

侧泄爆口数量对受限空间内氢气甲烷爆炸特性的影响

杨杰, 张好

重庆科技大学安全工程学院, 重庆

收稿日期: 2024年3月10日; 录用日期: 2024年3月31日; 发布日期: 2024年4月24日

摘要

为了减少受限空间内氢气甲烷爆炸的危害, 采用实验的方法在方形管 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 1000\text{ mm}$ 中开展爆炸试验, 借助高速摄像技术和压力采集技术, 研究了侧泄爆口数量对掺氢甲烷爆炸特性影响。结果表明: 当第一个泄爆口开设在距离点火源 200 mm 时, 随着泄爆口数量的增加, 火焰在传播至第一个泄爆口的速度不受泄爆口数量的影响, 火焰经过泄爆口后, 火焰结构被破坏失去加速的基础。火焰在两个泄爆口之间时, 在流场的作用下会略微加快火焰速度。但增加泄爆口的数量, 下游的超压越来越小, 但上游超压双口泄爆和三口泄爆的相差不大。

关键词

氢气, 甲烷, 泄爆, 超压

Effect of the Number of Side Vents on the Explosive Characteristics of Hydrogen-Methane in Confined Spaces

Jie Yang, Hao Zhang

School of Safety Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Mar. 10th, 2024; accepted: Mar. 31st, 2024; published: Apr. 24th, 2024

Abstract

In order to reduce the hazards of hydrogen methane explosion in the confined space, using experimental methods in the square tube $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 1000\text{ mm}$ to carry out explosion tests,

with the help of high-speed camera technology and pressure acquisition technology, the study of the number of side relief ports on the hydrogen-doped methane explosion characteristics. The results show that: when the first vent opened in the distance from the ignition source 200 mm, with the increase in the number of vents, the flame propagation to the first vent speed is not affected by the number of vents, the flame through the vent, the flame structure is destroyed to lose the basis of acceleration. Flame propagation is slightly accelerated by the action of the flow field when the flame is between two vents. However, increase the number of vents, the downstream overpressure is getting smaller, but the upstream overpressure double-ported relief and three-ported relief is not much difference.

Keywords

Hydrogen, Methane, Explosion Venting, Overpressure

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,天然气掺氢技术在能源领域得到广泛关注。通过掺氢可以减少碳排放,提高能源利用效率,并促进可再生能源的大规模应用。全球都在积极推动掺氢技术的发展和应用,以应对气候变化和能源安全等挑战。但是氢气的掺入会提高可燃气体危险性。掺氢天然气在发生泄漏后,若在受限空间内积聚,可能会引发严重的安全风险[1],这种情况下,气体的混合比例和特性可能导致更快的燃烧速度和更高的火灾爆炸风险,从而增加人员伤亡和财产损失的可能性。

王玮等[2]评估分析了天然气在不同混氢比下的燃气互换性和燃烧特性,发现随着混合气体中氢气体积分数的增加,燃具的热负荷下降,燃气的火焰传播速度急剧增大,燃具发生回火的风险增大。郑凯[3]通过开展了闭口管道氢气/甲烷预混火焰传播实验,发现添加氢气能够明显缩短火焰传播到管道出口所需时间,同时爆炸压力峰值随着氢气体积分数增大而增大。Manh-Vu Tran 等[4]发现混合燃料中 H_2 含量的增加提高了最大爆炸压力,显著缩短了爆炸时间。余明高等[5]发现当氢气体积分数小于 50%时,爆炸特性受氢气体积分数和障碍物阻塞率共同的影响。因此,控制掺氢天然气爆炸是一个急需解决的重要安全问题。

