

doi:10.3969/j.issn.1671-9492.2024.04.003

贵州某卡林型金矿工艺矿物学研究

朱志雄^{1,2}, 聂光华^{1,3}, 邓强³, 杨勇^{1,2}, 唐云^{1,2}

(1. 贵州大学矿业学院, 贵阳 550025;

2. 喀斯特地区优势矿产资源高效利用国家地方联合重点试验室, 贵阳 550025;

3. 贵州省地质矿产中心实验室, 贵阳 550025)

摘要:运用工艺矿物学参数自动分析系统(BPMA)、X射线衍射(XRD)、X射线荧光光谱仪(XRF)等多种测试手段,对矿物的化学成分、矿物组成、金的赋存状态及载金矿物与脉石矿物的嵌布特征、元素赋存状态进行了详细研究。研究表明:卡林型金矿中Au含量为4.75 g/t,是最主要的有价值元素,59.36%的金以包裹金的形式存在,其中硫化矿中包裹金最高,为42.95%。次以碳质含金的形式存在,微量以裸露金的形式存在。包裹金含量较多,即使在细磨条件下也很难实现单体解离或裸露,不利于提高金矿的回收率。主要的载金硫化矿物为黄铁矿和毒砂。脉石矿物主要有白云石、石英、方解石、黏土矿物等;黄铁矿主要集中在0.015~0.02 mm粒级,毒砂主要集中在0~0.005 mm粒级,白云石主要集中在0.104~0.147 mm粒级,方解石主要集中在0.104~0.147 mm粒级,石英主要集中在0.104~0.147 mm粒级,5种矿物当中,毒砂的细颗粒最多,黄铁矿其次,方解石、白云石和石英的粗颗粒较多。随着物料粒度的降低,矿石中黄铁矿品位会随着升高;黄铁矿作为最主要的载金矿物,颗粒较细,且主要嵌布在绢云母、石英、白云石等矿物中,也有部分单体存在。为了使黄铁矿能够充分单体解离,建议在磨矿阶段提高磨矿时长或是采用多段磨矿的工艺流程。

关键词:卡林型金矿;工艺矿物学;低品位

中图分类号:TD912

文献标志码:A

文章编号:1671-9492(2024)04-0033-07

Study on Process Mineralogy of a Carlin-type Gold Deposit in Guizhou

ZHU Zhixiong^{1,2}, NIE Guanghua^{1,3}, DENG Qiang³, YANG Yong^{1,2}, TANG Yun^{1,2}

(1. School of Mines, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. National and Local Joint Key Laboratory of Efficient Utilization of Advantageous Mineral Resources in Karst Areas, Guiyang 550025, China;

3. Guizhou Central Laboratory of Geology and Mineral Resources, Guiyang 550025, China)

Abstract: The chemical composition, mineral composition, occurrence status of gold, distribution characteristics of gold-bearing minerals and gangue minerals, and occurrence of elements of the ore were studied in detail by means of automatic process mineralogical parameter analysis system (BPMA), X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence spectrometer (XRF) and other testing methods. The results show that the content of Au in carlin-type gold deposits is 4.75 g/t, which is the most important valuable element, and that 59.36% of the gold exists in the form of coated gold, most of which (42.95%) coated by sulfide minerals. Gold in the ore exists secondarily in the form of carbonaceous gold, and trace amount exists in the form of bare gold. Due to the high content of coated gold, it is difficult to achieve liberation or exposure even under fine grinding conditions, which is not conducive to improving the recovery of gold. The main gold-bearing sulfide minerals are pyrite and arsenopyrite. Gangue minerals are mainly dolomite, quartz, calcite, clay minerals, etc. Pyrite concentrated mainly in the 0.015–0.02 mm size range, arsenopyrite concentrated mainly in the 0–0.005 mm size range, dolomite concentrated mainly in the 0.104–0.147 mm size range, calcite concentrated mainly in the 0.104–0.147 mm size range, quartz

收稿日期:2023-03-23

基金项目:贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2022]一般225)

作者简介:朱志雄(1998—),男,贵州毕节人,硕士研究生,主要从事选矿工艺与理论研究。

concentrated mainly in the 0.104—0.147 mm size range, quartz concentrated mainly in the 0.104—0.147 mm size range. Among the five minerals, arsenopyrite has the most fine particles, followed by pyrite, while calcite, dolomite and quartz have more coarse particles. With the decrease of particle size, the grade of pyrite increases. As the main gold-bearing mineral, pyrite has most fine grains and is mainly embedded in sericite, quartz, dolomite and other minerals, some free particles also exist. In order to fully liberate pyrite, it is suggested to increase grinding time in grinding stage or adopt multi-stage grinding process.

