

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.01.020

# 100% 置障与浓度梯度耦合作用甲烷爆炸激励效应实验研究\*

徐景德,冯若尘,田思雨,秦汉圣,张延炜

(华北科技学院 安全工程学院,北京 101601)

**摘要:** 以阻塞率100%柔性障碍物及浓度梯度为影响因素,构建甲烷—空气预混爆炸实验模型,设立了6个实验工况,以爆炸压力峰值、火焰传播速度为表征参数,研究置障及浓度梯度耦合作用下爆炸激励效应。结果表明:障碍物数量与浓度梯度叠加造成的激励效应,非常猛烈,实验中出现最大火焰传播速度超过3Ma,最大压力达到0.27MPa。同时发现,置障及浓度梯度耦合作用下爆炸火焰波传播区域,较之于均匀浓度条件下,增加1倍。本文有助于矿井巷道内设置风帘等设施下甲烷气体爆炸传播过程特殊现象的研究,为甲烷爆炸事故调查、事故防治、应急救援等提供理论依据。

**关键词:** 甲烷爆炸;激励效应;浓度梯度;柔性障碍物

中图分类号: X932 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2020)01-0139-06

## Excitation Effect of Methane Explosion Propagation Under Condition of Coupling of 100% Blocking Probability and Concentration Gradient

XU Jing-de, FENG Ruo-chen, TIAN Si-yu, QIN Han-sheng, ZHANG Yan-wei

(School of Safety Engineering, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China)

**Abstract:** A methane-air premix explosion experiment model was constructed with the influence factors of 100% flexible blocking rate and concentration gradient. To study the explosion excitation effect under the coupling effect of obstacles and concentration gradient, the peak pressure of the explosion and flame propagation velocity were used as the characteristic parameters in six experiment conditions. The results showed that the excitation effect caused by the superposition of the number of obstacles and the concentration gradient is very strong. The maximum flame propagation velocity exceeded 3 Ma and the maximum pressure reached 0.27 MPa. At the same time, it was found that the explosion flame wave propagation area increased twice compared with the uniform concentration condition. This paper is helpful to study special phenomena of methane gas explosion propagation process under the installation of air curtains and other facilities in a mine tunnel, and provides theoretical basis for methane explosion accident investigation, accident prevention and emergency rescue.

**Key words:** methane explosion; excitation effect; concentration gradient; membrane obstacle

收稿日期:2019-10-28

作者简介:徐景德(1965-),男,教授、博士,从事矿井瓦斯灾害防治、安全生产监管与应急救援研究,(E-mail)xujd1430@126.com。

通讯作者:田思雨(1994-),女,硕士研究生,从事矿井瓦斯灾害防治研究,(E-mail)552109785@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51874134、51374108);国家重点研发计划“十三五”科技部专项(2016YFC0801502);中央高校基本科研业务费资助(3142018017、3142019032)

由于气体的扩散作用,矿井巷道内甲烷与空气形成混合气体,浓度沿巷道封闭部分向出口方向形成浓度梯度分布<sup>[1,2]</sup>。在这种情况下,气体发生爆炸的传播过程与均匀分布时相比是不同的。同时,井下风门、风帘等通风设施将巷道内分隔成多个区域,这种柔性障碍物不同于矿车等刚性障碍物,其

阻塞率为100%，抗冲击抗剪切力较差，破膜过程中会消耗一部分能量，膜破裂之后湍流加剧<sup>[3]</sup>。在浓度梯度分布条件下，柔性障碍物对甲烷气体爆炸产生的激励效应更加复杂。甲烷气体的爆炸极限为5%~16%<sup>[4]</sup>，浓度小于5%时，爆炸火焰通过时，甲烷气体能否参与爆炸问题未得到解决，为此展开了一系列研究。刘振乾已在相同实验台即华北科技学院爆炸实验室的激波管道实验系统进行了一部分实验，研究发现在甲烷浓度均匀分布的条件下，阻塞率为100%但能发生破裂的薄膜障碍物数量对火焰传播速度和爆炸超压具有明显的激励作用<sup>[5]</sup>。李祥春、聂百胜等人利用定容反应器模型对不同甲烷浓度的甲烷爆炸反应进行了模拟研究，表明随着初始甲烷浓度的增加，甲烷爆炸的最终温度先升后降，压力逐渐升高。M Kuznetsov<sup>[7]</sup>等人通过在可燃气体浓度梯度分布条件下的实验研究得出一些结论，具有浓度梯度的混合物意外点火可能导致火焰加速和爆燃至爆轰(DDT)转变<sup>[6]</sup>。Vollmer等人研究发现与均匀混合物相比，浓度梯度可导致明显更强烈的火焰加速<sup>[8-10]</sup>。

