

文章编号: 1673-3363-(2012)03-0429-05

不同当量比条件下 矿井瓦斯爆炸过程的数值模拟

陈先锋^{1,2}, 张银^{1,3}, 许小江¹, 王亚平¹, 李星¹

(1. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430070; 2. 中国科学技术大学火灾科学
国家重点实验室, 安徽 合肥 230027; 3. 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院, 云南 昆明 650051)

摘要 为了研究管道预混火焰的传播特性及内在机理, 运用数值模拟的方法, 建立矿井瓦斯气体爆炸的数学模型和物理模型, 对不同当量比浓度的矿井瓦斯气体爆炸过程进行模拟研究。计算结果表明, 矿井瓦斯气体爆炸过程中速度和压力值均会经历上升-下降-二次波峰-下降-震荡的过程。火焰传播初期, 气体爆燃体积迅速增大, 火焰的速度、压力和温度随之迅速上升, 并在一段时间内呈现层流燃烧状态。而后速度和压力均出现了不同程度的波动, 可知这是压力波和反射波共同作用的结果。速度和压力并未同时达到峰值, 速度要超前于压力达到最大状态, 这主要是爆炸压力波和反射压力波的相互叠加作用导致压力上升, 而反射压力波导致速度下降。当量比浓度的压力、速度值最小, 燃烧持续时间最长, 此时气体还未完全加速, 未形成爆轰状态。

关键词 瓦斯爆炸; 当量比浓度; 数值模拟; 火焰传播

中图分类号 TD 712

文献标识码 A

Numerical Simulation on Mine Gas Explosion in Different Gas Content

CHEN Xian-feng^{1,2}, ZHANG Yin^{1,3}, XU Xiao-jiang¹, WANG Ya-ping¹, LI Xing¹

(1. Institute of Natural Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China; 2. State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China; 3. HydroChina Kunming Engineering Corporation, Kunming, Yunnan 650051, China)

Abstract In this paper, to research the propagation rule and inherent mechanism of premixed flame in pipeline, we established the mathematical model and physical model by using numerical simulation method, and conducted simulation research on the process of mine gas explosion in different gas content. The calculation results show that both the velocity and pressure in gas explosion process experience the stages of “rise - fall - second wave - fall - swing”. In the initial stage of the flame propagation, the deflagration volume of gas increases rapidly, and the velocity, pressure and temperature of the flame also rise up quickly, and present laminar burning state during a certain time. Then, both the velocity and pressure have appeared swings in various degrees, which are the results of concurrent effects of pressure wave and reflected wave. Meanwhile, the velocity of the flame achieves the peak value ahead the pres

收稿日期: 2011-07-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50804038, 51174153); 火灾科学国家重点实验室开放课题项目 (HZ2011-KF06); 公安部重点研究计划项目 (2011ZDYJHBXF020)

作者简介: 陈先锋 (1975-), 男, 湖北省应城市人, 副教授, 博士, 从事工业防火防爆及灾害机理方面的研究。

E-mail: cxf618@whut.edu.cn

Tel: 13627212572

sure, this is mainly attributed to the superimposition of explosion pressure wave and reflected pressure wave, which leads to the rise of pressure, while the reflected pressure wave leads to the decrease of velocity. The best content of mine gas is that the velocity and pressure are in the minimum value, and the gas burning lasts the longest time, in this time the mine gas hasn't been completely accelerated, and haven't formed the detonation state.

Key words gas explosion; gas content; numerical simulation; flame propagation

为了有效遏制矿井瓦斯气体爆炸事故的发生,人们建立了多种实验研究手段来探索管道预混火焰的传播特性及内在机理,有建立大型实验管道的,如 Wingerden^[1], Chao^[2], 徐景德^[3]等;有建立小尺寸实验管道平台的,如林柏泉^[4]、喻健良^[5]、Chen^[6]等;还有建立数值模型进行模拟计算研究的,如范宝春^[7]。由于大型实验平台的费用高、局限性、数据采集难度大,所以现今的研究手段多集中在小尺寸实验平台和数值模拟计算。

数值模拟的方法是利用现今计算机的超强数值运算能力,编制运行程序,来求解满足不同种类流体的运动和传热传质规律的 3 大守恒定律及附加的各种模型方程所组成的非线性偏微分方程组,得到确定边界条件的数值解,这种兼有理论性和实践性的方法手段已成为解决爆炸等复杂问题的有效手段^[8]。本文正是利用了数值模拟成本低、周期短、不受实验仪器的干扰、可改变量多等优点,建立了爆燃过程中的流体力学基本方程组和燃烧反应方程,研究管道瓦斯爆炸火焰传播中的动态特征和内在机理,对弄清矿井瓦斯爆炸事故的原因,制定有效泄爆抑爆措施,减少灾害损失具有重要的意义。

