

连续旋转爆震波传播模态试验*

王超,刘卫东,刘世杰,林志勇,蒋露欣

(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:通过保持空气流量不变、改变 H_2/air 当量比开展了连续旋转爆震对比试验,发现随当量比的降低出现三种传播模态:在较高的当量比(0.90~1.86)下,连续旋转爆震波以同向传播模态传播;在较低的当量比(≈ 0.75)下,则以双波对撞模态传播;在中间工况,则以上述混合模态维持传播。分析了不同传播模态下的高频压力特征,并初步分析了传播模态的转换机制:当量比较高时,爆震强度较高,传播过程中的损失和速度亏损相对较小,爆震波以同向传播模态维持传播;当量比较低时,爆震强度较低,传播过程中的损失和速度亏损较大,此时无法维持同向传播模态,而以双波对撞模态传播,这是由于双波对撞模态中的激波对撞产生高温环境,有利于燃烧放热,其可能是连续旋转爆震的极限传播模态。

关键词:连续旋转爆震;同向传播模态;双波对撞模态;速度亏损;模态转换

中图分类号:V231.2 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2015)04-121-07

Experiment on the propagation mode of continuous rotating detonation wave

WANG Chao, LIU Weidong, LIU Shijie, LIN Zhiyong, JIANG Luxin

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

Abstract: Experiments on continuous rotating detonation wave of H_2/air were performed with constant air mass flow rate and varied H_2/air equivalence ratio (ER). Three different propagation modes of the continuous rotating detonation wave were found as the decreasing of ER, namely, one direction mode at high ER from 0.90 to 1.86, two-wave collision propagation mode at low ER of about 0.75, hybrid mode of one direction mode and two-wave collision propagation mode at middle ER. The propagation characteristics of the high-frequency pressures were analyzed and the mode transition mechanism of continuous rotating detonation wave was preliminarily studied. With a higher ER, the strength of the detonation wave is increased and the loss and velocity deficit during the propagation are relatively small, and the continuous rotating detonation wave can be sustained in the one direction mode; while with a lower ER, the strength of the continuous rotating detonation wave is reduced and the influence of the loss and velocity deficit during the propagation is relatively enlarged, only in the two-wave collision propagation mode can the continuous rotating detonation wave be sustained. This can be attributed to the collision of the two counter-propagating shock waves in the two-wave collision propagation mode, which will promote the heat release, will enable the continuous rotating detonation wave to propagate steadily at a low ER, and will make the two-wave collision propagation mode possibly be the ultimate propagation mode of continuous rotating detonation wave.

Key words: continuous rotating detonation; one direction propagation mode; two-wave collision propagation mode; velocity deficit; mode transition

连续旋转爆震(Continuous Rotating Detonation, CRD)既有爆震燃烧本身放热速率快、热效率高的优点,又有工作频率高、产生推力稳定的特点,并有利于发动机结构简单紧凑。连续旋转爆震发动机通常采用环形燃烧室,喷注的推进剂在燃烧室入口形成可燃混合气,起爆后形成连续旋转爆震波沿圆周方向传播,爆震燃烧的高温高压产物向燃烧室出口膨胀加速产生推力^[1]。

经过半个世纪的研究,对连续旋转爆震流场

的普遍认识为:连续旋转爆震波在环形燃烧室内高速传播,爆震波后高温高压的燃烧产物使得爆震波后推进剂的喷注过程受阻,随着与爆震波间周向距离的增加,推进剂的喷注过程开始恢复,为下一个周期爆震波的传播创造条件。爆震波前可燃混合气的填充、累积和爆震波的传播都是动态过程,在爆震燃烧消耗和动态填充累积的共同作用下,爆震波头所在位置的可燃混合气高度达到最大,形成三角形的可燃混合气累积区^[2-6]。

* 收稿日期:2014-09-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51306202,91216120)

作者简介:王超(1987—),男,湖北黄冈人,博士研究生,E-mail:emspire529@163.com;

刘卫东(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:lwd_insa@sohu.com

目前,大多数试验^[2,7]和数值计算^[3,6-12]的结果发现,在同一时刻,环形燃烧室中的连续旋转爆震波的传播方向相同,即同向传播模式^[13],爆震波头个数则与流量等有关。

