

文章编号: 1000-8055(2007)10-1632-07

爆震室压力测量可靠性试验

张义宁, 王家骅, 何小民, 张彭岗, 韩启祥, 张靖周
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 为了提高脉冲爆震发动机(Pulse Detonation Engine, 简称 PDE)内爆震波压力测量值的可靠性, 解决多循环 PDE 爆震室压力测量问题, 通过动态压力测试系统, 对单次爆震和多循环 PDE 爆震室内的压力进行测量. 单循环爆震波压力测量的比较性试验研究发现: 当主爆震室的旁支套管长度小于 100mm 左右, 可以测到爆震波的峰值; 当套管长度大于 150mm 左右时, 火焰不能在旁支小管内传播, 传感器测到的只是爆震波后的平台的压力. 当通过冷却套管来测量多循环 PDE 爆震室压力时, 采用较短长度的套管, 可以得到爆震波压力. 研究结果解决了多循环爆震波的压力测量问题.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 脉冲爆震发动机; 爆震; 压力测量
中图分类号: V235 **文献标识码:** A

Reliability test in pressure measurement of detonation combustor

ZHANG Yi-ning, WANG Jia-hua, HE Xiao-min, ZHANG Peng-gang,
HAN Qi-xiang, ZHANG Jing-zhou
(College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To improve the reliability of pressure measurement in detonation combustor of pulse detonation engine (PDE), the pressure/ time curves of detonation were measured at single detonation and multicycle detonation, respectively, by using a dynamic pressure measurement system. The experimental study at single detonation reveals that, if the length of branch tube is less than 100mm, the peak value of detonation pressure can be measured; if the length of tube is more than 150mm, the flame cannot propagate within the branch tube, and only platform pressure after detonation could be measured. For multicycle detonation, if the length of cooling tube is short enough, the detonation pressure can be measured. The research results resolve the reliability problem of pressure measurement on multicycle detonation.

Key words: aerospace propulsion system; pulse detonation engine (PDE); detonation; pressure measurement

脉冲爆震发动机作为新概念发动机^[1-2], 其优越的性能及广阔的应用前景^[3-4] 引起了国内外众多科研机构的浓厚兴趣. 脉冲爆震发动机具有非稳态的、间歇的工作特性, 试验过程中对于参数的测量提出了很多苛刻的要求, 特别是对于多循环

的、高频工作的 PDE, 其爆震室内动态压力, 非稳态推力, 爆震室内不同位置的瞬时温度以及对于不同燃料在不同初始条件下的爆震产物的测量, 到目前为止, 还没有行之有效的测试方法. 这给研究工作带来了许多挑战, 即使在理论上高频的动

收稿日期: 2006-10-19; 修订日期: 2006-03-20

基金项目: 国家自然科学基金资助(50506012)

作者简介: 张义宁(1977-), 男, 江苏连云港人, 讲师, 博士, 主要从事燃烧研究.

态压电式传感器可以解决 PDE 内的压力测量问题^[5],但由于测试环境的限制,在多循环的高温 PDE 管内,常用的高频响的动态压力传感器不能直接插入管内进行测量. 本文的研究目的是对于多循环 PDE 爆震管内的压力测量,如何才能保证测得结果的真实可靠. 多循环与单循环爆震波压力测量区别在于:多循环的 PDE 爆震管壁温较高,所以在测量压力时必须通过一定长度的冷却套管来联接爆震室与压力传感器;而单循环可以将压力传感器直接插入爆震管内,直接与充分发展的爆震波接触,可以测得真实的压力时序曲线. 通过试验选择合适的冷却套管的长度,以保证在多循环条件下压力测量的可靠性,解决多循环 PDE 爆震室内压力测量问题.

