

环缝宽度对两相旋转爆轰波压力与频率特性 影响实验研究^{*}

葛高杨¹, 马 虎¹, 夏镇娟¹, 马 元², 侯世卓¹, 邓 利³, 周长省¹

(1. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094;

2. 海军航空大学青岛校区 航空机械工程与指挥系, 山东 青岛 266100;

3. 中国工程物理研究院 化工材料研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 为了研究空气喷注环缝宽度对两相旋转爆轰波压力与频率特性的影响, 通过改变环缝宽度与当量比开展了大量实验研究。旋转爆轰发动机环形燃烧室外径、内径以及长度分别为204mm, 166mm和155mm。汽油和高温空气采用高压雾化喷嘴与环缝对撞喷注的方式进行混合, 以此提高推进剂的掺混效果与活性, 发动机采用预爆轰管作为点火装置。实验通过燃烧室内测得的高频动态压力信号, 对两相旋转爆轰波的传播稳定性、压力特性以及频率特性进行了详细分析。实验结果表明: 在不同环缝宽度下均实现了高总温空气与汽油的两相旋转爆轰。当环缝宽度为3mm和4mm时, 旋转爆轰波平均峰值压力与传播频率均随着当量比增大而增大; 增加环缝宽度至6mm, 爆轰波传播稳定性变差, 平均峰值压力与传播频率随当量比先增大后减小。当环缝宽度为4mm时, 获得的旋转爆轰波平均峰值压力最高, 压力脉动强度最小, 爆轰波传播稳定性最强。在一定工况范围内, 增加当量比可有效降低爆轰波峰值压力脉动强度。此外, 随着空气环缝宽度的增加, 爆轰波传播频率整体降低。当环缝宽度为3mm, 当量比为1.19时, 爆轰波以单波模态在环形燃烧室内连续旋转传播, 平均传播速度约为1176.6m/s, 爆轰波传播速度存在严重亏损。

关键词: 环缝宽度; 两相旋转爆轰波; 当量比; 压力特性; 频率特性

中图分类号: V435.12

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2022) 08-210251-11

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 210251

Experimental Study on Effects of Annular Gap Width on Pressure and Frequency Characteristics of Two-Phase Rotating Detonation Wave

GE Gao-yang¹, MA Hu¹, XIA Zhen-juan¹, MA Yuan², HOU Shi-zhuo¹, DENG Li³, ZHOU Chang-sheng¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Department of Aeronautical Mechanical Engineering and Command, Qingdao Campus of Naval Aeronautical University, Qingdao 266100, China;

3. Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

Abstract: In order to study the effects of air injection annular gap width on pressure and frequency charac-

^{*} 收稿日期: 2021-04-25; 修订日期: 2021-06-26。

基金项目: 国家自然科学基金 (12072163; 52106161; 11802134); 中国博士后科学基金 (2020M681616); 国防科技重点实验室基金 (HTKJ2020KL011004-1)。

作者简介: 葛高杨, 博士生, 研究领域为爆轰推进。

通讯作者: 马 虎, 博士, 副教授, 研究领域为爆轰推进。

引用格式: 葛高杨, 马 虎, 夏镇娟, 等. 环缝宽度对两相旋转爆轰波压力与频率特性影响实验研究[J]. 推进技术, 2022, 43(8):210251. (GE Gao-yang, MA Hu, XIA Zhen-juan, et al. Experimental Study on Effects of Annular Gap Width on Pressure and Frequency Characteristics of Two-Phase Rotating Detonation Wave [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(8):210251.)

teristics of two-phase rotating detonation wave, experiments were carried out by varying gap width and equivalence ratio. The outer diameter, inner diameter and length of rotating detonation engine annular combustor are 204mm, 166mm and 155mm, respectively. Gasoline and high temperature air are injected into the combustor through a nozzle-gap impinging model constructed of high pressure atomizing nozzles and annular gap to improve the mixing effect and chemical activity of propellant. A pre-detonator tube is used as ignition device. Based on high frequency dynamic pressure signals measured in combustor, the propagation stability, pressure characteristics and frequency characteristics of two-phase rotating detonation wave were analyzed in detail. Experimental results show that two-phase rotating detonation of high temperature and gasoline is realized with different gap widths. When the gap widths are 3mm and 4mm, average peak pressure and propagation frequency of rotating detonation wave increase with the increase of equivalence ratio. Increasing the gap width to 6mm, propagation stability of detonation wave become worse, and the average peak pressure and propagation frequency increase first and then decrease with the increase of equivalence ratio. The highest average peak pressure, the lowest pressure fluctuation intensity and the best propagation stability of detonation wave is obtained with the annular gap width of 4mm. Under a certain range of operating conditions, increasing equivalence ratio can effectively reduce the peak pressure fluctuation intensity of detonation wave. In addition, with the increase of air gap width, propagation frequency of detonation wave decreases in the entirety. At the gap width of 3mm and equivalence ratio of 1.19, single detonation wave propagates continuously in the annular combustor. The average propagation speed is around 1176.6m/s, and there is a heavy velocity deficit existing during the propagation of detonation wave.

Key words: Annular gap width; Two-phase rotating detonation wave; Equivalence ratio; Pressure characteristics; Frequency characteristics

1 引言

旋转爆轰发动机(RDE)具有结构简单、推重比大、热循环效率高以及自增压等优点,在航空航天领域具有广阔的应用前景。随着对RDE的深入研究以及工程应用的需求,且液态燃料与气态燃料相比具有更高的密度比冲,在相同体积下能够产生更大的冲量,气液两相旋转爆轰逐渐成为了各个研究机构的重点研究内容。

Kindracki^[1]对环形燃烧室内煤油和空气的冷态雾化流场开展了实验研究,测量了空气的速度分布以及煤油液滴的直径分布。进一步对煤油氧气推进剂的起爆特性进行了实验研究,研究了不同管径、点火能量以及氧含量条件下爆轰波能否直接起爆^[2]。采用煤油、氢气和空气三组元推进剂开展了旋转爆轰实验,研究了燃料中氢含量对燃烧室压力以及爆轰波传播速度的影响。此外,通过在煤油中加入液态硝酸异丙酯,对其提高煤油空气混合物爆轰敏感性的影响进行了考察^[3]。Frolov等^[4]采用三组元推进剂在大尺寸环形燃烧室内进行了旋转爆轰实验,在氢气空气混合物实现自持传播的旋转爆轰后加入液态丙烷,获得了连续旋转传播的两相旋转爆轰波。Bykovskii等^[5-10]对两相连续旋转爆轰做了大量实验研究,采用的推进剂主要包括煤油/液氧、煤油/富氧

