

文章编号:1000-8055(2013)09-1933-09

# 旋流空气对双油路离心喷嘴雾化特性影响的实验

周 兵<sup>1</sup>, 吉洪湖<sup>1</sup>, 张宝诚<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

2. 沈阳航空航天大学 动力与能源学院, 沈阳 110136)

**摘 要:** 采用相位多普勒粒子分析仪(PDPA)对带空气旋流器的双油路离心喷嘴的雾化特性进行了实验研究,供油压力的工作范围在 0.3~2.1 MPa,采用轴向逆流器,旋流器叶片出口角为 79°,旋流器前后空气压降在 0.03~0.15 MPa,实验得到了索太尔平均直径(SMD)与喷雾锥角随供油压力与风速的变化规律.结果表明:在相同供油压力下,旋流器通入空气后,喷雾锥角值较未通入旋流空气时将增大 15°~20°,索太尔平均直径比未通入旋流空气时减小 40%.

**关 键 词:** 旋流空气; 离心喷嘴; 多普勒粒子分析仪; 喷雾锥角; 雾化

**中图分类号:** V233.2<sup>+</sup>2

**文献标志码:** A

## Experiment of swirled air effect on spray characteristic of double-line pressure-swirl atomizer

ZHOU Bing<sup>1</sup>, JI Hong-hu<sup>1</sup>, ZHANG Bao-cheng<sup>2</sup>

(1. College of Energy and Power Engineering,  
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. College of Energy and Power Engineering,  
Shenyang University of Aeronautics and Astronautics, Shenyang 110136, China)

**Abstract:** The spray characteristic of the double-line pressure-swirl atomizer with air swirler was investigated using phase Doppler particle analyzer (PDPA). The fuel injection pressure ranged from 0.3 MPa to 2.1 MPa. The axial air swirler with blade outlet angle of 79° was adopted. The air pressure drop across the swirler ranged from 0.03 MPa to 0.15 MPa. The change rules of Sauter mean diameter (SMD) and spray cone angle with fuel injection pressure and swirled air velocity were obtained. The results show that in contrast with the situation without swirled air, the spray cone angle increases by 15°~20° and the Sauter mean diameter decreases by 40% which is induced by swirled air under the same fuel injection pressure.

**Key words:** swirled air; pressure-swirl atomizer; phase Doppler particle analyzer; spray cone angle; spray

燃油喷嘴作为燃烧室的供油装置,其工作性能将直接影响燃烧室的性能.喷雾锥角与雾化程度是评价燃油喷嘴工作性能的主要指标.喷雾锥

角过小,燃料在火焰筒中心轴线附近集中,使中心处过度富油缺氧燃烧,造成燃烧室出口温场热点温度过高;喷雾锥角过大,燃油液滴极易穿透燃

收稿日期:2012-09-08

网络出版地址: [http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130926.1103.201309.1933\\_008.html](http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130926.1103.201309.1933_008.html)

作者简介:周兵(1985—),男,山东淄博人,博士生,主要从事航空发动机传热、传质的研究.

气,打到火焰筒头部壁面上,造成壁面的烧蚀,缩短燃烧室使用寿命.燃油雾化粒度平均直径越大,液滴蒸发越慢,燃烧所需时间越长,将增加发动机的排气污染<sup>[1-5]</sup>.为了改善燃油喷嘴的性能,有必要进一步研究影响喷雾锥角和雾化粒度的因素和影响规律.离心喷嘴是航空发动机燃油喷嘴的主要形式之一,国内外学者对其雾化特性的研究逐步深入,如在对雾化粒度的研究中,丁红明、诸惠民<sup>[6]</sup>对几种离心式压力雾化喷嘴性能进行了实例计算,杨建辉、樊未军等人<sup>[7]</sup>提出了离心式喷嘴雾化参数预估的计算方法,得出了喷雾场中索太尔平均直径的计算方法.陈俊等人<sup>[8-9]</sup>应用相位多普勒粒子分析仪对双油路离心喷嘴雾化特性进行实验研究,得出油雾场中索太尔平均直径的分布以及雾化油滴的平均和脉动速度场,对喷嘴的雾化特性有了更深入的研究.Chu等人<sup>[10]</sup>对压力雾化喷嘴的雾化特性做了详细的研究,得出了喷嘴几何尺寸及供油压力对雾化粒度的影响规律.在对喷雾锥角的研究中,Gellalles<sup>[11]</sup>对影响喷嘴雾化锥角的几何参数做了详细的研究.另外杨立军、葛明和等人<sup>[12]</sup>还研究了影响喷嘴流量的几何参数,结果表明喷口长度增加会导致离心喷嘴的流量增加.

随着高性能燃烧室的发展,依靠单一形式的喷嘴难以达到高温升、低污染燃烧室对燃油雾化的要求,这就要求发展新型组合式喷嘴.目前组合式喷嘴形式较多,如张弛、孙荣伟等人<sup>[13]</sup>将直射式喷嘴与径向双级空气旋流器组合,研究了双级旋流器旋向相反时喷嘴喷雾场中雾化粒度的索太尔平均直径.郭新华、林宇震等人<sup>[14]</sup>将单油路离心喷嘴与径向双级空气旋流器组合,研究了双级空气旋流器旋向相同时喷嘴喷雾场的雾化特性.Hadef和Lenze<sup>[15]</sup>应用PDA(dual-phase Doppler anemometry)研究了旋流杯中双级旋流空气同向流动和反向流动时喷嘴的雾化粒度.Karnawat和Kushari<sup>[16]</sup>对油气混合流体流过喷嘴旋流室的雾化进行了实验研究.结果表明旋流空气的变化能够有效改变喷嘴的雾化特性.

