

文章编号: 1001-1455(2004)04-0356-07

泄爆诱导二次爆炸的实验研究^{*}

叶经方, 姜孝海, 贾正望, 董刚, 范宝春
(南京理工大学动力工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 在不同泄爆压力、不同泄爆面积和不同当量比的甲烷/空气预混气的实验条件下, 采用容积为 0.00814m^3 带导管的柱形泄爆容器和底端中心点火方式, 进行了一系列泄爆实验。实验获得了内外流场测点的压力历史曲线。结果表明泄爆后外流场出现典型的破膜激波和二次爆炸波的双峰变化特征, 前者不断下降, 其强度随泄爆压力的增大而增大, 而后者经历了上升和下降过程, 强度随泄爆压力、泄爆面积和甲烷/空气当量比的增大而增大。

关键词: 爆炸力学; 二次爆炸; 实验研究; 甲烷/空气预混气; 泄爆

中图分类号: O381; X932

国标学科代码: 130°3510

文献标志码: A

1 引言

工业上常用泄爆或抑爆措施来防止、减轻爆炸灾害, 其中泄爆是指通过泄爆装置将容器或管道内部的高压已燃和未燃混合气体导至外部空间, 使内部爆燃、爆炸压力迅速降低的一种技术。泄爆过程强烈耦合了可燃介质流动与热化学反应, 在泄爆过程中, 外部流场可能出现很高的压力峰值, 甚至产生所谓的二次爆炸。因此研究泄爆后外部流场的变化特征, 具有重要的现实意义。

为了合理设计泄爆装置以达到最佳的泄爆效果, 人们进行了很多实验和理论研究。对泄爆容器内流场的研究, 主要包含内部超压的产生机制、经验关系式的确定和验证、最佳泄爆条件以及泄爆容器的合理设计等^[1~3]; 对外流场的研究相对较少^[4~6]。A. J. Harrison 等^[5]对 30m^3 大型爆炸管开口泄爆所诱导的外部爆炸现象进行了较详细的试验研究, 对不同泄爆条件下, 射流火焰、湍流以及外部爆炸等对内部超压的影响等进行了讨论, 但对外部压力, 其测压点的布置可能不尽合理, 测得的压力曲线并没有出现破膜激波和二次爆炸波的双峰变化特征, 因此对泄爆后外部压力场的变化特征仅进行了简单的讨论。C. A. Catlin^[6]对不同泄爆条件下泄爆外流场进行了试验研究, 简略讨论了火焰射流与外部云团的变化过程, 从外部爆炸对内部压力的影响方面进行了定性讨论, 但对二次爆炸的产生机制和变化特性以及不同泄爆条件对其强度的影响等仍未进行详细系统的分析。

本文中采用不同泄爆压力、不同当量比的甲烷/空气预混气和不同泄爆面积等泄爆条件, 对容积为 0.00814m^3 带导管的柱形泄爆容器, 进行了一系列实验。并根据这些实验结果, 详细讨论了泄爆后内外流场主要波系的变化特征, 系统分析了破膜激波和二次爆炸波的发展变化过程。

2 实验系统与实验步骤

实验装置及测试系统如图 1 所示, 含泄爆容器、配气系统、点火装置和瞬态动压数采系统四部分。

泄爆容器为内径 180mm、高 300mm 的密闭圆柱形容器, 其上端的引爆导管内径为 75mm、高 116mm, 顶端面用纸膜密封。纸膜经同一的工艺处理, 使破膜压力误差小于 5%。距导管端面 73mm 处, 可安装不同内径 ($\varnothing 68\text{mm}$ 和 $\varnothing 58\text{mm}$, 厚度均为 10mm) 的环形孔板, 用以改变出口的阻塞比, 即改变不同的泄爆面积。 $\varnothing 68\text{mm}$ 和 $\varnothing 58\text{mm}$ 的环形孔板阻塞比分别为 17.8% 和 40.2%。

