

刚果(金)MSESA 矿体崩积物及其浸出矿浆 沉降特性研究

刘思源¹, 李 辉¹, 章 俊^{2,3}, 郑 彬¹, 许 卫¹, 韩 斌²,
李 鑫¹, 张长达¹, 徐龙隆¹

(1. 中国有色创新研究院(天津)有限公司, 天津 300380;

2. 刚波夫矿业股份有限公司, 加丹加 利卡希;

3. 东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要:针对刚果(金)MSESA 矿体崩积物具有沉降性能差、固液分离效率低等技术难题,系统分析了该崩积物的工艺矿物学和沉降特性,探讨了崩积物及其与 MSESA 原矿混合体系的矿物学特征与沉降特性。结果表明:崩积物为低品位氧化铜钴物料,铜主要以自由氧化铜形式存在,钴主要赋存于脉石中。沉降试验确定了不同体系的最优参数:崩积物原矿和混合矿的最佳絮凝剂用量均为 20 g/t,沉降终点时间分别为 40 和 25 min;崩积物浸出矿浆和混合矿浸出矿浆的最佳絮凝剂用量均为 120 g/t,沉降终点时间分别为 20 和 40 min。研究结果可为 MSESA 矿体崩积物资源化利用及工艺设计提供依据。

关键词:崩积物;铜;钴;絮凝沉降;固液分离;细泥矿浆;铜钴氧化矿

中图分类号:TF811;TF816;TD926.4

文献标识码:A

文章编号:1009-2617(2026)04-0547-09

DOI:10.13355/j.cnki.sfyj.2026.04.011

刚果(金)作为全球最重要的铜钴资源产地,其矿床具有储量大、品位高、易开采等特点^[1-4]。铜、钴作为新能源、电子及军工领域的关键战略金属,随着全球能源转型的加速,其需求量持续攀升^[5-7]。与此同时,随着矿山开采的深入,地表及周边的崩积物资源逐渐引起关注。刚果(金)MSESA 矿体崩积物属于低品位氧化铜钴资源,主要通过酸浸法回收其中的铜、钴,但在生产实践中,浸出矿浆的固液分离是制约产能的关键因素之一。处理高硅细泥类复杂矿石时,常出现沉降速度慢、絮凝剂加入量不准确等问题,进而影响后续工序^[8-10]。

在湿法冶金生产中,添加合适的絮凝剂是加快浸出矿浆固液分离的关键措施^[11]。聚丙烯酰胺(PAM)能通过选择性吸附与桥接作用促使细颗粒物聚集成絮团,显著提高沉降效率,因其具有优异的化学活性和广泛的适应性,已成为处理高泥质复杂矿浆固液分离的首选药剂^[12-13]。目前,

针对典型铜钴氧化矿的沉降行为已有一些研究,但多集中在浸出矿浆的絮凝沉降优化方面^[14-17],对于崩积物这一特殊物料的沉降特性,尤其是其与原矿混合后的协同或干扰效应,尚缺乏系统试验数据支撑。因此,针对刚果(金)MSESA 矿体崩积物,系统对比了崩积物单独体系及其与原生矿混合体系在磨矿、浸出及絮凝沉降过程中的行为差异,明确了不同体系下絮凝剂合理用量及沉降参数,以期为高泥氧化铜钴矿湿法冶金流程中浓密与固液分离工序设计提供工程依据。

1 试验原料与工艺矿物学特征

1.1 原料来源及基本性质

试验用原料为刚果(金)MSESA 矿体崩积物,呈泥样状,干燥后形成土黄色硬质团块,其中混杂 5%~10% 的块状原生矿石,经颚式破碎机和双辊破碎机破碎后,采用双层振筛机筛分,确保

收稿日期:2026-03-25;修订日期:2026-05-19

基金项目:中国有色集团科技项目(2025KMSKJ01)。

第一作者简介:刘思源(2000—),男,硕士,助理工程师,主要研究方向为选矿冶金。

通信作者简介:章俊(1987—),男,工程硕士,高级工程师,主要研究方向为铜冶金技术。E-mail:zj6601906@163.com。

100%通过 2 mm 标准筛。将筛下样品混匀并缩分,取 100 g 样品,经振动磨样机研磨后进行化学多元分析和物相分析;其余样品密封保存备用。

破碎后的样品采用自然堆积法测定堆比重,采用量筒法测定真比重。结果显示:粒度 ≤ 2 mm 崩积物堆比重为 1.25 g/cm³,真比重为 2.37 g/cm³;粒度 ≤ 200 目的细磨样品堆比重为 1.07 g/cm³,真比重为 2.52 g/cm³。崩积物样品的多元化学分析结果见表 1。

表 1 崩积物样品多元化学分析结果
Table 1 Multi-element chemical analysis results of collapse deposit samples

%					
Cu	Ca	Co	Fe	Mn	S
1.10	1.35	0.15	3.97	0.19	0.095
Mg	Al ₂ O ₃	Pb	Zn	As	SiO ₂
3.05	11.01	0.005 6	0.029	0.009 8	58.86

