

文章编号: 1000-8055(2005) 06-01083-05

液体离心喷嘴喷雾场动态特性的初步研究

杨立军, 葛明和, 张向阳
(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083)

摘要: 为了研究喷嘴的动态特性, 建立了喷嘴动态特性试验系统。采用高速动态图像测量设备, 以水为模拟介质, 对离心喷嘴喷雾场轴向速度、离心液膜破碎距离及表面波波长等参数进行了初步研究。结果表明: 在脉动工况下, 喷嘴压降及几何特性系数的变化对喷雾场轴向速度及离心液膜相关参数影响较大; 所设计建造的试验系统及采用的测试仪器和试验方法可满足喷嘴动态特性研究的需要。

关键词: 航空、航天推进系统; 液体火箭发动机; 离心喷嘴; 动态特性

中图分类号: V 434. 13

文献标识码: A

Preliminary Investigation on Dynamic Characteristics of Swirl Injector

YANG Li-jun, GE Ming-he, ZHANG Xiang-yang

(School of Astronautics,

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

Abstract: To investigate the dynamic characteristics of the swirling injector, an experimental system was built. High velocity photographic testing system has been used in the experiment. Original investigation of the velocity pulsation, breakup length and the wavelength of the liquid film in the spray field were tested. It can be concluded that effects of pressure drop and geometric characteristic coefficient of the injector on the axial velocity in the spray field and some parameters about swirling liquid film are significant. Pressure drop and pulsation of feed system will greatly affect the wavelength and the breakup length of the liquid film. Experimental system, testing device and method of the experiment can be used for the investigation of the dynamic characteristics of the injector.

Key words: aerospace propulsion system; liquid rocket engine; swirling injector; dynamic characteristics

国际上对液体火箭发动机喷注器的各类动力学问题进行了广泛的研究。莫斯科航空学院的巴扎洛夫在喷嘴动力学领域进行了大量的研究工作。其中, 他对液体离心喷嘴动力学的研究得到了

“喷注器不但起着雾化和参混的作用, 同时也是动力系统敏感元件、放大器、相移器”、“喷注器动力学特性的好坏对发动机稳定工作有着重要的影响”等结论, 对于不同的喷注器设计、推进剂类

收稿日期: 2004- 12- 13; 修订日期: 2005- 04- 25

基金项目: 国家自然科学基金资助(50406007)

作者简介: 杨立军(1970-), 男, 黑龙江大庆人, 北京航空航天大学宇航学院副教授, 主要从事火箭发动机喷雾燃烧研究。

别, 得出了各输出参数振幅和相位角的关系, 并详细地描述了喷嘴动态特性的工程计算方法。此外, 俄罗斯热过程研究所、萨马拉航空大学、俄罗斯化工研究所的研究人员以及美、法、荷兰等国家的研究人员都对各类喷注器在实际应用中喷嘴内不稳定过程及自激振荡等相关雾化特性进行了诸多研究^[1~4]。而我国对液体火箭发动机喷注器领域的研究主要集中在液体雾化破碎机理、掺混喷雾燃烧方面^[5], 在喷注器动态特性方面的研究较少。有关动态特性的研究集中在液体火箭发动机系统的动态特性方面, 仅在数值模拟方面作了一些工作^[6]。尽管国外学者进行了许多喷嘴动态特性的研究^[7~10], 但受测量仪器的限制, 针对喷雾场动态特性的研究还远远不够。本文建立了喷嘴动态特性试验系统, 初步研究了离心喷嘴脉动喷雾场动态特性, 开始了我国在喷嘴动力学领域的研究, 初步探索了喷嘴动力学的实验研究方法。

