

引用格式:赵晨阳,何荣权,尤腾胜,等.智能磨矿控制系统在某多金属选矿厂的应用研究[J].有色设备,2025,39(6):88-95.
ZHAO Chenyang, HE Rongquan, YOU Tengsheng, et al. Research on application of intelligent grinding control in a poly-metallic ore concentrator[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(6): 88-95.

智能磨矿控制系统在某多金属选矿厂的应用研究

赵晨阳¹, 何荣权¹, 尤腾胜¹, 韩彬², 符海桃²

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 云南华联锌铜股份有限公司, 云南 文山 663701)

[摘要] 国内某多金属选矿厂因其矿石性质复杂多变, 长期面临生产操作依赖人工、调节频繁、控制稳定性差等问题, 严重制约磨矿流程的产品质量和生产效率。为解决上述问题, 本文研究并开发一套能够实现自适应优化的智能磨矿控制系统, 以提升运行指标和生产智能化水平。系统依托专家经验与数据驱动的智能控制策略, 通过智能给矿、模糊控制和工艺控制逻辑, 实现了磨矿流程的多参数、多回路协同精准控制与自适应调整。工业应用表明, 系统投运后稳定可靠, 磨矿系统原矿处理量提升了 3.41%, 产品浓度合格率提高了 4.58 个百分点, 产品粒度合格率提高了 3.34 个百分点, 实现了该选矿厂提高产量质量、降低劳动强度、增加企业经济效益的目标, 为同类型选矿厂的智能化升级提供了可靠的技术路径与实践范例。

[关键词] 选矿厂; 智能磨矿; 模糊控制; SAB 工艺; 磨矿工况; 处理量; 产品粒度; 产品浓度

[中图分类号] TD453; TP273

[文献标志码] A

[文章编号] 1003-8884(2025)06-0088-08

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.06.012

0 前言

碎磨作业是选矿厂生产能源及钢材消耗占比最高的工序, 作为选矿过程的关键环节, 其生产稳定性将制约着整个选矿厂处理能力和选别效率, 磨矿产品质量(如产品粒度、产品浓度等)对后续浮选、磁选、重选等选别流程的分选效果有直接联系, 影响整个选矿厂技术经济指标^[1]。目前, 随着各种金属原矿入选品位日趋下降, 矿石性质复杂多变, 如在生产过程中对磨矿工艺流程进行优化控制, 不仅能得到高质量合格磨矿产品, 提高后续选别效果, 而且可有效控制矿石单耗成本、突破处理能力瓶颈^[2]。近年来, 国内外矿山企业为了提升经济效益和市场竞争力, 正积极推动从传统粗放式磨矿控制向精细化控制转变^[3-4]。然而在实际生产中, 现场操作人员仍主要依赖个人经验对磨矿工艺控制进行判断和调节, 人工调节控制不及时、不合理等问题突出, 导致磨矿过程长期在非最优工况下运行, 产品浓粒度波动大, 无法实现稳

定高效生产, 严重制约了生产效率和资源利用率。因此, 研发先进、可靠的磨矿过程自动化与智能化控制技术, 降低能耗和劳动强度, 已成为提升整个选矿行业技术水平、产品质量和经济效益的迫切需求与必然趋势。

磨矿过程是一个典型的参数时变特征的复杂工业对象, 传统的单回路 P&ID 控制策略因其“单输入-单输出”的线性控制本质, 难以有效处理复杂的动态工况。为克服 P&ID 控制的局限性, 将模糊逻辑与经典控制理论相结合成为一条重要技术路径。通过模糊逻辑处理非线性问题, 弥补 P&ID 控制在复杂环境下的不足, 从而降低磨矿过程中参数非线性和时变性的影响, 形成更有效的控制方式^[5]。钱杰等^[6]针对磨矿分级过程中的滞后性问题, 设计了一种基于动态矩阵控制算法的双输入单输出模糊控制系统, 有效消除了给矿量误差。于云鹏等^[7]采用一阶 TSK 模糊控制方法, 依据专家经验分析变量间的耦合关系, 建立模糊规则库, 提升了控制精度。葛鹏等^[8]通过磨机电流和筒体

