DOI: 10.11883/1001-1455(2015)02-0249-06

氢气/丙烷/空气预混气体爆轰性能的实验研究*

程关兵,李俊仙,李书明,瞿红春
(中国民航大学航空工程学院,天津 300300)

摘要:通过采用压力传感器和烟灰板两种测试设备,开展了常温常压下氢气/丙烷和空气混合气体爆轰性能的实验研究。实验过程中观察到自持爆轰波,爆轰速度比值在 0.99～1 之间,爆轰压力比值在 0.8～1.2 之间。爆轰胞格尺寸在 10～50 mm 范围内,建立了爆轰胞格尺寸和化学诱导长度的关系式。随着丙烷不断添加,爆轰速度减小,而爆轰压力和胞格尺寸增加。这种变化趋势起初较快,而后变缓。因为起初氢气摩尔分数较大,混合气体趋向于氢气/空气的爆轰性能;而后因丙烷摩尔质量较大,丙烷逐渐起主要作用,混合气体表现出丙烷/空气的爆轰性能。

关键词:爆炸力学;爆轰压力;压力传感器;氢气;丙烷;爆轰速度;爆轰胞格尺寸
中图分类号:O381　　**国标学科代码**:1303510　　**文献标志码**:A

与常规碳氢燃料相比,氢气具有热值高、燃烧产物中不含碳氢化合物和二氧化碳等优点,被视为一种替代能源载体[1-2]。然而,氢气某些特性(较高反应活性、较低点火能、较宽泛的燃烧浓度范围以及易于扩散等),使得氢气在发生泄漏后,在火源点燃后火焰不断加速,在某些特定条件下(如障碍物、较强的紊流水平以及较高的初温初压等)可能出现湍流燃烧、爆燃甚至爆轰等情况[3]。因此,氢气在存贮、运输、使用和分配过程中可能存在安全隐患。近年来,研究者尝试在氢气/空气预混气体中添加少量链烷(如甲烷和乙烯),以此降低前者反应活性和爆轰性能,一定程度上抑制了氢气爆炸发生[4-10]。如 O. Bozier 等[8]、R. Sorin 等[9]通过向氢气/空气预混气体添加少量甲烷,爆轰胞格尺寸 λ 也相应地增加。因此,向氢气/空气混合气体中添加少量的链烷不失为一种减少氢气爆炸灾害的方法。

当前,有关氢气/丙烷和空气混合气体爆轰性能的研究仍很少。K. Takita 等[6]、C. Matignon 等[7]、O. Bozier 等[8]、R. Sorin 等[9]和 N. Chaumeix 等[10]分别从不同角度开展二元燃料氢气/甲烷、氢气/乙烷、甲烷/乙烷和空气混合气体爆轰特性的实验研究,获得一定量的上述混合气体爆轰性能参数,如爆轰速度 v、压力 p 以及胞格尺寸 λ 等。本文中,以常温常压下二元燃料氢气/丙烷和空气预混气体为研究对象,采用压力传感器和烟灰板两种测试设备,测量表征该混合气体的爆轰性能参数爆轰速度 v、压力 p 以及胞格尺寸 λ 等,建立胞格尺寸 λ 和 Zeldovich-Neumann-Doring(ZND)化学诱导区长度 L_i 的关系式,以期在氢气爆炸灾害预防方面积累一定量的实验数据。

1 实验设备和测试系统

实验系统包括爆轰实验管道、数据采集分析系统、测试系统、点火系统和配气系统等,如图 1 所示。所有实验均在长度 12 m、管径 92 mm 和两端封闭的不锈钢圆管中进行。该爆轰实验管道由左边(3 m)和右边(9 m)两部分组成。管左边部分上有 9 个用于安装压力传感器的安装孔,每两个相邻孔间距为 10 cm;管右边末端部分有 2 个用于安装压力传感器的安装孔,两个相邻孔间距为 50 cm。为了加速火焰,采用了阻塞比 0.5、长度 3 m 以及铜质的 Schelkin 螺纹管。测试系统包括压力传感器、数据采集线、与压力传感器相连的放大器以及数据采集系统(Graphtec GL1100 硬盘式数据收集记录仪)等。共采用了 11 个 Kistler 603B 型石英压电式压力传感器,响应时间约为 1 μs。其中,在管左边部分安装了 9 个

