

非煤矿山复杂地质条件下的采矿技术创新

张毕书

洛阳鼎鸿贸易有限公司 河南 洛阳 471000

摘要：当前露天非煤矿山开采面临深大边坡高应力、软弱岩层、断层破碎带、含水层等复杂地质条件，传统工艺在边坡稳定性控制、采掘效率、资源回采率及生态修复等方面存在明显不足。本文剖析复杂地质条件下露天非煤矿山开采的核心难点，围绕地质探测、采剥工艺、边坡灾害防控、绿色开采四大维度，阐述系列创新技术，并结合工程案例验证应用成效，分析现存技术短板，展望智能化、融合化、低碳化发展方向，为复杂地质露天非煤矿山安全高效绿色开采提供技术参考。

关键词：露天非煤矿山；复杂地质条件；采矿技术创新

引言：随着我国露天非煤矿山开采规模持续扩大、采深逐步增加，开采揭露的地质条件日趋复杂，高陡边坡失稳、顺层滑移、地下水渗涌等灾害频发，传统采剥工艺与灾害防控手段难以有效适应破碎断层、软弱夹层、含水岩层等复杂条件，普遍存在安全风险高、采掘效率低、资源损失大、生态扰动突出等问题，严重制约矿山行业高质量发展。为破解技术瓶颈，提升露天非煤矿山本质安全水平与资源利用效率，推进绿色智能矿山建设，本文聚焦复杂地质条件，探究露天非煤矿山开采技术创新路径，结合工程实践分析技术应用价值与发展趋势。

1 露天非煤矿山复杂地质特征及传统开采技术弊端

1.1 露天非煤矿山复杂地质主要类型及特征

(1) 深大边坡高应力地质：随着采坑深度不断加大，边坡高度持续增加，坡体内应力集中程度显著，局部区域出现挤压破碎带，边坡岩体蠕变、松弛及塑性变形特征明显，台阶坡面及运输平盘稳定性降低，易发生整体或局部滑坡。(2) 破碎断层与软弱夹层地质：受多期构造运动影响，岩体节理裂隙密集发育，断层破碎带交错分布，层间软弱夹层、泥化夹层普遍存在，岩体整体强度低、结构面连通性好。在采掘扰动及降雨渗流作用下，极易诱发顺层滑移、坍塌及泥石流等灾害，严重威胁采场及排土场安全^[1]。(3) 含水岩层与富水构造：含矿地层中砂岩含水层、岩溶裂隙水带发育，地下水补给条件复杂，采掘揭露时易产生涌水、渗水，导致边坡岩体软化、强度劣化，同时增加采场排水难度与设备运行风险。

1.2 复杂地质条件下开采核心难点

(1) 安全管控难点：边坡失稳、滑坡、涌水等多灾种并存，致灾因素耦合作用复杂，滑坡前兆识别困难，预警阈值难以精准确定，安全风险全流程动态管控面临严峻挑战。(2) 采掘效率难点：复杂地质条件限制大型采剥设备（电铲、卡车、钻机）的作业效率，破碎岩层影响爆破效果和铲装效率，雨季涌水导致采场积水，作业面泥泞，设备运行受阻，采掘接续紧张。(3) 资源利用难点：矿体赋存形态受断层、褶曲影响，边界模糊、厚度变化大，采剥过程中矿石与围岩混杂严重，品位波动大，资源回采率与矿石质量难以兼顾。(4) 生态环保难点：露天开采剥离范围广、扰动面积大，易诱发边坡水土流失、地下水疏降、土地压占及排土场扬尘等复合生态环境问题，后期复垦治理周期长、投入高。

1.3 传统开采技术应用弊端

(1) 工艺适应性差：传统水平分层采剥、组合台阶开采等工艺参数固定，难以针对断层破碎带、软弱夹层、富水区等局部异常地质条件灵活调整，技术适用性不足。(2) 安全防控滞后：边坡监测以人工巡查和简易测量为主，布点稀疏、数据连续性差，滑坡前兆信息捕捉不足，风险研判依赖经验，缺乏实时精准预警能力。(3) 绿色开采欠缺：缺少配套的内排压脚、减载护坡等主动治理技术，排土场堆置无序，水土流失和扬尘问题突出，复垦率偏低，与绿色矿山标准差距较大。(4) 智能化水平偏低：采剥装备自动化程度不高，爆破设计、配矿管理依赖人工经验，信息感知手段单一，决策缺乏数据支撑，数字化转型升级需求迫切。