由表 1 可知;崩积物中 Cu 和 Co 的品位分别为 1.10%和 0.15%,说明该崩积物具有一定回收价值,但品位较低,属低品位混合物料;SiO₂ 质量分数高达 58.86%,符合以石英为主的脉石矿物特征;Ca 和 Mg 质量分数不高,但 Al₂O₃ 质量分数为 11.01%,可能增加浸出酸耗;S 质量分数仅为 0.095%,说明硫化物含量极低。

1.2 化学组成与物相特征

崩积物中铜的化学物相分析结果见表 2。可知:样品中的铜主要以氧化态形式赋存;自由氧化铜占比高达 76.70%,是铜的主要存在形式,通常具有良好的可溶性与浸出性能;结合氧化铜占比 17.07%,属于难溶性氧化物;次生硫化铜和原生硫化铜占比较低,分别为 3.52%和 2.17%;总硫化铜占比极低,合计为 5.69%。分析结果表明,该样品具有典型的高氧化率铜矿特征。

表 2 崩积物样品中铜化学物相分析结果
Table 2 Chemical phase analysis results of copper in collapse deposit samples

物相	w(Cu)/%	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
合计	1.107	100.00

崩积物中钴的化学物相分析结果见表 3。可知:脉石在所有钴的化学物相中占比高达 45.57%,在常规酸浸条件下难以有效浸出;钴华和碳酸钴占比为 42.41%,属于易浸出的氧化钴矿物,是主要的回收目标;此外还有少量其他含钴化合物。总体来看,钴的赋存形态较为复杂,且部分与脉石紧密共生,导致其回收难度高于铜。

表 3 崩积物样品中钴化学物相分析结果
Table 3 Chemical phase analysis results of cobalt in collapse deposit samples

物相	w(Co)/%	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
其他含钴化合物	0.018	11.39
合计	0.158	100.00

1.3 工艺矿物学特征

采用矿物自动定量分析系统(FEI,MLA650)对崩积物进行表征,结果如图 1 所示。

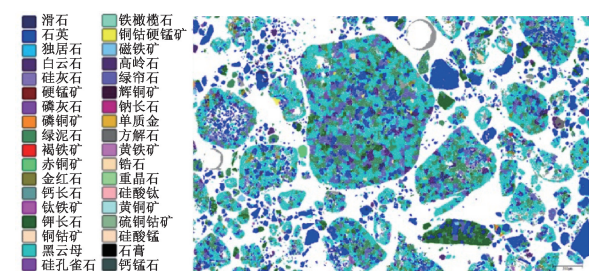


图 1 MSEA 矿体崩积物的 MLA 背散射颗粒图
Fig. 1 MLA backscattered electron image of collapse deposits from MSEA orebody

由图 1 看出:崩积物样品具有矿物组成复杂和粒度分布宽泛的特征,主要矿物为硅酸盐脉石矿物;铜钴矿物呈微细粒嵌布于脉石中,单体解离度低。

崩积物的主要矿物组成见表 4。可知:Cu 和 Co 的矿物组成复杂且含量相对较低;主要的含铜矿物包括硅孔雀石、铜钴矿、铜钴硬锰矿、磷铜矿和赤铜矿,占比分别为 0.75%、0.25%、0.19%、0.13%和 0.12%,这些矿物大部分属于氧化铜矿物,印证了化学物相分析中铜具有高氧化率的结论;脉石矿物含量较高,主要由黑云母、石英和绿泥石构成,总占比超过 80%,其中黑云母和绿泥

石占比为 53.54%,表明样品中存在大量层状硅酸盐矿物,这些矿物通常比表面积较大,易形成黏性矿浆,会对后续的沉降、浓缩和固液分离工序产生明显影响;高岭石是主要的黏土矿物,占比为 2.3%,其存在会进一步增加矿浆的黏度和稳定性。

表 4 崩积物中主要矿物组成

Table 4 Major mineral composition in collapse deposits

矿物名称	占比/%	矿物名称	占比/%
黑云母	34.97	滑石	0.58
石英	26.59	磁铁矿	0.49
绿泥石	18.57	铜钴矿	0.25
绿帘石	7.43	铜钴硬锰矿	0.19
钾长石	4.08	磷铜矿	0.13
高岭石	2.30	硅灰石	0.12
普通辉石	1.13	赤铜矿	0.12
白云石	0.97	褐铁矿	0.11
钙长石	0.84	方解石	0.07
硅孔雀石	0.75	其他	0.31

崩积物中氧化铜矿物为主要回收目标,从中检测到了微量黄铜矿等硫化矿物,但因其占比极低,对整体浸出沉降行为影响有限。因此,采用 MLA、偏光显微镜和 SEM-EDS 技术进一步分析了含铜钴矿物的嵌布特征。结果表明:1)硅孔雀石主要与黑云母和石英连生,部分可直接参与酸浸反应;2)铜钴矿表面暴露率高,易解离,主要与黑云母、白云石及钾长石连生,并与赤铜矿、褐铁矿等含铁锰矿物存在弱连生关系,是回收钴的最佳矿物;3)铜钴硬锰矿主要与黑云母、石英、绿泥石和褐铁矿等脉石矿物连生,同时与赤铜矿等金属矿物存在少量连生关系;4)磷铜矿单体解离度最低,与石英高度连生,解离难度大,常规工艺难以有效回收;5)赤铜矿主要与黑云母、褐铁矿、石英和金红石等矿物连生,与孔雀石等次生氧化铜矿物接触较少,但表面暴露充分,最利于酸浸回收。

