辅助捕收剂 MC-07 应用于刚果(金)某氧化铜钴矿的浮选试验研究①

李勇[1,2], 汤川[1,2], 陈兴海[1,2], 刘杰[1,2], 周宽达[1,2], 兰福荫[1,2], 陆智国[1,2]
(1.华刚矿业股份有限公司, 北京 100083; 2.中铁资源集团有限公司, 北京 100083)

摘 要: 针对刚果(金)某氧化铜钴矿原矿氧化率高、矿石含泥量大、原捕收剂丁基黄药用量高等问题,进行了辅助捕收剂 MC-07 应用于该矿石的浮选试验研究。结果表明:氧化铜浮选段以丁基黄药为捕收剂,丁基黄药总用量 400 g/t,可以获得铜回收率 78.41%、钴回收率 38.93%的总精矿;采用辅助捕收剂 MC-07+常规捕收剂丁基黄药的组合捕收剂药剂制度,MC-07 总用量 33 g/t、丁基黄药总用量 99 g/t,可以获得铜回收率 78.76%、钴回收率 39.30%的总精矿。通过添加少量辅助捕收剂 MC-07,在技术指标相近的条件下,可以大幅降低捕收剂丁基黄药用量。

关键词: 氧化铜钴矿; 辅助捕收剂; MC-07; 浮选; 捕收剂; 丁基黄药; 铜钴精矿
中图分类号: TD923 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.06.017
文章编号: 0253-6099(2025)06-0096-06

Experimental Study on Using Auxiliary Collector MC-07 in Flotation of Copper-Cobalt Oxide Ore from Democratic Republic of Congo

LI Yong[1,2], TANG Chuan[1,2], CHEN Xinghai[1,2], LIU Jie[1,2], ZHOU Kuanda[1,2], LAN Fuyin[1,2], LU Zhiguo[1,2]
(1.*Huagang Mining Co., Ltd., Beijing* 100083, *China*; 2.*China Railway Resources Group Co., Ltd., Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of high oxidation rate, high content of slime and high consumption of collector (butyl xanthate) for the copper-cobalt oxide ore from the Democratic Republic of the Congo, experimental researches were carried out with an auxiliary collector (MC-07) in its flotation process. The results show that at the stage of copper oxide ore flotation, with butyl xanthate as a single collector at a total dosage of 400 g/t, the concentrate is produced totally with a copper recovery of 78.41% and a cobalt recovery of 38.93%; while by using the conventional collector of butyl xanthate in combination with an auxiliary collector of MC-07, at the dosage of 99 g/t and 33 g/t respectively, the concentrate is finally produced totally with a copper recovery of 78.76% and a cobalt recovery of 39.30%. It is shown that small additions of auxiliary collector of MC-07 can reduce the dosage of butyl xanthate with the similar technical indicators.

Key words: copper-cobalt oxide ore; auxiliary collector; MC-07; flotation; collector; butyl xanthate; copper-cobalt concentrate

刚果(金)作为全球重要的铜钴资源产地,其矿石的高效开发利用对全球新能源产业及区域经济发展具有重要意义[1-2]。刚果(金)某铜钴矿位于加丹加铜矿带,矿床受热液改造程度低,氧化率较高,氧化面深度较大,矿物组成复杂,矿石含泥量大、选冶回收难度大[3-4]。浮选是铜钴矿选矿的主要方法,硫化浮选法是目前工业上处理氧化铜钴矿的主要方法,适用于含碳酸盐氧化铜矿石,如孔雀石、赤铜矿、蓝铜矿等,目前工业上硫化浮选法在使用硫化剂(硫化钠或硫氢化钠)将氧化铜矿物硫化后,主要使用黄药类捕收剂进行浮选[5-8]。黄药捕收性能较弱,在高氧化率铜钴矿浮选过程中,存在捕收剂用量大、药剂成本高的问题[9-10]。近

① **收稿日期**: 2025-06-23
基金项目: 中国中铁股份有限公司 2025 年重大专项课题(2025-专项-03)
作者简介: 李勇(1986—),男,广西桂林人,硕士,高级工程师,主要研究方向为非洲铜钴矿资源高效利用。E-mail:624603184@qq.com

