DOI: 10.11883/1001-1455(2016)06-0847-06

点火位置对氢气-空气预混气体泄爆过程的影响*

曹 勇,郭 进,胡坤伦,邵 珂,杨 帆
(安徽理工大学,安徽 淮南 232001)

摘要: 利用高速纹影和压力测试系统对不同点火位置及不同破膜压力条件下氢气-空气预混气的泄爆特性进行研究。研究结果表明:在所有情况下,中心点火时火焰传播速率和面积最大,产生了最大的内部压力峰值,尾端点火时火焰传播速率和面积次之,产生的内部压力峰值也次之;前端点火时火焰传播速率和面积均最小,产生了最小的内部压力峰值。前端点火时,容器内部压力出现了 3 个明显的压力峰值,中心和尾端点火时,只能观察到第 1 个和第 3 个压力峰值。并且,随着破膜压力的增加,中心和尾端点火时,火焰面积均增大,产生的内部压力峰值均增大。在前端点火的条件下出现了声学振荡的现象,对内部压力产生了显著的影响。

关键词: 爆炸力学;泄爆;破膜压力;点火位置;氢气
中图分类号: O382.1 **国标学科代码**: 1303520 **文献标志码**: A

氢气作为一种清洁能源,能够很好地解决当今社会出现的温室效应、燃烧气体污染和对化石燃料依赖等问题。然而,由于氢气具有爆炸极限范围宽、最小点燃能量低等特点,导致氢气能源在使用过程中存在着突出的爆炸安全问题。泄爆是指当容器内的爆炸压力超过某个设定压力时,预设的薄弱面首先破裂,高压气体迅速泄放,以减轻爆炸造成的灾害和损失。因此,对于氢气工作系统进行正确的泄爆安全设计,能够有效地提高氢气能源的安全性。对碳氢燃料的泄爆研究已经有很多[1-5],对碳氢燃料泄爆的现象和机理的研究已经足够深入,并且有了一系列的标准(如 BS EN 14491[6] 和 NFP A68[7] 等)。然而,与碳氢燃料相比,氢气具有更高的燃烧速率,使氢气泄爆的过程能够在更短的时间内完成,产生的现象也更加复杂,人们对氢气泄爆的实验现象和规律还不够清楚。B. Ponizy 等[8] 使用以往的压力预测模型,对氢气泄爆实验得到的预测结果与实际情况进行对比,发现二者存在明显的差异,这也表明氢气泄爆的预测并不完全适用于已有标准。因此,进一步研究氢气-空气泄爆实验,对氢气混合物意外爆炸时产生的超压进行准确地预测从而进行保护,是十分必要的。

在氢气泄爆过程中,容器的体积、燃料的浓度和破膜压力这些参数都可以进行预设,达到建立预测模型的目的。而发生氢气爆炸时,具体的点火位置难以确定,所以我们对点火位置的影响进行了重点研究。V. Molkov 等[9] 研究了氢气-空气在大尺寸容器的泄爆实验,考虑了不同点火位置作用,建立了多种参数的超压预测公式;A. J. Harrion 等[10] 的实验结果表明,较小的泄放面积情况下,氢气-空气泄爆会引发外部爆炸现象,这时点火位置对容器内部压力峰值的大小有显著的影响,尾端点火导致了最强的外部爆炸,产生了最大的内部压力峰值;C. R. Bauwens 等[11] 在不同泄放面积下的氢气泄爆实验中,发现中心点火和前端点火分别产生了最大和最小的内部压力峰值;而 K. Kumar[12] 对不同浓度的氢气-空气混合气进行的大尺寸的泄爆实验中,却得出了前端和尾端点火产生了相近的内部压力峰值的结论。上述实验都只考虑了不同燃料浓度和不同泄放面积,却都没有涉及不同破膜压力时点火位置对于内部超压的影响;并且都仅仅分析了压力的数据,而没有对容器内部实际燃烧情况进行观察。

