DOI: 10.11883/bzycj-2017-0172
文章编号: 1001-1455(2018)01-0019-09

障碍物对甲烷/氢气爆炸特性的影响*

余明高[1,2],阳旭峰[1],郑 凯[1],万少杰[1]
(1. 重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室,重庆 400044;
2. 河南理工大学安全科学与工程学院,河南 焦作 454003)

摘要: 通过自主搭建的小尺寸实验平台,研究管道内障碍物阻塞率及形状对当量比为 1 时甲烷/氢气爆炸特性的影响。研究结果表明:相同工况下火焰传播结构基本相似,预混火焰传播路径随障碍物阻塞率增大而变窄;预混火焰传播速度随着障碍物阻塞率与氢气体积分数的增大而上升,也随着障碍物形状的改变而产生变化;最大爆炸超压随着障碍物阻塞率和氢气体积分数的增大而增大,达到最大爆炸超压的时间随着阻塞率的增大而缩短;混合气体在管道内爆炸特性受障碍物与混合气体中氢气体积分数共同影响,氢气体积分数小于 50%时,受障碍物与混合气体共同影响,氢气体积分数大于 50%时,主要受混合气体燃烧特性影响。此研究能够为甲烷/氢气的安全利用提供理论基础。

关键词: 阻塞率;障碍物形状;甲烷/氢气;爆炸特性
中图分类号: O381;X932 **国标学科代码**:1303510 **文献标志码**: A

掺氢碳氢燃料是未来能源发展的趋势,而燃料掺氢后能够明显增加混合气体的爆炸危险性。近年来,学者们针对添加氢气对甲烷爆炸特性的影响已进行了大量研究。Ma 等[1-2]通过实验与数值计算的方法研究发现最大爆炸压力和爆炸温度随氢气体积分数增大呈线性升高。Yu 等[3]对不同氢气体积分数条件下的甲烷/氢气预混火焰传播特性进行详细的研究。Salzano 等[4]、Faghih 等[5]的研究表明:当氢气体积分数小于 70%时,预混气体爆炸特性受氢气影响较小,此时爆燃指数随气体体积分数增加缓慢;而氢气体积分数大于 70%时,预混气体爆炸特性主要受氢气主导,此时爆燃指数呈指数增长。

可燃气体爆炸会受环境中障碍物的影响,障碍物的存在会加剧火焰传播过程中的湍流现象,而火焰/湍流的耦合作用对火焰传播速度有巨大的促进作用[6-7]。管道内障碍物阻塞率和障碍物数量的不同会对管道内预混火焰传播特性造成巨大影响。大量研究发现:在一定范围内,预混火焰传播速度与峰值超压均随着障碍物阻塞率以及障碍物数量的增加而上升[8-11],而上升速率与障碍物的几何形态有关。丁以斌等[12]、王成等[13]通过实验研究不同形状障碍物对火焰传播速度和爆炸超压的影响,发现平板障碍物对火焰传播影响较大。Wen 等[14]通过研究交错障碍物对甲烷/空气爆燃火焰传播特征的影响,发现当障碍物位于中间位置的爆炸超压与火焰传播速度要远远大于障碍物位于两侧时。Na'inna 等[15-16]研究了障碍物间距对爆炸超压与火焰传播速度的影响,发现两障碍物之间存在一个最佳距离,使得爆炸超压与火焰传播速度达到最大值。

添加氢气和增加障碍物阻塞率均能改变甲烷气体的爆炸特性,但前人研究主要局限于某一个影响因素,而对甲烷气体爆炸规律受障碍物与氢气共同影响的研究较少。本文中在自制小尺寸实验平台上开展不同氢气体积分数条件下障碍物阻塞率及障碍物形状对甲烷爆炸特性的影响,获取不同障碍物阻塞率与形状下甲烷/氢气预混火焰传播结构、火焰传播速度和爆炸超压等数据,探索管道内障碍物阻塞率及形状对甲烷/氢气爆炸特性的影响规律,以期为后续研究提供参考。

* **收稿日期**: 2017-05-16; **修回日期**: 2017-09-11
基金项目: 国家自然科学基金项目(U1361205,51574111,50974055);
重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室自主研究课题重点项目(2011DA105287-ZD201401)
第一作者: 余明高(1963—),男,博士,教授,博士生导师,mg_yu@126.com。

1 实 验

为研究管道内障碍物阻塞率及形状对甲烷/氢气预混气体爆炸特性的影响，自主搭建小尺寸实验平台来捕捉管道内预混火焰传播行为。平台由实验管道、配气系统、点火系统和数据采集系统组成。实验管道尺寸为 100 mm×100 mm×500 mm，由透明石英玻璃制成，以便高速摄像机捕捉预混火焰传播行为。管道底部采用不锈钢钢板进行封闭，管道顶部(泄爆端)采用 PVC 薄膜封闭。配气系统主要使用 3 个高灵敏度质量流量控制器按照气体分压定律进行直接配气。点火装置、压力传感器和进气口均安装于管道底部钢板的中央位置，三者相距 20 mm。光电传感器安装于管道外部并指向点火位置，用于标定火焰传播时间。实验过程中采用高频脉冲点火器点火，点火电压为 6 V，点火能量为 0.2 J；利用数据采集卡采集爆炸过程中的压力信号，采集频率为 15 kHz；采用高速摄像仪采集预混火焰传播图像，采集频率为 5 000 s^{-1}。为对比分析障碍物阻塞率及形状对当量比为 1 时，甲烷/氢气预混气体爆炸特性的影响，实验在 4 个工况中进行，其障碍物阻塞率分别为 0.3、0.4、0.5 和 0.5，其中工况 3 与工况 4 障碍物形状不同，各实验工况如图 1 所示。预混气体中氢气体积分数分别为 0%、25%、50%、75%和 100%。

