

LPP 低污染燃烧室单头部燃烧性能试验

颜应文^{1,2}, 党龙飞¹, 邓远灏^{1,2}, 徐 榕¹, 徐华胜²

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院 江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016;

2. 中国航空工业集团公司 中国燃气涡轮研究院, 成都 610500)

摘 要: 对贫油预混预蒸发(LPP)低污染燃烧室单头部三级旋流器进行燃烧性能试验,研究不同的油气比、进口空气流量和进口空气温度以及值班级喷嘴安装位置对燃烧室出口截面燃烧性能的影响,获得了燃烧室出口截面温度分布、燃烧效率以及污染物排放的规律.试验结果表明:①油气比增加,NO_x排放相应增加;头部A燃烧性能稍优于头部B;②同一油气比下进口空气温度越高,其燃烧污染物排放越多;进口空气流量越大,污染物排放越少;③值班级喷嘴安装位置对LPP低污染燃烧室燃烧性能有一定影响.

关 键 词: 低污染燃烧室; 燃烧性能; 油气比; 值班级喷嘴安装位置; 燃烧试验

中图分类号: V231

文献标志码: A

Experiment of combustion performance in LPP low emission combustor with single dome

YAN Ying-wen^{1,2}, DANG Long-fei¹, DENG Yuan-hao^{1,2},
XU Rong¹, XU Hua-sheng²

(1. Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System,
College of Energy and Power Engineering,

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

2. China Gas Turbine Establishment,
Aviation Industry Corporation of China, Chengdu 610500, China)

Abstract: Combustion performance experiment was conducted for three-stage swirler of lean premixing and prevaporizing (LPP) low emission combustor with single dome. In order to investigate the effects of different fuel air ratios, inlet air mass flow rates, inlet air temperatures and positions of pilot atomizer on the combustion performance of combustor outlet, and the outlet temperature profile, combustion efficiency and pollutant emission rules of combustor were obtained. The experiment results show: (1) emission of NO_x increases with the fuel air ratio increasing, and the combustion performance of dome A is better than that of dome B; (2) at the same fuel air ratio, if inlet air temperature increases or inlet air mass flow rate decreases, pollutant emission raises correspondingly; (3) position of pilot atomizer has effect on the combustion performance of LPP low emission combustor.

Key words: low emission combustor; combustion performance; fuel air ratio; position of pilot atomizer; combustion experiment

收稿日期:2013-11-16

基金项目:国家自然科学基金(50906040); 航空科学基金(2013ZB52017)

作者简介:颜应文(1978—),男,湖南衡山人,副教授,博士,主要从事低污染燃烧技术、燃烧数值仿真与燃烧试验研究.

E-mail:yanyw@nuaa.edu.cn

随着我国大飞机项目的立项,对航空发动机污染物排放越来越关注.航空发动机排放的污染物主要有 CO_2 、 NO_x 、 CO 、冒烟、UHC(未燃碳氢化合物)和 SO_x 等,这些有害物质对大气造成严重危害.因此开发低污染燃烧技术是我国航空发动机发展过程中一项非常重要的任务^[1-4].

为了控制航空发动机燃烧污染物排放,国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)下属的航空环境保护委员会(Committee on Aviation Environmental Protection, CAEP)分别制定了CAEP1, CAEP2, CAEP4, CAEP6等标准,在各个标准中对污染物 NO_x 排放的要求也日趋严格.为此,世界各国都对低污染燃烧技术进行广泛的研究.20世纪70年代,美国NASA主持实施了高效节能发动机(energy efficient engine, E³)研究计划^[5],其中General Electric (GE)公司发展了径向分级的双环腔低污染燃烧室和单环腔低污染燃烧室,而Pratt & Whitney(P&W)公司发展了轴向分级的低污染燃烧室;P&W公司在E³平台上发展了一种低污染燃烧室:富油燃烧/快速猝熄/贫油燃烧(rich burn-quick quench-lean burn, RQL),其结果比当时污染物排放标准低50%;GE公司在径向分级的双环腔低污染燃烧室基础上提出了中心分级的双环预混旋流(twin annular premixing swirler, TAPS)燃烧室^[6],其污染物排放大幅降低;欧洲Rolls-Royce公司和德国宝马公司共同发展的lean-burn燃烧室^[7],也是一种中心分级的低污染燃烧室,其污染物排放比CAEP6低40%~50%.

国内近年来也对航空发动机低污染燃烧技术开展了大量的研究.文献[8]对其提出的LPP低污染燃烧室(以下简称LPP燃烧室)两相喷雾燃烧性能进行了数值预估;文献[9]对提出的LPP燃烧室采用粒子图像测速试验研究了其冷态流场,并与数值计算结果进行对比,获得其冷态流场结构;文献[10]对直混燃烧室与LPP组合燃烧室两相喷雾燃烧流场进行了数值预估;文献[11]对双环预混旋流燃烧室、单环腔燃烧室和双环腔燃烧室采用数值计算方法预估其燃烧性能;文献[12]采用大涡模拟计算环形燃烧室,采用亚网格动力学模型较好地得到了 NO 和 CO 的排放;文献[13]对某LPP多点喷射低污染燃烧室头部从冷态流动、燃烧流场以及污染物排放进行了数值模拟;文献[10]对一种直混燃烧和LPP组合的单管燃烧室进行了数值研究;文献[14]对R0110重

型燃气轮机采用干式低污染燃烧室设计,对其低污染及燃烧特性进行了试验研究;文献[15]着重研究了采用燃油中心分级的燃烧室 NO_x 排放特性,结果表明值班级喷嘴燃油流量对 NO_x 排放的影响较大,在总油气比不变时存在一最佳油气比使得 NO_x 排放最少.

