

赞比亚穆利亚希复杂混合铜矿工艺矿物学研究*

黄草明¹, 朱景和¹, 文书明², 邓久帅², 蔡教忠², 白旭²

(1. 中国有色矿业集团有限公司 科技部, 北京 100029; 2. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要:采用电子探针(EPMA)、矿物解离分析仪(MLA)、X-射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)和光学显微镜等分析测试手段,对赞比亚穆利亚希铜矿区混合铜矿石的化学组成、矿物组成及嵌布特征等进行了系统研究,并就选矿工艺进行了探讨。结果表明:该矿石平均含Cu 1.46%,游离氧化铜含量为37.76%,结合氧化铜含量为39.16%,其余23.08%的铜主要以硫化物的形式存在;矿物成分复杂,相互包裹严重,并有含铜铁质聚集体存在;硅孔雀石解离较难,硫化铜和孔雀石解离难度一般,而含铜黑云母解离容易,易造成过粉碎;因此,矿石属典型高氧化率高结合率的复杂难处理混合铜矿。根据工艺矿物学结论,提出了先浮选回收硫化铜,然后用酸浸—溶剂萃取—电积法(L-SX-EW)有效回收氧化铜的建议流程。

关键词:混合铜矿;工艺矿物学;氧化铜;浮选;酸浸;溶剂萃取;电积

中图分类号:TD91 文献标识码:A 文章编号:1001-0076(2019)02-0041-06

DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2018.06.036

Process Mineralogy Study on Complex Mixed Ores of Zambia Muliashi Copper Mine

HUANG Caoming¹, ZHU Jinghe¹, WEN Shuming², DENG Jiushuai², CAI Jiaozhong², BAI Xu²

(1. Department of Science and Technology, China Nonferrous Metal Mining (Group) Co. Ltd., Beijing 100029, China; 2. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: The chemical composition, mineral composition and dissemination characteristics were systematically studied by means of Electron Probe Microanalysis (EPMA), Mineral Liberation Analyser (MLA), X-ray diffraction (XRD), Scanning Electron Microscope (SEM) and Optical Microscope, then the mineral processing circuit was discussed. The results show that the valuable component is Cu and the grade is 1.46%. The content of independent copper oxide minerals is 37.76%, and the content of impregnated copper is 39.16%. The remaining 23.08% copper mainly exists in the form of copper sulfide. The mineral composition is very complex and the minerals are encapsulated with each other, in which some copper-bearing iron aggregations exist. It is difficult to liberate of copper independent minerals while is easy for copper-bearing biotite, which will cause overgrinding. In summary this copper-bearing ore is low copper grade, complex mineral composition, fine-grained dissemination, high oxidation level and high content of alkaline gangues. According to process mineralogy conclusion, this study puts forward the feasible process: flotation recovery of copper sulfide—acid leaching—solvent extraction—electrowinning (L-SX-EW).

Key words: compound copper ore; process mineralogy; copper oxide ore; flotation; acid leaching; solvent extraction; electrowinning

* 收稿日期:2018-08-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51464029)

作者简介:黄草明(1981-),高级工程师,主要从事有色金属选冶技术开发和资源综合利用研究,E-mail:huangjiaorui1204@126.com。

随着经济社会的快速发展,铜的需求量与日俱增,高品位易选别的硫化铜矿资源日益枯竭,因此对复杂难选氧化铜矿和混合铜矿的开发利用具有重要意义^[1]。据报道,在世界铜资源中,全部铜矿床的10%~15%为氧化铜矿床和混合铜矿床,上述两者铜储量约占已探明铜总储量的25%^[2]。

