

# 刚果(金)某选矿厂磨矿优化控制专家系统研究

高立强<sup>1</sup>, 尤腾胜<sup>2</sup>, 张维国<sup>2</sup>, 祝晋<sup>1</sup>, 胡学平<sup>1</sup>, 刘佳鹏<sup>1</sup>

(1. 北方矿业有限责任公司, 北京 100053; 2. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

**[摘要]** 磨矿是选矿流程的关键作业之一,传统选矿厂通常因矿石可磨性质波动导致磨矿工艺频繁调整,相关控制参数的调整多数依赖人工经验,刚果(金)某选矿厂磨矿作业存在类似问题。本文在深入研究传统选矿厂工艺和刚果(金)选矿智能化改造和工艺控制需求后,提出了磨矿优化控制专家系统解决方案,通过磨矿工艺流程智能化控制策略对生产流程和工艺设备进行了改造,实现了磨矿过程的智能化控制和工艺分级优化,为选矿厂工艺流程优化和智能化升级提供技术方案和建设路径。

**[关键词]** 智能选厂; 磨矿分级; 优化控制; 专家系统; 装备智能化; 选矿; 粒度

**[中图分类号]** TD921 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2024)01-0036-05

**DOI:** 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2024.01.006

## 0 引言

随着科技的不断进步,新一代信息技术助推了智能选矿厂技术的不断创新和升级,设备大型化和装备水平提升以及绿色低碳矿山要求,智能选矿厂建设也将迎来更多机遇。以选矿生产过程的自动化、智能化和优化的智能选矿厂建设,提高选矿效率、降低能耗以及减少环境污染已经成为矿业发展的必然趋势<sup>[1-3]</sup>。智能选矿厂通过集成先进的信息技术、自动化技术和人工智能技术,实现对选矿过程的智能化控制和管理<sup>[4]</sup>。其中,根据输入的数据和规则,进行推理和判断的专家系统是智能化控制的核心<sup>[5-9]</sup>。在选矿过程中,专家系统可以根据矿石性质、设备状态、环境条件等多种因素,自动调整选矿参数,优化选矿效果<sup>[10-11]</sup>。在美国、加拿大、澳大利亚等矿业发达国家,智能选矿厂的建设与发展已经取得了较大的进展,实现了高度的自动化和智能化,在环保和节能方面也做出了突出的贡献,近年来

国内大型矿山企业在建设智能选矿厂也取得了一定的成果<sup>[12-14]</sup>。

刚果(金)某选矿厂磨矿作业存在矿石可磨性质波动大、磨矿工艺调整频繁、过多的人工干预和频繁调节等问题,造成磨机充填率过低或过高,影响系统和设备安全运行的同时,增加了钢耗、电耗和生产成本。本文将基于磨矿优化控制整体需求及目标,提出磨矿系统基础自动化升级和半自磨机变频调速改造方案,为了解决工艺流程智能化控制,建立了半自磨给水调节和优化控制策略、旋流器分级控制及磨矿流程协同优化控制策略,为选矿厂智能化建设提供完整的技术方案。

## 1 选矿厂磨矿工艺及升级需求研究

### 1.1 磨矿工艺

刚果(金)某矿山设计采选年处理矿石量260万t/a。矿山采用露天开采,来自采场的矿石经汽车运至选矿厂原矿堆场,再进入选矿作业。现场生产的选矿工艺流程为:破碎-半自磨+球磨-分级-脱水。选矿作业主要为后续冶炼提供满足浸出粒度、浓度要求的原料矿浆。

1) 破碎工艺流程。选矿厂破碎设两个系列,矿石经自卸车运至粗碎前原矿仓,原矿仓底部设一台重型板式给矿机,重型板式给矿机变频调速,其中重型板式给料机将原矿仓矿石先均匀给入振动棒条给料机,棒条筛下产物通过漏斗落至No. 1带式输送

