

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0295

石化装置工业尺度管道爆轰传播实验研究*

鲍磊^{1,2}, 王鹏^{1,2}, 党茜³, 李厚达^{1,2}, 邝辰^{1,2}, 于安峰^{1,2}

1. 中国石油化工股份有限公司青岛安全工程研究院, 山东 青岛 266101;
2. 中国石油化工股份有限公司化学品安全控制国家重点实验室, 山东 青岛 266101;
3. 西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川 成都 610500)

摘要: 针对石化装置罐区大口径、长距离管道内火焰传播缺乏系统研究的问题, 设计搭建了DN50~DN500工业尺度管道火焰传播实验装置, 并开展了丙烷/空气、乙烯/空气等可燃气体在不同管径下的实验研究。实验结果表明: 可燃气体积分数对火焰传播及爆轰有一定影响, 当接近化学计量浓度时, 爆轰加速距离更短, 更易形成稳态爆轰, 而当可燃气体混合气为贫燃或富燃状况时, 爆轰加速距离则会增长; 火焰爆轰传播速度、爆轰压力与管道管径基本无关, 受可燃气体种类影响更大; 对应体积分数为6.6%的乙烯/空气和体积分数为4.2%的丙烷/空气混合气体, 爆轰压力分别是初始压力的15.17和14.47倍, DN150以下管径内的爆轰压力远高于ISO16852标准给出的参考值。罐区连通管道阻火器选型安装时, 应结合安装位置选用合适的阻火器。

关键词: 爆轰; 火焰传播; 工业尺度; 管道

中图分类号: O381 国标学科代码: 1303510 文献标志码: A

Experimental study on detonation propagation in industrial scale pipelines used in petrochemical plants

BAO Lei^{1,2}, WANG Peng^{1,2}, DANG Qian³, LI Houda^{1,2}, KUANG Chen^{1,2}, YU Anfeng^{1,2}

1. *Research Institute of Safety Engineering, SINOPEC, Qingdao 266101, Shandong, China;*
2. *State Key Laboratory of Safety and Control for Chemicals, SINOPEC, Qingdao 266101, Shandong, China;*
3. *Petroleum Engineering School, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan, China)*

Abstract: Based on the lack of systematic research on flame propagation in large-diameter and long-distance pipelines in the tank area of petrochemical plants, an experimental device for flame propagation in DN50-DN500 industrial-scale pipelines was designed and built. In this paper, effects of concentration of gas mixture for propagation characteristics of steady gaseous detonation waves in ethylene-air mixtures with DN50 pipeline were studied experimentally. The volume concentration of gas mixture was 5.6%, 5.93%, 6.6%, 7.15%, 8.0% ethylene in air. Homogeneous C₂H₄/air (6.6%) and C₃H₈/air (4.2%) mixtures were used with 9 kinds of pipelines which were from DN50 to DN500 to study the effects of pipeline diameter for propagation characteristics of steady gaseous detonation. The experimental results show that the concentration of combustible gas has an effect on flame propagation and detonation. The detonation runup distance is short and steady detonation is more likely to be formed when it is close to chemical equivalent concentration, when the combustible mixture is poorer or richer, the steady detonation will need more runup distance. The detonation flame speed and pressure are more affected by the type of combustible gas instead of pipe diameter. The detonation pressure of the mixture of 6.6% C₂H₄/air and the mixture of 4.2% C₃H₈/air is 15.17 and 14.47 times of the initial pressure, respectively, which is different from the reference value given by the ISO16852 standard where the ratio p_m/p_0 (the average value of the detonation pressure to initial pressure) increases with pipe

* 收稿日期: 2020-08-28; 修回日期: 2020-12-24

第一作者: 鲍磊(1987—), 男, 硕士, 工程师, baol.qday@sinopec.com

通信作者: 于安峰(1982—), 男, 博士, 教授级高级工程师, yuaf.qday@sinopec.com

diameter. The detonation pressure of pipeline below DN150 is far higher than the reference value which is 10 and 12. It's suggested that in the design of pipelines and selection and installation of flame arresters for connecting pipelines in the tank areas, detonation pressure requires careful consideration and appropriate arresters should be selected in combination with the installation position.