* 收稿日期: 2003-08-26; 修回日期: 2003-11-25

基金项目: 国家重点基础研究专项基金项目(2001CB409600)

作者简介: 叶经方(1950—), 男, 高级工程师。

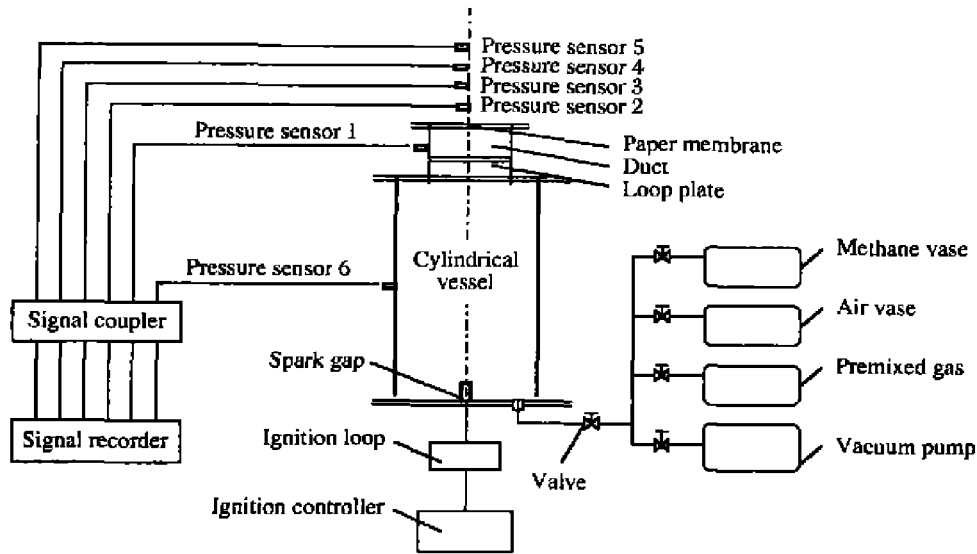


图 1 泄爆实验系统简图

Fig.1 Experimental system diagram of gaseous explosions venting

瞬态动压数采系统由石英压电动压传感器(Kistler 211B 型, 量程 0.7MPa)、信号调理器(Kistler 5124 型 12 通道)、瞬态记录仪(JV 5200 型 8 通道, 10bit, 采样频率 20MSPS)组成。实验时, 动压传感器将压力信号转化为电荷信号并由内置阻抗变换器和放大器转换为相应的电压信号。信号调理器为传感器提供恒流电流并将传感器传来的电压信号进行二次放大后输出。瞬态记录仪由 VXIbus 主机箱、VXI 系统控制器、系统软件包以及具有转换、放大、滤波、贮存、记录多用途的功能模块组成, 它采集信号调理器输出电压信号并记录 $p-t$ 曲线。容器内外共布置 6 个测压点, 其中测压点 1 距导管口 55mm, 测压点 6 距密闭容器底端 150mm, 二者用来测容器内压力的变化。容器外轴线上分别布置四个间距为 100mm 的测压点, 测压点 2 距泄爆口端面 80mm。

点火装置包括火花电极、点火线圈和点火控制器。点火电极装于容器底端中心处, 点火线圈采用能量 150mJ 的汽车通用线圈。由点火器通过点火线圈电感放电产生电火花, 点燃 CH₄/Air 预混气。

配气系统由阀门、CH₄气瓶、Air 气瓶、预混气瓶和真空泵组成。实验前, 通过预混系统, 将一定当量比的甲烷和空气预混 24h 以上。

实验时, 泄爆口由纸膜密封后, 由真空泵将整个容器抽成真空, 然后充入一定当量比的 CH₄/Air 预混气。通过点火系统, 使安装在底端的点火电极放电产生电火花并点燃预混气, 同时触发瞬态记录仪记录各传感器的压力信号。随着容器内气体的燃烧, 管内压力逐渐上升, 当管口压力超过膜片的最大耐压值时, 膜片破裂。管外的压力信号(测压点 2~5)经信号调理器转换放大后, 由瞬态记录仪采集并记录。在做不同阻塞比实验时, 先将选定的环形孔板安装在指定的位置, 固定好后, 其余操作步骤同前。不同实验条件下, 具体的实验内容参见表 1。

