

文章编号: 1673-3363-(2014)01-0139-07

瓦斯爆燃防爆安全距离及传播特征的数值模拟

江丙友^{1,2}, 林柏泉^{1,2}, 陈健¹, 郭畅^{1,2}, 张鹏¹

(1. 中国矿业大学安全工程学院, 江苏 徐州 221116;

2. 中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要 运用 AutoReaGas 软件建立了长为 100 m, 截面为 0.08 m×0.08 m 的爆炸巷道, 其中前 10 m 巷道均匀充满体积分数 9.5% 的甲烷与空气预混气体。结果表明: 在瓦斯爆炸传播过程中, 最大超压呈现先减小、后增大、再减小的变化过程, 它在火焰熄灭的位置附近达到最大。最大燃烧速率和火焰传播速度均随着传播距离的增加而增大, 取得最大值后又开始减小。最大超压和最大气流速度在距离点火源 35 m 时均已减小为零, 最大密度在此点也减小为原始密度, 此条件下的防爆安全距离为 35 m。最大燃烧速率和火焰传播速度在距离点火源 17 m 时均已减小为零, 火焰锋面传播的最大距离为 17 m。气体发生逆流与火焰的存在有关。研究成果可为煤矿瓦斯爆炸最佳避灾路线的确定、爆炸发生后的抢险救灾、事故的调查等提供参考。

关键词 瓦斯爆炸; 爆炸波; 火焰; 防爆安全距离; 数值模拟

中图分类号 TD 712.7

文献标志码 A

Numerical simulation of explosion-proof safety distance and propagation characteristics of gas deflagration

JIANG Bingyou^{1,2}, LIN Baiquan^{1,2}, CHEN Jian¹, GUO Chang^{1,2}, ZHANG Peng¹

(1. Faculty of Safety Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract In this paper, an explosion roadway with the length of 100 m and cross-sectional area of 0.08 m×0.08 m was established by using AutoReaGas Software, where the methane/air mixture gas with 9.5% fuel concentration is distributed uniformly within the first 10 m of the roadway. The results show that the maximum explosion overpressure presents a changing trend of decreasing, increasing, and decreasing again in the process of gas explosion propagation, and reaches its maximum value near the location where the flame is extinguished. Both the maximum combustion rate and flame propagation speed increase firstly with the increase of propagation distance, and then begin to decrease after obtaining their corresponding maximum values. The maximum overpressure and gas velocity have reduced to zero at the distance of 35 m from the ignition source, and the maximum density also has decreased to its initial value at this distance. These trends indicate that the explosion-proof safety distance is 35 m under this condition. The maximum combustion rate and flame propagation speed have reduced to zero at the

收稿日期: 2012-11-19

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项资金项目(2013YQ17046309); 国家自然科学基金项目(51204174, 51274195, 51004048, 51374003, U1361106); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXZZ12_0960); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2012DXS02); 江苏省自然科学基金项目(BK2012571); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-12-0959)

作者简介: 江丙友(1987-), 男, 安徽省亳州市人, 博士, 从事矿井瓦斯防治方面的研究。

E-mail: cumtjiangby@163.com

Tel: 15996953831

distance of 17 m, which indicates that the maximum distance of flame propagation is 17 m. The occurrence of gas backflow is related to flame propagation. The research results can provide references to optimal route determination for avoiding gas explosion disasters in underground coal mines, the emergency rescue and disaster relief after gas explosion, the explosion accident investigation, and so on.

Key words gas explosion; blast wave; flame; explosion-proof safety distance; numerical simulation

当瓦斯爆炸在煤矿巷道内传播时,随着可燃气体的消耗和不可逆的能量损失(如冲击波波阵面内层存在着热传导和热辐射等),使冲击波不断发生衰减,最终转化为声波^[1],因此存在一个防爆安全距离。安全距离是指井下发生瓦斯爆炸时,从爆炸中心到井下人员不受冲击波伤害的最小直线距离^[1]。对于直巷道,防爆安全距离可用爆源点到冲击波衰减为声波的距离表示。煤矿在制定瓦斯爆炸应急救援预案时,通过统计井下可能发生瓦斯爆炸的地点,利用防爆安全距离可确定合理的瓦斯爆炸避灾路线,一旦井下发生瓦斯爆炸,矿领导即可根据防爆安全距离确定冲击波可以波及的范围,为救护队的抢险救灾提供参考。因此,开展瓦斯爆炸安全距离的研究对井下人员的安全、爆炸事故的预防与救灾等都具有极其重要的实际意义。

