青年专家学术专栏

【编者按】为助力煤炭行业青年科技人才队伍建设，营造有利于青年科技创新人才成长的学术氛围，充分发挥科技期刊人才培养、学术交流的平台作用，同时为促进和提高《工矿自动化》杂志办刊质量和学术影响力，本刊编辑部于 2019 年初成立了青年专家委员会。第一届青年专家委员会成员包括中国煤炭科工集团、中国矿业大学、中国矿业大学(北京)、西安科技大学、山东科技大学、太原理工大学、重庆大学、西北工业大学、北京科技大学等单位共 59 名青年科技人才。为了更好地展示煤炭行业青年科技人才在科学研究前沿、技术开发应用热点上的学术观点和科研成果，增进青年人才之间学术交流和科研合作，推动煤炭行业科技进步与创新，本刊推出了“青年专家学术专栏”，并于 2019 年第 7 期起陆续刊登。衷心感谢各位青年专家为本刊撰稿！

文章编号：1671-251X(2019)07-0021-07　　DOI：10.13272/j.issn.1671-251x.17440

矿井火灾风烟流区域联动与智能调控系统研究

增强视频　　扫码移动阅读

王凯[1,2]，　郝海清[1,2]，　蒋曙光[1,2]，　吴征艳[1]，　邵昊[1]

(1. 中国矿业大学 安全工程学院，江苏 徐州　221116；
2. 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)

摘要：针对矿井通风异常情况下应急决策与智能调控水平不高、无法实现风烟流远程控制的现状，设计了矿井火灾风烟流区域联动与智能调控系统；结合通风网络结构，分析了火灾时期风烟流区域联动控制机理，即通过设置烟雾传感器、可调风门等通风设施及远程调控，实现火灾时期烟流区和非烟流区 2 个并联分支的风量按需分配；研究了矿井火灾风烟流智能调控的影响因素，通过分析矿井火灾前后通风网络结构，构建了火灾风烟流智能调控模型，并介绍了可视化功能实现算法。该系统根据火灾时期火区风阻、通风网络结构、主要通风机运行参数等得出各分支实时风量，通过模拟火灾过程计算关键巷道理想风量并设置阈值，当实际风量与阈值误差超过 10%时远程调控风门开度，以实现最佳风量分配。应用结果表明，系统对巷道风量的模拟计算结果、可视化界面显示结果与现场测定结果具有很好的耦合性。

关键词：矿井火灾；矿井通风；应急救援；火灾风烟流；区域联动；风量调控；可视化调控

中图分类号：TD75　　文献标志码：A

Research on regional linkage and intelligent control system of mine fire wind-smoke flow

WANG Kai[1,2]，　HAO Haiqing[1,2]，　JIANG Shuguang[1,2]，　WU Zhengyan[1]，　SHAO Hao[1]

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

Abstract: For existing status of low emergency decision-making and intelligent control level and inability to remotely control wind-smoke flow under abnormal conditions of mine ventilation, a regional linkage and intelligent control system of mine fire wind-smoke flow was designed. Combining with ventilation network structure, regional linkage control mechanism of wind-smoke flow during fire period was analyzed, which realized wind volume distribution according to needs of two parallel branches of

收稿日期：2019-05-21；**修回日期**：2019-06-19；**责任编辑**：李明。

基金项目：国家重点研发计划项目(2018YFC0808100)；江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)。

作者简介：王凯(1985－)，男，山东聊城人，副教授，博士，主要从事矿井智能通风、重大灾害应急救援方面的研究工作，E-mail：wangkai850321@163.com。

引用格式：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.

smoke flowing zone and non-smoke flowing zone during fire period through setting smoke sensor, adjustable air doors and other ventilation equipments and remote control. Influence factors on intelligent control of mine fire wind-smoke flow were researched. An intelligent control model of wind-smoke flow during fire period was built through analyzing ventilation network structure before and after mine fire, and realization algorithm of visual function was also introduced. The system obtains real-time wind volume of each branch according to wind resistance, ventilation network structure and operation parameters of main ventilator during fire period, calculates ideal wind volume of key roadways through simulating fire process and sets a threshold value. When error between actual wind volume and the threshold value exceeds 10%, open degree of air door is controlled remotely, so as to realize optimal wind distribution. The application result shows that there is a perfect coupling among simulated calculation result of the system, displaying result on visual interface and field test result of wind volume in roadway.

