

燃用高炉煤气的燃气轮机燃烧室喷嘴结构改进

郑玮琳¹, 宋雪松¹, 代佳奇¹, 谢 凡², 曾 文¹

(1. 沈阳航空航天大学 航空发动机学院, 辽宁 沈阳 110136;

2. 中国航空工业集团有限公司 沈阳飞机设计研究所, 辽宁 沈阳 110035)

摘 要:以改烧低热值高炉煤气为研究目的,针对单头部中心分级旋流燃烧室,采用数值模拟方法开展燃气轮机燃烧室喷嘴结构改进研究,分析了燃烧室各级喷嘴面积对燃烧室性能的影响。结果表明:随着主燃级喷嘴无量纲面积从 1 增大到 15,燃烧室出口温升在 1 199 ~ 1 212 K 之间变化,燃烧室出口温度分布系数(OTDF)基本不变;燃烧室出口 NO_x 和 CO 排放值整体上呈先减小后增大的变化规律, NO_x 排放值在 1.3×10^{-5} 以下,CO 排放量较高,在 $2.54 \times 10^{-4} \sim 4.45 \times 10^{-4}$ 之间变化;燃烧效率先增大后减小。随着预燃级喷嘴无量纲面积从 1 增大至 12,燃烧室温升由 1 208 K 降低至 1 054 K,OTDF 在 0.017 ~ 0.030 之间变化;燃烧室出口 NO_x 排放值变化较小且均在 1.0×10^{-5} 以下,燃烧室出口 CO 排放值呈明显上升的趋势,由 2.54×10^{-4} 增加至 1.289×10^{-4} ;燃烧效率由 99.85% 降低至 99.23%。随着值班级喷嘴无量纲面积从 1 增大到 40,温升变化在 1 206 ~ 1 214 K 之间,OTDF 值在 0.025 左右;燃烧室出口 NO_x 排放值变化很小且均在 9×10^{-6} 以下,燃烧室出口 CO 排放值呈明显下降趋势;燃烧效率基本不变。

关 键 词:高炉煤气;燃料喷嘴;燃烧室;燃烧性能;污染物排放

中图分类号:TK221

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2025.04.006

[引用本文格式]郑玮琳,宋雪松,代佳奇,等.燃用高炉煤气的燃气轮机燃烧室喷嘴结构改进[J].热能动力工程,2025,40(4):55-63. ZHENG Weilin, SONG Xuesong, DAI Jiaqi, et al. Improvement of combustion chamber nozzle structure of gas turbine burning blast furnace gas[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(4): 55-63.

Improvement of Combustion Chamber Nozzle Structure of Gas Turbine Burning Blast Furnace Gas

ZHENG Weilin¹, SONG Xuesong¹, DAI Jiaqi¹, XIE fan², ZENG Wen¹

(1. School of Aero-engine, Shenyang Aerospace University, Shenyang, China, Post Code: 110136;

2. Shenyang Aircraft Design & Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Shenyang, China, Post Code: 110035)

Abstract: For the purpose of switching to blast furnace gas of low calorific value, a numerical simulation method was used for single head center staged swirl combustion chamber to improve the nozzle structure of the gas turbine combustion chamber, and the influence of each stage nozzle area on the performance of the combustion chamber was analyzed. The results show that with the increase of the dimensionless area of the main combustion stage nozzle from 1 to 15, the temperature rise of the combustion chamber outlet changes between 1 199 - 1 212 K, and the outlet temperature distribution factor (OTDF) of the combustor remains essentially unchanged. NO_x and CO emissions at the combustion chamber outlet show an overall pattern of decreasing first and then increasing. The emission of NO_x is below 1.3×10^{-5} , and the emission of CO is relatively high between 2.54×10^{-4} and 4.45×10^{-4} . The combustion efficiency increases first and then decreases. With the increase of the dimensionless area of the pre-combustion stage nozzle from 1 to 12, the temperature rise of the combustion chamber decreases from 1 208 K to 1 054 K, and the

收稿日期:2024-09-24; 修订日期:2025-01-07

基金项目:国防基础科研计划资助(JCKY2021130B039)

Fund-supported Project: Defense Industrial Technology Development Program (JCKY2021130B039)

作者简介:郑玮琳(1989-),女,沈阳航空航天大学副教授.

