

两股互击式喷嘴雾化研究及应用*

张蒙正 傅永贵 张泽平 李 平

(陕西动力机械设计研究所, 西安, 710100)

摘 要: 用激光全息及图像处理技术, 研究两股互击式喷嘴的撞击状况及雾化性能, 获得了喷嘴的雾化性能参数, 在喷嘴的水试雾化性能、热试燃烧效率及比冲对比后, 提出用水试雾化性能评估其热试效果, 检验喷嘴的加工质量。此技术已用于小推力发动机喷嘴的筛选。

主题词: 撞击式喷嘴, 推进剂雾化, 全息摄影

分类号: V434.23

SPRAY PROPERTY RESEARCH AND APPLICATION OF UNLIKE IMPINGING INJECTOR

Zhang Mengzheng Fu Yonggui Zhang Zeping Li Ping

(Shaanxi Engine Design Inst., Xi'an, 710100)

Abstract: A laser holograph and image processing method was used to analysis the striking and spray properties of unlike double-impinging injector. The spray characteristics were obtained. The spray properties and combustion efficiencies of combustion chamber were statistically analyzed, the relationship between the water test spray property and the hot-run performance was found. The following results were reached during the research: the water test spray property can be used to evaluate the hot-run performance and examine injector performance. The method has been used for selection and quality inspection of injectors of small thrust liquid propellant rocket engine.

Subject terms: Impinging injector, Propellant spray, Holography

1 引 言

喷嘴的雾化及混合性能直接影响燃烧室的燃烧稳定性和燃烧效率。研究喷嘴雾化性能的目的在于: (1) 对于给定喷嘴, 预测其在给定条件下的雾化性能, 为喷雾燃烧数值模拟提供液滴的尺寸及分布、运动的速度及角度等燃烧室内流动模拟计算所必须的原始数据, 进而预估燃烧性能; (2) 发展一种优化喷嘴设计方法, 使之达到要求的雾化液滴分布、质量分布及速度分布。在特定条件下, 通过测试喷嘴的雾化性能, 进行喷嘴筛选, 以保证发动机可靠性及稳定性。本文用激光全息技术研究了两股互击式喷嘴的撞击状况及雾化性能, 并将冷试雾化数据与热试燃烧效率及比冲进行对比, 提出了用水试雾化性能进行喷嘴的筛选。

2 实验系统及研究方法

实验系统由激光全息记录系统、全息再现及图像处理系统、气液路系统组成。全息记录

* 收稿日期: 1998-05-30, 修回日期: 1998-08-06, 本课题获航天工业总公司科技进步二等奖

系统用于记录喷雾场的信息,包括红宝石激光器、记录光路、喷雾场定位及标定装置。全息再现及图像处理系统包括再现光源、光路、监视器、图像处理计算机,可确定喷雾场的边界和液丝完全破碎的位置。图像处理软件按系统标定的空间与监视器象素的关系计算出喷雾锥角、液膜或液丝的长度、喷雾破碎长度等;计算出每个液滴的直径,按统计关系式计算出体积平均直径 D_{30} 和索特尔平均直径 D_{32} ,计算 Rosin-Rammler 液滴尺寸分布指数、质量直径 D_m 等参数。

本文研究的两股互击式喷嘴的结构图如图 1 所示,两射流偏心撞击如图 2 所示,实验时为了对喷雾场进行标定,在喷嘴头部设立一右手坐标系,取两孔连线方向为 Z 轴,雾场垂直向下为 Y 轴,原点设在喷注面两孔中心点。

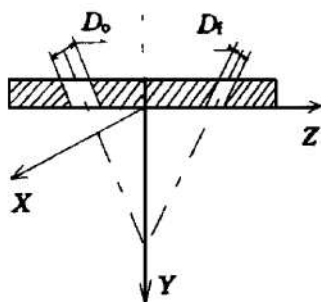


Fig. 1 The sketch of injector

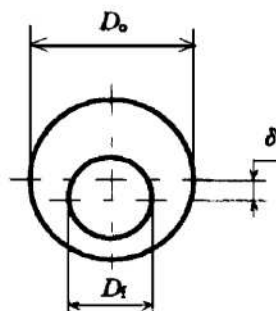


Fig. 2 Deviation of two jet center

实验时,在额定工况下,沿 X , Z 方向各拍一张全息图,然后将全息图进行再现,经图像处理获得雾化场的性能参数。图 3、图 4 是沿 Z , X 方向拍摄的喷雾场图像。图 5 是两射流孔径比等于 1.47,射流偏心撞击的照片。



