

矿井网域系统上行火灾灾情演变特征研究

张明乾¹,李宗翔^{1,2},李 腾³,王海文¹,许昊宇¹,杨志斌¹

(1. 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院,辽宁 阜新 123000;2. 辽宁工程技术大学 安全科学与工程研究院,辽宁 阜新 123000;3. 苏州金像电子有限公司,江苏 苏州 215000)

摘要:矿井火灾通风系统紊乱及其灾情演变特征是当前矿井火灾研究的热点问题。通过实验得到不同通风能力时上行风流火灾主干风路和旁侧支路温度与风量变化规律。运用矿井物理通风仿真TF1M3D软件,结合算例矿井,详细描述全域矿井的上行通风火灾变化及通风系统紊乱过程。研究表明,在矿井系统中,火灾燃烧作为非控制性能量释放热动力源,其火风压与矿井通风动力相互作用,导致矿井风流紊乱。随着火势不断增强,上行风流火灾可以导致旁侧支路风量的降低、停滞和逆变化,在复杂风网中引发烟流沿某一回路形成大流循环,扩大灾害,影响救灾。提高通风机能力,可以降低旁侧支路的通风热阻力增量,避免旁侧支路发生风流逆转,TF1M3D仿真结果表明,当算例矿井风机转数从540 r/min提高到740 r/min时,克服了上行风流火灾引起旁侧支路402工作面的烟流逆转。从变化规律上,理论结果与实验结果相印证。

关键词:火灾实验;灾变通风;TF1M3D平台;系统紊乱;应急管理

中图分类号:TD752.2 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2021)S2-0785-08

Experiments of mine fire in ascensional airflow and the mine fire control simulation

ZHANG Mingqian¹, LI Zongxiang^{1,2}, LI Teng³, WANG Haiwen¹, XU Haoyu¹, YANG Zhibin¹

(1. College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Research Institute of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 3. Suzhou Gold Circuit Co., Ltd., Suzhou 215000, China)

Abstract: That disordered characteristics and its disaster evolution characteristics of mine ventilation system caused by as-censional airflow fire is a focus of mine fire research. Through repeated experiments, the variation laws of temperature and air volume in main and side branches of ventilation system with different ventilation capacity due to ascensional airflow fire are obtained. Using the TF1M(3D), a catastrophic ventilation simulation software, to solve the problems of mine physical ventilation, combined with the analysis on the example, the variation of ascensional airflow fire and the process of disordered ventilation system in the whole mine are described in detail. It is shown that in the mine ventilation system, the combustion plays a role of the power source of non-controlled energy release, and its fire pressure interacts with the thermal resistance of mine ventilation, which directly causes the airflow disorder of the mine ventilation system. As the fire intensifies, the ascensional airflow fire can cause the airflow in side branch to decrease, stagnate or even reverse, which may lead to the expansion of the disaster and seriously affect the

收稿日期:2021-05-21 修回日期:2021-07-21 责任编辑:王晓珍 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2021.0873

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51774170);国家重点研发计划资助项目(2018YFC0807900, 2018YFC0808105)

作者简介:张明乾(1991—),男,辽宁丹东人,博士研究生。E-mail:zmq1991@126.com

通讯作者:李宗翔(1962—),男,黑龙江绥化人,教授,博士生导师,博士。E-mail:lxz6211@126.com

引用格式: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.



移动阅读

speed of disaster relief. Improving the fan supply capacity can not only reduce the ventilation thermal resistance increment of the side branch, but also avoid the airflow reversal of the side branch at the same time. The simulation results using the software TF1M3D demonstrate that when the speed of mine fan increases from 540 r/min to 740 r/min, the reversal of smoke flow in the side branch (the 402 working face) caused by ascensional airflow fire is overcome. In terms of variation law, the theoretical results and the experimental results are mutually verified.

Key words: fire test; disaster ventilation; TF1M3D; system disorder; emergency management

矿井上行风流火灾使通风系统风流紊乱,甚至会导致旁侧支路的风流逆转^[1],造成灾情意外扩大。例如,2020年9月27日重庆能源集团松藻煤矿发生一起火灾。长期以来,针对井下火灾烟流蔓延、温度传播和风流变化等开展了大量的实验研究和软件仿真工作^[2-7]。包括输送机输送带燃烧实验^[2-3]、火灾巷道临界风速进行研究^[4-11], ATKINSON等^[11]通过大量试验研究了巷道坡度对火灾烟流运动的影响规律等。周福宝等^[12]通过下行通风角联网络火灾模拟实验,揭示了高温烟气流与风流分层流动。在矿井火灾软件仿真方面,常心坦^[13]编译了CFIRE软件,王德明等^[14]编制了火灾时期最佳救灾和避灾路线的决策软件。邢玉忠^[15]结合AutoCAD开发了可视化的三维矿井通风系统软件,研究矿井火灾时期火灾烟流蔓延过程,给出矿井火灾时期最佳避灾路线。周静^[16]利用C#.NET平台等计算机技术设计了矿井火灾应急救援管理系统,提高了企业灾害救援的决策能力和反应能力。李宗翔等^[17]提出了质-能有源风网理论,开发了矿井通风物理热动力学仿真系统TF1M3D,实现了矿井系统除风流风量-阻力外的温度、湿度、密度、瓦斯等多组分气体浓度全参数动态分布的描述,并对矿井上行风流火灾灾害蔓延及通风系统紊乱过程进行仿真分析。李腾^[5]应用矿井火灾烟流紊乱测试实验装置对火灾管道风流紊乱规律进行了实验研究,并应用TF1M3D平台对矿井全网域火灾进行的数值模拟。

