

三组元喷嘴混合特性的试验研究*

沈赤兵 姜春林 童荣瑜 周进 王振国

(国防科技大学航天技术系 长沙 410073)

摘要 本文对四种类型的气氢/液氧/煤油三组元喷嘴进行了混合特性试验,研究了内喷嘴的缩进长度对同轴离心外混式喷嘴混合特性的影响,对比了相同的三组元工况下各喷嘴的混合特性,分析了喷嘴结构对混合特性的影响,进行了单喷嘴和三喷嘴的混合特性试验,试验结果表明:在相同的三组元工况下,同轴直流式喷嘴的流强分布跨度比同轴离心式喷嘴小。所得结论对三组元喷嘴和气液同轴式喷嘴的优化设计有参考价值。

关键词 三组元喷嘴,混合特性,冷流试验,液体火箭发动机,流强分布

分类号 V434

Experimental Investigation on Mixing Characteristics of Tripropellant Injectors

Shen Chibing Jiang Chunlin Tong Rongyu Zhou Jin Wang Zhenguo

(Department of Aerospace Technology, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract Four types of $\text{GH}_2/\text{LO}_2/\text{RP-1}$ tripropellant injectors are employed to present the mixing characteristics test in this paper. The effects of the internal injector's recess on the mixing characteristics of the swirl coaxial injector with separate fuel injection are studied. The mixing characteristics of each injector are compared with those of the others in the same tripropellant operating condition. The effects of the injectors' configuration on the mixing characteristics are analyzed. The mixing characteristics tests of the single injector and three injectors are presented. The tests results show that the span of the mass flux distribution of the shear coaxial injector is smaller than that of the swirl coaxial injector in the same tripropellant operating condition. The conclusions reached in this paper provide a reference for the optimization design of the tripropellant injectors and the gas/liquid coaxial injectors.

Key words tripropellant injector, mixing characteristics, cold flow test, liquid rocket engine, mass flux distribution.

三组元火箭发动机又称双燃料火箭发动机。用氢和烃作为两种燃料组元,液氧作为氧化剂。在地面起飞时三组元发动机能提供大推力,同时将三组元通过喷注器喷入推力室组织燃烧,可以获得很高的密度比冲,而在火箭飞到一定高度后,转入双组元工况,发动机在液氢液氧两组元降低推力而具有高比冲的工况下工作,火箭要求的两种工况由一种三组元发动机来完成,如果把这样的三组元双工况高性能的发动机用作单级入轨运载器的动力装置,这是最理想的动力装置方案之一。中、美、俄、日、德等国均在三组元火箭发动机领域作了许多研究工作。三组元喷嘴是三组元火箭发动机的重要部件,喷嘴对燃烧室的燃烧效率、燃烧稳定性和火箭发动机的性能有重要作用,因此,开展三组元喷嘴的研究工作有重要的理论意义和工程应用价值。

1 冷流试验装置和试验方法

自行设计了四种类型的三组元喷嘴,各喷嘴的结构如图1~图4所示。喷嘴的中心是液氧喷嘴,分为直流式和离心式喷嘴。煤油和氢气分别由径向进入各自的环形通道,这两种燃料的混合方式分为内混式和外混式。为了实现在各种工况下,喷嘴都具有较好的雾化、混合和燃烧特性,四种喷嘴都采用

* 1998年10月15日收稿

第一作者:沈赤兵,男,1968年生,博士

了三组元同轴式喷嘴，其中，1号喷嘴为同轴离心外混式（其结构如图1所示），按照1号喷嘴的内喷嘴的缩进长度 L （如图1所示）的不同，将1号喷嘴分为3种型式，即1号、 \quad 、 \quad 型，其缩进长度 L 分别为 $Y+20$ 、 $Y+10$ 、 Y mm，其中， Y 为基准尺寸。2号喷嘴为同轴离心内混式（其结构如图2所示），3号喷嘴为同轴直流内混式（其结构如图3所示），4号喷嘴为同轴直流外混式（其结构如图4所示）。