年来,针对氧化矿浮选难题,研究者通过分子结构设计优化捕收剂的官能团与吸附性能,取得了显著进展。目前对氧化铜矿浮选捕收剂的开发主要集中在两个方面,一是使用组合捕收剂,使不同种类的捕收剂产生协同效应;二是研制新型高效捕收剂[11]。MC-07 是一种新型螯合型辅助捕收剂,其分子中的多活性基团可与铜、钴离子形成稳定络合物,具备强捕收性,并且具备一定的选择性和起泡性。

本文以刚果(金)某典型高氧化率铜钴矿为研究对象,系统研究添加 MC-07 辅助捕收剂的浮选效果,并与以丁基黄药为捕收剂的常规捕收剂药剂制度试验结果进行对比,确定辅助捕收剂 MC-07 应用于该矿的技术、经济可行性,研究结果可为加丹加铜矿带同类矿石资源的绿色高效回收提供技术参考。

1　原矿性质

原矿化学多元素分析结果见表 1。原矿中有价元素 Cu、Co 含量分别为 2.36%和 0.133%;杂质元素 Fe、Mn 含量分别为 2.03%、0.117%;耗酸物质 CaO、MgO 含量较高,分别为 5.74%和 10.80%。

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	Fe	Mn	S	CaO	MgO	Al_2O_3	SiO_2
2.36	0.133	2.03	0.117	0.14	5.74	10.80	9.31	28.69

原矿铜、钴物相分析结果见表 2。原矿中铜以自由氧化铜为主,其次为次生硫化铜和结合氧化铜,还有少量原生硫化铜,占比 2.12%;原矿中钴以氧化钴为主,还有少量脉石中钴、硫化钴及硫酸钴。

表 2　原矿铜、钴物相分析结果

Table 2　Analysis results of copper and cobalt phase in raw ore

元素	物相	含量(质量分数)/%	分布率/%
铜	原生硫化铜	0.05	2.12
	次生硫化铜	0.31	13.14
	自由氧化铜	1.61	68.22
	结合氧化铜	0.39	16.52
	合计	2.36	100.00
钴	硫化钴	0.005	3.76
	硫酸钴	0.001	0.75
	氧化钴	0.121	90.98
	脉石中钴	0.006	4.51
	合计	0.133	100.00

根据原矿物相分析结果,结合镜下鉴定结果可知:铜以自由氧化铜为主,矿物形式主要为孔雀石、假孔雀石、蓝铜矿等;其次为次生硫化铜中铜,主要为辉铜矿、蓝辉铜矿及铜蓝等矿物;结合氧化铜主要为褐铁矿、铜钴硬锰矿等铁氧结合物中的铜。原生硫化铜占比较低。钴主要为硫化钴和氧化钴两类。硫化钴矿物形式为硫铜钴矿;氧化钴矿物形式为水钴矿、含钴褐铁矿、含钴铁氧化物;脉石中钴主要为脉石矿物中类质同象所含的钴。脉石矿物主要为石英、长石、云母、绿泥石、白云石等。

2　试验方法

该氧化铜钴矿原生产工艺流程为:原矿经一次粗选、一次扫选、五次精选的硫化铜闭路浮选,得到硫化铜精矿;硫化铜浮选尾矿经一次粗选、六次扫选的氧化铜全开路浮选,得到氧化铜精矿(分高品位氧化铜精矿和低品位氧化铜精矿)。生产中使用的浮选药剂为捕收剂丁基黄药、硫化剂硫氢化钠、起泡剂松醇油。