1 试验系统及压力传感器的选型

1.1 试验系统

试验系统包括爆震管、真空泵、充气与循环系统、点火系统和测量系统等,如图 1 所示:

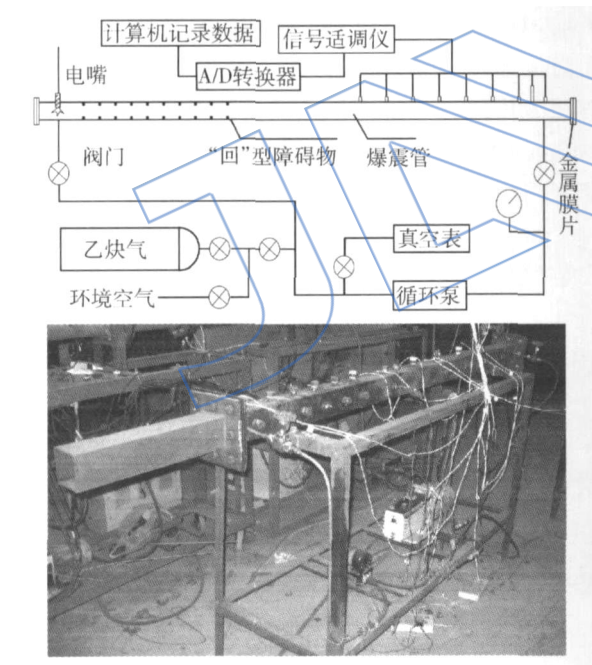


图 1 试验系统示意图及实物图
Fig.1 Schematic of the test and test photo

选用气态乙炔作为燃料,空气为氧化剂. 爆震管为 60 mm ×60 mm 方管,长 2 000 mm,一端刚性密封,开口端在抽真空前用厚 0.5 mm 的塑料膜片密封. 爆震管内装有“回”型障碍物的紊流发生器,以强化燃烧,提前触发爆震. 沿管侧壁不同位置焊接传感器安装座,如图 1 所示,具体选择的测量位置将在文中说明. 试验在确定系统可靠气

密性的条件下,先对爆震管进行抽真空,然后按比例充填燃料(C_2H_2)和氧化剂(Air),经过循环泵的充分掺混(大约 5min),形成均匀的可爆混气,点火触发爆震.

1.2 压力传感器的选型

对于测量爆震波压力传感器的选型必须满足两条件:1)具有高频响的动态压力响应特性;2)能够承受瞬时的高温. 对于多循环 PDE 还必须考虑周围环境温度不能超过传感器的使用温度范围. 试验采用美国压电公司(PCB 公司)生产的型号为 M113A26 和 M113A22 两种高频通用型传感器,具体的性能参数见表 1.

表 1 PCB M113A26 及 PCB M113A22 技术参数

Table 1 Technology parameter of PCB M113A26 and PCB M113A22

型号	M113A26	M113A22
动态范围/ kPa	0.68~3 450	6.9~34 500
灵敏度/ (mV/ kPa)	1.45 ±0.07	1.5 ±0.007
分辨率/ kPa	0.069	0.69
量程(5V 输出)/ kPa	3 450	34 500
量程(10V 输出)/ kPa	6 900	69 000
最大过载压力/ kPa	69 000	138 000
线性/ %FS		≤1
谐振频率/ kHz		≥500
上升时间/ μs		≤1
放电时间常数/ s	≥50	≥500
低频(- 5 %)/ Hz	0.01	0.001
耐冲击(最大值)/ (m/ s ²)		196 140
使用温度范围/ °C		- 73~ + 135
瞬时温度/ °C		1 650
敏感元件材料		石英

试验证明,型号为 M113A22 和 M113A26 的高频响压电传感器都能满足爆震波压力的测量要求. 单循环爆震时,传感器直接插入爆震管,传感器的受力端面与爆震管内壁面共面的条件下,测得的爆震波压力时间历程如图 2 所示,可以看出,当爆震波掠过传感器端面时,压力上升所需时间极短,在爆震波传播至爆震室出口之前,有一个压力平台,这一点完全符合经典的爆震波 ZND 理论分析模型. 两种型号的传感器在爆震室同一截面测量时,所得结果基本一致.

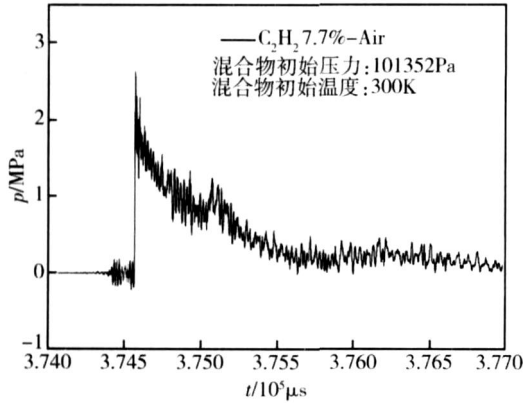


图 2 直接测量得到的乙炔/空气爆震波压力/时间曲线
Fig.2 History of pressure through direct measurement

2 试验工况

可爆混气:充分混和的乙炔/空气化学恰当比
(C_2H_2 7.7 % 空气) 混气;
混气初始压力:101 352 Pa;
混气初始温度:常温;

