

连续旋转爆震波传播过程研究(I):同向传播模式^{*}

刘世杰, 刘卫东, 林志勇, 林 伟

(国防科技大学 高超声速冲压发动机技术重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘 要:通过改变空气、氢气质量流量, 在大工况范围内开展了 H_2 /Air 连续旋转爆震试验, 结合高频压力测量和高速摄影观测手段, 重点分析了同向传播模式下的爆震波传播过程。在该模式下爆震波头个数随推进剂总流量的增大而增多, 但同一时刻所有爆震波头的传播方向相同。试验发现了单波、混合单/双波、双波三种连续旋转爆震波传播模式, 三种模式分别对应一定的试验工况范围。单波模式下的爆震波传播主频为 5.05 ~ 5.8 kHz, 平均传播速度为 1510 ~ 1735 m/s; 双波模式下的爆震波传播主频为 8.6 ~ 9.9 kHz, 平均传播速度为 1280 ~ 1480 m/s; 而在混合单/双波模式下, 在试验过程中爆震波头个数会发生变化。当试验工况位于工况范围中间时, 单、双波模式下的爆震波传播过程比较稳定, 不会改变传播方向; 而当试验工况位于工况范围边界时, 发现了连续旋转爆震波改变传播方向的现象。

关键词:连续旋转爆震波; 同向传播模式; 单波模式; 双波模式; 混合单/双波模式

中图分类号: V435.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2014) 01-0138-07

Research on Continuous Rotating Detonation Wave Propagation Process (I): One Direction Mode

LIU Shi-jie, LIU Wei-dong, LIN Zhi-yong, LIN Wei

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

Abstract: Through changing the mass flow rates of air and hydrogen, H_2 /Air continuous rotating detonation wave has been realized in a wide range of test conditions. Based on the PCB and observation results, the detonation wave propagation process of one-direction rotating mode has been analyzed. For this rotating mode, the number of detonation waves is mainly influenced by the total mass flow rate of the propellant, and all the detonation waves propagate along the same direction at the same time. There are three kinds of propagation mode: one-wave, two-wave and hybrid one/two wave, which have their corresponding test condition domains. The detonation wave propagation frequency of one-wave and two-wave mode are in the ranges of 5.05 ~ 5.8 kHz and 8.6 ~ 9.9 kHz respectively, with the mean rotating velocity of 1510 ~ 1735 m/s and 1280 ~ 1480 m/s, respectively. For the hybrid one/two wave mode, the number of detonation waves changes during the test process. When the test condition locates in the middle of the condition domains of one-wave and two-wave modes, the detonation wave propagates stably. Otherwise, the propagation direction may change during the test process.

Key words: Continuous rotating detonation wave; One-direction mode; One-wave mode; Two-wave mode; Hybrid one/two wave mode

* 收稿日期: 2013-03-18; 修订日期: 2013-05-10。

基金项目: 国家自然科学基金 (91216120)。

作者简介: 刘世杰 (1983—), 男, 博士, 研究领域为爆震燃烧机理及其应用。E-mail: lsjnudt@gmail.com

1 引言

连续旋转爆震发动机 (CRDE) 通常都采用环形燃烧室, 推进剂从燃烧室一端喷注, 存在一个或者多个爆震波沿周向连续旋转传播, 高压爆震产物迅速膨胀, 从燃烧室另一端高速排出, 从而产生推力。CRDE 只需一次点火即可连续爆震燃烧, 能够提供稳定的推力, 具有广阔的应用前景。

