

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0249

约束端面对管内甲烷爆炸特性的影响*

王亚磊¹, 郑立刚^{1,2}, 于水军^{1,2}, 朱小超¹, 李 刚¹, 杜德朋¹, 窦增果¹

(1. 河南理工大学瓦斯地质与瓦斯治理国家重点实验室培育基地, 河南 焦作 454003;

2. 河南理工大学煤炭安全生产河南省协同创新中心, 河南 焦作 454003)

摘要: 为研究不同约束端面下甲烷的爆炸特性, 利用自行搭建的实验平台完成了多种约束端面下不同浓度甲烷的爆炸实验。研究表明: 约束端面的性质对甲烷的爆炸特性有显著影响, 约束端面的承压强度越高, 甲烷的爆炸超压越大。单层 PVC 薄膜作用下, 薄膜破裂, 不会引起火焰与超压的振荡; 而纸膜破裂后, 管道内外气流的高速泄放和回流则会引起超压振荡, 使火焰前锋波动并发生扭曲变形; 两者共同作用时, PVC 薄膜会阻碍气流的泄放与回流, 加速超压衰减, 抑制火焰和超压的振荡。然而, 随着纸膜层数增加, 破膜时管道内外形成的巨大压差会使约束端面完全破裂, 降低 PVC 薄膜的抑制作用。当破膜难度达到一定程度时, 约束端面作用下的泄压峰值成为不同浓度甲烷爆炸的最大超压峰值, 且泄爆压力并不随甲烷浓度的改变而改变, 因此不同浓度甲烷的爆炸超压在较高的泄爆压力下相同; 此时, 相同约束端面下不同浓度甲烷的压力振荡曲线在压力衰减的前半个周期内完全重合, 管道内外的压差成为主导超压振荡的重要因素, 而不同浓度甲烷的燃烧速率对超压振荡的影响则可以忽略不计。

关键词: 约束端面; 甲烷; 爆炸; 耦合分析; 火焰传播; 压力振荡

中图分类号: O381; TD712

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

天然气作为一种高效清洁的能源, 给人们生活带来便利的同时, 也埋下了一些潜在隐患。在加工、使用和储运可燃气体的过程中, 火灾和爆炸事故时有发生, 因此有必要掌握预混火焰和爆炸超压的发展规律, 及时做好预防和控制措施^[1-2]。

近年来, 针对甲烷/空气预混气体爆炸, 学者们进行了大量实验, 主要涉及对爆炸火焰的传播^[3-5]和爆炸超压^[6-8]的研究。研究发现, 火焰的传播速度主要由可燃气体的燃烧速度与气流的扩散速度组成^[9]。较高的气流扩散速度会引发管内形成一系列湍流, 湍流能在燃烧瞬间增大火焰的燃烧面积, 急剧加快能量的释放速率, 使火焰加速、压力升高, 对生产设备及厂房造成严重的损害^[10]。

为有效降低爆炸事故造成的损失, 泄爆作为一种常用的技术手段受到众多学者的关注^[11-17]。而点火位置^[12-13]、预混气体浓度^[14-17]、泄爆面积^[15-16]和泄爆压力^[11, 13, 15, 17]等均对泄爆措施的有效性具有重要的影响。小规模管道实验中, 学者们通常使用各种约束端面密封管道一端, 研究火焰和爆炸超压在管内的变化规律^[18-20]。不同材质的约束端面所需的泄爆压力不同, 泄爆后所引发的火焰和超压的变化趋势亦有所差异^[21-25]。约束端面破裂, 管内气体泄流, 火焰传播加速^[26]。然而, 相对于无膜密封下, 约束端面又能显著减弱管内超压的振荡幅度^[27]。约束端面的种类及有无严重影响着爆炸火焰及爆炸超压的变化趋势, 现有文献却少有记载约束端面的破裂过程及破膜后不同约束端面对气流外泄和回流的影响。因此, 有必要研究不同约束端面下可燃气体的爆炸过程, 分析不同约束端面下火焰和超压的变化规律。基于此, 自主搭建一套预混气体爆炸系统, 采用高速摄像技术研究不同浓度甲烷/空气预混气体在多种约束端面作用下的火焰传播规律, 并通过压力传感器记录管内的超压变化, 耦合分析不同约束端面下火焰与超压的变化过程。

* 收稿日期: 2018-07-10; 修回日期: 2018-09-12

基金项目: 国家自然科学基金(51674104, 51504083); 中国博士后基金(2013M540570);

河南省高等学校青年骨干教师项目(2012GGJS-053); 河南理工大学创新型科研团队(T2018-2)

第一作者: 王亚磊(1991—), 男, 硕士研究生, 2575635245@qq.com;

通信作者: 郑立刚(1979—), 男, 博士, 教授, zhengligang97@163.com。

1 实验装置与方法

1.1 实验装置

如图 1 所示,实验系统主要由爆炸管道、配气系统、点火系统、光电与压力采集系统、高速摄像系统及同步控制系统几部分组成。爆炸管道为竖直放置的 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 500\text{ mm}$ 的方形有机玻璃管道,耐压强度为 2 MPa 。管道下端用不锈钢法兰盘密闭,上端用不同材质的约束端面密封。

实验中,采用排空气法配制不同浓度的甲烷/空气预混气体。具体操作是通过 2 个质量流量计分别控制纯度为 99.99% 的甲烷和空气的体积流量,将不同浓度的甲烷/空气预混气体由管道底部的进气口通入管内,然后通过管道上端的排气口排出管外。为配制所需的气体浓度,实验中通入不少于管道 4 倍容积的预混气^[18, 28-29]。通气结束后,同时关闭管道的进气阀和排气阀。为降低管内初始湍流对预混气体爆炸火焰传播的影响,将管内气体静置 30 s 后,当管内处于较低程度的湍流时,再利用电压为 6 V 的高频脉冲点火器引燃管内预混气体。点火电极由直径为 0.3 mm 的铂丝制成,其距底部法兰盘 80 mm 。持续点火时间为 0.3 s 。

