

文章编号: 1000-8055(2023)02-0298-14

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20210199

## 中心分级燃烧室慢车工况油雾场特性

段争梁<sup>1,2</sup>, 桂 韬<sup>3</sup>, 房人麟<sup>2,3</sup>, 刘云鹏<sup>2</sup>, 颜应文<sup>2</sup>

(1. 中国航发控制系统研究所, 江苏 无锡 214063;

2. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

3. 中国航发四川燃气涡轮研究院, 成都 610500)

**摘 要:** 为获得中心分级燃烧室慢车工况下主副级油雾场特性, 采用粒子图像测速仪(PIV)对单管燃烧室不同头部方案 and 不同喷嘴燃油比例的油雾场进行试验测量, 开发了油雾场图像后处理软件, 对油雾场图像进行后处理, 获得了中心分级燃烧室油雾场空间分布。慢车工况下油雾场试验结果表明: 大粒径油珠在燃烧室富油头部区域呈锥形分布, 同时索太尔平均直径(SMD)沿径向呈 V 型分布, 即中间小、两侧大。燃烧室头部折流板扩张角的减小, 使得燃烧室富油头部区域油珠数目集中、同时平均 SMD 较大。保持来流条件和油气比一定时, 改变燃油比例对燃烧室雾化效果影响不大。油雾场中油珠数目最多的粒径是 25  $\mu\text{m}$ , 而体积占比最大的粒径范围是 30~50  $\mu\text{m}$ 。

**关 键 词:** 中心分级燃烧室; 油雾场; 索太尔平均直径(SMD); 慢车工况; 燃油比例

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

## Characteristics of fuel spray field in central staged combustor at idle condition

DUAN Zhengliang<sup>1,2</sup>, GUI Tao<sup>3</sup>, FANG Renlin<sup>2,3</sup>, LIU Yunpeng<sup>2</sup>, YAN Yingwen<sup>2</sup>

(1. Aero Engine Control System Institute,

Aero Engine Corporation of China, Wuxi Jiangsu 214063, China;

2. College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

3. Sichuan Gas Turbine Establishment, Aero Engine Corporation of China, Chengdu 610500, China)

**Abstract:** In order to obtain the characteristics of spray field of main stage nozzle and pilot nozzle of central staged combustor at idle condition, the particle image velocimetry (PIV) was used to measure the spray field of single-tube combustion chamber with different head schemes and different nozzle fuel ratios. And the post-processing software of spray field image was developed, the spatial distribution of the spray field was obtained by extracting oil droplets on raw pictures in the central graded combustion chamber. The research of spray field under idle condition indicated that: large-size droplets were distributed in a conical shape in the fuel-rich head area of the combustion chamber, while the Sauter mean diameter (SMD) was distributed in a V-shaped radial direction, namely, small in the middle and large on both sides. The reduction of the expansion angle of the baffle made the number of droplets concentrated in the fuel-rich head area of the combustion chamber and the average SMD was larger. When the incoming

收稿日期: 2021-04-27

基金项目: 国家科技重大专项(J2019-III-0004-0047)

作者简介: 段争梁(1997—), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事航空发动机燃烧室燃烧研究。

通信作者: 刘云鹏(1992—), 男, 讲师, 博士, 主要从事航空发动机燃烧室燃烧相关技术研究。E-mail: ypliu@nuaa.edu.cn

引用格式: 段争梁, 桂韬, 房人麟, 等. 中心分级燃烧室慢车工况油雾场特性[J]. 航空动力学报, 2023, 38(2): 298-311. DUAN Zhengliang, GUI Tao, FANG Renlin, et al. Characteristics of fuel spray field in central staged combustor at idle condition[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(2): 298-311.

flow conditions and the fuel-air ratio were kept constant, changing the fuel ratio had little effect on the atomization effect. The particle size with the largest number of droplets in the spray field under idle conditions was 25  $\mu\text{m}$ , and the particle size range with the largest volume ratio was 30—50  $\mu\text{m}$ .

**Keywords:** central staged combustor; fuel spray field; Sauter mean diameter (SMD); idle condition; fuel allocation

目前航空发动机朝着高推重比、高温升方向发展, 因此对发动机高效组织燃烧提出更高的要求, 同时也对燃烧室污染物排放带来了更严格的要求<sup>[1]</sup>; 在此种背景下, 为解决高温升和低污染, 新型的航空发动机燃烧室结构如贫油预混预蒸发(lean premixed prevaporized, LPP)燃烧室、富燃-猝熄-贫燃(rich burn-quench-lean burn, RQL)燃烧室、分级燃烧室(staged combustor)等<sup>[2]</sup>相继被发展, 其中分级燃烧室中采用气动分级燃烧理论的中心分级燃烧室是目前处于研究热点的低污染燃烧室。研究中心分级燃烧室中的雾化、燃烧对于实现低污染有着重要的影响<sup>[3]</sup>。

中心分级燃烧室的燃油雾化过程和雾化效果直接影响燃烧室中的燃烧效率、温度分布以及污染生成; 国内外许多研究者针对高温升和低污染燃烧室的流场和油雾场做了许多的研究。刘富强等<sup>[4]</sup>研究表明中心分级燃烧室中值班级燃油量对于 $\text{NO}_x$ 排放影响更大, 同时主副级燃油比例对 $\text{NO}_x$ 排放有影响; 张峰<sup>[5]</sup>对旋流燃烧室中的油雾场进行研究, 分析了不同气流温度、压力以及燃油流量下燃烧室油雾场的变化; 朱嘉伟<sup>[6]</sup>对LPP燃烧室在不同进口空气流量、主副级不同燃油比例下的油雾场进行试验研究, 仅值班级喷嘴或主级喷嘴工作, 随燃油流量增加雾化效果呈现相异结果, 保持油气比不变, 改变燃油比例, 雾化效果有改变; 金仁翰等<sup>[7]</sup>通过PIV对燃烧室头部油雾场进行测量, 研究了燃油比例分配以及预燃级喷嘴位置下的油雾场特性; 党龙飞等<sup>[8]</sup>使用高速摄影仪对双油路离心喷嘴在不同供油压力下的油雾特性进行测量; 刘易安等<sup>[9]</sup>对中心分级燃烧室头部喷嘴喷入静止大气中的雾化特性进行研究, 获得燃烧室燃油分布规律, 发现燃烧室中大液滴主要存在中心回流区和角回流区; 王家俊等<sup>[10]</sup>针对某中心分级燃烧室离心喷嘴研究发现, 燃油低温时喷嘴的流量数下随温度升高而降低的程度更大, 索太尔平均直径(the Sauter mean diameter, SMD)沿径向方向随燃油温度的升高而减小, 研究结果揭示了低温燃油温煦对于离心喷嘴雾化的影响;

傅江坤等<sup>[11]</sup>对中心分级燃烧室的预燃级雾化特性进行试验研究, 预燃级雾化锥角受到套筒结构限制, 空气压降对于雾化水平的影响更大。陈登柄<sup>[12]</sup>对中心分级燃烧室点火工况下副级油雾场进行研究, 进口流量增大燃烧室内的SMD空间分布逐渐均匀、平均SMD逐渐减小; Cai、Felden等<sup>[13-14]</sup>试验数值仿真表明: 燃烧状态下燃烧室中轴向旋流器的不同流动方向上平均直径 $d_{32}$ 和 $d_{10}$ 沿径向的分布先增大后减小, 至下游基本不发生变化, 沿轴向下SMD逐渐增大; Fan等<sup>[15]</sup>研究表明流场与喷雾场之间相互作用, 回流区大小影响中心区域的燃油浓度分布, 回流区宽度越大, 燃油浓度越大; Yan等<sup>[16]</sup>采用粒子图形测速仪对LPP燃烧室油雾场特性进行研究, 仅值班级喷嘴工作时, 增加燃油流量雾化效果变差, 同时值班级雾化效果位置喉道好于主级旋流器上的雾化效果, 值班级喷嘴和主燃级喷嘴燃油分配存在较优解; Lucas等<sup>[17]</sup>对真实发动机中的液体燃料在燃烧状态下进行研究发现, 贫油熄火状态下液体燃料在不同轴向位置上沿径向分布SMD基本相同, 但是沿轴向下运动SMD呈现先减小后增大, 回流区温度的降低减慢燃油蒸发过程, 降低气态燃料的利用率, 促进贫油熄火的形成; Wood等<sup>[18]</sup>采用高速成像分析仪研究燃油物性参数对燃烧时液滴破碎过程的影响, 液体燃料的蒸馏温度越高, 其SMD越大; 若在非燃料条件下则证明除蒸馏外的其他特性(黏度)与液体破碎过程最相关; Opacich等<sup>[19]</sup>研究航空煤油替代燃料中表明液态燃料在低温状态下黏性对于雾化性能的影响占据主导, 即低温下黏性对点火的影响更大; 而在高温燃烧状态下燃油的表面张力在雾化中影响更大, 进而对高空再点火的影响更大。

