

青海某微细浸染型难处理金矿石工艺矿物学研究

张鑫宇¹, 霸慧文^{2*}, 应永朋¹, 陈攀¹

(1. 青海省地质矿产测试应用中心; 2. 青海省自然资源博物馆)

摘要: 为了进一步提高青海某微细粒浸染型金矿石回收指标, 对其进行详细的工艺矿物学研究。研究结果表明: 影响金回收率的主要因素是细粒和微细粒级黄铁矿、毒砂的回收问题。由于大部分微细粒级黄铁矿和毒砂在磨矿作业时不易单体解离, 造成部分金矿物损失。除此之外, 脉石矿物包裹微细粒金也是金矿物的重要损失形式。建议采用阶段磨矿阶段选别的浮选工艺, 提高金回收率。

关键词: 微细粒浸染型金矿; 包裹体; 黄铁矿; 毒砂; 单体解离度

中图分类号: TD952

文献标志码: A

文章编号: 1001-1277(2024)03-0042-04

doi: 10.11792/hj20240310

引言

随着中国金矿资源不断开发利用, 矿石中金嵌布粒度越来越细, 伴生元素越来越复杂, 选矿难度越来越大^[1]。目前, 中国已探明黄金储量中约 30 % 为难处理金矿石^[2]。难处理金矿石可分为微细粒浸染型金矿石、碳质金矿石和复杂多金属硫化物金矿石等^[3]。对难处理金矿石的开发利用, 关键在于对这类金矿石进行系统的工艺矿物学研究, 揭示造成其难处理的关键因素, 从而针对性地制订提金流程^[4]。青海省金矿资源丰富, 集中分布于柴达木北缘成矿带、东昆仑成矿带、北巴颜喀拉成矿带, 这些金矿石具有金嵌布粒度微细, 含锑、砷等有害元素, 多以包裹体形式存在等特点^[5]。东昆仑成矿带中某微细粒浸染型金矿石, 平均金品位 2.87 g/t。目前, 选矿厂采用浮选工艺, 金回收率 80.45 %。为了进一步提高选别指标, 对该金矿石进行了详细的工艺矿物学研究, 旨在查明影响金回收率的因素, 为选择合理的选矿工艺流程提供依据。

1 矿石性质

1.1 化学成分及物相分析

原矿化学成分分析结果见表 1, 金物相分析结果见表 2。

表 1 原矿化学成分分析结果

Table 1 Analysis results of chemical composition in raw ore

成分	Au ¹⁾	Ag ²⁾	S	As	C	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
w/%	2.87	5.18	1.08	0.62	2.84	56.49	12.15	3.14	10.56	1.08

注: 1) $w(\text{Au})/(\text{g} \cdot \text{t}^{-1})$; 2) $w(\text{Ag})/(\text{g} \cdot \text{t}^{-1})$ 。

表 2 金物相分析结果

Table 2 Analysis results of gold physical phase

相别	$w(\text{Au})/(\text{g} \cdot \text{t}^{-1})$	分布率/%
裸露及半裸露金	1.00	34.97
硫化物包裹金	1.75	61.19
铁氧化物包裹金	0.02	0.70
硅酸盐包裹金	0.09	3.14
合计	2.86	100.00

由表 1、表 2 可知: 矿石中金品位为 2.87 g/t, 含砷 0.62 %, 含碳 2.84 %。砷、碳含量较高, 对金的回收存在一定影响。物相分析结果显示, 金主要以硫化物包裹金和裸露及半裸露金形式存在。其中, 34.97 % 的金以裸露及半裸露金形式存在, 61.19 % 的金包裹于硫化物中。

1.2 矿物组成

该金矿石中矿物组成分析结果见表 3。

表 3 矿石矿物组成分析结果

Table 3 Analysis results of mineral composition in ore

矿物名称	相对含量/%	矿物名称	相对含量/%
黄铁矿	1.51	石英	40.71
毒砂	1.24	白云母	28.98
闪锌矿	0.06	长石	4.25
黄铜矿、铜蓝、黝铜矿	0.03	方解石	15.83
金红石	0.35	白云石	4.94
褐铁矿	1.76	其他	0.34

由表 3 可知: 矿石中金属硫化物主要为黄铁矿, 其次为毒砂, 少量闪锌矿, 其他金属矿物有褐铁矿、金红石等。脉石矿物主要为石英, 其次为白云母和方解

收稿日期: 2023-11-08; 修回日期: 2023-12-27

基金项目: 青海省重点研发与转化计划项目 (2019-SF-139)