全部试验是在常温常压下进行的，试验介质是空气和水，以空气模拟气氢，以水模拟液氧和煤油。整个冷试台系统由高压气源、气液贮箱、管路、阀门、流量计、压力表、喷嘴冷试头部及其夹具、两相探针、光栅分光光度计等组成。测量参数包括喷注压降、流量、喷雾流强分布、混合比分布等。

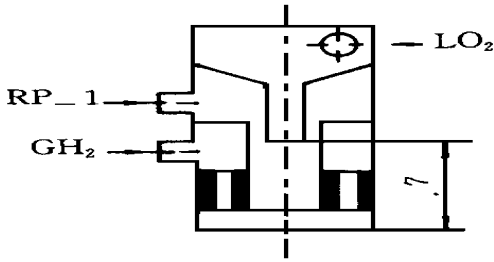


图1 1号喷嘴结构示意图

Fig. 1 Schematic of injector 1

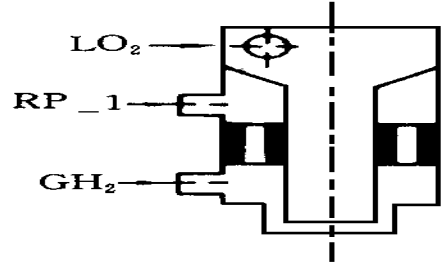


图2 2号喷嘴结构示意图

Fig. 2 Schematic of injector 2

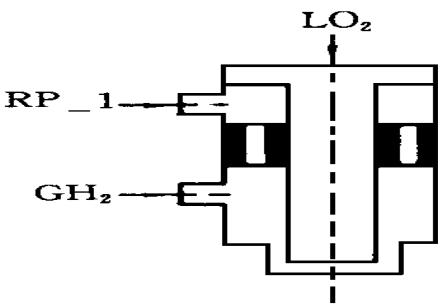


图3 3号喷嘴结构示意图

Fig. 3 Schematic of injector 3

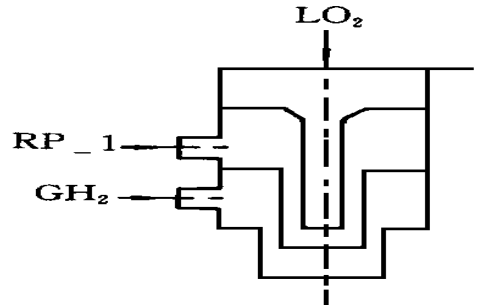


图4 4号喷嘴结构示意图

Fig. 4 Schematic of injector 4

流强及混合比分布特性试验的目的是测量沿喷注器轴线下游各横截面上的流强分布和混合比分布，这些分布是否合理，将会对三组元发动机燃烧室的燃烧效率以及燃烧过程的稳定性产生直接影响。三组元喷嘴是气液两相喷嘴，因此，采用两相探针和光栅分光光度计可同时测量三种模拟推进剂的流强及混合比，在试验前要标定光栅分光光度计的读数与品红浓度之间的对应关系，也要标定两相探针的气相测速修正系数 ξ_g 和液相流强非等速测量的修正系数 ξ_l 。具体的测量方法是：①将模拟煤油的介质（水）用碱性品红染成红色，用光栅分光光度计测出品红浓度的初值；②使三组元喷嘴或喷注单元工作在冷试的稳态工况下，在一定时间内通过两相探针及与之相连的U形管测量气相的总静压差，从而可求出气相流强；测出两相探针采集到的液体的质量，再用光栅分光光度计根据液体颜色的深浅测量出品红浓度，并且将品红浓度的当前值与初值对比以求出液氧和煤油的模拟介质之间的混合比，并求出液氧和煤油的模拟介质的流强。因此，可以求出液氧、煤油和氢气的模拟介质的流强分别占总流强的百分数。

