

# 基于 MLA 分析的某铜矿石选矿工艺初步研究<sup>①</sup>

张晶<sup>1,2</sup>, 唐鑫<sup>1,2</sup>, 吕向文<sup>1,2</sup>, 简胜<sup>1,2</sup>, 张琳<sup>1,2</sup>

(1.昆明冶金研究院有限公司, 云南 昆明 650031; 2.云南省选冶新技术重点实验室, 云南 昆明 650031)

**摘要:** 采用自动矿物参数分析系统 (MLA) 分析了某矽卡岩型铜矿矿物组成、嵌布关系, 测定了不同磨矿细度下原矿及混合精矿产品的粒度分布特征及解离度特征, 并根据该结果对该矿石进行了选矿工艺初步研究, 确定选矿流程为: 磨矿、铜硫混合浮选、粗精矿再磨、铜硫分离浮选。结果表明, 在磨矿细度-74 μm 粒级占 70%、再磨细度-20 μm 粒级占 75% 条件下, 可以得到铜品位 20.88%、铜回收率 70.42%、银品位 183.9 g/t、银回收率 76.78% 的铜精矿和硫品位 32.65%、硫回收率 91.47% 的硫精矿。

**关键词:** 铜矿; 工艺矿物学; MLA 分析; 单体解离度; 粗精矿再磨; 浮选; 铜硫混合浮选; 铜硫分离

中图分类号: TD92

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2023.01.014

文章编号: 0253-6099(2023)01-0063-04

## Preliminary Study on Mineral Processing Technology of Copper Ore Based on MLA

ZHANG Jing<sup>1,2</sup>, TANG Xin<sup>1,2</sup>, LÜ Xiangwen<sup>1,2</sup>, JIAN Sheng<sup>1,2</sup>, ZHANG Lin<sup>1,2</sup>

(1. Kunming Research Institute of Metallurgy Co Ltd, Kunming 650031, Yunnan, China; 2. Yunnan Key Laboratory for New Technology of Beneficiation and Metallurgy, Kunming 650031, Yunnan, China)

**Abstract:** A mineral liberation analysis (MLA) automatic measurement technology was used to not only analyze the composition and dissemination of minerals in a skarn copper ore, but also investigate the characteristics like particle size distribution and mineral liberation degree of raw ore and bulk concentrate samples ground to different fineness. After a preliminarily study on beneficiation technique for such ore based on the obtained results, a processing flowsheet comprised sequentially of grinding, Cu-Pb bulk flotation, regrinding of roughing concentrate and Cu/Pb flotation separation. It is shown that such flowsheet with the primary grinding fineness of -74 μm 70% and the regrinding fineness of -20 μm 75% can produce a copper concentrate grading 20.88% Cu at 70.42% recovery, and 183.9 g/t Ag at 76.78% recovery, as well as a product of sulfur concentrate grading 32.65% S at 91.47% recovery.

**Key words:** copper ore; process mineralogy; mineral liberation analysis (MLA); liberation degree; regrinding of roughing concentrate; flotation; copper-sulfur bulk flotation; Cu/S flotation separation

尽管我国是全球第一大铜资源消费国, 但铜资源有限, 且铜矿石禀赋差异大。近十几年来, 国内诸多矿业公司开始在海外合作开发铜矿资源, 因此, 有必要充分认识矿石基本性质, 以便提出更优的矿物加工解决方案, 提高资源利用率, 降低企业海外投资风险<sup>[1-3]</sup>。

根据铜矿石元素含量、嵌布状态不同, 铜矿石的浮选工艺一般有混合浮选、优先浮选、混合浮选-优先浮选联合工艺等, 工艺选择的关键是进行工艺矿物学研究, 观察其中次生硫化铜的嵌布粒度及铜与其他元素

