

文章编号:1000-8055(2013)10-2276-08

乙烯和汽油多循环脉冲爆震发动机起爆特性比较

程晓军, 范育新, 蔡 迪, 韩启祥, 王家骅
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 为了研究脉冲爆震发动机(PDE)结构对其工作性能的影响,在内径为 40 mm、长为 1 050 mm 的气动阀式脉冲爆震发动机样机上,进行了气态乙烯/空气和液态汽油/空气的多循环起爆特性试验研究. 研究表明:在 25, 30 Hz 和 40 Hz 下都能在乙烯/空气中成功触发爆震波,40 Hz 下产生 C-J(Chapman-Jouguet)爆震波,传播速度为 1 724 m/s(低于 C-J 爆震波速度理论值 1 832.45 m/s 的 5.6%),峰值压力为 3.01 MPa(高于 C-J 爆震波压力理论值 2.79 MPa 的 7.88%). 在相同结构下,汽油/空气未能完成由缓燃向爆震转变的过程. 通过对比两种燃料下的试验结果发现:相对于气态燃料,液态燃料受其蒸发过程的影响,在爆震管内的火焰加速缓慢,需要更多的强化燃烧装置来加速火焰,带来的总压损失也更大. 因此,对于液态燃料改善雾化和蒸发,提高可燃混气的质量是其实现低阻起爆的关键.

关 键 词: 缓燃向爆震转变; 爆震管; 火焰传播速度; 压力波速度; 爆震波
中图分类号: V231.2⁺2 **文献标志码:** A

Comparative ignition characteristics of ethylene and gasoline in multi-cycle pulse detonation engine

CHENG Xiao-jun, FAN Yu-xin, CAI Di, HAN Qi-xiang, WANG Jia-hua
(College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To investigate the influence of the structure of multi-cycle pulse detonation engine (PDE) on its operation performance, experiments of ethylene-air and gasoline-air mixtures initiation process in the aero-valve PDE of 1050 mm length and 40 mm inner diameter were performed. The results show that the detonation wave can be successfully initiated in the ethylene-air with frequency of 25, 30 Hz and 40 Hz, and C-J (Chapman-Jouguet) detonation wave can be achieved at the frequency of 40 Hz with detonation wave propagation velocity of 1 724 m/s (less 5.6% than the C-J detonation wave velocity theoretical value 1 832.45 m/s) and peak wave pressure of 3.01 MPa (higher 7.88% than the C-J detonation pressure theoretical value 2.79 MPa). While the deflagration to detonation transition failed to complete in gasoline-air. By comparison of the two results, it was found that the evaporation process dominated the initiation process in liquid fuels, thus slowing the flame acceleration process in the detonation tube. More novel and optimized-designed reinforced-combustion devices for accelerating the flame should be developed, which may cause higher total pressure loss. Thus, atomization and evaporation to improve the quality of the mixture is a key technology for detonation in the liquid fuel.

收稿日期:2012-09-26

网络出版地址:

基金项目:江苏省普通高校研究生科研创新计划(CXZZ12_0167)

作者简介:程晓军(1986—),男,陕西宝鸡人,博士生,主要从事脉冲爆震发动机低阻起爆技术研究及涡扇冲压组合发动机燃烧室燃烧组织方面研究. E-mail:468759826@qq.com

Key words: deflagration to detonation transition; detonation tube;
flame propagation velocity; pressure wave velocity; detonation wave

PDE 是利用爆震燃烧产生推力的新概念脉冲喷气式发动机. 其结构简单、近似于等容燃烧的高热循环效率等优势受到越来越多的关注. PDE 内只有实现了爆震燃烧才能发挥其性能优势, 采用低能点火通过火焰不断加速, 促进火焰与激波相互作用, 最终完成从缓燃到爆震的转变过程 (DDT) 是常用的起爆手段. PDE 内实现 DDT 过程的基础是可爆混气的形成, 相对于气态燃料, 液态燃料受到雾化掺混等因素的影响, 可爆混气的形成过程复杂, 难度大, 从目前国内外公开文献 [1-7] 看液态燃料的可爆混气的形成是 PDE 实现液态燃料起爆的关键.

