

doi: 10.20239/j.issn.1671-9492.2025.03.008

某铜矿铜钴有价元素综合回收技术研究

许永伟^{1,2}, 许鹏飞², 华金仓¹, 陶武玲¹, 岳显林¹, 毛益林³, 王晓慧³

(1. 四川会东大梁矿业有限公司, 四川 会东 615200;

2. 兰州大学 化学化工学院, 兰州 730000;

3. 中国地质科学院 矿产综合利用研究所, 成都 610041)

摘 要: 铜、钴资源是我国重要的矿产资源, 对我国的发展起着战略性作用。某铜矿伴生钴, 矿石中铜、钴品位分别为1.01%、0.01%, 具有综合利用的价值。为高效利用该含钴铜矿资源, 提高经济价值, 通过工艺矿物学手段深入分析了原矿性质, 该矿石含硅量较高, 其组分和嵌布关系复杂, 严重影响了选矿过程中含钴矿物的综合回收。基于工艺矿物学研究结果, 开展了浮选条件试验和全流程闭路实验, 确定了适宜的浮选工艺流程及工艺条件, 获得了显著效果。最终确定“铜钴混合浮选—铜钴分离”的工艺技术流程, 混合浮选采用“一次粗选、三次精选、两次扫选”流程, 分离浮选采用“一次粗选、一次精选、两次扫选”流程。当磨矿细度为-0.074 mm占75%、氢氧化钠用量为7 500 g/t、硫酸铜用量750 g/t、丁基黄药用量400 g/t时, 选矿指标最优, 重点针对铜钴分离开展了详细的试验, 采用粗精矿再磨及黄铁矿组合抑制剂“石灰+EMT-22”, 实现了铜钴有效分离, 当粗精矿再磨细度为-0.045 mm粒级占66.40%, 石灰用量为5 000 g/t, EMT-22用量为800 g/t时, 分离效果最好。实验室闭路实验可获得产率3.77%、铜品位24.61%、铜回收率92.11%的铜精矿, 以及产率1.08%、钴硫精矿中钴品位0.29%、钴回收率31.45%的钴硫精矿。研究结果达到了对铜、钴等矿物综合回收的目的, 为高效开发利用该铜矿资源及类似资源提供了技术参考。

关键词: 铜矿; 硫钴精矿; 铜钴混合浮选; 铜钴分离; 综合回收

中图分类号: TD952 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-9492(2025)03-0065-08

Research on Comprehensive Recovery Technology of Valuable Elements of Copper and Cobalt in a Copper Ore

XU Yongwei^{1,2}, XU Pengfei², HUA Jincang¹, TAO Wuling¹,
YUE Xianlin¹, MAO Yilin³, WANG Xiaohui³

(1. Sichuan Huidong Daliang Mining Co., Ltd., Huidong 615200, Sichuan, China;

2. College of Chemistry & Chemical Engineering, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

3. Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chengdu 610041, China)

Abstract: Copper and cobalt resources are important mineral resources in China and play a strategic role in its development. A certain copper mine is associated with cobalt, and the copper and cobalt grades in the ore are 1.01% and 0.01%, respectively, which have comprehensive utilization value. In order to efficiently utilize the cobalt containing copper ore resources and improve economic value, the properties of the original ore were analyzed in depth through process mineralogy methods. The ore has a high silicon content, and its composition and distribution relationships are complex, which seriously affects the comprehensive recovery of cobalt containing minerals in the beneficiation process. Based on the research results of process mineralogy, flotation condition tests and full process locked-cycle tests were carried out, and suitable flotation process flowsheet and conditions were determined, achieving significant results. The final technological process of “copper-cobalt bulk flotation-copper cobalt separation” was determined. The bulk flotation adopted the process of “one roughing, three cleanings, and two scavengings”, while the separation flotation adopted the process of “one roughing, one cleaning, and two scavengings”. When the grinding fineness is -0.074 mm accounting for 75%, the sodium hydroxide dosage is

收稿日期: 2024-03-26

基金项目: 四川省重点研发计划项目(2022YFS0453)

作者简介: 许永伟(1988—), 男, 青海乐都人, 硕士, 高级工程师, 主要从事选矿技术研究与管理。

7 500 g/t, the copper sulfate dosage is 750 g/t, and the butyl xanthate dosage is 400 g/t, the beneficiation indexes are optimal. Detailed tests were conducted on copper and cobalt separation, using a combination depressant of rough concentrate regrinding and pyrite “lime+EMT-22” to achieve effective separation of copper and cobalt. When the rough concentrate regrinding fineness is -0.045 mm , accounting for 66.40%, the lime dosage is 5 000 g/t, and the EMT-22 dosage is 800 g/t, the separation effect is the best. The locked-cycle tests in the laboratory can obtain copper concentrate with a yield of 3.77%, a copper grade of 24.61%, and a copper recovery of 92.11%, as well as cobalt-sulfur concentrate with a yield of 1.08%, a cobalt grade of 0.29%, and a cobalt recovery of 31.45%. The research results have achieved the goal of comprehensive recovery of minerals such as copper and cobalt, providing technical reference for the efficient development and utilization of this copper mine resource and similar resources.

