

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2021.02.010

某低品位铜矿磨机给矿预先分级—浮选试验

何美丽

(紫金矿业集团股份有限公司, 福建 上杭 364200)

摘要: 铜矿物过磨是浮选时铜损失的原因之一。磨机给矿预先分级—粗粒磨矿—合并再浮选工艺可在一定程度上减少磨矿过程中 $-10\ \mu\text{m}$ 难选矿泥的产生, 减少 $-10\ \mu\text{m}$ 粒级铜浮选损失, 从而提高铜的回收率。进行了某低品位铜矿的磨机给矿直接磨矿浮选与磨机给矿预先分级—粗粒磨矿—合并再浮选对比试验。闭路试验结果表明, 控制铜精矿的铜品位相当时, 磨机给矿直接磨矿浮选的铜回收率为89.87%, 磨机给矿预先分级—粗粒磨矿—合并再浮选的铜回收率为91.19%, 较磨机给矿直接磨矿浮选的铜回收率高1.32个百分点。

关键词: 低品位铜矿; 浮选; 过磨; 预先分级

中图分类号: TD923

文献标志码: A

文章编号: 1005-7854(2021)02-0062-08

Pre-classification and flotation experiment of a low grade copper mine

HE Mei-li

(Zijin Mining Group Co. Ltd., Shanghang 364200, Fujian, Chian)

Abstract: Overgrinding of copper minerals is one of the causes of copper loss during flotation. The process of pre-classifying—coarse-grained grinding—combined refloatation can reduce the generation of $-10\ \mu\text{m}$ refractory slime in the grinding process to a certain extent, and reduce the copper loss of $-10\ \mu\text{m}$ in flotation, so as to improve the recovery of copper. In this paper, a comparative experiment was carried out between the mine mill direct grinding flotation of a low grade copper feed and the mill feed pre-classified-coarse-grained grinding-combined re-flotation. Closed circuit experiment results show that the control of the copper grade of copper concentrate is quite, mill feed directly grinding flotation of copper recovery rate was 89.87%, the mill feed graded in advance-grade coarse grinding-merger and flotation of copper recovery rate was 91.19%, which is 1.32 percentage points higher.

Key words: low grade copper ore; flotation; overgrinding; pre-classification

铜是重要的有色金属,也是国民经济建设中不可缺少的一种战略性矿产资源,对经济的增长和资源的消费会产生极大地促进作用^[1-3]。全球铜资源储量最丰富的前三国分别是智利、澳大利亚和秘鲁,这三国的铜资源储量占全球总储量的52.8%^[4]。我国是全球最大的铜资源消费国,接近全球的一半^[5],但铜储量少,仅占全球的3.9%^[4],铜资源保障程度低,对外依存度高达70%以上^[6-8]。我国铜资源特点是富矿少、贫矿多,

铜矿资源以硫化矿为主,矿山铜产量182万t,仅占全球的8.8%^[4-5]。目前,我国很多铜矿山已进入开采后期,富矿、易选矿产资源已近枯竭^[7-8],因此,如何高效、经济地开发利用低品位铜矿资源,对缓解我国优质铜矿供需矛盾突出,提升铜矿资源的保障年限和铜工业的国际竞争力具有十分重要的意义。

对某低品位铜矿浮选工艺各产品粒度筛析考查中发现,浮选给矿 $-10\ \mu\text{m}$ 产率约为20%,且该产率的铜金属占有率为10%~15%,选铜尾矿中 $-10\ \mu\text{m}$ 粒级损失的铜金属量占总尾矿的40%左右,占浮选原矿的5%左右。铜矿物过磨,且微细

收稿日期: 2021-03-06

作者简介: 何美丽, 学士, 工程师, 主要研究方向为有色金属选冶。

粒铜矿物回收率低是浮选时铜损失的主要原因之一^[9]。为提高该资源铜浮选回收率，开展该资源磨机给矿预先分级—粗粒磨矿—合并再浮选工艺研究。

1 试验

1.1 原料性质

取某低品位铜矿入磨矿石 500 kg，按图 1 制备试验样品。该低品位铜矿的化学多元素分析结果见表 1、矿物组成见表 2、磨机给矿粒度筛分结果见表 3、预先分级—74 μm 矿样的粒度筛析结果见表 4。

