

燃料分配方式对微燃机燃烧室燃烧性能影响

陈炫任¹, 刘爱骥¹, 胡建², 杨宇东¹, 王成军¹, 曾文¹, 毛晓东¹

(1. 沈阳航空航天大学 航空发动机学院
辽宁省航空推进系统先进测试技术重点实验室, 沈阳 110136;
2. 中国航空发动机集团有限公司 湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

摘 要: 提出了一种喷嘴位置可采用燃料多点喷射的干式低排放(DLE)微型燃气轮机燃烧室,为了获得值班级与主燃级之间燃料分配方式对燃烧性能的影响,对该燃烧室在不同分配方式下的燃烧性能进行了实验测试与数值模拟。结果表明:燃料喷嘴位置改变对污染物排放影响不显著;燃料分配方式的改变对温度场和污染物的生成特性有影响,随着两级燃料分配比例的增大,NO_x排放量呈现先减少后增加的趋势,存在一个最佳的燃料分配比例使 NO_x 排放最低;燃烧室内存在明显的中心回流区(PRZ),便于点火及火焰传播;热力型 NO_x 的生成量与温度高于 1950 K 的区域大小和最高燃气温度有直接关系。所设计的燃烧室在以天然气为燃料的所有工况下 NO_x 排放都可降低到 50 mg/m³ 以下,达到了低污染燃烧室排放标准(小于 50 mg/m³)。

关 键 词: 干式低排放 (DLE) 技术; 燃料分配方式; 氮氧化物 (NO_x); 燃烧性能; 低污染燃烧室

中图分类号: V231.2 **文献标志码:** A

Effect of fuel distribution on combustion performance for micro gas turbine combustor

CHEN Xuanren¹, LIU Aiguo¹, HU Jian², YANG Yudong¹,
WANG Chengjun¹, ZENG Wen¹, MAO Xiaodong¹

(1. Key Laboratory of Advanced Measurement and Test Technique for Aviation Propulsion Systems, Liaoning Province, School of Aero-engine, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;
2. Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Aero Engine Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China)

Abstract: A dry low emission (DLE) micro gas turbine combustor with variable nozzle position and multi-point fuel injection was put forward. In order to gain the effect of different fuel-staged methods on the combustion performance for the combustor, and the effect of fuel distribution mode between pilot and primary on combustion performance, different distribution modes of the combustor were experimentally studied by numerical simulation. Results showed that: the change of fuel nozzle position had little effect on the emissions. With the increase of two-stage fuel distribution ratio, the NO_x emissions decreased first and then increased, and there existed an optimal fuel distribution ratio to minimize NO_x emissions.

收稿日期:2020-02-28

基金项目:辽宁省自然科学基金(20180550358,2019-ZD-0226); 辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1802092)

作者简介:陈炫任(1994—),男,硕士生,主要研究方向为航空发动机燃烧设计与分析技术。E-mail:1874552942@qq.com

通信作者:刘爱骥(1979—),男,副教授,博士,主要研究方向为先进低排放燃烧技术。E-mail:agliu@sau.edu.cn

引用格式:陈炫任,刘爱骥,胡建,等. 燃料分配方式对微燃机燃烧室燃烧性能影响[J]. 航空动力学报,2020,35(9):1875-1883.
CHEN Xuanren, LIU Aiguo, HU Jian, et al. Effect of fuel distribution on combustion performance for micro gas turbine combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(9): 1875-1883.

There existed obviously a primary recirculation zone (PRZ) in combustor, helping to facilitate ignition and propagation of flame. The amount of thermal NO_x produced was directly related to the size of the region above 1950 K and the highest gas temperature. The NO_x emissions of the designed combustion can be reduced to below 50 mg/m³ under all working conditions with natural gas as fuel, which can reach the level of low-emission combustion (less than 50 mg/m³).

Key words: dry low emission (DLE) technology; fuel distribution; nitrogen oxides (NO_x); combustion performance; low-emission combustor

燃气轮机排放的主要污染物包括 NO_x、CO、未充分燃烧的碳氢化合物等,这些对于环境的污染是非常严重的。随着燃气轮机的飞速发展以及环境的恶化,燃气轮机燃烧室的设计已经从原来的只追求高燃烧效率向高效低污染模式转变^[1]。干式低污染技术(DLN 或 DLE)是目前主流的低排放燃烧技术,这项技术的基本原理是稀态均相预混燃烧,是通过燃料与过量空气进入燃烧室之前的均匀混合,来保证燃烧室内不产生局部高温,从而降低 NO_x 的排放^[2]。DLE 燃烧技术在大型燃气轮机上得到了广泛的应用,美国通用(GE)公司、日本三菱公司、西门子的 E 级和 F 级燃气轮机采用干式低排放技术,均可将 NO_x 降低到 50 mg/m³,其中,当 GE 公司的 F 级采用 DLN2.6+燃烧器时,NO_x 排放可降低至 19 mg/m³。这些低排放燃烧室的共同特点,一是燃料预先流经混气机构上的诸多小孔分散喷入空气中,二是来流空气有相当的旋流和湍流强度,三是具有足够长的预混距离。