Key words: copper ore; sulfur-cobalt concentrate; copper-cobalt bulk flotation; copper-cobalt separation; comprehensive recovery

随着世界经济的发展,铜、钴等各种金属的需求量呈快速增长态势。虽然我国有色金属矿产资源种类较为齐全,但大部分资源呈贫、细、杂的特点,综合利用程度低,浪费严重^[1-3]。我国铜钴资源储量不足,铜资源储量占世界铜资源储量的4%^[4],钴资源储量仅占世界钴资源储量的1.14%,资源储量保证程度低,人均占有量少,对外依存度高^[5]。我国大部分铜依赖进口^[6],钴主要依赖于从刚果(金)等钴资源多的国家进口,产量也不能满足国家的发展需求^[7-9]。为保障我国铜钴冶炼原料的稳定供应,加强国内铜钴矿山资源的综合利用刻不容缓^[10]。钴常与铜、镍等矿物伴生,全球绝大多数的钴是作为铜或镍的副产品^[11]。我国的钴资源分布相对集中,主要是与硫化铜矿伴生,开展该类铜钴资源的高效综合回收利用研究意义重大^[12-13]。

某铜矿组分及嵌布关系复杂,矿石中主要有价元素为铜和钴。矿石中含铜矿物主要为黄铜矿和斑铜矿,含钴矿物主要为黄铁矿、黄铜矿,还有少量钴的独立矿物辉砷钴矿。本文根据矿石的工艺矿物学特

点进行铜钴回收浮选试验研究,为此类含钴铜矿资源的开发利用提供技术参考。试验最终确定了“铜钴混合浮选—铜钴分离”的工艺流程,采用黄铁矿的高效抑制剂EMT-22与石灰配合使用进行铜钴分离,闭路试验获得了较好的浮选指标。

1 矿石性质

1.1 矿石中矿物组成及含量

矿石中金属矿物含量较少,以黄铜矿、黄铁矿为主,还有少量斑铜矿、磁铁矿、赤铁矿、褐铁矿、钛铁矿、铬铁矿、辉钼矿、辉砷钴矿、磁黄铁矿等;非金属矿物以钠长石、石英、白云石为主,其次为黑云母、白云母、方解石、磷灰石、金红石、角闪石、绿帘石、独居石、滑石、楣石、锆石、重晶石等。矿石中主要化学成分分析结果见表1,由表1可知,矿石中主要有价元素为Cu和Co,Cu含量为1.00%,Co含量为0.0099%。其中铜矿物主要以黄铜矿为主,还有少量斑铜矿;其中钴的载体矿物主要是黄铁矿,还有少量的独立矿物辉砷钴矿,但其矿物量很少,很难独立回收。

表1 矿石主要化学成分分析结果

Table 1 Results of main chemical composition analysis of the raw ore

/%

组分	Cu	Co	Mo	SiO ₂	Na ₂ O	TFe	S
含量	1.00	0.009 9	0.002 7	37.41	2.39	8.11	1.83
组分	As	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Zn	P ₂ O ₅	TiO ₂
含量	0.009 3	8.52	5.76	13.67	0.026	0.55	0.53
组分	Ag ¹⁾	Nb ₂ O ₅ ¹⁾	Ta ₂ O ₅ ¹⁾	Ga ¹⁾	Au ¹⁾	灼失	—
含量	6.37	317	6.10	102	0.003 5	15.34	—

注:1)单位为g/t。

1.2 矿石中铜的化学物相分析

矿石中铜的化学物相分析结果见表2。由表2可知,矿石中铜主要以黄铜矿为主,占93%,次生硫化铜及氧化铜很少。

1.3 矿石粒度筛分分析

矿石粒度筛分分析结果见表3。由表3可知,矿石中 -0.074 mm 粒级占22.21%,其中 -0.038 mm 粒级占14.33%,铜、钴、硫的分布率分别占16.26%、

