玻利维亚某金钴多金属铜矿资源综合回收试验研究①

李英，邓颖，欧乐明，吴维明，戴建豪，史慧莹
（中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083）

摘　要：对玻利维亚某金钴多金属铜矿进行了资源综合回收试验研究。采用优先选铜再混合浮选金钴铋的浮选流程，以 OL-Ⅱ A 为铜捕收剂、OL-TL 为抑制剂，经过一粗两精一扫优先选铜，获得了铜品位 30.00%、回收率 94.56%的铜精矿，实现了低碱度下铜和砷黄铁矿的分离；浮铜尾矿经过一粗一精一扫混合浮选金钴铋，获得了 Au、Co、Bi 品位分别为 19.50 g/t、1.58%、1.80%，回收率分别为 92.22%、96.33%、58.87%的金钴铋混合精矿，实现了该金钴多金属铜矿资源的综合回收。

关键词：金钴多金属矿；铜矿；浮选；OL-Ⅱ A；OL-TL；低碱度
中图分类号：TD923　　**文献标志码**：A　　doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.06.010
文章编号：0253-6099(2025)06-0063-04

Experimental Study on Comprehensive Recovery Process for Gold-Cobalt Polymetallic Copper Ore in Bolivia

LI Ying, DENG Ying, OU Leming, WU Weiming, DAI Jianhao, SHI Huiying
(*School of Resource Processing and Bioengineering*, *Central South University*, *Changsha* 410083, *Hunan*, *China*)

Abstract: An experimental study was carried out on comprehensive recovery process for the gold-cobalt polymetallic copper ore in Bolivia. A flow sheet of Cu-preferential flotation followed by bulk Au-Co-Bi flotation was adopted, with OL-Ⅱ A as a Cu collector and OL-TL as a depressant. The Cu-preferential flotation process consisting of one stage of roughing, two cleaning and one scavenging produced a copper concentrate grading 30.00% Cu at 94.56% recovery, indicating separation between copper and arsenopyrite actualized by low-alkalinity flotation. Then, the obtained tailings were subjected to a bulk Au-Co-Bi flotation consisting of one stage of roughing, one cleaning and one scavenging, resulting in a Au-Co-Bi concentrate grading 19.50 g/t Au, 1.58% Co and 1.80% Bi, with corresponding recoveries of 92.22% Au, 96.33% Co and 58.87% Bi. It is concluded that the comprehensive recovery of metallic resources can be actualized from this gold-cobalt polymetallic ore.

Key words: gold-cobalt polymetallic ore; copper ore; flotation; OL-Ⅱ A; OL-TL; low alkalinity

玻利维亚是南美洲重要的矿产资源产地，拥有丰富的铜金钴多金属资源[1-2]。铜金钴多金属矿床成分较复杂，因此选择合适的选别工艺和药剂制度对提高精矿回收率具有重要意义[3]。本文以玻利维亚某与铜共伴生的金钴多金属矿为研究对象，分析了其矿石性质，研究了磨矿细度、药剂制度、浮选工艺等因素对该金钴多金属矿回收效果的影响，探讨提高铜、金、钴等资源回收率的适宜工艺，可为该类多金属矿资源回收利用提供技术依据。

1　试验材料与试剂

1.1　矿样性质

矿样化学多元素分析结果见表 1，矿物组成见表 2。原矿中主要有用元素为 Cu 和 S，伴生的有益组分为 Au、Co 和 Bi，具有综合回收利用价值。原矿中金属矿物以毒砂、黄铜矿、黄铁矿为主，含有少量磁铁矿、褐铁矿、辉铋矿、锡石等，主要脉石矿物为石英，其次为绿泥石、电气石。

① **收稿日期**：2025-06-18
基金项目：国家自然科学基金(51674291)
作者简介：李英(1999—)，女(瑶族)，云南勐腊人，硕士研究生，主要研究方向为矿物加工浮选药剂与工艺。E-mail:ying_li159@163.com
通信作者：欧乐明(1964—)，男，湖南宁乡人，博士，教授，主要研究方向为矿物加工浮选药剂、工艺及资源综合回收利用。E-mail:olmpaper@csu.edu.cn