氧化铜含量较高的铜矿石由于含泥量大,氧化率高,采用浮选时含泥矿物会罩盖在有用矿物表面,导致药剂用量增加,恶化浮选过程,选别指标较差。目前,国内外针对氧化铜矿的选别采取的方法主要为浮选法和化学选矿法^[3]。浮选法可分为直接浮选法和硫化浮选法。但硫化浮选法主要是针对孔雀石等碳酸盐类氧化铜矿石具有较好的选别效果,而对于硅孔雀石、赤铜矿及以结合铜存在的含铜矿物硫化效果差,较难通过硫化浮选法实现资源的综合利用^[4]。因此,对于这类难处理氧化铜矿石主要是采用化学选矿法,该方法主要包括酸浸出、碱浸出、氨浸出和生物浸出等。针对浮选和浸出这两种处理混合铜矿或氧化铜矿石的方法,近年来又开发出选冶联合技术,该方法综合了浮选和浸出两大技术特点,扬长避短,优势互补,能够有效保证铜金属回收率及降低生产成本,特别是对于难处理的混合铜矿的回收利用具有一定优势^[5]。

工艺矿物学是决定选矿工艺流程的基础,是矿物学的分支学科,其主要任务是通过通过对矿物中元素或矿物的赋存状态和性质的系统研究,阐明其分布规律,指导和配合选矿研究和实际生产^[6,7]。

赞比亚穆利亚希铜矿区是赞比亚卢安夏铜矿的矿段之一,从北向南覆盖距离约800 m,厚45 m,贮量大,埋藏浅,适于露天开采,但工艺矿物学复杂。本文利用EPMA、MLA、XRD和光学显微镜等分析测试手段,对非洲赞比亚穆利亚希复杂混合铜矿进行了工艺矿物学研究,获得较为全面的化学成分、矿物组成、嵌布特征及赋存状态等原矿工艺矿物学信息,并根据工艺矿物学研究结果探讨了合理的选矿工艺,为该矿最终合理选矿流程的确定提供了重要依据。

1 原矿物质组成

1.1 原矿化学组成

原矿化学多元素分析结果见表1。结果表明,原矿所含的主要有价成分为Cu,含量为1.46%。SiO₂和Al₂O₃含量较高。铅锌含量均低于0.005%,金银等稀贵元素含量低于工业品位,因此常见的与

铜伴生的有价金属回收价值低。因此,原矿为单一铜矿石,该矿石主要考虑的回收对象为含铜矿物。

表1 原矿化学多元素分析结果 /%

成分	Cu	Fe	Pb	Zn	Au	Ag
含量	1.46	4.45	<0.005	<0.005	<0.10	<5.00
成分	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	S	SiO ₂	-
含量	1.90	5.53	14.62	0.24	56.60	-

注: Au、Ag 单位为 g/t。

1.2 原矿物相组成

XRD 分析结果见图1, 化学物相分析结果见表2。

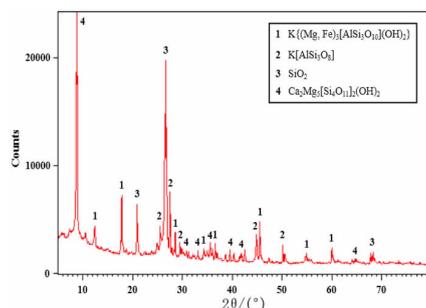


图1 原矿X射线衍射图谱

Fig. 1 XRD pattern of the raw ore

表2 铜物相分析结果 /%

名称	游离氧化铜	结合氧化铜	硫化铜及其它	硫酸盐	总铜
含量/%	0.54	0.56	0.33	<0.01	1.43
分布率/%	37.76	39.16	23.08	<0.70	100.00

图1结果表明,原矿含有较多的黑云母、钾长石、石英和透闪石等脉石矿物,这些脉石矿物都含有硅元素,这与原矿多元素分析中SiO₂较高的结果一致。而含铜矿物谱峰较弱,表明含铜矿物含量相对较少。由表2进一步可知:铜矿物主要以氧化铜为主,分布率高达76.92%,其中游离氧化铜占37.76%,结合氧化铜占39.16%,硫化物及其他矿物分布率为23.08%,此外还有少量硫酸盐。因此,原矿属于典型高氧化率、高结合率的混合铜矿,结合氧化铜和游离氧化铜占比接近1:1。矿石中的结合氧化铜一般呈浸染分布,嵌布极细,极为难选,常见的方法是化学选矿法^[8]。原矿还含有一部分硫化铜矿,可用浮选法回收。

