



移动扫码阅读

裴晓东, 郝海清, 王 凯, 等. 矿井复杂风网火灾风烟流应急调控技术及应用[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(5): 124-132.

PEI Xiaodong, HAO Haiqing, WANG Kai, *et al.* Research and application of fire air and smoke flow emergency control technology for mine complex ventilation network[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(5): 124-132.

矿井复杂风网火灾风烟流应急调控技术及应用

裴晓东^{1,2,3}, 郝海清^{2,3}, 王 凯³, 蒋曙光^{2,3}, 孙 勇¹, 陈佳辉³, 吴征艳³, 蒋合国⁴, 邵 昊³

(1. 中煤科工集团沈阳研究院有限公司 煤矿安全技术国家重点实验室, 辽宁 抚顺 113122; 2. 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116; 4. 彝良驰宏矿业有限公司, 云南 昭通 657000)

摘要: 针对复杂通风网络井巷火灾预防和应急救援较困难现状, 分析了风流场、温度场、烟流浓度场的风流扰动、热量传递、烟流扩散等规律。根据不同火源位置的烟流演化规律, 提出一种能够同时满足排烟风量和采场风量需求的火灾风烟流应急联动调控方案。以鄂尔多斯转龙湾煤矿为应用案例, 建立了转龙湾煤矿火灾烟流应急联动调控系统。为分析其控风排烟效果, 结合实际的井巷和通风参数, 基于 Ventsim 软件构建了其复杂通风网络三维可视化模型。运用 VentFire 模块对其不同火源位置火灾场景的风烟流蔓延效果进行模拟。分析了采取应急调控方案前后的排烟效果和风量分配情况。结果表明: 当不同位置发生火灾时, 及时启动应急排烟方案, 在满足排烟风量的基础上其他各关键地点的风量仍能保证正常通风时的 90% 以上, 能够满足转龙湾煤矿灾变期间的控灾、救灾需求。

关键词: 矿井火灾; 火灾烟流; 控风排烟; 应急调控; Ventsim 模拟; 复杂风网

中图分类号: TD75 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2023)05-0124-09

Research and application of fire air and smoke flow emergency control technology for mine complex ventilation network

PEI Xiaodong^{1,2,3}, HAO Haiqing^{2,3}, WANG Kai³, JIANG Shuguang^{2,3}, SUN Yong¹, CHEN Jiahui³, WU Zhengyan³, JIANG Heguo⁴, SHAO Hao³

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Safety Technology, China Coal Technology & Engineering Group Shenyang Research Institute, Fushun 113122, China; 2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, Xuzhou 221116, China; 3. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 4. The Mining Limited Company of Yiliang Chihong, Zhaotong 657000, China)

Abstract: In view of the difficult situation of fire prevention, control, disaster resistance and relief in complex ventilation networks, the laws of air flow disturbance, heat transfer and smoke flow diffusion in air flow field, temperature field and smoke flow concentration field are analyzed. According to the evolution law of smoke flow at different fire source locations, an emergency linkage regulation scheme of fire air and smoke flow that can simultaneously meet the requirements of smoke exhaust air volume and stope air volume is proposed. Taking Zhuanlongwan Coal Mine as an application case, the fire smoke emergency linkage control system of Zhuanlongwan Coal Mine was established. In order to analyze the effect of air control and smoke exhaust, combined with the actual tunnel and ventilation parameters, a three-dimensional visualization model of its complex ventilation network was built based on VENTSIM software. The VentFire module is used to simulate the wind and smoke spreading effect of the fire scene in different fire source locations. The smoke exhaust effect and air volume distribution before and after the emergency control scheme is adopted are analyzed. The results show that when a fire occurs in different locations, the emergency smoke exhaust scheme should be started in time. On the basis of meeting the smoke exhaust air volume, the air volume of other key locations can still ensure more than 90% of the normal ventilation period, which can meet the disaster control and relief needs during the disaster of Zhuanlongwan Coal Mine.

收稿日期: 2022-10-05 责任编辑: 常 琛 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1787

基金项目: 辽宁省自然科学基金-重点联合开放基金资助项目(2021-KF-23-02); 国家自然科学基金资助项目(52074278)

作者简介: 裴晓东(1981—), 男, 江苏徐州人, 副教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: peixiaodong@cumt.edu.cn

通讯作者: 郝海清(1995—), 男, 山西长治人, 博士研究生。E-mail: haohaiqing0926@163.com

Key words: mine fire; fire smoke flow; wind control and smoke exhaust; emergency regulation; Ventism simulation; complex ventilation network

0 引 言

井巷火灾因其突发性强、破坏性大、耦合性高、难预测、易诱发重大复合灾害等特点,极大地增加了灾变预防和应急救援的难度。尤其是矿井主要进风巷发生火灾,若防控不当,高温有毒烟流会迅速顺风蔓延至井下人员集中区域,由于井下巷道环境独特、空间狭小、通风网络错综复杂,易促使火灾、瓦斯爆炸相互转化,诱发次生灾害,造成重大人员伤亡和经济损失^[1-2]。因此,矿井应预先建立火灾风烟流应急调控系统,发生火灾时,可以快速有效地控风、排烟、撤人以避免重大灾害发生^[3]。

