

# 富氧预燃室高压缩尺试验研究<sup>\*</sup>

吴宝元, 葛李虎, 谭永华, 刘红军

(陕西动力机械设计研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 为满足液氧/煤油发动机推力大范围变化和预燃室要在大范围工况条件下工作的要求, 采用带缩进长度和二次喷注的双组元离心式喷注单元, 对富氧预燃室进行了高压缩尺试验研究。头部二次喷注孔为矩形和圆形、身部 4 种不同长度的 6 台试验件的试验结果表明, 缩尺试验的最好温度均匀性  $\leq 50^\circ\text{C}$ , 燃气平均停留时间为 10ms 左右, 矩形和圆形喷注方案的缩进室混合比分别小于 20 和 24 时可以避免产生低频不稳定燃烧。所得结论可用于液氧/煤油发动机的研制, 并对新型发动机的研制具有一定的借鉴作用。

**关键词:** 烃氧发动机; 高压补燃火箭发动机; 富氧推进剂; 预燃室; 燃烧试验; 缩尺模型

**中图分类号:** V434.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2003) 02-0104-05

## Experimental investigation of oxidizer-rich subscale preburner

WU Bao-yuan, GE Li-hu, TAN Yong-hua, LIU Hong-jun

(Shaanxi Engine Design Inst., Xi'an 710100, China)

**Abstract:** To make sure that the preburner could work steadily and dependably when engine's thrust change at a large range, and the temperature deviation is small, adopting dual-propellant injector with withdraw chamber and secondary spray, this paper investigated the combustion character of the oxidizer-rich preburner via high pressure subscale test. The six testers adopted with rectangle and round secondary spray in four different lengths were test. The results show that the best temperature deviation is less or equal to than  $50^\circ\text{C}$ , and the combustion gas stage time must be longer than 10ms, and when the withdraw chamber mixture ratio is less than 20 and 24 at the case of rectangle and round secondary spray respectively, it is possible to avoid low-frequency combustion instability. The result is valuable for fullscale preburner design.

**Key words:** Hydrocarbons-oxygen engine; High pressure staged combustion rocket engine; Oxidizer-rich propellant; Precombustion chamber; Combustion test; Scale model

## 1 引 言

在烃氧高压补燃火箭发动机预燃室研制中, 低压缩尺试验难以模拟真实的燃烧特点。模拟计算虽然可以预期其性能<sup>[1,2]</sup>, 但富氧预燃室的高压缩尺试验仍是全尺寸预燃室设计不可少的关键一步。室压为 15MPa ~ 20MPa 的富氧预燃室高压缩尺试验可比较真实地反映实际预燃室中的燃烧和流动过程, 可以检验全尺寸预燃室喷注单元的结构和参数选择的合理性和适用性, 为全尺寸预燃室的燃烧稳定性、温度场均匀性设计和试验提供依据。本文在对具有二次喷注和缩进室的双组元离心式喷注单元(图 1)的流量特

性<sup>[3]</sup>、理论和低压试验研究<sup>[4]</sup>的基础上, 进行了富氧预燃室高压缩尺试验研究。

## 2 试验件设计和参数

试验件采用全尺寸预燃室的喷注单元, 缩尺件和全尺寸预燃室的流密和停留时间相同, 身部的前段进行冷却, 且在头部分布了冷却孔(位于喷注面)。

共设计、加工了 6 台缩尺试验件, 头部和身部采用法兰联接。两个头部方案的喷注器包括三个全尺寸预燃室的喷注单元, 外喷嘴的液氧流量占总液氧流量的百分比分别为 26.97%, 27.49%, 头部二次喷注孔分别为矩形孔和圆孔, 其中, A, B 和 C 试验件的二次喷注孔