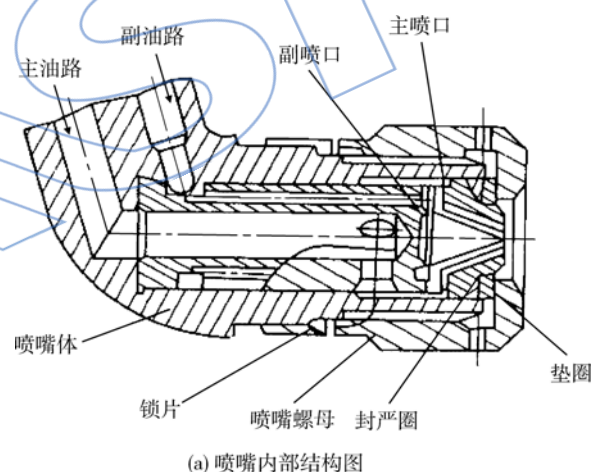
由文献可知,组合式喷嘴是燃油喷嘴发展的必然趋势,而目前国内所研究的组合式喷嘴在雾化方式上更多的是依赖于气动力,这就要求更多的空气参与到燃油的雾化过程.考虑到离心式喷嘴与空气雾化喷嘴在雾化性能方面存在各自的优点,采用压力雾化喷嘴进行一次雾化,利用旋流空气进行二次雾化,达到理想的雾化效果.因此,本文以一种成熟的双油路离心雾化喷嘴为基础,增加了

一种轴向单级空气旋流器,形成了双油路离心式喷嘴与空气单级旋流的组合式喷嘴,该组合式喷嘴使空气旋流方向与燃油喷嘴旋流槽旋向相反.

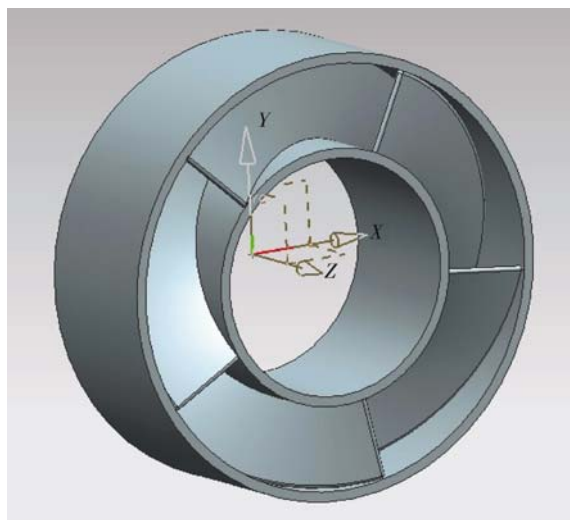
## 1 实验装置和方法

### 1.1 实验喷嘴及旋流器

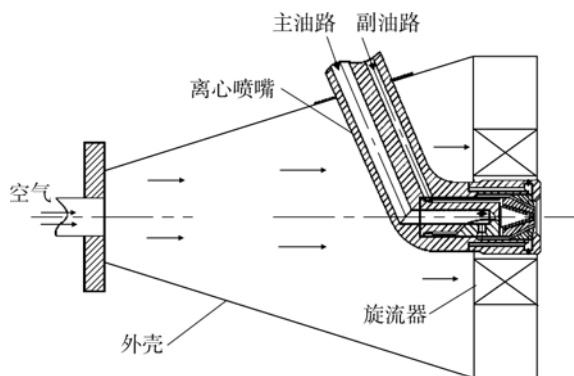
本文所研究的带空气旋流器的喷嘴结构如图1所示.图1(a)给出了喷嘴内部结构图.该喷嘴为双油路双喷口离心喷嘴,喷嘴内部有相互独立的主、副两条油路,每条油路有各自的旋流室和喷口,主、副喷口直径分别为3 mm和1 mm.当发动机供油量较小时,燃油喷嘴仅通过副油路进行供油,即燃油经副油路最终由副喷口喷出;当发动机供油量逐渐增大时,副油路供油压力增大,同时主油路开始供油,即燃油经主油路最终由主喷口喷出.此种喷嘴相当于两种不同几何特性的离心喷嘴组合在一起,能够保证在宽广的工作范围有较



(a) 喷嘴内部结构图



(b) 空气旋流器模型



(c) 喷嘴与旋流器的安装位置和气流流动



(d) 离心喷嘴及其旋流器实物照片



(e) 带空气旋流器的双油路离心喷嘴实验台安装图

图1 实验喷嘴

Fig. 1 Test injector

好的雾化质量。图1(b)为空气旋流器(以下简称旋流器)模型,该旋流器外径  $R_s = 34\text{ mm}$ , 内径  $r_s = 16\text{ mm}$ , 叶片数  $n = 5$ , 叶片厚度  $\delta = 1.5\text{ mm}$ , 出口的安装角  $\beta = 79^\circ$ 。旋流器产生的旋流强度通常用旋流数来度量,旋流数定义为

$$S = 2G_m / (D_{sw} \cdot G_t) \quad (1)$$

它反映了切向动量通量与轴向动量通量的比值,一般认为旋流数  $S$  远远大于 0.6 后为强旋流。实验用空气旋流器旋流数由式(2)得出

$$S = \frac{1 - \left(\frac{r_s}{R_s}\right)^4}{2 \left[ 1 - \frac{(R_s - r_s) \cdot n \cdot \delta}{\pi(R_s^2 - r_s^2) \cos \beta} \right] \left[ 1 - \left(\frac{r_s}{R_s}\right)^2 \right]} \tan \beta \quad (2)$$

