

氧化剂环缝宽度对旋转爆震波传播特性影响的实验

赵明皓¹, 王 可², 朱亦圆¹, 张玉坤¹, 黄忻昱¹, 范 玮¹

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072;

2. 西北工业大学 陕西省航空动力系统热科学重点实验室, 西安 710129)

摘 要: 为了揭示氧化剂环缝宽度对旋转爆震波传播特性的影响, 在凹腔形旋转爆震燃烧室中, 采用环缝-喷孔式喷注器, 燃料和氧化剂分别为乙烯和氧气体积分数为 50% 的富氧空气, 实验研究了氧化剂环缝宽度对旋转爆震波传播模式及传播特性的影响。结果表明: 在不同氧化剂环缝宽度下, 均成功实现了旋转爆震波的稳定传播, 并观察到稳定爆震、周期性振荡和非周期性振荡 3 种模式; 周期性振荡模式的当量比范围随着氧化剂环缝宽度的增加而扩大, 且每个振荡周期包括爆震波解耦、缓燃波加速和爆震波形成 3 个过程; 与稳定爆震模式相比, 在两种振荡模式中, 燃烧波的平均传播速度大幅降低且存在较大的速度波动。

关 键 词: 旋转爆震; 氧化剂环缝宽度; 传播模式; 传播速度; 乙烯

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Experiment on propagation characteristics of rotating detonation waves in different oxidizer inlet slots

ZHAO Minghao¹, WANG Ke², ZHU Yiyuan¹, ZHANG Yukun¹,
HUANG Xinyu¹, FAN Wei¹

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Thermal Sciences in Aeroengine System,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: To investigate the propagation characteristics of rotating detonation waves in different oxidizer inlet slots, experimental study was performed in a cavity-based annular combustor. The slot-orifice impinging injection scheme was utilized. Ethylene and oxygen-enriched air with an oxygen volume fraction of 50% were used as fuel and oxidizer, respectively. The propagation modes and characteristics of the rotating detonation wave were discussed. Experimental results indicated that the rotating detonation waves can propagate steadily, and three propagation modes, i.e., stable detonation mode, periodic oscillation mode, and aperiodic oscillation mode, were observed in different oxidizer inlet slots. The equivalence ratio range of the periodic oscillation mode was expanded as the width of the oxidizer inlet slot increased, and each oscillation cycle included three processes, i.e., decoupling of detonation waves, acceleration of deflagration waves, and regeneration of detonation waves. The average velocity of the

收稿日期: 2021-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(52076181, 52176133); 陕西省创新能力支撑计划项目(2021KJXX-93);

中央高校基本科研业务费项目(3102019ZX024); 西北工业大学博士论文创新基金(CX2021072)

作者简介: 赵明皓(1995—), 男, 博士生, 主要从事爆震燃烧与爆震推进研究。

通信作者: 王可(1986—), 男, 教授, 博士, 主要从事爆震燃烧与爆震推进研究。E-mail: wangk@nwpu.edu.cn

引用格式: 赵明皓, 王可, 朱亦圆, 等. 氧化剂环缝宽度对旋转爆震波传播特性影响的实验[J]. 航空动力学报, 2023, 38(8): 1984-1994. ZHAO Minghao, WANG Ke, ZHU Yiyuan, et al. Experiment on propagation characteristics of rotating detonation waves in different oxidizer inlet slots[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(8): 1984-1994.

combustion waves in the two oscillation modes was significantly lower than that in the stable detonation mode, and there existed significant velocity variations.

Keywords: rotating detonation; oxidizer inlet slot width; propagation mode; propagation velocity; ethylene

旋转爆震发动机(rotating detonation engine, RDE)作为一种新型的动力装置,具有结构简单和热循环效率高等优点,受到国内外的广泛关注并已成为先进航空航天动力领域的研究热点。中国、美国、波兰和新加坡等国家均在积极开展 RDE 的相关研究^[1-2]。

目前,针对 RDE 的研究主要集中在以下 4 个方面:①氧化剂和燃料的喷注器设计^[3-5];②高效起爆方法探索^[6-8];③燃烧室构型优化^[9-12];④尾喷管设计及推力性能分析^[13-15]。其中,氧化剂和燃料的喷注器设计是一个重要的研究方向,在很大程度上决定了能否产生稳定传播的旋转爆震波。相关研究中,常用的喷注器包括喷孔-喷孔式、喷孔-环缝式和同轴离心式等。在气态燃料 RDE 中,通常采用喷孔-环缝式喷注器设计,氧化剂通过环缝进入燃烧室,燃料则通过均匀分布的喷孔进行喷注,以获得较好的掺混效果。该类型喷注器主要设计参数包括氧化剂环缝宽度、燃料喷孔个数、喷孔直径、喷孔和环缝的相对位置等,国内外学者围绕这些设计参数开展了诸多研究^[16-18]。

在 RDE 研究初期,科研人员为获得稳定的旋转爆震波,普遍采用化学反应活性较为活泼且易于起爆的氢气作为燃料,并针对氧化剂环缝宽度这一参数开展了大量的研究。Frolov 等^[17]在外径为 406 mm 的大尺寸环形旋转爆震燃烧室内进行了一系列的实验研究,发现随着氧化剂环缝宽度增加,爆震波波头数量不断减少,由最初的 4 个减少到 1 个,最终变为纵向脉冲爆震。Bluemner 等^[18]针对喷注器设计开展了相关研究,结果表明,增加氧化剂的喷注面积或减小燃料的喷注面积均会导致旋转爆震波的不稳定传播。Rankin 等^[19-20]采用 OH 基化学发光图像技术,在不同氧化剂质量流量和当量比条件下,研究了氧化剂环缝宽度对旋转爆震波传播特性的影响,发现随着氧化剂喷注面积增加,爆震波传播速度有所降低,但对氧化剂供给腔的影响加剧。Zhou 等^[5]在氢气/空气的环形 RDE 中,实验研究了氧化剂环缝宽度对旋转爆震波传播特性的影响,发现随着氧化剂环缝宽度的增加,爆震波压力和速度的稳定性都呈先增大后减小的趋势;其中,在 0.5 mm 的环缝宽度

下,反射波会使新鲜混合物提前点燃,导致的爆震波速度亏损高达 20%。随着研究的进一步深入,科研人员逐渐将目光转到碳氢燃料上,Bykovskii 等^[21]基于环形燃烧室,研究了氧化剂环缝宽度对乙炔/空气旋转爆震波传播过程的影响,结果表明,增加环缝宽度会影响新鲜反应物的掺混过程,导致爆震波传播不稳定。Zhong 等^[4]针对煤油预燃裂解气旋转爆震开展了实验研究,结果表明,在环形燃烧室中,减小氧化剂环缝宽度会增加双波碰撞的发生概率,但对爆震波的传播速度影响较小。

综上,国内外学者通过改变氧化剂流量,主要研究了氢气 RDE 的氧化剂环缝宽度对旋转爆震波传播特性的影响,但在不同当量比下,比较碳氢燃料 RDE 的氧化剂环缝宽度对旋转爆震波传播特性影响的相关研究仍不够充分。此外,凹腔形旋转爆震燃烧室^[22-23]同时兼顾了空筒形燃烧室爆震波传播特性较好^[9-10]和环形燃烧室推力性能较优等特点,具有较好的实际应用前景,但在该燃烧室构型内尚未开展喷注器设计方面的研究。因此,本研究基于凹腔形旋转爆震燃烧室,在总质量流量不变的条件下,改变当量比,研究了氧化剂环缝宽度对旋转爆震波传播模态及传播特性的影响,可为凹腔形 RDE 喷注器设计与优化提供借鉴和参考。

