

矿井通风系统抗灾变能力评估与提升路径研究

邓涌水

乐矿能源集团(山西)矿业公司 山西 太原 030032

摘要: 矿井通风系统是保障煤矿安全生产的核心基础设施,其在应对火灾、瓦斯突出、爆炸、冒顶等突发灾变事件中的稳定性和可靠性直接关系到井下人员生命安全与矿井财产安全。本文围绕矿井通风系统抗灾变能力这一核心议题,首先系统梳理了矿井灾变类型及其对通风系统的影响机制,继而构建了包含结构韧性、调控能力、应急响应与恢复能力等维度的综合评估指标体系,并引入模糊综合评价法与层次分析法(AHP)相结合的评估模型。在此基础上,从系统优化设计、智能监测预警、应急调控技术及管理机制完善四个层面,提出了提升矿井通风系统抗灾变能力的系统性路径。研究结果表明,通过多维度协同优化,可显著增强通风系统在极端扰动下的功能维持与快速恢复能力,为构建本质安全型矿井提供理论支撑与实践指导。

关键词: 矿井通风; 抗灾变能力; 评估体系; 智能调控; 应急响应; 安全韧性

引言

煤炭作为我国能源结构的主体,在可预见的未来仍将发挥不可替代的作用。然而,煤矿开采环境复杂、灾害频发,尤其是瓦斯爆炸、火灾、煤与瓦斯突出等重大事故,严重威胁矿工生命安全与国家能源安全。据统计,近十年我国煤矿重大事故中,约70%与通风系统失效或紊乱直接相关。矿井通风系统不仅是稀释瓦斯、排除粉尘、调节温湿度的基础保障,更是在灾变发生时控制灾情蔓延、引导人员逃生的关键防线。传统矿井通风系统设计多基于稳态工况,对突发扰动的适应性与恢复能力考虑不足。随着深部开采推进,地压增大、瓦斯涌出量增加、热害加剧,系统运行环境愈发恶劣,抗灾变能力面临严峻挑战。因此,亟需从“被动应对”转向“主动防御”,系统评估现有通风系统的抗灾变能力,并探索科学有效的提升路径。本文旨在构建一套科学、可操作的矿井通风系统抗灾变能力评估体系,并提出多维度协同的提升策略,为煤矿企业安全管理和技术升级提供理论依据与实践指南。

1 矿井灾变类型及其对通风系统的影响机制

1.1 主要灾变类型

矿井生产过程中可能遭遇多种突发性灾害,其中最具破坏性且与通风系统密切相关的主要包括瓦斯爆炸、火灾、煤与瓦斯突出、冒顶与冲击地压以及突水事故。瓦斯爆炸通常由高浓度甲烷在有限空间内遇明火或高温引发,其瞬间释放的巨大能量可摧毁巷道结构及通风设施,造成风流路径中断甚至逆转。火灾则分为外因火灾(如电气设备短路起火)和内因火灾(如煤层自燃),不仅释放大量有毒烟气,还会因高温形成“火风压”,

显著改变巷道内气流动力学特性。煤与瓦斯突出是一种动力灾害,在高地应力与高瓦斯压力共同作用下,大量煤岩与瓦斯在极短时间内喷出,极易堵塞回风巷道,导致局部区域瓦斯积聚,进而诱发二次爆炸^[1]。此外,深部开采条件下频发的冒顶与冲击地压事件,可直接压垮通风巷道或损毁风门、风桥等构筑物,而突水事故则通过淹没巷道物理阻断风流,同时可能引发电力系统故障,间接影响主扇运行。这些灾变类型虽成因各异,但均对通风系统的完整性与功能性构成严重威胁。

1.2 灾变对通风系统的影响机制

灾变事件对矿井通风系统的影响并非孤立存在,而是通过多重机制交织作用,最终导致系统功能退化甚至崩溃。首先,物理结构破坏是最直接的表现形式。爆炸冲击波、高温火焰或围岩坍塌可瞬间摧毁风门、密闭墙、风筒乃至主通风机等关键设施,使通风网络的物理连通性遭到破坏。其次,风流动力学状态发生剧烈紊乱。例如,火灾产生的火风压会显著改变巷道断面压力分布,引发风流反向或短路;瓦斯突出则因大量气体突然涌入,造成局部风阻剧增,风量分配失衡。再次,灾变释放的有害气体成分迅速恶化井下空气质量。一氧化碳、二氧化碳及高浓度甲烷的积聚,不仅超出通风系统的稀释能力,更直接威胁人员呼吸安全,缩短有效逃生时间窗口。最后,控制系统在灾变中极易失效。电力中断或通信链路中断将导致自动化调控系统瘫痪,使得调度人员无法及时获取井下状态信息,更难以实施有效的风量风向调整。上述影响机制往往相互耦合、正反馈放大,若通风系统缺乏足够的抗灾变韧性,灾情极易从局部失控演变为全矿灾难。

