

离心喷嘴初始雾化性能 PDPA 及 DOH 对比试验

王东辉^{1, 2, 3}, 黄 勇^{1, 2, 3}, 汪 磊⁴, 吴迎春⁴

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 北京航空航天大学 航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191;

3. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191;

4. 浙江大学 清洁能源利用国家重点实验室, 杭州 310027)

摘 要: 为了开展离心喷嘴初始雾化阶段雾化性能研究, 结合传统的相位多普勒颗粒分析仪(PDPA)和新兴的数字离轴全息术(DOH)两种测试方法对离心喷嘴雾化性能进行了测试。测试过程中, 以航空煤油 RP-3 为工质, 保持燃油压力为 0.8 MPa 不变, 改变燃油温度(240~300 K)。测试结果表明: 初始雾化阶段 SMD 空间分布呈“单峰”分布, 且随着轴向距离的增大, SMD 的峰值变大, 峰值位置向外侧移动; 对于初始雾化阶段的同一轴向位置, 油温的改变会同时影响液膜破碎长度和液滴破碎过程, 使燃油温度对 SMD 分布无明显的规律性; DOH 液滴识别算法会将重叠的液滴识别为液丝或不规则液滴排除在统计范围内, 使 DOH 测得的 SMD 和液滴尺寸微分分布峰值位置较 PDPA 偏小; DOH 可以直接观察到液膜破碎过程和破碎后的液滴分布情况, 有助于对试验结果进行分析。

关 键 词: 粒径空间分布; 离心喷嘴; 燃油温度; 相位多普勒颗粒分析仪(PDPA); 数字离轴全息术(DOH)

中图分类号: V231.23

文献标志码: A

Comparative experiment on initial atomization performance of centrifugal nozzle with PDPA and DOH

WANG Donghui^{1, 2, 3}, HUANG Yong^{1, 2, 3}, WANG Lei⁴, WU Yingchun⁴

(1. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics, Beihang University, Beijing 100191, China;

3. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China;

4. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: To study the atomization performance of the centrifugal nozzle in the initial atomization stage, a traditional phase Doppler particle analyzer (PDPA) and a digital off-axis holography (DOH) were used. Using aviation kerosene RP-3 as the working fluid and maintaining the fuel pressure at 0.8 MPa, the atomization performance of the centrifugal nozzle at different fuel temperatures (240—300 K) was studied. The experimental results showed that: the spatial distribution of the Sauter mean diameter (SMD) in the initial atomization stage presented a “single peak” distribution, and with the increase of the axial distance, the peak value of the SMD increased, and the peak position of the SMD moved to the outside; for the same axial position of the initial atomization stage, because the change of fuel temperature could affect the

收稿日期: 2022-04-25

作者简介: 王东辉(1995—), 男, 博士生, 主要从事航空发动机喷嘴雾化性能研究。

通信作者: 黄勇(1964—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事燃油雾化及燃烧室点火熄火机理研究。E-mail: yhuang@buaa.edu.cn

引用格式: 王东辉, 黄勇, 汪磊, 等. 离心喷嘴初始雾化性能 PDPA 及 DOH 对比试验[J]. 航空动力学报, 2022, 37(11): 2513-2523. WANG Donghui, HUANG Yong, WANG Lei, et al. Comparative experiment on initial atomization performance of centrifugal nozzle with PDPA and DOH[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(11): 2513-2523.

length of the liquid film and the process of droplets breaking, the fuel temperature had no obvious regularity to the SMD distribution; the algorithm of droplets identification could identify the overlapping droplets as liquid filaments or irregular droplets. And the algorithm might exclude overlapping droplets from the statistical range, so the SMD and the peak position of the differential distribution of droplets size and number measured by DOH was smaller than that of DOH; DOH can directly observe the breaking process of the liquid film and the distribution of droplets, helping to analyze the experimental results.

Keywords: spatial distribution of droplet sizes; centrifugal nozzle; fuel temperature; phase Doppler particle analyzer (PDPA); digital off-axis holography (DOH)

离心式喷嘴是一种压力雾化喷嘴, 由于具有结构简单、雾化能耗小且性能优异的特点, 自 1902 年提出以来, 在液体火箭发动机、燃气轮机、内燃机及锅炉等热力设备上得到广泛的应用^[1-2]。离心喷嘴雾化后会形成大量尺寸各异的液滴, 液滴雾化的好坏很大程度直接关系到航空发动机燃烧室的性能。其中, 液滴粒径空间分布是衡量喷嘴雾化质量的最重要的指标之一^[3-4]。

目前, 液滴粒径空间分布的研究主要通过试验研究来开展。雾化粒径的测量方法可以分为机械测量法、电子测量法和光学测量法^[5]。机械测量法方法简单, 但误差大; 电子测量法属于接触测量, 对流场的干扰较大; 光学测量法属于非接触测量, 对流场不会产生干扰, 且测量效率较高。目前, 基于夫琅禾费衍射理论的 Malvern 法和 Lorenz-Mie 散射理论的 PDA (phase Doppler analyzer, 包括 laser Doppler anemometry, LDA 和 phase Doppler particle analyzer, PDPA) 法是最常用的光学测试方法, 已经成为雾化粒径测量中的常用手段。对于操作简单的 Malvern 方法, 研究者进行了大量试验, 获得其有效测量直径范围在 $0.1 \sim 2\,000\ \mu\text{m}$, 但 Malvern 方法在测量尺寸大于 $300\ \mu\text{m}$ 的颗粒时精度会下降^[6]。相较于 Malvern 方法, PDA 法虽然操作复杂 (需要反复调试发射器和接收器的透镜、散射角、光束直径等), 但由于该技术可以测量包括颗粒三维速度、粒径、数量、体积流量等信息, 使得 PDA 自 1984 年被 Bachalo 和 Houser 提出后便在喷雾测量领域中具有举足轻重的地位^[7]。对于航空发动机燃烧室及喷嘴的雾化分布特性, 国内外的很多学者利用 PDA 进行了试验研究。陈俊等^[8]利用 PDPA 对某双路离心喷嘴下游油雾场的速度和粒径空间分布进行了研究。周兵等^[9]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, 得到了相同油压下旋流器空气对喷雾锥角和 SMD 的影响规律。

邢小军等^[10]利用 PDPA 对不同工况下燃烧室内冷态喷雾场的喷雾特性进行了试验研究, 并分析了旋流器和燃油压力对喷雾场雾化特性的影响。Bulzan^[11]利用 LDA 和 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的气流和油珠的速度分布以及油珠尺寸分布。Marchione 等^[12]同样利用 PDA 对离心喷嘴下游不同截面上沿径向的多个点进行了测量 (在每个点处测量的次数都超过 10^5 次), 最终得到了不同截面处十分精确的液滴粒径空间分布和速度空间分布构型。Xie 等^[13]利用 PDA 测得了离心喷嘴喷雾在不同轴向距离位置上各截面上的液滴通量分布和轴向速度的空间分布, 结果表明随着轴向距离的增加, 空心雾锥逐渐变成了实心雾锥。上述研究者研究离心喷嘴雾化性能的过程中测点位置均位于二次雾化所处的轴向位置。除以上研究者外, 通过 PDPA 对离心喷嘴雾化性能的最新研究同样主要集中在二次雾化阶段^[14-21]。尽管 PDA/PDPA 在喷雾测量领域得到了广泛的应用, 但由于测量过程中轨迹误差、非球形问题以及浓雾场的多重散射^[7]使 PDPA 测量中存在一些误差。目前, 由于在离心喷嘴初始雾化阶段存在液膜破碎产生的液丝、液团和非球形液滴会对 PDPA 测试的准确度产生很大的影响^[14-15, 21], 很少有研究者通过 PDPA 对离心喷嘴初始雾化性能进行试验研究。Santolaya 等^[14], Lee 等^[15]和 Dafsari 等^[16]通过 PDPA 对离心喷嘴初始雾化阶段液滴的速度分布和尺寸分布的性能试验进行了尝试, 但没有对初始雾化阶段的测试结果进行深入的分析。

