

# 氢气/甲烷-空气爆轰波在含环形障碍物 圆管内传播的试验研究\*

王鲁庆<sup>1</sup>, 马宏昊<sup>1,2</sup>, 王 波<sup>1</sup>, 沈兆武<sup>1</sup>

(1. 中国科学技术大学中国科学院材料力学行为和设计重点实验室, 安徽 合肥 230027;  
2. 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽 合肥 230026)

**摘要:** 在内径 48 mm、长度 5800 mm 的含环形障碍物圆管内, 进行了氢气-空气及氢气-甲烷-空气的爆轰波传播试验研究, 确定了爆燃转爆轰 (Deflagration-to-Detonation Transition, DDT) 极限。环形障碍物阻塞比为 0.56, 间距分为两种, 即  $S=D$  和  $S=2D$ , 其中  $S$  为障碍物间距,  $D$  为管道内径。火焰的速度由安装在管道壁面上的光电二极管采集得到。试验测量得到的火焰为准爆轰或阻塞火焰。在  $S=2D$  情况下得到的火焰速度均比  $S=D$  情况下的火焰速度快, 并且靠近 DDT 极限时速度波动更明显, 表明在间距较大的情况下爆轰的重起爆循环周期更长, 类似于“弛振爆轰”。对于氢气-空气, 障碍物间距为  $D$  时在 DDT 极限处有  $d/\lambda > 1$  (富氧条件下  $d/\lambda = 1.6$ , 贫氧条件下  $d/\lambda = 1.4$ ), 间距为  $2D$  时更容易形成爆轰的重起爆, 在 DDT 极限处与准则  $d/\lambda \approx 1$  一致; 对于氢气-甲烷-空气, 甲烷的添加使爆轰更不稳定, 对于两种间距的障碍物得到的 DDT 极限均有  $d/\lambda \approx 1$  ( $d$  和  $\lambda$  分别为障碍物内径和爆轰胞格尺寸)。说明障碍物间距对爆轰波传播有显著的影响, 即间距的增大更有利于爆轰波的传播。为形成准爆轰, 障碍物内径必须至少可以容纳一个爆轰胞格, 同时障碍物间距足够大而引起爆轰的重起爆。

**关键词:** 气体爆炸; 环形障碍物; DDT 极限; 氢气-甲烷

**中图分类号:** O381 **文献标识码:** A

在核能及爆炸推进领域, 含障碍物的管道结构经常用于加速火焰爆轰的形成<sup>[1]</sup>。障碍物能够增加火焰面的表面积, 提高化学反应速率, 因此能够加速爆轰的形成, 有效地缩短点火到爆轰的距离。另一方面, 由气体泄漏引起的爆炸事故时有发生, 现实中存在的障碍物极大地提高了爆炸威力, 造成了不可估量的损失。因此, 研究障碍物对火焰加速及爆燃转爆轰 (Deflagration-to-Detonation Transition, DDT) 的过程具有极其重要的作用。

装载阵列环形障碍物的密闭圆管是最常见的研究火焰加速及 DDT 过程的装置。Cross 等<sup>[2]</sup>指出, 火焰的传播形态依赖于可燃气体的敏感度。对于特别敏感的气体, 火焰的传播速度可达到 CJ 爆轰速度。对于中等敏感的可燃气, 火焰的传播速度介于 CJ 爆轰速度与产物的声速之间, 被称作准爆轰。对于不太敏感的可燃气, 火焰的传播速度接近产物的声速, 被称作 CJ 爆燃或者是阻塞火焰。对于极不敏感的可燃气, 火焰的传播速度仅为亚声速, 或者是火焰熄灭。此外, 障碍物的阻塞比及间距也会影响火焰的传播形态。Peraldi 等<sup>[3]</sup>指出,  $d/\lambda = 1$  可作为阻塞火焰与准爆轰的分界线, 其中,  $d$  为环形障碍物的开孔直径,  $\lambda$  为可燃气体的爆轰胞格。对于  $d/\lambda > 1$  的气体, 火焰的传播形态为准爆轰或 CJ 爆轰; 对于

\* 收稿日期: 2017-12-01; 修回日期: 2018-01-11

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51674229, 51374189); 中国科学技术大学重要方向项目培育基金 (WK2480000002)

