

# 巴基斯坦某铜矿选矿工艺研究

Beneficiation Process Research on a Copper Mine in Pakistan

俞宏军<sup>1</sup>, 刘兆瑞<sup>2</sup>, 于保强<sup>2</sup>

(1. 中冶集团资源开发有限公司, 北京 100028; 2. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

**摘要:** 巴基斯坦某铜矿为低品位硫化矿, 本研究采用三次粗选、粗精矿再磨后三次精选的流程对其进行处理。试验确定粗选适宜的磨矿细度为  $-0.074$  mm 含量占 65%、石灰用量为 1 400 g/t、捕收剂 AP 用量为 28 g/t、起泡剂 BK202 用量为 25 g/t, 精选时磨矿细度为  $-0.043$  mm 含量占 90%。全流程闭路试验可获得铜品位为 26.35%、回收率为 89.34% 的铜精矿, 此外还可以回收 33.77% 的金和 20.15% 的银。该工艺流程简单且浮选指标较好, 为该矿的有效开发利用提供了技术指导。

**关键词:** 铜矿; 浮选; 再磨

中图分类号: TD952

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2023)03-0074-06

**Abstract:** A copper ore in Pakistan belongs to low grade sulphide ore, and three rougher, rougher concentrate regrinding, three cleaner flotation process was used to treat the ore. Optimum conditions, rougher grinding product size  $P_{65} = 0.074$  mm, dosage of lime 1 400 g/t, dosage of collector AP 28 g/t, and dosage of frother BK202 25 g/t were confirmed, and regrinding product size was confirmed to be  $P_{90} = 0.043$  mm. Final copper concentrate with copper grade 26.35% and copper recovery 89.34% could be obtained through closed flow sheet, besides 33.77% of gold and 20.15% of silver could also be recovered. The process is simple and the flotation index is good, which will provide technical guidance for the development and utilization of the mine.

**Key words:** copper ore; flotation; regrinding

## 1 前言

铜矿是我国急需的战略性矿产资源, 铜具有良好的导电、导热、抗腐蚀等性能, 因而被广泛应用于电力、电器、通讯、交通、航空航天等领域, 对经济建设具有举足轻重的作用<sup>[1]</sup>。世界铜矿资源非常丰富, 但分布不均匀, 主要分布于南美洲和澳大利亚<sup>[2-4]</sup>。我国铜矿资源相对丰富, 但需求量大, 主要依赖进口<sup>[5-8]</sup>。随着我国经济的不断发展, 我国对铜矿资源的需求将持续增大<sup>[9-10]</sup>。

巴基斯坦某铜矿是我国在海外经营的一座矿山, 随着补充勘探工作的不断进行, 在原有采区外围发现了新的矿产资源, 储量较大, 但铜品位较低。低品位铜矿的利用通常具有一定难度<sup>[11]</sup>, 为了实现对该低品位铜矿资源的有效开发利用, 本论文首先对该铜矿矿石性质进行研究, 随后通过浮选试验确定该铜矿适宜的选矿工艺, 以期对矿山选矿工艺的优

化提供技术依据。

## 2 矿石性质

### 2.1 矿石化学元素及矿物组成

该铜矿化学多元素分析结果见表 1, 主要有价元素为铜, 其含量为 0.35%, 其他有价元素钼、金、银的含量很低, 可作为伴生金属进行回收。

通过 X 射线衍射、光学显微镜、扫描电镜及 X 射线能谱分析等手段对矿石中主要矿物组成进行分析, 结果见表 2。可以看出, 该铜矿中铜矿物主要为黄铜矿, 闪锌矿、方铅矿、辉钼矿的含量较低, 主要脉石矿物为石英、斜长石、白云母、绿泥石、石膏等。

### 2.2 矿石中硫化矿物嵌布粒度特性

该矿石中主要硫化矿物为黄铜矿和黄铁矿, 其嵌布粒度对磨矿工艺及磨矿细度的选择具有重要指导意义。采用线段法在显微镜下对黄铜矿和黄铁矿的嵌布粒度进行系统测定, 结果见表 3。通过粒度分析可知, 矿石中黄铜矿嵌布粒度相对较粗, 粒度在 0.074 mm 以上的含量占 47.46%, 在 0.02 ~ 0.104 mm 粒级范围内分布最多, 约占 61.60%, 微细粒级 ( $-0.020$  mm) 含量较少, 约占 7.29%。黄铁矿嵌布粒度较粗, 0.074 mm 以上含量

[作者简介] 俞宏军(1973—), 男, 江西上饶人, 工程师, 从事有色金属铜、金选矿工艺、选矿技术实践及研究工作。

[引用格式] 俞宏军, 刘兆瑞, 于保强. 巴基斯坦某铜矿选矿工艺研究[J]. 中国矿山工程, 2023, 52(3): 74-79.