近几年来国内外在降低污染物排放方面开展了大量的基础研究,在燃烧室结构参数、气动参数对低排放燃烧室污染物生成特性的影响开展了研究。在燃烧室的结构参数方面,沈阳航空航天大学^[3-5]对一种采用三级旋流器的中心分级燃烧室开展了实验研究,获得了结构参数改变对于燃烧特性的影响。吴垚程等^[6]用数值模拟的方法获得了旋流数、文氏管间距、扩压器与头部的间距等对多点喷射燃烧室回流区的影响规律。刘潇^[7]针对预混燃烧特性进行了研究,得到了贫燃预混燃烧室的设计方法以及燃料掺混对于燃烧模式的影响。朱佳伟、邓远灏等^[8-10]对贫油预混预蒸发(LPP)燃烧室的两相喷雾燃烧性能进行了数值模拟与实验研究,获得了不同旋流数对于燃烧室内流场的影响。Sadamas 等^[11]运用数值模拟和实验研究了旋流器结构变化对预混均匀性和燃烧室燃烧特性的影响。在燃烧室的气动参数方面,林

宇震等^[12]对燃烧室的分级燃烧空气流量进行了实验研究,得到了分级燃烧室的设计经验。程明等^[13]对于双环预混旋流燃烧室(TAPS)燃烧室的值班级与主燃级燃料分配方式进行了数值模拟研究,得到了其对于燃烧性能及排放的影响;邹博文、付镇柏等^[14-15]对中心分级燃烧室的燃油分级进行实验测试了,并对贫油熄火机理进行了数值模拟研究。Benarous 等^[16]对燃料当量比的变化,进行了预混燃烧室的数值模拟研究,并得出燃料当量比变化对 CO 和 NO_x 生成量的影响。邢畅等^[17]通过实验研究了分级方式对于燃烧室燃料预混特性的影响,指出了不同燃料预混特征数对于燃烧室出口平均分布、出口温度分布系数以及总压恢复系数没有影响。

微型燃气轮机具有结构紧凑、燃料通用性强、使用灵活、单机功率密度大等特点,在分布式供能系统中得到了广泛应用。目前,世界范围内生产微型燃气轮机的公司主要有 Honewell、Capstone、Eliott、Ingersoll-Rand、GE、Bowman、Asea Brown Boveri(ABB)、Ishikawajima-Harima Heavy Industries(IHI)和川崎等。微型燃气轮机同样面临着降低污染物排放问题。与大型燃气轮机相比,微型燃气轮机燃烧室结构紧凑,采用 DLE 燃烧技术时可用于预混的距离和燃料在燃烧室内的停留时间会明显缩短。需要在燃料混合、燃烧控制等方面开展深入的研究,开发出适合微型燃气轮机的 DLE 燃烧室。

本文采用实验测试与数值模拟相结合的方式,对一种带有两级轴向旋流器的干式低排放微型燃气轮机燃烧室内部流动特性,燃料与空气混合特性及值班级与主燃级的燃料分配对燃烧室燃烧特性的影响进行了研究。

1 研究对象

所研究的 DLE 燃烧室结构如图 1 所示,使用天然气作为燃料,为逆流式燃烧室,采用中心分级

的方式。其中,值班级采用扩散燃烧来产生稳定的火焰,主燃级采用贫燃预混燃烧,来降低火焰温度,从而减少 NO_x 的排放。燃烧室设有 4 个燃料喷口如图 2 所示,其中,喷口 1、2 为值班级燃料喷口,喷口 3、4 为主燃级燃料喷口。燃料喷口 1 位于一级旋流器后,采用多点喷射的方式,气体燃料通过喷口与经过一级旋流器的空气掺混,在值班级燃烧区进行扩散燃烧;喷口 2 位于二级旋流器前,其射流方向与旋流器轴向一致;喷口 3、4 均位于二级旋流器的外套筒上,两喷口的射流方向为旋流器轴线的垂直方向,由该燃料喷口喷射出的燃料与经过二级旋流器的空气进行预混后再进入燃烧室主燃级燃烧区进行燃烧。该燃烧室取消了主燃孔,同时为了满足燃烧室出口温度场的要求,在燃烧室出口附近设计了 8 个掺混孔来调节燃烧室出口温度场。燃烧室采用二级轴向旋流器,旋流器两级叶片旋向相同,但角度不同,作用是使火焰筒内部产生回流区,便于点火和火焰的稳定传播,还可以帮助主燃级燃料与空气进行均匀混合,有利于主燃级的预混燃烧。

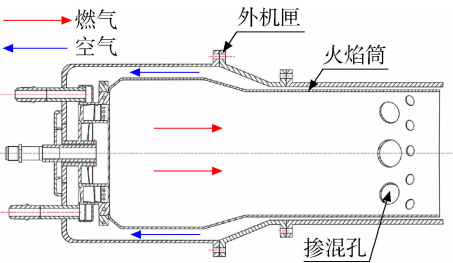


图 1 燃烧室结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the combustor

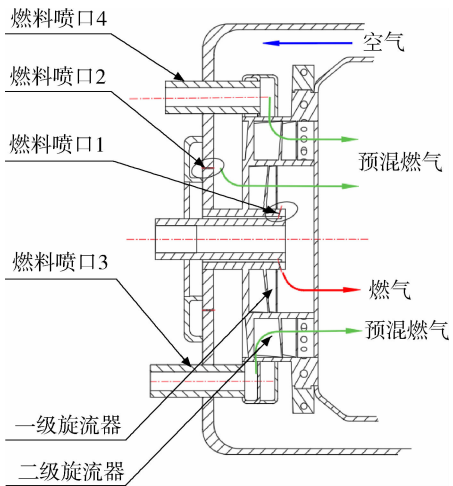


图 2 燃烧室头部放大图

Fig.2 Enlarged schematic diagram of combustor head

根据微型燃气轮机的总体性能设计,燃烧室设计的目标参数如表 1 所示,其中污染物排放量(文中以质量浓度来计量,故后文排放量均指质量浓度,单位为 mg/m³)为折算到基准氧含量为 15% 的排放量。