综上所述, 目前对燃烧室雾化特性研究较多, 主要分为两个研究方向: 一是雾化喷嘴直接喷入静止大气中的雾化特性, 二是燃烧过程中喷嘴的雾化特性; 对中心分级燃烧室的研究主要集中在燃烧特性、流场结构以及常温常压下的燃油雾化等方面, 而对中心分级燃烧室高温高压工况下雾

化特性研究较少,特别是对慢车工况下中心分级燃烧室的雾化特性不明确。同时慢车工况下值班级单独供油,由于值班级富油导致冒烟、整机状态下供油泵压力限制和值班级喷嘴流量数较小等原因<sup>[20-22]</sup>,结合本文的前期试验证明主燃级参与供油对慢车工况的燃烧效率和稳定性影响较小,但能够显著降低慢车冒烟状况的基础上,折中考虑燃烧效率和冒烟问题,对中心分级燃烧室慢车工况下的值班级单独供油与主副级同时供油策略进行了探究。因此研究慢车工况下中心分级燃烧室的雾化特性对于慢车工况下喷嘴设计、点火、燃烧性能研制等具有重大意义,亟需开展相关工作。

## 1 研究对象及试验方法

### 1.1 研究对象

本文对不同头部方案的中心分级燃烧室简化得到单管中心分级燃烧室试验模型,该模型结构如图 1 所示。该试验模型由旋流器和喷嘴、火焰筒、火焰筒上的主燃孔、掺混孔及冷却孔构成。

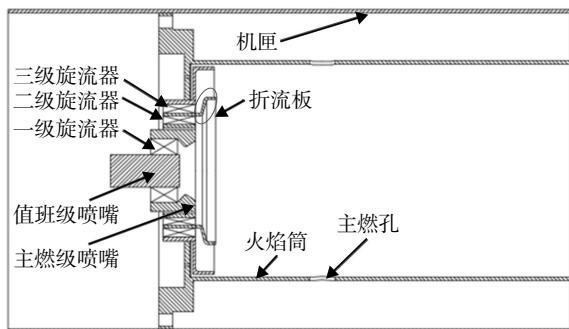
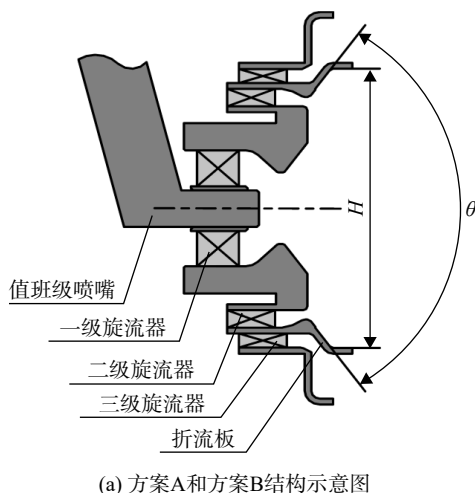


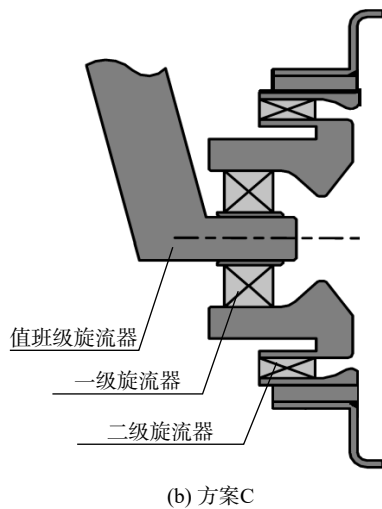
图 1 中心分级燃烧室结构示意图

Fig. 1 Schematic of geometric structure of the center-staged combustor

针对不同值班级、主燃级喷嘴和不同头部旋流器组合成 3 种中心分级燃烧室头部方案,分别开展慢车工况下燃烧室主副级油雾场雾化特性试验研究,3 种头部方案如图 2 所示。中心分级燃烧室头部方案中主燃级喷嘴为多点喷射的直射式喷嘴,该喷嘴喷射方向与中心轴向存在一定的夹角,值班级喷嘴为离心喷嘴;图 2(a)展示了方案 A 和方案 B 的头部结构示意图,两者的喷嘴以及各级旋流器结构相同,仅方案 B 的二级和三级轴向旋流器之间的折流板的扩张角  $\theta$  和折流板高度  $H$  小于方案 A,其中方案 A 和 B 的扩张角  $\theta$  分别为  $150^\circ$  和  $110^\circ$ ,  $H$  值分别为 80、72 mm;方案 C 的主级旋流器由一级轴向旋流器构成,该方案无



(a) 方案 A 和方案 B 结构示意图



(b) 方案 C

图 2 燃烧室头部方案组合结构示意图

Fig. 2 Schematic of combustor head component combination

折流板结构,同时主级喷嘴和值班级喷嘴与方案 A 和方案 B 不相同。

### 1.2 试验系统

基于粒子图像测速仪(particle image velocimetry, PIV)测量的试验系统示意图如图 3 所示。该系统由试验准备段(包括气源、加热装置以及供油装置)、试验测量段(燃烧室模型装置、PIV 测量系统以及温度、压力等状态参数测量装置)以及尾气处理段组成。图 3(b)为试验测量段的组成示意图,试验拍摄燃烧室头部的油雾空间分布,本文采用中心分级燃烧室头部开观察窗的方式拍摄,拍摄时激光从燃烧室尾部透明石英玻璃穿过照亮燃烧室中心截面  $Z=0$  截面(该截面穿过主燃孔以及喷嘴中心),相机通过光学观察窗记录燃烧室中的油雾分布原始图片;同时试验测量段上布置有燃烧室进出口压力测量点以及温度测量点,记录燃烧室进出口状态参数。

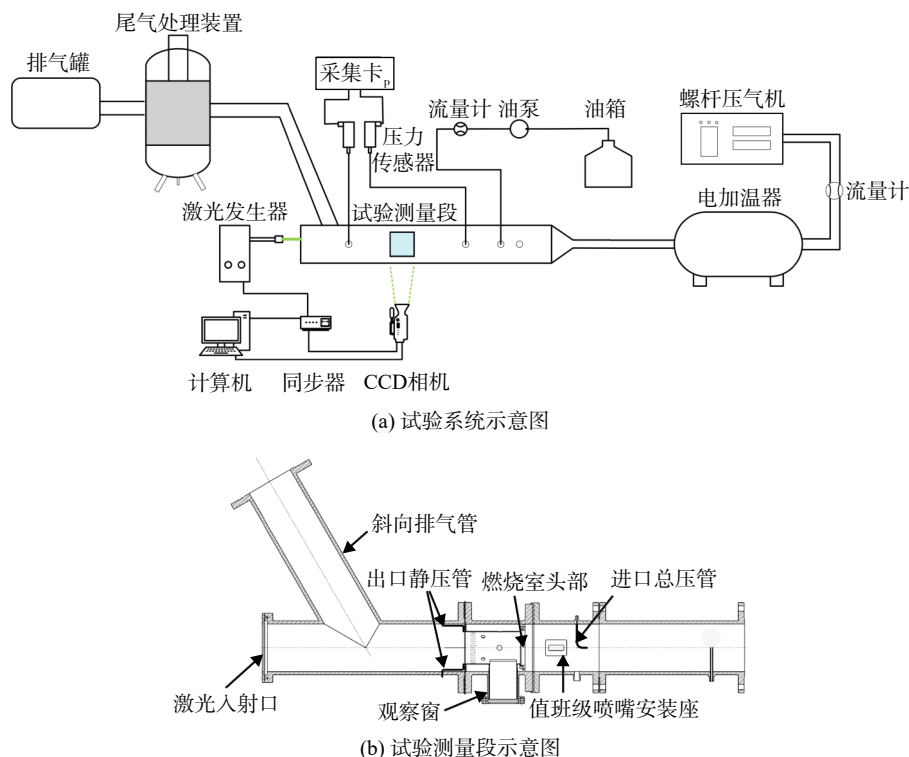
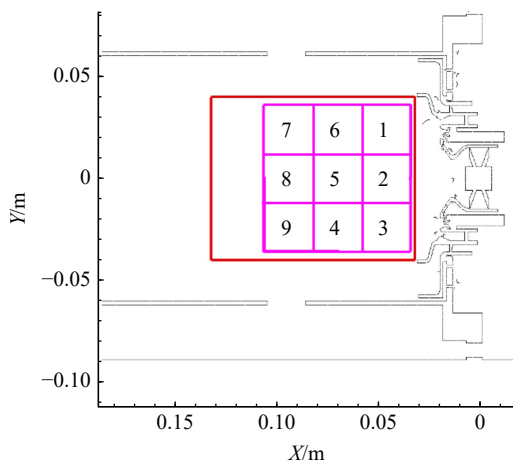


图3 油雾特性试验系统示意图

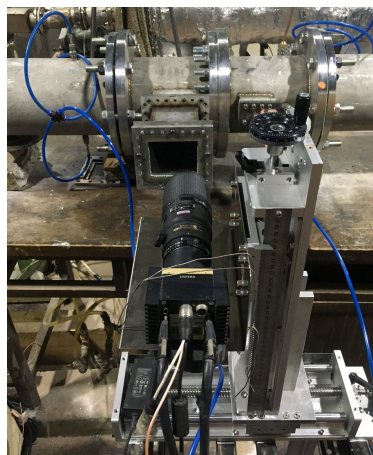
Fig. 3 Diagram of experiment system about characteristics of spray

