

国外某铜矿石浮选药剂优化试验研究

李云鹏¹, 杨文化², 吴凯¹

(1. 烟台黄金职业学院资源与土木工程系; 2. 西安科技大学能源学院)

摘要: 国外某铜矿石含铜较高, 氧化率较低, 为原生硫化铜矿石, 铜品位达 1.21 %, 而铅、钴、锌等其他金属含量较低, 不具备综合回收利用价值。为最大化该矿石的经济效益, 进行浮选药剂优化试验。试验结果表明: 在磨矿细度-0.074 mm 占比 75 %, 石灰用量 500 g/t, Z-200 用量 30 g/t 条件下, 采用一粗两精两扫、中矿循序返回的工艺流程, 闭路试验可获得铜品位 31.09 %、铜回收率 97.62 % 的铜精矿, 尾矿铜品位仅为 0.03 %。试验结果为同类型矿石的选矿工艺改造和药剂优化提供数据支撑, 也为企业提质降耗奠定了坚实基础。

关键词: 低硫铜矿; 浮选; 物相分析; 药剂优化; 选矿试验; 原生硫化铜矿石

中图分类号: TD923

文献标志码: A

文章编号: 1001-1277(2025)05-0044-04

doi:10.11792/hj20250509

引言

铜是最早发现和使用的金属之一, 紫红色, 相对密度 8.96 g/cm³, 熔点 1 083 ℃。铜及其合金优良性能被广泛应用于电气工业、机械工业、国防工业等行业, 其消费量仅次于钢铁和铝, 是国家基础建设和国防工业乃至新能源汽车产业中不可或缺的基础工业材料和战略物资^[1-2]。但是, 中国铜资源禀赋不佳, 贫矿多、富矿少, 接替资源不足^[3-6]。近年来, 国内矿山企业通过“一带一路”倡议等, 积极实施海外开发战略, 使得海外铜资源开发取得了显著成效, 有效缓解了国内铜资源短缺的问题^[7-8]。

国外某铜矿石含铜较高, 氧化率较低, 为原生硫化铜矿。含铜矿物以斑铜矿为主, 其次为辉铜矿、黄铜矿和铜蓝, 主要脉石矿物为石英。铜是唯一具备综合回收利用价值的金属, 其他金属含量较低, 不具备综合回收价值。根据该矿石的工艺矿物学性质, 在现场工艺流程和药剂制度基础上, 开展系统的浮选试验研究, 取得了较好的指标, 为该铜矿石的选矿工艺改造和药剂优化提供数据支撑, 为企业提质降耗奠定基础。

1 矿石性质

1.1 化学成分

为查明矿石化学成分, 进行原矿化学成分分析, 结果见表 1。由表 1 可知: 原矿铜品位为 1.21 %, 硫品位为 1.03 %, 属低硫含铜矿石。矿石中 Au、Ag 品位较低, 分别为 0.07 g/t、5.96 g/t, 其他金属元素 Pb、Zn、Co

含量都较低, 不具备综合回收利用价值。P、As 有害元素含量很低, 不影响铜的回收。

表 1 原矿化学成分分析结果

Table 1 Chemical composition analysis results of raw ores

成分	Cu	Pb	Zn	Fe	S	As	C	Mo	P
w/%	1.21	0.02	0.022	1.29	1.03	0.001 0	1.02	<0.001	0.03
成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Co	Au ⁽¹⁾	Ag ⁽²⁾
w/%	75.33	5.46	2.89	2.10	2.63	0.51	<0.005	0.07	5.96

注: 1) $w(\text{Au})/(\text{g} \cdot \text{t}^{-1})$; 2) $w(\text{Ag})/(\text{g} \cdot \text{t}^{-1})$ 。

1.2 铜物相

为查明原矿中铜的化学存在形式, 根据选择性溶矿原理^[9], 进行铜物相分析, 结果见表 2。由表 2 可知: 铜主要以硫化铜形式存在, 分布率为 94.21 %; 以氧化铜形式存在的铜较少, 分布率为 3.31 %。故浮选法是该铜矿石的主要选矿方法。