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	S	Au[1)]	Co	Bi	As
1.60	8.85	5.4	0.45	0.78	8.73
TFe	Sn	SiO_2	Al_2O_3	Ag[1)]	
14.96	0.12	42.15	3.28	60.2	

1) 单位为 g/t。

表2 矿物组成分析结果(质量分数)

Table 2 Mineral composition analysis results %

毒砂	黄铜矿	黄铁矿	磁铁矿	褐铁矿	辉铋矿
21.0	6.0	5.0	1.5	1.5	0.7
锡石	石英	绿泥石	电气石	其他	
0.3	41.0	10.0	5.0	8.0	

1.2 试验方法及药剂

矿石中可回收的主要金属矿物为黄铜矿、辉铋矿,镜下观察发现,铜钴紧密共生。因此拟采用优先选铜再混合浮选金、钴、铋的浮选流程。主要药剂包括捕收剂煤油、乙硫氮、OL-Ⅱ A(中南大学自主研发的高效硫化铜矿捕收剂)、Z-200、丁基黄药、戊基黄药,黄铁矿抑制剂 OL-TL(购于长沙明大分离科技有限公司)、石灰,活化剂硫酸铜,起泡剂 2#油。

2 试验结果与讨论

2.1 铜粗选试验

2.1.1 优先选铜捕收剂种类试验

采用棒磨机,在磨矿浓度(质量分数)53%、磨矿细度-0.074 mm 粒级占 70%条件下,考察了捕收剂煤油、乙硫氮、OL-Ⅱ A 和 Z-200 对铜浮选的影响,试验流程见图 1,结果见图 2。结果表明,捕收剂 OL-Ⅱ A 获得的铜回收率明显高于其他 3 种捕收剂,且品位较高。选取 OL-Ⅱ A 作为铜捕收剂。

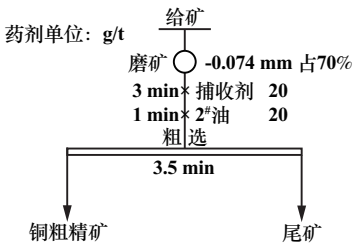


图1 优先选铜捕收剂种类试验流程

Fig. 1 Flowchart for testing collector type in Cu-preferential flotation

2.1.2 铜粗选磨矿细度试验

为了最大程度地富集和回收铜,以OL-Ⅱ A为捕收剂,按照图 1 所示流程,考察了磨矿细度对铜浮选的影响,结果见图 3。结果表明:磨矿细度-0.074 mm 粒级占比从 45%增加到 70%,铜回收率大幅上升,铜品位小幅上升;之后再增加磨矿细度,铜精矿品位变化不大,铜回收率明显下降。确定适宜的磨矿细度为-0.074 mm 粒级占 70%。