不管是GE公司的TAPS燃烧室,还是RRD公司的lean-burn燃烧室,都采用的是LPP技术.本文提出了一种带有多点燃油直接喷射双环预混旋流头部的LPP燃烧室,已经开展了相应的燃烧性能数值仿真^[8]和流场^[9]以及油雾场^[16]试验测量工作,因此为了研究该LPP燃烧室燃烧性能,本文对其进行单头部燃烧性能试验,分别研究了不同油气比、相同油气比不同进口条件(进口空气流量和进口空气温度)、值班级喷嘴安装位置以及不同LPP燃烧室头部对出口燃烧性能的影响.

1 试验设备及方案

1.1 试验设备

本文LPP燃烧室单头部燃烧性能试验在南京航空航天大学江苏省航空动力系统重点实验室完成.压缩空气由空气压缩机压缩,经由管道进入电加热器加温,进入试验件进口整流段,继而进入前测量段,测量进口空气的压力和温度.然后进入单头部燃烧室,空气分别从三级旋流器进入头部,并分别与值班级喷嘴和主级喷嘴喷出的燃油充分混合雾化,形成可燃混气,由电嘴点火使其燃烧.燃烧后的高温燃气流入后测量段,在后测量段分别采用7点双铂铑温度耙、7点取样耙测量出口截面燃气的温度和组分.燃气最后进入排气罐,经过处理后排出.

LPP单头部燃烧试验件由前、后测量段及单头部燃烧室3部分组成(见图1).单头部燃烧室由圆形火焰筒、LPP燃烧室头部以及燃烧室机匣

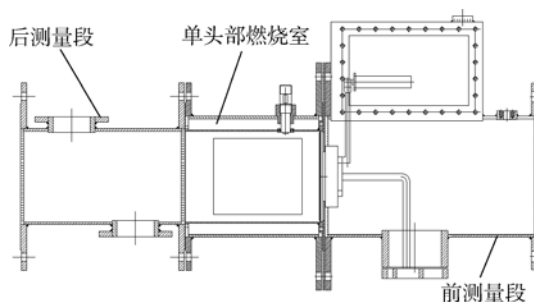


图1 单头部燃烧试验件结构

Fig. 1 Configuration of single dome combustion rig

组成。

LPP 燃烧室旋流器由值班级旋流器、值班级喷嘴、主级旋流器和主级多点燃油直接喷射小孔组成,结构如图 2 所示,其中值班级旋流器为两级轴向旋流器,两级轴向旋流器旋向相同,主级旋流器为一级径向旋流器,值班级旋流器旋向与主级旋流器旋向相反。由于值班级喷嘴采用压力雾化喷嘴,在值班级旋流器出口形成扩散燃烧,提供不同工况条件下的稳定点火源;主级燃油从多点燃油直接喷射小孔逆向喷出,燃油在主级旋流器空腔中进行了充分的雾化与蒸发,在进入燃烧室之前,与空气基本形成均匀混气,在燃烧室中进行贫油预混预蒸发燃烧,燃烧温度低,热力型 NO_x 大幅降低,因此把该燃烧室称为 LPP 燃烧室。

试验所用两种 LPP 燃烧室头部 A 和头部 B 的主级旋流器结构一致,而值班级两级轴向旋流器叶片旋转角度不同(头部 A:一级和二级旋流器叶片安装角分别为 30° 和 35° ;头部 B:一级和二级旋流器叶片安装角分别为 25° 和 30°),并且分别研究了值班级喷嘴在值班级旋流器叶片出口、文丘里管喉道对燃烧室出口燃烧性能的影响。

1.2 试验方案

LPP 燃烧室进口空气流量采用孔板流量计进行测量;进口空气压力和进口空气温度分别采用标准 K 型热电偶及压力传感器测量;出口燃气温度采用 7 点双铂铑温度靶测量,温度信号通过 PCI-1002 热电偶模块进行数据采集,直接在计算机上进行读数并记录;出口燃气组分用 7 点取样

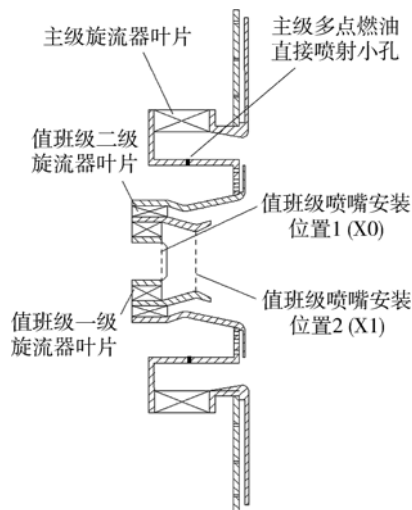


图 2 LPP 燃烧室旋流器结构

Fig. 2 Configuration of LPP combustor swirler

靶取样,经 XGF-4044 气体分析仪红外分析模块(适用于 NO_x , CO , O_2 及 CO_2 等气体)转化为电信号,通过数据采集模块进入计算机直接读数并记录。

根据测得出口截面气体的燃气组分,计算燃烧效率 $\eta^{[17]}$ 。考虑 LPP 燃烧室燃烧效率比较高,燃油基本都完全燃烧,故 UHC 很少,本试验中为测量方便未对 UHC 进行测量,忽略 UHC 对燃烧效率的影响从而使所测燃烧效率稍高。

在常压下试验研究两种 LPP 燃烧室头部分别在 3 种不同油气比、两种进口空气温度以及两种值班级喷嘴安装位置等条件对单头部燃烧性能的影响。试验方案如表 1 所示。

