

高温来流下 U 型脉冲爆震燃烧室 燃烧特性试验

谭汶昊¹, 郑龙席¹, 卢杰¹, 王凌羿¹, 黄康²

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710129;

2. 中国空气动力研究与发展中心 空天技术研究所, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 为了获得高温来流下气/液两相多循环 U 型脉冲爆震燃烧室(U-PDC)的燃烧特性,使用汽油/空气为燃料和氧化剂开展了相关试验研究。结果表明:当来流温度为 373 K, U-PDC 能够在 15~38 Hz 范围内稳定工作,且随着工作频率提高爆燃向爆震转变(DDT)距离缩短;在室温条件下、工作频率为 15~25 Hz 时,未能形成充分发展爆震波,表明高温来流可促进 DDT 过程。在室温条件下、工作频率为 15~25 Hz 时,由于 U 型爆震弯段内可燃混气分布不均匀, U 型爆震弯段外侧监测到火焰的时间晚于 U 型弯段出口,当来流温度升至 373 K 后该现象明显改善。此外, U-PDC 的点火起爆时间在 3~10 ms 内,且点火延迟时间是影响点火起爆时间的主要因素; U-PDC 工作频率相同、来流温度从室温升高至 373 K 或来流温度相同、 U-PDC 工作频率提高时,波速随之提高,点火起爆时间缩短。

关 键 词: 脉冲爆震; U 型脉冲爆震燃烧室; 高温来流; DDT(爆燃向爆震转变)距离; 点火起爆时间

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Experiment on combustion characteristics of U-bend pulse detonation combustor under high temperature inlet stream

TAN Wenhao¹, ZHENG Longxi¹, LU Jie¹, WANG Lingyi¹, HUANG Kang²

(1. School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China;

2. Aerospace Technology Institute,

China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China)

Abstract: In order to obtain the combustion characteristics of gas-liquid two-phase multi-cycle U-bend pulse detonation combustor (U-PDC) under high temperature inlet stream, experimental research was carried out by using gasoline and air as fuel and oxidant. The results indicated that the U-PDC can achieve stable operation at the working frequency of 15–38 Hz when the inlet temperature was 373 K, and the deflagration to detonation transition (DDT) distance was shortened when the working frequency increased. When the working frequency was 15–25 Hz, the detonation initiation failed at room temperature. The results showed that high temperature

收稿日期: 2021-04-08

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(G2021KY05114);

中国空气动力研究与发展中心基础和前沿技术研究基金(PJD20170145)

作者简介: 谭汶昊(1995—),男,博士生,主要从事脉冲爆震涡轮发动机控制研究。

通信作者: 卢杰(1988—),男,副教授,博士,主要从事爆震燃烧与爆震推进研究。E-mail: lujie@nwpu.edu.cn

引用格式: 谭汶昊,郑龙席,卢杰,等. 高温来流下 U 型脉冲爆震燃烧室燃烧特性试验[J]. 航空动力学报, 2022, 37(3): 502-510. TAN Wenhao, ZHENG Longxi, LU Jie, et al. Experiment on combustion characteristics of U-bend pulse detonation combustor under high temperature inlet stream[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(3): 502-510.

inflow can promote the DDT process. At room temperature and working frequency of 15—25 Hz, due to the uneven distribution of combustible gas in the U-bend detonation tube, the time when the flame was detected outside of the U-bend detonation tube was later than the exit of the U-bend detonation tube. When the inflow temperature increased to 373 K, the phenomenon was obviously improved. In addition, the ignition time of U-PDC was within 3—10 ms, which was greatly affected by ignition delay time. When the working frequency of U-PDC was the same and the inlet stream temperature raised from room temperature to 373 K, the wave velocity increased, and the ignition time decreased.

Key words: pulse detonation; U-bend pulse detonation combustor;
high temperature inlet stream; DDT (deflagration to detonation transition) distance;
ignition and detonation time

脉冲爆震燃烧室(pulse detonation combustor, PDC)是一种利用爆震燃烧的新型燃烧室,由于爆震波传播速度快,爆震波后燃烧产物来不及膨胀,燃烧过程接近等容燃烧,所以PDC具有熵增小、自增压的优势^[1-6]。脉冲爆震涡轮发动机(pulse detonation turbine engine, PDTE)是一种利用PDC替代传统燃气涡轮发动机中的等压燃烧室的动力装置,与传统燃气涡轮发动机相比,其循环热效率更高、单位推力更大、耗油率更低^[7-9]。但实现液态燃料与空气混合物短距快速起爆仍然是PDC工程应用的难点。

由于直接起爆所需点火能量过大,所以PDC一般采用低点火能量点火,通过爆燃向爆震转变(deflagration to detonation transition, DDT)的方法实现起爆。然而研究表明当前直管中碳氢燃料和空气混合物的DDT距离较长^[10],使得直接缩短PDC长度难度较大。因此,为了缩短DDT距离和PDC轴向长度,研究人员提出了U型、螺旋形等异形PDC缩短爆震室的轴向长度。Frolov等^[11-14]使用丙烷/空气为燃料和氧化剂对U型爆震段燃烧特性进行了研究,发现U型爆震段可以加速DDT过程,有利于缩短DDT距离,降低DDT时间。Shinobu等^[15]通过数值计算分析了爆震波在U型段的传播过程,结果表明爆震波在U型段会先熄灭,但由于U型管外壁反射的压力波与燃烧波相互作用导致重新起爆,并且曲率半径和流通面积较小时有利于快速重新起爆。Qiu等^[16]使用汽油/空气为燃料和氧化剂试验研究了螺旋形爆震室的起爆特性,研究结果表明螺旋型爆震室可以获得充分发展的爆震波,且轴向长度较直管PDC短。谭汶昊等^[17]使用汽油/空气为燃料和氧化剂试验研究了U形爆震室的点火起爆

