

# 复杂嵌布高硫铜矿分选系统优化研究

## Optimization of Separation System of the High-Sulfur Copper Ore with Ccomplicated Mineral Distribution

邓禾森(铜陵有色金属集团股份有限公司生产机动部, 安徽 铜陵 244000)

**摘要:**本文以安徽某高硫铜矿为研究对象,以现场生产过程问题为导向,基于试样的矿石性质基础,经过系统条件优化对比试验,获得了具比较优势的铜优先浮选-中矿再磨再选工艺。试验结果表明,相对于铜优先浮选-中矿顺序返回工艺,铜优先浮选-中矿再磨再选工艺可有效降低分选过程中中矿的循环累积,强化铜粗选分选效率,减弱易浮易泥化脉石影响,提高金属回收率及精矿品质等;在实验室条件下,相对于中矿顺序返回工艺,以中矿再磨再选工艺处理试样1和试样2时,过程循环中矿铜金属累积量分别降低3%、11%,总铜回收率分别提高了0.6%、0.2%,对于试样1表现出铜粗选作业回收率提高5%以上,试样2表现出选铜精矿铜含量提高3.6%以上。本研究为复杂嵌布高硫铜矿资源的高效分选提供参考。

**关键词:**高硫铜矿;中矿再磨再选;有效解离;易浮脉石;分选效率

中图分类号:TD453

文献标志码:A

文章编号:1672-609X(2023)02-0026-07

**Abstract:**For field production processing problems, the method of copper selective flotation - middling regrinding separation was obtained as a preferred method for Anhui high-sulfur copper ore, which based on mineralogical property analysis and optimization test of separation system conditions. The results show that, compared with the flow of copper selective flotation which used middling regrinding-returning in order, the optimized separation process could decrease the accumulation of procedural middling, improve the separation efficiency of ore, reduce the impact of floatable and fine gangue, increase the recycling ratio of copper, and improve the concentrate quality. It showed that the copper accumulation of the during middling decreased by 3% and 11% and the total copper recovery ratio increased by 0.6% and 0.2% of the Sample 1 and Sample 2, respectively, by using the middling regrinding separation than that of the middling regrinding returned sequentially under laboratory conditions. Moreover, the recovery ratio of the copper roughing flotation increased more than 5% for Sample 1, and the content of the copper in copper concentrate increased more than 3.6% for Sample 2. This work provides a reference for high efficiency separation of the complex dissemination high-sulfur copper resources.

**Key words:** high-sulfur copper ore; middling regrinding separation; effective liberation; floatable gangue minerals; separation efficiency

## 1 前言

据统计斑岩铜矿、含铜砂岩铜矿、含铜黄铁矿铜矿、硫化铜镍矿是世界上主要的工业铜矿床,这些铜矿约占铜总储量的96%<sup>[1-2]</sup>。我国的铜矿87%为硫化铜矿,多为矿床规模小、铜品位低、共生伴生矿物多的铜矿<sup>[3-4]</sup>。其中,铜硫矿石是我国一类重要的含铜硫化矿石,常产于含铜黄铁矿和矽卡岩铜矿床中,受其矿物组成多样,矿物粒度粗细不均,矿物共生关系复杂等因素影响,从该类矿石中高效

分选回收铜的难度较大<sup>[5-6]</sup>。

在铜硫矿石的生产实践上,国内外应用最广的方法仍是铜优先浮选<sup>[7]</sup>。研究表明,从铜硫矿石选择性分离铜的主要难点是铜矿物有效解离和铜硫分离问题,前者受限于铜矿物的复杂赋存状态特征,后者则表现为铜硫化矿物与黄铁矿、磁黄铁矿、白铁矿等含铁矿物的高选择性分离<sup>[8-10]</sup>。目前,从矿石性质基础、磨浮流程结构及体系药剂制度等方面优化,研究者们已报道了多种的优势工艺或工艺组合,应用这些方法也解决了不少的实际生产问题<sup>[11-12]</sup>。对于矿物组成复杂、矿物嵌布关系紧密的高硫铜矿,一方面需考虑为目的矿物浮游提供有利的矿物解离基础,另一方面需要考虑完善药剂体系以调控目的矿物的选择性分离,同时应统筹分选系统对矿石性质变化的普适

[作者简介] 邓禾森(1976—),男,高级工程师,主要从事复杂多金属资源综合利用研究和选矿技术管理。

[引用格式] 邓禾森. 复杂嵌布高硫铜矿分选系统优化研究[J]. 中国矿山工程,2023,52(2):26-32.

