紫金山铜金矿中金铜银的赋存状态研究

李美荣¹, 孟庆波^{1*}, 梁冬云¹, 沈贤德², 李 波¹, 张莉莉¹ (1. 广东省科学院 资源利用与稀土开发研究所,稀有金属分离与综合利用国家重点实验室,广东省矿产 资源开发和综合利用重点实验室,广州 510650; 2. 紫金矿业集团股份有限公司,福建 上杭 364200)

摘 要:采用矿物自动分析仪(MLA)、扫描电镜(SEM)、X 射线衍射(XRD)研究了紫金山金铜矿入选 矿石中有价元素铜、金、银的赋存状态以及分选过程中的金属走向。结果表明,铜矿物主要有蓝辉 铜矿、铜蓝、硫砷铜矿,金银以游离矿物和硫化物包裹体为主。铜矿物常见沿明矾石溶蚀孔洞或碎 裂缝隙充填,与黄铁矿密切连生,从原矿中分选铜矿物,理论品位为 Cu 69.70%,理论回收率 93.55%。 中粒金嵌布于铜矿物和黄铁矿矿物粒间或裂隙,可随着铜和硫的回收进入铜、硫精矿,金的理论回 收率分别为 57.19%和 27.27%; 微细金粒包裹于明矾石和石英中,随脉石损失于尾矿中。银以显微 银为主,多见呈微细粒包裹于硫化矿物中,铜精矿和硫精矿中银的理论回收率分别为 56.96%和 26.71%。

关键词:铜金矿;铜矿物;自然金;赋存状态 中图分类号:TD982 文献标识码:A 文章编号:1004-0676(2021)02-0041-08

Study on occurrences of copper, gold and silver in Zijinshan Cu-Au deposit

LI Mei-rong¹, MENG Qing-bo^{1*}, LIANG Dong-yun¹, SHEN Xian-de², LI Bo¹, ZHANG Li-li¹

(1. Institute of Resources Utilization and Rare Earth Development, Guangdong Academy of Sciences, State Key Laboratory of Rare Metal Separation and Comprehensive Utilization, Guangdong Provincial Key Laboratory of Development & Comprehensive Utilization of Mineral Resources, Guangzhou 510650, China; 2. Zijin Mining Group Co. Ltd., Shanghang 364200, Fujian, China)

Abstract: The occurrences of the valuable elements copper, gold and silver in Zijinshan Cu-Au deposit ore and their trends in the separation process were studied by using MLA, SEM and XRD techniques. It was shown that copper minerals mainly included chalcocite, covellite, enargite, etc., and that gold and silver minerals existed as dissociate minerals and sulfide inclusions. Copper minerals were commonly filled along dissolution holes or broken cracks of alunite, closely associated with pyrite. Separating copper minerals from the original ore, the theoretical grade was Cu 69.70%, and the theoretical recovery rate was 93.55%. Medium-grained gold embedded between grains or cracks of copper minerals and pyrite minerals, was obtained from copper and sulfur concentrates, and the theoretical recovery rates of gold in copper and sulfur concentrates were 57.19% and 27.27%, respectively. Fine gold particles were encapsulated in alunite and quartz, and lost in tailings along with gangue. Silver was dominated by microscopic silver, and it was mostly wrapped in sulfide minerals. The theoretical recovery rates of silver in copper and sulfur concentrates were 56.96% and 26.71%, respectively.

Key words: Cu-Au deposit; copper minerals; native gold; occurrence states

紫金山铜金矿床是国内首个发现的高硫化型浅 成

临化型浅 成低温热液矿床,位于紫金山矿田中部,关于该矿

收稿日期: 2020-09-01

基金项目: 广州市科技计划项目(201804010423)

第一作者:李美荣,女,硕士,工程师,研究方向:稀贵金属工艺矿物学研究。E-mail: happy_199002@126.com

^{*}通信作者: 孟庆波, 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 稀贵金属矿物加工研究。E-mail: 13202001016@163.com