“回”障碍物参数:阻塞比为 0.4,片数 10,间距 60 mm,起始位置距刚性封闭端为 180 mm;

点火条件:火花塞在距离爆震管封闭端 60 mm 处点火,点火能量 0.5 J,爆震波的触发有一个由爆燃向爆震转变的过程 (Deflagration to Detonation Transition, 即 DDT 过程)。

3 试验方案及试验结果

试验的直接目的是获得直接测量与间接测量 (带冷却套管) 之间的规律,利用这些规律来判断多循环 PDE 内的爆震波压力的可靠性,从而用来衡量多循环 PDE 是否真的触发了充分的爆震波。

3.1 稳定传播的爆震波的获得

试验首先在爆震管侧壁布置多个传感器,以确定在单爆震时形成充分发展的爆震波,经过试验发现,在爆震管内,距离封闭端 1 100~1 200 mm 以后,爆震波由过渡驱动爆震燃烧衰减为 Chapman-Jouguet 理想定常爆震波 (简称 C-J 波),如图 3 所示:

图 3 显示了在爆震室不同位置爆震波压力及爆震波后火焰传播速度试验值,关于爆震波的速度及火焰传播速度的测量方法请参阅文献[6]。理论上在混气初温 298 K,初压 0.1 MPa,爆震波速度 $u_b = 1\,863\text{ m/s}$, $p_{cj} = 19\,338.75\text{ Pa}$,试验所得结果 (初始温度 300 K) 与 C-J 波值基本一致,在确定方管内可以得到充分发展爆震波的条件下,

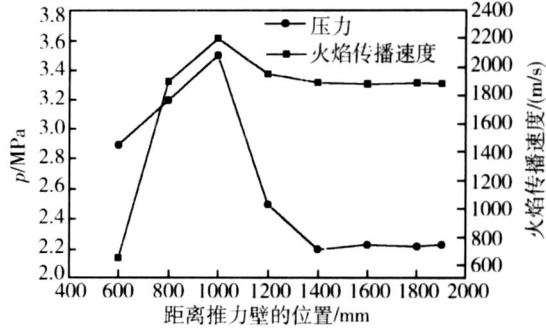


图 3 爆震管内不同位置压力及火焰传播速度试验值
Fig. 3 Experimental pressure and the flame velocity at different position

进行了两种方案的试验。

3.2 不同压力测试方法测得的压力比较

Case 1:将原本装在多循环 PDE 上的带有冷却套管的测压装置装在单爆震方管上,距离推力壁 1 750 mm,套管内管的内、外径分别为 6 mm 和 8 mm,外管为内径 10 mm 的钢管,两管同轴配置,套管长 80 mm,冷却水在管间环形柱体空间流动,对内管内的气体进行冷却,在单循环试验中无需接通冷却水。在 1 800 mm 处装上直接测量的压力传感器,位于 1 850 mm 处侧壁装长 5 mm 的金属管 (认为是半无限长管,末端密封),内径与套管内径相同,分别在距离主管内壁面 80 mm 及 135 mm 处装有压力传感器。图 4 示意了传感器安装位置。

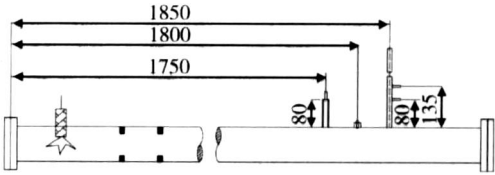


图 4 Case 1 传感器安装位置 (单位:mm)
Fig.4 Schematic of fixing position of pressure sensor in case 1

Case1 的试验结果如图 5 所示。

Case1 试验结果分析讨论:

图 5 显示,直接测量与带套管的传感器压力峰值基本一致,在 2.4 MPa 左右。由于激波在套管空腔内的复杂反射以及爆震管内压力与空腔内压力相互作用,使得套管内压力存在一定的起伏,但总体趋势基本与直接测量保持一致。在半无限长的管内测得的结果峰值偏低,其原因在于:在充填混气的过程中,先充填的为空气,在空气分压力达到 0.093 MPa 时,充填乙炔,由于半无限长管

