

文章编号: 1003-1480(2024)03-0091-06

非对称泄爆条件下甲烷爆炸双向传播特性的研究

路长^{1,2}, 李明月¹, 郭洪江¹, 李世伟¹, 王健^{1,2}, 邵翔宇^{1,2}

(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 煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同创新中心, 河南 焦作, 454003)

摘要: 为探究非对称泄爆条件下甲烷爆炸双向传播特性, 利用自主搭建的小型爆炸试验系统, 对不同点火位置和左端泄爆口面积下甲烷爆炸双侧火焰传播速度和爆炸超压进行了试验研究。结果表明: 非对称传播情况下, 距离泄爆口较近的右侧火焰的传播速度更快; 左端泄爆口面积的减小会进一步促进右侧火焰传播, 同时抑制左侧火焰传播, 当泄爆口面积小于或等于 90 mm×90 mm 时, 左侧火焰出现逆流现象; 随着左端泄爆口面积的减小, 点火源两侧压力、压力差和最大压力上升速率均增大, 从而导致爆炸指数增大, 提高了爆炸危险性。

关键词: 甲烷爆炸; 非对称; 双向传播; 泄爆口面积; 爆炸压力

中图分类号: TJ530; TD712 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1480.2024.03.015

Study on the Bidirectional Propagation Characteristics of Methane Explosion under Asymmetric Venting Condition

LU Chang^{1,2}, LI Ming-yue¹, GUO Hong-jiang¹, LI Shi-wei¹, WANG Jian^{1,2}, SHAO Xiang-yu^{1,2}

(1. State Key Laboratory Cultivation Bases for Gas Geology and Gas Control, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, 454003; 2. State Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean-efficiency Utilization, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, 454003)

Abstract: In order to explore the bidirectional propagation characteristics of methane explosion in the context of asymmetric venting, a study was conducted using a customized small explosion test system. This study focused on analyzing the flame propagation velocity and explosion overpressure of methane explosion under varying ignition positions and in relation to the left venting area. The results show that the flame propagation speed on the right side near the vent is faster under the condition of asymmetric propagation; the reduction of the left vent area will further promote the flame spread on the right side and restrain the flame spread on the left side; when the left vent area is less than or equal to 90 mm × 90 mm, the flame on the left side appears countercurrent; with the decrease of the area of the left vent, the pressure, differential pressure and maximum pressure rise rate on both sides of the ignition source all increase, which leads to the increase of the explosion index and explosion risk.

Key words: Methane explosion; Asymmetric; Bidirectional propagation; Vent area; Explosion pressure

瓦斯爆炸是煤矿开采过程中最严重的灾害之一, 往往会造成大量的人员伤亡与财产损失^[1]。因此, 研究瓦斯爆炸的传播规律对其防治工作具有重要意义。国内外学者针对单向传播条件下的预混气爆炸特性

及影响因素进行了大量研究, 发现泄爆口是影响爆炸传播特性的重要因素。泄爆口的大小^[2-3]、位置^[4]、强度^[5]等对泄放效果及气体爆炸传播特性都有着重大影响。Wan 等^[6-7]研究了含障碍物管道内的侧向泄爆口

收稿日期: 2023-11-09

作者简介: 路长(1975-), 男, 教授, 主要从事火灾爆炸、煤矿安全等技术研究。

基金项目: 国家自然科学基金(No.51974107); 河南省双一流创建培育项目(AQ20230777); 河南理工大学创新型科研团队项目(T2021-4)。

引用本文: 路长, 李明月, 郭洪江, 等. 非对称泄爆条件下甲烷爆炸双向传播特性的研究[J]. 火工品, 2024(3): 91-96.