床的区域地质、矿床地质、地球化学特征以及矿化 分带特征已有系统研究[1-6],矿石中的主要矿物硫化 铜矿物(辉铜矿-蓝辉铜矿-铜蓝、硫砷铜矿、斑铜矿 等)、黄铁矿、脉石矿物(明矾石等)的空间分布特征、 成矿过程以及矿物学特征也有专门研究[7-14]。紫金 山铜金矿床受火山机构控制,其矿化特征是脉状引 爆角砾岩发育及蚀变分带明显,形成典型的"上金下 铜"垂直矿化分带特征,铜矿体为特殊的蓝辉铜矿-铜蓝-硫砷铜矿-明矾石矿物组合。以引爆角砾岩脉 为中心,从内向外,从上到下,依次为硅化带、明 矾石化带、地开石化带、绢英岩化带。硅化带控制 着大部分金矿体的空间分布,还有小部分的金矿体 是产在明矾石化带中,明矾石化带控制着下部高硫 化型铜矿体,主要包括蓝辉铜矿、铜蓝以及硫砷铜 矿等铜矿化组合类型。明矾石可分为4种产出类型, 分别为蚀变岩型明矾石、与铜-硫化物共生的明矾石、 脉状明矾石和粉末状明矾石。绢英岩化带控制着黄 铜矿、斑铜矿、铜蓝、方铅矿、闪锌矿的铜铅锌矿 化组合类型。地开石化带类型介于明矾石化带和绢 英岩化带之间。

作为国内首屈一指的特大规模型铜、金、银矿 田,矿山已探明可利用的金资源储量从 5.45 吨增加 到 316 吨(平均地质品位 Au 0.596 g/t),铜资源储量 从 146 万吨增加到 242 万吨(平均地质品位 Cu 0.426%),其矿床地质方面已经形成了一个成熟完整 的研究体系,相对而言,矿石矿物学及矿物加工等 方面的研究尚未完善^[15]。在现有的生产工艺流程中, 主要以金属铜、硫为回收对象,金、银通过半自磨 顽石进行浸出回收,部分金银在选矿过程中进入铜、 硫精矿,导致金的回收率较低。查明矿石中金银的 赋存状态及流失情况,在保证铜、硫的选矿指标的 前提下,尽可能提高金、银的回收率,增加企业的 附加值,是选矿厂面临的重要技改问题之一。

1 样品制备与试验方法

1.1 样品准备

本次矿石样品取自紫金山金铜矿,块矿取自采 矿粗碎样品,从矿样中选择具有代表性块状矿石样 制成光片,其余样品经破碎、混匀、筛分(2 mm)后, 再混匀、缩分制成试验样品备用。多元素化学分析 样品研磨至 0.074 mm 以下,矿物自动检测样碎至-0.2 mm,筛分+0.1 mm,-0.1+0.04 mm,-0.04+0.02 mm,-0.02 mm 粒级产品制成树脂光片,通过选矿 方法从样品中分离得到硫化铜矿物、黄铁矿和脉石 单矿物,在-0.04 mm 粒级完成最后提纯。

1.2 设备和试剂

矿物含量的自动检测、矿物能谱分析和元素扫 描分析均采用美国 FEI 矿物自动分析仪 MLA 650 系 统^[16],该系统联合 FEI Quanta 650 扫描电镜、Bruker XFlash5010 能谱仪以及 MLA 软件 3.1 版本进行分 析。工作条件为,加速电压 20 kV,工作距离 10 mm, 高真空模式,时间常数 6 s。

背散射电子是被固体样品中的原子反射回来的 一部分入射电子,它的成像衬度与样品微区化学组 成及形貌有关。样品通过磨抛后获得光面,此平面 的背散射电子图像(BSE)衬度仅取决于不同微区物 相的平均原子序数。样品表面平均原子序数较高的 区域,产生较强的背散射电子信号,在 BSE 中呈现 较亮的灰度,反之亦然^[17]。MLA 检测体系中,采用 找金模式过滤掉主要矿物脉石矿物和黄铁矿颗粒进 行金的查定,将背景灰度值设置为 GL(Fe₂S)+20, 检测颗粒粒径为1μm,采集时间为 50 ms,总测量 颗粒为 100000 颗,测量时间为 720 min。