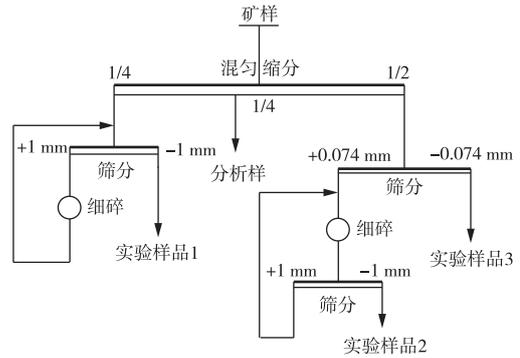


图 1 试验样品加工流程

Fig. 1 Flowsheet of experimental samples

表 1 入磨矿石化学多元素分析结果

Table 1 Chemical multi-element analysis results of grinding ore

Cu	Au ¹⁾	Ag ¹⁾	Fe	S	As	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂
0.47	0.11	3.82	3.34	3.67	0.018	0.026	0.018	11.74	72.36

注：1)单位为 g/t

表 2 入磨矿石的矿物组成

Table 2 Mineral composition of grinding ore

矿物	矿物含量	矿物	矿物含量	矿物	矿物含量
自然金	微量	辉钼矿	0.004	磷铝钙石	0.069
银矿物	微量	方铅矿	0.002	金红石	0.191
辉铜矿-蓝辉铜矿	0.346	石英	66.998	锆石	0.037
铜蓝	0.178	长石	0.103	砷铅铁矿	0.032
硫砷铜矿	0.082	绢云母	1.061	纤磷钙铝石	0.066
硫锡锌铜矿	0.006	地开石	13.300	氯黄晶	0.058
黝铜矿-碲黝铜矿	0.007	明矾石	10.748	重晶石	0.023
黄铜矿	0.005	方解石	0.006	水铝石	0.011
斑铜矿	0.006	白云石	0.006	其他	0.145
黄铁矿	5.550	赤铁矿	0.564		
水胆矾	0.005	褐铁矿	0.368		
闪锌矿	0.022	磷钼矿	0.001	合计	100.0

表 3 入磨矿石粒度筛析结果

Table 3 Size sieve analysis results of grinding ore

粒级/mm	产率/%		铁品位/%	金属分布率/%	
	个别	累计		个别	负累积
+1	61.29	100.0	0.37	48.69	100.0
-1 000+212	23.12	38.71	0.51	25.32	51.31
-212+150	0.98	15.59	0.84	1.77	25.99
-150+74	3.14	14.61	0.98	6.61	24.23
-74+45	2.08	11.47	0.92	4.11	17.62
-45+38	0.82	9.39	0.96	1.69	13.51
-38+20	1.87	8.57	1.21	4.86	11.82
-20+10	2.78	6.7	0.56	3.34	6.96
-10	3.92	3.92	0.43	3.62	3.62
合计	100.0	—	0.47	100.0	—

表 4 预先分级-74 μm 样品粒度筛析结果

Table 4 Screening analysis results of -74 μm sample size of pre-classification

粒度/mm	产率/%		铜品位/%	金属分布率/%	
	个别	负累计		个别	负累积
-74+45	18.13	100.0	0.92	23.32	100.0
-45+38	7.15	81.87	0.96	9.59	76.68
-38+20	16.30	74.72	1.21	27.57	67.09
-20+10	24.24	58.41	0.56	18.97	39.51
-10	34.18	34.18	0.43	20.54	20.54
合计	100.0	—	0.72	100.0	—

由表 1 可知,原矿主要有价元素为金和铜,伴生极少量的银,有害元素砷含量较低。

由表 2 可知,入磨前矿石中铜矿物种类较复杂,有次生硫化铜矿物(包括辉铜矿、铜蓝、斑铜矿和硫锡锌铜矿等)和原生硫化铜矿物(包括硫砷铜矿、黄铜矿、黝铜矿-碲黝铜矿);金以自然金为主;银矿物有碲金银矿和碲银矿;其他硫化矿物主要为黄铁矿。脉石矿物以石英为主,其次为黏土类的地开石和硫酸盐类矿物明矾石。

