

## 气液同轴双离心式喷嘴喷雾特性\*

康忠涛<sup>1,2</sup>, 李清廉<sup>1,2</sup>, 张新桥<sup>1,2</sup>, 成鹏<sup>1,2</sup>

(1. 国防科技大学 高超声速冲压发动机技术重点实验室, 湖南 长沙 410073;

2. 国防科技大学 航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**采用流体体积方法分析涡流器离心式喷嘴内部流动过程,采用单反相机和相位多普勒测速仪测量离心式喷嘴、气液同轴双离心式喷嘴的喷雾特性。发现涡流器离心式喷嘴内部流动的总压损失主要发生在涡流器槽道入口、收敛段和等直段。等直段使液膜厚度减小,喷雾锥角减小。离心式喷嘴喷雾粒径分布范围沿径向逐渐增加,轴向速度分布范围沿径向先减小后逐渐增加。气液同轴双离心式喷嘴喷雾特性受气液比影响很大,气液比小时旋流空气使喷雾锥角增加,粒径分布范围减小;气液比大时,气体膨胀压缩喷雾,使大液滴能够到达喷雾中心,喷雾外侧为二次雾化成的细小液滴。

**关键词:**气液同轴式喷嘴;双离心;喷雾特性

中图分类号:V235.21 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2014)05-050-08

## Spray characteristic of gas-liquid double swirl coaxial injector

KANG Zhongtao<sup>1,2</sup>, LI Qinglian<sup>1,2</sup>, ZHANG Xinqiao<sup>1,2</sup>, CHENG Peng<sup>1,2</sup>

(1. Science and Technology on Scramjet Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The volume of fluid method was used to analyze the flow process in pressure swirl injector. SLR camera and phase doppler anemometry were used to measure the spray characteristics of swirl injector and gas-liquid double swirl coaxial injector. Results show that the total pressure loss occurs mainly in inlet section, convergent section, and columned section of swirler trough. The longer the columned section is, the thicker the liquid film and the smaller the spray cone angle is. The range of spray particle distribution increases gradually along the radial direction while the axial velocity distribution decreases firstly and then increases along radial direction. Spray characteristic of gas-liquid double swirl coaxial injector is greatly influenced by gas-liquid ratio (GLR). While GLR is small enough, swirling air increases the spray cone angle and decreases the range of particle distribution; while GLR is large enough, the expansion of air compresses the spray, pushing large droplets to the center of the spray. And at the edge of spray locates small droplets from second atomization.

**Key words:** gas-liquid coaxial injector; double swirl; spray characteristic

液体离心式喷嘴主要有切向孔离心式和涡流器离心式喷嘴两种,目前研究较多的是切向孔离心式喷嘴,主要集中在喷嘴结构参数对喷雾特性的影响和喷嘴内部流动两个方面。刘娟<sup>[1-2]</sup>采用流体体积(Volume of Fluid, VOF)方法分析结构参数对喷嘴性能的影响,指出喷嘴的总压损失主要发生在收缩段和等直段,发现喷嘴出口扩张角和旋流室长度对喷雾性能起着正反两方面的作用,是需要进一步优化的参数。此外刘娟<sup>[3]</sup>和Yang<sup>[4]</sup>的研究均表明喷嘴的几何特性参数 $A$ 也需要优化,因为增加 $A$ 能够同时增加喷雾锥角的宽度和液膜的破碎长度。切向孔离心式喷嘴的切

向孔个数能够同时增加喷雾锥角<sup>[5]</sup>、减小液膜厚度<sup>[1]</sup>,但同时也会使得流量系数减小即喷注压降增加,因此也需要对其进行优化。Kim<sup>[6]</sup>对切向孔离心式喷嘴气核稳定性的分析发现在喷嘴顶部增加一个盲端孔有利于内部气核的稳定。

涡流器离心式喷嘴在液体火箭发动机和燃气发生器上应用得偏少,而在航空发动机燃油喷嘴应用较多。王国辉<sup>[7]</sup>发现旋流室及旋流器的结构和尺寸均会对喷嘴出口速度产生影响,但只有旋流器螺旋升角和槽道数目才会对喷雾锥角产生显著影响。Seoksu<sup>[8]</sup>发现由切向孔离心式喷嘴得到的经验公式并不能很好地描述涡流器离心式

\* 收稿日期:2014-01-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11472303,11402298);新世纪优秀人才支持计划(NCET-13-0156)

作者简介:康忠涛(1987-),男,四川内江人,博士研究生,E-mail:kangzhongtao@126.com;

李清廉(通信作者),男,教授,博士,E-mail:peakdreamer@163.com

喷嘴出口的液膜厚度。此时喷注压降对出口液膜厚度的影响不大,而喷嘴长径比  $L/D$  影响显著。Hamid<sup>[9]</sup>发现随着喷注压降的增加,涡流器离心式喷嘴的喷雾锥角增加、破碎长度减小、流量系数增加。苏中高<sup>[10]</sup>研究发现喷嘴旋流槽的长短对喷嘴雾化性能有一定影响,槽长对雾化有利,但影响不大。

