

文章编号: 1000-8055(2021)09-1924-08

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20200507

燃料喷口位置对燃烧室污染物生成性能影响

刘爱琥¹, 李皓然², 陈炫任¹, 于浩洋¹, 毛晓东¹, 胡建²

(1. 沈阳航空航天大学 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: 对一种使用中低热值生物质气的干式低排放(DLE)微型燃气轮机燃烧室开展了研究, 对燃料喷嘴口在不同位置时的污染物生成特性进行了实验测试和数值模拟, 获得了喷嘴口位置对燃料与空气的混合均匀性、NO_x生成特性的影响规律。结果表明: 调节燃烧室的燃料分配比例、燃料喷嘴口位置对燃烧室的排放特性会产生影响, 存在一个使NO_x排放最低的燃料分配比例; 燃料与空气混合的均匀性是影响NO_x生成的主要因素之一; NO_x主要在值班燃烧区中产生, 调整值班级喷嘴喷射方式可以使NO_x质量浓度降至7.6 mg/m³。

关键词: 干式低排放(DLE)技术; 燃料喷嘴口位置; 中低热值气体燃料; 混合特性;

氮氧化物(NO_x); 生物质气

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Effect of fuel nozzle position on pollutant generation performance of combustor

LIU Aiguo¹, LI Haoran², CHEN Xuanren¹, YU Haoyang¹,
MAO Xiaodong¹, HU Jian²

(1. Key Laboratory of Advanced Measurement and Test Technique for Aviation

Propulsion System, Liaoning Province,

Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. Hunan Aviation Powerplant Research Institute,

Aero Engine Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China)

Abstract: A dry-type low emission (DLE) micro gas turbine combustor with medium and low calorific value biomass gas was studied. The experimental test and numerical simulation of pollutant generation characteristics at different positions of fuel nozzle were carried out. The influences of nozzle position on fuel air mixing uniformity and NO_x generation characteristics were obtained. The results showed that: adjusting the fuel distribution ratio and the position of the fuel nozzle can affect the emission characteristics of the combustion chamber, and there was a fuel distribution ratio that made the NO_x emission the lowest; the uniformity of the fuel and air mixture was the main factor affecting the NO_x generation; NO_x was mainly produced in the duty com-

收稿日期: 2020-11-25

基金项目: 国家国际科技合作专项(2015DFR70590); 株洲市科技计划项目(20160102);

辽宁省兴辽英才计划项目资助(XLYC1802092)

作者简介: 刘爱琥(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: 刘爱琥, 李皓然, 陈炫任, 等. 燃料喷嘴口位置对燃烧室污染物生成性能影响[J]. 航空动力学报, 2021, 36(9): 1924-1931.

LIU Aiguo, LI Haoran, CHEN Xuanren, et al. Effect of fuel nozzle position on pollutant generation performance of combustor [J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(9): 1924-1931.

bustion area, and the NO_x mass concentration can be reduced to 7.6 mg/m³ by adjusting the fuel distribution ratio and the position of the fuel nozzle.

Key words: dry low emission (DLE) technology; fuel nozzles positions; medium and low calorific value gas fuel; mixing characteristics; nitrogen oxides (NO_x); biomass gas

生物质气包括垃圾填埋气(landfill gas, LFG)、厌氧发酵的沼气、生物质热解气化气等,其主要成分为CH₄、CO₂和N₂^[1]。由于生物质气中含有大量的甲烷成分,会造成温室效应,故需要燃烧后才可以排放到大气当中^[2]。将生物质气为燃料,一方面可以降低对化石燃料的依赖,同时也可以降低沼气对环境的污染,国内外在生物质气发电方面开展了大量的研究工作。美国于1981~2000年先后建成了299套填埋气机组^[3]。英国的垃圾填埋气体发电能力达18 MW,除此之外,法国、芬兰、瑞典、澳大利亚、日本等都有大型垃圾填埋气发电站在运行^[4]。近年来,国内也建设了多个沼气发电站。国外垃圾填埋气电站的原动机使用燃气轮机和内燃机,国内的大多都是使用内燃机。国外的应用经验表明:使用燃气轮机作为生物质气发电站的原动机在燃料适应性、可靠性、综合能效、运行成本、低排放环保效应等方面具有优势,由于燃料组成发生了改变,燃烧特性会发生变化,所以要对燃气轮机的燃烧室开展研究^[5]。

