

doi:10.3969/j.issn.1671-9492.2021.03.013

多源矿点配矿的 SAB 流程磨矿优化控制技术应用

张兴勋¹, 叶志勇¹, 饶明生¹, 黄兆驱¹, 杨佳伟^{2,3}, 邹国斌^{2,3}, 罗峰⁴

(1. 紫金矿业集团股份有限公司, 福建 上杭 364200;

(2. 矿冶过程自动控制技术国家重点实验室, 北京 100160;

(3. 矿冶过程自动控制技术北京市重点实验室, 北京 100160;

(4. 福建金岳慧创智能科技有限公司, 福州 350000)

摘 要: 选矿生产管理过程自动化、信息化与智能化的融合技术, 已经成为进一步优化选矿厂资源配置, 全面提升选矿厂安全生产、经营管理科学化、现代化水平的有效手段。以某选厂典型的 SAB 流程为例, 介绍了一套优化控制系统在多源矿点配矿磨矿分级流程中的应用方法和使用效果。在目标流程中通过采用智能给料、专家系统、模糊控制和参数自适应等先进的检测和过程控制技术实现了磨矿生产流程的智能控制。

关键词: 磨矿; 分级; 半自磨机; SAB 流程; 优化控制; 专家系统

中图分类号: TD921⁺.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-9492(2021)03-0075-08

Application of Grinding Optimization Control Technology in SAB Flowsheet with Multi-source Ore Point Blending

ZHANG Xingxun¹, YE Zhiyong¹, RAO Mingsheng¹, HUANG Zhaoqu¹,
YANG Jiawei^{2,3}, ZOU Guobin^{2,3}, LUO Feng⁴

(1. Zijin Mining Group Co., Ltd., Shanghang 364200, Fujian, China;

2. State Key Laboratory of Process Automation in Mining & Metallurgy, Beijing 100160, China;

3. Beijing Key Laboratory of Process Automation in Mining & Metallurgy, Beijing 100160, China;

4. Fujian Kingop Intelligent Technology Co., Ltd., Fuzhou 350000, China)

Abstract: The integration technology of automation, informatization and intellectualization in mineral processing production management process has become an effective means to further optimize the resource allocation of mineral processing plants, and comprehensively improve the level of safety production, scientific management and modernization of mineral processing plants. Taking the typical SAB flowsheet of a concentrator as an example, the application method and effect of a set of optimal control system in the flowsheet of multi-source ore point ore blending and grinding classification are introduced. In the objective process, the intelligent control of the grinding process is realized by using the advanced detection and process control technologies such as intelligent feeding, expert system, fuzzy control and parameter self-adaptation.

Key words: grinding; classification; SAG mill; SAB; process optimization; expert system

随着资源的持续枯竭和环保、生产成本压力的不断增加, 矿山企业的生产模式正在由人工经验驱动的粗放型生产模式向知识和数据驱动的精细化生产模式转变。通过自动化、信息化与智能化技术在

选矿生产过程的融合, 结合管理流程的优化再造, 已经成为进一步优化企业的资源配置, 全面提升企业在安全生产、经营管理等方面的科学化、现代化水平的有效手段。同时, 基础工业流程自动化技术的普

收稿日期: 2021-02-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFE0105000)

作者简介: 张兴勋(1975-)男, 福建省龙岩市人, 学士, 高级工程师, 主要从事有色金属选冶方面的研究工作。

及大数据、智能控制技术的快速发展也为选矿精细化操作提供了基础条件和技术支撑^[1]。

国外某大型矿山结合其选矿厂多源矿点配矿导致的入选矿石品类较多、品位波动较大、工艺流程变化快的特点,通过研究各项选矿参数和指标的变化规律,利用基于先验信息和自然分级的磨机智能给料技术、基于筒体振动信号特征分析的磨机负荷智能监测技术、基于专家模型和模糊规则的磨矿优化控制技术、基于统计聚类的磨矿控制算法参数自适应技术等,实施了磨矿生产流程的智能控制,实现了磨矿生产过程工艺数据的自动采集、生产工况智能诊断和操作参数的自动设定。该技术的实施稳定了生产流程、增加了磨矿生产处理量、降低了生产成

本,进一步优化了资源配置。

1 工艺流程

该选厂设计规模日处理矿石 5 000 t,磨矿工艺采用“半自磨+球磨+旋流器”(即 SAB)工艺流程,顽石直接返回半自磨,不设顽石破碎,半自磨机规格为 $\Phi 7.0\text{ m} \times 3.5\text{ m}$,球磨机规格为 $\Phi 4.5\text{ m} \times 7.03\text{ m}$ 。半自磨排矿采用滚筒筛筛分,筛上顽石经皮带倒运至半自磨机。筛下矿浆进入磨矿泵池后泵送至 1 组 6- $\Phi 660$ 水力旋流器,旋流器沉砂返回球磨机进行磨矿,球磨机排矿进入磨矿泵池与旋流器组形成闭路。旋流器溢流进入浮选作业,磨矿产品细度为 -0.074 mm 占 66%,矿浆浓度为 32%。