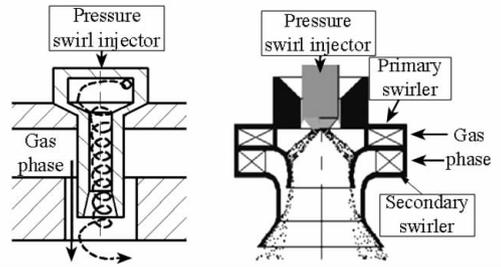
气液同轴式喷嘴通过气液两相的相互作用来增强雾化和掺混,具有很高的雾化和燃烧性能。根据内喷嘴的不同,气液同轴式喷嘴可以分为同轴直流式和同轴离心式两种。其中同轴离心式又可以分为气体中心式和液体中心式两种。液体中心式喷嘴由于能够在较大工况范围内稳定高效燃烧而得到广泛关注,其中心喷嘴为离心式液体喷嘴,气体通过环缝或旋流器以直流或旋流的形式与液体相互作用增强雾化性能,如图1所示。

液体中心式气液同轴离心式喷嘴可以进一步分为 Gas-blast 和 Gas-assist 两种,分别记作 GB 和 GA 喷嘴。GB 喷嘴主要应用于液体火箭发动机/燃气发生器,气相的作用主要是与液相相互作用辅助雾化。GA 喷嘴主要应用于航空发动机/燃气发生器,气相除了辅助雾化外还能够在喷嘴下游产生一个展向涡用于稳定火焰。

对 GB 喷嘴雾化性能影响最大的一个结构参数是内喷嘴缩进,最重要的一个工况参数是气液比 (Gas-Liquid Ratio, GLR)。Zhuang<sup>[11]</sup>和 Yang<sup>[12]</sup>进一步指出存在一个使索太尔平均直径 (Sauter Mean Diameter, SMD) 最小的喷嘴缩进长度。在喷嘴混合性能方面,周进<sup>[13]</sup>认为喷嘴缩进可以使喷雾混合更加均匀。随着 GLR 的增加,GB 喷嘴的喷雾锥角逐渐减小<sup>[14]</sup>。刘娟<sup>[15]</sup>分析发现随着 GLR 的增加,GB 喷嘴的 SMD 逐渐减小。

彭云晖<sup>[16]</sup>对 GA 喷嘴的喷雾性能进行了综述,指出 GA 喷嘴的关键结构参数和工况参数均会对其喷雾特性产生重要影响。郭新华<sup>[17]</sup>指出随着压降的增加, SMD 减小、分布指数增加。Zhao<sup>[18]</sup>发现增加空气速度和减小 GLR 使得 R-R 分布中参数  $N$  减小,随着距喷嘴出口距离的增加,参数  $N$  增大。Zheng<sup>[19]</sup>认为增加反压使得喷雾锥角变大不仅仅是反压增大造成的,而是在保持气液比的同时使得燃料流量和空气压力同时增加的结果。

综上,目前对于离心式喷嘴的研究还主要集中在切向孔离心式喷嘴,对涡流器离心式喷嘴的认识还不够深入,特别是对其内部流动过程的



(a) 气动雾化喷嘴<sup>[20]</sup> (b) 气体辅助雾化喷嘴<sup>[21]</sup>

图1 液体中心式气液同轴离心式喷嘴

Fig. 1 Scheme of liquid-centered gas-liquid swirl coaxial injector

特征还不是很清楚,对喷嘴结构参数影响喷嘴雾化性能的规律认识还需要加强。GA 喷嘴本身结构过于复杂,喷嘴工作时气液两相间以及两股旋流空气间的相互作用过于复杂,造成旋流空气对离心式喷嘴锥形液膜及其喷雾特性的影响不是很清楚。因此需要加深对涡流器离心式喷嘴内部流动过程的认识,强化对旋流空气影响离心式喷嘴喷雾特性规律的认识,提高喷注器、燃气发生器的设计水平。

## 1 试验与仿真基础

设计了一种采用涡流器离心式喷嘴为内喷嘴,外侧气体与锥形液膜反向旋转的气液同轴双离心式喷嘴。采用 VOF 方法模拟涡流器离心式喷嘴内部流动过程,采用 Canon EOS 50D 单反相机、相位多普勒测速仪 (Phase Doppler Anemometry, PDA) 测量离心式喷嘴和气液同轴双离心式喷嘴的喷雾特性。

### 1.1 喷嘴设计

试验与仿真采用的气液同轴双离心式喷嘴如图2所示。液体经过涡流器逆时针旋转进入旋流室,在离心力的作用下形成中心气核,经等直段后以锥形液膜从喷嘴出口喷出。气体经旋流器顺时针旋转,与液体相互作用辅助雾化。

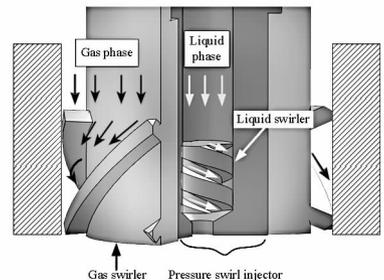


图2 气液同轴双离心式喷嘴

Fig. 2 Scheme of gas-liquid double swirl coaxial injector

涡流器离心式喷嘴的结构参数如表 1 所示, 气体旋流器的具体结构参数如表 2 所示。具体的设计参考文献[22-23]。

表 1 涡流器离心式喷嘴结构参数

Tab.1 Parameters of pressure swirl injector

旋流室直径/mm	9.8
等直段长度/mm	2
喷嘴出口直径/mm	4.1
涡流器槽道数/个	2
涡流器槽道升角/(°)	20
旋流室收敛角/(°)	120
涡流器通道总面积/mm <sup>2</sup>	2.766

