

刚果(金)某地铜钴矿还原酸浸工艺研究

刘秀富

穆索诺伊矿业简易股份有限公司, 刚果 科卢韦齐

收稿日期: 2025年12月11日; 录用日期: 2026年1月8日; 发布日期: 2026年1月16日

摘要

针对刚果(金)某铜钴矿, 采用还原酸浸的方法浸出其中的铜、钴。考察磨矿细度、矿浆浓度、浸出终点pH值、焦亚硫酸钠用量、浸出温度、浸出时间对铜、钴浸出率的影响, 结果显示: 在矿细度-74 μm 占66.75%、矿浆浓度30%、浸出pH值为1.8、焦亚硫酸钠用量10 kg/t矿、浸出温度20°C、浸出时间5 h的较优条件下, 铜、钴浸出率分别为93.77%、83.74%, 铜、钴提取效果较优。

关键词

铜钴矿, 还原酸浸, 焦亚硫酸钠

Study on Reducing Acid Leaching Process of Copper-Cobalt Ore from a Certain Area in Congo (DRC)

Xiufu Liu

Musonoie Mining Global Simplex S.A., Kolwezi, Democratic Republic of the Congo

Received: December 11, 2025; accepted: January 8, 2026; published: January 16, 2026

Abstract

For a copper-cobalt ore in the Democratic Republic of the Congo, a reducing acid leaching method was used to extract copper and cobalt from it. The impact of grinding fineness, pulp concentration, leaching pH value, reducing agent sodium pyrosulfite, leaching temperature, and leaching time on the leaching rate of copper and cobalt was investigated. Under the conditions of ore fineness of -74 μm accounting for 66.75%, pulp concentration of 30%, leaching pH of 1.8, sodium pyrosulfite amount of 10 kg/t ore, leaching temperature of 20°C, and leaching time of 5 hours, the leaching rates of copper and cobalt can reach 93.77% and 83.74% respectively, and the extraction effect of copper and

cobalt is excellent.

Keywords

Copper-Cobalt Ore, Reducing Acid Leaching, Sodium Pyrosulfite

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

非洲刚果(金)有世界第三大铜钴矿带(赞比亚 - 刚果(金)铜钴矿带), 铜、钴资源丰富, 其钴资源储量为 4×10^6 t, 占世界钴资源储量的 48% [1]-[3]。随着资源的开采, 高品位铜钴矿资源愈发减少, 如何高效、低成本地开发低品位铜钴资源已成为研究重点。

针对低品位难处理铜钴矿, 主要有浮选 - 酸浸法[4]、直接酸浸法[5]、柱浸法[6]、生物浸出法[7]等。浮选 - 酸浸法在较低酸耗量下即能实现铜的浸出, 克服了现有技术中低品位氧化铜矿铜富集的工艺复杂, 药剂耗量大、成本高等缺陷, 但该方法工艺复杂, 条件苛刻, 成本高昂, 难以大规模实际运用, 部分工艺不适合处理低品位矿石, 处理低品位矿石时指标会恶化, 所得产品难以进入产业链条, 同时很多工艺会使用大量药剂, 部分药剂有毒, 对环境污染治理和生产安全管理均是很大的挑战。直接酸浸法具有浸出效果好, 成本低、耗时少、铁杂质含量低, 且对后续净化、电积等工序无影响。生物浸出法其工艺其成本低、利于环境保护、基建投资少, 能耗低, 试剂消耗少, 能经济地处理低品位、难处理的矿石, 但生物浸出反应速度慢, 细菌对环境的适应性差, 难以处理碱性矿床和碳酸盐型矿床。直接酸浸铜钴矿具有短流程, 易操作, 铜、钴浸出率高的优点。本文以刚果(金)某地铜钴矿为原料, 采用还原酸浸提取其中的铜、钴, 考察各因素对铜、钴浸出率的影响。

