

高总温空气与汽油燃料的旋转爆震验证试验^{*}

葛高杨¹, 马元², 夏镇娟¹, 侯世卓¹, 马虎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: 为验证高总温空气来流条件下汽油燃料旋转爆震的可行性, 开展了气液两相旋转爆震发动机试验研究。旋转爆震发动机环形燃烧室外径和内径分别为202mm和166mm, 长度为155mm。通过空气加热器模拟高总温空气来流环境, 汽油和空气采用分开喷注的方式, 分别通过高压喷嘴和环缝进入燃烧室。试验采用垂直安装的预爆震管成功起爆了旋转爆震波, 并实现了旋转爆震波的连续稳定传播。试验结果表明: 当空气质量流量为1110.0g/s, 当量比为0.97, 空气总温为713K时, 旋转爆震波以双波对撞模态在燃烧室内连续传播, 爆震波传播频率为1827.31Hz, 与高频压力信号经快速傅里叶变换得到的主频一致, 爆震波传播速度为1059.6m/s。在空气质量流量为1110.0g/s, 当量比为0.84, 空气总温为713K的工况下进行了3s的长程试验, 验证了以高总温空气为氧化剂、汽油为燃料的旋转爆震发动机长时间连续稳定工作的可行性, 获得的旋转爆震波传播频率为1907.5Hz。

关键词: 高总温空气; 气液两相; 旋转爆震; 双波对撞; 长程试验

中图分类号: V435.12

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2022) 06-200943-11

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 200943

Verification Experiment of Rotating Detonation Fueled by Gasoline with High Total Temperature Air

GE Gao-yang¹, MA Yuan², XIA Zhen-juan¹, HOU Shi-zhuo¹, MA Hu¹, 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 verify the feasibility of rotating detonation fueled by gasoline under high total temperature air, experimental research of gas-liquid two-phase rotating detonation engine was carried out. The outer diameter and inner diameter of the annular combustor are 202mm and 166mm, respectively, and the length is 155mm. The air heater is used to simulate the high total temperature air environment. Gasoline and air are injected into the combustor through high-pressure nozzle and annular gap respectively. The rotating detonation wave was successfully initiated by a perpendicularly installed pre-detonator, and continuous propagation of the rotating detonation wave was realized. The experimental results show that when the air mass flow rate is 1110.0g/s, the

^{*} 收稿日期: 2020-11-26; 修订日期: 2021-01-20。

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, 研究领域为爆震推进。

通讯作者: 马虎, 博士, 副教授, 研究领域为爆震推进。

引用格式: 葛高杨, 马元, 夏镇娟, 等. 高总温空气与汽油燃料的旋转爆震验证试验[J]. 推进技术, 2022, 43(6): 200943. (GE Gao-yang, MA Yuan, XIA Zhen-juan, et al. Verification Experiment of Rotating Detonation Fueled by Gasoline with High Total Temperature Air[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(6):200943.)

equivalence ratio is 0.97 and the air total temperature is 713K, the rotating detonation wave propagates continuously in two-wave collision mode in the combustor. The propagation frequency of detonation wave is 1827.31Hz, which is consistent with the main frequency obtained from the Fast Fourier Transform of high-frequency pressure signal, and the propagation speed of detonation wave is 1059.6m/s. A long duration test for 3s was performed at the air mass flow rate of 1110.0g/s, equivalence ratio of 0.84 and air total temperature of 713K. The continuously working feasibility of the rotating detonation engine with high total temperature air as oxidant and gasoline as fuel for a long time was verified. The obtained rotating detonation wave propagation frequency is 1907.5Hz.

Key words: High total temperature air; Gas-liquid two-phase; Rotating detonation; Two-wave collision; Long duration test

1 引言

旋转爆震发动机(RDE)是利用环形燃烧室内连续旋转传播的一道或者多道爆震波扫过推进剂混合物生成的高温高压爆震产物从喷管排出从而产生推力的新型推进装置。燃料通过环形面的微型喷嘴喷注到燃烧室内,使用火花塞或其它起爆装置进行起爆,形成燃烧波沿环形燃烧室周向传播,逐渐发展成为爆震波在燃烧室内连续旋转传播。由于旋转爆震发动机具有结构简单、推重比大、热循环效率高等优点,发展前景好,近年来已成为国内外的研究热门之一。

随着对旋转爆震发动机的深入研究以及工程应用的需求,由于液态燃料与气态燃料相比具有更高的密度比冲,在相同体积的情况下能产生更大的冲量,开展采用液态燃料组织燃烧的旋转爆震成为了各个研究机构的重点研究内容。俄罗斯拉夫连季耶夫流体力学学院(LIH)的Bykovskii等^[1-6]对以煤油/液氧、煤油/富氧空气、煤油/氧气、柴油/富氧空气以及汽油/富氧空气为推进剂的两相连续旋转爆震做了大量工作。首先,Bykovskii等^[1]在外径204mm,出口直径50mm的圆盘型燃烧室内开展了煤油/富氧空气、煤油/空气以及柴油/空气的旋转爆震试验,成功获得了连续旋转传播的爆震波。Bykovskii等^[2]采用丙烷/空气以及液态煤油/空气在环形燃烧室内进行了试验,研究发现这两种推进剂活性较低,以空气作为氧化剂无法起爆,只有在推进剂中加入氧气(氧气与氮气质量比为1)才能获得连续传播的旋转爆震波。随后Bykovskii等^[3]针对煤油/液氧开展了旋转爆震试验,采用速度补偿的方法通过观察窗对燃烧室内流场进行了拍摄,得到了两相连续旋转爆震波的结构特征。在外径为100mm,宽10mm,长100mm的燃烧室中,获得了连续旋转传播的爆震波,传播速度为2460m/s;在外径为280mm,宽10mm,长60mm的燃烧室中,爆