[收稿日期] 2025-08-10

[第一作者] 赵晨阳(1993—), 男, 河南周口人, 工程师, 硕士, 主要从事选矿工程咨询设计工作。

噪声两个变量,运用模糊数学方法精确判断球磨机负荷,优化给矿量,使球磨机工作稳定在最优状态。刘道喜等^[9]从工艺知识和优化算法两个维度入手,建立了SABC工艺流程的经验数学模型,并提出了一种基于参考向量的动态多目标优化方法。该方法通过调整建模方案,构建了设备状态稳定下的狭义数学模型,并引入模糊逻辑表达式作为参考向量,实现了多目标优化控制,为磨矿过程的优化提供了新思路。刘鹏南等^[10]开发了基于模糊控制的磨矿动态优化系统,通过模糊逻辑解决了数学模型难以建立的问题,提高了球磨机的处理能力。高立强等^[11]通过对工艺设备和工艺流程改造,实现了对磨矿过程的智能控制和分级优化。尤腾胜等^[12]深入研究半自磨机变频调速在磨矿控制系统的重要作用,将转速率写入智能控制系统后实现了磨矿控制系统的稳定运行。邹国斌等^[13]结合现场操作经验,采用规则控制建立一段闭路磨矿流程的专家控制系统,实现了磨矿分级优化设定和输出。

尽管当前磨矿控制有诸多研究成果,但瓶颈依然明显,模糊控制和专家系统的核心均依赖于“专家经验”来制订控制规则。经验的提炼主观性强、工作量大,难以保证完备性与最优性,使得系统的自适应能力和泛化性能受限。无论是模型预测控制还是经验数学模型,都无法得到准确反映干扰因素和非线性时变特性的模型,导致在矿石性质波动时模型失准,控制与优化效果下降。现有研究多聚焦于局部优化(如给矿量、转速率、负荷判断、单段磨矿流程等),缺乏一个能够融合“底层”整体工艺参数控制、“中层”运行工况识别与“高层”经济效益优化于一体并能充分利用历史数据价值的顶层智能架构。

结合某多金属选矿厂因原矿性质波动大、磨矿工况复杂、人工调节滞后导致SAB流程不稳定、磨矿产品指标不合格的具体需求,本文设计并实施了一种智能磨矿控制系统,该系统包含矿石粒度检测分析系统、专家系统和交互界面,基于人工智能技术,深度融合专家经验和历史工况数据构建知识库,通过设定工艺控制逻辑规则,实现对磨矿工艺的全过程实时反馈与工艺控制参数调节,使得现场生产管理保持稳定高效,有效提升了整个选矿厂的工艺指标和经济效益。

1 磨矿工艺及其现状

1.1 工艺流程

某多金属选矿厂磨矿工艺采用半自磨+球磨(SAB)工艺流程,其粗矿堆下设6台皮带给料机,皮带给料机将矿石分别给到带式输送机后输送至1台 $\phi 7.50\text{ m} \times 3.20\text{ m}$ 半自磨机。半自磨机排矿经圆筒筛筛分,筛上顽石经带式输送机转运返回至半自磨机,筛下产物进入矿浆池后经2台渣浆泵分别给至2组 $\phi 500-8$ 水力旋流器,旋流器沉砂给入1台 $\phi 5.03\text{ m} \times 8.50\text{ m}$ 溢流型球磨机,旋流器溢流(-0.074 mm 占70%)自流进入浮选作业。多金属选矿厂磨矿工艺流程如图1所示。