表 1 LPP 燃烧室单头部燃烧试验方案

Table 1 Combustion experimental scheme of LPP combustor with single dome

方案编号	试验方案	进口空气流量/(kg/s)	进口空气温度/℃	油气比	值班级喷嘴安装位置
1	头部 A、 头部 B	0.1	100	0.0223	值班级旋流器 叶片出口
				0.0265	
				0.0311	
2	头部 A	0.1	150	0.0265	值班级旋流器 叶片出口
3		0.1	150	0.0265	文丘里管喉道
4		0.1	150	0.0265	值班级旋流器 叶片出口
	0.12				
	0.14				

2 试验结果及分析

2.1 油气比对 LPP 燃烧室燃烧性能的影响

方案1在给定进口空气流量和进口空气温度条件下,通过改变燃油流量来调节进口油气比,研究3种不同油气比对单头部燃烧试验件出口截面温度、燃气成分和燃烧效率等径向分布的影响。

图3~图6分别为头部A的燃烧室出口截面温度 t 、燃气成分 NO_x 、 CO 体积分数及燃烧效率 η 沿径向分布随油气比(f/a)的变化曲线。图中

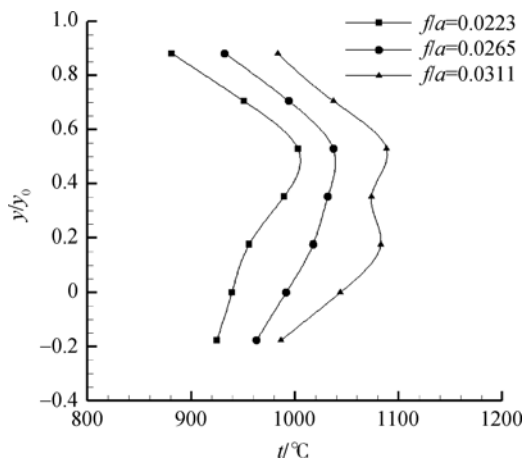


图3 出口截面温度径向分布(头部A,不同油气比)

Fig. 3 Radial profiles of outlet temperature
(dome A, different fuel air ratios)

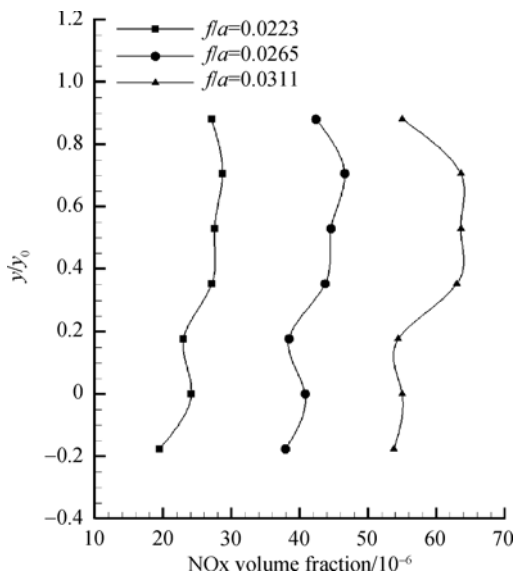


图4 出口截面 NO_x 体积分数径向分布
(头部A,不同油气比)

Fig. 4 Radial profiles of outlet NO_x volume fraction
(dome A, different fuel air ratios)

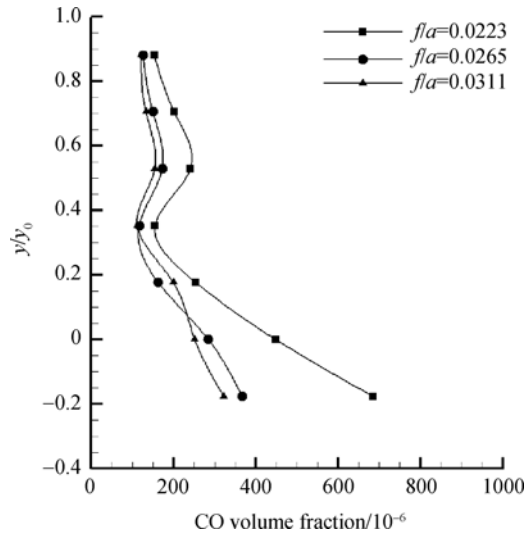


图5 出口截面 CO 体积分数径向分布
(头部A,不同油气比)

Fig. 5 Radial profiles of outlet CO volume fraction
(dome A, different fuel air ratios)

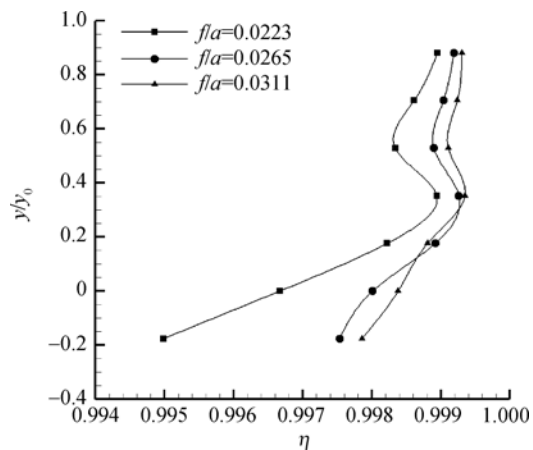


图6 出口截面燃烧效率径向分布(头部A,不同油气比)

