

文章编号: 1000-8055(2012)11-2421-08

TAPS/MLDI 低污染燃烧室油雾特性

徐 榕, 赵坚行, 刘 勇, 颜应文, 王锁芳
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 采用粒子图像测速仪对一个带多点贫油直接喷射双环预混旋流燃烧室头部的低污染燃烧室油雾场进行了测量, 试验研究不同燃油喷射方式时燃油流量变化对油雾特性的影响。结果表明: 在试验工况下, 粒径 $40\mu\text{m}$ 左右的油珠数目最多, 大于或小于此粒径的油珠数目都较少; 单开值班级喷嘴时, 随着燃油流量增加, 燃油雾化变差; 单开主燃级喷嘴时, 增加燃油流量使燃油雾化稍有改善。同时打开值班级和主燃级喷嘴, 保持油气比不变时, 值班级和主燃级燃油量分配比例改变对燃油雾化特性的影响不大。

关 键 词: 多点燃油直接喷射; 双环预混旋流低污染燃烧室; 粒子图像测速仪; 油雾特性; 燃油雾化
中图分类号: V231.1 **文献标志码:** A

Fuel spray characteristic of TAPS/MLDI low emission combustor

XU Rong, ZHAO Jian-xing, LIU Yong,
YAN Ying-wen, WANG Suo-fang

(College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A particle image velocimetry (PIV) was employed to measure fuel spray fields of the TAPS/MLDI (twin annular premixing swirler/multipoint lean direct injection) low emission combustor under different inlet conditions. The influences of different fuel flow rates with various fuel injection fashions on fuel spray characteristic of the low emission combustor were experimentally investigated. Results show that: the number of droplet with the size of $40\mu\text{m}$ reaches maximum under experimental conditions. The number of droplet, which is larger or smaller than the droplet size of $40\mu\text{m}$, hardly decreases. When the pilot fuel atomizer is operated, the fuel atomization is worsened with the increase of the fuel flow rate. When the primary fuel injector is operated, the fuel atomization is slightly improved with the increase of the fuel flow rate. When the pilot and primary atomizer are operated at the same time, the inlet fuel air ratio is the same, and the effect of the decrease of primary fuel flow rate and increase of pilot fuel flow rate on the fuel atomization is weak.

Key words: multipoint lean direct injection (MLDI);
twin annular premixing swirler (TAPS) low emission combustor;
particle image velocimetry (PIV); fuel spray characteristic;
fuel atomization

收稿日期: 2011-11-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20121115.1028.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金(50906040); 中央高校基本科研业务费用专项资金(N22012107)

作者简介: 徐榕(1982—), 男, 江苏吴江人, 博士生, 主要研究方向为航空发动机燃烧室燃烧试验与数值仿真。

现今,随着民用航空迅速发展,航空发动机向大气排放的污染物剧增.航空发动机排放的污染物主要有 CO_2 、 NO_x 、 CO 、碳烟、未燃烃(UHC)和 SO_x 等,这些有害物质对人类及大气环境造成了严重的危害.因此,在提高航空发动机性能同时,必须降低污染物排放.低污染燃烧技术已成为发展我国民用航空发动机事业亟待突破的关键技术之一.

为了控制航空发动机的污染物排放,世界各国都对低污染燃烧技术开展了广泛的研究,先后发展了多种低污染燃烧室^[1-2],主要有:分级燃烧室^[3](staged combustor)、变几何燃烧室(variable geometry combustor, VGC)、催化燃烧室(catalytic combustor)、贫油预混预蒸发燃烧室^[4](lean premixed prevaporized, LPP)、富油燃烧/淬熄/贫油燃烧^[5](rich-burn, quick-mix, lean-burn, RQL)燃烧室、双环预混旋流燃烧室(twin annular premixing swirler, TAPS)以及陶瓷基复合材料(ceramic matrix composite, CMC)燃烧室等几种.其中,双环预混旋流(TAPS)燃烧室^[6](见图1)污染物排放比目前标准低 85%,通用电气公司(GE)利用此项技术开发了 2 种双环预混燃烧室^[7]:一是 CFM56-7B 发动机的单环腔燃烧室 Tech56/CFM SAC TAPS,另一为 GE90-94B 发动机的双环腔燃烧室 GE90 DAC TAPS.这 2 种燃烧室在着陆/起飞时 NO_x 排放量较目前生产的富油头部双环腔(GE90-94BDAC)燃烧室降低了 50%左右.现该型燃烧室用于正在研制的 GENx 发动机中,GENx 的 TAPS 燃烧室所产生的 NO_x 排放值分别比富油头部单环腔(CFM56SAC)和双环腔(GE94BDAC)燃烧室降

低 46%和 22%.同时,TAPS 燃烧室还具有大幅降低烟尘和碳粒排放的潜力.