1 建立数学物理模型

1.1 数学模型基本公式

由流体力学基本方程组建立数学模型^[9],具体如下所示。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\rho \frac{du}{dt} = \rho F + \nabla \cdot P \quad (2)$$

能量方程:

$$\rho \frac{de}{dt} = \rho q + \nabla \cdot (k \nabla T) + \nabla \cdot (uP) - u \nabla p \quad (3)$$

理想气体状态方程:

$$p = p(\rho, T) \quad (4)$$

Navier-Stocks 方程:

$$\rho \frac{du}{dt} = \rho F + \nabla \cdot (-p + \lambda \nabla \cdot u) + \nabla \cdot (2\mu S) \quad (5)$$

式中: ρ 为密度; u 为速度; F 为体积力; p 为气体压力; P 为应力张量; k 为热导率; e 为单位质量内能; q 为热流量; μ 为动力黏度系数; S 为变形速率张量。

燃烧反应过程的组分方程组为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho m_{fu}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j m_{fu}) - \\ \frac{\partial}{\partial x_j}(D_{fu} \frac{\partial m_{fu}}{\partial x_j}) = R_{comb} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho M_f) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j M_f) - \\ \frac{\partial}{\partial x_j}(D_{mf} \frac{\partial M_f}{\partial x_j}) = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

式中: m_{fu} 为可燃性气体所占质量百分率, 燃烧中逐渐被燃烧项 R_{comb} 所消耗; M_f 为混合关系, 由初始浓度配比决定, 为守恒物理量。由组份方程组可以确定混合气中各个组份的量。

对燃烧过程中的湍流过程, 这也是气体爆炸机理的关键因素, 目前对燃烧过程中的湍流过程, 国外广泛运用的描述模型为 $k-\varepsilon$ 模型^[10], 该模型为湍流动能 k 和湍流动能的扩散速率 ε 的守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \\ \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_k \frac{\partial}{\partial x_j}) + \tau_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} - \rho \varepsilon \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) = \\ \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_\varepsilon \frac{\partial}{\partial x_j}) + c_1 \tau_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} - c_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: Γ 为湍流扩散因子; c_1, c_2 为模型常数。

湍流强度

$$u' = \sqrt{\frac{2}{3} k} \quad (10)$$

特征长度

$$L_t = C_\mu^{0.75} \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \quad (11)$$

结合以上方程组,即可形成一个可燃性气体爆炸过程的数值计算方案。具体计算过程可使用控制容积法、差分法等。

1.2 物理模型

模拟实验管道的物理模型为长方形,长为 5 m,

宽为 0.1 m, 高为 0.1 m, 点火处位于左侧封闭端, 管道右侧设置泄压口, 泄压口比率 24%, 最左端到最右端均匀设置 11 个测点, 见图 1。主要参数包括: 网格数: $50 \times 6 \times 6$; 初始压力: 1 atm; 初始温度: 293.15 K; 层流火焰拉伸系数 $F_s=0.15$; 无量纲湍流系数 $C_t=30$; $k-\varepsilon$ 模型常数: $C_1=1.44$, $C_2=1.79$, $C_\mu=0.09$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$, 湍流动能转换系数 $F_k=0.1$ 。

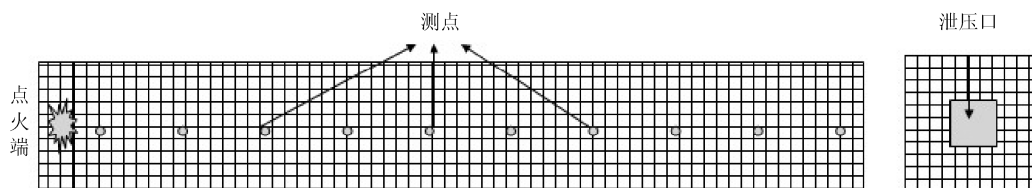


图1 网格划分、测点及底端横截面示意图

Fig.1 Meshing, the measuring spot set and the bottom section

2 瓦斯气体爆炸的模拟结果分析

2.1 当量比体积分数下火焰加速机理

在理想状态下, 当量比体积分数的 (9.5%) 瓦斯气体燃烧速度和爆热反应热达到最大, 爆燃的强

度也达到最大, 破坏力也最大^[11], 因此对当量比体积分数的可燃预混气的爆炸过程进行爆炸模拟意义重大。图 2~3 都是基于体积分数 9.5% 时所得出的图像。

