

微型燃气轮机燃烧室燃烧特性实验

刘爱骥, 李昱泽, 杨宇东, 曾 文, 刘 凯
(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)

摘 要: 针对燃气轮机低污染排放要求,在为使用气体燃料设计的低排放微型燃气轮机燃烧室单头部实验件上进行了燃烧特性实验,对比分析了燃料喷口位置、数量,值班级与主燃级燃料分配比例和不同空气流量分配方式时的燃烧效率和污染物排放特性。结果表明:改变燃料喷口的位置、数量可以改变燃料与空气的混合特性,对燃烧特性产生较大的影响;值班级与主燃级燃料流量分配比例的变化,会导致各燃烧区当量比的变化,主燃级燃烧区当量比降低至 0.8 以下有利于降低污染物排放;通过改变燃烧室空气流量分配方式,可以降低主燃级燃烧区的当量比,使 NO_x 排放降低至 27.2 mg/m³,燃烧效率达到 98.6%。但用于掺混的空气流量的降低会使出口温度分布系数由 0.21 升高至 0.24。

关 键 词: 微型燃气轮机; 燃烧特性; 排放特性; 当量比; 燃料分配比

中图分类号: V231.1 **文献标志码:** A

Experiment on combustion characteristics of micro gas turbine combustor

LIU Aiguo, LI Yuze, YANG Yudong, ZENG Wen, LIU Kai
(Liaoning Key Laboratory of Advanced Measurement and Test Technology for
Aviation Propulsion System, School of Aero-Engine,
Shenyang Aerospace University, Liaoning Shenyang 110136, China)

Abstract: According to the requirements of low pollution emission of gas turbine, the combustion characteristic experiment was carried out on the single head experiment piece of the combustor of low emission micro gas turbine designed for the use of gas fuel. The position and quantity of the fuel nozzle, the fuel distribution ratio between the duty class and the main combustion stage, and the combustion efficiency and pollutant emission characteristics under different air flow distribution modes were compared and analyzed. Results showed that changing the position and quantity of the fuel nozzle can change the mixing characteristics of the fuel and air, yielding a great effect on the combustion characteristics; the change of the fuel flow distribution ratio between the duty class and the main combustion stage led to the change of the equivalence ratio of each combustion zone, and the reduction of the current ratio of the main combustion stage to below 0.8 was conducive to the reduction of pollutant emissions; the change of air flow distribution ratio of the combustion chamber was conducive to the reduction of pollutant emissions. With this method, the equivalence ratio of the main

收稿日期:2019-12-02

基金项目:辽宁省自然科学基金(20180550358,2019-ZD-0226); 航空科学基金(20170354001)

作者简介: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:刘爱骥,李昱泽,杨宇东,等.微型燃气轮机燃烧室燃烧特性实验[J].航空动力学报,2020,35(6):1335-1344. LIU Aiguo, LI Yuze, YANG Yudong, et al. Experiment on combustion characteristics of micro gas turbine combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(6):1335-1344.

combustion zone can be reduced, the NO_x emission can be reduced to 27.2 mg/m³, and the combustion efficiency can reach 98.6%. However, the decrease of air flow rate for mixing could increase the outlet temperature distribution coefficient from 0.21 to 0.24.

Key words: micro gas turbine; combustion characteristics; emission characteristics; equivalent ratio; fuel distribution ratio

干式低排放(DLE)燃烧技术是目前用于降低燃气轮机燃烧室 NO_x 排放的一项主流技术,这项技术的基本原理是稀态均相预混燃烧^[1-3]。通过改变燃烧室内过量空气系数,可以从量上满足燃料与空气的比例使燃料和空气在进入燃烧室之前能够均匀混合,这可以保障燃烧室不产生局部高温的同时控制主燃区的温度从而降低排放^[4-6]。燃料与空气的掺混特性与燃烧室的结构尺寸和流动参数有关,一般来说包含燃料与空气的分级方式、主燃区空气配气方案、燃料分配方式、燃料射流深度、预混段结构、旋流强度等^[7-8]。

国际上现有的先进 DLN 燃烧室,如美国通用(GE)公司的 DLN2.6 型燃烧室和西门子公司的 HR3 燃烧器,都精心设计了预混过程以确保燃料和空气有较好的混合均匀性。其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^[9-11]。Adzic 等^[12]通过实验,揭示了燃料贫预混条件对污染物生成规律的影响,发现进气旋流数增加,NO_x 和 CO 的生成量都会下降,但会引起燃烧稳定性大问题。Furuhata 等^[13]对燃料掺混特性对火焰稳定性及排放特性的影响进行了实验研究,发现当燃烧区处于贫燃状态时,增加燃料与空气的混合均匀度可以减少 NO_x 的生成量,同时发现随着燃料与空气的掺混特性的提高,燃烧室的稳定燃烧边界也会大幅度扩展。

国内在燃烧室结构设计、外部参数对微型燃气轮机低排放燃烧室运行特性影响等方面也开展了大量的数值模拟和实验研究工作,并取得了一定的成果。薛鑫等^[14]通过实验研究了火焰筒压力损失对贫油熄火性能及燃烧效率的影响,发现低压状态下,低压力损失会导致贫油熄火油气比降低,高温高压状态下,火焰筒压力损失对燃烧效率影响不大。中国科学院的汪凤山^[15]设计了一种采用燃料径向预混分级技术的微型燃气轮机低排放燃烧室,研究发现随着主燃区进气旋流强度的增加,燃烧室火焰峰值温度有所降低,燃烧室 NO_x 排放质量浓度也显著降低;随着值班区燃料