从以上研究的发展趋势看,以应急控灾减灾为目的的矿井火灾研究,与矿井火灾应急救援管理系统密不可分,应运用灾变通风仿真技术反映矿井系统整体性的抗灾能力;运用先进的决策平台,最大程度降低火灾损失。目前,针对矿井空间网域的物理力学通风仿真平台研究是热点问题。这里利用矿井火灾烟流测试装置,结合TF1M3D仿真平台,对矿井上行风流火灾烟流蔓延及系统风流紊乱复杂过程做进一步阐述。

1 火灾时期矿井系统灾变过程的动力学仿真模型

1.1 火灾时期井巷烟流移动-弥散过程基本方程

矿井网络火灾风流移动规律及有源风网求解方

法按文献[17]所列。若假设火灾燃烧产生的烟流主要成分是CO₂,由风流中的氧燃烧后等当量转化而来,其他外源气体(如CO等)与风流相比绝对量有限,烟气源强度对风流变化产生影响,则对于网络分支 j ,巷道烟流对流扩散方程为

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} + v \frac{\partial c}{\partial x} = E_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (1)$$

式中, c 为巷道断面平均烟气浓度体积分,%; τ 为时间,s; x 为分支的位置,m; v 为巷道平均风速,m/s; E_x 为风流纵向机械弥散系数,m²/s。

1.2 火灾时期井巷烟流热交换温度变化过程基本方程

对于网络分支 j ,巷道通风温度(可燃物燃烧生产大量的水和二氧化碳,将火灾高温烟流假设为:湿度饱和风流)对流扩散微分方程为

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + v \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{W_T + a_r U(T - T_r)}{C_p \rho_j S} \quad (2)$$

式中, T 为风流温度,°C; k 为温度扩散系数,m²/s; C_p 为风流定压比热容,J/(kg·°C); ρ_j 为风流密度,kg/m³; T_r 为巷道围岩(壁)的温度,°C; S 为巷道面积,m²; U 为巷道周长,m; a_r 为巷道壁面换热系数,W/(m²·°C)。 W_T 为井巷中热源升温放热强度,J/(m·s)。

1.3 矿井火灾灾变时期分支风流参数及通风热阻力计算

火灾时期风流温度的变化引起空气密度变化,根据气体状态方程,有

$$\rho_{j,F} = \rho_{j,0} \frac{T_{j,0}}{T_{j,F}} \quad (3)$$

式中, $\rho_{j,0}, \rho_{j,F}$ 分别为火灾前后分支 j 风流平均密度,kg/m³; $T_{j,0}, T_{j,F}$ 分别为分支 j 火灾前后的绝对温度,K。

风风压的计算式为

$$h_{F,b} = \sum_{s=1}^{N_s} [p_{e,s} - p_{e,s}^{(0)}] \quad (4)$$

式中, b 为回路; s 为回路分支; N_s 为回路分支数; $p_{e,s}^{(0)}$ 为火灾前 s 上的位压差,Pa; $h_{F,b}$ 为回路火风压,Pa; $p_{e,s}$ 为火灾时期 s 上的位压差,Pa。

火灾时期巷道分支 j 的高温风流通风阻力

$$h_{r,j} = \frac{T_{j,F}}{T_{j,0}} R_{t,j} \rho_{j,0} Q_{j,0}^2 \quad (5)$$

式中, $R_{t,j}$ 为新定义的巷道几何风阻^[17], m^{-4} ; $h_{r,j}$ 为通风阻力, Pa; $Q_{j,0}$ 为未发生火灾时期的风流体积流量, m^3/s 。

风流绕火源点火焰的节流局部热阻力计算公式为

$$h'_{e,r} = \frac{1}{2} \xi \rho v^2 \quad (6)$$

式中, ρ 为通过火区的(出口)风流密度, kg/m^3 ; v 为出口风速, m/s ; ξ 为火焰局部阻力系数, 无因次。

令

$$\zeta = \left(\frac{1.7k_s}{1 - k_s} \right)^2, k_s < 1 \quad (7)$$

其中, k_s 为火焰断面积与巷道断面积之比值, 无因次。依火源类型和燃烧强度的不同, 最大火焰面积系数取值一般在 0.285 ~ 0.410。其中火源强取大值, 这里

