

基于脉冲数字全息的回油盘雾化特性

薛志亮¹, 蒋 志¹, 李 峰², 施子福¹, 周永刚¹, 吴学成¹
(1. 浙江大学 能源工程学院 能源清洁利用国家重点实验室, 杭州 310027;
2. 中国航天科工集团有限公司 北京动力机械研究所, 北京 100074)

摘 要: 设计搭建离心式回油盘雾化场测量系统, 提出多孔板式抽吸罩防止油雾外溢, 仿真计算回油盘雾化实验器流场, 采用脉冲数字全息技术测量了不同转速下回油盘雾化场雾滴的空间分布, 粒径分布及雾化锥角, 结果表明: 多孔板式抽吸罩抽吸气流径向流速均匀, 在回油盘附近形成的流场速度比雾滴运动速度低一个数量级, 对雾化场影响较小; 实验回油盘雾化场雾滴的峰值粒径为 20 μm , 占比 20%~30%, 随着转速的升高, 雾化粒径索特尔平均直径(SMD)减小, 且雾化场沿轴向集中, 雾化锥角减小。在同一转速下随着距离喷嘴出口高度的增加, 雾化粒径 SMD 增大, 且随着转速的升高, 增大的幅度减小。

关 键 词: 离心式回油盘; 脉冲数字全息; 雾化场; 索特尔平均直径 (SMD); 雾化锥角

中图分类号: V231.2⁺3 **文献标志码:** A

Atomization performance on fuel slinger with pulsed digital holography

XUE Zhiliang¹, JIANG Zhi¹, LI Feng², SHI Zifu¹,
ZHOU Yonggang¹, WU Xuecheng¹

(1. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, College of Energy Engineering,
Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. Beijing Power Machinery Institute,
China Aerospace Science and Industry Corporation Limited, Beijing 100074, China)

Abstract: The measurement system of atomization field was built on a centrifugal fuel slinger test bench. A suction hood with multi-well plate was used to prevent the oil mist spill, and its flow field was calculated by simulation. Performance parameters such as fuel droplet space distribution, size distribution and atomization cone angle were measured by pulsed digital holography under different rotary speeds. Results indicated that the radial velocity of suction hood was uniform, the velocity field near the fuel slinger was an order of magnitude lower than the droplet velocity, so its influence on the atomization field was small. The 20 μm peak droplet size of atomization field accounted for 20%—30%. With increase of the rotary speed, droplet size Sauter mean diameter (SMD) gradually decreased, atomization field was centralized to axial direction and atomization cone angle was reduced. At the same rotary speed, with the increasing distance away from the nozzle outlet, the

收稿日期:2020-03-05
基金项目:国家自然科学基金重大研究计划培育项目(91741129)
作者简介:薛志亮(1990—),男,博士生,主要从事数字全息测量技术研究与应用。
通信作者:吴学成(1978—),男,教授,博士,主要从事复杂多相流动系统测试与判断。E-mail:wuxch@zju.edu.cn
引用格式:薛志亮,蒋志,李峰,等. 基于脉冲数字全息的回油盘雾化特性[J]. 航空动力学报,2020,35(9):1822-1830. XUE Zhiliang, JIANG Zhi, LI Feng, et al. Atomization performance on fuel slinger with pulsed digital holography[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(9): 1822-1830.

droplet size SMD rose, and when the speed increased, the amplitude diminished.

Key words: centrifugal fuel slinger; pulsed digital holography; atomization field; Sauter mean diameter (SMD); atomization cone angle

离心式甩油盘利用高速旋转形成的离心力,在甩油盘喷嘴出口处产生极高的压差,使燃油从喷嘴高速流出形成液膜,在气流的剪切下雾化破碎^[1-3]。一般离心式甩油盘直接安装在发动机转子上,与转子一同转动,与常规的燃油雾化装置相比,离心式甩油盘具有雾化粒径小、周向分布均匀、供油压力低、不易堵塞、结构紧凑等优点,因而广泛应用于各类中小型航空发动机上^[4-6]。测量研究离心式甩油盘的雾化参数,定量分析甩油盘的性能特征,对优化设计甩油盘结构,提高发动机效率和寿命具有重要意义^[7]。

为了探明甩油盘的雾化机理,获得表征甩油盘雾化性能的参数,如索特尔平均直径(Sauter mean diameter, SMD,量符号记为 D_{sm}),雾化锥角,液膜厚度,破碎长度等,学者们采用了多种测量方法对甩油盘的雾化过程进行观测,主要有:相位多普勒粒子分析仪(phase Doppler particle analyzer, PDPA)、马尔文粒度仪、高速摄影、振动频谱分析等。熊纯、蔡文哲、李宏伟、高翔等^[8-11]用PDPA测量了不同转速下甩油盘的燃油雾化粒度SMD、雾化锥角等参数,并给出了其随转速的变化规律。Seong、Han等^[12-15]结合PDPA和高速摄影,定量分析了雾化粒径、雾滴分布,速度等,对甩油盘雾化过程进行可视化研究。Werner等^[16-17]采用高速摄影在不同喷油孔形状、大小、液体流量和甩油盘转速下进行了一系列雾化特性实验,给出了丰富的可视化实验结果,并根据实验结果对适用于小型燃气涡轮的圆孔甩油盘的设计和性能准则进行了分析。Morishita等^[18]改变甩油盘直径、孔数量、孔尺寸、液体流量等,通过对喷雾照片进行处理获得了各种工况下的SMD,给出了用水进行实验时索特尔平均直径的经验公式,并分析了甩油盘结构等对雾化质量的影响。叶宇隆等^[19]结合三维数值模拟和高速摄影研究了甩油盘内外部的非均匀流动现象,发现甩油盘雾化场的空间均匀性受到内部流动不均匀性的影响较大。贾永忠^[20]采用振动频谱的分析方法开展了系统性的实验,建立了甩油盘雾化粒径SMD和燃油各物理参数以及甩油盘转速等重要参数之间的关系式。