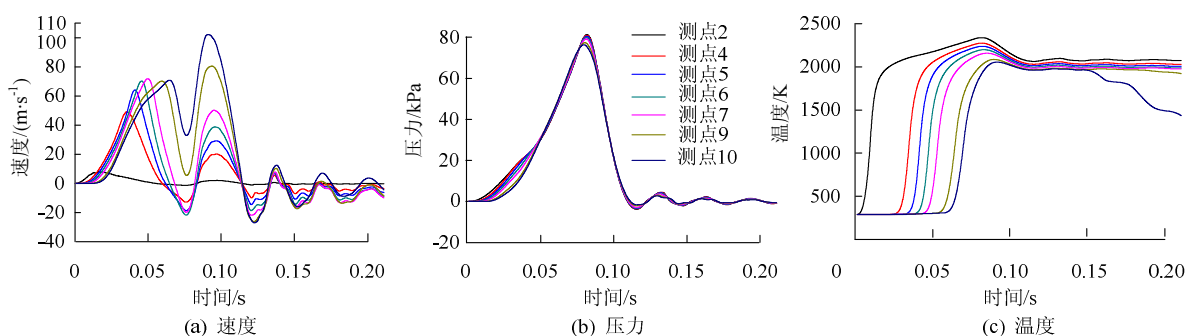


图2 各测点所测参数随时间变化图

Fig.2 Relation of parameters and time of different measuring points

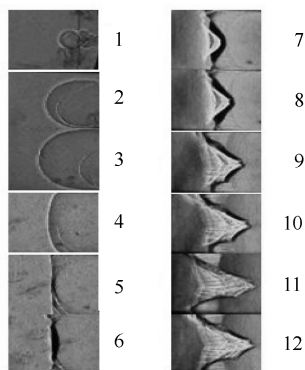


图3 当量比体积分数下瓦斯爆炸典型纹影图

Fig.3 High-speed schlieren photographs of mine gas

图 2a 为模拟管道内各测点处所测的速度随时间变化图。由图易知测点处的质点速度基本都经历

了先迅速上升, 而后出现下降, 但随即上升出现二次峰值, 然后在一定范围内震荡的过程。测点 2 设置离点火处较近, 测点 10 离泄压口较近, 所以模拟数据可靠性较低, 故分析时不予考虑 (后同)。在初期, 管道内的矿井瓦斯气体被点燃后, 火焰流场的速度迅速增加, 这是由于在封闭管道内, 燃烧产物体积的迅速膨胀使火焰速度加速传播, 对照当量比体积分数下瓦斯爆炸典型的高速纹影图片^[12] (图 3) 可知, 此阶段大概是图 3 中的 1~3 阶段。质点速度并没有一直增加, 最大峰值能达到 71.84 m/s, 到了峰值后出现下降, 根据气体爆炸过程分析, 这是压力波传播到端头后反射, 在反射压力波的作用下火焰速度出现下降的现象, 大概是图 3 的

4~5 阶段。而后再次上升出现二次峰值并在一定范围内震荡,这往往是出现了湍流的标志,大概是图 3 的 6~12 阶段。

图 2b 是各测点所测压力随时间变化图。由图可知在随着管道火焰的传播(泄压前期),压力值是迅速增大的,0.082 s 内由 0 增大到 79.90 kPa。泄压后超压值迅速下降并出现波动,这是形成了湍流后的不稳定现象。图像中的各个测点符合度较高,表明在气体爆炸所产生的超压在各测点均匀变化。图 2c 是各测点所测温度随时间的变化图。由图可以看到随着时间的增加,火焰阵面经过未燃区,流场的温度急剧上升,0.046 s 内上升到 1856.5 K,在 0.084 s 时各测点开始有微小的下降,此时虽然管道已经泄压了,但是温度短期内不会大幅下降。

经过以上的分析,综合可知火焰传播初期,由于气体爆燃体积迅速增大,火焰的速度、压力和温度都会迅速上升,并在一段时间内呈现层流燃烧状态。而后速度和压力图均出现了不同程度的波动,可知这是压力波和反射波共同作用的结果。

