

矿山浮选智能化系统研发与应用

吴红梅¹, 胡一多¹, 林安川¹, 蔡正鹏²

(1. 昆明工业职业技术学院; 2. 玉溪大红山矿业有限公司)

摘要:针对矿山浮选工艺过程中的浮选泡沫质量判断、浮选工艺调整依赖人工实时监控及操作人员的经验和手动操作,其效率和精确度都不高的问题,研发了一套真正能够长期投入使用,为生成指标稳定提高带来实质性帮助的浮选智能化系统,助力矿山建设成为国内一流的磨矿浮选智能化协调控制现场,在选矿过程控制上与国际接轨。该浮选智能化系统采用泡沫影像系统对矿山浮选工艺的泡沫质量数据进行图像识别分析并量化、建立浮选专家系统模型进行综合分析,研发矿山浮选进气精细化控制系统。介绍了系统的架构设计、系统功能等。智能控制实现了矿山浮选数据实时监控、交互和精细化控制,提升了矿山企业工作效率和产品回收率,加快了智能化矿山建设,为矿山浮选智能化建设提供参考。

关键词:浮选工艺;智能化;泡沫影像系统;浮选专家系统;浮选进气控制系统;智能控制

中图分类号:TD679

文章编号:1001-1277(2025)08-0029-06

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20250806

引言

多年来,中国加速推进绿色与智能矿山建设,出台了一系列政策,引导中国矿业转型升级,绿色智能发展。矿山浮选工艺过程中的浮选泡沫质量判断、浮选工艺调整还依赖于人工肉眼实时监控及操作人员的经验和手动操作,其效率和精确度都不高。为落实国家绿色发展战略,加快智能化矿山建设,实现地面和井下作业人员大幅减少、矿山安全风险大幅降低的目标,在智能化设备迭代升级的技术背景下,矿山浮选工艺智能化是智慧矿山建设的重要一步^[1-4]。本文以某矿山浮选智能化系统建设为例,介绍了一套真正能够长期投入使用,为生成指标稳定提高带来实质性帮助的浮选智能化系统,以期为同类型矿山浮选智能化建设提供参考。

1 矿山浮选工艺及自动化现状

1.1 矿山泡沫浮选概述

泡沫浮选是一种可实现矿物分选的筛选、分离、净化技术,广泛应用于选矿领域。一般的矿物颗粒使用常规方法不容易分离,加入浮选药剂能够改变矿物颗粒物化性质,在矿物憎水性提高和矿物与气泡黏附力增加的情况下,矿物的浮选性大幅提升,实现了矿物的富集。泡沫浮选采用起泡剂在一定的注气速度下形成泡沫后在浮力、表面张力等作用力下对矿物进

行分离。

泡沫浮选是一个复杂的过程,操作人员根据泡沫颜色、气泡大小、气泡形状、纹理等状态信息调整药剂的投加量,将浮选状态控制在特定范围内。泡沫的状态是矿物的物理化学性质、浮选药剂、机械和操作条件等因素的综合反映,泡沫尺寸的分布情况是观察充气量、pH变动、浮选药剂添加量及表面泡沫附着量等因素的可视化指标,泡沫的颜色能反映出泡沫里矿物的种类和浓缩的信息,泡沫的表面纹理特征变化反映了浮选工况的变化过程,都与生产指标关系密切^[5-7]。

1.2 基础自动化现状

目前,浮选药剂已经实现远程添加控制,且控制精度较高;浮选液位控制硬件为浮选机配套阀门执行机构、浮球,具备PLC控制系统,已实现模糊液位控制。

2 浮选智能化系统研发

浮选智能化系统主要包括泡沫影像系统、浮选专家系统、浮选进气精细化控制系统(包含浮选进气V型控制阀成套设备)等。浮选智能化系统结构如图1所示。

1)泡沫影像系统。配套泡沫影像系统设备包含粗扫选泡沫影像单元,24口赫兹曼交换机,以及配套的光纤网络通信设备。

2)浮选专家系统。浮选进气、液位、部分药剂的智能化控制系统定制与现场调试,并包含品位分析仪参与智能化控制逻辑基础编程。

收稿日期:2025-03-29; 修回日期:2025-05-03

基金项目:云南省教育厅科学研究基金项目(2024J1489)

