

文章编号: 1000-582X(2012)11-1111-06

突出瓦斯流与矿井通风系统耦合移动仿真

李宗翔^{a,b}, 刘宇^c, 于景晓^{a,b}, 贾进章^{a,b}

(辽宁工程技术大学 a. 安全科学与工程学院; b. 矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室;
c. 矿业学院, 辽宁阜新 123000)

摘要: 针对 2009 年重庆松藻煤电有限公司同华煤矿“5·30”特别重大煤与瓦斯突出事故, 运用有源通风网络理论和数值模拟仿真技术(开发了计算机仿真系统), 对瓦斯突出时期矿井通风系统突变过程进行了详细模拟。突出后矿井通风系统一般经历突出溢流、自然流动和通风顺流 3 个过程。在突出源动力作用下, 做辐射流动, 可沿主进风大巷逆流; 瓦斯先灌入主通风巷道, 滞后进入低风量风门巷道或硐室, 导致这些巷道的瓦斯浓度超限, 威胁矿井安全。突出完成后, 瓦斯动力消失, 矿井在瓦斯自然风压的作用下开始自然流动。在恢复通风后, 矿井在通风机动力作用下瓦斯开始随风流动。受瓦斯自然风压干扰, 通风机工况点出现频繁变动(与巷道网结构有关), 随着瓦斯排净, 恢复到原来的工作状态。值得注意的是, 低风量巷道和硐室中的瓦斯滞留时间相对较长, 成为持续性瓦斯供给源, 十分危险; 此外, 主流巷道与支路低风量巷道之间的延迟灌入或瓦斯滞留产生的瓦斯自然风压, 导致局部回路发生逆转的风流紊乱现象, 也容易扩大瓦斯波及范围, 或形成瓦斯排放延迟与滞留。

关键词: 瓦斯突出; 3D 有源风网; 瓦斯自然风压; 突出逆流; 回流滞留; 风流逆转

中图分类号: TD725; TD712.54

文献标志码: A

Dynamic superposition and simulation research on flowing of gas outburst and mine ventilation network

LI Zongxiang^{a,b}, LIU Yu^c, YU Jingxiao^{a,b}, JIA Jinzhang^{a,b}

(a. College of Safety Science and Engineering; b. Key Laboratory of Mine Thermodynamic Disasters and Control, Ministry of Education; c. College of Mining Technology, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: In allusion to the “5·30” especially serious coal and gas outburst accident of Tonghua coal mine of Songzao Coal Electricity Group CO., LTD in 2009, a detailed simulation of the mutation process of mine ventilation system during gas outburst disaster period is done by using theory of ventilation network with sources and numerical simulation technology (we develop a computer simulation system). Three changing processes, namely outburst overflow, natural flow and ventilation downstream occurs in the ventilation system after outburst. Due to the expanded power of outburst source, gas enters main ventilation roadways at first, and flows outward, and flows counter-current along main intake air roadway, and then enters low air quantity roadways with air doors or underground chamber, which leads to gas concentration overrun and threat to the whole mine. After outburst, gas power disappears. Due to the action of gas natural

收稿日期: 2012-05-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51174109); 国家自然科学基金资助项目(51074086)

作者简介: 李宗翔(1962-), 男, 辽宁工程技术大学教授, 博士生导师, 从事煤矿重大灾害理论及灾变时期矿井通风研究,
(E-mail) lzx6211@126.com。

ventilation pressure, mine ventilation may begin to flow naturally. After the ventilation systems are restored, gas flows with the wind as a result of the power of the main fan. Due to the interference of gas natural ventilation pressure, the operating points of main fans may drift (relative to roadway structure), but the operating points recover with the discharge of gas. It is worth noting that the detention time of gas in low air quantity roadways and underground chambers is relatively long, and the gas becomes continuous gas supply sources, so it is dangerous. In addition, the delayed pour between main roadways and by-pass low air quantity roadways and the gas natural ventilation pressure caused by gas detention may lead to airflow disorder of reversion in some local circuits, and may enlarge the affected range of gas, or lead to the delay and detention of gas discharge.