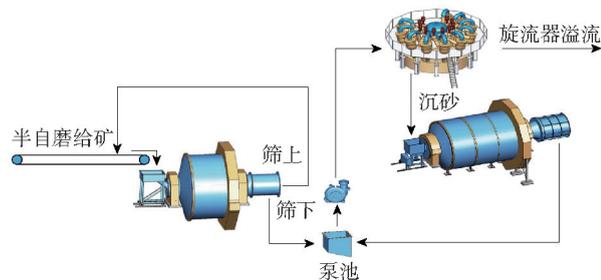


图1 半自磨+球磨(SAB)工艺流程示意
Fig.1 Schematic diagram of SAB process

1.2 优化控制难点

该多金属选矿厂长时间运行以来,近几年矿石性质变化大,因原矿粒度、硬度、可磨性等原因导致生产工艺流程易波动,设备运行参数波动大,人工调节频繁,生产操作及控制复杂,现场半自磨+球磨(SAB)工艺流程很难稳定在最佳运行状态,无法将设备工作效率发挥至最优,制约瓶颈特点和难点。主要体现在以下几个方面。

1) 原矿性质波动大:多金属矿有用组分多,矿石性质随多源点配矿变化快,导致硬度和可磨性变化大;原矿堆直径大,储存物料存在离析现象,随着原矿堆堆存高度不同,不同下料口的原矿粒度组成存在差异。

2) 生产任务重:必须保证处理能力和磨矿产品质量才能完成选矿厂的生产任务。磨矿流程作为选矿厂的核心,磨矿产品质量直接决定了后续选别流程的效率,磨矿产品数量直接决定了整个工艺流程的处理量。