本文所使用的二维 PIV 系统为北京立方天地科技公司生产, 该系统由数字电荷耦合(charge coupled device, CCD)相机、激光发生器、同步控制器等部件组成; 试验所使用到的 CCD 相机分辨率为  $2072 \text{ 像素} \times 2072 \text{ 像素}$ , 曝光时间为  $0.2 \text{ ms}$ 。图 4 展示出试验拍摄油雾场的方法, 图 4(a) 中红色框代表观察窗区域, 其大小为  $80 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ , 观察窗右侧距离喷嘴和旋流器出口距离  $10 \text{ mm}$ ; 油雾场测量区域为图中粉色框, 该框大小为  $72 \text{ mm} \times$

$72 \text{ mm}$ , 试验中由于相机分辨率的限制, 对燃烧室头部测量区域分 9 个区拍摄, 拍摄顺序如粉色框中所标示, 每一个小区域的面积为  $24 \text{ mm} \times 24 \text{ mm}$ , 拍摄时各个区域之间有  $1 \text{ mm}$  的重叠区域, 即拍摄时图像大小为  $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ , 全场区域之间通过图像拼接技术合并得到最终全场油雾空间分布。不同区域之间的移动通过二维移动坐标架进行, 将数字相机固定于坐标架上, 坐标架移动的最小刻度为  $0.125 \text{ mm}$ 。



(a) 油雾场分区拍摄示意图



(b) 试验拍摄实物图

图4 油雾场拍摄方法示意图

Fig. 4 Schematic of photograph method for fuel spray field

燃烧学中常用于衡量液雾分布的平均直径 SMD(变量符号记为  $d_{32}$ ), 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(1)所示。式中  $n_{d,i}$  为液滴直径为  $d_i$  的液滴数量。

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

### 1.3 试验工况

本文对慢车工况下中心分级燃烧室主副级油雾场进行试验测量, 慢车工况时进口压力  $p_3$ 、温度  $T_3$  以及空气流量  $\dot{m}_3$  如表 1 所示, 燃烧室油气比为 0.014, 在不同头部方案中保持燃烧室进口压力、温度、进口流量及油气比相同, 分别改变值班级喷嘴燃油和主燃级喷嘴燃油比例。表 2 为本次试验中各头部方案的试验工况安排, 表中展示了主副级喷嘴燃油所占的比重。

表 1 燃烧室进口条件

Table 1 Operation conditions for combustor inlet

| 燃烧室进口<br>压力 $p_3/\text{kPa}$ | 燃烧室进口<br>温度 $T_3/\text{K}$ | 进口空气<br>流量 $\dot{m}_3/(\text{g/s})$ | 燃烧室油气比<br>(FAR) |
|------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|-----------------|
| 340                          | 450                        | 620                                 | 0.014           |

表 2 试验工况参数表

Table 2 Operating parameters of experiment

| 方案   | 油气比   | 值班级喷嘴<br>燃油占比/% | 主燃级喷嘴<br>燃油占比/% |
|------|-------|-----------------|-----------------|
| 方案 A | 0.014 | 100             | 0               |
|      | 0.014 | 60              | 40              |
|      | 0.014 | 100             | 0               |
|      | 0.014 | 80              | 20              |
| 方案 B | 0.014 | 60              | 40              |
|      | 0.014 | 40              | 60              |
|      | 0.014 | 20              | 80              |
|      | 0.014 | 100             | 0               |
| 方案 C | 0.014 | 80              | 20              |
|      | 0.014 | 60              | 40              |
|      | 0.014 | 40              | 60              |
|      | 0.014 | 20              | 80              |

### 1.4 油雾场图像处理方法

本文对 PIV 获取的油雾场原始图像, 采用图像处理技术获取空间中的油珠数目和粒径分布。

油珠提取程序主要经过背景除噪、图像二值化处理以及油珠轮廓提取三个过程; 油珠提取程序原理如下: 首先原始图像数据呈现低灰度比——呈过暗或过亮, 同时由于激光散射和油珠反射造成油珠与周围环境的灰度变化缓慢, 使得油珠粒径和数目与实际存在误差, 故本文中采用分段线性灰度变换技术对原始图片进行除噪, 经除噪后的图像转化为二值化图像, 其次由于图像中油珠呈现亮(其灰度值为 255)的色彩, 与周围环境(值为 0)形成不连续性, 故采用边缘检测算法对油珠边缘进行检测, Roberts 检测算法采用对角方向的两个像素值之差进行像素边界强度计算, 计算油珠直径及数目时, 其检测效果要优于其他算法, 图 5 展示了软件提取油珠粒径结果示意图(图中  $d_{\text{origin}}$  表示程序提取单张图片的油珠粒径)。试验拍摄时可能存在气流脉动和燃油脉动影响拍摄结果, 因此一个区域连续拍摄 50 帧图像进行叠加平均, 得到每一个小区域的空间分布, 通过图像拼接得到全场平均油雾场空间分布信息, 进而通过统计和计算  $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$  区域范围内的粒子的粒径和数量获得单位面积上的  $d_{32}$  以及单位面积上的油珠数目和体积分布。

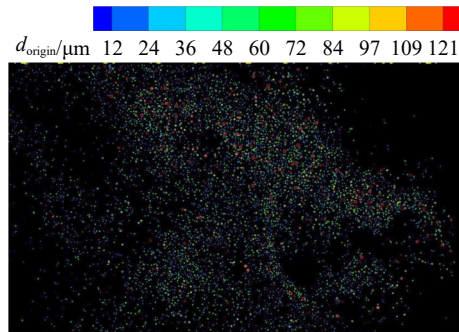


图 5 油珠提取示意图

Fig. 5 Schematic of spray droplets

图 6 展示了最终获得的 SMD 空间分布及同中心分级燃烧室内的位置关系, 本文后续结果讨论中所得油雾场区域大小、与燃烧室相对位置均与图 6 中相同, 即气流和燃油从左至右流动; 图中  $R$  代表以值班级喷嘴喷射点为原点, 沿  $y$  方向距值班级喷嘴中心的径向距离,  $y$  的正向为  $R$  正方向,  $R$  对称分布;  $X$  代表值班级喷嘴出口沿轴向上的距离(图中红色短虚线所示),  $X=0$  位于 PIV 图像原点;  $D$  代表距离拍摄原点  $X=0$  的轴向距离。结果分析中定义图 4(a)中标号 1、2、3 区域为近头部区域(富油头部区域, 用  $F_B$  表示), 标号 4~9 区域为油珠稀疏区, 而区域 1~9 表示的是全场测量区域, 用  $Q_C$  表示。

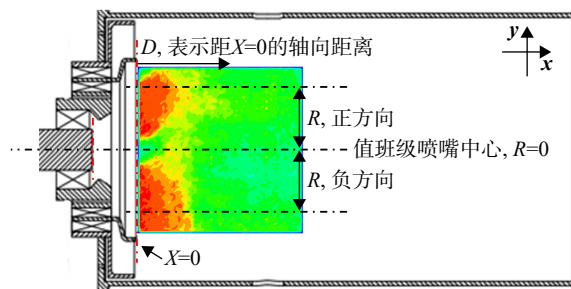
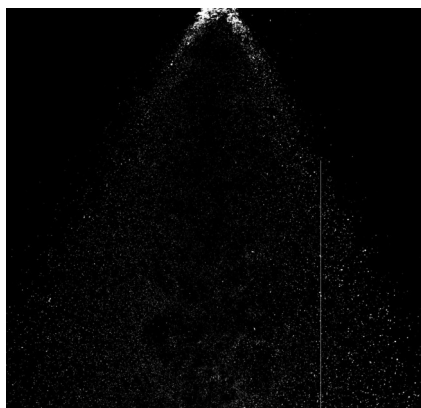


图6 拍摄结果与燃烧室位置关系

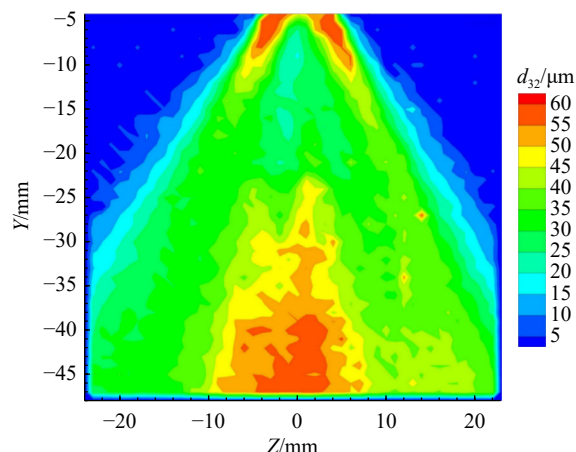
Fig. 6 Relative position of between observed results with combustor

