

文章编号:1000-8055(2013)04-0783-09

某型航空发动机用离心喷嘴燃油空间分布特性试验

刘存喜^{1,2}, 刘富强^{1,2}, 毛艳辉^{1,2}, 穆 勇¹, 徐 纲¹

(1. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100190)

摘 要: 建立了平面激光诱导荧光(PLIF)用于燃油分布特性测量的试验装置及其校正方法,并验证了校正方法的有效性. PLIF 和平面激光散射(PLS)方法的燃油分布特性测量结果表明 PLS 方法对直径小于 $50\ \mu\text{m}$ 的液滴存在非线性效应使小液滴集中区燃油分布测量结果偏大,PLIF 方法适合燃油分布特性测量. 利用 PLIF 方法从喷雾锥角、燃油周向分布不均匀度和分布指数等方面综合评价燃油空间分布特性. 偏心 and 尺寸大小不等的凹槽等分布不均匀的表现形式表明:造成燃油分布不均匀的因素包括喷嘴内部通道表面粗糙度、喷射孔圆度和零件之间的同轴度. 利用 PLIF 方法研究雾锥在供油压差分别为 0.14、0.25、2.5 MPa 时雾锥沿喷射方向的发展过程,液滴随雾锥发展逐渐从环形集中区分散到整个雾锥横截面,并且液滴分散过程随供油压差增加而加快.

关 键 词: 离心喷嘴; 平面激光诱导荧光; 周向分布; 分布指数; 雾化特性

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Experiment of fuel distribution of pressure-swirl atomizers for aero-engine

LIU Cun-xi^{1,2}, LIU Fu-qiang^{1,2}, MAO Yan-hui^{1,2}, MU Yong¹, XU Gang¹

(1. Institute of Engineering Thermophysics,

Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The experimental unit and correction method for estimation of performance of fuel distribution based on planar laser induced fluorescence (PLIF) method were established, and the correction method was validated. The comparisons between results of PLIF method and planar laser scattering (PLS) method indicate that, the results of PLS method overrepresents droplet concentration for droplets less than $50\ \mu\text{m}$ and PLIF is suitable for fuel distribution measurement. To make sure the quality of machining and performances of the atomizers, the distributions of droplets were evaluated comprehensively by PLIF method in terms of spray cone angle, non-uniformity of circumferential distribution and patternation index, and then, the results of eccentricity and grooves of different sizes for the poor droplets distribution show that, the factors for non-uniformity include the roughness of internal flow wall, roundness of nozzle and coaxiality of parts. The opening processes of spray cones in the direction of ejection were visualized by PLIF method at pressure differential of 0.14, 0.25 and

收稿日期: 2012-05-09

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130417.1353.201304.783_009.html

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2007CB210109)

作者简介: 刘存喜(1983—),男,山东菏泽人,博士生,主要从事燃油雾化机理及测试方法研究.

2.5 MPa, respectively, and the droplets dispersed from annulus to round in cross-sectional plane with development of the spray. Furthermore, the rate of droplets dispersion increased with the growing pressure differential of fuel.

Key words: pressure-swirl atomizer; planar laser induced fluorescence (PLIF); circumferential distribution; patternation index; characteristics of spray

发展先进的燃气轮机燃烧室技术主要依靠良好的雾化、空气和燃料快速并且均一的掺混,这种方式可以避免对燃烧性能、污染物排放和发动机寿命不利的条件出现^[1-3]。液滴平均粒径、粒径分布和燃油空间分布等雾化特性都对燃烧室的性能具有重要的影响^[4-5]。

为提高燃烧效率、降低污染物排放和优化燃烧室出口温度分布,除保证液滴足够小使蒸发过程不是燃烧效率的决定因素外,燃烧室中燃料分布要均匀,因此雾锥燃油空间分布是雾化特性的一个重要方面^[6-7]。人为的观察很难发现雾锥的非对称性,除非雾锥非对称性特别严重。因此,对于喷嘴的设计和雾化质量检测需要定量的分析燃油空间分布特性。雾锥中燃油的空间分布特性一般通过径向和周向分布不均匀度表示^[8-9],表 1 对燃油分布特性测量的方法进行了对比。燃油径向分布不均匀度传统的检测方法是在喷嘴下方沿径向等角度或等距离布置若干量筒,由量筒中的燃油高度得到燃油沿径向的分布。燃油周向分布不均匀度传统的检测方法是将喷嘴处于中心,喷嘴雾锥的下部周向分为若干扇形区域,一般为 12 或 16 个,把每个扇形区域中的燃油分别收集到容器中,每个容器中燃油量的标准误差表示燃油周向分布不均匀度。虽然传统的检测方法可以给出燃油的空间分布特性,但介入式的传统方法中收集燃油容器的加工精度,对雾锥及周围气流场的