20 世纪五六十年代, Voitschkovskii^[1] 首先实现了乙炔/氧气预混气的连续旋转爆震燃烧, 验证了该燃烧模式的可行性。随后, Nicholls^[2] 等将该燃烧模式应用到推进系统, 开展了连续旋转爆震发动机可行性论证。由于在一开始就考虑了很多工程应用的实际因素, 试验虽成功起爆并得到了旋转爆震波, 但无法维持其持续旋转传播。在随后的 50 年内, CRDE 研究一直没有得到重视, 仅俄罗斯拉夫连季耶夫流体力学院 (LIH) 在持续开展该方面的研究^[3~5], 试验了多种起爆方式、十多种燃料和氧化剂组合、不同发动机构型下的工作过程, 对比研究了推进剂喷注压降、推进剂流量、燃烧室构型、出口反压等因素对连续爆震波传播过程和发动机性能的影响。进入 21 世纪后, CRDE 又逐渐受到了更多的关注, 近些年 Daniau^[6], Canteins^[7], Naour^[8], Wolanski 和 Kindracki^[9,10], Russo^[11], Liu^[12,13], Shank^[14], Suchocki^[15], Dyer^[16] 等相继开展了连续旋转爆震试验, 这些研究成果进一步验证了连续旋转爆震发动机的可行性。

根据 CRDE 试验观测结果, 可有效的判断出爆震波的传播速度、传播方向、爆震波头个数等信息。为进一步了解其内部流场结构和爆震波传播过程, 针对 CRDE 也开展了较多的数值模拟^[17,18]。图 1 所示为连续旋转爆震的三维数值模拟结果^[17], 其中顶端为燃烧室入口, 底端为燃烧室出口。目前对连续旋转爆震波流场的基本波系结构和爆震波的传播过程有着比较一致的认识: (1) 是旋转爆震波, (2) 是斜激波, (3) 是爆震波前的可燃气体区, (4) 是上一轮燃烧产物与可燃气体层的接触面。当燃烧室直径或推进剂流量较大时, 会存在多个沿相同方向传播的爆震波头。

连续旋转爆震发动机的燃料和氧化剂实施分别喷注, 在燃烧室内边混合边燃烧, 喷注方式将会对燃烧模态和爆震波的传播过程产生很大的影响。为对比研究推进剂喷注方式的影响, 设计、加工了两套模型发动机, 其中一个采用 60 组对撞式喷嘴喷注, 标记

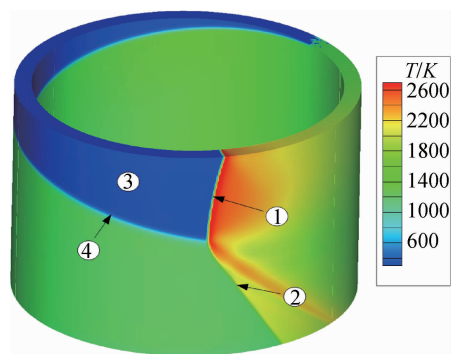


Fig. 1 Flowfield of continuous rotating detonation wave^[17]

为模型发动机 A; 另一个的氧化剂通过环缝喷注, 燃料通过 90 个喷孔喷注, 标记为模型发动机 B。两模型发动机内直径均为 90mm, 外直径均为 100mm, 模型发动机 A 长 150mm, 模型发动机 B 长 75mm。

采用 H_2/O_2 热射流切向喷射起爆方式, 在两套模型发动机上都实现了 H_2/Air 连续旋转爆震。试验发现了两种爆震波传播模式: 同向传播、双波对撞传播。同向传播模式如图 1 所示, 是一种常见的连续旋转爆震波传播模式, 在同一时刻, 流场内的所有爆震波头传播方向相同。而在双波对撞模式下, 在同一时刻, 两个爆震波的传播方向相反, 在传播过程中, 周期性的发生对撞。本文将结合试验结果重点对同向传播模式下的爆震波传播过程进行分析。

2 试验系统介绍

连续旋转爆震试验系统如图 2 所示, 本文主要通过高频压力测量和高速摄影观测结果对爆震波传播过程进行分析, 文献[12, 17] 已对试验系统、高频压力测量结果的处理方法进行过详细介绍, 此处不再赘述。为更直观的研究连续旋转爆震波的传播过程和传播模态, 设计了 Z 形连接段, 将高速相机置于发动机尾部进行了光学观测, 试验布置如图 3 所示。