\* 收稿日期: 2002-05-08; 修订日期: 2002-09-01。

作者简介: 吴宝元 (1969—), 男, 博士生, 高级工程师, 研究领域为喷雾燃烧过程。

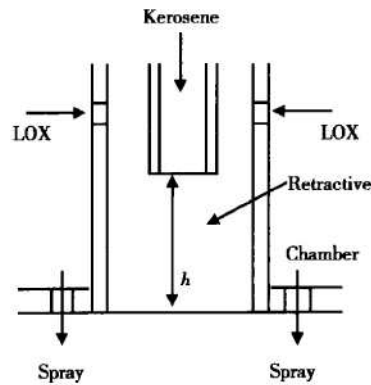


Fig.1 Sketch of oxidizer-rich preburner injector

为36个 $2\times 2.4$ 矩形孔和6个 $\phi 1.8$ 的冷却孔,另外三个试验件的二次喷注孔为36个 $\phi 2.2$ 圆孔和9个 $\phi 0.9$ ,18个 $\phi 1.1$ 冷却孔。四个身部方案的长度不同,对应于全尺寸预燃室不同工况下的停留时间。

缩尺试验件在两个截面上安装8个热电偶,与喷注单元的位置关系见图2。试验件的主要结构参数见表1。内喷嘴的参数为:几何特征 $A=4.72938$ ,内径 $d_c=4.0\text{mm}$ ,孔数 $n=4$ ,孔径 $d_{\text{BX}}=0.82\text{mm}$ ,外径 $d_i=6.5\text{mm}$ 。外喷嘴的参数为:几何特性 $A=2.23923$ ,内径 $d_c=10.0\text{mm}$ ,孔数 $n=8$ ,孔径 $d_{\text{BX}}=2.1\text{mm}$ ,空腔直径 $d_m=6.97\text{mm}$ 。

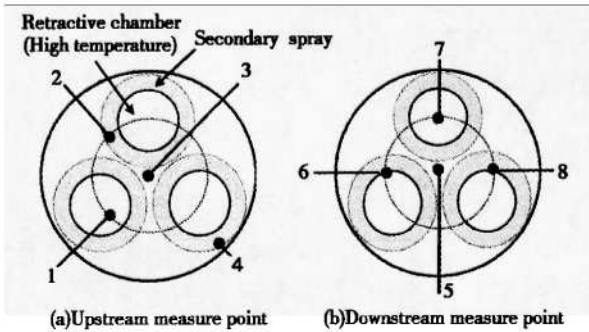


Fig.2 Relation between the thermocouple and injectors

3 试验结果及分析

3.1 试验系统介绍

进行试验的高压试验台虽不存在反馈系统,但能根据事先计算和对管道特性的如下设定,使试验的室压和混合比满足设计要求。

$$\dot{m}_t = C_t \sqrt{p_{x,t} - p_c} \tag{1}$$

$$\dot{m}_o = C_o \sqrt{p_{x,o} - p_c} \tag{2}$$

$$C^* = A_t \cdot p_c / (\dot{m}_t + \dot{m}_o) \tag{3}$$

式中 $\dot{m}_t$ 和 $\dot{m}_o$ 分别为煤油流量和液氧流量,kg/s; $C_t$ 和 $C_o$ 分别为煤油管道和液氧管道(包括试验件)的总流量系数, $\text{m}^2$ ; $p_{x,t}$ 和 $p_{x,o}$ 分别为煤油和液氧贮箱压力,Pa; $p_c$ 为试验件室压,Pa; $A_t$ 为试验件喉部面积, $\text{m}^2$ 。

试验标定步骤:根据 $A_t$ 、 $p_c$ 和 $K_m$ 由式(3)确定 $\dot{m}_t$ 和 $\dot{m}_o$ ,由 $K_m$ 确定 $C_t$ 和 $C_o$ ,使 $C_o/C_t$ 接近 $K_m$ 值(这样可以保证 $p_c$ 的变化不影响 $K_m$ ), $C_t$ 和 $C_o$ 的值依靠更换管道上的节流圈来改变。 $\dot{m}_t$ 和 $\dot{m}_o$ 已知后,由式(1),(2)就可以确定箱压。

当变工况工作时,只调节煤油箱压(由于煤油流量很小,煤油箱压响应很快),使得混合比变化,由式(1)~(3)可以知道,系统会自适应这种变化,其最终平衡结果是室压变化不大,而混合比能按设计要求进行变化。

