

刚果(金)MSESA 矿体崩积物的酸浸工艺优化及经济性评价

张长达¹, 李 辉¹, 章 俊², 郑 彬¹, 许 卫¹, 韩 斌², 李鑒灿¹

(1. 中国有色创新研究院(天津)有限公司, 天津 300112;

2. 刚波夫矿业股份有限公司, 加丹加 利卡希)

摘要:为拓展海外低品位氧化铜钴矿开发边界, 针对刚果(金)MSESA 矿体坑内崩积物, 研究了用硫酸浸出其中的铜、钴, 考察了各关键因素对浸出的影响, 并对工艺的经济性进行了评价分析。结果表明:该崩积物中铜、钴品位分别为 1.1% 和 0.15%, 矿石氧化率高, 泥化严重, 主要脉石物相为滑石、黑云母、石英、绿泥石、白云石; 铜主要以氧化物存在, 钴以钴华、碳酸钴和脉石中钴形态存在; 在磨矿细度-200 目占比 70%、硫酸加入量 7%、浸出温度 25℃、浸出时间 2 h、液固体积质量比 2.5:1、搅拌速率 300 r/min 条件下, 铜、钴浸出率分别为 88.72% 和 71.75%, 酸耗为 5.43 t/tCu; 采用浸出-萃取-电积工艺生产阴极铜, 生产成本为 3 450.618 美元/tCu, 仅占阴极铜售价的 36.322%, 具有较高的经济效益。

关键词:崩积物; 刚果(金); MSESA 矿体; 铜; 钴; 硫酸; 浸出; 经济性评价

中图分类号:TD91; TF816

文献标识码:A

文章编号:1009-2617(2026)03-0299-09

DOI:10.13355/j.cnki.sfyj.2026.03.004

刚果(金)作为全球铜钴资源的核心富集区, 其境内中非铜钴带孕育出 Kamo-a-Kakula、Tenke-Fungurume 等一系列超大型矿床^[1]。据美国地质调查局 2024 年数据, 其境内铜资源储量已达 8 000 万 t、钴资源储量为 600 万 t, 分别占全球总资源储量的 8% 和 55%, 其中, 钴年产量更是占到全球总年产量的 74%, 长期主导全球关键金属供应格局^[2]。在全球“碳达峰、碳中和”目标驱动下, 新能源汽车动力电池、储能设备等领域对铜、钴的需求持续攀升, 预计 2030 年, 我国钴资源消费量将达 25.34 万 t, 动力电池将成为最主要消费领域, 市场供需缺口持续扩大^[3]。但随着高品位铜、钴矿资源的日渐枯竭, 地表层 Cu 品位>3%、Co 品位>1% 的优质资源日益减少, 低品位氧化铜钴矿已成为未来资源开发的核心对象^[4-5]。此类矿石多以氧化物形态赋存, 常伴随含泥量高、矿物嵌布复杂等特点^[6-8], 传统火法和浮选工艺因能耗高、适应性差难以适用, 而湿法浸出工艺凭借投

资省、建设周期短、产品方案灵活等优势, 成为低品位氧化铜钴矿处理的优先选择^[9-11]。其中, 酸浸-溶剂萃取-电积-除铁-沉钴工艺已发展成熟, 是当前低品位氧化铜钴矿开发的主流技术路径^[12-15]。

刚果(金)MSESA 矿体坑内崩积物属低品位氧化铜钴资源, 此前尚未得到系统的工艺研究, 其矿物组成、嵌布特征及浸出特性仍不明确。因此, 针对刚果(金)MSESA 矿体坑内崩积物进行了工艺矿物学分析, 以探明其主要化学成分、物相组成、铜钴赋存状态及嵌布特征; 并在此基础上, 进一步开展硫酸浸出提取铜、钴试验, 确定了最佳硫酸用量、液固体积质量比、浸出时间、温度、搅拌速率等浸出参数; 同时结合当地企业生产数据, 对包含浸出、沉降及萃取的全流程工艺进行了初步经济分析。所得相关数据可为该类型铜钴资源的工业化开发提供参考。

收稿日期:2025-12-26; 修订日期:2026-02-06

基金项目:中国有色集团科技项目(2025KMSKJ01)。

第一作者简介:张长达(1995—), 男, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向为有色金属冶金。

通信作者简介:李辉(1965—), 男, 本科, 教授级高级工程师, 主要研究方向为有色金属冶金。E-mail: huil65@163.com。

1 试验原料与方法

1.1 原料性质

崩积物样品呈泥样状,干燥后结成泥状硬块,外观呈土黄色,其中可见少量块状矿石。样品经颚式破碎机和双辊破碎机破碎后,采用双层振筛机筛分,保证 100% 通过 2 mm 标准筛。将筛分后颗粒混匀、缩分,取 100 g 样品,经振动磨样机研磨后进行化学元素分析和物相分析,结果分别如图 1 和表 1 所示。破碎后样品的堆比重采用自然堆积法测定,真比重采用量筒法测定,测得-2 mm 崩积物堆比重为 1.25 g/cm³,真比重为 2.37 g/cm³; -200 目占比 70%,崩积物堆比重为 1.07 g/cm³,真比重为 2.52 g/cm³。

由图 1 可知,崩积物主要物相为滑石、黑云母、石英、绿泥石、白云石;并未发现含铜、钴的物相,可能是由于矿石中对应元素含量较低所致。由表 1 可知:崩积物全 Cu 质量分数为 1.10%,酸溶铜(CuO)质量分数为 0.954%,钴质量分数为 0.154%。钙、镁含量不高,但 Al₂O₃ 质量分数达 11.01%,可能增加浸出酸耗。