表 2 矿石铜的化学物相分析结果

Table 2 Results of copper chemical phase analysis of the ore /%

铜相别	原生硫化铜中铜	次生硫化铜中铜	自由氧化铜中铜	结合氧化铜中铜	硫酸铜中铜	总铜
含量	0.93	0.035	0.022	0.011	0.002	1.00
分布率	93.00	3.50	2.20	1.10	0.20	100.0

表 3 矿石粒度筛析结果

Table 3 Results of particle size sieving analysis of the ore /%

粒度/mm	产率	品位			分布率		
		Cu	Co	S	Cu	Co	S
+1.0	26.76	0.53	0.010	1.25	14.12	26.56	17.19
−1.0+0.5	25.07	0.78	0.010	1.98	19.46	24.88	25.50
−0.5+0.3	15.13	1.45	0.010	2.58	21.84	15.01	20.06
−0.3+0.15	5.97	1.53	0.011	2.78	9.09	6.51	8.53
−0.15+0.074	4.86	1.70	0.012	2.97	8.22	5.78	7.41
−0.074+0.045	7.52	1.42	0.012	2.43	10.63	8.96	9.39
−0.045+0.038	0.36	1.04	0.010	1.55	0.37	0.36	0.29
−0.038	14.33	1.14	0.008 4	1.58	16.26	11.94	11.63
合计	100.0	1.00	0.010	1.95	100.0	100.0	100.0

11.94% 及 11.63%, 说明矿石中有部分铜、钴矿物粒度很细。总的来说, 各粒级铜、钴品位相差不大。

2 试验方案确定

常见的铜钴硫化矿浮选工艺主要有混合浮选和铜钴依次优先浮选^[14-15], 根据矿石性质, 回收的有价元素主要为铜和钴, 铜的主要载体矿物是黄铜矿(少量斑铜矿), 钴的主要载体矿物是黄铁矿, 铜和钴的品位在各个粒级中相差不大, 根据前期的探索试验, 确定了适合矿石性质的“铜钴混合浮选—铜钴分离”的工艺流程, 即先混合浮选铜矿物与硫钴矿物, 然后对铜钴混合精矿进行铜钴分离, 实现了铜和钴的综合回收。

3 选矿试验及结果讨论

3.1 铜钴混合浮选试验

3.1.1 粗选磨矿细度试验

磨矿细度决定了有用矿物的解离情况, 对选矿回收有用矿物起着关键作用。然而为了尽可能降低磨矿成本同时避免有用矿物的过磨, 在保证高回收率的前提下, 粗选一般情况下会选择在较粗的粒度下进行, 粗精矿进行再磨精选获得最终精矿^[16]。固定铜钴混合浮选粗选试验条件: 硫酸铜用量 50 g/t, 丁基黄药用量 40 g/t, 松醇油用量 32 g/t。铜钴混合浮选粗选磨矿细度试验结果见图 1。

由图 1 可知, 随着磨矿细度的增加, 铜钴粗精矿中铜品位呈逐渐降低的趋势, 铜、钴回收率均呈缓慢增加趋势, 当磨矿细度增至 −0.074 mm 占 75% 后,

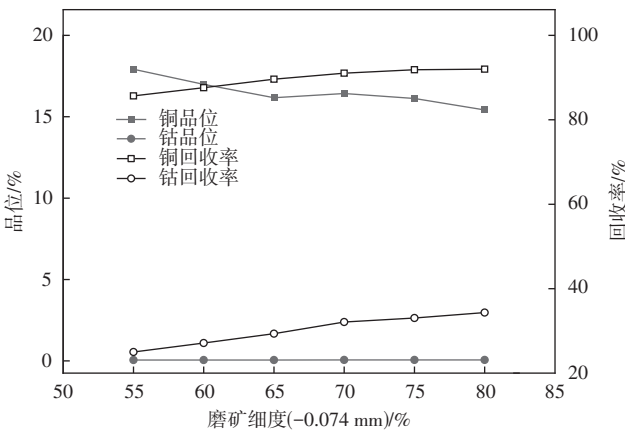


图 1 粗选磨矿细度试验结果

Fig. 1 Results of roughing grinding fineness tests

铜、钴回收率增加幅度较小。综合考虑, 粗选磨矿细度选择 −0.074 mm 占 75%。

3.1.2 粗选调整剂氢氧化钠用量试验

通过探索试验确定采用氢氧化钠作为铜钴混合浮选的 pH 调整剂, 固定磨矿细度为 −0.074 mm 占 75%, 硫酸铜用量 50 g/t, 丁基黄药用量 40 g/t, 松醇油用量 32 g/t, 考察氢氧化钠用量对铜矿物、含钴黄铁矿可浮性的影响。试验结果见图 2。

