

文章编号: 1001-1455(2009)04-0390-05

球形容器内气体的泄爆过程*

师喜林, 王志荣, 蒋军成

(南京工业大学城市建设与安全工程学院, 江苏 南京 210009)

摘要: 为了得到球形容器内可燃气体的泄爆强度产生机理以及燃烧火焰与压力传播的基本规律, 从流体力学和化学反应动力学守恒出发, 采用 $\kappa\epsilon$ 湍流模型和 EBU-Arrhenius 燃烧模型, 利用 SIMPLE 算法对带泄爆导管的球形容器二维空间内甲烷-空气预混气体的泄爆过程内外场进行了数值计算, 获得了气体燃烧过程中火焰和压力传播特性以及气体流动特性, 能够比较清晰地反映泄爆的整个过程。研究表明, 燃烧火焰在泄爆过程中发生湍流, 传播得到了极大的加速, 泄爆导管对于容器内的高压气体泄放有很大的约束作用。

关键词: 爆炸力学; 泄爆; SIMPLE 算法; 球形容器; 可燃气体

中图分类号: O381

国标学科代码: 130 · 3510

文献标志码: A

由泄爆口卸去高压以防容器爆炸的技术称为泄爆, 它是被广泛采用的爆炸防治手段之一。目前有关标准如美国消防协会标准 NFPA 68 已经给出了化工设备内介质物理超压时的安全泄放设计方法, 但有关泄放的研究还没有形成一致的结论^[1]。D. Bradley、V. V. Mokov 等以泄爆实验数据和经验为基础, 建立了多组有关气体泄爆最大升压计算式^[2], 但计算结果并不令人满意。因此必须深入、多角度地研究泄爆问题, 以便为工程设计提供可靠的设计方法^[3]。

由于气体泄爆现场的实际情况非常复杂, 而且开口泄爆是一个耦合了可燃介质流动与热化学反应的复杂的非定常过程^[4], 诸如可燃气体的成分和摩尔分数、点火温度和能量、泄放面积和泄放压力^[5]等各类因素都会对爆炸的性质产生不同程度的影响。基于这样的考虑, 本文中利用数值模拟的方法对球形容器泄爆过程中流场进行了数值分析, 侧重于泄爆导管长度和泄放压力对火焰阵面和速度场的影响以及对最终爆炸压力和爆炸强度的影响的研究。

1 数学模型和计算方法

1.1 基本方程

气体泄爆过程是一个快速的燃烧反应过程, 满足质量守恒、动量守恒、能量守恒和化学组分平衡方程^[6-7]

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

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_i u_j - \mu_e \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_e \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\delta_{ij} \left(\rho \kappa + \mu_e \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j h - \frac{\mu_e}{\sigma_h} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) = \frac{Dp}{Dt} + S_h \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho Y_{fu})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j Y_{fu} - \frac{\mu_e}{\sigma_{fu}} \frac{\partial Y_{fu}}{\partial x_j} \right) = R_{fu} \quad (4)$$

这些守恒关系可以通过非稳态的 Navier-Stokes 方程组直接求解。

由 $\kappa\epsilon$ 模型描述湍流, 湍流能 κ 和耗散率 ϵ 方程分别为

* 收稿日期: 2008-03-10; 修回日期: 2009-01-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(50904037); 江苏省高校自然科学基金基础研究项目(06kjB6200381)

作者简介: 师喜林(1984—), 男, 硕士研究生。

$$\frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j \kappa - \frac{\mu}{\sigma_\kappa} \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right) = G - \rho \varepsilon \tag{5}$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j \varepsilon - \frac{\mu}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) = C_1 G \frac{\varepsilon}{\kappa} - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} \tag{6}$$

式中： $G = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\rho \kappa + \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \right]$ 。

湍流燃烧区是已燃气体和未燃气体微团所组成的混合物，化学反应在其界面上进行，化学反应速率主要是湍流作用下各气体微团破碎成更小微团的速率，取决于已燃和未燃气体微团破碎速率中的较小值，燃烧模型选用 EBU-Arrhenius 燃烧模型^[8]

$$R_{fu} = - \min(|R_{fu,A}|, |R_{fu,T}|) \tag{7}$$

$$R_{fu,A} = B \rho^2 \omega_1 \omega_2 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad R_{fu,T} = C_{EBU} \rho \frac{\varepsilon}{\kappa} \min(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$$

