

LPP 低污染燃烧室冷态流场与油雾特性

邓远灏^{1,2} 朱嘉伟¹ 颜应文^{1,2} 马存祥² 徐华胜² 张靖周¹

(1. 南京航空航天大学能源与动力学院, 南京, 210016; 2. 中国燃气涡轮研究院, 成都, 610500)

摘要: 为了研究某贫油预混预蒸发(Lean premixed prevaporized, LPP)低污染燃烧室冷态流场和油雾特性, 本文采用粒子图像测速仪(Particle image velocimetry, PIV)首先试验研究不同进口空气流量对燃烧室冷态流场的影响, 其次分别在单开值班级喷嘴、主级喷嘴以及同开主级和值班级喷嘴时, 分析了燃油流量分配和值班级喷嘴位置对燃烧室油雾特性的影响。试验结果表明: 在 LPP 燃烧室头部流场存在中心回流区、角落回流区和唇口回流区, 中心回流区宽度随着距燃烧室头部距离的增加先逐渐增加, 而后逐渐减少, 且进口空气流量对燃烧室回流区形状影响不大; 单开值班级喷嘴时, 供油量增加, 燃烧室油雾特性变差; 单开主级喷嘴时, 主级供油量增加, 燃烧室油雾特性得到改善; 主级和值班级喷嘴同时打开时, 随着主级供油量增加, 值班级供油量减少, 燃油雾化特性得到改善; 值班级喷嘴位于喉道处时燃油雾化效果优于值班级喷嘴在旋流器出口处。

关键词: 贫油预混预蒸发; 低污染燃烧室; 冷态流场; 油雾场; 粒子图像测速仪

中图分类号: V231.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2013)02-0162-08

Cold Flow Field and Fuel Spray Characteristic of LPP Low Emission Combustor

Deng Yuanhao^{1,2}, Zhu Jiawei¹, Yan Yingwen^{1,2}, Ma Cunxiang², Xu Huasheng², Zhang Jingzhou¹

(1. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. China Gas Turbine Establishment, Chengdu, 610500, China)

Abstract: In order to study cold flow fields and fuel spray characteristics of a lean premixed prevaporized (LPP) low emission combustor, effects of different inlet conditions on cold fields are experimentally investigated by using particle image velocimetry (PIV), and effects of different fuel allocations and positions of pilot atomizer on fuel spray characteristics are studied when only pilot atomizer or primary atomizer is operated, or primary and pilot atomizers are operated at the same time. Experimental results show that central recirculation zone (CRZ), corner recirculation zone and lip recirculation zone appear in the cold flow field. The width of CRZ gradually increases firstly and then decreases with the increase of axial distance from combustor inlet. Changes of the CRZ shape are weak when inlet air flow rates change. When only pilot atomizer operates, fuel spray characteristic is gradually worsened with the increase of fuel flow rate. When only primary atomizer operates, fuel spray characteristic is gradually improved with the increase of fuel flow rate. When the pilot and primary atomizers operate at the same time, spray characteristic is gradually improved with the increase of primary fuel flow rate and the decrease of pilot fuel flow rate. The spray characteristics of pilot atomizer at the throat are better than that of at the swirler outlet.

Key words: lean premixed prevaporized; low emission combustor; cold flow field; fuel spray characteristic; particle image velocimetry (PIV)

基金项目: 国家自然科学基金(50906040)资助项目; 中央高校基本科研业务费专项资金(NZ2012107)资助项目。

收稿日期: 2012-04-05; **修订日期:** 2013-01-07

通信作者: 颜应文, 男, 博士, 副教授, E-mail: yanyw@nuaa.edu.cn。

随着世界民航业的迅速发展,每年世界新增的民航航线数量越来越多,民用航空发动机向大气排放的污染物也随之日益增多,对大气产生的污染也日趋严重。因此,航空发动机的污染问题越来越引起世界各国的关注,民用航空发动机的环保性在适航要求中也越来越突出,降低污染、延长寿命成为民用发动机的主要发展目标。因此,低污染燃烧技术研究对发展中国航空事业具有十分重要的意义^[1-2]。

为了控制航空发动机排放对机场及其周围环境的影响,国际民航组织下属的航空环境保护委员会(Committee aviation environmental protection, CAEP)对航空发动机排放标准陆续颁布有 1986 年 CAEP1、1993 年 CAEP2、1996 年 CAEP4 和 2004 年 CAEP6 标准。为了加强对 NO_x 排放的控制,CAEP 标准中对 NO_x 排放的要求也愈加严格,为此,世界各国都对低污染燃烧技术进行广泛深入的研究。早在 20 世纪 70 年代,美国 NASA 就开始了“清洁燃烧计划”^[3],发展了分级燃烧室、贫油预混预蒸发燃烧室(Lean premixed prevaporized combustor, LPP)^[4]、催化燃烧室以及变几何燃烧室等先进低污染燃烧室,主要目的是为了大幅度减少氮氧化物的生成。NASA 还在 1999 年提出了超高效发动机技术(Ultra-efficient engine technology, UEET)计划,对贫油直接喷射(Lean direct injection, LDI)^[5]、LPP 和富油/猝熄/贫油燃烧(Rich-quench-lean, RQL)^[6]等低污染燃烧技术进行研究。为了能满足其他设计要求同时,进一步降低 NO_x 的排放,20 世纪 90 年代 GE 公司开发了双环预混旋流(Twin annular premixing swirler, TAPS)燃烧室^[7-8],其污染排放比目前的标准低 50%。此外,文献[9, 10]分别对 TAPS/MLDI 低污染燃烧室头部流场进行了数值研究和 PIV 试验测量。