震波传播速度为2200m/s。此外,在外径为100mm的燃烧室内,以富氧空气为氧化剂,实现了煤油为燃料的两相旋转爆震波的稳定传播,爆震波传播速度为1.1~2km/s。在点火方面,Bykovskii等^[4]通过试验验证了旋转爆震波在煤油/空气以及汽油/空气混合物中连续稳定传播的可能性,试验结果表明,爆震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,还发现随着氧化剂中氧含量的降低,爆震波传播速度以及燃烧室内的压力降低。此外,Bykovskii等^[5-6]采用航空煤油、空气以及氢气或者合成气(CO/H₂)进行了旋转爆震试验,随着空气、煤油和氢气流量的改变,爆震波传播模态从单波模态切换到五波模态,爆震波速度分布在1.15~1.67km/s,频率为0.73~4.86kHz。在煤油空气混合物中加入混合气(CO+3H₂)时,爆震波传播模态为双波对撞,平均传播速度为0.66~1.47km/s,传播频率为0.85~1.87kHz,试验证明能否维持煤油燃料的旋转爆震状态是由混合气中的氢含量决定的。根据燃烧室出口测量的滞止压力,旋转爆震获得的比冲是两相燃料组分的函数,当两相燃料中氢气的质量分数达到42%,得到最大比冲值约为4000s。Frolov等^[7]采用氢气、液态丙烷和空气三组元推进剂在大尺寸环形燃烧室内进行了旋转爆震试验,其中燃烧室外径为406mm,宽度为25mm,在氢气空气混合物实现自持传播的旋转爆震后加入液态丙烷,获得了连续旋转传播的两相旋转爆震。

波兰的Kindracki^[8]对煤油和空气喷入环形燃烧室的雾化流场进行了试验研究,测量了空气的速度分布以及煤油液滴的直径。随后Kindracki^[9]对煤油氧气混合物的起爆特性进行了试验,研究了不同管径、点火能量以及氧化剂中不同氧含量条件下爆震波能否直接起爆。Kindracki采用煤油、氢气和空气三组元推进剂开展了旋转爆震试验,通过高频压力传感器和离子探针对旋转爆震波的起爆和传播特性

进行了分析,研究了燃料中氢含量对燃烧室压力以及爆震波传播速度的影响,在燃料中氢气占比57%的工况下,爆震波传播速度为1550m/s,试验结果表明,非均相混合物的旋转爆震存在20%~25%的速度亏损。此外,还将液态硝酸异丙酯加入煤油中,并对其对提高煤油空气混合物爆震敏感性的影响进行了考察^[10]。

法国MBDA公司与LIH针对气氢/液氧两相旋转爆震发动机开展了研究,在直径100mm的环形燃烧室内实现了爆震波的连续旋转传播,并在不同气氢/液氧喷注面积比的工况下,测量了燃烧室压力与发动机比冲^[11]。随后MBDA公司设计了大尺寸模块化的两相旋转爆震发动机试验样机,爆震燃烧室外径为350mm,内径为280mm,包含推力矢量测量装置和机械冷却结构,并计划未来在该发动机上采用气氢/气氧、气氢/液氧以及液态碳氢燃料/空气作为推进剂进行旋转爆震试验^[12]。在两相连续旋转爆震发动机应用方面,法国计划将连续旋转爆震发动机与冲压发动机进行组合,应用于“英仙座”导弹作为动力装置^[13]。

目前国内研究机构对于旋转爆震发动机的试验研究大多采用气态燃料,北京大学^[14]、清华大学^[15]、国防科技大学^[16-18]和南京理工大学^[19-24]等单位对采用氢气、甲烷、乙烯以及乙炔为燃料的气相旋转爆震开展了大量的试验研究,并对爆震波起爆、传播模式与控制、速度亏损以及推力性能等方面开展了深入研究。

南京理工大学的郑权等^[25]开展了汽油/富氧空气的旋转爆震试验,试验成功起爆并实现了旋转爆震波的自持传播,在当量比为1.13时爆震波的传播频率为2.1~2.4kHz,传播速度为1022.2~1171.8m/s,试验中发现了单波头、双波头和多波头同时存在的混合传播模式,且旋转爆震波传播速度存在亏损。在一定工况范围内,旋转爆震波的传播速度和压力值随推进剂的质量流量增大而增大,旋转爆震波压力极大值出现在当量比1.1附近。此外,在富氧空气(34.3%O₂/65.7%N₂)流量为945.3g/s,汽油流量为84.3g/s,当量比为0.82的工况下,爆震波传播模式为双波对撞,平均传播频率为2.174kHz,平均传播速度为1051m/s,爆震波高度在55~70mm,有效推力为607.3N,燃料比冲为735.1s。试验发现双波对撞模式下发动机推力波动较大,推力曲线围绕平均推力振荡,稳定工作阶段发动机振动频率与爆震波平均传播频率基本一致^[26]。

西安近代化学研究所的李宝星等^[27]开展了燃料/氧化剂分别为煤油/富氧空气的两相旋转爆震试验研究,常温下成功实现了旋转爆震的起爆与自持传播。试验使用微小型脉冲爆震发动机进行点火,研究发现混合物的反应活性至关重要,当氧化剂中氧含量偏低时,旋转爆震波无法起爆,直至氧含量增加到39.2%,才能形成自持传播的爆震波;爆震波成功起爆后均以双波对撞模式传播,平均传播速度偏低,波速分布在815~920m/s内;在贫油工况下,爆震波传播速度随当量比提高而增大;当空气质量流量大于822g/s时,发动机基本以缓燃形式工作。

国防科技大学的王迪等^[28]采用富氧空气或氧气为氧化剂对煤油两相旋转爆震燃烧室中爆震波的起爆和传播过程进行了研究。基于PDA方法对雾化流场进行了测量,发现随着煤油液滴受到气流剪切作用距离的增加,雾化细度和均匀度变好。在煤油流量为78g/s,氧气流量为224g/s,空气流量为72.5g/s,当量比为1.083时,燃烧室在单波模式下工作,爆震波频率为0.904kHz。在纯氧工况下,当煤油流量为81.8g/s,氧气流量为231.8g/s,当量比为1.222时,燃烧室在双波模式下工作,爆震波传播频率为5.882kHz。在试验工况范围内,随着氧化剂中含氧量的增加,爆震波速度逐步增大。