为了更好地降低发动机排气污染,文献[8-9]还对贫油直接喷射(clean direct injection, LDI)低污染燃烧技术开展了研究,该技术采用多点直接喷射把燃油喷入燃烧室内,多点喷射可大大增加燃油与空气接触面积,促使燃油与空气快速混合形成均匀贫油混气进行燃烧,消除局部过热点,从而抑制 NO_x 的排放.研究表明:将 LDI 技术与其他低污染燃烧方案一起配合使用,效果会更好.

在燃烧室中,燃油雾化、蒸发,并与空气混合形成一定分布的可燃混气,此混气形成对燃烧过程有重要影响.其中燃油雾化质量和浓度分布对提高燃烧效率、出口温度场、排气冒烟和污染物排放等燃烧性能指标起着至关重要的作用.为此,不少国内外学者对燃烧室油雾场进行了细致的试验研究,采用以现代光学方法为基础的激光多普勒测速仪(laser Doppler velocimeter, LDV),相位多普勒粒子分析仪(phase Doppler particle analyzer, PDPA)和粒子图像测速仪(particle image velocimetry, PIV)等测试技术来测量油雾场.例如文献[10]对装有单级轴向旋流器的石英玻璃圆筒燃烧室内油雾燃烧流场进行研究,分别利用 LDA 和 PDPA 测量气流和油珠的速度分布以及油珠尺寸分布.文献[11]采用 PDPA 测量了不同旋流数时突扩旋风筒内气粒两相流的速度场,试验研究不同旋流数下气粒两相流的紊流特性变化规律.文献[12]利用 PDA 对模型燃烧室内的冷态喷雾场进行试验研究,分析不同喷雾压力和旋流器对喷雾场的影响.

虽然 PDPA 和 PIV 都可测量油雾场,但前者需逐点测量燃烧室内某一处油珠粒径及其速度分布,用它测量整个燃烧室油雾场需要多次测量,工作量非常大,并且需要较长的测量周期,难度较大.而后者突破了单点测量的局限性,可在同一时刻测量燃烧室全场内油珠尺寸及其速度分布^[13],测量精度高,速度快,故逐渐广受关注.

为此,本文采用 PIV 测试技术,对带有多点燃油直接喷射双环预混旋流(twin annular premixing swirler/multipoint lean direct injection, TAPS/MLDI)燃烧室头部的低污染燃烧室^[14]油雾场进行测量,试验研究在不同燃油喷射方式下燃油流量变化对 TAPS/MLDI 低污染燃烧室油雾特性的影响,以便对该燃烧室优化设计提供有用的依据.

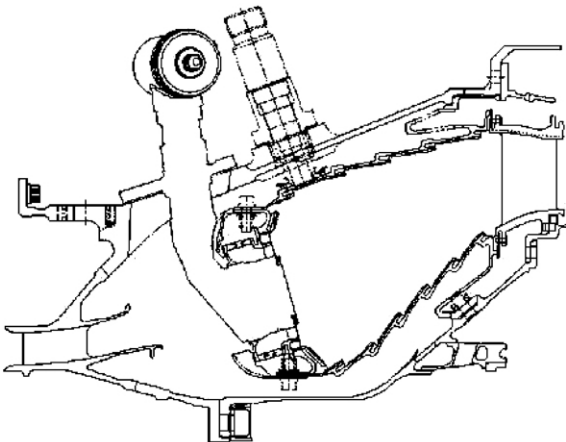


图 1 Tech56/CFM TAPS 燃烧室
Fig. 1 Combustor of Tech56/CFM TAPS

为了便于试验研究,本文所用的试验燃烧室为圆筒形的 TAPS/MLDI 低污染燃烧室,它是由 TAPS/MLDI 燃烧室头部和圆筒形燃烧室 2 部分组成,该燃烧室头部采用双环预混旋流与多点贫油直接喷射相组合的低污染燃烧技术.如图 2 和 3 所示,它包括值班级和主燃级(又称主混合器)2 部分,其中值班级由一个 2 级轴向旋流器、文氏管、套筒和单路离心喷嘴等组成;主燃级由一个径向旋流器、空腔和沿圆周方向均布的多个燃油直接喷射孔等组成.

