

# 氧气 / 醇类燃气发生器启动过程试验研究

李清廉, 李 庆, 王振国

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘 要:** 对氧气/醇类燃气发生器进行了热态试验, 对启动过程进行了描述和分析, 并引入点火时间和着火延迟两个参数深入研究了燃气发生器的启动规律。研究表明, 燃烧室流量密度的增加对燃气发生器的点火时间影响不大, 但会引起着火延迟的明显增加; 时序中氧气与燃料两种组元进入燃烧室的时刻对启动过程有较大的影响, 二者存在一个最优的时间间隔, 可以保证燃气发生器快速、平稳、安全的启动。

**关键词:** 点火时间; 着火延迟; 启动过程; 流量密度

**中图分类号:** V434.22

**文献标识码:** A

**文章编号:** (2010) 01-0013-06

## Experimental research of the start-up process of gaseous oxygen/ethanol gas generator

Li Qinglian, Li Qing, Wang Zhenguo

(Inst. of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The start-up process of gaseous oxygen/ethanol gas generator was analyzed based on the results of hot fire tests. The ignition time and ignition delay are presented for study of the start-up rule. The results suggest that the increase of mass flow rate does not affect the ignition time to a certain extent while it prolongs the ignition delay. The time sequence of oxygen and fuel injected into the chamber has an obvious impact on the start-up process and there exists an optimal interval at which the rapid, smooth and safe start up can be achieved.

**Key words:** ignition time, ignition delay; start-up process; flux density

收稿日期: 2009-10-13; 修回日期: 2009-12-17。基金项目: 自然科学基金 (10802095)。

作者简介: 李清廉 (1974—), 男, 博士, 研究领域为液体火箭发动机技术及应用、液体燃料喷雾燃烧过程。

## 0 引言

目前,世界上多个国家对燃气发生器开展了大量的研究工作,所研制的燃气发生器用于泵压式液体火箭发动机、真空模拟系统、激光器的压力恢复系统、软着陆气囊充气装置等多个领域<sup>[1-3]</sup>。由于启动过程在燃气发生器整个动态工作过程中最关键,国内外许多学者针对燃气发生器的启动过程开展了相关研究工作。其中 Morgan<sup>[4]</sup>将燃气发生器的部分喷嘴设计成混合比接近化学当量比的高温喷嘴,高温喷嘴喷雾燃烧形成的高温区可以作为火焰稳定区域,有效解决了燃气发生器启动过程中点火困难的问题。田章福<sup>[5]</sup>开展了过氧化氢燃气发生器试验,研究了余氧系数、流量密度、过氧化氢喷注压降及其部分催化分解对启动过程中点火性能的影响,并利用高速摄影拍摄了启动过程中火焰的发展过程。王爱玲<sup>[6]</sup>开展了气氧/煤油火箭发动机启动过程的数值模拟和试验研究,对气液燃气发生器的启动过程也具有较大的借鉴意义。在对自主研制的氧气/醇类燃气发生器进行试验研究,并在此基础上对氧气/醇类燃气发生器的启动过程进行了描述和分析,研究了启动过程的影响因素。

## 1 试验系统

燃气发生器热试试验采用挤压式供应方案,试验系统如图1所示。

供应系统包括氧气供应系统和燃料供应系统。推进剂供应管路中,氧气供应管路中安装音速喷嘴,当音速喷嘴喉部静压与上游入口总压之比小于临界压力比,气流在喉部达到当地音速,通过的流量只与上游压力有关而与下游压力无关。燃料供应管路中安装文氏管,当液体流经文氏管喉部发生气蚀时,通过的流量只与上游压力有关而与下游压力无关。音速喷嘴和文氏管作为气体管路和液体管路的限流部件,它们都工作在临界状态,可以准确控制氧气及燃料的流量,从而保证二者以设计的混合比完成燃烧过程,同时

它们还可以起到隔离压力波动、减小供应管路水击的作用。

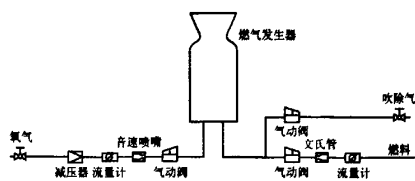


图1 燃气发生器试验系统结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of gas generator experimental system

