

文章编号: 1000-8055(2010)04-0774-06

双路离心喷嘴雾化特性的实验

陈 俊¹, 吉洪湖¹, 张宝诚²

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

2. 沈阳航空工业学院 能源与动力学院, 沈阳 110136)

摘 要: 采用相位多普勒粒子分析仪(PDPA)对某型航空发动机双路离心喷嘴的雾化特性进行了实验研究,得到了索太尔平均直径(d_{32})的空间分布和喷雾锥角.实验结果表明:液滴尺寸随着供油压力的增大而减小,当压力增大到一定程度,液滴尺寸趋于不变;当主、副油路分别单独工作时,随测量横截面与喷口之间距离 z 的增加, d_{32} 减小;在供油压力不变时,同一个测量横截面内,随着径向距离 x 的增加 d_{32} 值变化不大;喷雾锥角基本不随供油压力改变而变化.

关 键 词: 双路离心喷嘴; 雾化粒度; 喷雾锥角

中图分类号: V233.2⁺2

文献标识码: A

Experimental investigation of spray characteristics of a double line pressure-swirl atomizer

CHEN Jun¹, JI Hong-hu¹, ZHANG Bao-cheng²

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

2. College of Energy and Power Engineering,
Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, Shenyang 110136, China)

Abstract: The atomization quality of a double line pressure-swirl atomizer for aero-engine was investigated using phase Doppler particle analyzer (PDPA). The spacial distributions of Sauter mean diameter (d_{32}) and the angle of spray cone were obtained. The results show that: the droplet size decreases with the increase of fuel-supplying pressure, and tends to become invariable when the pressure rises to certain extent; the spray cone angle is basically independent from fuel-supplying pressure; d_{32} decreases with the widening distance from the spray nozzle, when the main or secondary fuel lines operates respectively; at the same measuring cross section, d_{32} slightly changes with the radial distance.

Key words: double line pressure-swirl atomizer; droplet size; spray cone angle

燃油喷嘴是航空发动机燃烧室的一个重要组成部分,其雾化性能的好坏直接关系到燃烧室能否可靠点火、稳定工作,能否满足发动机的推力耗油率和工作经济性的要求^[1-3].反映喷嘴雾化性能好坏的主要参数有:雾化粒度和喷雾锥角.雾化粒度反映了油雾颗粒尺寸的大小.燃烧室最小点火能量与索太尔平均直径成正比,平均直径越大,点

火越困难;另外平均直径越大意味着粗大的油滴越多,大油滴在燃烧室中运动时能穿过燃气到达壁面上,引起壁面局部过热、蚀积焦,造成燃烧效率降低;喷雾锥角的大小是决定燃烧室内燃油分布的一个重要因素,它在很大程度上决定了燃料在燃烧空间中的分布.喷雾锥角过大,液滴会打到火焰筒头部壁面,造成头部过热烧蚀;喷雾锥角过

收稿日期:2009-03-27; 修订日期:2009-07-16

作者简介:陈俊(1981-),男,湖南津市人,博士生,主要从事航空发动机燃烧、传热、传质的研究.

小,使更多液滴集中在火焰筒中心线附近,导致中心区过于富油,燃烧不完全,易于冒烟和积炭。

航空发动机上采用的燃油喷嘴有多种类型,如离心式喷嘴,空气雾化喷嘴和组合式喷嘴等。其中离心式喷嘴是国内外现役航空发动机中广泛使用的一种燃油喷嘴。关于这种喷嘴的雾化特性已经有许多研究者进行了深入的研究,如 Simmons^[4]提出平均直径及分布指数是影响离心喷嘴液滴尺寸分布的两个参数;金如山^[5]提出雾化平均直径 d_{32} 和喷嘴直径的平方根成正比,即 $d_{32} \propto d^{0.5}$ 。丁红明、诸惠民^[6]对几种离心喷嘴性能进行了实例计算。杨立军等人^[7]的研究表明喷嘴口长度增加会导致离心喷嘴的流量增加。杨建辉等人^[8]提出了离心式喷嘴雾化参数预估的计算方法。