对甲烷/空气预混气爆炸特性的影响,发现泄爆口设置在点火源附近、障碍物之前的泄放作用更好。Sun 等^[8]在 $2.0\text{ m}\times 1.2\text{ m}\times 0.6\text{ m}$ 钢腔室内进行乙烯/空气混合气爆炸试验,结果表明,小尺寸泄爆条件下呈现双峰压力曲线,大尺寸泄爆条件下呈现单峰超压曲线。王金贵等^[9]开展了不同泄爆面积下甲烷/空气预混气泄爆试验,结果表明随着泄爆面积减小,第 1 个内部超压呈增大趋势。此外,Kindrack 等^[10]通过试验研究了密闭条件下点火位置和障碍物对甲烷/空气混合气爆炸特性的影响,结果表明火焰的传播和压力变化对点火位置、障碍物的大小和形状非常敏感。Kasmani 等^[11]研究表明,与末端点火相比,中心点火时的爆炸压力与火焰传播速度更低。Xiao 等^[12]研究表明点火位置在管道中心时,火焰震荡较弱。Xing 等^[13]研究了通风口面积与点火位置对压力振荡的影响,结果表明,中心点火时,只有在通风口面积较小时才会产生较大的压力峰值。

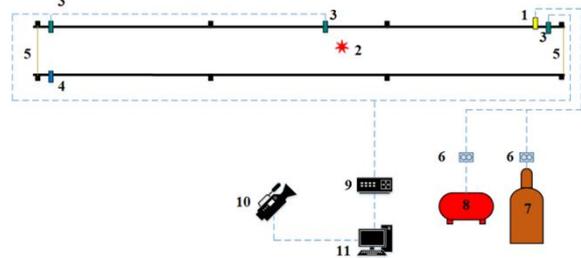
现有研究多为一端点火向另一端的单向传播,有关中间点火的文献也主要研究爆炸整体上的传播规律。而在实际的工业燃气管道或煤矿巷道中,发生爆炸的初始位置是不确定的,并且会向两侧同时传播。本文搭建了小型甲烷爆炸试验系统,研究了点火位置和泄爆口面积对甲烷爆炸双侧火焰传播速度和爆炸超压的影响规律,以期为防治瓦斯爆炸与降低事故损害提供一定的支持。

1 试验系统

1.1 试验装置

甲烷爆炸双向传播试验装置如图 1 所示,主要由管道、点火源、配气系统、数据采集系统 4 部分组成。其中,管道由厚度为 20 mm 的透明树脂玻璃制作而成,尺寸为 $150\text{ mm}\times 150\text{ mm}\times 3\text{ 000}\text{ mm}$ 。管道左、右两端泄爆口均采用 PVC 薄膜进行密封。进气口位于管道右端上表面,距离管道右端口 0.2 m ;排气口位于管道左端下表面,距离管道左端口 0.1 m 。点火源采用点火能量为 0.15 J 的脉冲点火器,通过高频脉冲方式形成高压,击穿空气放电产生电火花进行点火。

配气系统主要由空气压缩机、甲烷气瓶、质量流量计组成。数据采集系统主要由高速摄像机、压力传感器、数据采集卡、计算机等组成,3 个压力传感器分别置于管道左端上表面距离点火源 $0.1, 1.6\text{ m}$ 处和管道右端上表面距离右端口 0.1 m 的管道壁处。



注: 1 为进气口; 2 为点火源; 3 为压力传感器; 4 为排气口; 5 为 PVC 薄膜; 6 为质量流量计; 7 为甲烷; 8 为空气压缩机; 9 为数据采集卡; 10 为高速摄像机; 11 为计算机。

图 1 试验装置图

Fig.1 Test device sketch

1.2 试验过程

为了探究点火源位置及泄爆口面积对甲烷爆炸双向传播特性的影响,试验时,将点火源分别置于管道正中间和中间偏右 0.2 m 处,记为 $(0, 0)$ 和 $(0, 0.2)$;左端泄爆口尺寸分别选取 $150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 、 $120\text{ mm}\times 120\text{ mm}$ 、 $90\text{ mm}\times 90\text{ mm}$ 、 $60\text{ mm}\times 60\text{ mm}$ 、 $45\text{ mm}\times 45\text{ mm}$,共 5 种情况,如图 2 所示;右端泄爆口尺寸均为 $150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 。每组工况进行 3 次重复试验以减小试验误差。