当试验工况发生改变时,爆震波的传播特征会有所变化。Bykovskii 等^[2]开展了大量 H_2/air 推进剂组合的连续旋转爆震试验,试验结果表明,爆震波头个数随着推进剂流量的增加而逐渐增加。刘世杰等^[13]在大工况范围内开展了 H_2/air 连续旋转爆震试验,试验发现同向传播模式下有三种传播形式:单波(单个爆震波头)、双波(两个爆震波头)、混合单波/双波,爆震波头个数随推进剂流量的增加而增加。Dyer 等^[14]在以 H_2/air 为燃料的连续旋转爆震试验中发现,随着推进剂流量、当量比和燃烧室压力的改变,爆震波可能以单波、双波的同向传播模式,以及单波/双波/多个波头的混合模式传播,且波头个数随流量增加而增加。Suchocki 等^[15]在以 H_2/air (富氧)推进剂组合的连续旋转爆震试验中发现,给定当量比时,随着空气流量的增加,爆震波传播过程中波头个数由单波逐渐变化为混合单波/双波和双波。

上述研究中,爆震波均以同向模式传播。试验结果表明,连续旋转爆震还有一种不太常见的传播模式——双波对撞传播模式。刘世杰等^[16]在两种喷注方式的连续旋转爆震试验中发现了两个反向传播的爆震波在燃烧室内周期性的对撞现象,且该传播过程可长时间稳定维持。Suchocki 等^[15]在 H_2/air 推进剂组合的连续旋转爆震试验中观测到了两个沿相反方向传播并发生对撞的爆震波,但该现象不能长时间维持。郑权等^[17]在 H_2/air 连续旋转爆震试验中也发现了短暂的对撞传播现象。

1 实验系统介绍

连续旋转爆震发动机采用环形燃烧室,外径 100mm、内径 80mm。空气喷注环缝宽度为 0.95mm;氢气的喷注位于空气环缝过渡至燃烧室的环形面上,采用 90 个直径 0.7mm 的喷孔喷注。空气和氢气的流量均采用涡轮流量计测量,其精度为 0.5% FS。

在燃烧室外壁面布置了五个高频压力传感器 PCB 测点 1~5,其中 PCB 传感器测点 1~4 共轴、相邻测点间隔 15mm,PCB 测点 5 与测点 3 轴向位置相同,但圆周方向间隔 45° ,PCB1 与燃料喷注位置轴向间距 40mm。PCB 测点 1~4 均位于面积扩张型面上,其中 3~4 位置基本接近于等直

段。燃烧室构型与传感器的布置如图 1 所示。PCB 传感器型号为 113B24,其频响大于 500kHz,精度为 0.035kPa,压力上升时间小于 $1.0\mu s$ 。

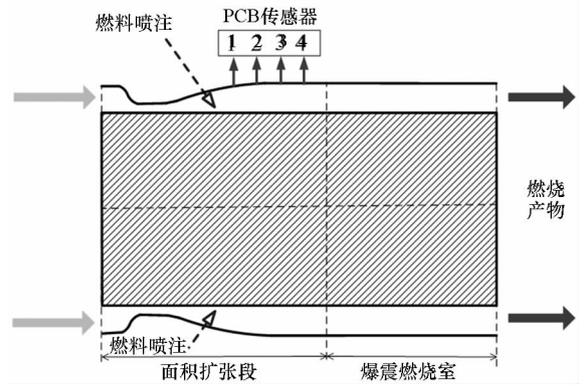


图 1 爆震燃烧室构型

Fig. 1 Schematic configuration of detonation combustor

在保持空气流量基本不变的情况下,通过改变氢气流量来改变推进剂组合的当量比。在工况范围内共发现了三种传播模式:单个波头的同向传播模式(One Direction Mode, ODM)、双波对撞传播模式(Two-Wave Collision Propagation Mode, TWCPM)以及二者的混合传播模式(hybrid mode)。表 1 为试验工况与结果统计。表中 m_{air} 、 m_{H_2} 、 ER (equivalence ratio)和 \bar{V} 分别为试验过程中的 air 流量、 H_2 流量、 H_2/air 当量比和连续旋转爆震波的平均传播速度。其中#4、#5 次试验(混合传播模式)中的两个传播速度分别取试验中相对稳定的双波对撞、同向传播模式时的速度。