国外学者 Lee J H S 等^[2]第一次比较全面的概述了火焰的加速及其转变成爆轰的过程, Ciccarella G 等^[3]论述了近些年的最新研究成果, Oran E S 等^[4]通过数值模拟的手段深入分析了火焰加速最终转变成爆轰的过程。爆燃到爆轰的转变及其转变距离也已被广泛地研究^[5-10]。Dorofeev S B^[11]简述了火焰加速机理及其应用到爆炸安全的最新研究成果。先前出版的成果大多集中在火焰的加速和爆燃转爆轰方面,关于安全距离的研究多见于工程爆破、水下爆破、液化石油气、液化天然气、油罐火灾、建筑玻璃防爆等方面^[12-17],防火距离的研究多见于建筑防火设计和储罐区池防火方面^[18-19]。除了林柏泉教授等^[20]研究了初始温度对瓦斯爆炸安全距离影响之外,有关煤矿瓦斯爆炸防爆安全距离和防火距离等方面的研究较少。

考虑到 AutoReaGas 软件具有很好的可用性和可靠性^[21-29],本文运用该软件对瓦斯爆燃的传播特征、防爆安全距离及防火距离进行研究。研究成果希望能为煤矿井下瓦斯爆炸事故的预防和救灾提供指导,也可供我国《矿山救护规程》中相关内容的修订作参考。

1 瓦斯爆燃模型

AutoReaGas 是由美国世纪动力公司和荷兰 TNO 联合开发的三维计算流体动力学软件,该软件主要用于模拟可燃气体爆炸及其产生的冲击效应,它包括爆燃和爆轰 2 种模型,在此研究爆燃模型。AutoReaGas 软件的可靠性已被广泛证实,例如在著名的 BFETS 测试中,模拟结果与实验数据吻合的很好。美国于 2006 年运用 AutoReaGas 软件非常真实的还原了煤矿井下瓦斯爆炸的发生及对设备的破坏情况。Popat N R 等^[30]对 FLACS 和 AutoReaGas2 种软件分析得出它们都能较好的对爆炸特征参数进行预测,但都存在一定误差,FLACS 的预测值比实验值偏小,而 AutoReaGas 预测值偏高。考虑到煤矿瓦斯爆炸的防护和工程设计需要一定安全值,即“就高不就低”,故采用 AutoReaGas 进行瓦斯爆炸计算是正确的选择。

瓦斯爆燃过程在数学模型上可以模拟为理想气体的受热膨胀过程,气体动力学过程可用质量守恒、动量守恒、能量守恒及燃料组分方程来表示。在笛卡尔坐标系下分别为^[20]:

连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0$$

动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$$

能量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j E) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_E \frac{\partial E}{\partial x_j}) - \frac{\partial}{\partial x_j}(p u_j) + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

燃料组分方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho m_{fu}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j m_{fu}) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_{fu} \frac{\partial m_{fu}}{\partial x_j}) + R_{fu}$$

湍流是气体燃烧爆炸的重要因素,采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型,湍流动能 k 方程^[3]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}) + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon$$

湍流动能的耗散率 ε 方程^[31]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma \varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k}$$

$$\tau_{ij} = \mu_t (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) - \frac{2}{3} \delta_{ij} (\rho k + \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_j})$$

式中: ρ 为密度; u_i 为 i 坐标方向上的粒子速度; p 为静压; $E = C_v T + m_{fu} H_c$ 为比内能; k 为湍流动能; ε 为湍流动能的耗散率; m_{fu} 为燃料质量分数; $\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon$ 为湍流黏度; R_{fu} 为体积燃烧速率; C_v 为定容比热; T 为温度; H_c 为燃烧热; Γ 为输运特性的湍流耗散系数; δ_{ij} 为克罗内克算子; i, j 为坐标方向; C_1, C_2, C_μ 为湍流模型常数。