### 1.5 试验方法验证

试验中各种误差的存在会影响油珠提取结果, 需要对本文采用的油雾场图像处理方法进行验证, 而相位多普勒粒子分析仪(PDPA)在测量油珠粒径时考虑了包括油珠散射、反射等因素, 对于油雾场测量有较高的精度, 故本文对某离心喷嘴喷入敞口静止大气环境下的油雾场空间分布分别利用PIV与油雾场图像处理方法所得结果与PDPA测量的试验结果进行对比, 验证本文采用的PIV与油雾场图像处理方法的准确性; 离心喷嘴两种测量方法的对比结果如图7所示, 其中图7(a)是离心喷嘴喷雾原始图像, 原始图像表明离心喷嘴喷入静止大气中存在明显雾化锥角, 油雾锥上的粒径较大, 下游由于油珠碰撞合并等因素使得粒径增大, 图7(b)是采用油雾场图像处理方法所得结果, 图中油珠粒径分布同原始图像一致, 图7(c)对比了 $Y=-14\text{ mm}$ 处, 油珠粒径沿半径 $Z$ 的分布, 两者沿半径方向分布趋势相同, 采用两种方法测量获得的相同位置处油珠粒径大小相差较小, 最大误差11%, 位于 $Z=-6\text{ mm}$ 处, 该值在工程可接受范围内。以上验证了本文油雾场处理方法的准确性, 可以将其用于本文油雾场试验测量。



(a) 离心喷嘴原始油雾场图像



(b) 采用油雾场图像处理方法的结果

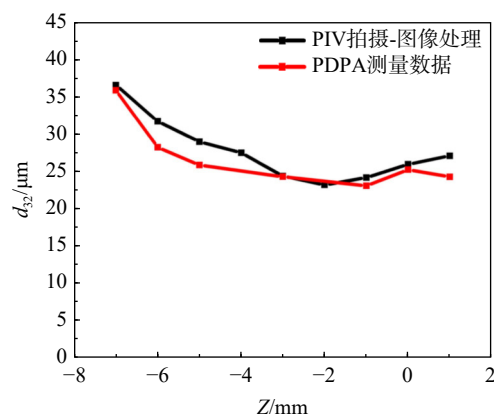
(c)  $Y=-14\text{ mm}$ 时径向 $d_{32}$ 对比

图7 油雾场图像处理方法验证

Fig. 7 Verification of image processing method for fuel field

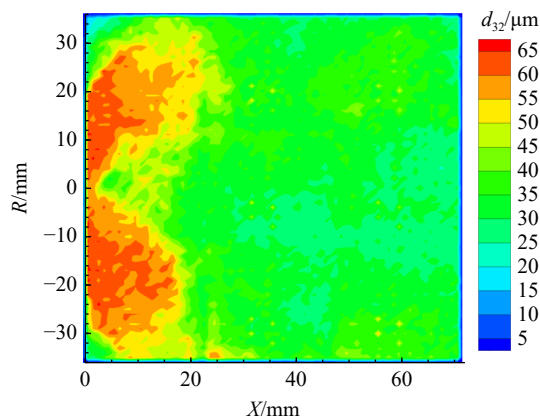
## 2 试验结果与分析

### 2.1 折流板结构对油雾场特性影响

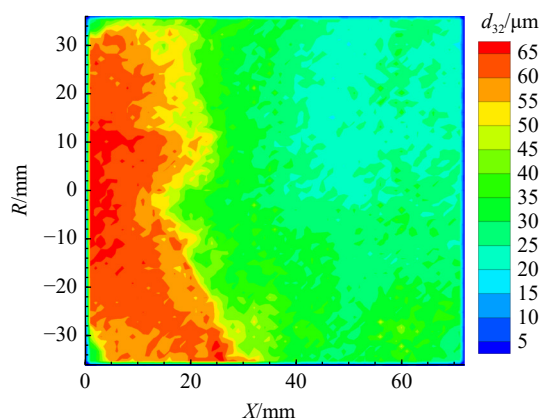
图8展示了值班级喷嘴燃油比例为100%时方案A和方案B全场 $d_{32}$ 分布云图。结果表明油珠粒径较大的分布区域为富油头部区域, 该处大粒径油珠呈锥形对称分布, 主要原因是离心喷嘴结构决定, 喷嘴结构中旋流槽的存在使得出口燃油做旋流运动形成旋转射流, 该射流即为油雾锥; 射流主流速度高, 仅两侧收到较大剪切, 主流上剪切速度小, 所以油雾锥上的 $d_{32}$ 大; 而由于气流旋流流场和自身的作用, 油珠在径向方向上存在运动, 所以 $R=0$ 中心和油雾锥之间的区域 $d_{32}$ 缓慢过渡; 图8(c)展示了不同轴向位置(表示距二级旋流器出口的距离, 以 $D$ 表示) $d_{32}$ 沿径向分布, 图中, 在富油头部区域 $D<20\text{ mm}$ 时 $d_{32}$ 沿径向呈V型分布, 即中间小, 测量粒径较大, 沿轴向下游经流场剪切、蒸发使得油珠逐渐破碎为小液珠, 至油珠稀疏区域( $D=40\sim 60\text{ mm}$ )油珠粒径大小基本不变。

图8(a)与图8(b)对比表明, 方案B大油珠

分布主要集中在  $R=-20\text{ mm}$  至  $R=20\text{ mm}$  附近区域,同时方案 B 油珠稀疏区域内  $d_{32}$  较小(如图 8(d));两个方案喷嘴结构、工作压力以及来流条件相同,方案 B 折流板扩张角减小,导致一级旋流器和二级旋流器在径向方向气流速度分量减小,一方面使得油珠数目较为集中,另一方面使得离心喷嘴出口下游的雾化效果变差,表现为  $d_{32}$  数值变大;三级旋流器受折流板的限制减小,由图 6 拍摄区域与几何结构的相对位置可知,三级旋流器在径向方向上的作用增大,速度大小增加,速度增大使得气流的剪切作用增强,部分燃油  $d_{32}$  逐渐减小;其次速度增加使得油珠的对流换热增强,进一步加速了油珠的蒸发,所以下游的油珠粒径减小剧烈;Opacich 等<sup>[19]</sup>探究了不同温度下燃油雾化效果的影响因素,低温下黏度对雾化起主导作用,随着温度升高至高温(温度值在  $475\text{ K}$  及以上)油珠的表面张力对雾化起决定作用,本文中油珠温度升高能够增强了表面张力,促进油珠的蒸发,使得  $d_{32}$  减小。图 9 展示了单位面积( $1\text{ mm}^2$ )上油珠数目分布,以  $N_{\text{drop}}$  表示。图 9 表明在头部富油区油珠数目较多,方案 A 油珠密度大于方案 B;而在油珠稀疏区方案 B 的油珠分布明显小于方案 A。



(a) 方案A



(b) 方案B

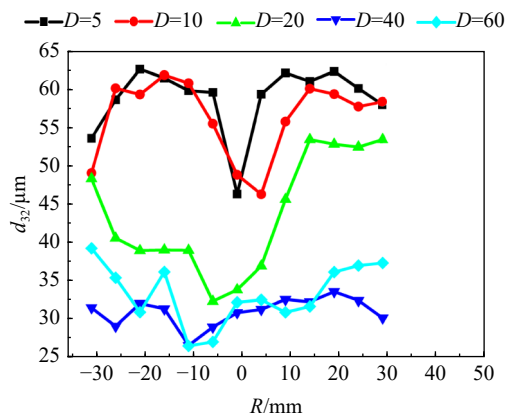
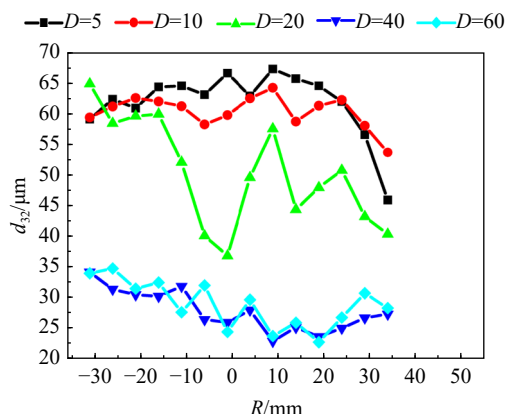
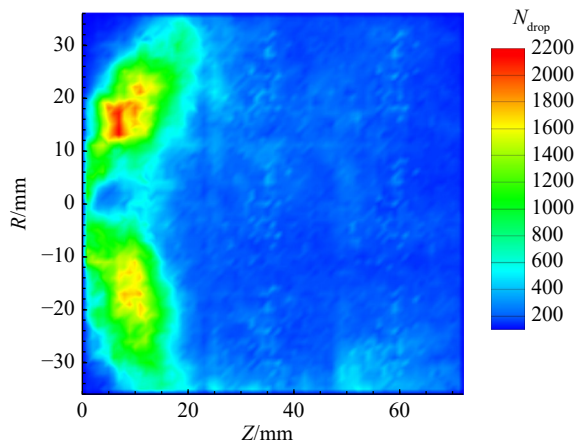
(c) 方案A不同轴向位置 $d_{32}$ 沿径向分布(d) 方案B不同轴向位置 $d_{32}$ 沿径向分布图 8 值班级喷嘴燃油占比 100% 时方案 A 和方案 B 的  $d_{32}$  分布云图Fig. 8 Distribution contour of  $d_{32}$  for Plan A and Plan B at pilot nozzle fuel ratio 100%

