

# 鲁泊数和孔径比对直流互击式 喷注器性能的影响

刘晓伟, 胡伟, 曹晶, 夏开红, 常小庆  
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘要:** 设计高性能喷注器、提高发动机比冲性能是发动机设计者一直追求的目标。对于直流互击式喷注器, 鲁泊数和孔径比是影响喷注器性能的两个关键参数, 而且两者之间有一定关联。为了初步研究鲁泊数和孔径比参数对直流互击式喷注器性能的影响, 合理匹配两者的关系, 设计了三种状态的喷注器, 进行了混合比分布试验和热试车考核。结果表明, 兼顾鲁泊数和孔径比才能使氧化剂和燃料达到最佳混合效果, 提高燃烧效率。

**关键词:** 直流互击式喷注器; 鲁泊数; 孔径比

**中图分类号:** V434

**文献标识码:** A

**文章编号:** (2010) 03-0024-04

## Effects of Rupe number and ratio of injection orifice diameter on unlike impinging injector performance

Liu Xiaowei, Hu Wei, Cao Jing, Xia Kaihong, Chang Xiaoqing  
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** To design a high performance injector and to improve engine impulse performance are the permanent goals of engine designers. The Rupe number and the ratio of injection orifice diameter are two key parameters affecting unlike impinging injector performance, and they are closely interrelated. To study the effect of Rupe number and ratio of injection orifice diameter on unlike impinging injector performance and to match reasonably the relationship between Rupe number and ratio of injection orifice diameter, three kinds of injectors were designed, and relevant mixture ratio distribution tests and hot fire tests were performed. The results show that mixture characteristics of oxidizer and fuel can be improved only by taking into account both Rupe number and ratio of injection orifice diameter, and thus combustion efficiency can be improved.

**Key words:** unlike impinging injector; Rupe number; ratio of injection orifice diameter

收稿日期: 2010-01-06; 修回日期: 2010-02-12。

作者简介: 刘晓伟 (1978—), 男, 工程师, 研究领域为轨姿控推力室设计。

0 引言

随着航天技术的发展,有效载荷的大小成为航天器竞争的焦点,从而对发动机比冲性能提出了越来越高的要求。提高比冲性能的途径之一是增加喷管面积比,但这样不仅增加了发动机结构质量,比冲增加的幅度通常也较为有限。另外一条途径是采用高性能喷注器,提高发动机燃烧效率。国外在高性能喷注器研究方面取得了很大突破,如美国研制的 890N 先进材料双组元发动机(AMBR)、445N 高性能远地点发动机(HiPAT),燃烧效率均接近 100%,其中 445N 发动机的比冲已达到 329s<sup>[1]</sup>。本研究设计了一组喷注器,通过试验对比,初步摸索了鲁泊数和孔径比参数对直流互击式喷注器性能的影响。

1 参数影响分析

直流互击式喷注器依靠两股射流的撞击完成雾化和混合过程,典型的圆孔互击式喷注单元见图 1。

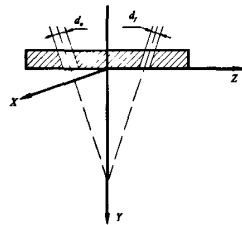


图 1 圆孔互击式喷注单元  
Fig.1 Unlike impinging injector element

美国喷气推进实验室的杰克·鲁泊采用推进剂模拟液进行了大量冷试试验,从而得出结论:氧化剂与燃料射流的动量比与孔径比相同时,推进剂达到最佳混合效果<sup>[2]</sup>。该试验结果得到了热试验证,并被定义为鲁泊准则:对于孔径比小于 1.5 的互击撞击对,鲁泊数为 1 时推进剂达到最佳混合效果。其中鲁泊数定义为:

$$Rupe=\left(\frac{q_{mf}}{q_{mo}}\right)^2\left(\frac{d_o}{d_f}\right)^3\left(\frac{\rho_o}{\rho_f}\right) \tag{1}$$

式中,  $Rupe$  为鲁泊数;  $q_{mf}$  为燃料质量流量;  $q_{mo}$  为氧化剂质量流量;  $d_o$  为氧化剂孔直径;  $d_f$  为燃料孔直径;  $\rho_o$  为氧化剂密度;  $\rho_f$  为燃料密度。

对于特定的推进剂组合,确定混合比后,鲁泊数准则为选定推进剂两路孔径比提供了参考依据。也就是说,推进剂最佳混合需要某个孔径比,且这个比值只取决于推进剂流量比和密度比。

