

矿井密闭巷道内瓦斯排放的数学模型

王红刚¹, 李小艳², 张检让¹, 吴奉亮¹, 常心坦¹

1. 西安科技大学能源学院, 西安 710054
2. 陕西宇泰建筑设计有限公司, 西安 710075

摘要 矿井密闭巷道的瓦斯排放属于矿井通风管理中重要的非正常作业, 应对瓦斯排放的过程进行详细的设计以保证排放过程的安全。在瓦斯排放速度不变的条件下, 假设巷道内瓦斯与新鲜风流瞬间充分混合, 则巷道瓦斯浓度在排放过程中均匀变化。在与传统瓦斯排放方法比较的基础上, 建立一种新的瓦斯排放数学模型。该模型推导了巷道内瓦斯浓度与排放速度、排放时间和全负压通风量等参、变量之间的依赖关系。通过计算在排放过程中的危险时间长度及排放风险, 得出危险排放时间与初始浓度无关、排放风险与排放率无关的重要结论。最后通过一个瓦斯排放算例, 证明了该数学模型的优越性。

关键词 密闭巷道; 瓦斯排放; 排放时间; 排放风险

中图分类号 TD722

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.27.007

A Mathematics Model for the Gas Drainage from a Sealed Lane in Coal Mine

WANG Honggang¹, LI Xiaoyan², ZHANG Jianrang¹, WU Fengliang¹, CHANG Xintan¹

1. School of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China
2. Shaanxi Yutai Architectural Design Ltd., Xi'an 710075, China

Abstract As an important abnormal operation of coal mine's ventilation management, the design of gas drainage from a sealed lane in coal mine should be paid more attention to the safety of drainage process. On condition that the gas drainage rate is unchanged, the methane concentration during the gas drainage process would uniformly vary; the fresh air flow is able to be mixed sufficiently with those containing more methane in the lane. Based on the comparison with the traditional methods for gas drainage, a new mathematics model for gas drainage is established; the model deduces the dependent relation among parameters involving the methane concentration in drained lane, the flow rate of gas drainage, gas drainage time, and the flow rate under the total negative pressure ventilation system. Furthermore, the length of dangerous time and the risk during the gas drainage process are calculated in order to obtain an important conclusion, that is, the dangerous time of gas drainage is irrelevant to the initial concentration, the risk of gas drainage has nothing to do with the ratio between the gas drainage flow rate to the volume of drained lane. Finally, a case study of gas drainage is adopted to validate the new proposed model.

Keywords sealed lane; gas drainage; drainage time; drainage risk

0 引言

在煤矿生产过程中, 由于意外的或计划中的停电、检修及其他事故经常会造成主要通风机、局部通风机停止运转, 进而引起停风的掘进工作面或其他地点瓦斯超限; 有时需要对较长时间停工的掘进工作面启封重新开工, 而封闭空间内瓦斯浓度往往很高^[1]。瓦斯排放是煤矿处理积聚瓦斯最常见的措施, 不少煤矿曾在瓦斯排放过程中导致了恶性事故的发

生, 为此《煤矿安全规程》专门对瓦斯排放问题做了规定。鉴于瓦斯排放问题的重要性和危险性, 许多煤矿工作者对此进行了研究。文献[2—9]主要对独头巷道瓦斯排放的技术要求和排放方法的选择进行了阐述, 并给出了估算瓦斯积聚量和最大允许瓦斯排放速度的公式(本文称之为传统方法); 王志玉^[10]研究了巷道贯通时的瓦斯排放技术问题和现场实施措施; 贺玉凯等^[11]对以数字信号处理器(DSP)为控制核心, 采用

收稿日期: 2012-07-09; 修回日期: 2012-08-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(51104116); 西安科技大学博士科研启动金项目(2010QDJ002)

作者简介: 王红刚, 讲师, 研究方向为矿井通风与瓦斯灾害防治, 电子信箱: maxwell79@126.com

变频调速驱动局部通风机的智能瓦斯排放系统进行了研究;王淑芳等^[2]采用层次分析法、BP神经网络方法建立了瓦斯排放双模糊控制仿真模型;王淑芬等^[3]将S7系列的PLC技术应用到煤矿井下,提高了瓦斯排放的可靠性和控制精度。