作者简介:吴红梅(1988—),女,工程师,硕士,研究方向为自动化控制;E-mail:519047991@qq.com

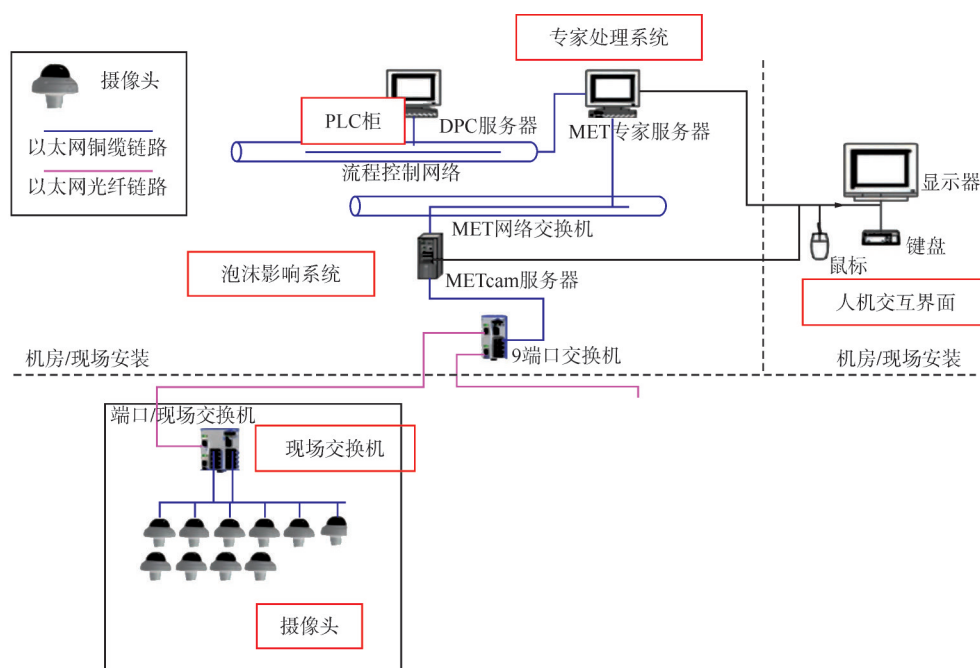


图1 浮选智能化系统结构

Fig. 1 Structure of the intelligent flotation system

3)浮选进气精细化控制系统。依照现场工艺控制特点定制高精度浮选进气精细化控制V型球阀、一体式执行机构、定位器。

4)浮选智能化调试。控制逻辑编程、系统现场定制、现场工艺调试,直至生产指标满足要求。

5)浮选流程主要设备运行联锁和信号接入。主要设备的远程运行监控和联锁报警功能。

6)浮选智能化控制预留。系统界面需要对浮选精选流程、品位分析仪介入进行提前预留,整体浮选智能化界面需要包含控制流程界面。

3 浮选智能化系统实现

该系统主要包含泡沫影像系统、浮选专家系统、浮选进气精细化控制系统3部分。

3.1 泡沫影像系统

在每台浮选机上方安装泡沫影像单元,监控浮选泡沫质量,逐步代替人工巡视浮选现场。泡沫影像除了能够让操作人员远程直观查看各浮选机的出矿情况,还能够实现泡沫质量监控,将原有感性的泡沫数据进行量化,将以往靠操作人员判断的泡沫太黏、泡沫太脆、泡沫出矿慢、沉槽、满槽等现象进行量化,及时发现各浮选槽的异常,并将量化数据提供给浮选智能化系统决策。泡沫影像分析数据界面如图2所示。

