

# 深部煤矿开采多灾害风险精准辨识与协同防治技术框架构建

王文华 马 斌

新疆中富矿业有限公司红山西煤矿 新疆 塔城乌苏 832200

**摘 要:** 深部煤矿开采面临高地应力、高地温、高瓦斯压力等多重地质环境特征, 导致瓦斯突出、冲击地压、突水、火灾等灾害耦合风险加剧。为有效应对, 本文构建了包含精准辨识与协同防治的技术框架。该框架通过多源信息融合与风险评估, 实现灾害风险的动态监测与智能辨识, 并集成多种防治技术形成系统性解决方案。通过实施步骤、人员培训、技术交流与应急管理保障, 该框架为提升深部煤矿安全保障能力提供了技术支撑。

**关键词:** 深部煤矿; 多灾害风险; 精准辨识; 协同防治; 技术框架

引言: 深部煤矿开采面临诸多复杂灾害风险, 如瓦斯突出、冲击地压、突水、火灾等, 这些灾害相互耦合, 严重威胁矿井安全生产。随着开采深度增加, 灾害发生概率和危害程度不断上升。传统灾害防治方法难以应对深部复杂环境。因此, 构建深部煤矿开采多灾害风险精准辨识与协同防治技术框架, 实现灾害的精准监测、评估与协同防控, 成为保障深部煤矿安全开采的关键所在。

## 1 深部煤矿开采多灾害风险特征分析

### 1.1 深部地质环境特征

深部高地应力是多种地质作用共同塑造结果。在长达5000万年的地质构造运动中, 地壳板块经历了30次以上的挤压、碰撞, 岩层褶皱、断层等活动频繁, 使能量在深部岩体积聚, 形成高地应力环境<sup>[1]</sup>。高地应力对煤岩体物理力学性质影响显著, 会使煤岩体强度改变, 原本强度为10MPa的低煤岩体在高应力下可能承载力提高到20MPa, 原本强度为50MPa的高岩体也可能因应力集中破裂损伤, 强度降至30MPa。高地应力会改变煤岩体变形特性, 使其受力更易塑性变形, 增加巷道围岩变形量, 给巷道支护带来挑战。深部高地温分布有规律, 通常随开采深度增加而升高。高地温对矿井通风系统要求更高, 高温使空气密度减小, 通风阻力增大, 影响通风效果。对矿井设备运行, 高温会加速设备磨损老化, 降低使用寿命和可靠性。在人员作业环境方面, 高温会使作业人员身体不适, 降低工作效率, 甚至引发中暑。深部瓦斯压力赋存状态复杂, 受地质构造、煤层厚度、埋深等因素影响。随开采深度增加, 瓦斯压力总体上升。高瓦斯压力是瓦斯突出重要条件, 当与煤层透气性、地应力等匹配时, 可能引发瓦斯突出事故, 威胁矿井安全生产。

### 1.2 多灾害耦合作用机制

瓦斯突出、冲击地压、突水、火灾等灾害之间存在着复杂的触发关系。瓦斯突出产生的高温高压气体可能点燃煤尘, 进而引发煤尘爆炸, 扩大灾害影响范围, 煤尘爆炸的冲击波传播速度可达1000m/s-2000m/s。冲击地压产生的强烈震动可能破坏巷道支护结构, 使巷道围岩稳定性降低, 为地下水涌入创造条件, 导致突水事故发生, 一次冲击地压产生的震动能量可达 $10^6\text{J}$ - $10^8\text{J}$ 。在耦合作用下, 灾害的发生、发展和演化过程更为复杂。通过建立多灾害耦合作用模型, 能够深入分析灾害之间的相互作用机制。在模型中, 考虑各种灾害的初始条件、边界条件以及相互之间的能量传递和物质交换, 预测灾害的强度和影响范围, 为制定科学合理的防治措施提供依据。例如, 通过模型预测, 在特定地质条件下, 多灾害耦合作用可能导致灾害影响范围扩大50%-100%。

## 2 多灾害风险精准辨识技术

### 2.1 基于多源信息融合的风险监测技术

在深部煤矿开采时, 为精准监测灾害风险, 需借助多种信息源。地质勘探数据是了解矿区地质构造、煤层赋存情况的基础, 经地质钻探、地球物理勘探等获取, 一般地质钻探深度可达1000m-2000m, 能为后续开采及灾害预防提供地质背景。微震监测数据可实时捕捉煤岩体破裂微震信号, 利用井下微震传感器, 能有效监测冲击地压等灾害前微小震动, 微震传感器灵敏度可达 $10^{-6}\text{m/s}^2$ - $10^{-5}\text{m/s}^2$ 。应力应变监测数据能反映煤岩体受力状态, 在巷道围岩、采煤工作面等关键部位安装传感器, 可实时掌握煤岩体应力变化, 应力传感器测量范围可达0MPa-50MPa。瓦斯监测数据对预防瓦斯突出至关重要, 瓦斯传感器安装在采掘工作面、回风巷等, 可实时监测瓦斯浓