燃气轮机燃烧室通常采用的是湍流扩散燃烧方式,使用LFG燃料仍高于排放标准,需要采用低污染燃烧技术^[6-7]。干式低排放燃烧技术(dry low emission, DLE)作为燃气轮机低排放燃烧技术,其基本原理是稀态均相预混燃烧^[8]。通过燃料与过量空气在进入燃烧室之前的均匀混合,来避免燃烧室内产生局部高温,从而降低氮氧化物的排放量^[9]。燃料与空气的掺混主要与气动参数和结构有关^[10]。在燃烧室的气动参数方面,林宇震、付镇柏等^[11-13]通过实验测试获得了中心分级燃烧室内空气和燃油的分级方式。王峰等^[14]采用化学网格法模拟了当量比、燃烧室内压力等参数对污染物排放的影响规律,研究结果表明:达到一定当量比之后,随着当量比增加,燃烧室出口NO与CO的摩尔分数均会增加。沈亚洲等^[15]通过数值模拟得出适当降低当量比,以及在天然气中加入适当比例的CO₂均能够有效控制DLE燃烧室中NO_x的排放。在结构参数方面,刘爱骥等^[16-17]通过实验测试获得了旋流器结构参数改变对于航改

型TAPS(双环预混旋流)燃烧室燃烧特性的影响规律。吴垚程等^[18]研究了点喷射燃烧室内旋流器叶片安装角、文氏管间距等结构参数变化对回流区的影响。朱嘉伟等^[19]采用数值模拟的方法得出了贫油预混预蒸发(LPP)燃烧室内主模旋流角增加可以使中心回流区缩短,还可以使出口温度分布更加均匀的结论。Sadamas等^[20]研究了旋流器结构变化对三级模型燃烧室预混均匀性和燃烧特性的影响,并分析了NO_x在燃烧室内产生的原因。Adzic等^[21]通过实验得出改变燃烧室进气旋流数对排放特性影响不大。

为获得燃烧室结构参数对LFG低排放燃烧室燃烧特性的影响,本文测试了燃料成分变化时燃烧室的污染物排放情况,并通过实验和数值模拟相结合的方法研究了喷口位置改变对燃烧室燃料与空气掺混特性及燃烧特性的影响。

1 研究对象

所研究的逆流式低污染燃烧室结构如图1所示,该燃烧室是基于稀相预混贫燃料燃烧技术设计的,采用中心分级的燃烧方式,设有值班级燃烧区和主燃级燃烧区,分别由值班级燃料喷口和主燃级燃料喷口供应燃料^[22-24]。为简化实验件,在一个实验件上安装了4个燃料喷口,其中1、2号喷口为值班级燃料喷口,3、4号喷口为主燃级燃料喷口,可以通过开关不同的燃料喷口来实现喷口位置的改变。

燃烧室总体设计要求全参数工作范围燃烧效

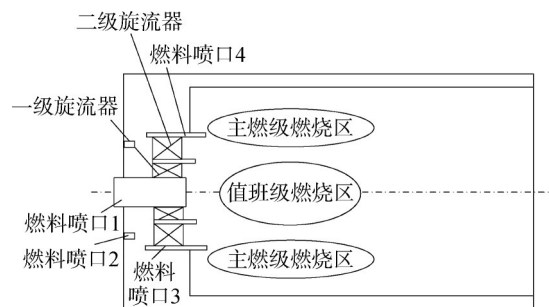


图1 燃烧室结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the combustor

率 $\eta \geq 97\%$,出口污染物排放要求 NO_x 质量浓度 $\rho(\text{NO}_x) \leq 50 \text{ mg/m}^3$,CO质量浓度 $\rho(\text{CO}) \leq 30 \text{ mg/m}^3$,其中污染物排放质量浓度为折算到基准氧体积分数为15%的质量浓度。本次研究中喷口位置的变化是通过改变燃烧室喷口组合方式实现的,选取的喷口组合方式见表1,其中C1与C2、C3与C4是为了对比主燃级喷口位置的影响;C1与C3、C2与C4是为了对比值班级喷口位置的影响。

表1 不同燃料喷口组合方式

Table 1 Different fuel nozzles combinations

方案	燃料喷口
C1	1+3
C2	1+4
C3	1+2+3
C4	1+2+4

2 实验测试与结果分析

本次实验采用的喷口组合方式如表1所示,使用了 CH_4 和 CO_2 的体积分数分别为50%的合成气来代替垃圾填埋气作为燃料,燃料的华白数(WI)为 17.75 MJ/m^3 ,热值为 17.85 MJ/m^3 密度为 1.35 kg/m^3 ,摩尔质量为 30 kg/kmol 。属于一种中热值气体燃料。实验中,空气流量采用标准孔板流量计测量,测量误差为 $\pm 1.0\%$ 。燃料流量采用质量流量计测量,测量误差为 $\pm 1.0\%$ 。进出口温度采用K型热电偶,测量误差为 $\pm 1.0\%$ 。燃烧室出口尾气采用Testo 350烟气分析仪进行测量, NO_x 质量浓度测量误差为 $\pm 5\%$ 测量值,CO质量浓度测量误差为 $\pm 5\%$ 测量值。