2. 试验

2.1. 试验原料

试验原料取自刚果(金)某地铜钴矿, 铜钴矿化学成分如表 1 所示, 主要含铜、含钴矿物组成如表 2 所示。由表 1 可知主要含钴矿物为水钴矿, 原矿含铜 2.35%, 含钴 0.15%, 由表 2 可知主要含铜矿物组成为硅孔雀石、孔雀石、假孔雀石以及辉铜矿。原矿 XRD 图如图 1 所示。

Table 1. Chemical composition of copper-cobalt ore

表 1. 铜钴矿化学成分

元素	Cu	Co	S	Ca	Mg	Mn	Fe	Al	SiO ₂
含量(%)	2.35	0.15	0.07	5.49	5.72	0.19	1.25	3.02	55.17

Table 2. Main copper- and cobalt-bearing mineral composition of copper-cobalt ore

表 2. 铜钴矿主要含铜、含钴矿物组成

矿物组成	硅孔雀石	孔雀石	假孔雀石	富铜钴硬锰矿	辉铜矿	水钴矿	褐铁矿	石英
含量(%)	1.17	0.38	0.36	0.10	0.72	0.30	0.95	75.44

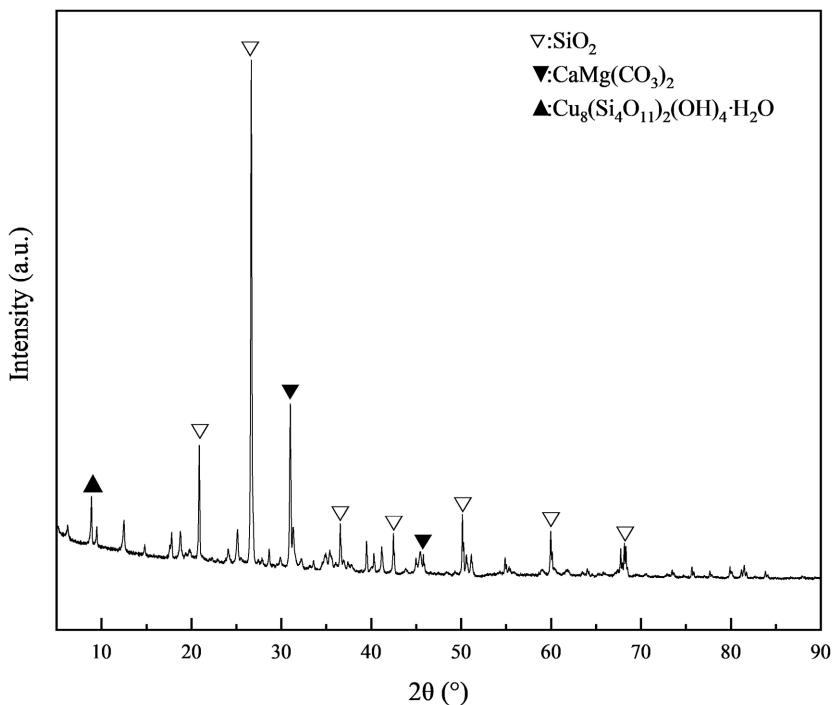


Figure 1. XRD pattern of a copper-cobalt ore sample from a location in the democratic republic of Congo
图 1. 刚果(金)某地铜钴矿 XRD 图

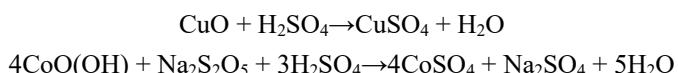
2.2. 试验试剂及设备

试验试剂：分析纯浓硫酸(98%)，分析纯焦亚硫酸钠。

试验设备：HH-2 型数显恒温水浴锅(常州国宇仪器制造有限公司)、JJ-1 型精密增力电动搅拌器(常州国宇仪器制造有限公司)、DHG 型 9623A 电热恒温鼓风干燥箱(上海精宏实验设备有限公司)。

