

DOI: 10.11883/bzycj-2019-0237

掺氢比对甲烷-氧气爆轰特性的影响*

倪靖, 潘剑锋, 姜超, 陈祥, 张顺

(江苏大学能源与动力工程学院, 江苏镇江 212013)

摘要: 含氢多组分燃料由于其优良的燃烧特性逐渐成为研究关注的重点。为了对掺氢燃料的爆轰特性作进一步的研究, 设计了长 3 000 mm、管径 30 mm 的圆柱形半封闭燃烧室, 对不同初压下的 $\text{CH}_4\text{-}2\text{O}_2$ 、 $6\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-}12.5\text{O}_2$ 、 $3\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-}6.5\text{O}_2$ (掺氢比分别为 0%、5.1%、9.5%) 3 种预混合气的爆轰特性进行了实验研究, 并采用烟熏膜、离子探针和压力传感器分别探测胞格结构、火焰位置和内部压力。结果表明, 甲烷/氧气掺氢后可以有效提高爆轰波的传播速度, 且掺氢浓度越高, 传播速度越快; 同时, 氢气的掺入可减少管道出口处的速度亏损并在初始压力较低时加速火焰和激波的耦合, 降低胞格尺寸, 提高爆轰敏感性。

关键词: 爆轰波; 爆轰胞格尺寸; 掺氢比; 爆轰敏感性

中图分类号: O382 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Effects of hydrogen-blending ratio on detonation characteristics of premixed methane-oxygen gas

NI Jing, PAN Jianfeng, JIANG Chao, CHEN Xiang, ZHANG Shun

(School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China)

Abstract: Hydrogen-doped fuel has gradually become the focus of research due to its excellent combustion characteristics. In order to further study the detonation characteristics of hydrogen-doped fuel, a cylindrical semi-enclosed tube with the length of 3 000 mm and the diameter of 30 mm was designed. The detonation characteristics of three premixed gases, $\text{CH}_4\text{-}2\text{O}_2$, $6\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-}12.5\text{O}_2$ and $3\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-}6.5\text{O}_2$ (hydrogen ratio is 0%, 5.1% and 9.5%, respectively), were studied experimentally under different initial pressures. Smoked foils, ion probes and pressure sensors were used to measure the cell structures, the flame positions and the internal pressures, respectively. The results show that hydrogen-doped methane/oxygen can effectively increase the propagation velocity of detonation waves, and the higher the concentration of hydrogen, the faster the propagation velocity. In addition, hydrogen can reduce the velocity loss at the outlet of the tube and accelerate the coupling of flame and shock wave at lower initial pressures, reduce the cell size and improve detonation sensitivity.

Keywords: detonation wave; detonation cell size; ratio of mixing hydrogen; detonation sensitivity

混合燃料具有优良的燃烧特性, 特别是单一燃料掺氢所形成的混合燃料, 可以很好地改善燃烧性能^[1-3]。一些实验和数值研究结果表明, 对于天然气燃料, 随着氢气的掺入, 燃料的点火性能和燃烧性能都会有极大的提高。其主要的原因是氢气的火焰传播速度远高于天然气等碳氢燃料。同样, 在内燃机中, 甲烷和氢气的二元混合燃料能够改善燃料整体的稀薄燃烧特性, 降低排放, 弥补天然气发动机的不足^[4-6]。

在燃料掺氢方面, 早期已经进行了一些相关研究。刘海全等^[7]研究了不同掺氢比对天然气发动机排放特性的影响, 结果表明, 掺氢后可以有效提高发动机的指示热效率, 改善稀燃效果。殷勇等^[8]同样进行了天然气掺氢发动机的实验研究, 获得了相似的结论, 天然气掺氢以后可以拓宽燃料的稀燃极限, 且随着掺氢比的增大, 相同功率的稀燃极限加大。尉庆国等^[9]在定容燃烧弹内进行了甲烷/氢气/

* 收稿日期: 2019-06-13; 修回日期: 2019-09-30

基金项目: 国家自然科学基金(91641113)

第一作者: 倪靖(1996—), 男, 硕士研究生, a1437407300@163.com

通信作者: 潘剑锋(1978—), 男, 博士, 教授, mike@ujs.edu.cn

空气混合气燃烧实验,结果表明,混合气在较低初始压力和较高初始温度下,燃烧速率较大,随着掺氢比的升高,燃烧压力峰值增大。阳旭峰等^[10]研究了氢气体积分数对甲烷/氢气预混气爆炸特性的影响,发现预混火焰传播速度随着氢气体积分数的增大而上升,最大爆炸超压随着氢气体积分数的增大而增高。

目前,多是研究掺氢燃料的缓燃、爆燃特性,爆轰特性却少有研究。随着爆轰理论和研究的不断发展,掺氢燃料的爆轰特性研究渐渐进入人们的视野。Chaumeixa等^[11]实验研究了甲烷浓度对甲烷/氢气/氧气预混合气爆轰特性的影响,结果表明甲烷浓度的升高对混合物的爆轰有很大的抑制作用。Rudy等^[12]对化学当量比下的甲烷/氢气/空气预混气进行了相关研究,以爆轰胞格尺寸作为衡量爆轰敏感性标准,发现随着氢气的掺入,爆轰胞格尺寸降低且更加不规则,爆轰敏感性增强。Porowski等^[13]在长为6 m、放有扰流器的管道中对化学当量比的甲烷/空气/氢气混合物进行了相关实验,他们认为随着氢气浓度的提高,混合物的爆轰敏感性增强。白桥栋等^[14]研究了掺氢对爆轰参数的影响,发现当初始压力为一个大气压时,掺氢后爆轰波的峰值压力和爆轰传播速度显著提高,且起爆位置提前,有利于减少DDT (deflagration to detonation transition)距离。Zhang等^[15]在长度为2.5 m,内径为4、14、36 mm的爆轰管中,研究了 $\text{CH}_4\text{-}2\text{H}_2\text{-}3\text{O}_2$ 在近爆轰极限处的速度波动,得到了6种具有不同特性的爆轰传播模式,即稳定爆轰、带有快速波动的稳定爆轰、结巴爆轰、带有快速爆燃的结巴爆轰、快速爆燃、快速火焰模式。

