

某石英脉型含金矿石工艺矿物学研究

马东梅,王艳,高歌,陈健龙,王铜,张修超

(长春黄金研究院有限公司)

摘要:针对某石英脉型含金矿石进行了详细的工艺矿物学研究,并在此基础上开展了重选—重尾浮选试验及金流失状态考查。研究结果表明:金为唯一有价回收元素,金品位为 1.78 g/t。金矿物主要以自然金、银金矿形式存在,以包裹金(占 45.33%)形式嵌布。粒度主要集中在 -0.037 mm ,占 78.98%。采用重选—重尾浮选工艺,总金回收率为 94.80%,浮选尾矿中流失的金矿物主要以脉石矿物包裹金形式存在,目的矿物浸出效果良好,金流失特征符合工艺矿物学研究结果。

关键词:石英脉型;金矿石;工艺矿物学;嵌布特征;重选;重尾浮选

中图分类号:TD952

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2024)02-0037-04

doi:10.11792/hj20240208

引言

金作为一种重要的贵金属,在国家发展中扮演着举足轻重的角色。然而,随着金矿资源的不断消耗,相对易选别的富矿逐渐减少,“贫、细、杂”成为当前金矿的主要特征^[1-2]。因此,实现对于嵌布粒度细、共生紧密的低品位金矿石的高效选别变得尤为重要。在选别之前,需要进行工艺矿物学研究,明确矿石工艺特性,有助于确定选别工艺流程和技术条件,从而得到最佳技术指标,为企业未来生产提供理论依据。本研究采用 MLA、扫描电镜和体视显微镜等多种技术手段,对某石英脉型含金矿石进行了详细分析,查明了矿石性质及主要矿物工艺特征等。同时,分析了影响目的矿物回收的矿物学因素,为该金矿石的开发利用提供了矿物学依据^[3-4]。

1 矿石性质

该金矿石中金为唯一有价回收元素,金品位为 1.78 g/t,硫品位为 3.44%。金属硫化矿物占 6.92%,金属氧化矿物占 2.58%,脉石矿物占 90.45%,矿石氧化率为 9.10%,故该矿石工艺类型为中等硫化矿物石英脉型含金矿石。该金矿石化学成分分析结果见表 1,矿物相对含量分析结果见表 2。

表 1 金矿石化学成分分析结果

Table 1 Analysis results of chemical composition of gold ore							
成分	Au ¹⁾	Ag ²⁾	Cu	Pb	Zn	Fe	S
w/%	1.78	3.08	0.096	0.018	0.072	5.88	3.44
成分	As	C	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Sb
w/%	0.11	0.17	0.27	0.17	0.74	85.18	<0.005

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

表 2 矿物相对含量分析结果

Table 2 Analysis results of relative mineral content

矿物名称	相对含量/ %	矿物名称	相对含量/ %
黄铁矿(含磁黄铁矿)	6.17	石英	84.19
毒砂	0.31	斜长石、正长石类	1.94
黄铜矿	0.28	黑云母、白云母类	1.57
闪锌矿、方铅矿	0.16	辉石类	0.60
斜方砷铁矿	0.03	方解石、铁白云石	0.07
铜锌矿、自然铋	0.02	磷灰石	0.02
褐铁矿、磁铁矿、赤铁矿	2.58	锆石、石墨、高岭土等	2.06

2 主要矿物工艺特征

2.1 主要矿物种类

1) 黄铁矿。黄铁矿(含磁黄铁矿)是该金矿石中主要金属硫化矿物,占 6.17%。主要嵌布在脉石矿物粒间或裂隙,多呈他形一半自形晶状结构,少量呈五角十二面体、立方体等自形晶状结构^[5]。粒度主要分布在 $0.010 \sim 0.100\text{ mm}$,呈浸染状构造、团块状构造、脉状构造产出,部分粒度较粗的黄铁矿可见碎裂结构。与毒砂嵌布关系密切,常见二者连晶分布,也可见与黄铜矿、闪锌矿等连晶分布。另外,在黄铁矿孔洞中常见磁黄铁矿与黄铜矿连晶分布。