3.2 试验结果

前两次试验是在固定混合比下进行的,且试验压力比设计值低。试验过程中当混合比偏高时,出现了较严重的低频振荡,试验件完好;当混合比降低时,振荡有所改善。据此,后面的试验重点放在混合比对低频振荡影响的研究上,其途径是在一定范围内使混合比呈台阶变化,看不同工况对同一试验件稳定性的影响。试验均按预定程序启动和关机,试验后的产品完好。结果表明,同一次试验中混合比呈台阶变化所得到的信息更多、更有意义。试验结果见表2。

Table 1 Parameters of high-pressure subscale testers

| Tester No.         | Symbol                       | 0-0    | 0-0A-J1 | 0-0C-J1 | 0-0A   | 0-0B   | 0-0C   |
|--------------------|------------------------------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|
| Chamber length     | $l_c/\text{mm}$              | 590    | 653     | 310     | 653    | 387    | 310    |
| Throat diameter    | $d_t/\text{mm}$              | 22.4   | 25.8    | 17.5    | 25.8   | 19.6   | 17.5   |
| LOX flowrate       | $1/3\dot{m}_o/(\text{kg/s})$ | 3.948  | 4.7347  | 2.5203  | 4.7347 | 3.24   | 2.5203 |
| Fuel flowrate      | $1/3\dot{m}_t/(\text{kg/s})$ | 0.0627 | 0.0893  | 0.031   | 0.0893 | 0.045  | 0.031  |
| Mixture ratio      | $K_m$                        | 63     | 53      | 81.3    | 53     | 72     | 81.3   |
| Stay time          | $\tau_s/\text{ms}$           | 10.35  | 9.36    | 11.83   | 9.36   | 11.17  | 11.83  |
| Chamber pressure   | $p_c/\text{MPa}$             | 18     | 18      | 16.19   | 18     | 18     | 16.19  |
| LOX pressure drop  | $\Delta p_o/\text{MPa}$      | 1.9787 | 2.846   | 0.8064  | 2.846  | 1.3327 | 0.8064 |
| Fuel pressure drop | $\Delta p_t/\text{MPa}$      | 1.3355 | 2.714   | 0.3268  | 2.714  | 0.6887 | 0.3268 |

Table 2 Survey of high-pressure subscale test

| Tester No.                            | 0-0                         | 0-0A                        | 0-0B                        | 0-0C                         | 0-0A-J1                     | 0-0C-J1                      |
|---------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Test No.                              | 6                           | 5                           | 1                           | 3                            | 4                           | 2                            |
| Total mixture ratio                   | 99 ~ 47.5                   | 60 ~ 48.5                   | 89 ~ 71                     | 91 ~ 62                      | 65 ~ 51                     | 98 ~ 77                      |
| Test time/s                           | 73                          | 57                          | 52                          | 54                           | 56                          | 53                           |
| Mixture ratio of retractive chamber * | 30.07 ~ 14.43               | 16.79 ~ 13.57               | 25.13 ~ 20.05               | 25.9 ~ 17.7                  | 19.6 ~ 15.37                | 30.5 ~ 24                    |
| LOX flowrate/(kg/s)                   | 14 ~ 11.5                   | 13.9 ~ 13                   | 11.3 ~ 9.9                  | 7 ~ 5.1                      | 14.7 ~ 13.4                 | 8.4 ~ 5.8                    |
| Fuel flowrate/(kg/s)                  | 0.14 ~ 0.22                 | 0.23 ~ 0.27                 | 0.126 ~ 0.14                | 0.11 ~ 0.08                  | 0.22 ~ 0.263                | 0.1 ~ 0.07                   |
| Chamber pressure/MPa                  | 17.7 ~ 19.3                 | 17.1 ~ 17.9                 | 19.5 ~ 19                   | 13.2 ~ 14.3                  | 17.5 ~ 18.2                 | 13.7 ~ 14.3                  |
| Temperature distribution              | $\leq \pm 75^\circ\text{C}$ | $\leq \pm 60^\circ\text{C}$ | $\leq \pm 68^\circ\text{C}$ | $\leq \pm 145^\circ\text{C}$ | $\leq \pm 50^\circ\text{C}$ | $\leq \pm 120^\circ\text{C}$ |

\* : Obtained from the calculation of cool-test after hot-test.