3) 复杂的磨矿工艺运行状态:相对于常规老三

裂”等紧急情况处理。专家系统是整个 IGC 系统的中枢,包含收集储存的系统运行样本信息、磨矿专家和现场资深工程师经验、核心控制逻辑库等。交互

界面是 IGC 系统的显示界面,客户可以实时在界面看到 IGC 系统全部参数监控状态、控制逻辑动作信息和控制效果反馈,如图 3 所示。

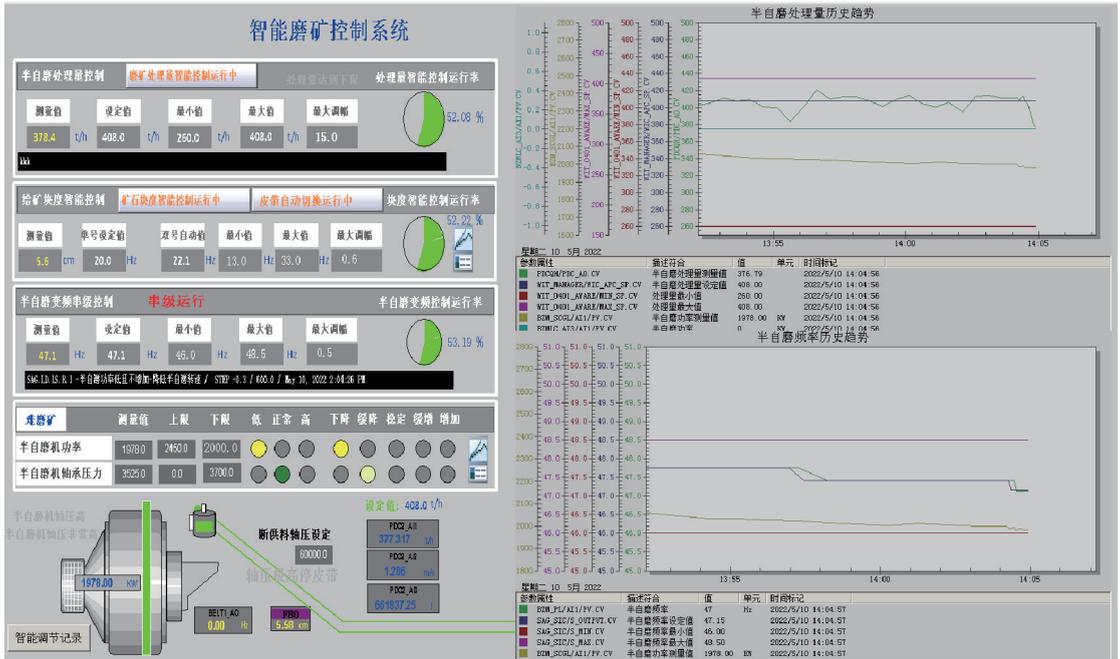


图 3 IGC 系统交互界面

Fig. 3 Interactive interface of intelligent grinding control

2.3 控制方案实现

2.3.1 智能给矿

半自磨机的运行稳定性是整个磨矿系统稳定运行的基础,智能给矿可以保障半自磨机的给矿粒度和给矿量。考虑到粗矿堆储矿的时变性难点,需对粗矿堆下方各个给料口之间进行动态切换,稳定给矿粒度^[15]。针对原矿性质变化和磨矿系统运行情况,定制矿石粒度分析系统,在粗矿堆下的 6 条皮带给料机上方安装高清摄像头,分析不同下料口的给矿粒度,依据长期的操作经验对不同给料机的运行频率分配进行调整;根据整个磨矿系统的设备负荷,最大化优化控制给矿量,通过提高给矿粒度的适配性,保障磨矿系统的稳定运行。

2.3.2 模糊控制规则

在实际生产过程中,多个控制变量参数同时变化,引起磨矿流程及后续选别流程的不稳定性,且变化还表现出一定的惯性滞后,现有控制系统无法对磨矿工况准确测量和监测。为了解决多个控制目标的多变量耦合问题,在信息处理方面引入模糊控制规则,IGC 系统对输入运行工况数据信息(包括给矿

粒度、给矿量、磨矿浓度、转速率、半自磨机功率、半自磨机轴压、球磨机功率、球磨机轴压、矿浆浓度、液位计数据、渣浆泵频率、旋流器运行组数、旋流器压力、粒度分析仪数据等)进行模糊化处理^[16]。输出的清晰化工况信息供 IGC 系统进行判定如图 4 所示。

2.3.3 工艺控制逻辑

通过大数据技术、深度学习技术和人工智能技术对磨矿系统海量历史生产数据、工况信息和人工执行动作进行学习训练,同时结合磨矿专家经验、现场资深工程师经验,形成 IGC 系统的核心控制逻辑。核心控制逻辑基础是在采集磨矿系统运行工况数据并结合专家和现场经验基础上,使用历史设备运行状态样本信息进行比对分析得到当前实际运行工况状态(含低、正常、高和非常高)。

IGC 系统的控制逻辑根据磨机的负载情况和旋流器溢流产品的浓粒度目标,依据专家经验调整控制参数使得整个系统处于最佳工作状态,工艺控制逻辑主要包括水量逻辑控制、磨机逻辑控制和产品浓粒度逻辑控制。

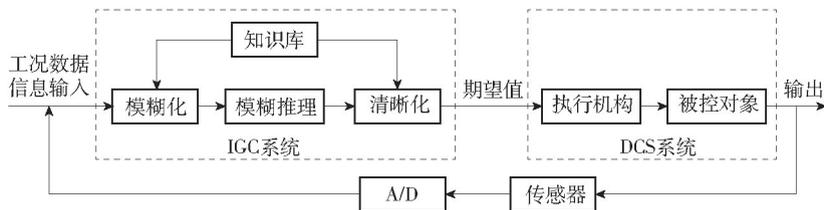


图 4 模糊控制执行图

Fig. 4 Fuzzy control execution diagram

水量逻辑控制设置半自磨机添加水、泵池添加水、球磨机添加水等,构成整个磨矿系统的水量检测、控制和添加,从半自磨机磨矿优化和球磨分级优化 2 个部分调整,根据旋流器溢流产品浓度、给矿量、给矿性质调整各个补加水点、渣浆泵频率和旋流器运行组数。