作者简介: 张鑫宇 (2000 年—), 男, 大学本科, 从事矿物加工, 煤炭及有色金属的浮选、重选工作; E-mail: 395587965@qq.com

* 通信作者: 霸慧文 (1995—), 女, 助理工程师, 从事矿产综合利用研究及科普教学工作; E-mail: 849430614@qq.com

石,少量白云石和长石。

2 主要矿物嵌布特征

2.1 自然金

通过对矿石光片、重砂富集样进行显微镜、扫描电镜下检测,发现金矿物以自然金为主,偶见银金矿。以包裹体形式存在的金矿物主要呈圆粒状包裹在黄铁矿中,少量包裹在毒砂中,以微细粒为主。此外,部分金矿物以粒间金形式存在,这部分金矿物一般呈细长条状、粒状嵌布在黄铁矿或褐铁矿粒间,粒度一般小于0.005 mm(见图1)。重砂富集样中发现金矿物呈三角形、长条状单体金和连生金形式存在。在扫描电镜下检测还发现大量包裹于黄铁矿或毒砂中粒度小于0.001 mm的自然金颗粒(见图2)。大部分金矿物赋存于黄铁矿和毒砂中,脉石矿物中赋存金矿物较少。矿石中金矿物嵌布特征见表4。金矿物X射线能谱分析结果显示,该金矿物含金90.96%,含银9.04%。

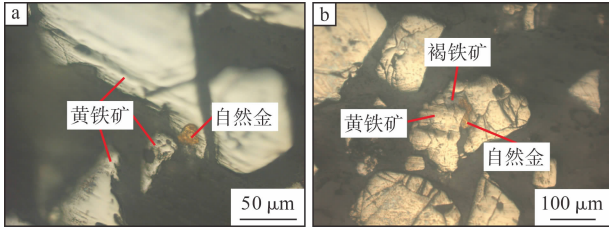


图1 自然金显微镜照片
Fig. 1 Microscopic image of native gold

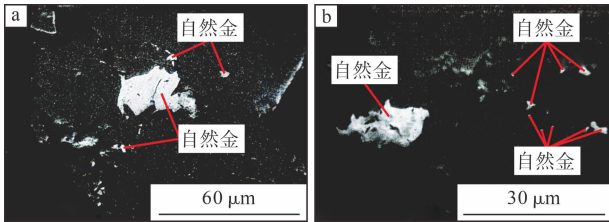


图2 扫描电镜能谱成分分析
Fig. 2 Composition analysis by scanning electron microscope spectrometry

表4 金矿物嵌布特征分析结果

嵌布状态		分布率/%
粒间金	黄铁矿与其他硫化物	7.35
	黄铁矿与褐铁矿	0.89
包裹金	黄铁矿等硫化物包裹金	52.95
连生金	与毒砂连生金	2.98
	单体金	35.83
合计		100.00

2.2 黄铁矿

黄铁矿是矿石中主要载金硫化物,粒度分布不均匀,主要呈自形晶、半自形晶粒状或不规则状嵌布在

脉石矿物中(见图3),少量呈他形晶粒状嵌布在脉石矿物中,微量黄铁矿呈条带状或晶状嵌布。部分中粗粒黄铁矿发育有压碎结构,其间隙和空洞常被脉石矿物充填。此外,部分黄铁矿与毒砂紧密共生,黄铁矿中包裹菱形状、长条状或不规则状毒砂,少量黄铁矿与磁黄铁矿、黄铜矿、脆硫锑铅矿、闪锌矿等硫化矿物共生,偶见黄铁矿被褐铁矿交代呈残余结构。

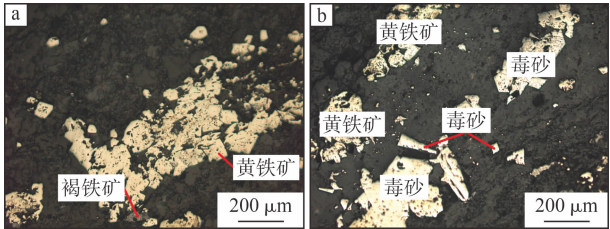


图3 黄铁矿、毒砂显微镜照片
Fig. 3 Microscopic image of pyrite and arsenopyrite

2.3 毒砂

毒砂也是矿石中含量比较高的载金矿物,主要呈微细粒菱形自形晶一半自形晶嵌布在脉石矿物中,有时可见毒砂呈不规则状、长条状、矛状集合体嵌布在脉石矿物中(见图3),微量毒砂呈骸晶状与脉石矿物或闪锌矿紧密共生。此外,部分毒砂与黄铁矿关系较为密切,二者常紧密共生或呈固溶体分离结构产出在脉石矿物中,少量毒砂与闪锌矿共生或包裹在脉石矿物,偶见毒砂与黝铜矿、黄铜矿紧密共生。

