

同轴双剪切气-气喷嘴试验研究*

杜正刚, 高玉闪, 李 茂, 汪小卫, 蔡国飙

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘 要: 为研究应用于全流量补燃循环发动机的新型结构气-气喷注器, 对以气氢和气氧为推进剂的同轴双剪切喷嘴进行试验研究, 分析喷嘴不同中心氢流量比例和流量变化对推进剂燃烧效率的影响。结果表明: 中心氢流量与外圈氢流量的比例是同轴双剪切喷嘴重要的设计参数。当中心氢流量比例为 0.3 至 0.4 之间时, 同轴双剪切喷嘴使推进剂高效燃烧; 在喷嘴流量相当于航天飞机主发动机单喷嘴 8 倍的工况下, 同轴双剪切喷嘴能使推进剂达到高的燃烧效率。

关键词: 流量; 喷嘴; 效率

中图分类号: V431

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2010) 02-0170-04

Experimental investigation on dual shear coaxial gas-gas injector

DU Zheng-gang GAO Yu-shan LIM aq WANG Xiao-wei CAI Guo-biao

(School of Astronautics, Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract In order to develop the new pattern gas-gas injector for full flow staged combustion cycle engine, experimental investigation was conducted on the dual shear coaxial injector in which the gaseous oxygen and hydrogen were used as propellants. The effects of the center hydrogen ratio as well as total mass flow rate of injector on combustion efficiency were analyzed. The results showed that the ratio of center hydrogen mass flow rate to the total hydrogen mass flow rate was a key parameter for dual shear coaxial injector. At the fraction between 0.3 and 0.4, the propellants combusted efficiently. High combustion efficiency can be obtained with this type of injector at the condition of large mass flow rate close to eight times as that of space shuttle main engine with single element injector.

Key words Mass flow rate; Injector; Efficiency

1 引 言

全流量补燃循环是下一代可重复使用动力循环方式之一, 气-气喷注器是全流量补燃循环发动机重要关键部件。气-气推进剂在燃烧室中没有雾化和蒸发, 而只有掺混与燃烧过程, 气-气推进剂的燃烧机理与气-液推进剂不完全相同。对气-气喷注器的研究主要集中在美国^[1], 宾州州立大学发展了光学仪器测量燃烧室内流场分布^[2]和使用数值模拟的方法对燃烧室流场进行数值模拟^[3]; 近年来, 对气-气喷嘴燃烧室热流的研究也逐渐被重视^[4], 国内对气-气喷注器的研究也取得一定进展^[5]。

研制大流量的气-气喷嘴有很高的实用性和可行

性^[6]。现代火箭发动机的研制过程中, 发动机的制造成本是研究人员关注的问题, 通过增大喷注单元的流量, 减少头部的喷注器数目是降低发动机制造成本的手段之一。日本在研制 LE-5B 和 LE-7A 发动机过程中, 都有通过减少喷嘴数目而降低发动机制造成本的计划^[7-8]。气-气推进剂的燃烧过程相对简单, 在增大单喷嘴流量情况下可能实现高的燃烧效率。

同轴双剪切喷嘴通过将推进剂以燃料-氧化剂-燃料的形式喷射入燃烧室, 形成两个燃烧面, 有能在大流量实现高燃烧效率的潜力。中心燃料流量和外圈燃料流量的分配比例是双剪切喷嘴独有的设计参数。

推进剂燃烧的特征速度能反映出推进剂的有用能量级以及喷注器的设计质量, 试验特征速度值与理

* 收稿日期: 2009-02-26 修订日期: 2009-05-12

作者简介: 杜正刚 (1980—), 男, 博士生, 研究领域为全流量补燃循环发动机技术。E-mail: dzg1980@sa.buaa.edu.cn

论特征速度值之比为推进剂燃烧的特征效率。特征效率是衡量推进剂燃烧最重要的参数。本文通过试验的方法,研究同轴双剪切喷嘴中心氢流量比例和总流量变化对推进剂特征效率的影响。