表 2 气体旋流器结构参数

Tab.2 Parameters of gas swirler

旋流数	1.09
叶片数	6
叶片安装角/(°)	50
叶片厚度/mm	2

### 1.2 试验系统

试验系统由供应系统、测控系统组成,如图 3 所示。供应系统可以实现模拟液体和气体的平稳流量供应,采用氮气对液体贮箱增压。测控系统测量并记录集液腔和集气腔压力和模拟介质流量。压力传感器采用麦克传感器公司的压阻式压力变送器,最大响应频率为 30kHz,测量精度为 0.5% fs。流量测量采用开封仪表有限公司的 LWGY 及 LWGQ 型涡轮流量计,精度为 5% fs。

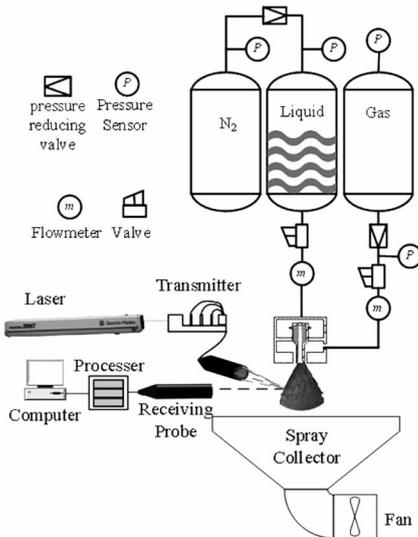


图 3 喷雾特性试验系统

Fig.3 Test system of spray characteristics

试验中用的 PDA 为丹麦 DANTEC 公司的产品,主要由激光器、分光器、发射探头、接收探头、控制器、信号处理器和主控计算机组成。发射探头发射绿色和蓝色激光各两束,其中同色激光存在一个频移 40MHz,这两种颜色的激光得到的各自频率差信息分别用于计算两个方向的速度。绿光的相位差用于计算液滴直径,而蓝色激光的相位差信息用于排除绿光相位相差  $2\pi$  的干扰。

### 1.3 试验数据处理方法

将喷雾场的图片转换成灰度图像,再用 Matlab 对图像进行二值化处理并进行边界检测,最后读出喷雾锥角,如图 4 所示。

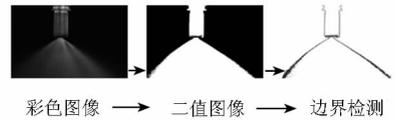


图 4 喷雾锥角测量方法

Fig.4 Spray cone angle detecting method

### 1.4 数值仿真基础

网格采用 Gambit 软件划分,涡流器槽道部分采用标准四面体网格,其余位置采用拉伸网格,并对喷嘴出口、喷嘴壁面进行局部加密处理。采用了两套网格:Grid 0 和 Grid 1,Grid 1 及其坐标系如图 5 所示。两套网格的涡流器槽道、收敛段和等直段的总网格数分别为 42 684 和 234 175。

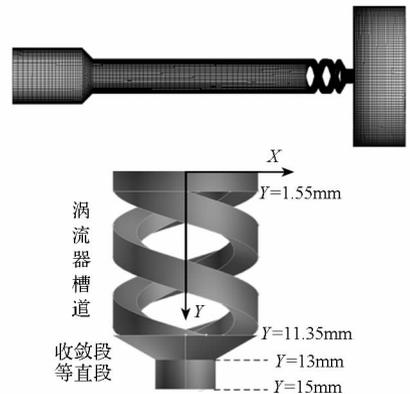


图 5 坐标系与网格划分

Fig.5 Coordinate system and grid

采用 Fluent 软件求解三维分离隐式 N-S 方程,湍流模型采用 RNG  $k-\epsilon$  模型。两相界面追踪采用 VOF 方法,采用非定常计算。涡流器喷嘴入口采用速度入口,速度大小根据设计流量  $\dot{m} = 0.1\text{kg/s}$ ,由  $\dot{m} = \rho AV$  计算得  $V = 0.5\text{m/s}$ ,喷嘴出口为压力出口,压力值为 0.1MPa,壁面为无滑移边界条件。

## 2 结果与讨论

### 2.1 算例验证

图6为试验得到的涡流器离心式喷嘴流量系数随喷注压降的变化曲线,从图中可以看出喷注压降增加但喷嘴流量系数基本保持不变,为0.107。由阿伯拉莫维奇理论公式  $c_d = \sqrt{\phi^3 / (2 - \phi)}$  计算喷嘴出口有效截面系数  $\phi = 0.2705$ ,据此可以算出液膜厚度应为0.299mm。

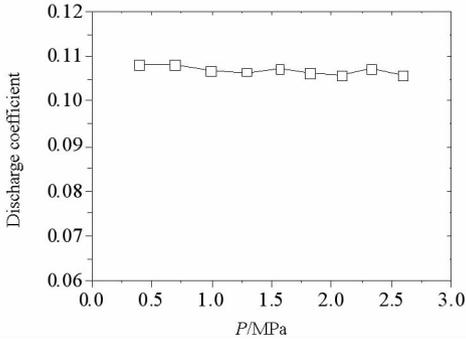


图6 涡流器离心式喷嘴流量系数

Fig. 6 Discharge coefficient of pressure swirl injector

图7为采用上述两种网格仿真得到的喷嘴出口处液相百分数分布,取液相体积分数为50%处为气液分界面,则Grid 0捕捉到的液膜厚度为0.335mm,Grid 1捕捉到的液膜厚度为0.286mm。与理论值0.299mm相比,误差分别为12.04%和4.35%。因此研究喷嘴内部流场和流量系数时采用网格Grid 1,误差小于5%,可以接受。

