刚果(金)某复杂难处理氧化铜钴矿综合回收试验研究①

杜长臻[1,2,3,4], 何桂春[1], 孟庆波[2,3,4], 徐晓萍[2,3,4], 徐晓衣[2,3,4], 余利红[2,3,4]
(1.江西理工大学 资源与环境工程学院, 江西 赣州 341000; 2.广东省科学院资源利用与稀土开发研究所, 广东 广州 510651; 3.稀有金属分离与综合利用国家重点实验室, 广东 广州 510651; 4.广东省矿产资源开发与综合利用重点实验室, 广东 广州 510651)

摘 要: 对刚果(金)某复杂难处理氧化铜钴矿开展了综合回收试验研究。采用先浮选富集铜、后强磁选回收钴的流程,以 Na_2S 为活化剂、丁基黄药为主捕收剂、TP 为辅助捕收剂、2 号油为起泡剂,经二粗二扫二精优先浮选铜,选铜尾矿进行强磁选回收弱磁性含钴矿物,闭路试验获得了 Cu、Co 品位分别为 16.31%、0.24%,Cu、Co 回收率分别为 80.82%、29.41%的铜精矿以及 Co 品位 0.304%、回收率 40.34%的钴精矿。联合流程通过硫化活化与辅助捕收剂协同作用提升假孔雀石及硅孔雀石可浮性,并以强磁选实现钴的有效回收,显著提高了铜、钴综合回收效率。

关键词: 氧化铜钴矿; 硫化活化; 浮选; 磁选; 联合流程; 综合回收; 流程优化; 铜; 钴
中图分类号: TD92 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.04.019
文章编号: 0253-6099(2026)04-0131-05

Experimental Study on Comprehensive Recovery of a Complex Refractory Copper-Cobalt Oxide Ore from DRC

DU Changzhen[1,2,3,4], HE Guichun[1], MENG Qingbo[2,3,4], XU Xiaoping[2,3,4], XU Xiaoyi[2,3,4], YU Lihong[2,3,4]
(1.*School of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou* 341000, *Jiangxi, China*; 2.*Institute of Resource Utilization and Rare Earth Development, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou* 510651, *Guangdong, China*; 3.*State Key Laboratory of Rare Metals Separation and Comprehensive Utilization, Guangzhou* 510651, *Guangdong, China*; 4.*Guangdong Provincial Key Laboratory of Development and Comprehensive Utilization of Mineral Resources, Guangzhou* 510651, *Guangdong, China*)

Abstract: A comprehensive recovery test was conducted for a complex refractory copper-cobalt oxide ore from the Democratic Republic of the Congo (DRC). A combined process of copper flotation for enrichment followed by high-intensity magnetic separation (HIMS) for cobalt recovery was adopted. Sodium sulfide was used as activator, butyl xanthate as primary collector, TP as auxiliary collector, and No.2 oil as frother. In a closed-circuit test, a flotation process consisting of two-stage roughing, two-stage scavenging, and two-stage cleaning was adopted to preferentially recover copper, and the flotation tailings were then treated by HIMS to recover weakly magnetic cobalt-bearing minerals. Finally, the closed-circuit test produced a copper concentrate grading 16.31% Cu and 0.24% Co with recoveries of 80.82% Cu and 29.41% Co and a cobalt concentrate grading 0.304% Co at 40.34% recovery. It is concluded that this combined process can enhance the floatability of pseudomalachite and chrysocolla through a synergistic effect of sulfide activation and auxiliary collectors, and can also actualize effective recovery of cobalt minerals by HIMS. Accordingly, the overall recovery of copper and cobalt can be significantly enhanced.

Key words: copper-cobalt oxide ore; sulfidization activation; flotation; magnetic separation; combined flowsheet; comprehensive recovery; process optimization; copper; cobalt

刚果(金)是全球重要的铜钴资源保障地,铜、钴储量分别约占全球总储量的 15%和 50%[1-2]。铜主要用作导电与结构支撑材料,钴则是锂电池正极材料的核心成分[3-4]。国内外针对氧化铜矿的浮选强化、药剂

① **收稿日期**: 2026-03-01
基金项目: 广东省科学院专项资金项目(2022GDASZH-2022010104)
作者简介: 杜长臻(2000—),男,甘肃永昌人,硕士研究生,主要研究方向为矿物浮选。E-mail:duchangzhen0119@163.com
通信作者: 孟庆波(1988—),男,河北秦皇岛人,博士,高级工程师,主要从事矿产资源综合利用研究。E-mail:13202001016@163.com

