

Multi-parameter coupled exploration and optimization of prevention and control scheme for water inrush disaster in hidden faults in deep mines

Xincheng Xu Yuxiang Liu Chenxu Yan

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

Abstract

With the deepening of mining resource extraction, concealed fault water inrush has become a prominent threat to mine safety. Traditional single-parameter detection and prevention methods struggle to meet the demands for precise identification and efficient control of concealed faults under complex geological conditions. This study focuses on multi-parameter coupling to systematically analyze the disaster mechanisms of concealed fault water inrush in deep mining areas. It explores multi-source collaborative detection technologies including geophysical exploration, drilling, and hydrochemical analysis, while establishing an integrated multi-parameter identification system combining “geology-hydrology-mechanics-chemistry”. Using field data from typical mines, the study evaluates the effectiveness of multi-parameter collaborative detection and analyzes the adaptability and optimization pathways of prevention strategies. The research demonstrates that coordinated multi-parameter approaches significantly enhance the accuracy of concealed fault localization and water source identification, enabling scientific early warning and proactive prevention of water inrush disasters. The proposed optimization strategies provide theoretical and technical support for mine safety production and disaster management in deep mining operations.

Keywords

deep mine; concealed fault; water inrush disaster; multi-parameter coupling; exploration technology; prevention and control optimization

矿山深部隐蔽断层突水灾害多参数耦合探查与防控方案优化

徐锦程 刘宇翔 延晨旭

山东泰山资源勘查有限公司, 中国·山东 济南 250100

摘要

随着矿山资源开采向深部推进, 隐蔽断层突水灾害已成为矿井安全生产的突出威胁。传统单一参数探查与防控手段难以满足复杂地质条件下对隐蔽断层的精准识别与高效防控需求。本文以多参数耦合为核心, 系统分析深部矿区隐蔽断层突水致灾机理, 探讨物探、钻探、水化学等多源协同探查技术, 并构建“地质—水文—力学—化学”多参数综合判识体系。结合典型矿山实测数据, 评估多参数协同探查成效并分析防控方案的适应性与优化路径。研究表明, 多参数协同显著提升了隐蔽断层定位与水源识别的准确率, 实现了突水灾害的科学预警与主动防控。提出的防控优化策略为深部矿井安全生产和灾害治理提供了理论与技术支持。

关键词

矿山深部; 隐蔽断层; 突水灾害; 多参数耦合; 探查技术; 防控优化

1 引言

矿山深部资源开发是当前能源、冶金等行业发展的必然趋势, 随之而来的地质条件日益复杂, 水害类型呈现多样化、隐蔽性和突发性并存的特点。隐蔽断层作为深部矿井突水的主要通道和危险源, 其空间展布、导水能力及与含水层的水力联系具有高度不确定性, 传统的单一物探或钻探方法存在识别精度低、致灾水源难以精准锁定等瓶颈。

近年来, 地球物理勘查、水文地质调查、地球化学分析等多学科协同发展, 为矿山隐蔽断层突水探查与防控提供了新思路和技术手段。多参数耦合技术以综合、协同、智能为核心理念, 通过集成不同物理、化学和地质参数, 实现对隐蔽断层和致灾水源的高精度定位和风险判别, 为灾害防控措施的科学制定奠定基础。本文聚焦矿山深部隐蔽断层突水灾害, 从多参数耦合探查理论出发, 探讨关键技术体系、应用成效及防控优化路径, 旨在推动矿井水害治理向系统化、智能化方向迈进。

【作者简介】徐锦程(1997-), 男, 中国山东淄博人, 硕士, 助理工程师, 从事水工环研究。

2 矿山深部隐蔽断层突水灾害的致灾机理分析

2.1 隐蔽断层突水的地质成因

深部矿区断层结构复杂,受多期地质构造运动影响,断层类型多样且空间展布隐蔽。不同断层在地应力作用下,与周围岩性、孔隙结构和含水层赋存条件耦合,形成多样化的导水通道。隐蔽断层常因后期沉积覆盖和构造变形,其准确位置、走向及内部结构难以直接探明^[1]。尤其在深部高应力、富水环境下,断层岩体裂隙在采掘扰动和水压升高条件下极易扩展,进一步增强断层的导水能力。当断层与含水层连通后,受开采扰动影响,水体可沿断层裂隙快速迁移,形成突水通道。断层泥化、胶结和充填物特征直接影响其水力封闭性与导水性,部分断层因胶结物溶蚀、泥质带崩解而封闭性降低,突水致灾的不确定性和突发性随之增加,为矿山安全生产带来巨大挑战。