由国内外文献可知,双路离心式喷嘴作为一种成熟的、已经装备的燃油喷嘴,目前对其雾化特性的实验研究较少。本文采用相位多普勒粒子分析仪(PDPA)和计算机图像处理等先进测试和处理手段分别对某型双路离心燃油喷嘴的雾化粒度、喷雾锥角进行了实验研究,并研究了不同工况下,喷嘴主、副油路雾化特性相互影响。

1 实验装置和方法

1.1 实验喷嘴

本文所研究的喷嘴是某型航空发动机主燃烧室的燃油喷嘴,其结构如图1所示。其中图1(a)给出了喷嘴内部结构示意图,图1(b)为实验喷嘴实物照片。此喷嘴是双油路压力雾化喷嘴,双室双喷口型,喷嘴壳体内有主、副两条油路,互相独立,并有各自的旋流器和喷口,主、副喷口直径分别为2.8 mm和1 mm。当发动机的供油量小时,供油压力较低,仅由副油路供油,即燃油从副油路1进入,经过油滤2进入副旋流器5,最后从副喷口7喷出。当发动机供油量增大时,副油路内的油压逐渐增大,燃油从副喷口喷出的同时主油路也开始供油,即燃油从主油路3进入,通过主旋流器4从环形主喷口6喷出。这种喷嘴相当于两种不同几何特性的离心式喷嘴组合在一起,能保障在较大的供油范围内保持良好的雾化特性。为了防止喷嘴积炭,在外罩9上开有吹除积炭的小孔8,从压气机引来的高压气体经小孔喷出。这样,一方面有助于燃油雾化,同时又可吹除沾附在喷嘴上的燃油,防止积炭的发生。

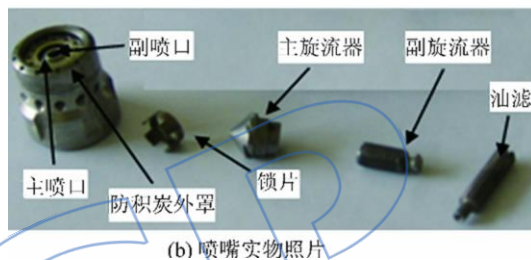
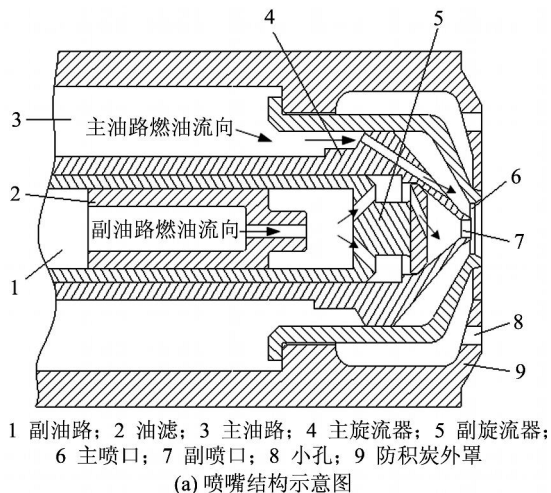


图1 实验喷嘴

Fig. 1 Test injector

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。该系统由:燃油供给系统、喷嘴试验段、PDPA、回油系统和计算机数据采集系统及控制台等组成。

图3给出了喷嘴的安装、雾锥的形状、研究中所采用的坐标系和相位多普勒粒子分析仪PDPA系统的布置及测点示意图。所采用的是二维PDPA系统,该系统可直接测得雾化油滴的尺寸分布和速度分布,据此可求出测点上液滴的平均直径和两个方向上的平均速度分量。其工作原理是把一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,可测量粒径大小和二维的速度大小和方向。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。多普勒脉冲信号由接收探测器接收放大后,再传给信号处理器,根据多普勒脉冲信号的相位差计算粒子的大小,根据多普勒信号的频差计算粒子速度大小,式(1)和(2)分别为计算粒径大小和速度大小的公式