性。然而,现有技术常难以有效规避矿石性质波动、矿物蚀变的显著影响,分选系统持续稳定较困难。因此,如何稳定、高效分选复杂高硫铜矿中铜矿物,是该类资源综合利用的研发重点之一。

本文以安徽某复杂嵌布的高硫铜矿为研究对象,针对现场生产的过程问题,以两种试验矿样的矿石性质为基础,以磨浮工艺条件优化为前提,对比研究及探讨不同磨浮流程对该高硫化铜矿的适用性,重点研究了分选过程中矿的再磨再选工艺流程,解析了中矿的有利处置方式,得到了具比较优势的磨浮工艺流程,为该类矿物组成复杂、矿物嵌布多样的高硫铜矿的综合回收提供技术参考。

## 2 生产现状

安徽某高硫铜矿采用优先浮铜-中矿再磨顺序返回的工艺,具体生产流程如图1所示。多年来对该铜矿的选矿试验研究成果、流程考查及原矿工艺矿物学研究,表明其生产存在以下难题:(1)矿石性质波动显著影响铜分选指标,一方面受制于该铜硫矿中复杂的金属硫化矿物组成,多种铜矿物与硫铁矿物的复合矿物体系,导致铜选择性分选难度高;另一方面受限于矿石中多样的脉石矿物组成,含较多蚀变易浮镁硅酸盐(滑石、云母等)时,大量易浮脉石矿物堆积在中矿循环回路中,极大地降低铜的分选效率。(2)含铜矿物表达多样的浮游性能差异,部分铜矿物存在浮游滞后现象,大量含铜矿物或其矿物结合体需在扫选作业上浮,使得大量的铜金属被堆积在中矿中,且致使铜粗选负荷大、回收率低,分选尾矿铜含量高等多类问题。(3)含铜矿物粒度分布不均匀且与其他矿物间关系复杂多样,部分铜矿物与脉石矿物

嵌布关系紧密,部分又与其他金属矿物如黄铁矿、磁黄铁矿、磁铁矿连生关系紧密,导致铜矿物的有效单体解离难度增大。尤其是,当中矿再磨细度要求相对较细,与原溢流给料的细度差别明显时,粗选铜矿物浮选滞后及中矿易浮脉石不当累积的不利影响更为突出。

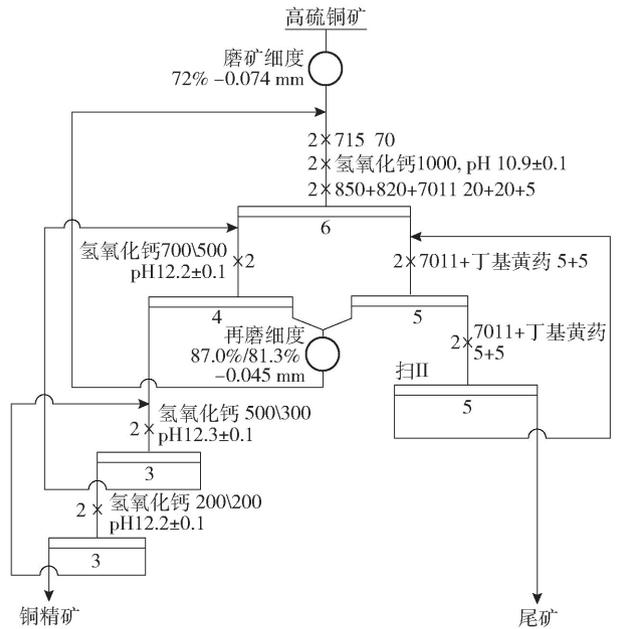


图1 优先浮铜-中矿再磨顺序返回工艺

## 3 试验矿石性质

### 3.1 化学多元素分析

试验试样为该矿区不同采矿点的生产给料试样,两种试样的化学多元素分析结果见表1。由表1可知,原试样1和试样2中Cu、S含量分别为0.92%、13.65%和0.85%、15.28%,Cu是选铜作业的主要回收元素。