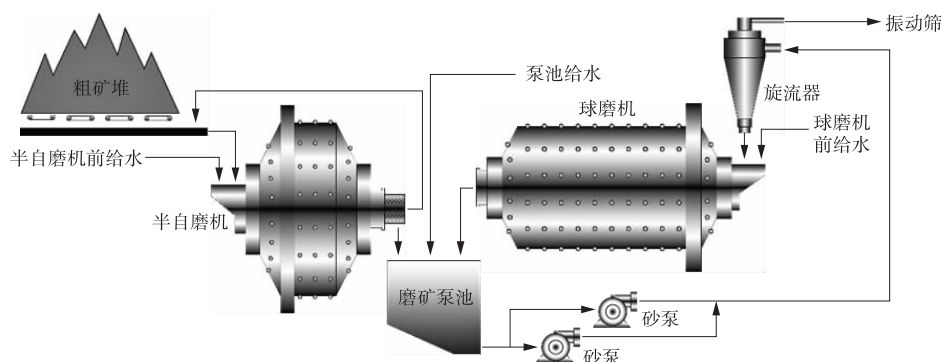


图 1 SAB 工艺流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SAB process

区别于传统的破碎磨矿分级流程,该流程具有以下特点和控制难点:

1)原矿性质波动大:原矿来源复杂,选矿入选矿石为硫化铜和氧化铜配矿,硫氧混合比例变化快,导致原矿硬度、块粉比和可磨性变化大;当地气候条件导致旱季与雨季降水区别明显,磨矿料堆露天配置,导致原矿含水量随季节波动大。给矿波动若不加以控制,将给系统运行带来很大扰动,导致磨矿和分级产品质量在很大范围内波动。

2)生产任务重:为了保证生产金属量的目标,选矿流程生产任务较重,必须同时保证处理能力和原矿品位。磨矿作为选矿的关键生产流程,磨矿产品的质量直接决定了后续选别流程的效率,同时磨矿产品的数量也决定了整个生产流程的矿石总量。

3)半自磨机运行状态多变:半自磨机是一种破碎磨设备,同时兼有破碎和磨矿两种功能,提升条和排矿窗口的设计导致其填充率波动范围很大,运行参数如功率和轴压等随工况的不同变化很大。在工艺操作时需要及时的根据工况的变化情况进行

针对性的调整,才能够保证主体设备运行在最佳状态。

4)操作人员经验不足:由于技术水平与操作经验欠缺,责任心不足,国外操作人员很难准确的判断出磨机的运行状态,无法及时做出正确的生产决策和在正确的时间点上进行操作,从而影响流程整体的运行效率和稳定性。不同生产操作人员之间的经验和习惯的不同,也会导致不同的生产班次之间工艺指标和设备状态的波动,影响选厂整体生产的稳定。

以上特点导致 SAB 流程很难稳定在最佳工作状态,尤其是半自磨/球磨等大型设备的效率无法发挥到最佳。

2 控制系统整体设计

磨矿专家系统充分利用当前磨矿工艺配置的过程检测仪表、执行机构和在线分析仪器的数据,根据磨机的实际负荷和运行状况,自动调整磨矿系统给矿、给水的设定值,实现生产工艺参数的自适应调整,减少人为操作,同时对操作的稳定性、可靠性和

生产指标变化情况进行统计监控^[2]。

1) 针对多源矿点配矿的问题,分析原矿堆的自然分级特性,并结合破碎配矿的先验知识,确定不同下料口的给矿特性,按照半自磨不同的工作状态实现智能给料。

2) 将基于筒体振动信号特征的磨机负荷智能监测技术应用于半自磨机和球磨机,实现关键生产设备负荷的实时监测。

3) 开发一套磨矿专家系统控制算法,通过模糊算法建立负荷特征值、电流等生产参数与磨矿生产过程运行状态的对应模型,实现磨矿生产工况的智能诊断和自动操作。

4) 通过统计聚类分析对不同生产条件下的生产状态进行分类,区分出雨季、旱季等各类生产状态,并针对不同的控制对象实现控制算法和参数自适应,提高系统的适用性。

3 基于先验信息和自然分级的磨机智能给料

给矿量和给矿粒度的精准控制是半自磨机高效、稳定运行的前提,也是整个磨矿过程专家控制的基础。实际生产过程中,考虑到空料、设备检修、调

整磨机工况等因素,需要在各个下料口之间进行切换,若不加以控制,将给半自磨的给矿量引入较大扰动,直接影响半自磨工作的稳定性。同时,由于多源矿点配矿的影响,原矿的块度、硬度等性质变化较大,再加上上端布料和下料过程导致的自然分级作用,粗矿堆各下料口的矿石块度会有明显的区别,如不精细控制,半自磨给矿块度将波动较大,同样影响磨矿过程的稳定性。

针对此情况,利用矿堆的自然分级原理,量化操作经验建立下料块度与料口位置的预测模型,对给料机的频率分配结果进行开环调整,稳定给矿的块度,通过最大化提高前端流程的稳定性使后续流程的控制规则简化。

智能给料的难点在于料仓储料量的时变性、各给矿机的差异性以及现场多种异常情况的突发性。原矿的采集面积较大,在不同位置开采的矿石性质也不同。实际生产中,选厂根据矿石中铜品位和粒度的不同将原矿分为 $F_2 \sim F_5$ 四种矿石,然后根据浮选工艺流程的特点进行配矿调度。针对这一问题,控制系统结合破碎调度的先验知识,对不同块粉比的原矿采用不同的控制策略和控制参数,保证磨矿生产的稳定性。

