

文章编号:0253-9993(2012)05-0857-06

# 矿井火灾应急救援系统的数值模拟及应用研究

王 凯<sup>1,2</sup>, 蒋曙光<sup>1,2</sup>, 张卫青<sup>1,2</sup>, 吴征艳<sup>2</sup>, 邵 昊<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221008; 2. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘 要:** 为了应对矿井主进风巷道火灾造成的灾难, 研究进风巷胶带及电器电缆火灾发生后烟流在通风系统中的扩散运动, 建立矿井火灾应急救援系统, 通过预设多组可远程监控的风门, 在两主进风巷联络巷之间设立常开风门, 进回风巷联络巷之间设立闭锁风门; 灾变时通过远程控制常开风门关闭, 闭锁风门打开, 阻止烟流进入采区人员集中的地点而将其导入回风巷。建立数学物理模型, 利用火灾动态模拟软件 FDS 进行数值模拟, 对比启动应急救援系统前后的火灾烟流运动路径变化; 模拟点火源与线火源条件下, 火灾蔓延、烟流运动及温度分布规律, 以指导地面对井下烟流的监测与控制, 证明应急救援系统的实用性和可行性。

**关键词:** 外因火灾; 应急救援系统; 数值模拟; 烟流控制; 风门

**中图分类号:** TD752.3      **文献标志码:** A

## Numerical simulation and application research of mine fire emergency rescue system

WANG Kai<sup>1,2</sup>, JIANG Shu-guang<sup>1,2</sup>, ZHANG Wei-qing<sup>1,2</sup>, WU Zheng-yan<sup>2</sup>, SHAO Hao<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China; 2. School of Safety Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** In order to cope with the fire disaster in the main ventilation roadway, researched into plume dispersion in the ventilation system after belt and electrical apparatus fire in the intake airflow roadway. Mine fire emergency rescue system was established, through preinstalling many groups of remote monitoring air doors, in the crossheading between two main intake airflow roadways set up normally open air door, and set up blocking air door between the intake and return airflow roadway. During the disaster through remote monitoring to close the normal open air door and open the blocking air door, so as to prevent smoke from the working area, but import it into return airflow roadway. Established mathematical-physical model using fire dynamic simulation software of FDS to simulate and contrast the change of the smoke flow movement path before and after starting emergency rescue system. Under the conditions of point and line fire, simulated fire spread, smoke movement and temperature distribution, in order to guide ground to monitor and control the smoke underground, and prove the feasibility and practicality of emergency rescue system.

**Key words:** external fire; emergency rescue system; numerical simulation; smoke control; air door

矿井外因火灾具有突发性和严重破坏性的特点, 主要进风巷道一旦发生火灾, 将会造成大量的人员伤亡和经济损失<sup>[1]</sup>。随着特大型高产高效矿井的建设及机械化程度的提高, 矿井胶带使用规模迅速扩大,

大功率的设备促使胶带和电缆发火已成为井巷火灾的主要原因<sup>[2-3]</sup>。研究矿井火灾的发生发展过程以控制烟流的动向, 从而尽可能缩小烟流波及范围, 避免进入采区人员集中区域并为灭火和人员逃生创造

收稿日期: 2011-05-03      责任编辑: 毕永华

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50674090); 煤炭资源与安全开采国家重点实验室资助项目(3Y080015); 江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CXZZ11-0316)

作者简介: 王 凯(1985—), 男, 山东聊城人, 博士研究生。Tel: 0516-83885156, E-mail: wangkai850321@163.com

条件<sup>[4]</sup>。风门是控制风流的主要设施,而目前井下风门多数靠人力打开,灾变条件下自动风门无法实现远程控制,不能短时间内改变风流,延误战机使灾情扩大<sup>[5]</sup>。鉴于此,提出了建立矿井火灾远程应急救援系统的构想,开发了灾变(无电无气压)条件下可以远程监控的风门系统及地面监控系统。

