

燃烧室宽度对煤油旋转爆震波传播模态的影响^{*}

王致程¹, 严 宇², 王 可^{1,3}, 赵明皓¹, 朱亦圆¹, 范 玮¹

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710129;

2. 西安航天动力研究所 液体火箭发动机技术重点实验室, 陕西 西安 710100;

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

摘 要: 为研究基于煤油的旋转爆震波的传播特性, 以煤油和含氧量40%的富氧空气作为燃料和氧化剂, 对基于燃烧室外径均为100mm的无内柱燃烧室和燃烧室宽度分别为32, 26, 20mm的环形燃烧室开展了对比实验。不同氧化剂流量下, 共观察到四种燃烧波模态, 分别为爆燃模态、准稳定爆震模态、双波对撞模态和稳定旋转爆震模态。无内柱燃烧室中, 氧化剂流量较低时无法维持旋转爆震波的稳定传播, 出现爆燃模态和准稳定爆震模态; 当氧化剂流量超过154g/s时, 可以得到稳定旋转爆震模态, 旋转爆震波峰值压力超过0.7MPa, 平均传播速度为1750m/s。对于环形燃烧室, 旋转爆震波的传播速度仅为1245~1465m/s, 明显低于无内柱燃烧室中的传播速度。随环形燃烧室宽度减小, 对应旋转爆震波模态的工况范围更窄, 传播速度更慢。在本研究对应的工况范围内, 增大燃烧室宽度, 更有利于基于煤油的旋转爆震波的稳定传播。

关键词: 旋转爆震; 煤油; 无内柱燃烧室; 环形燃烧室; 传播模态

中图分类号: V231.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2021) 04-0842-09

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 200256

Effects of Combustor Width on Propagation Modes of Rotating Detonation Waves Utilizing Liquid Kerosene

WANG Zhi-cheng¹, YAN Yu², WANG Ke^{1,3}, ZHAO Ming-hao¹, ZHU Yi-yuan¹, FAN Wei¹

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China;

2. Science and Technology on Liquid Rocket Engine Laboratory, Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China;

3. 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 utilizing liquid kerosene, this experimental study has been performed in a laboratory-scale rotating detonation combustor. Kerosene and oxygen-enriched air with an oxygen volume fraction of 40% have been used as fuel and oxidizer respectively. One hollow combustor and annular combustors with combustor widths of 32mm, 26mm and 20mm, respectively, have been considered based on a fixed outer diameter of 100mm. Four propagating modes, i.e., the fast deflagration mode, the quasi-stable detonation mode, the dual-wave collision mode, and the stable rotating detonation

^{*} 收稿日期: 2020-04-25; 修订日期: 2020-07-18。

基金项目: 国家自然科学基金 (91441201; 51876179; 51506157); 陕西省自然科学基金基础研究计划 (2020JQ-185); 国防科技重点实验室基金 (6142704180101); 中央高校基本科研业务费 (3102018AX006; 3102019ZX024)。

作者简介: 王致程, 博士生, 研究领域为旋转爆震发动机高效组织燃烧。E-mail: wangzhichengnwpu@163.com

通讯作者: 王 可, 博士, 副教授, 研究领域为爆震燃烧及其应用。E-mail: wangk@nwpu.edu.cn

引用格式: 王致程, 严 宇, 王 可, 等. 燃烧室宽度对煤油旋转爆震波传播模态的影响[J]. 推进技术, 2021, 42(4):842-850. (WANG Zhi-cheng, YAN Yu, WANG Ke, et al. Effects of Combustor Width on Propagation Modes of Rotating Detonation Waves Utilizing Liquid Kerosene[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(4):842-850.)

mode, have been observed at different oxidizer mass flow rates and their propagation characteristics have been discussed. In the hollow combustor, stable detonation waves cannot propagate and the fast deflagration mode and the quasi-stable detonation mode are able to be observed with smaller oxidizer mass flow rates. As the oxidizer mass flow rate is larger than 154g/s, the stable detonation mode is easily to be obtained, which average propagation velocities and peak pressures of rotating detonation waves are around 1750m/s and 0.7MPa, respectively. In the annular combustor, the average propagation velocities of rotating detonation waves are around 1245~1465m/s, which are obviously lower than the values in the hollow combustor. Besides, the range of the stable detonation mode is narrowed and the average propagation velocity is decreased when the combustor width is reduced. As a result, the combustor with a larger width is a more favorable choice to obtain stable rotating detonation waves utilizing liquid kerosene in the present study.

Key words: Rotating detonation; Kerosene; Hollow combustor; Annular combustor; Propagation mode

1 引言

旋转爆震发动机(Rotating Detonation Engine, RDE)仅需一次起爆,便可实现持续的爆震燃烧^[1-2],近年来受到了广泛关注,包括美国空军实验室^[3]、辛辛那提大学^[4]、日本名古屋大学^[5],以及国内的国防科技大学^[6-7]、北京大学^[8-9]、清华大学^[10-11]和南京理工大学^[12-14]等多家单位均开展了相关研究工作。早在20世纪50年代,人们便对旋转爆震用作动力装置的可行性进行了探索^[15-18],近十年来,国内外围绕火箭式^[5,19]和吸气式^[6,20]旋转爆震发动机的应用开展了大量实验工作。目前,大部分研究采用气态燃料^[3-11,21],并且主要以氢气和空气为反应物。例如,Liu等^[7]分析了影响旋转爆震波稳定传播的关键因素,发现旋转爆震波存在不同的工作模态,包括单波模态、双波模态以及双波对撞模态等。George等^[4]基于氢气和空气为反应物,验证了旋转爆震波传播的最小燃烧室宽度和爆震波高度。Wen等^[11]研究了多孔壁面对旋转爆震波传播特性和发动机性能的影响,发现通过多孔壁面抑制旋转爆震波的不稳定传播。Peng等^[22]用火花塞替代热射流管,在氢气和空气中实现了成功起爆,起爆成功率达到94%。此外,围绕气态碳氢燃料^[23-24],研究人员也开展了相关的实验研究工作。