表 1 实验内容

Table 1 Item of test

编号	CH ₄ /Air 当量比	泄爆压力/kPa	点火位置	环形孔板内径/mm
T1	0.7	230 ± 10	底端中心	
T2		350 ± 15		
T3		230 ± 10		
T4	1.0	140 ± 5	底端中心	
T5		230 ± 10		68
T6		230 ± 10		58
T7	1.3	230 ± 10	底端中心	

3 实验结果与讨论

3.1 典型压力曲线

图2为测压点1、6所测得的内压力典型曲线。在破膜(图中A和A'点)前,因容器内混合气体的燃烧,压力逐渐上升,直至达到泄爆压力。破膜后,管口附近稀疏波进入导管,引起两测点的压力迅速下降,其中测点6因离导管口较远,稀疏波的影响较测点1滞后,故压力的下降亦滞后,如图中A点对应时刻(65.5ms)较A'点(65.0ms)滞后0.5ms。而且测点1的压力并不像测点6一直在下降,而是出现短暂的突升后再继续下降,图中B点处压力峰值达到176.5kPa。破膜瞬间,火焰阵面并未到达管口。当火焰阵面在向管口推进过程中,因受管壁剪切层、内外压差及湍流等的作用,火焰失稳加速,加剧了燃料的燃烧,引起局部压力的上升。测点1压力的突升是由于火焰阵面到达该处时引起的。火焰阵面出管口后,因该处燃料的消耗和管口稀疏波的作用,压力又继续下降,显示出泄爆的效果。

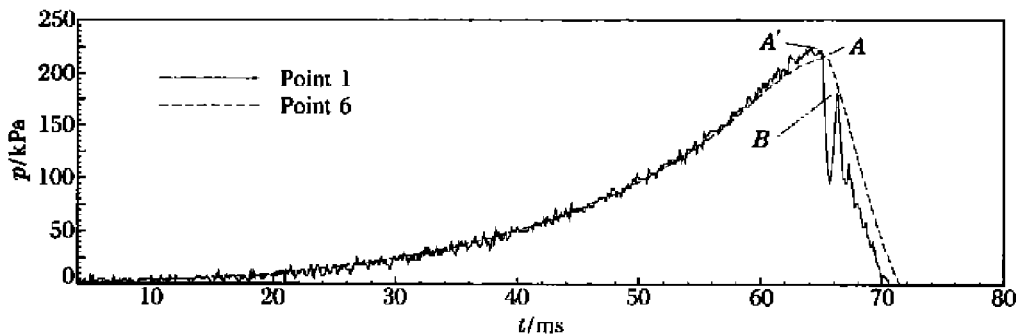


图2 测压点1和6测得的内压力变化曲线

Fig.2 Pressure variation of the internal pressure at point 1 and 6

图3为T3实验所测外流场轴线上四个测压点(2~5)的压力历史(其中虚线为破膜激波和二次爆炸波的阵面在 $x-t$ 平面上的投影)。由图可见,除了测压点2的曲线,其他压力曲线均存在两个典型的压力波峰,后出现的波峰明显较前一峰值大。前一波峰是泄爆时膜片破裂产生的激波,称为破膜激波。而后一波峰是泄出火焰点燃外部可燃气体所致,称为二次爆炸波。并且破膜激波的波阵面随 x 轴在不断下降,而二次爆炸波大小经历一个突升后下降。破膜时可燃气体以射流的形式泄出,在导管口附近形成可燃云团。当湍流火焰射流从管中进入外部可燃云团,其阵面上发生Talyor和Helmholtz不稳定^[7],在湍流的作用下,火焰失稳加速,加剧了外部可燃气体的燃烧,引起外压力的迅速上升,甚至产生所谓的二次爆炸。随后,因波阵面的扩大、燃料的消耗等,二次爆炸波峰值开始下降。

