

高效磨矿分级新工艺、新设备及新技术研究

裴跃勇 刘云鹏 张广庆 黄玉辉 马远峰

内蒙古包钢钢联股份有限公司白云选矿分公司（选矿厂） 内蒙古自治区 包头 014080

【摘要】：磨矿分级是矿产资源加工利用的核心环节，其效率与能耗直接决定选矿厂的经济效益与绿色发展水平。本文系统综述了高效磨矿分级领域的最新研究成果，从新工艺创新、新设备研发、新技术集成三个维度展开深入分析。重点探讨了“多碎少磨”升级工艺、高压辊磨-微制粒协同工艺等新型工艺的技术特征与应用效果；详细介绍了高效搅拌磨机、智能分级设备等新型装备的结构创新与性能优势；深入剖析了智能控制、材料强化、数字孪生等新技术在磨矿分级系统中的集成应用机制。结合江西铜业、宝武资源等工业应用案例，验证了新型技术体系在节能降耗、提质增效方面的显著成效。最后展望了未来磨矿分级技术向智能化、低碳化、模块化方向发展的趋势，为矿产加工行业的高效绿色转型提供技术参考。

【关键词】：磨矿分级，新工艺，新设备，智能控制，节能降耗

DOI:10.12417/2811-0536.26.05.077

1 引言

在矿产资源加工过程中，磨矿分级工序承担着将原矿破碎至目标细度、实现有用矿物与脉石矿物单体解离的关键任务，其能耗占选矿厂总能耗的60%~80%，作业成本占比超40%。随着全球矿产资源日趋贫、细、杂化，传统磨矿分级工艺面临效率低下、能耗过高、产品质量不稳定等突出问题，已难以满足现代矿业绿色低碳、高效集约的发展需求。

近年来，随着材料科学、智能控制、数字技术与矿物加工工程的深度融合，高效磨矿分级领域涌现出一系列新工艺、新设备与新技术，推动磨矿分级系统向高效、高精度、智能化方向转型升级。本文通过梳理国内外最新研究与工业应用成果，系统分析各类创新技术的核心原理、技术优势与应用效果，旨在为磨矿分级技术的优化升级与产业应用提供理论支撑与实践指导。

2 高效磨矿分级新工艺研究

新工艺的创新核心在于优化磨矿分级流程、强化能量利用效率、提升矿物解离质量，主要包括“多碎少磨”升级工艺、高压辊磨-微制粒协同工艺、多段分级闭环工艺等。

2.1 “多碎少磨”升级工艺

“多碎少磨”是磨矿分级领域的经典优化理念，其核心是通过强化破碎环节、降低入磨矿石粒度，减少磨矿工序的能量消耗。近年来，该工艺通过与高压

破碎设备、精准筛分技术的结合实现升级突破。江西铜业德铜泗洲厂通过引入高压辊磨机改造碎矿系统，历经五年试验改进，将碎矿产品粒度P80从8.62毫米降至5.62毫米，突破6毫米行业大关，-5毫米细粒级含量提升近20个百分点。工业数据显示，该升级工艺使下游球磨机处理能力显著提升，碎磨电耗与钢球单耗双双下降，2024年工厂原矿处理量、磨机台效等7项关键指标创历史最好水平，充分验证了“多碎少磨”升级工艺的降本增效潜力。

该工艺的技术关键在于破碎与磨矿环节的参数协同优化，通过精准控制破碎产品粒度分布，使入磨物料更符合磨矿设备的最佳工作区间，避免过破碎与欠破碎现象，从而提升能量利用效率。山东大学研发的脉冲电磁预裂装置进一步强化了该工艺效果，通过破碎前施加高频脉冲电磁场弱化矿物晶界结合力，使临界破碎应力降低28%，在海螺水泥石灰石破碎线应用中实现系统综合电耗下降9.7%，年节约电费超320万元。

2.2 高压辊磨-微制粒协同工艺

针对低品位难处理矿石的高效利用问题，高压辊磨-微制粒协同工艺实现了破碎与分选的深度耦合创新。该工艺通过高压辊磨机对矿石进行高压挤压力粉碎，不仅大幅提升细粒级矿物含量，更在矿石内部形成大量微裂纹，为后续分选创造有利条件；同时结合絮凝团聚微制粒技术优化矿堆结构，解决细粒级矿石堆浸渗透性差的行业难题。

山东黄金选冶实验室研发的该工艺在贫硫化物半氧化微细粒浸染低品位金矿石堆浸中应用成效显著，金浸出率提升10%以上，推动低品位难处理金矿从“可利用”向“高效利用”转变。其技术优势在于通过高压辊磨的“微裂纹效应”强化矿物解离，再通过微制粒技术改善矿堆渗透性，缩短浸出周期，实现资源利用效率与生产效率的双重提升。洛钼中国区选矿一公司应用该工艺相关的高压辊磨技术，2024年总处理量超300万吨，单位能耗下降25%，设备维护成本降低40%。