X 射线衍射(XRD)用 Empyrean XRD 仪测定, 实验条件为: CuK_α靶; 波长 0.15406 nm, 靶电压 45 kV, 靶电流 40 mA; 扫描方式: 连续扫描; 扫描速 度:0.06°/s; 2θ 起始角 5°,终止角 90°,步长 0.013°; 发散狭缝 1°,接受狭缝 0.15 mm,防止散射狭缝 1°。

单矿物分离采用的药剂主要有丁基黄药, MIBC,石灰,硫化钠,活性炭,选矿用水主要为自 来水,选矿设备主要为 XFGC 型充气挂槽浮选机, 真空过滤机与烘箱。

2 结果与讨论

2.1 矿石基本性质

原矿主要化学成分分析结果如表1所示。样品 中的铜为主要的有价元素,伴生金、银和硫,达到 了斑岩型铜矿床的综合回收要求。

表1 原矿化学成分分析结果(质量分数)

Tab.1 The chemical analysis results of ore (ω)

Cu	Au	Ag	Fe	S	As
0.47%	0.12 g/t	4.0 g/t	2.81%	4.74%	0.019%
Pb	Zn	Мо	CaO	MgO	Р
0.012%	0.008%	0.0006%	0.017%	0.016%	0.042%
K ₂ O	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂		
1.41%	0.055%	10.05%	73.28%		

原矿矿物组成结果见表 2。原矿中金属矿物主 要有蓝辉铜矿、铜蓝、硫砷铜矿、斑铜矿、黄铜矿、 黄铁矿等,贵金属矿物包括微量的自然金和银矿物, 脉石矿物为石英、明矾石、地开石等。

表2 原矿矿物组成结果

Tab.2 The mineralogical composition results of ore					/%
自然金	银矿物	蓝辉铜矿	铜蓝	硫砷铜	司石广

微量	微量	0.346	0.178	0.0)82
黝铜矿	黄铜矿	斑铜矿	黄铁矿	硫锡铜	亲铜矿
0.007	0.005	0.006	5.550	0.0)06
闪锌矿	辉钼矿	方铅矿	石英	赤/褚	 铁矿
0.022	0.004	0.002	67.101	0.9	932
绢云母	地开石	明矾石	金红石	锆石	其他
1.061	13.300	10.748	0.191	0.037	0.422

2.2 矿石中铜的赋存状态

根据原矿矿物组成和单矿物化学分析结果,有 价元素铜的平衡分配如表 3。铜主要赋存于硫化铜 矿物中,分配率为93.55%,以微细包裹体赋存于黄铁矿的铜为3.31%,分散于脉石中的铜为2.58%,从原矿中分离铜精矿,理论品位为Cu69.70%。

表3 矿石中铜的平衡分配表

Tab.3 The balanced distribution of copper in the ore

矿物	比例/%	Cu 品位/%	Cu 分配率/%
硫化铜矿物	0.630	69.70	93.55
水胆矾	0.005	56.22	0.56
黄铁矿	5.550	0.28	3.31
脉石	93.312	0.013	2.58
其他	0.503	/	/
合计	100	0.47	100.00

对铜精矿样品进行 XRD 分析,并采用 High Score Plus 软件进行无标定量和结构精修后,获得铜 精矿主要物相组成及物相晶体结构,结果见图 1 和 图 2,铜矿物以蓝辉铜矿、铜蓝和硫砷铜矿为主。 铜矿物化学成分能谱分析结果及主要嵌布形式如表 4 和图 3 所示。