尽管对于高掺氢燃料的爆轰特性目前已经有了诸多研究,但是对较低掺氢比下甲烷/氧气爆轰特性的研究却略显不足,还需要更进一步的研究。因此,本文中在长3 000 mm、管径30 mm的圆形半封闭管道中,对不同初压下的 $\text{CH}_4\text{-}2\text{O}_2$ 、 $6\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-}12.5\text{O}_2$ 、 $3\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-}6.5\text{O}_2$,掺氢比分别为0%、5.1%、9.5%等3种预混合气的爆轰特性进行实验研究,以期获得掺氢比对甲烷-氧气预混气爆轰速度、火焰激波耦合过程、爆轰压力、爆轰胞格尺寸的影响。

1 实验原理及实验工况

1.1 实验原理与方法

实验系统如图1所示,半封闭的激波管管径为30 mm,长度为3 000 mm,分两段用法兰拼接而成,每段1 500 mm,实验时开口端用0.1 mm厚的铝箔胶密封。整个系统由混气装置、爆轰管、点火系统、真空泵和测量系统组成。火焰信号由离子探针^[16]来测量,压力信号用PCB压力传感器(113A22,频响为500 kHz)采集。数据采集系统为NIPXI21042Q系统。爆轰管上分别设置了8个压力传感器和8个离子探针,且压

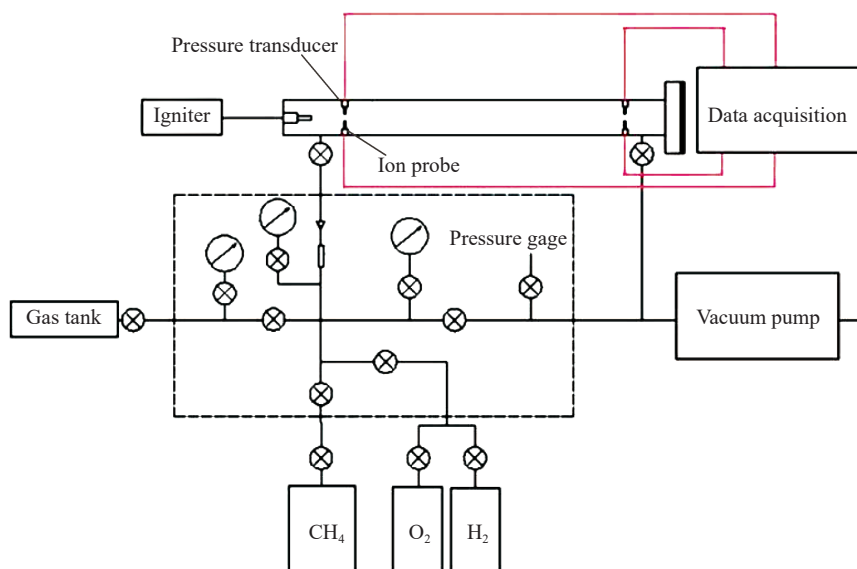


图1 实验系统

Fig. 1 Experimental system

力传感器和离子探针设置在爆轰管同一截面上,每2个压力传感器与离子探针间距皆为360 mm。同时以圆柱形管道的中轴线为横轴,管道封闭端所处的位置为原点,规定自封闭端向右为正方向,以此建立坐标系。

实验前先将甲烷、氧气、氢气采用道尔顿分压法在混气罐中混合,使各组分自由扩散24 h,保证各组分能够充分混合。每次充气前将烟熏膜贴壁放入爆轰管末端,用0.1 mm厚的铝箔胶将开口端密封,随后用真空泵将系统抽到100 Pa,然后将预混好的燃气充入管中,达到预期的初始压力,最后点火起爆。采用高频高能的点火器进行点火,点火系统等效电路^[17]如图2所示,点火器输出电压为15 kV,电容为20 μF ,放电能量为2.25 J,根据Lee等^[18]提出的1/4周期放电能量理论,用于起爆的有效能量为0.562 5 J,远小于detonation database^[19]中的临界能量。起爆后将烟熏膜从爆轰管中取出,喷上定型剂,随后采用扫描仪对烟熏膜上的胞格进行记录,并进行数字化处理^[20]。

1.2 气体组分

本文中采用的实验气体为 $\text{CH}_4\text{-}2\text{O}_2$ 、 $6\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-}12.5\text{O}_2$ 、 $3\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-}6.5\text{O}_2$ 等3种,当量比为1,具体参数如表1所示。

表1 实验气体组分

Table 1 Experimental gas compositions

气体编号	气体配比	氢气摩尔分数/%
#1	$\text{CH}_4\text{-}2\text{O}_2$	0
#2	$6\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-}12.5\text{O}_2$	5.1
#3	$3\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-}6.5\text{O}_2$	9.5