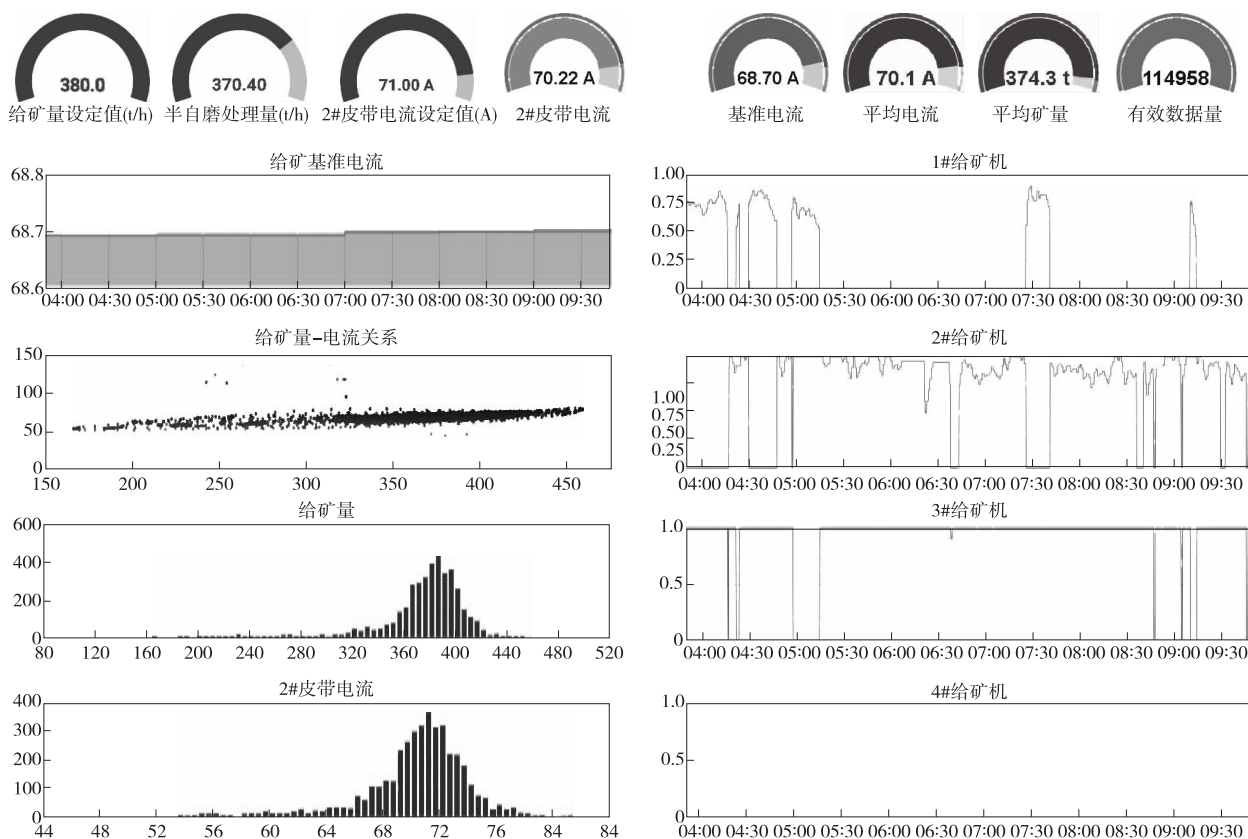


图2 智能给料系统界面

Fig. 2 Interface of intelligent feeding system

对于粉矿含量较高的原矿,适当提高半自磨磨矿浓度,保证半自磨的混合充填率,防止出现“砸衬板”的情况,同时延长半自磨磨矿时间,平衡半自磨机与球磨机负荷;而对于块矿含量较高的原矿,适当降低磨矿浓度,提高半自磨电流的控制区间,降低给矿量的上限,使半自磨运行在一个比较稳的工作点,防止出现“涨肚”的情况,减小系统波动。

在不安装矿石块度分析系统的前提下,智能配矿依赖下料块度与下料口位置的预测模型。不同块度的矿石在堆积时会出现边缘块度大、中间块度小的自然分

级现象,利用该原理可对不同下料口的矿石块度大小进行预测,对给料机的频率分配结果进行开环调整,在保持给矿量稳定的前提下,实现给矿块度的基本稳定。

4 基于筒体振动信号特征的磨机负荷智能监测

磨机负荷监测设备通过安装在磨机筒壁上的传感器实时采集其振动信号,并通过特殊的算法进行计算,得到磨机负荷的特征值,从而对磨机的工作状态进行监测。

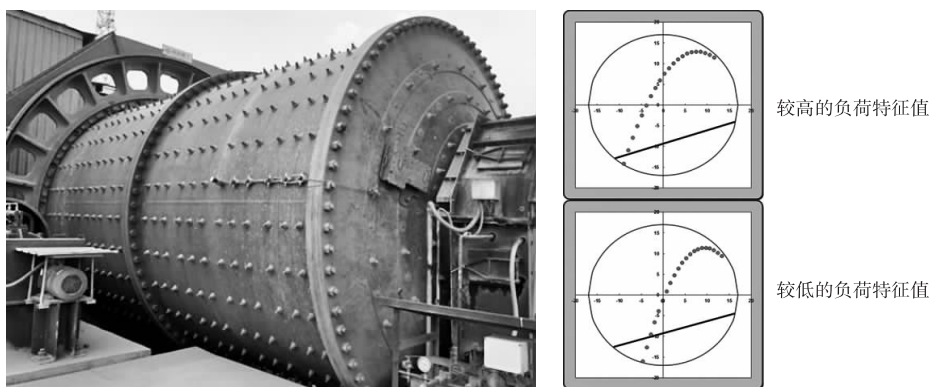


图3 磨机负荷监测设备和不同负荷状态下的磨机负荷检测数据

Fig. 3 Mill load monitoring equipment and mill load detection data under different load condition

通过对于不同工况下典型振动波形的比较可以明显看出,尽管每个周期的振动信号具有一定的随机性,但是振动信号的波形大体形状十分相似,整体表现出一定的规律性。每个周期的波形呈一个中间大两头小的纺锤形状,纺锤中间波形幅值较大是因为球磨机旋转时钢球抛落到传感器所在的衬板时产生更大的加速度所造成的,而随着磨机负荷不同,导致磨机内部物料的运行轨迹发生变化,磨机筒壁上的振动信号也发生相应的改变^[3]。

