

文章编号:1000-8055(2013)09-1967-08

基于侧向膨胀影响爆震波的自持机理

周朱林, 刘卫东, 刘世杰, 林志勇

(国防科学技术大学 航天科学与工程学院

高超声速冲压发动机技术重点实验室, 长沙 410073)

摘 要: 为了研究受侧向膨胀影响时爆震波的传播特性及自持机理, 在实验段对比分析了当量比(0.70~2.25)和波前预混气高度(1, 2, 3 cm)对爆震波自持传播能力的影响. 实验表明: 波前预混气高度越高、预混气活性越强, 则爆震波抵御侧向膨胀影响的能力越强, 速度亏损越小, 自持传播能力越强. 运用 Fay 流体扩张理论, Dabora 和 Murray 速度亏损理论, 并结合 Zeldovich-von Neumann-Döring (ZND) 模型对受侧向膨胀影响的爆震波激波角、界面角和速度亏损进行理论预测, 证明 Dabora 的理论预测与实验值吻合很好, 且发现若要受侧向膨胀影响的爆震波自持传播, 则其速度亏损的极限为 7.0%~11.0%.

关 键 词: 侧向膨胀; 当量比; 预混气高度; 速度亏损; 自持机理

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Self-sustaining mechanism of detonation wave influenced by lateral expansion

ZHOU Zhu-lin, LIU Wei-dong, LIU Shi-jie, LIN Zhi-yong

(Science and Technology on Scramjet Laboratory, College of Space Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to study propagating characteristics and self-sustaining mechanism of detonation wave influenced by lateral expansion, the influences of different equivalent ratios (0.70—2.25) and different premixed gas heights (1, 2, 3 cm) on the self-sustaining propagation of detonation wave were researched in the test section. It was found that if the premixed gas height is higher and premixed gas activity is stronger, the ability of detonation wave resisting the influence of lateral expansion is stronger and velocity deficits is smaller. Based on Fay's fluid expansion theory, Dabora and Murray's velocity deficits theory and Zeldovich-von Neumann-Döring (ZND) model, the shock wave angle, interface angle and velocity deficits of detonation wave by lateral expansion can be predicted theoretically, proving that experiment is in good agreement with theoretical prediction with Dabora's theory. In order to keep self-sustaining propagation of detonation wave influenced by lateral expansion, the velocity deficit limitation of detonation wave is 7.0%—11.0%.

Key words: lateral expansion; equivalent ratio; premixed gas height; velocity deficits; self-sustaining mechanism

收稿日期: 2012-09-21

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130926.1103.201309.1967_023.html

基金项目: 国家自然科学基金(51006119, 90816016)

作者简介: 周朱林(1988—), 男, 安徽安庆人, 硕士生, 研究方向为高超声速推进技术. E-mail: zhouzhulin_61769@163.com

由 Chapman-Jouguet (CJ) 理论得到的爆震波速度与边界条件无关, 只与预混气的热力学参数有关^[1]. 然而大量实验已经证明边界条件对于爆震波的传播特性具有很大影响^[2]. 一般而言, 受边界条件影响的爆震波传播速度会比通过 CJ 理论预测的速度要低, 即导致速度亏损, 从而影响爆震极限. Paillard 等^[3]利用一系列不同直径的管道进行了临界管径的研究. 对于速度亏损的计算, Fay^[4]提出流体扩张理论, 通过考虑负边界层位移厚度和前导激波与 CJ 面的距离, 详细研究了圆管中爆震波的传播特性. Tsuge^[5]对速度亏损进行了理论分析, 并且得出速度亏损与管道直径成反比. Ishii 等^[6-8]认为速度亏损是由于前导激波后黏性边界层的发展引起的.

此外, 爆震波的传播特性还与管道构型及壁面的限制性程度有很大的关联^[9-10]. Radulescu 等^[11]发现不规则胞格结构的预混气速度亏损与流道的宽高比有很大关联, 而规则胞格结构的预混气速度亏损受流道宽高比的影响较小. 爆震波在限制性作用很弱的壁面传播, 将受到侧向膨胀的影响, 利用隔膜将上侧预混气和下侧惰性气体隔开, 形成侧向膨胀段, 爆震波进入侧向膨胀段后, 高温高压的爆震产物将隔膜瞬间打破, 并在下侧惰性气体区域形成激波角和界面角, 如图 1 所示.

Dabora^[12]通过在一侧壁面安装薄膜来模拟气体可压缩壁面, 系统研究了侧向膨胀对爆震波传播特性的影响. Murray^[13]和 Lee 等^[14]分别在 1 个, 2 个或 3 个壁面布置不同厚度、不同材料的薄

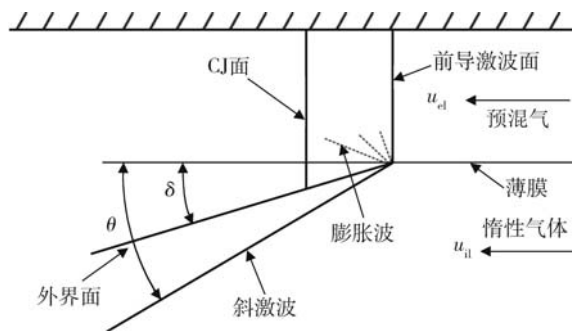


图 1 侧向膨胀爆震波流场结构

Fig. 1 Flow field structure of detonation wave in lateral expansion section

膜, 研究了侧向膨胀引发的气流扩散程度. 此外, 旋转爆震发动机 (RDE) 中也存在侧向膨胀现象. 刘世杰等^[15]研究发现侧向膨胀对于旋转爆震波的传播特性影响很大.