计算可知该旋流器的旋流数为 4.15,属于强旋流。图1(c)给出了喷嘴与旋流器的安装位置和气流的流动。离心喷嘴与旋流器通过一个外壳相连,空气由外壳左边圆管进入,经过旋流器后,在喷雾锥外围形成旋流流动的空气。图1(d)给出了该离心喷嘴及其旋流器的实物照片。图1(e)给出了带旋流器的双油路离心喷嘴在实验台上的安装。

## 1.2 实验设备

本实验是在燃油喷嘴综合实验系统(见图2)上进行的,该系统包括:燃油供给系统(包括主、副两条油路)、供气系统、喷嘴实验段、相位多普勒粒子分析仪、回油系统、计算机数据采集系统及控制系统等。

图3给出了相位多普勒粒子分析仪系统工作示意图。本实验采用二维相位多普勒粒子分析仪系统,可直接测得雾化油滴的尺寸分布,据此可以求出测点上液滴的平均直径。其工作原理是用分光器将一束激光束分为直径与光强相等的四束激光,其中两束蓝光,两束绿光,它们在喷雾场中聚焦于一点,形成一椭球形测量体。颜色相同的两束光形成一个测量通道,共两个通道,其中蓝光可测量粒径大小。当油滴穿过测量体时引起干涉条纹变化,产生多普勒脉冲信号。多普勒脉冲信号经接收器接收放大后,传给信号处理器,由多普勒信号的频差便可计算油滴粒径。式(3)给出了粒径的计算公式

$$D = \frac{\phi \lambda}{2\pi(\sin \tau - m \sin \tau')} \quad (3)$$

式中  $\phi$  为相位差,  $\lambda$  为激光波长,  $\tau$  为光束入射角,  $\tau'$  为光束折射角,  $m$  为雾滴折射指数。所采用的坐标系原点位于喷嘴出口截面的中心,喷嘴轴线方向定义为  $Z$  方向。

