

文章编号: 1000-8055(2000)03-0317-04

气液同轴直流式喷嘴喷雾及燃烧试验研究

孙纪国¹ 田昌义¹ 程圣清¹ 王 珏¹ 周 进² 王振国²

¹(北京丰源机械研究所, 北京 100076)
²(国防科技大学 航天技术系, 湖南 长沙 410073)

摘要: 介绍了气液同轴直流式喷嘴的冷流喷雾特性实验研究和热点火燃烧试验工作。冷态实验以空气和水作为模拟工质在亚临界条件下模拟燃气和液氧, 研究了气液喷嘴的雾化特性、流量特性和气液两相的相互影响。用液氧和高温燃气对多个喷注单元组成的喷注器在超临界压力下进行了燃烧试验。通过冷态和热态试验, 确定了 4 种喷嘴的性能优劣。

关 键 词: 喷嘴; 喷雾; 燃烧; 试验

中图分类号: V 431 **文献标识码:** A

1 引 言

喷注器的喷雾及其燃烧是液体火箭发动机最基本的过程, 也一直是主要研究课题之一。有关同轴式喷注器的非反应流和反应流研究在美国和欧洲已进行了较深入的研究工作^[1~8], 但对该类喷嘴的雾化机理、混合性能、气液相互作用以及反压的影响等重要特性还缺乏深入透彻的了解, 尚未形成可直接工程应用的喷嘴设计理论和方法。补燃发动机所用的气液同轴式喷嘴在我国尚无实践经验, 在设计全尺寸补燃燃烧装置之前, 进行喷嘴的预先试验研究是非常必要的。本文将介绍对 4 种气液同轴直流式喷注器进行的冷流喷雾特性实验研究和热点火燃烧性能试验工作, 并从宏观的测量参数比较四种同轴直流式喷嘴的性能。

2 喷嘴的冷态喷雾研究

对 4 种不同结构的同轴直流式喷嘴进行了冷流实验, 研究其冷态流量特性、混合特性和雾化特性。冷流实验是对单个喷注单元(单喷嘴)进行的。喷嘴结构如图 1 所示, 有关结构尺寸见表 1。

实验中以水模拟液氧, 用空气模拟燃气, 用涡轮流量计测量流量; 用气液两相探针测量喷雾流

表 1 4 种试验喷嘴的结构尺寸

喷 嘴 方 案	№1	№2	№3	№4
氧喷嘴节流孔径/mm	Φ8.3	Φ8.3	Φ8.4	Φ2.5
氧喷嘴缩入深度/mm	2	4	4	4
燃气喷嘴环行间隙/mm	2.1	2.1	2.1	1.35

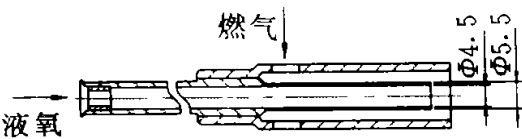


图 1 同轴直流式喷嘴示意图

强分布和混合比分布, 液相流强的测量用收集法, 气相流强利用插入式探针测定; 雾化特性的测量采用 MF 激光散射粒度分析仪^[9]。在冷流特性实验时首先分别测量气、液相单独存在时的流量特性和流强分布特性, 然后再对不同喷嘴压降和反压条件下气液共存时的流量特性和流强分布特性进行测量。实验的反压最高做到 1 MPa。有关冷喷雾尺寸的测量是在常压下气液两相共存的条件下进行的。流强和雾化特性测量取样的位置位于喷嘴下游 100 mm 处, 即在喷嘴下游相对于液体

收稿日期: 1999- 09- 03; 修订日期: 1999- 11- 02
基金项目: 国家 863 高技术资助项目
作者简介: 孙纪国(1966-), 男, 北京丰源机械研究所高级工程师