湍流强度 u' 和湍流特征尺寸 L_t 可由 k, ε 表示为^[32]:

$$u' = \sqrt{\frac{2}{3}k} \quad L_t = C_\mu^{0.75} \frac{k^{3/2}}{\varepsilon}$$

湍流燃烧速度与湍流参数及混合物特性参数的关系为^[33]:

$$S_t = 1.8 u'^{0.412} L_t^{0.196} S_l^{0.784} \nu^{-0.196}$$

式中: S_t 为湍流燃烧速度, m/s; S_l 为层流燃烧速度, m/s; ν 为混合物的运动黏度, m^2/s 。

2 数值模型及初始条件

爆炸模拟巷道长为 100 m, 断面为 0.08 m×0.08 m, 如图 1 所示。巷道终端开口, 其它壁面均封闭。爆炸气体为甲烷和空气的预混气体, 甲烷体积分数为 9.5%, 可燃气体均匀分布于前 10 m 的巷道内。初始温度保持为 288 K 不变, 初始压力为 101.3 kPa。沿着巷道横截面的中心, 距离点火端每隔 1 m 布置一个测点, 共计 99 个测点, 用来监测瓦斯爆炸过程中产生的超压、温度、密度、燃烧速率及气流速度等参数。在 x, y, z 方向上分别划分了 1 000, 4, 4 个网格, 共计 16 000 个网格和 25 025 个节点。在充有可燃气体的封闭端点火, 研究瓦斯爆燃的传播特性及防爆安全距离。

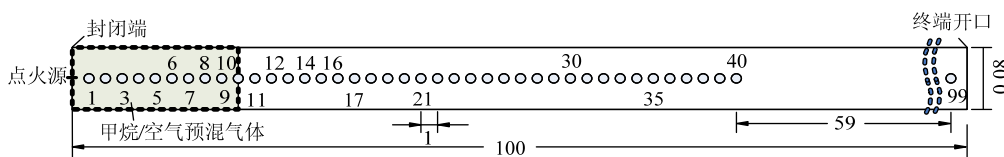


图1 模拟巷道的物理模型 (m)