近年来,国内外学者针对火灾时期巷道内环境特征的时空演化规律和风烟流应急调控机理进行了大量研究。在火灾时期巷道环境特征的时空演化规律方面文献^[4-8]利用弗劳德数模型推导了倾斜井巷的火灾烟流演化公式,建立了防止烟流倒退的临界风速计算模型,并通过实验加以验证。文虎等^[9]、程卫民等^[10]、王凯等^[11-12]、李祥春等^[13]、季经纬等^[14]、张圣柱等^[15]、吴兵等^[16]等通过数值模拟分析了井巷火灾灾变时期的温度、烟气浓度、瓦斯浓度的分布规律,并提出合理控制排烟风速能够有效防止继发性灾害的发生。但对于火灾期间复杂通风网络的全风网烟流演化规律方面研究较少。在风烟流应急调控理论方面,MCGRATTAN K B等^[17]介绍了煤矿火灾探测传感器和基于火灾模拟数据的风流远程控制系统。PERERA I E等^[18]研制的矿井通风监控系统,能够实时模拟通风系统状态。LITTON C D等^[19]介绍了一种通风网络时空控制导航系统,用以模拟矿井灾变期间的疏散路线。陈晓晶^[20]和蒋曙光等^[21-22]研发了运输巷火灾烟流远程应急救援系统并在龙东矿应用,演习实现了矿井火灾烟流控制。周刚等^[23]研发了运输巷火灾灾变预警与控制系统,并在孔庄煤矿应用,演习实现了运输巷火灾控制和人员快速避灾。现有研究多集中在火灾烟流场范围内,缺乏对复杂通风网络全风网的风烟流蔓延规律和应急联动调控方案的研究,使得火灾风烟流应急联动调控系统现场应用的安全性、适用性等方面较弱。

基于此,笔者以前人研究为基础,进一步研究了井巷火灾多个物理场的时空演化规律,提出一种在满足排烟风量基础上,最大化保障采区供风量的

最优火灾风烟流应急调控方案,在鄂尔多斯转龙湾煤矿建立了井巷火灾风烟流应急调控系统,基于Ventsim软件对应急调控方案前后的三维可视化烟流蔓延规律模拟分析。结果表明此方案能够满足矿井灾变时期的控风排烟和应急撤人需求。

1 井巷火灾风烟流演化规律

井巷火灾发生发展是风流场、温度场、烟流浓度场等多物理场耦合过程,其灾变期间风流扰动、热量传递、烟流扩散等规律受到多个因素的相互作用,因此,对灾变时期巷道内环境特征进行准确表征是制定火灾风烟流应急调控方案的重要依据。

1.1 灾变烟流动力场

在井巷火灾中,火源点上方的高温烟流由于浮力效应会产生轴对称羽流撞击顶板,形成顶板射流。当火源点在水平巷道中时,烟囱效应可忽略不计,烟流主要驱动力为由于高温烟流与井巷风流的密度差产生的静压 P_s 和通风动压 P_v ,如图1a所示。若要将烟流排至下风侧时,通风动压 P_v 必须大于等于静压 P_s 。即

$$P_v \geq P_s \Rightarrow \frac{1}{2}\rho_0 V^2 \geq \frac{1}{2}\Delta\rho gh \quad (1)$$

式中: V 为风流速度, m/s; h 为烟层厚度, m; g 为重力加速度, m/s²; $\Delta\rho$ 为烟流与环境的密度差, kg/m³; ρ_0 为风流密度, kg/m³。

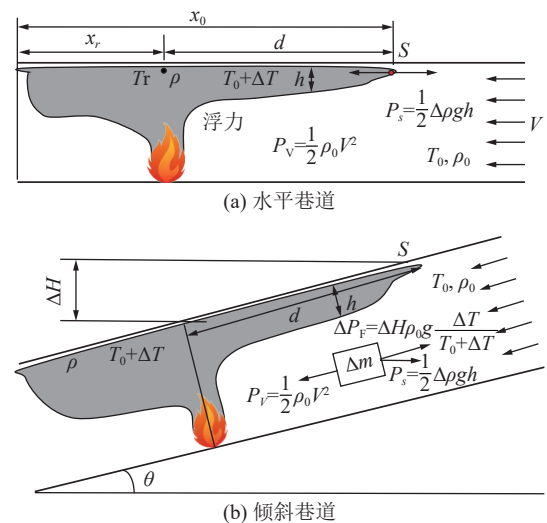


图1 井巷火灾风烟流演化驱动力分析
Fig.1 Analysis on driving force of evolution of air and smoke flow in tunnel fire

火灾烟流厚度的计算公式^[6]为

$$h = \left(\frac{0.076Q_c^{1/3} x^{5/3}}{D^2} \right)^{1/3} \quad (2)$$

式中: Q_c 为对流热释放速率, 一般取 $0.7Q$ (Q 为火灾热释放速率), kW; D 为巷道的当量直径, m; ($D=4S/U$); S 为巷道断面积, m^2 ; U 为巷道断面周长, m; x 为烟流蔓延距离, m。

当通风动压 P_V 等于静压 P_S 时, 此时风流速度为水平巷道中防止烟流倒退的临界风速 V_c , 由文献 [4] 可知:

$$V_c = \sqrt{gh\gamma(Q^{*2/3}/Fr^{1/3})^\varepsilon} \quad (3)$$

式中: γ 和 ε 为常数, 当 $Q^{*2/3}/Fr^{1/3} < 1.35$, $\gamma=1.77$, $\varepsilon=1.2$; 当 $Q^{*2/3}/Fr^{1/3} \geq 1.35$, $\gamma=2.54$, $\varepsilon=0$ 。 Q^* 为无量纲热释放速率; Fr 为弗劳德数。进一步可将无量纲处理^[4] 为

$$V_c^*(0) = \frac{t\sqrt{gh\gamma}}{H\sqrt{Fr^{\varepsilon/3}}}(Q^*)^{\varepsilon/3} \quad (4)$$

式中: H 为巷道的特征高度, m; t 为特征时间变量, s。

在倾斜巷道中, 因其井巷顶板为倾斜面, 烟流可随巷道顶板蔓延向上, 烟囱效应产生的烟流浮力较大。当下行通风时, 如图 1b 所示, 烟流驱动力包括通风动压 P_V 、由于高温烟流与井巷风流的密度差产生的静压 P_S 和烟囱效应的浮力 ΔP_F 。若要防止烟流倒退, 必须保证通风动压大于等于烟囱效应的浮力和静压, 即:

$$P_V \geq \Delta P_F + P_S \quad (5)$$

$$P_V \geq \frac{1}{2}\Delta\rho gh + \rho_0 g \frac{\Delta T}{T_0 + \Delta T} d \sin \theta \quad (6)$$

式中: T_0 为环境温度, $^\circ\text{C}$; ΔT 为烟流与环境的温度差, $^\circ\text{C}$; d 为烟流倒退距离, m; θ 为巷道倾斜角度, $^\circ$ 。