图1 铜精矿 X 射线衍射图谱

Fig.1 The XRD pattern of cooper concentrate



蓝辉铜矿(Ref.Code: 96-900-0118)理论化学组成 Cu_{7.20}S_{4.00},为等轴晶系,空间群 *Fm-3m*,晶胞参数 a = b = c = 0.555 nm, $\alpha = \beta = \gamma = 90^{\circ}$ 。矿石中蓝辉铜矿含 Cu 75.73%~79.79%,存在少量 Ag、Fe 作为类质同象混入物代替 Cu 进入晶格,实际计算化学式为 Cu_{1.925}(Al₄Si₁₁Fe₆Ag_{0.55})_{0.001}S_{1.05}。反光显微镜下观察,蓝辉铜矿反射色为灰蓝色或浅蓝色,显均质性,呈自形-半自形板状或粒状,集合体呈不规则状、脉状或粒状,可见交代结构、碎裂结构和固溶体分离结构,在蓝辉铜矿中可出现由固溶体分离而产生的辉铜矿或铜蓝的叶片,亦可与蠕虫状硫砷铜矿交代连生。

铜蓝(Ref.Code: 98-002-6968)理论化学组成 Cu₆S₆,为三方晶系,空间群*P63/mmc*,晶胞参数*a* = *b* = 0.379 nm, *c* = 1.633157 nm, $\alpha = \beta = 90^{\circ}$, $\gamma = 120^{\circ}$ 。 矿石中铜蓝含Cu 66.53%~67.44%,存在少量Ag、 Fe 作为类质同象混入物代替 Cu 进入晶格,计算化 学式为 Cu_{1.01}(Al₂Si₆Fe_{1.5}Ag_{0.3})_{0.001}S_{0.98}。反光显微镜 观察,反射色为深蓝色至白色微蓝,显多色性和强 非均质性,呈自形晶板状或他形、半自形粒状,集 合体呈不规则粒状,可见交代结构,常与蓝辉铜矿 交代共生。

硫砷铜矿(Ref.Code: 96-900-7518)理论化学组 成 Cu₆As₂S₈,为斜方晶系,空间群: *Pmn2*₁,晶胞参 数 a=0.738 nm, b=0.644 nm, c=0.618 nm, $a = \beta = \gamma$ =90°。矿石中硫砷铜矿含 Cu 47.26%~48.59%,作为 类质同象混入物 Sb 代替 As, Fe 代替 Cu,化学式 为 Cu₃As(Si_{2.5}Fe_{1.4}Sb_{1.2}Sn_{0.3})_{0.01}S₄。反光显微镜下观 察,反射色为淡粉红灰白色或浅橘红色,反射多色 性显著,强非均质性,呈板状晶体或他形粒状、浑 圆颗粒集合体,可见交代结构,与蓝辉铜矿、铜蓝 交代连生。



(a). 蓝辉铜矿充填于板状明矾石中,交代硫砷铜矿和黄铁矿(Digenite is filled in plate-shaped alunite, replacing enargite and pyrite);
 (b). 蓝辉铜矿交代 板状硫砷铜矿,部分蚀变为铜蓝(Digenite replaces tabular enargite and corrods into covellite);
 (c). 铜蓝充填于明矾石的裂缝和孔洞中,并见交代残余的 黄铜矿(Covellite is filled in the cracks and holes of alunite);
 (d). 板状自形晶硫砷铜矿集合体嵌布于明矾石中,局部被辉铜矿交代(The self-shaped enargite aggregates are embedded in alunite and partially replaced by chalcocite)

图 3 铜矿物在矿石中的赋存状态 Fig.3 The disseminated state of copper minerals in ore

45

Tab.4 The chemical component (ω) results of copper minerals by EDS						/%	<i>6</i>		
矿物	Cu	S	As	Sb	Ag	Fe	Al	Si	
蓝辉铜矿	77.98	21.49	/	/	0.04	0.21	0.07	0.20	
铜蓝	66.82	32.85	/	/	0.03	0.09	0.05	0.17	
硫砷铜矿	48.05	32.15	18.93	0.38	/	0.20	/	0.19	