OTDF varies between 0.017 and 0.030. NO_x emissions at the combustion chamber outlet change little and are all below 1.0×10^{-5} , and CO emission at the combustion chamber outlet shows a significant upward trend, increasing from 2.54×10^{-4} to 1.289×10^{-4} . Combustion efficiency decreases from 99.85% to 99.23%; with the increase of the dimensionless area of the pilot stage nozzle from 1 to 40, the temperature rise varies from 1 206 K to 1 214 K, and the OTDF value is about 0.025. The NO_x emissions at the combustion chamber outlet change little and are all below 9×10^{-6} , and the CO emission at the combustion chamber outlet shows a significant downward trend. Combustion efficiency is basically unchanged.

Key words: blast furnace gas, fuel nozzle, combustion chamber, combustion performance, pollutant discharge

引言

为了解决我国能源供应紧张问题,开发新型清洁能源替代传统化石燃料变得尤为重要。高炉煤气作为钢铁冶炼的副产品,具有低热值特性,其主要成分包括氢气、一氧化碳、二氧化碳和氮气,热值范围为 $3\ 300 \sim 4\ 200\ \text{kJ/m}^3$ 。与天然气等高热值燃料相比,高炉煤气燃烧存在流速过快、流场组织恶化、点火困难等问题。为实现高炉煤气在燃气轮机燃烧室中的高效、稳定燃烧,需对燃烧室结构,特别是喷嘴结构进行优化改进。

国内学者针对喷嘴直径对燃料喷射和燃烧过程的影响进行了大量研究。宋全斌等人^[1]通过增大喷嘴直径,改善了 80 kW 微型燃气轮机的燃烧室流场结构和燃烧。刘国库等人^[2]发现增大喷嘴直径和燃料孔有利于改善燃料分布和点火特性。杨旸等人^[3]研究表明,喷嘴直径增大会增加燃烧室内燃料掺混的不均匀度。周驯黄等人^[4]指出喷嘴直径增大可能导致燃料掺混效率降低。李涛等人^[5]设计了适用于焦炉气的优化喷嘴结构,并进行了数值模拟分析。陈炫任等人^[6]的数值模拟研究显示燃料喷口直径对掺混的影响明显。孙付军等人^[7]提出了一种新型的贫预混喷嘴,研究了包括喷嘴直径的喷嘴关键结构参数对混合特性的影响。李涛等人^[8]的研究表明,喷嘴燃料孔径的增大会影响燃气轮机以焦炉煤气为燃料时的燃烧室温度分布。徐海成等人^[9]分析了双燃料喷嘴气体燃料路孔径、布置及喷射角度对燃烧室性能的影响。何敏等人^[10]在将燃气轮机燃烧室从使用柴油改为使用天然气时,

设计了 3 种不同孔径的天然气管嘴,发现增大天然气管嘴直径可以提升燃烧室性能。邱朋华等人^[11]通过改变喷嘴直径,提高了微混喷嘴的混合强度。范洪武^[12]研究了低热值燃料燃气轮机发电技术,研究表明,扩大燃料管管径和采用旋流式喷嘴能使燃烧室形成高强度、高稳定性和均衡燃烧的扩散火焰。

国外研究人员也针对不同喷孔尺寸的燃烧室喷嘴开展了大量研究。Jung 等人^[13]设计了 3 种不同尺寸的预混涡流燃气轮机燃烧室喷嘴,以优化燃烧特性。Liaw 等人^[14]在使用计算流体动力学方法优化燃气轮机的喷嘴和叶片时也发现增大喷嘴直径可改善燃烧性能。Szymon 等人^[15]讨论了微型燃气轮机中不同喷嘴形式对提高性能和减少环境影响的作用。Baklanov 等人^[16]的研究也证明了喷嘴直径对燃烧室燃烧性能有影响。Do 等人^[17]对 500 W 微型燃气轮机燃烧室喷嘴内流体的流动进行了研究,研究表明:改变喷嘴直径,可以显著改善流体分布的均匀性,从而提高燃烧效率和燃烧室的可靠性。

