

燃油温度对离心喷嘴雾化特性影响的试验

王家俊¹, 桂 韬², 邱 伟², 段争梁¹, 梅 雨¹, 颜应文¹

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;
2. 中国航空发动机集团有限公司 四川燃气涡轮研究院, 成都 610500)

摘 要: 对某中心分级燃烧室头部的三种型号离心喷嘴副油路燃油喷入静止大气中的雾化特性进行了试验研究, 获得了不同进口燃油温度(−40~80 ℃)和供油压差对燃油雾化特性的影响规律。利用相位多普勒粒子测量技术(PDPA)测量了沿流向距离离心喷嘴出口 30 mm 平面上的油雾特性, 并利用激光粒度分析仪对试验结果进行了进一步验证。研究表明: ①离心喷嘴的流量数随燃油温度的升高而逐渐减少, 且在低温段下降幅度更大; ②测量平面上沿直径各处的 Sauter 平均直径(SMD)在低温段随燃油温度的升高而减小, 且油锥中心处的 SMD 下降幅度更大; ③利用激光粒度分析仪测得的油雾场粒径分布在一定程度上验证了 PDPA 测量结果的正确性, 液滴特征直径和液滴尺寸分布系数随供油压差的增大而减小。

关 键 词: 雾化特性; 粒径分布; 离心喷嘴; 燃油温度; 激光多普勒

中图分类号: V232 **文献标志码:** A

Experiment on the influence of fuel temperature on the atomization characteristics of centrifugal nozzles

WANG Jiajun¹, GUI Tao², QIU Wei², DUAN Zhengliang¹,
MEI Yu¹, YAN Yingwen¹

(1. College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Sichuan Gas Turbine Establishment,
Aero Engine Corporation of China, Chengdu 610500, China)

Abstract: The atomization characteristics of three types of centrifugal nozzles' injection into static atmosphere at the head of a central staged combustion chamber's auxiliary oil passage were experimentally studied. The influences of different injected fuel temperature (−40~80 ℃) and fuel supply pressure difference on the fuel atomization characteristics were obtained. Phase Doppler particle anemometry (PDPA) was used to measure the spray mist characteristics on the plane 30mm away from the nozzle exit along the flow direction, and the laser particle size analyzer was used to further verify the experimental results. The results of the experimental study were given as follows: (1) the flow number of the centrifugal nozzle gradually decreased with the increase of the fuel temperature, and decreased sharper in the low temperature section. (2) The Sauter mean diameter (SMD) in the diameter on the meas-

收稿日期: 2020-01-08
基金项目: 国家自然科学基金(51676097)
作者简介: 王家俊(1996—), 男, 硕士生, 主要从事航空发动机喷嘴雾化性能研究。
通信作者: 颜应文(1977—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事航空发动机燃烧技术研究。E-mail: yanyw@nuaa.edu.cn

引用格式: 王家俊, 桂韬, 邱伟, 等. 燃油温度对离心喷嘴雾化特性影响的试验[J]. 航空动力学报, 2020, 35(8): 1643-1654. WANG Jiajun GUI Tao, QIU Wei, et al. Experiment on the influence of fuel temperature on the atomization characteristics of centrifugal nozzles[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(8): 1643-1654.

uring plane decreased with the temperature rise in the low temperature section, while the decrease was sharper at the center of the fuel spray cone. (3) The particle size distribution of the spray field measured by the laser particle size analyzer verified the accuracy of the PDPA measurement results to a certain extent. The droplet characteristic diameter and the droplet size distribution coefficient decreased with the increase of the fuel supply pressure difference.

Key words: atomization characteristics; particle size distribution; centrifugal nozzle; fuel temperature; laser Doppler

喷嘴是航空发动机供油系统的主要部件,其功能是将燃油喷入燃烧室内,使燃油雾化并实现所需的燃油油气比分布^[1]。对于结构紧凑、尺寸很小的航空发动机来说,在极短的时间内要实现航空煤油的破碎,增加其与空气的接触面积,并实现空气和航空煤油的混合,这对喷嘴提出了相当高的性能要求^[2-3]。

喷嘴的典型结构包括直射式喷嘴、离心喷嘴、空气雾化喷嘴、甩油盘喷嘴和蒸发管喷嘴。其中离心喷嘴是一种常用的航空发动机喷嘴类型,属于压力雾化喷嘴的一种。它借助燃油的压力使燃油雾化。进入离心喷嘴的燃油做切向运动,在离心力的作用下,在喷嘴出口形成空心油膜。随后在油膜表面波及气动力等的共同作用下,油膜失稳形成液滴^[4]。

除了喷嘴结构对于雾化性能的直接影响外,为了满足航空发动机宽广的使用范围,使得航空发动机在非常冷或热的情况下正常工作,不同温度的燃油(本文如无特殊说明,温度均指燃油温度),尤其是低温燃油对喷嘴雾化性能的影响亟待研究。低温性质限制了航空发动机的使用范围:冰点不够低,航空发动机无法在非常冷的环境下工作;而冰点太低,又使航空煤油的可获得性受限。温度对于雾化性能的影响,还反映在温度对于航空煤油物性参数的影响,航空煤油的密度、黏性和表面张力都会随着温度有较大变化。黏性对燃油雾化影响很大,低温下黏性很大程度上影响在非常冷的地面环境中点火起动以及高空起动。表面张力对燃油雾化也有较大影响,表面张力大则雾化变差^[5]。

诸多学者对于喷嘴油雾场的各项性能展开了一系列研究。Bulzan^[6]利用激光多普勒测量技术(laser Doppler anemometry, LDA)和相位多普勒粒子测量技术(phase Doppler particle anemometry, PDPA)测量了某装有单级轴向旋流器的燃烧室内油雾燃烧流场内气流和油珠的速度分

布以及油珠尺寸分布。张弛等^[7]采用马尔文激光粒度分析仪测量了双径向旋流器的 Sauter 平均直径(Sauter mean diameter, SMD)和液滴尺寸分布指数 n ,研究了不同空气压力降和气液比对 SMD 和 n 的影响。邢小军等^[8]利用 PDPA 对燃烧室内的冷态喷雾场进行试验研究,测量了不同工况下燃烧室的喷雾特性,分析了喷雾压力和旋流器对喷雾场的影响。Liu 等^[9]利用激光片成像方法研究了 RP-3 航空煤油液滴的破碎和碰撞现象,得到了喷嘴出口处的空心锥形喷雾结构及下游的结构发展形态。章敏等^[10]利用粒子成像测速(particle image velocimetry, PIV)技术研究了以水为单介质流体的某喷嘴出口流场,得到了纵向截面和横向界面上速度、旋流强度、流速与位置、压差的一系列结论。陈俊等^[11]利用 PDPA 对某双路离心喷嘴进行了试验研究,得到了该喷嘴油雾场的空间分布和喷雾锥角。周兵等^[12]利用 PDPA 对带空气旋流器的双油路离心喷嘴的雾化特性进行了试验研究,得到了相同供油压力下通入空气的旋流器将使喷雾锥角增大, SMD 减小的结论。曾卓雄等^[13]利用 PDPA 开展了对三种新型喷嘴的试验研究,试验结果表明增加气液两相的相对速度以增加气动力、提高液喷嘴的出口速度以增强对撞力可有效改善喷嘴雾化。成丁南^[14]、党龙飞等^[15]利用高速摄影仪对双油路喷嘴的雾化特性进行了试验研究,得到了一系列关于 SMD 与供油压差间关系的结论。肖为等^[16]还提出了一种双油路离心喷嘴液膜破碎长度和 SMD 的半经验预测公式。王亚军等^[17]采用流体体积函数(volume of fluid, VOF)耦合 level-set 算法对燃油直接喷射入横向气流中的破碎雾化进行了数值模拟,分析了流场结构对液柱破碎雾化过程的影响。石佚捷等^[18]针对压力旋流喷嘴进行的模拟仿真研究,得到了沿喷嘴轴线方向,随着轴向距离的增大雾滴粒径不断增大、雾滴速度逐渐减小等液雾滴粒径和速度与位置的关系。吴永洪等^[19]研究了某振荡式喷嘴的流量分布、喷雾锥角和振荡频