Fig. 6 Radial profiles of outlet combustion efficiency
(dome A, different fuel air ratios)

y/y_0 表示在燃烧室出口截面上各测点相对于测量段中心沿半径方向上高度的位置,即纵坐标轴数值0为单头部燃烧试验件出口中心位置,数值1为壁面位置。

由图3可以看出,在距中心沿半径方向高度为0.2~0.5时温度相对最高,靠近中心轴向温度稍有降低,而在壁面附近温度最低。这是由于该试验件为单管燃烧室,壁面上既没有主燃孔也没有掺混孔,因此燃烧回流区比较长,而燃烧室长度比较短,温度测量位置有可能在回流区尾部之前,因此在距中心沿半径方向高度为0.2~0.5附近测点刚好测量的是火焰锋面附近,所以温度较高,

而中心处为回流区,中间温度稍有下降,壁面附近由于有火焰筒上大量冷却小孔进气保护火焰筒,壁面附近温度最低.比较图3~图6,在温度高的区域附近,燃烧比较充分,因此燃烧效率 η 均相对比较高;同时由于LPP燃烧室中 NO_x 为热力型 NO_x ,其排放速率是温度的指数函数,因此温度越高, NO_x 体积分数越大;在火焰筒中心区域,由于 O_2 相对较少,燃烧效率稍有降低,因此CO体积分数有所增加.另外随着油气比的增加,由于喷入更多的燃油并参与燃烧,温度逐渐增加,热力型 NO_x 排放速率大大增加,因此相应的 NO_x 体积分数明显增加,相应的出口截面温度也逐渐增加;由于主级喷入的燃油逐渐增加,有利于主级燃油的雾化,因此CO体积分数稍有降低,导致燃烧效率 η 增加不大;由于LPP燃烧室结构没有发生改变,因此随着油气比的增加,燃烧性能出口截面径向分布趋势基本保持不变.

图7~图9所示为头部B的燃烧室出口截面燃烧性能曲线,比较图3和图7,由于燃烧室头部有所差异,因此导致燃烧区域回流区有所变化,温度的径向分布有所变化,相比头部A,头部B高温区域向燃烧室中心偏移.而污染物排放与温度随油气比增加的变化规律大致与头部A一致,即出口截面温度和 NO_x 体积分数随油气比的增加而增大;而CO体积分数随油气比增加而降低.

2.2 头部结构对LPP燃烧室燃烧性能的影响

为了比较不同头部结构对燃烧性能的影响,方案1中油气比 $f/a=0.0265$ 为LPP燃烧室设计点油气比,因此取方案1中 $f/a=0.0265$ 这一

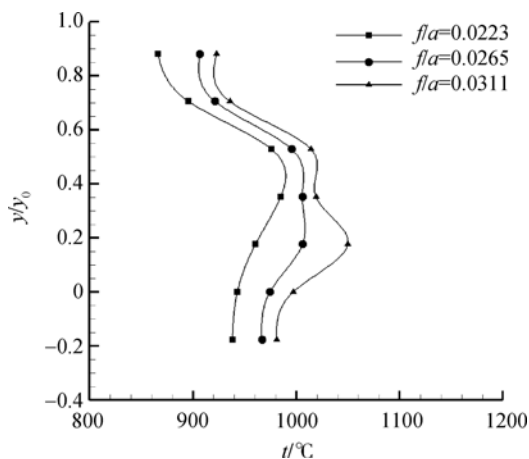


图7 出口截面温度径向分布(头部B,不同油气比)

Fig. 7 Radial profiles of outlet temperature
(dome B, different fuel air ratios)

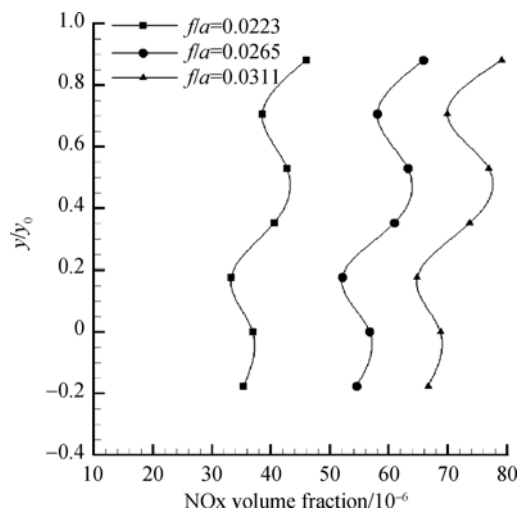


图8 出口截面 NO_x 体积分数径向分布
(头部B,不同油气比)

Fig. 8 Radial profiles of outlet NO_x volume fraction
(dome B, different fuel air ratios)

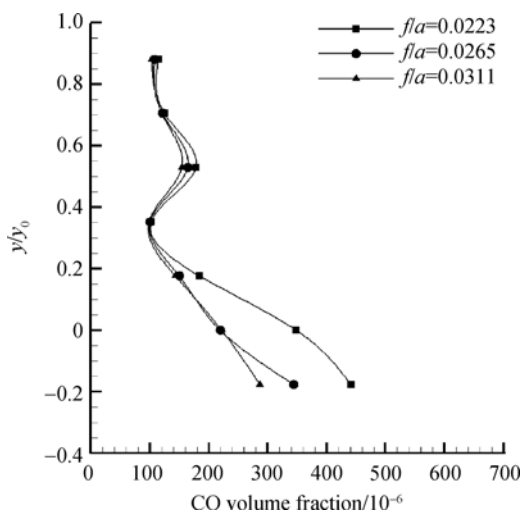


图9 出口截面CO体积分数径向分布
(头部B,不同油气比)

Fig. 9 Radial profiles of outlet CO volume fraction
(dome B, different fuel air ratios)

工况来研究两种不同值班级旋流器在同一油气比下对燃烧性能的影响.