图 10 展示了值班级喷嘴燃油为 60% 时,方案 A 和方案 B 全场  $d_{32}$  分布云图;油珠大小、分布趋势和分布位置与图 8 相同。但值班级喷嘴燃油占比 60% 时,在富油头部区域径向  $R=\pm 5\text{ mm}$  位置形成较小的  $d_{32}$  分布即中心的小粒径范围变宽,虽然离心喷嘴压力降低,自身的雾化作用收到影响,但一级旋流器的气流速度即气动条件不



(a) 方案A

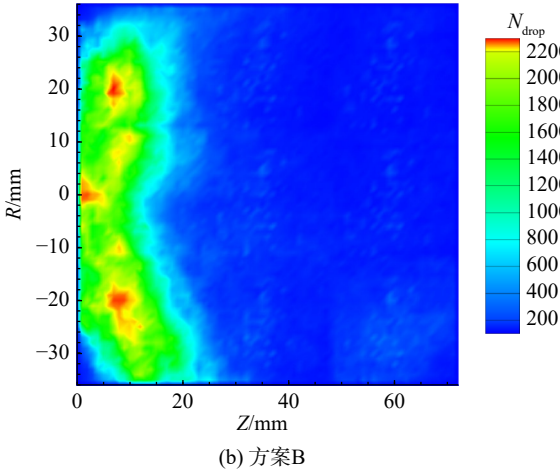


图 9 值班级喷嘴燃油占比 100% 时方案 A 和方案 B 的油珠数目分布云图

Fig. 9 Distribution contour of droplets number of Plan A and Plan B at pilot nozzle fuel ratio 100%

发生改变,故小燃油量下油雾场的综合效果提升,此时方案 A 和方案 B 的规律均相同。开启主燃级喷嘴时方案 B 的燃油分布与只开启值班级喷嘴时燃油分布规律存在差异,对比图 8(d)与图 10(d),减小值班级燃油之后使得方案 B 的分布趋向方案 A,表明折流板的影响主要局限在头部富油区域。

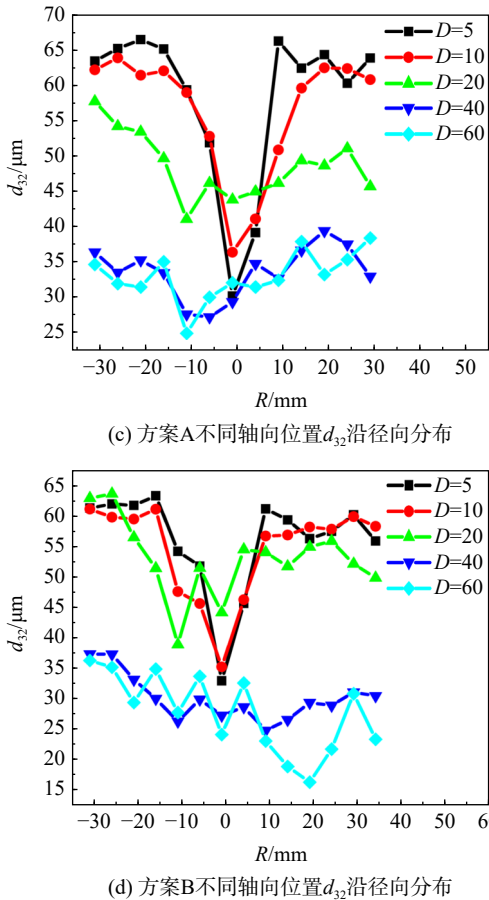
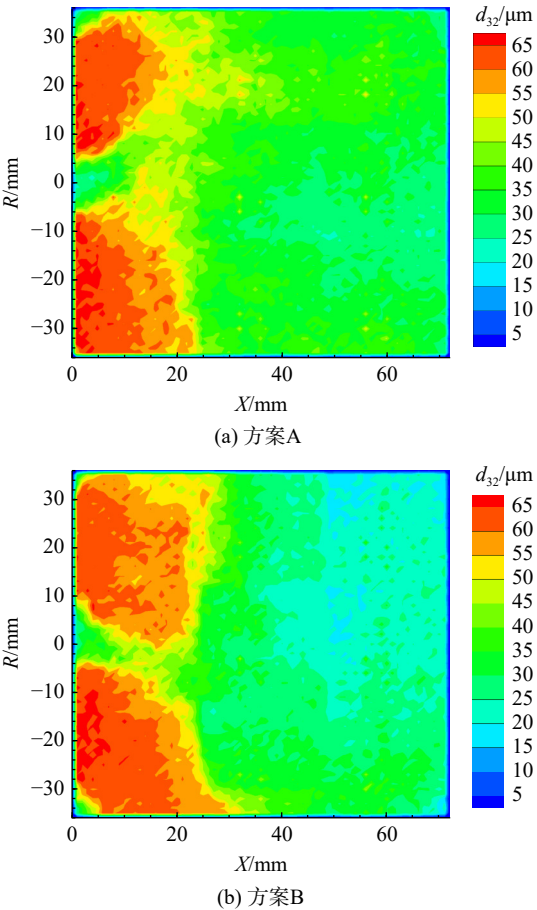


图 10 值班级喷嘴燃油占比 60% 时方案 A 和方案 B 的  $d_{32}$  分布云图

Fig. 10 Distribution contour of  $d_{32}$  for Plan A and Plan B at pilot nozzle fuel ratio 60%

表 3 是方案 A 和方案 B 不同工况下全场平均  $d_{32}$ ,结果表明在值班级喷嘴燃油占比为 100% 时,方案 B 的全场  $d_{32}$  要大于方案 A,而开启主燃级喷嘴时两个方案下的  $d_{32}$  基本一致,方案 B 中主级喷嘴不工作时,值班级喷嘴前压力最大,喷嘴的扩张角最大,可能导致部分燃油在一级旋流器出口的喉道附近上形成油膜聚合,然后脱离,由于二级旋流器的速度收到折流板的限制,再破碎时雾化效果较弱,最终拍摄区域内的  $d_{32}$  呈现大油珠;以上结果再次表明折流板主要通过改变

| 表 3 方案 A 和方案 B 的全场平均 $d_{32}$                             |      |                           |
|-----------------------------------------------------------|------|---------------------------|
| Table 3 Results of Average $d_{32}$ for Plan A and Plan B |      |                           |
| 工况                                                        | 头部方案 | 全场平均 $d_{32}/\mu\text{m}$ |
| 值班级喷嘴燃油占比 100%                                            | 方案 B | 59.70                     |
|                                                           | 方案 A | 52.32                     |
| 值班级喷嘴燃油占比 60%                                             | 方案 B | 56.57                     |
|                                                           | 方案 A | 56.24                     |