1 实验装置

图 1 为实验系统示意图,包括供给单元、采集与控制单元和旋转爆震燃烧室 3 部分。氧化剂采用氧气体积分数为 50% 的富氧空气,由 4 组气

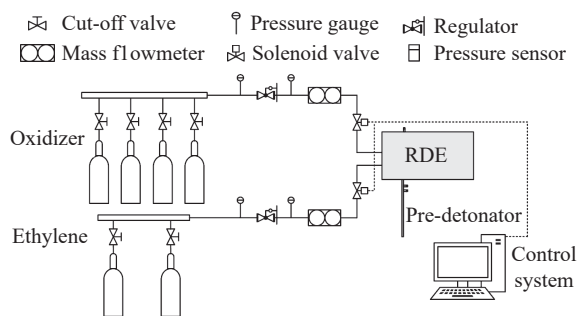


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

瓶并联供给;燃料为乙烯,由两组气瓶并联供给;氧化剂和燃料分别经减压阀、流量计和电磁阀等供给到旋转爆震燃烧室中。

1.1 旋转爆震实验系统

图 2 为旋转爆震燃烧室示意图,燃烧室半径 R_o 为 36 mm、长 L_o 为 81 mm。燃烧室采用喷孔-环缝喷注方式,氧化剂通过环缝喷注,相应的喉道宽度 w 分别为 0.5、0.7 mm 和 0.9 mm,燃料则通过 100 个直径为 0.6 mm 的均布喷孔喷注。燃烧室构型为凹腔形,凹腔长度 L_c 为 58 mm,凹腔

处的内柱直径为 34 mm,相应的燃烧室宽度 R_1 为 19 mm,凹腔出口处的内柱直径为 42 mm,相应的燃烧室宽度 R_2 为 15 mm,即凹腔深度为 4 mm。已有研究表明,尾喷管会影响旋转爆震燃烧室上游的爆震波传播^[15,24],为剥离此影响,本研究未在燃烧室出口处安装尾喷管。采用切向安装的预爆管进行点火,预爆管中的氧化剂和燃料分别为氧气和乙烯。预爆管直径为 6 mm、长为 300 mm,前段安装有长度为 150 mm 的 Shchelkin 螺旋结构,以促进缓燃向爆震的转变。

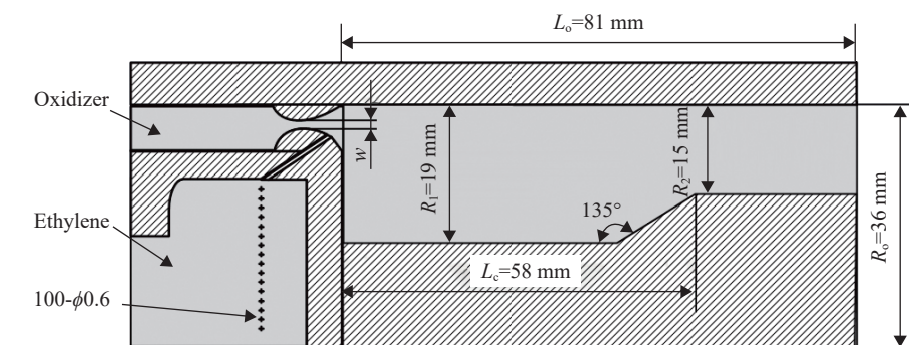


图 2 旋转爆震燃烧室示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the rotating detonation chamber

1.2 数据采集及操作时序

如图 3 所示,利用高频压电式压力传感器和压阻式传感器分别对旋转爆震波的峰值压力和平均压力进行测量。其中,高频压电式压力传感器共 5 个,测量精度为 $\pm 3\%$,3 个传感器(P1、P2、P3)安装在燃烧室外环,周向间隔为 120° ,以监测燃烧室内旋转爆震波的峰值压力,所测压力分别记为 p_1 、 p_2 、 p_3 (空间分布位置见图 3);其余 2 个传感器(Pt1、Pt2)安装在预爆管出口处,用以监测预爆管中传出的爆震波压力,所测压力记为 p_{t1} 、 p_{t2} ;压阻式传感器共 3 个(Po、Pf、

Pc),分别监测氧化剂供给腔、燃料供给腔和燃烧室的压力,所测压力记为 p_o 、 p_f 、 p_c ,测量精度为 $\pm 1\%$ 。所有测量数据,均通过采样频率为 1 MHz 的 16 通道采集仪进行采集。

实验中,首先开启数据采集与控制单元,并向燃烧室内供给氧化剂和燃料。待供给稳定后,预爆管内开始填充反应物,随后触发点火系统形成缓燃波。缓燃波经 Shchelkin 螺旋结构加速形成爆震波并传入旋转爆震燃烧室中,产生旋转爆震波。在 350 ms 的燃烧过程之后,切断氧化剂和燃料的供给,同时关闭数据采集与控制单元,完成

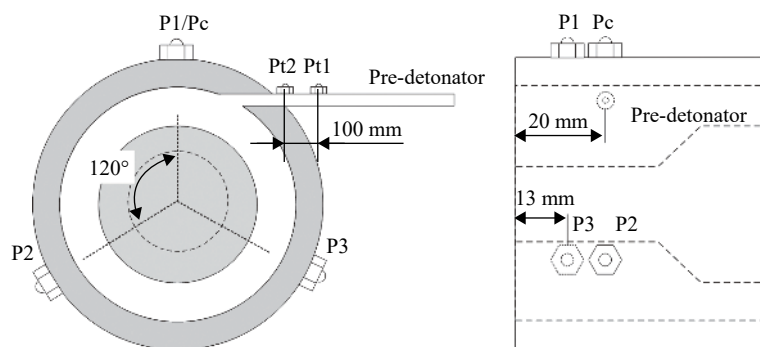


图 3 压力传感器分布

Fig. 3 Distribution of the pressure transducers

单次点火实验。

2 结果分析与讨论

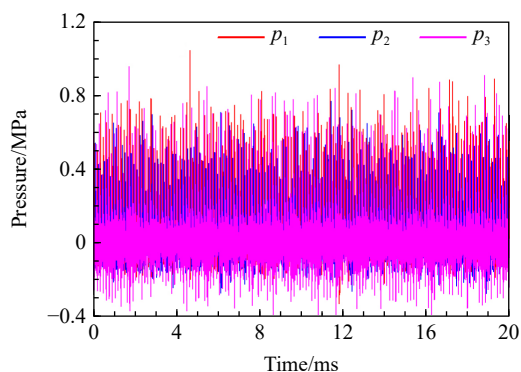
固定反应物(富氧空气和乙烯)的总质量流量为 (198.5 ± 5) g/s, 调节全局当量比, 研究了氧化剂环缝宽度对旋转爆震波传播模式及其传播特性的影响。