上述研究主要以气态燃料作为推进剂,实现了旋转爆震波的稳定传播,分析了供给流量和燃烧室宽度等对旋转爆震波传播特性和传播模态的影响。但实际飞行器受体积和重量的限制,需要采用能量密度更高,储存安全的液态燃料。然而,旋转爆震波传播速度可达km/s量级,故需要在极短时间内完成液态燃料的雾化、蒸发以及氧化剂的掺混,实现起来有很大挑战。目前,只有少数单位基于液态燃料

开展了相关实验研究工作。Kindracki^[25]在液态煤油和空气的RDE实验中,加入少量氢气后实现了旋转爆震波的稳定传播,速度亏损约为20%~25%。王迪等^[26]以氧气和富氧空气为氧化剂,煤油为燃料,初步实现了旋转爆震波的稳定传播,但当氧气体积分数低于75%时,爆震波速度低于1km/s。Zhong等^[27]以煤油和氧气体积分数30%~50%的氧化剂为反应物,采用预燃发生器的方式,提高了煤油与氧化剂的掺混效果,从而实现了液态燃料旋转爆震波的传播,传播速度为800~1200m/s,与理论的爆震波传播速度相比,速度亏损较大。郑权等^[13-14]以汽油和氧气体积分数约40%的富氧空气为反应物,实现了旋转爆震波的传播,旋转爆震波的速度为1022.2~1171.8m/s,并分析了不同燃烧室长度和宽度对旋转爆震波传播模态、爆震波峰值压力和传播速度的影响。从已有研究来看,虽然基于液态燃料初步实现了旋转爆震波的传播,但相比于气态燃料,液态燃料与氧化剂雾化和掺混效果不理想,造成旋转爆震波稳定自持传播特性较差,当氧气体积分数低于50%时,旋转爆震波的传播速度较低,速度亏损较大。

此外,已发表的大部分研究均采用环形燃烧室结构^[1-14],即燃烧室是由外环和内环组成的环腔形结构。为了进一步简化RDE燃烧室的结构,Tang等^[8]提出了无内柱燃烧室结构,即去掉了环形燃烧室内柱,燃烧室内部空间类似圆柱形或空桶形。与环形燃烧室相比,无内柱燃烧室结构简单、质量小,省去内柱后亦不再需要相应的冷却措施,简化了燃烧室的冷却系统设计。Lin等^[28]通过实验验证了无内柱燃烧室的可行性,并分析了旋转爆震波的传播模态,提出喷注足够的可燃气体是实现旋转爆震稳定传播的关键。Wang等^[24]和Peng等^[23,29]分别基于甲烷和乙烯等碳氢燃料与空气开展了实验研究,在无内柱

燃烧室内观察到了单波头和双波头的旋转爆震波,但由于甲烷的可爆性更差,旋转爆震波稳定传播的工况范围,明显小于乙烯和空气旋转爆震波稳定传播的工况范围。Kawasaki等^[30]对比了无内柱燃烧室和不同宽度环形燃烧室的推力和比冲,发现无内柱燃烧室的推力和比冲小于环形燃烧室,并且随燃烧室宽度减小,RDE的比冲越高。Zhang等^[31]研究表明,不同燃烧室结构会影响旋转爆震波的传播特性,相比于环形燃烧室,无内柱燃烧室更有利于旋转爆震波稳定传播,并且传播速度更快。

综上所述,采用气态燃料时,能够实现旋转爆震波的稳定传播,人们基本掌握了气态燃料旋转爆震波的传播特性和模态转变规律。采用液态碳氢燃料时,虽基于富氧空气初步实现了旋转爆震波的起爆与传播,但当氧气体积分数低于50%时,爆震波稳定自持传播特性较差,速度亏损严重。目前,基于液态燃料的相关研究较少,影响液态燃料旋转爆震波稳定传播的关键因素和模态转变规律仍需要进一步探索。掌握液态燃料旋转爆震波的稳定传播机制和模态控制规律,是亟待突破的关键问题之一。此外,已有气态燃料研究表明,无内柱燃烧室有利于旋转爆震波稳定传播,采用液态燃料时,上述结论是否依然成立尚需进行进一步验证。

本文采用煤油和含氧量40%的富氧空气,分别基于环形和无内柱燃烧室开展实验研究,分析了液态燃料旋转爆震波在两种燃烧室内的传播特性和模态变化规律。

2 实验装置介绍

2.1 旋转爆震实验系统

实验系统由供给系统、采集与控制系统以及旋转爆震燃烧室组成。供给系统包括氧化剂供给单元、燃料供给单元和氮气供给单元。氧化剂为含氧量40%的富氧空气,为了保证供给流量稳定,气源由三组气瓶并联供给,且气源压力>10MPa;燃料为航空煤油。实验中,以氮气作为吹除气体,每次运行结束后将已燃气体排出燃烧室。采集与控制系统包括采集单元和控制单元,其中采集单元由压力传感器、热电阻和采集仪等组成。控制单元包括电磁阀和点火触发装置等,用以不同介质供给的时序控制和热射流管的点火。