综合分析表明,该崩积物具有矿物组成复杂、细粒嵌布明显及层状硅酸盐和黏土矿物含量较高等特征,对后续浸出及沉降分离过程可能产生不利影响。

2 试验方法

2.1 磨矿试验

崩积物经过自然晒干,细碎至-2.00 mm 占 100%。采用堆锥四分法对筛下物料进行缩分混匀,

每次球磨称取崩积物 500 g,加水 500 mL,使用 200 目和 325 目标准筛对不同时间球磨的崩积物进行筛分,得到磨矿时间与磨矿细度,绘制磨矿曲线。

2.2 矿浆沉降试验

原矿沉降试验和浸出矿浆沉降试验均在预先标注高度的 500 mL 量筒中进行,絮凝剂选用阴离子型聚丙烯酰胺(山东诺尔,分子量约 2 500 万),其溶液配制浓度为 0.2%。

原矿沉降试验:在烧杯中配制原矿矿浆,加入按预设量计算的絮凝剂溶液,后继续搅拌 3 min,之后迅速将矿浆转移至量筒,静置在水平台上,记录固液界面高度随时间的变化。

浸出矿浆沉降试验:加入按预设量计算的絮凝剂溶液,继续搅拌 3 min 后转移至量筒,静置放在水平台上,记录固液界面高度随时间的变化。

本试验将固液界面高度在 5 min 内变化小于 2 mm 时视为沉降终点。

2.3 崩积物与 MSESA 矿石混合矿浆沉降试验设计

崩积物与 MSESA 矿石按质量比 3:5 混合,采用阴离子型聚丙烯酰胺絮凝剂(山东诺尔,分子量约 2 500 万)进行原矿沉降试验和浸出矿浆沉降试验。试验采用静态沉降方法,测定矿浆在不同沉降时间内沉降界面高度、矿浆浓度等参数,并绘制相应曲线,为浓缩设备的选择及动态沉降试验提供基础数据。

3 试验结果与讨论

3.1 崩积物的磨矿特性分析

每次取 500 g 过 2 mm 筛的崩积物,用球磨机磨矿。磨矿时间与粒级分布关系(磨矿曲线)如图 2 所示。

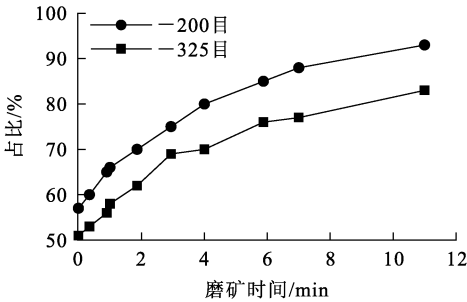


图 2 崩积物磨矿时间与粒级分布关系

Fig. 2 Relationship between grinding time and particle size distribution of collapse deposits

磨矿试验结果表明,该崩积物泥化严重,磨矿性能较好。由图 2 可知:通过 2 mm 标准筛的崩积物不经磨矿,粒级为-200 目的颗粒占比已达 57.07%, -325 目占比达 50.61%,说明崩积物本身具有较高的细粒比例;随磨矿时间延长, -200 目占比持续增加,在 5.88 min 时达 85%,增幅达 27.93%,反映出该物料对研磨作用响应敏感,易解离;随磨矿时间延长至 5.88 min,粒级为-325 目的颗粒占比增加速度略低于-200 目,从 50.61% 增至 75.64%,增幅为 25.03%,这表明随磨矿时间延长,细粒级(-325 目)含量持续增加,但与此同时, -200~+325 目中间粒级亦在不断累积与转化,粒度分布呈整体细化趋势。根据磨矿曲线,得出-200 目占比为 60%、65%、70%、75%、80%、85%时,所需磨矿时间分别为 0.35、0.9、1.86、2.94、4.0、5.88 min。

3.2 崩积物矿浆沉降及过滤洗涤试验

开展原矿沉降试验和浸出矿浆沉降试验;测定矿浆在不同沉降时间内沉降界面高度、矿浆浓度等参数,并绘制相应的曲线,为浓缩设备的选择及动态沉降试验提供基础数据。

3.2.1 原矿沉降试验

为评估崩积物磨矿产品的絮凝沉降效果,开展絮凝剂用量沉降试验。试验初始矿浆浓度为 33.3%,确定沉降终点矿浆浓度约为 50%,矿浆总质量为 600 g,絮凝剂配制浓度为 0.2%。试验设定不加絮凝剂及絮凝剂加入量分别为 10、20、30、40、50、60 g/t 7 个条件,分别测算在不同絮凝剂用量下崩积物球磨产品矿浆达到沉降终点所需时间。原矿矿浆沉降曲线如图 3 所示,原矿在不同沉降时间下的矿浆浓度曲线如图 4 所示。