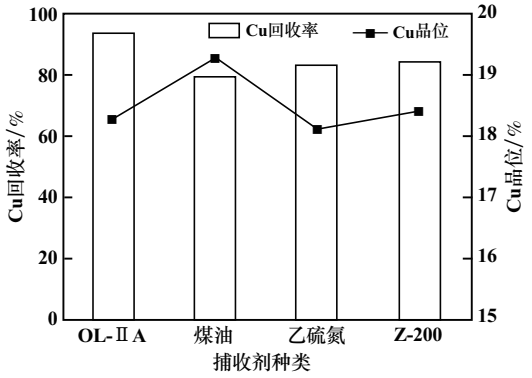


图2 捕收剂种类对铜粗选指标的影响

Fig. 2 Effect of collector type on copper roughing indexes

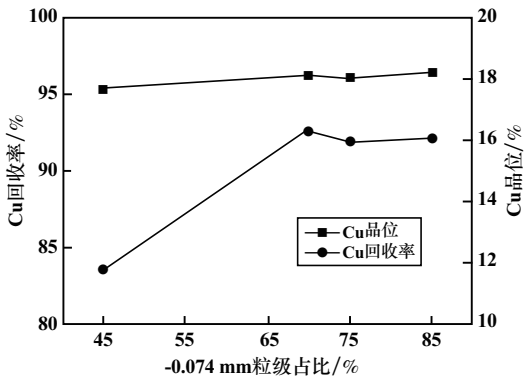


图3 磨矿细度对铜粗选指标的影响

Fig. 3 Effect of grinding fineness on copper roughing indexes

2.1.3 铜粗选捕收剂用量试验

磨矿细度-0.074 mm 粒级占 70%,其他条件不变,进行了捕收剂 OL-Ⅱ A 用量试验,结果见图 4。由图 4

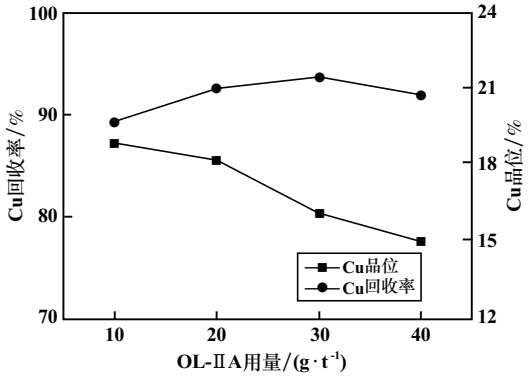


图4 OL-Ⅱ A 用量对铜粗选指标的影响

Fig. 4 Effect of OL-Ⅱ A dosage on copper roughing indexes

可知,随着 OL-Ⅱ A 用量增加,铜回收率先升高后降低,铜品位逐渐降低。OL-Ⅱ A 用量 20 g/t 时,铜精矿回收率为 92.68%,铜品位为 18.12%,之后继续增加 OL-Ⅱ A 用量,回收率只有小幅提高,但品位却下降明显。确定适宜的 OL-Ⅱ A 用量为 20 g/t。

2.2　铜精选试验

2.2.1　铜粗精矿再磨细度试验

对磨矿细度 -0.074 mm 粒级占 70%、捕收剂 OL-Ⅱ A用量 20 g/t、起泡剂 2#油用量 20 g/t 条件下所得铜粗精矿进行镜下观察,发现铜粗精矿中有一部分黄铜矿与毒砂和辉铋矿等矿物伴生。为了降低铜粗精矿中的毒砂含量,对铜粗精矿进行了再磨再选试验,试验流程如图 5 所示,再磨细度对铜精选指标的影响见表 3。

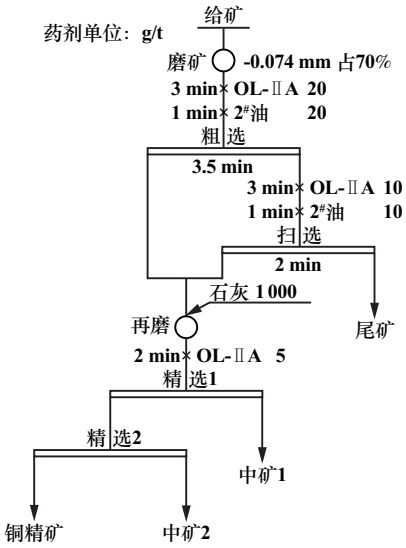


图 5　铜粗精矿再磨再选试验流程

Fig. 5　Flowchart for copper regrinding and re-separation of coarse concentrate from roughing

表 3　再磨细度对铜精选指标的影响

Table 3　Effect of regrinding fineness on copper cleaning indexes

再磨细度	铜精矿 Cu 品位/%	铜精矿 Cu 回收率/%
-0.074 mm 占 90%	27.57	84.55
-0.038 mm 占 75%	28.30	81.23
-0.038 mm 占 85%	28.94	84.49