目前学者们对径向供油甩油盘研究较多,而

关于轴向供油甩油盘雾化特性的研究报道较少。轴向供油甩油盘不仅结构更紧凑,而且可以对燃油进行预热,有利于雾化和燃烧。高速摄影在燃油雾化过程的可视化分析上具有明显的优势,但是定性的分析,PDPA能够获得雾化液滴的粒径和三维速度,但是点测量。数字全息技术具有三维、非接触测量颗粒场的能力,被广泛应用在流体力学、能源、环境等领域中颗粒物的三维测量^[21-22]。本文设计搭建了甩油盘雾化场测量系统,提出多孔板式抽吸罩防止油雾外溢,回收燃油,并用数值仿真评估了抽吸对雾化场的影响;进一步基于脉冲数字全息技术对不同转速下离心式甩油盘的雾化场参数进行测量,获得了雾化场雾滴的空间分布,粒径分布及雾化锥角,为实验甩油盘的喷嘴设计及结构优化设计提供数据支持。

1 测量原理和实验系统

1.1 测量原理

全息技术是利用参考光和目标物体衍射或散射光干涉,以干涉条纹的形式记录物体的振幅和相位信息,再通过相同的参考光照射记录的全息图,可以重建出物光的波前,是一种典型的两步成像技术,包括全息图记录与波前重建两个步骤^[23]。数字全息采用数字相机代替传统化学银盐干板作为记录介质,可实现全息图像传输和定量计算处理。一般激光经过空间滤波后均匀光束照射目标颗粒场,颗粒散射光与参考光干涉,干涉条纹被数字相机记录,然后以标量衍射理论为基础,模拟参考光照射全息图,采用重建算法对记录图进行重建再现,从而获得颗粒场中颗粒的粒径、三维位置和体积分数等信息^[24-26]。

平面激光照射下颗粒场全息图记录过程中对于记录距离为 z_0 的颗粒,全息记录平面的干涉条纹光强 $I(\alpha, \beta)$ 为

$$I(\alpha, \beta, z_0) = 1 - \frac{2}{\lambda z_0} O(x, y) \otimes \sin \left[\frac{\pi}{\lambda z_0} (x^2 + y^2) \right] \quad (1)$$

其中 $O(x, y)$ 为物平面上颗粒光强函数, λ 为入射光波波长, $\otimes$ 是对函数作二维卷积运算。由于小波变换算法具有重建图像信噪比高、图像背景均

匀的优点,本文采用小波变换算法来对全息图进行重建.波的传播以及衍射过程可以用小波来描述,全息图的光学重建过程等同于全息图记录的逆过程,则重建全息图像的光强 $I(x, y)$ 可以用全息图 $I(\alpha, \beta)$ 的小波变换表示为

$$I(x, y, z_0) = 1 - I(\alpha, \beta, z_0) \otimes \phi_a(x, y) = 1 - I(\alpha, \beta, z_0) \otimes \left\{ \frac{1}{\alpha^2} \left[\sin\left(\frac{x^2 + y^2}{\alpha^2}\right) - M_\psi \right] \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\alpha^2 \sigma^2}\right) \right\} \quad (2)$$

其中 $\phi_a(x, y)$ 为校正的小波函数, σ 是宽度因子, M_ψ 为引入的调零参数,使 $\phi_a(x, y)$ 均值为零,它可以表示为

$$M_\psi = \frac{\sigma^2}{1 + \sigma^4} \quad (3)$$

其中 σ 代表窗口函数的宽度,它依赖于帧采集特性,为

$$\sigma = \min \left[\frac{N\delta_{\text{ccd}}}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\lambda z} \ln(\epsilon^{-1})}, \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi \lambda z}{\ln(\epsilon^{-1})}} \right] \quad (4)$$

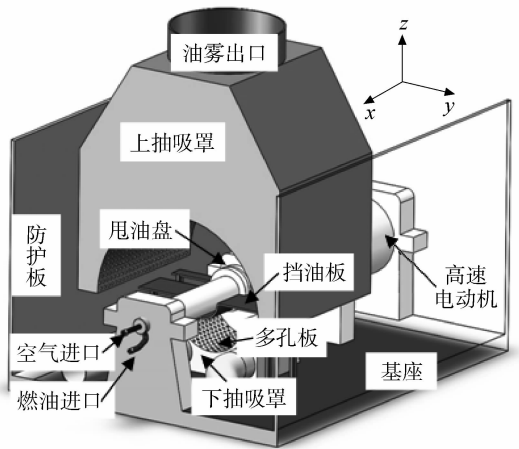
在颗粒场全息图被数字相机记录后,选定图像重建平面的位置 z ,生成对应平面的小波函数,对全息图和小波函数进行卷积,即得到该平面的重建图像,再对重建图像进行景深扩展,识别、定位颗粒,获得颗粒场信息.

