刚果(金)SICOMINES高氧化率铜钴矿浮选尾矿再选试验研究*

高丹校,范海宝

(华刚矿业股份有限公司, 北京 100083)

摘要:刚果(金)SICOMINES高氧化率铜钴矿含有部分较难选的含铜矿物,导致选别指标较差。为回收浮选尾矿中的含铜矿物,对浮选尾矿进行了矿物成分分析,并对浮选尾矿进行了重选、磁选、浮选以及多种选别方式联合的再选试验研究。最终确定了对浮选尾矿采用一粗一扫强磁选,对磁选精矿进行一粗一扫浮选,对磁选精矿的浮选尾矿再进行一段强磁选的选别工艺。增加浮选尾矿再选工艺后,总铜和总钴回收率分别达到了84.74%和56.88%,比原浮选工艺分别提高了8.96和8.28个百分点。同时,对浮选尾矿再磁选的磁选精矿再选别,大大降低磁选精矿的浸出酸耗量。

关键词:高氧化率铜钴矿;强磁选;强磁精矿再选;浸出酸耗

中图分类号:TD952 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)03-0237-08

Study on Flotation Tailings Re-separation Test of Copper-Cobalt Ore with High Oxidation Rate in SICOMINES from the Democratic Republic of the Congo

GAO Danxiao, FAN Haibao

(La Sino-Congolaise Des Mines S.A., Beijing 100083, China)

Abstract: Copper-cobalt ore with high oxidation rate in SICOMINES from the Democratic Republic of the Congo contains some copper-bearing minerals which are difficult to be separated, resulting in poor separation indexes. In order to recover copper-bearing minerals in flotation tailings, the mineral composition of flotation tailings was analyzed. The flotation tailings were re-separated by gravity separation, magnetic separation, flotation and combination of various separation methods. Finally, it was determined that the flotation tailings were separated to one roughing and one scavenging strong magnetic separation, the magnetic separation concentrate was separated by one roughing and one scavenging flotation, and the flotation tailings of the magnetic separation concentrate were separated by a section of strong magnetic separation process. The recovery rates of total copper and total cobalt reach 84.74% and 56.88% respectively after adding the re-separation process on flotation tailings, which are 8.96 and 8.28 percentage points higher than those of the original flotation process. Meanwhile, conducting re-separation on the magnetic separation concentrate from magnetic separation of flotation tailings can greatly reduce the leaching acid consumption of magnetic separation concentrate.

Key words: Copper-cobalt ore with high oxidation rate, Strong magnetic separation, Re-separation of strong magnetic concentrate, Leaching acid consumption

0 引言

铜、钴金属具有优异的理化性质,被广泛地应用于各工业领域,其需求量日益增长,而易开采易选别的铜、钴资源日益减少,难选的铜、钴资源的开发利用成为亟需解决的问题[1-2]。中国铜金属消耗量居世界第一,占全球铜消费量近一半,而我国铜资源储量仅居全球第九位,已探明的铜资源储量静态保障年限不足20 a,远低于全球平均值[3];同时,中国也是全球最大的精炼钴生产国和全球最大的钴消费国,而我国探明的钴资源储量仅占全球的1%左右,钴资源严重匮乏[4-6]。因此,我国通过"走出去"战略,获得海外铜、钴资源,有效地弥补了国内铜、钴资源的短缺。其中,中国企业在非洲-赞比亚铜钴矿

* **收稿日期**:2024-04-09
基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC2904503,2022YFC2904505)
作者简介:高丹校(1994—),男,广东揭阳人,硕士研究生,助理工程师,主要研究方向为铜钴矿选矿。E-mail:382928473@qq.com
通信作者:范海宝(1986—),男,山东聊城人,硕士,高级工程师,主要研究方向为铜钴矿选矿。E-mail:sunnyfan86@126.com

带上就有许多开采经营[7-9],对保障我国铜、钴资源的稳定供应起着重要作用。非洲-赞比亚铜钴矿带属于沉积层状铜矿床,不仅含有大量容易选别的硫化铜矿石,也存在大量难选的高氧化率铜钴矿石[10-12]。目前,除了部分较难选的高氧化率铜钴矿只能通过化学选矿法处理外,其余的主要处理方法为浮选法[13-16]。高氧化率铜钴矿石具有含泥量大,矿物组成复杂,结合率高,有用矿物可浮性差,浮选药剂耗量大的特点,导致其选别指标较差[17-18]。由于高氧化率铜钴矿的矿物组成复杂,其中可浮性较好的矿物可通过浮选回收,而可浮性较差的含铜矿物,例如铜钴硬锰矿、铜钴锰铁结合物、(含铜)赤铁矿、(含铜)褐铁矿等矿物,其浮选效果较差,可联合其他选别方法回收。因此,加强高氧化率铜钴矿的选别研究,提高高氧化率铜钴矿的选别效果,对促进高氧化率铜矿资源的开发利用,降低其选别成本有着重要的意义。