## 1.3 实验工况

本次实验过程中的变量有 3 个,即主油路供

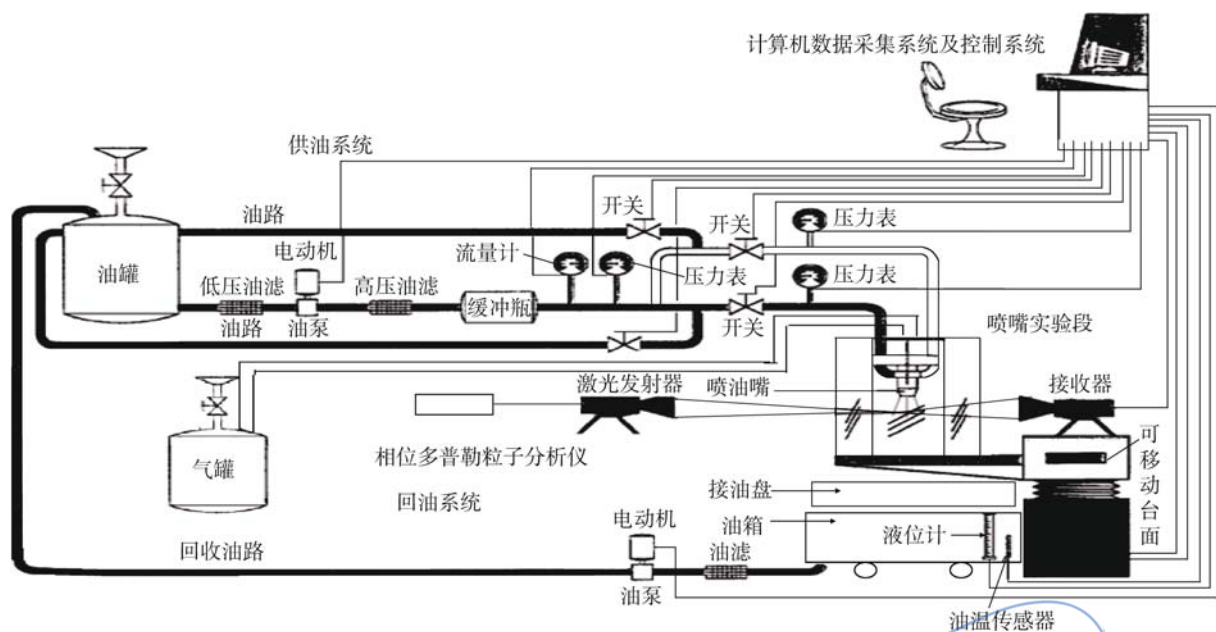


图 2 燃油喷嘴综合实验系统

Fig. 2 Experimental rig of fuel injector

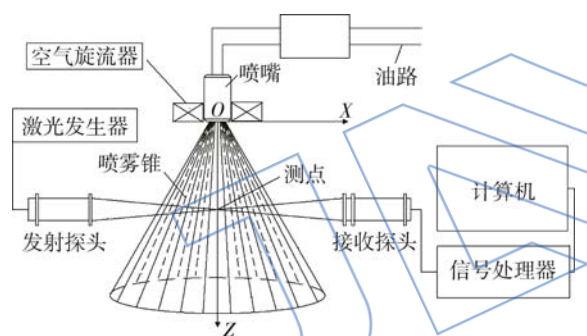


图 3 相位多普勒粒子分析仪系统工作示意图

Fig. 3 Operation sketch map of PDPA

表 1 不同空气压降下的流量与速度

Table 1 Mass flow and velocity in different air pressure drops

| $\Delta p_{\text{air}} /$<br>MPa | $\dot{m}_{\text{air}} /$<br>(kg/s) | $V_{\text{air}} /$<br>(m/s) | $V'_{\text{air}} /$<br>(m/s) | $V''_{\text{air}} /$<br>(m/s) |
|----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 0.03                             | 0.021                              | 24                          | 8                            | 22                            |
| 0.06                             | 0.031                              | 34                          | 12                           | 31                            |
| 0.09                             | 0.038                              | 42                          | 14                           | 36                            |
| 0.12                             | 0.043                              | 48                          | 16                           | 44                            |
| 0.15                             | 0.048                              | 54                          | 18                           | 48                            |

油压力  $\Delta p_{\text{fm}}$ 、副油路供油压力  $\Delta p_{\text{fs}}$  以及流经旋流器的空气压力降  $\Delta p_{\text{air}}$ 。主油路供油压力，副油路供油压力值选取发动机典型工作点，从 0.3 MPa 和 0.6 MPa，依次递增至 2.1 MPa，空气压力降取 0.03~0.15 MPa 之间的 5 个压力点为测量点，不同空气压力降下对应空气流量  $\dot{m}_{\text{air}}$  及速度  $V_{\text{air}}$ ， $V'_{\text{air}}$ ， $V''_{\text{air}}$ ，其中  $V_{\text{air}}$  为旋流器出口绝对速度， $V'_{\text{air}}$  为旋流器出口的轴向速度， $V''_{\text{air}}$  为旋流器出口的切向速度，如表 1 所示。环境压力为一个大气压（即为 101 325 Pa）。

#### 1.4 雾化粒度实验数据处理

燃油从喷嘴喷出以后，形成尺寸不一的雾滴组，因此用雾滴平均直径的概念来表示雾滴组的

雾化粒度，最常用的表示雾滴平均直径的方法是索太尔平均直径。它是用一个假想的直径都为  $d_{32}$  的油滴群来代替原来的燃油雾滴，该油滴群与原燃油雾滴的总体积和表面积相等。其定义式为

$$d_{32} = \frac{\sum n_i D_i^3}{\sum n_i D_i^2} \quad (4)$$

式中  $D_i$  为粒子直径， $n_i$  为直径是  $D_i$  的粒子的个数，求和是对所有的粒子进行的。

#### 1.5 喷雾锥角处理

喷雾锥角是指在一定供油压力下，喷嘴喷出的油雾锥夹角  $\alpha$ 。本实验用数码相机采集喷嘴工作时的喷雾照片，用锥角软件识别油雾锥边界并读取锥角值。如图 4 所示。

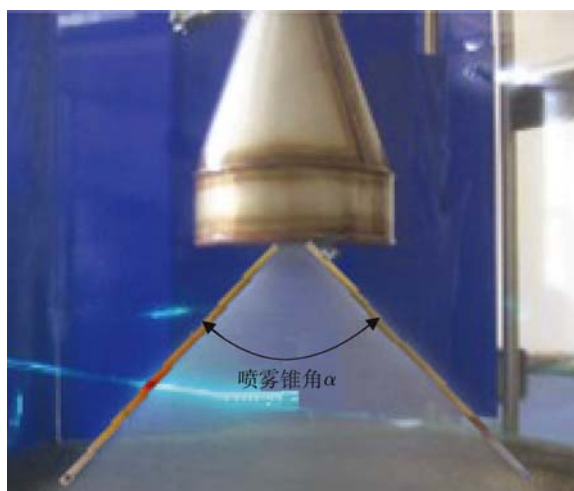


图4 喷雾锥角

Fig. 4 Spray cone angle

## 2 实验结果与分析

### 2.1 喷雾锥角实验结果与分析

#### 2.1.1 旋流空气对主油路单独工作时喷雾锥角的影响

图5给出了主油路单独工作,供油压力为1.2 MPa时,流经旋流器的空气压力降 $\Delta p_{\text{air}}$ 为0, 0.06, 0.15 MPa时,即对应的风速为0, 34, 54 m/s时喷雾锥角的实验照片。由图5(a)~图5(c)可以直观地看出:在主油路供油压力 $\Delta p_{\text{fm}}$ 一定时,随着旋流空气速度的增加,喷雾锥角会逐渐增大。从图中还可以看出随着旋流空气速度的增加,喷嘴油雾场更加弥散,细小的油滴颗粒充满整个测量空间。现场测量时可明显看到在通入旋流空气后的旋转雾场。

图6给出了主油路单独工作时的喷雾锥角。由图可见,在无旋流空气时,供油压力在0.3 MPa时锥角为 $96.9^\circ$ ,供油压力在1.2 MPa时锥角为 $88.4^\circ$ ,供油压力在2.1 MPa时锥角为 $84.6^\circ$ ,可以看出随着主油路压力的增加,主油路喷雾锥角逐渐变小。供油压力在达到1.2 MPa之前,喷雾锥角随供油压力的增加,减小趋势比较明显,当供油压力增加到1.2 MPa时,继续增加供油压力,喷雾锥角基本不变,可以认为供油压力大于1.2 MPa时喷雾锥角不随供油压力的增加而改变。在图6中也给出了有旋流空气时的喷雾锥角的变化,图中 $\Delta p_{\text{air}}$ 是旋流器上游的空气压力与背压的差值,在旋流器叶片出口角一定的情况下, $\Delta p_{\text{air}}$ 的大小决定了旋流空气的速度。有旋流空气与无旋流空气时相比,喷雾锥角有明显的增加,且锥角随 $\Delta p_{\text{air}}$