迄今, 美国海军研究生院在乙烯和 JP10 等不同碳氢燃料的起爆特性方面做了深入的研究. Danaher 等^[8-10] 采用乙烯和丙烷作为燃料, 对爆震燃烧室内强化燃烧结构和碳氢燃料爆震发展过程中的激波反射进行了研究. 研究表明: 在所选用的助爆结构中, 乙烯成功起爆, 而丙烷因为燃烧速率慢, 爆震管内的湍流强度低未能产生充分发展的爆震波. LI 等^[11] 通过数值计算得到 360 K 时, 乙烯/空气在化学恰当比下成功起爆. Hutcheson 等^[12] 试验研究了增强紊流强度的螺旋状扰流器的尺寸对乙烯/空气混合物的起爆特性的影响, 结果表明, 所选用的两种扰流器均能成功完成 DDT 过程, 但是直径为 6.35 mm 比直径为 3.175 mm 的扰流器的 DDT 距离短, 直径为 3.175 mm 的总压损失为直径为 6.35 mm 的 30%. Shimo 等^[13] 设计了气动阀式脉冲爆震燃烧室, 并对其多循环起爆特性进行了研究, 试验在常压下, 乙烯/空气和丙烷/空气在化学恰当比附近, 不同体积填充分数下进行. 研究表明, 乙烯/空气混合物在体积填充分数为 1.1, 当量比为 1.1 时, 可以产生最高频率为 8.3 Hz 的爆震波. 丙烷/空气混合物在体积填充分数为 1.7, 当量比为 1 时, 可以触发最高频率为 6.3 Hz 的爆震波. 综上所述可知, 乙烯是一种易于触发爆震波的燃料.

为了消除液态燃料雾化、蒸发等物理过程对爆震特性的影响, 重点研究 PDE 结构对 PDE 工作的影响, 采用气态燃料进行 PDE 结构对起爆和推进性能的影响研究比较合理. 乙烯分子结构简单, 可燃性较好^[14], 同时具有碳氢燃料的性质, 所以本文选取乙烯作为燃料进行多循环 PDE 结构

的工作特性研究. 为了验证雾化、蒸发等液体燃料的物理过程对 PDE 起爆性能的影响, 在相同结构的 PDE 上还进行了气、液不同燃料的研究, 比较气、液不同燃料的爆震波触发和传播特性. 本文以内径 $\phi 40$ mm、长为 1050 mm 的气动阀式 PDE 样机 (下文简称 PDE 样机) 为研究平台, 进行了气态乙烯/空气和液态汽油/空气的多循环 PDE 的起爆特性试验研究, 并比较了气、液两种燃料的爆震特性在爆震波传播速度、DDT 时间、DDT 距离和压力波特性的差异. 本文的研究结果对 PDE 的工程应用研究具有一定的参考价值和指导意义.

1 试验系统和试验方案

1.1 试验系统

试验系统包括进气系统、燃料供给系统、点火系统、数据采集系统和 PDE 样机. 图 1 是气态乙烯/空气起爆特性试验系统示意图.

供气系统由一台罗茨风机及相应的管道和调节阀门组成. 气源最大供气量为 1.5 kg/s, 最大供气压力为 0.08 MPa. 试验采用地面冲压进气方式, 进气压力为 0.05 MPa. 气态燃料和液态燃料的供给系统有所不同. ①气态燃料的供给系统由乙烯储存钢瓶、供气阀、减压阀、喷乙烯孔, 减压阀的压力范围为 0~0.4 MPa. 乙烯通过输气管与爆震管壁面的喷乙烯环相连. 喷乙烯环位于气动阀后方, 在 $\phi 40$ mm 的圆周上 (即爆震管壁面) 均布 6 个 $\phi 1$ mm 的小孔, 由壁面向中心喷射乙烯, 同时, 在爆震管内布置一个 $\phi 12$ mm 的分流环, 防止轴线附近过于富油, 如图 2(a) 所示. ②液态汽油的供给系统由输油泵和相应的输油管组成, 通过输油阀和回油阀控制爆震管内的汽油量. 如图 2(b) 所示, 6 个 $\phi 0.5$ mm 的喷油孔喷出的汽油打在溅环上, 在气动力的作用下进行气动雾化, 同时在爆震管内放置蒸发器, 以改善汽油的蒸发率, 加强雾化.

测试系统主要包括火焰传播速度测量和压力波的测量. 压力波的测量使用高频动态压力传感器 (PCB) 进行测量, 测试信号通过放大器及 A/D (模拟/数字) 转换器与计算机数据采集系统相连测试. 火焰传播速度使用离子探针测量, 通过计算机数据采集系统进行数据采集. 在距激波反射器