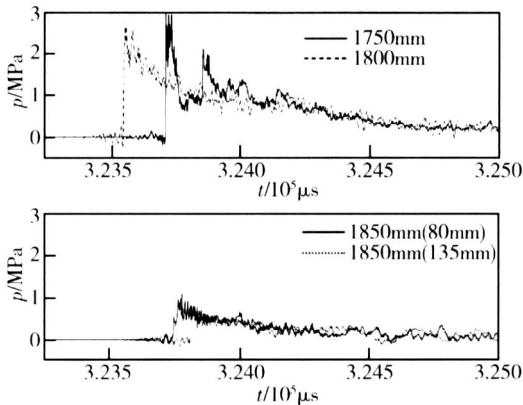


图 5 试验获得 Case 1 的压力/时间曲线

Fig.5 History of pressure at case1

在混气循环混合过程中一直不能达到均匀可燃状态,所以当爆震波传到 1 850 mm 处时,爆震波不能向小管传播,发生熄爆,压力传感器测得是传入小管的激波的峰值压力,随后的爆震波后的平台压力对其有一定影响. 由于从套管向方管传播的稀疏波的作用,使得压力值始终低于直接测量和带套管的测量值. 同样是在距离主管 80 mm 处通过套管测得的压力与半无限长测得的结果有显著的差别,主要是由于在套管的内管距离主管的空间内,在混气循环混合的过程中,扩散和对流的作用使得有限空间形成的混气比较均匀,爆震燃烧可以促发,但究竟怎样传播,在 Case2 中将进行试验研究. 究竟套管长度对测得的压力峰值有什么影响,在保证测得压力与直接测量一致的情况下,希望套管可以长一点,以保证传感器在所承受的安全测量温度下工作,所以有必要对套管长度改变来测量爆震波压力.

3.3 不同套管长度测得的压力比较

Case2:改变套管长度,将测得的压力与直接测得的压力进行比较,试验分别选取了传感器受力端面离开方管内壁的距离 L 分别为 75, 80, 100, 120, 150, 170, 180, 190, 200, 210 mm. 为了测试是否有火焰传入小管,在传感器的端面前 5 mm 及 40 mm 处装上离子探针,如图 6 中的照片所示,带套管的传感器安装位置在距推力壁 1 850 mm 处,为了比较,在 1 200 mm 处和 1600 mm 处直接插入压力传感器.

Case 2 试验结果如图 7(套管长度 75 mm), 图 8(套管长度 180mm) 所示:

试验结果显示,当 $L = 75$ mm,或 80 mm 时,所测得的压力峰值基本和直接测量的结果一致,只是带套管测量结果有较大的波动,离子探针的

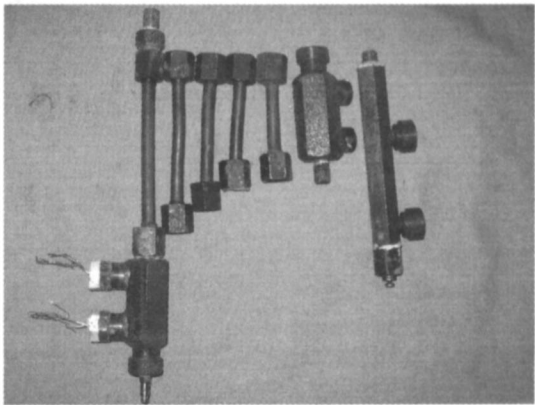


图 6 不同长度套管的实物图

Fig.6 Photo of different length tube

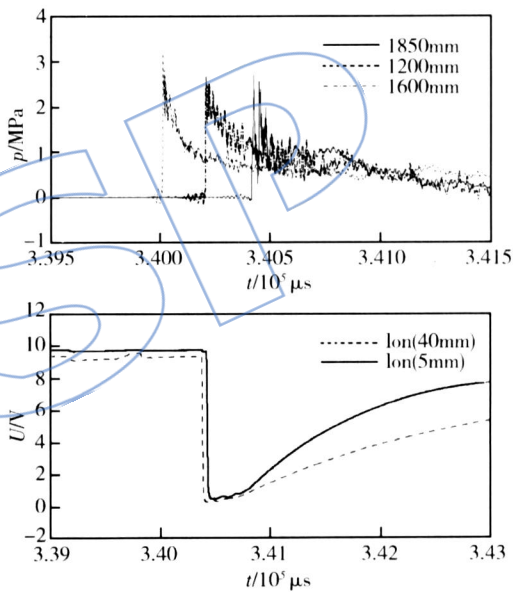


图 7 压力信号及离子探针信号曲线

Fig.7 History time of pressure and ion transducer ($L = 75$ mm)