1.2 实验系统

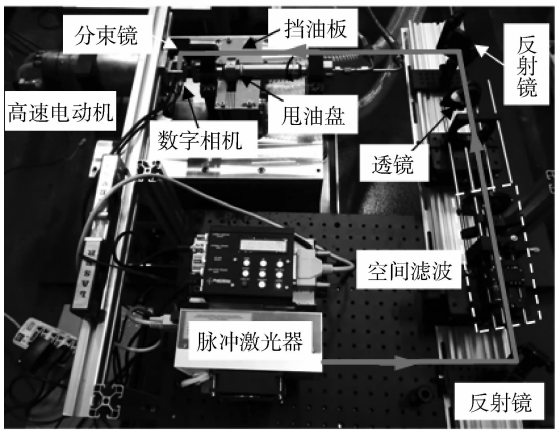
搭建甩油盘雾化场测量系统,如图 1 所示,主要包括:甩油盘雾化实验器和脉冲数字全息测量系统.甩油盘雾化实验器示意图如图 1(a)所示,能够实现转速、燃油流量、供气压力的调节和数据采集,以及燃油的回收.主要由以下部件组成:高速电动机、甩油盘、抽吸罩、基座、供油供气装置和数据采集系统.高速电动机型号 100ES40G,采用变频器调节电动机转速,电动机和甩油盘用柔性联轴器连接,减少高转速引起的机械振动.采用 VP-20-FA3 液压油泵供油,金属管转子流量计测量油量,防爆型压力变送器测量油压,通过调压阀控制燃油流量.为了使供气压力稳定,采用高压气瓶供气,减压阀调节供气压力.供油流量、压力和供气压力数据用安捷伦数据采集仪记录,采样频率为 1 Hz.实验燃油为 RP-3 航空煤油,在空气中弥散有爆炸危险,设计抽吸罩防止油雾外溢,再用油雾分离器实现燃油的回收循环利用.抽吸罩分为上部和下部,进气口为半圆弧形多孔板,孔径为 3 mm,上、下抽吸罩半圆弧的半径分

别为 120 mm 和 50 mm.下抽吸罩由于空间限制进气口距离甩油盘喷嘴仅为 25 mm,通过设置挡油板,避免雾化油滴碰到进气口反溅到测量区及甩油盘下部油雾逸散到测量区.实验用甩油盘轴向供油,周向均布多个喷油孔组成的喷嘴.

脉冲数字全息测量系统实物图如图 1(b)所示,主要由脉冲激光器,光束滤波扩束和数字相机组成.激光器出射光经过由显微物镜和针孔组成的空间滤波器,滤掉光束中的高频噪声,提高光束质量,然后经过透镜扩束成直径为 50 mm 的光束照亮雾滴场,雾滴干涉信号光经分束镜被数字相机记录.其中激光器为 Bright Solutions 公司的高功率亚纳秒激光器(Wedge-HF-532),波长为 532 nm,脉宽为 800 ps,频率为 1~10 kHz,光束直径为 4 ± 0.5 mm.雾滴全息图记录数字相机型号为 Basler acA2040-90uc,分辨率为 2 040 像素 $\times$ 2 046 像素,像素尺寸为 $5.5 \mu\text{m}$,帧率为 90 帧/s.高转速甩油盘雾化的油滴运动速度高,采用脉冲



(a) 甩油盘雾化实验器示意图



(b) 脉冲数字全息测量系统实物图

图 1 甩油盘雾化场测量系统图

Fig. 1 Measurement system of fuel sling atomization field

激光实现雾化场的“冻结”,避免拖影的产生,以提高测量精度。激光器脉宽远小于相机的曝光时间 $20\mu\text{s}$,为了精确捕捉雾滴全息图,采用数字延时发生器(DG645)同步激光器和相机,每次相机开始曝光 $5\mu\text{s}$ 后激光器再出光。

2 抽吸罩流场仿真计算

设计抽吸罩捕集油雾防止油雾外溢不可避免的改变甩油盘雾化场,为了评估抽吸罩对测量区域雾化场的影响,采用 ANSYS 软件对甩油盘雾化实验器流场进行仿真计算分析。

2.1 计算数模及网格划分

考虑抽吸罩,甩油盘支座及周围遮挡结构,仿真计算模型如图 2 所示,在实验器周围设置长宽高分别为 $1.5\text{ m}\times 1.2\text{ m}\times 1.5\text{ m}$ 的大空间,模拟实验器周围环境。由于计算区域大,而甩油盘周围是要重点分析的区域,网格采用 ICEM 软件进行分块划分非结构化网格的方式,在甩油盘周围及抽吸罩小孔处网格加密处理,网格总数为 847 万。边界设置:大空间压力入口,抽吸罩出口为压力出口,通过调节出口压力使上、下抽吸罩分别为 $885\text{ Nm}^3/\text{h}$ 和 $115\text{ Nm}^3/\text{h}$ 。选用 RNG (re-normalization group) $k\text{-}\epsilon$ 两方程湍流模型来计算流场,压力-速度耦合采用 SIMPLEC (semi-implicit method for pressure-linked equation consistent) 算法进行求解。