磨机逻辑控制在设备监测和安全运行基础上,最大化提高设备的处理能力,分别设置给矿量、给矿粒度、磨矿浓度、转速,构成整个磨矿系统的磨机运行检测、控制和优化,根据不同运行工况状态设定参数调整的优先级^[17-18]。其中,磨机变频调速是适应矿石性质变化的重要手段,在处理软矿石时,半自磨机转速低,确保半自磨机功率运行合理;在处理硬矿石时,半自磨机转速高,加大磨矿能力。

旋流器溢流产品浓粒度作为控制系统全流程优化控制的目标,产品浓粒度逻辑以稳定产品浓粒度为原则,使半自磨回路、球磨回路、分级回路之间互相匹配,调整系统内的给矿性质、补加水点和设备操作参数。

结合不同回路设备运行参数、工艺流程信息和仪器仪表数据,对磨矿系统运行工况进行快速判断、智能分析并自动调整控制,实现磨矿系统的无人化、智能化操作,保障磨矿系统稳定高效运行。该优化控制逻辑具有高度的适应性,若单个仪器仪表损坏或数据异常,不影响系统的整体稳定运行,同时具有高度的通用性,适用于多种不同磨矿工艺系统,包括但不限于半自磨+球磨流程、常规破碎+球磨流程、单段半自磨流程、球磨+球磨流程等。IGC 系统运行控制流程见图 5。

3 应用效果

IGC 系统在某多金属选矿厂投入运行 3 年以来,各项控制参数和工艺指标都得到稳步提升。

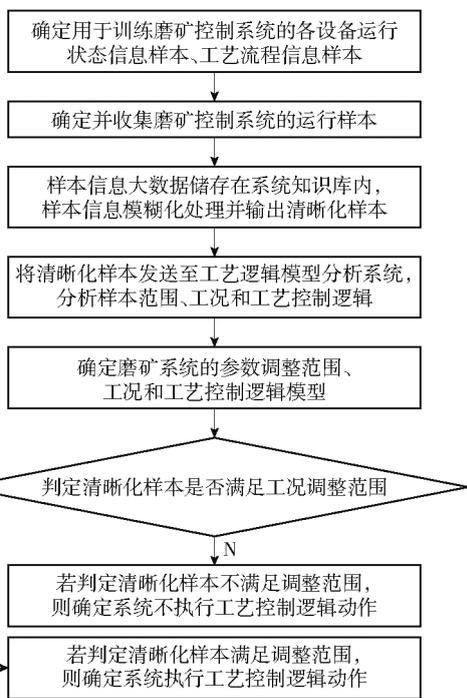


图 5 IGC 系统运行控制流程

Fig. 5 Flowsheet of IGC operation control

3.1 控制逻辑

控制逻辑的运行,使得现场工艺控制更加稳定。半自磨机(功率高)控制逻辑执行数据见表 1。

从表 1 可知,随着半自磨机的功率不断提高,功率逐渐达到设定上限值,首先触发的控制逻辑为半自磨机的给矿粒度调节,粗矿堆下皮带放矿机由 2 号、3 号自动切换为 2 号、1 号运行;确定半自磨机运行频率已在上限 50 Hz;半自磨磨矿浓度由 72.79% 降低至 67.85%;随着半自磨机功率继续上升,半自磨机给矿量逐步降低,由 408 t/h 左右降低至 355 t/h 左右。以上 4 个动作完成了半自磨机功率高时的控制逻辑触发和执行。

3.2 IGC 系统参数与浓粒度

IGC 系统智能调节参数变化如图 6 所示。

表 1 半自磨机(功率高)控制逻辑执行数据

Table 1 Control logic execution data of the semi-autogenous mill (high power)

时间	皮带 1	皮带 2	矿石粒度 F_{80}/mm	瞬时输送能力/ $(\text{t}\cdot\text{h}^{-1})$	排矿浓度/ %	运行功率/ kW	半自磨机变频器 频率/Hz
18:20:00	2	3	54.63	408.54	72.79	2 249.00	50.00
18:25:00	2	1	41.42	407.57	72.54	2 274.15	50.00
18:30:00	2	1	42.33	409.46	71.81	2 330.10	50.00
18:35:00	2	1	41.67	386.28	69.72	2 377.52	50.00
18:40:00	2	1	41.56	355.66	67.85	2 408.00	50.00