1 研究对象

本文研究对象为某 LPP 燃烧室头部,如图 1 所示。它是由主级与值班级旋流器、主级与值班级喷嘴等部分组成。其中值班级旋流器为一个带有单油路离心喷嘴的单级轴向旋流器;而主级旋流器为一个在其周向均布一排 10 个燃油直接喷射孔的单级轴向旋流器。为了满足燃烧室头部冷却的要求,在其头部还开有均布的许多冷却小孔。

值班级采用扩散燃烧模式,燃油经值班级喷嘴喷入 LPP 火焰筒内,与值班级旋流器进入的空气

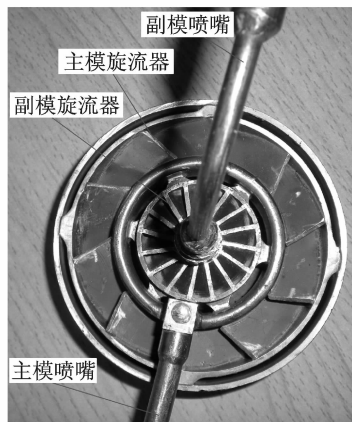


图 1 LPP 燃烧室头部实物

掺混燃烧,提供不同工况条件下的稳定点火源;主级采用预混预蒸发燃烧模式,燃油通过 10 个喷射孔以一定角度射入主级旋流器叶片通道内,在主级旋流作用下进行雾化、预混预蒸发形成均匀混气,然后进入 LPP 火焰筒内进行燃烧,使 NO_x 降低。

燃烧室头部流场特性对燃油雾化有着重要的作用,而燃油浓度的空间分布又是实现低污染燃烧的关键。因此,本文采用 PIV 分别对该燃烧室的冷态流场和油雾特性进行试验测量,研究不同工况对燃烧室冷态流场和油雾特性的影响。

2 PIV 试验装置与试验方案

LPP 燃烧室 PIV 试验装置如图 2 所示,它是由入口段、LPP 燃烧室头部、LPP 燃烧室筒体以及 PIV 测量段组成。燃烧室筒体采用全透明的石英玻璃筒体,并在 PIV 测量段末端装有石英玻璃观察窗,以方便将一束激光射入被测量区域,示踪粒子由专用粒子发生器在燃烧室入口段喷入,通过 CCD 相机从石英玻璃观察窗记录粒子图像。试验气源是由一台空气压缩机提供,通过气阀调节所需空气流量,气流从入口段流入 LPP 燃烧室头部,通过 LPP 燃烧室后进入 PIV 测量段,经 PIV 测量后,由 PIV 测量段侧向出口处进入排气罐后直接排入大气中。

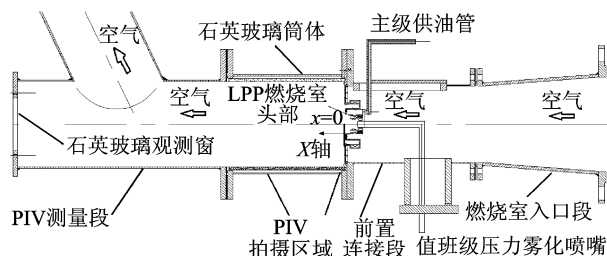


图 2 LPP 燃烧室 PIV 试验装置

3 冷态流场试验结果及分析

本文采用 PIV 试验研究不同进口空气流量对 LPP 燃烧室头部冷态流场的影响,分别测量燃烧室头部出口 25~160 mm 范围内的不同横截面以及中心纵截面上气流速度分布,测量位置如表 1 所示。其中: $Z=0$ 截面表示燃烧室中心纵截面(即旋流器中心截面), $X=0$ 截面表示 LPP 燃烧室头部出口横截面,燃烧室头部出口中心坐标为 $(X, Y, Z=0, 0, 0)$ 。冷态流场试验工况共有 3 个,如表 2 所示,图 3~7 为部分试验结果。

表 1 不同横截面位置 mm

距燃烧室头部出口轴向距离 X

| | | | | | | |
|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| 25 | 40 | 55 | 70 | 100 | 130 | 160 |
|----|----|----|----|-----|-----|-----|

表 2 冷态流场试验工况

| 工况 | 进口总压 p / MPa | 进口总温 T / ℃ | 进口流量 G / ($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$) |
|----|-------------------|-----------------|--|
| 1 | 0.107 45 | 28 | 114 |
| 2 | 0.108 95 | 28 | 129 |
| 3 | 0.110 45 | 28 | 143 |

