

# 过氧化氢自燃点火器的试验研究

肖 锋, 谭建国, 沈赤兵

(国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南 长沙, 410073)

**摘 要:** 采用分段可拆卸的点火器, 对带后向台阶的横向喷注器、气液同轴喷注器、不同喉部直径的喷管等结构进行了试验研究。后向台阶高度为 7mm 的喷注器比 13mm 的后向台阶火焰稳定效果更好。在相同温度和室压下, 横向喷注器的自燃能力优于气液同轴喷注器, 喷管收缩比越大, 越利于自燃。

**关键词:** 过氧化氢; 自燃点火器; 横向喷注器; 气液同轴喷注器

**中图分类号:** V511

**文献标识码:** A

**文章编号:** (2006)04-0021-05

## Experimental investigation of an auto-ignition igniter with hydrogen peroxide

Xiao Feng, Tan Jianguo, Shen Chibing

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

**Abstract:** The configurations of transverse injectors with a rearward facing step, gas/liquid coaxial injectors, nozzles with different throat diameters were studied by a series of tests. It is shown that injectors with a 7mm rearward facing step have better flame stabilization than injectors with a 13mm step. Under the same temperature and the chamber pressure, hypergolic ability of transverse injectors is better than that of the gas/liquid coaxial injectors. Hypergolic ability tends to improve with higher nozzle contraction ratio.

**Key words:** hydrogen peroxide; hypergolic igniter; transverse injectors; gas/liquid coaxial injector

### 1 引言

近几十年来, 液体火箭发动机的发展主要致力于提高推力、比冲及可靠性等性能指标, 基本

采用  $N_2O_4$ /肼、一甲基肼、偏二甲肼等有毒、有污染推进剂组合, 或者采用液氧/液氢等低温、不易贮存的推进剂组合。随着社会不断进步, 航天技

收稿日期: 2005-11-14; 修回日期: 2006-05-30。

作者简介: 肖峰 (1978—), 男, 硕士, 研究领域为液体火箭发动机试验。

术对环保和人体健康的要求日益提高, 航天动力系统采用无毒、无污染、易贮存及易处理的推进剂已是今后发展的必然趋势。过氧化氢具有绿色环保、常温可储存、高密度比冲、可单分解和可自燃等优点, 是绿色推进剂的首选。

国内外广泛开展了过氧化氢发动机的研制。在用于支持 X-43 飞行试验的火箭基组合循环系统 (RBCC) 中, 使用了浓度为 90% 的过氧化氢和 JP-8 组合的火箭发动机<sup>[1]</sup>。普渡大学采用带后向台阶结构的横向燃料喷注器, 研究了多种燃料、燃料/催化剂混合物与过氧化氢反应时的比冲、密度比冲、着火延迟时间等内容<sup>[2]</sup>。我国某研究所在 1993 年也成功进行了 80%、94%~96% 浓度过氧化氢与煤油的热试研究<sup>[3]</sup>。现有以过氧化氢作自燃推进剂的研究中, 主要致力于使用添加催化剂的燃料的发动机研究。

本文通过一系列的试验, 研究了带后向台阶的横向喷注器、气液同轴喷注器、不同喉部直径的喷管等结构对过氧化氢/烃类自燃点火器自燃的影响, 得到了一些有意义的结论。

## 2 最优后向台阶高度

横向喷注器以垂直于过氧化氢分解气流的方向将液体燃料喷入高温、高速分解气流中, 高速的气流给横向喷入的燃料施加剪切力, 造成液流的破碎、雾化、蒸发。横向喷注器对液体燃料的雾化可以取得很好的效果。本文试验工作中采用的横向喷注器采用了后向台阶的结构。来流在后向台阶的下游会产生一个回流区, 以此达到燃烧室火焰稳定的作用。

在催化床出口内径、燃烧室内径一定的情况下, 增大后向台阶的高度, 将必然减小横向喷注器的内径, 增加过氧化氢催化分解气体通过喷注器时的速度。增大后向台阶高度与减小分解气体通过喷注器的速度是矛盾的。在改变台阶高度和通过喷注器的来流速度之间, 必然存在一个最佳台阶高度, 使后向台阶达到最好的火焰稳定效果。

