

文章编号: 1000-8055(2006)06-0962-05

脉冲爆震燃烧效率的 探索性试验研究

黄希桥, 严传俊, 范 玮, 邱 华, 王治武
(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 为了对脉冲爆震燃烧过程的燃烧效率有一个初步了解, 在分析脉冲爆震发动机工作原理的基础上, 设计了一套带有压力可调单向阀结构的取样系统, 并进行了试验验证。试验针对爆震频率为 5 Hz、当量比为 1 的汽油和空气混气, 测试了爆震波充分发展前后不同位置处爆震燃烧过程的燃烧效率, 结果表明可以利用设计的取样系统进行脉冲爆震发动机燃烧效率的测量, 试验还发现在脉冲爆震室后爆震发展比较充分的位置, 测取的燃烧效率比较高, 最高可达 99.6 %。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 脉冲爆震发动机; 取样系统; 燃烧效率; 试验研究
中图分类号: V231.22 **文献标识码:** A

Preliminary experimental study of pulse detonation combustion efficiency

HUANG Xi-qiao, YAN Chuan-jun, FAN Wei, QIU Hua, WANG Zhi-wu
(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A sampling system with a variable pressure check valve was designed to investigate the combustion efficiency of pulse detonation combustion process on the basis of the pulse detonation engine (PDE) operating principle analysis. With the designed sampling system, the combustion efficiencies of the pulse detonation combustion processes using gasoline as fuel and compressed air as oxidizers at operating frequency of 5 Hz were measured both at conditions that the steady and fully developed detonation waves were formed and not formed. The experimental results indicate that the pulse detonation combustion efficiency can be measured successfully using the designed sampling system. The combustion efficiency where the detonation waves have fully developed is higher than that of not fully developed. The highest combustion efficiency is up to 99.6 %.

Key words: aerospace propulsion system; Pulse Detonation Engine (PDE); sampling system; combustion efficiency; experimental study

脉冲爆震发动机(PDE)是一种高效的、低成本的推进系统。它利用间歇式或脉冲式爆震波来产生高温高压燃气, 从而产生推力, 因此不需要压

缩循环, 去掉了笨重的压气机和涡轮部件。这种发动机具有热循环效率高, 耗油率低, 推重比高, 结构简单等优点, 目前已成为国际航空动力界的

收稿日期: 2006-01-05; 修订日期: 2006-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(50336030, 50106012)

作者简介: 黄希桥(1973-), 女, 陕西省武功县人, 西北工业大学动力与能源学院讲师, 博士, 主要从事燃烧学方面研究。

一大研究热点^[1-3]。

正是由于脉冲爆震发动机具有普通发动机所无法比拟的优点,使其在航空航天上的应用前景将十分可观。尽管脉冲爆震发动机的应用前景十分广阔,但是根据资料显示目前关于这方面的研究仍然处于探索性阶段,很多关键技术有待解决。而燃烧效率是脉冲爆震发动机的一个关键性技术指标,它是衡量发动机燃烧性能以及发动机经济性的关键指标。关于此课题的研究目前国内外几乎没有任何资料报道。脉冲爆震发动机非稳定性的特点决定其燃气产生的间歇性,如何比较准确的提取燃气的样气,是爆震燃烧过程燃烧成分和燃烧效率测量的一大难点,同时也是一个很关键的问题。本文对脉冲爆震发动机的燃气成分及燃烧效率进行了一些探索性的试验尝试,为以后深入全面地进行此方面的研究奠定一定的基础。

1 测量燃烧效率的基本原理

燃烧效率是表示燃油化学性能转化为热能的程度。一般情况下有三种燃烧效率的定义:焓增燃烧效率;温升燃烧效率;燃气分析法的燃烧效率^[4]。燃气分析法是指通过分析燃气中各种组分的含量来推算燃烧效率的方法,该方法基础技术成熟,准确率较其它两种方法高,分析仪器已商业化。本试验采用的是燃气分析法。