特性,研究表明,相比于直管PDC,U-PDC(U型脉冲爆震燃烧室)可以缩短DDT距离和PDC轴向长度。

上述研究工作主要针对室温条件下脉冲爆震燃烧室起爆及其燃烧特性。对于涡轮发动机,PDC进口来流为压气机压缩后的空气,温度较室温更高,爆震室的燃烧特性随之发生变化。Brophy等^[18]试验研究了JP10/空气为燃料和氧化剂的直管PDC的工作边界,试验结果表明,爆震室来流温度的升高能显著的减小燃油雾化粒径,提高燃油蒸汽比例,缩短DDT距离。Ciccarelli等^[19-20]相关试验结果表明,PDC填充温度为300~650 K时,对氢气-空气-蒸汽混合物,填充温度提高,爆震胞格尺寸变小;对丙烷/空气混合物,当量比为1时填充温度升高对DDT过程影响很小,当量比不为1时,填充温度提高有利于火焰加速。Card等^[21]使用氢气、乙烯、乙炔和JP-10为燃料,空气为氧化剂,分析了填充温度300、473、573 K时可燃混合物的起爆特性。试验发现在可燃混合物当量比低于1.2时,4种可燃混合物的DDT距离均缩短,且填充温度对JP10/空气混合物的胞格尺寸的影响很小。Wen等^[22]使用JP8/氧气为燃料和氧化剂,填充温度373 K时未正常起爆,温度提高至393 K后爆震室起爆。

由于U-PDC轴向长度较直管PDC更短,有望直接应用于燃气涡轮发动机,但目前U-PDC的研究主要是室温条件下气态燃料和液态燃料的数值模拟及试验研究,与实际工作条件有所差异。为了进一步研究温度对气液两相多循环U-PDC燃烧特性的影响,本文以U-PDC为研究对象,采用汽油/空气为燃料和氧化剂,研究将来流温度升至373 K时,脉冲爆震燃烧室的燃烧特性的变化

规律,以期脉冲爆震燃烧室调节与控制提供参考。

1 U-PDC 试验系统与测试方法

1.1 试验系统

无阀 U-PDC 试验系统如图 1 所示,由供油系统、供气系统、空气加热器、U-PDC、数据采集系统组成。其中,空气加热器功率为 180 kW,可以将来流加温至 600 K。U-PDC 试验器的内径为 62 mm,由进气管道、掺混段、点火段、爆震直段 1、爆震弯段、爆震直段 2 及 U-PDC 收缩出口组成。掺混段和点火段总长为 200 mm,掺混段内安装气

动雾化喷嘴,爆震室内径为 62 mm,等效长度为 735.5 mm,并且爆震室内设有节距为 60 mm 的 Shechelkin 螺旋结构,促进爆燃向爆震转变,缩短 DDT 距离。试验采用 92# 汽油为燃料,空气为氧化剂。并使用无阀自适应的方式控制汽油与空气的供给。试验时,空气先进入空气加热器,空气经加热后流入单管回流型脉冲爆震燃烧室的进气管道,然后高温空气与掺混段喷出的燃油经一段距离掺混后形成可燃混气并充满爆震室。在点火段使用热射流点火方式点燃可燃混气,火焰经过爆震室内安装的 Shchelkin 螺旋进行火焰加速转变为爆震波,经过爆震室出口向外传播。

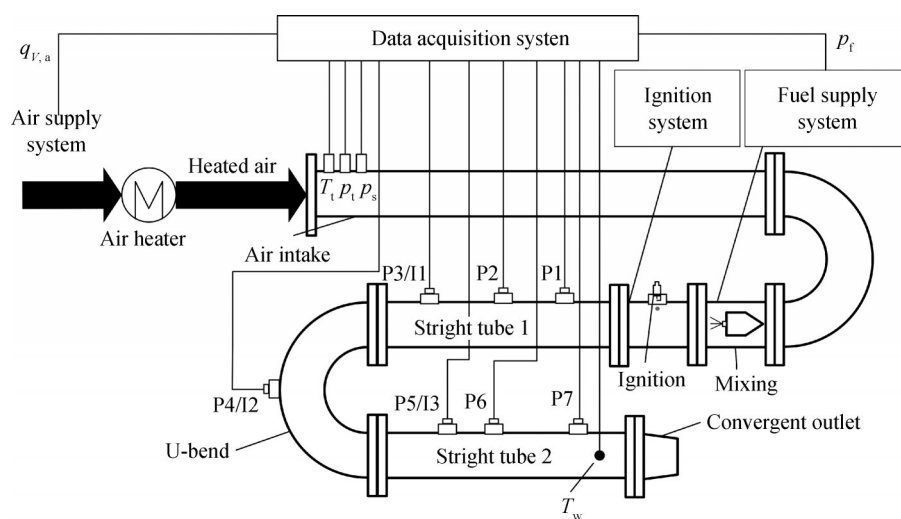


图1 U-PDC 试验系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the U-PDC system