1 原矿矿石性质

SICOMINES 铜钴矿位于非洲-赞比亚铜钴矿带,属于层状特大型铜钴矿床[19-21]。矿区的矿石性质复杂,矿石氧化率波动较大,含有大量难选的高氧化率铜钴矿石。该矿石的铜品位为 2.50%,钴品位为 0.24%,铁品位为 4.05%,锰品位为 0.29%,硫品位为 0.10%,矿石中主要有价元素为铜和钴。原矿的铜、钴物相分析结果见表 1。由表 1 可见,原矿中的铜主要以自由氧化铜和结合氧化铜为主,分别占总铜的 85.60%和 12.40%,含少量的次生硫化铜和原生硫化铜。自由氧化铜主要以孔雀石、蓝磷铜矿和硅孔雀石等为主,结合氧化铜主要有铜钴硬锰矿、铜钴锰铁结合物、含铜褐铁矿等,次生硫化铜矿物由辉铜矿、铜蓝和斑铜矿组成,原生硫化铜主要以黄铜矿为主。原矿中的钴主要以氧化钴、硫化钴和硅酸盐中的钴组成,分别占总钴含量的 58.33%、25.00%和 16.67%。其中,氧化钴主要以水钴矿和菱钴矿为主,硫化钴主要以含铜钴硬锰矿、铜钴锰铁结合物形式赋存,硅酸盐中的钴主要为硫铜钴矿等。原矿中的非金属矿物主要为石英、白云母、黏土、钾长石等;铁矿物主要以褐铁矿、菱铁矿和赤铁矿为主;锰矿物主要为铜钴硬锰矿和铜钴锰铁结合物。

表 1 原矿的铜、钴物相分析结果

Table 1 Phase analysis results of copper and cobalt in raw ore

铜相/钴相	含量/%	分布率/%	可能存在的矿物
自由氧化铜	2.14	85.60	孔雀石、蓝磷铜矿、硅孔雀石等
结合氧化铜	0.31	12.40	含铜钴硬锰矿、铜钴锰铁结合物、含铜褐铁矿等
原生硫化铜	0.01	0.40	黄铜矿等
次生硫化铜	0.04	1.60	辉铜矿、铜蓝、斑铜矿
总铜	2.50	100.00	
氧化钴	0.14	58.33	水钴矿、菱钴矿等
硫化钴	0.06	25.00	含铜钴硬锰矿、铜钴锰铁结合物等
硅酸盐中的钴	0.04	16.67	硫铜钴矿等
总钴	0.24	100.00	

2 现场选别工艺与主要技术指标

根据该高氧化率铜钴矿石的性质和特点,目前现场采用半自磨-球磨碎磨工艺对该矿石进行破碎和磨矿处理,对磨矿好的矿浆采用先硫后氧的浮选法对矿石中不同可浮性的铜矿物进行梯级浮选,即对磨好的矿浆依次进行硫化铜浮选、氧化铜浮选和钴浮选,分别得到硫化铜精矿、氧化铜精矿和钴精矿。现场矿浆磨矿细度约为 72%,使用戊基黄药为捕收剂,硫氢化钠为硫化剂,松醇油(2# 油)为起泡剂;另外,主流程浮选设备均使用 WEMCO160RT 溢流型浮选机,硫化铜精选使用 WEMCO50RT 溢流型浮选机。高氧化率铜钴矿的选别总铜、总钴回收率分别为 75.78%和 48.60%,浮选尾矿的铜、钴含量较高,浮选尾矿铜、钴品位分别为 0.78%和 0.15%。因此,需要对高氧化率铜钴矿的浮选尾矿进行再回收利用的研究,降低尾矿中的铜、钴品位,以提高资源的开发利用水平和选矿经济效益。

3 尾矿性质和试验设备

3.1 尾矿性质

取现场生产的高氧化率铜钴矿的浮选尾矿,在实验室进行浮选尾矿再选试验。浮选尾矿样品的铜品位为 0.78%,钴品位为 0.14%,铁品位为 3.29%,锰品位为 0.17%,尾矿铜的物相分析结果见表 2。由表 2 可知,该浮选尾矿的结合氧化铜的含量较原矿有所升高,达到 21.79%。浮选尾矿中主要有用矿物为较难浮选的硅孔雀石、孔雀石,以及可浮性较差的含铜钴硬锰矿、铜钴锰铁结合物、含铜褐铁矿等。

