

文章编号: 1000-8055(2005)02-0225-05

预混气爆震波在不同直径管间的传播特性

韩启祥, 王家骅

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 在管径20 mm 与60 mm 的两管间研究了预混气爆震波的传播特性, 着重测量了爆震波传递过程中的压力与速度变化, 并分析了预混气压力、浓度、当量比以及连接段尺寸等参数对爆震波传播的影响与规律。研究发现: 小管中没有爆震时大管中仍然可以出现爆震波, 小张角的连接段对爆震波的再触发有利, 再触发后的爆震波其压力、速度受到预混气压力、浓度及当量比等参数的影响。

关键词: 航空、航天推进系统; 航空宇航推进理论与工程; 爆震波传播; 爆震波压力

中图分类号: V 235.22

文献标识码: A

Investigation on Characteristics of Detonation Wave Propagation in Tubes with Different Diameter

HAN Qi-xiang, WANG Jia-hua

(College of Energy and Power,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The characteristics of premixed gas detonation wave propagating in two tubes with diameter, 20 mm and 60 mm respectively, were investigated. Primarily, the detonation wave pressures and velocities were measured, and the mixture pressure, concentration, equivalence ratio, and the dimension of connection tube were considered in the study. It was found that the detonation could appear in the bigger tube even when the detonation was not triggered in the smaller tube. The connection tube with smaller diffusion angle is favorable for detonation re-triggering. The pressure and velocity of re-triggered detonation are affected by mixture pressure, concentration, and equivalence ratio.

Key words: aerospace propulsion system; detonation; detonation wave propagation; detonation pressure; equivalence ratio

爆震波在不同管径间的传递特性是爆震推进概念研究中的一项重要研究课题, 当前国内外研制的大管径的脉冲爆震发动机样机中一般都采用预爆技术, 其核心就是爆震波在不同管径间的成功传

递^[1]。国外将爆震波从小管到自由空间的传递过程称为爆震波的衍射(Diffraction of Detonation), 并对其机理做了大量的研究, 发现爆震波的这种传

收稿日期: 2004-05-27; 修订日期: 2004-10-14

基金项目: 国防基础科研资助项目(K1600060704)

作者简介: 韩启祥(1968-), 男, 江苏兴化人, 南京航空航天大学能源与动力学院副教授, 博士, 主要从事脉冲爆震发动机、燃烧学及航空发动机燃烧室方面的研究

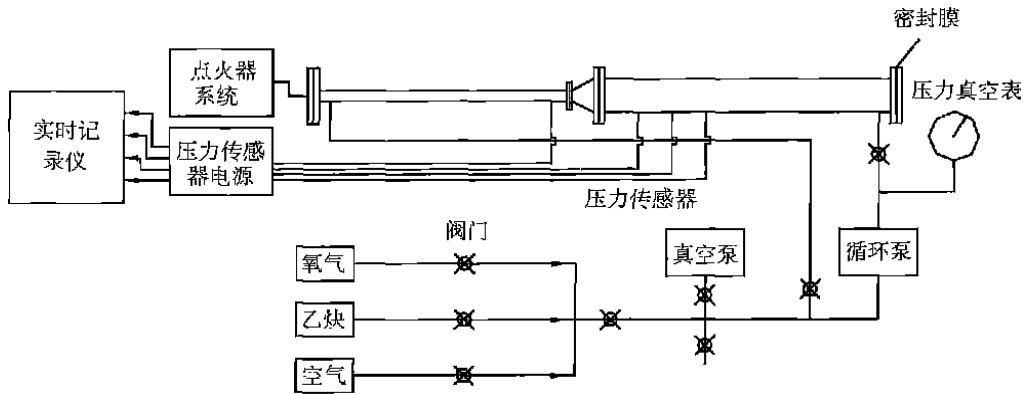


图1 爆震波传递试验系统

Fig 1 Schematic of experimental setup

递存在两种模式: 亚临界传递与超临界传递, 只有超临界传递时才能成功传递爆震波, 亚临界传递时爆震波将衰变为燃烧波, 一般在其它条件不变的情况下存在一个临界直径, 当管径大于临界直径时为超临界传递, 否则为亚临界传递^[2], 临界直径与混气性质有关, 约为爆震波胞格宽度的4~30倍^[3]。

