DOI: 10.11883/bzycj-2017-0087
文章编号: 1001-1455(2018)05-1099-07

方形空间可燃气体爆燃泄爆实验及三维数值模拟研究*

郭 强[1,2],王明洋[1],高康华[1],赵天辉[1],孙 松[1]
(1.陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室,江苏 南京 210007;
2.海军东海工程设计院,上海 200083)

摘要: 为了研究大空间内预混可燃气体爆燃泄爆过程中的压力与火焰传播规律,在 1.21 m^3 的方形空间内进行了不同体积分数乙烯气体和两种不同泄压面积的泄爆实验,针对泄压面积为 0.18 m^2、体积分数为 7% 的乙烯-空气预混气体爆燃泄爆过程进行了三维数值模拟研究。结果表明:不同泄爆条件下压力形式不同,小面积泄爆口开启后,压力先下降后上升且第 2 峰值较大,在高体积分数下超过第 1 峰值,大面积泄爆时第 2 峰值较小。数值模拟结果与实验得到的压力时程曲线趋势一致,与实验中观察到的外部火焰形态相似;泄爆口开启后引发的湍流效应,使得空间内火焰阵面变形和火焰传播速度显著加快,导致了小面积泄爆第 2 峰值压力较大。

关键词: 方形空间;乙烯;泄爆;火焰传播
中图分类号: O389 **国标学科代码**: 1303599 **文献标志码**: A

可燃性气体在工业和生活中得到了广泛应用,但由于生产、储存、输配、使用等环节中设备老化、维护滞后及人为操作等因素,气体爆炸事故时有发生,且多发生在厂房、仓库及民用住宅等建筑屋室内部,造成的后果十分严重[1]。泄爆是此类气体内爆炸事故的有效防护措施,在管道、容器等方面研究较多。例如:胡俊等[2-3]进行了大长径比柱形容器开口泄爆过程的实验研究,探究了不同开口面积以及不同泄爆压力对压力与火焰速度的影响;Alexiou 等[4-5]和 Kamani 等[6]对圆形管道内的燃爆泄爆过程进行了相应的实验研究,研究了不同点火位置及不同泄爆位置对压力的影响;周灿等[7]、师喜林等[8]对球形容器泄爆过程开展了大量的研究工作。对于大空间泄爆过程,Chao 等[9]分别在 63.7 和 2.32 m^3 空间内进行泄爆实验,分析了不同类型可燃气体、不同泄压面积、不同体积以及障碍物等因素对最大压力的影响。与圆柱形管道或球形容器不同,常见建筑屋室多为容积较大的方形空间,内部存在障碍物,爆炸时门、窗等构件可破裂形成泄压口,其位置及泄压面积任意,加上气体类型、浓度、点火位置等影响,泄爆过程十分复杂,研究时应当根据实际需求,分析其中主要的一种或几种因素对空间内压力和火焰发展的影响。当前在此方面的实验研究不多,如文献[9-11]仅得到了泄爆口外部火焰传播特性和压力特性,内部火焰传播特性难以从实验手段获取,而空间内部火焰传播与压力变化的相互作用关系也不容忽视[2]。常用的解析模型未考虑动力学问题,假设整个空间内部压力任何时刻都均匀分布,与实际工况相差较大[12]。现阶段 CFD 研究取得了显著进展,肖华华[13]、李润之等[14]借助 Fluent 软件研究火焰形状,得到了与实验非常相近的结果。数值模拟研究可以详细揭示火焰传播特性,有助于理解泄爆过程。

本文中,通过实验研究,分析 1.21 m^3 方形空间内泄压面积和气体体积分数对泄爆压力的影响,在此基础上,针对 7%体积分数乙烯-空气混合气体泄爆过程进行数值模拟,分析泄爆过程中火焰阵面发展及火焰传播速度对泄爆过程空间内部压力变化的影响,为方形空间的工程泄爆防护提供参考。

* **收稿日期**: 2017-03-20; **修回日期**: 2017-06-20
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0804702)
第一作者: 郭 强(1991—),男,硕士研究生; **通信作者**: 高康华,weikang515@163.com。