喷嘴直径 22 倍处。据文献[6],在喷嘴下游的轴向相对尺寸大于 20 时,能得到较好的测量结果。

喷嘴的流量特性是喷嘴的基本特性。冷试结果表明,同轴直流式喷嘴的流量特性几乎不受气液共存的影响,两相之间的相互作用对流量特性影响极小。故在此仅给出气液单独存在时的流量曲线(见图 2 和图 3,图中◇△*+ 为 No1~ No4, $p_e = 0$; □×○= $p_e = 1 \text{ MPa}$)。由图 2 可见,当反压(p_e)增大时,由于气相密度增大,气相流量增大。在常压下喷嘴的流量特性均保持了线性的特点;但当有反压时, No4 喷嘴流量特性呈指数型增长,这是由于反压提高后流动变为亚音速所致。随着反压的增高,液相流量也明显增大(见图 3)。常压下液相流量为指数型特征;当有反压时流量特征曲线上有拐点,拐点之后曲线斜率变小,这是喷嘴节流处发生了局部汽蚀的结果^[10]。

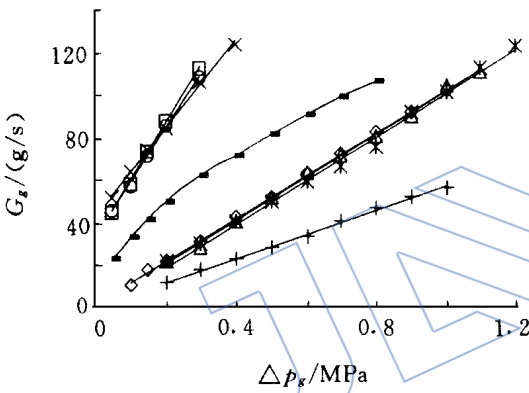


图 2 同轴直流式喷嘴气相流量特性

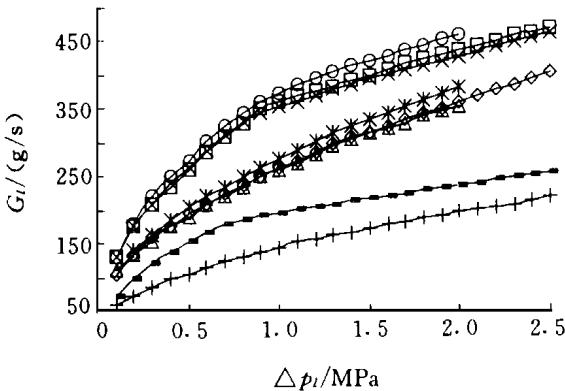


图 3 同轴直流式喷嘴液相流量特性

图 4 是典型的单喷嘴两相流强和混合比径向分布。从形状上看,两相同时存在时气相流强(q_g)分布大致呈 Δ 型分布;而液相流强(q_l)分布总的来看仍呈单峰型分布,这正是直流式喷嘴的典型流强分布特征。受喷嘴结构的影响,中心处液相流

强大于气相流强,而在远离中心处则反之,所以图 4 中气液混合比(ALR)的分布大致呈 U 型分布,但在 $r = 9 \text{ mm}$ 的圆形区域内混合比分布很均匀。由于火箭发动机喷注单元的尺寸一般也在这个量级,故可说明在喷注面下游 100 mm 处推进剂已混合得相当均匀了。