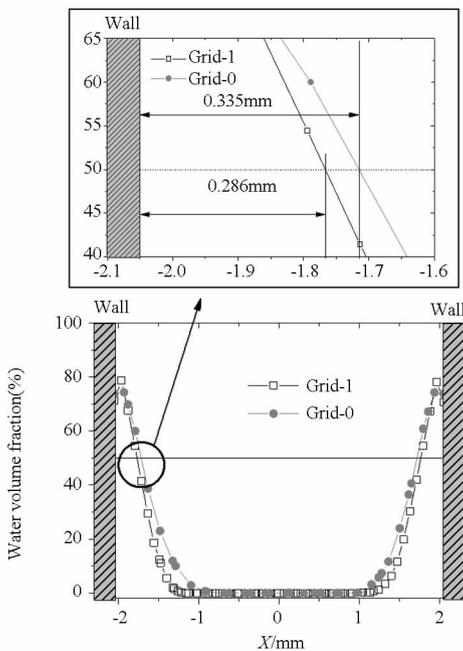
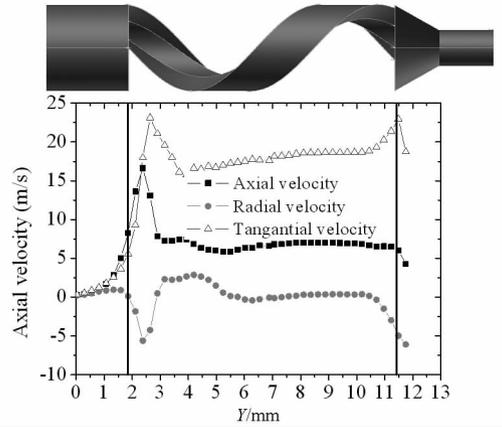


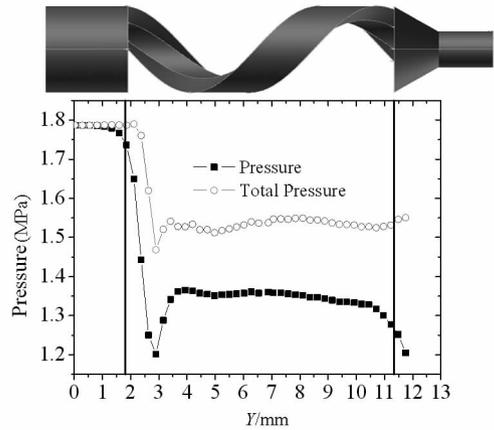
图7 喷嘴出口液相分布

Fig. 7 Liquid phase distribution at nozzle exit

从图8中可以看出在进入涡流器槽道前的直管段内液体的轴向、径向、切向速度均很低,与之对应的总压和静压相差很小。进入涡流器槽道之后液体速度主要为切向速度和轴向速度。在涡流器槽道内轴向速度基本保持不变,只在涡流器槽道入口处产生一个波动式的跳跃。从压力分布来看涡流器离心式喷嘴的总压损失主要发生在液体从入口直管段进入涡流器槽道的过程中,而液体在涡流器槽道内运动的过程中总压基本保持不变。在改进涡流器离心式喷嘴的流量特性时,涡流器槽道入口构型应是考虑的重点。



(a) 速度分布



(b) 压力分布

图8 涡流器内液相压力分布

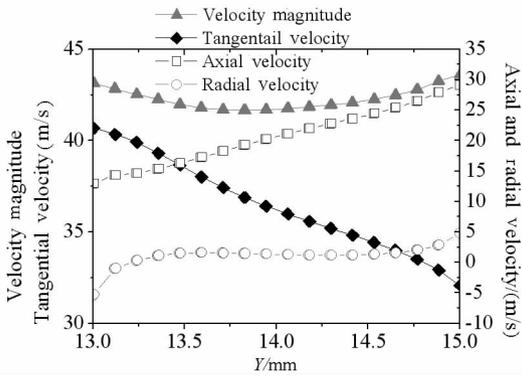
Fig. 8 Velocity and pressure distribution in liquid swirler

### 2.2 涡流器离心式喷嘴内部流动

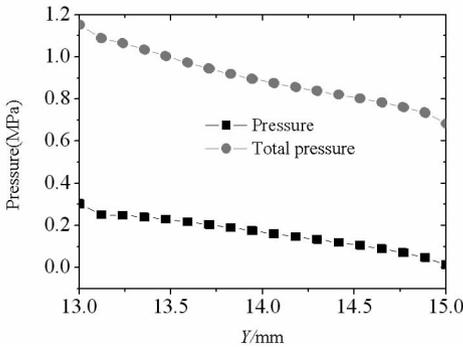
等直段内液相的速度和压力分布如图9。液相的径向速度在等直段入口处指向喷嘴中心轴线,这是由于流体经过收缩段后具有一个向中心的径向速度,而在喷嘴出口处随着旋转锥形液膜的产生,将产生一个指向外侧的径向速度,但总的来看液相的径向速度远小于轴向和切向速度。液相在等直段内运动的过程中轴向速度逐渐增加,切向速度逐渐减小,合速度呈现出先减小后增加

的趋势,但其变化不是很大。一方面,切向速度减小,轴向速度增加会减小喷雾锥角,使得喷嘴的空间分布范围减小。另一方面,流量不变时轴向速度增加必然导致液膜厚度减小,而  $SMD \propto h^{0.4}$ ,故喷嘴雾化性能会变好。因此涡流器离心式喷嘴等直段是一个重要参数,可根据实际需要进行优化。