由图 2 可知, 随着氢氧化钠用量的增加, 铜钴混合粗精矿铜品位逐渐下降, 铜回收率先增加后减少, 但总体上, 铜回收率保持在 95% 左右, 钴回收率表现出与铜相似的变化趋势, 回收率保持在 55% 左右。综合考虑, 试验确定氢氧化钠用量为 750 g/t。

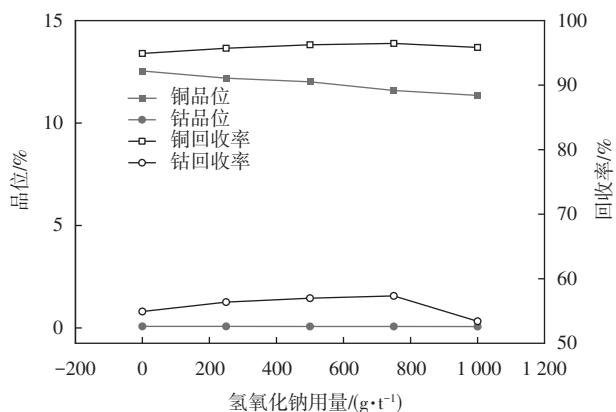


图2 氢氧化钠用量试验结果

Fig. 2 Results of sodium hydroxide dosage tests

3.1.3 粗选活化剂硫酸铜用量试验

由矿石性质可知,黄铁矿是钴的主要载体矿物。硫酸铜作为黄铁矿的常用活化剂之一,往往在黄铁矿之前添加以提高其回收率。固定磨矿细度 -0.074 mm 占75%,氢氧化钠用量750 g/t,丁基黄药用量40 g/t,松醇油用量32 g/t,考察了硫酸铜用量对含钴黄铁矿浮选的影响。试验结果见图3。

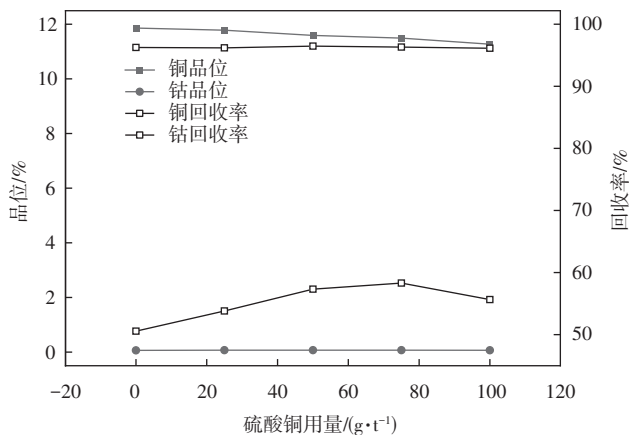


图3 硫酸铜用量试验结果

Fig. 3 Results of copper sulphate dosage test

由图3可知,随着硫酸铜用量的增加,铜钴混合粗精矿中铜品位略有降低,铜回收率基本保持不变;钴回收率随硫酸铜用量的增加逐渐提高,当硫酸铜用量大于75 g/t后,钴回收率呈下降趋势。出现该现象的原因可能是适量的硫酸铜可以活化难选黄铁矿,而过量的硫酸铜会消耗捕收剂丁基黄药。综合考虑,确定硫酸铜的合适用量为75 g/t。

3.1.4 粗选捕收剂丁基黄药用量试验

矿石中主要有价金属元素为铜,其次为伴生的钴等元素,硫化铜与含钴硫化矿常用的捕收剂为丁基黄

药和丁铵黑药,丁铵黑药虽然捕收能力强且选别效果好,但成本比较高。由于该硫化铜矿可浮性较好,故试验确定直接采用丁基黄药作为捕收剂^[17]。固定磨矿细度为 -0.074 mm 占75%,氢氧化钠用量750 g/t,硫酸铜用量75 g/t,松醇油用量32 g/t,考察氢氧化钠用量对选别指标的影响。试验结果见图4。

