

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0144

柔性障碍物对甲烷空气爆炸波激励作用的实验研究*

张延炜, 徐景德, 胡 洋, 田思雨, 冯若尘, 秦汉圣
(华北科技学院安全工程学院, 河北 廊坊 065201)

摘要: 为研究柔性障碍物对甲烷空气爆炸波的激励效应, 采用双向拉伸聚丙烯 (biaxially oriented polypropylene, BOPP) 薄膜作为柔性障碍物将管道内甲烷空气预混气体与空气隔开, 对比障碍物前后火焰、激波变化, 分析膜状柔性障碍物激励效应的机理。实验结果表明: 这种具有一定承压能力的柔性障碍物对甲烷爆炸波产生的激励效应不可忽视, 在膜片破裂前产生多次激波反射过程, 可诱导湍流火焰形成, 促使膜前爆炸压力提高, 膜片破裂后, 火焰在伴流作用下传播速度突增, 并加速逐渐逼近前驱冲击波, 致使膜后爆炸压力大幅提高; 激励效应可使膜片前后最大爆炸压力相差 5 倍, 火焰速度相差 7 倍; 另外在膜片位置 2.5 m 后增设一道膜片, 可增强这种激励效应, 而增加膜片的实质是使激波火焰相互作用的次数增加。

关键词: 甲烷空气爆炸; 柔性障碍物; 激励效应; 激波

中图分类号: O381 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Experimental study on incentive effect of flexible obstacle on methane-air explosion wave

ZHANG Yanwei, XU Jingde, HU Yang, TIAN Siyu, FENG Ruochen, QIN Hansheng
(College of Safety Engineering, North China Institute of Science and Technology, Langfang 065201, Hebei, China)

Abstract: In order to study the incentive effect of flexible obstacles on methane-air explosion waves, a biaxially oriented polypropylene (BOPP) film was used as a flexible obstacle to separate the methane-air premixed gas from the air in the pipeline, the difference of the flame and shock wave before and after they propagated through the obstacle was compared, and the mechanism of the incentive effect of the flexible membrane obstacle was analyzed. The experimental results show that the incentive effect of this flexible obstacle with certain pressure-bearing capacity on the methane explosion wave cannot be ignored. Multiple reflections of shock wave before the rupture of the flexible membrane can result in the formation of turbulent flame, and thus greatly increase the explosion pressure. After the rupture of the flexible membrane, the velocity of the flame increases suddenly under the action of the concomitant flow and approaches the shock wave, resulting in a great increase in the explosion pressure behind the membrane. The experimental data show that the difference in the maximum explosion pressure between the locations before and after the membrane is five times and the corresponding difference of flame velocity is seven times. In addition, it is found that the incentive effect can be enhanced by adding an additional membrane after the original one with a prescribed distance and the essential role of the additional membrane is to increase the interaction numbers between the shock wave and the flame.

Keywords: methane-air explosion; flexible obstacle; incentive effect; shock wave

* 收稿日期: 2020-05-11; 修回日期: 2020-06-22

基金项目: 国家自然科学基金(51874134, 51374108); “十三五”国家重点研发计划(2016YFC0801502); 华北科技学院中央高校基本科研业务费项目(3142018017)

第一作者: 张延炜(1996—), 男, 硕士研究生, zywtime@163.com

通信作者: 徐景德(1965—), 男, 博士, 教授, xujd1430@126.com

甲烷是自然界中常见的烷烃类气体,也是矿井瓦斯的主要成分,其爆炸极限为 5%~15%。激励效应是甲烷爆炸过程中的一个特殊现象,由于矿井巷道中存在大量影响甲烷爆炸传播的设备,如矿车、液压支架、风门、风帘、密闭墙等,这些矿井生产必不可少的设备在甲烷爆炸传播过程中,起到障碍物的作用,产生激励效应,即导致传播速度迅速上升,紊流度突然迅猛增加,甲烷燃烧速度加快,导致爆炸冲击波超压、速度增大。在其他管状空间也存在类似现象,掌握甲烷爆炸过程中障碍物的激励效应对瓦斯爆炸事故预防、抑爆以及事故机理调查具有重要意义。