由图 3 可见, 矿石中铜矿物主要有以下嵌布形 式:1)沿明矾石溶蚀孔洞或碎裂缝隙充填, 交代黄 铁矿;2)在明矾石和地开石中零星分布;3)呈微细 粒包裹于黄铁矿中。受充填空间位置制约, 铜矿物 嵌布粒度分布极不均匀, 粗粒者可达 1 mm, 微粒 (≤10 µm)占有率为 13%左右, 且与黄铁矿密切连生。

2.3 矿石中金的赋存状态

表4 铜矿物化学成分能谱分析结果

矿石中金的平衡分配如表 5 所列,有价元素金 以游离金和硫化物包裹金的形式存在。以游离金的 形式存在的金为 29.49%,赋存于硫化铜矿物和黄铁 矿中的金为 27.70%和 27.27%,分散于脉石中的金 为 15.54%。从原矿中分离铜精矿,金的理论回收率 分别为 57.19%,分离硫精矿,金的理论回收率分别 为 27.27%。

表5 矿石中金的平衡分配表

Tab.5 The balanced distribution of gold in the ore

矿物	比例/%	Au 品位/(g/t)	Au 分配率/%
游离金	微量	/	29.49
硫化铜矿物	0.630	5.28	27.70
水胆矾	0.005	/	/
黄铁矿	5.550	0.59	27.27
脉石	93.312	0.02	15.54
其他	0.503	/	/
合计	100	0.12	100.00

检测发现的金粒主要以金的独立矿物自然金形 式存在,颗粒形态主要为不规则状、薄板状和枝叉 状等。自然金表面粗糙不平,无任何被膜,观察所 见的自然金切面多为不规则状、近圆状和短柱状等。

矿石中的金粒主要有 3 种嵌布状态: 1) 中细粒 金常见以粒间金和裂隙金的形式嵌布于蓝辉铜矿等 硫化铜矿物中,这部分金粒常随硫化铜矿物浮选进 入铜精矿; 2) 少数微粒金以裂隙金的形式充填于黄 铁矿晶洞中,或者以粒间金的形式充填于黄铁矿与 明矾石、石英之间的缝隙中; 3) 大部分微粒金以裂 隙金或包裹金的形式沿明矾石和石英晶粒缝隙充填, 或者以粒间金的形式充填于石英和明矾石颗粒间隙, 这部分金粒不易在磨矿过程中解离,常见损失于尾 矿中,如图4所示。

采用 MLA 找金模式进行游离金的查找,在原 矿矿石光片和铜精矿重砂产品中共发现金粒 258 颗, 其化学成分能谱分析结果如表 6。可以看出,该矿 石中金粒的成色较高,以自然金为主,极少数银金 矿。自然金中金、银和铜的含量波动较大,Au 80.87%~100.00%,Ag 0%~19.13%,Cu 0%~5.92%。

结合显微镜观察和扫描电镜检测对铜精矿和原 矿矿石中发现的金粒进行粒度统计,其中铜精矿中 发现金粒 99 颗,原矿矿石中发现金粒 159 颗,结果 如表 7 所示。可以看出,样品中的金粒以显微金为 主(0.2 μm~0.2 mm)^[19],铜精矿中的金粒粒度相对较 粗,以中粒金(38~74 μm)和细粒金(10~38 μm),粒级 占有率分别为 21.05%和 75.44%。而原矿矿石中发 现的金粒以细粒金和微粒金(≤10 μm)为主,粒级占 有率分别为 38.44%和 61.56%。

2.4 矿石中银的赋存状态

矿石中银的平衡分配如表 8,有价元素银主要 以微细包裹体的形式存在,以游离银的形式存在的 银为 22.99%,赋存于硫化铜矿物和黄铁矿中的银分 别为 33.97%和 26.71%,分散于脉石中的银为 16.32%。从原矿中分离铜精矿,银的理论回收率分 别为 56.96%,分离硫精矿,银的理论回收率分别为 26.71%。

采用 MLA 找金模式查找进行银矿物的查定, 发现金属银主要以碲银矿(Ag2Te)和碲金银矿 (Ag2AuTe2)形式存在,少量脆银矿(Ag5SbS4)和螺状 硫银矿(Ag2S)。以显微银为主,多见呈微细粒包裹 于黄铁矿、方铅矿等硫化矿物中,如图 5 所示。