空气、煤油/氧气、柴油/富氧空气以及汽油/富氧空气。在圆盘形^[5]和环形^[6]燃烧室内开展了煤油/富氧空气和煤油/空气的两相旋转爆轰实验,研究发现:圆盘形燃烧室内成功获得了连续旋转传播的爆轰波,而对于环形燃烧室,只有在推进剂中加入氧气才能获得连续传播的旋转爆轰波。随后以煤油/液氧作为推进剂在环形燃烧室内开展了旋转爆轰实验,采用速度补偿的方法拍摄到了两相连续旋转爆轰波的结构特征^[7]。通过实验验证了煤油/空气以及汽油/空气连续旋转爆轰的可能性,研究结果表明爆轰燃烧室直径必须大于306mm,且氧化剂气体中氧气与氮气的质量比大于0.41^[8]。此外,通过在航空煤油/空气混合物中加入氢气或者合成气(CO/H₂)开展了两相旋转爆轰实验研究,改变煤油、空气和氢气的质量流量,爆轰波传播模态从单波切换到五波模态,传播频率为0.73~4.86kHz,实验验证了燃料中的氢含量是维持煤油燃料旋转爆轰状态的关键因素^[9-10]。

贾冰岳等^[11]采用氧气/煤油预爆轰管作为点火方式,研究了预爆轰波压力、燃烧室油气比、来流总温、点火器安装方式等对液态碳氢燃料/纯净空气旋转爆轰发动机的起爆特性和旋转爆轰波稳定传播过程的影响。实验结果表明,较高的预爆轰波压力、较好的燃油雾化效果、化学当量比以及垂直安装的点火器

可以有效缩短旋转爆轰波的起爆时间。王顺利等^[12]以煤油预燃裂解气和富氧空气为推进剂,实验研究了不同当量比下喷管构型对旋转爆轰特性的影响。研究发现:旋转爆轰稳定工作当量比为0.73~1.3。改变推进剂当量比和喷管构型,燃烧室内出现了单波、不稳定双波对撞和稳定双波对撞三种传播模态,且喷管构型对模态转变和旋转爆轰波速有重要影响。郑权等^[13]分析了双波对撞模态下爆轰波自持的传播特征、时域频域特征和爆轰波高度,实验发现双波对撞模态下发动机推力波动较大,推力曲线围绕平均推力振荡。通过实验研究了液态燃料喷注压力对旋转爆轰波的传播特性的影响。研究结果表明随着喷注压力的增大,液滴雾化细度得到改善,旋转爆轰波可以成功起爆并稳定自持传播,传播速度和平均峰值压力均逐渐增大^[14]。分析了不同燃烧室长度下爆轰波传播模态、平均峰值压力和传播速度的变化特征。测量了发动机模型在不同燃烧室长度下的一维推力,并分析了推力和燃料比冲的变化趋势^[15]。李宝星等^[16]采用二维数值模拟研究了汽油液滴半径对爆轰性能参数的影响,结果表明:随着液滴半径增大,爆轰压力峰值、温度峰值以及爆轰波速度均降低;当增大到70 μm 时,爆轰波将无法成功起爆。对汽油/富氧空气两相旋转爆轰开展了二维数值模拟^[17],获得了气液两相旋转爆轰流场结构,并分析了燃烧室轴向和周向长度对燃烧室流场、爆轰波传播特性以及发动机推力性能的影响。在不同燃烧室宽度下开展了两相旋转爆轰实验研究,分析了爆轰波的起爆过程,以及燃烧室宽度对爆轰波传播特性与发动机推力性能的影响^[18]。王致程等^[19]在外径100mm的无内柱和环形燃烧室内开展了煤油/富氧空气的旋转爆轰实验,在不同氧化剂流量下,共观察到四种燃烧波模态。当氧化剂流量超过154g/s时,无内柱燃烧室中可以得到稳定旋转爆轰模态,旋转爆轰

波峰值压力超过0.7MPa,平均传播速度为1750m/s。环形燃烧室内旋转爆轰波的传播速度为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,对应旋转爆轰波模态的工况范围更窄,传播速度更慢。实验发现增大燃烧室宽度,更有利于基于煤油的旋转爆轰波的稳定传播。魏万里等^[20]以汽油/富氧空气为推进剂,通过实验研究了中心锥对环形阵列式液态燃料旋转爆轰发动机工作特性的影响,并测量了不同中心锥位置和锥角时的发动机推力,分析了推力和燃料比冲的变化趋势。各工况下旋转爆轰波传播模态均为双波对撞,爆轰波传播速度随中心锥位置的前移呈下降趋势。

综上所述,国内外研究机构以富氧空气或氧气作为氧化剂或者在液体燃料中加入氢气,研究了推进剂喷注压力、质量流量、当量比、氧含量、雾化效果、燃烧室长度、燃烧室宽度以及喷管构型对爆轰波传播特性的影响,而空气喷注环缝宽度对两相旋转爆轰特性的影响尚未涉及。实验发动机采用高温空气与汽油液滴对撞喷注模型,高温空气与汽油液滴快速对撞,汽油液滴迅速破碎雾化,以此提高推进剂的掺混效果与化学活性。本文通过改变空气喷注环缝宽度与推进剂当量比,开展了高温空气与汽油的两相旋转爆轰实验,研究了环缝宽度与当量比对两相旋转爆轰波压力特性和频率特性的影响。

2 实验系统

两相旋转爆轰实验系统主要由空气供给系统、加热器系统、燃油供给系统、两相旋转爆轰燃烧室、点火系统以及控制与采集系统组成,如图1所示。

2.1 推进剂供给系统

空气供给系统主要包括高压气源、球阀、过滤器、减压阀、流量计以及电磁阀,通过调节减压阀出口压力控制空气流量,流量设计为0.5~2kg/s。汽油

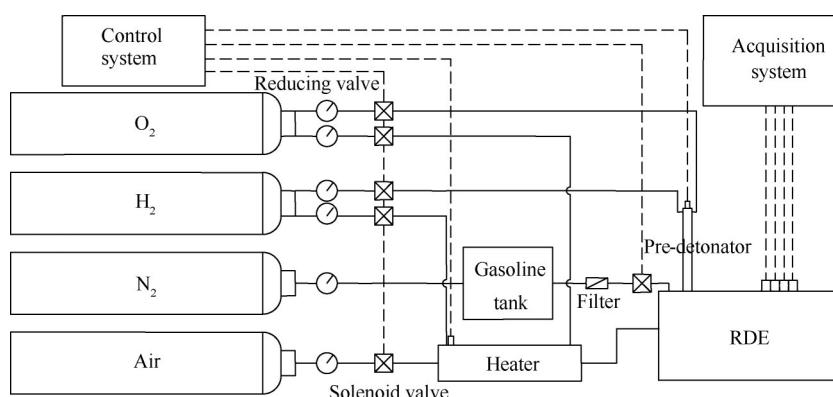


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

存储在高压油罐中,在高压氮气的挤压作用下,汽油依次通过过滤器、球阀、液体涡轮流量计、单向阀以及电磁阀,最后通过周向均匀分布的高压雾化喷嘴喷注进入燃烧室,以此提高雾化效果,冷流状态下雾化后的最小液滴粒径可达到 $20\mu\text{m}$ 。实验中通过控制高压油罐内的压力达到控制汽油流量的目的,汽油流量最大可达到 200g/s 。空气和汽油流量由流量计进行监测,通断时间通过电磁阀进行控制。

