

文章编号: 1001-3571 (2025) 03-0001-13

选煤过程自动化和智能化研究现状与发展趋势

王天悦, 陈军, 于国强, 徐丽婷

(安徽理工大学材料科学与工程学院, 安徽淮南 232001)

摘要: 煤炭作为我国主要能源之一, 在“双碳”战略推动下, 亟需进行产业转型。选煤厂作为煤炭加工的关键环节, 其自动化与智能化转型对提高能源利用效率、推动企业升级及实现行业可持续发展具有重要战略意义。针对选煤行业在此背景下的发展需求, 详细阐述了自动化与智能化的定义及区别; 系统梳理了自动化技术在重介质选煤过程、脱水过程、浮选过程、监督管理过程中的应用现状, 智能化技术在重介质选煤过程、浮选过程、煤泥水处理过程、信息系统中的实践; 同时分析了灰分检测仪、浓度检测仪、各类传感器等关键设备的应用现状。自动化技术在煤炭分选领域的应用, 不仅大幅提升了生产效率, 减少了人工干预, 提高了产品质量, 还增强了整个生产流程的稳定性和安全性; 智能化技术也逐步应用至选煤流程的各关键环节, 是顺应市场需求变化和应对资源管理挑战的必然选择, 不仅能够显著提高生产过程的智能化和信息化水平, 还能推动整个行业向更高效、绿色的方向转型; 选煤领域的检测仪器与设备逐步实现了自动化、智能化、系统化与全面化的转型, 提高了生产稳定性与安全性, 提升了分选效率和精度。未来, 选煤过程的自动化与智能化转型需建立统一智能平台、推动机器学习与云服务应用、完善智能选煤的标准化及人才培养体系, 以助力选煤行业实现高效、绿色、可持续发展, 推动整个煤炭产业的升级变革。

关键词: 选煤过程; 自动化技术; 智能化技术; 可持续发展; 智能化建设

中图分类号: TD948.9

文献标志码: A

Research status and development trends of automation and intelligence in coal preparation processes

WANG Tianyue, CHEN Jun, YU Guoqiang, XU Liting

(School of Materials Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: As one of the main energy sources in China, coal is in urgent need of industrial transformation driven by the "dual-carbon" strategy. As a key link in coal processing, the automation and intelligence transformation of coal preparation plants holds significant strategic importance for enhancing energy utilization efficiency, propelling corporate upgrading, and achieving sustainable development in the industry. In response to the development needs of the coal preparation industry under this context, this study elaborates in detail on the definitions and distinctions between automation and intelligence. It systematically reviews the current application status of automation technology in heavy medium coal preparation processes, dewatering processes, flotation processes, and supervision and management process, alongside the implementation of intelligent technologies in heavy me-

收稿日期: 2025-03-15 责任编辑: 樊阳 DOI: 10.16447/j.cnki.cpt.2025.03.001

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC2907704); 国家自然科学基金项目(52174233)

作者简介: 王天悦(2000—), 女, 河北石家庄人, 硕士研究生, 研究方向: 煤泥脱水药剂选择智能化。E-mail: wangtianyue1114@163.com。通讯作者: 陈军(1990—), 男, 安徽青阳人, 教授, 博士生导师, 工学博士, 从事微细颗粒界面调控理论与过程强化方面的研究。E-mail: jchen412@126.com。

引用格式: 王天悦, 陈军, 于国强, 等. 选煤过程自动化和智能化研究现状与发展趋势[J]. 选煤技术, 2025, 53(3): 1-13.

WANG Tianyue, CHEN Jun, YU Guoqiang, et al. Research status and development trends of automation and intelligence in coal preparation processes[J]. Coal Preparation Technology, 2025, 53(3): 1-13.



移动阅读

dium coal preparation, flotation, coal slurry water treatment, and information systems. Concurrently, it analyzes the application status of key equipment such as ash content monitors, density monitors, and various sensors. The article argues that the application of automation technology in coal preparation not only significantly enhances production efficiency and reduces manual involvement, but also improves product quality while strengthening the stability and safety of the entire production process. Intelligent technologies are also being progressively implemented across key stages of the coal preparation process, representing a necessary step to respond to evolving market demands and address resource management challenges. They not only significantly elevate the intelligence and informatization levels of production processes but also drive the transformation of whole industry to a more efficient and green direction; Detection instruments and equipment in coal preparation have progressively undergone transformation toward automation, intelligence, systematization, and comprehensiveness, enhancing production stability and safety while boosting separation efficiency and precision. In the future, the automation and intelligent transformation of coal preparation process needs to establish a unified intelligent platform, promote the application of machine learning and cloud services, improve the standardization of intelligent coal preparation and talent training system, so as to help the coal preparation industry to achieve efficient, green and sustainable development, and promote the upgrading and reform of the whole coal industry.

Keywords: coal preparation process; automatics; intelligent technology; sustainable development; intelligent construction

煤炭作为我国主要的能源之一，对保障国家能源安全和推动社会经济发展发挥了至关重要的作用^[1]。自2020年我国明确提出碳达峰、碳中和战略目标以来，煤炭产业正面临着一场深刻的转型变革^[2]。在此背景下，信息技术的迅猛发展，特别是以互联网、大数据和人工智能为代表的技术，在工业经济领域发挥了至关重要的作用。智能化建设的浪潮已席卷工业界，并逐渐影响到选煤行业，加速推进其智能化进程^[3-4]。智能化选煤厂的概念已逐步转化为现实，众多选煤企业已开展不同级别的智能化项目，涵盖重介质分选系统、浮选系统、脱水设备以及视频监控系统等^[5]。随着科技的快速进步，数字矿山和智能矿山技术成为煤炭行业的新趋势。选煤厂作为煤炭加工的重要环节，正在积极引入先进工艺和技术，快速向自动化和智能化方向发展。构建智能化选煤厂不仅有助于提高选煤过程的智能化水平和能源利用效率，而且对于推动煤炭企业的升级和转型具有深远的战略意义^[6]。

通过政策支持和技术创新，推动煤炭选洗行业的绿色转型，不仅能够有效解决资源消耗和环境污染问题，也为实现国家的长远能源战略和环境目标提供了关键路径^[7]。面对我国能源结构现状与挑战，尤其是在煤炭作为主体能源的背景下，推动煤炭行业的清洁化进程^[8]，注重选煤过程各个工艺流程环节的智能化转型，对于实现经济可持续发展和“双碳”目标至关重要。选煤技术的未来发展将更

加注重环保、安全和智能化，企业需要紧跟政策导向，持续创新^[9]。

1 自动化和智能化的定义及区别

1.1 自动化

自动化是指在无需或仅需少量人工干预的情况下，机器、系统或过程（涵盖生产和管理环节）按照预定要求，通过自动监测、信息处理、分析判断和控制执行来实现目标的过程^[10]。在选煤领域应用自动化技术，有助于工作人员将更多精力投入到精细化管理中。相较之下，传统的人工生产与监控方式，易导致产品设计误差较大，作业周期较长，并频繁出现故障。自动化技术以其较高的灵活性，有效弥补了人工生产的不足^[11]。

1.2 智能化

智能化依托互联网、人工智能和神经网络等先进技术支持，实现了对人类多样化需求的满足。该技术能够灵敏感知外部信息、精准进行判断和决策，并有效执行相应操作^[12]。此外，智能化系统还具有自我学习和自我优化的能力。

1.3 自动化与智能化之间的区别

自动化与智能化是现代工业、信息技术和人工智能领域的两个关键概念，尽管二者紧密相关，但在功能和应用上存在显著区别^[13]，主要体现在判断能力^[14]、数据处理^[15]、智能特点^[16]、性质与应用^[17]、技术依赖等方面。自动化与智能化的主

