

# 自动化选矿技术的现状及展望

陈海滔

文山学院, 云南 文山 663099

DOI: 10.61369/SSSD.2026070017

**摘 要：** 人工智能、大数据及物联网技术融合创新，推动现代选矿业深刻变革，还将实现由单机自动化迈向全流程智能化、现代化领域。因此，本文重在剖析破碎、磨矿、浮选关键环节中的自动化技术的应用情况，特别是自动加药系统和液位智能调控系统对于优化分选效率、稳定精矿品位所取得的积极成果。针对当下技术应用当中存在的传感器精度不够、多源数据难以融合以及复合型人才缺少等问题，给出了对应的解决办法。未来，选矿技术还会朝着数字孪生、无人值守和绿色高效的方向变革发展，创建起具有自感知、自决策、自执行能力的智能矿山生态系统，值得我们深入探索与实践。

**关 键 词：** 自动化选矿技术；现状；问题；对策；未来展望

## Current Status and Prospects of Automated Mineral Processing Technology

Chen Haitao

Wenshan University, Wenshan, Yunnan 663099

**Abstract：** The integrated innovation of artificial intelligence, big data, and the Internet of Things (IoT) technologies has driven profound transformations in the modern mineral processing industry, and will further realize the leap from single-machine automation to full-process intelligence and modernization. Therefore, this paper focuses on analyzing the application of automated technologies in key links such as crushing, grinding, and flotation, especially the positive achievements of automatic dosing systems and intelligent liquid level control systems in optimizing separation efficiency and stabilizing concentrate grade. In response to the current problems in technology application, such as insufficient sensor accuracy, difficulty in fusing multi-source data, and shortage of interdisciplinary talents, corresponding solutions are proposed. In the future, mineral processing technology will continue to evolve towards digital twin, unattended operation, and green efficiency, establishing an intelligent mine ecosystem with self-perception, self-decision-making, and self-execution capabilities, which is worthy of in-depth exploration and practice.

**Keywords：** automated mineral processing technology; current status; problems; countermeasures; future prospects

## 引言

矿产资源是国民经济发展的物质根基，选矿是连接采矿和冶炼的关键环节，其技术水平直接影响到资源利用率和未来经济效益。以往的选矿生产一直依靠人工经验来操作，存在劳动强度大、生产指标起伏较大、能耗高、安全风险多等问题。近年来，“十四五”规划持续推进，2025年中央经济工作会议重视“新质生产力”，智能化和绿色化已然成为矿业转型的关键方向。自动化选矿技术融合先进的传感、自动控制和数据分析方法，可以精确调节粉碎、磨矿、浮选等复杂工艺流程，不但明显削减了经营成本，还优化了资源回收率 and 环境友好性。研究尝试整理自动化选矿技术在各个主要工序中的应用情况，分析其中的技术难点，并对其在数字孪生和人工智能推动下的未来走向作出预估，希望给该行业的技术革新提供一些参考。

## 一、自动化选矿技术与应用

### （一）破碎的自动化选矿技术

破碎是选矿流程的关键一部分，其自动化程度直接影响到后续工序的入料粒度稳定性及整个系统的能效表现。当下，破碎自动化不仅仅是简单的单机开关控制而已，而是发展成依靠大量传

感器协同工作的全流程智能调节体系。现代化的破碎生产线往往装备有高精度激光雷达、毫米波雷达、机器视觉类的先进设备，可以随时掌握给料粒度分布情况、矿石硬度变动状况、破碎机内部物料填充比例等重要信息。凭借这些前端采集到的数据，中央控制单元借助复杂的模型预测控制理论，灵活调整给料机转速，破碎机排矿口径大小（即 CSS 值）以及主轴旋转速度，从而保证

破碎出来的颗粒一直保持在理想范围之内，很大程度上防止了过度粉碎的发生，明显改善磨矿阶段的加工能力<sup>[1]</sup>。对于圆锥破碎机和旋回破碎机而言，智能润滑系统和液压过载保护系统做到了深度结合，会遵照负载波动情况自动调整润滑压力及流量，一旦检测到无法破碎的物体进入时，可在极短时间内作出反应以自动打开排矿口。在大型露天矿山当中，破碎站已经同无人驾驶矿卡调度系统紧密相连，达成了从采场到破碎站之间的“无人化”连续运输及作业目标<sup>[2]</sup>。基于数据反馈进一步改善了爆破块度与破碎参数之间的适应关系，促使破碎工艺朝着“少人值守，无人操控，智能决策”的更高层级方向发展。