试验测量参数主要包括氧气及燃料流量、供应系统压力(包括各储箱压力及管路压力)、燃气发生器各部位压力(包括集气腔、集液腔、身部及喉部)及燃烧室温度。主要测量设备如下:

(1) 供应系统压力和燃气发生器各部位压力采用压阻式压力变送器,频率响应大于20kHz,测量精度为0.5%FS;

(2) 燃气发生器燃烧室温度测量采用镍铬镍硅热电偶,测量精度为1.5%FS;

(3) 氧气及燃料流量测量采用内锥式差压流量计,测量精度为1.0%FS。同时还可以使用经过标定的音速喷嘴和文氏管对流量进行校准。

## 2 启动过程现象与描述

与火箭发动机类似,在燃气发生器的动态工作过程中,启动过程最为关键。在启动过程中,燃料与氧化剂在很短的时间内被喷射进入燃烧室,经过雾化、蒸发、混合和燃烧等一系列极为复杂的物理化学变化,燃气发生器工作过程参数(流量、压强及温度)发生大幅度的变化。在启动阶段,各种动力载荷作用在燃气发生器结构上,其中包括热冲击、压强及加速度,这对燃气发生器能否正常工作是一个极大的考验。热试试验中压力曲线如图2所示。燃气发生器的启动过程可以分为两个部分:第一个过程是推进剂系统及其容腔中组元的充填与建压,第二个过程是推进剂组元的点火和火焰传播。

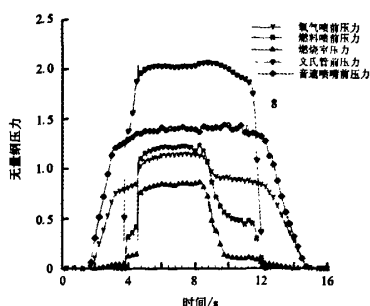


图 2 燃气发生器热试试验典型曲线

Fig.2 Typical hot test curve of the gas generator

## 2.1 充填与建压过程

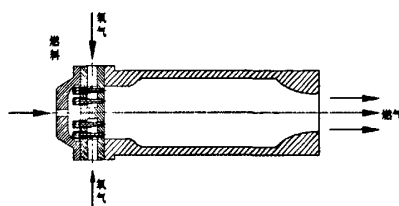
推进剂系统及其容腔中组元的充填包括气体组元的充填与建压, 以及液体组元的充填与建压。充填过程是指推进剂逐渐充满管路及燃气发生器喷注器头腔的过程。该过程从阀门打开开始, 到喷注器头腔压力开始上升结束。建压过程是指头腔压力从开始上升至压力到达设定值的过程。

由图 2 中的启动过程所示, 对于气体组元来说, 气体的扩散能力较强, 流动速度快, 氧气在 100ms 以内的很短时间就已经充满喷注器集气腔。但由于气体的可压缩性, 在充满集气腔后, 氧气集气腔的压力上升较为缓慢, 斜率小, 建压时间可达 1~3s。对于液体组元来说, 流动速度较慢, 需要较长的时间才能将集液腔充满, 充填过程可能需要 1s 以上, 充填过程中集液腔压力基本没有变化。由于液体的不可压缩性, 燃料建压时集液腔压力上升陡峭, 斜率较大, 建压时间基本在 500ms 以内。

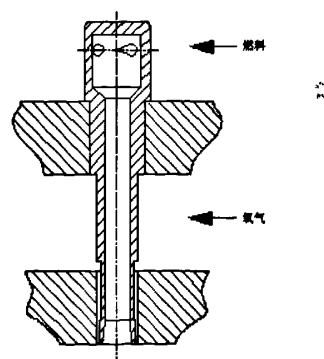
## 2.2 推进剂组元的点火与火焰传播

燃气发生器采用氧气/Lf80 燃料, 其中 Lf80 是一种自制醇类液体燃料。这种燃气发生器的燃烧过程与液/液推进剂燃烧有较大差别。氧气没有雾化蒸发的过程, 以音速 (冷态情况下) 从喷嘴喷出后即迅速膨胀扩散到整个燃烧室中, 难以与燃料均匀混合。同时为了获得设定温度的燃气, 试验中燃气发生器采用富燃方案。这使得推进剂混合比偏离化学当量比, 进一步导致燃气发生器的点火困难。为解决点火问题, 燃气发生器

