

文章编号: 1000-8055(2007)03-0500-05

气-气喷注器流量特性实验研究

杜正刚¹, 金 平¹, 杨立军¹, 蔡国飙¹, 张蒙正²

(1. 北京航空航天大学, 宇航学院, 北京 100083;

2. 中国航天科技集团公司第十一研究所, 西安 710100)

摘 要: 对气-气喷注器的两种类型七种结构的喷嘴进行了带反压的流量特性试验, 选择其中一种结构的喷嘴展开在单路工作的流量特性试验, 重点考察进口压力和反压变化对喷嘴流量特性的影响和氧化剂喷嘴和燃料喷嘴的相互作用; 通过试验测量和对实验数据的拟合, 得到喷嘴流量系数的经验公式. 所得的结论对全流量补燃循环发动机气-气喷注器的优化设计有一定的指导意义.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 气-气喷注器; 流量特性; 反压; 全流量补燃循环

中图分类号: V431

文献标识码: A

Experimental investigation of flowrate characteristics of gas-gas injector

DU Zheng-gang¹, JIN Ping¹, YANG Li-jun¹, CAI Guo-biao¹,
ZHANG Meng-zheng²

(1. School of Astronautics,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

2. The 11th Research Institute of CASC, Xi'an 710100, China)

Abstract: Seven types of gas-gas injectors involving two patterns were employed to conduct the flowrate characteristics tests at different back pressure conditions. An investigation on flowrate characteristics of one type of injectors was made at single propellant injection. The effects of inlet pressure of injector and back pressure as well as interaction between oxidizer injector and fuel injector on flowrate characteristics were investigated. Through the experimental measurements and fitting a mathematical expression, the formula of discharge coefficient was given. The results presented in this paper may provide valuable reference for the optimization design of the gas-gas injector for full flow staged combustion cycle engine.

Key words: aerospace propulsion system; gas-gas injector; flowrate characteristics; back pressure; full flow staged combustion cycle

全流量补燃循环(FFSC)发动机是 21 世纪可重复使用航天器的候选动力装置之一. 全流量独特的循环方式决定其推进剂以气态进入主燃烧室, 因而气-气喷注器成为全流量补燃循环发动机

的关键部件之一. 气-气喷注器的流量系数影响喷入主燃烧室的推进剂流量, 进而影响燃烧室的混合比与燃烧过程, 从而对火箭发动机的性能产生重要作用. 因此展开对气-气喷注器流量特性的研

收稿日期: 2006-03-16; 修订日期: 2006-07-10

作者简介: 杜正刚(1980-), 男, 贵州黄平人, 北京航空航天大学宇航学院博士生, dzg1980@sa.buaa.edu.cn.

究有重要的理论意义和工程应用价值。

喷嘴的流量特性是指在一定反压条件下,喷嘴压降与流量的关系. 流量特性试验是通过试验的手段测量喷嘴的进口压力、反压和喷嘴流量,通过流量公式确定喷嘴的流量系数。

国外在 20 世纪 70 年代就展开对气-气喷嘴的冷流实验研究^[1],但大多沿用以往的同轴离心式^[2]、同轴剪切式^[3]或撞击式等喷注器,且多集中于对气-气推进剂掺混机理与燃烧性能的研究. 研究表明这三种结构的喷嘴均能实现推进剂均匀的掺混与稳定的燃烧,但上述喷嘴也有其自身的缺点:同轴离心式喷嘴和撞击式喷嘴尾部热载荷难以控制,同轴剪切式喷嘴制造成本较高^[4]. 国内曾广泛开展了对液-液喷嘴和气-液喷嘴的流量特性的研究,研究对象有同轴直流喷嘴^[5]、同轴离心喷嘴和三组元喷嘴^[6]等,且主要研究在常压下,喷嘴结构形式或喷嘴关键尺寸变化对喷嘴流量特性的影响。

本文综合考虑各种喷嘴的特点和气-气推进剂在燃烧室掺混的特性,设计了两种新型结构的喷嘴. 由于喷嘴在反压状况下的流量特性更能揭示喷嘴在发动机中工作的真实情况,本文开展了喷嘴在反压下的流量特性实验,以研究氧化剂路喷嘴和燃料路喷嘴的相互作用,并对影响喷嘴流量系数的参数进行数值拟合,此外还研究了喷嘴结构对喷嘴流阻损失的影响。