率,并建立了其内外流动特性的数值仿真模型,通过与试验结果的对比验证了该模型的准确性。

综上所述,目前针对离心喷嘴(下文简称为喷嘴)在常温条件下的雾化特性研究的文献较多,但关于温度对于喷嘴雾化性能影响的研究较少,喷嘴在高温和低温条件下的工作情况尚不明确。开展温度对于喷嘴雾化性能影响的相关研究,对于航空发动机在非常冷的地面环境中的点火起动或高空起动等极端条件下工作性能的研究具有重大意义,亟需开展相关研究工作。

1 研究对象和试验系统

1.1 研究对象

本文选用某中心分级燃烧室头部的三种型号的离心喷嘴副油路燃油喷入静止大气中的雾化特性开展试验研究,三种型号喷嘴及其结构示意图如图 1 所示。喷嘴的结构参数与特性参数如表 1 所示。一个广泛使用的常用于表达喷嘴特性的参数是流量数(flow number,记为 N_f),它仅与喷嘴的几何结构和通过的流体有关,与喷嘴的工况无关。因此它给定了某种用途下的喷嘴“尺寸”。流

量数的定义如式(1)所示:

$$N_f = \frac{\dot{m}_1}{\sqrt{\Delta p_1}} = C_d A_n \sqrt{2\rho_1} \tag{1}$$

式中 $\dot{m}_1$ 是通过喷嘴的燃油流量; Δp_1 是喷嘴供油压差; C_d 是考虑了通过喷嘴流动时的各种损失的流量系数; A_n 是喷嘴出口截面积; ρ_1 是燃油密度。试验中通过测量 $\dot{m}_1$ 、 Δp_1 ,即可确定喷嘴在某一温度下的流量数。

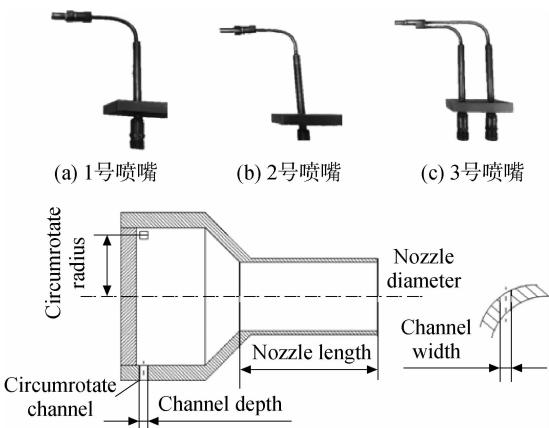


图 1 试验用喷嘴及其结构示意图

Fig. 1 Experimental nozzle and structure diagram

表 1 喷嘴的结构参数与特性参数

Table 1 Structural parameters and characteristic parameters of nozzle

喷嘴 型号	旋流 槽数	旋流槽深/ mm	旋流槽宽/ mm	旋流半径/ mm	喷口长度/ mm	喷口直径/ mm	流量数/ (g/(s·MPa ^{0.5}))
1	3	0.5	0.5	0.8	0.5	0.68	6.000
2	3	0.55	0.6	0.75	0.5	0.74	8.000
3	2	0.45	0.5	0.75	0.5	0.56	4.000

1.2 试验系统

基于 PDPA 激光测量系统的试验系统示意图如图 2 所示,由试验段(红框内所示)、测量段(蓝框)、后处理段(绿框)三部分组成。试验段的主要设备是调节温度的电加热器、冰柜和板式换热器,以及用于燃油测量的压力表和温度表。试验段的电加热器和冰柜可控制温度在 $-40\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内稳定可靠工作,并通过油路上的压力表和温度表实时记录燃油的压差和温度。测量段主要设备是 PDPA 激光系统、电动坐标架及其控制器和计算机。测量段通过计算机控制电动坐标架选取待测油锥截面,利用 PDPA 激光系统,获得该截面上与油珠粒径有关的光信号,再使用光电转化器转化为电信号,使用处理器进行数据分析

和处理,最后在计算机上完成试验数据的汇总和统计。后处理段的主要设备是风机和油气分离器,用于处理经过测试段的燃油。

对于燃油低温的实现和测量是本试验的重点。为确保燃油达到最低温 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$,本试验设置了两个冷却用冰柜,油路经由两个板式换热器与冰柜充分换热,并在冰柜内设置风扇进一步强化换热,实现冰柜出口的油温达到试验要求。同时将冰柜后所有暴露在空气中的油路使用双层隔热材料进行包裹,尽可能减少低温下油路的冷量损失。采用 T 型热电偶连接温度数显仪进行温度测量,可测温度范围为 $-200\sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}$,布置在接近喷嘴出口处。实际试验过程中,温度表示数与冰柜设置温度很接近,可认为由保温材料包裹的

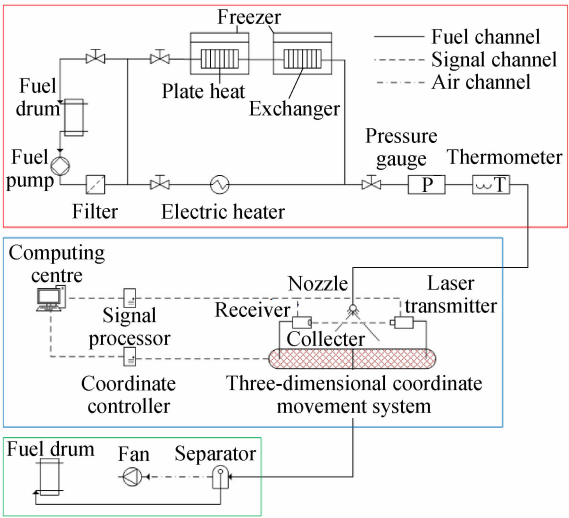


图 2 PDPA 激光测量系统示意图

Fig. 2 Laser measurement system diagram of PDPA

油路在空气中几乎没有冷量损失,由热电偶测得的即燃油温度。

1.3 激光测量系统

PDPA 激光测量系统示意图如图 3 所示,由激光发射器、分光器、BSA(burst spectrum analyzer)处理器、二维绿光和蓝光激光发射探头、激光接收探头、控制中心几部分构成,并辅以三维坐标移动系统和坐标架控制器进行镜头的位置调整。

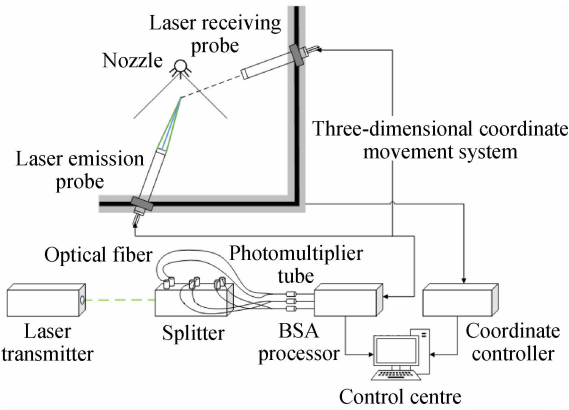


图 3 PDPA 激光测量系统构成图

Fig. 3 Laser measurement system structure diagram of PDPA

基于激光粒度分析仪的激光测量试验系统的试验段与后置处理段与图 2 相似,差异仅在于其试验段不存在调温段,仅在常温进行测量,作为 PDPA 试验测量结果的对照。激光粒度分析仪试验系统可直接统计出某直径上所有油珠的粒径分布,不需要处理器进行后置处理和三维坐标移动系统调节位置。