Keywords: gaseous detonation; flame propagation; industrial scale; pipeline

随着国家对环保的日益重视, 相关法规标准日益严格。为满足国家法律法规的要求, 各炼化企业开始大面积实施或改造油品储存系统挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)收集与治理工程, 涉及到中间原料与产品、石脑油、成品油等罐组。罐组连通后, 一旦某一储罐发生闪爆或火灾时, 火焰可沿连通管线传播到其它储罐, 引发群罐火灾。近年来, 气相连通罐组事故频发, 如某石化企业 6 号罐爆炸后, 由于各罐气相管线连通, 导致 7、8 号罐相继发生闪爆; 某化工厂焚烧炉引风机故障, 生产装置可燃气体通过罐区废气收集管向各储罐倒灌, 引发火灾^[1]。

国内外学者针对小尺度管道内预混气体火焰传播加速、火焰抑制等已开展了大量研究^[2-8], 但对大尺度管道内火焰传播行为的研究较少, 司荣军^[9]采用管径 DN500(长度 66.5 m)和 DN700(长度 93.1 m)的实验装置, 研究了瓦斯爆炸的峰值压力和火焰到达时间, 认为管道直径的大小明显影响了瓦斯的爆炸传播过程, DN700 管道的压力波峰值和火焰传播速度均要大于 DN500 的管道, 但根据实验结果, 管道内最大火焰传播速度约为 500~700 m/s, 尚未形成爆轰传播。Zuraji 等^[10]采用内径为 500 mm、长为 30 m 的管道对不同体积分数的甲烷空气混合物火焰传播开展了研究, 在 28.5 m 处得到最大速度 133.1 m/s。白春华等^[11]采用内径为 0.199 m、长径比为 163 的水平长直管道研究了甲烷空气爆轰传播, 得到在强点火条件下, 甲烷体积分数为 9.13% 时, 经过 14.35 m(长径比约 72)形成稳态爆轰, 爆速维持在 1 700 m/s。蒋新生等^[12]采用直径为 0.15 m, 长径比分别为 69.3 和 155.3 的实验管道研究了油气在不同长径比管道内的火焰传播行为, 得出最大爆炸超压值和火焰传播速度随长径比增大而显著增大, 当长径比达到一定程度后, 发生了爆轰现象, 最大爆炸超压值均达到 3 MPa 以上, 火焰传播速度最快达到 3 000 m/s 以上; 而当长径比足够大时, 管道内沿程的最大超压值会出现随传播距离增大而下降再迅速升高的现象。孙少辰等^[13]采用 DN80 和 DN400 管道研究了管道爆轰传播特性, 实验发现 DN80 管道爆轰压力峰值大于 DN400 爆轰压力峰值。上述研究更多地集中在瓦斯爆炸传播领域, 且更多的为爆燃传播, 对于石化装置典型介质气体(丙烷、乙烯等)在工业级管道(管径以 DN50~DN500 为主)内的爆轰传播行为研究较少。

本文中针对石化装置常用管道规格(DN50~DN500)搭建 9 种规格管道火焰传播行为研究实验装置, 研究了典型介质气体(丙烷、乙烯等)在不同规格管径的管道内火焰传播速度及压力关键参数, 以期为指导石化装置连通管线设计及阻火器选型等提供数据。

1 实验装置与实验过程

1.1 实验装置

实验装置主要由以下几部分组成: 实验管道系统、自动配气系统、点火系统、测量与采集系统以及安全控制系统等, 如图 1 所示。实验管道系统包括 50~500 mm 等 9 种不同管径规格不锈钢材质管道, 管道内未做特殊加工处理, 内壁平滑无锈斑等。管道长度如表 1 所示。其中, 50 mm 管道实验装置中火焰速度、压力传感器以管径 D 整数倍作为单位进行布置, 具体如表 2~3 所示。

自动配气系统采用动态法配气, 通过实时自反馈调节可燃气与空气的流量实现气体的混合。可根据实验需要配置丙烷、乙烯等与空气的混合可燃气体, 可燃气体积分精度为 $\pm 0.2\%$; 点火系统采用高压放电点火, 点火能量可调, 范围为 1 mJ~30 J, 为保证实验中可燃气体被点燃, 实验中点火能量采用 1 J。测量与采集系统包括火焰速度测量、压力测量等。