MC-07 由青岛柏垚科技有限公司提供,它是一种新型氧化铜螯合捕收剂,具有较强的捕收能力和起泡性能,主要用作氧化铜矿的辅助捕收剂,尤其适用于复杂硫化-氧化混合铜矿、单一氧化铜矿等。该药剂为浅黄色油状液体,具有良好的流动性,不易燃,pH 值 6.0~7.0,性质稳定,无刺激性气味,使用过程以原液添加。本试验的目的是研究新型捕收剂 MC-07 应用于氧化铜钴矿的辅助捕收效果,同时与常规捕收剂药剂制度的浮选效果进行对比。因此,硫化矿浮选试验以常规捕收剂丁基黄药进行试验,氧化矿浮选试验分别进行常规捕收剂丁基黄药和辅助捕收剂 MC-07+常规捕收剂丁基黄药的组合捕收剂试验,并比较两种捕收剂体系的技术经济指标。

试验中,使用 Φ240×90 锥形球磨机进行磨矿,在 XFD-3.0 L 挂槽式浮选机中进行粗选及扫选,在 XFD-1.0 L 挂槽式浮选机中进行硫化铜精选,浮选用水为生产用新水,浮选温度为室温(25 ℃左右)。试验使用的常规捕收剂丁基黄药、硫化剂硫氢化钠、起泡剂松醇油均为生产现场使用的工业级浮选药剂。

3　试验结果

3.1　硫化矿浮选试验

参照现场工艺流程及药剂制度进行常规捕收剂硫化矿浮选,试验流程如图 1 所示,试验结果如表 3 所示。针对铜品位 2.31%、钴品位 0.135%的原矿,经过一次粗选、一次扫选、五次精选的硫化矿闭路浮选,可获得产率 0.53%、铜品位56.52%、钴品位 0.248%、铜回

收率 12.97%、钴回收率 0.98%的硫化铜精矿。

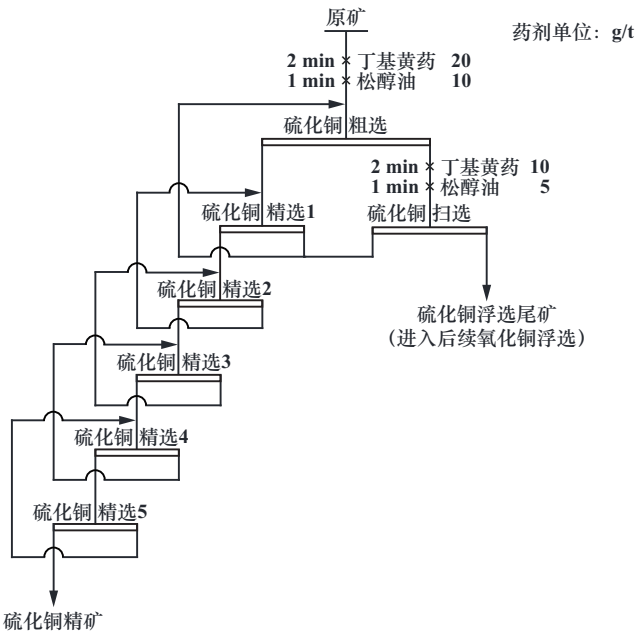


图 1 硫化铜闭路浮选试验流程

Fig. 1 Flowchart for closed-circuit flotation of copper sulfide ore

表 3 硫化铜闭路浮选试验结果

Table 3 Closed-circuit flotation results of copper sulfide ore

产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
		Cu	Co	Cu	Co
硫化铜精矿	0.53	56.52	0.248	12.97	0.98
硫化铜浮选尾矿	99.47	2.02	0.134	87.03	99.02
原矿	100.00	2.31	0.135	100.00	100.00

3.2 氧化矿浮选试验

采用硫化黄药浮选法选别氧化矿，硫化效果是浮选效果的关键所在。参考生产现场药剂制度，使用硫氢化钠作为硫化剂。由于原矿氧化率近 70%，且铜品位较高，即原矿中氧化铜含量较高，需将氧化铜全部硫化，硫化剂用量较大。同时由于硫化剂硫氢化钠对氧化铜矿具有适量起活化作用、过量起抑制作用的双重特性[12]，参考生产现场加药方式，氧化矿浮选采用分段加药，确保每段硫化剂不过量。氧化矿浮选条件试验采用一次粗选、三次扫选全开路流程，四次开路浮选精矿混合作为氧化铜精矿。氧化矿浮选试验流程见图 2。