2 试验内容

2.1 流量特性测定试验

在常温下对三种离心喷嘴进行了流量特性测定试验。

本文分别进行了常温(28.6℃)下三种型号的喷嘴流量在 2~6 g/s 范围内的流量特性测量。同时进行了一定温度范围内,三种型号的喷嘴在某两个特定流量的流量特性测定,选取的工况为喷嘴正常工作范围内的典型工况。

2.2 利用基于 PDPA 激光测量系统的油雾场特性测量试验

PDPA 是在 LDA 基础上发展起来的一种新型粒子测量技术,其原理是利用运动粒子散射光的多普勒效应,对粒子的尺寸、相对折射率进行测量。本文使用激光相位多普勒测量系统,对三种型号的喷嘴距喷嘴流向 30 mm 横截面上的粒径分布进行了测量,燃油温度范围为-40~80℃。此外还研究了相同位置处,燃油温度为常温(28℃)和低温(-42℃)时、不同燃油流量下 1 号喷嘴的粒径分布。

2.3 利用基于激光多普勒技术的激光粒度分析仪油雾场特性测量试验

激光粒度分析仪基于电磁波理论准确描述的光线在行进中遇到微小颗粒时发生的散射现象。颗粒越大,散射角越小;颗粒越小,散射角则越大。通过测得散射光的分布情况,就可以推算出颗粒的大小,进而测量微小颗粒分布。本文使用 DP-02 激光粒度分析仪,对三种型号的离心喷嘴距喷嘴流向 30 mm 的横截面处中心直径上的粒径分布进行了测量,以与激光相位多普勒测量试验结果进行对比验证。

3 试验结果与分析

3.1 流量特性试验结果分析

由试验获得的三种型号离心喷嘴对应的流量特性如图 4 所示。对燃油流量 $\dot{m}_1$ 与喷嘴供油压差 Δp_1 的平方根进行了线性回归拟合,拟合结果如表 2 所示。

三种型号的喷嘴在常温下的 $\dot{m}_1$ 与 Δp_1 的平方根的线性拟合度很高,决定系数 R^2 均大于 99.9%。并统计得到了三种型号的喷嘴常温下的平均流量数。

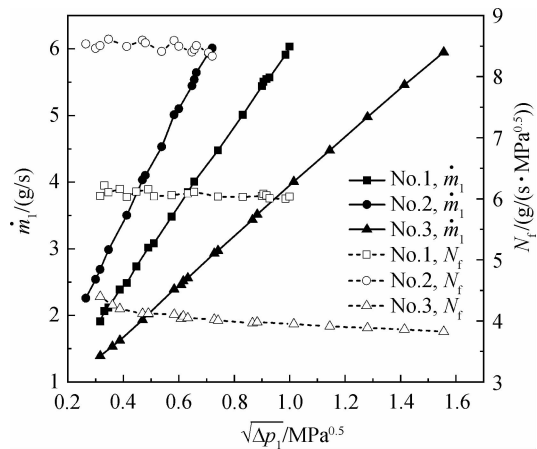


图 4 常温下三种型号喷嘴的供油压差-流量特性

Fig. 4 Fuel supply pressure difference-mass flow rate characteristics of three types of nozzles at room temperature

表 2 流量特性拟合结果

Table 2 Fitting results of flow characteristic

喷嘴 型号	截距	斜率	决定系数	平均流量数/ (g/(s · MPa ^{0.5}))
1	0.053	5.980	0.9997	6.080
2	0.076	8.328	0.9991	8.490
3	0.210	3.717	0.9998	4.040

试验得到的三种型号的喷嘴的温度-流量数特性如图 5 所示。这些工况根据供油压差确定，它们在常温下对应的流量和流量数如表 3 所示。在温度(t)从 $-40\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化的过程中，三种型号的喷嘴表现出了类似的流量数变化规律，流量数随着温度的上升而下降，且在低温下变化更敏感。同一喷嘴在不同工况下，因温度改变而引起的流

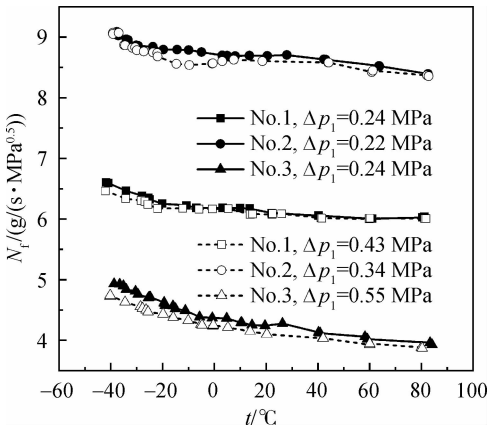


图 5 喷嘴的温度-流量数特性

Fig. 5 Temperature-flow number characteristics of nozzle

表 3 工况参数表

Table 3 Operating parameters of experiment

喷嘴 型号	流量/ (g/s)	供油压差/ MPa	流量数/ (g/(s · MPa ^{0.5}))
1	3.081	0.24	6.042
	4.008	0.43	6.111
2	4.032	0.22	8.597
	5.011	0.34	8.593
3	2.020	0.24	4.124
	2.972	0.55	4.007

量数相对于常温的变化比较接近。如最低温下，三种型号的喷嘴(No. 1、No. 2 和 No. 3)在不同供油压差下流量相对于常温的变化分别约为 5.5%、5.6%、18.5%。低温下流量数的变化也有类似规律。得到了三种型号喷嘴指定流量下的温度-流量数曲线。

根据式(1), A_n 由喷嘴结构决定,主要引起流量数变化的分别是 C_d 和 ρ_1 。本试验使用的国产 RP-3 航空煤油,其物性已有学者进行过一系列相关研究。吴宗霖^[20]建立了一种包含正癸烷、正十二烷等组分的 RP-3 航空煤油替代燃料,并在一定温度范围内研究了 RP-3 航空煤油及其替代燃料的密度和黏度。研究结果表明:低温下 RP-3 航空煤油的密度与温度成近似线性关系,随着温度降低,其密度会有所升高,黏度也同样会升高。密度的升高是低温下流量数明显升高的主要原因。另一方面, C_d 在低温情况下也会发生改变。根据伯努利假设、无黏假设、最大流量原理,可以得到简单离心喷嘴的流量系数的表达式,如式(2)所示^[4]:

$$C_d = \sqrt{\frac{(1-k)^3}{1+k}}$$

(2)

其中 k 为喷口处空气涡面积与喷口面积的比值。低温下,由于温度下降,燃油的黏性和表面张力会有所上升。同时,燃油中可能存在的水会结晶。在这些因素的综合作用下,喷口处的燃油所占面积增大,即空气涡面积有所减小,使得流量系数减小,进一步使流量数在低温下增大,使其流量数与温度的图像表现出一定的下凹性。