本文主要研究受侧向膨胀影响时爆震波的自持机理, 重点分析了狭窄流道中不同气体活性及不同流道构型对于爆震波速度亏损的影响. 爆震波速度亏损主要运用 Fay 的负边界层位移厚度的概念, Dabora 和 Murray 的速度亏损理论及 ZND 模型进行计算, 并与实验结果进行对比分析, 从而预测侧向膨胀影响时爆震波的传播极限.

1 实验装置及数值方法

1.1 实验装置

实验装置及测试仪器如图 2 所示.

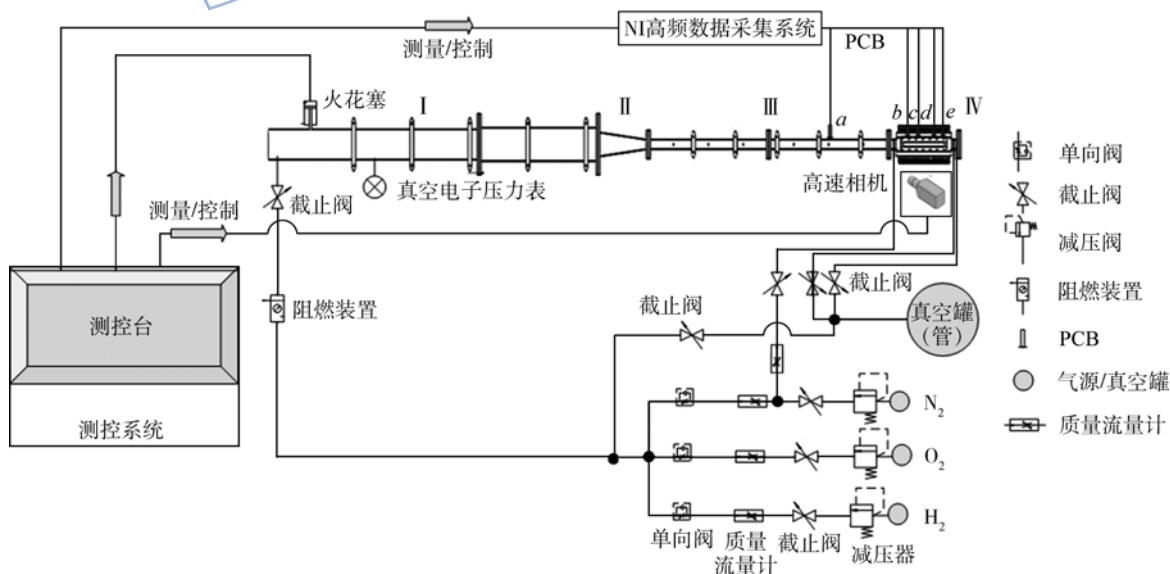


图 2 实验系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test system

1.1.1 爆震管

爆震管由4个部分组成:起爆段(I)、过渡段(II)、稳定段(III)和实验段(IV)。起爆段是内径为32 mm,长为3 m的圆截面管道,预混气在此段经火花塞点火起爆。过渡段一端内截面尺寸为40 mm×40 mm,另一端内截面尺寸为30 mm×10 mm,长度为200 mm。稳定段内截面尺寸为30 mm×10 mm,长度为1.5 m。实验段用隔板密封隔开,形成上侧预混气区域和下侧惰性气体区域,如图3所示。

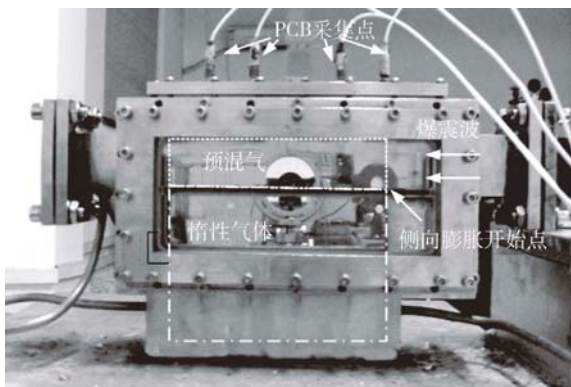


图3 实验段

Fig. 3 Experimental section

1.1.2 测试系统

测试主要在稳定段和实验段中进行,内容包括爆震波速度、烟膜图和阴影图。实验通过由national instruments(NI)高频数据采集系统和高频压力传感器(PCB)组成的高频压力采集系统进行爆震波速度测量。高频数据采集卡为PXIe-6368,单通道采样频率为2 MHz,共16路同步模拟输入。PCB沿流向依次布置在a,b,c,d和e处,其中 $L_{ab}=505$ mm, $L_{bc}=30$ mm, $L_{cd}=60$ mm和 $L_{de}=30$ mm,如图2所示。采用Photron Fastcam SA-5.1高速彩色数字摄影仪拍摄受侧向膨胀影响的爆震波阴影图,拍摄频率为50 000 帧/s。通过在侧壁熏制烟膜,观察爆震波胞格结构的变化。