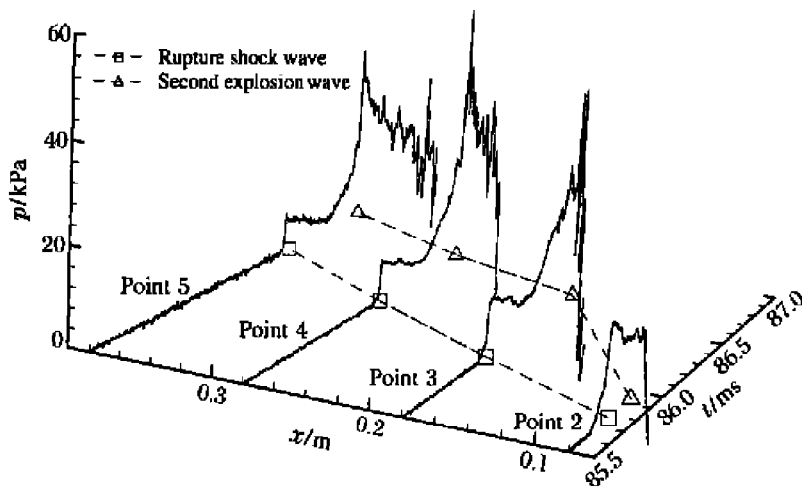


图3 测压点2~5的压力变化曲线

Fig.3 Pressure variation at point 2~5

图 4(a)、(b)为与图 3 对应的外流场两压力波峰值沿轴线的分布图和阵面轨迹图,图中测点从左至右依次为 2~5。由图 4(a)可见,破膜激波峰值从测点 2 的 18.8kPa 到测点 5 的 8.4kPa 依次下降,即破膜激波沿轴线不断下降,并趋于环境压力。而二次爆炸波峰值由最初的 13.6kPa 迅速上升到极大值 53.6kPa,而后开始下降,在测点 5 上其值为 37.7kPa,即二次爆炸波峰值先上升后下降,最大值达到 53.6kPa。由图 4(b)中破膜激波的阵面轨迹图可看出,其传播速度也在不断下降。而二次爆炸波的传播速度经历先加速后减速的过程。如图测点 3 到测点 4 的轨迹线斜率(传播速度的倒数)小于测点 2 到测点 3 点的斜率,即前者的速度大于后者,可见是一个加速过程。而测点 4 到测点 5 的轨迹斜率大于测点 3 到测点 4 的斜率,即前者速度小于后者,是一个减速过程。可见破膜激波的强度是在不断下降的,二次爆炸波的强度在经历突升后开始下降。