实验时,由同步控制器统一控制点火系统、光电与压力采集系统和高速摄像系统的启闭。光电传感器对准点火电极,用于记录点火放电时刻,压力传感器一个位于管道底端法兰盘中心,一个位于距管道上端开口 100 mm 处,其量程均为 $-100\sim 100\text{ kPa}$ 。光电与压力信号通过 USB-1608FS PLUS 型数据采集卡采集,采样频率为 15 kHz 。高速摄像系统为德国 LaVision 4G 高速摄像机,拍摄频率为 $2\,000\text{ s}^{-1}$ 。

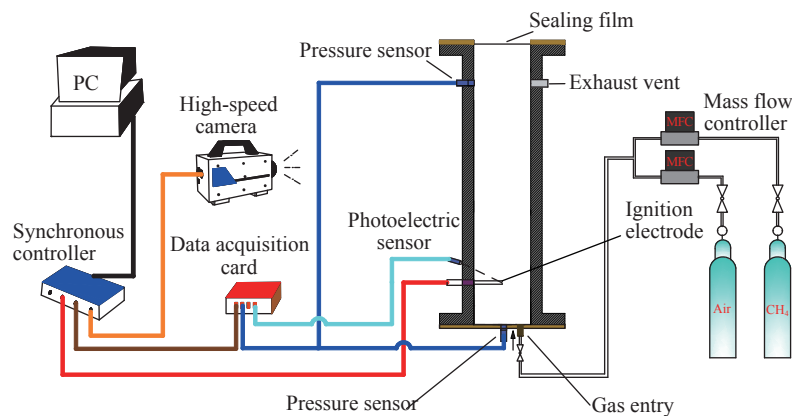


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

1.2 管道上端的密封材料

实验中,分别用不同层数的 0.3 mm 厚的 PVC 薄膜和 0.3 mm 厚的纸膜密封管道上端。经测试,单层 PVC 薄膜和纸膜作用下的泄压峰值分别为 6.7 和 15.0 kPa ,且在这 2 种薄膜共同作用的工况下,PVC 薄膜始终置于最底层。爆炸过程中,火焰对称发展,使管内压力上升,薄膜轻微隆起,形成帐篷式的弧面。破膜前薄膜的受力分析图可简化为图 2, A 、 B 、 C 、 D 为管道四边的中点, E 、 E' 为横截面中心。

上端法兰盘将薄膜与管道边缘固定,限制了薄膜的膨胀,使薄膜各点处均受到垂直弧面向外的压力,但由于弧面上各点受力并不相同,在管道两边的交点和薄膜正中心的 E (或 E') 点处形成应力集中区,其中 E (或 E') 点处受到各方向上压力的合力最大。当管内压力达到该薄膜密封条件下的泄爆压力时,薄膜极易由此点破裂,且通过实验证实, E (或

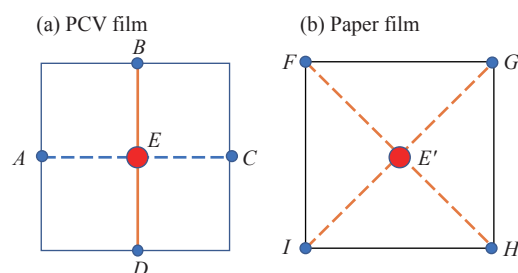


图 2 不同材质薄膜的破裂分析

Fig. 2 Fracture analysis of films with different materials

E' 点处最先破裂的概率最大。因此,本文中是基于 E (或 E')点最先破裂开展研究的。

尽管上端密封薄膜均从 E (或 E')点最先破裂,但不同材质的薄膜,如脆性材料(纸)和塑性材料(PVC薄膜),其破膜情况亦有所不同。PVC薄膜的横向与纵向拉伸强度不同,但同一方向上拉伸强度相近。因此,PVC薄膜由 E 点破裂后裂痕(裂痕在水平方向的投影)往往为平行于管道的某一边,如图2(a)中的 AC 或 BD 两线,其破膜后的效果如图3(a)所示。由图3(a)可知,PVC薄膜破裂后,管道上端的泄爆口宽度明显小于管宽。因此,管道上端的泄爆面积明显小于管道的横截面积。而脆性材料纸膜,受火焰传播扩张的影响,从 E' 点破裂后则沿对角线 FH 和 IG 完全撕裂,如图3(b)所示。在高压气流的推动下,破裂的纸片向管外张开,形成完全的开口,使管道上端的泄爆面积近似等于管道的横截面积。