* **收稿日期**:2013-07-24;**修回日期**:2014-04-23
基金项目:中央高校基本科研业务费专项项目(ZXH2012J001)
第一作者:程关兵(1977—　),男,博士,讲师,forrest_cgb@163.com。

压力传感器,用于记录火焰在 Schelkin 螺纹管影响下加速过程中前锋面到达时间和压力。在管右边末端部分安装的两个压力传感器,用于确定自持爆轰速度和压力。另外,在传感器对面布置有烟灰板,用于记录爆轰波轨迹,以此来确定胞格尺寸。在实验管道左端面中心位置处,安装了 1 个汽车通用火花塞点火装置,点火能量约为 15 mJ,点火装置与相应的触发装置相连。

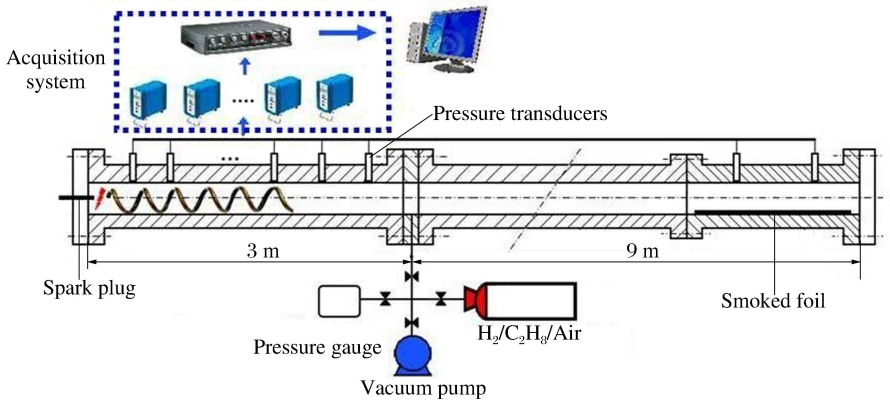

图 1 实验设备系统图

Fig. 1 Sketch of experimental setup

在常温常压下,采用按一定比例配比的氢气、丙烷和空气混合气体。相关参数定义为:$\Phi[x\mathrm{H_2}+(1-x)\mathrm{C_3H_8}]+(5-4.5x)[\mathrm{O_2}+3.76\mathrm{N_2}]$。其中,$\Phi$ 为混合气体的化学当量比,x 为在二元燃料氢气/丙烷中的氢气摩尔分数。本文中混合气体,$\Phi=1.1$,$0.5\leqslant x\leqslant 1.0$。

对于每种混合气体,实验至少重复 3 次,以保证实验结果可重复性。实验时,首先对爆轰实验管道抽真空,将通过分压法配好的预混气体填入管道中,发出点火信号,点燃混合气体。火焰在 Schelkin 螺纹管作用下不断加速,最后到达自持爆轰波。通过分析爆轰实验管道右端部分上的压力传感器所得的压力信号,数据采集系统对爆轰速度 v 和压力 p 进行测量和分析。通过管末端的烟灰板测量该混合气体的爆轰胞格尺寸 λ。

2 结果与分析

2.1 爆轰速度和压力

2.1.1 爆轰速度和压力的测量

通过位于爆轰管道右端的两个压力传感器(T10 和 T11)记录爆轰波到达传感器时刻,可获得爆轰速度 v 和压力 p 的实验值,测量原理如图 2 所示。对于爆轰速度,测量爆轰波到达传感器的时间 t,可求

