

Risk assessment of water inrush in coal roadway excavation under positive fault influence based on fracture development characteristics

Yuxiang Liu Jincheng Xu Hengyue Fang

Shandong Taishan Resources Exploration Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250100, China

Abstract

During deep coal mining operations, the presence of normal faults significantly alters the fracture structure and seepage conditions of roadway surrounding rock, substantially increasing water inrush disaster risks. Traditional risk assessment methods often overlook the synergistic effects between fracture spatial distribution and fault systems, making precise early warning challenging. This study investigates roadway excavation under normal fault influence by systematically analyzing the evolution mechanisms of fault and fracture systems. Utilizing high-density fracture parameter data and actual water inrush measurements, we developed a comprehensive risk evaluation model that integrates fracture density, connectivity, filling characteristics, and hydrodynamic parameters. A zonal early warning method tailored for normal fault-affected zones was proposed. Results demonstrate that this evaluation system significantly enhances early warning capabilities and risk management effectiveness for water inrush disasters in normal fault areas, providing both theoretical and practical foundations for safe and efficient coal mine excavation.

Keywords

positive fault; fissure development; coal mine roadway; tunneling water inrush; risk assessment; risk management

基于裂隙发育特征的正断层影响下煤矿巷道掘进突水危险性评价

刘宇翔 徐锦程 方恒月

山东泰山资源勘查有限公司, 中国·山东 济南 250100

摘要

煤矿深部开采过程中, 正断层发育显著改变了巷道围岩裂隙结构与渗透环境, 显著增加突水灾害风险。传统危险性评价方法往往忽视裂隙空间分布与断层协同效应, 难以实现精准预警。本文围绕正断层影响下煤矿巷道掘进, 梳理断层与裂隙系统演化机理, 采用高密度裂隙参数采集和突水实测数据, 建立综合考虑裂隙密度、连通性、充填特性与水动力参数的危险性评价模型, 并提出适用于正断层影响带的分区预警方法。结果显示, 该评价体系显著提升了正断层区突水灾害的预警和风险管理能力, 为煤矿安全高效掘进提供理论与实践依据。

关键词

正断层; 裂隙发育; 煤矿巷道; 掘进突水; 危险性评价; 风险管理

1 引言

煤矿深部资源开采加速推进, 巷道掘进不断穿越断层发育区。正断层作为地质构造运动的直接产物, 不仅重塑了地层结构, 还极大促进了岩体裂隙的发育和渗透性增强。断层活动造成的围岩破碎和裂隙系统演化为含水层与巷道掘进面之间搭建了高效水力通道, 导致突水灾害事件频发。当前, 矿井突水评价大多侧重水文地质参数、断层规模或单一

物探数据, 忽略了裂隙结构与空间连通性等控制突水风险的关键变量。随着裂隙观测和数字化建模手段的进步, 基于多参数、多尺度耦合的突水危险性评价已成为煤矿水害防控的重要方向。本文以正断层影响下的裂隙系统为切入点, 分析裂隙发育机理、参数化建模与危险性定量分级, 旨在建立更加科学的掘进突水预警与管理体制。

2 正断层与裂隙发育对突水危险性的影响机理

2.1 正断层区岩体结构重组与裂隙演化

正断层在区域构造应力场主导下, 产生大规模断裂及断层泥充填带, 使断层带岩体显著破碎^[1]。断层两侧岩性对比、活动历史及埋深差异共同作用, 导致围岩出现高密度、

【作者简介】刘宇翔(1997-), 男, 中国安徽合肥人, 硕士, 助理工程师, 从事正断层对煤矿巷道掘进过程中的突水危险性研究。

多方向裂隙，形成贯通性极强的网络结构。裂隙的宽度、连通性和空间展布直接决定了水力通道的形成与突水通道的规模。断层活动周期性反复，促进新旧裂隙交替发展，围岩的致密性和力学稳定性持续下降，增强了突水风险。

2.2 裂隙与水动力系统的协同致灾作用

裂隙系统不仅作为水体运移的主通道，还因其几何特征对水压响应高度敏感。高密度裂隙区受巷道掘进扰动后，裂隙张开度和导水能力迅速增强。含水层水体可沿贯通裂隙网络向低压巷道侧迁移，在高水压梯度作用下形成强突水流束。裂隙内泥质、方解石等充填物的空间变化，会影响通道开放性，决定突水的突发性和规模。深部掘进条件下，高地应力区裂隙自愈能力减弱，使灾害风险持续存在并难以预测。

2.3 突水危险性的综合影响因素

正断层区突水危险性不仅取决于断层规模和含水层赋存，还与裂隙分布密度、张角、连通概率、水力梯度、围岩强度等多参数密切相关。巷道掘进方向与断层夹角、掘进速度及扰动强度等工艺参数也会改变裂隙张开度与水体渗流路径^[2]。定量描述多参数协同对突水危险性的贡献，是提升风险分级和防控精度的基础。建立基于裂隙特征的危险性评价体系，将微观裂隙结构与宏观水害分区相结合，可有效推动煤矿突水灾害从经验型向科学化、系统化管理升级。