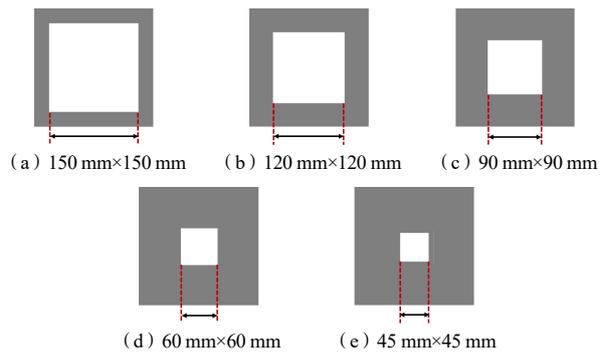


图 2 左端泄爆口尺寸图

Fig.2 Dimension drawing of left vent

试验前,检查管道气密性以及数据采集系统是否正常运行,检查合格后采用排气法进行配气。通过调整质量流量计参数使得甲烷、空气在三通阀内按照设定浓度预先混合均匀,再将预混气通入管道。甲烷预混气体积分数为 9.5% ,每分钟充入管道内的气体总体积为 20 L ,因此将甲烷、空气的质量流量计参数分

别设置为 $1.9 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $18.1 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 。为确保管道内预混气浓度达到预设值, 充入 4 倍管道体积的预混气, 根据公式 (1) 计算出充气时间为 13.5 min。

$$t = (1000 \cdot V \cdot N) / 20 \quad (1)$$

式 (1) 中: t 为充气时间, min; V 为管道体积, m^3 ; N 为管道体积倍数。

充气结束后, 将管道内预混气静置 10 min, 使其充分混合, 消除充气时初始湍流对爆炸的影响。然后点火引爆甲烷预混气, 记录、保存试验数据。每次试验结束后, 需要对管道进行通风, 排出管道内废气, 更换 PVC 薄膜, 为下次试验做准备。

2 试验结果与分析

2.1 对称与非对称情况下的爆炸传播特性

当左、右端泄爆口尺寸均为 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 时, 点火源分别位于 $(0, 0)$ 处和 $(0, 0.2)$ 处的对称和非对称传播情况下的甲烷爆炸火焰图像如图 3 所示。图 3 中右侧标注数字为点火后时间, 点火时刻记为 0; 下方数字为管道长度, 点火位置记为原点 0, 左侧为负, 右侧为正。

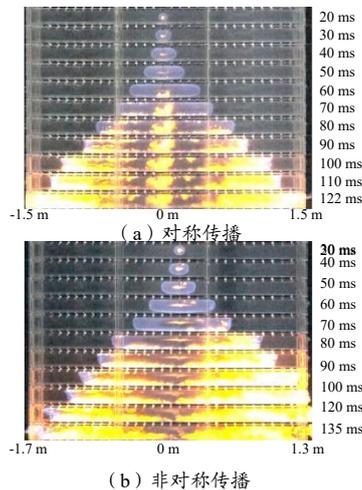


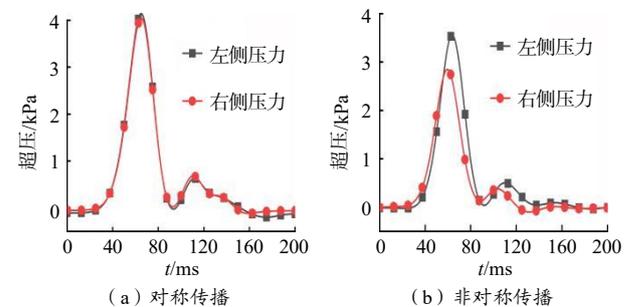
图 3 甲烷爆炸火焰传播图像
Fig.3 Explosion flame propagation

由图 3 (a) 可见, 对称传播情况下, 在点火后的 30 ms 内, 火焰以半球形向两侧对称发展, 该阶段为爆炸发展的初期, 火焰传播速度较慢, 火焰颜色呈淡蓝色, 火焰锋面为平滑弧线。随着爆炸的持续发展, 90 ms 时, 在火焰前沿反应面扩大和流体力学 (D-L)、