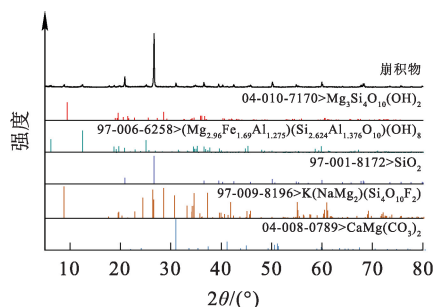


图 1 崩积物 XRD 图谱

Fig. 1 XRD pattern of colluvium

表 1 崩积物元素化学分析结果

Table 1 Chemical analysis results of colluvium %						
全 Cu	酸溶铜(CuO)	Co	Fe	Mn	S	Ca
1.10	0.954	0.154	3.97	0.19	0.095	1.35
Mg	Al ₂ O ₃	Pb	Zn	As	SiO ₂	
3.05	11.01	0.005 6	0.029	0.009 8	58.86	

崩积物中铜、钴化学物相分析结果分别见表 2、3。由表 2 可知,崩积物中铜大部分以自由氧化铜形态存在,占比 76.70%,结合氧化铜占比

17.07%,硫化铜占比 5.69%。由表 3 可知,钴大部分以钴华和碳酸钴、脉石形态存在,占比分别为 42.41%和 45.57%。取 200 g 磨矿 1.86 min 的崩积物进行筛分,-200 目质量占比为 70.14%,-100 目质量占比为 86.89%,-325 目质量占比达 62.44%,说明该崩积物泥化严重,可能对矿浆沉降产生不利影响,增加絮凝剂消耗。表 4 为不同粒级区间的崩积物中铜、钴含量。可知,崩积物粒度越细,铜品位先升高后下降,钴含量呈升高趋势。

表 2 崩积物中铜化学物相分析结果
Table 2 Analysis results of chemical phases for Cu in colluvium

铜物相	铜物相中 $w(\text{铜})/\%$	铜物相占比/%
硫酸铜	0.006	0.54
自由氧化铜	0.849	76.70
结合氧化铜	0.189	17.07
次生硫化铜	0.039	3.52
原生硫化铜	0.024	2.17
全 Cu	1.107	100.00

表 3 崩积物中钴化学物相分析结果
Table 3 Analysis results of chemical phases for Co in colluvium

钴物相	钴物相中 $w(\text{钴})/\%$	钴物相占比/%
硫酸钴	0.001	0.63
钴华和碳酸钴	0.067	42.41
脉石	0.072	45.57
其他化合物	0.018	11.39
全 Co	0.158	100.00

表 4 不同粒级区间的崩积物中铜、钴含量
Table 4 Contents of Cu and Co in colluvium with different particle size intervals

粒级区间/目	粒径/mm	$w_B/\%$		
		全 Cu	酸溶铜(CuO)	Co
-325	-0.045	1.06	0.955	0.159
+325~-200	0.045~0.075	1.05	0.962	0.156
+200~-150	0.075~0.15	1.26	1.090	0.150
+150~-48	0.15~0.3	1.09	0.939	0.144
+48~-12	0.3~1.4	1.08	0.042	0.103

图 2 为崩积物的 XPS 图谱。从图 2(a)中的 Co 2p 高分辨谱图明显看出,其可以分为 Co 2p_{3/2} 和 Co 2p_{1/2} 一对自旋分裂峰,其中位于 780.67 eV

和 795.40 eV 处的拟合特征峰主要归因于 $\text{Co}^{3+} 2p_{3/2}$ 和 $\text{Co}^{3+} 2p_{1/2}$, 位于 783.32 eV 和 799.11 eV 处的特征峰主要归因于 $\text{Co}^{2+} 2p_{3/2}$ 和 $\text{Co}^{2+} 2p_{1/2}$, 此外位于 785 eV 的特征峰属于 FeLM2 俄歇干扰峰, 787.28 eV 和 802.88 eV 处的特征峰归因于 $\text{Co}^{2+} 2p_{3/2}$ 和 $\text{Co}^{2+} 2p_{1/2}$ 轨道震激效应产生的卫星峰, 以上结果表明崩积物样品中存在 Co^{3+} 和 Co^{2+} 化合物。从图 2(b) 中的 Cu 2p 高分辨谱图同样看出, 其可以分为 $\text{Cu} 2p_{3/2}$ 和 $\text{Cu} 2p_{1/2}$ 一对

自旋分裂峰, 其中位于 932.81 eV 和 952.50 eV 处的拟合特征峰主要来自 Cu^+ 或者 Cu^0 , 位于 935.07 eV 和 954.90 eV 处的特征峰主要来自 $\text{Cu}^{2+} 2p_{3/2}$ 和 $\text{Cu}^{2+} 2p_{1/2}$, 而位于 942 eV 和 960 eV 左右的特征峰为 $\text{Cu}^{2+} 2p_{3/2}$ 和 $\text{Cu}^{2+} 2p_{1/2}$ 轨道震激效应产生的卫星峰, 以上结果表明崩积物样品中铜化合物除了以 Cu^{2+} 化合物存在, 还可能存在少量的 Cu^+ 或者单质 Cu。

