

四川盐源混合铜矿的工艺矿物学研究

杨 虎¹, 罗红莹², 陆宽伟¹, 张 英^{1,3}

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 2. 攀钢集团 攀枝花钢铁研究院有限公司 四川 攀枝花 617000;
3. 昆明理工大学 省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 云南 昆明 650093)

摘要: 利用扫描电镜、X射线能谱分析、XRD、MLA矿物检测软件对四川盐源混合铜矿的物质组成、赋存状态、嵌布特性、粒度特征、解离特征进行了研究。结果表明,该矿石中的主要有价金属是铜,含量为1.05%,主要赋存于黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿、孔雀石中,脉石矿物主要有石英和长石,其次为方解石、绿泥石;主要矿物的粒度均小于20 μm,其中-9.6 μm粒级的金属含量为0.3%,矿物单体解离度差;主要的铜矿物与脉石矿物共生紧密,仅仅利用常规手段难以达到良好的经济指标。基于上述工艺矿物学研究结果,采用一粗两精两扫的强化浮选流程、集中处理部分中矿的方案进行闭路试验,获得铜精矿铜品位达19.12%,回收率达79.16%。

关键词: 混合铜矿; 工艺矿物学; 微细粒嵌布; 强化浮选; 四川盐源

中图分类号: P579; P618.41; TD95

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)04-0757-07

A study of process mineralogy of a mixed copper mine in Yanyuan, Sichuan Province

YANG Hu¹, LUO Hong-ying², LU Kuan-wei¹ and ZHANG Ying^{1,3}

(1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. Panzhihua Iron and Steel Research Institute Co., Ltd., Panzhihua 617000, China; 3. State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean Utilization, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: Scanning electron microscope, X-ray spectroscopy, XRD, MLA mineral detection software were used to study the material composition, modes of occurrence, embedded properties, particle size and dissociation characteristics of a copper mine. The results show that the main valuable metal in the ore is copper, possessing 1.05%, which mainly occurs in chalcopyrite, bornite, chalcocite and malachite. The gangue minerals mainly include quartz and feldspar, followed by calcite and chlorite. The grain size of the main minerals is less than 20 μm, and the metal content of -9.6 μm is 0.3%. The degree of liberation is low. Moreover, the main copper minerals have close association with gangue minerals, reaching more than 40%. It is difficult to achieve a good economic index only by flotation. Based on the results of process mineralogy research, the authors adopted one roughing process- two cleaning processes- two scavenging flotation intensification processes to carry out closed-circuit test for part of the scheme of centralized treatment of middle ore. The copper grade and recovery of copper concentrate are 19.12% and 79.16%.

Key words: mixed copper ore; process mineralogy; fine grain dissemination; intensified flotation; Yanyuan, Sichuan Province

Fund support: Youth Project of National Natural Science Foundation of China(51504108); Analysis and Testing Fund of Kunming University of Science and Technology(2017T20130111)

收稿日期: 2020-09-24; 接受日期: 2021-05-20; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(51504108); 昆明理工大学分析测试基金项目(2017T20130111)

作者简介: 杨 虎(1996-)男, 硕士, 研究方向: 矿物加工工程, E-mail: 2352769327@qq.com; 通讯作者: 张 英, 副教授, 从事矿物加工研究, E-mail: zhyingsu@163.com。

作为一种重要的有色金属,铜在国家发展中具有举足轻重的作用,但是随着铜矿资源的不断消耗,相对容易选别的富铜矿已经逐渐减少,贫、细、杂成为了目前铜矿资源的真实写照。因此,目前选矿工作人员开始探索嵌布粒度细、共生紧密的低品位原矿的选矿方法,争取获得好的经济指标(王京彬, 2004; 罗良烽等, 2007; 郜伟等, 2018; 赵晖等, 2009; 肖仪武, 2019; 聂文林等, 2020)。

相对于原生硫化铜矿,自然界的次生硫化铜矿种类更多,其中斑铜矿与辉铜矿最为常见。次生硫化铜矿是原生硫化铜矿经还原、浸染迁移而形成的(武钊等, 2016),一般都具有结晶不完全、嵌布粒度细的特征,导致天然可浮性较差。目前对这类矿石大多数采用浮选的方法进行回收(武钊等, 2016),在保证磨矿细度的同时为保证实际生产效益,大多数磨矿细度为 -0.074 mm (占70%左右),通过组合捕收剂进行回收(傅开彬等, 2018)。但是目前选矿过程中因为药剂用量不够、药剂作用时间较短导致选矿指标不够理想。

