

煤矿井下重大安全风险智能辨识与预警机制研究

李大伟

汇永控股集团有限公司 北京 100093

【摘要】：煤炭作为我国主体能源，井下安全生产始终是行业发展的重中之重，而通风系统紊乱是诱发瓦斯超限、煤自燃等重大事故的核心诱因。现阶段煤矿智能化转型加速，传统人工巡检、经验预判的风险管控模式，已无法满足动态风险防控需求。本文紧扣通风系统核心功能，聚焦重大安全风险智能辨识与分级预警，结合新一代信息技术构建适配井下场景的防控体系，补齐现有技术短板，为煤矿通风安全智能化管控提供理论参考与实践路径，切实降低井下安全事故发生率。

【关键词】：煤矿通风系统；安全风险；智能辨识；预警机制

DOI:10.12417/2705-0998.26.04.058

1 煤矿通风系统关联重大安全风险类型与致灾机理

矿井通风系统是煤矿井下安全生产的核心命脉，承担着供风、稀释有害气体、排尘、调节环境及灾变风流调控等关键功能，其稳定性直接决定井下重大安全风险的防控成效。从通风角度划分，井下重大风险围绕系统失效、风流紊乱及衍生灾害展开，各类风险耦合连锁，易引发重特大事故，明确风险类型与致灾机理是智能辨识预警的核心前提。

1.1 通风系统结构性缺陷风险

这是源头性安全隐患，主要表现为通风网络不合理、阻力失衡、设施故障及主辅风机运行异常。受开采深度增加、采掘接续频繁、巷道复杂影响，易出现通风路线过长、角联巷道多、漏风超标等问题，引发局部风量不足、风流短路，难以稀释有害气体；风门、密闭等设施老化失灵、缺乏智能管控，会形成风险盲区；风机性能不达标、闭锁失效，会直接造成通风中断，诱发瓦斯积聚、煤自燃等连锁灾害，该类风险隐蔽性强、波及范围广，传统人工巡检难以全面排查。

1.2 通风参数异常关联灾害风险

通风参数动态异常是灾害直接前兆，核心关联瓦斯超限、煤自燃、粉尘爆炸三类重大风险。风量不足、风流停滞会导致瓦斯积聚超限，遇火源引发爆炸；采空区持续漏风为煤自燃供氧，加速氧化反应；风速过低无法降尘、过高扬起沉积粉尘，均会触发粉尘爆炸风险，参数失衡直接主导灾害演化进程。

1.3 灾变时期通风应急调控风险

灾变时通风应急调控失效属于极端重大风险，传统人工处置存在响应滞后、决策不准、调控不精等问题，高温烟流与有害气体随风流快速蔓延，若无法及时反风、封闭管控，会大幅扩大灾害范围、加重人员伤亡。加之灾变后通风系统易受损、数据传输中断，会加剧风险辨识难度，形成灾害升级恶性循环，

适配灾变场景的联动预警调控机制是防控关键。

2 基于通风系统的重大安全风险智能辨识技术体系

传统煤矿通风安全风险辨识依赖人工巡检、定期检测与经验判断，存在效率低下、精准度不足、滞后性突出、无法全时段覆盖等突出短板，难以适配井下复杂多变、动态耦合的通风环境，无法有效防控重大安全隐患。依托物联网、大数据、人工智能、数字孪生等新一代信息技术，构建多源数据融合的智能辨识技术体系，能够实现通风关联重大安全风险的实时、精准、动态辨识，彻底突破传统辨识模式局限，为矿井安全风险超前预警与高效处置提供核心技术支撑。

2.1 多维度感知数据采集体系搭建

全面精准的感知数据是风险智能辨识的核心基础，需围绕通风系统关键要素，搭建“固定监测+移动巡检+分布式感知”三位一体的多维度数据采集网络，实现通风、环境、设备、开采四类核心参数全要素覆盖。固定监测层面，在进回风巷、采掘工作面、采空区、通风机房等关键区域，部署高精度风速、风压、气体浓度及设备运行传感器，实时采集风量、风压、瓦斯、一氧化碳等核心数据；移动巡检层面，依托智能巡检机器人、便携式多参数检测仪，补齐偏远巷道、临时施工区等监测盲区的数据短板；分布式感知层面，运用光纤传感、微机电传感器，实现采空区漏风、围岩形变的连续监测，弥补点式监测覆盖不足的问题。同时借助井下万兆光网、5G 专用通信技术，实现数据低时延、高可靠传输，为智能辨识筑牢实时数据根基。