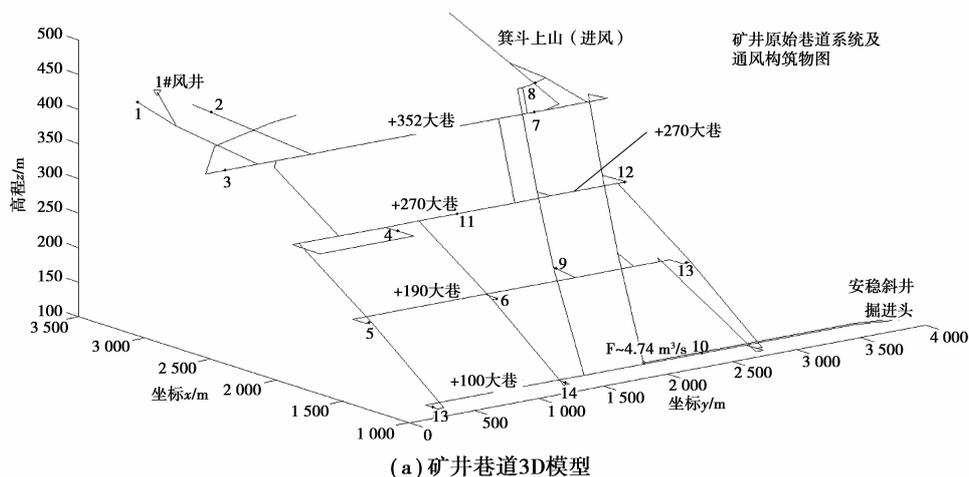
Key words: gas outburst; 3D ventilation network with sources; gas natural ventilation pressure; outburst counter-current; backflow retention; airflow reversal

近年来,国内煤矿煤与瓦斯突出灾害事故频发,如 2004 年郑煤集团大平煤矿“10·20”特大型煤与瓦斯突出引发特别重大瓦斯爆炸事故造成 148 人死亡;2009 年松藻煤电公司同华煤矿“5·30”特别重大煤与瓦斯突出事故死亡 30 人;2009 年龙煤集团鹤岗分公司新兴煤矿“11·21”特别重大瓦斯爆炸事故造成 108 人死亡;2010 年 3 月 31 日河南伊川国民煤业有限公司“3·31”煤与瓦斯突出事故,瓦斯逆流从副井口涌出,遇火在地面副井口爆炸,致 46 人死亡;2010 年 10 月 16 日,河南禹州中平能化集团平禹煤电公司四矿 12190 采面在施工防突钻孔时发生煤与瓦斯突出,37 人死亡,等等。上述事故的特点是突出瓦斯流在矿井大范围巷道中传播导致人员窒息或引发瓦斯爆炸等二次灾害。长期以来,国内外学者对煤与瓦斯突出的研究主要集中在突出机理和事发巷道(局部地)的尺度上开展讨论^[1-10],主要在突出发生的条件、突出源动力学与能量关系以及突出巷道局部瓦斯冲击力学特征方面取得诸多进展,为防止、防治和预测煤与瓦斯突出提供重要理论支撑,可以说目前在防突方面已经取得了可喜的成果。但由于突出本身的复杂性,要完全避免还需一个漫长过程,因此,二次灾害研究已经成为当前紧迫

的问题。关于二次灾害的研究,针对突出瓦斯在矿井网络系统流动过程以及对突出瓦斯流与通风动力叠加的研究尚属空白,自从笔者文献[13]提出了有源风网模型及其应用算法,为解决这一问题提供了可行的捷径。这里根据已掌握的资料,运用数值模拟方法对松藻同华煤矿“5·30”特别重大煤与瓦斯突出事故做一详细分析。

1 算例基本概况及通风系统

2009 年 5 月 30 日 10 时 49 分,重庆市能源投资集团公司松藻煤电公司同华煤矿(以下简称同华煤矿)三区+100 水平安稳皮带斜井揭煤工作面发生一起特别重大煤与瓦斯突出事故(以下简称“5·30”事故)。同华煤矿 1958 年投产,改扩建 3×10^5 t/a。矿井地质条件复杂, K_1 和 K_3 主采煤层均为煤与瓦斯突出煤层;绝对瓦斯涌出量为 $49.09 \text{ m}^3/\text{min}$,相对瓦斯涌出量为 $77.51 \text{ m}^3/\text{t}$ 。属自燃煤层。矿井现有两个生产采区(一区和二区);三区为准备采区,事故当时三区的主体工程只剩安稳斜井尚未贯通。巷道布置见图 1(a)。+100 三区大巷尽头为安稳斜井掘进工作面(节点号位 103)。