等直段压力分布呈现出逐渐减小的趋势,从入口处的 1.15MPa 减小到喷嘴出口处的 0.71MPa。由图 8 ~ 9 知涡流器槽道入口总压损失 0.26MPa,收缩段总压损失 0.38MPa,等直段总压损失 0.44MPa。气动力在离心式喷嘴和空气雾化喷嘴液膜破碎过程中起到了重要作用,增加喷嘴出口等直段长度对合速度大小的影响不大,即等直段长度对气动雾化的影响不大。



(a) 速度分布



(b) 压力分布

图 9 等直段液相速度和压力分布

Fig. 9 Velocity and pressure distribution in liquid central post

### 2.3 涡流器离心式喷嘴喷雾特性

如图 10 所示,随着流量的增加,喷雾锥角先逐渐增加,达到某个值之后基本保持不变。在设计工况下喷雾锥角约为  $110^\circ$ 。

如图 11 所示的测量平面距喷嘴出口 80mm,为了分析涡流器离心式喷嘴喷雾的周向均匀性,沿径向测量了 2 个方向上各点的 SMD 和轴向速度。

Direction 1 和 Direction 2 上 SMD 沿径向分布曲线如图 12(a) 所示,从图中可以看出 SMD 沿径向呈“双峰”分布,且两个方向的曲线重合度较

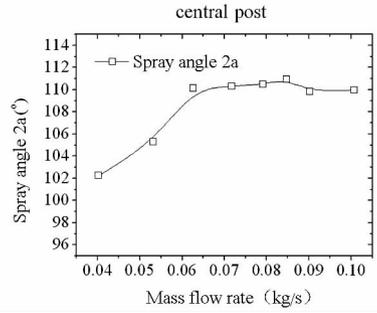


图 10 涡流器离心式喷嘴喷雾锥角随流量的变化  
Fig. 10 Spray cone angle with mass flow rate

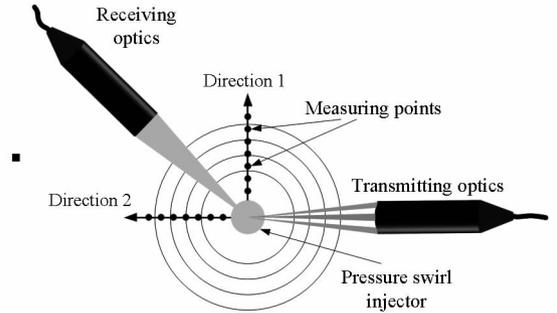
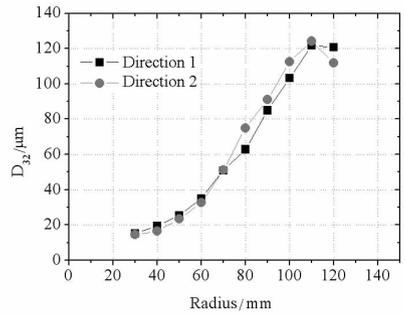


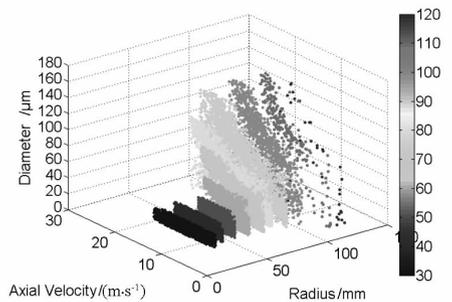
图 11 PDA 测量平面与测量点

Fig. 11 Scheme of spray cross section and measuring points

好,相对误差在  $R = 40\text{mm}$  和  $R = 80\text{mm}$  位置分别为 15.5% 和 17.7%,其余位置均小于 8%,可以认为涡流器离心式喷嘴喷雾场沿周向均匀分布。做出 Direction 1 上各测点的液滴直径 - 轴向速度分布如图 12(b) 所示。从图中可以看出对于涡流器离心式喷嘴喷雾场,喷雾中心位置分布的是直



(a) SMD 分布

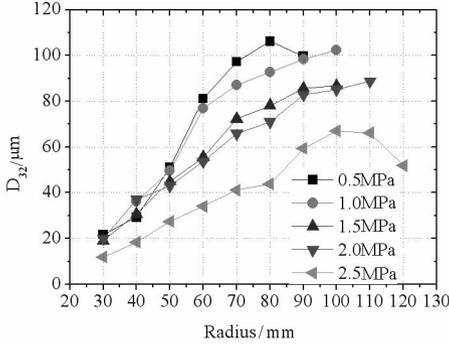


(b) 粒径 - 速度分布

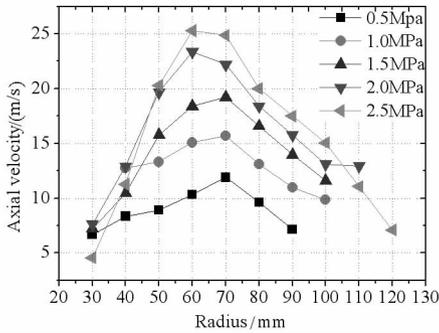
图 12 SMD 和轴向速度的径向分布图

Fig. 12 Radial distribution of SMD and axial velocity

径和轴向速度均较小的液滴。沿径向,液滴直径分布范围逐渐增加,速度分布范围在略微减小之后也逐渐增加。从粒子直径与轴向速度的分布区域来看,大液滴具有较大的轴向速度,分布在图中的左上方。这是因为大液滴是由锥形液膜经一次雾化得到的,其速度接近于液膜的速度,大液滴在气流中运动受到气动力作用进行二次雾化,液滴直径和速度均减小,因此小液滴主要分布于低速区域。