## 1 矿井火灾应急救援系统建设

平朔井工二矿为年产量 1 700 万 t 的特大型矿井,主副斜井为主进风巷道,主斜井安装带式输送机及电缆,副斜井由无轨胶轮车运料和拉人。胶带全长约 1 800 m,每天平均运行时间超过 20 h,矿井机械化程度高、大型设备多且电缆负荷大。一旦发生火灾,烟流进入采区将会酿成灾难,给矿井安全生产带来严重威胁。结合井工二矿的通风与生产的实际情况,提出了建立火灾远程应急救援系统的方案,如图 1 所示:在主运巷与中央辅运巷之间的 4 处联络巷内安装常开风门 FM1, FM2, FM3, FM4, 为保证胶带检修,风门开度设置为 4.5 m×3.0 m;在主运巷与中央回风巷之间的两处联络巷内安装闭锁风门 FM5, FM6, 风门开度设置为 2.5 m×2.0 m,风门只有启动救灾时才能同时打开。火灾发生时为了迅速监测烟流,分段设置烟雾传感器探头 YW1, YW2, YW3, YW4, 每处两台(冗余设计),悬挂在胶带两侧的上方。灾变时,通过地面中心站启动应急救援系统,常开风门全部关闭,如果 YW1, YW2 同时监测到信号, YW3, YW4 无信号,则打开闭锁风门 FM6 排烟;如果 YW3, YW4 同时监测到信号,或者所有探头同时监测到信号,则打开闭锁风门 FM5 排烟,风门 FM5, FM6 不可同时打开。每道风门上均设有逃生小门,用于风门关闭后灾区人员逃向安全区。

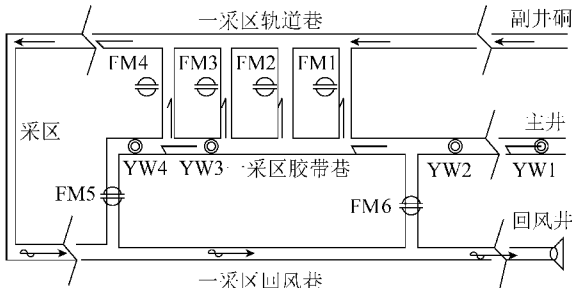


图 1 矿井火灾远程应急救援系统建设示意

Fig. 1 Mine fire remote emergency rescue system construction diagram

## 2 矿井火灾烟流控制的数值模拟

中国矿业大学火灾课题组对矿井巷道火灾的火

区阻力、节流效应、火风压、不同条件下的烟流滚退距离等做了大量实验研究和理论分析,得出了火灾发生发展的基本规律<sup>[6-7]</sup>。并结合现有理论,以井工二矿为实验现场,利用 PyroSim 软件建立三维数学物理模型,导入 FDS 软件求解烟流运移过程,分析应急救援系统在烟流控制中的作用。

### 2.1 火灾模拟的理论基础

巷道内发生的火灾,受风流影响会迅速蔓延。烟流运动过程中受风网、动量、能量、燃烧反应、组分变化等参数影响,利用 FDS 模拟矿井火灾时需做假设以简化模型:研究烟流羽的运动规律,忽略火焰燃烧过程及化学反应导致的烟气成分变化<sup>[8]</sup>;不计紊流脉动影响,采用紊流时均值;不考虑辐射传热及壁墙的热交换;不计烟气的可压缩性,烟气与空气的热物性性质相同;不计热扩散、黏性耗散、压力功等对烟气流动的影响<sup>[9]</sup>。

FDS 建立在流体动力学和组分燃烧学理论基础之上,在利用 LES(大涡模拟)方法求解火灾模型时需应用 Favre 过滤操作  $f = \overline{\rho f} / \bar{\rho}$  对湍流基本方程进行滤波得以下控制方程<sup>[10-13]</sup>。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial u_i \bar{\rho}}{\partial x_i} = 0$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial u_j u_i \bar{\rho}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_i \bar{\rho}}{\partial t} = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \bar{\rho} g \delta_{ij} + f_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right] - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial h \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial u_i h \bar{\rho}}{\partial x_i} = \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + q''' - \frac{\partial q_{ri}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \sum_i \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \bar{\rho} D_i h_i \frac{\partial Y_i}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial \theta_i}{\partial x_i}$$

组分方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} Y_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} u_i Y_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \bar{\rho} D_i \frac{\partial Y_i}{\partial x_i} \right) + W_i''' - \frac{\partial \gamma_i}{\partial x_i}$$