2.3. 试验原理

铜钴矿中铜主要以氧化矿形式存在，采用硫酸即可与矿石反应，将铜转化为可溶于水的硫酸铜；钴则主要以三价形式存在于矿石中，不易溶于酸，需加入还原剂(焦亚硫酸钠)将三价钴还原为二价钴，主要化学反应如下：



2.4. 试验方法

取 200 g 矿样置于密封制样机中研磨，在烧杯中加入细磨后的矿，根据液固比添加适量水调配成矿浆，再将烧杯放置于恒温水浴锅中，待水浴锅达到指定温度后，开启搅拌，并在搅拌过程中添加硫酸保持在指定 pH 值，并添加还原剂焦亚硫酸钠于烧杯中搅拌一定时间。待浸出结束后，矿浆过滤，浸渣经洗涤、干燥、制样，测定浸渣中的铜、钴含量，计算铜、钴浸出率。试验流程如图 2 所示。

3. 结果与讨论

3.1. 磨矿细度对铜、钴浸出率的影响

在矿浆浓度为 25%、浸出 pH 值 1.8、焦亚硫酸钠用量 10 kg/t 矿、浸出温度 20℃、浸出时间 5 h 的条

件下, 考察不同磨矿细度对铜、钴浸出率的影响, 试验结果如图 3 所示。

由图 3 可知, 当磨矿越细, 矿石解离度越高, 矿石比表面积增大, 与硫酸反应更为充分, 铜、钴浸出率越高, 当磨矿细度由 $-74 \mu\text{m}$ 占比由 55.73% 增加至 66.75%, 铜、钴浸出率分别由 88.43%、76.56% 增加至 93.27%、83.47%, 继续提高磨矿细度, 铜、钴浸出率增长较少。因此考虑磨矿能耗和铜、钴浸出率, 控制 $-74 \mu\text{m}$ 占比 66%~67% 为宜。