图2为不同燃料喷口组合方式时 NO_x 排放的实验测量值,其中横坐标 r 为值班级与主燃级的燃料流量比。对于C3和C4方案,有2个值班级(主燃级)时,燃料在两级之间平均分配。由实验结果可以看出,随着 r 增大,不同喷嘴组合方案下 NO_x 排放的变化趋势相同,且存在一个最佳值使 NO_x 排放达到了最低值。通过C1与C2、C3与C4方案的对比可以得出,随着主燃级喷口位置后移,即燃料与空气的预混距离变短,燃烧室出口处的 NO_x 排放有小幅度的增加,变化值小于 3 mg/m^3 ;C1与C3、C2与C4方案的对比可以看出,在值班级增加喷口2对 NO_x 排放的影响显著。从 NO_x

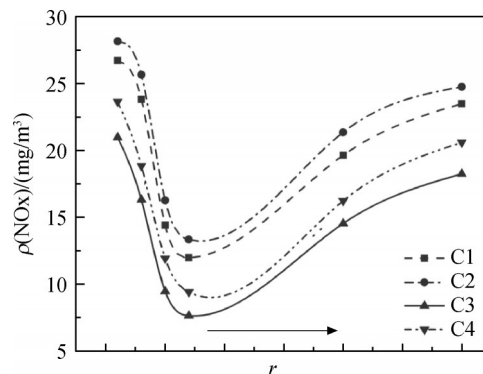


图2 不同燃料喷口组合方式下的 NO_x 质量浓度
Fig.2 NO_x mass concentration under different fuel nozzles combinations

的排放量来看,5种喷口组合方式下的 NO_x 排放量均处于 30 mg/m^3 以下,其中C3方案下整体的 NO_x 排放最低,最小值为 7.6 mg/m^3 。

采用燃气分析法对各方案下燃烧室的燃烧效率进行了计算,结果如图3所示。由计算结果可以看出,燃烧效率均在97%以上。其中,C3方案的燃烧效率最高,达到了99.70%。同时,随着两级燃料分配比例 r 的增加,5种喷口组合方式下的燃烧效率均呈现先增后减的趋势,存在一个最佳分配比例,该值与 NO_x 为最低值时的分配比例相同。为获得燃料混合特性对 NO_x 生成特性的影响规律,在下文中采用数值模拟的方法对最佳燃料分配方案下不同喷口位置时的燃料/空气混合均匀性和 NO_x 生成特性进行了数值计算。

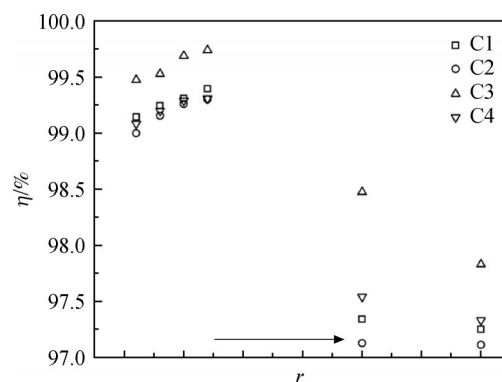


图3 不同燃料喷口组合方式下的燃烧效率
Fig.3 Combustion efficiency under different fuel nozzles combinations

3 计算模型及结果分析

3.1 计算模型

本文使用ANSYS Meshing对燃烧室模型进

行网格划分。由于燃料喷口 3 和 4 包含直径小且数量多的喷射孔,所以采用区域法和非结构网格划分,并对燃料喷孔以及燃烧室头部网格进行部分加密。经过网格无关性验证,得到 286 万网格满足无关性要求。最终生成的网格节点数为 53 万,最小网格尺度为 0.344 mm,平均网格质量为 0.897,图 4 为燃烧室的计算域网格。

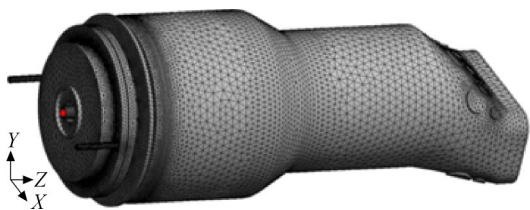


图 4 DLE 燃烧室网格
Fig.4 Grid of DLE combustor

利用 CFD 对该燃烧室进行了数值模拟,目的是研究不同喷口位置时燃料与空气的混合特性及混合特性对污染物生成特性的影响^[25]。采用 realizable $k-\epsilon$ 模型模拟湍流黏性,标准壁面无滑移。燃烧模型选用有限速率/涡耗散模型来模拟非全预混燃烧,辐射模型采用离散坐标辐射模型,壁面为绝热壁面,NO_x 排放只考虑热力型和快速型。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算法对离散方程进行迭代求解。指定燃烧室空气进口、值班级与主燃级燃料的进口均为质量流量进口,给定质量流量和温度。燃烧室的出口设为压力出口,给定静压和出口温度。数值模拟的结果为能量残差值低于 1×10^{-6} ,其余全部残差小于 1.0×10^{-3} 时的迭代结果。