在PDE (Pulse Detonation Engine) 中预爆管的容积应小于主爆震管的1%^[1], 因此两管尺寸相差较大, 管间的爆震波传递与爆震波的衍射相似, 但若两管间采用过渡段连接且其张角较小时将利于超临界传递的形成^[4]。

本文侧重研究爆震波在不同直径的圆形管道间传播过程及传播后爆震波特性参数的变化, 揭示爆震波传播过程的实质, 探讨用爆震波传播方式触发大爆震管中产生爆震波的可行性及影响因素与规律。

1 试验系统与试验方法

试验系统如图1所示, 包括小爆震管、大爆震管、连接段、抽气、充气及循环系统、点火系统以及测量系统。小爆震管内径为20 mm, 长400 mm, 大爆震管内径为60 mm, 长为400 mm。两管通过连接段连接, 共有3种尺寸的连接段, 扩张角分别为30°、60°及90°, 如图2所示。试验前先将管内抽成真空, 然后分别充入乙炔、氧气及氮气, 充入量由分压力确定。充气完成后启动循环泵, 使混气充分混合。起爆时爆震管一端为刚性密封, 另一端通过纸质膜片密封, 膜片的破碎压力约0.01 MPa, 低压试验时根据管内预混气的真空度适当增加膜片个数。

点火器(火花能量为1 J)安装在刚性端面上, 4只高频响的压力传感器(PCB 113, 谐振频率500

kHz, 上升时间小于1 μs) 安装在管壁上, 分别在

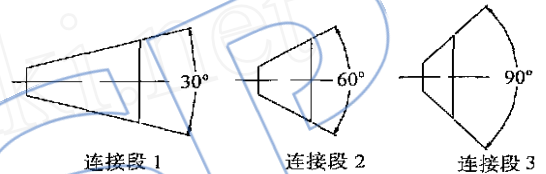


图2 3种尺寸的连接段

Fig 2 Three type junction sections

距小爆震管出口40 mm处以及距大爆震管进口端40, 80, 120 mm处。压力信号通过一台高频响实时记录仪(CS2119, 采样率1.25 M)采集。

2 试验结果与分析

2.1 爆震波在两管间传递的3种状况

试验中爆震管内压力变化历程曲线出现了3种状况: 小管末端、大管前端均出现了爆震波, 小管末端没有爆震波, 大管前端有爆震波, 以及小管末端、大管前端均未出现爆震波, 如图3所示。

图3(a)中3条压力曲线都具有明显的爆震波压力曲线的特性, 表明小管与大管中都产生了爆震波, 也就是说爆震波成功实现从小管到大管的传递。

图3(b)中小管末端的压力不是骤升, 说明爆震波尚未形成, 还处于压力积累阶段, 但大管前端压力变化却具有爆震波压力曲线的特性, 表明大管前端出现了爆震波。这说明爆震波的传递不是一道爆震波从一个管道传播到下一个管道, 而应该小管喷出的火焰在大管中触发了新的爆震波, 因此不管小管中有没有产生爆震波, 大管中都有可能出现爆震波。