基于衍射理论的数字全息 DH (digital holography, 包括 DIH (digital inline holography) 和 DOH (digital off-axis holography) 作为一种新兴的三维成像技术, 具有同时量化某一区域内液滴大小和形状、三维位置、三维速度 (时间分辨全息) 的能力^[22-24]。在过去的几十年中, DH 技术在液滴气动

碎片诊断中有多种应用^[25-26],但耗时、复杂的数据分析过程和空间分辨率的限制阻碍了其进一步发展。随着计算机和相机技术的进步,这些缺陷逐渐消失,DH 技术重新回到雾化研究者的视野中。Chareyron 等^[27]研究了高雷诺数强湍流中液滴的蒸发和三维轨迹。然而,高浓度的喷雾场的杂散光会降低全息图的质量,为此研究人员已经采用了多种措施来提高密集喷雾的测量质量,且取得了一定的成效。James 等^[28]通过将皮秒脉冲激光和光克尔门与全息相结合,成功地提高了重建密集喷雾图像的质量。Ali 等^[29]构建了超短激光数字离轴全息技术,在高浓度喷雾环境下也能清晰地单次拍摄喷雾结构。

目前针对离心喷嘴初始雾化阶段的雾化性能的相关研究较少,且在不同燃油温度下,离心喷嘴初始雾化阶段的雾化性能尚不明确。因此,本文利用目前常用的 PDPA 和新兴的 DOH 两种光学测试方法开展了离心喷嘴初始雾化阶段的液雾性能的试验研究。开展该研究对离心喷嘴在高原高寒环境中航空发动机低温地面点火起动或高空熄火再点火等极端条件下的工作性能研究具有重大的意义。

1 试验及测试系统

1.1 研究对象

本文选用的离心式喷嘴的结构如图 1(a)所示,其工作原理简单:在离心式喷嘴工作过程中,燃油被加压后通过旋流槽进入旋流室,在旋流室内部做旋转运动,形成自由涡。由于燃油沿旋流室壁面的高速旋转,在旋流室中心形成负压区,喷嘴外部空气在压差的作用下倒流进入喷嘴,在喷嘴中央形成空气涡,内部液体则以环形液膜的形式喷出。从喷口喷出的液膜在向下游发展的过程中共经历 3 个阶段:液膜阶段、初始雾化阶段和二次雾化阶段,如图 1(b)所示。在液膜阶段,随着燃油加压直至超过临界压力的过程中,从喷嘴出口喷出的环形液膜依次经历铅笔形、洋葱形和郁金香形,最终液膜完全打开为锥形液膜。在初始雾化阶段,离开喷嘴的液膜与气体相互作用使得液膜表面静压发生变化,不均匀的压力分布使得表面波在液膜上扰动,最终导致锥形液膜破碎为液丝、液团和液滴。在二次雾化阶段,液丝、液团和液滴与空气进一步相互作用导致其破碎形成尺寸更小、分散更均匀的液滴。

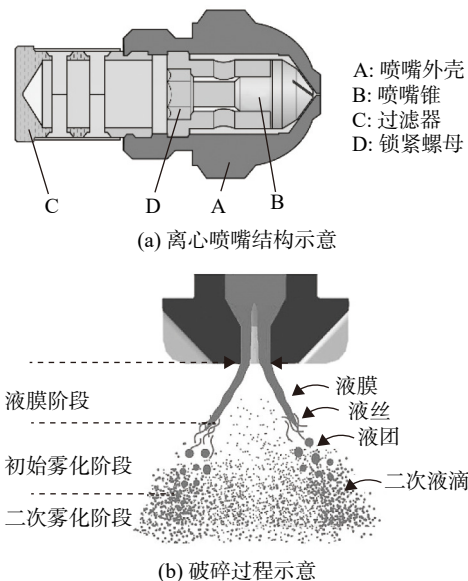


图 1 试验用离心喷嘴结构和破碎过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the centrifugal nozzle structure and breakup process for the experiments

1.2 燃油供给及回收系统

燃油供给与回收系统由燃油供给系统和废气回收系统组成,如图 2 所示。燃油供给系统主要包括制冷机、油箱、加热器、3 L/min 齿轮燃油泵、变频器、油水分离器、10 μm 燃油过滤器、阀门和一些测表。圆齿轮流量变送器(体积流量范围为 0.6~50 L/h,测量误差为 0.5%)、压力变送器和温度变送器用于测量进入喷嘴的燃油的流量、压力和温度。其中,压力变送器和温度变送器安装在喷嘴入口附近,以减少测量误差。在进行低温工况实验时,所有管路都进行保温处理,保温材料为橡塑保温棉,以保证到达喷嘴处的油温与温度测点位置的油温基本一致。废气回收系统主要由收集器、油气分离器、轴流式风机、油水分离器、油滤、油泵和油箱组成。从喷嘴产生的油雾与空气的混合气被收集器收集后进入油气分离器,经过油气分离器作用后不含燃油的废气排入环境中。过滤后的燃油经过过滤器和油水分离器的处理,去除其中的杂质和水后收集到油箱备用。同时,试验过程中通过热线风速仪测量喷嘴下游抽吸空气流速约为 0.5 m/s,因此可以忽略废气处理装置对离心喷嘴下游喷雾流场的影响。燃油雾化试验均在室温条件下进行,选择航空煤油 RP-3 为工质,试验过程中保持燃油压力 0.8 MPa 不变,燃油温度选择 240、260、280 K 和 300 K。

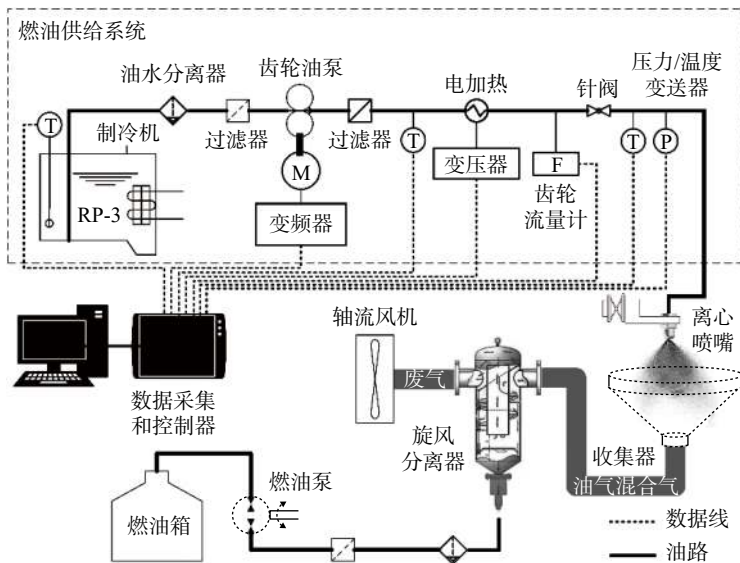


图 2 燃油供给与回收系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the fuel supply and recovery system