作者简介: 王鲁庆 (1990—), 男, 博士, 主要从事气体爆轰相关研究. E-mail: aiyuan@mail.ustc.edu.cn

通信作者: 马宏昊 (1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事爆破器材与安全工程研究. E-mail: hhma@ustc.edu.cn

$d/\lambda < 1$  的气体,火焰的传播形态为阻塞火焰。因此, $d/\lambda = 1$  可以作为 DDT 极限的判断准则。此外,Dorofeev 等<sup>[4]</sup>指出, $L = (S+D)/[2(1-d/D)] = 7\lambda$  同样可以作为 DDT 极限的判断准则,其中, $D$  为管道的内径, $S$  为障碍物的间距。对于  $L > 7\lambda$  的气体,火焰的传播形态为准爆轰或 Chapman-Jouguet (CJ) 爆轰;对于  $L < 7\lambda$  的气体,火焰的传播形态为阻塞火焰。

氢气和甲烷在工业中有广泛的用途。近年来,甲烷-氢气的二元混合气在某些工业进程中得到了广泛的关注,如内燃机领域。甲烷内添加氢气可以有效地提高甲烷的层流燃烧速率、爆炸压力、输出热能,同时可以降低温室气体的排放<sup>[5-10]</sup>。然而,由于可燃气泄漏带来的灾害时有发生,造成了不可估量的损失;另一方面,前人对二元混合气 DDT 过程的研究甚少。通过对氢气-空气及氢气-甲烷-空气在含环形障碍物圆管中的 DDT 探究,得到了火焰的传播规律及 DDT 极限。

## 1 试验装置与试验方法

试验装置如图 1 所示。装置包括管道系统、环形障碍物、配气系统、点火系统及数据采集系统 5 部分。管道为长 5 800 mm、内径 48 mm 的不锈钢圆管,由一节 3 300 mm 和一节 2 500 mm 的管道法兰连接而成,法兰处由橡胶垫密封。障碍物为外径 48 mm、内径 32 mm、厚度  $\delta = 5$  mm 的不锈钢环,阻塞比  $B_R = 1 - d^2/D^2 = 0.56$ ;障碍物的间距为  $S = D, S = 2D$ 。每个障碍物钻 3 个内径为 5 mm 的圆孔(见图 2),通过直径 4 mm 的不锈钢杆及内径 5 mm、外径 6 mm 的不锈钢套管连接、固定而成。

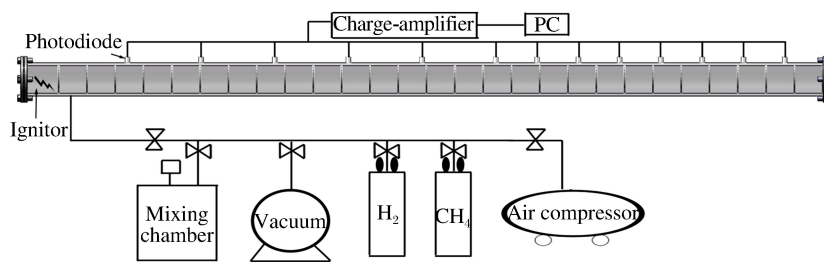


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Sketch of experimental apparatus