本文中,在不同破膜压力下,运用高速纹影系统记录容器内部火焰的发展动态,并通过纹影图片计算火焰传播速率,结合压力曲线和峰值的分析进一步研究不同点火位置对容器内部超压的影响。这对于建立准确的爆炸压力预测公式,正确地进行泄爆减压设计,从而减轻氢气意外爆炸带来的危害,有着重要的意义。

* **收稿日期**: 2015-03-19; **修回日期**: 2015-06-10
第一作者: 曹 勇(1991—),男,硕士研究生; **通信作者**: 胡坤伦,klhu999@sina.com。

1 实 验

图 1 为实验装置示意图，泄爆实验在内径 25 cm、长 25 cm 的圆柱形容器进行，容器两侧各装有一个厚 5 cm、直径 30 cm 的圆形石英玻璃，为高速纹影系统提供光路通道；高速相机的拍摄频率为 10^4 s^{-1}。容器中部连接截面 7 cm×7 cm、长度 10 cm 的泄爆短管。图中 PT_1 和 PT_2 是 2 个压力传感器，分别安装在容器内部和泄放口处。每次实验只使用其中的一个位置点火：前端点火(N_1)、中心点火(N_2)和尾端点火(N_3)。

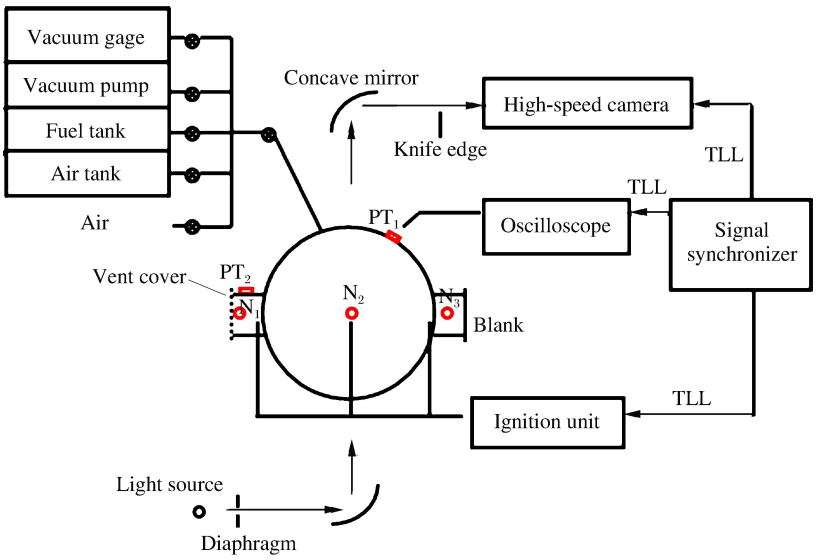

图 1 实验装置和纹影系统示意

Fig. 1 Schematic photoes of explosion chamber and schlieren system

首先，用不同厚度的膜片封闭泄爆口，破膜压力 p_v 分别为 0(无封口)、35、70、210 和 240 kPa。然后，将体积浓度为 49%的氢气-空气混合气体充入容器中；最后，由同步控制器输出 TLL 信号，触发点火系统点火氢气-空气预混气，并同时触发示波器和高速相机记录相关数据。所有实验在 15 ℃室温下进行，环境压力约为 100 kPa。