近年来很多学者开展了这方面的研究:林柏泉等^[1]通过实验得出障碍物数量的增加可有效提高火焰传播速度、增大冲击波波形变化幅度;何学秋等^[2]结合高速摄影、纹影系统观察到障碍物会引起火焰锋面弯曲度、表面积增大;徐景德等^[3-5]结合理论、实验、数值模拟对障碍物产生激励效应的机理进行了系统的解释;景国勋等^[6]通过实验发现,障碍物也会导致含煤尘瓦斯爆炸火焰加速、形状改变;余明高等^[7]通过实验发现,交错布设障碍物与平行布设障碍物相比,可显著增强火焰形变、传播速度及爆炸压力;Wang 等^[8-9]通过实验发现不同角度的平板障碍物对爆炸影响程度有限,此外他们将实验与数值模拟相结合,发现障碍物之间的瓦斯气体可发生局部爆炸;Masri 等^[10]研究了不同截面(圆形、三角形、正方形)、不同阻塞率(10%~78%)的障碍物对预混火焰的影响,实验发现方形截面障碍物对火焰加速作用最大,圆形的最小,且火焰传播速度随阻塞率的增大而增大;Andrzej^[11]通过在管道内周期连续放置障碍物,发现激波-火焰相互作用导致火焰失稳是火焰加速的主要原因;Bakke 等^[12]结合实验和数值模拟研究了树木对气体爆炸火焰的影响,发现火焰加速是由障碍物引起的湍流与火焰相互作用导致。

目前的研究多集中在障碍物形状、阻塞率、放置方式等因素对管状空间内气体爆炸的影响,且此类障碍物均有一个共性,即根据材质划分属于刚性障碍物,受到冲击后,宏观来看形状不会发生变化。在矿井中,矿车、液压支架等均可看作此类障碍物,这种障碍物产生激励效应的机理已经有了系统的解释^[3-5]。

薄膜在管道中的应用非常广泛,典型的有激波管的驱动,但仅是当作工具使用,即将高压段与低压段隔开,将其看作气体爆炸传播途径中的障碍物,相关研究还少有涉及。这种膜状障碍物对正向冲击具有较强的承压能力,但抗高温能力及抗剪切能力较弱,在超过其载荷极限后,会产生永久的破坏,从材质划分属于柔性障碍物,在矿井中,风门、风帘等均可看作此类障碍物。薄膜 100% 阻塞率且有一定载荷极限的特性致使其产生激励效应的机理与刚性障碍物会有很大的不同,而由于这种特性导致无法建立较好的计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 模型,因此本文中采用实验方法,探究双向拉伸聚丙烯 (biaxially oriented polypropylene, BOPP) 薄膜对甲烷空气预混气体爆炸的激励效应。

1 柔性障碍物激励效应机理分析

结合经典的“两波三区”^[5,13]理论,在甲烷爆燃传播阶段,前驱冲击波先于火焰与障碍物相遇,此时会有两种结果:(1)前驱冲击波高温高压作用足够强,致使柔性障碍物直接被破坏;(2)高温高压作用不足以破坏障碍物,导致前驱冲击波反射,与火焰产生复杂的相互作用。

第 1 种情形中,障碍物被破坏可分为形变、破裂两个过程(整体时间是极短的)。在形变阶段,障碍物产生应力,限制前驱冲击波传播,而冲击波后的化学反应区持续提供能量,冲击波处于一个动能、内能积攒的过程(实际是障碍物前气体的动能、内能上升),直至障碍物被高温高压作用破坏,冲击波以更高的速度传播。

第 2 种情形中,柔性障碍物起到反射的作用,致使前驱冲击波向火焰传播。火焰与未反应气体之间可看作是不同的密度的流体界面^[11,14-18],当反射波作用于该界面时,发生 Richtmyer-Meshkov (RM) 不稳定;界面扰动形成“泡”和“钉”的结构,进而产生 Kelvin-Helmholtz (KH) 不稳定,促使两种流体发生混合,即火焰卷吸未反应气体;并在湍流作用诱导下,形成湍流火焰,加快化学反应速率,使激波强度提高;激波与火焰多次作用后,激波强度达到第一种情形,破坏障碍物。

障碍物被破坏后,冲击波带动未反应气体高速流动;在伴随气流作用下,火焰传播速度突增,导致前驱冲击波增强,形成一种正反馈机制,使火焰持续加速,导致障碍物前后爆炸压力、火焰速度产生较大差异。

2 实验条件

2.1 实验装置

实验装置为中尺度密闭方形可拆卸爆炸管道, 共 14 段, 如图 1 所示。管道总长度为 35 m, 截面尺寸为 200 mm×200 mm, 壁厚为 10 mm。沿管道轴线布设压力传感器、火焰传感器。

压力传感器选用 PCB 公司 ICP 压电传感器 (型号为 111A22), 灵敏度为 0.145 mV/kPa, 谐振频率高于 500 kHz, 上升时间小于 1 μs; 火焰传感器由光纤、光电二极管自制而成^[19], 核心部件为 GT101 系列硅 PIN 光电二极管, 火焰光信号通过光纤、二极管转变为电信号; 压电信号、光电信号通过动态测试分析系统采集, 型号为 DH8302, 放大器频响范围为 DC~300 kHz, 单道最高连续采样速率为 1 MHz; 点火器由自行研制^[20], 原理为利用电容充电, 通过外触发信号实现对电极放电, 电极产生高压放电火花; 整个系统由多通道同步控制器连接, 信号发生器给出标准 TTL (transistor-transistor logic) 信号至同步控制器, 实现一个信号控制点火及数据采集。