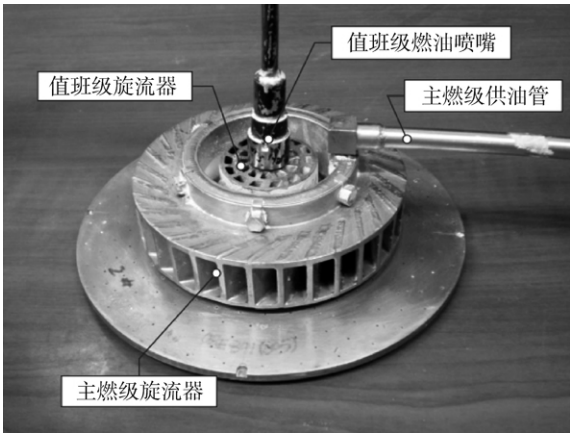


图 2 TAPS/MLDI 试验燃烧室头部实物

Fig. 2 Photograph of TAPS/MLDI test combustor header

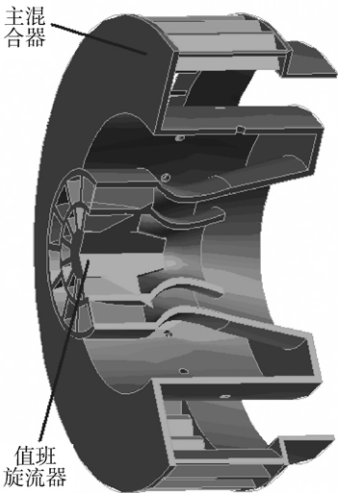


图 3 主混合器和值班旋流器组合图

Fig. 3 Schematic of main mixer and pilot swirler assembly

燃油可分别从值班级离心喷嘴和主燃级多点直接喷射孔 2 处喷射(如图 4 所示).从值班级离心喷嘴喷出油雾锥,在 2 股旋向相同的值班旋流作用下被雾化成细微油滴,并与旋流空气迅速掺混,形成可燃混气,在低污染燃烧室主燃区内进行燃烧,提供不同工况下的稳定点火源.主燃级燃油

通过多点直接喷射孔喷出多股燃油射流进入低污染燃烧室后,在主旋流作用下迅速均匀混合形成贫油混气,进行贫油预混燃烧,减少了 NO_x 的生成量.本燃烧室头部方案中,多点直接喷射的燃油在值班级和主燃级 2 股旋流作用下,进一步改善雾化与掺混质量,促使油气均匀混合,提高贫油预混燃烧性能,从而进一步抑制 NO_x 排放.



图 4 TAPS/MLDI 燃烧室燃油喷射方式

Fig. 4 Fuel injection fashion in TAPS/MLDI combustor

1 试验及测量系统

1.1 试验系统

为了满足 PIV 测量油雾场对光路要求,在试验燃烧室筒体顶部与侧面分别开有 2 个相互垂直的石英玻璃观察窗口,其中一个作为 PIV 激光入射窗口,另一个作为 CCD 相机捕捉粒子图像的观测窗口使用.

油雾场试验系统如图 5 所示,气源由 1 台空气压缩机提供,气流经稳压罐稳压后流经 1 台电加热器进行加热,以确保在进行油雾场测量时提

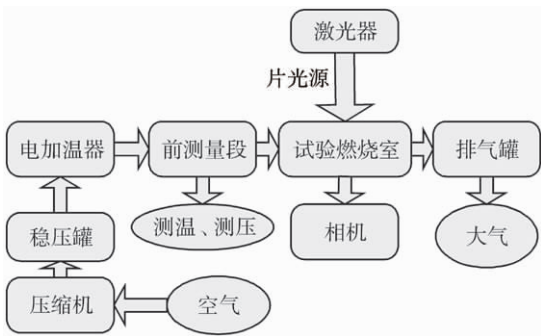


图 5 油雾场试验系统简图

Fig. 5 Experimental system sketch of fuel spray fields using PIV

供试验所需的进口气流温度. 加热后的气流依次进入前测量段和试验燃烧室, 燃油分别从该燃烧室头部值班级离心喷嘴和主燃级多点直接喷射孔喷出, 与空气旋流相互作用被雾化为细小的油珠. 油雾经 PIV 测量后, 随着燃烧室内气流一起进入排气罐, 经净化后排放到大气中.

1.2 测量试系统及测量原理

试验采用 1 台粒子图像测速仪(PIV)测量燃烧室头部油雾场, PIV 系统激光器通过光臂将一束片状激光从试验燃烧室顶部石英玻璃观测窗口射入(如图 6 所示), 照亮燃烧室纵向中心截面的燃油喷雾, CCD 相机通过与片状平面激光相互垂直的观测窗拍摄燃烧室内燃油喷雾图像.

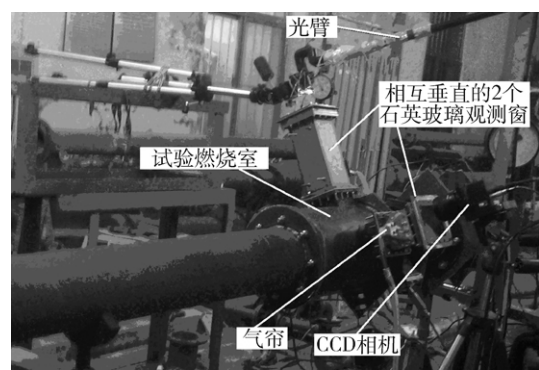


图 6 PIV 油雾场试验设备实物图

Fig. 6 Photograph of spray field test facility with PIV

由于试验燃烧室形状的限制, 石英玻璃观察窗口不可能开得很大, 激光拍摄区域为燃烧室旋流器出口下游中心截面 80 mm×80 mm 的矩形区域. 为了从图像中分辨出较小的油珠, 更详尽了解燃烧室内油珠粒径分布, 采取分区法^[15]将测量区域分为Ⅰ~Ⅳ等 4 部分, 分别对其进行拍摄(见图 7).