为便于说明与分析试验结果，在下文中将液氧、煤油、气氢的模拟介质分别简称为介质1、介质2、气体，各物理量的下标1、2、g分别表示介质1、介质2、气体。

2 数据处理

用 U 形管测量总压、静压之差所形成的液柱高度 h (Hg mm), 密度则为常温常压环境下的 $\rho_{Hg} = 13550 \text{ kg/m}^3$, 则气相流强 Q_g 可根据下式计算:

$$Q_g = \frac{2\rho_0 \rho_{Hg} g h \xi_g}{\rho_{Hg}} \quad (1)$$

上式中, $\xi_g = 0.657$, 是由试验标定的两相探针测速修正系数^[1]。

试验时各喷嘴出口平面距离两相探针集液口平面的距离是 200mm。用秒表记录两相探针可启盖板的开启时间 t (s), 用天平将采集的液体称重得 m_L (kg), 两相探针的集液口径为 d , 此集液口的面积为 $A = \pi d^2/4$, 这样, 液相总流强为

$$Q_L = \frac{m_L}{t A \xi_L} \quad (2)$$

上式中, ξ_L 是由试验标定的液相流强非等速测量的修正系数^[1], $\xi_L = 0.9237$ 。

为了从液相总流强中分别计算出液氧和煤油模拟介质的流强, 在试验前需要做到

① 要标定光栅分光光度计, 也就是要得到光栅分光光度计的读数 N 与碱性品红溶液浓度 C 之间的对应关系, 结果是:

$$C = \begin{cases} 2.5062281 \times 10^{-7} N, & \text{当 } n < 57 \text{ 时;} \\ 4.74015 \times 10^{-7} N - 1.37845 \times 10^{-5}, & \text{当 } 57 \leq N < 240 \text{ 时;} \\ 1.15247 \times 10^{-6} N - 1.3807 \times 10^{-4}, & \text{当 } 240 \leq N < 480 \text{ 时.} \end{cases} \quad (3)$$

② 在煤油模拟介质的贮箱中加入碱性品红, 并测出该贮箱溶液的品红浓度 C_0 。

在试验过程中, 要测量采集液的品红浓度 C_1 , 这样, 可分别算出两相探针入口处的液氧、煤油模拟介质的流强 Q_1 、 Q_2 , 具体计算公式是:

$$Q_1 = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \frac{m_L}{A t \xi_L} \quad (4)$$

$$Q_2 = \frac{C_1}{C_0} \frac{m_L}{A t \xi_L} \quad (5)$$

根据上述各式的计算结果 Q_1 、 Q_2 、 Q_g , 可按下式算出各组元流强占总流强的百分数:

$$r_i = \frac{Q_i}{Q_1 + Q_2 + Q_g}, \quad i = 1, 2, g$$

3 试验结果及分析

3.1 单喷嘴混合特性试验结果及分析

对各喷嘴进行了流强及混合比沿径向分布特性的试验, 试验工况为: 喷注压降 $\Delta p_1 = 1 \text{ MPa}$, $\Delta p_2 = \Delta p_g = 0.8 \text{ MPa}$ 。图 5 ~ 图 8 中的 X 是两相探针集液口的轴线与喷嘴轴线之间的距离 (mm)。

图 5(a)、(b) 是 1 号型喷嘴的混合特性试验结果, 由图可知, 在试验工况下, 流强 Q_g 、 Q_1 、 Q_2 均呈双峰形分布, Q_1 、 Q_2 在喷嘴轴线附近等于 0, 相应的各组元流强占总流强的百分数 r_1 、 r_2 、 r_g 的分布表明: 在喷嘴轴线附近, r_g 为 1, r_g 的分布呈“W”形, 而在同一位置上, r_g 总大于 r_1 和 r_2 , r_1 、 r_2 的分布分别与 Q_1 、 Q_2 的分布相似, 在同一位置上, 总是 $r_1 > r_2$ 。这是因为: 介质 1、介质 2 在喷嘴内侧, 均以离心方式喷出, 而气体介质在喷嘴外侧, 从多个轴向直流孔中喷出后, 与锥形液膜撞击, 并迅速膨胀, 由于锥形液膜的中心及其附近是空心的, 因此, Q_1 、 Q_2 的流强分布曲线上出现了两个峰值, 而 Q_g 在喷嘴轴线附近并不为 0。