图10和图11分别为装有头部A和头部B的LPP燃烧室出口截面温度和 NO_x 体积分数沿径向分布比较图,由图中可以看出:设计点油气比下,头部A出口截面温度整体稍高于头部B,由于燃烧温度稍高,热力型 NO_x 排放速率稍大,因此头部B的 NO_x 体积分数也明显要高于头部A.头部A出口截面 NO_x 排放更少.

2.3 进口空气温度对LPP燃烧室燃烧性能的影响

本文研究了两种进口空气温度 t_0 对装有头

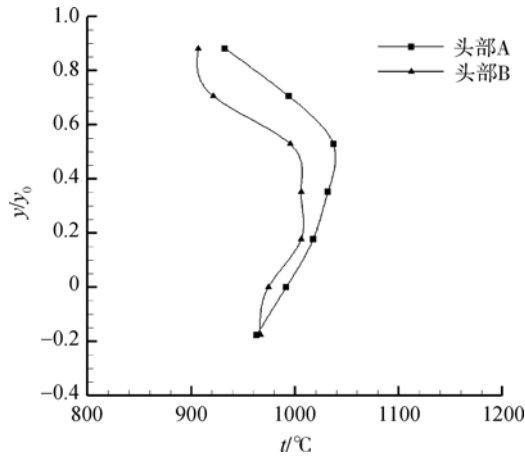


图 10 出口截面温度径向分布(不同头部结构)
Fig. 10 Radial profiles of outlet temperature
(different dome structures)

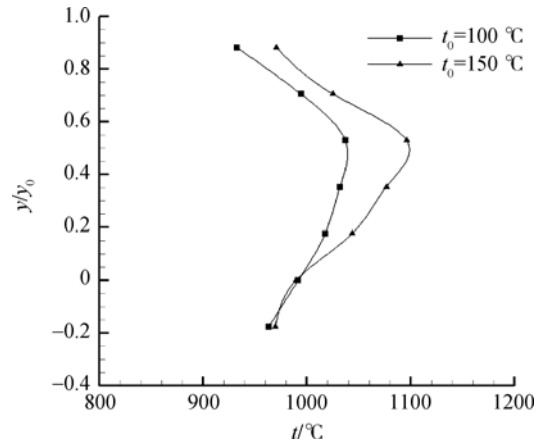


图 12 出口截面温度径向分布(不同进口空气温度)
Fig. 12 Radial profiles of outlet temperature
(different inlet air temperatures)

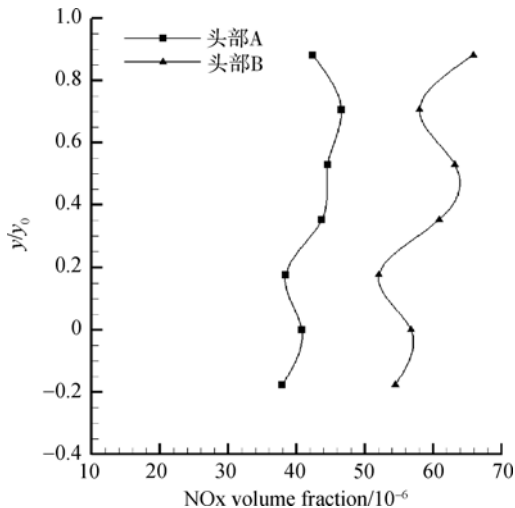


图 11 出口截面 NOx 体积分数径向分布(不同头部结构)
Fig. 11 Radial profiles of outlet NOx volume fraction
(different dome structures)

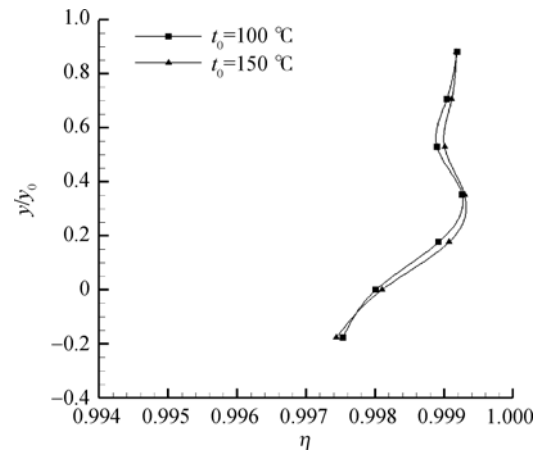


图 13 出口截面燃烧效率径向分布(不同进口空气温度)
Fig. 13 Radial profiles of outlet combustion efficiency
(different inlet air temperatures)

部 A 的 LPP 燃烧室燃烧性能的影响,如方案 1 和方案 2 所示,在同一设计点油气比为 0.0265 下,通过改变进口空气温度,分别测量头部 A 在进口空气温度为 100°C (方案 1) 和 150°C (方案 2) 时出口截面燃烧性能,如图 12~图 14 所示.随着进口空气温度增加,喷嘴喷出的燃油更有利于雾化与蒸发,因此燃油能更好更快地与空气进行掺混,并形成预混预蒸发可燃混气,因此燃烧效率稍有增长.由于进口空气温度增加,而燃烧效率与油气比保持不变,因此燃烧室温升保持不变,出口截面温度相应增加,而热力型 NOx 排放速率有所增加,导致燃烧室出口截面 NOx 排放有所增加.从图 12~图 14 可以看出,由于燃烧室结构同样没有发生改变,因此燃烧室出口截面各参数沿出口径向