3.2 利用基于 PDPA 激光测量系统的油雾场特性试验结果分析

3.2.1 供油压差对粒径分布的影响

在燃烧学中,常用的衡量液雾微分分布的平

均直径是 SMD(记为 d_{32}),其等效原则是假定一群大小相同的油珠,总表面积和体积与真实液雾的总表面积和体积相同,而油珠数目可以不同,那么这群油珠的直径即 SMD,其表达式如式(3)所示,式中 $n_{d,i}$ 为液滴直径为 d_i 的液滴数量。这种平均方法同时考虑了液雾总体积与总表面积的等效性,最能反映真实液雾的燃烧属性。本文通过 PDPA 即可直接得到喷嘴喷入静止大气中油雾场距喷嘴流向 30mm 的横截面直径上某处的 SMD。

$$d_{32} = \frac{\sum_{i=1}^m n_{d,i} d_i^3}{\sum_{i=1}^m n_{d,i} d_i^2} \tag{3}$$

不同供油压差下 1 号喷嘴的油雾场粒径分布如图 6 所示,在常温(23℃)和低温(−40℃)下,1 号喷嘴的油雾场粒径分布表现出相似的规律。半

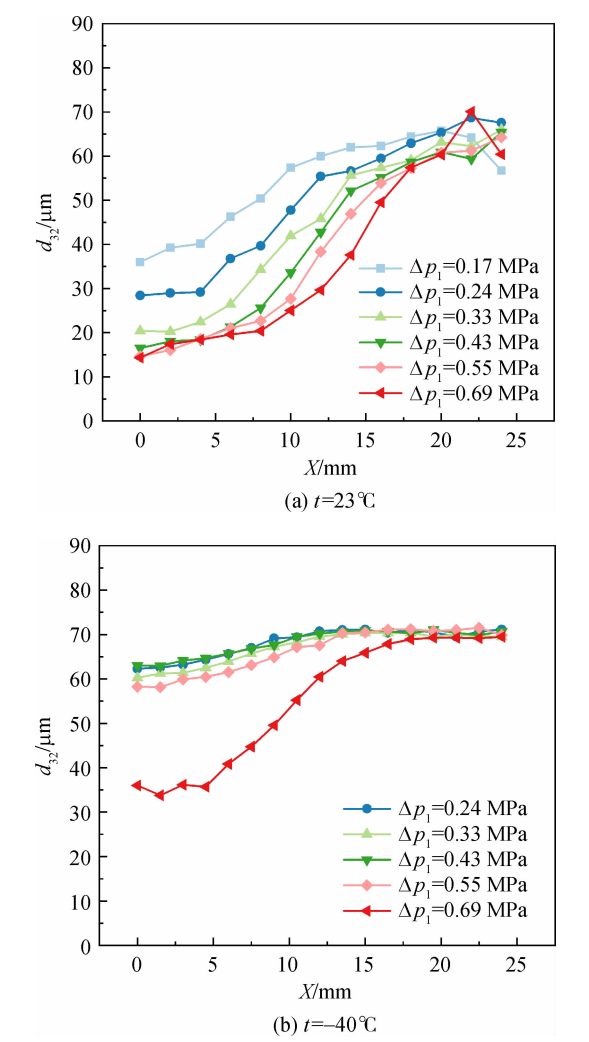
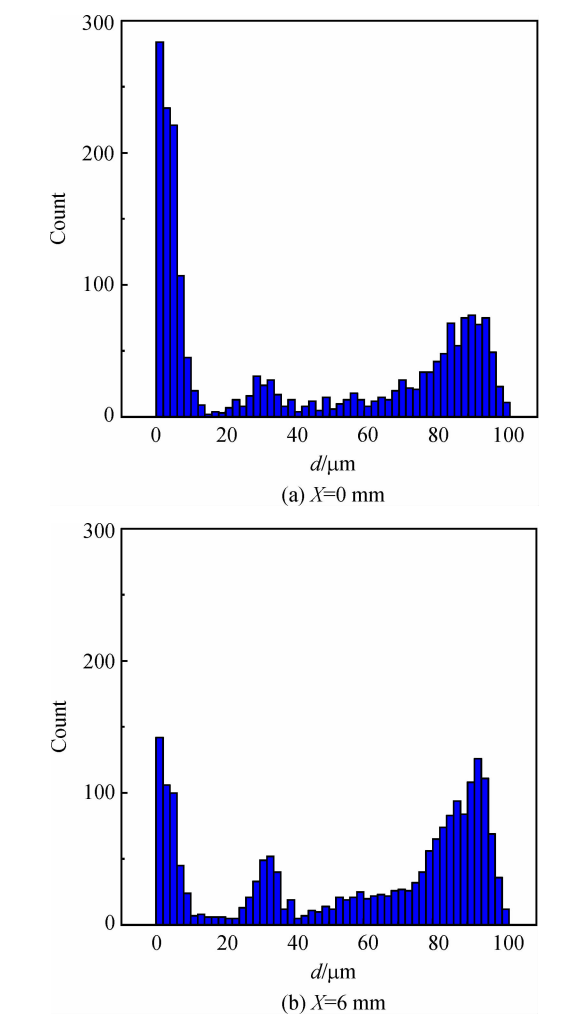


图 6 不同供油压差下 1 号喷嘴的油雾场粒径分布
Fig. 6 Fuel spray field particle size distribution of No. 1 nozzle under different fuel supply pressure differences

径典型位置处实际测得的 1 号喷嘴的油雾场粒径 d 分布如图 7 所示,纵坐标表示实际测得的粒子样本数量, X 表示测量直径上的位置, $X=0$ mm 处定位于喷嘴液雾锥正中心的下方。

在同一供油压差下,液雾的 SMD 在 $X=0$ mm 处最小,沿半径方向随着半径的增大而增大,这是由离心喷嘴的油雾场结构所决定的。离心喷嘴的出口截面只有一小部分面积由液体占据(环形圈,即位于油锥面上),中间是空气涡。典型的充分发展的良好雾化的喷嘴生成的是一个倒锥形的油膜(或油雾面),其中心或油锥外侧只有很小部分的油滴。

试验结果表明:占据中心的油滴(即 $X=0$ mm 处附近)的 SMD 要小于处于油锥面上的油滴,这部分的油滴包含了一部分油锥上散射而来的油滴,同时也包含由中部的空气涡卷吸外层油锥面上的质量较小的极小油滴(如图 7(a)所示,小直径的油珠数量非常多)。质量很小的油滴极易被中心空气涡卷吸,因此在占据中心的油滴绝大部分的粒径都很小,这使得中心的 SMD 更小。



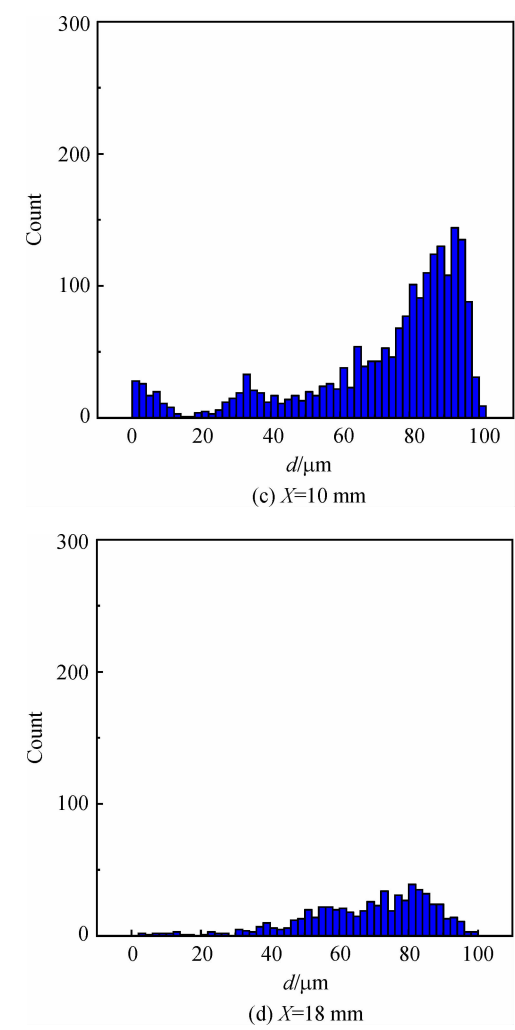


图 7 不同径向位置处 1 号喷嘴的油雾场粒径分布
Fig. 7 Particle size distribution of fuel spray field of No. 1 nozzle at different radial positions