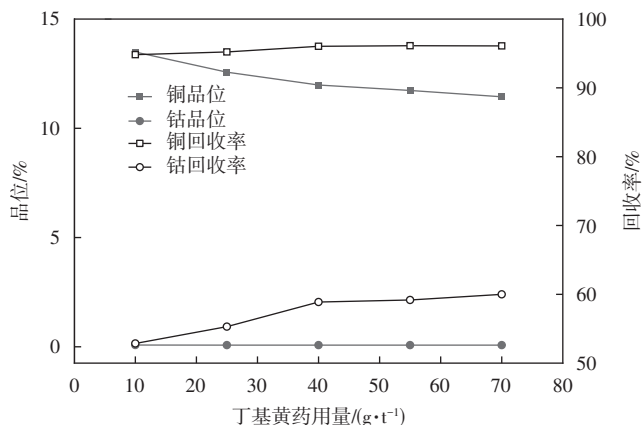


图4 丁基黄药用量试验结果

Fig. 4 Results of butyl xanthate dosage tests

由图4可知,随着丁基黄药用量的增加,铜钴混合粗精矿产率升高,铜品位呈下降趋势,而铜、钴回收率均呈逐渐增加趋势。当丁基黄药用量大于40 g/t后,铜、钴回收率变化幅度均不大。综合考虑,确定丁基黄药的合适用量为40 g/t。

3.2 铜钴分离试验

3.2.1 铜钴混合粗精矿再磨细度试验

铜钴粗精矿品位较低,为了获得较好的铜钴分离效果,进行了铜钴混合粗精矿再磨细度试验。以铜钴混合粗精矿为给矿,再磨后经两次混合精选、一次分离粗选得到铜精矿与硫钴精矿。再磨细度试验结果见表4。

由表4可知,当粗精矿不再磨时,分离铜精矿铜品位仅22.81%,钴硫精矿钴品位仅0.19%,表明进入铜钴分离前仍有连生体存在;随着再磨细度增加,铜精矿铜品位逐渐增加,硫钴精矿钴品位也有所增加,但其中铜含量也逐渐增加。由此可见,磨得过细也不利于铜钴分离。综合考虑,确定再磨细度为 -0.045 mm 占66.40%为宜。

3.2.2 组合抑制剂用量试验

目前铜钴分离工艺主要为抑硫钴浮铜,实质上就是铜矿物与含钴黄铁矿的分离,石灰为黄铁矿最常用的抑制剂之一。通过前期探索试验发现,单用石灰作为黄铁矿抑制剂效果一般,而采用其他诸如铁盐、

表 4 再磨细度试验结果
Table 4 Results of regrinding fineness tests

/%

再磨细度 (-0.045 mm)	产品名称	作业产率	品位		作业回收率	
			Cu	Co	Cu	Co
54.40(不再磨)	铜精矿	72.14	22.81	0.074	96.02	50.21
	钴硫精矿	27.86	2.45	0.19	3.98	49.79
	给矿	100.0	17.14	0.11	100.0	100.0
66.40	铜精矿	77.28	25.24	0.075	95.49	48.58
	钴硫精矿	22.72	4.05	0.27	4.51	51.42
	给矿	100.0	20.43	0.12	100.0	100.0
81.00	铜精矿	80.51	26.54	0.068	94.92	48.36
	钴硫精矿	19.49	5.87	0.30	5.08	51.64
	给矿	100.0	22.51	0.11	100.0	100.0
87.80	铜精矿	80.27	27.90	0.058	94.89	44.03
	钴硫精矿	19.73	6.12	0.30	5.11	55.97
	给矿	100.0	23.60	0.11	100.0	100.0

腐殖酸钠等黄铁矿抑制剂也无法达到预期效果,故采用石灰作为主抑制剂,同时加入自主研发的一种新型高效黄铁矿抑制剂 EMT-22 与石灰配合使用^[18],组合抑制剂用量对铜钴分离效果的影响见表 5。

由表 5 可知,石灰与 EMT-22 配合使用时,铜钴混合精矿经过一次分离作业,就可以得到较好的分离效果。但是,当 EMT-22 用量较小(500 g/t)时,不管石灰用量大、小,铜精矿铜品位都相对较低;当 EMT-22

用量增至 800 g/t、石灰用量为 500 g/t 时,铜钴分离效果良好,获得的铜精矿铜品位为 25.51%,钴硫精矿钴品位为 0.26%、含铜 2.91%。综合考虑,确定组合抑制剂石灰用量为 500 g/t、EMT-22 用量为 800 g/t。