1.2 测试方法

爆震室供气系统中气体涡轮体积流量计用以测量进入爆震室的空气体积流量 $q_{v,a}$, 量程为 0~400 m³/h, 精度为 1.5%。爆震室进口安装 T 型热电偶测量来流空气温度 T_t , 量程为 73~623 K。爆震室出口外壁面点焊 K 型热电偶 T_w 测量爆震室的壁面温度, 量程为 273.15~1 573.15 K。压阻传感器(量程为 0~1 MPa, 补偿温度为 273.15~423.15 K, 精度为 2.5%FS(full scale), 频响为 0~200 kHz, 上升时间为 5 μ s)测量来流空气的总压 p_t 、静压 p_s 以及燃油供给压力 p_{f0} 。为监测 PDC 内压力变化情况, 在 U 型爆震室上设计有 7 个压力传感器 P1~P7(SINOCERA CYD-205, 量程为 0~10 MPa, 频响为 500 kHz, 测量误差为 ± 72.5 mV/MPa), 可以测量 U 型爆震室内沿程压力 ($p_1 \sim p_7$), 监测爆震波的生成情况。其中 P1~P7 安装位置如图 1 所示, 各传感器距离点火位置的

距离分别为 98、199、300、437、586.5、623.5、681.5 mm, 并且传感器安装座带循环水冷系统, 避免传感器因温度过高产生温漂带来测量误差。由于离子探针可以检测气体中带电粒子的存在, 也就是燃烧波的存在, 为监测火焰在爆震弯段中的传播情况, 将 P3~P5 传感器更换为离子探针 I1~I3, 通过测得的离子信号 $i_1 \sim i_3$ 分析爆震室内火焰传播情况, 试验中使用火花塞作为离子探针。

2 结果与讨论

2.1 爆震生成的判定

根据 C-J(Chapman-Jouguet)爆震理论, 当爆震波压力峰值和燃烧波传播速度达到或者超过可燃混合物对应的 C-J 压力和传播速度时, 认为获得了充分发展的爆震波。可燃混合物的 C-J 爆震参数可以根据美国国家航空航天局开发的 CEA(chemical equilibrium and applications)计算得到,

由于汽油的组分复杂,文中采用性质相近的异辛烷代替汽油进行计算。可燃混合物压力为0.11 MPa、温度为373 K时,计算得到C-J爆震压力、C-J爆震波波速 V_{CJ} 分别为1.5 MPa和1 787.1 m/s。根据两相爆震的特性^[23-25],受爆震室内Shchelkin螺旋造成的流动损失、液态燃料的雾化掺混和壁面热损失等影响,两相系统中很难达到C-J波速,目前两相爆震的波速判据一般为60%~70%的C-J波速理论值^[6,16,23,26]。考虑到爆震弯段给气流传播带来的损失和燃气掺混的不均匀性影响,因此,爆震波波速不小于计算值的65%,即1 161.6 m/s,并且爆震波压力峰值大于

C-J爆震波的理论值即获得充分发展的爆震波。试验中燃烧波的速度为 $\Delta x/\Delta t$,其中 Δx 为两个压力传感器之间的间距, Δt 为相邻两个压力传感器监测到压力上升沿的时间差。U-PDC的DDT距离为点火位置到爆震波生成位置的距离,起爆所需的轴向长度定义为U-PDC起爆位置与来流入口(即进气管道进口)的轴向距离。

