

文章编号:0253-9993(2013)S2-0388-05

工业容器气体泄爆实验研究

黄甄^{1,2},陈先锋²,董利辉¹,李振¹

(1. 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院,北京 100083;2. 武汉理工大学资源与环境工程数字化实验室,湖北 武汉 430070)

摘要:为了给降低受限空间爆炸事故的发生率提供依据,揭示约束条件下甲烷-空气预混气体爆炸动力学过程,研究气体爆炸时压力与速度相互作用的规律,利用小尺寸爆炸实验平台,采用唯象法捕捉气体爆炸过程中的动态影像,宏观上揭示火焰传播的变化特征,并利用高速摄影、纹影系统直观地记录火焰传播的瞬态过程以及层流向湍流转变的过程。通过实验研究了不同泄压口比率和不同泄压膜强度时的泄爆规律。实验数据表明,受限环境中爆炸压力不仅决定火焰的传播速度,还影响火焰的结构变化。

关键词:甲烷-空气预混气体;泄爆;泄压口比率;泄压膜强度

中图分类号:TE88 **文献标志码:**A

Experimental study on vented gas explosion in industrial container

HUANG Zhen^{1,2}, CHEN Xian-feng², DONG Li-hui¹, LI Zhen¹

(1. School of Resource and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Digital Laboratory of Natural Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to provide theoretical knowledge about reducing the explosion probability within confined space, this study investigated the process of premixed methane-air explosion and the interaction law between gas pressure and speed in a confined space. The experiment was conducted under a small explosion experiment platform to capture the gas explosion dynamic images by phenomenological method, revealing the changes in flame propagation characteristics macroscopically. In addition, with the high-speed photography and schlieren camera system, the transient flame propagation process, and the flame transition from layer flow to turbulence were recorded intuitively. The ratio of different pressure relief openings and the venting law of different vent lamination strength were also studied. The experimental result shows that the explosion pressure within constrained environment not only determines the flame propagation velocity but also affects the flame structure.

Key words: methane-air premixed gases; vented explosion; pressure relief openings ratio; vent lamination strength

现代工矿业火灾大都与可燃气体的爆炸密切相关,而发生在管道及其类似结构内的爆炸占相当大的比例^[1]。在可燃气体的开采、装运、储存和使用过程中,如果由于泄漏而形成的可燃气体与空气混合物被意外地点燃,就会发生气云爆炸并威胁着人们的生命与财产安全。王汉良等^[2]通过对可燃气体在90°弯曲管道中爆炸的火焰速度进行研究,证明弯曲管道对爆燃与爆轰波火焰有明显的加速作用;郭长铭等^[3]研究了气相爆轰波在阻尼管道中传播时的衰减现象。这些研究对防止可燃气体爆炸起到了很好的理论指导作用。

上述研究主要集中在管道内气体由爆燃向爆轰的转变过程以及爆炸灾害及其破坏效应的宏观参数的研究,而且大部分的实验研究都是在一些密闭不可见的容器内,本研究以长方体管道为基础,建立小尺寸实验平台,采用清晰直观的高速纹影摄像系统来揭示火焰的传播规律。同时还研究了泄爆过程,给防灾减灾提供了一些数据支持。

1 实验系统

实验系统如图1所示,整个实验系统由截面为正

方形的长方体管道、配气系统、高压点火装置、高速摄影仪、纹影系统、数据采集系统、同步控制系统组成。

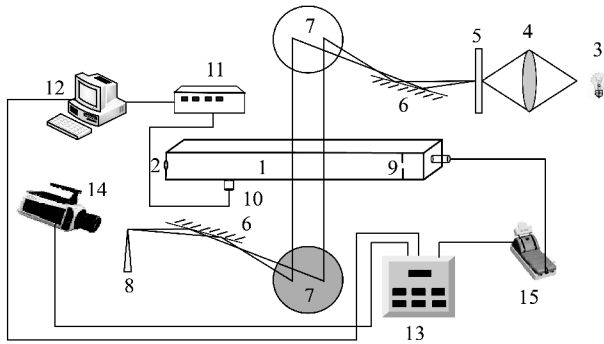


图1 实验系统

Fig. 1 Experimental system

1—实验管道;2—泄爆口;3—碘钨灯;4—凸透镜;5—光栅;
6—平面镜;7—凹面镜;8—刀口;9—高压点火电极;10—压力传感器;
11—数据采集系统;12—计算机;13—同步控制系统;
14—高速摄影仪;15—高压点火系统