3.2.3 闭路试验

在条件试验的基础上,进行了铜钴混合浮选—铜钴分离闭路试验,试验流程见图 5,试验结果见表 6。

由表 6 可知,采用铜钴混合浮选—铜钴分离工艺对

表 5 组合抑制剂用量试验结果
Table 5 Results of combined depressant dosage tests

/%

石灰+EMT-22 用量/(g·t ⁻¹)	产品名称	作业产率	品位		作业回收率	
			Cu	Co	Cu	Co
200+500	铜精矿	85.67	21.74	0.089	97.76	68.92
	钴硫精矿	14.33	2.98	0.24	2.24	31.08
	给矿	100.0	19.72	0.12	100.0	100.0
500+500	铜精矿	79.52	23.87	0.076	96.50	49.58
	钴硫精矿	20.48	3.36	0.30	3.50	50.42
	给矿	100.0	19.67	0.12	100.0	100.0
800+500	铜精矿	82.50	22.91	0.079	96.29	53.03
	钴硫精矿	17.50	4.16	0.33	3.71	46.97
	给矿	100.0	19.63	0.12	100.0	100.0
1 100+500	铜精矿	83.93	22.41	0.079	95.14	55.56
	钴硫精矿	16.07	5.98	0.33	4.86	44.44
	给矿	100.0	19.77	0.12	100.0	100.0
200+800	铜精矿	81.62	22.21	0.077	94.48	57.76
	钴硫精矿	18.38	5.76	0.25	5.52	42.24
	给矿	100.0	19.19	0.11	100.0	100.0
500+800	铜精矿	72.86	25.51	0.055	95.92	36.22
	钴硫精矿	27.14	2.91	0.26	4.08	63.78
	给矿	100.0	19.38	0.11	100.0	100.0
800+800	铜精矿	71.63	26.19	0.048	94.08	30.20
	钴硫精矿	28.37	4.16	0.28	5.92	69.80
	给矿	100.0	19.94	0.11	100.0	100.0
1 100+800	铜精矿	68.74	26.72	0.057	93.15	31.70
	钴硫精矿	31.26	4.32	0.27	6.85	68.30
	给矿	100.0	19.72	0.12	100.0	100.0