1 实 验

1.1 实验装置与方法

图 1 为自制的方形泄爆实验装置，由方形腔体、混气系统、点火系统、高速摄像系统、压力检测与数据采集系统等组成。方形腔体一端封闭、一端完全开口，内部空间尺寸为 2 000 mm×1 100 mm×500 mm，容积为 1.21 m^3。腔体一侧沿轴线每隔 300 mm 均匀开设 6 个的进气孔，安装进气管道，中间开设 1 个抽气孔。采用气体分压原理，参照文献[15]的方法，混气时根据所需配置乙烯体积分数先抽取部分空气，然后通过开设多个气孔的进气管道充入乙烯气体至标准大气压，进气过程的局部湍流将加速直管气孔周边空间内的气体混合，进气完成后静止 10 min。点火装置设置于封闭端，采用直流电源加热电阻丝的方式点火。压力传感器选用 PCB113B24，采样频率为 200 kHz，分别位于腔体顶部与点火端相距 600 mm 和靠近泄爆口 100 mm 处，即图 1 中的 P_1 和 P_2 处；高速摄像机记录泄爆过程，拍摄频度为 1 000 s^{-1}。

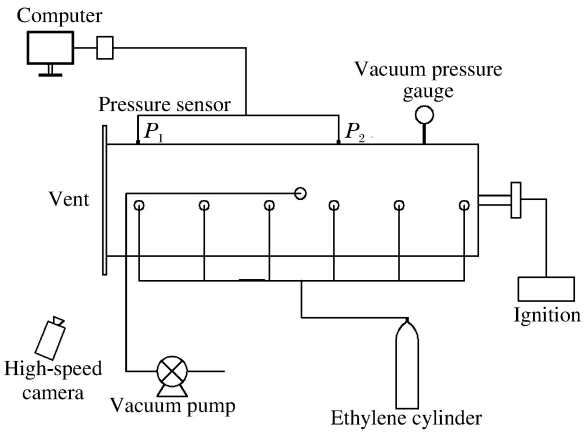


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

在腔体开口端安装两种泄压面积不同的泄压装置：第 1 类泄压装置为聚乙烯薄膜，尺寸为 300 mm×600 mm，面积为 0.18 m^2；第 2 类为硅酸钙板，尺寸为 1 200 mm×600 mm，泄压面积为 0.55 m^2。实验时，分别充入体积分数为 3%、4%、5%、6%、7%、8%的乙烯气体。

1.2 实验结果

图 2～3 分别为不同气体体积分数时、两类泄爆条件下靠近泄爆口处测点的压力曲线。由图可见，泄爆压力曲线均出现两个峰值。点火后，空间内部压力上升使得泄压装置作用，泄放气体介质，产生第 1 个压力峰值，泄压面积不同时，第 1 个压力峰值均在 10 kPa 左右，且随体积分数变化不明显，而空间内部升压速率随乙烯体积分数增大而增大。随后，压力经过了先下降后上升的过程，并形成第 2 个峰值：在小泄压面积时，压力下降幅度随着气体体积分数增大而减小，第 2 个压力峰值则随着气体体积分数的逐渐增大而增大，在 6%～8%体积分数时，泄爆压力第 2 峰值超过第 1 峰值，体积分数为 8%时，第 2 个压力峰值达到 26 kPa；在大泄压面积时，压力下降幅度随着气体体积分数变化不大，均下降至−4kPa左右，相比小泄压面积时低，第 2 峰值压力均较小且随体积分数变化不明显。

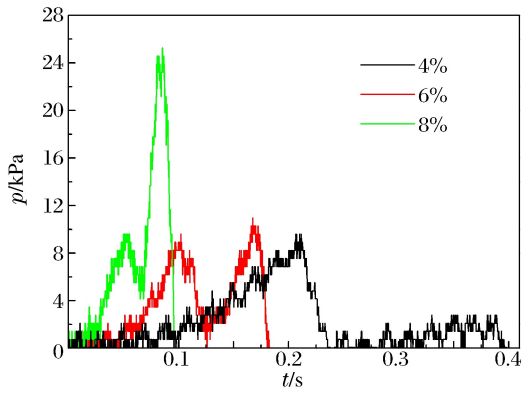


图 2 0.18 m^2 泄压面积时不同体积分数压力曲线

Fig. 2 Overpressure curves for different volume fractions with 0.18 m^2 vent area