2.4 黄铜矿、黝铜矿

矿石中铜矿物含量相对较低,主要为黄铜矿,少量黝铜矿,微量铜蓝、辉铜矿和蓝辉铜矿。黄铜矿主要呈微细粒、细粒不规则状嵌布在脉石矿物中。此外,黄铜矿与黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂关系较为密切,常紧密共生或相互包裹嵌布在脉石矿物中。有时可见黄铜矿与黝铜矿共生产出或相互包裹,偶见黄铜矿与铜蓝、闪锌矿共生。黝铜矿主要呈微细粒、细粒不规则状嵌布在脉石矿物中,有时可见黝铜矿与黄铜矿、铜蓝紧密共生,偶见黝铜矿与脆硫锑铅矿紧密共生。黝铜矿粒度较细,一般小于0.020 mm,对矿石中黝铜矿进行X射线能谱成分分析,发现大部分黝铜矿含银0.36%,少量黝铜矿银含量较高(见图4)。

2.5 脆硫锑铅矿、辉锑矿、辉锑铁矿

脆硫锑铅矿是矿石中主要锑矿物,另有少量辉锑矿和辉锑铁矿。脆硫锑铅矿主要呈不规则状、梳状、柱状、针状嵌布在脉石矿物中,有时可见脆硫锑铅矿呈微细粒裹于黄铁矿、毒砂、闪锌矿等硫化物中,少量脆硫锑铅矿与黝铜矿紧密共生,偶见粗粒脆硫锑铅矿中包裹黄铁矿、毒砂、方铅矿或黄铜矿等。脆硫锑铅矿嵌布粒度不均匀,以中细粒为主,粒度一般为0.020~0.147 mm,个别粒度较粗,可达0.400 mm。

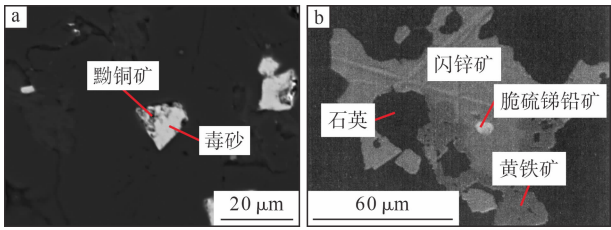


图4 黝铜矿、脆硫锑铅矿背散射电子图
Fig.4 Backscattered electron image of covellite and stibnite-argentiferous galena

辉锑矿和辉锑铁矿主要呈不规则状嵌布在脉石矿物中,偶见二者与黄铁矿、毒砂、闪锌矿紧密共生。X射线能谱成分分析结果显示,辉锑矿成分稳定,含锑73.63%,含硫26.37%。

2.6 褐铁矿

褐铁矿是主要铁矿物之一,主要呈不规则状、粒状与脉石矿物共生,常有微细粒黄铁矿等硫化矿物交代残余。有时可见褐铁矿沿黄铁矿裂隙产出,偶见褐铁矿与黄铁矿共生,褐铁矿常沿黄铁矿边缘或裂隙交代形成镶边结构。对矿石中褐铁矿进行X射线能谱成分分析,发现褐铁矿含铁62.15%,含砷2.81%。褐铁矿中还常含有镁、硅、钙等杂质元素(见图5)。

