DOI: 10.11883/1001-1455(2016)05-0680-08

圆柱形管道旁侧油气泄爆实验研究*

吴松林[1,2],杜 扬[1],欧益宏[1],张培理[1],梁建军[1]
(1.后勤工程学院供油工程系,重庆 401311;
2.后勤工程学院基础部,重庆 401311)

摘要:油气是一种组分复杂的可燃气体,极易发生爆炸。为了研究油气在受限空间的泄爆规律,对不同体积分数油气在圆柱形直管道旁侧的单孔和双孔泄爆进行了可视化实验,获得了管道内外流场的爆炸超压规律和管道外流场的火焰特征。发现油气泄爆过程存在未燃气体从开孔泻出、形成"蘑菇云"、持续剧烈燃烧、逐渐熄灭 4 个阶段。通过对最大爆炸超压的数据对比分析,获得了双孔泄爆可以数倍分流单孔的外部最大超压;开孔位置距点火端越远,孔外最大超压越大;泄爆中外流场最大超压远大于内流场最大超压等结论。

关键词:爆炸力学;泄爆;超压;油气;圆柱形管道
中图分类号:O389 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

可燃气体在受限空间内的爆炸一般会引起极大的爆炸超压[1-2],导致灾难性事故的发生。为了防止气体爆炸带来重大的经济损失和人员伤亡,人们通过实验深入研究了可燃气体利用泄爆管在柱形腔体[3-9]、球形容器[10-15]的泄爆过程,以及通过导管直接连接的不同容器[16]的泄爆过程。获得了单质可燃气体在不同开口面积容器内部的爆炸超压规律、传播特性,或者外部流场的二次爆炸特性等,而对容器内外流场相结合,对不同部位的开孔,多个开孔的泄爆过程研究比较少。

油气是汽油的挥发物,是以轻质烷烃为主要组分的复杂混合物。由于油气在油料洞库、储罐、管道、隧道、地下建筑等受限空间中比较容易聚集,又容易满足爆炸的条件,因此容易造成重大的爆炸事故。基于这个原因,一些作者深入研究了油气在封闭空间中的爆炸特性[17-18],获得了不同于其他可燃气体爆炸的成果,而对油气的泄爆过程还未有相关深入研究。

本文中通过内外流场相结合的可视化泄爆实验和数据分析,深入研究油气在圆柱形直管道旁侧单孔、双孔下的泄爆过程,获得管道内外流场的压力特征,管道外流场的火焰特征,获得的相关数据和可视化成果可丰富受限空间油气爆炸成果,为消防安全等提供技术基础。

1 实验装置和测试系统

主实验装置为一段长 1.7 m、半径 200 mm 的圆柱形直管道,左右两端用法兰封闭。管道侧面有 2 个观察窗,对应的上端旁侧有 2 个直径 120 mm 的开孔,开孔用法兰或者薄膜(破膜压力约 600 Pa)封闭。自制点火电极安装在管道一端的法兰中心,通过线缆与自主设计的多功能电点火器(见图 1)相连,点火能量范围为 0.1~6.9 J,本文实验中点火能量为 3 J。油气雾化循环系统主要由汽化装置、真空泵、安全阀门和导气管组成。



图 1 多功能智能点火器
Fig. 1 Multifunctional intelligent ignition device

实验测试系统主要由压力动态采集系统、油气

* **收稿日期**:2015-03-04;**修回日期**:2015-06-10
基金项目:国家自然科学基金项目(51276195);重庆市基础与前沿研究计划项目(cstc2013jcyjA00006)
第一作者:吴松林(1973—),男,博士研究生,副教授,wusonglin100@163.com。

体积分数测试系统、高速摄像等组成。压力动态变化由 7 支泰斯特压力传感器测试，测试频率为 100～300 kHz，测试压力量程为 0～2 MPa，压力采集分析软件为 DAP6.13 版。浓度测试系统为 GXH-1050 红外线分析器和日本 COSMOS 电子有限公司生产的 FGA-4100(5G)汽车排气分析仪。高速摄像拍摄最大速度为 1 000 s^{-1}。整个实验装置及测试系统连接情况如图 2 所示。