2 结果与讨论

2.1 掺氢对火焰和激波耦合过程的影响

图3给出了 $\text{CH}_4\text{-}2\text{O}_2$ 混合物在不同初始压力(p_0)下,激波和火焰触发时间随着距离的变化情况。横坐标表示离子探针或压力传感器的触发时间,纵坐标与实验系统坐标系相同。曲线斜率表示激波或火焰的速度,曲线越陡,速度越高。如图3(a)所示,在初始压力为50.5 kPa时,起初激波位于火焰的前方,在360 mm处火焰加速,以大于激波的速度向前传播,在接近720 mm处火焰超过激波,随后激波开始急剧加速,在1 080 mm处追赶上前方的火焰。随后火焰和激波耦合到一起,形成稳定的爆轰波,以一个较稳定的速度传播到管道出口。在初始压力为15.0 kPa时,如图3(b)所示,可以发现激波和火焰的位置波动大幅增加,在720 mm附近两者的距离甚至比初始360 mm附近的间距还大。在1 440 mm处火焰与激波耦合但并未形成稳定爆轰,直到1 800 mm处才形成了稳定的爆轰。这是因为随着初始压力的降低,预混气的能量密度降低,起爆距离增大,爆轰强度下降。

图4~5分别给出了 $6\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-}12.5\text{O}_2$ 、 $3\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-}6.5\text{O}_2$ 两种预混气体,在初始压力为50.5 kPa和15.0 kPa的情况下,激波和火焰触发时间随距离的变化情况。通过比较可以发现,当初始压力较高时(50.5 kPa),不同掺氢比下火焰和激波的耦合过程与 $\text{CH}_4\text{-}2\text{O}_2$ 中火焰与激波的耦合过程非常相似,掺氢对火焰与激波的耦合过程影响较小。在初始压力较低时,如图4(b)、5(b)所示,掺氢后火焰与激波的耦合过程发生了很大变化。以掺氢9.5%情况为例,在初始压力为15.0 kPa时,在360 mm前后,激波位于火焰

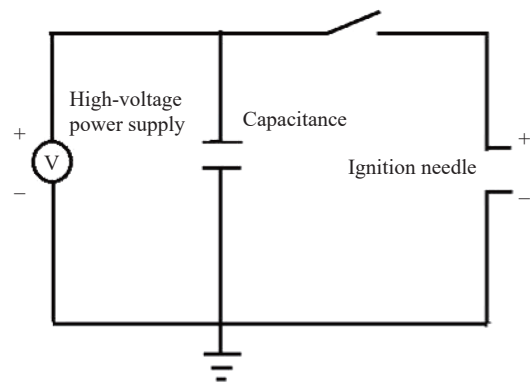


图2 点火系统等效R-L-C电路^[17]

Fig. 2 An equivalent R-L-C circuit of the ignition system^[17]

前方,随后激波和火焰同时加速且激波速度大于火焰速度,激波和火焰间距变大,在 360~720 mm 间激波速度始终大于火焰速度,在 720~1 080 mm 间激波速度发生衰减而火焰在反射激波和湍流反应区的作用下速度增加,逐渐接近前方的激波,最终在 1 080 mm 稍后的一段位置上火焰激波初步耦合到一起,随后在 1 440 mm 前后形成稳定的爆轰波。由此可知,掺氢后可以促进低初始压力情况下火焰与激波的耦合过程,加速爆轰的形成。