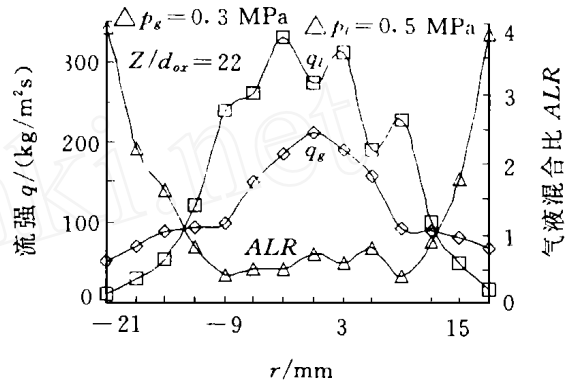


图 4 典型的同轴直流式喷嘴流强和混合比分布

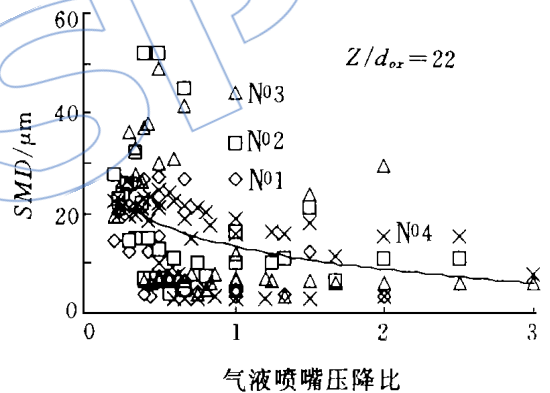


图 5 气液喷嘴压降比对喷嘴下游 SMD 的影响

图 5 为测量的液滴 SMD (D_{32}) 直径(实线为 4 种喷嘴的总拟和曲线,图中对应于某一气液喷射压降比有不同的 SMD 值,这是由于在不同的压降下测量结果不同所致)。一般地,随着喷嘴压降的增大,雾化变细。气体对液体的雾化也有好处,因为气流将加速中心射流的破碎,由于气流速度较大,气液速度差的增大将有利于雾化。因此,随着气液喷射压降比(流量比)的增大, SMD 变小。由图 5 可见, No2 喷嘴的 SMD 比 No1 喷嘴大,即随着缩入深度的增长,液滴尺寸将增大。这与文献[6]的结论一致。可见,气液喷射速度比的增大与缩入深度的增大对雾化性能具有相反的影响。

3 喷注器燃烧试验

到目前为止,反应流和无反应流之间直接的,

定量的比较仍受到限制。冷、热试所预测的性能仍有较大差别,而且冷试也不可能模拟所有的反应流过程,所以热试验仍是最直接可信的试验研究方法。除了可定量测量整体的外部可辨识参数外,热试验也可定性地观察喷雾燃烧火焰的结构和特征。最近,由于激光诊断技术的发展,已可以定量测量热试时内部敏感参数的当地值^[7],如气体成分和液滴尺寸等。

燃烧试验是对多个喷注单元组成的喷注器用挤压试车台在超临界压力下进行的。有关的燃烧试验硬件如图 6(a)所示。供入喷注器的液氧为低于 100 K 的低温液氧,气氢和液氧进入燃气模拟装置燃烧后产生约 700 K 的高温燃气进入同轴式喷嘴的环行通道。燃气和液氧经喷注器在燃烧室燃烧后排出。燃烧室模拟件用水通过夹套冷却。

4 种结构尺寸的喷嘴组成的 4 种喷注器方案的差别是燃气液氧喷嘴的设计参数不同和喷嘴在头部的排列方式不同。№1 和№2 喷嘴仅缩入深度不一致;在相同的设计工况下,№3 喷嘴流量比№1 或№2 稍大;而№4 喷嘴为小流量喷嘴。№1, №2 和№3 喷嘴在喷注器头部的排列如图 6(b)所示,而№4 喷嘴在头部采用了图 6(c)所示的排列。

对 4 种喷注器方案各进行了一次燃烧试验。有关热试验的详尽信息见表 2(压力、流量和温度的测量精度分别为±0.7%,±2%,±2.5 K)。其中修正的 C^* 效率是考虑了燃烧室身部冷却水所带走的那部分能量损失后的 C^* 效率。由表 2 可见, T03 的 C^* 效率最低, T04 的 C^* 效率最高, T01 和 T02 的 C^* 效率基本相同,可从以下几方面解释这一结果:

(1) 氧喷嘴缩入深度的影响。缩入深度主要决定预蒸发量和混合效率。缩入深度的增大将有利于混合但不利于雾化,所以在某个最优的氧喷嘴

缩入深度下将获得最高的 C^* 效率。缩入深度对 C^* 效率的影响通过各一次试验尚未得出明显的规律,有待于进一步试验优选。

(2) 气液喷射速度比和动量比的影响。同轴式喷嘴高的喷射速度比和动量比将有利于雾化和混合效率的提高^[1,2]。T01 热试时气液喷射速度比和动量比均比 T02 高,可以推论在本试验条件下 T01 的雾化和混合性能比 T02 高。