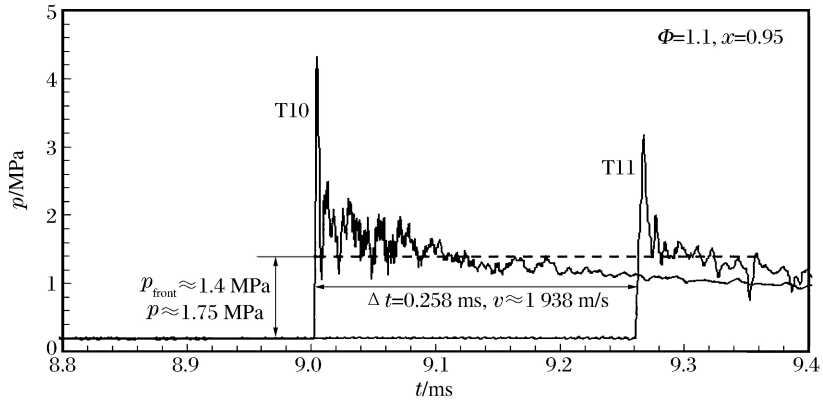

图 2 爆轰速度和压力测量原理图

Fig. 2 Example of determination of detonation velocity and pressure for the mixtures

得平均位置处的平均速度 v，即 $v=l/(t_{11}-t_{10})$，其中 t_{10}、t_{11} 分别为爆轰波到达第 10 个和第 11 个传感器的时刻。l 是第 10 个和第 11 个传感器的距离间隔，$l=50$ cm。对于爆轰压力，当爆轰速度达到理论 Chapman-Jouguet (CJ) 值的 99%及其以上时，爆轰波后压力 p_{front} 为爆轰压力 p 的 80%左右[11]。本文中采用此法确定爆轰压力 p 的实验值。图 2 中，通过该方法测量 H_2/C_3H_8-Air 混合气体($\Phi=1.1$，$x=0.95$)的爆轰速度和压力分别为 1.938 km/s 和 1.75 MPa。

2.1.2　爆轰速度

为了更好地分析所获得的实验结果，结合 Chemkin 程序和 Gri Mech 3.0[12] 化学动力机理，计算氢气和丙烷的质量分数 $w(H_2)$ 和 $w(C_3H_8)$、CJ 爆轰速度 v_{CJ}、压力 p_{CJ} 和 ZND 化学诱导区长度 L_i，结果如表 1 所示。

表 1　混合气体爆轰性能参数的理论值

Table 1　CJ detonation theoretical values of the studied mixtures

x	$w(H_2)$/%	$w(C_3H_8)$/%	v_{CJ}/(km·s^{-1})	p_{CJ}/MPa	L_i/mm
0.5	4.35	95.65	1.839	1.875	1.348 3
0.6	6.38	93.62	1.846	1.849	1.243 0
0.7	9.59	90.41	1.857	1.827	1.106 6
0.8	15.38	84.62	1.874	1.792	0.928 3
0.9	29.03	70.97	1.909	1.732	0.674 7
0.95	46.34	53.66	1.942	1.681	0.487 9
1.0	100.00	0	2.015	1.599	0.229 1

图 3 是实验所测得的爆轰速度 v 和爆轰速度比值 v/v_{CJ} 随氢气摩尔分数 x 变化的关系图。由图 3 可知：(1)实验所测得的爆轰速度总是略低于 CJ 爆轰速度，其比值 v/v_{CJ} 在 0.99～1 之间，即在管末端已经达到自持爆轰波。(2)随着氢气摩尔分数 x 增加，爆轰速度 v 从 1.832 km/s 增加到 2.005 km/s。但爆轰速度增加起初较慢，而后增加较快。因为丙烷摩尔质量大于氢气的摩尔质量，当氢气摩尔分数 x 增加时，丙烷质量分数 $w(C_3H_8)$ 起初下降程度较小，而后减少程度较快，如表 1 所示。当 x 从 0.5 增加到 0.8 时，丙烷质量分数 $w(C_3H_8)$ 从 95.65%逐渐减小到 84.62%；但当 x 从 0.8 增加到 1.0 时，丙烷质量分数 $w(C_3H_8)$ 下降较明显。