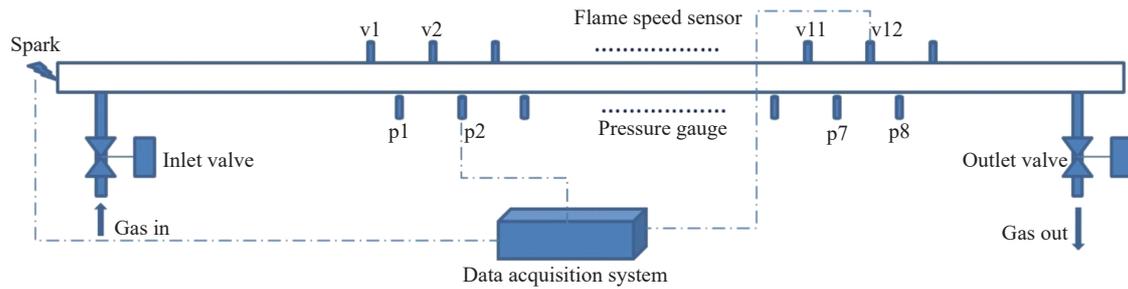


图 1 实验系统组成

Fig. 1 Schematic representation of the experimental apparatus

表 1 各实验管道长度

Table 1 Length of each experimental pipeline

管径/mm	长度/m	管径/mm	长度/m
50	15	250	55
80	24	300	60
100	25	400	84
150	36	500	110
200	48		

表 2 50 mm 管道实验装置火焰速度传感器布置位置

Table 2 Location of flame speed sensors in 50-mm-pipeline experimental apparatus

传感器	位置/D	传感器	位置/D	传感器	位置/D
v1	144	v5	168	v9	208
v2	148	v6	176	v10	216
v3	152	v7	184	v11	224
v4	156	v8	192	v12	232

表 3 50 mm 管道实验装置火焰压力传感器布置位置

Table 3 Location of flame pressure sensors in 50-mm-pipeline experimental apparatus

传感器	位置/D	传感器	位置/D
p1	146	p5	180
p2	150	p6	188
p3	154	p7	212
p4	172	p8	228

火焰速度测量采用光电二极管原理的火焰传感器,当管道内有火焰传播时,其火焰的可见光传至火焰传感器时,火焰传感器中的光电二极管将输出 0~3 000 mV 的信号并记录下可见光出现的时间点,通过相邻测试点的间距与时间差可求得其间的平均速度;间距越小,计算得到的平均速度值越真实反映火焰的瞬间速度,可根据火焰传播的不同形态设计火焰传感器间距值,火焰传感器响应时间≤0.5 μs。

火焰压力测量采用压电式动态压力传感器,其量程为 0~100 MPa,测量精度:响应时间小于 0.4 μs,采样频率大于 500 kHz。由于爆轰压力的峰值压力(p_{max})通常具有一定的随机性,加之当爆轰产生时,爆轰对管道或者其他设备的破坏需要一定的作用时间,根据 ISO16852^[14](国际阻火器测试标准)规定,采用爆轰平均压力 p_m 表征爆炸压力,其计算方法如下:

$$p_m = \frac{\int_{t_p}^{t_p+200\mu s} p(t)dt}{200\mu s} \quad (1)$$

式中: p_m 为爆轰平均压力,MPa; t_p 为爆轰峰值压力时间点,μs。

安全控制系统包括远程控制进、出气阀,阻火器以及管道末端的爆破片等,远程控制进、出气阀实现实验过程的配气与吹扫操作,避免实验人员进入实验管道区域,配气完成后,远程控制关闭进、出气阀,保证实验时管道内可燃气体处于独立状态,与配气系统等物理隔离;阻火器用于防止火焰传播至非实验管道区域;由于实验基于常压、微正压开展,在管道末端安装爆破片以保护实验仪器等。

实验采用石化装置典型可燃气体乙烯、丙烷等与空气的混合气体开展。

1.2 实验过程

为保证实验过程的安全,在管道末端安装爆破片,管道进出口设置远程控制开关阀。实验开始前开展气密性检查,确保实验管道无泄漏;配气采用动态配气,通过置换 5~10 倍实验管道体积的实验气体

来确保实验气体满足对体积分数的要求。点火前关闭进出气阀, 通过高压放电点火装置远程点火, 点火同步触发火焰速度和压力采集系统。当开展正压实验时, 通过管道上的静压表来确定实验压力。