1.3 矿石矿物组成

进一步采用矿物解离分析仪(MLA)、电子探针分析(EPMA)和扫描电子显微镜(SEM)等手段对原

矿中的矿物组分及嵌布特征进行了分析,结果见表 3 和图 2。

表 3 原矿物组成及矿物嵌布粒度
Table 3 Mineral composition and its disseminated grain size of raw ore

类型	矿物名称	分子式	粒度/mm	含量/%
硫化物	辉铜矿	Cu_2S	0.006 ~ 0.23	0.05
	蓝辉铜矿	Cu_9S_5	0.002 ~ 0.05	
	斑铜矿	Cu_5FeS_4	0.002 ~ 0.20	
	铜蓝	CuS	0.001 ~ 0.015 集合体最大 0.05	
	黄铜矿	CuFeS_2	0.002 ~ 0.68 最大 1.00	
	黄铁矿	FeS_2	0.001 ~ 0.37 最大 1.10	
氧化物	赤铜矿	Cu_2O	0.001 ~ 0.01	0.03
	石英	SiO_2	0.004 ~ 1.10	20.36
	褐铁矿	FeOOH	0.001 ~ 0.70	3.10
	金红石	TiO_2	0.001 ~ 0.05	0.52
硅酸盐	硅孔雀石	$(\text{Cu}, \text{Al})_2\text{H}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	0.05 ~ 1.00	1.10
	榍石	$\text{CaTi}[\text{SiO}_4]\text{O}$	0.004 ~ 0.30	0.11
	绿帘石	$\text{Ca}_2\text{FeAl}_2[\text{Si}_2\text{O}_7][\text{SiO}_4]\text{O}(\text{OH})$	0.004 ~ 0.40	0.90
	透闪石	$\text{Ca}_2\text{Mg}_5[\text{Si}_4\text{O}_{11}]_2(\text{OH})_2$	0.01 ~ 1.70	2.20
	黑云母	$\text{K}\{(\text{Mg}, \text{Fe})_3[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2\}$	0.02 ~ 0.40	28.00
	白(绢)云母	$\text{K}[\text{Al}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2]$	0.004 ~ 0.50	3.10
	高岭石	$\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}][\text{OH}]_8$	0.004 ~ 0.40	3.20
	绿泥石	$(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_3(\text{OH})_6\{(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_3[(\text{Si}, \text{Al})_6\text{O}_{10}(\text{OH})_2]\}$	0.004 ~ 0.50	3.00
	钾长石	$\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	0.004 ~ 1.30	31.00
	斜长石	$\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	0.004 ~ 1.00	0.80
	电气石	$\text{Na}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Mn}, \text{Li}, \text{Al})_3\text{Al}_6[\text{Si}_6\text{O}_{18}][\text{BO}_3]_3(\text{OH}, \text{F})_4$	0.01 ~ 1.00	1.00
	锆石	$\text{Zr}[\text{SiO}_3]_2$	0.004 ~ 0.10	0.04
	碳酸盐	孔雀石	$\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$	0.01 ~ 1.70
方解石		$\text{Ca}[\text{CO}_3]$	0.004 ~ 0.20	0.30
白云石		$\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$		0.03
合计	/	/	/	100.00