前人通过大量试验可得, 火源点位于倾斜巷道中时, 其无量纲临界排烟风速 $V_c^*(\theta)$ 与水平巷道中的无量纲临界排烟风速 $V_c^*(0)$ 和巷道的倾斜角度 θ , 有如下关系^[4]:

$$V_c^*(\theta)/V_c^*(0) = 1 + 0.028\theta \quad (7)$$

1.2 灾变烟流温度场

井巷火灾中烟流温度除了为烟流运移提供驱动力外, 还可能对救援人员造成烧伤危险, 因此在井巷火灾救援过程中也会考虑火灾发展过程中的烟流最高温度及其分布。在水平巷道中, 烟流温度在井巷顶板附近水平轴对称分布。如果存在通风动力, 当巷道风速小于临界风速时, 高温烟流传播距离随着

时间的增加而增大, 随着供风风速的增加而减少。当巷道风速大于等于临界排烟风速时, 高温烟流不再向上风侧传播, 最高温度分布于下风侧。随着风速的增加, 下风侧的风流温度出现明显分层。水平巷道中, 烟流最高温度计算公式^[4] 为

$$\frac{\Delta T_{\max}}{T_0} = \gamma \left(\frac{Q^{*2/3}}{Fr^{1/3}} \right)^\varepsilon \quad (8)$$

式中: ΔT_{\max} 为烟流最高温度, $^\circ\text{C}$;

文献 [4] 中推导了井巷火灾顶板射流温度分布方程:

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_{\max}} = e^{-k(x_0-x_r)} \quad (9)$$

式中: k 为温度衰减系数; x_0 为烟流所处位置, m; x_r 为火源点所处位置, m;

因此, 对于水平巷道, 倒退距离 $d=x_0-x_r$, 故结合式 (6) 和式 (7) 烟流温度分布计算公式可写为:

$$\frac{\Delta T}{T_0} = \gamma \left(\frac{Q^{*2/3}}{Fr^{1/3}} \right)^\varepsilon e^{-kd} \quad (10)$$

在倾斜巷道中, 火灾烟流最高温度更易分布于上风侧, 严重威胁救援人员安全。在烟囱效应浮力作用下, 巷道中温度分布需要考虑巷道坡度的影响, 对倾斜巷道中最高温度模型^[6] 重新定义为

$$\frac{\Delta T_{\max}}{T_0} = (1 - 0.077\beta) \gamma \left(\frac{Q^{*2/3}}{Fr^{1/3}} \right)^\varepsilon \quad (11)$$

同时引入倾斜巷道坡度的修正系数 K , 对于坡度为 β 的倾斜巷道顶板射流温度分布计算公式^[6] 为

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_{\max}} = e^{-K(\beta)k(x-x_r)} \quad (12)$$

结合式 (11) 和式 (12), 倾斜巷道中烟流温度分布计算公式^[6] 可写为

$$\frac{\Delta T}{T_0} = (1 - 0.077\beta) \gamma \left(\frac{Q^{*2/3}}{Fr^{1/3}} \right)^\varepsilon e^{-K(\beta)kd} \quad (13)$$

1.3 灾变烟气浓度场

井巷火灾烟流在蔓延过程中, 烟流会随着风流蔓延至下风侧的巷道, 巷道的烟气浓度受风速、火灾强度、烟气辐射换热、烟气组分等多因素影响。但烟气浓度场基本与温度场和风流场趋势一致。由于高温浮力作用, 纵向高浓度烟气分布于顶板附近, 在风流作用下, 形成分层现象。横向高浓度烟气分布与通风风速有关。风速低于临界风速时, 烟流倒退至火源点上风侧, 高浓度的烟气在浮力作用和通风作用下进行分层, 并沿着巷道顶部蔓延。

井巷火灾发生发展过程中, 除了有毒烟气和高

温烟流外，井巷环境的能见度也是影响安全疏散和灭火救援过程的重要因素。井巷火灾发生发展过程中，其能见度的估算公式^[14]为

$$S = \frac{K_{\text{Konst}} \lg e V_G H_u}{D_m L} \quad (14)$$

式中： K_{Konst} 为消光系数，视为常数； D_m 为烟气的平均质量光学密度， $\text{B} \cdot \text{m}^2/\text{g}$ ； V_G 为巷道体积， m^3 ； H_u 为可燃物低热值， kJ/g ； L 为对流热释放速率， kW 。

2 火灾风烟流应急调控方案

井巷火灾发生后，最佳调控方案应在满足排烟路径最低风量要求，快速将高温烟流以最短路径排出地面的同时，保证非污染区的采场最低风排瓦斯的需风要求。

井巷火灾风烟流应急调控方案如图2所示，预先在主/采区运输巷与回风巷之间的前、中、后部联络巷设置常闭防火调节门TF1、TF2、TF3，在主/采区

运输巷与轨道巷之间的前、中、后部联络巷设置常开防火调节门FM1、FM2、FM3、FM4、FM5、FM6、FM7、FM8。矿井未发生火灾正常通风时期，如图2a所示，风流分别通过矿井主/采区运输巷和轨道巷为采区提供新鲜风流，经采区用风区后，将污风通过回风巷排出地面。若主/采区运输巷前部发生火灾，预先建立的风烟流应急调控系统启动，风烟流调控路线如图2b所示，关闭火灾巷道下风侧的防火门FM2和FM7，隔离烟流。同时调节火源点下风侧最近的风门TF1，使得排烟路径风量大于最小排烟风量，将烟流以最短路径排至回风巷，同时保证部分新鲜风流经火源点上风侧的联络巷绕过烟流污染区域继续向采区供风。同理，若主/采区运输巷中部发生火灾，风烟流调控路线如图2c所示，若主/采区运输巷后部发生火灾，风烟流调控路线如图2d所示。若运输巷和回风巷距离较远，可根据具体情况自主构建排烟通道，利用该文原理进行应急控风排烟。