瑞利-泰勒 (R-T)、开尔文-赫姆霍茨 (K-H) 等多种不稳定性的影响下, 火焰锋面褶皱加剧^[4]。同时, 受壁面摩擦的影响, 管道上下壁面附近的燃烧反应速率和火焰速度均高于管道中心区域, 形成了“郁金香”状的内凹火焰。火焰锋面褶皱进一步增大了燃烧反应的面积, 甲烷与空气混合反应量增多, 反应更剧烈, 火焰颜色变为明黄色。最终, 在 122 ms 时, 左、右两侧火焰同时冲出管道。

由图 3 (b) 可见, 非对称传播情况下, 点火后 50 ms 时, 两侧传播出现差异, 距离泄爆口较近的一侧 (右侧) 火焰传播距离更远、传播速度更快, 表明点火源与泄爆口距离越近, 传播阻力越小。80 ms 时, 右侧火焰出现明显的湍流火焰特征, 火焰颜色变得更加明亮, 以明黄色为主, 并在 90 ms 时冲出管道; 而左侧火焰冲出管道时刻为 135 ms。此外, 当火焰接近管道末端时, 受末端泄爆口热量交换和不稳定气体流动的影响, 火焰会发生明显的变形和紊乱, 非对称传播时这种现象更加明显。

对称与非对称传播情况下管道左、右两侧的压力曲线如图 4 所示。



(a) 对称传播 (b) 非对称传播

图 4 对称与非对称情况下的爆炸超压

Fig.4 Explosion overpressure in symmetric and asymmetric cases

由图 4 (a) 可见, 对称传播时, 管道左、右两侧的压力曲线重合, 与该工况下的火焰传播规律吻合。由图 4 (b) 可见, 非对称传播时, 管道右侧爆炸压力开始上升的时间略早于左侧, 与该工况下右侧爆炸火焰传播速度较快一致。随着爆炸的持续进行, 爆炸超压逐渐达到最大值, 随后泄爆口的泄放速率超过压力产生速率, 超压曲线呈现下降趋势。由于左端泄爆口距离点火源较远, 减小了爆炸区域的开放程度, 爆炸气体膨胀产生的高压形成有效积累, 同时左侧的预混气也更多, 燃烧产生更多的化学能并转化为内能; 并

且，泄爆口面积相同时，压力更容易从距离点火源近的一侧（右侧）排出，因此，左侧超压大于右侧。此外，点火位置非对称情况下管道左、右两侧的超压均小于对称情况下管道左、右两侧的超压，表明点火位置非对称情况下泄压更快、更容易。

2.2 泄爆口面积对甲烷爆炸双向传播特性的影响

在点火源位于(0, 0.2)处、右端泄爆口面积为150 mm×150 mm的条件下，左端泄爆口面积分别为120 mm×120 mm、90 mm×90 mm、60 mm×60 mm、45 mm×45 mm时的爆炸火焰传播图像如图5所示。