表 1 燃烧室总体设计参数

Table 1 Overall design parameters of combustor

参数	数值
空气质量流量/(kg/s)	1.491
进口总温/K	445.27
进口总压/kPa	327.7
NO _x 排放量指标/(mg/m ³)	<50

本文对所研究的 DLE 燃烧室在表 2 所示的喷口组合方式以及不同值班级与主燃级间燃料分配方式下进行了实验测试。为了进一步探究燃烧室内部流场及各工况下的燃烧室出口污染物 NO_x 排放量变化的原因,还对该燃烧室展开了数值计算,得到了燃烧室内部温度场和 NO_x 分布,并将计算结果与实验数据进行对比。

表 2 不同的喷口组合方式

Table 2 Different nozzle combinations

方案编号	喷口组合方式
1	1+2+3
2	2+3+4
3	1+2+4
4	1+2+3+4

2 实验测试与结果分析

本次实验采用的是表 1 所示的设计工况下进行实验,即在实验台上模拟发动机处于全负荷状态时进行的燃烧特性测试。所使用的燃料为辽 3 号天然气,其体积分数为 92.18% 的 CH₄, 4.54% 的 C₂H₆, 1.2% 的 C₃H₈, 其余为不可燃成分,密度为 0.654kg/m³,热值为 36920kJ/m³,具体实验系统及实验件见参考文献[18]。其中空气流量采用标准孔板质量流量计测量,测量误差为±1.0%。燃料流量采用质量流量计测量,测量误差为±1.0%。进出口温度采用 K 型热电偶,测量误差为±1.0%。燃烧室出口尾气采用 Testo 350 烟气分析仪进行测量,NO_x 排放量测量误差为±5% 测量值。

为获得燃料在值班级与主燃级间分配方式对燃烧污染物生成的影响,定义 r 为值班级与主燃级之间燃料的质量流量(文中简称为流量)之比。

$$r = \frac{q_{m,p}}{q_{m,m}}$$

(1)

其中 $q_{m,p}$ 为值班级燃料流量(kg/s); $q_{m,m}$ 为主燃级燃料流量(kg/s)。

实验测试中发现,在 r 小于 0.12 或大于 0.71 后分别发生贫油熄火和富油熄火,因此 r 在此区间范围内进行了选取。在实验测试过程中,首先调节空气和燃料流量,使燃烧室在设计点稳定运行,待一个点测试完后保持空气流量不变,使用燃料流量计调节值班级燃料流量,稳定后再调节主燃级流量计,使燃料总量保持不变。实验测试所采用的值班级与主燃级燃料流量如表 3 所示。表中给出的值班级与主燃级燃料流量为该级所开喷口的燃料流量总和。

表 3 值班级与主燃级流量

Table 3 Fuel mass flow rate for pilot and primary stage

工况 编号	质量流量/ 10^{-3} (kg/s)		r
	值班级	主燃级	
A	0.981	8.175	0.12
B	1.254	7.902	0.16
C	1.526	7.630	0.20
D	1.744	7.412	0.24
E	3.052	6.104	0.50
F	3.815	5.341	0.71

图 3 为实验测得的不同喷口组合方式下的燃烧室出口 NOx 排放。如图所示,4 条曲线的变化趋势相同,线上大部分点的数据差别较小,说明不同燃料喷口组合方式即喷口位置改变对于 NOx 排放的影响不是很大。由 4 种方案的 NOx 排放曲线可以看出,随着值班级与主燃级燃料流量比 r 的增大,NOx 排放呈现出先下降再增大的变化趋势,在 $r=0.24$ 附近 NOx 排放达到了最低值,为最佳燃料流量比。两级流量比 0.24 为根据空气流量分配特性计算出的燃烧室设计点分配比例,可以看出燃料在值班级与主燃级之间的分配比例对于燃烧室的排放影响显著。从 NOx 的排放量来看,4 个喷口组合方案的整体 NOx 排放量均处于 50 mg/m^3 以下,其中, r 在 $0.17\sim0.5$ 范围内污染物 NOx 排放量降低至 40 mg/m^3 以下,方案 4 的 NOx 排放量最低为 23 mg/m^3 。

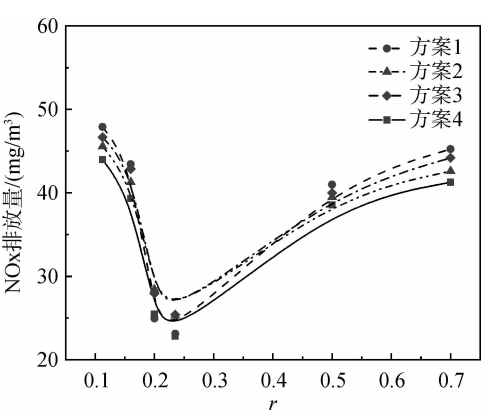


图 3 不同燃料分配方式下的 NOx 排放
Fig. 3 NOx emissions under different fuel distributions

3 计算模型

3.1 网格划分与边界条件

本文使用 ANSYS Meshing 对三维燃烧室模型进行网格划分。由于燃料喷孔不仅直径小而且数量多,所以采用区域法和非结构网格划分,网格基本单元为四面体及六面体网格,并对燃料喷孔以及主燃区位置进行部分加密。又对该 DLE 燃烧室模型进行了网格无关性验证,图 4 给出了喷口组合方式为 1+2+3+4,值班级与主燃级燃料流量比为 0.24 时,燃烧室中心轴线上温度分布。由图可知,286 万网格与 359 万网格的计算结果差异较小,可认为 286 万网格已达到网格无关性要求。因此燃烧室流体域最终网格数为 286 万,总节点数为 53 万,燃烧室计算网格如图 5 所示。同时,在图中定义了原点及各轴的方向,竖直向上为 X 轴正向,燃烧室轴向为 Y 轴正向,水平向外为 Z 轴正向,坐标原点位于燃烧室轴线左端起始点,如图 5 中红点所示。