**[收稿日期]** 2023-11-26

**[第一作者]** 高立强(1984—),男,内蒙古赤峰人,高级工程师,硕士,主要从事矿山开发的研发、咨询、设计、矿产资源评估与并购的技术和项目管理工作,现任北方矿业有限责任公司设计研究院院长助理。

**[引用格式]** 高立强,尤腾胜,张维国,等.刚果(金)某选矿厂磨矿优化控制专家系统研究[J].有色设备,2024,38(1):36-40.

机,棒条筛上产物给入 1 台颚式破碎机进行破碎。

破碎产品通过 No. 1 带式输送机送至粗矿堆,粗矿堆下设置 3 台重型板式给矿机,重型板式给矿机变频调速,将粗矿堆矿石定量、均匀给入 No. 3 带式输送机, No. 3 带式输送机将矿石输送至磨矿分级系统的半自磨机。

粗碎站重型板式给矿机、振动棒条给料机、颚式破碎机及 No. 1 带式输送机与粗碎站原矿仓、粗矿堆料位构成工艺连锁控制。根据原矿仓、粗矿堆料位高、低对各相应设备进行顺序启停。

2) 磨矿分级。磨矿分级系统设两个系列,流程为:粗矿堆下部重型板式给料机卸料至 No. 3 带式输送机,然后给料至 1 台  $\phi 6400\text{ mm} \times 3500\text{ mm}$  半自磨机。半自磨机、球磨机、渣浆泵及水力旋流器构成闭路磨矿分级。半自磨机排矿端带圆筒筛,筛上物料(顽石)经 No. 5、No. 7 带式输送机返回半自磨机,筛下物料进入水力旋流器给矿泵池。

## 1.2 磨矿系统智能化改造需求

刚果(金)某选矿厂自投产运行以来,选矿厂磨矿作业存在矿石因硬度等原因导致可磨性质波动大、磨矿工艺调整频繁、过多的人工干预和频繁调节等问题。同时,因缺乏工艺流程精细化稳定性控制,导致磨机充填率过低和过高,出现磨机“过磨”和“涨肚”的情况。因此,选矿厂现场作业在产量提升、提高资源利用率、降低能耗和提升自动化控制水平等方面有着迫切的升级改造需求。

1) 半自磨机高压变频调速技术改造。根据现有同步电机工频配置,增加包含高压变频器、励磁系统、一次预充电系统及工频切换系统等,将实现变频启动、变频运行功能,并能手动切换至软启动模式<sup>[15]</sup>。

2) 基础自动化升级改造。根据现有仪器仪表及控制系统现状,通过增加粒度分析仪、矿浆浓度计、自动加球机等设备,同时提高现场仪器仪表检测准确性、控制精度和系统运行稳定性,为磨矿优化控制系统实施创造良好条件,打牢基础。

3) 磨矿优化控制专家系统建设,在半自磨机变频调速和基础自动化升级改造完成并投入运行基础上,引入矿石块度分析系统和磨矿专家控制系统等新技术,实现磨矿系统智能给矿及产品浓度、细度的自动调节等优化控制功能。

通过优化控制专家系统高频低量智能调控寻找最优工况和自动获取最佳生产参数,提前预判运行

状况,降低故障率,最大化的稳定运行降低原矿性质波动造成的生产波动,引入磨矿优化控制专家系统可有效解决磨矿作业存在的以上问题,可进一步提高系统效能,对提高企业总体经济效益具有重要意义。

## 2 磨矿优化控制专家系统解决方案

### 2.1 基础自动化升级改造

1) 矿浆浓度检测。在旋流器给矿管道和溢流管道各增设 1 台矿浆浓度计,采用低核辐射的 Na-22 矿浆浓度计,用于检测旋流器给矿管道和溢流管道内的矿浆浓度,其放射源活度  $\leq 1\text{X Bq}$ ,该活度是低于标准要求的豁免源活度。

