

文章编号:1000-8055(2012)09-1948-10

当量比和间隙尺寸对爆震波传播过程的影响

张 超, 唐 豪, 李 明, Sudip Bhattarai
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 为探索微型脉冲爆震发动机推进系统的可行性,进行了微空间内爆震极限特性的研究. 通过对预混氢气/氧气爆震火焰在平板狭缝中的传播过程进行测量,分析了爆震波压力、速度随当量比和间隙尺寸的变化趋势,发现在极限范围外,来自稳流段的爆震波都能在间隙内通过压力和速度的自我调整后达到稳定状态,调整过程所需的距离随间隙尺寸减小而增长. 根据爆震波速度衰减的定义,给出了激波和火焰锋面速度沿间隙通道方向的变化特点,观察到了微尺寸下爆震波的 4 种传播模式:稳定爆震波、准稳定爆震波、低速爆震波和非爆震波.

关 键 词: 微尺寸; 爆震波; 极限特性; 速度衰减; 传播模式

中图分类号: V235. 22

文献标志码: A

Effects of equivalence ratio and gap size on the propagation behavior of detonations

ZHANG Chao, TANG Hao, LI Ming, Sudip Bhattarai

(College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To explore the feasibility of micro-scale pulse detonation engine propulsion system, detonation limits in narrow channels have been investigated. By observing and measuring the propagation behavior of premixed hydrogen-oxygen detonation flames in narrow gaps, effects of gap size and equivalence ratio on detonation wave pressure and velocity were experimentally analyzed. Outside the detonation limit, the detonation wave coming from the guide section can reach a steady state in the gap by self-adjustment of the pressure and velocity. The distance required by the adjustment process was growing when the gap size decreased. According to the definition of velocity deficit, the characteristics of the velocities of shock and flame front along the micro-channel were summarized, and four propagation models—steady detonation, sub-steady detonation, low-speed detonation and non-detonation were observed.

Key words: micro-size; detonation wave; detonation limit; velocity deficit; propagation behavior

微型飞行器(micro aerial vehicle, MAV)是当今先进国家竞相研究的科技前沿问题,飞行器的微型化是和动力系统的微型化密不可分的,因

此,各个国家在提出研制微型飞行器的同时,便开始着手进行与之相配套的微型发动机的研制工作. 脉冲爆震发动机(pulse detonation engine,

收稿日期:2011-10-31

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20120921.1251.005.html>

基金项目:国家自然科学基金(50776045);江苏省普通高校研究生科研创新计划(CXLX11_0194)

作者简介:张超(1986—),男,河南焦作人,博士生,主要从事爆震燃烧、超声速流动等项目.

PDE)因其自身的优越性能在军事和民用方面有着广阔的应用前景^[1-3],同时由于它结构简单、对材料要求相对较低,因此将微型脉冲爆震发动机作为微型飞行器的动力装置是一种可行的方案。

脉冲爆震发动机是利用脉冲式爆震波来获得推力的新概念发动机^[4],爆震波能否形成对发动机的性能有直接的影响。目前国内外研究的模型主要集中在中、小级别,对微型尺寸的研究相对较少。这是因为微型脉冲爆震发动机的工作过程不仅受到一般因素的影响,还要考虑爆震波自身的特点,尤其是要考虑爆震波的传播极限问题。

为研究爆震波的传播极限,Dupre等^[5-6]连接不同尺寸的爆震管,从中找出能成功传播爆震波的临界管径。Manson和Guenoche^[7]研究了乙炔/氧气和丙烷/氧气在不同当量比下的爆震特性,发现在给定混合物情况下,当接近爆震极限时,爆震波速度随管径的减小而成线性衰减,文中提出速度衰减是由于壁面附近的混合物因热量损失而产生了熄火边界。根据Fay^[8]的研究,热量和动量损失的正确解释是由于边界层的存在,边界层导致流线分离,进而导致爆震波弯曲,当弯曲过度并超过一个特定临界值时,爆震波的速度将衰减。在微尺寸爆震管方面,Wu等^[9-10]首次研究了乙烯/氧气在1~2 mm石英玻璃管内的传播特性,并用高速摄影仪记录下了爆震波的形成和传播特点。

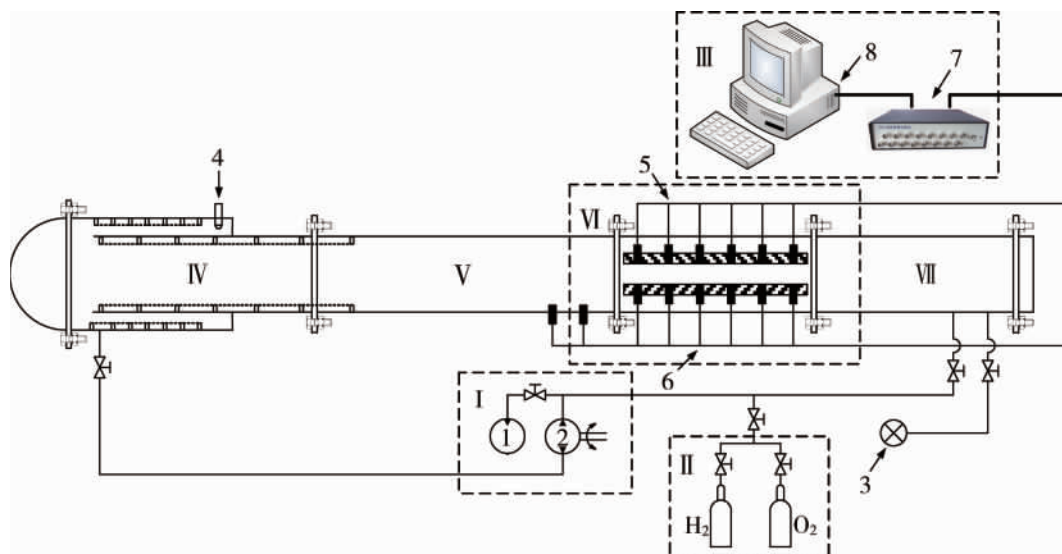
本文采用氢气和氧气作为实验对象,研究了微空间内当量比和间隙尺寸对爆震波传播过程的影响。通过压力传感器和离子探针记录的数据,观察到了4种爆震波的传播模式,并讨论了微空间内爆震波的速度衰减问题,试图通过实验的方法为微型脉冲爆震发动机的设计提供参考依据。