试验中采用的是美国的 IMR1400 烟气分析仪,该仪器配有氮化物和碳化物传感器,测量之前先由分析仪对环境进行标定,测出发动机工作环境中氮化物、碳化物、含氧量以及过量空气量作为环境参数。然后在发动机工作过程中,由取样系统从爆震发动机中取出样气送入储样系统,分析仪从储样系统测取爆震燃烧成分并根据本身的“BImSCHV”算法计算出爆震燃烧效率。然后把测得的燃气成分、燃烧效率以及过量空气量一并显示出来。

2 取样系统的设计

由于脉冲爆震发动机工作的非定常特征,决定其爆震燃烧过程是不连续的、脉动的,它的燃气和新鲜可爆混气是交替式地通过发动机的燃烧室,那么如何准确的提取燃气的样气就是燃烧效率测量过程中的一个关键问题,同时也决定燃烧成分和燃烧效率测量的科学性。

本试验首先根据爆震燃烧的特点,设计出了一套带有压力可调单向阀结构的燃气取样装

置^[5]。如图 1 所示:该装置由 6 部分组成,第 1 部分为顶盖,用来密封进入容腔的燃气,同时通过控制其旋入的高度来改变作用在作动杆上的力进而调节燃气进气量;第 2 部分为作动杆,其作用类似一个阀门;第 3 部分为平台,主要是撑住弹簧起到传递力的效果,以保证只有在足够的燃气压力时才能打开阀门进气,这也是保证取得的样气为爆震燃气的关键;第 4 部分为引接段,将取出的燃气输送入储气系统;第 5 部分为容腔,起总体承载作用;第 6 部分为弹簧系统,只有正确设计它才能保证燃气顺利进入容腔,然后进入储气系统进行分析。从图中可以看出该取样装置的工作原理和一个单向阀的工作原理极其相似。只有发生爆震燃烧时,爆震管内的燃气才有足够的压力推动作动杆进入容腔,具体可以通过调节上端的顶盖来保证。当足够的燃气进入容腔后,燃气就会逐渐排空容腔中的空气,然后流入储气系统。同样当储气系统中的空气排空、燃气充满储气系统时就可以进行燃气分析,此时测量的结果会相对准确。

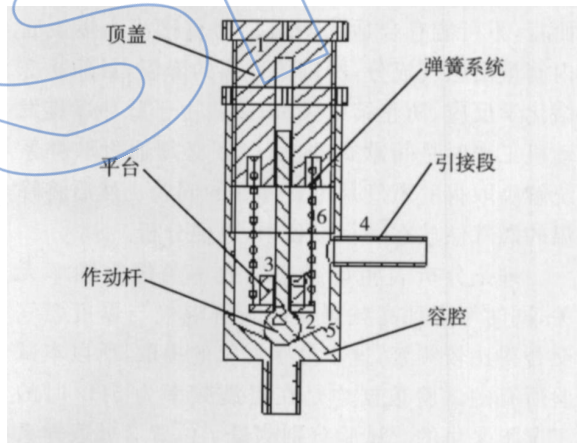


图 1 取样装置简图

Fig. 1 Diagram of sampling equipment

3 试验装置与试验方法

两相脉冲爆震发动机原理性试验模型装置示意图如图 2 所示,由供油、供气系统,爆震点火及频率控制系统,混合室,爆震室,压力测量系统以及数据采集系统等组成。爆震室的头部封闭,尾端敞口。发动机总长 1 700 mm。火花塞由频率在 1~100 Hz 范围内连续可调的爆震点火及频率控制系统控制起爆。试验采用汽油为燃料,空气为氧化剂。供气、供油由相应的调节阀门控制,并由相应的流量计测定。在爆震室前部放置一压力传感器(位置 1),沿轴向(位置 2,位置 3,)分别放置了 2 个压力传感器来测量爆震室内的压力及其