旋转爆震燃烧室外径100mm,长度115mm。氧化剂和燃料分别通过环缝和离心喷嘴进入旋转爆震燃烧室。氧化剂环缝宽度0.7mm,分布在燃烧室直径

80mm处。燃料通过周向均匀分布的8个离心喷嘴进行喷注,喷嘴的雾化锥角为60°。通过热射流管切向喷注热射流的方式实现爆震燃烧室的点火和起爆,热射流管的直径6mm,长度300mm。采用的燃料和氧化剂分别为乙烯和氧气。为了保证在热射流管内产生爆震波,在热射流管前部安装了长度150mm的Shchelkin螺旋结构,在出口通过高频压力传感器监测传出热射流管的爆震波压力。

2.2 实验数据采集

在燃烧室外环布置6个高频压力传感器 $p_1 \sim p_6$ (SINOCERA CY-YD-205,响应频率为200kHz,测量精度 $\pm 3\%$)进行压力测量,传感器分布如图1所示,每两个传感器一组,每组之间间隔120°。同时,采用质量流量计(测量精度 $\pm 1\%$)对氧化剂流量进行实时测量。氧化剂和燃料进入燃烧室之前,通过压阻式传感(KELLER PA-21Y,测量精度 $\pm 1\%$),监测了氧化剂和燃料的供给压力。所有测量数据,均通过采样频率为200kHz的十六通道采集仪进行采集。

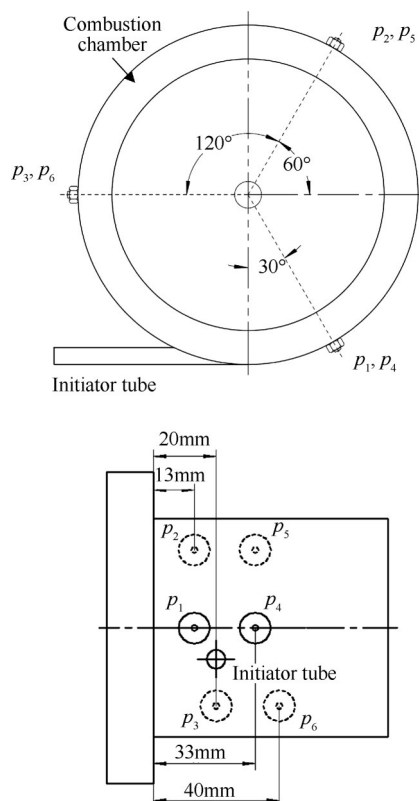


Fig. 1 Distribution of the pressure transducers

实验中,采用了四种燃烧室结构,分别为无内柱燃烧室和燃烧室内柱直径分别为36,48,60mm(对应的燃烧室宽度分别为32,26,20mm)的环形燃烧室。煤油流量固定在20.5g/s,氧化剂流量范围为80~350g/s。

3 结果分析与讨论

3.1 无内柱燃烧室

当氧化剂供给流量为 82g/s 时,对应的当量比 $ER=2.0$,高频压力传感器测得的压力信号 p_1 如图 2 所示。可以看出,燃烧室内出现了规则的压力脉动,压力峰值约为 0.1MPa。燃烧波压力峰值较低,压力上升沿不陡峭。对压力数据进行短时傅里叶变换 ST-FT,结果如图 3 所示。可以看出,燃烧波的一阶主频 f 约为 3120Hz,可由燃烧波的平均传播速度公式($\bar{v} = \pi D_{out} f$, 式中 D_{out} 为燃烧室的外径。)计算得到 $\bar{v} = 979.7\text{m/s}$,对应工况的爆震波理论 C-J 速度为 2154.1m/s,低于理论值的 50%,这里定义为爆燃模态。在气态燃料 RDE 实验中,当氧化剂供给流量较低时,Xie 等^[10]基于气态燃料的实验中也观察到该模态。产生该模态的原因在于,进入燃烧室的氧化剂通道横截面积固定不变,氧化剂流量较低时,根据质量守恒,氧化剂喷注速度较小,氧化剂与煤油之间的相对速度不高,雾化和掺混效果不理想,故无法得到稳定传播的旋转爆震波。

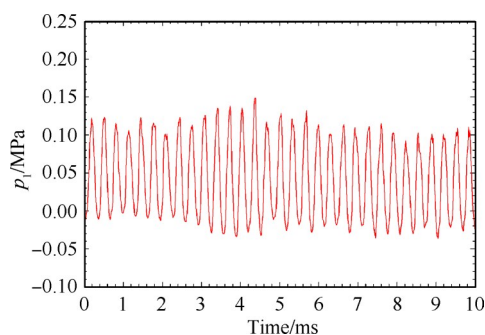


Fig. 2 Pressure data of the fast deflagration mode for the hollow combustor ($\dot{m}_{oxi}=82\text{g/s}$, $ER=2.0$)

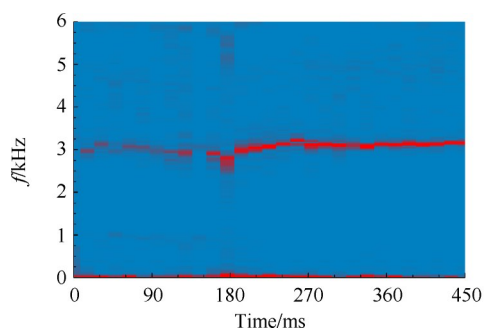


Fig. 3 STFT analysis result of the pressure profiles for the fast deflagration mode