以浓度梯度、柔性薄膜两者耦合作用条件下，甲烷爆炸传播过程中的火焰传播速度、爆炸压力峰值的变化规律进行研究，得出激励效应对甲烷爆炸传播特性的影响。研究结果对矿井不同甲烷浓度梯度环境下气体爆炸传播过程的特殊现象提供一定的解释，为预防和控制甲烷爆炸事故提供理论依据，为甲烷爆炸事故调查、事故防治、应急救援等提供参考。

## 1 实验方案设计

实验装置系统由爆炸激波管、点火系统、数据采集系统、延时同步控制系统、充配气及真空系统等子系统组成，见图1(实验装置系统图)。爆炸激波管管体采用材料为A20号碳钢、冷拔无缝钢管，内截面为方形截面200 mm×200 mm，壁厚为10 mm。为了便于实验管道长度调节，将管体分割为13段，每段长2.5 m。各段管体由法兰首尾连接成一体。装配过程中不仅需要考虑到各连接处的密封问题，还要重视整个管体的同轴度，以保证整个管体前后可以灵活移动。

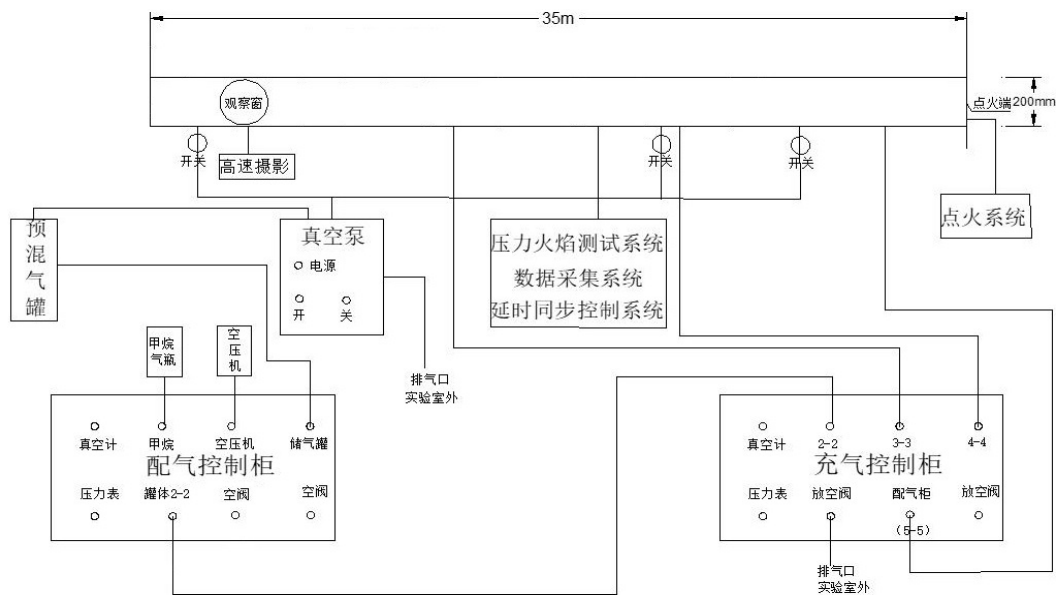


图1 实验装置系统图

Fig. 1 System diagram of experimental device

点火系统由高压直流电源给电容器充电，达到所需电压后通过触发使尖端击穿空气形成高压电火花，从而形成放电。本实验利用220 V低电压击穿部分空气形成部分电弧诱导5 kV高压放电，其中电容器电容测得为0.225  $\mu\text{F}$ ，实验采用的放电电压5 kV，故点火能量为2.81 J。

数据采集系统包括压力、火焰测量系统，实验

配备16通道数据采集卡和DHDAS动态信号采集分析系统，故实验工况1、2、3在爆炸激波管分别安装7个PCB压力传感器和6个火焰传感器。实验采用的M113B24压力传感器是ICP压电传感器，量程为0~68.95 MPa，灵敏度为0.725 MV/kPa，谐振频率高于500 kHz。火焰的测量是利用光线收集光信号，将光信号转化为电信号，后通过DH8302