1.1.3 实验介质及配气系统

实验采用 H_2 , O_2 , N_2 配比预混气在爆震管中形成稳定爆震波,同时下侧惰性气体区域采用 N_2 作为惰性气体,并用聚乙烯薄膜与上侧预混气区域密封隔开,形成气体可压缩壁面。采用4个质量流量控制器(MFC)配比预混气和惰性气体,MFC控制精度达到1%,响应时间小于0.8 s。在充预混气前须将密封实验系统内的空气抽出,本实验真空度能够达到99%,能够有效保证预混气的填充精度。

1.2 数值方法

本文控制方程采用二维Euler反应流控制方程,忽略黏性项作用,流动和化学反应部分采取解耦处理方法来解决方程的刚性问题。空间离散采用5阶的WENO(weighted essentially non-oscillatory)格式,时间步采用具有TVD(total variation diminishing)保持性质的2阶时间精度Runge-Kutta方法,化学反应采用Jachimowski 8组分19反应机理。

2 实验及数值仿真结果分析

2.1 流场结构特点

受侧向膨胀影响的爆震波流场结构如图4所示,其中 Q/Q_0 表示相对于流场初始状态的无量纲密度。①是预混区,②是爆震波,③是爆震波后的燃烧产物,④是将预混气与惰性气体隔开的薄膜,⑤是惰性气体,⑥是斜激波,⑦是惰性气体与爆震波后的燃烧产物分界面。爆震波从稳定段进入实验段,由于下侧无固壁约束,爆震波后的爆震产物将发生侧向膨胀,爆震波后的高温高压产物将把中间密封薄膜瞬间打破,从而形成激波角和界面角。受侧向膨胀影响的爆震波传播速度将下降,横波间距离增大,爆震波波面形状发生变形。

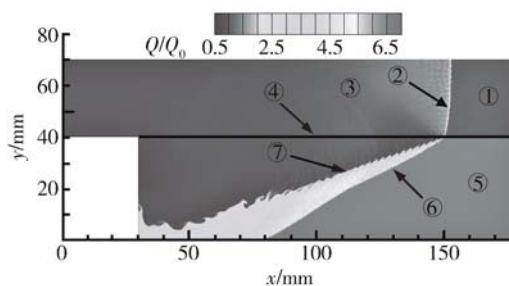


图4 爆震波流场结构

Fig. 4 Flow field structure of detonation wave

2.2 波前预混气活性的影响

在实验段高度 $h=3$ cm,初始温度为300 K,初始压力为101 kPa时,进行了当量比 φ 为0.70,0.80,1.00,1.75,2.00和2.25这6组工况实验,其中预混气 H_2 , O_2 , N_2 的配比为 $(2 \times \varphi) : 1 : 3.76$ 。当 φ 为0.80,1.00和1.75时,爆震波能够自持传播而未熄爆;而当 φ 为0.70和2.25时,爆震波在气体可压缩壁面上传播一段距离后出现解耦现象,不能够自持传播,如图5所示。

由图5可知,受侧向膨胀影响时,爆震波的传

播极限与 φ 有关. 当爆震波传至侧向膨胀段时, 流场上侧可燃预混气的存在有利于维持爆震波稳定自持传播. 流场下侧的惰性气体不参与反应, 并形成气体可压缩壁面, 对爆震波传播具有一定的限制性作用, 但流场下侧受到膨胀波和流体扩张的影响, 速度将会亏损, 同时波面发生变形. 可以发现 φ 为 0.80 和 1.75 时, 爆震波虽然能够自持传播, 但是波面形状相对于 φ 为 1.00 的工况变形较大. φ 为 0.70 和 2.25 时, 爆震波不能够自持传

播, 传播一段距离后, 发生解耦而熄爆. 当 φ 为 2.00 时, 可以发现爆震波的上侧尚未解耦, 而下侧已经开始解耦, 可见侧向膨胀是由下至上逐渐影响爆震波的传播特性. 此外, 对 φ 进一步分析, 可以发现受侧向膨胀影响的爆震波对于贫燃的影响更为敏感, 实验发现在 φ 为 0.80 时爆震波能够自持传播, 但在 φ 为 0.70 时爆震波发生解耦而熄爆. 在富燃情况下, φ 存在一个相对较宽的传播范围, 在 φ 为 2.25 时爆震波才发生解耦.