1 冷流实验装置和实验方法

自行设计了两种类型七种结构的喷嘴,根据燃料喷嘴出口型面的不同分为两类:环孔式,中心为氧化剂喷孔,均布环绕氧化剂喷孔的小孔为燃料喷孔;环缝式,中心为氧化剂喷孔,燃料通过环绕氧化剂喷孔的缝隙喷射. 各喷嘴的结构如图 1、图 2 和表 1 所示,共有 7 种喷嘴。

表 1 七种喷嘴的结构

Table 1 Configurations of seven injectors

喷嘴名称	结构形式
4-45	环孔式,四孔,45 夹角
6-30	环孔式,六孔,30 夹角
6-45	环孔式,六孔,45 夹角
6-60	环孔式,六孔,60 夹角
8-45	环孔式,八孔,45 夹角
直缝式	同轴剪切式
斜缝式	斜缝,倾斜角 30°

全部实验是在反压下进行的,试验的介质是压缩空气,分别模拟富氧燃气和富燃燃气. 整个实验台系统由高压气源、管路、阀门、气体质量流量计、压力传感器、过滤器、反压舱等组成,实验系统原理图见图 3. 测量的参数包括喷嘴进口压力、反压和气体流量。

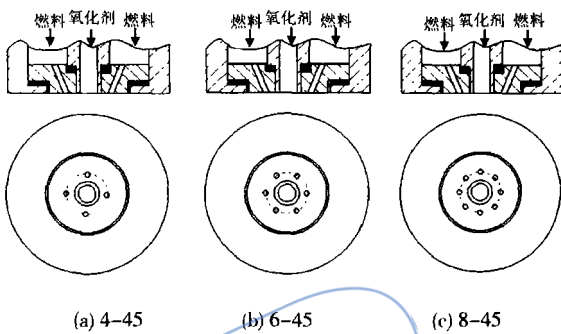


图 1 环孔式喷嘴示意图

Fig. 1 Sketch of orifice-rounded injectors

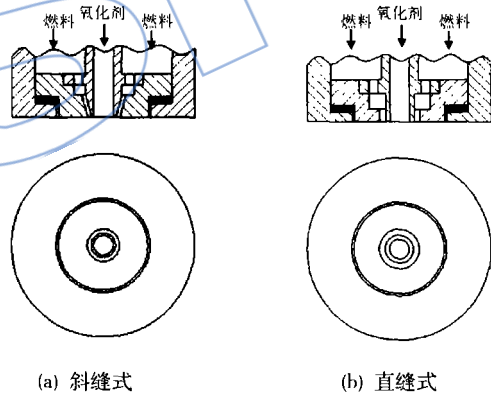


图 2 环缝式喷嘴示意图

Fig. 2 Sketch of gap-rounded injectors

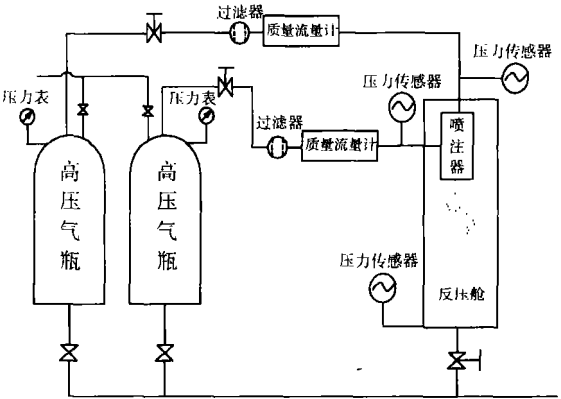


图 3 实验系统原理图

Fig. 3 Sketch of test system

2 流量公式

在计算以空气为模拟介质的喷嘴流量系数时,假定空气为理想气体,认为气流与外界没有热交换;忽略气流流过喷嘴时的能量损失,因而可将喷嘴中的流动视为等熵流动.考虑到实际气体流动过程中的各种流阻损失,引入流量系数 C_d . 流量系数 C_d 是一个试验系数,就是实际测量的气体流量与理论流量之比^[5].