2.5 元素赋存状态对选矿回收的影响

 浮选药剂的选择。该矿石为原生硫化铜矿次 生富集带矿石,铜矿物种类繁多,以次生硫化铜矿 物蓝辉铜矿和铜蓝为主,金矿物以自然金为主。因此,在药剂的选择上应注意对不同种类铜矿物和游 离金的捕收。



(a). 铜精矿中的单体金粒,呈枝叉状(Branched single gold in copper concentrates);
 (b). 金粒充填于辉铜矿粒间缝隙中(The gold is filled in the gaps between chalcocite particles);
 (c). 金粒嵌布于黄铁矿晶洞,与次生石英连生(Gold is embedded in the geode of pyrite, and associated with secondary quartz);
 (d). 多粒金粒嵌布于明矾石与石英晶粒间缝隙中(Multiple grains of gold are embedded in the gap between alunite and quartz)

图 4 金粒在矿石中的嵌布状态

Fig.4 The disseminated state of gold in ore

表 6 金粒化学成分(质量分数)能谱分析结果

Tab.6 The chemical component (ω) results of gold by EDS /%

矿物	Au	Ag	Cu
银金矿	78.09	21.91	0.00
自然金	94.86	4.92	0.22

表7金粒粒度组成结果

Tab.7 The size distribution results of gold in samples /%						
粒级/µm	铜精矿	原矿				
-80 + 40	21.05	/				
-40+20	52.63	6.76				
-20+10	22.81	31.68				
-10+5	2.63	42.13				
-5+2		18.52				
-2+1	0.88	0.85				
-1		0.06				
合计	100.00	100.00				

表 8 有价元素银的平衡分配表

Tab.8 The balanced distribution of silver in the ore

矿物	比例/%	Ag 品位/(g/t)	Ag 分配率/%
游离银	微量	/	22.99
硫化铜矿物	0.630	215.80	33.97
水胆矾	0.005	/	/
黄铁矿	5.550	19.26	26.71
脉石	93.312	0.70	16.32
其他	0.503	/	/
合计	100	4.00	100

表9银矿物化学成分(质量分数)能谱分析结果

Tab.9 The chemical component (ω) results of silver minerals by

EDS				/%
矿物	Ag	Te	Cu	Au
碲银矿	61.29	37.62	1.09	/
碲金银矿	41.46	33.32	/	25.22



 ⁽a). 微细粒碲银矿包含于黄铁矿中(Micro-fine hessite is contained in pyrite);
 (b). 铜精矿中碲金银矿和辉铜矿包含于碲黝铜矿中(Petzite and chalcocite are concluded in goldfieldite in copper concentrates)
 图 5 银矿物在矿石中的嵌布状态 Fig.5 The disseminated state of silver minerals in ore

2) 金的综合回收。金的嵌布粒度极微细,粗者为0.07 mm,微细金粒(-40 μm)分布率为79%,大部分微粒金含铜,并以包裹金的形式嵌布于明矾石和石英中。研究发现,中粒金嵌布于铜矿物和黄铁矿矿物粒间或裂隙,可随着铜和硫的回收进入铜、硫精矿;而包裹于明矾石和石英微细含铜金粒,不易磨矿解离,提高磨矿细度有利于提高金的回收率。

3) 铜的综合回收。从原矿中分选铜矿物,理论 品位约 Cu 69.70%,理论回收率 94%左右。由于以 含铜较高的铜矿物为主,分选得到矿物含量为 30% 的铜精矿产品,即可达到精矿品位 Cu 20%的要求; 另外,铜矿物粒度变化大,粗细粒度悬殊,在粗磨 的条件下亦可获得到合格铜精矿品位。黄铁矿中赋 存少量铜,黄铁矿进入铜精矿将影响铜品位,但对 铜回收率影响不大。另外,硫砷铜矿中的砷进入铜 精矿,导致铜精矿中含 As 2.46%。