表 1 试验工况与结果

Tab. 1 Experiment condition and result

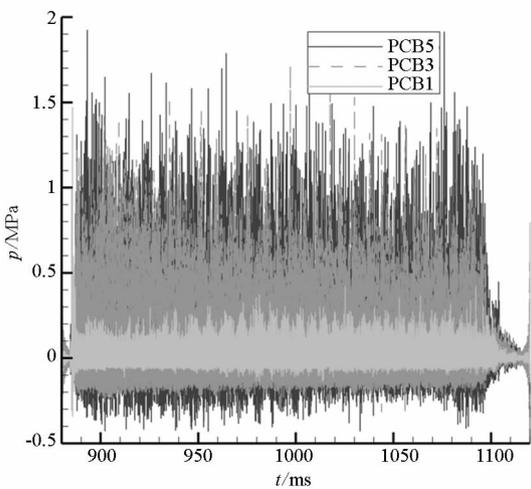
No.	$m_{air}/$ (g/s)	$m_{H_2}/$ (g/s)	ER	Note	$\bar{V}/$ (m/s)
#1	392.0	8.40	0.736	TWCPM	1152
#2	395.0	8.56	0.744	TWCPM	1169
#3	395.7	8.64	0.750	TWCPM	1182
#4	392.0	9.33	0.818	Hybrid	1178/ 1492
#5	395.3	9.47	0.823	Hybrid	1188/ 1420
#6	390.0	10.21	0.900	ODM	1517
#7	399.0	11.61	1.000	ODM	1596
#8	391.5	16.30	1.431	ODM	1663
#9	390.0	20.14	1.775	ODM	1656
#10	390.0	21.11	1.860	ODM	1664

2 传播特性分析

2.1 同向传播模式

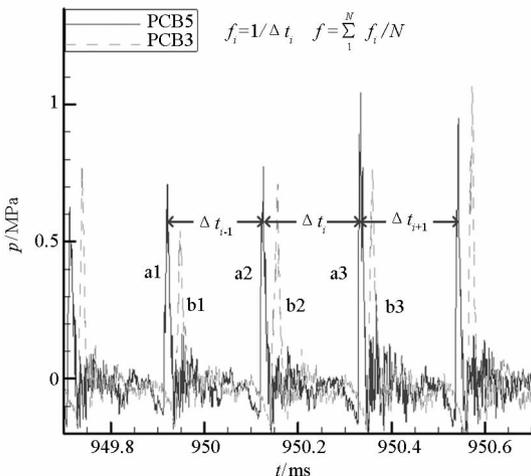
以#6次试验为例分析同向传播模式。#6次试验布置的PCB测点为1,3,5,其中PCB3、PCB5圆周方向间隔45°。图2(a)为试验过程中的高频压力,图2(b)为局部放大图,如图所示,压力峰值达到了1MPa,压力序列a1、a2、a3表示爆震波传播经过PCB5,而压力序列b1、b2、b3则表示爆震波传播经过PCB3,均呈现出较为规律的周期性。压力序列a与序列b呈现出间隔交替出现的整体分布特点,即a1—b1—a2—b2……。整个试验过程中,高频压力特征均与图2(b)类似。由于a1—b1表示传播方向为PCB5→PCB3,因此试验中爆震波始终保持该传播方向不变。

图2(c)为900ms~1090ms时间段内的爆震波传播频率分布,计算方法如图2(b),其变化范



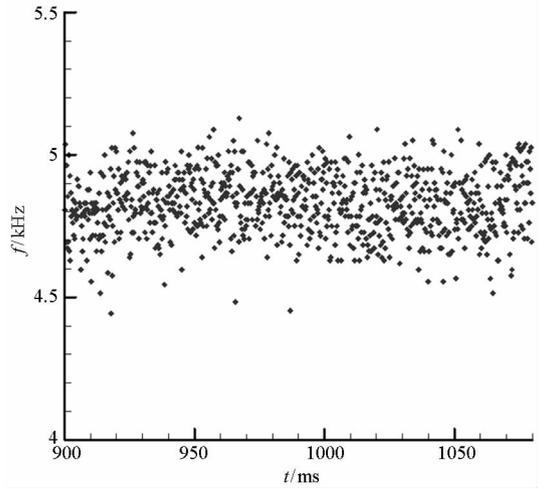
(a) 高频压力整体视图

(a) Global view of high-frequency pressure



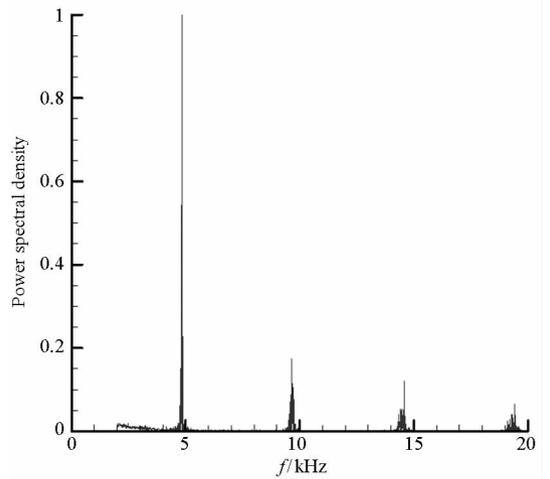
(b) 高频压力局部视图

(b) Local view of high-frequency pressure



(c) 连续旋转爆震波传播频率分布

(c) Propagation frequency distribution of CRD wave



(d) 高频压力 FFT 结果

(d) FFT result of high-frequency pressure

图2 #6次试验高频压力分析结果

Fig. 2 High-frequency pressure result of test #6

围为4.44~5.13kHz,平均传播频率 \bar{f} 为4.83kHz,与图2(d)中快速傅氏变换(Fast Fourier Transformation, FFT)结果的主频4.85kHz基本吻合。