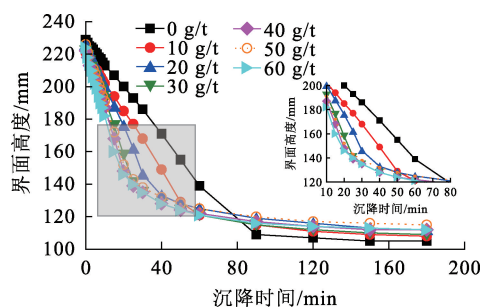


图 3 原矿矿浆沉降曲线

Fig. 3 Settling curves of raw collapse deposits slurry

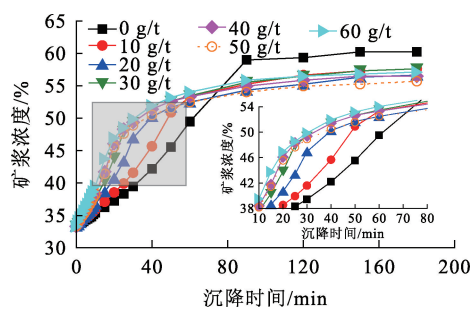


图 4 原矿在不同沉降时间下的矿浆浓度曲线

Fig. 4 Slurry concentration curves of raw collapse deposits at different settling times

根据图 3、4 数据计算,得到崩积物原矿沉降试验结果,见表 5。沉降界面高度通过量筒刻度读取,沉降距离为初始界面与沉降终点界面之间的高度差。

表 5 崩积物原矿沉降试验结果

Table 5 Settling tests results on raw collapse deposits

絮凝剂 加入量/ (g · t ⁻¹)	前 3 min 沉降速度/ (mm · min ⁻¹)	沉降终点 所需时间/ min	沉降终点平均 沉降速度/ (mm · min ⁻¹)	沉降终点 矿浆浓度/ %
0	1.67	~60	1.50	~50
10	2.00	~50	1.84	~50
20	2.67	~40	2.32	~50
30	3.33	~40	2.35	~50
40	4.00	~40	2.35	~50
50	4.00	~40	2.35	~50
60	4.67	~30	2.97	~50

由表 5 可知:随絮凝剂加入量增加,矿浆初始沉降速度显著提升,当絮凝剂用量从 0 增至 20 g/t 时,前 3 min 沉降速度增至 2.67 mm/min;絮凝剂用量超过 30 g/t 时,沉降前 3 min 沉降速度虽进一步增大,但沉降终点平均速度稳定在 2.35 mm/min,且沉降终点所需时间稳定在 40 min 左右。这是因为崩积物中层状硅酸盐矿物及黏土矿物含量较高,细泥占比较大,矿物颗粒表面电荷密度高,添加适量絮凝剂可有效形成桥联结构;而当絮凝剂用量超过 20 g/t 后,颗粒表面趋于饱和,进一步添加对沉降终点影响有限。综合考虑,崩积物原矿脱水浓密絮凝剂最佳用量为 20 g/t,此时,沉降前 3 min 的矿浆沉降速度为 2.67 mm/min,沉降终点所需时间约为 40 min,沉降终点平均沉降速

度为 2.32 mm/min, 沉降终点矿浆浓度约为 50%。

3.2.2 浸出矿浆沉降试验

为评估浸出过程对沉降性能的影响, 采用 500 mL 量筒对浸出矿浆开展絮凝剂用量沉降试验。在浸出矿浆浓度为 27.14%、矿浆总质量为 700 g、絮凝剂浓度为 0.2%、设置沉降终点矿浆浓度约 45% 条件下, 考察不加絮凝剂和絮凝剂加入量分别为 20、40、60、80、100、120、140 g/t 条件下的浸出矿浆沉降效果。根据试验结果绘制浸出矿浆沉降曲线和浸出矿浆在不同沉降时间下的矿浆浓度曲线, 分别如图 5、6 所示。根据图 5、6, 计算得出崩积物浸出矿浆沉降试验结果, 见表 6。

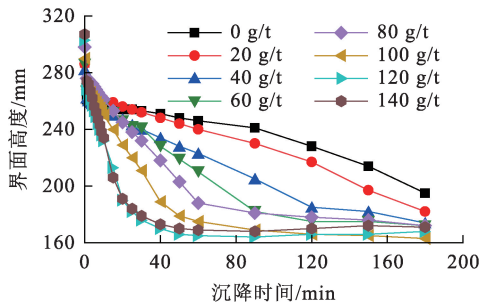


图 5 浸出矿浆沉降曲线

Fig. 5 Settling curves of leaching slurry

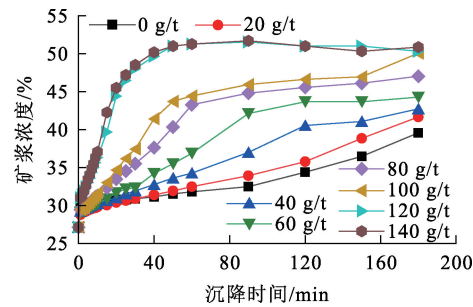


图 6 浸出矿浆在不同沉降时间下的矿浆浓度曲线

Fig. 6 Slurry concentration curves of leaching slurry at different settling times

试验结果表明, 浸出过程中矿浆体系中 Fe^{3+} 等离子浓度升高, 改变了颗粒表面电性和矿浆体系稳定性, 导致絮凝剂需求量显著高于原矿体系。由表 6 看出: 当絮凝剂用量由 0 增至 80 g/t 时, 沉降前 3 min 的沉降速度增幅有限, 基本保持在 7.33~8.33 mm/min 范围内; 继续增加絮凝剂用量至 120 g/t 时, 沉降速度逐渐加快, 沉降终