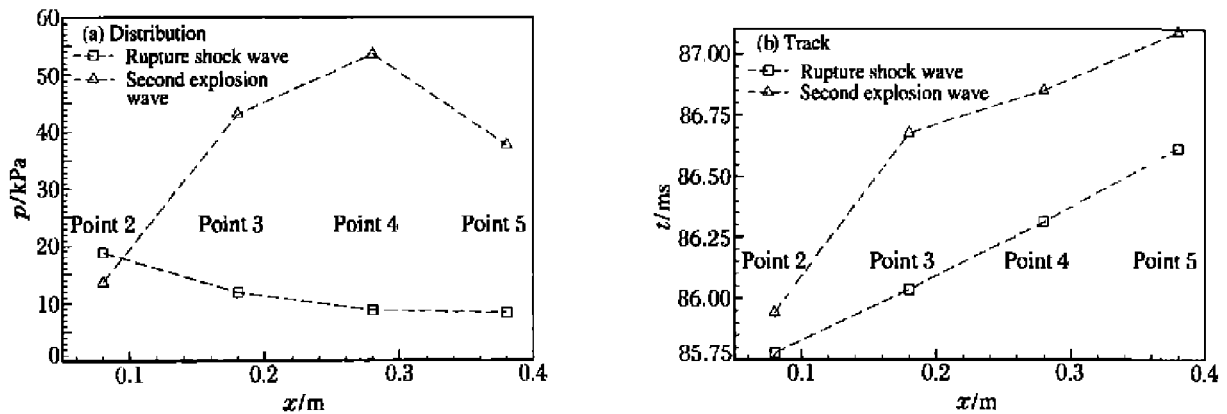


图 4 破膜激波和二次爆炸波的阵面沿轴线分布图和轨迹图

Fig.4 Distributions and track of the rupture shock wave and second explosion wave front along the axis

3.2 泄爆压力的影响

图 5 为当量比相同、泄爆压力不同时,测得的破膜激波和二次爆炸波阵面沿轴线的分布图(T2、T3、T4)。由于破膜激波初始峰值随泄爆压力的增大而增大,即从 T2 到 T4,破膜激波初始峰值从 37.7kPa 到 9.3kPa,依次降低。随后各点压力均沿 x 轴下降,最后趋于环境压力。但二次爆炸波阵面峰值的变化较复杂,不仅随泄爆压力的增大而增大,而且泄爆压力越大离管口越近。T2、T3、T4 对应的最大峰值依次为 83.0、53.6、18.3kPa,且在 T2 中,最大峰值出现在 $x=0.18m$ 处,即测压点 3 上,较 T3、T4(最大

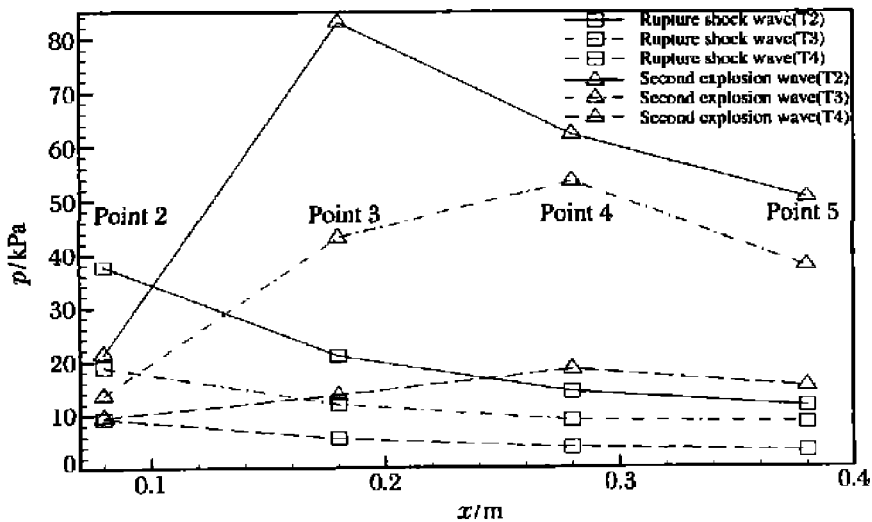


图 5 泄爆压力不同时,破膜激波和二次爆炸波阵面沿轴线分布图

Fig.5 Distributions of the rupture shock wave and second explosion wave front with different failure pressure along the axis

峰值出现在 $x=0.28\text{m}$ 处) 靠前。在达到最大值后, 其峰值变化与前述的典型曲线一样开始下降。当泄爆压力较大时(即内外压差大), 产生的破膜激波强度亦较大。同时容器内燃料消耗相对较多, 火焰阵面离管口也较近, 未燃气体质量相对较少。当火焰高速泄出并点燃可燃云团时, 压力迅速上升, 因燃料较少, 且火焰阵面离管口较近, 可燃云团还来不及扩散到更远的地方, 便被紧随其后的火焰点燃而迅速燃烧, 引起压力迅速上升, 因此二次爆炸的最大峰值出现在管外离管口相对较近的地方。对于小的泄爆压力, 因内外压差小, 火焰阵面离管口较远, 虽然未燃气体较多, 但火焰的泄出速度相对较小, 受管外空气稀释的时间较长, 可燃云团的燃烧并不像前者那么剧烈, 因此产生的外部压力最大峰值较小。