接下来采用浮选、磁选和重选方法对该浮选尾矿进行再选试验研究,主要考察浮选尾矿铜金属回收。

表 2 尾矿的铜物相分析结果

Table 2 Phase analysis results of copper in the tailings

铜相	含量/%	分布率/%	主要矿物
自由氧化铜	0.53	67.95	硅孔雀石、孔雀石等
结合氧化铜	0.17	21.79	含铜钴硬锰矿、铜钴锰铁结合物、含铜褐铁矿等
硫化铜	0.08	10.26	辉铜矿、铜蓝等
总铜	0.78	100.00	

3.2 试验设备

浮选试验采用 XFD-1.5 型单槽浮选机、XFD-0.5 型单槽浮选机及 XMQ-Φ240×90A(6.25L)型磨矿机,磁选使用 Slon750 型高梯度磁选机,重选使用 LYN-1100×500 型摇床和 Φ800 mm 的螺旋溜槽。

4 试验与结果分析

4.1 再浮选试验

基于该高氧化率铜钴矿中有用矿物与脉石矿物间的可浮性差异,首先采用浮选工艺回收浮选尾矿中的有用矿物。参考选矿厂初步设计相关试验结果,优选捕收剂,对该浮选尾矿进行再选试验。

4.1.1 捕收剂筛选试验

根据该矿石的性质,对戊基黄药以及阴离子捕收剂 RS 和阴离子捕收剂 MJ 进行捕收剂种类遴选试验,试验流程如图 1 所示,试验结果见表 3。由表 3 可见,与戊基黄药相比,使用 RS 和 MJ 的精矿品位较低,精矿产率较大,同时不利于精矿后续处理,而使用戊基黄药可获得相对较好的浮选效果。因此后续试验使用戊基黄药进行试验。

表 3 捕收剂筛选试验结果

Table 3 Results of collector screening tests

捕收剂种类	产品名称	产率/%	Cu 品位/%	Cu 回收率/%
戊基黄药	粗选精矿	2.20	3.02	8.77
	扫选精矿	1.92	2.04	5.17
	浮选尾矿	95.88	0.68	86.06
	给矿	100.00	0.76	100.00
RS	粗选精矿	29.59	1.19	45.73
	扫选精矿	12.42	0.61	9.84
	浮选尾矿	57.99	0.59	44.43
	给矿	100.00	0.77	100.00
MJ	粗选精矿	35.61	0.86	40.51
	扫选精矿	27.51	0.71	25.83
	浮选尾矿	36.88	0.69	33.66
	给矿	100.00	0.76	100.00

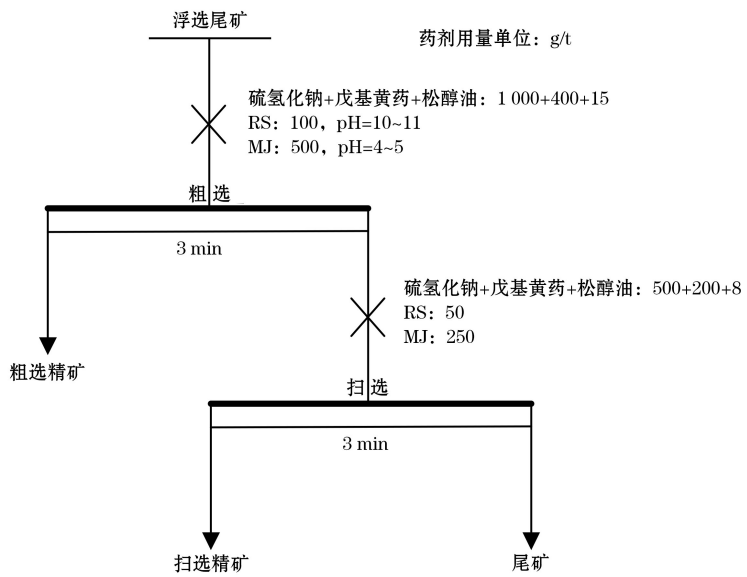


图 1 浮选试验流程

Fig.1 Flow of flotation test

4.1.2 捕收剂戊基黄药浮选试验

使用捕收剂戊基黄药进行增加浮选段数的浮选试验,试验流程见图 2,试验结果见表 4。由表 4 可知,采用戊基黄药作为捕收剂,浮选尾矿再经过一粗一扫可以将尾矿的 Cu 含量降低到 0.68%,再通过增加浮选段数,尾矿的 Cu 品位降低不明显,据此认为,高氧化率铜钴矿浮选尾矿再浮选一粗一扫即可。浮选尾矿再经一粗一扫浮选,可获得产率 4.12%,铜品位为 2.56%,铜回收率为 14.27% 的指标。