影响,以及燃油喷嘴的安装精度都对周向与径向分布均匀性有较大的影响,测量精度不高。传统式两次测量经常产生较大的不重复性。另外,传统的检测方法只能测量一定时间内平均值,不能测量燃油的瞬态分布。非介入式激光诊断方法的出现,解决了介入式方法对雾锥及流场影响的问题^[10]。用于流量显示、粒径和燃油分布测量的激光诊断技术包括粒子图像测速仪 (particle image velocity, PIV)、平面激光诱导荧光 (planar laser induced fluorescence, PLIF)、相位多普勒粒子分析仪 (phase Doppler particle analyzer, PDPA) 和平面激光散射方法 (planar laser scattering, PLS) 等。基于 Lorenz-Mie 散射理论的 PLS 方法已经在雾锥空间分布特性的测量中得到应用^[11-12],但 PLS 方法在粒径小于 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的局部区域,散射信号的强度大于实际的燃油质量分布,因此粒径小于 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的局部区域,PLS 方法测量的燃油质量分布偏大^[13]。PLIF 方法基于燃油中添加的荧光染料在一定波长的光照射时发出荧光,荧光信号的强度和粒径的立方成正比。但 PLIF 方法只能用于燃油液滴粒子数比较稀疏的雾锥,在燃油液滴粒子数较大雾锥中激光强度在测试区沿光程方向成指数减弱,导致沿光程测试区后部激光强度很弱,因此,沿光程测试区后部荧光信号很弱,引起燃油分布测量误差。

表 1 燃油分布特性测量方法对比

Table 1 Comparisons between methods of measurement for fuel distribution

测量方法	原理	优点	缺点
传统方法	周向或径向布置量筒收集燃油	简单、易于实现	只能得到统计结果,干扰流场,实时显示困难
PDPA	激光多普勒原理测量液滴直径,多次测量得到液滴统计分布	单点精度相对较高	单点测量(每点至少上千次)费时,无法得到二维瞬态结果
光学方法	PLS	米氏散射原理,散射信号强度正比于液滴表面积(d^2)	可以得到二维瞬态结果和平均结果
PLIF	激光诱导荧光,荧光信号强度正比于液滴体积或质量(d^3)	可以得到二维瞬态结果和平均结果	燃油液滴粒子数大时,光沿程衰减引起测量误差,对于液滴直径小于 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的区域,测量结果偏大 需要特定波长的光,燃油液滴粒子数大时,光沿程衰减引起测量误差

本文基于液体燃料的平面激光诱导荧光(PLIF)方法研究离心喷嘴雾锥燃油空间分布特性,利用航空煤油中的芳香族化合物在波长为266 nm的紫外光照射时能发出荧光,不需要添加荧光染料。本文分为四部分,第一部分是试验装置和试验方案,建立了PLIF燃油分布特性测量试验台,设计了用于校正激光强度沿光程在雾锥中衰减引起燃油分布测量误差的方法;第二部分首先比较了燃油空间分布测量的PLIF和PLS方法,然后对某型航空发动机用离心喷嘴的燃油空间分布特性进行了试验研究,分析了导致燃油分布不均匀的因素;第三部分分析了雾锥发展过程中不同轴向截面中的燃油分布特性;第四部分是本文的结论。

1 试验装置及试验方案

本文中试验装置如图1所示。图1(a)由供油系统、三维可移动雾化试验平台和油气分离系统组成。图1(b)是基于平面激光诱导荧光(PLIF)方法的燃油分布测量系统,由Nd:YAG(Neodymium-doped Yttrium Aluminium Garnet)双腔激光器、导光臂、片光源成型部件、同步控制器、图像增强器、CCD(charge-coupled device)相机和PC(personal computer)机组成。YAG双腔激光器工作频率最大为15 Hz,波长532 nm时能量为200 mJ,脉宽为6~8 ns。YAG激光器发出波长为1064 nm的光,经2倍频和4倍频光学元件变成波长266 nm的紫外光,经导光臂进入片光源成型部件,激光束经片光源成型部件变成片光,在测试区片光的厚度约为1 mm,片光源位于喷嘴下方,垂直于喷嘴雾锥中心线。CCD相机在试验过程中位于雾锥侧下方,处于倾斜拍摄位置(见图1(b))。同步控制器(PTU)给YAG激光器、图像增强器和CCD相机发出不同时间延迟的TTL(transistor-transistor logic)信号,以上升沿作为触发信号,激光器的Q开关打开时间使激光发射时间在相机快门打开时间范围内,保证激光器和相机同步工作,通过多次调节激光器和图像增强器快门打开的时间延迟,使采集到的荧光信号最强,最佳的时间延迟为450 ns。本文中采用266 nm长通滤光片使发生红移的荧光信号进入CCD相机,而266 nm的散射光不能透过。由于荧光信号强度比较弱,普通的CCD相机对这种弱信号不敏感,通过使用图像增强器和CCD相机结合采集荧光信号。

根据Baranger等的研究,航空煤油中的某些芳香族化合物(1,2,4-三甲基苯、萘、1-甲基萘和1,3-二甲基萘等)在紫外光的照射下能够发出荧光^[14-15]。如图1(b)所示,片光源的厚度为 h ,和片光源相交的雾锥是测试区,测试区中面积为 δA 某一小块的体积为 $\delta V = h \cdot \delta A$,从体积为 δV 的测试区中发出的荧光光子数是和曝光时间、片光强度和测试区中荧光组分的分子数成正比的,假设荧光组分粒子数在煤油中是均一的,则发出的光子数和 δV 的测试区中航空煤油的质量成正比。相机曝光时间 τ 一定,假设片光强度在整个测试区中是均一的,则体积为 δV 的测试区中的荧光信号强度和此局部的煤油质量成正比。