进行了特殊的结构设计, 参见图 3, 选用同轴离心式喷嘴, 燃料由离心式内喷嘴喷入燃烧室, 而氧气由外环缝喷嘴喷入燃烧室; 同时对单喷嘴的流量、喷嘴的数目及排列方式进行优化设计。试验中采用推进剂流量限制措施, 使得启动时混合比维持在 3.15~3.25。同时采用了火炬点火器产生的高温燃气对燃气发生器主流进行点火。火炬点火器可以提供足够的点火能量、较高的点火温度并且维持 250~500ms 的点火时间, 能够满足燃气发生器的点火要求。火炬点火器产生的高温气体首先引燃了附近的可燃混合物, 然后火焰逐渐由初始的火团传播到附近的区域, 最后点燃了整个燃烧室。



(a) 总体结构



(b) 同轴式喷嘴

图 3 燃气发生器结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of the gas generator

为了研究燃气发生器的启动性能, 定义两个参数: 点火时间  $t_i$  和着火延迟  $t_d$ , 分别对应着火和火焰传播过程。如图 4 所示, 其中点火时间定义为火炬点火器室压突跃时刻 (火炬点火器开始工作) 到燃气发生器燃烧室室压突跃时刻的间隔。参考文献[7]关于动态特性的定义, 将着火延

迟定义为燃烧室室压突跃时刻到燃烧室室压达到稳态压力值的 95%之间的间隔。各次试验的点火时间

时间及早着火延迟对比如表 1 所示，表 1 中涉及的时序 1 和时序 2 分别如图 5 和图 6 所示。

表 1 燃气发生器热试试验点火性能比较

Tab.1 Comparison of hot test results

序号	点火时间 $t$ (ms)	着火延迟 $t_d$ (ms)	点火时序	混合比	流量密度 / $\text{kg}\cdot(\text{s}\cdot\text{m}^2)^{-1}$
1	330	248	时序 1(图 4)	3.186	474.96
2	225	468	时序 1	3.196	568.82
3	300	893	时序 1	3.160	756.11
4	10	40	时序 2(图 5)	3.172	748.76
5	10	47	时序 2	3.180	777.27
6	10	60	时序 2	3.218	797.92
7	14	60	时序 2	3.187	800.31
8	10	65	时序 2	3.170	817.01