2.2 多源数据融合与风险特征提取技术

井下通风风险数据具有多源异构、耦合性强的特点，单一数据无法全面反映风险态势，必须通过多源融合技术实现数据深度挖掘与特征提取。先搭建数据预处理模型，对原始数据开展降噪、去冗余、异常值剔除等处理，消除井下粉尘、电磁干扰等外界影响，保障数据质量；

再通过深度学习与多源融合算法,将各类参数进行时空维度融合,构建通风-灾害耦合关联模型,深挖风量、漏风、风阻与瓦斯超限、煤自燃、风流紊乱等风险的内在关联;最后借助卷积神经网络、LSTM等AI算法,提取风险演化特征,划定不同风险状态阈值,同步辨识显性与隐性风险,解决传统模式无法捕捉风险前兆的痛点。

2.3 数字孪生通风系统动态仿真辨识技术

数字孪生技术是实现精准动态辨识的核心创新手段,通过搭建1:1高镜像度的三维通风孪生模型,实现物理通风系统与虚拟模型的实时映射、双向交互,打破传统静态辨识局限。基于巷道测绘、通风网络拓扑、设备参数搭建精准孪生模型,完整还原井下通风布局;实时接入感知数据,通过通风网络动态解算算法,模拟风流分布、风量分配规律,快速诊断通风阻力异常、漏风超标、风流紊乱等问题;依托模型模拟采掘推进、设施调整、灾变发生等场景,实现风险超前预判,推动风险管控从“事后处置”转向“事前防控”,同时快速溯源风险源头,为处置提供精准方向。

2.4 风险智能分级辨识标准制定

结合行业安全规范与矿井实际开采条件,制定标准化智能分级辨识标准,将风险划分为一般、较大、重大三个等级,明确各等级对应参数阈值与风险表征。一般风险为参数小幅波动、局部轻微漏风,不影响系统整体运行;较大风险为局部风量不足、有害气体临近临界值,存在升级隐患;重大风险为通风系统局部失效、瓦斯超限、风流严重紊乱,直接危及作业安全。通过智能算法自动匹配风险等级,实现结果标准化、可视化输出,规避人工判断的主观性与误差,提升风险管控规范性。

3 通风视角下井下重大安全风险分级预警机制构建

基于风险智能辨识结果,立足通风系统核心管控功能,构建“分级预警、精准响应、通风联动、闭环管控”的井下重大安全风险预警机制,破解传统预警一刀切、响应滞后、部门联动性差的痛点,推动预警指令与通风调控、应急处置深度融合,最大限度压降井下安全风险危害。该机制核心涵盖预警等级划分、多渠道预警发布、分级响应与通风联动、闭环管理优化四大模块,全程聚焦通风系统稳定性管控,保障风险处置针对性与实操有效性。

3.1 预警等级划分与阈值设定

结合风险智能分级辨识成果,对应设置蓝、黄、橙、红四级预警,各级预警阈值紧密绑定通风关键参数与关联灾害指标,实现动态精准预警。蓝色预警为一般风险,通风参数小幅偏离标准、局部通风设施运行异常,有害气体浓度达标,仅需现场巡检人员排查整改;黄色预警为较大风险,局部风量不足、漏风率超标,有害气体浓度接近临界值,通风系统局部稳定性下滑,需通风班组快速调整通风设施消除隐患;橙色预警为重

大风险前兆,通风系统明显异常,局部瓦斯、一氧化碳浓度超标,风流紊乱趋势显现,灾害隐患突出,需启动专项预案并实施通风设备远程调控;红色预警为特大重大风险,通风系统局部失效、风流中断,瓦斯超限、煤自燃等灾害已发生或即将发生,直接威胁人员生命安全,需立即启动矿井级应急响应,组织人员撤离并开展应急通风调控。所有预警阈值结合矿井通风条件、瓦斯等级、开采深度动态优化,保障适配性与精准度。

3.2 多渠道立体化预警发布方式

搭建“地面中心+井下终端+移动终端”立体化预警发布体系,实现预警信息全覆盖、快传递。地面监控中心通过可视化大屏、声光报警装置,实时展示预警等级、风险点位、参数变化等信息,同步推送至通风调度、安全管理、应急救援等核心部门;井下依托巷道声光报警器、人员定位终端、防爆智能设备,推送语音、文字、灯光预警,明确风险位置与避灾路线;管理人员通过移动端APP远程接收信息、下达处置指令。同时针对不同预警等级设置差异化报警频次与音量,避免信息混淆,提升预警辨识度。