Key words: mine fire; mine ventilation; emergency rescue; fire wind-smoke flow; regional linkage; wind adjustment; visual control

0 引言

据统计，国内外死亡数十人甚至数百人的煤矿重大恶性火灾事故中，90%源于井巷火灾[1]。矿井火灾产生的风烟流沿途蔓延是造成重大人员伤亡的主要原因。由于井下巷道环境独特、空间狭小、通风网络错综复杂等，火灾、爆炸等热动力灾害发生后会相互转化，引发严重的次生灾害。灾变时期最有效的抗灾救灾手段是实现风烟流可调可控，通过设置风烟流调控系统，控制灾变后烟气动向，从而创造良好的逃生条件。但目前大多数矿井依靠救灾人员临时搭建通风设施来引导风烟流，灾变时不能对风烟流进行远程控制[2-4]。另外，当前矿井通风异常情况下应急决策与智能调控水平不高，对火灾、爆炸等灾变时期矿井通风系统风流逆转、烟气扩散机理及灾害防控机制认识不清，因局部失效造成通风系统级联崩溃、进而导致重特大事故的情况时有发生。据统计，该类事故中，85%～95%的人员伤亡因窒息导致[5]。因此，研究矿井灾变时期通风网络风烟流演化与控风机理，开发灾变风流应急调控与智能决策关键技术装备，对保障矿井通风系统安全稳定、提升灾害防控能力具有重要意义。

笔者所在课题组研发了矿井火灾风烟流区域联动与智能调控系统，通过在通风网络中预设可远程控制的通风设施、监测关键区域通风参数和环境参数、迭代解算通风网络、智能控制可调风门开度、开发可视化界面，实现了火灾时期风烟流区域联动与可视化智能调控。本文着重介绍矿井火灾风烟流区域联动控制机理、智能调控理论，以及系统开发和应用情况。

1 矿井火灾风烟流区域联动控制机理

根据矿井火灾风烟流演化规律和通风网络结构特点，以某采区胶带巷火灾为例，建立矿井火灾风烟流区域联动与智能调控系统。以下为矿井火灾风烟流区域联动控制机理。

在轨道巷和胶带巷的联络巷内设置常开风门 FM1—FM3；在胶带巷与回风巷的联络巷内设置闭锁风门 FM4，FM5；在主要进风巷及关联巷道设置烟雾传感器 CGQ1—CGQ4 并进行冗余设计；在总回风巷设置风速传感器 FS1，FS2。正常时期系统配置及状态如图 1 所示。风流可在胶带巷与轨道巷之间经联络巷动态流动，风门 FM1—FM3 处于常开状态，风门 FM4，FM5 处于闭锁状态。当联络巷内行车过人时，系统能够识别并自动闭锁。火灾时期系统配置及状态如图 2 所示。系统将风门 FM1—FM3 全部关闭，若 CGQ1，CGQ2 同时监测到信号，CGQ3，CGQ4 未监测到信号，则远程调控风门 FM4 使其打开，隔断风烟流在进风巷间的流动并将其排入回风巷；若 CGQ3，CGQ4 监测到信号，或所有烟雾传感器同时监测到信号，则远程调控风门 FM5 使其打开，使风烟流短路进入总回风巷。系统启动后，采区风量急剧减少，可能使瓦斯浓度迅速增大而产生次生灾害。因此，实现火灾风烟流演化区域和人员逃生区域所需风量动态调控是科学救灾的关键。将 FM4，FM5 设置为级差开关，以调控排放烟流的短路风流风量，为通风网络改变后风量调控及合理分配提供保障。另外，每道风门上均设有逃生小门并加装自动关门装置，保证灾区人员在风