由表 3 可知,入磨原矿石-74 μm 占比为 11.47%,含铜 0.72%,金属占有率为 17.62%。

由表 4 可知,相对入磨原矿石预先分级出的-74 μm 后的矿样,-10 μm 粒级占比达 34.18%,金属占有率 20.54%。

1.2 试验方案

1)预先分级浮选试验。将入磨矿石预先分级,以-74 μm 矿石为原料,分别按工艺流程图 2、

图 3 开展开路浮选和闭路浮选试验。

2)直接磨矿浮选试验。以入磨矿石为原料,直接将入磨矿石磨至规定的粒度,然后分别按工艺流程图 2、图 3 开展开路浮选和闭路浮选试验。

3)预先分级-粗粒磨矿-合并再浮选试验。入磨给矿预先分级-74 μm 矿,再将+74 μm 粒级先磨矿至-74 μm 粒级占 57%,然后按预先分级-74 μm 粒级产率与+74 μm 粗粒级磨矿产品合并,最后分别按工艺流程图 2、图 3 开展开路浮选和闭路浮选试验。

2 结果及讨论

2.1 预先分级-74 μm 矿浮选试验

2.1.1 石灰用量试验

取入磨原矿预先分级-74 μm 试验矿样 1 kg,采用 3 L 浮选机进行浮选试验,试验流程见图 2,试验结果见表 5。

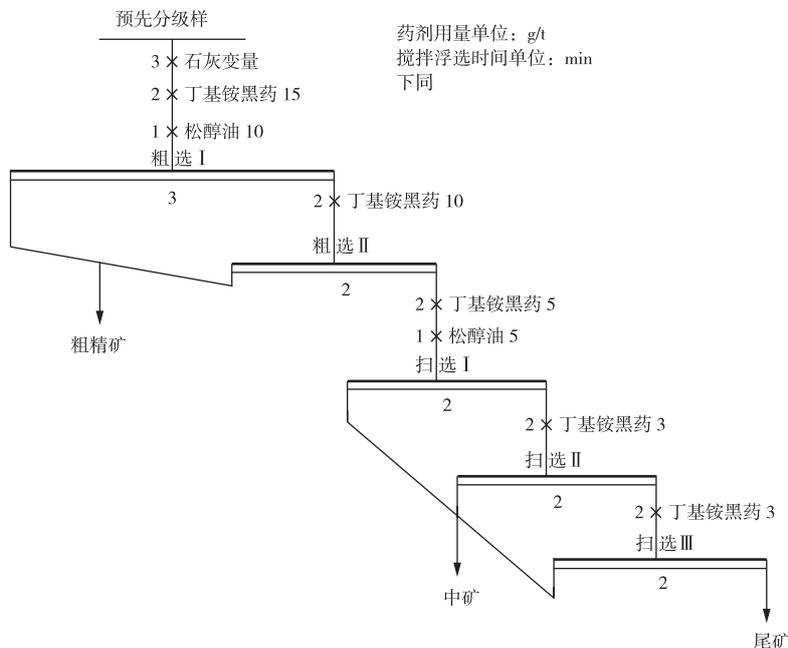


图 2 预先分级浮选试验流程

Fig. 2 Flowsheet of the pre-classification flotation test

表 5 石灰用量对预先分级—74 μm 矿石浮选结果的影响Table 5 Effect of lime dosage on flotation results of pre graded —74 μm ore

石灰用量/($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)	pH 值	产品	产率/%	Cu 品位/%	回收率/%
1.0	10.24	粗精矿	10.28	5.81	82.76
		中矿	4.49	1.12	6.97
		尾矿	85.23	0.087	10.27
		合计	100.0	0.72	100.0
1.5	10.72	粗精矿	9.03	6.91	86.34
		中矿	3.04	1.05	4.42
		尾矿	87.93	0.076	9.25
		合计	100.0	0.72	100.0
2.0	11.48	粗精矿	8.22	7.21	82.07
		中矿	4.85	1.02	6.85
		尾矿	86.93	0.092	11.08
		合计	100.0	0.72	100.0
2.5	12.06	粗精矿	6.82	7.84	74.486
		中矿	5.98	1.52	12.68
		尾矿	86.80	0.106	12.83
		合计	100.0	0.72	100.0

由表 5 可知，预先分级—74 μm 矿石浮选适宜的 pH 值为 10.72，此时石灰用量为 1.5 kg/t，在该条件下浮选得到的铜粗精矿含铜 6.91%，铜回收率 86.34%。