1 实验装置及方法

实验系统如图1所示,整个系统包括循环系统Ⅰ、供气系统Ⅱ、测量和采集系统Ⅲ、爆震管(Ⅳ,Ⅴ,Ⅵ,Ⅶ)。爆震管长为4300 mm,内径为80 mm,整个管子分为4个部分:1100 mm的起爆段Ⅳ;1600 mm的稳流段Ⅴ;600 mm的测试段Ⅵ和1000 mm的延伸段Ⅶ,延伸段是为了避免爆震管末端产生的膨胀波回传对测量造成影响。

为了提高主爆震室内的点火能量,实现PDE在短距离内成功起爆,本实验的起爆段采用带半圆型封闭端的近壁空间聚焦起爆技术,内部安装7片孔板型扰流片,扰流片堵塞比为30%,间距为125 mm,近壁空间内径为89 mm,外径为114 mm,长为400 mm,近壁空间内安装7片孔板型扰流片,扰流片的堵塞比为43%,间距为40 mm。

测试段是本实验的关键,对比前人在单次爆震方面的研究方法^[11-12],本文采用新的结构方式,



1 真空泵;2 循环泵;3 压力表;4 高能电嘴;5 压力传感器;6 离子探针;7 A/D 转换器;8 数据采集计算机;
Ⅰ 循环系统;Ⅱ 供气系统;Ⅲ 测量和采集系统;Ⅳ 起爆段;Ⅴ 稳流段;Ⅵ 测试段;Ⅶ 延伸段。

图1 实验装置

Fig. 1 Schematic of experimental setup

测试段由两片长为 600 mm、宽为 70 mm 的平板构成,如图 2 所示,平板间放置 2 个可调垫片,使得平板能在 0.5~5.0 mm 间调整.在测试段,6 个压力传感器和 6 个离子探针相对应的安装在平板上,间距为 100 mm.由于采用的是矩形通道,不能像圆形截面通道那样使用长径比来描述实验模型的特征,如果用长高比代替长径比,那么对应于实验中通道间隙高度的变化范围 0.5~5.0 mm,相应的长高比变化范围为 1200~120.实验证明,在本文采用的长高比范围内,可以观察到爆震波速度明显的变化,当间隙尺寸还没有达到爆震极限范围时,不同当量比混合物形成的爆震波在进入通道后都能通过自我调整达到稳定.

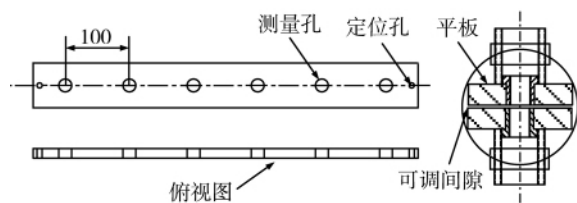


图 2 测试段示意图(单位:mm)

Fig. 2 Schematic of test section (unit:mm)

本文中使用的实验气体组合列在表 1 中.爆震管内充填混合物的压力为 101325 Pa,温度为室温,高能电嘴成功点火后,经过爆燃向爆震的转变过程,爆震波形成,在稳流段内得到稳定的爆震波.用安装在稳流段后端的 2 个离子探针测量稳定后的爆震波速度,用此值和文献[13]中的 Chapman-Jouguet(C-J)值做比较,可以知道稳流段出口处是否形成稳定的爆震波.

表 1 实验中使用的混合物类型

Table 1 Test mixtures used in the experiment

$\Phi(\text{H}_2 + \text{O}_2)$	p/Pa	$V_{\text{C-J}}/(\text{m/s})$	测量值 $V/(\text{m/s})$
0.2	101325	1826	1766
0.4		2187	2083
0.6		2447	2439
0.8		2661	2631
1.0		2842	2777
1.4		3125	3030
1.6		3235	3125
2.0		3409	3225

表 1 中显示,除了当量比为 2.0 的工况之外,

测量的爆震波速度值和文献中的 C-J 速度值相差不大,从而验证了实验的可要性.测试段内激波和火焰锋面速度的计算方法为:相邻两个测量器件的距离比上对应的时间差.虽然本文的研究重点是测试段 VI,但测试段前面的实验部件作为爆震波发生器,用来产生实验所需的爆震波,因此对于本文的研究目的来说,稳流段内的爆震波合适与否,关系到整个实验的可靠性.

2 实验结果及讨论

实验主要研究了 0.5,0.8,1.0,2.0,5.0 mm 间隙尺寸下氢/氧混合物产生的爆震波的传播特性.理论上,同一间隙尺寸下,随着当量比的增加,压力传感器获得的值会增加;同一次测量中,第 1 个压力传感器获得的值比其他传感器得到的值大;激波和火焰锋面的速度分别是由压力传感器和离子探针的相关数据计算所得.通过研究微小空间内爆震波速度变化情况,可以了解氢/氧混合物形成的爆震波的特性,明确不同当量比下爆震波的可传播性.

2.1 爆震波的传播特性

2.1.1 间隙尺寸为 5.0 mm

图 3 所示为 5.0 mm 间隙通道内,当量比为 0.4,1.0,1.6 工况下 6 个压力传感器所获得的数据.图中 PT1~PT6 为压力传感器 1~压力传感器 6.从图中可以看到,每个当量比下,爆震波的压力曲线清晰可见,除了第 5 个传感器的值外,沿通道方向其余传感器所获得的值基本不变,随后的实验证明这是此传感器自身的问题,但这个偏差只限于最大值的大小问题,其灵敏性不受影响.随着当量比的增加,通道内压力传感器获得的值也在提高,和 Camargo^[14]的观察结果相比,第 1 个压力传感器没有出现过高的值,这是因为此模型的稳流段和测试段之间衔接较好,避免了测试段头部过驱爆震的产生.