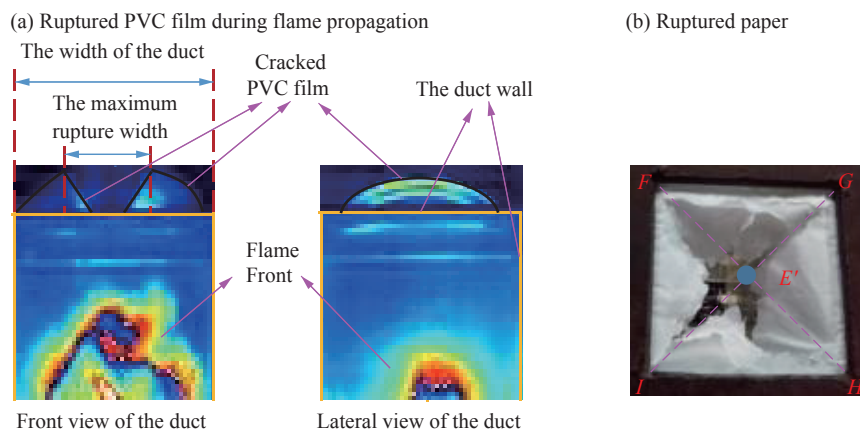


图 3 薄膜破裂形态

Fig. 3 Morphology of the ruptured films

1.3 爆炸超压的选取

如上所述,管道上端用不同材质的薄膜密封。破膜前,管内预混气体爆炸属于定容爆炸,且由于管道较短,管内各点压力在较短时间内即可达到准平衡状态,使管内各点处压力值基本相同。如图4所示,单层纸膜密封下,6.5%的甲烷爆炸时,两压力传感器达到最大压力的时间差仅为1.13 ms,所测的最大爆炸超压也仅相差0.02 kPa。相对于破膜前火焰在管内传播的时间和破膜时所达的爆炸超压,此时间差和压力差基本可以忽略。而破膜后,由于管道上端泄压较快,所测压力值相对较小;受预混气体爆炸的影响,管道底端所测的压力峰值整体略大。一般而言,较大的爆炸超压会造成更大的破坏威力。因此,从安全防护角度而言,应选管道底端压力传感器所测的压力作为预混气体的爆炸超压。另外,本文使用薄膜破裂时管道下端法兰处压力传感器所测的管内超压作为此时的泄爆压力,且实验过程中每个工况重复3~4次,取重复性较好的3组数据的平均值进行超压分析。

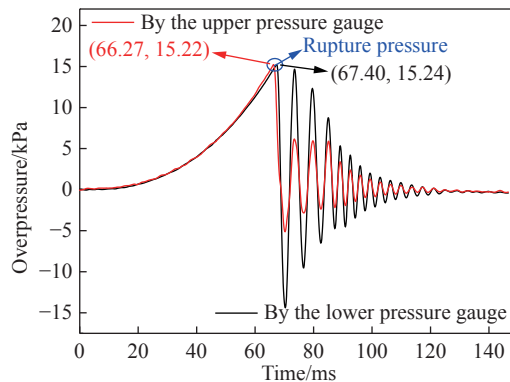


图 4 单层纸膜密封下 6.5% 的甲烷爆炸时上、下两压力传感器所测的压力曲线

Fig. 4 Pressure profiles of 6.5% methane explosion measured by the two pressure gauges with the upper end sealed by a layer of paper

2 结果与分析

2.1 不同约束端面下爆炸火焰与压力的耦合分析

相同材质约束端面下,不同浓度甲烷爆炸火焰与压力的耦合图相似,由于篇幅所限,每种约束端面

本文仅取一种浓度的甲烷爆炸火焰与压力耦合曲线进行分析。

图 5(a) 为单层 PVC 薄膜密封上端管口时, 9.5% 的甲烷爆炸火焰与压力耦合关系图。预混气体被引燃后, 管内超压快速上升, 并于 15 ms 时达到第一个压力峰值, 即泄压峰值 (6.7 kPa)。薄膜破裂造成管内压力骤降, 一部分预混气体由上端管口泄出, 使管内气体流速加大, 火焰在短时间内加速传播。然而, 相对于无膜密封时, 管内的实际泄压速率明显要小, 管道上端残存的 PVC 薄膜如障碍物一般阻碍可燃气体的泄流和火焰传播速度的增大; 且单层 PVC 薄膜的承压强度较小, 管道内外压差较小时 PVC 薄膜即已破裂。因此, 破膜后管内并未造成大的湍流, 伴随着气体流速的减小, 火焰传播速度缓慢下降。然而, 破膜后管道上端对火焰的约束减弱, 燃烧速率不断升高, 爆炸超压再次上升, 并随指形火焰传至上端管口时达到最大值。当火焰传播至管口附近时, PVC 薄膜受热收缩, 泄爆口进一步扩张, 伴随着燃烧产物的降温, 管内超压再次降低。此时, 外部的可燃气体虽发生爆炸, 但由于泄出的气体相对较少, 因此并未造成管内超压的大幅振荡。值得一提的是, 尽管本文所用管道与温小萍等^[30]所用 (150 mm×150 mm×500 mm) 相似, 且上端均为 PVC 薄膜密封, 然而对比两者的压力曲线可知, 两者间仍存在明显的差异。由此证实, 即使所用密封材质相似, 不同厚度和拉伸强度的密封材料, 所测的爆炸超压曲线亦有所不同。

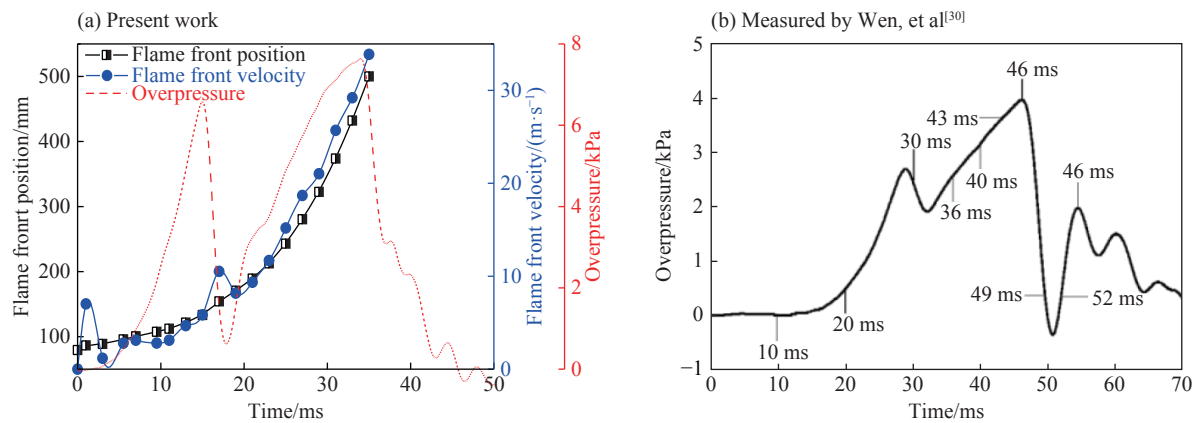


图 5 单层 PVC 薄膜下 9.5% 的甲烷爆炸火焰与压力耦合图

Fig. 5 Coupled relationship between flame propagation and overpressure history of 9.5% methane explosion sealed by a single layer of PVC film

