DOI: 10.11883/bzycj-2016-0344
文章编号: 1001-1455(2018)04-0898-07

点火位置对泄爆空间甲烷-空气爆炸荷载的影响*

王超强[1],杨石刚[1],方 秦[1],鲍 麒[2]
(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;
2.91058 部队,海南 三亚 572000)

摘要: 在 12 m^3 密闭空间内开展了甲烷-空气预混气体(甲烷体积分数为 9.5%)的爆炸试验研究,改变点火位置,分析有泄爆口时点火位置对甲烷-空气爆炸超压和火焰形态的影响。结果表明:点火位置对 Δp_1 的升压速度基本没有影响,Δp_2 的峰值随着点火位置远离泄爆口而增大,Δp_4 的峰值与点火位置的关系为:中心点火最大,尾部点火次之,前端点火最小。在所有位置,Δp_1 随着泄爆阈值的增大而增大,且增量相同;Δp_2 在前端点火和中心点火时随泄爆阈值的增加而消失,仅在尾部点火时出现;Δp_4 只有在中心点火时随泄爆阈值的增加而增加。外部火焰发展过程可以分为火球阶段和火焰喷射阶段,尾部点火和中心点火的火球大小及火焰喷射长度远大于前端点火。

关键词: 甲烷;泄爆;超压峰值;点火位置
中图分类号: O381;TD712 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

目前,天然气在公共和民用建筑中的普及率越来越高。然而,由于设备、管道的老化或使用者操作、应急处理不当,经常造成天然气泄漏;加之天然气燃点较低,一旦遇到明火,极易导致火灾、爆炸事故,给周围环境和人员财产安全带来严重威胁。在设备、管道或房屋上安装泄爆口是一种减小爆炸荷载、降低事故损失的有效方法[1]。决定泄爆空间(如厨房)内天然气爆炸荷载大小的因素有很多,如天然气浓度、泄爆阈值、点火位置和壁面粗糙程度等[2]。其中点火位置是一个非常特殊的因素,在实际安全事故中,引起爆炸的点火位置往往是不确定的,研究点火位置对爆炸荷载的影响具有重要意义[3]。

研究表明,点火位置对爆炸超压和火焰形态都有很大影响。郑立刚等[3]发现在一端开口的方形管道中,超压峰值和震荡幅度均随点火位置远离闭口端而增加;曹勇[4]和 Solberg 等[5]发现在带有泄爆口的管道内,中心点火时压力最大且升压速度最快,尾部点火其次,前端点火最小;Bradely 等[6]认为在带有泄爆口的球形容器中,最危险的点火位置是在容器中心。但是也有学者得到了不同的结论,Kasmani 等[7]研究了甲烷-空气预混气体在带有泄爆口的柱形容器中的爆炸超压,发现相对于中心点火,尾部点火可以造成更严重的后果;Harrision 等[8]研究表明,尾部点火时爆炸容器外形成的可燃气云体积最大,且超压荷载最大,前端点火产生的爆炸超压荷载最小;Bauwens 等[9]研究表明不同点火位置、泄爆面积、障碍物互相影响下,最危险的点火位置是不确定的。以上结果都证实点火位置对爆炸荷载有影响,然而,分析以上研究可知:一方面,目前的研究主要集中在球形、柱形、管道等长径比大的工业设备上,对建筑物内气体泄爆的研究比较匮乏;另一方面,由于大体积试验研究要求较高,目前研究所使用的容器体积一般较小,大体积空间的泄爆试验比较少见。

本文中,利用自主设计、建立的 12 m^3 泄爆空间可燃气体爆炸试验系统,开展甲烷-空气预混气体(甲烷的体积分数为 9.5%)的爆炸试验研究,通过改变点火位置,分析当有泄爆口存在时,点火位置对甲烷-空气预混气体爆炸超压和火焰形态的影响,以期为建筑物的安全设计提供思路。

* **收稿日期**: 2016-11-10; **修回日期**: 2017-02-17
基金项目: 国家自然科学基金项目(51408608);国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2015CB058001);
江苏省自然科学基金项目(BK20150060,BK20140067)
第一作者: 王超强(1991—),男,硕士研究生; **通信作者**: 杨石刚,youngshg@126.com。