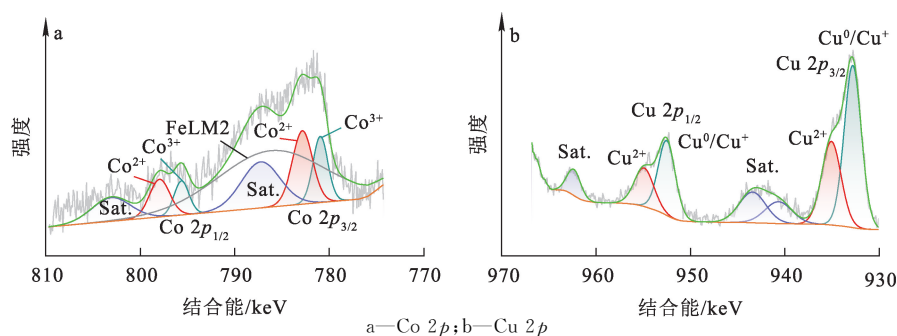


图 2 崩积物的 XPS 图谱

Fig. 2 XPS patterns of colluvium

1.2 试验方法

崩积物浸出试验在 500 mL 烧杯中进行, 首先在烧杯中放入 100 g 崩积物, 按照一定液固体积质量比加入一定量自来水, 再根据崩积物质量比加入一定量硫酸开启机械搅拌, 进行浸出反应一定时间。浸出结束后, 真空抽滤, 浸出渣淋洗在布氏漏斗上进行(液固体积质量比 1:1)。采用化学法和 ICP 光谱法测定浸出液和洗液混合液中 Cu、Co 离子浓度及 H_2SO_4 浓度, 浸出渣烘干后称重, 分析 Cu、CuO、Co 质量分数。铜、钴浸出率均为渣计, 铁和锰浸出率按液计, 吨铜酸耗按浸出液中铜计算。所用硫酸(H_2SO_4)和焦亚硫酸钠($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$)试剂均为分析纯。

2 试验结果与讨论

2.1 磨矿细度对铜、钴浸出的影响

崩积物 100 g, 硫酸加入量 9%, 液固体积质量比 2:1, 浸出温度 25 °C, 浸出时间 2 h, 搅拌速率 300 r/min。崩积物细度对铜、钴浸出效果的影响结果如图 3 所示。可以看出: 崩积物细度—200 目占比在 57%~85% 范围内时, 铜浸出率从

89.36% 升至 91.64%; 整体来看, 磨矿细度对铜浸出率的影响不明显, 但对钴浸出率影响较大, 在磨矿细度—200 目占比 70% 时, 铜和钴浸出率分别达 90.51% 和 77.81%; 继续增大磨矿细度, 铜浸出率升高不明显, 钴浸出率有小幅提高。考虑到崩积物泥质严重, 磨矿粒度过细, 可能会影响矿浆沉降性能; 此外, 崩积物中 Al_2O_3 质量分数高达 11.01%, 磨矿粒度过细可能加剧脉石组分溶出, 导致吨铜酸耗升高。为保证铜、钴浸出率, 降低磨矿成本和吨铜酸耗, 选择磨矿细度—200 目占比 70% 进行后续浸出。

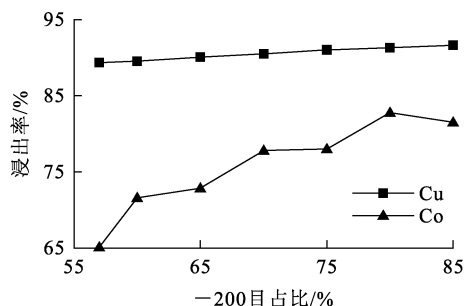


图 3 磨矿细度对铜、钴浸出率

Fig. 3 Effect of grinding fineness on leaching rates of Cu and Co

2.2 硫酸加入量对铜、钴浸出的影响

由于浸出液中游离酸含量偏高,因此,在崩积物 100 g、磨矿细度—200 目占比 70%、液固体积质量比 2:1、浸出温度 25 ℃、浸出时间 2 h、搅拌速率 300 r/min 条件下,进一步考察硫酸加入量(相对与崩积物质量,下同)对铜、钴浸出效果的影响,结果如图 4 所示。

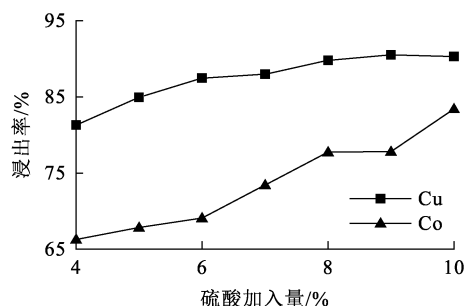


图 4 硫酸加入量对铜、钴浸出率的影响

Fig. 4 Effect of acid dosage on leaching rates of Cu and Co

由图 4 看出,随硫酸用量增加,铜、钴浸出率呈上升趋势:硫酸加入量从 4% 增加至 9%,即初始酸质量浓度从 20 g/L 升至 45 g/L 时,铜浸出率从 81.29% 升至 90.51%,钴浸出率从 66.27% 升至 77.81%;继续增加硫酸加入量至 10%,铜浸出率无明显变化,钴浸出率升至 83.42%。由于崩积物中钴含量不高,在硫酸加入量的考察范围内所得浸出渣中钴品位均小于 0.054%。考虑到随硫酸加入量增加,浸出液中游离硫酸浓度逐渐上升,酸度升高不利于后续萃取工序,且过量硫酸会加剧崩积物中脉石组分的溶出,导致酸耗增加,因此,确定硫酸加入量以 7% 为宜,即在初始酸质量浓度为 35 g/L 条件下进行后续试验。