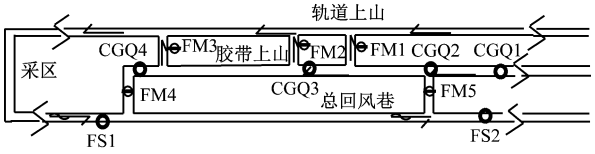
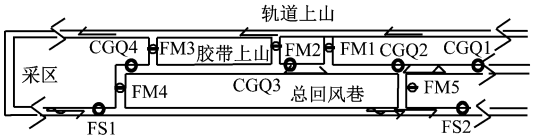
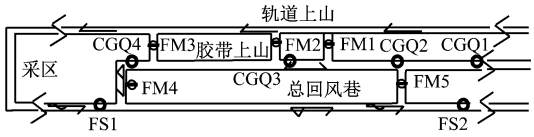


图 1 正常时期系统配置及状态

Fig. 1 System configuration and status during normal period



(a) 胶带巷前部着火



(b) 胶带巷后部着火

图 2　火灾时期系统配置及状态

Fig. 2　System configuration and status during fire period

门关闭后逃向安全区。

根据图 2 可知，火灾时期系统将通风网络划分为烟流区和非烟流区。2 个区域网络结构为 2 个并联分支，可通过增阻或减阻方式调节 2 个分支风量分配，将烟流区风量调整至不产生烟流滚退，将烟流导入总回风巷。

2　火灾风烟流智能调控理论分析

热动力灾害发生发展过程中会出现相互转化现象，次生灾害更易造成重大事故，火灾风烟流可视化智能调控是实现系统风量按需分配的关键[6]。通过研究火灾时期风烟流智能调控的影响因素，分析调节断面和风阻间关系，构建复杂通风网络中风烟流智能调控模型，实现火灾风烟流可视化智能调控。

2.1　火灾风烟流智能调控影响因素

火风压是火灾时期风烟流演化的主要影响因素，其会引起烟流滚退等风流紊乱现象。风速和热释放速率是影响烟流滚退距离的最直接因素。风速越大，烟流滚退距离越小；热释放速率越大，烟流滚退距离越大[7]。在特定巷道中，风速也是风烟流调控的重要指标，应综合分析各项因素关系，确定最合理风速[8]。

为了减少烟流滚退造成的次生灾害，专家学者通过大量研究拟合了多元信息的无因次公式。周延[9]根据实验结果拟合出以下经验公式：

$$L_b^* = 0.040\,4\exp\left(\frac{0.041\,4Q}{u_a}\right) \tag{1}$$

式中：L_b^* 为无量纲逆流长度，$L_b^* = L/H$，L 为烟气逆流长度，m，H 为巷道高度，m；Q 为火源热释放速率，kW；u_a 为通风风速，m/s。

周福宝等[10]结合量纲分析，提出以下经验公式：

$$L_b^* = 0.236\,9\exp\left(\frac{0.002\,03Q}{\rho S u_a^3}\right) \tag{2}$$

式中：ρ 为风烟流密度，kg/m^3；S 为巷道断面面积，m^2。

O. Vanquelin 等[11]给出以下经验公式：

$$L_b^* \propto \left(\frac{gQ}{\rho c_p T_a u_a^3 H}\right)^3 \tag{3}$$

式中：g 为重力加速度，m/s^2；c_p 为风烟流的比定压热容，J/(kg·K)；T_a 为风烟流温度，K。

周延[12]通过实验构建了多元非线性回归模型，得到以下经验公式：

$$L_b^* = \left(\frac{29}{28+Q^{*\,-0.89}}\right)^2 F^{-0.91}\left(\frac{HW}{S}\right)^{-1.6} - 2.4 \tag{4}$$

式中：Q^* 为无量纲的火源热释放速率，$Q^* = \dfrac{Q}{\rho c_p T_a g^{0.5} H^{2.5}}$；$F$ 为 Froude 数，$F = \dfrac{u_a^2}{gH}$；W 为巷道宽度，m。

实际测试表明，当 $Q = 10$ MW（相当于一场井下中型火灾）、$L_b^* = 0$ 时，根据式(1)、式(2)、式(4)得到的临界风速分别为 1.86，2.03，1.96 m/s。可见，烟流巷道内风速大于 2 m/s 时才会避免发生烟流滚退。为有效减缓火灾蔓延速度，必须将火灾巷道的风速控制在 2 m/s 以上[13]。