导通情况说明,火焰可以迅速的在小管中传播,但速度平均在 795 m/s 左右,可以认为爆震波发生了解耦,此时测得的第一个迅速上升压力是激波的压力,随后有一个压力爬升的过程,这一过程为流动滞止过程,峰值即为流动的滞止总压,计算发现,这一滞止压力的峰值大小与 C-J 压力基本相等,当激波反射以后,流动将被相向运动的激波滞止,传感器端面的压力迅速下降到波后压力,与此同时解耦后的火焰继续在小管中传播,未燃混气经过激波的一次压缩后,压力和温度上升,当回传的激波与火焰再次相遇时,触发了二次爆震,二次爆震继续向封闭端的未燃混气传播,传感器测得的第二个峰值为爆震波的压力. 如图 9 所示(图 7 的 1 850 mm 处的压力放大),由图 9 可以发现, a

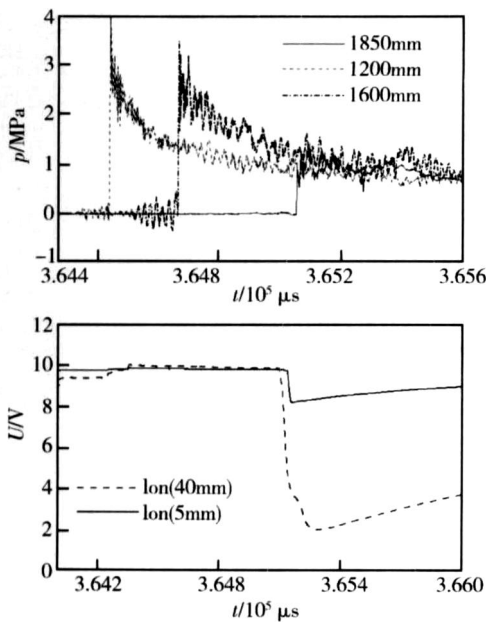


图 8 压力信号及离子探针信号曲线
Fig. 8 History time of pressure and ion transducer ($L = 180\text{ mm}$)

波是在两个离子传感器之间被促发的, 795 m/s 的火焰传播速度其实是解耦后的缓燃波与爆震波传播速度的平均值. 试验发现, 随着 L 的缩短 ($< 100\text{ mm}$), c, e 之间的时间差缩短, 压力低谷逐渐上升, 最后趋近直接测量的结果. 其物理过程如图 10 所示.

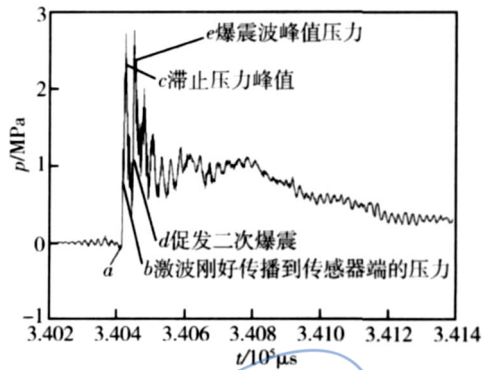


图 9 套管测得的压力/时间曲线
Fig. 9 History of pressure with cannula

到 b 和 d 到 e 为压力迅速上升段, 前者是激波与传感器端面的作用过程, 后者为爆震波与传感器端面作用的过程; 而 b 到 c 为流动滞止的过程, c 到 d 为流动滞止面逐渐离开传感器端面的过程, 由 b 到 c 共用了 $9\text{ }\mu\text{s}$ 的时间, 而 c 到 d 用了大约 $20\text{ }\mu\text{s}$ 时间, 其中包括反射激波回传到火焰面的时间和二次爆震波传播到传感器端面的时间, 根据激波和爆震波的相关物理参数估算, 二次爆震