表 2 原矿中铜物相分析结果

Table 2 Phase analysis results of copper in raw ores

相别	$w(\text{Cu})/\%$	分布率/%
氧化铜	0.04	3.31
硫化铜	1.14	94.21
其他	0.03	2.48
总铜	1.21	100.00

1.3 矿物组成

矿石矿物组成简单, 金属矿物以硫化铜矿物为主, 包括斑铜矿、铜蓝、黄铜矿、辉铜矿等; 其他金属矿物含量较低, 包括黄铁矿、磁铁矿、磁黄铁矿、方铅矿、闪锌矿等。脉石矿物主要为石英、方解石、长石、云母

收稿日期: 2024-11-20; 修回日期: 2025-02-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51874231)

作者简介: 李云鹏(1990—), 男, 副教授, 硕士, 从事有色矿产资源高效开发利用技术研究工作; E-mail: 664911723@qq.com

和白云石等。

2 试验方法

矿石通过小型破碎机进行粗碎,破碎产品进入辊式破碎机与 2 mm 筛子构成的闭路破碎系统,物料破碎至-2 mm,破碎后的物料混匀缩分成每袋 500 g;矿石通过磨矿、浮选试验,获得最佳工艺参数。

试验用调整剂为石灰、碳酸钠和氢氧化钠,均为分析纯;起泡剂为 2 号油;捕收剂包括 Z-200、丁基黄药、丁铵黑药,均为工业级药剂。

试验设备主要包括 PEX-100×125 颚式破碎机、XPS-250×150 辊式破碎筛分机、XMQ-φ240×90 系列球磨机、XFD0.5L 单槽式浮选机、XFD1.5L 单槽式浮选机、多用真空过滤机、电热恒温鼓风干燥箱、标准筛(筛孔尺寸为 0.12 mm、0.074 mm、0.043 mm、0.038 mm、0.028 mm)。

3 结果与讨论

3.1 磨矿细度试验

磨矿细度决定有用矿物单体解离程度,对浮选指标具有显著影响^[10-11]。在调整剂石灰用量 600 g/t,捕收剂丁基黄药用量 50 g/t,起泡剂 2 号油用量 20 g/t,磨矿细度-0.074 mm 占比分别为 55 %、65 %、75 %、85 % 条件下开展磨矿细度试验,试验流程见图 1,试验结果见图 2。