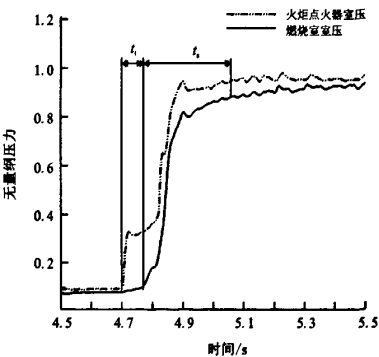


图 4 燃气发生器启动阶段典型曲线

Fig.4 Typical test curve of gas generator during start-up

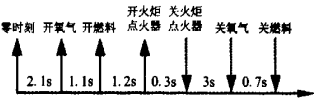


图 5 燃气发生器试验控制时序 1

Fig.5 Time sequence 1 for GG test

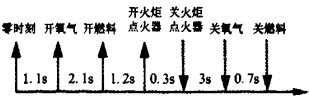


图 6 燃气发生器试验控制时序 2

Fig.6 Time sequence 2 for GG test

3 启动过程的影响因素

3.1 流量密度的影响

燃烧室流量密度定义为燃烧室单位横截面积上的质量流量。表 1 中 1、2、3 三次试验的氧气及燃料流量密度逐渐增大（氧气及燃料压降逐渐提高），但混合比基本保持不变，点火时序也完全相同。由试验结果可以看出，虽然点火时刻三次试验的流量密度逐渐增加，但它们的点火时间基本相同。由于三次试验采用相同的试验时序，因此在点火瞬间，三次试验中喷注器的混合比基本相同。由吴晋湘<sup>[9]</sup>对同轴离心式喷嘴的研究结果可知，一定范围内，在反压一定、气液比相同的情况下，随着气体喷前压力的增加，喷嘴的雾化质量将有所提高，喷嘴的流强分布也更加均匀，因此氧气与燃料两种组元的混合也就越充分。但在喷嘴气液比相同的情况下，随着气体喷前压力的提高，液体的喷前压力也在增加，从而导致离心式内喷嘴喷出的燃料液膜初始厚度也在增加。因此流量密度增大到一定程度以后，雾化和混合质量也有变差的趋势。最终由试验结果可以看出，虽然流量密度增加会引起三次试验中燃

料雾化与两组元混合质量的差异,但最终未对点火时间产生较大影响。

同时,由表 1 可以看出,1、2、3 三次试验中着火延迟随着流量密度的增加而逐渐增加。由于三次试验中可燃混合气体的化学性质相同,混合比一致,因此着火温度也相同。随着燃气发生器流量密度的增加,燃烧室内气流速度不变,但密度增加。由火焰传播的热力理论可知,在其他因素相同的情况下,火焰传播速度与可燃混合气体的密度成反比。因此随着燃烧室流量密度的增加,火焰传播速度逐渐降低,火焰传播速度的降

低延长了火焰传播过程,从而导致了着火延迟的增加。表 1 中采用时序 2 的 5~8 试验数据,验证了着火延迟随流量密度增加而增加的规律。

3.2 时序的影响

为了研究推进剂组元进入燃烧室时间对启动性能的影响,在试验参数不变的情况下,分别采用两组不同的时序进行了启动试验。试验 3 采用时序 1,启动过程压力变化曲线如图 7 所示,两根竖线间区域放大显示在图 8 中;试验 4 采用时序 2,启动过程压力变化曲线如图 9 所示,两根竖线间区域放大显示在图 10 中。

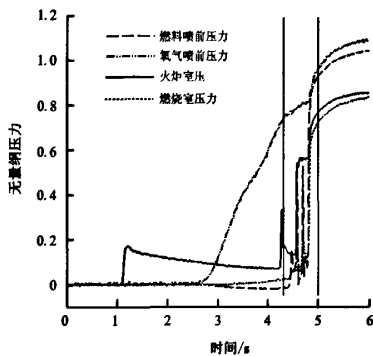


图 7 试验 3 启动压力曲线

Fig.7 Pressure curve of test 3 during start-up

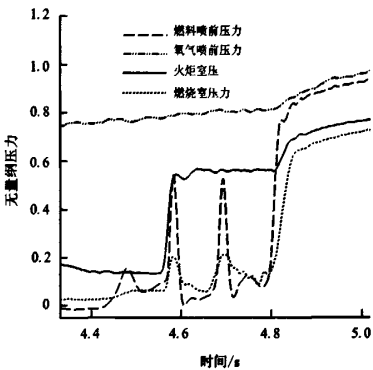


图 8 试验 3 启动压力曲线

Fig.8 Pressure curve of test 3 during start-up

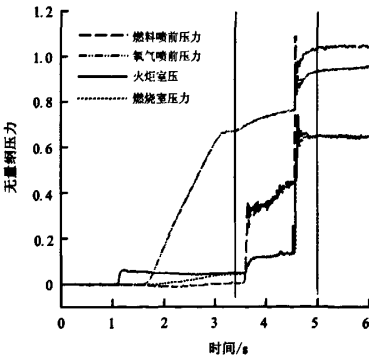


图 9 试验 4 启动压力曲线

Fig.9 Pressure curve of test 4 during start-up

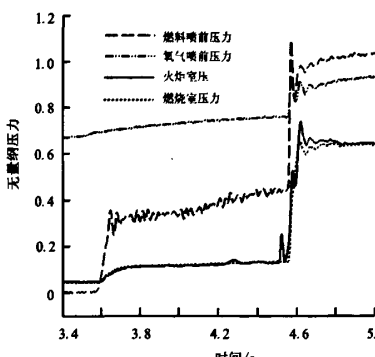


图 10 试验 4 启动压力曲线

Fig.10 Pressure curve of test 4 during start-up

试验 3 采用时序 1,时序 1 中于 2.1s 打开氧气阀门,3.2s 打开燃料阀门,4.4s 火炬点火器开始工作。如图 7 及图 8 所示,当火炬点火器开始工作以后,燃烧室与燃料腔出现压力波动。出现这种波动的主要原因是燃烧室内火炬点火器产生