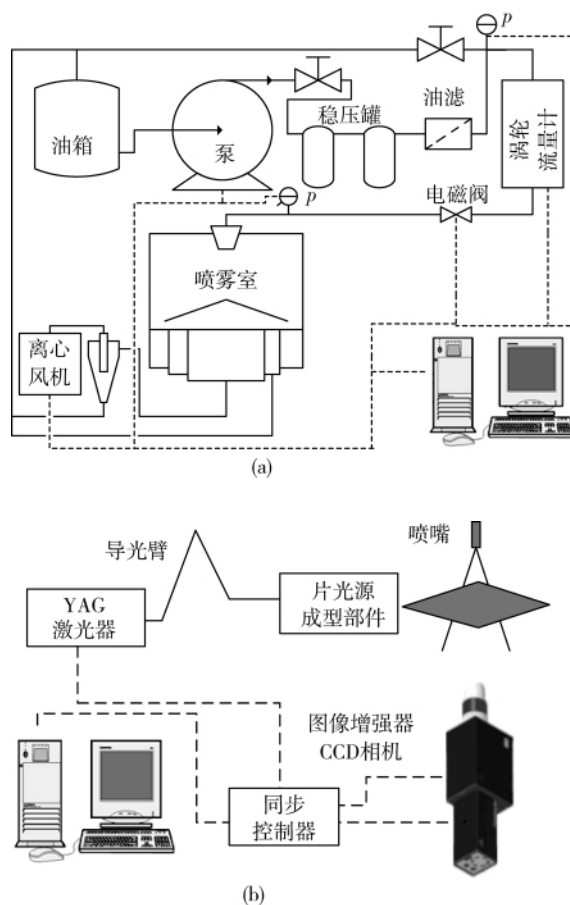


图1 试验装置

Fig. 1 Experimental setup

把雾锥横截面分成12等份角度为 30° 的扇形区域(图2),每个扇形区域中荧光信号强度之和代表扇形区域中燃油量的分布。燃油周向分布不均匀度定义为

$$\delta = \frac{G_{\max} - G_{\min}}{G_{\max}} \times 100\% \quad (1)$$

式中 $G_{\max}$ 表示12等份扇形区域中最大燃油量,

$G_{\min}$ 表示 12 等份扇形区域中最小燃油量。

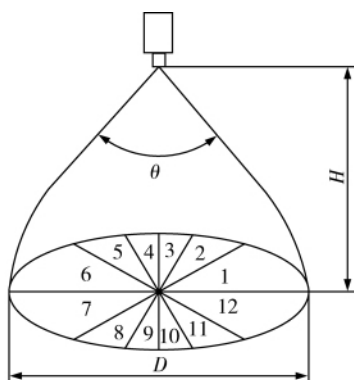


图 2 雾锥示意图

Fig. 2 Schematic diagram of spray cone

周向分布不均匀度 δ 不能表示燃油量为中间值的扇形区内的燃油分布, 燃油周向分布指数 η_{pi} 比较每个扇形区中的燃油体积分数和理想值, 因此, 分布指数能够考虑燃油量为中间值的扇形区内的燃油分布, 表示为

$$\eta_{pi} = \sum_{i=1}^n \left| \varphi_i - \frac{100}{n} \right| \quad (2)$$

式中 n 表示扇形区的个数, φ_i 表示第 i 个扇形区中的燃油体积分数。

喷雾锥角作为喷嘴设计指标的一个重要方面, 可以表示液滴的分散程度, 一般情况下, 喷雾锥角增加使液滴和更多的空气相互作用, 有利于改善雾化效果、加强热量和质量交换。由于雾锥外表面是曲线增加了表示喷嘴锥角的难度, 本文中喷雾锥角通过喷嘴出口距离 H 时雾锥直径 D 得到, 见图 2。喷雾锥角表示为^[7]

$$\theta = 2 \arctan \left(\frac{D}{2H} \right) \quad (3)$$

2 结果与分析

2.1 PLIF 和 PLS 方法比较

把图 1(b) 中片光旋转 90° 使激光面穿过雾锥轴中心, 调整 CCD 相机位置使其垂直于激光面, 分别采用波长为 266 nm 的长通滤波片和带通滤波片, 得到了雾锥轴向截面中荧光信号和 Mie 散射信号的分布。图 3 给出了喷嘴下方 50 mm 处 LIF 信号和 Mie 散射信号分布轮廓, 中心处 LIF 信号强度略低于外围, 而 Mie 散射信号强度在中心处远高于外围。这是由于 Mie 散射信号强度正比于液滴粒径的平方, 航空煤油中荧光组分的粒子数均一, 则 LIF 信号强度正比于雾锥总航空煤油液滴的体积或质量。图 4 表示液滴索太尔平均

直径 (SMD, 量符号记为 D_{sm}) 沿径向的分布, 液滴平均直径沿径向逐渐增大。由于液滴直径在雾锥中心相对较小, 因此液滴的表面积 d^2 较大, 导致雾锥中心的 Mie 散射信号强度大于外围。这时, 采用强度分布均一的片光作为光源, 用 PLS 方法测量离心喷嘴燃油空间分布时导致空心雾锥中心的燃油液滴粒子数偏大, 而 PLIF 方法测量燃油空间分布时 LIF 信号强度只有燃油的体积有关, 因此, 能准确表示雾锥中燃油空间分布。