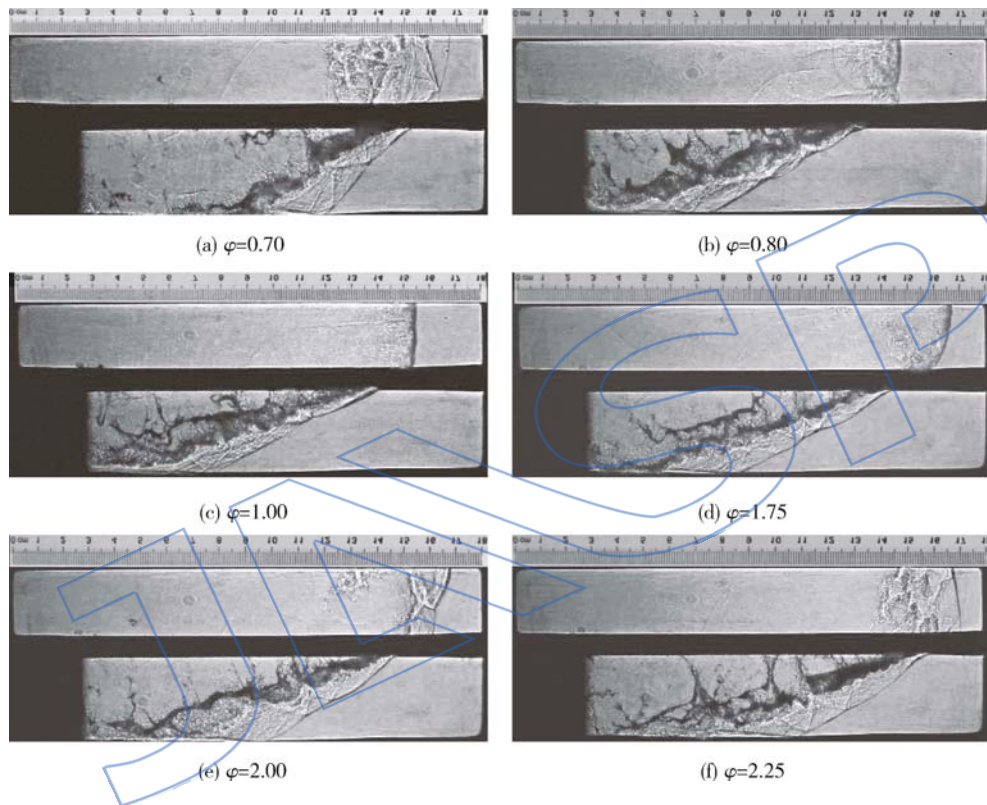


图5 不同当量比下爆震波流场结构 ($h=3\text{ cm}$)

Fig. 5 Flow field structure of detonation wave by different equivalence ratios ($h=3\text{ cm}$)

同时, 运用 PCB 测得爆震波传播速度及速度亏损如表 1 所示, 其中 ab 段速度可视为爆震波的稳定速度, $V_{\infty} = V_{ab}$, 速度亏损可定义为

$$\frac{\Delta V}{V_{\infty}} = \frac{V_{\infty} - V(d)}{V_{\infty}} \quad (1)$$

$f_{CJ_{\infty}}$ 表示稳定段相对于 CJ 的速度亏损, $f_{\infty_{bc}}$, $f_{\infty_{cd}}$ 和 $f_{\infty_{de}}$ 分别表示 bc 段、 cd 段和 de 段速度相对于稳定段的速度亏损, δ 表示界面角, θ 表示激波角.

由表 1 可知, 随着当量比 φ 的提高, 爆震波 CJ 理论速度也相应增大, 同时发现稳定段 ab 的速度要略低于 CJ 速度, 其速度亏损 $f_{CJ_{\infty}}$ 为 4.0% ~ 5.3%, 考虑到稳定段内截面尺寸为

30 mm × 10 mm, 可以认为爆震波在狭窄管道中传播. 狭窄管道中爆震波速度亏损与管道尺寸成反比关系, 即 $\Delta V \propto h^{-0.8}$, 并根据 Ishii 经验公式^[16]可计算得 φ 为 0.70 ~ 2.00 时, 内截面尺寸为 30 mm × 10 mm 的狭窄管道中爆震波速度亏损为 2.9% ~ 5.5%, 同时考虑到壁面表面粗糙度和测量误差等因素, 可见稳定段爆震波速度亏损与理论估算的速度亏损值吻合较好.

由表 1 可知, 稳定爆震波在刚进入侧向膨胀段后, 受侧向膨胀影响爆震波速度将发生亏损, 如 $f_{\infty_{bc}}$ 所示. 随着爆震波的传播, 速度亏损值 $f_{\infty_{cd}}$ 增大, 此时爆震波处于失稳阶段. 受侧向膨胀影响的爆震波在经历失稳阶段之后, 将面临两种结果:

表 1 不同当量比下爆震波参数

Table 1 Parameters of detonation wave by different equivalence ratios

φ	$V_{CJ}/$ (m/s)	$V_{ab}/$ (m/s)	$V_{bc}/$ (m/s)	$V_{cd}/$ (m/s)	$V_{de}/$ (m/s)	$f_{CJ_{-}\infty}/$ %	$f_{\infty_{bc}}/$ %	$f_{\infty_{cd}}/$ %	$f_{\infty_{de}}/$ %	$\delta/$ (°)	$\theta/$ (°)
0.70	1791.3	1702.1	1488.8	1288.9	1158.3	4.8	12.5	24.2	31.9	23.4	44.1
0.80	1862.5	1766.7	1744.2	1655.2	1704.5	4.2	1.3	6.3	3.5	19.0	29.4
1.00	1968.1	1883.6	1823.7	1757.1	1818.2	4.3	3.2	6.7	3.4	18.2	27.6
1.75	2116.9	2032.2	1935.5	1791.0	1960.8	4.0	4.8	11.8	3.5	18.4	27.8
2.00	2143.6	2031.4	1880.9	1604.3	1886.8	5.2	7.4	21.0	7.1	21.2	32.7
2.25	2166.6	2052.8	1954.4	1772.5	1265.8	5.3	4.8	13.7	38.3	22.3	33.7