量占总燃料量的比例增大,其 NO_x 排放质量浓度急剧增加,影响十分显著。付忠广等^[16]通过改变燃烧室喷口角度的方式来增加旋流强度,对主燃区旋流强度及值班区旋流强度两方面进行了数值模拟,发现随着主燃区旋流强度的增加,回流区面积明显增大,燃料、空气均匀混合并迅速燃烧,但当主燃区旋流强度增大到一定程度时,回流区会影响到燃烧室出口处的气流流动,不利于流场的稳定。哈尔滨工业大学的邢畅等^[17]对单轴微型燃气轮机样机进行了整机实验,指出由于燃烧室内燃气温度较低,NO_x 生成量近似为零,CO₂ 排放质量浓度与燃烧效率随转速增加的变化趋势基本一致,而与 CO 排放质量浓度变化趋势正好相反。沈阳航空航天大学在前期的工作中,曾针对燃烧室的可靠性设计了一种微型燃气轮机燃烧室,并进行了实验测试。测试结果表明:在设计点燃烧室具有较好的点火特性;对贫油熄火特性影响较大的因素是燃烧室入口温度,当大气温度由 -30℃ 升至 30℃ 时,贫油熄火燃空比会降低;排放及燃烧效率未能达到要求,尤其是 CO 排放较高^[18]。

在前期工作基础上,基于分级、分区燃烧和贫燃预混燃烧理念,设计了一种径向分级微型燃气轮机燃烧室。为分析影响燃烧室污染物及燃烧特性的影响因素,对所设计的低排放燃烧室在不同的喷口组合方式、值班级与主燃级燃料比和主燃区当量比下的燃烧特性进行了实验测试,获得了基本规律。

1 实验件与实验系统

1.1 实验件结构

燃烧室实验件结构示意图如图 1 所示,为逆流式圆筒型燃烧室,由压气机出来的空气逆向流动进入燃烧室。燃料通过不同的燃料喷口分别进入燃烧室的值班级燃烧区和主燃级燃烧区,分别产生值班级燃烧火焰和主燃级燃烧火焰。燃烧室取消主燃孔,燃烧所需空气通过燃烧室头部的双级轴向旋流器进入燃烧室。由使用天然气的低压

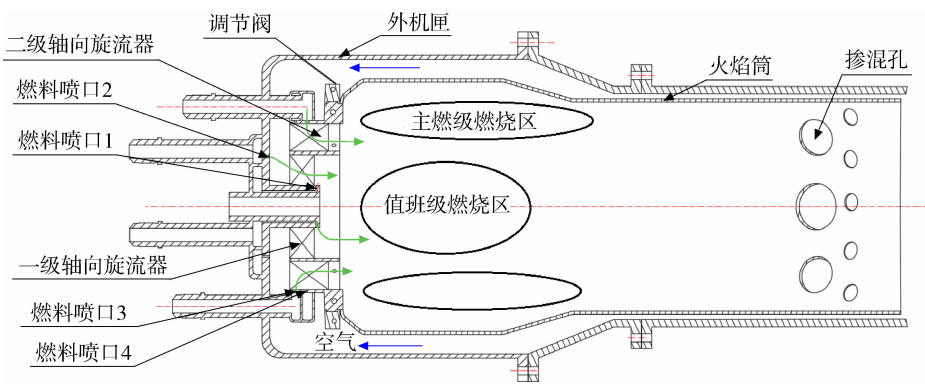


图 1 燃烧室结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the combustor structure

燃气轮机对燃烧室出口温度分布系数的要求,及考虑所采用的单管式燃烧室实验件,燃烧室出口温度分布系数要求小于 0.25。为满足燃烧室出口温度场要求,在燃烧室出口设置了两排共 16 个掺混孔,其中,直径为 15 mm 的大孔 6 个,直径为 4 mm 的小孔 10 个。

燃烧室头部结构图如图 2 所示,该燃烧室为采用了双级轴向旋流器的径向分级燃烧室。有 2 个旋流器和 4 个燃料喷口,燃料喷口为采用了相同直径的多点直射式喷口。从喷口进入的燃料具有足够的射流动量,能够有效利用来流空气的湍流作用实现燃料与空气的混合。燃料喷口 1、2 为值班级,用于满足燃烧稳定性。燃料喷口 1 的燃料射流角度与来流空气呈 60° ,此时进行扩散燃烧。燃料喷口 2 的燃料喷射角度与燃烧室轴线方向平行,燃料在混合段与空气掺混再经一级旋流器进入值班级燃烧区。燃料喷口 3 和燃料喷口 4

为主燃级,用于降低污染物排放。3、4 号燃料喷口射流角度与头部进气方向垂直。燃料与从二级旋流器进入的空气预混合,混合气进入主燃级燃烧区进行反应,此时进行贫预混燃烧。在喷孔 1、2 和喷口 3、4 同时供应燃料时 1、2 喷口中燃料流量分配相同,3、4 喷口中燃料流量分配相同。为进行燃料喷口位置及射流深度对燃烧性能影响的研究,使喷口 1、2 的通流面积相同,喷口 3、4 的通流面积相同。在燃烧室的头部设计了一个进气阀门,可以通过调节进气阀门的开度调节燃烧室头部的通流面积,进而改变燃烧室空气流量分配,研究空气流量分配对燃烧特性的影响。