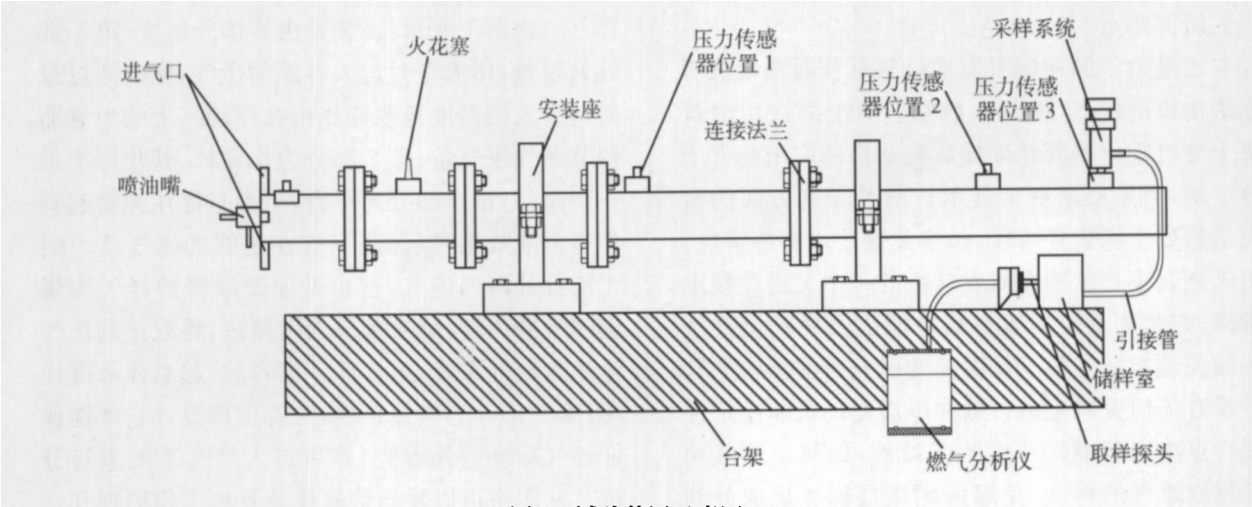


图 2 试验装置示意图

Fig. 2 Sketch of the experimental arrangement

爆震波速,用以判断爆震的形成与否。在混合室头部,供油系统采用气动喷嘴,空气采用切向进气方式,这有利于燃料的雾化及其与空气的掺混。

首先取样系统将燃气从爆震管中取出来,这是因为:第一由于燃气温度过高,目前的测量技术而言,不可能有合适的测量仪器直接深入爆震管内测量出燃气成分,所以要适当的降温,目的是冻结化学反应,防止结果失真;第二由于脉冲爆震发动机工作时是间歇式的,所以就必须通过取样系统解决取得的燃气是爆震燃气的问题。然后将降温的燃气储放在一个设备中,以便分析。

理论分析表明爆震燃烧效率与爆震频率无关,同时考虑到高频爆震时新鲜混气与爆震燃气交替得比较频繁,这不易于燃气的提取,所以本试验所有的试验数据均是在爆震频率为 5 Hz 时的工况下采集的。试验分别测量了位置 3 处取样系统加芯前后爆震燃烧的燃烧成分和燃烧效率,另外还测量了位置 1 处的燃烧效率,目的是了解爆震发展充分与否与燃烧效率之间的关系。

4 试验结果与分析

图 3 给出了发动机尾部位置 3 处的压力波形图,从图上可以看到平均压力都在 2 MPa 以上,这说明在位置 3 处已产生了充分发展的爆震。另外,也可以通过图 4 给出的位置 2,3 的压力波形图计算出此时的波速大约为 1 600 m/s,这进一步证明爆震管位置 3 处发生的是充分发展的爆震,也就是说在位置 3 处取得的燃气样气是真正爆震燃烧时的燃气。另外因为位置 3 处在爆震发动机比较靠后的部分,这时,未燃混气不容易传到此位置,即通过位置 3 处的大部分为爆震燃烧的已燃