预混气体中氢气体积分数可按下式计算：

$$\varphi=\frac{V(H_2)}{V(H_2)+V(CH_4)} \tag{1}$$

式中：$V(H_2)$为氢气体积，$V(CH_4)$为甲烷体积。

燃料当量比为：

$$\Phi=\frac{F}{A}\Big/\frac{F}{A}\Big|_{stoic}$$

式中：F/A 为燃料与空气体积比，$(F/A)|_{stoic}$ 为燃料与空气的燃空当量比。$\Phi<1$ 为贫燃；$\Phi=1$ 为化学计量浓度；$\Phi>1$ 为富燃。

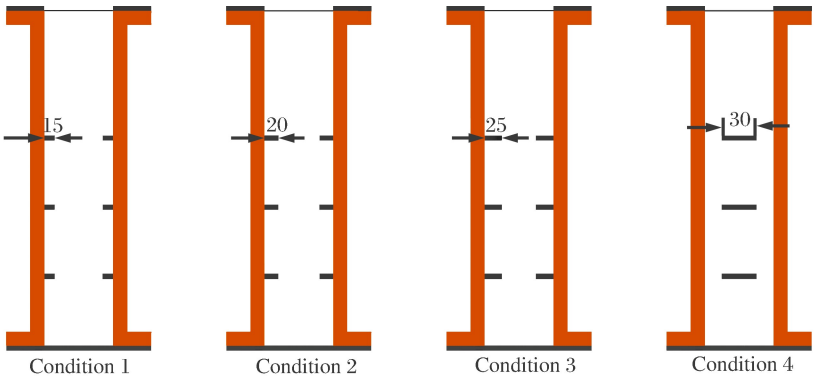


图 1 实验工况设置

Fig. 1 Experimental conditions

2 实验结果分析

2.1 对预混火焰传播结构的影响

对高速摄像机采集到的爆炸预混火焰传播图像进行处理，得到火焰锋面结构随时间变化图像。图 2所示为各工况在氢气体积分数为 50%时的预混火焰传播图像。从图中可以看出，点火初期各工况火焰传播结构基本相同[17-18]。火焰传播遇障碍物后，由于障碍物阻塞率与形状的变化，其传播结构出现明显差异。在图 2(a)～(c)中，在火焰经过第 1 组障碍物时，由于障碍物的阻碍作用与已燃气体的膨胀作用，火焰锋面被拉长，形成尖端火焰锋面，且随着障碍物阻塞率的增加，这一现象变得更加明显。经过拉伸的火焰由第 1 组障碍物中间的空隙喷出，形成“蘑菇状”火焰结构。通过障碍物后的火焰在高压气流的作用下向两侧不断产生卷吸和褶皱，导致火焰传播结构变得扭曲，从而使得大量未燃烧气体与高温

燃烧气体混合[14]，进而导致预混火焰传播由层流向湍流转变。障碍物的阻塞率越大，经过障碍物时火焰锋面拉伸越长，形成的火焰通道越窄，加速效应愈明显。在图 2(d)中，障碍物位于管道中央位置，当火焰传播到第 1 组障碍物时，火焰前锋被障碍物压平，此后由于已燃气体膨胀产物的压缩作用与障碍物的阻挡作用，火焰由障碍物两侧空隙向下游喷出，形成两束火焰前锋。穿过障碍物后的火焰前锋在高压气流的作用下不断的卷吸和扭曲，形成“舌状”火焰前锋。由于火焰前锋的卷吸作用，这 2 个独立火焰锋面逐渐向管道中心轴线靠拢，重新结合在一起，在这一过程中，预混火焰完成由层流向湍流的转变[19]。实验中含有 3 组障碍物，火焰通过每组障碍物时其传播结构会经历相似的变化过程。但经过的障碍物数量越多，火焰湍流特征越明显，火焰前锋变得更扭曲。