1.2 实验系统

燃烧室实验系统如图 3 所示。实验台包括气罐,空气加热器,天然气瓶,燃料供应管道,数据采集系统,循环冷却系统,主控制台,烟气分析仪,尾气处理装置等。其中,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 $\pm 1.0\%$ 。燃烧室进出口布置压力传感器,用于测量燃烧室进出口压力,压力传感器的测量误差为 $\pm 0.5\%$ 。进出口温度采用 K 型热电偶测量,测量误差为 $\pm 1.0\%$ 。燃烧室出口周向安装了 4 组采样装置,每组有 3 个采样点,共 12 个采样点,如图 4 中所示。从采样点采出的尾气经冷却掺混后进入 Testo 350 烟气分析仪进行测量。各成分的测量误差如下: O_2 质量浓度测量误差为 $\pm 0.8\%$ 满量程, CO 质量浓度测量误差为 $\pm 5\%$ 测量值; NO 质量浓度测量误差为 $\pm 5\%$ 测量值; NO_2 质量浓度测量误差为 $\pm 5\%$ 测量值。实验时,使用控制台调节燃烧室进口温度、流量以达到要求的燃烧室入口条件,气体燃料的流量通过质量流量计进行测量并控制。

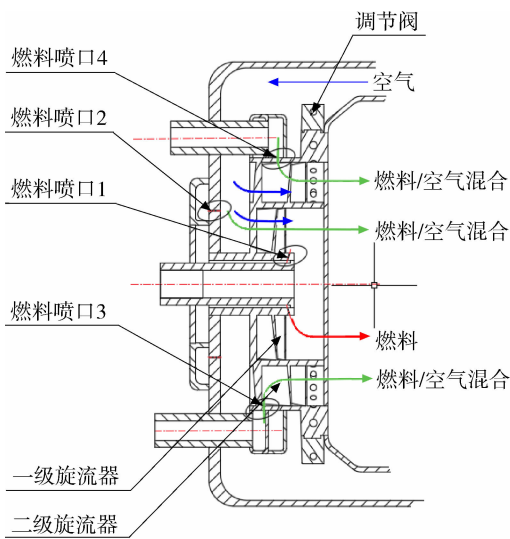


图 2 燃烧室头部结构

Fig. 2 Structure of combustor head

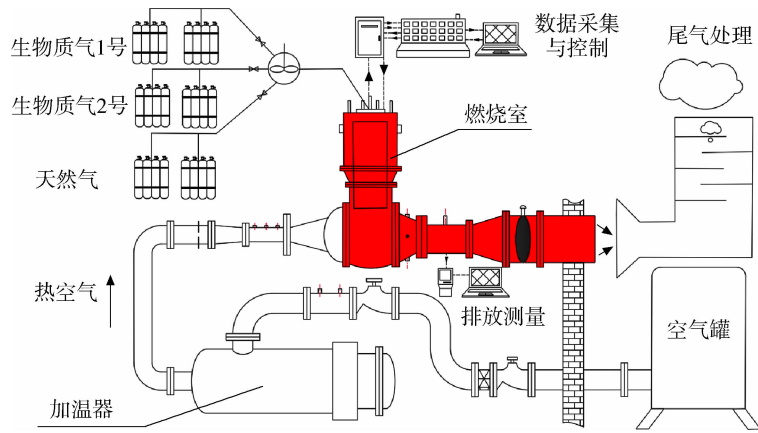


图 3 实验系统图

Fig. 3 Experiment system diagram

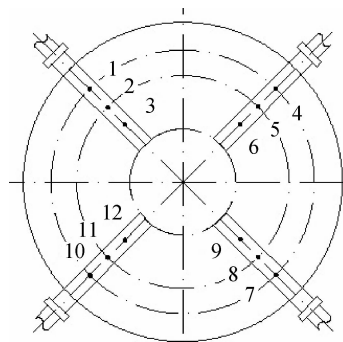


图 4 燃烧室出口采样系统

Fig. 4 Combustor outlet sampling system

1.3 实验条件

所设计的微型燃气轮机采用简单循环,根据热力循环计算,燃烧室在设计工况下的热力学参数如表 1 所示,其中污染物排放质量浓度为 100% 负荷时,折算到基准氧含量 15% 的排放质量浓度。所使用的燃料为辽 3 号天然气,其组成体积分数为 92.18% 的 CH_4 , 4.54% 的 C_2H_6 , 1.2% 的 C_3H_8 ,其余为不可燃成分,密度为 0.654 kg/m^3 ,热值为 36920 kJ/m^3 。

表 1 燃烧室设计目标参数

Table 1 Combustion design target parameters

项目	数值
空气流量/(kg/s)	1.491
入口空气温度/K	445.27
进口总压/kPa	327.7
出口燃气平均温度/K	989.84
总压恢复系数/%	≥ 97
燃烧效率/%	≥ 97
污染物排放质量浓度要求/(mg/m^3) $\rho_{\text{NO}_x} < 50, \rho_{\text{CO}} < 60$	

为分析燃烧室工作过程中物理参数、几何参数对燃烧室燃烧特性的影响,对燃烧室在设计点时喷口组合方式、燃料分配比例和空气流量分配对污染物生成和燃烧效率的影响进行了实验研究,其中燃烧效率的计算采用式(1)所示的燃气分析法

$$\eta = 1 - \frac{282\,710 \times \rho_{\text{CO},d} + 801\,536 \times \rho_{\text{UHC},d} + 90\,204 \times \rho_{\text{NO},d}}{H_u(12.011 + 1.008n)(\rho_{\text{CO}_2,d} + \rho_{\text{CO},d} + 90\,204\rho_{\text{NO},d})} \quad (1)$$

式中下标 d 表示干基; H_u 为燃料的热值; n 为燃料分子 H/C 摩尔比, $\rho_{\text{CO},d}$ 、 $\rho_{\text{CO}_2,d}$ 、 $\rho_{\text{UHC},d}$ 、 $\rho_{\text{NO},d}$ 为实测的尾气排放值(质量浓度)。

污染物排放为采用式(2)折算到干基 15% 氧的排放质量浓度。

$$\rho_{d,15\%O_2} = \frac{(20.9 - 15)\rho_{d,m}}{20.9 - \varphi_{O_2,d,m}} \quad (2)$$