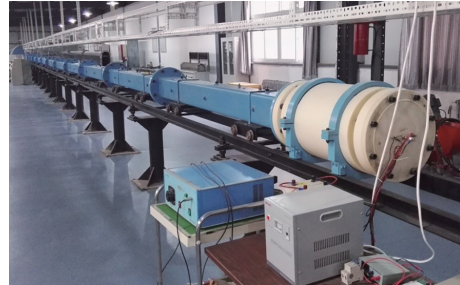


图 1 实验管道

Fig. 1 Experimental pipeline

2.2 障碍物条件

选择双向拉伸聚丙烯 (biaxially oriented polypropylene, BOPP) 薄膜为柔性障碍物, BOPP 薄膜阻气性好, 具有一定的抗撕裂能力。将 BOPP 薄膜裁剪为圆形装载至工况对应位置。装载方法: 打开可拆卸管道, 将圆形 BOPP 薄膜夹在两管道之间, 并靠密封圈及黄油固定以保证气密性。

2.3 工况设计

实验工况 I: 前 3 节管道中为甲烷体积分数为 9.5% 的甲烷-空气预混气体 (最佳浓度), 后续管道中均为空气, 空气与预混气体用 BOPP 薄膜隔开, 薄膜距点火端 8.54 m, 如图 2 所示。模拟矿井巷道某处密闭空间瓦斯积聚并发生爆炸, 破坏作用致使风门或密闭墙被破坏, 爆炸传播至无瓦斯区域, 探究柔性障碍物对甲烷爆炸传播的影响。沿点火端向管道末端布设传感器, 压力传感器依次为 $P_1 \sim P_6$, 火焰传感器位置在管道轴线上与压力传感器一致, 依次为 $F_1 \sim F_6$, 另在 20.08 m 处增设一个火焰传感器 (根据以往实验火焰传播最远距离所定)。

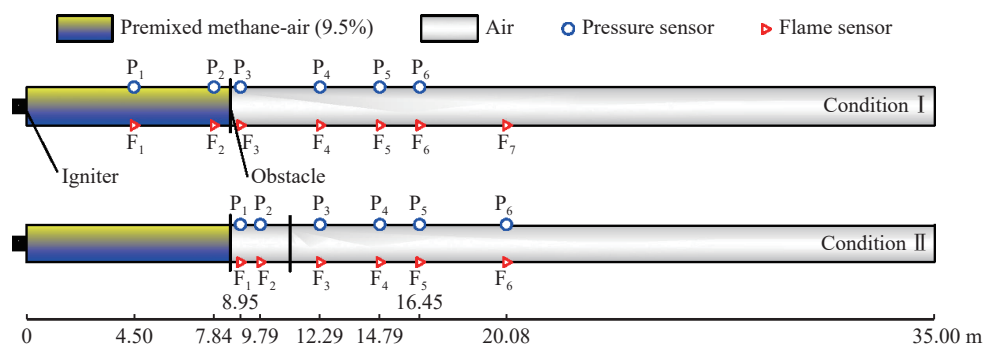


图 2 实验工况

Fig. 2 Experimental conditions

实验工况 II: 在实验工况 I 的基础上, 于第 4 节与第 5 节管道间增设一道 BOPP 薄膜, 薄膜间距为 2.5 m, 探究柔性障碍物数量对激励效应的促进作用。

2.4 实验步骤

- (1) 根据道尔顿分压定律在储气罐中预先配置 9.5% 体积分数的甲烷空气预混气体。
- (2) 将 BOPP 薄膜装载至工况对应位置, 并确保气密性。
- (3) 前 3 节管道抽真空, 并将预混气充入管道, 直至前 3 节管道内甲烷预混气体初压为 101.325 kPa。
- (4) 在点火端将变压器调至 5 kV, 通过信号发生器控制多通道同步控制器实现点火及数据采集。

3 实验结果分析

3.1 柔性障碍物对激波火焰的影响

实验工况 I 下的激波特征参数如表 1 所示, 表中参数均为激波第一次扫过相应传感器的参数, 激波传播速度由相邻传感器的间距除以激波第一次扫过该相邻传感器的时间差所得, 膜前传感器 P_2 膜后传感器 P_3 不参与激波传播速度的计算。