2 结果和讨论

2.1 火焰特性

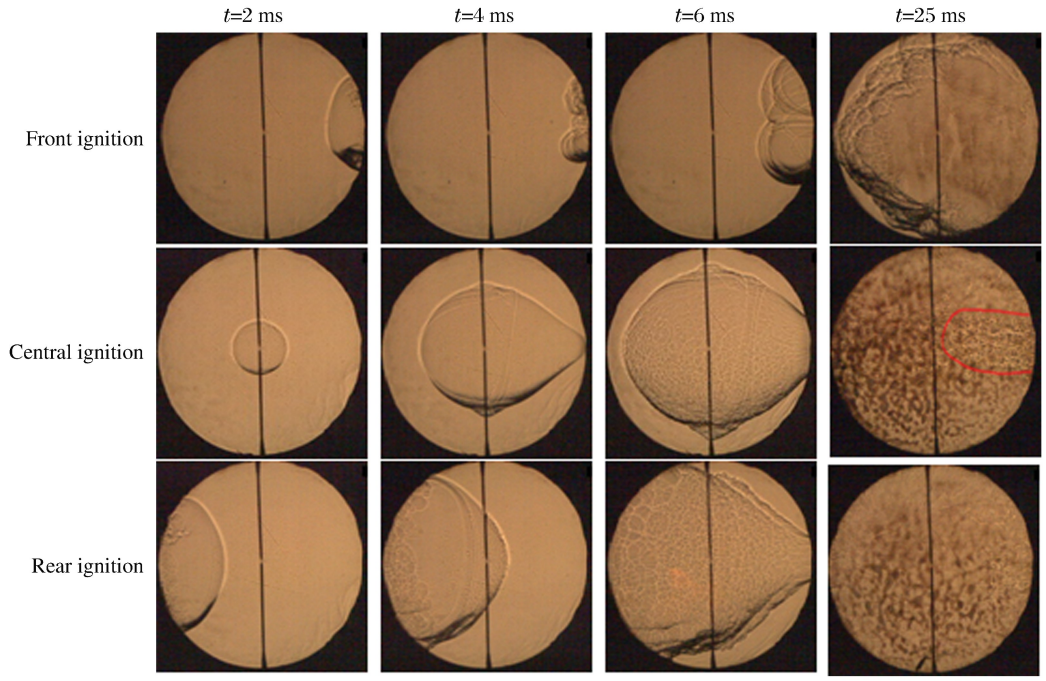

图 2 当 $p_v=0$ 时容器内部火焰纹影图

Fig. 2 Schlieren photoes of internal flame generated by vented explosion in the vessel at $p_v=0$

图 2 为 $p_v=0$(无封口)时泄爆容器内部火焰纹影图，图 3 为根据火焰纹影图像得到的火焰速度。

中心和尾端点火的情况下，点火之后火焰迅速形成球形和半球形向泄放口传播，随着火焰的扩展，通过自加速作用，火焰传播速率不断增大，到 2 ms 时分别达到 35 和 40 m/s；在 4 和 6 ms 时，中心点火和尾端点火的火焰分别传播至泄放口附近，火焰前锋面受到强烈拉伸，使火焰传播速率显著增大，火焰最大传播速率均达到 75 m/s 左右。在 25 ms 时，容器内部燃烧过程基本结束之后，外部火焰被吸入到容器中，使容器内部剩余燃料继续燃烧。

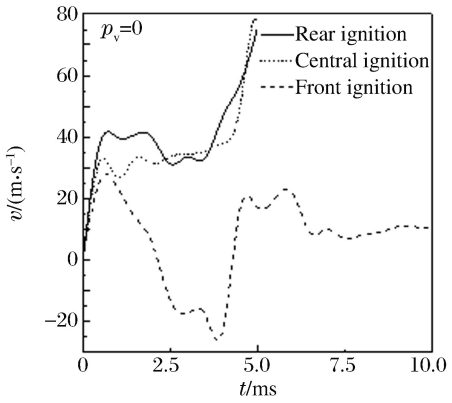

图 3 容器内部火焰传播速率

Fig. 3 Flame propagation velocities in the vessel

前端点火情况下，点火之后火焰迅速向容器内部扩展，2 ms 后受到泄放口气流的强烈作用，使火焰表面呈现出不规则的形状，火焰传播方向发生了反转，向容器外部传播，火焰速率出现了负值；4 ms 后，火焰向容器内部传播，可以看到火焰前锋面不断扭曲形成了湍流皱褶，之后火焰保持 10～20 m/s 速率向容器内部传播。

通过图 2～3 对比，可以得出：中心点火和尾端点火时，火焰更晚地受到泄放气流的影响，燃烧地相对稳定，火焰面积和燃烧速率均很大；前端点火时，火焰距泄放口最近，较早地受到泄放气流影响，火焰传播速率和面积都最小，表面很大的皱褶和扭曲，燃烧过程很不稳定。