2.3 浸出温度对铜、钴浸出的影响

崩积物 100 g、磨矿细度—200 目占比 70%,硫酸加入量 7%,液固体积质量比 2:1,浸出时间 2 h,搅拌速率 300 r/min。浸出温度对铜、钴浸出率的影响结果如图 5 所示。可以看出:当温度为 25 ℃ 时,铜、钴浸出率分别达 87.97% 和 73.42%。继续升高温度至 40 ℃,铜浸出率无明显变化,而钴浸出率提幅较大,从 73.42% 提高至 78.93%;温度进一步升至 80 ℃ 时,铜浸出率由 87.97% 小幅升至 88.23%,钴浸出率升至 86.52%。虽然升温更有利于钴浸出,但考虑生产现场实际情况,升温条件难以实现,且会增大能耗,使成本增加。综

合考虑,确定浸出温度以 25 ℃ 为宜。

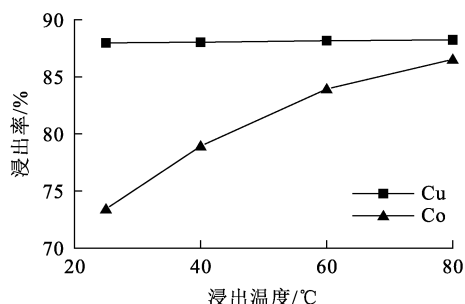


图 5 浸出温度对铜、钴浸出率的影响

Fig. 5 Effect of temperature on leaching rates of Cu and Co

2.4 液固体积质量比对铜、钴浸出的影响

崩积物 100 g、磨矿细度—200 目占比 70%,硫酸加入量 7%,浸出时间 2 h,浸出温度 25 ℃,搅拌速率 300 r/min。液固体积质量比对铜、钴浸出率的影响结果如图 6 所示。

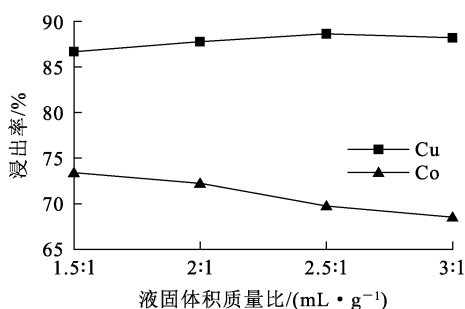


图 6 液固体积质量比对铜、钴浸出率的影响

Fig. 6 Effect of liquid volume to solid mass ratio on leaching rates of Cu and Co

由图 6 看出:液固体积质量比增至 2.5:1 时,铜浸出率小幅升至 88.64%,液固体积质量比继续增至 3:1 时,铜浸出率略有下降,为 88.20%;钴浸出率随液固体积质量比增大呈下降趋势。这是由于在硫酸加入量不变的情况下,液固体积质量比增大会使得浸出液中初始硫酸浓度降低,从而导致铜、钴浸出率稍有下降。由于崩积物中铜、钴含量不高,浸出液固体积质量比不宜过大,以控制在 2:1~2.5:1 为宜。综合考虑,确定选择液固体积质量比 2.5:1 进行后续试验,此时初始酸质量浓度为 28 g/L。

2.5 浸出时间对铜、钴浸出的影响

崩积物 100 g、磨矿细度—200 目占比 70%,硫酸加入量 7%,液固体积质量比 2.5:1,浸出温

度 25 ℃,搅拌速率 300 r/min。浸出时间对铜、钴浸出率的影响结果如图 7 所示。

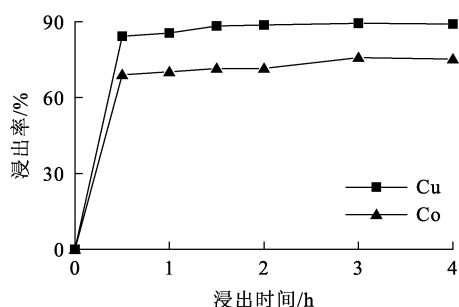


图 7 浸出时间对铜、钴浸出率的影响

Fig. 7 Effect of leaching time on leaching rates of Cu and Co

由图 7 看出:浸出 0.5 h 时,铜、钴浸出率快速升高;继续延长浸出时间至 3 h,铜、钴浸出率均只有小幅升高,铜浸出率从 84.29% 升至 89.43%,钴浸出率从 69.08% 升至 78.34%。综合浸出率、能耗及生产效率,确定浸出时间以 2 h 为宜。

2.6 搅拌速率对铜、钴浸出的影响

崩积物 100 g,磨矿细度—200 目占比 70%,硫酸加入量 7%,液固体积质量比 2.5 : 1,浸出温度 25 ℃,浸出时间 2 h。搅拌速率对铜、钴浸出率的影响结果如图 8 所示。

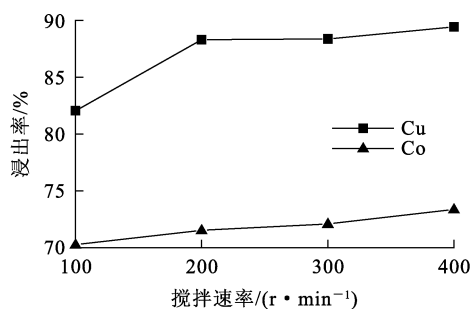


图 8 搅拌速率对铜、钴浸出率的影响

Fig. 8 Effect of stirring speed on leaching rates of Cu and Co

由图 8 看出,适当加快搅拌速率有利于铜、钴的浸出:搅拌速率加快至 300 r/min 时,铜、钴浸出率分别升至 88.37% 和 72.11%,这是由于适当的搅拌有利于提高矿浆中 H^+ 的扩散速度,使 H^+ 更易扩散至矿石颗粒表面并与之直接接触,进而促进其中铜、钴的浸出;继续加快搅拌速率至 400 r/min,铜、钴浸出率升幅均