1.1 实验仪器

(1)实验管道。实验燃烧管道如图2所示,采用管道尺寸 $1.0\text{ m}\times 0.08\text{ m}\times 0.08\text{ m}$,点火源位于右封闭端,泄压口位于管道左端,并采用40%的泄压口,管道内从左到右分别设置压力传感器和高压点火装置。实验中,利用40%泄压口,以及分别启用1~3个管道上、下面的预留孔,每个孔泄口比率为5%,来研究泄压口比率对泄爆过程的影响。图3为实验管道结构。

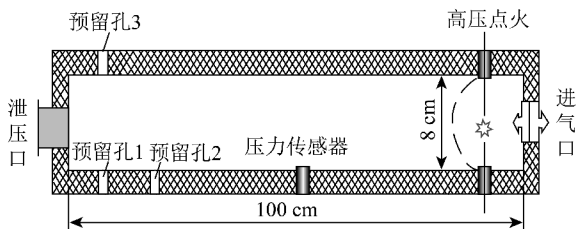


图2 实验燃烧管道

Fig. 2 Experimental combustion pipeline

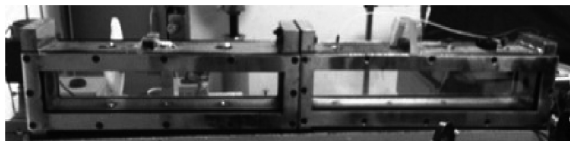


图3 实验管道结构

Fig. 3 Experimental pipeline structure

(2)配气系统。配气系统由高压空气罐、甲烷气罐、压力表和小型混气罐组成。

(3)高压点火装置。采用自行设计的电容储能放电的高压点火装置,通过电池对电容充电,经过变压器升压后,由高压电极放电点火。

(4)高速摄影系统。如图4所示,实验平台所采

用的是日本 Photron 公司生产的 Fastcam SA1.1 型高速动态成像仪,由 CCD 摄像头、高速处理器及外接 LCD 显示系统组成,它通过高感光度的百万像素的尼康 CCD 传感器进行高速拍摄。



图4 高速摄影机

Fig. 4 High speed camera

(5)纹影系统。纹影系统如图5所示,由主反射镜两套、光源狭缝系统、控制刀口、照相系统、变压器、备用灯泡 24V250W 组成。

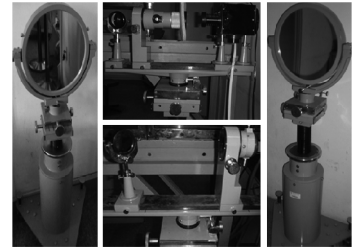


图5 纹影系统

Fig. 5 Schlieren system

(6)压力传感器。考虑到火焰传播的速度极快,同时由于火焰传播的瞬间温度很高,选用了美国 PCB 116B 系列高温高灵敏压力传感器。

(7)数据采集系统。实验数据采集系统是基于 LabView 开发的控制面板,利用 NI PXI-6221 型号的采集卡来采集数据。针对不同的信号特点,其中静态动态应变信号用 SCXI-1520 模块做桥路调理,然后通过 PXI-6123 数采模块并行采集。

(8)同步控制系统。实验采用型号 DDGS-II 的延迟与控制器来完成对高速摄影仪、高压点火和数据采集系统的同步精确控制。

1.2 边界条件与初始条件

Bartknecht 研究了管道内边界条件对甲烷空气预混气体火焰加速的作用。基于该理论,实验以甲烷空气预混气体为研究对象,壁面采用无滑移、无传热的边界条件,采用壁面函数法补充壁面区域的流动条件,采用非平衡壁面函数法处理壁面边界条件^[4]。在右端侧封闭端点火,甲烷空气混合浓度为 9.5%,初始压力为 101 325 Pa,初始温度为室温 293.15 K。