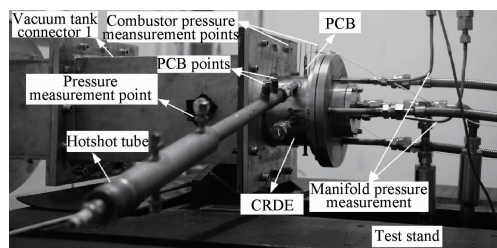


Fig. 2 Photograph of the test system

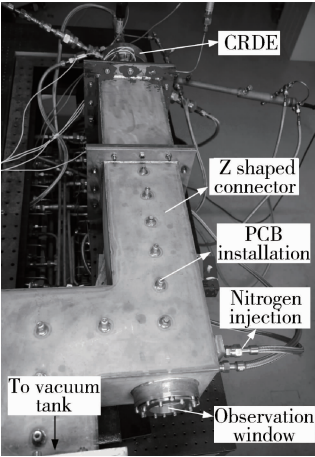


Fig.3 Optical observation from the end of the combustor

目前试验得到的 H_2/Air 旋转爆震波的传播频率不低于 5.0 kHz,而 H_2/Air 燃烧产物的亮度较弱,要拍摄清楚内部传播过程,需设置较高的拍摄频率和较短的曝光时间。所采用的是 Photron Fastcam SA - 1.1 高速彩色数字摄影仪,其最高拍摄频率可达 650000 帧/s,最短曝光时间达 0.37 μs ,它采用高灵敏度 CMOS 非增强型图像传感器,感光性能较强。尾部拍摄时,拍摄结果是光线在整个轴向上的叠加,亮度较强,因此可得到较清晰的拍摄结果。

3 连续旋转爆震波传播过程研究

以模型发动机 B 上的试验结果为例,对同向传播模式下的爆震波传播过程进行分析。通过改变氢气、空气的质量流量开展了大量试验,其中氢气流量变化范围为 2.4 ~ 8.0 g/s,空气为 103 ~ 790g/s,总质量流量为 107 ~ 798g/s,当量比为 0.33 ~ 1.40。试验发现只有当总流量大于 240 g/s 时,在该模型发动机上才能维持连续旋转爆震燃烧。

在同向传播模式下,在燃烧室尺寸确定的情况下,爆震波头个数主要受试验工况的影响,随着总流量的增大而增加。当总流量在 240 ~ 345 g/s 之间

时,只存在一个爆震波头连续旋转传播,将其记为单波模态;而当总流量在 368 ~ 553 g/s 之间时,燃烧室内会存在两个爆震波头沿相同的方向连续旋转传播,将其记为双波模态;在单波和双波传播模态之间,还存在一种过渡传播模态。当总流量范围为 337 ~ 396 g/s 时,在一次试验过程中,爆震波头个数会发生变化,同时存在单波和双波传播状态,将其记为混合单/双波模态。本文将以不同传播模态下的试验结果为例,对同向模式下的爆震波传播过程进行分析,所采用试验的工况情况统计于表 1。

3.1 单波模态介绍

以 Test #1 为例,对单波模态时的爆震波传播过程进行分析。本次试验采用了两个高频压力传感器 (PCB 113B24 型),安装位置距空气环缝喉部 10mm,间隔 30°,测量结果如图 4 所示。试验实现了连续旋转爆震燃烧,爆震波在燃烧室内的连续旋转传播引起了规律的压力振荡分布。从两个 PCB 测量结果的峰值压力位置关系可判断爆震波的传播方向,对于 Test #1,在整个试验过程中爆震波都是沿从 PCB2 到 PCB1 的方向旋转传播,没有改变传播方向。由快速傅里叶变换 (FFT) 可得 PCB 测量结果的振荡主频为 5.61kHz,则由公式可得爆震波的平均传播速度为 1674.3m/s。

$$\bar{v} = \pi D_m f / n$$

(1)

式中 $\bar{v}$ 为爆震波的平均传播速度, D_m 为环形燃烧室的平均直径, f 为振荡主频, n 为爆震波头的个数。

从 PCB 测量结果的振荡规律可判断爆震波的瞬时传播特性,基于 PCB2 的测量结果,根据相邻压力峰值的时间差计算了爆震波在每个周期内的平均传播速度,如图 4 所示,将这个传播速度称为瞬时传播速度。整个过程中的瞬时传播速度变化范围为 1575 ~ 1725m/s,可见,在本次试验中爆震波传播过程比较平稳,传播速度变化范围较小。