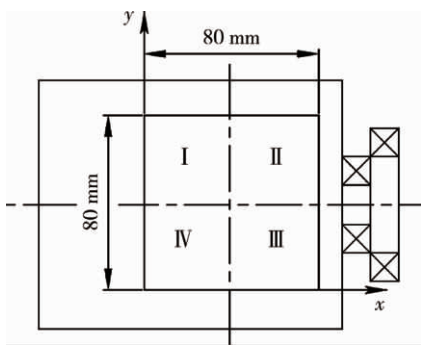


图 7 油雾场测量分区示意图 ($z=0\text{ mm}$)

Fig. 7 Schematic of measure zones of spray field ($z=0\text{ mm}$)

在 PIV 油雾场测试中, 为了得到油珠粒径分布, 本文利用自主编制的图像处理程序对 PIV 拍摄得到的油雾场图像进行处理, 得到油珠粒径分布等油雾特性. 在提取粒径分布等信息之前, 预先对图像进行灰度处理, 改善图像质量. 在灰度图像中提取油珠轮廓主要通过边缘检测方法, 该法利用图像区域属性发生突变处存在边缘来实现对图像的分割. 目前常用边缘检测算法有 Sobel 和 Roberts 法等, 考虑到 Roberts 法是采用对角方向相邻的 2 个像素值之差进行像素边界强度计算, 所得油珠边缘的检测效果要优于 Sobel 法, 因此本文采用 Roberts 法提取油珠信息. 即利用局部差分算子寻找油珠边缘, 其油珠边缘像素可表示为

$$g(x,y)=\{[f(x,y)-f(x+1,y+1)]^2+[f(x+1,y)-f(x,y+1)]^2\}^{1/2}$$

式中 $f(x,y)$ 和 $g(x,y)$ 分别为输入和输出图像的像素值.

利用上式对图像中像素进行处理后, 再进行阈值化处理和数量统计, 完成对目标的边缘提取. 图 8 为未经处理的不同粒径油珠分布的原始数字图像. 图 9 为经数字图像处理得到的油珠粒径分布图. 最后对多张处理得到的油珠分布图进行统计平均, 得到油珠的时均分布, 其中包括油珠总数, 平均粒径, 不同粒径段油珠数目及其体积分数. 此外, 将二维平面上 80 mm×80 mm 的区域分割为 1 mm×1 mm 总计 6 400 个小区域, 可统计得到每个小区域中油珠数目, 索太尔平均直径(SMD)、体积分数等参数, 作为分析油珠二维平面分布规律的依据.

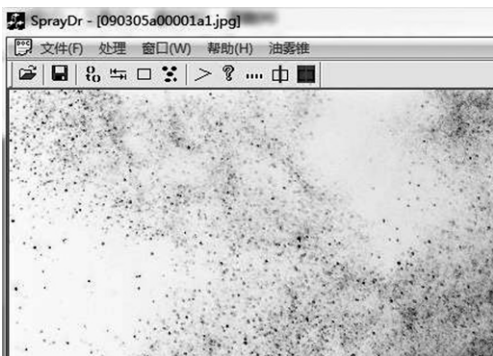


图 8 油珠分布的原始数字图像

Fig. 8 Original digital image of droplets

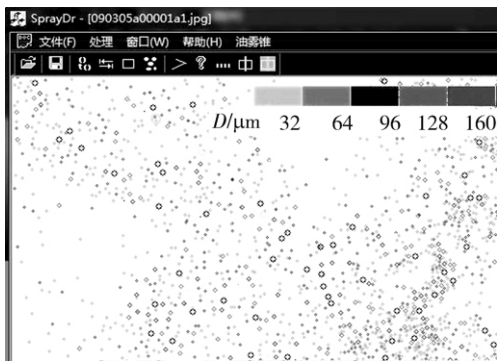


图 9 经数字图像处理后不同粒径油珠分布图

Fig. 9 Distributions of different droplet sizes under digital image treatment

2 试验结果及分析

本试验工况是模拟航空发动机慢车工况,进口气流参数:空气流量 0.148 kg/s,总温 475 K,总燃油流量 3.9 g/s. 试验研究单开值班级或主燃级喷嘴以及同时打开值班级和主燃级喷嘴等不同燃油喷射方式时燃油流量配比变化对试验燃烧室油雾特性的影响. 各试验工况如表 1 所示. 测量平面为燃烧室中心纵截面 ($z=0$ mm). 部分试验结果如图 10~图 21 所示.