在后向台阶区域, 有湍流剪切层存在于自由来流和回流之间, 产生大尺度的湍流涡。这些高温的湍流涡必须在自由来流使之冷却之前自燃,

否则火焰不能维持。因此湍流混和时间必须足够大以维持稳定的火焰。湍流混和时间通常等于涡破碎的特征时间。在 J.C.Sisco 和 B.L.Austin<sup>[4]</sup>等的研究中指出, 该特征时间  $\tau_{sl}$  可以表示为:

$$\tau_{sl} = 2h/V_g \quad (1)$$

式中,  $h$  为后向台阶的高度,  $V_g$  为后向台阶边界处自由来流的速度, 与过氧化氢分解气体的流量、密度以及流动面积相关。J.C.Sisco 和 B.L.Austin 在假定质量流量和密度为常数的情况下, 推出有最佳火焰稳定效果的最优后向台阶高度  $h_{opt}$  为:

$$h_{opt} = D_c / 6 \quad (2)$$

式中,  $D_c$  为燃烧室的内径, 本文所用点火器内径为 40mm。

## 3 试验装置

为了比较不同结构对过氧化氢点火器自燃的影响, 点火器设计为分段可拆卸结构, 分为四个部分 (如图 1 所示): 过氧化氢催化床、推进剂喷注器、燃烧室、喷管。其中, 催化床#1 和催化床#2 直径不同, 从而具有不同的床载; 不同的喷管喉部直径反映了不同的收缩比, 从而反应了燃烧室内的气体流速; 采用了气液同轴式和横向式喷注器结构。横向喷注器结构如图 2 所示, 由三部分组成: 由压板、可换喷注及基座, 并可拆卸以方便调整后向台阶高度。



图1 点火器结构图

Fig.1 Igniter structure

图 3 是过氧化氢自燃点火器热试的系统简图。过氧化氢经文氏管进入点火器的催化床, 燃料经

喷注器进入催化床下游的过氧化氢高温分解混合物。试验系统由推进剂供应系统、测量系统、控制系统组成。推进剂供应系统由过氧化氢供应管路、燃料供应管路、过氧化氢氮气吹除管路组成。测量系统由压力传感器、温度传感器、激励电源单元、数字显示单元及计算机采集单元五个部分组成。在文氏管入口、燃料喷注器入口安装有压力传感器,燃烧室安装有铂铑—铂温度传感器和压力传感器。



图2 横向喷注器组合件

Fig.2 Transverse injector assembly

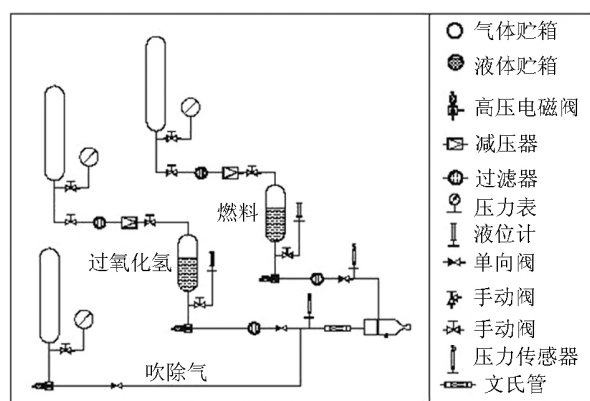


图3 过氧化氢自燃点火器热试系统图

Fig.3 Schematic of experimental system

## 4 试验结果与分析

### 4.1 横向喷注器的试验研究

为研究后向台阶高度不同的喷注器对火焰稳定的影响,主要对两个后向台阶高度分别为 7mm、13mm 喷注器进行了对比试验。通过改变燃料流量

的方式,分析了两个喷注器的自燃延迟和可自燃的余氧系数范围。在相同余氧系数的情况下,自燃延迟小。自燃迅速定性的表明该带后向台阶的喷注器对燃烧室火焰的稳定效果好。试验中,富燃工况下点火器可自燃的余氧系数小,也定性的表明该喷注器对燃烧室的火焰稳定效果好。

表1是后向台阶高度为13mm时的试验结果,可知,对该横向喷注器,必须在富氧工况下才能自燃。当余氧系数小于1.33时,关闭燃料供应以后才自燃。试验表明,在富氧工况试验中,随着余氧系数的减小,发生自燃的速度减慢、自燃延迟增大。其自燃的下限是1.4~1.5左右。

表2是后向台阶高度7mm时的试验结果,可知,对该喷注器,在富燃情况(余氧系数为0.78)下也可以自燃。所以与13mm的后向台阶高度相比,本喷注器的自燃范围更宽、自燃更迅速、火焰稳定效果更好。这一结论也证明了方程(2)中的关于最优后向台阶高度结论的正确性。在本文的后续工作中,所有横向喷注器都是指这种后向台阶高度为7mm的喷注器。

### 4.2 同轴喷注器与横向喷注器的性能比较

喷注器的性能,直接影响到推进剂在燃烧室内的雾化、混和以及燃烧室内火焰的稳定,是液体火箭发动机中非常重要的关键部件。对喷注器性能的评价,主要以冷试中的雾化混和质量,热试中的相同工况下的燃烧效率作为衡量指标。对于本文进行的过氧化氢/烃类燃料的自燃试验,还要考虑相同工况下成功自燃的余氧系数,以此作为喷注器的性能评价指标。