浮选泡沫影像系统功能有:

1)浮选出矿速率监控。通过监控 x 方向出矿速率,连续调整进气、液位、药剂,保障每台浮选机出矿

速率在合理区间。在发现粗选溢流品位太低/回收率太低情况下,系统自动调整进气、液位、药剂,使浮选出矿速率根据生产指标自动调整。通过监控 y 方向发现浮选槽异常现象并进行控制。

2)浮选泡沫稳定性监控。泡沫稳定性分为新泡沫稳定性和泡沫流动稳定性,新泡沫稳定性是在视频范围内新的泡沫产生后立即破裂的比例,而泡沫流动稳定性是泡沫产生后并流动到出矿下矿口过程中产生破裂的比例。通过对不同的稳定性监控分析发现,这是泡沫层太厚、起泡剂不足、进气量不足等引起的不同泡沫稳定性现象。针对性地调整浮选进气、液位、药剂(起泡剂等)。

3)浮选泡沫大小监控。监控浮选槽各槽的泡沫载矿量、泡沫变大现象。了解扫选一第二槽的泡沫载矿情况。供浮选智能化系统对出矿速率、泡沫层、扫选药剂调整参考。根据扫选二的载矿情况及跑尾数据,对扫选药剂进行调整。

4)浮选泡沫覆盖率监控。监控浮选液面泡沫覆盖现象,并根据现象调整工艺。在来矿波动时,也有可能出现扫选跑水情况。

5)泡沫溢流排矿监控。监控浮选溢流泡沫,通过溢流槽排矿情况,及时发现泡沫拥堵情况,供专家系统及时调整工艺。

3.2 浮选专家系统

浮选过程中矿物学变化、入选矿浆量较大变化、入选品位变化等多因素导致浮选现场工艺指标波动^[8-11]。浮选智能化系统自带智能化数据处理平台,

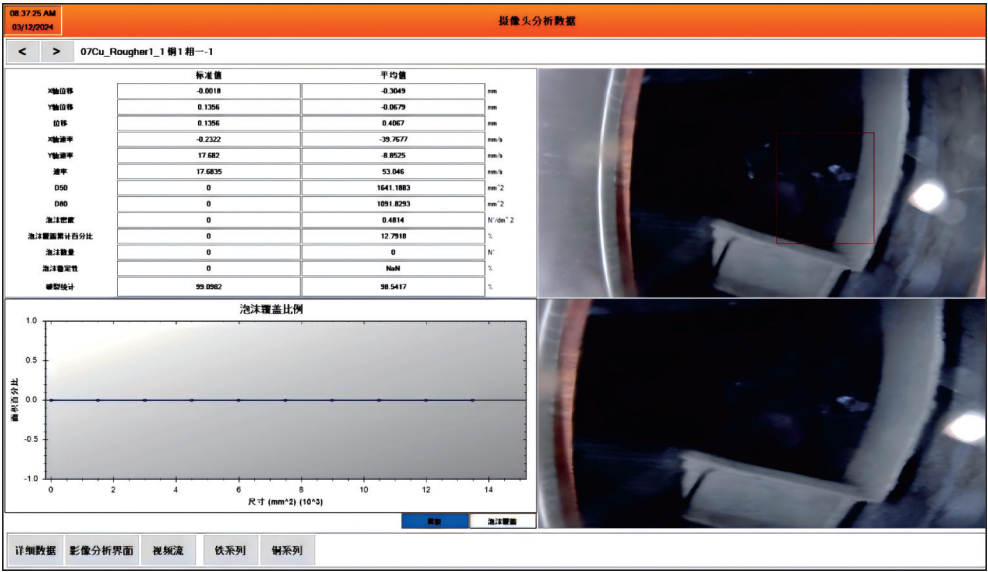


图2 泡沫影像分析数据界面
Fig. 2 Interface of froth image analysis data

对各个浮选槽的变化进行分析监控,快速发现浮选机浮选泡沫出矿速率等指标变差、浮选机液位较快降低导致浮选出矿速率较快降低,实时监控各浮选机的泡

沫变化趋势,供浮选智能化系统及时做出控制决策。浮选专家系统操控界面如图3所示。
浮选专家系统可实现的功能有:

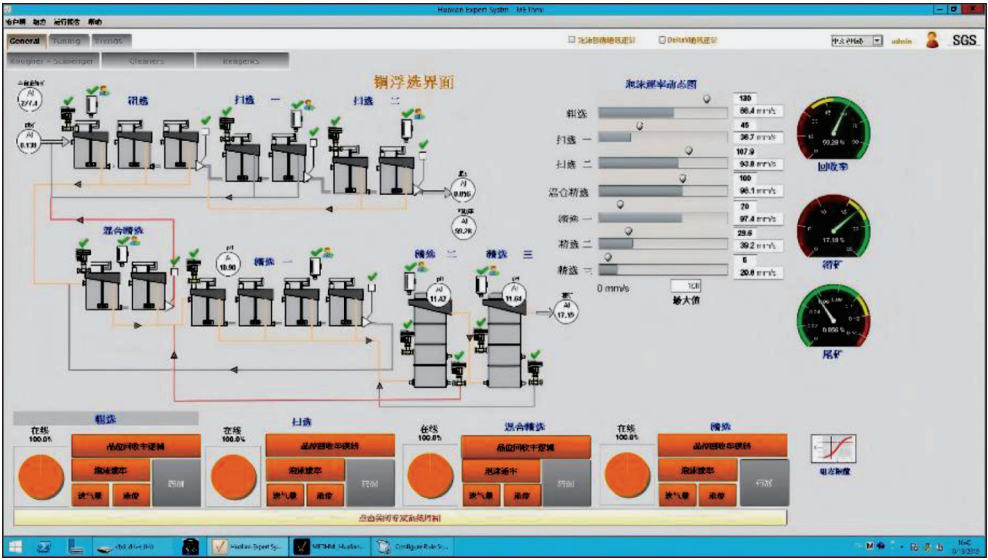


图3 浮选专家系统操控界面
Fig. 3 Interface of the Flotation Expert System

1)浮选出矿速率控制。①出矿稳定控制。实时根据每台浮选机的出矿快慢变化,自动调整进气、液位。维持出矿速率在某一区间,避免沉槽、粗选、扫选、精选出矿严重偏离。②出矿速率综合协同控制。浮选智能化系统根据品位分析仪分析数据,使用控制逻辑,自动决策对某一工艺段或多个工艺段进行联动控制。系统自动根据控制逻辑调整粗选、扫选、精选,或者全流程协同控制,减少跑尾、产品品位过高等现象,维持生产指标稳定。

2)浮选泡沫稳定性控制。通常操作人员将浮选泡沫统称为泡沫脆、黏,并未进行较好的量化。浮选

智能化系统通过分析不同的泡沫稳定性,结合泡沫层厚度变化趋势,能够自动选择调整进气、药剂或泡沫层,实现泡沫稳定性在合适范围。通过收集泡沫稳定性数据、在线品位数据确定粗选各个浮选槽的稳定性控制目标值,并确定稳定性控制逻辑。系统持续跟进监控情况执行控制策略,维持各浮选槽的泡沫稳定性。

3)浮选泡沫层厚度控制。浮选泡沫层厚度实现动态调整,自动设定泡沫层厚度目标值,保障浮选出矿稳定。浮选给矿矿浆流波动较大的现场,浮选智能化系统可以根据供矿矿浆的波动趋势,实时动态调整