1　试验系统和方法

1.1　试验系统

试验系统由泄爆空间、泄爆装置、气体供应装置、浓度控制装置、点火装置和数据采集装置组成，具体结构如图 1 所示。

(1) 泄爆空间

试验系统的主体为 1 个内部尺寸 2 m×2 m×3 m 的钢筋混凝土爆室，其所能承受的最大爆炸超压设计值为 600 kPa。

(2) 泄爆装置

在爆室正面中心预留 0.8 m×0.8 m 的泄爆口(有效泄爆面积为 0.64 m^2)。通过在其上密封不同泄爆阈值的泄爆板材料实现泄爆。试验中采用两种泄爆板材料，即厚为 0.015 mm 的聚乙烯薄膜和厚为 4 mm 的浮法玻璃。

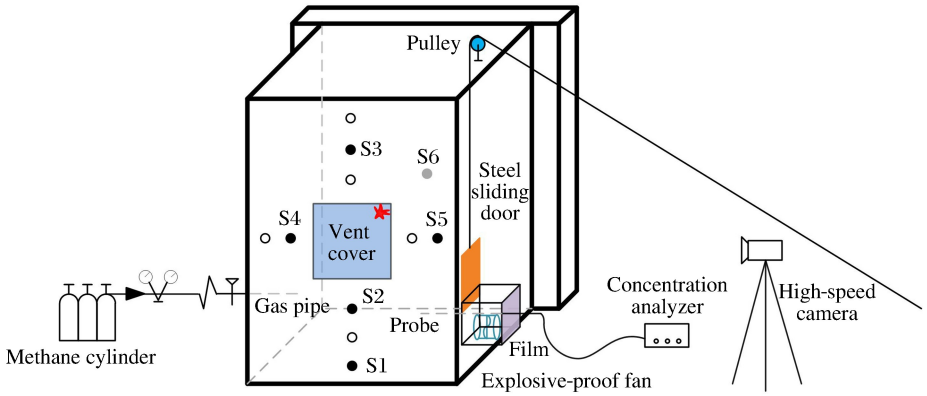


图 1　试验系统结构

Fig. 1　Schematic diagram of the test setup

(3) 气体供应装置

将纯度(体积分数)为 99.9%的甲烷气体通过充气软管和进气阀门缓缓充入建筑物模型内部，与空气混合形成可燃气体。

(4) 浓度控制装置

浓度控制装置包括闸门、防爆风机、风机盒与红外线气体浓度分析仪。防爆风机可以对室内甲烷-空气混合气体进行循环搅拌，红外线气体浓度分析仪可以对室内气体浓度进行实时监测。

(5) 点火装置

采用点火能量为 100 mJ 的点火头引爆气体，通过起爆线将点火头连接至 WY2 型同步起爆仪，起爆仪的输出电压为 20 V，电压脉冲持续时间为 2 μs。

(6) 数据采集装置

数据采集装置由动态信号测试分析仪、压力传感器、计算机和高速摄像机组成。数据采集仪选用 DH5927 动态信号测试分析仪，采样频率为 200 kHz。压阻式压力传感器采用昆山双桥 CYG1409 型传感器(量程为－100～300 kPa，精度为 0.5%，输出电压为 0～5 V)。为避免试验数据受到试验过程中强光和高温的干扰，在传感器头部安装防光膜片，在尾部连接水冷循环系统对传感器进行降温处理。整个泄爆空间共安装有 6 个压力传感器，其中 1 号、2 号和 3 号传感器分别安装于前面墙体竖向中线距地面 0.2、0.8 和 2.5 m 处房间内侧，4 号、5 号传感器分别安装于前面墙体横向中线距边线 0.65、0.90 m 处房间内侧，6 号传感器安装于后面墙体正中部，如图 1 所示。高速相机采用日本 Photron FASTCAM SA-Z 型相机，拍摄速度设定为 2000 s^{-1}，分辨率为 1024×1024。高速摄像机置于距离爆心 15 m 处，由 WY2 同步起爆仪触发启动。

1.2 试验方法

试验操作流程如图 2 所示。首先,在泄爆空间内相应位置安装点火头;然后,将泄爆板安装于泄爆口,并采用薄膜密封风机盒,使整个泄爆空间完全密闭。之后,打开进气阀门向泄爆空间内充入甲烷气体,同时启动风机搅拌混合气体,并对甲烷浓度进行全程实时监测。当甲烷浓度接近试验浓度时,关闭进气阀门,当红外线气体浓度分析仪读数稳定时,若浓度满足试验要求,则关闭风机、放下闸门;相反,则重复上述充气操作,直至浓度达到指定要求。最后,启动数据采集仪,确认信号清晰可用。风机关闭后等待约 30 s,待室内紊乱的气流平静后,启动同步起爆仪引爆气体,并记录爆炸超压、拍摄爆炸火焰。