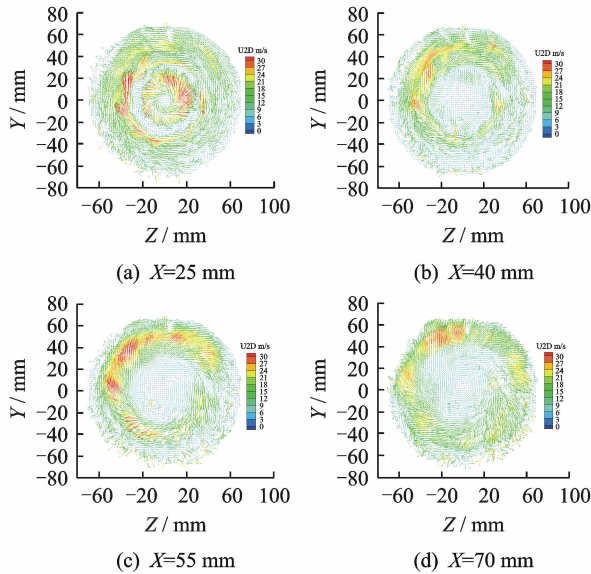


图 3 不同横截面速度矢量图(工况 2)

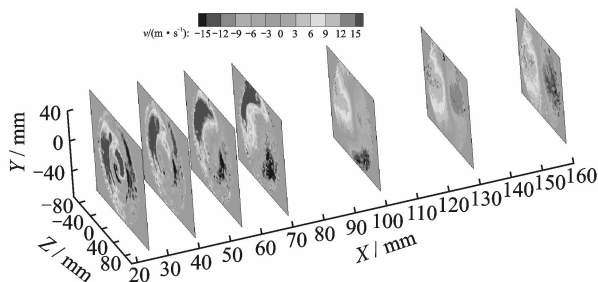


图 4 不同横截面径向速度 V 云图(工况 2)

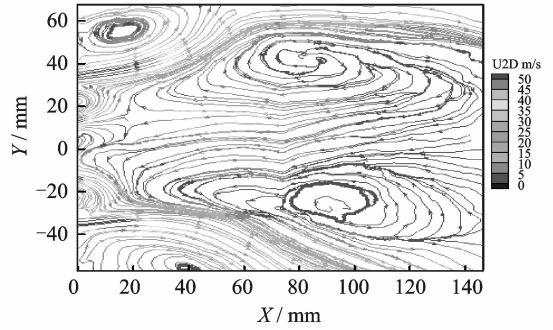


图 5 旋流器中心纵截面速度流线图

图 3 是工况 2 下不同横截面速度矢量图。从图中可以看出,在距火焰筒头部出口 25 mm 处,可以明显看到值班级出口的气流旋向与主级气流旋向相反,并且可以明显看出主级每个叶片通道出口的气流流动情况,在距火焰筒头部出口 40 mm 处时,由于主级气流流量远远大于值班级气流,值班级气流在主级气流作用下被掺混,主级和值班级两股相反旋向的气流转变为与主级旋向相同的气流,但旋流强度明显减弱。由于从主级和值班级流出的气流同时具有轴向、径向和切向速度,因此在距火焰筒头部出口 55 和 70 mm 处,中心回流区范围逐渐增大,但速度大小逐渐减弱。图 4 为工况 2 下各横截面处 V 速度云图。由图可知,随着轴向距离增加,旋流强度逐渐减弱,因此 V 速度值相应减小,但速度分布逐趋均匀。

图 5 为工况 2 下 LPP 燃烧室旋流器中心纵截面($Z=0$)上速度流线图。由图可知,气流分别从值班级和主级旋流器流出,在火焰筒头部形成了具有轴向、切向和径向的高速旋转射流,由于空气粘性及旋转气流作用,形成一个低压中心回流区,以保证火焰稳定。此外,在主级和值班级之间区域形成小的唇口回流区。又因火焰筒头部结构的影响,在火焰筒上下壁面附近形成角落回流区。从图中还可看出,中心回流区在距离火焰筒头部距离 $X=80$ mm 左右时达到最大宽度。另外,由于燃烧室没有主燃孔射流对中心回流区的截断作用,因此中心回流区长度相对比较长。

图 6 为 3 种工况下旋流器中心截面上不同轴向位置的轴向速度 u 径向分布图。从图中可看出,轴向速度在火焰筒头部出口附近处,靠近主级和值班级旋流器旋转射流锥面上,出现两个中心呈对称的峰值,并且主级气流速度明显大于值班级气流速度。随着距离增加,两个峰值逐渐合并为一个,但速度值逐渐减少,径向分布逐趋均匀;中心回流区