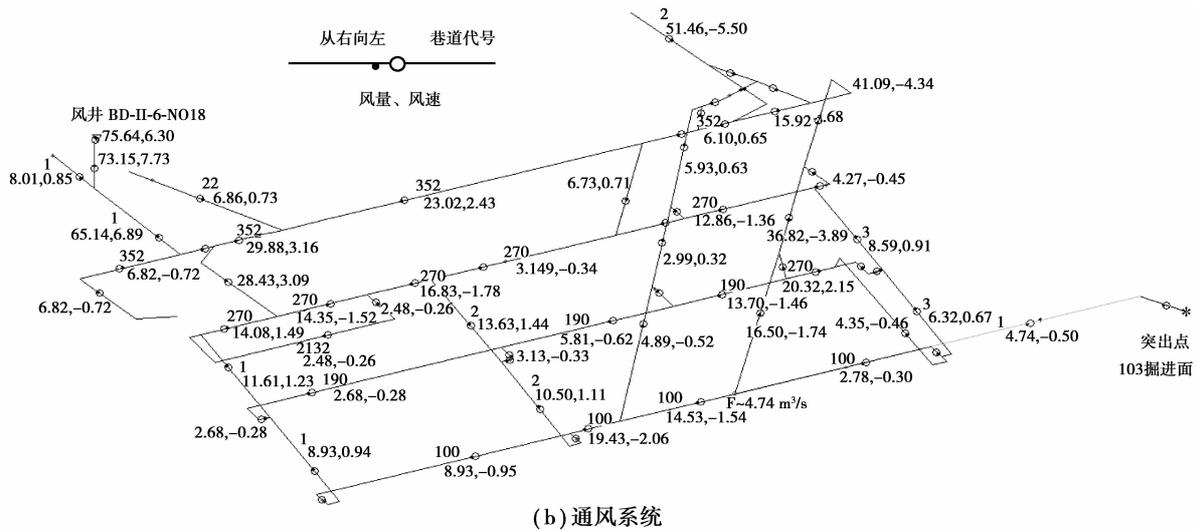


图 1 同华煤矿三区矿井巷道 3D 模型与通风系统

事故是在自下 (+100 水平大巷) 而上的方式揭 K₃ 煤层时发生的, 事故突出煤量 3 000 t, 瓦斯量约 23 万 m³; 在井下 131 人中造成 30 人死亡, 79 人受伤, 其中 12 人重伤, 直接经济损失 1 219 万元^[11-12]。事故前的矿井通风系统如图 1(b) 所示。矿井由箕斗上山进风、斜井回风井回风, 模拟采用 BD-II-6-No18 型风机, 通风机转速为 740 r/min, 通风机风量为 75.64 m³/s (外部漏风量 2.7 m³/s), 风压为 2 050.96 Pa, 自然风压为 -17.28 Pa。

2 瓦斯突出源边界条件设定及模拟方案

在有源风网中, 将突出涌出瓦斯作为源项。如图 2 所示, 瓦斯突出源的边界条件可有 2 种条件给出, 第 1 类 (压力) 边界条件和第 2 类 (流量) 边界条件, 煤与瓦斯突出问题的瓦斯压力边界条件在数值上一般不易获得, 流量边界条件可通过现场实例中突出瓦斯总量与突出时间记录运用统计方法可估算得到, 所以瓦斯突出源通常以第 2 类边界条件给出, 即

$$Q|_r = D(\tau), \quad (1)$$

式中, $D(\tau)$ 代表瓦斯突出源的流量, m³/s; 根据现场实际经验, 突出源属于非均匀源, 即 $D(\tau)$ 是时间 τ 的函数。

那么, 总突出瓦斯量为

$$V_0 = \int_0^{\tau_0} D(\tau) d\tau, \quad (2)$$

式中: V_0 为瓦斯突出的气体总量, m³; τ_0 为瓦斯突出经历时间, s。

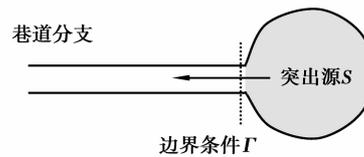


图 2 突出源的边界条件

用 MATLAB 语言开发编写了瓦斯突出灾变时期矿井通风系统计算机程序 (简称 TFM)^[13-14], 通过在计算机上建 3D 矿井风网模型计算。突出灾变时期矿井风流系统是非稳定流的, 这里按时间离散, 假设在每个时间步长内是稳定流的; 忽略突出前后温度变化。以“突增—高峰—衰减”变化描述突出源流量^[6, 8], 瓦斯 23 万 m³ 在 6.5 min 内完成突出和解吸过程 (3 000 t 煤), 见图 3。问题表达忽略突出点局部冲击能的影响, 以高速流动反映冲击, 忽略突出瞬间超高速逆风流非稳定流扰动影响^[6]。风网中瓦斯流动计算用一维迎风格式有限元法, 动态过程