管道上端用单层纸膜密封时, 浓度为 6.5% 的甲烷爆炸火焰与压力的耦合关系如图 6 所示。单层纸膜密封下甲烷的爆炸超压明显高于单层 PVC 薄膜时的爆炸超压, 火焰与压力随时间变化的曲线在破膜后也都呈现出不同程度的振荡。薄膜破裂前, 管内超压已达 15 kPa, 较大的压差下, 大量气体在薄膜破裂瞬间涌出, 使火焰传播速度短时间内由破膜前的 2 m/s 升至 79 m/s。如图 7 所示, 破膜后指形火焰前锋被迅速拉长 (76.5~78.5 ms)。然而, 火焰前锋传播速度的升高主要是由气流外泄引起的, 由颜色变浅的火焰可知, 此时, 管内的实际燃烧速度并无明显变化。火焰面的拉长及气流的高速泄出导致管内单位时间的散热增加, 使管内压力骤降为负压。负压下外部高密度可燃气体倒吸至管内挤压火焰面, 造成火焰前锋的倒退, 使指形火焰变为平面形火焰直至火焰前锋向已燃气体凹陷 (78.5~82.0 ms)。此时, 火焰前锋速度也骤降至

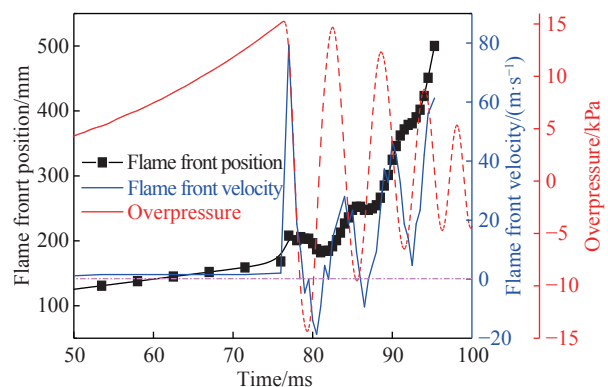


图 6 单层纸膜下 6.5% 的甲烷爆炸火焰与压力耦合图

Fig. 6 Coupled relationship between flame propagation and overpressure history of 6.5% methane explosion sealed by a single layer of paper

-32 m/s。往复的气流振荡使管内形成较大湍流,在湍流的作用下,火焰前锋产生褶皱,进一步加速甲烷燃烧,使管内压力再次升高,将未燃气体排出管外(82.0~85.5 ms)。随着未燃气柱的不断缩短及管外可燃气体的不断稀释,气流振荡幅度不断减小,管内超压振荡峰值也逐渐降低。然而,不同于不断减小的超压峰值,火焰前锋在振荡中却不断向上传播,且随着气流振荡的减弱及燃烧速率的不断升高,火焰前锋的峰值速度在泄压后逐渐加大。当燃烧速率达到一定程度时,外部气体的挤压下,火焰前锋速度虽有减小但始终大于零,火焰锋面也不再发生倒退,直至火焰传出管外。

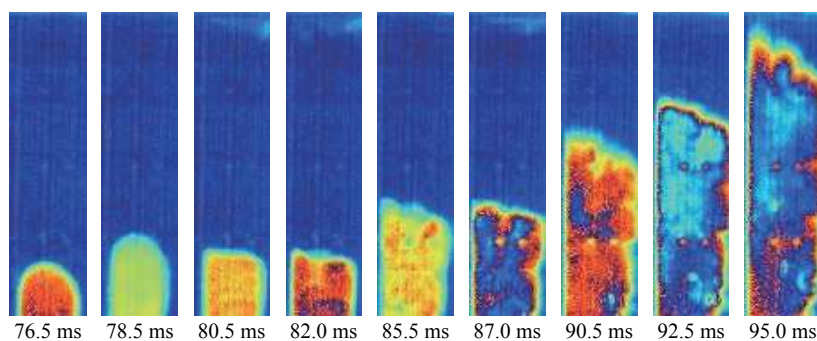


图 7 单层纸膜密封下 6.5% 的甲烷爆炸火焰传播

Fig. 7 Flame propagation of 6.5% methane explosion sealed by a single layer of paper

2.2 不同约束端面下爆炸火焰的传播

图 8 为多种约束端面下 11.5% 的甲烷爆炸火焰传播图。火焰在管内的传播可分为约束端面破裂前的初期发展阶段和破裂后的加速燃烧阶段。尽管单层纸膜密封下火焰的初期发展阶段比单层 PVC 密封下长,但其整体传播时间却最短。单层 PVC 薄膜密封时,火焰在管内缓慢传播,破膜时管道内外的压差较小,无法引起气流的振荡,破膜后火焰加速也不明显,因此火焰在管内整体传播较慢;而单层纸膜密封下,泄压后气流振荡加速了火焰的燃烧,缩短了火焰的整体传播时间;两者共同作用时,火焰传播时间进一步延长,一方面,破膜难度的加大延长了火焰的初期发展;另一方面,未完全破裂的 PVC 薄膜会阻碍气流的振荡,降低管内的湍流强度,因此,火焰的整体传播时间再次延长。