图 4 为 3 种当量比下激波和火焰锋面的速度值沿通道长度方向的变化情况.图中显示随着当量比的增加,爆震波的速度在上升,这也对应着图 3 中描述的爆震波压力随当量比的增加而提高.坐标原点的速度值为稳流段内的速度值,每种当量比下,随着爆震波的发展,可以看到激波和火焰锋面的速度值在一定范围内上下波动,但相互之间没有产生分离,并且两者的速度值在稳流段速度值上下范围内波动.和稳流段内的速度相比,激

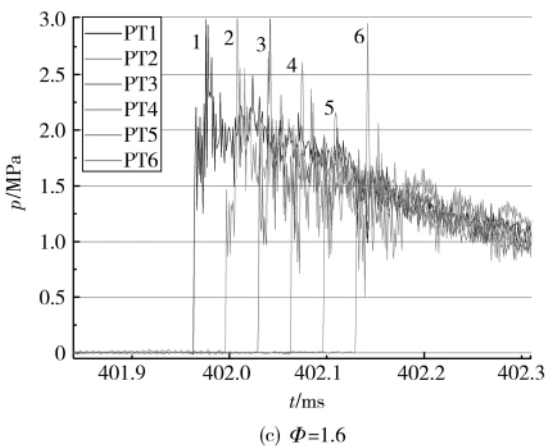
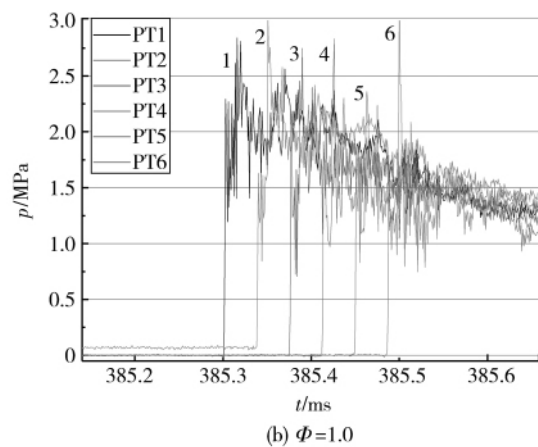
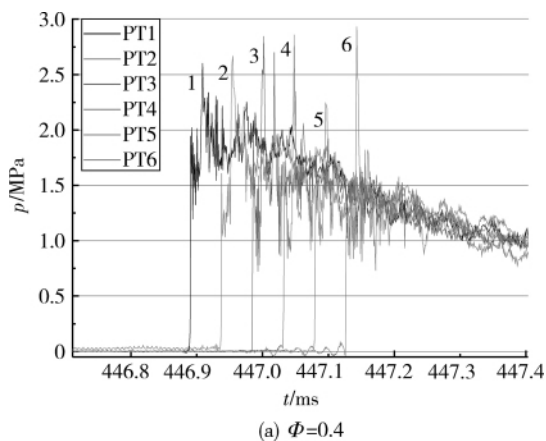


图3 3种当量比下的压力曲线(5.0 mm)

Fig. 3 Pressure histories at three equivalence ratios (5.0 mm)

波和火焰锋面速度都有所下降,但下降的幅度在10%以内,参考 Jackson^[15]对爆震波的分类方法,此时的爆震波属于准C-J爆震波,速度方面如此小的下降趋势,加上稳定的压力值,说明5.0 mm间隙为氢/氧爆震波提供了充分的发展空间,壁面散热等不利因素只在壁面附近起作用,不会对主

流爆震波产生较大的负面影响。

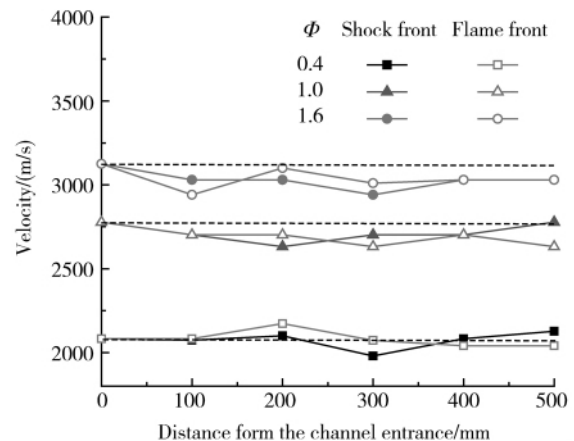


图4 激波和火焰锋面速度曲线(5.0 mm)

Fig. 4 Velocity profiles of the shock and flame front (5.0 mm)

2.1.2 间隙尺寸为2.0 mm

图5为间隙为2.0 mm时,3种当量比下的压力曲线。随当量比的增加,只有第1个压力传感器所获得的值有较明显的上升,但没有5.0 mm间隙时相对应当量比下的值大。其余压力传感器的值随当量比的增加没有大的变化,都在2.0 MPa左右浮动,此时若忽略传感器的自身误差和实验的偶然性,可认为通道内的压力逐渐趋于稳定。和5.0 mm间隙内的压力曲线相比,此时的压力像是遇到了一个瓶颈,不管当量比如何增加,第2个及第2个以后的压力传感器获得的值不再提高。文献[10]中指出:在直径为2.0 mm的石英玻璃管内,因无滑移壁面的影响,火焰锋面面积会快速增加,导致出现爆燃-爆震转捩(deflagration to detonation transition, DDT)过程。这说明间隙尺寸为2.0 mm尺寸下,边界层对中心主流火焰已经有了较大影响。结合本实验的现象,主流为稳流段内传过来的稳定爆震波,爆震波的各项参数已经达到相当量比时的最大值,而此时边界层对主流火焰的影响将是负面的,因此爆震波在进入间隙时强度开始降低,但是边界层对主流的影响还不够剧烈,所以爆震波能以较低形态继续传播。

结合图6通道内激波和火焰锋面速度变化趋势可知,和稳流段内相比,测试通道内激波和火焰锋面速度都有所下降,但下降的幅度不大,都能维持一个较平衡的状态。图中也表明随着当量比的增加,激波和火焰锋面的速度值与稳流段内速度值的差在逐渐增大,这个差值比5.0 mm间隙时

的差值要大,这是因为随着当量比增加,燃烧释所放的能量也相应增加,这样就能提供更强的激波压缩未燃气体,所以爆震波的速度就会随当量比的增加而增加,但 2.0 mm 间隙相对较小,受上下壁面的影响较大,燃烧释放的能量并不能完全用

于压缩未燃气体,同时由于壁面吸收的能量也相对较多,最后导致爆震波的速度不能达到相应的最大值.结合图 5 中对应的压力变化曲线可知,2.0 mm 间隙能引起测试段内爆震波压力和速度较大程度的衰减.