状态方程:

$$\bar{p} = \bar{\rho} T R \sum (Y_i / M_i)$$

式中, $\rho$  为气体密度; $f$  为大尺度量; $t$  为时间; $k$  为导热系数; $D_i$  为扩散系数; $u$  为速度( $u_i$  为  $x$  方向上分量,  $u_j$  为  $y$  方向上分量); $\delta_{ij}$  为烟流的膨胀速度; $M_i$  为分子量; $Y_i$  为组分质量分数; $h$  为焓; $h_i$  为燃烧组分焓;

$W_i''$  为组分反应速率;  $q'''$  为体积热释放率;  $q_{ri}$  为辐射热通量矢量;  $g$  为重力加速度;  $P$  为压强;  $T$  为温度;  $\tau_{ij} = \bar{\rho}(u_i u_j - u_i u_j)$  为亚格子应力张量;  $R$  为气体摩尔常数;  $\theta_i = \bar{\rho}(u_i h - u_i h)$  为能量方程滤波后的亚格子项;  $\gamma_i = \bar{\rho}(u_i Y_i - u_i Y_i)$  为组分方程滤波后的亚格子项, 它们体现了小尺度涡流对运动方程解的影响。

2.2 数学物理模型的建立

井工二矿的主斜井斜长为 620 m, 副斜井斜长 1 340 m 盘曲而下, 回风斜井长 334 m 至井底进入平巷, 其中斜巷为半圆拱, 平巷为矩形巷道。主运巷全长 1 200 m, 通过联络巷与中央辅运巷沟通, 在带式输送机尾联络巷风流并入中央辅运巷进入采区, 最后流入中央回风巷。主运巷断面为 4.5 m×3.0 m, 中央辅运巷断面为 5.0 m×3.5 m, 中央回风巷断面为 4.5 m×3.5 m, 主辅联络巷断面为 4.5 m×3.5 m, 主回联络巷断面为 4.5 m×3.0 m, 联络巷长 25 m。现场研究火灾发生后的烟流运移情况, 促使烟流在各大巷间流动的是联络巷, 遂以三大平巷及六条联络巷为现场建立数学物理模型, 为简化模型并能体现模拟效果, 在带式输送机机尾风流导入中央辅运巷后进入采区的部分简化成一段巷道直接导入回风巷。为了提高模型在 FDS 中的解算速度和精度, 缩短烟流运动距离而不影响其运动过程, 将大巷长度缩短为实际长度的一半, 各联络巷的间距等比例缩短。按照实际断面在 PyroSim 中建立了辅运巷和回风巷长 600 m、主运巷长 580 m 及联络巷长 25 m 的三维数学模型, 如图 2 所示, 按照网格大小为 0.5 m×0.5 m×0.5 m 划分了 120 万个网格。在各联络巷中设置了风门, 风门开度为实际尺寸, 同时设置了风门的开关指令。

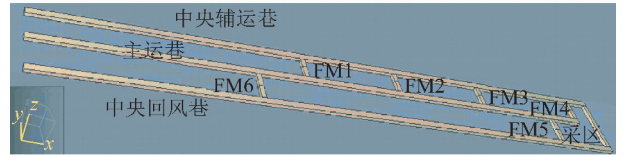


图 2 救援系统烟流控制的数学物理模型

Fig. 2 Mathematical-physical model of rescue system smoke flow control

井巷火灾火源主要包括由电火花、煤尘自燃引起堆积物燃烧引发的点火源及由电缆或胶带燃烧引发的线火源, 根据不同位置的火源与发火特征研究应急救援系统在火灾过程中的烟流控制功能<sup>[14]</sup>。

2.3 数值模拟结果分析

数字模拟主要研究: ① 通过火焰与烟流的运移动画来形象描述火灾在通风系统中的发生发展过程, 从宏观角度研究应急救援系统在烟流控制中的作用; ② 系统设置两处闭锁风门在灾变时将烟流导入回风巷, 分析如何配置才能有效地控制火势发展及烟流影响区域; ③ 火灾发生并稳定燃烧后, 烟流在火风压等热动力因素影响下的平均运动速度, 为系统自动启动及人工启动的响应时间提供参考。