1 喷嘴动态特性试验系统

喷嘴动态试验系统由推进剂组元模拟供应调节系统、脉动发生系统、动态压力测量系统、防反雾流体收集系统和高速动态测量分析系统组成, 试验系统如图1所示。

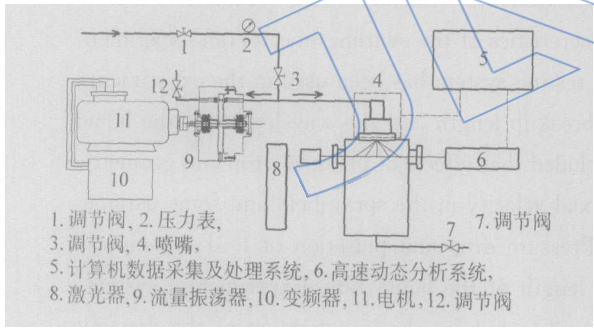


图1 喷嘴动力学试验系统

Fig. 1 Dynamics of injector testing system

1.1 主要仪器简介

高速动态测量分析系统主要由激光器、高速摄影机和配套分析软件组成。其工作原理是: 采用激光为背景光源, 高速摄影机拍摄研究对象(喷雾场或喷雾滴), 拍摄图像存入电脑, 用图象分析软件对图像进行处理。

1.2 流量脉动发生器

流量脉动发生器是试验系统中的关键装置, 它产生流量脉动, 其结构如图2所示。流量脉动发生器由电机驱动, 通过传动装置周期性的截断液

流通道, 液流经过脉动发生器不产生流量损失, 只产生瞬时零流量, 系统有旁路供液, 不会破坏液流的连续性。

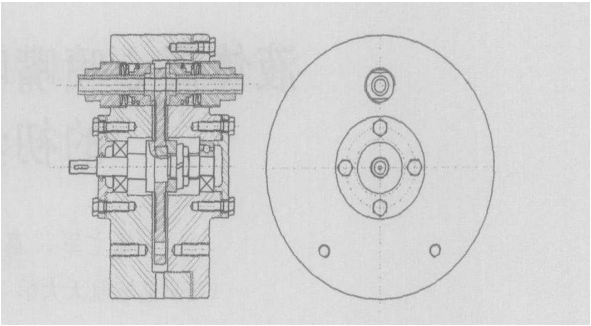


图2 脉动流量发生器结构示意图

Fig. 2 Scheme of pulsating flow generator

2 试验内容

喷嘴试验件采用组合式离心喷嘴, 结构示意图见图3。喷嘴几何特性系数定义为: $A = Rr_c(nr_{bx}^2)$ 。其中, n 为切向孔数目。

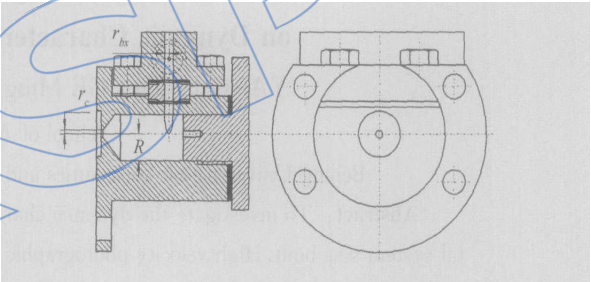


图3 离心喷嘴结构示意图

Fig. 3 Structure of swirling injector

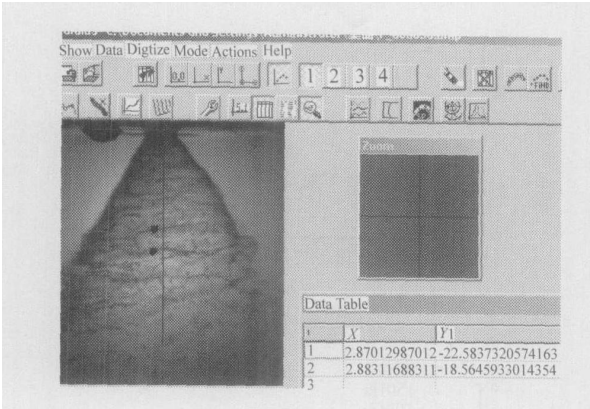
试验工况见表1。

表1 试验工况参数

Table 1 Conditions of experiment

离心喷嘴					
喷嘴直径/mm	2				
工况	稳态	150 Hz	500 Hz		
几何特性系数 A	2	4	6		
$\Delta p/\text{MPa}$	0.2	0.35	0.5	0.65	0.8