1.3 测试系统

1.3.1 PDPA 测试系统

PDPA 系统主要由硬件系统和软件系统组成, 如图 3 所示。硬件系统由激光器、光学系统、三维位移机构、信号处理器组成, 其中光学系统包括发射单元和接收单元。功率可调的 0~5 W 水冷式氩离子激光器发出两对波长分别为 514.5 nm 的绿光与 476.5 nm 紫光, 两对激光通过分光器引入发射单元后在空间中交于一点, 该点即为测量点。在发射器对面, 接收器安装在导轨上, 与激光束轴成 147° 方位角。接收器将检测到的信号发送到光电探测器, 然后将信号引导至实时信号分析仪(分别用于绿色光束和紫色光束)进行处理, 处理后的结果导入计算机中的 DataView 中输出。

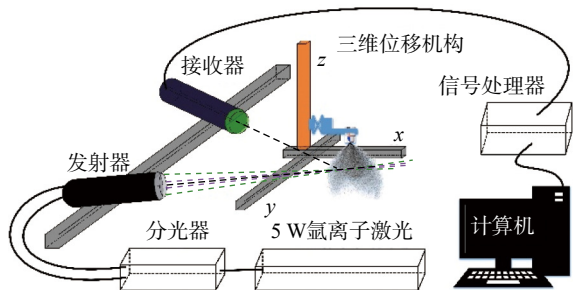


图 3 二维 PDPA 测试系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of 2D PDPA measurement system

在进行试验时, 所有 PDPA 测量值都是在环境温度下获得。在所有测试工况下, 选取离心喷嘴出口下游 7 mm 轴向位置进行测试; 同时, 在 280 K 和 300 K 工况下, 还选取喷嘴出口下游 5

mm 轴向位置进行测试。喷嘴下游 5 mm 轴向位置在 0~11 mm 之间以 1 mm 间隔进行测量; 7 mm 轴向位置在 0~16 mm 之间以 2 mm 间隔进行测量。在每个测试点, 喷雾液滴通过该点后被记录速度与尺寸, 当一个测量点记录的粒子数量超过 10 000 或测量时间超过 40 s 后, 结束该点, 进入下一点测量。

1.3.2 DOH 测试系统

数字颗粒全息三维测量技术作为一种三维成像技术, 可用于测量雾化场各截面位置的清晰成像, 记录液滴的三维位置、粒径和形貌, 图 4 是用于雾化测试的脉冲离轴全息测试系统示意图。该光学测试系统主要包含激光器、空间滤波-扩束-准直系统、分束立方、相干调制系统、同步控制系统以及成像系统。试验开始时, 从 Wedge HF-532 发射的激光经过过滤、扩展和准直后形成 40 mm 的均匀激光束。光束经过分束镜后被分成物光束(object beam, 记为 U_o) 和参考光束(reference beam, 记为 U_{ref})。其中照射离心喷嘴下游雾场并经过反射镜 D、E、F、G 进行空间相干调制的物光与经过反射镜 A 和 B 进行空间相干调制后的参考光到达分束镜汇聚, 照射到相机靶面上形成数字离轴全息图(digital off-axis hologram), 这一过程可由 $I_h = |U_o|^2 + |U_{ref}|^2 + U_o U_{ref}^* + U_{ref} U_o^*$ 实现。脉冲激光由相机同步, 激光脉冲持续时间约为 700 ps。采用海康威视 CH250 (FOC1) 和 CH080 (FOC2) 相机进行时均拍摄, Phantom V2512 高速相机瞬态拍摄。其中, FOC1 空间分辨率为 5 120 像素×5 120 像素, 视场为 23.040 mm×23.040 mm;

FOC2 空间分辨率为 3 296 像素×2 472 像素, 视场为 9.888 mm×7.416 mm; 高速相机空间分辨率 1 280

像素×800 像素, 视场为 7.268 mm×5.451 mm, 帧速率为 25 000 帧/s。

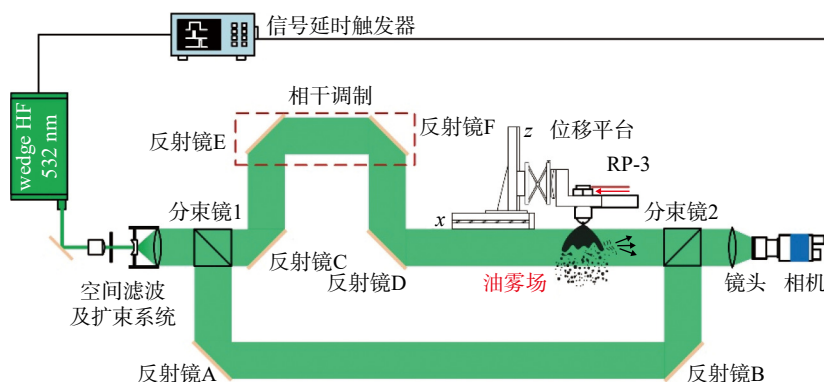


图 4 脉冲激光离轴全息测试系统示意图^[22]

Fig. 4 Schematic diagram of pulsed laser DOH measurement system^[22]

2 试验数据处理方法

2.1 DOH 粒径识别和定位

DOH 粒径识别和定位主要包括对液滴离轴数字全息图的重建、识别和定位, 如图 5 所示。

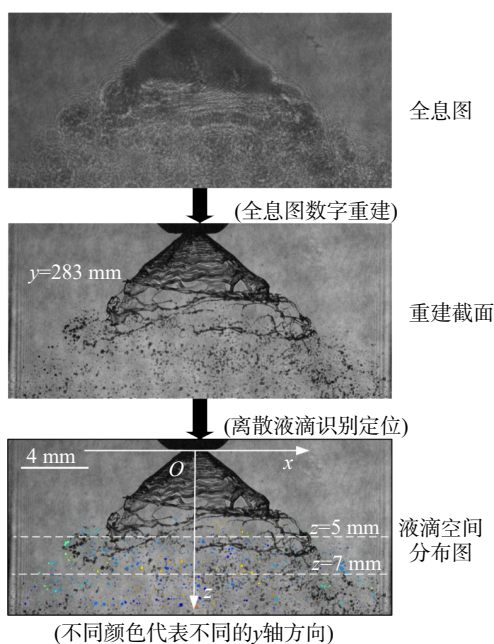


图 5 DOH 方法中液滴记录、识别和重建过程

Fig. 5 Droplet recording, identification and reconstruction process in DOH method