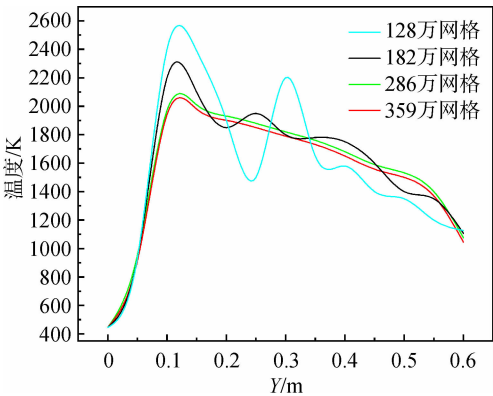


图 4 网格无关性验证
Fig. 4 Grid independence verification



图 5 DLE 燃烧室模型网格图
Fig. 5 Grid of DLE combustor model

利用 FLUENT 软件对低排放微型燃气轮机燃烧室的流场和燃烧场进行了数值模拟,研究了不同燃料分配方式对燃烧性能及流场的影响,采用了 Realizable $k-\epsilon$ 模型模拟湍流黏性,标准壁面无滑移。燃烧室燃料选用天然气,燃料成分与实验相同。由于本模型的值班级为扩散燃烧,所以选用有限速率/涡耗散 (finite-rate/eddy-dissipation) 模型来模拟非全预混燃烧,考虑到热辐射对于壁温和气流温度的影响,采用离散坐标辐射 (DO) 模型,NO_x 排放只考虑热力型。动量、湍流动能以及湍流动能耗散率等其他物理量均采用 2 阶迎风插值格式,计算方法使用解压力耦合方程的半隐式 (SIMPLE) 算法对离散方程进行迭代求解。指定燃烧室空气进口为速度进口,给定速度和温度;值班级及主燃级燃料进口为质量进口,给定质量流量及进口温度;燃烧室出口为压力出口,给定静压;固体壁面为绝热壁面。本文数值模拟的能量收敛标准为残差值低于 1×10^{-6} ,其余全部残差小于 1.0×10^{-3} 时的迭代结果作为收敛结果。由上面实验结果可以看出,方案 4 在 6 种工况下的 NO_x 排放普遍较低,所以数值模拟采用方案 4 (喷口 1+2+3+4) 的喷口组合方式展开。

3.2 模型的验证

表 4 为采用方案 4 的喷口组合方式,在 6 种不同值班级与主燃级燃料分配比例下的计算结果

表 4 计算结果与实验结果对比
Table 4 Comparison of simulation and experiment results

工况编号	平均温度/K		误差/%
	实验结果	计算结果	
A	1063.05	1049.36	1.29
B	1054.11	1038.05	1.52
C	1042.65	1020.79	2.09
D	1038.33	1015.23	2.22
E	1059.42	1045.41	1.32
F	1089.17	1063.27	2.38

与实验得到的出口平均温度对比,由表中数据可知,实验结果与计算结果的误差均能保持在 5% 以下,而且温度变化趋势一致,说明两者结果基本吻合;同时由图 4 中大网格数的两条曲线可知,燃烧室内中心轴线上的温度在主燃区后呈现逐渐降低的趋势,没有温度突变现象,符合真实燃烧室内燃烧情况。

图 6 为在方案 4 喷口组合下计算与实验得到的燃烧室出口截面的 NO_x 排放曲线,由对比结果可知计算结果普遍比实验结果偏低,相对误差在 15% 以下。这是由几方面因素导致的:一方面由于数值模拟只计算了热力型 NO_x,而实际燃料燃烧中还有少量燃油型和快速型 NO_x 的产生,所以计算结果偏低;另一方面,在燃烧室出口 NO_x 的分布是不均匀的,实验结果的采样点布置在燃烧室径向中心位置附近,NO_x 排放量较大,而计算结果是对整个燃烧室出口截面取平均值,在火焰筒壁面附近处,由于冷却作用,温度降到很低,NO_x 排放量基本可以忽略。因此,总的比较结果显示实验的 NO_x 排放比计算的略高,但是两者总体变化趋势保持一致。从温度变化和 NO_x 生成的对比,可以证明所采用的计算方法基本合理可靠,可用于对燃烧室内部燃烧特性的分析。

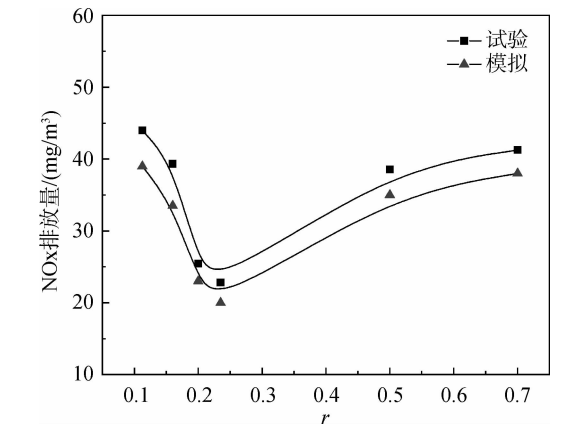


图 6 实验与数值模拟得到的燃烧室出口 NO_x 排放对比
Fig. 6 Comparison of NO_x emission between experiment and simulation at combustor outlet