综上所述,针对以汽油为燃料的旋转爆震波的起爆与传播特性研究较为少见,且多以常温富氧空气为氧化剂。以常温空气为氧化剂的两相旋转爆震波无法起爆,通过加热冷流空气至高总温,提高汽油空气混合物中气态汽油占比,以此提高反应物的可燃性。为充分验证高总温空气与汽油燃料的旋转爆震,本文开展了不同工况下的旋转爆震试验,分析了爆震波的起爆过程与传播特性,并验证了高总温空气与汽油为推进剂的旋转爆震发动机长时间工作的可行性。

2 试验系统介绍

两相旋转爆震试验系统包括空气供给系统、加热器系统、燃油供给系统、两相旋转爆震燃烧室、点火系统以及控制与采集系统,如图1所示。

2.1 推进剂供给系统

氧化剂空气由高压气源供给,设计流量范围为0.5~2kg/s。空气供给系统包括高压气源、球阀、过滤器、减压阀、流量计以及电磁阀,通过调节减压阀的出口压力控制空气流量。空气流量由流量计进行监测,通断时间通过电磁阀进行控制。燃料汽油存储

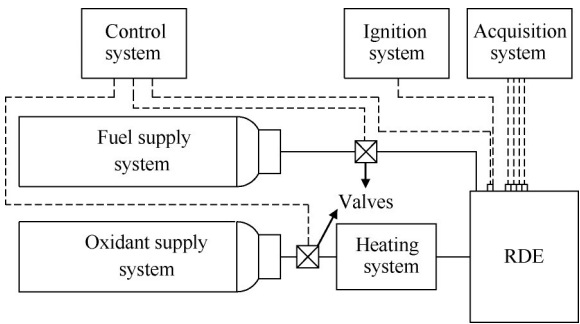


Fig. 1 Schematic diagram of the experiment system

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,冷流状态下雾化后的最小液滴粒径可达到 $20\mu\text{m}$ 。试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 。

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,试验过程中采用火花塞放电对冷流空气/氢气预混气进行点火,加热冷流空气至高温,通过在加热器出口补充氧气保持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 两相旋转爆震燃烧室

两相旋转爆震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 202mm 和 166mm ,环形通道宽度为 18mm ,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与燃料进行快速混合,如图2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,试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。

试验主要通过测量的压力信号对旋转爆震波的传播特性进行分析,燃烧室外壳测量孔位置如图2所示。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,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和1个扩散硅式压力变送器,用来测量燃烧室内瞬态高频压力以及燃烧室的平均稳压。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,以减小对爆震波面的干扰。高频压力传感器P1,P2和P3在同一周向位置,分别位于空气环缝下游 8mm , 24mm 以及 40mm 处,扩散硅式压力变送器 P_c 距环缝 24mm ,其中P2与P4位于同一轴向位置,周向间隔 90° , P_c 与P4轴对称分布。

2.4 点火系统

试验利用垂直安装的预爆震管对汽油/空气混合物进行起爆。预爆震管内径为 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通道压力处于稳定的区间。为了减少填充阶段燃烧室对预爆震管内混合气体的影响,预爆震管出口与燃烧室连接处采用薄膜隔离,点火位置如图2所示。试验环境温度为 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

试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

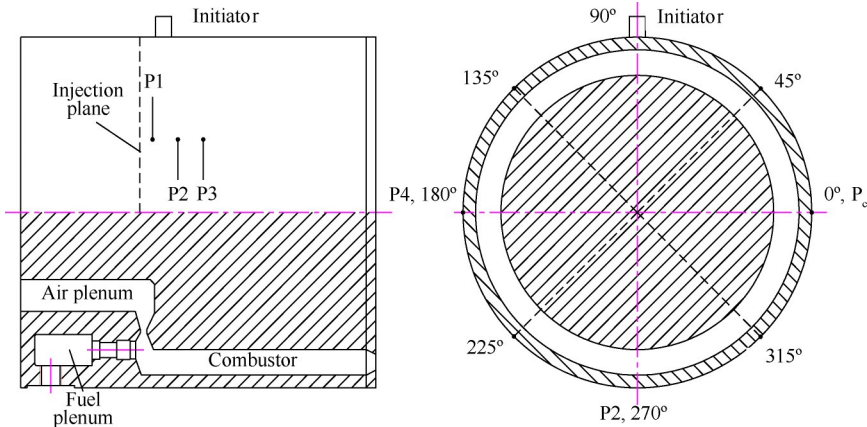


Fig. 2 Schematic diagram of injection configuration and instrumentation

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震波传播信号。图 3 为两相 RDE 点火试验工作时序图,其中,蓝色箭头向上表示打开,红色箭头向下表示关闭。试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,高总温空气进入环形燃烧室作为氧化剂。空气流量稳定后,打开汽油管路的电磁阀,同时向预爆震管内喷注氢气和氧气,当集油腔压力稳定后点火,预爆震管内发展形成的初始爆震波进入燃烧室点燃油气混合物。 Δt 为两相旋转爆震发动机的工作时间,试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,试验中发动机工作时间设置为 1s。

3 结果与讨论

使用液态燃料开展旋转爆震试验存在几个难题:

(1) 液态燃料的破碎雾化问题。液态燃料破碎雾化后液滴颗粒直径的大小直接影响到爆震波的起爆特性以及传播特性。

(2) 液态燃料与氧化剂的掺混问题。掺混效果的好坏对爆震波的传播特性以及稳定性影响较大。

(3) 相比于气态燃料,液态燃料组织燃烧的旋转爆震需要更大的点火能量,才能成功激发连续旋转传播的爆震波。

针对两相旋转爆震存在的难点,试验中采用高总温空气与液态汽油对撞喷注的方式,在高温来流空气的剪切力作用下,汽油液滴迅速破碎蒸发成气态,高温环境加速了汽油与空气分子的运动速度,提高了推进剂的掺混效果。