1.3 实验过程

连接并调试好各实验设备;配制所需 9.5% 的甲

烷-空气预混气体;在管道开口一端用膜封住,打开真空泵将管道抽成真空,压力表为 -0.1 MPa即可;将配制好的预混气体充入实验管道,直至压力表变为0;将管道调至需要测定的方位并设定好同步控制装置,打开高速摄像机、数据采集系统、点火系统、高速摄影仪,使其均处于等待触发状态,确认一切准备完成后,手动触发各个系统,同时记录实验过程;最后存储实验数据,包括高速摄影图像、压力传感器信号等。

2 实验结果与分析

2.1 不同泄压膜强度对泄爆过程的影响

研究有泄压封口的爆炸过程时,首先应考虑泄爆膜片的破裂,而后再考虑泄压过程的流动。该实验就泄爆过程中泄压膜片的强度对其影响进行了研究。如图6所示,分别采用强度较大的聚乙烯、强度中等的锡纸和无膜3种情况研究管道内爆炸的压力变化规律。

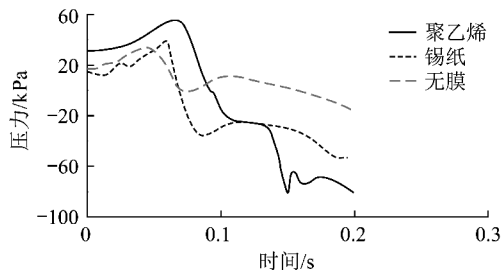


图6 不同泄压膜强度气体爆炸压力-时间曲线

Fig. 6 Explosion pressure-time curves of different membrane strength

泄爆过程是流动与热化学反应相互耦合的非正常过程^[5]。图6显示了不同泄压膜强度下气体爆炸时管内压力与时间的关系。从图中可以看出,气体引爆后,甲烷与氧气迅速反应,已燃气体释放出大量热量使局部区域内气体温度急剧上升,体积膨胀,进而形成压力波。压力波向前传播,超前于火焰燃烧阵面的速度,使前方未燃气体发生扰动,推动压力波向管道的出口端集中。但当向前传播的压力波遇到管道端头时会产生反射压力波,并与爆炸压力波相互作用。随着反应的快速进行,产生的能量不断加大,管内压力也迅速达到泄压口强度极限值,最终促使泄压口破裂,此时管内压力由峰值开始下降。之后泄压膜的破裂,管道内发生泄爆,并伴随着压力波与可燃气体的震荡现象。

表1列出了3种不同泄压膜强度下的破膜时间以及管内的压力峰值。其中,聚乙烯膜情况下爆炸所能达到的压力峰值最大,为 55.251 kPa,破膜所耗时间最长,为 66 ms;锡膜次之,压力峰值达到

37.960 kPa,破膜所耗时间为 56 ms;而无膜时所能达到的压力峰值最小,为 32.019 kPa,破膜所耗时间最短,为 44 ms。根据泄压峰值不同的结果,在工程实际中可考虑选用不同强度的泄压膜以保护受限空间。然而,不管采用哪种强度的膜,气体泄放过程中压力变化的趋势是一致的。

表1 不同泄压膜强度爆炸压力峰值

Table 1 Explosion peak pressure of different membrane strength

泄压膜	时间/ms	压力峰值/kPa
聚乙烯	66	55.251
锡纸	56	37.960
无膜	44	32.019

2.2 不同泄压口比率对泄爆过程的影响

泄爆装置的设计重点之一是泄放口的形状与大小,不同泄压口比率可能造成管内不同的压力与速度变化。本实验控制泄压膜强度不变(均使用聚乙烯泄压膜),分别开启不同数量预留孔,利用泄压口比率的变化研究管道中的超压值。