随着 X 的增大 ($X=6\text{ mm}$), 越来越靠近雾化油锥面, $80\sim100\text{ }\mu\text{m}$ 部分的油滴数量逐渐增多, 直到油锥上 ($X=10\text{ mm}$) 时, 这部分油滴数量已占绝大部分。值得注意的是, 由于采样时样本数量设置有上限, 因此中心处和油锥处的样本数量总数相等, 但实际上中心处的油滴数量远小于油锥处的油滴数量。随着 X 的进一步增大 ($X=18\text{ mm}$), 粒径分布规律没有明显变化, 故其 SMD 变化也不明显, 但总体的油滴数量已有大幅下降 (如图 7(d) 所示)。而在 $X>22.5\text{ mm}$ 后, 液雾的 SMD 分布没有表现出明显规律。实际上在 $X>20\text{ mm}$ 后 PDPA 采得的样本数量急剧减小, 可认为该处已脱离喷嘴的雾化范围, 取得的 SMD 没有意义。

图 6 结果表明在同一径向位置处, 液雾的 SMD 则随着供油压差的增大而减小, 这是由离心喷嘴的雾化机理决定的。液体在离开离心喷嘴出口时, 有切向速度、轴向速度, 形成一个油膜。喷

嘴雾化是油膜的破碎, 雾化结果 (粒径分布) 在其他因素一致的情况下与油膜厚度成正比 (不一定是一次方关系)。油膜厚度与雾化结果直接相关。当喷嘴供油压差变大时, 喷射速度加大, 雾化变细, 这使得下游的同一位置处的 SMD 变小。

图 6 对比两个温度下的油雾场粒径分布, 同一供油压差下, 低温时不同径向位置位置上 SMD 均大于常温时, 这是燃油物性的综合影响结果。促进雾化的因素是气动力和湍流, 阻碍破碎雾化因素是黏性和表面张力。当温度降低时, 黏性和表面张力都升高^[18], 这使得雾化变得困难, SMD 变大。

图 6(b) 表明在低温下, 0.55 MPa 供油压差以下的工况, 所选测量同一径向位置处的 SMD 相当接近, 此时低温下的雾化模式与常温下并不相同。有关研究表明: 对于简单离心喷嘴的雾化模式, 随喷射压力的增大会表现出四种模式——“畸变铅笔”模式、“洋葱”模式、“喇叭口”模式、充分发展液雾, 如图 8 所示。常温时, 在所有试验工况下均可以得到如图 8(d) 所示良好雾化的充分发展液雾, 而在低温下, 供油压差在 0.55 MPa 以下的工况, 由于黏性和表面张力的升高, 其雾化模

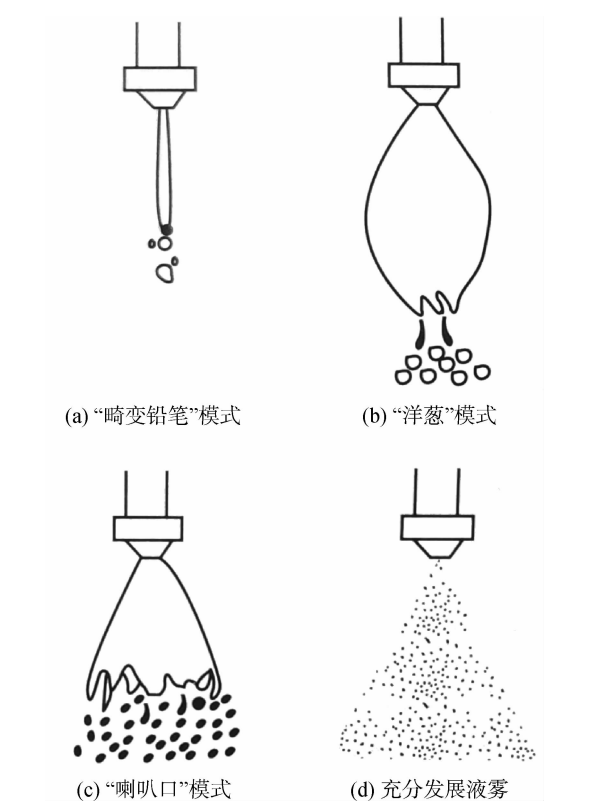


图 8 简单离心喷嘴液雾模式随喷射压力增大的变化
Fig. 8 Variation of simple centrifugal nozzle liquid mist mode with increasing injection pressure

式则更接近于图 8(c)所示的“喇叭口”模式。两种雾化模式的典型情况如图 9 所示。这使得尽管测量截面在液膜位置下方,但得到的 SMD 则都较大,且不同供油压差下 SMD 的值很接近。实际上在低温、0.17 MPa 下无法取得有效的试验数据,该压差下的喷嘴雾化模式接近图 8(a)所示的雾化模式,测量截面上并没有有效的雾化油雾。

温度对于离心喷嘴雾化模式的影响主要是通过对于燃油物性的综合影响而实现的。燃油的黏性和表面张力使其雾化模式发生变化,由于黏性和表面张力的变高,相同供油压差下的充分发展液雾模式而更接近于“喇叭口”模式。同时,燃油中的水等物质在低温下结晶也可能是导致这一现象出现的原因。

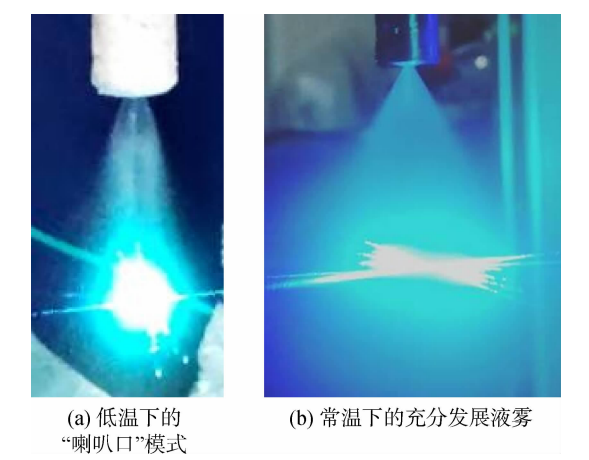


图 9 试验喷嘴的典型雾化模式

Fig. 9 Typical liquid mist mode of experimental nozzle

3. 2. 2 温度对粒径分布的影响

不同燃油温度下 1 号喷嘴的油雾场粒径分布如图 10 所示。其沿半径的粒径分布表现出与图 6 相似的规律,本节主要比较温度对油雾场粒径分布的影响规律。

图 10 表示在不同径向位置处,温度对 SMD 表现出类似的影响,随着温度从 -40 ℃ 升高到 80 ℃,各位置处的 SMD 均有所降低,但其降低速度和降低幅度在不同径向位置有一定差异。选取比较了径向位置 $X=0$ mm 和 $X=12$ mm 处的 SMD 分布,如图 11 所示。 $X=0$ mm 处位于喷嘴中心的正下方, $X=12$ mm 处则位于喷嘴形成的油锥处。实际上从 PDPA 取得的数据率(样本数量与采样时间的比值)看,下一个位置的数据率已有较大幅度下降,可认为 $X=12$ mm 是油锥接近