3.3 分级预警响应与通风联动调控策略

遵循“快速响应、分级处置、通风优先、联动防控”原则,制定分等级针对性处置策略,实现预警与通风调控无缝衔接。蓝色预警由现场通风作业人员现场核查整改,1小时内办结反馈;黄色预警由通风调度中心远程调控通风设备,增补风险区域风量,4小时内消除风险;橙色预警立即暂停涉险区域作业,切断非必要电源,启动备用通风设备,1小时内制定专项处置方案;红色预警第一时间下达人员撤离指令,启动主通风机反风或风流封闭程序,依托数字孪生模型模拟灾变通风演化,优化应急通风方案,严防灾害扩大。全流程纳入智能管控平台,实现自动触发、自动派单、全程跟踪。

3.4 预警闭环管理与持续优化机制

为保证预警机制长效运行,构建预警一响应一处置一核查一优化的闭环管理模式,避免预警处置流于形式。风险处置完成后,智能系统自动核查通风参数、环境参数是否恢复正常,风险是否彻底消除,未达标则重新升级预警等级,强化处置力度;同时,系统自动记录预警时间、风险类型、处置过程、处置结果、通风参数变化等数据,建立预警案例数据库;定期通过大数据分析算法,复盘预警案例,优化风险辨识特征阈值、预警等级划分标准与通风联动策略,适配矿井采掘接续、通风系统改造、开采条件变化等动态需求,不断提升预警机制的精准性与可靠性。

4 智能辨识与预警机制落地实施保障措施

煤矿井下通风关联重大安全风险智能辨识与预警机制的落地实施,需依托技术、设备、管理、人才四大保障体系,解决井下复杂环境适配、系统协同运行、人员操作规范等问题,

确保机制稳定高效运行，发挥风险防控实效。

4.1 智能化设备与系统升级保障

加大通风安全智能化设备投入，更换老化、精度低的传统监测传感器，配备高精度、高稳定性的矿用本安型智能监测设备，保证感知数据精准可靠；完善井下通信网络建设，实现5G专用网络、工业万兆光网全区域覆盖，解决井下数据传输时延、中断问题；搭建一体化智能通风安全管控平台，整合感知数据采集、风险智能辨识、分级预警、通风调控、应急管理功能，打破各系统数据壁垒，实现全流程一体化管控；定期对智能设备、管控平台进行维护、升级与校准，避免设备故障、系统卡顿影响风险辨识与预警效果。

4.2 管理制度与责任体系保障

建立健全通风安全智能辨识与预警专项管理制度，明确通风部门、安全管理部门、机电部门、应急救援部门的职责分工，细化预警响应、处置、核查各环节的工作流程与时间节点；将预警机制运行成效纳入矿井安全生产考核体系，落实岗位责任，杜绝推诿扯皮、处置滞后等问题；严格执行通风安全隐患排查治理制度，结合智能预警结果，开展常态化隐患排查，实现显性隐患与隐性隐患同步治理；完善灾变时期通风应急管理

制度，定期开展应急演练，提升应急处置与通风联动协同能力。

4.3 专业技术人才培养保障

针对智能化系统操作、风险辨识、预警处置需求，开展专项技术培训，培养既懂煤矿通风专业知识，又掌握人工智能、大数据技术的复合型人才；定期组织技术人员学习智能辨识算法、数字孪生系统操作、预警联动调控技巧，提升设备操作、系统维护、风险研判与应急处置能力；建立外部专家技术支撑机制，邀请高校、科研院所专家开展技术指导，解决机制运行中的技术难题，推动技术迭代升级。

5 结语

本文围绕煤矿通风视角，完成了重大安全风险致灾机理剖析、智能辨识技术搭建、分级预警机制构建及保障措施梳理，形成了完整的通风安全风险智能化防控框架。该体系可实现风险提前辨识、精准预警、快速处置，有效破解传统管控难题，具备较强的理论价值与实践可行性。后续可结合不同矿井地质与通风条件，细化技术参数与预警阈值，推动机制落地应用，全面筑牢煤矿井下通风安全防线，保障煤炭行业安全稳定发展。

参考文献：

- [1] 段自强,王振华,张科,等.煤矿井下辅助输送机器人与地面输送机器人研发及应用[J].智能矿山,2026,7(01):65-71.
- [2] 童义.东周窑煤矿井下安全风险预控管理体系探讨[J].江西煤炭科技,2025,(02):171-174.
- [3] 晁智翔,王悦,程绍辉.基于GIS的煤矿井下安全监控智能化管理策略[J].内蒙古煤炭经济,2024,(23):97-99.
- [4] 郑昆,常淑光.基于物联网的煤矿井下安全监控系统设计与应用研究[J].数字通信世界,2024,(06):188-190+194.
- [5] 张开园.煤矿井下电磁辐射安全风险评估方法研究[D].中国矿业大学,2024.
- [6] 刘辉,张晓利,黄天尘,等.基于改进RBF数据融合算法的煤矿井下安全监控研究[J].计算机测量与控制,2023,31(11):173-180.