要区别见表 1。随着技术的发展,许多系统同时具备自动化和智能化的元素,自动化和智能化之间的

界限将会变得愈加模糊,但理解两者的根本差异对于设计和实施技术解决方案仍然是必要的^[18]。

表 1 自动化与智能化的主要区别

Table 1 The difference between automation and intelligence

	自动化	智能化
判断能力	不具备自我判断和决策的能力	具备“一定”程度的自我判断能力
数据处理	通常处理结构化数据	可以处理半结构化甚至非结构化数据
智能特点	主要关注任务的高效执行	能够通过与环境交互不断优化自身表现
性质与应用	侧重于通过机械或其他设备将人类工作自动化	更强调使用人工智能技术,如深度学习使系统具有类似人类的智能
技术依赖	依赖传感器、执行器和控制系统的实现预定的操作流程	依赖数据处理、人工智能技术需要大量的数据来训练和优化模型

2 选煤过程中的自动化与智能化

2.1 自动化技术在选煤过程中的应用

自动化技术已在众多行业领域得到应用,并推动了该技术的持续发展^[19]。我国煤矿开采领域正迎来新的发展机遇,选煤过程也在逐步实现自动化。自动化技术在该领域中的应用,主要集中在精准控制和操作优化,包括实时监测煤质、调整分选参数、自动调节设备运行状态以及数据记录和分析^[20]等。在选煤工艺流程中,自动化技术的主要应用环节包括:原料的筛分与破碎、洗选工艺(包括浮选和重介质分选)、尾矿的自动化管理与环保处理,以及选煤厂的自动化监管等。自动化技术在这些环节的应用,不仅大幅提升了生产效率,减少了人工干预,提高了产品质量^[21],还增强了整个生产流程的稳定性和安全性。文章将深入探讨自动化技术在重介质选煤过程、脱水过程、浮选过程、监督管理过程中的应用现状。

2.1.1 重介质选煤过程自动化

重介质选煤是利用密度介于煤与矸石之间的重悬浮液进行分选的一种选煤方式^[22]。在选煤厂实际生产过程中,重介质选煤能够有效实现原煤的分选和处理。各设备间的协同联动和精确控制,对提高选煤效率和介质利用率至关重要。

重介质选煤过程中应用先进控制策略可以显著提高选煤效率和产品质量,同时减少能耗和资源浪费。先进控制策略通常指的是基于现代信息技术和自动化技术的控制方法,如模型预测控制(MPC)、智能控制、自适应控制等,这些方法能够更好地应对复杂工业过程中的动态变化和不确定性。先进控制策略在重介质选煤过程中的应用,是通过建立精确的数学模型来实现生产过程的优化,从而提高选煤厂的经济效益。要实施这种控制策略,需要深入理解重介质选煤的生产过程,并建立相应的数学模

型。基于流体力学的重介质旋流器模型已被用于研究重介质分选过程机理,如黄波等^[23]分析了重介质旋流器内的悬浮液速度场、密度场、压力梯度场和黏度场,并研究了煤粒在分选过程中的运动行为及其效果。MEYER等^[24-25]通过质量守恒原理,对重介质选煤过程中的设备进行了动态特性分析,建立了全流程动态模型,并结合选煤厂实际生产数据进行了验证,确保模型的可靠性和适用性。

重介质选煤是一种高效且先进的煤炭分选技术。自动化系统能够精确控制重介质的密度、流量以及分选过程的其他参数,从而提高煤炭分选的精度和效率,减少煤炭资源的浪费^[26]。重介质选煤过程的自动化是现代煤炭加工行业提高竞争力和可持续发展的重要手段,对于实现高效、环保、安全的煤炭生产具有不可替代的作用。

2.1.2 脱水过程自动化

在选煤工艺中,压滤脱水环节直接影响洗选过程的闭路循环效率,是确保煤炭分选效率和各辅助工艺流程正常运行的关键^[27-28]。若脱水效率不达标,会导致循环水的浓度和黏度增加,严重影响洗选作业的进行。此外,煤泥水分含量过高会导致选煤产品品质下降,热值减少,进而加剧资源浪费^[29]。因此,提高煤泥脱水效率,对提升选煤厂生产工艺的整体水平和资源利用效率具有重要的现实意义。

沉降式离心脱水机通过高速旋转产生的离心力来实现固液分离,此种设备具有占地面积小、处理能力强、脱水效率高以及高度自动化等特点^[30]。筛网沉降离心脱水机将沉降式离心机的澄清能力与筛网的高效脱水功能结合在一起,无需额外设备,该设备可以处理大量原料并有效降低成品水分含量^[31]。黄文辉等^[32]通过对压滤机入料的粒度组成进行分析,探讨了不同压滤压力、压滤次数以及物料的用量对脱水性能的影响,并进行了仿真动态模

拟。尚海洋等^[33]对永平铜矿选矿厂精矿浓密脱水工段进行了改造,采用西门子控制系统,实现了电气设备远程监控、系统联锁开停机、过滤器远程监控和电子报表功能,从而提高了生产效率,降低了人工劳动强度,取得了显著成效。引入自动化技术后,煤泥脱水流程不仅实现了效率与经济效益的双重提升,还减轻了对人工的依赖,提高了生产的安全性和环保性。

2.1.3 浮选过程自动化

浮选也称泡沫浮选^[34],是一种基于矿物表面亲水性与疏水性的差异,实现有用矿物与脉石分离的工艺过程。该方法处理粒度 $<0.5\text{ mm}$ 细粒煤泥最为高效的分选方法。通过引入自动化技术,可确保浮选过程的高效进行,有效防止因人工操作不当而导致的处理不及时等问题^[35]。

1902年开始,自动控制技术开始在少数选矿厂中应用;1915年,普林斯顿大学 RICKETTS Louis 教授设计的 Inspiration 选矿厂,实现了浮选自动控制技术的首次应用,该厂借助大型机械设备和检测与控制技术,日处理能力达到 $15\ 000\ \text{t}$ ^[36-37];1970年,一些选矿厂开始引入精矿在线分析仪和计算机控制系统等现代设备来优化浮选过程^[38];自1975年起,集中监控系统在众多选矿厂中逐步普及^[39]。

随着自动化技术在选矿领域的不断发展,研究人员开始探索更智能的控制方法。WANG等^[40]提出了一种与传统专家系统相结合的方法,建立了一套添加药剂的控制系统,该方法能够监控浮选过程的工况。刘金平等^[41]提出了一种模式识别方法,用于统计加药量的状态,分析浮选泡沫的大小和动态分布特征,从而建立起浮选状态和加药量之间的关系。李璐等^[42]设计了一套用于浮选自动加药的专家系统,通过对数据进行实时监控和记录,实现了对药剂添加过程的自动化控制。张志伟等^[43]运用计算机视觉技术,对浮选槽表层泡沫图像进行实时捕获与分析,该技术能够有效评估浮选生产过程的稳定性,并为调整浮选工艺参数提供精确的量化数据支持。

自动化技术在浮选过程中的应用显著降低了生产成本,提高了生产效率。实施自动化控制是企业增强生存能力和市场竞争力的关键路径。这些创新和技术进步,不仅丰富了国内选煤自动化控制技术的应用场景,还为提高生产效率和优化工艺参数提供了技术支持。