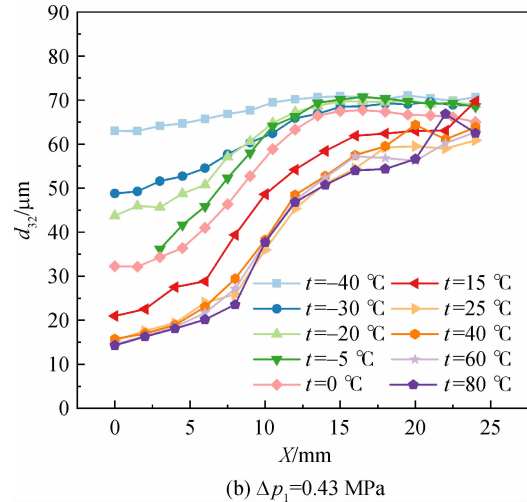
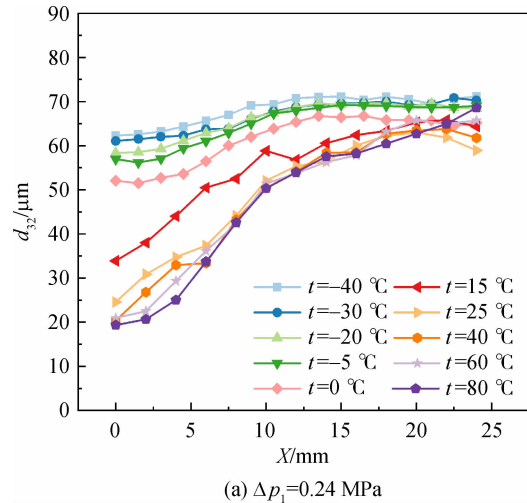


图 10 不同温度下 1 号喷嘴的油雾场粒径分布
Fig. 10 Particle size distribution of fuel spray field of No. 1 nozzle at different temperatures

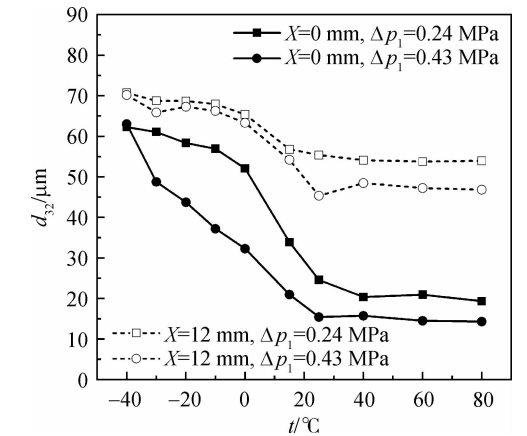


图 11 不同供油压差下不同径向位置处 1 号喷嘴的油雾场粒径分布
Fig. 11 Particle size distribution of the fuel spray field of No. 1 nozzle at different radial positions and different fuel supply pressures differences

外侧表面的位置;而当 $X>20\text{ mm}$ 时,数据率在各工况下都已经很低,可认为该处以外只存在少量溅洒出的油滴。

在低温—常温段($-40\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$),两供油压差下的两径向位置处的 SMD 均有所降低, $X=0\text{ mm}$,即油锥中心处的 SMD 下降幅度较大; $X=12\text{ mm}$,即油锥处的 SMD 下降幅度较小,且常温段($0\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)表现出的这种变化相对于低温段($-40\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$)更强烈。供油压差为 0.24 MPa 下,下低温段的 SMD 几乎没有变化,直到进入常温段才有明显的下降。在常温—高温段($20\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$),两压差下的两径向位置处的 SMD 的变化幅度都很小,几乎没有表现出明显的与温度变化相关性质。

图 12、图 13 所示为 2 号喷嘴在 0.22 MPa 供油压差、不同燃油温度、不同径向位置处的油雾场粒径分布。图 14、图 15 所示为 3 号喷嘴不同供油压差、不同温度和不同径向位置处的油雾场粒径分布。其表现出的性质与 1 号喷嘴相近。温度对于一定流量数范围内离心喷嘴的油雾场粒径分布的影响是类似的。

温度对于喷嘴雾化性能的影响是通过改变燃油物性而造成的。促进雾化的因素是气动力和湍流,阻碍破碎雾化的因素是黏性和表面张力。当温度降低时,黏性和表面张力都升高,这使得雾化变得困难,SMD 变大。而常温段的物性变化没有低温段明显,因此在温度进入常温段后其 SMD 变化并不大。

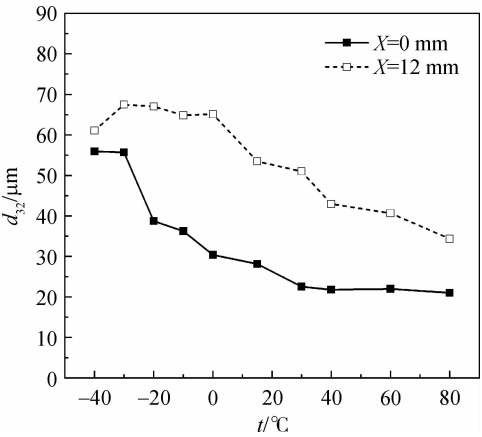
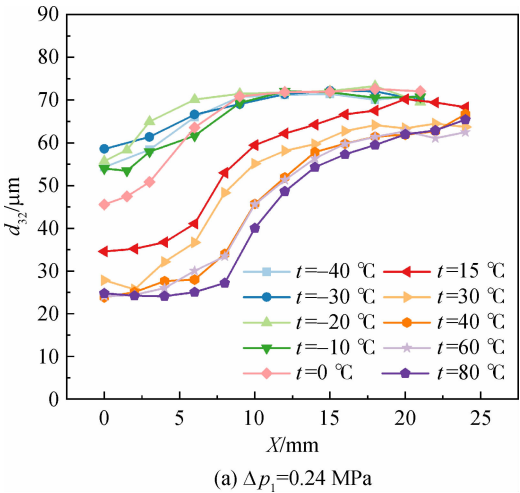


图 13 0.22 MPa 供油压差下不同径向位置处 2 号喷嘴的油雾场粒径分布

Fig. 13 Particle size distribution of the fuel spray field of No. 2 nozzle at different radial positions at 0.22 MPa fuel supply pressure difference



(a) $\Delta p_1=0.24\text{ MPa}$

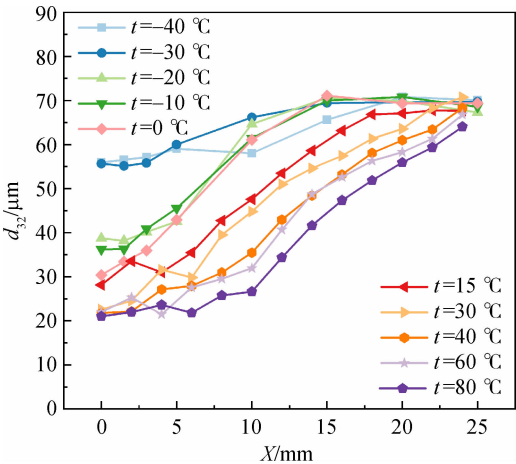
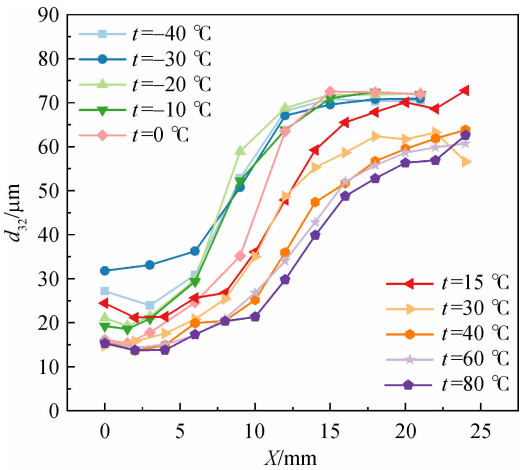