取 $k_s = 0.4$ 。

2 矿井火灾风流紊乱过程实验

为了直观理解上行风流火灾矿井系统风流紊乱过程及特征, 运用辽宁工程技术大学火灾实验平台^[5], 通过实验验证理论规律。如图 1 所示, 装置包括升降台架、火灾主干管路和与之并联的通风管路、微型通风机及电源调压器、火源电热丝和功率调节器、风速传感器以及 5 个 J 型热电偶等。实验按弗汝德相似准则, 实验高度最高可调到 4.8 m, 实验通风管路高度为 3.8 m, 宽度为 1.2 m, 管路内径 50 mm; 主干管路为耐高温的石英管, 旁侧支路为散热性好的薄壁不锈钢管。火源电热丝位于主干风路中心位置, 通过功率调节器调节电热丝的加载电压, 模拟火源燃烧的放热强度变化。风机风量通过直流电源调压器来控制, 实验加载电压为 4.5, 5, 6 和 7.5 V 等。实验电压设置参数见表 1。

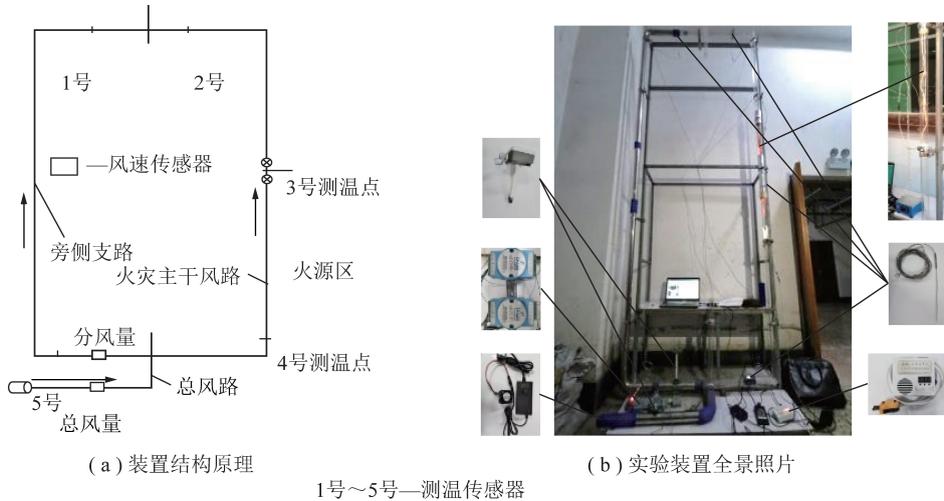


图 1 矿井火灾风流紊乱的实验装置

Fig.1 Experimental device of airflow system disorder in mine fire

表 1 火源设置参数

Table 1 Setting parameters at the source of the fire

| 时间/s | 0 | 60 | 120 | 240 | 360 | 480 | 600 | 660 | 780 |
|------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 电压/V | 0 | 180 | 220 | 220 | 180 | 160 | 110 | 80 | 0 |

3 实验结果及分析

3.1 上行风流火灾通风系统风流紊乱特征

各组实验中, 回路内风速和测点温度的变化情况如图 2 所示。上行风流火灾时, 主干风路风速 v_1 随火势的增强而增长, 最大值为 $v_{1-\max}$; 风机电压为 4.5, 5, 6 和 7.5 V 时, 对应 $v_{1-\max}$ 为 2.03, 1.87, 1.68 和 1.74 m/s , 燃烧结束时 v_1 恢复至初始原值。旁侧支路

风速 v_l 随火势的增强而降低, 风机加载电压为 4.5, 5 和 6 V 时, v_l 很快衰减, 直至风流停滞, v_l 出现负值, 风流发生逆流反向; 风机加载电压为 7.5 V 时, v_l 减弱但未发生停滞和逆流。各组实验中 v_l 的最小值 $v_{l-\min}$ 分别为 -0.32, -0.22, -0.14 和 0.02 m/s ; 当风机电压为 4.5, 5 和 6 V 时, 总风速 v_0 在实验开始阶段均出现增大, 随着火势减弱, v_0 逐渐恢复至初始值, 当通风机电压为 7.5 V 时, v_0 变化微弱, 克服旁侧支路风流逆转。