将数学物理模型导入 FDS 后, 设定火灾及通风的各项参数见表 1。热释放速率(HRR)是指单位面积试样释放热量的速率, 按照木材等堆积物作为点火源燃烧物稳定燃烧时计算其热释放速率为 7.34 MW, 按照橡胶胶带及电缆作为线火源燃烧物稳定燃烧时计算其热释放速率为 16.86 MW。其他参数不变, 通过设置风门的开关, 研究不同火源点下分别打开风门 FM5, FM6 的烟流运动, 模拟结果通过 Smoke view 软件播放烟流运动时间为 120 ~ 350 s。

表 1 火灾模拟设定参数

Table 1 Setting parameters of fire simulation

火源	风速/(m·s <sup>-1</sup> )			热释放速率/MW	火源尺寸/(m×m×m)	火源距巷口距离及长度/m
	主运巷	辅运巷	回风巷			
点火源	3.2	4.6	7.9	7.34	3×2×1	80 320
线火源	3.2	4.6	7.9	16.86	160×1.4×1	70 ~ 230 330 ~ 490

(1) 点火源条件下, 火灾发生并稳定燃烧后不同时刻的烟流运动规律, 由 Smoke view 播放截图(图 3)。

(2) 线火源条件下, 火灾发生并稳定燃烧后火焰及烟流在应急救援系统作用下的运动规律, 由 Smoke view 播放截图(图 4)。

大量模拟结果表明在相同风网结构条件下点火

源和线火源发生后的烟流运动规律趋于一致, 限于篇幅, 由图 3 分析点火源条件下不同时刻的烟流运动规律, 由图 4 分析线火源条件下应急救援系统改变烟流运动的作用。模拟结果显示: ① 由图 3 可以看出, 无应急救援系统条件下烟流在火灾发生并稳定燃烧后 330 s 左右将整个模型区域污染。如果由地面入井人工开启风门 FM6, 正常行走需要 40 min, 开启风门

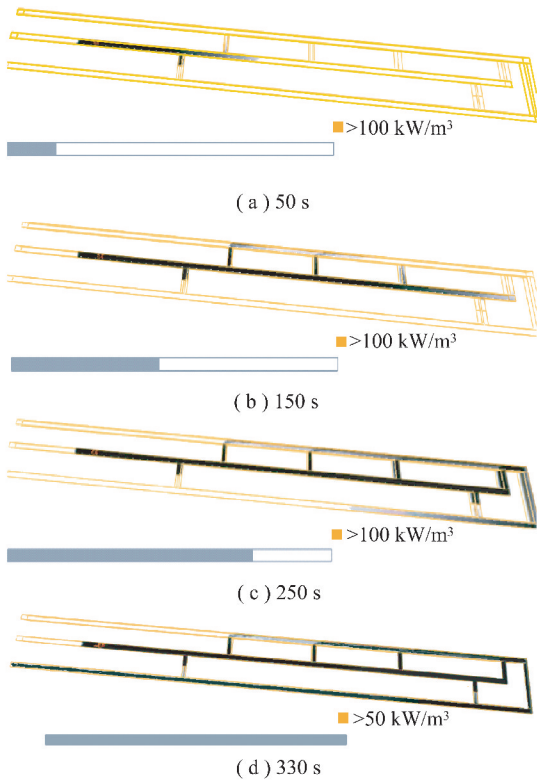


图3 点火源条件下不同时刻的烟流运动规律  
Fig.3 Smoke motion law when the back-end of the main haulage catches fire