2 实验结果与讨论

管道内火焰传播由爆燃、爆燃转爆轰、最后发展为爆轰已经有很多学者研究, 这里不做赘述。本文中主要关注可燃气体积分数、管径等对火焰传播的影响。

2.1 体积分数影响

图 2~3 给出了 C_2H_4 体积分数不同的 C_2H_4 /空气混合物在爆轰段 ($146D \sim 228D$) 的火焰传播压力和火焰传播速度。每组工况开展 5 次重复实验, 其中误差定义为测量值与平均值的最大差值(包括正误差与负误差, 下同)

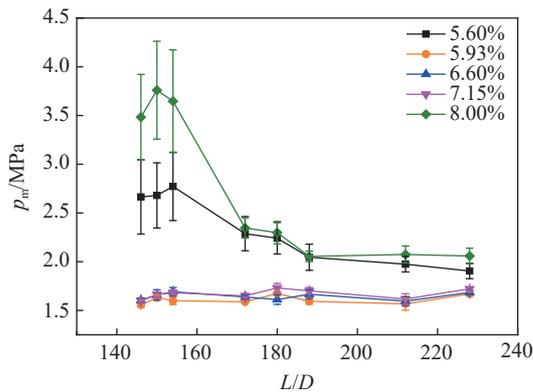


图 2 不同 C_2H_4 体积分数下 C_2H_4 /空气爆轰传播压力

Fig. 2 Detonation pressure of different C_2H_4 concentrations in air

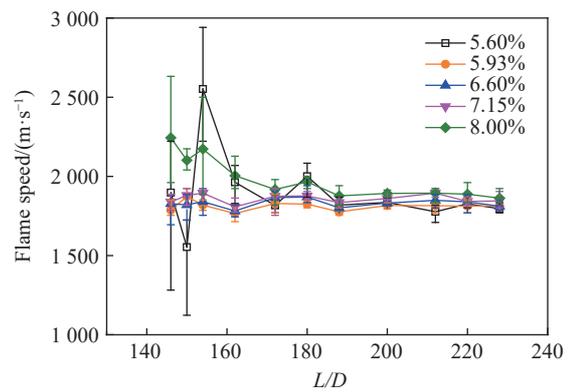


图 3 不同 C_2H_4 体积分数下 C_2H_4 /空气混合物爆轰传播速度

Fig. 3 Detonation flame speed of different C_2H_4 concentrations in air

由图 2~3 可以看到, 当 C_2H_4 /空气混合气体中 C_2H_4 体积分数为 5.93%, 6.6% 和 7.15% 时, 火焰传播速度和压力均呈现出较为稳定的特性, 多次实验的数据重复性较好, 当火焰传播至 $150D$ 以后即形成了稳态爆轰, 速度约为 1800 m/s , 与 CJ 理论爆轰速度接近。而当 C_2H_4 体积分数为 5.6% (贫燃工况) 时, 火焰速度和爆炸压力波动均较大, 且随着火焰的进一步传播呈现逐渐降低的规律, 并在 $190D$ 以后逐渐形成稳态爆轰; 这主要是由于该体积分数下, 相对过量的空气吸收了燃烧产生的热量, 一定程度上削弱爆轰反应, 使得需要更长的火焰传播距离发展成为稳态爆轰, 同时稳态爆轰火焰速度略低于 C_2H_4 体积分数为 6.6% 时稳态爆轰速度。而当 C_2H_4 体积分数为 8% (富燃工况) 时, 火焰速度和爆炸压力与贫燃工况类似, 均呈现较大的波动, 这主要是由于随着 C_2H_4 体积分数的增加, 导致在非稳态爆轰区的反应速率增大, 支持非稳态爆轰波传播所需要的化学反应热能释放率也相应升高, 进而增高了非稳态爆轰波传播的速度和压力, 导致爆轰加速距离增长, 这一现象与夏昌敬等^[15] 实验观察到的比较一致。

有趣的是, 由图 2~3 可以看出, 随着 C_2H_4 体积分数的提高, 爆轰速度呈现微弱的提高, 而爆轰压力却未呈现相同的规律, 特别是 C_2H_4 体积分数为 5.6% 时, 其爆轰压力要高于 C_2H_4 体积分数为 5.93%, 6.6% 和 7.15% 对应的爆轰压力值, 这主要是由于当 C_2H_4 体积分数为 5.6% 时, 爆轰还处于一定的过驱状态, 并未完全稳态, 这从图 2 可以看出, 其压力值还存在一定的下降趋势, 并未实现相对稳态。