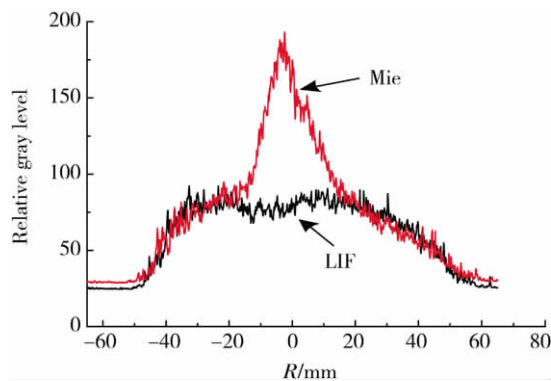


图 3 喷嘴下方 50 mm 处 LIF 和 Mie 信号分布

Fig. 3 Distributions of LIF and Mie signal at 50 mm below atomizer

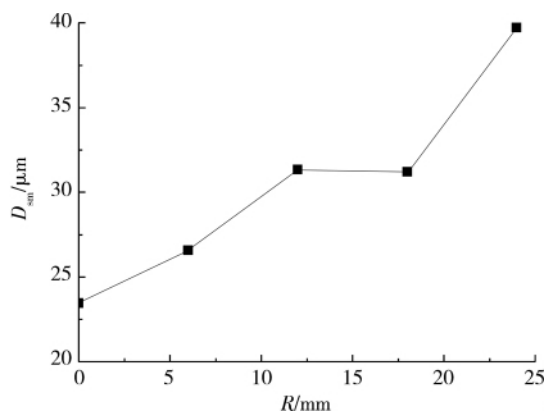


图 4 SMD 沿径向分布

Fig. 4 Distribution of SMD in radial direction

2.2 图像校正

航空煤油中的芳香族化合物在波长为 266 nm 的紫外光照射下, 光发生红移, 发出的荧光波长在 270~420 nm。在 CCD 相机前使用 266 nm 的长通滤波片使波长大于 266 nm 的光能够透过滤光片, 而波长为 266 nm 的光不能透过滤光片, 因此, CCD 相机只采集荧光信号。CCD 相机采集到的信号首先需要进行背景校正, 在没有喷雾的试验状态下, 相机参数和激光器参数都与喷雾试验状态相同, 采集到的信号是空气中的成分在 266

nm 激光照射下所发出的荧光信号和外界可见光的信号,通过背景校正可以把这些噪声除去。第二步对图像进行几何结构校正。从图 1(b)中看出, CCD 相机的感光芯片和激光平面并不平行, CCD 相机采集到的图像不是雾锥横截面的真实图像。几何结构校正前及校正后的图像见图 5。经过几何结构校正后,雾锥横截面图像从椭圆形变成圆形,得到了雾锥横截面的真实形状。

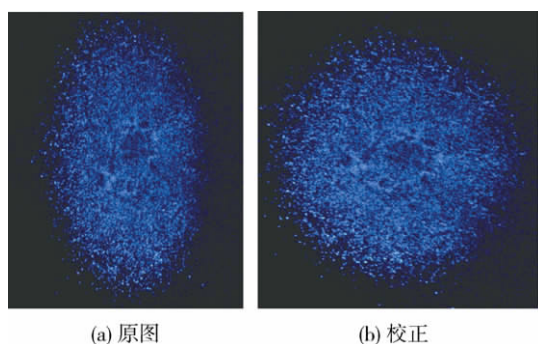


图 5 雾锥横截面荧光信号瞬态图像

Fig. 5 Raw and corrected fluorescent images of spray

根据 Lambert-Beer 定律,激光片光源通过雾锥时光强度会衰减。由于荧光信号强度和片光源中局部的激光强度和燃油质量分布成正比,因此,激光片光源强度在雾锥中的衰减会给采用荧光信号表示雾锥横截面中燃油质量分布带来测量误差。由于在不同供油压差时,雾锥中的燃油液滴粒子数分布是不同的,因此,激光在雾锥中的衰减程度是无法预测的,目前还没有精确的办法校正

激光能量在雾锥中衰减引起的测量误差。随着供油压差的增大,雾锥横截面中心线沿光程的灰度衰减程度增大。本文中所有试验结果都是在供油压差为 1.0 MPa 时得到的。为校正激光强度在雾锥的衰减给燃油分布质量测量所产生的误差,采取了把喷嘴在同一位置旋转 180° 的方法(见图 6)。在一次测量完成后,图像采集和试验状态参数都保持不变,把喷嘴旋转 180° 进行第 2 次测量。喷嘴旋转 180° 后得到的图像再以喷嘴中心为原点旋转 180° ,这样两次测量 CCD 相机得到的图像是同一个雾锥横截面,采集的图像见图 6。两次测量时,激光分别位于喷嘴的两侧 B 和 D,两次的测量结果使用图像处理软件合成为一张图像。这时,激光在雾锥横截面中的衰减通过分别从喷嘴的两侧射入激光而抵消。另外,两次测量时相机分别位于喷嘴的 A 侧下方和 C 侧下方,此方法可以校正由于相机拍摄位置引起的雾锥横截面中局部光程不同所产生的测量误差。