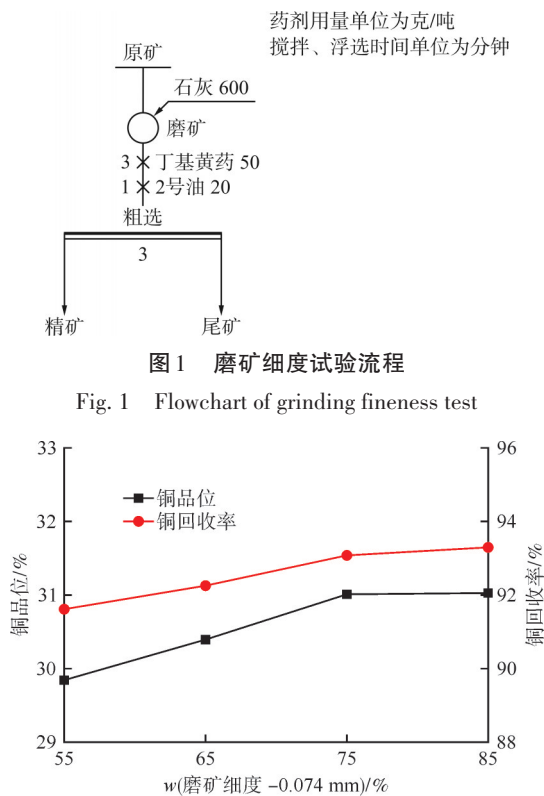


图2 磨矿细度试验结果
Fig. 2 Grinding fineness test results

由图 2 可知:随着磨矿细度的增加,铜品位呈先缓慢升高后趋于稳定,铜回收率先逐渐升高后变化缓慢。综合考虑,确定磨矿细度为-0.074 mm 占比 75 %。

3.2 捕收剂种类试验

在磨矿细度-0.074 mm 占比 75 %、调整剂石灰用量 600 g/t、起泡剂 2 号油用量 20 g/t、捕收剂用量 50 g/t 条件下,考察 Z-200、丁基黄药、丁铵黑药和组合药剂 ($m(\text{丁基黄药}):m(\text{丁铵黑药})=1:1$) 对浮选指标的影响,试验流程见图 1,试验结果见表 3。由表 3 可知:试验选用的捕收剂均有着较好的捕收性能,其中,使用 Z-200 进行浮选时,综合效果最佳,铜品位为 30.82 %,铜回收率为 93.24 %。综合考虑,确定采用 Z-200 作捕收剂。

表 3 捕收剂种类试验结果
Table 3 Collector types test results

捕收剂种类	产率/%	铜品位/%	铜回收率/%
Z-200	4.67	30.82	93.24
丁基黄药	3.46	31.28	92.78
丁铵黑药	5.34	29.14	92.11
组合药剂	7.21	21.07	93.96

3.3 捕收剂用量试验

在磨矿细度-0.074 mm 占比 75 %、调整剂石灰用量为 500 g/t、起泡剂 2 号油用量为 20 g/t,捕收剂 Z-200 用量分别为 18 g/t、24 g/t、30 g/t、36 g/t 的条件下,进行捕收剂用量试验,试验流程见图 1,试验结果见图 3。由图 3 可知:随着捕收剂 Z-200 用量的增加,铜回收率呈先升高后降低趋势,铜品位呈快速下降趋势。综合考虑,确定捕收剂 Z-200 用量为 30 g/t。

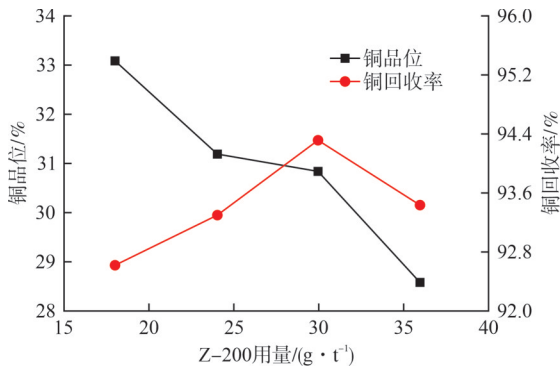


图3 捕收剂用量试验结果
Fig. 3 Collector dosage test results

3.4 调整剂种类试验

提升矿浆 pH 以抑制硫化铁矿物,有利于优化含铜矿物的浮选性能^[12-13]。在浮选过程中,常用的 pH 调整剂包括石灰、碳酸钠和氢氧化钠。为探究这 3 种调整剂对浮选效果的影响,在磨矿细度-0.074 mm 占比 75 %、捕收剂 Z-200 用量 30 g/t、矿浆初始 pH 值 8.2

的条件下,开展调整剂种类试验,试验流程见图 1,试验结果见表 4。由表 4 可知:石灰作调整剂时,浮选效果最佳,铜品位为 30.55 %,铜回收率为 94.03 %。综合考量,选定石灰作为调整剂。

表 4 调整剂种类试验结果
Table 4 Regulator types test results

调整剂	产率/%	铜品位/%	铜回收率/%
石灰	4.07	30.55	94.03
碳酸钠	3.83	39.32	91.26
氢氧化钠	4.48	33.84	92.20