2.2 加热器系统

加热器系统由高压氢气罐、高压氧气罐、球阀、减压阀、限流喉道、电磁阀、单向阀以及点火装置组成。加热器的燃料和氧化剂分别为氢气和空气,实验过程中采用火花塞放电对冷流空气和氢气预混气进行点火,加热冷流空气至高总温,通过在加热器出口补充氧气保持高温空气中的氧含量不变。加热器具有稳定可靠、加热速度快等优点,最大可加热质量流量 2kg/s 的空气至 1000K 。

2.3 两相旋转爆轰燃烧室

图 2 是两相旋转爆轰发动机实物图,其中爆轰燃烧室采用一端封闭一端开口的等直圆环形结构,燃烧室外径和内径分别为 204mm 和 166mm ,环形通道宽度为 19mm ,轴向长度为 155mm 。空气与汽油采用环缝与喷嘴对撞喷注的方式进行混合,其中汽油通过周向均匀分布的 36 个高压微细雾化喷嘴沿轴向喷注,而空气则通过收缩扩张型环缝进入燃烧室,如图 3(a)所示。汽油和空气的流量通过安装在管路中的流量计进行测量,实验中的全局当量比采用管路中的汽油与氧气质量流量进行计算。

实验主要通过测量的压力信号对旋转爆轰波的传播特性进行分析,燃烧室外壳测量孔位置如图 3 所

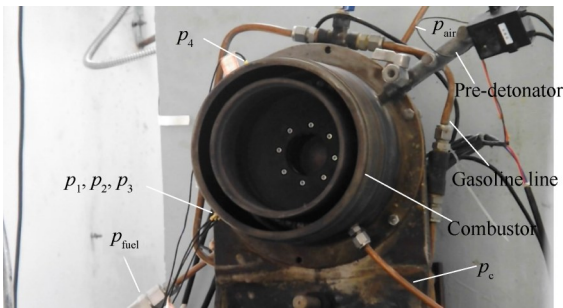


Fig. 2 Two-phase rotating detonation engine

示。空气管路和汽油集油腔分别安装有扩散硅式压力变送器,测量空气以及集油腔内的平均压力 p_{air} 和 p_{fuel} ,如图 2 所示,该压力变送器具有响应时间快、测量精度高的优点。燃烧室外壁面分别安装有 4 个高频动态压力传感器($p_1\sim p_4$)和扩散硅式压力变送器 p_c ,用来测量燃烧室内高频瞬态压力以及燃烧室的平均压力。高频动态压力传感器和扩散硅式压力变送器均采用平齐安装的方式,以减小对爆轰波面的干扰。高频压力传感器 p_1, p_2 和 p_3 在同一周向位置,分别位于空气环缝下游 $8\text{mm}, 24\text{mm}$ 以及 40mm 处,扩散硅式压力变送器 p_c 距环缝 24mm ,其中 p_2 与 p_4 位于同一轴向位置,周向间隔 90° , p_c 与 p_4 轴对称分布。

2.4 点火系统

实验利用垂直安装的预爆轰管对汽油空气混合物进行起爆,预爆轰管内径为 20mm ,长度为 600mm ,其内填充一定浓度的 H_2/O_2 预混气,以达到足够的起爆能量。点火时刻选择为汽油集油腔和空气管路压力处于稳定的区间。为了减少填充阶段燃烧室对预爆轰管内混合气体的影响,预爆轰管出口与燃烧室连接处采用薄膜隔离,点火位置如图 3 所示。实验

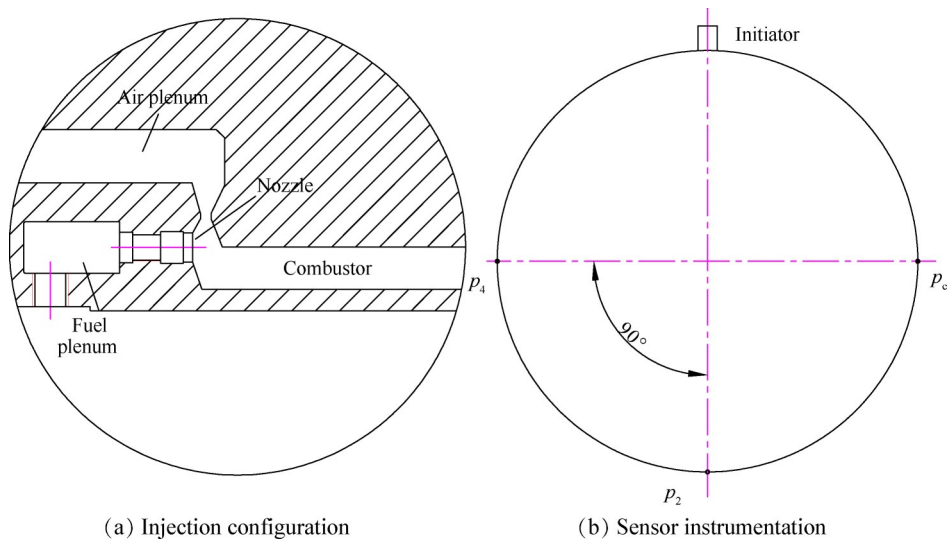


Fig. 3 Schematic diagram of injection configuration and sensor instrumentation

环境温度为 293K, 燃烧室出口直接与大气相通, 环境压力为一个标准大气压。

2.5 控制与采集系统

实验采用自主开发的时序控制程序实现电磁阀的通断控制和火花塞状态的控制, 其中时序控制精度达 ms 级。高频数据采集系统由高频压力传感器及 NI 公司 X 系列多功能高频压力采集模块组成, 其中 NI 高频数据采集系统采用 NI-STC3 定时同步与 USB 总线技术, 数据采集卡型号为 USB-4716, 共有 8 通道同步模拟信号输入, 单通道采样频率高达 2MS/s, ADC 位数为 16 位, 能够捕捉到瞬态的旋转爆轰波传播信号。

图 4 为两相 RDE 点火实验工作时序图, 其中, 绿色箭头向下表示打开, 红色箭头向上表示关闭。实验过程中首先打开空气与加热器氢氧管路的电磁阀, 随后开启采集系统, 几十毫秒后使用火花塞对加热器进行点火, 高总温空气进入燃烧室作为氧化剂。空气流量稳定后, 打开汽油管路的电磁阀, 随后向预爆轰管内喷注氢气和氧气, 当集油腔压力稳定后点火, 预爆轰管内形成的初始爆轰波进入燃烧室引燃油气混合物。 Δt 为两相旋转爆轰发动机的工作时间, 实验结束停止喷注汽油以及加热器的氢气和氧气, 通过持续喷注一段时间的空气实现发动机的熄火与冷却。为保证传感器与发动机的使用寿命, 实验中发动机工作时间设置为 1s。