4 数值计算结果分析

4.1 DLE 燃烧室冷态流场

冷态流场参数如下:进口总温为 445.27 K,总压为 327.7 kPa,空气质量流量为 1.479 1 kg/s,图 7 为从旋流器中心位置 ($X=0$ m) 的纵截面冷态流线图。从图中可以看出,来流空气分别从两

级轴向旋流器以及燃烧室尾部掺混孔进入燃烧室内。空气经过旋流器的旋流作用,形成了一个稳定的中心回流区(PRZ),可以提供稳定的点火源,确保火焰传播;在燃烧室的进口角落形成角回流区(CRZ)。此外,从图中还可看出,由于燃烧室尾部的掺混孔影响,燃烧室尾部的速度可达到100~130 m/s,对燃烧室出口的冷却起到了一定的作用。

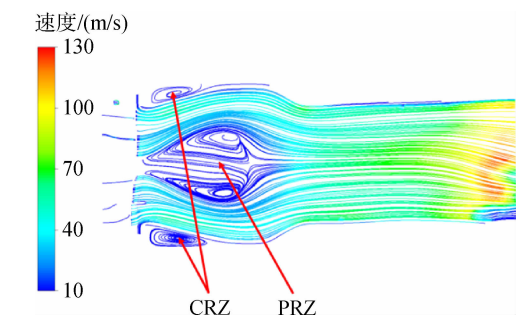


图 7 燃烧室冷态流场

Fig. 7 Cold streamline diagram of combustor

4.2 燃料空气混合特性

图 8 为喷口组合为方案 4(喷口 1+2+3+4)时燃烧室处于冷态状态下,值班级与主燃级燃料在分配方式为工况 A、工况 D、工况 F 下的燃料(主要成分为 CH₄, 所以用 CH₄ 质量分数表示)在预混段出口 Y=0.05 m 截面的掺混情况。如图 8(a)所示,掺混云图的外环为主燃级燃料与第二级旋流器内空气进行掺混得到,记作 S1;内环由值班级 2 号喷口的燃料与第一级旋流器内的空气掺混得到,记作 S2;最内圈的燃料射点为值班级喷口 1 直接喷入燃烧室进行扩散燃烧,故不参与预混分析。由图 8(a)~图 8(c)的对比可知,随着两级燃料流量比 *r* 的增大,主燃级燃料混合的高质量分数区域逐渐消失,混合趋于均匀,值班级燃

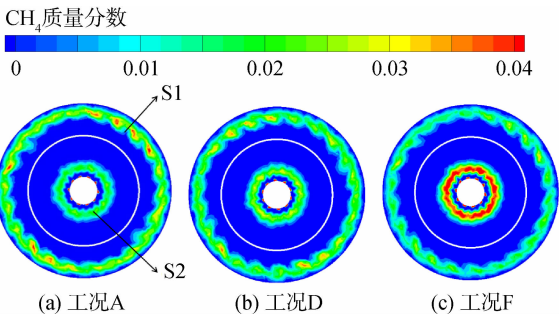


图 8 不同工况下 Y=0.05 m 处燃料/空气混合情况

Fig. 8 Fuel/air mixing under different conditions at Y=0.05 m

料的质量分数增加,燃料分配方式在工况 D(图 8(b))下,两级燃料高质量分数点最少。

根据混合不均匀定义式^[19]

$$N_s = \sqrt{\frac{\delta^2}{\bar{\rho}(1-\bar{\rho})}} \tag{2}$$

$$\delta^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\rho_i - \bar{\rho})^2 \tag{3}$$

式中 *N_s* 为混合不均匀度, *N* 为该平面内燃料浓度点的数量, ρ_i 为该点的燃料质量浓度, $\bar{\rho}$ 为该平面内燃料平均质量浓度, δ 为燃料质量浓度标准差。对燃烧室冷态下 3 种分配方式的预混区域即为 S1 与 S2 处的混合不均匀度进行了计算,结果如表 5 所示,其中混合不均匀度为 1 时代表没有发生混合,混合不均均度为 0 时代表充分混合。由表可知,工况 D 下燃料的最大与最小值相差最小为 0.0078,混合不均匀度为 0.0126,故工况 D 混合效果最好;工况 F 下燃料与空气混合均匀性最差。

表 5 *N_s* 计算结果

Table 5 Calculation result of *N_s*

工况 编号	CH ₄ 质量分数		$\bar{\rho}/10^{-2}$	$\delta^2/10^{-6}$	<i>N_s/10⁻²</i>
	最大值	最小值	(mg/m ³)		
A	0.0379	0.0251	2.92	8.74	1.76
D	0.0343	0.0265	2.87	4.45	1.26
F	0.0398	0.0132	2.07	15.61	2.78