1 号型喷嘴的流强分布试验结果分别如图 6、图 7 所示。由图 5、图 6、图 7 可见, 在三组元工况下, 1 号型喷嘴的各组元流强分布形状分别与 1 号型喷嘴类似, 1 号型喷嘴的流强分布跨度较大, 而 1 号型喷嘴的流强分布跨度较小, 这说明 1 号喷嘴的内喷嘴缩进长度 L 的增大将使喷嘴的流强分布跨度增大, 这是因为内喷嘴上的入口孔为离心孔, 较大的 L 增强了介质 1 的离心作用, 在相同的工况下, 使喷嘴下游同一平面上的喷雾流强分布跨度较大。

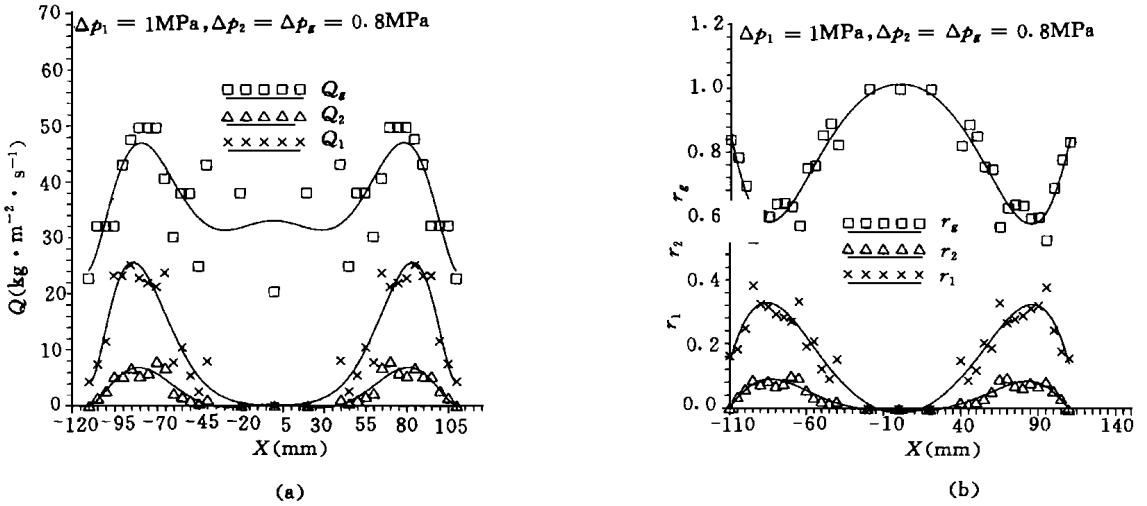


图5 三组元工况下的流强及混合比分布

Fig.5 The distribution of mass flux and mixture ratio at the tripropellant operating condition

