



外因火灾通风网络风量风质失效模型与数值解算方法

李伟 刘彦青 张浪

引用本文:

李伟, 刘彦青, 张浪. 外因火灾通风网络风量风质失效模型与数值解算方法[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(5): 196–212.

LI Wei, LIU Yanqing, ZHANG Lang. Model and numerical solution method the failure of air volume and air flow components in the ventilation network during the period of external fire[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 196–212.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0226>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

有限实测风量下矿井风网校准的二次规划模型

Quadratic programming model for calibration of mine ventilation network under limited measured air quantities

煤炭科学技术. 2024, 52(12): 154–164 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1511>

矿井复杂风网火灾风烟流应急调控技术及应用

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

煤炭科学技术. 2023, 51(5): 124–132 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1787>

矿井智能通风理论与技术研究进展

Research progress of mine intelligent ventilation theory and technology

煤炭科学技术. 2023, 51(1): 313–328 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2212>

不同阻塞条件下的隧道火灾全尺寸试验研究

Experimental study on safety full-scale of tunnel fire disaster under different blocking conditions

煤炭科学技术. 2021, 49(2): 93–101 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.02.012>

高温矿井制冷降温管网解算及优化方法研究

Research on calculation and optimization method of refrigeration and cooling pipe network in high temperature mine

煤炭科学技术. 2024, 52(2): 150–158 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0426>

煤矿局部通风机风量智能控制系统研究及应用

Research on local ventilation constant air volume intelligent switching technology and its application

煤炭科学技术. 2023, 51(4): 166–174 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2199>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

李 伟,刘彦青,张 浪. 外因火灾通风网络风量风质失效模型与数值解算方法[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(5): 196-212.

LI Wei, LIU Yanqing, ZHANG Lang. Model and numerical solution method the failure of air volume and air flow components in the ventilation network during the period of external fire[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 196-212.

外因火灾通风网络风量风质失效模型与数值解算方法

李 伟^{1,2,3}, 刘彦青^{1,2,3}, 张 浪^{1,2,3}

(1. 煤科通安(北京)智控科技有限公司, 北京 100013; 2. 煤炭科学技术研究院有限公司, 北京 100013;

3. 智能开采与岩层控制全国重点实验室, 北京 100013)

摘要: 为了尽可能复现火灾时期通风网络内风量波动、风流逆转、风温异常、有毒有害气体蔓延、氧气体积分数降低等灾变过程, 构建了外因火灾通风网络风质风量失效物理模型, 采用时序化分析方法进行了解耦处理。通过风阻、火风压、风流密度关键通风参量计算模型, 将基于质量流量守恒的通风网络回路风压平衡方程、通风网络风流-围岩热量交换-传播控制方程、有毒有害气体弥散-扩散控制方程、氧气消耗-运移控制方程进行联立, 构建了外因火灾通风网络“风量风向-风温-有毒有害气体体积分数-氧气体积分数”非稳定多场耦合数学模型。采用回路风量牛顿法求解通风网络风量风向变化, 采用迎风离散格式的有限差分法求解通风网络内风流传热-传质过程, 建立了火灾时期全网“节点-分支-网络”风量风质失效多物理场耦合解算方法, 构建了多物理场间接耦合解算流程, 编写了解算程序。通过在角联结构试验巷道内开展外因火灾试验, 初步验证了模型的准确性与适用性, 在此基础上分别模拟了进风区分支与用风区分支火源位置情况下复杂通风网络内风量变化、风流逆转、风温异常、有毒有害气体蔓延、氧气体积分数波动的动态变化过程。模拟结果表明: 火源位置在进风井条件下风量显著变化分支达到通风网络分支总数的 61%, 风流逆转分支数量占通风网络分支总数的 11%, 风温显著变化分支数量达到通风网络分支总数的 76%, CO 侵入分支数量达到通风网络分支总数的 84%, 氧气体积分数显著变化分支数量达到通风网络分支总数的 41%, 进风井分支发生外因火灾造成的灾害影响范围和影响强度均明显大于其他分支。

关键词: 通风网络; 回路风量法; 风流质量流量守恒; 有限差分法; 传热传质; 节点元素; 分支元素

中图分类号: TD724

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2025)05-0196-17

Model and numerical solution method the failure of air volume and air flow components in the ventilation network during the period of external fire

LI Wei^{1,2,3}, LIU Yanqing^{1,2,3}, ZHANG Lang^{1,2,3}

(1. CCRI Tongan (Beijing) Intelligent Control Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 2. CCTEG China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;

3. State Key Laboratory of Intelligent Coal Mining and Strata Control, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to reproduced as much as possible the disaster processes such as air volume fluctuations, airflow reversal, abnormal airflow temperature, the spread of toxic and harmful smoke, and the decrease in oxygen volume fraction in the ventilation network during the period of fire occurrence, the airflow pressure balance equation of the ventilation network circuit based on the conservation of airflow mass flow rate, the control equations for heat exchange and propagation in ventilation networks, the control equations for the diffusion and dispersion of toxic and harmful gases in ventilation networks, and the control equation of the consumption and transport of oxygen component in ventilation network were constructed. Based on the theory of multi physics field coupling, the above equations were combined using key ventilation parameters such as airflow resistance, fire pressure, and air flow density to construct the multi field coupling mathematical

收稿日期: 2024-02-23

策划编辑: 宫在芹

责任编辑: 李雅楠

DOI: 10.12438/cst.2024-0226

基金项目: 中国煤炭科工集团科技创新创业基金资助项目(2021-2-TD-ZD005); 煤科院科技发展基金资助项目(2021CX-II-14)

作者简介: 李 伟(1983—), 男, 黑龙江木兰人, 副研究员, 硕士。E-mail: 172711904@qq.com

通讯作者: 刘彦青(1989—), 男, 山西忻州人, 副研究员, 硕士。E-mail: lyqing0906@163.com

model for an unstable ventilation network during the period of external fire, which included “air volume and airflow direction, airflow temperature, toxic and harmful gases volume fraction, and oxygen volume fraction”. Based on the Newton method of loop air volume, the variation of air volume and airflow direction in the ventilation network was solved. The finite difference method of upwind discrete format was used to solve the heat and mass transfer process of airflow in the ventilation network. The indirect coupled multi physical field solution method based on temporal logic was adopted to construct the solution process. The accuracy and applicability of the model were preliminarily verified by carrying out external fire experiments in the test roadway of the angular structure, and on this basis, the dynamic change process of air volume change, wind flow reversal, abnormal wind temperature, spread of toxic and harmful gases, and oxygen volume fraction fluctuation in the complex ventilation network under the location of the fire source of the branch in the air inlet area and the branch branch in the air consumption area were simulated respectively. The simulation results showed that under the condition that the ignition source was located in the air inlet well, the number of branches with significant changes in air volume reached 61% of the total number of branches in the ventilation network, the number of branches with significant changes in wind flow reached 11% of the total number of branches in the ventilation network, the number of branches with significant changes in wind temperature reached 76% of the total number of branches in the ventilation network, the number of branches with CO intrusion reached 84% of the total number of branches in the ventilation network, and the number of branches with significant changes in oxygen volume fraction reached 41% of the total number of branches in the ventilation network. The impact scope and intensity of disasters caused by fire in the air inlet shaft branch were significantly greater than those in other branches.

Key words: ventilation network; loop air volume method; air flow conservation; finite difference method; heat and mass transfer; node element; branch element

0 引 言

矿井机电设备、运输输送带、线缆等易燃设备是造成矿井外因火灾的主要原因^[1-2],火灾燃烧放热造成矿井通风系统风流紊乱,火灾产生的有毒有害烟气在通风系统内肆意蔓延,燃烧耗氧造成巷道风流氧气体积分数降低,上述原因极易造成井下人员中毒与窒息,酿成重大事故,2020年9月重庆松藻煤矿发生皮带燃烧火灾事故,导致17人伤亡,造成极其不良的社会影响。近年来随着煤矿智能化建设进程的不断推进,外因火灾应急控风减灾降灾决策是智能通风亟需解决的关键难题之一^[3],而外因火灾通风网络风量风质失效模拟是实现外因火灾应急控风减灾降灾决策的前提与基础^[4],因此外因火灾通风网络风量风质失效模型及解算方法具有重要的价值与意义。

矿井外因火灾演变发展规律一直是煤矿安全领域的重要研究内容之一,国内外学者围绕火灾巷道风流紊乱和风温烟气分布规律、通风网络火灾风流模拟等方面开展了大量研究工作,并取得了一系列重要成果。在火灾巷道风流紊乱和风温烟气分布规律研究方面,李祥春等^[5]利用 FLUENT 模拟分析了单一直巷内火源条件下风流紊乱状态和流场分布变化特征;张春华等^[6]、田水承等^[7]、刘雨晴等^[8]利用 PyroSim 分别模拟分析了 L 型水平巷道、水平直巷、倾斜直巷内火源条件下烟气蔓延与风温变化特征;李宗翔等^[9]采用相似模拟试验方法研究了下行风流火灾时期风流紊乱和烟流滚退特征;李晴等^[10]推

构建了分叉和汇合巷道内烟流温度预测模型;马砺等^[11]采用相似模拟试验方法验证了火灾条件下不同巷道断面封堵情况下直巷内风温预测模型;王海燕等^[12]建立了火灾时期巷道风阻模型,采用相似模拟试验方法验证了模型准确性;白志鹏等^[13]推导建立了有毒有害烟气单一巷道传播模型和分叉节点传播模型。在通风网络火灾风流模拟方面,周福宝等^[14]基于 MFRDSS 分别模拟了水平巷道和倾斜巷道火灾条件下全风网火灾烟流蔓延过程;李贺等^[15]利用 FDS 模拟火灾时期回采工作面通风系统区域内风温变化与烟流蔓延规律;戚宜欣等^[16]建立了考虑火风压的火灾时期矿井风流流动动态数学模型;李宗翔等^[17-19]开发了基于 MATLAB 的火灾时期矿井通风系统灾变演化可视化仿真软件 TF1M(3D),实现了矿井尺度的火灾时期风流运动、烟浓度与温度分布的动态模拟;张景钢等^[20]以 Mfire 解算模块为基础开发了火灾模拟风网解算软件;裴晓东等^[21]、郝海清等^[22]利用 Ventsim 软件分别对转龙湾煤矿皮带巷火灾风烟流蔓延效果和火灾应急联动调控系统排烟效果进行了模拟解算;李翠平等^[23]建立了矿井火灾可视化仿真数据结构模型,实现了矿井火灾场烟流三维可视化仿真。

在总结前人研究成果基础上,深入梳理总结分析火灾时期通风网络内质量、动量、热量传递过程之间的耦合关系,构建了火灾时期巷道分支风阻、火风压、风流密度 3 个关键耦合参量计算模型,建立以场量为解算结果的通风网络风量风质失效耦合数学模

型,首次将回路风量法与有限差分法进行结合,建立了火灾时期矿井“节点-分支-网络”风量风质失效多物理场耦合解算方法,编写解算程序,动态解算通风网络风量场、风温场、有毒有害气体体积分数分布场、氧气体积分数分布场,实现矿井通风网络全时域外因火灾演化过程快速模拟。

1 外因火灾通风网络风量风质失效耦合作用机制

构建外因火灾时期风网内风量变化及风流逆转过程、风流热量交换传播过程、有毒有害气体运移蔓延过程、氧气组分消耗波动过程四者之间的耦合作用关系,形成完善的外因火灾风网风量风质失效机制,构建了火灾时期风网风量风质失效过程物理模型,如图 1 所示。