Fig.1 Physical model of the simulative roadway

3 计算结果与分析

前人研究得出爆炸波经过某测点时会造成该点的超压、密度和气流速度发生较大变化, 为了探

讨爆炸波的传播特征, 将这些参数的历史曲线分别绘制成图 2~4。

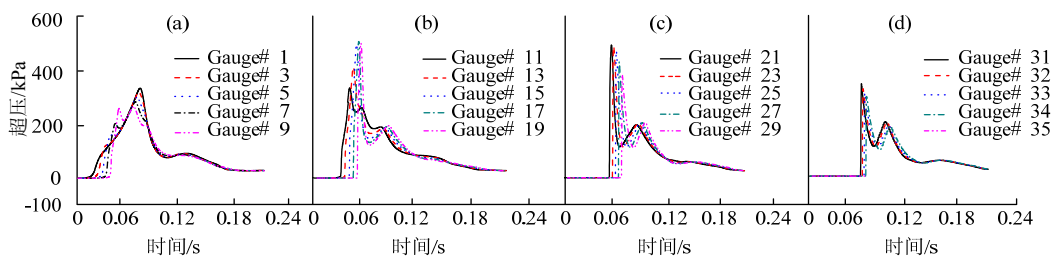


图2 超压历史曲线

Fig.2 Profiles of overpressure-time

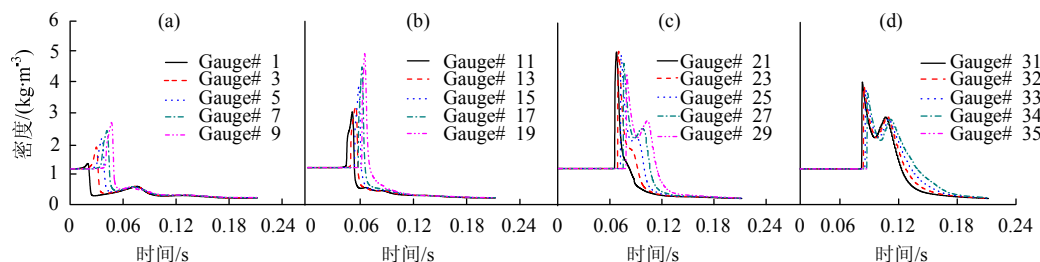


图3 密度历史曲线

Fig.3 Profiles of density-time

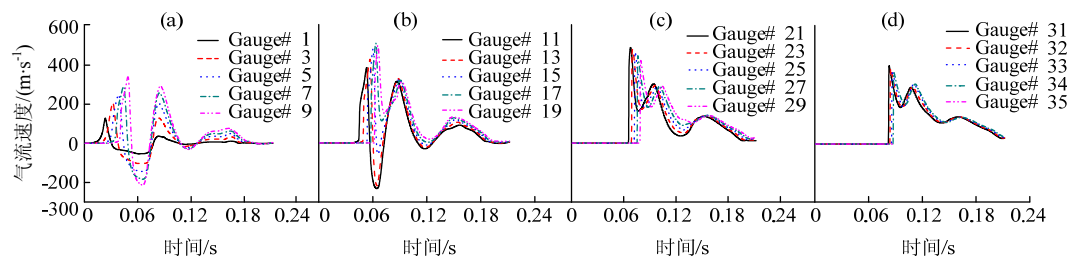


图 4 气流速度历史曲线(传播方向)

Fig.4 Profiles of gas velocity-time (propagation direction)

由图 2 可知在爆炸前期(测点 9 之前), 前驱冲击波尚未完全形成, 火焰锋面加热后形成的最大超压值较小, 不超过 300 kPa, 测点 11 之后, 升压曲线明显陡峭, 冲击波强度逐渐增强, 最大超压开始增大, 而在测点 21 之后, 最大超压明显减小, 到测点 35 时超压已降低为零。从各测点的升压时刻及存在的时间差, 可看出瓦斯爆炸过程中存在着明显的冲击波传播现象。

图 3 中密度开始增加的时刻与超压升压的时刻基本相同, 密度取得最大值的时刻也与最大超压时刻基本一致, 在测点 21 之后, 最大密度开始减小, 到测点 35 时减小为原始密度 1.22 kg/m^3 。从图 4 看出, 在测点 17 之前, 气流速度出现负值情况, 说明瓦斯爆炸过程中气体发生了逆向流动, 而在测点

17 之后, 气流速度均未出现负值情况(即气体在测点 17 之后均未发生逆流现象), 到测点 21 之后, 最大气流速度开始减小, 至测点 35 时减小为零。

由以上分析可知, 在测点 21 之后, 最大超压、最大密度和最大气流速度都不断减小, 到测点 35 时均已减小为对应的原始值, 说明在距离点火源 35 m 时冲击波已衰减为声波, 亦即该条件下的防爆安全距离为 35 m。

当火焰锋面到达某一测点时, 该点的温度开始升高, 但密度开始降低^[20,34-35]。为了探讨火焰传播特征及火焰到达时间, 以测点 1, 6, 11 和 16 为例将燃烧速率、密度、气流速度(传播方向)和温度的历史曲线进行对比, 见图 5。