通过对大量典型振动波形的统计分析,磨机筒壁振动信号的分布大致满足以下分布特点:

$$p(x|\mu,\beta) = \frac{1}{2\beta} \exp\left(-\frac{|x-\mu|}{\beta}\right) \quad (1)$$

其中, μ 是位置参数, $\beta>0$ 是尺度参数。

通过对波形参数提取特征值,并与现场工况对比发现,综合该特征值和磨机电流等表征量的变化情况能够比较及时和准确的判断出半自磨和球磨机工况的变化情况,从而及时做出正确的操作响应。

5 基于专家模型和模糊规则的磨矿优化控制

要实现磨矿过程优化,就必须对磨机的工况进行准确的监测,但由于磨机特殊的工作状态和工作

环境,很多与磨机运行状态相关的关键参数都无法实时准确地测量。磨矿分级过程的控制问题本质上可以归结为同时满足多个控制目标的多变量控制问题,在这种情况下,基于规则和模糊控制的专家系统是一种有效的控制方式。专家系统是在狭窄领域,以规则的形式来表达知识,使用符号推理来解决问题。由于在选矿生产过程中专家系统要求能处理不完整、不确定和模糊的数据,所以在系统中引入了模糊控制算法。首先通过模糊表和隶属度函数对观测量进行模糊化处理,然后通过专家系统按照控制规则进行决策,并对决策结果进行反模糊化从而得到相关的控制量^[4]。其算法结构如图4所示。

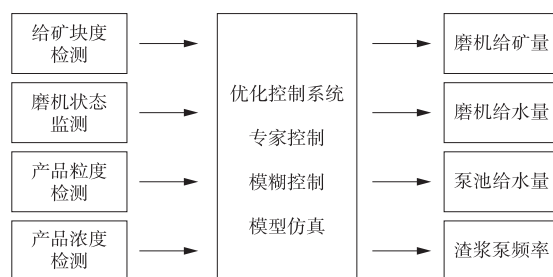


图4 磨矿优化控制算法结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of grinding optimization control algorithm

磨矿优化控制算法根据磨机的负载变化情况及溢流粒度及时调整操作条件,使得 SAB 流程工作在最佳工作点附近,从而保证整个磨矿工序的操作智能化,实现生产安全、平稳,并且满足浮选工艺流程的供矿粒度和浓度^[5]。

磨矿优化控制包含智能给矿规则控制、半自磨规则控制、分级规则控制、磨矿协同规则控制四个优化控制模块。独立的模块设计有利于控制目标在一定程度上相互解耦,提高控制的可靠性和有效性,保证整体目标的最优。

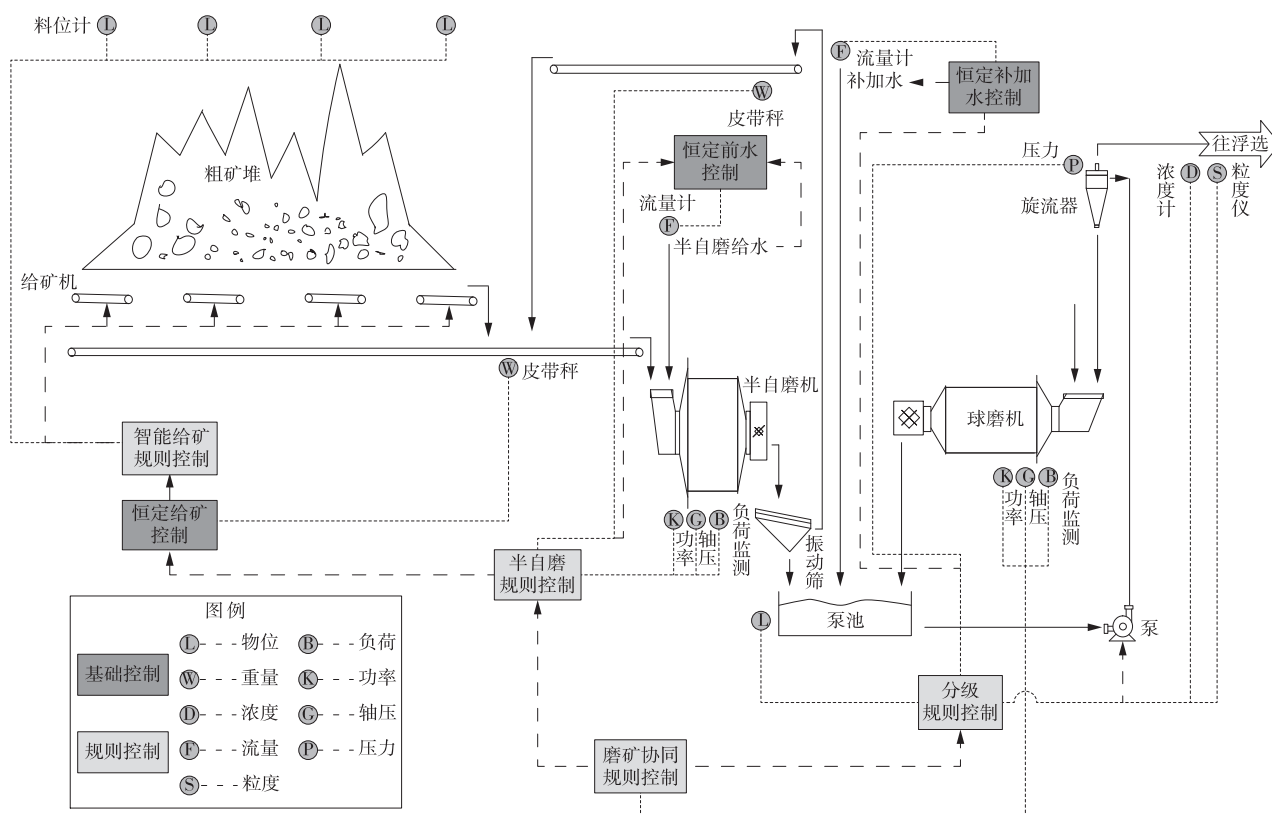


图5 磨矿优化控制算法结构框图

Fig. 5 Structure block diagram of grinding optimization control algorithm

磨矿工艺流程优化控制的策略如下:

1)磨矿工艺流程总体分为“半自磨机—圆筒筛”和“球磨机—旋流分级”两个生产工艺回路;因此优化控制的实施也从半自磨机磨矿优化和球磨分级优化两个部分入手。半自磨机磨矿优化主要针对半自磨机工作状态的优化,主要调整的变量为半自磨机的给矿量和前给水量;而球磨机分级优化主要针对旋流器和磨矿泵池的状态,主要调整的变量为泵池的补加水和渣浆泵的频率。

2)稳定半自磨机的生产流程是优化控制的基本条件,通过对流程不同状态的识别,采用不同的控制参数和控制规则,保证系统在不同工况下稳定运行在不同的工作点,通过最大化前端流程的稳定性简化后续流程的控制。在 SAB 全流程安全生产运行的前提下,优先保证半自磨机工作在

最佳状态,同时通过“球磨机—旋流分级”回路的调整,使球磨机工作在与之相匹配的最佳工作状态。

3)当球磨机工况超出正常工作范围时,首先在“球磨机—旋流分级”回路的内部进行调整,改善其工作状态,当回路内部无法有效调整时,再进行全流程的协同控制,调整“半自磨机—圆筒筛”回路。分级优化以稳定旋流器溢流的浓细度为原则,充分利用泵池的缓冲作用,使球磨机和旋流器工作在与半自磨机回路相匹配的最佳工作状态。

根据磨矿过程优化控制的实际要求,优化控制软件主要功能包括数据分析和显示、生产过程实时监控和设定优化、历史趋势定制和过程分析、磨矿过程的动态显示和模拟、磨矿生产要素的实时分析等。优化控制软件界面如图 6 所示。

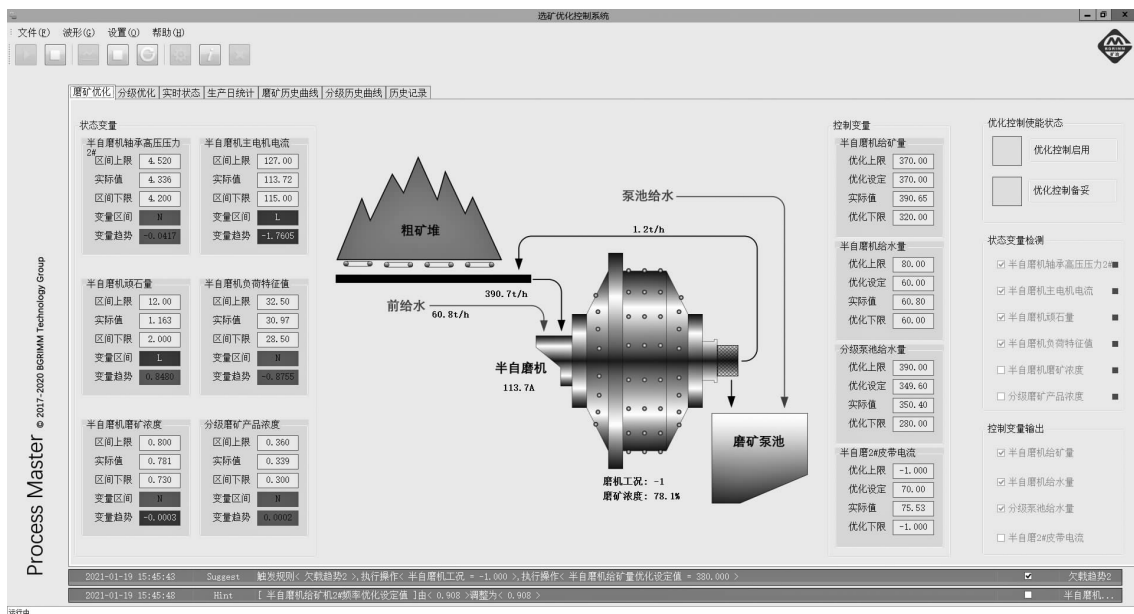


图6 优化控制系统软件界面

Fig. 6 Software interface of optimization control system

6 基于统计聚类的控制算法参数自适应

由于当地气候条件导致旱季与雨季降水区别明显,而磨矿料堆露天配置,导致原矿含水量随季节波动大。旱季时原矿含水量在8%~10%左右,而在雨季降水量较大时,原矿含水量可以达到15%左右。这给磨矿生产控制带来了很大的干扰,影响优化控制系统在雨季的控制效果。为提高控制系统的适应性,需要实现控制算法参数的自适应。

模式识别,也被称为分类或者是统计分类,其研究目的就是为构建能够自动判别输入数据类别信息的分类系统。聚类分析是一种无监督的模式识别方法,能够探索输入数据的内部群组结构,将数据分成不同的群集(簇),这些数据对象在同一群集中彼此