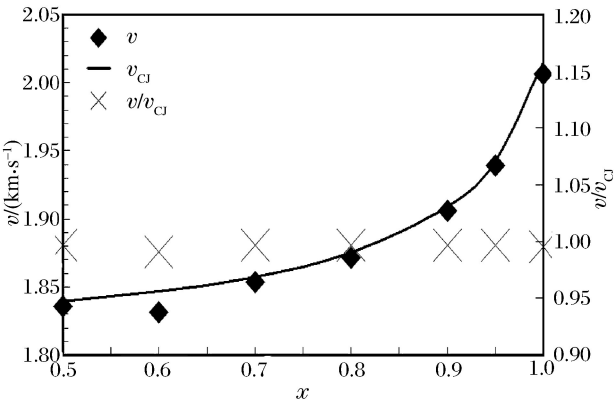

图 3　爆轰速度

Fig. 3　Detonation velocity

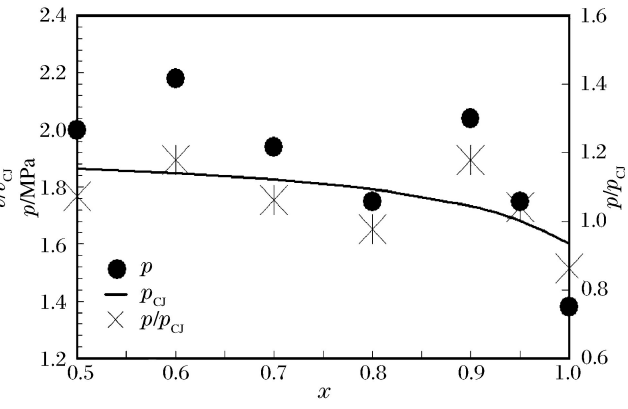

图 4　爆轰压力

Fig. 4　Detonation pressure

2.1.3　爆轰压力

图 4 表示实验所得的爆轰压力 p 和爆轰压力比值 p/p_{CJ} 随氢气摩尔分数 x 变化的关系图。由图 4 可知：(1)爆轰压力实验值 p 总体趋势随氢气摩尔分数 x 增加而减小，但爆轰压力减小起初较慢，而后较快。(2)爆轰压力 p 变化在 1.3～2.2 MPa 之间。(3)爆轰压力比值 p/p_{CJ} 变化在 0.8～1.2 之间，即

$p=(1\pm20\%)p_{CJ}$，爆轰压力 p 的实验值和理论 p_{CJ} 的差值可能是由通过爆轰波后压力 p_{front} 确定爆轰压力 p 的方法所引起的。

2.2 爆轰胞格尺寸

2.2.1 胞格尺寸的测量

采用烟迹法可获得混合气体爆轰胞格尺寸 λ。在实验过程中，在爆轰管道右端两个压力传感器(T10 和 T11)对面位置处放置烟灰板，记录爆轰波传播轨迹。在烟灰板内圆柱面放置圆形刻度尺，并对烟灰板拍照，可测量爆轰胞格尺寸的大小。为了减小测量误差，选取烟灰板中段部分作为测量段。对于每种混合气体，测量胞格数量不低于 50 个。当丙烷添加量较大时，需多次重复实验，以便获得足够多的胞格实验数据。图 5 是 3 种不同组分燃料($\Phi=1.1$；$x=0.6$，0.7，0.95)的典型爆轰胞格结构图。由图 5 可知：随着丙烷不断增加，爆轰胞格尺寸逐渐增加，胞格结构趋于规则。