根据连续旋转爆震波的平均传播频率 \bar{f} ,计算了爆震波在燃烧室外壁面处的平均传播速度 \bar{V} ,计算方法如下:

$$\bar{V} = \pi D_o \bar{f} \quad (1)$$

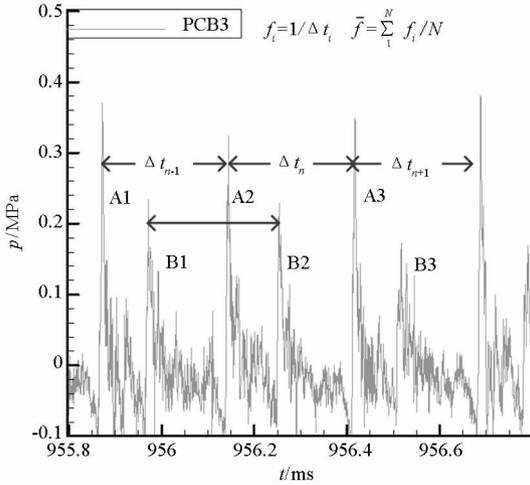
式中, D_o 为燃烧室外径。则#6次试验中爆震波的传播速度约为1517m/s。

#7~#10次试验中,爆震波也均以稳定的同向传播模式传播,高频压力特征与#6次试验类似,其传播速度见表1。

2.2 双波对撞传播模式

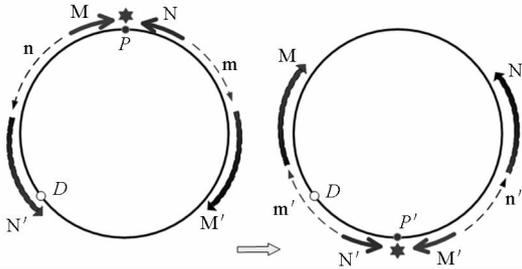
#1次试验布置的PCB测点为1,2,3。

图 3(a)为 PCB3 处的高频压力局部放大图,如图,高频压力呈现出较为规律的周期性,且有两个大小不同的压力峰值序列 A、B,此特点明显不同于同向传播模式。两个峰值序列各自的周期间隔一致,但两个峰值之间的时间间隔: A1—B1 与 B1—A2 不同。PCB1 和 PCB2 处的波形特征类似



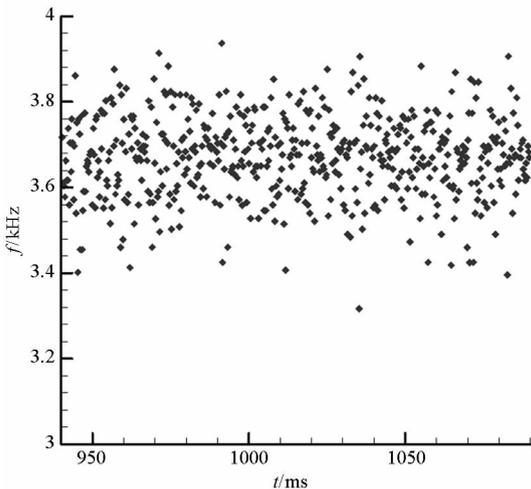
(a) 高频压力局部视图

(a) Local view of high-frequency pressure



(b) 双波对撞传播过程示意图

(b) Schematic diagram of TWCPM



(c) 连续旋转爆震波传播频率分布

(c) Propagation frequency distribution of CRD wave

图 3 #1 次试验高频压力分析结果

Fig. 3 High-frequency pressure result of test #1

于 PCB3。研究表明^[16],上述压力信号特征属于另一种传播模式——双波对撞传播模式。

图 3(b)为双波对撞传播模式示意图:燃烧室中存在两个反向传播的爆震波 M、N,其周期性发生对撞。爆震波 M、N 在 P 点对撞后分别形成透射激波 m、n 沿原来爆震波的传播方向继续传播,并诱导可燃混合气逐渐发展成为新的爆震波 M'、N'在 P'点对撞,P 和 P'通常对称。爆震波 M'、N'对撞后形成的透射激波 m'、n'又发展成为新的爆震波 M、N 在 P 点对撞,循环往复。