的嵌布情况<sup>[4-5]</sup>。自动矿物参数分析系统 (Mineral Liberation Analysis, MLA) 运用现代图像及能谱, 能实现快速分析检测<sup>[6-7]</sup>, 通过矿物分类、表征矿物丰度 (模态分析) 和样品元素分布 (定量分析)<sup>[8-10]</sup> 等, 查明矿物颗粒和颗粒尺寸的分布解离情况及嵌布关系、理论品位-回收率曲线、颗粒密度和形状系数等, 为矿石可选性试验提供基础资料, 确定适宜磨矿细度, 指导确定选矿工艺<sup>[11-13]</sup>。

本文采用 MLA 分析查明了国外某铜矿矿物组成、

① 收稿日期: 2022-09-19

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFC2904603); 云南省基础研究专项 (202201AS070054)

作者简介: 张晶 (1985—), 女, 湖北应城人, 硕士, 高级工程师, 主要从事选矿工艺及药剂研发工作。

通信作者: 简胜 (1972—), 男, 四川资中人, 博士, 正高级工程师, 主要从事选矿工艺及药剂研发工作。

粒度分布及解离度特征,并根据 MLA 分析结果对该矿石进行了初步选矿工艺研究。

## 1 矿石性质

试样化学多元素分析结果见表 1。由表 1 可知,矿石中有价元素为铜,品位为 0.78%,是选矿主要回收对象。银品位 7.5 g/t,含量不高,在保证铜回收率前提下,可以考查伴生金属的回收情况。矿石中硫含量 11.12%,SiO<sub>2</sub>、MgO 含量较高,这将影响铜精矿品质。

表 1 试样化学多元素分析结果(质量分数) %

Cu	Mo	S	As	Pb	Zn	Fe	K <sub>2</sub> O	Au <sup>1)</sup>	Ag <sup>1)</sup>
0.78	0.001 3	11.12	<0.10	0.024	0.16	14.65	0.40	<0.10	7.5
Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	P	F	C	Mn	
0.26	33.74	6.04	1.15	16.29	0.12	0.22	0.037	0.048	

1) 单位为 g/t。

进一步对矿物成分及嵌布特征、铜在各主要含铜矿物中的分配情况进行了分析,结果见表 2 和表 3。

表 2 铜在各主要含铜矿物中的分布情况

矿物名称	矿物含量/%	矿物中铜含量/%	分配率/%
黄铜矿	0.83	34.48	41.21
辉铜矿	0.23	76.40	25.36
铜蓝	0.16	66.32	15.27
砷黝铜矿	0.06	42.37	3.60
透闪石	19.26	0.27	7.49
蛇纹石	7.51	0.55	5.91
黑云母	4.63	0.14	0.86
滑石	2.19	0.09	0.29
其他	65.13	—	—
合计	100.00		100.00

由表 2 可见,矿石中最主要的铜矿物是黄铜矿,其次为次生硫化铜矿物(辉铜矿、铜蓝、砷黝铜矿等)。透闪石、蛇纹石、黑云母、滑石等脉石矿物中的铜可能是矿石受接触变质、热液作用、表生作用影响,含铜组分(外来组分或原生铜矿物蚀变)进入部分硅酸盐晶格形成类质同像替代,也可能是次显微、超显微含铜组分混入部分硅酸盐中(未进入晶格)。该部分铜难以有效回收。

由表 3 可见,黄铜矿嵌布粒度 0.003~0.5 mm,其中部分黄铜矿微-细粒包裹于脉石(透闪石、绿泥石为主)及金属矿物(磁铁矿为主)中。次生硫化铜矿嵌布粒度较黄铜矿更细,这部分极难选别。矿石中黄铁矿含量较高,部分黄铁矿包裹有细粒黄铜矿,或边沿、裂

隙被辉铜矿、铜蓝交代,预计有少量铜会损失于硫精矿中。透闪石、绿泥石、蛇纹石、角闪石等是矿石中最主要的脉石矿物,其中透闪石和蛇纹石为铜的载体矿物,但即使通过提高磨矿细度也很难实现这部分铜矿物与脉石矿物的高效分离。

