

基于全息 of 某型喷嘴燃油雾化三维特性实验研究

曹娜^{1*}, 徐青¹, 韩长才¹, 马继明¹, 宋岩¹, 宋文艳²

¹西北核技术研究院激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024;

²西北工业大学能动学院, 陕西 西安 710072

摘要 采用离轴脉冲激光全息诊断技术, 在发动机试车台上对某型号涡轮发动机喷嘴在常温常压及高温纯空气来流条件下的燃油雾化参数进行了实验测量, 获得了雾化场空间结构特征、雾化粒子空间位置、数量分布以及索太尔平均直径分布等三维量化数据。实验结果表明, 常温常压条件下, 该型号喷嘴形成的雾化场呈空心圆锥体分布, 雾化粒子集中分布在锥体表面, 粒子直径多在 60~80 μm 之间, 随距喷嘴距离的增加, 粒子直径减小且趋近一致, 表现出均匀的雾化效果; 喷射压力较低时, 近喷嘴区域密集涡流环下游出现一个类似主流环的涡流环, 随着喷射压力的增大, 喷嘴附近涡流环数量减少, 液膜波纹及细丝增多, 下游没有观察到主流环; 射流两侧的雾化结构呈现不完全对称分布。在 800 K、5.5 kPa 的高温纯空气来流作用的工况条件下, 燃烧室内雾化粒子的平均直径减小至 12 μm 左右, 雾化质量得到明显改善。

关键词 全息; 射流; 雾化; 粒子; 分布

中图分类号 O438.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1109001

Study of a Centrifugal Nozzle Spray Characterization in Space Based on Off-Axis Holography

Cao Na^{1*}, Xu Qing¹, Han Changcai¹, Ma Jiming¹, Song Yan¹, Song Wenyan²

¹State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China;

²School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China

Abstract For investigating the fuel spray characteristics of the nozzle designed for the aero-engine, the off-axis particle field holographic measuring system is used on an engine test-bed. The spray structure, atomized particles locations, amounts, and sizes distribution in space under different experimental conditions are obtained quantitatively. Experimental results show that under normal temperature and pressure conditions, the atomization field formed by this type of nozzle is distributed in a hollow cone. The atomized particles are concentrated on the surface of the cone. The diameter of the particles is mostly between 60 μm and 80 μm , with the distance from the nozzle increases, the particle diameter decreases and approaches the same, showing a uniform atomization effect. When the injection pressure is low, a vortex ring similar to the mainstream ring appears downstream of the dense vortex ring near the nozzle area. As the injection pressure increases, the number of vortex rings near the nozzle is reduced, the ripples and filaments of the liquid film are increased, and the mainstream ring is not observed downstream. The atomization structure on both sides of the jet is not completely symmetrical. Under the working conditions of 800 K and 5.5 kPa high temperature pure air flow, the average diameter of atomized particles in the combustion chamber is reduced to about 12 μm , and the atomization quality is significantly improved.

Key words holography; spray; atomization; particles; distribution

OCIS codes 090.2880; 290.5850; 110.2960

1 引言

燃烧室是航空发动机的核心部件, 燃烧室工作

特性的好坏取决于燃油的雾化、与燃油雾化相匹配的空气流动以及在此基础上的燃烧特性, 其性能直接影响发动机的性能。发动机燃油喷嘴将燃料喷射

收稿日期: 2020-04-20; 修回日期: 2020-05-13; 录用日期: 2020-07-09

* E-mail: caona@nint.ac.cn

雾化到燃烧室内与氧化剂混合燃烧,燃烧室的燃烧效率、容积参数、可靠性、稳定性和经济性都与燃油的雾化质量有着极其密切的关系^[1],因此燃油雾化特性研究对发动机燃烧室及喷嘴设计至关重要。燃油在空间的分布是表征喷嘴雾化特性的一个重要方面,目前有关雾化特性的实验研究主要通过光学非接触测量技术实现。粒子图像测速(PIV)^[2-4]、平面激光诱导荧光(PLIF)^[5]、相位多普勒粒子分析(PDPA)^[4,6]以及光散射方法^[7]等已经在发动机燃烧室雾化特性的研究中得到应用。然而,PDPA是单点测量,PIV、PLIF和光散射给出的是二维结果,要得到三维空间数据需要进行多次重复测量,这在工程实践中通常是不现实的。激光全息作为一项独特的三维测试技术,单次测量即可得到三维空间的量化数据,早期曾作为标准检测手段被应用到常规颗粒测量中^[8-9],然而由于其实验系统的精密昂贵且后处理过程复杂等原因,人们将研究重心转移到数字全息技术的发展应用中^[10]。虽然未来数字全息取代光学全息是技术发展的必然趋势,但现阶段,图像传感器的灵敏面积及分辨率等因素制约了数字全息技术在工程特别是发动机燃烧室雾化测量中的实际应用。因此,采用全息技术开展的实际工况条件下

发动机燃油喷嘴雾化三维特性的实验测量结果较少。

基于航空工业总公司某所对其设计的新型航空发动机喷嘴雾化性能空间测量的需求,本文采用离轴脉冲激光全息诊断技术,在西北工业大学发动机试车台上对该型号喷嘴的燃油雾化特性开展了实验研究,给出了国产 RP-3 航空煤油在常温常压及 800 K、5.5 kPa 高温纯空气来流实验条件下的雾化粒子空间分布、数量尺度分布、指定区间索太尔平均直径(SMD, D_{32})分布等重要数据,为该型号喷嘴性能评估及改进设计提供了依据。