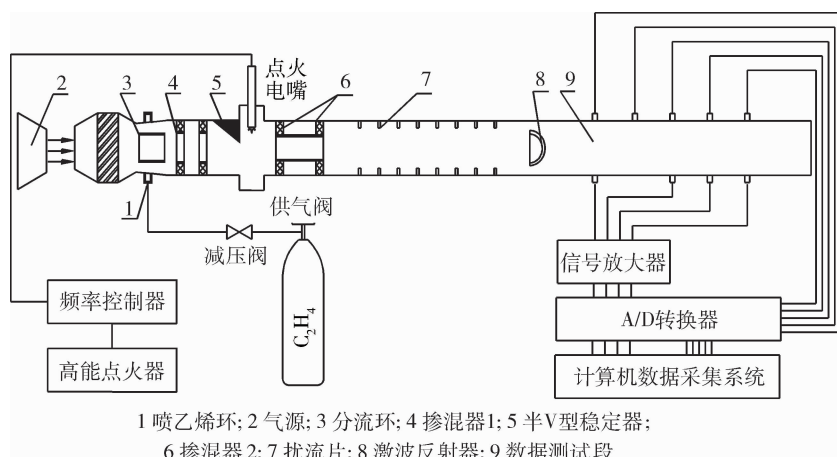


图 1 乙烯/空气起爆特性试验系统示意图

Fig.1 Schematic of experimental setup for ethylene-air mixtures

1.875D (D 为爆震管的直径) 的截面开始布置 5 个离子探针和 4 个压力传感器, 离子探针和压力传感器的布置如图 3 所示, 离子探针 Ion P1~Ion P5 之间为间距 1.25D 的均匀布置; 压力传感器 PCB-A 和 PCB-B 之间间距为 2.5D, PCB-B~PCB-D 之间为间距 1.25D 的均匀布置; 每个压力传感器截面上布置 1 个离子探针. 本试验得到的压力波传播速度由压力时序曲线得到为相邻 2 个压力传感器之间的平均速度, 用 v_{ij} 表示; 火焰传播速度由离子探针曲线得到, 为 2 个离子探针之间的火焰传播速度平均值, 用 u_{ij} 表示; 各压力传感器的峰值压力用 p_i 表示.

图2 乙烯和汽油的供入方式示意图(单位:mm)
Fig.2 Schematic of injections of ethylene and gasoline (unit:mm)

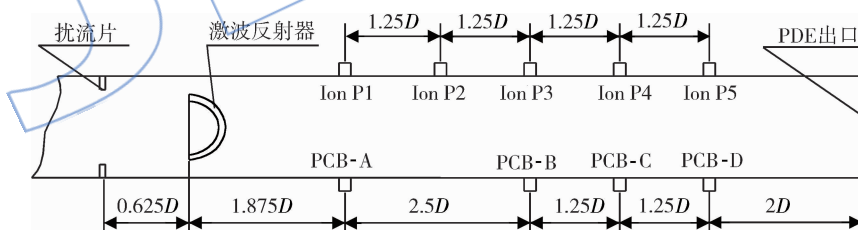


图 3 离子探针和压力传感器测点布置图

Fig. 3 Schematic of locations of ion probes and pressure sensors

点火系统包括频率控制器、高能点火器和点火电嘴,高能点火器的点火能量为 0.5 J. PDE 样机内径为 40 mm,总长为 1050 mm. PDE 样机中包括掺混器、凹腔与半 V 型稳定器结合组成的点火扩焰装置、强化燃烧的扰流片和激波反射器. 扰流片共 7 片,阻塞比为 43%,激波反射器阻塞比为 36%.

2 试验结果及分析

2.1 乙烯/空气起爆特性的试验研究

图 4 为乙烯/空气在 25, 30 Hz 和 40 Hz 下各

压力传感器的压力时序图,图 5 为乙烯/空气各频率下一个周期的压力曲线局部放大图. 表 1 为试验测得的乙烯/空气爆震特性参数表.