表1 试验矿样主要元素含量化学分析结果

试样	元素	Cu	S	TFe	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Au/g·t <sup>-1</sup>	Ag/g·t <sup>-1</sup>
试样1	含量/%	0.92	13.65	27.50	11.22	3.90	26.14	3.78	0.44	5.15
	元素	Cu	S	TFe	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Au*	Ag*
试样2	含量/%	0.85	15.28	27.75	7.88	6.33	26.35	3.43	0.36	2.82

### 3.2 铜硫化学物相分析

试验用试样1和试样2中铜、硫的化学物相分析结果如图2所示。由图2可知,两种试验矿石中铜主要赋存在硫化物中,其占比均高于85%;试样2中含铜氧化物占比相对试样1高些。

### 3.3 矿物组成特征分析

两种试验矿石的主要矿物组成分析见表2。两种试样中铜矿物主要为黄铜矿,次为铜蓝、方黄铜矿,及含少量墨铜矿;硫主要呈磁黄铁矿和黄铁矿存在;氧化铁矿物主要为磁铁矿,其次为赤铁矿、菱铁

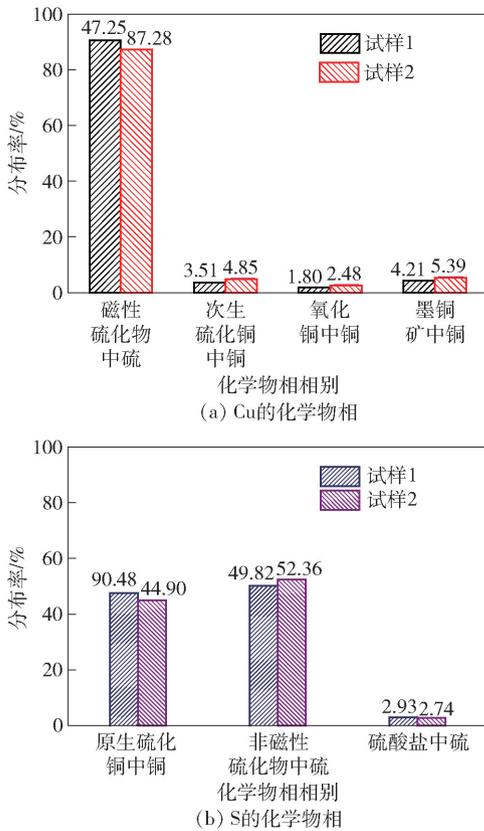


图2 试验矿样中铜、硫的化学物相分析

表2 试验矿样的主要矿物组成及相对含量

矿物名称	金属矿物		非金属矿物		
	含量/%	含量/%	含量/%	含量/%	
	试样1	试样2	试样1	试样2	
黄铜矿	2.42	2.31	蛇纹石	6.55	8.38
斑铜矿/铜蓝	0.030	0.030	滑石	4.11	8.22
墨铜矿	0.41	0.46	透辉石/钙铁辉石	3.17	3.12
黄铁矿/白铁矿	10.90	15.38	黑/白/绢云母	1.06	2.91
磁黄铁矿	15.57	12.36	绿泥石	0.71	0.92
磁铁矿	7.90	8.55	白云石	3.66	4.69
菱铁矿	1.09	0.35	橄榄石/菱镁矿	0.22	0.43
赤铁矿/褐铁矿	1.23	0.32	石英	15.95	11.44
其他金属矿物	0.26	0.19	其他非金属矿物	24.76	19.94
合计	39.81	39.95	合计	60.19	60.05

①目的矿物与其他矿物间的紧密共生关系,选择性解离难度高;②金属硫化矿物多样,多元含铜、含硫矿物共存,可浮性差异调控困难;③复杂的脉石矿物组成,且含易浮、易泥化的含镁脉石矿物,定向分离调控难度大。因而,从两种矿样的磨浮系统工艺流程的优化出发,研究目标矿物高效解离,有效抑制硫铁矿矿物,同时规整脉石矿物的迁移走向的可行性,是

矿,褐铁矿。非金属矿物矿物主要有石英、蛇纹石、滑石、透辉石/钙铁辉石等。从表1、表2和图2所示结果可知,试样1与试样2原料性质的相对差别主要体现在硫铁矿物、含镁硅酸盐矿物的占比不同,矿物组成的差异满足现场生产过程中给料矿物蚀变性变化特征。