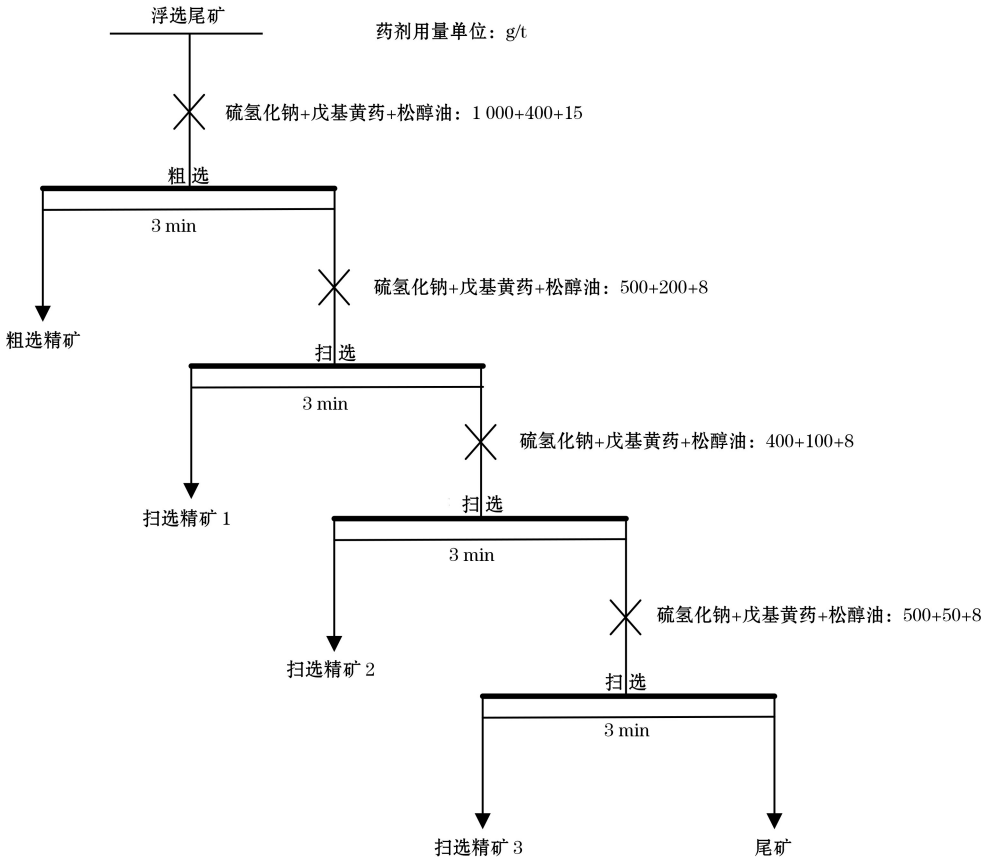


图 2 增加浮选段数的试验流程

Fig.2 Test flow of increasing the number of flotation segments

表 4 增加浮选段数的试验结果

Table 4 Test results of increasing the number of flotation sections

产品名称	产率/%	Cu 品位/%	Cu 回收率/%
粗选精矿	2.20	3.02	8.98
扫选精矿 1	1.92	2.04	5.29
扫选精矿 2	1.41	1.22	2.32
扫选精矿 3	0.82	1.05	1.16
尾矿	93.65	0.65	82.25
给矿	100.00	0.75	100.00

4.2 重选试验

对高氧化率铜钴矿浮选尾矿分别进行摇床和螺旋溜槽试验，试验结果见表 5。由表 5 可知，该浮选尾矿再经摇床选别，可获得精矿产率为 10.59%，铜品位为 1.31%，铜回收率为 17.86%的精矿；浮选尾矿再经螺旋溜槽选别，可获得精矿产率为 18.41%，铜品位为 1.05%，铜回收率为 25.12%的精矿。由此可见，对高氧化率铜钴矿浮选尾矿再进行重选的效果较差。

表 5 浮选尾矿重选试验结果

Table 5 The results of gravity separation test of flotation tailings

作业方式	样品名称	产率/%	Cu 品位/%	Cu 回收率/%
摇床	精矿	10.59	1.31	17.86
	中矿	32.61	0.58	24.36
	尾矿	56.80	0.79	57.78
	给矿	100.00	0.78	100.00
螺旋溜槽	精矿	18.41	1.05	25.12
	中矿	40.06	0.63	32.79
	尾矿	41.53	0.78	42.09
	给矿	100.00	0.77	100.00