2.1.2 粗选丁基铵黑药用量试验

预先分级—74 μm 矿粗选石灰用量 1.5 kg/t，粗选变化丁基铵黑药用量，试验流程同图 2，试验结果见表 6。

表 6 丁基铵黑药用量对预先分级—74 μm 矿石浮选结果的影响Table 6 Effect of butylamine black agent dosage on flotation results of pre classification —74 μm ore

粗选丁基铵黑药用量/($\text{g} \cdot \text{t}^{-1}$)	产品	产率/%	Cu 品位/%	回收率/%
10+10	粗精矿	7.21	8.38	83.64
	中矿	2.99	1.04	4.30
	尾矿	89.8	0.097	12.06
	合计	100.0	0.72	100.0
15+10	粗精矿	9.03	6.91	86.34
	中矿	3.04	1.05	4.42
	尾矿	87.93	0.076	9.25
	合计	100.0	0.72	100.0
20+10	粗精矿	10.43	5.94	86.14
	中矿	3.03	1.12	4.72
	尾矿	86.54	0.076	9.14
	合计	100.0	0.72	100.0
20+15	粗精矿	10.51	5.87	86.03
	中矿	3.02	1.17	4.93
	尾矿	86.47	0.075	9.04
	合计	100.0	0.72	100.0

由表 6 可知，随粗选丁基铵黑药用量的增加，铜粗选粗精矿铜的回收率上升，但粗选丁基铵黑药用量超 25 g/t 后，丁基铵黑药用量的增加对铜粗选回收率的影响甚微。另外，

丁基铵黑药剂用量过大，不仅造成药剂成本增加，而且造成粗精矿精选时铜精矿品位较难提高。综合考虑，粗选丁基铵黑药用量选择 (15+10) g/t。

2.1.3 闭路试验

入磨原矿预先分级—74 μm 粒级矿单独浮选闭

路试验流程见图 3，试验结果见表 7。

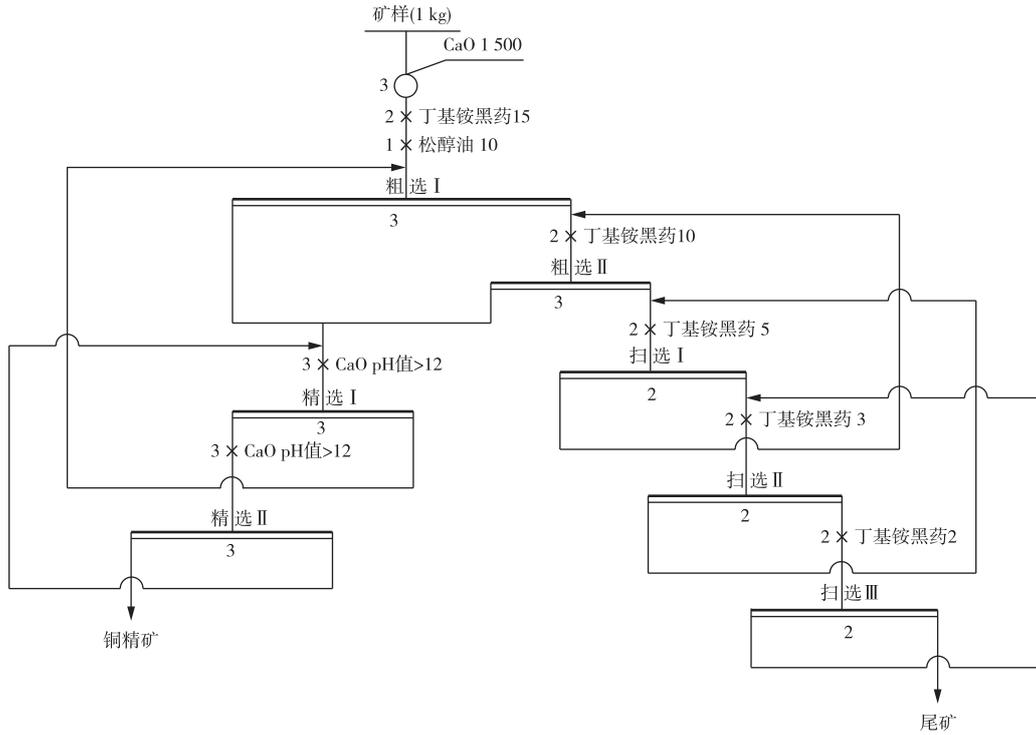


图 3 闭路试验流程

Fig. 3 Flowsheet of the closed circuit test

表 7 预先分级—74 μm 矿浮选闭路试验结果

Table 7 Closed circuit flotation test results of

pre-classification —74 μm ore /%			
产品	产率	Cu 品位	回收率
精矿	2.96	21.14	86.34
尾矿	97.04	0.10	13.66
合计	100.0	0.72	100.0