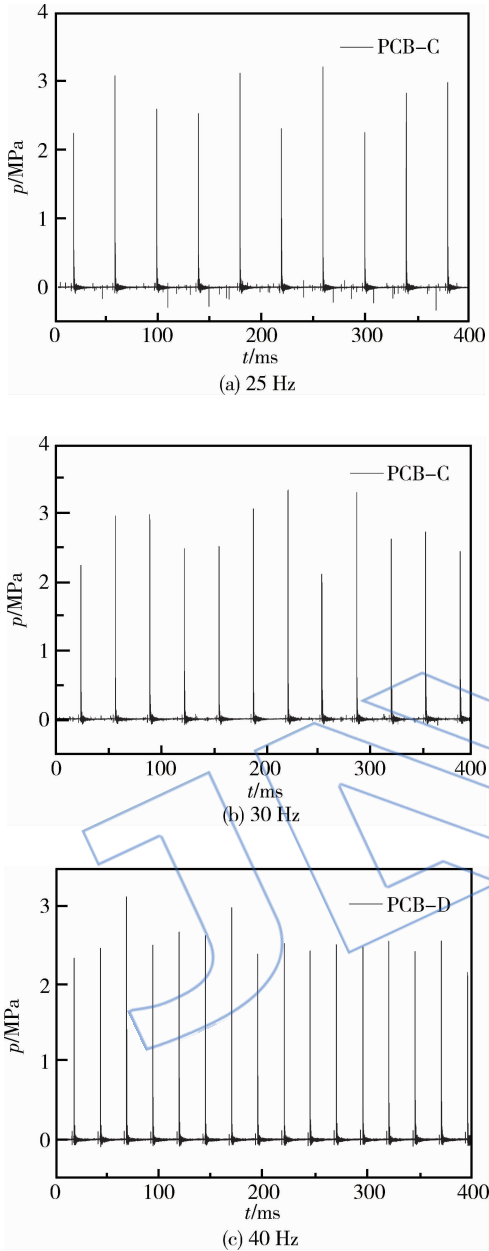


图 4 乙烯/空气压力时序图
Fig. 4 Pressure time sequences with ethylene-air mixtures

由图 4 可以看出,不同频率下采用气态乙烯为燃料的 PDE 样机都能实现间歇工作,峰值压力都大于 2.5 MPa. 图 5 中各压力传感器采集的压力曲线变换规律大体相同,都经历了由强到弱再到更强的发展过程. PCB-A 测得的压力波形有很陡的上升沿,且在各频率下的波形基本稳定. 这是因为 PCB-A 离激波反射器较近,此处的压力波强

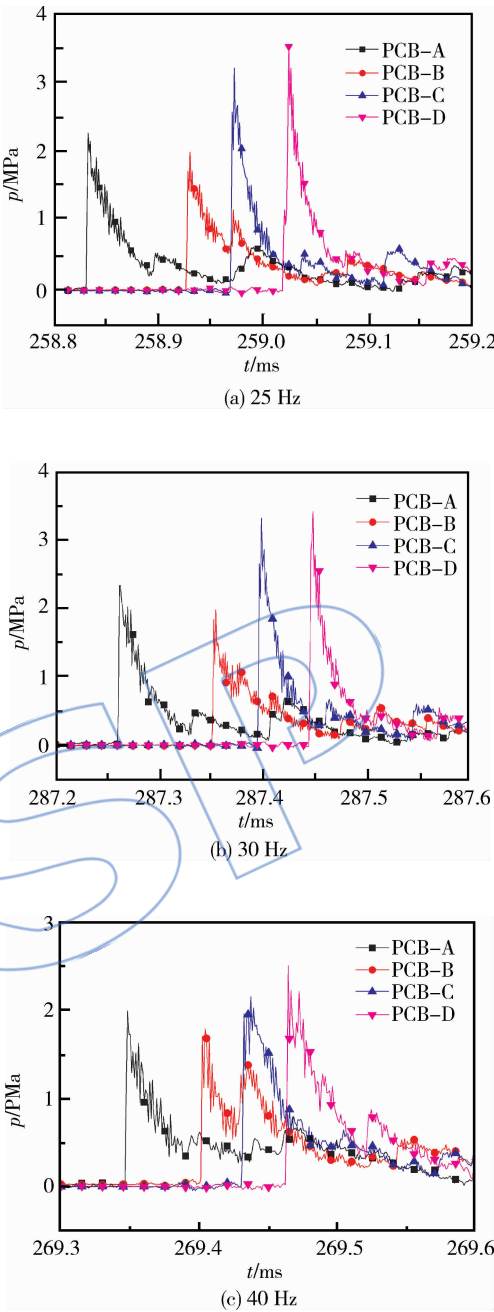


图 5 乙烯/空气压力一个周期局部放大图
Fig. 5 Enlarged map of pressure in a cycle with ethylene-air mixtures

度增加,触发局部爆震波. PCB-B 采集的压力波强度较弱,从图 5(c)的某个周期局部放大图看出压力波形具有明显的双峰结构. PCB-C 和 PCB-D 处呈现陡峭上升沿状的压力波形. DDT 过程同时为火焰加速追赶压力波并使两者速度一致重合的过程,即在爆震管内火焰在压力波后. 表 1 为试验得到的乙烯/空气爆震参数,其中 f 为工作频率, t_{ddt} 为 DDT 时间, L_{ddt} 为 DDT 距离. 从表 1 可以看出各工作频率下,PCB-A 和 PCB-B 之间的火焰传播速度明显高于压力波传播速度,此阶段火焰

表 1 试验得到的乙烯/空气爆震参数表

Table 1 Experimental detonation parameters for ethylene-air mixtures

$f/$ Hz	$v_{12}/$ (m/s)	$v_{23}/$ (m/s)	$v_{34}/$ (m/s)	$v_{45}/$ (m/s)	$u_{ab}/$ (m/s)	$u_{bc}/$ (m/s)	$u_{cd}/$ (m/s)	$p_1/$ MPa	$p_3/$ MPa	$p_4/$ MPa	$p_5/$ MPa	$t_{\text{ddt}}/$ ms	$L_{\text{ddt}}/$ mm
25	1669	1328	1185	1072	1073	1185	1070	2.46	2.07	2.66	3.16	1.35	<635
30	1445	1443	1125	1119	1148	1118	1049	2.41	1.89	2.71	2.87	1.33	<635
40	2223	1673	1958	1744	1823	1850	1724	2.43	1.98	2.68	3.01	1.14	<685