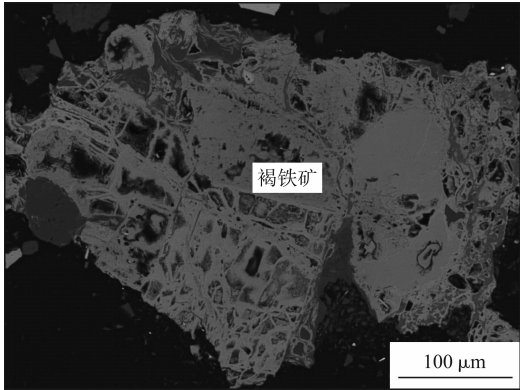


图5 褐铁矿背散射电子图
Fig.5 Backscattered electron image of hematite

2.7 其他矿物

矿石中其他金属矿物主要为闪锌矿,少量磁黄铁矿,另有极少量方铅矿、铜蓝等。此外,矿石中还有少量石墨。闪锌矿主要呈微细粒不规则状嵌布在脉石矿物中,有时可见闪锌矿与黄铁矿、毒砂、黄铜矿紧密共生。X射线能谱成分分析结果显示,闪锌矿中含少量镉。磁黄铁矿主要呈粒状或不规则状,偶见磁黄铁矿与黄铜矿、闪锌矿紧密共生嵌布在脉石矿物中。磁黄铁矿嵌布粒度较细,一般小于0.074 mm。方铅矿主要呈微细粒不规则状嵌布在脉石矿物中,有时可见方铅矿与闪锌矿紧密共生嵌布在脉石矿物中;方铅矿嵌布粒度较细,一般集中分布在0.010~0.034 mm。石墨主要呈细小的板状、叶片状嵌布在

脉石矿物中,一般集中分布在0.010~0.043 mm。

3 主要矿物粒度分布特征

3.1 自然金

显微镜下统计金矿物粒度时,其粒度均大于0.001 mm,扫描电镜下检测时发现大量金矿物以包裹体形式嵌布在黄铁矿等硫化物中,粒度小于0.001 mm。这部分金矿物暂时无法统计。金矿物粒度分布特征见表5。

表5 金矿物粒度分布特征

Table 5 Characteristics of gold mineral grain size distribution	
粒度/mm	分布率/%
-0.020 ~ +0.010	17.08
-0.010 ~ +0.005	32.49
-0.005 ~ +0.001	50.43
合计	100.00

由表5可知:金矿物主要以微细粒为主。其中,粒度-0.020~+0.010 mm占17.08%,粒度-0.010~+0.001 mm占82.92%。还存在大量以黄铁矿、毒砂等硫化矿包裹金形式的微粒金矿物,粒度一般小于0.001 mm,最细可达0.000 01 mm。

3.2 黄铁矿、毒砂

黄铁矿、毒砂等硫化矿为主要载金矿物,测定矿石中黄铁矿和毒砂的粒度及硫化物集合体粒度对选择合适的磨矿细度极为重要,结果见表6。

表6 硫化矿粒度分布特征

Table 6 Characteristics of sulfide mineral grain size distribution					
矿物名称	粒度/mm				%
	-0.010	-0.074 ~ +0.010	-0.300 ~ +0.074	+0.300	
黄铁矿	3.56	40.24	42.96	13.24	
毒砂	10.61	73.41	14.72	1.26	
硫化物集合体	5.75	50.92	34.22	9.11	

注:硫化物集合体指黄铁矿与毒砂的集合体。

由表6可知:矿石中硫化物集合体粒度-0.074~+0.010 mm占比最多,为50.92%。黄铁矿以细粒、中粒为主,少量呈粗粒产出;毒砂以细粒为主,其次呈中粒、微粒产出;硫化物集合体以中细粒为主,少量呈粗粒产出,微量以微粒产出。矿石中黄铁矿嵌布粒度为+0.074 mm占56.20%, -0.074~+0.010 mm占40.24%, -0.010 mm占3.56%;矿石中毒砂嵌布粒度为+0.074 mm占15.98%, -0.074~+0.010 mm占73.41%, -0.010 mm占10.61%;硫化物集合体+0.074 mm占43.33%, -0.074 mm~+0.010 mm占50.92%。由此可见,毒砂粒度较黄铁矿更细。

3.3 硫化物集合体解离特征

对选矿综合样中硫化物集合体(黄铁矿-毒砂)单体解离度进行测量,结果见表 7。

表 7 不同磨矿细度下硫化物集合体解离特征

Table 7 Characteristics of sulfide aggregate liberation under different grinding fineness %

w(磨矿细度 -0.074 mm)	单体	与脉石矿物		合计
		连生体	包裹体	
60	64.44	26.77	8.79	100.00
70	79.94	15.10	4.96	100.00
80	86.59	9.11	4.30	100.00
90	89.06	9.49	1.45	100.00
95	92.77	6.78	0.45	100.00

由表 7 可知:当磨矿细度为 -0.074 mm 占 60 % 时,硫化物集合体单体占有率为 64.44 %。当磨矿细度为 -0.074 mm 占 80 % 时,硫化物集合体单体解离度达到 86.59 %,硫化物集合体基本单体解离。随着磨矿细度提高,硫化物集合体单体解离度逐渐增加,但增长幅度较小,说明矿石中存在一部分微细粒黄铁矿和毒砂在细磨条件下难以充分单体解离,这部分连生体形式的黄铁矿和毒砂很容易损失在浮选尾矿中。