2 复杂地质条件下露天非煤矿山核心开采技术创新

2.1 精准地质建模与智能探测技术创新

(1) 三维可视化地质建模技术: 借助无人机航测、三维激光扫描、瞬变电磁法、高密度电法等综合探测手段, 系统获取地表地形、矿体产状、断层构造及含水层分布等精细数据, 利用专业地质建模软件构建包含矿体实体模型、构造模型及水文地质模型在内的三维可视化系统, 精准圈定采剥边界与不良地质体空间展布, 为采场设计、边坡治理及排水方案提供可靠地质依据。(2) 智能化超前探测技术: 融合微震监测、钻孔电视、电阻率 CT 等多种传感技术, 建立采场及边坡区域的智能探测网络, 实时采集断层活化、软弱层位变化、地下水位动态等关键信息, 结合大数据分析平台对海量数据进行智能识别与预警, 实现不良地质体的超前预判, 降低采掘工程遭遇构造突变的风险^[2]。(3) 地质数据动态更新技术: 伴随采剥工程持续推进, 不断获取新揭露的地质剖面与钻孔数据, 通过数据库动态管理及三维模型自动更新, 实时修正矿体边界与断层位置, 动态反映地质条件变化, 为采剥方案及时调整提供持续更新的数据支撑。

2.2 高效采剥工艺技术创新

(1) 分区优化采剥技术: 针对破碎软弱地质条件下的边坡稳定性难题, 对传统组合台阶采剥工艺进行系统优化, 将采场划分为合理的分区单元, 结合矿体赋存条件与边坡稳定系数, 动态调整台阶高度、坡面角及平盘宽度, 实现采剥推进与边坡治理的协同作业, 有效控制坡体变形, 保障采场作业安全。(2) 精细爆破与分采工艺: 针对断层破碎带及矿岩交界区域, 突破传统大孔径深孔爆破思路, 采用小孔径微差爆破、预裂爆破及光面爆破技术, 结合采掘机械精细化装载与矿岩分运工艺, 实现矿岩界线精准识别与分采分运, 最大限度降低废石混入与矿石损失, 提升资源回采率与矿石质量稳定性^[3]。(3) 深部扩帮与低扰动开采技术: 针对深大边坡高应力区域, 基于边坡应力实测数据与数值模拟分析, 优化扩帮推进方向与采剥时序, 采用分期扩帮、分段卸压的渐进式开采策略, 合理安排内排压脚时机, 最大限度降低开挖活动对高应力坡体的动力扰动, 从源头规避边坡突发性滑移风险。

2.3 边坡稳定与灾害防控技术创新

(1) 主动加固与排水联合技术: 创新研发锚杆(索)、抗滑桩、挡土墙、坡面防护与深层疏干降水一体化的联合治理工艺体系, 针对不同边坡破坏模式(平面滑动、楔形体滑动、圆弧滑动)动态确定加固参数组合, 通过深层锚固、坡脚反压与地下水位控制的协同作用, 有效提高破碎边坡整体稳定性, 大幅减少滑坡治理工程量^[4]。(2) 实时智能监测预警技术: 搭建覆盖全

采场及排土场的边坡灾害智能监测预警平台, 集成北斗/GNSS 位移监测、深部测斜、孔隙水压力监测、雨量监测、微震监测等多维感知系统, 利用云计算与机器学习算法实现边坡位移速率、地下水位、降雨响应等关键指标的实时在线监测与分级自动预警, 显著提升滑坡灾害感知的时效性与准确性。(3) 地质灾害协同治理技术: 将超前疏水降压、坡体注浆加固、截排水沟优化等主动治理手段与采剥动态调控相结合, 配套完善应急撤离与抢险救援方案, 构建“超前治理—动态调控—应急响应”三位一体全流程灾害防控体系, 实现多灾种协同治理与风险全链条闭环管控, 全面提升露天非煤矿山本质安全水平。

2.4 绿色节能开采技术创新

(1) 内排压脚与生态修复技术: 充分利用剥离废石进行采坑内排, 科学设计排土场堆置顺序与排弃标高, 通过压脚护坡、分层碾压、覆土绿化等综合措施, 有效控制排土场边坡稳定, 减少土地压占与水土流失, 同时推进采剥—排弃—复垦一体化作业, 缩短生态修复周期^[5]。(2) 低尘低耗清洁开采技术: 系统优化穿孔、爆破、采装、运输全流程工艺参数, 推广干雾抑尘、泡沫抑尘等高效降尘技术, 配套采场排水沉淀循环系统, 大幅降低采剥过程粉尘浓度与废水排放量, 实现生产全过程清洁化管控。(3) 资源综合利用技术: 建立废石分级分质利用、疏干水净化回用、表土剥离储存回用等多层次资源循环利用体系, 将废石加工为建材原料或用于填方工程, 疏干水经处理回用于采场降尘及洗车系统, 表土妥善保存用于后续复垦绿化, 全方位提升共伴生资源及矿山废弃物的综合利用率, 推动露天非煤矿山向绿色低碳与无废化方向持续迈进。

3 技术工程应用、效果分析与发展展望

3.1 工程应用案例概况

(1) 矿山地质条件: 选取我国北方某典型复杂地质露天非煤矿山为案例。矿田受多期构造影响, 矿体赋存于向斜翼部, 断层发育, 局部有陷落柱, 矿体厚度 3~18m, 倾角 5°~15°, 但层位起伏明显。上覆岩层以泥岩、砂岩为主, 其中含多层软弱泥化夹层, 遇水易软化, 边坡稳定性差。第四系松散层厚, 含水丰富, 采场涌水量大。设计采深约 350m, 边坡高度超过 250m, 属高陡边坡。(2) 原有开采问题: 矿山采用单斗—卡车工艺, 水平分层采剥, 存在突出问题。安全方面, 雨季多次发生局部滑坡, 边坡加固工程量大; 效率方面, 破碎岩层爆破效果差, 铲装效率低, 雨季积水严重制约作业; 资源方面, 断层附近矿岩混杂, 品位波动大, 资源