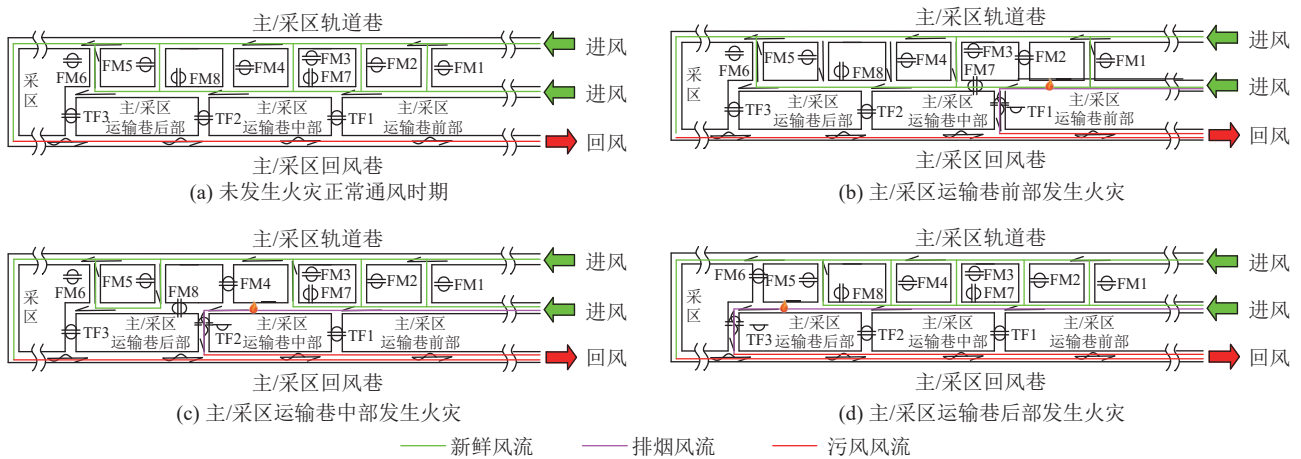


图2 采区火灾远程救灾单元配置原理
Fig.2 Schematic of remote disaster relief unit configuration in mining area

3 火灾风烟流应急调控技术现场应用

3.1 矿井概况及火灾风烟流应急调控系统构建

鄂尔多斯市转龙湾煤炭有限公司位于内蒙古自治区鄂尔多斯市伊金霍洛旗纳林陶亥镇。矿井始建于2015年5月，2016年11月联合试运转，其设计生产能力500万t/a，核定生产能力1000万t/a。矿井开拓方式为斜井开拓，开采方式为走向长壁后退式。主斜井和副斜井主要用于提升和进风，东风井和西风井专用于回风。矿井采用两翼对角抽出式通风，主斜井和副斜井进风，东风井和西风井回风。西风井地面安设两台主通风机，型号均为FBCDZ-NO.34/2×

630轴流式通风机，配用电机为2×630kW，额定转速为596r/min。东风井地面安设2台主通风机，型号均为FBCDZ-NO.24/2×200轴流式通风机，配用电机为2×200kW，额定转速为742r/min。

随着矿井采深的加大和生产能力的提高，带式输送机正朝着大型化和高速化的方向发展。在矿井带式输送机得到广泛应用的同时，带式输送机运输系统的火灾隐患随之增大，时刻威胁着矿井安全生产。因此，结合转龙湾煤矿生产实际，建立了转龙湾煤矿灾变风烟流智能调控系统。

灾变风烟流调控设施设计了风门+风窗的方式，如图3所示，安装于图2原理图所示的防火调节门

位置,上部风窗用于风烟流的连续调节,下部风门灾变状态下用于烟气隔离和排烟。常态下用于过车行人,风门采用压气作为动力,使用气缸推拉主动门,通过钢丝绳实现联动,四周门框设计了可调滑轨有效克服巷道变形,保障风门处于可靠运行状态。风窗通过动力气缸和定位气缸实现移移空间的精确调控,从而实现分支风量的连续调节。当风门进入救灾模式时,控制系统发出控制命令驱动电磁阀使闭锁三角块推出,随后发出控制命令将两扇风门同时打开。当闭锁三角块被推出后,闭锁三角块由2根恢复闭锁限位弹簧牵引使其被推出后不会旋转,以便救灾结束后恢复机械闭锁。当救灾模式结束后,先将2道风门关闭,随后由控制系统命令恢复机械闭锁。



图3 矿井通风调节风门实物及原理
Fig.3 Physical and schematic of mine ventilation regulating damper

井下通风监控分站如图4所示,实现对通风设施和区域环境参数的监测和控制,内置PLC控制器、采样模块、通信模块、本安电路、切换电路、备用电源等器件。实现风门、风窗的开关状态、周围环境的监测分析,地面远程监控中心通信、分站间通信、远程指令的执行、风门与风窗的开关调节等功能。备用电源在常态下进行充电,一旦外部电源断开,切换电路自动切换至备用电源供电,满足井下通风监控分站能够保持自动和远程控制等功能。

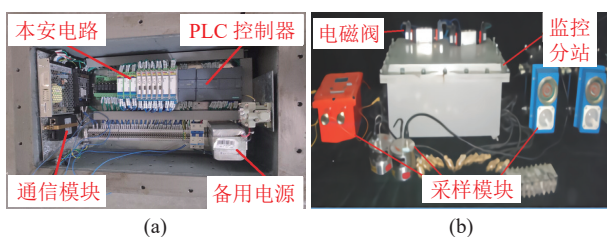


图4 矿用隔爆兼本安型风门控制分站实物

Fig.4 Physical of mine flameproof and intrinsic safety damper control station

转龙湾煤矿火灾烟流应急调控界面如图5所示,通过监测井下主运输巷安装布置的一氧化碳、烟雾、温度、风向、风速、差压等共57个传感器实时数据,计算显示包括主斜井段、233采区运输大巷段、西部运输大巷段等8个主要运输巷区段的阻力分布及通风参数,具有运输巷异常状态诊断预警功能,在主要运输巷发生火灾后,可迅速明确火灾影响的范围,执行应急联动调控隔离排烟方案,减小火灾影响范围。