对于石化装置连通管道, 可燃气体积分数多处于贫燃或富燃工况, 在阻火器选用安装时, 应当选用爆轰阻火器, 安装位置距离可能点火点在标准^[16] 建议(大于 120 倍管径)的基础上可适当增加安全裕量。

2.2 管径影响

考虑到实验的稳定性及可操作性, 本节研究中分别采用 C_2H_4 体积分数为 6.6% 的 C_2H_4 /空气混合气与 C_3H_8 体积分数为 4.2% 的 C_3H_8 /空气混合气开展实验。

图 4 给出了 $50 \sim 500 \text{ mm}$ 等 9 种不同管径下两种可燃气体/空气混合气的管道火焰爆轰传播速度, 由

图 4 可以看出, 从可燃气体种类来看, 体积分数为 6.6% 的 C₂H₄/空气混合气体的爆轰速度要大于体积分数 4.2% 的 C₃H₈/空气混合气体, 这主要是由于 C₂H₄ 化学反应活性高于 C₃H₈, 火焰燃烧反应强度更高所致; 从管径来看, 随着管径的增加, 爆轰速度并未呈现明显的变化, 这说明爆轰速度与管径基本无关。

由于火焰处于爆轰传播状态时, 其速度与管径基本无关, 采用 3 个特征点速度偏差值对速度进行表征。ISO16852 标准^[14]中提出采用火焰速度偏差来判断是否达到稳态爆轰状态, 即 3 个速度的最大偏差不超过 10% 即认为是爆轰状态。其火焰速度传感器布置如图 5 所示。其中, $L_1 \geq 3D$, 且 $L_1 \geq 100$ mm, $L_2 \geq 500$ mm, $2L_1 + L_2 > 30D$, 其中 D 为管道内径, 单位 mm。

定义无量纲量速度偏差 δ 为最大速度 v_{\max} 相较最小速度 v_{\min} 的偏差, 即 $\delta = (v_{\max} - v_{\min}) / v_{\min}$ 。

最大速度偏差 δ_{\max} 定义为多组重复实验中的速度偏差最大值。

为了更好地反映不同尺寸管径内火焰的传播特性, 压力采用无量纲化处理, 即采用爆轰压力 p_m 与初始压力 p_0 的比值 (p_m/p_0) 作为比较爆轰压力的参数。

图 6 给出了 50~500 mm 等 9 种不同管径下爆轰压力与初始压力 (p_m/p_0) 的关系。其中实线分别为不同管径下对应的 p_m/p_0 值, 虚线分别为 p_m/p_0 值的偏差范围, 即 $\pm 20\%$ 上下限值。从图 6 中可以看出, 管径从 50 mm 增大到 500 mm, p_m/p_0 相对稳定, 均在 12~19 之间。ISO16852 标准^[14]将管径与 p_m/p_0 的关系进一步分为 4 个区间, 如表 4 所示, 并认为 20% 以内的偏差都可以认为是稳态爆轰。由表 4 可以看出, p_m/p_0 值随着管径的增大而逐渐增大, 呈现正相关性。而图 6 中, p_m/p_0 值并未随管径增大而呈现明显增大趋势, 9 种规格管道内 p_m/p_0 平均值为 15.17, 相对偏差为 (-11.27%~12.13%)

根据图 5 所示测得的 3 个位置点速度的 δ_{\max} 与管径的关系如图 7 所示。其中, 虚线为 ISO16852 给出的管道直径分界值, 分别为 80 和 150 mm; 下同图 10, 不再赘述。由图 7 可以看出, 对于 50~500 mm 等 9 种管径下测得的 δ_{\max} 最大为 8.9%, 均不超过 10%, 且管径越大, 其 δ_{\max} 越小。图 10 同样呈现相近的规律。 δ_{\max} 与管径呈现负相关性, 这主要是当管径增加后, 可燃气体体积增大导致反应能量增加, 管道边界层对爆轰火焰影响相对减小, 进而使得爆轰火焰更为稳定。

特别的, 这里以 50 mm 管径为例, 其 3 个测点的速度及速度偏差如图 8 所示, 共开展 4 组重复实验, 在 4 组重复实验中, δ_{\max} 值为 8.52%, δ_{\min} 值为 4.02%, 符合 ISO16852 标准^[14]中通过速度判定稳态爆轰的准则。