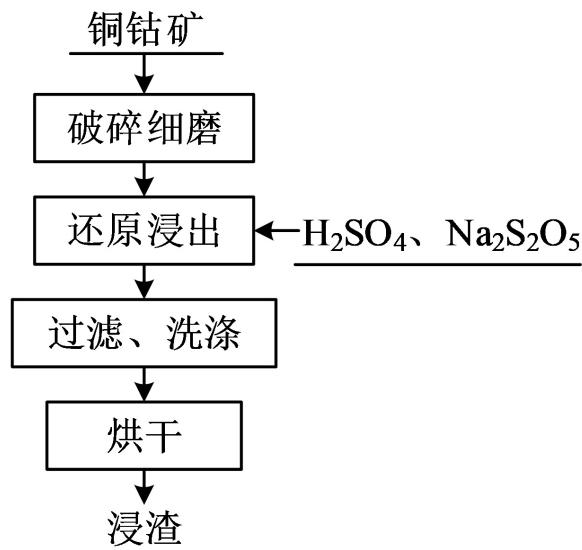


Figure 2. Experimental procedure flowchart
图 2. 试验流程图

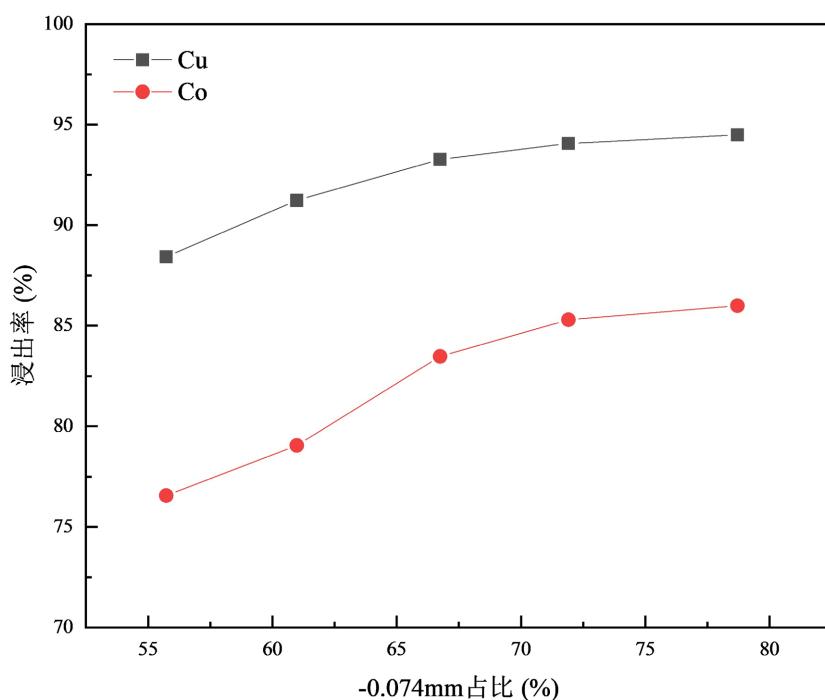


Figure 3. The effect of grinding fineness on the leaching rate of copper and cobalt
图 3. 磨矿细度对铜、钴浸出率的影响

3.2. 矿浆浓度对铜、钴浸出率的影响

在磨矿细度-74 μm 占 66.75%、浸出 pH 值 1.8、焦亚硫酸钠用量 10 kg/t 矿、浸出温度 20℃、浸出时间 5 h 的条件下, 考察浸出矿浆浓度对铜、钴浸出率的影响, 试验结果如图 4 所示。

由图 4 可知, 当矿浆浓度升高时, 单位时间内处理矿量增大, 导致矿与酸反应时间不充足, 铜浸出率轻微下降, 钴浸出率明显降低。矿浆浓度由 15% 提高至 35%, 铜浸出率仅由 94.52% 降低至 93.15%, 而钴浸出率由 84.27% 降低至 78.82%。结合矿山现场情况, 为保证处理量和浸出液铜浓度, 选取矿浆浓度为 30%, 此时铜、钴浸出率分别为 94.01%、80.24%。

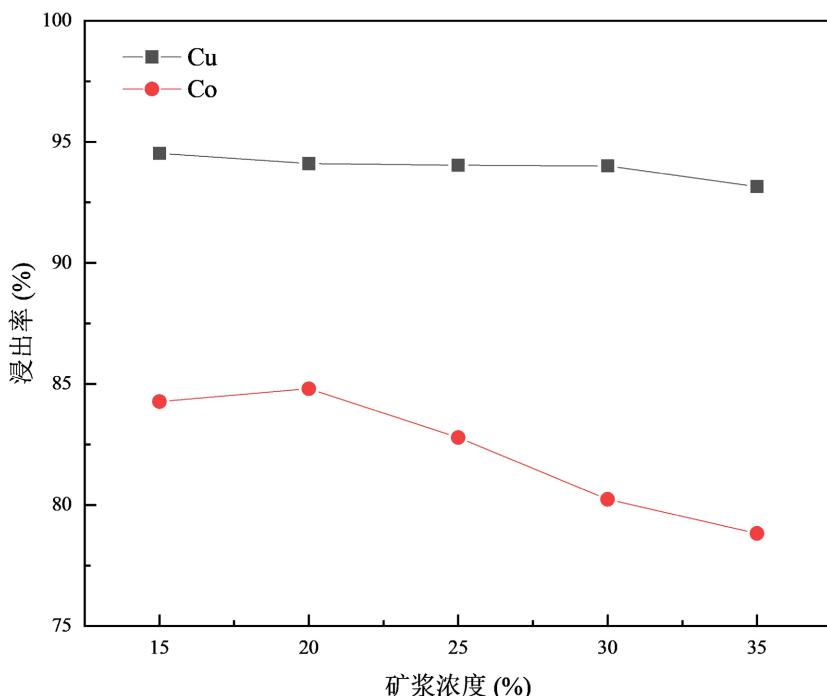


Figure 4. The effect of pulp concentration on the leaching rate of copper and cobalt
图 4. 矿浆浓度对铜、钴浸出率的影响