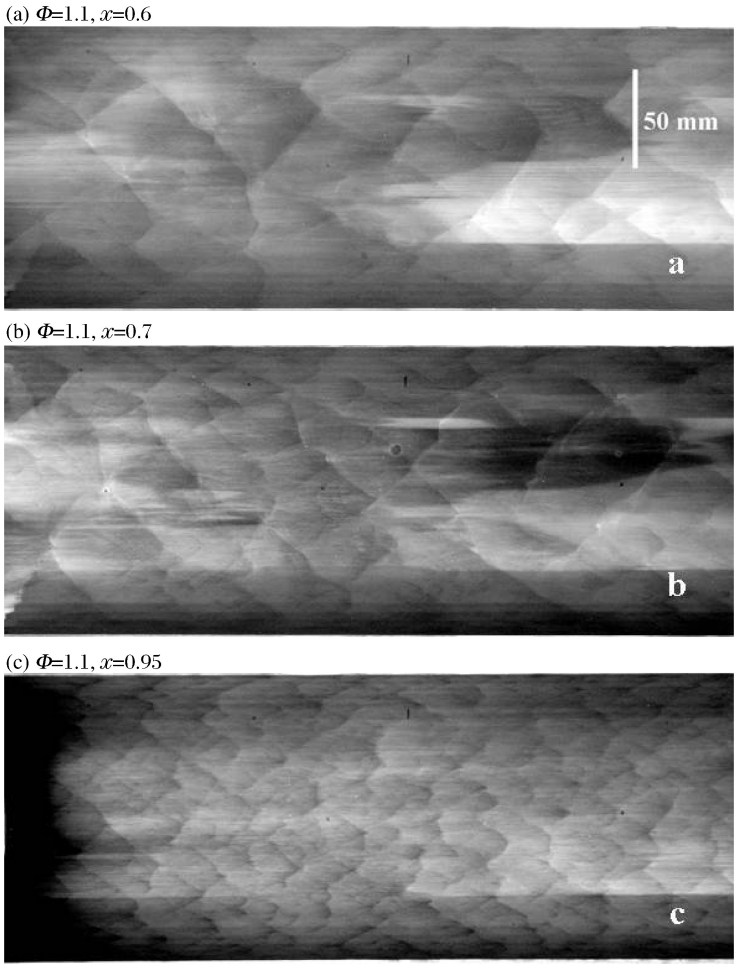

图 5 爆轰胞格结构

Fig. 5 Detonation front structure

2.2.2 胞格尺寸的变化

图 6 是爆轰胞格尺寸 λ、胞格比值 λ/λ_1 随氢气摩尔分数 x 变化的关系图。λ_1 是混合气体($\Phi=1.1$，$x=1$)的爆轰胞格尺寸，定义胞格比值 λ/λ_1 主要用于判断胞格尺寸随 x 变化程度。由图 6 可知：(1) 爆轰胞格尺寸变化在 10～50 mm 范围内。对于本文中混合气体，爆轰胞格尺寸最大值小于爆轰实验管道内径，且管道足够长，因此，实验中能观察到稳定自持爆轰波。(2) 随着氢气摩尔分数减少，胞格尺寸逐渐增加。起初增加快，而后增加逐渐放慢。当 x 从 1.0 减小到 0.8 时，爆轰胞格尺寸增加了约 2.5 倍；而当 $0.5\leqslant x\leqslant0.7$ 时，胞格比值 λ/λ_1 变化在 4.5～5 范围内，即胞格尺寸 λ 为 45～50 mm，这与常温常

压下、当量比为 1 时丙烷/空气混合气体的爆轰胞格尺寸大小相当。由表 1 和图 6 可知，这种变化趋势主要是因为丙烷摩尔质量较大，但氢气摩尔分数 x 起初较大，爆轰胞格尺寸较小，混合气体趋向于氢气/空气的爆轰性能。随着 x 进一步减少，丙烷的摩尔质量分数逐渐增加，丙烷进一步降低了原混合气体反应活性，前驱激波波后温度增加，延长了化学诱导时间和长度。丙烷逐渐起到主要作用，混合气体表现出丙烷/空气的爆轰性能。