从图 6 可知,结合 5 月 8 日该选矿厂的生产计划与矿石性质分析,IGC 系统始终维持处理能力在设定的最高值,由于给矿粒度或者硬度的变化,半自磨机功率一直在控制设定范围内波动,未出现因功率过高问题导致处理量降低的工况。其中,16:40~17:40 时段内,随着半自磨机运行功率下降,半自磨机转速随之下降,由 48 Hz 逐步降低至 46 Hz,给矿粒度通过皮带给料机切换逐渐增加,配合水量逻辑调整控制,逐步调整半自磨机工况进入正常范围状态,从功率、轴压、转速、给矿粒度的曲线可以看出参

数间的变化具有一定的滞后性,其中功率和轴压基本同步变化,转速的变化较功率变化表现出相同趋势和一定滞后;00:40~1:40 时段内,随着半自磨机运行功率上升,半自磨机转速随之增加,由 48 Hz 逐步增加至 49.5 Hz,给矿粒度通过皮带给料机切换随之下降,配合水量逻辑调整控制,控制半自磨机功率上升使其维持在 2 000 kW 左右。不同工况状态下 IGC 系统实现了控制参数的智能优化调整,保障了磨矿系统的稳定高效运行。

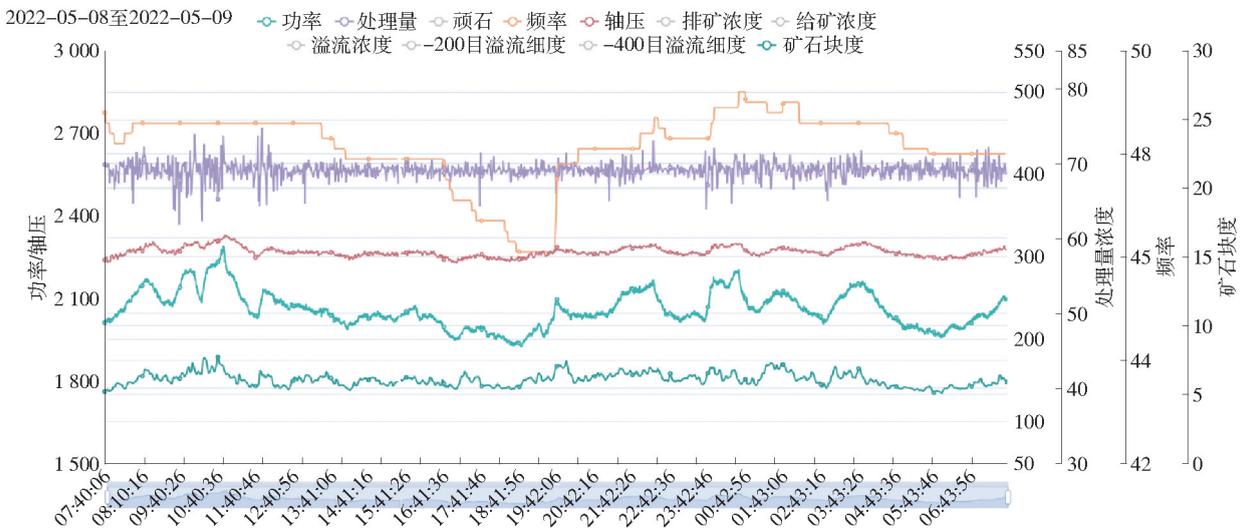


图 6 IGC 系统智能调节参数变化

Fig. 6 Change of intelligent adjustment parameters of IGC

根据该多金属选矿厂 1 个月内 IGC 系统操作模式和人工操作模式的性能对比,在原矿性质相近时,IGC 系统投用后磨矿系统的处理能力由投用前的 380.69 t/h 提升至 393.68 t/h,IGC 系统操作模式下原矿处理量较人工操作模式提高 3.41%,IGC 系统