Key words: carlin-type gold deposit; process mineralogy; low grade

黄金是人类较早发现并利用的金属之一,在很长一段时间里被用来打造商用货币和首饰,并且作为各个国家最主要的金融储备,在人类社会发展中发挥着重要的作用。在现代社会中,由于黄金具有极高的抗腐蚀性,良好的导电性和导热性以及化学性质稳定等一系列有益性质,黄金不仅应用于国际资源储备和珠宝装饰方面,在科学技术与工业方面也同样具有广泛的使用^[1-3]。

黄金的广泛应用,导致近些年来金矿被不断地大量开采。易处理、高品位的金矿石储量也不断降低^[4]。相较于易处理的金矿,难处理金矿占有金矿的60%以上^[5]。因此,难处理、低品位的金矿石选冶逐渐受到重视。

在金矿开发中,我国在全国范围内对金矿资源进行了勘查,其中贵州、广西、云南、辽宁、河北、黑龙江、陕西、新疆、四川、甘肃、山东、河南、内蒙、青海、安徽等省区是我国黄金的主要产地,对于我国黄金资源开发有非常重要的意义^[6-7]。其中贵州省金矿类型特征明显,最主要的金矿类型为卡林型金矿,占到贵州省查明金矿资源的90%以上,主要分布在黔西南州、盘县—普安一线和丹寨—三都一线^[8]。

卡林型金,又称微细浸染型金,是20世纪60年代初于美国西部内华达州发现的一种新类型金矿,与一些广泛分布的金矿不同,卡林型矿床只出现在某些地区,如美国西部、中国西南部、伊朗西北部以及其他一些地区^[9-10],这类金矿的金属矿物与脉石

矿物都非常细小并呈现浸染状,矿化发育在碳酸盐岩石中,矿化部位浅,成矿年龄小,金矿中的大部分金以肉眼不可见的形式被包裹在其他矿物中,比如硫化物和黏土中^[11-12]。卡林型金矿的黄金颗粒一般嵌布在脉石矿物或其他硫化物当中,即使磨矿阶段磨矿时间再长也不能充分地解离出来^[13]。所以卡林型金矿的开采成本较高,并且开采过程会不可避免混入大量碳酸盐矿石在其中,使得后期的选冶过程变得更加困难。

贵州某卡林型金矿位于贵州省黔西南州境内,属于低品位大型卡林型金矿,探明黄金储量高达120 t^[14]。金的赋存状态和工艺矿物学特性是确定金矿石选冶工艺的前提,为查清矿石加工技术性能,对该矿石进行工艺矿物学研究。本文利用工艺矿物学参数自动分析系统(BPMA)、XRF、XRD等手段对贵州某卡林型金矿进行详细的工艺矿物学研究,为制定合理的选矿试验流程提供科学依据^[15-17]。

1 矿石物质组成研究

1.1 矿样元素分析

矿石化学多元素分析主要是对矿石进行准确地定量分析,据此决定哪几种元素在选矿工艺中必须考虑回收,哪几种元素为有害杂质需将其分离。化学多元素分析是了解矿石的一项重要工作^[18]。为了了解矿石中所含全部物质的含量,使用-2 mm综合样,缩分后破碎至-0.074 mm,进行化学多元素分析,分析结果见表1。

表1 矿样多元素分析

Table 1 Results of chemical multi-elemental analysis of the ore / (g · t⁻¹)

元素	Au	Ag	As	Be	Bi	Cd	Co	Cs
含量	4.75	0.24	6 420	1.38	8.59	0.40	26.3	7.95
元素	P	Pb	Rb	Cu	Sb	Sc	Se	Sn
含量	1 330	7.0	63.6	74.7	175.0	13.4	2	2.7
元素	MnO	Na ₂ O	NiO	P ₂ O ₅	PbO	SiO ₂	SnO ₂	SO ₃
含量	0.18	0.04	0.02	0.31	<0.01	36.48	<0.01	13.55

注: MnO、Na₂O、NiO、P₂O₅、PbO、SiO₂、SnO₂、SO₃的含量单位为%。

金的含量采用火试金原子吸收光谱法测定,使用电感耦合等离子体发射光谱仪测定其他元素。表1结果表明,矿石中伴生组分较为复杂,有用组分为Au和Ag,Au的品位为4.75 g/t,Ag为0.24 g/t,

两者含量都很低。脉石矿物元素主要是SiO₂。

1.2 矿石矿物组成分析

经X衍射分析、电子探针分析及化学分析,对矿石中各矿物含量进行定量。分析结果见表2。

表2 矿石中主要矿物组成

Table 2 Main mineral composition in the ore

/%

矿物名称	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	黄铁矿
含量	28.4	0.3	0.5	8.7	34.1	6.8
矿物名称	石膏	锐钛矿	伊利石	高岭石	伊/蒙混层	合计
含量	0.4	2.0	16.168	0.188	2.444	100.0