(a)  $\Delta p_{\text{fm}}=1.2$  MPa,  $V_{\text{air}}=24$  m/s(b)  $\Delta p_{\text{fm}}=1.2$  MPa,  $V_{\text{air}}=34$  m/s(c)  $\Delta p_{\text{fm}}=1.2$  MPa,  $V_{\text{air}}=54$  m/s

图5 供油压力一定时,不同风速下的喷雾锥角  
Fig. 5 Spray cone angles in different swirled air velocities in the same fuel injection pressure

的增大而增加。例如,在主油路供油压力为1.2 MPa、旋流器的空气压力降为0.03 MPa时锥角为 $104.2^\circ$ ,比无旋流空气时增加了 $15.8^\circ$  ( $\Delta p_{\text{fm}}=1.2$  MPa)。在旋流器的空气压力降从0.03 MPa

增加到 0.15 MPa 时, 锥角增大到  $110.3^\circ$ , 锥角值增加了  $6.1^\circ$ . 由图中数据可以看出, 在某一旋流器的空气压力降下, 随供油压力的增加, 喷雾锥角值在逐渐减小, 但变化值不超过  $5^\circ$ . 这样可以使得喷雾锥角值在一定范围内相对稳定.

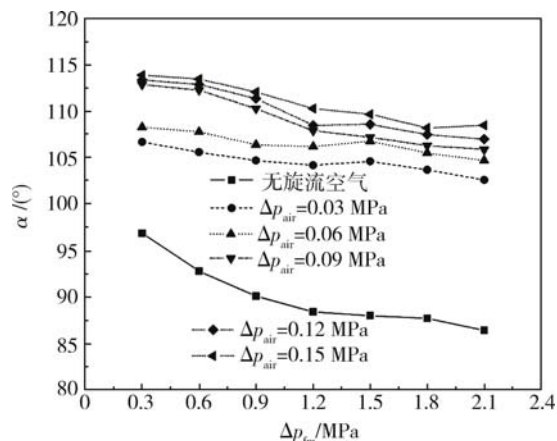


图6 主油路单独工作时的喷雾锥角

Fig. 6 Spray cone angle of main fuel line

### 2.1.2 旋流空气对副油路单独工作时喷雾锥角的影响

图7给出副油路单独工作时的喷雾锥角. 由图可见, 在不通入旋流空气时, 副油路喷雾锥角在  $70^\circ$  左右, 且随着供油压力的增加喷雾锥角略有增加.

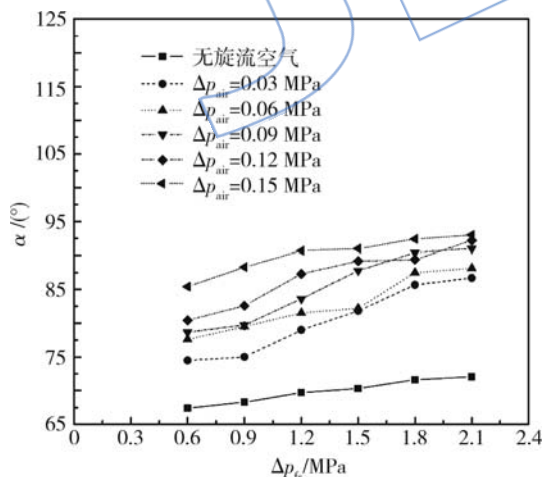


图7 副油路单独工作时的喷雾锥角

Fig. 7 Spray cone angle of second fuel line

### 2.1.3 旋流空气对主副油路共同工作时喷雾锥角的影响

图8给出了主、副油路共同工作时的喷雾锥角. 主、副油路共同工作时, 由于主、副喷口的相互影响, 使得喷雾锥角介于两者之间. 无旋流空气

时, 喷雾锥角平均值为  $87.6^\circ$ . 对比主油路单独工作和主、副油路共同工作的喷雾锥角值, 可以看出两种工作状态下喷雾锥角值变化趋势相同, 这说明主油路供油压力的改变对主、副油路共同工作时的喷雾锥角有很大的影响.

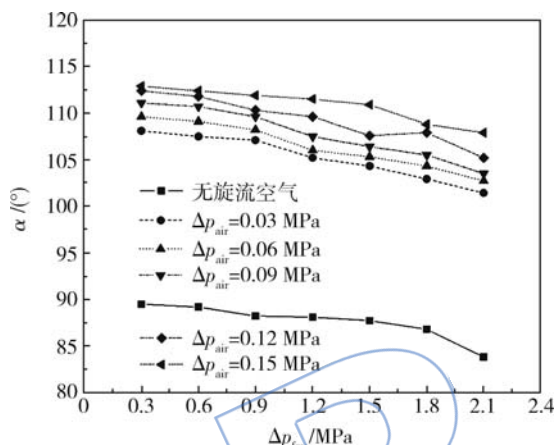


图8 主、副油路共同工作时的喷雾锥角

Fig. 8 Spray cone angle of main-secondary fuel line cooperation

由图6~图8可以看出, 无论主油路单独工作, 副油路单独工作或是主、副油路共同工作均由于增加了旋流空气使喷雾锥角有所增大. 这是由于环绕喷雾锥的空气产生的旋转运动, 造成动压增加, 静压减少, 使喷雾锥向外扩张, 增大了喷雾锥角.