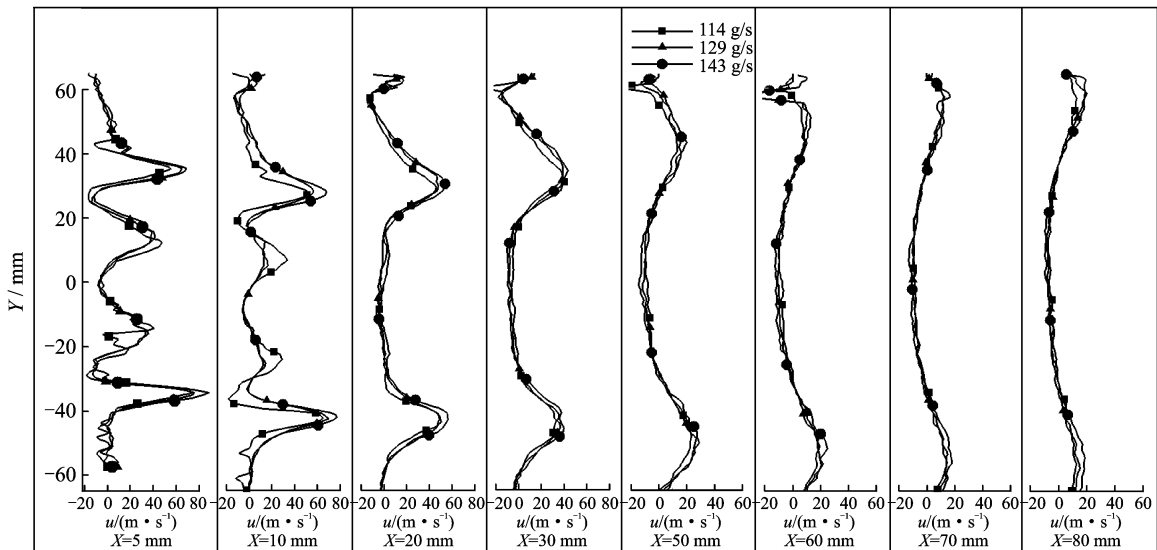


图 6 不同轴向位置上速度 u 径向分布

宽度先逐渐增大,后又减小。此外,从图中还可看出,随着进口流量增加,速度分布形状基本保持不变,但随着进口流量的增加,轴向速度的数值大小也相应增大。

图 7 为 3 个不同进口流量对 LPP 燃烧室旋流器中心截面($Z=0$)上回流区大小的影响。从图中可看出,进口流量改变对回流区形状基本无影响。

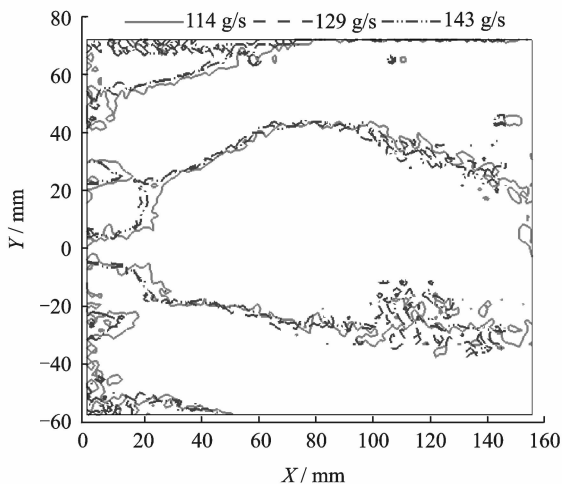


图 7 不同进口流量时中心回流区大小

4 油雾特性试验结果及分析

本文还采用 PIV 对 LPP 燃烧室油雾特性进行测量,试验研究单开值班级喷嘴、主级喷嘴以及同时打开值班级和主级喷嘴情况下,不同进口油气比和值班级喷嘴位置对 LPP 燃烧室燃油雾化特性的影响。

4.1 单开值班级喷嘴时油雾特性结果分析

当关闭主级油路、单开值班级喷嘴、进口空气

流量为 0.117 kg/s、进口温度为 397 K 时,试验研究不同值班级喷嘴位置(图 8)和燃油流量对油雾场的影响,试验工况如表 3 所示。

表 3 单开值班级喷嘴时试验工况

| 工况 | 喷嘴位置 | 进口总压 p/MPa | 进口总温 T/K | 值班级燃油 流量/ $(\text{g} \cdot \text{s}^{-1})$ |
|----|-------|------------------------|----------------------|---|
| 1 | 旋流器出口 | 0.108 70 | 397 | 0.5 |
| 2 | 旋流器出口 | 0.108 70 | 397 | 0.9 |
| 3 | 旋流器出口 | 0.108 00 | 397 | 1.2 |
| 4 | 值班级喉道 | 0.108 00 | 397 | 0.5 |
| 5 | 值班级喉道 | 0.108 00 | 397 | 0.9 |
| 6 | 值班级喉道 | 0.108 70 | 397 | 1.2 |

图 9 为工况 3 时燃烧室中心截面上油珠粒径分布图,由于燃油从值班级喷嘴喷出后形成一个空心油锥,在火焰筒头部出口附近,燃油尚未完全雾化,锥面上油粒密集形成一层油膜,PIV 很难区分

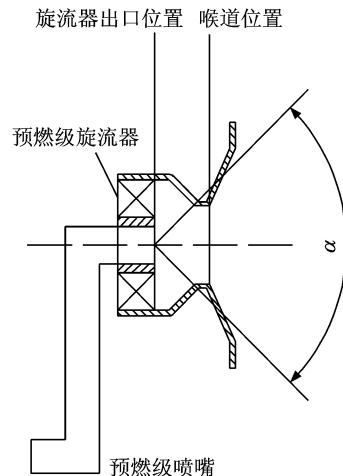


图 8 值班级喷嘴不同安装位置

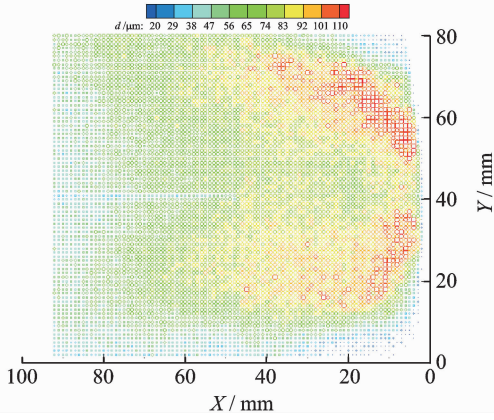


图9 油珠粒径分布图(工况3)