3 结论

 1)紫金山铜金矿床为高硫化型浅成低温热液 矿床,采选样品中的铜为主要的有价元素,伴生金、 银和硫。金属矿物主要有蓝辉铜矿、铜蓝、硫砷铜 矿、斑铜矿、黄铜矿、黄铁矿等;贵金属矿物包括 微量的自然金和碲银矿、碲金银矿等银矿物;脉石 矿物为石英、明矾石、地开石等。

2) 铜的有用矿物为蓝辉铜矿、铜蓝、硫砷铜矿、 斑铜矿等,受空间位置制约,嵌布粒度分布极不均 匀,常见沿明矾石溶蚀孔洞或碎裂缝隙充填,与黄 铁矿密切连生,少数在明矾石和地开石中零星分布 或呈微细粒包裹于黄铁矿中。从原矿中分选铜矿物, 理论品位约 Cu 69.70%,理论回收率 94%左右。 3)金粒以自然金为主,中粒金嵌布于铜矿物和 黄铁矿矿物粒间或裂隙,可随着铜和硫的回收进入 铜、硫精矿,微细金粒普遍含铜,多见包裹于明矾 石和石英中,不易磨矿解离,从而随脉石损失于尾 矿中。从铜精矿中回收金,理论回收率 57%,从黄 铁矿中回收金,理论回收率 27%,黄铁矿进入铜精 矿,有利于提高金的回收率。

4) 银主要以碲银矿和碲金银矿的矿物形式存 在,少量脆银矿和螺状硫银矿,以显微银为主,多 见呈微细粒包裹于黄铁矿、方铅矿等硫化矿物中。 从原矿中分离铜精矿和硫精矿,银的理论回收率分 别为 56.96%和 26.71%。

参考文献:

 张德全, 丰成友, 李大新, 等. 紫金山地区斑岩-浅成热 液成矿系统的成矿流体演化[J]. 地球学报, 2005, 26(4): 127-136.

ZHANG D Q, FENG C Y, LI D X, et al. The evolution of ore forming fluids in the porphyry epithermal metallogenic system of Zijinshan area[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2005, 26(4): 127-136.

[2] 黄仁生.福建紫金山矿田火成岩系列与浅成低温热液-斑岩铜金银成矿系统[J].地质力学学报,2008,14(1):74-86.

HUANG R S. Igneous series and epithermal porphyry Cu-Au-Ag mineralization system in the Zijinshan ore field, Fujian province[J]. Journal of Geomechanics, 2008, 14(1): 74-86.

 [3] 陈可,邱小平,邓俊斌. 福建上杭紫金山高硫化型铜矿 床矿化分带特征[J]. 福建地质, 2013, 32(4): 255-263.
 CHEN K, QIU X P, DENG J B. The characters of

