

文章编号 :1001-2486(2007)02-0015-04

## 一种反压自适应恒流喷嘴工作原理及实验研究\*

李 芳,王中伟,张为华

(国防科技大学 航天与材料工程学院,湖南 长沙 410073)

**摘 要** :应水反应金属燃料发动机启动过程对水流量的苛刻要求,提出一种新型反压自适应恒流喷嘴。理论分析此喷嘴的流量自适应保持原理,通过流量特性实验验证此喷嘴能够自动调节流阻,实现流量恒定。

**关键词** :反压自适应;流量恒定;喷嘴;水反应金属燃料发动机

中图分类号 :V435 文献标识码 :A

## Theoretic and Experimental Research on Pressure-adaptive and Flux-constant Orifice

LI Fang, WANG Zhong-wei, ZHANG Wei-hua

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract** :Under the severe demand of the Water/Metal Fuel Motor on the flux of water in the starting period, a new type of pressure-adaptive and flux-constant orifice was brought forward. The flux-constant principle of this orifice with pressure-adaptability was analyzed theoretically. Experiments were carried out. Their results show that the orifice can satisfactorily adjust the flux resistance automatically and keep the flux constant.

**Key words** :pressure-adaptive; flux-constant; orifice; water/metal fuel motor

在化学火箭推进装置中,燃料和氧化剂配比关系是重要的设计参数之一,维持合理的氧燃比是实现稳定燃烧的前提。固体推进剂的燃料和氧化剂在制造中已按设计配方掺混。液体推进剂的流量与发动机工作状态相关,由下式决定:

$$m = \mu A \sqrt{2\rho(p_w - p_c)} \quad (1)$$

式中  $\mu$  为流量系数,  $A$  为喷嘴节流面积,  $\rho$  为推进剂密度,  $p_w$  为喷嘴前压强,  $p_c$  为燃烧室反压。

发动机启动时燃烧室压强比额定压强小,由(1)式得到的推进剂流量偏大。对于液体火箭发动机,氧化剂和燃料流量同时变化,二者配比关系变化不大,系统能够自动趋于稳定。对于水反应金属燃料发动机<sup>[1]</sup>,启动过程中过多的水流量将带来较大危害。

令  $m^0$  为设计水流量,  $p_c^0$  为燃烧室额定压强,当  $dp = p_c - p_c^0$  较小时,对(1)式求导得:

$$\frac{dm}{m^0} = -\frac{1}{2} \frac{dp}{(p_w - p_c^0)} \quad (2)$$

取文献[2]的数据:  $p_c^0 = 2.5 \text{ MPa}$ ,  $p_w = 5.3 \text{ MPa}$ 。设启动时  $p_c = 0.7 \text{ MPa}$ ,由(2)式  $dm/m^0 = 32\%$ ,即水流量比设计流量大 32%。此时燃烧室内水反应金属燃料正进行不完全燃烧,过量的水瞬间加入燃烧室,通过蒸发消耗大量热量(水的蒸发潜热较高,约为煤油的 10 倍),使燃烧室温度陡然下降。当燃烧室内化学反应放热跟不上水滴蒸发吸热时,易导致不剧烈的贫氧推进剂火焰被“浇灭”,发动机熄火。因此设计一种反压自适应恒流喷嘴,实现反压在一定范围内变化时水流量恒定,对于水反应金属燃料发动机顺利启动非常重要。

\* 收稿日期 2006-12-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50376071)

作者简介:李芳(1980—),女,博士生。

用于液体火箭发动机的喷嘴设计技术已经相当成熟,但有关反压自适应恒流喷嘴的设计技术未见报道。文献[3-5]中,再生式液体发射药火炮采用差动活塞式喷嘴建立高压,具有自启动功能,但不具备自适应性。

## 1 反压自适应恒流喷嘴工作原理

图1为反压自适应恒流喷嘴原理简图。反压自适应恒流喷嘴由套筒、活塞、弹簧和中心杆组成,水由中心杆底部孔进入,从中心杆与活塞间的环缝流出,进入燃烧室。活塞、弹簧组件作为敏感元件感应燃烧室反压变化,通过弹簧与反压力平衡,由弹簧弹性压缩量记录反压改变量,同时将作用传给执行机构活塞,活塞相对调节机构中心杆的位置变化导致二者间缝隙即节流面积变化,实现流阻随反压反向变化,保持介质流量恒定。