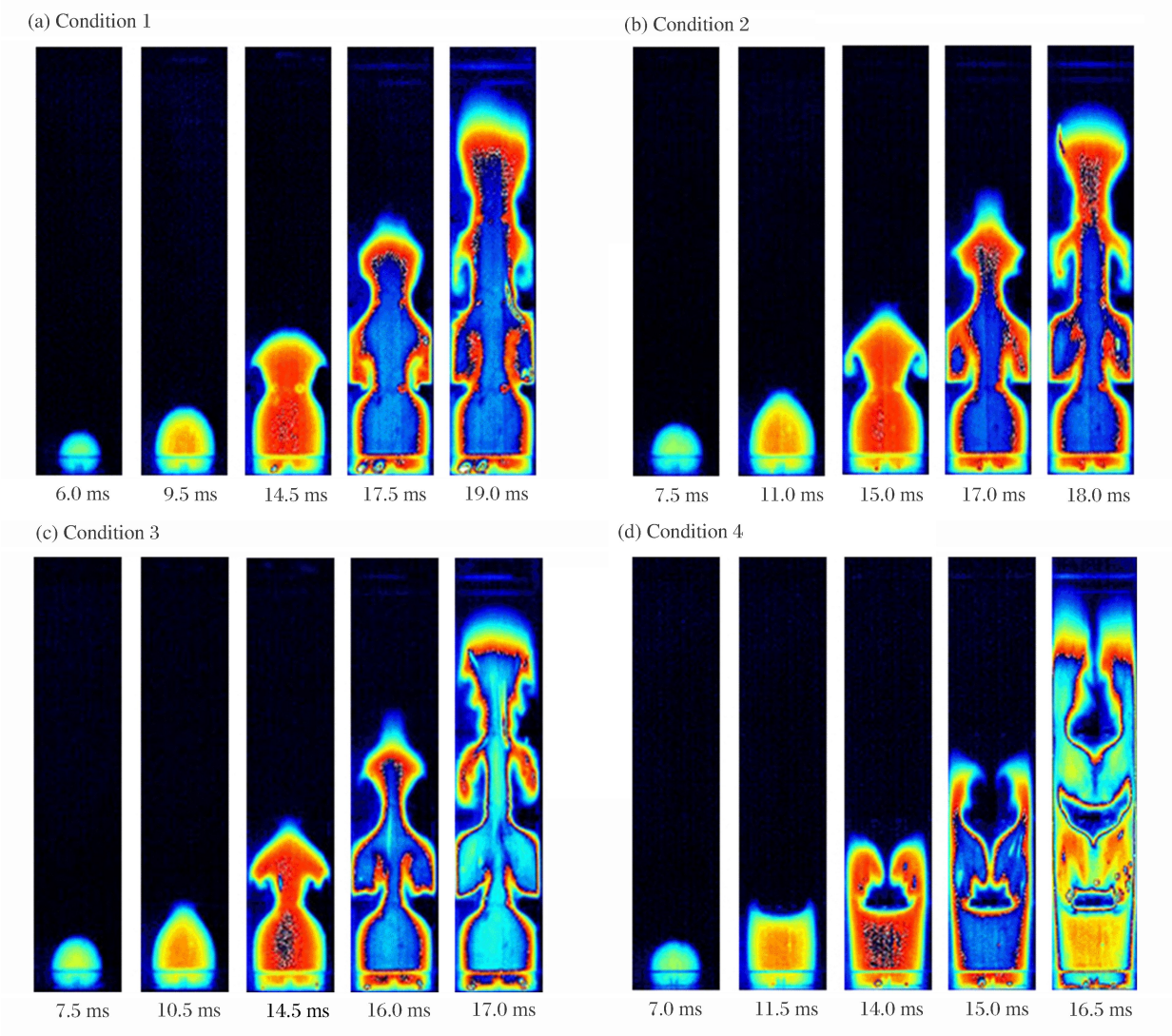


图 2　混合气体氢气体积分数为 50%时各工况预混火焰传播图像

Fig. 2　Flame evolution structure for various conditions with 50% hydrogen fraction of stoichiometric mixtures

图 3 所示为工况 3 在混合气体氢气体积分数分别为 $\varphi=0$，25%，75%和 100%时预混火焰传播过程中的结构变化，$\varphi=50\%$的结果则在图 2(c)中给出。从图 3 中可以看出，随着氢气体积分数的增加，火焰颜色发生明显变化。当氢气体积分数为零时，在点火后，火焰传播初期呈淡蓝色，随着氢气体积分数的增加，火焰颜色逐渐出现黄色、红色，这是由于甲烷与氢气燃烧时，自由基浓度及其光谱不同而造成火焰颜色的变化[20]。随着氢气体积分数的增大，火焰变得更加明亮，这表明火焰温度随着氢气体积分数的增大而升高[21]。相同工况条件下预混火焰传播结构变化趋势基本相同，但是随着预混气体中氢气体积分数的增加，预混火焰稳定性逐渐减弱，使得火焰锋面变得更加扭曲。