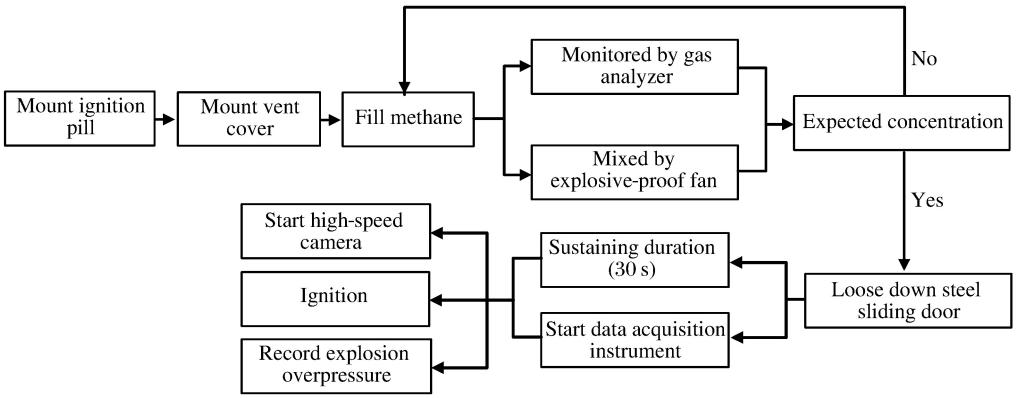


图 2 试验操作流程

Fig. 2 Operation process of test

1.3 试验工况

试验中采用不同泄爆阈值的泄爆板材料,即厚为 0.015 mm 聚乙烯薄膜和厚为 4 mm 浮法玻璃,其泄爆阈值分别为 0.3、7.3 kPa。通过在爆室中心、距离泄爆口中心 20 cm 处、距离爆室背面中心 20 cm 处 3 个不同点火位置处的甲烷-空气预混气体爆炸试验,考察点火位置对爆炸荷载的影响。以下叙述中,为描述方便起见,分别将 3 种工况称为中心点火(CI)、前端点火(FI)、尾部点火(RI)。

2 试验结果与分析

2.1 爆炸压力峰值探讨

图 3 给出了不同试验工况下得到的超压时程曲线。图 3(a)为泄爆板为厚 4 mm 的浮法玻璃、中心点火工况下 6 个压力传感器记录的超压时程曲线。由图 3(a)可知,6 条超压时程曲线几乎重合。这是由于试验泄爆空间的尺寸较小,压力波传播至各传感器的时间差远小于爆炸超压的上升时间,因而各传感器处超压基本相同。以下分析中,均取 6 号压力传感器记录的数据进行讨论。

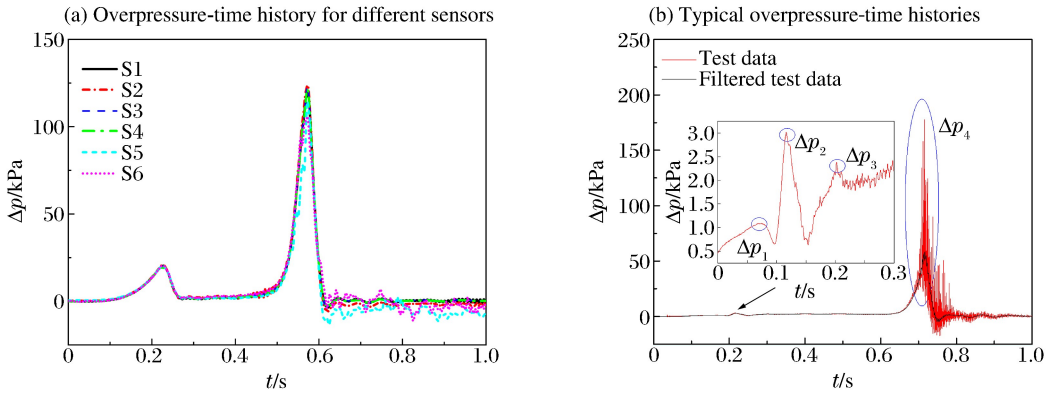


图 3 不同试验工况下的超压时程曲线

Fig. 3 Overpressure-time curves under different test conditions

对于可燃气体爆炸试验，不同试验条件下的超压峰值不同。以聚乙烯薄膜为泄爆板、中心点火工况下得到的爆炸压力时程曲线如图 3(b)所示，可以看出，共出现了 4 个超压峰值，与 Cooper 等[10]得到的典型可燃气体泄爆超压时程曲线一致。