表 3 矿物含量及嵌布粒度

矿物名称	粒度/mm	含量/%
黄铜矿	0.003~0.5	0.83
辉铜矿	0.003~0.3	0.23
铜蓝	0.003~0.015	0.16
砷黝铜矿	0.005~0.02	0.06
辉钼矿	0.01~0.03	0.002
黄铁矿	0.1~8.0	20.69
磁黄铁矿	0.01~0.1	0.17
闪锌矿	0.01~0.05	0.23
方铅矿	0.01~0.03	0.01
磁铁矿	0.005~0.5	5.52
褐铁矿	0.05~0.1	0.02
石英	0.05~0.2	1.56
透闪石	0.05~0.2	19.26
阳起石	0.03~0.3	2.74
普通角闪石	0.05~0.5	6.23
透辉石	0.05~0.2	8.04
绿泥石	0.05~0.5	10.61
滑石	0.005~0.15	2.19
蛇纹石	0.005~0.2	7.51
镁铝榴石	0.2	0
黑云母	0.02~0.5	4.63
白云母	0.01~0.3	0.42
钾长石	0.1~0.5	0.36
拉长石	0.2~0.6	4.12
高岭石	0.01~0.5	3.48
锆石	0.005~0.02	0.01
硬石膏	0.01~0.1	0.12
磷灰石	0.01~0.03	0.51
白云石	0.01~1.0	0.29

由矿石性质分析结果可知:①铜在主要铜矿物中的分配率为 85.44%,即该矿石铜理论回收率为 85.44%。其中铜在黄铜矿中的分配率为 41.21%,这是铜回收的主要矿物。②矿石中含有黄铁矿(20.69%),矿石类型为黄铁矿化-蛇纹石化矽卡岩型铜矿石,部分包裹黄铜矿、边缘被辉铜矿、铜蓝、砷黝铜矿交代,预计要进行铜硫分离才能提高铜精矿品质。铜硫分离也会使部分铜损失于硫精矿中,磨矿细度成为铜回收的关键因素。③次生硫化铜矿嵌布粒度较细且含量较多,这部分铜没有充分单体解离,会影响后续选矿工艺指标,特别是对提高铜精矿品位和回收率有很大影响。④部分铜以较细粒度嵌布于脉石矿物中,这部分脉石矿物也是

铜的载体矿物之一,回收其中的铜较困难。

## 2 主要目的矿物粒度分布及解离度特征

### 2.1 不同磨矿细度下原矿主要目的矿物粒度分布特征

采用 MLA 对不同磨矿细度条件下的原矿主要矿物黄铜矿、辉铜矿、铜蓝、砷黝铜矿粒度特征进行了分析(统计对象代表被统计矿物在当前磨矿条件下的工艺粒度或嵌布粒度),结果如表 4 所示。

表 4 不同磨矿细度条件下主要目的矿物的粒度含量

-74 μm 粒级 含量/%	粒级/μm	不同粒级下的矿物含量/%			
		黄铜矿	辉铜矿	铜蓝	砷黝铜矿
55	+74	31.00	7.68	22.20	32.38
	-74+10	60.35	72.96	52.16	40.02
	-10	8.64	19.36	25.63	27.59
65	+74	15.51	5.53	13.00	21.40
	-74+10	72.63	75.58	59.34	46.73
	-10	11.86	18.89	27.66	31.87
70	+74	3.63	3.76	0	14.19
	-74+10	82.74	76.99	69.28	50.07
	-10	13.62	19.24	30.72	35.75
75	+74	0	1.25	0	8.24
	-74+10	79.55	75.3	64.92	52.03
	-10	20.45	23.45	35.08	39.73

表 4 结果表明,当磨矿细度为 -74 μm 粒级占 55% 时,+74 μm 粒级中黄铜矿、砷黝铜矿含量相对多些。随着磨矿细度增加,黄铜矿在 +74 μm 粒级的含量急剧减少,而其他次生硫化铜矿含量减少幅度没有黄铜矿大,可能是本身次生硫化铜嵌布粒度细,在这个范围内矿物含量低。当磨矿细度从 -74 μm 粒级占 55% 增加到 70%,铜矿物在 -74+10 μm 粒级的含量普遍增加。当磨矿细度继续增加至 -74 μm 粒级占 75% 时,铜矿物在 -74+10 μm 粒级的含量增加幅度不明显,而在 -10 μm 粒级含量增加相对明显。-74+10 μm 这个粒级范围也是矿石较易浮选回收的粒级。增加磨矿细度容易造成过细粒级(-10 μm)含量增加,因此建议粗选磨矿细度为 -74 μm 粒级占 70%。