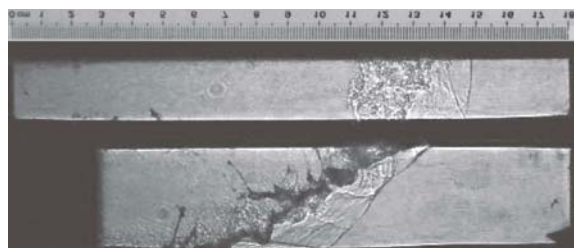
一种是速度亏损 $f_{\infty_{de}}$ 继续增大,爆震波解耦而熄爆,即 φ 为 0.70 和 2.25;另一种是速度亏损 $f_{\infty_{de}}$ 减小,爆震波内部发生重新起爆,爆震波稳定自持传播,即 φ 为 0.80,1.00 和 1.75. 可以发现在 φ 为 2.00 时爆震波在 bc 和 cd 段速度亏损相对于 φ 为 1.75 和 2.25 都较大,而在 de 段速度亏损减小,且发现下侧爆震波已经开始解耦,并且逐渐影响至爆震波上侧,由于 PCB 布置在实验段上侧,所以测得的上侧爆震波速度亏损较小,由图 5 可以发现下侧爆震波反应区厚度急剧增长,爆震波解耦,上侧爆震波也将受到侧向膨胀影响而逐渐解耦熄爆,爆震波将不能够自持传播,可见 $\varphi=2.00$ 是爆震波熄爆的临界工况. 同时实验测得界面角 δ 在 $18^\circ\sim 23^\circ$ 范围内,界面角值相对比较稳定,自持传播爆震波的界面角低于不能自持传播爆震波的界面角,且自持传播爆震波的界面角 δ 在 $18^\circ\sim 21^\circ$ 范围内,考虑到实验误差,可以认为当量比 φ 对自持传播爆震波的界面角 δ 影响很小. 实验发现激波角 θ 在 $27^\circ\sim 44^\circ$ 范围内,当量比 φ 从 0.70 到 0.80 时,激波角 θ 由 29.4° 急剧增加到 44.1° ,而当量比从 1.75 增加到 2.00 时,激波角 θ 由 27.8° 缓慢增加到 32.7° ,可见不能够自持传播的爆震波激波角对贫燃的敏感性更高. 而对于自持传播的爆震波激波角 θ 在 $27^\circ\sim 30^\circ$ 范围内,相对稳定,可见当量比 φ 对自持传播爆震波的激波角影响很小.

由此可见,爆震波 CJ 速度随着当量比 φ 的增加而增加,爆震波在受侧向膨胀影响后速度将发生亏损,且将经历一个失稳阶段,随后爆震波是否能够在气体可压缩壁面上自持传播取决于爆震波在经历失稳阶段后能否重新起爆,即速度亏损能否降低. 贫燃,即当量比 φ 较低时,对爆震波是否能够自持传播的影响更为强烈. 实验表明:当量比

φ 对稳定自持传播爆震波的界面角 δ 和激波角 θ 影响很小.

2.3 波前预混气高度的影响

受侧向膨胀影响的爆震波传播极限不仅与预混气活性有关,也与实验段预混气高度有关,如图 6 所示,此时实验段高度为 2 cm,初始温度为 300 K,初始压力为 101 kPa,预混气配比 $H_2 : O_2 : N_2 = 2 : 1 : 3.76$,即 $\varphi=1.00$. 与图 5 中 φ 为 1.00 的工况进行对比,可以发现初始温度、初始压力和 $H_2/O_2/N_2$ 配比都相同,而不同的就是波前预混气的高度,其中图 5 中 $h=3$ cm,而图 6 中 $h=2$ cm. 通过对比可以发现 $h=3$ cm 时爆震波能够自持传播,而 $h=2$ cm 时爆震波解耦熄爆. 受侧向膨胀影响的爆震波在传播过程中受到其底部膨胀波衰减的影响,速度将发生亏损,下侧的波阵面明显落后于上侧的波阵面,且爆震波波面发生弯曲. 可见,波前预混气的高度 h 可以增强其抵御侧向膨胀影响的能力, $h=3$ cm 时其抵御侧向膨胀衰减的能力要比 $h=2$ cm 时强,因此在上述工况下 $h=3$ cm 时爆震波能够自持传播,而 $h=2$ cm 时爆震波传播一段距离后前导激波与燃烧锋面解耦而不能够自持传播.

图 6 爆震波流场结构 ($\varphi=1.00, h=2$ cm)Fig. 6 Flow field structure of detonation wave
($\varphi=1.00, h=2$ cm)

在实验段高度为 2 cm,初始温度为 300 K 和

初始压力为 101 kPa 不变情况下,减少 N_2 的稀释比例,即 $H_2 : O_2 : N_2 = 2 : 1 : 3$,这也就提高了预混气的活性,发现爆震波能够自持传播,如图 7 所示.而在保持预混气 $H_2 : O_2 : N_2 = 2 : 1 : 3$ 不变,将实验段高度改为 1 cm 时,发现爆震波传播一段距离后解耦而熄爆.进一步对此工况下不同高度的爆震波传播特性进行数值仿真,如图 8 所示.由密度云图可以发现 $h = 2$ cm 时爆震波能

够稳定自持传播,而 $h = 1$ cm 时爆震波传播一段距离后在 140 mm 处就已经解耦,形成激波与燃烧锋面,传播速度迅速降低,此时爆震波不能够自持传播,再次证明增加波前预混气高度 h 有利于受侧向膨胀影响的爆震波自持传播.

由此可见:爆震波受侧向膨胀影响时,提高预混气高度有利于爆震波自持传播,提高波前预混气高度有利于爆震波自持传播.