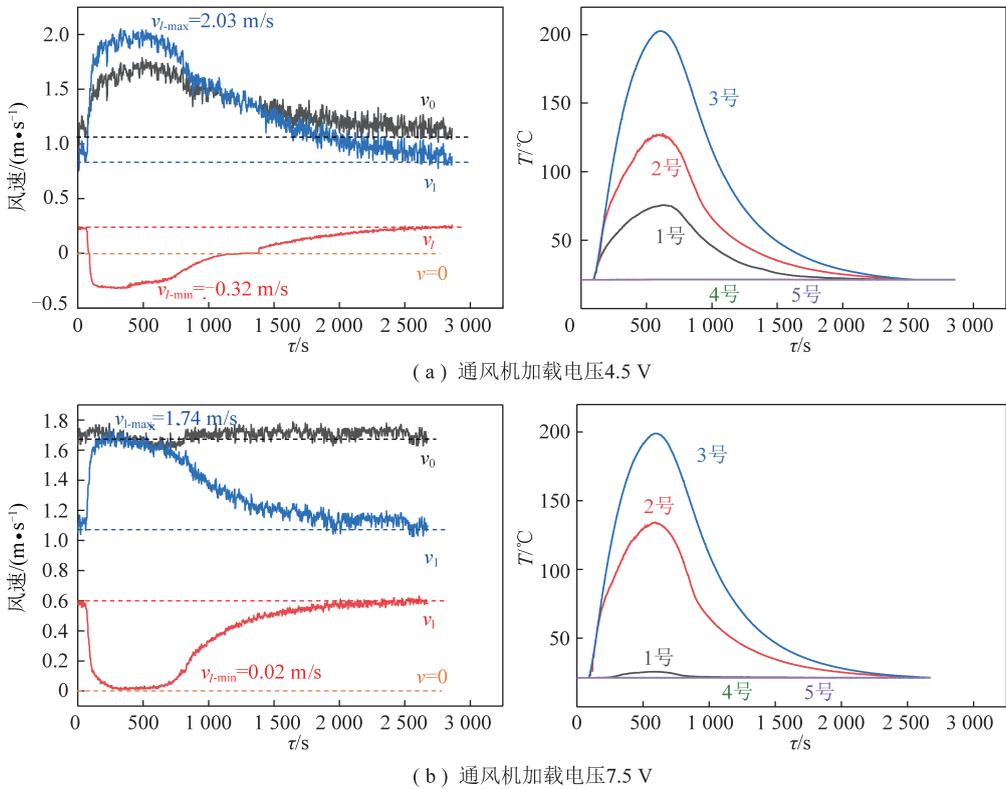


图2 实验通风机不同风机加载电压下各分支风速变化情况

Fig.2 Variable situation of the wind speed of each branch under different fan loading voltage

3.2 火风压、通风热阻力的变化特征分析

由图3(a)可知,火灾时期主干风路火风压的变化趋势大体分为初期加速增长-高峰缓慢增长-缓慢衰减3个阶段,火风压增幅随通风机能力的提高而降低,火风压峰值由4.5 V的5.50 Pa降至7.5 V的5.31 Pa。

实验表明,高温烟气主要影响范围在1,2与3号测温点之间,用2~3号段平均温度变化近似判断主干风路的通风热阻力的变化,用1~2号段的平均温度变化来表征火灾旁侧支路的平均温度变化特征,进而判断旁侧支路通风阻力的变化特征。由图3(b),(c)可知,火灾时期1~2号段的平均温度 T_{1-2} 和2~3号段的平均温度 T_{3-2} 随火势发展均表现为初期加速增长-高峰缓慢增长-缓慢衰减的变化趋势。风机电压由4.5 V增至7.5 V, T_{1-2} 的峰值为101.35, 100.85, 98.05和79.90 °C, T_{3-2} 的峰值为164.70, 168.20, 169.55和166.40 °C。受火灾升温影响系统通风热阻力增大,旁侧支路通风热阻力随风机能力的提高而减弱,在旁侧支路发生风流逆转的3组实验(风机电压为4.5,5和6 V)中,主干风路通风热阻力随风机能力增强而提高,在未发生旁侧支路风流逆转的实验组(风机电压为7.5 V)中,主干风路通风热阻力增大介于电压4.5~5 V。

随着火源燃烧强度的增大,系统中火风压和通风热阻力也增大,主干风路两端压差增大, v_1 增大;当火势发展强盛时,火风压增大,旁侧支路两端压差减小,回路内甚至出现循环风流。当提高通风机能力时,火风压增幅降低,主干风路平均温度 T_{3-2} 增大,通风阻力增大;火风压导致旁侧支路通风压力减小,平均温度 T_{1-2} 增长强度降低,通风阻力增量减小,有利于风流维持原来的方向,即提高通风系统的稳定性。

4 矿井上行风流火灾演变过程仿真

4.1 矿井上行风流火灾时期灾害演变过程

上述实验装置仅能反映简单拓扑管路系统紊乱现象,全域矿井网络火灾烟流运移和风流紊乱更复杂的情况,须运用灾变通风仿真平台。这里以TF1M3D软件描述这一过程。

如图4所示,算例矿井有401,402和403等3个采煤工作面,401和402为上行通风,403为下行通风。正常通风时期风机转数 $n=540$ r/min。火灾前401,402,403工作面风量分别为11.23,9.09,10.01 m³/s,矿井总风量为58.66 m³/s,总阻力为1 192.6 Pa,自然风压为441.79 Pa,矿井系统总风阻为0.35 N·s²/m⁸。TF1M3D仿真平台显示的矿井通