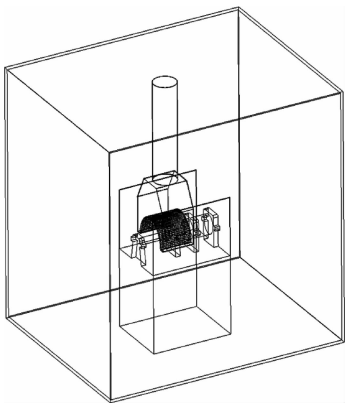


图 2 甩油盘雾化实验器流场仿真计算模型
Fig. 2 Simulation model of the fuel slinger test bench flow field

2.2 仿真计算结果及分析

垂直旋转轴,经过喷嘴中心截面实验器速度分布云图如图 3 所示,大空间的速度小,分布均匀,在抽吸罩的作用下甩油盘周围速度增加,抽吸

罩出口速度最大。抽吸罩的进口为多孔板结构,气流经过时先加速再减速,抽吸罩表面的高速气流保证油雾被吸走不会逸散,而远离抽吸罩进口,气流速度降低,以减弱对雾化场的影响。甩油盘附近速度矢量图如图 4 所示,抽吸罩入口速度矢量长度基本一致,明显大于其他位置,且气流沿径向流入抽吸罩。而抽吸罩进口半圆弧面与甩油盘同轴,使沿甩油盘切向雾化出的油雾被均匀吸走。相比一般敞口式抽吸罩,进口处流场均匀,抽吸形成的流场与雾化流场相似度高,能够减弱抽吸对雾化场的影响。

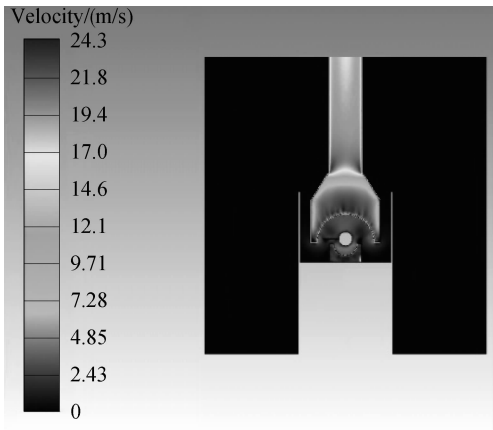


图 3 实验器速度分布云图
Fig. 3 Velocity distribution contour of the test bench

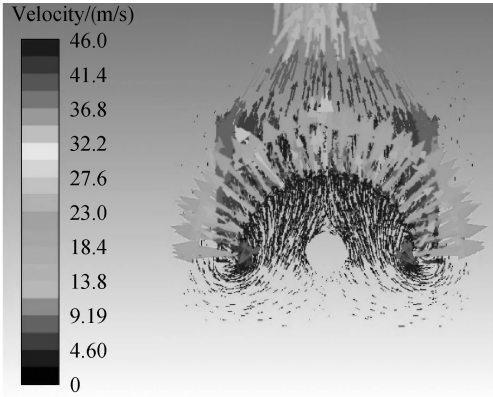


图 4 甩油盘附近速度矢量图
Fig. 4 Velocity vector diagram near the fuel slinger

读取甩油盘正上方 20、30 mm 处测量光轴方向两条线上的速度,如图 5 所示,随着距离喷嘴高度的增加,速度增大,20、30 mm 处速度分别为 0.8 m/s 和 1.6 m/s 。在喷嘴两侧附近,速度分布对称,随着距离增加,速度增大,然而在喷嘴两侧较远处(雾化锥角外),受实验器结构影响速度分布明显不对称,在右侧(电动机侧)20 mm 处有凸

起的轴支座遮挡,但左侧(进油侧)轴支座距离喷嘴中心达 100 mm。在甩油盘高速旋转带动下,雾化油滴运动速度达几十米每秒,比抽吸气流速度高一个数量级,故抽吸对甩油盘雾化场的影响很小。

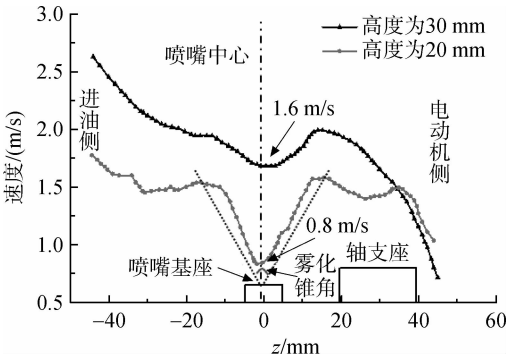


图 5 甩油盘正上方光轴方向速度分布
Fig. 5 Velocity distribution along the optics axis above the fuel slinger

3 实验和结果分析

利用已知直径和位置的标准丝分析测量系统精度,标定喷嘴中心位置。采用脉冲数字全息测量系统,控制测量时序,对不同转速下甩油盘雾化场全息图进行记录,重建获得雾化场的粒径分布,空间分布和雾化锥角参数。

3.1 实验参数

实验供油流量为 10 kg/h,采用控制变量法调整转速 n 分别为 5 000、8 000 r/min 和 15 000 r/min,待工况稳定后进行全息图记录。实验时保持燃油温度为 20~25 ℃,燃油物性参数:密度为 779.51 kg/m³,黏度为 7.971×10^{-7} m²/s,表面张力为 0.24 N/m。测量系统视场大小为 11.22 mm×11.25 mm,有效曝光时间为 800 ps。