在高总温空气来流条件下,开展了汽油燃料的两相旋转爆震试验,燃烧室内成功获得了连续旋转传播的爆震波,最后进行了 3s 的长程试验,验证了以高总温空气与汽油为推进剂的旋转爆震发动机长时间工作的可行性,试验工况如表 1 所示。表中 ER 表示推进剂当量比; T_0 表示空气总温; $\dot{m}_{air}$, $\dot{m}_{fuel}$ 分别为空气与汽油的质量流量; f_d 是燃烧室内高频压力信号经快速傅里叶变换得到的主频。下文的 p_c 表示燃烧室内的平均压力; p_{air} , p_{fuel} 分别为空气管路及集油腔内的平均压力。

Table 1 Experiment condition

Case	ER	T_0/K	$\dot{m}_{air}/(g/s)$	$\dot{m}_{fuel}/(g/s)$	f_d/Hz	Mode
1	1.19	483	1110.0	85.70	—	Failure
2	1.16	673	904.0	69.60	—	Deflagration
3	0.97	713	1110.0	70.30	1827.3	Two-wave collision
4	0.84	713	1110.0	62.35	1818.2	Hybrid mode
5	0.84	713	1110.0	62.35	1907.5	Long duration test

3.1 起爆过程分析

当汽油质量流量为 85.70g/s,空气质量流量为 1110.0g/s,推进剂当量比为 1.19,加热空气总温至 483K,如表 1 中的工况 1 所示,预爆震管内形成的初始爆震波进入燃烧室未能点燃油气混合物,发动机起爆失败。这可能是因为:一方面空气总温 483K 温度较低,空气在喷注环缝处达到声速,汽油液滴与空气预混合距离较短,液滴破碎蒸发速度慢,导致汽油液滴颗粒直径过大,大颗粒汽油液滴与空气混合物活性低,需要较大的点火能量才能起爆;另一方面相对于环形燃烧室,预爆震管出口面积较小,预爆震管内形成的初始爆震波进入燃烧室后向非受限空间传播,爆震波在膨胀作用下发生解耦,点火能量损失较大。

工况 2 维持推进剂当量比不变,汽油质量流量为 69.60g/s,空气质量流量为 904.0g/s,空气总温为 673K,对两相旋转爆震波的起爆过程进行研究。点火后,燃烧室内高频瞬态压力时间曲线如图 4 所示。

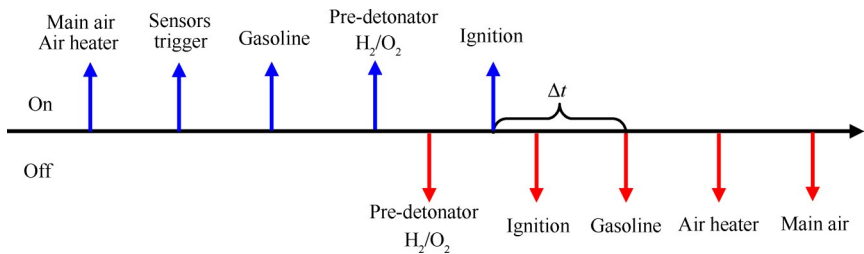


Fig. 3 Schematic diagram of experiment time sequence

由图可知,高频压力传感器采集到的压力信号波动较小,预爆震管内形成的初始爆震波进入燃烧室引燃了油气混合物,反应物以爆燃形式组织燃烧,没有发展形成爆震波,发动机起爆失败。这可能是因为:一方面工况 2 中的空气总温提高到 673K,汽油中的轻组分在高总温空气的剪切力作用下破碎蒸发形成气态汽油,但仍存在部分重组分的汽油液滴直径较大,导致油气混合物存在很大的空间分布不均匀性,反应物可爆性较差;另一方面可能是工况 2 处于富油状态,其中汽油重组分含量高,导致油气混合物严重的非均相性以及两相间的相互作用加剧,混合物化学反应区长度较长,能量释放速率低,无法提供火焰加速所需的能量。

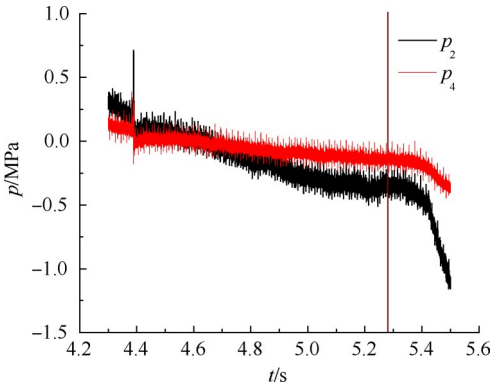


Fig. 4 Original high-frequency pressure signals in case 2

由于汽油的引燃温度为 688~803K,因此,当汽油的质量流量为 70.30g/s,提高空气的质量流量为 1110.0g/s,推进剂当量比为 0.97,加热空气总温至 713K,见表 1 工况 3,此时爆震波成功起爆。图 5 是点火初期燃烧室内压力信号随时间的分布,在 3815.2ms 时刻燃烧室稳压传感器采集到第一个压力尖峰,压力峰值约为 0.43MPa,由预爆震管内的初始爆震波进入环形燃烧室引起。初始爆震波进入燃烧室后引燃油气混合物,压力信号出现波动,但并没有直接形成旋转爆震波,而是经过大约 3.06ms 高频压力传感器采集到了第一个压力峰值,这主要是因为预爆震管采用垂直安装的方式,其内产生的初始爆震波进入环形燃烧室后衍射衰减为缓燃波,并沿燃烧室周向相反方向传播,发生碰撞后削弱,在燃烧室曲率、推进剂喷注以及边界层发展的湍流作用下,火焰燃烧锋面加速与前导激波耦合,最终在 3818.26ms 时刻发展成连续旋转传播的爆震波。爆震波建立后,燃烧室、空气管路以及集油腔的平均压力均出现了高频压力振荡,其中燃烧室平均压力明显上升,空气喷注