式中： ρ 为流体的密度； p 为流体的压力； u_i, u_j, u_k 分别为质点速度在 i, j, k 方向的分量； h 为焓， S_h 为单位质量的燃烧热， κ 为湍流动能； ω_{fu} 为燃烧组分的质量分数； R_{fu} 为混合气体时均燃烧速率； μ 为湍流粘度； ε 为湍流扩散率； δ_{ij} 为单位张量的元素； $C_1, C_2, \sigma_h, \sigma_{fu}, \sigma_\kappa, \sigma_\varepsilon$ 为常数，取值分别为 1.44、1.92、0.85、0.85、1.00 和 1.30； B 为 Arrhenius 因子； $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 为燃烧的质量分数； R 为气体常数； T 为气体温度； C_{EBU} 为计算常数。

1.2 计算方法

球形泄爆容器内径为 350 mm；泄爆导管内径为 50 mm，长 165 mm，法兰盘外径为 50 mm；外部空间直径为 400 mm，长 660 mm。考虑到轴对称性，计算区域如图 1 所示。初始时，容器内充满一定初压的、当量比为 1 的甲烷-空气预混气体，容器外为空气。在球形容器中心处点火，点火温度为 2 000 K，初始时刻点火区域有 50% 的燃料瞬间燃烧。壁面处采用绝热边界条件。数值计算采用半隐方法来求解压力耦合方程的 SIMPLE 算法^[9]。

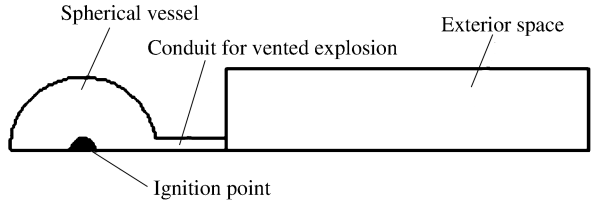


图 1 计算域示意图

Fig. 1 Schematic plan of computation zones

2 计算结果与分析

2.1 计算结果实验验证

为了验证本文中的计算方法，对气体燃爆泄放实验^[10]进行了模拟。

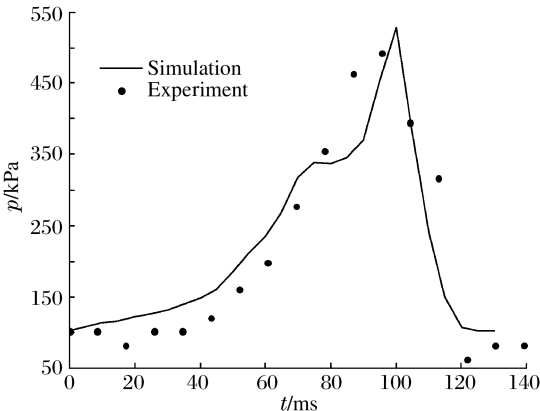


图 2 非平衡泄爆时爆炸压力

Fig. 2 Pressures of non-equilibrium explosion venting

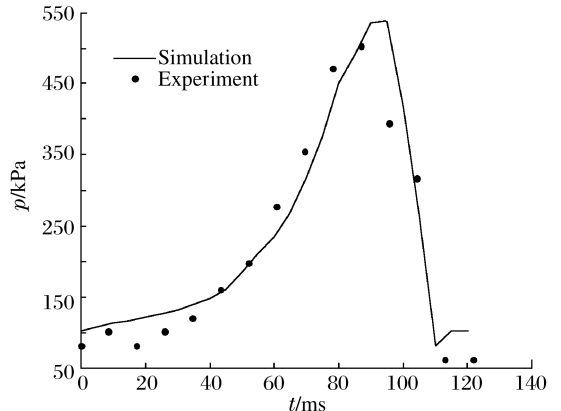


图 3 平衡泄爆时爆炸压力

Fig. 3 Pressures of equilibrium explosion venting

图2表示非平衡泄爆时球形容器中爆炸压力随时间的变化情况,泄爆压力为340 kPa,最大爆炸压力为529 kPa,卸压后有两个最大压力值。图3表示平衡泄爆时球形容器中爆炸压力随时间的变化情况,泄爆压力为500 kPa,最大爆炸压力为538 kPa,卸压后,爆炸压力逐渐减弱至接近外界压力。从图中可以看出,2种情况下数值计算结果与实验数据基本吻合。