点所需时间逐渐缩短; 但当絮凝剂用量增至 140 g/t 时, 沉降速度略有下降, 且平均沉降速度增速变小, 显示出絮凝剂过量效应。由于该浸出矿浆的沉降主要发生在沉降初期, 综合考虑絮凝剂消耗和矿浆浓度, 确定浸出矿浆浓密脱水絮凝剂最佳用量为 120 g/t, 此时, 沉降前 3 min 的沉降速度为 14.00 mm/min, 沉降终点所需时间约为 20 min, 沉降终点平均沉降速度为 5.65 mm/min, 沉降终点矿浆浓度约为 45%。

表 6 崩积物浸出矿浆沉降试验结果

Table 6 Results of settling tests on leaching slurry of collapse deposits

絮凝剂 加入量/ (g · t ⁻¹)	前 3 min 沉降速度/ (mm · min ⁻¹)	沉降终点 所需时间/ min	沉降终点平均 沉降速度/ (mm · min ⁻¹)	沉降终点 矿浆浓度/ %
0	7.33	—	—	—
20	7.67	—	—	—
40	7.67	—	—	—
60	8.00	~180	0.62	~45
80	8.33	~90	1.3	~45
100	9.00	~50	2.22	~45
120	14.00	~20	5.65	~45
140	13.67	~20	5.8	~45

3.3 崩积物与 MSEA 矿石混合沉降行为

为探究崩积物与 MSEA 矿石混合体系的沉降特性, 试验采用静态沉降方法测定矿浆在不同沉降时间内沉降界面高度、矿浆浓度等参数, 并绘制沉降曲线, 为浓缩设备的选择及动态沉降试验提供基础数据。

3.3.1 MSEA 矿石磨矿曲线

将 MSEA 矿石自然晒干, 破碎至 -2.00 mm 占 100%, 通过堆锥四分法混合均匀。每次球磨称取矿石 500 g, 加水 500 mL, 之后使用 200 目筛分别对球磨 2.0、7.0、14.0 min 的矿石进行筛分, 测定 -200 目粒级占比, 建立磨矿时间与磨矿细度的定量关系, 绘制磨矿曲线, 如图 7 所示。可以看出: 随磨矿时间延长, 粒级为 -200 目的颗粒占比呈显著上升趋势; 当磨矿时间为 8 min 时, -200 目颗粒占比约为 70%。考虑到磨矿效率与能耗平衡, 确定采用磨矿时间 8 min 的矿石作为沉降试验原料, 此时磨矿后矿石真比重为 2.73 g/cm³。

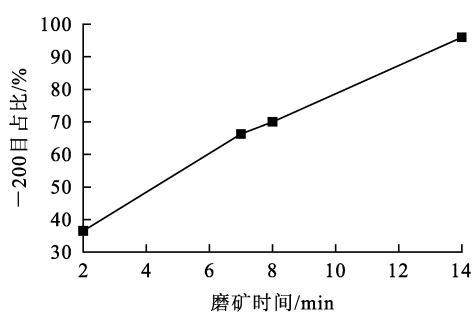


图7 MSEA 矿石磨矿时间-细度曲线

Fig. 7 Grinding time versus fineness curve of MSEA ore

3.3.2 崩积物+MSEA 矿石混合物沉降试验

对崩积物与 MSEA 矿石混合物原矿开展絮凝剂用量沉降试验,崩积物与 MSEA 矿石按质量比 3:5 混合。试验初始矿浆浓度为 33.3%,确定沉降终点矿浆浓度约为 54%,矿浆总质量为 600 g,絮凝剂配制浓度为 0.2%。考察不加絮凝剂及絮凝剂加入量分别为 10、20、30、40、50、60 g/t 条件下的混合矿浆沉降效果,测算达到沉降终点所需时间。根据试验结果绘制混合原矿沉降曲线和混合原矿在不同沉降时间下的矿浆浓度曲线,分别如图 8、9 所示。