四川盐源铜矿发现于2015年,矿区位于扬子准地台与松潘甘孜地槽的过渡带,2020年准备采-选-冶一体回收其有价金属。为经济合理地开发四川盐源铜矿资源,实现矿产资源综合利用,从工艺矿物学角度对该矿的化学成分、矿物组成、主要载铜矿物的嵌布特征、解离度、矿石结构构造以及铜在矿石中的赋存状态等工艺矿物学参数进行了详细的研究,进而设计了强化硫化浮选试验以回收该矿有价金属。该工作对提高这类矿石的选矿指标及改进选矿工艺方案具有一定的参考价值。

1 样品情况及分析方法

矿石样品由四川盐源县平川铜业有限责任公司从矿区采取,后在室内经中碎、细碎、筛分、混匀和缩分制备获得。样品主要通过QUANTA650F型光学显微镜在 $5^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 、电压110~220 V的工作条件下进行矿石结构构造、矿石的嵌布特征的分析;利用Bulake型号X射线能谱仪、X3000型号X射线衍射分析仪进行矿物组成、矿物的共生关系的分析;利用Winner3009智能型大量程激光粒度分析仪对矿石的粒度分布进行研究;利用解离度分析仪进行解离特征分析;利用MLA全元素、光谱半定量法完成对多元素和物相数据的采集和分析;最后采用硫化黄药

法进行浮选试验。样品的光学显微镜分析、X射线能谱分析、X射线衍射分析、粒度分析、解离度分析由新疆有色金属研究所分析测试完成,硫化黄药浮选试验在昆明理工大学纯矿物浮选实验室完成。

2 矿石的结构构造

矿石主要具有中细粒它形结构、土状结构、胶状结构、半自形晶粒结构、圆粒状结构、镶边结构和侵蚀交代结构,主要构造为稀疏脉状浸染构造、薄膜状构造、斑杂状构造和星点状构造(周乐光, 2002)。

3 矿石的矿物组成

矿石中的主要硫化矿物包括斑铜矿、黄铜矿、铜镍矿物、辉铜矿等;金属氧化物主要包括孔雀石、硅孔雀石、黑铜矿等;其他金属矿物主要有黄铁矿、磁铁矿、褐铁矿等;脉石矿物主要有石英和长石,其次为方解石、绿泥石、白云母,还有少量的辉石、磷灰石、重晶石。通过对综合样品的统计分析,矿石的矿物组成以及相对含量见表1。

表1 矿石的矿物组成及相对含量 $w_B/\%$
Table 1 Mineral composition and relative content of ores

矿物组	矿物名称	含量	小计
金属硫化物	黄铁矿 ⁺	0.40	0.44
	毒砂	0.04	
铜的硫化矿物	黄铜矿 ⁺	0.95	1.78
	斑铜矿 ⁺	0.75	
	辉铜矿 ⁺	0.05	
	铜镍硫化物(辉铜矿和辉镍矿微晶几何体)	0.03	
	铜蓝	微量	
金属氧化物	磁铁矿 ⁺	0.28	0.76
	金红石	0.36	
	赤(褐)铁矿 ⁺	0.11	
	含锰钛铁矿 ⁺	0.01	
铜的氧化矿物	黑铜矿 ⁺	0.09	0.09
铜的硅酸盐、碳酸盐和硫酸盐矿物	孔雀石	0.04	0.16
	硅孔雀石	0.09	
	水胆矾	0.03	
脉石矿物	石英	53.21	96.77
	方解石	12.52	
	长石	18.94	
	绿泥石	7.28	
	其他矿物	1.83	
	合计	100.00	100.00

4 矿石中铜矿物的嵌布特征

4.1 黄铜矿

黄铜矿是矿石中主要铜矿物之一,多为它形,常呈集合体分布,部分为单矿物集合体(图 1a)。黄铜矿单矿物集合体部分呈脉状或不连续脉状分布,部分呈粒状局部浸染矿石分布,其与斑铜矿形成的硫化物集合体最大粒度可达 2 cm,集合体内孔隙发育,斑铜矿侵蚀黄铜矿分布,斑铜矿内常可见黄铜矿包裹体,少量斑铜矿呈蠕虫状分布于黄铜矿集合体内(图 1b)。