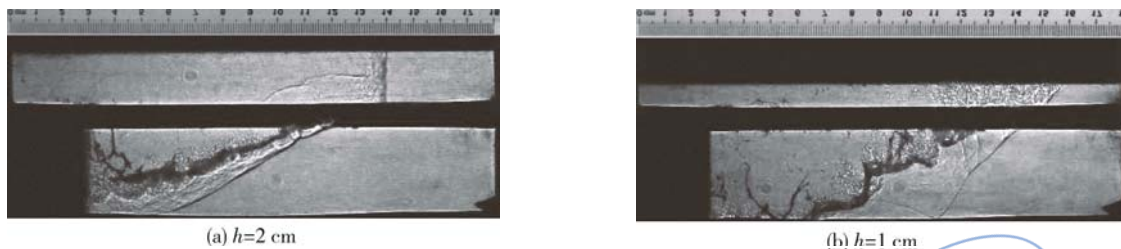


图 7 爆震波流场结构($H_2 : O_2 : N_2 = 2 : 1 : 3$)

Fig. 7 Flow field structure of detonation wave ($H_2 : O_2 : N_2 = 2 : 1 : 3$)

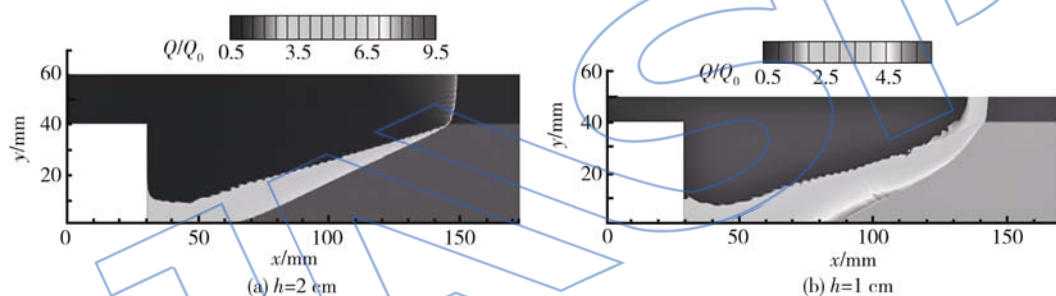


图 8 侧向膨胀爆震波密度云图($H_2 : O_2 : N_2 = 2 : 1 : 3$)

Fig. 8 Density contours of detonation wave in lateral expansion section ($H_2 : O_2 : N_2 = 2 : 1 : 3$)

3 速度亏损理论分析与计算

根据 Fay 的理论^[4],反应区流体扩张,负边界层位移厚度增加,因而降低了爆震波传播速度.如图 9 所示,将参考坐标系固定在激波面上,预混气和壁面都将激波速度 V 流动,由于边界层附近较高的流动速度,流线将向边界层方向偏离.

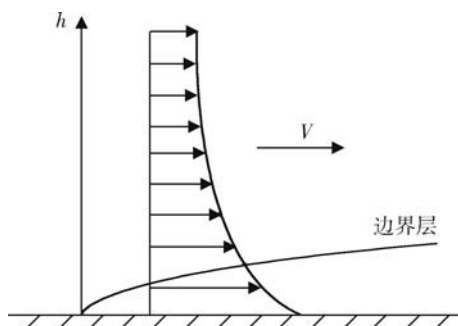


图 9 流体扩张示意图

Fig. 9 Sketch of flow divergence

因此,主流区域流动将变形,流线的偏转将形成一个弯曲的爆震波面,弯曲的曲率正比于远离前导激波面的 CJ 面面积增加率.负边界层位移厚度增加导致的速度亏损与在限制性作用较小的气体可压缩壁面中由侧向膨胀引起速度亏损机制是相同的. Dabora^[12]将受侧向膨胀影响的爆震波分为前导激波面和 CJ 面,如图 1 所示. CJ 面由于受到侧向膨胀的影响,面积会增大,从而影响爆震波的传播速度.

根据 Dabora 速度亏损公式可得界面角 δ 、激波角 θ 和速度亏损的求解公式如下:

$$\tan \delta = \frac{2}{\gamma_{e2} - 1} \phi_2 \left[1 - \left(\frac{\bar{p}}{\phi_1} \right)^{\frac{\gamma_{e2} - 1}{2\gamma_{e2}}} \right] \quad (2)$$

$$\sin \theta = \frac{\gamma_{i1} + 1}{2} \frac{\left[\bar{p} + \frac{\gamma_{i1} - 1}{\gamma_{i1} + 1} \left(\frac{p_{i1}}{p_{e1}} \right) \frac{1}{Ma_{e1}^2} \right]}{\left[\bar{p} - \left(\frac{p_{i1}}{p_{e1}} \right) \frac{1}{Ma_{e1}^2} \right]} \tan \delta$$

(3)

$$\frac{\Delta Ma_1}{Ma_1(\xi=0)} = 1 - \sqrt{\frac{\left[1 - \left(\frac{\epsilon}{1+\gamma_{e2}}\right)\left(\frac{\xi}{1+\xi}\right)\right]^2}{\left[1 - \left(\frac{\epsilon}{1+\gamma_{e2}}\right)\left(\frac{\xi}{1+\xi}\right)\right]^2 + \gamma_{e2}^2 \left[2\left(\frac{\epsilon}{1+\gamma_{e2}}\right)\left(\frac{\xi}{1+\xi}\right) - \left(\frac{\epsilon}{1+\gamma_{e2}}\right)^2 \left(\frac{\xi}{1+\xi}\right)^2\right]}} \quad (4)$$