(3) 喷嘴流量(或尺寸)的影响。喷嘴流量增大将导致 C^* 效率降低^[3]。№4 喷嘴流量(尺寸)最小, №3 最大,相应地, T04 性能最高, T03 最低。

表 2 4 种喷注器热试验参数及性能

试 验 序 号	T01	T02	T03	T04
喷嘴方案	№1	№2	№3	№4
喷 嘴 数	11	11	11	18
单喷嘴氧流量/(kg/s)	0.389	0.387	0.415	0.251
单喷嘴燃气流量/(kg/s)	0.108	0.113	0.111	0.068
单喷嘴总流量/(kg/s)	0.497	0.500	0.526	0.319
燃烧室压力/MPa	6.29	6.46	6.53	6.75
燃烧室混合比 O/F	5.39	5.00	5.55	5.42
燃气液氧喷射速度比	26.7	26.4	24.1	40.4
燃气液氧喷射动量比	7.4	6.5	6.3	10.9
头部平均流强分布/(kg/m ² s)	631	635	668	663
头部喷嘴排列密度/m ²	1270	1270	1270	2079
C^* 效率	0.94	0.94	0.92	0.96
修正的 C^* 效率	0.972	0.972	0.952	0.992

(4) 喷嘴排列密度的影响。头部喷嘴排列越密、越均匀,混合效率越高。由表 2 可见,尽管 4 种方案的喷注器头部的平均流强分布差别不大,但 T04 头部喷嘴的排列密度和均匀度比其它三者要高得多,这也是其 C^* 效率比其它三者高许多的原因之一。

综而观之, T04 喷注器具有最高的性能, T01

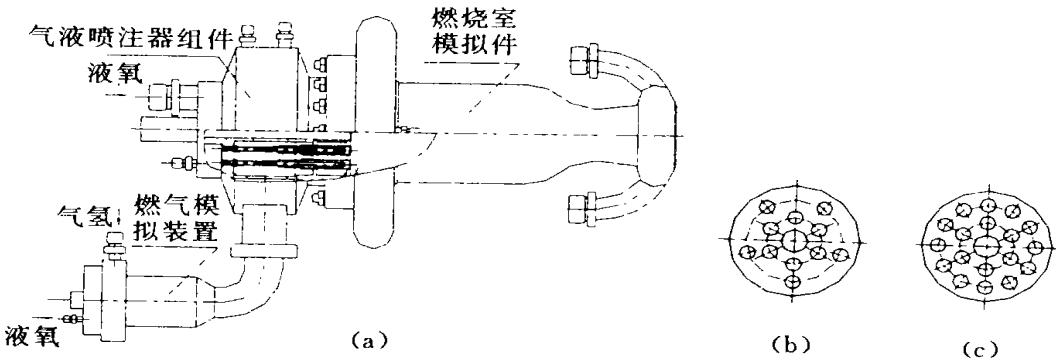


图 6 同轴直流式喷注器燃烧试验硬件(a)和喷注器头部喷嘴的排列形式(b)(c)示意图

和 T02 喷注器次之, T03 喷注器性能最低。在表 2 的热试验条件下, T01 比 T02 具有更好的雾化和混合条件, 尽管如此, 二者的 C^* 效率却基本相同, 这意味着在相同试验条件下, T02 喷注器 C^* 效率将比 T01 高, 即 №2 喷嘴总体燃烧性能比 №1 好, 尽管在冷流实验时 №1 喷嘴的雾化性能比 №2 好。因此, 所试的 4 种喷嘴可从综合性能由高到低作如下排序: №4, №2, №1, №3。