2 测试系统

2.1 装置与方法

如图 1 所示,实验系统由雾化装置、高压供油系统、控制电路及离轴脉冲全息测量系统组成。高压供油系统提供的 RP-3 液体航空煤油在压缩空气作用下以恒定压力进入燃烧室经燃油喷嘴进行雾化。用于雾化的涡喷嘴为管状注油结构,内部流道有三重相互垂直的腔室,出口为锥角 74°的锥型腔,喷孔直径为 0.53 mm,孔长为 0.4 mm。同时,外部高压罐提供的高速气流,在进气道进行预加热,形成不同温度与压力的来流进入燃烧室,辅助燃油雾化。

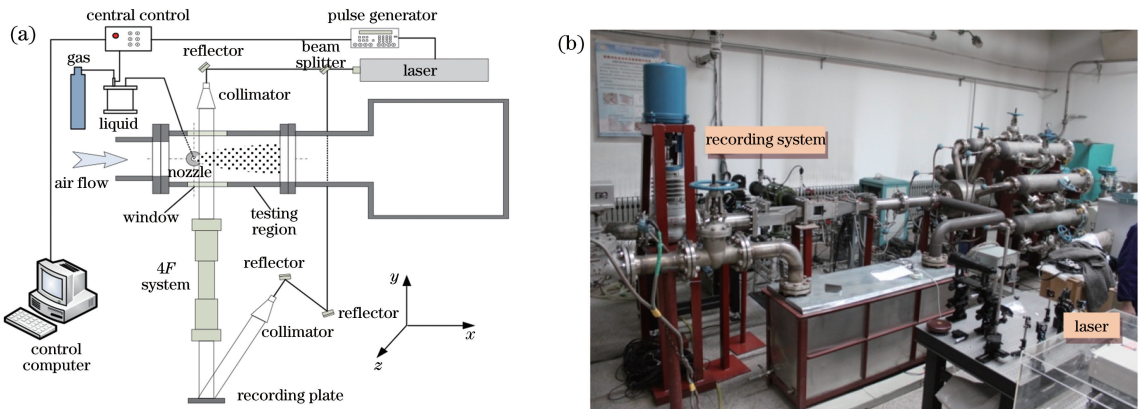


图 1 实验装置。(a)示意图;(b)照片

Fig. 1 Experimental setup. (a) Diagram; (b) picture

燃烧室测试段开有光学窗口作为光学测试通道,采用离轴光学全息系统对燃油雾化场进行测量,系统分辨率为 7 μm 。记录光源采用波长为 532 nm 的 Nd:YAG 激光器,脉冲宽度为 180 ps,单脉冲能量为 72 mJ。激光器输出的光脉冲经分光镜分为物光和参考光两束,分别经扩束准直后得到直径为 60 mm 的平行光,其中物光垂直于燃油射流方向入射,经 4F 光学系统后入射到全息干板上,参考光与物光夹角为 30°;实验得到的全息图用波长 532 nm

的连续激光器进行再现,再现粒子场通过自行研制的空间图像采集和数据处理系统进行后期分析,其基本原理示意图如图 2 所示。

载有粒子场信息的全息图经 532 nm 的平行光照明,在其后的空间再现出雾化粒子场,此时可以采用 CCD 作为接收器件对空间再现的各部分粒子像进行拍摄接收,并将图像数据存储在计算机上进行后期处理。实验采用的 CCD 像元大小为 7.4 $\mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$,像素数为 2048 \times 2048。为提高 CCD 对小

粒子记录能力,在再现系统中采用了3倍放大物镜对粒子场放大后再进行采集。由于CCD灵敏面积远小于粒子场的空间尺寸,实验中需要通过三维平移台控制干板及CCD按照一定的步长移动来获得不同区域粒子场的图像。为减少平移台的无效移动距离,按照图2(b)箭头所示的方向,从确定的起点开始,先采集一幅图像,然后将干板沿光轴方向按照 $10\ \mu\text{m}$ 的步长进行纵深序列的采集,到尽头后将

CCD沿水平方向移动一定距离,然后逆光轴方向进行反向采集,重复上述过程,直到该高度水平方向的图像采集完成;随后,CCD沿竖直方向移动一定距离后再开始新一序列的采集,如此在空间三个方向上按照“之”字形采集路线和顺序,最终实现对整个再现粒子场的分幅分层采集。采集得到的图像经过滤波、梯度运算、在焦粒子判断等方法处理后^[11-13],得到粒子的等效直径、位置等数据信息。

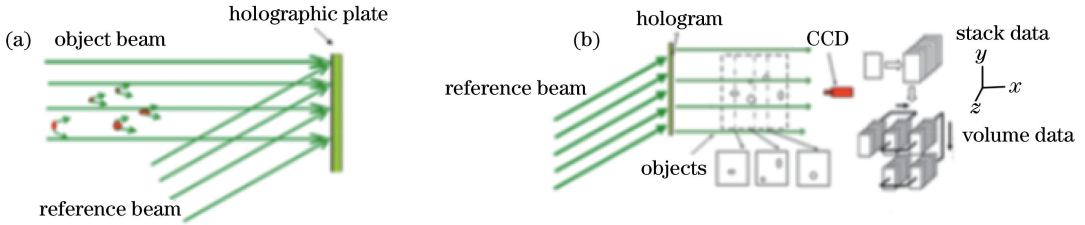


图2 离轴全息原理示意图。(a)全息记录;(b)再现与采集过程

Fig. 2 Schematic of the off-axis holography. (a) Holographic recording; (b) reconstruction and collection process