图 4 为破膜压力 70 kPa 时容器内部火焰的纹影图片。与图 2 进行对比，可以看出：由于泄爆封口的存在，容器内部形成了一个封闭的空间，封口破裂之前内部燃料进行层流燃烧，随着破膜压力不断增大，封闭燃烧的时间不断增加，火焰面积和传播速率也不断增大；在泄爆封口破裂之后，火焰逐渐扭曲变形，燃烧变得更加剧烈。可以得出结论：泄放口封闭时，内部压力先增大至破膜压力，泄放封口发生破裂；泄放封口破裂之后泄放口才会打开，火焰阵面开始出现湍流皱褶。

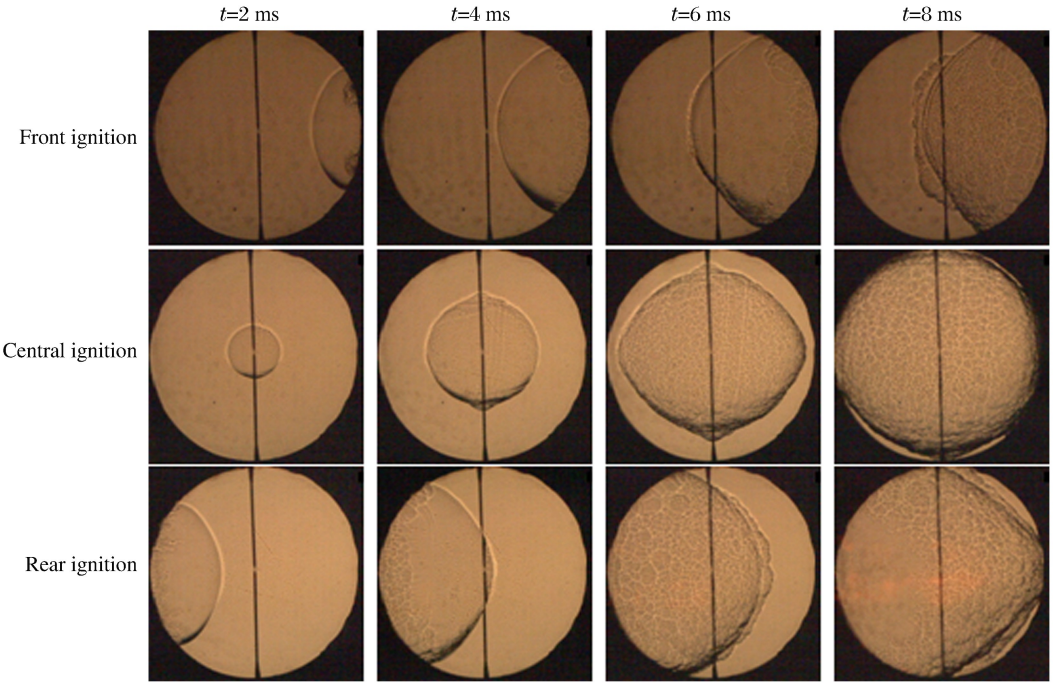

图 4 当 $p_v=70$ kPa 时容器内部火焰纹影图

Fig. 4 Schlieren photoes of internal flame generated by vented explosion in the vessel at $p_v=70$ kPa

2.2 压力变化规律

图 5 为容器内部的压力曲线。由图 5(b)可以明显看出,前端点火的内部压力曲线出现了 3 个明显的压力峰值。第 1 个压力峰值为破膜压力 p_1,在点火之后,容器的内部压力不断增大,直到达到破膜压力,泄放口打开。第 2 个压力峰值 p_2,由于容器内部燃烧速率不断上升达到最大值,内部压力也不断增大,之后由于气体泄放,容器内部压力开始下降,因而产生了第 2 个压力峰值。由于外流气体的惯性作用,压力曲线出现了一段明显的负值阶段。第 3 个压力峰值 p_3 是容器内部燃烧基本结束之后,外部火焰被吸入容器中(如图 2 红色实线所示)、容器内部燃料剩余燃烧导致的。而中心点火和尾端点火时,只能观察到第 1 个压力峰值 p_1'和第 3 个压力峰值 p_3',第 2 个压力峰值则观察不到,这是由于容器内部达到破膜压力、泄放口打开之后,中心和尾端点火的火焰仍保持很高的燃烧速率,燃烧所产生的压力增大高于泄放所产生压力减小,容器内部压力保持上升。