为比较气液同轴喷注器与横向喷注器的性能优劣,限定过氧化氢流量,通过燃料流量来改变余氧系数,以获得喷注器的适应范围。通过单分解试验,可以了解到过氧化氢单分解时燃烧室内的压力、温度随时间的变化关系曲线。通过控制燃料的喷入时间,使不同试验中燃料喷入时的燃烧室温度与压力基本相同。

图4中,分别给出了采用同轴喷注器(左图)和横向喷注器(右图)时,自燃的燃烧效率与推进剂余氧系数的关系。对发生自燃的工况以方形点表示,对未发生自燃及关闭燃料喷注器后才出现自燃的工况以三角形点表示。未自燃时,其燃

烧效率值为 0。

表 1 后向台阶高度为 13 mm 时的试验数据

Tab.1 Experimental data when backward step height is 13mm

燃料喷入时室压/MPa	燃料流量/(g/s)	余氧系数	燃烧效率	备注
0.5	1.7	4.20	0.72	迅速自燃
0.48	4.0	1.74	0.591	延迟 0.13s 自燃
0.5	5.2	1.33	0.589	关燃料后才自燃

表 2 后向台阶高度为 7 mm 时的试验数据

Tab.2 Experimental data when backward step height is 7mm

燃料喷入时室压/MPa	燃料流量/(g/s)	余氧系数	燃烧效率	备 注
0.5	3	2.32	0.565	迅速自燃
0.5	8.7	0.80	0.493	延迟 0.1s 自燃
0.5	8.9	0.78	0.502	延迟 0.05s 自燃
0.5	12.8	0.55	0.461	关燃料后才自燃

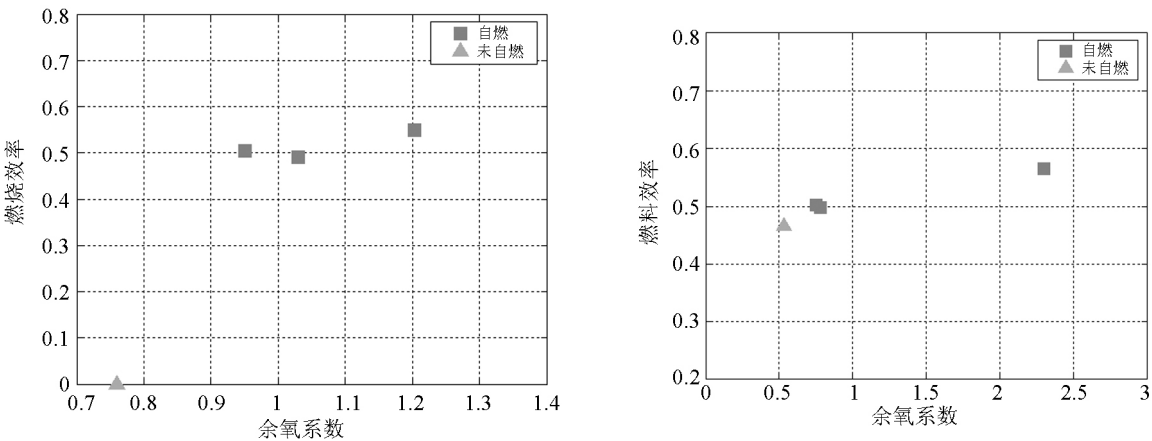


图4 采用两种类型喷注器的燃烧效率与余氧系数的关系

Fig.4 Combustion efficiency vs. excess oxygen coefficient using different injector

图 4 从燃烧效率方面可以看出采用两种类型喷注器的自燃效率基本相同，在 0.5 左右。在相同燃烧室压力、温度（燃料喷入时的压力都是 0.5MPa，温度都约为 700K）情况下，从可自燃的余氧系数范围比较，采用横向喷注器时，在余氧系数为 0.78 时就能自燃，而采用同轴喷注器时余氧系数增加到 0.96 才出现自燃。所以，在相同燃烧室温度和压力下，横向喷注器比同轴喷注器具有更优的性能，更易于自燃。

在本文的试验中，多次出现燃料喷入时未自

燃，燃料关闭后迅速自燃的情况（如图 5 所示）。对该现象的解释是：燃料喷入时的推进剂余氧系数是富燃工况，超出在该温度、压力情况下能自燃的余氧系数范围，在燃料喷前阀关闭以后，燃烧室内的余氧系数迅速提高，达到了自燃的条件。

4.3 不同喉部直径的喷管对自燃的影响

燃烧室的一个重要特征就是它的火焰稳定能力。推进剂在燃烧室内停留的时间越长，过氧化氢/烃类推进剂组合自燃的可能性就越大。在过氧化氢流量一定的情况下，喷管喉部直径越小，燃烧室内