测试中规定沿喷嘴射流中心轴线方向为X轴,测试物光光轴方向为Z轴,与射流及光轴垂直的方向为Y轴,坐标原点为喷嘴中心轴线与喷嘴平面交点处。

2.2 系统测量不确定度

为了解全息测量系统的测量不确定度,本文采用了静态标定和动态比对两种方法。静态标定中,被测对象由四块标准粒子板(粒子板为玻璃基底上光刻的规则分布小粒子)和一根直径 $20.8\ \mu\text{m}$ 的标准丝组成[图3(a)~(e)],四块粒子板之间光刻面与玻璃面相邻紧密相贴,标准丝紧贴在最后一块粒子板的玻璃面上。图3(a)中粒子板上的粒子直径从左至右依次为 $100, 5, 5, 20, 20, 10, 100, 5, 20, 50, 10, 100\ \mu\text{m}$;图3(b)中依次为 $100, 5, 50, 20, 100,$

$10, 50, 5, 20, 5\ \mu\text{m}$;图3(c)中依次为 $20, 50, 50\ \mu\text{m}$;图3(d)为 $50\ \mu\text{m}$ 均匀点阵。

图3给出了上述对象经全息记录再现及图像处理后的粒子再现像分布局部结果,从左至右分别对应上述的标准粒子板和标准丝。从图3(a)、(b)可以看出,受系统分辨率的限制,各粒子板上 $5\ \mu\text{m}$ 的粒子未能被有效识别,需要指出的是,图3(d)粒子阵列中有一个白色缺口圆形是粒子板固有的制作瑕疵再现像。通过图像处理得到不同粒子的直径、相邻粒子间的距离及粒子总数,与对应标准粒子板上的粒子大小、位置及数量进行比较,最终得到 $10\ \mu\text{m}$ 以上粒子直径测量不确定度 $<7\%$,粒子位置测量不确定度 $<1\%$,粒子的漏检率 $<3.1\%$ 。



图3 静态标定结果。(a)~(d)标准粒子板再现像;(e)标准丝再现像

Fig. 3 Static calibration results. (a)~(d) Reconstructed images of the standard particle plates; (e) reconstructed image of the standard wire

在动态实验比对中,以一定压力作用下喷嘴稳态喷射的雾化粒子场为测试对象,采用相位多普勒粒子分析仪(PDPA)对激光全息测量系统进行验证^[14],为确保比对结果的可靠性,PDPA实验由中国空气动力研究与发展中心空气动力学国家重点实验室负责完成。PDPA测量粒子统计值设定为

5000个,三次重复测量所得 D_{32} 平均值为 $95.95\ \mu\text{m}$;在雾化相同位置处 $2.5\ \text{cm} \times 2.5\ \text{cm} \times 0.4\ \text{cm}$ 的测量范围内,激光全息系统,测量得到该区域内粒子粒径 D_{32} 平均值为 $97.97\ \mu\text{m}$ 。两种方法所得 D_{32} 测量结果的相对不确定度为 2.1% ,表明本文方法所得结果是可靠的。

3 实验结果与分析

3.1 常温常压下雾化场空间结构及分布

图4给出了常温常压状态下,喷嘴在不同喷射压力作用下产生的雾化场中心层面再现像。由图可见,燃油进入喷嘴时所具有的压力能在出口处转变为动能,使得燃油离开喷口后,在离心力作用下沿一定锥角喷射,形成空心的锥形油膜,厚度越

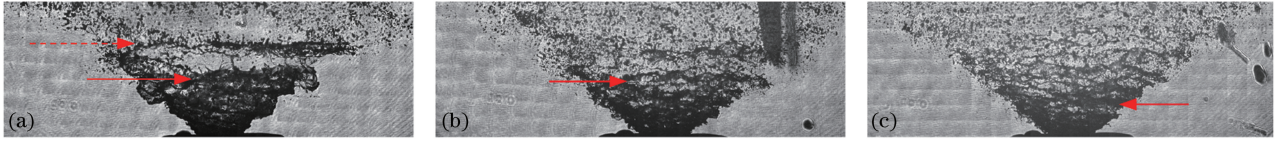


图4 不同压力条件下雾化场中心层面再现像。(a) 0.42 MPa; (b) 0.9 MPa; (c) 1.0 MPa

Fig. 4 Reproduction of the central plane of the atomization field under different pressure conditions.