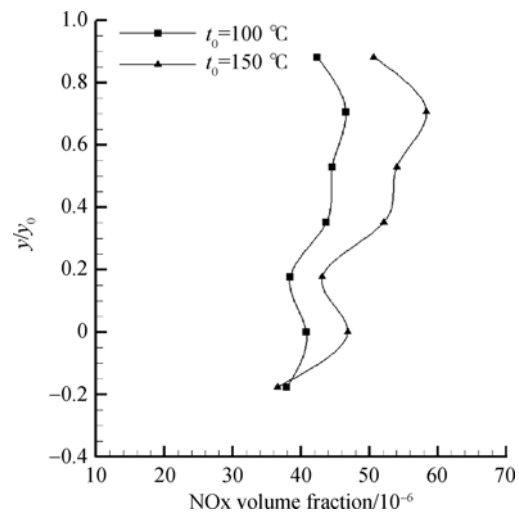


图 14 出口截面 NOx 体积分数径向分布
(不同进口空气温度)

Fig. 14 Radial profiles of outlet NOx volume fraction
(different inlet air temperatures)

分布规律基本相似。

2.4 值班级喷嘴安装位置对 LPP 燃烧室燃烧性能的影响

为了研究值班级喷嘴安装位置对 LPP 燃烧室出口截面燃烧性能的影响,本文方案 3 在装有头部 A 的 LPP 燃烧室,在相同进口参数条件下,分别将值班级喷嘴安装在值班级旋流器叶片出口位置(用 X0 表示)和文丘里管的喉道处位置(用 X1 表示),分别测量 LPP 燃烧室燃烧性能,如图 15~图 18 所示。

从图 15~图 18 中可以看出,值班级喷嘴安装在文丘里管的喉道处时,其 CO 体积分数稍低,

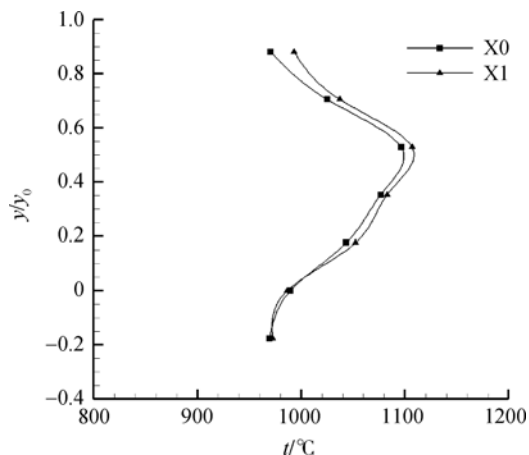


图 15 出口截面温度径向分布
(不同值班级喷嘴安装位置)

Fig. 15 Radial profiles of outlet temperature
(different positions of pilot atomizer)

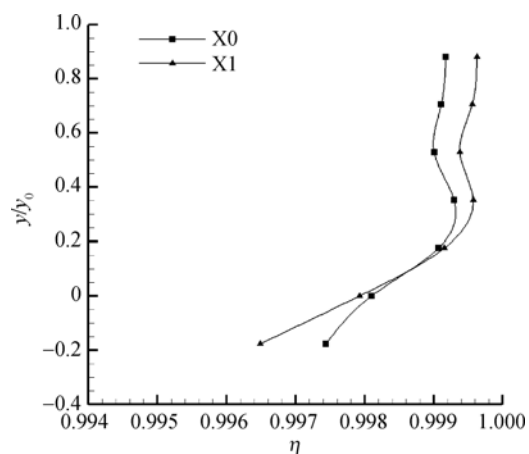


图 16 出口截面燃烧效率径向分布
(不同值班级喷嘴安装位置)

Fig. 16 Radial profiles of outlet combustion efficiency
(different positions of pilot atomizer)

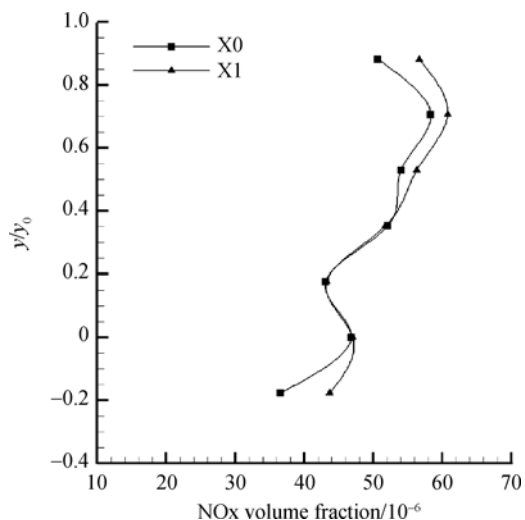


图 17 出口截面 NOx 体积分数径向分布
(不同值班级喷嘴安装位置)

Fig. 17 Radial profiles of outlet NOx volume fraction
(different positions of pilot atomizer)

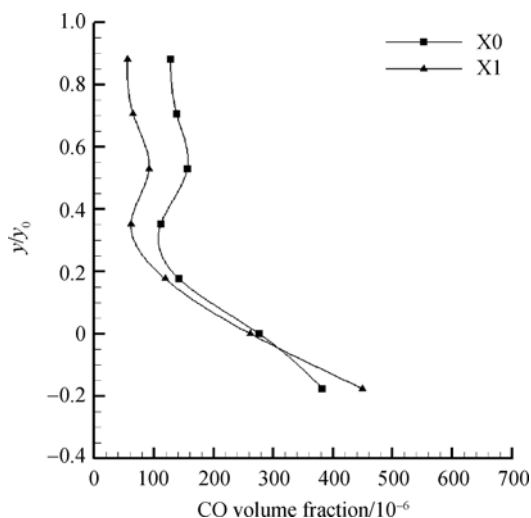


图 18 出口截面 CO 体积分数径向分布
(不同值班级喷嘴安装位置)