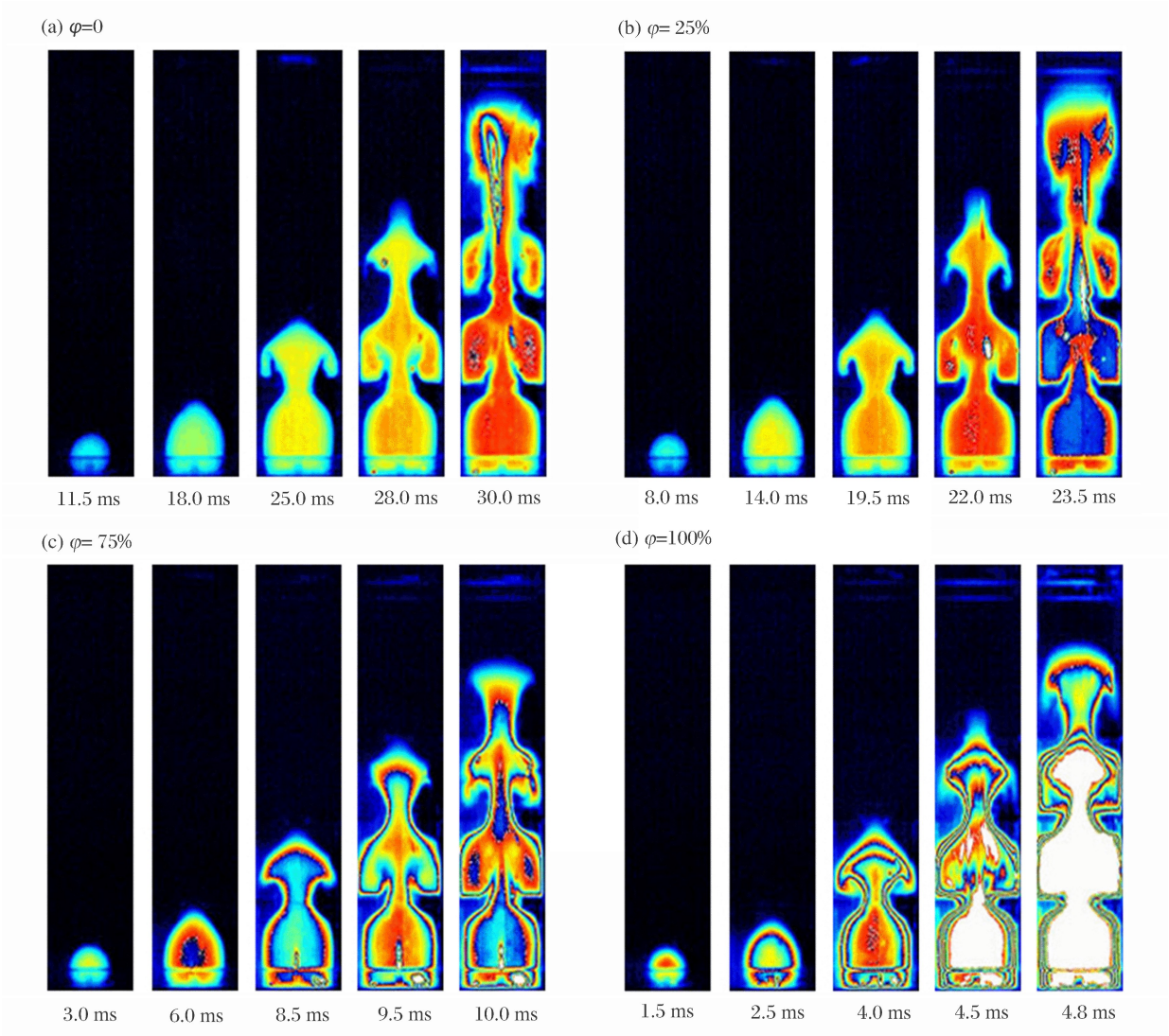


图 3 不同氢气体积分数时工况 3 预混火焰传播图像

Fig. 3 Flame evolution structure for condition 3 with different hydrogen fractions of stoichiometric mixtures

2.2 对预混火焰传播速度的影响

对高速摄像机拍摄到的火焰传播图像进行计算处理，得到火焰前锋速度随位置变化曲线。图 4 所示为氢气体积分数 $\varphi=0$，50%，100%时，不同工况下火焰前锋位置与速度的变化曲线。从图 4 中可以看出，相同氢气体积分数条件下，各工况在火焰传播初期的火焰传播速度变化曲线基本保持重合。经第 1 组障碍物作用后，各工况火焰传播速度变化趋势基本相似，即火焰传播速度经过障碍物时经历先加速后减速然后再次加速的过程，这是由于经过障碍物时火焰被拉伸使得火焰加速，经过障碍物后火焰会向两侧或中央卷吸使得速度下降；火焰传播速度大小出现明显的差别，这是由障碍物阻塞率变化而致使预混火焰湍流强度的变化所引起的，阻塞率越大时湍流强度越大，火焰/湍流耦合效应对火焰传播速度的加速效应愈发明显。火焰传播速度会随着障碍物阻塞率的增加而增大。对比工况 3 和 4 可以看出，阻塞率相同时，障碍物形状对火焰传播速度具有较大的影响。工况 4 的火焰传播速度明显大于工况 3，且工况 4 的火焰传播速度变化更加剧烈。这主要因为障碍物位于管道中间位置时，经过障碍物后火焰锋面面积变化幅度较大，产生的火焰/湍流耦合效应对火焰速度的激励作用更加明显。

对比图 4(a)～(c)中火焰前锋位置-速度图可以看出，当混合气体中氢气体积分数较低($\varphi\leqslant50\%$)时，火焰传播速度均呈现出先增加后下降再增加的变化趋势；而氢气分数为 75%和 100%时，火焰传播速度在经过第 1 组障碍物后呈近似直线增长。火焰传播经第 1 组障碍物作用后会由层流转变为湍流，