数字离轴全息图的重建通过衍射公式解决光的传播、成像、干涉等对光传播描述等问题实现的。根据波动方程不同边界条件得到的菲涅尔-基尔霍夫衍射公式和瑞利-索末菲衍射公式可以将数字全息图表示出来, y_{ref} 处复振幅分布为^[30]

$$\Gamma(u, v; y_{\text{ref}}) = \frac{1}{\lambda} \iint I_h(x, y) U_{\text{ref}}(x, y) \exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(x-u)^2 + (z-v)^2 + y_{\text{ref}}^2} \right] \frac{du dv}{\sqrt{(x-u)^2 + (z-v)^2 + y_{\text{ref}}^2}} \quad (1)$$

式中 $\Gamma(u, v; y_{\text{ref}})$ 表示重建光场的复振幅分布; λ 为单色光波长; i 为虚数单位; $U_{\text{ref}}(x, y)$ 为参考光的复振幅分布; (x, z) 和 (u, v) 分别为全息平面和重建平面的坐标; y_{ref} 为重建距离。

数字颗粒全息图重建时, 通过计算机对参考光进行数值模拟, 等距重建出不同 y 轴方向位置的截面图像而重建整个三维颗粒光场, 如图 5 中所示。

在液滴识别和定位过程中, 当液滴位于重建截面时, 重建得到液滴的聚焦图像; 当液滴偏离重建截面时, 重建得到液滴的离焦图像。图 6 展

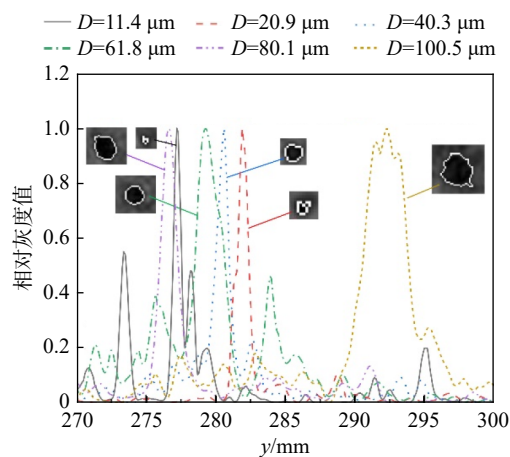


图 6 离散液滴聚焦曲线

Fig. 6 Focusing curves of discrete droplets

示了基于不同亮度梯度局部方差法对离散液滴进行识别时液滴的聚焦曲线。图中 D 表示液滴直径。当液滴聚焦时,液滴图像轮廓清晰,与周围背景有一个大的亮度梯度,从而导致液滴边缘方差最大,聚焦曲线的相对灰度值取得最大值。因此,可以通过液滴聚焦曲线对颗粒进行 y 轴方向定位,为了方便观察,对处于不同 y 轴方向位置的液滴用不同的颜色区分,得到的液滴识别结果如图 5 中所示。

2.2 误差分析

PDPA 和 DOH 试验方法的误差分析是数据处理的重点。PDPA 作为一种成熟的测试手段,在理想测试条件下,对于标准的球形液滴粒径的不确定度为 $\pm 0.5\%$ 。DOH 作为一种新兴的基于图像识别的粒径测试方法,其测试精度由硬件和图像识别算法决定。本研究所采用的 DOH 测试设备的粒径测试精度将通过标准标定板的标定结果给出,标定板重建截面图像如图 7 所示。

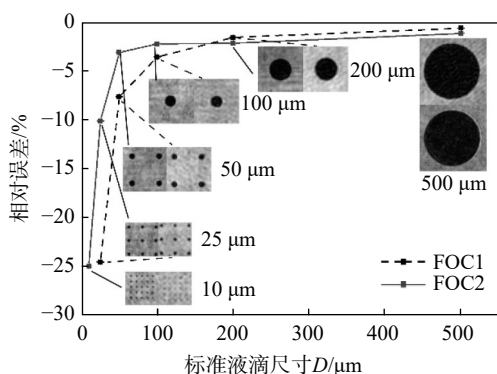


图 7 DOH 标定板不同尺寸粒径测量相对误差

Fig. 7 Relative error between the measurement of DOH and stand particle of calibration plate with different sizes

将图 7 标定板中不同尺寸粒径的标准尺寸和 DOH 测得的尺寸进行对比。对比结果显示,对于 FOC1, 500、200、100、50、20 μm 的标准颗粒测量粒径分别为 496.5、196.7、96.4、46.2、18.7 μm , 测量粒径的标准差分别为 0.2、0.9、0.8、1.1、1.8 μm ; 对于 FOC2, 500、200、100、50、20、10 μm 的标准颗粒测量粒径分别为 493.9、197.6、98.7、48.4、22.5、7.5 μm , 测量粒径的标准差分别为 0.1、0.4、0.5、0.6、0.8、0.8 μm 。图 7 同时给出了 FOC1 和 FOC2 获得的标定板不同尺寸粒径相对误差结果。通过误差结果可以看出, FOC2 较 FOC1 在相对误差上有明显的提升, 因为 FOC2 具有更高的分辨率。同时, FOC2 可以测量 10 μm 量级的颗粒, 测

试的偏差则可能达到 25%。对 10 μm 以下特别细小的颗粒, 其测试误差受限于空间分辨率精度, 有较大的误差。

对于真实燃油雾化场, 随油压、油温、燃油种类、喷嘴结构等的变化, 燃油的雾化浓度、雾化形态也有较大差异。同时, 真实的雾化场景内, 燃油液滴、液丝同时存在且形态各异, 且视场内存在颗粒重叠、噪声等情况, 进一步造成测试误差, 如图 8 所示。因此, DOH 标定板标定误差与真实雾场可能存在差异, 而这种差异有待建模分析。

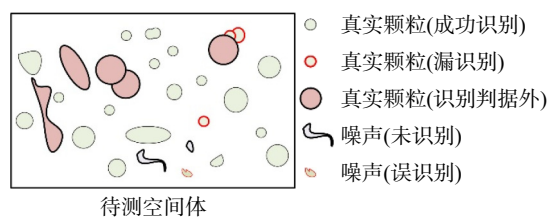


图 8 典型喷雾场内液滴识别情况

Fig. 8 Droplet identification in the typical spray field

2.3 SMD 空间分布数据处理方法

DOH 对所有工况分别采用 40 张在喷嘴中心位置单一截面重建图进行粒径识别, 得到测试空间内所有位置的液滴尺寸和数量分布数据。选取距喷嘴初始雾化阶段的不同轴向截面 ($z=5, 6, 7, 8 \text{ mm}$) 的数据按照图 9 所示的方法进行处理可以得到不同截面的 SMD 分布云图 and 不同径向位置 SMD 分布曲线。

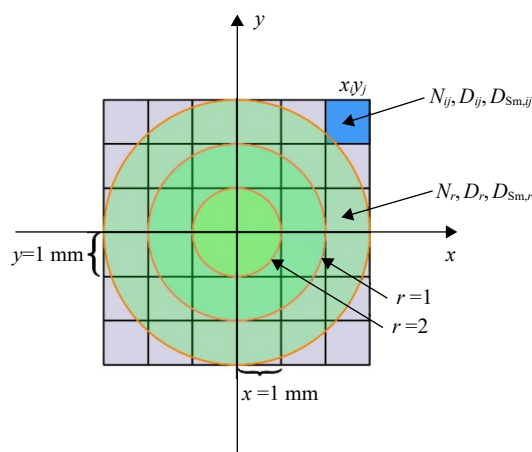


图 9 SMD 空间分布云图和分布曲线计算方法

Fig. 9 SMD spatial distribution cloud atlas and distribution curves calculation method