3.2 测量位置标定

实验前用铁丝悬挂标准丝放置在雾化场,其中铁丝直径为 0.8 mm,竖直放在喷嘴中心正上方,标准丝直径为 0.15 mm,打结固定在铁丝上,打结处距离喷嘴出口 30 mm。铁丝和标准丝的全息图如图 6(a)所示,由于光路系统中存在多个光学器件(透镜、分束镜等),不可避免的产生背景噪声,如图中箭头处的干涉条纹。为了减弱背景对测量的影响,提高信噪比,同时便于观察目标物体的全息图,利用多张背景图合成一张背景,采用背景相减法除去原始全息图像中的背景噪声。根据小波重建算法,对去背景的全息图进行重建,景深

扩展后铁丝和标准丝的聚焦图像如图 6(b)所示,铁丝和标准丝的重建图像都很清晰,可以看到局部打结的细节。统计不同位置处标准丝占的像素点数,实测标准丝直径为 0.154 mm,误差为 2.7%,满足测量要求。对铁丝和打结处进行定位,得到记录平面距离喷嘴中心为 125 mm,视场中心距离喷嘴出口高度为 31.4 mm。

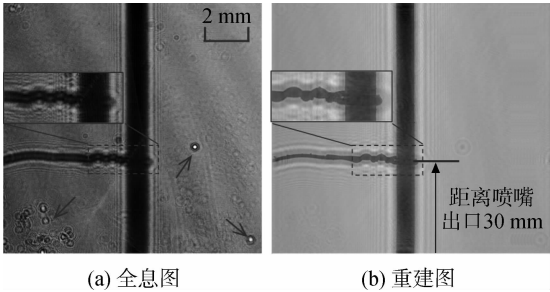
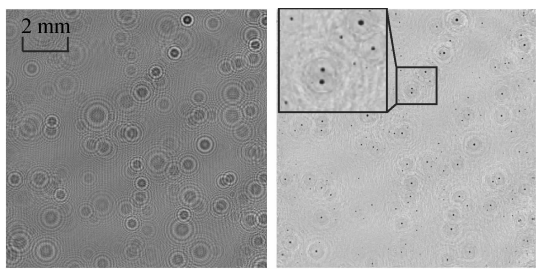


图 6 标准丝全息图和重建图
Fig. 6 Hologram of standard wire and its reconstruction

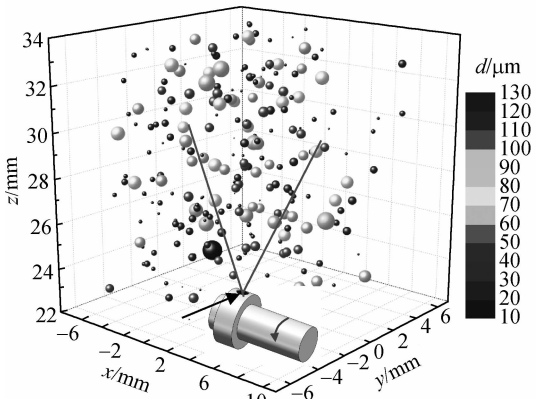
3.3 实验结果讨论

利用脉冲数字全息测量系统对不同转速下甩油盘雾化场进行测量,图 7 是雾化场雾滴全息图的重建,图 7(a)是雾滴全息图,可以看出去背景后的雾滴全息条纹清晰。采用小波算法重建全息图,每隔 0.5 mm 重建一个图层,重建全息图的景深扩展图如图 7(b)所示,雾滴聚焦图像呈圆形,与背景区别明显,具有很高的识别度。进一步采用小波域内亮度梯度局部方差算法对雾滴进行定位,以喷嘴中心为原点,旋转轴向为 x 轴,水平方向为 y 轴,竖直方向为 z 轴建立直角坐标系,雾滴的三维空间分布如图 7(c)所示,图中 d 表示雾滴粒径,大小雾滴相间均匀分布,随着距离喷嘴出口高度的增加,雾化场沿 x 方向展开。

为了直观显示甩油盘雾化场雾滴粒径的空间分布,每个工况统计约 6 000 个颗粒,分别计算不同转速下距离甩油盘喷嘴出口高度为 26.5、29.5、32.5 mm 和 35.5 mm 处雾滴的粒径分布,如图 8 所示。雾化场雾滴的峰值粒径为 20 μm,占比 20%~30%,距离甩油盘喷嘴出口不同高度处雾滴的粒径分布曲线相似,随着高度的增加,小颗粒的占比降低,如转速为 5 000 r/min 时,高度为 26.5、35.5 mm,粒径范围为 17.5~22.5 μm 颗粒占比分别为 37.75%、31.45%。随着转速的升高,大颗粒占比减少,峰值粒径对应的占比增加,转速为 5 000、8 000、15 000 r/min,高度为 29.5 mm 处峰值粒径占比分别为 22.60%、26.12%、28.39%。