现有燃烧室喷嘴结构的研究大多集中在天然气等高热值燃料或焦炉煤气、合成气等中、高热值替代燃料。然而,改烧低热值高炉煤气后燃料体积显著增加,原有喷嘴结构无法保证高流速气体条件下的燃烧室性能。因此,本研究以燃用天然气的中心分级燃烧室为原型,研究各级燃料喷嘴结构对燃烧室性能的影响。不仅为低热值燃料的燃烧室应用提供了新的视角,也为燃烧室喷嘴设计的优化提供了依据。

1 计算方法

1.1 几何模型和网格划分

本研究所采用的燃烧室是中心分级单筒燃烧

室,燃烧室几何模型如图 1 所示。燃烧室由燃烧室头部的燃料喷嘴、空气旋流器和火焰筒组成,燃烧室整体长 472.7 mm,火焰筒直径 190 mm,燃烧室由外向内依次配置 20 个主燃级喷嘴、4 个预燃级喷嘴和 1 个中心值班级喷嘴。

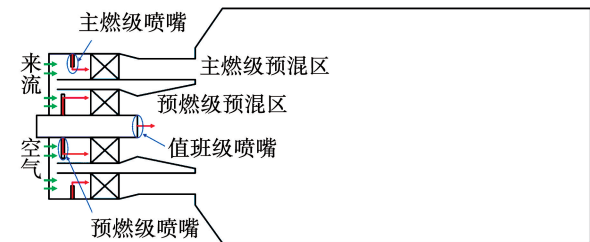


图 1 中心分级燃烧室结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of center graded combustion chamber

燃烧室主燃级喷嘴为圆柱形,喷孔直径 1.5 mm;预燃级喷嘴为圆柱形,圆柱喷嘴两侧开设两组不同直径的燃料喷孔,其中大孔直径 1.8 mm、小孔直径 1.1 mm;值班级燃料喷孔直径为 1.5 mm。本研究通过改变燃料喷孔的大小来控制喷嘴面积,其他参数无变化。中心分级燃烧室燃料喷嘴三维结构如图 2 所示。

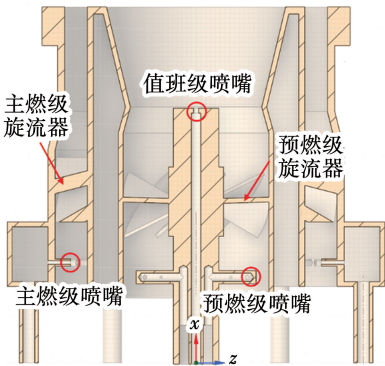


图 2 中心分级燃烧室燃料喷嘴结构图

Fig. 2 Structural diagram of fuel nozzle in center graded combustion chamber

本研究模拟的计算域为空气入口到燃烧室出口之间的整个流体区域。计算区域采用六面体和多面体混合网格 (Poly - Hexcore),如图 3 所示。燃烧室喷嘴附近、旋流器叶片周围、突变处以及中心回流区等处气体流场特性较为复杂,因此要在以上位置进行网格局部加密处理。采用 3 套网格进行网格无关