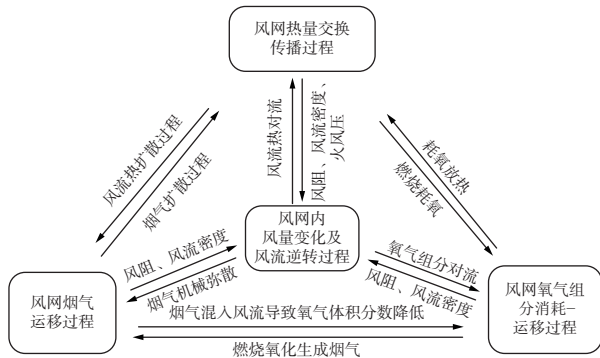


图 1 外因火灾通风网络风量风质失效耦合作用机制
Fig.1 Coupling mechanism of failure of air volume and air flow components in ventilation network during the period of external fires

2 外因火灾通风网络风量风质失效数学模型

基于多物理场耦合理论,分别对外因火灾风网风量变化及风流逆转过程、风网内热量交换传播过程、风网内火灾产生有毒有害气体扩散弥散过程、风网内氧气组分消耗运移过程、4 个过程之间耦合关系进行数学建模,构建外因火灾通风网络“风量-风温-有毒有害气体体积分数-氧气体积分数”多场耦合网络解算数学模型。

2.1 风量风质失效过程耦合关系数学模型

采用时序化分析方法对外因火灾通风网络风质风量失效耦合过程进行解耦处理,构建了基于时序逻辑的外因火灾通风网络风质风量失效耦合流程,如图 2 所示,通过关联参量将并列存在的通风网络风量风向过程、风流非稳态传热过程、风流非稳态传质过程进行了耦合,关联参量包括风量、风温、有毒

有害气体体积分数、氧气体积分数等基本关联参量和风流密度、风阻、火风压复合关联参量。

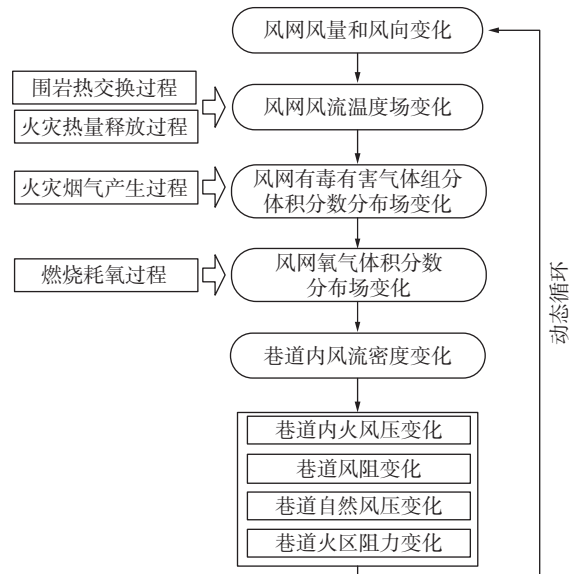


图 2 外因火灾通风网络风量风质失效耦合流程
Fig.2 Coupling process of failure of air volume and air flow components in ventilation network during the period of external fires

1)风流密度计算模型。外因火灾时期火灾释放热量引起风流温度升高,风流体积膨胀,造成风流密度减小、风流体积流量增加,导致风流流动阻力增加,形成节流效应,为了考虑节流效应需动态计算风流密度,同时风流密度与自然风压、火风压、风阻也密切相关。风流密度由风流静压、温度、相对湿度计算得到,巷道分支风流平均密度按式(1)计算。

$$\rho = \frac{0.003484 \left(\sum_{k=1}^n P_k \Delta x - \sum_{k=1}^n \Phi_k P_{qb-k} \Delta x \right)}{\sum_{k=1}^n T_k \Delta x} \quad (1)$$

式中: ρ 为巷道分支平均空气密度, kg/m^3 ; n 为巷道分支划分区段数量; P_k 为巷道分支第 k 个区段绝对气压, Pa ; Δx 为巷道分支区段长度, m ; Φ_k 为巷道分支第 k 个区段风流湿度, %; P_{qb-k} 为巷道分支第 k 个区段饱和蒸汽压, Pa ; T_k 为巷道分支第 k 个区段风流温度, K 。

2)风阻计算模型。巷道风阻由风流密度与巷道固定参数决定,火灾对巷道固有参数基本无影响,火灾条件下风阻计算模型见式(2)。

$$R_t = R_0 \frac{\rho_t}{\rho_0} \quad (2)$$

式中: R_t 为火灾发生之后 t 时刻巷道风阻, $(\text{N} \cdot \text{s}^2)/\text{m}^8$; R_0 为外因火灾发生之前巷道风阻, $\text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^8$; ρ_0

为初始时刻巷道平均空气密度, kg/m^3 ; ρ_t 为火灾发生之后 t 时刻巷道平均空气密度, kg/m^3 。

3) 火风压计算模型。矿井外因火灾时期井下风流非稳定移动, 满足回路风压平衡定律, 且在回路风压平衡方程中考虑火风压。将每个巷道分支分为多个巷道区段, 根据每个巷道区段温度、气体组分计算风流密度, 将各个巷道区段风流密度依次累加在一起, 得到火灾时期该巷道分支位压差, 见式(3), 通风网络中第 a 个基本回路的火风压为回路中火灾发生之后各个分支位压差与火灾发生之前各个分支位压差的代数和, 见式(4)。

$$P_{e-j} = g \sum_{k=1}^n \rho_{jk} \Delta x \sin \theta_j \quad (3)$$

$$h_{f-a} = \sum_{j=1}^{N_a} [P_{e-j} - P_{e-j}^{(0)}] \quad (4)$$

式中: P_{e-j} 为火灾发生之后第 j 个巷道分支位压差, Pa;

$$2 \sum_{j=1}^B \sum_{k=1}^M C_{kj} R_j \Delta Q_j |Q_j^0| \frac{\Delta Q_{r-k} \rho_{r-k}}{\rho_{r-k}} = \sum_{j=1}^B C_{kj} P_j - \sum_{j=1}^B C_{kj} R_j Q_j^0 |Q_j^0| \quad (k=1, 2, 3, \dots, M) \quad (7)$$

式中: ρ_j 为第 j 个巷道分支风流密度, kg/m^3 ; Q_j 为第 j 个巷道分支风流体积流量, m^3/s ; B 为通风网络巷道分支数量; M 为通风网络基本回路数量; C_{kj} 为指示函数, 如果第 k 个基本回路中包含第 j 个巷道分支, 则该函数取值为 1, 如果第 k 个基本回路中不包含第 j 个巷道分支, 则该函数取值为 0; Q_{r-k} 为第 k 个基本回路风流质量流量, kg/s ; ρ_{r-k} 为第 k 个基本回路风流密度, kg/m^3 ; h_j 为第 j 个分支通风阻力, Pa; P_j 为第 j 个巷道分支机械风压、自然风压、火风压之和, Pa; ΔQ_{r-k} 为第 k 个基本回路风量增量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; R_j 为第 j 个巷道分支风阻值, $(\text{N} \cdot \text{s}^2)/\text{m}^8$; Q_j^0 为第 j 个巷道分支迭代风量初值, m^3/s ; ΔQ_j 为第 j 个巷道分支迭代风量增量, m^3/s 。

2.3 通风网络内风流非稳态传热过程数学模型

为了构建考虑时间变化、围岩吸热放热效应、风流密度动态变化、风阻动态变化、火风压动态变化的外因火灾通风网络内风流非稳态传热数学模型。给出巷道内风流非稳态传热过程建模假定条件: ①考虑巷道壁面与风流之间热交换; ②考虑巷道风流流动方向上风流热量传播, 基于上述前提条件, 以热量守恒定律为基础, 建立了适用于风网的一维形式(沿巷道走向方向上)风流非稳态传热控制方程, 见式(8)。

θ_j 为第 j 个巷道分支巷道倾角, ($^\circ$); ρ_{jk} 为第 j 个巷道分支第 k 个区段空气密度, kg/m^3 ; h_{f-a} 为通风网络第 a 个基本回路的火风压值, Pa; N_a 为通风网络第 a 个基本回路所包含巷道分支数量; $P_{e-j}^{(0)}$ 为火灾发生之前第 j 个巷道分支的位压差, Pa。

2.2 基于质量流量守恒的风网解算数学模型

基于风流质量流量守恒, 建立了通风网络回路风量平衡公式, 见式(5)。式(6)为基于动量守恒建立的回路风压平衡公式, 结合式(5)和式(6), 建立了基于风流质量流量守恒的通风网络回路风量解算数学模型, 见式(7), 用于解算通风网络内风量变化与风流逆转过程。

$$\rho_j Q_j = \sum_{k=1}^M C_{kj} Q_{r-k} \rho_{r-k} \quad (j=1, 2, 3, \dots, B) \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^B C_{kj} h_j = \sum_{j=1}^B C_{kj} P_j \quad (k=1, 2, 3, \dots, M) \quad (6)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T_a}{\partial t} + \rho V C_p \frac{\partial T_a}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\kappa}{C_p} \frac{\partial T_a}{\partial x} \right) + hU(T_{S0} - T_a) + E_f \quad (8)$$

式中: C_p 为空气比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T_a 为巷道风流温度, K; κ 为空气导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; V 为巷道风速, m/s ; E_f 为火灾源释放热量速率, kJ/s ; h 为巷道风流与巷道壁面对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; U 为巷道周长, m ; T_{S0} 为巷道壁面温度, K。

为了解算围岩吸热放热效应, 给出了巷壁围岩内非稳态传热建模假定条件: ①巷道围岩为各项同性均质煤岩体; ②岩体内部无热量产生。基于上述前提条件, 以傅里叶导热公式为本构模型, 构建了巷壁围岩内非稳态传热控制方程, 见式(9)。

$$\rho_w C_{p-w} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) \quad (9)$$

求解条件: $t=0$ 且 $r \rightarrow \infty$, $T_s = T_{RS}$; $t=0$ 且 $r=r_0$, $\lambda \frac{\partial T_s}{\partial t} = h(T_a - T_{S0})$ 。

式中: ρ_w 为巷道围岩密度, kg/m^3 ; C_{p-w} 为巷道围岩比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T_s 为巷道围岩温度, K; λ 为巷道围岩导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; r 为巷帮围岩内部与巷道中线之间距离, m ; T_{RS} 为巷道围岩原始岩温, K; T_a 为巷道风流温度, K; r_0 为巷道当量半径, m 。

2.4 通风网络风流非稳态传质过程数学模型

通风网络内气体组分弥散扩散过程和氧气消耗

运移过程均属于风流传质过程,给出巷道内风流非稳态传质过程建模假定条件:①同一巷道风支内风流质量流量相同(非灾源巷道分支);②巷道节点区域内风流中各类气体瞬间混合均匀。基于上述建模假定条件,以气体组分守恒定律为基础,建立了适用于风网的一维形式(沿巷道走向方向)气体组分弥散-扩散控制方程,见式(10)。

$$\frac{\partial \rho \varphi_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho V \varphi_i}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial x} \right) + q_i (i = 1, 2, 3, \dots, D) \quad (10)$$

式中: φ_i 为风流中 i 气体组分质量浓度, %; D 为巷道

风流气体组分种类数量; Γ_i 为巷道风流中第 i 种气体组分自由扩散系数, m^2/s ; q_i 为第 i 种气体组分释放速率, m^3/s , 对于火灾产生的一氧化碳等有毒有害气体而言, 释放速率为正值, 对于氧气而言, 因燃烧消耗氧气, 释放速率为负值。