2.2　火灾风烟流智能调控模型

根据采区通风网络、主要通风机、瓦斯涌出规律、通风网络结构变化特性、风量调控方法，从通风网络结构与矿井火灾风烟流区域联动与智能调控系统的耦合关系出发，研究通风网络结构变化后风阻分布与风烟流演化规律。正常、火灾时期通风网络结构如图 3、图 4 所示。R_1 为轨道巷风阻，R_2 为胶带巷风阻，R_3 为工作面风阻，R_4 为总回风巷风阻，R_f 为火区风阻，R_5 为火灾后风量调节风阻。R_3 是

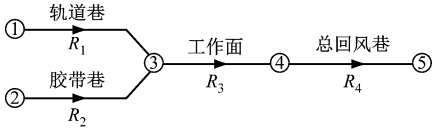
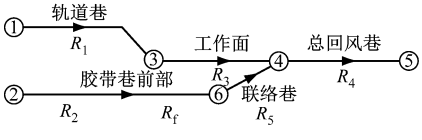
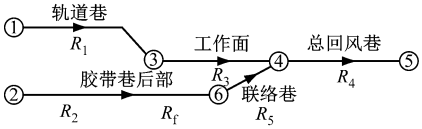


图 3　正常时期通风网络结构

Fig. 3　Ventilation network structure during normal period



(a) 胶带巷前部着火



(b) 胶带巷后部着火

图 4　火灾时期通风网络结构

Fig. 4　Ventilation network structure during fire period

一个非常大的风阻组合，若能实现 R_5 线性连续调节，则系统就可实现理想的耦合关系。鉴于监控技术的局限性，R_5 应设置为级差较小的多点离散调节，通过风阻模拟和进一步的通风网络解算得到较理想的耦合关系。在风量调控过程中，火灾基本进入稳定燃烧阶段，R_f 虽是动态变化的，但会在某一稳定值附近上下浮动。系统启动后，后台进行通风网络迭代解算和风量供需匹配的超前模拟，确定较理想的风量调控方案。

风门作为通风网络分支风量调节分配的主要通风设施，其调节风阻可根据局部风阻计算方法来获取，具体如式(5)—式(8)所示[14]。

$$R_m = \alpha \frac{LU}{S^3} \tag{5}$$

$$R_{jx} = 0.5\left(1 - \frac{S_1}{S}\right)\frac{\rho}{2S^2} \tag{6}$$

$$R_{jd} = \left(1 - \frac{S_1}{S}\right)^2 \frac{\rho}{2S_1^2} \tag{7}$$

$$R_5 = R_m + 2(R_{jx} + R_{jd}) \tag{8}$$

式中：R_m 为摩擦风阻，N·s²/m⁸；α 为摩擦阻力系数，N·s²/m⁴；L 为测试段长度，m；U 为测试段周长，m；R_{jx} 为缩小段局部风阻，N·s²/m⁸；S_1 为可调断面面积，m²；R_{jd} 为扩大段局部风阻，N·s²/m⁸。

闭锁风门 FM5 最大开度为 2.4 m×2.5 m，2 道风门间距为 18 m，可调断面分别 2.4 m×2.5 m，1.6 m×2.5 m，0.8 m×2.5 m。将上述参数代入式(5)—式(8)，可得风量调节风阻分别为 0.021 9，0.058 8，0.197 0，1.152 0 N·s²/m⁸。利用这 4 种调节风阻，将热释放速率设置为 10 MW，火区长度为 300 m 时拟定风阻为 0.043 2 N·s²/m⁸，通过通风网络迭代解算获取烟流区和非烟流区最佳风量分配。根据解算结果，风门开度为 1.6 m×2.5 m 时，主要通风机运行工况参数与火灾前较接近，胶带巷风速为3 m/s 左右，能够顺利排出烟流，有效控制火势；轨道巷风速为 5 m/s 左右，采区新鲜风流供风量为正常状态下的 63%，采区风量的 37% 用于排放火灾烟流。可见系统与通风网络在火灾前后具有很好的耦合性，即火灾前不影响正常通风，火灾后可有效实现风烟流智能调控。