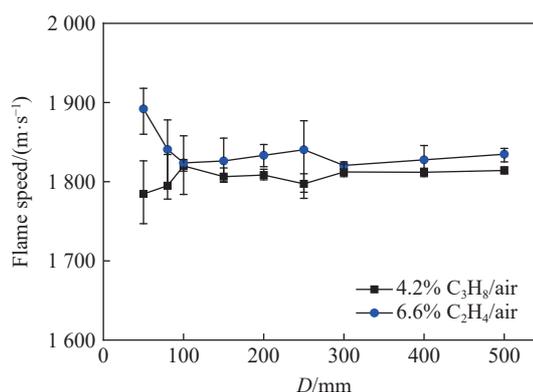


图 4 不同管径下管道火焰爆轰速度

Fig. 4 Detonation speed of different pipe diameters



图 5 ISO16852 标准关于爆轰速度的位置设置

Fig. 5 Location settings of detonation speed in ISO16852

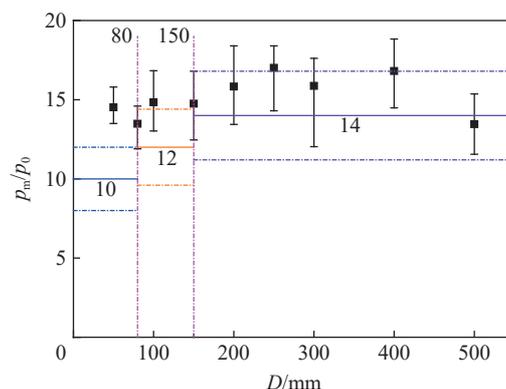


图 6 爆轰火焰无量纲压力 p_m/p_0 值与管径关系 (6.6% C₂H₄/空气)

Fig. 6 Relationship between p_m/p_0 and pipe diameters (6.6% C₂H₄/air)

表 4 ISO16852 标准的 p_m/p_0 参考值

Table 4 p_m/p_0 given by ISO16852

介质	$D \leq 80$ mm	$80 \text{ mm} < D \leq 150$ mm	$150 \text{ mm} < D < 1000$ mm	$D \geq 1000$ mm
C ₃ H ₈ /空气	10±2	12±2.4	14±2.8	16±3.2
C ₂ H ₄ /空气	10±2	12±2.4	14±2.8	16±3.2

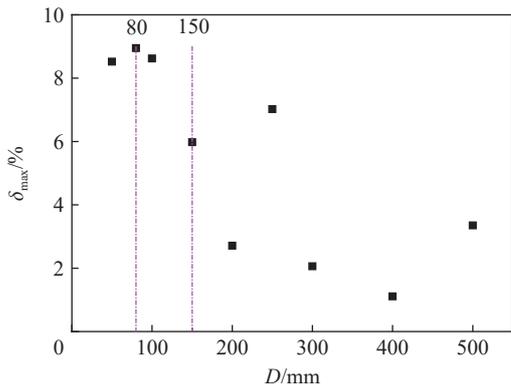


图 7 不同管径下火焰 δ_{\max} 值(6.6% C_2H_4 /空气)

Fig. 7 δ_{\max} in different pipes (6.6% C_2H_4 /air)

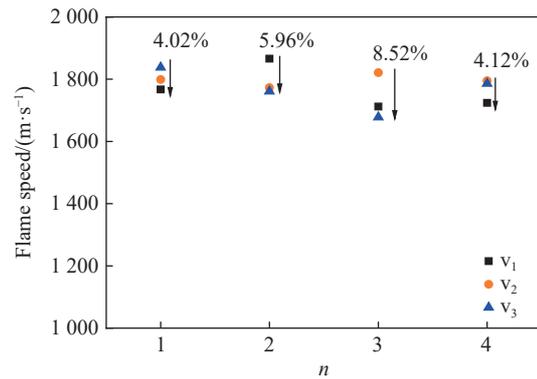


图 8 50 mm 管道不同位置处火焰速度(6.6% C_2H_4 /空气)

Fig. 8 Flame speed at different positions in 50 mm pipeline (6.6% C_2H_4 /air)