(a) 雾滴全息图 (b) 重建全息图的景深扩展图

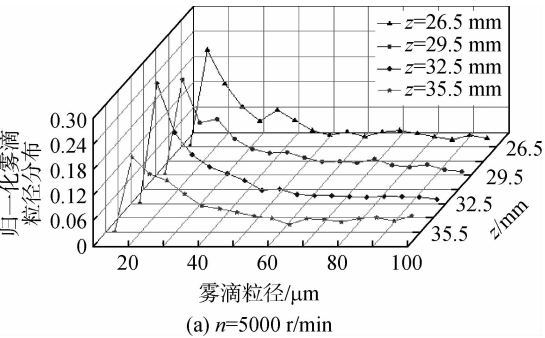


(c) 雾滴的三维空间分布

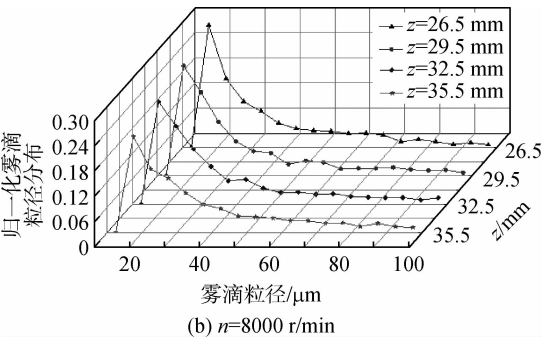
图 7 雾滴场全息图重建

Fig. 7 Reconstruction of droplet field hologram

根据雾化场的空间粒径分布,统计计算喷嘴出口不同高度处雾化粒径索特尔平均直径(SMD)随转速的变化,结果如图 9 所示。在相同的转速下,随着距离喷嘴出口高度的增加,雾化粒径 SMD 增大,且随着转速的升高,增大的幅度减小,如转速为 5 000 r/min,高度从 26.5 mm 到



(a) $n=5000\text{ r/min}$



(b) $n=8000\text{ r/min}$

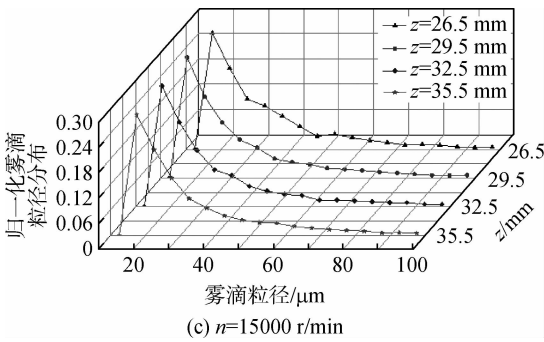


图 8 不同转速下雾滴粒径分布

Fig. 8 Droplet size distribution at different rotary speeds

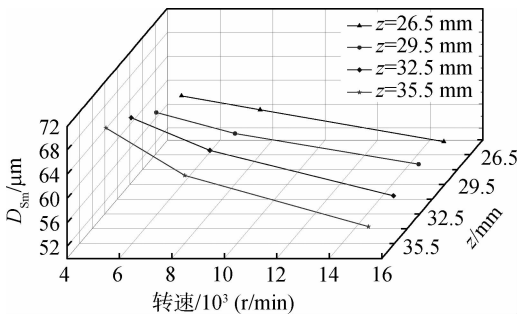


图 9 雾化粒径 SMD 随转速的变化

Fig. 9 Variation of droplet size SMD with rotary speed

35.5 mm, SMD 从 59.84 μm 增加到 69.3 μm,而转速为 15 000 r/min, SMD 从 52.2 μm 增加到 52.82 μm。燃油在雾化时,高转速甩油盘产生的离心力使油膜从喷嘴高速喷出,油膜和空气间存在较大的速度差,逐渐被撕裂成液丝,再破碎为小雾滴。雾滴受空气阻力运动速度降低,小雾滴的惯性小,穿透能力弱,而大雾滴具有较大动能,穿透能力强,能够运动到距离喷嘴出口更远的地方,因此距离喷嘴出口越远, SMD 越大。随着转速的升高,喷嘴出口不同高度处 SMD 都呈减小的趋势,5 000、8 000、15 000 r/min 转速下雾化粒径的 SMD 分别为 64.31、59.50、52.85 μm。甩油盘旋转产生的当量供油压差 Δp 可以表示为

$$\Delta p = \rho_t \left(\frac{\omega R}{K} \right)^2 \quad (5)$$

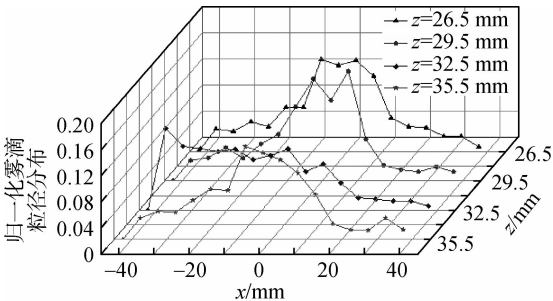
其中 ρ_t 为燃油密度 (kg/m³); ω 为旋转速度 (rad/s); R 为甩油盘直径 (m); K 为速度系数,取值 0.95。

可以看出,当量供油压差与转速呈线性二次方关系,当转速升高时,当量供油压差增大,使燃油在甩油盘喷嘴出口的喷射速度增大,同时喷嘴出口周向线速度也增大,燃油离开喷嘴的切向速度增加,共同作用下燃油与空气的相对速度增大,