利用图像处理软件对拍摄到的大量图像进行人工处理和分析。图象处理软件分析喷雾场相关参数的界面如图4中第一幅图所示, 其余3幅图片为高速摄影拍摄的喷雾场照片示例。



(a) 稳态 ($L=0.6\text{mm}, A=4, \Delta p=0.5\text{MPa}$) (b) 150Hz ($L=0.6\text{mm}, A=4, \Delta p=0.5\text{MPa}$) (c) 500Hz ($L=0.6\text{mm}, A=4, \Delta p=0.5\text{MPa}$)

图4 图象处理软件界面及拍摄的喷雾场图片示例

Fig. 4 Interface of processing software and photographs about spray filed

3 试验结果和分析

3.1 离心液膜表面波长试验结果与分析

从图5可看出, 对相同的几何特性系数, 在同一压降工况下, 稳态工况下, 液膜表面波波长大于脉动工况下液膜表面波波长。随着供应系统脉动频率的增加, 液膜表面波波长减小。其原因是离心喷嘴内, 离心液膜随供应系统的脉动产生波动, 因波长为频率的倒数, 故随供应系统脉动频率的增加, 液膜表面波波长减小。因此, 供应系统的脉动对喷嘴内离心液膜表面波波长有很大影响。而稳态工况下, 液膜虽有波动, 但其脉动频率较低, 故

的液膜表面波波长。

3.2 喷雾场轴向脉动速度测试结果

图6为喷雾场轴向速度与压降随时间变化曲线。从图6(a)~(d)均可看出, 稳态工况下, 喷雾场轴向速度也有脉动特性, 但脉动振幅较小; 在脉动工况下, 当喷嘴压降较小时, 喷雾场轴向速度脉动振幅较大, 随喷嘴压降的增大, 喷雾场轴向速度脉动振幅略有减小的趋势。其原因, 根据离心喷嘴速度公式 $V = \sqrt{2\Delta p / \rho}$, 压降小时, 喷嘴内流速也小, 流体粘性的作用比较显著, 使得离心液膜厚度较大, 从而使离心液膜脉动的振幅较大, 导致喷雾场轴向速度脉动振幅也较大; 喷嘴压降增加时, 液体流速增加, 旋转动量增加, 离心液膜厚度减小, 离心液膜脉动振幅亦减小, 因而, 喷雾场轴向速度脉动振幅有随压降增加而减小的趋势。从图6(a)可看出, 对于几何特性系数 $A = 2$ 离心喷嘴, 压降较小时, 喷雾场轴向脉动速度的平均速度值, 小于稳态工况下的喷雾场轴向速度值。其原因是, 脉动使得喷嘴内离心液膜产生波动, 导致液流沿流动方向的速度减小, 结果使喷雾场轴向速度减小。随压降的增加, 喷雾场轴向脉动速度的平均速度值略有增加。