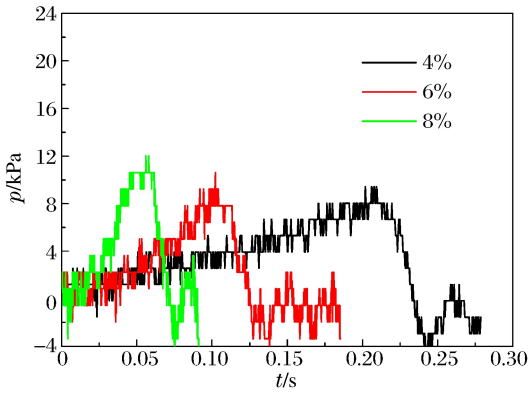


图 3 0.55 m^2 泄压面积时不同体积分数压力曲线

Fig. 3 Overpressure curves for different volume fractions with 0.55 m^2 vent area

2　数值模拟

2.1　数值模拟方法和初始条件

对泄压面积为 0.18 m^2、体积分数 7%乙烯-空气混合气体爆燃泄爆过程进行数值模拟研究。使用 GAMBIT 软件对实验装置进行三维建模，为简化计算，模拟过程中忽略容器中进气管路的影响，根据对称性取二分之一模型并划分六面体网格，如图 4 所示。其中：方形空间为 12.5 mm 的三维均一结构网格，泄爆口外部流场为大小呈梯度变化的结构网格，总网格数为 629 760 个；壁面边界条件为绝热边界条件，泄爆口初始时设置为壁面边界类型，假设内部压力到达开启压力 10 kPa 后泄爆口瞬间完全开启，设置为内部边界类型。

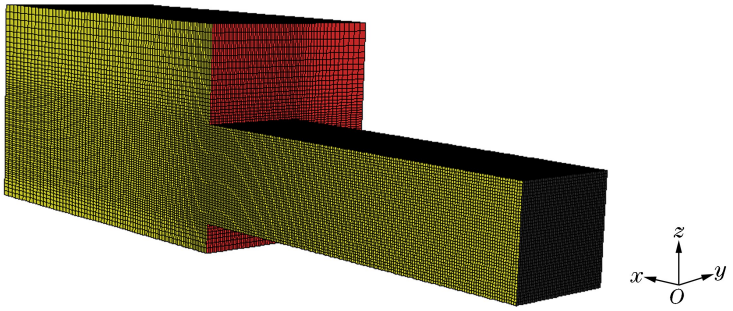


图 4　计算网格

Fig. 4　Numerical mesh

计算选用的 CFD 软件为 Fluent 17.0，采用压力基瞬态求解器，基于 RNG k-ε 湍流模型和 EDC 燃烧模型，压力-速度耦合求解算法采用 SIMPLEC 算法。质量方程、动量方程、组分方程和能量方程的控制方程为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}-\frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho\overline{u_i' u_j'}) \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_s)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i Y_s)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(D_{\mathrm{eff}}\rho\frac{\partial Y_s}{\partial x_j}\right)-\omega_s \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E)+\frac{\partial}{\partial x_i}[u_i(\rho E+p)]=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[k_{\mathrm{eff}}\frac{\partial T}{\partial x_i}-\sum h_s J_s+u_i(\tau_{ij})_{\mathrm{eff}}\right]+S_{\mathrm{h}} \tag{4}$$