3 结果与讨论

在两相旋转爆轰发动机实验过程中, 固定空气质量流量与空气总温, 通过改变汽油质量流量与空气喷注环缝宽度, 在多种工况下开展了热试实验, 研究了空气喷注环缝宽度对两相 RDE 内旋转爆轰波传播稳定性、压力特性以及频率特性的影响。表 1 为实验工况表, 表中 Φ 为推进剂当量比, T_0 为空气总温, $\dot{m}_{\text{air}}$, $\dot{m}_{\text{fuel}}$ 分别为空气与汽油的质量流量, f_0 是燃烧室内高频压力信号经快速傅里叶变换得到的主频, p_{av} 表示旋转爆轰波平均峰值绝对压力, 如无特别说明, 其

余压力均为表压。空气质量流量与总温分别为 1110g/s 和 713K, 空气环缝宽度分别为 3mm, 4mm 以及 6mm, 研究两相旋转爆轰的当量比工作范围以及爆轰波传播特性。当空气环缝宽度为 3mm, 当量比为 0.83~1.19 时, 燃烧室内均得到了连续自持传播的旋转爆轰波, 传播模态为双波对撞与单波的混合模态以及单波模态, 爆轰波传播频率为 1.83~2.05kHz; 降低当量比至 0.7, 爆轰波传播模态转变为间断爆轰; 进一步降低当量比至 0.61, 爆轰波起爆失败。当空气环缝宽度为 4mm, 当量比为 0.84~1.19 时, 爆轰波传播模态为混合模态以及单波模态, 爆轰波传播频率为 1.82~1.9kHz; 降低当量比至 0.61~0.66, 爆轰波传播稳定性变差, 传播模态表现为间断爆轰或零星爆轰。当空气环缝宽度为 6mm 时, 旋转爆轰波传播当量比范围缩小为 0.83~1.19, 且传播模态为稳定性较差的间断爆轰和零星爆轰。由表 1 可知, 在同一当量比条件下, 随着空气环缝宽度的增加, 爆轰波传播频率降低。当环缝宽度为 3mm, 当量比为 1.19 时, 传播频率达到最大值 2047.7Hz。此外, 爆轰波平均峰值压力基本随着当量比增大而增大, 当空气环缝宽度为 4mm 时, 爆轰波平均峰值压力最大。

3.1 发动机工作过程

当环缝宽度为 3mm 时, 汽油质量流量为 85.7g/s, 空气质量流量为 1110.0g/s, 此时推进剂当量比为 1.19, 空气总温为 713K, 对两相旋转爆轰发动机的工作过程进行研究, 如表 1 中 Case 5 所示, 该工况下爆轰波成功起爆, 传播模态为单波。由于高频压力传感器在实验过程中受到高温爆轰燃烧产物的影响, 测得的高频压力原始信号存在温度漂移现象, 如图 5 所示。为了便于分析爆轰波的传播过程, 对高频原始压力信号进行高通滤波以及基准值归零处理, 处理后的高频压力时程曲线如图 6 中的 p_2 所示。由图可知, p_2 采集到的高频压力信号周期性陡升骤降表明燃烧室内存在连续旋转传播的爆轰波, 在发动机工作过程中, 高频压力信号幅值整体上较为稳定, 没有出现明显的熄灭现象。随着旋转爆轰波的连续传

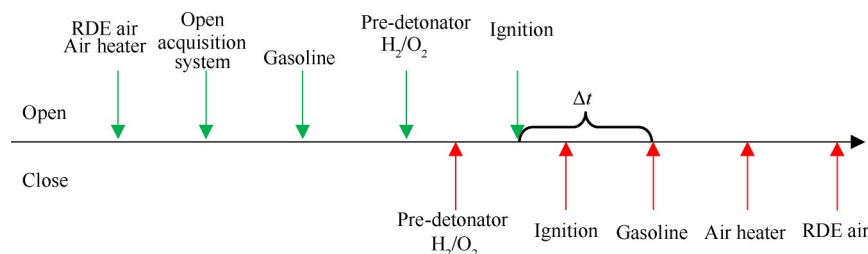


Fig. 4 Schematic diagram of experiment time sequence

Table 1 Experiment condition								
Case	δ/mm	Φ	T_0/K	$\dot{m}_{\text{air}}/(\text{g/s})$	$\dot{m}_{\text{fuel}}/(\text{g/s})$	f_d/Hz	p_{av}/MPa	Mode
1	3	0.61	713	1110.0	44.2	—	—	Deflagration
2	3	0.70	713	1110.0	50.8	1718.1	0.29	Intermittent detonation
3	3	0.83	713	1110.0	60.2	1830.7	0.40	Hybrid mode
4	3	0.97	713	1110.0	70.3	1945.8	0.52	Hybrid mode
5	3	1.19	713	1110.0	85.7	2047.7	0.60	Single wave
6	4	0.61	713	1110.0	44.2	1452.0	0.18	Sporadic detonation
7	4	0.66	713	1110.0	47.9	1521.7	0.21	Intermittent detonation
8	4	0.84	713	1110.0	62.4	1818.2	0.61	Hybrid mode
9	4	0.97	713	1110.0	70.3	1827.3	0.64	Hybrid mode
10	4	1.19	713	1110.0	85.7	1900.9	0.73	Single wave
11	6	0.66	713	1110.0	47.8	—	—	Deflagration
12	6	0.83	713	1110.0	60.2	1404.5	0.30	Local detonation
13	6	0.94	713	1110.0	68.0	1455.2	0.38	Intermittent detonation
14	6	1.04	713	1110.0	75.0	1536.7	0.43	Intermittent detonation
15	6	1.19	713	1110.0	85.7	1437.7	0.37	Local detonation

Hybrid mode: coexistence of double wave collision and single wave.

播,燃烧室与集油腔内的稳压信号均出现高频压力振荡现象,燃烧室平均压力明显上升。

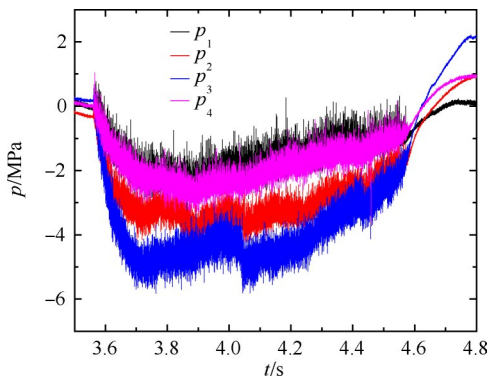


Fig. 5 Original high frequency pressure in Case 5

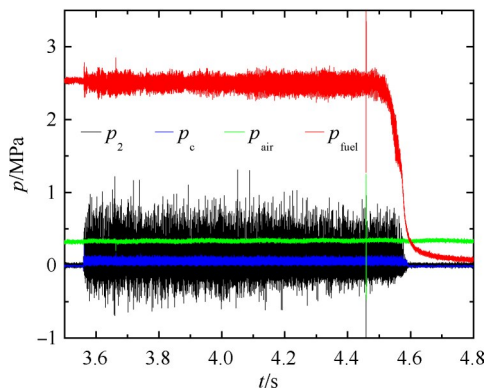


Fig. 6 Global pressure signals in Case 5

图 7 是点火阶段燃烧室内压力信号的时程曲线图。当空气集气腔以及集油腔压力达到稳定状态后,采用预爆轰管进行点火,预爆轰管内形成的初始

爆轰波击穿薄膜进入环形燃烧室引燃汽油空气混合物。 p_2 与 p_c 分别在 3559.812ms 和 3559.816ms 时刻采集到第一个压力扰动,压力峰值约为 0.12MPa,为初始爆轰波进入环形燃烧室引起。初始爆轰波进入燃烧室后引燃汽油空气混合物,压力信号出现波动,但并没有直接形成爆轰波,而是经过大约 2.648ms 高频压力传感器 p_2 采集到了第一个压力跃升信号,压力峰值约为 0.462MPa。这主要是因为实验采用垂直安装的预爆轰管作为点火装置,初始爆轰波进入非受限环形燃烧室衍射衰减为缓燃波,沿燃烧室周向相反方向传播,随后在燃烧室壁面曲率、推进剂喷注以及边界层发展等湍流作用下,火焰燃烧锋面加速与前导激波耦合,最终在 3562.46ms 时刻形成连续旋转传播的爆轰波。