2) 毒砂。毒砂是该金矿石中次要金属硫化矿物之一,占 0.31%。多呈他形一半自形晶状结构,少部分呈菱面体、楔形体等自形晶状结构,主要呈浸染状构造、脉状构造产出。粒度以 -0.053 mm 为主。常

收稿日期:2023-10-18;修回日期:2023-11-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC2904500)

作者简介:马东梅(1988—),女,工程师,硕士,从事工艺矿物学研究;E-mail:332385144@qq.com

见与黄铁矿、斜方砷铁矿连晶分布,与金矿物嵌布关系密切,为矿石中主要载金矿物之一。矿石中部分毒砂嵌布特征见图 1。

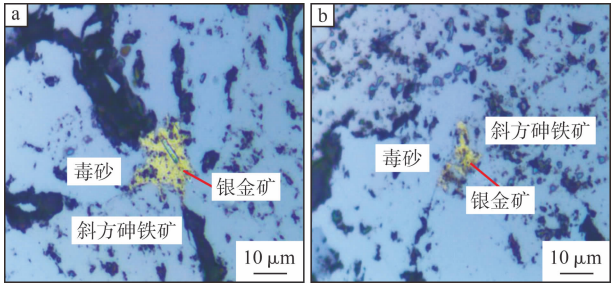


图 1 显微镜照片(毒砂)
Fig. 1 Microscopic image(arsenopyrite)

3)黄铜矿。黄铜矿是该金矿石中含量较少的金属硫化矿物,占 0.28 %。主要以他形晶状结构存在。粒度主要分布在 0.010 ~0.100 mm。与磁黄铁矿、闪锌矿、黄铁矿嵌布关系密切,常见嵌布在磁黄铁矿粒间或与磁黄铁矿连晶分布,也可见与闪锌矿连晶分布或呈微细粒包裹于闪锌矿中,以及与黄铁矿连晶分布。

4)方铅矿。方铅矿为该金矿石中少见的金属硫化矿物,占 0.06 %。主要呈他形—不规则粒状结构,粒度以 -0.053 mm 为主。主要嵌布在脉石矿物粒间及裂隙,与其他金属硫化矿物嵌布关系不密切。

5)闪锌矿。闪锌矿为该金矿石中含量较少的金属硫化矿物之一,占 0.10 %。主要呈他形粒状集合体形式嵌布在脉石矿物中,粒度以 -0.053 mm 为主。在该金矿石中,闪锌矿与黄铁矿、黄铜矿、方铅矿嵌布关系密切,常见闪锌矿与方铅矿、黄铁矿连晶分布也可见闪锌矿与黄铜矿连晶分布。

2.2 主要矿物粒度分布特征

金属硫化矿物与金矿物嵌布关系密切,金属硫化矿物嵌布粒度会影响金矿物的回收效果。因此,对该金矿石中主要金属硫化矿物粒度进行检测,结果见表 3。由表 3 可知,黄铁矿、毒砂的粒度主要集中在中、细粒,黄铁矿粒度略粗于毒砂。

表 3 主要金属硫化矿物粒度检测结果
Table 3 Analysis results of particle size for major metal sulfide minerals

粒级/mm	分布率/%	
	黄铁矿	毒砂
巨粒	+0.300	0.67
粗粒	-0.300 ~ +0.100	4.37
中粒	-0.100 ~ +0.053	20.18
细粒	-0.053 ~ +0.010	68.34
微粒	-0.010	6.44
合计	100.00	100.00

3 金矿物工艺特征

3.1 金矿物组成及成色分析

经显微镜下鉴定并结合扫描电镜能谱成分分析结果,确定该金矿石中金矿物主要以自然金和银金矿形式存在。自然金平均成色为 858.7 ‰,银金矿平均成色为 642.4 ‰。

3.2 金矿物粒度特征

金矿物粒度分析结果见表 4。部分嵌布在毒砂及斜方砷铁矿粒间的金矿物粒度分布见图 2,重砂中较粗金矿物粒度分布见图 3。经检测,该金矿石中金矿物粒度主要分布在 -0.074 mm,粒度为 -0.010 mm 的微粒银金矿主要嵌布在毒砂中,粒度为 0.010 ~ 0.037 mm 的细粒银金矿嵌布在毒砂与斜方砷铁矿粒间。