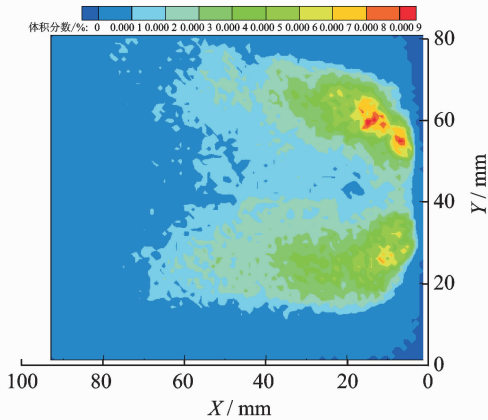


图10 油珠体积分数分布云图(工况3)

油粒大小与分布,因此在试验过程中测量区域是在距头部一定距离才开始。从图中可看出,在油雾锥附近区域油珠直径比较大,数目也较多,而其他区域则油珠直径相对较小,数目也较少;这是由于随着轴向距离增加,油珠吸收热量,一边向后运动,一边蒸发,因此油珠直径逐渐缩小,最后一些细小油珠变为燃油蒸气,因此油珠数目也逐渐减少。

图10为工况3时燃烧室中心截面上油珠体积分数(%)分布云图,油珠体积分数表示在该处油珠的体积与空间总体积的百分比。从图中可看出,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11为工况3时燃烧室中心截面上油珠数密度分布云图,油珠数密度表示在单位体积内油珠颗粒的数目,单位为个/ mm^3 。与图10相似,在油雾锥附近,油珠数密度也较高。

图12~15分别为工况1,2和3时油雾特性。其中,图12和13分别为油珠数目与粒径索太尔直径(Sauter mean diameter, SMD)的轴向分布。由图可知,在头部附近,油珠数目最多,粒径SMD也

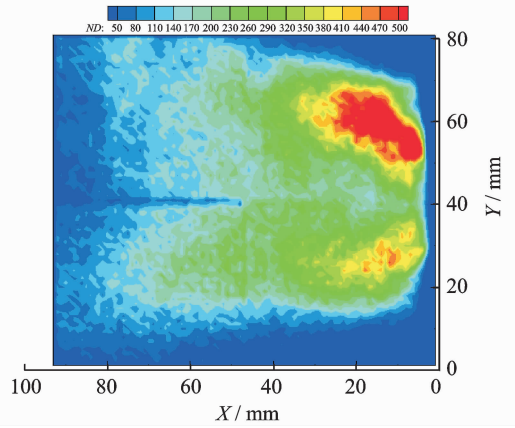


图11 油珠数密度分布云图(工况3)

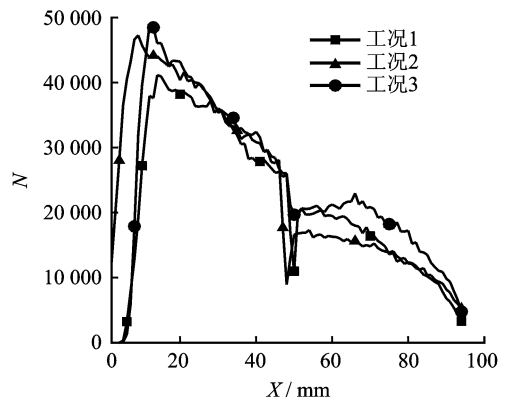


图12 不同值班级燃油量时油珠数目轴向分布

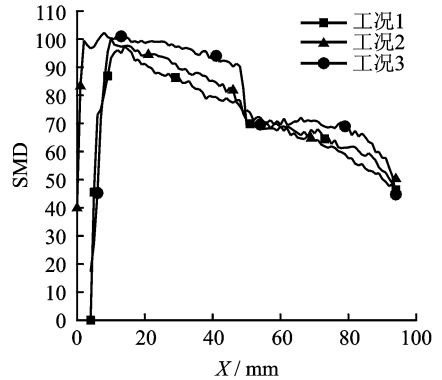


图13 不同值班级燃油量时油珠 SMD 轴向分布

较大,但随着轴向距离增加,油珠不断吸热蒸发,油珠数目不断减少,粒径SMD也相应缩小。另外,随着值班级供油量的增加,油珠数目增加,油珠平均直径SMD也变大。图14为在燃烧室中心截面上不同粒径油珠数目分布。由图可知,绝大部分的油珠直径约为 $40\ \mu\text{m}$,随着油珠粒径变小或加大,油珠数目急剧减小;不同供油量下所得不同直径油珠数目分布规律基本相似,但随着燃油流量增加,油珠数目逐渐增加。图15为在燃烧室中心截面上