表 1 工况 I 下激波特征参数

Table 1 Characteristic parameters for shock wave under experimental condition I

压力传感器	激波到达时刻/ms	波阵面位置/m	超压/kPa	激波传播速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	马赫数
P_1	66.37	4.50	42.70	396.67	1.12
P_2	74.79	7.84	43.25		
P_3	197.21	8.95	74.43	424.94	1.23
P_4	205.07	12.29	70.59		
P_5	211.10	14.79	53.07	406.86	1.18
P_6	215.18	16.45	49.32		

由表 1 可看出, 激波到达传感器 P_2 及 P_3 的时刻存在较长时间差, 近 120 ms, 在此时段内, 激波在可燃气体中发生多次复杂的反射过程, 结合膜后传感器 P_3 在 197.21 ms 测得的激波信号, 说明位于 8.54 m 处的膜片在 197.21 ms 前的某一时刻破裂, 且该时刻与 197.21 ms 十分接近。结合后续传感器数据, 激波与火焰多次作用后, 特征参数均有较高的上升量, 超压从 43.25 kPa 上升至 74.43 kPa, 增幅为 72.09%; 激波传播速度由 396.67 m/s 上升至 424.94 m/s, 增幅为 7.13%; 马赫数从 1.12 上升至 1.23, 增幅为 9.82%, 由于膜片前后流体介质的不同, 马赫数的提升幅度可更直观地体现激波的变化。破膜后在空气中传播的激波则呈衰减趋势。

工况 I 下的火焰特征参数如表 2 所示, 火焰传播速度由相邻传感器的间距除以火焰传播至相邻传感器的时间差所得。

表 2 工况 I 下的火焰特征参数

Table 2 Characteristic parameters for flame under experimental condition I

火焰传感器	火焰到达时刻/ms	火焰锋面位置/m	火焰传播速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
F_1	165.11	4.50	64.30
F_2	217.05	7.84	
F_3	222.31	8.95	231.62
F_4	236.73	12.29	
F_5	243.70	14.79	358.68
F_6	246.78	16.45	
F_7		未出现火焰	538.96

由表 2 可得, 火焰在 165.11、217.05 ms 时依次传播经传感器 F_1 、 F_2 , 另外由表 1 得出破膜时刻与 197.21 ms 十分接近, 表明在破膜瞬间, 火焰传播至传感器 F_1 、 F_2 之间, 还有近 1 m 的预混气体没有燃烧, 这部分气体将在膜片破裂后继续燃烧。未燃气体在激波作用下向管道下游运动, 火焰速度在叠加未反应气体的运动速度后, 由 64.30 m/s 突增至 211.03 m/s。若将该过程看作理想状态, 即超压 70 kPa 的激波以 400 m/s 速度在空气中传播, 波后受扰动气体流动速度经计算后约为 135.34 m/s, 与实验中火焰叠加速度较为吻合。结合后续传感器数据, 火焰速度将持续增加, 且增幅较大, 在观测到的火焰数据中, 最高速度可达 538.96 m/s, 是初始火焰的 8.4 倍, 而在末端传感器 F_7 处未发现火焰, 表明在此之前, 所有可燃气体均已燃烧完毕。

为分析激励效应机理, 绘制障碍物前激波、火焰阵面运动轨迹示意图(见图 3)及传感器 P_1 、 P_2 测得的压力变化曲线(见图 4~5)。将激波首次扫过传感器 P_1 的时刻称为 a(见图 3~4), 扫过传感器 P_2 的时刻称为 a'(见图 3、5), 依次类推。