2.2 计算结果分析

图4表示球形容器中心点火时泄爆口打开前后火焰传播过程中球形容器内外温度等值线图。从图中可以看出,球形容器泄爆过程中传播主要经历几个过程:首先,气体在球形容器中心点燃后发生层流燃烧,火焰面呈球形而且比较光滑;随后爆破片打开,火焰发生变形并加速流出泄爆导管;然后火焰面进入外部空间,泄爆出的未燃气体被点燃,形成喷射火焰;最后未燃气体燃尽,高压已燃气体迅速泄流出容器。从图中还可以看出:泄爆过程极大地增大了燃烧火焰的面积,泄放出的可燃气体在8 ms内完全燃烧,说明燃烧火焰在泄爆过程中发生湍流,传播得到了极大的加速。

球形容器泄爆导致火焰阵面变形,变形的速度矢量图见图5。可以看出,在泄爆口打开前,火焰阵面包围的已燃气体受到壁面约束,质点的运动速度很小,几乎静止,相反火焰前锋的未燃气体在前驱冲击波的扰动下运动剧烈,最大速度为7.67 m/s;泄爆口打开后,高压气体迅速泄放,沿着泄爆导管方向气体流动剧烈,在 $t=100$ ms时,速度出现最大值,达到1 160 m/s,并在泄爆导管出口的边缘产生旋涡,可见泄爆口打开后泄爆导管对于容器内的高压气体泄放起到了很大的约束作用。为了证明这种说法,计算出不同时刻沿着轴线压力变化曲线,见图6。