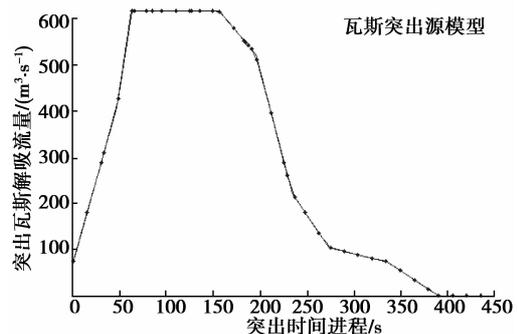


图 3 瓦斯突出源模型

用事件步长法,模拟给出瓦斯到达巷道各交叉点的时间;设定模拟瓦斯传感器测点为 48、68、20、7、56 (节点),风机停风时间 14 min。

3 瓦斯突出时期矿井通风系统灾变过程模拟

模拟以 103 节点(安稳斜井掘进头)为突出源详细描述了突出发生过程,给出 400 多幅画面,可进行动态回放,限于篇幅这里仅列出几幅模拟图,见图

4、5。在图 4(a)中,强大的瓦斯突出气流形成暴风,沿矿井进风路线和进风井发生逆流,在第 65~154 秒突出高峰时,事发巷道逆流流量为 $617.8 \text{ m}^3/\text{s}$,逆流风速为 65.3 m/s ;原来作为进风的箕斗井发生逆流,逆流流量为 $274.38 \text{ m}^3/\text{s}$,逆流风速为 29.31 m/s 。回风井风量由 $75.64 \text{ m}^3/\text{s}$ 突增到 $278.32 \text{ m}^3/\text{s}$,超过额定风量,通风机受到“被迫推动”,此时保护通风机的防爆门随即开启,矿井通风系统陷于瘫痪状态。