图 12 0.22 MPa 供油压差下不同温度下 2 号喷嘴的油雾场粒径分布

Fig. 12 Particle size distribution of fuel spray field of No. 2 nozzle at different temperatures and 0.22 MPa fuel supply pressure difference



(b) $\Delta p_1=0.55\text{ MPa}$

图 14 不同温度下 3 号喷嘴的油雾场粒径分布
Fig. 14 Particle size distribution of fuel spray field of No. 3 nozzle at different temperatures

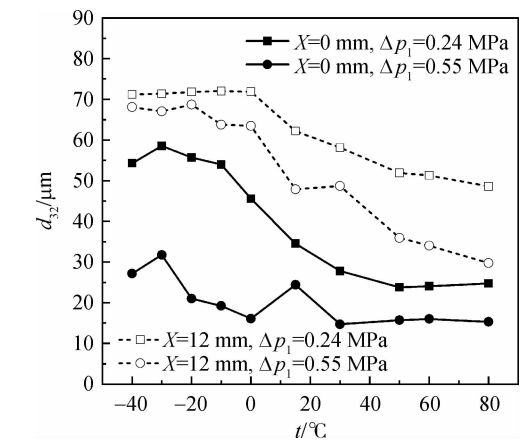


图 15 不同供油压差下处 3 号喷嘴的油雾场粒径分布
Fig. 15 Particle size distribution of the fuel spray field of No. 3 nozzle at different fuel supply pressure differences

3.3 利用基于激光多普勒技术的激光粒度分析仪的油雾场特性试验结果分析

为验证 PDPA 的油雾场特性测量结果,使用 DP-02 激光粒度分析仪对三种型号的喷嘴在不同工况下,距离喷嘴出口 30 mm 径向位置处的油滴粒径分布进行了测量,测量温度为常温。测量结果如图 16 所示。1 号喷嘴测量了五个不同供油压差下的油滴粒径分布,在不同供油压差下该测量直径上的油滴粒径有着类似的分布,大量油滴粒径分布在 75~150 μm 的范围内,大粒径和小粒径的油滴都分布较少。随着供油压差的增大,油滴粒径峰值变小,且分布整体向油滴较小的方向

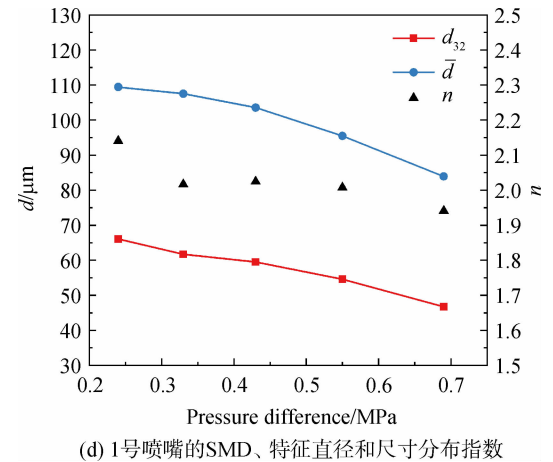
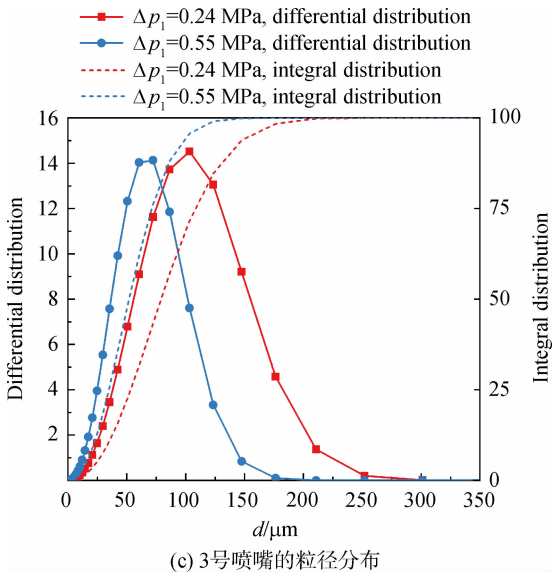
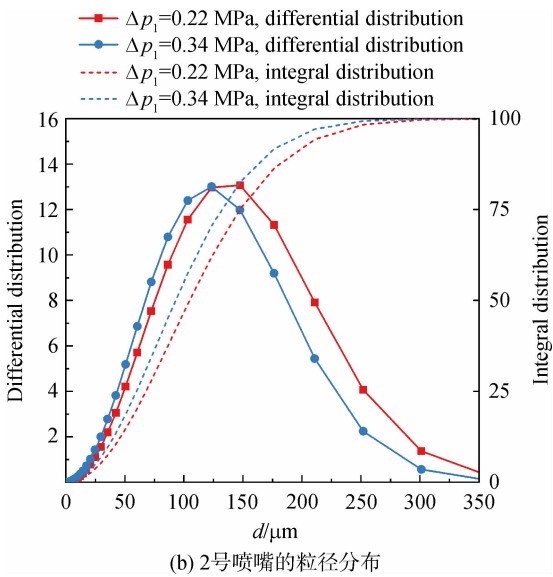
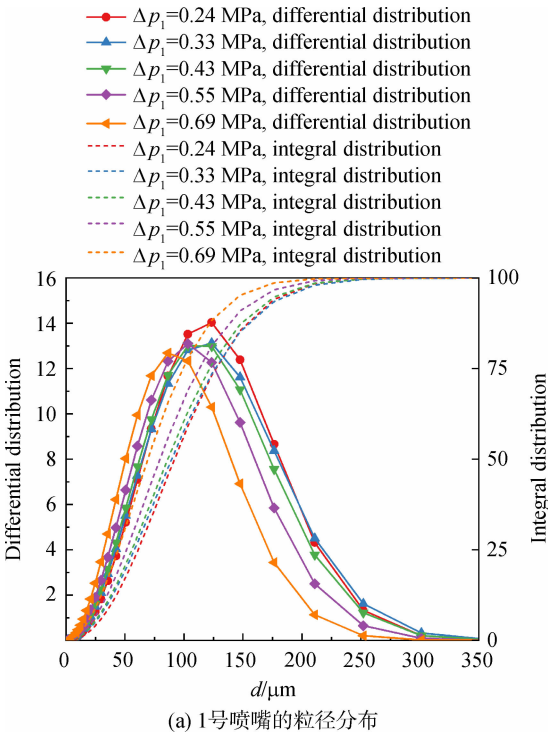


图 16 不同供油压差下三种型号喷嘴的粒径测量结果
Fig. 16 Particle size measurement results of three types of nozzles under different fuel supply pressure differences

移动,即在同样的粒径位置上,更大压差工况的积分分布更高,雾化效果变好。2 号和 3 号喷嘴测量了两个工况点,规律与 1 号喷嘴类似,但总体粒径分布的范围不同。

一种常用的用于描述液滴尺寸分布的积分分布为 Rosin-Rammle 分布,其数学式如式(4)所示。

$$w = 1 - \exp\left[-\left(\frac{d}{\bar{d}}\right)^n\right] \tag{4}$$

式中 w 为液滴直径小于 d 的液滴质量(或体积)占液滴总质量(或总体积)的百分数; d 为与 w 相应的液滴直径; $\bar{d}$ 为液滴特征直径;当 $d=\bar{d}$ 时, $w=0.632$,即对应 63.2% 累积质量(或体积)的液滴直径为特征直径; n 为液滴尺寸分布指数,表明液滴尺寸分布的均匀性,通常 $1.8 \leq n \leq 4$ 。通过拟合可得到不同型号的喷嘴在不同工况下的 $\bar{d}$ 和 n 。