图 6 为当量比相同、泄爆压力不同(T2、T3、T4)时, 测得的破膜激波和二次爆炸波阵面沿轴线变化的轨迹图, 其时间轴以破膜激波到达管外第一个传感器的时刻为零点。对于破膜激波, 其轨迹斜率均沿 x 轴的增大而增大, 即传播速度也是不断下降的。但随泄爆压力的增大(从 T4 到 T2)其斜率减小, 即对应的传播速度增大。这与前述的随泄爆压力的增大, 破膜激波的强度亦增大是一致的。

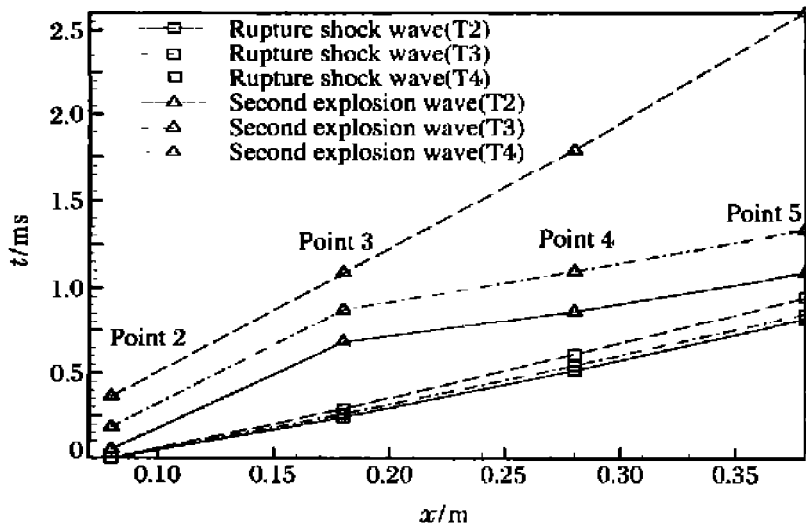


图 6 泄爆压力不同时, 破膜激波和二次爆炸波阵面沿轴线轨迹图

Fig. 6 Tracks of the rupture shock wave and second explosion wave front with different failure pressure along the axis

3.3 泄爆面积(阻塞比)的影响

图 7(a)、(b)、(c)分别为阻塞比为 0(T3)、17.8%(T5)和 40.2%(T6)时, 同一当量比和相同泄爆压力下管内测压点 1 的压力变化曲线。由图可见, 泄爆后, 压力均迅速下降, 但随后的压力突升点(图 7(a)、(b)中的 B 、 B' 点)却随阻塞比的增大而下降, 以致消失, 即无障碍物时, 突升点明显较有障碍物(17.8%)时大, 而当阻塞比为 40.2%时, 突升点已消失, 可见障碍物对突升点的影响较大。由于测压点 1 在障碍物和导管口之间的管壁上(见图 1), 当管内可燃气体迅速燃烧, 火焰向导管加速过程中生成的激波经过障碍物时, 发生衍射, 即激波在径向(垂直管壁)上发生衰减, 因而图 7(b)中 B' 点的压力较图 7