如图 8 所示,多种约束端面下火焰前锋位置随时间变化的曲线在火焰发展前期均有不同程度的重合,而后随约束端面的破裂逐渐分离。约束端面破裂,高压气体泄流,火焰传播加速,火焰前锋位置随时间变化的曲线出现明显的转折点,并在后续的发展中随气流的振荡产生波动。对比不同约束端面下转折点出现的时刻可以发现,薄膜层数越多,转折点出现的时刻越晚,破膜时火焰前锋距点火点的距离越远。薄膜层数的增多加大了约束端面的泄爆难度,破膜时管内需要更多的能量积蓄,因此要求更多的气体燃烧放热;且在较大的破膜难度下,火焰传播速度受到很大的抑制,因此,从点火到破膜所需的时间也越来越长。

2.3 不同约束端面下的爆炸超压

图 9 为多种约束端面下 7.5% 的甲烷爆炸超压图。受破膜、泄流、外部爆炸等因素的影响,短管爆炸具有多个超压峰值,第 1 个超压峰值为约束端面的泄压峰值^[22]。由图 9 可知,破膜后单层 PVC 作用下的超压曲线较平缓,而其他约束端面下的超压曲线均呈现不同程度的振荡。一般而言,约束端面的泄爆

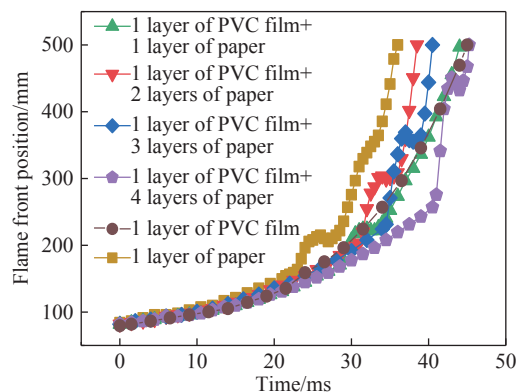


图 8 不同约束端面下 11.5% 的甲烷爆炸火焰传播

Fig. 8 Flame propagation of 11.5% methane under different confined surfaces

压力越高,管内超压振荡越明显。然而,尽管单层 PVC 和单层纸膜共同作用下的泄爆压力比单层纸膜的要高,但破膜后管内的负压绝对值却明显小于单层纸膜作用下的负压绝对值,且破膜后产生超压振荡也弱于单层纸膜下的超压振荡。这是因为管道上端未完全破裂的 PVC 薄膜阻碍可燃气体的泄流和倒吸,使管内超压振荡快速衰减,湍流不断减弱。随着甲烷燃烧速率的不断增大,燃烧放热逐渐加强,气流倒吸作用大大减弱,超压曲线也不再发生振荡,管内热量积累,爆炸超压上升直至火焰前锋到达泄爆口附近,泄压增强,爆炸超压才随之降低。然而,随着泄爆压力的进一步升高,较大的压差下,管内气体泄流加强,约束端面被完全冲开,爆炸超压再次剧烈振荡。

2.4 相同薄膜密封下不同浓度甲烷爆炸超压的衰减分析

表 1 记录了多种约束端面下不同浓度甲烷的爆炸超压。PVC 薄膜约束下,不同浓度甲烷爆炸超压曲线的第 1 个压力峰值均在 6.7 kPa 左右,其第 2 个压力峰值间却存在较大差异,浓度为 6.5%、7.5%、9.5% 和 11.5% 时,第 2 个超压峰值分别为 4.3、5.3、7.7 和 5.8 kPa。这是因为浓度为 9.5% 的甲烷燃烧反应更剧烈,破膜时燃烧的可燃气体最少,火焰前锋上端的未燃气体柱最长,在爆燃气体的作用下,管内超压快速上升,最终大于泄压峰值;而其他浓度的甲烷,破膜后管内压力积存则相对较少,均小于该约束端面下的泄压峰值。因此,PVC 薄膜作用下的泄爆压力并不随甲烷浓度的改变而大幅改变,且当泄压峰值为最大峰值压力时,泄压峰值即可视为该浓度下甲烷的爆炸超压。

表 1 多种约束端面下不同浓度甲烷的爆炸超压

Table 1 Explosion overpressure of methane at different concentrations with the upper end sealed by different materials

甲烷浓度/%	爆炸压力/kPa					
	1层PVC薄膜	1层纸膜	1层PVC薄膜+1层纸膜	1层PVC薄膜+2层纸膜	1层PVC薄膜+3层纸膜	1层PVC薄膜+4层纸膜
6.5	6.7	15.3	19.4	34.3	52.2	69.2
7.5	6.7	14.2	18.7	33.6	57.7	70.0
9.5	7.7	15.2	20.1	33.7	55.4	70.2
11.5	6.8	14.9	19.4	35.4	57.0	70.6

由表 1 可知,其他约束端面下,不同浓度的甲烷/空气预混气体的爆炸超压相近,如 1 层纸膜、1 层 PVC 薄膜+1 层纸膜、1 层 PVC 薄膜+2 层纸膜、1 层 PVC 薄膜+3 层纸膜、1 层 PVC 薄膜+4 层纸膜密封下不同浓度甲烷的爆炸超压均分别在 15、19、34、55 和 70 kPa 左右。这些约束端面的承压强度较高,破膜后大量的可燃气体外泄使管内可燃气体密度不断降低,且上端的泄压使管内压力无法大量积蓄,造成后续的爆炸超压均低于约束端面的泄爆压力。因此,当泄爆压力达到一定程度时,泄压峰值即可视为甲烷的爆炸超压,此时,不同浓度甲烷的爆炸超压相同。