在 4495.816ms 时刻,关闭汽油管路电磁阀,集油腔压力逐渐降低,而此时空气管路压力基本不变,导致波前推进剂当量比下降,爆轰波强度逐渐降低,表

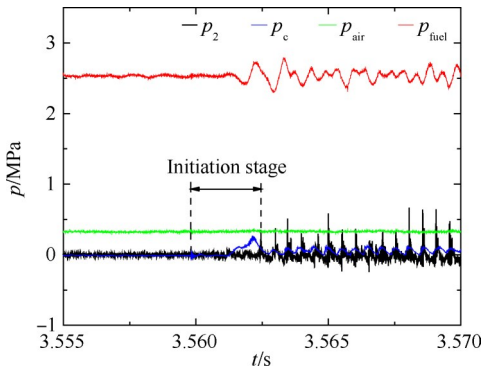


Fig. 7 Initiation stage of RDE in Case 5

现为爆轰波压力峰值的持续衰减,如图8所示。关闭汽油管路电磁阀并未导致爆轰波的瞬时熄灭或解耦,而是逐渐衰减至熄灭,主要原因为汽油管路以及集油腔内剩余的汽油维持爆轰波继续传播了一段时间,这说明旋转爆轰波具有自适应当量比变化的能力。由图可知,在4581.864ms左右,剩余的汽油耗尽,发动机熄火,持续通冷流空气进行爆轰燃烧产物吹除以及发动机冷却。

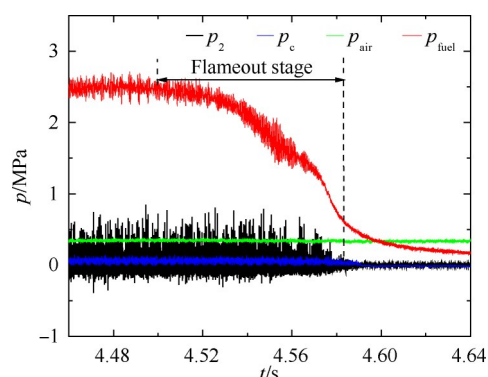


Fig. 8 Flameout stage of RDE in Case 5

3.2 爆轰波传播压力特性分析

图9是三个不同空气喷注环缝宽度条件下的实验结果。当空气环缝宽度为3mm时,在不同当量比条件下对爆轰波的传播过程进行了实验研究,如图9(a)所示。当推进剂当量比为0.61时,汽油空气混合物活性较低,爆轰波起爆失败,燃烧室静压等于外界环境压力;提高推进剂当量比至0.7,旋转爆轰波成功起爆,传播模式为间断爆轰,且峰值压力较低,平均

峰值压力约为0.29MPa;当推进剂当量比为0.83时,爆轰波峰值压力明显上升,但传播过程中存在周期性多波对撞-解耦-再起爆过程;提高当量比至0.97,爆轰波传播模式为双波对撞与单波的混合模式,发动机工作过程中没有出现明显的熄爆现象;进一步提高推进剂当量比至1.19,爆轰波峰值压力增大,且峰值压力脉动量降低,旋转爆轰波以单波模式在燃烧室内连续自持传播。图9(b)表示空气环缝宽度为4mm时的实验结果。由图可知,在当量比为0.61~1.19的工况下,旋转爆轰波均成功起爆,但爆轰波传播状态存在差异。从爆轰波压力曲线整体情况来看,当推进剂当量比处于0.84~1.19时,爆轰波峰值压力较高,且压力波动幅度较小,爆轰波传播模式为双波对撞与单波的混合模式或单波模式;降低当量比至0.61~0.66,爆轰波传播稳定性变差,传播模式表现为间断爆轰或零星爆轰,平均峰值压力约为0.18~0.21MPa。增加空气喷注环缝宽度至6mm,不同当量比条件下旋转爆轰波压力时程分布曲线如图9(c)所示。由图可知,当推进剂当量比为0.66时,汽油空气混合物以爆燃模式组织燃烧,爆轰当量比区间下限提高;当推进剂当量比为0.83和1.19时,爆轰波传播模式为局部爆轰,燃烧室以爆轰模式分别工作了98.3ms和184.0ms,其余阶段燃烧室均以爆燃模式工作;当推进剂当量比为0.94和1.04时,爆轰波传播稳定性有所提高,爆轰波多次解耦后重新起爆,在整个发动机工作过程中,燃烧室均以间断爆轰模式工作。

