主要有价元素为金和银, 还具有含碳、高砷、含泥量大的特性。原矿中金除了与黄铁矿等硫化物密切共生外, 还有部分嵌布于石英等脉石矿物中, 赋存状态复杂; 矿石中金及载体矿物嵌布粒度均很细, 属典型的难选难浸金矿石。结合工艺矿物学研究结果, 本文还提出了该矿石开发利用的建议。

关键词: 复杂难选金矿石; 工艺矿物学; 毒砂

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2019.06.014

中图分类号: TD952; P8 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2019) 06-0065-04

卡林型金矿是一种主要产于碳酸盐构造中的微细浸染型金矿床^[1]。其显著特点为品位低、规模大、矿体与围岩界线不明显等。大多数的卡林型原生金矿, 很少存在独立金, 多为胶体金和细粒金存在于其他矿物中。卡林型金矿中金主要以小于 1 μm 的微细粒形式赋存在毒砂、黄铁矿等硫化物中, 少量次显微金颗粒在矿物表面存在^[2-4]。

广东省某复杂难选金矿属于典型的卡林型金

矿。由于该金矿矿物组成复杂, 嵌布粒度较细。查明矿石矿物特性、矿物组成、嵌布关系、单体解离度和赋存状态是选择选矿方案的重要依据。因此, 必须对其进行充分的工艺矿物学研究。

1 矿物物质组成

1.1 原矿多元素化学分析

矿石多元素化学分析结果见表 1。

表 1 原矿多元素化学分析结果 /%

Table 1 Chemical analysis results of multi-elements of the raw ore

Au*	Ag*	S	As	Sb	Cu	Pb	Zn	Hg	Fe	C	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Te
4.51	15.70	3.40	0.82	0.025	0.023	0.016	0.03	<0.0005	3.36	0.85	74.06	6.62	3.39	0.22	1.51	0.044	0.0011

*单位为 g/t。

从表 1 可知: 主要有价元素为金和银, 品位分别为 4.51 g/t 和 15.70 g/t; 伴生铜、铅、锌、铁等含量较低, 不具综合回收价值; 主要有害元素为 As 和 C, 对金的回收有较大影响。

1.2 矿石中金、碳的化学物相分析

将原矿样破碎至 -2 mm, 再研磨至 -0.074 mm, 进行化学物相分析, 分析结果见表 2、3。

表 2 矿石中金的化学物相分析结果

Table 2 Phase analysis results of gold

相别	裸露金	硫化物包裹	碳酸盐矿物包裹	铁矿物包裹	硅酸盐矿物包裹	合计
含量 / (g·t ⁻¹)	2.16	2.28	0.001	0.03	0.04	4.511
占有率 / %	47.88	50.54	0.03	0.675	0.875	100.00

表 2 表明, 原矿中金主要以硫化物包裹金和裸露金的形式存在, 其中 50.54% 的金包裹于硫化物中, 47.88% 以裸露金形式存在, 0.95% 的金包裹于硅酸盐矿物中, 0.71% 的金包裹于铁矿物中, 极少量的金包裹于碳酸盐矿物中, 其分布率为 0.03%。

表 3 矿石中碳的化学物相分析结果

Table 3 Phase analysis results of carbon

相别	碳酸盐中碳	无定型碳	合计
碳含量 / %	0.51	0.34	0.85
分布率 / %	60.00	40.00	100.00

表 3 结果表明原矿中碳主要以碳酸盐形式存

收稿日期: 2018-08-23; 改回日期: 2018-10-30

作者简介: 梁晓 (1990-), 男, 工程师, 硕士研究生, 主要从事选矿项目咨询及设计工作。

在，分布率为 60.00%，其余 40.00% 以无定形碳形式存在，对金的浸出有一定影响。

1.3 矿石矿物组成及相对含量

原矿中可见金矿物主要为自然金，其次为银金矿，偶见碲金银矿；银矿物主要为硫锑铅银矿，其次为辉锑银矿及辉银矿；金属硫化矿物主要为黄铁矿，其次为毒砂，另有少量闪锌矿、磁黄铁矿、黄铜矿、方铅矿等；砷矿物主要为雄黄及雌黄；金属氧化物主要为褐铁矿，另有少量金红石。脉石矿物主要为石英，其次为绢云母、方解石、高岭石及角闪石，另有少量绿泥石、无定形碳、重晶石、磷灰石等（见表 4）。