Fig. 18 Radial profiles of outlet CO volume fraction
(different positions of pilot atomizer)

燃烧效率和温度稍高,导致出口截面 NOx 体积分数也稍高.这可能是由于当值班级喷嘴安装在文丘里管的喉道处时,与安装在值班级旋流器叶片出口位置相比,文丘里管的喉道处流通面积显著减少,气流加速,提高了气流速度与喷油速度之间的速度差,从而有利于值班级喷嘴喷出的燃油的气动雾化与掺混,因此燃烧更充分.虽然值班级喷嘴安装在文丘里管的喉道处位置,燃烧性能稍有提高,但增加不明显,并且实际燃烧中,在该位置燃烧很不稳定,燃烧噪声大,因此建议值班级喷嘴安装在值班级旋流器叶片出口位置。

2.5 进口空气流量对 LPP 燃烧室燃烧性能的影响

本文还同时研究了不同进口空气流量对 LPP 燃烧室燃烧性能的影响. 方案 4 中, 保持进口空气温度为 150°C , 油气比 $f/a=0.0265$, 值班级喷嘴安装在值班级旋流器叶片出口位置, 通过改变进口空气流量, 即改变 LPP 燃烧室气流流动速度, 研究其对 LPP 燃烧室燃烧性能的影响, 如图 19~图 22 所示.

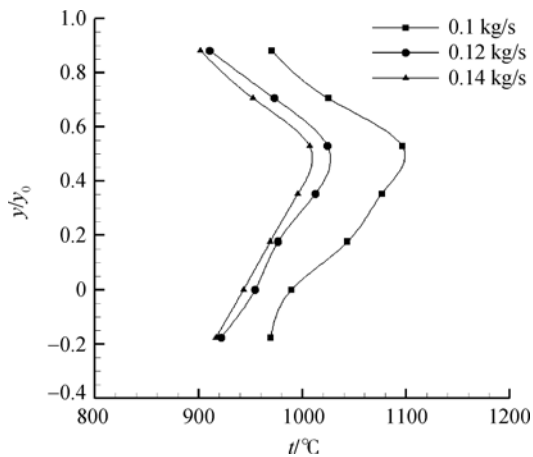


图 19 出口截面温度径向分布 (不同进口空气流量)

Fig. 19 Radial profiles of outlet temperature (different inlet air mass flow rates)

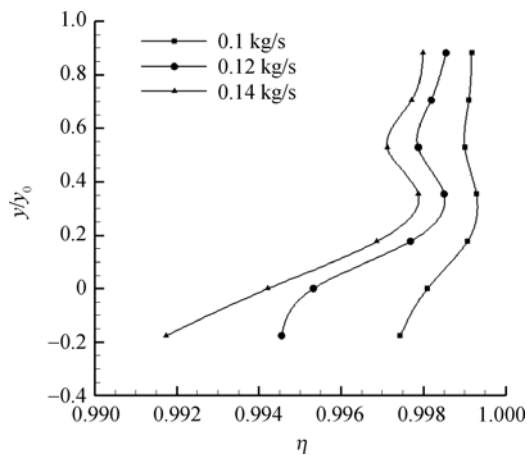


图 20 出口截面燃烧效率径向分布 (不同进口空气流量)

Fig. 20 Radial profiles of outlet combustion efficiency (different inlet air mass flow rates)

从图 22 可以看出, 随着进口空气流量增加, 气流流速增加, 因此在 LPP 燃烧室中停留时间减少, 因此燃烧不充分, 出口截面 CO 体积分数增加, 导致出口截面燃烧效率下降 (图 20) 和温度减少 (图 19), 因此相应燃烧产生 NO_x 体积分数也

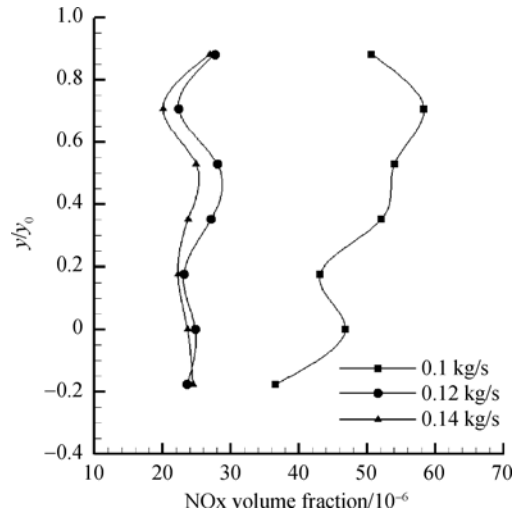


图 21 出口截面 NO_x 体积分数径向分布 (不同进口空气流量)

Fig. 21 Radial profiles of outlet NO_x volume fraction (different inlet air mass flow rates)

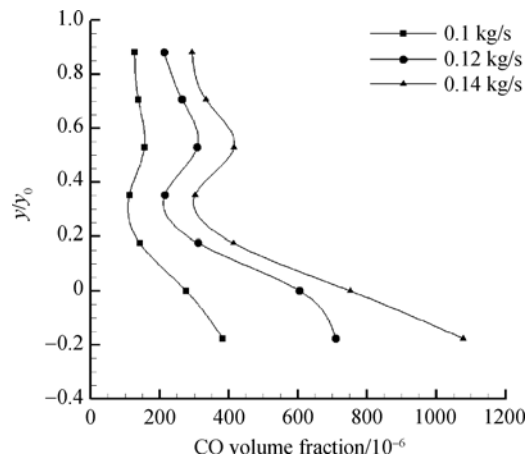


图 22 出口截面 CO 体积分数径向分布 (不同进口空气流量)