协同及浮选-浸出等工艺开展了大量研究,并取得了一定进展。然而,由于矿石性质差异显著,仍需基于典型矿样开展针对性的工艺与流程优化研究[5-6]。本文以刚果(金)某典型复杂氧化铜钴矿为研究对象,构建了优先浮选铜、强磁选补充回收钴的联合流程,研究结果可为同类型氧化铜钴矿的高效开发利用提供技术参考。

1 矿样性质及试验方法

1.1 矿样性质

原矿化学多元素分析结果和矿物组成分别如表1和表2所示,铜和钴在矿石中赋存状态分析结果分别见表3和表4。原矿中有价金属元素为铜和钴,品位分别为2.52%和0.13%。铜矿物种类较多,以孔雀石为主,其次为假孔雀石和硅孔雀石,还有微量的赤铜矿、辉铜矿、黄铜矿、斑铜矿和铜蓝,铜在孔雀石、假孔雀石和硅孔雀石中的分布率合计为80.03%,浮选回收铜矿物,理论回收率为80%左右,但假孔雀石和硅孔雀石可浮性差,对氧化铜的回收有一定影响。钴主要以分散形式赋存于褐铁矿、赤铁矿、孔雀石、假孔雀石中,钴矿物只有极少量为水钴矿,脉石矿物主要为粉砂岩和次生石英。原矿中钴的赋存形式较为复杂,主要集中于水钴矿和含铜钴硬锰矿中;此外,褐铁矿和赤铁矿中合计含钴6.07%。采用强磁选回收水钴矿、含铜钴硬锰矿和褐铁矿/赤铁矿,钴理论回收率为77%左右。

表1 原矿化学多元素分析结果(质量分数)

Table 1 Multi-elemental analysis of raw ore %

Cu	Co	Mn	S	P	Na_2O	Fe
2.52	0.13	0.11	0.048	0.115	0.099	3.00
SiO_2	TiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	K_2O	
61.08	0.765	0.29	3.35	14.30	3.93	

表2 原矿矿物组成(质量分数)

Table 2 Mineral composition of raw ore %

铜钴褐铁矿	假孔雀石	孔雀石	辉铜矿	黄铜矿	斑铜矿	铜蓝	赤铜矿
2.603	0.678	2.776	0.008	0.003	0.003	0.002	0.013
铜钴硬锰矿	硅孔雀石	水钴矿	粉砂岩	电气石	白云石	金红石	磷灰石
0.881	0.407	0.063	73.235	0.330	0.796	0.622	0.135
铜钴赤铁矿	次生石英	独居石	闪锌矿	其他	合计		
0.713	16.060	0.034	0.060	0.578	100.000		

表3 铜在矿石中赋存状态分析结果

Table 3 Occurrence state of copper in ores

矿物名称	Cu品位/%	分布率/%
孔雀石	55.52	62.23
假孔雀石	51.91	14.21
硅孔雀石	21.82	3.59
辉铜矿	75.76	0.24
黄铜矿	34.56	0.05
斑铜矿	63.33	0.08
铜蓝	66.48	0.06
赤铜矿	88.61	0.47
硬锰矿	20.32	7.23
褐铁矿/赤铁矿	2.14	2.87
水钴矿	12.80	0.32
粉砂岩/次生石英	0.24	8.65
合计	2.48	100.00

表4 钴在矿石中赋存状态分析结果

Table 4 Occurrence state of cobalt in ores

矿物名称	Co品位/%	分布率/%
水钴矿	49.45	21.95
含铜钴硬锰矿	7.87	48.84
褐铁矿/赤铁矿	0.26	6.07
孔雀石/假孔雀石/硅孔雀石	0.18	4.90
粉砂岩/次生石英	0.029	18.24
合计	0.142	100.00

1.2 试验方法及药剂

该铜钴矿中铜以氧化矿物为主,可通过浮选回收;钴多赋存于弱磁性矿物中,宜采用强磁选富集。基于此,构建了浮选-磁选联合流程开展系统试验,试验原则流程如图1所示。主要药剂包括捕收剂丁基黄药、丁铵黑药、GYB、TP(GYB和TP均为广东省科学院资源利用与稀土开发研究所自主研发的氧化铜矿捕收剂),活化剂硫化钠,起泡剂2号油。