2.1 旋转爆震波传播模式

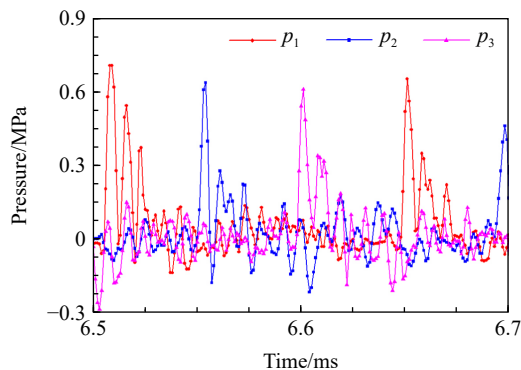
实验中, 随着全局当量比由 0.27 增加到 1.17, 燃烧室内燃烧波的传播模式依次为稳定爆震模式(爆震波在燃烧室内稳定传播)、周期性振荡模式(爆震波和缓燃波在燃烧室内交替出现, 压力信号呈现周期性振荡)和非周期性振荡模式(燃烧波传播状态不稳定, 压力信号的振荡具有随机性)。下面以氧化剂环缝宽度为 0.7 mm 的实验结果为例, 对上述 3 种旋转爆震波传播模式进行详细分析。

2.1.1 稳定爆震模式

当氧化剂和乙烯的质量流量分别为 187.0 g/s 和 7.8 g/s 时, 对应的全局当量比为 0.27, 高频压力传感器 P1、P2 和 P3 测得的压力信号如图 4 所示。可以看出, 燃烧波的压力峰值分布均匀, 在 0.7 MPa 左右波动, 且 P1 和 P3 测得的压力峰值与 P2 接近, 表明 3 个压力传感器的测量位置都在爆震波高度范围内, 即爆震波高度大于 20 mm。由压力信号



(a) 压力波形



(b) 压力波形局部放大图

图 4 稳定爆震模式的压力波形

Fig. 4 Pressure profiles measured at the stable detonation mode

局部放大图(图 4(b))可知, 爆震波上升沿仅用时 $4 \sim 6 \mu\text{s}$, 且上升沿波形较为陡峭。综上, 该工况下燃烧室内爆震波的传播状态较为稳定, 是典型的稳定爆震模式。此外, 通过压力传感器 P1~P3 的周向安装位置及测得的爆震波压力峰值时序($p_1 \rightarrow p_2 \rightarrow p_3$), 可知爆震波沿逆时针方向传播。

燃烧室内旋转爆震波的瞬时传播速度 v_i 可以用式(1)进行计算

$$v_i = \frac{2R_o\pi}{\Delta t_i} \quad (1)$$

式中 Δt_i 为同一传感器测得的相邻两个燃烧波压力峰值之间的时间间隔(此处采用压力传感器 P1 的数据)。如图 5 所示, 爆震波的瞬时传播速度在 $1480 \sim 1650$ m/s 之间波动, 平均值 $\bar{v}$ 为 1580.4 m/s。利用 CEA(chemical equilibrium and application)程序可计算该工况下爆震波的理论 C-J(Chapman-Jouguet)速度, 计算的初始条件设置为: 氧化剂体积分数为 50% 的富氧空气, 燃料为乙烯, 环境压力为 0.1 MPa, 环境温度为 278 K, 当量比为 0.27, 计算得到的爆震波理论 C-J 速度为 1601.4 m/s。假设在该工况下, 燃烧室内存在两个沿同向传播的旋转爆震波, 则每个爆震波的传播速度约为平均传播速度的 1/2, 即 790.2 m/s, 低于 1/2 的 C-J 爆震速度, 显然不正确。因此, 综合燃烧波的压力峰值分布和传播速度可知, 燃烧室内只存在一个爆震波, 传播速度为 1580.4 m/s, 约为理论值的 98.7%, 即速度亏损 1.3%。旋转爆震波在燃烧室内沿周向传播, 受侧向膨胀和边界层效应的影响, 产生一定的速度亏损。需要指出, 受掺混过程的影响, 氧化剂和燃料的全局当量比与实际参与爆震燃烧的局部当量比存在一定差异, 故实际参与爆震燃烧的当量比高于全局当量比, 相应的爆震波速度亏损高于 1.3%。

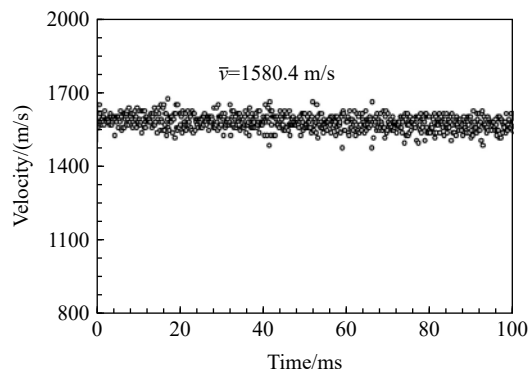


图 5 稳定爆震模式的传播速度分布

Fig. 5 Propagation velocities distribution of the stable detonation mode

对压力传感器 P1 测得的压力信号进行短时傅里叶变换(short time fourier transform, STFT)和快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT),结果如图 6 所示。可以看出,旋转爆震波在 0~100 ms 内的频率分布较为稳定,相应的 1 阶主频 f_1 为 6 950 Hz,

利用式(2)计算得到的爆震波速度 v_1 为 1 572.1 m/s,与平均传播速度的相对误差为 0.53%,一致性较好。进一步说明在该工况下,爆震波的传播状态较为稳定。

$$v_1 = 2R_0 f_1 \pi \quad (2)$$

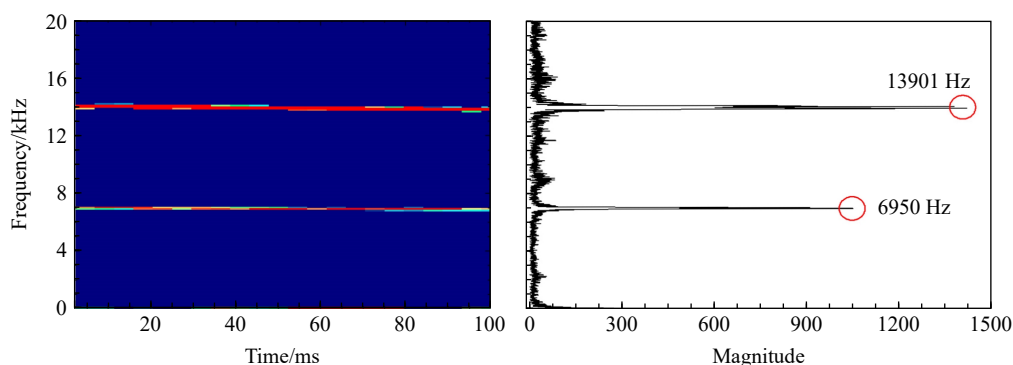


图 6 稳定爆震模式的 STFT 和 FFT 结果

Fig. 6 STFT and FFT results of the stable detonation mode

在稳定爆震模式中,旋转爆震波起始过程的压力波形如图 7 所示。将预爆管出口处测得压力信号的时刻记为 t_1 ,将燃烧室内形成稳定旋转爆震波的时刻记为 t_2 。根据燃烧波的峰值压力和传播速度两方面综合判断旋转爆震波是否稳定传播,并利用式(3)计算爆震波的建立时间 Δt 。当前工况旋转爆震波的建立时间为 2.63 ms。需要指出,图 7 中压力传感器 Pt1 测得的爆震波压力峰值为 3.9 MPa 的区域接近 0.15 ms,是由于采集仪测量上限和下限较小所导致。其中,采集仪的测压范围为 ± 10 V,压力传感器的输出信号经电荷放大器后为 2.56 MPa/V,即采集仪的测量范围为 ± 3.9 MPa,当传感器测量到的压力大于 3.9 MPa 时,测得的信号均保持 3.9 MPa 不变。因此,预爆管内存在 0.15 ms 的时间段,压力恒定为 3.9 MPa。虽然采