$$D = \frac{\phi \lambda}{2\pi (\sin \tau - m \sin \tau')} \quad (1)$$

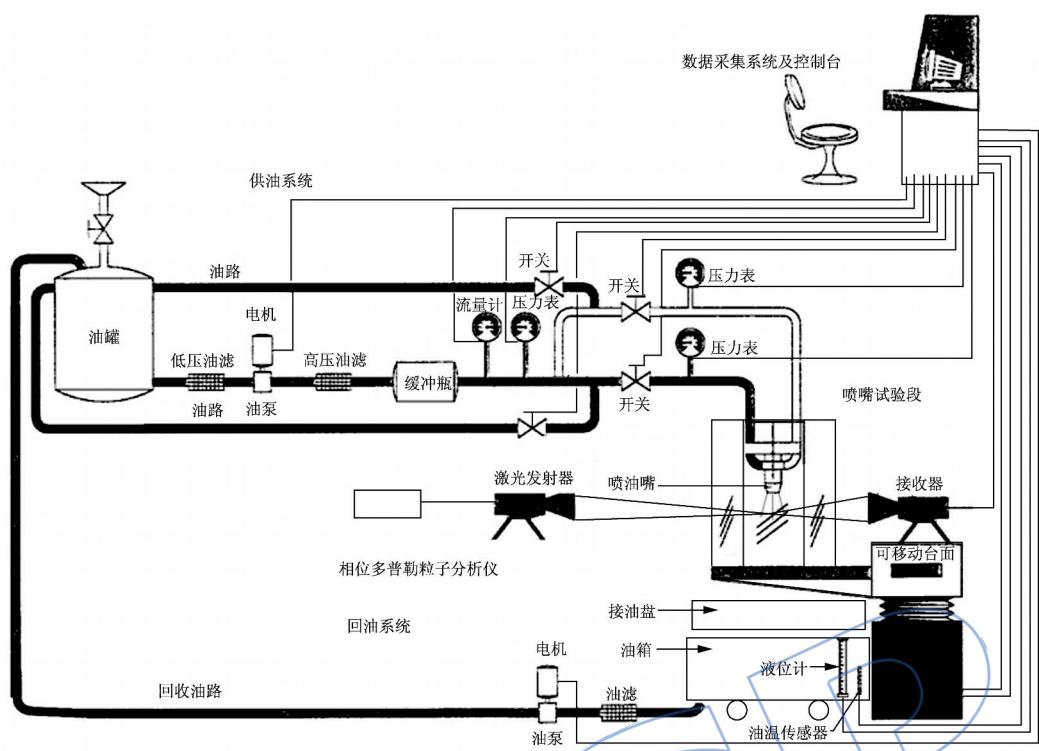


图 2 燃油喷嘴综合实验系统
Fig. 2 Experimental rig of injector

$$V = \frac{f\lambda}{2\sin(0.5\tau)} \tag{2}$$

式中 ϕ 为相位差, f 为多普勒频差, λ 为激光波长, τ 为光束入射角; τ' 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, 径向方向定义为 x 方向.

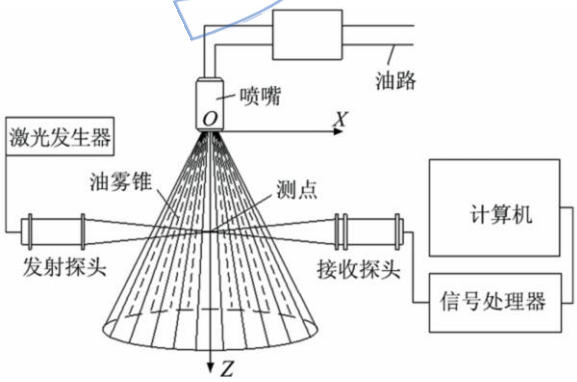


图 3 PDPA 工作示意图
Fig. 3 Operation sketch map of PDPA

1.3 雾化粒度实验数据处理

雾锥中任一测点的油滴尺寸都是随机变化的, 为此常采用其统计平均特性表征其粒度的大小. 最常用的油雾平均直径是索太尔平均直径

d_{32} , 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液雾, 该油滴群与原油雾的总体积和总表面积相等. 其定义式为

$$d_{32} = \frac{\sum n_i D_i^3}{\sum n_i D_i^2} \tag{3}$$

式中 D_i 为粒子直径, n_i 为直径为 D_i 的粒子的个数, 求和是对所有的粒子进行.