数采系统得到数据。将两个火焰传感器之间的距离除以光信号所经过的时间得到火焰传播的平均速度。压力传感器和火焰传感器的位置尽可能位于同一轴向位置,以便比较冲击波和火焰到达同一轴向位置的时间差。为着重探究膜状障碍物附近表征参数的变化,在薄膜附近压力传感器布置数量较多,火焰传感器进行均匀布置,在进行一层和两层夹膜两种环境下传感器具体安装位置示意图,如图 2(一层薄膜传感器布置)图 3(两层薄膜传感器布置)所示,管道上方为火焰传感器(F1\F2\F3\F4\F5\F6),管道下方为压力传感器(P1\P2\P3\P4\P5\P6\P7)。

实验在阻塞率 100% 的柔性障碍物与非均匀甲烷浓度分布耦合条件下,通过改变甲烷的浓度与薄膜数量来营造不同浓度梯度的甲烷爆炸环境,研究甲烷爆炸时的火焰传播速度、压力的传播变化规律。以柔性障碍物数量和甲烷浓度梯度分布为实

验因子,用正交法设计试验工况,依照所需要解决的问题,实验中选择的甲烷浓度分别为 9.5%、6%、3%、0%。分别在管道 7.8 m, 10.3 m 两处放置阻塞率为 100% 的柔性障碍物 BOPP 薄膜,将整个实验管道分成 2 或 3 个区域。实验工况通过正交设计,3 种浓度和 2 个薄膜设计 6 组实验工况(0%,3%,6%; I, II),每种浓度下分别进行三次重复实验,以减少实验误差的产生。具体实验工况如下表 1。

表 1 1 道膜实验工况

Table 1 The one membrane experimental conditions

工况序号	工况	第一区域	夹膜 1 处	第二区域	夹膜 2 处	第三区域	夹膜数量
1	9.5%0%	9.5%	√	0%	×	0%	I
2	9.5%3%	9.5%	√	0%	×	3%	I
3	9.5%6%	9.5%	√	0%	×	6%	I

“√”表示此处放置 BOPP 薄膜,“×”表示此处没有放置 BOPP 薄膜。

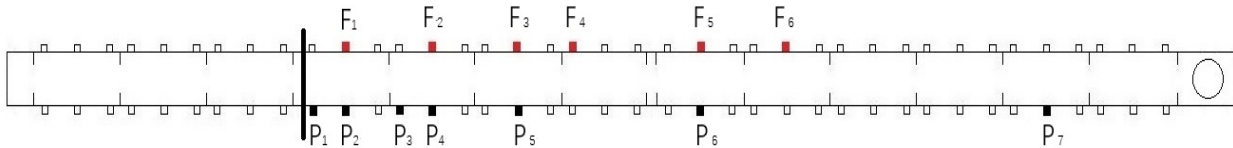


图 2 一层薄膜传感器布置图

Fig. 2 Layout of sensor in a thin film

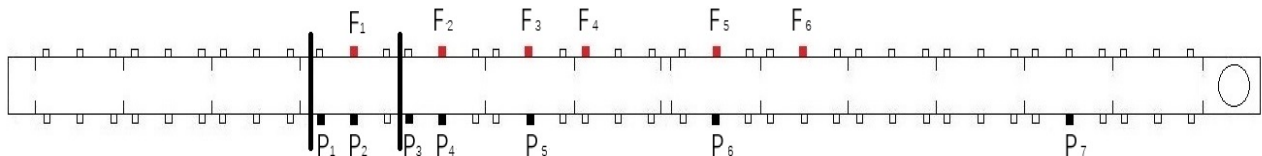


图 3 两层薄膜传感器布置图

Fig. 3 Sensor layout in two layers of thin Films

## 2 实验结果分析

为了研究阻塞率 100% 的柔性障碍物与非均匀甲烷浓度分布耦合条件对甲烷爆炸激励效应的影响,分别对甲烷爆炸压力峰值和火焰速度的沿程分布进行分析,总结爆炸压力峰值和火焰速度的变化规律。

表 2 2 道膜实验工况

Table 2 The two membranes experimental conditions

工况序号	工况	第一区域	夹膜 1 处	第二区域	夹膜 2 处	第三区域	夹膜数量
4	9.5%0%0%	9.5%	√	0%	√	0%	II
5	9.5%0%3%	9.5%	√	0%	√	3%	II
6	9.5%0%6%	9.5%	√	0%	√	6%	II