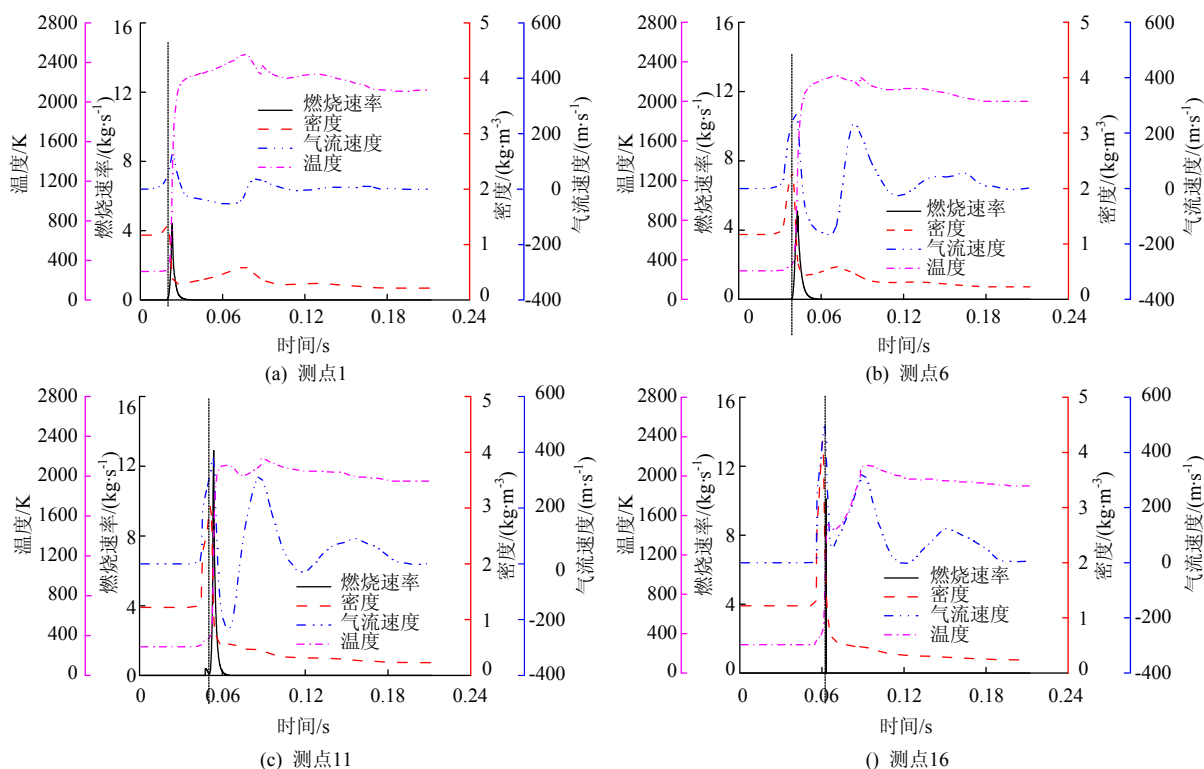


图 5 燃烧速率、密度、气流速度和温度的对比

Fig.5 Relationships among combustion rate, density, gas velocity and temperature

从图 5 得出, 当燃烧速率开始大于零时, 温度开始升高, 密度开始减小, 此时刻与火焰前锋到达时间吻合, 不仅如此, 出现最大燃烧速率梯度的时刻也与出现最大温度梯度的时刻基本相同。因此, 可将某测点燃烧速率开始大于零的时刻定义为火焰前锋到达该测点的时间。

图 6 为燃烧速率的历史变化曲线, 从中看到远离点火源测点(测点 9~16)的最大燃烧速率明显大于近距离测点(测点 1~8)。各测点间存在一个明显的

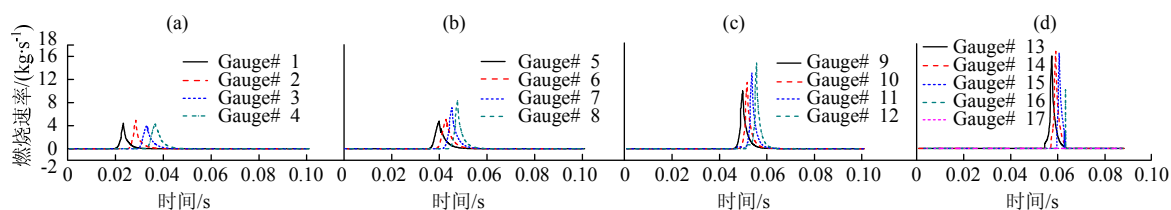


图 6 燃烧速率历史曲线

Fig.6 Profiles of combustion rate-time

通过燃烧速率历史曲线可得出各测点的最大燃烧速率及火焰到达时间, 分别见图 7, 由图 7a 看出最大燃烧速率随着距离的增加先逐渐增大, 在距离点火源 14 m 时取得最大值 16.71 kg/s, 然后开始减小, 到距离 17 m 时减小为零。图 7b 中曲线斜率的倒数代表火焰传播速度的大小。从中看出, 随着火焰不断向前传播, 火焰传播速度先逐渐加快, 到某转折点达到最快, 随后开始降速直至降低为零。