RNG k-ε 湍流模型的方程为：

$$-\rho\overline{u_i' u_j'}=\mu_{\mathrm{t}}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\left(\rho k+\mu_{\mathrm{t}}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right)\delta_{ij} \tag{5}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha_{\mathrm{k}}\mu_{\mathrm{eff}}\frac{\partial k}{\partial x_j}\right)+G_{\mathrm{k}}+G_{\mathrm{b}}-\rho\varepsilon-Y_{\mathrm{M}} \tag{6}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha_\varepsilon\mu_{\mathrm{eff}}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right)+G_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_{\mathrm{k}}+G_{3\varepsilon}G_{\mathrm{b}})-G_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}-R_\varepsilon \tag{7}$$

式中：$\mu_{\mathrm{t}}=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon}$，$R_\varepsilon=\frac{C_\mu\rho\eta^3(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3}\frac{\varepsilon^2}{k}$，$\eta\equiv Sk/\varepsilon$，$\rho$ 为密度，p 为压力，u_i、u_j 为速度分量，t 为时间，μ 为动力黏性系数，Y_s、ω_s、h_s、J_s 分别为组分 s 的质量分数、反应率、焓和扩散流，S_{h} 为反应热，k_{eff} 为热导率，$(\tau_{ij})_{\mathrm{eff}}$ 为应力张量，E 为总能，k 为湍流动能，ε 为湍流耗散率，G_{k} 是由层流速度梯度而产生的湍流动能，G_{b} 是由浮力产生的湍流动能，Y_{M} 是由在可压缩湍流中过渡的扩散产生的波动，各常数取值 $C_\mu=0.084\,5$，$\eta_0=4.38$，$\beta=0.012$，$\alpha_{\mathrm{k}}=\alpha_\varepsilon=1.393$，$C_{1\varepsilon}=1.42$，$C_{2\varepsilon}=1.68$。

采用的化学反应为总包反应，化学反应方程为：$C_2H_4+3O_2\rightarrow 2CO_2+2H_2O$。

初始压力为标准大气压，容器中完全静止，各方向速度分量为零，湍流动能为 1 m^2/s^2，湍流耗散率为 1 m^2/s^2，容器中混合气体体积分数分别为乙烯 0.07，氧气 0.024，其余均为氮气，初始温度为 300 K。点火区域设置于容器一端中心处，点火半径为 5 cm，初始温度为 1 200 K，假设点火时乙烯质量分数的一半发生反应。压力监测点位于容器内靠近泄爆口的上壁面，与实验中的 P_2 压力传感器位置相同。

2.2 数值模拟结果

图 5 为小泄压面积(0.18 m^2)、7%体积分数时数值模拟结果与实验中测得的压力曲线的对比。由图可见:在泄爆前密闭空间爆燃阶段,两者压力曲线较为一致;泄压口开启后,计算压力和实验压力均呈现先下降后上升再下降的趋势,但计算压力整体小于实验压力,且计算压力的下降速率要大于实验压力,而上升速率和第 2 个压力峰值小于实验压力。主要原因在于,数值模拟中假设泄爆口瞬时完全开启,未考虑泄爆口的开启过程,而在实验中,泄爆口的开启虽然短暂但仍需要一定的时间。该时段实验泄爆效果不如数值模拟结果。此外,实验装置内部含有 6 根进气管道,尽管阻塞率较小,但在火焰传播过程中仍会造成火焰速度加快,压力上升速率增大,在泄压面积一定时,将产生更大的压力峰值,数值模拟中未考虑其影响也是造成计算与实验压力误差的原因之一。上述分析表明,该数值模拟方法能够较合理地描述方形空间内气体爆燃泄放过程及其压力发展趋势。