### 3.3 温度均匀性分析

试验得到了测点(测点位置见图2)1,2,3,4,5和7的燃气温度,测点6和8引入控制间绘为近似曲线。图3是0-0产品试验得到的各温度曲线。

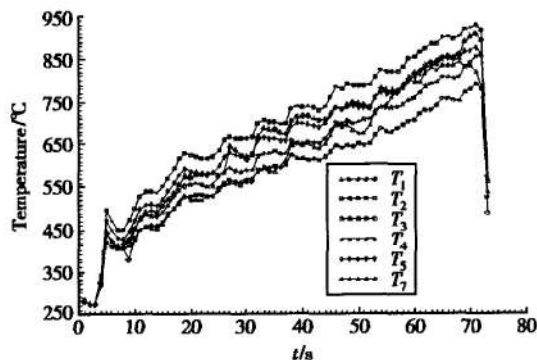


Fig.3 Temperature curves of 0-0 tester

各温度测点与喷注单元的相对位置不一样(见图2),其所测温度范围也不相同。燃烧室中心线上的  $T_3$  (热电偶3的温度)和  $T_5$  温度最高。热电偶4,2和由于处于二次喷注区所在的轴向位置上,温度为最低。其中,由于壁面效应,靠近壁面的  $T_4$  又稍高于  $T_2$ 。

另外,从表2中的温度均匀性范围可以得知,各次试验的温度偏差相差较大,其中,NO<sub>4</sub>(试验件为0-0A-J1)次试验的温度均匀性为  $\pm 50^\circ\text{C}$ 。单纯从各次试验的温度分布均匀性的测量值来看,燃烧室越长,均匀性越好。在燃气平均停留时间相等的前提下,燃烧室越长,意味着燃气流速越大,湍动能就越大,从而使得掺混加强,均匀性有所改善。

### 3.4 燃烧性能分析

用特征速度效率来描述燃烧的完善程度。实际特征速度由下式计算<sup>[6]</sup>:

$$C^* = \mu_c \sigma_c \frac{P_c \cdot A_t}{\dot{m}}$$

式中:  $\mu_c$  为喉部流量系数;  $\sigma_c$  为喷管收敛段总压恢复系数;  $\dot{m}$  为推进剂(即燃气)流量。

喉部流量系数  $\mu_c$  采用试验值相关曲线<sup>[7]</sup>来读取,取  $\mu_c = 0.98$ ,对本试验件,喷管收敛段总压恢复系数  $\sigma_c$  为 0.98。

图4是0-0产品试验的特征速度效率、燃烧室压力、混合比和燃气平均停留时间随时间的变化曲线。

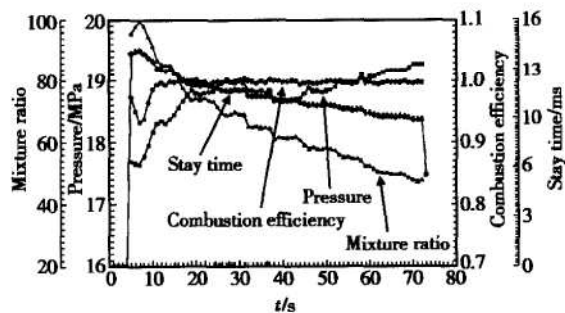


Fig.4 Parameter variation of 0-0 tester

从试验数据可以看出,富氧预燃室的特征速度效率接近1.0,即使混合比高达100,反应温度很低时也是如此。回顾低压缩尺试验,其特征速度效率仅70%~90%,其根本原因在于燃气平均停留时间过短。高压压缩尺试验的燃气平均停留时间为9ms~13ms(全尺寸预燃室各工况下的停留时间也基本是这个范围),而低压缩尺试验由于加工原因,使试验在短的燃烧室情况下进行,其停留时间仅为5ms左右。由此可见,采用具有二次喷注孔、带一定缩进长度的双组元离心式喷注单元时,高富氧预燃室的燃气平均停留时间应设计为10ms左右。