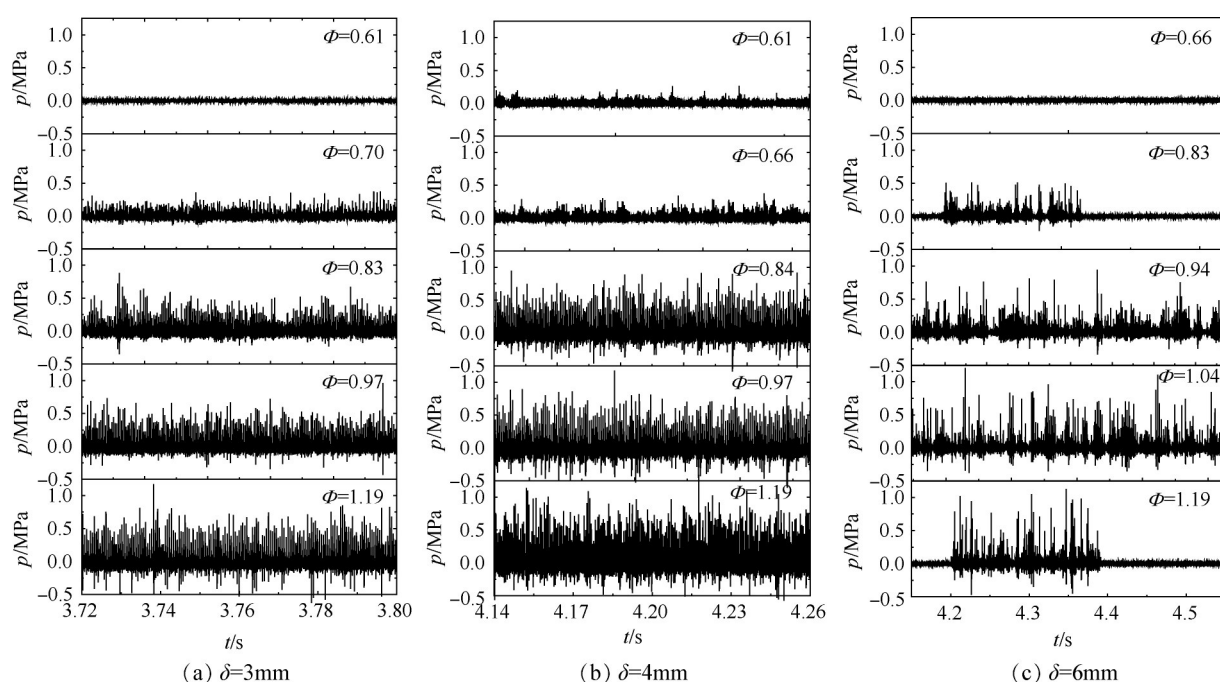


Fig. 9 Experimental results with different equivalence ratio and gap width

图 10 表示不同空气喷注环缝宽度下爆轰波平均峰值压力随推进剂当量比的变化趋势。由图可知,当环缝宽度为 3mm 时,爆轰波平均峰值压力随着当量比单调递增,这主要是因为贫油条件下反应物当量比增大,即汽油喷注压力增大,使得汽油液滴穿透深度变大,提高了汽油空气混合物掺混效果与化学反应活性,导致爆轰波峰值压力上升;而富油工况下,一方面高温空气与汽油液滴掺混距离较小,仍剩余部分汽油重组分以小液滴形态存在,没有参与爆轰燃烧;另一方面由于空气的径向喷注导致轴向喷注的雾化汽油颗粒之间碰撞聚合加剧,部分汽油液滴吸附在燃烧室外壁面上,实际反应物当量比低于实验给定值,在当量比 1.19 的工况下,实际参与反应的推进剂当量比接近理想化学当量比,因此爆轰波峰值压力随着当量比的增加持续上升。由于 4mm 环缝与 3mm 环缝宽度相差较小,爆轰波峰值压力随当量比变化趋势基本一致,而爆轰波平均峰值压力有所升高,可能是因为 4mm 环缝下扩张段空气流速较慢,提高了汽油空气混合物的掺混效果;此外,由于流体的惯性,燃烧室内壁面拐角处存在低速回流区,吸附高温爆轰产物。4mm 环缝下空气流速较低,形成的回流区较小,回流区与新鲜反应物接触面积较小,较少的新鲜反应物提前燃烧,能量损失低于 3mm 环缝下,且较小的低速回流区对新鲜反应物喷注过程影响较小,因此环缝宽度 4mm 条件下爆轰波平均峰值压力整体较高。当空气环缝宽度为 6mm 时,空气喷注总压下降,环缝喉道处大部分区域达不到壅塞状态,反应物的喷注动量显著降低,波前新鲜反应物的压力与高度均较低,表现为爆轰波峰值压力的整体下降。爆轰波平均峰值压力随着当量比增加先上升后降低,在当量比 1.04 时达到最大值 0.43MPa,此时爆轰波传播模态为间断爆轰。

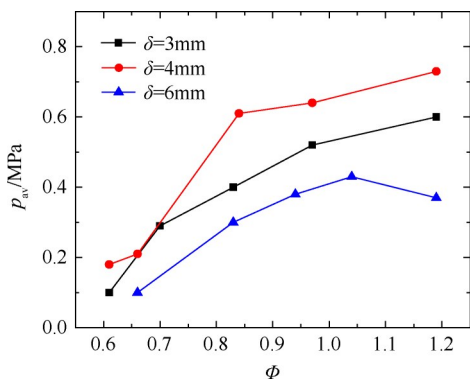


Fig. 10 Average peak pressure with different equivalence ratio and gap width

图 11 是三个环缝宽度条件下爆轰波传播模态随当量比的变化趋势。由图可知,环缝宽度 3mm 与 4mm 条件下爆轰波模态转变基本一致,但环缝宽度为 4mm 时爆轰当量比下限更低。增加空气喷注环缝宽度至 6mm,爆轰波传播稳定性和爆轰区间降低,推进剂当量比 1.04 为最佳实验工况,旋转爆轰波传播频率为 1536.7Hz。

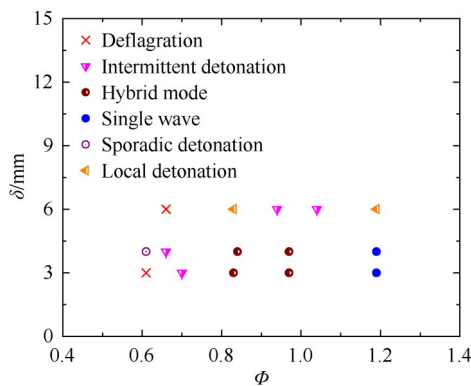


Fig. 11 Propagation mode with different equivalence ratio and gap width

为进一步研究旋转爆轰波的压力特性,对爆轰波峰值压力脉动特性进行分析。图 12 是 Case 5 条件下发动机工作过程中爆轰波峰值压力的时程分布图,由图可知,爆轰波峰值压力变化为 0.19~0.98MPa,峰值压力脉动量较大,平均峰值压力约为 0.6MPa。该工况下爆轰波 CJ 压力为 1.252MPa,远大于实验测得的平均值,原因可能为:(1)空气环缝宽度较小,高温空气喷注速度较快,导致汽油液滴穿透深度低,进而影响到汽油空气掺混效果。(2)燃烧室流通面积与环缝面积之比较大,空气流速变快,导致燃烧室头部存在较大燃烧产物回流区,吸附部分汽油空气混合物提前燃烧。因此,实验测得的爆轰波峰值压力存在损失,整体低于理论 CJ 爆轰压力。平均压力反映了爆轰波在整个传播过程中的宏观压力特性,不能反映爆轰波峰值压力的脉动特性,实际上爆轰波瞬时峰值压力围绕着平均压力上下脉动,如图 13 所示。由于新鲜反应物层高度的空间与时间差异,爆轰波峰值压力随机性变化,不可能保持绝对稳定。为了评估旋转爆轰波峰值压力的脉动特性,引入压力脉动强度 I ,定义为爆轰波峰值压力标准差与平均峰值表压力的比值,数学表达式为

$$I = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - p_{av})^2}}{p_{av}} \times 100\% \quad (1)$$