泄爆是常用的降低爆炸危害的控制技术,但泄爆效果受到诸多因素的影响,如泄爆口的布局、尺寸、数量、障碍物以及开启时间等。Huaduo Xing 等[6]通过泄爆口密闭、开口面积、点火位置,对甲烷爆炸的影响进行了研究。王金贵等[7]研究了泄爆口尺寸对甲烷泄爆时的影响,火焰未达到泄爆口之前,火焰上部的平均速度随着泄爆尺寸增大而出现降低的趋势。Minggao Yu 等[8]发现,在同一侧泄爆位置,在大尺寸泄爆口会增加火焰在管道内的传播时间,甲烷爆炸的峰值超压会显著衰减,泄爆效果得到显著提升。Ajrash 等[9]研究侧向泄爆对甲烷爆燃时的影响,发现侧向泄爆位置与火焰传播速度和超压发展存在显著的相关性。Chuanyu Pan 等[10]在研究在泄放汽油蒸汽爆炸中对容器顶部的影响。发现管道中的最大爆炸超压和爆燃指数随着侧泄爆口与点火器之间距离的增加而线性增加。

综上所述,以往的研究主要集中在单口泄爆,而多口泄爆作用下受限空间内的爆炸特性还有待进一步研究。为此,本文采用实验的方法,探讨了受限空间内掺氢甲烷在侧泄爆口数量的影响下的变化规律。

2. 试验

试验平台

图 1 所示为自主搭建的实验平台。主要包括实验管道、配气系统、压力采集系统、高速摄像系统以及点火系统组成。爆炸管道尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 1000\text{ mm}$ ，由有机玻璃 PMMA 制成，可以清晰完整的记录管道内火焰发展的过程，且管道上侧设有三个的泄爆口，可以调整其开合状态，泄爆口尺寸为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ ，每个泄爆口中心距离点火源的距离分别为 200 mm 、 400 mm 、 600 mm ，为了便于分析和讨论，对泄爆口从左往右依次命名为泄爆口 1、泄爆口 2、泄爆口 3。考虑到实验的安全性，在管道末端增设了一圆形泄爆口，如图 2 所示。配气系统包括氢气气瓶、甲烷气瓶、空气压缩机和 3 个高灵敏度质量流量控制计构成。压力采集系统由两个压力传感器和冲击测试仪组成，压力传感器分别设置在管道两端。高速摄像系统由 PhantomV710L 高速摄像机和摄像机控制软件(Phantom Camera Control, PCC)组成，采样频率 2000 fps ，曝光时间 490 us ，分辨率 1280×320 像素。点火系统由点火头、高压脉冲点火器和点火控制器组成，电源输入电压为 6 V ，在点火位置焊接两根直径 0.1 mm 的铂丝，产生高温火花。