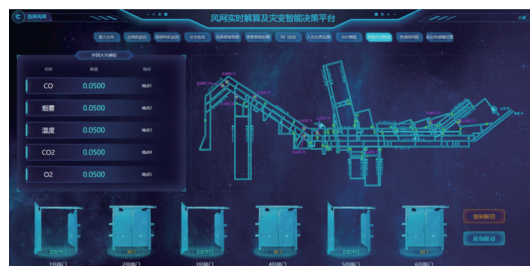


图5 转龙湾煤矿火灾烟流应急调控界面
Fig.5 Emergency control interface of fire smoke flow in Zhuanlongwan Coal Mine

系统通过井下分布式区域联动监控子系统实时监测拟定区域的通风参数、环境参数、通风设施状态,通过工业以太网通信子系统将数据传输给地面远程监控中心;当分布式监控分站监测到井下风烟流信息或其他灾害信息时,迅速将相关信息传输至地面远程监控中心,并发出报警;同时根据以太网通信研判各分布式分站的的状态,为应急指令的发布和联动调控做好准备。地面远程监控中心对井下异常分支的通风参数和环境参数进行数据分析与深度挖掘,将关键信息输入决策平台,自动生成火灾风烟流综合性区域联动调控方案;远程终端显示综合性决策方案具体内容,并提供一键式远程区域联动调控服务。地面远程监控中心下达应急决策命令后,风烟流联动调节装置执行动作,并实时反馈井下火灾风烟流受控后的通风参数、环境参数和通风设施状态。地面远程监控中心根据关键分支需风量要求,对灾变区域风烟流进行连续调控,以达到最佳风烟流控制效果;通过监测灾区风烟流及相关设施状态,实现井下火灾风烟流区域联动调控的可视化。

3.2 转龙湾煤矿火灾风烟流演化分析

为了对鄂尔多斯转龙湾煤矿的不同地点的火灾风烟流的演化规律进行分析,利用Ventism软件建立了转龙湾煤矿通风系统三维可视化模型,如图6所示。依据矿井最新的通风阻力报告、主通风机性能测定报告、通风系统图等资料,结合矿井实际情况设置巷道参数、配置风机及通风设施,使其风量分配仿

真满足误差要求,正常通风时期的风量分配见表2。

根据矿井的实际情况,分别制定了5种火灾场景的控风排烟方案。利用VentFire模块分别模拟主斜井带式输送机机尾、一水平运输大巷带式输送机机头、一水平运输大巷带式输送机机尾、西部运输大巷带式输送机机头、西部运输大巷带式输送机机尾5种火灾场景,分析其灾变期间的烟流演化规律。为了降低火灾模拟的复杂性,对火源场景进行如下简

化:火灾风烟流流动过程中视为理想气体,满足理想气体状态方程;假设烟气流动过程中与巷道岩壁不发生热交换;巷道风烟流视为不可压缩流体,流体黏性忽略不计;巷道风流为稳态湍流,并在巷道中均匀分布;巷道中无杂物堆积;排烟路径断面均小于20m²。火源模拟参数设置见表1,由于火灾场景均设置在运输巷中,故设置火灾燃料为50%PVC橡胶+10%木材+40%高热值煤,火源燃烧时间为6000s。

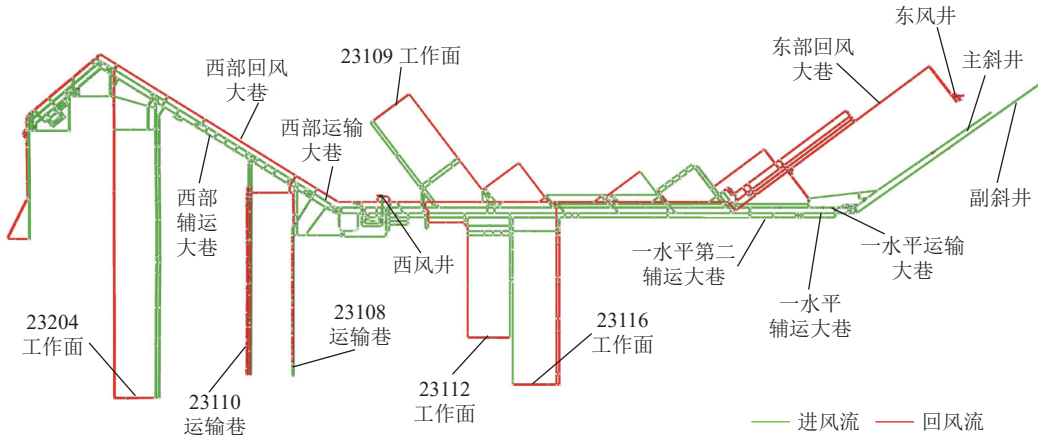


图6 转龙湾煤矿复杂通风系统三维可视化模型

Fig.6 Three dimensional visualization model of complex ventilation system in Zhuanlongwan Coal Mine

表1 火灾模拟参数设置

Table 1 Fire simulation parameter settings

火源	时间/s	燃烧速率/(kg·h ⁻¹)	燃烧效率/%
PVC橡胶50%	0 ~ 1 200	0 ~ 2 000	70
木材10%	1 200 ~ 3 000	2 000 ~ 8 000	
高热值煤40%	3 000 ~ 5 000	8 000 ~ 8 000	
	5 000 ~ 6 000	8 000 ~ 0	

根据火源位置不同,模拟了5种不同火源场景的风烟流演化规律。由图7可知,由于巷道风流作用,火源位置不同,其烟流污染范围也不同。若不发生烟流倒退,火灾烟流污染范围为火源点下风侧的所有巷道。若火源点处发生烟流倒退,倒退距离与火灾热释放速率、巷道断面参数、巷道风速、烟流温度、巷道倾角有关。随着烟流倒退距离的增加,烟流温度降低。当烟流密度差引起的静压和浮力效应等于通风动压时,烟流停止倒退,此时烟流污染范围为不发生烟流倒退位置的下风侧所有巷道。随着火源点向采区深部移动,烟流污染范围逐渐减小。此外,火灾烟流蔓延速度与巷道风量分配有关,风量越大的巷道,烟流蔓延速率越快,有毒烟流更容易到达。烟流温度和浓度也随着蔓延距离逐渐减小。主斜井带式输送机机尾火灾发生后,由于巷道风量较大,烟