结合已有的研究成果，对超压时程曲线中 4 个压力峰值的产生机制进行分析。开始时，室内均匀混合的可燃气体被点燃，引起压力上升；当压力达到泄爆阈值时，泄压口打开，大量未燃气体及燃烧产物快速泄放到室外，致使室内压力下降，因此产生了 Δp_1。随着燃烧的继续，火焰逐步向外扩展，当火焰传播至泄压口时，之前泄放到室外的未燃气体被引爆，因此产生了 Δp_2。随着泄放过程的继续，未燃气体和燃烧产物间的泄放流速差进一步加大，导致火焰面积增大，引起压力上升，当火焰传播至墙壁后，火焰面积减小，造成压力损失，因此产生了 Δp_3。泄爆口的打开带来了气流的扰动，引起了流体热力学参数的扰动，并导致热释放率的波动；热释放率的波动激起了声压的振动，而声波在室内墙壁间多次反射后形成了爆炸波，从而加强了声波的振动；声波的振动又再次引起室内流体热力学参数的改变。这样，每一个物理现象都依次引发下一个物理现象的产生，形成一个闭合的正反馈循环，最终导致高幅周期振动的剧烈燃烧现象，称为不稳定燃烧。不稳定燃烧使燃烧率的迅速增长，从而产生超压峰值 Δp_4，整个过程如图 4 所示。不同点火位置条件下压力峰值出现的个数也不相同，其中 Δp_3 只有在尾部点火和中心点火工况下、且泄爆板为聚乙烯薄膜时才出现，所以本文中仅就 Δp_1、Δp_2 和 Δp_4 进行分析。

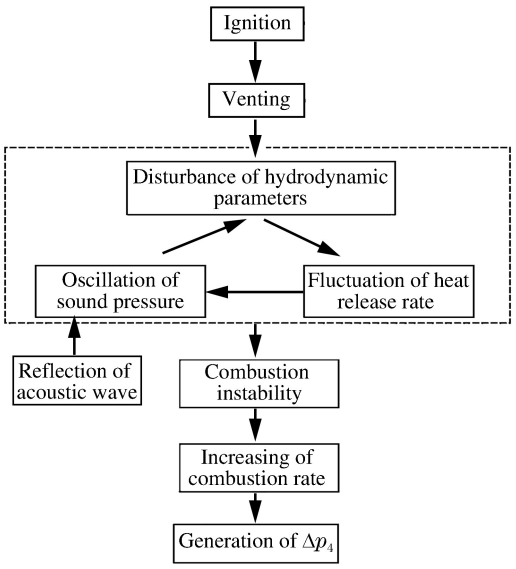


图 4　Δp_4 的产生机制

Fig. 4　Generation mechanism of Δp_4

2.2　泄爆空间内部超压

图 5 给出了不同点火位置时的超压时程曲线。由图 5 可知，直到泄爆口开启之前，不同的点火位置超压上升曲线几乎重叠，即点火位置对 Δp_1 的升压速度没有影响。当采用泄爆阈值较低的聚乙烯薄膜作为泄爆板时，前端点火对应的 Δp_1 的峰值偏小，这是由于前端点火在聚乙烯薄膜附近产生的高温气体，使得薄膜开始熔化，加速了聚乙烯薄膜的破裂，薄膜的抗爆能力减弱，泄爆阈值减小，Δp_1 减小。而当泄爆板采用 4 mm 厚浮法玻璃时，温度对玻璃的破碎基本没有影响，因此，不同点火位置产生的 Δp_1 大小和升压速度基本一致，如图 5(b)所示。