的高温气体周围的混合物被点燃,但由于此时燃烧室压力较低,火团无法传播出去,导致火焰熄灭同时燃气发生器总体当量比仍然偏离着火适当比,雾化混合质量较差,氧气燃料混合极不均匀,燃烧室内混合比值差异较大。部分区域仍然

不满足着火条件。因此火焰出现了熄灭的现象。随着充填过程的继续,氧气与燃料流量有所增加,雾化和混合进一步改善,混合比接近着火适当比,最终火焰得到顺利传播。在该时序下,点火时间与着火延迟较长。由此可见,当氧气与燃料进入燃烧室的时间差较小时,点火过程会出现着火再熄火的现象,此时点火较为困难。

试验 4 采用时序 2,时序 2 中燃料阀门的打开时间以及火炬点火器工作的时间与试验 4 中完全相同,但氧气阀门的打开时间提前了 1s。如图 9 及图 10 所示,可以看出,在 3.9s 的时刻,氧气已经进入燃烧室,燃烧室内开始建压。对比同一时刻图 6 中的燃料喷前压力可以看出,燃料喷前压力也突然上升。由于时序 2 只是改变了氧气阀门打开的时间,并没有改变燃料阀门的打开时间,因此此时燃料喷前压力突然上升主要是因为提前进入燃烧室的氧气窜入燃料腔造成的结果。这种情况较为危险,有可能在点火过程中使火焰窜入燃料腔并发生烧蚀现象。同时,由表 1 可以看出,采用时序 2 的试验点火时间与着火延迟都大大缩短。增大氧气与燃料进入燃烧室的时间差,虽然试验点火时间与火焰传播时间大大缩短,但存在氧气进入燃料腔的危险,同时燃烧室内会积存大量的氧气,不利于稳定的启动。

## 4 结论

(1)为了研究燃气发生器的启动性能,依据启动过程中压力曲线的特点,引入点火时间和着火延迟两个物理参数,分别对应着火和火焰传播过程。

(2)燃烧室流量密度对启动过程中的点火过程影响不大,但却对火焰传播过程影响较大,流量密度的增加导致着火延迟延长。

(3)时序中组元进入燃烧室的时间对启动过程有较大的影响,氧气与燃料之间的间隔太短时,点火较为困难,点火时间与着火延迟都较长;但氧气与燃料间隔太长,又会导致氧气进入燃料腔,产生危险;同时燃烧室积存大量氧气,不利于稳定启动,点火后可能出现压力峰和温度峰。

## 参考文献:

- [1] McGrath D K, Kirschner T J. Mars Pathfinder Airbag Gas Generator Development[R]. AIAA 98-3845.
- [2] Josef S. Tactical High Energy Laser [D]. The SPIE Proceedings on Laser and Beam Control Technologies, 2002.
- [3] Glaese R M, Anderson E H, Janzen P C. Active Suppression of Acoustically Induced Jitter for the Airborne Laser [M]. Laser Weapons Technology. 2002.
- [4] Morgan D, Beichel R. Stoichiometric Gas Generator—a Strategic Departure[R]. AIAA 91-2584.
- [5] 田章福. 低浓度酒精/过氧化氢燃气发生器喷雾燃烧过程研究[D]. 国防科技大学研究生院. 2007.
- [6] 王爱玲, 林庆国, 吴建军. 运载火箭气氧/煤油姿控发动机技术研究. 上海航天, 2006, 23(5): 6-11.
- [7] 郑丽. 大流量减压器的特性研究及内部流场动态仿真 [D]. 国防科技大学研究生院. 2007.
- [8] 吴晋湘. 不同反压下大流量气液同轴式喷嘴雾化特性及喷雾两相流场的试验和理论研究 [D]. 国防科技大学研究生院. 1993.

(编辑: 马 杰)