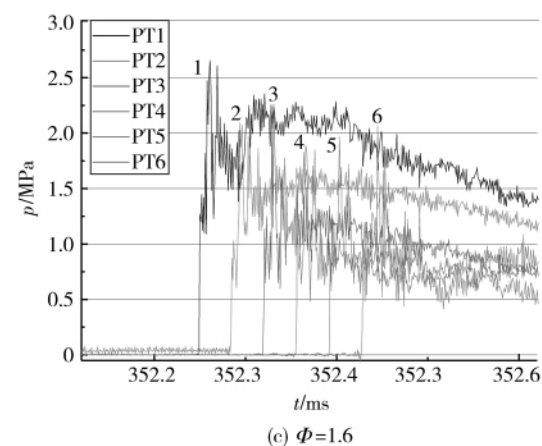
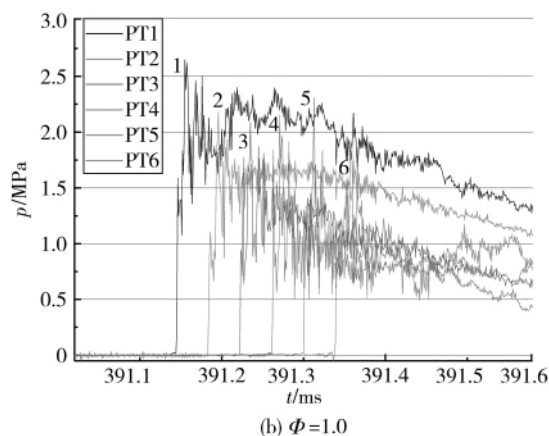
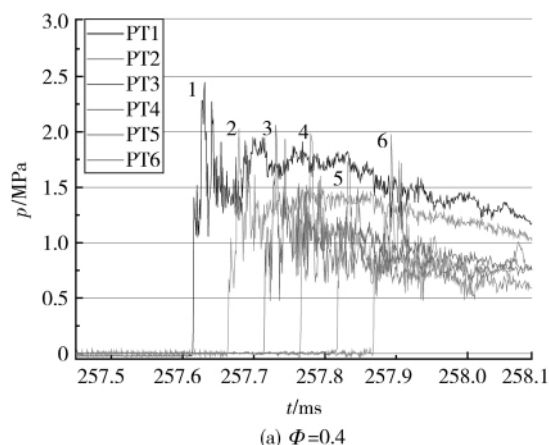


图 5 3 种当量比下的压力曲线 (2.0 mm)

Fig. 5 Pressure histories at three equivalence ratios (2.0 mm)

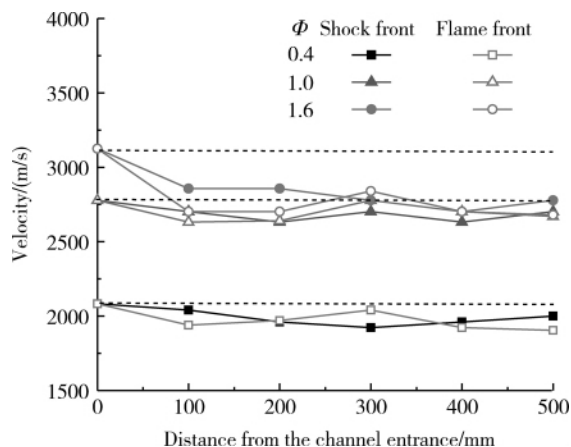


图 6 激波和火焰锋面速度曲线 (2.0 mm)

Fig. 6 Velocity profiles of the shock and flame front (2.0 mm)

2.1.3 间隙尺寸为 1.0 mm

从图 7 中可发现,第 1 个压力传感器的值在 3 种当量比下已无大的变化,这幅图中最明显的现象是最后一个传感器的值.在当量比为 0.4,1.0 时,其值很高,达到了 2.5 MPa,比第 1 个压力传感器的值都要高出好多;但当量比为 1.6 时,其值与之前的压力传感器的值相同.除了最后一个压力传感器的值,其他值的变化和 2.0 mm 间隙时的情况相似,如:第 1 个压力传感器的值上升幅度很小,其余压力传感器的压力峰值最终能保持稳定.此图清楚地显示了爆震波进入通道后压力的递变过程,前 3 个压力曲线的峰值基本呈线性递减,之后压力达到稳定.达到稳定所需的距离要比 2.0 mm 工况时对应的距离长,这是因为此时边界层对爆震波的影响更加剧烈,爆震波需要更长距离来达到压力和速度的平衡.边界层对爆震波的影响不仅体现在压力峰值上,还体现在前导激波的变化形式上,图中给出了相应的现象:编号靠后的压力曲线在刚开始上升的那一段不再是垂直的,也就是说爆震波的压力上升时间更长.