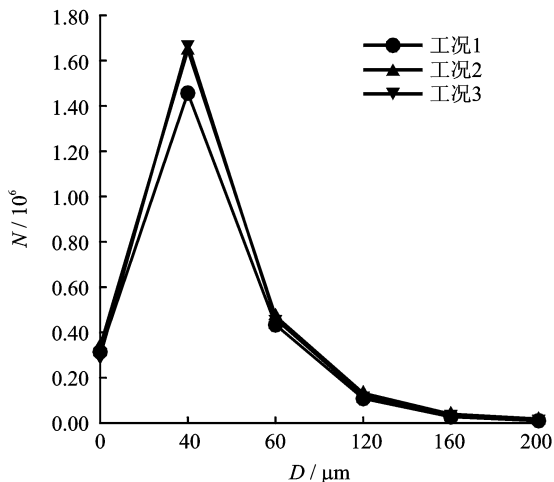


图 14 不同值班级燃油量时油珠数目分布

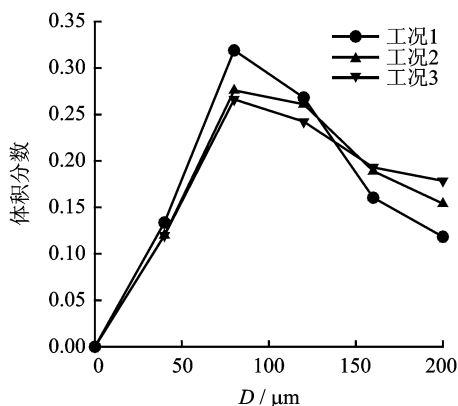


图 15 不同值班级燃油量时油珠体积分数分布

不同粒径油珠体积分数分布图,该图表示不同粒径下的油珠体积与整个测量区域内所有油珠体积的比值。与图 14 相比可知,油珠体积分数分布与油珠数目有所不同,虽然粒径约为 40 μm 时油珠数目最多,但由于每颗油珠的体积较小,因此该粒径的油珠体积分数并不是最大,而是粒径约为 80 μm 的油珠体积分数最大。此外,工况 1 小油珠占的体积分数最多,大油珠占有的体积分数最少,而工况 3 刚好相反,小油珠体积分数最小,大油珠体积分数最多,工况 2 介于两者之间。

综上所述,随着值班级燃油流量的增加,油珠颗粒数目和 SMD 逐渐增加,大油珠所占的比例逐渐增加。因此,值班级喷嘴雾化效果变差。

图 16,17 分别为燃油流量相同而值班级喷嘴在不同位置时油雾特性。从图 16 可看出,值班级喷嘴位于旋流器喉道时油珠 SMD 比在旋流器出口油珠 SMD 小。图 17 为不同喷嘴位置时不同油珠直径下油珠体积分数积分分布,油珠体积分数积分分布是指油珠直径小于某直径的所有油珠的体

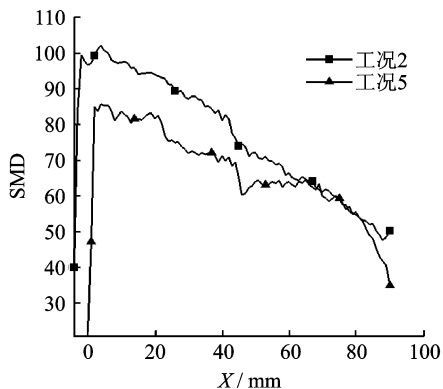


图 16 不同喷嘴位置时油珠 SMD 轴向分布

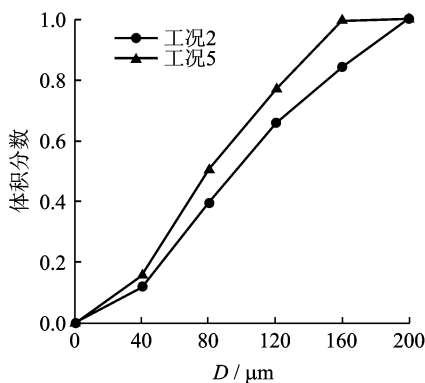


图 17 不同喷嘴位置时油珠体积分数积分分布

积占油珠总体积的分数。由图可知,喷嘴位于喉道处小油珠体积占总油珠体积比例大,而喷嘴位于旋流器出口时大油珠占的比例较大。综上所述,在相同工况下,值班级喷嘴位于喉道时雾化效果要优于在旋流器出口时的雾化效果。

4.2 单开主级时油雾特性结果分析

当关闭值班级喷嘴、单开主级喷嘴时,进口空气流量为 0.115 kg/s,进口温度为 423 K,试验研究不同主级燃油流量对油雾特性的影响,试验工况如表 4 所示。

表 4 单开主级喷嘴时试验工况

| 工况 | 进口总压 p/MPa | 进口总温 T/K | 主级燃油 流量/ $(\text{g} \cdot \text{s}^{-1})$ |
|----|------------------------|----------------------|--|
| 7 | 0.108 70 | 423 | 1.7 |
| 8 | 0.108 70 | 423 | 1.94 |
| 9 | 0.108 00 | 423 | 2.29 |