2 试验组件设计

本文试验组件设计以航天飞机主发动 (SSME) 喷注器喷注单元为参考。将 SSME 总流量除以喷注器数目,得到喷注单元流量;再进行压力换算,得到压力为 3 MPa 时喷注单元的流量。SSME 喷注器设计参数^[9]见表 1。

Table 1 Parameters of SSME inietor		
Chamber pressure/MPa	Mass flow rate/(kg/s)	Injector number
20.7	469	600

将 SSME 喷注单元高压下的流量换算到 3 MPa 喷注单元流量为 0.113 kg/s。由于气 - 气推进剂比气 - 液推进剂容易燃烧,本文以常温的气氢和气氧为推进剂,氢氧混合比为 6。对流量为 0.452 kg/s 至 0.904 kg/s 的同轴双剪切喷嘴开展试验研究。

本文选取的燃烧室特征长度为 800 mm,与 SSME 一致。选取燃烧室截面的流密与 SSME 相同,即:流量与燃烧室横截面面积之比与 SSME 喷注器在低压下的流密相同。气 - 气喷注器试验的燃烧室设计参数见表 2。

Table 2 Chamber design parameters of experiments			
Mass flow rate /(kg/s)	Chamber diameter /mm	Diameter of throat/mm	Mass flux /(kg/(s·m ²))
0.113	18.4	10.4	425
0.452	36.8	20.8	425
0.565	41.2	23.0	424
0.678	45.1	25.6	425
0.791	48.6	27.7	427
0.904	52.0	29.6	426

燃烧室设计压力为 3 MPa,燃烧室特征长度为 800 mm,燃烧室内径根据推进剂总流量而变化,圆柱段长度为 255 mm。试验时间为 3 秒,使用导热性能较好的紫铜作为燃烧室材料,喷注器使用不锈钢为材料。图 1 和图 2 分别是燃烧室设计简图和试验安装照片,在燃烧室前端设计有压力传感器安装孔;壁面设计有热电偶安装孔,能测量燃烧室的壁面温度。

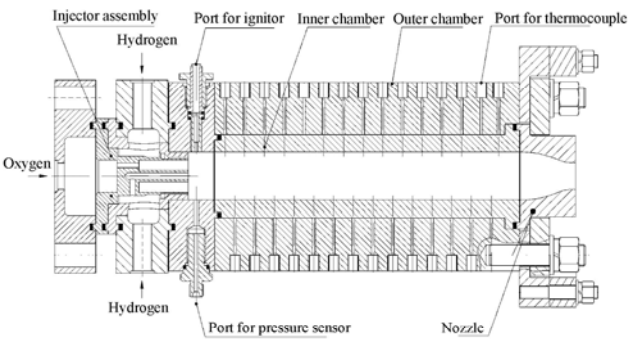


Fig. 1 Schematic map of combustor chamber

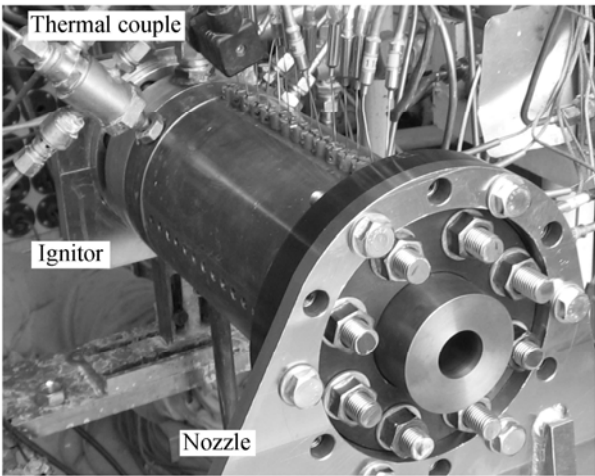


Fig. 2 Photograph of combustor chamber

如图 3 所示,同轴双剪切喷嘴设计采用 H-O-H 的喷注形式,即在中心的是氢射流,氧围绕在中心氢,最外圈是氢,使燃烧室壁面附近形成富燃区域,有利于燃烧室的热防护。本文同轴双剪切喷嘴设计中,氧在喷嘴出口处设计速度为 39.4 m/s 与典型液推进剂氧化剂出口速度相近^[10],氢出口速度与氧出口速度的比值为 9。喷嘴壁面厚度设计值为 1.5 mm。