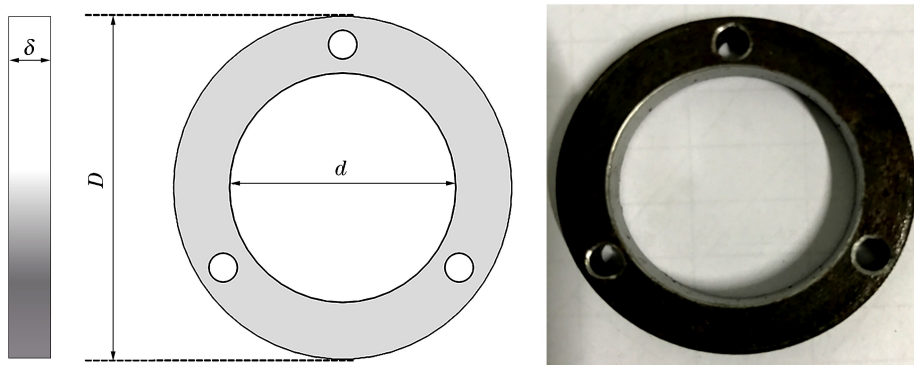


图 2 圆形孔板障碍物

Fig. 2 Orifice plate

每次试验之前先将管道内空气由旋片式真空泵抽至低于 100 Pa。之后将预混罐内的可燃气体通入管道至约 0.1 MPa。预混罐内的可燃气体由分压配气法配制,各组分压力由精度为  $\pm 0.1$  kPa 的压力计监测,并利用空气压缩机将压力压至 0.2 MPa,静置 24 h 使气体扩散均匀。因此,对于氢气-空气和氢气-甲烷-空气,燃料的最大误差分别为  $\pm 0.1$  kPa 和  $\pm 0.2$  kPa。这种配气方法和静置周期被广泛地应用在与气体爆炸相关的研究<sup>[11-14]</sup>。本研究所使用的气体分为两种:(1) 含不同氢气浓度的氢气-空气,(2) 化学计量比条件下的氢气-甲烷-空气。为区分此二元混合气,定义

$$X = C_{H_2} / (C_{H_2} + C_{CH_4}) \quad (1)$$

式中:  $C_{CH_4}$ 、 $C_{H_2}$  分别为预混气中甲烷、氢气的体积分数。预混气导入管道后静置 5 min 以便气体静止。高压点火器通过放电尖端将管内的预混气点燃, 火焰信号由安装在管道壁面的 12 个光电二极管捕捉并由计算机采集。火焰在管道内局部传播速度  $V$  为

$$V = \Delta d / \Delta t \quad (2)$$

式中:  $\Delta d$  为相邻二极管之间的距离,  $\Delta t$  为相邻二极管光电信号到达的时间差。

## 2 试验结果

### 2.1 氢气-空气

所有试验均在常温(298 K)、常压(101 kPa)下进行。图 3 为 3 种氢气含量的氢气-空气在障碍物间距为一倍管径时的传播速度。对于含 29.6% (体积分数) 氢气和 22% 氢气的混合气, 火焰速度介于 CJ 爆轰速度与产物声速之间, 可以判断为准爆轰形态。当氢气含量降低为 21% 时, 火焰速度低于产物的声速, 因此为阻塞火焰。本研究 CJ 爆轰速度由 CHEMKIN 软件<sup>[15]</sup> 计算得到, 等压状态下产物的声速则由 GASEQ 软件<sup>[16]</sup> 计算得到。

图 4 为不同氢气含量的混合气在障碍物间距为一倍、二倍管径时测得的火焰速度。作为对比, CJ 爆轰速度与产物声速曲线也列于图 4 中。需要说明的是, 图 4 中的数据点为每次试验测得的管尾部两个速度(由最后 3 个二极管确定)的平均值, 误差棒表示两个速度之差。

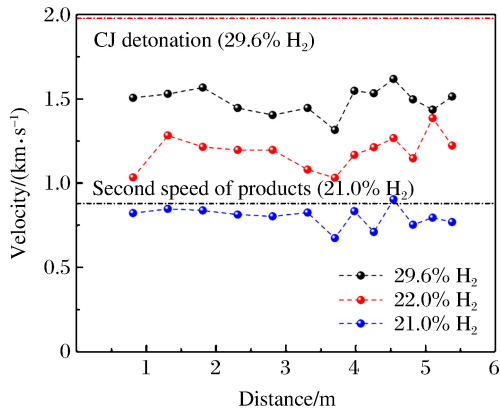


图 3 不同氢气含量的火焰在管中的传播速度  
Fig. 3 Flame velocity down the length of the tube

明显地, 在富氧(氢气含量低于 29.6%) 极限与贫氧(氢气含量高于 29.6%) 极限处, 测量速度均出现了突跃, 并且此突跃将准爆轰与阻塞火焰分开。普遍来讲, 氢气含量相同时, 障碍物间距为二倍管径时的速度均高于间距为一倍管径时的速度, 这是由于越稠密的障碍物将损失更多的动量与热量, 造成更显著的速度损耗。另外, 在接近极限处, 障碍物间距大时造成的速度波动更加明显(误差棒更大)。两种间距对应的当量比( $\varphi$ ) 和 DDT 极限列于表 1 中。其中爆轰胞格尺寸  $\lambda$  的值由试验测得(见图 5), 即将附着均匀苯烟的铝片(0.2 mm 厚) 卷曲后置入管道的尾端。记录爆轰胞格时, 仅第一段管道含有障碍物, 第二段管道为空管。图 5 中两条虚线代表