4.3 燃烧室内温度分布特性

图 9(a)~图 9(f)为不同分配比例下燃烧室中心截面(X=0 m)的温度分布云图,燃料分级比例如表 2 所示。由图可见,高温区主要分布在值班级喷口 1 的出口处以及二级旋流器出口处,同时燃烧室的尾部会出现低温区域,这是由于燃烧室尾部的掺混孔所致。由图 9(a)~图 9(f)对比可得,随着值班级与主燃级燃料流量比 *r* 的不断增大,燃烧室中心区域的值班级燃气温度逐渐上升,高温区域逐渐拉长;二级旋流器出口处产生脱体火焰,该火焰随着主燃级燃料流量的减小,火焰温度在不断的降低,燃气高温区不断缩短。造成以上两种现象的原因在于:当空气量不变时, *r* 在 0.12~0.2 变化时,主燃级的燃料分配过多,燃料与空气混合不均匀,导致燃烧时产生较高温度的火焰,使高温区域面积变大。当 *r* 在 0.2~0.7 变化时,主燃级燃料逐渐减少,燃料与空气的混合效果变好,所以燃气温度逐渐降低,直至高于1950 K

的温度区域消失;对于值班级来说,值班级属于扩散燃烧,用于点火和火焰的稳定传播,会产生较高温度的火焰,但是随着燃料流量的增加,导致燃料在值班级喷口处的浓度过大,燃烧不充分,产生的火焰温度也会提升,同时如果值班级火焰的高温区域过长还会烧毁燃烧室后面的涡轮叶片,造成不必要的损失。

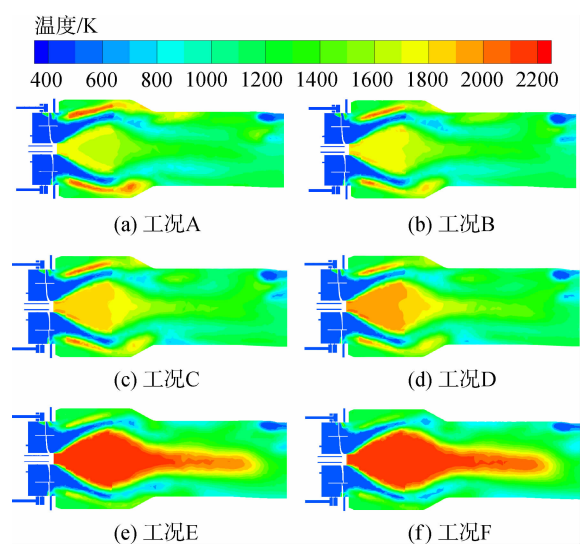


图 9 不同燃料分配方式下 $X=0\text{ m}$ 处的温度分布
Fig. 9 Temperature distribution under different fuel distributions at $X=0\text{ m}$

图 10 为不同燃料分配方式下燃烧室中心轴线上的温度变化,由图可知,由于燃烧室点火发生在 $Y=0.1\text{ m}$ 处截面附近,所以各温度线在该处温度发生大幅度上升,达到了峰值,其中,工况 E 最高为 2259 K ;随着两级流量比 r 增加,相同位置处的温度不断升高,高温点的数量增多,高温段区域逐渐拉长,工况 E、工况 F 下超过 1950 K 的区域

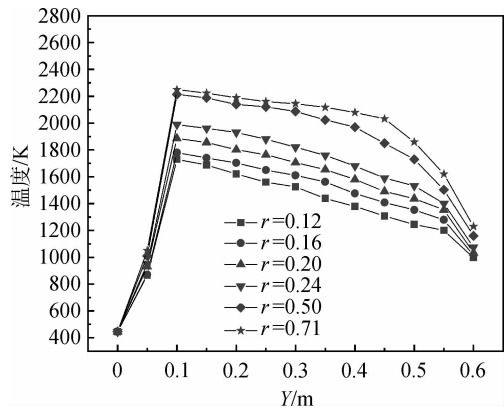


图 10 燃烧室中心线上的温度分布
Fig. 10 Temperature distribution on the center line of combustor

已拉长至 0.45 m 处; r 为 $0.12\sim0.24$ 下的 4 条温度线在 $Y=0.2\sim0.5\text{ m}$ 范围内的间隙基本一致,这是由于该 4 个工况下的流量比 r 间隔为 0.04 ,燃烧室中心位置的值班级燃料流量增加量均为 0.00025 kg/s 左右,故燃烧所产生的温升差距不大;温度线在 Y 大于 0.5 m 的位置开始大幅度下降,这是由于燃烧室尾部掺混孔的空气导致,6 个工况下燃烧室的出口中心位置保持在 $996\sim1187\text{ K}$ 范围内,达到了一定的冷却效果。

4.4 燃烧室内部 NO_x 分布特性

图 11 为燃烧室中心截面 ($X=0\text{ m}$) 处 NO_x 的质量分数云图,由图可知 NO_x 生成量的最大区域与温度超过 1950 K 的区域基本重合,并且图 11(c)~图 11(f) 中 NO_x 生成量最大值出现在值班级火焰锋面附近以及后面的高温区域;而对于图 11(a)、图 11(b) 两图可以看出,两级流量比 r 分别为 0.12 与 0.16 ,主燃级预混均匀性变差,导致其高温区温度超越值班级扩散燃烧火焰的温度,热力型 NO_x 在主燃级质量分数较高。形成以上现象的主要原因在于:热力型 NO_x 的生成原理是由于温度过高(超过 1950 K),空气中的 N_2 与 O_2 的相互作用,此过程为一个强吸热过程,因此该反应只发生在高温区域内,当燃气温度超过 1950 K 时,NO_x 生成量为温度的指数函数,因此热力型 NO_x 主要分布在温度高于 1950 K 的高温区域。

