

地质矿产绿色开发技术创新与实践

李正普¹, 黄军¹, 阳帅¹, 钟岸青²

1. 中核二十五建设有限公司, 湖南 长沙 410153

2. 广东环境保护工程职业学院, 广东 佛山 528000

DOI: 10.61369/SSSD.2025160045

摘 要 : 本文系统阐述了地质矿产绿色开发领域的技术创新与实践路径, 重点分析了绿色勘查、智能开采、资源综合利用及环境修复等关键技术体系。通过集成多源地质数据三维建模、无废开采工艺、数字矿山平台等创新手段, 实现了矿产开发过程中资源效率最大化与生态环境影响最小化的平衡。研究表明, 绿色开发技术不仅有效降低能耗与排放, 还能通过协同优化实现经济-环境-社会效益的统一, 为矿产行业可持续发展提供系统性解决方案。

关 键 词 : 地质矿产; 绿色开发技术; 智能开采; 技术创新; 实践

Technological Innovation and Practice in the Green Development of Geological Minerals

Li Zhengpu¹, Huang Jun¹, Yang Shuai¹, Zhong Anqing²

1.China Nuclear Industry 25th Construction Co., Ltd., Changsha, Hunan 410153

2.Guangdong Polytechnic of Environmental Protection Engineering, Foshan, Guangdong 528000

Abstract : This paper systematically elaborates on the technological innovation and practical paths in the field of green development of geological minerals, focusing on the analysis of key technical systems such as green exploration, intelligent mining, comprehensive resource utilization and environmental restoration. By integrating innovative means including 3D modeling of multi-source geological data, waste-free mining technology and digital mine platform, the balance between maximizing resource efficiency and minimizing ecological environmental impact in the mineral development process is achieved. Research shows that green development technologies not only effectively reduce energy consumption and emissions, but also realize the unification of economic, environmental and social benefits through collaborative optimization, providing a systematic solution for the sustainable development of the mineral industry.

Keywords : geological minerals; green development technology; intelligent mining; technological innovation; practice

一、绿色勘查技术创新与应用实践

(一) “空-地-井”一体化勘查技术体系

“空-地-井一体化勘查”以“宏观-中观-微观”多尺度信息整合为核心理念, 构建“卫星遥感普查-无人机详调-地下证实”为闭环的勘查系统。“空-地-井”的组合是利用卫星遥感能力发现和识别出矿化蚀带的特征(如铁化、羟基异构化), 判定找矿目标区域^[1]; 运用无人机搭载的 LiDAR 与热红外传感器可以生成厘米量级的 DEM 与热红外图, 利于找寻深层矿石露出点, 代替传统的“地毯式”露采勘探模式, 节约约 80% 的露采工作量。地下阶段应用实时岩相分析技术, 利用 X 光荧光光谱 (XRF) 或近红外光谱 (NIR) 仪器对岩屑中的有价值的成分进行实时分析, 无需像常规勘探收集完整的岩石样品, 约 3 ~ 5g (g) 的样品即可判断该矿质的成分含量, 每个孔洞的取样比例由 100% 降低到 30%, 且节能约 30%。将该 3 种技术组合后通过 GIS 可实现勘查任务部署最优: 在 1 个沉积岩型找矿项目中, 其探测作业间距由原来的 60m 缩减到 30m, 且钻孔数量去掉 12 个, 共节约 25%

的工作量, 减轻了地表植被破坏和水土流失^[2]。

(二) 三维地质建模与资源动态评估

作为绿色开发的“数字底座”, 3D 建模可以根据钻探、地球物理勘探 (例如高分辨率磁力测井、地震波形分析) 及化学成分检测数据集, 以及 Kriging 插值 (又称“克里金法”) 插值, 是一种建立在统计学基础上的点值内插方法, 通过一定数学方法和统计推断原理确定点值之间关系后, 用已知点值来估计未知点值) 算法、随机森林算法 (一种机器学习方法, 通过构建包含多个决策树的集合来解决问题) 等模型与计算机进行通信, 从而预测地层深度、构造断层方位、透水能力、含水层位置等 10 余个参数构成的多函数模型, 构建出包含相关变量与矿物以及边界的三维建模。即矿体的空间结构、品位赋存状况以及周围岩石状态。而且, 此模型不是静态的, 而是可以通过矿藏采掘后的矿物残渣样本或矿区坑道外露断层线等数据信息来不断地修正模型, 也能够利用云计算技术实时调整矿体边界, 某矿区 3D 模型误差由原先的二维平面矿体边缘 15 米减少至 5 米以内, 避免了多余的超过 15 万方的矿体挖掘、流失; 利用 MODFLOW 软件, 能够预判开采顶部

出现干井、枯水现象的风险、优化矿井巷道与支路布局，将采矿消耗降低超过3%。除此之外，还可提供岩体稳定性分析成果——通过耦合微震监测数据，筛分出位移速率大于阈值范围的区域并预先给予锚杆防护或填充加固，降低冒顶灾害的可能性^[3-5]。