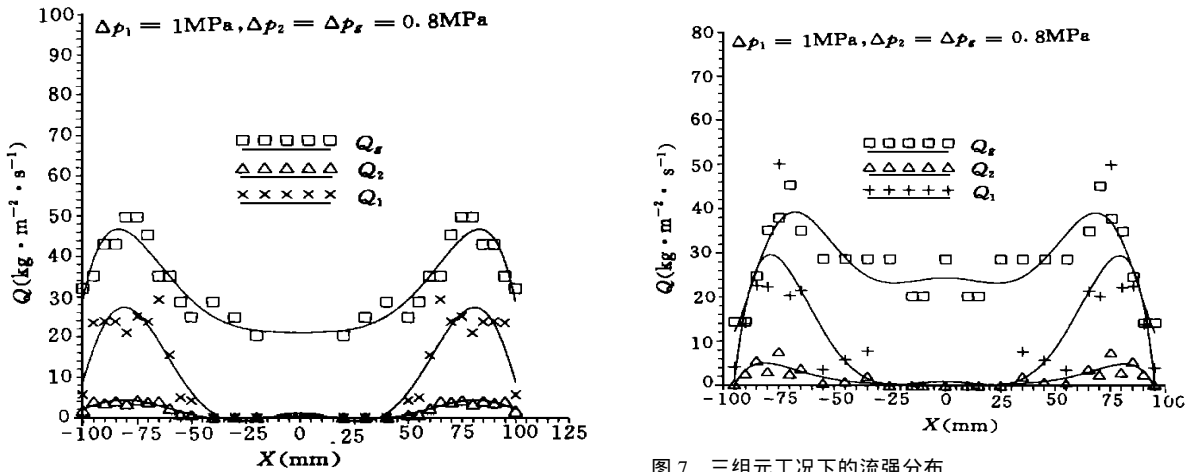


图6 三组元工况下的流强分布

Fig.6 The distribution of mass flux at the tripropellant operating condition

图7 三组元工况下的流强分布

Fig.7 The distribution of mass flux at the tripropellant operating condition

2号单喷嘴的混合特性试验结果如图8(a)、(b)

所示。由图可见，在三组元工况下， Q_g 、 Q_1 、 Q_2 均呈双峰形分布，但是，与1号喷嘴相比，2号喷嘴的 Q_2 的峰值很小，这是由于2号喷嘴的流量 m_g 对 m_2 有影响；与1号喷嘴相比，2号喷嘴的 Q_2 分布得更均匀，这是因为2号喷嘴的结构具有离心内混式的特点。在双组元工况下，气体从2号喷嘴中喷出时，已有一定的周向速度，并与锥形液膜混合，使得流强分布的跨度比相应的三组元工况时的大。

3号单喷嘴的混合特性试验结果表明：在三组元工况下， Q_1 、 Q_g 均呈轴对称单峰分布，且分布的跨度比1号、2号喷嘴小，这是因为气体、液体均从直流式喷嘴喷出，尤其是气流包围了液流，有沿轴向挤压液膜的趋势。在三组元工况时， Q_2 呈双峰分布，这主要是由于介质2与气体在内混腔充分混合了，从内喷嘴喷出的中心液流占据了轴线附近的区域，使得从内混腔喷出的液体只能沿外侧分布。

4号单喷嘴的混合特性试验结果表明：在三组元工况下， Q_1 、 Q_g 呈单峰分布，而 Q_2 呈双峰分布，且 Q_1 、 Q_2 、 Q_g 的分布跨度比1号、2号喷嘴小，这是因为，4号喷嘴是直流同轴式喷嘴，介质2同时受到外侧的气流和内侧的介质1的挤压。