3 外因火灾时期全风网风量风质失效过程解算方法

采用回路风量法对通风网络内风量风向进行解算, 采用有限差分法对通风网络内风流传热过程和传质过程进行解算, 如图 3 所示。

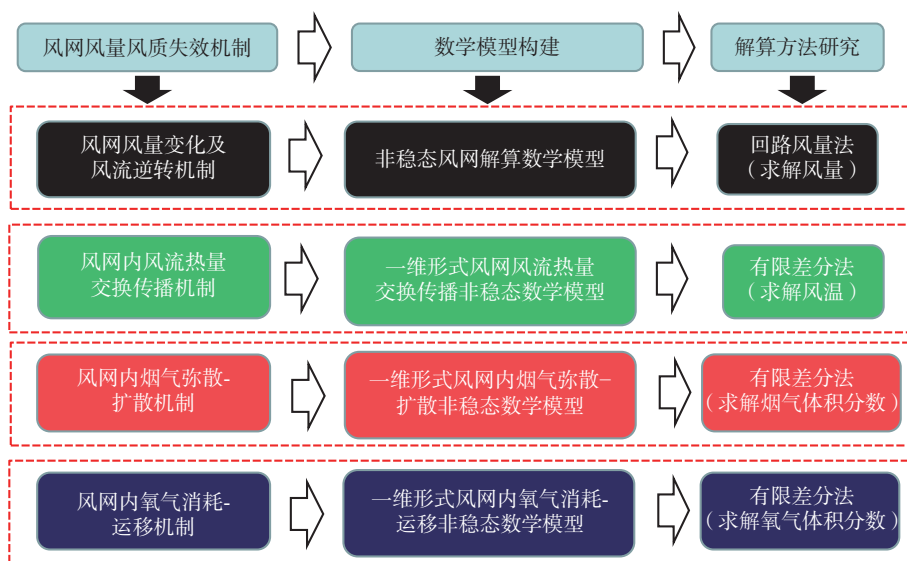


图 3 外因火灾通风网络风质风量失效解算方法

Fig.3 Calculation method for sub process of failure of air volume and air flow components in ventilation network during the period of external fires

3.1 通风网络风量风向变化解算方法

在式(7)基础上,建立以回路风量增量为待求解量的非线性矩阵方程组,采用迭代法对式(7)进行求解,反复带入方程求得回路风量增量,进而计算分支风量增量,直至分支风量解算结果收敛,收敛精度设置为 0.1%。

3.2 通风网络内风流传热-传质过程解算方法

将通风网络所有巷道分支沿巷道走向方向划分为有限个数量的有限差分解算控制体,每个控制体对应一个有限差分解算节点。通风网络划分为节点元素和分支元素,有限差分解算节点同样分为节点元素的有限差分解算节点与分支元素的有限差分解算节点,其中节点元素直接对应通风网络节点元素的有限差分解算节点,分支元素按照一定比例划分为多个有限差分解算控制体和解算节点。

主通风机、火风压等矿井通风动力使得通风网络内分支风流处于定向流动状态,风流传热和风流

传质过程具有主导方向,针对有限差分解算控制体和解算节点,选择有限差分迎风离散格式构建相应的解算控制方程。通风网络节点元素的有限差分解算控制方程中待求解变量为本节点元素变量值、与本节点元素相连的分支元素内第一个(或最后一个)分支元素节点变量值。通风网络分支元素的有限差分解算控制方程中待求解变量为本分支元素节点变量值、本分支元素内相邻的分支元素节点变量值。

联立通风网络所有节点元素和分支元素的有限差分解算控制方程,构成多元线性巨方程组,采用高斯消元法,求解得到通风网络所有节点元素和分支元素的节点变量值,进而获得通风网络内变量场分布情况。

3.2.1 通风网络内风流传热过程解算方法

1)通风网络内巷道风流传热过程解算方法。
图 4、图 5 分别为用于解算风流非稳态传热过程的分支元素和节点元素控制体划分示意,式(11)、式

(12)分别为用于求解通风网络分支元素和节点元素风流温度的有限差分迎风流离散格式解算控制方程。

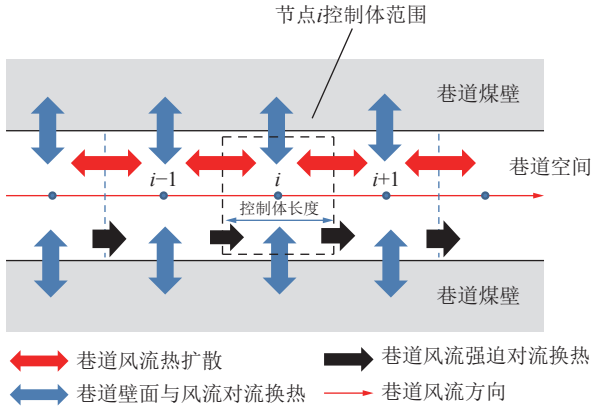


图 4 通风网络分支元素的风流传热解算网格划分示意

Fig.4 Schematic meshing of the wind transfer heat transfer of the branch elements of the ventilation network

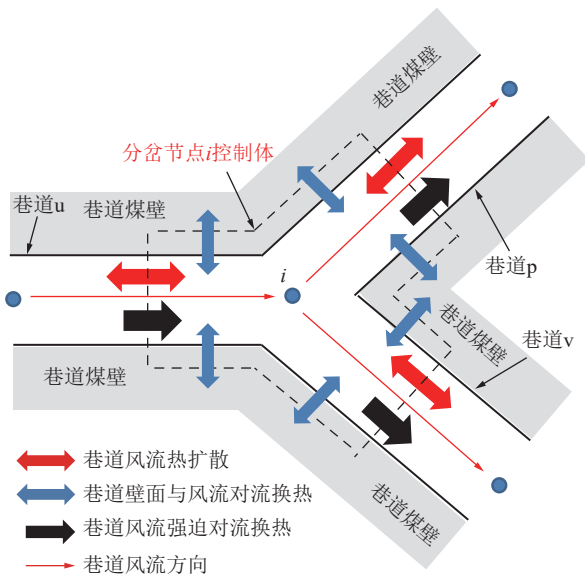


图 5 通风网络节点元素的风流传热解算网格划分示意

Fig.5 Schematic diagram of the calculation of the air heat transfer of the node elements of the ventilation network

$$\rho_j S_j dx_{ji} C_p \frac{(T_{ji}^n - T_{ji}^{n-1})}{\Delta t} + \rho_j V_j S_j C_p \left(\frac{T_{ji-1}^n + T_{ji-1}^{n-1}}{2} - \frac{T_{ji}^n + T_{ji}^{n-1}}{2} \right) + h C_j dx_{ji} C_p \left(\frac{T_{ji}^n + T_{ji}^{n-1}}{2} - T_{S_{ji}} \right) = \frac{\kappa S_j (T_{ji-1}^{n-1} + T_{ji-1}^n)}{2(x_{ji} - x_{ji-1})} + \frac{\kappa S_j (T_{ji+1}^{n-1} + T_{ji+1}^n)}{2(x_{ji+1} - x_{ji})} - \frac{\kappa S_j (T_{ji}^{n-1} + T_{ji}^n)}{2(x_{ji} - x_{ji-1})} - \frac{\kappa S_j (T_{ji}^{n-1} + T_{ji}^n)}{2(x_{ji+1} - x_{ji})} + E_{T-j,i} \quad (11)$$

$$\frac{(T_i^n - T_i^{n-1})}{\Delta t} \left(\sum_{j=1}^m 0.5 \rho_j S_j dx_j C_p \right) + \sum_{j=1}^m \rho_j V_j S_j C_p \left(\frac{T_{ji}^n + T_{ji}^{n-1}}{2} - \frac{T_i^n + T_i^{n-1}}{2} \right) + \sum_{j=1}^m \left[0.5 U_j dx_j h C_p \left(\frac{T_i^n + T_i^{n-1}}{2} - W_j \right) \right] = 0 \quad (12)$$

式中： T_{ji}^n 、 T_{ji}^{n-1} 分别为第 n 个时刻和第 $n-1$ 个时刻，第 j 个分支元素中第 i 个节点位置风流温度，K； T_{ji+1}^n 、 T_{ji+1}^{n-1} 分别为第 n 个时刻和第 $n-1$ 个时刻，第 j 个分支元素中第 $i+1$ 个节点位置风流温度，K； T_{ji-1}^n 、 T_{ji-1}^{n-1} 分别为第 n 个时刻和第 $n-1$ 个时刻，第 j 个分支元素中第 $i-1$ 个节点位置风流温度，K； x_{ji+1} 、 x_{ji} 、 x_{ji-1} 分别为第 j 个分支元素中第 $i+1$ 个节点、第 i 个节点、第 $i-1$ 个节点坐标位置，m； dx_{ji} 为第 j 个分支元素中第 i 个节点控制体长度，m； $E_{T-j,i}$ 为当第 j 个分支元素中第 i 个节点位置作为火源条件下释放热量速率， $\text{kJ} \cdot \text{s}^{-1}$ ； U_j 为第 j 个巷道分支周长，m； T_i^n 、 T_i^{n-1} 分别为第 n 个时刻和第 $n-1$ 个时刻，第 i 个节点元素位置处风流温度，K； dx_j 为第 j 个分支元素中第一个节点或最后一个节点控制体长度，m； T_{j1}^n 、 T_{j1}^{n-1} 分别为第 n 个时刻和第 $n-1$ 个时刻，与第 i 个节点元素相关联的第 j 个分支元素中第一个控制体风流温度，K； m 为与第 i 个节点元素相关联的分支元素数量； W_j 为第 j 个分支元素中第一个节点或最后一个节点对应的巷道壁面温度，K； Δt 解算时间步长，s。

2)通风网络内风流与围岩热交换过程解算方法。巷道围岩内热传导以温差作为动力，不存在热量强迫传递方向，故选用有限差分 C-N 离散格式对巷壁围岩内非稳态传热控制方程进行离散化处理，图 6 为用于解算巷道围岩温度场的巷道围岩内部节点解算控制体划分示意图，式(13)为用于解算巷道围岩温度场的控制方程有限差分离散形式。

$$\rho_w C_{p-w} \frac{(T_i^n - T_i^{n-1})}{\Delta t} \left[(r_i + 0.5 \Delta r_i)^2 \pi - (r_i - 0.5 \Delta r_i)^2 \pi \right] = -\lambda \pi (r_i - 0.5 \Delta r_i) \frac{T_i^n + T_i^{n-1} - T_{i-1}^n - T_{i-1}^{n-1}}{r_i - r_{i-1}} + \lambda \pi (r_i + 0.5 \Delta r_i) \frac{T_{i,j}^n + T_{i,j}^{n-1} - T_{i+1}^n - T_{i+1}^{n-1}}{r_{i+1} - r_i} \quad (13)$$

式中： T_i^n 、 T_{i-1}^n 、 T_{i+1}^n 分别为第 n 个时刻巷道围岩内第 i 个节点、第 $i-1$ 个节点、第 $i+1$ 个节点位置处围岩温度，K； T_i^{n-1} 、 T_{i-1}^{n-1} 、 T_{i+1}^{n-1} 分别为第 $n-1$ 个时刻第 i 个节点、第 $i-1$ 个节点、第 $i+1$ 个节点位置围岩温

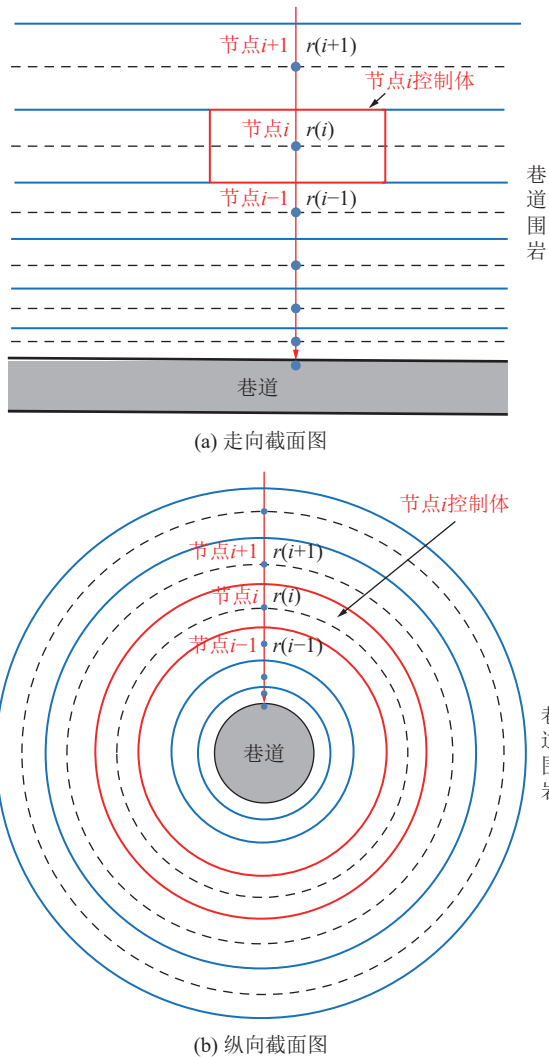


图 6 巷道围岩内部节点控制体划分示意

Fig.6 Schematic diagram of the division of the internal node control body in the surrounding rock of the roadway