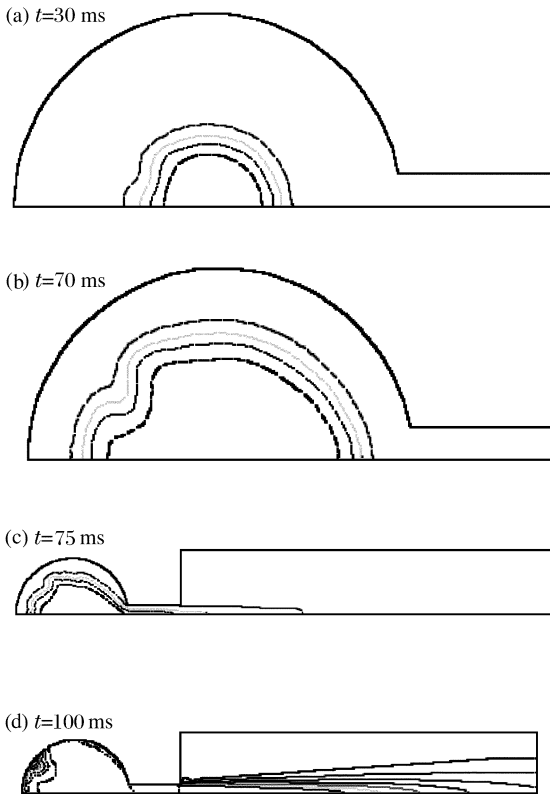


图4 泄爆过程的温度等值线

Fig. 4 Temperature contribution of explosion venting

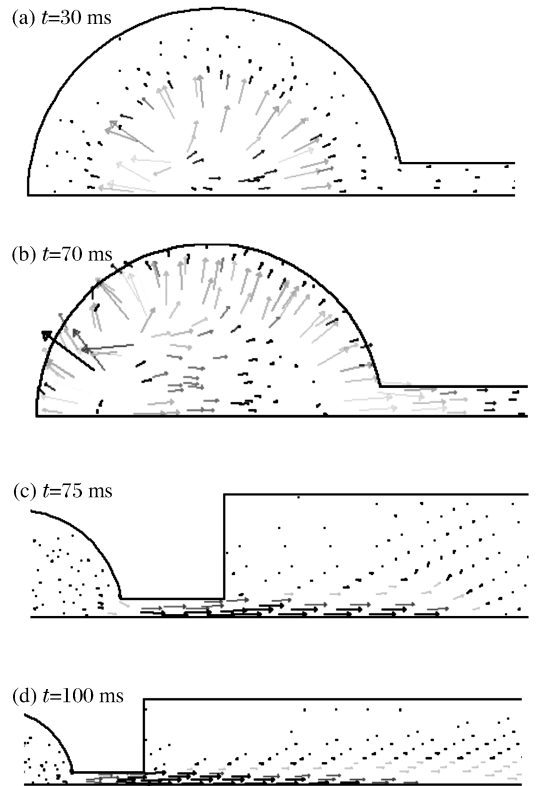


图5 泄爆过程的速度矢量场

Fig. 5 Velocity vector of explosion venting

从图6可以清楚看到,不同时刻沿轴线方向的压力变化情况。在 $t=71.0$ ms时,容器内包括泄爆导管内的压力等值;当泄爆口打开后,在泄爆出口处会产生压力冲击波,如 $t=73.5, 75.0$ ms时,外部空间出现压力波,在0.165 m长的泄爆导管内会产生很大的压力梯度,可见安装泄爆导管不利于气体爆燃高压泄爆。

图7表示泄爆导管长度对容器内压力变化的影响。图中3条曲线在75.0 ms前是重合的,表现了泄放口开启之前容器内等容爆炸的特性。出现平衡泄爆和非平衡泄爆,泄放导管长度减小,泄放引起压力下降的速率增大,当由于燃烧引起压力增加的速率小于泄放引起压力下降速率时,会出现平衡泄爆。

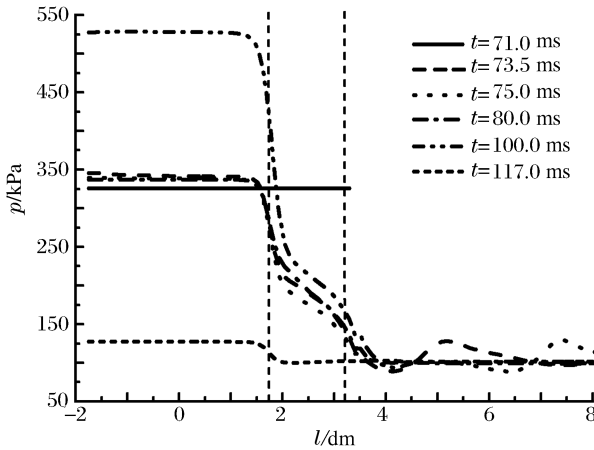


图6 不同时刻压力沿轴线变化

Fig. 6 Pressure curves along the axis

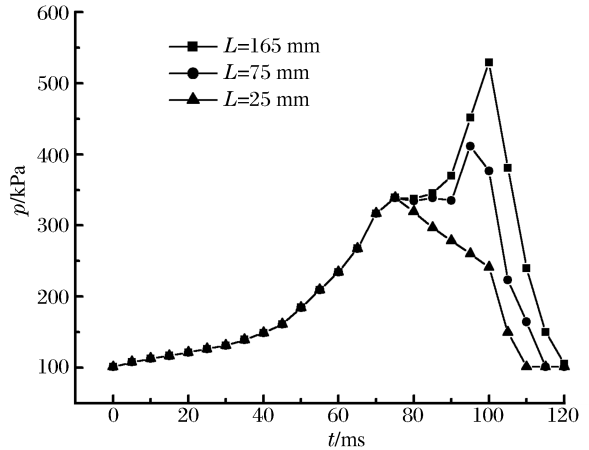


图7 不同泄爆导管长度容器内压力变化

Fig. 7 Pressure curves at different length of explosion venting pipes

3 结论

(1)利用 $\kappa\epsilon$ 湍流模型和EBU-Arrhenius燃烧模型能够比较准确地对球形容器泄爆过程进行模拟计算和数值分析,模拟结果与实验数据基本吻合,而且模拟结果能够全面直观描述气体泄爆过程。