表2结果表明,矿石主要由石英、白云石、方解石、伊利石、黄铁矿等矿物组成,含量分别占比28.4%、34.1%、8.7%、16.17%、6.8%,硫的独立矿物主要为黄铁矿,含量占6.8%。

相分析,结果见表3。由表3可知,矿石中59.36%的金以包裹金的形式存在,其中硫化矿中包裹金最高,为42.95%;次以碳质含金的形式存在,占有率为38.53%;微量以裸露金的形式存在,占有率仅为2.11%。

1.3 金物相分析

利用扫描电子显微镜进行了矿石中金的化学物

表3 矿石中金的化学物相分析结果

Table 3 Results of chemical phase analysis of gold in the ore

金相别	裸露金	硫化物包裹金	碳酸盐及氧化物包裹金	碳质含金	硅酸盐及其他包裹金	合计
含量/(g·t ⁻¹)	0.10	2.04	0.11	1.83	0.67	4.75
占有率/%	2.11	42.95	2.31	38.53	14.10	100.0

1.4 原矿粒度分析

矿物的原生粒度是重要的矿石性质,对选矿工艺有较大的影响,它反映的是矿物的实际粒度^[19]。

采用工艺矿物学参数自动分析系统(BPMA)进行了矿样粒度分析,结果如表4所示。

表4 矿样粒度分析结果

Table 4 Particle size analysis results of the ore sample

粒度/mm	各矿物的粒度累积量/%				
	黄铁矿	毒砂	方解石	白云石	石英
+0.417	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.417+0.295	0.00	0.00	0.00	7.45	7.47
-0.295+0.208	0.00	0.00	16.65	11.68	12.09
-0.208+0.147	0.00	0.00	30.08	18.96	20.94
-0.147+0.104	7.42	0.00	53.10	38.55	37.35
-0.104+0.074	9.61	0.00	59.05	48.91	47.84
-0.074+0.053	13.79	0.00	65.73	58.46	59.03
-0.053+0.043	22.58	0.00	73.05	65.23	67.49
-0.043+0.038	32.92	0.00	74.92	70.29	71.57
-0.038+0.020	37.04	0.00	77.40	72.54	73.32
-0.020+0.015	56.56	4.24	84.83	84.23	81.14
-0.015+0.010	65.52	16.11	87.84	88.20	84.34
-0.010+0.005	77.82	35.35	92.60	92.94	88.37
-0.005	93.89	74.36	98.03	97.97	94.26
平均粒径/mm	0.029 7	0.005 0	0.111 8	0.099 4	0.099 8

从图1、表4的数据可知,黄铁矿主要集中在0.015~0.02 mm 粒级,占比19.52%;毒砂主要集中在0~0.005 mm 粒级,占比39.01%;方解石主要集中在0.104~0.147 mm 粒级,占比23.02%;白云石主要集中在0.104~0.147 mm 粒级,占比19.59%;石英主要集中在0.104~0.147 mm 粒级

占比16.41%。5种矿物当中,毒砂的细颗粒最多,黄铁矿其次,方解石、白云石和石英的粗颗粒较多。随着物料粒度的降低,矿石中黄铁矿品位会随着升高。

2 主要矿物的元素赋存状态

元素赋存状态是指元素在矿物原料中的存在形式及其在不同存在形式中的分布数量^[20]。从表5的数据得出,C分布在方解石和白云石中,其中方解石占比16.08%,白云石占比83.92%,S分布在黄铁矿和毒砂中,其中大部分S存在于黄铁矿中,占比98.23%,Mg主要集中在白云石中,占比81.36%,O分布广泛,方解石、白云石、石英当中都有O存在,并且白云石和石英当中,O分布较多,分别占比27.03%和26.12%,Si主要集中在石英中,占比52.40%,Fe主要分布在黄铁矿中,含量占比75.14%,少量分布在毒砂当中,含量仅占2.70%。

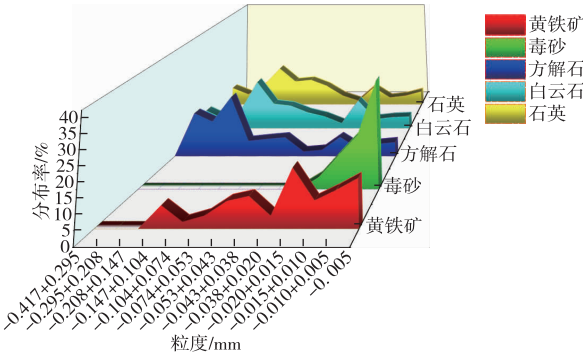


图1 卡林型金矿主要矿物粒度瀑布图

Fig.1 Waterfall diagram of main mineral size in carlin-type gold deposit

表5 矿石中主要金属矿物的元素赋存状态测量结果

Table 5 Measurement results of occurrence states of main metallic minerals in the ores /%