3.2 模型验证

对采用 4 种组合方式下 6 种不同 r 值时的燃烧特性进行了数值模拟,将得到的出口平均温度与实验结果进行对比,如表 2 所示,实验结果与模拟结果基本吻合,偏差均能保持在 5% 以下。又将该方案下 NO_x 排放进行对比,如图 5 所示。通过对比可知:两条排放曲线的总体变化趋势一致,计算结果比实验结果稍低。通过以上对比可以说明本次研究所采用的模型合理,可于燃烧室内部燃烧特性的计算与分析。

3.3 燃烧室冷态计算

为了研究不同喷口组合方式下燃料/空气的混合情况,选取了特征位置为 $Z/D=0.05, 0.30, 0.55$ 三个监测平面(图 6 中①、②、③位置),其中

表 2 出口平均温度模拟结果与实验结果对比
Table 2 Comparison of simulated and experimental results of outlet averaged temperature

燃料分 配方案	出口平均温度/K		误差/%
	模拟结果	实验结果	
1	1 040.27	1 053.05	1.21
2	1 027.63	1 035.11	0.72
3	982.58	1 022.65	3.92
4	971.79	1 018.34	4.57
5	1 035.85	1 029.42	0.62
6	1 061.01	1 050.19	1.03

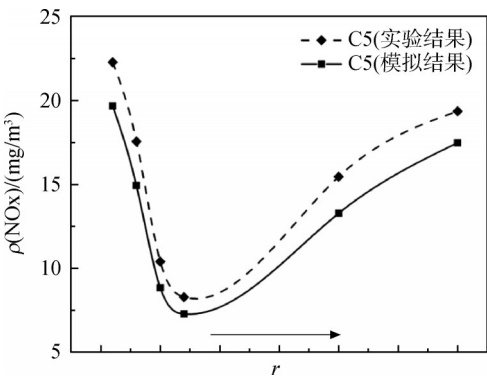


图 5 实验与模拟测得的燃烧室出口 NO_x 排放量对比
Fig.5 Comparison of NO_x emission between experimental and simulated at combustor outlet

D 为火焰筒直径, Z 为轴向距离, X 和 Y 分别为火焰筒的水平和垂直方向距离,以火焰筒中轴线上燃料旋流器出口为零点,如图 6 所示。又根据混合不均匀度定义式(1)、式(2)^[26]对几种方案下的混合不均匀度进行了计算

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

$$\delta^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\varphi_i - \bar{\varphi})^2 \tag{2}$$

式中 N_s 为混合不均匀度, N 为燃料种类数, φ_i 为

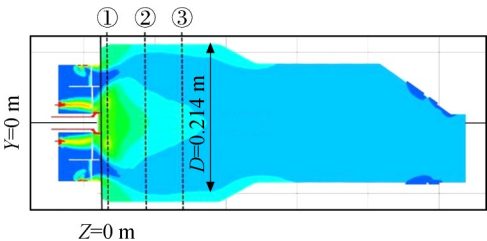


图 6 燃烧室内选取的监测平面
Fig.6 Monitoring planes selected in combustor

该处燃料的质量浓度, $\bar{\varphi}$ 为平面内燃料的平均质量浓度, δ 为燃料质量浓度的标准差。其中 $N_s = 1$ 表示没有发生混合, $N_s = 0$ 表示混合均匀。

3.3.1 主燃级喷口位置对混合特性的影响

图 7 为 C1 与 C2 方案下在 $Z/D=0.05, 0.30, 0.55$ 三个位置处的混合情况。由于喷口 1 喷射的燃料直接进入火焰筒不与空气预混, 故进行冷态计算时将该喷口关闭, 只对比喷口 3、4 的混合情况。 $Z/D=0.05$ 处截面位于预混段出口位置, 该位置处的燃料大多分布在截面的外环, 这是由于该区域位于燃烧室由于尖端结构而形成的角回流区附近, 流速较低, 燃料易在该区域内发生聚集。由表 3 中模拟结果可知, 两种喷口组合方式下的燃料分布类似, 说明主燃级喷口位置变化对于燃料与空气的混合效果影响不显著。这主要是由于: 在所研究燃烧室内, 主燃级处燃料与空气的预混主要发生于第二级旋流器位置, 距离较短, 改变主燃级燃料喷口位置对预混距离增加不大, 故对混合效果影响不明显。