2 实验结果和分析

2.1 雾化粒度的空间分布及随供油压力的变化

2.1.1 雾化粒度的空间分布

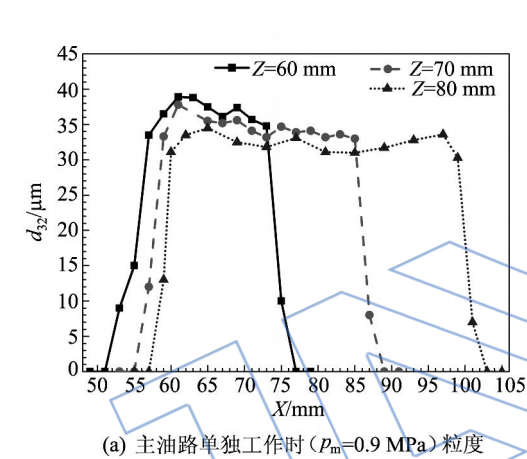
该实验主要测量了 $z = 60, 70, 80$ mm 三个横截面上雾化粒度沿径向 x 的变化情况. 图 4~图 6 分别给出了主、副油路单独工作时和主、副油路共同工作时的部分实验结果. 喷嘴供油压力为定值, 主、副油路分别单独工作时, 主油路压力 $p_m = 0.9$ MPa, 副油路压力 $p_s = 1.8$ MPa; 主、副油路共同工作时 $p_m = 0.9$ MPa, $p_s = 1.8$ MPa.

图 4(a) 为主油路单独工作时, 在 $z = 60, 70$ mm 和 80 mm 截面内油雾粒度沿径向距离 x 的变化规律. 可以看出在 $z = 60$ mm 截面内, 在 $x < 51$ mm 的范围内 d_{32} 的值为 0, 即在雾锥中心区域内油滴数量很少几乎为零; 在 51 mm $< x <$

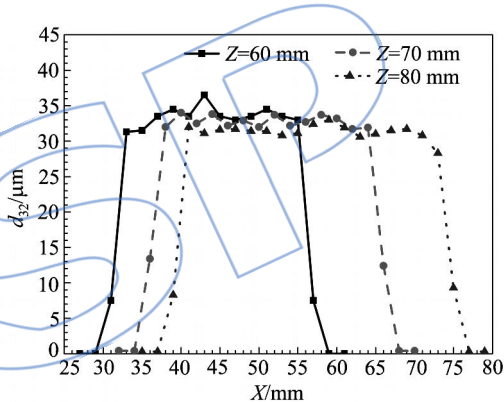
56 mm 的区域内,随着 X 的增加 d_{32} 迅速增加到 $34\mu\text{m}$ 左右;在 $56\text{ mm} < X < 73\text{ mm}$ 范围内,粒径几乎保持不变;在 $73\text{ mm} < X < 77\text{ mm}$ 范围内,随着 X 的增加, d_{32} 迅速减少到 0. 这说明在油雾锥中心区和油雾锥外的油滴数很少,可以认为是无雾区. 雾区介于这两个区域之间. 雾区又可分为内边界区、核心区和外边界区. 大多数的油滴粒子都分布在核心区,这一区域内雾化液滴的 d_{32} 值沿径向几乎不变. 两个边界区是核心区与无雾区之间的过渡区域. 在这两个区中 d_{32} 较小,并且沿径向的变化很大. 在 Z 值增加至 70 mm 和 80 mm 时, d_{32} 随 X 的变化曲线基本相似;只是核心区加厚,内外边界区均沿径向向外移,随着 Z 值的增加,核心区中油滴的 d_{32} 值略有减少. 图 4 (b) 是根据图

4(a) 中数据绘制的 $Z = 60, 70, 80\text{ mm}$ 截面上雾区分布示意图. 雾区外边界的连线与喷嘴轴线的夹角为 50° 左右,这与图 9 得到的喷雾锥角是一致的.