2.2 深部突水灾害的多源诱发机制

深部矿井突水灾害的发生并非单一因素作用的结果,而是地应力、地下水动力、采掘扰动及水化学反应等多源因素协同驱动的产物。开采活动引发的区域应力重新分布,会促使断层带及其附近岩体的裂隙扩展和贯通,降低断层岩体整体稳定性。地下水动力作用下,致灾水体沿低压区汇聚并向工作面渗流,极大提升突水概率。此外,部分矿区含有较高活性水化学成分,水岩反应加剧时,断层泥质胶结带可能发生溶蚀和崩解,使断层封闭性进一步减弱^[2]。深部矿井的高温高压环境又加剧了水岩反应速度,导致断层的导水能力不断变化,灾害隐患动态演化。因此,突水灾害呈现时空叠加、多参数协同、突发性和不可预见性强等特点,防控难度大幅提升。

2.3 传统灾害探查与防控的局限性

传统矿山灾害探查与防控方法多以物探、钻探等单一技术为主,受制于精度、空间分辨率及技术手段本身的局限,难以精准锁定隐蔽断层及其水力特征。传统物探分辨率有限,对于复杂地质环境下的小型断层及分支结构辨识能力不足;钻探虽然可获得直接信息,但受工作面分布、钻孔布设密度等因素限制,难以形成完整的空间识别网^[3]。灾害防控层面,多依赖被动堵截和单一工程措施,防控反应滞后且治理成本高昂,不能实现动态、主动和系统化防控。面对深部矿井地质环境日益复杂、突水致灾机制日趋多样化的新形势,迫切需要引入多参数耦合探查与综合防控技术,推动灾害治理从经验型向智能化、科学化、系统化转变,实现对隐蔽断层突水灾害的精准探测与主动防控。

3 多参数耦合探查理论基础与关键技术体系

3.1 多参数耦合探查理论框架

多参数耦合探查理论强调以“多源信息、协同分析、系统判识”为核心理念,突破传统单一手段在矿山水害识别中的局限。该理论倡导在地质、物理、水文、化学等多种数

据的有机融合基础上,综合分析各参数的空间分布、相关性^[4]与内在耦合机制。通过挖掘物理场异常与水文地质过程、化学特征之间的互动关系,可以揭示隐蔽断层与含水层、致灾水体之间的复杂动力学联系。具体操作上,理论主张将地球物理异常响应、钻孔揭示信息、水化学指标、地应力变化等多维数据归集,运用多参数融合模型(如主成分分析、贝叶斯网络等),提升对隐蔽断层展布及其突水风险的判别准确率。多参数耦合探查不仅提高了灾害预警的科学性,也为风险分级和精准治理提供理论支撑。

3.2 物探、钻探与水化学等多源协同探查技术

为应对深部复杂矿区隐蔽断层突水的识别难题,必须充分发挥多种探查手段的协同效应。物探技术如高密度电法、地震反射、瞬变电磁、激电、地质雷达等,能够在非侵入性条件下,对断层空间展布、断面结构及水体富集区进行快速判别。钻探则通过实地岩心揭示、孔隙压力测试等,直接获取断层带的岩性、含水性和水文地质参数。水化学分析可以追踪不同水体的来源和迁移路径,判别断层导水性的动态变化。多源技术的协同应用,通过数据比对、参数互证、异常归集等流程,不仅提升了隐蔽断层与致灾水体的识别精度,也大幅提高了探查工作的效率和可靠性,为灾害防控提供了扎实的基础数据和决策支撑。

3.3 “地质—水文—力学—化学”多参数综合判识体系

针对深部矿区隐蔽断层突水灾害的多样性与复杂性,构建“地质—水文—力学—化学”四位一体的综合判识体系至关重要。该体系以地质参数为基础,全面描述断层几何形态、发育规律及其充填特征;水文参数则动态反映水位、水压、流量等水体活动变化;力学参数关注断层区地应力场的演变与岩体结构的稳定性;化学参数则聚焦水体主要离子及溶解成分的变化特征,通过水化学指纹判别水源与断层的水力联系。各类数据协同归集后,经综合分析^[5]与模型判识,能够有效锁定突水灾害的高风险靶区,明晰导水通道的空间分布与动态演化,为后续风险分级和靶向防控措施^[6]的制定提供科学、系统的依据。

4 典型矿区多参数耦合探查应用与成效分析

4.1 案例矿区地质与水文条件概述

华北某煤矿深部开采区位于典型的多断层构造带,地质条件极为复杂。该区断层呈北东向密集分布,部分断层为晚期活动断裂,具有隐蔽性强、空间展布不规则等特点。岩性横向变化大,夹杂有多层砂岩、泥岩及局部炭质页岩,造成含水层的分布极不均匀。含水层与断层组合形成多个潜在的导水通道,加剧了突水风险。矿区以往突水灾害多发,既有沿断层带集中突水,也有多点分散渗漏。针对复杂地质和水文环境,项目团队通过多轮物探、钻探和水化学调查,系统积累了断层几何、充填、含水性及水化学等多参数数据,