表1 原矿化学多元素分析结果

元素	Cu	Mo	Pb	Zn	Fe	S	As	C	P	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Au*	Ag*
含量/%	0.35	0.004 2	0.051	0.041	3.80	3.28	0.006 3	0.46	0.11	57.34	14.51	5.39	2.93	2.01	1.24	0.07	2.36

注:表中 Au\*、Ag\* 单位为 g/t。

表2 原矿物组成及相对含量

矿物名称	含量/%	矿物名称	含量/%
黄铜矿	1.01	白云母	18.35
黄铁矿	3.80	绿泥石	9.00
闪锌矿	0.06	石膏	4.19
方铅矿	0.06	白云石	2.81
辉钼矿	0.01	黑云母	2.35
磁铁矿	0.62	高岭石	1.17
毒砂	0.01	方解石	1.12
石英	35.70	磷灰石	0.26
斜长石	19.08	其他	0.40

表3 矿石中黄铜矿和黄铁矿嵌布粒度分布

粒级/mm	黄铜矿		黄铁矿	
	含量/%	累计/%	含量/%	累计/%
+0.589	1.43	1.43	3.04	3.04
-0.589 +0.417	2.87	4.29	8.04	11.08
-0.417 +0.295	4.06	8.35	8.85	19.94
-0.295 +0.208	5.38	13.73	14.30	34.24
-0.208 +0.147	6.83	20.56	14.19	48.43
-0.147 +0.104	10.02	30.58	11.82	60.25
-0.104 +0.074	16.87	47.46	13.44	73.69
-0.074 +0.043	21.26	68.72	12.58	86.26
-0.043 +0.020	23.44	92.16	10.24	96.50
-0.020 +0.015	4.44	96.60	2.02	98.53
-0.015 +0.010	2.85	99.45	1.20	99.72
-0.010	0.55	100.00	0.28	100.00

占 73.69%, 且主要分布在 0.02 ~ 0.295 mm 粒级范围内, 占 76.57%。总体来说, 该矿石中黄铜矿和黄铁矿嵌布粒度相对较粗, 在磨矿过程中容易解离, 有利于后续浮选回收。

### 2.3 矿石中铜金物相分析

矿石中铜、金的化学物相分析结果见表4、表5。可以看出, 该矿中铜主要以硫化铜为主, 占 99.42%, 氧化铜含量很少, 说明该矿属于相对易选的硫化矿石。原矿中裸漏金占 14.29%, 硫化物包裹金占 28.57%, 其他金主要被脉石矿物包裹, 说明该矿中金回收难度较大。

表4 铜物相分析结果

相别	氧化铜	硫化铜	合计
铜含量/%	0.002	0.34	0.342
分布率/%	0.58	99.42	100.00

表5 金物相分析结果

相别	裸露金	硫化物包裹金	其他矿物包裹金	合计
金含量/g·t <sup>-1</sup>	0.01	0.02	0.04	0.07
分布率/%	14.29	28.57	57.14	100.00

## 3 试验结果与讨论

工艺矿物学研究结果表明, 该铜矿属于相对易选硫化矿, 三次粗选流程相对于常规一次粗选两次扫选流程能够最大程度使目的矿物得到回收并进入到精选作业, 有利于提高目的矿物的回收率。因此, 本研究首先采用三次粗选流程对该铜矿进行粗选条件优化试验, 粗选试验流程如图1所示。粗选条件优化试验包括磨矿细度试验、石灰用量试验、捕收剂种类及用量试验、硫化钠用量试验、起泡剂种类及用量试验。粗选条件优化后进行精选磨矿细度试验, 最后进行三次粗选-粗精矿再磨-三次精选的闭路试验。