式中 $\rho_{d,m}$ 为实测的干基气态污染物质量浓度, $\varphi_{O_2,d,m}$ 为实测的干基氧的体积分数。

实验中具体测试参数如下:

1) 燃料喷口组合方式

燃料喷口位置及数量不同,会导致燃料喷入气流的湍流特性、燃料与空气的混合距离及射流深度不同。研究表明,射入位置的空气湍流度高、燃料射流深度大、燃料与空气的动量比大和混合距离长对燃料与空气的混合均匀性都会产生有利影响,进而影响到燃烧特性^[19]。在不改变燃烧室进出口条件的前提下,通过采用不同的喷口组合方式,可以改变燃料与空气的混合均匀性。具体采用的喷口组合方案如表 2 所示。其中,方案一、二和三、四为主燃级位置不同的对比,方案一、三和二、四为值班级位置不同的对比,方案一、三、五为值班级位置及射流深度影响的对比,方案三、

四、六为主燃级位置及射流深度影响的对比。

表 2 喷嘴组合方案
Table 2 Nozzle combination scheme

方案	燃料喷嘴	方案	燃料喷嘴
一	1+3	四	2+4
二	1+4	五	1+2+3
三	2+3	六	2+3+4

2) 值班级与主燃级燃料分配比例

为分析值班级与主燃级燃料分配比例对燃烧特性的影响,调节燃烧室运行达到表 1 的设计点状态后,在保持燃料总量不变的前提下,按照表 3 所示的实验工况调节值班级与主燃级的燃料流量,改变值班级当量比 ϕ_p 与主燃级当量比 ϕ_m ,表中 r 为值班级燃料流量与主燃级燃料流量的比值, ϕ'_m 为调节阀全开时主燃烧区的当量比。

表 3 实验工况
Table 3 Experimental conditions

测试点	ϕ_p	ϕ_m	ϕ'_m	r
1	0.352	0.874	0.790	0.1
2	0.646	0.801	0.724	0.2
3	0.894	0.739	0.668	0.3
4	1.107	0.687	0.621	0.4
5	1.292	0.641	0.579	0.5
6	1.453	0.601	0.543	0.6

3) 空气流量分配

考虑到 NOx 和 CO 排放的要求,希望主燃级燃烧区的当量比处于 0.6~0.8 的贫燃区间,而从值班级燃烧稳定的角度考虑,则希望值班级燃烧区的当量比在 1 附近^[20]。根据空气流量分配及燃料分配,可以计算出在燃烧室设计点,主燃级燃烧区的当量比为 0.687,值班级燃烧区的当量比为 1.107,燃烧室总的当量比为 0.77。为分析空气流量分配方式的改变对燃烧性能影响,在燃烧室头部设计了调节阀,可通过调节阀开度对进入燃烧室的空气流量分配进行调节,进而改变燃烧区燃烧特性和燃烧室出口温度分布特性。通过对空气流量分配的计算,由于进气阀门处于二级轴向旋流器的外侧,进气阀门全开时主要引起主燃级燃烧区当量比的变化,根据流量分配可以计算出在调节阀全开时主燃烧区当量比 ϕ'_m 随燃料分配比值的变化如表 3 所示。

2 实验结果与分析

2.1 喷嘴组合方案对燃烧特性的影响

进行喷嘴组合方式对燃烧特性影响实验时,将头部空气调节阀关闭。调节空气流量及燃料流量达到设计点。对于表 2 所示的 6 种组合方案,每一种组合方式进行了 3 组不同值班级和主燃级的燃料比例时的燃烧特性测试,选取的燃料分配比例 r 分别为 0.286、0.406 和 0.552,则值班级燃烧区的当量比 ϕ_p 分别为 0.82、1.12 和 1.38,主燃级燃烧区当量比 ϕ_m 为 0.76、0.68 和 0.62。

不同喷嘴组合方式对 NOx 排放质量浓度值为 ρ_{NOx} 的影响如图 5 所示。从总的变化趋势来看,燃料喷嘴位置、射流深度的变化对 NOx 的生成量有较大的影响。方案一、二为主燃级喷嘴位置不同,方案二主燃级喷嘴更靠近燃烧区,燃料与空气混合距离较短不利于与燃料与空气的混合均匀,但方案二主燃级喷嘴燃料喷出位置的空气湍流强度大,有利于燃料与空气的快速混合,因此两种方案的 NOx 生成量差别不大。方案三、四的对比结果同样符合这一规律。方案一、三和方案二、四为值班级位置不同对 NOx 排放影响的对比,可以明显看出值班级采用预混方式、增加混合距离有益于 NOx 排放的降低。由方案一、三、五的对比可以看出,值班级的预混合方式有利于 NOx 排放的降低,但由于喷嘴面积下降导致燃料射流深度下降不利于 NOx 排放的降低。方案三、四、六的差别为主燃级射流深度不同,在燃料流量相同时,由于方案六增加了喷嘴的通流面积会导致燃料射流深度下降,不利于燃料与空气的充分预混,导致 NOx 排放增加。

由以上不同喷嘴组合方式对 NOx 生成量的影响可以看出,燃料/空气混合距离、燃料喷入空

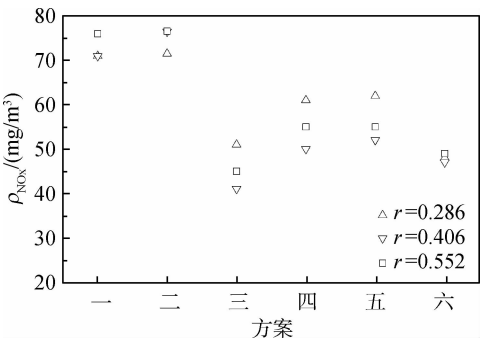


图 5 喷嘴位置对 NOx 排放的影响
Fig. 5 Effect of nozzle position on NOx emissions

气处空气的湍流强度、燃料射流深度都会对污染物的生成特性产生影响,且各因素之间是相互影响的。本实验测试只是初步确认了产生影响的几个因素,未对各因素的影响进行深入的研究,该部分工作将在后期深入开展。