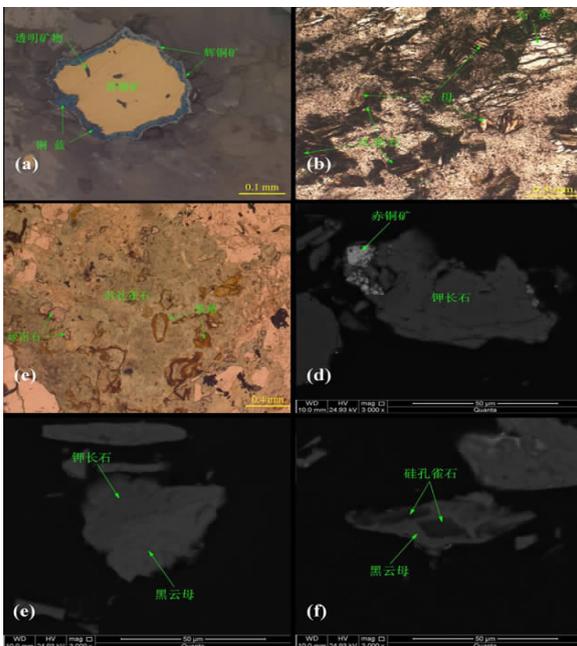


图 2 矿物嵌布的显微照片及 SEM 图片
Fig. 2 Micrograph and SEM images of minerals

由表 3 和图 2 可知:矿石中有硫化物、氧化物、硅酸盐和碳酸盐四类 25 种矿物存在。矿石中主要以硅酸盐矿物为主,占 74.45%;氧化物次之,占 24.01%;碳酸盐占 1.03%,硫化物占 0.51%。铜蓝和辉铜矿沿黄铜矿颗粒边缘交代,黄铜矿中包裹有透明矿物颗粒,细粒铜蓝及辉铜矿包裹于孔雀石中(图 2a)。孔雀石交代云母,云母残余状于其中(图 2b)。硅孔雀石中包裹绿帘石,部分颗粒析出铁质(图 2c)。赤铜矿与钾长石连生,或包裹于其中。黑云母与长石、石英混杂分布,黑云母与硅孔雀石连生或相互包裹(图 2d)。黄铜矿粒度一般在 0.002 ~ 0.68 mm 之间,最大达 1 mm;斑铜矿残余分布于辉铜矿中,偶见沿黄铜矿边缘连生,粒度一般 0.002 ~ 0.2 mm 之间;孔雀石粒度在 0.01 ~ 1.70 mm 之间;硅孔雀石粒度在 0.05 ~ 1.0 mm 之间;黑云母粒度在 0.02 ~ 0.4 mm 之间,经电子探针 5 个点测数据成分分析,黑云母中含 CuO 最高 1.92%,最低

0.03% ,平均含 CuO 0.95% 。

2 矿石的结构和构造

矿石多呈灰色、灰褐色和黄褐色;矿石中孔雀石和硅孔雀石多呈条带状分布,或浸染状分布,构成矿石的条带状构造和浸染状构造;另外部分矿石具层状和纹层状构造。

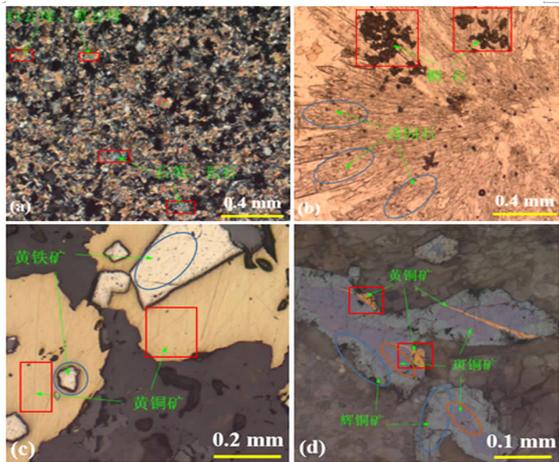


图3 矿石结构显微照片
Fig.3 Micrograph of ore structure

矿石呈现出多种结构特征。黑云母和白云母呈鳞片状定向排列,与细粒石英和长石混杂分布,金属矿物稀疏浸染状分布于云母及长石颗粒之间,构成片状和粒状变晶结构(如图3a)。透闪石呈长柱状,集合体呈放射状,构成矿石的放射状结构(如图3b)。部分黄铁矿呈自形-半自形,黄铜矿、辉铜矿和斑铜矿等呈它形粒状,构成矿石的自形-半自形-它形粒状结构(如图3c)。部分矿石中黄铜矿、斑铜矿和辉铜矿发生交代作用残余状分布于辉铜矿中,构成矿石的残余结构(如图3d)。

3 铜在矿石中的分布

对镜下观察、X 射线衍射分析、能谱分析和电子探针成分分析等结果进行综合分析,得到铜在矿石中各主要含铜矿物中的分布结果见表4。

表4表明:铜主要以独立矿物的形式赋存在孔雀石、硅孔雀石、黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿、蓝辉铜矿、铜蓝和赤铜矿中,以机械混入的形式赋存在黑云母和褐铁矿中。其中铜在孔雀石中的分布率最高,为30.25%;其次为硅孔雀石,为29.56%;然后是黑云母,为20.14%,其他矿物中所含铜量较少。因此,