和压力波间的距离缩短明显,还处于 DDT 过程中的火焰加速追赶压力波阶段. 25 Hz 和 30 Hz 时,在 PCB-B 和 PCB-C 的距离内 $v_{34} \approx u_{bc}$,即火焰传播速度与压力波传播速度一致,此时 PBC-C 的峰值压力分别为 2.66 MPa 和 2.87 MPa,峰值压力达到理论值,因此认为 25 Hz 和 30 Hz 时爆震波产生于 PCB-B 和 PCB-C. 40 Hz 时, $v_{34} > u_{bc}$,认为 PCB-B 和 PCB-C 之间仍处于火焰加速阶段;在 PCB-C 和 PCB-D 之间 $v_{45} \approx u_{cd}$,即火焰传播速度与压力波速度一致,认为激波和火焰在该段重合,形成爆震波.

由表 1 可以看出,25 Hz 时的爆震波传播速度为 1185 m/s,峰值压力为 2.66 MPa;30 Hz 爆震波传播速度为 1118 m/s,峰值压力为 2.71 MPa;40 Hz 时的爆震波传播速度为 1724 m/s,峰值压力为 3.01 MPa. 理论上初温 $T_{1s} = 300$ K 时的乙烯/空气混合物($\text{C}_2\text{H}_4 + 3\text{O}_2 + 11.28\text{N}_2$)的爆震参数如表 2 所示^[15]. 表 2 中 p_{1s} 为初压, p_{2d} 为爆震后压力.

表 2 理论上的乙烯/空气爆震参数

Table 2 Theoretical detonation parameters for ethylene-air mixtures

$p_{1s}/10^5$ Pa	T_{1s}/K	$U_{\text{C-J}}/(\text{m/s})$	$p_{2d}/10^5$ Pa
1.4	300	1831.2	26.041
1.6	300	1833.7	29.828

本试验的工况为初温为 293 K,初压为 1.5 atm(约为 1.5×10^5 Pa),试验得到的各频率下的峰值压力与理论上相近. 40 Hz 时的爆震波传播速度为 1724 m/s 与理论值相近,从压力和速度上可以判断 40 Hz 时产生了充分发展的爆震波(C-J 爆震波);25 Hz 和 30 Hz 时的火焰传播速度与激波传播速度一致,但是速度值相对于 C-J 爆震波速度较低. 分析认为:爆震波在爆震管内的传播速度与爆震管内温度有关,温度越高爆震波的传播速度越快. 爆震管内的温度与 PDE 样机工作时的

放热和与外部环境的散热有关. PDE 样机频率越高,单位时间内的放热时间越长,放热量越大;而爆震管与环境的散热又取决于单位体积的表面积 $4/D$. 本文的爆震管内径 $\phi 40$ mm,散热率较高. 25 Hz 和 30 Hz 时由于放热量较小,相对与 40 Hz 时的爆震管内环境温度低,爆震管内未达到维持 C-J 爆震波速度所需要的温度,爆震波传播速度较低,虽然火焰传播速度与压力波速度一致,火焰与压力波重合,但此时形成的爆震波较之理论 C-J 爆震波传播速度低. 在 40 Hz 时,爆震内达到维持 C-J 爆震波速度所需要的温度,因此得到了 40 Hz 下的稳定爆震波.

2.2 汽油/空气起爆特性试验研究

为了便于比较乙烯/空气和汽油/空气的起爆特性,保持 PDE 样机内的扰流片和激波反射器等助爆措施不变. 考虑到气动阀后汽油的雾化和掺混,在气动阀后面放置掺混器增强油气掺混,并且在点火后,蒸发器代替乙烯/空气爆震中的掺混器,利用蒸发管的壁面的储热能力增强汽油的蒸发率,而起促进 DDT 过程的扰流片和激波反射器的结构和位置都不变,并在相同的助爆距离内采用相同的测试段进行数据采集.

图 6 为汽油/空气在 25,30 Hz 和 40 Hz 下压力传感器的压力时序图,图 7 为各频率下,一个周期的压力曲线局部放大图. 表 3 为试验得到的汽油/空气爆震参数.