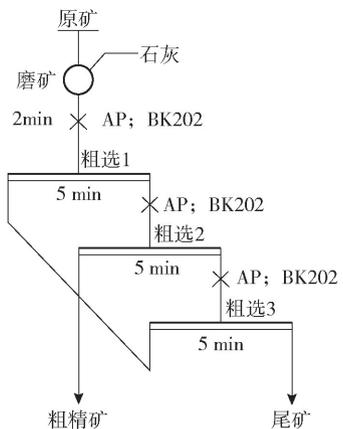


图1 粗选条件试验流程

### 3.1 粗选磨矿细度对铜回收的影响

本试验固定石灰用量为 1400 g/t, 捕收剂 AP 用量为 28 g/t, 起泡剂 BK202 用量为 20 g/t, 磨矿细度

为变量,分别取-0.074 mm 粒度含量占55%、60%、65%、70%、75%、80%,试验结果如图2所示。由图2可知,随着磨矿细度增加,粗精矿中铜品位先升高后逐渐降低,铜回收率逐渐升高,当磨矿细度-0.074 mm含量超过65%后,铜回收率增加幅度变缓。综合考虑,该矿适宜的粗选磨矿细度为-0.074 mm含量占65%。

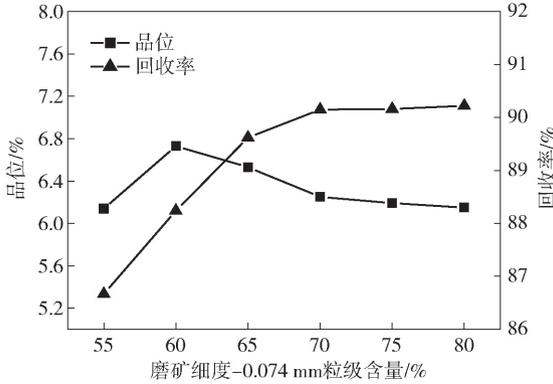


图2 粗选磨矿细度对铜回收的影响

为了进一步探索磨矿细度对铜矿物回收的影响,试验对不同磨矿细度下黄铜矿和黄铁矿的解离度进行统计分析,结果见表6、表7。根据解离度的统计结果可知,随着磨矿细度的增加,黄铜矿和黄铁矿的解离度也增加。当磨矿细度-0.074 mm 含量占60%时,黄铜矿的单体解离度为59.97%,解离情况不够,且连生体部分主要为黄铜矿与脉石的贫连生体;黄铁矿的解离度为68.95%,但是黄铁矿的富连生体部分含量较高,单体和富连生体合计达92.11%。当磨矿细度达到-0.074 mm 含量占65%时,黄铜矿的单体解离度达66.01%,单体和富连生体合计占76.71%;黄铁矿的解离度为72.82%。当磨矿细度达到-0.074 mm 占70%时,黄铜矿的单体解离度达68.81%,单体和富连生体合计占82.82%;黄铁矿的单体解离度为75.88%,单体和富连生体合计占94.91%。通常磨矿细度越大矿物解离度越大,浮选回收率越高,但磨矿细度越大则磨矿能耗也就越大,因此需要技术经济比较来确定

表6 不同磨矿细度下黄铜矿的解离特性

-0.074 mm 含量/%	单体/%	与脉石连生/%				与黄铁矿连生/%
		0~1/4	1/4~1/2	1/2~3/4	>3/4	
60%	59.97	14.61	12.93	6.62	4.99	0.88
65%	66.01	10.80	11.57	5.93	4.77	0.92
70%	68.81	9.05	7.91	4.25	9.76	0.22
80%	72.67	4.73	5.05	4.02	12.95	0.58

表7 不同磨矿细度下黄铁矿的解离特性

-0.074 mm 含量/%	单体/%	与脉石连生/%				与黄铁矿连生/%
		0~1/4	1/4~1/2	1/2~3/4	>3/4	
60%	68.95	3.28	4.36	7.65	15.51	0.25
65%	72.82	2.85	3.21	6.16	14.63	0.33
70%	75.88	2.32	2.51	5.21	13.82	0.26
80%	82.65	1.83	2.18	3.79	9.17	0.38