压力上升幅度较小,集油腔压力围绕初始平均压力振荡。

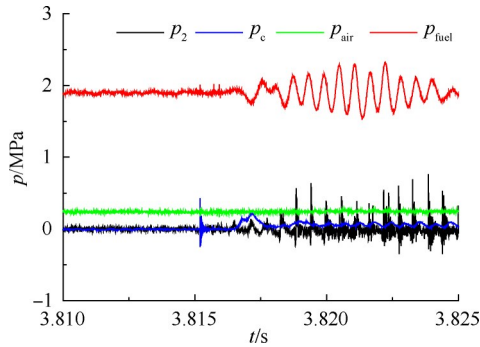


Fig. 5 Initiation stage of RDE in case 3

3.2 爆震波传播过程分析

图 6 是工况 3 试验过程中测得的高频压力原始信号,由于高频压力传感器受到高温爆震燃烧产物的影响,压力信号在试验测试过程中发生了温度漂移现象。为了便于分析爆震波的传播过程,使用快速傅里叶变换滤波器对原始压力信号进行了高通滤波处理,处理后的高频压力时程曲线如图 7 所示,其中为了对比 P1~P4 采集到的高频压力幅值,对压力信号基准进行了调整。由图可知,压力传感器采集到高瞬态的周期性压力跃升信号,表明环形燃烧室内成功获得了连续自持传播的旋转爆震波,在发动机整个工作过程中,高频压力信号较为稳定,没有出现爆震波熄灭现象,爆震波压力峰值存在一定的波动。其中高频压力传感器 P1 和 P3 采集到的压力峰值基本持平,说明 P1 和 P3 的位置均在爆震波高度以内,即旋转爆震波高度超过 40mm。

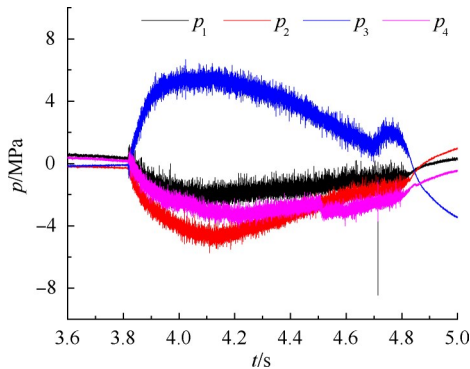


Fig. 6 Original high-frequency pressure in case 3

为了便于分析旋转爆震波的具体传播模态,对 P1,P4 测得的高频压力信号进行局部放大处理,如图 8 所示。在 4556.92~4559.1ms 以及 4560.19~4562.38ms 时间段内,每相邻的两个 p_4 压力峰值之间存在两个 p_1

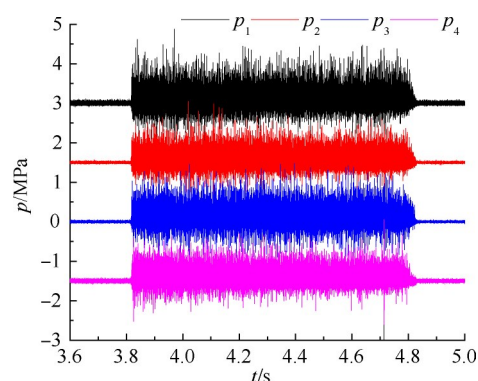


Fig. 7 High-frequency pressure after high-pass filtering in case 3

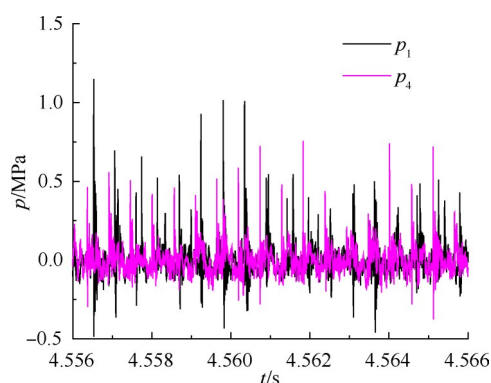


Fig. 8 Local pressure in case 3

压力峰值,这说明环形燃烧室内存在两道爆震波,传播方向相反,周期性发生对撞,爆震波传播模态为双波对撞。在4556.53ms时刻, P_1 测得的压力峰值为1.15MPa,远大于扫过 P_4 的压力峰值,推测相向传播的两道爆震波在 P_1 附近发生对撞,对撞后分别透射到相向的爆震燃烧产物中转化为透射激波,两道透射激波在新鲜油气混合物的支持下增强发展为爆震波进行下一次对撞。由图可知,在双波对撞过程中,每两个相邻的 p_1 压力峰值间距逐渐变大,对撞点由 P_1 向 P_4 移动,这主要是因为:一方面两道爆震波在 P_1 附近发生碰撞导致 P_1 处压力过高,抑制了新鲜空气和汽油的喷注以及掺混过程,导致 P_1 处积累的预混可燃气体层高度以及活性降低,当爆震波再次传播到 P_1 处,由于可燃气体层高度以及活性较低,爆震波扫过后波速降低,周而复始,导致燃烧室内不同相位点可燃气体层高度的差异;另一方面,爆震波碰撞后透射到彼此爆震燃烧产物中转变成的透射激波强度不同,在新鲜油气混合物的支持下发展成爆震波的速度存在差异,诸多因素导致双波对撞点产生相位偏移。提取周期性压力尖峰值对爆震波的平均压力进行计算,得到爆震波的平均峰值压力约为0.55MPa,远低于对应的CJ压力值,主要原因为双波