集仪测得的压力峰值上限为 3.9 MPa,但当旋转爆震燃烧室稳定工作时,爆震波的压力峰值小于 3 MPa,故当前设备对旋转爆震波压力峰值的测量不造成影响。

$$\Delta t = t_2 - t_1 \quad (3)$$

当预爆管内的爆震波传入燃烧室后,迅速形成一道压力峰值接近 3.8 MPa 的爆震波。原因在于,燃烧室内氧化剂和燃料的供给在预爆管点火前已经开始,此时,燃烧室内积累了大量的新鲜反应物,相应的填充高度比旋转爆震波稳定传播时高^[25]。因此,当预爆管内的爆震波引燃积累的反应物后,形成的爆震波压力峰值较高。受该爆震波强度的影响,新鲜反应物无法填充到燃烧室内,爆震波发生解耦,退化为缓燃波。随后缓燃波逐渐加速,最终在燃烧室内形成了稳定传播的旋转爆震波。

2.1.2 周期性振荡模式

当氧化剂和乙烯的质量流量分别为 169.5 g/s 和 24.5 g/s 时,对应的全局当量比为 0.93,高频压力传感器 P1、P2 和 P3 测得的压力信号如图 8 所示。可以看出,3 个压力传感器测得的燃烧波压力峰值高低起伏,具有周期性振荡的趋势。在一个振荡周期内,压力峰值最高达到 2.5 MPa,远高于稳定爆震模式的压力峰值,且上升沿较为陡峭,即此时已经形成了充分发展的爆震波。然而,同一振荡周期内,压力峰值的最低值仅为 0.5 MPa,

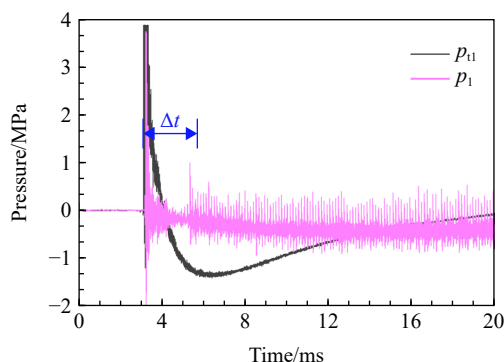


图 7 稳定爆震模式的起始过程压力波形

Fig. 7 Pressure profiles of the initiation process measured at the stable detonation mode

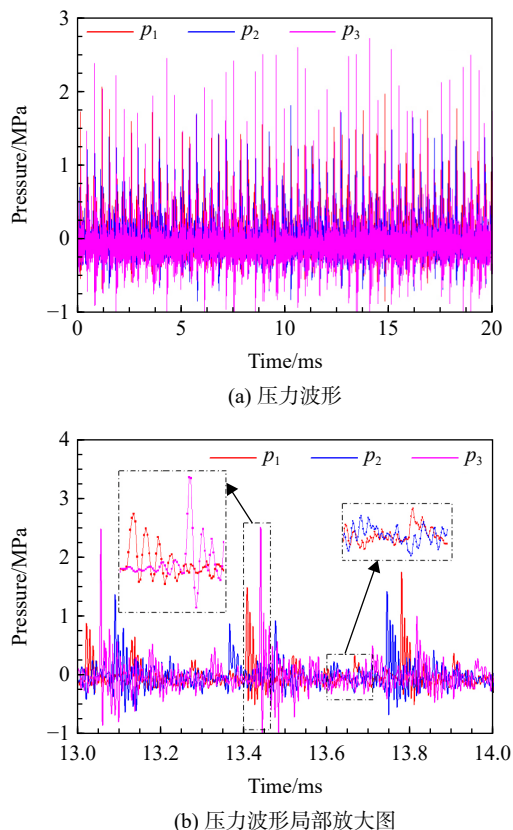


图8 周期性振荡模式的压力波形

Fig. 8 Pressure profiles measured at the periodic oscillation mode

且上升沿较为平缓,可认为爆震波已经解耦。综上,在周期性振荡模式中,存在爆震波解耦、缓燃波加速和爆震波形成3个过程。

实验中,固定总反应物质量流量保持不变,在当量比增加时,乙烯质量流量大幅增加,而氧化剂质量流量下降。因此,氧化剂的填充高度下降,不利于稳定旋转爆震波的形成,即爆震波易发生解耦,变为缓燃波。另一方面,随着氧化剂质量流量的下降,氧化剂供给腔的供给压力下降。此时,爆震波产生的斜激波更易反传至供给腔,影响氧化剂的喷注,同样不利于旋转爆震波的传播。爆震波解耦形成缓燃波后,燃烧波的压力下降,对供给腔的影响时间减小,新鲜反应物更易填充到燃烧室内,进而填充高度增加,爆震波更易形成。此外,由于填充时间较稳定爆震模式更长,更多的新鲜反应物在燃烧室头部积累,故形成的爆震波压力峰值较稳定爆震模式更高,甚至达到2.5 MPa。此时,爆震波的高压力峰值对供给腔的影响更加剧烈,严重阻塞新鲜反应物的供给,爆震波发生解耦,形成缓燃波。上述过程在燃烧室内不断重复,最终形成了周期性振荡模式。

在周期性振荡模式中,燃烧波的瞬时传播速度如图9所示。可以看出,瞬时传播速度在900~2400 m/s之间波动,速度平均值 $\bar{v}$ 为1683.0 m/s。在一个振荡周期内,存在缓燃波和爆震波交替,即燃烧波以爆震波的形式传播时,瞬时传播速度较高,可达2000 m/s;而当燃烧波转变为缓燃波时,传播速度急剧下降,低于1500 m/s。因此,在周期性振荡模式中,瞬时传播速度变化剧烈。利用CEA程序,求得同工况下,旋转爆震波的理论C-J速度为2085.9 m/s。可见旋转爆震波的速度亏损约为19.3%,远高于稳定爆震模式。

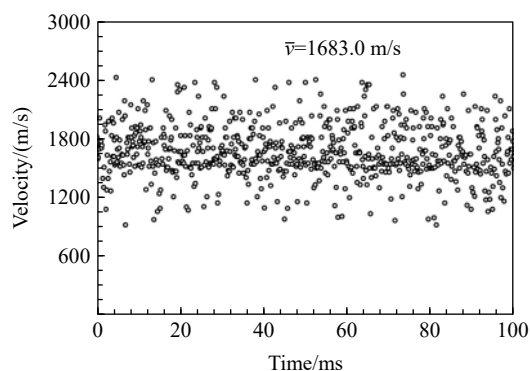


图9 周期性振荡模式的传播速度分布

Fig. 9 Propagation velocities distribution of the periodic oscillation mode

对压力传感器P1测得的压力信号进行短时傅里叶变换和快速傅里叶变换,结果如图10所示。可以看出,与稳定爆震模式相比,旋转爆震波的频率分布较乱,其中,1阶主频为7858 Hz,相应的爆震波速度为1776.5 m/s。需要指出,频谱图中存在1个2898 Hz的频率峰值,且相应的FFT幅值较高,这是周期性振荡的结果,即在燃烧室中,每秒存在2898个振荡周期,每个振荡周期约为0.345 ms,进一步说明燃烧室内存在较为规律的周期性振荡。