(a) SMD 分布



(b) 轴向速度

图 13 喷注压降对 SMD 和轴向速度的影响

Fig. 13 SMD and axial velocity of pressure swirl injector with different pressure drops

图 13 为离心式喷嘴 SMD 和轴向速度随喷注压降的变化曲线。从图中可以看出随着喷注压降的增加,SMD 沿径向均逐渐减小。因为喷嘴出口液膜厚度随压降的增加逐渐减小,而  $SMD \propto h^{0.4}$ ,故 SMD 会逐渐减小。由图 13(b)可知液滴轴向速度随着压降的增加逐渐增加,因为液膜厚度随压降增加逐渐减小,而由  $m = C_d \sqrt{2\rho\Delta P}$ 可知喷嘴流量随压降增加逐渐增加,因此喷嘴出口处液膜的轴向速度只能显著增加才能满足质量守恒方程。液滴是由液膜破碎而来的,轴向速度较大的液膜自然产生轴向速度较大的液滴。

### 2.4 气液同轴双离心式喷嘴喷雾特性

由图 14 可知气液同轴双离心式喷嘴喷雾锥角随 GLR 的变化关系与传统 GB 喷嘴不同。随着 GLR 的增加,受气体压缩作用的影响,GB 喷嘴的喷雾锥角逐渐减小。当 GLR 较小时,空气在气体旋流器出口膨胀较弱,旋流空气具有径向速度,在涡流器喷嘴出口与气体旋流器出口之间形成一个低压区,锥形液膜在内外压差的作用下向外膨胀,从而使得喷雾锥角增加。当 GLR 较大时,空气在旋流器出口膨胀,从而使得整个喷雾受到压缩。而在离心式喷嘴出口的一个小区域内,空气的离心作用形成的低压区同样使得锥形液膜膨胀。从喷雾空间分布的角度看,喷雾锥角应采用下游喷雾锥角,此时喷雾锥角要小于离心式喷嘴的喷雾锥角。即当 GLR 较小时,旋流空气使喷雾锥角增加,当 GLR 较大时,气体膨胀压缩液体,使得喷雾锥角减小。

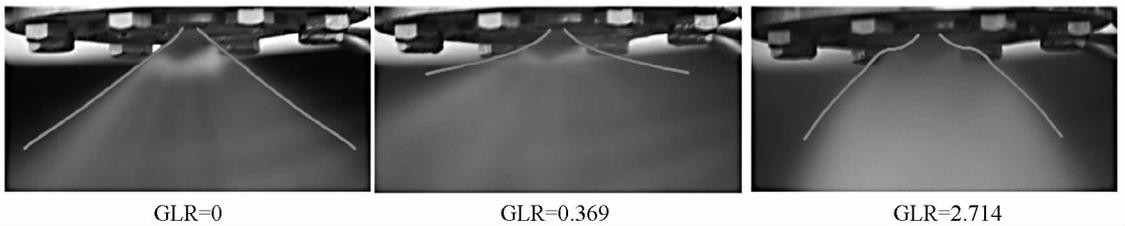
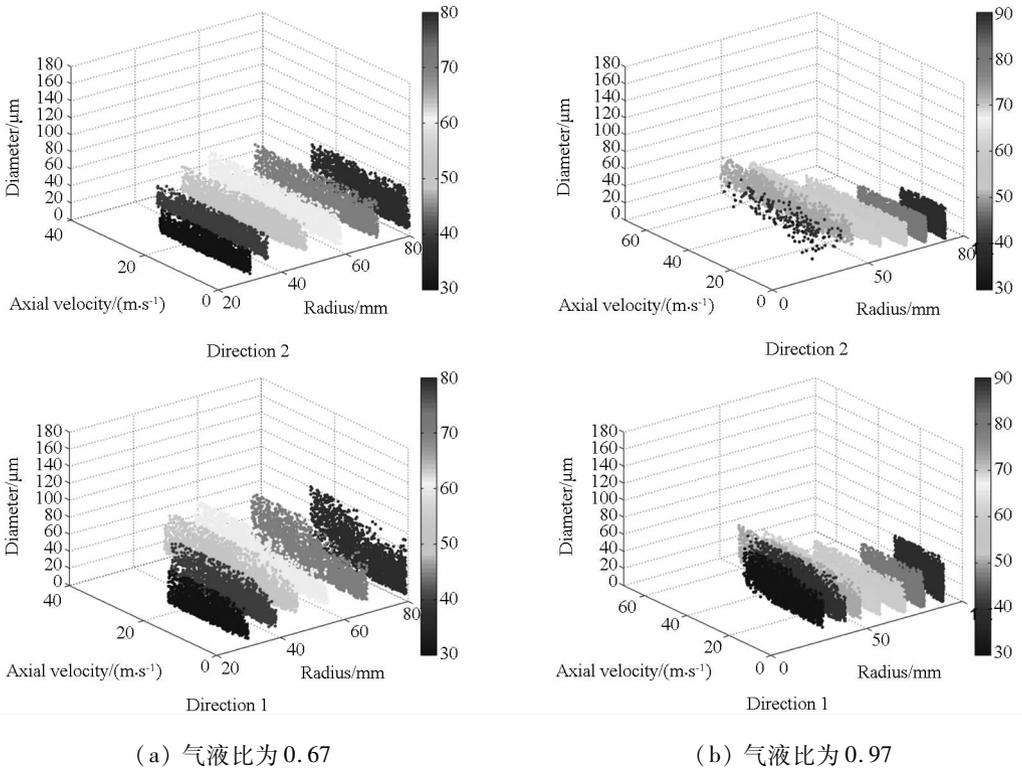