且实验过程中含有 3 组障碍物，而障碍物的数量能够明显增加火焰传播过程中的湍流强度[22]。当混合气体中氢气体积分数 $\varphi \leqslant 50\%$ 时，氢气对火焰传播速度的增加效果较弱，火焰传播速度较慢，增加预混火焰湍流强度能够明显增加预混火焰传播速度；在氢气体积分数较大（$\varphi > 50\%$）情况下，预混火焰传播速度非常大，当预混火焰为湍流传播时，火焰/湍流耦合效应对火焰传播速度的加速效果并不明显[23]，此时燃料自身燃烧特性对火焰传播速度的影响占据主导性作用，而湍流效应影响甚微。

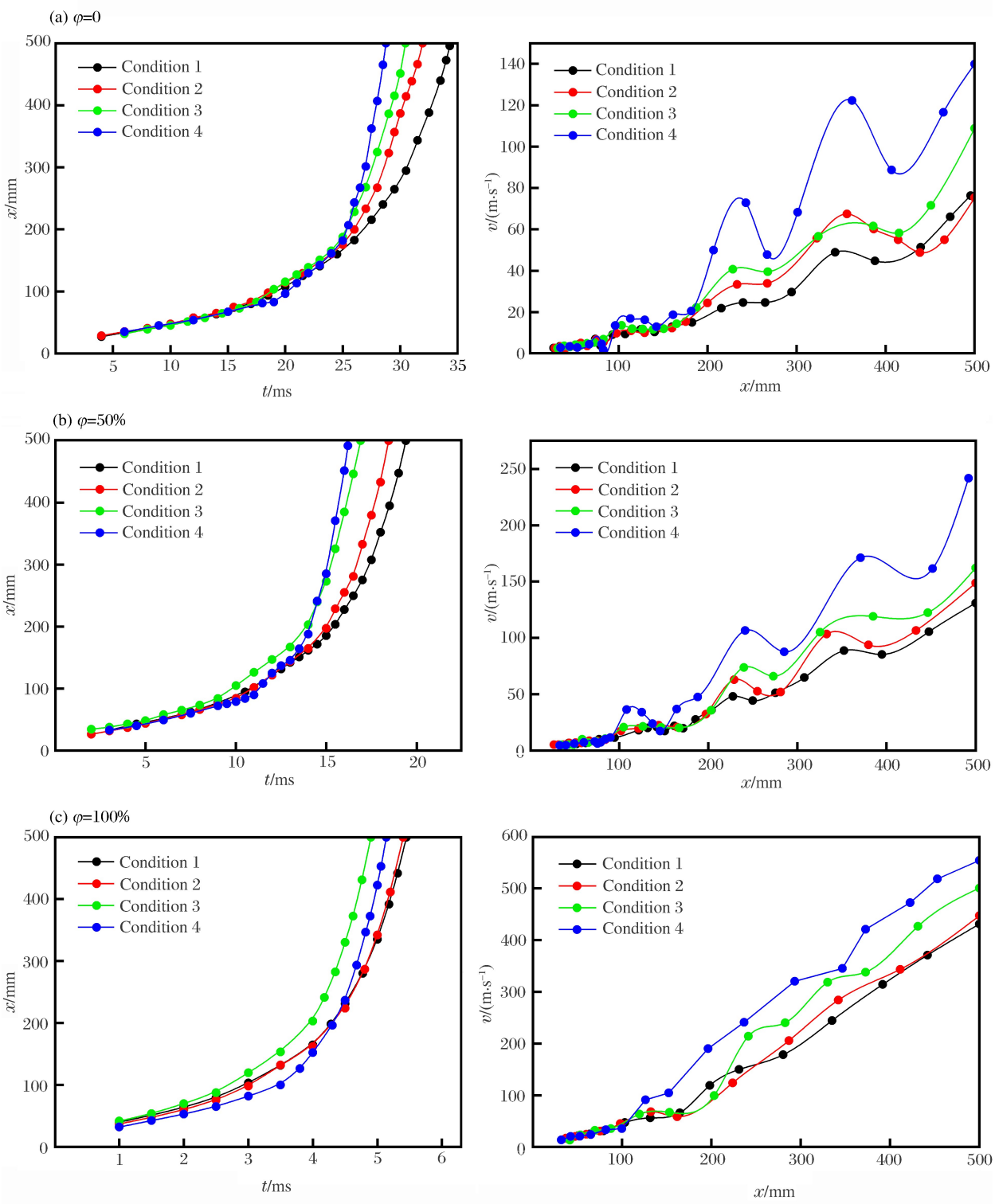


图 4　不同工况下火焰传播参数变化曲线

Fig. 4　Flame propagation parameters under different working conditions

表 1 给出各工况预混火焰传播至管道出口所需时间 t。从表中可以看出,添加氢气、增加障碍物阻塞率和改变障碍物形状均能使得火焰传播至出口所需时间缩短。对于工况 1,在氢气体积分数从零增大到 100%的过程中 t 相应地从 34.30 ms 缩短到 5.45 ms,减少了 84.11%。对于氢气体积分数为零阻塞率由 0.3 增大到 0.5 时,t 相应地从 34.30 ms 缩短到 30.45 ms,缩短 11.22%。而氢气体积分数为零时障碍物位于两侧与中间的 t 分别为 30.45 ms 和 28.75 ms,缩短 5.58%。对数据对比分析可以看出,障碍物阻塞率与形状对预混火焰传播至出口所需时间明显影响要小于增加氢气体积分数对预混火焰传播至出口所需时间的影响。