2.3 风量调控可视化功能实现算法

火灾时期，受风速和热释放速率变化的影响，火区风阻随时间动态变化，其他地点的风量与风阻因火区风阻变化而变化。根据前人经验和试验结果，火区风阻采用式(9)进行定量计算[15]，根据式(10)得到火区风阻。

$$p_f = \rho\bar{u}^2 - \rho_0\bar{u}_0^2 + \int_0^l \frac{\lambda\rho u^2}{2d}\mathrm{d}x + (\rho_0 - \rho)gl\sin\theta \tag{9}$$

$$R_f = \frac{p_f}{q_v^2} \tag{10}$$

式中：p_f 为热阻力，Pa；$\bar{u}$ 为风烟流速度，m/s；ρ_0 为上风侧风烟流密度，本文取 1.29 kg/m³；$\bar{u}_0$ 为上风侧风烟流速度，m/s；l 为高温区域长度，m；λ 为巷道摩擦因数，砌碹巷道一般取 0.035；d 为当量直径，m；θ 为高温区域倾角，(°)；q_v 为风烟流体积流量，m³/s。

因 $\bar{u} = \frac{q_v}{S}$，$\rho = \frac{q_m}{q_v}$（q_m 为风烟流质量流量，kg/s），$q_m = \frac{\varphi Q}{\Delta T c_p}$（$\varphi$ 为燃烧转化系数，本文取 0.6；ΔT 为风烟流温升，K），可知 $R_f \propto Q$。

根据通风网络结构图论理论，对通风网络中任一回路，选择只存在 1 条待求风阻的分支组成回路，采用风压平衡定律推导分支调节风阻方程，即

$$\sum_{j=1}^{m} R_j V_j |V_j| - N_f - N_p = 0 \tag{11}$$

式中：m 为闭合网孔所含最大支路数；R_j 为分支 j（$j=1,2,\cdots,m$）调节风阻，N·s²/m⁸；V_j 为分支 j 风量，m³/s；N_f 为主要通风机风压，Pa；N_p 为自然风压，Pa。

在计算调节风阻时，采用 Hardy-Cross 迭代法进行通风网络迭代解算，在迭代解算中设定迭代次数，防止计算进入死循环。迭代解算反复进行，为了提高收敛速度，对 Hardy-Cross 迭代法施加 Gausscide 技巧参与计算。

$$V_i = -\frac{\sum_{j=1}^{m} R_j V_j |V_j| - N_{fi} - N_{pi}}{\sum_{j=1}^{m} 2R_j |V_j| - f} \tag{12}$$

式中：V_i 为闭合回路 i 风量，m³/s；N_{fi} 为闭合回路 i 中主要通风机风压，Pa；N_{pi} 为闭合回路 i 中自然风压，Pa；f 为主要通风机曲线斜率。

在配置矿井火灾风烟流区域联动与智能调控系统时，应尽可能通过最少的监测信息获取最多通风网络参数。通过风速传感器（如图 1 中 FS1，FS2）监测非烟流区和烟流区风量；通过主要通风机在线监测系统获取主要通风机运行参数；根据火灾时期通风网络结构，利用通风网络迭代解算程序反推通风网络风阻，得出火区风阻。将火区风阻、主要通风机运行参数代入矿井火灾风烟流区域联动与智能调控系统启动后的通风网络结构并进行解算，得出救灾

过程中各分支所需风量。

3　系统开发及应用

矿井火灾风烟流区域联动与智能调控系统包括地面远程监控中心、工业以太网通信子系统、风烟流智能调节装置、井下分布式区域联动监控子系统，如图 5 所示。系统通过井下分布式区域联动监控子系统中的分布式监控站点实时监测拟定区域通风网络分支的通风参数、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至地面远程监控中心；当分布式监控站点监测到井下风烟流信息或其他显著灾害异常信息时，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是否正常实施对应的调控方法。