2.2 U-PDC燃烧特性分析

2.2.1 爆震压力及DDT距离分析

图2给出了U-PDC工作频率 f 为15、20、25、30、35、38 Hz时,1 s内P6、P7处传感器测得的压力曲线,由图中可见,U-PDC在各个工作频率下

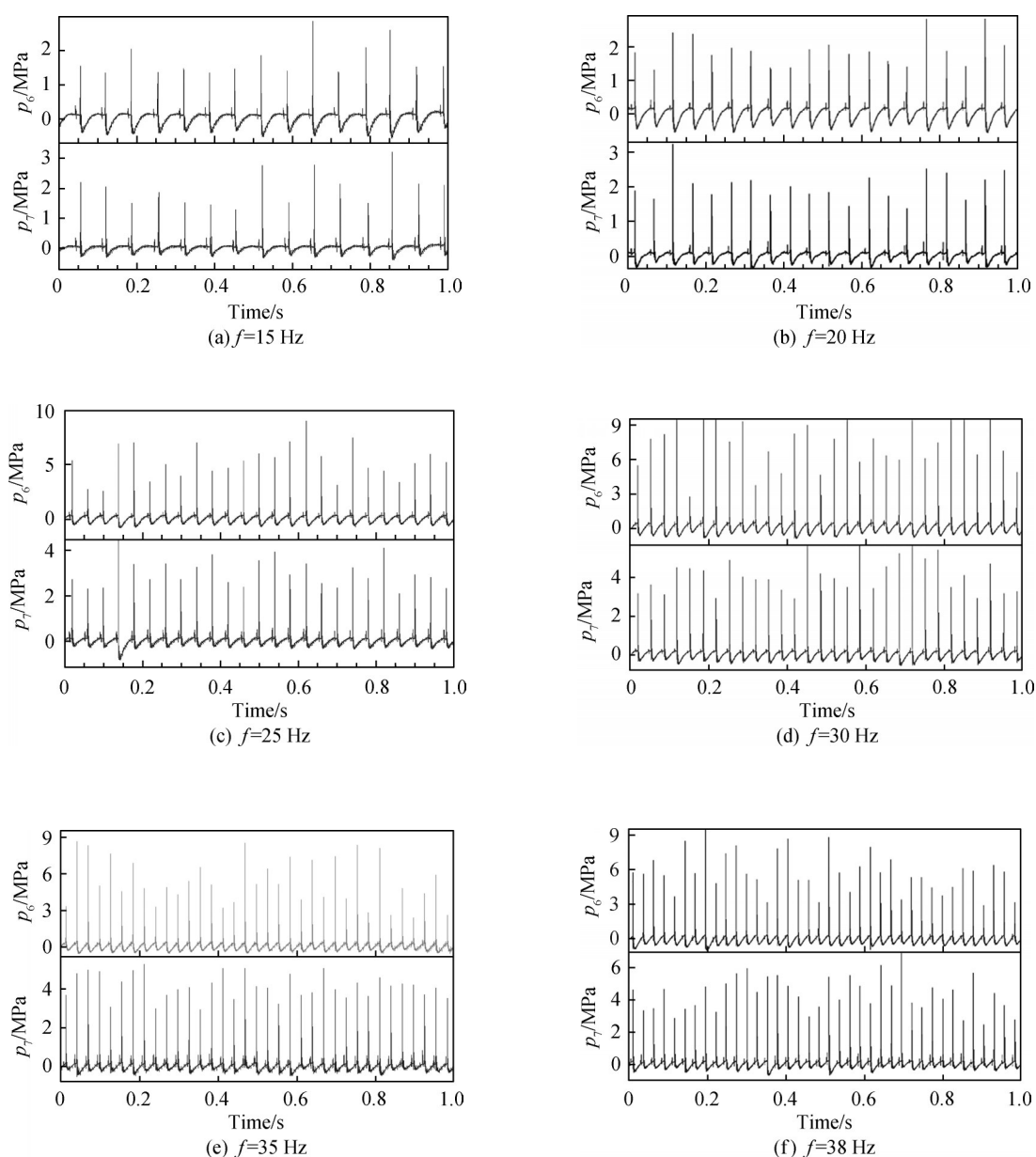


图2 工作频率为15~38 Hz时压力波形

Fig.2 Pressure waveform at working frequency of 15—38 Hz

均能稳定工作,工作频率 15 Hz 时仅 P7 传感器压力峰值大于 1.5 MPa,其余工作频率下 P6 和 P7 传感器处压力峰值均大于 1.5 MPa。

图 3 所示为工作频率为 38 Hz 时试验测得的压力波形放大图。从图中可见,当汽油/空气混合物被点燃时,产生顺着气流方向的压缩波,引起爆震室内的压力扰动(虚线 1 所示)。由于 P1 距离射流点火器最近,故该处最先受到影响,压力略微上升,压力扰动依次从 P1 传播到 P7,其压力上升沿梯度和压力峰值均增加。在 P6 附近生成了充分发展的爆震波,并产生了一道反传爆震波(虚线 2 所示),逆着来流方向向爆震室头部传播,由于障碍物影响反传爆震波强度逐渐衰减。图中 P5 传感器处燃烧波峰值压力已经接近 3 MPa,大于爆震波压力,此时 P6 和 P7 传感器间平均波速为 1 288.89 m/s, P5 和 P6 传感器间平均波速仅为 468.35 m/s,因此认为爆震波在 P6 附近生成。

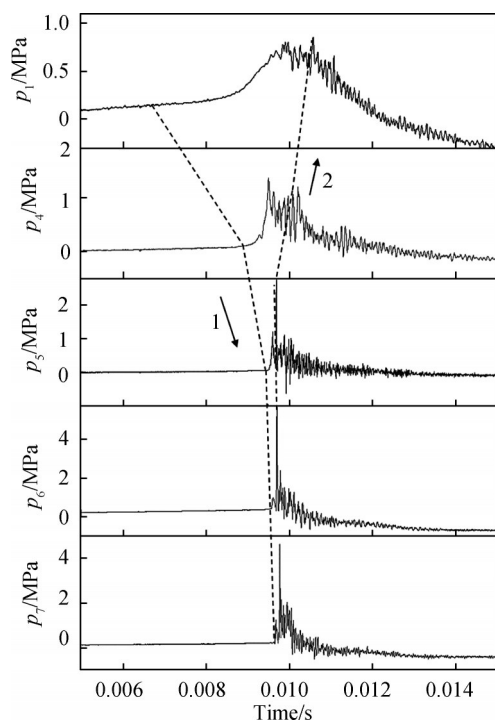


图 3 图 2(f)中第一个爆震波沿程压力波形放大图

Fig.3 Enlargement of the 1th detonation pressure waveform shown in Fig.2(f)

表 1 所示为 P6、P7 传感器之间的平均波速和 U-PDC 的 DDT 距离,其中 f 为 U-PDC 工作频率, U 为平均波速。根据表 1 中数据可得出结论,工作频率为 15 Hz 时在 P7 传感器附近起爆,其余工况下在 P6 传感器附近获得了充分发展的爆震波。工作频率为 15 Hz 时爆震波波速略低于 1 161.6

表 1 $T_i=373$ K 时不同工作频率下波速和 DDT 距离

Table 1 Detonation wave velocity and DDT distance under different working frequencies when $T_i=373$ K

f/Hz	$U/(\text{m/s})$	DDT 距离/mm
15	1 074.07	681.5
20	1 137.25	623.5
25	1 260.87	623.5
30	1 288.89	623.5
35	1 260.87	623.5
38	1 288.89	623.5

m/s,是因为该工况下起爆位置更加接近 P7 传感器处,导致使用传感器间距计算出的平均波速较低。随着工作频率提高,爆震室起爆位置缩短到 P6 传感器处,由于此时 P6 传感器处已经起爆,加之 P6 传感器安装位置靠近螺旋且螺旋对高速燃气具有一定滞止作用,所以 P6 传感器处所测压力峰值大于 P7 传感器。