对撞导致形成的新鲜反应物层高度低,能量释放少,且部分汽油重组分液滴未参与爆震燃烧导致实际反应当量比低于试验设定值。

图9是发动机熄火过程中的试验曲线图。在4751.04ms时刻,关闭汽油管路的电磁阀,集油腔压力逐渐降低,而此时空气管路压力基本不变,导致波前混合物当量比降低,爆震波强度逐渐降低,表现为爆震波压力峰值的持续衰减,这一现象说明停止燃料供给并未导致爆震波的瞬时熄灭或解耦,而是逐渐衰减至熄灭,主要原因是汽油管路以及集油腔内剩余的汽油维持爆震波继续传播了一段时间,这说明旋转爆震波具有自适应当量比变化的能力。在4825.99ms左右,剩余的汽油耗尽,发动机熄火,持续通空气进行爆震燃烧产物吹除以及发动机冷却。

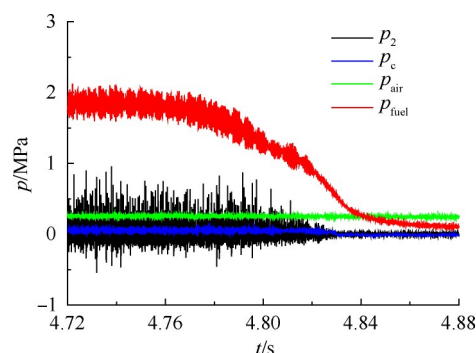


Fig. 9 Flameout stage of RDE in case 3

3.3 爆震波传播特性分析

为了进一步分析爆震波的传播特性,对工况3下 P_2 测得的高频压力信号进行频域和时域分析,分别采用快速傅里叶变换(FFT)和短时傅里叶变换(ST-FT)进行处理。通过FFT得到的功率谱密度随频率分布图如图10所示,FFT结果显示旋转爆震波传播主频为1827.31Hz,除了主频之外还存在1573.1Hz的较低主频,这可能是由于双波对撞过程中对撞点在 P_2 附近或者双波对撞衰退为单道爆震波所形成。FFT结果可以得到高频压力信号的振荡主频分布,但无法反映压力信号的时频特性,STFT结果反映了高频压力信号在不同时刻的振荡特性,如图11所示。由图可知,在发动机工作过程中,旋转爆震波连续自持传播,没有出现熄灭、解耦等现象,传播频率为1831.1Hz以及1586.9Hz,与FFT得到的结果基本一致。

基于 P_2 测得的高频瞬态压力信号,计算得到的旋转爆震波瞬时传播速度随时间的分布图如图12

所示,旋转爆震波传播速度主要在 1010.4~1086.4m/s 内波动,平均传播频率为 1813.4Hz,与 FFT 以及 STFT 得到的结果吻合较好。该工况下 CJ 爆震速度为 1785.3m/s,受到燃烧室曲率、燃料的蒸发与掺混、侧向膨胀等影响,爆震波传播速度存在严重亏损。

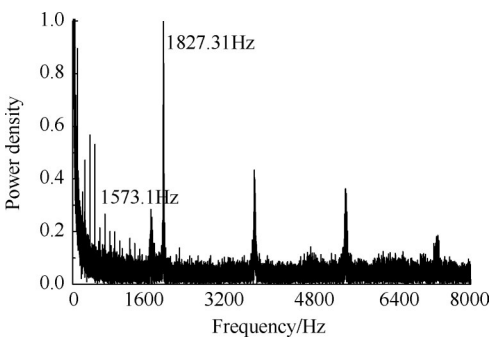


Fig. 10 FFT results in case 3

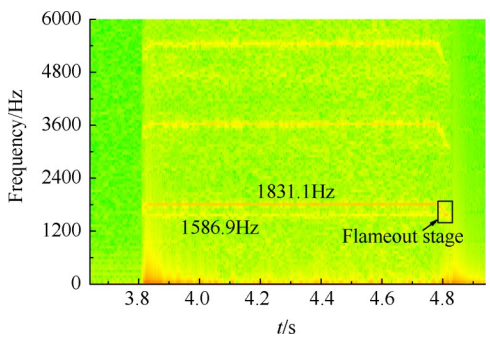


Fig. 11 STFT results in case 3

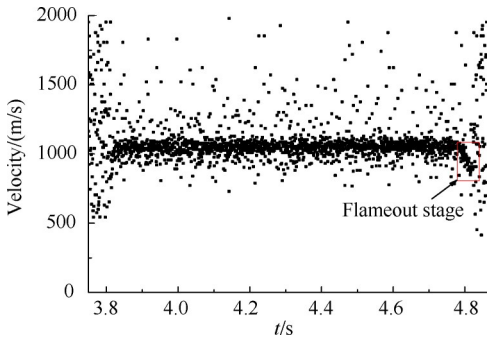


Fig. 12 Propagation velocity in case 3

3.4 长程试验

为了验证高温空气与汽油为推进剂的旋转爆震发动机长时间工作的可行性,开展了两相旋转爆震长程试验。由于受高温爆震燃烧产物的影响,高频压力传感器出现温度漂移现象,当试验时间过长时,采集到的电压信号超出了高频压力传感器的量程下限,且对高频压力传感器造成不可逆损坏,因此长程试验未采集高频压力,而是使用响应时间快的扩散硅式压力传感器对燃烧室稳压以及集油腔平均

压力进行了测量。为避免损伤稳压传感器以及发动机过热,长程试验时间设置为 3s。

图 13 是工况 4 条件下的试验曲线图,汽油质量流量为 62.35g/s,空气质量流量为 1110.0g/s,推进剂当量比为 0.84,加热空气总温至 713K,发动机工作时间为 1s。由图可知,高频压力传感器采集到连续周期性压力跃升信号,发动机成功起爆。随着旋转爆震波的连续传播,燃烧室以及集油腔的平均压力均出现了高频压力振荡,燃烧室平均压力明显上升,在发动机工作过程中宏观上较为稳定。爆震波传播模态为单波与双波对撞的混合模态,由 FFT 得到的爆震波主频为 1818.21Hz。对压力信号进行局部放大处理,发现集油腔内平均压力振荡频率与爆震波传播频率一致,当爆震波传播至燃烧室某处时,该位置处喷嘴出口压力升高,导致喷油速度降低,集油腔压力上升,随着爆震波的传播,当地局部压力下降,喷嘴逐渐恢复喷注状态,集油腔压力降低,燃烧室与集油腔压力之间建立了动态平衡。此外,随着燃烧室内爆震波的连续稳定传播,测得的燃烧室平均压力振荡频率与爆震波主频同样保持一致。