3.3. 浸出 pH 值对铜、钴浸出率的影响

在磨矿细度-74 μm 占 66.75%、矿浆浓度 30%、焦亚硫酸钠用量 10 kg/t 矿、浸出温度 20℃、浸出时间 5 h 的条件下, 考察浸出 pH 值对铜、钴浸出率的影响, 试验结果如图 5 所示。

由图 5 可知, 当浸出 pH 值升高时, 溶液酸浓度降低, 对矿的浸出能力降低, 导致部分含铜、含钴矿物不能被有效地浸出到溶液中, 铜、钴浸出率降低。浸出 pH 值由 1.2 升高至 2.3, 铜、钴浸出率分别由 93.12%、85.83% 降低至 89.75%、77.17%。当浸出 pH 值为 1.8 时, 铜、钴浸出率为 92.48%、83.47%, 较之浸出 pH 值 1.2 时降低较少, 因此考虑酸耗情况, 选取浸出 pH 值为 1.8。

3.4. 焦亚硫酸钠用量对铜、钴浸出率的影响

在磨矿细度-74 μm 占 66.75%、矿浆浓度 30%、浸出 pH 值为 1.8、浸出温度 20℃、浸出时间 5 h 的条件下, 考察焦亚硫酸钠用量对铜、钴浸出率的影响, 试验结果如图 6 所示。

根据图 6 可知, 焦亚硫酸钠用量增加, 铜浸出率无明显影响, 钴浸出率因还原剂逐渐充裕而显著增

加。当焦亚硫酸钠用量由 5 kg/t 增加至 15 kg/t, 铜浸出率影响较小, 钴浸出率由 74.15% 升高至 83.98%。焦亚硫酸钠用量增加至 10 kg/t 后, 钴浸出率随焦亚硫酸钠的用量增加而缓慢升高, 因此考虑焦亚硫酸钠用量成本, 选取焦亚硫酸钠用量为 10 kg/t。

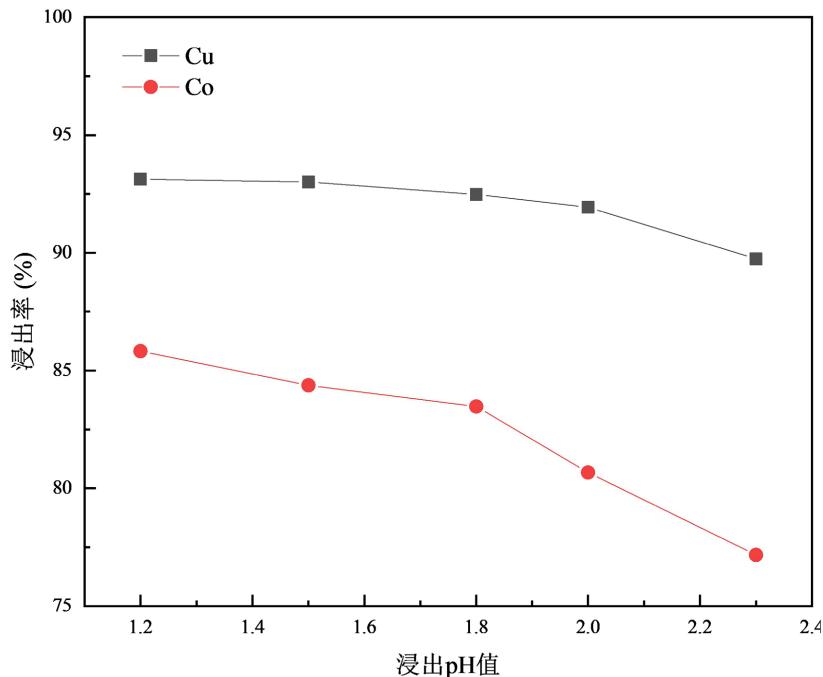


Figure 5. The effect of leaching pH on the leaching rates of copper and cobalt
图 5. 浸出 pH 值对铜、钴浸出率的影响