4 影响金选矿回收的矿物学因素分析

1)对矿石中自然金、银金矿的粒度分布特征进行分析,发现该矿石中自然金、银金矿以微细粒为主,嵌布粒度 -0.010 ~ +0.001 mm 占 82.92 %。存在部分微粒金矿物以包裹体的形式嵌布于黄铁矿、毒砂中,这部分金矿物嵌布粒度更细,粒度一般小于 0.001 mm,最细可达 0.000 01 mm,可见金矿物嵌布粒度微细是影响其回收的重要因素之一。

2)对矿石中硫化物集合体的粒度分布特征进行分析,发现矿石中微粒硫化物集合体占 5.75 %,这部分硫化物集合体难以单体解离,其连生的金矿物极易损失于尾矿中。

3)矿石中金赋存状态表明,3.84 % 的石英、白云母等脉石矿物包裹金也会损失于尾矿中。

5 结 论

1)矿石中金品位为 2.87 g/t,主要以自然金形式存在。61.19 % 的金矿物包裹于黄铁矿、毒砂等硫化物中,34.97 % 的金矿物以裸露及半裸露金形式产出。

2)载金矿物黄铁矿、毒砂的嵌布粒度分布于 -0.010 mm 的分别占 3.56 % 和 10.61 %;硫化物集合体嵌布粒度分布于 -0.010 mm 占 5.75 %。这部分微粒黄铁矿、毒砂和硫化物集合体较难单体解离,与之共生的金矿物将随其损失在尾矿中。强化对细粒黄铁矿和毒砂的回收可以显著提高金矿物的选矿回收率。

3)当磨矿细度为 -0.074 mm 占 80 % 时,硫化物集合体单体解离度达到 86.59 %,硫化物集合体基本单体解离。

4)矿石中含有白云母等层状硅酸盐矿物,易产生泥化现象,在磨矿过程中要防止过磨,并在浮选过程中加强对这些矿物的分散和抑制。

[参 考 文 献]

[1] 康秋玉,徐祥斌,张太雄,等. 某微细浸染型难处理金矿石选矿工艺试验研究[J]. 黄金,2020,41(3):56-60.

[2] 梁泽来. 某金矿选矿工艺试验研究[J]. 黄金,2022,43(10):78-81.

[3] 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.

[4] 张博,张雁生,张家明,等. 某微细粒难处理金矿石选矿试验研究[J]. 黄金,2017,38(7):47-49,62.

[5] 常征,熊馨,孙晓华. 青海某含金含碳微细浸染型难处理金矿石选矿试验研究[J]. 黄金,2021,42(1):55-58,63.

[6] 张辰敏. 工艺矿物学在难处理金矿物加工中的应用[J]. 中国金属通报,2021(5):158-159.

[7] 刘立新,王绍兴,李艳军,等. 三和金业难处理金矿氧化渣工艺矿物学研究[J]. 现代矿业,2020,36(4):133-135,138.

[8] 谢雄辉. 陇南紫金难处理金精矿工艺矿物学研究[J]. 黄金科学技术,2019,27(6):950-956.

[9] 明平田,李飞. 某微细粒蚀变岩型金矿高效浮选新工艺研究[J]. 矿产综合利用,2019(5):127-133.

[10] 贵琪皓,王仕兴,张利波,等. 云南镇源难处理金精矿工艺矿物学研究[J]. 黄金科学技术,2019,27(6):941-949.

[11] 陈小辉. 对工艺矿物学在难处理金矿矿物加工中的运用分析[J]. 世界有色金属,2017(24):297-298.

Process mineralogy on a refractory microfine-dissemination gold ore in Qinghai Province

Zhang Xinyu¹, Ba Huiwen², Ying Yongpeng¹, Chen Pan¹

(1. Qinghai Geological Minerals Testing and Application Center; 2. Qinghai Provincial Museum of Natural Resources)

Abstract: In order to further improve the recovery index of a refractory microfine-dissemination gold ore in Qinghai Province, a detailed process mineralogy study was conducted. The results showed that the main factors affecting gold recovery were the recovery of fine and micro-fine pyrite and arsenopyrite. Due to the difficulty of monomer dissociation of most fine and micro-fine pyrite and arsenopyrite during the grinding process, some gold minerals were lost. In addition, fine-grained gold inclusion by vein minerals was also an important form of gold mineral loss. It is suggested to use a flotation process with staged grinding and separation to improve gold recovery rate.

Keywords: refractory microfine-dissemination gold ore; inclusion; pyrite; arsenopyrite; monomer dissociation