

气液同轴离心式喷嘴雾化特性实验研究*

王振国 周进 鄢小清 吴晋湘

(国防科技大学航天技术系 长沙 410073)

摘要 采用自行设计的两相喷雾实验设备和测量装置,通过MF激光散射测粒仪,对液氧液氢火箭发动机所用气液同轴离心式喷嘴后方喷雾液滴的平均直径MMD和液滴尺寸分布指数 n 等雾化特性,进行了试验研究,测量了A型喷嘴在不同气体和液体喷注压降、不同空间位置的喷雾特性。分析了气体喷注压降一定时液体喷注压降对雾化特性的影响规律,以及当液体喷注压降一定时气体喷注压降对雾化特性的影响规律,得出了一些有意义的结论。研究结果对气液同轴离心式喷嘴设计有一定的指导意义。

关键词 同轴离心式,喷嘴,喷雾特性,两相流

分类号 V211.7, V434.11

Experimental Investigation on Spray Characteristics of Coaxial Swirling Injector

Wang Zhenguo Zhou Jin Yang Xiaoqing Wu Jinxiang

(Department of Aerospace Technology, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract In this paper, an experimental investigation on spray characteristics of coaxial swirling injector was performed using the laser-scattering system (Malvern) and the self-designed atomization and sprays test facility. It was analyzed and discussed that the effect of gas injecting pressure differential on the spray mass median diameter (MMD) and spray diameter size distribution exponent (n). The study results should provide theoretic guidance in on going gas-liquid coaxial swirling injector design.

Key words coaxial swirling injector, spray characteristic, two phase flow

发动机内能量转换过程主要受推进剂初始液滴尺寸与分布的影响^[1]。液滴尺寸及分布由喷嘴尺寸、型式、结构特性、工作压力以及推进剂性质所确定。因此,液体推进剂

* 国家自然科学基金资助项目
1995年8月23日收稿

的喷射与雾化过程是液体火箭发动机中重要的内部过程，必须对其进行全面而深入的研究。

液氢液氧火箭发动机上广泛采用了气液同轴式喷嘴。近 20 多年来，国外对此进行了大量实验研究和理论分析，得到了一些有意义的结果^[2,3]，但这些研究都是针对气液同轴直流式喷嘴的。本文以空气和水为模拟介质，采用激光散射测粒系统对大流量气液同轴离心式喷嘴在不同气体喷注压降和液体喷注压降情况下的喷雾特性进行了实验研究，所得结果对于该类喷嘴的改进设计具有一定的指导意义。

1 实验设备

本文实验所用喷嘴是国内某型液氧液氢火箭发动机喷注器上采用的气液同轴离心式喷嘴，其结构示意图如图 1 所示。这种喷嘴是由两个同轴的不锈钢管组成，中心为液氧流道，液氧首先经过旋流室后以旋流方式经此流道喷出，喷嘴外侧环形流道为直流式气氢（液氢经冷却通道到达喷注面时已变成气态）喷射通道。这种喷嘴有一个显著的特点：离心液氧喷射通道相对于直流气氢喷射通道有一个缩进量 L ，缩进量 L 的适当选取有利于推进剂的雾化。离心液氧射流液膜喷入高速的气氢射流中雾化，进入燃烧室。图 1 中液氧旋流室入口直径 d_0 、液氧流道内径 d_1 、气氢环形流道内径 d_2 、外径 d_3 等喷嘴四种结构尺寸的不同选取，便组成了不同的二种喷嘴 A、B、C。本文研究的喷嘴为 A 型喷嘴。它的具体结构尺寸是： $d_0=2.1\text{mm}$ ， $d_1=4.8\text{mm}$ ， $d_2=7.2\text{mm}$ ， $d_3=9.8\text{mm}$ ，氧喷嘴缩进量 $L=5\text{mm}$ 。