由图 8 可知: 当 $L = 180\text{ mm}$ 时, 解耦后的激波在传播过程中逐渐削弱, 又由于小管的面容比 $\left[\frac{\text{散热面积}}{\text{容积}} \propto \frac{1}{D} \right]$ 较大, 散热较强, 容易发生熄火. 当主管中的爆震波掠过套管空腔的端面后, 最终传感器感受到的只能是爆震波过后的平台压力, 图 8 清楚的反映了这一压力随时间传播的过程. 图 8 的离子探针信号说明, 第一个离子探针虽然有导通的迹象, 但并非是彻底导通, 因为电压并不

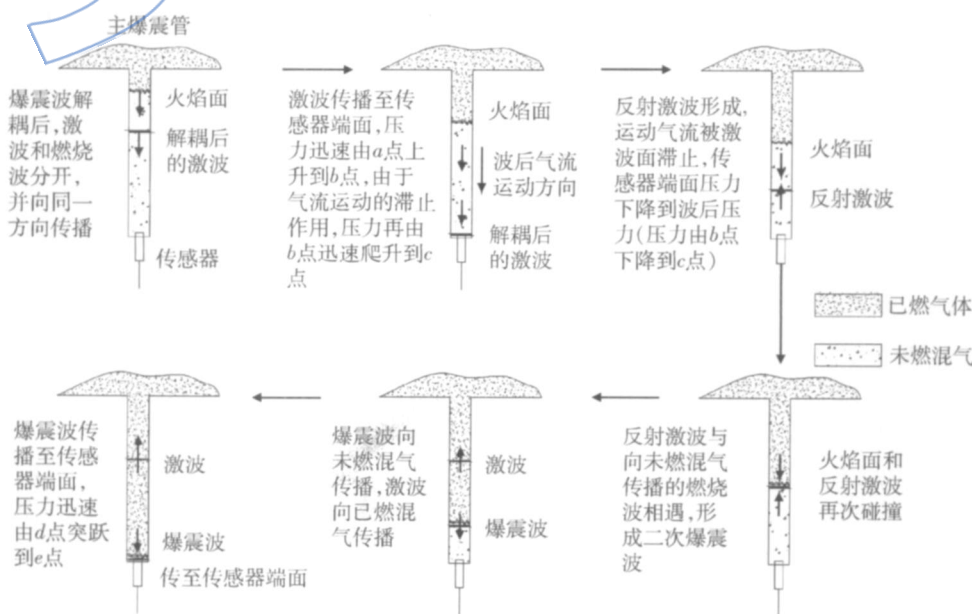


图 10 图 9 中套管测得的压力/时间曲线的物理图解
Fig. 10 Illustrate of pressure/ time curve in Fig. 9

像图 7 中的那样在极短的时间内迅速下降到零,而是较慢的下降到 3 V 左右,这一点说明,离子探针的导通并非是强烈的燃烧所致,而是波后气流携带的少量带电离子所致;由于反射激波的滞止作用,或者流动随着激波强度的衰减而衰减,第二个离子探针没有感受到带电离子。