氧化剂质量流量增大至 119g/s,对应的 $ER=1.35$,高频压力传感器测得的压力信号 p_1 如图 4 所示。可以看出,在起爆阶段,燃烧室内存在压力峰值脉动较

小的爆燃模态。在 120~140ms 时刻,传感器采集到的压力信号峰值增大,介于 0.6~0.8MPa 内,相应压力信号放大后的结果见图 5(a)。可以看出,燃烧波的压力峰值约为 0.7MPa,且压力峰值较稳定,对应工况的爆震波理论 C-J 压力为 2.87MPa。通过传感器 p_1 和 p_2 的周向安装位置和压力峰值时序,可以得出燃烧波沿顺时针方向传播($p_2 \rightarrow p_1$)。在 140~440ms 时刻,燃烧波的传播状态出现明显变化,如图 5(b)所示,压力峰值明显减小,约为 0.2MPa,且为逆时针方向传播,但压力峰值分布较为均匀。

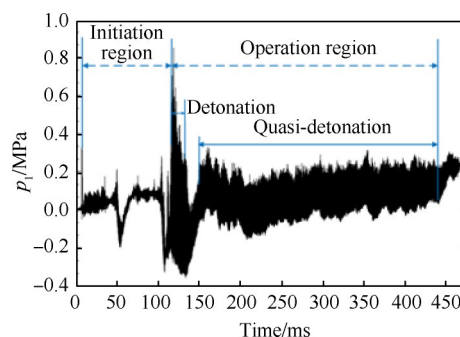
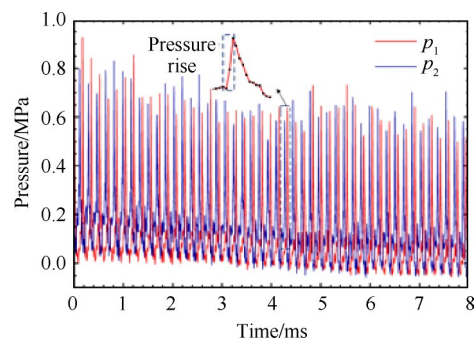
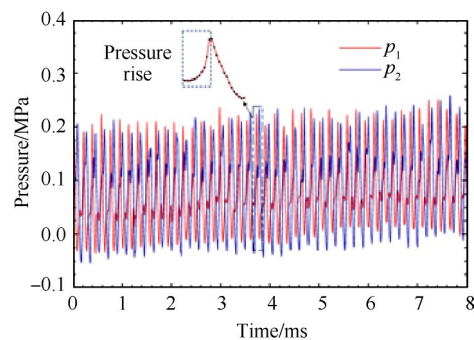


Fig. 4 Measured pressure profiles of the quasi-stable detonation mode for the hollow combustor ($\dot{m}_{oxi}=119\text{g/s}$, $ER=1.35$)



(a) Stable detonation



(b) Quasi-stable detonation

Fig. 5 Pressure data of the quasi-stable detonation mode for the hollow combustor

对压力数据进行短时傅里叶变换 STFT,结果如图 6 所示。可以看出,在 120~140ms 内的 f 约为

5770Hz, 可以计算出 $\bar{v}$ 为 1811.8m/s, 对应工况的爆震波理论 C-J 速度为 2113.9m/s, 约为理论值的 85.7%; 在 140~440ms 内, f 约为 5480Hz, 同理可得 $\bar{v}=1720.9$ m/s, 约为理论值的 81.4%。受侧向膨胀等因素的影响, 燃烧波的峰值压力低于爆震波的理论值^[1,7], 但是传播速度接近爆震波的理论传播速度。因此, 可以认为在 120ms 时刻以后, 燃烧室内得到了稳定传播的旋转爆震波, 且为单波模式。此外, 与 120~140ms 时刻内的旋转爆震波相比, 在 140~440ms 时刻内的爆震波压力峰值偏低, 压力上升沿亦更平缓, 但传播速度仍接近爆震波理论 C-J 速度, 这里定义为准稳定爆震模式。

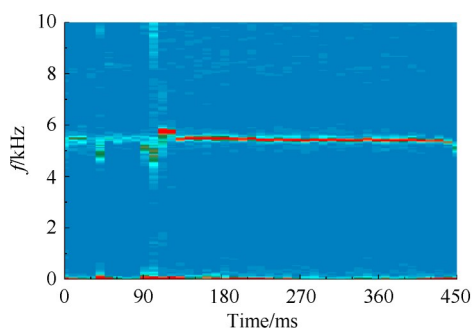
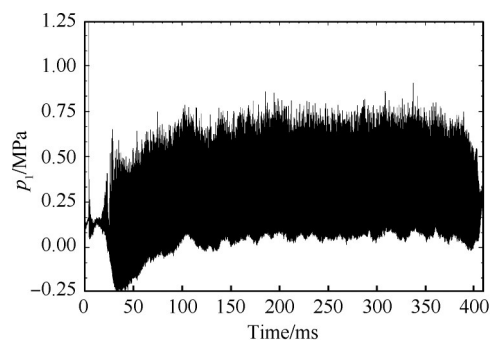


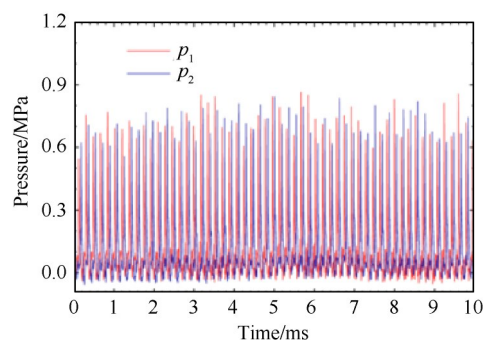
Fig. 6 STFT analysis result of the pressure profiles for the quasi-stable detonation mode