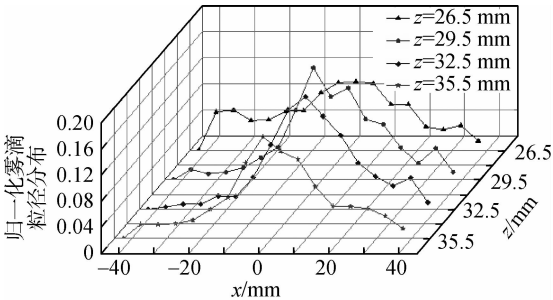
气流对油膜的扰动大大增强,促进燃油的雾化。

不同转速下雾滴空间分布如图 10 所示,分别统计了喷嘴出口高度为 26.5、29.5、32.5 mm 和 35.5 mm 处轴向的颗粒数分布。随着甩油盘转速的升高,雾化场沿轴向越集中,也就是随着转速升高图中颗粒数分布曲线由“胖矮”形变为“瘦高”形。随着高度的增加,雾化场沿轴向越分散,在高度为 26.5 mm 和 29.5 mm 处,喷嘴正上方($x=0$ mm)出现颗粒数较少的区域,当高度进一步增加时,雾滴分布趋向于均匀。这是由于实验甩油盘喷嘴由周向均布的多个喷嘴孔组成,在喷嘴中心存在一个空白区,而雾滴具有很大的径向速度,轴向速度分量小,要一定的距离才能填充该空白区域。

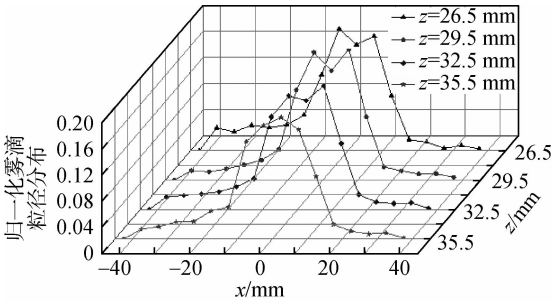
不同转速下喷嘴出口 29.5 mm 处雾滴轴向



(a) $n=5000$ r/min



(b) $n=8000$ r/min



(c) $n=15000$ r/min

图 10 不同转速下雾滴空间分布

分布如图 11 所示,距离喷嘴中心越远,雾滴数减少,存在明显的边界。以颗粒数分布曲线的半峰宽计算雾化锥角,5000、8000、15000 r/min 转速下雾化锥角分别为 45.55° 、 43.93° 、 40.04° ,随着转速的升高,喷嘴出口油膜径向速度在雾滴速度分量中显著增大,从而使雾化锥角减小。同时高转速下油膜在喷嘴出口较短的距离内完全破碎,雾化粒径小,雾化场更均匀。

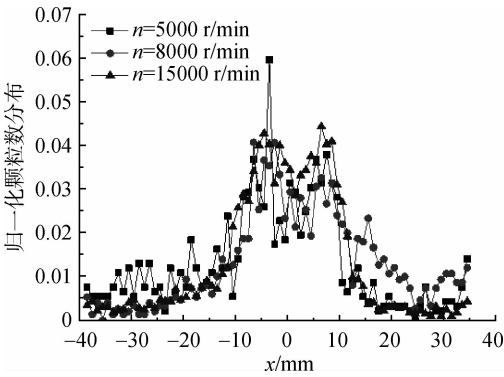


图 11 喷嘴出口 29.5 mm 处雾滴轴向分布

Fig. 11 Axial distribution of droplet at nozzle outlet 29.5 mm

4 结 论

利用数值仿真评估抽吸罩对实验器流场的影响,基于脉冲数字全息对不同转速下甩油盘雾化场参数进行测量分析,得出以下结论:

- 1) 多孔板式抽吸罩抽吸气流径向流速均匀,在甩油盘附近形成的流场速度比雾滴运动速度低一个数量级,可以防止油雾外溢,且对雾化场影响小。
- 2) 脉冲数字全息测量系统能够实现高速运动雾化场的“冻结”,记录的雾滴全息条纹清晰,重建后雾滴聚焦图像与背景区别明显,具有很高的识别度。
- 3) 实验甩油盘雾化场雾滴的峰值粒径为 $20\text{ }\mu\text{m}$,占比为 $20\%\sim 30\%$,随着转速的升高,雾化粒径 SMD 减小;随着距离喷嘴出口高度的增加,雾化粒径 SMD 增大,且随着转速的升高,增大的幅度减小。
- 4) 甩油盘转速为 5000、8000、15000 r/min 时,雾化锥角分别为 45.55° 、 43.93° 、 40.04° ,随着转速的升高,雾化场沿轴向集中,雾化锥角减小。
- 5) 基于脉冲数字全息技术测量甩油盘雾化场三维参数(雾滴空间分布、粒径分布、雾化锥角

Fig. 10 Spatial distribution of droplet at different roraty speeds

等)是可行的,为该技术在甩油盘高速运动雾化场三维速度测量应用奠定了基础。

参考文献:

[1] BERNARD P,ALAIN D E C,SMALL K,et al. Review of fuel spray distributions to predict performance of rotary atomizers in a slinger gas turbine combustor[J]. Journal of the International Institutes for Liquid Atomization and Spray Systems,2016,26(5):483-511.

[2] 马朝,黎明,索建秦,等. 某离心式喷嘴雾化特性及优化设计研究[J]. 航空工程进展,2017,8(1):58-67.

MA Zhao,LI Ming,SUO Jianqing,et al. Study on atomization characteristic and optimum design of a centrifugal nozzle[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering,2017,8(1):58-67. (in Chinese)

[3] WERNER J A D,PRASHANT R P,BRYAN H L,et al. Analysis of liquid breakup regimes in fuel slinger atomization[J]. Atomization and Sprays,2006,16(8):945-962.

[4] 刘邓欢,金捷,王方,等. 涡轮喷气式发动机整机环境下折流燃烧室性能试验[J]. 航空动力学报,2015,30(10):2410-2415.