较小,变化不明显。综合考虑,确定搅拌速率以 300 r/min 为宜。

2.7 还原剂用量对铜、钴浸出的影响

考虑到崩积物中含有部分三价钴,因此在崩积物 100 g、磨矿细度—200 目占比 70%、液固体积质量比 2.5 : 1、浸出温度 25 ℃、硫酸加入量 7%、浸出时间 2 h、搅拌速率 300 r/min 条件下,进一步考察还原剂焦亚硫酸钠($Na_2S_2O_5$)加入量(假设崩积物中所含钴为三价钴,按焦亚硫酸钠将三价钴还原为二价钴所需理论量倍数添加)对铜、钴浸出率的影响,结果如图 9 所示。

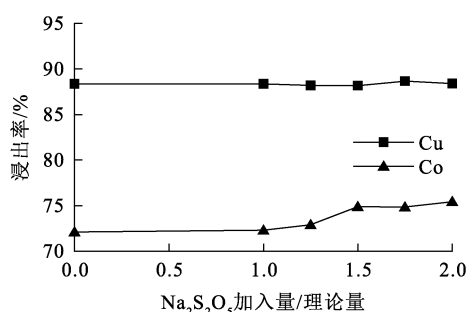


图 9 $Na_2S_2O_5$ 加入量对铜、钴浸出率的影响

Fig. 9 Effect of $Na_2S_2O_5$ adding dosage on leaching rates of Cu and Co

由图 9 看出: $Na_2S_2O_5$ 加入量对崩积物中铜浸出率几乎没有影响,而对钴浸出率影响较大;未添加 $Na_2S_2O_5$ 时,钴浸出率已可达 72.11%,这说明钴主要以二价形式存在; $Na_2S_2O_5$ 加入量为理论量时,钴浸出率为 72.29%,仅有轻微提升; $Na_2S_2O_5$ 加入量增至理论量的 1.5 倍时,钴浸出率达 74.88%;继续提高加入量至理论量的 2.0 倍时,钴浸出率仅为 75.44%,此时浸出渣中钴质量分数为 0.04%。由于崩积物中钴质量分数不高,仅为 0.154%,综合考虑成本等因素,确定浸出时不添加还原剂。

2.8 验证试验

为进一步确认酸浸试验结果的稳定性和重现性,在崩积物 100 g、磨矿细度—200 目占比 70%、浸出温度 25 ℃、浸出时间 2 h、浸出液固体积质量比 2.5 : 1、浸出渣洗涤液固体积质量比 1 : 1、硫酸加入量 7% (即初始硫酸质量浓度 28 g/L)、搅拌速率 300 r/min、不加还原剂优化浸出条件下进行 4 次平行验证试验,结果见表 5。

表 5 综合条件验证试验结果
Table 5 Results of comprehensive condition verification test

序号	渣率/%	浸出渣中 w_B /%					渣计浸出率/%					酸耗/ ($t \cdot t^{-1} Cu$)
		全 Cu	酸溶铜(CuO)	Co	Mn	Fe	全 Cu	酸溶铜(CuO)	Co	Mn	Fe	
1	95.05	0.126	0.041	0.048	0.042	3.82	89.11	95.92	70.37	78.99	8.54	5.33
2	94.98	0.125	0.048	0.044	0.039	3.76	89.21	95.22	72.87	80.50	10.04	5.32
3	95.11	0.136	0.041	0.046	0.048	3.94	88.24	95.91	71.59	75.97	5.61	5.51
4	95.23	0.135	0.049	0.045	0.044	3.86	88.31	95.11	72.17	77.95	7.41	5.56
平均	95.09	0.131	0.045	0.046	0.043	3.85	88.72	95.54	71.75	78.35	7.90	5.43

由表 5 看出:平均渣率为 95.09%,浸出渣中全 Cu 质量分数为 0.131%,浸出率为 88.72%,浸出渣酸溶铜(CuO)品位为 0.045%,浸出率为 95.54%;浸出渣中钴质量分数为 0.046%,浸出率为 71.75%;平均酸耗为 5.43 t/tCu。根据表 5 数据进一步计算可知:浸出液中铁质量浓度为 0.762 g/L,浸出率为 6.72%;浸出液中锰质量浓度为 0.428 g/L,浸出率为 78.84%;浸出液含游离酸质量浓度为 4.96 g/L。说明该崩积物浸出综合条件验证试验结果较好,技术条件稳定,技术指标重现性好。

将 4 次试验所得浸出渣等比例混合均匀,并对渣中铜、钴化学物相进行分析,结果见表 6、7。

表 6 浸出渣中铜化学物相分析结果
Table 6 Analysis results of chemical phases for Cu in leaching residue

铜物相	铜物相中 $w(Cu)$ /%	铜物相占比/%
硫酸铜	0.003	2.27
自由氧化铜	0.029	21.97
结合氧化铜	0.054	40.91
次生硫化铜	0.025	18.94
原生硫化铜	0.021	15.91
全 Cu	0.132	100.00

表 7 浸出渣中钴化学物相分析结果
Table 7 Analysis results of chemical phases for Co in leaching residue