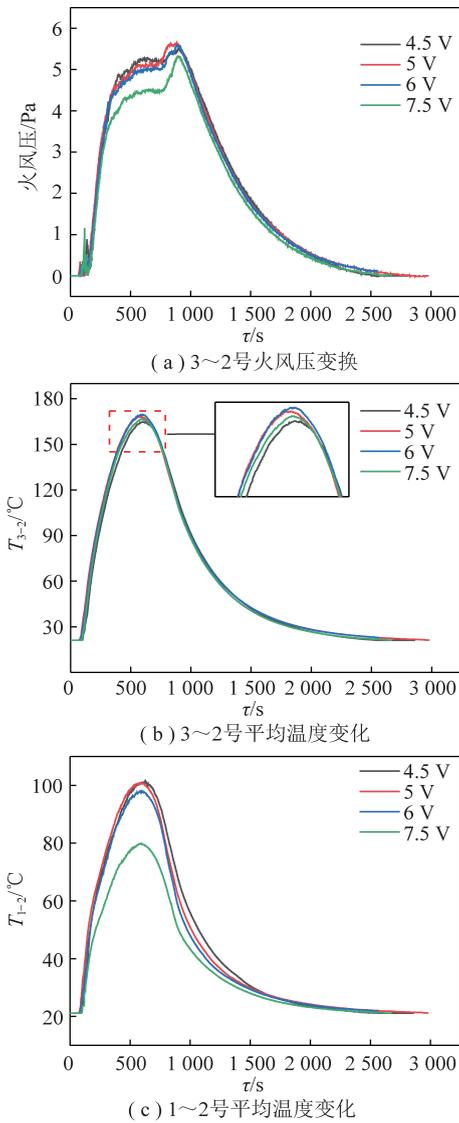


图 3 实验管路中的火风压和平均温度变化
Fig.3 Fire pressure and average temperature in ventilation lines

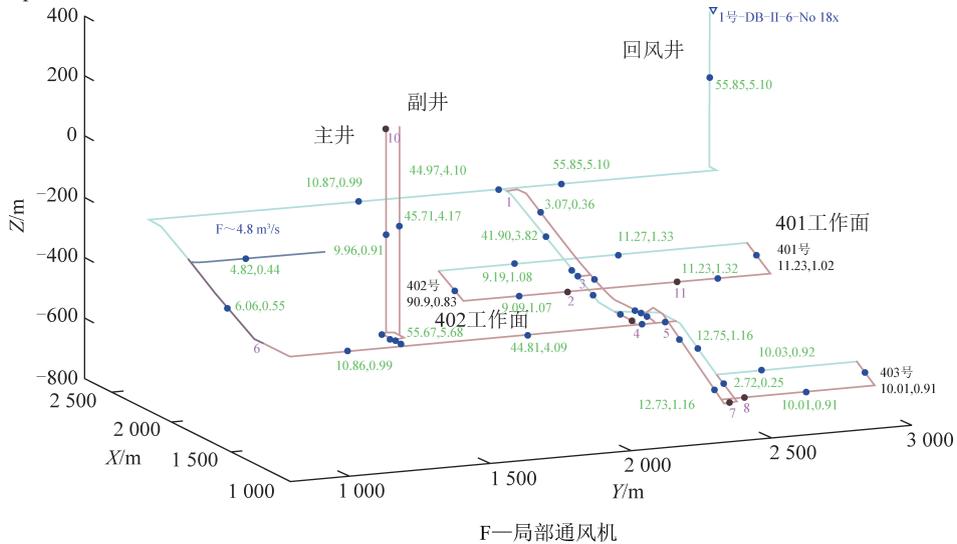


图 4 火灾前正常通风时期矿井通风系统的风量分布

Fig.4 Air volume distribution of mine ventilation system during the normal ventilation period before the fire

风系统及风流运动状态如图 4 所示,风量标注第 1 个值为风量, m^3/s ; 第 2 个值为风速, m/s ; 绿色单独标号为调节风窗标号; 分支中用金黄色“ $\circ \cdot$ ”表示风流方向,“ \cdot ”为前方; F 为局部通风机。

401 工作面高差 60 m, 设定火源点在 401 工作面进风端头附近, 为上行风流火灾。TF1M3D 仿真的预设火源燃烧模式为初期加速燃烧-高峰期-缓慢衰减(火灾模型), 燃烧总时间为 5 946 s 燃烬, 火源中心最高温度为 1 058 $^{\circ}C$ 。为了与火灾实验作对比, 火源燃烧模型与前面实验的火源模型要保持一致。