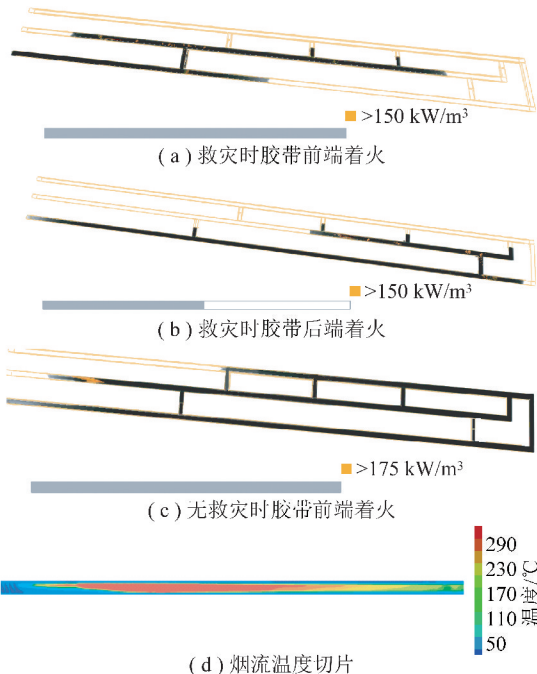


图4 线火源条件下的烟流及火焰运动规律  
Fig.4 Smoke motion and flame movement law of the line fire source

救灾系统。② 由图4(a)可以看出打开风门 FM6, 烟流直接导入回风巷, 烟流沿主运巷的扩散速度逐渐降低直至停止, 烟流污染区域控制在极小范围内。线火源时火焰随风流蔓延至风门 FM6 的联络巷口处, 接着进入无风区, 蔓延速度降低为灭火提供条件。③ 由图4(b)可以看出打开风门 FM5, 能够有效地将烟流污染区域控制在极小范围内而不进入采区。④ 图4(d)为巷道内的纵向烟流温度切片, 颜色由蓝色变为红色表示温度递增, 火源点附近烟流最高温度为 290 °C, 受进风流影响前方 120 m 处趋于环境温度, 后方 350 m 处的温度为 80 °C, 与前人的实验结果接近, 说明线火源的烟流对人员的伤害程度比较大。

### 3 应急救援系统设计与应用效果

#### 3.1 远程应急救援系统的结构及功能性设计

远程应急救援系统作为灾变条件下烟流控制的关键设备, 灾变时必须稳定可靠地启动运行。结合现场风门使用的优缺点设计了适合应急救援系统的门体结构如图5所示, 体现了如下特点: ① 灾变时一旦停气, 气源将自动切换至备用高压气瓶; ② 新设计门体在受矿压条件下横梁整体下移, 而可调滑轨在弹簧拉力作用下上移, 保证了对开门的运动空间不变, 可调间距为 60 mm; ③ 闭锁风门在使用过程中, 容易出现夹住人或车的事, 借鉴电梯的防夹原理, 对风门进行了防夹设计, 避免了机械事故的发生。

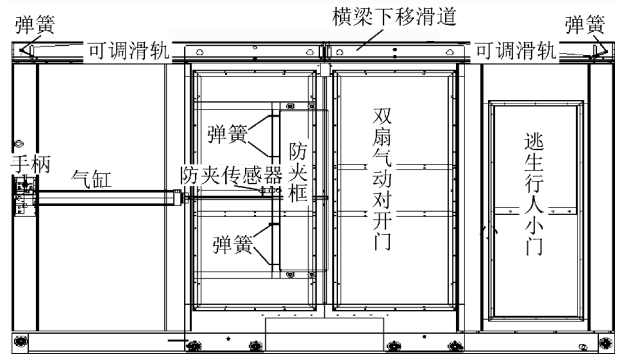


图5 矿井遥控风门的门体结构示意图

Fig.5 Remote control air door structural diagram

井下风门自动控制系统的标准, 智能化程度参差不齐。笔者结合远程应急救援系统的特点设计了基于 PLC 的风门控制器及关联设备如图6所示, 该系统通过了国家防爆检验和煤安认证, 开发了人机友好界面, 系统组成框图如图7所示。其功能特点: ① 控制器采用本安兼隔爆型设计, 电源在正常条件下使用外电供应, 灾变停电后自动切换到蓄电池供电, 关联设备考虑低功耗设计, 实验测定该系统蓄电池供电时间达 7 h<sup>[15]</sup>。② 各控制器 PLC 之间采用自

FM5 则需要更长时间, 远远超出了最佳救灾时间。图4(c)表明线火源条件下烟流蔓延更快, 因此在确定监测到火灾烟雾信号后, 必须在火灾蔓延之前启动

由口通信提高了速度,利用光纤通讯提高了系统传输距离和可靠性。③地面远程控制和井下组合自动控制相结合的控制方式,灾变后通过地面报警由人工启动远程救灾系统;在无法实现远程控制的情况下,救