3.2.1 硫化剂用量条件试验

按照图 2 所示流程，固定氧化铜扫选 1、2、3 的硫化剂用量分别为 700、700、500 g/t，对应的捕收剂用量分别为 50、50、40 g/t，起泡剂用量均为 2.5 g/t，氧化铜粗选捕收剂用量 100 g/t，进行了氧化铜粗选硫化剂用量条件试验，结果见表 4。随着硫化剂总用量由 2 900 g/t 增加至 3 400 g/t 时，氧化铜精矿铜、钴品位及回收率均增加，表明硫化效果增强；继续逐步增加硫化剂用量至 4 900 g/t 时，氧化铜精矿铜、钴品位及回收率均逐步降低，表明硫化剂已过量，硫化剂开始起抑制作用，且随着用量增加，抑制作用增强。适宜的氧化铜粗选硫化剂用量为 1 500 g/t，硫化剂总用量为 3 400 g/t。

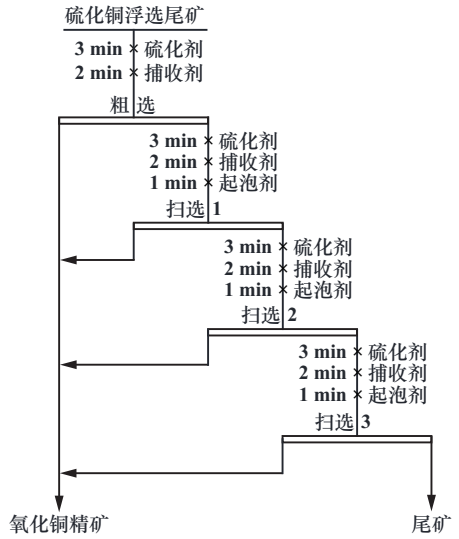


图 2 氧化铜矿浮选试验流程

Fig. 2 Flowchart for flotation of copper oxide ore

表 4 硫化剂用量试验结果

Table 4 Test results of sulfiding agent dosage

硫化剂用量/(g·t^{-1})		氧化铜精矿品位/%		精矿回收率/%	
粗选	总用量	Cu	Co	Cu	Co
1 000	2 900	11.17	0.358	38.00	21.31
1 500	3 400	13.21	0.426	38.94	23.28
2 000	3 900	12.51	0.405	37.15	21.68
2 500	4 400	11.72	0.400	35.41	20.26
3 000	4 900	10.63	0.373	34.62	20.23

3.2.2 常规捕收剂用量条件试验

参照现场工艺，使用常规捕收剂丁基黄药，粗选硫化剂用量 1 500 g/t，其他条件不变，按照图 2 所示流程，进行了丁基黄药用量试验，各作业捕收剂用量及对应的试验结果见表 5。随着捕收剂总用量由 230 g/t 逐步提高至 430 g/t 时，氧化铜精矿铜、钴回收率均逐步提高，氧化铜精矿铜、钴品位逐步降低。综合考虑氧化铜精矿铜、钴品位及回收率指标，确定粗选和总捕收剂用量分别为 120 g/t 和 280 g/t。

3.2.3 组合捕收剂用量及配比试验

按照图 2 所示流程，粗选、扫选 1～3 硫化剂用量分别为 1 500、700、700、500 g/t，不添加起泡剂，以辅助捕收剂 MC-07 与常规捕收剂丁基黄药按质量比 1∶1组

表 5　丁基黄药用量及对应的试验结果

Table 5　Dosage of butyl xanthate and corresponding test results

丁基黄药用量/(g·t^{-1})					氧化铜精矿品位/%		精矿回收率/%	
粗选	扫选 1	扫选 2	扫选 3	合计	Cu	Co	Cu	Co
100	50	50	30	230	14.74	0.489	40.15	24.34
120	60	60	40	280	14.36	0.457	43.20	24.88
140	70	70	50	330	14.36	0.449	44.22	25.60
160	80	80	60	380	13.21	0.405	44.70	25.64
180	90	90	70	430	11.01	0.337	45.29	25.73