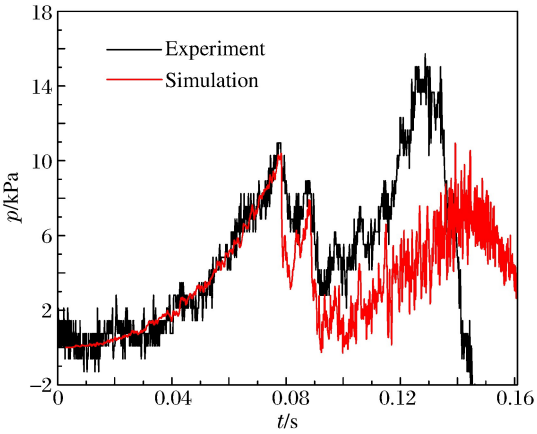


图 5 实验与数值模拟的压力曲线

Fig. 5 Overpressure curves between experimental and numerical results

3 结果与分析

3.1 泄爆过程火焰面形态变化

图 6 为方形空间内部不同时刻火焰发展情况。由图可见:在初始点火时刻到 $t=40$ ms 时,火焰呈半球形向外扩展;当 $t=78$ ms 时,火焰阵面接近空间上下壁面,火焰形状呈扁平状,尽管已燃气体体积较小,但空间内部的压力已达到泄爆开启压力 10 kPa,火焰形状主要由于壁面约束而呈扁平状并向前方和两侧发展;当 $t=100$ ms 时,火焰阵面接近空间两侧壁面,其后由于四周壁面限制仅向泄压口方向传播,火焰阵面前端呈扁球形,此时火焰阵面距泄压口较远,气流泄放对火焰形状的影响不大;当 $t=130$ ms 时,火焰阵面前端接近泄爆口,由泄爆产生的扰动效应使火焰阵面前端开始出现拉伸变形,并逐渐呈水滴形;当 $t=140$ ms,火焰阵面前端变形加大并被拉伸至泄爆口,其后从泄爆口中心位置传出,在泄爆口外逐渐形成蘑菇状的火焰前端,这与实验中观察到外部火焰形态基本一致。上述分析表明,本文数值模拟方法可合理地描述方形空间内部气体爆燃火焰的发展过程。

3.2 泄爆过程火焰传播速度特性

图 7~8 分别为方形空间气体泄爆过程中火焰速度与火焰前锋位置和爆燃压力的关系,其中压力为滤波后的曲线。在密闭爆燃阶段($t<78$ ms),气体燃烧缓慢,火焰速度小于 10 m/s 且振荡上升,压力上升速率也较慢且呈现一定的波动,火焰速度的震荡可能是火焰阵面受到空间内部压力波作用的影响。随着火焰阵面的发展,火焰传播速度不断增大,当 $t=78$ ms 时泄压口开启,气体泄放引起的扰动开始影响火焰前锋,尽管图 6 表明泄爆前后火焰阵面形状并没有明显变化,但计算表明火焰速度在 3~4 ms 内先急剧增大到 40 m/s 后再突然减小,形成一个峰值,该时段内火焰前锋位置也经历一个先变化较快后减缓的过程(见图 7),而压力同样产生一个较小峰值(见图 8)。产生该现象的原因可能为,泄压口开启后空间内气体瞬间泄放使得火焰加速向前传播,遇到冷的预混气体后,燃烧反应速率变慢,火焰传播速度减慢。随后,受泄放影响火焰传播速度又振荡上升,压力也产生了较大幅度振荡;随着火焰阵面逐渐接近泄压口,它受到的拉伸作用越加显著,火焰传播速度不断增大,火焰阵面前端受拉伸变形呈现水滴型,在火焰前锋到达泄压口时达到最大速度 90 m/s,此时空间内部压力也达到第 2 个峰值;此后,火焰传出泄压口,压力逐渐回落。