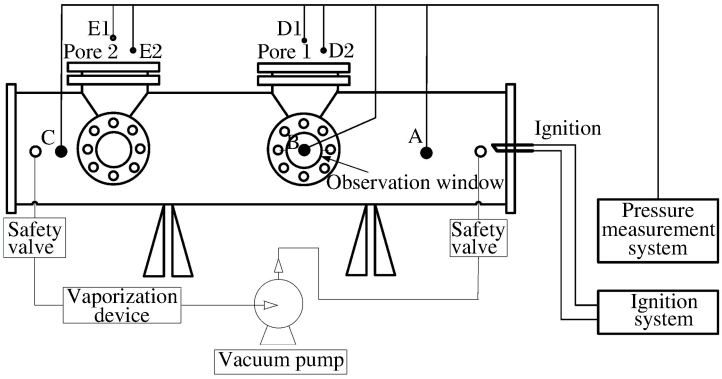

图 2 实验装置及系统连接示意图

Fig. 2 Diagram of experimental setup

主要实验步骤：首先，按图 2 布置好各种仪器和设备，检查线路；其次，调试、校准测试系统，使系统处于工作状态，清理现场；然后，启动真空泵，将 93# 汽油经过气体雾化系统循环输入到管道中，期间，通过气体浓度测试装置进行多次、多个位置油气浓度测量，保证油气在坑道中均匀分布，达到实验所需浓度，关闭安全阀；再然后，启动点火开关，通过内触发，触发压力测试系统，记录压力曲线，同时通过高速摄像机摄制火焰发展过程；最后，打开法兰，用吹风机吹扫，排出废气，进行分析、处理数据和视频，获得相关结果。

2　实验结果

为了对比研究，完成了体积分数为 0.9%～1.55%的油气在封闭空间爆炸实验、单孔开口泄爆实验和双孔开口泄爆实验。实验的环境温度为(14±2) ℃，环境湿度为(25.6±5)%，环境压力为 1.015×10^5 Pa。

2.1　封闭空间油气爆炸的压力特征

通过研究发现，因受限空间条件、油气特性的影响，油气在受限空间爆炸后不同位置的压力曲线可能有多个波峰，相同体积分数的压力曲线也略有差别。图 3 描绘了体积分数为 1.25%的油气在受限空间爆炸的一组典型压力曲线。B 点压力曲线呈现多峰状，最大超压为 135 kPa；而 C 点压力曲线呈现为

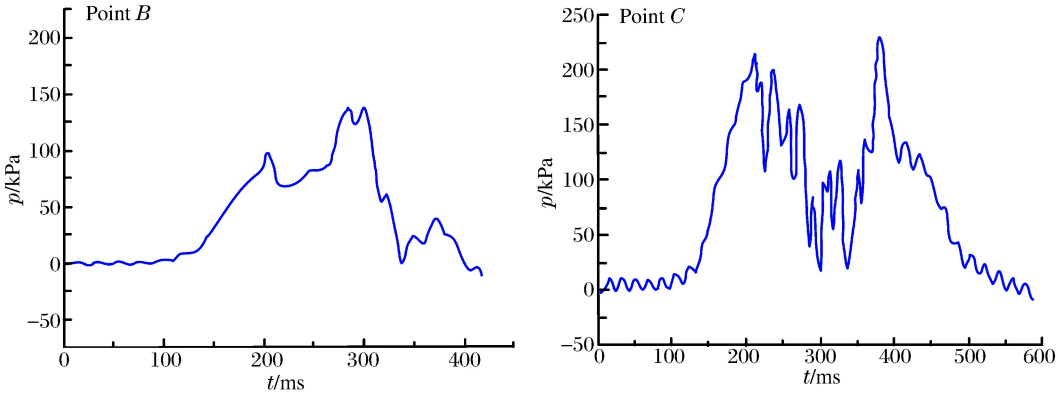

图 3 封闭空间油气爆炸的压力曲线(φ=1.25%)

Fig. 3 Curves of pressure for gasoline-air explosion in closed space(φ=1.25%)

双峰状,最大压力达到了 230 kPa。由于 C 点紧邻管道一端,它的第 2 个压力峰值应该是反射波造成的。从图 3 来看,当 B 点压力达到最大超压时,C 点压力却处于双峰中间的波谷,说明了冲击波在 B 与 C 之间得到了加强。