可以在相同生产计划下处理更多矿石,在入选品位不变的情况下,入选金属量保持了大幅增长;磨矿产品浓度和粒度方面,采用 DCS 报表中每半小时数据平均值进行统计分析,IGC 系统操作模式下磨矿产品浓度合格率较人工操作模式提高 4.58 个百分点

(控制浓度 39% ~ 41%), 磨矿产品粒度合格率较人工操作模式提高 3.34 个百分点(控制粒度 - 200 目含量占 68.50% ~ 70.50%), 显著改善磨矿产品的浓粒度合格率, 降低了后续选别流程的生产波动, 提高分选效率。IGC 系统投入前后磨矿产品浓度和粒度合格率分别如图 7、图 8 所示。

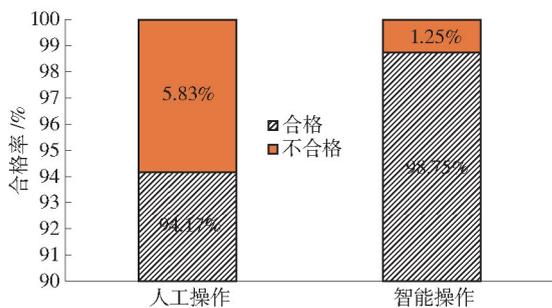


图 7 IGC 系统投入前后磨矿产品浓度合格率

Fig. 7 Qualified rate of grinding product concentration before and after IGC input

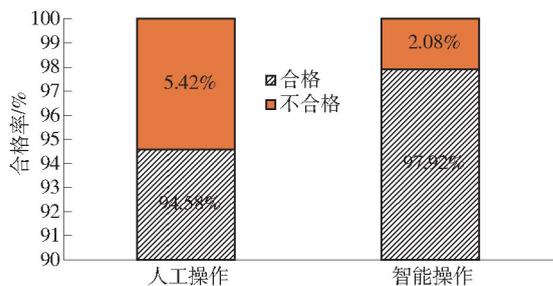


图 8 IGC 系统投入前后磨矿产品粒度合格率

Fig. 8 Qualified rate of particle size of grinding products before and after IGC input

4 结论

本文针对某多金属选矿厂在复杂矿石性质下, 半自磨 + 球磨(SAB)工艺流程难以稳定优化运行的突出问题, 研究并开发了一套基于大数据与专家经验深度融合的智能磨矿控制系统, 即 IGC(Intelligent Grinding Control)系统, 为解决传统磨矿过程控制中的自适应难题提供了新的解决方案, 通过复杂运行工况的应用验证, 得出以下主要结论。

1) 提出了一条切实可行的智能磨矿控制技术路径。IGC 系统摒弃了对传统数学模型的依赖, 创新性地构建了一种以历史数据和当前数据驱动为核心、融合工艺专家知识的智能控制逻辑。该系统通过实时工况识别与靶向参数调整, 共同赋能工艺控

制逻辑(水量逻辑控制、磨机逻辑控制、产品浓粒度逻辑控制)。工业实践表明, 该技术路线响应迅速、适应性强, 在给矿性质波动的复杂条件下具有高度的可行性与稳定性。

2) 获得了一套可量化的关键工艺优化样本参数集。研究揭示了转速率、磨矿浓度、给矿粒度与给矿量和设备操作参数等多变量之间的协同作用机制。通过 IGC 系统的自优化调整, 得出了一套能使磨矿系统处理能力最大化的最佳操作参数集。稳定运行数据证实, 应用该参数集可确保磨矿产品浓粒度指标持续稳定在合格范围内, 为同类流程的优化控制提供了重要参考。