从图 8 火焰锋面速度变化趋势可以看到(因此时压力变化曲线上升较缓慢,通过人为读数会存在较大误差,故只列出火焰锋面速度变化趋势),用最后 2 个离子探针数据计算的火焰锋面速

度值比前面几个得到的值大,并且随当量比的增加,这个差值在不断升高.综合考虑火焰锋面速度图和火焰锋面速度的计算方法,可以明显发现,除了第1个和最后一个速度值,其他4个值只是在小范围内波动,因此可以认为它们处于稳定状态,

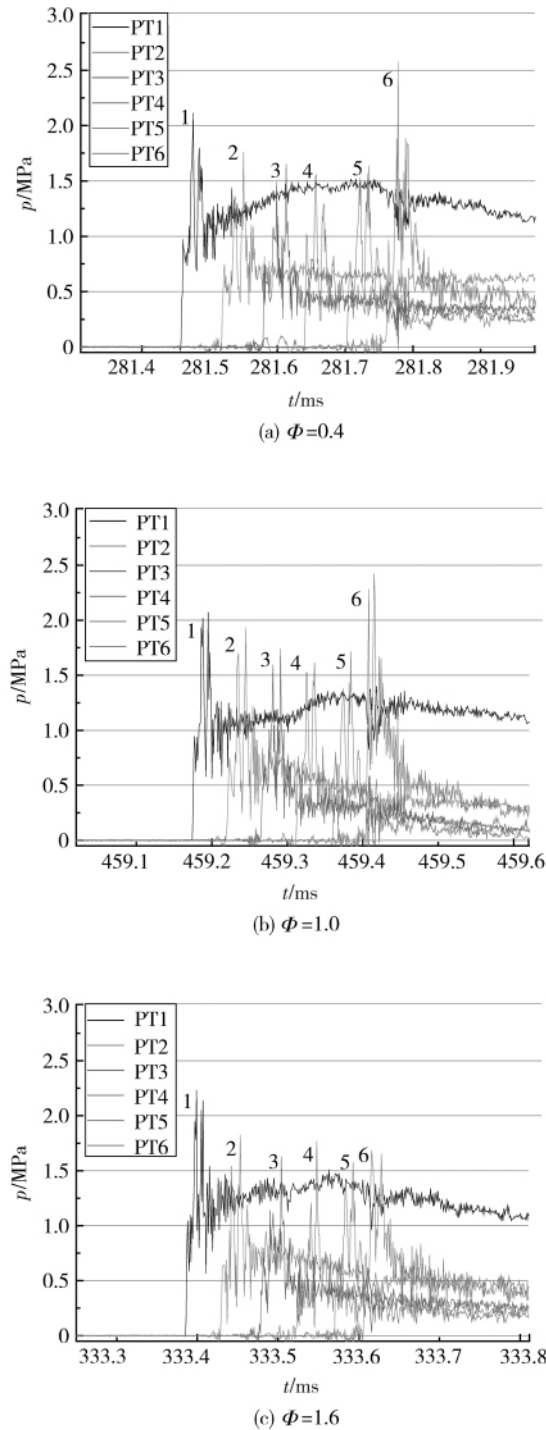


图7 3种当量比下的压力曲线(1.0 mm)

Fig. 7 Pressure histories at three equivalence ratios
(1.0 mm)

但最后一个速度值的明显升高,说明从正向进入通道内的火焰在到达最后一个离子探针前已经有火焰到达,这个火焰只能是从通道的尾部传入的,并且随当量比的增加,通道内正向火焰的速度和稳流段内的速度差值也在增大,这就导致正向火焰到达倒数第2个离子探针的时间和反向火焰到达最后一个离子探针的时间差减小,从而导致最后一段距离不适合采用之前提到的火焰速度计算方法.此时再结合压力传感器的数据可知,当量比为0.4和1.0时,因通道内爆震波和反向爆震波到达最后一个传感器的时间差很小,相当于在此处产生了激波碰撞,故压力相当高,当量比为1.6时,反向爆震波在正向爆震波到达第6个传感器位置之前已经到达,故压力不高.

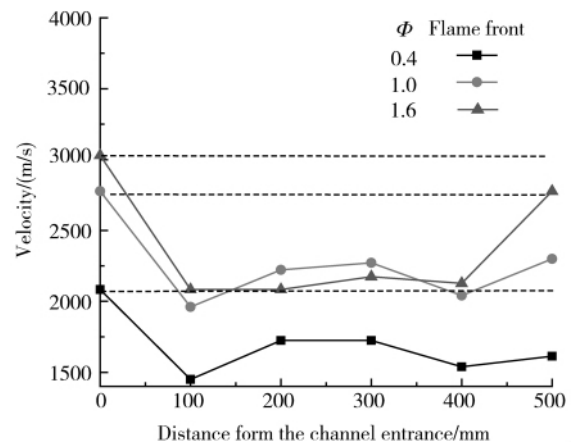


图8 激波和火焰锋面速度曲线(1.0 mm)

Fig. 8 Velocity profiles of the flame front
(1.0 mm)

和图6相比,图8中显示的1.0 mm间隙内火焰锋面速度和稳流段内的速度差值更大.结合图5和图7的压力曲线可知,2.0 mm间隙时,通道内的爆震波压力维持在2.0 MPa左右,而1.0 mm间隙时,爆震波维持在1.5 MPa.虽然间隙为2.0 mm和1.0 mm内的爆震波压力和速度在下降,但通过采集的数据来看,通道内的压力和火焰锋面速度基本能维持一个平衡状态(除了模型的末端).图8给出的另一个信息是:当量比为1.0和1.6工况下,测试段内稳定后的速度值相差不大.这说明高当量比混合物形成的爆震波在微小空间内更容易受到边界层的影响.