表4 铜在各主要含铜矿物中的分布率 /%

Table 4 Copper distribution in different minerals of raw ore

矿物	矿物含量	矿物中铜含量	铜分布率
孔雀石	0.70	57.08	30.25
硅孔雀石	1.10	35.49	29.56
黑云母	28.00	0.95	20.14
黄铜矿	0.18	34.56	4.71
斑铜矿	0.07	63.33	3.36
辉铜矿、蓝辉铜矿	0.05	79.86	3.02
铜蓝	0.05	66.48	2.52
赤铜矿	0.03	88.20	2.00
褐铁矿	3.10	1.89	4.44
其它	66.72	/	/
合计	100.00	/	100.00

针对该混合铜矿石,为了获得较为理想的选别指标,需要对原矿中的孔雀石和硅孔雀石采取特定方法重点处理,同时兼顾硫化铜矿和结合铜的回收。

4 目的矿物的共生和解离特征

采用磨矿细度为-0.074 mm 含量占80%的综合样进行树脂样品的二次镶嵌,将制备好的树脂样品进行 MLA 分析,共对矿石中的193 561 个矿物颗粒进行了分析和统计,分析总图见图4,矿物解离度特征曲线图见图5。

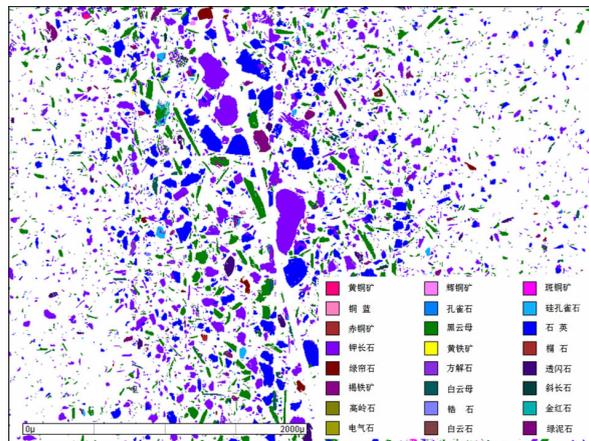


图4 矿石 MLA 分析总图(局部)
Fig.4 General diagram of MLA analysis (partial)

由图4可知,目的矿物的共生关系整体较为简单,目的矿物的自由表面积比例整体较高。其中,黄铜矿主要与钾长石连生,共有表面积比例为7.20%,其次与斑铜矿、黑云母、黄铁矿、石英、白云母和绿泥石等连生,黄铜矿的自由表面积比例达到86.54%。辉铜矿主要与黑云母和褐铁矿连生,共有表面积比例分别为6.05%和7.34%,其次为铜蓝、赤铜矿、钾

长石、石英等,辉铜矿的自由表面积比例达到 84.29%。孔雀石主要与硅孔雀石、赤铜矿、黑云母、石英、钾长石和方解石连生,共有表面积比例分别为 3.61%、4.40%、2.65%、1.27%、6.57% 和 3.32%,其次为绿帘石、透闪石、褐铁矿、白云母、斜长石和绿泥石等,孔雀石的自由表面积比例达到 75.10%。硅孔雀石主要与黑云母、石英、钾长石、透闪石、褐铁矿和绿泥石连生,共有表面积比例分别为 1.87%、1.65%、4.10%、4.59%、5.61% 和 3.24%,其次为孔雀石、绿帘石、白云母和金红石等,硅孔雀石的自由表面积比例达到 75.91%。黑云母主要与石英和钾长石连生,共有表面积比例分别仅为 1.05% 和 1.50%,其次为褐铁矿、白云母、斜长石和绿泥石等,黑云母的自由表面积比例达到 95.18%。