损失较高；生态方面，外排土场占地多，扬尘与水土流失严重，复垦进度滞后。（3）创新技术应用方案：根据矿山实际制定系统性方案。地质探测上，应用无人机航测与三维精细化建模技术重构矿体及构造形态，精准界定不良地质体位置。采剥工艺上，采用分区优化采剥与精细爆破分采工艺，优化台阶参数，推行矿岩分运。边坡治理上，应用锚索加固、抗滑桩、深层疏干井联合治理体系，搭建智能监测预警平台。排土与生态上，实施内排压脚与排土场同步复垦绿化，建设疏干水回用系统。

3.2 技术应用效果分析

（1）安全效益分析：技术应用后，边坡位移速率明显下降，滑坡事故率大幅降低，智能监测预警平台成功预测多次位移加速事件，重大滑坡灾害零发生，作业环境安全水平显著提升，边坡管控由被动应对转向主动防控，安全风险实现全时段在控。（2）经济效益分析：技术创新后，采剥综合效率明显提升，矿石回采率提高，品位稳定性增强，废石混入率显著降低，内排缩短运距降低运输成本，疏干水回用节约水资源费用，矿山年产值与利润率均实现稳步增长，综合生产成本有效压降，经济效益增长后劲充足。（3）生态效益分析：内排压脚实施后，外排土场占地面积大幅减少，排土场边坡稳定系数达标，复垦绿化率显著提高，采场扬尘与水土流失得到有效控制，疏干水回用率超过 80%，实现了生态环境保护与矿产资源高效利用的协调发展，生态修复与采矿作业同步推进，矿区绿色发展底色更加鲜明。

3.3 当前技术应用存在的问题

（1）技术适配性问题：三维建模、精细爆破等创新技术在极破碎岩层、强富水区等特殊条件下参数优化缺乏成熟经验参考，技术方案需反复试验调整，制约了技术效能充分发挥。（2）设备配套问题：智能监测传感器、高精度定位设备在露天采场严寒、高温、多尘环境中运行稳定性不足，设备故障率偏高，部分核心部件依赖进口，采购周期长、运维成本高，影响系统连续作业效率。（3）推广落地问题：创新技术涉及地质建模、智能监测、边坡治理等多专业交叉，对一线人员技能要求较高，矿山普遍缺乏完善培训体系，技术成果向同类矿

山规模化推广面临人才瓶颈与适应性调整双重制约。

3.4 技术创新发展展望

（1）智能化升级方向：推进无人驾驶卡车、远程遥控电铲、AI 智能配矿与爆破设计系统、数字孪生矿山平台的深度融合应用，实现地质探测、采剥计划、生产调度、安全监控全流程智能化闭环管理，逐步构建少人化、智能化露天矿山运行体系。（2）技术融合发展方向：推动采剥工艺、边坡加固、内排压脚与生态修复技术的一体化集成创新，形成标准化技术模块与设计规范，构建覆盖露天矿山全生命周期的协同技术体系，提升复杂地质条件下综合开采与治理能力。（3）绿色低碳发展方向：研发低成本高效复垦基质材料与快速植被恢复技术，探索废石全资源化利用路径，推进采剥运输装备电动化、清洁能源替代，建设“源网荷储”一体化新能源供电系统，助力露天非煤矿山行业实现绿色低碳可持续发展目标。

结束语

本文系统梳理了复杂地质露天非煤矿山的开采难题与传统技术缺陷，汇总了精准探测、高效采剥、边坡防控、绿色开采等核心创新技术，经工程实践证实，创新技术可有效提升矿山开采安全性、经济性与生态性。同时当前技术仍存在适配性不足、设备配套不完善等问题。未来需持续推进技术融合、智能升级与绿色革新，攻克技术应用短板，助力露天非煤矿山行业实现安全、高效、低碳的可持续发展。

参考文献

- [1] 陈新明, 孙金字, 焦华喆, 等. 金属矿山硬质地层智能化掘进发展现状及展望 [J]. 黄金, 2025, 46(02): 117-122.
- [2] 张光权. 复杂地质金属矿山采场围岩协同控制与高效采矿技术 [J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(09): 112-119.
- [3] 刘建. 复杂地质条件下非煤矿山高效采矿技术优化与创新 [J]. 矿产保护与利用, 2024, 44(03): 88-93.
- [4] 罗鼎, 熊浩凯. 深部急倾斜薄矿体充填采矿技术创新与应用 [J]. 有色金属 (矿山部分), 2023, 75(05): 91-103.
- [5] 杨海彬. 复杂地质金矿采场结构参数与回采顺序优化研究 [J]. 矿业工程研究, 2025, 38(02): 36-41.