喷嘴位置对燃烧室 CO 排放质量浓度 ρ_{CO} 的影响如图 6 所示。同样的燃料分配比例下,方案二的 CO 排放量高于方案一,方案三高于方案四。分析喷嘴位置变化可以得知,2 号值班级燃料喷嘴和 3 号主燃级的燃料喷嘴对比同级其他喷嘴位置相当于增加了预混段长度。预混段长径比越大,CO 质量浓度越高,因为随着预混段燃料与空气的预混均匀性的增加,主燃区出现局部缺氧和高温的几率减少,火焰温度降低。由于燃烧强度降低使燃烧温度低于 CO 转化为 CO_2 的临界温度,导致 CO 排放有所增加。

过改变喷嘴位置和燃料的深度可以有效改善燃烧特性。在所测试的几种组合方案中,采用方案三、燃料分配比为 0.406 时, NO_x 排放质量浓度可降低至 41.3 mg/m^3 ,CO 排放质量浓度为 12.5 mg/m^3 ,燃烧效率达到了 99.1%,完全满足设计要求。同时,也发现值班级与主燃级燃料分配比例对燃烧特性也会产生影响,因此在后面针对燃料分配比例对燃烧性能的影响进行了深入的研究。由于喷嘴组合方案一、二的 NO_x 排放远高于设计值,燃烧效率也未达到设计要求,因此在后面的实验测试中不再考虑方案一、二。

2.2 燃料分配比例对燃烧特性的影响

值班级与主燃级燃料分配比例的变化会导致进入值班级燃烧区和主燃级燃烧区的能量发生变化,进入各燃烧区无量纲能量 E_{dim} 随着比值 r 的变化如图 8 所示。值班级能量变化范围要大于主燃级能量变化范围。进入不同燃烧区能量的变化会导致当量比的变化,进而引起燃烧特性的变化^[21]。

燃料分配比例对 NO_x 排放的影响如图 9 所示。4 组喷嘴组合方案的 NO_x 随 r 的变化趋势

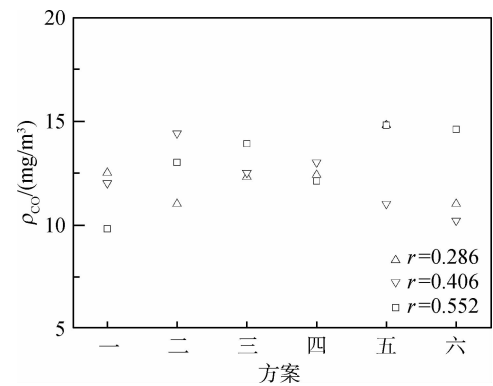


图 6 喷嘴位置对 CO 排放的影响

Fig. 6 Effect of nozzle position on CO emissions

喷嘴位置对燃烧室燃烧效率 η 的影响如图 7 所示,燃烧效率的变化规律与 CO 的变化规律基本相同,CO 生成量越高,燃烧效率越低。

由喷嘴位置对燃烧性能的影响可以看出,通

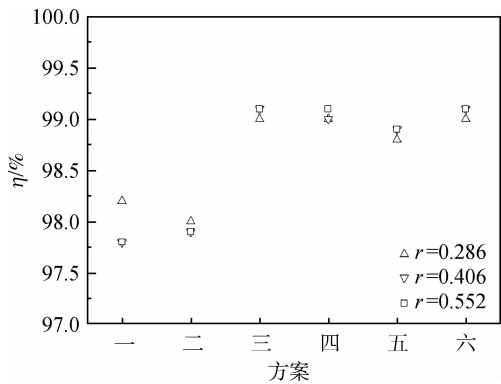


图 7 喷嘴位置对燃烧室燃烧效率的影响

Fig. 7 Effect of nozzle position on combustion efficiency

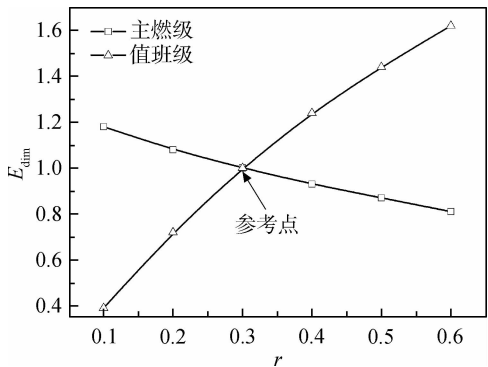


图 8 进入各燃烧区能量的变化

Fig. 8 Change of energy entering each combustion zone

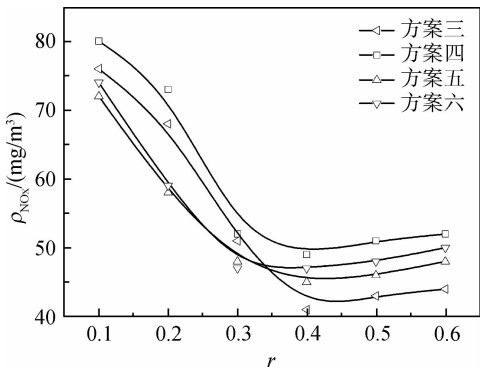


图 9 燃料分配比例对 NO_x 排放的影响

Fig. 9 Effect of fuel distribution ratio on NO_x emissions

相同,流量比 r 在 $0.1 \sim 0.3$ 范围内降低趋势较快,过了 0.3 变化趋于平缓。 NO_x 排放与燃料分配比例的关系可以通过表 3 所示的当量比的变化来解释,在实验点 1、2 时,由于主燃级燃料流量较多,当量比超过 0.8 导致燃料与空气的混合均匀性下降,产生局部的高温燃烧区,导致 NO_x 生成量较大。随着值班级燃料流量的增加,值班级达到了富燃,主燃级当量比进一步下降混合均匀性提高,导致 NO_x 生成量基本不变。从燃料流量比 r 从 0.3 增加至 0.6 的过程中 NO_x 的生成量的变化不大也可以看出,在主燃级当量比降至 0.8 以后 NO_x 主要是由值班级产生的。