点火后,火焰缓慢发展,管内压力积蓄,直至上端约束端面破裂,超压发展进入衰减振荡阶段。但由于不同浓度甲烷燃烧速率的不同,造成管道上端的破膜时间存在明显的差异。为方便对比破膜后管内超压的衰减过程,图 10 中爆炸超压的起点均从管道上端约束端面破裂时,管内爆炸压力达到最大值的时刻开始。如图 10 所示,破膜后管内超压骤降,并以正弦波的形式衰减振荡。然而,对比不同浓度甲烷在相同约束端面下的超压衰减曲线可以发现,在超压衰减振荡的前半个周期内,不同浓度甲

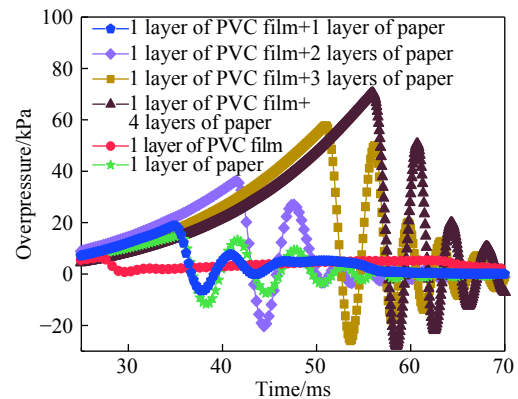


图 9 不同约束端面下 7.5% 的甲烷爆炸超压变化

Fig. 9 Explosion overpressure of 7.5% methane under different confined surfaces

烷爆炸超压的衰减轨迹几乎完全重合, 随后才逐渐分离, 以各自的频率衰减振荡。这是因为相同约束端面作用下的泄爆压力相同, 破膜后管道内外巨大的压差成为压力衰减振荡的主导因素, 而不同浓度可燃气体的燃烧速率对超压振荡的影响则相对较小, 可以完全忽略。因此, 不同浓度的甲烷在约束端面破裂后的前半周期, 超压衰减曲线完全重合。破膜后气流振荡促使管内产生湍流, 不断加强甲烷的燃烧速率, 使燃烧放热对超压振荡的影响逐渐显现, 造成超压衰减曲线的分离, 且振荡幅度越大, 超压曲线分离越快。

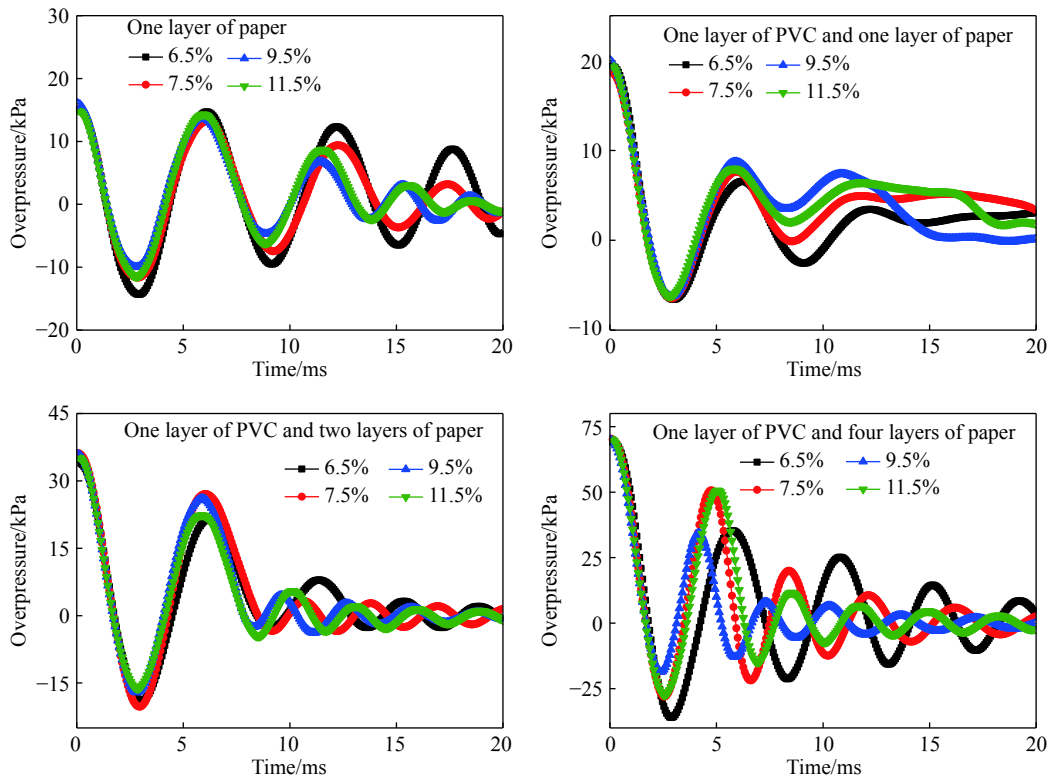


图 10 不同约束端面下甲烷爆炸超压衰减

Fig. 10 Explosion overpressure damping process of methane sealed by different films

3 结论

通过自主搭建的实验平台完成了多种约束端面下不同浓度甲烷的爆炸实验, 得出以下结论:

(1) 约束端面的性质对甲烷爆炸火焰和超压发展有显著的影响, 不同材质约束端面破裂后的形态有很大差异。塑性材料 PVC 薄膜的泄爆压力较低, 破裂后形成的泄爆口明显小于管道的横截面积, 且管道上端残存的 PVC 薄膜能有效抑制管道内外气流的泄出与回流, 阻碍火焰的传播发展, 使管内无法形成超压振荡; 而脆性材料纸膜破裂后形成的泄爆面积约等于管道的横截面积, 较大的压差下, 气流快速泄放、回流, 造成火焰与超压的振荡; 两者共同作用时, 破膜后火焰与超压的振荡幅度都有所减弱, 但随着纸膜层数的增加, PVC 薄膜的抑制作用逐渐减弱。