4.3 磁选试验

使用 SLon-750 型磁选机对高氧化率铜钴矿的浮选尾矿进行一粗一扫的强磁选，试验结果见图 3。由图 3 可知，在背景场强为 1.0 T 的条件下，对浮选尾矿进行一粗一扫试验，可获得精矿产率为 21.20%，铜品位为 1.80%，总铜回收率 48.69%的指标。对比前述高氧化率铜钴矿浮选尾矿再浮选和再重选试验结果可知，对该浮选尾矿采用强磁选别可

获得较好的选别效果。另外,由于磁选精矿产率较大,品位较低,接下来对该强磁精矿进行浸出试验,了解其浸出酸耗。浸出试验的条件为:浸出温度为室温,浸出液固比为 9∶1,浸出时间为 4 h,搅拌速度约 200 r/min,浸出终点 pH 约为 1.30,试验用质量分数为 98%的硫酸调节矿浆酸度。试验结果见表 6。由表 6 可知,该磁选精矿的铜渣计浸出率为 75.22%,吨铜净酸耗量为 11.41 t,吨铜酸耗较高。因此,需要对该磁选精矿再进行选别,以降低精矿产率,提高精矿品位,降低精矿浸出酸耗。

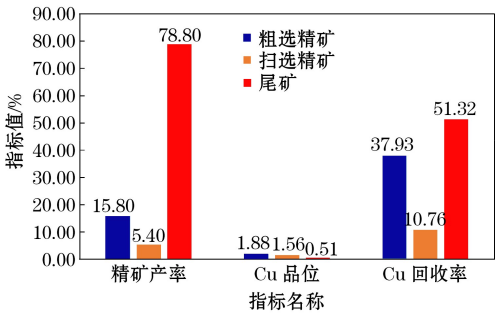


图 3 强磁选工艺试验结果

Fig.3 Test results of strong magnetic separation process

表 6 磁选精矿浸出试验结果

Table 6 Results of leaching test of the magnetic separation concentrate

磁选精矿		浸出渣		浸出液		渣计浸出率		渣率/%	吨铜净酸耗/t
Cu/%	Co/%	Cu/%	Co/%	Cu/(g/L)	Co/(g/L)	Cu/%	Co/%		
1.8	0.17	0.50	0.07	1.20	0.13	75.22	63.27	89.20	11.41

4.4 磁选精矿再重选(螺旋溜槽)试验

对浮选尾矿进行强磁一粗一扫作业后的磁选精矿进行再重选(螺旋溜槽)试验,试验结果见表 7。由表 7 可知,强磁选精矿再经螺旋溜槽再选,最终可获得铜品位 3.32%,铜回收率 18.92%的重选精矿。

表 7 强磁精矿螺旋溜槽再选试验结果

Table 7 Test results of spiral chute re-separation of strong magnetic concentrate

样品名称	产率/%	Cu 品位/%	Cu 回收率/%
重选精矿	4.50	3.32	18.92
尾矿	95.50	0.67	81.08
给矿	100.00	0.79	100.00

4.5 强磁精矿再浮选试验

对磁选精矿进行了再浮选试验。在硫氢化钠粗选用量为 1 500 g/t、扫选用量为 1 000 g/t,戊基黄药粗选用量为 600 g/t、扫选用量为 400 g/t,松醇油粗选用量为 15 g/t、扫选用量为 8 g/t 的条件下,对浮选尾矿进行强磁一粗一扫作业后的精矿再进行一粗一扫的浮选,可获得较好的浮选指标。试验流程见图 4,试验结果见图 5。由图 5 可知,对磁选精矿进行再浮选,可获得精矿产率为 6.98%,铜品位为3.76%,铜回收率 33.13%的浮选精矿。