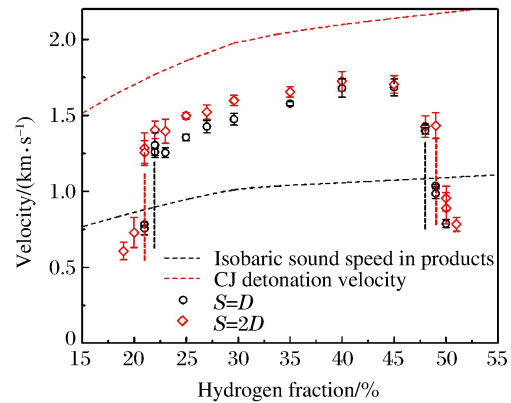


图 4 氢气-空气火焰在管尾的速度  
Fig. 4 Flame velocity of hydrogen-air mixtures at tube end

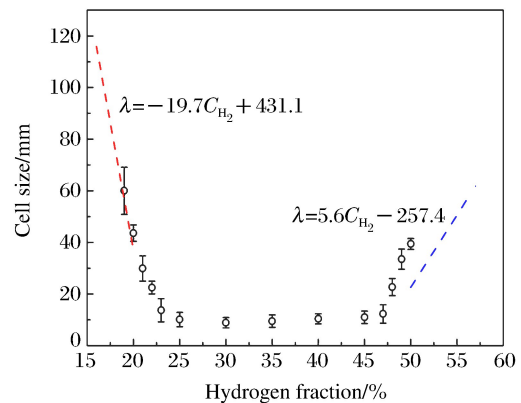


图 5 氢气-空气爆轰胞格尺寸  
Fig. 5 Detonation cell size of hydrogen-air mixtures

Cross 等<sup>[2]</sup>拟合的氢气-空气胞格尺寸与氢气含量的直线。可以看出,在富氧条件下本研究中得到的胞格尺寸与虚线拟合较好,而在贫氧条件下误差较大。出现此误差的原因为:(1) 氢气-空气爆轰固有的不稳定性造成胞格尺寸测量的误差,(2) Cross 等<sup>[2]</sup>拟合的贫氧条件下的直线主要针对氢气含量大于 50% 的混合气。

表 1 氢气-空气的 DDT 极限  
Table 1 DDT limits for hydrogen-air mixtures

Obstacle spacing	Lean limit/%	$\varphi$	$d/\lambda$	$L/\lambda$	Rich limit/%	$\varphi$	$d/\lambda$	$L/\lambda$
$D$	22	0.67	1.6	7.0	48	2.20	1.4	6.4
$2D$	21	0.63	1.1	7.2	49	2.29	1.0	6.6

### 2.2 氢气-甲烷-空气

图 6 为满足化学计量比的不同氢气/甲烷比例的氢气-甲烷-空气在管道中测得的速度。随着氢气含量的降低,火焰的速度降低。当氢气在燃料混合气(氢气-甲烷)中的比例( $X$ )为 0.75 时,火焰的速度高于产物中的声速;当  $X=0.7$  时,测得的速度低于产物中的声速。因此试验所得两种障碍物间距下的 DDT 极限均为  $X=0.75$ 。与图 4 类似, $S=2D$  时所得的速度大于  $S=D$  时的速度,并且接近 DDT 极限时的速度波动明显增大。

氢气-甲烷-空气的爆轰胞格同样由烟熏技术得到,测量得到的爆轰胞格尺寸如图 7 所示。由图 7 可知,随着  $X$  的降低(甲烷含量的增加),爆轰胞格尺寸增加,且胞格变得更加不规则(误差棒增大)。 $X=0.75$  时,测量得到的胞格尺寸为 35.65 mm,因此对于两种障碍物间距,在 DDT 极限处均有  $d/\lambda=0.9$ 。 $S=D$  时, $L/\lambda=4.0$ ;  $S=2D$  时, $L/\lambda=6.1$ 。两种间距对应的 DDT 极限见表 2。

表 2 化学计量比下氢气-甲烷-空气的 DDT 极限  
Table 2 DDT limits for stoichiometric hydrogen-methane-air mixtures

Obstacle spacing	Limit ( $X$ )	$d/\lambda$	$L/\lambda$
$D$	0.75	0.9	4.0
$2D$	0.75	0.9	6.1