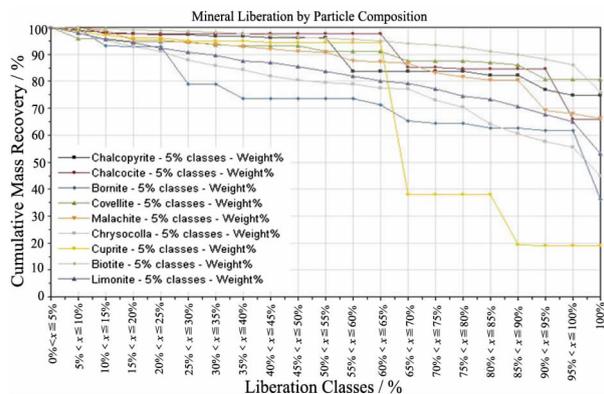


图 5 矿物解离度特征曲线图

Fig. 5 Curve chart of mineral liberation

图 5 表明,黄铜矿和孔雀石的解离情况一般,其中完全解离颗粒(100% 解离)的黄铜矿颗粒占 74.70%;完全解离颗粒(100% 解离)的孔雀石颗粒占 66.05%。硅孔雀石的解离情况较差;黑云母的解离情况较好。

目的矿物的共生和解离特征分析的结果对矿石的磨矿分级流程选择、浮选细度的控制和制定合理的选矿工艺流程等有着直接的影响^[9]。

5 原矿筛分分析

由上述研究可知黑云母等脉石矿物解离情况较好,含铜硫化物和碳酸盐矿物解离一般,而硅孔雀石解离情况较差,因此磨矿容易造成含铜矿物解离不充分和过粉碎。棒磨机主要依靠棒的压力及磨剥力磨碎矿石,由于棒与棒为线接触,磨矿时首先选择性

地磨碎粗粒矿石,其次再磨碎较小矿粒,对细颗粒矿物具有保护作用,降低能耗,可以避免过粉碎现象和减少次生矿泥的产生,能有效地控制排矿产品粒度^[10]。因此,对磨矿进行了筛分分析,用棒磨机对原矿进行磨矿,磨矿细度 -0.074 mm 含量占 80%,产品分析结果如表 5 所示。

表 5 原矿筛分分析结果 /%

Table 5	Result of sieve analysis of raw ore		
粒度/mm	产率	Cu 品位	分布率
+0.124	8.91	3.16	19.29
-0.124 + 0.074	11.50	2.33	18.35
-0.074 + 0.044	25.52	1.32	23.08
-0.044 + 0.038	0.77	1.10	0.58
-0.038	53.29	1.06	38.69
合计	100.00	1.46	100.00

由表 5 可知, +0.074 mm 的累积产率虽然为 20.41%,但是该级别的铜累积回收率却为 37.65%,这主要是由于 +0.124 mm 和 -0.124 + 0.074 mm 这两个粒级铜品位均较高,铜品位分别为 3.16% 和 2.33%,因此选矿流程的制定优先考虑这两个粒级中有价金属的回收。另外 -0.038 mm 的产率最高,为 53.29%,相应的铜分布率也最高,为 38.69%,因此,加强微细颗粒回收能力避免过磨是增加该矿石目的矿物总体回收率的关键^[11-13]。

6 影响选矿工艺制定的工艺矿物学因素

(1) 赞比亚穆利亚希铜矿石矿物种类较多,属氧化铜和硫化铜的混合矿,但以氧化铜矿为主,氧化铜部分分别由分布率为 37.76% 的游离氧化铜和分布率为 39.16% 的结合氧化铜组成,原矿属于高氧化率高结合率的复杂铜矿。脉石矿物主要是黑云母、钾长石、石英和透闪石等,而黑云母中铜分布率高达 20.14%;同时,矿物之间交代共生严重。这些都会造成铜回收处理难度加大,要获得理想的选别指标非常困难。

(2) 原矿 -0.038 mm 级别产率为 53.29%,铜分布率为 38.69%,细粒级含量多不仅会导致大量金属难以实现有效回收从而流失在尾矿中,且粗粒也有较多分布,这就需要考虑过粉碎现象的产生,对后续磨矿和选别流程的制定带来挑战。

(3) 因铜分布于不同矿物中,所以单一的选别

方法不能将铜最大化回收,采用选冶联合方案将是必要措施。先用浮选方法将易浮选的硫化铜矿物选别,然后对氧化铜矿物采用酸浸—溶剂萃取—电积法(L-SX-EW)有效回收,是处理该矿物的可行方案。