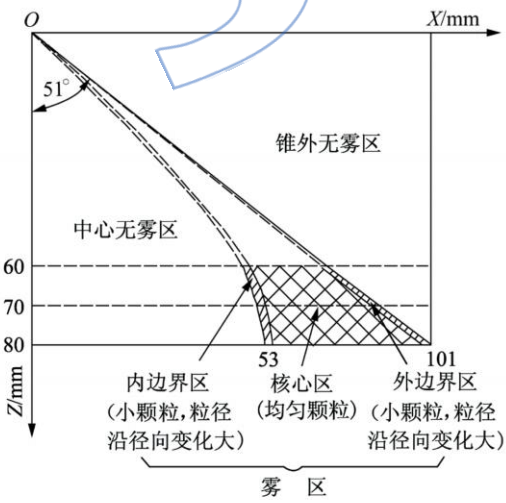
图 5 (a) 给出了副油路单独工作时,在 $Z = 60, 70$ 和 80 mm 截面内油雾粒度沿径向距离 X 的变化规律. 可以看出,副油路单独工作时粒度沿径向的分布规律和主油路单独工作时基本相似,也存在油雾核心区、边界区及无雾区,雾区中的 d_{32} 值基本在 $30\sim 35\mu\text{m}$ 范围. 在相同的 Z 值条件下,副油路的 d_{32} 值比主油路的 d_{32} 值小, Z 值越大,雾区中油滴的 d_{32} 越小,这是由于油雾滴在空气作用下不断破碎、蒸发,使得雾滴的 d_{32} 沿着喷射方向逐渐减小.



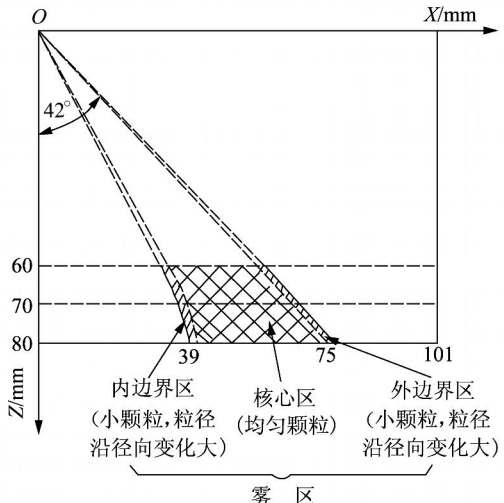
(a) 主油路单独工作时 ($P_m=0.9\text{ MPa}$) 粒度



(a) 副油路单独工作时 ($P_s=1.8\text{ MPa}$) 粒度沿径向的分布



(b) 主油路单独工作时 ($P_m=0.9\text{ MPa}$) 油雾锥的不同区域



(b) 副油路单独工作时 ($P_s=1.8\text{ MPa}$) 油雾锥的不同区域

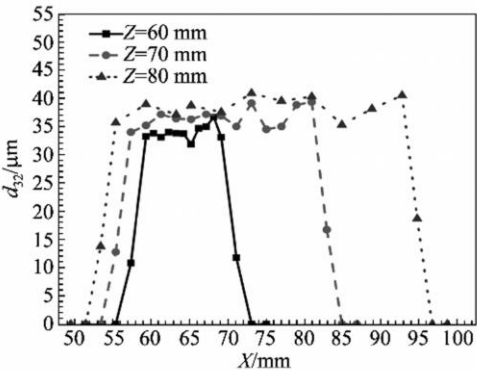
图 4 主油路单独工作时的雾化特性

Fig. 4 Spray characteristics when main fuel line works respectively

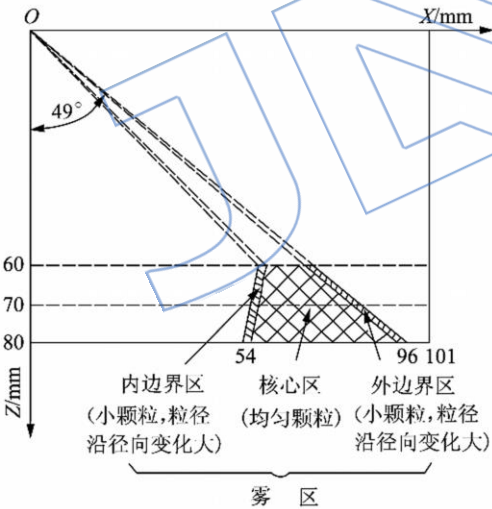
图 5 副油路单独工作时的雾化特性

Fig. 5 Spray characteristics when secondary fuel line works respectively

图 6(a) 给出主、副油路共同工作时, $Z = 60$, 70 mm 和 80 mm 截面内油雾粒度沿径向距离 X 的变化规律. 由图可以看出: 油雾粒子的空间分布和主、副油路分别单独工作时类似, 同样具有明显的分区特征. 与主、副油路单独工作时相反的是, 随着 Z 值的增加, 核心区的 d_{32} 值不断增加, 这是由于主、副油路共同工作时, 来自主油路和副油路的小颗粒不断相互融合形成大颗粒, 因而 d_{32} 值也不断增大.