矿浆阀的开度,根据给矿趋势,阀门开度提前开启,以降低给矿波动导致的液位较大波动。

4)浮选液位控制。浮选智能化控制结合浮选出矿速率快慢变化趋势,自动设定浮选液位单次回调量。根据液位波动趋势和变化快慢,自动调整阀门PID设置参数值,系统可以根据品位分析仪数据、出矿快慢,自动设定液位上下限,调整频率。同时,根据上游液位波动趋势,自动连锁调整下游液位,实现液位平稳过渡,最终实现真正意义上的系统自动设定控制参数。

5)药剂智能化添加。浮选智能化系统可以根据不同的泡沫状态、稳定性分析,在某些特殊泡沫稳定性异常情况下,自动选择连续调整起泡剂等参数,根据现场情况判断是否投入。

6)浮选泡沫防堵塞逻辑。根据泡沫影像监控浮选溢流堵矿情况,及时调整浮选机阀门开关,减少浮选过程泡沫溢出浮选机这一生产异常。

7)智能化系统控制显示记录功能。浮选智能化系统设计为开放逻辑、开放系统调试动作,操作人员与系统开放式交流。操作人员可以实时监控和评价系统执行情况,选矿人员可以根据系统的实时情况及时分析工艺异常根源并及时调整修正,管理人员可以通过系统历史数据分析,对比不同操作班组智能化系统使用的优劣,及时督促现场充分利用浮选智能化系统。

8)浮选全流程顶层控制逻辑预留。虽然本次为粗、扫选智能化系统,系统架构和控制逻辑预留依然需要考虑精选智能化控制系统需要。在粗、扫选智能化完成后,系统可以根据在线品位分析仪数据,自动按照控制逻辑先后顺序,实现浮选现场进气、液位、加药智能调整,保障浮选泡沫质量管理,保障浮选各工艺段生产指标的稳定。

9)全浮选流程PID监控。浮选智能化系统能够对浮选工艺流程PID等进行监控,确保浮选智能化实施基于基础自动化的稳定运行。在基础自动化异常时,系统自动限制部分工艺的智能化投入。

10)智能化系统动作评估。其能够很好地判断浮选智能化系统是以“专家”水平进行控制,还是以“普通操作工”水平进行控制。及时发现各个工艺段的系统投入率,各个工艺段智能化系统对工艺的帮助效果如何。管理人员能够根据统计数据及时调整控制逻辑库。

11)智能化数据处理平台。智能化数据处理平台是智能化系统的大脑,快速大量的数据处理、过滤与分析是专家系统进行正确决策的前提。该软件具备了数据存储、数据分析、数据显示、数据趋势跟踪、多

因素对比功能。独立的智能化数据处理平台,不占用DCS原有资源。

12)数据导出分析功能。浮选智能化系统需要具备所有通信数据,导出功能,以便对特定参数进行分析。

13)智能化系统投入率跟踪功能。浮选智能化系统能够自动统计各个班组智能化系统的投入和使用情况并提供每日报表。

3.3 浮选进气精细化控制系统

根据智能化系统在每个工艺段的调整精度需求,工艺特性,定制高精度V型球阀、进口气动执行机构,增加ABB定位器,并将相关信号上传回PLC,最终实现浮选进气的精细化控制。

浮选过程控制是气体、液位、药剂三者共同作用的结果,有经验的操作工不仅会对泡沫层厚度进行调整,而且在不同工艺状况下,粗选1槽、2槽的进气会根据出矿效率进行调整。经过调试和验证,浮选进气的精细化控制效果明显。因此,阀门的更换是浮选智能化项目进行的必要工作^[12-19]。

卡斯托阀门产品覆盖了自动化过程控制所涉及的大部分阀门:球阀、蝶阀、调节阀、闸阀、截止阀、止回阀、过滤器,以及相关的电动、气动控制机构。尖端的生产技术和严格的质量控制系统确保了产品的可靠性,而且能适应相关的国际标准。卡斯托阀门所有阀门产品在出厂前均采用氮气或氦气进行产品测试。同时,还可根据客户要求更加苛刻的条件下进行测试。