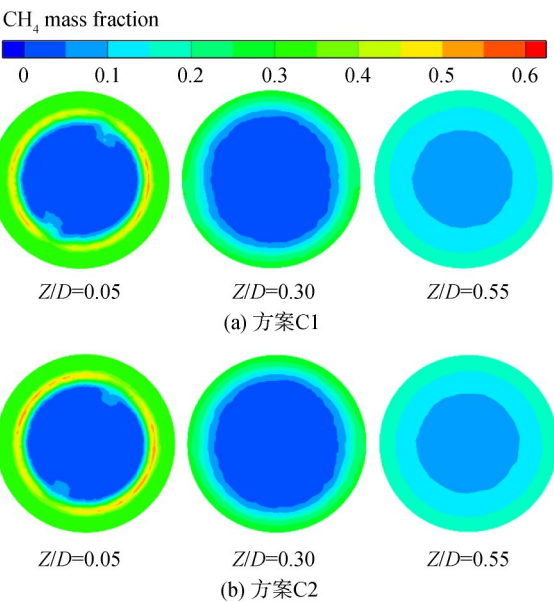


图 7 不同主燃级喷口位置下燃料/空气的混合情况
Fig.7 Fuel/air mixing under different positions of fuel nozzles at primary stage

根据式(1)、式(2)对 C1、C2 方案下预混截面出口处 ($Z/D=0.05$) 的混合不均匀度进行了计算, 结果如表 3 所示。由计算结果可得, 在预混出口截面处, C1 方案下的混合效果好于 C2, 这是由于喷口 3 位于喷口 4 的前方, 可供燃料预混的通道增长, 所以混合效果有所改善, 但两者相差较小, 与上述结论相符。

表 3 C1、C2 方案下的 N_s 计算
Table 3 Calculation of N_s under scheme C1 and C2

方案	CH ₄ 质量分数		N_s
	最大值	最小值	
C1	0.050 4	0.033 5	0.0129 7
C2	0.052 7	0.034 2	0.0132 5

3.3.2 值班级喷口位置对混合特性的影响

图 8 为值班级燃料喷口位置变化时 3 个监视面处燃料/空气混合情况。由表中相同位置处燃料分布可知, 3 组截面的外环处燃料质量分数基本一致, 这是由于 C1 与 C2 两种方案采用相同的主燃级燃料喷口; 而内环燃料质量分数差别明显, C1 方案在所选取截面处内环的燃料质量分数明显高于 C2 方案, 产生以上现象是由于 C1 方案的值班级燃料全部从 1 号喷口直接喷入火焰筒内部, 不参与预混, 而 C2 方案中的 2 号喷口位于燃烧室第一级旋流器之前, 经其喷出的燃料可以与进入燃烧室的空气充分混合, 故燃料分布相对均匀。

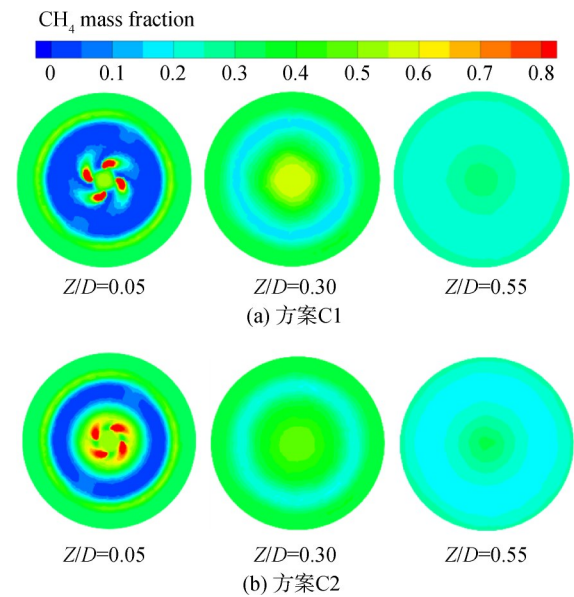


图 8 不同值班级喷口位置下燃料/空气的混合情况
Fig.8 Fuel/air mixing under different positions of fuel nozzles at polit stage

表 4 为 C1、C3 方案下 3 个监测截面位置 ($Z/D=0.05, 0.30, 0.55$) 处的值班级混合不均匀度 N_s 的计算结果。其中 C1 方案下在 $Z/D=0.05$ 截面处的混合不均匀度接近于 1, 未发生预混, 与图 8 中混合云图所得结论一致。由前两个监测面处的计算结果可知, 增加燃料喷口 2 有效的改善了整

表 4 C1、C3 方案下的 N_s 计算
Table 4 Calculation of N_s under scheme C1 and C3

方案	混合不均匀度 N_s		
	$Z/D=0.05$	$Z/D=0.30$	$Z/D=0.55$
C1	0.953 5	0.067 41	0.000 447
C3	0.467 2	0.036 57	0.000 452

个燃烧室内的燃料与空气混合均匀性。在 $Z/D=0.55$ 位置处, C1 与 C3 方案下的混合不均匀度均趋近于 0, 说明在该截面附近燃料与空气混合基本结束, 并且两种方案下两级间燃料总量一定, 所以充分混合之后燃烧室火焰筒内的燃料质量浓度基本相同。