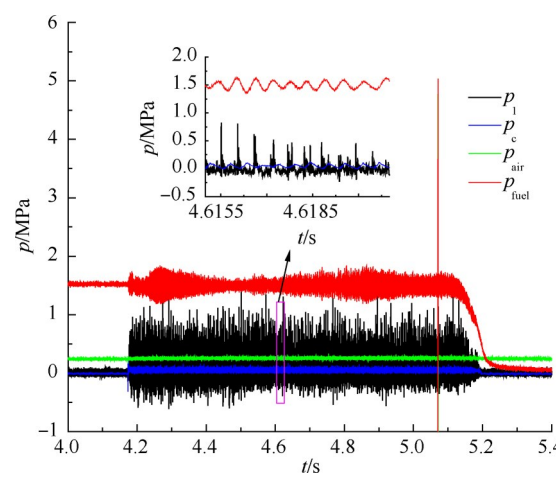


Fig. 13 Global pressure distribution and local pressure oscillation in fuel plenum in case 4

工况 5 为工况 4 条件下的长程试验,试验测得的集油腔与燃烧室压力曲线如图 14 所示。在发动机整个工作过程中,集油腔与燃烧室的稳压传感器均采集到了连续的高频压力振荡信号,压力幅值较为稳定。图 15(a)和(b)分别是爆燃模态和爆震模态下燃烧室平均压力曲线图,由图可知,工况 5 下燃烧室平均压力振荡特性与工况 4 爆震模态基本一致,燃烧室平均压力均存在明显压升,推断环形燃烧室内形成了连续旋转传播的爆震波。在 4370.46ms 时刻,

燃烧室稳压传感器采集到了第一个压力振荡信号,在 7459.45ms 时刻,燃烧室压力幅值开始降低,最后在 7501.92ms 时刻降至环境压力,发动机工作了 3131.46ms,燃烧室内平均表压为 0.051MPa。对测得的燃烧室与集油腔压力分别进行短时傅里叶变换,结果如图 16(a)和(b)所示,平均传播频率分别为 1907.5Hz 以及 1922.3Hz,略高于短时试验工况 4 下的 FFT 结果。这主要是因为长程试验中燃烧室壁面温度急剧上升,加速了汽油液滴的蒸发过程,提高了推进剂混合物的活性,导致了旋转爆震波传播频率的增加。

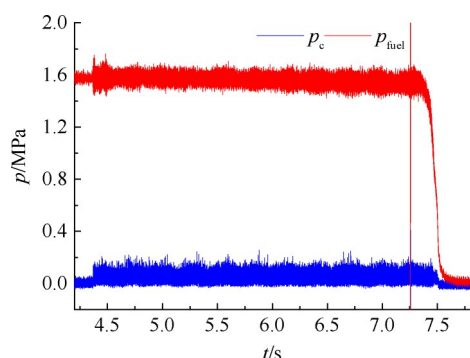
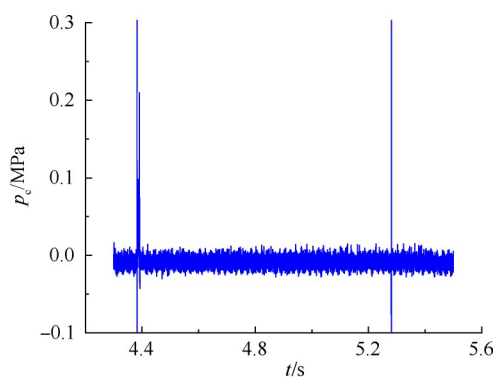
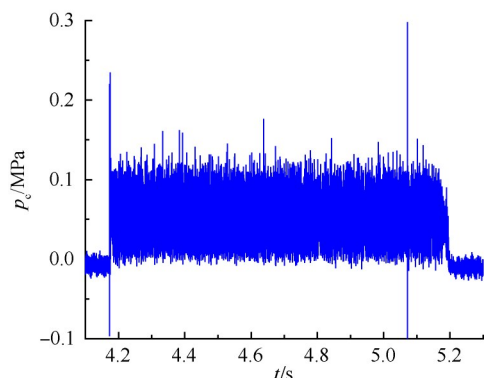


Fig. 14 High-frequency pressure oscillation in the fuel plenum and combustor in case 5

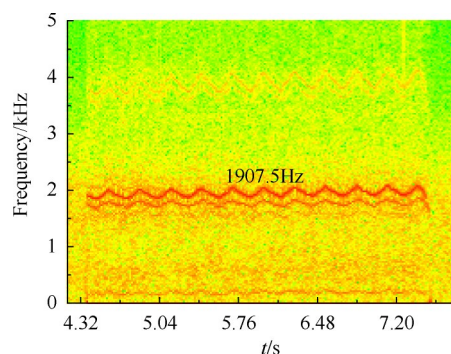


(a) Deflagration in case 2

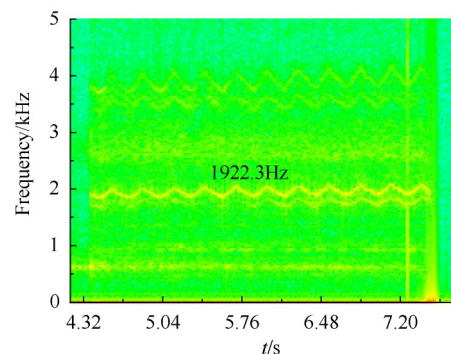


(b) Deflagration in case 4

Fig. 15 Comparison of pressure oscillation in the combustor under deflagration and detonation



(a) STFT results in the combustor



(b) STFT results in the fuel plenum

Fig. 16 STFT results of high-frequency pressure oscillation in the combustor and fuel plenum in case 5