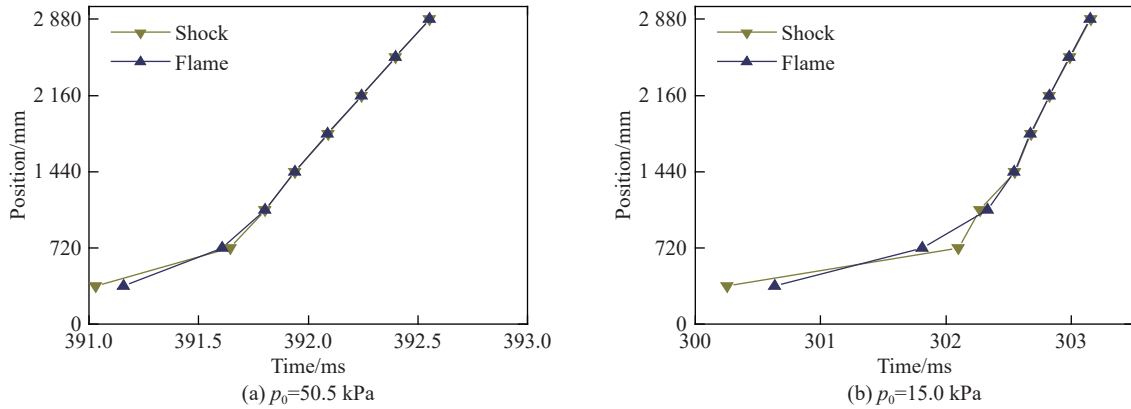


图 3 CH₄-2O₂ 激波与火焰的相互作用过程

Fig. 3 Time evolution of shock-flame interaction for CH₄-2O₂

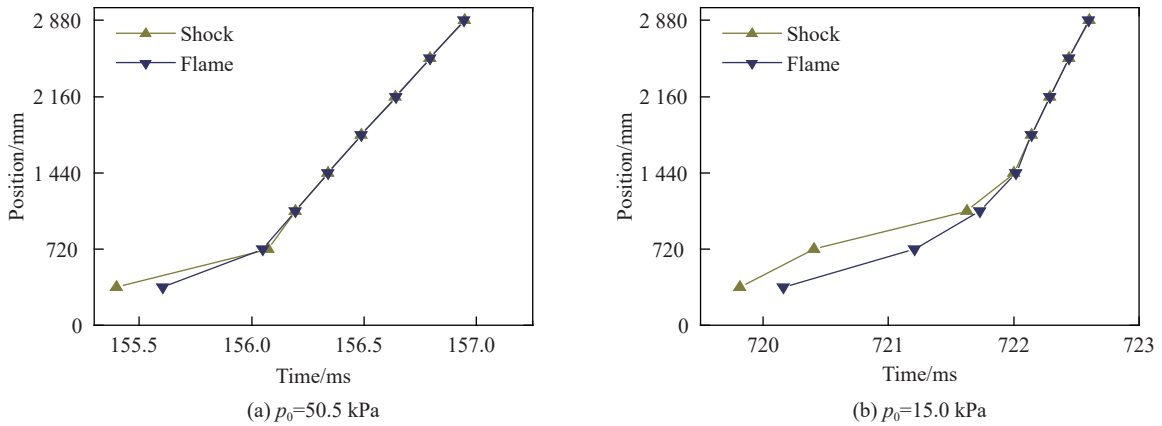


图 4 6CH₄-H₂-12.5O₂ 激波与火焰的相互作用过程

Fig. 4 Time evolution of shock-flame interaction for 6CH₄-H₂-12.5O₂

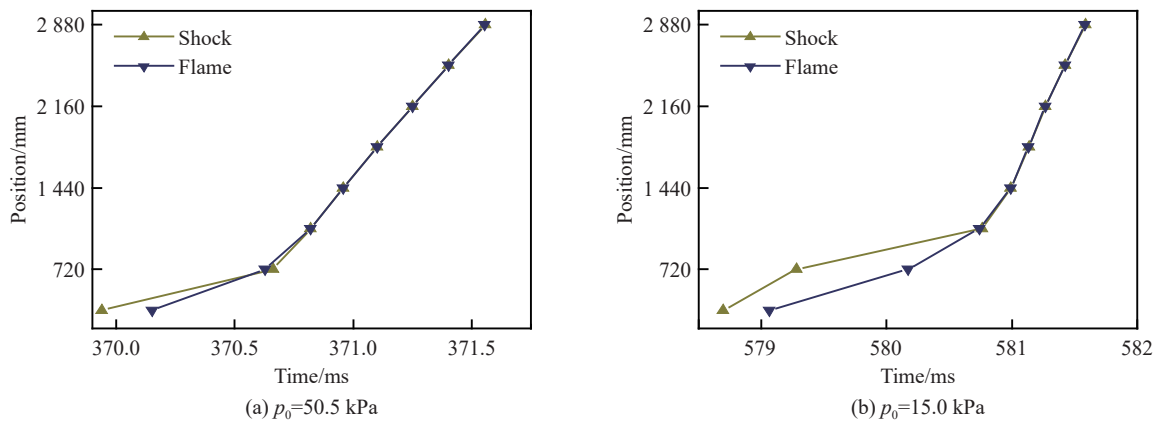


图 5 3CH₄-H₂-6.5O₂ 激波与火焰的相互作用过程

Fig. 5 Time evolution of shock-flame interaction for 3CH₄-H₂-6.5O₂

2.2 掺氢对爆轰波传播速度的影响

图6给出了不同初压下管道中不同位置处火焰传播速度与CJ(Chapman-Jouguet)速度(v_{CJ})的比值。传播速度 v 按照如下的方法获得:假设 n 和 $n+1$ 号离子探针感应到信号的时间分别为 t_n 和 t_{n+1} ,两者间隔距离 $X=360$ mm,则传火焰传播速度:

$$v = X / (t_{n+1} - t_n) \quad (1)$$

以 $\text{CH}_4\text{-2O}_2$ 在50.5 kPa下的曲线为例(图6(a))可以看出,在初始位置即在360 mm前后,电火花点燃预混气形成缓燃波,以较低的速度向前传播。在1 080 mm前后压缩波叠加形成激波,压缩前方的未燃混合气。激波撞击到封闭端和壁面后发生反射,形成的反射激波再次作用于火焰,形成湍流反应区加速火焰的传播。在1 080~1 440 mm之间湍流反应区与激波的相互作用,形成热点,热点爆炸后形成过驱动爆轰。此时 v/v_{CJ} 在1.1左右,随后过驱动爆轰逐渐衰减形成稳定爆轰。传至出口处时,出口处的薄膜在高压的作用下破裂。受外界空间的影响在2 880 mm前后,可以看到稳定的爆轰波发生了略微的衰减,且初始压力越低,衰减越明显。这是因为,随着初始压力的降低,爆轰波的强度下降,薄膜在爆轰波的作用下破裂后,爆轰波受到外界膨胀波的影响较大,从而发生较大的衰减。