(a) 0.42 MPa; (b) 0.9 MPa; (c) 1.0 MPa

涡喷嘴射流中的涡结构对雾化动力学研究至关重要。Fuchimoto等^[15]对5 MPa喷射压力作用下持续1 ms喷射的射流结构进行了计算模拟,研究发现,在喷射过程中($t < 1$ ms)多个涡流环持续从喷嘴喷出,在喷射结束后($t > 1$ ms)多个涡流环逐渐消失,最终仅剩一个大的主流环,其存活时间在5 ms以上。本文对不同喷射压力及较长喷射持续时间(约为百毫秒)条件下的雾化结构进行了比较,发现由于喷射压力的持续作用,喷嘴附近有多个涡流环(图中红色箭头所指)不断出现,射流根部结构与文献^[15]的模拟结果一致;但是在喷嘴下游则表现出不同的特征。在较低的喷射压力(0.42 MPa)下,多个涡流环区域的下游出现一个类似主流环的涡流环[图4(a)中红色点划线箭头所指],与Tetsuya模拟的喷射结束0.5 ms后的射流分布结构相似^[15]。随着喷射压力的增大,根部涡流环产生数量减少,液膜扭曲形成的波纹及细丝逐渐增多,下游为射流破碎雾化区,未观察到明显的主流环,其原因尚需深入研究分析。此外,从图中还可以看到,随着喷射压力的增加,破碎雾化发生的位置距喷嘴越近;射流雾化场左右侧结构略有差别,根部涡流环在左侧与下游主流环的连接程度较右侧多[图4(a)],且左侧射流边界出现较多雾化粒子,表明喷嘴加工中可能存在略微偏差。

为了明显表征实验得到的空间图像,对0.42 MPa喷射压力下射流雾化场再现像的顶部、中部及根部选择了三个区域[图5(a1)~(a3)中的红色矩形框],给出了这三个区域在景深 z 方向两

变越薄。由于周围空气-燃油相对速度的作用,液膜扭曲起伏形成波纹形,再被甩成细丝,继而形成雾滴群。随着喷射压力的增加,液体流速增加,破碎雾化距离减小;如果液流速度进一步加大,则燃料离开喷口后立刻雾化。从图中可以得到不同压力下的雾化张角分别为 54.5° [图4(a)]、 49.7° [图4(b)]、 46.7° [图4(c)],可见,随着喷射压力的增加,雾化张角减小。

个不同位置 $z = 0$ mm[图5(b1)~(b3)]及 $z = 63.4$ mm[图5(c1)~(c3)]处的再现像,如图5所示。

由图可见,喷嘴射流雾化场以一定的张角呈锥形向下游扩张。在喷嘴中心切面($z = 0$ mm)上,射流根部[图5(b3)]和中部[图5(b2)]区域的边界处可见清晰的雾化粒子再现像;而在顶部[图5(b1)]区域所记录的范围,一方面由于射流雾化场的中心为空气涡,雾化粒子数较少,另一方面由于视场(光束直径 $\Phi 60$ mm)有限,射流边界未能被记录,故在射流中心切面的顶部区域未观察到清晰的雾化粒子。而在 $z = 63.4$ mm切面,由于在射流的根部[图5(c3)]和中部[图5(c2)]区域,射流雾化未能扩张到 $z = 63.4$ mm位置处,因此观察不到清晰的粒子再现像;而在顶部[图5(c1)]区域则可见明显的雾化粒子,表明在喷嘴下游50 mm处射流雾化场的半径已达到63.4 mm。上述结果进一步表明了该型号喷嘴在空间呈空心圆锥型分布的特征。

图6给出了0.42 MPa喷射压力下的雾化场在沿射流方向的中心平面及喷嘴下游14.1 mm处垂直于射流方向的平面上的雾化粒子分布。由图可见,燃油呈锥形喷射出去,雾化场在空间分布上表现出中心区域雾化粒子密度低,边界存在密度较高射流环的特点。在距喷嘴不同距离处,雾滴群所处的射流环直径随距离的增加逐渐增大,中心表现为粒子极稀少的空气涡。需要说明的是,受图像采集时间冗长的限制,在 z 方向仅对(-12~30 mm)范围内的雾化场进行了图像数据采集及处理。

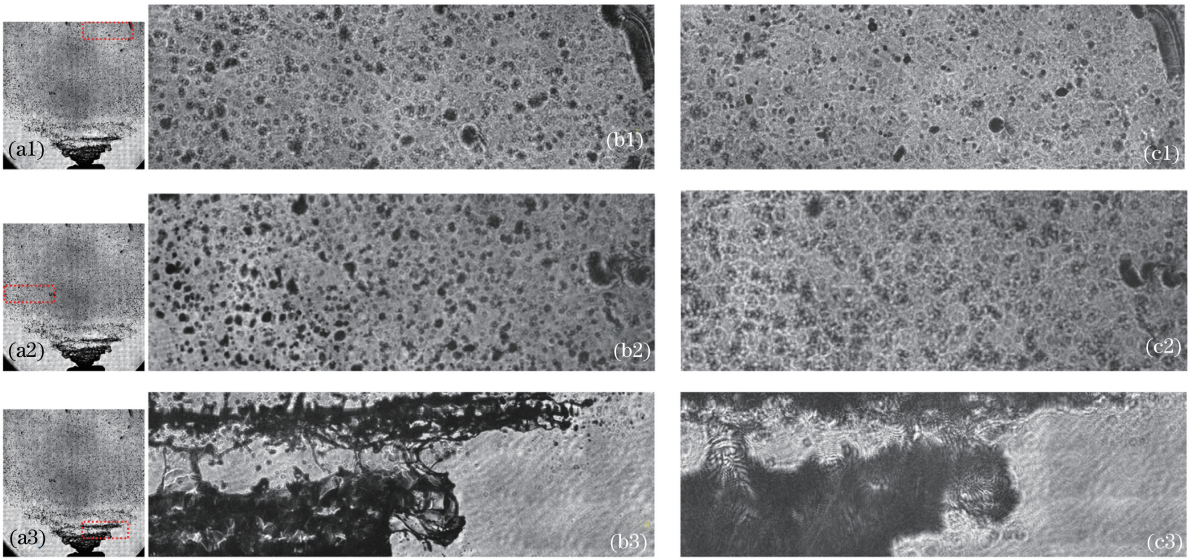


图 5 0.42 MPa 压力条件下雾化场不同区域在不同位置处的再现像。(a1)~(a3)不同区域示意；
(b1)~(b3) $z=0$ mm 处；(c1)~(c3) $z=63.4$ mm 处