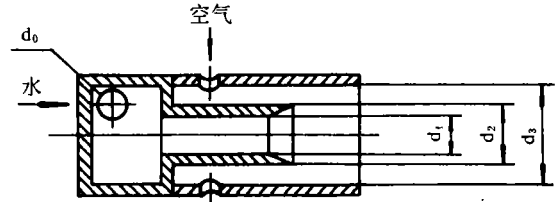


图 1 喷嘴结构简图

整个实验系统如图 2 所示。它包括高压气源、气体增压系统、气体贮箱和液体贮箱、管路及节流系统、测量与数据处理系统等五个部分组成。

实验过程中增压采用的是挤压方式。高压气源通过管路从泵房输送到实验现场，分别经过调压器调整压力后进入气体贮箱作为雾化介质用，经过气体调压器后进入液体贮箱对实验用水进行增压。通过调整减压阀来调节实验所需的贮箱压力。

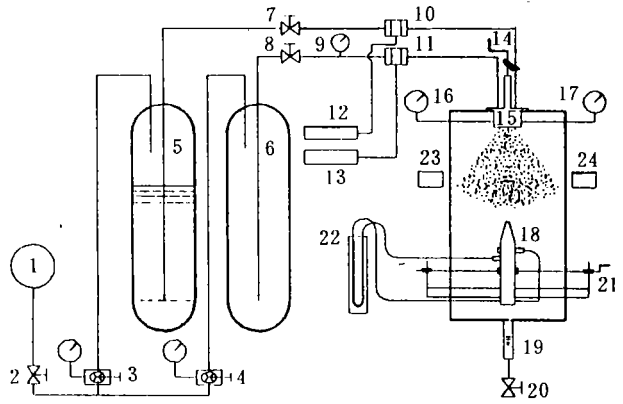


图 2 试验系统简图

贮箱包括三个圆柱形的液体贮箱和一个圆柱形气体贮箱。单个贮箱容积为 1.5m^3 ，设计压力为 18.0MPa 。管路采用的是不锈钢硬管和软管，节流用的是手拧开关。

试验在常温下进行，试验介质为空气和水。高压空气源 1 经过实验室总阀门之后，再分别经过减压阀门 3 和减压阀门 4，进入液体贮箱 5 和气体贮箱 6，贮箱工作压力由减压

阀保证。从液体贮箱流出的水经过减压阀 7 和涡轮转子流量计 10 后, 进入喷嘴液体集液腔; 同样, 从气体贮箱流出的空气经过减压阀 8 和气体涡轮转子流量计 11, 进入喷嘴气体集液腔。进入两个集液腔的水和空气同时喷入密封容器 23 (相当于燃烧室)。液体流量由流量计 10 和频率计 12 测量; 气体流量由流量计 11 和频率计 13 测量。通过螺杆摇柄机构 14 来调节单喷嘴喷注器与测量面的轴向距离; 通过调整两相探针 18 的螺杆摇柄机构 21 调节流强测点的径向位置。这样就可以得到任意需要测量截面的测量参数。用压力表 16 和 17 分别测量气体液腔的压力和液体集液腔的压力。液体收集容器 19 收集的液体, 通过阀门 20 取出来称量。气相总压、静压差由 U 形管 22 测量。23、24 分别为马尔文测粒仪的激光发射器和信号接受器。

测量系统包括流量测量、压力测量、喷雾场流强测量, 喷雾特性(质量平均直径 MMD 和液滴尺寸分布指数 n 等) 测量等。流量测量采用涡轮流量计和频率计进行, 压力测量直接用指针式压力表测量, 喷雾流强则采用一自制的两相探针、液体收集系统和 U 型管完成, 喷雾特性是由马尔文测粒仪测量的, 其中液雾尺寸分布服从 Rosin-Rammler 分布, 其表达式为

$$Q = 1 - \exp\left[-0.693\left(\frac{D}{\text{MMD}}\right)^n\right] \quad (1)$$

式中, Q 为累积分布, 即尺寸小于 D 的液滴体积占总液雾的体积百分数, MMD 为液雾质量平均直径, n 为液滴尺寸分布指数, 表明液滴尺寸分布的均匀性。本文正是要研究 MMD 和 n 的变化规律。