流不发生倒退,烟流随着风流作用迅速蔓延至一水平运输大巷、辅运大巷、西部运输大巷、西部辅运大巷,之后逐渐蔓延至工作面采场区域。其烟流污染范围最大,几乎蔓延至井下所有巷道,如图7a所示。同理,一水平运输大巷带式输送机机头、一水平运输大巷带式输送机机尾、西部运输大巷带式输送机机头、西部运输大巷带式输送机机尾烟流污染范围和蔓延速率与主斜井带式输送机尾火灾相同,如图7b~e所示。由于运输巷一般在主/采区进风流中,若运输巷发生火灾,其烟流必经过采场人员集中区域,如果对烟流不进行应急调控,可能导致重大经济损失和人员伤亡。

3.3 火灾烟流应急调控方案效果分析

为了进一步对鄂尔多斯转龙湾煤矿的火灾风烟流应急调控系统的控风排烟效果进行评估分析,当主斜井带式输送机机尾发生火灾时,启动风烟流应急调控系统,关闭主斜井井底防火门隔离烟流,同时根据式(3)和式(7),计算最小排烟风量,调节与回风巷道之间联络巷的风门,使其风量满足要求。新鲜风流可全部从副斜井进入,经井底联络巷分别通过一水平运输大巷、一水平辅运大巷、第二辅运大巷为各采场供风,风流路径如图8a标红巷道所示,采取控风排烟方案时的关键巷道风量分配见表2,其排烟

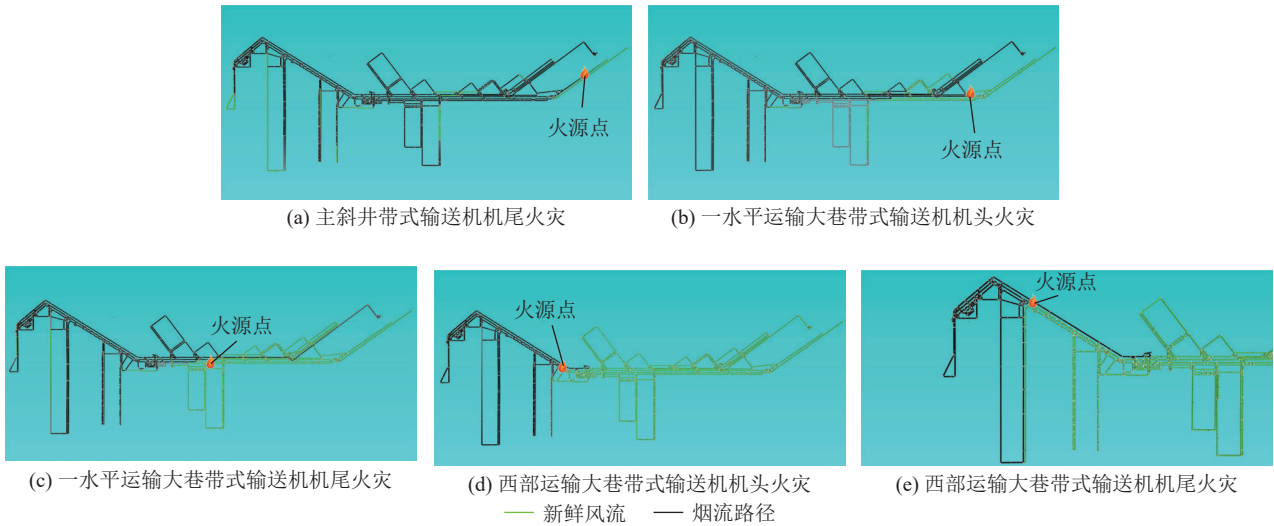


图 7 5 种不同火源位置风烟流演化规律模拟结果

Fig.7 Simulation results of evolution law of wind and smoke flow at five different fire sources