关于瓦斯排放问题的研究多集中在技术要求、排放措施、管理制度和智能排放上,而对排放过程本身的物理模型及其潜在的危险性缺乏深入分析和研究。本文拟在前人研究的基础上,对瓦斯排放过程有关参数之间的依赖关系进行较为细致的研究。

1 矿井瓦斯排放理论的数学模型

1.1 问题描述

设有如下图1所示的密闭巷道。

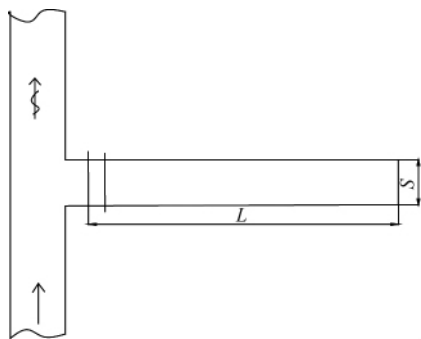


图1 密闭巷道
Fig. 1 A sealed lane

已知条件:密闭巷道断面为 S, m^2 ;巷道长为 L, m ;巷道内待排放瓦斯浓度为 C_0 ;全负压通风风量为 $Q, m^3/s$;全负压通风新鲜风流瓦斯浓度为0;全负压通风回风风流中允许最大瓦斯浓度 C_L ;排放过程中排放速度保持不变。

待求变量:(1)最大瓦斯排放速度 $q_L, m^3/s$;(2)当瓦斯排放速度为 q 时所需要的排放时间 t, s ;(3)设瓦斯爆炸的浓度上下限分别为 $C_{max}, C_{min}, \%$,求排放过程中巷道处于爆炸范围内的时间。

1.2 传统计算方法

瓦斯排放问题的传统计算方法如下。

(1)最大瓦斯排放速度为在瓦斯排放的过程中回风风流中瓦斯浓度等于最大允许浓度 C_L 时的排放速度,即为

$$q_L = QC_L / C_0 \quad (1)$$

(2)先计算出将浓度为 C_0 、体积为 $V_0 = SL$ 的气体稀释成浓度为 C_L 所需的气体量 V_r ,根据瓦斯总量平衡可以得出

$$(V_0 + V_r)C_L = V_0C_0 \quad (2)$$

由式(2)可得出

$$V_r = V_0 \left(\frac{C_0}{C_L} - 1 \right) \quad (3)$$

所以,排放时间为

$$t = \frac{V_r}{q} = \frac{V_0}{q} \left(\frac{C_0}{C_L} - 1 \right) \quad (4)$$

(3)在式(4)中的最大瓦斯排放速度 q 是根据巷道内的瓦斯浓度变化而动态变化的,但由于不可能随时掌握巷道内的瓦斯浓度,局扇的出口风量可任意控制(智能型瓦斯排放设施除外),在实际的操作中,为了方便起见,在整个排放过程往往使用最初估计的最大排放速度 q_L ^[9]。这样,传统计算方法并没有考虑巷道内瓦斯浓度随排放时间的动态变化关系,无法算出巷道内瓦斯停留在爆炸范围内的时间。

1.3 瓦斯排放过程的数学模型

瓦斯排放过程可以简化为在密闭上开设两根管道,一是新鲜风流的进风,另外是含有高浓度瓦斯的回风,如图2所示。图中, q_{in} 为每秒进入巷道A内的新鲜风量, m^3/s ; q_{out} 为每秒排出巷道A的含有高浓度瓦斯的混合风量, m^3/s ; q_{emit} 为排放过程中巷道周围煤岩层每秒向巷道内涌出的含瓦斯气体流量, m^3/s 。