7 结论

(1)工艺矿物学研究结果表明,该矿石中的铜主要以独立矿物的形式赋存在黄铜矿、辉铜矿、蓝辉铜矿、斑铜矿、铜蓝、赤铜矿、硅孔雀石、孔雀石中,以机械混入的形式赋存在黑云母、褐铁矿中,其中孔雀石中所含铜分布率最高为 30.25%,其次为硅孔雀石,为 29.56%,黑云母中为 20.14%。

(2)该矿石矿物成分复杂,矿石中有硫化物、氧化物、硅酸盐、碳酸盐四类 25 种矿物存在;且矿物共生复杂,部分细粒铜蓝及辉铜矿包裹于孔雀石中,黑云母与硅孔雀石连生或相互包裹,部分硅孔雀石颗粒析出铁质。铜矿物主要以氧化铜为主,其分布率达 76.92%,其中游离氧化铜为 37.76%,结合氧化铜为 39.16%,硫化铜矿物及其它分布率为 23.08%。结合氧化铜和游离氧化铜占比接近 1:1,矿石属典型高氧化率、高结合率的难处理复杂混合铜矿。

(3)该矿石硅孔雀石解离较难,硫化铜和孔雀石解离难度一般,而含铜黑云母解离容易,因此容易发生粉碎现象,导致选别难度大。通过详细工艺矿物学研究得知,单一的选别方法不能将铜矿物最大化地回收,采用选冶联合方案具有可行性。先用浮选法回收硫化铜,再用酸浸—溶剂萃取—电积法

(L-SX-EW)有效回收氧化铜是处理这种矿物的合理工艺流程。

参考文献:

- [1] 羊建波,柳群义,陈其慎,等. 未来 10 年中国矿山铜供应能力分析[J]. 中国矿业,2014(10):1-4.
- [2] 赵涌泉. 氧化铜矿的处理[M]. 北京:冶金工业出版社,1982.
- [3] 詹信顺,周源. 难选氧化铜矿石的处理技术研究[J]. 北京:国外金属矿选矿,2009,46(Z1):17-21.
- [4] 刘殿文,张文彬. 氧化铜矿浮选技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2009.
- [5] 余伟. 氧化铜矿石的选矿技术现状与发展[J]. 世界有色金属,2017(13):60-61.
- [6] 钟诚斌,徐志高,张臻悦,等. 加拿大某地区稀土矿的工艺矿物学研究[J]. 稀土,2017(2):11-18.
- [7] Hope GA, Woodsy R, Munce CG. Raman microprobe mineral identification[J]. Mineral engineering, 2011, 14(12):1565-1577.
- [8] 汤雁斌. 难选氧化铜矿石选矿综述[J]. 铜业工程,2011(2):10-13.
- [9] 孔汇贤,刘振辉,谢建宏,等. 某金矿工艺矿物学研究[J]. 矿冶工程,2012,32(s1):316-317.
- [10] 宋振国,Corin K, Wiese J G,等. 磨矿介质材质与捕收剂添加方式对某铜镍硫化矿浮选的影响[J]. 矿产保护与利用,2017(6):36-40.
- [11] Cao Yijun, Gui Xiahui, Ma Zilong, et al. Process mineralogy of copper-nickel sulphide flotation by a cyclonic-static micro-bubble flotation column[J]. Journal of China university of mining & technology, 2009, 19(6):784-787.
- [12] 聂琪,戈保梁,杨晶. 低品位细粒嵌布混合铜矿选矿试验研究[J]. 矿产保护与利用,2011(1):40-43.
- [13] 郑永兴,文书明,丰奇成,等. 含铜难处理铁矿选冶联合工艺研究[J]. 矿产保护与利用,2012(4):29-32.

引用格式:黄草明,朱景和,文书明,等. 赞比亚穆利亚希复杂混合铜矿工艺矿物学研究[J]. 矿产保护与利用,2019,39(2):41-46.

HUANG Caoming, ZHU Jinghe, WEN Shuming, et al. Process mineralogy study on complex mixed ores of Zambia muliashi copper mine[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2019, 39(2):41-46.