类似,并且与其他群集中的对象不相似。通过这一数据统计的方法,分别对由于季节变换原因导致的原矿含水量变化问题和由于处理量变化导致的旋流器开启组数变化问题进行了研究,并通过工况分类的方法实现了控制算法和参数的自适应控制,提高了控制系统在不同工况下的控制精度和适用性^[6-7]。

对一年的历史数据进行了聚类分析,分别得到了旱季和雨季等多个不同稳态下的磨矿流程的工作点:

1)在历史数据中随机选择K个初始质心,设定每一个质心为一个磨矿过程的稳态工作点;

2)将每个时间点的所有状态变量的值的集合称为一个观测,用下述公式计算每个观测到质心之间的距离:

$$d(X, Y) = \sqrt[q]{\omega_1 * |X_1 - Y_1|^q + \omega_2 * |X_2 - Y_2|^q + \dots + \omega_n * |X_n - Y_n|^q} \quad (2)$$

其中, $X_1 \sim X_n$ 为质心处所选择的状态变量的值; $Y_1 \sim Y_n$ 为观测所选择的状态变量的值; N 为状态变量的数据组数; $\omega_1 \sim \omega_n$ 为权重,根据各个状态变量的相关系数选取; q 为指数,取正整数,计算时根据实际的分类结果调整 q 的取值;

并将每个观测指派到离它最近的质心,与质心形成一个新的工作点;

3)以平均向量重新计算每个工作点的质心;

4)重复步骤2)和步骤3),由此得到 p 个不同的工作状态点 $C_1 \sim C_p$,

$$C = (F, J) \quad (3);$$

其中, $F = \{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7, f_8, \dots, f_n\}$

为磨矿过程状态变量的集合,包括磨机电流、磨机负荷特征值、磨矿浓度、分级泵池液位、磨矿产品浓度、磨矿产品粒度等; $J = \{j_1, j_2, j_3\}$ 为磨矿过程的操作变量集合,包括给矿机频率设定值、给水量设定值、分级砂泵频率设定值等。

在实际控制过程中,控制系统选择24 h内正常生产的磨矿流程(具体限制条件为半自磨机运行电流超过105 A,半自磨机给矿量超过320 t/h,正常生产时间累计超过12 h)数据的平均值作为输入变量,通过模型计算出当前工况的基准电流,再根据给矿量设定值的不同,计算出不同给矿量下实际的控制电流,从而作为优化系统控制的依

据。该算法每 24 h 更新一次基准电流,当原矿含水量发生变化时,基准电流也随之发生变化。控制系统和控制参数根据基准电流的情况自适应的选择不同的控制算法和控制参数,从而提高

了磨矿控制算法在不同季节的控制精度。图 7 为旱季和雨季的不同的给矿量与给矿皮带电流的对应模型,左图为旱季时的模型,右图为雨季时的模型。

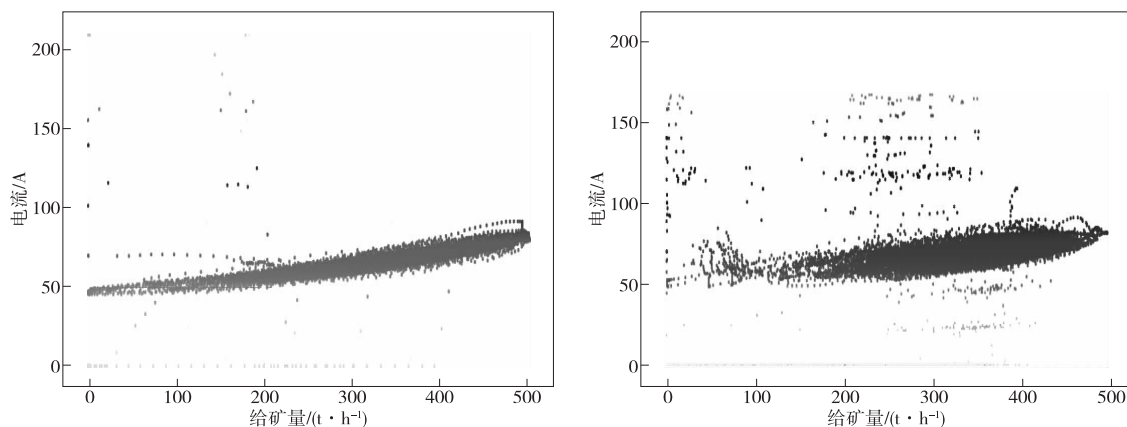


图 7 不同含水量的原矿给矿量与皮带电流模型

Fig. 7 Model of raw ore feed and belt current for different water content

7 应用效果

磨矿优化控制系统在该 SAB 流程实现了生产过程中给矿量、给水量、砂泵频率等操作变量的闭环控制和智能寻优,保障了整个生产流程的安全、稳定、高效运行,目前已经实际运行一年以上。具体应用效果如下:

1) 稳定了生产流程工艺指标,降低了生产过程的异常扰动。专家系统通过对生产流程运行状态的实时智能诊断,及时合理的调整生产操作变量,保证了生产设备运行状态和生产流程工艺参数的稳定,系统投用后各项关键生产工艺指标的波动均降低了 20% 以上。磨矿专家系统针对不同性质的矿石来源,分别将 SAB 流程的各个设备的运行参数稳定在合理的范围内,流程运行的稳定保证了磨矿和分级产品质量的稳定。磨矿专家系统投用后,在工艺设备改进和控制效率提高等的多重作用下,磨矿生产的平均处理量提高了 6.05%,而小时波动率下降了 47.6%,有效地提高了给矿的稳定性;磨机主机电流的波动率下降了 43.30%,轴承压力波动率下降了 35.0%,磨矿生产流程设备和工艺的运行状态更加稳定;同时分级产品 -0.074 mm 粒度指标增加了 1.65%,粒度和浓度的波动率也分别下降了 48.7% 和 35.1%,分级效果显著改善,为流程的稳定提供了良好的基础条件。