2.2 不同当量比体积分数下的火焰传播特性

为了研究不同体积分数条件下矿井瓦斯气体爆炸火焰的传播特性,本模拟分别在贫燃、当量比体积分数、富燃条件进行了数值模拟。

图 4 是在当量比体积分数 6%, 9.5%, 10%, 13% 条件下从模拟结果中解析出的速度压力随时间变化的曲线图。曲线均出现了下面 3 个阶段,第 I 阶段,质点的速度和压力随着时间的进行呈现上升趋势,这是由于在燃烧发生的初期,燃烧产生的气体膨胀使得速度和压力迅速上升;第 II 阶段,速度开始下降到最小值的同时压力上升到最大值,根据分析,前驱压力波到达端头后触发的反射压力波迫使速度迅速下降,甚至在短时间内出现了反向速度,此时还未泄压,压力仍在积蓄;第 III 阶段,速度下降到最小值后会出现二次峰值,压力会一直减小,最后压力和速度均呈现一定程度的波动,这时是在出现泄压之后,火焰出现弯曲褶皱,涡流开始影响火焰的结构,随着湍流强度的增大压力和速度出现震荡。

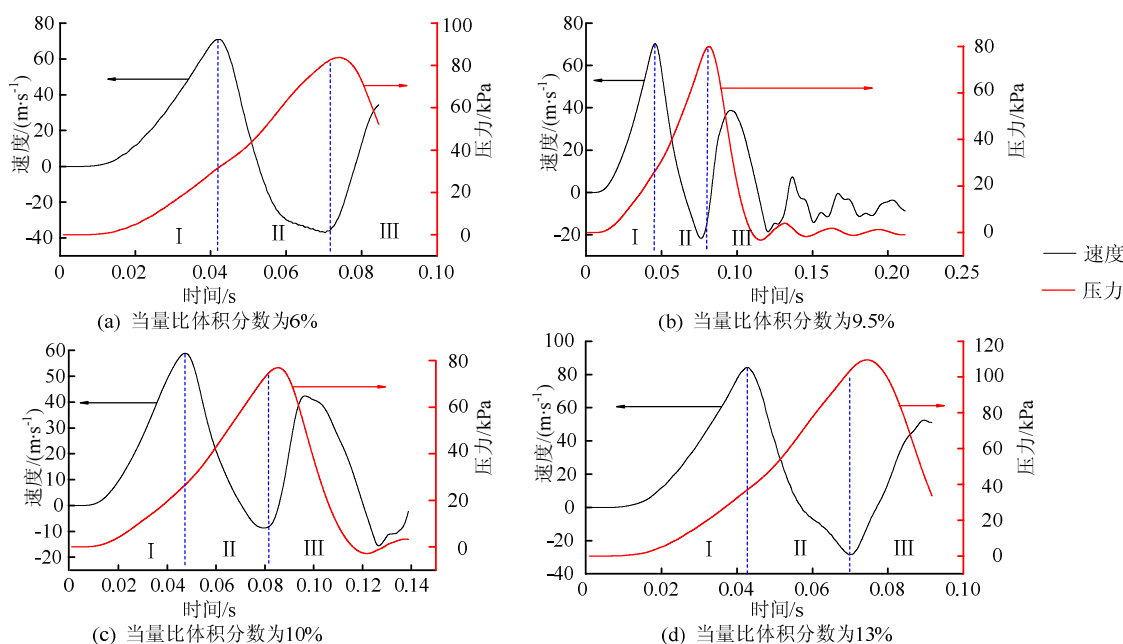


图 4 不同当量比体积分数下速度压力随时间变化曲线

Fig.4 Relationship between flame velocity, pressure and time of different gas content

依图 4 中显示,速度和压力并未同时达到峰值,速度要超前于压力达到最大状态,这主要是爆炸压力波和反射压力波的相互叠加作用导致压力上升,而反射压力波导致速度下降。

图 5 为不同当量比体积分数下压力和速度的对

比曲线。从曲线图易看出,13% (富燃) 时压力和燃烧速度最大。当量比体积分数时 (9.5%) 燃烧过程持续了 0.211 s, 6% (贫燃) 燃烧过程持续了 0.085 s, 13% (富燃) 燃烧过程持续了 0.092 s。速度峰值间相差 13.99 m/s, 压力峰值间相差 29.72 kPa。

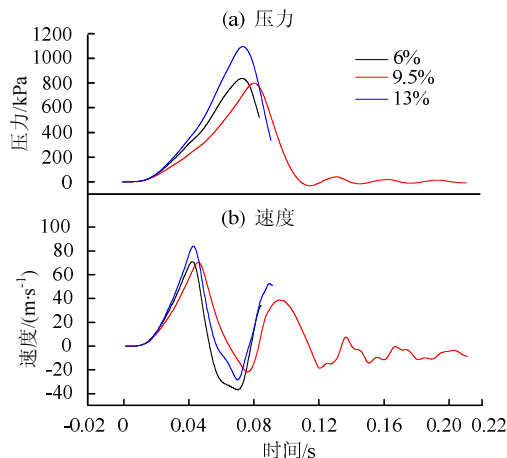


图5 不同当量比体积分数的压力与速度时间图

Fig.5 Relation of pressure, velocity and time of different gas content

一般情况下,在最佳当量比体积分数(9.5%)下由于燃烧的强度最大,其压力和速度的峰值应该是最小的^[11]。但是在本次模拟条件下,当量比体积分数9.5%时压力和速度的峰值反倒最小,经过对气体燃烧爆炸过程的初步分析,在该工况条件下矿井瓦斯气体在层流燃烧阶段未完全加速,就受到了反射压力波的作用,未形成爆燃状态。