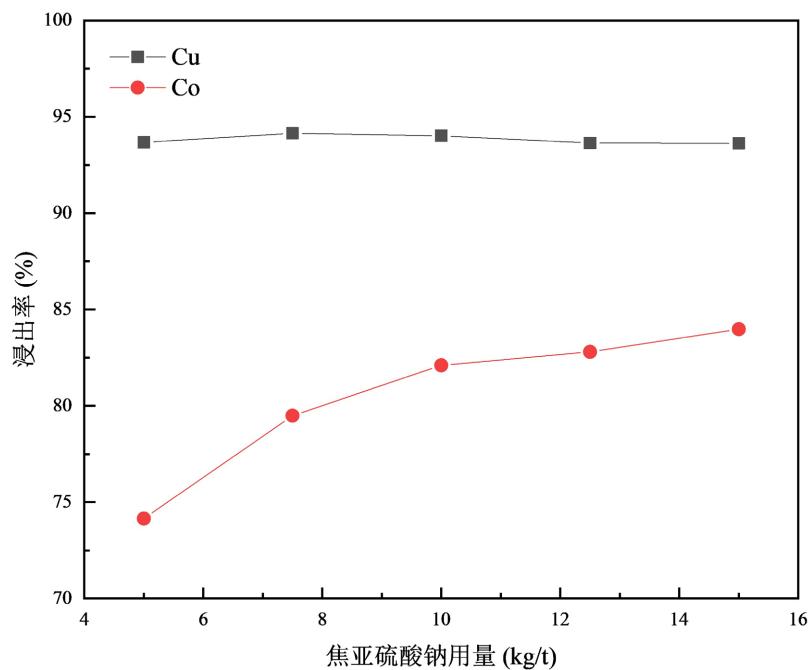


Figure 6. The effect of sodium metabisulfite dosage on the leaching rate of copper and cobalt
图 6. 焦亚硫酸钠用量对铜、钴浸出率的影响

3.5. 浸出温度对铜、钴浸出率的影响

在磨矿细度-74 μm 占 66.75%、矿浆浓度 30%、浸出 pH 值为 1.8、焦亚硫酸钠用量 10 kg/t 矿、浸出时间 5 h 的条件下, 考察浸出温度对铜、钴浸出率的影响, 试验结果如图 7 所示。

由图 7 可知, 浸出温度升高, 铜、钴浸出率无显著变化, 浸出温度由 20°C 升高至 60°C, 铜、钴浸出率分别由 93.79%、85.00% 轻微升高至 94.19%、86.84%。为降低浸出能耗, 浸出时不需加热即可获得较高的铜、钴浸出率, 因此选取浸出温度为 20°C。