LIU Denghuan,JIN Jie,WANG Fang,et al. Performance test of slinger combustor of turbojet engine running in engine test[J]. Journal of Aerospace Power,2015,30(10):2410-2415. (in Chinese)

[5] 宋双文,罗辉. 离心甩油盘特性浅析[R]. 温州:中国航空学会(动力)第3届小发动机暨中国航空学会(直升机)第3届动力与传动学术讨论会,2000.

[6] 曾川,王洪铭,单鹏. 微涡喷发动机离心甩油盘环形折流燃烧室的设计与实验研究[J]. 航空动力学报,2003,18(1):92-96.

ZENG Chuan,WANG Hongming,SHAN Peng. The design and study of the annular combustion chamber with centrifugal fuel injection[J]. Journal of Aerospace Power,2003,18(1):92-96. (in Chinese)

[7] 蒋雪辉. 气液两相离心甩油盘设计[J]. 航空发动机,2016,42(2):7-10.

JIANG Xuehui. Design of a gas-liquid two-phase slinger[J]. Aeroengine,2016,42(2):7-10. (in Chinese)

[8] 熊纯,宋双文,陈剑,等. 一种离心甩油盘雾化性能的试验[J]. 航空动力学报,2012,27(7):82-87.

XIONG Chun,SONG Shuangwen,CHEN Jian,et al. Experimental study of atomization performance on a fuel slinger[J]. Journal of Aerospace Power,2012,27(7):82-87. (in Chinese)

[9] 蔡文哲,李峰,吴静,等. 一种异型孔离心甩油盘雾化性能的试验[R]. 北京:中国航天第三专业信息网第40届技术交流会暨第四届空天动力联合会议,2019.

[10] 李宏伟,金捷,刘邓欢. 小型航空发动机燃烧室甩油雾化试验台的建设与研究[R]. 辽宁 大连:中国化学会第二届全国燃烧化学学术会议,2017.

[11] 高翔,王方,肖阳春,等. 甩油盘雾化试验台开发和验证[J]. 清华大学学报(自然科学版),2020,60(3):212-218.

GAO Xiang,WANG Fang,XIAO Yangchun,et al. Development and verification of a fuel slinger atomization test bench[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology),2020,60(3):212-218. (in Chinese)

[12] SEONG M C,SEONG H J,DONG H L,et al. Spray characteristics of the rotating fuel injection system of a micro-jet engine[J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2010,24(2):551-558.

[13] SEONG H J,SEONG M C. Spray behavior of the rotary atomizer with in-line injection orifices[J]. Atomization and Sprays,2010,20(10):863-875.

[14] HAN J J,SANGSIG Y,SEONG M C. Spray in cross flow of a rotary atomizer[J]. Atomization and Sprays,2012,22(2):143-161.

[15] SEONG M C,SANGSIG Y,HAN J J. Spatial drop behavior of a rotary atomizer in a cross flow[J]. Atomization and Sprays,2012,22(12):1077-1095.

[16] WERNER J A D,PRASHANT R P,BRYAN H L. Visualization and fundamental analysis of liquid atomization by fuel slingers in small gas turbine engines[R]. St. Louis, Missouri, USA: 32nd AIAA Fluid Dynamics Conference, 2002.

[17] WERNER J A D,PRASHANT R P,BRYAN H L. Experimental visualization of liquid breakup regimes in fuel slinger atomization[J]. Atomization and Sprays,2006,16(8):933-944.

[18] MORISHITA T. A development of the fuel atomizing device utilizing high rotational speed[R]. Houston, Texas: International Gas Turbine Conference and Products Show, 1981.

[19] 叶宇隆,金捷,刘睿,等. 直连式甩油盘非均匀流动特性[J]. 北京航空航天大学学报,2019,45(8):1560-1568.

YE Yulong,JIN Jie,LIU Rui,et al. Non-uniform flow characteristics of direct-connected fuel slinger[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2019,45(8):1560-1568. (in Chinese)

[20] 贾永忠. 甩油盘的雾化分析[J]. 推进技术,1995,16(4):45-49.

JIA Yongzhong. Ananalyse on atomization of fuel slinger[J]. Journal of Propulsion Technology,1995,16(4):45-49. (in Chinese)

[21] 吴迎春,吴学成,岑可法. 数字全息测量颗粒场研究进展[J]. 中国激光,2014,41(6):1-11.

WU Yingchun,WU Xuecheng,CEN Kefa. Development of digital holography in particle field measurement[J]. Chinese Journal of Lasers,2014,41(6):1-11. (in Chinese)

[22] 吴迎春. 数字颗粒全息三维测量技术及其应用[D]. 杭州:浙江大学,2014.

WU Yingchun. Digital particle holography for 3D measurement and its applications[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2014. (in Chinese)

[23] 姚龙超. 数字全息颗粒燃烧与液滴雾化测量方法与应用[D]. 杭州:浙江大学,2019.

YAO Longchao. Digital holographic method and application to measurement of particle combustion and droplet atomization[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019. (in Chinese)

[24] WU Yingchun, WU Xuecheng, YAO Longchao, et al. Simultaneous particle size and 3D position measurements of pulverized coal flame with digital inline holography[J]. Fuel, 2017, 195(5): 12-22.

[25] 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.

[26] WU Xuecheng, XUE Zhiliang, ZHAO Huafeng, et al. Measurement of slurry droplets by digital holographic microscopy: fundamental research[J]. Fuel, 2015, 158(15): 697-704.

(编辑:王碧琚)