3.4 喷口位置对燃烧特性的影响

图 9 为不同喷口组合方式下燃烧室中心截面的温度分布。由图可知, 4 种方案下燃烧室最高燃气温度在 2 200 K 以上, 其主要分布在燃烧室中心回流区附近, 这是因为经喷口 1 喷出的燃料在该域进行扩散燃烧产生的燃气温度较高, 提供稳定点火源; 同时, 由于主燃级燃料在角回流区域聚集, 燃烧室在该位置附近形成了局部的高温区域, 温度在 1 800~2 000 K; 由于燃烧室尾部的掺混孔作用, 燃烧室出口温度下降到 1 000 K 左右, 并且经过计算得出 4 种方案下燃烧室出口温度分布系数均在 0.2 以下, 满足了燃烧室出口温度场要求。

通过图 7 中 4 组温度图对比得出: 值班级增加 2 号喷口后, 燃烧室中心回流区处的高温区沿轴向缩短, 燃气温度降低; 对于主燃级燃烧区, C1 与 C2 (C3 与 C4) 方案相比, 主燃级喷口位置前移, 预混通道变长, 燃料/空气混合效果改善, 主燃级处燃气温度下降, 高温区域面积减小。

图 10 为燃烧室中心截面在 $Z/D=0.05$ 以及

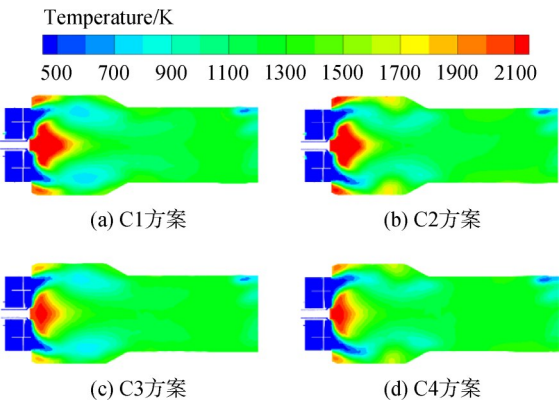


图 9 燃烧室中心截面温度分布
Fig.9 Temperature distribution at central section of combustor

$Z/D=0.3$ 两条特征线上的温度分布。由图可知, 4 条曲线均在第二级旋流器出口处温度梯度较大, 中心回流区域温度较高, 近壁面温度在 1 600 K 左右。其中, 与 C3、C4 方案相比, C1、C2 方案下中心回流区附近温度偏高, 高于 1 900 K 的温度区域的面积较大, 这是由于 C3、C4 方案增加的喷口 2 使得值班级处一部分燃料参与预混, 提高了燃料/空气的混合均匀性; 而 C1、C2 方案下值班级燃料的燃烧方式仅为扩散燃烧, 所以燃烧产生的燃气温度偏高。另外, C1 与 C3、C2 与 C4 两组方案的主燃级区域, 即径向距离 $D=0.05\sim0.10$ m 与 $-0.05\sim-0.10$ m 位置的温度线基本重合, 这主要是由于两组方案下采用的主燃级燃料喷口相同, 燃料/空气混合效果基本一致, 所以燃烧产生的燃气温度相差不大; 同时, 相比于 C1、C3 方案, 其余两方案的主燃级燃气温度会稍高一些, 可见 3 号喷口对比 4 号喷口预混距离的增加, 对降低燃气温度有一定作用, 但效果不明显。

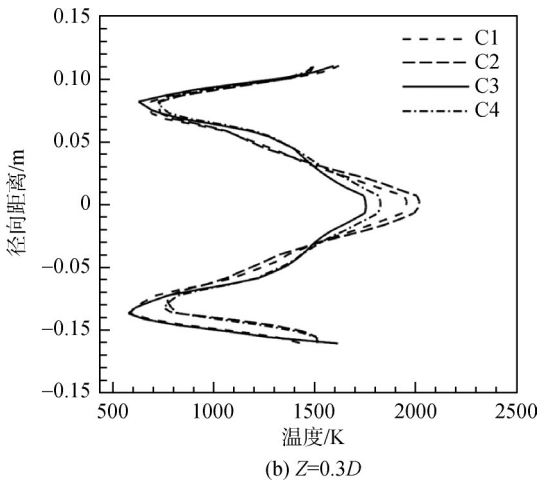
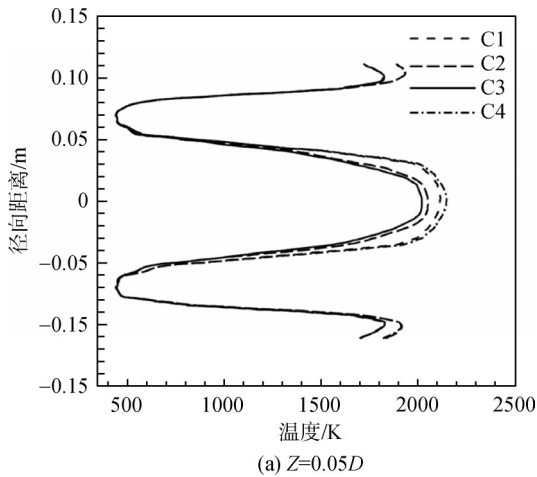