### 3.5 稳定性分析

试验测得了试验件燃烧室和氧化剂腔的脉动压力,两者的脉动频率相同。试验中出现了高频和低频

振动,其中,高频为一阶纵向声振,且幅值很低,为正常现象,它和试验件结构相关,并不反应全尺寸预燃室的声振特点,故对高频不稳定不作分析。

0-0的试验中,混合比大于90时,51.7Hz低频,最大振幅16.3%;混合比减小至85时,57Hz低频,振幅3%;混合比再减小,低频消失,但出现400Hz~410Hz的高频,振幅由2.4%下降至1.0%。0-0A整个试验过程中,均没有出现低频振动,但一直有340Hz左右高频,幅值不大于2%。0-0B整个试验过程中,均有低频存在,频率为52.6Hz(13s前)~56.6Hz,振

幅由开始的19.5%从10s以后下降至13.2%。0-0C整个试验过程中,均有低频存在,频率为40.3Hz(7s时)~38Hz,振幅由开始的30.9%从8s以后下降至10.5%(13s)、7.3%(13s时)和2.5%(31s后)。0-0A-J1整个过程中均没有低频振动,但有高频,6s时频率310Hz,幅值为2.4%,10s时频率316Hz,幅值2%;以后频率约340Hz,幅值2%逐渐下降至1%。0-0C-J1整个试验过程中,均有低频存在,频率为37.6Hz(20s前)~45Hz,振幅由开始的33.9%从10s以后逐渐下降至4.2%。表3是高压缩尺试验振荡情况。

Table 3 Instability survey of high-pressure subscale test

| Test No.       | Time/s | $k_m$ | Mixture ratio in retractive chamber | $\Delta p_t/\text{MPa}$ | $\Delta p_o/\text{MPa}$ | Frequency/Hz | Amplitude/% |
|----------------|--------|-------|-------------------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------|-------------|
| 1<br>(0-0B)    | 10     | 81.12 | 22.91                               | 0.552                   | 1.833                   | 52.6         | 19.5        |
|                | 20     | 72.63 | 20.51                               | 0.570                   | 1.650                   | 56.6         | 13.2        |
|                | 30     | 72.15 | 20.37                               | 0.624                   | 1.680                   | 55.6         | 13.6        |
|                | 40     | 71.74 | 20.26                               | 0.653                   | 1.915                   | 55.6         | 13.5        |
| 2<br>(0-0C-J1) | 9      | 81.71 | 25.46                               | 0.280                   | 0.819                   | 37.6         | 33.9        |
|                | 10     | 72.88 | 22.71                               | 0.324                   | 1.047                   | 37.5         | 31.4        |
|                | 11     | 91.23 | 28.43                               | 0.179                   | 0.874                   | 37.5         | 14.1        |
|                | 16     | 82.83 | 25.81                               | 0.172                   | 0.872                   | 37.5         | 8.8         |
|                | 20     | 78.06 | 24.33                               | 0.181                   | 0.746                   | 37.9         | 5.10        |
| 3<br>(0-0C)    | 50     | 78.39 | 24.43                               | 0.179                   | 0.591                   | 44.0         | 4.17        |
|                | 7      | 70.43 | 20.07                               | 0.383                   | 1.104                   | 40.3         | 30.9        |
|                | 13     | 87.67 | 24.98                               | 0.190                   | 0.807                   | 38.8         | 10.5        |
|                | 20     | 77.34 | 22.04                               | 0.206                   | 0.772                   | 37.7         | 5.6         |
|                | 27     | 72.73 | 20.72                               | 0.217                   | 0.686                   | 37.7         | 2.5         |
| 4<br>(0-0A-J1) | 50     | 61.64 | 17.56                               | 0.246                   | 0.496                   | 37.7         | 2.5         |
|                | 6      | 64.78 | 19.52                               | 1.699                   | 2.613                   | 310          | 2.4         |
|                | 10     | 63.50 | 19.14                               | 1.810                   | 2.600                   | 316          | 2.0         |
|                | 17     | 59.80 | 18.02                               | 1.977                   | 2.486                   | 333          | 2.3         |
|                | 24     | 56.85 | 17.13                               | 2.107                   | 2.373                   | 350          | 2.0         |
|                | 32     | 53.29 | 16.06                               | 2.290                   | 2.325                   | 333          | 2.0         |
| 5<br>(0-0A)    | 52     | 51.61 | 15.55                               | 2.327                   | 2.198                   | 350          | 1.0         |
| 6<br>(0-0)     | 5.1    | 59.15 | 16.56                               | 2.006                   | 2.936                   | 346          | 1.5         |
|                | 6.5    | 98.60 | 29.95                               | 0.683                   | 2.834                   | 51.7         | 16.3        |
|                | 13     | 85.19 | 25.88                               | 0.864                   | 2.466                   | 57           | 3.00        |
|                | 22     | 74.05 | 22.49                               | 1.033                   | 2.208                   | 409          | 2.40        |
|                | 35     | 64.73 | 19.66                               | 1.165                   | 1.960                   | 400          | 1.60        |
|                | 71     | 47.51 | 14.43                               | 1.642                   | 1.608                   | 400          | 1.00        |