3.5 调整剂用量试验

为探究调整剂用量对浮选指标的具体影响,在磨矿细度-0.074 mm 占比 75 %、捕收剂 Z-200 用量 30 g/t、起泡剂 2 号油用量 20 g/t 的条件下,进行了调整剂用量试验,试验流程见图 1,试验结果见图 4。由图 4 可知:随石灰用量的增加,铜回收率呈先升高后稳定的趋势,而铜品位则持续降低。综合考量各项指标,确定调整剂的最佳用量为 500 g/t。

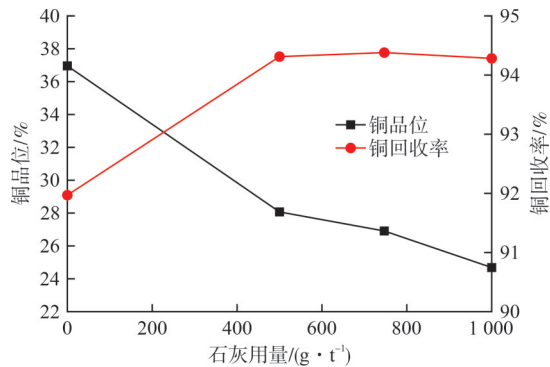


图 4 调整剂用量试验结果
Fig. 4 Regulator dosage test results

3.6 闭路浮选试验

闭路浮选试验流程见图 5,试验结果见表 5。由表 5 可知:闭路浮选试验获得产率为 3.84 %,铜品位为 31.09 %、铜回收率为 97.62 %的精矿,尾矿中铜品位降低至 0.03 %。

3.7 尾矿粒度筛析

为探究浮选尾矿中铜在不同粒级的损失分布,对闭路浮选试验尾矿进行了粒度筛析研究。采用筛孔尺寸为 0.12 mm、0.074 mm、0.043 mm、0.038 mm 和 0.028 mm 的筛网,将尾矿划分为 6 个粒度,并分别测定各粒级的铜品位,进而计算铜在各粒级的分布率,结果见表 6。由表 6 可知:铜的损失主要集中在粗粒级(+0.074 mm,分布率为 31.69 %)和细粒级(-0.038 mm,分布率为 55.92 %)。其中,+0.12 mm 粒度分布率为 12.30 %,铜品位为 0.04 %,该粒度较粗,可考虑采用分级后再磨再选工艺进行回收。-0.038 mm 粒度中的

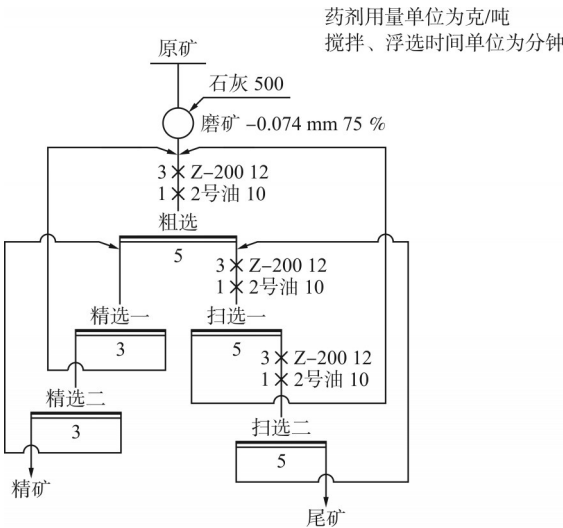


图 5 闭路浮选试验流程
Fig. 5 Flowchart of closed-circuit flotation test

表 5 闭路浮选试验结果
Table 5 Closed-circuit flotation test results

产物	产率/%	铜品位/%	铜回收率/%
精矿	3.81	31.09	97.62
尾矿	96.19	0.03	2.38
原矿	100.00	1.21	100.00

