

低品位矿高效开采利用技术研究

曹科亮

贵州省金沙县新化乡福利院煤矿，贵州省金沙县，551807；

摘要：低品位矿蕴藏量大而品位偏低，伴生脉石多、赋存结构复杂，导致传统流程在能耗、水耗与药耗方面负担沉重。为在资源约束与环境约束下实现稳定收益，需要以系统工程方法重构流程，将选采、爆破破碎、分级磨矿、预先富集、粗粒抛尾、尾矿利用与运行调度形成闭环。本文从资源属性表达、流程窗口设定与协同优化三方面展开，构建以减量化、连续化与智能化为核心的技术框架，并提出以指标治理、阈值管理与在线学习支撑的动态优化路径，使低品位矿在安全、经济与生态边界内实现高效利用。与以设备效率为中心的改进不同，该框架以整体能水强度与稳定度为约束，把单位金属边际成本作为综合指标，推动参数与组织协同调整与持续回溯。

关键词：低品位矿；预先富集；粗粒抛尾；分级磨矿；流程优化

DOI：10.69979/3060-8767.25.05.061

引言

低品位矿在全球矿业结构中的占比逐年升高，传统依赖深度磨矿与高药耗分选的模式越来越难以维持综合效益。资源品位的空间异质性与时间波动叠加水资源约束，使流程需要具备可切换、可减量与可追溯的能力。面向这一目标，应在上游推进精准选采与爆破破碎协同，在中游以分级磨矿与早期分选抑制无效细化，在下游通过尾矿资源化与能水管理形成闭环。方法层面强调机理与数据融合、窗口化控制与滚动优化，管理层面强调标准化作业包、跨专业协同与数字化监测，使技术能力通过组织机制转化为稳定的产出与可复制的流程。评价标准不仅追求单次回收率的高点，更关注稳定度、能水强度与边际成本的低点。与孤立改造相比，流程一体化带来的收益源自耦合项的削减与窗口的重叠扩展；组织一体化带来的收益则体现在标准作业、信息共享与学习闭环。下文从理论框架、采矿策略与选冶协同三个层面展开论述，对尾矿资源化与低碳运行给出控制要点。

1 流程重构的理论框架与目标体系

1.1 资源属性表达与可选性判据

资源属性决定流程边界。为把矿体差异转化为可计算的工艺窗口，需要以三维地质建模、矿物学解译与粒度级配表征为基础，建立互锁指数、暴露率与解离粒度之间的映射，使解离目标具体化。可将矿体按空间变异性划分为均质区与非均质区，前者以稳定工况求稳，后者以旁路与参数切换应对^[1]。针对含泥与易泥化特征，应在破碎筛分前设置除泥与擦洗，避免泥膜削弱下游选

择性。可采价值不仅取决于金属含量，还受剥采比、运输距离、水与尾砂处置约束影响，需以多目标函数刻画经济与环境的联合边界。由此形成的指标体系应覆盖品位、粒度、矿物组合、含泥、含水五类核心指标，并为每类指标设定可行区、警戒区与禁入区，作为流程切换与阈值触发的依据。评价框架上，可将可选性分级划分为高、中、低三档，用暴露率阈值与互锁阈值共同判别；对低可选性区段，优先考虑结构性解离与应力解理诱导，再考虑细化粒度。为提升表达与决策的一致性，应把采样、测试与仿真纳入同一数据结构，形成从样品到模型到参数的映射链，使“资源—流程—指标”的关系可以被追踪、被解释与被更新。对不确定性较大的边界区，设置探采与试验的小型循环线，用滚动试验校正判据并更新阈值，保证窗口既不过宽造成浪费，也不过窄造成回收损失。参数管理需要与空间位置绑定。以块段为基本单元，给出粒度目标、能耗上限与分选阈值的三元组，并在生产中以偏差带管理实施；当任一指标进入警戒区，系统触发旁路或降载方案。为防止指标间耦合造成误判，应在控制层引入软测量，将难以在线获取的矿物学变量由可测信号估计，实现对可选性的连续表征。

1.2 减量化、连续化与智能化的系统目标

目标体系围绕三条主线展开。减量化要求在尽可能粗的粒度区间完成有效分离，让无效物料早抛弃，从而压低磨矿与药剂强度；连续化要求以就地破碎、曲线带式输送与缓冲均化组成稳定节拍，降低装卸与等待造成的能耗浪费；智能化要求用在线监测、软测量与学习算法将波动转化为可预测的扰动，形成“感知—决策—执