中间变量 ϵ 定义式为

$$\int_0^{\xi} p d\xi = p_{CJ} \epsilon \xi \quad (5)$$

其中 $\bar{p}$, ϕ_1 和 ϕ_2 为中间变量, γ_{e2} 表示波后爆震产物比热比, γ_{e1} 表示波前预混气比热比, γ_{i1} 表示波前惰性气体比热比, p_{i1} 和 p_{e1} 分别为波前惰性气体和预混气压力, Ma_{e1} 为预混气马赫数, ΔMa_1 为马赫数亏损量, p_{CJ} 表示 CJ 面压力, 详细推导过程此处不再赘述。

Murray^[13] 则通过求解狭窄管道中面积扩张比 ξ , 代入式(4)可以求得速度亏损值, 其面积扩张比 ξ 的表达式为

$$\xi = \frac{2W\delta^* + 2H\delta^* + 4\delta^{*2}}{WH} \quad (6)$$

其中 δ^* 表示边界层位移厚度, W 表示管道宽度, H 表示管道高度. 边界层的位移厚度已经被 Goo-derum^[17] 的激波管实验确定。

$$\delta^* = 0.22\chi^{0.8} \left(\frac{\mu_e}{\rho_e u_e} \right)^{0.2} \quad (7)$$

其中 μ_e 表示波前预混气的气体黏度, ρ_e 和 u_e 分别表示波前预混气密度和速度。

本文根据 ZND 模型对 Dabora 理论公式中的中间变量 ϵ 和 $\bar{p}$, CJ 面压力 p_{CJ} 、反应区长度 $\bar{x}$ 进行计算, 得到激波角 θ 和界面角 δ 与当量比 φ 关系(图 10), 并对 Murray 理论公式中边界层位移厚度 δ^* 和面积扩张比 ξ 进行速度亏损计算, 可得 Dabora 速度亏损值、Murray 速度亏损值和实验速度亏损值与当量比 φ 的关系, 见图 11。

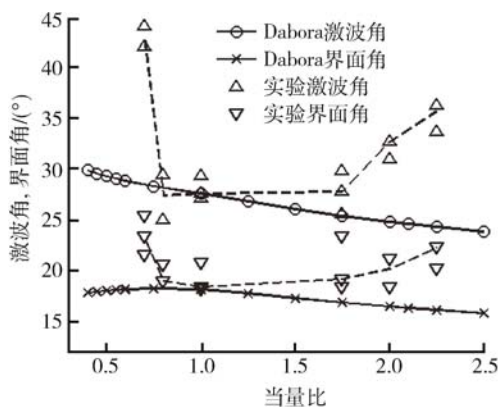


图 10 不同当量比下激波角和界面角

Fig. 10 Shock wave angle and interface angle under different equivalence ratios

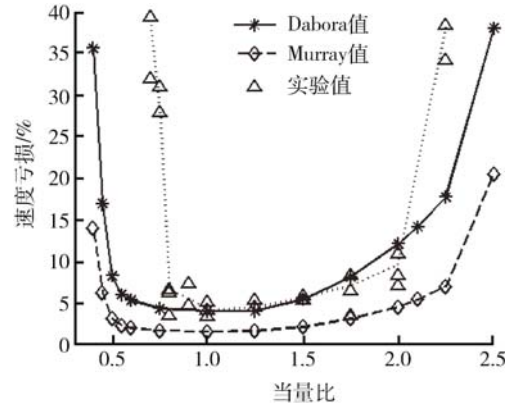


图 11 不同当量比下爆震波速度亏损

Fig. 11 Velocity deficits of detonation wave under different equivalence ratios

由图 10 可知, Dabora 理论预测的激波角 θ 和界面角 δ 随当量比 φ 变化很小, 且随着当量比 φ 的增加, 激波角 θ 和界面角 δ 呈减小趋势. 受侧向膨胀影响的爆震波能够自持传播时, 即 φ 为 0.75~2.00, 实验测得的激波角和界面角在 Dabora 理论预测值附近波动, 整体略微偏高, 特别在 φ 为 1.00 附近吻合得很好. 但爆震波不能够自持传播时, 激波角和界面角增大, 特别在当量比较小时激波角和界面角增大趋势更为剧烈。

图 11 表示 Dabora 和 Murray 理论预测的速度亏损值以及实验值与当量比 φ 的关系, 实验发现当量比 φ 在 0.75~2.00 时受侧向膨胀影响的爆震波能够自持传播, 而在此当量比之外, 爆震波传播一段距离后很快解耦而不能自持传播. 依据 Dabora 和 Murray 理论, 并结合 ZND 模型预测的速度亏损与当量比的关系都是呈现 U 型曲线, 且 Dabora 值整体比 Murray 值大. 由图 11 可知, Dabora 和 Murray 理论预测的速度亏损都对低当量比的变化极为敏感. 通过大量实验测得在初始温度为 300 K、初始压力为 1.0×10^5 Pa 和实验段高度为 3 cm 时不同当量比情况下速度亏损值, 发现受侧向膨胀影响时自持传播爆震波的速度亏损值与 Dabora 理论预测的速度亏损值较为吻合, 这也证明 Dabora 理论的适用性. 然而实验中测得的爆震波自持传播的当量比范围并没有 Dabora 理论预测的当量比范围宽, 可见极限附近的边界条件对爆震波传播特性的影响很大, 影

响机理也特别复杂.由图11可知,受侧向膨胀影响时爆震波能够自持传播的速度亏损极限为7.0%~11.0%,在速度亏损超过此极限时爆震波将解耦熄爆,不能够自持传播.