2.2 单孔泄爆基本特征

2.2.1 单孔泄爆的主要实验参数

将开孔 1 或者开孔 2 单独打开,其他孔和端口封闭,完成单孔泄爆实验,实验的主要参数情况见表 1。表中,p 表示最大超压,火焰最大高度 h 是火焰以孔口为基点的最大燃烧高度,火焰持续时间 t 表示的是在孔外燃烧火焰从出现到完全熄灭经历的时间。

表 1 单孔泄爆实验的主要参数

Table 1 Main parameters of single pore venting explosion test

实验编号	开孔	φ/%	p_B/kPa	p_C/kPa	p_{D_1/E_1}/kPa	h/m	t/s
1	1	0.90	38	14	650	0.8	3.2
2	1	1.10	42	19	720	1.5	4.5
3	1	1.13	53	21	730	1.6	5.6
4	1	1.17	59	27	750	2.2	5.2
5	1	1.50	200	132	810	2.8	3.6
6	1	1.55	311	180	830	2.9	3.2
7	2	1.10	90	13	740	1.8	3.5
8	2	1.20	150	23	810	2.6	4.0

从表 1 可以得出如下结论:

(1)当开孔 1 泄爆时,各点的压力、火焰最大高度基本随着体积分数的增加而增加(见图 4),其中泄爆孔外部的最大超压远远大于容器内部的最大超压。但是从火焰持续时间看,油气体积分数较小或者较大,持续时间都较短,而在体积分数为 1.13%时,火焰持续时间达到了最大为 5.6 s。

(2)当开孔 2 泄爆时,与同体积分数开孔 1 泄爆相比,开口的最大超压和火焰最大高度都大得多,主要原因应该是火焰前锋和压力波耦合加速的距离长所致。

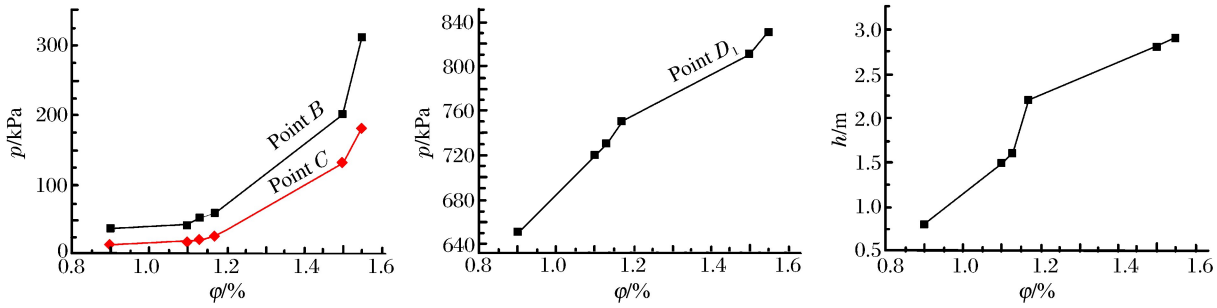

图 4 油气体积分数与最大超压、火焰最大高度的关系

Fig. 4 Gasoline-air volume fraction vs. maximum overpressure and flame altitude

2.2.2 外流场可视化结果

将体积分数为 1.50%和 1.13%的油气在开孔 1 泄爆的外流场视频进行截图,获得火焰变化过程如图 5 所示。

通过对图 5 和视频的分析,可得如下结论:

(1)外流场爆炸过程可归纳为 4 个阶段。第 1 阶段,气体在管道内发生爆炸,薄膜被掀开,未燃气体从开孔泻出,没有火焰出现;第 2 阶段,火焰从泄孔射出,与未燃气体一道在孔口外爆燃,形成“蘑菇云”,“蘑菇云”重心偏向一侧。第 3 阶段,气体持续射流燃烧,这个阶段持续时间长,火焰也最长,燃烧速度也最快,火焰颜色几乎变成了白色。第 4 阶段为火焰的熄灭阶段,火焰不稳定,颜色变淡,长度逐渐减小。

(2)通过对比分析，发现有 3 个明显特点：油气的体积分数越高，第 2 阶段形成的“蘑菇云”面积越大，“蘑菇云”的伞柄越短；油气体积分数越高，第 3 阶段形成的射流火焰越长，持续燃烧过程越稳定；油气的体积分数越高，熄灭阶段出现了火焰的再次增强、变厚，可能有多次压力峰值。