2) 提高了流程单位台时的矿石处理量和产品回收率,保证了年产金属量增长。磨矿专家系统能够灵敏的捕捉半自磨机关键运行参数的变化趋势,在

工况改变时能够及时调整台效,最大程度的保证半自磨机运行在合理的负荷状态区间,在稳定工况和保证工艺指标的前提下,提高了流程的生产台效。在选矿工艺持续改进、生产管理持续提升和磨矿专家系统的全面投用的综合作用下,2020 年磨矿生产指标相比 2019 年有了显著的提升,入磨矿量和磨机台效增长显著,投用的统计数据表明,与专家系统投用前相比,优化控制投用后半自磨机的平均台效从投用前的 332.2 t/h 提高到 352.3 t/h,平均提高了 6.05%。在入选品位降低的情况下,金属量仍然保持了大幅的增长。

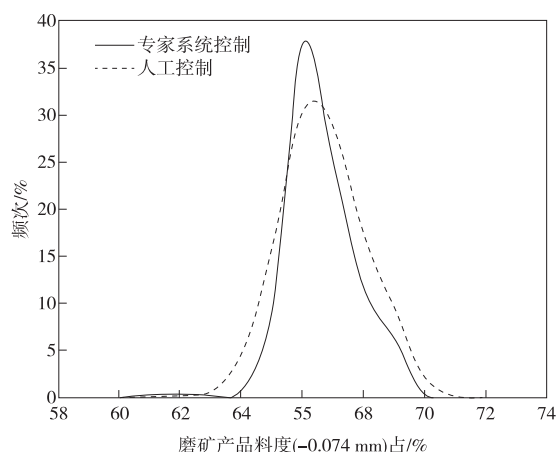


图 8 优化系统投用前后磨矿产品粒度分布统计

Fig. 8 Grinding product size distribution statistics before and after the optimization system is put into operation

表1 磨矿专家系统投用前后生产
参数统计对比(2020年)

Table 1 Statistical comparison of
production parameters before and
after the application of grinding
expert system(2020) /%

变量名称	系统投用前	系统投用后	变化率
分级产品粒度-0.074 mm 含量	65.95	67.04	1.65
半自磨机小时处理量波动率	33.81	17.72	-47.6
半自磨机主机电流波动率	10.39	5.89	-43.3
半自磨机轴承压力波动率	10.78	7.01	-35.0
分级产品粒度-0.074 mm 波动率	6.72	3.45	-48.7
分级产品浓度波动率	12.93	8.39	-35.1

注:波动率=标准差/平均值

3)实现了磨浮流程的闭环自动控制,降低了人工操作强度,提高了劳动生产率,消除了人工操作的差异。系统正式运行以来,磨矿专家系统投用率达到了93.3%。磨矿专家系统投用前,人工操作需时刻关注磨机电流、皮带秤矿量、泵池液位、旋流器顶部压力等参数,并结合个人的判断调节给矿机频率、磨机给水量、旋流器给矿频率等参数,还需频繁的对磨机等主要生产设备进行巡查,判断设备的工作状态,劳动强度大,对操作人员的经验和责任心要求高。专家系统投用后,实现了以上参数的自动调节,对设备的运行状态进行实时监控,保证设备和工艺的正常运行,操作人员对生产流程中的工艺参数、流程及设备状态一目了然,大大减轻了生产班组的劳动强度。同时,通过使用专家系统固化了操作流程,规范了操作参数,减少了由于操作人员习惯和判断标准不同等人为原因导致的不同班次之间的工艺参数波动。

4)对生产过程重要参数进行连锁保护,减少了事故发生率,保证设备和生产工艺的安全稳定运行。磨矿专家系统对半自磨机电流、2#皮带电流、磨机振动负荷、泵池液位等生产关键参数进行实时检测和显示,当设备和工艺出现异常时,控制系统根据工艺要求进行相关处理。具体比如:通过对磨机电流、磨机负荷等参数的实时监控,在磨机超负荷时及时降低处理量避免涨肚,在磨机欠负荷时及时加大处理量避免钢球空砸衬板;通过对给矿皮带电流进行连锁保护,电流超限时自动降低给矿机频率,避免下矿异常压死皮带;在旋流器顶部压力处于合理区间的前提下,通过自动调整分级泵频率,保证泵池液位在安全范围内,避免非计划停电时泵池冒槽等异常情况。

5)减少了磨矿生产和浮选药剂单耗,降低了选

矿综合成本。专家系统通过稳定生产流程运行状态,保证了在不同矿石性质下流程始终运行在经济效益较高的状态,降低了生产单耗,减少了衬板磨损。从磨矿系统包括台效、能耗(电耗、球耗)等工艺参数指标的统计数据看,磨机吨矿电耗平均下降了7.25个百分点,增加了单套衬板使用周期内的矿石处理总量。

8 结论

1)本文以某选厂的典型SAB流程为例,介绍了一套优化控制系统在多源矿点配矿的磨矿分级流程中的应用方法和使用效果。

2)通过采用智能给料、专家系统、模糊控制和参数自适应等先进的检测和过程控制技术,该系统在增强生产流程和设备运行状态的安全性和稳定性、提高磨矿生产效率、降低工人劳动强度等方面产生了显著的效果,为解决海外高品位混合型铜矿无人化、少人化需求、建设智能选厂做出了基础性贡献。