### 2.1 火焰传播速度的变化特征

由于整个爆炸过程十分短暂,相邻两个传感器之间的平均速度可以反映爆炸传播过程中的火焰传播速度。通过火焰传播速度曲线与爆炸沿程压力分布曲线,分析不同浓度梯度下甲烷爆炸火焰传播速度与爆炸压力的变化规律。如图 4(工况 1/3/5 甲烷爆炸火焰传播距离时间曲线)、图 5(工况 2/4/6 甲烷爆炸火焰距离时间传播曲线)、表 3(工况 1/3/5 甲烷爆炸火焰传播速度曲线)、表 4(工况 2/4/6 甲烷爆炸火焰传播速度曲线)。

从表 3 表 4 可以明显的看出,不同浓度梯度分布工况下,甲烷爆炸传播过程中火焰传播速度总体变化呈上升趋势。图 4 图 5 对比发现火焰传播距离有所增加。薄膜数量对甲烷爆炸火焰传播激励效

表3 工况 1/2/3 甲烷爆炸火焰传播速度

Table3 Curve of 1/2/3 methane explosion flame propagation velocity under working conditions

传感器编号	传感器距离差/m	工况 1 速度/(m·s <sup>-1</sup> )	工况 2 速度/(m·s <sup>-1</sup> )	工况 3 速度/(m·s <sup>-1</sup> )
F1F2	2.5	416.7	277.8	416.7
F2F3	2.5	833.3	312.5	833.3
F3F4	1.5	500	375	500
F4F5	3.5	875	无	875
F5F6	2.5	无	无	无

表4 工况 4/5/6 甲烷爆炸火焰传播速度

Table 4 Curve of 4/5/6 methane explosion flame propagation velocity under working conditions

传感器编号	传感器距离差/m	工况 4 速度/(m·s <sup>-1</sup> )	工况 5 速度/(m·s <sup>-1</sup> )	工况 6 速度/(m·s <sup>-1</sup> )
F1F2	2.5	416.7	416.7	416.7
F2F3	2.5	500	500	500
F3F4	1.5	500	500	500
F4F5	3.5	无	无	1166.7
F5F6	2.5	无	无	无

应有以下影响:

(1) 当甲烷浓度梯度处于9.5%~0%时,实验工况1与实验工况4火焰传播速度明显不同,一道膜的甲烷爆炸火焰速度明显比两道膜的甲烷爆炸火焰速度快,但是火焰传播距离是两道膜的甲烷爆炸火焰尾焰更远,速度也在破膜后得到提升,产生激励作用;随着火焰传播距离的增加,火焰最高速度在破膜后基本保持不变。

(2) 当甲烷浓度梯度处于9.5%~3%时,实验工况3与实验工况5中火焰传播距离基本一致,但一道膜的甲烷爆炸火焰速度明显比两道膜的甲烷爆炸火焰速度慢,推测甲烷爆炸火焰在破膜过程中消耗能量,在3%甲烷中燃烧不充分,造成多余火焰长度变化不明显,火焰速度降低,产生激励作用。

(3) 当甲烷浓度梯度处于9.5%~6%时,实验工况3与实验工况6中火焰传播距离基本一致,爆炸火焰初速度一致,但二道膜的火焰末速度明显比一道膜的火焰末速度高了一倍,达到了1166.7 m/s,说明在浓度梯度下甲烷爆炸传播至接近爆炸下限范围内时,薄膜数量对甲烷爆炸的激励作用显著。

通过对比0%、3%、6%浓度下甲烷气体爆炸火焰传播速度的变化,发现不同浓度梯度对甲烷爆炸火焰传播激励效应有以下影响:

(1) 当设置1道薄膜时,0%浓度梯度的甲烷爆炸火焰初速度最高;6%浓度梯度的甲烷爆炸火焰末速度最高;3%浓度梯度的甲烷爆炸火焰初速度最低,在破膜后虽有上升,但上升不大,火焰末速度只达到373 m/s;0%浓度梯度的甲烷爆炸火焰尾焰