2.3 燃油周向分布

某型航空发动机一整套 18 个喷嘴在喷嘴下方 50 mm 横截面内的燃油分布见图 7。图 7 是每个喷嘴雾锥横截面 100 张瞬态图像的平均值图像。从图 7 中可以看出,其中 1#, 2#, 3#, 4#, 9#, 10#, 13#, 14#, 15# 和 17# 喷嘴的雾锥横截面边缘存在明显的锯齿形,其中,3#, 13# 和 17# 喷嘴雾锥横截面存在一个大的凹槽,1#, 4# 和 9# 喷嘴雾锥横截面中存在多个大小不等的凹槽。这是由于在加工过程中旋流室或喷嘴出口内

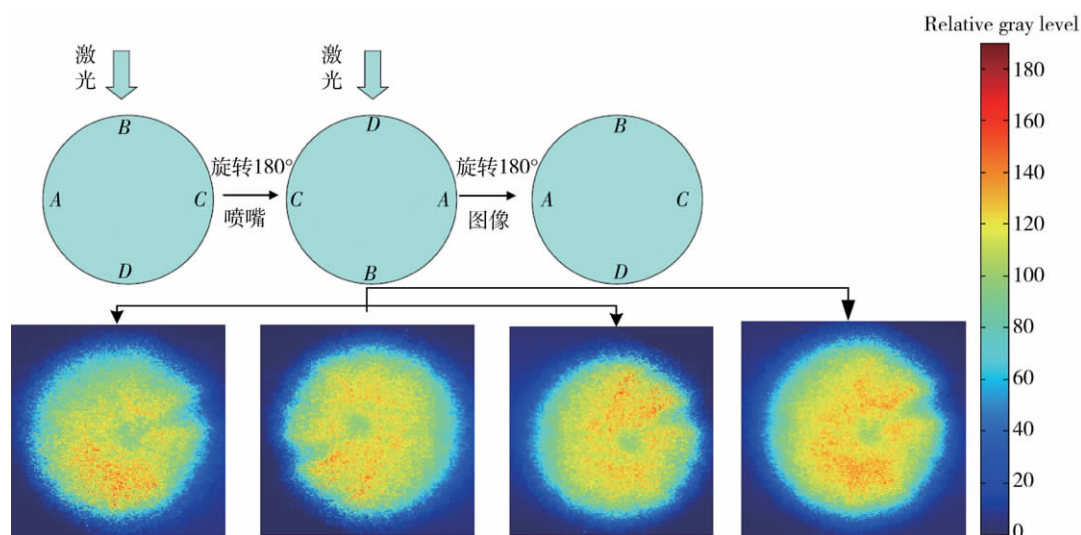


图 6 燃油分布测量校正方法

Fig. 6 Correction method for measurements of fuel distribution

表面粗糙度没有达到设计要求,存在小的凸台或凹槽,其中 10 号喷嘴粗糙度质量问题最严重。凸台或凹槽的存在一方面会引起雾锥周向分布不均匀;另一方面也会导致喷嘴的流量特性曲线改变,进一步引起发动机燃油周向分布不均匀,有可能导致燃烧室内产生局部高温区影响燃烧室出口温度分布的调节;其次,凸台或凹槽易使燃油喷嘴工作在高温时流道内产生结焦堵塞流道^[3],喷嘴燃油周向分布质量进一步恶化。从 1 号喷嘴的雾锥横截面中燃油分布可以明显看出雾锥的中心和横截面的中心出现大的偏离,这可能是由于喷嘴出口中心线和旋流室或旋流器的中心线不重合导

致的。

图 7 中定性给出了雾锥横截面燃油分布情况,为进一步研究雾锥横截面中燃油分布特性,根据等式(1)和图 2,表 2 定量给出了离心喷嘴雾锥在喷嘴下部 50 mm 处横截面内燃油分布特性,包括雾锥横截面半径 R 、燃油周向分布不均匀度系数 δ 和喷雾锥角 θ 。从雾锥横截面半径或喷雾锥角方面分析,喷雾锥角都处在 $75^{\circ} \sim 85^{\circ}$ 之间。

从表 2 中可以看出,除 10 号 and 17 号喷嘴的燃油周向分布不均匀度大于 20%,其他喷嘴燃油周向分布不均匀度都能满足设计要求($\delta \leq 20\%$)。8 号 and 18 号喷嘴的燃油周向分布不均匀度 $\delta \leq 5\%$,