钴物相	钴物相中 $w(钴)$ /%	钴物相占比/%
硫酸钴	0.001	2.22
钴华和碳酸钴	0.004	8.89
脉石	0.021	46.67
其他化合物	0.019	42.22
全 Co	0.045	100.00

由表 6 看出:浸出渣中自由氧化铜物相占比 21.97%,其中铜质量分数仅为 0.029%,铜浸出效果良好,说明自由氧化铜几乎完全浸出;崩积物中硫化铜含量极少,浸出渣中铜主要赋存在结合氧化铜中,占比 40.91%,其次赋存在自由氧化铜、次生硫化铜

和原生硫化铜中,分别占比 21.97%、18.94%、15.91%;经计算可知,结合氧化铜大部分被浸出,浸出率为 72.86%,次生硫化铜有部分被浸出,浸出率为 39.10%,原生硫化铜几乎不被浸出。由表 7 看出,浸出渣中未浸出的钴主要赋存在脉石矿物和其他含钴化合物中,占比分别为 46.67%和 42.22%。

3 全流程试验结果

根据浸出试验结果,进行崩积物浸出全流程试验,如图 10 所示,重点考察铜、钴、锰、铁的走向与分布。铜、钴走向与分布见表 8,铁、锰走向与分布见表 9。

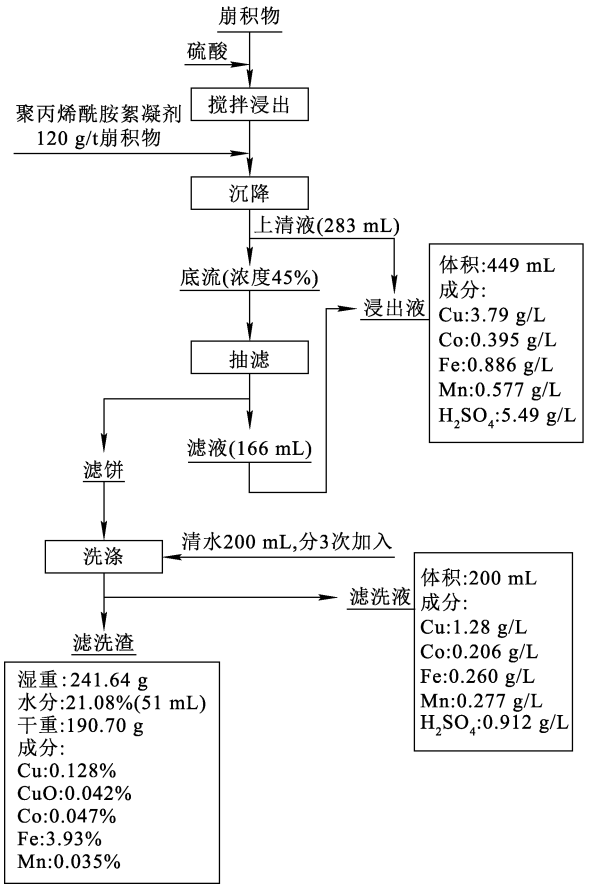


图 10 崩积物浸出全流程试验
Fig. 10 Full-process test of colluvium leaching

表 8 崩积物浸出全流程试验的铜、钴走向与分布
Table 8 Migration and distributions of Cu and Co in full-process test of colluvium leaching

项目	$m(\text{Cu})/\text{g}$	$w(\text{Cu})/\%$	$m(\text{Co})/\text{g}$	$w(\text{Co})/\%$
浸出渣	0.244	11.09	0.090	29.22
浸出液	1.70	77.27	0.177	57.47
洗液	0.256	11.64	0.041	13.31
合计	2.20	100.00	0.308	100.00

表 9 崩积物浸出全流程试验的铁、锰走向与分布
Table 9 Migration and distributions of Fe and Mn in full-process test of colluvium leaching

项目	$m(\text{Fe})/\text{g}$	$w(\text{Fe})/\%$	$m(\text{Mn})/\text{g}$	$w(\text{Mn})/\%$
浸出渣	7.49	94.33	0.066	17.37
浸出液	0.398	5.01	0.259	68.16
洗液	0.052	0.66	0.055	14.47
合计	7.74	100.00	0.380	100.00

根据图 10、表 8~9 数据计算得知:该崩积物中全铜浸出率为 88.91%,酸溶铜浸出率为 96.02%,钴浸出率为 70.78%,铁浸出率为 5.67%,锰浸出率为 82.63%,酸耗为 5.79 t/tCu。考虑到全流程试验浸出液中铜质量分数偏低,仅有 77.27%(3.79 g/L),会进一步影响阴极铜产量,因此,建议将崩积物和 MSESA 矿石中高品位氧化铜矿、浮选尾矿及其他脱钙精矿进行联合浸出,确保浸出液中铜浓度满足萃取工序要求,从而获得较高铜产能。

4 工艺的初步经济性评价

结合 MSESA 坑内崩积物浸出、沉降、萃取试验所得技术参数,以及刚波夫矿业股份有限公司提供的相关数据,对崩积物综合利用流程进行初步经济分析,阴极铜售价按 9 500 美元/t 计。由于钴回收成本涉及中和剂、沉淀剂等材料消耗,同时与萃余液中酸度、钴浓度有关,因此本研究只针对崩积物产出 1 t 阴极铜所消耗的主要材料成本进行初步计算,结果见表 10。其中,成本率=(成本/每吨阴极铜售价)×100%。