根据图 3(b),当对撞点 P 远离布置在 D 处的传感器时,由透射激波 n 诱导生成爆震波 N'传播至 D 的距离 PD 更远,发展更充分,爆震波强度较大,压力峰值也较高(如 A1);而爆震波对撞后的透射激波 m'传播至 D 的距离 P'D 更近,尚未充分发展为爆震波,强度也更小,故压力峰值也更低(如 B1)。由于 P'D 的距离较小,对应的压力峰值时间间隔也较短,如图 3(a)中的 A1—B1。

根据双波对撞传播模式下高频压力的周期性特征计算了爆震波的传播频率,计算方法如图 3(a),940 ~ 1100ms 时间段内的爆震波传播频率分布如图 3(c)。如图,爆震波的传播频率变化范围为 3.32 ~ 3.94kHz,平均传播频率为 3.67kHz,而 FFT 结果的主频为 3.68kHz,两种方法的结果吻合较好。

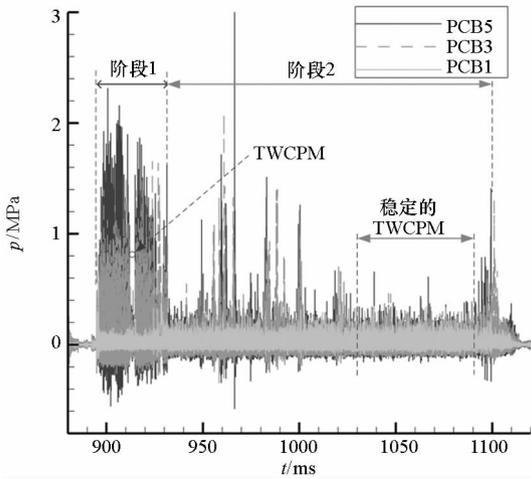
#2 与 #3 次试验均以稳定的双波对撞传播模式传播,高频压力特征与 #1 次试验类似,不再赘述。

2.3 混合传播模式

#4 次试验布置的 PCB 测点为 1,3,5。与 #1、#6 次试验相比,#4 次试验的空气流量基本一致,而 H₂流量处于二者之间。此次试验过程中频繁发生爆震波传播方向、传播模式的改变,传播过程极不稳定。

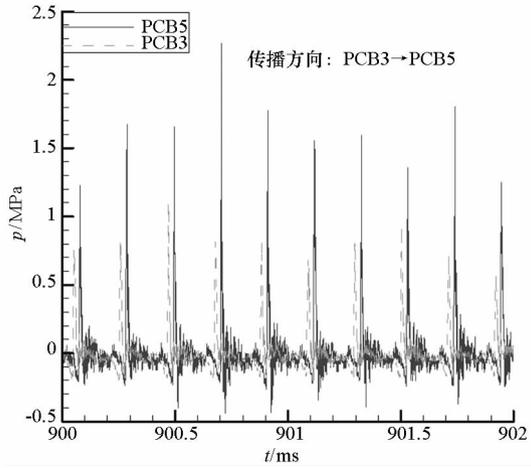
图 4(a)为 #4 次试验的高频压力测量结果,如图,试验过程中,爆震波的传播模式主要分为两个阶段:阶段 1,主要以同向传播模式传播,持续时间为 894ms ~ 932ms,但存在短暂的双波对撞传播模式;阶段 2,主要以双波对撞传播模式传播,持续时间为 932ms ~ 1094ms,期间也存在短暂的同向传播模式。

阶段 1 中,当爆震波以同向传播模式传播时,发生了传播方向改变的现象:在 896ms ~ 912ms 时间段内其传播方向为 PCB3→PCB5,局部放大图如图 4(b);而在 929ms ~ 931.5ms 时间段内,其传播方向变为 PCB5→PCB3,局部放大图如图