最佳的磨矿细度。

### 3.2 粗选石灰用量对铜回收的影响

铜矿浮选过程中石灰添加不但可以有效抑制黄铁矿,同时也可以调整矿浆 pH 值,改善浮选环境。本试验磨矿细度为-0.074 mm 含量占65%,捕收剂 AP 用量为28 g/t,起泡剂 BK202 用量为20 g/t,石灰用量分别取1 000 g/t、1 200 g/t、1 400 g/t、1 600 g/t、1 800 g/t、2 000 g/t,试验结果如图3所示。由图3可知,随着石灰用量的增加,粗精矿中铜品位

先升高后降低,铜回收率逐渐升高,当石灰用量超过1 400 g/t 后,铜回收率增加幅度变缓。因此,粗选适宜的石灰用量为1 400 g/t,矿浆 pH 值为9.5。

### 3.3 粗选捕收剂种类及用量对铜回收的影响

为了探索出针对该铜矿的适宜捕收剂,试验选择 HB421、Z-200、AP、BK404 以及异丙基黄药5种捕收剂进行浮选试验,试验时只进行一次粗选,磨矿细度-0.074 mm 含量占65%,石灰用量为1 400 g/t,起泡剂 BK202 用量为20 g/t,试验结果见

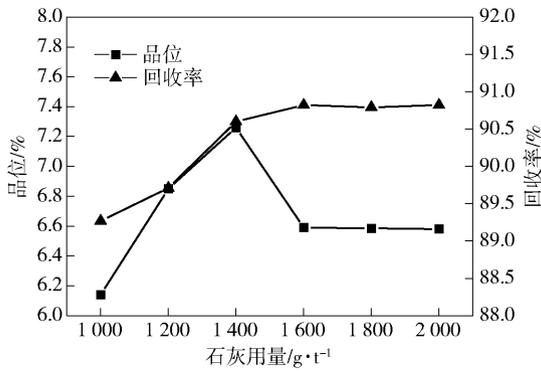


图3 粗选石灰用量对铜回收的影响

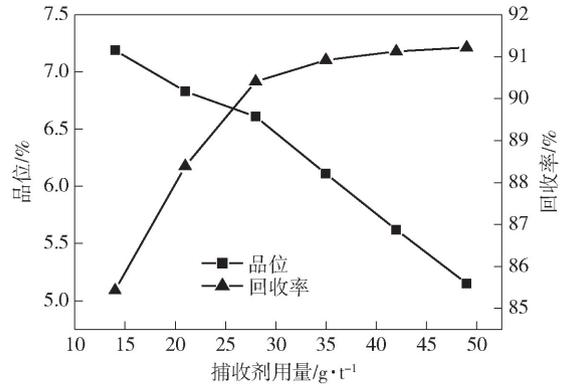


图4 粗选捕收剂用量对铜回收的影响

表8。可以看出当采用AP捕收剂时,粗精矿中铜品位最高,同时铜的回收率也较高,说明AP捕收剂对铜矿物具有较好的选择性,同时具有较强的捕收能力。HB421捕收剂得到的粗精矿中铜品位较低,选择性较差。BK404和异丙基黄药捕收能力较强,但对铜矿物的选择性比AP捕收剂略差。因此确定AP作为优先浮选的捕收剂。

表8 不同捕收剂对铜回收的影响

捕收剂种类及用量	产品名称	品位/%	回收率/%
HB421 28 g/t	粗精矿	4.65	86.57
Z-200 28 g/t	粗精矿	7.49	86.29
AP 28 g/t	粗精矿	10.89	88.78
BK404 28 g/t	粗精矿	7.02	88.63
异丙基黄药 40 g/t	粗精矿	6.18	88.93

本次试验磨矿细度固定为-0.074 mm含量占65%,石灰用量为1400 g/t,起泡剂BK202用量为20 g/t,捕收剂AP用量分别取14 g/t、21 g/t、28 g/t、35 g/t、42 g/t、49 g/t,试验结果如图4所示。由图4可知,随着捕收剂用量的增加,粗精矿中铜品位逐渐降低,铜回收率逐渐升高,当捕收剂用量超过28 g/t后,铜回收率增加趋势趋于平缓。综合考虑,粗选作业适宜的捕收剂用量为28 g/t。