2.3 多段分级闭环工艺

传统磨矿分级工艺存在分级精度低、合格产品循环过磨等问题，多段分级闭环工艺通过构建“粗磨-分级-细磨-再分级”的多级闭环系统，实现不同粒度物料的精准分流与针对性磨矿。该工艺通过在线粒度监测设备实时反馈产品粒度信息，动态调整各段磨矿参数与分级效率，确保合格产品及时分离，避免过磨造成的能量浪费与矿物泥化。

金川集团选矿厂采用多段分级闭环工艺，结合智能稳定给料系统，首次实现碎矿与磨矿工序的多参数协同控制与物料平衡，使磨矿可选粒级提高10%以上，2023年全厂系统作业率达到90.7%，部分系统负荷率突破103%，镍、铜回收率分别高于计划0.13%和1.03%。该工艺的核心创新点在于通过闭环控制实现磨矿分级系统的动态优化，提升了系统运行的稳定性与高效性。

3 高效磨矿分级新设备研发

新设备的研发聚焦于高效能、长寿命、智能化三大方向，通过结构创新、材料升级与智能赋能，显著提升磨矿分级设备的综合性能。主要包括高效搅拌磨机、智能高压辊磨机、精准分级设备等。

3.1 高效搅拌磨机

搅拌磨机通过高速旋转的搅拌器带动研磨介质产生剧烈冲击、研磨作用，相较于传统球磨机，具有能耗低、磨矿效率高、产品粒度均匀等优势，已成为细磨与超细磨领域的核心设备。2025年，Metso公司的Vertimill®和HIG Mill™搅拌磨机实现销量突破，全年售出二十余台，总装机功率达67兆瓦。该类设备通过优化搅拌器结构与研磨介质运动轨迹，能量利用率大幅提升，与传统球磨机相比能耗降低35%，单台设备年节约电力约36,550千瓦，相当于减少135,000吨CO₂排放，相当于20,200人年均碳排放量的总和。

搅拌磨机的技术创新主要体现在三个方面：一是

采用高效传动系统，中信重工研发的双级行星齿轮—永磁直驱系统将传动效率提升至96.2%，取消中间传动环节，有效抑制启停过程中的能量冲击；二是优化研磨腔结构，通过数值模拟技术设计合理的腔型曲线，提升能量传递效率；三是适配新型研磨介质，采用高硬度陶瓷介质替代传统钢球，降低磨损污染与能耗。

3.2 智能高压辊磨机

高压辊磨机作为“多碎少磨”工艺的核心设备，近年来在智能化与大型化方面取得显著进展。新型智能高压辊磨机由机架系统、定辊装置、动辊组件、精准施压机构及智能控制系统构成，工作压力可达50-300兆帕，通过对向旋转的高强度合金辊体实现矿石的挤压粉碎。其智能控制系统可根据入料粒度、硬度等参数动态调整辊压与转速，确保设备在最佳工况运行。

洛钼中国区选矿一公司应用的智能高压辊磨机，通过物料特性与设备参数的动态匹配，成功处理含水8%的粘湿物料，解决了传统设备的堵料难题，辊体使用寿命突破1万小时，较传统设备提升3倍以上。江西铜业泗洲厂采用高压辊磨机改造二期碎矿工段，开创国内高压辊磨机应用于斑岩类铜矿石破碎的先河，实现碎矿产品粒度的突破性降低。

3.3 精准分级设备

分级设备的精准度直接影响磨矿系统效率，新型精准分级设备通过结构优化与智能监测技术的融合，实现分级效率的大幅提升。主要包括智能水力旋流器组、激光粒度在线监测分级机等。

智能水力旋流器组通过采用可变锥角设计与智能调压装置，可根据物料特性动态调整分离参数，同时结合图像识别技术监测溢流与底流浓度，实现分级精度的实时调控。宝武资源大红山矿业采用智能分级设备与磨矿系统协同运行，配合磨矿分级专家系统，使分级产品浓细度合格率显著提升，为后续浮选作业提供优质原料。激光粒度在线监测分级机则通过激光粒度仪实时采集产品粒度数据，将数据反馈至控制系统，自动调整分级设备参数，避免不合格产品进入后续工序，提升系统整体效率。

4 高效磨矿分级新技术集成

新技术的集成应用是推动磨矿分级系统智能化、高效化的核心驱动力，主要包括智能控制技术、材料强化技术、数字孪生技术等，实现磨矿分级过程的精准调控、设备寿命延长与全流程优化。