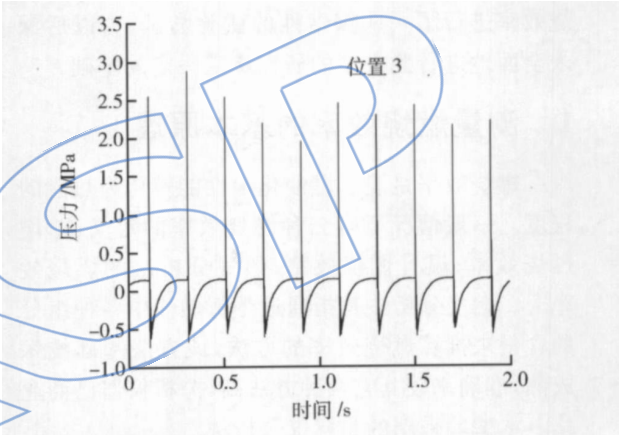


图 3 位置 3 处的压力波形图

Fig. 3 Pressure traces at position 3

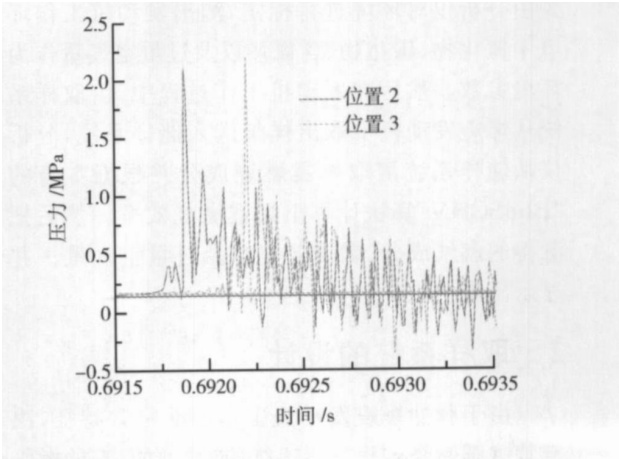


图 4 位置 2,3 处的压力波形

Fig. 4 Pressure traces at position 2,3

混气,而未燃的新鲜混气比较少,这样可以尽量避免已燃混气与新鲜混气的掺混,即避免爆震燃烧产物成分受到影响,从而尽可能地提高提取燃气的真实性。

首先在试验装置中的位置 3 处进行爆震燃烧效率的测定,主要目的就是证明所设计取样系统的科学性以及可行性。试验的方法是分别测取了取样系统在加上弹簧、作动杆以及平台的情况和未加这些部件的情况下的试验结果,然后进行对比、分析。取样系统如果不加内部的这些结构,相

当于爆震室中的任何混气都可以进入测量系统,取样系统仅仅起到一个降温作用;如果加芯,那么取样系统就可以“过滤”掉未燃混气,只取已燃混气。表 1 给出了仪器定标时的检测结果,表 2、表 3 分别给出了在位置 3 处取样系统在加芯前后所测取的试验结果。

表 1 环境标定时的检测结果

Table 1 Measuring results when standardizing the environment parameter

测量参数	O ₂ / %	CO _v / (mg/ m ³)	NO _v / (mg/ m ³)	CO ₂ / %	燃烧效率/ %	燃烧损失/ %	过量空气/ %
测量结果	20.9	0	0	0	0	0	0

表 2 安装弹簧、作动杆以及平台的情况下燃气成分检测结果

Table 2 Measuring results of gas with spring, actuator lever and support stand

组别	O ₂	CO	NO _v	CO ₂	燃烧效率/ %	燃烧损失/ %	过量空气/ %
1	2.6	2 500	938	13.6	99.6	0.4	1.14
2	2.5	2 500	941	13.6	99.6	0.4	1.14
3	2.5	2 500	949	13.6	99.6	0.4	1.14
4	2.6	2 500	945	13.6	99.6	0.4	1.14

表 3 不安装弹簧、作动杆以及平台的情况下燃气成分的检测结果

Table 3 Measuring results of gas without spring, actuator lever and support stand

组别	O ₂	CO	NO _v	CO ₂	燃烧效率/ %	燃烧损失/ %	过量空气/ %
1	8.5	1 331	2 054	9.2	98.0	2.0	1.69
2	8.4	1 548	2 054	9.3	98.5	1.5	1.67
3	8.5	1 119	2 054	9.2	97.6	2.4	1.69
4	8.4	996	2 054	9.3	96.6	3.4	1.67