CO 随燃料流量分配比例的变化趋势如图 10 所示,随着值班级燃料流量的增加, CO 排放整体呈现出增加的趋势,但在所测试的范围内, CO 排放都低于 17 mg/m^3 ,达到了排放的要求。这是因为随着值班级燃料流量增加,值班级燃烧区逐渐进入富燃状态,会导致部分燃料没有完全被氧化,同时值班级燃料射流速度的加快会导致燃料在燃烧室内停留时间缩短,不利于 CO 的氧化。

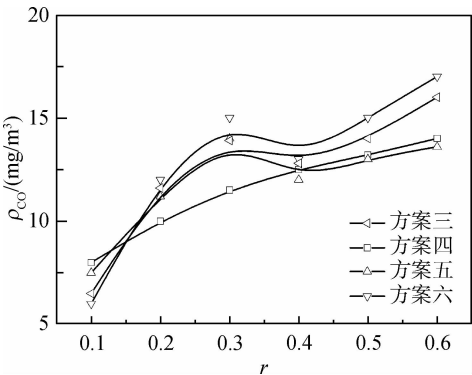


图 10 燃料分配比例对 CO 排放的影响
Fig. 10 Effect of fuel distribution ratio on CO emissions

燃烧效率 η 随燃料流量分配比例的变化如图 11 所示。在燃料分配比例小于 0.4 的范围内,燃烧效率变化不大,均在 99% 以上,达到了现代先进燃烧室对燃烧效率的要求。分配比例超过 0.4 后,燃烧效率会略有下降,但降幅不明显,这是由于值班级燃料流量增加后导致 CO 生成量增加导致的。

值班级与主燃级燃料流量分配比例的改变会导致在各自的燃烧区当量比的变化,因而导致了燃烧特性发生变化。从测试的范围可以看出,燃料分配比例的变化对 NO_x 的影响最大,变化范围为 $40 \sim 80 \text{ mg/m}^3$,部分值已远超出设计要求。

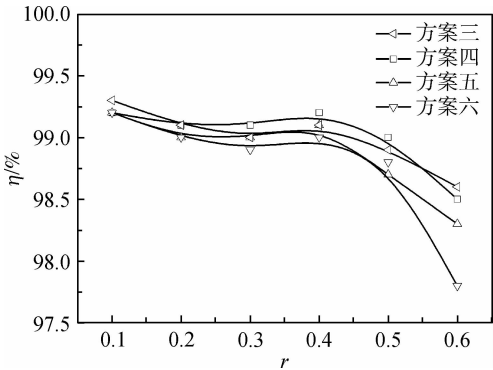


图 11 燃料分配比例对燃烧效率的影响
Fig. 11 Effect of fuel distribution ratio on combustion efficiency

CO 排放质量浓度的变化范围为 $5 \sim 17 \text{ mg/m}^3$,燃烧效率都在 97.5% 以上,均达到了设计要求。因此,在燃烧室运行中应严格控制值班级与主燃级的燃料分配比例范围。

2.3 空气流量分配对燃烧特性的影响

由燃料分配方式对燃烧特性的影响可以看出,燃烧区当量比的变化对燃烧特性会产生较大的影响,调节燃烧室头部的调节阀会改变燃烧室空气流量分配,进而改变各燃烧区的当量比。通过对空气流量分配的计算发现,调节阀的开关对主燃级燃烧区的当量比和进入掺混孔的空气量影响最大。调节阀全开时,使主燃级燃烧区当量比下降,同时进入掺混孔的空气流量下降。这一方面会影响到主燃级燃烧区的燃烧特性,另一方面对燃烧室出口温度分布也会产生影响。对表 3 所列值班级与主燃级燃料分配比例,采用表 2 喷口组合方案三、四、五、六时的燃烧特性进行了实验测试,结果如图 12~图 15 所示。同时,由图 9 可以看出,方案三的 NO_x 排放较低,为比较不同空气流量分配方式对燃烧特性的影响,将未开启调节阀门时的方案三的结果进行了对比。

在值班燃烧区当量比不变时,主燃区当量比下降对于降低 NO_x 排放是有利的。对于所测试的几种喷口组合方案,在所测试的范围内 NO_x 排放均小于阀门未开启时的方案三,且在 r 大于 0.15 后, NO_x 排放都达到了低于 50 mg/m^3 的要求。同时也发现主燃级燃烧区当量比的下降会引起 CO 生成量的增加及燃烧效率的下降,但 CO 的排放均低于设计值 (60 mg/m^3),燃烧效率高于 97% ,都满足设计要求。采用方案三,在燃料分配比例 0.4 时, NO_x 排放为 21 mg/m^3 , CO 排放为 27.2 mg/m^3 ,燃烧效率为 98.6% ,达到了较好的