根据已经确定的起爆位置,计算出来流温度为 373 K 时不同工作频率下 DDT 距离和波速如表 1 所示。其中,工作频率为 15 Hz 时 DDT 距离约为 681.5 mm(约 11 倍管径),U-PDC 的起爆所需的轴向长度约为 399 mm,其余工况 DDT 距离为 623.5 mm(约 10.1 倍管径),U-PDC 的起爆所需的轴向长度约为 341 mm。

表 2 所示为爆震室室温来流($T_i=283$ K),工作频率为 15~30 Hz 时 P7 传感器测得压力和计算的 P6、P7 传感器之间的平均波速,虽然各个工作频率下 P7 压力峰值均大于 C-J 理论值,但工作频率为 15~25 Hz 波速较低,未获得充分发展的爆震波,工作频率为 30 Hz 时在 P7 传感器附近起爆。当来流温度为 373 K 时,在 P7 传感器前已经获得了充分发展的爆震波,这是由于来流温度提高,气动喷嘴的雾化气和爆震室头部来流温度提

表 2 $T_i=283$ K 时不同工作频率下波速和 DDT 距离

Table 2 Detonation wave velocity and DDT distance under different working frequencies when $T_i=283$ K

f/Hz	p_i/MPa	$U/(\text{m/s})$	DDT 距离/mm
15	2.181	690.47	
20	2.643	783.78	
25	3.905	865.67	
30	4.054	1 074.07	681.5

高,喷嘴喷出的燃油液滴粒径更小^[27],燃油液滴和高温气掺混效果更好,爆震室内燃油分布均匀性提高,DDT 距离缩短。因此,来流温度升高 U-PDC 的 DDT 距离缩短,有利于 U-PDC 的工程应用。

2.2.2 U-PDC 波速及火焰传播分析

图 4 和图 5 为根据试验数据计算的 U-PDC 在 373 K 来流和室温来流下 P1~P7 传感器间燃烧波平均速度与工作频率的关系。

如图 4 所示,来流温度为 373 K 时,P6、P7 传感器之间平均波速急剧上升,波速均大于燃烧产物声速,且在工作频率大于 20 Hz 时平均波速大于 65% 的 C-J 波速理论值,因此爆震室工作时起爆位置均为 P6 附近。如图 5 所示,来流温度为室温时,工作频率为 15~25 Hz 时 P6、P7 传感器之

间平均波速均小于燃烧产物声速,未获得充分发展爆震波;工作频率为 30 Hz 时平均波速接近 65% 的 C-J 波速理论值,在 P7 附近起爆。因此,爆震室工作频率相同时,来流温度升高,爆震室内火焰传播速度变快,表明来流温度升高有利于促进爆震室内火焰加速过程。这是因为在爆震室内空气质量流量相同时,来流温度升高其气流流速更高,可燃混气的湍流度更高,加之来流温度升高,燃油液滴与高温来流发生热交换,受热蒸发,燃油粒度减小,可燃混气的雾化掺混效果更好,气相燃料增多,有利于燃油粒度的减小^[27]和爆震的形成。燃油粒度减小,油滴破碎和蒸发需要的时间随之减小,反应区长度减小,波速增加。

表 3 和表 4 为来流温度 373 K 和 283 K 时爆震室的工作参数,其中 $q_{m,a}$ 为爆震室空气流量, p_i 和 p_t 分别为爆震室进口来流压力和爆震室供油压力, T_w 为爆震室出口壁面温度。

表 3 $T_i=373\text{ K}$ 时 U 型爆震室工作参数

Table 3 Working parameters of U-bend detonation combustor at $T_i=373\text{ K}$				
f/Hz	$q_{m,a}/(\text{kg/s})$	p_i/MPa	p_t/MPa	T_w/K
15	0.19	0.193	0.079	811.35
20	0.26	0.265	0.162	956.62
25	0.31	0.321	0.220	1063.98
30	0.42	0.402	0.303	1 120.07

表 4 $T_i=283\text{ K}$ 时 U 型爆震室工作参数

Table 4 Working parameters of U-bend detonation combustor at $T_i=283\text{ K}$				
f/Hz	$q_{m,a}/(\text{kg/s})$	p_i/MPa	p_t/MPa	T_w/K
15	0.20	0.199	0.089	741.67
20	0.27	0.254	0.144	926.68
25	0.32	0.311	0.209	1 039.66
30	0.41	0.381	0.273	1 084.85

如图 4 和图 5 所示,随着工作频率升高,爆震室内波速提高,结合表 3~表 4 中爆震室工作参数可以得出其主要原因是试验时气动雾化喷嘴雾化气为来流空气,工作频率升高,爆震室内所需的空气质量流量变大,雾化气压力和燃油压力升高,气动雾化喷嘴雾化效果提高,燃油粒度减小^[27],来流空气与燃油的掺混效果变好;加之工作频率提高爆震室壁温提高,新鲜可燃混气在填充过程中与

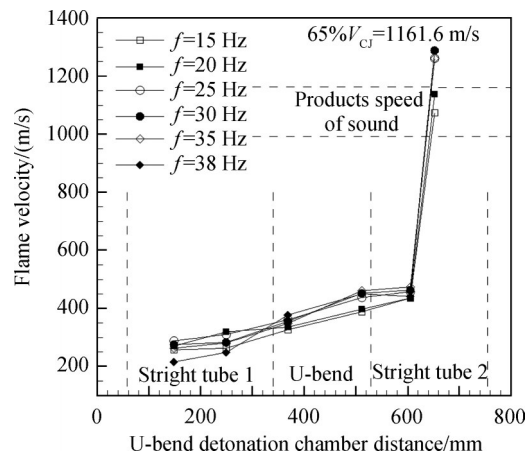


图 4 $T_i=373\text{ K}$ 时 U 型脉冲爆震燃烧室内的波速
Fig.4 Wave velocity in U-bend pulse detonation combustor when $T_i=373\text{ K}$