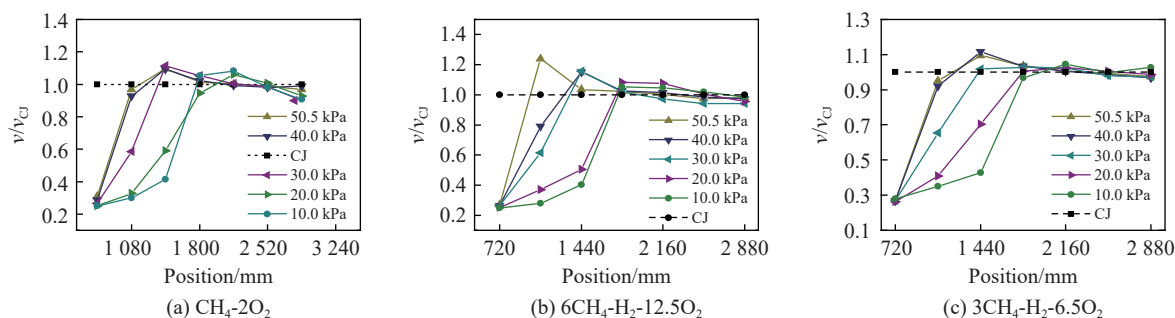


图6 不同初压下管道中各点火焰速度与CJ速度的比值

Fig. 6 Ratios of flame velocity to CJ velocity at each point in the pipeline under different initial pressures

观察图6中3种气体在管道出口处的速度变化,可以发现掺氢可以显著减少爆轰波在出口附近的衰减,降低出口附近的速度亏损,特别是对于低初始压力的情况更明显。这是因为氢气的爆轰敏感性高于甲烷,随着较高爆轰敏感性的氢气掺入到较低爆轰敏感性的甲烷/氧气混合气中时,整个混合气的爆轰敏感性增强,与未掺氢的情况相比,掺氢后高爆轰敏感性的气体在管道出口附近爆轰不稳定性更大,横波运动更剧烈,受到膨胀波的影响较小,因而掺氢后出口附近爆轰强度衰减较少。

图7反映了3种预混气在不同初始压力下爆轰波稳定传播的平均速度。从图中可以看出3种不同掺氢比下的爆轰稳定传播速度都随着初始压力的降低而不断下降。这是因为,随着初始压力的降低,爆轰诱导区长度增加,边界层扩散导致的能量损失增大,爆轰的化学反应变缓而导致传播速度的下降^[17]。

随着掺氢比的提高,相同初始压力下爆轰波的传播速度增大,且掺氢越高,速度越大,其原因可以从CJ理论的角度进行解释。依据CJ理论,爆轰波的稳定传播速度 D 可近似用下式来表示^[21]:

$$D = \sqrt{2(k^2 - 1)Q_v} \quad (2)$$

式中: k 为等熵指数, D 为爆轰波稳定传播速度

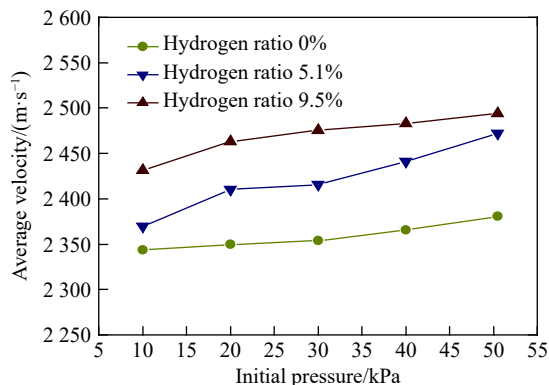


图7 不同掺氢比下爆轰波稳定传播平均速度随初压的变化
Fig. 7 Average velocity of steady propagation of detonation wave varying with initial pressure at different hydrogen-blending ratios

(m/s), Q_V 为单位质量爆炸物的定容爆热(kJ/kg)。 Q_V 可使用盖斯定律^[22]用下式计算:

$$Q_V = Q_{1,3} - Q_{1,2} \quad (3)$$

式中: $Q_{1,3}$ 为爆炸产物的生成热之和, $Q_{1,2}$ 为爆炸物的生成热。依据式(1)、(2)可计算出 $\text{CH}_4\text{-}2\text{O}_2$ 、 $6\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-}12.5\text{O}_2$ 、 $3\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-}6.5\text{O}_2$ 在标准状况下的 Q_V 分别为 10 029.5、10 150、10 267 kJ/kg, 可以发现预混气的定容爆热随着掺氢比的升高而增加, 对于相同质量的燃料, 掺氢比越高, 燃料发生爆轰时释放的能量越大, 爆轰波平均传播速度越高。

2.3 掺氢对爆轰波压力的影响

图 8 反映了在不同掺氢比、不同初始压力下管道中不同位置处峰值压力的变化。从图中可以看出, 随着初始压力的降低, 爆轰波峰值压力最大值后移且数值降低, 当爆轰达到稳定后, 初始压力越高, 总体上各点峰值压力也就越大。

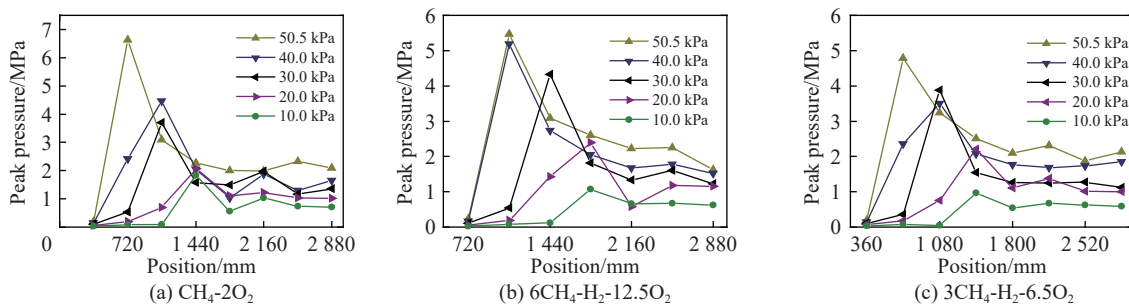


图 8 不同掺氢比、不同初始压力下管道中各点压力峰值的分布情况

Fig. 8 Distribution of the pressure peak at each point in the pipeline under different hydrogen-blending ratios and different initial pressures