矿物名称	各矿物的元素赋存状态					
	C	S	Mg	O	Si	Fe
黄铁矿	0	98.23	0	0	0	75.14
毒砂	0	1.77	0	0	0	2.70
方解石	16.08	0	0	5.18	0	0
白云石	83.92	0	81.36	27.03	0	0
石英	0	0	0	26.12	52.40	0
其他	0	0	18.64	41.67	47.6	22.16

3 主要矿物的嵌布关系及嵌布特征研究

3.1 主要矿物的嵌布关系

矿石中主要金属矿物的嵌布关系测量结果如表6所示,黄铁矿主要与石英和白云石有嵌布关系,分

别占比13.58%和12.04%;毒砂主要与黄铁矿、白云石和石英有嵌布关系,分别占比11.46%、15.02%和11.39%;方解石主要与石英有嵌布关系,占比为31.49%;白云石主要与石英有嵌布关系,占比为10.22%;石英主要与方解石和白云石有嵌布关系。占比分别为5.62%和7.63%。

表6 矿石中主要金属矿物的嵌布关系测量结果

Table 6 Measurement results of the distribution relationship of main metallic minerals in the ores /%

矿物名称	各矿物与其他矿物的嵌布占比					
	与黄铁矿	与毒砂	与方解石	与白云石	与石英	其他
黄铁矿		1.02	0.59	12.04	13.58	72.77
毒砂	11.46		1.61	15.02	11.39	60.52
方解石	1.11	0.27		1.31	31.49	65.82
白云石	5.38	0.58	0.29		10.22	83.53
石英	4.58	0.31	5.62	7.63		81.86

3.2 主要矿物的嵌布特征

3.2.1 黄铁矿与毒砂嵌布特征

黄铁矿作为最主要的载金矿物,颗粒较细,主要以自形、半自形嵌布于脉石矿物中(图2),其次以他

形粒状嵌布于脉石矿物中,且主要嵌布在绢云母、石英、白云石等矿物中,也有部分单体存在。

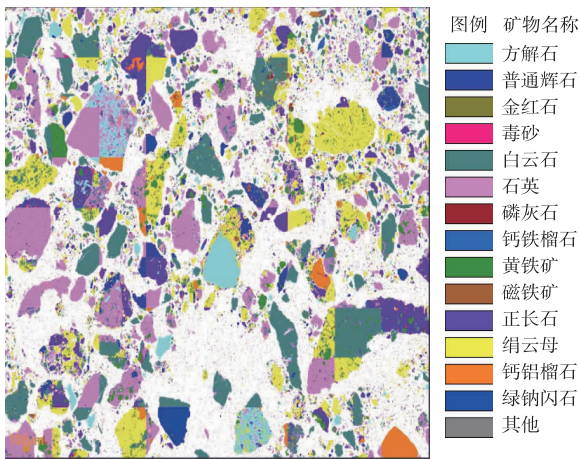


图2 主要矿物的BSE嵌布图
Fig. 2 BSE layout of major minerals

毒砂主要以自形晶、半自形晶的形式嵌布(图2)。毒砂颗粒较细,主要以颗粒状嵌布于脉石矿物中(图2)。

黄铁矿与毒砂有天然的相似可浮性^[21],如果两者大量连生,不利于后续的矿石选冶。贵州某卡林型金矿中只有微量的黄铁矿与毒砂矿紧密毗邻连生(图2),有利于后续的矿石分选。

3.2.2 石英嵌布特征

石英作为最主要的脉石矿物,主要以自形晶、半自形晶的形式嵌布,主要与黄铁矿和白云石有连生关系,少数与毒砂、方解石等矿物连生,部分呈单体存在(图3)。石英的电子能谱图显示石英中有Fe,则该石英晶体包裹或连生着黄铁矿或毒砂。