2.1.4 监督管理过程自动化

在选煤工艺流程中,对各个环节的监督管理十分重要,自动化技术在这一领域提供了重要支撑。借助 SCADA(数据采集与监视控制系统)等先进系统,操作人员可以在中央控制室通过远程监控系统实时监控全厂设备的运行状态,迅速识别和处理异常情况^[44],从而提高实时监督效率,这有助于迅速响应并解决潜在问题,进而确保生产的稳定性和可靠性。智能预警系统的部署,可以帮助企业预测潜在故障,从而提前采取维护措施,降低停机时间和生产损失^[45]。远程控制技术的应用,可进一步提高应急响应能力,操作人员通过远程控制系统对设备进行调整和操作,不仅减少了人工巡检的工作量,同时也减少了操作人员的安全风险^[46]。总体而言,自动化技术在监督管理过程中的应用,主要包括远程监控、智能预警系统和远程控制技术,为选煤厂提供了更加全面、精准且高效的管理手段,有助于提高生产的安全性和效率。

此外,在复杂的工作环境中,诸如煤炭的运输、仓储和装车等环节,存在诸多安全隐患^[47]。为有效应对这些安全隐患,不少企业开始积极探索科技赋能的解决方案。以国能宝日希勒能源有限公司为例,该企业利用 AI 安全视频监控系统来实时监测环境变化^[48],保障生产安全。该系统通过整合传感器数据、分析结果和预警信息,将数据传输至调度中心,以供决策参考。系统能够自动分析摄像头捕捉的图像,识别并定位目标,评估工作人员的操作行为,进而提供决策支持和风险预警^[49]。

2.2 智能化技术在选煤厂的应用

在选煤行业中,自动化技术已被广泛应用于各工艺流程,并取得了显著成效。与此同时,智能化技术也逐步应用至选煤流程的各关键环节。在现代化工业的发展浪潮中,智能化技术正成为提升生产效率和优化资源管理的核心动力^[50]。因此,智能化技术在选煤行业的应用,不仅是对传统作业模式的革新,更是顺应市场需求变化和应对资源管理挑战的必然选择^[51]。智能化选煤厂的建设,不仅能够显著提高生产过程的智能化和信息化水平,还能推动整个行业向更高效、绿色的方向转型。这一转型过程不仅能为选煤厂带来新的机遇,也可为煤炭行业的可持续发展奠定坚实基础。

2.2.1 重介质选煤过程智能化

在重介质选煤过程中,密度自动控制系统扮演着关键角色。该系统通过实时监测和调整悬浮液

的密度，确保最佳选煤效果^[52]。目前，现代化选煤厂普遍采用传感器对悬浮液的密度进行实时监测，并通过 PLC 或 DCS 系统自动调节介质添加量，以实现密度的高精度控制。在此基础上，结合先进的数据处理和人工智能技术，可以对密度控制系统实现实时优化和智能决策支持，从而进一步提升密度控制系统的整体性能。

众多研究人员围绕密度控制系统各环节展开了针对性的技术探索与实践：寇金成^[53]通过合格介质桶液位预测、智能控制模式及切换，增强了生产系统的适应性和控制精度，解决了实时性差、稳定性不足和调节范围受限的问题；李真^[54]基于耦合性模糊 PID 控制设计了两个控制器，分别用于悬浮液液位和密度的控制，控制器基于偏差和偏差变化率，动态调整分流箱和清水阀，实现了悬浮液液位和密度的精确控制；王中民等^[55]针对异常工况下分流箱控制失效的问题，设计优化了控制系统，实现了自动补水和自动分流的智能切换，减少了介质消耗，提高了分选精度；邱佳楷等^[56]在重介质分选过程中应用了反分流工艺，利用神经网络建立了合格介质桶液位预测模型，该模型以悬浮液密度的实际值与设定值的偏差、合格介质桶的实际液位、分流阀开度及补水阀开度作为输入变量，控制浓介质泵和反分流泵的运行时间。

随着计算机技术的快速发展，学者们也越来越关注数据驱动建模。数据驱动模型通过分析生产过程中大量隐含的数据，提取关键生产信息，通常具有较高的准确性^[57]。因此，神经网络和支持向量机等预测模型在重介质选煤过程中开始得到广泛应用^[58-59]。DAI 等^[58]提出了一种基于块增量来随机配置网络的建模方法，并建立了相应的预测模型。该模型以原煤进料速率和重介质悬浮液密度作为输入变量，以预测的精煤灰分含量作为输出结果。这种方法的关键在于通过优化网络结构和参数设置，提高了模型在复杂工业过程中的预测精度和适用性。然而，在实际生产过程中，由于受到技术的限制，灰分含量通常依赖人工经验判断。ZHANG 等^[60]基于详细的机理模型，在多种运行条件的约束下，应用了模型预测控制，成功实现了对精煤灰分含量的精确控制。该方法以选煤厂的原煤进料速率作为输入，考虑了不定因素的影响，其稳定性和可靠性在实际环境中得以验证。黄罡^[61]对文献^[60]中的方法进行了改进，设计了精煤产品质量和能耗两个运行优化指标，提出了一种重介质选煤过程的稳定多目

标经济模型预测控制算法。该方法旨在优化精煤灰分的控制，有效提升了选煤过程的响应速度和稳定性，为工业应用提供了一种先进的控制策略。

对重介质分选工艺流程中智能化技术的研究与应用，不仅提高了煤炭分选的效率和质量，还减少了资源消耗，降低了生产成本，对现代煤炭工业的可持续发展具有重要意义。

2.2.2 浮选过程智能化

随着智能算法的不断发展，模糊控制、神经网络、遗传算法和粒子群优化等多种算法在浮选过程中的应用逐步深入^[62-63]。吴刚等^[64]根据浮选泡沫的特性，采用深度学习技术，特别是卷积神经网络，将其应用于浮选加药系统中的泡沫识别与分类，用以实现药剂添加量的自动调整，不仅提高了浮选过程的自动化和智能化水平，而且克服了传统模式中依靠人工经验手动调整加药量的弊端。董志勇等^[65]运用 PSO 粒子群优化算法，对选煤厂的煤泥浮选药剂剂量预测和自动添加系统进行了全面升级。在确保产品质量的前提下，该系统有效减少了药剂消耗，其中捕收剂的用量降低了 13.73%，起泡剂的用量降低了 12.67%，应用效果良好。王勇等^[66]提出一种分析浮选泡沫纹理特征的方法，利用灰度行程矩阵提取算法，为视觉监控系统提供了浮选泡沫状态的信息。陈丽娜^[67]结合响应曲面方法与神经网络技术，成功构建了煤浆灰分预测模型，该模型相较于单一的响应曲面法，预测精度得到了显著提升。

浮选过程中的智能化应用，核心在于实现对浮选参数的全过程动态监测与操作的智能化和远程控制能力^[68]。通过智能化手段，不仅提高了生产效率和产品质量，还降低了生产成本和环境污染，体现了煤炭洗选行业向数字化、智能化转型的趋势。

2.2.3 煤泥水处理过程智能化

随着煤炭开采机械化程度的加深，细粒级煤泥在原煤中的比例持续攀升，这导致了煤泥水处理量的上升，增加了生产压力^[69]。与此同时，煤层厚度的减少以及构造断层的增多，使得矸石产量随之增加。矸石中所含的高岭石、蒙脱石等细微黏土矿物，在遇水后容易分散成微小颗粒，这无疑加大了煤泥水的处理难度^[70]。因此，高效处理煤泥水对于选煤厂的生产至关重要，直接关系到生产效率、产品品质 and 环境保护^[71]。在煤泥水处理过程中，加药环节直接影响着整体运行效果，合理的药剂添

加是保证压滤煤泥的黏度和水分达到标准的重要因素^[72]。尽管如此,我国众多选煤厂目前仍然使用人工加药的方式,这种方式面临着诸多问题,如主观因素干扰、反应时间滞后,以及药剂浪费等问题。同时,由于操作人员的工作经验参差不齐,加药量的准确性和即时性难以得到有效保障^[73-74]。