Fig. 5 Reconstructed images of different areas of the atomization field at different positions under 0.42 MPa pressure.
(a1)~(a3) Different regions; (b1)~(b3) $z=0$ mm; (c1)~(c3) $z=63.4$ mm

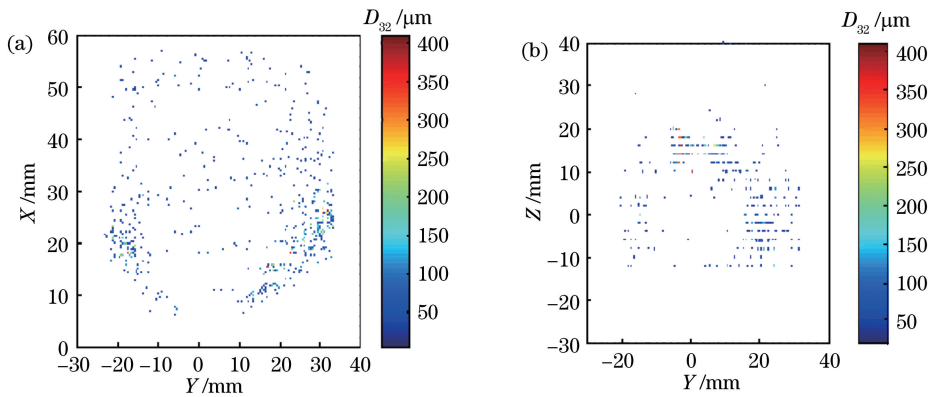


图 6 0.42 MPa 压力条件下,不同平面雾化粒子分布。(a)射流中心平面;(b)距喷嘴 14.1 mm 垂直于射流方向平面
Fig. 6 Particles distributions on different planes under 0.42 MPa pressure. (a) Plane along the spray central;
(b) plane perpendicular to the spray 14.1 mm away from the nozzle

3.2 常温常压条件下雾化粒子分布

图 7 给出了沿射流方向不同位置处的 YZ 截面上雾化粒子粒径与数量分布。截面厚度 $x=1.4$ mm, 高度 $y=60$ mm, 长度 $z=124$ mm。由图可见,雾化粒子的粒径分布范围较宽,粒子数量峰值位置出现在 $60\sim 80\ \mu\text{m}$ 之间,粒子粒径为 $80\sim 90\ \mu\text{m}$,沿着射流方向略有下降。同时观察图 7 中粒径数量分布的峰值位置及 D_{32} ,可以看出,喷嘴射流下游的雾化粒子平均粒径较上游明显减小,说明出现了二次雾化^[15]。

3.3 加热空气来流条件下的雾化特性

为考察喷嘴在实际工况时的雾化性能,本文实验测量了在来流温度为 861 K、来流压力为 552 kPa、空气流量为 0.446 kg/s、燃油流量为 11.26 g/s、供油压

差为 0.965 MPa 条件下的喷嘴雾化特性。

图 8 和图 9 分别给出了 $Y=0$ 平面及 $Z=0$ 平面内不同位置处的雾化粒子 SMD 沿射流 X 方向的分布。X 轴选取了 24 个点,每个点对应的物理空间大小为 $1.9\ \text{mm}\times 1.4\ \text{mm}\times 0.02\ \text{mm}$ 。

可以看出, $Y=0$ 平面内雾化粒子 SMD 的空间分布变化范围在 $11.5\sim 15\ \mu\text{m}$ 之间,不同 z 处的平均粒径均在 $11\ \mu\text{m}$ 左右,表明喷嘴在 $Y=0$ 平面上的雾化较为均匀;而在 $Z=0$ 平面的不同 y 处,雾化粒子的 SMD 在 $10\sim 23\ \mu\text{m}$ 范围内变化,平均粒径集中在 $12\ \mu\text{m}$ 左右,雾化粒子粒径有明显起伏,表明在 $Z=0$ 平面上雾化均匀性较 $Y=0$ 平面略差,与常温下空间分布实验结果所表现的特性一致。