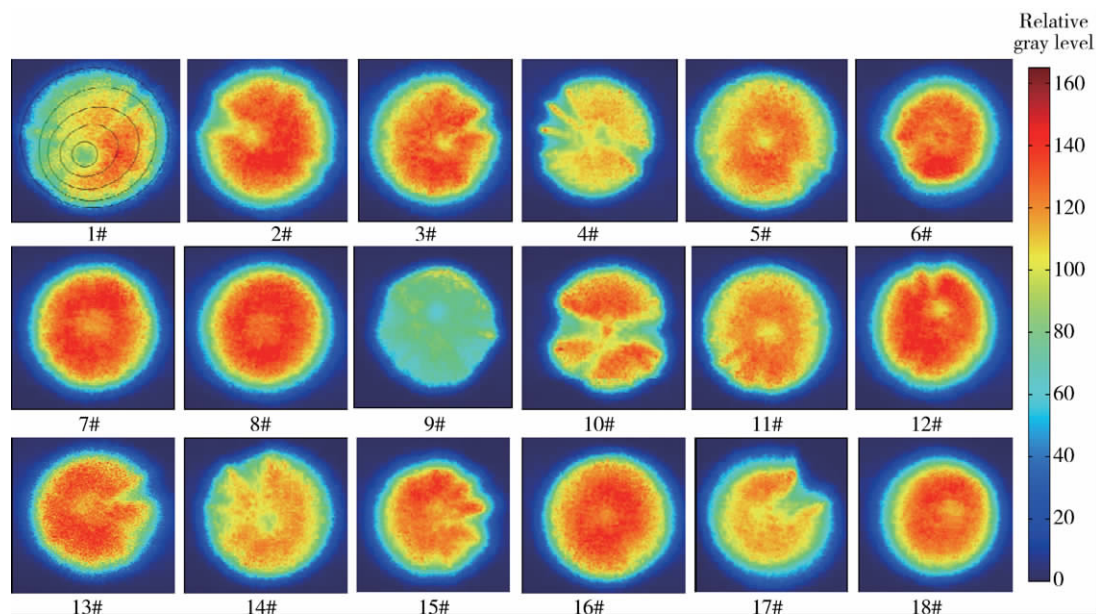


图 7 燃油分布图

Fig. 7 Images of spray distribution

表 2 雾锥燃油空间分布质量

Table 2 Quality results of fuel distribution

No.	R/mm	δ	$\theta/(^{\circ})$	No.	R/mm	δ	$\theta/(^{\circ})$
1	44.04	15.15	82.79	10	40.17	28.29	77.59
2	45.75	16.84	84.96	11	41.49	8.16	79.41
3	43.70	10.3	82.35	12	41.27	8.23	79.11
4	38.89	14.51	75.79	13	37.95	11.77	74.43
5	43.10	10.01	81.56	14	41.27	12.09	79.11
6	39.84	10.78	77.13	15	38.45	12.4	75.16
7	41.38	5.62	79.26	16	41.93	7.20	80.00
8	42.93	4.30	81.34	17	40.00	32.03	77.36
9	39.61	11.71	76.81	18	40.61	4.63	78.21

注:平面激光诱导荧光(PLIF)方法的测试位置为喷嘴下方 50 mm。

在燃油周向分布质量方面是最好的。

燃油周向分布不均匀度只能反映横截面中燃油量最大值和最小值,燃油分布指数反应了横截面中所有扇形区中燃油分布量和燃油理想分布量的差别程度。图8给出了18个喷嘴的雾锥横截面燃油分布指数,全部喷嘴的燃油分布指数都小于10,燃油分布指数反映雾锥横截面中燃油分布的总体质量,燃油分布总体质量是能达到设计要求的。1#,4#,10#和17#喷嘴的分布指数是所有喷嘴中比较高的,因此,燃油周向分布不均匀度是最差的。

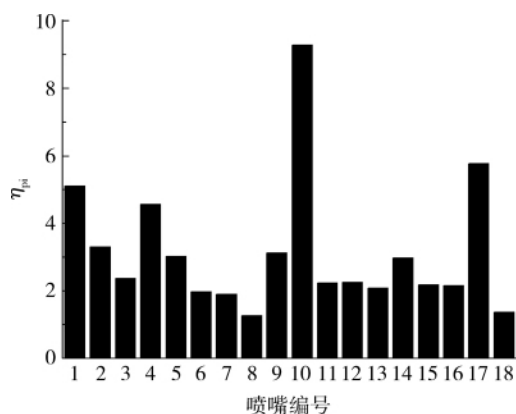


图8 燃油分布指数

Fig. 8 Patternation index

根据图7可以定性的对雾锥横截面中燃油分布特性进行分析,其中1#,4#和10#喷嘴的雾锥非对称性较严重。表2定量给出了雾锥横截面中燃油分布质量,根据周向分布不均匀度可以判断10#和17#喷嘴是不合格的。根据图8中燃油分布指数,1#,4#,10#和17#喷嘴的分布质量是最差的。综合考虑,其中1#,4#,10#和17#喷嘴是不合格的。

图7、图8和表2的结果说明8#喷嘴的燃油周向分布是比较均匀的,为进一步验证图6中燃油分布测量校正方法的有效性,图9对8#喷嘴的2张原始图像结果和校正结果进行了对比。第1次和第2次结果的荧光信号分别在激光射入一侧信号强度大于另一侧,因此,而校正后结果的荧光信号在雾锥横截面中是对称分布的,雾锥中心的荧光信号相对于外围较弱,这和离心喷嘴的空心雾锥结构是一致的。这说明图6中燃油分布测量校正方法有效消除了光沿程衰减所引起的燃油分布测量误差。