表 1 预混火焰传播至出口所需时间

Table 1 Time of flame needed to arrive at the vent

φ/%	t/ms			
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
0	34.30	31.95	30.45	28.75
25	25.68	24.95	23.90	22.90
50	19.40	18.45	17.30	16.20
75	11.58	11.30	10.45	9.50
100	5.45	5.40	5.00	5.14

2.3 对超压的影响

图 5 给出各工况在氢气体积分数 $\varphi=0$ 和 $\varphi=50\%$时的压力随时间变化规律曲线。对比图 5 可以发现,当预混气体中氢气体积分数在一定范围内($\varphi\leqslant50\%$),能够从压力曲线中明显观测到泄爆压力,此后泄爆压力会随着混合气体中氢气体积分数的增大而消失;达到最大超压的时间会随着障碍物阻塞率及氢气体积分数的增大而减小;当障碍物位于管道中间时达到最大超压的时间要小于障碍物位于管道两侧时的时间。根据 Ibrahim 等[24]的定义,管道内出现的第 1 个压力峰值为泄爆压力;第 2 个压力峰值称为峰值超压,此压力值为管道最大超压。但从图中 5(a)中可以发现,各工况在泄爆压力形成之后最大超压形成之前的时间段内均出现 1 个压力峰值,该压力峰值会随着障碍物阻塞率的增大而变的不明显,也随着混合气中氢气体积分数的增大而消失。这与 Ibrahim 等人结果出现明显差异。Ibrahim 等[24]的实验过程中管道内仅含有 1 组障碍物,而本文中实验管道内含有 3 组障碍物。可以认为,此现象是由管道内障碍物数量变化而引起的。

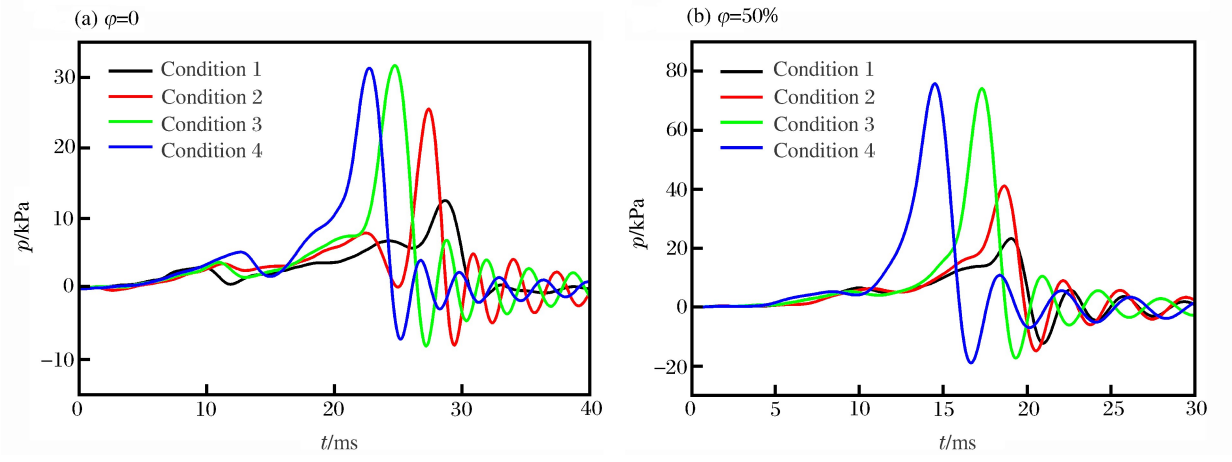


图 5 不同氢气质量分数下压力随时间变化曲线

Fig. 5 Histories of the measured overpressure with different hydrogen fractions of stoichiometric mixtures

图 6 所示为不同工况在不同氢气体积分数条件下的最大超压曲线,从图中可以看出,预混气体最大爆炸超压随着障碍物阻塞率和氢气体积分数的增大而增大。可以将图中最大爆炸超压随体积分数的增长分为 2 个部分。当混合气体中氢气体积分数 $\varphi\leqslant50\%$时,此时各工况最大爆炸超压随氢气体积分数

的增大而缓慢上升。当混合气体中氢气体积分数为零时工况 1 中的爆炸最大超压为 12.55 kPa，而氢气体积分数为 50% 时达到 23.29 kPa，最大超压升高约85.6%；当氢气体积分数为零时，工况 2 的最大爆炸超压为 25.54 kPa，相比于工况 1 中的最大超压升高 103.5%。可以看出，最大爆炸超压受障碍物阻塞率与预混气体中氢气体积分数的共同影响，但此时障碍物阻塞率对最大差压的影响明显占据主要地位。当混合气体中氢气体积分数较大（φ＞50%）时，最大爆炸超压随着氢气体积分数的加而急剧增长，相较于障碍物阻塞率的变化，混合气自身燃烧特性对最大爆炸压力的影响占据主导地位。对于工况 3 和工况 4 在障碍物形状不同、阻塞率相同的情况下，当氢气体积分数小于 50%时，两者最大爆炸超压基本相同；当体积分数大于 50%时，两者最大爆炸差压出现明显差异，障碍物位于管道中间位置时对最大爆炸超压的影响明显大于两侧时的。