图 5 为 Test #1 的高速摄影观测结果,图中所示

Table 1 Statistics of the test conditions

Test	m_{Air} (g/s)	Hydrogen /(g/s)	Equivalence ratio	Frame /fps	Shutter /s	Propagation characteristic
#1	264	7.39	0.96	42000	1/99000	One-wave
#2	413	7.29	0.61	42000	1/99000	Two-wave
#3	330	7.46	0.78	×	×	Hybrid one/two
#4	375	6.56	0.60	20000	1/40000	wave
#5	249	5.23	0.72	×	×	Change the
#6	523	7.61	0.50	×	×	propagation direction

为相邻时刻的 8 幅照片,顺序为从左至右、从上到下。由图可知,在本次试验过程中,燃烧室内只存在一个爆震波头,沿逆时针方向连续旋转传播。在拍摄间隙内,爆震波的旋转角度约为 48° ,由此可得爆震波的传播速度约为 1686.2m/s ,与根据高频信号所求得的传播速度吻合良好。

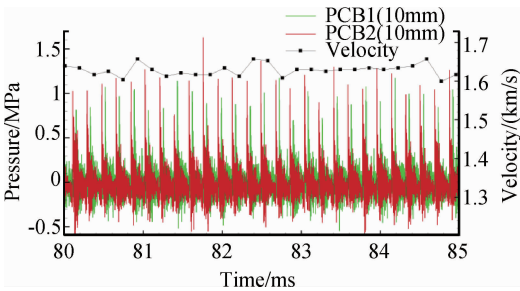


Fig. 4 Distribution of PCB result and instantaneous velocity of test #1

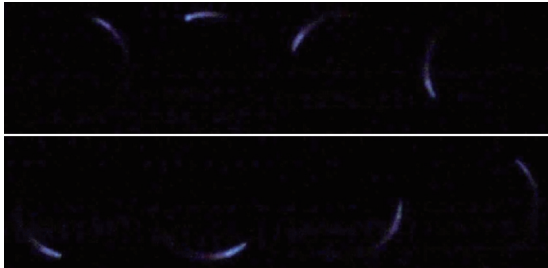


Fig. 5 Observation result of test #1

3.2 双波模式介绍

以 Test #2 为例,对双波模式下的爆震波传播过程进行分析。本次试验使用了两个 PCB 传感器,距空气环缝喉部的距离分别为 10mm 和 25mm,测量结果见图 6,由于本次试验两个 PCB 分布在同一个轴线上,其测量结果的压力峰值上升时刻非常吻合。由快速傅里叶变换(FFT)的分析结果可知,本次试验 PCB 测量结果的振荡主频约为 9.764kHz ,远大于单波模式时的结果。

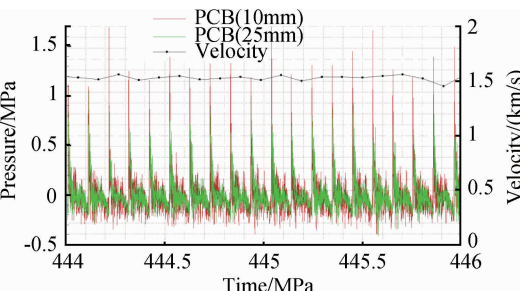


Fig. 6 Distribution of PCB result and instantaneous velocity of test #2

图 7 所示为 Test #2 的高速摄影拍摄结果,由图可知,本次试验在燃烧室内同时存在两个爆震波头,两个爆震波间隔约 180° ,都是沿逆时针方向连续旋转传播,且在传播过程中,两个爆震波的间距变化不大。在拍摄间隙内,爆震波约旋转传播了 42° ,由此可得爆震波的传播速度约为 1462.4m/s 。