4 结 论

通过以上分析,本文所得的主要结论如下:

1) 通过数值仿真详细分析了受侧向膨胀影响时自持传播爆震波的流场结构特点,发现在侧向膨胀段爆震波波面发生弯曲,在下侧惰性气体区域形成激波角和界面角.受侧向膨胀影响的爆震波会发生流体扩张,爆震波传播速度将会亏损.

2) 详细研究了预混气高度 $h=3\text{ cm}$,变当量比时爆震波的传播特性,发现当量比 φ 在 0.80, 1.00 和 1.75 时受侧向膨胀影响的爆震波能够自持传播;当量比在 0.70 和 2.25 时爆震波不能够自持传播而熄爆;当量比为 2.00 是爆震波熄爆的临界工况.同时,研究实验段爆震波的速度变化过程可以发现爆震波在侧向膨胀段会经历失稳阶段,在失稳阶段后爆震波的速度亏损是否减小直接影响着爆震波能否自持传播.

3) 对比研究了 $\varphi=1.00$ 时,波前预混气高度对爆震波传播特性的影响,发现 $h=3\text{ cm}$ 时爆震波能够自持传播,而 $h=2\text{ cm}$ 时爆震波熄爆.保持 $h=2\text{ cm}$ 不变,进一步降低 N_2 的稀释比例,即 $\text{H}_2:\text{O}_2:\text{N}_2=2:1:3$,发现此工况下爆震波能够自持传播,而当 $h=1\text{ cm}$ 时爆震波再次解耦熄爆.实验表明:波前预混气高度越高、预混气活性越强,爆震波抵御侧向膨胀影响的能力越强,速度亏损越小,就越有利于爆震波的自持传播.

4) 运用 Fay 流体扩张理论, Dabora 和 Murray 速度亏损理论,并结合 ZND 模型对受侧向膨胀影响的爆震波激波角、界面角和速度亏损进行理论预测,发现对能够自持传播的爆震波, Dabora 的理论预测与实验吻合得很好,且爆震波传播特性在极限附近极不稳定.实验表明:受侧向膨胀影响的爆震波若要自持传播,则其速度亏损的极限为 7.0%~11.0%.

参考文献:

- [1] Lee J H S. The detonation phenomenon[M]. New York: Cambridge University Press, 2008.
- [2] Murray S B. Numa manson on velocity deficits and detonation stability[J]. Shock Waves, 2008, 18(4): 255-268.
- [3] Paillard C, Dupré G, Aiteh H A. Influence de la cinétique chimique sur la structure des détonations: cas du bioxyde de chlore[J]. Annales de physique, 1989, 14(6): 641-648. (in France)
- [4] Fay J. Two-dimensional gaseous detonations: velocity deficit[J]. Physics of Fluids, 1959, 2(3): 283-290.
- [5] Tsuge S. The effect of boundaries on the velocity deficit and the limit of gaseous detonations[J]. Combustion Science and Technology, 1971, 3(4): 195-205.
- [6] Ishii K, Monwar M. Detonation propagation with velocity deficits in narrow channels[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(2): 2359-2366.
- [7] Ishii K, Tanaka T. A study on jet initiation of detonation using multiple tubes [J]. Shock Waves, 2005, 14(4): 273-281.
- [8] Ishii K, Kataoka H, Kojima T. Initiation and propagation of detonation waves in combustible high speed flows[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(2): 2323-2330.
- [9] Kistiakowsky G, Knight H T, Detonations M E G. The acetylene-oxygen mixtures[J]. Journal of the American Chemical, 1952, 20: 884-888.
- [10] Kistiakowsky G B, Zinman W G. A study of thermodynamic equilibration in acetylene-oxygen waves[J]. The Journal of Chemical Physics, 1955, 23(10): 1889-1894.
- [11] Radulescu M I, Ng H D, Lee J H S, et al. The effect of argon dilution on the stability of acetylene/oxygen detonations[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29(2): 2825-2831.
- [12] Dabora E K. The influence of a compressible boundary on the propagation of gaseous detonation[D]. Michgam, US: The University of Michigan, 1963.
- [13] Murray S B. The influence of initial and boundary conditions on gaseous detonation waves[D]. Montreal, Canada: McGill University, 1984.
- [14] Lee J H S, Radulescu M I. On the hydrodynamic thickness of cellular detonations [J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2005, 41(6): 745-765.
- [15] 刘世杰, 覃慧, 林志勇, 等. 连续旋转爆震波细致结构及自持机理研究[J]. 推进技术, 2011, 32(3): 431-436.
LIU Shijie, QIN Hui, LIN Zhiyong et al. Detailed structure and propagating mechanism research on continuous rotating detonation wave[J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 28(4): 403-407. (in Chinese)
- [16] Ishii K, Itoh K, Tsuboi G. A study on velocity deficits of detonation waves in narrow gaps[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29(2): 2789-2794.
- [17] Gooderum P B. An experimental study of the turbulent boundary layer on a shock-tube wall[M]. Virginia, US: NACA Langley Aeronautical Laboratory, 1958.