1 号喷嘴的 SMD、 $\bar{d}$ 、 n 与供油压差的关系如图 16(d)所示。随着供油压差的增大,SMD 有明显降低,随着供油压差的升高, $\bar{d}$ 、 n 都有所下降,即意味着液滴尺寸分布曲线的形状变窄,液滴尺寸分布整体向较小的方向偏移。这体现了高压差下雾化性能的提高。

这可以由离心喷嘴的工作原理解释。进入离心喷嘴的燃油做切向运动,在离心力的作用下,在喷嘴出口形成空心油膜,随后在油膜表面波及气动力等的共同作用下,油膜失稳形成液雾。更高的供油压差将带来更大的离心力和更高的燃油切向速度,使得形成的液雾发展更充分,雾化效果更完全。同时,测量得到的 SMD 与文中第 3.2.1 节常温下测得的相同工况下的 SMD 也较为接近,这从一定程度上验证了由 PDPA 测得的油雾场粒径分布的准确性。

4 结 论

本文对某中心分级燃烧室头部三种型号离心喷嘴的副油路喷入静止大气中的雾化特性进行了试验测量,研究了不同供油压差和燃油温度(−40~80℃)对喷嘴流量数和雾化特性的影响规律。研究结果如下:

1) 喷嘴流量数随温度增加而下降,且在低温下流量数的下降幅度更大;同一喷嘴因温度改变引起的流量和流量数的相对变化在不同供油压差下近似相等。

2) 测量截面上的 SMD 在油锥中心小、油锥

处大。各处 SMD 随供油压差的增大而减小,且低温下这种减小的趋势相对微弱,并表现出了不同于常温下的液雾模式。在低温段,各处的 SMD 随温度升高而减小,且油锥中心处的 SMD 下降幅度更大;在常温段,各处的 SMD 几乎没有表现出明显的随温度变化的相关性质。

3) 测量截面上同一径向位置不同供油压差下粒径分布相似。随着压差的增大,油滴粒径峰值变小,液滴尺寸分布指数和液滴特征直径下降,即液滴尺寸分布曲线的形状变窄,液滴尺寸分布整体向较小的方向偏移。

参考文献:

[1] 张峥. 燃烧室燃油喷雾场特性研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2009.
ZHANG Zheng. Experimental study on fuel spray characteristic in model combustor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2009. (in Chinese)

[2] 彭泽淡,刘刚. 航空燃气轮机原理[M]. 北京:国防工业出版社,2001.

[3] 杜声同,严传俊. 航空燃气轮机燃烧与燃烧室[M]. 西安:西北工业大学出版社,1995.

[4] 黄勇,林宇震,樊末军,等. 燃烧与燃烧室[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2014.

[5] 金如山,索建秦. 先进燃气轮机燃烧室[M]. 北京:航空工业出版社,2016.

[6] BULZAN D L. Velocity and drop size measurements in a confined, swirler-stabilized, combustng spray[R]. AIAA 96-3164,1996.

[7] 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(5): 805-809. (in Chinese)

[8] 邢小军,徐行,郭志辉,等. 模型燃烧室冷态喷雾场的实验研究[J]. 推进技术,2000,21(5):61-65.
XING Xiaojun,XU Xing,GUO Zhihui,et al. Experimental study on spray field in combustor by phase Doppler analyzer[J]. Journal of Propulsion Technology,2000,21(5):61-65. (in Chinese)

[9] LIU Cunxi,LIU Fuqiang,YANG Jinhu,et al. Experimental investigations of spray generated by a pressure swirl atomizer[J]. Journal of the Energy Institute, 2019, 92(2): 210-221.

[10] 章敏,张召明,陈尹. 喷雾器喷嘴出口喷流场特性的试验研究[J]. 南京航空航天大学学报,2019,51(4):493-502.
ZHANG Min,ZHANG Zhaoming,CHEN Yin. Experimental study on characteristics of jet field flow at nozzle outlet of sprayer[J]. Journal of Nanjing University of

Aeronautics and Astronautics, 2019, 51(4): 493-502. (in Chinese)

[11] 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.
XU Jun,JI Honghu,ZHANG Baocheng. Experimental investigation of spray characteristics of a double line pressure-swirl atomizer[J]. Journal for Aerospace Power, 2010, 25(4): 774-779. (in Chinese)

[12] 周兵,吉洪湖,张宝诚. 旋流空气对双油路离心喷嘴雾化特性影响的实验[J]. 航空动力学报, 2013, 28(9): 1933-1941.
ZHOU Bing,JI Honghu,ZHANG Baocheng. Experiment of swirled air effect on spray characteristic of double-line pressure-swirl atomizer[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(9): 1933-1941. (in Chinese)

[13] 曾卓雄,姜培正,谢蔚明. 喷嘴雾化粒径的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(4): 75-77.
ZENG Zhuoxiong,JIANG Peizheng,XIE Weiming. Investigation of atomizer particle diameter[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2000, 34(4): 75-77. (in Chinese)

[14] 成丁南. 某型双油路喷嘴喷雾特性试验研究[C]//2019 年(第 4 届)中国航空科学技术大会论文集. 北京:中国航空学会, 2019: 245-250.

[15] 党龙飞,颜应文,徐榕,等. 双油路离心喷嘴油雾特性试验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(4): 453-460.
DANG Longfei,YAN Yingwen,XU Rong, et al. Experimental study on fuel spray characteristics of pressure-swirl atomizer[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 45(4): 453-460. (in Chinese)

[16] 肖为,罗莲军,马柱,等. 双油路离心喷嘴雾化特性的半径
预测方法[J]. 航空动力学报, 2018, 33(2): 463-469.
XIAO Wei, LUO Lianjun, MA Zhu, et al. Semiempirical prediction on spray characteristics of dual-orifice atomizers[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(2): 463-469. (in Chinese)

[17] 王亚军,颜应文,党龙飞,等. 燃油直接喷射入横向气流中雾化机理数值研究[J]. 航空动力学报, 2016, 31(10): 2464-2471.
WANG Yajun,YAN Yingwen,DANG Longfei, et al. Numerical investigation on atomization characteristics of liquid jet in crossflow[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(10): 2464-2471. (in Chinese)

[18] 石伏捷,刘荣华,王鹏飞,等. 压力旋流喷嘴雾化特性数值模拟[J]. 工业安全与环保, 2019, 45(6): 52-57, 92.
SHI Yijie, LIU Ronghua, WANG Pengfei, et al. Atomization properties numerical simulation of pressure swirl nozzle[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2019, 45(6): 52-57, 92. (in Chinese)

[19] 吴永洪,赵文伯,胡宗杰,等. 振荡式喷嘴结构参数对喷雾特性的影响研究[J]. 汽车技术, 2019(10): 28-33.
WU Yonghong, ZHAO Wenbo, HU Zongjie, et al. Research on influence of the structure parameters of oscillating nozzle on spray characteristics[J]. Automobile Technology, 2019(10): 28-33. (in Chinese)

[20] 吴宗霖. 航空煤油模拟替代燃料雾化特性研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2020.
WU Zonglin. Spray characteristics of surrogate fuel of RP-3 kerosene[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2020. (in Chinese)

(编辑:陈 越)