已公开发表的气态燃料 RDE 研究中, 未见该传播模态的报道。采用液态燃料煤油时, 出现准稳定爆震模态的原因在于, 除受侧向膨胀的影响外, 煤油液滴在燃烧之前还要经过雾化和蒸发过程, 因此爆震波在包含液态燃料的混合物中传播时, 速度和压力亏损更大^[32]。与氧化剂流量 82g/s 的实验工况相比, 当氧化剂流量增大至 119g/s 时, 液相和气相之间的相对速度有一定幅度提高, 煤油的雾化和掺混效果得到改善, 但幅度有限, 液相因素的影响仍较大, 旋转爆震波的压力亏损大于对应的气态燃料工况, 导致了准稳定旋转爆震模态的产生。

当氧化剂流量增大至 220g/s 时, $ER=0.74$, 燃烧波的压力信号 p_1 如图 7(a) 所示。燃烧波的压力峰值分布均匀, 并未出现明显的压力脉动。相应压力信号放大后的结果见图 7(b), 燃烧波的峰值压力约为 0.7MPa, 为逆时针方向传播。对压力数据进行 STFT 分析, 结果如图 8 所示。可以看出, 压力波形对应的 f 约为 5592Hz, 对应 $\bar{v}=1755.8$ m/s, 约为理论值的 91.7%。综合分析测得的压力峰值和传播速度, 可认为燃烧室内得到了稳定的单波头旋转爆震波模式。当氧化剂流量增大至 305g/s, $ER=0.53$ 时, 燃烧室内同样为稳定的单波头旋转爆震波模式。



(a) Measured pressure profiles



(b) Stable detonation

Fig. 7 Pressure data of the stable detonation mode for the hollow combustor ($\dot{m}_{oxi}=220$ g/s, $ER=0.74$)

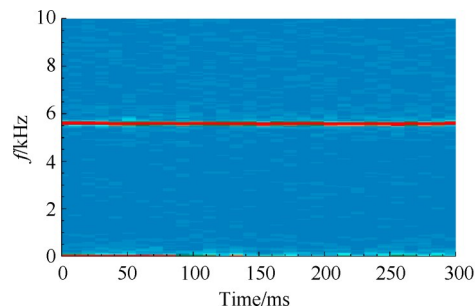


Fig. 8 STFT analysis result of the pressure profiles for the stable detonation mode

3.2 环形燃烧室

对于环形燃烧室结构, 选取燃烧室宽度 26mm 的工况为代表, 分析不同氧化剂流量条件下, 环形燃烧室内的燃烧波模态分布规律和传播特性。

当氧化剂流量为 80g/s, 同样得到了爆燃模态。与无内柱燃烧室不同, 当氧化剂流量增大至 120g/s 时, 未得到准稳定爆震模态, 为旋转爆震波模式。当氧化剂流量增大至 223g/s, 对应的 $ER=0.73$ 时, 燃烧波的压力波形和相应压力信号放大后的结果, 如图 9 所示。可以看出, 燃烧波的压力峰值分布均匀, 峰值压力约为 0.35MPa, 沿逆时针方向传播。如图 10 所示, 对压力数据进行 STFT 分析可知, 传播频率 f 约为 4281Hz, 对应的传播速度约为 1344.3m/s, 为爆震波理论值的 70.2%, 因此, 燃烧室内得到了稳定的旋转爆震波模式。

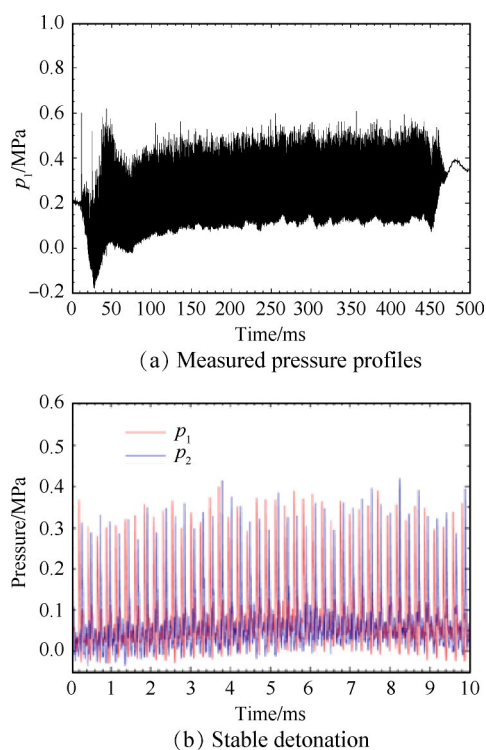


Fig. 9 Pressure data of the stable detonation mode for the annular combustor ($\dot{m}_{\text{oxi}}=223\text{g/s}$, $ER=0.73$)

与相似工况下的无内柱燃烧室实验结果相比, 环形燃烧室内的旋转爆震波峰值压力明显降低, 且传播速度明显低于无内柱燃烧室旋转爆震波的传播速度。原因可能在于以下两个方面: (1) 无内柱燃烧室中, 燃料和氧化剂喷注到燃烧室时, 会在头部形成较大的回流区, 有利于燃料和氧化剂的混合, 更加均匀的可燃混合物有利于旋转爆震波的稳定传播; 当燃料和氧化剂喷注到环形燃烧室内时, 由于燃烧室宽度更小, 无法形成有效的低速回流区, 氧化剂和燃料迅速抵达燃烧室下游, 不利于燃料和氧化剂的混合。(2) 当煤油喷注到环形燃烧室时, 部分经过离心喷嘴雾化的煤油液滴与燃烧室内柱碰撞后, 附着在燃烧室内柱上, 造成参与爆震燃烧的燃料质量减少, 影响了可爆混合物的空间分布, 不利于旋转爆震波传播。