度, K ; r_i 为巷道围岩内第 i 个节点的位置, m ; Δr_i 为巷道围岩内第 i 个节点的控制体长度, m 。

$$\rho_j S_j dx_i \frac{(\varphi_{j,i,k}^n - \varphi_{j,i,k}^{n-1})}{\Delta t} + \rho_j V_j S_j \left(\frac{\varphi_{j,i-1,k}^n + \varphi_{j,i-1,k}^{n-1}}{2} - \frac{\varphi_{j,i,k}^n + \varphi_{j,i,k}^{n-1}}{2} \right) = \left[-\Gamma_k \frac{(\varphi_{j,i,k}^n + \varphi_{j,i}^{n-1})}{2} - \frac{(\varphi_{j,i-1,k}^n + \varphi_{j,i-1,k}^{n-1})}{2} \right] \frac{1}{x_i - x_{i-1}} + \left[-\Gamma_k \frac{(\varphi_{j,i,k}^n + \varphi_{j,i,k}^{n-1})}{2} - \frac{(\varphi_{j,i+1,k}^n + \varphi_{j,i+1,k}^{n-1})}{2} \right] \frac{1}{x_{i+1} - x_i} + q_{j,i,k} \quad (14)$$

$$\frac{(\varphi_{i,k}^n - \varphi_{i,k}^{n-1})}{\Delta t} \left(\sum_{j=1}^m 0.5 \rho_j S_j dx_j \right) + \sum_{j=1}^m \left[\rho_j V_j S_j \left(\frac{\varphi_{j,i-1,k}^n + \varphi_{j,i-1,k}^{n-1}}{2} - \frac{\varphi_{i,k}^n + \varphi_{i,k}^{n-1}}{2} \right) \right] = 0 \quad (15)$$

式中: $\varphi_{j,i,k}^n$ 、 $\varphi_{j,i,k}^{n-1}$ 分别为第 n 个时刻和第 $n-1$ 个时刻第 j 个分支元素中第 i 个节点位置风流中第 k 种气体组分体积分数, %; $\varphi_{j,i+1,k}^n$ 、 $\varphi_{j,i+1,k}^{n-1}$ 分别为第 n 个时刻和第 $n-1$ 个时刻第 j 个分支

3.2.2 风网结构中风流非稳态传质过程解算方法

图 7、图 8 分别为用于解算通风网络内气体组分弥散-自由扩散过程的分支元素和节点元素的解算控制体划分示意, 式(14)~式(15)分别为用于求解分支元素和节点元素风流非稳态传质控制方程的有限差分迎风离散格式。

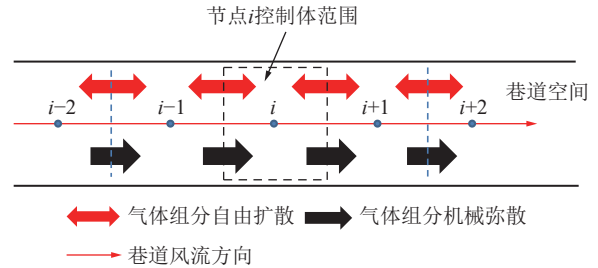


图 7 通风网络分支元素的风流传质解算网格划分示意

Fig.7 Schematic diagram of the solving meshing of the airflow quality of the branch elements of the ventilation network

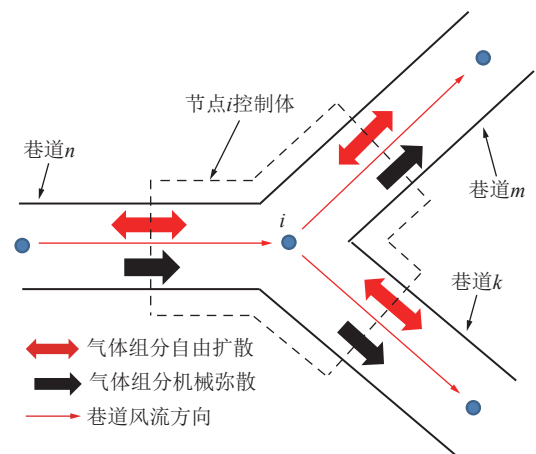


图 8 通风网络节点元素的风流传质解算网格划分示意

Fig.8 Schematic diagram of the solving meshing of the airflow quality of the node elements of the ventilation network

刻和第 $n-1$ 个时刻第 j 个分支元素中第 $i-1$ 个节点位置风流中第 k 种气体组分体积分数, %; $\varphi_{j,i+1,k}^n$ 、 $\varphi_{j,i+1,k}^{n-1}$ 分别为第 n 个时刻和第 $n-1$ 个时刻第 j 个分支

元素中第 $i+1$ 个节点位置风流中第 k 种气体组分浓度, $\%q_{i,k}$ 为第 j 个分支元素中第 i 个节点位置风流中第 k 种气体组分生成量(或者释放量), m^3/s ; $\varphi_{i,k}^n$ 、 $\varphi_{i,k}^{n-1}$ 分别为第 n 个时刻和第 $n-1$ 个时刻第 i 个节点元素位置风流第 k 种气体组分浓度, $\%$; $\varphi_{j,1,k}^n$ 、 $\varphi_{j,1,k}^{n-1}$ 分别为第 n 个时刻和第 $n-1$ 个时刻第 j 个分支元素中第一个节点位置第 k 种气体组分体积分数, $\%$ 。

3.3 外因火灾风网内风质风量失效解算流程

采用间接耦合多物理场解算方法,对风量、风温、有毒有害气体体积分数、氧体积分数组分进行联合求解,采用消元法和迭代法分别对非线性方程组和线性方程组进行求解,解算流程如图 9 所示。

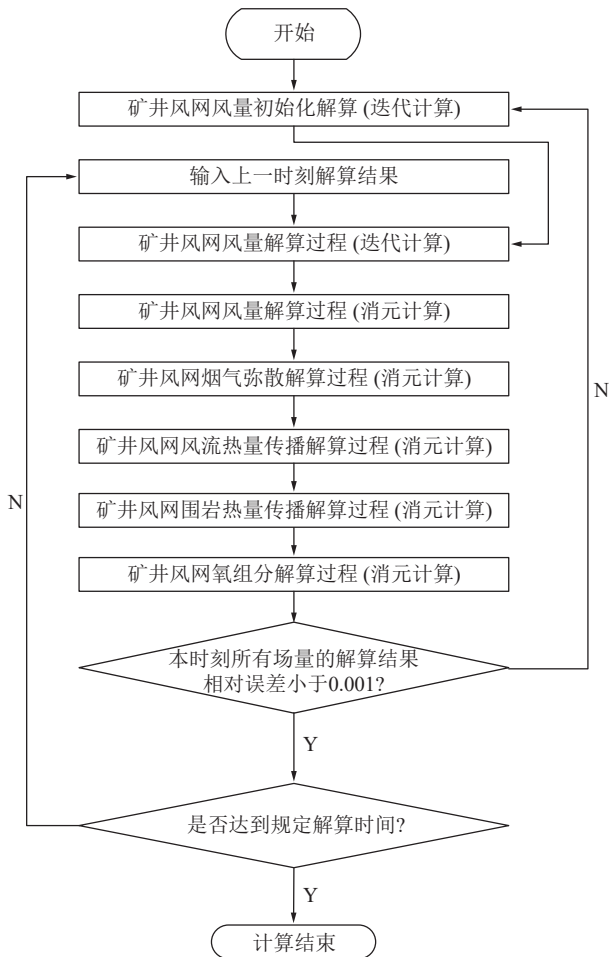


图 9 火灾时期通风网络内风质风量失效耦合解算流程

Fig.9 Coupled calculation process for failure of air volume and air flow components in ventilation network during the period of fire occurrence

4 模型准确性验证与计算应用

4.1 模型准确性与适用性验证

为了验证外因火灾风网内风质风量失效模型的适用性与准确性,在国家矿山应急救援开滦队角联

结构试验巷道中开展了外因火灾试验,试验巷道采用负压抽出式通风,试验巷道布置图和通风网络图如图 10 所示,试验中以木材燃烧作为火源,由坑木搭建木垛,燃烧物质量为 45 kg,在试验巷道节点 3、节点 4、节点 5 位置处分别布置风流温度传感器、一氧化碳传感器、氧气传感器,在试验巷道分支 e3、分支 e4、分支 e5、分支 e6 内分别布置超声波双向风速传感器,监测火灾试验过程中风质风量失效特征参数变化情况。

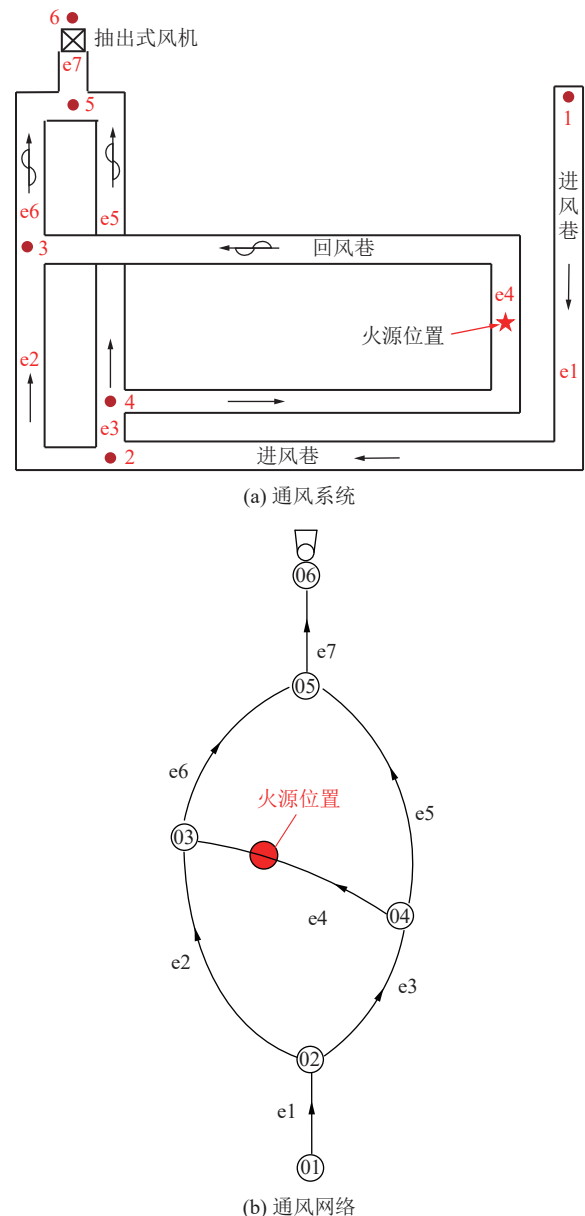


图 10 角联结构试验巷道通风系统图与通风网络图

Fig.10 Ventilation system diagram and ventilation network diagram of corner joint structure test tunnel