### 3.4 主要矿物嵌布特征分析

试验矿样中黄铜矿、磁黄铁矿、黄铁矿的嵌布粒度分布如图3所示,主要铜矿物的产出特征如图4所示。由图3可知,矿石中黄铜矿、磁黄铁矿和黄铁矿的嵌布粒度不均匀,试样1与试样2的粒度分布也存在较明显的差别。由图4可知,试验矿样主要的含铜矿物主要呈不规则粒状嵌布在脉石矿物中(图4a),其次是与磁黄铁矿、黄铁矿紧密共生(图4b、图4c)。铜矿物的不均粒度分布特征,及其与脉石矿物或含硫矿物的紧密共生关系,使得铜选择性分选回收,磨矿解离必然成为其重要的限制性因素。

综合上述试样1和试样2的矿石性质分析结果来看,铜矿物浮选回收主要表现为铜硫化矿物与多种脉石矿物、含铁硫化矿物的分离;其难点在于:

获得高稳、高效的复杂铜矿分选系统的重要途径,也是解决现有生产系统难题的有效途径。

## 4 分选系统优化试验

### 4.1 粗/精选 pH 影响试验

在捕收药剂制度与粗选磨矿细度(-0.074 mm 占比70%~75%)不变的前提下,选铜粗选作业的

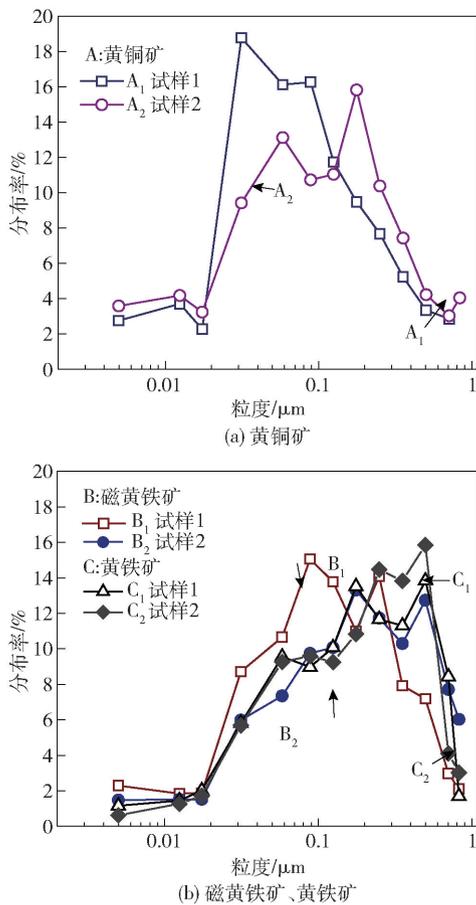


图3 试验矿样中黄铜矿、磁黄铁矿、黄铁矿粒度分布

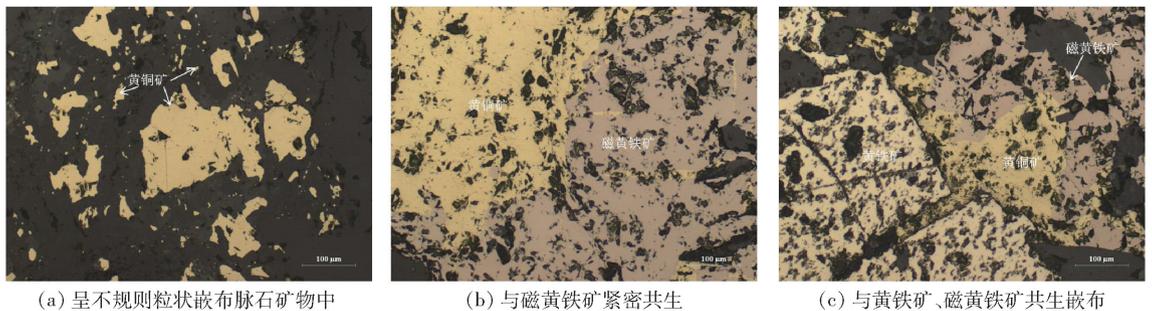


图4 主要铜矿物的产出特征

选的尾矿产品(如图5流程中矿3产品)混合,得到的混合中矿为给矿,进行中矿分选条件影响试验,具体地依序进行了再磨细度、氢氧化钙用量、850用量、矿浆质量浓度等单因素条件影响试验。其中,受原料性质影响,试样1和试样2所得的混合中矿Cu含量分别为1.46%~1.53%和0.47%~0.50%;单因素影响试验均采用一次浮选分离试验,得到相应的分选精矿和分选尾矿。各单因素对中矿选铜效果的影响试验结果如图7所示。