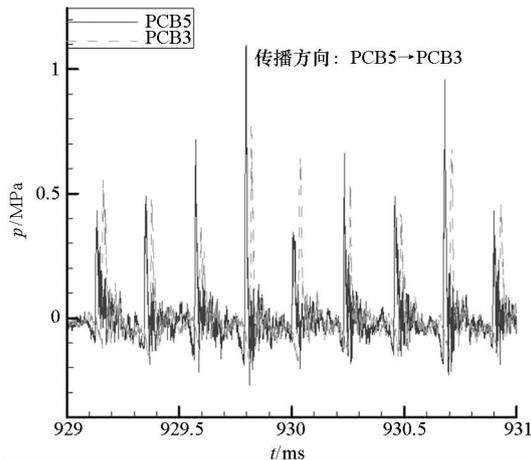
(a) 高频压力整体视图

(a) Global view of high-frequency pressure



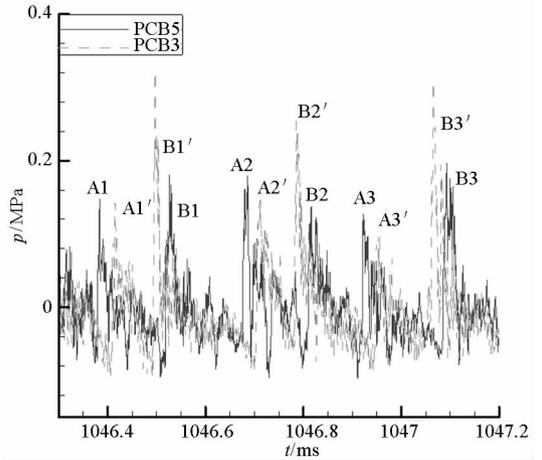
(b) 高频压力局部视图,同向传播模式,传播方向: PCB3 to PCB5

(b) Local view of high-frequency pressure, ODM, propagation direction: PCB3 to PCB5



(c) 高频压力局部视图,同向传播模式,传播方向: PCB5 to PCB3

(c) Local view of high-frequency pressure, ODM, propagation direction: PCB5 to PCB3



(d) 高频压力局部视图,双波对撞模式

(d) Local view of high-frequency pressure, TWCPM

图4 #4次实验高频压力分析结果

Fig. 4 High-frequency pressure result of test #4

4(c)。在912.5ms ~ 914ms 时间段内,爆震波以对撞传播模式传播。

阶段2中,双波对撞传播时的局部视图如图4(d),PCB3处高频压力 A1'B1' A2'B2'...呈现出与图3(a)中相同的特点,判断爆震波以双波对撞传播模式传播。与 PCB3 处高频压力相比,PCB5 处高频压力的时间间隔 A1—B1, B1—A2 的差异不明显,这与传感器和对撞点之间的相对位置有关。此外,PCB3 与 PCB5 的压力上升先后顺序呈现出交替的特点,如 A1—A1', B1'—B1,其对应的传播方向为 PCB5 to PCB3, PCB3 to PCB5,即燃烧室中存在两个沿相反方向传播的爆震波头,其引起的压力信号分别为: A1 A1'—A2 A2'..., B1' B1—B2' B2...,由于传播方向相反,故会发生对撞。此即双波对撞传播模式的又一个特点。

图5 为#5次试验的高频压力,与#4次试验类

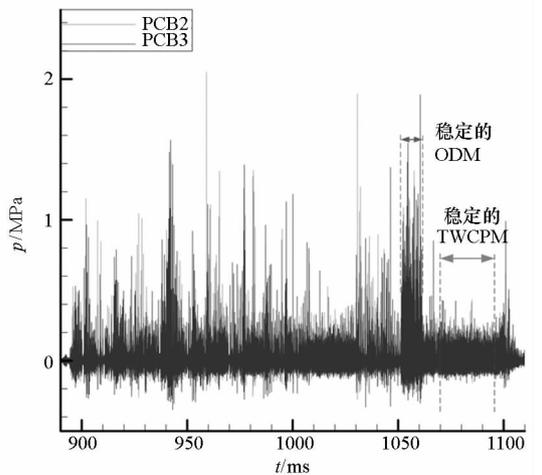


图5 #5次实验高频压力分析结果

Fig. 5 High-frequency pressure result of test #5

似,试验过程中同向传播模式和对撞传播模式反复改变;与#4 次试验相比,#5 次试验的当量比略有升高,但模式变换更加频繁,且同向传播模式出现的比例更大。

3 传播模式转换机制分析

表 1 中不同工况下连续旋转爆震波的传播速度和速度亏损如图 6 所示。其中#4 次、#5 次试验中不同传播模式下爆震波的传播频率和速度计算区域取为图 4(a)与图 5 中传播模式对应的相对平稳阶段。速度亏损 ε 的计算方法如下:

$$\varepsilon = (D_{CJ} - \bar{V}) / D_{CJ} \quad (2)$$

式中, D_{CJ} 为爆震波传播的理论 CJ (Champan-Jouguet) 速度。本文的 CJ 速度采用 Cantera 软件

进行计算^[18]。由于连续旋转爆震燃烧流场呈现强烈的三维性和非定常性,因此目前难以测量爆震波前可燃混合气的状态。而 CJ 速度主要受当量比、温度和压力的影响,其中后两者的影响较小,计算时予以忽略,均取为 300K、1 个大气压。