4 结 论

为了验证高总温空气与汽油燃料的两相旋转爆震,在不同工况下开展了连续旋转爆震试验研究,得出结论如下:

(1) 试验采用预爆震管的点火方式成功实现了高总温空气与汽油燃料的两相旋转爆震,高总温空气加速了汽油液滴的破碎与蒸发过程,提高了汽油燃料中气态汽油的占比,增强了反应物的可爆性。

(2) 在空气总温低于 673K 的轻微富油工况下,旋转爆震波起爆失败;当空气质量流量为 1110.0g/s,当量比为 0.97,空气总温为 713K 时,燃烧室内成功获得了连续旋转传播的爆震波,爆震波传播模态为双波对撞,传播频率为 1827.31Hz,爆震波传播速度存在亏损。

(3) 在空气质量流量为 1110.0g/s,当量比为 0.84,空气总温为 713K 的工况下,验证了高总温空气与汽油燃料的旋转爆震发动机长时间工作的可行性,燃烧室与集油腔稳压传感器测得的压力振荡特性与短时试验基本一致,获得的爆震波传播频率为 1907.5Hz。

下一步工作是研究汽油燃料两相旋转爆震的当

量比与空气总温可爆边界,试验最大空气总温为713K,接近汽油自燃温度,且汽油终馏点为478K,预测空气总温可爆范围为550~713K。空气总温影响燃料液滴的破碎蒸发与掺混过程,对当量比可爆范围影响较大。

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] 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.
- [2] 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.
- [3] Bykovskii F A, Zhdan S A, Vedernikov E F. Continuous Spin Detonations[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2006, 22(6): 1204-1216.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Kindracki J. Experimental Studies of Kerosene Injection into a Model of a Detonation Chamber[J]. *Journal of Power Technologies*, 2012, 92(2): 80-89.
- [9] Kindracki J. Study of Detonation Initiation in Kerosene-Oxidizer Mixtures in Short Tubes [J]. *Shock Waves*, 2014, 24(6): 603-618.
- [10] Kindracki J. Experimental Research on Rotating Detonation in Liquid Fuel-Gaseous Air Mixtures[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2015, 43: 445-453.
- [11] Lentsch A, Bec R, Serre L, et al. Overview of Current French Activities on PDRE and Continuous Detonation Wave Rocket Engines[C]. *Capua: AIAA/CIRA 13th International Space Planes and Hypersonics Systems and Technologies Conference*, 2005.
- [12] Francois F, Bruno L N. MBDA R&T Effort on Pulsed and Continuous Detonation Wave Engines [R]. *AIAA* 2009-7284.
- [13] Falempin F, Daniau E. A Contribution to the Development of Actual Continuous Detonation Wave Engine[R]. *AIAA* 2008-2679.
- [14] Liu Y S, Wang Y H, Li Y S, et al. Spectral Analysis and Self-adjusting Mechanism for Oscillation Phenomenon in Hydrogen-Oxygen Continuously Rotating Detonation Engine[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2015, 28(3): 669-675.
- [15] Xie Q F, Wen H C, Li W H, et al. Analysis of Operating Diagram for H₂/Air Rotating Detonation Combustors under Lean Fuel Condition [J]. *Energy*, 2018, 151: 408-419.
- [16] Liu S J, Liu W D, Wang Y, et al. Free Jet Test of Continuous Rotating Detonation Ramjet Engine [C]. *Xiamen: 21st AIAA International Space Planes and Hypersonics Technologies Conference*, 2017.
- [17] Lin W, Zhou J, Liu S J, et al. Experimental Study on Propagation Mode of H₂/Air Continuously Rotating Detonation Wave[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(4): 1980-1993.
- [18] Wang C, Liu W D, Liu S J, et al. Experimental Verification of Air-Breathing Continuous Rotating Detonation Fueled by Hydrogen[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(30): 9530-9538.
- [19] 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 Chun-sheng, BAI Qiao-dong. Experiment on Continuous Rotating Detonation Engine with Tilt Slot Injector [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2014, 35(4): 570-576.)
- [20] 魏万里, 翁春生, 武郁文, 等. 氧化剂喷注面积对连续旋转爆轰波传播特性影响的实验研究[J]. *兵工学报*, 2018, 39(12): 2345-2353.
- [21] Deng L, Ma H, Xu C, et al. The Feasibility of Mode Control in Rotating Detonation Engine[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 129: 1538-1550.
- [22] Xia Z J, Ma H, Ge G Y, et al. Effects of Ignition Condition on the Initiation Characteristics of Rotating Detonation Wave in Plane-Radial Structure[J]. *Acta Astronautica*

- ca, 2020, 175: 79–89.
- [23] Ge G Y, Deng L, Ma H, et al. Effect of Blockage Ratio on the Existence of Multiple Waves in Rotating Detonation Engine[J]. *Acta Astronautica*, 2019, 164: 230–240.
- [24] Zhou S B, Ma H, Chen S H, et al. Experimental Investigation on Propagation Characteristics of Rotating Detonation Wave with a Hydrogen–Ethylene–Acetylene Fuel [J]. *Acta Astronautica*, 2019, 157: 310–320.
- [25] 郑 权, 翁春生, 白桥栋. 当量比对液体燃料旋转爆轰发动机爆轰影响实验研究[J]. 推进技术, 2015, 36(6): 947–952. (ZHENG Quan, WENG Chun-sheng, BAI Qiao-dong. Experimental Study on Effects of Equivalence Ratio on Detonation Characteristics of Liquid-fueled Rotating Detonation Engine [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(6): 947–952.)
- [26] 郑 权, 李宝星, 翁春生, 等. 双波对撞模态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.
- [27] 李宝星, 王 中, 许桂阳, 等. 煤油燃料旋转爆轰波起爆与传播特性实验研究[J]. 兵工学报, 2020(7): 1339–1346.
- [28] 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.)

(编辑:刘萝威)