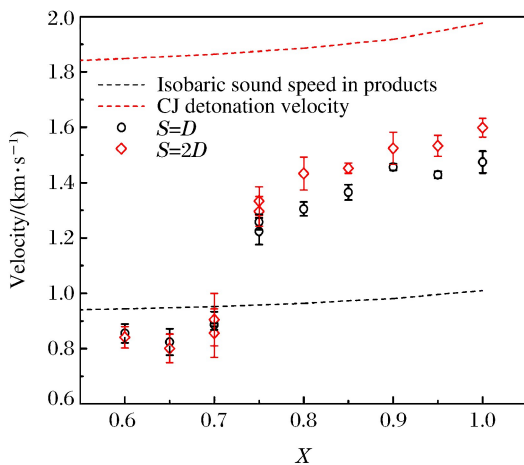


图 6 氢气-甲烷-空气火焰在管尾的速度  
Fig. 6 Flame velocity of stoichiometric hydrogen-methane-air mixtures at tube end

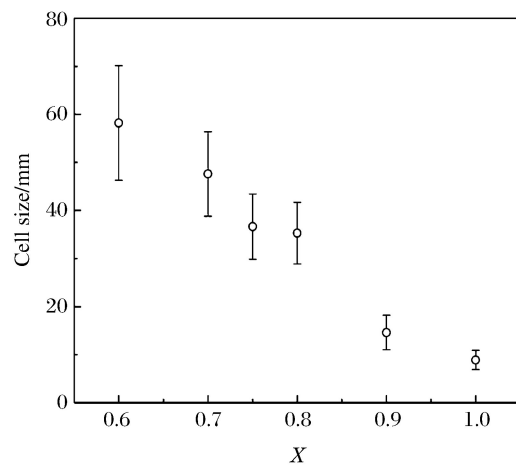


图 7 氢气-甲烷-空气的爆轰胞格尺寸  
Fig. 7 Detonation cell size of stoichiometric hydrogen-methane-air mixtures

### 3 讨 论

为了讨论试验得到的 DDT 极限以及障碍物间距的影响,将本研究结果与以往的文献作对比。Cicarelli 等<sup>[17]</sup>研究了圆管中孔板阻塞比和间距对氢气-空气、乙烯-空气和乙炔-空气爆轰传播的影响。



对于  $B_R=0.44$  的孔板障碍物,在极限处均有  $d/\lambda \approx 1$ 。对于  $B_R=0.62$  的障碍物,当  $S=D$  时,  $d/\lambda > 1$ ; 当  $S=1.5D$  和  $S=2D$  时,  $d/\lambda \approx 1$ 。Gu 等<sup>[18]</sup>研究了在 15 cm 内径圆管内的爆轰传播,发现  $S=D$  和  $S=2D$  时,DDT 极限均符合  $d/\lambda \approx 1$ ; 当  $S=D/2$  时,  $d/\lambda$  的值位于 4~10 之间。以上结果均表明障碍物的阻塞比和间距均对 DDT 极限产生影响。本研究中,对于氢气-空气,  $S=D$  时均有  $d/\lambda > 1$ ,  $S=2D$  时有  $d/\lambda \approx 1$ 。从尺寸分析的角度来说,在 DDT 极限处  $d/\lambda \approx 1$  是合理的,这是因为  $d$  代表了障碍物开孔的最大尺寸,同时  $\lambda$  代表了胞状爆轰波阵面的最大横向尺寸。为得到准爆轰,开孔必须至少容纳一个胞格通过,  $d/\lambda > 1$ 。另一方面,爆轰波在障碍物区域传播实际上是周期性的失效与重起爆的过程,而爆轰的重起爆需要足够长的距离(相对于爆轰胞格)。因此,在满足  $d/\lambda > 1$  的情况下,障碍物的间距需要足够大。Cicarelli 等<sup>[17]</sup>的研究表明爆轰重起爆的临界障碍物间距随着障碍物阻塞比的增加而增大。本研究中使用的  $B_R=0.56$  的孔板障碍物对爆轰波产生较大的扰动,因此在  $S=D$  时需要更敏感的混合气(爆轰胞格更小)形成重起爆。对于氢气-甲烷-空气,在 DDT 极限处均有  $d/\lambda = 0.9$ 。这可能是因为甲烷的加入使混合气不稳定性增加,从而使爆轰的重起爆变得容易。