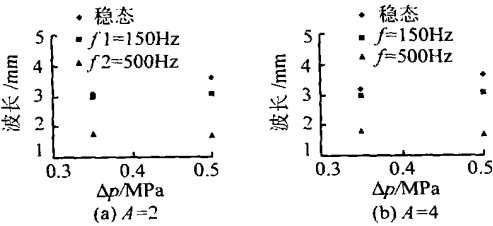


图5 压降对液膜表面波波长的影响
Fig. 5 Effects of Δp on wave length

稳态工况下的液膜表面波波长大于脉动工况下的

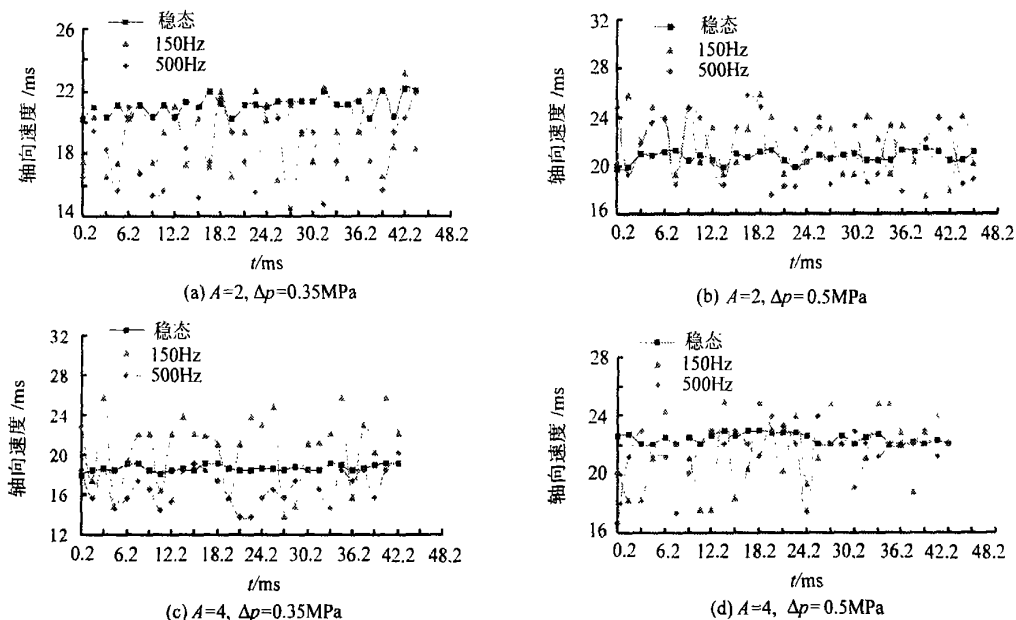


图6 稳、动态工况下液膜轴向速度对比

Fig. 6 Axial velocity comparison between steady and pulsating condition

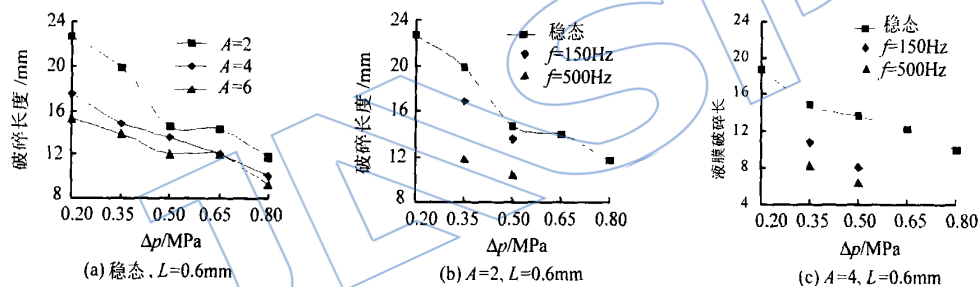


图7 在稳态与脉动工况下, 压降对液膜破碎长度影响的对比

Fig. 7 Effects of ΔP on Breakup length under the steady and pulsating condition

从图6(c)和(d)可看出, 对于几何特性系数 $A = 4$ 离心喷嘴, 压降较小时, 喷雾场轴向脉动速度的平均速度值, 与稳态工况下的喷雾场轴向速度值较接近; 其原因可能有两方面: 一是由于喷嘴几何特性系数的增大, 旋流强度增加, 液流转动动量亦随之增加, 喷嘴出口处的液膜周向速度增大, 从而使液膜轴向速度减小; 二是脉动导致的离心液膜波动, 使液流沿流道方向的速度减小, 结果使喷雾场轴向速度减小。而稳态工况下, 由于喷嘴压降较低, 故喷嘴速度亦较低。因此, 喷雾场轴向脉动速度的平均速度, 与稳态时的喷雾场轴向速度值较接近。压降增大时, 喷雾场轴向脉动速度的平均速度, 略小于稳态工况下的喷雾场轴向速度。这说明供应系统有脉动时, 压降与几何特性系数的变化对喷雾场轴向脉动速度都有明显的影响, 值得进一步深入研究。