在周期性振荡模式中,旋转爆震波起始过程的压力波形如图11所示。由于燃烧室内没有形成稳定的旋转爆震波,故将周期振荡开始的时刻记为 t_2 。可以看出,在该工况下,周期性振荡模式的建立时间 Δt 比稳定爆震模式长,约为7.66 ms。

2.1.3 非周期性振荡模式

当氧化剂和乙烯的质量流量分别为165.7 g/s和29.1 g/s时,对应的全局当量比为1.13,高频压力传感器P1、P2和P3测得的压力信号如图12所示。可以看出,3个压力传感器测得的燃烧波

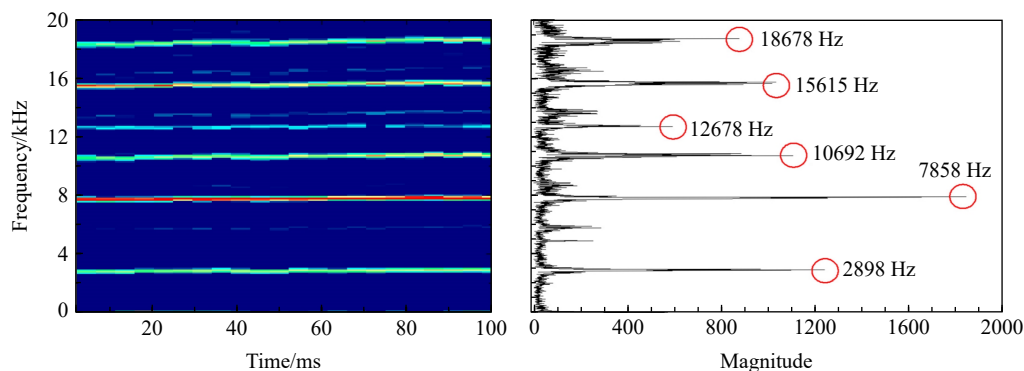


图 10 周期性振荡模式的 STFT 和 FFT 结果

Fig. 10 STFT and FFT results of the periodic oscillation mode

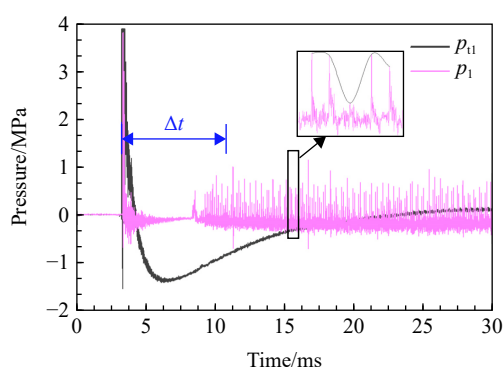
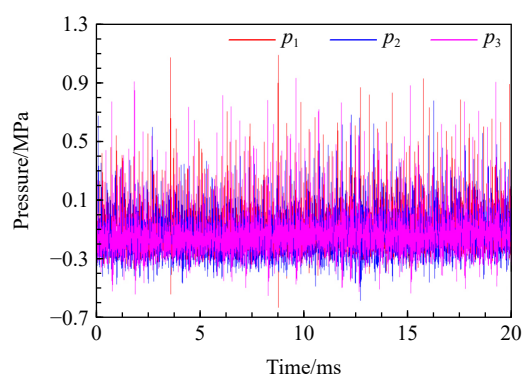


图 11 周期性振荡模式的起始过程压力波形

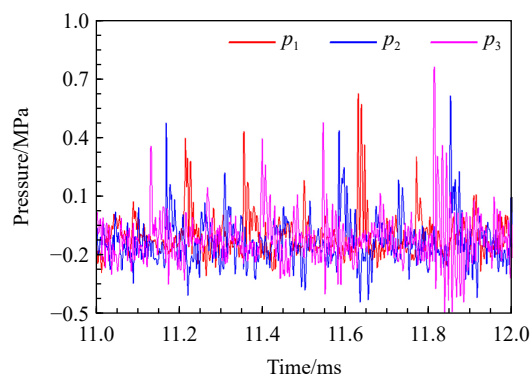
Fig. 11 Pressure profiles of the initiation process measured at the periodic oscillation mode

压力信号具有较大的波动且未呈现周期性特点;此外,压力峰值仅为 0.4 MPa 左右,远低于周期性振荡模式,故将该模式定义为非周期性振荡模式。原因包括,氧化剂和燃料以非预混的形式供给到燃烧室中,混合效果不好,虽然在当前工况中,全局当量比为 1.13,但实际参与爆震燃烧的局部当量比可能远高于 1.13,故反应物的化学反应活性相较于周期性振荡模式降低,不易于形成旋转爆震波,进而导致燃烧波的压力峰值较低;同样,随着当量比的增加,氧化剂的质量流量和供给压力进一步减小,不利于新鲜反应物的填充,爆震波易解耦形成缓燃波。虽然缓燃波后的新鲜反应物填充高度增加,但受限於化学反应活性的降低,形成的爆震波强度较低,峰值压力低于周期性振荡模式,对填充高度影响较小。因此,燃烧波的传播状态不再具有周期性,最终形成了非周期性振荡模式。

在非周期性振荡模式中,燃烧波的瞬时传播速度如图 13 所示。可以看出,瞬时传播速度在 1 500~1 800 m/s 之间波动,速度平均值 $\bar{v}$ 为 1 650.4 m/s。



(a) 压力波形



(b) 压力波形的局部放大图

图 12 非周期性振荡模式的压力波形

Fig. 12 Pressure profiles measured at the aperiodic oscillation mode

燃烧波速度波动程度低于周期性振荡模式,原因在于,受化学反应活性影响,形成的爆震波强度较低,对反应物供给影响的时间较为短暂,故当爆震波解耦后,燃烧室内的燃烧波仍能维持高速传播,即燃烧波传播速度降低程度较小,进而在整个燃烧过程中,燃烧波具有相对较小的速度波动。旋转爆震波的理论 C-J 速度为 2 162.0 m/s,速度亏损进一步增加,高达 23.7%。这是因为在该模式中,爆震波峰值压力比其他两种模式低,即