图7显示不同泄压口比率下管道内压力与时间的关系。由图可以看出,随着泄压口比率的增大,气体爆炸压力峰值降低,破膜所需时间缩短。

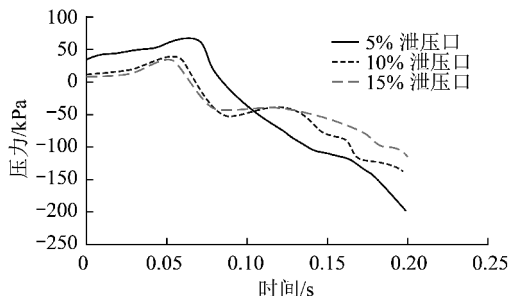


图7 不同泄压口比率气体爆炸压力-时间曲线

Fig. 7 Explosion pressure-time curve of different proportional vents

表2列出了不同泄压口比率所需的破膜时间以及破膜时管内达到的压力峰值。由表中数据可以看出;5%泄压口比率的压力峰值为 66.924 kPa,破膜所需时间为 64 ms;10%泄压口比率的压力峰值为 38.437 kPa,破膜所需时间为 56 ms;15%泄压口比率的压力峰值为 32.579 kPa,破膜所需时间为 52 ms。由此可以看出,在一定范围内,受限空间中预混气体爆炸时所能达到的压力峰值随着泄压口比率的增大而降低,因为随着泄压口比率增大管内所能承受的最大压力降低。因此在实际的生产中可根据不同需要设计不同的泄压口以满足对应的受限空间。

表2 不同泄压口比率爆炸压力峰值

Table 2 Explosion peak pressure of different proportional

泄压口比率/%	时间/ms	压力峰值/kPa
5	64	66.924
10	56	38.437
15	52	32.597

2.3 火焰传播高速纹影图片分析

许多学者^[6]认为管道因素、可燃气体反应活性和预混气体的浓度、障碍物、点火条件^[7]和位置、爆炸环境的影响等都会对瓦斯爆炸传播和火焰加速存在着影响。Masri等^[8]等进行了一系列管道内可燃气体的爆炸实验,综合研究了障碍物的形状、尺寸和阻塞率对管道内可燃气体爆炸过程的影响。王华等^[9]通过实验发现,甲烷爆炸最佳浓度为11%,此时爆炸压力最大,到达最大压力的时间最小。图8为采用9.5%预混气、40%泄压口比率爆炸时火焰传播高速纹影图,图中黑色阴影区为两截管道连接处。

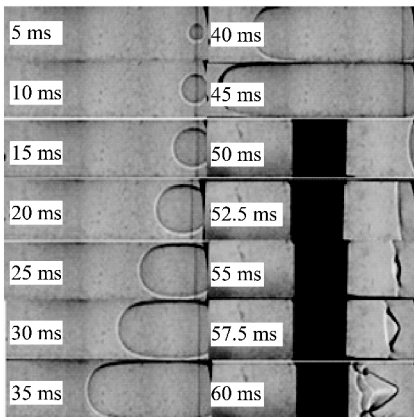


图8 火焰传播过程中高速纹影图

Fig. 8 Flame propagation process of high speed schlieren diagram

图8为预混气体在锡纸膜下的高速摄影图,整个过程直观地反映了火焰传播过程及火焰流场微观结构变化。电极放电后预混气体燃烧并以点火处为圆心,以球面波的形式均匀向外扩张,前段为典型的层流传播结构,火焰阵面非常稳定。爆炸初期,燃烧缓慢进行,已燃气体加热前方未燃气体,随着反应物的不断增多,周围预混气体温度上升,管内压力增大,混合气体流速也不断增加。火焰传播速度等于火焰前端气流的速度加上火焰燃烧速度,即不同的气流速度造成火焰传播速度的不一致。在火焰向前推进时,未燃区的气体将会转变为燃烧反应物,这是一个不断循环前进的过程。火焰会在一定时间内以圆滑的球面波继续向前传播, $t=45$ ms时火焰阵面仍以球面波形

