

卡莫阿项目管理经验

卡莫阿-卡库拉铜矿选矿工艺剖析与
EPCM 创新管理策略探究Analysis of Mineral Processing Technology and Research on EPCM Innovative
Management Strategies for Kamo-a-Kakula Copper Mine

陈名洁, 吕 鸿, 陶志勇(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

摘要:本研究深入聚焦刚果(金)的卡莫阿-卡库拉铜矿,对其选矿工艺展开全方位剖析,涵盖原矿性质、设计流程、设计指标以及碎磨工艺流程等关键要素,并详尽阐述创新EPCM管理策略。通过对该项目的系统分析,充分展现高质量设计与创新管理在项目成功进程中的关键效能,旨在为类似矿业项目提供极具价值的参考范例。

关键词:选矿工艺;碎磨工艺;创新EPCM管理

中图分类号: TD952 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2025)02-0068-04

Abstract: This research deeply focuses on the Kamo-a-Kakula copper mine in the Democratic Republic of the Congo, and conducts a comprehensive analysis of its beneficiation process, covering key elements such as the properties of the raw ore, the design flow, the design indicators, and the crushing and grinding process flow. Moreover, it elaborates in detail on the innovative EPCM management strategies. Through a systematic analysis of the project, it fully demonstrates the crucial effectiveness of high-quality design and innovative management in the success process of the project, aiming to provide a highly valuable reference example for similar mining projects.

Key words: mineral processing technology; grinding process; innovative EPCM management

1 前言

卡莫阿铜矿以其储量巨大、品位颇高的显著优势,在全球铜矿领域中占据重要地位,是中非铜矿带近十年极具价值的找矿成果。其I期380万吨选矿系统于2021年5月顺利投料试车,成功实现提前投产;II期380万吨选矿系统于2022年3月如期启动投料试车,较原计划提前4个月;至2024年5月,III期500万吨选厂成功投产,再次提前6个月完成任务,并于2024年6月10日正式出产首批精矿。随着III期选厂产能的逐步提升,该铜矿有望在未来数年达成年产60万吨铜的产能规模。选矿厂的顺利投产深刻彰显了高质量设计在工程项目中的核心地位,而提前投产则有力印证了创新设计管理的关键

意义。本文将从原矿性质、设计选矿工艺流程、设计工艺指标以及EPCM管理等多个维度对该矿山进行综合深入论述。

2 原矿性质

2.1 期及II期

1) 矿石矿物成分

矿石中的矿物成分以铜的硫化物(涵盖原生和次生矿物)为主,同时包含极少量氧化物。其中,主要矿物包含辉铜矿、斑铜矿、硫铜钴矿、黄铜矿、铜蓝、赤铜矿、自然铜、孔雀石、钎磷铜矿、铜铁硫酸盐、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、锰铁矿、钛铁矿、铬铁矿、氧化铁等;脉石矿物则有石英、高岭石、绿泥石、钾长石、钙长石、更长石、透辉石、镁橄榄石、斜黝帘石、角闪石、黑云母、白云母、金云母、锆石、榍石、钙铁榴石、锰硅酸盐、黏土矿物、方解石、白云石、氧化铝、金红石、自然硫、氧化钠、石膏、磷灰石、独居石等。经对试验样品的精确分析,各主要矿物的含量详情见表1。

2) 矿石化学成分

矿石的化学成分分析结果分别见表2(高品位

[作者简介] 陈名洁(1979—),男,江西萍乡人,教授级高级工程师,从事选矿工程设计管理工作。

[引用格式] 陈名洁,吕鸿,陶志勇.卡莫阿-卡库拉铜矿选矿工艺剖析与EPCM创新管理策略探究[J].中国矿山工程,2025,54(2):

表1 铜矿石的矿物组成及相关含量

| 矿物名称 | 含量/% | 矿物名称 | 含量/% |
|---------|------|---------|-------|
| 黄铜矿 | 0.2 | 绿泥石 | 7.5 |
| 斑铜矿 | 0.2 | 石英 | 20.1 |
| 辉铜矿 | 12.9 | 云母 | 10.8 |
| 铜蓝 | 0.0 | 高岭石 | 0.1 |
| 蓝铜矿 | 0.0 | 长石 | 43.9 |
| 硅孔雀石 | 0.0 | 铁(钛)氧化物 | 2.2 |
| 自然铜和氧化铜 | 0.2 | 碳酸盐 | 1.4 |
| 硫铜钴矿 | 0.0 | 磷灰石 | 0.2 |
| 黄铁矿 | 0.1 | 其它 | 0.1 |
| 辉石/角闪石 | 0.1 | 总计 | 100.0 |

表2 高品位矿石的化学成分分析表

| 元素 | Cu | Fe | S | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | CaO | As |
|------|------|------|------|------------------|--------------------------------|------|-------|
| 含量/% | 8.12 | 4.97 | 1.95 | 52.34 | 13.27 | 0.86 | <0.01 |