(2) 多种约束端面下火焰前锋位置随时间变化的曲线在火焰发展前期均有不同程度的重合, 而后随约束端面的破裂逐渐分离。约束端面破裂, 火焰传播加速, 火焰前锋位置随时间变化的曲线出现明显的转折点, 且泄压峰值越大, 转折点出现的时刻越晚, 破膜时火焰前锋距点火点的距离越远。

(3) 高承压约束端面下, 不同浓度甲烷的爆炸超压相同。此时, 泄压峰值即为不同浓度甲烷的爆炸超压; 且相同约束端面下, 破膜后不同浓度甲烷的超压振荡曲线在压力衰减的前半周期内完全重合。此时, 管道内外的压差成为主导压力振荡的重要因素, 而不同浓度甲烷的燃烧速率对超压振荡的影响则可以忽略不计。

参考文献:

- [1] CAO X Y, REN J J, ZHOU Y H, et al. Suppression of methane/air explosion by ultrafine water mist containing sodium chloride additive [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 285: 311–318. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2014.11.016.
- [2] JIN K Q, DUAN Q L, LIEW K M, et al. Experimental study on a comparison of typical premixed combustible gas-air flame propagation in a horizontal rectangular closed duct [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 327: 116–126. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2016.12.050.
- [3] 陈东梁, 孙金华, 刘义, 等. 甲烷/空气预混气体火焰的传播特征 [J]. *爆炸与冲击*, 2008, 28(5): 385–390.
CHEN Dongliang, SUN Jinhua, LIU Yi, et al. Propagation characteristics of premixed methane-air flames [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2008, 28(5): 385–390.
- [4] 李阳超, 杜扬, 齐圣, 等. 汽油蒸气/空气预混火焰的无拉伸层流燃烧速率 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(5): 863–870. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)05-0863-08.
LI Yangchao, DU Yang, QI Sheng, et al. Gasoline vapor/air premixed flame's unstretched laminar burning velocity [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(5): 863–870. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)05-0863-08.
- [5] 杨艺, 何学秋, 刘建章, 等. 瓦斯爆燃火焰内部流场分形特性研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2004, 24(1): 30–36.
YANG Yi, HE Xueqiu, LIU Jianzhang, et al. Fractal characteristics of flame inner flow field in methane/air explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2004, 24(1): 30–36.
- [6] ZHU C J, LIN B Q, JIANG B Y. Flame acceleration of premixed methane/air explosion in parallel pipes [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2012, 25(2): 383–390. DOI: 10.1016/j.jlp.2011.10.004.
- [7] 陆胤臣, 陶刚, 张礼敬. 球形容容器内甲烷-空气爆炸特性分析与理论计算 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(4): 773–778. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)04-0773-06.
LU Yinchen, TAO Gang, ZHANG Lijing. Analysis and theoretical calculation of explosion characteristics of methane-air mixture in a spherical vessel [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(4): 773–778. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)04-0773-06.
- [8] ZHANG K, WANG Z R, YAN C, et al. Effect of size on methane-air mixture explosions and explosion suppression in spherical vessels connected with pipes [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, 49: 785–790. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.02.013.
- [9] 孙松, 高康华. 管道内气体爆炸时火焰传播湍流因子的研究 [J]. *煤炭学报*, 2016, 41(S2): 441–447.
SUN Song, GAO Kanghua. Study on turbulence factors of flame propagation in tube under gas explosion [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(S2): 441–447.
- [10] 何学超, 孙金华, 陈先锋, 等. 管道内甲烷-空气预混火焰传播特性的实验与数值模拟研究 [J]. *中国科学技术大学学报*, 2009, 39(4): 419–423.
HE Xuechao, SUN Jinhua, CHEN Xianfeng, et al. Experimental and numerical study on flame propagation and structure behaviors of methane-air premixed combustion in tube [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2009, 39(4): 419–423.
- [11] SUN S, WANG M Y, GAO K H, et al. Effect of vent conditions on internal overpressure time-history during a vented explosion [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2018, 54: 85–92. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.03.002.
- [12] CHAO J, BAUWENS C R, DOROFEEV S B. An analysis of peak overpressures in vented gaseous explosions [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(2): 2367–2374. DOI: 10.1016/j.proci.2010.06.144.
- [13] CAO Y, GUO J, HU K L, et al. Effect of ignition location on external explosion in hydrogen-air explosion venting [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(15): 10547–10554. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.01.095.
- [14] SEZER H, KRONZ F, AKKERMAN V Y, et al. Methane-induced explosions in vented enclosures [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, 48: 199–206. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.04.009.
- [15] KUZNETSOV M, FRIEDRICH A, STERN G, et al. Medium-scale experiments on vented hydrogen deflagration [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015, 36: 416–428. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.04.013.
- [16] BAUWENS C R, CHAO J, DOROFEEV S B. Effect of hydrogen concentration on vented explosion overpressures from lean