## 2.2 雾化特性实验结果与分析

陈俊等在文献[8]中提出: 燃油形成的喷雾锥中油滴颗粒分布情况如图9所示, 故本次测量点选在具有均匀颗粒的核心区. 根据与本实验喷嘴相配的火筒主燃区位置, 设定雾化粒度测量点在距喷嘴端面  $Z=150\text{ mm}$  截面. 对主油路单独工作、副油路单独工作以及主副油路共同工作时通入旋流空气前后的索太尔平均直径进行测量.

### 2.2.1 旋流空气对主油路单独工作时雾化粒度的影响

由图10可以看出: 在无旋流空气时, 主油路供油压力为 0.3, 1.8, 2.1 MPa 时, 雾化粒度分别是  $27.95, 11.78, 11.31\text{ }\mu\text{m}$ , 即在整个供油压力范围内, 雾化粒度是随供油压力的增加而减小, 且主油路在低压 ( $<0.6\text{ MPa}$ ) 下雾化质量较差. 在供油压力从 0.3 MPa 增加到 1.8 MPa 时, 雾化粒度减少了  $16.17\text{ }\mu\text{m}$ , 减少较明显; 当压力增加到 1.8 MPa 时, 雾化粒度趋于不变. 与文献[9]结论

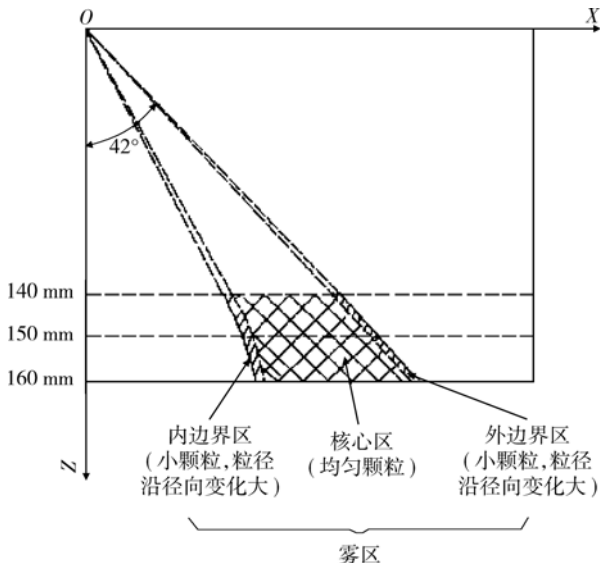


图9 喷雾锥的不同区域

Fig. 9 Different areas of spray cone

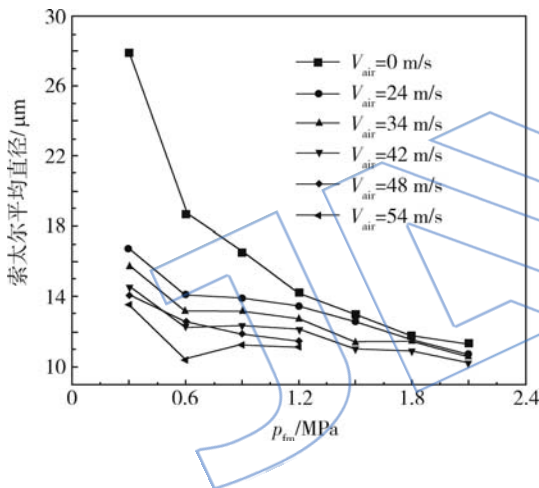


图10 不同风速时索太尔平均直径随供油压力的变化

Fig. 10 SMD varying with change of fuel injection pressure in different swirled air velocities

一致。

通入旋流空气后的雾化粒度值明显比无旋流空气时的雾化粒度值小,且供油压力较低时,旋流空气对燃油的二次雾化效果明显。这是因为在相同供油压力下,燃油流出喷口的速度一定,随风速的增加,两者相对速度增加,气动力增加而提高了雾化质量。而在供油压力较大时,燃油流出喷口的速度增大,气体与液体的相对速度减小,从而气体的二次雾化效果有所减弱。例如在供油压力为 0.3 MPa,风速为 24 m/s,索太尔平均直径为 16.75  $\mu\text{m}$ ,比未通入旋流空气时减小了 11.2  $\mu\text{m}$ ,索太尔平均直径减小 40%。而空气压力降不变,

当供油压力为 2.1 MPa 时,索太尔平均直径为 10.68  $\mu\text{m}$ ,比未通旋流空气时减少了 1  $\mu\text{m}$ 。与单纯离心式喷嘴相比,该组合式喷嘴在供油的初始阶段具有良好的雾化特性。

图 11 给出了在不同风速时,索太尔平均直径随着气液比(ALR)的变化规律,气液比的范围在 0.2~1.0,其变化类似于抛物线型,在顶点左边仍然由压力提供雾化,由于空气流量一定,气液比越小,燃油流量越大,供油压力越大,雾化粒度越小,且随着风速的增加雾化粒度逐渐减小。对比文献[14]中的空气雾化喷嘴雾化效果,该喷嘴兼顾了离心喷嘴与空气雾化喷嘴的优点,且用于雾化的空气量较少。