表 1 油雾场试验工况

Table 1 Experimental case of fuel spray fields

工况	进气温度/ K	值班级燃油 配比/%	主燃级燃油 配比/%
1	475	15	0
2	475	15	85
3	475	0	85
4	475	30	0
5	475	30	70
6	475	0	70
7	475	50	0
8	475	50	50
9	475	0	50

图 10~图 12 分别为单开值班级喷嘴(工况 1)时燃烧室中心截面油珠粒径、数目及体积分数分布.

从图 10 和图 11 中可看出,燃油从喷嘴喷出后在气动力作用下呈一定张角跟随气流运动,位于喷雾锥附近油珠的粒径和数目都较大. 其后,随着轴向距离增加,油珠不断向周围气体吸热蒸发,

其粒径不断减小直至部分油珠完全蒸发消失,因此下游的油珠数目较少.

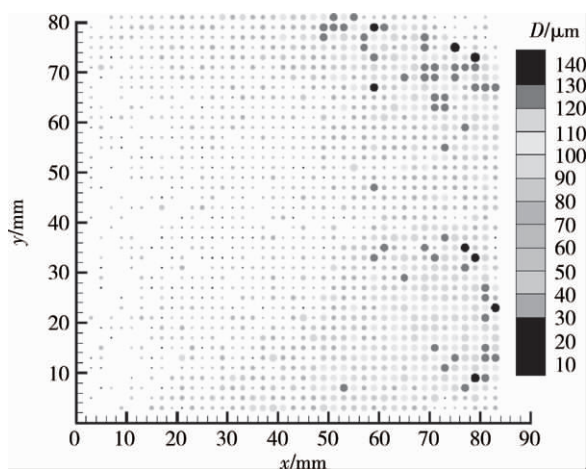


图 10 油珠粒径分布图(工况 1)

Fig. 10 Distributions of fuel droplet diameter (Case 1)

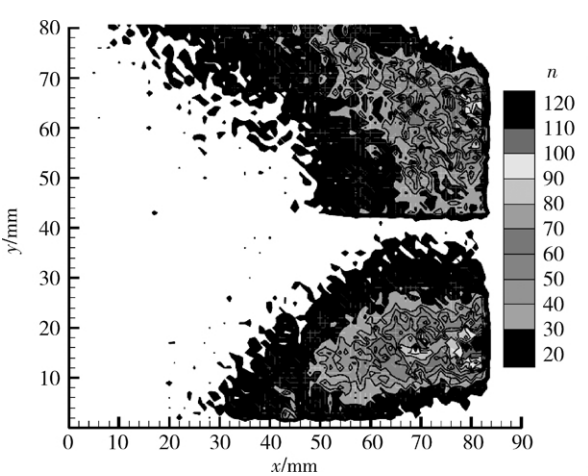


图 11 油珠数目分布(工况 1)

Fig. 11 Profiles of fuel droplet number(Case 1)

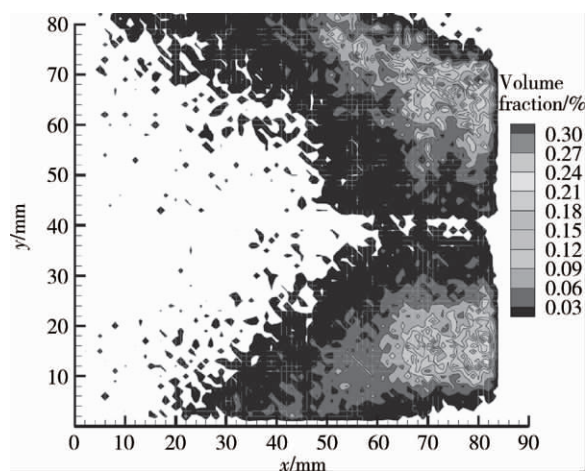


图 12 油珠体积分数分布(工况 1)

Fig. 12 Profiles of fuel droplet volume fraction (Case 1)

图 12 所示的油珠体积分数为在该处油珠的体积与总体积的百分比,从图中可以明显看出,在油雾锥附近区域油珠体积分数比较大,在其他区域,油珠体积分数迅速下降.

图 13~图 15 分别为同时打开值班级和主燃级喷嘴(工况 2,5 和 8),值班级和主燃级喷嘴燃油量分配比例分别为 15% 和 85%,30% 和 70% 以及 50% 和 50% 情况下,燃烧室中心截面上油珠 SMD 沿程分布,油珠数目与油珠体积分数分布图.由图 13 可知,位于喷雾锥附近的油珠粒径较大,但随着轴向距离加大,油珠不断吸热蒸发,油珠数目不断减少,SMD 也逐渐缩小.在总燃油量相同情况下,随着主燃级燃油量减少以及值班级