2) 矿浆粒度检测。在水力旋流器溢流管道增设矿浆粒度检测,用于检测旋流器溢流管道的矿浆粒度。

3) 顽石矿量检测。对顽石矿量检测系统进行升级改造,在顽石返回的 No. 5、No. 6 皮带上新增皮带秤,对顽石矿量进行精确计量。

4) 钢球自动添加系统。针对半自磨机和球磨机的工作特点和加球要求,在磨机平台给矿端分别设置 1 套自动加球系统,其由储球仓、缓冲仓、捞球装置、松球装置、智能控制器、计数器和触摸屏等组成,实现在设定加球时间和加球数量条件下分别向半自磨机和球磨机自动加球。

### 2.2 半自磨机变频调速改造

为了实现磨矿工艺的优化控制,需要将半自磨机现有的“同步电机软启 + 气动离合器”启动方式升级为变频启动和变频运行,并能手动切换至软启动模式。

根据现有同步电机配置,需要增加高压变频器、励磁系统、一次预充电系统以及工频切换系统等,同时,新旧励磁柜通过励磁切换柜进行闭锁互投,采用一拖一手动/变频切换方案。采用变频运行方式后,保留磨机就地控制箱和变频就地操作箱,用于变频运行方式下的磨机启、停等控制和运行装备操控监视等。

### 2.3 整体解决方案

在半自磨机变频调速和基础自动化升级改造的基础上,引入了矿石块度分析系统和磨矿专家控制系统等新技术,同时利用现场的粒度分析仪、电子皮带秤、流量计、浓度计等仪器仪表,磨矿专家控制系统功能包含半自磨机智能给矿的稳定精

细化控制、半自磨给水智能调节、半自磨机专家控制、钢球添加控制、旋流器分级专家控制、磨矿流

程协同优化控制等,磨矿分级优化控制专家系统示意图如图1所示。

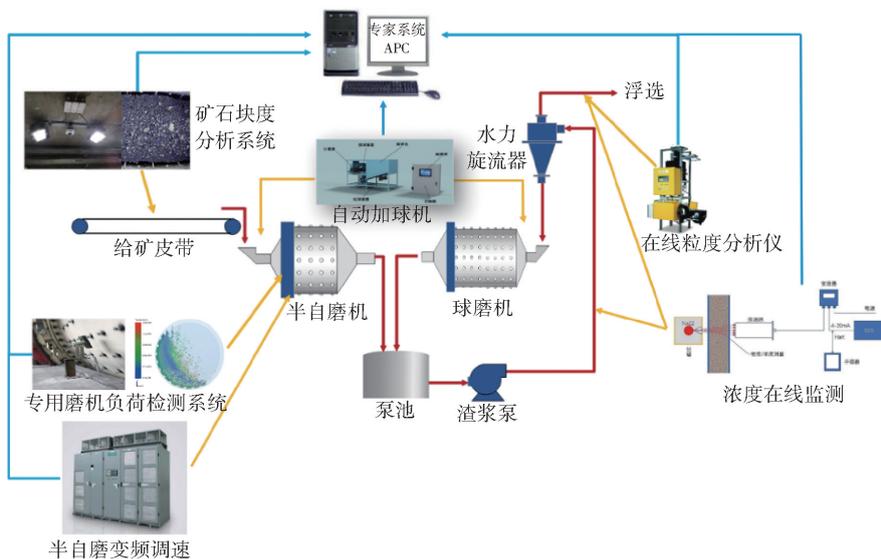


图1 磨矿分级优化控制专家系统示意

磨矿优化控制实现半自磨回路、球磨回路、旋流器分级等专家控制,对磨矿系统内的给矿量、给矿块度、转速、浓度等控制参数进行系统性、实时性的精准靶向智能优化调整。专家系统与DCS的通讯采用OPC方式进行通讯,实现各种数据的集成和优化控制指令的下达执行,磨矿优化控制专家系统网络拓扑图如图2所示。

磨矿回路建设基于视频分析的矿石块度分析系统,在颞式破碎机-粗矿堆的No.1、No.2带式输送机尾部分对破碎产品粒度进行监测和分析,另外,在粗矿堆-半自磨机的No.3、No.4带式输送机皮带上分别安装矿石块度分析的摄像头,实时分析矿石的各个粒度级别,将以上数据作为半自磨机智能给矿控制的依据<sup>[16-19]</sup>。