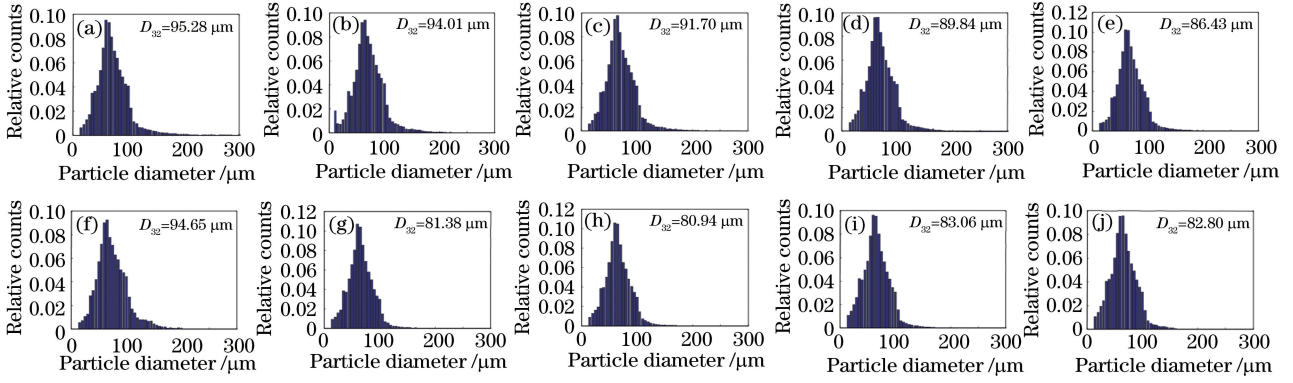


图 7 沿射流方向不同位置处 YZ 截面上雾化粒子粒径数量分布。(a) $x=11.2$ mm; (b) $x=12.6$ mm; (c) $x=21.0$ mm; (d) $x=22.4$ mm; (e) $x=30.8$ mm; (f) $x=32.2$ mm; (g) $x=40.6$ mm; (h) $x=42.0$ mm; (i) $x=49.4$ mm; (j) $x=50.8$ mm
 Fig. 7 Particles diameter and amount distributions on YZ planes at different positions along the spray direction. (a) $x=11.2$ mm; (b) $x=12.6$ mm; (c) $x=21.0$ mm; (d) $x=22.4$ mm; (e) $x=30.8$ mm; (f) $x=32.2$ mm; (g) $x=40.6$ mm; (h) $x=42.0$ mm; (i) $x=49.4$ mm; (j) $x=50.8$ mm

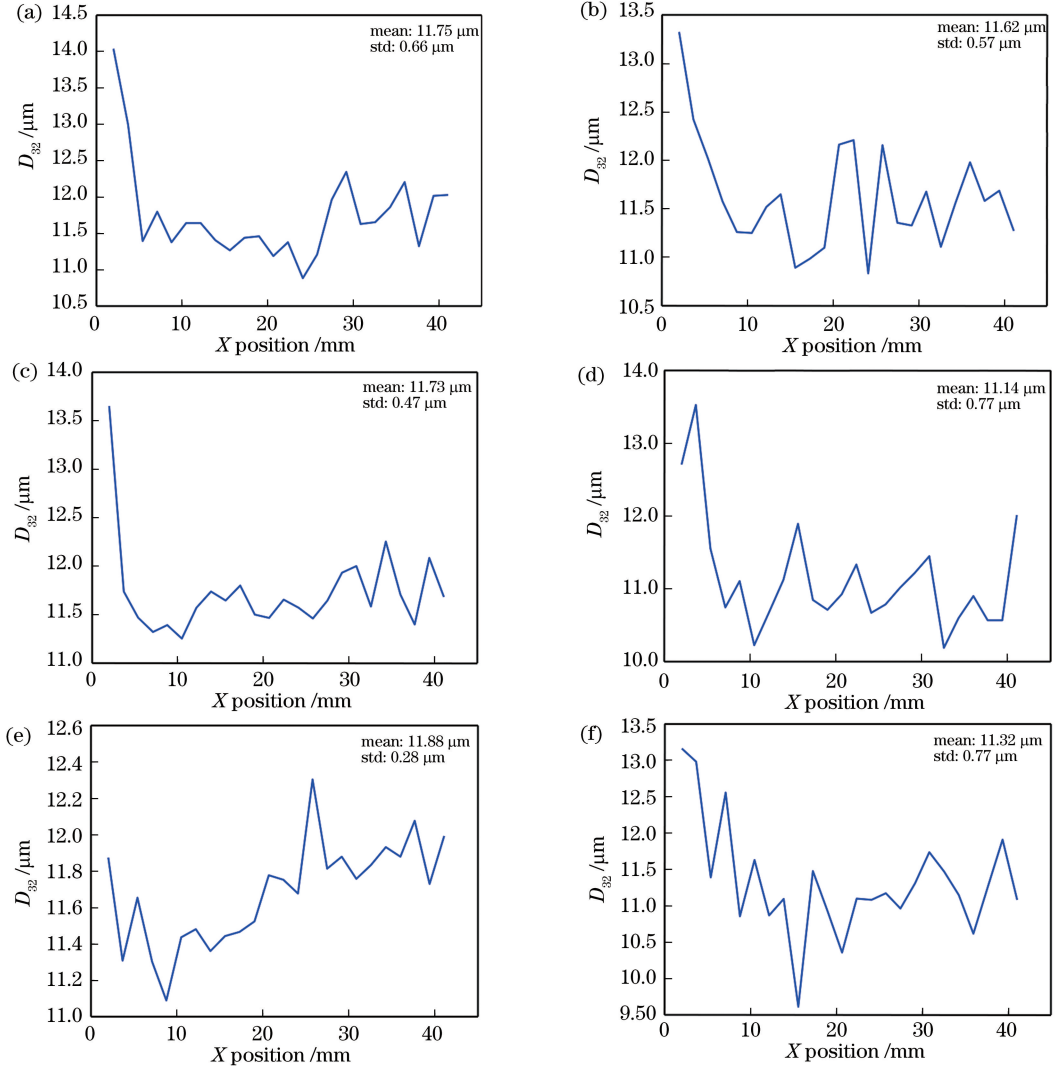


图 8 $Y=0$ 平面内不同 z 处雾化粒子沿射流方向的索太尔直径分布。(a) $Z=1$ cm; (b) $Z=-1$ cm; (c) $Z=2$ cm; (d) $Z=-2$ cm; (e) $Z=3$ cm; (f) $Z=-3$ cm