4 多循环 PDE 的爆震波压力测量

根据以上的试验研究结果,设计了冷却套管长度为 60 mm 的多循环爆震波压力测试装置,如图 11 所示。

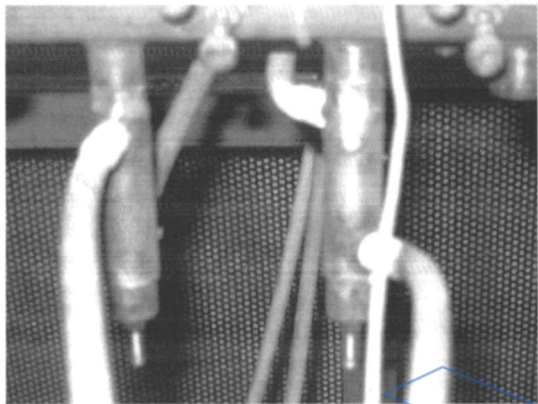


图 11 带冷却套管的压力测试装置

Fig. 11 Setting of pressure measurement with cooling tube

此装置安装在长 1 270 mm,内径 58 mm 的两相多循环吸气式 PDE 上,PDE 以液态汽油为燃料,空气为氧化剂,非预混式充填。爆震频率 50 Hz^[7]时的压力/时间曲线如图 12(b)所示,(a)为多循环的第二个爆震波的放大图,从放大图可以看出,流动滞止过程和二次起爆过程已经重叠在一起,原因在于:在多循环充填混气的过程中,先充填的混气进入爆震室的尾部,利用上一循环的热量,促进了燃油的蒸发,在爆震室内的掺混装置的作用下,混气形成质量比较好,且初始温度较高(100 °C左右),当爆震波传播到套管进口时,即便是发生解耦,但火焰的传播速度还是较高,随着管套的缩短,激波在高温混气中传播,相对于在单循环套管的环境温度下传播,能量损失较小,波后燃烧的热量释放,强化了激波,所以当激波传播到传感器端面后,流动的滞止过程还没有结束,随着封闭端的压力和温度的上升,爆震波被直接促发(放大图中的压力迅速上升段可以说明)。随后产生了压力平台,接着套管与主管中的压力发生周期性的相互作用,但随着主管压力的不断降低,振荡的

峰值逐渐减小,如图 12(a)所示。

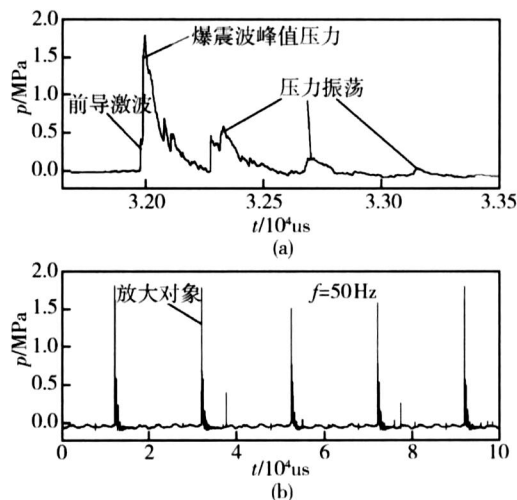


图 12 多循环爆震压力/时间曲线及单波放大

Fig. 12 History of pressure (b) and wave magnifying (a) at $f = 50$ Hz

总之,对于带冷却套管的爆震室压力测试装置,所测得的爆震波峰值压力与理论的爆震波的 C-J 压力基本相等。此测试手段克服了传感器的不耐高温的缺点,可用于多循环的 PDE 爆震室的压力参数测量。

5 结 论

在合理选择了高频响动态压力传感器的基础上,单循环爆震波压力测量的比较性试验研究发现:当主爆震室的旁支套管长度小于 100 mm 左右时,可以测到爆震波的峰值,当长度大于 150 mm 左右时,火焰不能在旁支小管内传播,传感器测到的只是爆震波后的平台的压力;当用带有冷却套管来测量多循环 PDE 爆震室压力时,在保证传感器安全工作温度范围内,较短长度的套管可以得到爆震波的 C-J 压力。研究结果解释了带冷却套管测量爆震波压力是否可靠的疑惑,同时解决了多循环爆震波的压力测量问题。

参考文献:

- [1] Helman D, Shreeve R P, Eidelman S. Detonation pulse engine[R]. AIAA 86-1683,1986.
- [2] Bussing T R A, Pappas G. An introduction to pulse detonation engine[R]. AIAA 94-0263,1994.
- [3] Fontfrenyde T, Levy F, Dupays J, et al. Numerical studies of pulse detonation rocket engines[R]. AIAA2004-3873,2004.
- [4] Litke P, Schauer F, Paxson D, et al. Assessment of the performance of a pulsejet and comparison with a pulsed-

detonation engine[R]. AIAA 2005-0228 ,2005.

[5] Mueller D , Bratkovich T , Bussing T , et al. Recent ASI progress in pulse detonation rocket engine hardware development[R]. AIAA 99-2886 ,1999.

[6] 张义宁 ,王家骅 ,张靖周. 两相多循环爆震波特性研究[J]. 航空动力学报. 2006 ,21 (5) :789-794.

ZHANG Yining ,WANG Jiahua ,ZHANG Jingzhou. Investigation on two-phase and multi-cycle detonation [J]. Journal of Aerospace power ,2006 ,21 (5) :789-794.

[7] 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.