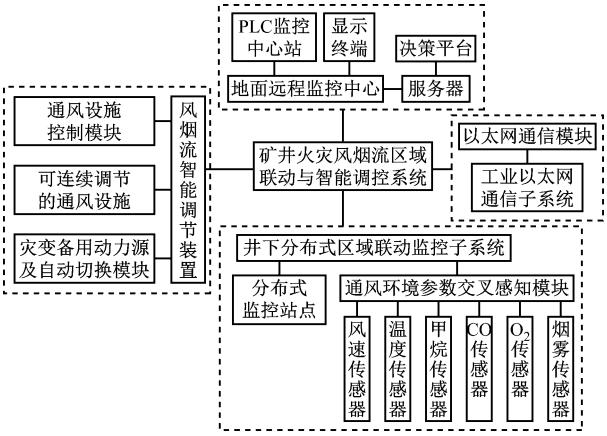


图 5　矿井火灾风烟流区域联动与智能调控系统组成

Fig. 5　Composition of regional linkage and intelligent control system of mine fire wind-smoke flow

当以太网通信正常时，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与智能调控方案；显示终端显示综合性方案具体内容，并提供一键式远程区域联动与智能调控服务。地面远程监控中心下发应急决策命令后，风烟流智能调节装置执行动作，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。系统根据关键分支需风量要求，对火灾区域风烟流进行智能调控，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与智能调控可视化。

当以太网通信异常时，分布式监控站点应用故障预测与健康管理技术，运行预计、监测、诊断、预测流程，保障监控站点内部各组件协同可靠工作，实现设备运行状态修复、自主式保障、异常感知与响应。各监控站点间采用机器学习、超高容错技术，通过定义异常问题、预处理感知数据、融合超高容错信息，结合监控站点间通信状态、远程指令，以及温度、烟雾、风烟流组分中 CH_4，CO，O_2 浓度等交叉感知信息，实现监控站点协同区域联动的自主分析与研判。

为了实现火灾过程中关键分支风量按需分配，设计了级差可调风门，利用三位五通电磁阀与行程开关对风门运行状态进行监控[16]。系统将火灾时期简化通风网络结构、火区风阻、主要通风机运行参数、实际通风网络结构、分支实际风阻等嵌入地面远程监控中心数据库，将 FS1，FS2 获取的动态风量参数和主要通风机运行参数通过地面远程监控中心的 PLC 监控中心站缓存处理后送入数据库，通过连续迭代解算获得各分支实时风量。通过模拟火灾过程计算救灾过程中关键巷道的理想风量，根据理想风量设置阈值。当实际风量与阈值误差超过 10%时，系统自动发出调整风门开度指令，对风量进行远程智能调控，以实现最佳风量分配。

系统可视化界面如图 6 所示。该系统在某采区应用以来，已进行3次模拟火灾演习，现场测定结

分支号	巷道名称	分支风阻/(N·s²·m⁻⁸)	分支风量/(m³·s⁻¹)	分支风压/Pa	关联分支可调性
1	主运巷	0.743 6	18.54	255.59	Y/N
2	辅运巷	0.041 3	81.63	275.20	Y/N
3	总回风巷	0.028 6	102.36	299.66	Y/N
4	盘区主运巷	2.261 5	12.18	187.15	Y/N
5	盘区辅运巷	0.134 2	26.37	93.31	Y/N
6	盘区回风巷	0.293 7	39.69	462.66	Y/N
7	工作面运输巷	2.216 3	8.56	162.39	Y/N
8	工作面回风巷	0.581 4	19.38	218.36	Y/N

图 6　矿井火灾风烟流区域联动与智能调控系统可视化界面

Fig. 6　Visual interface of regional linkage and intelligent control system of mine fire wind-smoke flow

果、模拟计算结果、可视化界面显示结果具有很好的耦合性。

4 结论

(1) 根据矿井火灾风烟流演化规律,结合通风网络结构介绍了风烟流区域联动控制机理。将火灾时期通风网络划分为烟流区和非烟流区 2 个并联分支,通过增阻或减阻方式调节 2 个分支风量分配;通过设置烟雾传感器、可调风门等通风设施并进行远程连续调控,实现火灾时期烟流演化区域和人员逃生区域所需风量的动态调控。

(2) 研究了矿井火灾风烟流智能调控的影响因素,根据矿井火灾前后通风网络结构构建了火灾风烟流智能调控模型,分析了火灾风烟流智能调控可视化功能实现算法。矿井火灾风烟流区域联动与智能调控系统根据关键分支风量参数、主要通风机运行参数和简化通风网络结构等进行通风网络迭代解算,获取火区风阻,再根据火区风阻对系统启动后的通风网络进行解算,实现矿井火灾风烟流智能调控可视化。