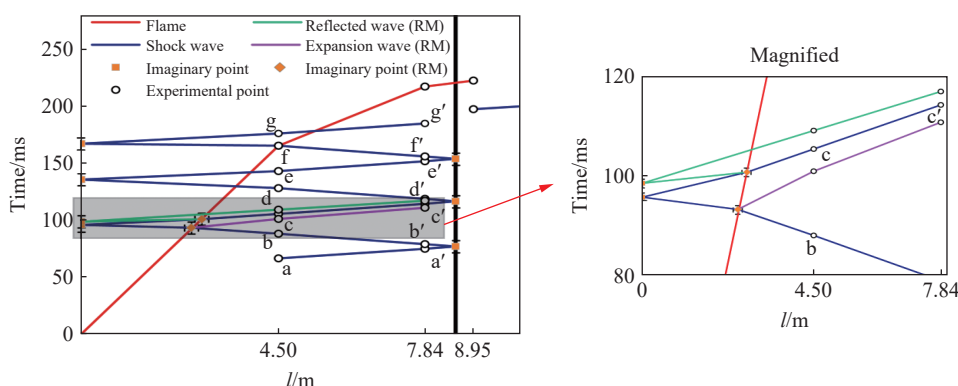


图 3 运动轨迹示意图

Fig. 3 Schematics of shock wave and flame front propagation

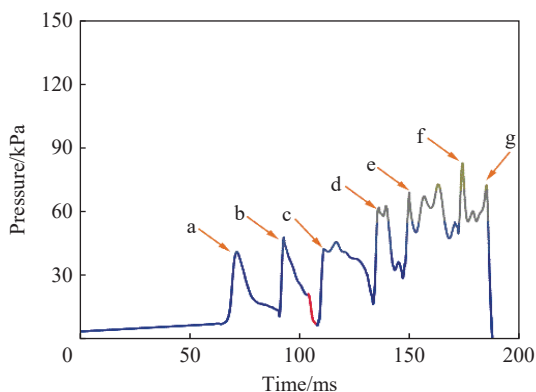


图 4 传感器 P_1 测得的压力变化

Fig. 4 Pressure-time history measured by pressure sensor P_1

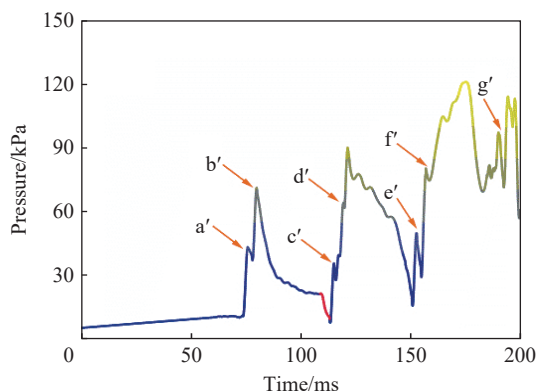


图 5 传感器 P_2 测得的压力变化

Fig. 5 Pressure-time history measured by pressure sensor P_2

由图 3 可知, 经障碍物反射后的激波在 87.97 ms(b)扫过传感器 P_1 , 之后在点火端壁面反射, 105.39 ms(c)再次扫过传感器 P_1 , 而相应的火焰传感器在 165.1 ms 测得火焰信号(见表 2), 因此可判定, 在 87.97~105.39 ms 这一时段内, 火焰与激波先相向相遇, 随后激波经点火端反射后追赶火焰并再次与火焰相遇。在激波与火焰相互作用后, 传感器 P_1 采集到的数据(c~d)由原先“突跃-缓降”变为“起伏不定”的形式(见图 4)。

在障碍物被破坏前, 激波将在点火端壁面与障碍物间不断振荡, 并与火焰发生多次相互作用, 激

波特征参数见表 3, 其中箭头 \rightarrow 表示激波从传感器 P_1 传向传感器 P_2 , \leftarrow 表示激波从传感器 P_2 传向传感器 P_1 。

表 3 实验工况 I 下激波振荡部分特征参数

Table 3 Characteristic parameters of shock wave oscillation under experimental condition I

激波到达传感器 P_1		方向	激波到达传感器 P_2		激波传播速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
时刻/ms	超压/kPa		时刻/ms	超压/kPa	
66.37 (a)	41.055	\rightarrow	74.79 (a')	42.151	396.67
87.97 (b)	31.252	\leftarrow	78.84 (b')	32.897	365.83
105.39 (c)	41.538	\rightarrow	114.27 (c')	39.477	376.13
128.00 (d)	29.059	\leftarrow	118.63 (d')	33.993	356.46
142.96 (e)	50.991	\rightarrow	151.59 (e')	51.539	387.02
165.20 (f)	38.823	\leftarrow	155.77 (f')	41.990	354.19
175.91 (g)	25.231	\rightarrow	184.69 (g')	37.462	380.41

由表 3 可知, 在绝对坐标系下, 从点火到形成激波稳定传播, 波速为 396.67 m/s , 超压约为 42 kPa , 经薄膜反射后, 激波朝点火端运动, 此时激波在已受扰动的流场中传播, 即在非定常流场中, 反射波的强度总是要低于入射波的强度^[21-22]。结合后续激波振荡特性, 可知经与火焰相互作用后的激波超压、速度均会上升。

激波与火焰相互作用的过程十分复杂, 相遇过程可视作激波作用于不同密度的流体界面, 流体界面一侧为高密度未反应气体, 另一侧为低密度已反应气体。当激波从高密度区域进入低密度区域时, 会出现反射、透射, 反射波为膨胀波朝相反方向运动, 透射波为激波继续以原方向运动; 当激波从低密度区进入高密度区时, 反射波、透射波均为激波^[16,23]。结合图 3, 经障碍物反射的激波在流体界面发生 RM 不稳定, 形成膨胀波向相反方向运动, 即朝障碍物运动, 图 4 中 b~c 和图 5 中 b'~c' 均可看到膨胀波的作用 (红色曲线), 透射激波继续运动与点火端壁面发生固壁发射, 然后追赶火焰, 当激波从已反应气体与未反应气体界面穿过时, 再次发生透射与反射, 透射激波朝障碍物运动, 反射激波朝点火端壁面运动, 因此可看到图 4 中 c~d 起伏不定的现象, 即有一道激波先行扫过, 气体压力发生突跃, 在第 2 道激波再次扫过后, 图像中出现“小的突起”。