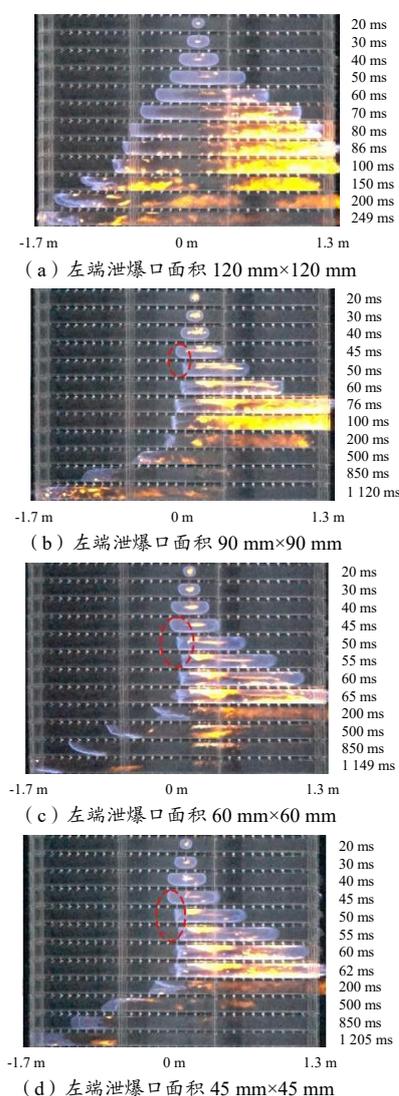


图5 不同左端泄爆口面积下的爆炸火焰传播图像

Fig.5 Explosion flame propagation images with different left vent areas

由图5可见，由于爆炸初期（点火40 ms内）的反应强度较小，不同泄爆口面积下的火焰传播距离、火焰形状基本一致。40 ms时，泄爆口PVC薄膜破裂，

由于右端泄爆口面积大于左端泄爆口面积，爆炸波、爆炸火焰更容易由右端泄爆口泄放，左、右两侧传播开始出现差异。不同泄爆口面积下，燃烧反应的释放速率与燃烧物质量不同，因此火焰传播速度不同。由于较小的泄爆口面积限制了压力波的排放速率以及管道内的供氧能力，因此，左端泄爆口面积越小，左侧火焰的传播速度越慢、到达管口的时间越长。此外，当左端泄爆口面积分别为90 mm×90 mm、60 mm×60 mm、45 mm×45 mm时，左侧火焰分别在45~50 ms、45~55 ms、45~55 ms之间出现了逆流现象。这是因为，一方面，右侧火焰正处于快速发展阶段，火焰向右高速传播带动了管道内的气流和预混气整体向右运动；另一方面，由于左端泄爆口尺寸变小，左侧压力波撞到左端口壁面时会形成反射，反射波会阻碍火焰向左传播，同时抬升压力，形成一个从左向右的作用力，当向右的气流速度大于左侧火焰传播速度时就会出现火焰逆流现象。并且，左端泄爆口尺寸越小，反射波与压力抬升的作用就越强，导致向右的气流速度、火焰速度越快，同时留在左侧的预混气也越少，从而导致向左火焰传播越慢、火焰也越弱。

通过火焰经过的管道长度与冲出管道所需时间，计算不同左端泄爆口面积下左、右两侧的火焰平均传播速度，结果如图6所示。

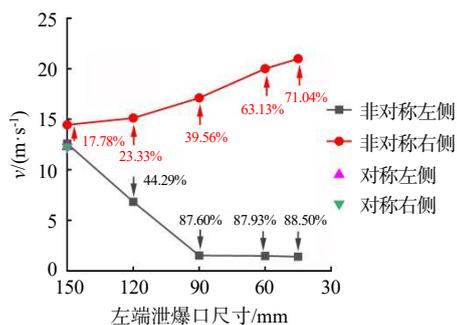


图6 不同工况下管道内左右两侧平均火焰传播速度

Fig.6 Average flame propagation velocity of the left and right sides under different working conditions

由图6可知，点火位置居中且左、右端泄爆口面积均为150 mm×150 mm（基础工况）时，管道左、右两侧火焰传播速度相同。点火位置偏右且左、右端泄爆口面积均为150 mm×150 mm时，左侧火焰传播速度与基础工况一致，右侧火焰传播速度加快，这是由于点火位置非对称，右侧火焰传播阻力小、距离近，

所以传播速度更快。随着左端泄爆口面积减小，非对称性增大，左侧火焰平均传播速度减小、右侧火焰平均传播速度增大，两侧火焰平均传播速度差增大。图6中的箭头与数字表示该工况相较于基础工况的火焰传播速度上升或下降的百分比。泄爆口面积相同条件下，右侧火焰平均传播速度的增幅均小于左侧火焰平均传播速度的降幅，说明泄爆口面积对远点火端火焰的减速作用大于近点火端火焰的激励作用。此外，泄爆口面积 $S \leq 90 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$ 时，相近2组间的左侧火焰平均传播速度降幅小于1%，右侧火焰平均速度涨幅大于8%，表明此时继续减小泄爆口面积对左侧火焰的减速作用已经很微弱，而对右侧火焰却有较强的激励作用。