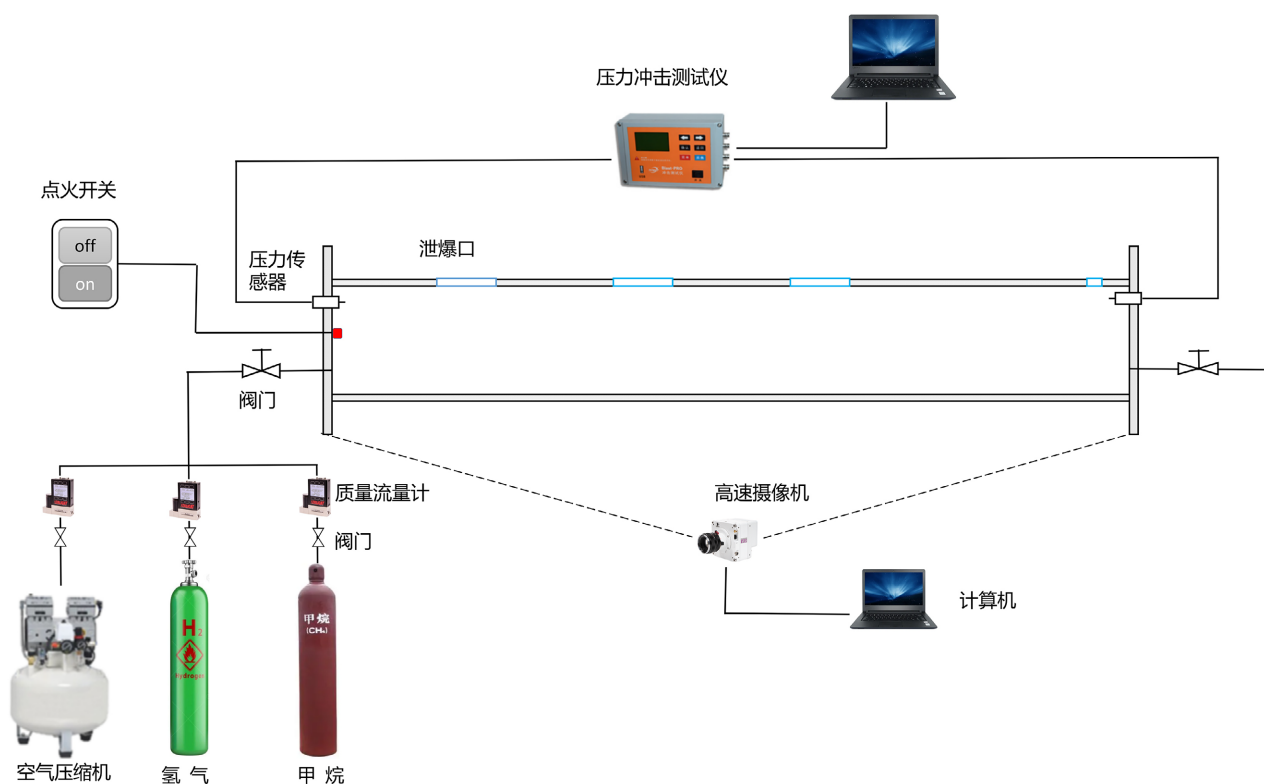


Figure 1. Experimental setup diagram

图 1. 实验装置图

实验在室内实验室进行，平均温度为 25°C ，管内初始压力为 $101,325\text{ Pa}$ 。实验前按照图 1，组装设备并调试设备，确保所有设备能正常工作，并用 PVC 膜将所有泄爆口密封。本文采用当量比为 1 时，氢气体积分数为 10% 的氢气甲烷预混气体，为了避免气体混合不均匀对实验效果的影响，利用四倍体积法将气体混合输送到实验管道内，通气时间为 8 min 。通气完成后，静置管内预混气体约 30 s 。高速摄像系统、压力采集系统和点火系统采用同步触发的方式，保证能够同时采集到火焰和压力数据。为了保证