4 浮选智能化系统应用

某矿山为特大型地下金属矿山,矿石产量超过1 000万t/a,每年可生产铁成品矿约400万t、铜成品矿约3万t。根据矿山智能化和安全生产的需要,开发了浮选智能化系统,并成功应用。该矿山浮选智能化系统如图4所示。

根据生产报表数据统计结果,在相同原矿品位前提下,泡沫速率稳定性相对增加了30%以上,回收率绝对值提高1.01%,浮选智能化系统投入前后粗选泡沫速率如表1、图5所示。

浮选智能化系统通过对给矿金属量变化及时做出调整,不再需要人工过多干预,生产流程更加稳定,现场岗位操作人员减少4人,实现减员增效,提高劳动生产率,关键工艺参数的闭环优化控制使生产效益达到最大化,班组间回收率波动也明显减小,经济效益显著。该矿山成为地方乃至全国的绿色、智能化示范矿山,提高了智慧矿山建设的整体水平,取得了较好的社会 and 经济效益。



图 4 某矿山浮选智能化系统

Fig. 4 Intelligent flotation system in a mine

表 1 某矿山浮选智能化系统投入前后粗选泡沫速率对比

Table 1 Comparison of roughing froth velocity before and after application of the intelligent flotation system

项目	指标	粗 1 泡沫速 率/(mm·s ⁻¹)	粗 2 泡沫速 率/(mm·s ⁻¹)
智能化系统投入前	平均值	54.38	44.78
	标准差	55.75	53.28
智能化系统投入后	平均值	95.62	104.30
	标准差	42.90	33.44
稳定性	标准差相对减少/%	23.05	37.24

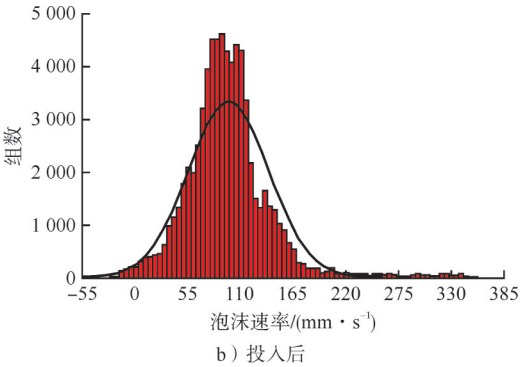
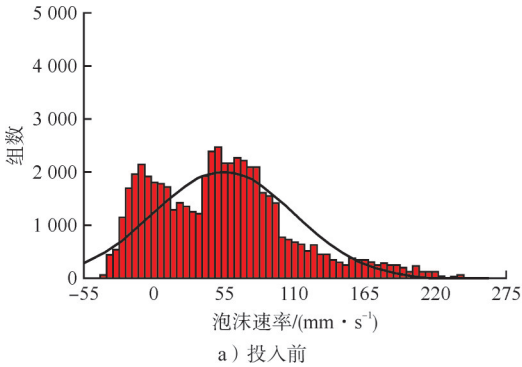


图 5 某矿山浮选智能控制系统投入前后粗选泡沫速率

Fig. 5 Roughing froth velocity before and after application of the intelligent flotation control system in a mine

[参 考 文 献]

[1] 许勇.技术创新引领矿业绿色智能转型[N].中国黄金报,2024-10-22(003).

[2] 韩兆龙.人工智能技术在矿山智能化建设中的有效运用[J].中国战略新兴产业,2024(29):54-56.

[3] 张绍周,苏之品,陈玉明.基于Flac^{3D}的某矿山开采方案优选及应用[J].黄金,2023,44(12):14-17,22.

[4] 王国法,庞义辉,任怀伟,等.智慧矿山系统工程及关键技术研究与实践[J].煤炭学报,2024,49(1):181-202.