## （二）磨矿的自动化选矿技术

磨矿作业在选矿流程中能耗最大，而且对最终回收率的影响非常关键。当前，先进的磨矿自动化系统全面运用功率密度分析、声学频谱监测及磁电式料位计等方法，创建起针对磨机内部钢球充填率、矿浆浓度、物料粒度的立体感知网络。依靠所得数据，分布式控制系统（DCS）可以立即计算并调控给矿量、补水比例及分级机的返砂比，促使磨机一直维持在接近理想功率点的状态，很好地解决了传统人工操作时经常出现的“胀肚”或者“空磨”问题<sup>[3-4]</sup>。在半自磨（SAG）和球磨机联合工艺流程当中，智能控制系统采用了专家系统和模糊逻辑控制策略，可以按照矿石性质的波动自动调整磨矿细度设置值，并且同浮选前段的浓密机构成回路联动，以保证入选品位的稳定。在线粒度分析仪被采用之后，磨矿产品的细度做到了秒级反馈，系统依照此反馈自动调节旋流器组的工作压力和底流口大小，从而达成分级效率的动态改良。对于长期存在的衬板磨损难题，凭借振动信号分析和数字孪生技术的预测性守护系统，能够准确预测衬板剩余寿命并规划合适更换时间，再配合智能钢球投放系统，做到了介质损耗的精准化经营。磨矿自动化深入应用以后，吨矿电耗明显下降，且能够稳定磨矿细度，给后续选别作业营造了良好条件，是选矿厂降低成本、提升效益的关键因素。

## （三）浮选的自动化选矿技术

### 1. 自动加药系统

浮选过程中的药剂制度是决定矿物分离效果的关键要素，自动加药系统是达成药剂精确投放、维持浮选指标稳定的核心技术设备。现在的智能自动加药系统利用高精度伺服电机来带动计量泵或者依靠质量流量计形成闭环控制体系，把加药误差缩小到 $\pm 1\%$ 以内，一些先进的设备可以做到 $\pm 0.5\%$ 这样极高的准确度<sup>[5]</sup>。这个系统同在线品位分析仪，矿浆pH计，电位计以及泡沫图像分析系统紧密融合起来，创建起一种依靠机理模型和数据推动相融合的专家控制方案。系统可以随时察觉到矿浆里目标矿物含量，药剂剩余浓度以及泡沫矿化状况的微细变动，而且能在极短的时间内自动调节捕收剂，起泡剂和抑制剂的加入量，从而做到了“按需用药”和“前馈-反馈”双重控制。这样的智能加药形式不但大幅削减了药剂用量，平均节省比例超过15%，而且有效地抑制了由于操作人员经验差别造成的回收率波动，使得精矿品位和回收率一同得到了改善<sup>[6]</sup>。新型加药系统具有完备的自诊断能力和防堵塞功能，可自动清洗管路，监测药剂液位与粘度的改

变情况，保证在复杂恶劣工况下长时间稳定运行，做到了浮选药剂管理的数字化、精准化、智能化。

### 2. 液位智能调控系统

基于自动化技术，液位控制系统利用非接触式雷达液位计或者超声波液位计充当检测元件，配合电动气动调节阀或者变频调速渣浆泵作为执行机构，创建起响应速度快的闭环控制回路。该系统既能把单个浮选槽的液位精准控制在毫米级别范围之内，又可以经由多变量解耦控制算法来协调粗选、扫选、精选各个作业段之间的液位差异，保证矿浆流动稳定而且泡沫层厚度合适。更重要的是，现代液位智能调控系统并非孤立存在，而是同泡沫图像分析技术紧密关联，借助随时识别泡沫的大小、颜色、流速及稳定性，间接推测浮选状况，并反过来改良液位设置值。系统检测到泡沫黏度过大或者脉石含量增多时，会自动微调液位高度来改变刮泡深度，进而改善精矿质量。在大型浮选柱的应用方面，液位控制关乎微泡形成和矿化碰撞的概率，智能系统精准地维持气-液界面的稳定性，明显改善了微细粒矿物的回收率。此系统有着很强的抗干扰能力，当给矿量大幅波动或者药剂制度调整时，能立即回到稳态，有效地防止由于液位无法控制而产生的跑槽或者沉槽事故<sup>[7]</sup>。液位智能调控得到全面推广，很大程度上加强了浮选作业的整体稳定性及其分选效率。