Fig. 3 Spray photo from Z



Fig. 4 Spray photo from X



Fig. 5 Spray photo of the two jet flows impacting eccentricly ($\gamma = 1.47$)

3 互击式喷嘴雾化研究

3.1 雾化机理

互击式喷嘴利用射流动能实现射流雾化,雾化过程主要取决于射流的雷诺数及韦伯数。从图 3、图 4 喷雾场照片,可分析喷嘴的雾化机理:两股高速射流撞击后,在射流轴相交处滞止,射流的法向动能转变为压力能,形成一个压力区。同时在撞击区域附近出现撞击波,高压

迫使撞击扇横向展开,形成液膜。测试发现,液膜的中间厚,边缘较薄。撞击波是两股射流混合的主要动力源,它支配着喷雾扇产生正弦状的脉动,液膜在表面张力及扰动力的作用下破裂形成液带和液丝,继而破碎形成液滴。液滴受到表面张力、密度、粘性 & 环境气流的影响,继续破碎。当液滴与周围气体流场达到动力平衡时,生成最终的液滴。可用液滴的韦伯数作为液滴是否继续破碎的准则。从图 3 展示的雾化过程,可以把喷嘴的雾化场分为三个区域:撞击波与液扇形成区,液膜、液丝雾化区,液滴二次雾化及完全雾化区。

3.2 射流孔径比和撞击状况对雾化性能影响分析

影响互击式喷嘴雾化性能的参数包括撞击夹角、喷嘴的孔径及孔径比,射流的雷诺数。本文主要分析孔径比和撞击状况对雾化的影响。设两孔孔径之比 $\gamma = D_o/D_f$,在两射流完全撞击状况下,其撞击形式按两孔中心偏差 δ 可分两类; $\delta = 0$,两股流中心相撞击; $(D_o - D_f)/2 \geq \delta > 0$,两射流

偏心撞击,如图 2 所示。不考虑流体的粘性、表面张力影响,把射流的动量按其横截面面积等分,得到单位面积的动能,从而可以计算出较大直径的射流没有参与撞击部分的动量占其总动量的百分比。表 1 列出了三种孔径比在 $\delta = 0$,及 $\delta = (D_o - D_f)/2$ 情况下,氧化剂射流没有参与撞击的动量占总动量的百分数。

Table 1 Influence of γ and δ on impinging momentum

γ	$\delta=0$	$\delta= (D_o - D_f) /2$
1.47	20.6%	27.6%
1.27	11.3%	15.5%
1.22	7.90%	10.9%

图 4 是 $\gamma=1.47$ 时两射流撞击的照片,由图可见,射流撞击后在原合成轴向形成一液膜,由于氧化剂射流直径大于燃料射流直径,氧化剂射流没有参与撞击部分将企图沿原射流方向流动,但粘性力及表面张力的作用又迫使其改变方向偏向 XY 平面,喷嘴是按两射流在 Z 方向合成动量角等于零设计的,因此氧化剂参与撞击部分的动量要小于燃料动量,撞击后合成喷雾流将稍偏向氧化剂孔一侧,两侧和中心两部分合成后的喷雾流从 X 方向看有一定的扩散度,即有一个 X 方向的喷雾角。

由表 1 的计算结果可见,两股互击式喷嘴的孔径比增加,氧化剂射流没有参与撞击部分增加,喷雾角增加;撞击的偏心度 δ 增加,氧化剂射流没有参与撞击部分也增加,喷雾角增加,喷雾扇还会产生一定的扭曲,两侧的液雾分布也不均匀。值得注意的是,两股互击式喷嘴是靠两射流的撞击实现雾化,同时也实现混合。孔径比 γ 及偏心度 δ 的增加,在导致雾化性能恶化的同时,也导致混合比分布的不匀。图 5 与图 4 的喷嘴有同样的几何结构,图 4 所示的喷嘴燃烧效率高达 95%,但该喷嘴的热试燃烧效率仅为 76%。可见,两股互击式喷嘴的孔径比及加工精度是很重要的。由表 1 的计算还可见,在两孔径比小于 1.22 时,较大直径的射流没有参与撞击部分的动量占其总动量的百分比小于 8%。