向前传播,但其曲率在逐渐变小。当 $t=60$ ms时形成tulip^[10]火焰。当管内压力达到超压值时,泄压膜破裂传播由层流向湍流转变,最终紊流向外喷出。余立新^[11]等用高速摄像机研究倒置火焰的形成左向右的火焰阵面依次为倒置火焰形成之前、之中和之后,其间隔都为2.2 ms。根据实验图像观测,所得图像符合此结论。关于tulip火焰的形成原因Matalon和Metzener^[12]认为tulip火焰是由于火焰传播中形成已燃气体的涡流状态而导致的;D. Dunn-Rankin等^[13]认为其结构是火焰前方未燃气体和管壁之间的相互作用而产生扰动形成的;Guenoche^[14]则认为是焰面与压力波的相互作用的结果形成的tulip火焰,虽然众多学者对这种特殊的火焰结构进行了研究,但对其形成机理尚未有权威定论。本课题经过试验研究认为:tulip火焰的形成在于反射压力波与爆炸压力波的相互作用,而对火焰传播速度造成扰动,使得管道中部区域火焰传播速度大幅减弱,在相对速度较快的两侧火焰作用下使中部形成了内陷情况。从图8中52.5~60 ms可看出中部火焰阵面基本没动,而上下两侧火焰均向前传播。表现为焰面表面积逐渐减小,厚度变大,形成平面甚至出现轴向拉伸,进而反向弯曲,使得表面积大大增加。最终形成tulip火焰结构。

图9为结合高速摄影图,采集若干个点,进行后期处理得到的火焰阵面位置与火焰传播速度随时间变化的关系。火焰传播过程中,由火焰阵面位置可知,当 $t=0.035$ s前曲线斜率不断增大,表明速度在不断增加; $t=0.035$ s以后斜率减小,速度也在减小。

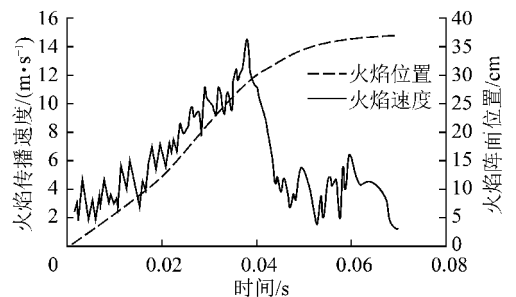


图9 火焰阵面位置和火焰传播速度与时间曲线
Fig. 9 Front position and speed transmission of flame versus time curve

由图8,9可知,管内气体被点燃后,火焰速度缓慢递增,一段时间内速度震荡上升并达到峰值,此时的火焰阵面仍是球面波型,随着火焰与压力相互作用,火焰阵面逐渐变厚,最后形成tulip火焰。泄压膜破裂后,气压迅速外泄,火焰阵面被轴向拉伸,此时速度发生震荡。

结合压力曲线和火焰速度图像可以看出,反应初期管道内预混气体被点燃火焰速度比较低,处于逐渐上升过程, $t=0.006\text{ s}$ 时,速度达到 3.76 m/s ,加速上升过程中, $t=0.037\text{ s}$ 时,速度达到峰值 15.06 m/s 。接着速度开始迅速下降, $t=0.040\text{ s}$ 时速度降到 10.06 m/s 。根据图8可知,无论速度上升至峰值或下降至波谷,火焰阵面都是以球面波的形式向前传播,而这期间的变化是火焰阵面变厚,表面积先减小再逐渐变大,焰面曲率变小。

整个爆炸过程速度与压力是紧密关联的。在 $t=0.056\text{ s}$ 时压力达到峰值 37.960 kPa ,压力超前于火焰速度达到峰值。由于在爆炸过程中,燃烧产物膨胀,在火焰阵面前形成压缩波,火焰传播速度越快,压缩波阵面到火焰面之间面积收敛越急剧,爆炸压力就越大^[15],引起的破坏效应就越大。达到一次峰值后压力迅速下降,短暂时间后又出现上升,反映在纹影图片上,这便是 tulip 火焰的形成时间段。二次波峰后压力则震荡下降。

3 结 论

(1)随着泄压膜强度增大,管内预混气体所能达到的爆炸压力最大值越大,破膜所需要的时间越长;在同一泄压膜强度情况下,随泄压口比率增大,管内所能达到的压力最大值减小,所耗时间缩短。

(2)爆炸过程中,压力不仅决定火焰的传播速度,还影响了火焰的结构变化。火焰阵面在压力波的作用下会引起火焰传播速度的扰动,进而表现为光滑球面波焰面曲率变小,逐渐被拉伸变厚,最终出现火焰倒置与分层的现象。

参考文献:

[1] 梁春利,李 芳.管道内可燃气体爆炸研究进展[J].化学装备技术,2006,27(2):38-41.
Liang Chunli, Li Fang. Combustible gas explosion research [J]. Chemical Equipment Technology, 2006, 27(2): 38-41.