4.2 斑铜矿

斑铜矿是矿石中主要富铜矿物之一,多为半自形-它形,常呈集合体分布,粒度在 0.005~0.5 mm 之间,部分为单矿物集合体或晶粒,部分与黄铜矿共生(图 1c)。单矿物斑铜矿,较大的颗粒多与黄铜矿共生,仅少量散布于矿石中,或充填氧化矿石孔隙,

其中部分颗粒可见黄铜矿包体(图 1d)。

4.3 辉铜矿

辉铜矿多与铜蓝叠加,形成集合体侵蚀交代斑铜矿,少量辉铜矿呈球形粒状集合体,粒度在 0.005~0.06 mm 之间,较均匀地分布于局部矿石中(图 1e),部分为单矿物集合体(图 1f)。

4.4 孔雀石

孔雀石是矿石中重要的铜矿物之一,多为它形,常呈不规则胶状集合体分布,结构较致密,多充填氧化矿石的孔洞和裂隙(图 1g),部分充填于石英孔隙中(图 1h)。

5 矿石中铜矿物的粒度特征

矿石中主要矿物斑铜矿、黄铜矿、辉铜矿、黑铜矿、硅孔雀石、孔雀石、铜镍硫化物和水胆矾的粒度分布如图 2。由图 2 可知,矿石中含铜矿物的颗粒均较细,主要铜矿物的平均粒度均小于 20 μm , 小于矿