表 4 矿石矿物组成及相对含量
Table 4 Mineral components and relative content

矿物	含量 /%	矿物	含量 /%
黄铁矿 ⁺	5.43	石英	66.33
毒砂	0.17	绢云母	11.52
雄黄	0.59	方解石	4.24
雌黄	0.54	高岭石	4.37
辉锑矿 ⁺	0.04	角闪石	3.28
褐铁矿 ⁺	0.29	长石	1.26
无定型碳	0.34	绿泥石	0.87
重晶石	0.48	其他	0.25
		合计	100.00

2 主要矿物嵌布特征

采用显微镜及 MLA（基于扫描电镜的矿物自动分析仪）对原矿样（磨矿细度为 -0.074 mm 60% ~ 90%）中主要矿物进行考查。

2.1 金矿物

原矿中可见金矿物主要为自然金，其次为银金矿，偶见碲金银矿。综合样中可见自然金、银金矿主要呈细粒、微粒单体产出，偶尔可见粗粒单体金。其次，可见金矿物嵌布于黄铁矿与石英、绢云母等脉石矿物粒间产出，或与黄铁矿、石英等脉石矿物连生产出。部分可见金矿物包裹于石英、黄铁矿或褐铁矿中产出。

2.2 银矿物

原矿中银矿物主要为硫锑铅银矿，其次为辉锑银矿及辉银矿，还有少量银以含银黝铜矿形式存在，微量银以碲金银矿形式存在。

硫锑铅银矿一般以与黄铁矿的连生体形式产出，部分呈单体产出。辉银矿产出特征复杂，部

分嵌布于黄铁矿中，部分嵌布于褐铁矿中，部分与石英连生体产出。

2.3 黄铁矿

黄铁矿是原矿中主要的硫化矿物，也是金的主要载体矿物。黄铁矿主要呈他形晶，细粒状，稠密浸染于石英等脉石矿物粒间、裂隙或包裹于其中。微细粒黄铁矿有时以细粒集合体或网状集合体形式产出，其中常夹杂有脉石矿物，有时以脉状集合体形式产出，还有部分呈云雾状弥散于脉石矿物中。少部分黄铁矿呈自形晶，细粒状，嵌布于脉石矿物中，还有很少部分黄铁矿呈中粗粒集合体产出，其中也常可见脉石矿物包裹体。

原矿中有时可见黄铁矿与雄黄或雌黄紧密伴生，雄黄、雌黄一般沿黄铁矿集合体边缘充填交代，或包裹细粒黄铁矿。偶尔可见黄铁矿与毒砂呈紧密的连晶关系产出。

黄铁矿的嵌布粒度以细粒、微粒为主，一般为 0.001 ~ 0.147 mm。

2.4 雌黄和雄黄

雌黄是原矿中主要的砷矿物之一。原矿中雌黄主要呈具有放射结构的肾状、球状、皮壳状、粉末状或土状集合体产出，其中常有泥质的机械混入物或脉石矿物包裹体。雌黄常与雄黄规则共生，部分与黄铁矿紧密伴生。未见金矿物嵌布于雌黄中。雌黄嵌布粒度相对较粗，一般为 0.1 ~ 1.0 mm。但由于其解理发育，磨矿时极易过粉碎。

雄黄也是原矿中主要的砷矿物之一。原矿中雄黄主要呈粒状、不规则状、致密块状或土状集合体产出。雄黄常与雌黄规则共生产出，部分与黄铁矿紧密伴生。雄黄嵌布粒度也相对较粗，一般为 0.05 ~ 0.8 mm。由于其本身结构松散，在磨矿时极易过粉碎。未见金矿物嵌布于雄黄中。

2.5 毒砂

毒砂是原矿中次要的含砷金属硫化矿物，含量较低。扫描电镜下考查，未见到毒砂中嵌布有可见金矿物。毒砂主要呈自形一半自形晶细粒状嵌布于脉石矿物中，其次与黄铁矿紧密连晶产出。毒砂嵌布粒度较细，一般为 0.010 ~ 0.074 mm。