4 冷试雾化研究的应用

我们对 7 台已经过热试车的 25 N 推力室的两股互击式喷嘴进行了研究,获得用水试时 X、Z 方向喷雾角,喷雾破碎长度,喷雾场液滴 D_{30} , D_{32} 直径,液滴均匀性分布指数 n 等。X 方向的喷雾角反映了两射流撞击状况,即加工的质量,也定性反映混合比的分布。喷雾破碎长度反映了射流破碎的速度,相对而言,也反映了燃烧死区的长度及雾化的速度。 D_{32} 直径和液滴均匀性指数 n 反映了雾化后液滴的大小及均匀性。考虑到在大气中冷试,射流会引起周

围空气的运动,从而影响雾化的液滴。为了减少此影响,仅取距喷注面 25 mm 处的 XY 平面中心 50 mm×60 mm 区域雾场的 D_{30} , D_{32} 直径,液滴均匀性分布指数 n 。热试效果取比冲和燃烧效率,进行统计对比。7 台喷嘴的编号为 SN12, SN03, SN15, SN17, SN19, SN20, SN02。其中 SN02, SN03 两台喷嘴是初样研制时产品,水试流量比其它喷嘴小,用于地面热试车,没有获得比冲数据。7 台喷嘴水试雾化性能及热试的燃烧效率和比冲等参数列在表 2。

Table 2 The water test spray property and hot-run performance

Injector No.	L/mm	$\beta/ (^{\circ})$	$D_{32}/\mu\text{m}$	n	$I_{sp}/ (\text{m/s})$	η_c
SN12	10	33	149	5.45	2780	95%
SN03	12	35	124	5.20	—	90%
SN15	14	30	132	5.14	2700	89%
SN17	16	25	143	5.24	2650	89%
SN25	15	30	145	5.04	2625	88%
SN24	13	35	147	5.06	2622	88%
SN19	18	46	158	4.43	2480	81%
SN20	16	40	157	4.75	2400	80%
SN02	10	50	118	4.60	—	76%

Note: The water test flow of injector No. SN02 and SN03 was different from others. They were used on ground hot-run test

由表 2 可见,喷嘴的水试雾化性能与热试性能(燃烧效率、比冲)之间有良好的对应关系,在下述条件:①X 方向喷雾角 $\leq 40^{\circ}$,②喷雾破碎长度 $L \leq 16 \text{ mm}$,③取样区域 $D_{32} \leq 150 \mu\text{m}$, $n \geq 5.0$ 。交付的产品能满足任务要求($I_{sp} \geq 2600 \text{ m/s}$),且有较好的燃烧效率。

将三项指标综合运用,作为判定准则,在其后的单机抽样试车中,对 5 台份两股互击式喷嘴进行了喷雾实验,获得了喷嘴的 X 方向喷雾角、喷雾破碎长度、取样区域的 D_{32} 直径和液滴均匀性指数 n 等冷试雾化性能参数,选取了编号为 SN24, SN25 的 2 台喷嘴进行高空模拟热试车,实际性能与预测结果基本相符。2 台喷嘴的热试性能也列在表 2。之后,对生产交付的喷嘴进行雾化性能的测试,按上述条件进行筛选,交付的产品取得良好的效果。

可见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。两孔互击式喷嘴的撞击精度很重要,它既影响喷嘴的雾化性能,也影响混合效率,从而影响推力室的性能。

参 考 文 献

- 1 Heidmanm M F, Priem R J, Humphrey J C. A wendy of sprays formed by two Impinging jets. NASA TN-3835, 1957.
- 2 Taylor G I. Formation of thin flat sheets of water. Proc Ray soc A, 1960, 259
- 3 Ingebo. Rocket motor injector performance, port, correlation of experrimental data. Northern Research and Engineering Corporation Report 1045-2, 1962.
- 4 Zajac L J. Correlation of spray drosize discription and injectors variables. NASA CR-125674, 1971.