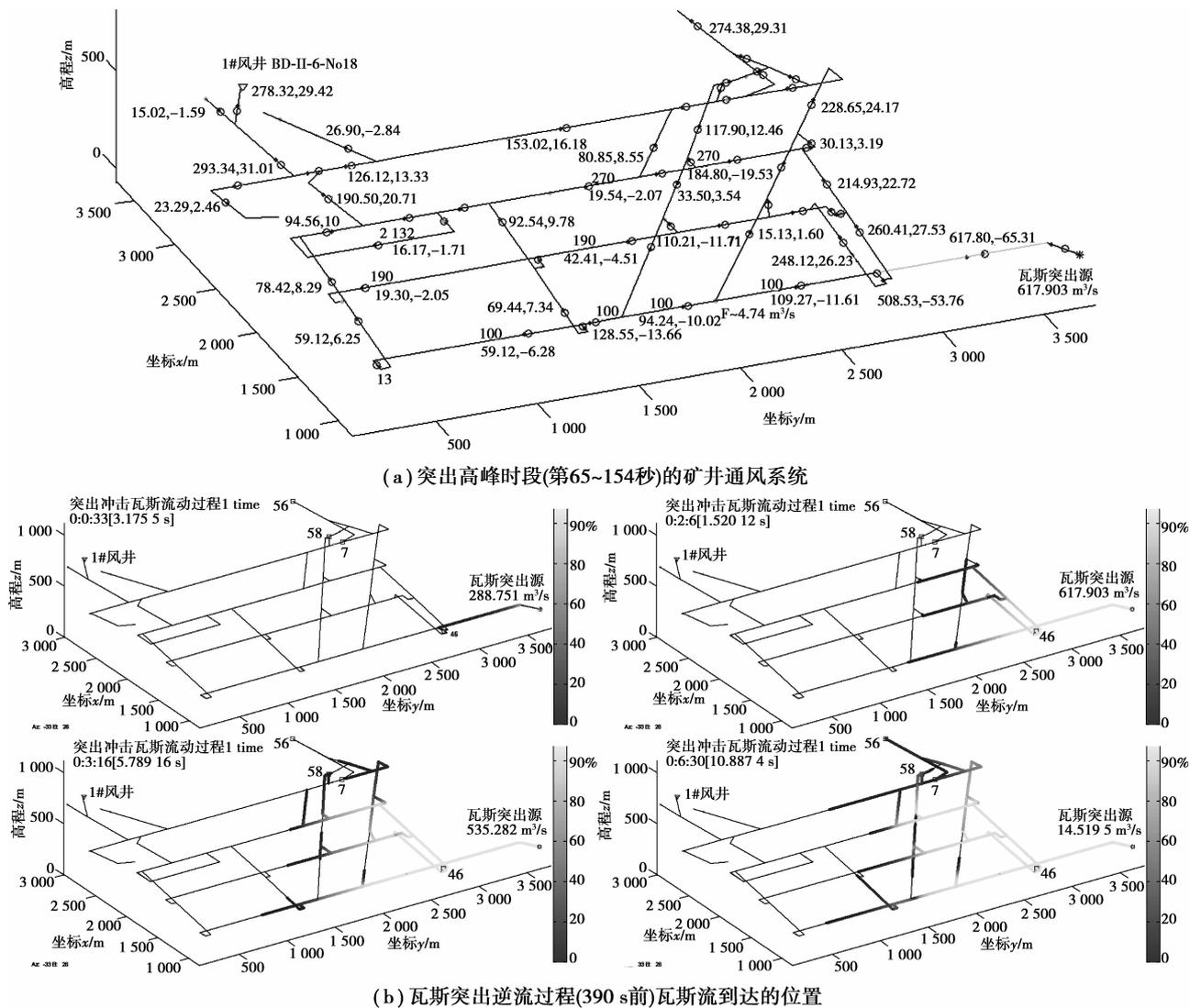


图 4 瓦斯突出矿井通风系统发生突出冲击逆流的模拟结果

模拟结果显示,突出发生第 126 秒,逆流瓦斯开始进入 +270S 大巷(进风段),模拟第 126 秒时 +270 大巷中的瓦斯逆流速度为 19.53 m/s ,第 198 秒时灌满该巷道,以后高浓度瓦斯流在 +270S 大巷滞留时间达 1 h。直接造成逃生误入 +270S 大巷内的 11 名矿工窒息死亡。模拟中记录了标志测点瓦斯浓度变动见图 6。

在整个通风紊乱过程中,突出瓦斯动力、瓦斯突出自然风压与通风动力相互交织作用。工况点不断变动,见图 7。矿井瓦斯突出最初的逆流动力是突出瓦斯膨胀动力,即矿井风流以突出点为中心向沿网路做辐射流动,在进风巷中产生逆流;突出动力将风井防爆门顶开,通风机失效,见图 7(b)的 A 区。瓦斯突出失去约束,继续膨胀扩张流动和瓦斯呈辐