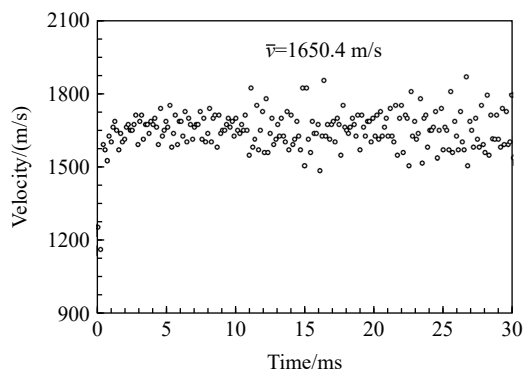


图 13 非周期性振荡模式的传播速度分布

Fig. 13 Propagation velocities distribution of the aperiodic oscillation mode

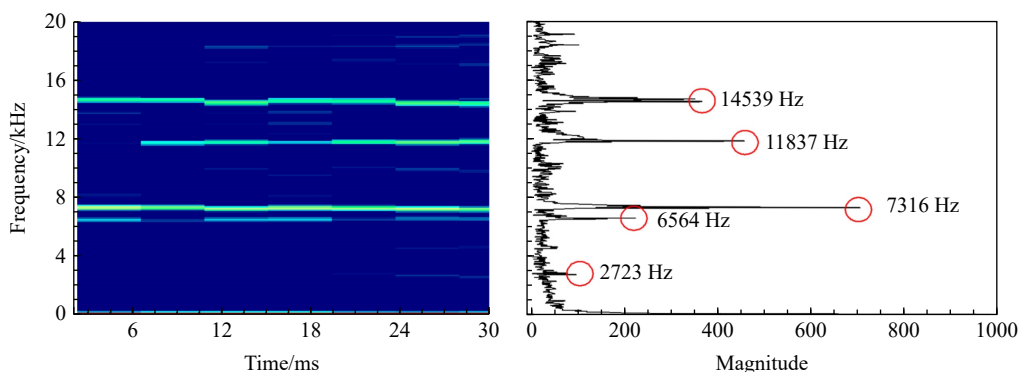


图 14 非周期性振荡模式的 STFT 和 FFT 结果

Fig. 14 STFT and FFT results of the aperiodic oscillation mode

在非周期性振荡模式中, 旋转爆震波起始过程的压力波形如图 15 所示。可以看出, 燃烧室内存在一个长达 301.01 ms 的缓燃燃烧阶段, 期间未建立旋转爆震波, 进一步证明此时燃烧室内的局部当量比不利于旋转爆震波的形成和传播。随着缓燃燃烧的进行, 燃烧室内温度逐渐提高, 相应的新鲜反应物化学反应活性提高, 最终燃烧室内形成了非周期性振荡, 整体建立时间高达 303.32 ms,

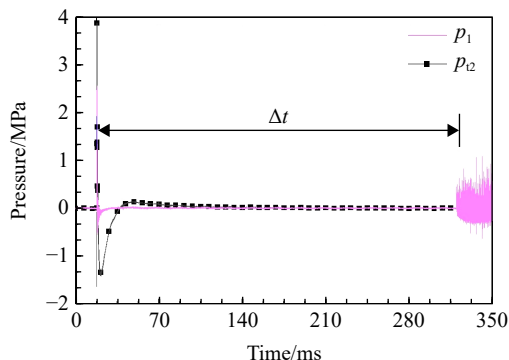


图 15 非周期性振荡模式的起始过程压力波形

Fig. 15 Pressure profiles of the initiation process measured at the aperiodic oscillation mode

爆震波发展不充分, 相应的速度亏损较大。

对压力传感器 p_1 测得的压力信号进行傅里叶变换, 结果如图 14 所示。可以看出, 旋转爆震波频率分布的混乱程度介于稳定爆震模态和周期性振荡模态之间。其中, 1 阶主频为 7 316 Hz, 相应的爆震波速度为 1 654.0 m/s, 与平均瞬时传播速度接近; 在 1 阶主频下方还伴随着 1 个次主频, 为 6 564 Hz, 相应的爆震波速度为 1 484.7 m/s, 说明该模态下爆震波传播速度具有一定的波动; 周期性振荡频率为 2 723 Hz, 但 FFT 的幅值较低, 即周期性不明显。进一步说明在该模态中, 压力信号不具有明显的周期性, 燃烧室内发生非周期性振荡。

远高于其他工况。

2.2 旋转爆震波传播特性

在 3 种氧化剂环缝宽度下, 随着当量比的增加, 燃烧室内依次出现稳定爆震模态、周期性振荡模态和非周期性振荡模态, 如图 16 所示。可以看出, 当氧化剂环缝宽度为 0.5 mm 时, 稳定爆震模态的当量比范围为 0.27~0.85, 在当量比为 0.916 附近, 爆震波以周期性振荡模态传播; 当氧化剂环缝宽度为 0.7 mm 时, 稳定爆震模态的当量比范围为 0.27~0.85, 周期性振荡模态的当量比范围扩大, 为 0.87~0.97; 当氧化剂环缝宽度增加至 0.9 mm 时, 稳定爆震模态的当量比范围缩小, 仅为 0.28~0.65, 而周期性振荡模态的当量比范围进一步扩大, 为 0.74~1.02。可见, 增加氧化剂环缝宽度有利于周期性振荡模态的形成, 对旋转爆震燃烧室的稳定工作带来不利影响。原因在于, 增加环缝宽度会降低氧化剂填充速度, 相应的填充高度亦降低, 抵御侧向膨胀的能力下降, 不利于稳定爆震波的传播; 此外, 受氧化剂填充速度的影响, 燃料和氧化剂的掺混效果下降, 同样不利于稳定爆震波的产生和传播。

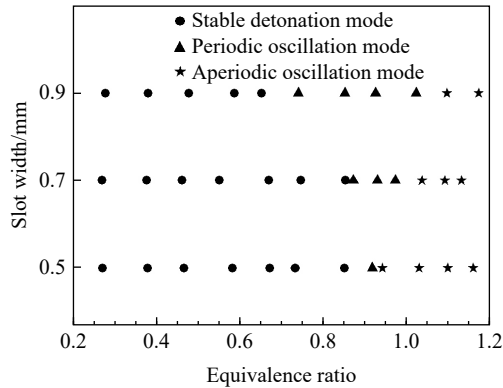


图 16 不同传播模式的工作范围

Fig. 16 Operating ranges of different propagation modes

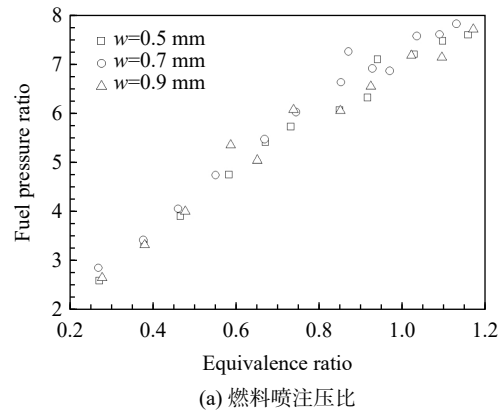
前人研究表明^[5], 氧化剂和燃料供给腔压力与燃烧室室压的比值会影响旋转爆震波的传播特性, 故定义燃料喷注压比 $R_{p,rf}$ 和氧化剂喷注压比 $R_{p,ro}$, 如式(4)和式(5)所示。

$$R_{p,rf} = \frac{p_f}{p_c} \quad (4)$$

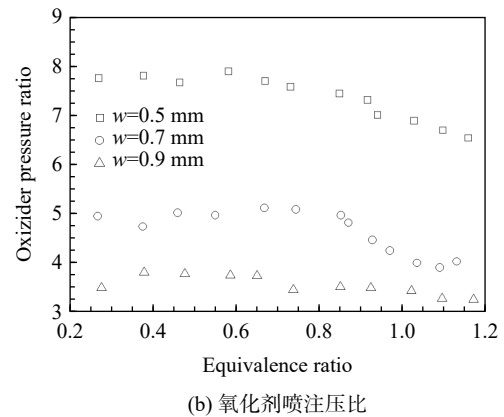
$$R_{p,ro} = \frac{p_o}{p_c} \quad (5)$$