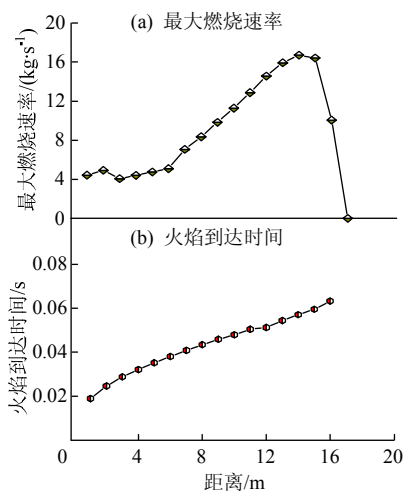


图 7 各测点的最大燃烧速率及火焰到达时间

Fig.7 Maximum combustion rate and flame arrival time at various points

图 8 展示了各测点的最大爆炸超压。图中最大爆炸超压呈现出先减小、后增大、再减小的变化过程。

火焰传播现象。在测点 14 之后, 最大燃烧速率开始减小, 到测点 17 时已减小为零, 说明火焰在测点 17 处已经熄灭, 火焰锋面传播的最大距离为 17 m, 该条件下的防火距离即为 17 m。结合图 4 分析的结果, 在距离点火源 17 m(测点 17)之前火焰尚未熄灭, 气流速度出现负值, 气流发生逆流现象, 而在距离点火源 17 m(测点 17)之后火焰已经熄灭, 气流速度均未出现负值, 气流均未发生逆流现象, 这说明气体发生逆向流动与火焰的存在有关。

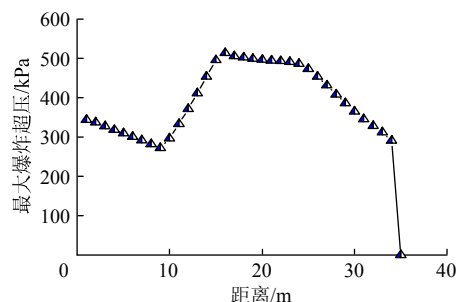


图 8 各测点的最大爆炸超压

Fig.8 Maximum explosion overpressure at various points

在爆炸前期(距离点火源 9 m 之前), 前驱冲击波尚未完全形成, 火焰锋面加热形成的压缩波强度较弱, 最大超压较小, 在距离点火源 10 m 之后, 随着爆炸化学反应的不断加剧, 冲击波强度逐渐增强, 最大超压开始增大, 在距离点火源 16 m 时达到最大值 513.18 kPa, 随后超压开始减小, 到距离 35 m 时减小为零。超压取得最大值的距离(16 m)与最大火焰燃烧速率减小为零的距离(17 m)极为接近, 考虑到相邻 2 个监测点的距离为 1 m, 因此存在的 1 m 误差很有可能是监测点设置造成的, 在这种情况下可以忽略误差。考虑到最大燃烧速率减小为零的距离即为火焰熄灭的位置, 因此, 瓦斯爆炸向前传播过程中, 在火焰熄灭的位置附近, 超压取得最大值。当火焰熄灭后, 瓦斯爆炸的化学反应终止, 冲击波失去了向前传播的能量供给, 因此冲击波超压开始逐渐减小, 直至减小为零。

4 结 论

1) 在瓦斯爆炸传播过程中,最大爆炸超压呈现出先减小、后增大、再减小的变化过程。超压取得最大值的距离与火焰燃烧速率减小为零的距离十分接近,说明爆炸超压在火焰熄灭的位置附近达到最大。