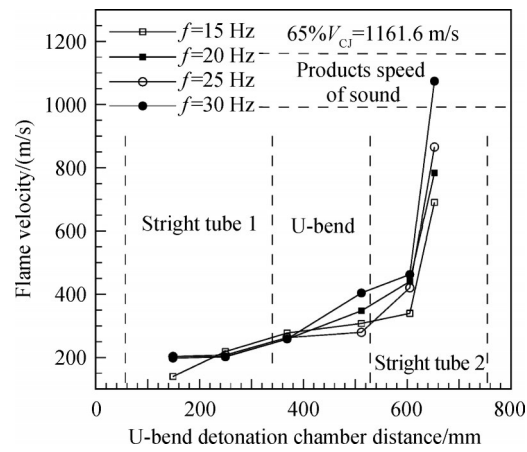


图 5 $T_i=283\text{ K}$ 时 U 型脉冲爆震燃烧室内的波速
Fig.5 Wave velocity in U-bend pulse detonation combustor when $T_i=283\text{ K}$

高温产物及管壁发生热交换,燃油分布均匀性提高,爆震室内可燃混气掺混效果进一步提高,所以波速随工作频率提高而增加。

图 6 和图 7 所示分别为来流温度为 373 K 和 283 K 时爆震弯段内离子探针测得的火焰传播过程,工作频率为 15~30 Hz。从图 6 和图 7 中可以看出,来流温度为 373 K 和 283 K 时,在部分工作频率下均为 I1(爆震弯段进口)最先监测到火焰, I2(即爆震弯段外侧)监测到火焰的时间晚于 I3(爆震弯段出口),工作频率提高后,爆震弯段进出口依次监测到火焰的出现。并且结合图 4 和图 5,压力波在爆震弯段中是顺着流动方向传播的,可以判断在 I2 较 I3 后监测到火焰的情况下,燃烧波靠近弯段内侧移动并逐渐向爆震弯段外侧传播,而高压区沿弯段外侧移动,加之压力传感器和离子探针均安装于爆震弯段外侧,所以测得压力波顺着气流方向, I2 较 I3 后监测到火焰。结合图 6 和图 7 可以发现,来流温度为 283 K,工作频率为 30 Hz 时爆震弯段进出口依次监测到火焰的出现;而来流为 373 K 时,工作频率为 20 Hz 即可依次监测到火焰的出现,这表明该现象的出现主要受爆震弯段内可燃混气分布均匀性影响,在燃油雾化掺混效果较差时,爆震弯段内燃油液滴受到离心力作用主要分布在爆震弯段外侧,导致爆震弯段内可燃混气分布不均匀,但随着工作频率提高,壁温提高且喷嘴燃油雾化更好,爆震弯段内可燃混气分布更加均匀,所以可以依次监测到火焰

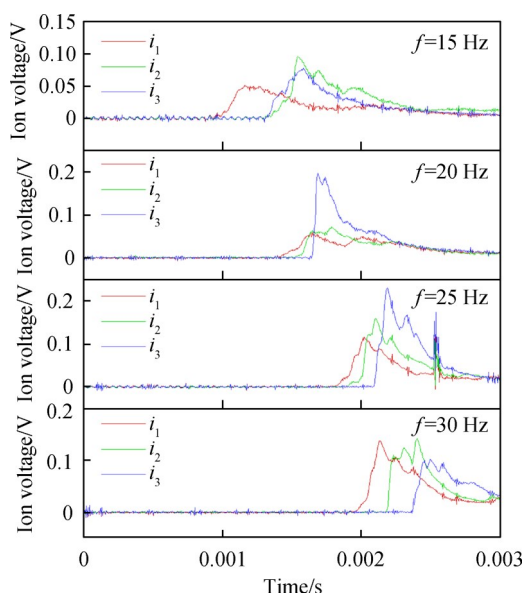


图 6 $T_1=373$ K 时 U 型爆震弯段内火焰传播过程
Fig.6 Flame propagation in U-bend detonation tube when $T_1=373$ K

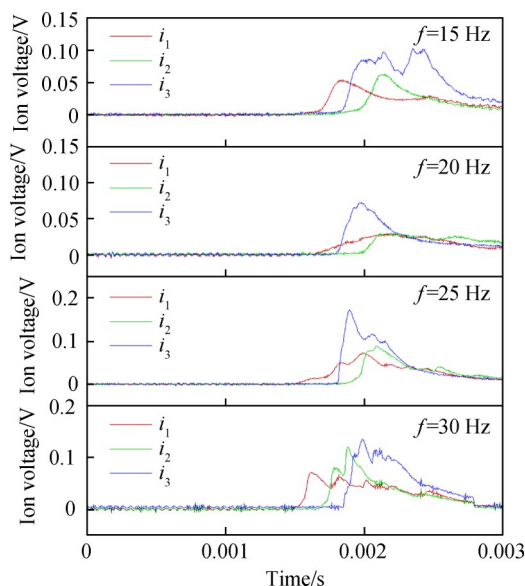


图 7 $T_1=283$ K 时 U 型爆震弯段内火焰传播过程
Fig.7 Flame propagation in U-bend detonation tube when $T_1=283$ K