1) SMD 分布云图计算方法: 选取轴向厚度为 1 mm 的截面, 以 1 mm 为间隔将测试截面分成 $i \times j$ 个方格, 方格内的液滴数量和尺寸用 N_{ij} 和

D_{ij} 来表示, 则第 $i \times j$ 个方格内液滴的索太尔平均直径(SMD), 量符号记为 $D_{Sm,ij}$, 可以利用式(2)来计算。

$$D_{Sm,ij} = \frac{\sum N_{ij} D_{ij}^3}{\sum N_{ij} D_{ij}^2} \quad (2)$$

2) SMD 分布曲线计算方法: 由于喷嘴下游液滴粒径和数量空间分布是周向均匀的, 因此选取轴向厚度为 1 mm 的截面, 以 1 mm 为间隔将测试截面分成 r 个圆环, 圆环内的液滴数量和尺寸可以用 N_r 和 D_r 来表示。则第 r 个圆环内液滴的平均直径, 量符号记为 $D_{Sm,r}$, 可以利用式(3)来计算。

$$D_{Sm,r} = \frac{\sum N_r D_r^3}{\sum N_r D_r^2} \quad (3)$$

3 试验结果及结果分析

3.1 不同轴向位置 SMD 分布试验结果与分析

图 10 为 DOH 方法测得的燃油温度在 $T=280$ K 时离心喷嘴初始雾化阶段不同轴向截面

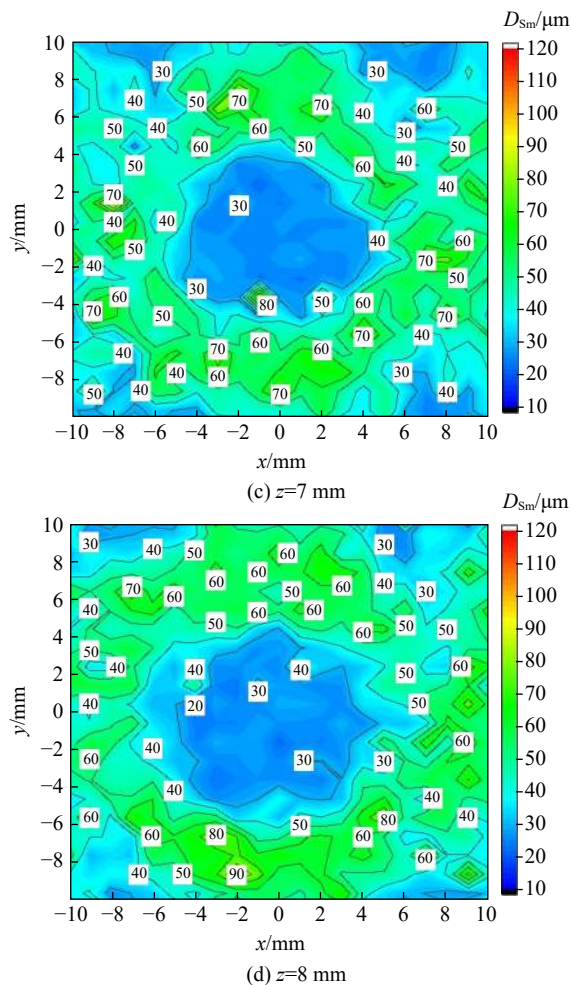
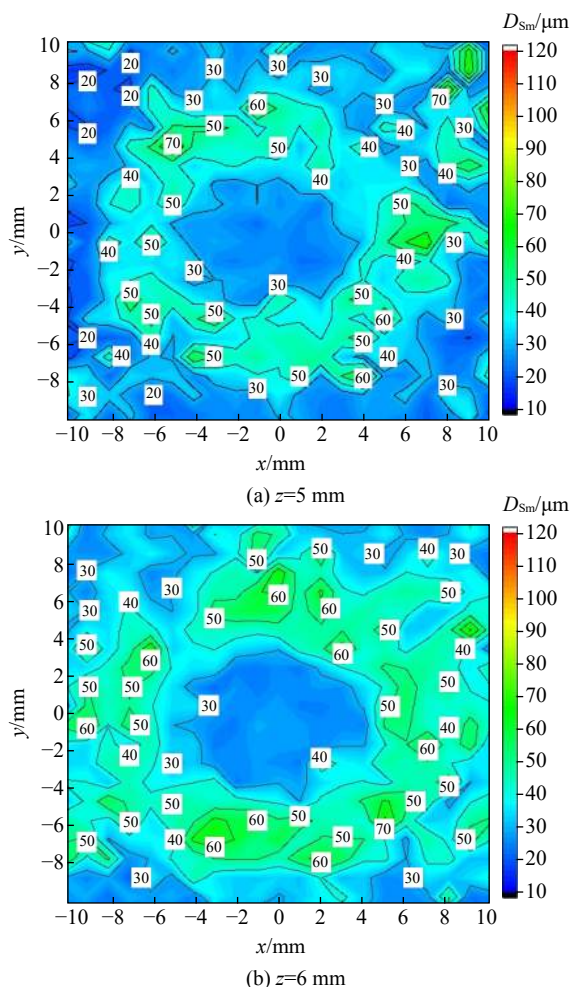


图 10 喷嘴下游 5~8 mm 处的 SMD 分布云图 ($T=280$ K)

Fig. 10 Cloud of SMD distribution at 5~8 mm downstream of the nozzle ($T=280$ K)

SMD 分布云图。通过图 10 可以发现, 在 $z=5, 6, 7, 8$ mm 截面 SMD 空间分布云图都呈现周向近似均匀的环形分布, 即在中心处和主流区外侧 SMD 较低, 在主流区 SMD 最大。同时可以发现, 随着雾化向下游进行, SMD 分布云图中的“圆环”的直径和厚度变大。这是因为离心喷嘴下游的油雾场是空心锥。

图 11 为燃油温度 $T=280, 300$ K 时离心喷嘴初始雾化阶段不同轴向位置 SMD 分布曲线。通过图中 DOH 的测试结果可以发现, 初始雾化阶段不同轴向位置 SMD 空间分布呈“单峰”分布。出现这一现象的原因是离心喷嘴下游雾场是空心锥, 即在下流中心处和主流区外侧只有很少的小液滴, 而在主流区存在数量较多的小液滴和部分大液滴。PDPA 的结果表明 SMD 有单峰分布的趋势: 即在燃油温度为 280 K 和 300 K 时随着远离轴线, SMD 先快速增大后基本保持稳定; 随着

轴向距离继续增大,液滴尺寸明显变小(如图 5), SMD 会逐渐减小。通过图 5 可以发现 PDPA 在主流区外侧测得的 SMD 相对较大,出现这一现象的原因是液膜波动会使部分液膜破碎后形成的液滴具有向上和向外侧运动的初速度而使液滴向主流区外侧移动,当这些液滴被 PDPA 捕捉到后会使主流区外侧测得的 SMD 偏大。