### 2.2 不同磨矿细度下原矿主要目的矿物解离度

不同磨矿细度下原矿主要目的矿物解离度测定结果如表 5 所示。由表 5 可知,尽管主要回收铜矿物单体解离度较低,但当磨矿细度从 -74 μm 粒级占 55% 提高到 70% 时,黄铜矿、辉铜矿、铜蓝、砷黝铜矿单体解离度分别提高了 16.49、10.52、9.17、17.13 个百分点。继续增加磨矿细度,铜矿物单体解离度增加不明显。适宜的粗选磨矿细度为 -74 μm 粒级占 70%。

表 5 不同磨矿细度下主要目的矿物的解离度

矿物 名称	-74 μm 粒级 含量/%	单体/%	连生体/%			
			>3/4	1/2~3/4	1/4~1/2	<1/4
黄铜矿	55	30.36	14.20	6.60	22.97	25.86
	65	40.12	14.73	8.93	16.2	20.02
	70	46.85	14.26	11.39	9.93	17.57
	75	47.02	17.67	12.76	7.12	15.43
辉铜矿	55	33.32	13.70	1.02	19.76	32.20
	65	38.90	16.89	3.25	10.87	30.09
	70	43.84	17.33	5.36	5.48	27.99
	75	45.09	17.80	9.21	3.34	24.56
铜蓝	55	41.27	1.55	2.65	2.16	52.38
	65	46.80	5.24	6.89	6.50	34.57
	70	50.44	10.86	8.19	7.21	23.31
	75	52.2	12.17	9.31	8.34	17.98
砷黝铜矿	55	36.90	24.79	4.55	12.43	21.33
	65	50.23	22.25	4.30	6.22	17.00
	70	54.03	22.85	4.48	3.54	15.10
	75	55.00	25.24	4.93	2.07	12.76

### 2.3 混合粗精矿不同再磨细度下主要目的矿物粒度分布特征

粗选磨矿细度下的产品解离度不是很高,同时矿物本身嵌布粒度较细,部分微-细粒包裹于脉石中的黄铜矿,粒度在 0.003~0.020 mm 之间,因此在粗磨细度 -74 μm 粒级占 70% 条件下,添加少量石灰调浆,以 KMY-2 为捕收剂、24K 为起泡剂进行混合浮选,对获得的铜硫混合精矿进行了不同再磨细度条件下各铜矿物粒度特征分析,结果如表 6 所示。

表 6 不同再磨细度条件下主要目的矿物的粒度含量

-20 μm 粒级 含量/%	粒级/μm	不同粒级下的矿物含量/%				
		黄铜矿	辉铜矿	铜蓝	砷黝铜矿	
65	-38+27	1.48	—	—	—	
	-27+19	3.34	9.95	2.74	2.56	
	-19+13.5	11.76	10.06	10.58	4.46	
	-13.5+9.6	18.98	16.45	14.42	10.66	
	-9.6+6.8	22.98	29.02	25.62	19.40	
	-6.8+4.8	19.83	20.20	25.74	24.25	
	-4.8+3.4	12.78	8.80	13.88	20.51	
	-3.4+2.4	6.87	4.38	5.39	13.36	
	-2.4+1.75	1.75	1.00	1.43	4.15	
	-1.75	0.22	0.15	0.19	0.66	
	75	-38+27	—	—	—	—
		-27+19	—	—	—	—
		-19+13.5	8.06	—	—	—
		-13.5+9.6	3.74	—	—	—
-9.6+6.8		11.40	—	13.73	21.35	
-6.8+4.8		22.31	—	38.05	20.20	
-4.8+3.4		27.07	36.36	26.87	20.78	
-3.4+2.4		16.66	39.39	14.10	23.27	
-2.4+1.75		8.72	15.91	6.41	11.04	
-1.75		2.03	8.33	0.85	3.36	