图 14 气液比对气液同轴双离心式喷嘴喷雾锥角的影响

Fig. 14 Spray cone angle of gas-liquid double swirl coaxial injector with different gas-liquid ratio(GLR)

气液同轴双离心式喷嘴在不同 GLR 下喷雾场粒径 - 轴向速度分布如图 15 所示。从图中可以看出,气液同时工作时喷雾场沿径向的粒径和速度分布更加均匀。GLR = 0.67 时,沿径向,粒子轴向速度分布范围呈现先增加后减小的趋势。而粒径分布范围呈逐渐增加趋势,但变化范围远小于单独涡流器离心式喷嘴。并且 Direction 1 方

向液滴粒径在径向上的分布范围更大,这也可以从图 16 中 SMD 的分布看出。说明采用叶片式气体旋流器的双离心式喷嘴在气体工作时整个喷雾场沿周向的均匀性不是很好。由于离心式喷嘴 SMD 沿周向分布均匀,因此这种影响是由旋流空气造成的。



(a) 气液比为 0.67

(b) 气液比为 0.97

图 15 气液同轴双离心式喷嘴喷雾粒径 - 轴向速度分布图

Fig. 15 Diameter-axial velocity distribution of gas-liquid double swirl coaxial injector

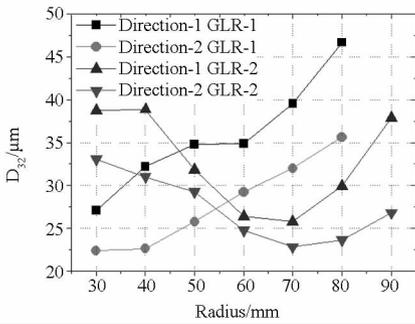


图 16 气液同轴双离心式喷嘴 SMD 周向分布曲线

Fig. 16 Circumferential distribution of SMD for gas-liquid double swirl coaxial injector

进一步增加气液比到  $GLR = 0.97$ , 发现整个喷雾场粒径 - 轴向速度分布发生显著变化。此时粒径分布范围沿径向呈先减小后增加的趋势, 而轴向速度分布范围呈突然增加后逐渐减小的趋势。从粒径 - 轴向速度分布图上看  $GLR = 0.97$  时的气液同轴双离心式喷嘴与涡流器离心式喷嘴正好相反, 图 16 中 SMD 的分布与上述粒径分布相一致。从粒径 - 轴向速度分布图上看气液同轴双离心式喷嘴喷雾分布受 GLR 影响非常大, 增加 GLR 会使得分布特性发生显著变化。这与喷雾锥角受工况影响非常大一样, GLR 不同时旋流空气对锥形液膜所起的作用不同。GLR 较小时, 主要体现为锥形液膜在内外压差下的膨胀, 同时气液相互作用辅助雾化使得粒径分布范围减小, 但 SMD 沿径向的

分布趋势不变, 只是其周向均匀性减弱。GLR 较大时, 气体膨胀压缩喷雾, 使得锥形液膜一次雾化形成的大液滴能够到达喷雾中心区域, 而在喷雾外侧则由于气液作用非常强, 液滴迅速二次雾化成细小液滴。从粒子分布上看, 旋流空气在不同 GLR 下都使得喷雾沿周向分布均匀性变差。

### 3 结论

针对传统气液同轴离心式喷嘴应用于空气/煤油燃气发生器时, 气流速度较大导致火焰难以稳定的问题, 设计了一种气液同轴双离心式喷嘴。采用 VOF 方法分析涡流器离心式喷嘴内部流动过程, 采用单反相机和 PDA 测量离心式喷嘴、气液同轴双离心式喷嘴的喷雾特性, 得到的主要结论有:

1) 涡流器离心式喷嘴内部流动的总压损失主要发生在涡流器槽道入口、收敛段和等直段。等直段内液膜切向速度逐渐减小、轴向速度逐渐增加, 使得液膜厚度减小, 喷雾锥角减小。等直段对雾化具有双重作用, 需要优化。

2) 离心式喷嘴喷雾粒径分布范围沿径向逐渐增加, 轴向速度分布范围沿径向先减小后逐渐增加。随着喷注压降增加, 喷雾锥角逐渐增加, SMD 逐渐减小, 轴向速度逐渐增加。

3) 气液同轴双离心式喷嘴喷雾特性受 GLR 影响很大, GLR 小时, 旋流空气形成低压区使得

喷雾锥角增加,同时气液作用增强使得粒径分布范围减小。GLR 大时,气体膨胀压缩喷雾,使大液滴能够到达喷雾中心,在喷雾外侧由于气液作用非常强,液滴迅速二次雾化成细小液滴。