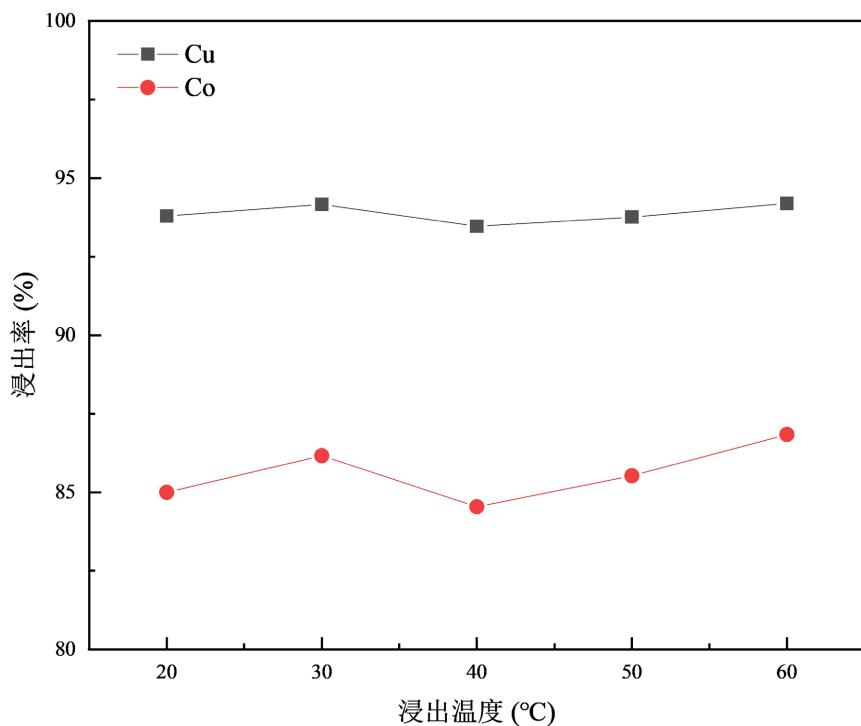


Figure 7. The effect of leaching temperature on the leaching rates of copper and cobalt
图 7. 浸出温度对铜、钴浸出率的影响

3.6. 浸出时间对铜、钴浸出率的影响

在磨矿细度-74 μm 占 66.75%、矿浆浓度 30%、浸出 pH 值为 1.8、焦亚硫酸钠用量 10 kg/t 矿、浸出温度 20°C 的条件下, 考察浸出时间对铜、钴浸出率的影响, 试验结果如图 8 所示。

由图 8 可知, 浸出时间延长, 硫酸、还原剂与矿反应更加充分, 铜、钴浸出率均有明显的提高。浸出时间由 2 h 延长至 6 h, 铜、钴浸出率分别由 91.55%、77.60% 增加至 94.20%、83.86%, 其中当浸出时间延长至 5 h 时, 铜、钴浸出率分别为 93.77%、83.74%, 且继续延长浸出时间对铜、钴浸出率的增效较低。因此选取浸出时间为 5 h。

3.7. 扩大联对比试验

取 2000 g 矿样在磨矿细度-74 μm 占 66.75%、矿浆浓度 30%、浸出 pH 值为 1.8、浸出温度为 20°C、焦亚硫酸钠用量 10 kg/t 矿、浸出时间 5 h 的最佳条件下, 考察最佳条件下铜、钴的浸出率如表 3 所示; 同时考察酸浸渣主要矿物组成, 将酸浸渣分级后磨制成光片, 光片经偏光显微镜观察、BPMA 测试, 获得矿物组成及含量如表 4 所示。