根据试验条件或相关文献进行火灾模拟参数取值,火灾模拟参数主要包括传热类物性参数、风机与巷道气候初始条件参数、火源特征类参数、解算设置

类参数。① 物性类参数取值通过查阅文献 [24] 进行准确取值, 共涉及 5 个参数, 具体包括空气导热系数、巷道围岩比热容、围岩与空气对流换热系数、氧气自由扩散系数、一氧化碳自由扩散系数。② 风机设备、巷道气候和巷道岩温条件参数根据实际条件或者通过查阅相关文献进行合理取值, 共涉及 11 个参数, 其中根据实际试验条件对风机特性参数(A_0 、 A_1 、 A_2)、矿井进风流温度、巷道壁面温度、进风流氧气浓度进行取值, 通过查阅文献 [25] 对巷道原始岩温、巷道围岩散热圈半径进行取值。③ 火源特征类参数, 通过查阅文献 [26-27] 进行估算得到, 共涉及 3 个参数, 具体包括火源位置生成热量速率、火源生成 CO 速率、火源消耗氧气速率。④ 数值解算设置类参数按照模拟要求进行合理取值, 共涉及 4 个参数, 具体包括模拟控制单元尺寸、风网风量解算残差、非稳态模拟时间步长、模拟时长。外因火灾模拟参数具体取值见表 1。

图 11 呈现了火灾试验过程中与火灾模拟过程中角联结构试验巷道各分支风量变化情况, 图 12—图 14 分别为灾试验过程中与火灾模拟过程中角联结构试验巷道各节点位置处风流温度、 O_2 体积分数、CO 体积分数变化情况, 风量、风流温度、 O_2 体积分

表 1 外因火灾模拟参数取值

Table 1 Parameter values for external fire simulation

序号	参数类型	参数名称	参数取值
1	物性参数	空气导热系数/($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	2.31
2		巷道围岩比热容/($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	878
3		围岩与空气对流换热系数/($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	14.75
4		氧气自由扩散系数/($m^2 \cdot s^{-1}$)	1.78×10^{-5}
5		一氧化碳自由扩散系数/($m^2 \cdot s^{-1}$)	1.43×10^{-5}
6	风机设备	风机特性参数 A_0	500
7		风机特性参数 A_1	0.1
8		风机特性参数 A_2	-0.7
9	巷道气候和巷道岩温条件参数	矿井进风流温度/ $^{\circ}C$	19.5
10		进风流氧气体积分数/%	20
11		巷道壁面温度/ $^{\circ}C$	19.0
12		巷道原始岩温/ $^{\circ}C$	45
		巷道围岩散热圈半径/m	32
14	火源特征参数	火源生成热量速率/($kJ \cdot s^{-1}$)	5.45
15		火源生成CO速率/($m^3 \cdot s^{-1}$)	0.34
16		火源消耗氧气速率/($m^3 \cdot s^{-1}$)	0.86
17	数值解算设置参数	模拟控制单元尺寸/m	0.5
18		风网风量解算残差/%	0.1
19		非稳态模拟时间步长/s	2
20		模拟时长/s	1800

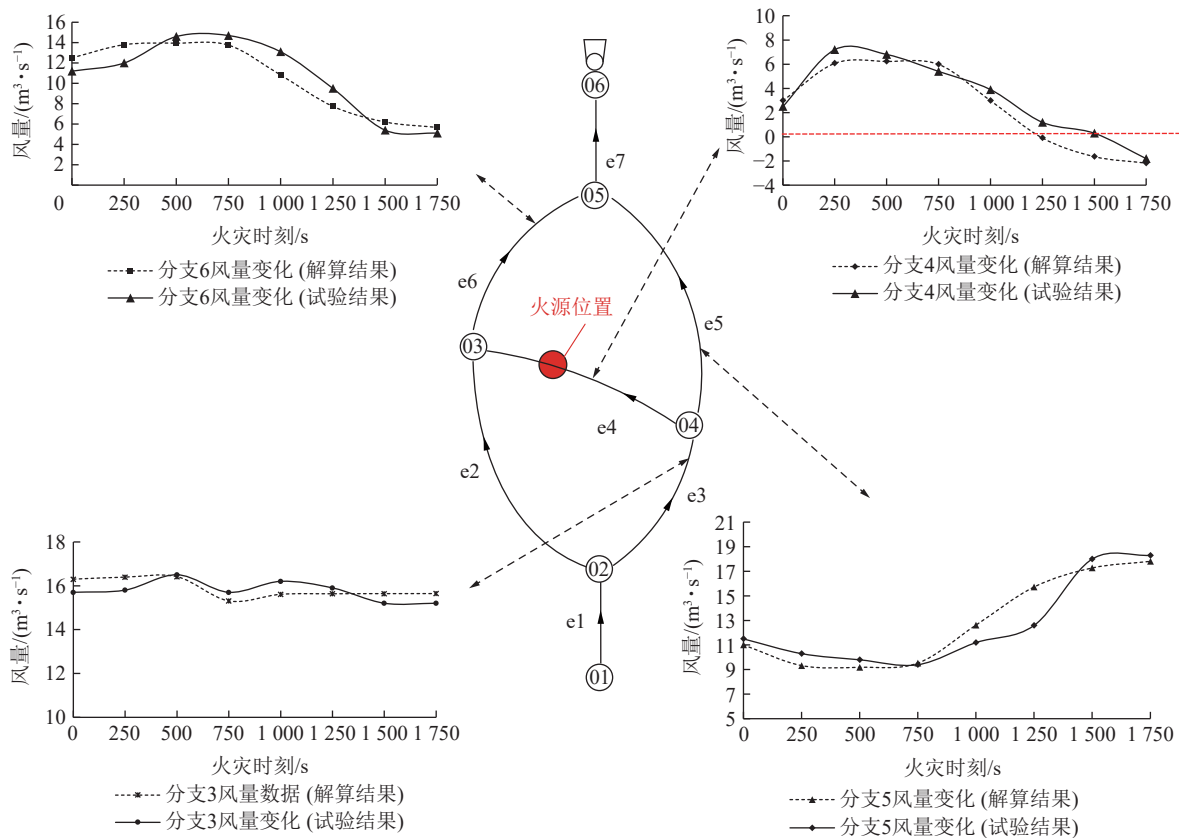


图 11 角联结构试验巷道各分支风量变化情况

Fig.11 Changes in air volume and airflow direction of branches of the corner joint structure test tunnel

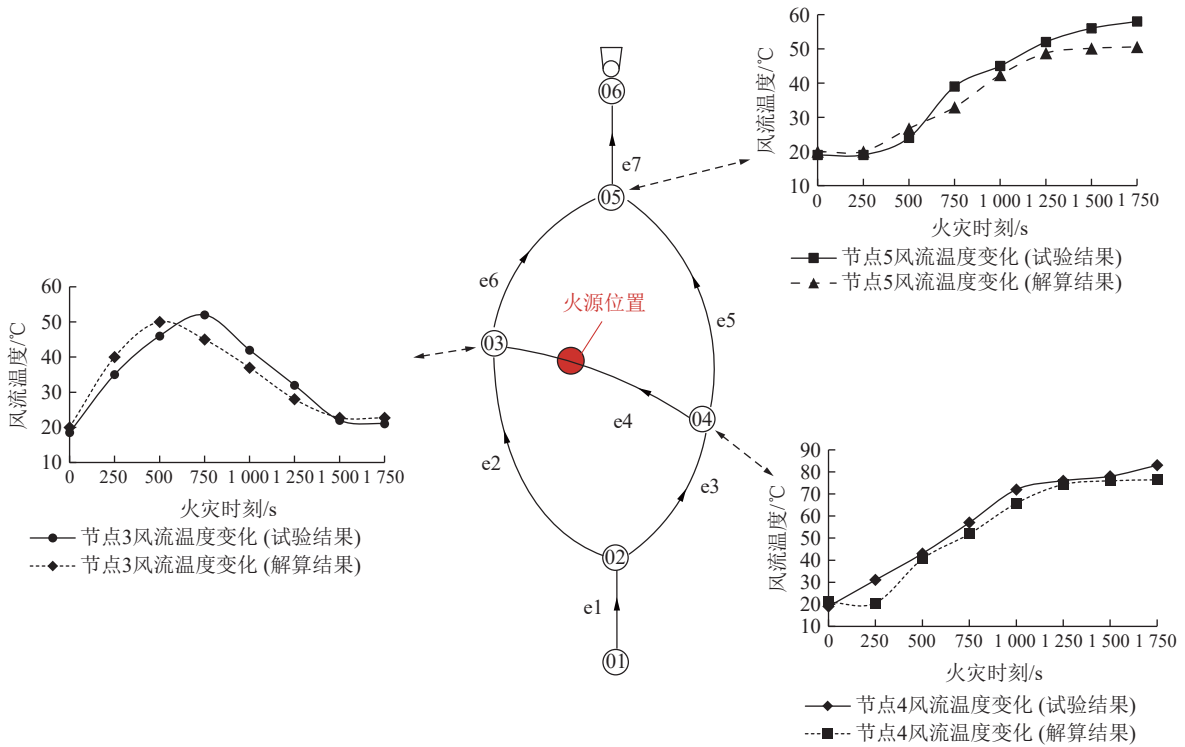


图 12 角联结构试验巷道各节点风流温度变化情况

Fig.12 Changes in temperature of airflow at each node of the corner joint structure test tunnel

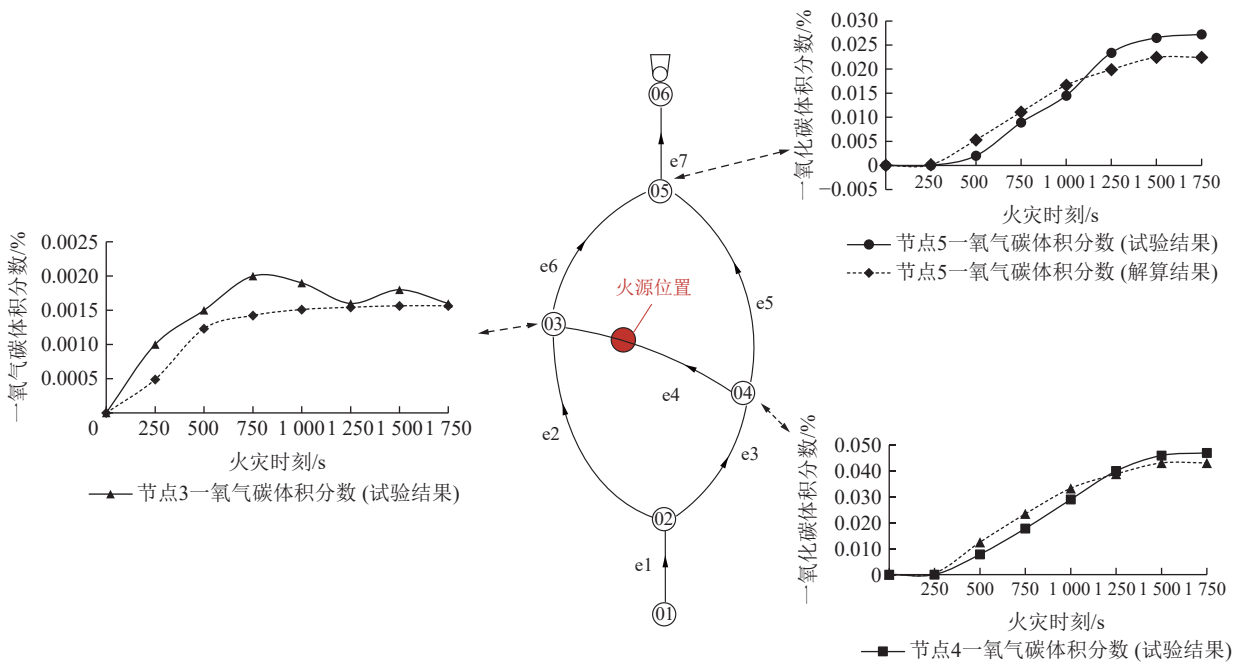


图 13 角联结构试验巷道各节点风流 CO 体积分数变化情况

Fig.13 Changes in CO volume fraction of airflow at each node of the corner joint structure test tunnel