合作为捕收剂进行氧化铜浮选,组合捕收剂用量及对应的试验结果见表 6。随着组合捕收剂(MC-07+丁基黄药)用量由 24 g/t 逐步提高至96 g/t,氧化铜精矿铜、钴品位逐步降低,铜、钴回收率逐步提高。综合考虑氧化铜精矿铜、钴品位及回收率指标,确定氧化铜浮选组合捕收剂的适宜用量为 96 g/t。

表 6　组合捕收剂用量及对应的试验结果

Table 6　Dosage of combined collector and corresponding test results

组合捕收剂用量/(g·t^{-1})					氧化铜精矿品位/%		精矿回收率/%	
粗选	扫选 1	扫选 2	扫选 3	合计	Cu	Co	Cu	Co
12	6	3	3	24	11.56	0.299	36.03	14.82
24	12	6	6	48	10.00	0.290	37.32	16.91
36	18	9	9	72	9.20	0.276	39.10	17.51
48	24	12	12	96	8.76	0.265	42.74	21.26
60	30	15	15	120	7.41	0.267	43.73	24.38

组合捕收剂用量 96 g/t(粗选、扫选 1~3 用量分别为 48、24、12、12 g/t),其他条件不变,考察了丁基黄药与 MC-07 配比(质量比)对氧化铜浮选效果的影响,具体配比及对应的试验结果见表 7。在组合捕收剂用量一定的情况下,由于丁基黄药具有相对更好的选择性、辅助捕收剂 MC-07 具备更强的捕收性和起泡性,随着丁基黄药配比增加,铜、钴品位逐渐升高,铜、钴回收率逐渐降低。综合考虑氧化铜精矿铜、钴品位及回收率指标,确定适宜的丁基黄药与 MC-07 配比为 3∶1。

表 7　丁基黄药与 MC-07 配比及对应的试验结果

Table 7　Ratio of butyl xanthate to MC-07 and corresponding test results

丁基黄药与 MC-07 配比	氧化铜精矿品位/%		氧化铜精矿回收率/%	
	Cu	Co	Cu	Co
1∶1	8.05	0.265	48.54	29.04
2∶1	9.75	0.291	47.95	24.55
3∶1	13.59	0.335	44.67	19.44
4∶1	14.12	0.351	40.23	18.74

3.3　全流程浮选试验

在生产现场,硫化剂用量偏低或偏高都会大幅降低浮选效果。氧化矿采用闭路流程浮选时,氧化矿扫选精矿返回前段氧化矿浮选时,其中残留的硫化剂会影响浮选效果。同时由于原矿氧化率高、原矿性质波动大,需经常调整每段硫化剂用量以使其处于适宜的用量范围内,扫选精矿残留的硫化剂会极大地增加调整难度,现场几乎无法操作,因此生产现场采用七段全开路浮选。参考现场生产工艺流程,这里采用一次粗选、六次扫选的七段全开路浮选流程。试验流程见图 3,其中硫化铜浮选部分药剂制度相同,氧化铜浮选部分常规捕收剂体系和组合捕收剂体系药剂制度见表 8,全流程浮选试验结果见表 9。