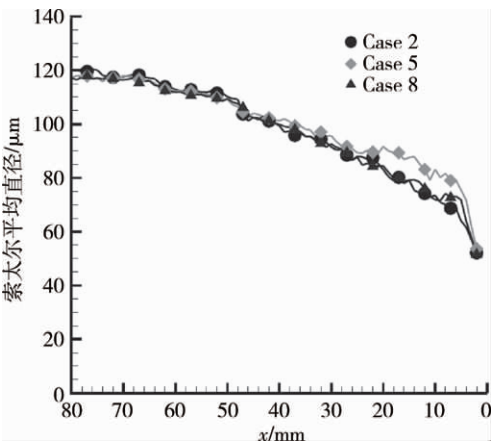


图 13 不同燃油流量分配时油珠 SMD 沿程分布图
(工况 2,5,8)

Fig. 13 Axial distributions of droplet SMD with different fuel flow rate allocations
(Case 2,5,8)

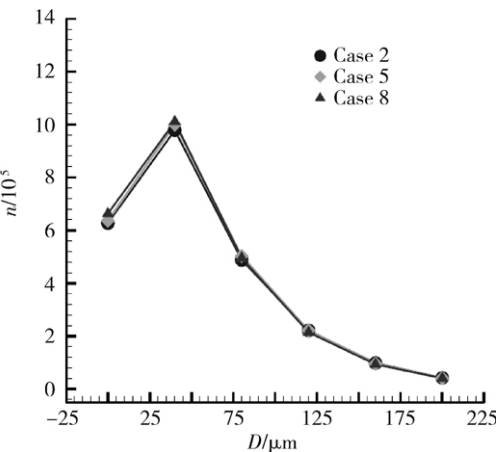


图 14 不同燃油流量分配时油珠数目分布图
(工况 2,5,8)

Fig. 14 Distributions of droplet number with different fuel flow rate allocations
(Case 2,5,8)

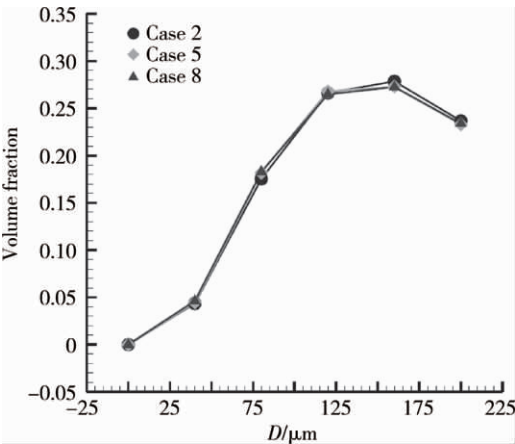


图 15 不同燃油流量分配时油珠体积分数分布
(工况 2,5,8)

Fig. 15 Distributions of droplet volume fraction with different fuel flow rate allocations
(Case 2,5,8)

燃油量同时增加时,所得的油珠 SMD 沿程分布规律基本相似.

由图 14 可知,不同值班级和主燃级喷嘴燃油量分配比例时所得油珠数目随粒径变化趋势基本相似,其中粒径约为 40 μm 的油珠数目均最多,偏离此范围,随着油珠粒径增大或减小,油珠数目均会急剧减少;而粒径为 200 μm 以上的油珠数目很少.

由图 15 可知,不同值班级和主燃级燃油量分配时所得油珠体积分数分布趋势基本相似,与图 14 比较可知,虽然大粒径的油珠数目较少,但是由于大粒径油珠的体积为小粒径油珠的数倍,因此所占的体积分数仍较大,其中粒径为 120 μm 左右时油珠所占体积分数最大.由图 13~图 15 可见,值班级和主燃级燃油量分配比例改变对燃油雾化特性的影响不大.

图 16~图 17 分别为单开值班级喷嘴时工况 1,4 和 7 下油珠粒径沿程分布、不同粒径油珠数目和油珠体积分数分布图.图 16 与图 13 比较可知,油珠粒径也随着轴向距离加大而逐渐减小,但随着值班级燃油量增加,SMD 也相应加大.此时值班级燃油流量的增加对油珠粒径沿程变化的影响要比值班级和主燃级喷嘴同时打开时大些.

从图 17 可以看出,随着值班级燃油流量逐渐增加,油珠数目增加.

由图 18 可知,大油珠所占的体积分数会随着值班级燃油流量的增大而略微增加.综上可知,值班级燃油流量为 15% 时雾化效果最好,而 50% 时雾化最差.