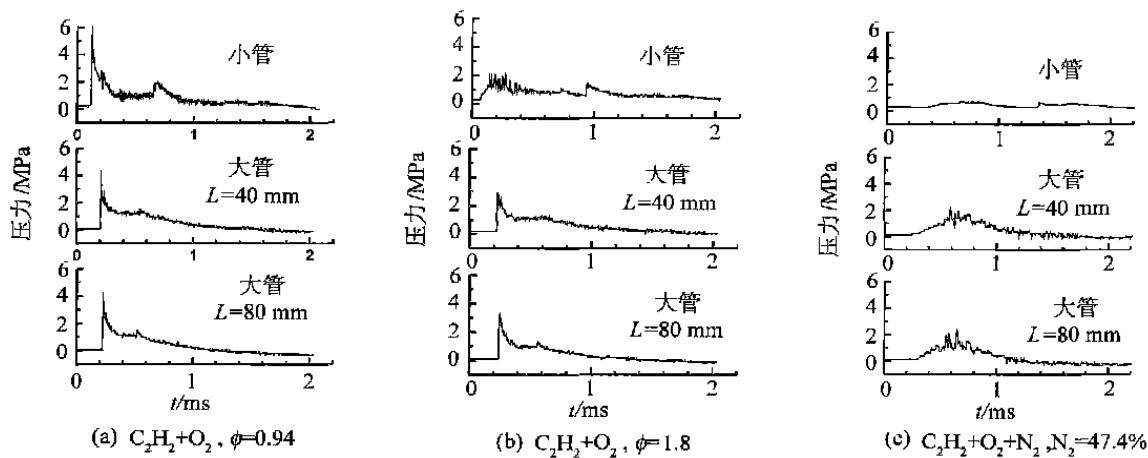


图3 爆震波传递时压力变化曲线

Fig 3 The history of detonation pressure

图3(c)为在乙炔与氧气的混气中加入稀释剂N₂后的爆震波传递试验结果,其中N₂体积百分含量为47.4%。由图可见,在小爆震管末端及大爆震管的前端均未出现爆震波。

试验中没有发现在小管中有爆震波,而大管中没有出现爆震波的情况,因为小管中一旦产生了爆震波,对于大管中的混气而言,这是一个能量大且集中的点火源,因此大管中一般都能产生爆震波。

比接近1时爆震波传播速度最高,贫燃料时传播速度相对较低。预混气的当量比影响了反应速度与释热率,进而影响爆震波的传播速度。但另一方面也应注意到,由于大管中的爆震波是通过小管中的爆震波或燃烧波触发而成的,触发能量相对较大,预混气当量比对爆震波传播速度影响被削弱,图中最高传播速度与最低传播速度仅相差17.8%。

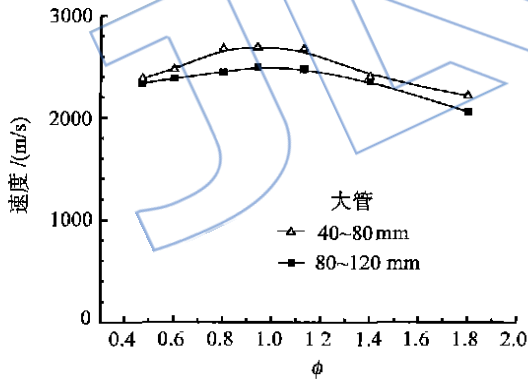


图4 混气当量比对爆震波传播速度的影响

Fig 4 Effect of mixture equivalence ratio on detonation velocity

2.2 影响预混气爆震波传递特性的因素与规律

图4、图5为混气(乙炔与氧气)当量比对传递中的爆震波的传播速度与压力的影响。由图4可知,在大管进口端40~80 mm段内爆震波的传播速度高于80~120 mm段内的传播速度,这说明大管内的爆震波在形成时被过度驱动,为强爆震波,其传播速度高于C-J (Chapman-Jouget)波,但强爆震波不稳定,很快衰减为C-J波。图中混气当量

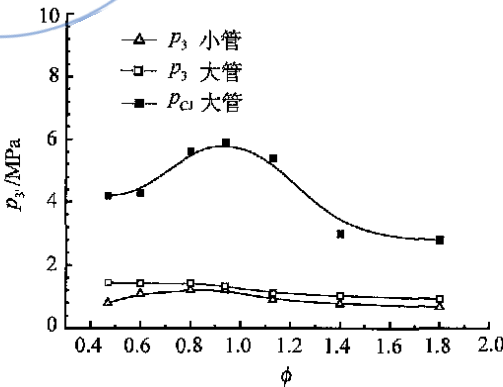


图5 混气当量比对爆震波压力的影响

Fig 5 Effect of mixture equivalence ratio on detonation pressure

由图5可知,当预混气当量比偏离1时,传递后的爆震波峰压明显下降,其中燃料偏富时下降得缓慢一些,而波后压力下降并不明显,表明当量比对波后压力的影响较小。另外当量比超出0.47~1.8时,小管、大管中均无爆震波出现。