数、CO 体积分数变化解算结果与试验结果呈现较好的一致性变化,表明模型具有较好的适用性与准确性。

4.2 复杂通风网络模型计算应用

1)计算参数设置。通过角联结构巷道试验验证

了外因火灾风网内风质风量失效过程耦合解算方法的准确性,利用该解算方法对较为复杂通风网络火灾时期矿井通风系统中风量风质变化规律进行模拟研究,模拟设计的通风网络如图 15 所示,包括 63 条巷道分支、36 个巷道节点,其中分支 e1、分支 e2、分

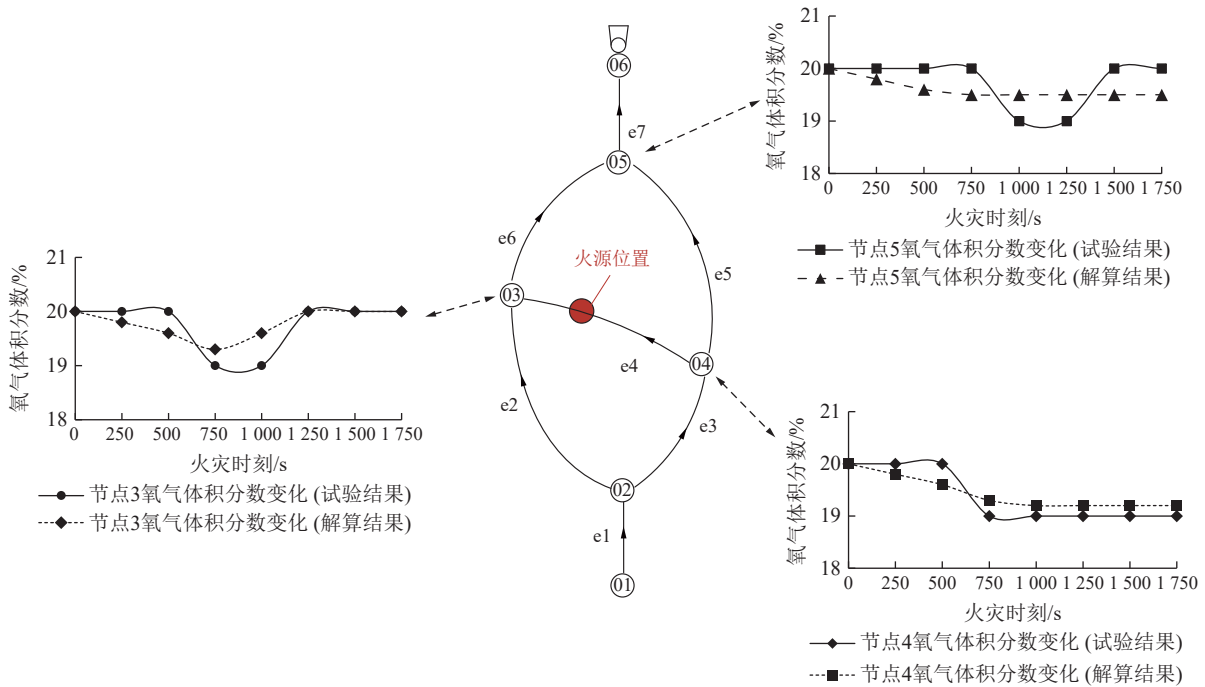


图 14 角联结构试验巷道各节点风流 O₂ 体积分数变化情况

Fig.14 Changes in O₂ volume fraction of airflow at each node of the corner joint structure test tunnel

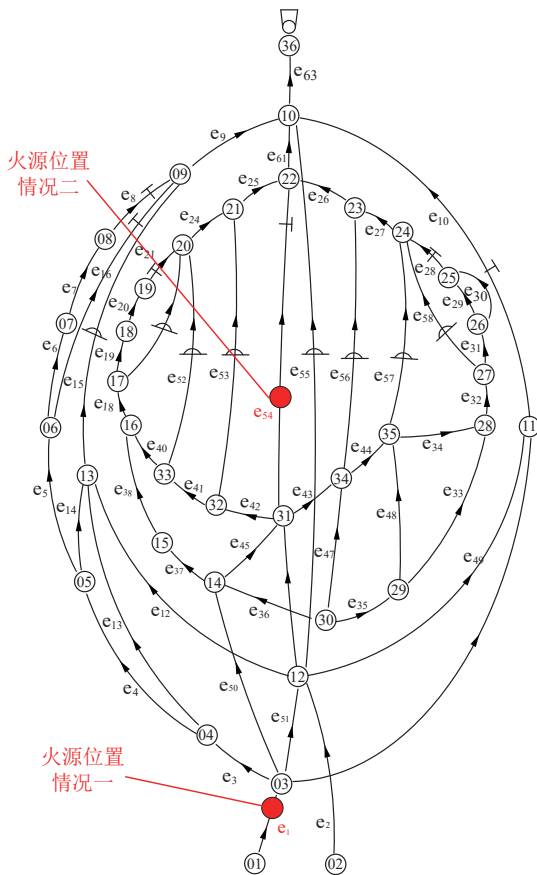


图 15 通风网络

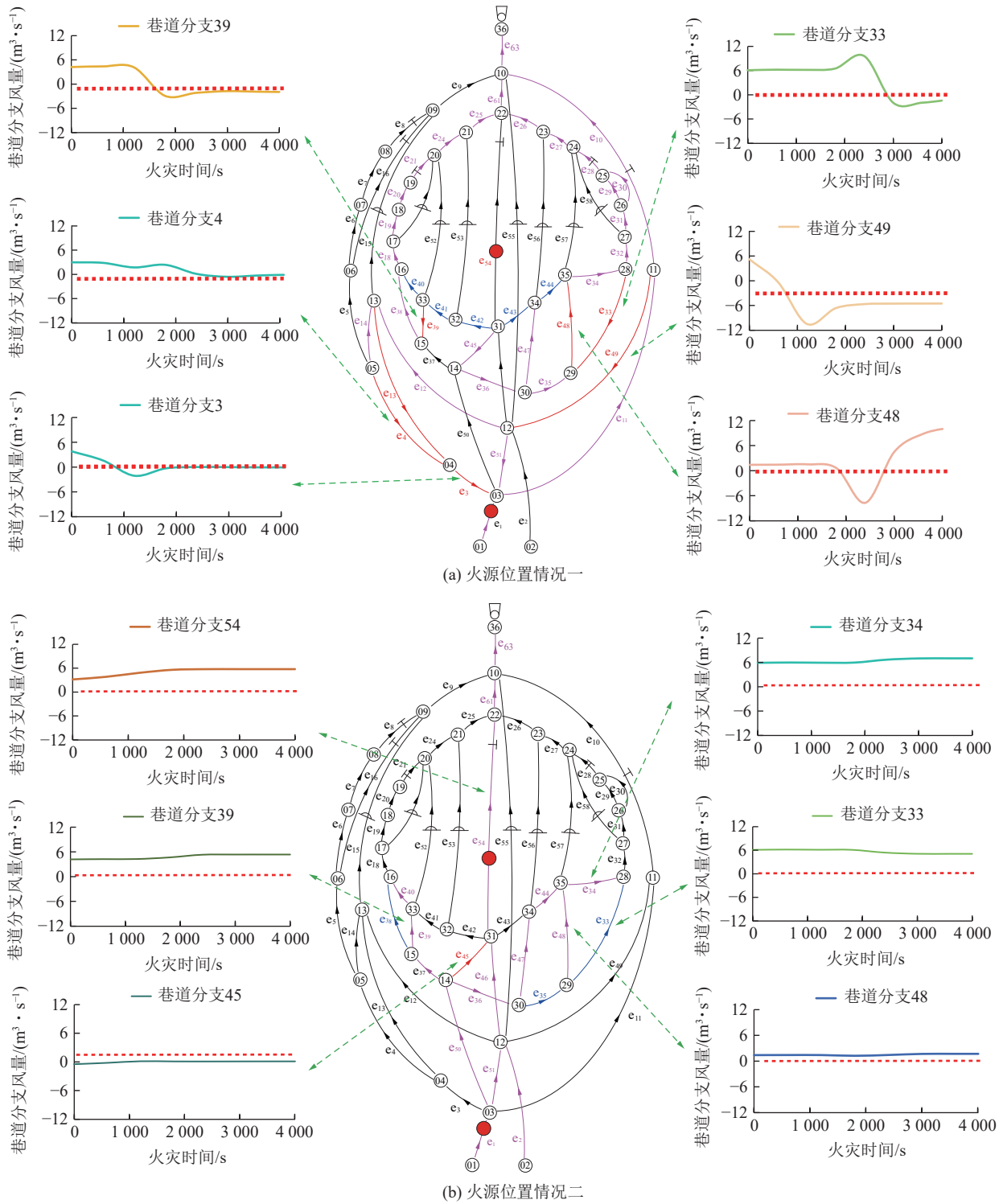
Fig.15 Ventilation network diagram

支 e63 分别为主井、副井、回风井。分别对进风井 (分支 e1)、硐室或者回采工作面 (分支 e54) 火源位

置情况下通风网络内风量风质变化进行模拟, 火源具体位置如图 15 所示, 火灾模拟中风机特性参数取值为 2 800(A_0 值)、16(A_1 值)、-0.34(A_2 值), 其他火灾模拟参数按表 1 进行取值。

2)通风网络风量风向变化模拟结果分析。图 16 为外因火灾发生 30 min 后通风网络分支风量风向变化模拟结果, 火源位置情况一条件下风量显著变化分支占通风网络分支总数的 61%, 其中 7 条分支发生风流逆转, 占通风网络分支总数的 11%, 且出现同一分支出现风量多次逆转现象, 分支逆转之后风量均逐渐趋于稳定且风量值较小; 火源位置情况二条件下风量显著变化分支占通风网络分支总数的 28%, 仅 1 条分支发生风流逆转。模拟结果表明进风井分支发生火灾, 对通风网络分支风量风向影响相对显著。

图 17 为外因火灾发生 30 min 后通风网络内分支风温变化模拟结果, 火源位置情况一条件下风温显著变化分支数量达到 48 条, 占通风网络分支总数的 76%, 遍布全矿井范围, 且分支风温变化幅较大; 火源位置情况二条件下风温显著变化分数量为 22 条, 占通风网络分支总数的 35%, 分布较为集中, 灾源产生热量直接随风流进入回风, 与灾源分支相连的分支风流在风流热传导作用下有一定温升, 但温升幅度相对较小, 不超过 1℃。模拟结果表明进风井分支发生火灾, 对通风网络分支风温影响相对显著。