TF1M3D 给出火灾不同时刻风流、烟流浓度和温度分布动态画面共 630 幅, 如图 5, 6 所示。

火灾初始时期, 火势较弱, 烟流随进风流进入 401 工作面回风巷; 随着火势增大, 在火风压作用下, 401 回风巷内风量增大, 402 工作面风量减少、停滞, 然后出现逆流现象, 401 回风巷中的一部分高温烟流侵入到 402 回风巷中, 在第 2 055 s 时高温烟流逆流至 402 工作面, 在 2 910 s 时 402 工作面全部被侵入。主干风路的高温烟气侵入旁侧支路内, 这与实验结果一致。另一条路线, 在第 480 s 时回风上山中的高温烟流通过采区变电所 1 号调节门侵入输送带上山(旁侧支路), 导致弱风流的输送带上山发生烟流逆转。该逆流烟气在 1 920 s 时抵达 401, 402 进风巷交汇点后侵入 401 进风巷, 在 2 070 s 烟流到达 401 工作面进风端, 对 401 工作面造成烟流二次侵害, 这也与实验规律相一致。同样, 在 3 240 s 时高温烟流又蔓延到 402 进风巷, 在 4 575 s 抵达 402 工作面进风端, 在 5 115 s 时弥漫整个 402 工作面, 造成对 402 工作面的二次侵害。

当火势降低(模拟熄灭),火灾动力消失,无法维持逆流状态,在5 055 s时恢复原来的上行通风,新鲜风流将有害气体逐渐驱替,最终完全由回风井口排出。

4.2 旁侧支路运输上山风流紊乱变化

上行风流火灾旁侧支路烟流逆转,大体分为初期减风、风流停滞、风流逆转和恢复通风4个过程。图7为TF1M3D给出的火灾时期运输上山风量变化曲线。

图7中火灾发生430 s时,运输上山风量减小到0,说明在火灾热动力与矿井通风机动力及热阻力共同作用下出现的风流停滞,该变化与实验结果一致。随着火势增大,火风压增大,导致运输上山逆流,且风量迅速增加,第825 s风量最高达 $3.95 \text{ m}^3/\text{s}$;火势衰减时火风压逐渐降低,逆转风量随之减小,在第4 950 s时恢复到原通风方向,在6 915 s时恢复到原来风量值。

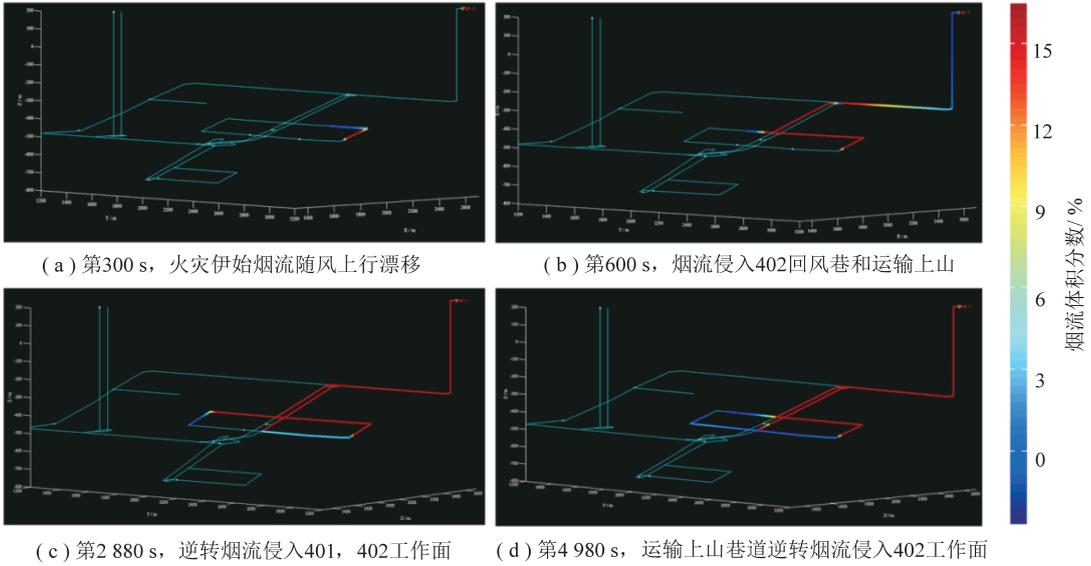


图5 上行风流火灾矿井系统烟流体积分数分布

Fig.5 Distribution of smoke concentration in mine system in ascensional airflow fire