2 矿井通风系统抗灾变能力评估体系构建

2.1 评估内涵界定

矿井通风系统抗灾变能力 (Disaster Resilience Capacity of Mine Ventilation System, DRC-MVS) 是指系统在遭受突发灾变扰动时, 维持基本通风功能、抑制灾情蔓延、保障人员安全撤离, 并在灾后快速恢复至正常状态的综

合能力^[2]。其核心特征包括鲁棒性 (Robustness)、冗余性 (Redundancy)、适应性 (Adaptability) 与恢复性 (Recoverability)。

2.2 评估指标体系构建

基于DRC-MVS内涵, 结合矿井通风系统运行特点, 构建四级评估指标体系 (见表1)。

表1 矿井通风系统抗灾变能力评估指标体系

一级指标	二级指标	三级指标	说明
结构韧性 (A1)	巷道网络结构 (B1)	网络连通度 (C1) 关键节点冗余度 (C2)	衡量风路网络在部分节点失效后的连通能力
	通风构筑物可靠性 (B2)	风门抗冲击等级 (C3) 密闭墙耐火性能 (C4) 主扇抗震等级 (C5)	构筑物在灾变环境下的物理耐受能力
调控能力 (A2)	风量调控灵活性 (B3)	可调风窗数量与分布 (C6) 主扇变频调节范围 (C7)	系统动态调整风量的能力
	风向控制能力 (B4)	反风系统响应时间 (C8) 局部风流导向装置 (C9)	控制风流方向以隔离灾源的能力
应急响应能力 (A3)	监测预警能力 (B5)	多参数传感器覆盖率 (C10) 数据传输实时性 (C11)	对灾变前兆的感知与预警能力
	应急决策支持 (B6)	通风仿真系统完备性 (C12) 应急预案数字化程度 (C13)	支持快速制定应急通风方案的能力
恢复能力 (A4)	快速修复能力 (B7)	应急通风设备储备 (C14) 抢修队伍响应时间 (C15)	灾后恢复通风功能的速度
	系统自愈能力 (B8)	智能重构算法 (C16) 备用电源保障 (C17)	系统自主调整或切换至备用模式的能力

2.3 评估模型构建

采用层次分析法 (AHP) 确定各级指标权重, 结合模糊综合评价法处理指标的模糊性与主观性。

(1) 步骤1: 构建判断矩阵并计算权重

邀请10位矿山安全专家对各级指标进行两两比较, 构建判断矩阵, 通过一致性检验 ($CR < 0.1$) 后, 计算各指标权重向量 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ 。

(2) 步骤2: 建立评语集与隶属度函数

设定评语集 $V = \{\text{优, 良, 中, 差, 极差}\}$, 对定量指标 (如响应时间) 采用梯形或高斯隶属函数, 定性指标 (如预案完备性) 由专家打分转化为隶属度。

(3) 步骤3: 模糊综合评价

计算综合评价向量 $B = W \circ R$, 其中 R 为隶属度矩阵, \circ 为合成算子 (通常取 $M(\wedge, V)$)。最终根据最大隶属度原则确定系统抗灾变能力等级。

该模型可实现对不同矿井通风系统的量化评估与横向对比, 为针对性提升提供依据。

3 矿井通风系统抗灾变能力提升路径

3.1 优化系统结构设计, 增强物理韧性

一是构建高连通性通风网络: 采用“环形+枝状”混合网络结构, 避免单点故障导致全矿停风。关键采区

应设置至少两条独立回风通道。二是提升构筑物抗灾等级: 推广使用抗冲击风门 (可承受0.1MPa以上冲击波)、耐火密闭墙 (耐火极限 ≥ 2 小时), 主扇基础采用隔震设计^[3]。三是设置物理隔离屏障: 在采区边界、主要进回风巷之间设置防爆门、自动隔爆水棚, 阻断爆炸火焰与冲击波传播。

3.2 发展智能监测与预警技术, 提升感知能力

(1) 部署多源异构传感网络: 集成 CH_4 、 CO 、 O_2 、温度、风速、压力等传感器, 实现巷道全覆盖、高频率 ($\leq 10s$) 数据采集。(2) 构建灾变前兆识别模型: 基于深度学习 (如LSTM、Transformer) 分析多参数时序数据, 识别瓦斯异常涌出、煤温缓慢上升等早期征兆, 提前预警。(3) 建立数字孪生通风系统: 构建矿井通风系统的高保真数字模型, 实时映射物理系统状态, 支持灾变情景模拟与预案推演。

3.3 强化应急调控技术, 实现快速响应

(1) 发展智能反风与风流重构技术: 基于灾源定位, 自动计算最优反风方案, 控制可调风窗、风门联动, 实现“灾源隔离、清洁风流导向逃生路线”。(2) 推广局部应急供风系统: 在避难硐室、关键巷道配置压风自救装置与移动式局部通风机, 确保灾变期间局部区