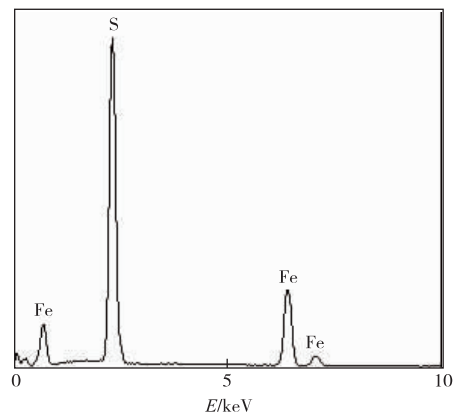
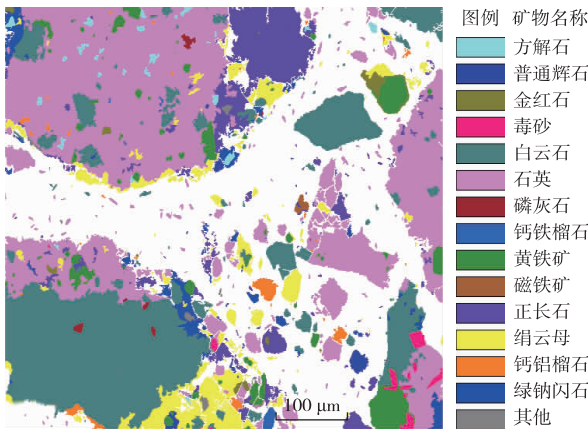


图3 石英的BSE嵌布图及能谱图

Fig. 3 BSE layout and energy spectrum composition of quartz

3.2.3 白云石嵌布特征

白云石主要以自形晶、半自形晶的形式嵌布,少量以星点状嵌布于其他矿物中,白云石主要与黄铁矿和石英有连生关系,少数与毒砂、方解石等矿物连

生(图4),白云石的电子能谱图显示白云石中有Fe,根据矿石中主要金属矿物的元素赋存状态测量结果,Fe并没有分布在白云石中,因此该白云石不是铁白云石,则该白云石晶体包裹或连生着黄铁矿或毒砂。

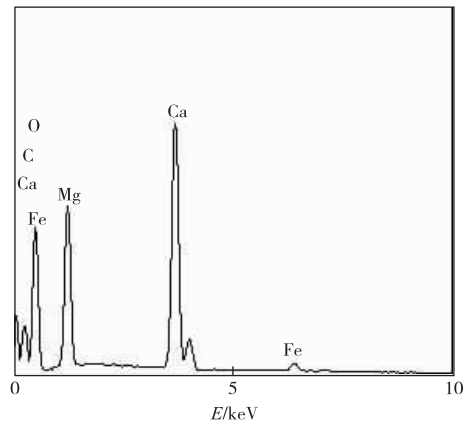
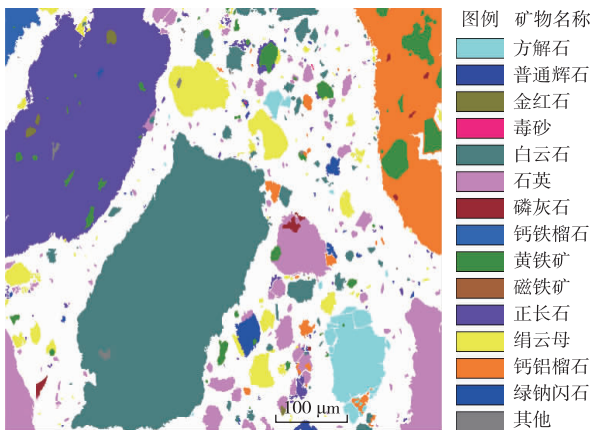


图4 白云石的BSE嵌布图及能谱图

Fig. 4 BSE placement and energy spectrum composition of dolomite

3.2.4 方解石嵌布特征

方解石主要以自形晶、半自形晶的形式嵌布,少量以星点状嵌布于其他矿物中,主要与石英有连生关系,少数与毒砂、白云石、黄铁矿等矿物连生(图 5),方解石的电子能谱图显示方解石中有 Fe,则该方解石晶体包裹或连生着黄铁矿或毒砂。

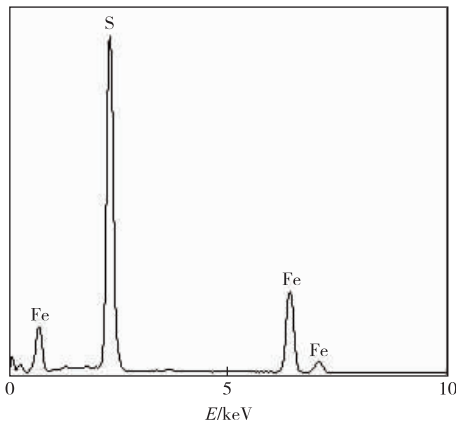
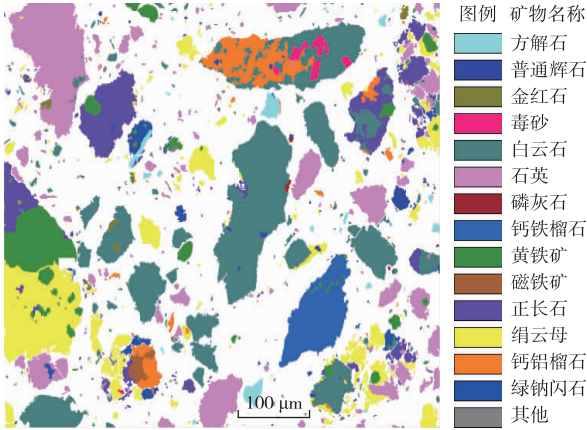