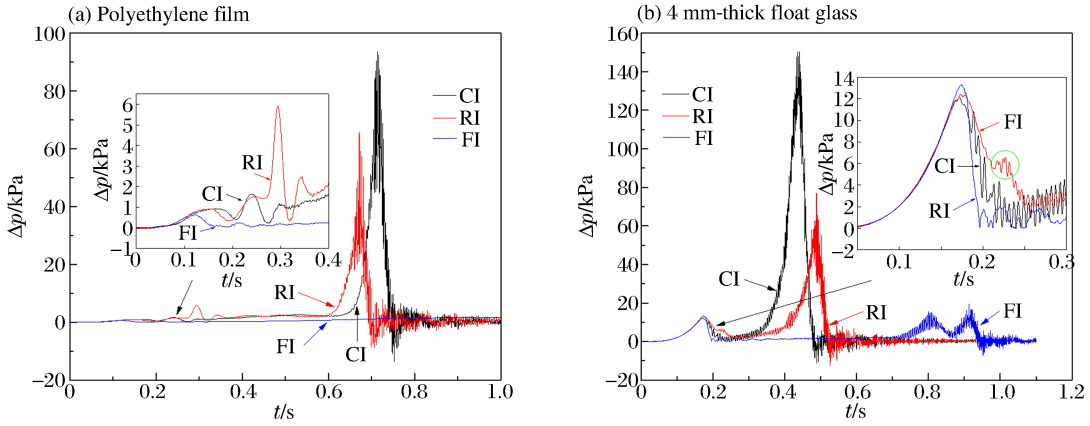


图 5　不同点火位置的超压时程曲线

Fig. 5　Overpressure-time histories for different ignition positions

当采用聚乙烯薄膜作为泄爆板时，尾部点火产生的 Δp_2 最大；前端点火对应的 Δp_2 几乎观察不到；而采用厚 4 mm 的浮法玻璃作为泄爆板时，尾部点火是唯一能够观察到 Δp_2 的工况。相比于其他两种点火方式，尾部点火使更多的可燃气体被泄放至试验房间外；而前端点火消耗了泄爆口附近更多的可燃气体，使更少的气体被泄放至试验房间外。因此，Δp_2 的峰值随着点火位置远离泄爆口而增大。前端点火产生的 Δp_4 远小于另外 2 种点火位置产生的 Δp_4。当使用聚乙烯薄膜作为泄爆板时，前端点火几乎不产生 Δp_4。此外，相比于其他两种点火位置，前端点火大大降低了 Δp_4 的升压速度。

表 1 给出了不同点火位置下各超压波峰的峰值，图 6 为不同点火位置对不同压力峰值的影响。由表 1 和图 6 可知：当使用厚 4 mm 的浮法玻璃作为泄爆板时，前端点火可将 Δp_4 的峰值减小至中心点火时的 7.4%；尾部点火可使 Δp_4 的峰值下降到中心点火时的 42.1%。当使用聚乙烯薄膜作为泄爆板时也得出了相似的规律。因此，不同点火位置产生的 Δp_4 的超压峰值的大小顺序为：中心点火最大，尾部点火次之，前端点火最小。导致该现象的原因在于：(1) 在近似立方体的泄爆空间内，中心点火时，火焰呈球形发展，产生的燃烧面积最大且燃烧速度最快，在泄爆口打开之后，中心点火残留在试验房间内的可燃气体多于尾部点火和前端点火；(2) 尾部点火使更多的火焰接触到了试验墙壁，导致更多的热量散失，相对来说，中心点火时火焰接触墙壁较少，热量损失少；(3) 前端点火时火焰从泄爆口向室内传播，与向外涌出的气体燃烧混合物流动方向相反，因此火焰燃烧速度最慢且爆炸超压最小。

表 1 不同点火位置下各超压峰值

Table 1 Overpressure peaks at different ignition positions

点火位置	聚乙烯薄膜			4 mm 厚浮法玻璃	
	Δp_1/kPa	Δp_2/kPa	Δp_4/kPa	Δp_1/kPa	Δp_4/kPa
前端点火	0.49	0.25		13.3	9.6
尾部点火	0.87	5.27	56.8	12.5	54.4
中心点火	1.04	2.32	90.5	11.7	129.2

然而，在 Rocourt 等[11]的试验中，不同点火位置条件下，Δp_4 超压峰值在中心点火时最大，尾部点火和前端点火时 Δp_4 超压峰值相近。这一方面可能是由于该试验使用的可燃气体(氢气-空气混合气体)与本文中试验不同；另一方面可能是由于该试验的规模较小，泄爆空间体积仅为 3.375×10^{-3} m^3，从起爆到结束的时间较快，前端点火与尾部点火超压峰值的差异未能充分体现出来。