与开孔 1 泄爆相比，开孔 2 泄爆实验的外流场类似。只是最大超压更大，火焰长度更长，爆炸声音更大，持续时间更短。

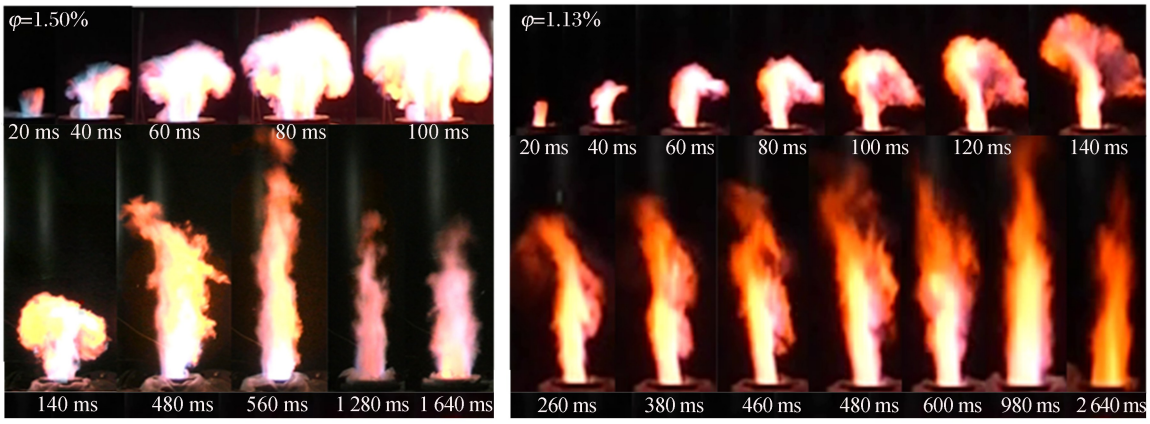

图 5　两种油气体积分数的外流场火焰变化过程

Fig. 5　Flame changing processes of the outflow field induced by two gasoline-air volume fractions

2.2.3　内外流场压力变化规律

图 6 是油气体积分数为 1.13%时，内外流场中 B、C 和 D 点的压力曲线。

从内流场的压力曲线来看，B 点的压力呈单峰，最大超压为 52 kPa，然后出现了负压；D 点的压力

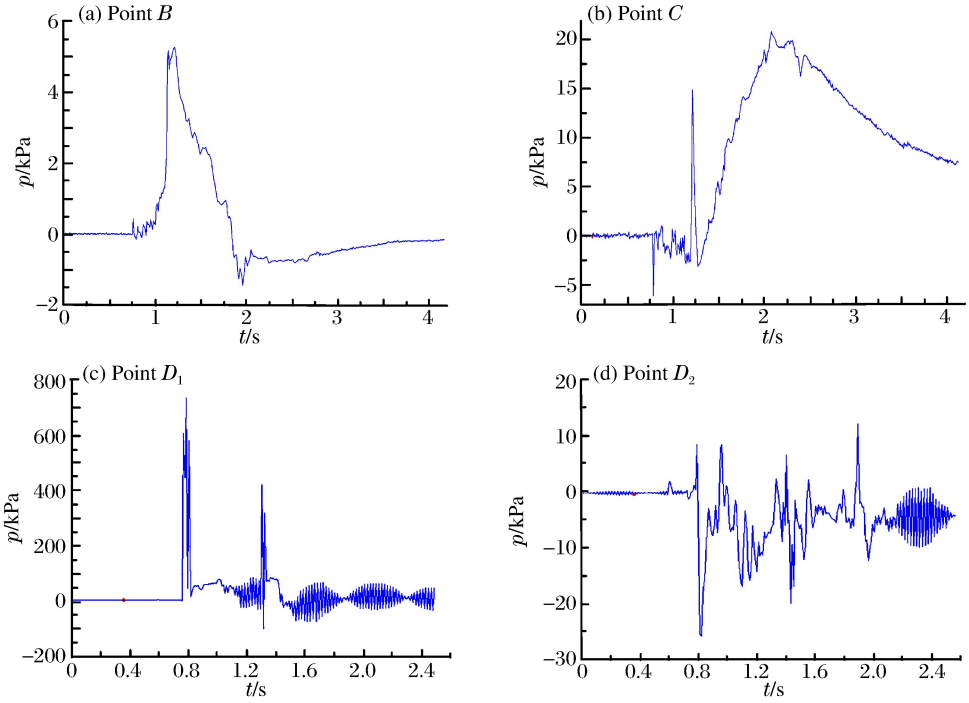

图 6　开孔 1 泄爆过程中内外流场压力曲线(φ=1.13%)