试验表明,高压缩尺试验中的低频不稳定与预燃室混合比(缩进室混合比)有极大的关系。从理论分析可知,在正常工作时,缩进室的混合比为15,此时煤油液滴在内喷嘴出口处即开始燃烧,在缩进室出口处能形成稳定的火焰,预燃室工作稳定。当缩进室混合比提高时,反应温度降低,煤油液滴着火需要的时间加长,着火点向后推移;当缩进室混合比高于某一个值时,着火点推移至缩进室出口处,由于二次喷注的影响,此时的火焰不稳定,即着火点不能固定于缩进室出口附近,而是一会儿往内缩进,一会儿往后延伸,表现为低频不稳定。从试验曲线中可以明显看出

混合比对低频振荡的影响:试验启动时的混合比为99(缩进室混合比为30.07),此时存在幅值较大的低频振荡,随混合比的降低,低频振荡幅值也降低,当混合比降低至80.3(缩进室混合比为24.39)时,低频振荡消失。

每次试验由于试验件结构和试验工况不同,低频不稳定情况也有所差异(见表3),如No.4和No.5次试验全程稳定(其混合比变化范围落在稳定区域),No.1, No.2和No.3次试验全程低频不稳定。对同一个试验件而言,低频不稳定随混合比的变化趋势是一样的。



矩形二次喷注孔方案 No.5(试验件为 0-0A)次试验的总混合比低于 60(对应缩进室混合比低于 16.79),燃料喷注压降大于 1.76MPa,整个试验过程稳定;No.1(试验件为 0-0B)次试验的喷注压降相当于某型号发动机预燃室的喷注压降,其全程低频振荡不受喷注压降的影响,完全是高混合比的作用结果,且其低频振荡的幅值较高,大于 13.2%;No.3(试验件为 0-0C)次试验的总混合比范围为 91~62(对应缩进室混合比为 25.93~17.66),在总混合比为 91~77(对应缩进室混合比为 25.93~21.94)时也有幅值不低于 5.6%的低频振荡,整个试验过程中的燃料喷注压降均很低(约为 0.217MPa),而当总混合比低于 71(对应缩进室混合比低于 20.23)时,其低频振荡幅值下降至 2.5%以下,且一直保持稳定(此时,燃料喷注压降为 0.217MPa 也基本上稳定)。No.3 次试验的前半部分时间内(27s 前)总混合比大于 72.73(对应缩进室混合比大于 20.72),此段时间内影响低频振荡的主要因素是混合比,时间大于 27s 后,混合比为 72.73~62(对应缩进室混合比为 20.72~17.66),此时影响低频振荡的主要因素是燃料喷注压降。