表 4 金矿物粒度分析结果

Table 4 Analysis results of particle size for gold minerals

	粒级/mm	分布率/%
巨粒	+0.295	1.97
粗粒	-0.295 ~ +0.074	4.75
	-0.074 ~ +0.053	6.83
中粒	-0.053 ~ +0.037	7.47
细粒	-0.037 ~ +0.010	33.46
微粒	-0.010	45.52
合计		100.00

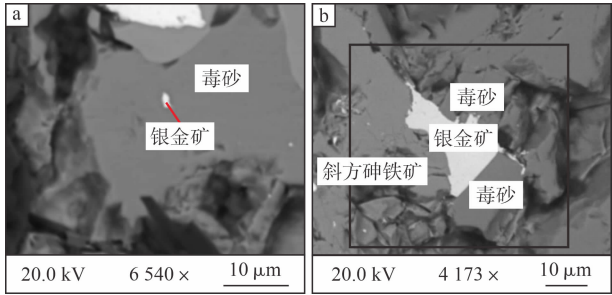


图 2 扫描电镜背散射照片(金矿物粒度)

Fig. 2 Image of scanning eletron microscope backscattering (gold mineral grain size)

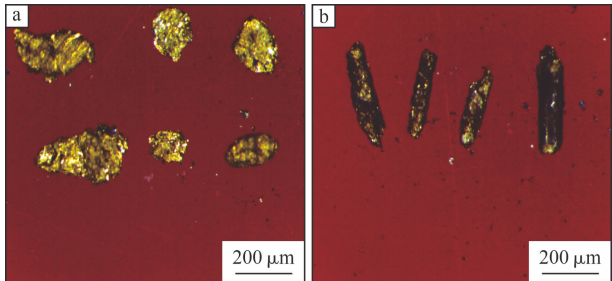


图 3 体视显微镜照片

Fig. 3 Microscopic image under a stereomicroscope

3.3 金矿物形态特征

金矿物主要呈长角粒状,其次为角粒状及浑圆状,其他形态相对较少。观察重砂中金矿物,发现少量金矿物表面不纯净,易夹杂黄铁矿、毒砂、石英等矿物。金矿物外形形态检测结果见表5,扫描电镜能谱成分分析结果见图4。

表5 金矿物外形形态检测结果

外形形态	角粒状	板片状	麦粒状	浑圆状	长角粒状	尖角粒状	合计
相对含量/%	21.43	15.57	7.14	18.56	32.86	4.44	100.00

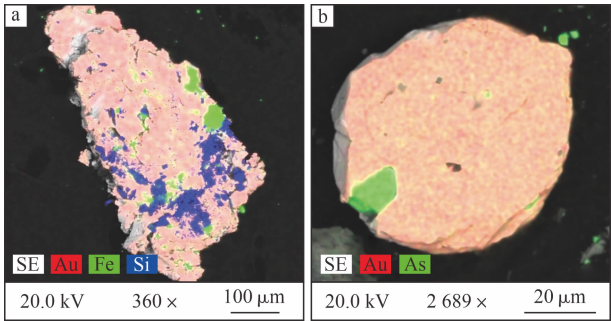


图4 扫描电镜能谱成分分析(金矿物形态)
Fig. 4 Composition analysis by scanning electron microscopy (gold mineral morphology)

3.4 金嵌布状态

金通常嵌布在毒砂与斜方砷铁矿粒间或与毒砂、自然铋、黄铁矿连晶分布,与其他金属矿物嵌布不密切,金矿物嵌布状态分析结果见表6。由表6可知:金矿物主要以硫化矿物包裹金形式存在,其次嵌布在硫化矿物粒间。部分金矿物嵌布状态见图5、图6。

表6 金矿物嵌布状态分析结果

Table 6 Analysis results of gold mineral dissemination		
嵌布状态		相对含量/%
包裹金	脉石矿物包裹	5.79
	硫化矿物包裹	39.54
	脉石矿物粒间	2.36
粒间金	硫化矿物粒间	37.21
	脉石矿物与硫化矿物粒间	0.85
裂隙金	脉石矿物裂隙及孔洞边部	1.73
	硫化矿物裂隙及孔洞边部	12.52