（三）生态环境本底评估技术

绿色勘查要求“先评估、后开发”，同步开展土壤－水体－生物多样性本底调查，建立环境基线数据库。土壤调查涵盖pH值、有机质含量、重金属（Pb、Cd、As）全量与有效态；水体调查包括化学需氧量（COD）、氨氮、总磷及重金属浓度；生物多样性则记录植物群落结构（如优势种、盖度）与动物活动痕迹（如鸟类巢穴、兽类足迹）^[6]。数据通过空间插值（Kriging）绘制污染分布热力图，明确环境敏感区——如水源保护区、湿地、珍稀物种栖息地。同位素示踪技术是关键工具：通过分析地下水的与同位素与组成，判定其补给来源（如大气降水或侧向径流）；用³H（氚）测定地下水年龄，识别流动缓慢的“古水”。某矿区勘查中发现，矿体顶板含水层的关键补给区与周边村庄饮用水井重叠，因此调整井巷布局——将原本穿越补给区的开拓巷道改道至补给区下游，并采用帷幕注浆限制开采对补给区的扰动，最终避免了居民供水系统的破坏，实现了资源开发与生态保护的协同。

二、绿色开采技术体系构建与优化

（一）无废开采与资源协同开发

“提高品位单位有用矿物品位，即无废开采”的基本出发点为，实现细粒级矿物、夹石和围岩的配套提取。首先，通过三维建模，精细划分矿体、确定“高品位边线”——品位线由25%划至22.5%，约15%空间可实现回采矿块，增大空间储量；其次，利用井下预选拣选出较纯净的低品位矿，即筛出低于15%品位的低品位矿物，在此基础上破碎后直接应用于采空区充填，即筛出物用于充填^[7]。例如在某矿场的具体开发实践中，通过该方法在井下预选出筛出物回填比例高达62%，代替传统将废石排弃在尾矿库，由于混合胶结剂废石的粒径更加均匀，所以提高顶板稳定性30%，降低塌落；另外，核心的另一个技术为尾矿胶结充填法：剔选出尾矿沙、经过浓缩机和过滤机处理后水分显著降低，加之按照一定比例掺加粉煤灰或者矿渣微粉部分替代水泥，得到优质的胶结充填材料——充填物的28d的压强比达到5MPa，可满足地下采空区所需的支护强度，此外每年消耗尾矿设计产量120%以上，解决了尾矿库占地问题。

（二）智能化开采与能耗管控

“智能开采”采用“无人工厂和自动调度”节省能源并提供安全保障。在地下部署无人化的钻孔机——它使用激光定位、钻头自动交换技术实现钻孔全程自动化操控，准确度可达 $\pm 5\text{cm}$ ；电力钻机——采用电力驱动远程操控而取代原有的燃料引擎驱动，节省石油消耗。由若干台机具协同工作是建立在工业网的基础上的，并实时收集钻孔机的工作进度、搬运车的载荷信息等，对工作计划进行优化——如，搬运车完成某一区域货物运输、卸

载后，将自动分配到最近的钻孔机执行下一作业点的任务，从而避免资源的浪费。能源管理系统是通过物联网感应器监测各个辅助设施如通风、排水、运输等方面所消耗的能源总量，同时应用可变速率技术调整水泵的转动频率（依据实时的矿井水位来确定抽水量），并同样使用可变速率技术控制鼓风机的风压（依据矿下的人数和有害气体的含量来决定），最终使得总的能量消耗降低到22%，而同时对柴油的需求降低到35%^[8]。此外，通过5G网络构建的远程操控体系可以将矿下工作的人员由每班100人降至50人——工作人员可通过远程的高清视频和传感数据显示在地面操控室进行机器的管理，以此能有效地避免高硫矿区内的中毒或窒息危险和顶板不稳固区有可能发生的坍塌事故，从而有效地降低了安全成本。

（三）地下水保护与扰动防控

矿体开采易扰动顶板含水层，引发突水或地下水疏干，绿色开采技术通过“隔水－预警－调控”三位一体防控体系保护水资源。针对砂岩含水层（渗透系数 10^{-4}cm/s ），采用帷幕注浆技术构建人工隔水屏障：从地面施工垂直钻孔，注入水泥－水玻璃双液浆，填充含水层裂隙，形成厚度5–10m、深度至含水层底部的隔水墙，阻断开采区与补给区的地下水联系。超前探水钻孔布置在掌子面前方50m处，呈扇形分布，探测前方的水文地质条件——若发现导水裂隙，立即调整开采速度或加强支护。微震监测系统通过布置在巷道周围的传感器阵列，实时监测岩体破裂产生的微震事件——当微震能量与频次突然增加，说明导水裂隙正在发育，系统自动预警，提示暂停开采并采取加固措施。某项目中，该技术将矿坑涌水量从设计的 $1000\text{m}^3/\text{d}$ 降至 $700\text{m}^3/\text{d}$ ，减少了排水泵的运行时间，年节约电耗120万kWh，同时保护了周边3个村庄的井泉供水，避免了因地下水疏干导致的生态退化^[9]。