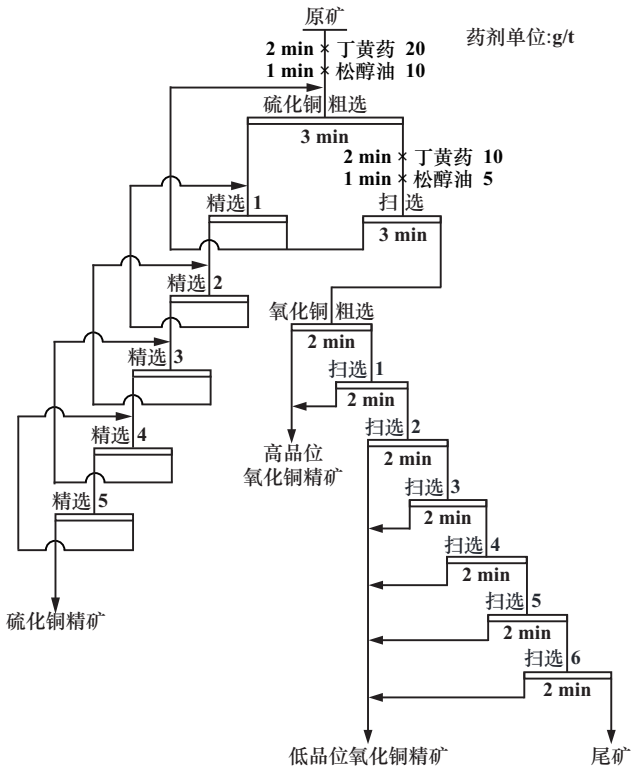


图 3　全流程浮选试验流程

Fig. 3　Flowchart for whole-process flotation

表 8　氧化铜浮选段药剂用量

Table 8　Reagent dosages for copper oxide flotation　g/t

作业名称	常规捕收剂体系			组合捕收剂体系		
	硫氢化钠	丁基黄药	松醇油	硫氢化钠	MC-07	丁基黄药
粗选	1 500	120	0	1 500	12	36
扫选 1	700	60	2.5	700	6	18
扫选 2	700	60	2.5	700	3	9
扫选 3	500	40	2.5	500	3	9
扫选 4	500	40	2.5	500	3	9
扫选 5	500	40	2.5	500	3	9
扫选 6	500	40	2.5	500	3	9
合计	4 900	400	15.0	4 900	33	99

表9 全流程浮选试验结果

Table 9 Whole-process flotation test results

药剂体系	产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
			Cu	Co	Cu	Co
常规捕收剂体系	硫化铜精矿	0.51	56.83	0.255	12.89	0.96
	高品位氧化铜精矿	4.81	19.58	0.527	42.14	18.84
	低品位氧化铜精矿	8.33	6.27	0.308	23.39	19.12
	总精矿	13.64	12.84	0.383	78.41	38.93
	尾矿	86.36	0.63	0.200	21.59	61.03
	原矿	100.00	2.30	0.134	100.00	100.00
组合捕收剂体系	硫化铜精矿	0.56	56.08	0.240	13.43	1.00
	高品位氧化铜精矿	5.27	18.93	0.492	42.70	19.23
	低品位氧化铜精矿	9.01	5.86	0.285	22.62	19.08
	总精矿	14.84	12.40	0.357	78.76	39.30
	尾矿	85.16	0.58	0.096	21.24	60.70
	原矿	100.00	2.33	0.135	100.00	100.00

原矿磨矿后经一次粗选、一次扫选、五次精选的硫化矿闭路浮选,以及一次粗选、六次扫选的氧化矿全开路浮选,氧化矿浮选段常规捕收剂体系以丁基黄药为捕收剂、总用量400 g/t,硫化剂硫氢化钠总用量4 900 g/t、起泡剂松醇油总用量15 g/t条件下,可以获得产率13.64%、铜品位12.84%、钴品位0.383%、铜回收率78.41%、钴回收率38.93%的总精矿;氧化矿浮选段以MC-07+丁基黄药为组合捕收剂,总用量为(33+99) g/t、硫化剂硫氢化钠总用量4 900 g/t条件下,可获得产率14.84%、铜品位12.40%、钴品位0.357%、铜回收率78.76%、钴回收率39.30%的总精矿;在流程相同、硫化剂种类和用量相同的条件下,针对高氧化率铜钴矿石,与采用以丁基黄药作捕收剂的常规捕收剂方案相比,采用以辅助捕收剂MC-07与丁基黄药组合的捕收剂方案可以获得指标接近的试验结果,但组合捕收剂方案在氧化矿浮选过程中添加少量辅助捕收剂MC-07,利用其优良的捕收性能和一定的起泡性能,可大幅降低常规捕收剂丁基黄药用量,降低选矿药剂成本。