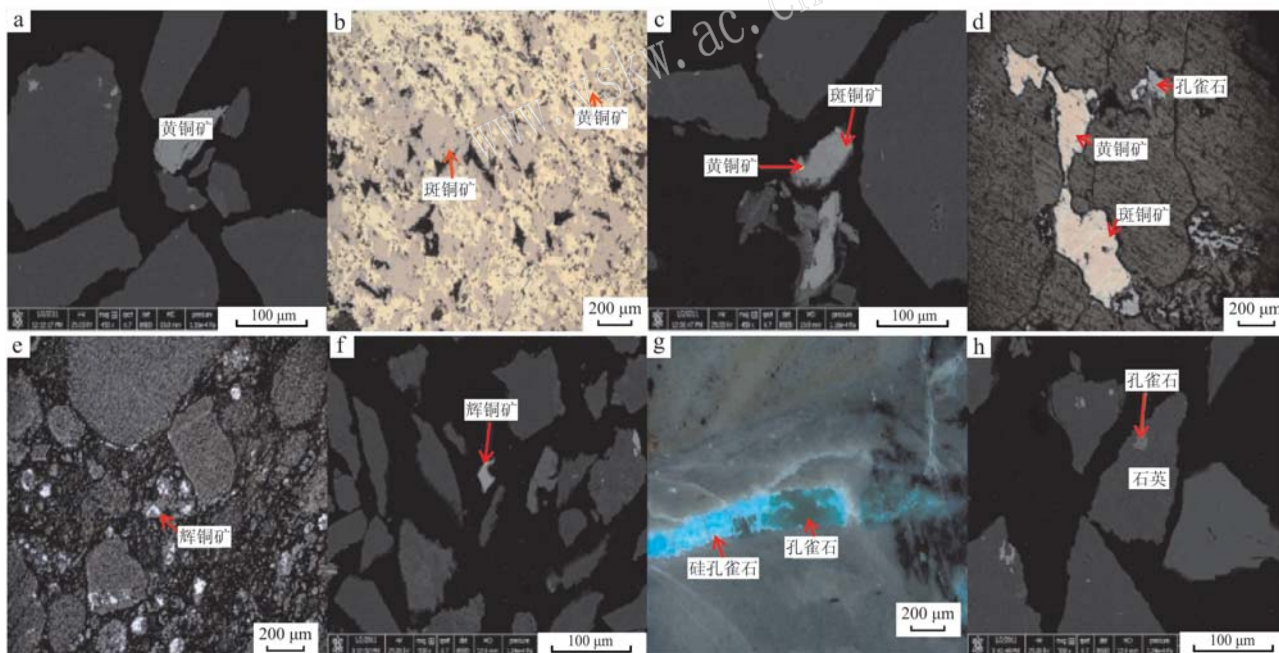


图 1 铜矿物的嵌布特征

Fig. 1 Dispersion characteristics of copper minerals

a—黄铜矿单体, SEM; b—黄铜矿斑铜矿共生, 反射光; c—斑铜矿侵蚀交代黄铜矿, SEM; d—斑铜矿中分布有针状黄铜矿,孔雀石集合体充填裂隙, SEM; e—辉铜矿呈微粒集合体分布在局部矿石中, SEM; f—辉铜矿单体均匀分布图, SEM; g—硅孔雀石-孔雀石集合体, 反射光; h—孔雀石充填于石英孔隙中, SEM

a—chalcopyrite monomer, SEM; b—symbiotic chalcopyrite and bornite, reflected light; c—erosion metasomatism of chalcopyrite by bornite, SEM; d—distribution of needle-like chalcopyrite in bornite, pyroxene eroded along the edge and fissures of bornite; e—pyroxene copper constituting a local particle aggregate, SEM; f—uniform distribution of pyroxene copper, SEM; g—formation of malachite-malachite aggregate, reflected light; h—malachite filling quartz pore, SEM

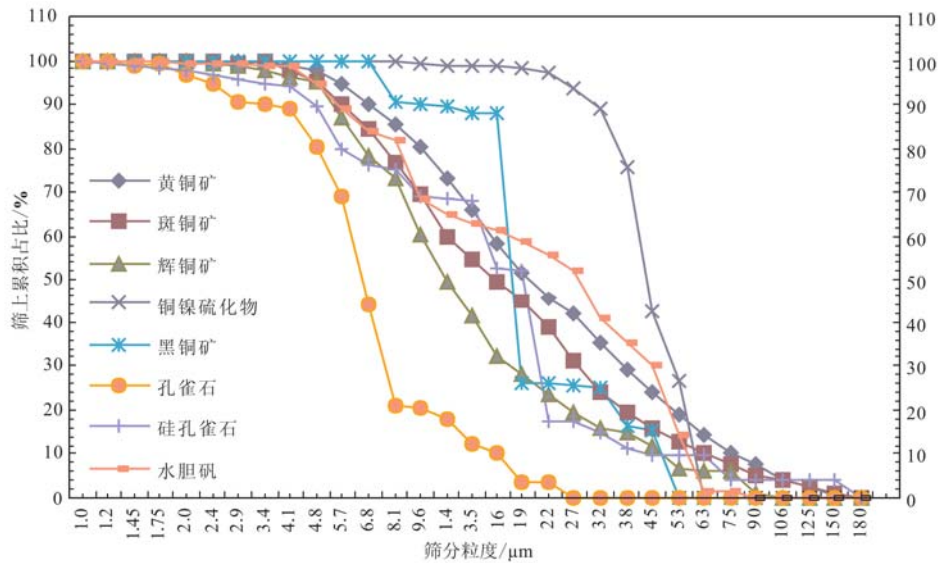


图 2 原矿中目的矿物的粒度分布特征曲线

Fig. 2 Characteristic curve of grain size distribution of target mineral in raw ore

样平均粒度,其中孔雀石的粒度最细,铜镍硫化物的粒度最粗。主要铜矿物平均粒度从细到粗依次是:孔雀石(6.53 μm) < 辉铜矿(11.30 μm) < 斑铜矿(15.86 μm) < 黑铜矿(17.84 μm) < 硅孔雀石(19.20 μm) < 黄铜矿(19.86 μm) < 水胆矾(27.90 μm) < 铜镍硫化物(43.44 μm) < 原矿(48.02 μm)。

由表 2 可以看出, -9.6 μm 粒级的金属含量为 0.30%, 其中, 黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿的粒级含量分别是 19.71%、30.25%、39.74%, 金属含量分别为 0.07%、0.15%、0.02%, 该粒级铜矿物很难达到单体解离。由于矿物 -9.6 μm 的含量较高, 只有细磨才能达到矿物有效的单体解离, 但对于浮选来说, -10 μm 的物料属于细泥, 其物料质量小, 比表面积和比表面能大, 使得该部分物料浮选效果差, 从而直