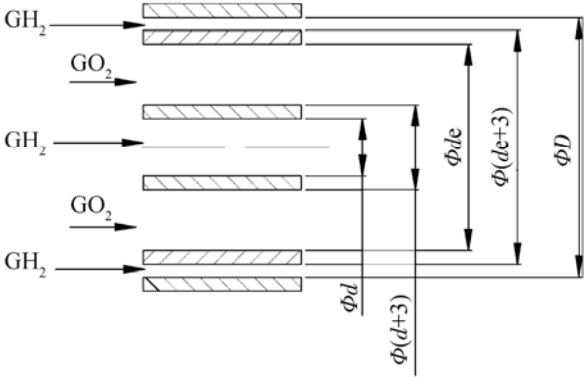


Fig. 3 Sketch of dual shear coaxial injector

喷嘴中心氢的流量与氢总流量比例是同轴双剪切喷嘴特有的设计参数,对中心氢流量合理的分配能充分发挥同轴双剪切喷嘴产生两个剪切燃烧面的作

用。本文对中心氢的流量比例的研究中,固定喷嘴总流量,通过改变中心氢通道和外圈氢环的面积比,开展中心氢流量对推进剂燃烧的影响;对喷嘴流量的研究中,设定中心氢流量的比例为氢气总流量的 30%,使喷嘴总流量由 0 452 kg/s 增加至 0 904 kg/s 研究喷嘴流量变化对推进剂特征效率影响。

同轴双剪切喷嘴使用不锈钢为材料,图 4 是同轴双剪切喷嘴设计三维图,同轴双剪切结构的中心氢由外圈氢通过 3 个径向孔引导至中心,3 个氢通道的面积为中心氢面积的 2 倍,以减少由外圈流向中心孔时的压力损失。通过确定中心氢通道面积与外圈氢通道的面积,实现对氢流量分配比例的控制。氧化剂头腔的氧通过 3 个线切割形成节流孔,将氧气引入氧喷嘴。节流孔使氧喷嘴在燃烧室头部形成一定压力,之后氧流通面积增大,使氧气在该位置流速降低,达到设计的速度值。氧喷嘴在出口前的节流段能使氧头腔与燃烧室形成一定压力差,有助于防止推进剂的不稳定燃烧。

图 5 是同轴双剪切喷嘴试验后的照片。试验后的喷嘴只是在出口处有变色,没有出现喷嘴烧蚀情况,说明同轴双剪切喷嘴有良好的热防护性能。

3 气 气喷嘴试验

使用声速喷嘴对推进剂的流量进行控制,通过调节声速喷嘴前压力使推进剂达到设计的流量。使用气动谐振点火器对推进剂进行点火,谐振点火器是利用气动谐振热效应产生的高温高能对谐振管加热,使其点燃富燃的氢氧混气,混气在点火室内形成一定压力,并喷入燃烧室点燃氢氧推进剂。