## 参考文献 (References)

- [1] 刘娟,孙明波,李清廉,等. 基于 VOF 方法分析离心式喷嘴结构参数对性能的影响[J]. 航空动力学报, 2011, 26(12):2826-2833.  
LIU Juan., SUN Mingbo., LI Qinglian, et al. Analysis of geometric parameters influence on pressure swirl injector performance based on VOF interface tracking method [J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(12):2826-2833. (in Chinese)
- [2] 刘娟,李清廉,王振国,等. 基于 VOF 方法模拟离心式喷嘴内部流动过程[J]. 航空动力学报, 2011, 26(9):1986-1994.  
LIU Juan, LI Qinglian, WANG Zhenguo, et al. Numerical simulation of flow field in pressure-swirl injector based on VOF interface tracking method [J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(9):1986-1994. (in Chinese)
- [3] 刘娟,李清廉,刘卫东,等. 离心式喷嘴液膜破碎过程实验[J]. 推进技术, 2011, 32(4):539-543.  
LIU Juan, LI Qinglian, LIU Weidong, et al. Experiment on liquid sheet breakup process of pressure swirl injector [J]. Journal of Propulsion Technology, 2011, 32(4):539-543. (in Chinese)
- [4] Yang L J, Fu Q F, Qu Y Y, et al. Spray characteristics of gelled propellants in swirl injectors [J]. Fuel, 2012, 97:253-261.
- [5] Rashid M S F M, Hamid A H A, Sheng O C, et al. Effect of inlet slot number on the spray cone angle and discharge coefficient of swirl atomizer [J]. Procedia Engineering, 2012, 41:1781-1786.
- [6] Kim S, Khil T, Kim D, et al. Effect of geometric parameters on the liquid film thickness and air core formation in a swirl injector [J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20(1):1-11.
- [7] 王国辉,蔡体敏,何国强,等. 一种旋流式喷嘴的实验和数值研究[J]. 推进技术, 2003, 24(1):28-32.  
WANG Guohui, CAI Timin, HE Guoqiang, et al. Experimental and numerical investigation of a swirl atomizer [J]. Journal of Propulsion Technology, 2003, 24(1):28-32. (in Chinese)
- [8] Moon S, Abo-Serie E, Bae C. Liquid film thickness inside the high pressure swirl injectors; real scale measurement and evaluation of analytical equations [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2010, 34(2):113-121.
- [9] Hamid A H A, Atan R. Spray characteristics of jet-swirl nozzles for thrust chamber injector [J]. Aerospace Science and Technology, 2009, 13(4-5):192-196.
- [10] 苏中高,甘晓华,王宏明,等. 离心式及其气动辅助雾化喷嘴试验研究[C]//中国工程热物理学会 2004 年学术会议论文集, 2004:613-622.  
SU Zhonggao, GAN Xiaohua, WANG Hongming, et al. Experiment investigation on pressure swirl and air-assist atomization injector [C]//2004 Annual Conference of the Chinese Society of Engineering Thermophysics. 2004:613-622. (in Chinese)
- [11] Zhuang F C, Sun J G. Effects of swirl coaxial injector parameters on LOX/GH2 engine combustion performance [R]. AIAA 3697, 2002.
- [12] Yang L J, Ge M H, Zhang M Z, et al. Spray characteristics of recessed gas-liquid coaxial swirl injector [J]. Journal of Propulsion and Power, 2008, 24(6):1332-1339.
- [13] 周进,胡小平,黄玉辉,等. 液体火箭发动机气液同轴式喷嘴混合特性实验研究[J]. 国防科技大学学报, 1997, 19(4):9-13.  
ZHOU Jin, HU Xiaoping, HUANG Yuhui, et al. A study of the mixing characteristics of gas-liquid coaxial swirling injector of liquid rocket engine [J]. Journal of National University of Defense Technology, 1997, 19(4):9-13. (in Chinese)
- [14] Im J H, Cho S, Yoon Y, et al. Comparative study of spray characteristics of gas-centered and liquid-centered swirl coaxial injectors [J]. Journal of Propulsion and Power, 2010, 26(6):1196-1204.
- [15] 刘娟. 旋转锥形液膜破碎过程实验与仿真研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2012.  
LIU Juan. Experimental and numerical simulation of the breakup process of swirling conical liquid sheet [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.
- [16] 彭云晖,林宇震,许宏宏,等. 双旋流空气雾化喷嘴喷雾、流动和燃烧性能[J]. 航空学报, 2008, 29(1):1-14.  
PENG Yunhui, LIN Yuzhen, XU Quanhong, et al. Atomization, aerodynamics and combustion performance of swirl cup [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(1):1-14. (in Chinese)
- [17] 郭新华,林宇震,张驰,等. 离心式同向双旋流空气雾化喷嘴雾化特性研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(10):2249-2254.  
GUO Xinhua, LIN Yuzhen, ZHANG Chi, et al. Experiment investigation on atomization characteristic of an air-blast atomizer with centrifugal nozzle and co-dual-swirl cup [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(10):2249-2254. (in Chinese)
- [18] Zhao Y H, Hou M H, Kong X Z, et al. Investigation on drop size distribution [C]. AIAA/SAE/ASME 20th Joint Propulsion Conference, 1984.
- [19] Heng Q P, Jasuja A K, Lefebvre A H. Influence of air and fuel flows on gas turbine sprays at high pressures [C]. 26th Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute, 1996.
- [20] 田章福. 低浓度酒精/过氧化氢燃气发生器喷雾燃烧过程研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2007.  
TIAN Zhangfu. Research on the spraying and combustion of diluted ethanol/hydrogen peroxide gas generator [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007.
- [21] Mohammad B S. Single annular combustor; experimental investigations of aerodynamics, dynamics and emissions [D]. University of Cincinnati, 2010.
- [22] 朱宁昌,董锡鉴,王新龄,等. 液体火箭发动机设计[M]. 北京:中国宇航出版社, 1994.  
ZHU Ningchang, DONG Xijian, WANG Xinling, et al. Liquid rocket engine design [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1994.
- [23] Huang Y, Yang V. Dynamics and stability of lean-premixed swirl-stabilized combustion [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2009, 35(4):293-364.