行一校核”的快速闭环^[2]。三者并非孤立：减量化提升了连续化的可实现性，连续化为智能化提供高质量数据，智能化反过来稳定前两者的窗口。工程实现上，应把关键节点的约束转化为窗口参数，如给矿粒度、筛分效率、矿浆浓度、介质密度与风水配比，并在控制层由边缘侧的轻量策略与中心侧的优化策略协同，确保在品位波动与环境变化下仍保持在可行区内。指标治理方面，建议以单位金属能耗、单位金属取水量与尾砂固含为主指标，以回收率稳定度与工况切换次数为过程稳定性指标；把这些指标映射到设备层的功率、振动与流量信号上，形成可落地的操作目标。控制策略可以采用层次化结构：现场层采用规则与边界控制，保障安全与节拍；过程层采用模型预测或自适应控制，优化能耗与产能；计划层采用滚动优化，根据矿源、气候与水位等外部信息重排参数。为确保策略可解释，应设置因果校核环节，将每次策略调整与指标变化对应起来，沉淀成可移植的标准作业包与参数库。稳定性来自缓冲与均化。关键节点布置等容量料仓与按流量反馈的给料控制，削弱上游冲击；磨矿前设置浓度与粒度双闭环，避免突变引起的过磨或欠磨；分选段设置旁路与短路，允许在窗口边缘快速试错并回退。数字孪生模型用于在安全边界内进行参数扰动试验，提前评估极端情形下的工况可行性，把异常处置流程固化为预案库，以减少现场的犹豫时间与沟通成本。

2 采矿阶段的高效开采策略

2.1 精准选采与爆破破碎协同

精准选采通过对矿体与围岩的快速识别，减少脉石混入与品位稀释。可将颜色、密度、音响特征与快速矿物学判定整合为现场可执行的识别规则，形成采前标识、采中核验与采后复核的台账链^[3]。爆破与破碎需共设计：孔距排距、装药结构与延时制度决定块度分布与裂隙连通度，目标是获得窄分布块度并暴露有用矿物解理，既避免二次破碎过多，也避免过粉导致泥化。破碎站宜前移至采场或坑内，缩短转运距离；与筛分联动实现先筛后破与按需破碎，使可在粗粒区完成分选的物料直接进入预先富集，难选部分再进入下轮破碎磨矿。通过在线粒度与皮带秤数据，构建爆破—破碎—筛分的能效看板，以负荷率与单位能耗为双指标，指导班组在稳态高效区运行。识别手段需兼顾速度与可靠性。可将图像、光谱与声发射信号融合判断块体属性；当判定概率低于阈值

时转入人工核验通道，避免误分导致质量波动。爆破参数优化以能量分配与裂纹导向为核心，通过台阶分区装药与延期曲线整形，在关键结构方向优先扩展裂隙，提升解理暴露率。破碎则采用按需原则：以开侧排矿口与电流负荷构成的双阈值控制破碎粒度，保持在分选目标的可行带内。为减少二次转运，可将移动式破碎筛分单元布置为可移动模块，随采场推进顺延迁移。数据侧需把爆破、破碎与筛分的关键变量汇聚到同一时间轴，构建从能量投入到粒度产出的因果链，量化不同环节的贡献与损失。根据该因果链，制定以负荷率、空转率与返料率为核心的班组考核，鼓励在稳态带内运行而非盲目追求瞬时高负荷。对极端天气、低温或高湿条件，提前启用防冻、防堵与防滑方案，并在策略库中切换到保守阈值，保证安全边界不被突破。

2.2 连续输送、分级回路与节能调度

连续输送以带式输送为骨干，配置可逆分流与分仓系统，实现不同品位物料的分时入厂与定量给料。为抑制无效磨矿，应建立分级回路与旁路抛尾通道，使难以在粗粒获得选择性的部分循环回破碎，选择性良好的部分进入预先富集与粗选^[4]。调度层以约束优化描述风、水、能三者的边界与目标，实时给出输送速度、破碎开度、筛分临界与给矿浓度的组合方案；当品位与含泥突变时，系统自动转入安全参数集并延长均化时间。为应对季节性变化，预设雨季与旱季两套参数，把含泥与含水波动吸收到缓冲与分类策略中，确保产线节拍与能效维持在稳态带内。输送系统的能效在于摩擦控制与节拍匹配。通过张力分区与弧形托辊降低运行阻力，以速度—载荷曲线保护皮带处于高效率区。分仓与定量给料结合，可把不同品位物料按时间片混配到稳定序列，减少下游参数的频繁震荡。分级回路设计上，遵循“先筛后磨、能量随粒度递减”的原则；细粒返回磨矿，粗粒经预先富集后抛尾或进入再破碎，避免把本应由筛分承担的任务推给高能耗单元。调度方面，以多目标滚动优化平衡产量、能耗与水位。将风、水、电等资源视作可调配的约束，定义代价函数并在给定预测时域内求解得到操作序列；当实际扰动超过阈值时，缩短时域并增加鲁棒项，保证可行性。为处理季节性含泥上升，提前加大擦洗与浓密能力占比，并调整输送倾角与落料高度，减少黏附与堵塞。系统通过异常识别模型对跑偏、撕裂、卡料与筛孔堵塞进行早期预警，把停机损失控制在最小。在人机协同方面，通过可视化大屏将关键窗口、阈值与