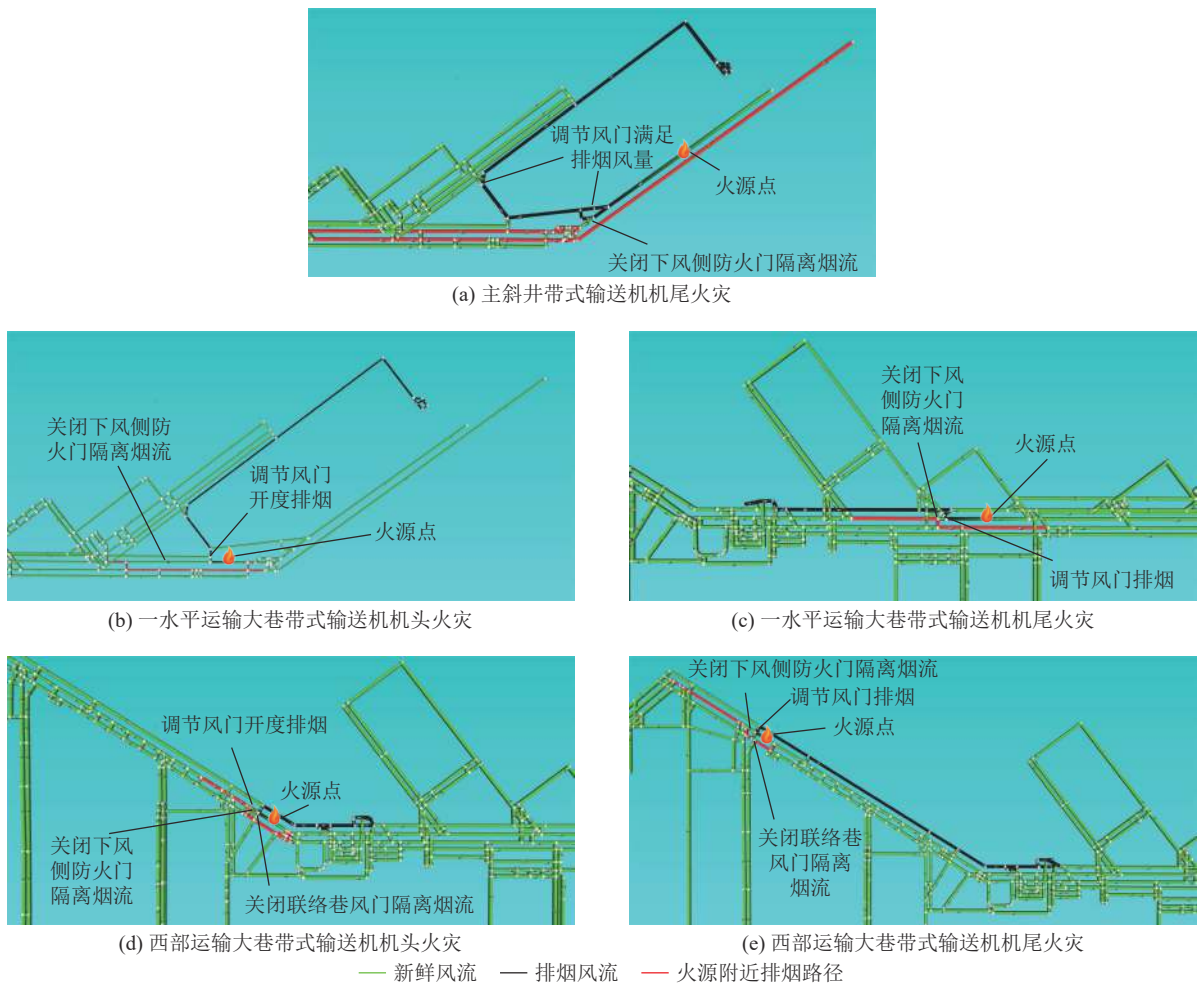


图 8 5 种不同火源位置风烟流应急调控措施及效果模拟结果

Fig.8 Emergency control measures and effect simulation results of wind and smoke flow at five different fire sources

路径风量达到 $2\ 020\ \text{m}^3/\text{min}$, 井下其他各关键巷道风量均超过正常通风时期风量的 90%, 风量变化较小; 当一水平运输大巷带式输送机机头发生火灾时, 及

时关闭火源下风侧防火门隔离烟流, 调节与回风巷之间联络巷风门开度满足排烟需求, 新鲜风流通过火源上风侧联络巷进入一水平辅运大巷, 再通过排

表2 不同火灾场景采取烟流调控过程中关键巷道的风量分配
Table 2 Air volume distribution table of key roadways in the process of smoke flow regulation in different fire scenarios

关键地点	m ³ /min					
	正常通风	主斜井带式输送机机尾火灾	一水平运输大巷带式输送机机头火灾	一水平运输大巷带式输送机机尾火灾	西部运输大巷带式输送机机头火灾	西部运输大巷带式输送机机尾
主斜井	4 430	2 020	4 470	4 431	4 508	4 471
副斜井	14 687	17 508	14 839	14 690	14 944	14 822
一水平运输大巷	4 524	4 109	2 237	4 640	4 600	4 564
一水平辅运大巷	7 025	6 506	8 361	7 226	7 159	7 097
一水平第二辅运大巷	6 599	6 112	7 854	6 788	6 723	6 664
西部运输大巷	2 542	2 495	2 492	2 189	2 279	2 660
西部辅运大巷	4 986	4 893	4 886	4 293	5 932	5 218
23116工作面	453	420	310	425	455	479
23112工作面	1 077	1 027	900	1 043	1 055	1 065
23109工作面	1 335	1 251	994	1 198	1 249	1 291
23204工作面	1 156	1 135	1 133	997	975	944
排烟风量	0	2020	2 237	2 576	2 279	1 782

烟路径下风侧防火门之后的联络巷流回一水平运输大巷,实现新鲜风流绕过排烟路径向采区供风,如图8b标红巷道所示,采取烟流调控方案时关键巷道的风量分配情况见表2,排烟风量为2 237 m³/min;同理,当一水平运输大巷带式输送机机尾、西部运输大巷带式输送机机头和机尾的控风排烟方案和烟流调控效果如图8c、图8d、图8e所示,标红巷道为火源点附近绕过烟流污染区域的风流路线,各火灾场景采取烟流应急调控措施时,排烟风量分别为2 576、2 279、1 782 m³/min,其他巷道风量均超过正常通风时期风量的90%。因此,通过模拟表明,转龙湾煤矿火灾风烟流应急调控系统,在满足排烟风量的基础上,可保障灾变时期井下各用风地点的风排瓦斯风量和用风需求。

4 结 论

1) 分析了井巷火灾的风流场、温度场、烟气浓度场的特征参数,表征了灾变期间的风流扰动、热量传递、烟流扩散等规律,为风烟流应急调控方案的制定提供依据。

2) 结合典型采场风流网络模型,针对不同火源场景提出了最短排烟路径和最优风量分配的控风排烟方案,在满足排烟风量的同时,最大限度保障采场风量,满足人员逃生和风排瓦斯需风要求。

3) 在转龙湾煤矿建立了火灾风烟流应急调控系

统,当运输大巷不同地点监测到发生火灾后,实现一键式应急联动调控,利用Ventsim软件模拟了调控方案实施前后的全风网的风流分配和排烟效果,结果表明转龙湾煤矿火灾烟流应急调控方案能够实现有效控风、排烟的同时保障采场风量仍为正常通风时期的90%以上。

参考文献(References):