4.1 智能控制技术

智能控制技术基于大数据、人工智能算法，实现磨矿分级过程的自主感知、决策与调控，解决了传统人工操作响应慢、参数匹配差等问题。宝武资源大红山矿业联合开发的磨矿分级专家系统是典型代表，该系统通过采集给矿量、磨矿浓度、半自磨机负荷等多维度数据，自动寻找最佳工作点，实现两段磨矿系统的负荷平衡与稳定运行。

工业应用数据显示，该系统使原矿处理量提高14.31%，电耗降低12.34%，钢耗降低12.63%。配套的智能加球机将传统“大水漫灌”式补加升级为“精准滴灌”，减少介质磨损，进一步降低能耗。在浮选环节，通过高速摄像头采集泡沫图像，结合Crystal-SortNet算法实现泡沫特性的量化分析，使铜回收率提高1.01%，减少作业人员4人。智能控制技术的核心优势在于通过多参数协同分析与自主调控，提升系统运行的稳定性与经济性。

4.2 材料强化技术

磨矿分级设备的磨损问题是影响运行效率与成本的关键因素，材料强化技术通过采用新型耐磨材料与表面改性技术，显著提升设备易损部件的使用寿命。山东大学与中材国际联合研发的纳米晶强化衬板，通过调控材料微观晶粒尺寸至100纳米以下，增强冲击韧性与抗疲劳性能，使球磨机动能损耗降低17.3%，能量利用率提升至58.4%，接近热力学理论上限的70%。

4.3 数字孪生技术

数字孪生技术通过构建磨矿分级系统的虚拟数字镜像，实现物理实体与虚拟模型的实时映射与协同优化。华润水泥与华为云合作构建的“磨矿系统数字镜像平台”，整合12类传感器数据与CFD仿真模型，实现研磨介质运动轨迹、物料填充率与功率曲线的毫秒级同步推演，可提前15分钟预测能效拐点，自动调

整给料配比与介质级配，使系统效率稳定在55%以上。金川集团选矿厂基于数字孪生技术构建“数字基础设施集成”场景，实现破碎—磨矿—浮选全流程的一体化智能管控，通过5G+技术实现底层数据的实时采集与集成分析，设备故障率每年降低约15%。WearCloud系统通过实时校准仿真参数，实现设备磨损状态的精准预测，年避免非计划停机损失670万元。预计到2027年，重点企业设备数字孪生覆盖率将达60%，推动磨矿分级系统向全生命周期智能管理转型。

5 工业应用案例分析

江西铜业泗洲厂高效碎磨工艺升级

江西铜业德铜泗洲厂针对矿石坚硬、老旧设备效率低等问题，启动《泗洲选矿厂高效节能碎磨工艺技术研究》项目，引入高压辊磨机改造二期碎矿工段，构建升级型“多碎少磨”工艺系统。通过五年试验改进与技术积累，2024年实现碎矿产品粒度P80降至5.62毫米，较上年同期降低2.52毫米，-5毫米细粒级含量提升近20个百分点。

该项目的成功实施使下游球磨机处理能力显著提升，碎磨电耗与钢球单耗大幅下降，2024年工厂原矿处理量、磨机台效等7项关键指标创历史最好水平，验证了高压辊磨技术与“多碎少磨”工艺结合在大型斑岩铜矿石加工中的可行性与优越性，为同类矿山的工艺升级提供了实践范例。

6 结论

高效磨矿分级新工艺、新设备及新技术的研发与应用，是解决传统磨矿分级系统效率低、能耗高、成本高问题的关键路径。本文研究表明：“多碎少磨”升级工艺、高压辊磨-微制粒协同工艺等新工艺通过流程优化实现能量高效利用；高效搅拌磨机、智能高压辊磨机等新设备通过结构创新与材料升级提升综合性能；智能控制、数字孪生等新技术通过精准调控与全流程优化推动系统智能化转型。

参考文献：

- [1] Metso.Record year for Metso stirred mills as mining industry opts for energy-efficient comminution technology [EB/OL].2026-01-13.
- [2] 豆丁网.2025 及未来 5 年中国水泥选矿设备行业发展监测及发展战略规划报告[EB/OL].2026-01-02.
- [3] 江西铜业集团.德铜泗洲厂碎矿产品粒度 P80 刷新纪录[EB/OL].2025-04-18.
- [4] 搜狐网.宝武资源大红山矿业选矿工序智能化升级纪实[EB/OL].2026-01-13.
- [5] 甘肃省科学技术厅.集成数字基础设施，高效利用矿产资源[EB/OL].2025-01-02.