针对这些问题,一些学者开始研究智能化的煤泥水加药系统,以期实现煤泥水的高效沉降。例如徐子利^[75]提出了一种选煤厂絮凝剂添加系统智能化升级改造方案,该方案将絮凝剂添加智能化划分为4个控制单元,并构建了多级过程智能控制系统,具体如图1所示。

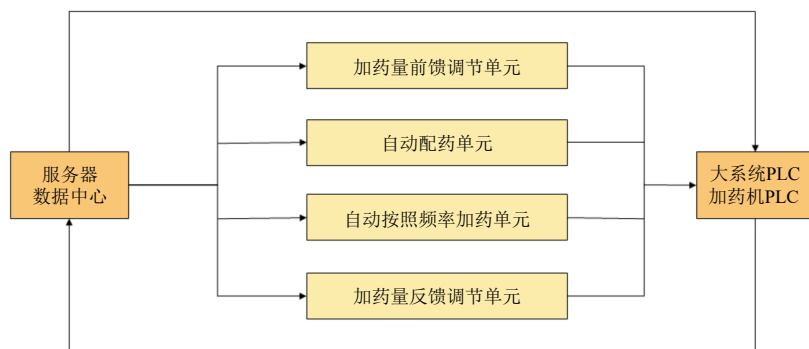


图1 絮凝剂智能添加控制系统^[75]

Fig. 1 Flocculant intelligent addition control system

也有学者从不同角度入手,为智能化煤泥水加药系统的发展提供了思路。邓建军等^[76]利用光电传感器对煤泥水沉降速度进行实时监测,并结合前馈和反馈控制策略,成功解决了传统自动加药系统的滞后问题。董宪姝等^[77]通过分析煤泥水的浓度和流量数据来确定煤泥含量,并计算药剂的添加量,通过监控溢流水的浊度来实时调整药剂的用量,从而有效保障了水质并减少了药剂消耗。成荣杰^[78]提出一种智能加药系统来应对选煤厂生产系统中的自动化程度低、药剂消耗量大、劳动强度高及配药精度偏低等问题,现场应用表明,该系统能显著降低劳动强度和操作风险。张夺等^[79]针对不连沟选煤厂在煤泥水处理过程中,药剂添加量的调整仍主要依赖人工经验,缺乏监测设备,无法实时调整加药量等问题,对加药系统进行了智能化升级,实现了浓缩环节的智能加药,有效降低了药剂消耗量,同时降低了员工的劳动强度。

通过引入智能化技术,煤泥水处理过程实现了药剂添加量的精确控制,确保了煤泥水处理的稳定性和效率。不仅提升了生产效率和产品质量,还降低了药剂的使用成本,对选煤厂的运行管理具有重要意义。

2.2.4 信息系统智能化

为了提高选煤厂的管理水平,智能化技术被引入生产管理系统中,并与智慧矿山理念和云计算技术相结合。这一整合策略不但满足了选煤厂的实际需求,而且实现了全厂生产数据的自动采集和长

期存储,促进了数据的集中管理与统一应用,进而提升了企业的竞争力^[80]。其中选煤厂数据信息平台的构建,正是对这一整合策略的具体体现。

随着信息化技术的发展,选煤厂开始使用ERP(企业资源规划)、MES(制造执行系统)等信息系统,实现生产数据的实时采集、处理和分析。这些系统不仅能够实时监控生产状态,还能进行数据分析,辅助管理层做出决策,提高运营效率。ERP系统可优化库存管理、采购、财务等方面的工作,助力企业高效地进行资源规划和管理^[81];MES系统则能够实时监控生产关键参数,收集并对其进行分析,帮助管理层了解生产状态,及时优化生产计划,进而提高生产效率和产品质量。目前,中国工业正处于机械化、自动化和信息化并存的阶段。虽然不同企业间的智能化程度并不相同,但普遍存在创新能力不足、产品质量低下、能源消耗高、管理精细度不足以及自动化和信息化水平有待提高等问题。各地区和行业的发展不均衡现象尤其明显,特别是在智能设备和生产过程智能控制方面,存在显著不足^[82],一些煤炭产业集团已逐步认识到智能化建设的重要性,并开始进行信息系统的智能化升级。

3 选煤过程中自动化、智能化检测仪器与设备

自2000年起,伴随自动化和智能化技术的飞速发展,选煤领域的检测仪器与设备逐步实现了自动化、智能化、系统化与全面化的转型。目前,选

煤厂普遍运用自动化检测仪表，如灰分检测仪、浓度检测仪等，实现了生产的全面自动化检测，提高了生产稳定性与安全性。通过引入智能化技术，利用传感器、控制器和执行器实现了煤炭开采设备的自动化控制，同时利用图像识别技术进行煤炭的智能分选，提升了分选效率和精度。自动化与智能化技术的融合应用，显著提升了选煤生产效率，保证了产品品质，并推动了环境友好型生产模式的发展。

3.1 灰分检测仪

灰分是指煤炭中不可燃物质的含量，过高的灰分会影响煤炭的燃烧效率及经济效益^[83]。因此，精确监测煤炭的灰分对于优化选煤工艺和提高产品质量至关重要。灰分检测仪是一种较新的自动化检测设备。该设备通过 γ 射线对检测对象进行照射，射线在物体内部经过反复的反射与散射过程后穿出，射线的能量衰减程度会随物体内部成分的原子序数变化而变化^[84]。

灰分检测仪已经在众多选煤厂中得到了广泛应用，如ZZ-89D型在线测灰仪和华科HC-3500型无源灰分仪等。这些仪器具有检测快速、适应性强、不接触煤样、安装方便等特点^[85-86]。通过实时检测灰分，可以及时调整生产工艺，指导选煤生产，确保产品质量稳定。代文飞等^[87]对蒋庄矿选煤厂正在投入使用的视觉识别浮选尾矿在线测灰仪进行了分析，发现该仪器能够对尾矿灰度和灰分进行准确的软测量，且具有较高的测量精度和可靠性。灰分检测仪在选煤过程中的广泛应用，对提高生产效率和提升产品品质起到了重要作用。该仪器能迅速、连续且无损地测定煤炭中的灰分，以此实时指导生产并进行质量监控^[88]。

3.2 浓度检测仪

矿浆浓度是选煤过程中的重要工艺参数，它对磨矿、浮选、重选和脱水等多个工艺过程产生直接影响。矿浆浓度的变化会显著影响选矿的经济指标，进而对整个选煤过程的效率和成本造成重要影响^[89]。为了提高检测精度，国内外研究了多种在线检测技术，如超声波、射线、光电、谐振、压差和称重等方法^[90]。

超声波矿浆浓度检测仪工作原理为：发射器从一侧发射超声波信号，这些信号在矿浆中传播后，被另一侧的接收器接收，接收到的超声波信号随后送至信号处理器，通过处理和计算，最终得出矿浆的浓度^[91]。超声波矿浆浓度检测仪能对悬浮在液体中的固体及乳化颗粒浓度进行有效地测量，具备

响应迅速和测量周期短的特点，因此非常适合进行在线浓度监测。但此种检测方法对传感器的密封性和声波穿透能力要求较高，而且矿浆中的气泡可能会干扰检测结果，从而影响测量的精度。在实际生产中，煤浆悬浮液密度检测仪器通常使用 γ 射线辐射探测器^[92]，这种仪器通过非接触方式进行检测，具有广泛的适用性和便于维护的优点。