接影响浮选指标, 导致精矿品位低、回收率低、药剂消耗高, 尾矿中铜损失严重, 即使达到解离度要求但由于粒度较细, 对其回收也会较为困难, 且磨矿耗能较高, 因此合适的磨矿细度对于浮选指标影响至关重要。

6 矿石的磨矿解离特征

为了了解原矿磨矿产品中硫化矿、氧化矿的解离特性, 对不同粒度范围下各铜矿物的解离度进行了测定, 结果如表 3。黄铜矿和斑铜矿是该样品的主要含铜矿物, 占了全铜 80.18%, 但是由表 3 可以看出, 这两种矿物在 38 μm 以上粒度时, 单体解离度都很差, 黄铜矿解离度均小于 27%, 斑铜矿解离度均小于 18%; 在 -38 μm 粒度范围, 单体解离度稍好一些,

表 2 原矿中目的矿物的粒度分布特征表 $w_B/\%$

Table 2 Grain size distribution characteristics of target minerals in raw ore

粒级	矿物种类	粒级含量	含金属量
-9.6 μm	黄铜矿	19.71	0.07
	斑铜矿	30.25	0.15
	辉铜矿	39.74	0.02
	铜镍硫化物	0.70	0.01
	黑铜矿	9.91	0.01
	孔雀石	79.74	0.02
	硅孔雀石	30.71	0.01
	水胆矾	31.64	0.01
合计			0.30

表 3 各粒度范围内主要铜矿物的单体解离度 %

Table 3 Degree of monomer dissociation of major copper ores in various granularity ranges

粒度范围/μm	+150	-150+74	-74+53	-53+38	-38
铜镍硫化物	100.00	100.00	0.00	60.96	100.00
水胆矾	53.79	0.00	34.60	52.32	33.59
黄铜矿	6.29	21.96	22.21	26.68	57.70
硅孔雀石	0.00	0.00	81.02	74.01	40.90
黑铜矿	40.00	48.08	0.00	0.00	86.77
斑铜矿	1.52	11.53	12.54	17.43	49.16
辉铜矿	0.00	1.35	0.00	17.01	47.84
孔雀石	0.00	16.56	0.00	0.00	78.76

但是均小于 60%,黄铜矿与斑铜矿解离度分别为 57.70%、49.16%。含铜矿物整体粒度较细,所以含铜矿物整体单体解离度较差,即使继续提高磨矿细度,仍然无法大幅度提高含铜矿物的单体解离度,这是含铜矿物的嵌布粒度太细造成的(Xu Yangbao *et al.*, 2012)。

7 主要目的矿物的共生关系

为了了解矿石矿物与脉石矿物的共生关系,进行了矿石矿物的关系特征分析,主要矿石矿物的关系特征如表 4。由表 4 可知,黄铜矿与斑铜矿作为矿

样中主要的含铜硫化矿物,其中黄铜矿仅有 0.55% 与其它目的矿物共生,与脉石矿物共生占 41.05%,斑铜矿与脉石矿物共生的更是高达 45.93%;黑铜矿和硅孔雀石作为主要含铜氧化矿物,与脉石矿物的共生分别达到了 18.29%、16.45%;另外,辉铜矿和孔雀石作为可回收的含铜矿物,与脉石矿物共生同样高达 43.81%。由此可见,样品中除了黑铜矿和硅孔雀石仅有 17%左右与脉石矿物共生,与脉石矿物共生关系不是很紧密,其他黄铜矿、斑铜矿、黄铜矿和孔雀石与脉石矿物共生关系均紧密,均有 40% 以上与脉石矿物共生,这也增加了铜矿物回收的难度。

表 4 样品中主要矿石矿物共生关系特征表

$w_B/\%$

Table 4 Characteristics of the association relationship of major target minerals in the samples

矿物名称	自由表面	与硫化物	与其他含铜矿物	与石英	与方解石	与长石	与其它脉石矿物	合计
铜镍硫化物	96.64	-	3.21	0.15	-	-	-	100.00
水胆矾	32.38	38.67	0.67	17.51	1.60	3.27	5.90	100.00
黄铜矿	58.40	0.22	0.33	18.39	3.01	6.60	13.05	100.00
硅孔雀石	80.98	2.19	0.38	9.52	0.74	2.94	3.25	100.00
黑铜矿	81.19	0.17	0.35	1.71	1.04	15.50	0.04	100.00
斑铜矿	45.48	6.98	1.61	31.35	1.46	8.06	5.06	100.00
辉铜矿	29.59	23.03	3.57	22.44	1.37	12.68	7.32	100.00
孔雀石	56.24	1.11	2.55	28.92	3.95	5.27	1.96	100.00