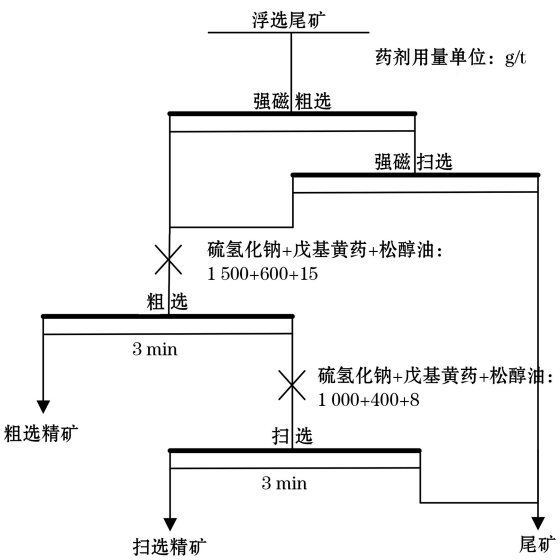


图 4 强磁选精矿再浮选试验流程

Fig.4 Flow of reflotation test of the strong magnetic separation concentrate

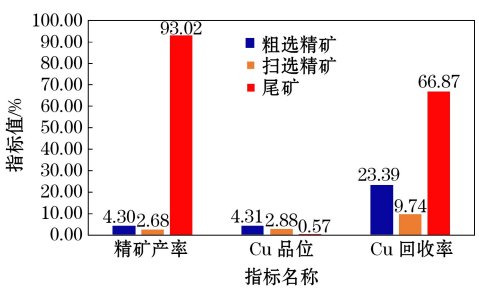


图 5 强磁选精矿再浮选试验结果

Fig.5 Results of reflotation test of the strong magnetic separation concentrate

4.6 强磁综合精矿再浮选-重选(摇床)联合工艺试验

试验发现,对强磁一粗一扫作业得到的磁选精矿进行一粗一扫再浮选所得浮选尾矿的铜品位相对较高。因此,对浮选尾矿再进行一段摇床处理,试验结果见表8。由表8可知,对浮选尾矿再进行一段摇床处理,可获得精矿产率为8.25%,铜品位为3.43%,铜回收率35.91%的指标。

表8 强磁精矿再浮选-摇床试验结果

Table 8 Results of reflotation-shaker test of the strong magnetic concentrate

样品名称	产率/%	Cu品位/%	Cu回收率/%
粗选精矿	4.25	4.29	23.15
扫选精矿	2.80	2.85	10.15
摇床精矿	1.20	1.72	2.61
尾矿	91.75	0.55	64.09
给矿	100.00	0.79	100.00

4.7 强磁综合精矿再浮选-磁选联合工艺试验

由于强磁精矿再浮选尾矿的铜品位仍然较高,对磁选精矿的浮选尾矿再进行强磁选回收,场强为1.0 T,试验结果见表9。由表9可知,对磁选精矿的再浮选尾矿进行一段强磁选处理,可获得精矿产率为8.31%,铜品位为3.49%,铜回收率36.97%的指标。

表9 强磁精矿再浮选-磁选试验结果

Table 9 Results of reflotation-magnetic separation test of the strong magnetic concentrate

样品名称	产率/%	Cu品位/%	Cu回收率/%
粗选精矿	4.26	4.35	23.61
扫选精矿	2.73	2.81	9.76
磁选精矿	1.32	2.14	3.60
尾矿	91.69	0.54	63.03
给矿	100.00	0.79	100.00

由此可见,该高氧化率铜钴矿浮选尾矿进行一粗一扫强磁选,磁选精矿再一粗一扫浮选,浮选尾矿再进行一段强磁选,可获得较好的选别指标。将该试验结果与前述试验结果综合计算得出的生产技术指标见表10。由表10可见,增加一粗一扫强磁选,磁选精矿再一粗一扫浮选,浮选尾矿再进行一段强磁选,可获得产率为6.46%,铜、钴品位分别为3.47%和0.29%,铜、钴回收率分别为8.95%和8.28%的再选精矿。另外,总铜和总钴回收率分别为84.74%和56.88%,较原工艺提高了8.96和8.28个百分点。

表10 生产技术指标

Table 10 Production specifications

产品名称	产率/%	铜品位/%	铜回收率/%		钴品位/%	钴回收率/%	
			对原矿	对作业		对原矿	对作业
硫化铜精矿	0.10	60.10	2.51	—	0.12	0.06	—
氧化铜精矿	13.98	10.75	60.05	—	0.54	33.29	—
浮选钴精矿	8.23	4.02	13.22	—	0.42	15.25	—
再选精矿	6.46	3.47	8.95	36.97	0.29	8.28	16.11
尾矿	71.23	0.54	15.27	63.03	0.14	43.12	83.89
给矿	100.00	2.50	100.00	—	0.23	100.00	—