4 结论

1) 刚果(金)某氧化铜钴矿原矿铜品位2.36%、钴品位0.133%。原矿中铜以自由氧化铜为主,占比68.22%,矿物形式主要为孔雀石、假孔雀石、蓝铜矿等;原矿中钴以氧化钴为主,占比90.98%,矿物形式主要为水钴矿、含钴褐铁矿、含钴铁氧化物及脉石矿物中类质同象所含的钴。原矿耗酸杂质钙镁碳酸盐矿物含量高,直接浸出酸耗高,经济效益差,因此先采用硫化浮选法富集目的矿物。

2) 氧化矿浮选段采用以丁基黄药为捕收剂的常规药剂制度,在硫化剂硫氢化钠总用量4 900 g/t、捕收剂丁基黄药总用量400 g/t、起泡剂松醇油总用量15 g/t条件下,可获得铜回收率78.41%、钴回收率38.93%的总精矿;氧化矿浮选段采用以辅助捕收剂MC-07+常规捕收剂丁基黄药的组合捕收剂药剂制度,在流程和硫化剂种类及用量相同的条件下,辅助捕收剂MC-07和丁基黄药总用量分别为33 g/t和99 g/t,不添加起泡剂,可获得铜回收率78.76%、钴回收率39.30%的总精矿。

3) 辅助捕收剂MC-07具有较强的捕收性能、一定的选择性能及较强的起泡性能,在不改变现场流程,且不对现有药剂制度进行大幅调整的前提下,仅需在氧化矿浮选过程中添加少量辅助捕收剂MC-07,在获得铜、钴品位及回收率接近的技术指标条件下,可大幅降低常规捕收剂丁基黄药用量。

参考文献(References):

[1] 杨卉芃,王威. 全球钴矿资源现状及开发利用趋势[J]. 矿产保护与利用, 2019,39(5):41-49.
YANG Huipeng, WANG Wei. Global cobalt resources status and exploitation trends[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019,39(5):41-49.

[2] 黄晓兵,贾密源,龙涛,等. 基于SWOT模型下刚果(金)矿业投资环境分析[J]. 中国矿业, 2017,26(11):96-102.
HUANG Xiaobing, JIA Miyuan, LONG Tao, et al. Analysis of mining investment in Congo (Kinshasa) based on SWOT model[J]. China Mining Magazine, 2017,26(11):96-102.

[3] 赵战锋. 刚果(金)Sicomines铜钴矿矿体氧化率研究[J]. 中国矿山工程, 2016,45(6):1-4.
ZHAO Zhanfeng. Study on oxidation rate of orebodies of Sicomines copper-cobalt deposit in D.R. Congo[J]. China Mine Engineering, 2016,45(6):1-4.

[4] 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.
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.

[5] 梁新星,胡磊,欧阳全胜. 铜钴矿研究进展及发展趋势[J]. 湖南有色金属, 2014,30(3):42-45.
LIANG Xinxing, HU Lei, OUYANG Quansheng. The research status and development trends of Cu-Co ore[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2014,30(3):42-45.

[6] 白洁,艾晶,张行荣. 氧化铜矿浮选药剂研究与应用进展[J]. 现代矿业, 2014,30(12):48-51.
BAI Jie, AI Jing, ZHANG Xingrong. Research and application progress of oxide copper ore flotation reagent[J]. Modern Mining, 2014, 30(12):48-51.

[7] 李江丽,刘殿文,李佳磊,等. 氧化铜矿物浮选的表面硫化研究进展[J]. 有色金属(选矿部分), 2020(5):122-129.
LI Jiangli, LIU Dianwen, LI Jialei, et al. Research progress on sur-

face sulfidization in flotation of oxidized copper ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2020(5):122-129.

[8] 王璐瑶,刘胜,刘广义,等. 铜矿浮选捕收剂研究进展与展望[J]. 铜业工程, 2024(3):69-84.
WANG Luyao, LIU Sheng, LIU Guangyi, et al. A crucial review on research progress for copper ore flotation collectors[J]. Copper Engineering, 2024(3):69-84.

[9] 蔺月萌,韩百岁,姜丽帅,等. 氧化铜矿浮选方法及药剂的研究现状及展望[J]. 矿产综合利用, 2024(3):112-120.
LIN Yuemeng, HAN Baisui, JIANG Lishuai, et al. Research status and prospects of flotation methods and reagents for oxidized copper ore[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024(3):112-120.