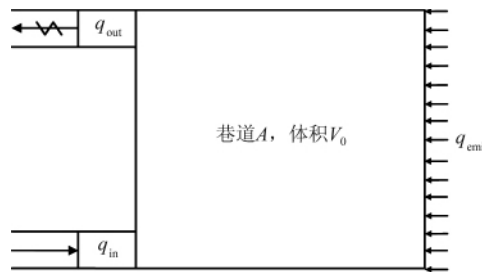


图2 瓦斯排放模型
Fig. 2 Model of gas drainage

假设 t 为排放瓦斯所需时间,则当 $t=0$ 时, A 内的瓦斯浓度为密闭巷道初始瓦斯浓度,当 $t=1s$ 时, q_{in} 完全进入 A , 同时有 q_{out} 从 A 中流出。在此过程中,假设如下条件成立:(1)气体流动为常温、常压下的不可压缩流动;(2)新鲜空气 q_{in} 与 A 内气体在 Δt 内充分混合;(3)在排放过程中排放流量保持不变。

基于上述假设,则有如下数学模型:

(1)当新鲜风流 q_{in} 中瓦斯浓度为0、在排放过程中无瓦斯涌出 ($q_{emit}=0$) 时,根据上述假设和瓦斯组分守恒定律,得

$$V_0C_0 = (V_0 + q_{out})C_1 \quad (5)$$

其中, C_1 为第1s时巷道内的瓦斯浓度。第 $t+1$ 时刻,有

$$V_0C_t = (V_0 + q_{out})C_{t+1} \quad (6)$$

定义排放比 $r = \frac{q_{out}}{V_0}$,则式(6)可改写为

$$C_{t+1} = \frac{C_t}{1+r} = \frac{C_0}{(1+r)^t} \quad (7)$$

式(7)表明,瓦斯排放浓度与排放时间呈负指数关系,其为非线性关系式,两边取对数使其线性化,即

$$\ln C_{t+1} = \ln \frac{C_0}{(1+r)^t} = \ln C_0 - t \ln(1+r) \quad (8)$$

式(8)表明,瓦斯排放浓度的对数与排放时间呈线性反比关系,其中斜率为 $-\ln(1+r)$,瓦斯排放浓度的对数轴截距为 $\ln C_0$ 。

取式(8)的反函数,可得:

$$t = \frac{\ln C_0 - \ln C_{t+1}}{\ln(1+r)} = \frac{\ln(C_0/C_{t+1})}{\ln(1+r)} \quad (9)$$

设瓦斯爆炸浓度的上下限为 C_{\max}, C_{\min} , 当巷道内初始瓦斯浓度高于瓦斯爆炸上限浓度, 即 $C_0 > C_{\max}$ 时, 根据式(9), 巷道内瓦斯排放到 C_{\max}, C_{\min} 所需的时间 t_1, t_2 分别为 $t_1 = \frac{\ln(C_0/C_{\max})}{\ln(1+r)}, t_2 = \frac{\ln(C_0/C_{\min})}{\ln(1+r)}$, 因此在瓦斯排放过程中, 巷道处于瓦斯爆炸浓度范围内的时间为

$$t_{\text{danger}} = t_2 - t_1 = \frac{\ln(C_0/C_{\min})}{\ln(1+r)} - \frac{\ln(C_0/C_{\max})}{\ln(1+r)} = \frac{\ln(C_{\max}/C_{\min})}{\ln(1+r)} \quad (10)$$

式(10)表明, 若巷道初始浓度高于瓦斯爆炸浓度上限 ($C_0 > C_{\max}$), 在瓦斯排放过程中, 巷道处于瓦斯爆炸范围内的时间与初始浓度 C_0 无关, 与瓦斯爆炸上下限之比的对数成正比, 与排放速度呈反比。

进一步地, 将式(10)与式(9)之比定义为排放风险 R , 经整理可得

$$R = \frac{t_{\text{danger}}}{t} = \frac{\ln(C_{\max}/C_{\min})}{\ln(C_0/C_{t+1})} \quad C_0 \geq C_{\max} \geq C_{\min} > C_{t+1} \quad (11)$$

排放风险的物理含义是在排放瓦斯过程中, 危险排放时间与总排放时间之比。从式(11)可以看出, 在排放瓦斯过程中, 排放风险与排放比无关, 与瓦斯本身的爆炸范围和排放始末状态的浓度有关。