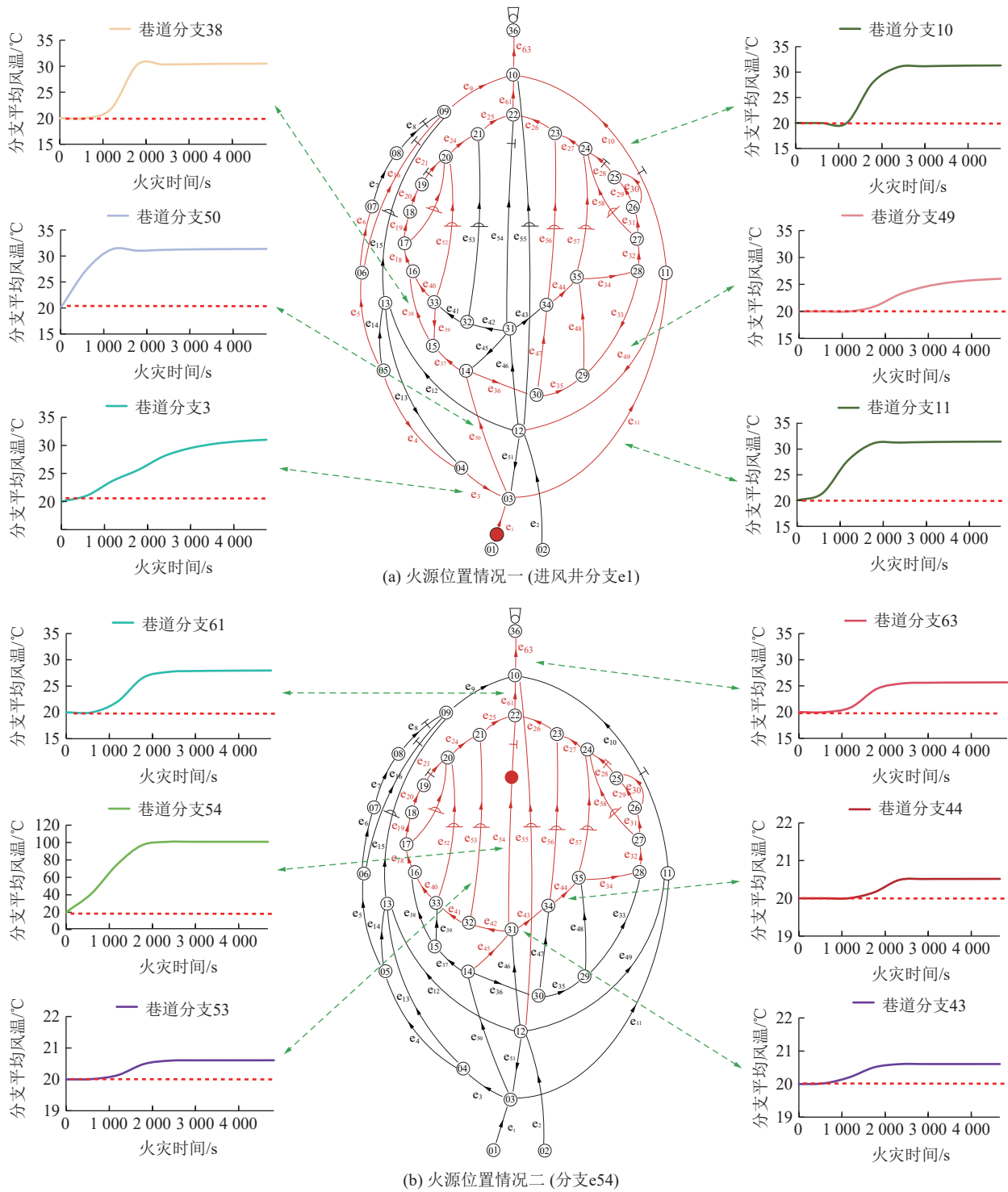
注：粉色分支代表分支风量增大；蓝色分支代表分支风量减小；红色分支代表分支风流逆转。

图 16 火灾发生 30 min 之后通风网络内分支风量风向变化模拟结果

Fig.16 Simulation results of changes in air volume and airflow direction of branches in the ventilation network after 30 minutes of fire

图 18 为外因火灾发生 30 min 后通风网络内分支 CO 蔓延模拟结果,火源位置情况一条件下 CO 侵入分支数量达到 53 条,占通风网络分支总数的 84%,通风网络内 CO 蔓延范围最广,分支 CO 体积分数变化幅较大;火源位置情况二条件下 CO 侵入分支数量

达到 8 条,占通风网络分支总数的 13%,通风网络内 CO 蔓延范围小,火源产生 CO 直接进入回风井,主要依靠自由扩散向灾分支相联的分支进行蔓延,导致分支 CO 体积分数较低。研究表明风流中有毒有害气体自由扩散过程对通风网络内传热传质影响程



注：红色分支代表风温变化分支
 图 17 火灾发生 30 min 之后通风网络分支风温变化模拟结果

Fig.17 Simulation results of airflow temperature changes of branches in ventilation network after 30 minutes of fire

度明显弱于气体机械弥散过程。

图 19 为外因火灾发生 30 min 后通风网络内分支氧浓度变化模拟结果, 火灾发生早期阶段, 火源位置情况一条件下氧气体积分数显著变化分支数量达到 26 条, 占通风网络分支总数的 41%, 分支氧气体

积分数变化较为显著, 分支氧气体积分数平均值逐渐趋于稳定; 火源位置情况二条件下氧气体积分数显著变化分支数量达到 5 条, 分支氧气体积分数平均值逐渐趋于稳定; 火源所在分支因分支风量波动变化, 分支氧气体积分数平均值变化呈现“波浪形”下降变化。

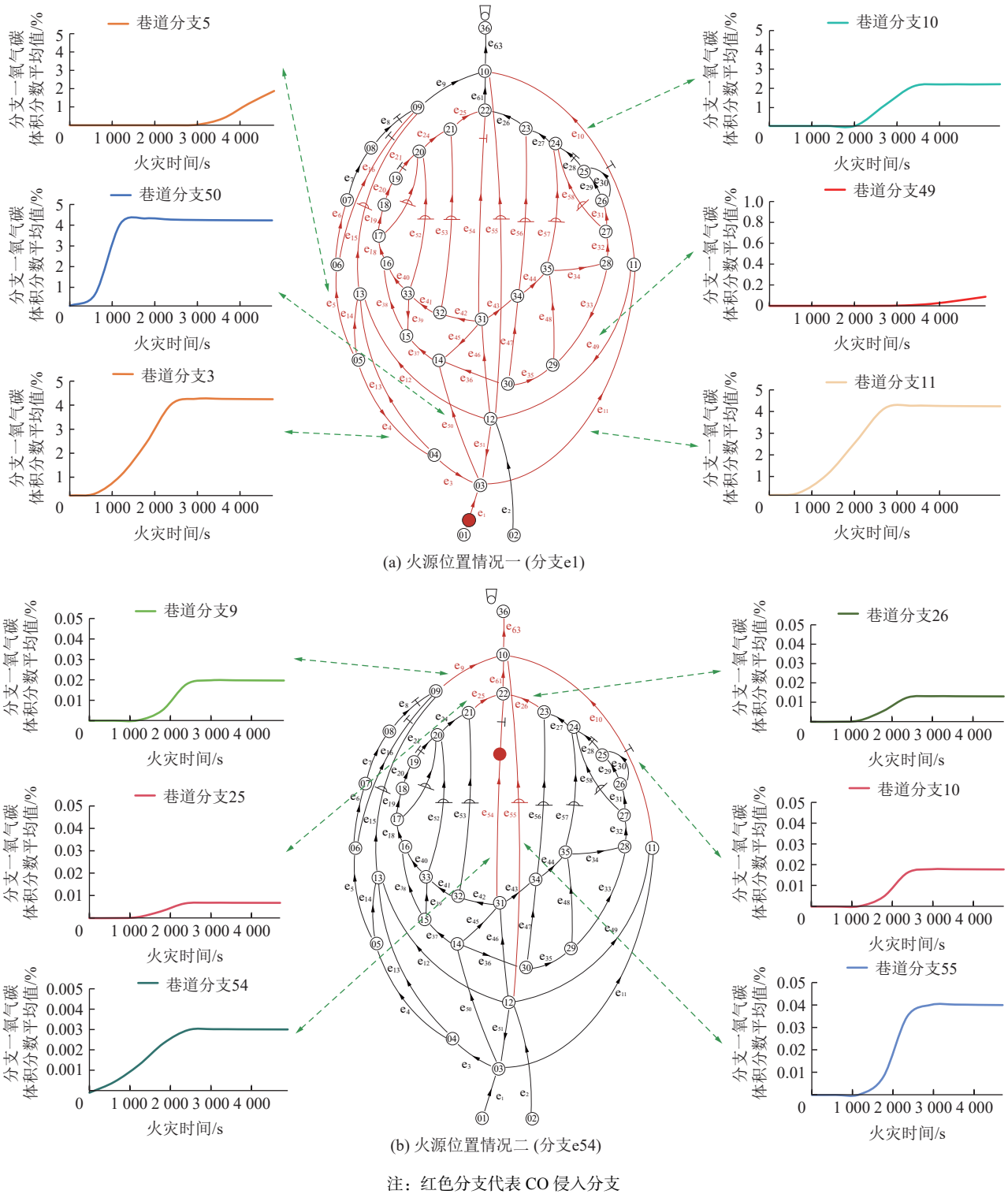


图 18 外因火灾发生 30 min 后通风网络内分支 CO 蔓延模拟结果

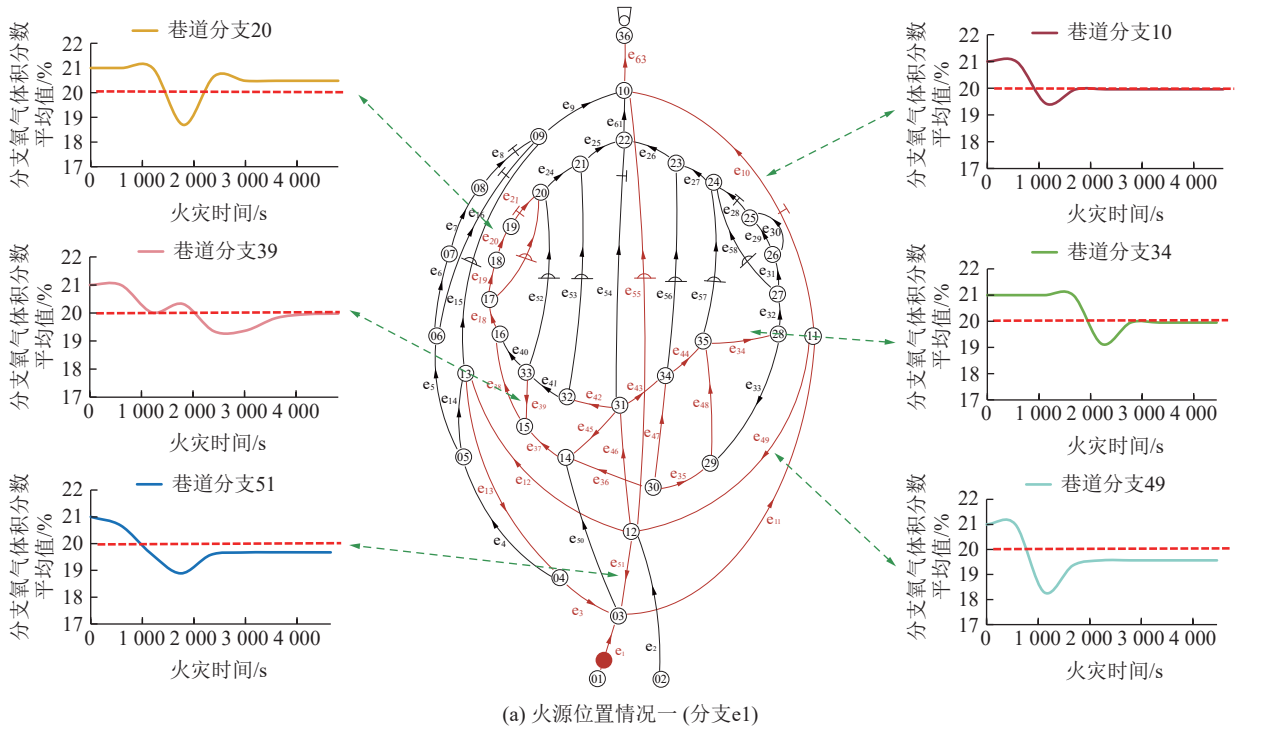
Fig.18 Simulation results of CO spread of branches in the ventilation network after 30 minutes of fire