Fig. 8 Sauter diameter distributions of spray particles at different z positions in $Y=0$ plane along the jet axis. (a) $Z=1$ cm; (b) $Z=-1$ cm; (c) $Z=2$ cm; (d) $Z=-2$ cm; (e) $Z=3$ cm; (f) $Z=-3$ cm

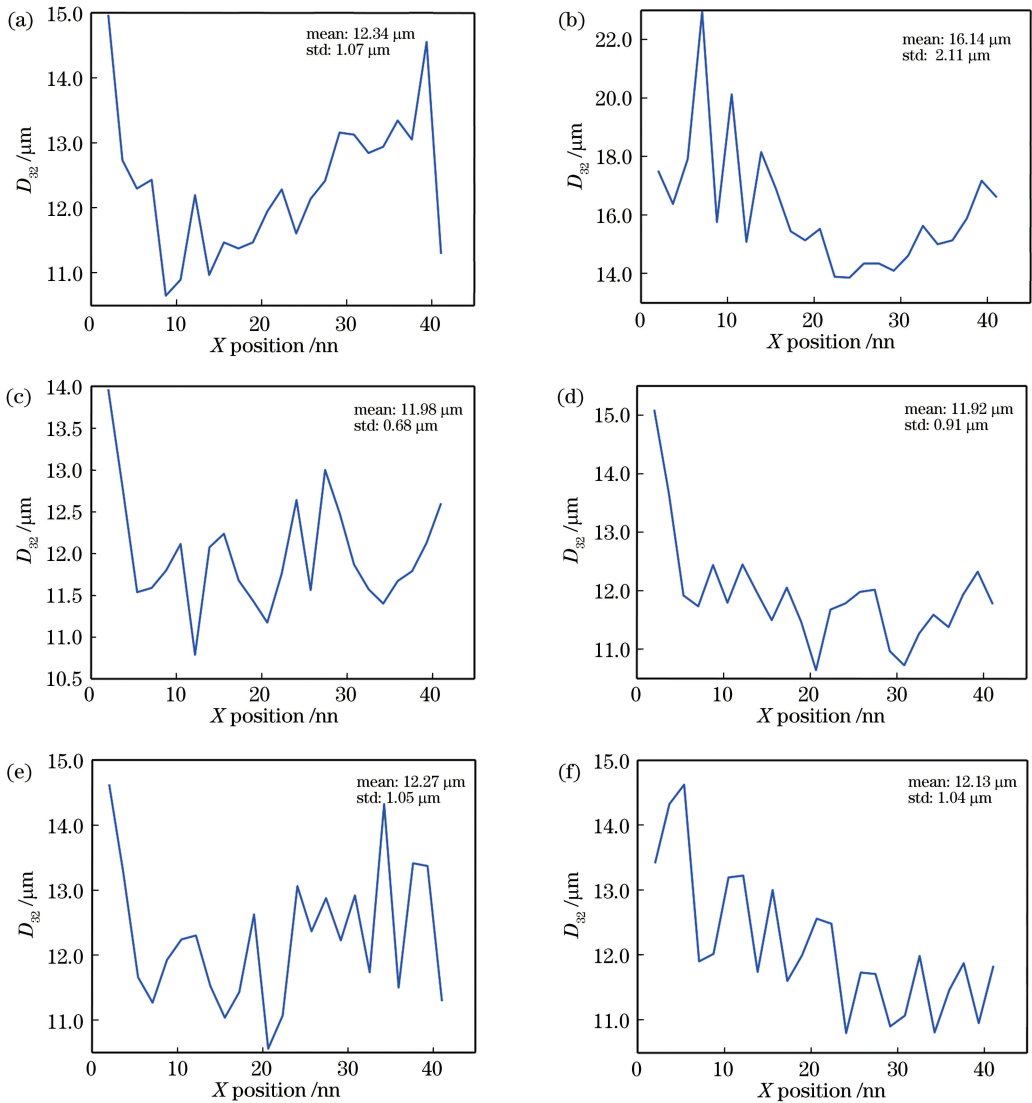


图 9 $Z=0$ 平面内不同 y 处雾化粒子沿射流方向的索太尔直径分布。(a) $Y=1.8$ cm; (b) $Y=-1.8$ cm; (c) $Y=0.48$ cm; (d) $Y=-0.48$ cm; (e) $Y=0.96$ cm; (f) $Y=-0.96$ cm

Fig. 9 Sauter diameter distributions of spray particles at different y positions in $Z=0$ plane along the jet axis. (a) $Y=1.8$ cm; (b) $Y=-1.8$ cm; (c) $Y=0.48$ cm; (d) $Y=-0.48$ cm; (e) $Y=0.96$ cm; (f) $Y=-0.96$ cm

同时,与常温常压下的实验结果相比,在高温高压条件下,由于辅助空气的引入,气流在出口处参与雾化,同时气流为热态使得进入燃烧室的雾化粒子迅速蒸发,在两者作用下,雾化粒子直径显著降低,雾化质量得到明显改善。