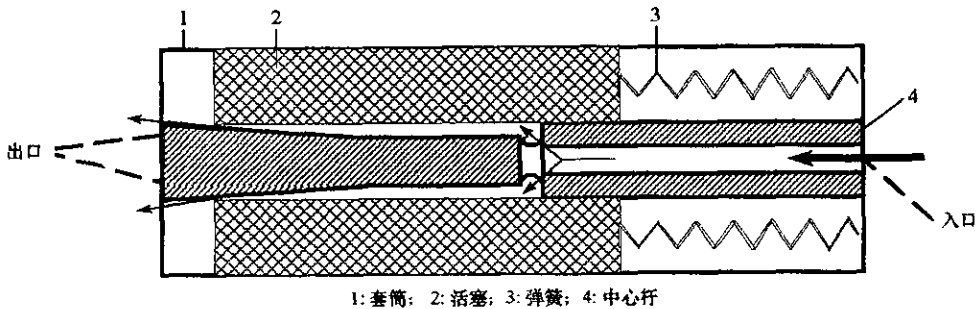


图1 反压自适应恒流喷嘴原理简图

Fig. 1 Pressure-adaptive and flux-constant orifice

以中心杆头部为坐标原点,  $x$  为活塞相对坐标原点位移量。当  $x = 0$  时, 弹簧处于自然伸长状态。忽略摩擦力, 活塞位移  $x$  时受力为:

$$F = (p_c - p_a)A_p - kx \quad (3)$$

式中  $p_a$  为外界大气压, 假设活塞底部与外界相通;  $A_p$  为活塞底面积;  $k$  为弹簧刚度。

系统平衡时,  $F = 0$ , 由(3)式得:

$$p_c(x) = \frac{kx}{A_p} + p_a \quad (4)$$

代入(1)式得:

$$A(x) = \frac{m}{\mu \sqrt{2\rho(p_w - p_c(x))}} = \frac{m}{\mu \sqrt{2\rho(p_w - kx/A_p - p_a)}} \quad (5)$$

节流面积  $A$  满足:

$$A(x) = \frac{\pi}{4} [D_p^2 - d^2(x)] \quad (6)$$

式中  $D_p$  为活塞内径;  $d(x)$  为中心杆型面直径。

由(5)式和(6)式得到中心杆型面方程:

$$d^2(x) = D_p^2 - \frac{4}{\pi \mu \sqrt{2\rho(p_w - kx/A_p - p_a)}} m \quad (7)$$

反压自适应恒流喷嘴是一种无需外加驱动能源, 依靠内部弹簧力与反压平衡自动调节节流面积, 保持流量恒定的自适应性控制装置。

## 2 反压自适应恒流喷嘴恒流特性试验

试验系统如图2所示。高压气瓶流出的空气过滤后分为两路, 分别流经一个减压阀后, 一路进入水箱, 建立水箱压力, 另一路填充反压室, 建立反压。水箱流出的水经过过滤器、流量计和电磁阀等组件后进入反压自适应恒流喷嘴, 节流后喷入反压室。计算机控制室压强和水路电磁阀时序, 采集测量数据。

以液态水为调节介质, 保持水路头部压力恒定为  $p_w = 0.6 \text{ MPa}$ , 当反压  $p_c$  在  $0.2 \sim 0.4 \text{ MPa}$  之间变化

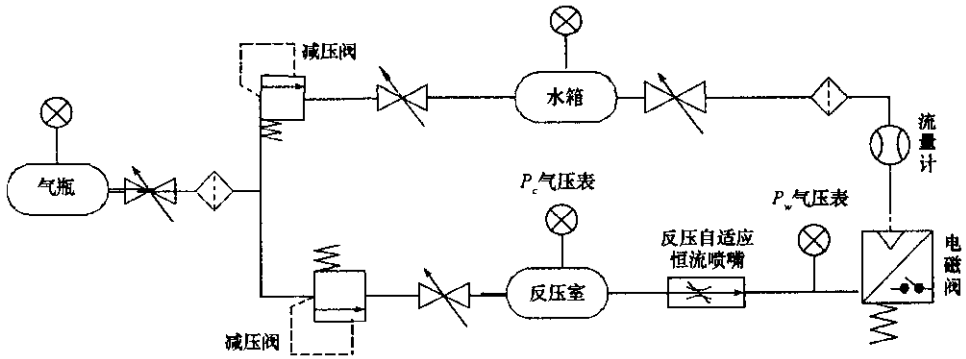


图2 试验系统

Fig. 2 Experiment System

时,测量流经反压自适应恒流喷嘴的水流量。共进行4次实验,反压和水路头部压力随时间变化如图3所示。从图3可看出,充气15s后 Test1 ~ Test4 反压分别稳定在0.21MPa、0.27MPa、0.31MPa和0.40MPa。此时打开水路电磁阀,4次实验的水路压强均立即上升至0.6MPa。