当氧化剂流量增大至 303g/s , $ER=0.53$ 时, 得到的压力波形如图 11 所示。可以看出, 燃烧内形成了稳定的双波对撞模态^[31], 且对撞点在传感器 p_3 附近。由于氧化剂流量增大, 燃烧室内氧化剂的流动速度更快, 更多氧化剂未与煤油进行充分混合便流向燃烧室下游, 在燃烧室头部附近无法驻留足够的可爆混合物, 不利于形成稳定的旋转爆震波, 并且随当量比的减小, 燃料和氧化剂混合物更接近贫油状态, 因此

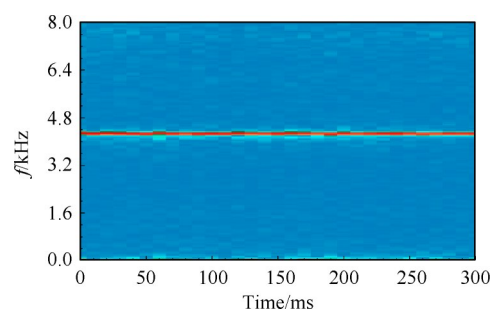


Fig. 10 STFT analysis result of the pressure profiles for the annular combustor

出现了双波对撞模态。已有研究结果表明, 当燃料和氧化剂混合较差时, 接近旋转爆震波的临界传播极限, 容易出现双波对撞模态^[6]。

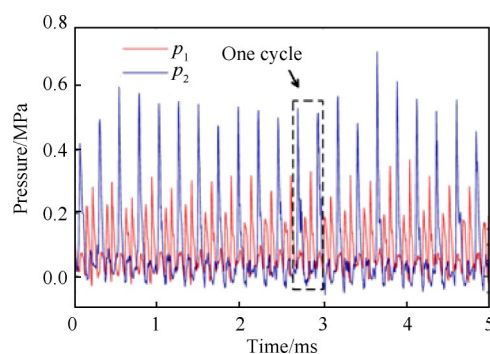


Fig. 11 Pressure data of the dual-wave collision mode for the annular combustor ($\dot{m}_{\text{oxi}}=303\text{g/s}$, $ER=0.53$)

3.3 燃烧波传播模态与传播速度

不同氧化剂流量条件下的燃烧波模态分布情况如图 12 所示。对于无内柱燃烧室, 当氧化剂流量低于 80g/s 时, 煤油雾化不理想, 且燃料和氧化剂混合较差, 因此无法形成旋转爆震波。当氧化剂流量增大至 $103\sim 119\text{g/s}$ 时, 煤油雾化改善, 燃料和氧化剂混合效果得到改善, 起始阶段实现了旋转爆震波的传播, 但同时旋转爆震波会堵塞氧化剂和煤油的供给, 对上游的供给流量产生影响, 导致氧化剂流量减小, 造成煤油和氧化剂的雾化掺混效果变差, 因此无法维持旋转爆震波长时间稳定传播, 很快便转变为亚稳定爆震波模态。随着氧化剂流量进一步增加至 $154\sim 352\text{g/s}$, 煤油破碎后的液滴更加细小均匀, 燃料与氧化剂混合得更好, 液相因素对爆震波传播特性的影响大幅降低, 可得到稳定传播的旋转爆震波, 且均以单波头形式出现, 爆震波峰值压力较高, 传播速度接近爆震波的理论传播速度。

对于环形燃烧室, 当燃烧室宽度 $W=32\text{mm}$ 时, 氧化剂流量低于 78g/s 时, 燃烧室内同样无法形成旋转

爆震波,燃烧波以爆燃模态传播。当氧化剂流量超过 100g/s 时,与无内柱燃烧室不同,不会出现准稳定爆震模态,均为稳定传播的单波头旋转爆震波。原因在于:相比于无内柱燃烧室,环形燃烧室内的燃料和氧化剂混合效果和空间分布较差,旋转爆震波的峰值压力较低,当燃料和氧化剂的混合效果和空间分布进一步变差时,无法在更低的压力下维持传播,即准稳定爆震模态传播,而直接转变为压力和速度都更低的爆燃模态。

当 W 减小至 26mm 时,氧化剂流量较低时,燃烧室内同样无法形成旋转爆震波,燃烧波以爆燃模态传播。当氧化剂流量增大至 120~223g/s 时,燃料和氧化剂的混合得到改善,得到了稳定传播的单波头旋转爆震波,但峰值压力和传播速度均明显低于无内柱燃烧室的实验结果。当继续增大氧化剂流量至 257~346g/s 时,由于氧化剂轴向速度增大,燃烧室头部的氧化剂和燃料空间分布变差,同时混合物更接近贫油状态,旋转爆震波无法维持稳定传播,出现了双波对撞模态。与 $W=32\text{mm}$ 的实验结果相比,随 W 减小,氧化剂和燃料空间分布变差,对应稳定爆震波模态的工况范围更窄,且氧化剂流量较大时,出现了双波对撞模态。