3 种点火位置的压力曲线中均出现了振荡现象,由图 5 可以看出,压力曲线的振荡总是出现在破膜压力之后,这也说明了振荡是由火焰传播至泄放口之后形成的。值得注意的是:在破膜压力 $p_v=0$ 时,前端点火的压力信号中振荡现象格外显著。这是因为,在火焰通过泄放口向外传播的阶段,燃烧气体和外界未燃气体之间形成一个交界面,当交界面受到气体运动的加速时,火焰会变得不稳定,增强了声学的作用,形成了声学振荡。而中心点火和尾端点火的压力曲线也出现了振荡,这是因为,包裹着未燃气体的燃烧火焰从泄放口喷射出来之后,火焰在外部点燃了带出的未燃气体,产生了二次爆炸现象。由图 2 可以清晰地看出,容器内部火焰形成了很大的皱褶,这是因为二次爆炸产生的冲击波和容器内部火焰相互作用,使容器内部火焰发生扭曲,内部压力曲线也出现了明显的振荡。A. J. Harrion 等[10]和 G. Ferrara 等[13]对甲烷进行了泄爆实验,也在前端点火的条件下产生了振荡的压力峰值,可以推断压力的振荡峰值的产生受到点火位置显著影响。

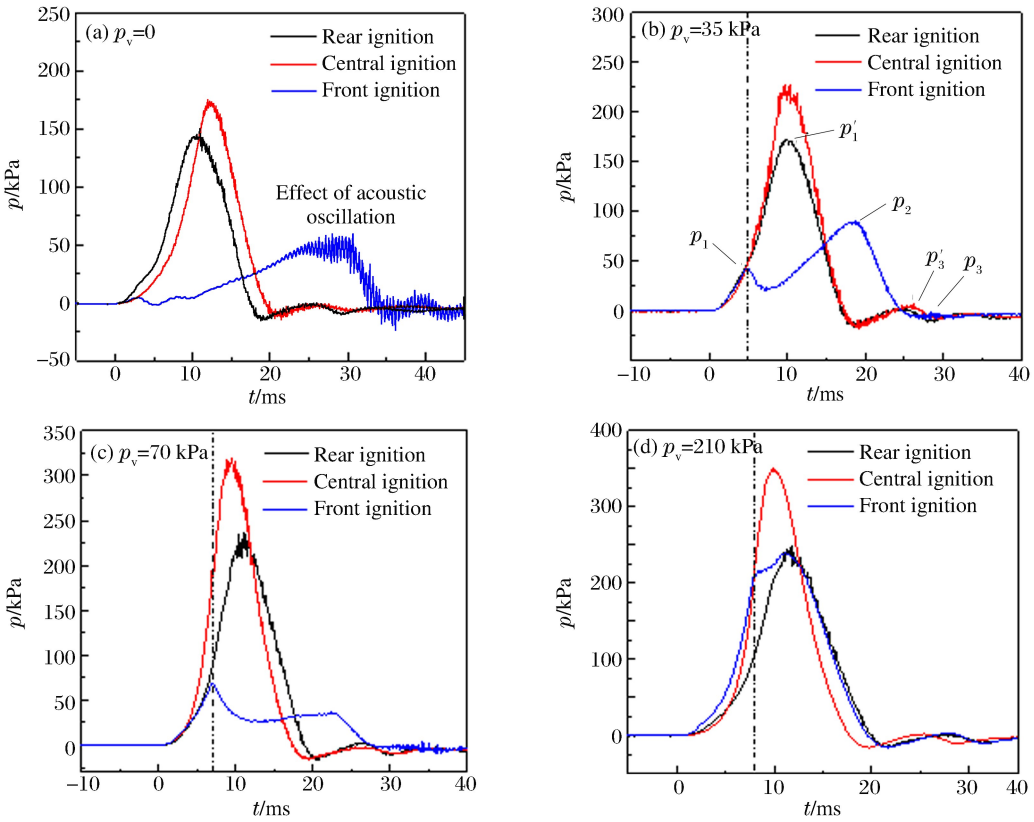

图 5 不同破膜压力下 3 种点火位置对应的内部压力

Fig. 5 Pressure profiles of three igniter locations at various bursting pressures

由图 5 可以直观地看到：前端点火总是产生最小的内部压力峰值，这可以解释为相对于燃烧气体而言，前端点火时泄放气体具有更大体积流量，火焰接近泄放口时，传播速率出现了急剧地下降（见图 3），这反映了内部压力也出现了一个迅速降低的过程。中心点火总是产生最大的内部压力峰值，这可以解释为，中心点火时火焰能够更晚地与容器壁接触，从而产生更小的热量损失和更大的火焰面积；并且，中心点火产生的火焰能够同时向泄放口和容器内部两个方向扩展，这有利于发展不同的火焰不稳定性机制，如火焰到达泄放口之后，形成了泰勒不稳定性，从而促进了容器内部压力的发展。