三、资源综合利用与循环经济模式

（一）选冶流程绿色化改造

选冶流程绿色化的关键是“提效降耗、变废为宝”。高压辊磨－磁选预抛尾工艺替代传统破碎－磨矿流程：原矿经高压辊磨（压力15MPa）破碎至 -3mm ，再用弱磁选抛尾矿（品位 $<10\%$ ），使入球磨机的矿石量减少40%，磨矿能耗降低35%。针对难选的红矿（赤铁矿），创新应用悬浮焙烧－磁选技术^[10]：将矿石磨至 -0.074mm 占70%，送入悬浮焙烧炉加热至 700°C ，使弱磁性的赤铁矿（ Fe_2O_3 ）转化为强磁性的磁铁矿（ Fe_3O_4 ），再用强磁选机回收，铁回收率从70%提高到85%以上。焙烧烟气温度高达 350°C ，通过余热锅炉产生蒸汽，推动汽轮机发电，每小时发电500kW，满足选厂15%的用电需求，实现能源梯级利用。选矿废水处理采用“混凝沉淀＋膜分离”工艺：先投加PAC与PAM去除悬浮物（浊度从500NTU降至10NTU），再用反渗透膜去除重金属与盐分，回用率达90%——剩余10%的浓水用于矿山降尘，实现零排放。此外，废水中的有价元素回收系统通过离子交换树脂吸附铜、镍离子，每年额外回收金属量3000吨，相当于增加一个小规模矿山的产量。

（二）固废资源化与生态修复协同

通过采取“低排放、少占用、边治理边恢复”的方式，使固体废弃物可重复利用，对尾矿库进行生态修复的有效途径是通过分层碾压程序，每层堆放20~30cm厚的尾矿，用振动压路机碾压压实度大于等于90%，铺撒抗污能力高的植被（蜈蚣草、紫花苜蓿等），通过根系使重金属稳定下来，可使固化期土层复垦率达到90%以上，可以使土壤复垦恢复森林或农田。另外，尾矿资源化利用方面，研究人员利用尾矿制备陶粒，该方法是通过先制备出小于0.074mm的细度占80%、黏合剂占10%，制备成粒料然后煅烧1100℃处理制得密度为1.8g/cm³、抗压强度高达8MPa的陶粒，可应用在建材中做原料，每年可消纳尾矿15万吨左右。将开采的废弃物做成道路路基和生态环境保护墙：废石粉碎过筛后，其抗压强度值达到了《公路基层施工技术规范》的要求，强度达到了15MPa，可以作为高速公路路面路基使用；并且废石可以和水泥按照3：1配比做成具有大空腔的环保墙，空腔体占比达

到25%，可用于河岸生态环境保护工作，既对泥土起到了固定作用防止水土流失，又可以为草本植物提供生长土壤，达到了80%以上的废物资源利用率，改变原来的废气排放形式，减少尾矿库及废弃物占用土地面积（每年需要500亩）。

四、结语

综上所述，地质矿产绿色开发技术通过勘查精准化、开采智能化、资源循环化及环境修复系统化的多维创新，构建了“资源-环境-经济”协同发展的新模式。实践证明，绿色技术不仅提升资源回收率15%以上、降低能耗20%-30%，更通过闭坑期生态重建实现土地功能恢复与生物多样性提升。未来需进一步攻关深部开采环境扰动控制、尾矿全组分利用等关键技术，推动绿色开发标准体系与国际接轨，最终实现矿产开发与生态文明建设的深度融合。

参考文献

[1] 王国法, 张建中, 刘再斌, 庞义辉, 王佟, 桑聪. 煤炭绿色开发复杂巨系统数智化技术进展 [J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(11): 1-16.

[2] 王焘, 妙超, 范超鹏, 雷鹏. 铜川市上店石灰岩矿绿色开发途径探讨 [J]. 四川地质学报, 2024, 44(01): 32-35+40.

[3] 李游勇. 贵州某矿矿产资源绿色开发利用方案研究 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2023, (23): 13-15.

[4] 贾永斌. 绿色技术创新驱动煤炭行业高质量发展 [J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(08): 103-105.

[5] 杨泽宇, 李碧海. 湖南砂石建材绿色开发利用途径 [J]. 江苏建材, 2023, (03): 10-12.

[6] 谭文娟, 赵国斌, 魏建设, 王小红, 姜寒冰, 彭素霞. 黄河流域矿产资源禀赋、分布规律及开发利用潜力 [J]. 西北地质, 2023, 56(02): 163-174.

[7] 卫婷婷. 攻克技术难题助力能源革命——记重庆地质矿产研究院页岩气绿色开发团队负责人张辉 [J]. 科学中国人, 2021, (07): 40-42.

[8] 王瑞廷, 成欢, 冀月飞, 李青锋. 秦岭陕西段主要矿产资源分布特征与绿色勘查开发 [J]. 矿产勘查, 2020, 11(12): 2672-2684.

[9] 寿立永, 李向阳, 欧阳友和, 张亮, 孔明. 我国石材矿山绿色开发存在的问题与思考 [J]. 中国非金属矿工业导刊, 2020, (06): 41-44+49.

[10] 肖巧玲, 高超, 刘伟. 环保理念下矿产资源勘查与开发工作意见 [J]. 世界有色金属, 2020, (22): 113-114.