稳态带直观化,使操作员与算法对系统状态形成一致理解;通过操作回放与事件快照,支持班组复盘并快速纠偏,把经验沉淀为可移植的规则。

3 选冶协同与综合利用路径

3.1 预先富集与粗粒抛尾的窗口控制

预先富集的价值在于以较低能耗实现早期减量。可依据密度差、光谱差或结构差选择对应手段,密度差显著时采用干式或湿式重力分选,光谱差突出时采用成像识别分选,结构差明显时采用擦洗解离;不同手段按粒度级配分工,而非简单叠加。窗口控制需用试验获得粒度—暴露率—回收率关系,明确给矿粒度与分选阈值的可行区。当监测到暴露率降低或含泥上升时,应将目标粒度上移并增强擦洗强度,防止选择性被泥膜遮蔽。药剂制度遵循少而准的原则,优先采用选择性高与环境负荷低的体系,并将矿浆浓度、搅拌功率与起泡特性纳入协同窗口,避免化学作用对物理分选产生负反馈。为提升鲁棒性,应将分选手段按粒度带并行布置,并以概率筛选进行投料分配,使每个子系统在自身最优响应区工作。暴露率不足时优先采用结构性解离与擦洗,再考虑粒度细化,避免盲目深磨;当含泥与黏性过高时,采用分级脱泥与絮凝沉降组合,减少泥膜对界面作用的遮蔽。成像分选需以阈值漂移控制应对矿色波动,并通过小样本增量学习保持识别器稳定。重力分选需以介质密度、脉动强度与床层厚度的耦合窗口维持选择性,任何单变量的激进调整都会牺牲稳定度。药剂制度的设计遵循最小干预原则。以选择性强、毒性低与可降解为优先,并在线滴定或软测量估计有效浓度,防止过量引发泡沫体系失稳。控制层把矿浆浓度、搅拌能、气泡粒径与气液比纳入统一窗口,通过稳态带与斜率约束避免振荡。为保证知识可迁移,建立由试验—生产—回溯组成的数据闭环,把窗口边界与触发条件按矿性标签化管理,使不同矿种之间的经验得以复用。

3.2 尾矿资源化、充填协同与低碳运行

尾矿与废石的去向决定全流程的边界条件。对可回收成分,采用再磨再选与分级回收;对占比高的惰性脉石,发展建材化与土工材料化路径,生产充填骨料、胶结材料与道路基层材料。采场与选厂之间建立充填协同,使采空区获得支护并把尾砂转化为承载构件,降低地表沉陷与库容压力。低碳运行依托能量梯级利用与水循环再生:破碎筛分余热回收、磨矿泵与压缩机的负荷

优化、浓密澄清回水的分级回用,共同压低单位金属的能水强度。信息化平台对品位、粒度与能耗的联动进行可解释建模,输出参数敏感性图谱与边界预警,支撑现场在安全阈值内做出快速而可追溯的调整。资源化路径的前提是性能与安全。充填用骨料需满足级配、强度与流动性要求,胶结材料需兼顾早期强度与长期耐久;建材化产品需满足抗冻、抗渗与收缩控制等指标。对含潜在环境风险的尾矿,应在稳定化与固化后再利用,并设置渗滤监测与围挡防护,保证生态边界不被突破。碳管理侧,通过余热回收、功率优化与有功无功协调降低峰值功率;水管理侧,通过澄清回水分级回用、低耗冲洗与干湿联合抛尾降低新水消耗与排放负荷。为实现全流程可解释与可审计,应建立碳足迹与水足迹台账,把能耗、水耗与排放分摊到设备、工序与产品三个维度,按月滚动披露并对偏差归因。数字化平台将品位、粒度与回收波动映射到能水强度变化,给出灵敏度图谱与边界预警,并把每次策略调整记录为事件,形成可复盘的知识库。跨专业协同方面,以“矿源—工艺—环境”三线共评机制取代单线决策,使流程优化兼顾采场推进、选厂节拍与尾砂处置的耦合,确保在安全边界内获得长期稳定的综合效益。

4 结语

低品位矿的高效开采利用离不开从资源表达到流程控制的系统化设计。以减量化、连续化与智能化为主线,把识别、估计与控制整合到同一框架,通过精准选采与爆破协同降低无效入厂,通过连续输送与分级回路压缩采运与磨矿能耗,通过预先富集与粗粒抛尾减少药剂与水消耗,并以尾矿资源化与低碳运行完成闭环。面向未来,应以滚动试验与在线学习不断校正窗口参数,使模型、规则与现场经验形成自适应的知识底座,在不同矿种与不同地域实现稳定可复制的效益。

参考文献

- [1]陈发兴.低品位矿利用的经济性分析[J].有色金属设计,2021,48(01):1-5.
- [2]钱刚.浅议低品位矿产资源的开发与利用[J].中国金属通报,2020,(01):49+51.
- [3]郑智刚.低品位矿床传统开采技术进展与发展方向[J].时代农机,2015,42(08):74-75.
- [4]赵彦璞,张腾.新形势下内蒙古超低品位矿产资源开发利用分析[J].中国矿业,2016,25(08):86-89.