图 6 给出了不同破膜压力条件下容器内部的压力峰值。由于泄爆封口的存在，使容器形成一个封闭的状态，随着破膜压力不断增大，点火之后，容器内部燃料进行封闭燃烧的时间也不断增加，热量损失不断减少，并且更晚地进行燃烧气体的泄放，从而使内部压力峰值也增大。由图 6 可以看到：中心和尾端点火产生的内部压力峰值均随着破膜压力增加而不断增加，中心点火产生的内部压力峰值可达到 350 kPa；除了 $p_v=35$ kPa 情况，前端点火产生的内部压力的峰值也随着破膜压力的增加而增大。随着破膜压力增大，延缓了封口破裂、气体泄放的时间，减小了火焰喷出后发生二次爆炸的可能性；并且，泄爆封口破裂之前燃烧时间的增加，也减少了声学作用的时间，减弱了声学的振荡现象。由图 5 可以看出，随着破膜压力增大，3 种点火位置的压力曲线中振荡变得越来越弱，当 $p_v=210$ kPa 时，中心点火的压力曲线振荡现象已经消失。

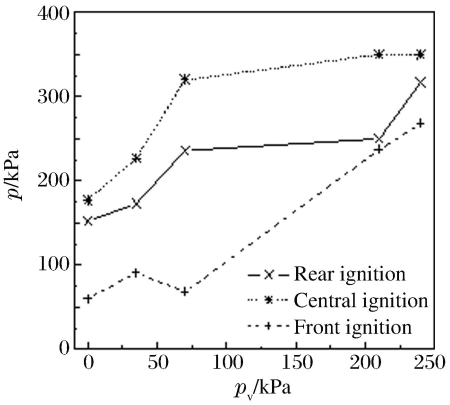

图 6 容器内部压力峰值

Fig. 6 Peak pressures in the vessel

3 结　论

（1）中心点火时，火焰同时朝泄放口和容器内部传播，接触容器壁的时间最晚，火焰面积和传播速率最大。尾端点火时，火焰向泄放口传播，火焰面积和传播速率次之。前端点火时，火焰先向容器内部传播，随后由于泄放口气流的作用，传播方向发生反转；最后火焰继续向容器内部传播，由于泄放气流有很大的体积流量，火焰面积和传播速率总是最小。

（2）在前端点火时，容器内部压力曲线出现了 3 个明显的压力峰值。而在中心点火和尾端点火时，只能观察到第 1 个和第 3 个压力峰值。在所有条件下，中心点火总是产生了最大的内部压力峰值，尾端点火次之，前端点火的内部压力峰值总是最小。泄爆封口破裂后，3 种点火位置的压力曲线均产生了振荡现象。前端点火时，振荡现象最显著。