2.1.4 间隙尺寸为0.8 mm

随着间隙尺寸的再次减小,压力和速度曲线产生了新的变化.图9所示为间隙为0.8 mm时

的压力曲线,此时的曲线在整体压力值上有所降低,和 1.0 mm 间隙时的情况相似,最后一个传感器的值也存在奇特的变化.和图 7 相比,这时的压力峰值波动变的无规律,并且出现了与前面不一样的地方:平均压力值不是随当量比的增加而增

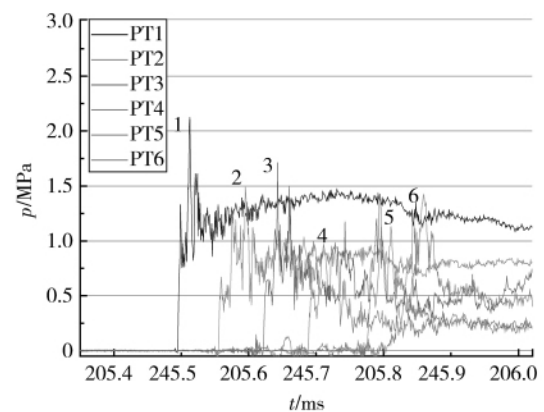
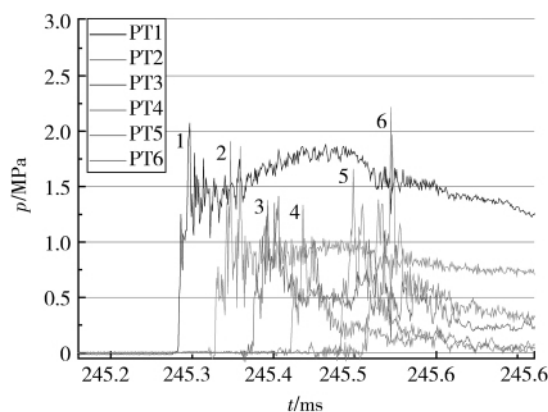
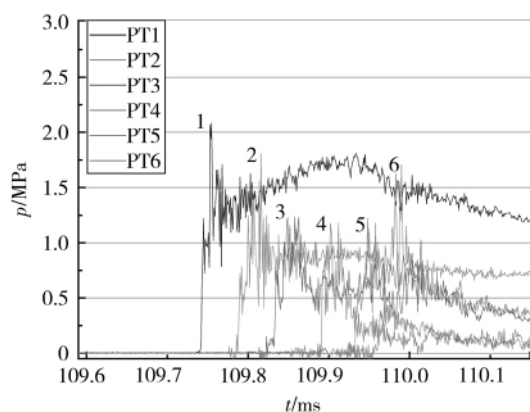
(a) $\Phi=0.4$ (b) $\Phi=1.0$ (c) $\Phi=1.6$

图 9 3 种当量比下的压力曲线 (0.8 mm)

Fig. 9 Pressure histories at three equivalence ratios (0.8 mm)

加,而是在 1.0 时最大,小于或大于 1.0 的工况压力都降低.文献[14]中提到当接近爆震极限时,爆震波的压力和速度将会剧烈的变化,因此图 9 中出现的现象可理解为目的的间隙尺寸已接近极限尺寸.

图 10 为每一当量下连续两次实验的火焰锋面速度图,从中可以看到相同的当量比下,两次实验数据差别较大,这也说明此时不存在什么规律性.结合压力曲线的变化趋势来看,3 种当量比下的爆震波在通道内压力都大于 1.0 MPa,并且没有继续衰减的趋势,火焰锋面的速度也相对较高,所以这时的爆震波并没有衰减为缓燃波.考虑到此时的爆震波还没有完全衰减,说明间隙尺寸没有达到极限尺寸,但爆震波压力和速度的无规律性,说明 0.8 mm 的间隙尺寸接近了爆震波所能通过间隙的临界尺寸.

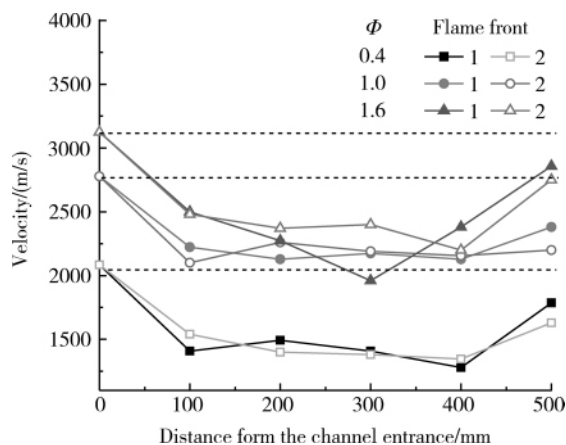


图 10 火焰锋面速度曲线 (0.8 mm)

Fig. 10 Velocity profiles of the flame front (0.8 mm)

2.1.5 间隙尺寸为 0.5 mm

上文提到 0.8 mm 接近了氢/氧爆震波的临界尺寸,那么当间隙为 0.5 mm 时,爆震波压力和火焰锋面速度将会发生更大的变化.图 11 中显示,3 种当量比下爆震波沿通道方向压力下降的特别迅速,并且通道内大部分传感器的值处于 0.5 MPa 左右,此时的燃烧波不属于爆震波的范畴,这是因为此时的间隙尺寸相对于前面提到的尺寸减小好多,相对而言边界层所引起的负面影响会大大增加,从图中看出,这种影响已经导致整个主流通道内爆震波参数发生剧烈的变化.这也说明氢气和氧气形成的爆震波不能通过 0.5 mm 间隙.

从图 11 中还可以明显看到,最后一个压力曲线的横坐标值随当量比的增加而逐渐向前推进,并且在当量比为 1.6 时,PT6 的变化先于 PT4,这十分形象的说明了进入通道内的爆震波因间隙尺寸太小,导致爆震波衰减,并且衰减的幅度很大,致使通道外面的爆震波优先通过通道后端进入通道. PT6 曲线随当量比的增加而前移的现象