在 DDT 极限处,  $L/\lambda \approx 7$  在氢气-空气中较为符合。在氢气-甲烷-空气中,  $L/\lambda$  的值与此判断准则相差较远。这可由以下理由解释:(1) 氢气在可燃气中含量( $X$ )的分辨率(变化步长)为 0.05,因此对 DDT 极限的确定有一定误差;(2) 加入甲烷使混合气爆轰更加不稳定,爆轰胞格随之更为不规则,因此测量胞格尺寸中会产生较大的不确定性。Zhang 等<sup>[19]</sup>指出,测得的胞格尺寸与平均值相比会有 50% 的误差。

对于非常敏感的气体(爆轰胞格尺寸非常小),爆轰波穿过障碍物开孔后,经过短暂的绕射解耦后就会由于壁面反射波形成的热点而重新起爆<sup>[20]</sup>。随着 DDT 极限的接近,重起爆过程需要的距离变长。也就是说,两个光电二极管之间会出现长距离的爆燃火焰和爆轰火焰,因此对于  $S=2D$  的障碍物测得的速度波动变大。Cicarelli 等<sup>[18]</sup>指出,这种情况下,爆轰重起爆的长度周期为 3~4 倍的障碍物间距(大于本研究的二极管间距),类似于在光滑管道中观察到的速度波动很大的“弛振爆轰”现象<sup>[21]</sup>。

## 4 结 论

通过对氢气-空气和氢气-甲烷-空气在含环形障碍物( $B_R=0.56$ )的圆管中的爆轰波传播的试验研究,得到以下结论。

(1) 障碍物间距对火焰速度产生显著的影响。初始条件相同的情况下,在  $S=2D$  条件下得到的速度比  $S=D$  条件的速度高,说明障碍物间距大时更有利于爆轰波的传播。

(2) 为使爆轰波在环形障碍物中传播,环形障碍物开孔内径必须至少等于爆轰胞格尺寸;同时,障碍物的间距足够大使解耦失效的爆轰波重起爆。对于氢气-空气,  $S=D$  时在 DDT 极限处有  $d/\lambda > 1$ ,  $S=2D$  时有  $d/\lambda \approx 1$ 。对于氢气-甲烷-空气,两种障碍物间距下得到的 DDT 极限均有  $d/\lambda \approx 1$ 。

(3) 接近 DDT 极限时,火焰速度的波动会随着障碍物间距增加而增加,表明在 DDT 极限附近出现了类似于弛振爆轰的现象。

## 参考文献:

- [1] CICCARELLI G, DOROFEEV S. Flame acceleration and transition to detonation in ducts [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2008, 34(4): 499-550.
- [2] CROSS M, CICCARELLI G. DDT and detonation propagation limits in an obstacle filled tube [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015, 36: 380-386.