2.6 无定型碳

原矿中碳质含量相对较高，其结晶程度及热稳定性均达不到石墨级别，称为无定型碳。原矿

中无定形碳主要呈片状、鳞片状产出，无定型碳与其他矿物共生不甚密切，少部分与黄铁矿呈简单的毗邻关系产出，还有少部分呈微鳞片状与粘土质矿物共生产出。无定形碳的产出粒度较细，一般为0.001~0.050 mm。

3 主要矿物的粒度特征

将原矿破碎至-20 mm后，制成环氧树脂光片，在显微镜下进行观察，矿样中黄铁矿的嵌布粒度以细粒为主产出，-20 mm矿样中黄铁矿基本保持原始嵌布粒度。在显微镜下用线段法对黄铁矿的嵌布粒度统计，结果见表5。

表5 原矿中金与黄铁矿的粒度分布结果 /%
Table 5 Grain size distribution results of gold and pyrite in the raw ore

粒级 /mm	粗粒 +0.3	中粒 -0.3+0.074	细粒 -0.074+0.010	微细粒 -0.010	合计
金	7.40	16.42	54.29	21.89	100.00
黄铁矿	19.67	27.00	35.18	18.15	100.00

表5的测定结果表明，原矿中金矿物与黄铁矿均以细粒、微细粒为主，因此加强对细粒及微细粒黄铁矿的回收是提高金的浮选回收率的关键。

4 矿石中主要矿物的单体解离特征

将原矿样磨至不同细度，在显微镜下测定了黄铁矿（包括黄铁矿与毒砂集合体等）的单体解离度，统计结果见表6。

表6 不同磨矿细度下黄铁矿的解离特征 /%
Table 6 Dissociation characteristics of pyrite with different grinding fineness

磨矿细度 -0.074 mm 占有率/%	黄铁矿的分布率		
	单体	与脉石连生体	合计
70	45.35	54.65	100.00
80	48.13	51.87	100.00
90	53.68	46.32	100.00
95	58.29	41.71	100.00

表6表明，当磨矿细度为-0.074 mm 70%时，黄铁矿的单体解离度为45.35%，单体解离较差，在浮选作业过程中，这部分的金可能会随黄铁矿一起进入到浮选尾矿中，从而影响金的浮选回收。

当磨矿细度增至-0.074 mm 95%时，黄铁矿的单体解离度仅为58.29%，单体解离度增加幅度

不大。主要是由于黄铁矿的嵌布粒度较细，一段磨矿很难使其充分单体解离，要想更好地浮选回收黄铁矿，进一步细磨是很有必要的。

5 影响金回收的矿物学因素

5.1 影响原矿中金的浮选回收的矿物学因素

原矿中金的载体矿物主要为黄铁矿。载体矿物黄铁矿的嵌布粒度很细，磨矿时单体解离很差，在浮选作业过程中，金易随黄铁矿进入浮选尾矿。

此外，部分金矿物呈细粒、微粒嵌布于褐铁矿、铁矾以及石英等脉石矿物粒间、裂隙或包裹于其中，这部分矿石占比达到了23%以上，其磨矿后仍然呈包裹或呈极贫连生体形式产出，会影响矿石的分选。

原矿中绢云母、高岭石及绿泥石等粘土质脉石矿物含量较高，原矿细磨后泥化严重，可能会在一定程度上恶化浮选指标。

5.2 影响原矿中金的氰化浸出的矿物学因素

原矿中金矿物以细粒、微细粒形式赋存于黄铁矿中，难以通过细磨后直接氰化浸出；原矿为含碳、高砷的含金硫化矿，其中碳质和含砷矿物将会严重恶化浸出指标；原矿中的泥质矿物不但影响黄铁矿的浮选回收效果，同时也在一定程度上影响金的氰化浸出效果。

