

Development and Application of an Integrated Technical System for Karst Water Hazard Investigation and Management in Post-Sequence Coal Seam Roof and Floor Shale

Chenxu Yan Yilun Lin Jincheng Xu

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

Abstract

Frequent karst water hazards in the roof and floor shale of post-sequential coal seams during mining operations in China pose significant threats to mine safety and production efficiency. Traditional water hazard management approaches often rely on single technical measures, which suffer from issues such as discontinuous information flow, delayed decision-making, and unstable treatment outcomes. This study establishes an integrated technical system combining “geological modeling, geophysical exploration, hydrological monitoring, comprehensive management, and dynamic evaluation” based on multi-source information integration, dynamic monitoring, and intelligent decision-making principles. Field trials and engineering applications have validated the system’s effectiveness in identifying concealed karst cavities, sealing sudden water inrush channels, and dynamically regulating groundwater. Results demonstrate that this integrated system significantly improves water hazard prediction accuracy and treatment efficiency, reduces accident risks, and enables safe and efficient coal mining.

Keywords

post-sequential coal seam; karst water hazard; integrated investigation and management; hydrogeological modeling; intelligent monitoring

煤矿后组煤顶底板岩溶水害探查治理一体化技术体系构建与应用

延晨旭 林依伦 徐锦程

山东泰山资源勘查有限公司, 中国·山东 济南 250100

摘要

我国后组煤层开采过程中顶底板岩溶水害频发, 严重威胁矿井安全与生产效率。传统水害治理方式多依赖单一技术手段, 存在信息不连续、决策滞后及治理效果不稳定等问题。本文基于多源信息集成、动态监测与智能决策理念, 构建了集“地质建模—物探探查—水文监测—综合治理—动态评估”于一体的煤矿后组煤顶底板岩溶水害探查治理一体化技术体系。研究通过现场试验与工程应用, 验证了该体系在隐伏溶洞识别、突水通道封堵及地下水动态调控等方面的高效性与可靠性。结果表明, 该技术体系能显著提升水害预测精度与治理效率, 降低事故风险, 实现煤矿安全高效开采。

关键词

后组煤; 岩溶水害; 探查治理一体化; 水文地质建模; 智能监测

1 引言

随着煤炭资源开采深度与范围的不断扩大, 矿区地质条件日趋复杂, 后组煤层顶底板岩溶水害问题日益突出。特别是在华北、华中及贵州、广西等喀斯特发育地区, 岩溶裂隙及溶洞系统与含水层结构耦合紧密, 形成了典型的“多层—多源—多通道”水文地质格局。一旦防水层遭到破坏或断层导水通道被激活, 极易引发突水事故, 造成严重的人员

伤亡与经济损失。

传统水害治理技术多以单一地质调查或局部防治为主, 缺乏系统性与动态性。在复杂岩溶条件下, 单一物探或钻探手段难以全面识别含水构造, 导致治理决策依赖经验, 效果难以量化。为此, 本文提出以“信息融合、系统防控、动态响应”为核心的后组煤岩溶水害探查治理一体化技术体系。该体系以多源数据驱动为基础, 融合地质、地球物理、水文监测与数值模拟技术, 实现探查、评估、治理全过程的集成化与智能化, 为煤矿深部开采提供科学支撑。

【作者简介】延晨旭(1996-), 男, 中国山东济南人, 硕士, 助理工程师, 从事水工环地质研究。

2 后组煤岩溶水害的地质特征与形成机理

2.1 地层结构与含水系统特征

后组煤层通常赋存于石炭二叠系灰岩、砂岩及页岩互层中,顶板及底板常为灰岩或白云岩,其裂隙、溶洞及孔隙发育,为岩溶水的主要储集与运移空间。区域地下水系统主要包括上部裂隙含水层、中部承压岩溶含水层及下伏喀斯特裂隙含水层,三者之间通过断层、陷落柱及节理裂隙相互连通。水文地质条件的非均质性与空间分布的不确定性,使得后组煤层的水害具有隐蔽性、突发性和破坏性。

2.2 岩溶发育及水动力特征

后组煤顶底板岩溶作用的形成与演化受岩性、构造与水动力条件共同控制。灰岩及白云岩易溶性强,在长期水化学作用下产生大量溶沟、溶槽、溶洞及暗河系统。断裂活动产生的破碎带不仅为岩溶发育提供渗流通道,也构成地下水的主要运移路径。区域地下水补给以降雨渗透与地表水下渗为主,在断裂及岩溶裂隙的导流作用下形成强承压岩溶含水层。由于补给强度与排泄条件的差异,含水层内水位波动显著,导致顶底板承压水头差周期性变化。当采掘扰动引起应力场重分布时,潜伏导水构造被激活,水动力条件突变,极易触发突水事故。研究表明,岩溶水动力环境的不稳定性是后组煤层水害多发的重要地质背景。