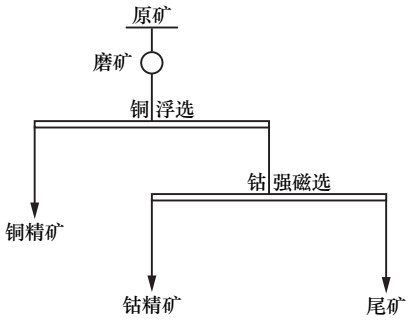


图1 试验原则流程

Fig. 1 Basic flowchart for test

2 选矿试验与结果讨论

2.1 铜矿物浮选试验

氧化铜矿物浮选的难点在于其表面亲水性强,难以直接吸附传统硫化矿捕收剂,需通过硫化钠在矿物表面生成疏水性的硫化铜膜以增强吸附。部分氧化铜

矿物,如硅孔雀石,因硅酸盐结构,难以完全硫化,主捕收剂作用有限,需通过辅助捕收剂强化氧化铜回收,实现难浮矿物的高效回收。本试验重点考察了磨矿细度、调整剂用量、辅助捕收剂种类及用量对铜浮选的影响。铜浮选条件试验流程如图 2 所示。

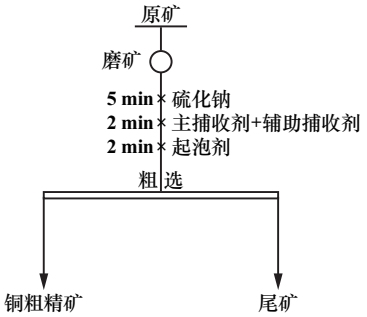


图 2　铜浮选条件试验流程

Fig. 2　Flowchart for copper flotation condition test

2.1.1　磨矿细度试验

在硫化钠用量 2 000 g/t、主捕收剂丁基黄药用量 600 g/t、辅助捕收剂 TP 用量 100 g/t、2 号油用量 40 g/t 条件下进行了磨矿细度试验,结果如图 3 所示。随着 -0.074 mm 粒级所占比例增大,尾矿 Cu 品位与回收率逐渐降低后趋于稳定,精矿铜品位呈先升高后降低趋势,在磨矿细度-0.074 mm 粒级占 74%时,尾矿损失率较低,精矿中铜品位和回收率较高。适宜的磨矿细度为-0.074 mm 粒级占 74%。

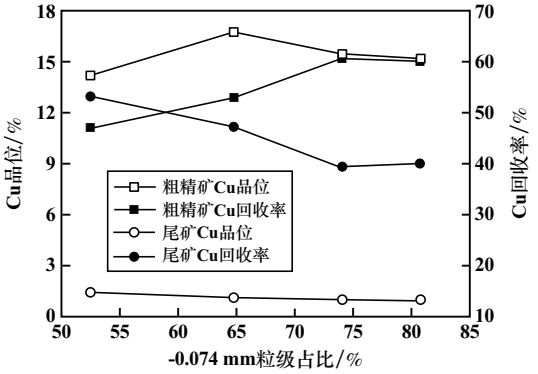


图 3　磨矿细度试验结果

Fig. 3　Grinding fineness test result

2.1.2　粗选硫化钠用量试验

硫化钠为氧化铜浮选中常用的活化剂,它可在矿物表面形成类硫化铜层,从而有利于捕收剂在矿物表面吸附,并可通过调节表面电性影响药剂作用,但用量过高可能导致“过硫化”。在磨矿细度-0.074 mm 粒级占 74%,丁基黄药用量 200 g/t、TP 用量 100 g/t、2 号油用量 40 g/t 条件下,进行了粗选硫化钠用量试验,结果如图 4 所示。随着硫化钠用量增加,粗精矿铜品位与回收率均呈先升高后降低的趋势。适宜的粗选硫化钠用量为 2 000 g/t。