结果表明,铜粗精矿再磨有利于黄铜矿与伴生矿物分离,可以进一步提升铜品位,最终确定铜粗选的再磨细度为-0.038 mm 粒级占 85%。

2.2.2　铜粗精矿再磨石灰用量与低碱工艺试验

为了进一步回收金钴并降低其在铜精矿中的含量,在不同石灰用量条件下进行了铜粗精矿再磨石灰用量试验。但石灰的高碱度易导致管道结垢、矿浆泡沫黏稠、被抑矿物难以活化等问题[4-5],因此在铜粗精矿再磨时,将石灰用量减至 100 g/t,此时矿浆 pH 值为 9,再通过添加抑制剂 OL-TL 来抑制黄铁矿和毒砂,从而有效实现低碱度下铜精矿的富集以及铜精矿与毒砂的分离。铜粗精矿再磨再选石灰用量与低碱度对比试验结果见表 4。铜粗精矿再磨石灰用量1 000 g/t时,铜精矿 Cu 品位为 30.40%、回收率为87.25%,总体指标很好;石灰用量 100 g/t 时加入抑制剂 OL-TL(用量 50 g/t),得到了 Cu 品位 29.20%、回收率 91.36%的铜精矿,在低碱条件下实现了黄铜矿与黄铁矿和毒砂的分离,此时铜精矿中 Au 品位4.7 g/t、回收率4.40%,金钴精矿中 Au 品位 19.20 g/t、回收率91.42%,尾矿中 Au 品位0.3 g/t。经过比较可知,以石灰+OL-TL 为抑制剂时,铜精矿回收率比单独使用石灰为抑制剂时高,且OL-TL可以在低碱度条件下实现黄铜矿与黄铁矿和毒砂的分离。选择 OL-TL 作为黄铁矿和毒砂的抑制剂进行后续试验。

表 4　铜粗精矿再磨再选石灰用量与低碱度对比试验结果

Table 4　Comparison test of regrinding and re-separation of copper concentrate from roughing with lime and low alkalinity

抑制剂种类及用量/(g·t^{-1})	铜精矿 Cu 品位/%	铜精矿 Cu 回收率/%
石灰　1 000	30.40	87.25
石灰　1 500	30.52	83.78
石灰　2 000	30.77	81.39
石灰+OL-TL　100+50	29.20	91.36

2.3　闭路试验

在条件试验基础上进行了闭路试验,结果如表 5 所示,闭路试验流程如图 6 所示。经过一粗两精一扫

表 5　闭路试验结果

Table 5　Closed-circuit test results

产品名称	产率/%	品位/%					回收率/%				
		Cu	Au[1)]	Co	Bi	S	Cu	Au	Co	Bi	S
铜精矿	4.79	30.00	4.40	0.03	4.37	31.80	94.56	3.91	0.34	26.84	17.64
金钴铋精矿	25.51	0.16	19.50	1.58	1.80	26.60	2.69	92.22	96.33	58.87	78.57
尾矿	69.70	0.06	0.30	0.02	0.16	0.47	2.75	3.88	3.33	14.29	3.79
原矿	100.00	1.52	5.40	0.42	0.78	8.64	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