图 18 和 19 分别为单开主级喷嘴时,不同燃油量时油珠数目轴向分布和不同粒径油珠体积分数分布。由图 18 可看出,随着主级供油量增加,油珠数目逐渐减少;从图 19 可看出,随着主级供油量增加,小油珠所占的比例增加,而大油珠所占比例减

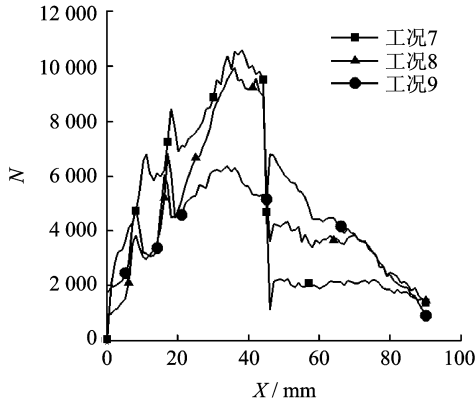


图 18 不同燃油量时油珠数目轴向分布

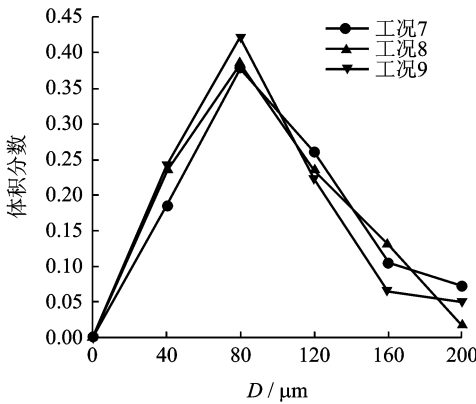


图 19 不同燃油量时体积分数分布

少。由此可见,单开主级喷嘴时,随着供油量的增加,燃油雾化得到改善,这可能是因主级供油量增加,燃油喷射孔前供油压力相应提高,油珠相对速度加大,促使油珠分裂,有利于燃油雾化。

4.3 主级与值班级喷嘴同开时油雾特性结果分析

当主级和值班级喷嘴同时打开,进口空气流量为 0.115 kg/s,进气温度为 423 K 时,保持总油气比不变条件下,试验研究不同主级和值班级燃油流量分配和值班级喷嘴位置对燃油雾化特性的影响,试验工况如表 5 所示。

表 5 主副级油路同开时试验工况

| 工况 | 喷嘴位置 | 进口总压 p/MPa | 主级燃油流 量/ $(\text{g} \cdot \text{s}^{-1})$ | 值班级燃油流 量/ $(\text{g} \cdot \text{s}^{-1})$ |
|----|-------|------------------------|--|---|
| 11 | 旋流器出口 | 0.108 70 | 1.61 | 0.69 |
| 12 | 旋流器出口 | 0.108 70 | 1.79 | 0.51 |
| 13 | 旋流器出口 | 0.108 00 | 1.96 | 0.35 |
| 14 | 值班级喉道 | 0.108 00 | 1.61 | 0.69 |
| 15 | 值班级喉道 | 0.108 00 | 1.79 | 0.51 |
| 16 | 值班级喉道 | 0.108 70 | 1.96 | 0.35 |

图 20,21 分别为进口工况 11,12 和 13 时燃油雾化特性。从图 20 中可看出,随着主级供油量的增加,值班级供油量的减少,油珠数目减少;图 21 为不同燃油流量分配对油珠体积分数的影响。由图可知,总体来说,工况 13 时,小油珠占的体积分数最多,大油珠占有的体积分数最少,而工况 11 刚好相反,小油珠体积分数最小,大油珠体积分数最多。因此,在油气比保持不变时,改变主级和值班级燃油流量的分配,即主级供油量增加同时,减少值班级供油量,则油珠数目减少,油珠 SMD 减小,雾化稍有改善。

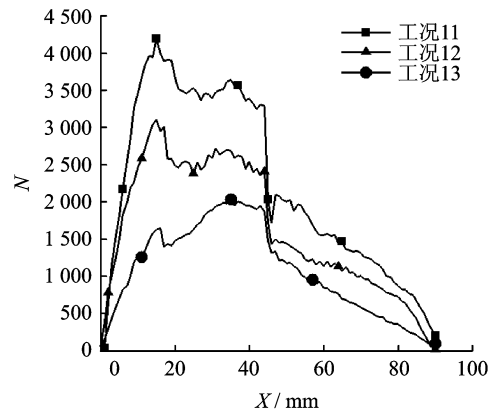


图 20 不同燃油流量分配时油珠数目轴向分布

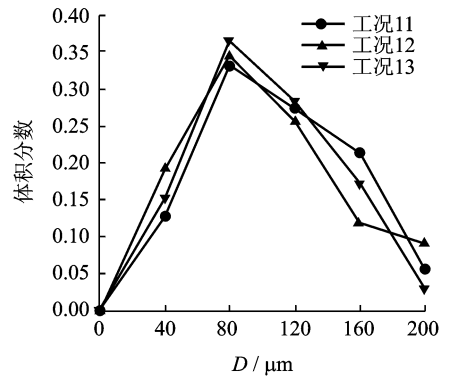


图 21 不同燃油流量分配时油珠体积分分数分布

图 22,23 分别为值班级喷嘴在不同位置时(工况 11 和 14)燃油雾化特性比较图。从图 22 中可以看出,值班级喷嘴位置在旋流器喉道位置时在旋流器出口位置时的油珠平均直径 SMD 要小;图 23 为不同的值班级喷嘴位置时的体积分数积分分布比较,充分反映喷嘴在喉道时小油珠占的比例稍大,喷嘴在旋流器出口时大油珠占的比例比较大。因此,值班级喷嘴在喉道位置时雾化效果优于喷嘴位置在旋流器出口时的雾化效果。