从表6可以看出,相较于黄铜矿,次生硫化铜矿在不同再磨细度下的粒度都偏细。当再磨细度为-20 μm 粒级占75%时,次生硫化铜矿都在-9.6 μm 粒级中,同时黄铜矿也基本达到了-20 μm 粒级。

2.4 混合粗精矿不同再磨细度下主要目的矿物解离度

采用 MLA 对混合粗精矿不同再磨细度条件下的主要目的矿物解离度特征进行了分析,结果如表7所示。

表7 不同再磨细度下主要目的矿物的解离度

矿物名称	-20 μm 粒级含量/%	单体/%	连生体/%			
			>3/4	1/2~3/4	1/4~1/2	<1/4
黄铜矿	65	74.45	11.49	6.22	4.05	3.79
	75	79.44	4.17	6.93	4.22	5.23
辉铜矿	65	64.90	18.54	7.03	5.60	3.93
	75	84.55	12.57	0	0	2.58
铜蓝	65	69.04	9.60	9.29	6.71	5.36
	75	73.66	11.34	1.96	4.24	8.80
砷黝铜矿	65	74.83	8.87	4.53	6.30	5.47
	75	83.87	4.73	2.46	5.05	3.98

在再磨细度-20 μm 粒级占65%条件下,黄铜矿、砷黝铜矿的解离水平相近且较高,超过70%,辉铜矿、铜蓝单体解离水平不到70%,单体及大于3/4解离合计约80%。提高再磨细度至-20 μm 粒级占75%,辉铜矿、砷黝铜矿单体解离度明显提高,辉铜矿提高了约10个百分点,单体及大于3/4解离合计约97%,少量铜矿物(微粒黄铜矿、铜蓝)嵌布粒度较细,解离效果有提升。建议在再磨细度-20 μm 粒级占75%条件下进行混合粗精矿再磨再选分离。

3 实验室小型浮选闭路试验

依据原矿性质及其对选矿工艺选择的影响情况,确定以粗磨-铜硫混合浮选-细磨-铜硫分离的流程开展试验。为便于铜硫分离,以选择性好的 KMY-2 作为捕收剂,在粗选磨矿细度-74 μm 粒级占70%、再磨细度-20 μm 粒级占75%条件下进行了小型浮选闭路试验,结果见表8,试验流程见图1。

表8 闭路试验结果

产品名称	产率/%	品位/%				回收率/%			
		Cu	S	Ag <sup>1)</sup>	Fe	Cu	S	Ag	Fe
铜精矿	2.62	20.88	28.67	183.9	33.64	70.42	6.81	76.78	5.74
硫精矿	30.89	0.32	32.65	0.9	33.16	12.72	91.47	4.43	66.77
尾矿	65.49	0.2	0.29	1.8	6.44	16.86	1.72	18.79	27.49
原矿	100.00	0.78	11.03	6.28	15.34	100.00	100.00	100.00	100.00

1) 单位为 g/t。

结果表明,小型浮选闭路试验可以得到铜品位

20.88%、铜回收率70.42%、银品位183.9 g/t、银回收率76.78%的铜精矿和硫品位32.65%、硫回收率91.47%的硫精矿。铜精矿中砷含量0.40%,结合矿石性质可知,原矿中部分铜与砷以砷黝铜矿形式存在,这部分砷很难脱除。