1) 由图 6 可以看出,在不同频率下最后一个压力传感器采集的峰值压力都大于 1.5 MPa, PDE 样机工作无掉频. 图 7 是最后两个压力传感器采集的压力波形图,可以看出各频率下压力波形基本相似,都是在 PCB-C 采集到一个强前导激波,在 PCB-C 至 PCB-D 阶段,强前导激波与火焰相互作用,火焰不断加速诱导爆震波的触发,在 PCB-D 采集到的压力波形可以看出,压力波形为典型的双峰结构,在强前导激波后紧跟爆震波,由于火焰在整个 PDE 样机内的加速不够,这两个波

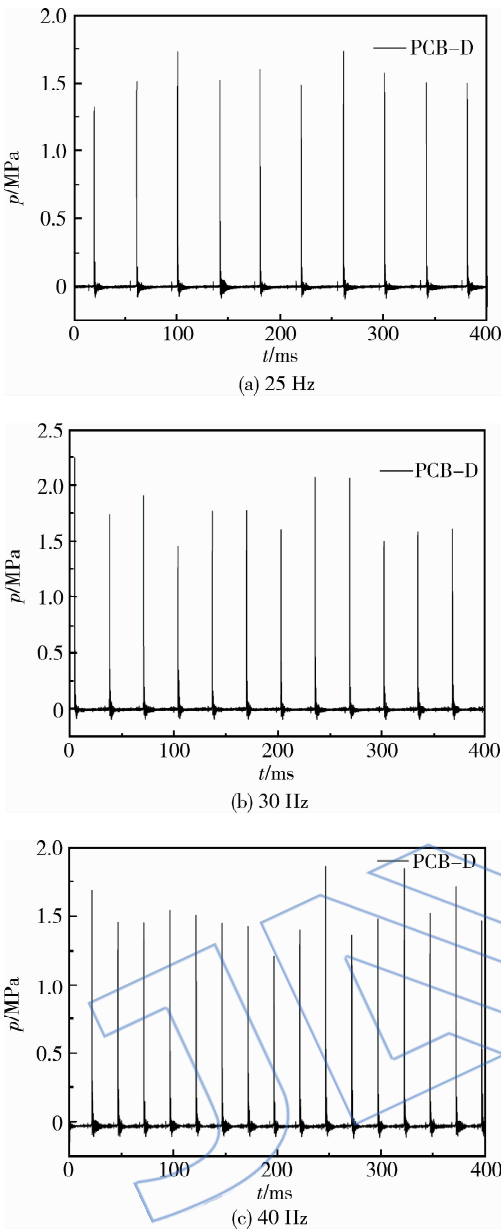


图 6 汽油/空气压力时序图

Fig. 6 Pressure time sequences with gasoline-air mixtures

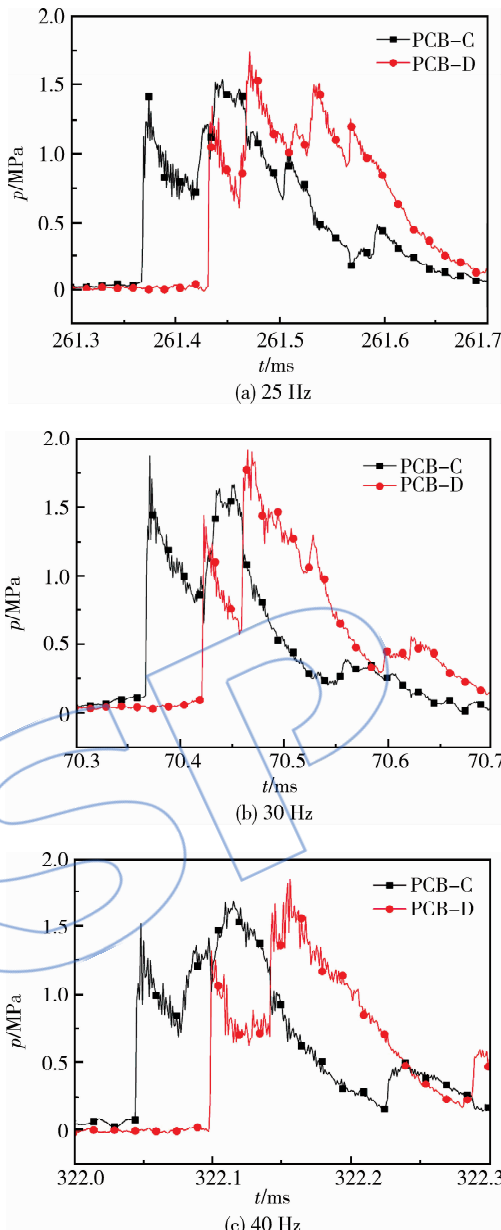


图 7 汽油/空气压力一个周期局部放大图

Fig. 7 Enlarged map of pressure in a cycle with gasoline-air mixtures

形还未重合,没有完成 DDT 过程,没有形成充分发展的爆震波产生。

2) 由表 3 可以看出,各压力传感器采集的峰值压力基本在 1.5 MPa 以上,但是火焰传播速度和激波传播速度较低,都在 1000 m/s 左右。在整个测试段,火焰加速缓慢,火焰传播速度没有很明显地大于激波传播速度的阶段。分析认为,火焰传播速度低是由于 PDE 样机内的放热率很低,放热强度不大。这是因为 PDE 样机内燃料的雾化较差,燃料经过气动雾化喷嘴后大多数以微小液滴的形式存在爆震管中,PDE 样机工作时爆震管内的余气系数接近 1,但由于蒸发成气相的成分少,