实验的准确性, 在表 1 所示的实验工况中, 每组实验重复 3~4 次。

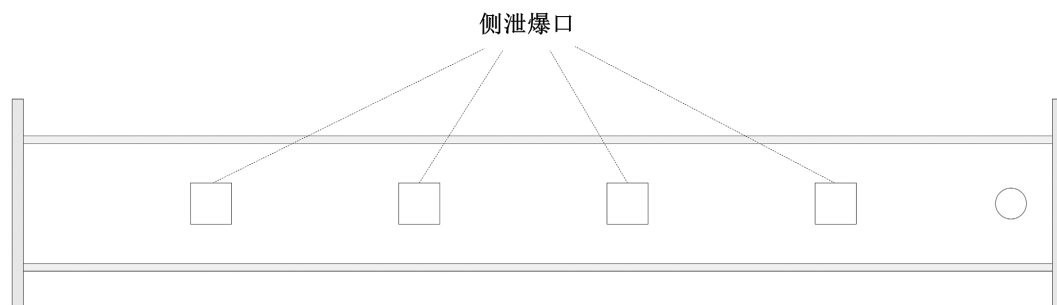
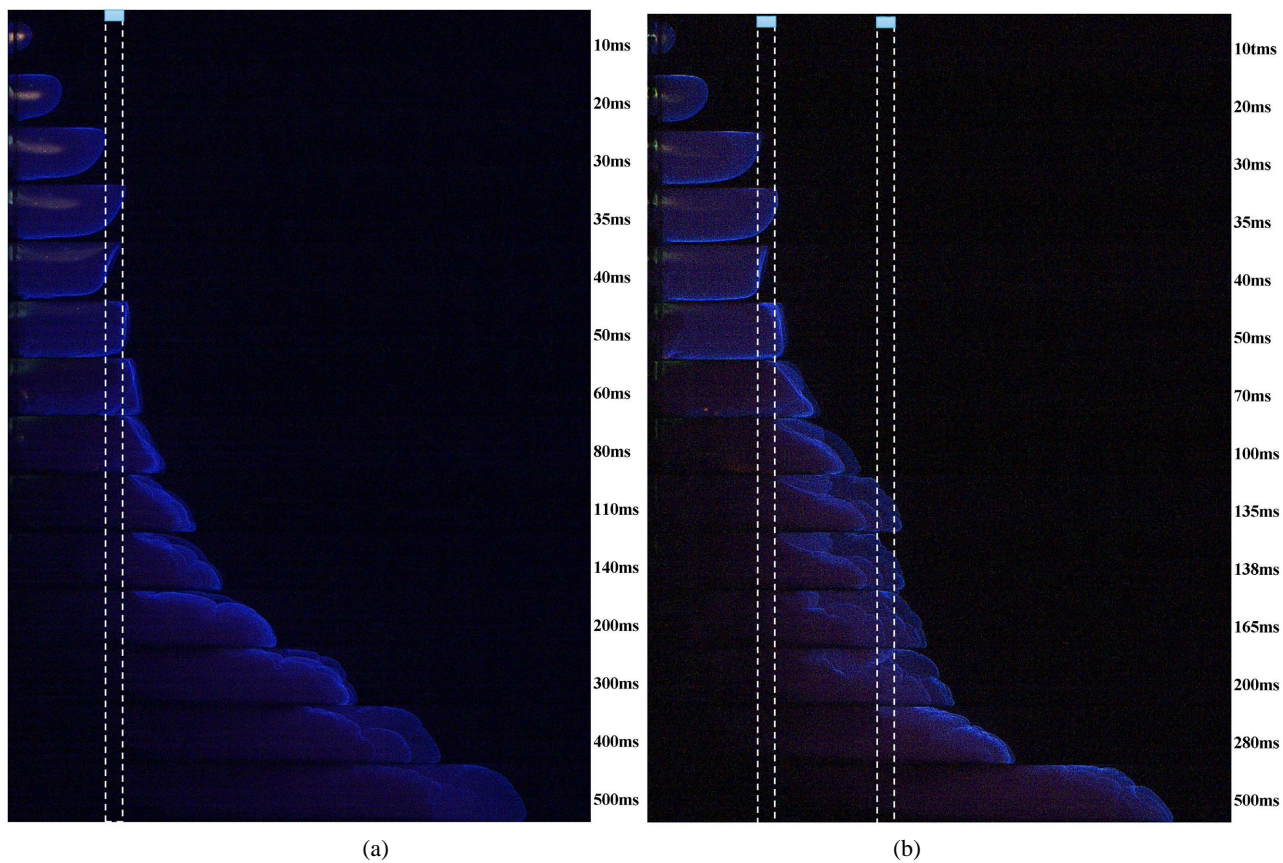