(3) 矿井火灾风烟流区域联动与智能调控系统在以太网通信异常状态下,可通过井下分布式监控站点间通信状态、远程指令,以及温度、烟雾、风烟流组分中 CH_4,CO,O_2 浓度等信息的交叉感知与研判,实现自主决策型火灾风烟流区域联动控制;通过实时监测火灾时期通风参数及环境参数,构建可视化界面,实现了火灾时期通风系统远程可视化智能调控。

参考文献(References):

[1] 谢之康,王省身. 矿井外因火灾计算机控制及有待解决的若干问题[J]. 中国安全科学学报,1998,21(1):124-129.
XIE Zhikang, WANG Xingshen. Current status and outlook of the application of computer in exogenous mine fire control[J]. China Safety Science Journal, 1998,21(1):124-129.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 王凯,蒋曙光,马小平,等. 瓦斯爆炸致灾通风系统实验及应急救援方法[J]. 中国矿业大学学报,2015,44(4):617-622.
WANG Kai, JIANG Shuguang, MA Xiaoping, et al. Experimental of the ventilation systems hazard by gas explosion and the methods of emergency rescue[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2015,44(4):617-622.

[5] 王凯,蒋曙光,张卫青,等. 矿井火灾应急救援系统的数值模拟及应用研究[J]. 煤炭学报,2012,37(5):857-862.
WANG Kai, JIANG Shuguang, ZHANG Weiqing, et al. Numerical simulation and application research of mine fire emergency rescue system[J]. Journal of China Coal Society,2012,37(5):857-862.

[6] 周延,王省身. 水平巷道烟流滚退发生条件的研究[J]. 煤炭学报,1998,23(4):362-365.
ZHOU Yan, WANG Xingshen. Conditions for formation of a reverse smoke flow in a horizontal tunnel[J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(4):362-365.

[7] 王海燕,周心权. 平巷烟流滚退火烟羽流模型及其特征参数研究[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.

[8] WU Y, BAKAR M Z A. Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems-a study of the critical velocity [J]. Fire Safety Journal, 2000,35(4):363-390.

[9] 周延. 一个新的水平隧道火灾烟气逆流层长度模型研究[J]. 中国矿业大学学报,2007,36(5):569-572.
ZHOU Yan. A novel model for length of countercurrent smoke layer in horizontal tunnel fire [J]. Journal of China University of Mining & Technology,2007,36(5):569-572.

[10] 周福宝,王德明. 巷(隧)道火灾烟流滚退距离的无因次关系式[J]. 中国矿业大学学报,2003,32(4):407-410.
ZHOU Fubao, WANG Deming. Non-dimensional expression for backflow distances of smoke and hot gases in roadway or tunnel fire[J]. Journal of China

University of Mining & Technology, 2003, 32(4): 407-410.

[11] VANQUELIN O, WU Y. Influence of tunnel width on longitudinal smoke control[J]. Fire Safety Journal, 2004, 35(6): 420-426.

[12] 周延. 纵向通风水平隧道火区阻力特性[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(6): 703-707.
ZHOU Yan. Flow resistance characteristics of fire zone in horizontal tunnel with longitudinal ventilation [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(6): 703-707.

[13] 夏云春, 吴静. 可燃性 PVC 电缆燃烧时的火蔓延速度[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2008, 29(4): 340-344.
XIA Yunchun, WU Jing. Study on the fire propagation velocity of PVC cable[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2008, 29(4): 340-344.

[14] 王凯, 蒋曙光, 张卫清, 等. 矿井火灾救灾中风量远程调控技术及数值分析[J]. 煤炭学报, 2012, 37(7): 1171-1176.
WANG Kai, JIANG Shuguang, ZHANG Weiqing, et al. Remote control technology and numerical analysis of airflow in coal mine fire disaster relief process[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(7): 1171-1176.

[15] 王凯. 煤矿热动力灾害控制机理及远程应急救援系统研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.