4.8 产品考察

由上述试验结果可知,对浮选尾矿再进行重选和浮选,选别效果均较差;而对浮选尾矿再进行一粗一扫强磁选,对磁选精矿再进行一粗一扫浮选,对浮选尾矿再进行强磁选,可获得较好的选矿指标。取浮选尾矿强磁选-浮选-强磁选的精矿进行浸出试验,试验条件为:浸出温度为室温,浸出液固比为9∶1,浸出时间为4 h,搅拌速度约200 r/min,浸出终点pH约为1.28,试验用质量分数为98%的硫酸调节矿浆酸度,浸出试验结果见表11。由表11可知,再选精矿浸出的吨铜酸耗量为2.43 t,而由表7可知,磁选精矿浸出的吨铜酸耗量为11.41 t。由此可见,对磁选精矿进行一粗一扫浮选,对浮选尾矿再进行磁选,可大大降低磁选精矿的浸出酸耗。

表11 精矿浸出试验结果

Table 11 Leaching test results of the concentrate

再选精矿		浸出渣		浸出液		渣计浸出率		渣率/%	吨铜净酸耗/t
Cu/%	Co/%	Cu/%	Co/%	Cu/(g/L)	Co/(g/L)	Cu/%	Co/%		
3.49	0.287	0.65	0.101	1.20	0.13	84.16	70.07	85.04	2.43

5 结论

(1) 刚果(金)SICOMINES的高氧化率铜钴矿的铜品位为2.50%,钴品位为0.24%,以自由氧化铜和结合氧化铜为主,含少量的次生硫化铜和原生硫化铜。原工艺的浮选尾矿中损失的有用矿物主要为较难浮选的硅孔雀石、孔雀石,以及可浮性较差的含铜钴硬锰矿、铜钴锰铁结合物、含铜褐铁矿等。

(2) 对该高氧化率铜钴矿的浮选尾矿采用重选(摇床和溜槽)和再浮选,选别效果较差,而采用一粗

一扫强磁选，对磁选精矿再进行一粗一扫浮选，对浮选尾矿再进行一段强磁选，可获得较好的选别指标，最终总铜和总钴回收率分别为84.74%和56.88%，较原工艺提高了8.96和8.28个百分点。

(3) 对该高氧化率铜钴矿的浮选尾矿进行一粗一扫强磁选，对磁选精矿直接浸出的酸耗量较高，而对磁选精矿再进行一粗一扫浮选，对浮选尾矿再进行一段强磁选得到的再选精矿，对再选精矿进行浸出的酸耗量大大降低，吨铜净酸耗为2.43 t。

参考文献(References)：

[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.
ZHOU Ping, TANG Jinrong, SHI Junfa, et al. Analysis of status and development trend of copper resources[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2012, 31(5): 750-756.

[2] 陈甲斌，梁振杰，高鹏.中国铜资源现状与发展战略研究[J].世界有色金属，2005(12)：8-11.
CHEN Jiabin, LIANG Zhenjie, GAO Peng. Status quo of copper resources in Chinese mainland and researches on strategies of development[J]. World Nonferrous Metals, 2005(12): 8-11.

[3] 林博磊，闫卫东，郭娟，等."十四五"期间全球铜供需形势展望[J].中国矿业，2021，30(6)：16-22.
LIN Bolei, YAN Weidong, GUO Juan, et al. Prospects of global copper supply and demand during the 14th Five Year Plan Period[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(6): 16-22.

[4] 中华人民共和国国土资源部.中国矿产资源报告(2015)[M].北京：地质出版社，2015.
Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. China mineral resources report (2015)[M]. Beijing: Geology Press, 2015.

[5] 张方方，王建平，王银宏.试析中国铜产业存在的问题与对策建议[J].中国矿业，2013，22(2)：9-13.
ZHANG Fangfang, WANG Jianping, WANG Yinhong. A brief analysis of the problems existing in Chinese copper industry and some countermeasures [J]. China Mining Magazine, 2013, 22(2): 9-13.

[6] 周应华，江少卿.刚果(金)铜钴矿业开发形势[J].中国金属通报，2010(45)：38-39.
ZHOU Yinghua, JIANG Shaoqing. Situation of copper-cobalt mine development in Congo(DRC)[J]. China Metal Bulletin, 2010(45): 38-39.

[7] 范海宝，李宋江.刚果(金)某铜钴矿石工艺矿物学研究[J].金属矿山，2019(9)：107-112.
FAN Haibao, LI Songjiang. Study on process mineralogy of a copper-cobalt ore in Congo(Kinshasa)[J]. Metal Mine, 2019(9): 107-112.

[8] 张汉彪，薛伟.刚果(金)SICOMINES铜钴矿选矿新工艺研究[J].资源信息与工程，2019，34(5)：46-49.
ZHANG Hanbiao, XUE Wei. Research on the new mineral processing technology of copper-cobalt ore from SICOMINES mine in the Democratic Republic of the Congo[J]. Resource Information and Engineering, 2019, 34(5): 46-49.