不同的是, 当掺氢比为 9.5% 时, 在初始压力为 30.0 kPa 情况下的爆轰波的峰值压力高于初始压力为 40.0 kPa 情况下的爆轰波的峰值压力。这是因为, 掺氢浓度的增加使得预混气体的爆轰不稳定性增加: 在高压时, 由于压力较大使得掺氢浓度对爆轰不稳定性的影响不明显, 因而整个曲线的发展趋势和之前的 $\text{CH}_4\text{-}2\text{O}_2$ 、掺氢比为 5.1% 的情况相比变化不明显; 在低压时, 由于边界条件影响较大, 使得掺氢对压力的影响仍然不明显; 在中压时, 由于初始压力和边界条件的影响都不是很突出, 因而掺氢浓度对整个压力变化的影响能够显现出来, 出现压力升高、过爆压力反而降低的不稳定现象。

2.4 掺氢对爆轰胞格的影响

图 9~11 为 3 种预混气体在不同初始压力下的胞格结构。可以发现, 对于同一种气体, 随着初始压力的升高, 胞格尺寸降低, 胞格的分布也更细密。在初始压力为 20.0 kPa 时, 3 种气体皆为双头爆轰, 胞格结构较规则, 横波间距较统一。随着初始压力的升高, 开始逐渐产生子胞格, 形成多头爆轰, 胞格不规则性增加。这是因为, 随着初始压力的升高, ZND (Zeldovich-Neumann-Döring) 诱导区长度降低, 爆轰敏感性提高。

观察图 9、图 10 可以发现, 在较高的初始压力下(30.0、40.0 kPa), 爆轰胞格尺寸随着掺氢比的升高而不断降低, 同时主胞格中出现了横波的分叉与交汇现象, 形成了精细的次生胞格。这表明, 氢气的掺入可以有效降低爆轰 ZND 诱导区长度, 且随着氢气的掺入, 爆轰波在传播的过程中横波不断的发生衰减和加速, 波系结构变得更不规则, 爆轰不稳定性提高, 横波分叉产生横向爆轰(transverse detonation), 在主胞格内产生次生的小胞格。与高压的情况不同, 在初始压力较低时(20.0 kPa, 图 8), 随着掺氢比的升高, 胞格并无明显变化, 也未产生子胞格, 仍然以双头爆轰的形式进行传播。这是因为, 尽管氢气的掺入可以提高爆轰的不稳定性, 但其提高的幅度有限, 当初始压力较低时, 气体的爆轰敏感性较低, 且受壁面边界层影响较大, 使得氢气的掺入对爆轰的影响并不明显。

通过测量烟膜上爆轰胞格中相邻的横波族的间距, 可以得到 3 种预混气形成的爆轰胞格尺寸 λ 随

初始压力的变化并依据 Gao 等^[23] 提出的公式 $\lambda=C(p_0/\text{kPa})^{-b}$ 进行拟合,如图 12 所示。可以发现,3 种预混气体的胞格尺寸均随着初始压力的升高而减小。这是因为,初始压力越高,爆轰敏感性越高,胞格尺寸越小。同时可以发现,氢气的掺入可有效降低胞格尺寸,且掺氢比越高胞格尺寸越小。不同掺氢比下爆轰胞格与初始压力的变化关系式参数如表 2 所示。