(2)泄爆过程极大地增大了燃烧火焰的面积,燃烧火焰在泄爆过程中发生湍流,燃烧速度得到了极大的提高。

(3)泄爆过程中泄爆导管对于容器内的高压气体泄放起到了很大的约束作用,泄爆导管的长度是影响泄爆过程中容器内部压力变化的重要因素,在工程允许范围内,泄放导管长度应尽量小。

参考文献:

- [1] 王志荣,潘勇,严建骏,等. 气体爆炸作用下爆破片安全泄放的模拟安全设计[J]. 石油与天然气化工,2006,35(6): 489-492.
WANG Zhi-rong, PAN Yong, YAN Jian-jun, et al. Simulating safety design of bursting disc for venting of gas explosion[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2006,35(6):489-492.
- [2] Razus D M, Krause U. Comparison of empirical and semi-empirical calculation methods for venting of gas explosions[J]. Fire Safety Journal, 2001,36:1-23.
- [3] 李岳,王淑兰,丁信伟,等. 气体爆炸泄放计算方法比较与实验[J]. 石油化工设备,2003,32(1):6-10.
LI Yue, WANG Shu-lan, DING Xin-wei, et al. Comparison of calculation methods and experiment for venting of gas explosion[J]. Petro-Chemical Equipment, 2003,32(1): 6-10.
- [4] 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 Yi-kang, WAN Shi-xin, et al. Experimental investigations of pressure development during explosion vent from cylindrical vessels[J]. Explosion and Shock Waves, 2001,21(1):47-52.
- [5] Ibrahim S S, Masri A R. The effect of obstructions on overpressure resulting from premixed flame deflagration[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2001,14(3):213-221.
- [6] 梁春利,毕明树. 设置障碍物密闭容器内气体爆炸数值模拟[J]. 石油化工设备,2005,34(6):23-26.
LIANG Chun-li, BI Ming-shu. Numerical simulation of flammable gas explosions in closed vessel built-in obstacle

- [J]. *Petro-Chemical Equipment*, 2005, 34(6):23-26.
- [7] 姜孝海, 范宝春. 泄爆外流场的数值研究[J]. *计算力学学报*, 2006, 23(3):328-333.
JIANG Xiao-hai, FAN Bao-chun. Numerical investigations on external flowfield in explosion venting[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2006, 23(3):328-333.
- [8] 王应时, 范维澄, 周力行, 等. 燃烧过程数值计算[M]. 北京: 科学出版社, 1986:65-79.
- [9] Date A W. Solution of Navier-Stokes equations on non-staggered grid[J]. *Journal of Heat and Mass Transfer*, 1993, 36(7):1913-1922.
- [10] 师喜林, 蒋军成, 王志荣, 等. 甲烷-空气预混气体泄爆过程的实验研究[J]. *中国安全科学学报*, 2007, 17(12):107-110.
SHI Xi-lin, JIANG Jun-cheng, WANG Zhi-rong, et al. Experimental investigation of methane-air mixture explosion venting[J]. *China Safety Science Journal*, 2007, 17(12):107-110.

Explosion-vented processes for methane-air premixed gas in spherical vessels with venting pipes

SHI Xi-lin, WANG Zhi-rong, JIANG Jun-cheng*

*(College of Urban Construction and Safety & Environmental Engineering,
Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, Jiangsu, China)*

Abstract: A mathematical model, considering the inner and outer fields of explosion vessels, was introduced to explore the induced mechanism of high explosion-vented pressures and the characteristics of flame and pressure transmission in spherical vessels. Based on the conservation equations for hydrodynamics and chemical reaction dynamics, by adopting the k- ϵ turbulent model and the EBU-Arrhenius combustion model, the SIMPLE algorithm was used to investigate numerically the methane-air premixed gas vented explosion process in the two-dimensional space of the spherical vessel with a conduit for explosion venting. The characteristics of flame and pressure transmission and gas flow in the process of vented explosion were obtained which could reflect the dynamics of gas explosion. The turbulent combustion appearing in the process of vented explosion accelerates the transmission of the combustion flame. Venting explosion conduits confines seriously the high-pressure gas venting from vessels.

Key words: mechanics of explosion; vented explosion; SIMPLE algorithm; spherical vessel; combustible gas

* Corresponding author: JIANG Jun-cheng

E-mail address: shiweibo2003@sina.com

Telephone: 86-25-83239973