气相燃料的余气系数远大于 1,所以化学反应速率较困难。由此可以得到结论,在整个 PDE 样机内工作频率低,放热强度低;另一方面,爆震燃烧生成的热量除了向环境散发,还有很大一部分用于液态燃料的蒸发,因此散热量较大。整个测量段仍然处于 DDT 过程中,火焰在压力波后追赶压力波,25 Hz 和 30 Hz 时火焰传播速度接近激波传播速度,需要很长的距离才能使火焰和激波重合;40 Hz 相对于 25 Hz 和 30 Hz,环境温度较高,散热量较少,火焰传播速度高于压力波传播速度,但从表 3 中的数据看,此速度差还不足以使火焰与激波的距离有明显的缩短,火焰很难追上激波并与之

表 3 试验得到的汽油/空气爆震参数

Table 3 Experimental detonation parameters for gasoline-air mixtures

$f/$ Hz	$v_{12}/$ (m/s)	$v_{23}/$ (m/s)	$v_{34}/$ (m/s)	$v_{45}/$ (m/s)	$u_{ab}/$ (m/s)	$u_{bc}/$ (m/s)	$u_{cd}/$ (m/s)	$p_1/$ MPa	$p_3/$ MPa	$p_4/$ MPa	$p_5/$ MPa	$t_{\text{ddt}}/$ ms	$L_{\text{ddt}}/$ mm
25	1110	727	797	889	826	950	803	1.53	1.68	1.68	1.63	>4.86	>685
30	1229	751	1000	1021	1177	1195	891	1.45	1.58	1.85	1.78	>4.11	>685
40	1315	769	1162	1041	955	1054	939	1.53	1.39	1.62	1.68	>3.98	>685

重合完成 DDT 过程成功触发爆震波。

3) 综合速度和压力波形两方面因素考虑,在本文中所提到的助爆措施下,爆震管内的峰值压力接近于 1.5 MPa,这与文献中的爆震波压力值较为接近,但是火焰传播速度和激波传播速度都与理论值相差较大,且火焰加速较慢,没有出现明显的火焰追赶激波缩短两者之间距离的现象,本试验所使用的 PDE 样机长度有限,无法完成 DDT 过程,没有充分发展的爆震波的产生。

2.3 气态燃料和液态燃料起爆特性的比较

PDE 样机内只改变乙烯和汽油的燃料供应方式和掺混方式,保持助爆装置不变的前提下,使用两种燃料进行起爆试验的最大差别是燃料在 PDE 样机内可爆混气的质量。采用气态燃料(乙烯)时,燃料在 PDE 内以气相成分存在;而采用液态燃料(汽油)时,燃料经过气动阀的雾化主要以气液两相成分存在,气相和微小液滴直接或很快参与燃烧,大液滴需要经过相对较长的蒸发时间变为气相参与燃烧。由于 PDE 样机内混气成分的不同导致其 DDT 特性及爆震特性有差异。通过对乙烯/空气和汽油/空气爆震参数的对比,发现有以下几点不同:

1) 在相同结构的 PDE 样机内,从压力波形和压力波速度与火焰传播速度的关系上分析,25, 30 Hz 和 40 Hz 时,乙烯/空气混合物完成了 DDT 过程,成功触发了爆震波,其中 40 Hz 时得到的爆震波传播速度和峰值压力与 C-J 爆震理论值相近。而采用汽油/空气混合物时,PDE 样机内未能完成 DDT 过程,没有触发充分发展的爆震波。

2) 从表 2 和表 3 的试验测得爆震参数对比发现,40 Hz 时气态燃料的 DDT 时间约为 1.14 ms,DDT 距离为 685 mm;而使用液态燃料时,在 3.98 ms 的时间和在 685 mm 的距离内都未完成 DDT 过程。

3) 试验发现,使用气态燃料和使用液态燃料时,在强化燃烧装置后由于紊流强度较大,都存在

一个火焰传播速度较大的区域(PCB-A~PCB-B 之间)。使用气态燃料时,该区域内的火焰传播速度明显大于压力波传播速度,火焰加速过程明显,在较短的距离内火焰赶上压力波并使两者重合形成爆震波;而液态燃料在该区域内的火焰加速比较缓慢,火焰加速距离变长。这是因为气态燃料相对于液态燃料在爆震管内的油气分布较为合理,接近于化学恰当比,化学反应速度较高,放热率和升压率高,火焰加速过程明显。而液态燃料受到大油珠在爆震管内蒸发过程的影响,燃烧放热率较低,火焰加速缓慢,DDT 距离较长。也就是说,对于液态燃料的起爆,文中所采用的助爆装置还不足以使汽油/空气混合物完成 DDT 过程,若在文中基础上再加若干强化燃烧装置使爆震管内有明显的火焰加速过程,则可以获得充分发展的爆震波。因此,液态燃料的起爆需要更多的强化燃烧装置,这也给液态燃烧的爆震管带来更大的总压损失。