[9] 李宋江，王华，薛伟，等.刚果民主共和国某铜钴矿废石选矿试验研究[J].有色冶金设计与研究，2013，34(3)：4-6+20.
LI Songjiang, WANG Hua, XUE Wei, et al. Research on mineral processing test of waste rock of a copper-cobalt mine in the Democratic Republic of the Congo[J]. Nonferrous Metals Engineering & Research, 2013, 34(3): 4-6+20.

[10] 范海宝，高丹校，王顺，等.刚果(金)SICOMINES铜钴矿浮选-磁选工艺优化研究[J].矿冶，2023，32(6)：52-58+108.
FAN Haibao, GAO Danxiao, WANG Shun, et al. Optimization of floation-magnetic process of SICOMINES copper-cobalt ore in the DRC[J]. Mining and Metallurgy, 2023, 32(6): 52-58+108.

[11] 廖启华，范海宝，李勇.刚果(金)SICOMINES高氧化率铜钴矿浮选效果提升研究与生产实践[J].中国矿业，2023，32(12)：226-234.
LIAO Qihua, FAN Haibao, LI Yong. Research and production practice on flotation effect improvement of SICOMINES high oxidation rate copper-cobalt ore in Congo (Kinshasa)[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(12): 226-234.

[12] 范海宝，高丹校，李勇，等.刚果(金)SICOMINES铜钴矿提高铜、钴选矿回收率研究与实践[J].中国矿业，2023，32(11)：206-212.
FAN Haibao, GAO Danxiao, LI Yong, et al. Research and practice on improving the recovery rate of copper and cobalt in Congo (Kinshasa) SICOMINES Copper-Cobalt Mine[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(11): 206-212.

[13] 欧乐明，胡本福，段景文.刚果(金)某难选氧化铜钴矿选矿工艺研究[J].金属矿山，2011(9)：76-81.
OU Leming, HU Benfu, DUAN Jingwen. Study on separating technology of a Congo (Kinshasa) refractory copper-cobalt oxide ore[J]. Metal Mine, 2011(9): 76-81.

[14] 巴红飞，董水森.刚果(金)某难选氧化铜钴矿选矿工艺连选试验研究[J].有色金属(选矿部分)，2017(4)：23-27.
BA Hongfei, DONG Shuisen. Continuous separation test research on a difficultly-dressed oxide copper-cobalt ore in D.R.C[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2017(4): 23-27.

[15] 张文彬.氧化铜矿浮选研究与实践[M].长沙：中南工业大学出版社，1992.
ZHANG Wenbin. Research and practice on flotation of copper oxide ore[M]. Changsha: Central South University Press, 1992.

[16] 曲思思，刘新聪，范耀芬，等.某难选氧化铜矿的浮选药剂试验[J].世界有色金属，2021(15)：116-117.
QU Sisi, LIU Xincong, FAN Yaofen, et al. Flotation reagent test of a refractory oxidized copper ore[J]. World Nonferrous Metals, 2021(15): 116-117.

[17] 张帆.刚果(金)某铜钴矿选矿工艺流程设计研究[J].有色冶金设计与研究,2017,38(5):8-12.
ZHANG Fan. Design and research on mineral processing process flow for a certain copper-cobalt mine in Congo (DRC)[J]. Nonferrous Metals Engineering & Research, 2017,38(5):8-12.

[18] 王淀佐,胡岳华.浮选溶液化学[M].长沙:湖南科学技术出版社,1988.
WANG Dianzuo, HU Yuehua. Solution chemistry of flotation[M]. Changsha: Hunan Science & Technology Press,1988.

[19] 陈兴海,刘运纪,杨焱,等.刚果(金)SICOMINES 铜钴矿床地质特征及成因探讨[J].有色金属(矿山部分),2012,64(6):31-37.
CHEN Xinghai, LIU Yunji, YANG Yan, et al. Geological characteristics and genesis of SICOMINES Copper-Cobalt Deposit in D. R. Congo[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2012,64(6):31-37.

[20] 阮诗昆.刚果(金)科卢韦齐铜钴矿床地质特征及成因探讨[J].世界有色金属,2017(21):128+130.
RUAN Shikun. Geological Characteristics and genesis of Kolwezi copper-cobalt deposit in Congo (COD)[J]. World Nonferrous Metals,2017(21):128+130.

[21] 陶则熙.刚果(金)加丹加铜矿带地质特征及成矿前景[J].地质与勘探,2016,52(2):392-398.
TAO Zexi. Geological characteristics and metallogenic prospect of the Katanga copperbelt in Democratic Republic of the Congo[J]. Geology and Exploration,2016,52(2):392-398.