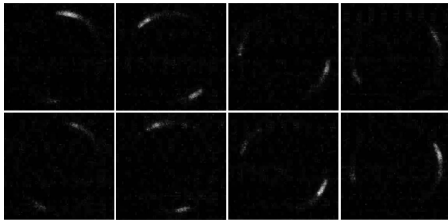


Fig. 7 Observation result of test #2

由于本次试验过程中燃烧室内存在两个爆震波头,则由公式(1)可知,本次试验的爆震波平均传播速度为 1457.0m/s ,与拍摄结果的预测值吻合较好。在双波模式下,相邻压力峰值间的时间间隔为爆震波传播半周所需的时间,则根据 PCB 测量结果可得爆震波在每个振荡周期内的平均传播速度,如图 6 所示,整个试验过程中瞬时传播速度的变化范围为 $1313 \sim 1612\text{m/s}$,传播过程也比较平稳。

在模型发动机 B 的所有试验结果中,单波模式下的 高频压力振荡主频的变化范围为 $5.05 \sim 5.8\text{kHz}$,平均传播速度的变化范围为 $1510 \sim 1735\text{m/s}$ 。而双波模式下的高频压力振荡主频的变化范围为 $8.6 \sim 9.9\text{kHz}$,平均传播速度变化范围为 $1280 \sim 1480\text{m/s}$ 。可见,双波模式下的爆震波传播频率远大于单波模式的,但其传播速度普遍低于单波模式时的结果。

3.3 混合单/双波模式介绍

在混合单/双波模式下,当 H_2/Air 混合气总流量较小时,试验过程中大多仅存在一次模式转变过程,且爆震波在单波和双波传播模式下的传播过程都比较稳定。而当混合气总流量较大时,在一次试验过程中,单波和双波传播模式都难以长时间维持,传播模式在两者之间频繁转变。

以 Test #3 为例对仅存在一次模式转变的传播过程进行分析,图 8 所示为本次试验的高频压力及瞬时传播频率分布,在 $550 \sim 594\text{ms}$ 之间,其瞬时传播频率变化范围为 $8.8 \sim 10.4\text{kHz}$,平均传播频率为 9.56kHz ,平均传播速度为 1426.6m/s ;而在 $594 \sim 830\text{ms}$ 之间,其瞬时传播频率变化范围为 $5.4 \sim 6.0\text{kHz}$,

平均传播频率为 5.79kHz, 平均传播速度为 1728.0m/s。可见, 在试验过程中存在两种爆震波传播模态, 从起爆至 594ms, 燃烧室内存在两个爆震波

头; 但从 594ms 以后, 燃烧室内仅存在一个爆震波头。单波模态时的爆震波传播速度更大, 且所形成的压力峰值也更高。

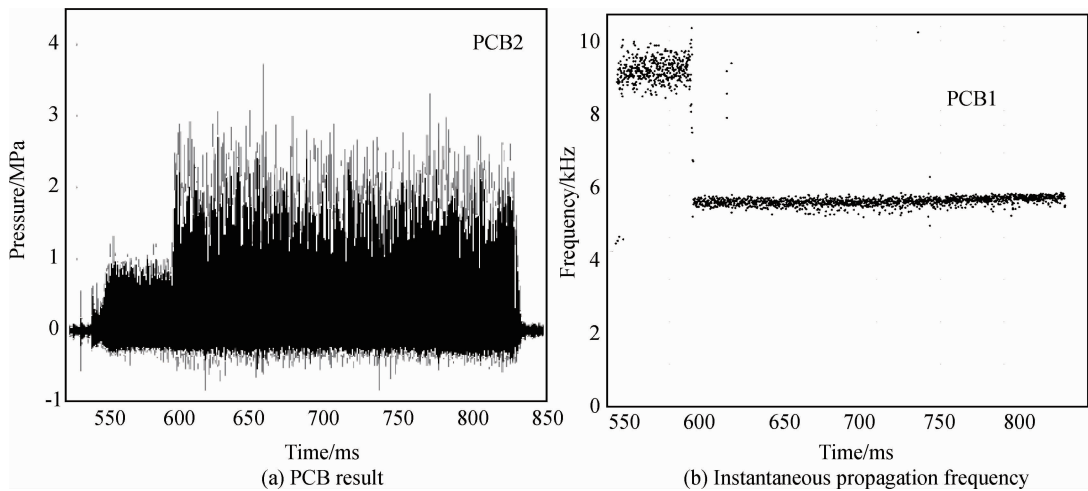


Fig. 8 Time evolutions of the PCB result and instantaneous propagation frequency of test #3