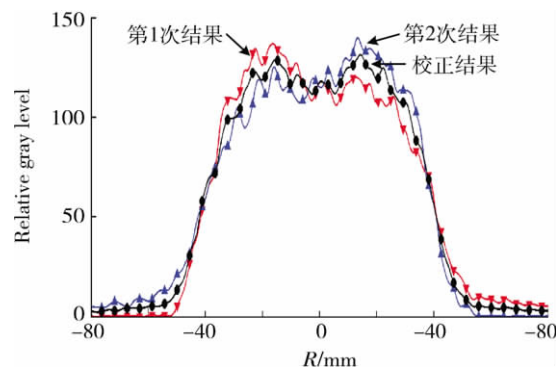


图9 雾锥横截面中心线相对灰度

Fig. 9 Relative gray level at centerline of the spray

2.4 雾锥发展过程

在供油压差分别为0.14, 0.25, 2.5 MPa时,激光面分别通过喷嘴下方10, 30, 50 mm得到的雾锥横截面燃油分布见图10。在相同的供油压差时,雾锥横截面直径在喷嘴下方沿喷射方向都逐渐变大。喷嘴下方同一位置,燃油在雾锥横截面中的粒子数随着供油压力的升高而增大。而雾锥横截面直径随供油压力的升高先升高而后略有降低,供油压差为0.14 MPa时,喷嘴出口的切向速度较小,因此雾锥横截面直径较小,当供油压差升高到0.25 MPa时,喷嘴出口的切向速度和轴向速度同时增加,但切向速度增加的比率大于轴向速度增加的比率,因此,雾锥横截面直径增大。继续增加供油压差到2.5 MPa时,雾锥横截面直径略有减小。喷嘴下方10 mm雾锥横截面中,在不同的供油压差下燃油液滴都集中在很窄的环形区域中。喷嘴下方30 mm雾锥横截面中,当供油压差升高到2.5 MPa时,整个横截面中充满了燃油液滴,中心的燃油液滴粒子数相对于外围略低。喷嘴下方50 mm雾锥横截面中,整个横截面中都充满了燃油液滴,在供油压差为0.14 MPa和0.25 MPa时,燃油集中在较宽的环形区中,中心燃油液滴粒子数低,但在供油压差为2.5 MPa时,整个雾锥横截面中燃油液滴粒子数沿径方比较均一。供油压差为0.14 MPa时,雾锥的燃油分布沿喷射方向,在30 mm和50 mm截面中燃油从10 mm截面中的燃油集中环形区主要向截面中心扩散。当供油压差增大到2.5 MPa时,在30 mm和50 mm截面中燃油从10 mm截面中的燃油集中环形区同时沿径向向内和向外扩散。当供油压差增大到0.25 MPa时,在30 mm和50 mm截面中燃油从10 mm截面中的燃油集中环形区迅速扩散到整个雾锥横截面中。