(a) 共同工作时 ($p_m=0.9\text{ MPa}$, $p_s=1.8\text{ MPa}$) 粒度沿径向的分布



(b) 共同工作时 ($p_m=0.9\text{ MPa}$, $p_s=1.8\text{ MPa}$) 油雾锥的不同区域

图 6 主、副油路共同工作时的雾化特性

Fig. 6 Spray characteristics when main-secondary fuel line cooperation

2.1.2 雾化粒度随供油压力的变化

图 7 的三条曲线分别给出了主油路单独工作、副油路单独工作及主、副油路共同工作时油滴索太尔平均直径 d_{32} 随供油压力的变化. 主、副油路分别单独工作时供油压力的工作范围相同, 均

为 $0.3\sim 2.7\text{ MPa}$. 主、副油路共同工作时, 主油路压力在 $0.3\sim 2.7\text{ MPa}$ 之间变化, 副油路的压力取某典型工况下的值, 即 1.8 MPa .

由图 7 可以看出: 主油路单独工作时随着供油压力的升高, d_{32} 值逐渐减小; 压力从 0.3 MPa 增加到 1.2 MPa 的过程中, d_{32} 数值减小的很快. 在主油路的供油压力 $p_m > 1.2\text{ MPa}$ 以后再增加压力, d_{32} 减小的幅度降低. 副油路单独工作时, 在相同的供油压力下, 副油路的 d_{32} 值明显低于主油路的 d_{32} 值, 并且随压力的增加 d_{32} 基本保持不变, 约在 $33.5\text{ }\mu\text{m}$ 左右. 这是由于在离心喷嘴中, 燃油在喷口内不是充满整个截面而是形成很薄的贴壁油膜, 在空气阻力的剪切作用下, 薄油膜不断破裂、粉碎, 形成雾滴群. 副喷口直径, 副油路旋流室直径, 副油路旋流槽深度、宽度、槽截面积均小于主喷口的对应参数, 在相同供油压力下, 在副喷口处形成的油膜比主喷口薄, 使得副油路的油滴更容易破碎, 这是造成副油路 d_{32} 小于主油路 d_{32} 的主要原因.

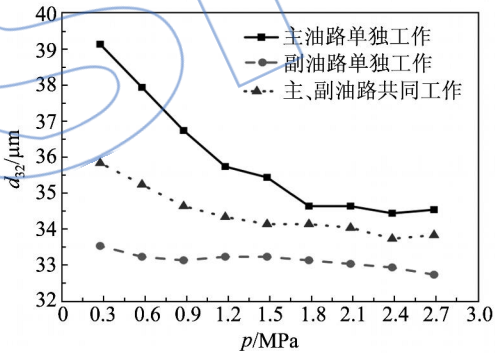


图 7 主、副油路单独工作及主、副油路共同工作粒度

Fig. 7 Diameter of spray droplet when main or secondary fuel line works respectively and main-secondary fuel line cooperation

在主、副油路共同工作的条件下(副油路油压 p_s 保持 1.8 MPa 不变), 油雾的 d_{32} 值随主油路压力的增大缓慢下降. 当主油路供油压力大于 1.5 MPa 后, 油雾的 d_{32} 值基本保持在 $34\text{ }\mu\text{m}$ 左右, 这表明当压力高于 1.5 MPa 后, 其雾化质量基本稳定, 将雾化粒度和主油路压力之间的数据进行拟合, 可得到了主、副油路共同工作时雾化粒度与主油路压力之间的拟合关系, 即

$$d_{32} = 3.14543 \times \exp\left(-\frac{p_m}{0.75727}\right) + 33.8 \tag{4}$$

其中 p_m 的单位为 MPa , d_{32} 的单位为 $\text{ }\mu\text{m}$.