当推进剂两路孔径比较大时,氧化剂射流未参与撞击的比例增加,雾化及混合效果偏离最佳状态,鲁泊数为 1 时并不能保证混合效果最佳。张蒙正等人的研究结果指出:互击式喷嘴的孔径比对喷嘴的雾化及混合有很大影响,孔径比增加,雾化及混合分布恶化,建议孔径比取在 1.2 以下<sup>[3]</sup>。

公式 1 表明,鲁泊数和孔径比是一组相互关联的参数,两者通常不可能同时达到最佳值(即均为 1.0)。特别是对于四氧化二氮/偏二甲胍推进剂组合,鲁泊数为 1.0 时孔径比通常都在 1.4 以上,这显然不利于达到最佳混合效果。因此,对于不同的推进剂组合,合理匹配鲁泊数与孔径比参数以提高喷注器性能是非常重要的。

2 研究方案

在喷注对数、排列方式(均为两圈周向均匀排列)相同的情况下,通过调整鲁泊数、孔径比参数,并尽可能保证合成动量角等其他设计参数接近,设计了三种喷注器,其主要设计参数见表 1。

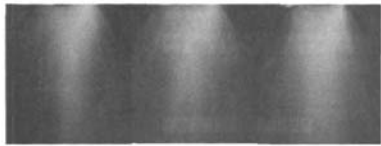
表 1 喷注器设计参数

Tab.1 Injector design parameters				
参数名称	单位	方案 A	方案 B	方案 C
内圈合成动量角	°	1	3	4
外圈合成动量角	°	6	10	8
鲁泊数	—	0.93	0.83	0.67
氧化剂/燃料孔径比	—	1.47	1.37	1.28

3 试验情况

3.1 混合比试验

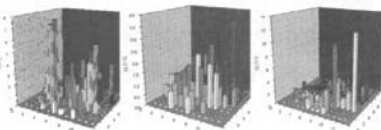
三种喷注器用水为介质进行了撞击雾化试验，并测量了混合比分布情况。喷注器喷雾场照片对比见图 2。A 方案喷雾场呈现一定的射流集中现象，而 B 方案、C 方案喷雾场较为均匀，分析认为与其设计合成动量角偏大有关。



A 方案      B 方案      C 方案

图 2 喷雾场照片

Fig.2 Spray fields



A 方案      B 方案      C 方案

图 3 混合比分布柱形图

Fig.3 Mixture ratio distribution histogram

产品安装于混合比试验台上方，喷注面距离收集台面 97.5mm。收集台面为 22×22 个孔所组成的正方形（共 484 个孔），每个孔边长 11mm，台面尺寸为 242×242mm。每孔下方安装有橡胶管，通入下方的塑料收集杯中。为测量混合比分布情况，燃料路加入硫酸铜溶液。

混合比分布情况用混合效率来评价，混合效率反映了混合比沿喷注面分布的均匀性<sup>[4]</sup>。混合效率计算公式为：

$$E_m=100\% \times \left[ 1 - \frac{\sum_i^n w_i}{\sum_i^n w_i} \frac{(R-r_i)}{R} - \frac{\sum_i^{\bar{n}} w_i}{\sum_i^{\bar{n}} w_i} \frac{(R-\bar{r}_i)}{R} \right] \tag{2}$$

式中， $w_i/w_i$  为  $i$  取样管的质量分数，等于当地的喷雾流量与总的喷雾流量之比； $R$  为总喷雾流量中的氧化剂质量分数； $r_i$  为对于  $r_i < R$  的取样管中

的氧化剂质量分数； $\bar{r}_i$  为对于  $r_i > R$  的取样管中的氧化剂质量分数； $n$  为  $r_i < R$  的取样管的数目； $\bar{n}$  为  $r_i > R$  的取样管的数目。

测量结果表明，A、B、C 三种喷注器方案的混合效率分别为 0.76、0.85、0.72。

3.2 热试情况

根据混合比试验结果，选择混合效率较高的 B 方案和混合效率较低的 C 方案喷注器进行了热试车考核，B 方案点火照片见图 4。考虑到三种喷注器雾化效果相当，混合效率是影响燃烧效率的主要因素，预估 A 方案喷注器热试性能居于 B、C 之间，未对其进行热试考核。