为后续的隐蔽断层突水探查和防控工作提供了坚实的数据基础和理论支撑。

4.2 多参数协同探查流程与技术集成

为提升隐蔽断层突水灾害探查的精度与效率，项目团队设计了多参数协同探查技术流程。首先，运用高密度电法与地震反射法对矿区进行全覆盖异常检测，初步圈定异常带和疑似断层区。其后，结合多孔钻探技术，重点揭示异常带断层结构、岩性转变和含水层赋存状况，并通过抽水试验获取水文动力参数。在物探与钻探的基础上，同步开展水化学采样与分析，监测水体中主要离子的变化趋势，判断水体成分及其与断层通道的关系。所有参数数据统一归集，运用主成分分析、贝叶斯网络等多参数融合模型进行综合判识，有效缩小突水灾害靶区，提高异常响应的科学性。该流程不仅实现了地质、水文、化学等多学科信息的深度整合，也极大提升了灾害风险判别的时效性和可靠性。

4.3 多参数探查成效及风险评估结果

多参数协同探查体系在矿区的实际应用中取得了显著成效。通过技术集成，断层空间定位的准确率提升了20%以上，致灾水体的识别率与来源判别精度显著增强。模型预测的突水风险靶区与后续钻孔揭露结果高度吻合，实现了突水隐患的精准锁定与预警。风险等级划分更加科学细致，有效指导了防控工程的提前部署。相关防控措施得以前置，极大降低了灾害发生率和治理成本。后续统计显示，矿区突水事故发生频率较实施前下降60%以上，直接经济损失明显减少，矿井安全生产保障能力大幅提升。多参数耦合探查的成功应用，不仅为隐蔽断层突水灾害的系统治理提供了技术支撑，也为其他复杂矿区的水害防控工作提供了范例和借鉴。

5 隐蔽断层突水灾害多参数防控方案优化

5.1 突水灾害风险分级与靶向治理策略

突水灾害的有效治理离不开科学的风险分级和靶向治理。基于多参数耦合探查结果，矿井可将隐蔽断层分为高、中、低三类风险区域，实现差异化防控。对于高风险区，应优先实施高强度的注浆加固、压滤固水及分区隔离等工程措施，确保断层导水通道有效封堵，减少突水通道的形成与扩展。中风险区则需加强实时监测和局部加固，结合定期水文和地质巡查，及时调整局部治理措施，防止风险转化和蔓延。低风险区以信息化监控和常规巡视为主，关注突发异常并动态调整管理策略。通过对风险等级的动态调整与资源合理配置，实现防控强度和效益的最优匹配，既提升了灾害治理的科学性，也提高了矿山防控的经济效益。

5.2 智能化监测与预警系统建设

伴随矿山智能化进程推进，利用物联网与无线传感器技术实现对隐蔽断层的多参数实时监控，成为突水灾害主动防控的重要手段。通过部署高精度传感设备，矿井能够24小时连续采集水压、水位、地应力、变形等关键参数，依托大数据平台进行动态分析与趋势识别。一旦监测数据超过设定阈值，系统可自动发出预警指令，并联动应急响应机制，极大提升早期灾害识别和主动干预能力。同时，智能化平台支持历史数据积累与模型自学习，不断优化预警精度和响应策略。通过自动化、智能化手段的深度嵌入，矿井突水灾害的监测效率和管理精度显著提升，有效支撑灾害防控工作的科学决策与快速反应。

5.3 防控工程与管理措施协同优化

突水灾害的系统防控需要科学管理和完善应急体系的有机结合。首先，应建立涵盖探查、预警、防控、应急的全流程闭环管理体系，实现信息流、决策流与执行流的无缝衔接。多部门协同机制的建立，有助于强化资源整合和信息共享，提升综合防控效能。同时，加强员工培训和定期演练，提升应急处置能力，确保一旦发生灾害能够迅速有序响应。管理层需定期复核防控措施实施效果，借助反馈信息和数据分析不断调整、优化治理方案。通过技术创新与管理提升协同发力，矿山可以构建起科学、系统、可持续的突水灾害防控体系，为矿井安全生产提供坚强保障。

6 结语

随着矿山深部开采进程加快，隐蔽断层突水灾害的精准探查与高效防控已成为保障矿井安全生产的关键。多参数耦合探查方法以多学科协同、信息融合和智能判识为核心，显著提升了隐蔽断层识别和突水风险判别的科学性与准确性。多参数协同探查和综合防控措施为矿区灾害治理提供了理论基础与技术支撑。未来应持续推动探查技术与智能化手段融合，完善多参数综合判识与动态管理机制，促进矿山灾害防控能力的整体提升，为深部矿井安全可持续发展保驾护航。

参考文献

- [1] 孙文斌,杨辉,赵金海,等.断层突水灾变演化过程划分基础试验研究[J].煤炭科学技术,2023,51(07):118-128.
- [2] 胡彦博.深部开采底板破裂分布动态演化规律及突水危险性评价[D].中国矿业大学,2020.
- [3] 高兵.承压水上次生构造活化突水机理及危险性预测研究[D].山东科技大学,2019.
- [4] 牛云飞.深部岩溶构造控水机制及底板突水非线性预测研究[D].中国矿业大学,2018.