以 Test #4 为例, 对存在多次模态转变的混合单/双波模态下的爆震波传播过程进行分析, 其高频压力的短时傅里叶变换 (STFT) 处理结果如图 9 所示。由图可知, 其高频压力主要有两个振荡频率, 较低的振荡主频与单波模态时的振荡主频吻合, 而较高的振荡主频与双波模态时的吻合。可见, 在本次试验过程中同时存在单波和双波传播模态, 且出现了多次模态转变过程。Test #4 的高速摄影观测结果如图 10 所示, 由图可知在本次试验过程中同时存在单波和双波传播模态, 与依据高频压力的分析结果吻合。

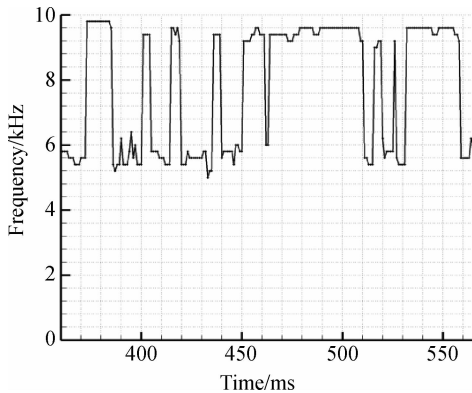


Fig. 9 STFT result of test #4

4 连续旋转爆震波改变传播方向现象

同向传播模式是指, 在同一时刻, 流场内的爆震

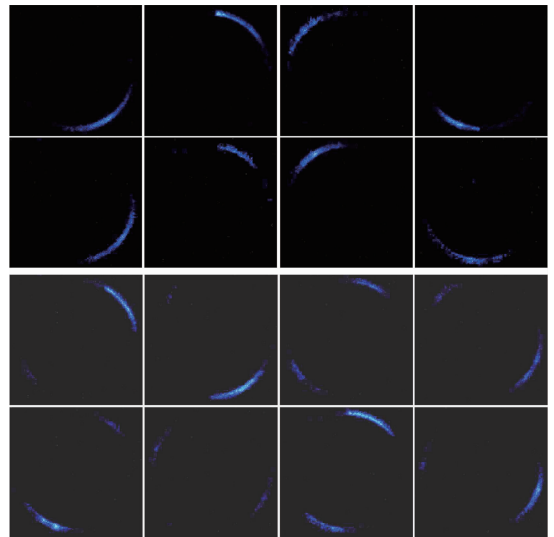


Fig. 10 Observation result of test #4

波传播方向相同。但是在整个试验过程中, 爆震波的传播方向可能会发生改变。由上述分析可知, 单波、双波模态都具有一定的工况范围。当试验工况位于工况范围的中间时, 所对应的爆震波传播过程非常稳定, 在整个试验过程中都不会改变传播方向。但当试验工况位于工况范围的边界时, 所对应的爆震波传播过程不太稳定, 可能会出现转变传播方向的现象。分别通过 Test #5, Test #6, 对单、双波模态下的传播方向转变现象进行介绍。

Test #5 采用了两个 PCB 传感器, 安装位置距环

缝喉部的距离分别为 10mm,35mm,间隔 90° ,分别标记为 PCB1,PCB2。本次试验的爆震波传播主频为 5.21kHz,说明在燃烧室内仅存在一个爆震波头,属于单波模态。图 11 所示为不同时刻的高频压力分布,由图可知,在 439 ~ 441ms 间,爆震波传播方向为从 PCB1 到 PCB2,但在 453 ~ 455ms 间传播方向为从 PCB2 到 PCB1,说明在试验过程中旋转爆震波改变了传播方向。