图 6 是对设计流量为 0 452 kg/s 的同轴双剪切喷嘴试验的压力曲线图。点火器工作时间为 1 秒,使

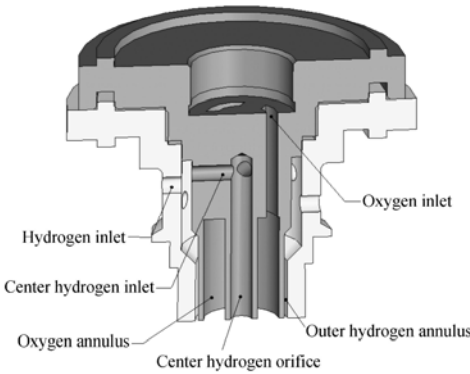


Fig. 4 Dual shear coaxial injector

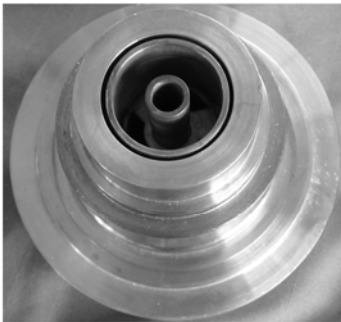


Fig. 5 Photograph of dual shear coaxial injector after experiment

点火器的室压建立;之后氢气进入燃烧室,第 4 秒时氧气进入燃烧室,推进剂在燃烧室发生化学反应,室压迅速上升。在氧气进入燃烧室 0 2 秒之后,点火器关闭,点火室压力下降,但点火室压力稍高于燃烧室压力。在第 7 2 秒关闭氧气阀门,试验结束,燃烧室压力迅速下降,氮气随之进入燃烧室,氢在第 9 5 秒的时候关闭,以便对燃烧室进行冷却。

试验过程中,喷嘴头腔的压力高于燃烧室压力,燃烧室和头腔压力曲线平稳,没有出现明显的压力波动。

4 试验结果分析

通过试验测量到的燃烧室压力、喷管喉部面积和推进剂流量,可计算出推进剂燃烧的实际特征速度,与热力计算得到的理论特征速度的比值为推进剂的特征效率。

本文将试验测量到的压力曲线进行平均处理,获得声速喷嘴前压力值和燃烧室压力值。表 3 是对设计流量为 0 452 kg/s 的喷嘴三次试验获得的声速喷嘴前压力、温度和换算的流量值。

Table 3 Experimental data for injector with designed mass flow rate 0 452 kg/s

Propellant	Upstream pressure of sonic throat /MPa	Temperature /℃	Mass flow rate /(kg/s)
Hydrogen	6 20	- 3	0 065 4
	6 18	- 2	0 065 1
	6 14	- 1 5	0 064 3
Oxygen	6 07	- 3 0	0 389 7
	6 01	- 0 6	0 385 5
	6 04	- 1 2	0 387 5

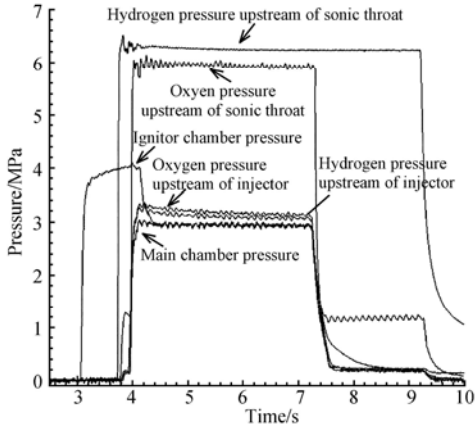


Fig. 6 Pressure curves of injector with mass flow rate 0 455 kg/s

表 4 是设计流量为 0.452 kg/s 的同轴双剪切喷嘴特征效率表。可见同轴双剪切喷嘴使推进剂的特征效率达到 96% 左右。

Table 4 Characteristic efficiencies of injector with designed mass flow rate 0.452 kg/s

Chamber pressure / MPa	Mass flow rate / (kg/s)	Mix ratio	Experimental characteristic velocity / (m/s)	Characteristic efficiency
2.98	0.455	5.96	2 224	0.962
2.95	0.451	5.92	2 223	0.96
2.96	0.452	6.03	2 225	0.965

图 7 是不同中心氢流量比例的试验结果。显示中心氢流量比例对推进剂的特征效率有重要影响,中心氢流量为氢总流量的 20% 时,推进剂特征效率约为 94%,外圈氢流量过大会导致推进剂不能完全燃烧;而中心氢流量为氢气总流量的 30% 至 40% 时,特征效率变化较小。说明中心氢流量变化影响推进剂的特征燃烧。图 8 是不同流量下,推进剂的特征效率图。