由表 7 可知，入磨原矿预先分级—74 μm 矿浮选闭路试验获得的铜精矿产率 2.96%，含铜品位 21.14%，回收率 86.34%。

2.2 直接磨矿浮选试验

入磨矿石直接磨矿至—74 μm 粒级占 60%，分别采用图 2、图 3 试验流程和相应的工艺条件进行开路和闭路试验，试验结果分别见表 8 和表 9。

表 8 入磨矿石直接磨矿浮选开路试验结果

Table 8 Open-circuit experimental results of direct

grinding flotation of ground ore /%			
产品	产率	铜品位	铜回收率
粗精矿	3.21	13.07	89.21
中矿	2.07	0.85	3.74
尾矿	94.72	0.035	7.05
合计	100.0	0.4703	100.0

表 9 入磨矿石直接磨矿浮选闭路试验结果

Table 9 Closed-circuit experimental results of direct

grinding flotation of ground ore /%			
产品	产率	Cu 品位	回收率
精矿	1.61	25.48	89.87
尾矿	98.39	0.047	10.13
合计	100.0	0.46	100.0

由表 9 可知，采用与预先分级—74 μm 矿相同流程和工艺条件浮选时，入磨矿石直接磨矿闭路试验获得产率 1.61%、铜品位 25.48%和回收率 89.87%的铜精矿，精矿铜品位和回收率分别较预先分级—74 μm 矿高 4.38 和 3.53 百分点，这是因为预先分级—74 μm 矿的粒度细、矿泥含量高，—10 μm 粒级含量高达 34.18%，单独浮选粗精矿产率较大，导致浮选难度大、精矿铜品位偏低。

2.3 预先分级—粗粒磨矿—合并再浮选试验

2.3.1 石灰用量试验

粗选石灰用量按 (15+10)g/t 加入，按图 2 试验流程开展磨机给矿预先分级—粗粒磨矿—合并再浮选的石灰用量试验，试验结果见表 10。

表 10 预先分级—粗粒磨矿—合并粗选石灰用量试验结果

Table 10 Lime dosage experimental results of preclassification—coarse-grained grinding—combined coarse separation

石灰用量/(kg·t ⁻¹)	pH 值	产品	产率/%	铜品位/%	铜回收率/%
1	10.07	粗精矿	7.81	5.58	92.75
		中矿	1.36	0.77	2.23
		尾矿	90.83	0.026	5.03
		合计	100.0	0.47	100.0
1.5	10.72	粗精矿	5.14	8.42	92.37
		中矿	2.58	0.42	2.31
		尾矿	92.28	0.027	5.32
		合计	100.0	0.47	100.0
2	11.16	粗精矿	3.96	10.81	90.88
		中矿	2.42	0.46	2.36
		尾矿	93.62	0.034	6.76
		合计	100.0	0.47	100.0
2.5	11.33	粗精矿	3.43	12.38	90.16
		中矿	1.3	0.56	1.55
		尾矿	95.27	0.041	8.29
		合计	100.0	0.47	100.0

由表 10 可知, 预先分级—粗粒磨矿—合并再浮选时, 粗选铜回收率随粗选石灰用量的增加而降低, 粗精矿铜品位随粗选石灰用量的增加而增加。综合考虑, 粗选石灰用量选择 1.5 kg/t。

2.3.2 粗选丁基铵黑药用量试验

粗选石灰用量 1.5 kg/t, 按图 2 试验流程开展磨机给矿预先分级—粗粒磨矿—合并再浮选的丁基铵黑药用量试验, 试验结果见表 11。

表 11 预先分级—粗粒磨矿—合并再粗选丁基铵黑药用量试验结果

Table 11 Butylammonium black dosage experimental results of pre-classified-coarse-grained grinding-combined with re-roughing