灾系统在检测到烟雾信号后开始计时,合理延时后系统自动启动。④为提高系统可靠性,避免误操作,采用地面中心站的硬件开关控制,计算机只监测烟雾浓度、风流情况、风门开关状态等参数。

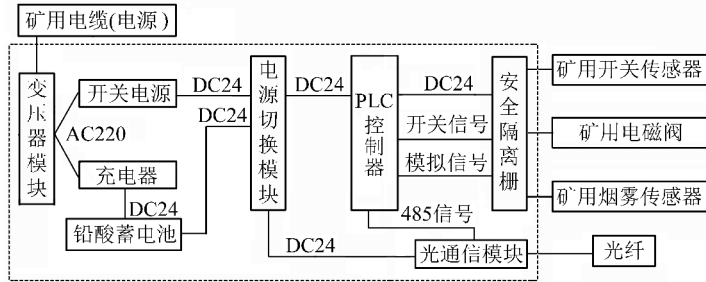


图6 风门控制器及关联设备

Fig. 6 Air door controller and associated equipment graph

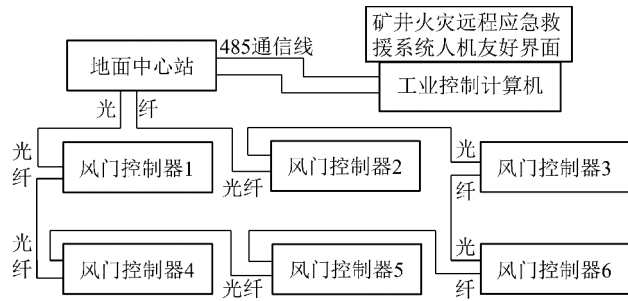


图7 救灾系统组成

Fig. 7 Rescue system composition graph

### 3.2 远程应急救援系统的应用效果

按照矿井火灾应急救援系统设计的要求,结合FDS对烟流发展过程及控制方法的模拟结果,将设备安装调试,系统正常运行后,对灾变烟流运动控制进行演习。从主运巷口沿巷道边缘设置连续燃烧物,监测火灾发生后启动救灾,系统打开风门FM6,烟流导入回风巷,消防人员根据烟流情况顺井口下去将火扑灭,演习结果证明了数值模拟的可行性和准确性,演习中火焰迅速地蔓延到风门FM6处的联络巷,而后火势蔓延速度迅速减弱;同样灾变条件下,打开风门FM5,通过带式输送机机尾联络巷将烟流导入回风巷,消防人员下井灭火,将火扑灭时火焰已经蔓延约1 000 m。证明了设置两处闭锁风门的必要性与合理性,同时表明如果是带式输送机机头位置着火,打开风门FM6能够迅速控制火势与烟流,进一步降低火灾损失和危害。

## 4 结 论

(1)通过分析前人对矿井火灾发生发展规律的研究成果,结合灾变过程中烟流控制的方法提出了建立矿井火灾远程应急救援系统的构想,以井工二矿为例,分析了系统结构组成及功能特点。

(2)按照井工二矿巷道实况,建立三维数学物理模型,利用FDS模拟结果显示,应急救援系统能够有效地将烟流控制在极小范围内并为灭火提供条件;在带式输送机机头着火时,风门FM6能够高效控制烟流范围及火势。

(3)根据应急救援系统的功能设计了能够克服巷道变形和防夹的门体结构,控制器具备远程通信和不间断供电功能,并加装备用压气瓶。系统监测到烟雾后报警计时,由人工远程启动;在无法人工启动时,延时到自动启动,提高了灾变过程控制的可靠性。

(4)研究巷道风速对火势的影响,通过调节闭锁风门的开度来控制风量,保证烟流能够顺利导入回风巷而不助长火势,同时保证新鲜风流进入各采区的安全风量,最大限度的为灭火救灾和人员撤离创造安全条件。

### 参考文献:

[1] 王德明,王省身,郭晋云. 矿井火灾救灾决策支持系统研究[J]. 煤炭学报,1996,21(6):624-629.  
Wang Deming, Wang Xingshen, Guo Jinyun. A mine fire rescue decision-making support system [J]. Journal of China Coal Society, 1996,21(6):624-629.