2 实验结果与分析

图 3 为固定气体喷注压降时 MMD 随液体喷注压降 ΔP_L 的变化规律。图 4 为固定液体喷注压降时 MMD 随气体喷注压降 ΔP_g 的变化规律。图 5 为固定气体喷注压降时, 液滴尺寸分布指数 n 随液体喷注压降 ΔP_L 的变化规律。图 6 为固定液体喷注压降时 n 随气体喷注压降 ΔP_g 的变化规律。从图 3 可以看到, 当固定气体喷注压降(气体流量)时, 增加液体的喷注压降, 也即增加液体的流量与喷射速度, 将使液雾的平均直径增加。其原因在于, 液体喷注压降的增加导致的液体流量和喷射速度的增加产生两个方面的影响: 一方面降低了气液两相之间的动量比和相对速度, 削弱了气体对液膜及液滴的破碎效果; 另一方面导致了最小液膜厚度增大而产生较为粗大的液滴。但当液体喷注压降增加到一定程度后, MMD 的增加变得平缓了。同样从图 4 中也可以看到, 当液体喷注压降固定不变时, 增加空气的喷注压降, 也即增加空气的流量和喷射速度时, 将使液雾的质量平均直径迅速减小。这表明, 对于我们现在研究的气液同轴离心式喷嘴来说, 气体速度和质量流量对液体的雾化有很大的影响。液体喷注压降(也即液体流量和液体喷射速度)保持常值时, 增加空气的喷注压降实际上带来了两个方面的影响: a) 气体喷注压降增加, 将增加气体的喷注速度, 这本身就可以改善雾化; b) 气体喷注压降增加, 将使喷嘴的气/液比增加, 这也会改善雾化。但当空气的喷注压降进一步增大时, 其对雾化的改善效果逐渐变得平缓。

气体和液体的喷注压降对液滴尺寸分布指数的影响比较复杂。从图 5 可以看到, 当

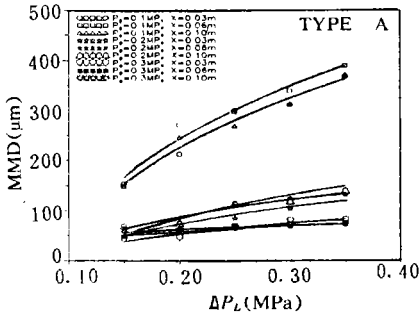


图3 不同轴向位置 MMD 随液体喷注压降 ΔP_L 的变化

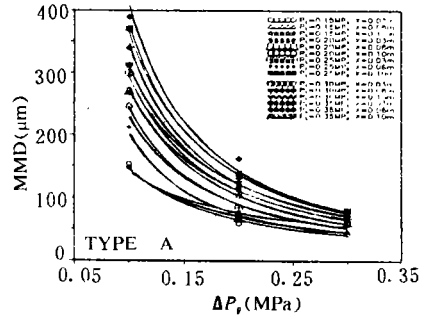


图4 不同轴向位置 MMD 随气体喷注压降 ΔP_g 的变化

气体喷射速度和质量流量不同时，增加液体喷射速度和质量，可以引起液滴尺寸分布指数不同的变化规律。当气体喷注压降为 0.1MPa 时，增加液体喷注压降开始使 n 增加，到达某一个值以后再增加液体喷注压降反而会降低液滴尺寸分布指数 n 。这表明，过程中雾化机理发生了变化。可以作这样的解释：当气体喷注压降为 0.1MPa 时，开始增加液体喷注压降时，使液体流量增大，液膜厚度增大，结果是液滴平均直径增大的同时也使液滴的尺寸更加均匀 (n 增大)；但当液体喷注压降增加到某一个值以后，再在此基础增加其喷注压降的话，这样便在增加液体质量流量，降低气液比的同时使得液体射流的喷射速度增加较大，结果是使得射流本身变得极不稳定，易于破碎。所以，虽然这时的液滴平均直径降低了，但分布变得更不均匀了 (n 变小)。图 6 表示当液体喷注压降一定时，增加气体喷射速度和质量对 n 分布的影响。从图中可以看到，增加气体喷注压降时，大部分情况下是既使液滴平均尺寸减小又使其分布更加不均匀 (n 减小)。产生这样的结果可能有两个方面的原因：a) 破碎以后的液滴聚合效应比较强烈，较大的液滴相互碰撞后结合成更大的液滴，这样虽然平均液滴尺寸降低了，但分布变得更加不均匀；b) 喷嘴结构的问题，喷嘴在加工时不可能保证完全对称，甚至在某一方向有奇异，而这种喷雾的奇异正好被激光测试仪器接收到了。但也有例外，当 $\Delta P_L = 0.35\text{MPa}$ 时，从 $X = 0.1\text{m}$ 测量