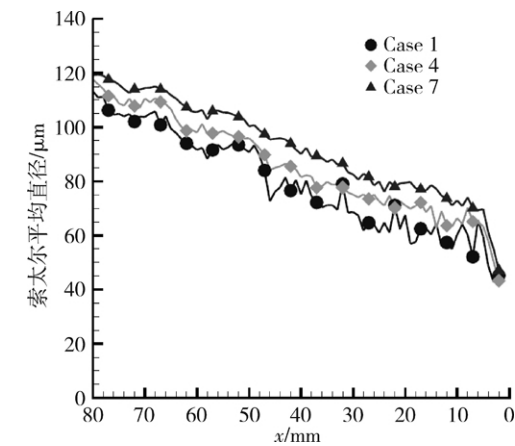


图 16 不同燃油流量时油珠 SMD 沿程分布图
(工况 1,4,7)

Fig. 16 Axial distributions of droplet SMD with different fuel flow rates (Case 1,4,7)

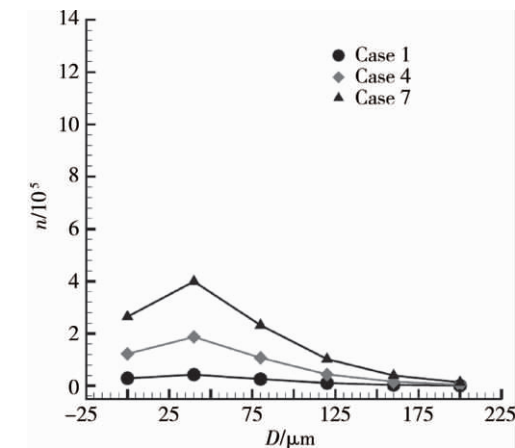


图 17 不同燃油流量时油珠数目分布图
(工况 1,4,7)

Fig. 17 Distributions of droplet number with different fuel flow rates (Case 1,4,7)

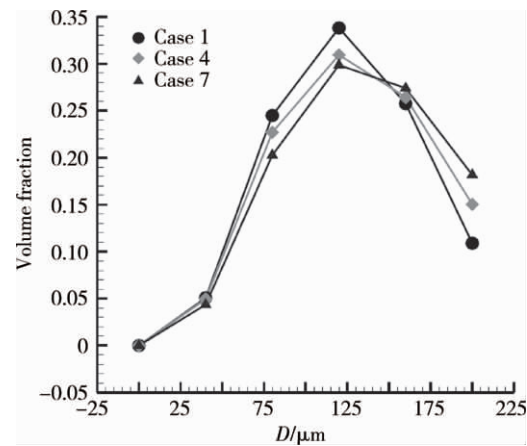


图 18 不同燃油流量时油珠体积分分数分布图
(工况 1,4,7)

Fig. 18 Distributions of droplet volume fraction with different fuel flow rates (Case 1,4,7)

图 19~图 21 分别为单开主燃级喷嘴时工况 3,6 和 9 下油珠 SMD 沿程分布、油珠数目和油珠体积分数分布图。

图 19 与图 16 相比,主燃级燃油量增加,对油珠粒径大小沿程变化的影响不如值班级大.由图 20 可见,随着主燃级燃油量增加,雾化后油珠数目有所增加.从图 21 可知,随着主燃级燃油流量的增加,小油珠所占的体积分数相差不大,而大油珠所占的体积分数稍有减少.由此可见,单开主燃级喷嘴时,随着供油量的增加,燃油雾化稍有改善,这可能是因主燃级供油量增加,燃油喷射孔前供油压力提高,油珠相对速度加大,有利于雾化.

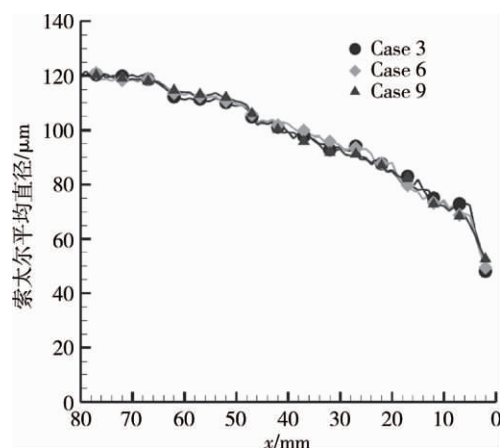


图 19 不同燃油流量时油珠 SMD 沿程分布图
(工况 3,6,9)

Fig. 19 Axial distributions of droplet SMD with different fuel flow rates (Case 3,6,9)

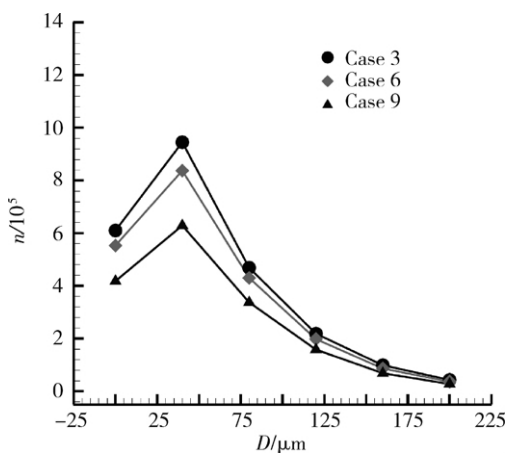


图 20 不同燃油流量时油珠数目分布图
(工况 3,6,9)

Fig. 20 Distributions of droplet number with different fuel flow rates (Case 3,6,9)