Fig. 6　Curves of pressure for internal and external flow field in the process of venting explosion for pore 1(φ=1.13%)

先是震荡,然后出现了短时间的峰值,最大超压为 15 kPa,最后呈现一个长时间单峰,最大超压达到了 21 kPa。

从外流场压力曲线来看,D_1 点(开孔 1 的正中央,距离开口 40 mm)出现了 2 次超压,最大压力分别达到了 720、410 kPa。D_2 点(距开孔 1 边缘 30 mm,开口 20 mm)出现了多次有规律的正压和负压的交替震荡,压力并不是很大。在 D_1 点出现 2 次很大的超压是因为开孔 1 处于点火端 700 mm 处,内部流场出现的正向和逆向冲击波从开孔射出。

通过以上分析,外流场的压力比内流场高了很多,破坏性很大。但内流场持续时间相对较长。图 7 是同样体积分数下开孔 2 泄爆的外流场压力曲线。

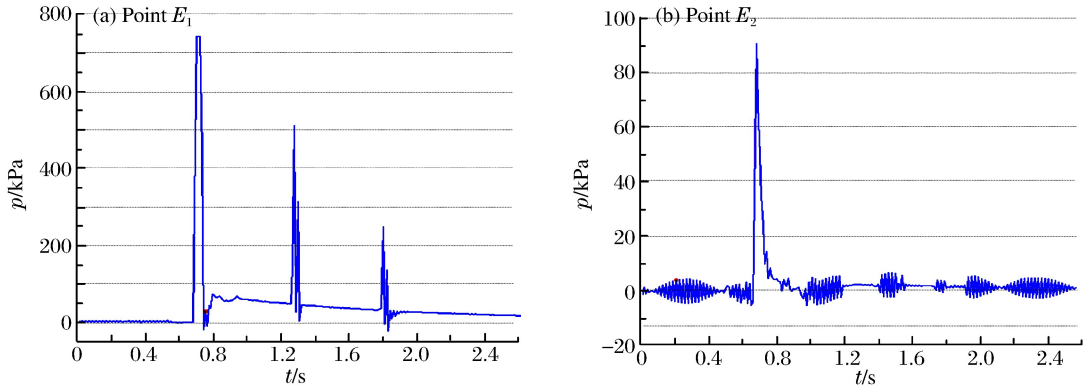

图 7 开孔 2 泄爆过程中外流场压力曲线(φ=1.13%)

Fig. 7 Curves of pressure for internal and external flow field in the process of venting explosion for pore 2(φ=1.13%)

从图 7 可以发现,当仅有开孔 2 泄爆时,E_1 点出现了 3 次压力峰值,最大超压分别是 740、505、250 kPa,而 E_2 点并未出现压力震荡,最大超压为 90 kPa。

2.3 双孔泄爆基本特征

将两个开孔同时打开,进行双孔泄爆实验,实验主要参数如表 2 所示。

表 2 双孔泄爆实验主要参数

Table 2 Main parameters for venting explosion test for the double cores

实验编号	φ/%	p_A/kPa	p_B/kPa	p_C/kPa	p_{D_1}/kPa	p_{E_1}/kPa	$h_{孔1}$/m	$h_{孔2}$/m	t/s
1	0.90	9.0	1.5	2.0	90	32.5	0.5	0.8	3.0
2	1.20	20.0	6.5	9.0	140	220.0	0.6	1.1	2.0
3	1.23	22.0	7.0	9.5	150	280.0	0.8	1.5	1.8
4	1.40	27.5	10.0	12.5	170	330.0	0.9	1.6	1.3

由表 2 可以发现,随着体积分数的增加,各点的最大超压,火焰最大高度基本呈递增趋势,持续时间反而降低。由于存在泄孔,A 点最大超压大于 B 点和 C 点的最大超压。与开孔 1 的最大超压相比,开孔 2 的最大超压较大,火焰最大高度较高。