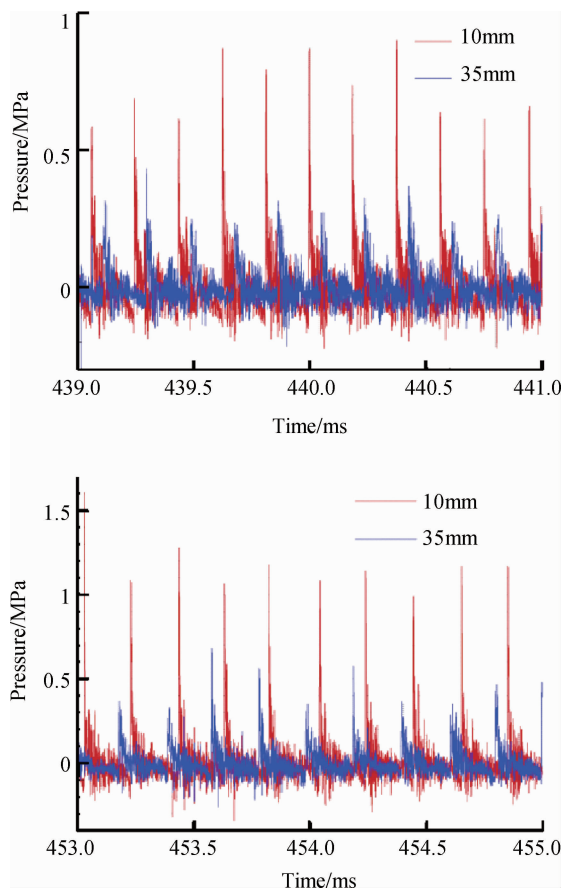


Fig. 11 Time evolutions of the PCB result of test#5

Test #6 的两个 PCB 传感器间隔 30° ,距环缝喉部距离 15mm。本次试验的振荡主频为 9.44kHz,说明在燃烧室内存在两个爆震波头,属于双波模态。图 12 所示为不同时刻的高频压力分布,可见爆震波在试验过程中改变了传播方向。

5 结 论

通过上述分析,本文所得的主要结论总结如下:

(1)在所设计的模型发动机上,在大工况范围内实现了 H_2/Air 连续旋转爆震。在同向传播模式下,当燃烧室几何尺寸一定时,爆震波头个数主要受试验

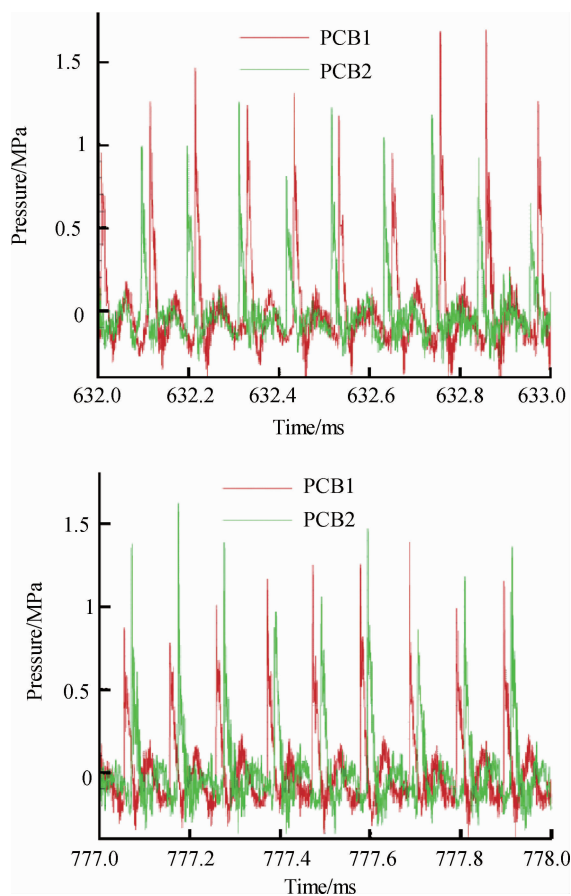


Fig. 12 Time evolutions of the PCB result of test #6

工况的影响,随推进剂总流量的增大而增多,但在同一时刻,燃烧室内所有爆震波头的传播方向相同。

(2)试验发现了单波模态、混合单/双波模态、双波模态三种连续旋转爆震传播过程,其中单波模态下的爆震波传播主频为 5.05 ~ 5.8kHz,平均传播速度为 1510 ~ 1735 m/s;双波模态下的爆震波传播主频为 8.6 ~ 9.9kHz,平均传播速度为 1280 ~ 1480m/s。