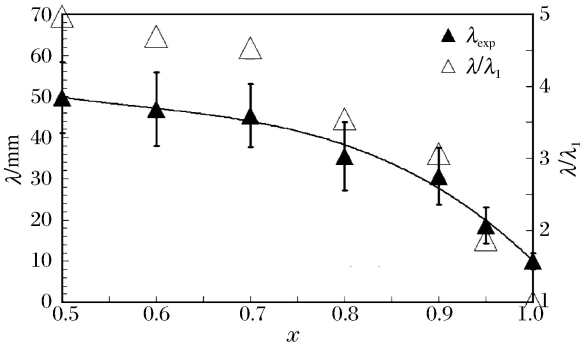

图 6 胞格尺寸

Fig. 6 Detonation cell size

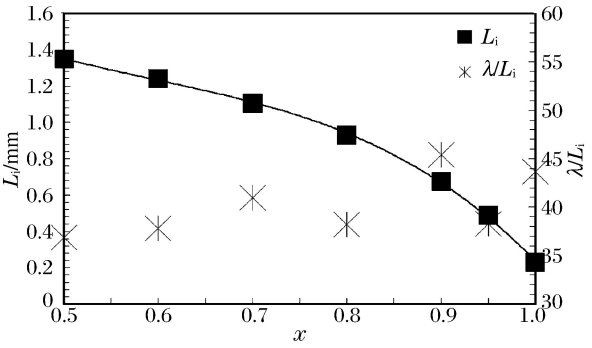

图 7 化学诱导长度

Fig. 7 Chemical induction length

2.3 胞格尺寸和化学诱导长度的关系

图 7 是 ZND 化学诱导长度 L_i 和比值 λ/L_i 随氢气摩尔分数 x 变化的关系图。对所研究的混合气体，ZND 化学诱导长度 L_i 计算结果见表 1。图 7 中所示的爆轰胞格尺寸为多次实验测量值的平均值。由图 7 可知：(1)ZND 诱导长度 L_i 随氢气摩尔分数增加而减小。(2)比值 λ/L_i 变化在 37～43 范围内，即 $\lambda=(1\pm10\%)40L_i$。(3)比值 λ/L_i 变化与氢气摩尔分数 x 无关。

3 结　论

(1)实验中观察到稳定自持爆轰波。

(2)往氢气/空气混合气体中添加丙烷削弱了前者的爆轰性能。随着丙烷不断增加，氢气摩尔分数减少，爆轰速度减小，爆轰压力和胞格尺寸增加。这种变化趋势起初较快，而后逐渐变缓。因为丙烷摩尔质量较大，但起初氢气摩尔分数 x 较大，混合气体趋向于氢气/空气的爆轰性能。随着 x 减少，丙烷摩尔质量分数逐渐增加，丙烷逐渐起主要作用。丙烷增加，提高了前驱激波波后温度，延长了化学诱导时间和长度，混合气体表现出丙烷/空气的爆轰性能。

(3)爆轰胞格尺寸和 ZND 化学诱导长度的比值约为 40。

参考文献：

[1] Desbordes D. A study of deflagration-to-detonation transition[R]. Poitiers, France: Laboratory of Combustion and Detonation, 1993.

[2] Ciccarelli G, Dorofeev S B. Flame acceleration and transition to detonation in ducts[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2008,34(4):499-550.

[3] 卢捷，宁建国，王成，等. 煤气火焰传播规律及其加速机理研究[J]. 爆炸与冲击，2004,24(4):305-311.
Lu Jie, Ning Jian-guo, Wang Cheng, et al. Study on flame propagation and acceleration mechanism of city coal gas [J]. Explosion and Shock Waves, 2004,24(4):305-311.

[4] Law C K, Kwon O C. Effects of hydrocarbon substitution on atmospheric hydrogen-air flame propagation[J]. International Journal of Hydrogen and Energy, 2004,29(8):867-879.