6 结论

(1) 原矿中金为主要回收元素，伴生有价金属元素为Ag，可综合回收，铜、铅、锌等金属元素含量很低，暂无综合回收价值，有害元素主要为As、Sb和C。原矿中金属硫化矿物主要为黄铁矿，其次为毒砂，另有很少量闪锌矿、磁黄铁矿、黄铜矿、方铅矿等；砷矿物主要为雄黄及雌黄；金属氧化物主要为褐铁矿，另有很少量金红石。脉石矿物主要为石英，其次为绢云母、方解石、高岭石及角闪石，另少量绿泥石、碳质、重晶石、磷灰石等。

(2) 原矿中金的载体矿物主要为黄铁矿。此外还含有自然金，银金矿等，偶见碲金银矿。银矿

物主要为硫锑铅银矿,其次为辉锑银矿及辉银矿等。

(3) 金的载体矿物黄铁矿嵌布粒度很细,粒度分布以细粒、微细粒为主;且矿石的单体解离度较低,当磨矿细度为 -0.074 mm 95% 时,黄铁矿的单体解离度仅为 58.29%。一段磨矿很难使其充分单体解离,要想更好地浮选回收黄铁矿,进一步细磨是很有必要的。

(4) 该含金硫化矿石具有含碳、高砷、含泥量大的特性。原矿中金矿物粒度及载体矿物粒度均很细,而且金的赋存状态复杂,除与黄铁矿等硫化矿物密切共生外,还有部分嵌布于石英等脉

石矿物中,采用单一浮选或氰化浸出工艺均很难获得理想的回收指标。

参考文献:

[1] 普传杰,高振敏.国内外卡林型金矿对比研究[J].云南地质,2003,22(1):27-38.
 [2] 夏光祥.难浸金矿提金新技术[M].北京:冶金工业出版社,1996.1-12.
 [3] 黎鼎鑫.贵金属提取与精炼[M].长沙:中南工业大学出版社,2000.117-118.
 [4] 宋龔.贵州太平洞卡林型金矿提金试验研究[M].昆明:昆明理工大学出版社,2011.10-28.

Study on the Technological Mineralogy of a Complex Refractory Gold Ore in Guangdong

Liang Xiao, Hu Ruibiao, Feng Zeping

(Changsha Engineering and Research Institute Ltd. of Nonferrous Metallurgy, Changsha, Hunan, China)

Abstract: The technological mineralogy of a complex refractory gold ore in Guangdong was studied. The results show that the main valuable elements in the gold-bearing rocks are gold and silver, and have the properties of carbon, arsenic and mud. In the raw ore, gold is closely associated with sulfide minerals such as pyrite, and some of it is embedded in quartz and other gangue minerals. The microstructure of gold and carrier minerals in ore is very fine. Combined with the research results of technological mineralogy, some suggestions for exploitation and utilization of the ore are also proposed in this paper.

Keywords: Complex refractory gold ore; Technological mineralogy; Arsenopyrite

////////////////////////////////////
(上接 79 页)

Vanadium Occurrence of a Vanadium Ore in Henan Province

Hui Bo, Mao Yilin, Chen Wei

(Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chengdu, Sichuan, China)

Abstract: The process mineralogy characteristics of a vanadium mine in Henan were studied by means of optical microscope, scanning electron microscope (SEM) and X-ray energy dispersive spectrometer (EDS). The chemical analysis results of the crude ore show that the content of V₂O₅ is 1.38%, which belongs to high-grade vanadium ore. Mineral composition is mainly composed of Quartzs and clay minerals. Vanadium mica and vanadium-containing illite are two independent minerals of vanadium in the sample. The characteristic elements of vanadium mica are vanadium, magnesium and potassium. The vanadium content is unstable, with a minimum value of 5.78%, a maximum value of 9.13% and an average value of 7.37%. The characteristic elements of vanadium-containing illite are vanadium and potassium. The vanadium content is unstable, with a minimum value of 0.54%, a maximum value of 1.31%, and an average value of 0.93%. Vanadium mica and clay minerals (including vanadium-containing illite) belong to layered silicate minerals, and their physical properties differ little from those of vanadium-containing illite, so they cannot be further separated by physical beneficiation. It is suggested that vanadium enrichment can be realized by separating Shi Ying and layered silicate minerals.

Keywords: Vanadium Ore; Process mineralogy; Occurrence state; Clay mineral