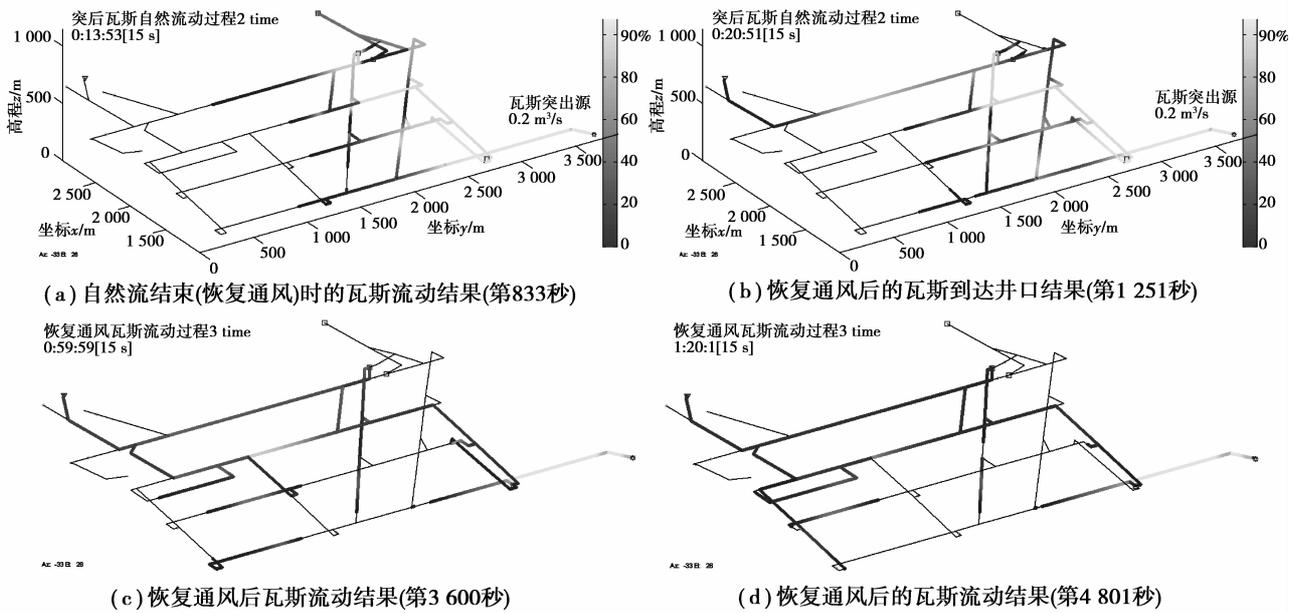


图 5 瓦斯突出后矿井通风系统瓦斯移动位置状态模拟结果

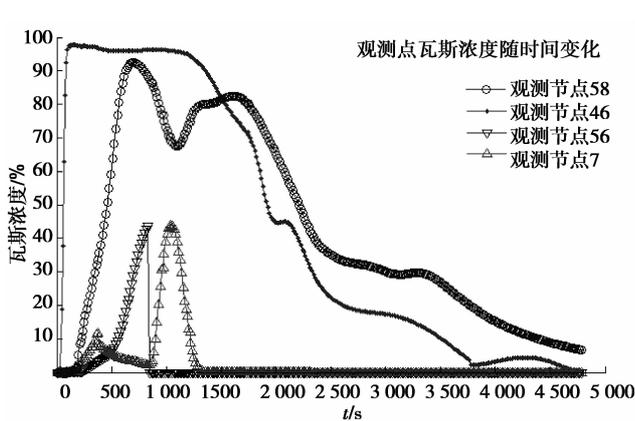
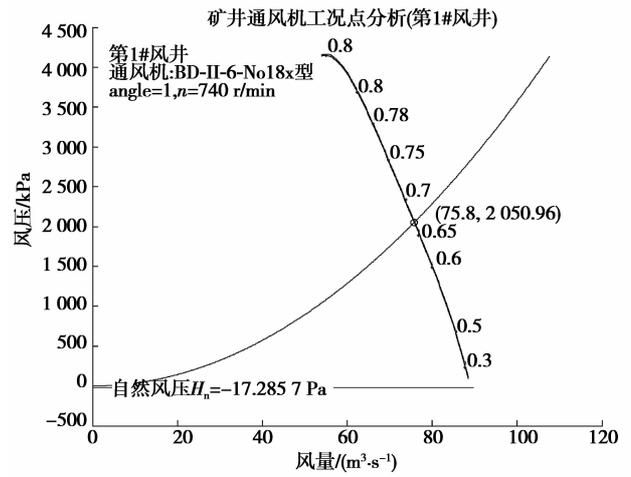
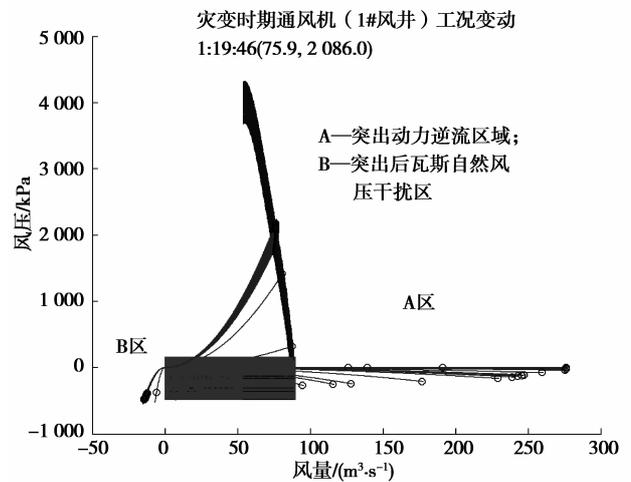