铜粒度细小、比表面积大且易氧化,因此通过浮选工艺进一步回收存在困难^[14-15]。

表 6 尾矿粒度筛析结果
Table 6 Screening analysis results of tailings particle size

粒度/mm	产率/%	铜品位/%	分布率/%
+0.12	7.84	0.04	12.30
-0.12 ~ +0.074	24.72	0.02	19.39
-0.074 ~ +0.043	21.71	0.01	10.06
-0.043 ~ +0.038	6.53	0.01	2.33
-0.038 ~ +0.028	6.65	0.04	9.49
-0.028	32.55	0.04	46.43
合计	100.00	0.03	100.00

3.8 产物化学成分分析

对闭路浮选精矿和尾矿开展化学成分分析,结果见表 7、表 8。由表 7 可知:经闭路浮选后,矿石中的铜有效富集到了精矿中,精矿主要成分为 Cu、S、Fe、SiO₂,品位分别为 31.09 %、19.59 %、9.36 %、20.67 %;有害元素 As、P 含量低,不影响铜的冶炼及铜产品的性能;Au、Ag 品位分别为 1.02 g/t、78.09 g/t,品位太低达不到冶炼计价水平。由表 8 可知:尾矿中主要成分为 SiO₂,品位为 77.60 %,铜品位为 0.03 %,硫品位为 0.017 %,可探索铜的化学浸出工艺^[16]或尾矿粗细分级后再磨再选工艺^[17-18]。

表 7 精矿化学成分分析结果

Table 7 Chemical composition analysis results of concentrate

成分	Cu	S	Mo	As	Pb	Zn	Fe	P
w/%	31.09	19.59	0.022	0.002 6	0.057	0.054	9.36	0.024
成分	Au ¹⁾	Ag ²⁾	Na ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O
w/%	1.02	78.09	0.49	20.67	4.61	2.66	0.56	2.24

注:1) $w(\text{Au})/(\text{g}\cdot\text{t}^{-1})$;2) $w(\text{Ag})/(\text{g}\cdot\text{t}^{-1})$ 。

表 8 尾矿化学成分分析结果

Table 8 Chemical composition analysis results of tailings

成分	Cu	S	Mo	As	Pb	Zn	Fe	P
w/%	0.03	0.017	<0.001 0	<0.001 0	0.016	0.022	0.98	0.025
成分	Au ¹⁾	Ag ²⁾	Na ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O
w/%	0.06	3.22	0.51	77.60	5.61	2.97	2.16	2.64

注:1) $w(\text{Au})/(\text{g}\cdot\text{t}^{-1})$;2) $w(\text{Ag})/(\text{g}\cdot\text{t}^{-1})$ 。

4 结 论

1) 矿石中主要回收金属为铜,品位为 1.21 %;硫品位较低,仅为 1.03 %。Pb、Zn、Co、Au、Ag 等元素含量均较低,无综合回收利用价值。铜在矿石中主要以硫化铜形式存在,分布率为 94.21 %;氧化铜分布率为 3.31 %。

2) 通过条件试验,确定最佳工艺参数为:磨矿细度-0.074 mm 占比 75 %,捕收剂 Z-200 用量 30 g/t,调整剂石灰用量 500 g/t。在此基础上进行闭路浮选试验,获得铜品位 31.09 %、铜回收率 97.62 % 的精矿,尾矿铜品位降至 0.03 %。浮选工艺有效富集了矿石中的铜,且有害元素含量低,对铜冶炼无影响。

3) 闭路浮选尾矿中铜损失主要集中在粗粒级(+0.074 mm,分布率为 31.69 %)和细粒级(-0.038 mm,分布率为 55.92 %)。+0.12 mm 粒级分布率为 12.30 %,铜品位 0.04 %,可考虑分级后再磨再选工艺。-0.038 mm 粒级中铜因粒度小、比表面积大、易氧化等特性,难以通过常规浮选工艺进一步回收。

【参 考 文 献】

[1] 胡岳华,冯其明. 矿物资源加工技术与设备[M]. 北京:科学出版社,2006.