二级旋流器进而影响燃油的雾化效果。

## 2.2 燃油比例对油雾特性的影响

方案 B 和方案 C 通过改变主副级燃油流量

比例,探究不同头部结构下燃油比例分配的影响。

图 11 展示了方案 B 不同燃油比例下全场  $d_{32}$  的空间分布。

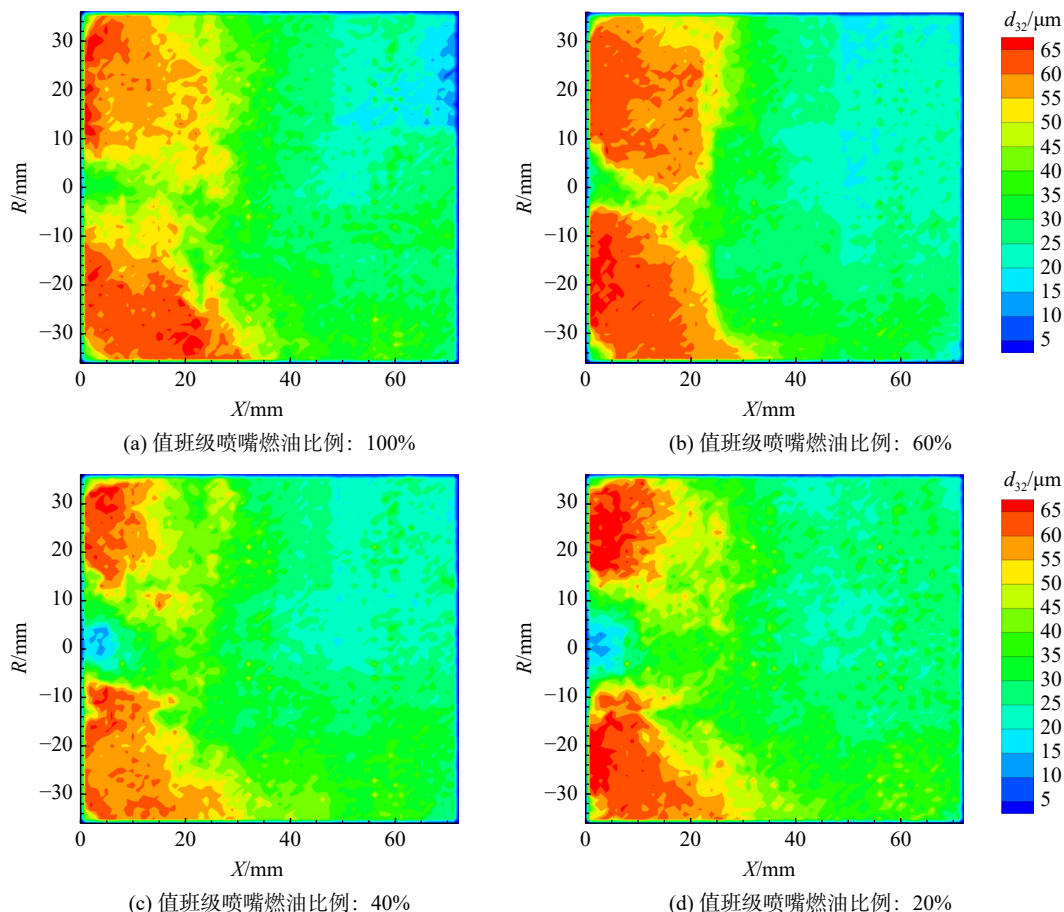


图 11 方案 B 不同燃油比例全场  $d_{32}$  分布

Fig. 11 Distribution of  $d_{32}$  for different fuel ratios about Plan B

方案 B 表明随着值班级燃油比例的减小,富油头部区域内油珠粒径最大区域( $d_{32}$  约为  $65\ \mu\text{m}$ )逐渐由中心  $R=0\ \text{mm}$  附近沿径向外侧分布,原因是值班级喷嘴的燃油比例缩小,虽然值班级喷嘴自身的雾化效果减弱,但进口来流条件不变,燃油相对被更强的一级旋流器切向气流剪切,使得破碎更剧烈,所以大油珠逐渐沿半径外侧移动;另一方面主燃级喷嘴为直射式喷嘴,其喷射方向与轴向存在沿径向外侧的夹角,嘴燃油比例增加自身的雾化增强,但直射燃油的破碎距离长,更依赖于气动条件的作用,喷嘴自身的破碎剪切力增加程度小于同样气动力下对燃油的剪切力,所以燃油破碎困难,故在直射式喷嘴下游以及径向外侧存在着较大的油珠。沿着下游流动,随着值班级燃油流量的减小,下游  $d_{32}$  范围在  $20\sim 30\ \mu\text{m}$  附近的油珠所占区域逐渐出现略微减小。

方案 C 随着值班级喷嘴燃油的减少,全场的分布趋势基本一致,故仅展示方案 C 两个工况下的  $d_{32}$  分布云图;图 12(a) 中燃油在富油头部区域内呈锥形对称分布,大粒径的油珠分布在油雾锥区域上,向下游运动过程中油珠粒径逐渐减小,在油珠稀疏区内油珠粒径分布差异较小,大部分区域的油珠粒径在  $35\ \mu\text{m}$  附近。随着值班级喷嘴燃油的减小,在下游区域油珠  $d_{32}$  在  $20\sim 30\ \mu\text{m}$  左右,分布基本均匀;图中小油珠主要分布在轴向中心区域,原因是油珠在下游运动过程中破碎和蒸发同时进行,径向外侧和上游区域的油珠通过回流区的作用、由于回流区中心的压力较低,两侧的较小的油珠在压差的作用下被带至中心,该区域油珠数目较少(结果如图 12(b) 所示),同时油珠粒径较小,最终下游中心区域  $d_{32}$  较小。图 12(c) 油雾锥分布不对称,图 13 为慢车工况下燃烧室流

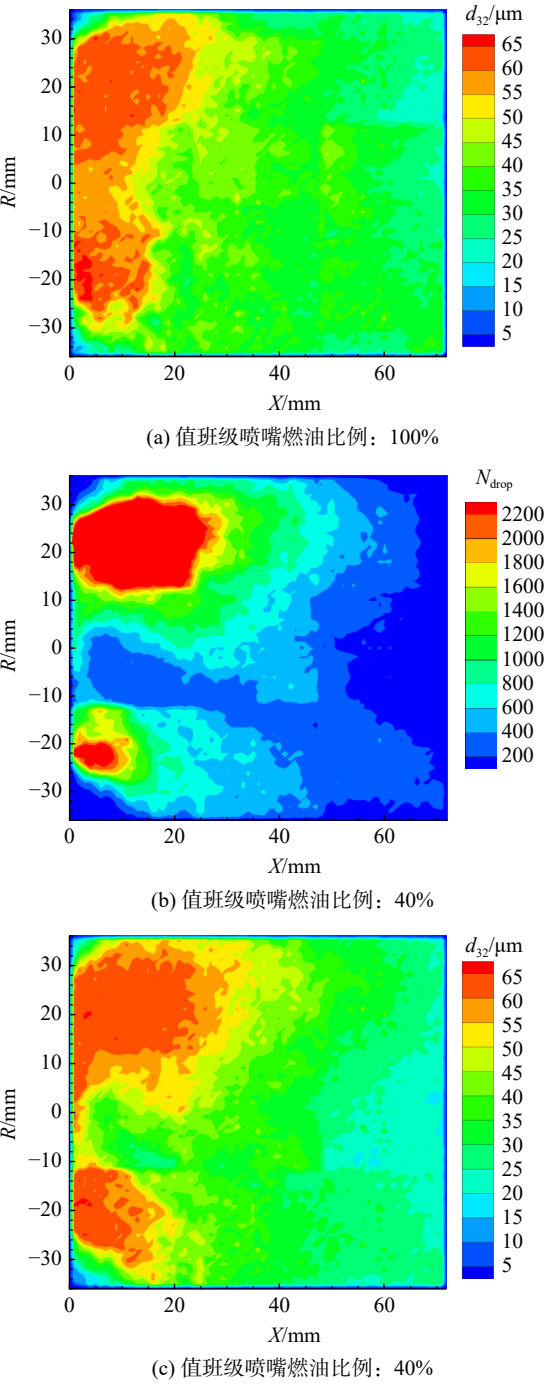


图 12 方案 C 不同燃油比例全场  $d_{32}$  和油珠数目分布  
Fig. 12 Distribution of  $d_{32}$  and droplets number for different fuel ratios about Plan C

线示意图, 图中  $U$  为轴向速度, 该图表明主燃区内的流场涡团不对称, 下侧的涡团较大, 使得燃油被挤压至上侧集中。

表 4 和表 5 展现了方案 B 和 C 在不同燃油比例全场平均  $d_{32}$  结果, 结果表明在全场平均  $d_{32}$  基本不随燃油比例而变化。以上结果表明随着燃油比例变化主要是富油头部区域轴向中心的粒径和数目会变化, 其他基本无影响。

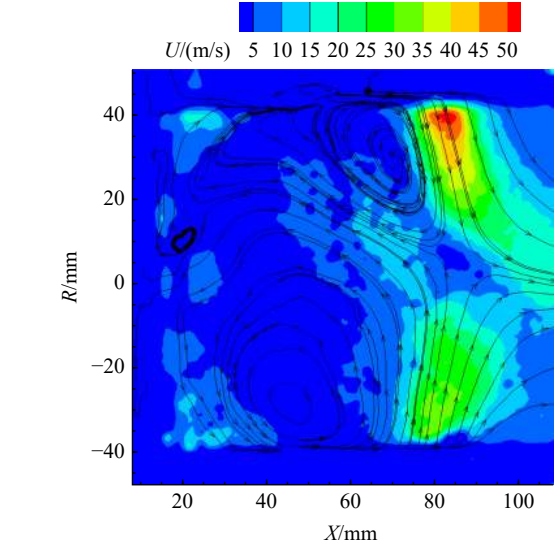


图 13 方案 C 慢车工况下流线分布  
Fig. 13 Distribution of streamlines for Plan C at idle condition

| 表 4 方案 B 全场平均 $d_{32}$                            |                           |
|---------------------------------------------------|---------------------------|
| Table 4 Average $d_{32}$ of full zones for Plan B |                           |
| 值班级燃油比例/%                                         | 全场平均 $d_{32}/\mu\text{m}$ |
| 80                                                | 58.3                      |
| 60                                                | 56.2                      |
| 40                                                | 54.4                      |
| 20                                                | 56.7                      |

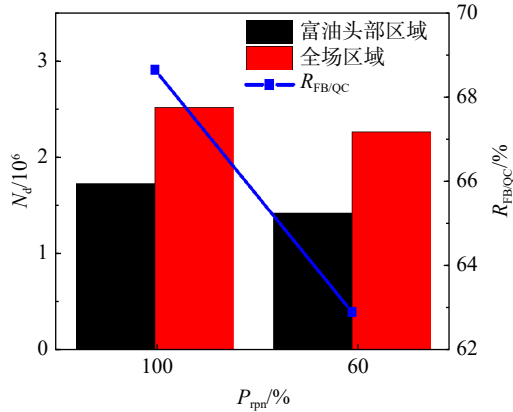
| 表 5 方案 C 全场平均 $d_{32}$                            |                           |
|---------------------------------------------------|---------------------------|
| Table 5 Average $d_{32}$ of full zones for Plan C |                           |
| 值班级燃油比例/%                                         | 全场平均 $d_{32}/\mu\text{m}$ |
| 100                                               | 53.9                      |
| 80                                                | 54.8                      |
| 60                                                | 53.2                      |
| 40                                                | 55.95                     |
| 20                                                | 55.2                      |