图 6 模拟传感器(测点)瓦斯浓度时序变化



(a) 突出前工况点



(b) 突出阶段工况点变动过程

图 7 瓦斯突出时矿井通风工况点及风阻变化的模拟结果

射弥散传播,蔓延整片区域。

在突出完成后,瓦斯动力消失,瓦斯在自然风压作用下自然流动与扩散,见图 7(b)的 A~B 区。突出逆流导致三区右侧巷道中几乎充满瓦斯,因瓦斯形成的自然风压(称瓦斯自然风压)继续维持逆流,并使风网局部的回路中出现风流逆转。启动通风机后,在通风机风压驱动下进入顺流流动阶段(图 7(b)的 B 区)。瓦斯的移动变化和残留分布,使在排放过程中瓦斯自然风压不断干扰和影响主要通风机工作,形成风压对抗,也伴随局部回路中出现风流紊乱现象。在瓦斯自然风压干扰作用下,通风机不能马上恢复原来的工况点,随着瓦斯排净,恢复到原来的工作状态。突出事发巷道安稳斜井掘进巷道由于没有通风,瓦斯积存与残留的时间更长。

4 结 语

1) 仿真 TF1M 程序实现了描绘瓦斯突出后通风系统瓦斯流动变化过程, 模拟结果与实际矿井发生瓦斯突出时的典型特征(经验)是一致的。上述数值模型, 为动态观察和分析突出瓦斯在矿井中传播、突出逆流和风流紊乱等提供了虚拟仿真技术手段, 可进一步对瓦斯突出后瓦斯爆炸次生灾害的防治提供预案分析。

2) 瓦斯突出事故对矿井通风系统的影响包括 3 个过程, 即突出溢流、自然流动和通风顺流, 使通风系统风流逆流和局部逆转。直接逆流主要沿着大通风主干回风路逆行并灌入(甚至逆流撞开风门); 在整个通风紊乱过程中, 突出瓦斯动力、瓦斯突出自然风压与通风动力相互作用, 过程复杂。

3) 在此次煤与瓦斯突出事故中, 逆流瓦斯很快灌入各水平的巷道中, 高浓度瓦斯窒息造成大量人员死亡。同华煤矿三区逃生误入+270S 大巷通风风流不畅通, 造成突出瓦斯长时间滞留是导致逃生误入+270S 大巷的 11 名矿工窒息死亡的直接原因。

4) 突出逆流瓦斯在硐室和小风量巷道或风门巷道中形成长时间滞留, 这些滞留瓦斯在排放回流时期将形成瓦斯的二次侵入, 使被侵巷道瓦斯浓度超限。突出消失后开始进入顺流排放的过程, 瓦斯可在矿井内向更大范围传播, 使巷道处在瓦斯爆炸限范围内。显然, 排放过程中, 应努力避免此类巷道的瓦斯积聚, 适当开启风门或风窗是十分必要的, 这有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 李希建, 林柏泉. 煤与瓦斯突出机理研究现状及分析[J]. 煤田地质与勘探, 2010, 38(1):7-13.
LI Xijian, LIN Baiquan. Status of research and analysis on coal and gas outburst mechanism[J]. Coal Geology & Exploration, 2010, 38(1):7-13.
- [2] 吴鑫, 许江. 煤与瓦斯突出过程模拟实验室瓦斯通风安全数值模拟[J]. 矿业安全与环保, 2010, 37(6): 5-8,12.
WU Xin, XU Jiang. Numerical simulation of gas and ventilation safety in coal and gas outburst process simulation laboratory [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2010, 37(6): 5-8, 12.
- [3] 尹光志, 赵洪宝, 许江, 等. 煤与瓦斯突出模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1674-1680.
YIN Guangzhi, ZHAO Hongbao, XU Jiang, et al. Experimental study of simulation of coal and gas outburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1674-1680.
- [4] 王维忠, 陶云奇, 许江, 等. 不同瓦斯压力条件下的煤与瓦斯突出模拟实验[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(3): 82-86.
WANG Weizhong, TAO Yunqi, XU Jiang, et al. Simulation of coal and gas outburst with different gas pressure[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(3): 82-86.
- [5] 郝宇. 煤与瓦斯突出沿井巷传播规律研究[J]. 煤炭技术, 2009, 28(11): 74-76.
HAO Yu. Research on propagation law of coal and gas outburst in road-way network[J]. Coal Technology, 2009, 28(11): 74-76.
- [6] 张建方, 王凯, 韦彩平. 煤与瓦斯突出冲击波的形成与传播规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(1): 67-71.
ZHANG Jianfang, WANG Kai, WEI caiping. Formation and propagation of shock waves during coal and gas outbursts[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(1): 67-71.
- [7] 程五一, 刘晓宇, 王魁军, 等. 煤与瓦斯突出冲击波阵面传播规律的研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(1): 57-60.
CHENG Wuyi, LIU Xiaoyu, WANG Kuijun, et al. Study on regulation about shock-wave-front propagating for coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(1): 57-60.
- [8] 董钢锋, 梁运培. 突出煤瓦斯涌出规律及逆流形成条件分析[J]. 煤炭科技, 2001, 22(4): 46-48.
DONG Gangfeng, LIANG Yunpei. Analysis of contraflow forming condition and gas flooding law in outburst coal seam[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2001, 22(4): 46-48.
- [9] 王文铎. 大型煤与瓦斯突出对矿井通风系统冲击的分析[J]. 煤矿安全, 1996, 27(7):14-17.
WANG Wenduo. Large-scale coal and gas outburst on the analysis of the impact of the mine ventilation system[J]. Safety in Coal Mines, 1996, 27(7):14-17.
- [10] 张仁松, 唐继东. 矿井瓦斯对风流稳定性影响的探讨[J]. 煤炭工程师, 1997, 26(5):31-33.
ZHANG Rensong, TANG Jidong. Inquiring into the influence of mine gas on the stability of air flow[J]. Coal Engineer, 1997, 26(5): 31-33.
- [11] 王魁军, 国务院“5·30”事故调查专家组. 重庆松藻煤电有限公司同华煤矿“5·30”特别重大煤与瓦斯突出事故原因及主要教训[EB/OL]. [2010-10-02]. <http://www.docin.com/p-224947081.html>.