图 6 为爆震波传播速度和速度亏损随当量比的变化,图 6(a)中混合传播模式的速度取稳定的双波对撞传播模式的速度,图 6(b)中则取稳定的同向传播模式的速度。由图可知,爆震波的传播速度基本随当量比的升高而增加,并在约为 1.4 时达到最大;随着当量比的进一步增加,传播速度稍有减小。速度亏损随当量比的变化趋势则相反,但在当量比为 1.0 时最小。

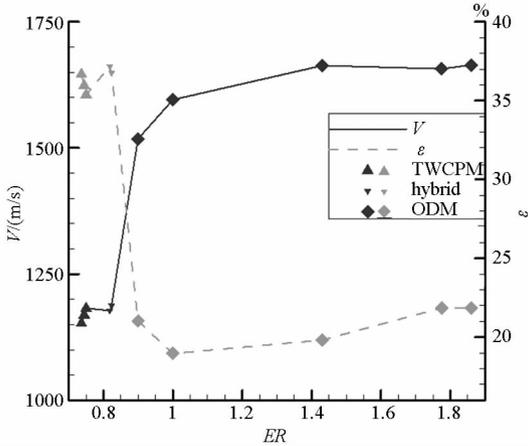
随着当量比的降低,爆震波由同向传播模式变为同向传播/双波对撞传播的混合模式、双波对撞传播模式。传播模式的变化也导致了传播速度和速度亏损变化范围的较大差异,同向传播、双波对撞模式的传播速度变化范围分别为:1517 ~ 1664m/s,1152 ~ 1182m/s;速度亏损的变化范围分别为 19.0% ~ 21.8%,35.4% ~ 37.2%。而混合传播模式中,取同向传播模式和对撞传播模式速度时的速度亏损分别为 20.4% ~ 24.4%,36.8% ~ 37.2%。

连续旋转爆震波在实际的传播过程中会受到不完全混合、热损失、黏性、侧向膨胀、曲率等的影响,导致其传播速度下降,这体现为速度亏损。而传播模式随当量比发生变化,与上述损失对爆震波的影响程度有关:在较高的当量比下,混合气的活性较强,燃烧放热量更多,爆震波的强度较大,传播速度也较快,爆震波足以克服上述损失以同向传播模式传播;随着当量比的降低,爆震波的强度减弱,上述损失的影响相对增强,爆震波难以继续克服损失维持同向传播模式,而可能以另一种模式传播,如本文中的双波对撞模式传播。

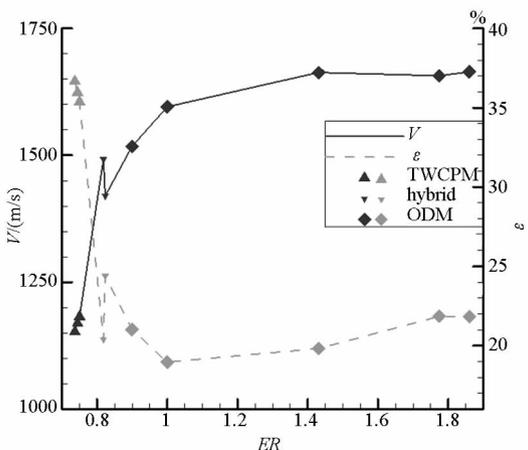
连续旋转爆震波能在当量比较低情况下以双波对撞模式传播,这与其传播特征有关:燃烧室中两个传播方向相反的爆震波周期性发生对撞,尽管其中的复杂过程使得平均传播速度较低、速度亏损较大^[16],但激波对撞形成局部高温高压区,有利于混合气的燃烧放热并维持爆震波的传播,其可能是连续旋转爆震波的极限传播模式。

4 结论

开展了 H₂/air 连续旋转爆震试验,分析了不同传播模式下的爆震波传播频率、速度及亏损,得到了以下结论:



(a) 混合模式中,取双波对撞模式计算爆震波传播速度
(a) Propagation velocity of the hybrid mode computed from TWCPM



(b) 混合模式中,取同向传播模式计算爆震波传播速度
(b) Propagation velocity of the hybrid mode computed from ODM

图 6 传播速度与速度亏损

Fig. 6 Propagation velocity and velocity deficit

1) 在相同的燃烧室构型下,连续旋转爆震波的传播模式与推进剂组合当量比有关:随着当量比的降低,爆震波的传播模式由单个波头的同向传播模式改变为同向/双波对撞混合传播模式、双波对撞传播模式。