8 矿石的化学成分

多元素分析得出,该矿石中主要的有价金属是 Cu(1.05%),还含有 Pb(0.03%)、Zn(0.006%)、Au(0.068×10^{-6})、Ag(5.80×10^{-6})、As(0.03%)、 Al_2O_3 (6.01%)、MgO(2.40%)、 SiO_2 (43.59%)、S(3.30%)、P(0.091%)、Fe(3.87%)、Sb(0.002%)、C(0.787%)、CaO(6.91%),达到了铜回收的品位要求,Pb、Zn、As、Sb 等对铜回收工艺有影响的元素在原矿中的含量很低。

由物相分析结果可知,矿石中以硫化铜形式存在的铜占 85.41%,以氧化铜形式存在的铜占 14.58%。硫化铜主要为次生硫化铜(45.83%)和原生硫化铜(39.58%),其中次生硫化铜的浮选难度较高,需要对次生硫化铜矿强化活化进行捕收,而强化浮选主要通过加大硫化钠的用量以及作用时间来实现。另外,采用常规的选矿方法处理氧化铜矿无法达到有效的回收效果(石贵明等, 2013; 许婷婷等 2017)。

9 铜矿物的赋存状态

研究发现,矿石中的铜大多数是以独立的矿物形式存在的,例如斑铜矿、黄铜矿、辉铜矿、孔雀石等。根据铜矿物的能谱分析数据和各矿物的相对含量,计算出铜元素在各个矿物中的平衡分配,结果见表 5。由表 5 可知,以斑铜矿形式存在的铜占原矿总铜的 46.53%,以黄铜矿形式存在的铜占原矿总铜的 33.65%,辉铜矿、黑铜矿、硅孔雀石、孔雀石、铜镍硫化物、水胆矾中的铜分别占原矿总铜的 3.85%、6.34%、4.11%、2.51%、1.16%、1.85%。初步推断,黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿、铜镍硫化物、黑铜矿以及部分孔雀石、硅孔雀石可以通过硫化钠硫化浮选回收,但少量的孔雀石、硅孔雀石以及水胆矾难以通过浮选回收。斑铜矿属次生硫化铜,在浮选中,需要的硫化钠用量较高且药剂作用时间长,而黄铜矿在硫化钠用量高的情况下又会被抑制,这给铜的回收带来困难(刘学胜等, 2003; 毕克俊, 2017)。

表5 铜元素在各个矿物中的平衡分配
Table 5 Equilibrium distribution of copper in each mineral

 $w_B/\%$

矿物名称	黄铜矿	斑铜矿	辉铜矿	铜镍硫化物	黑铜矿	孔雀石	硅孔雀石	水胆矾	合计
含矿物量	0.95	0.75	0.05	0.03	0.09	0.04	0.09	0.03	2.03
矿物含铜	37.20	65.15	80.90	40.69	73.93	65.78	47.92	64.75	-
铜金属量	0.35	0.49	0.04	0.01	0.07	0.03	0.04	0.02	1.05
分配率	33.65	46.53	3.85	1.16	6.34	2.51	4.11	1.85	100.00

10 工艺流程试验研究

根据工艺矿物学研究表明,该矿石的主要有价金属是铜,嵌布粒度细,单体解离差,且次生硫化铜的含量较高,可以采用硫化黄药法强化浮选回收铜。在条件试验中,-0.074 mm 含量 70%与 90%的经济指标几乎一致,但是由于选厂的实际生产效益,确定了磨矿细度为-0.074 mm 占 70%;在单一捕收剂与组合捕收剂的对比试验中,发现组合捕收剂的选择性和捕收性都要优于单一捕收剂;流程结构试验过程中两次的精、扫选试验指标都优于三次精、扫选;在开路试验发现中矿产率大,顺序返回易造成流程压力大,回收效果差。在上述对比试验的基础上,本文确定采用中矿部分集中处理的方案,闭路试验流程如图 3 所示。