4 影响金回收的矿物学因素

1)金矿物粒度及嵌布关系影响。金矿物粒度细,其中微粒金占45.52%、细粒金占33.46%。机械磨矿很难使这部分微、细粒金全部达到解离状态。即使磨矿达到一定细度时,也会有一部分金矿物依旧

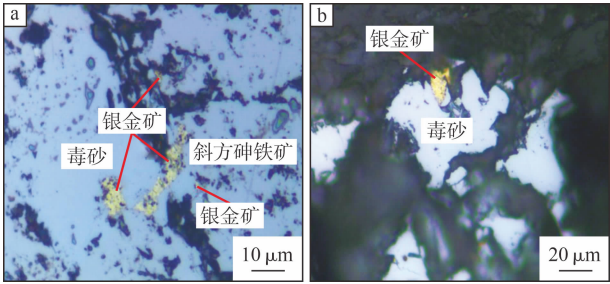
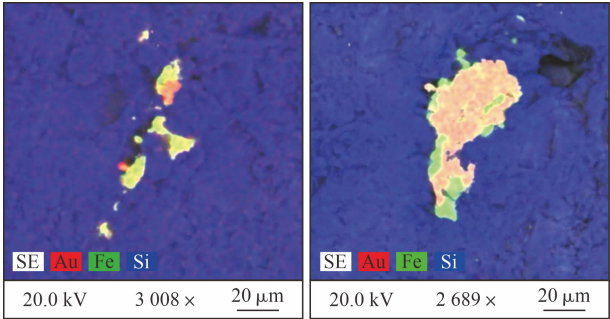
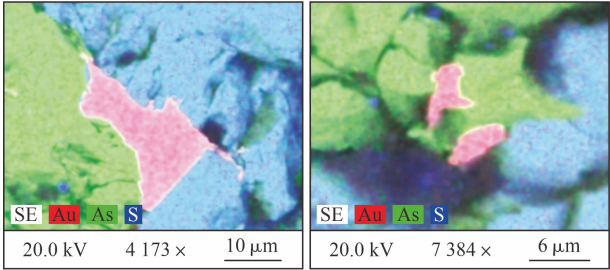


图5 显微镜照片(金矿物嵌布状态)

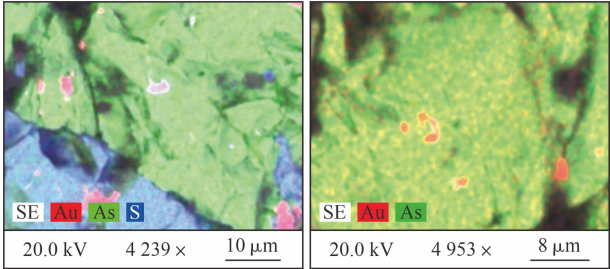
Fig. 5 Microscopic image (gold mineral dissemination status)



a) 银金矿与自然铋连晶嵌布在石英中



b) 金矿物嵌布在毒砂与斜方砷铁矿粒间



c) 金矿物嵌布在毒砂及斜方砷铁矿中

图6 扫描电镜能谱成分分析(金矿物嵌布状态)
Fig. 6 Composition analysis by scanning electron microscopy (gold mineral dissemination status)

被脉石矿物紧密包裹或与脉石矿物呈贫连生体状态,影响浮选工艺效果^[5-10]。

2)金矿物形态的影响。角粒状、浑圆状金矿物占39.99%,不利于浮选。因此,在浮选作业前有必要采用重选作业,提前回收颗粒金矿物。

5 浮选试验及产品考查

5.1 浮选试验

根据该金矿石性质,在最佳条件下采用重选—重尾浮选工艺进行试验,可获得金品位为3 034.60 g/t、

金回收率为 24.57 % 的重选金精矿,金品位为 16.85 g/t、金回收率为 70.23 % 的浮选金精矿,总金回收率可达 94.80 %。

5.2 流失状态考查

对磨矿细度为 -0.074 mm 占 70 % 的浮选尾矿进行金流失状态考查,发现流失金以脉石矿物包裹金(占 54.59 %)为主,其次为脉石矿物连生金(占 30.40 %),少量硫化矿物包裹金(占 9.97 %)及硫化矿物连生金(占 5.04 %),未发现大颗粒单体金流失。