[10] 王纪镇,荆茂晨,刘睿华,等. 浮选药剂性能理论分析[J]. 矿产保护与利用, 2023,43(3):10-16.
WANG Jizhen, JING Maochen, LIU Ruihua, et al. Theoretical analysis of flotation reagent performance[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023,43(3):10-16.

[11] 黄凌云,孙鑫,杨思原,等. 氧化铜矿浮选捕收剂研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2020,40(2):88-92.
HUANG Lingyun, SUN Xin, YANG Siyuan, et al. Application and research progress of flotation collectors for copper oxide ore[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020,40(2):88-92.

[12] 杨绵延,马英强,于岩,等. 孔雀石分段硫化的浮选行为及机理研究[J]. 矿产保护与利用, 2021,41(2):80-88.
YANG Mianyan, MA Yingqiang, YU Yan, et al. Staged sulfuartion-flotation of malachite and its mechanism[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021,41(2):80-88.

引用本文:李勇,汤川,陈兴海,等. 辅助捕收剂 MC-07 应用于刚果(金)某氧化铜钴矿的浮选试验研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(6):96-101.
LI Yong,TANG Chuan,CHEN Xinghai, et al. Experimental study on using auxiliary collector MC-07 in flotation of copper-cobalt oxide ore from Democratic Republic of Congo[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(6):96-101.

(上接第 90 页)

[11] 陈超,张裕书,张少翔,等. 川西九龙地区低品位锂辉石浮选试验研究[J]. 矿产综合利用, 2019(4):55-58.
CHEN Chao, ZHANG Yushu, ZHANG Shaoxiang, et al. Flotation test of low-grade spodumene in the Jiulong area of West Sichuan[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(4):55-58.

[12] 荆正强,金凯,张政军,等. 阴阳离子捕收剂高效浮选锂辉石的选矿试验研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(1):80-85.
JING Zhengqiang, JIN Kai, ZHANG Zhengjun, et al. High-efficiency flotation of spodumene with anionic-cationic collectors[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(1):80-85.

[13] 王星. 新疆某锂钽铌铍多金属矿选矿试验研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(4):198-202.
WANG Xing. Beneficiation of Lithium-tantalum-niobium-beryllium polymetallic ore from Xinjiang[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(4):198-202.

引用本文:刘星,李成秀,程仁举,等. 川西某锂铌钽铍多金属矿浮选共富集回收试验研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(6):87-90.
LIU Xing, LI Chengxiu, CHENG Renju, et al. Experimental study on flotation co-enrichment recovery of lithium-niobium-tantalum-beryllium polymetallic ore in Western Sichuan[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(6):87-90.

(上接第 95 页)

[6] 韩文杰. 新型高分子铁矿抑制剂的抑制机理研究[D]. 沈阳:东北大学, 2023.
HAN Wenjie. Study on depression mechanism of new polymer iron ore depressants[D]. Shenyang: Northeast University, 2023.

[7] 王维民,殷平. 金垦淘洗机在本溪矿业公司提质增效中的应用[J]. 现代矿业, 2020,36(12):153-155.
WANG Weimin, YIN Ping. Application of Jinken wachine in improving quality and increasing efficiency in Benxi Mining Company[J]. Modern Mining, 2020,36(12):153-155.

[8] 张汉泉,高王杰,蔡祥,等. 淘洗磁选机在鲕状赤铁矿提铁降杂中的应用[J]. 矿冶工程, 2019,39(3):37-39.
ZHANG Hanquan, GAO Wangjie, CAI Xiang, et al. Application of elutriation magnetic separator in upgrading iron concentrate of oolitic hematite by reducing impurities[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019,39(3):37-39.

引用本文:王斌,刘晓慧,李天霞. 某混合型铁矿高效选铁技术研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(6):91-95.
WANG Bin, LIU Xiaohui, LI Tianxia. Efficient beneficiation technology for mixed iron ores[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(6):91-95.