[2] 王全明,张大权. 中国铜矿资源找矿前景[J]. 地质通报,2010,29(10):1 445-1 451.

[3] 魏明辉. 我国铜资源开发利用现状及可持续发展策略[J]. 现代矿业,2023,39(10):9-12.

[4] 解舒喻,张嘉苒,孟嘉禾,等. 中国铜矿资源供应安全及对策[J]. 中国金属通报,2023(11):49-51.

[5] 张洋,席欣月. 铜硫浮选分离工艺及药剂研究进展[J]. 黄金,2025,46(1):47-55.

[6] 鹿爱莉,孙志伟,张华. 我国铜矿资源可供性分析[J]. 资源与产业,2010,12(1):12-16.

[7] 张楠. 新能源产业发展背景下我国铜资源供需现状与趋势[J]. 中国矿业,2023,32(6):2-9.

[8] 蒋伟,李伟,刘铁成,等. 全球铜资源分布与价格影响因素分析[J]. 矿产勘查,2025,16(1):205-213.

[9] 田俊,周文伟. 快速分相与测定铜矿石化学物相中铜量的效果[J]. 中国金属通报,2019(8):96-97.

[10] 苏万山. 复杂难选硫化铜矿的选矿工艺研究[J]. 山西冶金,2024,47(3):84-86.

[11] 李环,朱金超,李宁,等. 某高铜金精矿浸出过程中银工艺矿物学特征研究及工艺优化措施[J]. 黄金,2024,45(12):84-88.

[12] 孙文祥. 西藏某次生铜矿铜铅分离试验研究[J]. 黄金,2024,45(8):75-80.

[13] 万磊,王伟,岳守艳. 巴布新几内亚马当省某铜镍矿的选矿试验[J]. 矿冶,2014,23(1):14-17.

[14] 于鸿宾. 某低品位金铜矿选矿工艺优化研究与生产实践[J]. 黄金,2022,43(5):72-76.

[15] 王沐芝,杨晓龙,苗雨,等. 某高纬度寒冷地区低品位铜矿资源综合利用试验研究[J]. 黄金,2024,45(8):85-88.

[16] 冷红光,韩百岁,杨孟月. 黄铜矿浸出研究进展[J]. 湿法冶金,2021,40(5):355-360.

[17] 陶恒畅,吕昊子,毛富邦,等. 分级再磨方式对某铜尾矿再选指标的影响[J]. 有色金属(选矿部分),2022(5):74-78.

[18] 袁喜振,苏敏,邓林欣,等. 某混合矿浮选中矿、尾矿再磨再选提高铜回收率的研究[J]. 铜业工程,2021(1):34-39.

Experimental research on flotation reagent optimization for a copper ore from abroad

Li Yunpeng¹, Yang Wenhua², Wu Kai¹

(1. Department of Resources and Civil Engineering, Yantai Gold College;

2. College of Energy, Xi'an University of Science and Technology)

Abstract: A copper ore from abroad is characterized by a high copper content and a low oxidation rate, indicating that it is a primary sulfide copper ore. The copper grade reaches 1.21 %, while the contents of other metals such as lead, cobalt, and zinc are relatively low, lacking economic value for comprehensive recovery. To maximize the economic benefit of this ore, a flotation reagent optimization test was carried out. Test results show that under the conditions of grinding fineness with -0.074 mm accounting for 75 %, lime dosage of 500 g/t, and Z-200 dosage of 30 g/t, using a process flow of one roughing, two cleanings, and two scavengings with staged return of selected middlings, the closed-circuit test yielded a copper concentrate with a grade of 31.09 % and a recovery rate of 97.62 %, while the copper grade in the tailings was only 0.03 %. The test results provide data support for the beneficiation process improvement and reagent optimization of similar types of ore, laying a solid foundation for enterprises to improve quality and reduce consumption.

Keywords: low-sulfur copper ore; flotation; phase analysis; reagent optimization; beneficiation test; primary sulfide copper ore