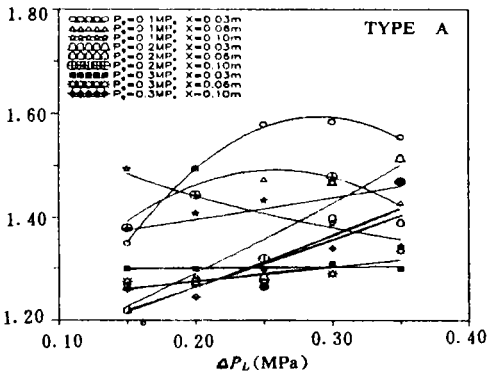


图5 不同轴向位置 n 随液体喷注压降 ΔP_L 的变化

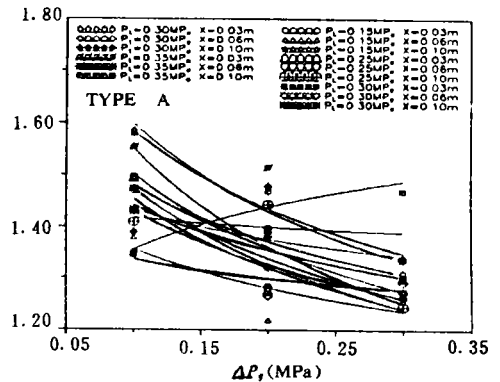


图6 不同轴向位置 n 随气体喷注压降 ΔP_g 的变化

的结果显示：增加气体喷注压降，也就是增加气体的喷射速度和质量，反而使液滴尺寸分布更加均匀（ n 增大），这是值得进一步研究的现象。

3 结论

本文用试验的方法研究了液体火箭发动机上采用的大流量气液同轴离心式喷嘴的雾化特性。分析了气体喷注压降和液体喷注压降对液滴平均直径 MMD 和液滴尺寸指数 n 的影响规律，得到了如下一些结论：

①当固定气体的喷注压降（相当于让气体喷射速度和喷射流量保持不变）时，增加液体的喷注压降（相当与增加液体喷射速度和液体喷射质量）总的趋势是使液滴质量平均直径 MMD 增加，但当气体喷注压降较高时，MMD 的增加相对平缓。

②当固定液体喷注压降时，增加气体喷注压降使液滴的平均直径 MMD 降低，但当喷注压降较大时，MMD 的变化变得平缓。

③当固定气体喷注压降时，液体喷注压降对液滴尺寸分布指数 n 的影响与 ΔP_g 有关系。研究发现了此种喷嘴的液滴尺寸分布指数在 ΔP_g 取不同的值时，可能有完全相反的变化规律，表明两种状态雾化机理的不同。

④当固定液体喷注压降时，增加气体喷注压降使液滴尺寸分布指数减小，也就是液滴尺寸分布更加均匀。

参 考 文 献

- 1 Priem R J, Heidmann M F. Propellant Vaporization as a Design Criterion for Rocket Engine Combustion Chamber. NASA TR R-67, 1960
- 2 八柳信之. 气液同轴型喷射要素にと喷雾流の实验及び解析(2). 航空宇宙技术研究所报告, TR-745, 1982
- 3 Sankar S V, Wang G. Characterization of Coaxial Rocket Injector Sprays Under High Pressure Environments. AIAA 92-0228

(责任编辑 卢天贶)