2.3 头部富油区域与全场油雾对比

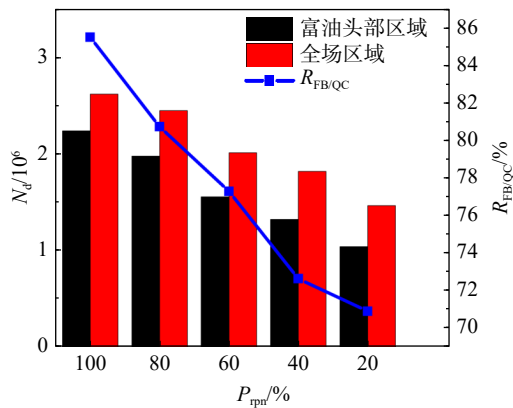
前述试验结果可以看到, 头部富油区域以及油珠稀疏区在油珠数目、油珠粒径分布上存在着明显差异。图 14 展示了富油头部区域和全场油珠数目的对比, 图中横坐标  $P_{\text{rpn}}$  (%) 表示值班级燃油比例, 其中下标 rpn 为 ratio of pilot nozzle 的缩写。图中  $N_d$  代表空间中的油珠数目,  $R_{\text{FB/QC}}$  代表富油头部的油珠数目占全场区域油珠数目的比例。

图 14 结果表明对于不同工况下的不同的头部方案富油头部区域占 1/3 的测量区域, 但其油珠数目占全场油珠数目均超过了 50%, 说明富油

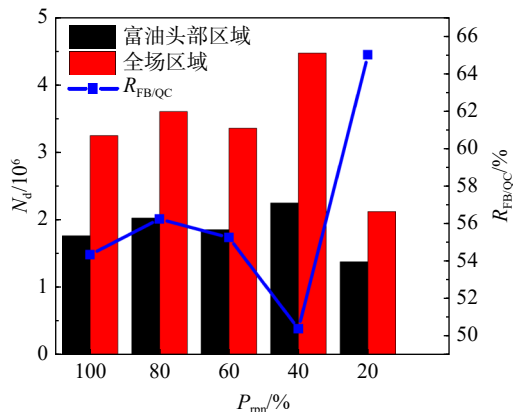
头部上油珠数目在整个油雾场中最集中;油珠在下游的减少主要是由于流场对于油珠的卷吸使得油珠不仅仅向中心流动,同时向油雾锥外侧流动,其次在稀疏区油珠粒径小与流场的速度差较小,剪切力减弱,但是下游区域的油珠由于在燃烧室中停留的时间更长,油珠接受的热量更多,使下游的油珠相对上游蒸发的更快,粒径变小。图14(a)中,方案A两个工况在 $F_B$ 区域内油珠数目



(a) 方案A



(b) 方案B



(c) 方案C

图14 不同方案下富油头部区和全场油珠数目对比示意图  
Fig. 14 Schematic of comparison of number of droplets between Rich head filed with whole area for different plans

占比主要在62%~69%,只开启值班级喷嘴下头部富油的油珠比例更大;图14(b)与方案A相比,同样工况下,方案B的富油头部区域占比(超过70%)要大于方案A,方案B在值班级燃油占比100%和60%的 $F_B/Q_C$ 分别占比为85%和76%,表明折流板的改变使得头部富油区域内燃油更加集中。图14(c)中方案C的头部富油区域油珠数目占全场比例主要在50%~65%范围内,较方案B在全场的分布要更均匀。

图15通过定义 $D_{\text{dif}} = \left( \frac{d_{32(\text{FB})} - d_{32(\text{QC})}}{d_{32(\text{QC})}} \right) \times 100$ 表示头部富油区的平均 $d_{32(\text{FB})}$ 与全场平均 $d_{32(\text{QC})}$ 的差异。图15的共同点是头部富油的平均 $d_{32}$ 大于全场平均 $d_{32}$ ;相同工况下方案B的 $d_{32}$ 差异要小于方案A,原因是下游油珠粒径和数目较小,计算全场 $d_{32}$ 时接近富油头部区域的平均 $d_{32}$ ,再次论证折流板对油雾场的影响。不同燃油比例下方案B的DIF变化如图15(b),随燃油比例减小,全场平均 $d_{32}$ 和头部富油区域的平均 $d_{32}$ 差异值 $D_{\text{dif}}$

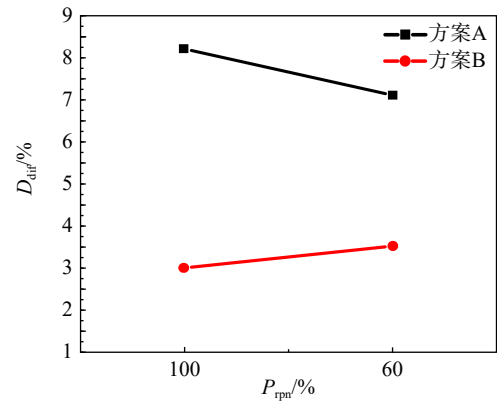
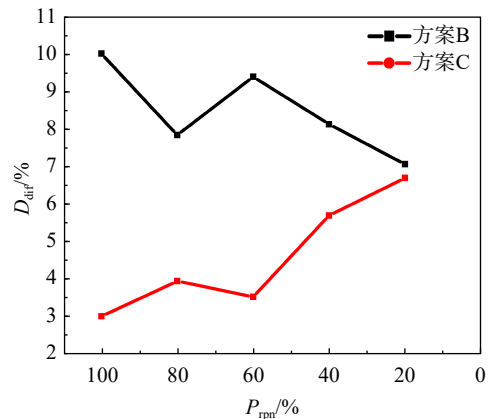
(a) 方案A和方案B的 $D_{\text{dif}}$ 变化(b) 不同燃油下方案B和方案C的 $D_{\text{dif}}$ 变化

图15 富油头部区域与全场区域平均 $d_{32}$ 差异水平示意图  
Fig. 15 Schematic of the average  $d_{32}$  difference between the fuel-rich head area and the whole area

增大, 尽管富油头部区主燃级直射式喷嘴燃油仍然有较大粒径的油珠, 但一方面富油区的雾化变差, 另一方面油珠运动至下游一定距离后破碎增多, 同时三级旋流器作用增强使得下游剪切更大, 导致下游油珠数目增大, 粒径减小; 方案 C 对比其他头部方案,  $d_{32}$  差异较大, 不同燃油比例下  $d_{32}$  的 DIF 差异不大, 认为影响方案 C 的结果来自于

流场不均匀对油珠的剪切作用和以及油珠自身的蒸发。

#### 2.4 不同工况下全场油珠信息

不同工况和不同头部方案下油雾场中油珠数量及体积随粒径的分布如图 16 所示, 图中  $d$  表示油珠粒子的直径, 其中图 16(a)、图 16(c)、图 16(e) 表明油滴数目随粒径的增大先增大后减小, 呈现