2.3 典型水害模式分析

结合实测资料与工程案例,后组煤岩溶水害主要可归纳为三种典型模式:①断层导水型,即断裂构造贯通含水层与采空区,形成水力通道,承压水突入采掘空间,常引发突水或突泥事故;②陷落柱充水型,由古岩溶塌陷形成的陷落柱充水体,在应力扰动下重新活化,成为潜在的集中突水通道;③底板破坏型,采掘扰动导致底板防水层剪切破坏或岩溶通道贯通,承压水从底板突入采区。三种模式在空间分布、导水特征及水动力机制上存在显著差异。针对不同模式的水害防治,应结合地质构造特征、含水系统类型及应力场变化,综合应用物探探查、注浆加固与动态监测等技术,实现差异化治理与精准防控。

3 探查治理一体化技术体系的构建原则

3.1 系统集成与分层协同

煤矿后组煤顶底板岩溶水害探查治理一体化体系的构建以系统性与协同性为核心目标,其关键在于实现“多源信息—多技术手段—多阶段流程”的高效耦合。该体系以地质建模、物探探查、水文监测、治理设计与动态评估五大模块为核心构架,形成从数据采集、模型构建到治理决策的全流程闭环^[1]。各模块在统一的矿区地质信息平台上进行数据共享与互联,实现空间定位一致、参数传递通畅、结果验证可追溯。系统采用分层协同设计理念,顶层为信息集成与决策层,负责多源数据融合与治理方案制定;中层为分析与建模层,承担地质结构解释、数值模拟与风险评估;底层为现

场实施与监测层,执行探查、治理与动态反馈任务。通过这种垂直分层、横向协同的体系结构,实现了数据流、信息流与决策流的高效统一,使水害治理从传统的阶段性作业模式转变为全过程、系统化的动态管理模式。

3.2 信息融合与多维验证

在复杂岩溶地质条件下,单一探查手段难以全面识别隐伏含水构造,因此一体化体系强调多源信息的综合融合与多维验证。通过将地震反射法、电磁测深、高密度电阻率法、瞬变电磁法与地质钻探等手段有机结合,实现对不同尺度、不同物理特征目标的联合探查。各方法在空间分辨率、深度精度及响应特征上互为补充,能够提高整体识别精度。系统通过多源数据反演算法,将地球物理参数与地质、钻探资料进行配准与综合解释,构建岩溶含水结构三维可视化模型。该模型不仅呈现溶洞、裂隙与导水构造的空间形态,还能表达含水层连通性、渗透系数及压力分布等关键水文参数,实现“几何—水文—力学”多维一体化表达。通过反演结果与现场钻探、抽水试验数据的交叉验证,可有效提高模型精度与可靠性。此种多维融合模式使探查结果从定性推断转向定量分析,为精确识别水害隐患和科学制定治理方案提供了坚实的技术支撑。

3.3 智能化与动态反馈机制

智能化与动态反馈机制是该体系实现实时预警与自适应决策的关键环节。系统在矿区布设地下水位自动监测仪、渗流传感器及压力传感器,构建多参数智能监测网络。监测数据通过无线传输实时上传至矿区信息平台,经人工智能算法与时序分析模型处理后,自动生成水位变化曲线、压力梯度图及风险预警指数,实现对潜在突水风险的早期识别。系统可依据监测结果对治理方案进行动态调整,如自动优化注浆流量、调控卸压孔开闭状态,形成“探查—治理—评估—优化”的闭环控制模式。平台同时具备可视化分析与专家决策辅助功能,可将实时数据叠加于三维地质模型中,直观展示水文动力变化与治理效果。通过建立AI驱动的反馈机制,系统实现了从静态防治向动态管理的转变,使水害治理具备预测性与前瞻性,极大提升了应急响应效率与矿井安全水平,为实现智慧矿山建设奠定了技术基础。

4 关键技术组成与实现路径

4.1 综合物探与地质建模技术

综合物探是识别隐伏溶洞与导水构造的关键环节,是煤矿岩溶水害防控的首要技术手段。针对后组煤顶底板地质结构复杂、岩性差异明显的特征,采用多方法互补的综合物探体系^[2]。地震反射法用于获取岩层界面形态与构造展布特征,分析断层破碎带及岩溶裂隙的延伸方向;瞬变电磁法可识别高导水性区域,通过电磁响应特征判定含水层分布与水体富集区;高密度电阻率法用于精确反演溶洞及裂隙发育范围,结合地质钻探、岩心取样与地球化学参数分析,实现

空间定位与属性约束。通过多源数据的反演融合,建立“地质—地球物理—水文”联合解释模型。在GIS与三维地质建模平台中,形成顶底板岩溶结构数字孪生模型,动态展示溶洞空间分布及含水层渗透特征,实现水害隐患的可视化识别、可量化评估与全过程动态管理,为精准治理提供科学基础。