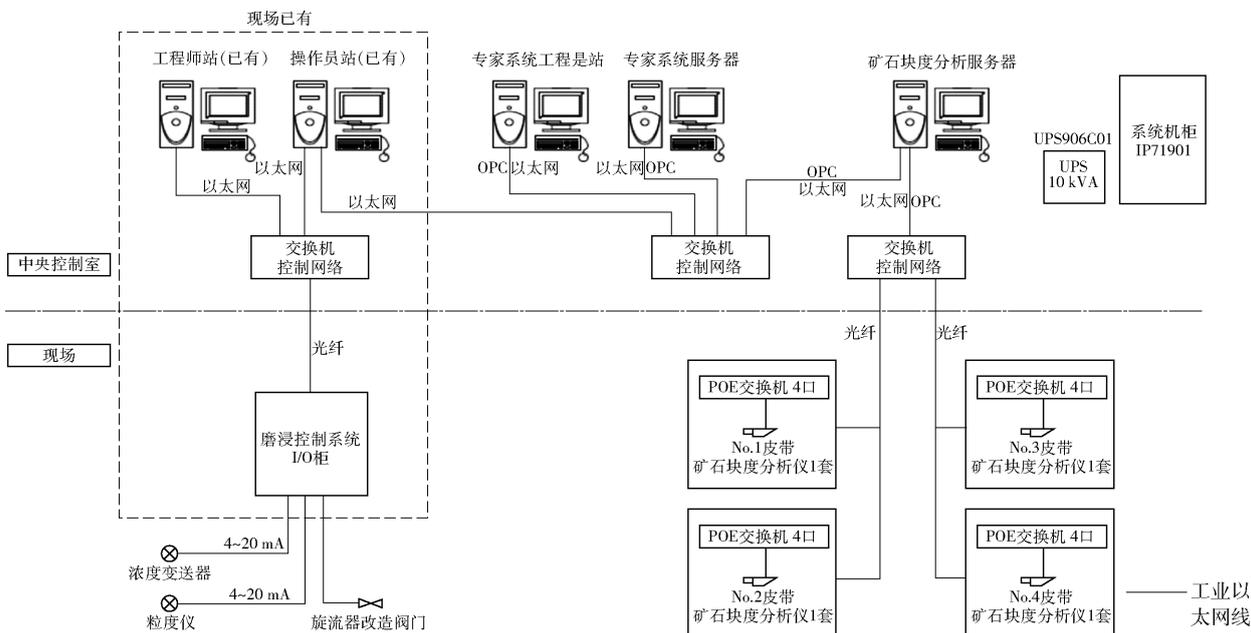


图2 磨矿优化控制专家系统网络拓扑图

### 3 智能化控制策略及应用

1) 智能给矿稳定控制策略。依据半自磨机的运行情况、产品浓细度情况以及磨矿指标自动调整给矿量、给矿皮带以及给矿粒度,对半自磨机给矿皮带上的矿石粒度进行监控,并合成半自磨给料块度,利用矿堆的自然离析原理,根据在线分析和经验建立下料粒度与给料机位置的预测模型,自动调整给料机,保证磨矿流程的稳定运行。给矿稳定控制实现了矿石粒度量化的,将量化的矿石粒度数据用于半自磨机的优化控制,并能适应较大供矿粒度变化情形<sup>[20-22]</sup>。

2) 钢球自动添加控制策略。通过半自磨机的运行状态及供矿情况,以及最近供矿粒度情况,自动计算出本班组的钢球添加数量,通过自动添加系统完成钢球添加工作。

3) 半自磨给水智能调节策略。根据磨机供矿量变化、磨机实际运行状态以及旋流器溢流产品的情况,自动实时调整供矿和非固定比例的供水调节,实现磨矿浓度的智能调整。

4) 半自磨机优化控制策略。在磨机设备安全运行的前提下,根据半自磨机运行功率、轴压、给矿粒度等状态参数,通过专家控制系统对半自磨机给矿量、给水量、转速率实现连续不间断的智能调整,对半自磨的磨矿过程进行精细控制,以最大化磨机处理量,保证磨矿产品粒度。