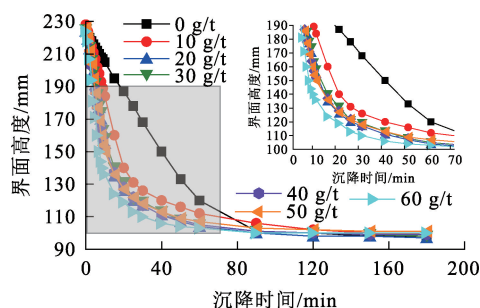


图8 混合原矿沉降曲线

Fig. 8 Settling curves of raw mixed ore

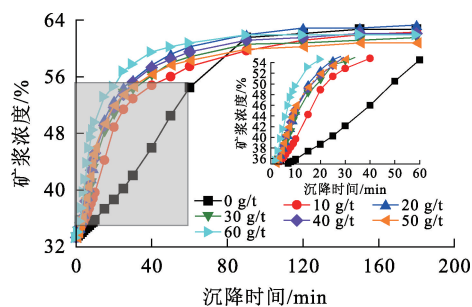


图9 混合原矿在不同沉降时间下的矿浆浓度曲线

Fig. 9 Slurry concentration curves of raw mixed ore at different settling times

根据图 8、9 数据,计算得到混合矿原矿沉降试验结果,见表 7。

表7 混合矿原矿沉降试验结果

Table 7 Results of settling tests on raw mixed ore

絮凝剂加入量/(g·t ⁻¹)	前 3 min 沉降速度/(mm·min ⁻¹)	沉降终点所需时间/min	沉降终点平均沉降速度/(mm·min ⁻¹)	沉降终点矿浆浓度/%
0	2.00	~60	1.73	~54
10	4.33	~40	2.7	~54
20	6.33	~25	4.16	~54
30	6.33	~25	4.16	~54
40	6.67	~25	4.04	~54
50	7.33	~25	4.16	~54
60	10.00	~20	5.35	~54

由表 7 可知:随絮凝剂用量增加,沉降前 3 min 矿浆沉降速度逐渐加快,沉降终点所需时间先明显减少后趋于稳定;絮凝剂用量增至 30 g/t 以上时,沉降速度虽仍加快,但增幅趋缓。综合考虑沉降效率、药剂消耗及操作稳定性,对于粒级-200目占比 70% 的混合矿原矿,确定脱水浓密絮凝剂最佳用量为 20 g/t,此时,沉降前 3 min 沉降速度为 6.33 mm/min,沉降终点所需时间约为 25 min,沉降终点平均沉降速度为 4.16 mm/min,沉降终点矿浆浓度约为 54%。

3.3.3 崩积物+MSEA 矿石浸出矿浆沉降试验

采用 500 mL 量筒对浸出矿浆开展絮凝剂用量沉降试验,崩积物与 MSEA 矿石质量比为 3:5。在适宜浸出条件下制备浸出矿浆,渣率按 95% 计,浸出矿浆浓度为 27.14%,矿浆总质量为 700 g,絮凝剂浓度为 0.2%,设置沉降终点矿浆浓度约 45%。考察在不加絮凝剂及絮凝剂加入量分别为 20、40、60、80、100、120、140 g/t 条件下的浸出矿浆沉降效果。根据试验结果绘制混合矿浸出矿浆沉降曲线和混合矿浸出矿浆在不同沉降时间下的矿浆浓度曲线,如图 10、11 所示。

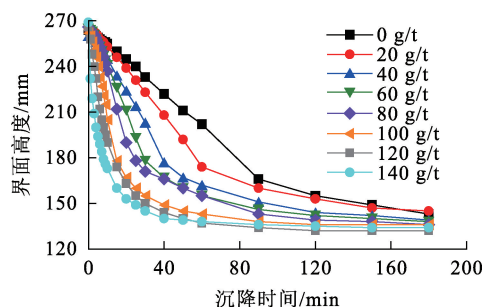


图10 混合矿浸出矿浆沉降曲线

Fig. 10 Settling curves of leaching slurry of mixed ore

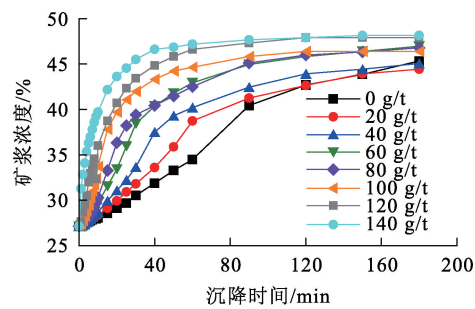


图 11 混合矿浸出矿浆在不同沉降时间下的矿浆浓度曲线
Fig. 11 Slurry concentration curves of leaching slurry of mixed ore at different settling times

根据图 10、11,计算并得到混合矿浸出矿浆沉降试验结果,见表 8。

表 8 混合矿浸出矿浆沉降试验结果
Table 8 Results of settling tests on leaching slurry of mixed ore

絮凝剂加入量/(g·t ⁻¹)	前 3 min 沉降速度/(mm·min ⁻¹)	沉降终点所需时间/min	沉降终点平均沉降速度/(mm·min ⁻¹)	沉降终点矿浆浓度/%
0	1.00	~180	~0.67	~45
20	1.33	~180	~0.67	~45
40	1.33	~180	~0.68	~45
60	1.67	~90	~1.32	~45
80	1.67	~90	~1.37	~45
100	3.67	~60	~1.98	~45
120	8.67	~40	~3.05	~45
140	20.00	~30	~4.13	~45

由表 8 可知:混合矿浸出矿浆在未加絮凝剂时沉降速度较慢,说明颗粒分散性较强;当絮凝剂用量从 20 g/t 增至 80 g/t 时,沉降前 3 min 沉降速度增幅有限,保持在 1.33~1.67 mm/min 范围内,但沉降终点时间缩短至约 90 min;继续增加絮凝剂用量至 100 g/t 以上,沉降性能显著提升。综合考虑絮凝剂消耗和矿浆浓度,确定浸出矿浆浓密脱水絮凝剂最佳用量 120 g/t,此时,沉降前 3 min 的沉降速度为 8.67 mm/min,沉降终点所需时间约为 40 min,沉降终点平均沉降速度约为 3.05 mm/min,沉降终点矿浆浓度约为 45%。