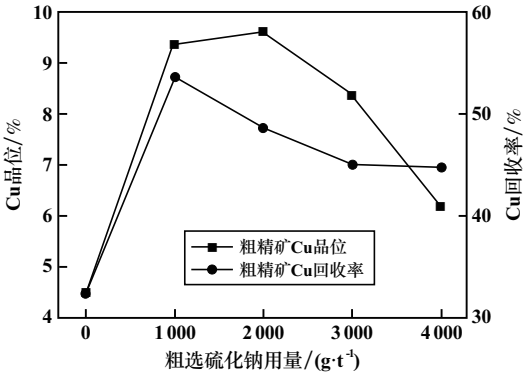


图 4　粗选硫化钠用量试验结果

Fig. 4　Test results of Na_2S dosage for roughing

2.1.3　辅助捕收剂种类及用量试验

氧化铜矿物表面羟基及硅酸盐结构极性强,天然疏水性差,难以被传统硫化矿捕收剂有效吸附。单一黄药捕收剂体系对硅酸盐型氧化铜矿物的捕收效率有限,尤其在表面致密、硫化不足的情况下,浮选回收率偏低。因此,引入辅助捕收剂成为改善复杂氧化铜矿浮选性能的重要途径。在磨矿细度-0.074 mm 粒级占 74%,丁基黄药用量 200 g/t、硫化钠用量 2 000 g/t、2 号油用量 40 g/t、辅助捕收剂用量 100 g/t 条件下,进行了辅助捕收剂种类试验,结果如图 5 所示。在单一黄药捕收剂体系下,粗精矿 Cu 品位较高但回收率偏低;加入不同辅助捕收剂后,浮选指标均有一定程度改善,其中 TP 与丁基黄药组合使用时能获得较高的粗精矿 Cu 品位和 Cu 回收率以及较低的尾矿 Cu 品位。选取 TP 作为辅助捕收剂。

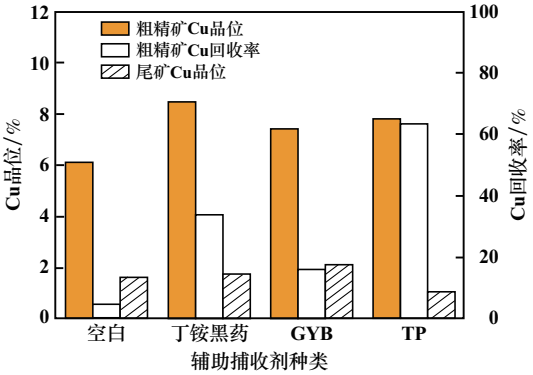


图 5　辅助捕收剂种类试验结果

Fig. 5　Test results of ancillary collector type

2.1.4　粗选丁基黄药用量试验

丁基黄药是氧化铜矿浮选中常用的捕收剂,其捕收效果与矿物硫化程度及浮选条件密切相关。通过优化硫化过程并配合辅助捕收剂,可提高对孔雀石等易硫

化矿物的回收率与选择性。在磨矿细度-0.074 mm 粒级占74%,粗选硫化钠用量2 000 g/t、TP 用量100 g/t、2号油用量40 g/t 条件下,进行了粗选丁基黄药用量试验,结果如图6所示。随着丁基黄药用量增加,粗精矿 Cu 品位与回收率均逐渐上升;丁基黄药用量超过600 g/t 后,铜回收率趋于稳定。适宜的粗选丁基黄药用量为600 g/t。

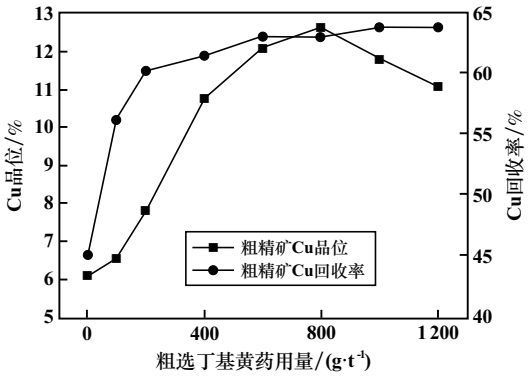


图6 粗选丁基黄药用量试验结果

Fig.6 Test results of butyl xanthate dosage for roughing

2.1.5 粗选 TP 用量试验

采用 TP 作为辅助捕收剂,在磨矿细度-0.074 mm 粒级占74%,粗选硫化钠用量2 000 g/t、丁基黄药用量600 g/t、2号油用量40 g/t 条件下,进行了粗选 TP 用量试验,结果如图7所示。随着粗选 TP 用量增加,粗精矿 Cu 品位先升高后降低,Cu 回收率逐渐升高。适宜的粗选 TP 用量为100 g/t。