最大瓦斯排放速度的计算与第 1.2 节中传统算法相同。

(2) 当进风风流 q_{in} 不太“新鲜”时, 设其瓦斯浓度为 C_{∞} , 则式(5)、式(6)变为

$$V_0 C_0 + q_{\text{in}} C_{\infty} = (V_0 + q_{\text{out}}) C_1 \quad (12)$$

$$V_0 C_t + q_{\text{in}} C_{\infty} = (V_0 + q_{\text{out}}) C_{t+1} \quad (13)$$

引入过剩浓度 $\tilde{C} = C - C_{\infty}$, 则有 $\tilde{C}_0 = C_0 - C_{\infty}, \tilde{C}_t = C_t - C_{\infty}$, 另外由假设条件得 $q_{\text{in}} = q_{\text{out}}$, 将其代入式(13), 整理后可得类似与式(7)的公式如下:

$$\tilde{C}_{t+1} = \frac{\tilde{C}_t}{1+r} = \frac{\tilde{C}_0}{(1+r)^t} \quad (14)$$

同理可得

$$\ln \tilde{C}_{t+1} = \ln \frac{\tilde{C}_0}{(1+r)^t} = \ln \tilde{C}_0 - t \ln(1+r) \quad (15)$$

$$t = \frac{\ln(\tilde{C}_0/\tilde{C}_{t+1})}{\ln(1+r)} \quad (16)$$

$$t_{\text{danger}} = \frac{\ln(\tilde{C}_{\max}/\tilde{C}_{\min})}{\ln(1+r)} \quad (17)$$

$$R = \frac{t_{\text{danger}}}{t} = \frac{\ln(\tilde{C}_{\max}/\tilde{C}_{\min})}{\ln(\tilde{C}_0/\tilde{C}_{t+1})} \quad \tilde{C}_0 \geq \tilde{C}_{\max} \geq \tilde{C}_{\min} > \tilde{C}_{t+1} \quad (18)$$

此时最大瓦斯排放速度的计算公式(1)变为

$$q_1 = Q(C_1 - C_{\infty})/C_0 = Q\tilde{C}_1/C_0 \quad (19)$$

注意, 在式(19)中右端的分母 C_0 并没有变为过剩浓度的形式, 这是因为无论进风流 q_{in} 中的瓦斯浓度如何 (当然小于

C_0), q_{out} 中的瓦斯浓度的最大值均为 C_0 。

(3) 若在瓦斯排放之前, 巷道内瓦斯浓度与煤层内部瓦斯浓度达到平衡, 没有瓦斯从煤壁涌入巷道, 当瓦斯开始排放时, 由于巷道内瓦斯浓度降低, 原有的浓度平衡被打破, 则煤层中的瓦斯开始向巷道内涌出。假设开始排放瓦斯后煤层向巷道涌出的气体量为 q_{emit} , 其中的瓦斯浓度为 C_{emit} , 如图 2 右端所示。对于 V_0 而言, q_{emit} 和 q_{in} 均为单位时间内进入其中的气体, 所不同的是二者的瓦斯浓度。因此, 可以定义一个总的进入 V_0 的流量 $q_{L,\text{in}}$ 和浓度 $C_{L,\infty}$, 则二者满足如下关系式:

$$q_{L,\text{in}} = q_{\text{in}} + q_{\text{emit}} \quad (20)$$

$$C_{L,\infty} = \frac{q_{\text{in}} C_{\infty} + q_{\text{emit}} C_{\text{emit}}}{q_{\text{in}} + q_{\text{emit}}} \quad (21)$$

这样只需将式(12)一式(18)中的 $q_{\text{in}}, C_{\infty}$ 分别用 $q_{L,\text{in}}$ 和 $C_{L,\infty}$ 代替, 即可得到完全相同的公式。

但由于增加了一个源项 q_{emit} , 计算最大瓦斯排放速度时应将此剔除, 因此式(19)可修正为

$$q_1 = Q(C_1 - C_{L,\infty})/C_0 - q_{\text{emit}} = Q\tilde{C}_1/C_0 - q_{\text{emit}} \quad (22)$$