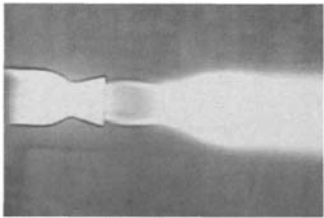


图 4 点火照片

Fig.4 Hot fire test

采用法兰连接试验件对两种喷注器各进行了一台份热试车考核，两台份试车采用同一喷管进行。试验进行了变混合比、变工况、稳态、脉冲工作考核。两种方案的发动机均完成了试验考核程序，各次点火起动、关机正常，停车后，产品外观检查未见异常。试车结果列于表 2。

表 2 试车考核结果

Tab.2 Hot fire test results

燃烧效率		
试车产品	均值	范围
B 方案	0.95	0.93 ~ 0.96
C 方案	0.91	0.90 ~ 0.93
发动机温度		
试车产品	法兰盘 最高温度 /℃	身部收敛段 最高温度 /℃
B 方案	83	1329
C 方案	71	1272

## 4 试验结果分析

喷注器燃烧效率高由雾化、混合、蒸发等多过程决定,是多参数综合优化的结果。考虑到燃烧效率受多个参数影响,而且各参数相互关联,研究设计参数对燃烧效率的影响时必须尽可能剥离其他参数的影响。相同混合比时,B、C方案喷注器的喷孔数目及排列方式、合成动量角等设计参数基本相同,可假设认为鲁泊数和孔径比是影响燃烧效率的独立因素。

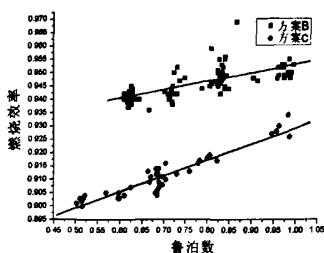


图5 鲁泊数与燃烧效率曲线

Fig.5 Rupe number vs combustion efficiency

图5列出了试车获得的鲁泊数与燃烧效率的关系曲线。综合分析冷热试试验数据认为:

(1) 混合效率较高的喷注器,其燃烧效率相应也高。额定工况下,A、B、C方案的喷注器混合效率分别为0.76、0.85、0.72,其中B、C方案对应的燃烧效率分别为0.95、0.91。A方案喷注器未进行热试车,但由混合效率和燃烧效率的对应关系分析,其燃烧效率应介于B、C之间。在雾化效果基本相当的情况下,采用混合效率作为喷注器设计水平高低的评价指标是合理的。

(2) 对于同一喷注器,通过调整混合比改变鲁泊数,当鲁泊数越接近于1时,其燃烧效率相应也较高,这一结果验证了鲁泊准则的正确性。

(3) 折衷选择鲁泊数和孔径比的B方案喷注器具有较高的混合效率和燃烧效率。为了确定最佳的鲁泊数和孔径比选择范围,需要进行更多、更深入地研究工作。

需要说明的是,本次试验采用的是多撞击对、两圈排列喷注器,单喷注对撞击后存在着喷雾场互相混合,喷注对排列方式对混合效率也有一定影响。为了排除喷注对排列方式的影响,后续对鲁泊数和孔径比的研究工作应针对单喷注对进行。

## 5 结论

对鲁泊数和孔径比的研究结果表明,合理匹配鲁泊数和孔径比的关系才能使氧化剂和燃料达到最佳混合效果,提高燃烧效率。为了确定最佳的鲁泊数和孔径比选择范围,应该以单喷注对为研究对象,进行更多、更深入的研究工作。

### 参考文献:

- [1] Larry C Liou, John W Dankanich, Leslie L Alexander. NASA In-Space Advanced Chemical Propulsion Development in Recent Years[R]. AIAA 2009-5126.
- [2] Dickerson R A. Like and unlike Impinging Injection Element Droplet Sizes[J]. J Spacecraft, V.6,N 11,1969.
- [3] 张蒙正,傅永贵. 两股互击式喷嘴雾化研究及应用[J]. 推进技术, 1999, 20(2): 73-76.
- [4] 庄逢辰. 液体火箭发动机喷雾燃烧的理论、模型及应用[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1995.
- [5] 杜正刚,高玉闪,蔡国飙. 气-气喷嘴结构分析[J]. 火箭推进, 2009, 35(3): 6-11.
- [6] 高玉闪,杜正刚,金平,等. 气氧/甲烷同轴剪切喷注器燃烧特性数值模拟[J]. 火箭推进, 2009, 35(5): 18-24.

(编辑:王建喜)