3 裂隙参数化建模与危险性分区评价体系

3.1 裂隙系统参数采集与空间结构分析

针对正断层影响下的煤矿巷道掘进区，准确、系统地采集裂隙系统参数是实现高质量危险性评价的前提。通过巷道实地测绘，项目组能够详细记录壁面裂隙的密度、长度、宽度、张角、充填状况以及裂隙间的空间连通性。三维激光扫描技术可获取巷道断面与围岩裂隙的高精度空间分布信息，实现复杂裂隙网络的数字化还原。岩心图像解析和显微镜分析则进一步揭示了岩体微裂隙的充填物类型和裂隙发育演化过程。在数据处理阶段，应用地质统计分析和网络建模方法，评估裂隙参数的空间分布特征和分形规律，识别主导渗流通道和可能的高危水害靶区。通过统计裂隙参数与突水事件的相关性，筛选出影响突水危险性最显著的主控裂隙带，并为后续量化模型输入提供科学、全面的基础数据支撑^[3]。这一系统参数采集与空间结构解析，不仅为巷道突水风险的科学评价提供了坚实基础，也为模型的精准化和可移植性奠定了条件。

3.2 多参数危险性评价模型的建立

在参数采集的基础上，危险性评价模型的构建是巷道掘进风险分区与科学治理的核心。模型设计综合考虑实测裂隙参数、水文地质条件和断层空间分布，将裂隙密度、连通性、张开度、水压及水头差等作为核心变量。采用多元回归、层次分析与模糊综合判别等方法，实现各变量间权重的

科学分配与动态调整，克服了单一参数评价的局限。评价模型能根据不同断层影响区和掘进工艺的实际情况，自动调整参数权重，实现模型的区域适应性和通用性^[4]。通过模型计算输出，将巷道掘进区划分为高、中、低三类危险区，并为每类区域匹配相应的治理措施与预警策略。该体系极大提升了突水危险性的空间辨识能力，强化了掘进过程的风险管理基础，为实现差异化、精准化的水害治理提供了理论与技术依据。

3.3 模型应用与实证分析

以华北某典型矿井正断层带巷道为对象，开展了裂隙系统的参数化建模和模型应用测试。根据实地采集的裂隙结构、水文参数与历史突水事件数据，模型回归分析发现，高危险区的空间分布与实际突水事件记录高度一致。危险性分级结果与水害发生频率呈现正相关关系，说明模型具备较强的风险预测能力和空间分辨率。应用过程中，评价体系能够根据最新采集的数据实时调整分区预警结果，为施工单位提供动态决策支持。掘进方案、监测点布设、注浆和封堵措施均可根据模型输出的风险等级灵活优化，极大提升了治理效率和安全保障水平。模型在后续推广应用过程中，不仅提升了突水灾害的科学预警与分区管理能力，也实现了多矿区、多场景下的技术可迁移和持续优化，为煤矿巷道突水风险治理提供了坚实的科学基础和实践路径。

4 正断层区巷道掘进突水风险分级与防控措施

4.1 高风险区突水防控关键技术

高风险区往往位于正断层主带或裂隙高度发育区域，与高水压含水层直接连通，是巷道掘进突水灾害最为集中的地带。这些区域裂隙网络密集且渗透性极强，水体沿裂隙系统形成多级流动通道，极易导致大规模突水事故。针对高风险区，必须实施超前、科学、系统的防控技术。首先，建议优先布置高密度物探与定向钻孔，精确定位高渗透性断层与水体富集区，提前掌握水力通道的空间展布和水文动力参数。防控工程以多级注浆加固、裂隙封堵和断层带充填为核心技术，有效切断巷道与含水层之间的水力连通。掘进作业采取小进尺、强支护工艺，并同步实施围岩力学参数和裂隙水压的动态监测，确保岩体结构的整体稳定性和渗流压力始终处于可控范围。配合智能水压监测、声发射、变形监测等自动化系统，实时掌握灾害前兆，联动应急排水设备，确保一旦出现突水苗头能够快速反应，最大限度降低灾害损失。多学科交叉的关键技术集成应用，有效提升了高风险区突水防控的前瞻性、主动性和可靠性，为矿井深部安全掘进保驾护航。

4.2 中风险区与弱风险区协同治理策略

中风险区与弱风险区虽然裂隙发育程度和水力连通性低于高风险区，但在长距离巷道掘进中同样存在突水隐患，若防控措施不到位，局部异常亦可引发灾害。中风险区通常

表现为裂隙分布不均、局部贯通，含水层与巷道联系有限。治理策略以常规物探和抽水试验为基础，结合定点钻孔，识别可能存在的隐伏水体或渗透异常区。施工过程中采用分区注浆加固，调整支护参数，确保围岩稳定与通道闭合。通过在线监测系统，动态记录裂隙水压与变形参数，出现预警信号时及时修正治理措施。弱风险区则以常态巡视、风险提醒和自动化监测为主，建立定期巡检与分级响应机制，确保异常工况第一时间被发现和处理。中、弱风险区协同治理不仅优化了治理资源配置，降低了总体治理成本，还通过差异化措施提升了水害管控的科学性和系统性，实现了巷道掘进全过程的风险最小化与安全最大化。