2.2 喷雾锥角随压力变化

喷雾锥角是指在离喷嘴喷口端面一定距离处的锥面切线所形成的夹角,如图8所示。

图9为喷嘴在主、副油路单独工作以及主副油路共同工作时,喷雾锥角 α_p 随压力变化的实验结果。

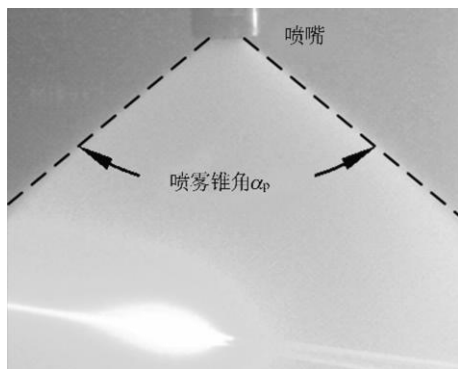


图8 喷雾锥角的定义

Fig.8 Definition of spray angle

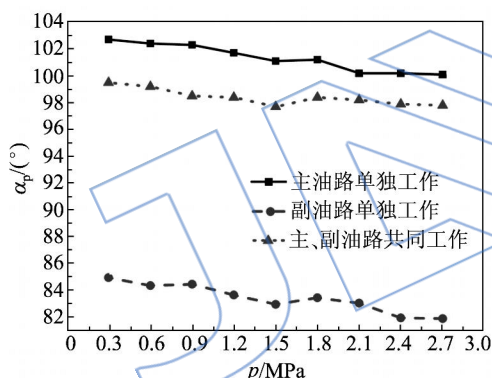


图9 喷雾锥角实验结果

Fig.9 Spray angle of test injector

从图9中可以看出:随着主油路压力的增加,主油路喷雾锥角略有减少.当压力从0.3 MPa升至2.4 MPa, α_p 减少量仅为 1.8° ,相对减少量约为1.82%.对于喷雾锥角测量,这个变化量已在测量误差范围之内,因此基本上可以认为压力对喷雾锥角的影响很小.该喷嘴主油路喷雾锥角的测量值在 $100^\circ \sim 103^\circ$ 范围.副油路喷雾锥角 α_p 随供油压力的变化趋势与主油路相似,但 α_p 的测量值在 $82^\circ \sim 86^\circ$ 之间变化.主、副油路共同工作时,在同一压力下喷雾锥角比主油路的喷雾锥角有所减小,约小 $2^\circ \sim 3^\circ$ 。

3 结论

实验研究表明:

1) 燃油雾化粒度分布呈现明显的分区特性.大部分的油雾粒子分布在雾区内,且 d_{32} 值沿径向距离 x 的变化不大.主、副油路分别单独工作时,随着距喷口端面距离 z 的增加,相同径向位置上的 d_{32} 值略有减小;而主、副油路共同工作时,随着 z 的增加,相同径向位置上的 d_{32} 值有所增加.无论对于主油路、副油路还是主、副油路共同工作时,雾化粒度 d_{32} 都随着供油压力的增大而减小,当供油压力大于1.5 MPa时,雾化粒度趋于不变,约为 $37\mu\text{m}$ 左右。

2) 主油路单独工作时的雾化锥角为 102° 左右,而副油路单独工作时的喷雾锥角为 85° 左右;共同工作时,由于主、副喷口的相互作用,使得喷雾锥角略小于主油路单独工作时的喷雾锥角,约为 100° ;喷雾锥角与压力无关,基本上保持不变,主要取决于喷嘴几何尺寸。

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] 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, 12(6): 36-41. (in Chinese)
- [4] Simmons H C. The correlation of droplet size distribution in fuel nozzle sprays[J]. J. Eng. Power, 1977, 99(3): 309-319.
- [5] 金如山.航空燃气轮机燃烧室[M].北京:宇航出版社,1985.
- [6] 丁红民,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, CHU Huimin. Spray parameters of pressure-swirl atomizer[J]. Aeroengine, 1999(3): 44-50. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] 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)