Fig. 22 Radial profiles of outlet CO volume fraction (different inlet air mass flow rates)

随着进口空气流量的增加而降低。

3 结论

本文对 LPP 燃烧室常压条件下燃烧性能进行了试验研究, 分别研究了不同头部结构、油气比、进口空气温度、值班级喷嘴位置和进口空气流量等参数对燃烧性能的影响, 获得以下结论:

1) 在保证其他条件不变情况下, 改变油气比, 随着油气比的增加, 燃烧室出口截面温度、燃烧效率、燃烧产物 NO_x 体积分数升高, 而 CO 体积分数相应降低。

2) 在相同的试验工况下头部 A 的燃烧性能

稍优于头部 B。

3) 在保证其他条件不变情况下,改变进口空气温度,随着进口空气温度的增高,燃烧室出口截面温度、燃烧效率明显增高, NO_x 体积分数也相应升高,而 CO 体积分数降低,因此提高进口空气温度对燃烧有利,但不利于污染物排放。

4) 值班级喷嘴安装位置对燃烧室出口截面污染物排放影响非常小,但直接影响其燃烧不稳定性,因此建议安装在值班级旋流器叶片出口位置。

5) 随着进口空气流量增加,燃烧效率下降,燃烧室出口截面温度降低,相应的 NO_x 体积分数降低,而 CO 体积分数相应增高。

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] 彭云晖, 许全宏, 张驰, 等. 我国大飞机发动机低污染燃烧室发展考虑[R]. 深圳: 中国航空学会 2007 年学术年会, 2007.
- [3] 尚守堂, 程明, 张军峰, 等. 低排放长寿命燃烧室关键技术分析[R]. 深圳: 中国航空学会 2007 年学术年会, 2007.
- [4] 史家荣, 徐华胜. 民机发动机燃烧室设计特点与研制的关键技术[R]. 深圳: 中国航空学会 2007 年学术年会, 2007.
- [5] Sokoloushi D E, Rohde J E. The E3 combustors: status and challenges[R]. AIAA 81-1351, 1981.
- [6] Mongia H C. TAPS-A: 4th generation propulsion combustor technology for low emissions[R]. AIAA-2003-2657, 2003.
- [7] Lazik W, Doerr T, Bake S, et al. Development of lean-burn low NO_x combustion technology at Rolls-Royce Deutschland[R]. ASME Paper GT2008-51115, 2008.
- [8] 邓远灏, 颜应文, 朱嘉伟, 等. LPP 低污染燃烧室两相喷雾燃烧数值研究[J]. 推进技术, 2013, 20(3): 353-361.
DENG Yuanhao, YAN Yingwen, ZHU Jiawei, et al. Numerical study of two-phase spray combustion for lean premixed prevaporized low-emission combustor[J]. Journal of Propulsion Technology, 2013, 20(3): 353-361. (in Chinese)
- [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 for head of lean premixed prevaporized low emission combustor[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(6): 965-976. (in Chinese)
- [10] 刘强, 索建秦, 梁红侠, 等. 直混燃烧与 LPP 组合燃烧室数值研究[J]. 航空动力学报, 2012, 27(11): 2448-2454.
LIU Qiang, SUO Jianqin, LIANG Hongxia, et al. Numerical investigation of combination of direct mixing combustion and LPP combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(11): 2448-2454. (in Chinese)
- [11] 李锋, 程明, 尚守堂, 等. 双环预混旋流与单、双环腔燃烧室性能对比[J]. 航空动力学报, 2012, 27(8): 1681-1687.
LI Feng, CHENG Ming, SHANG Shoutang, et al. Capability compare of twin annular premixing swirler with the single annular and dual annular combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(8): 1681-1687. (in Chinese)
- [12] 颜应文, 赵坚行, 张靖周, 等. 大涡模拟环形燃烧室污染特性[J]. 航空动力学报, 2008, 23(7): 1161-1167.
YAN Yingwen, ZHAO Jianxing, ZHANG Jingzhou, et al. Large eddy simulation of pollution formation in model annular combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(7): 1161-1167. (in Chinese)
- [13] 王铮钧, 索建秦, 黎明, 等. 基于贫油预混预蒸发(LPP)的多点喷射低污染燃烧室头部方案研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(34): 10409-10416.
WANG Zhengjun, SUO Jianqin, LI Ming, et al. Study of dome for low emission combustor with multipoint injection based on LPP[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(34): 10409-10416. (in Chinese)
- [14] 谢刚, 祁海鹰, 李宇红, 等. R0110 重型燃气轮机燃烧室污染排放性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(20): 51-57.
XIE Gang, QI Haiying, LI Yuhong, et al. Emission performance of the dry low NO_x combustors for R0110 heavy-duty gas turbine[J]. Proceeding of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2010, 30(20): 51-57. (in Chinese)
- [15] 刘富强, 穆勇, 刘存喜, 等. 燃油分级对中心分级燃烧室 NO_x 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 NO_x emission from central stage combustor[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2013, 19(3): 254-260. (in Chinese)
- [16] 徐榕, 赵坚行, 刘勇, 等. TAPS/MLDI 低污染燃烧室油雾特性[J]. 航空动力学报, 2012, 27(11): 2421-2428.
XU Rong, ZHAO Jianxing, LIU Yong, et al. Fuel spray characteristic of TAPS/MLDI low emission combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(11): 2421-2428. (in Chinese)
- [17] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册: 第 9 分册 主燃烧室[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000.