随着反应的进行, 激波与火焰的作用次数增多, RM 不稳定引起的反射膨胀波、反射激波的数量增加, 激波由原先的单道强间断演化为由多道波组成的波系。因此图像的复杂程度随之上升, 尤其图 5 中 d'~f' 区域, 单借助传感器数据已无法对这种复杂相互作用全面分析。

由图 4~5 可知, 在破膜前超压已达 70 kPa 以上。膜片破裂瞬间, 火焰在未反应气体的高速伴流作用下, 速度大幅上升, 并在破膜后不断加速。由图 6 可知, 在 243.7 ms , 传感器 P_5 测得波系中的一道强激波扫过, 压力接近 250 kPa , 结合表 2, 火焰锋面在 243.7 ms 时到达传感器 F_5 (P_5), 可得知火焰经加速后已逐渐逼近前驱冲击波。当火焰锋面与激波阵面间距缩小时, 无需消耗过多的能量于管壁热损失等作用, 于是化学反应区

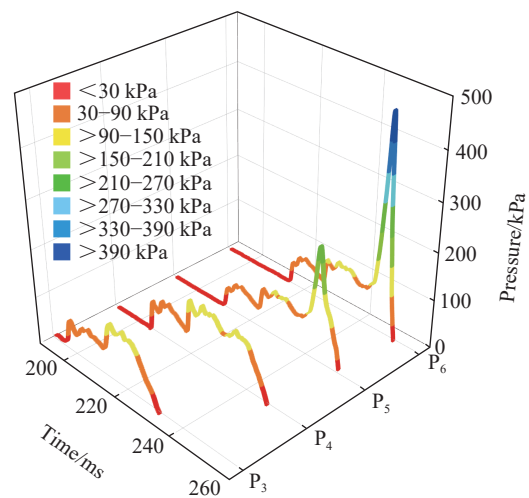


图 6 实验工况 I 下障碍物后压力传感器测得的压力变化曲线
Fig. 6 Pressure-time histories measured by different pressure sensors behind obstacle under experimental condition I

可提供更多的能量支持激波的传播。因此膜后爆炸压力大幅上升是由湍流火焰持续加速, 逐渐逼近前驱冲击波所致。

3.2 柔性障碍物数量对激励效应的影响

工况 II 中, 由表 4 可知, 第 2 道膜片前后传感器测得压力信号相差时间为 25 ms。将工况 I 膜后激波的变化与工况 II 在两道膜间的变化相比较, 发现趋势基本一致, 工况 II 激波从 78.34 kPa 降低至 71.78 kPa, 导致第 2 道膜片不能被直接破坏, 而由于下降幅度并不大, 在 25 ms 内, 激波经与火焰相互作用后, 可使激波再次增强至破坏膜片的强度。

表 4 实验工况 II 下的激波特征参数

Table 4 Shock wave characteristic parameters under experimental condition II

压力传感器	激波到达时刻/ms	波阵面位置/m	超压/kPa	激波传播速度/(m·s ⁻¹)	马赫数
P ₁	203.01	8.95	78.34	444.44	1.28
P ₂	204.90	9.79	71.78		
P ₃	230.26	12.29	91.41	448.83	1.30
P ₄	235.83	14.79	78.28	439.15	1.27
P ₅	239.61	16.45	66.30	447.60	1.29
P ₆	247.72	20.08	92.12		

激波在与火焰多次作用后, 超压上升至更高的 91.41 kPa(见表 4、图 7), 同时将表 5 与表 2 对比发现, 当火焰传播至相同位置时, 工况 II 的火焰速度均高于工况 I, 说明这种激励效应有所增强, 而激励效应的“强弱”, 实质是由激波火焰相互作用的次数决定, 当增设一道薄膜时, 激波与火焰相互作用次数增多, 于是在膜后相同位置, 火焰可达到更高速度, 再结合第 2 道膜前后传感器测得压力信号的时间差远低于第 1 道膜, 可推断如果膜片的数量在一定范围内增多, 后续膜片的作用实际则是越来越弱。由图 7 可知, 经湍流火焰持续加速导致 P₃~P₆ 传感器在 259.28 ms 后均出现较高的超压, 与图 6 对比, 发现增加薄膜数量可以使测得高压的位置提前(工况 I 在距点火端 14.79 m 处测得高压, 工况 II 则在 12.29 m), 出现该现象的原因也是由于激波火焰作用次数增多, 相比工况 I, 火焰可在更短距离内逼近前驱冲击波, 导致膜后高压测点前移。