对矩形二次喷注孔方案而言,在一定的喷注压降条件下(喷注压降对低频振荡的影响范围没有得到,但过低的喷注压降也会引起低频振荡),缩进室混合比小于 20 时不会引起低频振荡。

对三个圆形二次喷注孔方案,0-0A-J1 试验全程稳定,其总混合比为 65~51(对应缩进室混合比为 19.59~15.37),燃料喷注压降为 1.66MPa~2.27MPa。0-0 的试验工况变化范围较大,总混合比从启动时的 99 变化至关机时的 47.5(对应缩进室混合比为 30.07~14.43),且开始时由于混合比很大,产生了低频振荡,当总混合比降低至 80.32 时(对应的燃料喷注压降为 0.932MPa,缩进室混合比为 24.40),低频振荡消失。0-0C-J1 的试验全程总混合比为 98~78.06(对应缩进室混合比为 30.54~24.33),且燃料喷注压降很低,为 0.27MPa~0.16MPa,高的混合比和低的喷注压降共同对其全程低频振荡产生影响,并且 30s 后主要是喷注压降的影响(39s 后的振荡幅值较低且恒定)。

对圆形二次喷注孔方案,在一定的喷注压降条件下,缩进室混合比小于 24 时不会引起低频振荡。

圆形二次喷注孔方案的稳定性范围  $K_{m,j} < 24$  ( $K_{m,j}$  为缩进室混合比)比矩形二次喷注孔方案的稳定性范围  $K_{m,j} < 20$  稍微宽一些,其原因是圆孔在出

口处几乎没有雾化,而矩形孔在出口处由于尖角效应而有部分雾化,这种雾化不利于缩进室高混合比时(如 20~24 范围的高混合比)已推移至缩进室出口处的火焰的稳定。

## 4 结 论

(1)在富氧预燃室中,采用带缩进长度和二次喷注的喷注单元可以很好地解决高混合比条件下的稳定燃烧问题;

(2)当燃气平均停留时间不低于 9ms~10ms 时,富氧预燃室的燃烧效率接近 1.0;

(3)本次缩尺试验最好的温度均匀性为  $\leq \pm 50^\circ\text{C}$ ;

(4)缩进室的混合比直接影响预燃室的工作稳定性,此值过高,将产生低频振荡。在本试验条件下,矩形和圆形二次喷注方案的缩进室混合比小于 20 和 24 时,可以避免产生低频振荡;

(5)全尺寸预燃室缩进室混合比取为 12 至 19.1,可以确保全尺寸预燃室在各工况下的稳定工作。本次试验的最低缩进室混合比为 13.57,故对缩进室混合比为 12 的潜在危险(有可能烧蚀缩进室出口处)有待进一步的试验。

## 参考文献:

- [1] 冯喜平,何洪庆,葛李虎. 预燃室三维湍流和燃烧过程的数值模拟(I)计算模型和方法[J]. 推进技术,2002,23(2).
- [2] 冯喜平,何洪庆,葛李虎. 预燃室三维湍流和燃烧过程的数值模拟(II)数值模拟结果及分析[J]. 推进技术,2002,23(3).
- [3] 吴宝元,张民庆. 具有二次喷注孔带缩进长度离心式喷注单元流量特性的试验研究[J]. 推进技术,1996,17(5).
- [4] 吴宝元,张民庆. 液氧/煤油富氧预燃室的理论分析和实验研究[J]. 推进技术,1999,20(5).
- [5] 葛明龙. 离心式喷嘴理论的综述及改进[J]. 火箭推进,1975,(1).
- [6] 阿列玛索夫 B. E,等著. 火箭发动机原理[M]. 北京:宇航出版社,1993.
- [7] 宫岛博,等. 小型液氧/液氢高膨胀比燃烧室试验(1)[J]. 火箭推进,1993(3).

(编辑:梅 瑛)