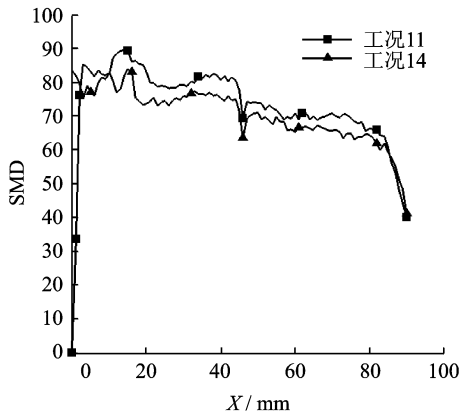


图 22 不同喷嘴位置时油珠 SMD 轴向分布

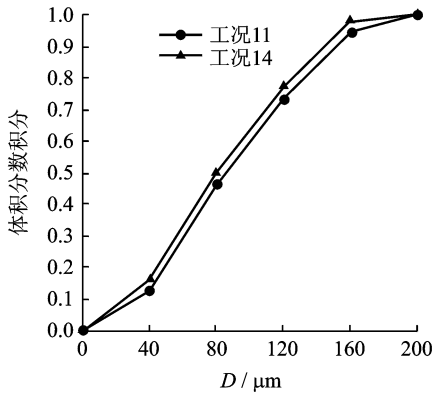


图 23 不同喷嘴位置时油珠体积分数积分分布

5 结 论

本文利用 PIV 测量技术对某 LPP 燃烧室头部冷态流场和油雾场进行试验研究,结果表明:

(1)LPP 燃烧室头部冷态流场明显存在主流区、角落回流区和唇口回流区,值班级旋流与主级旋流之间存在明显速度梯度,有利于值班级旋流与主级旋流之间气流质量、动量和能量的交换以及燃油的雾化。

(2)冷态流场中心回流区宽度随着距燃烧室头部距离的增加先逐渐增加,而后逐渐减少,随着进口空气流量的增加,燃烧室中心回流区形状变化不大,但其气流速度有所加大。

(3)单开值班级喷嘴时,随着供油量的增加,油珠数目和 SMD 均逐渐增加,雾化效果变差,且值班级喷嘴在喉道处时燃油雾化效果要稍优于值班级喷嘴在旋流器出口。

(4)单开主级喷嘴时,随着主级供油量的逐渐增加,油珠数目和 SMD 逐渐减少,即主级燃油雾化效果得到改善。

(5)当同时打开主级和值班级喷嘴时,保持油气比不变,改变主副级供油流量分配时,随着主级

供油量增加,值班级供油量减少,油珠数目和 SMD 逐渐减少,雾化得到改善,且值班级喷嘴在喉道处时燃油雾化效果要稍优于在旋流器出口处。

参考文献:

- [1] 刘大响,金捷,彭友梅,等.大型飞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.
- [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 aero engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23 (6):986-996.
- [3] Bahr W W, Gleason C C. Experiment clean combustor program, phase I : Final report[R]. NASA-CR-134737, 1975.
- [4] Imamura A, Yoshida M, Kawano M. Research and development of a LPP combustor with swirling flow for low NO_x[R]. AIAA 2001-3311, 2001.
- [5] Huh J, Cernansky N, Choi K. Mixing of axially injected liquid jets and pre-atomized sprays in a lean-direct-injection (LDI) mode [R]. AIAA 98-3831, 1998.
- [6] Rizk N K, Mongia H C. Low NO_x rich-lean combustion concept application [R]. AIAA 91-1962, 1991.
- [7] Dodds W. Twin annular premixing swirler (TAPS) combustor[C]//The Roaring 20th Aviation Noise and Air Quality Symposium. UC Berkeley: Palm Springs, 2005.
- [8] Stouffer S D, Ballal D R, Mongia H C. Development and combustion performance of a high-pressure WSR and TAPS combustor[R]. AIAA 2005-1416, 2005.
- [9] 颜应文,徐榕,邓远灏,等.贫油预混预蒸发低污染燃烧室头部流场研究[J].航空学报,2012,33(6):965-976.
Yan Yingwen, Xu Rong, Deng Yuanhao, et al. Flow field study of a lean premixing prevaporizing low-emission combustor[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2012,33(6):965-976.
- [10] 党新宪,赵坚行,刘勇,等.模型燃烧室油雾特性试验[J].南京航空航天大学学报,2010,42(5):595-600.
Dang Xinxian, Zhao Jianxing, Liu Yong, et al. Experiment on fuel spray characteristics in model combustor[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 42(5):595-600.