图 5 方解石的 BSE 嵌布图及能谱图

Fig. 5 BSE layout and energy spectrum composition of calcite

4 影响金矿中金回收的矿物学因素及选矿建议

贵州某卡林型金矿中的金大部分以包裹金的形式存在,次以碳质含金的形式存在,微量以裸露金的形式存在。包裹金与黄铁矿、毒砂的嵌布关系紧密,考虑到黄铁矿和毒砂是主要的载金矿物,可以采用反浮选的方式将矿石中的脉石矿物浮选出来,金以及载金矿物留在浮选槽底,以做到对金的浮选富集,后续再通过氰化浸出的方式浸出金。也可以在浮选过程中采用浮选硫化物的方式将金以及载金矿物富集到精矿中,做到对金的浮选富集。采用以上两种工艺流程回收贵州某卡林型金矿中的金,会有两个因素影响金矿中金的回收:1)整体而言,矿石中黄铁

矿、毒砂的嵌布粒度都比较细,需要对原矿进行细磨,才能让这两种矿物尽可能单体解离;2)矿石中大部分金以包裹金形式嵌布于载金矿物中,在浮选过程中应采用“阶磨阶选”的流程,使得更多的包裹金以裸露形式存在,才能提高精矿中金的品位。

5 浮选试验

根据矿石性质,本次试验采用常规反浮选工艺,以碳酸钠作为 pH 调整剂,油酸钠作为反浮选捕收剂,进行了条件试验,考察了磨矿细度对浮选的影响,试验流程见图 6。

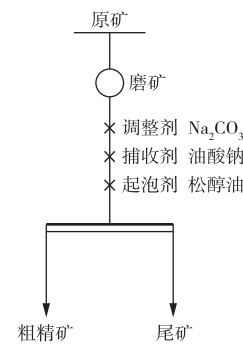


图 6 浮选试验流程

Fig. 6 Flowsheet of flotation tests

浮选过程中固定 pH 调整剂碳酸钠用量为 2 kg/t、捕收剂油酸钠用量为 400 g/t,进行磨矿细度试验,试验结果见图 7。由图 7 可知,随着磨矿细度的提高,精矿中黄铁矿品位逐渐升高,当磨矿细度为 -0.074 mm 含量占 90% 时达到最高,但黄铁矿回收率呈现先上升后下降的趋势。这是因为随着磨矿细度的增加,载金矿物的单体解离度会增加,导致精矿中黄铁矿品位增加;同时磨矿细度的增加,细粒脉石矿物的数量也会增加,部分细粒脉石矿物会附着在

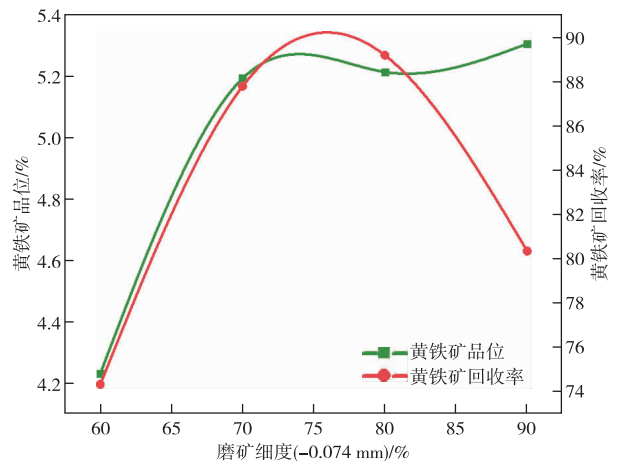


图 7 磨矿细度对黄铁矿浮选指标的影响

Fig. 7 Effects of grinding fineness on pyrite flotation index

载金矿物上,一同集中到尾矿中,导致精矿中黄铁矿回收率降低。

这与矿石的工艺矿物学性质相符,黄铁矿的颗粒较细,脉石矿物的颗粒较粗,随着磨矿时间的延长,浮选的精矿中,黄铁矿的品位会逐渐升高,黄铁矿的回收率则会因为细粒脉石矿物的增加呈现先升高后降低。