2) 随着瓦斯爆炸不断向前传播,各点测得的最大燃烧速率先逐渐增大,在某点取得最大值后开始减小,直至减小为零。火焰传播速度也随着瓦斯爆炸的传播先逐渐增加,取得最大值后开始降低直至降为零。

3) 各测点的最大超压和最大气流速度在距离点火源 35 m 时均已减小为零,最大密度在该距离也减小为原始密度,说明在距离点火源 35 m 时冲击波已衰减为声波,在本文条件下的瓦斯爆炸防爆安全距离为 35 m。

4) 在距离点火源 17 m 后,各测点的最大燃烧速率均减小为零,说明在此距离火焰已经熄灭,火焰锋面传播的最大距离为 17 m。在火焰熄灭前,气流速度存在负值情况,而在火焰熄灭后,气流速度不存在负值情况,说明气体发生逆向流动与火焰的存在有关。

参考文献:

- [1] 王省身,谢之康. 矿井沼气爆炸安全距离的探讨[J]. 中国矿业大学学报, 1989, 18(4): 1-8.
WANG Xingshen, XIE Zhikang. A discussion on the safety distance in case of gas explosion[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1989, 18(4): 1-8.
- [2] LEE J H S, SOLOHUKHIN R I, OPPENHEIM A K. Current views on gaseous detonation[J]. *Astonautica Acta*, 1969, 14: 565-584.
- [3] CICCARELLI G, DOROFEEV S B. Flame acceleration and transition to detonation in ducts[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2008, 34(4): 499-550.
- [4] ORAN E S, GAMEZO V N. Origins of the deflagration-to-detonation transition in gas-phase combustion[J]. *Combustion and Flame*, 2007, 148(1/2): 4-47.
- [5] BLANCHARD R, ARNDT D, GRÄTZ R, et al. Effect of ignition position on the run-up distance to DDT for hydrogen-air explosions[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2011, 24(2): 194-199.
- [6] CHAN C K, DEWIT W A. Deflagration-to-detonation transition in end gases[J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1996, 26(2): 2679-2684.
- [7] GRUNE J, SEMPET K, HABERSTROH H, et al. Experimental investigation of hydrogen-air deflagrations and detonations in semi-confined flat layers[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2013, 26(2): 317-323.
- [8] SILVESTRINI M, GENOVA B, PARISI G, et al. Flame acceleration and DDT run-up distance for smooth and obstacles filled tubes[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2008, 21(5): 555-562.
- [9] THOMAS G, OAKLEY G, BAMBREY R. An experimental study of flame acceleration and deflagration to detonation transition in representative process piping[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2010, 88(2): 75-90.
- [10] YAGETA J, SHIMADA S, MATSUOKA K, et al. Combustion wave propagation and detonation initiation in the vicinity of closed-tube end walls[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(2): 2303-2310.
- [11] DOROFEEV S B. Flame acceleration and explosion safety applications[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(2): 2161-2175.
- [12] 王新建. 爆破空气冲击波及其预防[J]. 中国人民公安大学学报: 自然科学版, 2003(4): 41-43.
WANG Xinjian. Blasting air shock wave and its prevent [J]. *Journal of Chinese People's Public Security University: Natural Science Edition*, 2003 (4): 41-43.
- [13] 王中黔. 关于水下爆破人身安全距离的探讨[J]. 爆炸与冲击, 1982, 2(1): 109-115.
WANG Zhongqian. On the safety distance for the protection of the human body during the operation of underwater blast[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1982, 2(1): 109-115.
- [14] 冯力群. 液化石油气火灾扑救中安全距离的确定[J]. 武警学院学报, 2007, 23(10): 19-21.
FENG Liqun. The determination of safety distance in liquid petroleum gas fire rescuing[J]. *Journal of Chinese People's Armed Police Force Academy*, 2007, 23(10): 19-21.
- [15] 占小跳. 液化天然气储存中的安全问题及应对措施[J]. 水运科学研究, 2006(1): 50-53.
ZHAN Xiaotiao. The security problems and counter-measures on the LNG storage process[J]. *Research on Waterborne Transportation*, 2006 (1): 50-53.
- [16] 夏建军, 傅学成, 张宪忠, 等. 油罐火灾模型试验的安全性分析[J]. 消防科学与技术, 2012, 31(2): 122-125.
XIA Jianjun, FU Xuecheng, ZHANG Xianzhong, et al. Security analysis of oil tank fire model test[J]. *Fire Science and Technology*, 2012, 31(2): 122-125.
- [17] 王书鹏, 高轩能. 建筑玻璃安全防爆距离研究[J]. 江西科学, 2008, 26(2): 194-197.
WANG Shupeng, GAO Xuanneng. Research on safe extent of architectural glazing subjected to explosion[J].