式中 p_c 为燃烧室室压, p_f 为燃料供给腔压力, p_o 为氧化剂供给腔压力。喷注压比随当量比的变化如图 17 所示。可以看出, 燃料喷注压比随当量比增加呈线性增加的趋势。原因在于, 实验中氧化剂和燃料的总供给流量保持不变, 增加当量比时, 需要向燃烧室内供给更多的燃料, 故燃料喷注压力相应增加。在同一当量比条件下, 改变氧化剂环缝宽度对燃料喷注的影响较小, 即燃料喷注压比近似相等。然而, 环缝宽度的改变对氧化剂喷注压比影响较大, 随着氧化剂环缝宽度由 0.5 mm 增加到 0.9 mm, 喷注压比相应的由 7 降低到 3.5 左右, 这正是周期性振荡模式当量比范围变化产生的原因。在环缝宽度为 0.5 mm 时, 氧化剂喷注压比高达 7, 即氧化剂供给腔压力远高于燃烧室室压。此时, 旋转爆震波在沿燃烧室周向传播时, 受供给腔高压的影响, 产生的斜激波难以进入供给腔内, 加之氧化剂环缝宽度较窄, 仅为 0.5 mm, 进一步加剧了斜激波向供给腔传播的难度。因此, 旋转爆震波对氧化剂的填充影响较小, 爆震波传播状态较为稳定。随着环缝宽度的增加, 氧化剂供给腔压力降幅较大, 旋转爆震波传播时产生的斜激波极易影响氧化剂的填充, 减小了新鲜反应物的填充时间, 使得供给恢复时间大幅增加, 不利于旋转爆震波的传播, 进而导致爆震波解耦变为缓燃波。缓燃波的压力较小, 新鲜反应物可以

填充到燃烧室内, 为爆震波的形成奠定了基础。缓燃波和爆震波交替出现, 燃烧室内形成了周期性振荡模式。需要指出, 在环缝宽度一定时, 稳定爆震模式的氧化剂喷注压比要比其他两种模式高。这是因为在稳定爆震模式中, 燃烧室内始终有爆震波传播, 阻塞了氧化剂的填充, 此时环缝喉道壅塞, 相应的喷注压比较高。在两种振荡模式中, 燃烧室内爆震波和缓燃波交替出现, 爆震波造成环缝喉道壅塞, 而缓燃波对供给腔的影响较小, 综合来看, 氧化剂喷注压比降低。



(a) 燃料喷注压比



(b) 氧化剂喷注压比

图 17 喷注压比随当量比的变化

Fig. 17 Injection pressure ratio with equivalent ratio

燃烧波的平均传播速度随当量比的变化如图 18 所示。可以看出, 在稳定爆震模式中, 平均传播速度随当量比的增加呈先增加后减小的趋势, 在当量比为 0.7 附近传播速度最高, 且高于理论 C-J 速度。这可能与局部当量比有关, 在当前喷注构型下, 氧化剂和燃料的混合效果不理想, 在全局当量比为 0.7 时, 实际参与爆震燃烧的局部当量比可能接近于 1, 故传播速度较高。这亦可从爆震波平均传播速度和理论 C-J 速度的对比中得到印证, 在当量比为 0.7 时, 平均传播速度接近化学恰当比条件下的理论 C-J 速度。在同一当量比下, 氧化剂环缝宽度对传播速度的影响不明显,

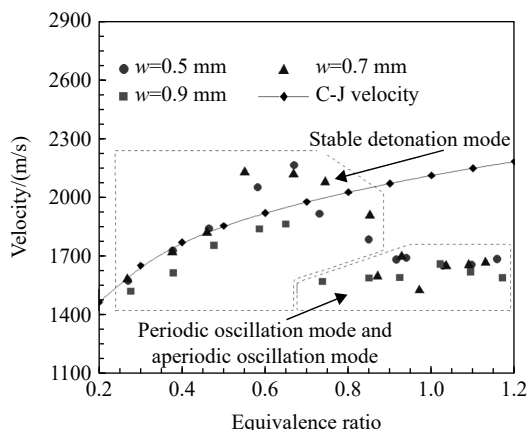


图 18 3 种模式的平均传播速度

Fig. 18 Average propagation velocities of three modes

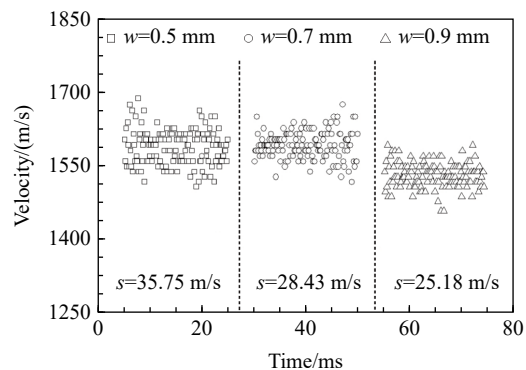
其中, 环缝宽度为 0.5 mm 和 0.7 mm 时的爆震波传播速度比环缝宽度为 0.9 mm 时的高。可能的原因在于, 环缝宽度为 0.9 mm 时, 氧化剂供给压力较低, 爆震波经过后需要经过较长时间, 新鲜反应物才能供给到燃烧室内。因此, 反应物的填充时间较为短暂, 不利于氧化剂和燃料的混合, 进而爆震波传播速度较低。当燃烧室的工作模式由稳定爆震模式转为两种振荡模式时, 燃烧波的平均传播速度大幅降低。由于在振荡模式中, 燃烧室内爆震波和缓燃波交替, 缓燃波的传播速度较低, 故降低了平均传播速度。在稳定爆震模式中, 爆震波的平均传播速度接近甚至高于理论 C-J 速度。原因在于, 一方面, 全局当量比和实际参与爆震燃烧的局部当量比存在一定的差异, 故用全局当量比来衡量爆震波的速度亏损情况, 具有较大的误差; 另一方面, 燃烧室外环的曲率会增加爆震波的强度, 导致压力传感器间接测得的爆震波速度偏高。此外, 在两种振荡模式中, 爆震波的速度亏损大幅增加, 高达 26.9%, 进一步说明这两种模式的速度较低。

为进一步分析燃烧波的传播特性, 利用式(6)计算燃烧波传播速度的标准差 s

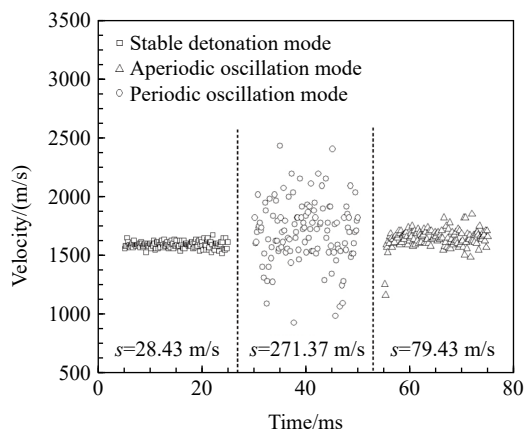
$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - v_{ave})^2}{n-1}} \quad (6)$$

式中 n 为燃烧波通过压力传感器 p_1 的次数, v_{ave} 为爆震波的平均传播速度。为避免随机误差, 取 20 ms 内的数据作为样本总体, 传播速度标准差分布如图 19 所示。可以看出, 环缝宽度对燃烧波传播速度影响较小, 标准差在 30 m/s 左右。而不同传播模式对旋转爆震波传播速度的影响较大,

