

# 通风系统与防灭火系统联动机制在灾害防治中的作用

郭勤磊 宋 磊

陕西彬长大佛寺矿业有限公司 陕西 咸阳 713500

**摘要:** 煤矿作为我国能源体系的重要支柱,其安全生产始终是国家关注的重点。火灾与瓦斯爆炸等热动力灾害是煤矿重大事故的主要诱因,严重威胁矿工生命安全和矿井正常生产秩序。传统的煤矿安全系统多采用“单点防控、独立运行”的模式,难以应对复杂多变的井下灾变环境。本文聚焦于通风系统与防灭火系统的深度协同,系统阐述了二者联动机制的理论基础、技术架构、功能实现路径及其在煤矿灾害防治中的关键作用。通过分析典型应用场景,论证了联动机制在灾前预警、灾中控制、灾后处置全周期中的显著优势,并结合当前技术发展趋势,提出了智能化、集成化、自适应化的未来发展方向。研究表明,构建高效可靠的通风-防灭火联动机制,是提升煤矿本质安全水平、实现灾害精准防控与快速响应的核心路径。

**关键词:** 煤矿安全;通风系统;防灭火系统;联动机制;灾害防治

## 引言

煤炭在我国一次能源消费中长期占主导,但煤矿开采环境复杂,存在瓦斯突出、火灾等多种重大安全风险。火灾事故突发性强、蔓延快、扑救难,易诱发连锁反应,造成灾难性后果。传统煤矿安全防控体系里,通风系统与防灭火系统同属安全子系统,却设计、运行与管理割裂,信息孤岛严重。灾变发生时,各系统独立响应,应急决策滞后、资源调配低效,措施不当还可能加剧灾情。如今,随着新一代信息技术在矿山领域深度融合,“智能矿山”建设成行业共识。在此背景下,打破系统壁垒,构建多系统联动机制是提升煤矿灾害综合防治能力的关键,而通风与防灭火系统联动因在热动力灾害防控中地位核心尤为重要。本文将深入探讨该联动机制的内涵、技术实现及实际效能,为相关研究与实践提供参考。

## 1 通风系统与防灭火系统的基本原理与功能

### 1.1 矿井通风系统

矿井通风系统是煤矿的“呼吸系统”,其核心任务是向井下各用风地点连续供给足量、清洁的新鲜空气,同时将作业过程中产生的有毒有害气体(如 $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ )、粉尘及热量及时排出,确保井下空气质量、温度、湿度等环境参数符合安全规程要求。该系统由主通风机、复杂的通风网络(包括进回风井、巷道、风门、风桥、调节风窗等)、局部通风设备以及覆盖全矿的监测监控系统共同构成。在日常运行中,它不仅保障作业环境的基本安全,更是预防瓦斯积聚和煤尘飞扬的第一道防线。而在灾害发生时,通风系统的作用则从“维持”转向“调控”——通过反风、增阻、减阻或封闭火区等手段,主动干预风流路径,控制灾变烟气扩散方向,为人员安全撤

离和救援力量进入创造关键的时间窗口与空间通道。因此,通风系统既是常态安全的基石,也是应急响应的核心执行单元。

### 1.2 煤矿防灭火系统

煤矿防灭火系统兼顾“防”与“治”。预防时,系统持续监测采空区、高冒区等易自燃区域,借助束管分析、光纤测温或人工取样,捕捉标志性气体浓度及温度异常,实现早期预警;同时采取阻化剂喷洒、均压通风、惰性气体注入等手段,抑制煤体氧化。火情确认后,系统进入治理模式,可用注浆、泡沫、胶体或喷水等方式灭火,注浆和胶体因覆盖与保水性好,适用于隐蔽火源或复杂巷道。防灭火体系的有效性依赖感知灵敏度、判断准确性和执行及时性,若脱离与通风状态的实时交互,易陷入“盲打”困境,如高风速区注浆被冲散、低氧环境注水产生水煤气加剧爆炸风险。所以,科学实施防灭火措施,必须精确掌握当前通风场态。

## 2 联动机制的理论基础与必要性

### 2.1 热动力灾害的耦合特性

煤矿火灾并非孤立事件,它与通风状态紧密耦合。一方面,通风状况(风量、风速、风流方向)直接影响火势的发展。充足的氧气供应会加速燃烧,而特定的风流模式(如火风压)则可能改变原有风流方向,导致烟流倒退,危及救援通道。另一方面,火灾一旦发生,其产生的高温烟气会剧烈扰动原有的通风网络,形成复杂的非稳态流动,使得常规通风调控策略失效<sup>[1]</sup>。这种强耦合性决定了,任何单一系统的干预都难以奏效。有效的火灾防控必须建立在对“火-风”耦合动态过程的深刻理解和协同控制之上。