中矿再磨有利于含铜矿物的回收,两种矿样表

抑硫pH调整剂,是影响铜回收的显著性因素;为考察选铜粗选作业中氢氧化钙(pH)对选铜的影响,进行不同氢氧化钙用量(pH)对比试验,试验流程如图5所示,试验结果如图6所示。其中,粗选磨矿细度选择为-0.074mm占72%,850为具有起泡性能的选择性较好的选铜捕收剂,820为不具起泡性能的选择性较好的选铜捕收剂;715为硅酸盐的高效抑制剂;7011是对脉石矿物不敏感的硫化矿物高选择性捕收剂;BC为起泡剂,从图6结果可知,两种试样在粗选氢氧化钙用量为1000g/t时(pH为10.8),选铜粗选指标相对较好,且经一次粗选二次扫选所得选铜损失率也相对较低,试样1、试样2选铜尾矿中铜损失分别为7.08%、8.01%。

考虑当前生产采用了中矿顺序返回的流程,其以扫选I泡沫产品和精选I分选尾矿返回至粗选作业,过程中因受矿物连生体及易浮脉石矿物等影响,造成了过程分选效率低且中矿严重堆积的问题;因而,优化的分选系统着重考虑过程中矿的合理处置问题,故后续试验重点研究分离过程中中矿的处置工艺。

#### 4.2 中矿分选条件影响试验

为获得中矿选铜的优势工艺条件,以扫选I所得泡沫产品(如图5流程中矿1产品)与精选I分

达相近的铜矿物分离趋势,一定范围内相对于中矿不再磨,随再磨细度的增加,铜矿物分选效率提高,而细度过细则不利于铜矿物回收;其中,试样1,试样2中矿再磨细度分别为-0.045mm占86.0%、81.3%相对较好,其优势再磨细度的差异,主要受物料性质的差异影响。中矿再磨再选氢氧化钙用量(pH)影响试验结果表明,两种试样pH在12.0~12.1可获得较好的选铜指标。两种试样在捕收剂850用量为10g/t时,选铜效果相对较好。浮选矿浆浓度对比试验结果表明,高浓度或低浓度均不利

于中矿再磨选铜作业。

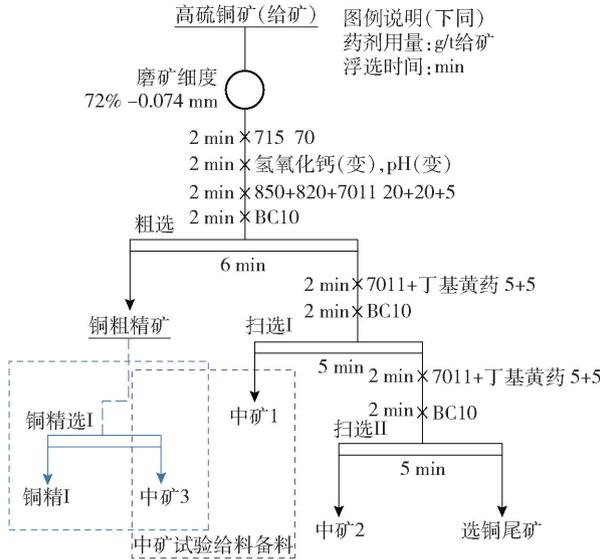


图5 粗选氢氧化钙(pH)影响试验流程

再磨细度、优势药剂条件等存在一定的差异,这主要取决于物料矿石性质;相对而言,试样2相对于试样1,其含易浮易泥化脉石矿物相对较多,且氧化铜中铜含量相对较高,使得选铜尾矿铜损失率相对高,较优的中矿再磨细度也相对略粗。

### 4.3 工艺流程对比试验

根据铜浮选粗选条件及中矿再磨再选试验的优化结果,进行铜优先浮选-中矿再磨顺序返回工艺(图1)、铜优先浮选-中矿再磨再选工艺(图8)的闭路对比试验,闭路试验对比结果见表3。