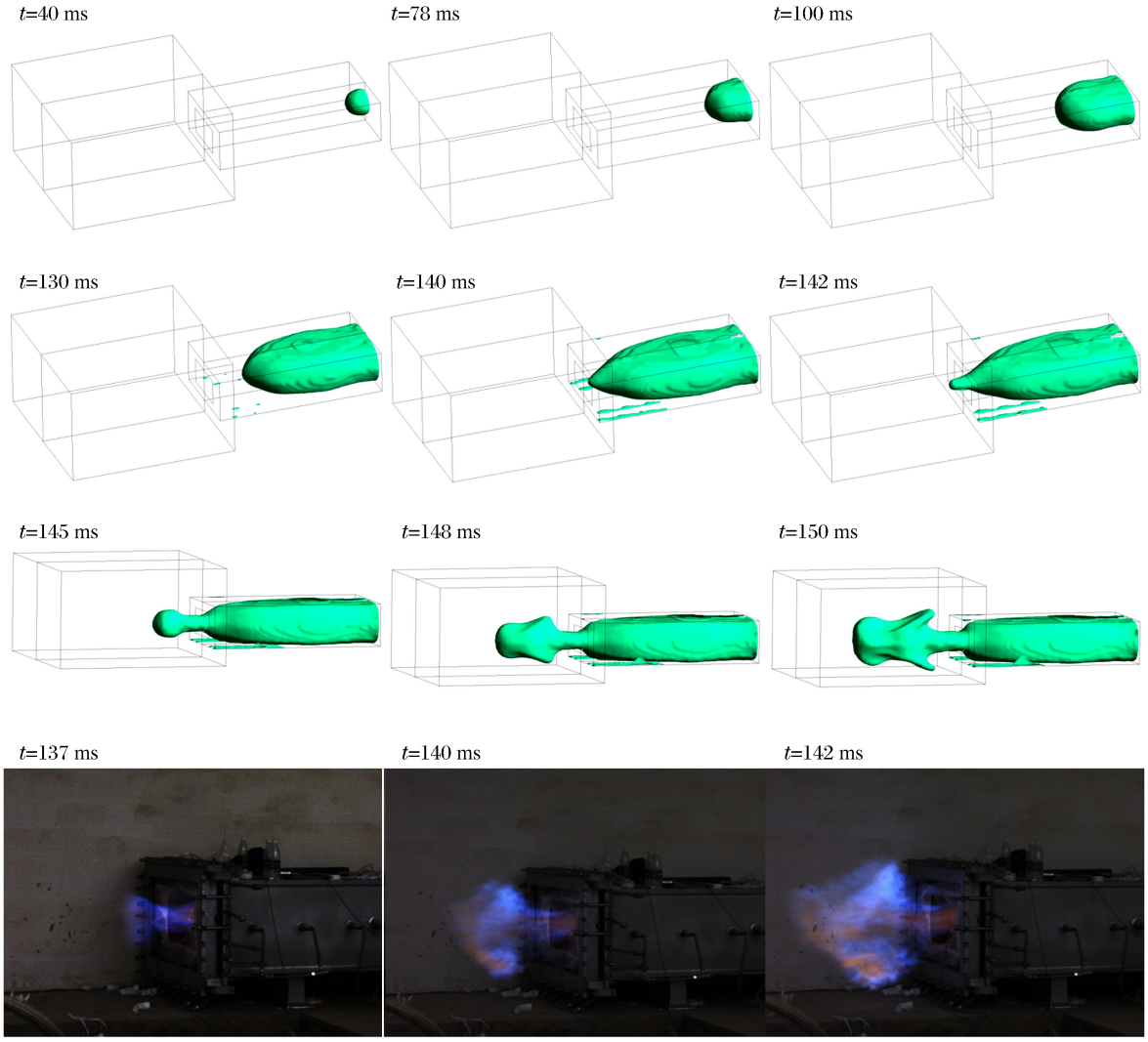


图 6　泄爆过程火焰传播图

Fig. 6　Image of premixed flame propagation during explosion venting

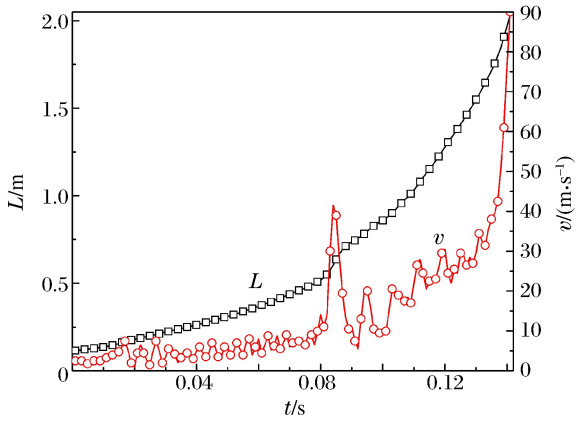


图 7　火焰阵面前端位置与速度

Fig. 7　Flames speed and flame front position

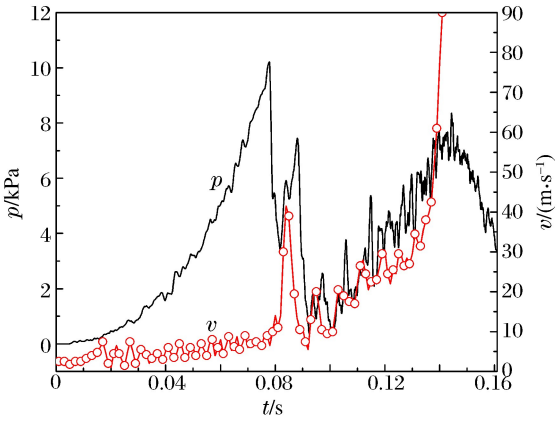


图 8　压力和火焰速度

Fig. 8　Flames speed and overpressure

由此可见,空间内部压力发展与火焰传播速度变化密切相关。火焰传播速度越快,化学反应越剧烈,单位时间产生的已燃气体体积越大,内部压力上升速率越快,将产生更大的压力峰值。泄压口开启后,气流泄放对空间内部的扰动引发爆燃火焰速度的加快,随着火焰前锋接近泄爆口,泄压口泄放效应对火焰传播影响更显著,导致火焰阵面变形更大,火焰传播速度也更大,因而产生了两次升压过程和的两个压力峰值。

4 结 论

通过对方形空间内不同体积分数乙烯-空气预混气体在两种不同泄压面积下的爆燃泄爆过程压力和火焰特性的实验和数值模拟研究,可以得出以下结论。

(1)在泄爆压力为 10 kPa 左右时,大泄压面积和小泄压面积条件下压力曲线均出现双峰。小泄压面积时,随着气体混合物中乙烯体积分数增大,升压速率越快,第 2 峰值越大,在 6%～8%体积分数时,第 2 峰值超过第 1 峰值。而在大泄压面积时,泄爆后压力下降幅度较大,第 2 峰值较小,且第 2 峰值随体积分数增加变化不大。

(2)数值模拟中,假设泄爆口瞬时完全开启,未考虑泄爆口开启过程,与实验中泄爆口非瞬时开启的情况相比,泄爆后压力下降较快且幅度更大,第 2 超压峰值小。因此,尽量减小泄爆装置的开启时间,对于泄爆后的二次升压过程有一定的削弱作用。