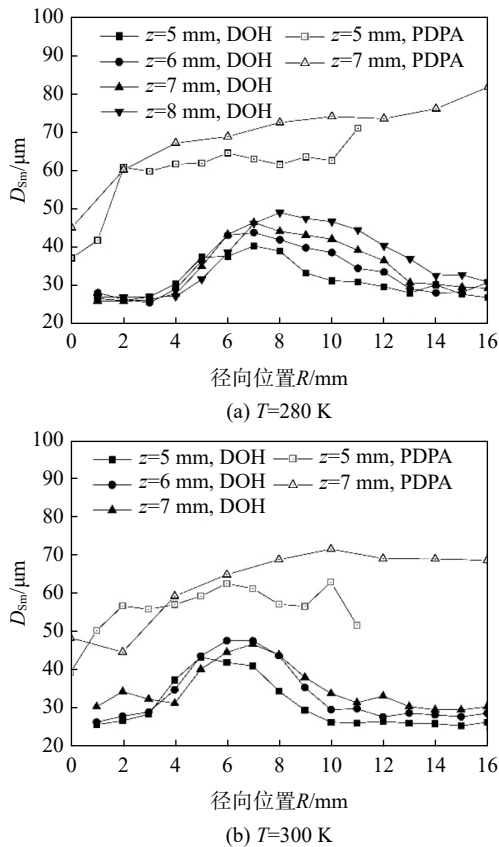


图 11 喷嘴下游 SMD 空间分布曲线

Fig. 11 SMD spatial distribution curve at downstream of the nozzle

通过图 11 可以发现, PDPA 测试得到的 SMD 分布曲线的“峰”比 DOH 测得的要宽,且中心区更窄。这是由于 PDPA 测试过程中的测点所在的直线未经过雾锥截面中心点。通过图 10 的 SMD 分布云图可以发现,当测点所在直线和中心点不重合时,该直线上的 SMD 空间分布的“峰”变宽,且向内移动。通过图 11 还可以发现,DOH 和 PDPA 的测试结果均表明随着雾化向下游进行, SMD 空间分布曲线的峰值位置向远离轴线的方向移动,且峰值增大。其中,峰值位置向外侧移动的原因是离心喷嘴下游雾场是空心锥。对于 SMD 峰值随轴向距离的增加而增加,可以通过观察离心喷嘴下游雾化图像图 5 得到解释。通过图 5 可以发

现,在 $z=5\text{ mm}$ 位置,只存在少量的从液膜剥离的小液滴;随着液雾向下游运动,液膜破碎形成的液丝和不规则液块进一步雾化形成尺寸更大、数量更多的大液滴。

图 12 展示了离心喷嘴初始雾化阶段,不同时刻 t 液膜破碎形成液丝及液丝在气动力的作用下破碎形成离散液滴的全过程。

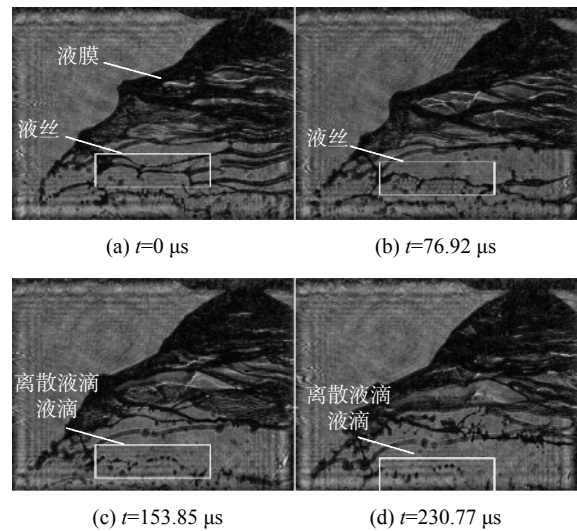


图 12 燃油温度为 280 K 时得到的时间分辨雾化结果

Fig. 12 Time-resolved atomization results obtained at fuel temperature of 280 K

3.2 不同工况 SMD 分布试验结果与分析

图 13 是燃油温度为 240、260、280、300 K 时离心喷嘴下游 7 mm 位置 SMD 空间分布曲线。通过图中 DOH 的试验结果可以发现,随着燃油温度的增加, SMD 分布曲线的峰值位置向喷嘴中心轴线的方向移动。出现这一现象的原因是,随

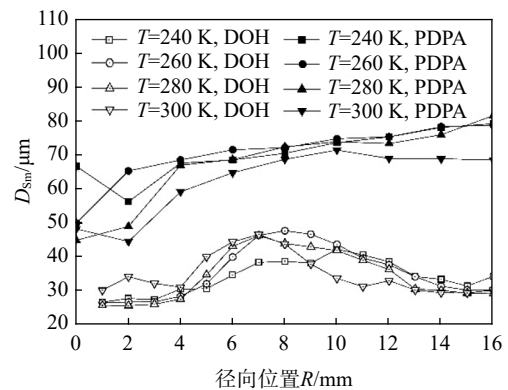


图 13 不同燃油温度下,喷嘴下游 7 mm 处 SMD 空间分布曲线

Fig. 13 Spatial distribution curves of SMD at 7 mm downstream of the nozzle under different fuel temperatures

着燃油温度的增加,离心喷嘴雾化锥角逐渐减小。通过图中 DOH 和 PDPA 的试验结果发现,燃油温度对 SMD 分布曲线的峰值不会产生显著的影响。出现这一现象的原因是, SMD 分布曲线的峰值是由液膜破碎长度和液滴破碎过程共同决定的。通过试验现象和理论都可以得到液膜破碎长度随着燃油温度的升高而减小。通过图 11 得到的规律可以发现,随着测试截面距液膜破碎截面距离的增加, SMD 分布的峰值增大。因此从液膜破碎长度的方面考虑, SMD 峰值随燃油温度的增大而增大。若以液滴破碎的角度考虑,随着燃油温度的升高,燃油的黏度和表面张力系数减小,破碎形成的液滴尺寸减小。

3.3 液滴数量微分分布试验结果与分析

经过雾化后的液滴尺寸相差悬殊,分布很不均匀。液滴尺寸数量微分分布作为一种常用的描述液滴尺寸差异的分布,很多研究者对它的分布特性进行了研究。其中,日本科学家 Nukiyama-Tanasawa 提出的用来描述液雾尺寸分布的一种偏高斯分布(被称为 Nukiyama-Tanasawa 分布)在离心喷嘴研究中被广泛使用^[31-32]。该分布的函数为

$$\frac{dN}{N_0 dD} = aD^2 \exp(-bD^n) + c \quad (4)$$

式中 N 为液滴数量; N_0 为液滴总数; D 为液滴直径; a 、 b 、 n 、 c 为经验常数。

图 14 是燃油温度为 240、260、280、300 K 时离心喷嘴下游 7 mm 位置液滴数量微分分布(differential distribution of droplets size and number, DDSN)试验结果和拟合结果对比。可以发现,对于离心喷嘴初始雾化阶段 DDSN 分布,两种测试方法获得的试验结果都可以用 Nukiyama-Tanasawa 分布函数来表示。同时,不同的工况和不同的测试方法,经验函数中的参数各不相同,但两种方法的试验结果和分布函数的吻合度很高,相关性系数 γ 都超过 0.96。因此,PDPA 和 DOH 两种测试方法可以获得离心喷嘴初始雾化阶段的 DDSN 分布规律,但由于 PDPA 和 DOH 在液滴采集过程中的差异导致分布规律会有较大的差异。