4 结束语

对 4 种气液同轴直流式喷嘴进行的冷态流量特性、混合特性和雾化特性实验结果表明: 同轴直流式喷嘴的流量特性几乎不受气液共存的影响。气相流量在常压下表现为线性增长的特点, 当有反压时小流量喷嘴流量特性呈指数型增长。液相流量在常压下为指数型增长特征, 当有反压时流量特征曲线上有拐点。两相共存时气相流强分布和液相流强分布大致呈 Δ 型分布。气液混合比的分布在喷注面下游 100 mm 处已相当均匀。雾化性能随着气液喷射速度比的增大而变好, 随缩入深度的增大而变差。

对 4 种燃气液氧同轴直流式喷注器进行的超临界压力挤压热试验表明: 小流量 №4 喷嘴的 C^* 效率最高, 大流量 №3 喷嘴 C^* 效率最低。分析认为, 氧喷嘴缩入深度为 4 mm 的 №2 喷嘴比缩入深度为 2 mm 的 №1 喷嘴的综合性能高。缩入深度的变化对喷雾性能和燃烧性能有一定影响, 因此, 氧喷嘴缩入深度应根据热试验结果慎重选择。

火箭发动机喷注器性能是一个综合性能, 它最终要通过热试验考验。从经济和优化设计的角

度出发, 通过冷流实验来弄清各种变量对喷嘴性能的影响是热试验前必要的辅助研究手段, 有助于确定影响综合性能的各种因素的主次关系。但由于冷试范围的局限性, 冷态实验研究的应是热反应所不改变过程的内容。

参 考 文 献

- 1 Wanhainen J P. Oxygen-Hydrogen Injector Performance and Compatibility with Ablative Chambers[R]. NASA TM X-2615
- 2 Falk A Y. Injector Design Guidelines for Gas/Liquid Propellant Systems[R]. NASA CR-120968
- 3 Conrad E W, Parish H C. Effect of Propellant Injection Velocity on Screech in 20,000 pound Hydrogen-Oxygen Rocket Engine[R]. NASA TN D-3373
- 4 Burick R J. Space Storable Propellant Performance Program-Coaxial Injector Characterization[R]. NASA CR-120936
- 5 Zaller M, Klem M D. Coaxial Injector Spray Characterization Using Water/Air as Simulants[C]. NASA TM-105322, 1992
- 6 Ledoux M, Micci M, Vingert L, et al. Coaxial Injectors Atomization[C]. Proc of 2nd int Symposium on Liquid Rocket Propulsion, France, 1995
- 7 Brummund U, Grish F, Snyder R, et al. Laser Diagnostics for Cryogenic Propellant Combustion Studies[C]. Proc of 2nd int Symposium on Liquid Rocket Propulsion, France, 1995
- 8 Mayer W, Schik A, Schweitzer C, et al. Injection and Mixing Processes in High Pressure LOX/GH₂ Rocket Combustors[R]. AIAA 96-2620
- 9 周猛. 气液同轴式喷注器雾化特性和激光散射测粒技术研究. [博士学位论文][D]. 国防科技大学, 1991
- 10 Nurick W H. Orifice Cavitation and its Effects on Spray Mixing[J]. J. of Fluids Engineering, December, 1976

(责任编辑 杨再荣)

Spray and Combustion Investigation of Gas/Liquid Coaxial Injectors

Sun Jiguo¹, Tian Changyi¹, Cheng Shengqing¹, Wang Jue¹

Zhou Jin², Wang Zhenguo²

¹(Beijing Fengyuan Machinery Inst Beijing, 100076, China)

²(National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract Cold flow spray tests utilizing water and air to imitate gas and liquid oxygen in subcritical conditions and firing tests using liquid oxygen and gas in supercritical pressure for coaxial injectors have been done. Cold spray characteristics are investigated, such as flow rate, atomization and mixing, influences of gas and liquid on these characteristics, and combustion performance of coaxial injectors at supercritical pressures are completed. The strong and weak points of four coaxial injectors are obtained from these cold and firing tests.

Key words: nozzles; spray; combustion; tests