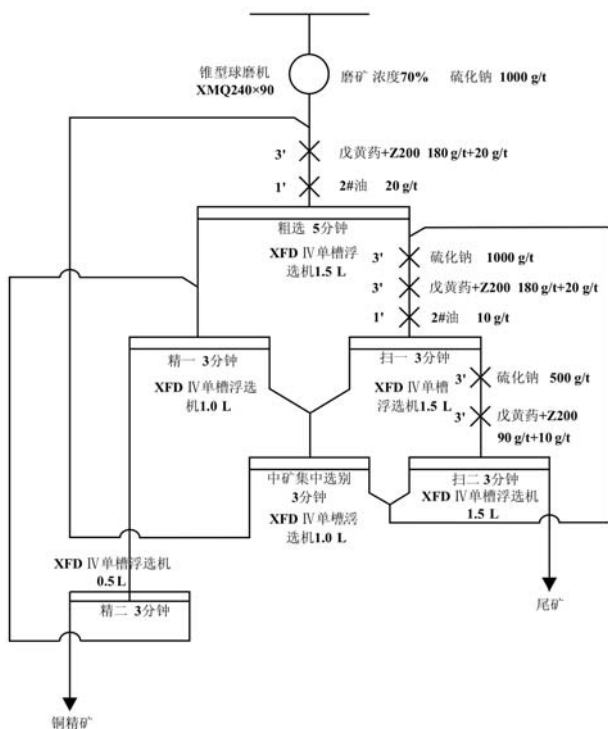


图 3 闭路试验流程

Fig. 3 Closed-circuit test flow

闭路试验结果(表 6)表明,在磨矿细度-0.074 mm 占 70%时,采用一粗两精两扫(中矿部分集中处理)的工艺流程可获得精矿铜品位为 19.12%,回收率为 79.16%,尾矿含铜 0.22%,回收率为 20.84%。

表 6 闭路试验流程结果

Table 6 Results of closed-circuit test procedures

产品名称	产率/%	Cu 品位/%	Cu 回收率/%
精矿	4.19	19.12	79.16
尾矿	95.81	0.22	20.84
原矿	100.00	1.05	100.00

根据工艺矿物学分析,由于主要含铜矿的平均粒度均小于 20 μm ,当磨矿-0.074mm 占 70%时,单体解离度还是小于 60%,即使再提高磨矿细度,也难以提高矿物的单体解离度,从而导致一部分铜矿物难以通过浮选作业回收。在-9.6 μm 粒级中铜含量高(0.30%),回收价值巨大,然而这部分铜矿物与脉石矿物共生紧密,后续可以通过浸出等手段回收其有价金属。

11 结论

(1) 四川盐源混合铜矿矿石主要以铜矿为主,品位 1.05%,其中硫化铜占了 85.41%,氧化铜占 12.50%。铜元素主要赋存于斑铜矿、黄铜矿中,其次赋存于辉铜矿、黑铜矿、硅孔雀石、孔雀石中,脉石矿物主要有石英、长石和方解石等。

(2) 含铜矿物整体粒度较细,尤其是主要含铜矿物平均粒度很细,均小于 20 μm ,整体单体解离度较差,而且有用矿物与脉石矿物共生关系紧密,仅仅通过浮选作业,难以达到较理想的回收指标。