图6、图7为预混气初始压力对爆震波传递特性的影响。由图可知,爆震波传播速度随混气初始压力下降而下降,混气初始压力越低,爆震波传播速度下降越快,当混气初始压力下降到0.04 MPa

时,爆震波传播速度下降33.3%。预混气初始压力下降导致化学反应速率、放热率下降,从而

递后爆震波峰压、波后压力分别下降了37.5%及51.1%。

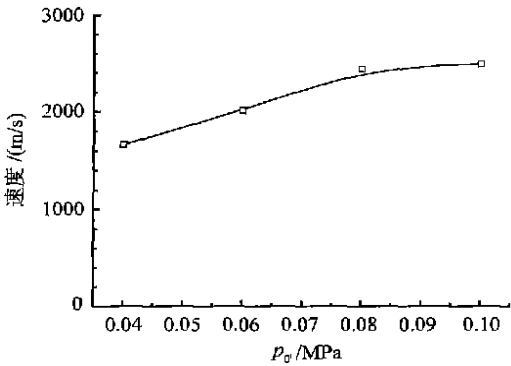


图6 预混气初始压力对爆震波传播速度的影响
Fig 6 Effect of mixture initial pressure on detonation velocity

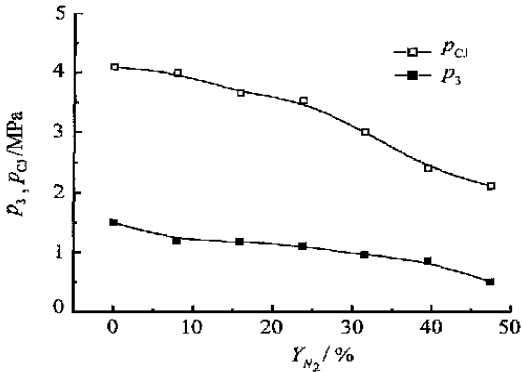


图9 N₂对爆震波压力的影响
Fig 9 Effect on N₂ on detonation pressure

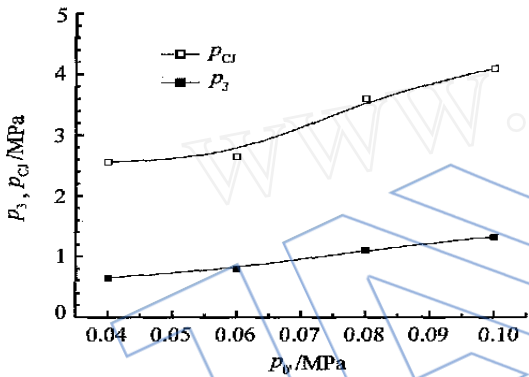


图7 预混气初始压力对爆震波压力的影响
Fig 7 Effect of mixture initial pressure on detonation pressure