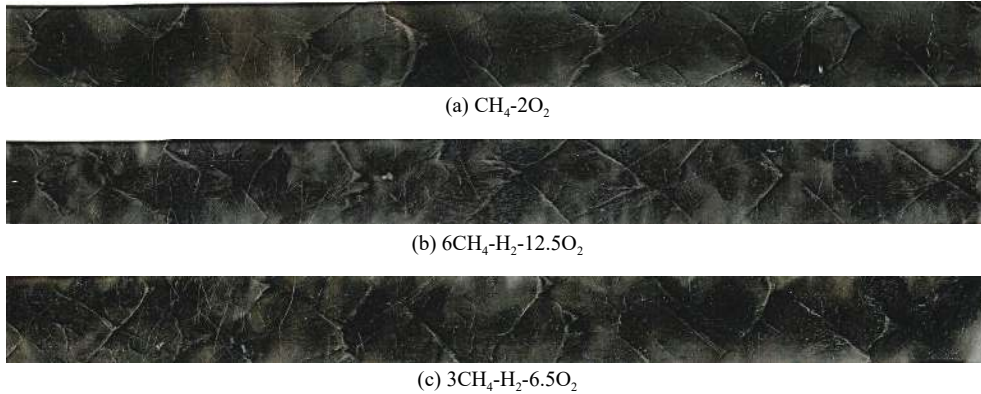


图 9 初始压力为 20.0 kPa 时 3 种气体的胞格结构

Fig. 9 Cellular structures of three gases at the initial pressure of 20.0 kPa

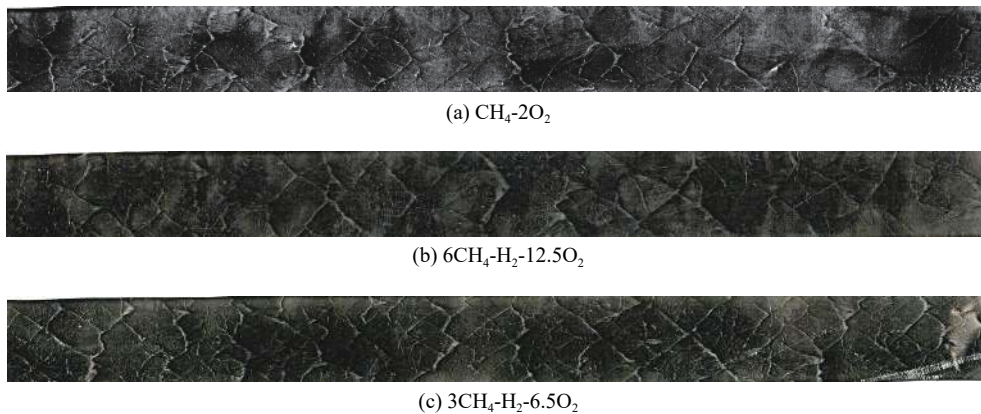


图 10 初始压力为 30.0 kPa 时 3 种气体的胞格结构

Fig. 10 Cellular structures of three gases at the initial pressure of 30.0 kPa

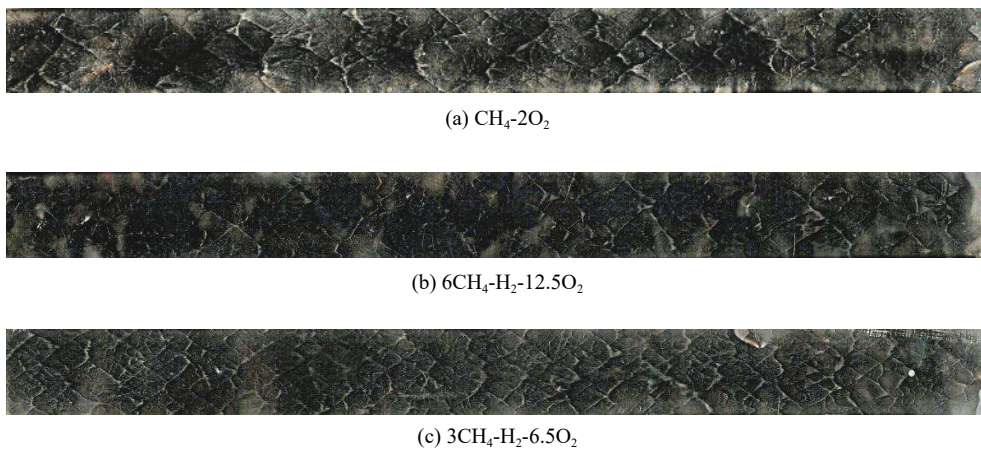


图 11 初始压力为 40.0 kPa 时 3 种气体的胞格结构

Fig. 11 Cellular structures of three gases at the initial pressure of 40.0 kPa

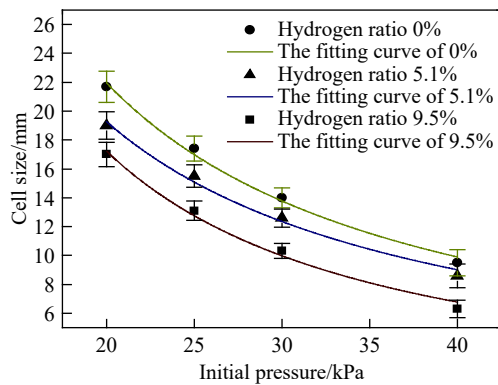


图 12 不同掺氢比下胞格尺寸随初始压力的变化

Fig. 12 Change of cell size with initial pressure at different hydrogen-blending ratios

表 2 爆轰胞格尺寸 λ 与初始压力 p_0 之间的拟合关系参数

Table 2 Parameters for fitting relationship between detonation cell size λ and initial pressure p_0

掺氢比/%	C/mm	b
0	688.229 57	1.149 81
5.1	515.502 93	1.096 92
9.5	977.119 24	1.347 64

3 结论

在长 3 000 mm、管径 30 mm 的圆形半封闭管道中, 对不同初压下的 $\text{CH}_4\text{-}2\text{O}_2$ 、 $6\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-}12.5\text{O}_2$ 、 $3\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-}6.5\text{O}_2$ (掺氢比分别为 0%、5.1%、9.5%) 3 种混合气体进行一系列的爆轰实验, 得到了以下结论:

(1) 氢气的掺入可以有效促进低初始压力情况下火焰和激波的耦合过程, 加速起爆。

(2) 掺氢可以显著减少爆轰波在出口附近的衰减, 降低出口附近的速度亏损, 特别是对于低初始压力的情况更明显。

(3) 预混气的定容爆热随着掺氢比的升高而增加, 对于相同质量的燃料, 掺氢比越高, 燃料产生爆轰时释放的能量越大, 爆轰波平均传播速度越高。

(4) 氢气的掺入可有效提高 CH_4 爆轰敏感性, 降低胞格尺寸, 且掺氢比越高, 胞格尺寸越小。同时得到了不同掺氢比下, 爆轰胞格与初始压力的变化关系式。

参考文献:

- [1] ZHOU J H, CHEUNG C S, LEUNG C W. Combustion, performance and emissions of a diesel engine with H_2 , CH_4 , and $\text{H}_2\text{-CH}_4$ addition [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(9): 4611–4621. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2013.12.194.
- [2] BAUER C G, FOREST T W. Effect of hydrogen addition on the performance of methane-fueled vehicles: Part I: effect on S. I. engine performance [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2001, 26(1): 55–70. DOI: 10.1016/S0360-3199(00)00067-7.
- [3] JEONGSEOG O, DONGSOON N, CHANGBOK K. The effect of hydrogen addition on the flame behavior of a non-premixed oxy-methane jet in a lab-scale furnace [J]. *Energy*, 2013, 62(Complete): 362–369. DOI: 10.1016/j.energy.2013.09.049.
- [4] 李勇, 马凡华, 刘海全, 等. HCNG 发动机掺氢比选择试验研究 [J]. *车用发动机*, 2007(2): 15–18. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2222.2007.02.004.
LI Y, MA F H, LIU H Q, et al. A test research on choosing a suitable hydrogen-CNG ratio for HCNG engine [J]. *Vehicle Engine*, 2007(2): 15–18. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2222.2007.02.004.
- [5] 牛仁旭, 张岳韬, 于秀敏, 等. 喷氢时刻对缸内直喷掺氢汽油机燃烧及排放的影响 [J]. *内燃机学报*, 2017, 35(1): 32–37. DOI: 10.16236/j.cnki.nrjxb.201701005.
NIU R X, ZHANG Y T, YU X M, et al. Effect of hydrogen injection timing on combustion and emission characteristics in a hydrogen-blended gasoline engine [J]. *Transactions of CSICE*, 2017, 35(1): 32–37. DOI: 10.16236/j.cnki.nrjxb.201701005.
- [6] 范宝伟. 天然气转子发动机缸内气流运动和燃烧过程的实验和数值模拟研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2015: 35–40.
- [7] 刘海全, 马凡华, 王宇, 等. 不同掺氢比天然气发动机的燃烧排放特性 [J]. *农业机械学报*, 2009, 39(8): 1–13.
LIU H Q, MA F H, WANG Y, et al. Combustion and emission characteristics of an engine fueled with hydrogen enriched nature gas of various blend ratios [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 39(8): 1–13.

- [8] 殷勇, 马凡华, 饶如麟. 天然气掺氢发动机实验研究 [C]//APC 联合学术年会论文集. 江苏丹阳, 2006: 176–185.
- [9] 尉庆国, 白小磊, 张红光. 甲烷-氢气-空气预混合气燃烧特性研究 [J]. *车辆与动力技术*, 2011(4): 12–17. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4687.2011.04.004.
WEI Q G, BAI X L, ZHANG H G. Combustion characteristics research on methane-hydrogen-air pre-mixture [J]. *Vehicle and Power Technology*, 2011(4): 12–17. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4687.2011.04.004.
- [10] 阳旭峰, 郑凯, 万少杰. 障碍物对甲烷/氢气爆炸特性的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(1): 19–27. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0172.
YANG X F, ZHENG K, WAN S J. Effect of obstacles on explosion characteristics of methane/hydrogen [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(1): 19–27. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0172.
- [11] CHAUMEIXA N, PICHONA S, LAFOSSEA F, et al. Role of chemical kinetics on the detonation properties of hydrogen/natural gas/air mixtures [J]. *Hydrogen Energy*, 2007, 32(13): 2216–2226. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2007.04.008.
- [12] RUDY W, ZBIKOWSKI M, TEODORCZYK A. Detonations in hydrogen-methane-air mixtures in semi confined flat channels [J]. *Energy*, 2016, 116(3): 1479–1483. DOI: 10.1016/j.energy.2016.06.001.
- [13] POROWSKI R, TEODORCZYK A. Experimental study on DDT for hydrogen-methane-air mixtures in tube with obstacles [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2013, 26(2): 374–379. DOI: 10.1016/j.jlp.2012.06.004.
- [14] 白桥栋, 翁春生. 进气掺氢对爆轰波参数影响的试验研究 [J]. *推进技术*, 2015, 36(12): 1915–1920. DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2015.12.023.
BAI Q D, WENG C S. Experimental study of effects of hydrogen addition on detonation wave parameters [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(12): 1915–1920. DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2015.12.023.
- [15] ZHANG B, WANG C, SHEN X B, et al. Velocity fluctuation analysis near detonation propagation limits for stoichiometric methane-hydrogen-oxygen mixture [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(39): 17750–17759. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.08.017.
- [16] 韩启祥, 王家骅, 王维来. 测量爆燃到爆震转换距离的离子探针技术研究 [J]. *航空动力学报*, 2003, 17(1): 97–100. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8055.2003.01.017.
HAN Q X, WANG J H, WANG W L. Investigation of the ion-probe technology for measuring the DDT distance [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2003, 17(1): 97–100. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8055.2003.01.017.
- [17] 张博, 白春华. 气相爆轰动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2012: 104–105.
- [18] KNYSTAUTAS R, LEE J H. On the effective energy for direct initiation of gaseous detonation [J]. *Combustion and Flame*, 1976, 27: 221–228. DOI: 10.1016/0010-2180(76)90025-0.
- [19] KANESHIGE M, SHEPHERD J E. Detonation database [DB/OL]. (2005-01-25)[2015-08-28]. http://shepherd.caltech.edu/detn_db/html/db.html.
- [20] 赵焕娟, LEE J H S, 张英华, 等. 边界条件对甲烷预混气爆轰特性的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(2): 201–207. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)02-0201-07.
ZHAO H J, LEE J H S, ZHANG Y H, et al. Effects of boundary conditions on premixed $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ detonation characteristics [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(2): 201–207. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)02-0201-07.
- [21] 张宝平, 张庆明. 爆轰物理学 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 2001: 99–100.
- [22] 郝志坚, 王琪. 炸药理论 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2015: 85–90.
- [23] 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. DOI: 10.1007/s00193-014-0505-8.

(责任编辑 张凌云)