## 2.2 “1+1>2”的协同效应

联动机制的价值在于通过信息互通与行动协同,实现系统整体效能的跃升。当防灭火系统检测到某区域一氧化碳浓度异常上升时,联动平台不仅能发出警报,更能立即调用通风模型,评估当前风量是否过大会助长氧化,或过小会导致瓦斯累积,并据此自动微调局部风窗开度,在保障人员供风安全的同时,精准抑制潜在火源的供氧条件。在火灾确认后的应急阶段,系统可基于实时采集的火源位置、温度场、气体分布及巷道拓扑结构,利用计算流体力学(CFD)快速模拟多种处置方案——如“先反风再注氮”或“边封闭边注胶”——并选择最优组合指令同步下发至通风风机、远程风门与注氮泵站,实现秒级协同响应。更重要的是,联动机制内置的安全互锁逻辑能有效规避人为误操作风险,例如在未完成火区封闭前,系统将自动锁定可能导致瓦斯超限的降风指令。这种从“孤立响应”到“协同免疫”的转变,不仅提升了处置效率,更从根本上增强了矿井面对复杂灾变的韧性。

## 3 联动机制的技术架构与实现路径

### 3.1 感知层(端)

联动机制的起点是全域、实时、高精度的环境感知。在井下关键区域,包括采掘工作面、采空区边界、回风巷道、机电硐室及高冒顶板处,密集部署多类型传感器构成感知网络。通风侧的风速、风压、甲烷及温湿度传感器持续描绘风流场态;防灭火侧则依靠多参数气体分析仪、分布式光纤测温系统及红外热像仪捕捉火险征兆;此外,视频监控与人员定位数据为态势研判提供空间上下文。这些异构数据通过工业环网或高可靠无线Mesh网络汇聚上传,为上层决策提供原始依据<sup>[2]</sup>。感知层的覆盖密度与数据质量,直接决定了联动系统能否“看得清、辨得准”,是整个机制有效运行的基础。

### 3.2 决策与控制层(边/云)

作为联动系统的核心大脑,决策层采用“边缘-云端”协同架构以兼顾实时性与智能性。边缘节点部署于井下或地面机房,负责对本地传感器数据进行滤波、融合与特征提取,支撑毫秒级的本地闭环控制,如根据局部CO突增自动关闭邻近风门。而云端智能平台则承担更高阶的全局优化任务:它首先整合来自通风、防灭火、电力、人员定位等多源系统数据,构建动态更新的矿井数字孪生体;继而调用内嵌的灾害演化仿真引擎,基于CFD与火灾动力学模型,对不同应急策略下的烟流轨迹、温度分布及有害气体浓度进行快速推演;最终,依托规则引擎与机器学习算法库,综合安全规程、历史案例与实时仿真结果,自动生成包含风流调整、介质注入、人员疏

散等多要素的联动预案,并通过三维可视化界面直观呈现给调度员。这种分层决策模式既保证了关键动作的即时性,又实现了复杂场景下的科学统筹。

### 3.3 执行层(端)

执行层是联动指令落地的最终环节,其可靠性直接关系到应急成败。该层由一系列可远程精准控制的机电设备组成,包括电动或液压驱动的风门、风窗、主通风机变频器、局部通风机组,以及注氮/注浆泵站的电磁阀、阻化剂喷洒装置乃至智能灭火机器人。当决策层生成联动方案后,控制指令经安全校验后并发下发至各执行单元,确保风流重构与灭火介质投送在时间与空间上高度同步。例如,在启动主扇反风的同时,系统会自动开启专用注氮管路,并关闭通往非受灾区域的联络风门,形成“控风-隔断-惰化”三位一体的应急屏障<sup>[3]</sup>。整个执行过程闭环反馈,执行状态实时回传至决策层,用于动态修正后续策略,从而形成完整的“感知-决策-执行-反馈”控制回路。

## 4 联动机制在灾害防治中的具体应用与作用

### 4.1 灾前预防阶段:从被动监测到主动干预

在传统模式下,防灭火系统发现一氧化碳异常仅能触发报警,后续干预依赖人工判断,存在明显滞后。而联动机制则实现了从“被动等待”到“主动干预”的范式转变。当系统监测到某采空区上隅角CO浓度呈指数上升趋势并伴随乙烯检出时,无需等待人工确认,即可自动启动预防性响应:首先,通过调节相关巷道的风窗开度或局部风机频率,实施智能均压,将漏入该区域的风量削减至安全阈值以下;同时,若风险持续升高,系统将提前开启小流量氮气注入,将局部氧浓度压制在煤自燃临界点之下。对于已废弃的高风险巷道,联动平台还可自动指令关闭其与主通风网络连接的风门,实现物理隔离。这种基于实时数据的自动化、前置化干预,有效将火灾扼杀于萌芽阶段,大幅降低了重大事故的发生概率。