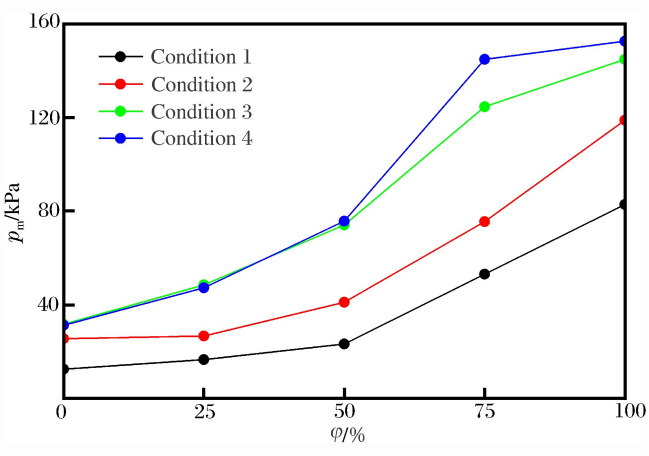


图 6　最大爆炸压力随氢气体积分数变化曲线

Fig. 6　Variation of maximum overpressure with hydrogen fractions of stoichiometric mixtures

3　结　论

通过自主搭建的小尺寸实验平台研究了障碍物阻塞率及形状对甲烷/氢气爆炸特性的影响主要得到以下结论：

(1)相同工况下的火焰传播经障碍物作用后会经历相似的变化过程。障碍物阻塞率越大，火焰前锋拉伸越长，火焰加速效应越明显。增大预混气体中氢气积分数能够明显提高火焰不稳定程度。

(2)预混火焰传播速度随着混合气体中氢气体积分数的增大而上升，而增加障碍物阻塞率能够进一步提高预混火焰传播速度，减少火焰传播至管道出口所需时间。阻塞率一定时，障碍物位于管道中间时的预混火焰传播速度及预混火焰传播速度变化趋势均大于障碍物位于两侧时的情况。

(3)最大爆炸超压随障碍物阻塞率与混合气体中氢气体积分数的增大而增大，但最大爆炸超压出现时间会随障碍物阻塞率和混合气体中氢气体积分数的增大显著减小，泄爆压力会随着混合气体中氢气体积分数的增大而消失。

(4)管道内甲烷/氢气爆炸特性可根据氢气体积分数的不同划分为两个部分。当氢气体积分数 $\varphi\leqslant$ 50%时，爆炸特性受障碍物的激励作用与混合气体燃烧性质共同影响；而在氢气体积分数 φ＞50%时，爆炸特性主要受到混合气体自身燃烧特性的影响。

参考文献：

[1] MA Q J, ZHANG Q, CHEN J C, et al. Effects of hydrogen on combustion characteristics of methane in air[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(21): 11291-11298. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.05.030.

[2] MA Q J, ZHANG Q, PANG L, et al. Effects of hydrogen addition on the confined and vented explosion behavior of methane in air[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, 27(1): 65-73. DOI: 10.1016/j.jlp.2013.11.007.

[3] YU M G, ZHENG K, ZHENG L G, et al. Effects of hydrogen addition on propagation characteristics of premixed methane/air flames[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013, 26(6): 1-9. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.01.017.

[4] SALZANO E, CAMMAROTA F, BENEDETTO D A, et al. Explosion behavior of hydrogen-methane/air mixtures[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2012, 25(3): 443-447. DOI: 10.1016/j.jlp.2011.

11.010.

[5] FAGHIH M, GOU X L, CHEN Z. The explosion characteristics of methane, hydrogen and their mixtures: A computational study[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016,40(22):131-138. DOI:10.1016/j.jlp.2015.12.015.

[6] 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:1000-1964.1992.02.002.
LIN Baiquan, ZHOU Shining, ZHANG Rengui. Influence of barriers on flame transmission and explosion wave in gas explosion[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1999,28(2):104-107. DOI:10.3321/j.issn:1000-1964.1992.02.002.

[7] OH K H, KIM H, KIM J B, et al. A study on the obstacle-induced variation of the gas explosion characteristics [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2001,14(6):597-602. DOI:10.1016/S0950-4230(01)00054-7.

[8] 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(1/2/3):109-116. DOI:10.1016/S0894-1777(99)00060-6.

[9] YU L X, SUN W C, WU C K. Flame acceleration and overpressure development in a semiopen tube with repeated obstacles[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002,29(1):321-327. DOI:10.1016/S1540-7489(02)80043-8.

[10] PARK D J, GREEN A R, LEE Y S, et al. Experimental studies on interactions between a freely propagating flame and single obstacles in a rectangular confinement[J]. Combustion and Flame, 2007,150(1/2):27-39. DOI:10.1016/j.combustflame.2007.04.005.

[11] HALL R, MASRI A R, YAROSHCHYK P, et al. Effects of position and frequency of obstacles on turbulent premixed propagating flames[J]. Combustion and Flame, 2009,156(2):439-446. DOI:10.1016/j.combustflame.2008.08.002.