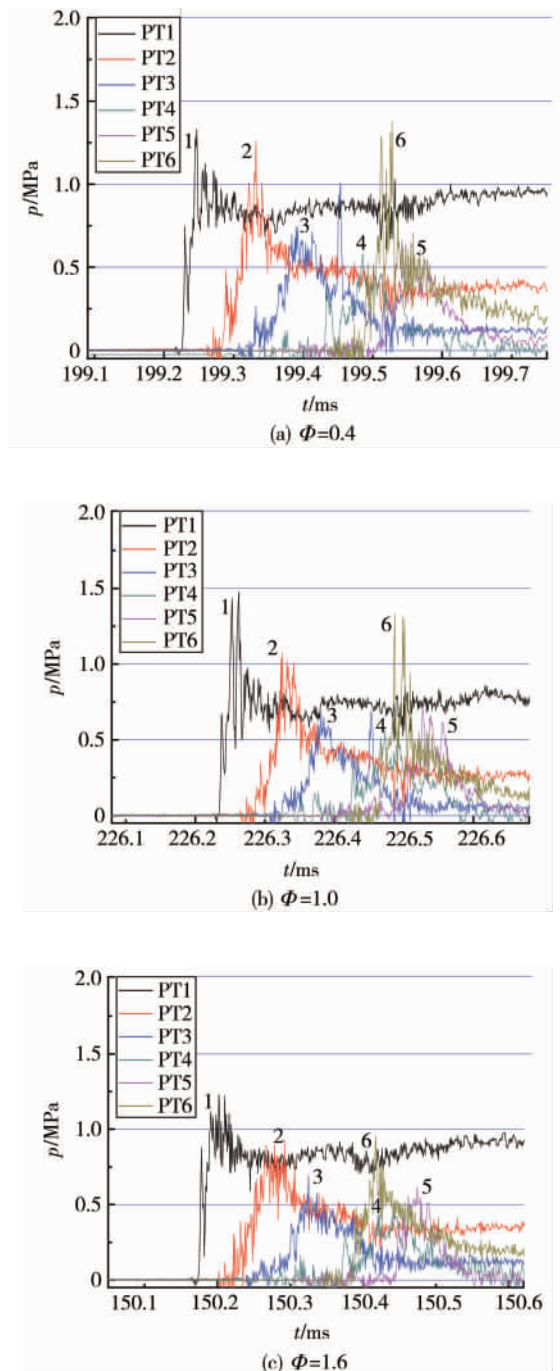


图 11 3 种当量比下的压力曲线 (0.5 mm)

Fig. 11 Pressure histories at three equivalence ratios (0.5 mm)

十分形象的说明了间隙内速度衰减的程度也在增加. 这为微型脉冲爆震发动机的设计提供了尺寸和运行模式方面的参考.

2.2 爆震波的速度衰减和类型

从前面的分析可知,不同间隙尺寸下,爆震波的压力和速度曲线变化趋势存在很大差别. 通道内稳定后的爆震波速度低于稳流段内的爆震波速度,为了能更清楚的说明问题,采用速度衰减百分比来衡量通道尺寸对爆震波的影响.

速度衰减的计算公式为

$$\Delta V = \frac{V_0 - V}{V} \times 100 \quad (1)$$

式中 V_0 为稳流段中测得的平均速度值. V 是间隙中测得的速度值. 本文中认为 V_0 接近 V_{C-J} , 因此用稳流段内测得的爆震波速度值代替 V_{C-J} 来计算爆震波速度衰减程度.

图 12 所示为在当量比为 1.0 工况下,爆震波通过各个间隙时速度衰减百分数沿通道方向的大小分布. 从前面的分析可以看出,通道内最后一对测量器件会受到通道外部爆震波的影响,因此图 12 已经省去了最后一个速度值. 间隙尺寸为 5.0 mm 和 2.0 mm 时,激波和火焰锋面的速度衰减程度都在 5% 及 5% 一下,并且发展情况趋于平衡状态,这种形式的爆震波称之为稳定爆震波.

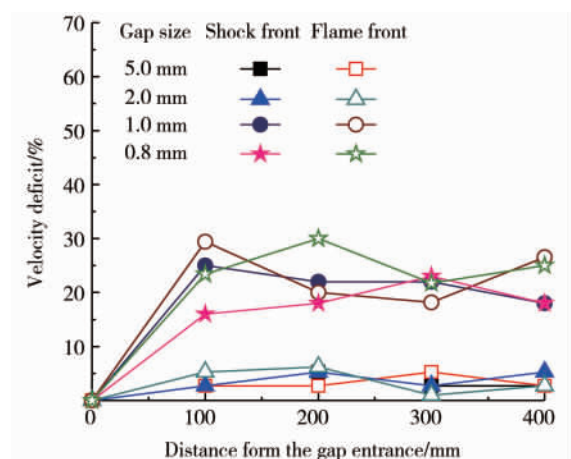


图 12 通道内激波和火焰锋面的速度衰减曲线

Fig. 12 Velocity deficits of the shock and flame front in the narrow gaps

间隙尺寸为 1.0 mm 和 0.8 mm 时,激波和火焰锋面的速度衰减程度有所上升,分布在 10% 到 30% 之间,结合此时爆震波的压力分布,得知此时的爆震波和稳流段内的爆震波相比,压力有所下

降,但与缓燃波相比,压力要高很多.因此,这种爆震波称之为准稳定爆震波.此间隙下的速度变化曲线上下波动,影响其波动的原因可能是由于通道空间基本忽略了高度的存在,使微小空间充当二维平面的角色,但由于爆震波胞格结构的强三维特性,其复杂结构会影响测量值的准确性,同时测量器件的精度也会引起误差.激波和火焰锋面的速度曲线上下交替发展,从这些曲线的发展趋势来看,整个通道内的速度基本稳定,这说明测试段所采用的模型长度达到了研究的要求.

图 13 所示为当量比为 2.0 工况下,各个间隙尺寸内激波与火焰锋面的速度衰减图.同样在 5.0 mm 间隙时,激波和火焰锋面速度衰减程度在 10% 以内,但此当量比下,2.0 mm 和 1.0 mm 间隙内的爆震波速度开始大幅度的衰减,在横坐标为 300 mm 和 400 mm 时这些曲线才基本趋于稳定,稳定时的激波和火焰锋面的速度衰减程度达到 50% 左右,这些的爆震波称之为低速爆震波.低速爆震波能自我提供传播所需要的能量,但由于受到通道边界和混合物当量比的影响,这种能量不能像 DDT 过程那样不断提高爆震波速度,所以这种工况下的爆震波也能稳定的传播.