3.3 离心液膜破碎距离试验结果

从图7(a)可看出, 在稳态工况下, 对不同的几何特性系数 A , 在所试验压降下, 离心液膜破碎距离随压降的增大而逐渐减小, 几何特性系数大的离心喷嘴, 其离心液膜破碎距离明显小于几何特性系数小的离心喷嘴。其原因是: 几何特性系数 A 增大则旋流强度增大, 喷嘴内流体转动动量增加, 使得离心液膜更不稳定, 液膜易于破碎, 因此离心液膜破碎距离随几何特性系数的增大而减小, 这明显有利于液膜的雾化。图7(b)和(c)是对不同的几何特性系数 A , 在稳态工况与脉动工况下, 离心液膜破碎距离的对比情况。脉动工况下的测试点虽少, 但仍能看出变化趋势: 脉动工况下的离心液膜破碎距离小于稳态工况下的离心液膜破碎距离。随脉动频率升高, 离心液膜破碎距离进一步减

小。其原因是, 在脉动工况下, 液流扰动较大; 且几何特性系数增大时, 离心喷嘴旋流强度亦增大, 喷嘴内液流旋转动量增加, 这两方面的原因使得离心液膜更加不稳定, 离心液膜更易破碎, 其结果表现为随喷嘴压降及脉动频率的增加, 离心液膜破碎距离减小。

4 结 论

(1) 在脉动工况下, 对几何特性系数较小的离心喷嘴, 压降较小时, 喷雾场轴向速度脉动振幅较大; 随着压降的增加, 喷雾场轴向速度脉动振幅有减小的趋势。与稳态工况相比, 当供应系统有脉动时, 在不同的喷嘴压降下, 几何特性系数 A 的变化对喷雾场轴向速度有显著影响。

(2) 脉动工况下的离心液膜破碎距离小于稳态工况下的离心液膜破碎距离; 随着脉动频率的增加, 离心液膜破碎距离逐渐减小。此外, 供应系统的脉动和喷嘴压降对液膜表面波波长也有明显的影响。

(3) 本文的试验系统、测试仪器及采用的试验方法可用于喷嘴动态特性的研究。

参考文献:

[1] Glickman B F. Dynamics of Pneumohydraulic Liquid Rocket

Engine System[M]. *Mashinostroenie*, 1983.

[2] Viets H, Balster D, Toms H. Time Dependent Fuel Injectors [R]. *AIAA / SAE 20th Joint Propulsion Conference Anaheim, USA*, 1985.

[3] Gamatte P. Etude des Instabilités d'une Neep Liquide de Geometric Annulaire en Pulvensation Assistee [R]. *These, Université de Rouen*, 1992.

[4] Борщин В А, Дитягин Ю Ф, Ключко Л А И, др. . Рапыливание жидкостей[М]. Машиностроение, Москва, Россия, 1967.

[5] Habiballah M, Popp M, Yang V. 液体火箭燃烧装置模拟、设计和分析[C]. 张宝炯, 等译. 第二届国际液体火箭推进技术论文集, 上海航天技术研究院第801所, 1998.

[6] Chen Zuoyi, Wang Pengfie, Wang Jue. The Propagation Rule Analysis of Fluid Oscillation in Air-Liquid Injector with Oscillation Fluid Mechanics Method[J]. *Missles And Space Vehicles*, 1998, 234: 21~26.

[7] Базаров В Г. Динамика жидкостных форсунок [М]. Машиностроение, Москва, Россия, 1979.

[8] Bazarov V G. Non-Linear Interactions in Liquid-Propellant Rocket Engine Injectors [R]. *AIAA 98-4039*.

[9] Bazarov V G. Influence of Propellant Injector Stationary and Dynamic Parameters on High Frequency Combustion Stability[R]. *AIAA 96-3119*.

[10] Андреев А В, Базаров В Г, Григорьев С С, И др. Динамика газожидкостных форсунок[М]. Машиностроение, Москва, Россия, 1991, г.