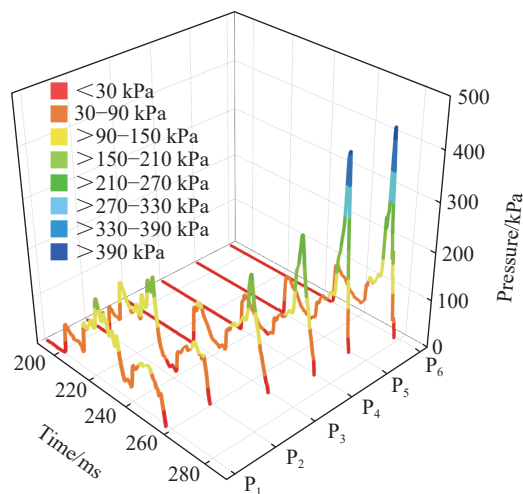


图 7 实验工况 II 下压力传感器测得的压力变化曲线

Fig. 7 Pressure-time histories measured by different pressure sensors under experimental condition II

表 5 实验工况 II 下的火焰特征参数

Table 5 Flame characteristic parameters under experimental condition II

火焰传感器	火焰到达时刻/ms	火焰锋面位置/m	火焰传播速度/(m·s ⁻¹)
F ₁	247.39	8.95	223.98
F ₂	250.98	9.79	301.20
F ₃	259.28	12.29	436.30
F ₄	265.01	14.79	568.49
F ₅	267.93	16.45	
F ₆	未出现火焰		

4 结 论

通过在管道内甲烷爆炸传播路径上布设双向拉伸聚丙烯薄膜, 测试该薄膜前后激波与火焰特征参数得出以下结论:

(1) 在爆炸初期激波不够强时, 柔性障碍物可使激波反射朝向火焰运动, 在后续激波与火焰相互作用后可形成一种特殊机制。该机制为柔性障碍物激励效应的实质, 即激波使层流火焰发展为湍流火焰, 化学反应速率随之提升, 激波增强, 达到破坏膜片的强度; 膜片破裂后, 火焰在伴流作用下, 速度突增; 湍流火焰在传播中可持续加速, 并逐渐逼近前驱冲击波, 导致爆炸压力大幅提高。

(2) 通过在薄膜位置 2.5 m 后增设一道膜片, 可使激励效应增强, 但效果是逐渐减弱的, 增加薄膜的实质是使激波与火焰相互作用的次数增加, 火焰可在更短距离内达到较高的传播速度。

(3) 从实验结果看, 柔性置障条件下, 火焰与爆炸波应存在更猛烈的相互作用, 即存在更大冲击波压力峰值和火焰速度。

由于传感器测试极限的限制, 无法进一步实验, 后续将在传感器测试的基础上, 增加高速摄影、激光纹影等光测技术, 从流场结构演化分析, 进一步探究这种复杂的激励效应。

参考文献:

- [1] 林柏泉, 周世宁, 张仁贵. 障碍物对瓦斯爆炸过程中火焰和爆炸波的影响 [J]. *中国矿业大学学报*, 1999, 28(2): 104-107. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-1964.1999.02.002.
LIN B Q, ZHOU S N, ZHANG R G. Influence of barriers on flame transmission and explosion wave in gas explosion [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1999, 28(2): 104-107. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-1964.1999.02.002.
- [2] 何学秋, 杨艺, 王恩元, 等. 障碍物对瓦斯爆炸火焰结构及火焰传播影响的研究 [J]. *煤炭学报*, 2004, 29(2): 186-189. DOI: 10.3321/j.issn: 0253-9993.2004.02.014.
HE X Q, YANG Y, WANG E Y, et al. Effects of obstacle on premixed flame microstructure and flame propagation in methane/air explosion [J]. *Journal of China Coal Society*, 2004, 29(2): 186-189. DOI: 10.3321/j.issn: 0253-9993.2004.02.014.
- [3] 徐景德, 张莉聪, 黎体发, 等. 煤矿瓦斯爆炸事故中矿车激励效应的数值模拟 [J]. *爆炸与冲击*, 2012, 32(1): 47-50. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)01-0047-04.
XU J D, ZHANG L C, LI T F, et al. A numerical simulation of stimulating effect of tramcars during the methane explosion propagation [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(1): 47-50. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)01-0047-04.
- [4] 徐景德, 黎体发, 张莉聪, 等. 瓦斯爆炸传播过程中矿车激励效应的实验研究 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2011, 7(2): 5-8. DOI: 10.3969/j.issn.1673-193X.2011.02.001.
XU J D, LI T F, ZHANG L C, et al. Experiment study of inspirit affection by the tramcar during the methane explosion propagation [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2011, 7(2): 5-8. DOI: 10.3969/j.issn.1673-193X.2011.02.001.
- [5] 徐景德. 矿井瓦斯爆炸冲击波传播规律及影响因素的研究 [D]. 北京: 中国矿业大学 (北京), 2003: 14-19.
- [6] 景国勋, 吴昱楼, 郭绍帅, 等. 障碍物对瓦斯煤尘爆炸火焰传播规律的影响 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2019, 15(9): 99-104. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2019.09.016.