设喷嘴的反压 p_b 与进口压力 p_i 之比为: $\sigma = \frac{p_b}{p_i}$, 气体流量最大时的压力比就是临界压力比: $\sigma = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$, 对于空气, 比热比 $k = 1.4$, 气体常数 $R = 287.1 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, $\sigma_c = 0.5283$.

在亚临界状态下, $\sigma < \sigma_c$, 气-气喷嘴流量按下式计算:

$$Q = \frac{C_d p_i A}{\sqrt{R T_i}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{p_b}{p_i} \right)^{2/k} - \left(\frac{p_b}{p_i} \right)^{(k+1)/k} \right]} \quad (1)$$

在超临界状态下, $\sigma < \sigma_c$, 气-气喷嘴流量按下式计算:

$$Q = C_d p_i A_t \sqrt{\frac{k}{R T_i} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (2)$$

其中 Q 指气体介质流量; p_b 指反压; p_i 指气体总压, 当忽略气体在入口处的动压时, p_i 等于气体在喷嘴入口处的静压; T_i 指气体总温; A 和 A_t 分别指喷嘴的流通面积和喷嘴喉部面积.

利用流量公式处理获得的试验数据, 计算喷嘴的流量系数; 再对影响流量系数的因素进行分析, 研究喷嘴结构型式对喷嘴流量特性的影响.

3 实验结果及分析

由于试验条件的限制, 选取实验反压在 2 MPa 左右变化, 而氧化剂喷嘴流量和燃料喷嘴流量之比约为 6. 实验中观测质量流量计的显示仪表, 调节介质流量, 通过压力传感器测量并记录喷嘴的进口压力 p_i 和反压舱压力 p_b . 先开展单路工作状况下喷嘴流量特性实验研究, 即氧化剂路工作时关闭燃料路, 燃料路工作时关闭氧化剂路. 为观测氧化剂路和燃料路的相互影响, 对所设计的 7 个喷嘴在双路工作的状态下, 进行不同反压的双路流量特性实验.

3.1 喷嘴单路工作的流量特性

图 4 是 6-45 喷嘴氧化剂和燃料单路工作流

量特性曲线, 全部实验是在亚临界状态下完成.

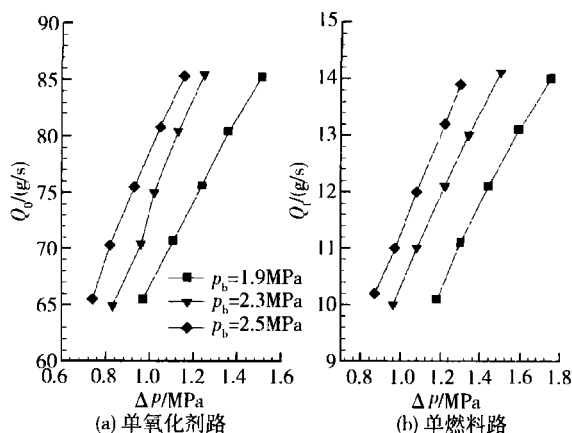


图 4 6-45 喷嘴单路工作流量特性

Fig. 4 Single element flowrate characteristics

of 6-45 injector

从图中可以看出, 在反压(反压舱压力 p_b) 相同条件下, 各喷嘴的气体流量随喷嘴压降 Δp 的增大而增加. 这是由于压降 Δp 增大, 使喷嘴的入口总压和介质的流量函数值变大^[7], 因而喷嘴的流量变大. 这种现象与流量公式(1)揭示的规律完全吻合.

3.2 氧化剂喷嘴和燃料喷嘴同时工作的流量特性

图 5 是 6-45 喷嘴氧化剂和燃料双路工作流量特性曲线. 通过图 4 和图 5 的比较, 从中可以看出: 6-45 燃料喷嘴单路工作时流量特性曲线的较好, 在不同的反压状态下, 喷嘴的流量随着压降的变化而有规律地增长; 图 5 中的 6-45 燃料喷嘴的流量特性曲线出现不规则的增长规律, 实验测量到的燃料喷嘴进口压力偏离理论值. 从这里可以看出, 当氧化剂路和燃料路同时工作时, 大流量的氧化剂路对小流量的燃料路产生影响, 使燃料喷嘴的进口压力偏离设计的压力值. 作者认为产生这种影响的原因是: 气体经喷嘴喷射入反压舱后迅速膨胀, 在撞击点附近形成不稳定的局部高压区, 在流量一定的情况下, 喷嘴进口压力会偏离设计值, 由于燃料路流量小且分为 6 股气流, 因而燃料喷嘴受影响的程度较大. 氧化剂喷嘴是单股喷入且流量较大, 因而受影响的程度较小. 此外气源的不稳定会对喷嘴的流量特性曲线产生一定影响. 其它环孔式和环缝式的燃料喷嘴在双路工作时也有类似的现象产生.