的出现;由于来流温度为 373 K 时气温较 283 K 更高,有利于燃油的雾化蒸发,所以在工作频率为 20 Hz 即可依次监测到火焰的出现。

2.2.3 U-PDC 点火起爆时间分析

如图 8 所示,点火起爆时间 t_{ig-det} 为从点火到爆震生成所用时间,在本文中 $t_{ig-det} = t_{delay} + t_{DDT}$,其中 t_{delay} 为点火延迟时间, t_{DDT} 为爆燃转爆震时间,即 DDT 时间(未起爆时即为爆震室内火焰传播时间)。

图 9 所示为不同来流温度下点火起爆时间、点火延迟时间、DDT 时间与工作频率的关系,其中误差条代表相对于各自时间平均值的上绝对偏

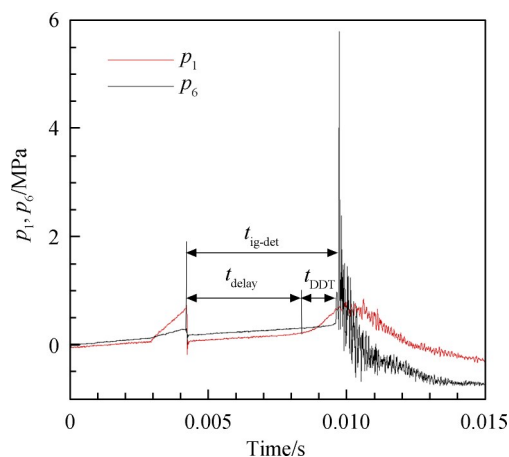


图 8 点火起爆时间、点火延迟时间和 DDT 时间定义
Fig.8 Definition of detonation initiation time, ignition delay time and DDT time

差和下绝对偏差。如图9所示,U-PDC的点火起爆时间在3~10 ms内,且点火延迟时间是影响点火起爆时间的主要因素,这是由于热射流点火后火焰要先从点火腔传播到点火段主管,其点火延迟时间包括初始火焰在点火腔内的传播时间,并且由于初始火焰传播速度较慢,导致 t_{delay} 占点火起爆时间的比例较大。来流温度相同时,随着爆震室工作频率提高,点火起爆时间和点火延迟时间明显缩短,但是DDT时间无明显变化,表明工作频率提高,爆震室和射流点火器壁温提高,燃油液滴的蒸发和掺混变好,初始火焰在射流点火器内传播时间变短,所以点火起爆时间变短。

如图9可见,爆震室工作频率相同时,来流温度升高,点火起爆时间、点火延迟时间、DDT时间均减小,其原因主要是来流温度升高引起的爆震室和射流点火腔内燃油粒度减小,雾化掺混效果变好。且来流温度为283 K、工作频率为15~25 Hz时并未起爆,但是其DDT时间较来流温度为373 K时相差不超过0.5 ms,这是由于爆震室采用DDT过程获得充分发展的爆震波,其起爆位置均靠近爆震室出口,即使来流温度为283 K时大部分工作频率下未起爆,但依然存在火焰加速过程,其火焰平均速度较正常起爆并未低太多。

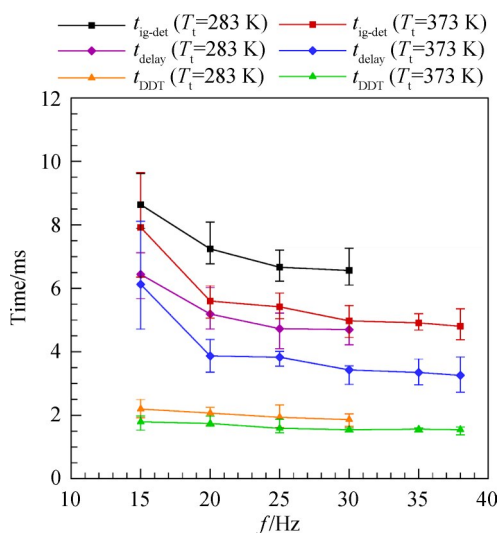


图9 不同工作频率下点火起爆时间、点火延迟时间和DDT时间

Fig.9 Detonation initiation time ignition delay time and DDT time at different working frequencies

3 结 论

本文通过试验研究了来流加温至373 K时无

阀自适应汽油/空气U-PDC的燃烧特性,主要结论如下:

1) 来流温度为373 K时,使用热射流点火实现了U-PDC在15~38 Hz稳定工作。靠近爆震室出口测点测得的压力峰值均大于CJ压力理论值。

2) 来流温度为373 K,工作频率为15 Hz时U-PDC的DDT距离约为681.5 mm,轴向长度约为399 mm;工作频率超过20 Hz时DDT距离约为623.5 mm,轴向长度约为341 mm。而来流温度为283 K、工作频率为15 Hz时,爆震室未获得充分发展的爆震波。表明来流温度升高,爆震室的DDT距离缩短,有利于爆震室的工程应用。

3) 在来流温度为373 K,工作频率为15 Hz以及来流温度为283 K,工作频率为15~25 Hz时,由于爆震弯段内可燃混气分布不均匀,爆震弯段外侧监测到火焰的时间晚于爆震弯段出口;

4) U-PDC的点火起爆时间在3~10 ms内,且点火延迟时间是影响点火起爆时间的主要因素;U-PDC工作频率相同、来流温度从室温升高至373 K或来流温度相同、U-PDC工作频率提高时,波速随之提高,点火起爆时间、点火延迟时间、DDT时间均缩短。

参考文献:

- [1] 严传俊,范玮,郑龙席,等.脉冲爆震发动机原理及关键技术[M].西安:西北工业大学出版社,2005.
- [2] 郑龙席,王治武,黄希桥,等.脉冲爆震涡轮发动机技术[M].西安:西北工业大学出版社,2019.
- [3] 郑龙席,卢杰,严传俊,等.脉冲爆震涡轮发动机研究进展[J].航空动力学报,2014,29(5):993-1000.
ZHENG Longxi, LU Jie, YAN Chuanjun, et al. Research progress on pulse detonation turbine engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(5):993-1000. (in Chinese)
- [4] 李晓丰,郑龙席,邱华,等.两相脉冲爆震涡轮发动机原理性试验[J].航空动力学报,2013,28(12):2731-2736.
LI Xiaofeng, ZHENG Longxi, QIU Hua, et al. Principle experiment of two-phase pulse detonation turbine engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(12):2731-2736. (in Chinese)
- [5] KAILASANATH K. Recent developments in the research on pulse detonation engines[J]. AIAA Journal, 2003, 41(2): 145-159.
- [6] 王凌碧,郑龙席,黄康,等.回流型脉冲爆震燃烧室工作特性分析[J].推进技术,2021,42(4):898-905.
WANG Lingyi, ZHENG Longxi, HUANG Kang, et al. Operating characteristics of a reverse flow pulse detonation combustor[J]. Journal of Propulsion Technology, 2021, 42(4):898-905. (in Chinese)

- [7] JEFFREY G, VENKAT T, ANTHONY D. System-level performance estimation of a pulse detonation based hybrid engine[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, 2008, 130(1):1-8.
- [8] LI Xiaofeng, ZHENG Longxi, QIU Hua, et al. Experimental investigation on the power extraction of a turbine driven by a pulse detonation combustor[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2013, 26(6):1353-1359.
- [9] WILLIAM H H, DAVID T P. Thermodynamic cycle analysis of pulse detonation engines[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2002, 18(1):68-76.
- [10] HELFRICH T M, SCHAUER F R. Ignition and detonation-initiation characteristics of hydrogen and hydrocarbon fuels in a PDE[R]. Reno, US: the 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2007.
- [11] FROLOV S M, AKSENOV V S, SHAMSHIN I O. Shock wave and detonation propagation through U-bend tubes[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(2):2421-2428.
- [12] FROLOV S M, AKSENOV V S, SHAMSHIN I O. Initiation of gaseous detonation in tubes with sharp U-bends[J]. *Doklady Physical Chemistry*, 2008, 418(5):642-646.
- [13] FROLOV S M, AKSENOV V S, SHAMSHIN I O. Reactive shock and detonation propagation in U-bend tubes[J]. *Journal of Prevention in the Process Industries*, 2007, 20(4/5/6):501-508.
- [14] FROLOV S M, AKSENOV V S, SHAMSHIN I O. Propagation of shock and detonation waves in channels with U-shaped bends of limiting curvature[J]. *Combustion and Explosion*, 2008, 2(5):759-774.
- [15] SHINOBU O, MASAYA S, MAKOTO Y. Numerical Investigation on detonation wave through U-bend[J]. *Journal of Thermal Science*, 2010, 19(6):540-544.
- [16] QIU Hua, SU Zheng, XIONG Cha. Experimental investigation on multi-cycle two-phase spiral pulse detonation tube of two configurations[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2018, 233(11):1-10.
- [17] 谭汶昊, 郑龙席, 黄康, 等. U型脉冲爆震燃烧室的点火起爆工作特性试验研究[EB/OL]. [2021-04-08]. <https://doi.org/10.13675/j.cnki.tjjs.200742>
- [18] BROPHY C M, NETZER D W, SINIBALDI J, et al. Operation of a JP10/air pulse detonation engine[R]. Huntsville, Alabama, US: the 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2000.
- [19] CICCARELLI G, GINSBERG T, BOCCIO J, et al. Detonation cell size measurements and predictions in hydrogen-air-steam mixtures at elevated temperatures[J]. *Combustion and Flame*, 1994, 99(2):212-220.
- [20] CICCARELLI G. Flame acceleration in fuel-air mixtures at elevated initial temperatures[R]. Indianapolis, Indiana, US: the 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2002.
- [21] CARD J, CICCARELLI G. DDT in fuel-air mixtures at elevated temperatures and pressures[J]. *Shock Waves*, 2005, 14(3):167-173.
- [22] WEN C S, CHUNG K M, LAI W H. Detonation initiation of JP-8-oxygen mixtures at different initial temperatures[J]. *Shock Waves*, 2012, 22(5):477-482.
- [23] 李牧. 多循环爆震起爆研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- [24] LI Mu. Multi-cycle detonation initiation[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007. (in Chinese)
- [25] STREHLOW R A. Gas phase detonations: recent developments[J]. *Combustion and Flame*, 1968, 12(2):81-101.
- [26] ROY G D, FROLOV S M, BORISOV A A, et al. Pulse detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2004, 30(6):549-552.
- [27] LU Jie, ZHENG Longxi, WANG Zhiwu, et al. Operating characteristics and propagation of back-pressure waves in a multi-tube two-phase valveless air-breathing pulse detonation combustor[J]. *Experimental Thermal and Science*, 2015, 61:12-23.
- [27] IBRAHIM I A, FARAG T M, ABDEL-BAKY M E, et al. Experimental study of spray combustion characteristics of air-blast atomizer[J]. *Energy Reports*, 2020, 6:209-215.

(编辑:王碧珺)