矿石)和表3(低品位矿石)。由分析可知,铜矿石的主要化学成分为SiO₂,其次为Al₂O₃,具有回收价值的主要有价元素为Cu,有害元素As的含量较低。

表3 低品位矿石的化学成分分析表

| 元素 | Cu | Fe | S | SiO ₂ | MgO | Al ₂ O ₃ | CaO |
|------|------|------|------|------------------|------|--------------------------------|------|
| 含量/% | 4.08 | 5.07 | 1.20 | 55.48 | 4.71 | 12.66 | 2.19 |

3) 物相分析

根据3%边界品位矿体内铜硫比分析,Kakula矿段主要的含铜矿物为辉铜矿,斑铜矿和较少黄铜矿。

XPS 试验样品的物相分析结果见表4。

表4 铜矿石中铜的化学物相分析结果

| 矿物组成 | 含量/% | 矿物组成 | 含量/% |
|------|-------|---------|------|
| 黄铜矿 | 0.58 | 孔雀石 | 0.19 |
| 斑铜矿 | 1.25 | 自然铜和氧化铜 | 1.32 |
| 辉铜矿 | 96.45 | 硫铜钴矿 | 0.01 |
| 铜蓝 | 0.04 | | |
| 蓝铜矿 | 0.09 | 总计 | 100 |

2.2 III期

Kamoa-Kakula 三期矿石矿物主要有辉铜矿、黄铜矿、斑铜矿等^[1-2],伴生矿物有黄铁矿及磁黄铁矿等,脉石成分主要包括方解石、白云石、石英、绢云母、绿泥石等。矿石来源主要为 Kamoa1 (40%)、Kamoa2 (40%) 和 Kansoko (20%) 矿区,平均给矿品位 Cu 3.47%, Fe 6.42%, S 2.52%。

3 设计流程

选矿厂的矿石破碎筛分系统设置为1个系列,高压辊超细碎回路2个系列、磨矿浮选系统设置2个系列,精矿压滤系统则设置1个系列。采用常规两段一闭路碎磨工艺,即“预先筛分+中、细碎+闭路筛分+两段球磨机连续磨矿”,粗碎环节设在井下。中碎前强化预先筛分,使产品粒度达到-50 mm,接着采用高压辊闭路筛分,产品粒度为-8 mm ($P_{80}=4.5$ mm),最后经两段球磨机连续磨矿,磨矿产品细度 $P_{80}=53$ μm。

选别流程采用全开路粗扫选、中矿再磨再选工艺原则流程,再磨细度 $P_{80}=8$ μm,以产出高品位铜精矿。脱水流程选用浓缩+压滤两段脱水工艺流程,精矿压滤后进行包装储存,并预留旁路散装汽车外运接口。

高压辊磨回路、磨矿、浮选系统设置2个系列,主要基于以下因素:首先,本项目属于特大规模的地采矿山,产能提升期和减产期较长,若仅设置1个系列,主要设备将长期处于低负荷运行状态;其次,试验研究表明矿石难磨,浮选时间长,若只设1个系列,球磨机、浮选机规格大,设备投资高,生产调试及维护难度显著增大。

4 设计指标及生产指标

4.1 I期及II期

选矿工艺的设计指标见表5,包括不同产品的产率、铜品位及回收率等关键指标。

表5 选矿工艺设计指标

| 产品 | 产率/% | 铜品位/% | 回收率/% |
|--------|--------|-------|--------|
| 高品位铜精矿 | 4.3 | 72.2 | 56.7 |
| 低品位铜精矿 | 3.9 | 40.7 | 29.0 |
| 混合铜精矿 | 8.2 | 57.2 | 85.7 |
| 尾矿 | 91.8 | 0.85 | 14.3 |
| 原矿 | 100.00 | 5.48 | 100.00 |

Kamoa I期和II期选厂整体在2024年第三季度的数据如下:精矿品位:I期和II期选矿厂在2024年第三季度研磨的矿石平均入选品位为4.9%。回收率:I期和II期选矿厂在2024年第三季度铜浮选回收率平均为86.6%。

4.2 III期

选矿工艺的设计指标见表6,包括不同产品的产率、铜品位及回收率等关键指标。

表6 选矿工艺设计指标

| 产品 | 产率/% | 铜品位/% | 回收率/% |
|-----|--------|-------|--------|
| 铜精矿 | 8.8 | 35.6 | 85.4 |
| 尾矿 | 91.2 | 0.38 | 14.6 |
| 原矿 | 100.00 | 3.47 | 100.00 |