(3)在单波、双波传播模态下,当试验工况位于工况范围中间时,爆震波传播过程非常稳定,不会改变传播方向。但当试验工况位于工况范围边界时,在试验过程中出现了爆震波改变传播方向的现象。

参考文献:

- [1] Voitsekhovskii B V. Maintained Detonations[J]. *Doklady Akademii Nauk UzSSR*,1959, 129(6):1254-1256.
- [2] Nicholls J A, Cullen R E. The Feasibility of a Rotating Detonation Wave Rocket Motor[R]. *RPL-TDR-64-113*.
- [3] Bykovskii F A, Klopotov I D, Mitrofanov V V. Spin Detonation of Gases in a Cylindrical Combustor[J]. *Doklady Akademii Nauk UzSSR*, 1975, 224(5):1038-1041.

- [4] Bykovskii F A, Mitrofanov V V. Detonation Combustion of a Gas Mixture in a Cylindrical Chamber[J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1980, 16(5):570-578.
- [5] Bykovskii F A, Zhdan S A, Vedernikov E F. Continuous Spin Detonations[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2006, 22(6):1204-1216.
- [6] Daniau E, Falempin F, Getin N, et al. Design of a Continuous Detonation Wave Engine for Space Application[R]. *AIAA* 2006-4794.
- [7] Gabriel Canteins. Study of Continuous Rotating Detonation—Application for Propulsion[D]. *Poitiers; University of Poitiers*, 2006.
- [8] Naour B L, Falempin F, Miquel F. Recent Experimental Results Obtained on Continuous Detonation Wave Engine[R]. *AIAA* 2011-2235.
- [9] Wolanski P, Kindracki J. Research on Continuous Rotating Detonation and Its Applications to Jet Propulsion[R]. *ISABE* 2009-1313.
- [10] Kindracki J, Wolanski P, Gut Z. Experimental Research on the Rotating Detonation in Gaseous Fuels-Oxygen Mixtures[J]. *Shock waves*, 2011, (21):75-84.
- [11] Russo R M, King P I, Schauer F R. Characterization of Pressure Rise Across a Continuous Detonation Engine[R]. *AIAA* 2011-6046.
- [12] Liu Shijie, Lin Zhiyong, Liu Weidong, et al, Experimental Realization of H_2 /air Continuous Rotating Detonation in a Cylindrical Combustor[J]. *Combustion Science and Technology*, 2012, 184(9):1302-1317.
- [13] 刘世杰,林志勇,林伟,等. H_2 /Air 连续旋转爆震波的起爆及传播过程试验[J]. 推进技术, 2012, 33(3):483-489. (LIU Shi-jie, LIN Zhi-yong, LIN Wei, et al. Experiment on the Ignition and Propagation Processes of H_2 /Air Continuous Rotating Detonation Wave[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2012, 33(3):483-489.)
- [14] Shank J C, King P I. Development and Testing of a Modular Rotating Detonation Engine[R]. *AIAA* 2012-0120.
- [15] Suchocki J A, S T J Yu, Rotating Detonation Engine Operation[R]. *AIAA* 2012-0119.
- [16] Dyer R, Naples A. Parametric Testing of a Unique Rotating Detonation Engine Design[R]. *AIAA* 2012-0121.
- [17] Liu Shi-jie, Lin Zhi-yong, Liu Wei-dong, et al. Experimental and Three-Dimensional Investigations on H_2 /air Continuous Rotating Detonation Wave[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2013, 227(2):326-341.
- [18] Schwer D, Kailasanath K. Numerical Investigation of the Physics of Rotating-Detonation-Engines[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33:2195-2202.

(编辑:朱立影)