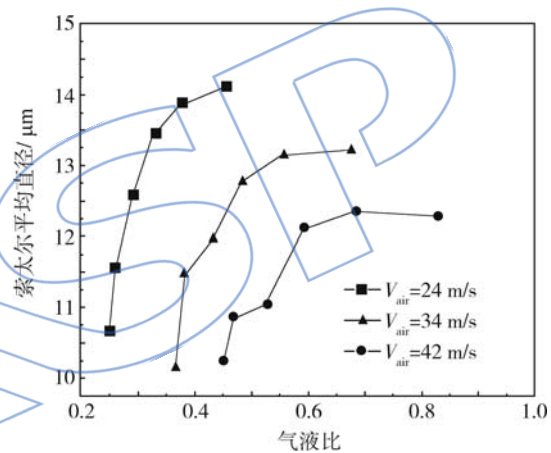


图11 不同风速时索太尔平均直径随气液比的变化

Fig. 11 SMD varying with change of air liquid ratio in different swirled air velocities

### 2.2.2 旋流空气对副油路单独工作时雾化粒度的影响

由图 12 可以看出,无旋流空气时,副油路即使在较低供油压力下,仍然有较好的雾化效果。供油压力从 0.6 MPa 增加 2.1 MPa 时,雾化粒度由 14.23  $\mu\text{m}$  减少到 9.97  $\mu\text{m}$ ,即随着供油压力的增加,雾化粒度值将减小。

在任一供油压力下,通入旋流空气后雾化粒度值明显减小,且随风速的增大而逐渐降低。风速从 24 m/s 逐渐增加到 54 m/s 时,雾化粒度值减小 2~3  $\mu\text{m}$ ;在副油路供油压力大于 1.5 MPa、风速大于 42 m/s 时,雾化粒度值均在 8  $\mu\text{m}$  以下。

图 13 给出了雾滴的索太尔平均直径随气液比的变化规律,气液比的变化范围在 2~16,在相同供油压力时,随着风速的增加,索太尔平均直径

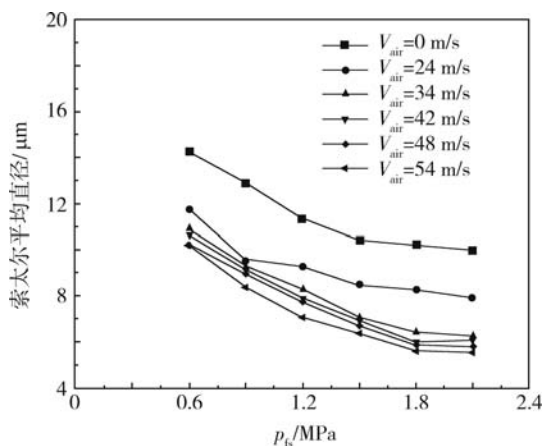


图12 不同风速时索太尔平均直径随供油压力的变化  
Fig. 12 SMD varying with change of fuel injection pressure in different swirled air velocities

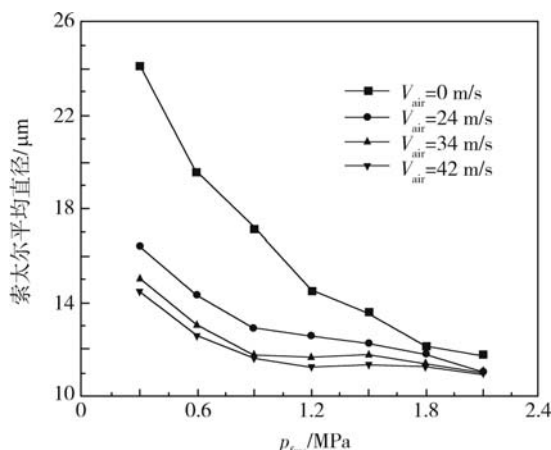


图14 不同风速时索太尔平均直径随供油压力的变化  
Fig. 14 SMD varying with change of fuel injection pressure in different swirl air velocities

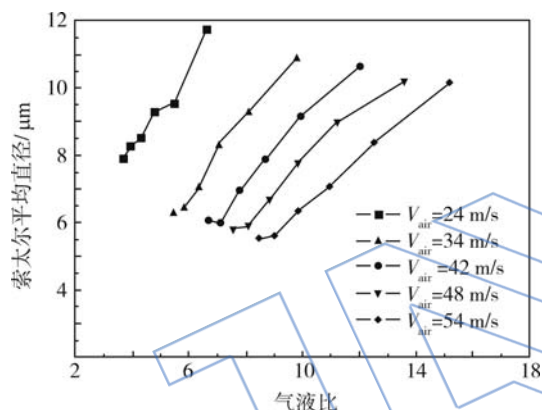


图13 不同风速时索太尔平均直径随气液比的变化  
Fig. 13 SMD varying with change of air liquid ratio in different air swirled velocities

会逐渐减小,但该种形式的组合喷嘴雾化特性与文献[14]中的研究结果不同的是,索太尔平均直径并不是随气液比的增加而减小,这是由于离心喷嘴与旋流器组合形式引起的,喷嘴的雾化主要依靠的是自身的压力来实现的,而通入旋流空气后雾化质量有所提高,表明通入的旋流空气起到了辅助雾化的作用。