2 应用

某矿一工作面顺槽掘进时由于某种原因密闭了一段时间之后(图 1), 需要重新打开密闭开始掘进, 因此需要首先对巷道内积存的瓦斯气体进行排放。经过密闭上预留的测孔检测, 并参考巷道密闭时间, 预计巷道内的瓦斯平均浓度为 $C_0 = 18\%$ 。巷道断面 $S = 10\text{m}^2$, 巷道长度 $L = 100\text{m}$, 因此密闭空间的体积为 $V_0 = SL = 1000\text{m}^3$, 回风流中允许的最高瓦斯浓度为 $C_1 = 1.5\%$, 全负压风量 Q 为 $15\text{m}^3/\text{s}$, 瓦斯爆炸范围为 $5\% - 16\%$ 。当采用风量为 $q_{\text{in}} = 1\text{m}^3/\text{s}$ 的局扇排放瓦斯时 (小于最大排放速度), 可用上述传统计算方法和本文第 1.3 节提出的 3 种数学模型分别进行计算, 结果如表 1 所示。

表 1 不同模型条件下的瓦斯排放参数计算
Table 1 Parameters calculation of gas drainage with different models

模型	最大排放速度 $q_1/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	排放时间 t/s	危险排放时间 $t_{\text{danger}}/\text{s}$	条件
传统计算方法	1.25	11000.000	—	$C_{\infty} = 0, C_{t+1} = 1.5, q_{\text{emit}} = 0, q_{\text{in}} = 1$
模型 (1)	1.25	2486.149	1164	$C_{\infty} = 0, C_{t+1} = 1.5, q_{\text{emit}} = 0, r = 0.001$
模型 (2)	1.17	2549.602	1178	$C_{\infty} = 0.1, C_{t+1} = 1.5, q_{\text{emit}} = 0, r = 0.001$
模型 (3)	1.08	2566.553	1150	$C_{L,\infty} = 0.2, C_{t+1} = 1.5, q_{\text{emit}} = 0.02, C_{\text{emit}} = 50, r = 0.00102$

从表 1 可以看出,采用传统方法计算出来的瓦斯排放时间大约是本文所介绍的模型计算出来的排放时间的 4 倍,过于保守。

3 结论

(1) 建立了新的瓦斯排放数学模型,推导了瓦斯浓度与排放时间之间的关系式以及计算瓦斯排放时间、危险排放时间和排放风险的公式,进而得出危险排放时间与初始浓度无关、排放风险与排放率无关的重要结论。

(2) 分别采用传统方法和本文提出的模型对一瓦斯排放做了计算,结果表明传统计算方法所得出的瓦斯排放时间过于保守。

(3) 由于理论基础和实际操作过程的相似性,本文所建立的瓦斯排放数学模型略加修改即可推广应用到其他领域大型密闭空间有害气体的排放中。

参考文献 (References)

- [1] 梁恒生. 浅谈煤矿瓦斯排放的技术要求[J]. 科学之友, 2011(12): 27-28.
Liang Hengsheng. *Friend of Science Amateurs*, 2011(12): 27-28.
- [2] 王俊伟. 1201 工作面瓦斯排放方法选择及其应用[J]. 山西煤炭, 2011, 31(6): 55-56.
Wang Junwei. *Shanxi Coal*, 2011, 31(6): 55-56.
- [3] 郭团结, 谷艺星. 浅谈独头巷道瓦斯排放方法、措施及注意事项[J]. 煤矿现代化, 2008(3): 36.
Guo Tuanjie, Gu Yixing. *Modern Coal Mines*, 2008(3): 36.
- [4] 陈建华, 孟凡新, 夏永中. 矿井瓦斯排放方法探讨 [J]. 中州煤炭, 2009(4): 89-91.
Chen Jianhua, Meng Fanxing, Xia Yongzhong. *Zhongzhou Coal*, 2009(4): 89-91.
- [5] 吴兵, 郭杰, 王志亮, 等. 矿井瓦斯排放方法及评测[J]. 煤炭科学技术,