- Jiangxi Science, 2008, 26(2): 194-197.
- [18] 李智勇. 建筑防火设计审核系统的研制与开发[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
- [19] 李丽霞. 储罐区池火灾状态下防火间距的理论基础研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2004.
- [20] JIANG B Y, LIN B Q, SHI S L, et al. Numerical simulation on the influences of initial temperature and initial pressure on attenuation characteristics and safety distance of gas explosion[J]. Combustion Science Technology, 2012, 184(2): 135-150.
- [21] CHAMPASSITH A, POURCEL P. Explosion modeling with a CFD software: AutoReaGas[J]. Journal De Physique, 2002, 12(7): 239-246.
- [22] INABA Y, NISHIHARA T, GROETHE M A, et al. Study on explosion characteristics of natural gas and methane in semi-open space for the HTTR hydrogen production system[J]. Nuclear Engineering and Design, 2004, 23(1): 111-119.
- [23] JANOVSKY B, SELESOVSKY P, HORKEL J, et al. Vented confined explosions in Stramberk experimental mine and AutoReaGas simulation[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2006, 19(2/3): 280-287.
- [24] MAREMONTI M, RUSSO G, SALZANO E, et al. Numerical simulation of gas explosions in linked vessels [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1999, 12(3): 189-194.
- [25] PANG L, ZHANG Q, WANG T, et al. Influence of laneway support spacing on methane/air explosion shock wave[J]. Safety Science, 2012, 50(1): 83-89.
- [26] PHYLAKTOU H, FOLEY M, ANDREWS G E. Explosion enhancement through a 90° curved bend[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1993, 6(1): 21-29.
- [27] SALZANO E, MARRA F S, RUSSO G, et al. Numerical simulation of turbulent gas flames in tubes[J]. Journal of Hazardous Materials, 2002, 95(3): 233-247.
- [28] TUFANO V, MAREMONTI M, SALZANO E, et al. Simulation of VCEs by CFD modelling: an analysis of sensitivity[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1998, 11(3): 169-175.
- [29] ZHANG Q, PANG L, LIANG H M. Effect of scale on the explosion of methane in air and its shockwave [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2011, 24(1): 43-48.
- [30] POPAT N R, CATLIN C A, ARNTZEN B J, et al. Investigations to improve and assess the accuracy of computational fluid dynamic based explosion models [J]. Journal of Hazardous Materials, 1996, 45(1): 1-25.
- [31] LAUNDER B E, SPALDING D B. Mathematical models of turbulence[M]. London: Academic Press, 1972: 123-137.
- [32] FAVRE A. Problems of hydrodynamics and continuum mechanics[M]. Philadelphia: Society for Industry and Applied Mathematics, 1969: 11-18.
- [33] BRAY K N C. Studies of the turbulent burning velocity [C]//Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1990: 315-335.
- [34] JIANG B Y, LIN B Q, SHI S L, et al. Numerical analysis on propagation characteristics and safety distance of gas explosion[J]. Procedia Engineering, 2011, 26: 271-280.
- [35] 林柏泉, 翟成. 煤炭开采过程中诱发的瓦斯爆炸机理及预防措施[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(1): 19-23.
- LIN Baiquan, ZHAI Cheng. Mechanism of gas explosion in coal exploitation and its preventive measures[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(1): 19-23.