2) 随着推进剂当量比的降低,混合气活性减弱、爆震波强度下降、传播速度减小,爆震波无法维持同向传播模式,转为双波对撞模式传播。

3) 双波对撞模式中,两个反向传播的激波对撞有利于燃烧放热,可能是连续旋转爆震波在推进剂组合活性较弱、传播速度较低时的极限传播模式。

参考文献 (References)

- [1] Liu S J, Lin Z Y, Sun M B, et al. Thrust vectoring of a continuous rotating detonation engine by changing the local injection pressure [J]. *Chinese Physics Letters*, 2011, 28(9): 094704.
- [2] Bykovskii F A, Zhdan S A, Vedernikov E F. Continuous spin detonations [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2006, 22(6): 1204 - 1216.
- [3] Schwer D, Kailasanath K. Numerical investigation of the physics of rotating-detonation-engines [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(2): 2195 - 2202.
- [4] Yi T H, Lou J, Turangan C, et al. Propulsive performance of a continuously rotating detonation engine [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2011, 27(1): 171 - 181.
- [5] Bykovskii F A, Zhdan S A, Vedernikov E F. Continuous spin detonation of fuel-air mixtures [J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2006, 42(4): 463 - 471.
- [6] 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 [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*, 2011, 32(3): 431 - 436. (in Chinese)
- [7] Liu S J, Lin Z Y, Liu W D, et al. Experimental realization of H₂/air continuous rotating detonation in a cylindrical combustor [J]. *Combustion Science and Technology*, 2012, 184(9): 1302 - 1317.
- [8] Zhdan S A. Mathematical model of continuous detonation in an annular combustor with a supersonic flow velocity [J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2008, 44(6): 690 - 697.
- [9] Eude Y, Davidenko D M, Gökalp I, et al. Use of the adaptive mesh refinement for 3d simulations of a CDWRE (continuous detonation wave rocket engine) [C]//*Proceedings of 17th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference*, 2011.
- [10] 姜孝海, 范宝春, 董刚, 等. 旋转爆轰流场的数值模拟 [J]. *推进技术*, 2007, 28(4): 403 - 407.
JIANG Xiaohai, FAN Baochun, DONG Gang, et al. Numerical investigation on the flow field of rotating detonation wave [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2007, 28(4): 403 - 407. (in Chinese)
- [11] 邵业涛, 刘勳, 王健平. 圆柱坐标系下连续旋转爆轰发动机的数值模拟 [J]. *推进技术*, 2009, 30(6): 717 - 721.
SHAO Yetao, LIU Meng, WANG Jianping. Numerical simulation of continuous rotating detonation engine in column coordinate [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2009, 30(6): 717 - 721. (in Chinese)
- [12] Liu S J, Lin Z Y, Liu W D, et al. Experimental and three-dimensional investigations on H₂/air continuous rotating detonation wave [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2013, 227(2): 326 - 341.
- [13] 刘世杰, 林志勇, 刘卫东, 等. 连续旋转爆震波传播过程研究(I): 同向传播模式 [J]. *推进技术*, 2014, 35(1): 138 - 144.
LIU Shijie, LIN Zhiyong, LIU Weidong, et al. Research on continuous rotating detonation wave propagation process(I): one direction mode [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2014, 35(1): 138 - 144. (in Chinese)
- [14] Dyer R, Naples A, Kaemming T, et al. Parametric testing of a unique rotating detonation engine design [C]//*Proceedings of 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 2012.
- [15] Suchocki J A, Yu S T J, Hoke J L, et al. Rotating detonation engine operation [C]//*Proceedings of 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 2012.
- [16] 刘世杰, 林志勇, 刘卫东, 等. 连续旋转爆震波传播过程研究(II): 双波对撞传播模式 [J]. *推进技术*, 2014, 35(2): 269 - 275.
LIU Shijie, LIN Zhiyong, LIU Weidong, et al. Research on continuous rotating detonation wave propagation process(II): two-wave collision propagation mode [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2014, 35(2): 269 - 275. (in Chinese)
- [17] 郑权, 翁春生, 白桥栋. 倾斜环缝喷孔式连续旋转爆轰发动机试验 [J]. *推进技术*, 2014, 35(4): 570 - 576.
ZHENG Quan, WENG Chunsheng, BAI Qiaodong. Experiment on continuous rotating detonation engine with tilt slot injector [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2014, 35(4): 570 - 576. (in Chinese)
- [18] Goodwin D. Cantera: object-oriented software for reacting flows [EB/OL]. [2014 - 06 - 26]. <http://code.google.com/p/cantera>.