6 结论

1)卡林型金矿中 Au 含量为 4.75 g/t,是最主要的有价元素;其他有价金属的含量较低,尚未达到综合回收利用的标准。59.36% 的金以包裹金的形式存在,其中硫化矿中包裹金最高,为 42.95%。次以碳质含金的形式存在,微量以裸露金的形式存在。包裹金含量较多,即使在细磨条件下也很难实现单体解离或裸露,不利于提高金矿的回收率。主要的载金硫化矿物为黄铁矿和毒砂。脉石矿物主要有白云石、石英、方解石、黏土矿物等,其含量分别占比 34.1%、28.4%、8.7%和 18.8%。

2)黄铁矿主要集中在 0.015~0.02 mm 粒级,毒砂主要集中在 0~0.005 mm 粒级,白云石主要集中在 0.104~0.147 mm 粒级,方解石主要集中在 0.104~0.147 mm 粒级,石英主要集中在 0.104~0.147 mm 粒级,5 种矿物中,毒砂的细颗粒最多,黄铁矿其次,方解石、白云石和石英的粗颗粒较多。随着物料粒度的降低,矿石中黄铁矿品位会随着升高。

3)主要矿物的 BSE 嵌布图显示,黄铁矿颗粒较细,且主要嵌布在绢云母、石英、白云石等矿物中,也有部分单体存在。为了使黄铁矿能够充分单体解离,建议在磨矿阶段提高磨矿时长或是采用多段磨矿的工艺流程。

参考文献

- [1] 夏国进. 某卡林型低品位难选金矿浮选试验[J]. 现代矿业, 2019, 35(3): 128-135.
XIA Guojin. Experiment on flotation of a carlin low-grade refractory gold ore [J]. Modern Mining, 2019, 35(3): 128-135.
- [2] WANG X, QIN W, JIAO F, et al. Mineralogy and pretreatment of a refractory gold deposit in Zambia [J]. Minerals, 2019, 9(7): 406. DOI: 10.3390/min9070406.
- [3] ZHANG L, GUO X Y, TIAN Q H. Extraction of gold from typical carlin gold concentrate by pressure oxidation pretreatment-sodium jarosite decomposition and polysulfide leaching [J]. Hydrometallurgy, 2022, 208: 105743. DOI: 10.1016/j.hydromet.2021.105743.
- [4] YIN W Z, TANG Y, MA Y Q, et al. Comparison of sample properties and leaching characteristics of gold ore from jaw crusher and HPGR [J]. Minerals Engineering, 2017, 111: 140-147.
- [5] 张辰敏. 工艺矿物学在难处理金矿矿物加工中的应用[J]. 中国金属通报, 2021(5): 158-159.
ZHANG Chenmin. Application of process mineralogy in processing refractory gold ores [J]. China Metal Bulletin, 2021(5): 158-159.
- [6] 陈云. 金矿地质勘查现状及找矿方向探讨[J]. 世界有色金属, 2022(13): 70-72.
CHEN Yun. Discussion on the present situation of geological exploration and prospecting direction of gold deposits [J]. World Nonferrous Metals, 2022 (13): 70-72.
- [7] XIE X, FU Y, LIU J. Mineralogical characteristic of ductile-brittle shear zone in the Baguamiao gold deposit, Shaanxi province: implication for gold mineralization [J]. Geological Journal, 2017, 52: 81-96.
- [8] 杨毕, 吴晓娟. 贵州省金矿勘查开发现状及工作建议浅析[J]. 西部探矿工程, 2021, 33(9): 162-165.
YANG Bi, WU Xiaojuan. Brief analysis on the status quo and suggestions of gold exploration and development in Guizhou province [J]. West-China Exploration Engineering, 2021, 33(9): 162-165.
- [9] 王可勇. 我国微细浸染型金矿床的形成条件及成矿作用特征[J]. 贵金属地质, 2000(3): 160-165.
WANG Keyong. Formation conditions and metallogenic characteristics of micro-disseminated gold deposits in China [J]. Journal of Precious Metal Geology, 2000(3): 160-165.
- [10] BIDARI E, AAZAMI M, AGHAZADEH V. Process mineralogical study of the arsenical zone from a carlin-type gold deposit [J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2020, 37(4): 1307-1315.
- [11] 赵爱林, 李景春, 王力, 等. 金矿床研究的回顾与展望[J]. 地质与资源, 2003(2): 125-128.
ZHAO Ailin, LI Jingchun, WANG Li, et al. Review and prospect of gold deposit research [J]. Geology and resources, 2003(2): 125-128.
- [12] EHSAN B, VALEH A. Pyrite from zarshuran carlin-type gold deposit: characterization, alkaline oxidation pretreatment, and cyanidation [J]. Hydrometallurgy, 2018, 179: 222-231.
- [13] OSPINA-CORREA J D, MEJIA-RESTREPO E M, SERNA-ZULUAGA C M, et al. Process mineralogy of refractory gold ore in thiosulfate solutions [J]. Hydrometallurgy, 2018, 182: 104-113.