(3)火焰传播速度与压力发展存在对应关系,火焰传播速度的变化是压力产生波动的主要原因。泄爆口开启后所引发的湍流效应将导致空间内火焰速度明显增大,火焰前锋越接近泄爆口,湍流效应对火焰的影响越显著,表现为火焰变形增大,火焰阵面前端呈水滴形,传播速度加快。火焰传播速率的增大导致压力上升速率的增加,当火焰传播速率增至最大时,产生了第 2 个压力峰值。

参考文献:

[1] 叶宏.民用燃气爆炸及对建筑结构影响的分析与研究[D].北京:清华大学,1994.

[2] 胡俊,浦以康,万士昕,等.柱形容器开口泄爆过程中压力发展特性的实验研究[J].爆炸与冲击,2001,21(1):47-52.
HU Jun, PU Yikang, WAN Shixin, et al. Experimental investigations of pressure development during explosion venting from cylindrical vessels[J]. Explosion and Shock Waves, 2001,21(1):47-52.

[3] 胡俊,万士昕,浦以康,等.柱形容器开口泄爆过程中的火焰传播特性[J].爆炸与冲击,2004,24(4):330-336.
HU Jun, WAN Shixin, PU Yikang, et al. The characteristics of flame propagation during explosion venting from cylindrical vessel[J]. Explosion and Shock Waves, 2004,24(4):330-336.

[4] ALEXIOU A, ANDREWS G E, PHYLAKTOU H. Side-vented gas explosions in a long vessel: The effect of vent position[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1996,9(5):351-356.