进一步采用 C_3H_8 /空气混合气作为实验介质,其结果如 C_2H_4 /空气混合气类似,具体如图 9~10 所示。图 9 中, p_m/p_0 值并未随管径增大而呈现明显增大趋势,9 种管径下 p_m/p_0 平均值为 14.47, 相对偏差为 (-6.37%~+6.21%)。Christoph 等^[17]提到 ISO16852 标准^[14]中 p_m/p_0 值的确定是依据 Lietze 通过可燃气体直接起爆得到的,而在文中 Christoph 等^[17]测得的 p_m/p_0 也未能与标准值对应,这可能是由于直接起爆的爆轰压力与火焰逐渐发展成为稳态爆轰的压力并不完全一致。在火焰传播逐渐发展成为爆轰的过程中,火焰与管道壁面热交换、管道边界层的影响等均会造成火焰能量的损失,进而导致稳态爆轰压力与直接起爆的压力不同。进一步可以看出,当管径增大到 100 mm 以上时,实验测得的 p_m/p_0 值与表 4 中的值吻合度较高,这主要是由于管径增大后,边界层对火焰爆轰压力的影响相对减小导致。对比图 6 和图 9,当采用 C_2H_4 /空气混合气时,即便管径增大后,实验测得的 p_m/p_0 值与表 4 中的值也存在一定的偏差,这说明 p_m/p_0 与气体介质有关系,需要进一步研究。

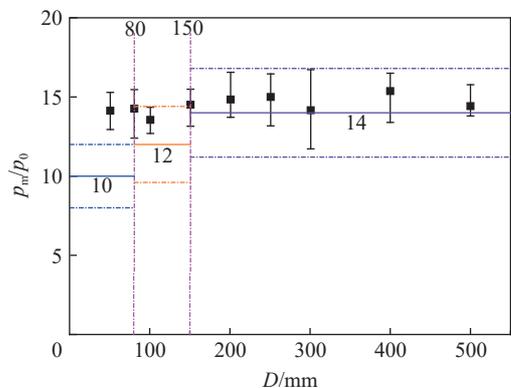


图 9 管径与爆轰火焰 p_m/p_0 关系(4.2% C_3H_8 /空气)

Fig. 9 Relationship between p_m/p_0 and pipe specifications (4.2% C_3H_8 /Air)

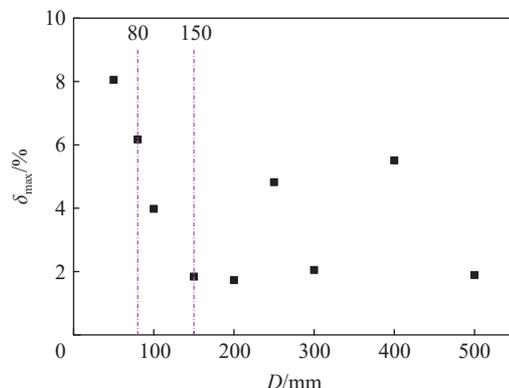


图 10 不同管径下火焰 δ_{\max} 值(4.2% C_3H_8 /空气)

Fig. 10 δ_{\max} in different pipes (4.2% C_3H_8 /Air)

由图 6、图 9 可以看出,管道爆轰压力并未随管道管径的增大而呈现明显的增大过程,而是与气体的种类有一定的关系,对于 C_2H_4 /空气混合气(C_2H_4 体积分数为 6.6%),其爆轰压力是初始压力的 15.17 倍,而对于 C_3H_8 /空气混合气(C_3H_8 体积分数为 4.2%),其爆轰压力是初始压力的 14.47 倍。在设计连通管道承受爆轰冲击时,特别是对于小管径管道(如 DN150 以下),应适当提高压力。

3 结 论

本文中搭建了罐区连通管道典型尺寸(50~500 mm)的管道火焰传播行为实验装置,并开展一系列实验研究,主要得到以下结论。

(1) 可燃气体积分分数对火焰传播及爆轰有一定影响, 当可燃气体处于或接近化学计量浓度时, 爆轰加速距离更短, 更易形成稳态爆轰, 而当可燃气体/空气混合气为贫燃或富燃状况时, 爆轰加速距离则会延长, 爆轰速度与可燃气体浓度呈现正相关性。在阻火器选用、安装时应考虑爆轰影响。