- JING G X, WU Y L, GUO S S, et al. Influence of obstacle on flame propagation laws of gas and coal dust explosion [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2019, 15(9): 99–104. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2019.09.016.
- [7] 余明高, 纪文涛, 温小萍, 等. 交错障碍物对瓦斯爆炸影响的实验研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2013, 42(3): 349–354. DOI: 10.13247/j.cnki.jcumt.2013.03.004.
- YU M G, JI W T, WEN X P, et al. Experimental study of the influence of staggered obstacles on gas explosion [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2013, 42(3): 349–354. DOI: 10.13247/j.cnki.jcumt.2013.03.004.
- [8] WANG C, CUI Y Y, MEBARKI A, et al. Effect of a tilted obstacle on the flame propagation of gas explosion in case of low initial pressure [J]. *Combustion Science and Technology*, 2020. DOI: 10.1080/00102202.2020.1740689.
- [9] WANG C, MA T B, LU J. Influence of obstacle disturbance in a duct on explosion characteristics of coal gas [J]. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2010, 53(2): 269–278. DOI: 10.1007/s11433-009-0270-3.
- [10] MASRI A R, IBRAHIM S S, NEHZAT N, et al. Experimental study of premixed flame propagation over various solid obstructions [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2000, 21(1–3): 109–116. DOI: 10.1016/S0894-1777(99)00060-6.
- [11] TEODORCZYK A. Scale effects on hydrogen-air fast deflagrations and detonations in small obstructed channels [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2007, 21(2): 147–153. DOI: 10.1016/j.jlp.2007.06.017.
- [12] BAKKE J R, VAN WINGERDEN K, HOORELBEKE P, et al. A study on the effect of trees on gas explosions [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2010, 23(6): 878–884. DOI: 10.1016/j.jlp.2010.08.007.
- [13] 赵衡阳. 气体和粉尘爆炸原理 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996: 13–14.
- [14] 归明月, 范宝春, 于陆军, 等. 入射和反射激波与火焰相互作用的实验和数值显示 [J]. *自然科学进展*, 2007, 17(6): 831–836. DOI: 10.3321/j.issn: 1002-008X.2007.06.019.
- [15] 范宝春, 江强, 董刚, 等. 激波与火焰的相互作用过程 [J]. *爆炸与冲击*, 2003, 23(6): 488–492.
- FAN B C, JIANG Q, DONG G, et al. The time evolution of shock-flame interaction [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(6): 488–492.
- [16] 蒋华. 激波诱导预混火焰界面 RM 不稳定性的数值研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2017: 21–22.
- JIANG H. Numerical study of RM instability on a perturbed interface of premixed flame induced by shock waves [D]. Nanjing: Nanjing University of Science Technology, 2017: 21–22.
- [17] CICCARELLI G, JOHANSEN C T, PARRAVANI M. The role of shock-flame interactions on flame acceleration in an obstacle laden channel [J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(11): 2125–2136. DOI: 10.1016/j.combustflame.2010.05.003.
- [18] GAMEZO V N, OGAWA T, ORAN E S. Numerical simulations of flame propagation and DDT in obstructed channels filled with hydrogen-air mixture [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(2): 2463–2471. DOI: 10.1016/j.proci.2006.07.220.
- [19] 史晓亮. 中尺度瓦斯爆炸试验管道测试系统调试与分析 [D]. 廊坊: 华北科技学院, 2016: 24–26.
- SHI X L. Commissioning and analysis of the test system for the gas explosion shock tube [D]. Langfang: North China Institute of Science and Technology, 2016: 24–26.
- [20] 赖芳芳. 电火源引爆瓦斯的规律和特征研究 [D]. 廊坊: 华北科技学院, 2015: 31–33.
- LAI F F. Study on the law and characteristics of gas explosion ignited by electric fire source [D]. Langfang: North China Institute of Science and Technology, 2015: 31–33.
- [21] 陈强. 激波管流动的理论 and 实验技术 [M]. 合肥: 中国科技大学五系, 1979: 59–61.
- [22] 林柏泉. 煤矿瓦斯爆炸机理及防治技术 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2012: 124–126.
- [23] 何惠琴. 反射激波作用下的 Richtmyer-Meshkov 不稳定性的相关研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015: 3.
- HE H Q. Research on the Richtmyer-Meshkov instability under reshock [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015: 3.

(责任编辑 张凌云)