从闭路对比试验结果(表3)及其闭路试验过程中矿的分布来看,试样1和试样2采用铜优先浮选-中矿再磨再选工艺(流程二)相对于铜优先浮选-中矿再磨顺序返回工艺(流程一)具有以下比较优势:①适合于分选系统中矿的有效规整,对嵌布关系复杂、蚀变易浮易泥化脉石矿物含量多物料分选,其优势更突出;相对于流程一,试样1和试样2采用流程二试验时,其过程中矿的铜金属累积量分别降低3%、11%;②适合于改善药剂与矿物间作用效率,提高粗选铜浮选速率,流程二相对于流程一,试样1所得的铜粗选作业回收率约提高了5%;③提高精矿产品品质,采用流程二有力规避了试样2易浮脉石矿物的不当上浮,所得的总铜精矿产品中铜含量达到17.94%,相对于流程一所得铜精矿中铜含量提高了3.69%;此外,采用流程二所得的精矿产品中铜回收率略有提高,试样1和试样2所得的总铜回收率分别为91.33%和89.49%。

从两种试样的实验室试验结果来看,对于矿物组成及其嵌布复杂的高硫铜矿分选加工系统,采用铜优先浮选-中矿再磨再选工艺流程具有突出的比较优势,该工艺对于多元矿物高选择性分离、中矿连生体矿物有效解离、易浮易泥化脉石矿物定向调控等,表现出更强的适应性,即其更适合于铜品位降低、硫含量增加、易浮蚀变矿物增加的复杂高硫铜矿的分选加工。

## 5 结论

(1)高硫铜矿生产实践表明,铜的有效分选过程常受限于复杂多元的矿物组成,分布不均的粒度特性,紧密共生的矿物关系,蚀变易浮矿物影响等多种因素,优化分选系统中矿物解离基础及其流程结构,尤其是连生体、易浮脉石含量高的中矿的迁移走向,是提高选铜系统效率的重要手段。

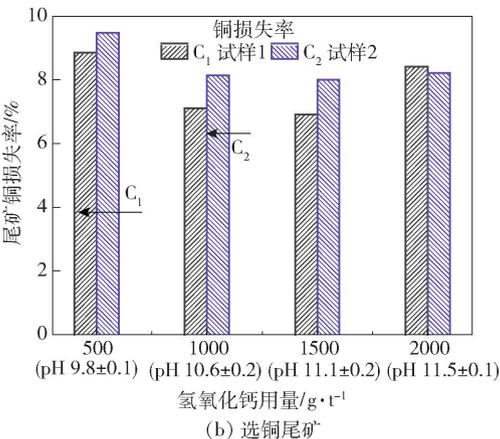
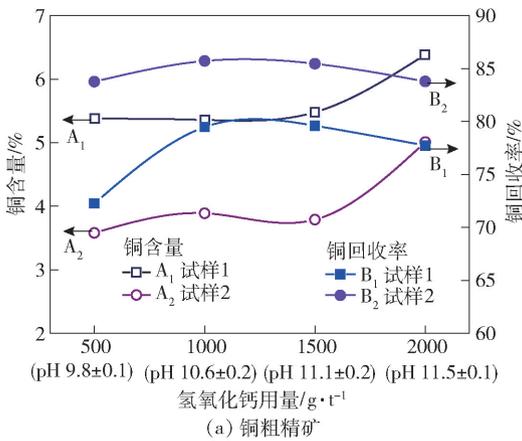