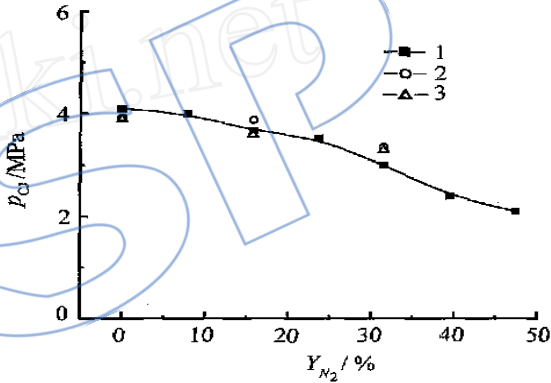


图10 连接段对爆震波峰压的影响
Fig 10 Effect of junction section on detonation peak pressure

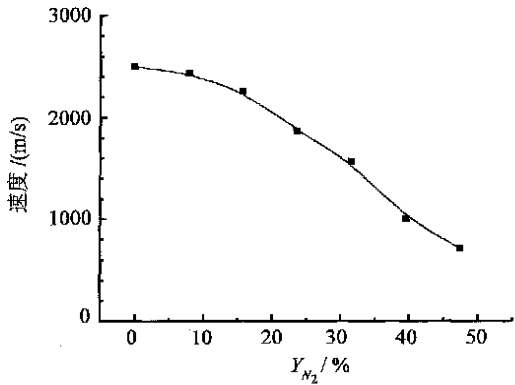


图8 N₂对爆震波传播速度的影响
Fig 8 Effect on N₂ on detonation velocity

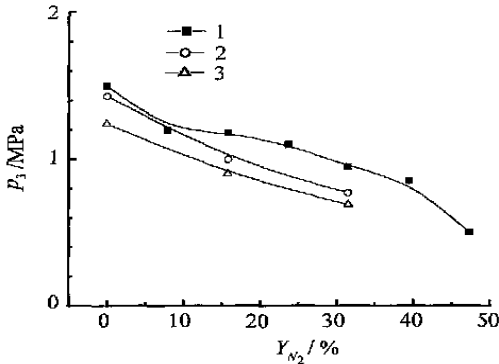


图11 连接段对波后压力的影响
Fig 11 Effect of junction section on detonation post wave pressure

导致爆震波传播速度下降。另外随着混气初始压力的下降,传递后的爆震波峰压、波后压力均会下降。混气初始压力从0.1 MPa 下降到0.04 MPa 时,传

递后爆震波峰压、波后压力均会下降。由图可知,随着预混气中N₂的体积百分含量增加,爆震波传播速度快速下降,

当预混气中 N_2 的体积百分含量达到47.4%时,爆震波传播速度下降了71.4%。预混气中 N_2 的存在不仅减少了爆震管的反应气体的含量,且 N_2 本身对反应有抑制作用,因此预混气中 N_2 增加后,爆震波传播速度迅速下降。同时随着 N_2 增加,传递后的爆震波压力明显下降。当 N_2 的体积百分含量达到47.4%时,爆震波峰压及波后压力分别下降了48.8%与66.7%。

图10、图11为连接段对爆震波压力特性的影响。由图可知,3种连接段对爆震波峰值的影响相当,但对波后压力的影响却不同,相同工况下,连接段1的波后压力最高,连接段3最低。连接段1效果最佳可能与其轴向长度最长、张角最小有关,因为此时爆震波传递过程中的损失最小。

3 结 论

根据以上分析,可概括为以下几点结论:

(1) 小管中没有产生爆震波时,大管中仍有可能出现爆震波,此时爆震波的传递过程实质上是爆震波的再触发过程。

(2) 预混气当量比偏离1时,传递后的爆震波传播速度、压力都会不同程度地下降,其中燃料偏富比燃料偏贫下降得稍慢一些。当量比在0.47~1.8以外,大小管中均无爆震波。

(3) 预混气初始压力下降时,传递后爆震波传

播速度、压力下降,当预混气初始压力从0.1 MPa下降到0.04 MPa时,传递后爆震波峰压、波后压力分别下降了37.5%及51.1%。

(4) 预混气中充入部分 N_2 稀释后, N_2 浓度对传递后的爆震波传播速度影响较大,当 N_2 浓度为47.4%时,爆震波传播速度下降了71.4%。且随着 N_2 浓度增加,爆震波压力明显下降,当 N_2 浓度为47.4%时,爆震波峰压、波后压力分别下降了48.8%及66.7%。

(5) 3种渐扩连接段试验结果表明,连接段1因其扩张角小、长度大,使得大管中爆震波的形成及爆震波的压力特性好于连接段2和3。

参考文献

- [1] Brophy C, Sinibaldi J. Operation of a JP-10/Air Pulse Detonation Engine[R]. AIAA 00-3591.
- [2] Zeldovich IaB, Kogarko SM, Simonov N N. An Experimental Investigation of Spherical Detonation in Gases[J]. *Soviet Phys Tech Phys*, 1956, 1: 1689~1713.
- [3] Desbordes D. Critical initiation conditions for gaseous diverging spherical detonations[J]. *Journal de Physique*, 1995, 5(4): 155~162.
- [4] Sugimura. Behavior of Detonations Passing Through Reflection Nozzles[J]. *JSM E International, Journal B*, 1995, 38(3): 353~359.