- Research progress in flotation bubbles and their interaction with particles[J]. *Metal Mine*, 2017, 46(8): 20-26.
- [44] 赵玉龙,张鹤,余俊甫,等. 纳米气泡在微细粒矿物浮选中的应用研究现状[J]. *净水技术*, 2021, 40(2): 127-135.
ZHAO Yulong, ZHANG He, YU Junfu, et al. Research status of application of nano-bubbles in flotation of fine minerals [J]. *Water Purification Technology*, 2021, 40(2):127-135.
- [45] 刘安,韩峰,李志红,等. 纳米气泡在微细粒矿物浮选中的应用研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2018, 38(3): 81-86.
LIU An, HAN Feng, LI Zhihong, et al. Research progress in the application of nano-bubbles in the flotation of fine minerals [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2018, 38(3):81-86.
- [46] 徐冬林,陶东平,吴中贤,等. 纳米气泡在鞍山式铁矿反浮选中效果探索[J]. *金属矿山*, 2020, 49(8):83-90.
XU Donglin, TAO Dongping, WU Zhongxian, et al. Exploration on the effect of nano-bubbles in the anti-flotation of Anshan iron ore [J]. *Metal Mine*, 2020, 49(8):83-90.
- [47] 冯其明,周伟光,石晴. 纳米气泡的形成及其对微细粒矿物浮选的影响[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(1):9-15.
FENG Qiming, ZHOU Weiguang, SHI Qing. The formation of nano-bubbles and its effect on the flotation of fine minerals[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2017, 48(1):9-15.
- [48] 马芳源. 石墨矿纳米气泡高效浮选及其机理研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2021.
MA Fangyuan. High-efficiency flotation of graphite ore with nano-bubbles and its mechanism [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [49] TAGHAVI F, NOAPARAST M, POURKARIMI Z, et al. Comparison of recovery of fine phosphate minerals by flotation machine and flotation column in the presence of nano-bubbles [J]. *Journal of Central South University*, 2022, 29(1):102-115.
- [50] 雷汪. 纳米气泡的制备及其对煤泥浮选影响研究[D]. 武汉:武汉科技大学, 2020.
LEI Wang. Study on the preparation of nano-bubbles and their influence on coal slime flotation[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2020.

(本文编辑 刘水红)

(上接第 39 页)

- [14] 杨超,王怀,郝福来,等. 贵州某卡林型金矿浮选试验研究[J]. *黄金*, 2018, 39(6):56-59.
YANG Chao, WANG Huai, HAO Fulai, et al. Experimental study on flotation of a carlin-type gold ore from Guizhou[J]. *Gold*, 2018, 39(6):56-59.
- [15] 周渝,董菁,刘亮. 江西遂川某金矿工艺矿物学研究[J]. *中国金属通报*, 2019(9):253-254.
ZHOU Yu, DONG Qin, LIU Liang. Research on process mineralogy of a gold mine in Suichuan, Jiangxi province[J]. *China Metal Bulletin*, 2019(9):253-254.
- [16] 温利刚,付强,贾木欣,等. 工艺矿物学自动分析仪(BPMA)在影响金氰化浸出的工艺矿物学因素研究中的应用[J]. *中国矿业*, 2021, 30(增刊 2):195-200.
WEN Ligang, FU Qiang, JIA Muxin, et al. Application of automated mineralogy analyzing system in the study of process mineralogical factors affecting gold cyanide leaching[J]. *China Mining Magazine*, 2021, 30(Suppl. 2): 195-200.
- [17] AGORHOM E A, SKINNER W, ZANIN M. Influence of gold mineralogy on its flotation recovery in a porphyry copper-gold ore [J]. *Chemical Engineering Science*, 2013, 99:127-138.
- [18] 赵晖,金自钦. 某金矿工艺矿物学研究[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2023(1):10-15.
ZHAO Hui, JIN Ziqin. Process mineralogy study on a gold ore [J]. *Journal of Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2023(1):10-15.
- [19] 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 Yue, WANG Jing, LI Xiaoyu, et al. Process mineralogy study of gold deposit in western Sichuan area and its influence on mineral processing technology[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(4):206-210.
- [20] 于淙权,李光胜,朱幸福,等. 黄铁矿和毒砂分离浮选研究[J]. *科技与创新*, 2023(4):73-75.
YU Congquan, LI Guangsheng, ZHU Xingfu, et al. Study on separation and flotation of pyrite and arsenopyrite[J]. *Science, Technology and Innovation*, 2023(4):73-75.
- [21] 吕宪俊. 工艺矿物学[M]. 长沙:中南大学出版社, 2011:269.
LYU Xianjun. Process mineralogy [M]. Changsha: Central South University Press, 2011:269.

(本文编辑 汪东芳)