东师范大学,2010.

- [11] 刘倩然. RBF 人工神经网络在棉花膜下滴灌灌溉预测中的应用[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2009.
- [12] Gheyas I A, Smith L S. A neural network approach to time series forecasting [C/OL]// Proceedings of the World Congress on Engineering 2009, London, U. K., July 1-3, 2009 [2012- 01- 10]. http://pdf.aminer.org/000/262/006/forecasting_time_series_combining_machine_learning_and_box_jenkins_time.pdf.
- [13] 李平, 卢文喜, 杨忠平. 频谱分析法在吉林西部地下水动态预测中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2005, 49(4):70-73.
LI Ping, LU Wenxi, YANG Zhongping. Application of spectrum analysis method to the prediction of groundwater regime in west Jilin province [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005, 49(4): 70-73.
- [14] Yang Z P, Lu W X, Long Y Q, et al. Application and comparison of two prediction models for groundwater levels: a case study in Western Jilin Province China [J]. Journal of Arid Environments, 2009, 73(4/5):487-492.
- [15] Gay C, Estrada F, Conde C. Some implications of time series analysis for describing climatologic conditions and for forecasting. An illustrative case: Veracruz, México [J]. *Atmósfera*, 2007, 20(2):147-170
- [16] Yildirim Y E, Turkes M, Tekiner M. Time-series analysis of long-term variations in stream-flow data of some stream-flow stations over the gediz basin and in precipitation of the akhisar station [J]. *Palistan Journal of Biological Sciences*, 2004, 7(1):17-24.
- [17] Zheng Z Q, Fan J S, Liu H P, et al. The analysis and predictions of agricultural drought trend in Guangdong province based on empirical mode decomposition [J]. *Journal of Agricultural Science*, 2010, 12 (2): 169-174.
- [18] Ahn H. Modeling of groundwater heads based on second-order difference time series models. *Journal of Hydrology*, 2000, 234(1/2):82-94.
- [19] 李鸿吉. Visual Basic 6.0 数理统计使用算法[M]. 北京:科学出版社,2003.

(编辑 郑洁)

(上接第 116 页)

- [12] 杨璇, 丁百川. 同华煤矿“5·30”事故回顾[J]. 劳动保护, 2010, 58(7): 31-33.
YANG Xuan, DING Baichuan. Tonghua coal mine with the “5·30” incident review [J]. *Labor Protection*, 2010, 58(7): 31-33.
- [13] 李宗翔. 有源风网模型及其应用计算[J]. 煤炭学报, 2010, 35(增刊): 118-122.
LI Zongxiang. Containing the source ventilation network model and its application[J]. *Journal of China Soal Society*, 2010, 35(Sup): 118-122.
- [14] 李宗翔, 王德民, 温永宇. 矿井 3D 风网图及基于 MATLAB 仿真编程与实现[J]. 安全与环境学报, 2010, 10(6): 168-171.
LI Zongxiang, WANG Demin, WEN Yongyu. 3D mine ventilation network graph and MATLAB based simulation program [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2010, 10(6): 168-171.

(编辑 郑洁)