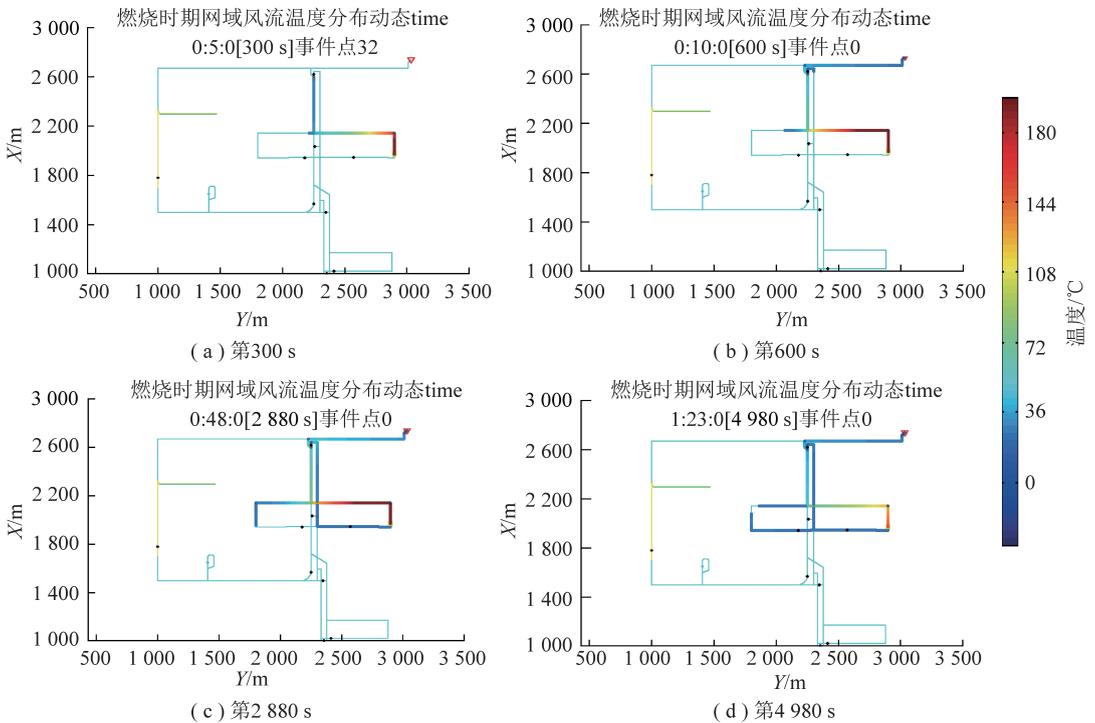


图6 矿井火灾时期通风系统烟温度度模拟显示结果

Fig.6 Simulation results of smoke temperature of ventilation system during mine fire

由此可见, 风流逆转过程与火灾燃烧越激烈程度有关, 风流逆转与风量随火灾火风压而变化。图 7 所描述的上行风流火灾旁侧支路运输上山的风量变化规律与实验研究结果一致(图 2)。

4.3 应对矿井火灾烟流逆转的应急预案措施

如图 5, 6 所示, 在正常通风、通风机转数为 540 r/min 的条件下, 401 工作面上行风流火灾烟流波及 402 工作面及 401 进风巷。为避免这种影响, 确保矿井通风系统的可靠性和稳定性, 需要采取提高矿井通风机能力预案措施, 提升火灾时期的矿井抗火灾能力。结合具体算例矿井, 将通风机转数升至 740 r/min, 火灾第 465 s, 烟流由火源点顺流上行飘移至回风井口, 第 660 s 火势强盛时, 有少部分烟气运移弥散到了输送带上山新风段中, 到达运输上山底端入风口, 第 3 660 s, 侵入烟流到达运输上山中部, 便恢复了原来的通风方向, 在 5 520 s 运输上山进风段的入侵烟气完全排出到上回风段, 在 6 735 s 火源燃尽后烟流排入回风大巷内。提高通风机能力, 保证了在整个火灾过程中, 位于旁侧支路的 402 工作面风流未发生逆转, 也就避免了 401 进风巷受到烟流的侵害, 为在 401 工作面进风侧进行灭火创造有利条件。

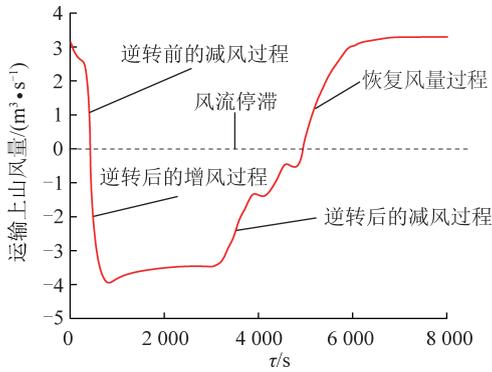


图 7 火灾旁侧支路-运输上山风量随时间变化曲线

Fig.7 Curve of air volume variation with time in belt rise heading-Bypass branch during fire period

5 结 论

(1) 实验表明, 在火灾热动力作用下上行风流火灾时, 总风量和主干风路风量均增大, 旁侧支路风量出现衰减、风流停滞, 甚至逆流现象。当火势发展强盛时, 火风压造成主干管路与旁侧支路回路出现循环风流, 同时管路通风热阻力增大。提高通风机能力可以克服上行风流火灾旁侧支路风流逆退, 减少灾害损失。仿真结果与实验结果相印证, 在风流变化规律上完全一致。