4.2 水文地质监测与风险预测技术

水文地质监测是实现突水预警与风险预测的重要技术环节。在采掘区、断层破碎带及溶洞发育区布设多参数自动化监测网络,监测指标包括水位、水压、流量、电导率及渗透速率等,实现连续动态采集。数据经物联网终端实时传输至矿区水害监测平台,形成多源时空数据库。基于时间序列分析与灰色关联模型,建立水文响应规律,识别降雨、采掘扰动与水位变化间的耦合关系。进一步利用BP神经网络算法训练预测模型,对突水趋势与水位异常进行短期与中期预测。预测结果与数值模拟的应力场分布耦合分析,可确定高风险区域及潜在突水通道。该技术体系实现了由静态监测向动态预警的转变,使水文地质信息可实时可视,极大提高了预警准确度与响应效率,为防治决策提供科学支撑。

4.3 综合治理与动态调控技术

综合治理与动态调控是岩溶水害防治体系的核心环节。治理策略遵循“分区防控、联合封堵、动态调水”的原则,针对不同类型水害实施差异化措施。对于断层导水型水害,采用注浆加固与帷幕灌浆构筑隔水屏障,形成“多层阻隔一定向封堵”的防渗体系;对陷落柱充水型水害,执行“探一封一排”一体化方案,通过定向钻孔与高压注浆实现水源分隔与压力释放;对于底板突水风险区,建立多层防水层与卸压孔系统,协调承压水动力。治理效果通过在线监测系统实时追踪,监测参数包括水压变化、渗透速率及注浆扩散范围。平台基于反馈数据自动优化治理参数,实现治理方案的智能化调整与动态优化。该体系不仅实现了从“事后抢险”向“事前预控”的转变,也为煤矿水害治理提供了标准化、数字化的技术范式。

5 工程应用与效果评估

5.1 试点工程概况

选取华中某大型矿区后组煤工作面开展一体化试点,区内构造复杂、断裂密集、岩溶发育强烈,顶底板灰岩溶蚀孔洞与裂隙连通性高。为实现“面一点一体”多尺度认知,完成地震反射勘探约12 km、电法测线9 km,布置验证钻孔38口,获取岩性、电性与含水性参数;同步设置46处自动化水位与水压监测点,形成时空连续监测网络。基于多源数据反演与联合解释,构建顶底板岩溶水系统三维地质—水文模型,识别潜在导水通道12条,圈定高风险区约0.36 km²,

并明确断层破碎带、陷落柱边界及底板薄弱带的空间展布,为后续分区治理与注浆设计提供量化依据。

5.2 治理实施与监测结果

遵循“探查先行、分区施策、动态校核”的原则,对不同水害单元实施差异化治理。底板薄弱段采用低黏度水泥—粉煤灰双液注浆加固,形成平均厚度9.2 m的复合防水层;断层导水带布置帷幕注浆与分级加固孔,通道封堵率达93%;对大型溶洞群实施“导—排—回”一体化调控,建立稳定排水与定量回灌系统。连续监测表明,承压水压力整体下降20%以上,水位波动由“快涨快落”转为“缓变稳态”,异常渗流信号消失^[3]。采面推进全过程未现突水与异常渗水,瓦斯抽采与通风系统运行稳定;对比改造前指标,煤层回采率提升8.7%,停产待检时间显著压缩,安全与产能实现同步提升。

5.3 技术效益与推广价值

一体化体系在试点中的应用,显著提升了隐伏通道识别精度与治理时效,达成“精准探查、科学治理、动态管控”的目标。安全效益方面,突水事故零发生,重大水害风险由事后处置转向事前预警;经济效益方面,通过精细注浆与分区治理,材料与工程成本综合下降约22%,回采效率与有效工作时长明显增加;管理效益方面,形成标准化流程与三维数字模型,监测—评估—决策实现闭环,支撑跨区块复制与迭代优化。该体系对断层密集、陷落柱发育及深部承压水强的矿区具有良好适应性,可与矿山信息化平台对接,构建水害数字孪生,实现区域级推广应用与持续更新,为后组煤安全高效开采提供可复制的技术路径与管理范式。

6 结语

煤矿后组煤顶底板岩溶水害是制约深部资源安全开采的关键地质问题。本文构建的一体化探查治理技术体系以信息融合、智能监测与动态调控为核心,实现了从被动防治到主动管控的转变。研究实践表明,该体系能够有效识别隐伏水害通道,精准控制突水风险,显著提升煤矿水害防控水平。未来,应在更大区域内推广该体系,结合人工智能、大数据与地质信息系统技术,建立煤矿水害数字孪生平台,实现水害治理的可视化、智能化与可持续化,为我国煤矿安全高效开采提供长效技术支撑。

参考文献

- [1] 宋子琦.潘二矿微震监测与煤层底板突水预警研究[D].安徽理工大学,2025.
- [2] 宋少鹏.煤层底板薄层灰岩区域治理技术及效果评价研究[D].河南理工大学,2024.
- [3] 柳昭星.煤层底板水害超前区域治理关键注浆参数控制机制[D].西安科技大学,2022.