其中, 稳定爆震模式的标准差为 28.43 m/s, 周期性振荡模式的标准差为 271.37 m/s, 非周期性振荡模式的标准差为 79.43 m/s。原因在于, 对于稳定爆震模式, 爆震波传播较为稳定, 速度波动较小; 而周期性振荡模式, 爆震波和缓燃波交替出现, 速度波动较大; 非周期性振荡模式中, 燃烧室内的燃烧波传播不稳定, 且爆震波和缓燃波并非交替出现, 相应的燃烧波压力较低, 速度扰动较小。



(a) 不同环缝宽度(当量比为0.27)



(b) 不同传播模式(w=0.7 mm)

图 19 传播速度标准差分布

Fig. 19 Standard deviations distribution of the propagation velocity

3 结 论

采用乙烯和氧气体积分数为 50% 的富氧空气, 在氧化剂和乙烯总质量流量为 (198.5 ± 5) g/s, 当量比为 0.27~1.17 的供给条件下, 基于凹腔形旋转爆震燃烧室, 研究了 3 种氧化剂环缝宽度对爆震波传播模式及其传播特性的影响, 得到以下结论:

1) 在 3 种氧化剂环缝宽度下, 成功实现了旋转爆震波的稳定传播, 并观察到 3 种传播模式, 即稳定爆震模式、周期性振荡模式和非周期性振荡模式。改变氧化剂环缝宽度对稳定旋转爆震波传播速度及波动程度影响较小。

2) 周期性振荡模态的当量比范围随着氧化剂环缝宽度的增加而扩大。在当量比为 0.93 时, 相应的振荡周期为 2 898 Hz, 且每个振荡周期包括爆震波解耦、缓燃波加速和爆震波形成 3 个过程。

3) 在稳定爆震模态中, 受当量比影响, 3 种环缝宽度下的爆震波平均传播速度均随当量比的增加呈先增加后减小的趋势, 在当量比为 0.7 附近传播速度最高。与稳定爆震模态相比, 在两种振荡模态中, 燃烧波的平均传播速度大幅降低且存在较大的速度波动。

参考文献:

- [1] 刘世杰. 连续旋转爆震波结构、传播模态及自持机理研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2012.
LIU Shijie. Investigations on the structure, rotating mode and lasting mechanism of continuous rotating detonation wave[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)
- [2] 王健平, 姚松柏. 连续爆轰发动机原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [3] ANDRUS I Q, POLANKA M D, KING P I, et al. Experimentation of premixed rotating detonation engine using variable slot feed plenum[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2017, 33(6): 1448-1458.
- [4] ZHONG Yepan, WU Yun, JIN Di, et al. Effect of channel and oxidizer injection slot width on the rotating detonation fueled by pre-combustion cracked kerosene[J]. *Acta Astronautica*, 2019, 165: 365-372.
- [5] ZHOU Shengbing, MA Hu, LI Shuai, et al. Experimental study of a hydrogen-air rotating detonation engine with variable air-inlet slot[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(24): 11253-11262.
- [6] FOTIA M, HOKE J, SCHAUER F. Experimental ignition characteristics of a rotating detonation engine under backpressured conditions[R]. AIAA 2015-0632, 2015.
- [7] MA Zhuang, ZHANG Shujie, LUAN Mingyi, et al. Experimental research on ignition, quenching, reinitiation and the stabilization process in rotating detonation engine[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(39): 18521-18529.
- [8] PENG Lei, WANG Dong, WU Xiaosong, et al. Ignition experiment with automotive spark on rotating detonation engine[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(26): 8465-8474.
- [9] LIN Wei, ZHOU Jin, LIU Shijie, et al. An experimental study on CH_4/O_2 continuously rotating detonation wave in a hollow combustion chamber[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2015, 62: 122-130.
- [10] TANG Xinmeng, WANG Jianping, SHAO Yetao. Three-dimensional numerical investigations of the rotating detonation engine with a hollow combustor[J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162(4): 997-1008.
- [11] 李宝星, 许桂阳, 舒慧明, 等. 燃烧室轴向和周向长度对气液两相旋转爆轰特性的影响[J]. *航空动力学报*, 2020, 35(8): 1601-1611.
LI Baoxing, XU Guiyang, SHU Huiming, et al. Influence of axial and circumferential lengths of combustion chamber on gas-liquid two-phase rotating detonation characteristics[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2020, 35(8): 1601-1611. (in Chinese)
- [12] PENG Haoyang, LIU Weidong, LIU Shijie, et al. The effect of cavity on ethylene-air continuous rotating detonation in the annular combustor[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(26): 14032-14043.
- [13] SCHWER D A, BROPHY C M, KELSO R H. Pressure characteristics of an aerospike nozzle in a rotating detonation engine[R]. AIAA 2018-4968, 2018.
- [14] SHAO Yetao, LIU Meng, WANG Jianping. Continuous detonation engine and effects of different types of nozzle on its propulsion performance[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2010, 23(6): 647-652.
- [15] ZHU Yiyuan, WANG Ke, WANG Zhicheng, et al. Study on the performance of a rotating detonation chamber with different aerospike nozzles[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2020, 107: 106338.1-106338.10.
- [16] WANG Yuhui, LE Jialing. Rotating detonation engines with two fuel orifice schemes[J]. *Acta Astronautica*, 2019, 161: 262-275.
- [17] FROLOV S M, AKSENOV V S, IVANOV V S, et al. Large-scale hydrogen-air continuous detonation combustor[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(3): 1616-1623.
- [18] BLUEMNER R, BOHON M D, NGUYEN H Q, et al. Influence of reactant injection parameters on RDC mode of operation[R]. Reston, US: AIAA Scitech Forum, 2019.
- [19] RANKIN B A, CODONI J R, CHO K Y, et al. Investigation of the structure of detonation waves in a non-premixed hydrogen-air rotating detonation engine using mid-infrared imaging[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(3): 3479-3486.
- [20] RANKIN B A, RICHARDSON D R, CASWELL A W, et al. Chemiluminescence imaging of an optically accessible non-premixed rotating detonation engine[J]. *Combustion and Flame*, 2017, 176: 12-22.
- [21] 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.
- [22] LIU Shijie, PENG Haoyang, LIU Weidong, et al. Effects of cavity depth on the ethylene-air continuous rotating detonation[J]. *Acta Astronautica*, 2020, 166: 1-10.
- [23] PENG Haoyang, LIU Shijie, LIU Weidong, et al. Enhancement of ethylene-air continuous rotating detonation in the cavity-based annular combustor[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2021, 115: 106842.1-106842.10.
- [24] ZHANG Hailong, LIU Weidong, LIU Shijie. Experimental investigations on H_2 /air rotating detonation wave in the hollow chamber with Laval nozzle[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(5): 3363-3370.
- [25] 赵明皓, 王可, 王致程, 等. 点火方式对空桶型旋转爆震燃烧室起爆特性的影响[J]. *航空学报*, 2022, 43(1): 124870.1-124870.12.
ZHAO Minghao, WANG Ke, WANG Zhicheng, et al. Effects of ignition on initiation characteristics of hollow rotating detonation combustor[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(1): 124870.1-124870.12. (in Chinese)

(编辑: 王碧琨)