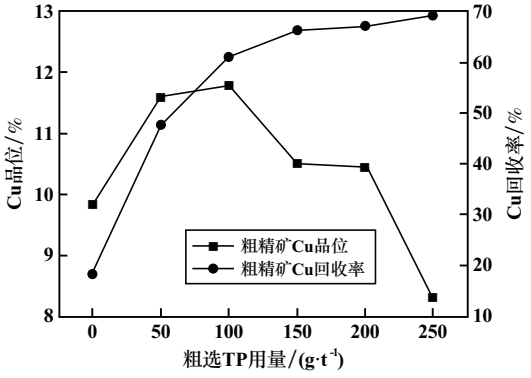


图7 粗选 TP 用量试验结果

Fig.7 Test results of TP dosage for roughing

2.2 钴矿物磁选试验

该矿石中钴主要赋存于含铜钴硬锰矿、水钴矿、赤褐铁矿和粉砂岩中,这些矿物具有不同程度的弱磁性。

在磨矿细度-0.074 mm 粒级占74%,硫化钠用量2 000 g/t、丁基黄药用量600 g/t、TP 用量100 g/t、2号油用量40 g/t 条件下,高效浮选回收铜之后的尾矿用于强磁选富集回收钴。

2.2.1 磁场强度试验

磁场强度是磁选过程的关键参数,决定磁性矿物的捕获效率。磁场强度过低,难以吸附弱磁性矿物;磁场强度过高则易夹带脉石,影响精矿品位。在脉动频率200 r/min 条件下,进行了磁场强度试验,结果如图8所示。随着磁场强度提高,钴品位下降而回收率升高;磁场强度超过1 000 mT 后,钴品位和回收率趋于平衡。适宜的磁场强度为1 000 mT。

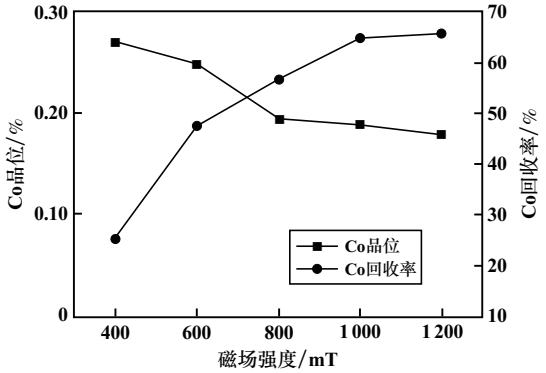


图8 磁场强度试验结果

Fig.8 Test results of magnetic field intensity

2.2.2 脉动频率试验

脉动频率是影响磁选性能的重要因素,它可改变矿浆流动性及矿物与磁介质的接触效率。适度的脉动有助于防止堵塞并冲洗非磁性颗粒,而脉动频率过高会缩短接触时间,导致回收率下降。磁场强度1 000 mT 条件下,进行了脉动频率试验,结果如图9所示。随着脉动频率增大,钴品位升高而回收率下降。综合考虑,适宜的脉动频率为200 r/min。

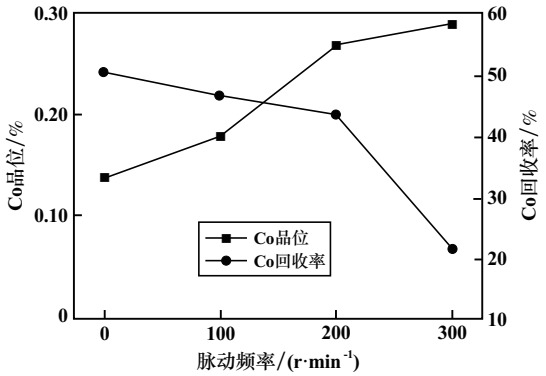


图9 脉动频率试验结果

Fig.9 Test results of pulsation frequency

2.3 全流程试验

为验证流程的稳定性,在开路试验基础上适当调整药剂用量,开展了全流程试验,试验流程如图10所示,试验结果如表5所示。通过二粗二扫二精铜浮选,

获得了 Cu 品位 16.31%、Co 品位 0.24%,相应回收率分别为 80.82%、29.41%的铜精矿;铜浮选尾矿在磁场强度 1 000 mT、脉动频率 200 r/min 条件下经一粗一扫磁选,获得了 Cu 品位 1.62%、Co 品位 0.304%,相应回收率分别为 8.69%、40.34%的含钴精矿。