3.3 传感器技术

在选煤过程中，传感器技术的应用显著提升了生产效率和安全性。传感器技术在选煤厂的各项作业中发挥着重要作用，例如激光雷达传感器在重介质自动添加系统中的运用，有效推动了重介质分选流程的自动化。同时，配备有各类传感器的智能化设备，如带式输送机巡检机器人，能够实时监控输送带运行状态，及时识别并处理潜在的故障隐患，确保运输线的安全运行^[93]。总体而言，传感器技术在选煤领域的应用现状凸显了其在增强生产效率和保障安全性方面的关键作用。

此外，全自动热量计、自动工业分析仪和红外测硫仪等煤炭检测设备，利用数据读取和图像观察等先进技术，减少了在检测过程中可能出现的问题，使工作过程变得更加高效，减少了误差来源，确保了测量工作的精准进行，并且有效控制了测定工作的周期^[94]。自动化、智能化检测仪器和设备在煤炭开采工艺流程中的应用，能够实时监控和控制选煤过程中的关键参数，确保煤炭产品的质量。

4 结语与展望

作为煤炭产业现代化的核心要素，选煤过程自动化与智能化集成了先进的信息技术、自动化控制、人工智能和大数据分析等多元化手段。其核心目标在于提高选煤效率，降低资源消耗，减轻环境污染，并提升煤炭产品品质。在“中国制造2025”战略规划指导下，煤炭行业正加速数字化转型，以增强行业竞争力，智能化选煤生产的推进具有战略性意义。以下是对未来发展方向的建议：

(1) 建立统一智能平台，整合生产控制、设备管理、能源管理和安全管理，实现全流程的智能监控和优化。利用大数据分析技术，对生产过程中的大量数据进行实时分析，提供决策支持。

(2) 通过机器学习算法，持续优化选煤工艺参数，实现动态调整，以适应原料变化。利用AI技术进行设备状态监测，预测潜在故障，实施预防性维护。

(3) 利用云服务进行数据存储和计算, 便于跨地域的数据共享和分析, 提升数据处理能力和决策速度。

(4) 推动智能选煤的标准化进程, 确保不同系统之间的兼容性和互操作性, 为行业升级提供规范指导。

(5) 构建完善的职业人才培养体系, 保障员工能够了解并掌握前沿的智能化技术, 不断提升自身的专业技能。

选煤过程的自动化与智能化转型是一项系统工程, 涉及到政策、技术、管理等多方面的革新。不仅需要行业内企业的主动参与和投入, 还需要政府层面的政策引导和支持。此外, 加强国际合作, 引进和消化吸收国际先进的智能化技术, 也是推动煤炭分选智能化进程的重要途径。总之, 选煤过程的自动化与智能化是煤炭工业未来发展的必然趋势, 将助力煤炭企业实现生产效率的飞跃, 同时减少对环境的负面影响, 为实现煤炭行业可持续发展目标做出贡献。

参考文献:

- [1] 王双明, 刘浪, 朱梦博, 等. “双碳”目标下煤炭绿色低碳发展新思路 [J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 152-171.
WANG Shuangming, LIU Lang, ZHU Mengbo, et al. New way for green and low-carbon development of coal industry under the target of “dual-carbon” [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 152-171.
- [2] 王双明, 申艳军, 宋世杰, 等. “双碳”目标下煤炭能源地位变化与绿色低碳开发 [J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2599-2612.
WANG Shuangming, SHEN Yanjun, SONG Shijie, et al. Change of coal energy status and green and low-carbon development under the “dual carbon” goal [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2599-2612.
- [3] LV Z Q, WANG W D, ZHANG K H, et al. A synchronous detection-segmentation method for oversized gangue on a coal preparation plant based on multi-task learning [J]. Minerals Engineering, 2022, 187: 107806.
- [4] 陈开玲. 关于选煤厂智能化建设的思考 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2021(12): 13-16.
CHEN Kailing. Reflect on the construction of intelligent coal preparation plant [J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2021(12): 13-16.
- [5] DENG J J, HUANG J Y, KUANG Y L. Design of integrated manufacturing system of coal preparation plant based on multi-agent [J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2009, 1(1): 713-717.
- [6] HU Q T, LIANG Y P, WANG H, et al. Intelligent and integrated techniques for coalbed methane(CBM) recovery and reduction of greenhouse gas emission [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(21): 17651-17668.
- [7] 刘峰, 郭林峰, 张建明, 等. 煤炭工业数字智能绿色三化协同模式与新质生产力建设路径 [J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 1-15.
LIU Feng, GUO Linfeng, ZHANG Jianming, et al. Synergistic mode of digitalization-intelligentization-greeniation of the coal industry and its path of building new coal productivity [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 1-15.
- [8] HOWER J C, FINKELMAN R B, EBLE C F, et al. Understanding coal quality and the critical importance of comprehensive coal analyses [J]. International Journal of Coal Geology, 2022, 263: 104120.
- [9] LIU Q L, QIU Z X, LI M, et al. Evaluation and empirical research on green mine construction in coal industry based on the AHP-SPA model [J]. Resources Policy, 2023, 82: 103503.
- [10] 林军. “数字化”、“自动化”、“信息化”与“智能化”的异同及联系 [J]. 电气时代, 2008(1): 132-137.
LIN Jun. Similarities, differences and connections among digitalization, automation, informationization and intelligence [J]. Electric Age, 2008(1): 132-137.
- [11] LUPI F, MABKHOT M M, BOFFA E, et al. Automatic definition of engineer archetypes: a text mining approach [J]. Computers in Industry, 2023, 152: 103996.
- [12] 刘卫国. 现代化、信息化、数字化、智能化及其相互关系 [J]. 中国铁路, 2011(1): 83-86.
LIU Weiguo. Modernization, informationization, digitalization, intelligentization and their relationships [J]. Chinese Railways, 2011(1): 83-86.
- [13] 王国法. 煤矿智能化最新技术进展与问题探讨 [J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 1-27.
WANG Guofa. New technological progress of coal mine intelligence and its problems [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 1-27.
- [14] 贾晓光. 新时代神东地区选煤技术现状与前景 [J]. 洁净煤技术, 2023, 29(S2): 706-709.
JIA Xiaoguang. Present situation and prospect of coal preparation technology in Shendong area in New Era [J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(S2): 706-709.
- [15] 王赫, 杜明辉, 徐鹏, 等. 空间引力波探测科学数据处理面临的挑战与人工智能技术的应用 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2024, 54(7): 68-90.
WANG He, DU Minghui, XU Peng, et al. Challenges in space-based gravitational wave data analysis and applications of artificial intelligence [J]. Scientia Sinica(Physica,