- [3] PERALDI O,KNYSTAUTAS R,LEE J H. Criteria for transition to detonation in tubes [J]. Symposium (International) on Combustion,1988,21(1):1629-1637.
- [4] DOROFEEV S B,SIDOROV V P,KUZNETSOV M S,et al. Effect of scale on the onset of detonations [J]. Shock Waves,2000,10(2):137-149.
- [5] KARIM G A,WIERZBA I,AL-ALOUSHI Y. Methane-hydrogen mixtures as fuels [J]. International Journal of Hydrogen Energy,1996,21(7):625-631.
- [6] YU M,ZHENG K,ZHENG L,et al. Effects of hydrogen addition on propagation characteristics of premixed methane/air flames [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries,2015,34:1-9.
- [7] DI SARLI V,DI BENEDETTO A. Laminar burning velocity of hydrogen-methane/air premixed flames [J]. International Journal of Hydrogen Energy,2007,32(5):637-646.
- [8] BOZIER O,SORIN R,VIROT F,et al. Detonability of binary  $H_2/CH_4$ -air mixtures [C]//Proceedings of Third ICHS, ID,2009:188.
- [9] HU E,HUANG Z,LIU B,et al. Experimental study on combustion characteristics of a spark-ignition engine fueled with natural gas-hydrogen blends combining with EGR [J]. International Journal of Hydrogen Energy,2009,34(2):1035-1044.
- [10] WU L,KOBAYASHI N,LI Z,et al. Experimental study on the effects of hydrogen addition on the emission and heat transfer characteristics of laminar methane diffusion flames with oxygen-enriched air [J]. International Journal of Hydrogen Energy,2016,41(3):2023-2036.
- [11] WANG L,MA H,SHEN Z,et al. Experimental investigation of methane-oxygen detonation propagation in tubes [J]. Applied Thermal Engineering,2017,123:1300-1307.
- [12] WANG L,MA H,SHEN Z,et al. Detonation characteristics of stoichiometric  $H_2-O_2$  diluted with  $Ar/N_2$  in smooth and porous tubes [J]. Experimental Thermal and Fluid Science,2018,91:345-353.
- [13] GAO Y,NG H D,LEE J H S. Minimum tube diameters for steady propagation of gaseous detonations [J]. Shock Waves,2014,24(4):447-454.
- [14] ZHANG B,SHEN X,PANG L,et al. Methane-oxygen detonation characteristics near their propagation limits in ducts [J]. Fuel,2016,177:1-7.
- [15] KEE R J,RUPLEY F M,MILLER J A. Chemkin-II : a fortran chemical kinetics package for the analysis of gas-phase chemical kinetics;SAND 89-8009 [R]. Albuquerque,NM:Sandia National Laboratories,1989.
- [16] MORLEY C. Gaseq:a chemical equilibrium program for Windows [Z]. 2005.
- [17] CICCARELLI G,WANG Z,LU J,et al. Effect of orifice plate spacing on detonation propagation [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries,2017,49(B):739-744.
- [18] GU L S,KNYSTAUTAS R,LEE J H S. Influence of obstacle spacing on the propagation of quasi-detonation [J]. Dynamics of Explosions of Progress in Astronautics and Aeronautics,1988,114:232-247.
- [19] ZHANG B,KAMENSKIHS V,NG H D,et al. Direct blast initiation of spherical gaseous detonations in highly argon diluted mixtures [J]. Proceedings of the Combustion Institute,2011,33(2):2265-2271.
- [20] CICCARELLI G,CROSS M. On the propagation mechanism of a detonation wave in a round tube with orifice plates [J]. Shock Waves,2016,26(5):587-597.
- [21] GAO Y,LEE J H S,NG H D. Velocity fluctuation near the detonation limits [J]. Combustion and Flame,2014,161(11):2982-2990.

## Detonation Propagation in Hydrogen/Methane-Air Mixtures in a Round Tube Filled with Orifice Plates

WANG Luqing<sup>1</sup>, MA Honghao<sup>1,2</sup>, WANG Bo<sup>1</sup>, SHEN Zhaowu<sup>1</sup>

(1. CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials (LMBD),  
University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

2. State Key Laboratory of Fire Science, University of Science  
and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** In this study experiments were carried out in a round tube, 5 800 mm in length and 48 mm in inner-diameter, filled with orifice plates, to investigate the detonation of hydrogen-air mixtures and stoichiometric hydrogen-methane-air mixtures, and the DDT (Deflagration-to-Detonation Transition) limits were determined. The blockage ratio of the orifice plates was 0.56, and the spacing was divided into two, i. e.,  $S=D$  and  $S=2D$ , in which  $S$  and  $D$  are the obstacle spacing and the tube diameter. The flame velocity was obtained using photodiodes mounted on the tube wall. The results show that the flame regime observed is the quasi-detonation or the choked flame. The flame velocity measured for  $S=2D$  is larger than that for  $S=D$ , and the velocity fluctuation is more significant. This indicates that the cycle of the detonation failure and re-initiation is longer for  $S=2D$ , which is similar to the “galloping detonation”. For hydrogen-air mixtures, detonation re-initiation occurs more aptly at  $S=2D$ , and the limits correlate well with  $d/\lambda \approx 1$ . In the case of hydrogen-methane-air mixtures, the DDT limits for  $S=D$  and  $S=2D$  are both consistent with  $d/\lambda \approx 1$ , where  $d$  and  $\lambda$  are the inner diameter of the orifice plate and the detonation cell size. The results indicate that the obstacle spacing has a significant effect on the propagation of detonation, i. e., detonation propagates more aptly for increased spacing. To generate the quasi-detonation, the opening of the orifice plate has to be large enough to contain at least one cell size while the spacing has to be large enough to form detonation re-initiation.

**Keywords:** gas explosion; orifice plates; DDT limits; hydrogen-methane