[5] ALEXIOU A, ANDREWS G E, PHYLAKTOU H. A comparison between end-vented and side-vented gas explosions in large L/D vessels[J]. Process Safety and Environmental Protection, 1997,75(1):9-13.

[6] KASMANI R M, ANDREWS G E, PHYLAKTOU H N. Experimental study on vented gas explosion in a cylindrical vessel with a vent duct[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2013,91(4):245-252.

[7] 周灿,王志荣,蒋军成.球形容器小口泄爆压力变化特性[J].实验流体力学, 2013,27(4):62-65.
ZHOU Can, WANG Zhirong, JIANG Juncheng. Change characteristics of gas explosion venting pressure inside spherical vessel with a small caliber[J]. Journal of Explosions in Fluid Mechanic, 2013,27(4):62-65.

[8] 师喜林,王志荣,蒋军成.球形容器内气体的泄爆过程[J].爆炸与冲击, 2009,29(4):390-394.
SHI Xilin, WANG Zhirong, JIANG Juncheng. Explosion-vented processes for methane-air premixed gas in spherical vessels with venting pipes[J]. Explosion and Shock Waves, 2009,29(4):390-394.

[9] CHAO J, BAUWENS C R, DOROFEEV S B. An analysis of peak overpressures in vented gaseous explosions[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011,33(2):2367-2374.

[10] MERCX W P M, WINGERDEN C J, PASMAN H J. Venting of gaseous explosions[J]. Process Safety Progress, 1993,12(1):40-46.

[11] BAO Q, FANG Q, ZHANG Y, et al. Effects of gas concentration and venting pressure on overpressure transients during vented explosion of methane-air mixtures[J]. Fuel, 2016,175:40-48.

[12] HAN Yongli, CHEN Longzhu. Mechanical model of domestic gas explosion load[J]. Transactions of Tianjin University, 2008,14(6):434-440.

[13] 肖华华. 管道中氢-空气预混火焰传播动力学实验与数值模拟研究[D]. 合肥：中国科学技术大学，2013.

[14] 李润之，司荣军. 低温环境下甲烷爆炸流场特性模拟[J]. 爆炸与冲击，2015,35(6):901-906.
LI Runzhi, SI Rongjun. Simulation study of flow field characteristics of gas explosion in low temperature environment[J]. Explosion and Shock Waves, 2015,36(6):901-906.

[15] 樊保龙，李斌，白春华，等. 大尺寸密闭空间内甲烷-空气二元混合方法的改进与评定[J]. 高压物理学报，2016,30(3):242-248.
FAN Baolong, LI Bin, BAI Chunhua, et al. Improvement and evaluation on binary mixing method of methane and air in large-scale confined space[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2016,30(3):242-248.

Experimental study and three-dimensional simulation of premixed combustible gas explosion venting in a rectangular cavity

GUO Qiang[1,2], WANG Mingyang[1], GAO Kanghua[1], ZHAO Tianhui[1], SUN Song[1]

(1. *State Key Laboratory for Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact, Army University of Engineering, Nanjing* 210007, *Jiangsu, China*;
2. *Navy Donghai Engineering Design Institute, Shanghai* 200083, *China*)

Abstract: In order to investigate the overpressure and flame propagation of premixed combustible gas explosion venting in a large space, experiments of different concentrations of ethylene gas and two different vent sizes have been carried out in a rectangular cavity of 1.21 m^3. Meanwhile, three-dimensional numerical simulations have been performed to simulate the ethylene air explosion venting process with a 0.18 m^2 vent area and a 7% concentration of ethylene gas. The results show that the overpressure has a different response with different vent size. When the small vent is used, the overpressure drops first and then rises, in which the second peak value is larger than the first one. The turbulence caused by the venting process increases significantly the flame front deformation and the flame propagation speed, resulting in the larger second peak. In contrast, for the large vent size, the second peak is lower . The simulated results are in good agreement with the experimental ones.

Keywords: rectangular cavity; ethylene gas; explosion venting; flame propagation

（责任编辑　丁　峰）