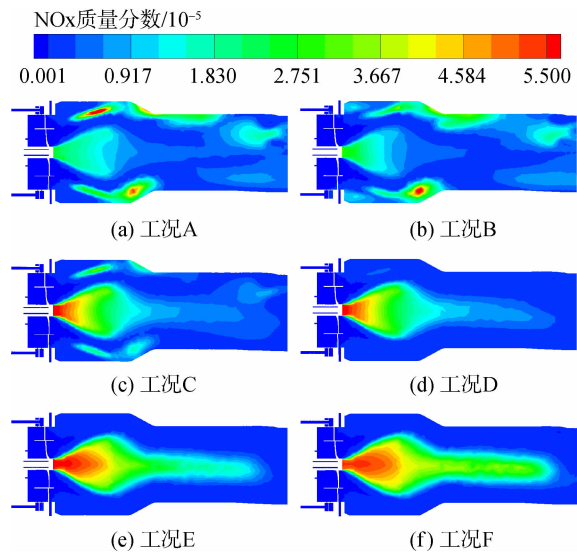


图 11 不同燃料分配方式下 $X=0\text{ m}$ 处 NO_x 排放分布
Fig. 11 NO_x emissions distribution under different fuel distributions at $X=0\text{ m}$

4.5 燃烧室出口参数比较

表 6 所示为喷口组合为方案 4 时不同分级配比下通过数值模拟得到的燃烧室出口界面的平均温度、温度分布系数、O₂ 质量分数、CO₂ 质量分数、NO_x 排放量。由表中数据对比可知,由于值班级与主燃级燃料供给量总和是一定的,总空气量不变,而且目前的燃烧室燃烧效率很高,所以改变燃料分配方式对 O₂ 及 CO₂ 的质量分数影响不大。但是出口截面的平均温度及出口温度分布系数(OTDF,量符号记为 F_{otd})呈现先减小后增大的趋势,是由于随着值班级与主燃级燃料分配方式发生变化,工况 A、工况 B 下主燃级的燃料流

量偏大,预混均匀性变差,导致燃烧产生高温燃气,影响出口截面,使得出口温度升高、出口温度分布不均匀。工况 E、工况 F 两工况下,值班级燃料过多,导致值班级燃烧产生的高温区拉长,使出口的高温面积增大,导致温度分布系数增大,因此以上 4 个工况下 NO_x 排放较多。工况 C、工况 D 两工况下,燃料在值班级主燃级分配得当,在出口截面形成的局部高温区偏小,所以平均温度、出口温度系数都偏低,也使得出口排放的 NO_x 量降低。从 NO_x 排放量的总体趋势来看,随着两级流量比的增大,NO_x 的排放量先减小后增大,呈现趋势与实验结果相符。

表 6 燃烧室出口平均燃烧性能
Table 6 Average combustion performance at combustor outlet

工况编号	平均温度/K	F_{otd}	O ₂ 质量分数	CO ₂ 质量分数	NO _x 排放量/ (mg/m ³)
A	1053.05	0.306	0.146 545	0.036 613	39.36
B	1043.11	0.276	0.146 216	0.036 392	34.79
C	1022.65	0.240	0.147 467	0.036 845	23.21
D	1018.33	0.231	0.147 357	0.036 530	20.08
E	1059.42	0.282	0.146 785	0.036 681	35.65
F	1072.17	0.293	0.146 876	0.036 951	38.22

5 结 论

- 1) 对采用中心分级的微型燃气轮机低排放燃烧室进行了实验测试,调节值班级与主燃级之间的燃料流量分配比例,发现燃料分配比例为 0.24 时 NO_x 排放量达到最低值 23 mg/m³。
- 2) 不同的喷口位置对 NO_x 排放会产生一定影响,但与燃料分配方式相比,喷口位置的影响不明显。
- 3) 燃料分配比例低于最佳值时,随着值班级燃料流量的增加使主燃区燃料/空气混和均匀性提高,降低高温区温度,导致 NO_x 排放下降。超过最佳值后,随着值班级燃料流量的增加,值班级火焰温度升高导致 NO_x 排放升高。
- 4) 燃烧室出口温度分布系数的变化趋势与 NO_x 排放变化趋势相同,在燃料分配比例为 0.24 时也达到最佳值。这是由于两级燃料分配比例发生变化后,值班级与主燃级火焰长度发生变化引起的。
- 5) 数值计算与实验得到的数据基本吻合,说

明选取的数学模型与数值方法合理可靠,可以用于对该类型燃烧室的燃烧性能的预估。

参考文献:

[1] 焦树建. 燃气轮机燃烧室[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981:139-173,254-268.

[2] 刘爱骥. 气体燃料燃气轮机低排放燃烧室技术发展现状及水平[J]. 沈阳航空航天大学学报,2018,35(4):1-28.
LIU Aiguo. Technology development status and level of low emission combustor for gas turbine using gas fuel[J]. Journal of Shenyang Aerospace University,2018,35(4):1-28. (in Chinese)

[3] 刘爱骥,陈欣,陈保东,等. 三级旋流器旋流角匹配影响双环预混旋流燃烧室燃烧性能试验[J]. 推进技术,2017,38(7):1539-1547.
LIU Aiguo, CHEN Xin, CHEN Baodong, et al. Experiment on effect of triple swirler swirl angle matching on combustion performance of twins annular premixing swirler combustor[J]. Journal of Propulsion Technology,2017,38(7): 1539-1547. (in Chinese)

[4] 张中飞,王成军,佟飞,等. 旋流器结构对中心分级燃烧室贫油熄火影响数值模拟[J]. 热力发电,2018,47(4):70-78.
ZHANG Zhongfei, WANG Chengjun, TONG Fei, et al.