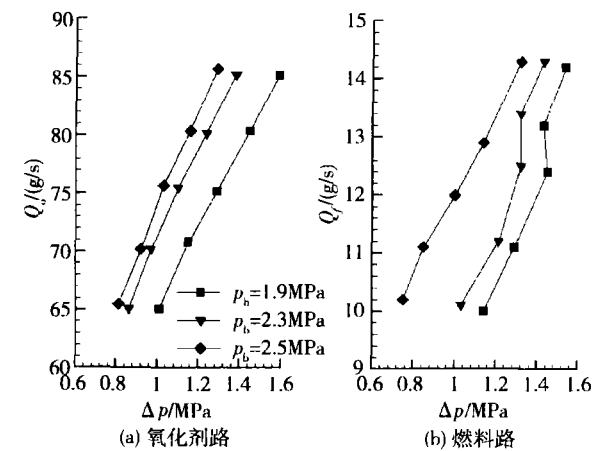


图 5 6-45 喷嘴双路工作流量特性

Fig.5 Flowrate characteristics of 6-45 injector double element working

3.3 流量系数的拟合

一般认为,造成喷嘴中气流损失的因素有:喷嘴的几何尺寸和气流的流动状态;本文选取喷嘴中气流的雷诺数 Re 和压力比 $\frac{p_b}{p_i}$ (喷嘴出口压力与进口压力之比) 为参数,选用最小二乘法^[8] 分别对环孔和环缝两种类型的喷嘴流量系数进行拟合,得到喷嘴流量系数的经验公式,拟合的公式形式如下:

$$C_d = a_0 Re^{a_1} (\frac{p_b}{p_i})^{a_2} \tag{3}$$

氧化剂喷嘴: $1.5 \times 10^6 \leq Re \leq 2.0 \times 10^6$
燃料喷嘴: $2.0 \times 10^5 < Re < 3.0 \times 10^5$
环孔和环缝式喷嘴的回归系数见表 2 和表 3.

表 2 环孔式喷嘴回归系数表

Table 2 Orifice-rounded injector coefficients

喷嘴	a_0	a_1	a_2
氧化剂喷嘴	0.263	0.070	- 0.189
燃料喷嘴	0.890	- 0.022	- 0.172

表 3 环缝式喷嘴回归系数表

Table 3 Gap-rounded injector coefficients

喷嘴	a_0	a_1	a_2
氧化剂喷嘴	0.244	0.077	- 0.189
燃料喷嘴	2.74	- 0.151	- 0.244

将喷嘴的流动参数代回公式 (3) 得到拟合的喷嘴流量系数,与通过流量公式 (1) 计算的流量系

数相比较,氧喷嘴拟合值与实验值的最大误差在 3 % 以内,拟合的精度较高;燃料喷嘴的误差在 10 % 以内.产生这种现象的原因是:在本次拟合中还没有考虑燃料喷嘴的孔数和角度变化对流量系数的影响.

3.4 喷嘴结构变化对流量系数的影响

通过流量公式 (1) 计算喷嘴的流量系数 C_d , 可发现环孔式各个燃料喷嘴流量系数 C_d 相差不大,但是明显比环缝式喷嘴的流量系数 C_d 大,而且直缝式燃料喷嘴流量系数 C_d 比斜缝式燃料喷嘴的流量系数 C_d 大 10 % 左右.这种状况是由喷嘴的结构决定的.环孔式喷嘴的孔数和角度变化引起流量系数变化较小,但是在缝式燃料喷嘴中,气流首先要经过 6 个孔径相同的小孔后再进入环缝中,气流在小孔中流动会产生一定的损失,因而环缝式喷嘴流量系数 C_d 要比环孔式的小.与直缝式喷嘴相比较,斜缝喷嘴的倾斜角对流量系数产生影响.当介质进入斜缝时,进口处钝角边一侧流动情况较好,锐角边一侧的流线发生严重弯曲,在进口处产生一定的损失,使喷嘴的流量系数 C_d 变小.