3) 完成了系统的工业应用验证并取得了显著效益。IGC 系统实现了从给矿粒度智能配比到工艺参数优化的全流程闭环控制。现场运行结果表明, 系统投运后, 原矿处理量提升 3.41%, 磨矿产品浓度与粒度合格率分别提高 4.58 个百分点和 3.34 个百分点。这不仅有效提升了产品质量, 还显著降低了操作人员的劳动强度。IGC 系统及其控制策略对于处理原矿性质复杂的多金属矿石具有良好的适用性与推广价值。

[参考文献]

- [1] 朱立, 姜观辉, 李娜, 等. 铜渣选矿生产工艺流程优化[J]. 绿色矿冶, 2023, 39(6): 62 - 67.
- [2] 周俊武, 徐宁. 选矿自动化新进展[J]. 有色金属(选矿部分), 2011(21): 47 - 54, 63.
- [3] 翟建波, 李永生, 张宝金, 等. 地下金属矿山智能建设系统架构设计与应用[J]. 中国矿山工程, 2024, 53(2): 76 - 83.
- [4] 桂华明. 浮选槽矿浆液位智能控制系统在钛精矿浮选的应用[J]. 有色矿冶, 2024, 40(1): 38 - 40.
- [5] 王威, 纪翠翠, 谢贤, 等. 我国选矿自动化技术研究进展[J]. 化工矿物与加工, 2024, 53(8): 73 - 82.
- [6] 钱杰, 魏镜弢, 王家涛. 球磨机给矿量的智能控制[J]. 化工自动化及仪表, 2019, 46(7): 523 - 527.
- [7] 于云鹏, 王岩. 磨矿分级过程模糊控制研究与仿真[J]. 金属矿山, 2017(1): 149 - 153.
- [8] 葛鹏, 黄宋魏, 于桂明, 等. 磨矿分级控制系统设计及应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2016(2): 75 - 78.
- [9] 刘道喜, 杨佳伟, 邹国斌, 等. 磨矿过程动态多目标优化方法研究及应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2024(3): 115 - 121.
- [10] 刘鹏南, 霍世伟, 代淑正. 一种基于模糊控制的磨矿动态优化系统: CN201920804200.0[P]. 2020-05-05.

- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 邹国斌, 王庆凯, 徐宁, 等. 基于物料平衡和智能工况识别的磨矿分级专家系统[J]. 有色金属(选矿部分), 2015(6): 74-77, 87.
- [14] 杨松荣. 自磨半自磨磨矿工艺及应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2019.
- [15] 董明. 利用堆矿粒度偏析现象提升碎磨效率[J]. 现代矿业, 2020, 36(5): 249-254.
- [16] 薛洁. 模糊自调整二自由度PID控制器及在磨矿分级中的应用[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2002.
- [17] 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.
- [18] 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.

Research on application of intelligent grinding control in a polymetallic ore concentrator

ZHAO Chenyang¹, HE Rongquan¹, YOU Tengsheng¹, HAN Bin², FU Haitao²

(1. China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China;

2. Yunnan Hualian Zinc and Indium Co., Ltd., Wenshan 663701, China)

Abstract: The multi-metallic concentrator has long been challenged by highly variable ore properties, frequent manual adjustments, and unstable control in China, which severely constrained both product quality and production efficiency in the grinding circuit. To address these issues, this study developed an intelligent grinding control (IGC) system capable of adaptive optimization, aiming to enhance operational performance and production intelligence. The system leverages a strategy that integrates expert knowledge with data-driven fuzzy control and process logic to achieve precise, multi-parameter, and multi-loop cooperative control with self-adaptive adjustment in the grinding process. After on-site production practice, the IGC system operates stably and reliably, increasing the processing capacity of the raw ore by 3.41%, improving the qualification rate of grinding product concentration by 4.58 percentages, and increasing the qualification rate of grinding product particle size by 3.34 percentages. These outcomes effectively met the plant's goals of increasing production quality, reducing labor intensity, and enhancing economic performance. The system provides a reliable technical pathway and a practical reference for the intelligent upgrading of similar concentrator.

Keywords: concentrator; intelligent grinding; fuzzy control; SAB process; grinding operation condition; throughput; product particle size; product density ▲