图6 粗选氢氧化钙(pH)影响试验结果

从上述试样1和试样2条件影响试验(粗/精选、中矿分选试验)结果来看,试样1、试样2表达了近似的选铜分选趋势;从两种矿石样品中选铜指标、

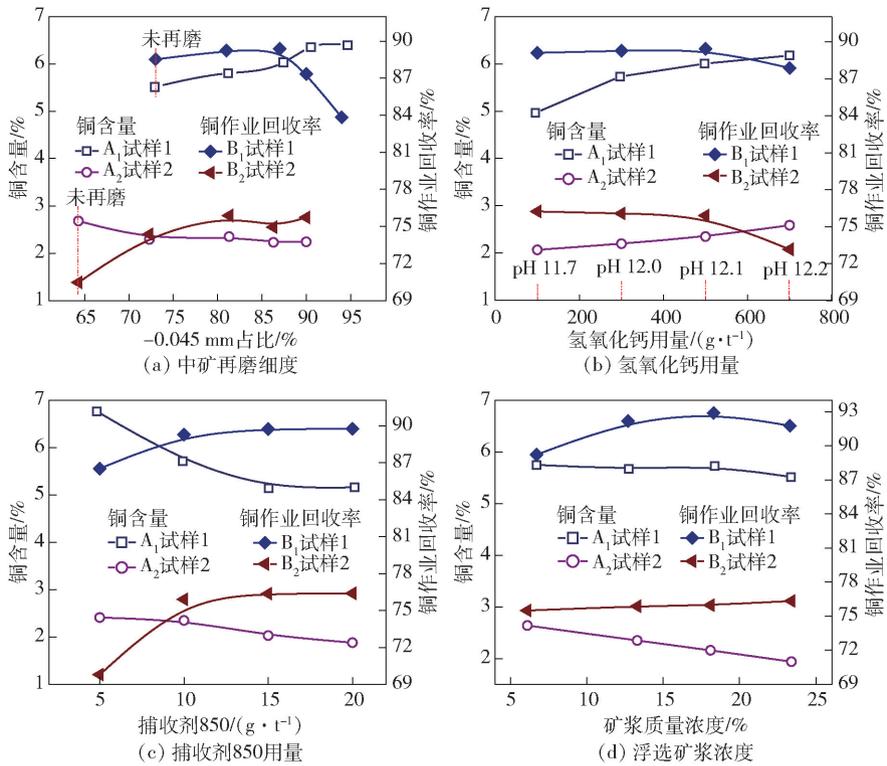


图7 中矿分选条件影响试验结果

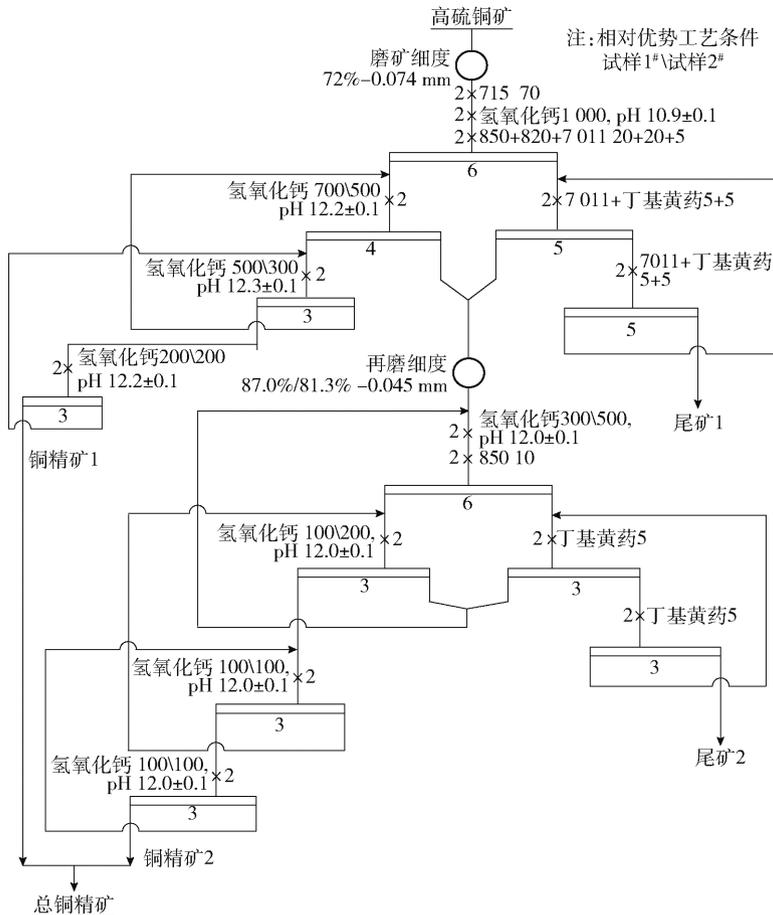


图8 铜优先浮选-中矿再磨再选工艺闭路试验流程

表3 高硫铜矿闭路对比试验结果

试样类型	工艺流程	产品名称	产率/ %	品位/%		回收率/%	
				Cu	S	Cu	S
试样 1	流程一:铜优先浮选 + 中矿再磨顺序返回(图 1)	铜精矿	4.22	19.55	27.77	90.66	8.54
		尾矿	95.78	0.089	13.10	9.34	91.46
		给矿	100.00	0.910	13.72	100.00	100.00
	流程二:铜优先浮选 + 中矿再磨再选(图 8)	铜精矿 1	3.54	19.29	31.32	75.37	8.19
		铜精矿 2	0.80	18.07	23.19	15.96	1.37
		总铜精矿	4.34	19.07	29.80	91.33	9.56
		尾矿 1	84.74	0.074	10.12	6.92	63.38
		尾矿 2	10.92	0.146	33.55	1.75	27.06
		总尾矿	95.66	0.082	12.79	8.67	90.44
		给矿	100.00	0.906	13.53	100.00	100.00
试样 2	流程一:铜优先浮选 + 中矿再磨顺序返回(图 1)	铜精矿	5.35	14.25	19.83	89.27	6.86
		尾矿	94.65	0.097	15.21	10.73	93.14
		给矿	100.00	0.854	15.46	100.00	100.00
	流程二:铜优先浮选 + 中矿再磨再选(图 8)	铜精矿 1	3.21	20.73	27.64	78.75	5.59
		铜精矿 2	0.99	9.17	17.50	10.74	1.09
		总铜精矿	4.20	17.94	25.26	89.49	6.68
		尾矿 1	76.25	0.092	12.39	8.30	58.05
		尾矿 2	19.55	0.094	28.65	2.21	35.27
		总尾矿	95.80	0.093	15.47	10.51	93.32
		给矿	100.00	0.845	15.88	100.00	100.00