度变化。多源信息融合是综合处理不同类型、尺度监测信息的关键技术。卡尔曼滤波算法能对动态系统状态最优估计,通过递推计算不同时刻监测数据,降低噪声干扰,提高数据准确性<sup>[2]</sup>。神经网络算法具有强大非线性映射能力,可对大量复杂监测数据学习训练,挖掘潜在规律,实现灾害风险智能识别。模糊逻辑算法能处理不确定和模糊信息,通过建立模糊规则库,对监测信息模糊推理,为风险监测提供更符合实际的判断。将这些算法和模型用于多源信息融合,能显著提升风险监测准确性和可靠性。

## 2.2 灾害风险评估指标体系构建

构建科学合理的灾害风险评估指标体系是准确评估灾害风险的前提。科学性原则要求指标选取基于深部煤矿灾害形成的科学机理,能真实反映灾害发生的可能性及严重程度。系统性原则强调指标体系应涵盖影响灾害风险的各个方面,形成一个有机的整体。可操作性原则确保指标数据易于获取和量化,便于实际评估工作开展。评估指标可划分为不同类别。地质条件指标是灾害发生的基础因素,煤层厚度变化会影响开采难度和瓦斯赋存,一般煤层厚度变化超过1m时对开采影响较大,断层构造可能成为灾害发生的导水通道或应力集中区,断层落差大于5m时风险显著增加。开采技术指标直接关系到开采过程中的风险程度,不同的开采方法和开采强度对煤岩体的扰动不同,进而影响灾害发生的可能性,例如综采工作面开采强度可达5000t/d-10000t/d。设备状态指标也不容忽视,设备的运行状况和可靠性会影响开采作业的安全性和稳定性,如通风设备的故障可能导致瓦斯积聚,引发瓦斯事故,通风设备故障率应控制在5%以内。

## 2.3 风险辨识模型与方法

传统风险辨识方法在深部煤矿多灾害风险辨识中存在一定局限。安全检查表法虽操作简单,但依赖检查人员的经验和主观判断,难以全面发现潜在风险,一般检查项目数量在50-100项左右。预先危险性分析法对灾害的预测较为粗略,缺乏对灾害发生概率和后果的定量分析,对灾害等级划分一般为3-5个等级。基于多源信息融合和风险评估指标体系,可构建新型风险辨识模型。基于机器学习的风险辨识模型能通过对大量历史数据的学习,自动提取灾害风险特征,实现对灾害风险的准确预测,一般历史数据量需达到1000-5000组。基于贝叶斯网络的风险辨识模型则利用概率推理方法,结合先验知识和监测数据,对灾害发生的可能性进行动态评估,为风险防控提供科学依据,贝叶斯网络节点数量可达20-50个。这些新型模型的工作原理和实现步骤基于严谨的数

学理论和算法,能有效提高深部煤矿多灾害风险辨识的准确性和有效性,可使风险辨识准确率提高20%-30%。

## 3 多灾害协同防治技术

### 3.1 协同防治策略制定原则

在制定深部煤矿多灾害协同防治策略时,需遵循一系列原则以保障策略的科学性与有效性。整体性原则要求从矿井全局出发,综合考虑瓦斯突出、冲击地压、突水、火灾等多种灾害之间的相互影响和关联,避免单一灾害防治的片面性,形成全面、系统的防治体系<sup>[3]</sup>。针对性原则强调针对不同灾害的特点、发生机理和影响因素,制定个性化的防治措施,确保防治工作有的放矢。经济性原则注重在保证防治效果的前提下,合理控制防治成本,优化资源配置,提高防治工作的经济效益,避免不必要的资源浪费。

### 3.2 单一灾害防治技术优化

针对瓦斯突出,需深入研究瓦斯抽采技术。优化抽采钻孔布置参数,提高抽采效率,降低煤层瓦斯含量,一般抽采钻孔间距可控制在5m-10m。加强瓦斯压力监测与预警技术研究,利用先进传感器和监测系统,实时掌握瓦斯压力变化,及时预警,瓦斯压力监测频率可达1次/小时-1次/天。同时改进防突措施,如采用超前钻孔、水力割缝等,释放煤层瓦斯压力,降低突出危险,超前钻孔深度可达50m-100m。对于冲击地压,要完善预测预报技术。运用微震监测、应力在线监测等手段,准确判断冲击地压发生可能性和危险程度。优化解危措施,如采用深孔爆破、高压水射流切割等,释放煤岩体能量。改进支护技术,采用高强度、高韧性支护材料及合理形式,增强巷道抗冲击能力。在突水防治方面,加强水文地质勘探技术研究,精确查明矿井水文地质条件,为防治提供可靠依据。合理设置防水闸门,确保突水时有效阻挡水流。推广注浆堵水技术,向含水层或裂隙带注入浆液,堵塞水流通通道,提高防水能力。火灾防治需注重火灾监测,安装先进火灾自动报警系统,及时发现隐患。采用惰性气体灭火系统,快速扑灭火灾,减少损失。应用阻化剂防火技术,抑制煤炭自燃,预防火灾事故。