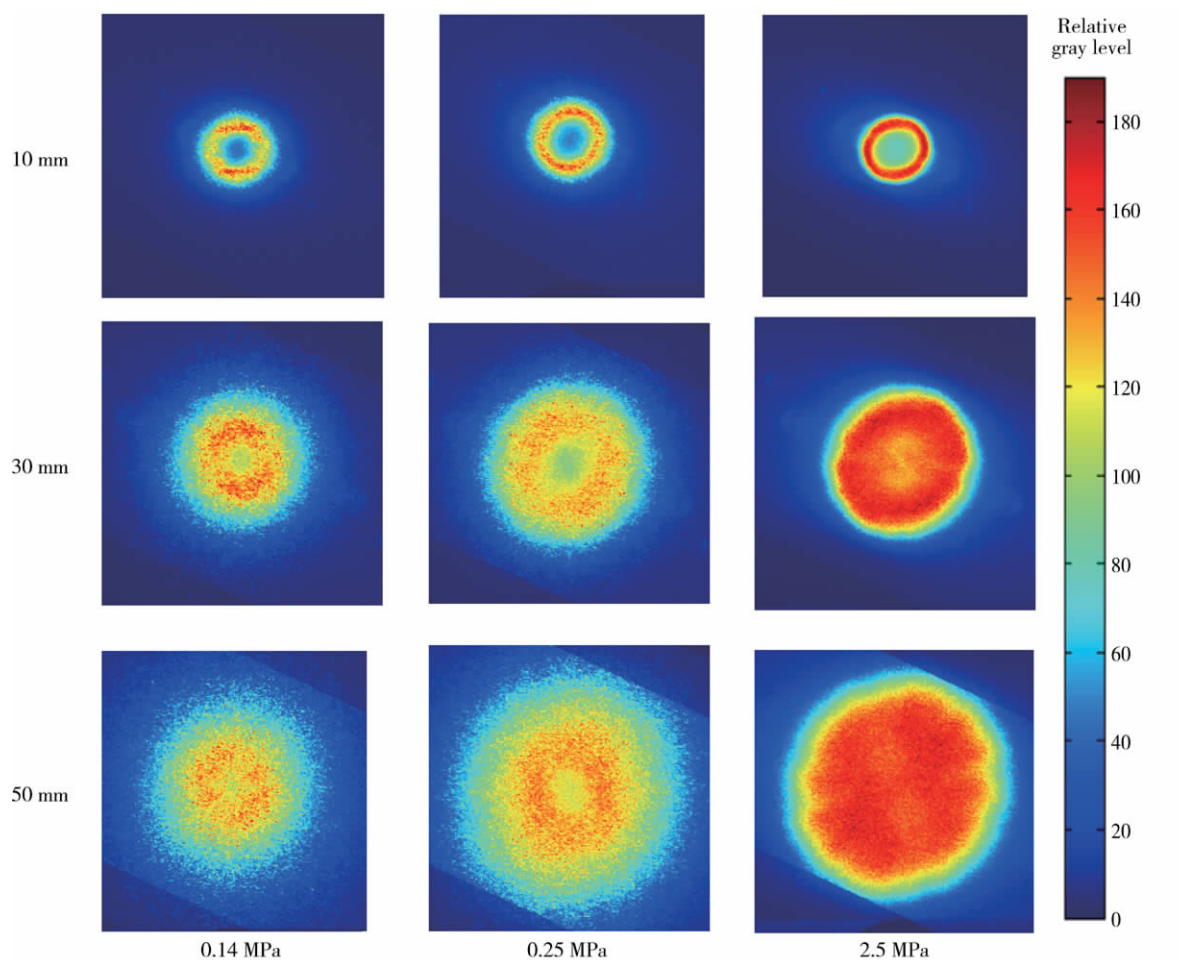


图 10 喷嘴下方不同位置燃油分布

Fig. 10 Fuel distribution of different positions below atomizer

3 结 论

本文使用平面激光诱导荧光方法对某型航空发动机用离心喷嘴的燃油分布特性进行了试验研究,首先,建立了燃料平面激光诱导荧光测量雾锥燃油空间分布特性的测量及校正方法,比较了燃油分布测量的 PLIF 和 PLS 方法,并验证了校正方法的有效性,然后对某型航空发动机用离心喷嘴分别从喷雾锥角、燃油周向分布不均匀度和分布指数等方面对燃油分布特性进行了分析,主要结论如下:

1) 根据离心喷嘴雾锥的空心锥结构特点、液滴直径沿径向的分布特性和轴向截面中 LIF 信号及 Mie 散射信号强度分布验证了 PLIF 方法适用于燃油空间分布特性测量。

2) 本文中的燃油分布特性测量校正方法,有效地消除了激光在雾锥中衰减所引起的燃油分布测量误差。

3) 本方法可用于检测新设计喷嘴的加工情

况和在役喷嘴的状态,根据雾锥周向分布情况检测喷嘴内部流道中是否存在加工精度不够而造成的凸台或凹槽、喷嘴出口圆度、各组件同轴度和喷嘴内部流道中是否存在结焦或其他原因引起的堵塞。

4) 不同供油压差下雾锥各横截面中燃油分布特点说明了各供油压差时雾锥中液滴的分散过程是不同的,为下一步研究空气和燃油的掺混提供了指导。

参考文献:

- [1] Rizk N K. Fuel atomization effects on combustion performance[R]. AIAA-2004-3540, 2004.
- [2] 赵坚行. 民用发动机污染排放及低污染燃烧技术发展趋势[J]. 航空动力学报, 2008, 23(6): 986-996.
ZHAO Jianxing. Pollutant emission and development of low-emission combustion technology for civil engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(6): 986-996 (in Chinese)
- [3] 金如山. 航空燃气轮机燃烧室[M]. 北京: 宇航出版社, 1985.
- [4] Lefebvre A H. Gas turbine combustion[M]. 2nd ed. Phila-

- dephia; Taylor & Francis, 1998.
- [5] 郭新华, 林宇震, 张弛, 等. 离心式同向双旋流器空气雾化喷嘴雾化特性研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(10): 2249-2254.
- GUO Xinhua, LIN Yuzhen, ZHANG Chi, et al. Experimental investigation on atomization characteristic of an air-blast atomizer with centrifugal nozzle and co-dual-swirl cup[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(10): 2249-2254. (in Chinese)
- [6] 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.
- [7] Lefebvre A H. Fifty years of gas turbine fuel injection[J]. Atomization and Sprays, 2000, 10(3/4/5): 251-276.
- [8] Lefebvre A H. Atomization and sprays[M]. Philadelphia: Taylor & Francis, 1989.
- [9] Chen S, Lefebvre A H, Rollbuhler J. Factors influencing the circumferential liquid distribution from pressure-swirl atomizers[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1993, 115(3): 447-452.
- [10] Bachalo W D. Spray diagnostics for the twenty-first century[J]. Atomization and Sprays, 2000, 10(3/5): 439-474.
- [11] Bishop C K, Allan W. Effects of fuel nozzle condition on gas turbine combustion chamber exit temperature distributions[R]. ASME Paper GT-2010-23441, 2010.
- [12] Guy S R D, Allan W, LaViolette M, et al. Optical patternation of gas turbine fuel sprays during simulated engine operating conditions[R]. ASME Paper GT-2009-59011, 2009.
- [13] Kenneth K K. Recent advances in spray combustion: spray combustion measurements and model simulation[M]. Reston: American Institute of Astronautics and Aeronautics Inc., 1996.
- [14] Baranger P, Orain M, Grisch F. Fluorescence spectroscopy of kerosene vapour: application to gas turbines[R]. AIAA-2005-828, 2005.
- [15] Seyfried H, Brackmann C, Lindholm A, et al. Optical investigation of the combustion characteristics of a gas turbine pilot burner[R]. AIAA-2007-469, 2007.