当泄爆板从聚乙烯薄膜变为厚 4 mm 的浮法玻璃时，点火位置对不同超压峰值的影响也不相同。从图 6 可以看出，对于所有点火位置，Δp_1 随着泄爆阈值的增大而增大，且增量基本相同；Δp_2 在前端点火和中心点火时随泄爆阈值的增大而消失，仅在尾部点火时出现；Δp_4 在中心点火时随泄爆阈值的增大而增大，在尾部点火时基本不随泄爆阈值变化。

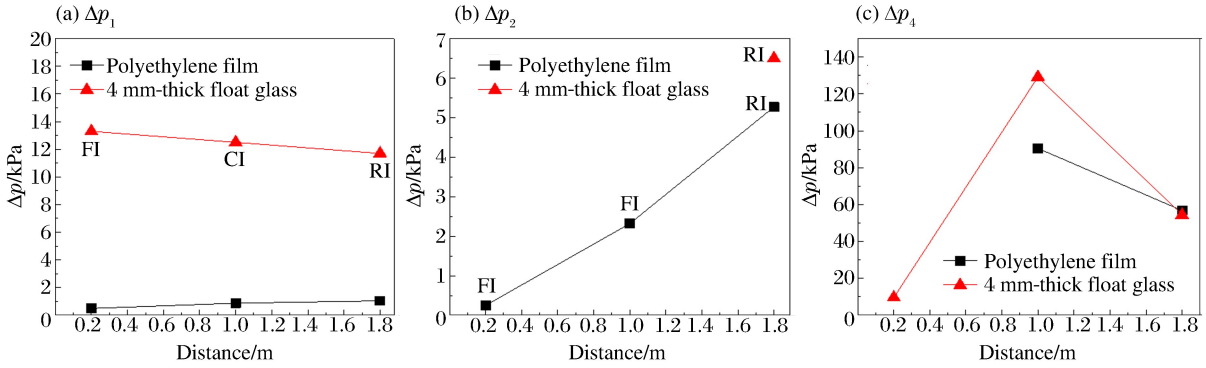


图 6 不同点火位置对不同峰值的影响

Fig. 6 Overpressure peaks influenced by different ignition positions

2.3　外部火焰的发展

图 7 为利用高速摄像机拍摄的泄爆口外部火焰发展过程，可以分为火球和火焰喷射两个阶段。泄爆口打开，内部大量可燃气体由于室内外压差快速冲出泄爆口，形成蘑菇状的可燃气云，随着燃烧的继续，室内火焰扩展至泄爆口，引燃外部可燃气体，形成球状火焰；之后，泄爆空间内的残余未燃气体继续涌出泄爆口，使燃烧火焰继续发展，形成舌状喷射火焰，此时火焰与声波相互作用，发生震荡并增强；最终，随着可燃气体的燃烧殆尽，火焰逐渐衰减并消失。

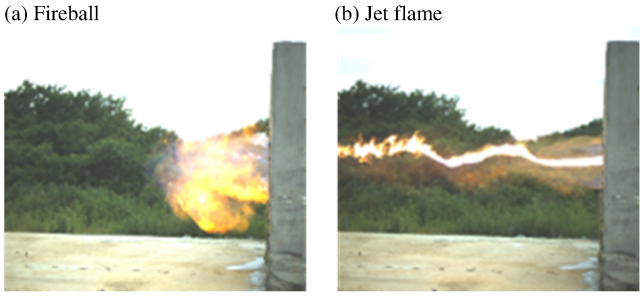


图 7　外部火焰形态发展

Fig. 7　Evolution of external flame

外部火焰的发展随点火位置的改变也不相同。前端点火产生的火球大小和火焰喷射长度远小于尾部点火和中心点火。其原因在于：尾部点火和中心点火时，大量的可燃气体通过泄爆口泄漏到泄爆空间外形成可燃气云而前端点火，由于泄爆口打开和火焰燃烧至泄爆口时间相差很短，只有少量可燃气体泄漏到试验房间之外，所以很难形成大体积可燃气云。