- 2004, 32(4): 64-66.
Wu Bing, Guo Jie, Wang Zhiliang, et al. *Coal Science and Technology*, 2004, 32(4): 64-66.
- [6] 闫志龙. 独头巷道的瓦斯排放 [J]. 科技情报开发与经济, 2005, 15(14): 262-263.
Yan Zhilong. *Sci-Tech Information Development & Economy*, 2005, 15(14): 262-263.
- [7] 姜国强. 浅谈独头巷道瓦斯排放的几种常用方法 [J]. 科技创新导报, 2008(33): 201-202.
Jiang Guoqiang. *Science and Technology Innovation Herald*, 2008(33): 201-202.
- [8] 漆旺生, 李华炜, 李建堂. 浅析瓦斯排放的安全措施[J]. 煤炭科学技术, 1999, 27(3): 26-28.
Qi Wangsheng, Li Huawei, Li Jiantang. *Coal Science and Technology*, 1999, 27(3): 26-28.
- [9] 戴启. 独头巷道瓦斯排放时间的探讨[J]. 煤炭工程师, 1998(2): 33-35.
Dai Qi. *Coal Engineer*, 1998(2): 33-35.
- [10] 王志玉. 复杂区域巷道贯通和瓦斯排放综合技术实践 [J]. 华北科技学院学报, 2011, 8(2): 6-8.
Wang Zhiyu. *Journal of North China Institute of Science and Technology*, 2011, 8(2): 6-8.
- [11] 贺玉凯, 王汝琳, 邓建平, 等. 智能瓦斯排放系统研究 [J]. 煤矿机械, 2005(2): 29-30.
He Yukai, Wang Rulin, Deng Jianping, et al. *Coal Mine Machinery*, 2005(2): 29-30.
- [12] 王淑芳, 杨智勇, 李一男. 组合赋权在瓦斯排放模型中的应用 [J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2011, 29(4): 625-629.
Wang Shufang, Yang Zhiyong, Li Yinan. *Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition*, 2011, 29(4): 625-629.
- [13] 王淑芬, 王汝琳, 邓建平, 等. S7-200 在煤矿瓦斯排放中的研究与应用[J]. 煤矿机械, 2005(1): 23-25.
Wang Shufen, Wang Rulin, Deng Jianping, et al. *Coal Mine Machinery*, 2005(1): 23-25.

(责任编辑 刘志远)

· 科学共同体介绍 ·

中国空气动力学会

中国空气动力学会 (Chinese Aerodynamics Research Society) 是全国性的空气动力学科技工作者组成的非营利的、公益性的学术性社会团体,它组织和联合航空航天、科研院所、高等院校和工业部门开展空气动力学方面的科学研究、学术会议、期刊出版和科学普及活动。

1978 年, 钱学森倡议成立空气动力学学术团体。1980 年 6 月 10 日在上海成立中国空气动力学研究会, 钱学森、沈元当选为名誉会长, 庄逢甘为会长, 曹鹤

苏等为副会长, 委员 136 名。1980 年 9 月 12 日经中国科协批准, 被命名为中国空气动力学研究会。1989 年 10 月, 常务理事会议决定并经中国科协批准改名为中国空气动力学会, 并在民政部登记注册。学会 2002 年 6 月 12 日在四川绵阳召开第四次会员代表大会, 选举钱学森、沈元、庄逢甘为名誉理事长, 张涵信为理事长, 崔尔杰等为副理事长, 理事 116 名。

中国空气动力学会设有风工程与工业空气动力学、低跨超声速空气动力学等 9 个专业委员会。学会自办或与兄弟

学会联合举办了国际国内学术会议, 内容涉及跨声速、高超声速、分离流、涡运动、非定常效应、涡控制、激波、计算流体、实验流体、物理气体、流体弹性、大气扩散、风能开发、风力工程、流动显示、测量控制等方面。学会出版发行《空气动力学学报》、《流体力学实验与测量》等刊物。

2010 年 5 月, 中国空气动力学会第六次全国会员代表大会在四川绵阳召开, 邓小刚当选为新一届理事长, 上一届理事长张涵信院士当选为名誉理事长。

(责任编辑 秦政)