- Mechanica & Astronomia), 2024, 54(7): 68–90.
- [16] ALHUYI NAZARI M, AHMADI M H, MUKHTAR A, et al. Intelligent techniques for prediction characteristics of shell and tube heat exchangers: a comprehensive review [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2024, 158: 107864.
- [17] BRODNY J, TUTAK M. Challenges of the Polish coal mining industry on its way to innovative and sustainable development [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 375: 134061.
- [18] DE SA P. Mining and sustainable development: territorializing the mining industry [J]. *Mineral Economics*, 2019, 32(2): 131–143.
- [19] HOLM M, BEITLER S, ARNDT T, et al. Concept of shield-data-based horizon control for longwall coal mining automation [J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2013, 46(16): 98–103.
- [20] NEUER M J, LOOS M, MARCHIORI F, et al. From controlling single processes to the complex automation of process chains by artificially intelligent control systems: the Control in Steel project [J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2022, 55(40): 295–300.
- [21] 匡亚莉. 复杂选煤过程综合自动化系统框架与实施现状 [J]. *选煤技术*, 2006(1): 41–45, 61.
KUANG Yali. Frame of comprehensive automation system for complicated coal cleaning processes and current state of its implement [J]. *Coal Preparation Technology*, 2006(1): 41–45, 61.
- [22] 王海雷. 矿物加工过程中的脱水设备与方法 [J]. *冶金与材料*, 2023, 15(2): 93–95.
WANG Hailei. Dehydration equipment and method in mineral processing [J]. *Metallurgical and Materials*, 2023, 15(2): 93–95.
- [23] 黄波, 徐宏祥, 陈晶晶, 等. 重介质旋流器分选过程的离散分析与数值模拟 [J]. *煤炭学报*, 2019, 44(4): 1216–1223.
HUANG Bo, XU Hongxiang, CHEN Jingjing, et al. Discrete analysis and numerical simulation for separation process of dense medium cyclone [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(4): 1216–1223.
- [24] MEYER E J, CRAIG I K. The development of dynamic models for a dense medium separation circuit in coal beneficiation [J]. *Minerals Engineering*, 2010, 23(10): 791–805.
- [25] MEYER E J, CRAIG I K. Coal dense medium separation dynamic and steady-state modelling for process control [J]. *Minerals Engineering*, 2014, 65: 98–108.
- [26] 赵琰. 重介分选智能控制系统设计及过程数据分析研究与应用[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
ZHAO Yan. Research and application of parameter characteristics of heavy media separation process based on data mining. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019.
- [27] 汪水清, 朱金波, 朱再胜. 选煤厂煤泥压滤工艺优化及成本控制研究 [J]. *煤炭加工与综合利用*, 2017(1): 33–35.
WANG Shuiqing, ZHU Jinbo, ZHU Zaisheng. Study on optimization and cost control of slime pressure filtration process in coal preparation plant [J]. *Coal Processing & Comprehensive Utilization*, 2017(1): 33–35.
- [28] HANSDAH P, KUMAR S, MANDRE N R. Performance optimization of dewatering of coal fine tailings using Box–Behnken design [J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2018, 40(1): 75–80.
- [29] 王东辉. 基于滤饼孔隙结构的煤泥水过滤脱水机理与调控研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2018.
WANG Donghui. Study on dewatering mechanism and regulation of coal slurry filtration based on filter cake pore structure[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2018.
- [30] 袁伯文. 卧式沉降过滤离心脱水机工艺流程及参数优化研究 [J]. *选煤技术*, 2021(5): 34–37.
YUAN Bowen. Optimization of the process flowsheet and operating parameters of the horizontal screen-bowl centrifuge [J]. *Coal Preparation Technology*, 2021(5): 34–37.
- [31] 王建南. DMI-44132型筛网沉降离心脱水机在选煤厂的应用 [J]. *煤炭与化工*, 2014, 37(9): 95–97.
WANG Jiannan. DMI-44*132 type mesh sedimentation centrifuge centrifugal dehydrator application in coal preparation plant [J]. *Coal and Chemical Industry*, 2014, 37(9): 95–97.
- [32] 黄文辉, 武彦, 刘利波, 等. 选煤厂煤泥压滤脱水研究 [J]. *中国煤炭*, 2020, 46(2): 77–80.
HUANG Wenhui, WU Yan, LIU Libo, et al. Study on filter-press dewatering of slime in coal preparation plant [J]. *China Coal*, 2020, 46(2): 77–80.
- [33] 尚海洋, 周俊武, 徐宁, 等. 永平铜矿选厂精矿浓密脱水工段自动化系统开发与应用 [J]. *矿冶*, 2011, 20(2): 85–89.
SHANG Haiyang, ZHOU Junwu, XU Ning, et al. Development and application of automation system of concentrate thick and dehydration department of Yongping concentration plant [J]. *Mining and Metallurgy*, 2011, 20(2): 85–89.
- [34] 桂卫华, 陈志鹏, 何明芳, 等. 基于相关向量机的硫泡沫浮选液位软测量 [J]. *控制工程*, 2014, 21(1): 1–4.
GUI Weihua, CHEN Zhipeng, HE Mingfang, et al. Soft sensor of sulfur flotation froth level based on relevance vector machine [J]. *Control Engineering of China*, 2014,

- 21(1): 1-4.
- [35] 孙宗成, 常苗苗, 张鑫, 潘一选煤厂浮选工艺改造的研究与探讨 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2024(6): 5-9.
SUN Zongcheng, CHANG Miaomiao, ZHANG Xin. Research and discussion on the flotation process transformation of Panyi Coal Preparation Plant [J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2024(6): 5-9.
- [36] 熊成. 攀钢选厂浮选过程自动控制系统设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
XIONG Cheng. Control system design for the flotation process in steel-making factory[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [37] GAN Y Q, ZHANG G Y, LU F L, et al. Predicting future velocity of mineral flotation froth using STMA-LSTM with sequence images [J]. *Measurement*, 2024, 229: 114436.
- [38] WENK G J, WILKINSON L R, HOWARTH W J. Current applications of isotope on-stream analysis in mineral processing [J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 1976, 9(5): 399-404.
- [39] ZHANG W J, SUN W, ZHENG M J, et al. Prediction of collector flotation performance based on machine learning and quantum chemistry: a case of sulfide minerals [J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 342: 126954.
- [40] WANG Z C, LU M X, CHEN L, et al. Flotation control system based on recognition of froth image [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2000(2): 42-44.
- [41] 刘金平, 桂卫华, 唐朝晖, 等. 基于泡沫大小动态分布的浮选生产过程加药量健康状态分析 [J]. *控制理论与应用*, 2013, 30(4): 492-502.
LIU Jinping, GUI Weihua, TANG Zhaohui, et al. Dynamic bubble-size-distribution-based health status analysis of reagent-addition in froth flotation process [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(4): 492-502.
- [42] 李璐, 董志勇, 王然风. 选煤厂浮选自动加药专家系统的设计与实现 [J]. *煤炭工程*, 2013, 45(11): 16-18.
LI Lu, DONG Zhiyong, WANG Ranfeng. Design and realization on experts system of automatic reagent feeding for flotation in coal preparation plant [J]. *Coal Engineering*, 2013, 45(11): 16-18.
- [43] 张志伟, 范鸿卓. 浮选加药自动控制系统的优化设计 [J]. *选煤技术*, 2016(2): 71-73, 76.
ZHANG Zhiwei, FAN Hongzhuo. Optimum design of flotation agent addition automatic control system [J]. *Coal Preparation Technology*, 2016(2): 71-73, 76.
- [44] WANG Y Y, ZHANG Y. Comparison and analysis of institutionalization, standardization and normalization of enterprise safety production [J]. *Procedia Engineering*, 2012, 43: 574-577.
- [45] 石建光. 煤炭洗选加工现状及安全生产管理探讨 [J]. *中国安全科学学报*, 2021, 31(S1): 29-33.
SHI Jianguang. Discussion on the present situation of coal washing and processing and safety production management [J]. *China Safety Science Journal*, 2021, 31(S1): 29-33.
- [46] LIU Q L, SHANG J P, WANG J Z, et al. Research on the evaluation of the operating effectiveness of the safety double prevention mechanism of coal mine enterprises based on matter-element extension [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, 185: 899-909.
- [47] 胡孙琪, 徐晓玲, 胡煜文, 等. 基于AHP-模糊综合法的城市应急管理评价研究 [J]. *武汉理工大学学报(信息与管理工程版)*, 2022, 44(2): 188-194.
HU Sunqi, XU Xiaoling, HU Yuwen, et al. Evaluation of city emergency management capability based on AHP-fuzzy comprehensive evaluation [J]. *Journal of Wuhan University of Technology(Information & Management Engineering)*, 2022, 44(2): 188-194.
- [48] ZHANG Y M, SHANG K J. Evaluation of mine ecological environment based on fuzzy hierarchical analysis and grey relational degree [J]. *Environmental Research*, 2024, 257: 119370.
- [49] 焦瑞. 基于模糊综合评价法的绿色供应链中环境管理绩效研究 [J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 45(9): 71-77.
JIAO Rui. On environmental management performance in green supply chain based on fuzzy comprehensive evaluation [J]. *Journal of Southwest China Normal University(Natural Science Edition)*, 2020, 45(9): 71-77.
- [50] 王占富, 程会朝, 许慧林, 等. 煤泥浮选智能化控制系统研制 [J]. *煤炭加工与综合利用*, 2022(8): 6-11.
WANG Zhanfu, CHENG Huichao, XU Huilin, et al. Development of intelligent control system for slime flotation [J]. *Coal Processing & Comprehensive Utilization*, 2022(8): 6-11.
- [51] 张肇龙, 李冬, 张治军, 等. 山西焦煤集团选煤厂智能化建设的实践与思考 [J]. *中国煤炭*, 2024, 50(6): 98-104.
ZHANG Zhaolong, LI Dong, ZHANG Zhijun, et al. Practice and reflection on coal preparation plant intelligent construction of Shanxi Coking Coal Group [J]. *China Coal*, 2024, 50(6): 98-104.
- [52] SHI C L, CHEN S H, MA J, et al. Recovery of heavy medium in coal washing plant using a flat plate magnetic separator and optimization of flow and magnetic fields [J]. *Fuel*, 2023, 333: 126414.