矿石进行分选,闭路试验可以获得产率3.77%、铜品位24.61%、铜回收率92.11%的铜精矿和产率1.08%、

钴品位0.29%、含铜4.88%、钴回收率31.45%的钴硫精矿,实现了矿石中有益组分铜钴的综合回收。

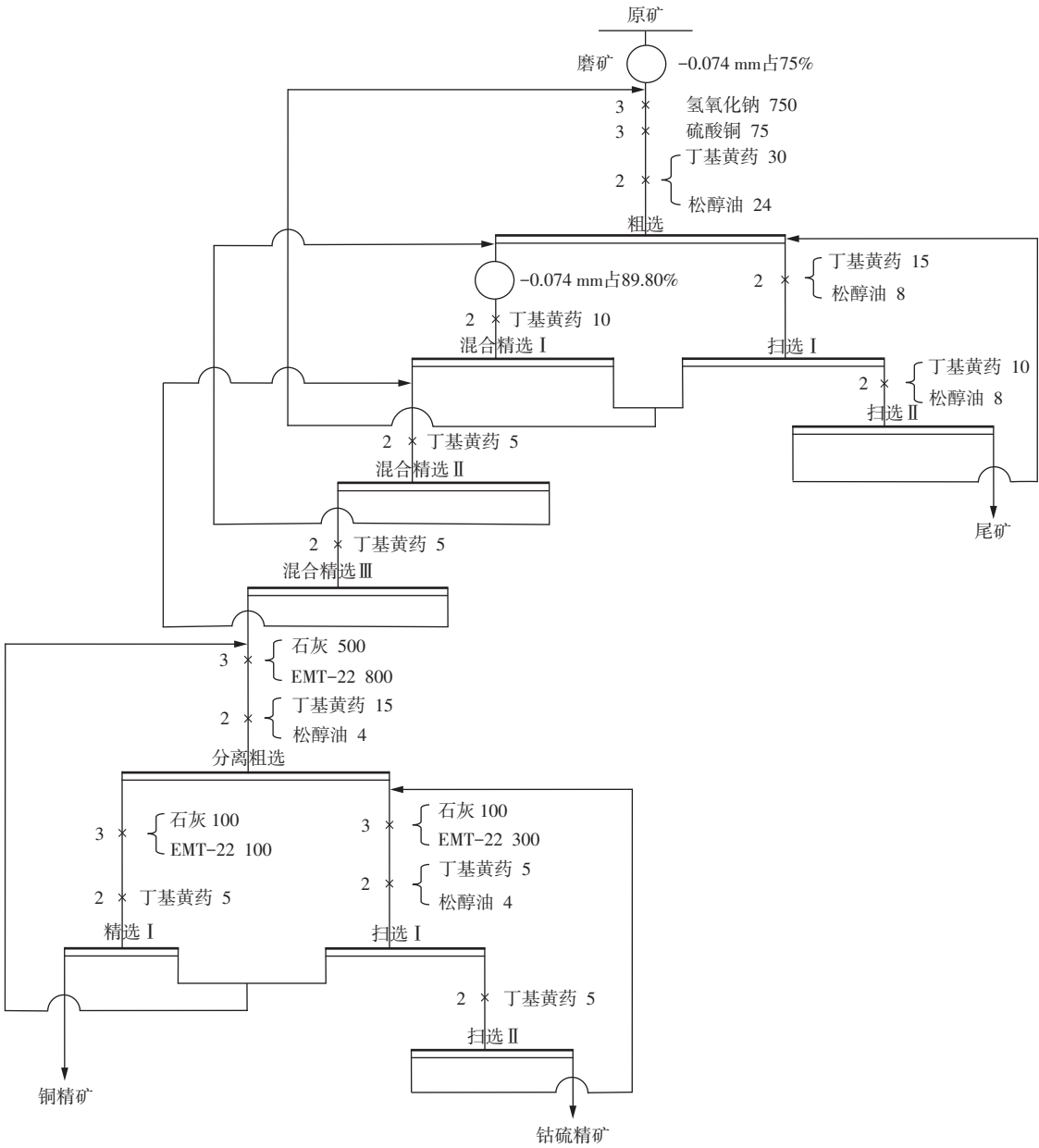


图5 闭路试验流程

Fig. 5 Flowsheet of the locked-cycle tests

表6 闭路试验结果

Table 6 Results of the locked-cycle tests

产品名称	产率	品位		回收率	
		Cu	Co	Cu	Co
铜精矿	3.77	24.61	0.065	92.11	24.59
钴硫精矿	1.08	4.88	0.29	5.24	31.45
尾矿	95.15	0.028	0.004 6	2.65	43.96
原矿	100.0	1.01	0.010	100.0	100.0

4 结论

1) 该含钴铜矿石可回收的有价金属铜、钴含量分别为1.00%、0.0099%,铜矿物主要为黄铜矿,少量斑铜矿;钴的载体矿物主要是黄铁矿,少量辉砷钴矿。脉石矿物以钠长石、石英、白云石为主,其次为黑云母、白云母、方解石、磷灰石、金红石、角闪石、绿帘石、独居石、滑石、榍石、锆石、重晶石等。

2) 针对该含钴铜矿石开展了浮选试验研究,采用铜钴混合浮选—铜钴分离工艺流程,闭路试验获得了产率为3.77%、铜品位24.61%、铜回收率92.11%的铜精矿和产率为1.08%、钴硫精矿钴品位0.29%、钴回收率31.45%的钴硫精矿。