### 2.2.3 旋流空气对主、副油路共同工作时雾化粒度的影响

由图14可以看出:供油压力从0.3 MPa增加到2.1 MPa时,雾化粒度值从24.09  $\mu\text{m}$ 减小到11.71  $\mu\text{m}$ ,即雾化粒度随供油压力的增大而增大。

通入旋流空气后雾化粒度值均比未通入旋流空气时的值小,说明了旋流空气能够明显改善雾化。通入旋流空气后,燃油受到比无旋流空气时更

大的气动力作用,使得雾化后的液滴索太尔平均直径要比未通入旋流空气时小。由实验数据还可以看出,在供油压力较低时,增加旋流空气后,燃油索太尔平均直径减小量较大,即该种组合式喷嘴在较低供油压力下也可保持良好的雾化水平。主、副油路共同工作时的雾化特性与主油路单独工作时的雾化特性相似,受篇幅限制不再详细叙述。

## 3 结 论

对带空气旋流器的双油路离心喷嘴雾化特性进行了实验研究,实验结果表明:

1) 对于带空气旋流器的离心喷嘴,通入旋流空气后,喷雾锥角会增大 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$ ,锥角值增加较为明显。

2) 通入旋流空气后,索太尔平均直径均小于相同供油压力下无旋流空气流动时的索太尔平均直径,并且雾化粒度随风速的增大而减小。

3) 在供油压力较低时,通入旋流空气可以使索太尔平均直径比单纯离心喷嘴雾化得到的索太尔平均直径减小40%。

## 参考文献:

- [1] 侯晓春,季鹤鸣,刘庆国.高性能航空燃气轮机燃烧技术[M].北京:国防工业出版社,2002.
- [2] 甘晓华.航空燃气轮机燃油喷嘴技术[M].北京:国防工业出版社,2006.
- [3] 金如山.航空燃气轮机燃烧室[M].北京:宇航出版社,1988.
- [4] 王宏明,全中,甘晓华.燃油喷嘴对燃烧性能的控制研究[J].推进技术,1991,12(6):36-41.

- WANG Hongming, QUAN Zhong, GAN Xiaohua. An investigation on fuel nozzles on combustion performance[J]. Journal of Propulsion Technology, 1991(6): 36-41. (in Chinese)
- [5] Rink K K, Lefebvre A H. Influence of fuel drop size and combustor operating conditions on pollutant emission[J]. International Journal of Turbomachinery and Jet Engines, 1989, 6(2): 113-121.
- [6] 丁红明, 诸惠民. 离心式压力雾化喷嘴性能计算方法的比较[J]. 航空发动机, 1999(3): 44-50.  
DING Hongmin, ZHU Huimin. Spray parameters of pressure-swirl atomizer[J]. Aeroengine, 1999(3): 44-50. (in Chinese)
- [7] 杨建辉, 樊未军, 杨茂林. 离心式喷嘴雾化参数的计算[J]. 航空动力学报, 2003, 18(6): 799-802.  
YANG Jianhui, FAN Weijun, YANG Maolin. A calculation of spray parameters of pressure-swirl atomizer[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(6): 799-802. (in Chinese)
- [8] 陈俊, 吉洪湖, 张宝诚. 双路离心喷嘴雾化特性的实验[J]. 航空动力学报, 2010, 25(4): 774-779.  
CHEN Jun, JI Honghu, ZHANG Baocheng. Experimental investigation of spray characteristics of a double line pressure-swirl atomizer[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(4): 774-779. (in Chinese)
- [9] 陈俊, 吉洪湖, 张宝诚. 双油路离心喷嘴雾化油滴的平均和脉动速度场的实验[J]. 航空动力学报, 2010, 25(11): 2464-2471. (in Chinese)  
CHEN Jun, JI Honghu, ZHANG Baocheng. Investigation on mean and fluctuation velocity distribution of droplet from a double line pressure-swirl atomizer with PDPA[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(11): 2464-2471. (in Chinese)
- [10] Chu C C, Chou S F, Lin H I, et al. An experimental investigation of swirl atomizer sprays[J]. Heat Mass Transfer, 2008, 45(1): 11-22.
- [11] Gellalles A G. Effect of orifice length-diameter ratio on spray characteristics[R]. National Advisory Committee for Aeronautics TN-352, 1930.
- [12] 杨立军, 葛明和, 张向阳, 等. 喷口长度对离心喷嘴雾化特性的影响[J]. 推进技术, 2005, 26(3): 209-214.  
YANG Lijun, GE Minghe, ZHANG Xiangyang, et al. Effects of spout length on spray characteristic of swirl injector[J]. Journal of Propulsion Technology, 2005, 26(3): 209-214. (in Chinese)
- [13] 张弛, 张荣伟, 徐国强, 等. 直射式双旋流空气雾化喷嘴的雾化效果[J]. 航空动力学报, 2006, 21(5): 805-809.  
ZHANG Chi, ZHANG Rongwei, XU Guoqiang, et al. Experimental investigation on atomization of an air-blast atomizer with plain-orifice nozzle and dual-swirl cup[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(10): 805-809. (in Chinese)
- [14] 郭新华, 林宇震, 张弛, 等. 离心式同向双旋流器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)
- [15] Hadeef R, Lenze B. Effects of co-and counter-swirl on the droplet characteristics in a spray flame[J]. Chemical Engineering and Processing, 2008, 47(12): 2209-2217.
- [16] Karnawat J, Kushari A. Spray evolution in a twin-fluid swirl atomizer[J]. Atomization and Sprays, 2008, 18(5): 449-470.