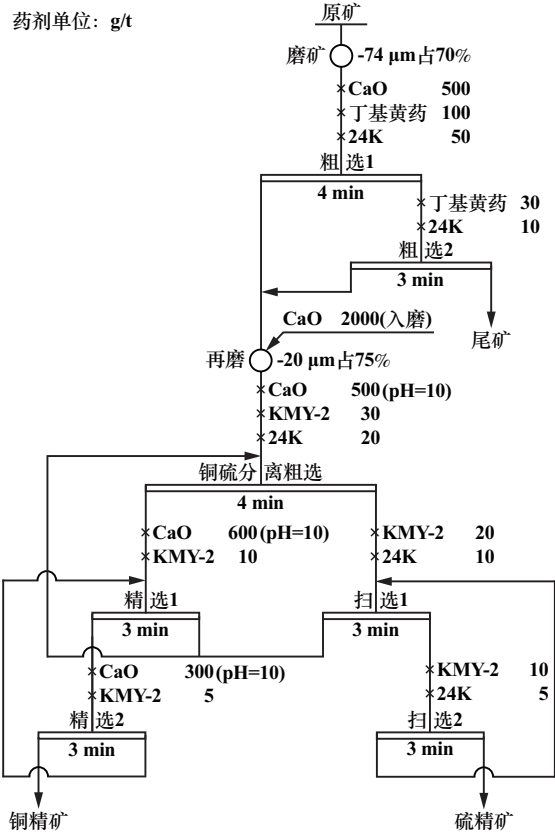


图1 闭路试验流程

4 结论

1) 采用 MLA 对矿石基本性质及特征进行了分析,矿石中铜矿物主要以黄铜矿形式存在,其次为辉铜矿、铜蓝、砷黝铜矿。次生铜矿物辉铜矿、铜蓝等嵌布粒度更细。砷黝铜矿的存在对铜精矿含砷会有影响。

2) 闭路试验可以得到铜品位20.88%、铜回收率70.42%、银品位183.9 g/t、银回收率76.78%的铜精矿和硫品位32.65%、硫回收率91.47%的硫精矿,选矿指标较佳。

3) 影响铜精矿铜回收率的主要原因是细粒嵌布硫化铜的回收,下一步除了对工艺进行优化,还需在实验室选矿设备、选矿药剂方面做一些改进试验,进一步提高精矿回收率。

4) 采用 MLA 对原矿矿石组成、主要铜矿物嵌布粒度及磨矿产品粒度分布及矿物解离度特征进行自动

(下转第71页)

能有效抑制方解石, 当其浓度达到 1.0 g/L 后, 方解石回收率下降至 15%; 水玻璃对 R opacus 活性没有明显影响。

2) R opacus 浓度达到 1.0 g/L 后, 其悬浮液表面张力可以降到 53 mN/m, 在 pH = 5 时表面活性最强。在实际矿物浮选中, 能较好地提高锡矿品位。

3) R opacus 能使锡石和方解石表面电位明显改变, 而石英砂基本不变, 有效调节了锡石和方解石表面湿润性, 这与浮选实验结果相吻合。

4) R opacus 悬浮液最小的表面张力对应的浓度值和 pH 值与获得锡石最大浮选回收率的条件基本一致。

### 参考文献:

- [1] 唐雪峰, 赵洪冬. 脱泥-浮选工艺回收极微细粒锡石试验研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(1): 41-44.
- [2] SU Z, ZHANG Y, LIU B, et al. Extraction and Separation of Tin from Tin-Bearing Secondary Resources: A Review[J]. JOM, 2017, 69(11): 2364-2372.
- [3] 汪泰. “重-浮-重”联合流程回收低品位细粒锡石[J]. 矿冶工程, 2015, 35(6): 68-71.
- [4] 李方旭, 周晓彤, 林日孝. 水杨羟肟酸的相转移催化合成及对锡石的浮选性能[J]. 矿冶工程, 2021, 41(3): 42-45.
- [5] 邱丽娜, 张旭, 赵志强, 等. 锡矿尾矿多金属联合分选综合利用试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2018(4): 41-45.