2024年第三季度,Kamoa-Kakula三期选矿厂的平均给矿品位为2.6%^[3]。有报告公示三期选矿厂在2024年第三季度生产了22 099吨铜精矿。2024年第三季度,Kamoa-Kakula三期选矿厂的回收率为79.9%,随着细磨机于9月份投产,矿石处理量和回收率得到了持续改善,9月底,选厂的单日平均铜回收率达87%,高于85.4%的设计指标,且Kamoa的工程团队预计将持续实现达到设计回收率的目标。

5 I期及II期碎磨工艺流程的研究

碎磨环节在选矿厂的基建投资、生产能源及钢材消耗方面占据重要地位,因此优化节能省耗的碎磨工艺技术对于实现选矿节能降耗的先进目标至关重要。为确定最佳综合经济效益的方案,对以下三种碎磨工艺方案进行了技术经济比较^[4]。

方案I:以进口高能圆锥破碎机为核心的“预先筛分+中、细碎+闭路筛分+两段球磨机连续磨矿”组合的常规二段一闭路碎磨工艺,其中粗碎设在井下(图1)。

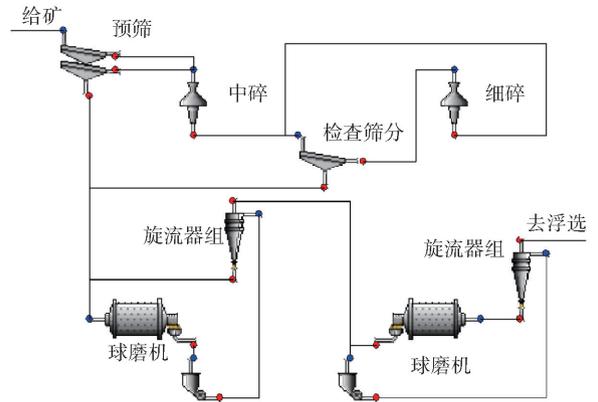


图1 方案I原则流程图

方案II:以半自磨机为核心的“半自磨+顽石破碎+球磨机及立磨机闭路磨矿”组合的碎磨工艺,粗碎同样设在井下(图2)。

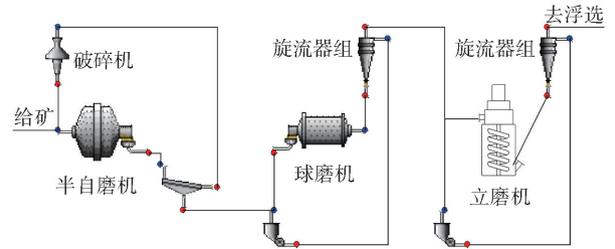


图2 方案II原则流程图

方案III:以高压辊为核心的“中碎闭路筛分+高压辊闭路筛分+两段球磨机连续磨矿”组合的二段两闭路超细碎碎磨工艺,粗碎也在井下。

I期和II期参比方案主要设备见表7。

表7 参比方案主要设备表

| 方案I | | | 方案II | | | 方案III | | |
|------|--------------------|----|------|--------------------|----|--------|------------------|----|
| 作业 | 设备名称 | 台数 | 作业 | 设备名称 | 台数 | 作业 | 设备名称 | 台数 |
| 中碎 | GP7圆锥破碎机 | 1 | 半自磨 | φ8.8 m×4.8 m | 2 | 中碎 | CS660C圆锥破碎机 | 3 |
| 细碎 | HP6圆锥破碎机 | 4 | 顽石破碎 | HP5圆锥破碎机 | 3 | 一段筛 | 2-3670圆振动筛 | 2 |
| 预先筛分 | 2YKR3675圆振动筛 | 1 | 一段球磨 | φ7.32 m×10.68 m球磨机 | 2 | 超细碎 | 1712高压辊磨机 | 2 |
| 闭路筛分 | ZXF3073香蕉型直线振动筛 | 5 | 二段立磨 | VTM3000 | 2 | 一段磨给料筛 | 2-3661直线振动筛 | 2 |
| 一段球磨 | φ6.71 m×10.97 m球磨机 | 2 | 一段分级 | 17-φ500水力旋流器组 | 2 | 一段磨 | φ6.1 m×9.75 m球磨机 | 2 |
| 二段球磨 | φ6.71 m×11.58 m球磨机 | 2 | 二段分级 | 20-φ350水力旋流器组 | 2 | 二段磨 | φ6.1 m×9.75 m球磨机 | 2 |
| 一段分级 | 16-φ500水力旋流器组 | 2 | | | | 一段分级 | 12-φ500水力旋流器组 | 2 |
| 二段分级 | 20-φ350水力旋流器组 | 2 | | | | 二段分级 | 16-φ350水力旋流器组 | 2 |

各参比方案的比较基础设定为:设计规模7.6 Mt/a,井下粗选产品粒度不大于350 mm,地表碎磨最终产品粒度 $P_{80} = 53 \mu\text{m}$ 。关键设备按整体引进或国产考虑,并确定主要耗材价格及相关费