(2) 利用 TF1M3D 平台仿真, 算例矿井通风机转数为 540 r/min 上行风流火灾发生 430 s 后旁侧支路

发生风流逆转烟流循环威胁 401 进风巷灭火, 4 950 s 后火势降低, 旁侧支路 402 工作面造成二次侵袭。提高通风机转数至 740 r/min 后, 克服了救灾不利局面, 使火烟疏导控灾更有利。

(3) TF1M3D 适用于更复杂的全矿井通风系统, 可以对具体矿井的真实条件进行火灾仿真, 为获得灾害经验、制定火灾应急管理预案提供辅助决策支撑。

参考文献 (References):

- [1] 王省身, 张国枢. 矿井火灾防治 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1990.
- [2] 弗雷, 袁树杰. 新鲜风流通风巷道中皮带火灾的试验研究 [J]. 矿业科学技术, 1992, 10(3): 73-77.
FREI A, YUAN Shujie. Experimental study on belt fire in fresh air ventilation tunnel [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 1992, 10(3): 73-77.
- [3] 程远平, 季经纬, 李增华. 矿用输送带与木材燃烧性能的对比实验研究 [J]. 煤炭学报, 2000, 25(6): 624-627.
CHENG Yuanping, JI Jingwei, LI Zenghua. Contrastive experimental study on combustion performance of mine conveyer belt and wood [J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(6): 624-627.
- [4] 傅培舫, 周怀春, 俞启香, 等. 巷道火灾节流过程及其影响因素的研究 [J]. 煤炭学报, 2005, 42(2): 146-150.
FU Peifang, ZHOU Huaichun, YU Qixiang, et al. Study on the fire - throttling process of tunnel fire and its influence factors [J]. Journal of China Coal Society, 2005, 42(2): 146-150.
- [5] 李腾. 大雁三矿通风系统仿真与火灾抗灾预案研究 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2020.
LI Teng. Study on ventilation system simulation and fire control plan of dayan No.3 mine [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2020.
- [6] 李宗翔, 王雅迪, 高光超, 等. 巷道火灾火焰局部阻力模型构建及参数识别 [J]. 煤炭学报, 2015, 40(4): 909-914.
LI Zongxiang, WANG Yadi, GAO Guangchao, et al. Construction of tunnel fire flames local resistance model and parameter identification [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(4): 909-914.
- [7] BETTIS R J, JAGGER S F, WU Y. Interim validation of tunnel fire consequence models; summary of phase 2 tests [R]. Buxton: The Health and Safety Executive, 1993.
- [8] BETTIS R J, JAGGER S F, MACMILLAN A, et al. Interim validation of tunnel fire consequence models; summary of phase 1 tests [R]. Buxton: The Health and Safety Executive, 1994.
- [9] 周延, 宋双林, 郭江炜, 等. 并联旁侧支路风流逆转次序的实验研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(4): 467-470.
ZHOU Yan, SONG Shuanglin, GUO Jiangwei, et al. Experimental study of the sequence of flow reversals in accessional airways parallel to a fire [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(4): 467-470.
- [10] OKA Y, ATKINSON G T. Control of smoke flow in tunnel fires [J]. Fire Safety Journal, 1995, 25(4): 305-322.
- [11] ATKINSON G T, WU Y. Smoke control in sloping tunnels [J]. Fire Safety Journal, 1996, 27(4): 335-341.
- [12] 周福宝, 王德明, 周延. 角联网络下行通风火灾的实验研究 [J].

- 矿业安全与环保,2001,28(6):1-3.
- ZHOU Fubao, WAN Deming, ZHOU Yan. Experimental study on ventilation fire under corner connection network [J]. Mining Safety & Environmental Protectio, 2001, 28(6):1-3.
- [13] 常心坦. 矿井火灾通风的模拟计算[J]. 煤矿安全, 1991, 21(4): 22-29.
- CHANG Xintan. Simulation calculation of mine fire ventilation [J]. Safety in Coal Mines, 1991, 21(4):22-29.
- [14] 王德明, 王省身. 计算机选择矿井火灾时期最佳避灾路线的研究[J]. 中国矿业大学学报, 1994, 40(3):27-32.
- WANG Deming, WANG Xingshen. Study on computer selection of the best route to avoid disaster in mine fire [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1994, 40(3):27-32.
- [15] 邢玉忠. 矿井重大灾害动态机理与救援技术信息支持系统研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2007.
- XING Yuzhong. Study on dynamic mechanism of mine major disaster and rescue technical information support system [D]. Taiyuan University of Technology, 2007.
- [16] 周静. 矿井火灾应急救援预案管理系统的开发与实现 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2011.
- ZHOU Jing. Development and Realization of Mine Fire Emergency Rescue Preplan Management System [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2011.
- [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研究 [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.