4 结论

通过系统的工艺矿物学分析和沉降特性试验,研究并探讨了刚果(金)MSESA 矿体崩积物

及与 MSESA 矿石混合体系的矿物学特征与沉降特性,主要结论如下:

1)MSESA 矿体崩积物为低品位氧化铜钴物料,铜钴矿物呈微细粒嵌布且单体解离度低。崩积物中 Cu 和 Co 品位分别为 1.10%和0.154%,铜主要以自由氧化铜存在,占比为 76.70%;钴主要以脉石矿物和钴华碳酸钴存在,占比分别为 45.57%和 42.41%。脉石矿物总量高,主要由黑云母、石英和绿泥石构成。

2)崩积物泥化严重,磨矿性能较好。未经磨矿时,粒级为-200 目颗粒占比已达 57.07%,将其占比提升至 70%的磨矿时间仅为 1.86 min;相比之下,将 MSESA 矿石磨至相同细度则需 8 min。

3)崩积物原矿沉降试验结果显示,絮凝剂最佳用量为 20 g/t,可在 40 min 内达到 50%的沉降终点浓度,前 3 min 沉降速度为 2.67 mm/min,终点平均沉降速度为 2.32 mm/min;崩积物浸出矿浆沉降试验结果表明,絮凝剂最佳用量为 120 g/t,此时可显著提升前 3 min 沉降速度至 14.00 mm/min、缩短沉降终点时间至 20 min,沉降终点矿浆浓度约为 45%,综合效果最优。

4)崩积物+MSESA 原矿的混合矿沉降试验结果表明,絮凝剂最佳用量为 20 g/t,此时可使矿浆前 3 min 沉降速度加快至 6.33 mm/min、沉降终点时间约 25 min、终点浓度约 54%;混合矿浸出矿浆絮凝剂最佳用量为 120 g/t,此时可显著提升前 3 min 沉降速度至 8.67 mm/min、缩短沉降终点时间至 40 min 左右,沉降终点矿浆浓度约为 45%,综合效果最优;上述参数可为崩积物处理规模放大及浓密设备选型提供依据。

参考文献:

[1] 余浔,刘瑜.刚果(金)地区超大型铜钴矿资源选冶工艺研究与实践[J].现代矿业,2024,40(2):162-166.
Yu Xun,Liu Yu. Research and practice of beneficiation-metallurgy combination process for super large copper-cobalt ore resources in Congo (DRC) area[J]. Modern Mining, 2024,40(2):162-166.
[2] 谢添,徐敬元,姚刚,等.刚果(金)铜-钴矿业发展现状[J].中国有色金属学报,2021,31(11):3422-3435.
Xie Tian,Xu Jingyuan,Yao Gang, et al. Review of development status of copper-cobalt mining in Congo (DRC)[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2021,31(11):3422-3435.
[3] 刘杰,周宽达,李勇,等.刚果(金)某高钴氧化铜矿分步酸浸试验[J].现代矿业,2025,41(11):65-69.