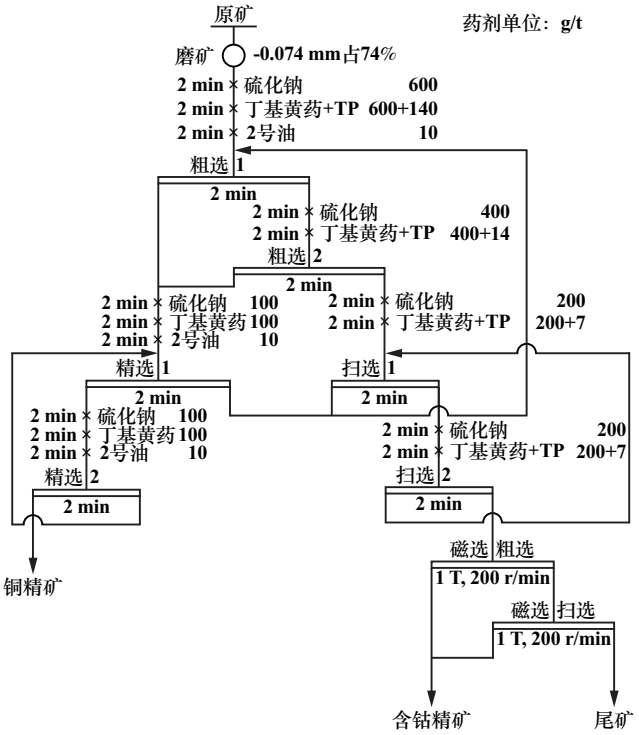


图 10　全流程试验流程

Fig. 10　Flowchart for closed-circuit test

表 5　全流程试验结果

Table 5　Closed-circuit test results

产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
		Cu	Co	Cu	Co
铜精矿	12.56	16.31	0.240	80.82	29.41
含钴精矿	13.60	1.62	0.304	8.69	40.34
尾矿	73.84	0.36	0.042	10.49	30.25
原矿	100.00	2.53	0.103	100.00	100.00

3　结论

1) 刚果(金)某复杂难处理氧化铜钴矿中铜和钴分别以孔雀石、假孔雀石、硅孔雀石及铜钴硬锰矿、水钴矿等形式赋存,矿物组成复杂,假孔雀石和硅孔雀石可浮性差,导致铜和钴的浮选分选回收困难。

2) 采用硫化-捕收协同浮选体系,通过硫化钠活化并引入辅助捕收剂TP,可显著改善假孔雀石、硅孔雀石等难浮氧化铜矿物的浮选性能,提高铜的回收率,浮选过程稳定且易于控制。

3) 通过优先浮选回收铜-强磁选强化回收钴的联合流程,优化药剂制度与操作参数后,可获得 Cu 品位 16.31%、回收率 80.82%的铜精矿及 Co 品位 0.304%、回收率 40.34%的含钴精矿,实现了该复杂氧化铜钴矿的高效综合回收,可为同类型矿石的资源利用提供技术依据。

参考文献(References):

[1] 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.

[2] 高永强. 水钴矿硫化浮选行为及钙离子强化机理研究[D]. 长沙:中南大学, 2024:2.
Gao Yongqiang. Study on the behavior of sulfide flotation of heterogenite and the mechanism of calcium ionenhancement[D]. Changsha: Central South University, 2024:2.

[3] 薛伟. 刚果(金)某铜钴矿选矿新工艺研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2019(6):27-31.
Xue Wei. Study on the new technology of copper-cobalt ore processing in DRC[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2019(6):27-31.

[4] 叶平先,王刚. 刚果(金)某复杂难选高钙镁铜钴矿选矿工艺研究[J]. 矿冶, 2022,31(1):41-48.
Ye Pingxian, Wang Gang. Research on the mineral processing of a complex refractory high Ca-Mg copper-cobalt ore in Congo (Kinshasa)[J]. Mining and Metallurgy, 2022,31(1):41-48.

[5] 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.

[6] 范宛惠,谢蕾,郭泽,等. 某高硫低品位铜矿浮选试验研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(4):185-188.
Fan Wanhui, Xie Lei, Guo Ze, et al. Investigation on flotation of low-grade high-sulfur copper ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(4):185-188.

引用本文:杜长臻,何桂春,孟庆波,等. 刚果(金)某复杂难处理氧化铜钴矿综合回收试验研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(4):131-135.
Du Changzhen, He Guichun, Meng Qingbo, et al. Experimental study on comprehensive recovery of a complex refractory copper-cobalt oxide ore from DRC[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(4):131-135.