5 结 论

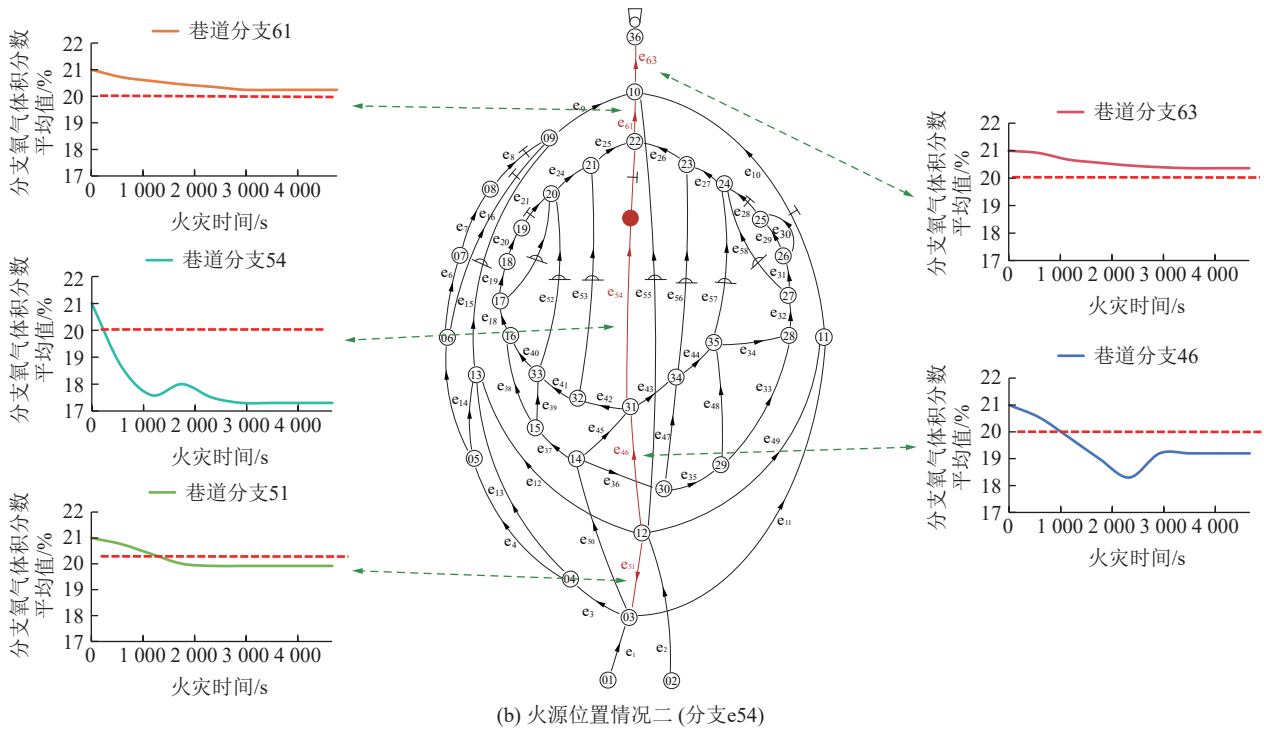
1)以通风网络内传热传质耦合作用机制为基础,构建并联合了基于质量流量守恒的通风网络解算方程、考虑围岩换热的通风网络风温非稳态预测控制方程、通风网络有毒有害气体非稳态机械弥散-扩散

控制方程、通风网络氧气非稳态消耗-运输控制方程,以及风流密度、风阻、火风压等耦合参量计算模型,形成了外因火灾风网内风量风质失效数学模型。

2)将回路风量法与有限差分法进行有机结合,采用牛顿法解算通风网络风量风向变化过程,将风网络结构划分为分支元素控制体和节点元素控制体,



(a) 火源位置情况一 (分支e1)



(b) 火源位置情况二 (分支e54)

注：红色分支代表氧浓度降低分支

图 19 外因火灾发生 30 min 后通风网络内分支氧气体积分数变化模拟结果

Fig.19 Simulation results of oxygen volume fraction changes of branches in the ventilation network after 30 minutes of fire

采用有限差分迎风流离散格式解算确定风流方向分支内风流传热传质过程, 构建了外因火灾风网内风量风质失效模拟算法。

3) 通过在角联结构试验巷道内开展了外因火灾试验, 初步验证了模型的准确性与适用性, 对不同火源位置条件下较为复杂的通风网络内风流逆转、有

毒有害气体蔓延、风温变化、氧浓度变化过程进行定模拟解算, 模拟结果表明火源位置在进风井条件下风量显著变化分支达到通风网络分支总数的 61%, 风流逆转分支占通风网络分支总数的 11%, 风温显著变化分支数量达到通风网络分支总数的 76%, CO 侵入分支数量达到通风网络分支总数的 84%, 氧浓

度显著变化分支数量达到通风网络分支总数的 41%, 进风井分支发生外因火灾造成的灾害影响范围和影响强度均明显大于其他分支。

参考文献(References):

- [1] 王德明, 邵振鲁, 朱云飞. 煤矿热动力重大灾害中的几个科学问题[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 57-64.
WANG Deming, SHAO Zhenlu, ZHU Yunfei. Several scientific issues on major thermodynamic disasters in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 57-64.
- [2] 王德明, 张伟, 王和堂, 等. 煤矿热动力重大灾害的不确定性风险特性研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(4): 826-837.
WANG Deming, ZHANG Wei, WANG Hetang, et al. Uncertain risk characteristics of major thermodynamic disasters in underground coal mines[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(4): 826-837.
- [3] 周福宝, 辛海会, 魏连江, 等. 矿井智能通风理论与技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 313-328.
ZHOU Fubao, XIN Haihui, WEI Lianjiang, et al. Research progress of mine intelligent ventilation theory and technology[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 313-328.
- [4] 张浪, 刘彦青. 矿井智能通风与关键技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 178-195.
ZHANG Lang, LIU Yanqing. Research on technology of key steps of intelligent ventilation in mines[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 178-195.
- [5] 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.
- [6] 张春华, 康璇, 申嘉辉. 矿井 L 形巷道火灾蔓延规律模拟研究[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(6): 3111-3118.
ZHANG Chunhua, KANG Xuan, SHEN Jiahui. Simulation study on fire spread law of L-shaped roadway in mine[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(6): 3111-3118.
- [7] 田水承, 窦培谦, 张成镇. 基于 Pyrosim 的风速对矿井火灾蔓延规律影响研究[J]. 金属矿山, 2020(2): 199-204.
TIAN Shuicheng, DOU Peiqian, ZHANG Chengzhen. Impact of different wind speeds on the law of mine fire spread based on pyrosim[J]. Metal Mine, 2020(2): 199-204.
- [8] 刘雨晴, 张培红. 大坡度倾斜巷道火灾烟气温度分布特征研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(4): 156-162.
LIU Yuqing, ZHANG Peihong. Study on fire-induced smoke temperature distribution characteristics in largely inclined roadway[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(4): 156-162.
- [9] 李宗翔, 王海文, 李腾, 等. 下行风流火灾管道试验与烟流动力特征研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(2): 391-396.
LI Zongxiang, WANG Haiwen, LI Teng, et al. Downstream airflow fire dust test and smoke flow dynamic characteristics study[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(2): 391-396.
- [10] 李晴, 康建宏, 周福宝, 等. 全尺寸巷/隧道火灾风烟流温度预测模型与验证[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(8): 5-12.
LI Qing, KANG Jianhong, ZHOU Fubao, et al. Prediction model and verification of smoke flow temperature in full-scale roadway/tunnel fires[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(8): 5-12.
- [11] 马砺, 张鹏宇, 李超华, 等. 不同封堵条件下巷道火灾烟气温度场预测模型[J]. 西安科技大学学报, 2021, 41(2): 213-220.
MA Li, ZHANG Pengyu, LI Chaohua, et al. Prediction model of roadway fire temperature field under different plugging conditions[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2021, 41(2): 213-220.
- [12] 王海燕, 徐祚卉, 徐良伟, 等. 矿井火灾时期火源分支巷道风阻变化趋势试验研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(8): 2661-2668.
WANG Haiyan, XU Zuohui, XU Liangwei, et al. Experimental study on the variation law of wind resistance in branch roadway of fire source during mine fire[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(8): 2661-2668.
- [13] 白志鹏, 王南, 杜珮颖, 等. 矿井复杂管网内有害气体的非稳态运移模型与试验研究[J]. 煤炭工程, 2021, 53(11): 135-139.
BAI Zhipeng, WANG Nan, DU Peiying, et al. Unsteady migration model of harmful gas in complex pipe network of mine and the experiment verification[J]. Coal Engineering, 2021, 53(11): 135-139.
- [14] 周福宝, 王德明. 矿山通风网络火灾的计算机仿真模拟[J]. 金属矿山, 2008(2): 115-117, 151.
ZHOU Fubao, WANG Deming. Computer simulation of mine fire of ventilation network[J]. Metal Mine, 2008(2): 115-117, 151.
- [15] 李贺, 田丽, 曾钢, 等. 基于 FDS 的风速对矿井火灾蔓延规律的影响研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(5): 143-149.
LI He, TIAN Li, ZENG Gang, et al. Study on influence of wind speed on spread law of mine fire based on FDS[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(5): 143-149.
- [16] 戚宜欣, 王省身, 鲍庆国. 矿井火灾时期风流流动及通风系统变化的动态模拟[J]. 中国矿业大学学报, 1995, 24(3): 19-23.
QI Yixin, WANG Xingshen, BAO Qingguo. Dynamic simulation of the flow of mine air and the change of ventilation systems during mine fire[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1995, 24(3): 19-23.
- [17] 李宗翔, 王雅迪, 李林. 上行风流火灾 3D 矿井通风系统灾变过程仿真[J]. 煤炭学报, 2015, 40(1): 115-121.
LI Zongxiang, WANG Yadi, LI Lin. 3D simulation of disaster process in mine ventilation system during fire period[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 115-121.
- [18] 李宗翔, 张慧博, 路宝生, 等. 矿井系统下行风流火灾试验与 TF1M3D 平台仿真研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(1): 30-34.
LI Zongxiang, ZHANG Huibo, LU Baosheng, et al. Research of test and TF1M3D platform simulation on descending airflow fire in mine[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(1): 30-34.
- [19] 张明乾, 李宗翔, 李腾, 等. 矿井网域系统上行火灾灾情演变特

- 征研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(S2): 785-792.
- ZHANG Mingqian, LI Zongxiang, LI Teng, et al. Experiments of mine fire in ascensional airflow and the mine fire control simulation[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S2): 785-792.
- [20] 张景钢, 孙春峰, 张海洋, 等. 矿井火灾模拟解算软件开发研究[J]. 华北科技学院学报, 2015, 12(1): 30-35.
- ZHANG Jinggang, SUN Chunfeng, ZHANG Haiyang, et al. Development & research of simulation calculating software of mine fire simulation[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2015, 12(1): 30-35.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 李翠平, 曹志国, 钟媛. 矿井火灾的场量模型构建及其可视化仿真[J]. 煤炭学报, 2015, 40(4): 902-908.
- LI Cuiping, CAO Zhiguo, ZHONG Yuan. Field variables modeling and visualization simulation of fire disaster in underground mine[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(4): 902-908.
- [24] 傅培舫. 实际巷道火灾过程热物理参数变化规律与计算机仿真的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2002.
- FU Peifang. Study on variation law of thermophysical parameters and computer simulation in actual roadway fire process[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2002.
- [25] 高建良, 杨明. 巷道围岩温度分布及调热圈半径的影响因素分析[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(2): 73-76.
- GAO Jianliang, YANG Ming. Analysis of the factors influencing temperature distribution of surrounding rock and cooled zone radius[J]. China Safety Science Journal, 2005, 15(2): 73-76.
- [26] 周心权, 吴兵. 矿井火灾救灾理论与实践[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996.
- [27] 姚勇征, 张文明, 吴兵, 等. 巷道火灾对通风系统影响的全尺寸试验与模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(4): 709-715.
- YAO Yongzheng, ZHANG Wenming, WU Bing, et al. Full-scale experimental and simulation study of the influences of laneway fire on ventilation system[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(4): 709-715.