参考文献

- [1] 周俊武,徐宁.选矿自动化新进展[J].有色金属(选矿部分),2011(增刊1):47-54,63.
ZHOU Junwu, XU Ning. New progress in mineral processing automation[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2011(S1):47-54,63.
- [2] 周俊武,徐宁.智能选矿厂架构设计[J].自动化仪表,2016,37(7):1-5.
ZHOU Junwu, XU Ning. Architectural design of the intelligent concentration plant[J]. Process Automation Instrumentation, 2016, 37(7):1-5.
- [3] 杨佳伟,陆博,周俊武.基于振动信号分析的球磨机工况检测技术的研究与应用[J].矿冶,2013,22(3):103-108.
YANG Jiawei, LU Bo, ZHOU Junwu. Research and application of ball mill load monitoring system based on vibration signals analysis[J]. Mining and Metallurgy, 2013, 22(3):103-108.
- [4] 王庆凯,杨佳伟,邹国斌,等.半自磨机优化控制技术研究[J].有色冶金设计与研究,2016,37(3):1-6.
WANG Qingkai, YANG Jiawei, ZOU Guobin, et al. Research on optimization control technology for SAG mill[J]. Nonferrous Metals Engineering & Research, 2016, 37(3):1-6.
- [5] SONG T, YANG T H, ZHOU J W, et al. Process modelling and univariate analysis of comminution circuits[C]//IFAC-Papers on Line, 2018, 51(21):19-23.

(下转第87页)

表 5 闭路试验结果
Table 5 Results of closed-circuit tests

/%

产品名称	产率	品位				回收率			
		Cu	Au ¹⁾	Ag ¹⁾	S	Cu	Au	Ag	S
铜精矿	8.45	19.05	7.46	42.00	39.57	90.07	60.43	41.20	18.07
硫精矿	27.90	0.34	0.91	7.21	41.28	5.30	24.32	23.34	62.22
尾矿	63.65	0.13	0.25	4.80	5.73	4.63	15.25	35.46	19.71
原矿	100.0	1.79	1.04	8.62	18.51	100.0	100.0	100.0	100.0

3 结论

1)甘肃某多金属矿可综合回收利用的有价值元素为铜、金、银、硫;铜物相中次生铜含量较高;矿石金属矿物以黄铁矿为主,黄铜矿与黄铁矿嵌布关系密切,交代包裹连生较为普遍;金主要赋存在黄铜矿、黄铁矿中,银主要赋存在黄铜矿、黝铜矿中。

2)针对该矿石的性质特点,试验采用铜硫混合浮选—粗精矿再磨—铜硫分离的工艺流程和对次生铜矿物捕收性能较好的新药剂酯-11,获得了铜品位 19.05%、铜回收率 90.07%、金品位 7.46 g/t、金回收率 60.43%、银品位 42.00 g/t、银回收率 41.20% 的铜精矿和硫品位 41.28%,硫回收率 62.22% 的硫精矿。

3)本试验确定的工艺流程结构合理,药剂种类少,试验指标良好,为该资源的回收利用提供了技术依据。

参考文献

[1] 张波. 硫化铜矿石浮选技术发展概述[J]. 铜业工程, 2012(2):31-37.
ZHANG Bo. Overview of flotation technology development of copper sulfide ores [J]. Copper Engineering, 2012(2):31-37.
[2] 周玉才. 某难选低品位铜硫矿选矿工艺研究[J]. 有色矿冶, 2013(2):31-34.

ZHOU Yucai. Study on beneficiation technology of a refractory low-grade copper-sulfur ore[J]. Non-ferrous Metals Mining and Metallurgy, 2013(2):31-34.
[3] 李宗站, 刘家弟, 王振玉, 等. 国内铜硫浮选分离研究现状[J]. 现代矿业, 2010(3):12-15.
LI Zongzhan, LIU Jiadi, WANG Zhenyu, et al. Research status of copper-sulfur flotation separation in China[J]. Modern Mining, 2010(3):12-15.
[4] 曾令明, 欧乐明, 李文涛, 等. 铜硫浮选分离研究进展[J]. 有色金属(选矿部分), 2017(2):5-8.
ZENG Lingming, OU Leming, LI Wentao, et al. Study the separation of copper and sulfur without lime on a porphyry copper molybdenum deposit [J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2017(2):5-8.
[5] 赵红芬, 彭时忠, 王周和, 等. 伏牛山高硫铜锌矿选矿工艺研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2015(3):9-14.
ZHAO Hongfen, PENG Shizhong, WANG Zhouhe, et al. Experimental study on beneficiation of a refractory copper ore with high sulfur content [J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2015(3):9-14.
[6] 冯博, 朱贤文, 彭金秀, 等. 有色金属硫化矿中伴生金银资源回收研究进展[J]. 贵金属, 2016(6):70-76.
FENG Bo, ZHU Xianwen, PENG Jinxiu, et al. Research progress on recovery of associated gold and silver resources in nonferrous sulfide ores [J]. Precious Metals, 2016(6):70-76.

(上接第 82 页)

[6] 邹国斌, 王庆凯, 余刚. MATLAB 仿真在选矿过程控制中的多层次运用[J]. 有色冶金设计与研究, 2015, 36(6):35-37.
ZOU Guobin, WANG Qingkai, YU Gang. Multi-level application of MATLAB simulation in mineral processing process control [J]. Nonferrous Metals

Engineering & Research, 2015, 36(6):35-37.
[7] 瞿安辉, 陈建文. 半自磨(SABC)流程与常规碎磨流程对比分析[J]. 有色金属(选矿部分), 2020(3):85-88.
QU Anhui, CHEN Jianwen. Comparative analysis of SABC process and conventional grinding process [J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2020(3):85-88.