3) 采用铜钴混合浮选—铜钴分离工艺流程,配合以石灰+EMT-22组合作为铜、钴分离含钴黄铁矿的抑制剂,实现了矿石中有价金属铜、钴的综合回收。

参考文献

- [1] 赵晔泉,陈伟. 全球钴资源贸易网络演化及其启示[J]. 资源科学, 2024: 100-113.
ZHAO Xiquan, CHEN Wei. Evolution of global cobalt resource trade network and its inspiration[J]. Resource Science, 2024: 100-113.
- [2] 郑润浩,郑向党,丁良中,等. 金川铜镍硫化矿选矿降镁药剂研究进展[J]. 有色金属(选矿部分), 2024(2): 90-97.
ZHENG Runhao, ZHENG Xiangdang, DING Liangzhong, et al. Research progress on magnesium reducing agents for beneficiation of Jinchuan copper nickel sulfide mine[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2024(2): 90-97.
- [3] 余玮,叶岳华,王立刚. 某低品位铜矿短流程优化工艺技术及工业试验[J]. 有色金属(选矿部分), 2023(6): 197-204.
YU Wei, YE Yuehua, WANG Ligang. Short process optimization technology and industrial trial of a low-grade copper mine [J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2023(6): 197-204.
- [4] U. S. Geological Survey. Mineral commodity summaries 2022 [R/OL]. [2024-03-01]. <https://www.usgs.gov>.
- [5] 于志超,吴熙群,王立刚,等. 硫铜钴矿浮选行为研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2020(1): 18-23.
YU Zhichao, WU Xiqun, WANG Ligang, et al. Research on the flotation behavior of sulfide copper cobalt ore[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2020(1): 18-23.
- [6] 张明,高利坤,饶兵,等. 铜冶炼渣湿法浸出资源化高效回收研究现状[J]. 矿冶, 2022, 31(5): 88-97.
ZHANG Ming, GAO Likun, RAO Bing, et al. Current status of research on efficient recovery of copper smelting slag through wet leaching resource utilization [J]. Mining and Metallurgy, 2022, 31(5): 88-97.
- [7] 张念. 双循环格局下我国镍资源国际化策略研究[J]. 中国有色金属, 2021(23): 40-42.
ZHANG Nian. Research on the internationalization strategy of China's nickel resources under the dual-cycle pattern[J]. China Nonferrous Metals, 2021(23): 40-42.
- [8] 周艳晶,李建武,王高尚,等. 中国钴资源进口安全分析[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(5): 50-55.
ZHOU Yanjing, LI Jianwu, WANG Gaoshang, et al. Analysis on import security of China's cobalt resources[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019, 39(5): 50-55.
- [9] 沈旭. 国外某铁金钴矿选矿试验研究[J]. 中国矿业, 2015, 24(12): 136-137.
SHEN Xu. Study on ore dressing of a certain iron gold cobalt ore abroad[J]. China Mining Magazine, 2015, 24(12): 136-137.
- [10] 卢宜冠,郝波,孙凯,等. 钴金属资源概况与资源利用情况分析[J]. 地质调查与研究, 2020, 43(1): 72-80.
LU Yiguan, HAO Bo, SUN Kai, et al. Overview of cobalt metal resources and analysis of resource utilization[J]. Geological Survey and Research, 2020, 43(1): 72-80.
- [11] 刘军,王晓彤,何军成,等. 还原性矽卡岩型金矿床基本特征、研究现状及在中国前景[J]. 矿床地质, 2024, 43(1): 1-28.
LIU Jun, WANG Xiaotong, HE Juncheng, et al. Basic characteristics, research status, and prospects in China of reducible skarn type gold deposits[J]. Mineral Geology, 2024, 43(1): 1-28.
- [12] 鲁力,马奎,张响荣,等. 中非某铜钴精矿工艺矿物学特性及影响分析[J]. 有色金属(选矿部分), 2023(05): 10-15.
LU Li, MA Kui, ZHANG Xiangrong, et al. Mineralogical characteristics and impact analysis of a copper cobalt concentrate process in Central Africa[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2023(5): 10-15.
- [13] 朱丹,孙小俊,程国柱,等. 利用AMICS测试技术分析冶炼矿渣中Cu-Co元素的赋存状态[J]. 有色金属(选矿部分), 2023(4): 10-16.
ZHU Dan, SUN Xiaojun, CHEN Guozhu, et al. Analysis of the occurrence of Cu-Co elements in smelting slag by AMICS[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2023(4): 10-16.
- [14] 刘先春,苏敏,孙志健,等. 非洲某铜钴矿浮选流程试验

- 研究[J]. 中国矿业, 2020, 29(增刊1): 441-444.
- LIU Xianchun, SU Min, SUN Zhijian, et al. Experimental study on a copper-cobalt ore flotation flowsheet in Africa[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(Suppl. 1): 441-444.
- [15] 万丽, 周少珍, 曾克文, 等. 安徽某铜硫矿选矿工艺优化试验研究[J]. 矿产综合利用, 2019(6): 41-44.
- WAN Li, ZHOU Shaozhen, ZENG Kewen, et al. Experimental research on beneficiation technology of a copper-sulfur ore from Anhui[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(6): 41-44.
- [16] 余江鸿, 徐飞飞, 黄国贤. 提高内蒙古某铜矿选矿指标的试验研究[J]. 矿产综合利用, 2014(6): 28-31.
- YU Jianghong, XU Feifei, HUANG Guoxian. Experimental study on promoting dressing index for a copper ore in Inner Mongolia[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2014(6): 28-31.
- [17] 周涛, 黄国贤, 李飞, 等. 西藏某细粒嵌布难选硫化铜矿选矿实验研究[J]. 矿产综合利用, 2022(4): 45-50.
- ZHOU Tao, HUANG Guoxian, LI Fei, et al. Experimental research on mineral processing for a refractory fine disseminated copper sulfide ore in Tibet[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(4): 45-50.
- [18] 杨进忠, 毛益林, 陈晓青, 等. 某尾矿资源化处置与综合利用研究[J]. 矿产综合利用, 2019(6): 117-122.
- YANG Jinzhong, MAO Yilin, CHEN Xiaoqing, et al. Study on resource disposal and comprehensive utilization of tailings[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(6): 117-122.

(本文编辑 刘水红)