### 3.4 粗选硫化钠用量对铜回收的影响

为了探索硫化钠用量对铜回收的影响,试验固定磨矿细度-0.074 mm含量占65%、石灰用量为1400 g/t、捕收剂AP用量为28 g/t、起泡剂BK202用量为20 g/t,硫化钠用量分别取0 g/t、25 g/t、50 g/t、75 g/t、100 g/t,试验结果见图5。从试验结果可以看出,随着硫化钠用量的增加,粗精矿中铜品位逐渐降低,铜回收率逐渐增加但不显著,说明黄铁矿受到硫化钠的活化,大量上浮,综合考虑,粗选时

不添加硫化钠。

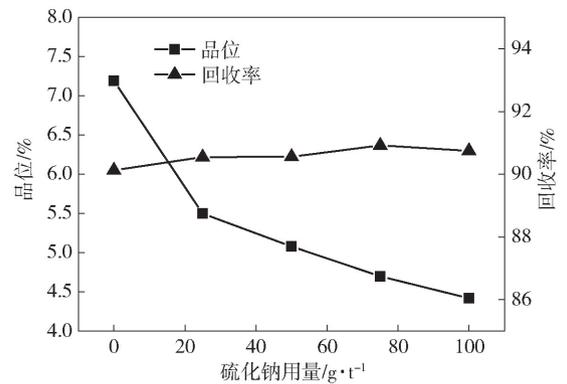


图5 粗选硫化钠用量对铜回收的影响

### 3.5 粗选起泡剂种类和用量对铜回收的影响

为了选择适宜的起泡剂,试验选择了MIBC、BK202、BK204、2#油四种起泡剂进行浮选试验,试验过程中磨矿细度为-0.074 mm含量占65%,石灰用量固定为1400 g/t,捕收剂AP用量为28 g/t,试验时只进行一次粗选,试验结果见表9。可以看出,当以BK202为起泡剂时粗精矿中铜的回收率最高,但铜品位略低。MIBC、BK204以及2#油为起泡剂时铜粗精矿中铜的品位较高,但铜的回收率略低。粗选阶段应尽可能保证较高的回收率,粗精矿的品位可以通过后续精选作业进一步提高,因此试验确定选择BK202为起泡剂。

表9 不同起泡剂对铜回收的影响

捕收剂种类及用量	产品名称	品位/%	回收率/%
MIBC 20 g/t	粗精矿	11.95	86.23
BK202 20 g/t	粗精矿	9.98	87.83
BK204 20 g/t	粗精矿	11.33	85.92
2#油 20 g/t	粗精矿	14.02	87.04

在磨矿细度为-0.074 mm占65%,石灰用量

为 1 400 g/t,捕收剂用量为 28 g/t 的条件下进行起泡剂用量试验。本次试验起泡剂为 BK202,其用量分别取 15 g/t、20 g/t、25 g/t、30 g/t、35 g/t,试验结果如图 6 所示。由图 6 可知,随着起泡剂用量的增加,粗精矿中铜的品位逐渐降低,回收率逐渐升高,当起泡剂用量达到 25 g/t 后铜回收率增加幅度变缓,综合考虑,粗选起泡剂的用量取 25 g/t。

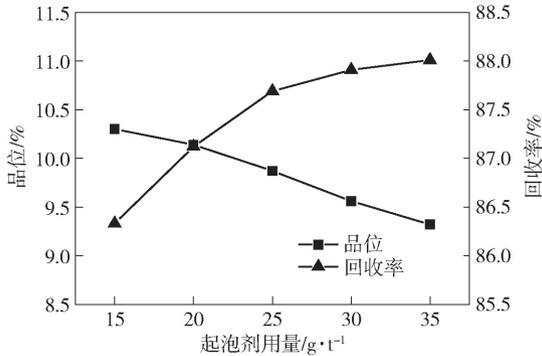


图 6 粗选捕收剂用量对铜回收的影响

### 3.6 粗选矿浆浓度对铜回收的影响

在磨矿细度为 -0.074 mm 含量占 65%、石灰用量为 1 400 g/t、捕收剂 AP 用量 28 g/t、起泡剂 BK202 用量 25 g/t 的条件下,进行浮选浓度试验,矿浆浓度分别取 25%、29%、33%、37%、41%,试验结果如图 7 所示。从试验结果可以看出,随着浮选浓度的增加,粗精矿中铜回收率均呈先升高后降低趋势,铜的品位先保持不变,当矿浆浓度超过 33% 之后品位开始下降,因此粗选浮选浓度控制在 33% 左右较为适宜。