当 W 减小至 20mm 时,氧化剂和燃料的混合进一步变差,旋转爆震波模态对应的工况范围也越小,并且氧化剂流量增大时,更易出现双波对撞模态。总体来看,随着 W 从无内柱燃烧室减小至 $W=20\text{mm}$ 的环形燃烧室,对应旋转爆震波稳定传播的工况范围不断减小,即减小 W ,不利于旋转爆震波稳定传播。

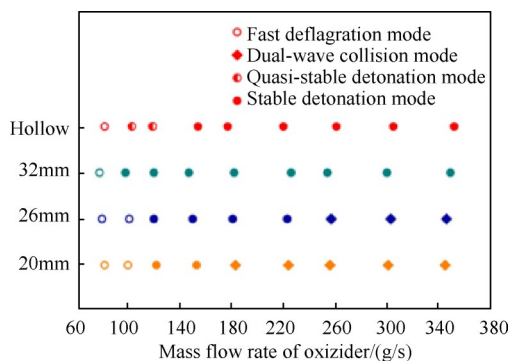


Fig. 12 Ranges of different operating modes

图 13 为不同 W 下的旋转爆震波的平均传播速度。无内柱燃烧室内的旋转爆震波平均速度约为 1750m/s。对于环形燃烧室结构,当 $W=32\text{mm}$ 时,旋转爆震波速度约为 1465m/s,仅为无内柱燃烧室内旋转爆震波速度的 84%。当 W 减小至 26mm 和 20mm 时,

对应的旋转爆震波传播速度分别约为 1365m/s 和 1245m/s。由此可以看出,无内柱燃烧室旋转爆震波的传播速度更快,相较于环形燃烧室更有利于旋转爆震波的稳定传播。对于环形燃烧室,同样的工况下,随 W 的减小,旋转爆震波的传播速度减小,且稳定传播的对应的况范围也更小。因此,在本研究对应的工况下,减小 W 不利于旋转爆震波稳定传播,且传播速度也更低。

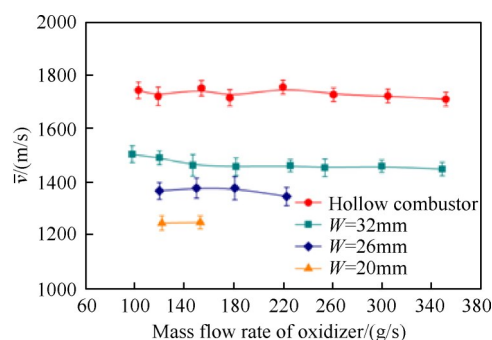


Fig. 13 Average velocities of the rotating detonations for different combustors

4 结论

本研究实现了基于煤油的液态燃料旋转爆震波的稳定传播,分析了燃烧室内存在的不同燃烧波模态及其传播特点,以及不同燃烧室结构和氧化剂流量对旋转爆震波传播特性的影响,得到主要结论如下:

(1) 随氧化剂流量从 80g/s 增加至 350g/s,无内柱燃烧中依次出现了爆燃模态、准稳定爆震模态和稳定旋转爆震模态,环形燃烧室中依次出现了爆燃模态、稳定旋转爆震模态和双波对撞模态。

(2) 对于无内柱燃烧室,当氧化剂流量低于 80g/s 时,无法产生旋转爆震波,对应于爆燃模态;当增大氧化剂流量,燃烧室内出现了准稳定爆震模态,即爆震波压力峰值较低,但是传播速度与稳定的旋转爆震波相差不大;当氧化剂流量超过 154g/s 时,可形成稳定的旋转爆震波。

(3) 对于环形燃烧室,随燃烧室宽度从 32mm 减小至 20mm 时,旋转爆震波稳定传播对应的工况范围不断减小;当燃烧室宽度为 26mm 和 20mm,氧化剂流量较大时,出现了双波对撞模态。

(4) 无内柱燃烧室中,旋转爆震波的平均传播速度为 1750m/s,接近理论的爆震波传播速度。对于环形燃烧室,旋转爆震波的传播速度仅为 1245~1465m/s,

明显低于无内柱燃烧室中的传播速度。并且燃烧室宽度越小,对应的旋转爆震波传播速度越低。基于本文选取的实验工况,增大燃烧室宽度,更有利于液态燃料旋转爆震波的稳定传播。