2.3.1 外流场可视化结果

将体积分数为 1.40%的油气在两个开孔同时泄爆的外流场视频进行截图,得到如图 8 所示的火焰变化过程。

由图 8 的前 3 幅图可以看出,开孔 1 的火焰已经出现“蘑菇云”,而开孔 2 还没有火焰出现。第 4 幅图中开孔 2 的“蘑菇云”不明显,主要原因是破膜压力已将薄膜冲开,油气散失了一些。在泄爆第 3 阶段,开孔 2 外流场火焰更高、更稳定。从最后 3 幅图看出,燃烧过程持续时间最长。

2.3.2 内外流场压力变化规律

图 9 是油气体积分数为 1.40%时,内外流场的压力曲线。

从内流场来看，受 2 个开孔的原因，A 点的最大超压大于 B 和 C 点的最大超压。A 点的压力曲线仍然呈单峰，最大超压为 28 kPa。B 点的压力仍然呈双峰，最大超压分别为 10.1、10.0 kPa。C 点的第 1 个峰压已经不是很明显，第 2 个峰的最大超压为 13.0 kPa。

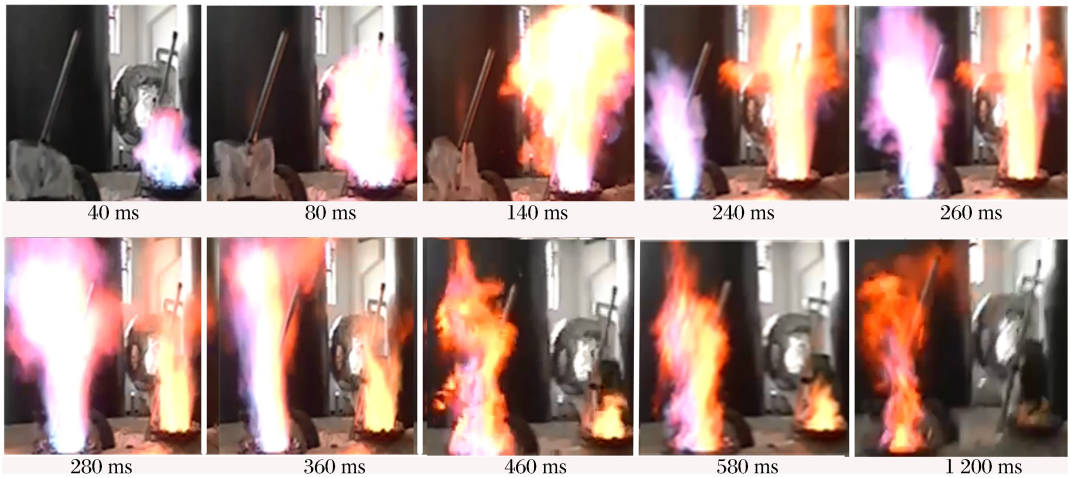

图 8　双孔泄爆过程中外流场火焰变化过程(φ=1.40%)

Fig. 8　Flame changing process of outflow filed during the venting explosion for the double cores(φ=1.40%)