最短,3%、6%浓度梯度的甲烷爆炸火焰尾焰有所延长,分别延长了2.5 m与6 m。说明在一个障碍物的条件下,不同浓度梯度甲烷爆炸对火焰传播速度和火焰尾焰长度起到激励作用,其中6%浓度梯度甲烷爆炸火焰传播速度和火焰尾焰长度的激励作用显著。

(2) 当设置2道薄膜时,0%、3%、6%浓度梯度的甲烷爆炸火焰初速度一致,但6%浓度梯度的甲烷爆炸火焰末速度最高,0%、3%浓度梯度甲烷爆炸火焰速度在破膜后上升速率一致,最后火焰末速度都达到500 m/s;0%、3%浓度梯度甲烷爆炸火焰尾焰长度一致为15.25 m,6%浓度梯度甲烷爆炸火焰尾焰长度为18.75 m,说明在多个障碍物数量的条件下,不同浓度梯度甲烷爆炸对火焰传播速度起到激励作用。

文献[5]中已对同浓度条件下薄膜对甲烷爆炸传播产生的激励效应作出了研究,发现在浓度为9.5%的甲烷预混气体工况下,随薄膜障碍物数量的增多火焰初始速度升高,火焰整体速度也随之进一步提高;爆炸超压初始值随之升高,最大超压峰也相应增大,相对于一般的障碍物而言,更易发生爆燃转爆轰现象。由以上实验现象及分析可知,在0%和6%浓度梯度下,不同数量的阻塞率100%柔性障碍物BOPP薄膜对甲烷爆炸火焰传播起到激励效应,对火焰长度和火焰传播速度起到激励作用,浓度为6%时火焰传播速度最快;在3%浓度梯度下,多个阻塞率100%柔性障碍物BOPP薄膜对甲烷爆炸火焰传播速度起到激励作用,对火焰长度基本

没有影响。在同置障条件下,不同浓度梯度对甲烷爆炸火焰传播都起到激励效应,最大可达到 3 马赫数。爆炸最低浓度要在 5% 以上,柔性障碍物产生的激励效应影响强烈。

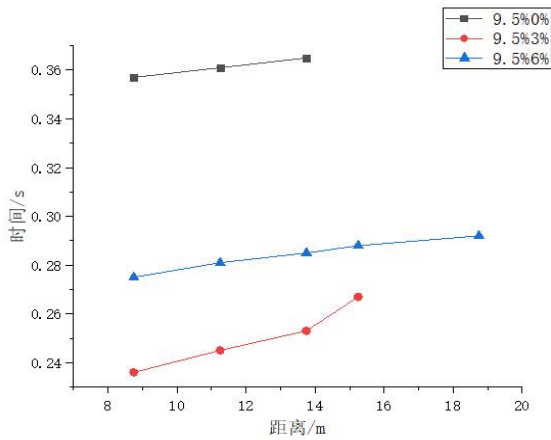


图 4 工况 1/2/3 甲烷爆炸火焰传播曲线

Fig. 4 Fire propagation curve of methane explosion under working condition 1/2/3

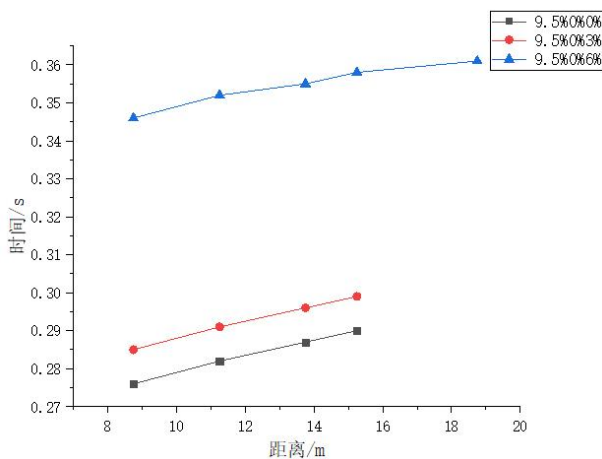


图 5 工况 4/5/6 甲烷爆炸火焰传播曲线

Fig. 5 Fire propagation curve of methane explosion under working condition 4/5/6

## 2.2 爆炸压力峰值的变化特征

根据实验结果分析得出不同工况下甲烷爆炸压力峰值沿程分布曲线,即图 6(工况 1/3/5 爆炸压力峰值沿程分布曲线)、图 7(工况 2/4/6 爆炸压力峰值沿程分布曲线)。从图 6 图 7 可以看出,6% 浓度的甲烷管道内最大爆炸压力峰值比 0% 与 3% 浓度下明显增大。其中,不同薄膜数量对甲烷爆炸压力传播激励效应产生以下影响:

(1) 当甲烷浓度梯度处于 9.5%~0% 时,实验工况 1 与实验工况 4 爆炸初始压力基本一致,但破膜后一道膜的甲烷爆炸压力上升速率明显比两道膜

的甲烷爆炸压力上升速率慢,但是一道膜的甲烷爆炸压力在管道末端达到 242.156 kPa,二道膜的甲烷爆炸压力在管道末端达到 161.187 kPa,推测一道膜的甲烷爆炸压力率先达到峰值,而二道膜的甲烷爆炸压力还未达到峰值,延长了爆炸压力达到峰值的距离。在甲烷浓度梯度处于 0% 时,障碍物数量对甲烷爆炸压力产生激励作用。

(2) 当甲烷浓度梯度处于 9.5%~3% 时,实验工况 2 与实验工况 5 爆炸初始压力基本一致,但一道膜的甲烷爆炸压力率先达到了峰值 268.237 kPa,而二道膜的甲烷爆炸压力还未达到峰值,说明增加障碍物数量延长了爆炸压力达到峰值的距离。在甲烷浓度梯度处于 3% 时,障碍物数量对甲烷爆炸压力产生激励作用。

(3) 当甲烷浓度梯度处于 9.5%~6% 时,实验工况 3 与实验工况 6 爆炸初始压力基本一致,一道膜的甲烷爆炸压力上升速率与二道膜的甲烷爆炸压力上升速率也基本一致,但在破膜后实验工况 6 的爆炸压力比实验工况 5 的爆炸压力高,说明障碍物对甲烷爆炸压力有激励作用。

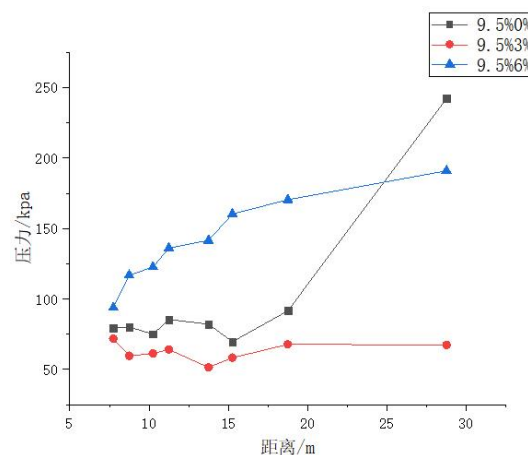


图 6 工况 1/2/3 爆炸沿程压力分布曲线

Fig. 6 Pressure distribution curve of explosion along the way on condition 1/2/3

通过对比 0%、3%、6% 浓度下甲烷气体爆炸传播过程中压力峰值大小的变化,不同浓度梯度条件对甲烷爆炸压力峰值产生以下影响:

(1) 当设置 1 道薄膜时,3% 浓度梯度的甲烷爆炸压力率在管道前部先达到峰值;0% 浓度梯度的甲烷爆炸压力在管道末端可能达到峰值;6% 浓度梯度的甲烷爆炸压力在全程没有明确一点有达到爆炸压力峰值。说明在一个障碍物的条件下,不同浓度梯度甲烷爆炸对爆炸压力起到激励效应,当浓度梯度低于甲烷爆炸下限时,甲烷爆炸压力会比在

其他浓度梯度条件下先到达压力峰值。

(2)当设置2道薄膜时,0%、3%、6%浓度梯度甲烷爆炸压力在全程没有达到峰值,但6%浓度梯度的甲烷爆炸压力全程最高,0%、3%浓度梯度甲烷爆炸压力在破第二道膜前爆炸压力基本一致,在破第二道膜后0%浓度梯度甲烷爆炸压力比3%浓度梯度甲烷爆炸压力高;3%浓度梯度甲烷爆炸压力在破第二道膜后先降低后升高,推测爆炸火焰破膜消耗能量,而使3%甲烷燃烧需要消耗能量,但3%甲烷燃烧不充分没有为压力波提供足够的能量,导致第二道膜后火焰波为压力波提供的能量减少。说明在多个障碍物数量的条件下,不同浓度梯度甲烷爆炸对火焰传播速度起到激励作用。