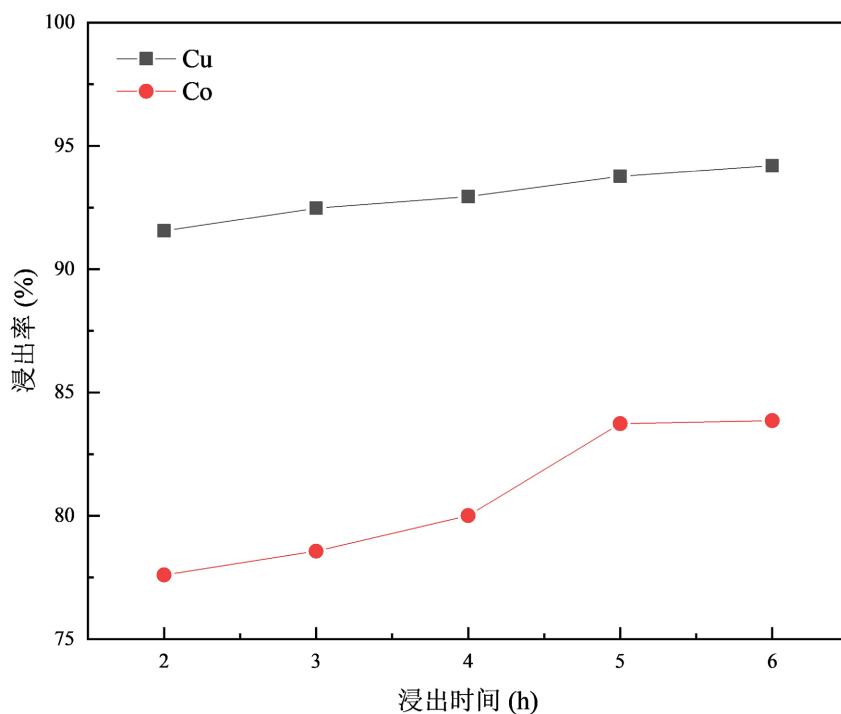


Figure 8. The effect of leaching time on the leaching rates of copper and cobalt
图 8. 浸出时间对铜、钴浸出率的影响

由表 3 可知, 在最佳条件下, 铜、钴的浸出率分别达到 93.75% 和 83.73%, 工艺稳定且高效。由表 4 可知酸浸渣中铜主要赋存于蓝辉铜矿、铜蓝、硅孔雀石和富铜钴硬锰矿。

Table 3. Leaching rates of copper and cobalt under optimal conditions
表 3. 最佳条件下铜、钴的浸出率

实验编号	铜浸出率(%)	钴浸出率(%)
1	93.79	83.80
2	93.67	83.69
3	93.80	83.78
4	93.73	83.64
平均值	93.75	83.73

Table 4. Main mineral composition of the acid leaching residue
表 4. 酸浸渣主要矿物组成

矿物组成	蓝辉铜矿	孔雀石	硅孔雀石	假孔雀石	铜蓝	富铜钴硬锰矿	自然铜	水钴矿	石英
含量(%)	0.10	0.01	0.18	0.01	0.13	0.31	0.01	0.05	65.54

4. 结论

- 1) 刚果(金)某铜钴矿主要含铜矿物组成为孔雀石、硅孔雀石、假孔雀石以及辉铜矿, 主要含钴矿物为水钴矿, 原矿含铜 2.35%, 含钴 0.15%。
- 2) 采用还原酸浸法浸出该铜钴矿可获得较优的铜、钴浸出率。在磨矿细度-74 μm 占 66.75%、矿浆

浓度 30%、浸出 pH 值为 1.8、焦亚硫酸钠用量 10 kg/t 矿、浸出温度 20℃、浸出时间 5 h 的条件下，铜、钴浸出率分别可达 93.77%、83.74%。

3) 酸浸渣中的铜主要赋存于蓝辉铜矿、铜蓝、硅孔雀石和富铜钴硬锰矿。

参考文献

- [1] 郑伟, 兰川, 王桂楼, 田全宝, 李旭. 刚果(金)某铜钴矿酸浸试验研究[J]. 湖南有色金属, 2024, 40(1): 34-37.
- [2] 段俊, 徐刚, 汤中立, 闫海卿, 刘君泰, 陈阳阳, 刘奇. 我国钴资源产业发展现状、问题与对策[J]. 中国工程科学, 2024, 26(3): 98-107.
- [3] 张志兵, 石玉臣, 张恩普, 张骄, 沈金灵, 孙剑. 刚果(金)某铜钴矿含钴萃余液制备粗制钴盐的工艺及试验研究[J]. 矿冶工程, 2022, 42(1): 112-116.
- [4] 廖乾, 解振朝, 李淮湘, 程建国, 周韫. 某含钴氧化型铜矿选冶联合成套工艺研究[J]. 矿冶工程, 2022, 42(4): 86-89.
- [5] 郭双华. 从某低品位氧化铜钴矿石中直接浸出铜钴[J]. 湿法冶金, 2021, 40(3): 190-192.
- [6] 陈晓军, 孙彦文, 郭持皓. 某铜钴矿柱浸试验研究[J]. 云南化工, 2021, 48(9): 34-36.
- [7] 田炳阳, 李京泽, 尚鹤, 刘学, 高文成, 温建康. 响应面法优化间接生物浸出铜钴矿中有价金属的工艺参数[J]. 生物学杂志, 2024, 41(3): 46-51+97.