1) 单位为 g/t。

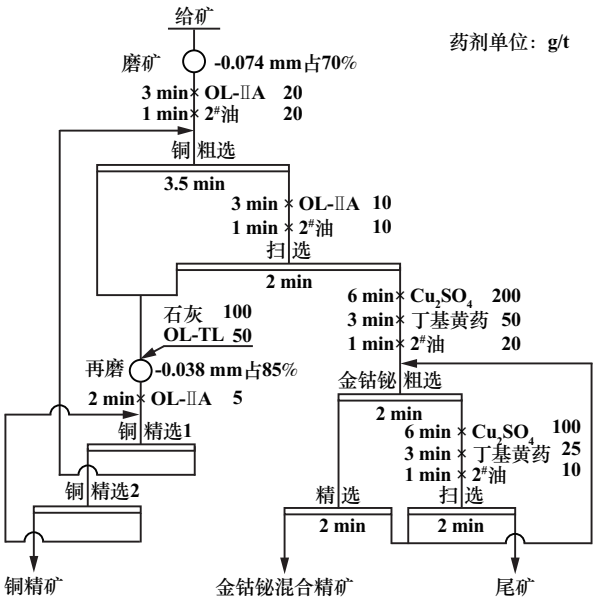


图6 闭路试验流程

Fig.6 Flowchart for closed-circuit test

优先选铜，获得了 Cu 品位 30.00%、回收率 94.56% 的铜精矿；经过一粗一精一扫混合浮选金钴铋，获得了 Au、Co、Bi 品位分别为 19.50 g/t、1.58%、1.80%，回收率分别为 92.22%、96.33%、58.87% 的金钴铋混合精矿，尾矿中含有极少量的砷。

3 结论

1）玻利维亚某金钴多金属矿样中主要有用组分为 Cu 和 S，并伴生有 Au、Co 和 Bi 等稀有金属，具有综合回收利用价值；矿样中主要金属矿物为黄铜矿和毒砂，主要脉石矿物为石英，其次是绿泥石和电气石。

2）采用优先选铜再混合浮选金钴铋的流程，在磨矿细度 -0.074 mm 粒级占 70%、铜粗精矿再磨细度 -0.038 mm粒级占 85%、再磨石灰用量100 g/t条件下，采用 OLⅡA 为铜捕收剂、OL-TL 为黄铁矿和毒砂抑制剂、丁基黄药为金钴铋混合浮选捕收剂，经过一粗两精一扫优先选铜，获得了Cu 品位 30.00%、回收率 94.56% 的铜精矿；经过一粗一精一扫混合浮选金钴铋，获得了 Au、Co、Bi 品位分别为 19.50 g/t、1.58%、1.80%，回收率分别为 92.22%、96.33%、58.87% 的金钴铋混合精矿，尾矿中含有极少量的砷，实现了该金钴多金属铜矿资源的综合回收。

参考文献(References)：

[1] 董乐，安第斯，李泓锟，等. 玻利维亚矿产开发趋势与特点[J]. 中国投资(中英文)，2023(增刊3)：56-60.
DONG Le, AN Disi, LI Hongkun, et al. Trends and characteristics of mineral development in Bolivia[J]. China Investment, 2023(S3): 56-60.

[2] 张金矿，杜晓冉，周姣花. 玻利维亚某矿金钴多金属矿石工艺矿物学研究[J]. 黄金，2012，33(10)：44-46.
ZHANG Jinkuang, DU Xiaoran, ZHOU Jiaohua. Process mineralogy study on Au-Co polymetallic ores from a mine in Bolivia[J]. Gold, 2012, 33(10): 44-46.

[3] 牛芳银，郭彩莲，宁新霞，等. 某难选金矿石选矿试验研究[J]. 矿冶工程，2024，44(5)：79-83.
NIU Fangyin, GUO Cailian, NING Xinxia, et al. Beneficiation experiment of refractory gold ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024, 44(5): 79-83.

[4] 周利华. 某复杂铜硫矿浮选分离与综合回收试验研究[J]. 矿冶工程，2020，40(1)：77-80.
ZHOU Lihua. Flotation separation and comprehensive recovery of a complex copper sulfide ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020, 40(1): 77-80.

[5] FENG Q, YANG W, CHANG M, et al. Advances in depressants for flotation separation of Cu-Fe sulfide minerals at low alkalinity: A critical review[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2024, 31(1): 1-17.

引用本文：李英，邓颖，欧乐明，等. 玻利维亚某金钴多金属铜矿资源综合回收试验研究[J]. 矿冶工程，2025，45(6)：63-66.
LI Ying, DENG Ying, OU Leming, et al. Experimental study on comprehensive recovery process for gold-cobalt polymetallic copper ore in Bolivia[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(6): 63-66.