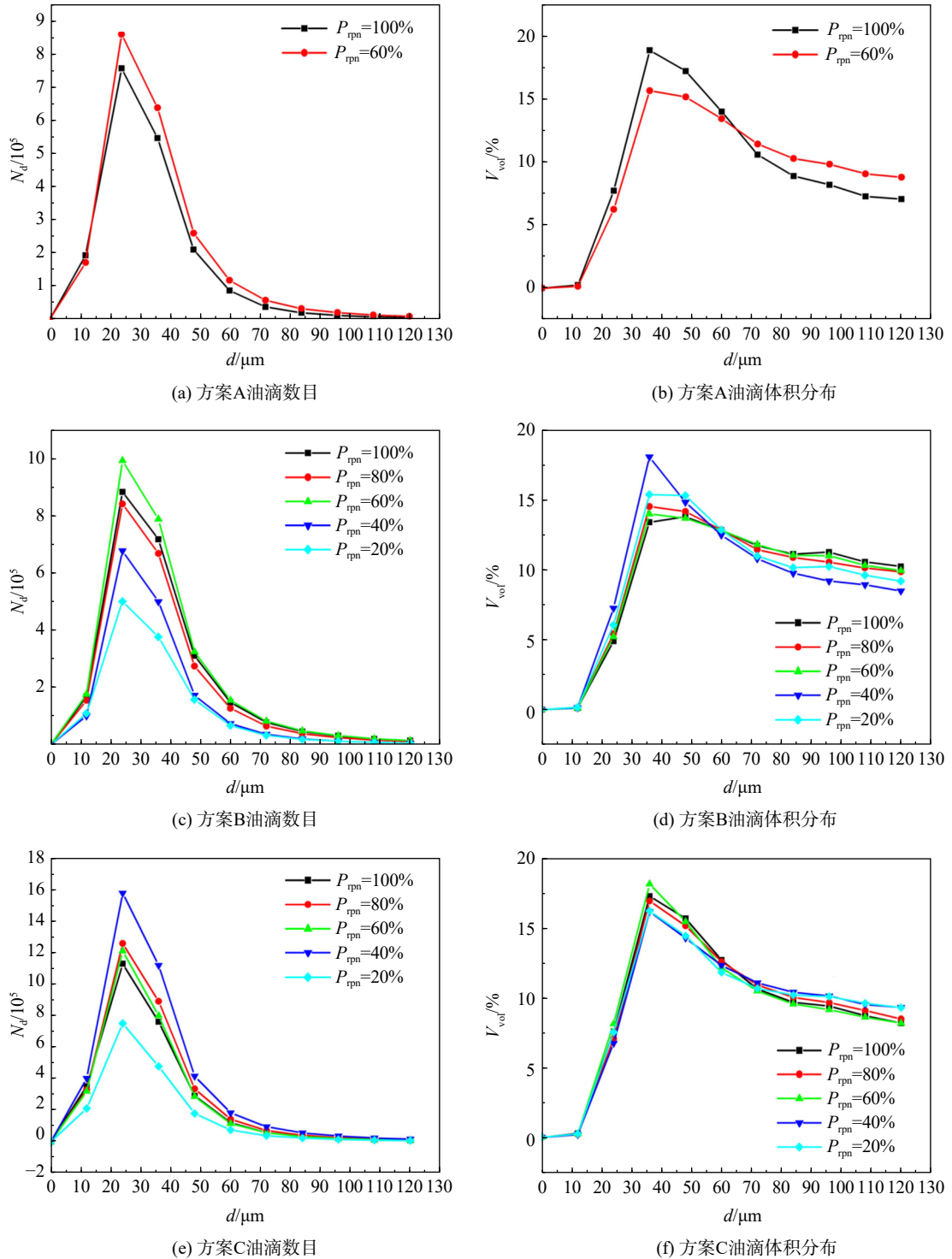


图 16 不同工况下油珠数量及体积随粒径的分布规律

Fig. 16 Distribution of fuel droplets number and volume with particle size for different conditions

单峰分布;图中粒子数目最多的粒径是  $25\text{ }\mu\text{m}$  附近的粒子,其次是  $40\text{ }\mu\text{m}$  附近的粒子数目也较多,粒径大于  $70\text{ }\mu\text{m}$  的粒子数目较少;图 16(b)、图 16(d)、图 16(f)表明油滴体积分分数分布随粒径的增大先增大后逐渐缓慢减小,其中体积分分数占比最大的粒径是  $40\text{ }\mu\text{m}$ ,对比分析油珠数目分布和体积分分数,表明粒子数目最多的粒径,体积分分数并非最大,主要是粒子数目最多的占据的粒径较小;粒径较大的粒子数目较小,但总体积占比较大;不同工况下粒子数目较多的粒径处于  $25\sim 40\text{ }\mu\text{m}$ ,而  $40\sim 50\text{ }\mu\text{m}$  之间油珠所占的体积分分数最大。

### 3 结 论

本文利用 PIV 测量油雾图像与图像后处理技术相结合方法对慢车工况下中心分级燃烧室的三种不同头部方案和不同的主副级燃油比例的油雾场空间分布特性进行试验研究。研究结果如下:

1) 各头部方案中大粒径油珠在头部富油区呈锥形对称分布;在头部富油区内,油珠  $d_{32}$  沿径向呈 V 型分布,即  $d_{32}$  中间小、两侧大,在下游稀疏区域油珠粒径较小,并且在径向方向上分布均匀。

2) 头部旋流器折流板扩张角减小、高度减小主要影响富油头部区域的油珠数目及大小分布,使得油珠数目集中,平均  $d_{32}$  较大;特别对只开启值班级喷嘴时影响最大。

3) 来流条件和油气比一定时,改变主副级燃油比例对燃烧室雾化效果影响不大,但会影响富油头部粒径的径向分布。

4) 燃烧室中油珠主要集中分布在富油头部区域,油珠数目占整个油雾场 50% 以上,同时富油头部区域的平均  $d_{32}$  较全场大。

5) 油雾场中油珠数目最多的油珠粒径为  $25\text{ }\mu\text{m}$ ,其次是  $35\text{ }\mu\text{m}$ ;油雾场中体积分分数最大的油珠粒径范围为  $35\sim 50\text{ }\mu\text{m}$ 。

上述中心分级燃烧室慢车工况下油雾特性研究结果为中心分级燃烧室和喷嘴的优化匹配设计提供相应的支撑。

### 参考文献:

[1] 刘大响,金捷,彭友梅,等.大型飞机发动机的发展现状和关键技术分析[J].航空动力学报,2008,23(6):976-980.  
LIU Daxiang, JIN Jie, PENG Youmei, et al. Summarization of development status and key technologies for large airplane engines[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(6): 976-980. (in Chinese)

[2] BAHR W W, GLEASON C C. Experiment clean combustor pro-

gram: phase 1 final report[R]. NACA-CR-134737, 1975.

[3] 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.

[4] 刘富强,穆勇,刘存喜,等.燃油分级对中心分级燃烧室 NOx 排放的影响[J].燃烧科学与技术,2013,19(3):254-260.  
LIU Fuqiang, MU Yong, LIU Cunxi, et al. Influence of fuel stage proportion on NOx emission from central stage combustor[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2013, 19(3): 254-260. (in Chinese)

[5] 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 characteristics in model combustor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009. (in Chinese)

[6] 朱嘉伟. LPP 低污染燃烧室头部方案研究[D].南京:南京航空航天大学,2013.  
ZHU Jiawei. Research on the heads projects of LPP low emission combustor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)

[7] 金仁瀚,刘勇,冯志鹏,等.双旋流燃烧室单头部油雾特性实验[J].航空动力学报,2014,29(2):250-258.  
JIN Renhan, LIU Yong, FENG Zhipeng, et al. Experiment on spray characteristic of single head of dual-swirl cup combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(2): 250-258. (in Chinese)

[8] 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 & Astronautics, 2013, 45(4): 453-460. (in Chinese)

[9] 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.  
LIU Yian, GUO Zhihui, ZHANG Man. Experimental investigation on spray characteristics of internally-staged combustor[J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(8): 1824-1831. (in Chinese)

[10] 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):1634-1654.  
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): 1634-1654. (in Chinese)

[11] 傅江坤,周建华,郭志辉.中心分级燃烧室预燃级的喷雾特性研究[J].推进技术,2020,41(6):1305-1313.  
FU Jiangkun, ZHOU Jianhua, GUO Zhihui. Experimental investigation on pilot spray characteristics of internally-staged combustor[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(6): 1305-1313. (in Chinese)

[12] 陈登炳.中心分级燃烧室头部油雾场试验研究[D].南京:南京航空航天大学,2019.  
CHEN Dengbing. Experimental study on fuel spray field of the central-staged combustor head[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese)

[13] CAI J, JENG S M, TACINA R. The structure of a swirl-stabilized reacting spray issued from an axial swirler[C]//43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. Reston: AIAA, 2005: 14-24.

[14] FELDEN A. Development of analytically reduced chemistries (ARC) and applications in large eddy simulations (LES) of turbulent combustion[D]. France: Institut National Polytechnique de

- Toulouse, 2017.
- [15] FAN Xiongjie, XU Gang, LIU Cunxi, et al. Experimental investigations of the flow field structure and interactions between sectors of a double-swirl low-emission combustor: effects of main stage swirl intensity and venturi angle[J]. *Journal of Thermal Science*, 2020, 29(1): 813-819.
- [16] YAN Yingwen, WANG Yajun, DENG Yuanhao, et al. Fuel spray characteristics investigation in LPP combustor[J]. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2016, 88(4): 498-507.
- [17] LUCAS E, MA P C, MAYHEW E, et al. Fuel effects on lean blow-out in a realistic gas turbine combustor[J]. *Combustion and Flame*, 2017, 181: 82-99.
- [18] WOOD E J, MCGANN B, MOTILY A, et al. Impact of fuel properties on combustor jet fuel spray breakup, analyzed using high-speed phase contrast imaging[R]. AIAA 2020-0522, 2020.
- [19] OPACICH K C, HEYNE J S, PEIFFER E, et al. Analyzing the relative impact of spray and volatile fuel properties on gas turbine combustor ignition in multiple rig geometries[R]. AIAA 2019-1434, 2019.
- [20] 李继保, 胡正义. 高温升高热容燃烧室设计技术分析[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2000, 13(4): 5-8.
- LI Jibao, HU Zhengyi. Design technology for high-temperature rise and high-heat capacity combustor[J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2000, 13(4): 5-8. (in Chinese)
- [21] LEFEBVRE A H. Fuel effects on gas turbine combustion: ignition, stability, and combustion efficiency[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, 1984, 107(24): 23-37.
- [22] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册: 第9册 主燃烧室设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000: 189-190.

(编辑: 张 雪)