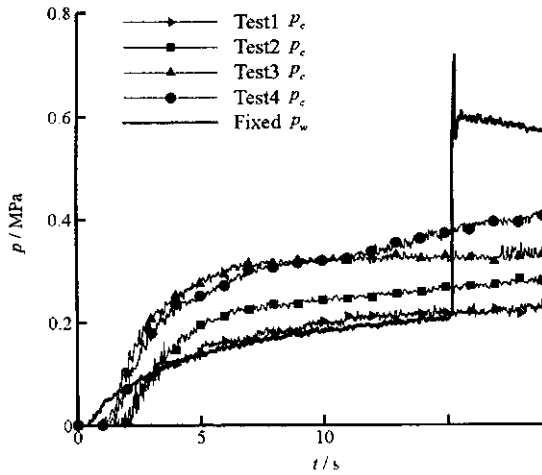


图3 反压和水压随时间变化

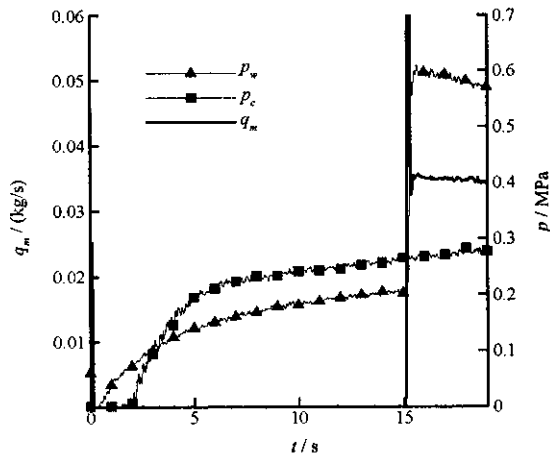
Fig. 3  $p_c$   $p_w$  v. s. time

图4 Test2反压、水压和水流量随时间变化

Fig. 4  $p_c$   $p_w$  and  $q_m$  v. s. time (Test2)

以 Test2 为例,反压、水压和水流量随时间变化如图4所示。从图4可看出,充气15s后反压基本稳定在0.27MPa,水路电磁阀打开后,水压升至0.6MPa,流量计读数在一个尖峰后立即稳定在0.034kg/s,

此尖峰为电磁阀开启时涡轮流量计读数失真所致。

4 次实验涡轮流量计读数随时间变化如图 5 所示,从图 5 可看出,忽略电磁阀开启时涡轮流量计读数失真,除加水初期 1.5s 之内流量波动外,从 Test1 到 Test4 反压逐步升高,喷嘴水流量基本稳定在 0.035kg/s 附近。

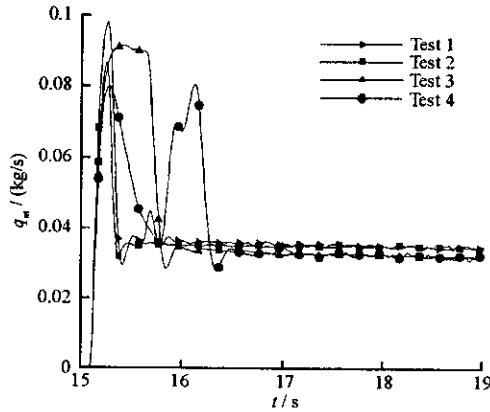


图 5 水流量随时间变化

Fig. 5  $q_m$  v. s. time

4 次实验水流量随反压变化及散布分析如表 1 所示。计算表明 4 次试验水流量散布不大,在 1.0% ~ 1.7%。由此可见,反压在一定范围内变化时,反压自适应恒流喷嘴能够自动调节流阻,实现流量恒定。

表 1 水流量随反压变化

Tab. 1  $q_m$  v. s.  $p_c$

Test	$P_c$ (MPa)	$m$ (kg/s)	$m_{ave}$ (kg/s)	$m/m_{ave}$
1	0.216	0.035	0.0346	0.011
2	0.314	0.035		0.011
3	0.269	0.034		-0.017
4	0.376	0.034		-0.017

### 3 结论

提出一种新型反压自适应恒流喷嘴,通过节流面积与压降一一对应,实现流量恒定,有望消除水反应金属燃料发动机启动时水流量过大造成的熄火现象。流量特性试验表明反压在一定范围内变化时,反压自适应恒流喷嘴能够自动调节流阻,实现流量基本恒定。反压自适应恒流喷嘴应水反应金属燃料发动机需求提出,在液体火箭发动机和固液混合发动机中也有广泛的应用前景。

### 参考文献:

[ 1 ] 李芳,张为华. 铝基水反应金属燃料性能分析 [ J ]. 国防科技大学学报, 2005, 27( 4 ).  
 [ 2 ] 罗凯,党建军,等. 金属/水反应水冲压发动机系统性能估算 [ J ]. 推进技术, 2004, 25( 6 ).  
 [ 3 ] Morrison W F, Kanpton J D. Liquid Propellant Guns [ R ]. AD 1987 - A188575, 1987.  
 [ 4 ] Baer P G, Coffee T P, Morrison W F. Design Optimization for a High Performance Regeneration Liquid Propellant Gun [ R ]. AD 1988 - A192664, 1988.  
 [ 5 ] 王中伟. 再生式液体炮环形喷嘴雾化过程的试验和理论研究 [ D ]. 长沙: 国防科技大学, 1995.