（3）破膜压力对火焰传播和容器内部压力峰值有很大影响。随着破膜压力的不断增大，容器内部燃料封闭燃烧的时间不断增加，延缓了气体泄放的时间，火焰面积和传播速率均增大，容器内部压力峰值也不断升高。破膜压力的增大，也减弱了火焰的不稳定性和声学振荡现象。3 种点火位置的内部压力峰值，均随着破膜压力增加而增大。

参考文献：

[1] Catlin C A. Scale effects on the external combustion caused by venting of a confined explosion[J]. Combustion & Flame, 1991,83(3/4):399-411.

[2] 叶经方，姜孝海，贾正望，等. 泄爆诱导二次爆炸的实验研究[J]. 爆炸与冲击，2004,24(4):356-362.
Ye Jingfang, Jiang Xiaohai, Jia Zhengwang, et al. Experimental investigations of external second-explosion induced by vented explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2004,24(4):356-362.

[3] Bauwens C R, Chaffee J, Dorofeev S B. Effect of ignition location, vent size and obstacles on vented explosion o-

verpressures in propane-air mixtures[J]. Combustion Science and Technology, 2010,182(11/12):1915-1932.

[4] Lunn G A, Nicol A M, Collins P D, et al. Effects of vent ducts on the reduced pressures from explosions in dust collectors[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1998,11(2):109-121.

[5] 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 Yikang, Wan Shixin, et al. Experimental investigations of pressure development during explosion vent from cylinderical vessels[J]. Explosion and Shock Waves, 2001,21(1):48-52.

[6] BS EN 14491-2006 Dust explosion venting protective systems[S]. European Committee for Standardization, 2006.

[7] NFPA 68-2007 Standard on explosion protection by deflagration venting[S]. National Fire Protection Association, USA, 2008.

[8] Ponizy B, Veyssiere B. Mitigation of explosions in a vented vessel connected to a duct[J]. Combustion Science and Technology, 2000,158(1):167-182.

[9] Molkov V, Dobashi R, Suzuki M, et al. Modeling of venting hydrogen-air deflagrations and correlations for vent sizing[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1999,12(2):147-156.

[10] Harrion A J, Eyre J A. External explosions as a result of explosion venting[J]. Combustion Science and Technology, 1987,52(1):91-106.

[11] Bauwens C R, Chaffee J, Dorofeev S B. Vented explosion overpressures from combustion of hydrogen and hydrocarbon mixtures[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011,36(3):2329-2336.

[12] Kumar K. Vented combustion of hydrogen-air mixtures in a large rectangular volume[C]//44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevad, 2006.

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

Effect of ignition locations on vented explosion of premixed hydrogen-air mixtures

Cao Yong, Guo Jin, Hu Kunlun, Shao Ke, Yang Fan

(*Anhui University of Science and Technology*, *Huainan* 232001, *Anhui*, *China*)

Abstract: In this work experiments were carried out to investigate the effect of ignition locations and vent burst pressures on the pressure profile and the flame propagation during explosion venting of hydrogen-air mixtures. The results indicate that, in all the cases, the central ignition leads to the largest flame areas, the highest flame propagation velocities and peak pressures peak pressures; compared with that of the central ignition, the effect of the rear ignition on the flame propagation velocity, the flame areas and the peak pressures is reduced, while the front ignition results in the smallest flame areas, the lowest flame propagation velocity and peak pressures. For the front ignition, the pressure profile exhibits three peak pressures which correspond to the following three successive stages, but for the central and rear ignition, only the first and the third peak pressure can be found. Furthermore, both the peak pressures and the flame areas increase with the bursting pressure. Overpressure measurements made inside the chamber show clearly that the acoustic oscillation occurs and the internal pressures were influenced by the external explosion.

Key words: mechanics of explosion; vented explosion; burst pressure; igniter locations; hydrogen

(责任编辑 丁 峰)