- [53] 寇金成. 选煤厂重介质悬浮液密度控制方案优化 [J]. *山西焦煤科技*, 2021, 45(3): 41-43.
KOU Jincheng. Optimization of density control scheme of dense medium suspension in coal preparation plant [J]. *Shanxi Coking Coal Science & Technology*, 2021, 45(3): 41-43.
- [54] 李真. 选煤厂重介质分选智能控制系统研究 [J]. *自动化应用*, 2021(1): 1-3.
LI Zhen. Research on intelligent control system of heavy medium separation in coal preparation plant [J]. *Automation Application*, 2021(1): 1-3.
- [55] 王中民, 王然风, 王德璋, 等. 重介悬浮液密度智能控制系统 [Z/OL]. (2011-11-11) [2025-03-12]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=Qc2UN8NgW0uu9nj-tAHNEyP2GUEoahIujSGqWqkZiempLMme7quG3w3WtXBUB9ErC_xkkuDHV3YrG72UU2DIFiOF5VQB-bcUdcuRgQOLxjKi2um6ZIPZYnr8MRDLAXwkArfr77_RBYY1KWWEeHAWSw75bh8fTyZ5dntUeKPGEOR9JB0V8KeecuVQ=&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
WANG Zhongmin, WANG Ranfeng, WANG Dezhang, et al. Intelligent control system for heavy medium suspension density [Z/OL]. (2011-11-11) [2025-03-12]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=Qc2UN8NgW0uu9nj-tAHNEyP2GUEoahIujSGqWqkZiempLMme7quG3w3WtXBUB9ErC_xkkuDHV3YrG72UU2DIFiOF5VQB-bcUdcuRgQOLxjKi2um6ZIPZYnr8MRDLAXwkArfr77_RBYY1KWWEeHAWSw75bh8fTyZ5dntUeKPGEOR9JB0V8KeecuVQ=&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [56] 邱佳楷, 王然风, 付翔. 重介悬浮液密度宽域智能控制系统设计 [J]. *工矿自动化*, 2019, 45(7): 33-37.
QIU Jiakai, WANG Ranfeng, FU Xiang. Design of intelligent control system for dense medium suspension density with wide domain [J]. *Industry and Mine Automation*, 2019, 45(7): 33-37.
- [57] 陈龙, 刘全利, 王霖青, 等. 基于数据的流程工业生产过程指标预测方法综述 [J]. *自动化学报*, 2017, 43(6): 944-954.
CHEN Long, LIU Quanli, WANG Linqing, et al. Data-driven prediction on performance indicators in process industry: a survey [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(6): 944-954.
- [58] DAI W, LI D P, ZHOU P, et al. Stochastic configuration networks with block increments for data modeling in process industries [J]. *Information Sciences*, 2019, 484: 367-386.
- [59] 张云飞. 基于 PPO-NN 的数据驱动重介质选煤预测模型 [J]. *洁净煤技术*, 2024, 30(S2): 687-691.
ZHANG Yunfei. Data-driven prediction model of dense medium coal preparation based on PPO-NN [J]. *Clean Coal Technology*, 2024, 30(S2): 687-691.
- [60] ZHANG L J, XIA X H. A model predictive control for coal beneficiation dense medium cyclones [J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2014, 47(3): 9810-9815.
- [61] 黄罡. 面向重介选煤过程控制的虚拟仿真系统 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
HUANG Gang. Virtual simulation system for dense medium coal preparation process control [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [62] 葛威浩. 操作参数对浮选柱分选效果的影响 [J]. *洁净煤技术*, 2013, 19(3): 6-9, 13.
GE Xianhao. Influence of operation parameters on separation performance of flotation column [J]. *Clean Coal Technology*, 2013, 19(3): 6-9, 13.
- [63] BOUCHARD J, DESBIENS A, DEL VILLAR R, et al. Column flotation simulation and control; an overview [J]. *Minerals Engineering*, 2009, 22(6): 519-529.
- [64] 吴刚, 李红强, 郑杰. 基于深度学习的浮选加药控制系统 [J]. *山东煤炭科技*, 2020, 38(5): 196-198.
WU Gang, LI Hongqiang, ZHENG Jie. Flotation dosing control system based on deep learning [J]. *Shandong Coal Science and Technology*, 2020, 38(5): 196-198.
- [65] 董志勇, 王然风, 樊民强, 等. 基于 PSO-LSSVM 的煤泥浮选药剂自动添加系统研究 [J]. *煤炭工程*, 2017, 49(2): 117-120.
DONG Zhiyong, WANG Ranfeng, FAN Minqiang, et al. Research on automatic dosing system for coal slime flotation based on PSO-LSSVM [J]. *Coal Engineering*, 2017, 49(2): 117-120.
- [66] 王勇, 杨公训, 路迈西, 等. 煤泥浮选泡沫图像灰度行程及其统计纹理特征 [J]. *煤炭学报*, 2006, 31(1): 94-98.
WANG Yong, YANG Gongxun, LU Maixi, et al. The gray Run length and its statistical texture features of coal flotation froth image [J]. *Journal of China Coal Society*, 2006, 31(1): 94-98.
- [67] 陈丽娜. 基于 RSM 与 BP 神经网络的煤浮选试验研究 [J]. *矿产综合利用*, 2018(5): 28-32.
CHEN Lina. Experimental study on coal flotation based RSM and BP neural network [J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2018(5): 28-32.
- [68] BENDAOUIA A, ABDELWAHEDE H, QASSIMI S, et al. Artificial intelligence for enhanced flotation monitoring in the mining industry: a ConvLSTM-based approach [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2024, 180: 108476.
- [69] CHEN J, MIN F F, LIU L Y, et al. Hydrophobic aggregation of fine particles in high muddied coal slurry water [J]. *Water Science and Technology*, 2016, 73(3): 501-510.