致谢:感谢国家自然科学基金、陕西省自然科学基金计划、国防科技重点实验室基金和中央高校基本科研业务费的资助。

参考文献

- [1] Lu F K, Braun E M. Rotating Detonation Wave Propulsion: Experimental Challenges, Modeling, and Engine Concepts[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2014, 30(5): 1125-1142.
- [2] Anand V, Gutmark E. Rotating Detonation Combustors and Their Similarities to Rocket Instabilities[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2019, 73: 182-234.
- [3] 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.
- [4] George A S, Driscoll R, Anand V, et al. On the Existence and Multiplicity of Rotating Detonations[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36: 2691-2698.
- [5] Ishihara K, Nishimura J, Goto K, et al. Study on a Long-Time Operation Towards Rotating Detonation Rocket Engine Flight Demonstration[R]. *AIAA* 2017-1062.
- [6] Liu S J, Liu W D, Wang Y, et al. Free Jet Test of Continuous Rotating Detonation Ramjet Engine[R]. *AIAA* 2017-2282.
- [7] Liu S J, Lin Z Y, Liu W D, et al. Experimental Research on the Propagation Characteristics of Continuous Rotating Detonation Wave Near the Operating Boundary[J]. *Combustion Science and Technology*, 2015, 187: 1790-1804.
- [8] Tang X M, Wang J P, Shao Y T. Three Dimensional Numerical Investigations of the Rotating Detonation Engine with a Hollow Combustor[J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162(4): 997-1008.
- [9] Yao S B, Tang X M, Luan M Y, et al. Numerical Study of Hollow Rotating Detonation Engine with Different Fuel Injection Area Ratios[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36: 2649-2655.
- [10] Xie Q F, Wen H C, Li W H, et al. Analysis of Operating Diagram for H_2 /Air Rotating Detonation Combustors under Lean Fuel Condition[J]. *Energy*, 2018, 151: 408-419.
- [11] Wen H C, Wang B. Experimental Study of Perforated-Wall Rotating Detonation Combustors[J]. *Combustion and Flame*, 2020, 213: 52-62.
- [12] 马 虎, 张义宁, 杨成龙, 等. 燃料分布对旋转爆震波传播特性影响[J]. *航空动力学报*, 2019, 34(3): 513-520.
- [13] 郑 权, 李宝星, 翁春生, 等. 燃烧室长度对液态燃料旋转爆震发动机性能影响实验研究[J]. *推进技术*, 2018, 39(12): 2764-2771. (ZHENG Quan, LI Bao-xing, WENG Chun-sheng, et al. Experimental Investigation for Effects of Combustor Length on Liquid-Fueled Rotating Detonation Engine Performance[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(12): 2764-2771.)
- [14] 李宝星, 许桂阳, 翁春生, 等. 燃烧室宽度对液态燃料旋转爆震发动机影响实验研究[J]. *推进技术*, 2021, 42(2). (LI Bao-xing, (XU Gui-yang, WENG Chun-sheng, et al. Experimental Investigation for Effects of Chamber Width on Rotating Detonation Engine with Liquid Fuel[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(2).)
- [15] Voitsekhovskii B V. Stationary Spin Detonation[J]. *Soviet Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1960, (3): 157-164.
- [16] Mikhailov V V, Topchiyan M E. Studies of Continuous Detonation in an Annular Channel[J]. *Fizika Goreniya i Vzryva*, 1965, 2(4): 20-23.
- [17] Nicholls J A, Gullen R E, Ragland K W. Feasibility Studies of a Rotating Detonation Wave Rocket Motor[J]. *Journal of Spacecrafts and Rocket*, 1966, 3(6): 893-898.
- [18] Adamson T C, Olsson G R. Performance Analysis of a Rotating Detonation Wave Rocket Engine[J]. *Astronautica Acta*, 1967, 13: 405-415.
- [19] 严 宇, 胡洪波, 洪流, 等. 自燃推进剂旋转爆震燃烧实验研究[J]. *推进技术*, 2018, 39(9): 1986-1993. (YAN Yu, HU Hong-bo, HONG Liu, et al. Experimental Investigation on Rotated Detonation Combustion of Hypergolic Propellants[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(9): 1986-1993.)
- [20] 夏寒青, 黄 玥, 张义宁, 等. 旋转爆震发动机喷管非定常流动特性的数值模拟研究[J]. *推进技术*, 2020, DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.190721. (XIA Han-qing, HUANG Yue, ZHANG Yi-ning, et al. Numerical Investigation on Unsteady Flow of Nozzle in Rotating Detonation Engine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, DOI:10.13675/j.cnki.tjjs.190721.)
- [21] Bykovskii F A, Zhdan S A, Vedernikov E F. Continuous Spin Detonations[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2006, 22(6): 1204-1216.
- [22] Peng L, Wang D, Wu X S, et al. Ignition Experiment

- with Automotive Spark on Rotating Detonation Engine [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40: 8465–8474.
- [23] Peng H Y, Liu W D, Liu S J, et al. Experimental Investigations on Ethylene–Air Continuous Rotating Detonation Wave in the Hollow Chamber with Laval Nozzle [J]. *Acta Astronautica*, 2018, 151: 137–145.
- [24] Wang Y H, Le J L, Wang C, et al. A Non-Premixed Rotating Detonation Engine Using Ethylene and Air [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 137: 749–757.
- [25] Kindracki J. Experimental Research on Rotating Detonation in Liquid Fuel–Gaseous Air Mixtures [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2015, 43: 445–453.
- [26] 王 迪, 周 进, 林志勇. 煤油两相连续旋转爆震燃烧室工作特性试验研究 [J]. 推进技术, 2017, 38(2): 471–480. (WANG Di, ZHOU Jin, LIN Zhi-yong. Experimental Investigation on Operation Characteristics of Two-Phase Continuous Rotating Detonation Combustor Fueled by Kerosene [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(2): 471–480.)
- [27] Zhong Y P, Wu Y, Jin D, et al. Investigation of Rotating Detonation Fueled by the Pre-Combustion Cracked Kerosene [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 95 (10).
- [28] Lin W, Zhou J, Liu S J, 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.
- [29] Peng H Y, Liu W D, Liu S J, et al. Realization of Methane–Air Continuous Rotating Detonation Wave [J]. *Acta Astronautica*, 2019, 164: 1–8.
- [30] Kawasaki A, Inakawa T, Kasahara J, et al. Critical Condition of Inner Cylinder Radius for Sustaining Rotating Detonation Waves in Rotating Detonation Engine Thruster [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(3).
- [31] Zhang H L, Liu W D, Liu S J. Effects of Inner Cylinder Length on H_2 /Air Rotating Detonation [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41: 13281–13293.
- [32] Kailasanath K. Liquid-Fueled Detonations in Tubes [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2006, 22(6).

(编辑:朱立影)