3 结 论

本文在内径为 40 mm 长为 1050 mm 的气动阀式 PDE 样机内对乙烯/空气混合物和汽油/空气混合物的多循环爆震特性进行了试验研究。通过对爆震管内间隔排列的压力传感器和离子探针信号的分析,得到气态燃料和液态燃料的起爆特性差异,研究结论如下:

1) 在 PDE 样机内部结构相同的条件下,乙烯/空气混合物实现了 25,30 Hz 和 40 Hz 的频率下的多循环起爆。其中 40 Hz 得到的爆震波传播速度为 1724 m/s,低于 C-J 爆震波速度理论值 1832.45 m/s 的 5.6%,峰值压力为 3.01 MPa,高于 C-J 爆震波压力理论值 2.79 MPa 的 7.88%,在误差范围内,可以认为 40 Hz 下实现了 C-J 爆震;汽油/空气混合物在各频率下未能成功起爆。

2) 乙烯/空气的 DDT 时间和 DDT 距离要比汽油/空气小得多。

- 3) 无论是气态燃料还是液态燃料, 有明显的火焰加速过程是短距离内成功触发爆震波的前提.
- 4) 相对于气态燃料, 液态燃料的成功起爆需要更多的强化燃烧装置, 爆震管内的总压损失较大, 气体膨胀时的阻力较大. 因此对于液态燃料, 改善雾化和蒸发, 提高混气的可爆性质量其实现低阻起爆的关键.

参考文献:

[1] Brophy C M, Sinibaldi J O, Netzer, et al. Operation of a JP-10/air pulse detonation engine[R]. AIAA 2000-3591, 2000.

[2] Brophy C M, Netzer D W, Dorester D. Detonation studies of JP10/air with oxygen and air for pulse detonation engine development[R]. AIAA 98-4003, 1998.

[3] Brophy C M, Sinibaldi J O, Dampousse P. Initiator performance for liquid-fueled pulse detonation engine[R]. AIAA 2002-0472, 2002.

[4] 范育新. 大管径气动阀式两相脉冲爆震发动机几个关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.

FAN Yuxin. Investigation on several key technologies of two-phase valveless large-scale pulse detonation engine [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005. (in Chinese)

[5] 张义宁, 王家骅, 张靖周. 频率 30~50 Hz 两相脉冲爆震发动机研究[J]. 航空学报, 2006, 27(6): 993-997.

ZHANG Yining, WANG Jiahua, ZHANG Jingzhou. Investigation on two phase pulse detonation engine at the frequency 30—50 Hz[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(6): 993-997. (in Chinese)

[6] 张义宁. 提高两相脉冲爆震发动机工作频率的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.

ZHANG Yining. Investigation on increasing operating frequency of two-phase pulse detonation engine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)

[7] 宫继双, 范育新, 王家骅. 两相多循环扇形 PDE 试验研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(11): 2068-2074.

GONG Jishuang, FAN Yuxin, WANG Jiahua. Experimental investigation on two-phase and mutli-cycle sector-PDE [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(11): 2068-2074. (in Chinese)

[8] Danaher T J. Characterization of ethylene/JP-10 fuel injection profiles for a valveless pulse detonation Engine[D]. California, US: Naval Postgraduate School, 2007.

[9] Sexton N G. Detonability of hydrocarbon-air mixtures using combustion enhancing geometries for pulse detonation engines [D]. California, US: Naval Postgraduate School, 2001.

[10] Hackard Jr C N. Ignition characteristics for transient plasma ignition of ethylene-air and JP-10-Air mixtures in a pulse detonation engine [D]. California, US: Naval Postgraduate School, 2007.

[11] LI Chiping, Kailasanath K. Detonation initiation in pulse detonation engines[R]. AIAA 2003-1170, 2003.

[12] Hutcheson P, Brophy C, Sinibaldi J. Investigation of flow field properties on detonation initiation[R]. AIAA 2006-5099, 2006.

[13] Shimo M, Heister S. Multicyclic detonation initiation studies in valveless pulsed detonation combustors[R]. AIAA 2006-4308, 2006.

[14] Roya G D, Frolovb 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): 545-672.

[15] 严传俊, 范玮. 脉冲爆震发动机原理及关键技术[M]. 西北工业大学出版社, 2006.