Figure 2. Position of the vent
图 2. 泄爆口位置图

Table 1. Experimental condition
表 1. 实验工况

序号	泄爆口数量	位置
工况 1	1	200 mm
工况 2	2	200 mm~400 mm
工况 3	3	200 mm~400 mm~600 mm

3. 结果与分析



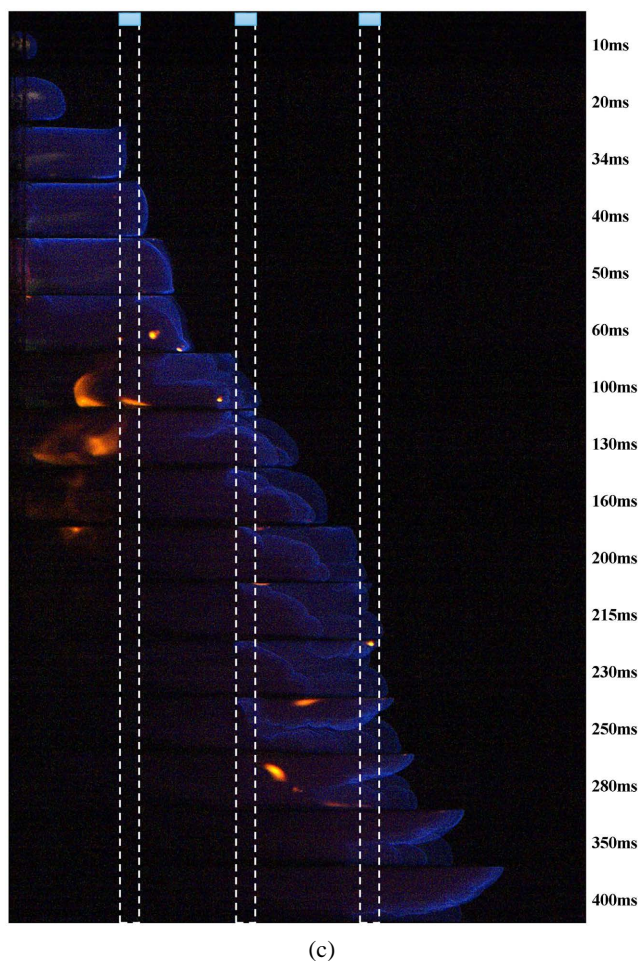


Figure 3. Changes in flame structure; (a) Case 1; (b) Case 2; (c) Case 3
图 3. 火焰结构变化; (a) 工况 1; (b) 工况 2; (c) 工况 3

图 3 显示了不同数量单泄爆口时的火焰结构变化情况。从图中可以发现, 在到达第一个泄爆口前, 火焰的变化均类似, 火焰结构由“球形”火焰转变为“指形”火焰[11]。当火焰前锋在接近侧泄爆口时, 受到侧泄爆口泄放效应的影响, 靠近管道上壁的火焰传播速度逐渐增大, 在火焰前锋上形成大的速度梯度, 引起 Kelvin-Helmholtz 不稳定性并形成湍流[12], 火焰前锋开始变形, 随后火焰和未燃气体一起被泄放至管道外, 同时火焰传播速度迅速降低。在图 3 中 $t = 35 \text{ ms}$ 时, 上端火焰越过泄爆口, 下端火焰逐渐向内凹陷, 此时火焰传播速度小于泄放速度, 但随着反应的继续以及负压的作用下, 火焰下端开始膨胀, 但火焰上端仍受泄爆口影响, 火焰贴着下壁传播。但是在工况 3 时, 火焰经过第三个泄爆口后贴着上壁燃烧, 这可能是由于负压, 被泄放的未燃气体在压差的作用下回流造成的。之后火焰以较低速度传播至管道末端。

图 4、图 5 展示了火焰传播速度和位置变化图。火焰到达第一个泄爆口时, 此时已经达到最大火焰传播速度分别为 13.11 m/s (工况 1)、 13.48 m/s (工况 2)、 13.35 m/s (工况 3), 火焰传播至第一个泄爆口时的火焰传播速度相差不大, 然后火焰速度迅速下降, 并以较低的速度向前发展。综上可以发现火焰前锋到达同一位置的相应时间基本相同均为 30 ms , 这与泄爆口的数量无关。但从图 5 可以发现, 在设置多个侧泄爆口时, 当越过第一个泄爆口后, 同一时间火焰传播的距离增加, 且火焰传播至管道末端所需要的时间缩短。这是因为对于工况 1 当火焰经过第一个泄爆口后, 仅受到第一个泄爆口的泄放作用, 但对于工况 2 和工况 3, 第二个和第三个泄爆口此时同样在作用, 因此与第一个泄爆口形成竞争, 使得内部