不加弹簧、作动杆以及平台的试验结果和加上这些部件的试验结果相比,明显可以看出其燃烧效率较低,并且氧气含量、过量空气量相对较高,CO 含量较低。这就说明在燃气提取过程中,有过量的空气渗入了测量系统。因为只有新鲜空气进入的情况下,氧气和过余空气量才比较大。而 CO 含量较低是由于部分 CO 被空气中的氧气氧化了。空气的渗入可以从两个方面进行考虑:一是本身爆震管内的填充空气可能冲到了位置 3 处,导致测量系统内有新鲜空气;另外,由于在储气系统上开的排气孔导致的,结果取样系统在不加芯的情况下的燃烧效率比较低。由表二也可以看出取样系统在加芯的情况下 O₂ 的含量和初始值 20.9 %相比还是比较低的,CO₂ 含量和其参考

最大值 CO_{max} = 15.5 %相比是比较接近的,并且试验结果重复性很好,试验结果比较稳定。这说明本试验取样系统的整体设计是十分成功的,容腔中的一些部件十分关键,关系到取样的成功与否。

另外还进行了爆震燃烧室前位置 1 处的燃烧效率测定,此时取样系统加芯,该试验主要是看爆震充分发展前后燃烧效率有何变化。图 5 给出的是位置 1 即爆震发动机燃烧室前压力随时间变化图,从图上可以看出此处压力均不高,说明此时爆震燃烧不是充分发展的爆震。试验结果发现 CO 和 NO 含量均超出仪器的量程,燃烧效率无法正常显示。这说明爆震燃烧充分发展之前燃烧得很不充分。

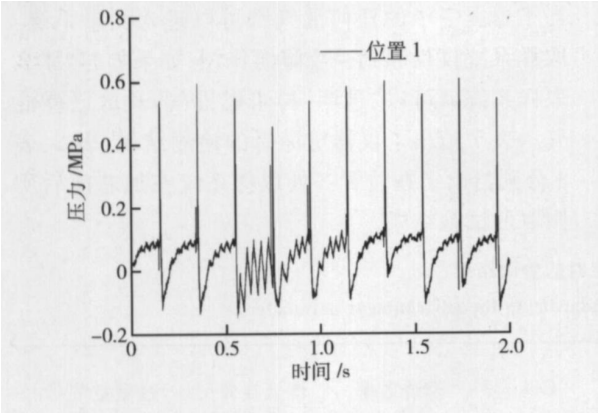


图 5 位置 1 处的压力波形图
Fig.5 Pressure traces at position 1

5 结 论

- (1) 根据脉冲爆震发动机的工作特点设计了一套新的取样系统,并进行了试验验证,试验结果表明此系统可以稳定的工作。
- (2) 试验对比测试了取样系统加芯先后脉冲爆震燃烧的燃烧效率,结果发现不加芯时,燃烧效

率较低,并且氧气含量、过量空气相对较多,CO 含量较低,说明取样系统有空气进入;加芯后氧气含量、过量空气相对少,燃烧效率较高,最高可达 99.6 %。

(3) 在同样工况下,试验测试了爆震燃烧室前后不同位置的燃气成分和燃烧效率,结果发现在爆震室后爆震发展比较充分位置,燃烧效率比较理想,而在爆震发展不充分处,CO 和 NO 含量急剧上升,均超出仪器的量程范围,燃烧效率无法正常显示。

参考文献：

- [1] Kailasanath K. Recent developments in the research on pulse detonation engines[R]. In: 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit ,AIAA-2002-0470.
- [2] Chao T, Wintenberger E, Shepherd J E. On the design of pulse detonation engines[R]. GALCIT Report FM00-7, Graduate Aeronautical laboratories, California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125, 2001.
- [3] Brophy C M, Werner L T S, Sinibaldi J O. Performance characterization of a valveless pulse detonation engine[R]. AIAA-2003-1344.
- [4] 陈义良,张孝春,孙慈,等编译. 燃烧原理[M]. 北京:航空工业出版社,1992.
- [5] 徐灏. 机械设计手册[M]. 北京:机械工业出版社,2001.