- [70] ZHAO Y, MENG L, SHEN X N. Study on ultrasonic-electrochemical treatment for difficult-to-settle slime water [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 64: 104978.
- [71] 刘小会, 王建南. 斜沟煤矿选煤厂智能加药系统的研究与应用 [J]. *煤炭加工与综合利用*, 2020(8): 39-41.
LIU Xiaohui, WANG Jiannan. The study and application on smart dosing system at Xiegou Coal Preparation Plant [J]. *Coal Processing & Comprehensive Utilization*, 2020(8): 39-41.
- [72] 高勇, 王德刚, 孙涛, 等. 煤泥水处理工艺中自动加药系统的研究与应用 [J]. *煤炭加工与综合利用*, 2018(S1): 20-26, 8.
GAO Yong, WANG Degang, SUN Tao, et al. Research and application of automatic dosing system in slurry process [J]. *Coal Processing & Comprehensive Utilization*, 2018(S1): 20-26, 8.
- [73] 闫继宏. 煤泥水浓缩池自动加药系统的设计与应用 [J]. *煤炭加工与综合利用*, 2023(11): 26-28.
YAN Jihong. Design and application of automatic adding chemical system for coal slime water thickener [J]. *Coal Processing & Comprehensive Utilization*, 2023(11): 26-28.
- [74] 毛箫瑀, 刘令云. 煤泥水处理智能控制研究现状 [J]. *选煤技术*, 2022, 50(2): 78-85.
MAO Xiaoyu, LIU Lingyun. Present status of the research work on intelligent control in slime water treatment [J]. *Coal Preparation Technology*, 2022, 50(2): 78-85.
- [75] 徐子利. 门克庆煤矿选煤厂煤泥水智能加药系统研究与应用 [J]. *煤炭加工与综合利用*, 2022(12): 9-13.
XU Zili. Research and application of intelligent upgrade of flocculant adding system in Menkeqing Coal Preparation Plant [J]. *Coal Processing & Comprehensive Utilization*, 2022(12): 9-13.
- [76] 邓建军, 张孝逐, 林喆, 等. 基于光电测量的煤泥水自动加药系统研究 [J]. *洁净煤技术*, 2017, 23(2): 92-97, 102.
DENG Jianjun, ZHANG Xiaozhu, LIN Zhe, et al. Study on the automatic dosing system of coal slurry based on photoelectric measurement [J]. *Clean Coal Technology*, 2017, 23(2): 92-97, 102.
- [77] 董宪姝, 高贵军, 寇子明. 基于煤泥界面检测的絮凝剂溶解液自动添加系统的研究 [J]. *选煤技术*, 2007(4): 102-104, 4.
DONG Xianshu, GAO Guijun, KOU Ziming. Research on flocculent solving liquid automatic adding system based on coal slurry interface detection [J]. *Coal Preparation Technology*, 2007(4): 102-104, 4.
- [78] 成荣杰. 大海则选煤厂智能加介系统的改造实践 [J]. *煤炭加工与综合利用*, 2023(2): 47-50.
CHENG Rongjie. Transformation practice of intelligent adding system in Dahaize Coal Preparation Plant [J]. *Coal Processing & Comprehensive Utilization*, 2023(2): 47-50.
- [79] 张夺, 胡海洋, 王东起, 等. 不连沟煤矿选煤厂煤泥水智能加药系统的设计与应用 [J]. *选煤技术*, 2024(52): 79-85.
ZHANG Duo, HU Haiyang, WANG Dongqi, et al. Design and application of the intelligent agent dosing system in coal slurry water treatment process at Buliangou Mine's Coal Preparation Plant [J]. *Coal Preparation Technology*, 2024(52): 79-85.
- [80] YU B, FENG J S, LIANG Z C, et al. Construction and application of basic-element database for intelligent dust removal in coal mines [J]. *Procedia Computer Science*, 2023, 221: 1366-1375.
- [81] ALFARZAEI M S, NIU Q, ZHAO J Q, et al. Coal/gangue recognition using convolutional neural networks and thermal images [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 76780-76789.
- [82] YIN X H, HE Z, NIU Z W, et al. A hybrid intelligent optimization approach to improving quality for serial multistage and multi-response coal preparation production systems [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2018, 47: 199-216.
- [83] ZHENG C, WANG S R, ZHANG Y H, et al. A robust and automatic recognition system of analog instruments in power system by using computer vision [J]. *Measurement*, 2016, 92: 413-420.
- [84] 王崇君, 王瑞敏, 周广文. 浅谈在线灰分检测仪的作用 [J]. *中国煤炭*, 2002, 28(3): 49-50.
WANG Chongjun, WANG Ruimin, ZHOU Guangwen. Discussion on the function of online ash detector [J]. *China Coal*, 2002, 28(3): 49-50.
- [85] 岳跃辉. ZZ-89D型测灰仪在徐庄矿的应用 [J]. *中国高新技术企业*, 2016(23): 149-150.
YUE Yuehui. Application of ZZ-89D ash measuring instrument in xuzhuang mine [J]. *China High-Tech Enterprises*, 2016(23): 149-150.
- [86] 李元军, 张磊, 王良. HC-3500型(无源)灰分仪在柴里选煤厂的应用 [J]. *山东煤炭科技*, 2021, 39(6): 134-135, 140.
LI Yuanjun, ZHANG Lei, WANG Liang. Application of HC-3500(passive)ash analyzer in chaili coal preparation plant [J]. *Shandong Coal Science and Technology*, 2021, 39(6): 134-135, 140.
- [87] 代文飞, 高文字, 仇庆敏, 等. 基于视觉识别的浮选尾矿在线测灰仪的应用 [J]. *选煤技术*, 2021(3): 76-80.
DAI Wenfei, GAO Wenyu, QIU Qingmin, et al. Applica-

- tion of the vision recognition-based online flotation tailings ash monitor [J]. *Coal Preparation Technology*, 2021(3): 76–80.
- [88] MASAKI H, YASUIKE S, MATSUMOTO K, et al. Development of a novel non-contact and quick-response detector for boron in coal fly ash based on thermal neutron absorptiometry [J]. *Heliyon*, 2018, 4(8): e00752.
- [89] 汪洋, 黄宋魏, 唐敏, 等. 矿浆浓度检测技术及其应用研究 [J]. *自动化仪表*, 2022, 43(10): 96–100.
WANG Yang, HUANG Songwei, TANG Min, et al. Research on ore slurry concentration detection technology and its application [J]. *Process Automation Instrumentation*, 2022, 43(10): 96–100.
- [90] 耿文瑞. 选矿厂自动化测量仪表的发展现状 [J]. *现代矿业*, 2014, 30(7): 172–174.
GENG Wenrui. Development status of automatic measuring instruments in concentrator [J]. *Modern Mining*, 2014, 30(7): 172–174.
- [91] 曾理, 黄宋魏, 田妞, 等. 矿浆浓度自动检测技术研究进展 [J]. *化工自动化及仪表*, 2024, 51(2): 152–158.
- ZENG Li, HUANG Songwei, TIAN Niu, et al. Study progress in auto-detection technology of pulp concentration [J]. *Control and Instruments in Chemical Industry*, 2024, 51(2): 152–158.
- [92] 殷海宁. 选煤生产过程自动检测仪表的应用现状 [J]. *选煤技术*, 2006(5): 54–57.
YIN Haining. Application status of automatic detection instrument in coal preparation production process [J]. *Coal Preparation Technology*, 2006(5): 54–57.
- [93] 梁运涛, 田富超, 冯文彬, 等. 我国煤矿气体检测技术研究进展 [J]. *煤炭学报*, 2021, 46(6): 1701–1714.
LIANG Yuntao, TIAN Fuchao, FENG Wenbin, et al. Research progress of coal mine gas detection technology in China [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(6): 1701–1714.
- [94] 马克富. 煤炭检测仪器设备研究现状及发展趋势 [J]. *煤质技术*, 2021, 36(2): 73–80.
MA Kefu. Research status and development trend of coal testing equipment [J]. *Coal Quality Technology*, 2021, 36(2): 73–80.