流场对火焰传播速度有一定的促进作用。但是从图中发现火焰经过泄爆口后都会得到衰减, 且火焰传播速度主要受第一个泄爆口的影响。

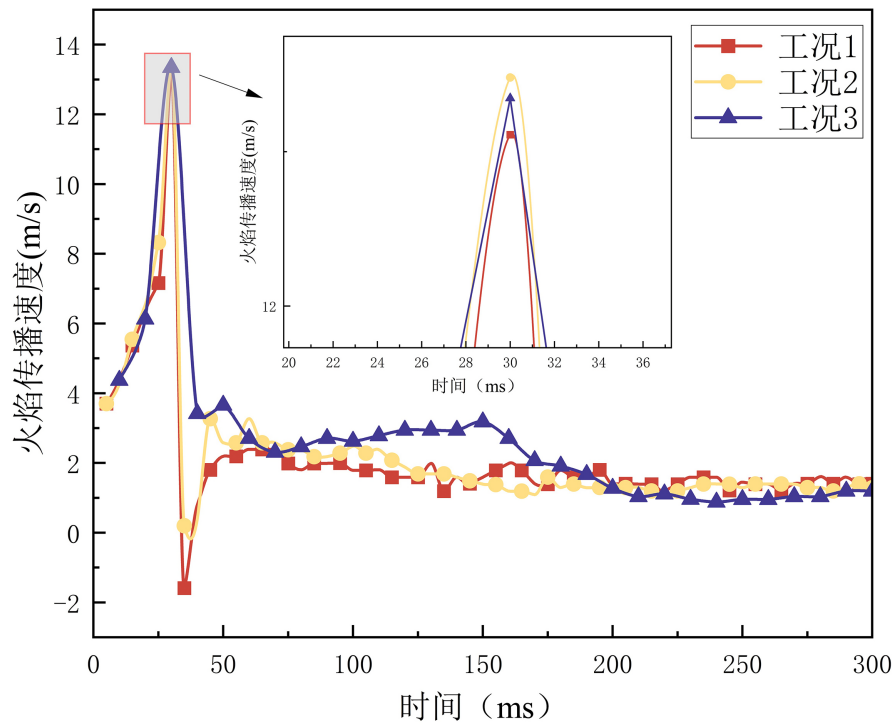


Figure 4. Velocity change of the flame front
图 4. 火焰传播速度变化图

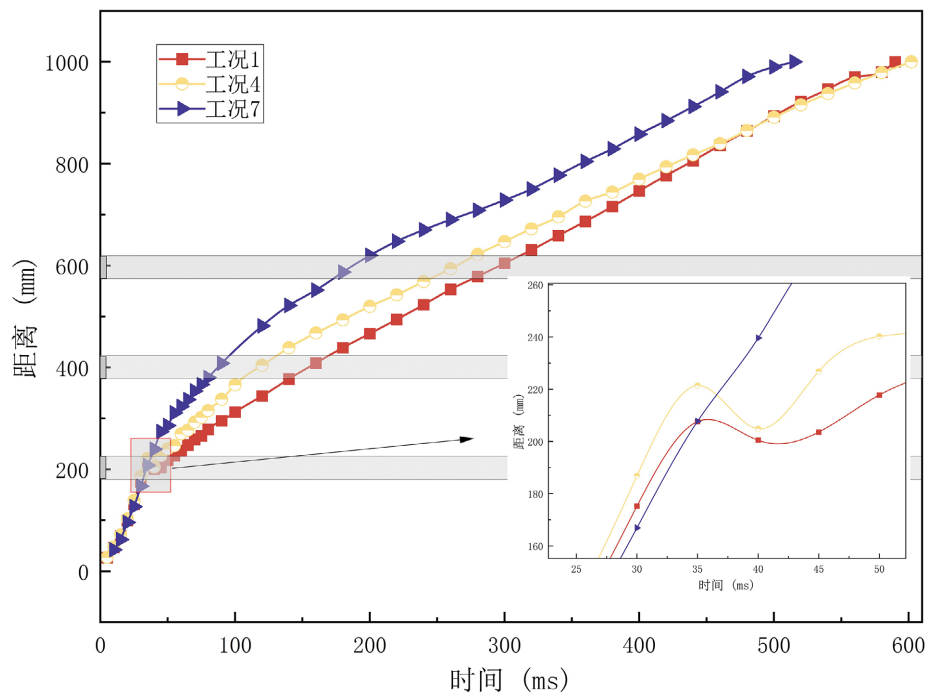


Figure 5. Flame propagation distance in a pipeline
图 5. 火焰在管道中的传播距离

图 6 显示了不同数量泄爆口在管道内上下游超压随时间的变化情况。三个工况下的压力变化情况基本相似, 点火后, 氢气 - 甲烷 - 空气预混气体迅速反应, 燃烧产物迅速膨胀并压缩周围气体, 导致在压缩波的影响下, 管内压力迅速上升, 均在在 20 ms 左右时, 管道内的超压达到临界值, 泄爆膜破裂, 压力迅速降低, 出现第一个压力峰值为泄爆压力, 但由于惯性作用, 使得压力下降至负压。随后管道内气体燃烧反应速率加快, 压力开始上升, 出现最大超压峰值分别为 16.77 kPa、13.83 kPa、13.84 kPa, 且对应此时的火焰处于泄爆口附近。分析原因主要是当火焰传播至泄爆口时, 由于泄爆口的局部阻碍作用, 使得附近的局部压力急剧上升, 泄爆口附近局部未燃气体被加热压缩, 加剧了火焰的湍流反应, 使得压力升高, 而压力的升高会和湍流火焰的进一步相互作用。但是随着泄爆口数量的增加, 超压均得到衰减, 但泄爆口数量在 2 个以上时对上游超压的作用不明显, 这是因为泄爆口 2 和泄爆 3 作用后, 部分未燃气体也被泄放至管道外, 使得管道内燃料浓度降低。对于下游超压, 不同工况对应的超压峰值分别是 7.75 kPa、6.89 kPa、5.98 kPa, 说明侧向泄爆口对下游超压具有很明显的衰减作用, 且随着泄爆口数量的增加, 超压峰值越小。