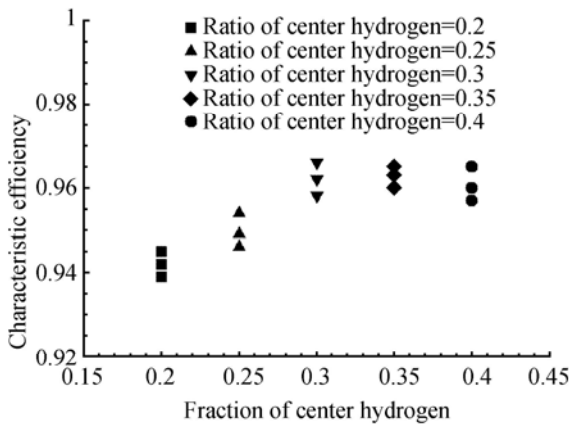


Fig. 7 Characteristic efficiencies of injector with different center hydrogen mass flow rate

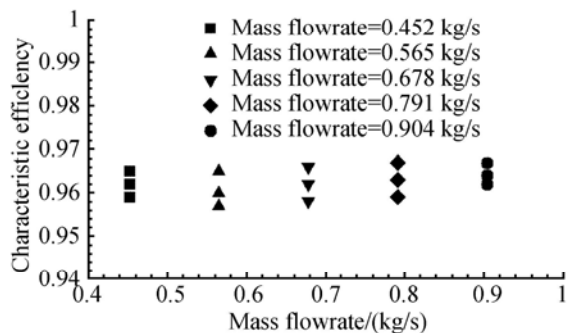


Fig. 8 Characteristic efficiencies of injector with different mass flow rate

大。在设计流量为 0.904 kg/s 的工况下,特征效率仍高于 96%。说明推进剂仍能实现较高的特征效率。

本文采用热沉式燃烧室可以不使用冷却系统,但燃烧室的吸热导致燃烧室压力有所下降,因而特征效率降低,低于 100%。但试验研究说明同轴双剪切喷嘴能在相当于 SSME 单喷嘴 8 倍流量的工况下实现较高的特征效率。

5 结 论

通过本文对以气氢和气氧为推进剂的同轴双剪切喷嘴开展试验研究,得出以下结论:

(1) 中心氢流量的分配比例是影响同轴双剪切喷嘴性能的重要参数,中心氢流量占氢总流量的比例为 0.3 至 0.4 之间时,同轴双剪切喷嘴能使推进剂高效燃烧。

(2) 同轴双剪切喷嘴使推进剂在相当于 SSME 单喷嘴 8 倍流量的工况下实现较高的燃烧效率。

参考文献:

[1] Fahngi S, Yu T, Rojas L, et al Gas-gas injector technology for full flow combustion cycle application [R]. AIAA 99-2757.

[2] Foust M J, Pal S, Santoro J Gaseous propellant rocket studies using raman spectroscopy [R]. AIAA 96-2766

[3] Sozer E, Vaidyanathan A, Shyy W. Computational assessment of gaseous reacting flows in single element injector [R]. AIAA 2009-449.

[4] Vaidyanathan A, Gustavson J, Segal C. Heat fluxes/OH PLIF measurements in a GO₂/GH₂ single-element shear injector [R]. AIAA 2007-5591.

[5] Cai guobiao, Du zhenggang Experimental investigation of gaseous hydrogen / gaseous oxygen shear coaxial injector [R]. AC-07-C4 3 05

[6] Fomet A, Lonchard J M, Thomas J L. Technological demonstration for low cost gas generator [R]. AIAA 2004-4006

[7] Yojiro Kakum a, Masaaki Yasui, Tadaoki Onga LE-5B engine development [R]. AIAA 2000-3775

[8] Yukio Fukushima, Hiroyuki Nakatuzi Development status of LE-7A engine [R]. AIAA 1997-2817.

[9] 杨 V, 安德松 W E. 液体火箭发动机燃烧不稳定性 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.

[10] 萨顿 G P, 比布拉兹 O. 火箭发动机基础 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.

可见随着喷嘴总流量的增大,特征效率变化不

(编辑: 梅 瑛)