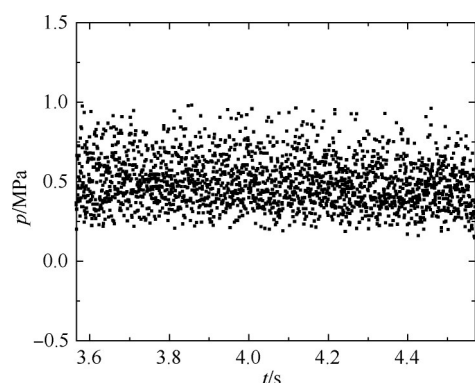


Fig. 12 Peak pressure distribution in Case 5

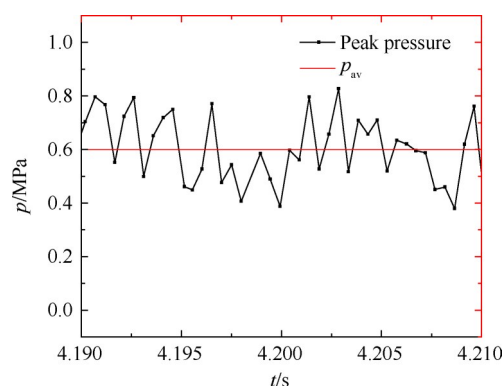


Fig. 13 Local peak pressure fluctuation in Case 5

图14是压力脉动强度 I 的计算结果。当燃烧室工作模态为爆燃、零星或间断爆轰以及局部爆轰时,爆轰波峰值压力剧烈波动,传播稳定性极差,不计算其压力脉动强度。由图可知,当推进剂当量比处于0.83~1.19时,当量比越高,压力脉动强度越低,即爆轰波峰值压力脉动越小。环缝宽度4mm下爆轰波峰值压力的脉动强度整体低于环缝宽度3mm下的压力脉动强度,这主要是因为环缝宽度为3mm时空气流动速度较大,汽油液滴穿透深度低,导致汽油空气混合物掺混效果较差;此外,燃烧室流通面积与3mm环缝面积之比大于与4mm环缝面积之比,空气流速更快,增加了燃烧产物回流区存在的可能性,导致新鲜反应物提前燃烧,新鲜反应物层高度的时空差异表现为爆轰波峰值压力的强烈脉动。当空气喷注环缝宽度为4mm,推进剂当量比为1.19时,爆轰波峰值压力脉动强度 I 为16.3%,旋转爆轰波传播压力最为稳定。

3.3 爆轰波传播频率特性分析

为了分析旋转爆轰波的传播频率特性,对Case 5条件下 p_2 测得的高频压力信号进行频域与时域分析,分别采用快速傅里叶变换(FFT)和短时傅里叶变换(STFT)进行处理。图15是通过FFT得到的功率谱密度随频率的分布图,结果显示旋转爆轰波传播频率

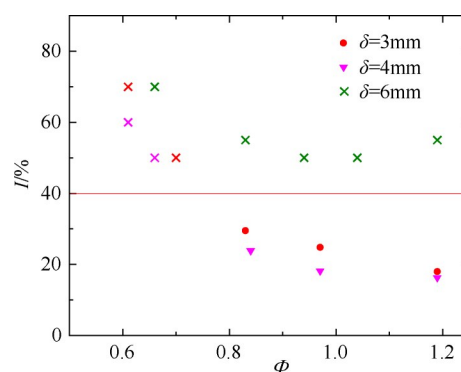


Fig. 14 Pressure fluctuation intensity with different equivalence ratio and gap width

振荡范围为1997.7~2080.8Hz,功率谱密度最大的主频值为2047.7Hz。STFT结果反映了高频压力信号在不同时刻的频率振荡特性,如图16所示。由图可知,在3562.73ms时刻燃烧室内形成连续旋转传播的爆轰波,旋转爆轰波的传播频率在发动机工作过程中围绕着平均频率振荡,振荡范围为1911.6~2076.7Hz,平均传播频率约为2014.2Hz,与FFT得到的结果基本一致。在4573.9ms时刻,爆轰波传播频率明显下降,爆轰波逐渐衰退为爆燃波直至发动机熄灭,环形燃烧室以爆轰模态工作了1011.17ms,略大于实验设定值1s。

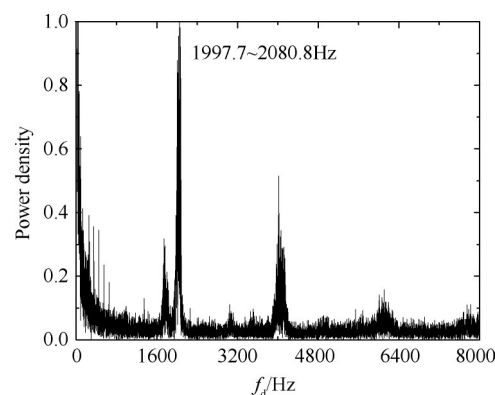


Fig. 15 FFT results in Case 5

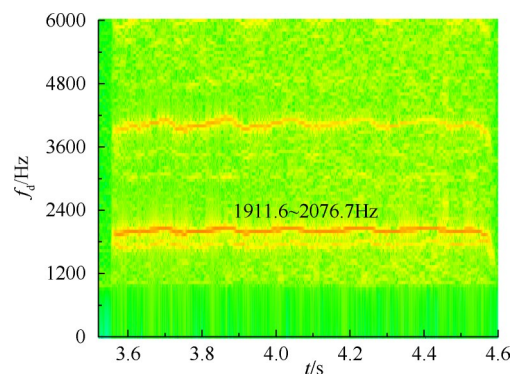


Fig. 16 STFT results in Case 5

基于 p_2 测得的高频瞬态压力信号,捕捉每个传播周期内爆轰波压力尖峰的时刻,计算得到的旋转爆轰波瞬时传播速度随时间的分布,如图 17 所示。由图可知,旋转爆轰波传播速度主要在 1117.5~1241.6m/s 内波动,平均传播速度约为 1176.6m/s,对应的平均传播频率为 2024.5Hz,与 FFT 以及 STFT 得到的结果吻合较好。该工况下 CJ 爆轰速度为 1815.9m/s,由于受到燃烧室壁面曲率、汽油液滴蒸发与掺混以及侧向膨胀等影响,爆轰波传播速度存在严重亏损。

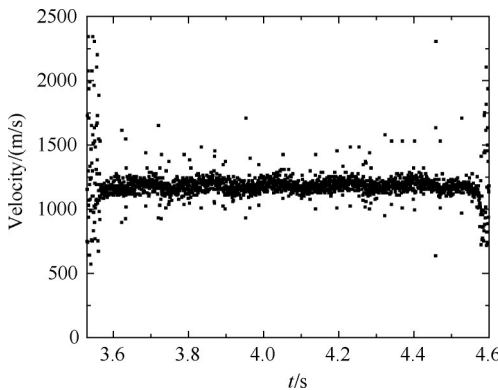


Fig. 17 Propagation velocity in Case 5

图 18 是不同空气喷注环缝宽度下旋转爆轰波传播频率随当量比的变化趋势。由图可知,当环缝宽度为 3mm 和 4mm 时,爆轰波传播频率随着当量比增大而增大;当环缝宽度为 6mm 时,爆轰波传播频率极大值出现在当量比 1.04 附近。随着空气环缝宽度的增加,爆轰波传播频率呈现整体降低的趋势,这主要是因为环缝宽度较小时,空气喷注阻塞比较高,使得空气喷注总压上升,而爆轰波峰值压力较低,在爆轰波扫过后推进剂更快恢复喷注,使得波前反应物中气态汽油含量以及掺混效果有所提高。由于气态汽