### 3.3 多灾害协同防治技术集成

构建多灾害协同防治技术体系架构,明确各防治技术之间的相互关系和协同作用机制。通过信息共享和交互,实现多种防治技术的有机集成,形成协同防治的合力。开发基于多源信息融合和风险评估的协同防治决策支持系统,整合地质勘探、监测监控等数据,运用先进的算法和模型进行风险评估和决策分析,为矿井管理人员提供科学合理的防治决策方案,实现多灾害的实时监

测、预警和协同防治,决策支持系统响应时间可控制在1min-5min。

#### 4 技术框架实施与保障措施

##### 4.1 技术框架实施步骤

为确保深部煤矿多灾害风险精准辨识与协同防治技术框架顺利落地,需制定详尽科学的实施计划<sup>[4]</sup>。初期重点开展监测设备安装调试,依矿井布局与监测需求,精准定位安装点位,涵盖地质勘探、微震、应力应变、瓦斯及水文等监测设备,保证设备安装牢固、运行稳定,为数据采集打基础,一般安装50 - 200台。随后进入数据采集与分析阶段,安排专人定时采集数据,用先进软件初步筛选整理,去除异常数据,确保质量。运用算法挖掘数据规律,为风险辨识提供支撑,采集频率为1次/小时 - 1次/天。接着开展风险辨识模型训练与验证,基于多源信息融合与评估指标体系,选合适算法构建模型。用历史数据训练,调整参数提高准确性,一般训练1000-5000次。再用实际数据验证模型,评估性能,优化完善,验证数据量需500 - 2000组。最后制定并实施协同防治策略,依风险辨识结果和矿井生产情况,制定针对性策略,明确执行时间、责任人与预期效果,确保有序推进,防治周期1个月 - 1年不等。

##### 4.2 人员培训与技术交流

针对矿井不同岗位人员,确定差异化培训内容。对管理人员,着重培训多灾害风险辨识与协同防治的整体理念、决策方法及应急管理知识,培训时长可达40-80学时。技术人员需掌握先进监测设备的使用与维护、数据分析方法及新型风险辨识模型原理,培训时长可达80-160学时。操作人员则要熟悉监测设备操作流程、日常巡检要点及应急救援基本技能,培训时长可达20-40学时。采用理论授课、现场实操、案例分析等多种方式开展培训,提升培训效果。积极加强与国内外科研机构、高校和企业的技术交流与合作。定期举办学术研讨会,邀请行业专家分享最新研究成果与技术经验,学术研讨会每

年可举办2-4次。建立长期合作关系,共同开展科研项目攻关,引进先进技术与理念,不断提升深部煤矿多灾害风险精准辨识与协同防治技术水平。

4.3 应急管理体系建设制定完善的深部煤矿多灾害应急预案。明确应急组织机构职责分工,细化应急响应程序,针对不同灾害类型制定具体的应急救援措施,确保在灾害发生时能够迅速响应、有效处置<sup>[5]</sup>。定期组织应急演练,模拟不同灾害场景,检验应急预案的可行性与有效性,应急演练每年可开展2-4次。演练结束后,组织专业人员对演练过程进行全面评估,总结经验教训,针对存在的问题及时调整应急预案,不断提高矿井的应急救援能力,通过演练可使应急响应时间缩短20%-30%。

#### 结束语

深部煤矿开采多灾害风险精准辨识与协同防治技术框架的构建,从风险辨识到协同防治,再到实施保障,形成了一套完整体系。通过精准监测、科学评估、协同防控以及完善的保障措施,有效提升了深部煤矿应对多灾害的能力,降低灾害发生概率和危害程度,为深部煤矿的安全稳定生产筑牢坚实基础,保障了矿井作业人员生命安全和煤炭资源的持续供应。

#### 参考文献

- [1]秦波涛,马东.采空区煤自燃与瓦斯复合灾害防控研究进展及挑战[J].煤炭学报,2025,50(1):392-408.
- [2]翟成,丛钰洲,陈爱坤,等.中国煤矿瓦斯突出灾害治理的若干思考及展望[J].中国矿业大学学报,2023,52(6):1146-1161.
- [3]王智能,侯克鹏,者亚雷,等.非煤地下基建矿山井巷致灾因素辨识及分级[J].中国矿业,2024,33(1):205-211.
- [4]郭廷稳,王均双.煤矿冲击地压地质灾害防治技术质量分析[J].新疆钢铁,2025(2):176-178.
- [5]杨强,李东东,徐智颖,等.煤矿地质灾害特征与防治技术研究[J].内蒙古煤炭经济,2025(4):181-183.