通过图 14 中的试验结果可以发现,DOH 测试得到的 DDSN 分布曲线较 PDPA 更集中,且 DOH 测得的 DDSN 的峰值位置对应的液滴直径比 PDPA 测得的小。其中 DOH 得到的 DDSN 峰值位置对应的液滴直径在 20 μm 左右,而 PDPA

得到的在 60 μm 左右。PDPA 测得的 DDSN 峰值位置对应的液滴直径偏大的原因是 PDPA 将初始雾化阶段存在的大量液丝、液团和非球形大液滴识别为液滴。DOH 测得的 DDSN 峰值位置对应的液滴直径偏小的原因是 DOH 液滴定位识别算法对重叠液滴识别困难。通过前文关于 DOH 粒径识别定位的介绍可以发现,当部分重叠的液滴在相邻的聚焦平面聚焦时,在全息重建图中展示为相互重叠的非球形液团。当聚焦平面间隔比较远时通过聚焦曲线的亮度梯度可以将两个部分重叠的液滴识别区分为两个处在不同平面的液滴;当聚焦平面间隔比较近时聚焦曲线的亮度梯度不足以区分两个液滴的 y 方向位置而将重叠的两个液滴识别为一个非球形的液滴,排除在统计范围之内而使大液滴的数量变少。

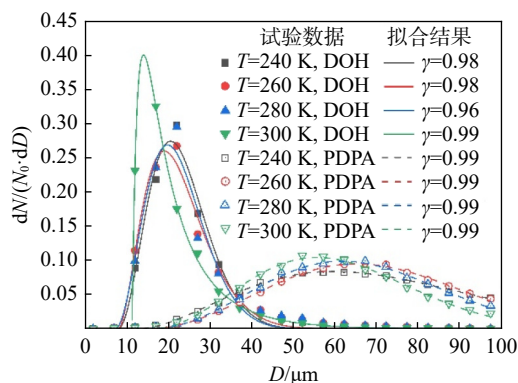


图 14 不同燃油温度下喷嘴下游 7 mm 处液滴尺寸数量微分分布试验结果和拟合结果对比

Fig. 14 Comparison of experimental and fitting results of DDSN at 7 mm downstream under different fuel temperatures

对于非球形液滴是否纳入统计范围,需要有相应的判断标准。根据试验结果,非球形液滴的形态可能是哑铃状、椭球状或拉丝状,如图 15(a)所示。球形度是为了表征非球形液滴与球体的接近程度而提出的物理量,定义为液滴投影图形的长轴和短轴的比值。根据实验室离散液滴判定标准,认为液滴球形度超过 3 的为非球形液滴排除在统计范围内;液滴范围在 1~3 范围内等效为球形液滴纳入统计范围内,如图 15(b)所示。通过液雾破碎图像(图 5)和液滴时间分辨雾化结果(图 12)可以看出,离心喷嘴初始雾化阶段存在大量的重叠的液滴,对这部分液滴的不完全识别会使 DOH 测试得到的 DDSN 峰值位置对应的液滴直径变小,同时使测得的 SMD 空间分布曲线向

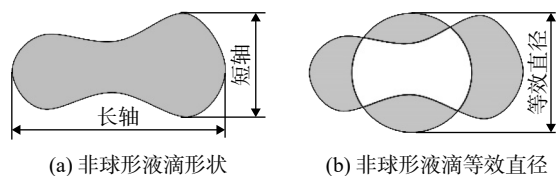


图 15 典型非球形液滴形状及其等效直径
Fig. 15 Shape and equivalent diameter of the typical non-spherical droplet

SMD 减小的方向移动。

PDPA 的技术手段是基于球形液滴假设, 获得球形液滴表面两束激光散射信号的干涉条纹, 并基于条纹方向与频率计算颗粒粒径和速度大小。在粒径测试过程中, 接收器接收到的激光散射光的多普勒信号存在相位差, 该相位差取决于液滴直径。对于球形液滴而言, 两组散射光的相位差是相等的, 但对于非球形液滴, 很难确定哪一个相位差确定的直径是液滴的真实直径。目前, 为了保证 PDPA 测试的精度, 一般认为球形度在 1~1.1 范围内的测试结果是准确的, 此时 PDPA 粒径测试的不确定度为 4%^[16]。本文对喷嘴初始雾化阶段进行测试时, 存在的大量的液丝、液团和非球形液滴会对 PDPA 的测试结果产生很大的影响, 但由于 PDPA 测试过程不可见, 判断 PDPA 在初始雾化阶段液雾分布误差存在很大的困难。

综上所述, PDPA 适用于球形液滴较多的雾化场景。而全息技术更适用于颗粒数浓度整体不高, 但是存在复杂液膜/液丝雾化破碎过程的场景。前者适用于雾化完全的下游雾化场粒径测试分析, 后者适用于解析雾化场上游一次、二次雾化三维破碎过程, 以及雾化破碎产生的液滴粒径分布。两项技术的适用范围有一定重叠, 但可以彼此互相补充, 有助于对雾化场有更深入的理解。

4 结 论

本文通过 PDPA 和 DOH 对不同燃油温度下离心喷嘴初始雾化阶段液雾空间分布进行了试验研究, 得到如下结论:

1) 通过 DOH 方法获得的离心喷嘴初始雾化阶段时间分辨雾化结果和重建截面可以直接观察到液膜的破碎过程和破碎后的液滴分布情况, 有助于对试验结果进行分析。PDPA 只能获得测点位置的粒径统计结果, 测试过程不可见, 在后期处理数据的过程中无法对测试结果进行误差分析。

2) PDPA 和 DOH 结果均表明, 不同工况下离

心喷嘴下游初始雾化阶段 SMD 空间分布曲线呈现“单峰”分布。对于同一轴向位置, DOH 测得的 SMD 分布曲线峰值位置比 PDPA 测得的离中心轴线远, 且“峰”更宽。出现这一现象的原因是, PDPA 测点所在的直线与雾锥所在截面的中心有一定的偏移。

3) PDPA 和 DOH 的结果均表明, 不同工况下, 初始雾化阶段的 SMD 空间分布曲线峰值位置随轴向距离($z=5\sim 7\text{ mm}$)增大向远离中心轴的位置移动。通过 DOH 重建截面和时间分辨雾化结果可以发现, 在初始雾化阶段, 燃油主要以液丝和不规则液团的形式存在, 小尺寸液滴只占其中小部分。随着液雾向下游运动, 液丝和不规则液团在气动力的作用下形成尺寸较大的液滴。

4) DOH 和 PDPA 的试验结果均表明, 在初始雾化阶段, 燃油温度从 240 K 增加到 300 K 的过程中, SMD 分布规律随燃油温度的变化不明显。燃油温度增加不仅会影响液滴的破碎过程, 还会改变液膜的破碎长度。