(3) 采用一粗两精两扫强化浮选流程、中矿部分集中处理的方案进行闭路试验,获得精矿中铜品位为 19.12%,回收率为 79.16%。

References

- Bi Kejun. 2017. Study on the Mechanism of Sulfide Flotation of Mixed Copper Ore[D]. Kunming University of Science and Technology(in Chinese with English abstract).
- Fu Kaibin, Tang Pengcheng, Qin Tianbang, *et al.* 2018. Flotation technology of fine-disseminated secondary sulfide copper ore from Sichuan[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 38(6): 48~50, 54(in Chinese with English abstract).
- Gao Wei and Fang Mingshan. 2018. Process mineralogy characteristics on an oxidized copper ore in Xinjiang[J]. Nonfer Metal, (2): 1~3, 19(in Chinese with English abstract).
- Luo Liangfeng and Wen Shuming. 2007. Research current situation of beneficiation of copper oxide ore and discussion on existent problems [J]. Mining Letters, (8): 26~28 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xuesheng and Meng Xianyu. 2003. Experimental study on beneficiation of Jilin Daheishan low molybdenum ore[J]. Nonfer Metal, (4): 4~7, 10(in Chinese with English abstract).
- Nie Wenlin, Wen Shuming, Zhou Yaowen, *et al.* 2020. Process mineralogy and dearsenification of sulfur coarse-concentrate from Dulong Tin-Zn polymetallic ore[J]. Acta Mineralogica Sinica, 40(3): 267~273 (in Chinese with English abstract).
- Peng Mingsheng, Liu Xiaowen, Liu Yu, *et al.* 2012. The main advances of process mineralogy in China in the last decade[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 31(3): 210~217(in Chinese with English abstract).
- Shi Guiming, Yu Xiajing, Wu Caibin, *et al.* 2013. Beneficiation tests of a refractory copper oxide ore in Sichuan[J]. Metal Mine, (5): 92~94 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jingbin. 2004. Analysis on the present situation and prospect of copper resources in China[J]. China Metal Bulletin, (47): 2~5(in Chinese with English abstract).
- Wu Zhao and Xiao Jun. 2019. Beneficiation technology study of a high-secondary-Cu copper sulphide ore [J]. Copper Engineering, 138(2): 39~43(in Chinese with English abstract).
- Xiao Yiwu. 2019. Development history, research status and outlook of process mineralogy in China[J]. Nonferrous Metals, (5): 2~5 (in Chinese with English abstract).
- Xu Tingting and Zhou Ping. 2017. Research progress on technology and theory for recovering combined oxidized copper[J]. Mining and Metallurgy, (6): 67~71(in Chinese with English abstract).
- Xu Yangbao, Qin Wenqing and Liu Hui. 2012. Process mineralogy of a tin polymetallic ore in Mengzi, Yunnan[J]. Chinese Journal of Non-ferrous Metals, 22(3): 725~730.
- Zhao Hui, Lan Yaosheng and Zhang Hanping. 2009. The mineralogy process research of one copper oxide ore in Yunnan Province[J]. Yunnan Metallurgy, (4): 55~58(in Chinese with English abstract).
- Zhou Leguang. 2002. Process Mineralogy [M]. Metallurgical Industry Press, 10~532(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 毕克俊. 2017. 混合铜矿硫化浮选的机理研究[D]. 昆明理工大学.
- 傅开彬, 汤鹏成, 秦天邦, 等. 2018. 四川某微细粒次生硫化铜矿浮选工艺研究[J]. 矿冶工程, 38(6): 48~50, 54.
- 邵伟, 方明山. 2018. 新疆某氧化铜矿的工艺矿物学特征[J]. 有色金属(选矿部分), (2): 1~3, 19.
- 罗良烽, 文书明. 2007. 氧化铜选矿的研究现状及存在问题探讨[J]. 矿业快报, (8): 26~28.
- 刘学胜, 孟宪瑜. 2003. 吉林大黑山贫钼矿石选矿试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), (4): 4~7, 10.
- 聂文林, 文书明, 周耀文, 等. 2020. 都龙锡锌多金属矿硫粗精矿工艺矿物学与脱砷试验[J]. 矿物学报, 40(3): 267~273.
- 石贵明, 余夏静, 吴彩斌. 2013. 四川某难选氧化铜矿石选别试验[J]. 金属矿山, (5): 92~94.
- 王京彬. 2004. 中国铜矿资源现状及前景分析[J]. 中国金属通报, (47): 2~5.
- 武钊, 肖骏. 2016. 某高次生铜硫化铜矿选矿工艺研究[J]. 铜业工程, 138(2): 39~43.
- 肖仪武. 2019. 中国选矿工艺矿物学发展历程、研究现状与展望[J]. 有色金属(选矿部分), (5): 2~5.
- 许婷婷, 周平. 2017. 结合氧化铜回收技术与理论研究进展[J]. 矿冶, (6): 67~71.
- 赵晖, 兰尧中, 张汉平. 2009. 云南某氧化铜矿工艺矿物学研究[J]. 云南冶金, (4): 55~58.
- 周乐光. 2002. 工艺矿物学[M]. 冶金工业出版社, 10~532.