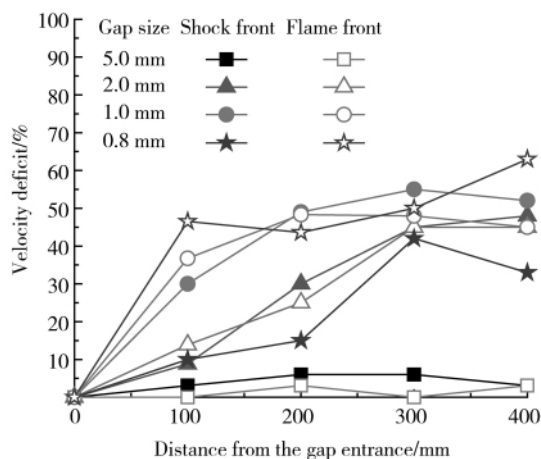


图 13 通道内激波和火焰锋面的速度衰减曲线

Fig. 13 Velocity deficits of the shock and flame front in the narrow gaps

从图 13 中还可以得出,间隙尺寸为 0.8 mm 时,激波和火焰锋面的速度衰减趋势不一样,这因为此时两者产生了速度分离,火焰锋面的速度赶不上激波的速度,这样就不能给激波提供足够的能量来压缩未燃气体,这时的爆震波将不能维持自身所需的能量,降级为缓燃波.这个类型称之为非爆震波.

由此可见,氢氧混合物形成的爆震波在间隙内呈现出不同的传播特性.同一当量比、不同间隙尺寸下,爆震波会有不同传播模式;同一间隙尺寸、不同的当量比也会出现传播模式的差异.结合图 12 和图 13 可知,间隙尺寸越小,速度衰减的程度越大,当量比越大,速度衰减的程度也会增加.只有在合适的当量比下,爆震波才能以最小的损失通过间隙.

3 结 论

1) 多次单爆实验证明,此实验装置能在稳流段成功产生稳定的爆震波,和文献中计算所得的数据相比,误差在 5% 以内,证明了实验的可靠性.

2) 研究了爆震波在狭窄间隙内的传播特性,成功实现了爆震波在 0.8~5.0 mm 间隙内传播,清晰显示了爆震波压力和速度在通道内的递变过程,分析了爆震波在各个间隙下的压力和火焰锋面速度变化特点,指出边界层对爆震波的影响随着间距的减小而增大.

3) 采用速度衰减的方法,将各个间隙尺寸通道内的激波和火焰锋面速度沿通道方向的变化特点呈现出来,更直观的说明了测试段内的爆震波和稳流段内的爆震波的速度差异.各个间隙尺寸下的速度衰减度都能达到稳定,说明所选实验段长度达到了要求.

4) 结合各个间隙下的爆震波压力图和速度衰减曲线,得出高当量比混合物形成的爆震波在微小空间内更容易受到边界层的影响.

5) 在一定的当量比范围内,参考速度衰减的值,观察到了微空间内的 4 种爆震波:稳定爆震波、准稳定爆震波、低速爆震波和非爆震波.间隙尺寸越小、当量比越大,爆震波的衰减程度都会增加.

参考文献:

- [1] Kitano S, Kimura Y, Sato H, et al. Micro-size pulse detonation engine performance[R]. AIAA 2007-581, 2007.
- [2] 黄明,唐豪,李建中,等.煤油/空气小尺寸脉冲爆震发动机实验研究[J].航空学报,2009,30(11):2015-2022.
HUANG Yue, TANG Hao, LI Jianzhong, et al. Experimental investigation on small-scale pulse detonation engine with kerosene/air[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(11): 2015-2022. (in Chinese)
- [3] 李建中.煤油/空气气动阀式脉冲爆震发动机研究[D].南京:南京航空航天大学,2006.
LI Jianzhong. Investigation on kerosene/air aero-valve pulse detonation engine[D]. Nanjing: Nanjing University

- of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)
- [4] 严传俊, 范玮. 脉冲爆震发动机原理及关键技术[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.
- [5] Dupre G, Knystautas R, Lee J H S. Near-limit propagation of detonation in tubes[J]. Prog. Astronaut. Aeronaut, 1986, 106(1): 244-259.
- [6] Dupre G, Peraldi O, Joannon J, et al. Limit criterion detonation in circular tubes[J]. Prog. Astronaut. Aeronaut, 1991, 133(1): 156-169.
- [7] Manson N, Guenoche H. Effect of charge diameter on the velocity of detonation waves in gas mixtures[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 1957, 6(1): 631-639.
- [8] Fay J A. Two-dimensional gaseous detonations: velocity deficit[J]. Phys. Fluids, 1959, 2(3): 283-289.
- [9] Wu M H, Wang C Y. Reaction propagation modes in millimeter-scale tubes for ethylene/oxygen mixtures[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(2): 2287-2293.
- [10] Wu M H, Burke M P, et al. Flame acceleration and the transition to detonation of stoichiometric ethylene/oxygen in microscale tubes[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(2): 2429-2436.
- [11] 张彭岗, 何小民, 李建中, 等. 丙烷爆震特性的试验[J]. 航空动力学报, 2009, 24(6): 1236-1241.
- ZHANG Penggang, HE Xiaomin, LI Jianzhong, et al. Experimental study on detonation characteristic of propane[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(6): 1236-1241. (in Chinese)
- [12] 邓君香, 严传俊, 范玮, 等. 单次爆震波的对比实验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2000, 6(4): 356-358.
- DENG Xiangjun, YAN Chuanjun, FAN Wei, et al. Comparative experimental study on single detonation wave[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2000, 6(4): 356-358. (in Chinese)
- [13] Schultz E, Shepherd J E. Validation of detailed reaction mechanisms for detonation simulation[R]. Graduate Aeronautical Laboratories of the California Institute of Technology, Explosion Dynamics Laboratory Report FM99-5, 2000.
- [14] Camargo A, Ng H D, Chao J, et al. Propagation of near-limit gaseous detonations in small diameter tubes[J]. Shock Waves, 2010, 20(6): 499-508.
- [15] Jackson S I. Gaseous detonation initiation via wave implosion[D]. California: California Institute of Technology, 2005.