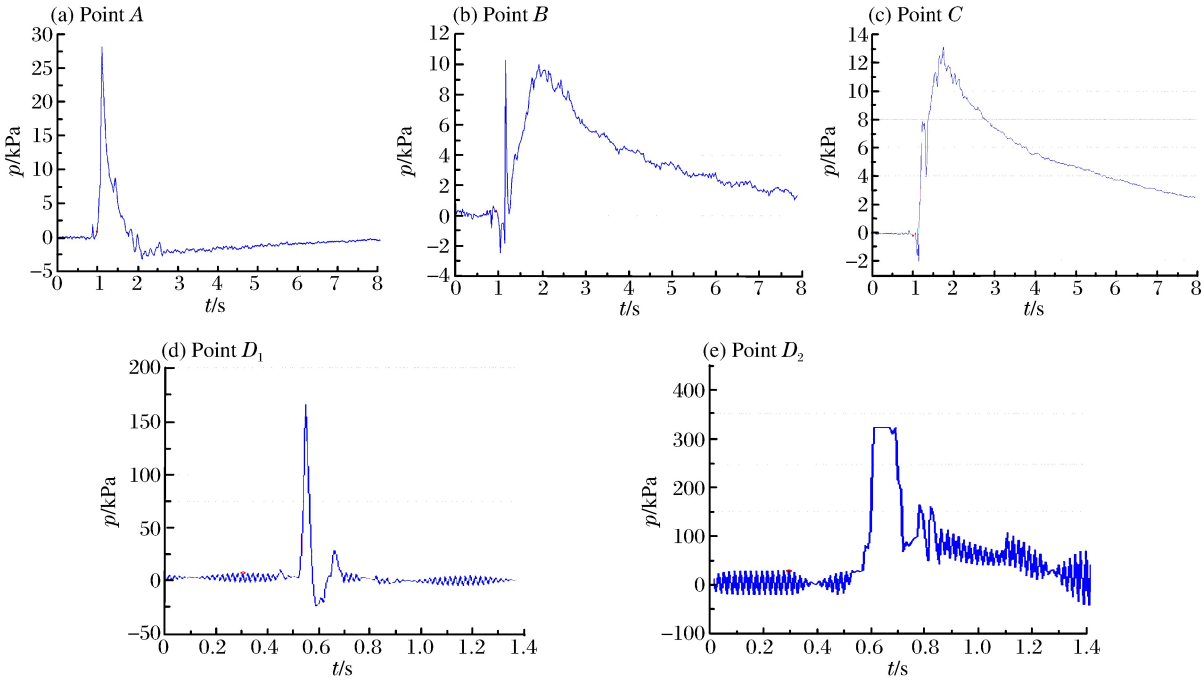

图 9　双孔泄爆过程中内外流场压力曲线(φ=1.40%)

Fig. 9　Curves of pressure for internal and external flow field in the process of venting explosion for the double pores(φ=1.40%)

从外流场来看，D_1 点压力曲线也是呈现为双峰状，最大超压分别达到 170、25 kPa；双峰中间有一最大负压为 25 kPa，负压出现的原因可能是开孔 2 此时出现了最大超压。说明了 2 个开孔有相互影响。E_1 点压力主要呈现单峰状，最大超压为 320 kPa。这样，开孔 2 的最大超压大于了开孔 1 的最大超压。

综上所述，管道外流场的最大超压远远大于了内流场的最大超压。

2.4　压力曲线的对比分析

对封闭空间油气爆炸实验、单孔、双孔泄爆实验的压力进行对比分析，获得如下结论：

(1)3 种实验中,封闭空间的内流场最大超压远远大于有开孔的内流场压力,但小于开孔外的最大超压;

(2)1 个泄孔外最大超压小于 2 个泄孔外的最大超压;

(3)开孔位置距点火端越远,开孔外最大超压越大;

(4)在实验油气体积分数区间内,体积分数越大,相应的压力越大。

3 结 论

通过本实验装置下油气爆炸实验,获得的主要结论如下:

(1)通过高速摄像,获得了单孔、双孔泄爆外流场火焰发展过程。油气泄爆过程可归纳为 4 个阶段,分别是薄膜被掀开,未燃气体从开孔泻出;火焰形成"蘑菇云;火焰持续剧烈燃烧;火焰逐渐熄灭。

(2)通过对比不同油气体积分数在封闭空间的爆炸,单孔、双孔泄爆实验,获得了管道不同位置的压力变化曲线特征,以及最大超压、开孔外火焰的最大高度和火焰持续时间等参数。数据分析表明,封闭空间的内流场最大超压远大于开孔泄爆内流场最大超压,而开孔泄爆的外流场最大超压远大于内流场最大超压,多孔泄爆可以分流最大超压等。

参考文献:

[1] Scheid M, Geiβler A, Krause U. Experiments on the influence of pre-ignition turbulence on vented gas and dust explosions[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2006,19(2):194-199.

[2] Zhang Peili, Du Yang, Zhou Yi, et al. Explosions of gasoline air mixture in the tunnels containing branch configuration[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013,26(6):1279-1284.

[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 f lame propagation during explosion venting from cylindrical vessel[J]. Explosion and Shock Waves, 2004,24(4):330-336.

[4] Kasmania 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.

[5] Cammarota F, Benedetto A D, Russo P, et al. Experimental analysis of gas explosions at non-atmospheric initial conditions in cylindrical vessel[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2010,88(5):341-349.