过氧化氢催化分解气体的稳定压力就越高。

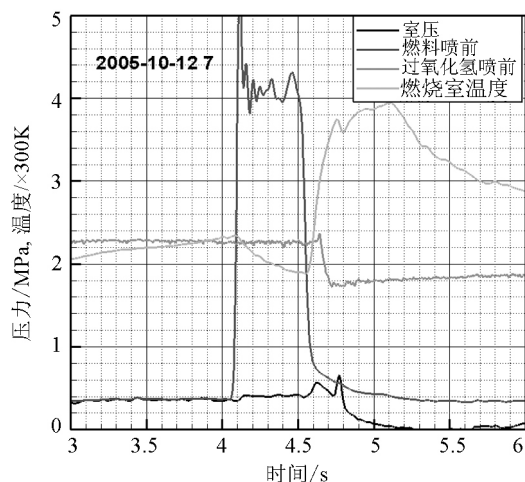


图5 燃料喷前阀关闭后才出现自燃

Fig.5 Auto-ignition after fuel shut down

为研究不同喉部直径的喷管对自燃的影响, 分别对喉部直径为 6mm、8mm、10mm 的 3 个不同喷管进行了试验, 对应的收缩比分别为 44、25、16。由于过氧化氢/烃类的自燃极限与温度、压力都有关系, 试验中通过改变不同喷管时的过氧化氢流量来达到燃料喷入时有相同的燃烧室压力, 并通过控制燃料喷入时间使燃料喷入时的初始温度大致相同。

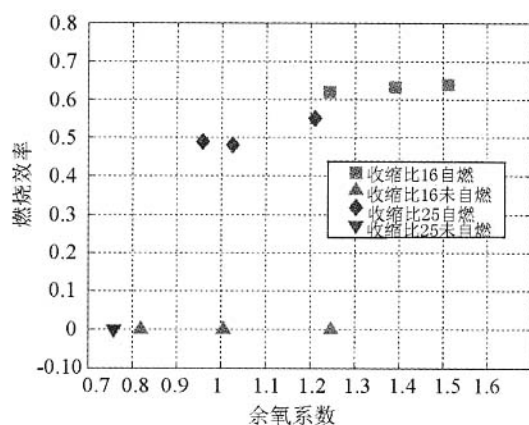


图6 不同收缩比时燃烧效率与余氧系数的关系

Fig.6 Combustion efficiency vs. excess oxygen coefficient at different contract ratios

图6中给出了喷管收缩比为16、25时的自燃试验余氧系数范围以及燃烧效率。可以看到, 当收缩比为25时, 余氧系数在0.76时没有自燃, 余

氧系数增加到0.96以后的每次试验, 都取得了成功自燃。而当收缩比为16时, 余氧系数为1.24时都没有自燃, 直到余氧系数增加到1.25以后的每次试验, 才取得自燃。由此可以得出: 喷管喉部直径越小, 即收缩比越大, 越利于实现自燃。这是由于喉部直径不同, 燃烧室的特征长度也不相同。在相同燃烧室的情况下, 喉部直径越小, 燃烧室的特征长度越长, 推进剂在燃烧室中的驻留时间越长。该驻留时间越长越利于自燃的发生。

## 4 结论

通过采用不同床载的催化床、两种类型的喷注器、三种喉部直径的喷管进行了一系列过氧化氢/煤油的自燃试验, 得出以下结论:

(1) 对本文所研究的40mm燃烧室, 当采用带后向台阶的横向喷注器时, 7mm高度后向台阶比13mm高度的火焰稳定效果更好。该结论与J.C.Sisco的最优后向台阶高度结论一致。

(2) 对带后向台阶的横向喷注器和气液同轴喷注器进行了性能比较试验, 在相同温度和室压下, 横向喷注器能在更宽范围的余氧系数下自燃。

(3) 对不同喉径的喷管下的自燃特性进行了试验研究。在相同温度和室压下, 喷管喉部直径越小, 即收缩比越大, 越利于实现自燃。

## 参考文献:

- [1] K J Miller, J C Sisco, B L Austin, et al. Design and ground testing of a hydrogen peroxide kerosene combustor for RBCC application[R]. AIAA 2003-4477.
- [2] J C Sisco, B L Austin, J S Mok, et al. Autoignition of kerosene by decomposed hydrogen peroxide in a dump combustor configuration[R]. AIAA2003-4921.
- [3] Plee S L, Mellor A M. Characteristic time correlation for lean blowoff of bluff-body-stabilized flames[J]. combustion and flame, 1979.
- [4] S A Frolik, et al. Development of hypergolic liquid fuels for use with hydrogen peroxide[R]. AIAA2000-3684.

(编辑: 马杰)