Effect of swirler structure on lean blow-out of central staged combustor:numerical simulation[J]. Thermal Power Generation,2018,47(4):70-78. (in Chinese)

[5] 刘爱斌,朱悦,陈保东,等. 航改型双环燃烧室燃烧反应特性试验[J]. 航空动力学报,2017,32(8):1793-1800.

LIU Aiguo,ZHU Yue,CHEN Baodong,et al. Experiment on combustion characteristics of aero derivative gas turbine twins annular combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2017,32(8):1793-1800. (in Chinese)

[6] 吴垚程,黄勇,王方,等. 不同结构多点喷射燃烧室冷态流场研究[J]. 航空动力学报,2010,25(7):1536-1544.

WU Yaozeng,HUANG Yong,WANG Fang,et al. Investigation of cold flow field of a multi-injection combustor with different geometries[J]. Journal of Aerospace Power, 2010,25(7):1536-1544. (in Chinese)

[7] 刘潇. 低排放燃烧室设计及预混燃烧特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2017.

LIU Xiao. Study on low emission combustion chamber design and premixed combustion characteristics[D]. Harbin: Harbin Engineering University,2017. (in Chinese)

[8] 朱嘉伟,颜应文,李诗,等. LPP 低污染燃烧室两相喷雾燃烧性能数值研究[J]. 航空动力学报,2014,29(4):792-800.

ZHU Jiawei,YAN Yingwen,LI Shi,et al. Numerical investigation of two-phase spray combustion performance for LPP low-emission combustor[J]. Journal of Aerospace Power,2014,29(4):792-800. (in Chinese)

[9] 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,2013,34(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,2013,34(3):353-361. (in Chinese)

[10] 邓远灏,颜应文,党龙飞,等. 贫油预混预蒸发低污染燃烧室流场特性试验[J]. 航空动力学报,2015,30(10):2416-2424.

DENG Yuanhao,YAN Yingwen,DANG Longfei,et al. Experiment of flow field characteristics in a lean premixed prevaporized low emission combustor[J]. Journal of Aerospace Power,2015,30(10):2416-2424. (in Chinese)

[11] SADAMASA A,ATUSHI I,SHIGERU H,et al. Emissions in combustion of lean methane-air and biomass-air mixtures supported by primary hot burned gas in a multi-stage gas turbine combustor[J]. Proceeding of the Combustion Institute,2006,31(2):3131-3138.

[12] 林宇震,林阳,张弛,等. 先进燃烧室分级燃烧空气流量分配的探讨[J]. 航空动力学报,2010,25(9):1923-1930.

LIN Yuzhen,LIN Yang,ZHANG Chi,et al. Discussion on combustion airflow distribution of advanced staged combustor[J]. Journal of Aerospace Power,2010,25(9):1923-1930. (in Chinese)

[13] 程明,尚守堂,刘殿春,等. 燃油分级比例对 TAPS 燃烧室性能的影响[J]. 航空发动机,2012,38(4):6-10.

CHENG Ming,SHANG Shoutang,LIU Dianchun,et al. Influence of fuel-staging ratio on TAPS combustor performance[J]. Aeroengine,2012,38(4):6-10. (in Chinese)

[14] 邹博文,许全宏,曹文宇,等. 中心分级燃烧室耦合回流区贫油熄火机理[J]. 航空动力学报,2013,28(8):1759-1763.

ZOU Bowen,XU Quanhong,CAO Wenyu,et al. Lean blowout mechanism of coupled recirculation zone in concentric staged combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2013,28(8):1759-1763. (in Chinese)

[15] 付镇柏,林宇震,张弛,等. 中心分级燃烧室进场工况燃油分级方式试验研究[J]. 推进技术,2014,35(1):77-86.

FU Zhenbai,LIN Yuzhen,ZHANG Chi,et al. Experimental investigation on fuel-staging mode of internally-staged combustor under approach condition[J]. Journal of Propulsion Technology,2014,35(1):77-86. (in Chinese)

[16] BENAROUS A,KARMED D,LIAZID A,et al. Numerical simulation of a turbulent partially premixed flame with inhomogeneous equivalence ratio[J]. Fuel,2014,124(15):57-65.

[17] 邢畅,邱朋华,刘栗,等. 燃料预混特性对燃烧室燃烧特性的影响[J]. 推进技术,2016,37(11):2114-2119.

XING Chang,QIU Penghua,LIU Li,et al. Effects of fuel premixed characteristics on combustion characteristics of combustor[J]. Journal of Propulsion Technology,2016,37(11):2114-2119. (in Chinese)

[18] 刘爱斌,陈思,王栋,等. 垃圾填埋气微型燃气轮机低排放燃烧室燃烧性能实验[J]. 热力发电,2020,49(3):92-99.

LIU Aiguo,CHEN Si,WANG Dong,et al. Experimental study on combustion performance of low emission combustor of landfill gas micro-turbine[J]. Thermal Power Generation,2020,49(3):92-99. (in Chinese)

[19] YIMER I,CAMPBELL L. Parametric study to optimize air/fuel mixing for lean,premix combustion systems[C]// Proceedings of International Joint Power Generation Conference, Scottsdale, Arizona, USA; American Society of Mechanical Engineers,2002:1-7.

(编辑:王碧珺)