- [1] WANG Kai, HAO Haiqing, JIANG Shuguang, et al. Escape route optimization by cellular automata based on the multiple factors during the coal mine disasters[J]. *Natural Hazards*, 2019, 99(1): 91-115.
- [2] 郭 军,蔡国斌,郑学召,等. 矿井热动力灾害及救援安全性判定研究现状及展望[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(12): 116-122. GUO Jun, CAI Guobin, ZHENG Xuezhao, et al. Research status and prospect of mine thermal disaster and rescue safety judgement[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(12): 116-122.
- [3] 李 晶. 矿井火灾事故调查关键技术难题及对策分析[J]. *矿业安全与环保*, 2016, 43(1): 111-114. LI Jing. Analysis on key technical problems of mine fire accident investigation and counter measures[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2016, 43(1): 111-114.
- [4] CHOW W K, GAO Y, ZHAO J H, et al. Smoke movement in tilted tunnel fires with longitudinal ventilation[J]. *Fire Safety Journal*, 2015, 75: 14-22.
- [5] FURIO Cascetta, MARILENA Musto, GIUSEPPE Rotondo. Innovative experimental reduced scale model of road tunnel equipped with realistic longitudinal ventilation system[J]. *Tunnelling and*

- Underground Space Technology*, 2016, 52: 85–98.
- [6] LI Qing, KANG Jianhong, WU Yuntao, *et al.* Theoretical and numerical study of smoke back-layering length for an inclined tunnel under longitudinal ventilation[J]. *Fire Technology*, 2022, 58(4): 2143–2166.
- [7] ZHAO Xiaolong, CHEN Changkun, SHI Congling, *et al.* An extended model for predicting the temperature distribution of large area fire ascribed to multiple fuel source in tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 85: 252–258.
- [8] ALI Haghghat, KRAY Luxbacher. Tenability analysis for improvement of firefighters' performance in a methane fire event at a coal mine working face[J]. *Journal of Fire Sciences*, 2018, 36(3): 256–274.
- [9] 文虎, 张铎, 郑学召. 煤矿平巷火灾数值模拟及其特征参数研究[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(4): 62–67.
WEN Hu, ZHANG Duo, ZHENG Xuezhao. Study on numerical simulation and feature parameters of fire disasters occurred in mine roadway[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(4): 62–67.
- [10] 程卫民, 姚玉静, 吴立荣, 等. 基于Fluent的矿井火灾时期温度及浓度分布数值模拟[J]. *煤矿安全*, 2012, 43(2): 20–24.
CHENG Weimin, YAO Yujing, WU Lirong, *et al.* Fluent-based numerical simulation of temperature and concentration during mine fire[J]. *Safety in Coal Mines*, 2012, 43(2): 20–24.
- [11] 王凯, 郝海清, 蒋曙光, 等. 矿井火灾风烟流区域联动与智能调控系统研究[J]. *工矿自动化*, 2019, 45(7): 21–27.
WANG Kai, HAO Haiqing, JIANG Shuguang, *et al.* Research on regional linkage and intelligent control system of mine fire wind-smoke flow[J]. *Industry and Mine Automation*, 2019, 45(7): 21–27.
- [12] 郝海清, 王凯, 张春玉, 等. 矿井皮带巷火灾风烟流场-区-网演化与调控规律[J]. *中国矿业大学学报*, 2021, 50(4): 716–724.
HAO Haiqing, WANG Kai, ZHANG Chunyu, *et al.* Evolution and regulation law of wind and smoke flow field area network in mine belt roadway fire[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(4): 716–724.
- [13] 李祥春, 蒋颖, 李梅生. 巷道火灾时期流场及瓦斯浓度变化规律数值模拟研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(5): 119–125.
LI Xiangchun, JIANG Ying, LI Meisheng. Study on numerical simulation of variations of airflow field and gas concentration during roadway fire[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(5): 119–125.
- [14] 季经纬, 程远平. 矿井火灾中火场能见度的估算方法[J]. *中国矿业大学学报*, 2006, 35(2): 149–152.
JI Jingwei, CHENG Yuanping. Estimation approach for predicting fire visibility in mine fires[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2006, 35(2): 149–152.
- [15] 张圣柱, 程卫民, 张如明, 等. 矿井胶带巷火灾风流稳定性模拟与控制技术研究[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(5): 812–817.
ZHANG Shengzhu, CHENG Weimin, ZHANG Ruming, *et al.* Stability simulation and control technology of airflow during fire in mine belt roadway[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(5): 812–817.
- [16] 吴兵, 周心权, 谢宏. 矿井火灾风流的远程自动控制[J]. *煤矿安全*, 2003, 34(10): 13–15.
WU Bing, ZHOU Xinquan, XIE Hong. Long-distance automatic control for mine fire air flow[J]. *Safety in Coal Mines*, 2003, 34(10): 13–15.
- [17] MCGRATTAN K B, FORNEY G P, FLOYD J, *et al.* Fire dynamics simulator(version 5): User's guide[M]. US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, 2005.
- [18] INOKA Eranda Perera, CHARLES D Litton. Impact of air velocity on the detection of fires in conveyor belt haulageways[J]. *Fire technology*, 2012, 48: 405–418.
- [19] LITTON C D, PERERA I E. Evaluation of criteria for the detection of fires in underground conveyor belt haulageways[J]. *Fire Safety Journal*, 2012, 51: 110–119.
- [20] 陈晓晶. 基于“云-边-端”协同的煤矿火灾智能化防控体系建设[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(12): 136–143.
CHEN Xiaojing. Discussion on the construction of intelligent prevention and control of coal mine fire based on “cloud-edge-end” cooperation[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(12): 136–143.
- [21] WANG Kai, JIANG Shuguang, WU Zhengyan, *et al.* Intelligent safety adjustment of branch air flow volume during ventilation-on-demand changes in coal mines[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2017, 111: 491–506.
- [22] 郝海清, 蒋曙光, 王凯, 等. 基于Ventsim的矿井运输巷火灾风烟流应急调控技术[J]. *煤矿安全*, 2022, 53(9): 38–46.
HAO Haiqing, JIANG Shuguang, WANG Kai, *et al.* Emergency control technology of air and smoke flow in mine belt roadway fire based on Ventsim software[J]. *Safety in Coal Mines*, 2022, 53(9): 38–46.
- [23] ZHOU Gang, CHENG Weimin, ZHANG Rui, *et al.* Numerical simulation and disaster prevention for catastrophic fire airflow of main air-intake belt roadway in coal mine: a case study[J]. *Journal of Central South University*, 2015, 22(6): 2359–2368.