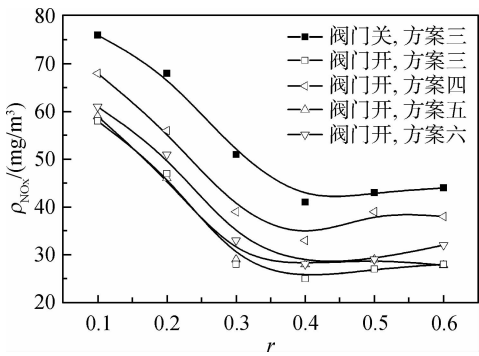


图 12 空气流量分配对 NOx 排放的影响

Fig. 12 Effect of air flow distribution on NOx emission

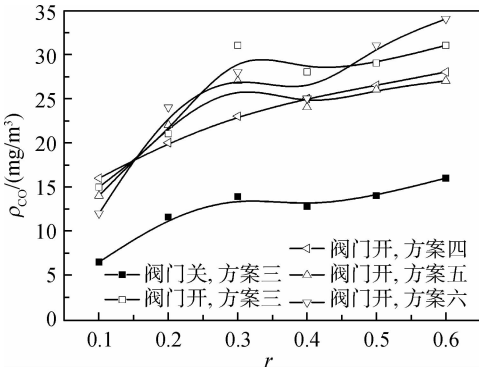


图 13 空气流量分配对燃烧室 CO 排放的影响

Fig. 13 Effect of air flow distribution on CO emission

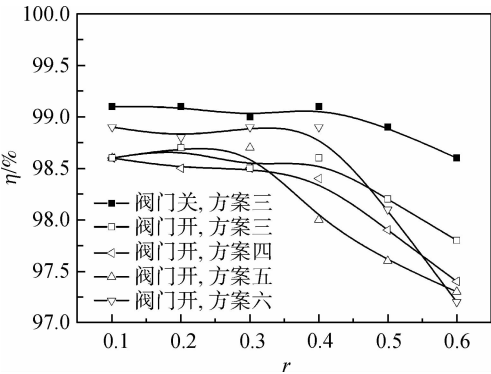


图 14 空气流量分配对燃烧室燃烧效率的影响

Fig. 14 Effect of air flow distribution on combustion efficiency

燃烧特性。

主燃级空气流量增加,导致进入掺混孔的空气量下降,会导致燃烧室出口温度场的变化。采用图 4 所示的布置方式,在燃烧室出口布置 12 只热电偶,分别采集燃烧室出口温度,采用式(3)计算不同空气流量分配方式下燃烧室出口温度分布系数 δ_4 ^[22],结果如图 15 所示。由测试结果发现,燃料分配比例和喷口组合方案对出口温度分布系

数的影响不明显,因此只对不同空气流量分配方式时采用喷口组合方案三的结果进行了对比。

$$\delta_4 = \frac{T_{4\max} - T_{4\text{av}}}{T_{4\text{av}} - T_{3\text{av}}} \quad (3)$$

式中 $T_{4\max}$ 为出口温度场中的燃气最高温度; $T_{4\text{av}}$ 为出口平均温度; $T_{3\text{av}}$ 为进口平均温度。

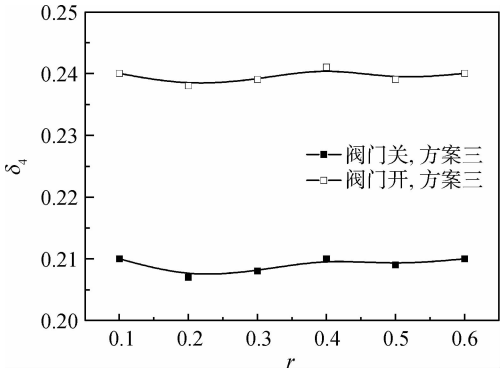


图 15 空气流量分配对出口温度分布系数的影响

Fig. 15 Effect of air flow distribution on outlet temperature distribution coefficient

由对比结果可以看出,空气流量分配对燃烧室出口温度分布系数的影响是很明显的。随着用于掺混的空气量的减小,出口温度分布系数增加。对于以天然气为燃料的低压比工业燃气轮机的出口温度分布系数应在 0.15 左右。但由于本实验采用的为单管燃烧室,温度分布系数偏高也是合理的。

3 结 论

1) 燃料喷口位置和燃料的射流深度会影响到燃料与空气的混合特性,进而影响燃烧特性。在采用方案三、燃料分配比为 0.406 时,NOx 排放可降低至 41.3 mg/m³,CO 质量浓度降低至 12.5 mg/m³,燃烧效率达到了 99.1%,满足设计要求。

2) 值班级与主燃级燃料分配比例的变化会导致值班级燃烧区和主燃级燃烧区当量比的变化,主燃级燃烧区当量比降至 0.8 以后 NOx,主燃级燃烧区 NOx 的生成量会明显下降,燃烧室中 NOx 主要是由值班级产生的。

3) 空气流量分配会改变主燃级燃烧区的当量比及燃烧室出口温度分布系数。增加主燃级燃烧区空气流量,可以使燃烧室的 NOx 排放降低至 21 mg/m³,CO 排放 27.2 mg/m³,燃烧效率为 98.6%,达到了较好的燃烧特性。燃烧室出口温度分布系数会随着掺混空气流量的降低而升高。

4) 喷口位置和燃料射流深度对燃烧特性的影响是复杂的,需要进一步的深入研究。

参考文献:

[1] 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 natural gas turbine application[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences,2016. (in Chinese)

[2] 孙宝成. 燃气轮机燃料/空气掺混规律的数值研究[D]. 北京:清华大学,2007.
SUN Baocheng. Numerical study of fuel/air unmixedness in a nonreacting gas turbine combustor[D]. Beijing: Tsinghua University,2007. (in Chinese)