3 结 论

1) 矿井瓦斯气体爆炸过程中速度和压力值均会经历上升-下降-二次波峰-下降-震荡的过程。火焰传播初期,气体爆燃体积迅速增大,火焰的速度、压力和温度随之迅速上升,并在一段时间内呈现层流燃烧状态。而后速度和压力图均出现了不同程度的波动,可知这是压力波和反射压力波共同作用的结果。

2) 速度和压力并未同时达到峰值,速度要超前于压力达到最大状态,这主要是爆炸压力波和反射压力波的相互叠加作用导致压力上升,而反射压力波导致速度下降。

3) 依据模拟结果,可以得出 $V(13\%) > V(6\%) > V(9.5\%)$, $P(13\%) > P(6\%) > P(9.5\%)$, $T(9.5\%) > T(13\%) > T(6\%)$ 。可见当量比体积分数下(9.5%)的压力、速度值最小,燃烧持续时间最长,可以推断此时气体还未完全加速,未形成爆轰状态。

参考文献:

[1] WINGERDEN K V, BJERKETVEDT D, BAKKE J R, et al. Detonations in pipes and in the open[R]. [S.l.]: Christian Michelsen Research, 1999.

[2] CHAO J, KOLBE M, LEE J H S. Influence of tube and obstacle geometry on turbulent flame acceleration and deflagration to detonation transition[D]. Montreal, Department of Mechanical Engineering, McGill University, 1999.

[3] 徐景德, 徐胜利, 杨庚宇. 矿井瓦斯爆炸传播的试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2004, 32(7): 55-57.
XU Jing-de, XU Sheng-li, YANG Geng-yu. Experimental study on mine gas explosion diffusion[J]. Coal Science and Technology, 2004, 32(7): 55-57.

[4] 林柏泉, 张仁贵, 吕恒宏. 瓦斯爆炸过程中火焰传播规律及其加速机理的研究[J]. 煤炭学报, 1999, 24(1): 56-58.
LIN Bai-quan, ZHANG Ren-gui, LV Heng-hong. Research on acceleration mechanism and flame transmission in gas explosion[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(1): 56-58.

[5] 喻健良, 周崇, 刘润杰, 等. 可燃气体爆炸火焰和压力波传播特性的实验研究[J]. 天然气工业, 2004, 24(4): 87-90.
YU Jian-liang, ZHOU Chong, LIU Run-jie, et al. Experimental study on propagating characteristics of flame and pressure waves in explosion of combustible gases[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(4): 87-90.

[6] CHEN Xian-feng, SUN Jin-hua, LU Shou-xiang, et al. Influence of rarefaction wave on premixed flame structure and propagation behavior[J]. Progress in Natural Science, 2007, 17(3): 328-333.

[7] 范宝春, 姜孝海, 谢波. 障碍物导致甲烷-氧气爆炸的三维数值模拟[J]. 煤炭学报, 2002, 27(4): 371-373.
FAN Bao-chun, JIANG Xiao-hai, XIE bo. Three dimensional numerical simulation of explosion induced by obstacles in $\text{CH}_4\text{-O}_2$ mixture[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(4): 371-373.

[8] 王瑞金, 张凯, 王刚. Fluent技术基础与应用实例[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.

[9] 张廷芳. 计算流体力学[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1992.

[10] LAUNDER B E, SPALDING D B. Mathematical models of turbulence[M]. London: Academic Press, 1972.

[11] 徐景德, 周心权, 吴兵. 瓦斯浓度和火源对瓦斯爆炸传播影响的实验分析[J]. 煤炭科学技术, 2001, 29(11): 15-17.
XU Jing-de, ZHOU Xin-quan, WU Bing. Experimental analysis on gas density and fire resource affected to expansion of gas explosion[J]. Coal Science and Technology, 2001, 29(11): 15-17.

[12] CHEN X F, ZHANG Y, CHEN M. et al. Experiment on thin structure behavior of explosion flame flow field[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011(44/47): 2793-2797.