### 4.2 灾中应急阶段:科学控灾与保障生命通道

火灾一旦爆发,联动机制的核心价值在于实现科学、有序、高效的应急控灾。针对不同火源位置,系统可动态生成差异化策略。若火灾发生在进风巷道,首要目标是阻止烟流向人员密集区扩散,此时系统会立即指令主通风机反风,并同步关闭通往采区的总进风门,同时激活回风侧排烟风机,确保新鲜风流沿预设避灾路线稳定输送。若火源位于回风侧,则维持原风向但增大总风量以稀释烟气,同时向火区大规模注入氮气或高分子胶体,实现快速降温与窒息灭火。对于隐蔽于采空区的火源,系统首先通过气体与温度场反演精确定位火区边界,随

后执行“封闭-惰化-监测”一体化流程：自动控制构筑密闭墙，并在其完成后立即启动大流量注氮，同时持续监测密闭内外压差与气体成分，确保火区稳定受控<sup>[4]</sup>。在整个应急过程中，系统还能结合人员实时定位信息，动态优化并推送个性化逃生路径，真正实现“以人为本”的精准救援。

#### 4.3 灾后恢复阶段：安全启封与生产重建

火灾扑灭后的火区启封是另一高风险环节，稍有不慎便可能引发复燃甚至爆炸。联动机制在此阶段提供了科学、渐进的安全保障。系统持续监测火区内部的氧气、一氧化碳、二氧化碳浓度及温度等关键指标，只有当所有参数连续多日稳定达标（如 $O_2 < 5\%$ 、CO持续为零、温度回落至常温）后，才会生成安全启封建议。启封过程并非一次性打开，而是由系统控制风门缓慢开启微小缝隙，并同步监测回风流中是否有异常气体涌出；一旦检测到CO回升或温度波动，立即重新封闭，确保万无一失。在确认火区彻底稳定后，系统还将对全矿通风网络进行重新优化计算，调整风量分配，以满足复产后的安全通风需求，为矿井安全、高效恢复生产奠定坚实基础。

#### 5 挑战与未来展望

尽管联动机制展现出显著价值，其推广应用仍面临若干挑战。不同厂商设备的数据格式与通信协议不统一，导致系统集成复杂、成本高昂，亟需建立统一的矿山物联网数据标准；高精度CFD仿真对算力要求极高，难以满足井下实时决策需求，未来需发展轻量化模型与边缘-云协同计算架构；作为安全关键系统，其自身的故障容错能力与网络安全防护也必须达到最高级别。展望未来，通风-防灭火联动机制将朝着更高层次的智能化迈进，深度融合AI大模型，实现从“规则驱动”到“认知驱动”的

跨越；同时，其集成范围将从双系统扩展至覆盖“水、火、瓦斯、顶板、粉尘”五大灾害的矿山全域安全智能体；此外，系统还将具备更强的自适应性，能够根据矿井开采进度与地质条件变化自动更新内部模型与策略库，真正实现“随矿而变”的动态安全防护。

#### 6 结语

煤矿安全生产形势依然严峻，对灾害防治技术提出了更高要求。通风系统与防灭火系统作为矿井安全的生命线，其独立运行的模式已难以满足现代矿山的安全需求。本文系统论述了构建二者联动机制的必要性、技术路径及其在灾前、灾中、灾后全周期中的核心作用。研究表明，通过建立以数据融合为基础、以智能决策为核心、以协同执行为保障的联动机制，能够实现对煤矿热动力灾害的精准感知、科学预判、快速响应和高效处置。这不仅显著提升了矿井的防灾、抗灾、救灾能力，也为智能矿山建设奠定了坚实的安全基石。未来，随着相关技术的不断成熟与标准体系的完善，通风-防灭火联动机制必将成为煤矿安全生产不可或缺的核心组成部分，为保障矿工生命安全和国家能源安全作出更大贡献。

#### 参考文献

- [1]张伯杰.通风防灭火技术在煤矿中的应用探析[J].能源与节能,2025,(12):285-288.
- [2]王彬.煤矿通风防灭火技术的应用研究[J].内蒙古煤炭经济,2025,(08):145-147.
- [3]徐振,徐龙,祝传军.浅析通风防灭火技术在煤矿中的应用[J].化工管理,2025,(07):115-118.
- [4]褚福涛,殷其朗,刘凯.煤矿通风防灭火技术在矿井中应用探析[J].内蒙古煤炭经济,2025,(01):130-132.