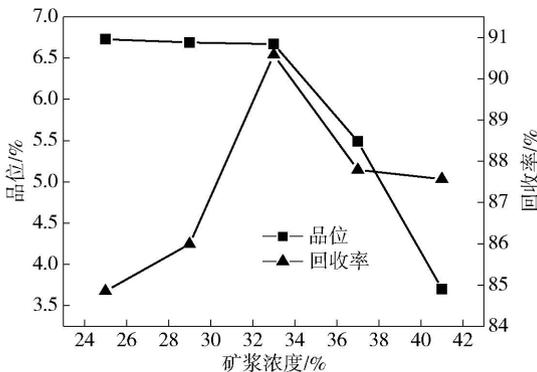


图 7 矿浆浓度对铜回收的影响

### 3.7 精选磨矿细度对铜回收的影响

粗选作业能够得到较高回收率的粗精矿,但铜品位较低,因此需要再磨并进行精选,粗精矿再磨再选试验流程如图 8 所示。粗精矿再磨时石灰添加量

为 200 g/t,捕收剂 AP 添加量为 3.5 g/t,再磨细度分别取 -0.043 mm 含量占 79%、87%、90%、92%、95%,试验结果如图 9 所示。由图 9 可知,随着磨矿细度的增加,铜精矿中铜的品位和回收率均逐渐升高,精选作业适宜的磨矿细度为 -0.043 mm 含量占 90%。

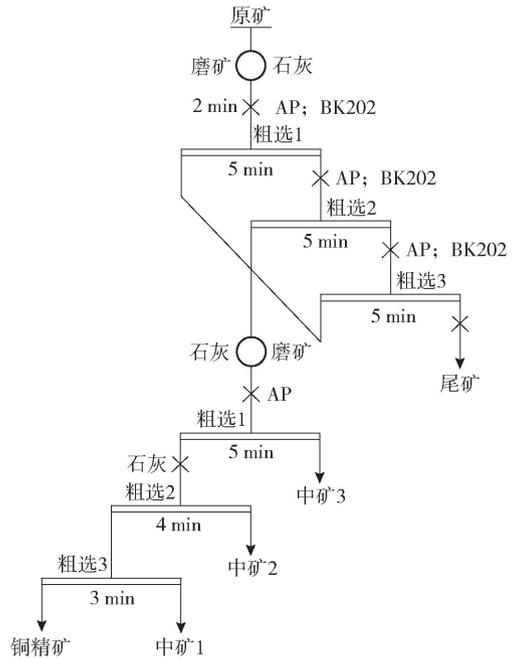


图 8 粗精矿再磨再选试验流程

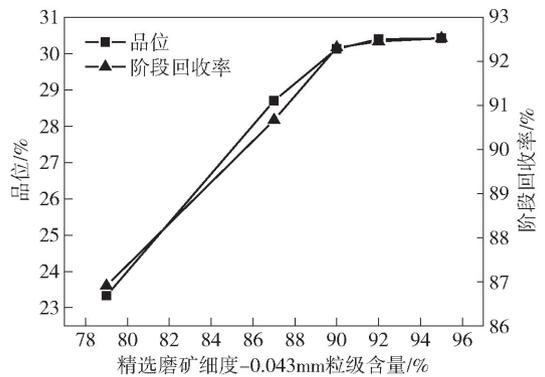


图 9 粗精矿精选磨矿细度对铜回收的影响

### 3.8 全流程闭路试验

该矿全流程闭路试验如图 10 所示,原矿一段磨矿至 -0.074 mm 占 65%,然后进行三次粗选,第三次粗选后的尾矿为最终浮选尾矿,三次粗选的精矿合并后进行再磨,再磨磨矿细度为 -0.043 mm 占 90%,粗精矿再磨后进行三次精选,三次精选的中矿顺序返回。该矿闭路试验指标见表 10,最终铜精矿铜的品位为 26.35%,铜的回收率为 89.34%,另可