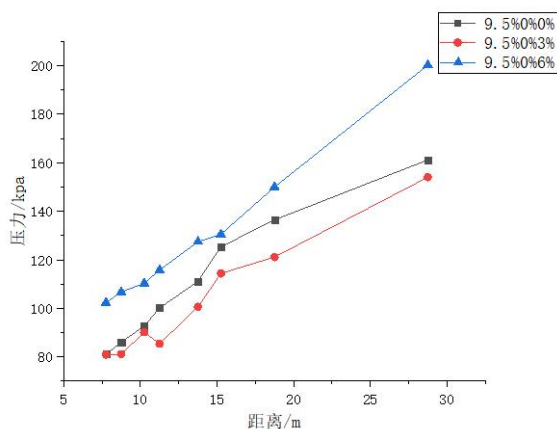


图7 工况4/5/6爆炸沿程压力分布曲线

Fig. 7 Pressure distribution curve of explosion along the way on condition 4/5/6

由以上实验现象及分析可知,在同浓度梯度条件下,不同障碍物数量对甲烷爆炸压力起到激励作用。在单一的阻塞率100%柔性障碍物BOPP薄膜条件下,当浓度梯度低于甲烷爆炸下限时,甲烷爆炸压力会比在其他浓度梯度条件下先到达压力峰值。在多个阻塞率100%柔性障碍物BOPP薄膜条件下,不同浓度梯度甲烷爆炸对甲烷爆炸压力具有激励效应。与刚性障碍物不同,柔性障碍物被冲破后会加剧紊流度,最大压力峰值不在障碍物附近而是在在管道后方达到最大压力峰值。由于薄膜的物质特性造成对燃烧波很难阻挡,高温火焰很快冲破柔性障碍物,导致湍流度增加,使燃烧速率加快,导致单位时间内火焰传播速度上升,爆炸压力不断加大,沿程消耗的能量远小于增加的能量。

全阻塞率薄膜与浓度梯度耦合作用对甲烷爆炸压力与火焰速度的影响显著。在耦合作用下,对甲烷爆炸压力和火焰速度起到激励效应;薄膜数量

和甲烷浓度梯度的增加会使甲烷爆炸压力增大;火焰速度随薄膜数量和甲烷浓度梯度的增加而增加;火焰尾焰随薄膜数量和甲烷浓度梯度的增加而得到了延长,使得甲烷爆炸的致伤范围扩大了1倍,实际安全距离也延长1倍。

### 3 结论

通过实验研究,分析了100%阻塞率柔性薄膜和浓度梯度耦合条件下甲烷爆炸的激励效应,得出了以下结论:

(1)与均匀浓度条件下相比,具有浓度梯度分布下甲烷爆炸传播过程中火焰传播速度和压力峰值成倍增加,柔性障碍物产生强烈的激励效应。在同浓度梯度条件下,不同障碍物数量对甲烷爆炸压力都起到激励效应。

(2)在单一的柔性障碍物存在时,当浓度梯度低于甲烷爆炸下限时,甲烷爆炸压力会比在其他浓度梯度条件下先到达压力峰值。甲烷浓度高于爆炸下限5%时才能产生强烈的激励效应。

(3)由于对全阻塞率薄膜与浓度梯度耦合条件下甲烷爆炸传播特性的实验研究中爆炸超压值相对过大,无法设置光学视窗进行观察,在下一步的研究中将会对此进行改进并展开深入研究。

(4)与刚性障碍物不同,柔性障碍物被冲破后会加剧紊流度,最大压力峰值不在障碍物附近而是在在管道后方达到最大压力峰值,可为部分甲烷爆炸事故调查提供一定的依据。

### 参考文献 (References)

- [1] 艾迪昊,荣涛,李聪,等. 综掘工作面停风后甲烷分布规律研究与应用[J]. 中国煤炭, 2015, 41(4): 118-121.
- [1] AI Di-hao, RONG Tao, LI Cong, et al. Research and application of gas distribution law at working face after ceasing ventilation [J]. China Coal, 2015, 41(4): 118-121. (in Chinese)
- [2] 俞启香,程远平. 矿井瓦斯防治[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 2012.
- [3] 叶青,林柏泉. 受限空间瓦斯爆炸传播特性[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 2012.
- [4] 徐景德,田思雨,刘振乾,等. 甲烷爆炸传播过程膜状障碍物的激励效应研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(7): 69-74.