- [6] 郭文达, 朱一民, 王鹏, 等. 新型酰胺基羧酸捕收剂 DWD-1 用于铁矿反浮选试验研究[J]. 矿产保护与利用, 2016(3): 22-25.
- [7] YIN W Z, WANG J Z. Effects of particle size and particle interactions on scheelite flotation[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(11): 3682-3687.
- [8] 熊宗彪, 蒋泽斌, 李春林, 等. 用新型锡石捕收剂 CS-6 优化广西某细粒锡石的回收[J]. 金属矿山, 2018(9): 117-120.
- [9] 余佩萍, 余永富, 许向阳. 新型捕收剂作用下赤铁矿与胶磷矿的分选及机理[J]. 中国有色金属学报(英文版), 2013, 23(2): 501-507.
- [10] YU Kanping, YU Yongfu, XU Xiangyang. Separation behavior and mechanism of hematite and Collophane in the presence of collector RFP-138[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(2): 501-507.
- [11] 杨帆, 杨耀辉, 刘红尾, 等. 新型季铵盐捕收剂对白钨矿和方解石的常温浮选分离[J]. 中国有色金属学报, 2012(5): 200-206.
- [12] Yanbo S. Research on Flotation of Low-grade Tungsten-Tin from a Certain Multi-metal Ore[J]. Mining Engineering, 2015, 13(5): 19-22.
- [13] Balasubramanian V, Honnavar R, Sankaran S. Basic studies on the role of components of Bacillus megaterium as flotation biocollectors in sulphide mineral separation[J]. Applied microbiology and biotechnology, 2014, 98(6): 2719-2728.
- [14] Gungoren C, Guven O, Cinar M, et al. An investigation of the effect of clay type on coal flotation along with DLVO theoretical analyses[J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2020, 40(3): 210-222.

引用本文: 蓝丽红, 马忻狄, 郑锡瀚, 等. 浑浊红球菌对锡石的浮选性能及作用机理[J]. 矿冶工程, 2023, 43(1): 67-71.

(上接第 66 页)

检测, 可以确定选矿工艺原则流程, 并且可以确定试验中原磨矿细度需达到 -74  $\mu\text{m}$  粒级占 70% 以上、再磨细度需达到 -20  $\mu\text{m}$  粒级占 75%, 这对选矿工艺流程选择具有很好的指导意义。

### 参考文献:

- [1] U S Geological Survey. Mineral Commodity Summaries 2021[DB/OL]. <https://www.usgs.gov/>.
- [2] 李鹏远, 周平, 唐金荣, 等. 中国铜矿资源供应风险识别与评价: 基于长周期历史数据分析预测法[J]. 中国矿业, 2019(7): 44-51.
- [3] 跻身全球 30 大铜资源生产商行列的中国五大铜矿公司[J]. 矿产勘查, 2020, 11(12): 2627.
- [4] 胡熙庚. 有色金属硫化矿选矿[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992.
- [5] 张曙光, 简胜, 唐鑫, 等. 某低品位细粒嵌布硫化铜矿选矿工艺研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(6): 77-80.
- [6] 苟瑞涛. 基于 MLA 的碳酸岩-碱性杂岩稀土-铈-铁矿物学特征研

- 究[D]. 北京: 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 2016.
- [7] 周乐光. 工艺矿物学(第 3 版)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.
- [8] 王利珍, 刘洋, 钟彪, 等. 某钛磁铁矿矿物学特征及分选性能研究[J]. 矿冶工程, 2016, 36(5): 57-59.
- [9] 曾广圣, 欧乐明. X 射线衍射-扫描电镜等技术研究秘鲁铜硫矿石选矿工艺矿物学特征[J]. 岩矿测试, 2019, 38(2): 160-168.
- [10] 胡志凯, 谈伟军, 曾克文. 青海某铜多金属矿选矿试验研究[J]. 矿冶工程, 2022, 42(1): 41-44.
- [11] 黄春海, 胡新红, 段瑶, 等. 湖南某高硫低品位铜矿选矿试验研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(3): 72-74.
- [12] 赵玉卿, 王守敬, 田滔, 等. MLA 在青海某石煤钒矿钒的赋存状态研究中的应用[J]. 矿产综合利用, 2020(1): 89-93.
- [13] 胡海祥, 李广. MLA 在广东斑岩型锡石矿嵌布特征及赋存状态研究中的应用[J]. 过程工程学报, 2019, 19(5): 1006-1013.

引用本文: 张晶, 唐鑫, 吕向文, 等. 基于 MLA 分析的某铜矿石选矿工艺初步研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(1): 63-66.