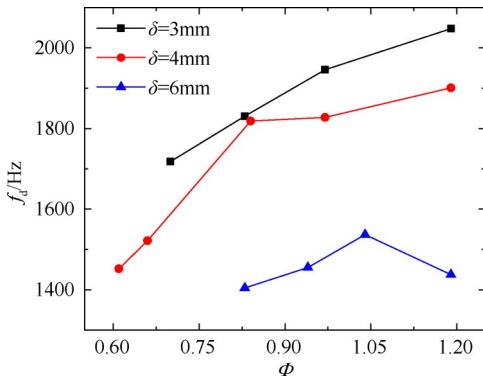


Fig. 18 Propagation frequency with different equivalence ratio and gap width

油反应区长度远小于液态汽油反应区长度,化学反应速率快,能量释放速率快,因此当环缝宽度为 3mm 时,爆轰波传播频率整体较高。当空气环缝宽度为 6mm 时,空气喷注总压较低,环缝喉道大部分区域处于亚声速流动状态,反应物喷注动量降低,使得波前积累的新鲜反应物层高度降低,导致旋转爆轰波抵抗侧向膨胀的能力减弱,爆轰波传播稳定性较差,传播频率整体较低。

4 结 论

为了研究空气喷注环缝宽度对两相旋转爆轰波压力与频率特性的影响,在一定当量比范围内开展了旋转爆轰实验,所得结论如下:

(1)在三个空气喷注环缝宽度下均实现了高总温空气与汽油的两相旋转爆轰。当环缝宽度为 3mm 与 4mm 时,爆轰波平均峰值压力与传播频率均随着当量比单调递增;增加环缝宽度至 6mm,爆轰波传播稳定性变差,爆轰波平均峰值压力与传播频率随当量比先增大后减小。

(2)当环缝宽度为 4mm 时,获得的旋转爆轰波平均峰值压力最高,压力脉动强度最低,爆轰波传播稳定性最强;当环缝宽度为 6mm 时,爆轰波平均峰值压力最低,传播稳定性最差。在一定工况范围内,增加当量比可有效降低爆轰波峰值压力脉动强度。

(3)随着空气环缝宽度的增加,爆轰波传播频率呈现整体降低的趋势。当环缝宽度为 3mm,当量比为 1.19 时,爆轰波以单波模态在环形燃烧室内连续旋转传播,平均传播速度约为 1176.6m/s,爆轰波传播速度存在严重亏损。

(4)实验结果表明,综合考虑旋转爆轰波峰值压力、爆轰当量比区间、压力脉动强度以及传播频率,在外径与内径分别为 204mm 和 166mm 的燃烧室结构下,最佳空气喷注环缝宽度为 4mm。燃烧室流通面积与环缝面积之比对两相旋转爆轰波传播特性的影响有待深入研究。

致 谢:感谢国家自然科学基金、中国博士后科学基金和国防科技重点实验室基金的资助。

参考文献

[1] Kindracki J. Experimental Studies of Kerosene Injection into a Model of a Detonation Chamber [J]. *Journal of Power Technologies*, 2012, 92(2): 80-89.
[2] Kindracki J. Study of Detonation Initiation in Kerosene-Oxidizer Mixtures in Short Tubes [J]. *Shock Waves*,

- 2014, 24(6): 603-618.
- [3] Kindracki J. Experimental Research on Rotating Detonation in Liquid Fuel-Gaseous Air Mixtures[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2015, 43: 445-453.
- [4] Frolov S M, Aksenov V S, Ivanov V S, et al. Continuous Detonation Combustion of Ternary "Hydrogen-Liquid Propane-Air" Mixture in Annular Combustor [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42 (26) : 16808-16820.
- [5] Bykovskii F A, Mitrofanov V V, Vedernikov E F. Continuous Detonation Combustion of Fuel-Air Mixtures [J]. *Combustion Explosion and Shock Waves*, 1997, 33 (3) : 344-353.
- [6] 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.
- [7] Bykovskii F A, Zhdan S A, Vedernikov E F. Continuous Spin Detonations [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2012, 22(6): 1204-1216.
- [8] Bykovskii F A, Zhdan S A, Vedernikov E F. Initiation of Detonation of Fuel-Air Mixtures in a Flow-Type Annular Combustor [J]. *Combustion Explosion and Shock Waves*, 2014, 50(2): 214-222.
- [9] Bykovskii F A, Zhdan S A, Vedernikov E F. Continuous Spin Detonation of a Heterogeneous Kerosene-Air Mixture with Addition of Hydrogen [J]. *Combustion Explosion and Shock Waves*, 2016, 52(3): 371-373.
- [10] Bykovskii F A, Zhdan S A, Vedernikov E F. Continuous Detonation of the Liquid Kerosene-Air Mixture with Addition of Hydrogen or Syngas [J]. *Combustion Explosion and Shock Waves*, 2019, 55(5): 589-598.
- [11] 贾冰岳, 张义宁, 潘 虎, 等. 液态碳氢燃料旋转爆震发动机起爆过程试验研究[J]. 推进技术, 2021, 42 (4): 906-914. (JIA Bing-yue, ZHANG Yi-ning, PAN Hu, et al. Experimental Study on Initiation Process of Liquid Hydrocarbon Rotary Detonation Engine [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(4): 906-914.)
- [12] 王顺利, 吴 云, 金 迪, 等. 不同当量比下喷管对旋转爆震特性的影响研究[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40 (10): 18-28.
- [13] 郑 权, 李宝星, 翁春生, 等. 双波对撞模式下的液态燃料旋转爆轰发动机推力测试研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(4): 679-689.
- [14] 郑 权, 魏万里, 翁春生, 等. 液态燃料喷注压力对旋转爆轰波影响的实验研究[J]. 推进技术, 2020, 41 (12) : 2790-2797. (ZHENG Quan, WEI Wan-li, WENG Chun-sheng, et al. Experimental Study for Effects of Liquid-Fuel Injection Pressure on Rotating Detonation Wave [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(12): 2790-2797.)
- [15] 郑 权, 李宝星, 翁春生, 等. 燃烧室长度对液态燃料旋转爆轰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.)
- [16] 李宝星, 翁春生. 液态燃料对连续旋转爆轰发动机爆轰特性的影响[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(2): 331-338.
- [17] 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.
- [18] 李宝星, 许桂阳, 翁春生, 等. 燃烧室宽度对液态燃料旋转爆轰发动机影响实验研究[J]. 推进技术, 2021, 42(2): 372-381. (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): 372-381.)
- [19] 王致程, 严 宇, 王 可, 等. 燃烧室宽度对煤油旋转爆震波传播模式的影响[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.)
- [20] 魏万里, 郑 权, 鲁江涛, 等. 中心锥对液态燃料旋转爆轰发动机工作过程与性能的影响[J]. 兵工学报, 2021, 42(6): 1185-1194.

(编辑:朱立影)