- Li Jie, Zhou Kuanda, Li Yong, et al. Step-by-step acid leaching test of a high-cobalt copper oxide ore in Congo (DRC) [J]. Modern Mining, 2025, 41(11): 65-69.
- [4] 李新富, 车建明, 鲁明星, 等. 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, et al. Study on ore-body characteristics and enrichment regularity of SICOMINES copper-cobalt deposit in Congo (Kinshasa) [J]. Modern Mining, 2025, 41(9): 193-197.
- [5] 曾培, 李宋江. 刚果(金)SICOMINES 氧化铜钴矿协同浸出试验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2025(12): 46-54.
- Zeng Pei, Li Songjiang. Cooperative leaching test of copper-cobalt oxide ore in SICOMINES in Congo (DRC) [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2025(12): 46-54.
- [6] 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.
- [7] 苏柯宇, 马玉天, 王鹏, 等. 中国钴资源现状、开采利用及未来发展趋势 [J/OL]. 稀有金属与硬质合金, 2025-11-03. <https://doi.org/10.19990/j.issn.1004-0536.20250915.1019>.
- Su Keyu, Ma Yutian, Wang Juan, et al. Current situation, exploitation and future development trend of China's cobalt resources [J/OL]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2025-11-03. <https://doi.org/10.19990/j.issn.1004-0536.20250915.1019>.
- [8] 谢添, 刘芳斌, 童雄, 等. 刚果(金)高泥氧化铜矿的絮凝沉降试验研究及技改应用[J]. 矿冶, 2020, 29(6): 26-31.
- Xie Tian, Liu Fangbin, Tong Xiong, et al. Experimental study on flocculation and sedimentation of high-mud oxidized copper mine in Congo and application of technical modification [J]. Mining & Metallurgy, 2020, 29(6): 26-31.
- [9] 郭晓亮, 董文龙, 吕超飞. 酸性含铜矿浆絮凝沉降试验研究与实践[J]. 黄金, 2021, 42(6): 83-86.
- Guo Xiaoliang, Dong Wenlong, Lü Chaofei. Research and practice on flocculating sedimentation of acidic copper-containing ore pulp [J]. Gold, 2021, 42(6): 83-86.
- [10] 肖超, 吴海国, 李婕. 细粒级氧化铜矿浸出矿浆絮凝沉降试验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2013(4): 20-22.
- Xiao Chao, Wu Haiguo, Li Jie. Test on flocculating sedimentation for fine copperoxide ore leached slurry [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2013(4): 20-22.
- [11] 杜荣珍. 絮凝剂在湿法炼锌中的实践研究[J]. 当代化工研究, 2023(19): 78-80.
- Du Rongzhen. Practical study of flocculant in wet zinc smelting [J]. Modern Chemical Research, 2023(19): 78-80.
- [12] 李夺, 孔令强, 赵立业, 等. 某氧化铜矿浸出矿浆絮凝沉降试验研究[J]. 湖南有色金属, 2025, 41(3): 35-38.
- Li Duo, Kong Lingqiang, Zhao Liye, et al. Study on flocculation and sedimentation of leaching slurry from copper oxide ore [J]. Hunan Nonferrous Metals, 2025, 41(3): 35-38.
- [13] 郑幼松. 聚丙烯酰胺类絮凝剂的现状与进展[J]. 山东化工, 2009, 38(7): 24-27.
- Zheng Yousong. Polyacrylamide flocculants status and progress [J]. Shandong Chemical Industry, 2009, 38(7): 24-27.
- [14] 田全宝, 兰川, 王桂楼, 等. 刚果(金)某氧化铜矿 908 V 絮凝剂实验室及工业试验研究[J]. 湖南有色金属, 2023, 39(6): 17-20.
- Tian Quanbao, Lan Chuan, Wang Guilou, et al. Laboratory and industrial test research on 908 V Flocculant in a copperoxide mine in Congo (Kinshasa) [J]. Hunan Nonferrous Metals, 2023, 39(6): 17-20.
- [15] 付晨晓, 姚现召. 铜钴矿酸浸渣絮凝沉降试验研究[J]. 中国资源综合利用, 2024, 42(4): 4-7.
- Fu Chenxiao, Yao Xianzhao. Experimental study on flocculation and settlement of copper cobaltore acid leaching residue [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2024, 42(4): 4-7.
- [16] 朱坤娥, 秦树辰, 郑朝振, 等. 浸出矿浆固液分离过程中颗粒的沉降行为研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(11): 7-11.
- Zhu Kune, Qin Shuchen, Zheng Chaozhen, et al. Study on particle sedimentation behavior of leaching slurries during solid-liquid separation [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2019(11): 7-11.
- [17] 刘媛媛, 杨洪英, 佟琳琳, 等. 赞比亚低品位难处理铜钴矿湿法冶金新工艺研究[J]. 中国资源综合利用, 2016, 34(4): 21-24.
- Liu Yuanyuan, Yang Hongying, Tong Linlin, et al. Study on Hydrometallurgy process of refractory copper-cobalt ore of Zambia [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2016, 34(4): 21-24.

Settling Characteristics of Colluvial Deposits from the MSEA Orebody in Congo (DRC) and its Leaching Slurries

LIU Siyuan¹, LI Hui¹, ZHANG Jun^{2,3}, ZHENG Bin¹, XU Wei¹, HAN Bin²,
LI Liucan¹, ZHANG Changda¹, XU Longlong¹

(1. *China Nonferrous Metal Innovation Research Institute (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300380, China;*
2. *Kambove Mining SAS Co., Ltd., Katanga Likasi, Congo (DRC);*)
3. *School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China*)

Abstract: Addressing the technical challenges of poor settling performance and low solid-liquid separation efficiency of the collapse deposits in the MSEA orebody of the Democratic Republic of the Congo, the process mineralogy and settling characteristics of these deposits was systematically analyzed. Furthermore, it investigates the mineralogical features and settling behaviors of both the collapse deposits and their mixed systems with the MSEA run-of-mine ore. The results indicate that the collapse deposits are low-grade copper-cobalt oxide materials, with copper mainly existing as free copper oxide and cobalt primarily hosted in gangue minerals. Settling tests determined the optimal parameters for different systems; the optimal flocculant dosage for both raw collapse deposits and the mixed ore is 20 g/t, with final settling times of 40 and 25 min, respectively. For the leaching slurries of the collapse deposits and the mixed ore, the optimal flocculant dosage is 120 g/t, with final settling times of 20 and 40 min, respectively. These findings provide a reliable basis for the resource utilization and process design of collapse deposits in the MSEA orebody.

Key words: collapse deposits; copper; cobalt; flocculation settling; solid-liquid separation; fine slimes slurry; copper-cobalt oxide ore

本刊声明

本刊已加入《中国期刊全文数据库》(中国知网)、《中文科技期刊数据库》(维普网)、《中国核心期刊(遴选)数据库》(万方网)、《超星期刊数据库》(超星移动“域出版”平台)、钛学术智慧平台、中邮阅读网、博看网、荷兰 Scopus 数据库、美国化学文摘(CAS)、美国 EBSCO 数据库(EBSCO Information Services)、日本科学技术振兴数据库(JST)、科技核心评价数据库(CSCIED), 许可在其网站及其系列数据库产品中以数字化方式复制、发行、信息网络传播本刊全文。本刊所付稿酬包括上述各项目。作者向本刊投稿即视为同意我刊上述声明, 如有异议请在投稿时声明。