4 结 论

在发动机试车台上,采用脉冲激光全息技术实现了某型号单位设计的涡轮发动机喷嘴在常温常压和实际工况条件下的燃油雾化性能实验测量。常温常压下该喷嘴的雾化场表现为中心为空心圆锥体分布。在较低的喷射压力时,多个涡流环区域的下游出现一个类似主流环的涡流环;随着喷射压力的

增大,根部涡流环产生数量减少,液膜扭曲形成的波纹及细丝逐渐增多,下游为射流破碎雾化区,未观察到明显的主流环。受该喷嘴可能存在的加工精度偏差的影响,射流雾化场左右两侧略显不对称,涡流环左侧与主流的连接较右侧为多,且左侧射流边界出现较多雾化粒子。近喷嘴区域雾化粒子的索太尔平均直径在 $90 \mu\text{m}$ 左右,随着距喷嘴距离的增加,喷嘴射流下游雾化粒子平均直径减小到 $80 \mu\text{m}$ 左右。距喷嘴下游 40 mm 后,雾化粒子平均直径变化不明显,表现出均匀的雾化效果。当喷嘴在真实工况条件下工作时,由于加热空气的辅助雾化,空间各位置雾化粒子平均尺度基本在 $12 \mu\text{m}$ 左右,雾化质量得到明显改善。在垂直于射流方向的平面上,射流雾

化场的粒径空间分布仍然表现出一定的非对称性。

致谢 感谢中国空气动力研究中心张力虎、关平对本文工作的帮助。

参 考 文 献

- [1] Meng G, Zhao C C, Sun Y J, et al. Foreign advanced combustion test facilities for aero-engine [J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2016, 29(3): 55-64.
孟刚, 赵聪聪, 孙用军, 等. 国外航空发动机燃烧室试验器综述 [J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2016, 29(3): 55-64.
- [2] Zhang Y L, Luo Q, Ma Z, et al. Flow field investigation in single-dome combustor using particle image velocimetry [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2018, 50(4): 484-493.
张亿力, 罗谦, 马柱, 等. 单头部燃烧室流场 PIV 试验测量 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2018, 50(4): 484-493.
- [3] Deng Y H, Zhu J W, Yan Y W, et al. Cold flow field and fuel spray characteristic of LPP low emission combustor [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2013, 45(2): 162-169.
张亿力, 罗谦, 马柱, 等. 单头部燃烧室流场 PIV 试验测量 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2018, 50(4): 484-493.
- [4] Liu Y A, Guo Z H, Zhang M. Experimental investigation on spray characteristic of internally-staged combustor [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(8): 1824-1831.
刘易安, 郭志辉, 张漫. 中心分级燃烧室雾化特性试验研究 [J]. *推进技术*, 2019, 40(8): 1824-1831.
- [5] Liu C X, Liu F Q, Yang J H, et al. Investigations of the effects of spray characteristics on the flame pattern and combustion stability of a swirl-cup combustor [J]. *Fuel*, 2015, 139: 529-536.
- [6] Jing D L, Zhang F, Li Y F, et al. Experimental investigation on the macroscopic and microscopic spray characteristics of diesel fuel [J]. *Fuel*, 2017, 199: 478-487.
- [7] Qi W Y, Zhang Y Y. A three-color absorption/scattering imaging technique for simultaneous measurements on distributions of temperature and fuel concentration in a spray [J]. *Experiments in Fluids*, 2018, 59(4): 1-12.
- [8] Li T, Nishida K, Hiroyasu H. Characterization of initial spray from a D. I. Gasoline injector by holography and laser diffraction method [J]. *Atomization and Sprays*, 2004, 14(5): 477-494.
- [9] Yamakawa M, Kamikawa M, Yoshizaki T, et al. Measurement of droplet distribution of a D. I. Gasoline spray with pulsed laser holography [J]. *Transactions of the Society of Automotive Engineers of Japan*, 2001, 32:45-50.
- [10] Wu Y C, Wu X C, Cen K F. Development of digital holography in particle field measurement [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(6): 0601001.
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): 0601001.
- [11] Yuan J T, Yang L, Wang X C, et al. Measurement and analysis of water mist droplet size based on machine vision [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(10): 2842-2847.
袁江涛, 杨立, 王小川, 等. 基于机器视觉的细水雾液滴尺寸测量与分析 [J]. *光学学报*, 2009, 29(10): 2842-2847.
- [12] Lü Q N, Zhao C, Ma Z B, et al. Digital holography experiment on the measurement of particle size and size distribution of diesel spray [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(3): 779-783.
吕且妮, 赵晨, 马志彬, 等. 柴油喷雾场粒子尺寸和粒度分布的数字全息实验 [J]. *中国激光*, 2010, 37(3): 779-783.
- [13] Dembia C L, Liu Y C, Avedisian C T. Automated data analysis for consecutive images from droplet combustion experiments [J]. *Image Analysis & Stereology*, 2012, 31(3): 137-149.
- [14] Zhang L, Zhang L H, Cao N, et al. Spray fuel particle field measurement by using laser holography and PDPA technology [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2011, 25(2): 83-87.
张龙, 张力虎, 曹娜, 等. 运用激光全息术和 PDPA 测量喷射燃料粒子场 [J]. *实验流体力学*, 2011, 25(2): 83-87.
- [15] Fuchimoto T, Yanase S, Mizushima J, et al. Dynamics of vortex rings in the spray from a swirl injector [J]. *Fluid Dynamics Research*, 2009, 41(4): 045503.