(2)两种高硫铜矿试样的分选系统优化试验结果表明,采用铜优先浮选-中矿再磨再选工艺,在系统稳定性及矿物分选效率上具有明显的比较优势,具体地,该工艺能有力降低过程中矿的循环累积,强化铜粗选分选效率,减弱易浮易泥化脉石影响,提高精矿品质等。

(3)实验室条件下流程对比试验结果表明,相对于中矿顺序返回工艺,采用中矿再磨再选工艺处理试样 1 和试样 2 时,所得中矿铜金属累积量分别降低 3%、11%,总铜回收率分别提高了 0.6%、0.2%,且试样 1 铜粗选作业回收率提高超过 5%,试样 2 精矿铜品位提高幅度达 3.6% 以上,铜优先浮选-中矿再磨再选工艺适合于该矿区高硫铜矿的分选加工。

#### [参考文献]

[1] 周平,唐金荣,施俊法,等.铜资源现状与发展态势分析[J].岩石矿物学杂志,2012,31(5):750-756.  
 [2] 李海涛.近代安徽铜陵铜矿资源的调查与认知[J].铜陵学院学报,2021(2):98-102.  
 [3] 吴熙群,胡志强,王立刚,等.我国硫化铜矿选矿技术现状及进展[J].有色金属(选矿部分),2019(5):

9-14.  
 [4] 陈甲斌.中国铜资源保供需要关注的三个问题[J].中国国土资源经济,2022,35(10):4-10.  
 [5] 邓森森.冬瓜山铜矿深部矿石工艺矿物学研究[J].有色金属(选矿部分),2022(1):14-20.  
 [6] NDORO T O, WITIKAL K. A review of the flotation of copper minerals [J]. International Journal of Sciences Basic & Applied Research, 2017, 34(2):145-165.  
 [7] 董敬申,刘全军,盛洁,等.国内外铜矿选矿技术与选矿设备的最新研究及应用[J].有色金属工程,2021,8(11):69-74.  
 [8] 董耗.磁黄铁矿与黄铜矿的交互作用对其浮选行为的影响规律研究[D].赣州:江西理工大学,2021.  
 [9] 薛季玮.铜矿物及黄铁矿浮选动力学及药剂作用机理研究[D].沈阳:东北大学,2019.  
 [10] 赵开乐,闫武,刘飞燕,等.细粒嵌布硫化钼矿铜钼高效分离技术[J].矿产综合利用,2021(2):1-7.  
 [11] 卫亚儒,王宇斌,何延树等.复杂铜硫多金属矿综合利用试验研究[J].有色金属(选矿部分),2021(2):98-103.  
 [12] 朱继生.某高硫难选铜矿石选矿试验研究[J].有色金属(选矿部分),2020(5):53-58.