6 结 论

1)该金矿石中金属矿物占 9.50 %,脉石矿物占 90.45 %,硫品位为 3.44 %,金品位为 1.78 g/t,金为唯一有价回收元素,矿石工艺类型为中等硫化矿物石英脉型含金矿石。金矿物主要为自然金和银金矿,粒度以微粒金、细粒金为主,分别占 45.52 %、33.46 %,机械磨矿很难使这部分微、细粒金全部达到解离状态,会对浮选提金工艺产生不利影响。另外,角粒状、浑圆状金矿物占 39.99 %,同样不利于浮选。因此,在浮选作业前有必要采用重选作业,提前回收颗粒金矿物。

2)采用重选—重尾浮选工艺进行试验,可获得

金品位为 3 034.60 g/t、金回收率为 24.57 % 的重选金精矿,金品位为 16.85 g/t、金回收率为 70.23 % 的浮选金精矿,总金回收率可达 94.80 %。流失金以脉石矿物包裹金(占 54.59 %)为主,其次为脉石矿物连生金(占 30.40 %),流失的金矿物均属于合理流失。金的流失特征符合工艺矿物学研究结果。

[参 考 文 献]

[1] 杨虎,罗红莹,陆宽伟,等.四川盐源混合铜矿的工艺矿物学研究[J].岩石矿物学杂志,2021,40(4):757-763.
[2] 胡兵,胡程飞,易凌云,等.印尼典型海砂矿的工艺矿物学及固态还原特性[J].工程科学学报,2021,43(5):619-626.
[3] 王维维,杨占峰,李强,等.白云鄂博白云石型稀土-铁矿石工艺矿物学研究[J].稀土,2021,42(4):45-51.
[4] 王艳,程晓霞,高歌,等.吉尔吉斯斯坦某砂卡岩型金铜氧化矿石工艺矿物学研究[J].黄金,2021,42(5):63-67.
[5] 卢静文.金属矿物显微镜鉴定手册[M].北京:地质出版社,2010.
[6] 申滔,余厚福,陈延,等.银山矿业选矿厂再磨沉砂选金试验研究[J].铜业工程,2022(2):35-38,76.
[7] 贺国帅,黄晓毅,罗小新,等.山阳县某低品位金矿重选试验研究[J].铜业工程,2022(5):38-42.
[8] 王铜.河南某氧化型含银矿石工艺矿物学研究[J].黄金,2023,44(12):39-42.
[9] 刘朝辉.某多硫化物金铜矿石工艺矿物学研究[J].黄金,2023,44(8):66-69.
[10] 陈贵民,蔡明明,秦香伟,等.某含金尾矿的工艺矿物学分析[J].世界有色金属,2023(14):226-228.

Process mineralogy study of a quartz vein gold-bearing ore

Ma Dongmei, Wang Yan, Gao Ge, Chen Jianlong, Wang Tong, Zhang Xiuchao
(Changchun Gold Research Institute Co., Ltd.)

Abstract: A detailed process mineralogy study was conducted on a quartz vein gold-bearing ore, and a gravity separation - gravity separation tailings flotation test and gold loss state inspection were carried out based on this study. The results showed that gold is the sole valuable element to recover with a grade of 1.78 g/t. The main gold minerals are native gold and electrum, which are disseminated in the form of encased gold, accounting for 45.33 %. The particle size is mainly concentrated at -0.037 mm, totaling 78.98 %. By using the gravity separation - gravity separation tailings flotation process, the total gold recovery rate was 94.80 %. The gold minerals lost in the flotation tailings mainly exist in the form of encased gold in vein minerals. The leaching effect of the target minerals is good, and the gold loss characteristics are in line with the results of the process mineralogy study.

Keywords: quartz vein type; gold ore; process mineralogy; dissemination characteristics; gravity separation; gravity separation tailings flotation