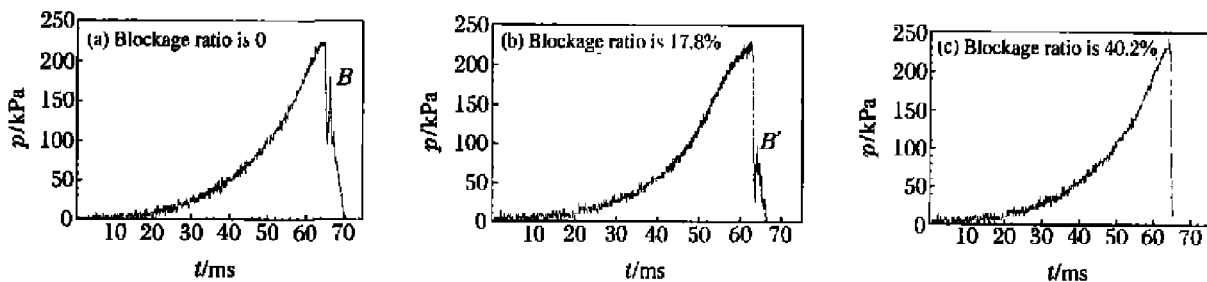


图 7 泄爆压力相同、阻塞比不同时, 测压点 1 的压力曲线变化图

Fig. 7 Pressure variations at point 1 with different vent area in the same failure pressure

(a)中无障碍物时 B 点值小。当障碍物阻塞比较大时,即阻塞部分的径向距离增大,激波衍射后到达管壁时已衰减为压缩波,对应的突升值变小或消失,如图 7(c)所示。

图 8 为阻塞比不同时,二次爆炸波最大峰值变化图。由于火焰从导管泄出时,受障碍物的阻挡,其运动速度减缓,因而火焰点燃外部可燃云团时,其燃烧的剧烈程度较低,使二次爆炸压力峰值较小。由图可见,在阻塞比分别为 0、17.8%、40.2% 时,对应的最大峰值为 53.4 (T3)、49.2 (T5)、20.7kPa (T6);即随着阻塞比的增大,二次爆炸最大压力峰值是下降的,故在相同的泄爆压力下,二次爆炸波的强度是随泄爆面积的增大而下降增大的。

3.4 当量比的影响

图 9 为泄爆压力相同时,不同当量比的甲烷/空气预混气的二次爆炸波最大峰值的曲线图。在预混气的当量比分别为 0.7、1.0、1.3 时,对应的二次爆炸波最大峰值为 34.2 (T1)、53.8 (T3)、84.5kPa (T7)。可见当量比越大,对应的外部二次爆炸波的最大峰值越大。因为当量比越大,即甲烷的浓度越高,在可燃气体喷出与外界空气混合后,管外可燃云团的燃料浓度相对较高,当泄出火焰引燃外部可燃云团时,形成的二次爆炸波的最大压力峰值也就更高。

4 结 论

(1)一定的泄爆条件下,外压力场出现两典型的波峰,第一个波峰由破膜产生,称为破膜激波,其值不断衰减;第二个波峰的产生较第一个波峰滞后,它是火焰从内流场进入外流场,点燃外部可燃气体所致,称为二次爆炸波,其值明显大于破膜激波。

(2)在不同的泄爆压力下(T2、T3、T4 实验),二次爆炸波的最大峰值随泄爆压力的增大而增大,其中泄爆压力为 (350 ± 15) kPa 时最大的(T2 实验)中,其最大峰值达到 83.0kPa,且出现的位置离导管口较近($x=0.18$ m)。

(3)不同阻塞比对二次爆炸波强度的影响较大,在相同泄爆压力(T3、T5、T6),阻塞比分别为 0、17.8%、40.2% 时,对应的二次爆炸波最大峰值为 53.4、49.2、20.7kPa,即随着阻塞比的减小,二次爆炸波的强度是下降的。对于导管内测点 1,其压力在泄爆后,并不持续下降,而是在下降过程中出现短暂的突升,其突升点的值随着阻塞比的减小而减小。

(4)相同泄爆压力下,甲烷/空气预混气的当量比分别为 0.7、1.0、1.3 时,对应的二次爆炸波的最大峰值分别为 34.2(T1)、53.8(T3)、84.5kPa(T7),即当量比越大,产生的二次爆炸波的强度亦越大。