半自磨机专家系统可以根据磨机现有的运行状态,根据各种供矿条件下磨机的不同状态,采用最佳控制逻辑与模型,自动在“功率控制模型”、“轴压控制模型”之间自动切换,实现磨机最大化稳定生产。

5) 水力旋流器分级控制策略。通过模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)及模糊控制(Fuzzy Control)逻辑,对矿浆池液位、补加水、旋流器开关和泵的转速实现智能化控制,维持旋流器压力稳定、矿浆浓度稳定,保障旋流器溢流粒度的合格,实现分级流程的优化控制。

依据浓度仪、粒度仪数据自动调整泵速、补加水量等,为后续作业提供最佳浓度、粒度分布的矿浆流。

6) 磨矿流程协同优化控制。磨矿流程协同控制主要基于半自磨、球磨负荷匹配情况,智能调整给矿控制、半自磨优化控制和旋流器分级优化控制三个控制模块的参考值,根据磨矿的粒度分析指标智

能调整相应参数,以实现磨矿和磨矿流程整体控制目标的最优化,根据相关控制策略,开发完成了磨矿智能管控系统。

磨矿流程协同优化控制在磨矿设备、工艺流程未发生改变的情况下适应各种生产条件,并自动做出最佳控制逻辑选择,实现现场磨矿流程产品的稳定。

### 4 结论

选矿厂通过引入磨矿优化控制专家系统可减少人为因素对流程及指标的不利影响,保证磨矿回路安全稳定运行,实现磨矿系统产品粒度可调可控和产能的最大化。通过优化控制专家系统的应用,使得刚果(金)某选矿厂磨矿工艺实现了智能化升级。

1) 通过增加矿浆浓度检测、矿浆粒度检测,升级完善基础自动化控制系统建设,实现碎磨系统生产过程的智能监测,为选矿厂管理和技术人员提供及时有效的生产过程数据,提高现场生产劳动效率和生产稳定性。

2) 利用半自磨机变频调速功能,结合磨矿专家控制系统,可以实现磨机负荷状态等特征的自动识别,能够根据磨机功率、轴压、给矿量等参数进行磨机转速的自适应调节,从而更好地适应矿石性质波动的动态变化,实现半自磨机的安全稳定及精细化控制,提高系统产能的同时降低衬板、钢球以及单位矿石处理量的电能消耗。

3) 通过实施磨矿专家控制系统建设,通过测算预计使磨矿作业电耗降低3%以上、磨矿钢耗降低3%以上,使磨矿产品浓度、粒度合格率达到98%以上,可以大幅提高碎磨系统生产运行稳定性,最大限度发挥系统的生产能力,稳定工艺流程的相关参数,是智能选矿厂建设的关键环节。

#### [参考文献]

- [1] 鞠建华,韩见,鞠方略. 中国智能矿山发展趋势与路径分析[J]. 中国矿业,2023,32(5):1-7.
- [2] 孙传尧,周俊武. 流程工业选矿过程智能优化制造发展战略[J]. 有色金属(选矿部分),2019(5):1-5.
- [3] 祝晋,刘威,高立强. 智能选矿厂的建设探索与实践[J]. 有色金属(选矿部分),2023(1):121-126.
- [4] 耿帅,姚婧. 磨矿过程智能优化控制技术研究与应用[J]. 有色冶金设计与研究,2022,43(6):32-35.
- [5] 俞宏军,刘兆瑞,于保强. 山达克铜矿碎磨流程设计研究[J]. 中国矿山工程,2023,52(2):77-81.
- [6] 夏雨,卢爱红. 连续级配高强胶结充填体力学特性及破