[3] 李娜,张强,邵思东,等. 重型车用稀燃天然气发动机碳氢排放特性[J]. 农业工程学报,2013,29(2):45-51.
LI Na,ZHANG qiang,SHAO Sidong,et al. HC emission characteristics of heavy vehicle equipped with lean-burn natural gas engine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2013,29(2):45-51. (in Chinese)

[4] 冯冲,祁海鹰,谢刚,等. R0110 燃烧室预混均匀性与排放的研究[J]. 工程热物理学报,2010,31(8):1431-1434.
FENG Chong,QI Haiying,XIE Gang,et al. Study on premixing uniformity and emission of R0110 combustor [J]. Journal of Engineering Thermophysics,2010,31(8):1431-1434. (in Chinese)

[5] 李宇红,孙宝成,祁海鹰. 燃烧室预混段燃料/空气混合规律的数值研究[J]. 热能动力工程,2008,23(3):235-239.
LI Yuhong,SUN Baocheng,QI Haiying. A numerical study of the fuel/air mixing law specific to the premixing section of a gas turbine combustor[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2008,23(3):235-239. (in Chinese)

[6] 李孟涵,张强,李国祥,等. 引燃柴油量及喷射间隔对直喷天然气发动机排放的影响[J]. 农业工程学报,2016,32(6):95-100.
LI Menghan,ZHANG Qiang,LI Guoxiang,et al. Effects of diesel injection quantity and injection interval on emission characteristics of directly injected natural gas engine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2016,32(6):95-100. (in Chinese)

[7] 谢刚,李宇红,祁海鹰. DLN 燃烧室的燃料-空气预混均匀性研究[J]. 工程热物理学报,2006,27(增刊 2):227-230.
XIE Gang,LI Yuhong,QI Haiying. Experimental study on non-uniformity off fuel/air premixing in a DLN combustor [J]. Journal of Engineering Thermophysics,2006,27(Suppl. 2):227-230. (in Chinese)

[8] 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)

[9] 刘凯,张宝诚,马洪安. 过量空气系数对 DLN 燃烧室性能影响的基本规律[J]. 热力发电,2010,39(8):8-11.
LIU Kai,ZHANG Baocheng,MA Honfan. Basic influence regularity of excess air coefficient upon the performance of DLN combustor[J]. Thermal Power Generation,2010,39(8):8-11. (in Chinese)

[10] 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)

[11] 祝俊宗,胡羽,夏单城,等. 改善低 NOx 燃烧室预混均匀性的结构优化策略[J]. 中国电机工程学报,2017,37(21):6353-6362.
ZHU Junzong, HU Yu, XIA Dancheng, et al. Structural optimization strategy of improving the premixing uniformity in a low NOx combustor[J]. Proceedings of the CSEE, 2017,37(21):6353-6362. (in Chinese)

[12] 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):1135-1143.

[13] FURUHATA T, AMANO S, YOTORIYAMA K, et al. Development of can-type low NOx combustor for micro gas turbine(fundamental characteristics in a primary combustion zone with upward swirl)[J]. Fuel,2007,86(15):2463-2474.

[14] 薛鑫,林宇震,张弛,等. 火焰筒压力损失对贫油熄火特性和燃烧效率的影响[J]. 航空动力学报,2012,27(12):2687-2691.
XUE Xin,LIN Yuzhen,ZHANG Chi,et al. Effects of liner pressure loss on combustor lean blow-out and combustion efficiently performances[J]. Journal of Aerospace Power, 2012,27(12):2687-2691. (in Chinese)

[15] 汪风山. 低 NOx 排放微型燃气轮机燃烧室的数值模拟及实验研究[D]. 北京:中国科学院,2009.
WANG Fengshan. Numerical simulation and experimental study on combustion chamber of micro gas turbine with low NOx emission [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences,2009. (in Chinese)

[16] 付忠广,张译中,卢可,等. 合成气微型燃气轮机旋流燃烧特性数值模拟[J]. 热力发电,2015,44(3):15-20.
FU Zhongguang,ZHANG Yizhong,LU Ke,et al. Numerical study on swirl combustion characteristics of micro gas turbine combustor burning syngas [J]. Thermal Power Generation,2015,44(3):15-20. (in Chinese)

[17] 邢畅,邱朋华,刘栗,等. 起动机驱动过程中微型燃气轮机燃烧室变工况燃烧特性[J]. 中国电机工程学报,2018,38(8):2367-2375.
XING Chang, QIU Penghua, LIU Li, et al. Off-design com-

bustion performance under starter-driven process for a micro-gas turbine combustor[J]. Proceedings of the CSEE, 2018,38(8):2367-2375. (in Chinese)

[18] 刘爱斌,陈思,李昱泽,等. 微型燃气轮机燃烧室性能实验测试[J]. 热力发电, 2019,48(6):71-78.
LIU Aiguo,CHEN Si,LI Yuze,et al. Combustion characteristics test for a micro-gas turbine combustor[J]. Thermal Power Generation,2019,48(6):71-78. (in Chinese)

[19] REN Z,YANG H,LU T. Effects of small-scale turbulence on NOx formation in premixed flame fronts [J]. Fuel, 2014,115(1):241-247.

[20] 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)

[21] 秦皓,汤冠琼,林宇震,等. 燃油分级比对 LESS 燃烧室压力振荡频率的影响. [J]. 航空动力学报, 2015, 30(6): 1337-1343.
QIN Hao,TANG Guanyong,LIN Yuzhen,et al. Influence of fuel stage ratio on pressure oscillation frequency of LESS combustor[J]. Journal of Aerospace Power,2015,30(6):1337-1343. (in Chinese)

[22] 金如山,索建秦. 先进燃气轮机燃烧室[M]. 北京:航空工业出版社,2016.

(编辑:叶 青、王碧琚)