图 10 特征线上的温度分布
Fig.10 Temperature distribution on characteristic lines

图11为4种喷口组合方式下燃烧室中心截面处NO_x质量分数分布图。由图可知,4种方案下NO_x生成速率较大的区域主要集中于燃烧室的中心回流区和角回流区附近,与燃烧室内高温区域分布重合。产生以上现象的原因在于:燃烧室内上述区域的燃料/空气混合不均匀度较大,燃烧后产生的燃气温度高,且燃烧室内生成的NO_x大部分属于热力型,当燃气温度较高时,热力型NO_x的生成量为温度的指数函数,所以NO_x在以上两个位置生成较多。综合4组喷口组合方式下NO_x质量分数对比可知,C3方案下燃烧室内NO_x生成量最少。

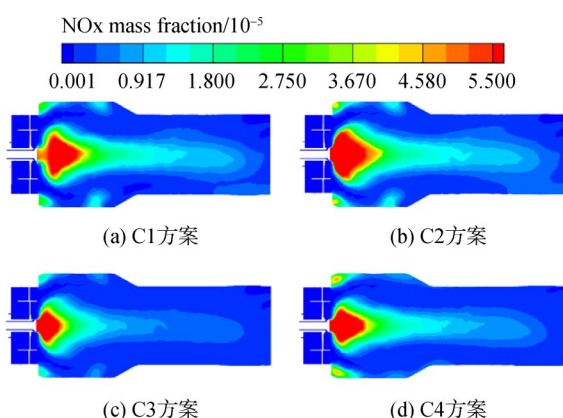


图11 燃烧室中心截面的NO_x质量分数分布

Fig.11 NO_x mass fraction distribution at central section of combustor

图12为在4个方案下模拟与实验得到的燃烧室出口截面处NO_x排放量。由图可知,C3方案下的NO_x排放最低,这是由于C3组合方式下值班级与主燃级的燃料/空气混合均匀性均为最好,燃烧产生燃气温度较低,故NO_x排放最少。

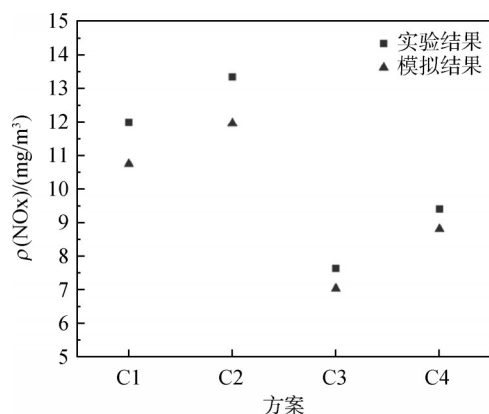


图12 实验与模拟得到的燃烧室出口NO_x质量浓度对比

Fig.12 Comparison of NO_x mass concentration between experimental and simulated at combustor outlet

对比实验与模拟的NO_x排放量可以看出,模拟结果相对实验偏低,两者误差在15%左右,其中C3、C4方案的误差在10%以下。这主要由于:燃烧室出口NO_x分布是不均匀的,实验的采样点布置在燃烧室出口处径向中心位置附近,该区域温度较高,热力型NO_x产生较多;而模拟结果是对整个燃烧室出口截面取平均值。因此,实验测得的NO_x排放会比模拟结果高一些,但是几个方案下NO_x排放变化趋势一致,说明所得结论基本可信。

4 结 论

1) 存在一个最佳的值班级与主燃级燃料分配比例,此时NO_x排放量达到7.6 mg/m³,燃烧效率达到99.70%。

2) 燃烧室的NO_x主要由值班级产生,燃料/空气的混合均匀性对NO_x的生成影响很大。

3) 主燃级喷口位置变化对NO_x排放的影响不明显,这是由于该燃烧室头部结构紧凑,可供燃料与空气预混的距离较短,故改变主燃级处喷口位置对燃料与空气混合效果影响较小。

4) 值班级引入燃料喷口2,使部分值班级燃料参与预混,有效地改善了燃料/空气混合均匀性,从而降低值班级燃气温度,达到了减少污染物NO_x排放的效果。

参考文献:

- [1] KNAEBEL K S, REINHOLD H E. Landfill gas: from rubbish to resource[J]. Adsorption Journal of the International Adsorption Society, 2003, 9(1): 87-94.
- [2] 石磊, 赵由才, 牛冬杰. 垃圾填埋气的净化技术进展[J]. 天然气化工, 2004, 29(2): 58-62.
SHI Lei, ZHAO Youcai, NIU Dongjie. Technique progress in landfill gas purification[J]. Natural Gas Chemical Industry, 2004, 29(2): 58-62. (in Chinese)
- [3] 黄希. 垃圾填埋场沼气发电市场前景浅析[J]. 有色冶金设计与研究, 2009, 30(6): 80-83.
HUANG Xi. Tentative study on future market of power generation by landfill gas (LFG) [J]. Nonferrous Metals Engineering and Research, 2009, 30(6): 80-83. (in Chinese)
- [4] 曹伟华, 王艳明. 垃圾填埋场: 填埋气发电技术应用[J]. 建设科技, 2007(21): 42-43.
CAO Weihua, WANG Yanming. Landfill: application of landfill gas power generation technology[J]. Construction Science and Technology, 2007(21): 42-43. (in Chinese)
- [5] 翁一武, 闻雪友, 翁史烈. 燃气轮机技术与发展[J]. 自然杂志, 2017, 39(1): 43-47.
WENG Yiwu, WEN Xueyou, WENG Shilie. Gas turbine technology and development[J]. Chinese Journal of Nature, 2017, 39(1): 43-47. (in Chinese)

- [6] 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.
- [7] 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)
- [8] 赵岩.天然气贫预混燃烧器燃空掺混与燃烧特性研究[D].北京:中国科学院,2016.
ZHAO Yan. Investigation of fuel/air mixing and combustion characteristics of a lean premixed burner for nature gas turbine combustor application[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2016. (in Chinese)
- [9] 康振亚,郑洪涛,贾翔羽,等.微型燃气轮机燃烧室预混结构性能研究及改进[J].燃气轮机技术,2013,26(1):21-26.
KANG Zhenya, ZHENG Hongtao, JIA Xiangyu, et al. Research and improvement of performance of micro-turbine combustor premixing structure[J]. Gas Turbine Technology, 2013, 26(1):21-26. (in Chinese)
- [10] 邵卫卫,赵岩,刘艳,等.燃气轮机燃烧室预混燃烧器天然气燃料/空气掺混均匀性研究[J].中国电机工程学报,2017,37(3):795-802.
SHAO Weiwei, ZHAO Yan, LIU Yan, et al. Investigation of fuel/air mixing uniformity in a natural gas premixed burner for gas turbine combustor applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(3):795-802. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] 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)
- [13] 付镇柏,林宇震,张弛,等.中心分级燃烧室预燃级燃烧性能实验[J].航空动力学报,2015,30(1):46-52.
FU Zhenbai, LIN Yuzhen, ZHANG Chi, et al. Experimental of combustion performance of internally-staged combustor pilot stage[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(1):46-52. (in Chinese)
- [14] 王峰,肖俊峰,王玮,等.燃气轮机燃烧过程中污染物排放影响规律研究[J].热力发电,2015,44(5):26-29.
WANG Feng, XIAO Junfeng, WANG Wei, et al. Influence of combustion on pollutant discharge of gas turbines[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(5):26-29. (in Chinese)
- [15] 沈亚洲,付忠广,石黎,等.当量比对干式低排放燃烧室燃烧及NO_x生成影响的数值研究[J].热力发电,2017,46(7):46-53.
SHEN Yazhou, FU Zhongguang, SHI Li, et al. Numerical simulation of influence of equivalence ratio on combustion and NO_x formation in a DLE combustor[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(7):46-53. (in Chinese)
- [16] 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)
- [17] 刘爱骥,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)
- [18] 吴奎程,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)
- [19] 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)
- [20] SADAMASA A, ATUSHI I, SHIGERU H. Emissions in combustion of lean methane-air and biomass-air mixtures supported by primary hot burned gas in a multistage gas turbine combustor[J]. Proceeding of the Combustion Institute, 2007, 31(2):3131-3128.
- [21] ADZIC M, FOTEV V, MILIVOJEVIC A, et al. Effect of a microturbine combustor type on emissions at lean-premixed conditions[J]. Journal of Propulsion and Power, 2010, 26(5):1135-1135.
- [22] 李皓然,胡建,罗虎,等.适应多燃料的燃烧室及多级燃料共给预混与控制方法:CN201810067501.X[P].2018-01-24.
- [23] 李皓然,温泉,胡建,等.采用变截面进气与多级燃料供给的燃烧室及其控制方法:CN201810437323.5[P].2018-05-09.
- [24] 何昊宸,胡建,李皓然,等.主动控制流通面积的火焰筒:CN201810437321.6[P].2018-05-09.
- [25] 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. (in Chinese)
- [26] 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)