- 坏特征分析[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2023, 5(1): 55-66.
- [7] 吉庆军. 多金属共生矿一段磨矿分级技术改造应用实践[J]. 有色矿冶, 2021, 37(6): 19-23.
- [8] PANI A K, MOHANTA H K. Soft sensing of particle size in a grinding process: Application of support vector regression, fuzzy inference and adaptive neuro fuzzy inference techniques for online monitoring of cement fineness [J]. Powder Technology, 2014, 264: 484-497.
- [9] VIRIVINTI N, MITRA K. Fuzzy expected value analysis of an industrial grinding process [J]. Powder Technology, 2014, 268: 9-18.
- [10] 杨佳伟, 王庆凯, 邹国斌. 磨矿分级过程优化控制技术研究与应[ J ]. 有色金属(选矿部分), 2021(4): 124-131.
- [11] 孙伟, 张雪娇, 熊伟, 等. 多金属选矿厂磨矿分级优化控制研究与应用[J]. 矿冶工程, 2018, 38(4): 36-40.
- [12] 杜五星, 戴惠新, 何东祥, 等. 我国选矿自动化的现状及发展趋势[J]. 矿产保护与利用, 2016(1): 74-78.
- [13] 张仁忠, 朱颖舟. 沙溪铜矿选矿厂 SABC 流程智能专家系统建设方案[J]. 现代矿业, 2021, 37(12): 83-85.
- [14] 张兴勋, 叶志勇, 饶明生, 等. 多源矿点配矿的 SAB 流程磨矿优化控制技术应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2021, (3): 75-82+87.
- [15] 尤腾胜, 邓朝安, 何荣权, 等. 变频调速技术在半自磨工艺中的应用研究[J]. 中国矿山工程, 2022, 51(6): 64-68.
- [16] 段文权, 赵辉军, 刘敬智, 等. 金属矿山生产全流程协同管控技术与平台研究[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(12): 172-179.
- [17] 耿帅, 姚婧. 磨矿过程智能优化控制技术研究与应用[J]. 有色冶金设计与研究, 2022, 43(6): 32-35.
- [18] 何泽平, 李显杰, 江帆, 等. 基于 SAB 磨矿智能系统的旋流器结构优化与运用[J]. 铜业工程, 2022(5): 101-105.
- [19] 赵奕, 张维国, 何煦春, 等. 智能矿山多维度一体化建设架构与实施路径研究[J]. 有色设备, 2022, 36(6): 1-12.
- [20] 牛桂强. 磨矿分级自动控制与优化控制技术在某选厂的应用[J]. 矿山机械, 2022, 50(3): 37-40.
- [21] 周旭东. 多金属选矿厂磨矿分级优化控制应用研究[J]. 中国设备工程, 2020(1): 228-229.
- [22] 何荣权, 尤腾胜, 邓朝安. 智能磨矿系统半自磨机控制关键参数研究[J]. 绿色矿冶, 2023, 39(1): 17-20.

## Grinding optimization control expert system for a mineral processing plant in congo (DRC)

GAO Liqiang, YOU Tengsheng, ZHANG Weiguo, ZHU Jin, HU Xueping, LIU Jiapeng

**Abstract:** Grinding is one of the key operations in the beneficiation process. Traditional beneficiation plants often adjust the grinding process frequently due to fluctuations in the grindability of the ore. The adjustment of related control parameters mostly relies on manual experience. A certain beneficiation plant in the Democratic Republic of Congo has similar problems with grinding operations. After in-depth research on traditional beneficiation plant processes and the intelligent transformation and process control requirements of Congo (DRC) beneficiation, this article proposes a grinding optimization control expert system solution. Through the intelligent control strategy of grinding process flow, the production process and process equipment are transformed, achieving intelligent control and process classification optimization of the grinding process, it provides technical solutions and construction paths for the optimization and intelligent upgrading of the beneficiation plant's process flow.

**Key words:** intelligent dressing plant; grinding and classification; optimized control; expert system; intelligent equipment; ore beneficiation; granularity