[2] Wang Deming, Wang Jun, Zhou Fubao. Real-time information acquisition and communication technology during mine rescue [A]. Computer Applications in the Minerals Industries [C]. Netherlands: A. A. Balkema Publishers, 2001:535-539.

[3] 刘雨忠,吴吉南,冯学武,等. 煤矿胶带火灾救灾决策的研究与实施[J]. 北京科技大学学报,2000,22(6):501-504.  
Liu Yuzhong, Wu Jinan, Feng Xuewu, et al. Study and application of mine's belt fire rescue [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2000,22(6):501-504.

[4] 何新建,蒋曙光,吴征艳,等. 龙东煤矿西翼运输巷远控气动火灾应急救援系统[J]. 煤炭科学技术,2008,36(8):53-54.  
He Xinjian, Jiang Shuguang, Wu Zhengyan, et al. Mine fire disaster

- pneumatic remote control emergent rescue system in west wing transportation roadway of Longdong Mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2008, 36(8):53-54.
- [5] 王德明,张广文,鲍庆国. 矿井火灾时期的风流远程控制系统[J]. *中国安全生产科学学报*, 2002, 12(1):60-63.  
Wang Deming, Zhang Guangwen, Bao Qingguo. Study on remote control technology of airflow during mine fire[J]. *China Safety Science Journal*, 2002, 12(1):60-63.
- [6] 蒋军成,王省身. 火灾巷道烟气流动的数值分析[J]. *煤炭学报*, 1997, 22(2):165-170.  
Jiang Juncheng, Wang Xingshen. Mumeric analysis of smoke in roadway in a mine fire[J]. *Journal of China Coal Society*, 1997, 22(2):165-170.
- [7] 王德明,周福宝. 井巷网络火灾过程中回燃现象的研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2003, 32(3):227-231.  
Wang Deming, Zhou Fubao. Backdraft phenomenon in roadway network fire[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2003, 32(3):227-231.
- [8] 王海燕,周心权. 平巷烟流滚退火烟羽流模型及其特征参数的研究[J]. *煤炭学报*, 2004, 29(2):190-194.  
Wang Haiyan, Zhou Xinquan. Fire buoyant plume model and characteristic parameters of a reverse smoke in a horizontal airway during mine fire[J]. *Journal of China Coal Society*, 2004, 29(2):190-194.
- [9] Dong-Ho Rie, Myung-Whan Hwang, Seong-Jung kim, et al. A study of optimal vent mode for the smoke control of subway station fire[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2006, 21(3/4):300-301.
- [10] Kim J Y, Kim K Y. Experimental and numerical analyses of train-induced unsteady tunnel flow in subway[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology Research*, 2007, 22(2):166-172.
- [11] Kevin B McGrattan. Large eddy simulations of smoke movement[J]. *Fire Safety Journal*, 1998, 30:161-178.
- [12] Howard R Baum, Ronald G Rehm. A simple model of the World Trade Center fireball dynamics[A]. *Thirtieth International Symposium on Combustion*, part 2[C]. 2004:2247-2254.
- [13] 马洪亮,周心权. 矿井火灾燃烧特性曲线的研究与应用[J]. *煤炭学报*, 2008, 33(7):780-783.  
Ma Hongliang, Zhou Xinquan. Research and application of the characteristic curves in mine fire[J]. *Journal of China Coal Society*, 2008, 33(7):780-783.
- [14] 季经纬,郝耀华,王玉娥,等. 线性热流下可燃物着火时间的积分法预测[J]. *中国矿业大学学报*, 2009, 38(5):613-617.  
Ji Jingwei, Hao Yaohua, Wang Yu'e, et al. Predicting the ignition time of combustibles exposed to a linear heat flux via an integral method[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2009, 38(5):613-617.
- [15] 蒋曙光,王凯,邵昊,等. 一种远程风门救灾门的控制器[P]. 中国专利:ZL200920036020.9, 2009-12-16.