由表 10 看出:MSESA 坑内崩积物采用浸出一萃取—电积工艺生产阴极铜时,生产成本为 3 450.618 美元/tCu,总成本率为 36.322%,其中,硫酸、磨矿和电耗的成本率较高,分别为 15.97%、12.95%和 6.60%。需要说明的是,表中硫酸消耗

的数据不包括电积返酸,而湿法炼铜厂电积工序每生产 1 t 阴极铜可产生 1.54 t 硫酸,产出的硫酸在萃取工序可返回萃余液中,用于浸出、洗涤作业。按此计算硫酸成本率可从原来的 15.97%降至 11.44%;此外,考虑到崩积物泥化现象严重、质地极易磨,即使将来在生产中与其他高品位氧化铜矿配矿,也能适当缩短磨矿时间、提高矿石处理量,从而有望进一步降低磨矿成本。该工艺经济性指标较好,说明其具有良好的经济效益。

表 10 MSESA 矿体坑内崩积物推荐工艺流程的初步经济分析

Table 10 Preliminary economic evaluation of recommended process for colluvium in MSESA orebody pit

项目	消耗量/ ($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1} \text{Cu}$)	单价/ (美元· kg^{-1})	成本/ (美元· $\text{t}^{-1} \text{Cu}$)	成本 率/%
磨矿费用	102.5 ^①	12 ^②	1 230.00	12.950
硫酸	5 430	0.279 4	1 517.142	15.970
絮凝剂	14.35	3.24	46.494	0.490
萃取剂	1.1	14.065	15.472	0.160
溶剂油	5.4	2.55	13.770	0.144
钴尔胶	0.145	5.1	0.740	0.008
电积耗电	2 850 ^③	0.22 ^④	627.00	6.60
合计	—	—	3 450.618	36.322

注:①—单位为 t 矿/tCu;②—单位为美元/t 矿;③—单位为度/tCu;④—单位为美元/度。

5 结论

针对刚果(金)MSESA 矿体坑内崩积物,分析了其工艺矿物学,并考察了用硫酸浸出其中的铜、钴的效果,结论如下:

1) —2 mm 崩积物堆比重 1.25 g/cm³,真比重 2.37 g/cm³;—200 目占比 70%崩积物堆比重 1.07 g/cm³,真比重 2.52 g/cm³。元素化学分析表明,崩积物中全铜、酸溶铜(CuO)、钴质量分数分别为 1.10%、0.954%和 0.154%;Al₂O₃ 和 SiO₂质量分数较大,分别为 11.01%和 58.86%。物相分析表明,崩积物中铜大部分以自由氧化铜形式存在,占比为 76.70%,结合氧化铜和硫化铜占比分别为 17.07%和 5.69%;钴主要赋存在钴华碳酸钴和脉石矿物中,占比分别为 42.41%和 45.57%;主要脉石矿物以滑石、黑云母、石英、绿泥石、白云石为主。

2)酸浸试验结果表明,采用湿法工艺处理高铝含量崩积物是可行的。取100 g崩积物,在磨矿细度—200目占比70%、浸出温度25℃、浸出时间2 h、液固体积质量比2.5:1、硫酸加入量7%、洗水液固体积质量比1:1、搅拌速率300 r/min、不加还原剂条件下,全铜浸出率为88.72%,酸溶铜(CuO)浸出率为95.54%,钴浸出率为71.75%,铁浸出率为6.72%,锰浸出率为78.84%,酸耗为5.43 t/tCu。浸出重复试验结果稳定性和重现性较好。

3)初步经济性评价分析结果表明,针对该崩积物,采用浸出—萃取—电积工艺生产阴极铜,直接生产成本为3 450.618美元/tCu,占阴极铜售价的36.322%,经济性评价指标较好。

参考文献:

- [1] 李庆哲,刘大文,王京彬,等.中非铜钴成矿带地质特征及铜钴矿床资源量分析[J].地质与勘探,2023,59(2):451-464.
LI Qingzhe, LIU Dawen, WANG Jingbin, et al. Geological characteristics and copper-cobalt resources of the Central Africa copper-cobalt metallogenic belt [J]. Geology and Exploration, 2023, 59(2): 451-464.
- [2] USGS. Mineral commodity summaries 2024 [M]. Reston: U. S. Geological Survey, 2024.
- [3] 易杏花,王笑笑,成金华,等.清洁能源关键矿产加工产品供需预测及保供措施研究:以锂、钴、镍为例[J].资源与产业, 2025, 27(1): 63-76.
YI Xinghua, WANG Xiaoxiao, CHENG Jinhua, et al. Supply-demand forecast and supply-securing measures of clean energy mineral processing products based on a case study on lithium, cobalt and nickel [J]. Resources & Industries, 2025, 27(1): 63-76.
- [4] 张海宝,骆贞江,孟祥龙,等.刚果(金)铜钴矿湿法冶金工程实例分析[J].有色冶金设计与研究,2023,44(3):9-14.
ZHANG Haibao, LUO Zhenjiang, MENG Xianglong, et al. Analysis of hydrometallurgical engineering cases of copper-cobalt ore in Democratic Republic of Congo [J]. Nonferrous Metals Engineering & Research, 2023, 44(3): 9-14.
- [5] 李新富,车建明,鲁明星.刚果(金)SICOMINES铜钴矿床矿体特征及富集规律研究[J].现代矿业,2025,41(9):193-197.
LI Xinfu, CHE Jianming, LU Mingxing. Study on orebody characteristics and enrichment regularity of SICOMINES Copper-Cobalt Deposit in Congo (Kinshasa) [J]. Modern Mining, 2025, 41(9): 193-197.
- [6] 李圣.刚果(金)铜钴矿废石工艺矿物学研究[J].中国资源综合利用,2023,41(2):59-65.
LI Sheng. Study on process mineralogy of copper-cobalt ore waste rock in Congo (Kinshasa) [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2023, 41(2): 59-65.
- [7] 姚建云,孙磊,陈兴海,等.刚果(金)某铜钴废石回收工艺实验研究[J].矿产综合利用,2025,46(6):85-91.
YAO Jianyun, SUN Lei, CHEN Xinghai, et al. Research on recovery technology and test of waste rock of copper and cobalt in Congo (DRC) [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(6): 85-91.
- [8] 雷志兰,王建雄.刚果(金)某地铜钴矿工艺矿物学研究[J].湖南有色金属,2024,40(6):9-12.
LEI Zhilan, WANG Jianxiong. Study on mineralogy of copper and cobalt ore in Congo [J]. Hunan Nonferrous Metals, 2024, 40(6): 9-12.
- [9] 孟祥龙,张海宝,陈燕杰,等.刚果(金)铜钴矿处理方法综述[J].有色冶金设计与研究,2022,43(1):1-4.
MENG Xianglong, ZHANG Haibao, CHEN Yanjie, et al. Review on the treatment methods of Copper-Cobalt Ore in Congo (DRC) [J]. Nonferrous Metals Engineering & Research, 2022, 43(1): 1-4.
- [10] 李晓东,王巧玲.刚果金某复杂铜钴矿选矿试验研究[J].湖南有色金属,2025,41(4):8-12.
LI Xiaodong, WANG Qiaoling. Experimental research on beneficiation of a complex copper-cobalt ore from the DRC [J]. Hunan Nonferrous Metals, 2025, 41(4): 8-12.
- [11] 姚建云,杨含蓄,高春庆.刚果(金)高氧化率铜钴矿浮-磁联合工艺试验研究[J].矿业研究与开发,2025,45(3):229-236.
YAO Jianyun, YANG Hanxu, GAO Chunqing. Experimental study on the floating-magnetic combined process of copper and cobalt ore with high oxidation rate in the Democratic Republic of Congo [J]. Mining Research and Development, 2025, 45(3): 229-236.
- [12] 郑伟,兰川,王桂楼,等.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.
ZHENG Wei, LAN Chuan, WANG Guilou, et al. Experimental study on acid leaching of a copper-cobalt ore in Congo (Kinshasa) [J]. Hunan Nonferrous Metals, 2024, 40(1): 34-37.
- [13] 杨玮,王倩,王刚.刚果(金)某氧化铜钴矿浸出试验研究[J].矿冶工程,2019,39(6):75-77.
YANG Wei, WANG Qian, WANG Gang. Leaching test of a copper-cobalt oxide ore in Congo (DRC) [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019, 39(6): 75-77.
- [14] 于文圣.从刚果(金)某铜钴氧化矿石中直接还原浸出铜钴[J].湿法冶金,2019,38(2):88-91.
YU Wensheng. Direct reduction leaching of copper and cobalt in oxide ore from Congo (Kinshasa) [J]. Hydrometallurgy of China, 2019, 38(2): 88-91.
- [15] 陈雄,李亚新,江源,等.刚果(金)某低品位氧化铜钴矿强化还原浸出试验研究[J].有色金属工程,2023,13(6):66-72.

CHEN Xiong, LI Yaxin, JIANG Yuan, et al. Experimental study on enhanced reduction leaching of a low grade copper

cobalt oxide from D. R. Congo [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(6): 66-72.

Optimization and Economic Evaluation of Acid Leaching Process for Colluvium in MSESA Orebody, Congo (DRC)

ZHANG Changda¹, LI Hui¹, ZHANG Jun², ZHENG Bin¹, XU Wei¹, HAN Bin², LI Liucan¹

(1. *China Nonferrous Metal Innovation Research Institute (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300112, China;*
2. *Kambove Mining SAS Co., Ltd., Katanga Likasi, Congo (DRC)*)

Abstract: In order to expand the development boundary of overseas low-grade copper-cobalt oxide ore, the leaching of copper and cobalt with sulfuric acid was studied for the Colluvium of MSESA orebody in Congo (DRC). The effects of various key factors on the leaching were investigated, and the economy of the process was evaluated and analyzed. The results show that the contents of copper and cobalt in the colluvium are 1.1% and 0.15%, respectively. The oxidation rate of the ore is high and the argillization is serious. The main gangue phases are talc, biotite, quartz, chlorite and dolomite. Copper mainly exists in the form of oxide, and cobalt exists in the form of cobaltite, cobalt carbonate and cobalt in gangue. Under the conditions of grinding fineness of 70% (−200 mesh), sulfuric acid addition of 7%, leaching temperature of 25 °C, leaching time of 2 h, liquid volume to solid mass ratio of 2.5 : 1, and stirring rate of 300 r/min, the leaching rates of copper and cobalt are 88.72% and 71.75%, respectively, and the acid consumption is 5.43 t/tCu. Cathode copper is produced by leaching—extraction—electrowinning process. The production cost is \$ 3 450.618/tCu, accounting for only 36.322% of the sales price of cathode copper, which has good economic benefits.

Key words: colluvium; Congo (DRC); MSESA orebody; copper; cobalt; sulfuric acid; leaching; economic evaluation