3　结　论

利用自主设计、建立的泄爆空间可燃气体爆炸试验系统，改变点火位置，研究了甲烷-空气预混气体在带有泄爆口的密闭空间中爆炸荷载的特征，得出以下结论：

(1) 点火位置对 Δp_1 的升压速度基本没有影响；Δp_2 的峰值随着点火位置远离泄爆口而增大；前端点火大大降低了 Δp_4 的升压速度，不同点火位置对应的 Δp_4 的峰值的大小顺序为：中心点火最大，尾部点火次之，前端点火最小。

(2) 在所有位置，Δp_1 随着泄爆阈值的增大而增大，且增量相同；Δp_2 在前端点火和中心点火时随泄爆阈值的增大而消失，仅在尾部点火时出现；Δp_4 只有在中心点火时随泄爆阈值的增大而增大。

(3) 外部火焰发展过程可以分为火球阶段和火焰喷射阶段，点火位置对火球大小和火焰喷射长度有重大影响，尾部点火和中心点火时火球大小和火焰喷射长度远大于前端点火。

参考文献：

[1] VYAZMINA E, JALLAIS S. Validation and recommendations for FLACS CFD and engineering approaches to model hydrogen vented explosions: effects of concentration, obstruction vent area and ignition position[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016,41(33):15101-15109.

[2] 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.

[3] 郑立刚，吕先舒，郑凯，等. 点火源位置对甲烷-空气爆燃超压特征的影响[J]. 化工学报，2015(7):2749-2756.
ZHENG Ligang, LÜ Xianshu, ZHENG Kai, et al. Influence of ignition position on overpressure of premixed methane-air deflagration[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2015(7):2749-2756.

[4] 曹勇. 点火位置对氢气-空气泄爆特性影响的实验研究[D]. 安徽淮南：安徽理工大学，2016.

[5] SOLBERG D M, PAPPAS J A, SKRAMSTAD E. Observations of flame instabilities in large scale vented gas explosions[J]. Symposium on Combustion, 1981,18(1):1607-1614.

[6] BRADLEY D, MITCHESON A. The venting of gaseous explosions in spherical vessels: Ⅰ: theory[J]. Combustion and Flame, 1978,32(78):237-255.

[7] 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.

[8] HARRISON A J, EYRE J A. External explosions as a result of explosion venting[J]. Combustion Science and Technology, 1987,52(1/2/3):91-106.

[9] BAUWENS C R, CHAFFEE J, DOROFEEV S. Effect of ignition location, vent size, and obstacles on vented explosion overpressures in propane-air mixtures[J]. Combustion Science and Technology, 2010,182(11/12):1915-1932.

[10] COOPER M G, FAIRWEATHER M, TITE J P. On the mechanisms of pressure generation in vented explosions [J]. Combustion and Flame, 1986,65(1):1-14.

[11] ROCOURT X, AWAMAT S, SOCHET I, et al. Vented hydrogen-air deflagration in a small enclosed volume [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014,39(35):20462-20466.

Effect of ignition position on overpressure in vented explosion of methane-air mixtures

WANG Chaoqiang[1], YANG Shigang[1], FANG Qin[1], BAO Qi[2]

(1. *State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact, Army Engineering University of PLA, Nanjing* 210007, *Jiangsu, China*;
2. *Unit* 91058 *of PLA, Sanya* 572000, *Hainan, China*)

Abstract: Vented explosion tests were carried out in a 12 m^3 concrete chamber filled with premixed methane-air mixture with the methane volume fraction of 9.5%, and the influence of the ignition position on the development of overpressure and the evolution of flame was investigated. The results show that this influence on the rising rate of Δp_1 was nearly negligible but the peak value of Δp_2 increased with the increase of the distance between the ignition position and the vent, and the peak value of Δp_4 was correlated with different ignition positions, i.e. central ignition, rear ignition, front ignition, in an order of descending influence. Moreover, when the venting pressure got bigger, Δp_1 had the same increment at all the ignition positions, whereas Δp_2 vanished in front and central ignitions, and Δp_4 increased with the increase of venting pressure only in center ignition. Besides, the evolution of the external frame was observed to fall into two stages: the fireball formation and the jet frame. The size of the fireball and the maximum length of the external jet flame in rear and central ignitions were larger than those in front ignition.

Keywords: methane-air mixtures; vent explosion; peak overpressure; ignition position

(责任编辑 王玉锋)