率^[5]。通过比较发现:

基建投资方面:方案I和方案III流程长、厂房多、占地大、设备及缓冲矿仓数量多、矿石倒运点多,建筑工程投资大,基建投资较高;方案II流程短、占

地小、设备少、投资小,基建投资较低^[6],即碎磨基建投资:方案 I > 方案 III > 方案 II。

生产经营费用方面:方案 I 破碎衬板消耗高、维修及人工费用高、钢耗高但电耗低;方案 II 维修强度低、人工及钢耗省,但总体电耗最高;方案 III 采用高压辊磨实现多碎少磨,磨矿成本低、电耗最低、单位矿石成本最低,即参比方案单位矿石碎磨平均生产费用:方案 I > 方案 II > 方案 III。

从费用现值($i = 10\%$, $n = 10$)角度考虑,同样是方案 I > 方案 II > 方案 III,高压辊方案费用现值最低,故设计碎磨工艺推荐方案三。

6 创新管理策略

作为卡莫阿项目的设计管理者,也深度融入到采购及施工管理流程中,积极面对项目进程中涌现的各类挑战,凭借创新的思维和有效的管理手段,在多个关键领域实现了显著突破,成功推动项目不断向前发展。以下是对卡莫阿项目创新 EPCM 设计、采购及施工管理的全面系统总结。

6.1 进度管理创新举措

项目工期紧张,行业平均工期在 24 ~ 30 个月,本项目给出 22 个月 II 期总工期后仍要求进一步压缩,最终要在 18 个月内完成任务。在设计管理过程中,通过缜密计算和审慎决策,对项目进度进行精细规划,合理安排各设计阶段和工作任务,实现了高效的进度管理,成功在 18 个月内提前完成项目,在工期大幅压缩的严苛情况下有力保障了项目的顺利推进。

6.2 设计协调创新机制

项目分包方众多,在设计管理过程中图纸分发和更新管理极为复杂。为此建立了清晰明确的图纸分发和更新机制,精确定义每种图分发给对应的单位,并且在图纸更新后,除及时向业主发送外,同步更新并迅速发送给相关分包单位,确保各方使用的均为最新且有效的图纸,有力保障了项目施工和管理的准确性与协调性^[7]。

6.3 基于已有资源的采购策略创新

项目处于 EPCM 模式的 II 期工程阶段,需在 I 期基础上对采购管理进行优化。创新措施包括:充分利用第一阶段精心制定的采购方法、成本控制、质量保证、质量控制和物流规范及模板,以单一来源采购为主导,优先选用第一阶段的优质供应商和承包商,确保了采购管理的连贯性和高效性,大幅减少了

重新筛选供应商所需的时间和成本,同时凭借已有的合作经验有效降低了风险。

6.4 采购包精细化管理创新模式

面对复杂多变的项目需求和差异显著的执行条件,传统采购包划分和管理方式难以切实满足项目要求。综合全面考虑设计深度、当地市场、供应商能力和施工分包等多方面关键因素进行采购包划分,如针对胶带输送机、电机、施工安装、钢结构和非标等分别设置采购包,使采购管理更具针对性和灵活性,显著提高了采购效率和管理精度,确保每个采购包的供应能够与项目实际需求紧密契合。

6.5 采购进度管理文件体系创新构建

项目对采购进度管理提出了严格要求,需要清晰准确地跟踪和汇报采购包进度。创新措施为建立了包含 POP 文件、进度会、周报月报等在内的完善进度管理文件体系。POP 文件详细划分采购包从请购到合同签订的 8 个关键节点,每个节点明确计划、预计和实际时间,每周会议向业主汇报采购包全方位信息;同时按要求召开不同频率的进度会,详细汇报合同执行各方面情况。这种体系化的管理方式实现了对采购进度的精准把控,确保项目按计划有序推进,能够及时发现和解决问题,有效提高了采购管理的透明度和可控性。

6.6 施工进度管理创新实践

采用精细化的四级计划管理体系,并结合赢得值法进行动态监控。运用关键路径法和 P6 软件编制涵盖全施工过程的四级计划,明确各工作包下每个交付物,确保计划细致全面且具有可操作性。按照月度利用赢得值方法跟踪项目进展,对比实际与计划完工百分比,绘制“S”曲线,计算进度绩效指数 SPI,精准判断项目绩效,及时发现偏差并调整。

6.7 建立全面且严格的安全管理体系

确立明确且严格的安全管理目标,并制定详细安全管理计划,执行有效的 HSE 管理体系。每周进行安全专题会议并进行现场安全大检查,控制风险源并及时整改,排查隐患。

全面增强施工人员安全意识,针对施工人员文化水平和语言差异,开展多语种安全教育,提升专业技能。同时贯彻安全责任制,做到“人人讲安全、个个会应急”。

(下转第 76 页)