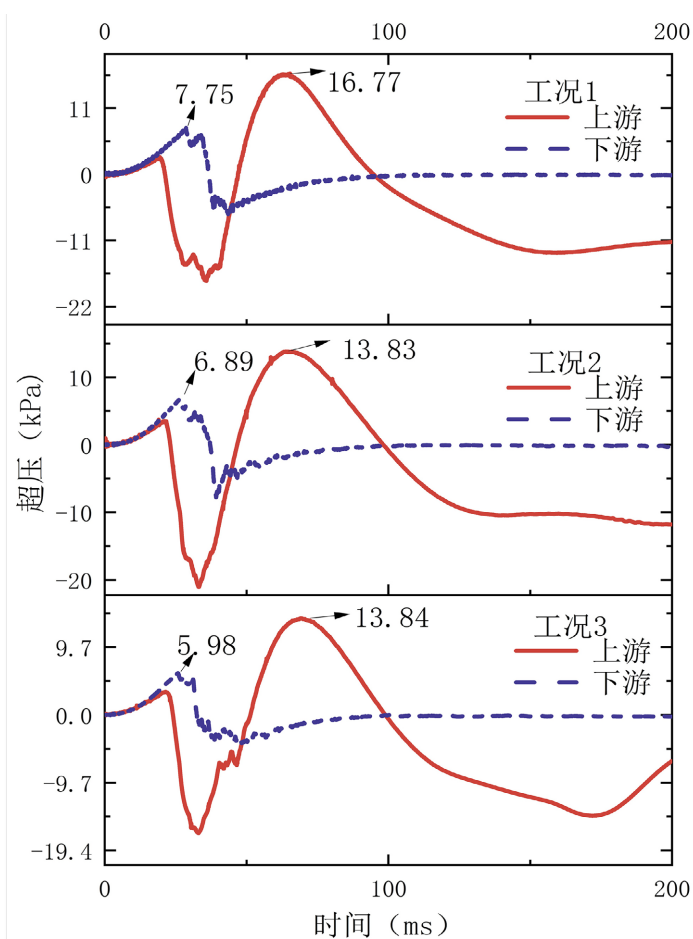


Figure 6. The overpressure of different conditions

图 6. 不同工况超压图

4. 结论

- 1) 火焰在到达第一个泄爆口(200 mm)位置时的速度相差不大, 与泄爆口数量无关, 但是增加泄爆口

数量, 会使得火焰在泄爆口间的传播速度略微加快, 火焰一旦经过泄爆口, 传播速度会迅速受抑制。

2) 增加泄爆口数量更有利下游爆炸超压的衰减。与单口泄爆口相比, 设置两个泄爆口和三个泄爆口的时超上游压分别为衰减了 2.94 kPa 和 2.93 kPa, 上游超压在 2 个泄爆口和 3 个泄爆口时的效果相差不多; 下游超压分别衰减了 0.86 kPa、1.77 kPa, 随着泄爆口的数量的增加下游超压越小。

基金项目

重庆科技大学研究生创新计划项目(YKJ CX2220713)。

参考文献

- [1] Zhang, S., Ma, H., Huang, X., et al. (2020) Numerical Simulation on Methane-Hydrogen Explosion in Gas Compartment in Utility Tunnel. *Process Safety and Environmental Protection*, **140**, 100-110. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.04.025>
- [2] 王玮, 王秋岩, 邓海全, 等. 天然气管道输送混氢天然气的可行性[J]. 天然气工业, 2020, 40(3): 130-136.
- [3] 郑凯. 管道中氢气/甲烷混合燃料爆燃预混火焰传播特征研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [4] Tran, M.-V., Scribano, G., Chong, C.T., et al. (2018) Simulation of Explosion Characteristics of Syngas/Air Mixtures. *Energy Procedia*, **153**, 131-136. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.10.024>
- [5] 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.
- [6] Xing, H., Xu, Q., Song, X., et al. (2020) The Effects of Vent Area and Ignition Position on Pressure Oscillations in a Large L/D Ratio Duct. *Process Safety and Environmental Protection*, **135**, 166-170. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.12.030>
- [7] 王金贵, 胡超, 罗飞云, 等. 泄爆面积对甲烷-空气预混泄爆容器结构响应影响的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(4): 139-150.
- [8] Yu, M., Wan, S., Zheng, K., et al. (2018) Effect of Side Venting Areas on the Methane/Air Explosion Characteristics in a Pipeline. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **54**, 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.03.010>
- [9] Ajrash, M.J., Zanganeh, J. and Moghtaderi, B. (2018) Flame Deflagration in Side-on Vented Detonation Tubes: A Large Scale Study. *Journal of Hazardous Materials*, **345**, 38-47. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.11.014>
- [10] Pan, C., Li, G. and Wang, X. (2020) Effects of Top Vent Locations and Gasoline Volumes on Vented Gasoline Vapor Explosion in Closed Small-Scale Vessel. *Fuel*, **277**, Article ID: 118226. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118226>
- [11] Bychkov, V., Akkerman, V., Fru, G., et al. (2007) Flame Acceleration in the Early Stages of Burning in Tubes. *Combustion and Flame*, **150**, 263-276. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2007.01.004>
- [12] 胡俊, 万士昕, 浦以康, 等. 柱形容器开口泄爆过程中的火焰传播特性[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(4): 330-336.