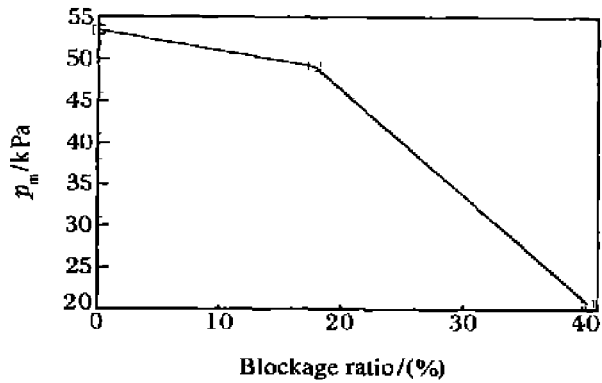


图 8 泄爆压力相同、阻塞比不同时,二次爆炸最大压力峰值变化图

Fig.8 Variation of the maximum pressure value of the second explosion with different vent area in the same failure pressure

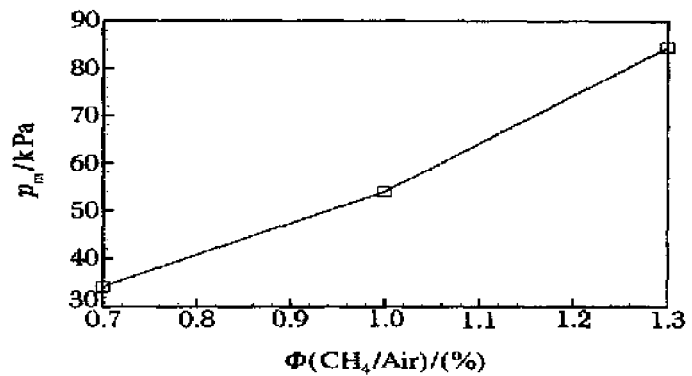


图 9 泄爆压力相同、当量比不同时,二次爆炸压力最大值变化图

Fig.9 Variation of the maximum pressure value of the second explosion with different stoichiometric ratio of methane/air mixture in the same failure pressure

二次爆炸波的这些特点,可为进一步的理论研究和安全生产提供有意义的参考。

参考文献:

- [1] Cooper M G, Fairweather M, Tite J P. On the mechanisms of pressure generation in vented explosions[J]. *Combustion and Flame*, 1986, 65: 1—14.
- [2] Ponizy B, Leyer J C. Flame dynamics in a vented vessel connected to a duct; 1. Mechanism of vessel-duct interaction [J]. *Combustion and Flame*, 1999, 116: 259—271.
- [3] 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): 48—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): 48—52.
- [4] Forcier T, Zalosh R. External pressures generated by vented gas and dust explosions[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2000, 13: 411—417.
- [5] Harrison A J, Eyre A J. “External explosions” as a result of explosion venting[J]. *Combustion Science and Technology*, 1987, 52: 91—106.
- [6] Catlin C A. Scale effects on the external combustion caused by venting of a confined explosion[J]. *Combustion and Flame*, 1991, 83: 399—411.
- [7] 王继海. 二维非定常流和激波[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 348—377.

Experimental investigations of external second-explosion induced by vented explosion

YE Jing-fang^{*}, JIANG Xiao-hai, JIA Zheng-wang, DONG Gang, FAN Bao-chun
(*School of Powering Engineering, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing 210094, Jiangsu, China*)

Abstract: A series vented explosion experiments in a 0.00814m^3 cylindrical vented vessel with central bottom ignition, were performed. The effects of different failure pressure, different vent area and different stoichiometric ratio of methane/air mixture on venting were investigated. The results show that there exists the typical rupture shock wave and the second explosion wave in the external flow field during venting. The value of the rupture shock wave declined all the time, and the value of second explosion wave rose to the maximum and then declined. The peak value of the second explosion rose with the increase of failure pressure, vent area and stoichiometric ratio of methane/air mixture respectively.

Key words: mechanics of explosion; second explosion; experimental investigation; methane/air mixture; vented explosion

^{*} Corresponding author: YE Jing-fang
E-mail address: njjxh0700@sina.com
Telephone: 025-84315493