- [4] 张江. 紫金山铜金矿床地质地球化学特征[J]. 地质与勘探, 2001, 37(2): 17-22.
 ZHANG J. Minxi Zijinshan copper-gold mineral deposit geology and geochemical features[J]. Geology and Prospecting, 2001, 37(2): 17-22.
- [5] 黎富金,姚香. 紫金山金铜矿的金矿体矿岩变化规律研 究[J]. 有色金属(矿山部分), 2007, 59(5): 18-21.
 LI F J, YAO X. Gold mine body mineral rock variety regulation research of Zijinshan gold-copper mine[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2007, 59(5): 18-21.
- [6] 梁清玲. 福建紫金山铜金矿床机理研究[D]. 北京: 中国 地质科学院, 2013.
 LIANG Q L. The metallogenic mechanism of Zijinshan Cu-Au deposit, Fujian[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2013.
- [7] 阮诗昆. 福建紫金山铜矿床深部铜硫矿物空间分布特 征[J]. 有色金属(矿山部分), 2018, 70(6): 54-62.
 RUAN S K. Spatial distribution characteristics of coppersulfur minerals in deep Zijinshan copper deposit, Fujian Province[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2018, 70(6): 54-62.
- [8] 王翠芝. 紫金山铜金矿明矾石交代蚀变岩的岩石地球 化学特征[J]. 地球科学进展, 2013, 28(8): 897-912.
 WANG C Z. Lithogeochemical characteristics of the alunite metasomatic alterated rock of the Zijinshan gold- copper deposit[J]. Advanced in Earth Science, 2013, 28(8): 897-912.
- [9] 王翠芝, 阙洪华. 紫金山金铜矿明矾石的矿物学特征[J]. 矿物学报, 2013, 33(3): 329-336.
 WANG C Z, QUE H H. Mineralogical characteristics of alunite from Zijinshan gold-copper deposit [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2013, 33(3): 329-336.
- [10] 辛秀, 王翠芝. 福建紫金山金铜矿明矾石的流体包裹体 特征[J]. 现代地质, 2014, 28(1): 42-50.
 XIN X, WANG C Z. Fluid inclusion characteristics of alunite in Zijinshan gold-copper deposit, Fujian province [J]. Geoscience, 2014, 28(1): 42-50.
- [11] 刘羽, 刘文元, 王少怀. 紫金矿铜蓝-蓝辉铜矿的矿物成 分研究[J]. 矿物学报, 2010(S1): 52-53.
 LIU Y, LIU W Y, WANG S H. Research on mineral composition of covellite-digenite in Zijin deposit[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2010(S1): 52-53.
- [12] 黄珊珊, 王翠芝, 黄福龙, 等. 紫金山铜金矿斑铜矿矿

物学特征[J]. 有色金属(矿山部分), 2015, 67(4): 28-34. HUANG S S, WANG C Z, HUANG F L, et al. Mineralogical characteristics of bornite in Zijinshan Cu-Au deposit[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2015, 67(4): 28-34.

- [13] 张文媛, 王翠芝, 孙颖超, 等. 紫金山铜金矿黄铁矿环带 结构特征[J]. 有色金属(矿山部分), 2014, 66(6): 36-42.
 ZHANG W Y, WANG C Z, SUN Y C, et al. Characte- ristics of zonal pyrite in Zijinshan Cu-Au deposit[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2014, 66(6): 36-42.
- [14] 吴明皓,张阳,蔡元峰. 福建紫金山矿床硫砷铜矿的成 因研究[J]. 矿物学报, 2018, 38(1): 41-49.
 WU M H, ZHANG Y, CAI Y F, et al. A study on genesis of enargite from Zijinshan copper deposit, Fujian province, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2018, 38(1): 41-49.
- [15] 鲁美, 申硕果, 王碧雪, 等. 福建紫金山矿田金、银赋存 状态及黄铁矿标型研究[J]. 现代地质, 2016, 30(2): 303-315.
 LU M, SHEN S G, WANG B X, et al. Study on occurrences

of gold and silver, and typomorphism of pyrite in the Zijinshan ore field, Fujian province[J]. Geoscience, 2016, 30(2): 303-315.

- [16] 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. QIU X Y, LIANG D Y, HONG Q Y, et al. Process mineralogy and process improvement analysis of a refractory gold ore[J]. Precious Metals, 2020, 41(2): 36-44.
- [17] 王培铭, 丰曙霞, 刘贤萍. 背散射电子图像分析在水泥
 基材料微观结构中的应用[J]. 硅酸盐学报, 2011, 39(10):
 1659-1665.

WANG P M, FENG S X, LIU X P. Application of backscattered electron imaging and image analysis in microstructure research on cement-based materials[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2011, 39(10): 1659-1665.

[18] 王濮, 潘兆橹, 翁玲宝. 系统矿物学[J]. 北京: 地质出版社, 1982.
WANG P, PANG Z L, WENG L B, et al. Systematic

mineralogy[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1982.

[19] 马建秦,李朝阳,温汉捷.不可见金赋存状态研究现状
[J]. 矿物学报, 1999, 19(3): 335-342.
MA J Q, LI C Y, WEN H J. The status quo of research on the occurrence of invisible gold[J]. Acta Mineralogica Sinica, 1999, 19(3): 335-342.