[12] 丁以斌,肖福全,宣晓燕,等.5 种结构障碍物对火焰传播影响的试验研究[J].中国安全科学学报,2011,21(2):63-67. DOI:10.3969/j.issn.1003-3033.2011.02.011.
DING Yibin, XIAO Fuquan, XUAN Xiaoyan, et al. Experimental study on the effects of five different shaped obstacles on flame propagation[J]. China Safety Science Journal, 2011,21(2):63-67. DOI:10.3969/j.issn.1003-3033.2011.02.011.

[13] 王成,回岩,胡斌斌.障碍物形状对瓦斯爆炸火焰传播过程的影响[J].北京理工大学学报,2015,35(7):661-665. DOI:10.15918/j.tbit1001-0645.2015.07.001.
WANG Cheng, HUI Yan, HU Binbin. Effect of obstacle shape on gas explosion flame propagation process[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2015,35(7):661-665. DOI:10.15918/j.tbit1001-0645.2015.07.001.

[14] WEN X P, YU M G, LIU Z C, et al. Effects of cross-wise obstacle position on methane-air deflagration characteristics[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013,26(6):1336-1340. DOI:10.1016/j.jlp.2013.08.006.

[15] NA'INNA A M, PHYLAKTOU H N, ANDREWS G E. The acceleration of flames in tube explosions with two obstacles as a function of the obstacle separation distance[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013,26(6):1597-1603. DOI:10.1016/j.jlp.2013.08.003.

[16] NA'INNA A M, SOMUANO G B, PHYLAKTOU H N. Flame acceleration in tube explosions with up to three flat-bar obstacles with variable obstacle separation distance[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015,28:819-124. DOI:10.1016/j.jlp.2015.08.009.

[17] JOHANSEN C, CICCARELLI G. Modeling the initial flame acceleration in an obstructed channel using large eddy simulation[J]. Journal of Loss Prevention in the Process industries, 2013,26(4):571-585. DOI:10.1016/j.jlp.2012.12.005.

[18] BYCHKOV V, AKKERMAN V, FRU G, et al. Flame acceleration in the early stages of burning in tubes[J].

Combustion and Flame，2007，150(4)：263-276. DOI：10.1016/j.combustflame.2007.01.004.

[19] 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)：2126-2136. DOI：10.1016/j.combustflame.2010.05.003.

[20] 余明高，袁晨樵，郑凯. 管道内障碍物对加氢甲烷爆炸特性的影响[J]. 化工学报，2016，67(12)：5311-5318. DOI：10.11949/j.issn.0438-1157.20160645.
YU Minggao，YUAN Chenqiao，ZHENG Kai. Effects of hydrogen addition on explosion characteristics of gas under condition of obstacles[J]. CIESC Journal，2016，67(12)：5311-5318. DOI：10.11949/j.issn.0438-1157.20160645.

[21] LI D，ZHANG Q，MA Q J，et al. Comparison of explosion characteristics between hydrogen/air and methane/air at the stoichiometric concentrations[J]. International Journal of Hydrogen Energy，2015，40(28)：8761-8768. DOI：10.1016/j.ijhydene.2015.05.038.

[22] ZHENG K，YU M G，ZHENG L G，et al. Effects of hydrogen addition on methane-air deflagration in obstructed chamber[J]. Experimental Thermal and Fluid Science，2017，80(8)：270-280. DOI：10.1016/j.expthermflusci.2016.08.025.

[23] MCGARRY J P，AHMED K A. Flame-turbulence interaction of laminar premixed deflagrated flames[J]. Combustion and Flame，2017，176(11)：439-450. DOI：10.1016/j.combustflame.2016.11.002.

[24] IBRAHIM S S，MASRI A R. The effects of obstructions on overpressure resulting from premixed flame deflagration[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries，2001，14(3)：213-221. DOI：10.1016/S0950-4230(00)00024-3.

Effect of obstacles on explosion characteristics of methane/hydrogen

YU Minggao[1,2]，YANG Xufeng[1]，ZHENG Kai[1]，WAN Shaojie[1]

(1. *State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics Control，Chongqing University，Chongqing* 400044，*China*；
2. *School of Safety Science Engineering Henan Polytechnic University，Jiaozuo* 454003，*Henan*，*China*)

Abstract：The effects of the blocking rate and shape of obstacles on the explosion characteristics of methane/hydrogen at the stoichiometric mixture were investigated using experimental facilities fabricated by ourselves. The results demonstrate that there are similar trends in the flame evolution structure obtained from all hydrogen fractions for the same condition，i.e. the blocking rate increases as the premixed flame propagation channel become more narrow；the rate of the premixed flame propagation increases along with the blocking rate and hydrogen fraction，and changes with the obstacle shape. Increasing the blocking rate and the hydrogen fraction enhances the maximum overpressure and speeds up the time of the arrival of the maximum overpressure；both the blocking rate and the hydrogen fraction affect the explosion characteristics of methane/hydrogen，and the explosion characteristics are affected by the blocking rate and the hydrogen fraction when the hydrogen fraction comes below 50%，but by the combustion characteristics of the premixed gas when it comes above 50%. This research can provide a theoretical foundation for the safe use of methane/hydrogen fuel.

Keywords：blocking rate；obstacle shape；methane/hydrogen；explosion characteristics

（责任编辑　王易难）