5) 针对同一工况和同一径向位置, PDPA 测得的 SMD 均比 DOH 测得的偏大。同时, DOH 测得的 DDSN 峰值位置比 PDPA 测得靠近轴线。出现上述现象的原因是, 采用亮度梯度局部方差识别颗粒法, DOH 会将不同重建截面内相互重叠的液滴识别为液丝或不规则液团而排除在统计范围内。同时, 通过 DOH 重建截面和时间分辨雾化结果可以发现在 PDPA 测点处存在大量的液丝和不规则液团, 它们会对 PDPA 测量结果产生很大的影响。DOH 对粒径球形度的敏感性低于 PDPA, PDPA 可以在球形度为 1~1.1 范围内保证测试结果的准确性, DOH 在球形度为 1~3 范围内都有很好的精度。

参考文献:

- [1] 黄勇. 燃烧与燃烧室[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009.
- [2] 甘晓华. 航空燃气轮机燃油喷嘴技术(精)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [3] LARYEA G N, NO S Y. Development of electrostatic pressure-swirl nozzle for agricultural applications[J]. *Journal of Electrostatics*, 2003, 57(2): 129-142.
- [4] 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 Guoqing, 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)
- [5] 蔡小舒. 颗粒粒度测量技术及应用[M]. 北京: 化学工业出

- 版社, 2010.
- [6] BACHALO W. Spray diagnostics for the twenty-first century[J]. *Atomization and Sprays*, 2000, 10(3/4/5): 439-474.
- [7] ALBRECHT H E, DAMASCHKE N, BORYS M, et al. Laser Doppler and phase Doppler measurement techniques[M]. Berlin: Springer Science and Business Media, 2013.
- [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] 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 Aero-space Power*, 2013, 28(9): 1933-1941. (in Chinese)
- [10] 邢小军, 李继保. 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, LI Jibao. Experimental study on spray field in combustor by phase doppler analyzer[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2000, 21(5): 61-65. (in Chinese)
- [11] BULZAN D L. Velocity and drop size measurements in a confined, swirl-stabilized, combustng spray[R]. AIAA-96-3164, 1996.
- [12] MARCHIONE T, ALLOUIS C, AMORESANO A, et al. Experimental investigation of a pressure swirl atomizer spray[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2007, 23(5): 1096-1101.
- [13] XIE J L, GAN Z W, DUAN F, et al. Characterization of spray atomization and heat transfer of pressure swirl nozzles[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2013, 68: 94-102.
- [14] SANTOLAYA J L, AISA L A, CALVO E, et al. Analysis by droplet size classes of the liquid flow structure in a pressure swirl hollow cone spray[J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2010, 49(1): 125-131.
- [15] LEE J, BASU S, KUMAR R. Comparison and cross-validation of optical techniques in different swirl spray regimes[J]. *Atomization and Sprays*, 2013, 23(8): 697-724.
- [16] DAFSARI R A, CHANDRAHASAN R, AHN C, et al. Effect of internal geometry of the pressure-swirl duplex nozzle on the atomization characteristics of jet A-1 fuel[J]. *Atomization and Sprays*, 2020, 30(1): 55-73.
- [17] DAFSARI R A, LEE H J, HAN J, et al. Evaluation of the atomization characteristics of aviation fuels with different viscosities using a pressure swirl atomizer[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 145: 2-13.
- [18] 刘靖, 胡二江, 黄佐华, 等. RP-3航空煤油与其模型燃料雾化特性的对比试验[J]. *航空动力学报*, 2022, 37(4): 765-773.
LIU Jing, HU Erjiang, HUANG Zuohua, et al. Comparative experiment of atomization characteristics of RP-3 kerosene and surrogate fuel[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2022, 37(4): 765-773. (in Chinese)
- [19] WANG Junpeng, XU Cuicui, ZHOU Gang, et al. Spray structure and characteristics of a pressure-swirl dust suppression nozzle using a phase doppler particle analyze[J]. *Processes*, 2020, 8(9): 1-17.
- [20] 刘爱斌, 王栋, 于浩洋, 等. 燃油温度对离心式喷嘴雾化性能影响[J]. *航空动力学报*, 2020, 35(9): 1793-1800.
LIU Aiguo, WANG Dong, YU Haoyang, et al. Effect of fuel temperature on atomization characteristics of cen-trifugal nozzle[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2020, 35(9): 1793-1800. (in Chinese)
- [21] DAFSARI R A, LEE H J, HAN J, et al. Viscosity effect on the pressure swirl atomization of an alternative aviation fuel[J]. *Fuel*, 2019, 240: 1-9.
- [22] WU Yingchun, WANG Lei, LIN Wenhui, et al. Picosecond pulsed digital off-axis holography for near-nozzle droplet size and 3D distribution measurement of a swirl kerosene spray[J]. *Fuel*, 2021, 283: 119-124.
- [23] WANG Lei, LI Tianxiong, ZHAO Yue, et al. 65 kHz picosecond digital off-axis holographic imaging of 3D droplet trajectory in a kerosene swirl spray flame[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 160: 1-9.
- [24] 宋阁, 赵越, 汪磊, 等. 离轴全息成像测量三维气动旋流低温雾化场[J]. *实验流体力学*, 2022, 36(2): 21-29.
SONG Ge, ZHAO Yue, WANG Lei, et al. Measurement of 3D air-blast swirl atomization field at low temperature with off-axis holography[J]. *Journal of Experiments in Fluid mechanics*, 2022, 36(2): 21-29. (in Chinese)
- [25] NISHIDA K, LI T. Characterization of initial spray from a D. I. gasoline injector by holography and laser diffraction method[J]. *Atomization and Sprays*, 2004, 14(5): 1-18.
- [26] NISHIDA K, MURAKAMI N, HIROYASU H. Holographic measurement of evaporating diesel sprays at high pressure and temperature: heat transfer, combustion, power, thermophysical properties[J]. *JSME (the Japan Society of Mechanical Engineers) International Journal*, 1987, 30(259): 107-115.
- [27] CHAREYRON D, MARIÉ J L, FOURNIER C, et al. Testing an inline digital holography 'inverse method' for the Lagrangian tracking of evaporating droplets in homogeneous nearly isotropic turbulence[J]. *New Journal of Physics*, 2012, 14(4): 1-26.
- [28] JAMES T, BEN B, TOMOV I, et al. Probing dense sprays with gated, picosecond, digital particle field holography[J]. *International Journal of Spray and Combustion Dynamics*, 2011, 3(4): 351-366.
- [29] ALI Z, COLIN D, MARCO M, et al. Ultra-short pulsed off-axis digital holography for imaging dynamic targets in highly scattering conditions[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(13): 1-8.
- [30] WU Yingchun, WU Xuecheng, YANG Jing, et al. Wavelet-based depth-of-field extension, accurate autofocusing, and particle pairing for digital inline particle holography[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(4): 556-564.
- [31] KAHEN K, ACON B W, MONTASER A. Modified Nukiyama-Tanasawa and Rizk-Lefebvre models to predict droplet size for microconcentric nebulizers with aqueous and organic solvents[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2005, 20(7): 631-637.
- [32] LAN Zhike, ZHU Dahuan, TIAN Wenxi, et al. Experimental study on spray characteristics of pressure-swirl nozzles in pressurizer[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2014, 63: 215-227.

(编辑: 王碧琚)