不同左端泄爆口面积下的甲烷爆炸超压曲线如图7所示，最大压力值与左、右两侧压差如表1所示。

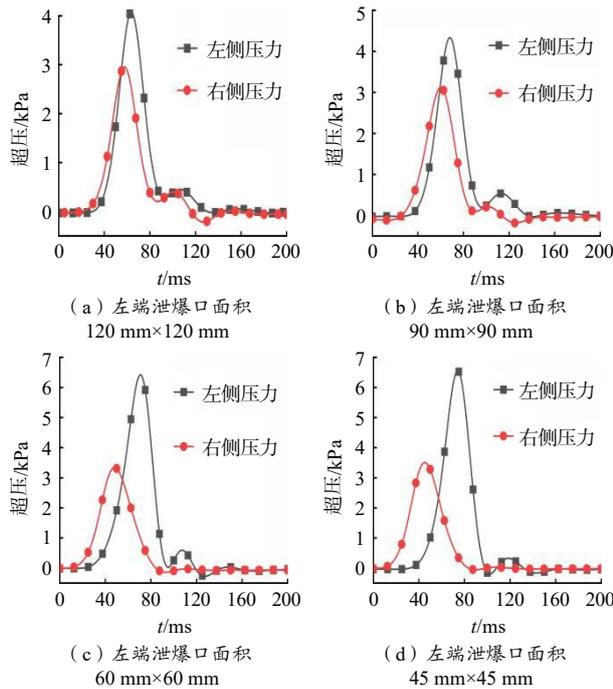


图7 不同左端泄爆口面积下的爆炸超压曲线
 Fig.7 Explosion overpressures of different left vent areas
 表1 左右两端泄爆口压力

点火位置	左端泄爆口面积/mm×mm	左侧压力/kPa	右侧压力/kPa	压力差/kPa
(0, 0.2)	45×45	6.55	3.51	3.04
(0, 0.2)	60×60	6.42	3.43	2.99
(0, 0.2)	90×90	4.33	3.11	1.22
(0, 0.2)	120×120	4.07	2.96	1.11
(0, 0.2)	150×150	3.56	2.85	0.71
(0, 0)	150×150	4.14	4.05	0.09

由图7和表1可知，非对称条件下，管道左侧最

大爆炸超压均大于右侧，且左、右两侧的最大压力均随左端泄爆口面积的减小而增大。这是由于随着左端泄爆口面积减小，左侧泄压不畅，压力波被反射，从而导致左侧压力抬升；而右侧爆炸反应增强，导致右侧压力增大。并且，左侧压力增大幅度大于右侧，因此，泄爆口面积越小，两侧压力差越大。此外，由于点火位置偏右，管道右侧压力更容易泄放，因此其右侧压力比中间点火时的右侧压力小。

爆炸指数 $K^{[15]}$ 可用于评估甲烷爆炸危险性，是一个与爆炸反应动力学有关的参数，计算公式如下：

$$K=(dp/dt)_{\max} \cdot V^{1/3} \quad (2)$$

式(2)中： K 为爆炸指数， $\text{kPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ； p 为压力， kPa ； t 为时间， s ； V 为试验容器体积， m^3 。

由公式(2)可知，在试验容器体积一定的情况下，爆炸指数 K 与最大压力上升速率成正比。对图7中压力与时间的关系曲线进行求导，得到最大压力上升速率与左端泄爆口面积的关系，如图8所示。由图8可见，点火源两侧的最大压升速率均随左端泄爆口面积的减小而增大，且左侧始终大于右侧，与压力变化规律一致。随着泄爆口面积由 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 减小至 $45 \text{ mm} \times 45 \text{ mm}$ ，左侧最大压升速率由 $0.198 \text{ kPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大至 $0.331 \text{ kPa} \cdot \text{s}^{-1}$ ，右侧最大压升速率由 $0.152 \text{ kPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大至 $0.186 \text{ kPa} \cdot \text{s}^{-1}$ ，左、右侧最大压升速率分别增加了67.17%、18.47%。因此，泄爆口面积越小， K 越大，爆炸危险性越大，在泄爆面积小、易产生点火源的区域内应加大防护治理力度。