[5] 曹文学.浅谈浮选起泡剂的泡沫性能及在选矿中的应用[J].科技视界,2020(28):119-120.

5 结 语

浮选智能化系统实现了浮选进气精细化控制、浮选液位、药剂标准化操作,并及时对工艺进行调整。浮选智能化系统在应对给矿金属量变化、及时调整方面展现了较大优势,操作频率、操作及时性均远高于操作人员手动操作。浮选智能化系统实现了浮选工艺基础自动化提升、浮选工艺控制标准化操作,最终实现生产稳定,工艺指标提高的目的。

[6] 赵福财,王苹.某金矿浮选尾矿综合利用试验研究[J].黄金,2024,45(4):48-51.

[7] 罗靓,彭成,罗浩.基于泡沫图像特征加权K近邻算法的锌矿浮选工况识别方法[J].矿产保护与利用,2024,44(5):93-99.

[8] 胡国栋.图像识别技术在选煤厂的应用实践[J].智能矿山,2024,5(10):67-72.

[9] 宛鹤,陆笑科,屈娟萍,等.浮选泡沫图像特征提取方法研究进展[J].中国钨业,2024,48(1):1-8.

[10] 翟雨双.基于深度学习的浮选泡沫信息提取算法研究[D].徐州:中国矿业大学,2023.

[11] 邱廷省,杨雯慧,邱仙辉.复杂多金属硫化矿低碱浮选分离技术

- 研究进展[J].有色金属(选矿部分),2024(11):1-11,32.
- [12] 张海洋,王旭,陆博,等.浮选生产过程泡沫状态与药剂控制关系研究[J].黄金,2024,45(3):32-36.
- [13] 路晓龙,李天恩.新疆某低铜辉钼矿浮选试验研究[J].黄金,2023,44(3):53-57.
- [14] 邢姜,邓久帅,张浩,等.重选尾矿细泥锡石浮选回收实验[J].矿产综合利用,2025,46(2):65-71.
- [15] 梁泽跃,田小松,蒋丛国,等.云南某低品位铜矿选矿试验研究[J].有色金属(选矿部分),2024(10):88-93,114.
- [16] 王艺竹,王佳怡,向泽慧,等.山东某金矿工艺矿物学及选矿影响因素研究[J].黄金,2024,45(2):33-36.
- [17] 胡苏楠,宋玮.智能矿山综合管控平台研究及应用[J].山东工业技术,2024(5):94-100.
- [18] 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.
- [19] 张伟,李腾飞,管孝强,等.浮选流体动力学关键技术与装备智能化发展路径[J].金属矿山,2023(9):145-155.

Development and application of an intelligent flotation control system for mines

Wu Hongmei¹, Hu Yiduo¹, Lin Anchuan¹, Cai Zhengpeng²

(1. Kunming Vocational and Technical College of Industry; 2. Yuxi Dahongshan Mining Co., Ltd.)

Abstract: In response to the problems in flotation operations where froth quality assessment and process adjustments still rely heavily on manual real-time monitoring and operator experience, resulting in low efficiency and accuracy, this study develops an intelligent flotation control system for mines. The system is designed to be robust for long-term deployment and capable of delivering substantial improvements in product quality and stability. It aims to transform flotation operations into a domestically leading, intelligent grinding-flotation coordinated control site that aligns with international standards. The intelligent flotation control system utilizes a froth imaging system to capture flotation froth data, which are analyzed and quantified through image recognition. A Flotation Expert System model is then established for integrated analysis. Mine flotation refined air inflow control system is developed. The paper presents the system's architecture and functions. The intelligent control enables real-time monitoring, interaction, and precision control of flotation data, enhancing operational efficiency and recovery rates in mineral processing, accelerating the construction of intelligent mines, and providing a valuable reference for intelligent flotation system development in mining enterprises.

Keywords: flotation process; intelligentization; froth imaging system; Flotation Expert System; flotation air inflow control system; intelligent control