(2) 火焰爆轰传播速度、爆轰压力与管道管径基本无关, 受可燃气体种类影响更大; 特别是中小管道 (150 mm 以下) 爆轰压力要远高于 ISO16852 标准^[14] 给出的参考值, 在管道设计时应特别注意。

参考文献:

- [1] 王鹏, 白永忠, 党文义, 等. 储罐 VOCs 安全收集零排放装置: CN110143376B [P]. 2018-02-13.
- [2] PROUST C. Gas flame acceleration in long ducts [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015, 36: 387–393. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.04.001.
- [3] WANG L Q, MA H H, SHEN Z W, et al. Effects of bluff bodies on the propagation behaviors of gaseous detonation [J]. *Combustion & Flame*, 2019, 201: 118–128.
- [4] CICCARELLI G, DOROFEEV S. Flame acceleration and transition to detonation in ducts [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2008, 34(4): 499–550. DOI: 10.1016/j.pecs.2007.11.002.
- [5] 周凯元, 李宗芬. 丙烷-空气爆燃波的火焰面在直管道中的加速运动 [J]. *爆炸与冲击*, 2000, 20(2): 137–142. ZHOU K Y, LI Z F. Flame front acceleration of propane-air deflagration in straight tubes [J]. *Explosion and shock waves*, 2000, 20(2): 137–142.
- [6] CICCARELLI G, WANG Z, LU J, et al. Effect of orifice plate spacing on detonation propagation [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, 49(9): 739–744. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.03.014.
- [7] 周宁, 王文秀, 张国文, 等. 障碍物对丙烷-空气爆炸火焰加速的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(5): 1106–1114. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0049. ZHOU N, WANG W X, ZHANG G W, et al. Effect of obstacles on flame acceleration of propane-air explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(5): 1106–1114. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0049.
- [8] ZHANG B. The influence of wall roughness on detonation limits in hydrogen-oxygen mixture [J]. *Combustion and Flame*, 2016, 169(7): 333–339. DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.05.003.
- [9] 司荣军. 管道内瓦斯爆炸传播试验研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2009, 37(2): 47–50. SI R J. Test and research on gas explosion transmission in pipeline [J]. *Coal Science and Technology*, 2009, 37(2): 47–50.
- [10] ZURAJI A A, ZANGANEH J, MOGHADDERI B. Application of flame arrester in mitigation of explosion and flame deflagration of ventilation air methane [J]. *Fuel*, 2019, 257(1): 115985. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.115985.
- [11] LIU Q M, BAI C H, LI X D, et al. Coal dust/air explosions in a large-scale tube [J]. *Fuel*, 2010, 89(2): 329–335. DOI: 10.1016/j.fuel.2009.07.010.
- [12] 蒋新生, 谢威, 赵亚东, 等. 不同长径比的狭长管道油气爆炸实验 [J]. *油气储运*, 2020, 39(8): 879–884. JIANG X S, XIE W, ZHAO Y D, et al. Experimental study on gasoline air mixture explosion using long-narrow pipes with different aspect ratios of oil storage and transportation engineering [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2020, 39(8): 879–884.
- [13] 孙少辰, 毕明树, 刘刚, 等. 爆轰火焰在管道阻火器内的传播与淬熄特征 [J]. *化工学报*, 2016, 67(5): 2176–2184. SUN S C, BI M S, LIU G, et al. Detonation flame propagation and quenching characteristics in crimped-ribbon flame arrester [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2016, 67(5): 2176–2184.
- [14] ISO/TC 21 Equipment for fire protection and fire fighting: ISO16852:2016 [S/OL]. 2016.
- [15] 夏昌敬, 周凯元, 沈兆武. 初始条件影响气体非稳态爆轰波在弯管中传播特性的实验研究 [J]. *中国科学技术大学学报*, 2004(1): 95–100. XIA C J, ZHOU K Y, SHEN Z W. Experimental study on effects of initial conditions for propagation characteristics of unsteady gaseous detonation in channels with a bend [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2004(1): 95–100.
- [16] BSI Standards. Guide for the selection, application and use of flame arresters: CEN16793 [S]. 2016.
- [17] KERSTEN C, FORSTER H. Investigation of deflagrations and detonations in pipes and flame arresters by high-speed framing [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2004, 17: 43–50. DOI: 10.1016/j.jlp.2003.09.004.

(责任编辑 王易难)