4.3 巷道掘进过程中的风险动态管理

突水灾害风险具有动态演化与阶段性突发的特性，巷道掘进过程中需要建立以“探查—评估—监测—预警—应急”为主线的闭环风险管理体系，实现各阶段工作的高效衔接与信息共享。在掘进前期，系统开展多参数地质探查和裂隙调查，精细化风险分区，为后续施工方案设计与防控资源配置提供科学依据。掘进实施阶段，持续监测地应力、裂隙张开度、水压等关键参数，通过数据分析平台实现风险等级动态调整。针对监测结果及时更新防控策略，调整注浆加固范围与支护方案，防止局部风险积聚和突发事件扩大。预警机制依托大数据和智能算法，自动识别异常变化并联动应急预案，确保险情发生时实现快速处置和最小化损失。同时，加强现场技术人员的业务培训与应急演练，提升灾害辨识、应急响应和现场自救互救能力。通过持续数据积累和反馈分析，不断总结经验、优化治理技术，实现风险管理的良性循环和技术迭代。动态管理体系的建立，极大增强了矿井水害的整体防控能力和事故应急处置水平，为深部煤矿绿色、安全、高效开发奠定了坚实基础。

5 案例分析与模型应用成效

5.1 典型矿区裂隙参数采集与模型验证

以华北某典型矿井正断层影响区为例，项目组对巷道沿线开展了系统裂隙参数采集，重点覆盖主断层带及不同影响半径区段。采用高分辨率巷道壁面测绘、岩心扫描和水力试验等多种手段，详细获取了裂隙的密度、长度、宽度、连通性及渗透性等核心数据，并同步监测裂隙动态演化过程。结合历史突水事件数据，将实测参数输入危险性评价模型，对各巷道区段进行高危靶区识别与分级。结果显示，模型计算出的高风险区与实际突水段落高度吻合，识别准确率大幅提升，有效验证了模型的科学性与适用性。这为后续的掘

进风险预控和防控方案制定奠定了坚实的数据基础和决策依据。

5.2 掘进风险分区与防控措施实施

基于模型输出的危险性分区结果，矿区对不同风险等级区域实施了分级治理策略。高风险区部署了高密度注浆加固、智能化水压监测和应急排水等综合工程措施，有效阻断了富水层与巷道的水力连通，极大降低了突水发生概率。中风险区则优化了支护结构、加强常规巡视和裂隙监测，保障巷道结构安全与异常预警响应的时效性。弱风险区主要采取动态巡检与风险提醒策略，确保各类水害隐患早发现、早处理。模型引导下的分区治理体系实施期间，矿区突水事件显著减少，治理效率与安全保障能力同步提升，实现了巷道掘进全过程的动态风险可控与安全生产。

5.3 模型推广应用与实践优化

该危险性评价模型已在多处不同类型矿区巷道掘进工程中得到推广应用，展现出良好的适应性和推广价值。模型针对不同地质环境、断层类型和掘进工艺，能灵活调整参数与权重，实现多场景下突水风险的精准识别和预警。现场反馈表明，模型不仅为施工单位提供了科学的决策支持，也有效优化了防控资源配置，提高了水害治理的经济性与安全性。通过集成大数据、人工智能等前沿技术，模型持续迭代升级，推动煤矿深部水害风险治理向智能化、系统化发展，为智能矿山建设和绿色高效采矿提供了有力技术保障。

6 结语

基于裂隙发育特征的正断层影响下煤矿巷道掘进突水危险性评价，为深部资源开发提供了系统化、科学化的水害预警与风险治理路径。通过多参数裂隙模型与分区治理体系，实现了风险的精准识别和动态防控，有效保障了矿井掘进过程的安全与高效。未来，随着数据分析、智能监测与智能决策等技术的深入融合，基于多源信息的突水危险性评价体系将不断完善，为煤炭行业绿色、安全、智能化发展注入新动力。

参考文献

- [1] 梁俊林,徐波,李旭,等.煤层顶底板裂隙发育特征及底板突水预测[J].内蒙古煤炭经济,2017,(02):110-111.
- [2] 许胜兵.喀斯特石漠化区岩—土界面干缩裂隙发育特征研究[D].贵州大学,2024.
- [3] 王纪尧.超声振动激励下煤系硬岩裂隙扩展特征与破坏机理研究[D].中国矿业大学,2024.
- [4] 李耿,秦勇,姚海鹏,等.互层状岩体裂隙发育控制因素研究概述及地质思考[J/OL].煤炭科学技术, 1-13[2025-09-11].