丁铵用量/(g·t ⁻¹)	产品	产率/%	铜品位/%	铜回收率/%
10+10	铜粗精矿	3.73	11.48	91.24
	中矿	2.51	0.48	2.57
	尾矿	93.76	0.031	6.19
	合计	100.0	0.469	100.0
15+10	粗精矿	5.14	8.42	92.37
	中矿	2.58	0.42	2.31
	尾矿	92.28	0.027	5.32
	合计	100.0	0.468	100.0
15+15	铜粗精矿	6.33	6.83	92.47
	中矿	2.34	0.49	2.45
	尾矿	91.33	0.026	5.08
	合计	100.0	0.468	100.0
20+15	铜粗精矿	8.75	4.93	92.11
	中矿	2.57	0.54	2.96
	尾矿	88.68	0.026	4.92
	合计	100.0	0.468	100.0

由表 11 可知, 预先分级—粗粒磨矿—合并再浮选时, 当铜粗选丁基铵黑药用量为 25 g/t 时, 再增加粗丁基铵黑药用量时, 增加丁基铵黑药用量

对粗选铜回收率的影响甚微, 但粗精矿铜品位随粗选丁基铵黑药用量的增加而逐步降低。综合考虑, 粗选丁基铵黑药用量选择 25 g/t。

2.3.3 浮选闭路试验

验, 试验结果见表 12。

按图 3 试验流程开展预先分级—浮选闭路试

表 12 预先分级—粗粒磨矿—合并闭路浮选试验结果

Table 12 Pre-classified-coarse-grained grinding—combined closed—circuit flotation results

产品名称	产率	铜品位	铜回收率
精矿	1.64	26.08	91.19
尾矿	98.36	0.042	8.81
原矿	100.0	0.469	100.0

由表 12 可见, 预先分级—粗粒磨矿—合并闭路浮选试验获得铜精矿产率为 1.64%, 铜精矿铜品位为 26.08%, 铜回收率为 91.19%; 铜回收率较磨机给矿直接浮选流程闭路提高 1.32 个百分点, 精矿铜品位较磨机给矿直接浮选流程闭路提高

0.6 个百分点。

2.4 闭路浮选试验尾矿粒度筛析

磨机给矿直接磨矿浮选闭路试验与预先分级—粗粒磨矿—合并闭路浮选试验的尾矿筛析结果见表 13。

表 13 闭路浮选试验尾矿筛析结果

Table 13 Screen analysis results of tailings in closed-circuit flotation experiment

粒度/ μm	产率		铜品位		铜金属分布率		对原矿铜损失率	
	直接磨矿	预先分级—磨矿	直接磨矿	预先分级—磨矿	直接磨矿	预先分级—磨矿	直接磨矿	预先分级—磨矿
+300	4.18	6.08	0.032	0.032	2.84	4.67	0.28	0.41
-300+212	5.51	7.41	0.031	0.034	3.63	6.05	0.36	0.54
-212+150	5.39	5.91	0.031	0.031	3.55	4.40	0.36	0.39
-150+100	11.24	11.77	0.027	0.025	6.44	7.07	0.65	0.63
-100+74	12.21	9.94	0.03	0.03	7.78	7.17	0.78	0.63
-74+45	11.14	11.88	0.024	0.022	5.68	6.28	0.57	0.56
-45+38	6.53	6.91	0.024	0.023	3.33	3.82	0.33	0.34
-38+20	14.55	14.72	0.027	0.028	8.34	9.90	0.84	0.88
-20+10	8.94	8.31	0.042	0.042	7.97	8.39	0.80	0.74
-10	20.31	17.07	0.117	0.103	50.45	42.25	5.06	3.74
合计	100.0	100.0	0.047	0.042	100.0	100.0	10.02	8.85

由表 13 可知, 磨机给矿预先分级—粗粒磨矿—合并闭路浮选所得尾矿-10 μm 粒度铜金属量相对于原矿金属量的铜损失率较磨机给矿直接磨矿闭路浮选低 1.32%。磨机给矿预先分级—粗粒磨矿—合并闭路浮选试验所得尾矿的-10 μm 粒度的铜金属分布率为 42.25%, 该金属量相对于原矿含量铜的损失率为 3.74%; 磨机给矿直接磨矿闭路浮选试验所得尾矿-10 μm 粒度铜金属量分布率为 50.45%, 该金属量相对于原矿铜含量的损失率为 5.06%。