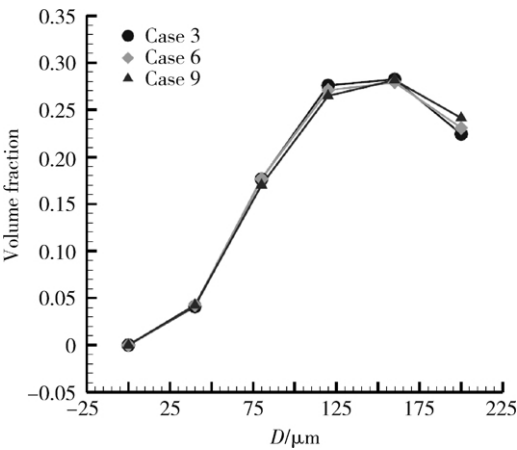


图 21 不同燃油流量时油珠体积分数分布图
(工况 3,6,9)

Fig. 21 Distributions of droplet volume fraction with different fuel flow rates (Case 3,6,9)

3 结 论

本文采用 PIV 试验研究不同燃油喷射方式时燃油流量变化对 TAPS/MLDI 燃烧室油雾特性的影响. 试验结果表明: ①在本试验工况下, 粒径为 40 μm 左右的油珠数目最多, 大于或小于此粒径的油珠数目都较少; ②在油雾锥附近大油珠数目较多, 随着离旋流器出口轴向距离的增加, 油珠平均粒径与数目均逐渐减少; ③随着燃油流量增加, 单开值班级喷嘴时, 油珠数目增加, 燃油雾化效果变差; 而单开主燃级喷嘴时, 油珠数目有所增加, 燃油雾化稍有改善. ④当主燃级和值班级喷嘴都打开, 保持进口油气比一定时, 值班级和主燃级燃油量分配比例改变对燃油雾化特性的影响不大.

以上所得的 TAPS/MLDI 低污染燃烧室油雾特性研究结果可为该燃烧室设计提供一些参考依据.

参考文献:

[1] 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 aero engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(6): 986-996. (in Chinese)

[2] Wulff A, Hourmouziadis J. Technology review of aero-engine pollutant emissions [J]. Aerospace Science and Technology, 1997, 1(8): 557-572.

[3] Gleason C C, Bahr D W. Experimental clean combustor program (ECCP) phase III final report[R]. NASA CR-135384, 1979.

[4] Maier G, Wiitig S. Fuel preparation and emission characteristics of a pressure loaded LPP combustor [R]. AIAA-99-3774, 1999.

[5] Novlck A S, Troth D L. Low NO_x heavy fuel combustor concept program[R]. NASA CR-165481, 1981.

[6] Stouffer S D, Ballal D R. Development and combustion performance of a high-pressure WSR and TAPS combustor [R]. AIAA-2005-1416, 2005.

[7] Mongia H C. TAPS-A 4th generation propulsion combustor technology for low emissions[R]. AIAA-2003-2657, 2003.

[8] Marek C J, Smith T D. Low emission hydrogen combustors for gas turbines using lean direct injection [R]. AIAA-2005-3776, 2005.

[9] Fu Y, Jeng S M. Characteristics of the swirling flow in a multipoint LDI combustor[R]. AIAA-2007-846, 2007.

[10] Bulzan D L. Velocity and drop size measurements in a confined, swirler-stabilized, combustor spray[R]. AIAA-96-3164, 1996.

[11] 柳朝晖, 郑楚光, 王汉封. 不同旋流数下湍流气粒两相流动特性的 PDPA 实验研究[J]. 化工学报, 2001, 52(6): 491-494.
LIU Zhaohui, ZHENG Chuguang, WANG Hanfeng. Experimental study on turbulent dilute gas-particle flows of different swirling intensity[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2001, 52(6): 491-494. (in Chinese)

[12] 邢小军, 徐行, 郭志辉, 等. 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, XU Hang, GUO Zhihui, et al. Experimental study on spray field in combustor by phase doppler analyzer[J]. Journal of Propulsion Technology, 2000, 21(5): 61-65. (in Chinese)

[13] 盛森芝, 徐月亭, 袁辉靖. 近十年来流动测量技术的新发展[J]. 力学与实践, 2002, 24(5): 1-14.
SHENG Senzhi, XU Yueting, YUAN Huijing. New development in the technology of flow measurement over the last decade[J]. Mechanics and Engineering, 2002, 24(5): 1-14. (in Chinese)

[14] 颜应文, 李红红, 赵坚行, 等. 双环预混旋流低污染燃烧室数值研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(9): 1923-1929.
YAN Yingwen, LI Honghong, ZHAO Jianxing, et al. Numerical study of low emissions for twin annular premixing swirler combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(9): 1923-1929. (in Chinese)

[15] Olinger D S, Sallam K A, Lin K C, et al. Effects of GLR on the spray in the near injector region of aerated liquid jets in crossflow[R]. AIAA 2009-1373, 2009.