[5] Tang C L, Huang Z H, Jin C, et al. Laminar burning velocities and combustion characteristics of propane-hydrogen-air premixed flame[J]. International Journal of Hydrogen and Energy, 2008,33(18):4906-4914.

[6] Takita K, Niioka T. On detonation behavior of mixed fuels[J]. Shock Waves, 1996,6(2):16-66.

[7] Matignon C. Etude de la détonation de deux mélanges stoechiométriques ($H_2/CH_4/O_2/N_2$ et $CH_4/C_2H_6/O_2/N_2$): Influence de la proportion relative des deux combustibles et de la températur initiale élevée[D]. Poitiers: University of Poitiers, 2000.

[8] Bozier O, Sorin R, Zitoun R, et al. Detonation characteristics of H_2-natural gas-air mixtures[C]// Proceeding of European Combustion Meeting. Vienna, Austria: German Section of the Combustion Institute, 2009:14-17.

[9] Sorin R, Bozier O, Zitoun R, et al. Deflagration to detonation transition in binary fuels H_2/CH_4 with air mixtures [C]// Proceeding of 22nd ICDERS. Minsk, Belarus: Heat and Mass Transfer Institute of National Academy of Science of Belarus, 2009:27-31.

[10] Chaumeix N, Pichon S, Lafosse F, et al. Role of chemical kinetics on the detonation properties of hydrogen /natural gas/air mixtures[J]. International Journal of Hydrogen and Energy, 2007,32(13):2216-2226.

[11] 孙锦山,朱建士. 理论爆轰物理[M]. 北京:国防工业出版社,1995.

[12] Smith G P, Golden D, Frenklach M, et al. GRI-Mech 3.0[Z]. 1999.

An experimental study on detonation characteristics of binary fuels hydrogen/propane-air mixtures

Cheng Guan-bing, Li Jun-xian, Li Shu-ming, Qu Hong-chun

(*Aeronautical Engineering College, Civil Aviation University of China, Tianjin* 300300, *China*)

Abstract: The paper is aimed to experimentally probe the detonation characteristics of the binary fuel hydrogen/propane-air mixture. The experiments were conducted in an obstructed cylindrical tube with a 92-mm inner diameter and a 12-m length at normal pressure and temperature. Eleven instrument ports and eleven piezoelectric pressure transducers were adopted on the tube wall surface. A Schelkin spiral with a blockage ratio of 0.5 and a pitch with inner diameter as the tube and with the length of 3 m were used to accelerate the flame propagation until the detonation initiated. The studied binary fuel mixtures with equivalence ratio of 1.1 and hydrogen molar fraction varying from 0.5 to 1.0 were prepared by the partial pressure and ignited via a spark plug at about 15-mJ discharge energy. The detonation characteristic parameters such as velocity, pressure and cell size were achieved with pressure transducers and smoking foils, respectively. It can be therefore concluded that the self-sustained detonation is observed as follows: (i) detonation velocity ratio v/v_{CJ} varies from 0.99 to 1.0 and pressure ratio p/p_{CJ} changes from 0.8 to 1.2; (ii) detonation cell size varies from 10 mm to 50 mm. When propane is added to hydrogen/air mixtures, the detonation velocity decreases, but the pressure and cell size inversely increase. The variation trends of the detonation parameters at the beginning change quickly because the detonation characteristics of hydrogen/propane-air mixtures are similar to those of hydrogen/air due to the larger hydrogen molar fraction. Afterwards, the trends gradually slow down because the increasing molar fraction of propane with heavier molecular mass in the mixtures which plays a dominant role in the binary fuels. At last, a relationship between detonation cell size and ZND chemical induction length was obtained. Thus, our conclusion can provide the experimental data in the hydrogen explosion hazard prevention.

Key words: mechanics of explosion; detonation velocity; piezoelectric pressure transducer; hydrogen; propane; detonation velosity; detonation cell size

(责任编辑 丁 峰)