[6] Movileanu C, Gosa V, Razus D. Explosion of gaseous ethylene-air mixtures in closed cylindrical vessels with central ignition[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012,235(2):108-115.

[7] 董冰岩,彭旭.泄爆面积对柱形容器泄爆过程压力影响[J].工业安全与环保,2012,38(12):47-51.
Dong Bingyan, Peng Xu. Influences of Vent Area on Pressure Development of Cylindrical Vessels Explosion Vent [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2012,38(12):47-51.

[8] Ferrara G, Willacy S K, Phylaktou H N, et al. Venting of gas explosion through relief ducts: Interaction between internal and external explosions[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008,155(1/2):358-368.

[9] Dong Bingyan, Huang Peiyu, Peng Xu. Numeral simulation on the venting explosion process of methane and propane gas in closed cylindrical vessel[J]. Procedia Engineering, 2012,45(3):448-452.

[10] Razus D, Movileanua C, Oance D. The rate of pressure rise of gaseous propylene-air explosions in spherical and cylindrical enclosures[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007,139(1):1-8.

[11] 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 Experiments in Fluid Mechanic, 2013,27(4):62-65.

[12] Yan Xingqing, Yu Jianliang, Gao Wei. Duct-venting of dust explosions in a 20 L sphere at elevated static activation overpressures[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014,32:63-69.

[13] 姜孝海,范宝春,叶经方.泄爆诱导的湍流、旋涡和外部爆炸[J].应用数学和力学, 2004,25(12):1271-1277.
Jiang Xiaohai, Fan Baochun, Ye Jinfang. Turbulence, Vortex and External Explosion Induced by Venting[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2004,25(12):1271-1277.

[14] 王志荣，潘沫羽，蒋军成. 泄爆外部压力变化特性的影响因素[J]. 解放军理工大学学报，2013，14(5)：535-539.
Wang Zhijun, Pan Moyu, Jiang Juncheng. Influencing factors of external pressure characteristic induced by venting gas explosion[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2013,14(5):535-539.

[15] 姜孝海，范宝春，叶经方，等. 泄爆过程中二次爆炸的动力学机理研究[J]. 力学学报，2005，37(4)：442-449.
Jiang Xiaohai, Fan Baochun, Ye Jing-fang, et al. Dynamics in external secondary explosion during venting[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2005,37(4):442-449.

[16] Zhang Qingwu, Jiang Juncheng, You Mingwei, et al. Experimental study on gas explosion and venting process in interconnected vessels[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013,26:1230-1237.

[17] 杜扬，欧益宏，吴英，等. 热壁条件下油气的热着火现象[J]. 爆炸与冲击，2009，29(3)：268-274.
Du Yang, Ou Yihong, Wu Ying, et al. Thermal ignition phenomena of gasoline-air mixture induced by hot wall [J]. Explosion and Shock Waves, 2009,29(3):268-274.

[18] Ou Yihong, Du Yang, Jiang Xinshen, et al. Study on the thermal ignition of gasoline-air mixture in underground oil depots based on experiment and numerical simulation[J]. Journal of Thermal Science, 2010,19(2):173-181.

Experimental study for lateral gasoline-air venting explosion in cylindrical pipeline

Wu Songlin[1,2], Du Yang[1], Ou Yihong[1], Zhang Peili[1], Liang Jianjun[1]

(1. *Department of Petroleum Supply Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing* 401311, *China*;
2. *Department of Fundamental Studies, Logistical Engineering University, Chongqing* 401311, *China*)

Abstract: Gasoline-air, being composed of combustible components, is apt to brings about explosion accidents. In order to study the laws governing its venting explosion in a confined space, we carried out visualization experiments on a single pore and double pores laterally situated along the shell of a cylindrical pipeline with different gasoline-air volume fractions, obtained some flame characteristics of outflow field and regularities of explosion overpressure for the pipeline's internal and external flow, and found out the four stages of the venting explosion including the flam eventing from the pore, the mushroom-cloud forming, the gradual violent burning and extinguishing. Through a comparative analysis of the data of explosion overpressure, we found that the external maximum overpressure of the double pores was several times larger than that of the single pore, and that the farther away from the ignition end, the bigger the maximum overpressure of the internal flow field.

Key words: mechanics of explosion; venting explosion; overpressure; gasoline-air; cylindrical pipeline

(责任编辑　曾月蓉)