## 二、自动化选矿技术的技术应用问题与对策

自动化选矿技术在深度应用方面面临诸多严峻考验，关键难点在于无法及时准确感知矿石复杂多变的性质，而且控制模型缺乏泛化能力。虽然在线元素分析仪和机器视觉系统已经得到初步推广，但是在应对高泥化、多金属共存、嵌布粒度特别细的复杂矿体时，传感器很容易受到矿浆气泡、磨损和化学药剂的影响，造成重要品位数据出现偏差，从而引起浮选药剂投放过多或者回收率产生波动。现存的控制系统大多依靠线性或者经过简化的机理模型，很难精确描绘选矿过程里那些强烈的非线性特征，巨大的时延现象以及众多变量相互交织的情况，所以像模型预测控制这样的先进控制方法，在实际操作环境里常常因为模型不相符合而失去作用，只能降级成传统的PID控制，使得智能化改良的实际效果大打折扣。针对前面提到的问题，迫切要形成起“感知-决策-执行”的闭合回路深度协同机制<sup>[8-9]</sup>。其一，要开发出抗干扰能力较强且具有自校准功能的多模态融合传感技术，把太赫兹、高光谱这些新的检测方法同原位分析联系起来以改善分析的精准度；其二，要推进数据激发与机理模型深入融合的数字孪生技术的应用，凭借深度学习找出大量历史生产数据当中潜藏的规律，动态调整控制参数，以此逐步构建出依托云边协同的自适应改良平台，做到从单个设备自动化朝着全流程智能协同控制转变，才能在波动的工作条件下守住指标稳定并且削减能耗药耗。

## 三、自动化选矿技术的发展展望

展望未来，自动化选矿技术会朝着全域感知、自主决策和绿

色集约方向发展，改变矿业生产的既定模式。工业物联网、5G 低时延通信、边缘计算技术成熟后，选矿厂就能创建起毫秒级响应速度的神经末梢网络，做到从破碎磨矿一直到脱水尾矿处理的全过程数字化模拟。数字孪生体既用来随时观察情况，又会成为工艺改良和故障预测的关键依托。借助虚拟空间的快速更新来引导实际生产，极大地缩减新工艺调试的时间。人工智能会从辅助手段变成具有认知能力的“超级操作员”，依靠改进学习算法，在多种限制之下自行探寻整体上的理想解决方案，达成不需要人工干涉的自适应闭环调节，而且能够遵照市场金价、电价、药剂成本的变动自动调整生产计划以最大程度提升经济收益<sup>[10]</sup>。当然，技术发展需紧密结合双碳目标，要精准执行能量流与物质流运作，大幅缩减单位矿石处理的能耗和水耗，助力打造无废矿山。日后选矿厂会变成高度整合的黑灯工厂，人机协作形式会是人类专家着重开展战略决策与异常处理，常规运作则完全由智能系统

接手，逐步创建起资源利用率最高、环境影响最小、韧性很强的智慧矿业新生态。

## 四、结论

综上所述，自动化选矿技术飞速发展，在破碎、磨矿及浮选等环节广泛应用，尤其是自动加药与液位调控技术的成熟应用，有效解决了传统生产中指标不稳定、能耗高的问题。尽管当前仍面临高端传感器依赖进口、数据孤岛效应及跨界人才匮乏等挑战，但随着5G、工业互联网及人工智能技术的持续突破，这些问题正逐步得到缓解。未来，选矿技术将深度融入数字孪生与自主决策体系，实现真正的“无人化”与“黑灯工厂”愿景。进而在保障国家资源安全、实现“双碳”目标及构建绿色矿山方面发挥不可替代的战略作用，引领全球矿业进入智慧互联的新纪元。

## 参考文献

- 
- [1] 衣成壁. 电气控制自动化技术在选煤厂中的应用[J]. 自动化应用, 2024, 65(S1): 273-275.
- [2] 霍鹏. 自动化技术在选煤厂机电设备方面的实践研究[J]. 矿业装备, 2024, (06): 114-116.
- [3] 肖良. 矿物加工工程中的自动化技术应用问题及优化对策分析[J]. 矿业装备, 2024, (04): 109-111.
- [4] 牛慧, 滕斌, 袁金龙. 电气控制自动化技术应用于选煤厂的实践探究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2023, (19): 157-159.
- [5] 凌佳韵. 自动化监测技术在矿用设备安全防护中的应用[J]. 设备管理与维修, 2023, (18): 129-131.
- [6] 张添钧. 基于矿业新形势下选矿自动化技术应用及建议探讨[J]. 有色矿冶, 2021, 37(05): 59-61.
- [7] 白益文. 电气控制自动化技术在选煤厂中的应用分析[J]. 矿业装备, 2021, (03): 232-233.
- [8] 徐鹰, 岳慧君, 段伟杰. 基于选矿电气自动化控制技术特点与运用探讨[J]. 科技与创新, 2020, (07): 145-146.
- [9] 徐小贤. 矿山选矿作业中电气自动化技术的应用及其创新发展[J]. 世界有色金属, 2019, (10): 66-67.
- [10] 彭培祯. PLC 控制在选矿工艺破碎自动化中的应用[J]. 设备管理与维修, 2018, (22): 168-169.