回收 33.77% 金和 20.15% 银。该工艺流程简单且浮选指标较好,为该矿的有效开发利用提供了技术依据。

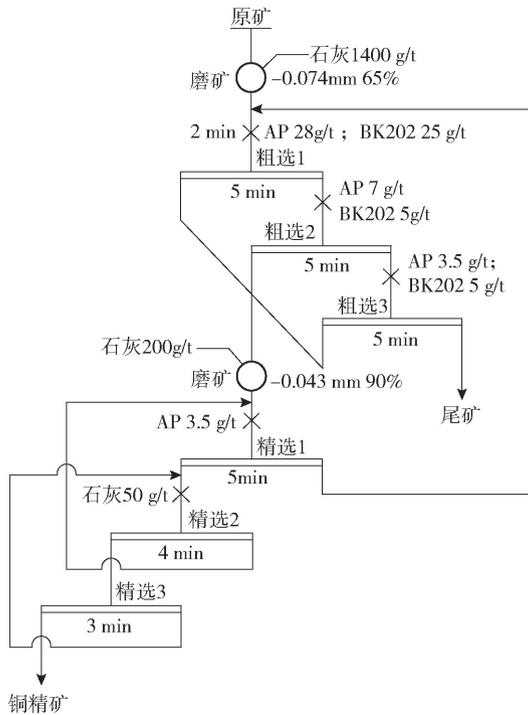


图 10 全流程闭路浮选试验流程

表 10 全流程闭路浮选试验结果

产品名称	产率/%	品位/%			回收率/%		
		Cu	Au*	Ag*	Cu	Au	Ag
铜精矿	1.194	26.35	2.11	39.47	89.34	33.77	20.15
尾矿	98.806	0.038	0.05	1.89	10.66	66.23	79.85
原矿	100.00	0.35	0.07	2.34	100.00	100.00	100.00

注:表中 Au\*、Ag\* 的单位为 g/t。

## 4 结论

通过对该铜矿进行工艺矿物学研究及浮选试验研究得到以下结论。

(1) 该铜矿铜的品位为 0.35%, 主要含铜矿物为黄铜矿, 脉石矿物主要为石英、斜长石、白云母、绿

泥石、石膏等。

(2) 粗选适宜的磨矿细度为 -0.074 mm 含量占 65%, 矿浆浓度为 33%, 石灰用量为 1 400 g/t, 捕收剂 AP 用量为 28 g/t, 起泡剂 BK202 用量为 25 g/t, 精选时适宜的磨矿细度为 -0.043 mm 含量占 90%。

(3) 采用三次粗选、三次精选以及粗精矿再磨、精选中矿顺序返回的流程进行全流程闭路试验, 最终可获得铜品位为 26.35%、回收率为 89.34% 的铜精矿, 此外还可以回收 33.77% 的金和 20.15% 的银。

## [参考文献]

- [1] 杨建锋, 马腾, 王尧, 等. 社会经济发展对铜矿资源勘查驱动传导机制分析[J]. 资源科学, 2018, 40(3): 526-534.
- [2] 江少卿. 全球铜矿资源分布[J]. 世界有色金属, 2018(2): 1-3.
- [3] 元春华, 韩九曦, 刘大文, 等. 全球铜矿资源潜力探析[J]. 中国矿业, 2012, 21(11): 1-5.
- [4] 张强, 钟琼, 贾振宏, 等. 世界铜矿资源与矿山铜生产状况分析[J]. 矿产与地质, 2014(2): 196-201.
- [5] 熊靓辉, 李调丽, 张会琼, 等. 国内外铜矿资源供需现状及趋势分析[J]. 矿产勘查, 2019, 10(2): 159-164.
- [6] 任彦琪. 中国铜矿资源的现状及潜力分析[J]. 中国金属通报, 2021(1): 5-6.
- [7] 张亮, 杨卉芑, 赵军伟, 等. 世界铜矿资源系列研究之一——资源概况及供需分析[J]. 矿产保护与利用, 2015(5): 63-67.
- [8] 刘立波, 李涛, 安生婷, 等. 浅谈我国铜矿资源现状与勘查技术要点[J]. 地球, 2016(4): 184-184.
- [9] 李巍. 我国铜矿资源形势与可持续发展[J]. 房地产导刊, 2014(21): 379-379.
- [10] 张悦婷. 我国铜矿资源产业布局与结构调整分析[J]. 西部资源, 2015(5): 131-132.
- [11] 贾振宏, 胡凤英. 低品位铜矿资源开发利用状况和选矿工艺技术综述[J]. 有色矿冶, 2014(2): 22-24.