- hydrogen-air deflagrations [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(22): 17599–17605. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.04.053.
- [17] QI B, QIN F, ZHANG Y D, 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. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.01.084.
- [18] 郑立刚, 苏洋, 李刚, 等. 点火位置对氢气/甲烷/空气预混气体爆燃特性的影响 [J]. *化工学报*, 2017, 68(12): 4874–4881. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20170369.
- ZHENG Ligang, SU Yang, LI Gang, et al. Effect of ignition position on deflagration characteristics of premixed hydrogen/methane/air [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2017, 68(12): 4874–4881. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20170369.
- [19] 余明高, 阳旭峰, 郑凯, 等. 障碍物对甲烷/氢气爆炸特性的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(1): 19–27. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0172.
- YU Minggao, YANG Xufeng, ZHENG Kai, et al. Effect of obstacles on explosion characteristics of methane/hydrogen [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(1): 19–27. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0172.
- [20] 余明高, 杨勇, 裴蓓, 牛攀, 朱新娜. N₂ 双流体细水雾抑制管道瓦斯爆炸实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(2): 194–200. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)02-0194-07.
- YU Minggao, YANG Yong, PEI Bei, et al. Experimental study of methane explosion suppression by nitrogen twin-fluid water mist [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(2): 194–200. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)02-0194-07.
- [21] 王世茂, 杜扬, 李阳超, 等. 含弱约束结构受限空间油气爆炸外部火焰特性 [J]. *后勤工程学院学报*, 2016, 32(5): 39–43. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7843.2016.05.007.
- WANG Shimao, DU Yang, LI Yangchao, et al. External flame characteristics of gasoline-air mixture explosion in confined space with weakly constrained structure [J]. *Journal of Logistical Engineering University*, 2016, 32(5): 39–43. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7843.2016.05.007.
- [22] 杜扬, 王世茂, 袁广强, 等. 含弱约束端面短管道油气爆炸特性实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(2): 465–472. DOI: 10.11883/bzycj-2015-0242.
- DU Yang, WANG Shimao, YUAN Guangqiang, et al. Experimental study of fuel-air mixture explosion characteristics in the short pipe containing weakly confined face at the end [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(2): 465–472. DOI: 10.11883/bzycj-2015-0242.
- [23] FAKANDU B K, ANDREWS G E, PHYLAKTOUN H N. Vent burst pressure effects on vented gas explosion reduced pressure [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015, 36: 429–438. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.02.005.
- [24] GUO J, LI Q, CHEN D, et al. Effect of burst pressure on vented hydrogen-air explosion in a cylindrical vessel [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(19): 6478–6486. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.03.059.
- [25] GUO J, WANG C J, LI Q, et al. Effect of the vent burst pressure on explosion venting of rich methane-air mixtures in a cylindrical vessel [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, 40: 82–88. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.12.006.
- [26] 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, 66(7): 2749–2756. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20141789.
- ZHENG Ligang, LV Xianshu, ZHENG Kai, et al. Influence of ignition position on overpressure of premixed methane-air deflagration [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2015, 66(7): 2749–2756. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20141789.
- [27] HISKEN H, ENSTAD G A, MIDDHA P, et al. Investigation of concentration effects on the flame acceleration in vented channels [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015, 36: 447–459. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.04.005.
- [28] IBRAHIM S S, MASRI A R. The effects of obstructions on overpressure resulting from premixed flame deflagration [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2001, 14(3): 213–221. DOI: 10.1016/S0950-4230(00)00024-3.
- [29] LV X S, ZHENG L G, ZHANG Y G, et al. Combined effects of obstacle position and equivalence ratio on overpressure of premixed [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41: 17740–17749. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.07.263.
- [30] 温小萍, 武建军, 解茂昭. 瓦斯爆炸火焰结构与压力波的耦合规律 [J]. *化工学报*, 2013, 64(10): 3871–3877. DOI: 10.3969/j.issn.2013.10.052.

WEN Xiaoping, WU Jianjun, XIE Maozhao. Coupled relationship between flame structure and pressure wave of gas explosion [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2013, 64(10): 3871–3877. DOI: 10.3969/j.issn.2013.10.052.

Effect of vented end faces on characteristics of methane explosion in duct

WANG Yalei¹, ZHENG Ligang^{1,2}, YU Shuijun^{1,2}, ZHU Xiaochao¹,
LI Gang¹, DU Depeng¹, DOU Zengguo¹

(1. *State Key Laboratory Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control,
Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan, China;*

2. *Collaborative Innovation Center of Coal Safety Production of Henan Province,
Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan, China)*

Abstract: In order to study the characteristics of methane explosion under different vented end faces, explosion tests of methane with different concentrations are carried out in a vertical 5 L quartz duct with the upper end sealed by different films. The results show that the properties of the vented end faces have significant effects on methane explosion. The explosion overpressure of methane with different concentrations is largely dependent upon the vent burst pressure of the vented end faces, which increases with the increasing vent burst pressure. Specially, by covering the end of the duct by a single layer of PVC film, neither the flame nor the overpressure oscillation will be aroused by the rupture of the PVC film, while the rupture of the paper which generates drastic discharge and reflux of the air flow will severely reverse and distort the flame, such that cause the overpressure oscillation in the duct. Moreover, as the two works together, the PVC film will hinder the venting of the air flow, resulting in accelerating the reduction of the overpressure and suppressing the flame and overpressure oscillation. However, this effect gradually decreases with the increasing layers of paper films. Indeed, as the vent burst pressure reaches a certain value, the difference among the explosion overpressure of different concentrations of methane gradually diminishes owing to the same vent burst pressure, which is the maximum pressure of the overpressure history, resulting in a similar overpressure amongst different concentrations of methane. Significantly, the overpressure attenuation curves of methane explosion with different concentrations completely coincide with each other in the first half of the period. At this point, the differential overpressure between the internal and external duct is the key factor leading to the overpressure oscillation, while the influence of the combustion rate of methane with different concentrations on the overpressure oscillation can be ignored.

Keywords: confined film; methane; explosion; coupling analysis; flame propagation; overpressure oscillation

(责任编辑 张凌云)