域供风。(3)构建“云-边-端”协同控制架构:井下边缘计算节点实现毫秒级本地控制,云端平台进行全局优化,确保在通信中断时仍具备基本调控能力。

3.4 完善管理机制与应急体系

(1)制定动态化应急预案:基于通风系统评估结果,针对不同灾变类型制定差异化应急通风方案,并定期演练更新。(2)建立抗灾变能力定期评估制度:每季度或重大系统改造后,采用本文提出的评估模型对通风系统进行“体检”^[4]。(3)加强人员培训与应急演练:培训通风调度员掌握灾变风流调控技能,组织全员参与通风异常情况下的避灾演练。

4 案例分析:某高瓦斯矿井通风系统抗灾变能力提升实践

4.1 矿井概况

某高瓦斯突出矿井开采深度已达850米,采用中央并列式通风方式,主通风机型号为FBCDZ-10-No30,核定风量为8000立方米/分钟。该矿在2023年曾发生一起局部瓦斯超限事件,虽未造成人员伤亡,但暴露出其通风系统在灾变应对中的明显不足:监测存在盲区导致预警滞后,风流调控手段单一导致响应迟缓,反映出系统整体抗灾变能力的薄弱。

4.2 抗灾变能力评估

应用本文构建的评估模型,组织专家团队对该矿通风系统进行综合评估。评估结果显示,其抗灾变能力综合评价价值处于“中”等水平。深入分析发现,其主要短板集中于三个方面:一是通风网络结构单一,东翼采区仅有一条回风上山,关键节点冗余度严重不足;二是应急反风系统老化,从指令下达到完成反风操作耗时长达8分钟,远超5分钟的安全标准;三是井下传感器布局不合理,部分偏远巷道未被覆盖,整体覆盖率为75%,存在显著的监测盲区。这些问题共同构成了该矿通风安全的重大隐患。

4.3 提升措施实施

针对评估发现的问题,该矿制定并实施了一套系统性的提升方案。在结构层面,投资新建了一条东翼回风上山,成功构建了双回风通道,从根本上提升了网络的连通性与冗余度。在智能化层面,全面升级了监测系统,新增部署了200个无线多参数传感器,使覆盖率提升至98%,并安装了15套智能风窗,实现了风量的远程、

精准调控。在应急能力层面,对反风系统进行了技术改造,通过优化控制逻辑和更换执行机构,将响应时间成功缩短至3分钟以内。同时,引入了矿井通风数字孪生平台,为应急决策提供了强大的仿真支持。在管理层面,修订了原有的应急预案,使其更具针对性和可操作性,并建立了季度演练制度。

4.4 效果评估

经过一年的系统改造与运行,于2024年对该矿通风系统进行了再次评估。结果显示,其综合评价价值已显著提升至“良”等级。更为重要的是,在一次全矿范围的瓦斯突出模拟演练中,新系统展现了卓越的应急能力:从灾源定位到完成风流重构仅用时90秒,成功将灾源区域隔离,并将清洁风流稳定地导向所有预设的避灾路线,圆满完成了演练目标。这一实践充分验证了本文所提出评估体系与提升路径的有效性和实用性。

5 结语

本文系统研究了矿井通风系统抗灾变能力的评估与提升问题,主要结论如下:矿井灾变通过物理破坏、风流紊乱、气体恶化等机制威胁通风系统功能,亟需构建以“韧性”为核心的抗灾变能力体系。提出的包含结构韧性、调控能力、应急响应与恢复能力的四级评估指标体系,结合AHP-模糊综合评价模型,可实现对通风系统抗灾变能力的科学量化评估。从系统结构优化、智能监测预警、应急调控技术与管理机制四方面提出的提升路径,具有系统性与可操作性,案例验证了其有效性。未来研究可进一步探索:基于强化学习的通风系统自适应调控算法;多灾种耦合作用下的通风系统失效机理;通风系统与人员定位、避灾路线规划的深度协同。通过持续技术创新与管理优化,矿井通风系统将从“安全保障”迈向“主动防御”,为实现煤矿本质安全提供坚实支撑。

参考文献

- [1]刘业娇,田志超,刘红,等.矿井通风系统抗灾能力评价研究[J].工矿自动化,2015,41(04):44-47.
- [2]李相通,韩海亭,付自豪.通风系统优化改造在矿井抗灾中的应用探讨[J].内蒙古煤炭经济,2025,(06):175-177.
- [3]武捷.多因素复杂地质条件下矿井通风系统优化布置方式研究[J].能源与节能,2025,(10):92-94+98.
- [4]冯刚.煤矿矿井通风技术及通风系统优化设计研究[J].能源与节能,2025,(07):105-107.