3.2 三喷嘴混合特性试验结果及分析

进行了3个2号喷嘴组成的喷注单元的混合特性试验，从喷注器冷试头部的结构可知，3个喷嘴均

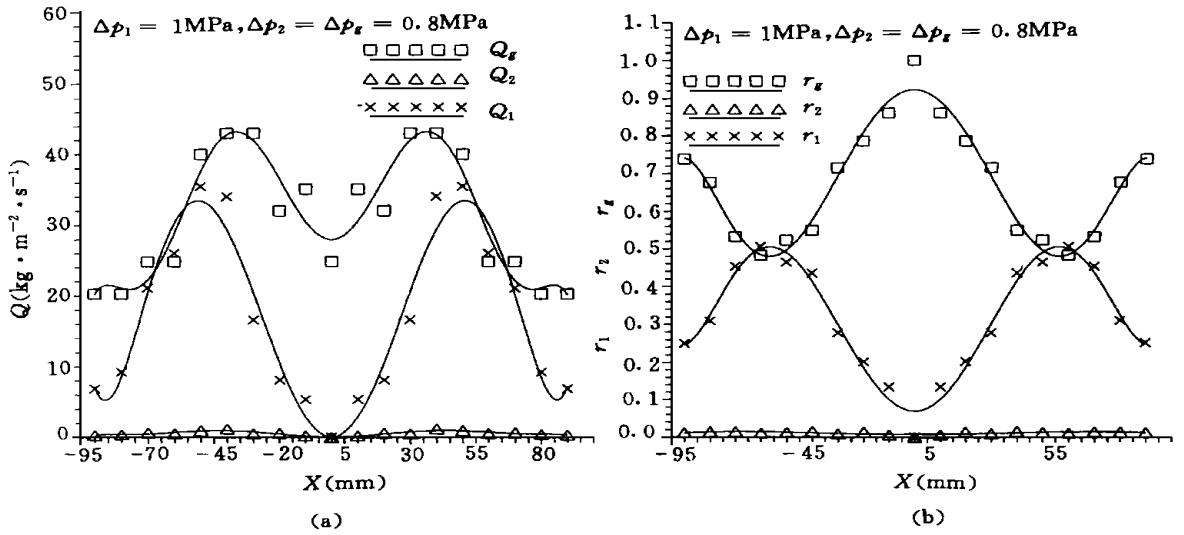


图8 三组元工况下的流强及混合比分布

Fig. 8 The distribution of mass flux and mixture ratio at the tripropellant operating condition

匀分布在同一个圆周上。试验中的三组元工况是: $\Delta p_1 = 0.2\text{MPa}$, $\Delta p_2 = 0.4\text{MPa}$, $\Delta p_g = 0.5\text{MPa}$, 试验结果如图9所示。图9中的 X_1 是两相探针集液口的轴线与喷嘴冷试头部轴线之间的距离 (mm)。从图9可知, 流强 Q_1 、 Q_2 均呈非轴对称的单峰分布, Q_g 呈非轴对称的多峰分布。还进行了双组元工况下的混合特性试验。上述三组元和双组元工况下的试验结果表明: 三个2号喷嘴在三组元工况和双组元工况下的混合比分布也呈非对称分布, 这种非对称分布是由于三个喷嘴的排列方式与两相探针的测量方向引起的。在双组元工况下的流强分布跨度大于三组元工况下的跨度, 这是由于在双组元工况下气体以离心方式喷出时与介质1液膜的作用大于三组元工况。

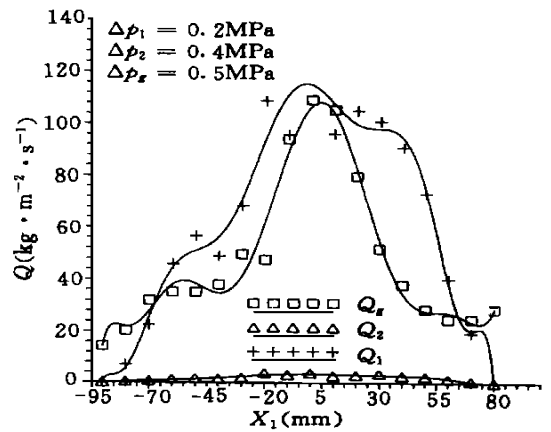


图9 三组元工况下三喷嘴的流强分布

Fig. 9 Mass flux distribution of three injectors at the tripropellant operating condition

4 结论

本文对自行设计的四种类型的三组元喷嘴进行了混合特性试验, 试验结果表明: 内喷嘴缩进长度 L 的增大将使1号喷嘴的流强分布跨度增大; 在相同的三组元工况下, 直流式喷嘴的分布跨度比离心式喷嘴小。由三个同轴离心内混式喷嘴组成的喷注单元的喷雾的流强及混合比分布是非对称的, 而同轴离心内混式单喷嘴形成的喷雾的流强及混合比分布是对称的; 用两相探针、光栅分光光度计分别测气相流强、不同组元的液相流强及混合比的空间分布, 能较好地反映三组元喷嘴的喷雾两相流场的规律。

致谢 国防科技大学航天技术系易新郁老师、陈晖工程师、李麦亮硕士、李清廉硕士均参加了本文的试验工作, 特此致谢!

参考文献

1 吴晋湘. 不同反压下大流量气液同轴式喷嘴雾化特性两相流场的试验和理论研究 [博士学位论文]. 长沙: 国防科技大学研究生院, 1993