[2] 王汉良,凯 元,昌 敬.波在弯曲管道中传播特性的实验研究[J].火灾科学,2001(4):209-212.
Wang Hanliang, Kai Yuan, Chang Jing. Wave propagation in the curved duct experimental study[J]. Fire Safety Science, 2001(4): 209-212.

[3] 郭长铭,李 剑.爆轰波在阻尼管道中声吸收的实验研究[J].爆炸与冲击,2000,20(4):289-295.
Guo Changming, Li Jian. Experimental investigation of acoustic absorption of detonation by absorbing materials lining wall[J]. Explosion and Shock Waves, 2000, 20(4): 289-295.

[4] 王志荣,蒋军成.受限空间工业气体爆炸研究进展[J].工业安

全与环保,2005,31(3):43-46.

Wang Zhirong, Jiang Juncheng. The research development on industrial gas explosion in confined space[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2005, 31(3): 43-46.

[5] 王 博,陈思维.密闭受限空间可燃气体爆炸特性数值模拟研究[J].工业安全与环保,2008,34(2):28-29.

Wang Bo, Chen Siwei. Numerical simulation of explosive characteristics of flammable gas in closed restricted space[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2008, 34(2): 28-29.

[6] 贾真真,林柏泉.管内瓦斯爆炸传播影响因素及火焰加速机理分析[J].矿业工程研究,2009,24(1):57-61.

Jia Zhenzhen, Lin Baiquan. Analysis on flame acceleration mechanism and affecting factors of methane explosion propagation in duct [J]. Mineral Engineering Research, 2009, 24(1): 57-61.

[7] 丁 云,丁大玉,汤明钧.非理想爆源爆炸波的数值计算[J].爆炸与冲击,1995,15(4):289-299.

Ding Yun, Ding Dayu, Tang Mingjun. Numerical calculation of blast waves from non-ideal explosion sources [J]. Explosion and Shock Waves, 1995, 15(4): 289-299.

[8] Masri A R, Ibrahim S S, Nehzat N, et al. Experimental study of premixed flame propagation over various solid obstructions [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2000, 21: 109-116.

[9] 王 华,葛岭梅,邓 军,等.受限空间可燃性气体爆炸特性的对比[J].煤炭学报,2009,34(2):218-223.

Wang Hua, Ge Lingmei, Deng Jun, et al. Comparison of explosion characteristics of ignitable gases in confined space [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(2): 218-223.

[10] 陈先锋,孙金华,姚礼殷,等.Tulip火焰形成过程中的细微结构特性[J].燃烧科学与技术,2008,14(4):350-354.

Chen Xianfeng, Sun Jinhua, Yao Liyin, et al. Characteristics of fine structure during tulip flame forming [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2008, 14(4): 350-354.

[11] 余立新,孙文超,吴承康.障碍物管道中湍流火焰发展的数值模拟[J].燃烧科学与技术,2003,9(1):11-15.

Yu Lixin, Sun Wenchao, Wu Chengkang. Numerical simulation of development of turbulent flame in an obstructed tube [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2003, 9(1): 11-15.

[12] Matalon M, Metzener P. The propagation of premixed flames in closed tubes [J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1997, 33(6): 331-350.

[13] Dunn-Rankin D, Barr P K, Sawyer R F. Numerical and experimental study of "tulip" flame formation in a closed vessel [A]. Twenty-First Symposium (International) on Combustion [C]. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1986: 1291-1301.

[14] Guenoche H. Nonsteady flame propagation [M]. New York: Pergamon, 1964.

[15] 林柏泉.瓦斯爆炸动力学特征参数的测定及其分析[J].煤炭学报,2002,27(2):164-167.

Lin Baiquan. The measurement and analysis of dynamics feature parameter in gas explosion [J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(2): 164-167.