3.5 超临界状况下喷嘴流量特性

图 6 是 6-30 喷嘴在超临界状况下氧化剂喷嘴和燃料喷嘴的流量特性曲线图.在超临界流动状态时,试验结果表现出喷嘴流量 (氧化剂流量 Q_o 或燃料流量 Q_f) 随进口压力 p_i 的增大而增大,反压 p_b 的大小不能影响喷嘴的流量,这是完全符合公式 (2) 所揭示的规律.

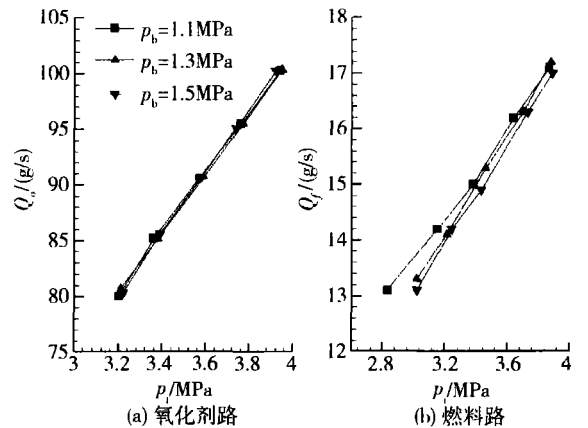


图 6 超临界 6-30 喷嘴
双路工作流量特性曲线

Fig.6 Flowrate characteristics on supersonic of 6-30 injector double element working

4 结 论

通过对以上两种类型的喷嘴流量试验可以看出:

(1) 喷嘴单路工作时,同一反压下介质流量随喷嘴压降 Δp 的增大而增加;

(2) 在亚临界状态下,同一结构形式喷嘴的氧化剂路对燃料路产生明显影响:使小流量的燃料路的入口压力偏离设计值,而燃料路对氧化剂路的影响较小;

(3) 在实验的基础上,给出了流量系数的拟合式. 研究喷嘴结构对流量系数的影响,结果表明:环孔式喷嘴的流量系数大于环缝式喷嘴的流量系数,直缝式喷嘴的流量系数大于斜缝式喷嘴的流量系数;

(4) 在超临界状况下,喷嘴流量只随进口压力变化,而与反压的大小无关,这与超临界流动的理论完全吻合.

参考文献:

[1] Nagai C K. Cold-flow optimization of gaseous oxygen/ gaseous hydrogen injector for the space shuttle APS thruster [R]. AIAA71-673.

[2] Smith Timothy D, Kelm Mark D, Breisacher Kevin J. Experimental evaluation of a subscale gaseous hydrogen/ gaseous oxygen coaxial rocket injector[R]. Glenn Research Center, Cleveland, Ohio NASA/ TM-2002-211982.

[3] Foust M J, Deshpande M, Pal S. Experimental and analytical characterization of a shear coaxial combustor GO2/ GH2 flowfield[R]. The Pennsylvania State University, University Park, PA AIAA 96-0646.

[4] Farhangi S, Yu T, Sprouse K. et al. Gas-gas injector technology for full flow combustion cycle application [R]. AIAA 99-2757.

[5] 孙纪国. 氢氧同轴式喷嘴流量特性试验和理论分析[J]. 航空动力学报, 2005, 20(4): 689-691.
SUN jiguo. Experimental investigation and analysis of coaxial injector discharge coefficient[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(4): 689-691.

[6] 李清廉, 田章福, 王振国. 模型三组元喷嘴流量特性实验[J]. 推进技术, 2002, 23(4): 268-272.
LI Qinglian, TIAN Zhangfu, WANG Zhenguo. Experimental study of import pass ways for model tripropellant injector[J]. Journal of Propulsion Technology, 2002, 23(4): 268-272.

[7] 潘锦珊. 气体动力学基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.

[8] 杨晓琼. 传热学-计算机辅助教学丛书[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1992.