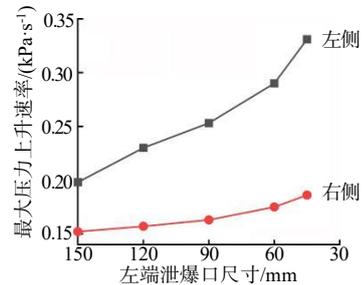


图8 不同工况下管道内左右两侧最大压力上升速率
 Fig.8 Maximum rate of pressure rise of the left and right sides under different working conditions

3 结论

本文通过试验研究了点火位置和末端泄爆口面

积对甲烷/空气预混气爆炸双侧传播特性的影响规律, 结论如下:

(1) 与正中点火的对称传播相比, 点火位置偏右的非对称传播情况下, 左侧传播速度大致保持不变, 而右侧传播速度明显加快; 同时两侧压力都比对称传播下的压力小。

(2) 左端泄爆口变小时, 左侧压力波在左侧端面会被部分反射, 抑制左侧的火焰传播同时使压力升高, 并形成一個从左到右的驱动力。该驱动力会强化向右的气流速度, 使得右侧爆炸火焰传播速度不断加快, 导致左侧火焰出现逆流现象。左端泄爆口面积越小, 左侧爆炸传播速度越慢, 右侧传播速度越快。

(3) 左端泄爆口变小时, 泄压不畅会抬升左侧压力, 左右两侧压差会强化右侧的爆炸传播与反应速度, 使得右侧压力也出现上升。左端泄爆口面积越小, 左右两侧的压力就越大, 两侧间的压差也越大; 爆炸指数 K 与最大压升速率有关, 左端泄爆口面积越小, 爆炸指数越大, 爆炸危险性越大。

参考文献:

- [1] 王云刚, 崔春阳, 张飞燕, 等. 2011—2020年我国较大及以上煤矿事故统计分析研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(09): 3 269-3 276.
- [2] 王发辉, 孙悦, 温小萍, 等. 富氧条件下不同泄爆面积对 CH_4 燃烧诱导快速相变的影响[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(01): 109-116.
- [3] ZHANG Q, CHEN G H, XUE Y Z, et al. Effects of methane volume fractions and vent areas on dynamic characteristics of vented methane-air explosion in a half-open duct[J]. Fuel, 2022 (319): 123 762.
- [4] 时静洁, 赵薇, 陈小林, 等. 泄爆口参数对氢气火焰传播过程影响的数值模拟[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(07): 178-186.
- [5] 文虎, 高慧慧, 王秋红, 等. 泄爆口强度对管内天然气爆炸流场的影响仿真[J]. 天然气工业, 2019, 39(08): 126-136.
- [6] WAN S J, YU M G, ZHENG K, et al. Influence of side venting position on methane/air explosion characteristics in an end-vented duct containing an obstacle[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2018(92): 202-210.
- [7] WAN S J, YU M G, ZHENG K, et al. Effect of side vent size on a methane/air explosion in an end-vented duct containing an obstacle[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2019 (101): 141-150.
- [8] 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.
- [9] 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(04): 139-150.
- [10] Kindracki J, Kobiera A, Rarata G, et al. Influence of ignition position and obstacles on explosion development in methane-air mixture in closed vessels[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2007, 20(4-6): 551-561.
- [11] Kasmani R M, Andrews G E, Phylaktou H N. Experimental study on vented gas explosion in a cylindrical vessel with a vent duct[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2013(91): 245-252.
- [12] XIAO H H, DUAN Q L, JIANG L, et al. Effects of ignition location on premixed hydrogen/air flame propagation in a closed combustion tube[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(16): 8 557-8 563.
- [13] XING H D, XU Q M, SONG X Z, et al. The effects of vent area and ignition position on pressure oscillations in a large L/D ratio duct[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020(135): 166-170.
- [14] 朱云飞. 煤矿巷道网络中瓦斯爆炸火焰和压力波传播规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- [15] 陈硕, 路长, 苏振国, 等. 煤矿瓦斯爆炸发展规律及防治的综述及展望[J]. 火灾科学, 2021, 30(02): 63-79.