获得的铜精矿产率 1.61%, 含铜品位 25.48%, 回收率 89.87%。预先分级—粗粒磨矿—合并闭路浮选试验获得的铜精矿产率为 1.64%, 铜精矿铜品位为 26.08%, 铜回收率为 91.19%。

2) 磨机给矿预先分级—粗粒磨矿—合并闭路浮选所得尾矿-10 μm 粒度铜金属量相对于原矿金属量的铜损失率较磨机给矿直接磨矿闭路浮选低 1.32%, 预先分级—粗粒磨矿—合并再浮选工艺可以一定程度上减少磨矿过程中-10 μm 难选矿泥的产生, 从而减少-10 μm 粒度铜浮选损失, 提高铜的回收率。

3 结论

1) 入磨前矿石预先分级—74 μm 矿闭路浮选试验获得的铜精矿产率 2.96%, 含铜品位 21.14%, 回收率 86.34%。入磨矿石直接磨矿闭路浮选试验

参考文献

[1] 丘世澄, 胡真, 邱显扬, 等. 含银铜硫矿石优先浮选与混合浮选工艺对比试验[J]矿冶, 2020, 29(1):

- 16-21.
- QIU S C, HU Z, QIU X Y, et al. Comparative test of preferential flotation process and mixed flotation process for silver-bearing copper-sulfur ore [J]. *Mining and Metallurgy*, 2020, 29 (1): 16-21.
- [2] 谭希发, 沈贤德, 张兴勋, 等. 从低品位次生硫化铜矿中回收铜的方法: 201610126622.8[P]. 2016-03-07.
- TAN X F, SHEN X D, ZHANG X X, et al. A method for recovering copper from low grade secondary copper sulfide ores 201610126622.8 [P]. 2016-03-07.
- [3] 郝冬冬, 蒋开喜, 王玉芳, 等. 白烟灰浸出液中铜的综合回收[J]. *矿冶*, 2019, 28(4): 126-130.
- HAO D D, JIANG K X, WANG Y F, et al. Comprehensive recovery of copper from leaching solution of copper flue dust [J]. *Mining and Metallurgy*, 2019, 28(4): 126-130.
- [4] 刘冲昊, 范凤岩, 柳群义. “一带一路”地区铜资源供需格局趋势分析[J]. *矿产保护与利用*, 2018(2): 44-51.
- LIU C H, FAN F Y, LIU Q Y, et al. Copper resources supply and consumption patterns and trend in the belt and road region [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2018(2): 44-51.
- [5] 冯安生, 李文军, 吕振福, 等. 我国铜矿资源开发利用“三率”调查与评价[J]. *矿产保护与利用*, 2016(5): 11-15.
- FENG A S, LI W J, LYU Z F, et al. An investigation on mining recovery, processing ratio and utilization ratio of coal mines in China [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2016(5): 11-15.
- [6] 伍赠玲, 赖晓康, 张鹏, 等. 低品位次生硫化铜矿生物堆浸工艺优化研究[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2018(1): 1-5.
- WU Z L, LAI X K, ZHANG P, et al. Process optimization on heap bioleaching of low-grade secondary copper sulfide [J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2018(1): 1-5.
- [7] 王显强, 戈保梁, 张晋禄, 等. 某低品位铜矿浮选工艺研究[J]. *矿冶*, 2016, 25(5): 19-22.
- WANG X Q, GE B L, ZHANG J L, et al. Experiment study on flotation of a low-grade copper ore [J]. *Mining and Metallurgy*, 2016, 25(5): 19-22.
- [8] 常艳, 杜晓慧, 张百忍. 国外低品位铜矿分布与利用技术现状[J]. *中国地质调查*, 2016, 3(3): 62-66.
- CHANG Y, DU X H, ZHANG B R. Reviews of distribution and utilization technology of international low-grade copper ore deposits [J]. *Geological Survey of China*, 2016, 3(3): 62-66.
- [9] 罗增鑫. 预先分级联合选别提高某低品位铜矿金属回收率试验[J]. *现代矿业*, 2020, 36(3): 103-107.
- LUO Z X. Experiment on improving the metal recovery of a low-grade copper ore by pre-classification combined beneficiation [J]. *Modern Mining*, 2020, 36(3): 103-107.