性验证,如图 4 所示。

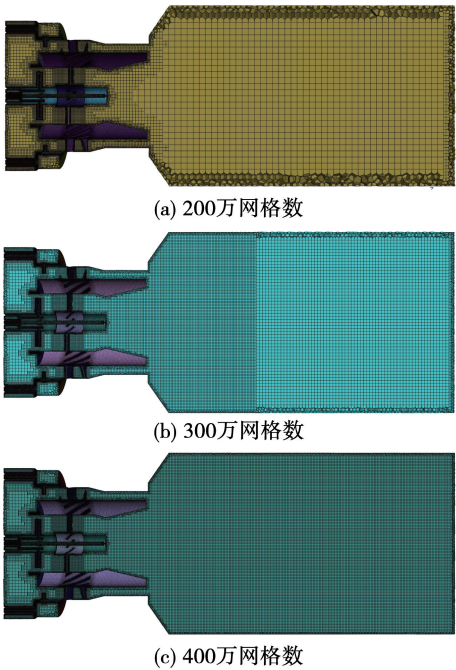


图 3 燃烧室网格划分

Fig. 3 Combustion chamber meshings

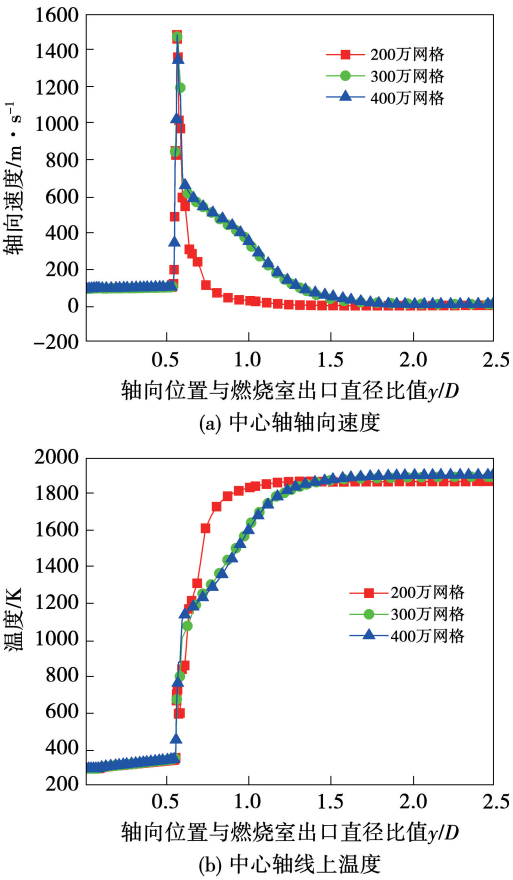


图 4 网格无关性验证结果

Fig. 4 Verification results of mesh-independence

3 套网格的最小正交比均为 0.4,纵横比分别为 17.1、16.0 和 19.9。通过对比分析 200 万、300 万和 400 万网格的计算结果,考虑计算精度以及计算消耗,最终选用的网格数量为 300 万。

1.2 计算模型和边界条件

采用 ANSYS Fluent 2021 软件进行数值模拟计算。湍流计算模型采用能模拟复杂流场并且具有高计算效率的 Realizable $k-\varepsilon$ 模型,壁面函数采用标准壁面函数,燃烧模型采用部分预混火焰面生成流形(Flamelet Generated Manifold,FGM)模型,辐射模型采用 P-1 模型,压力与速度的耦合求解采用 COUPLE 算法,并结合二阶迎风差分格式以提高数值计算的精度。本研究采用文献[18]中 GRI Mech 3.0 机理,该机理包含 53 种化学物种参与的 325 个基元反应,该机理涵盖了 CO、H₂、CH₄ 等关键组分的详细化学反应路径,空气和燃料入口均设为质量入口,并采用自由流出口条件作为出口边界条件。燃烧室头部壁面设为绝热壁面;火焰筒壁面设为等温壁面,温度为 690 K。本研究选取高炉煤气燃烧当量比是 1.0。为保证模拟结果的可比性,在进行数值模拟时,采用了与原型燃烧室进行数据模拟时相同的计算条件,即空气压力为 400 kPa、进口温度为 685 K。

1.3 燃料喷嘴结构变化方案

数值模拟所用的高炉煤气组分和热值如表 1 所示。

表 1 高炉煤气组分比例和热值^[19]

Tab. 1 Proportion and calorific value of blast furnace gas components^[19]

煤气组分/%				热值/ MJ·m ⁻³
H ₂	CO	CO ₂	N ₂	
7.00	21.45	21.72	49.83	4.03

由于高炉煤气热值远低于天然气等高热值燃料,在保证燃烧室功率不变的情况下,改烧高炉煤气会造成燃料的体积急剧增加,需要扩大燃料喷嘴面积以降低燃料喷射速度,本研究中通过更改图中主燃级、预燃级和值班级的喷嘴直径来控制喷嘴面积的大小。为方便研究,本文将改进后燃烧室的喷嘴面积与原型燃烧室喷嘴面积的比值定义为无量纲面积。

在对主燃级喷嘴进行研究时,本文将主燃级喷

嘴面积分别扩大了 3、6、9、12 和 15 倍,扩大后的主燃级喷嘴的无量纲面积分别为 3、6、9、12 和 15,喷嘴变化方案和其对应的无量纲面积如表 2 所示。

表 2 主燃级喷嘴变化方案

Tab. 2 Main combustion stage nozzle change programme

参数名称	基准	a1	a2	a3	a4	a5
喷嘴无量纲面积	1	3	6	9	12	15

将预燃级喷嘴面积分别扩大了 3、6、9 和 12 倍,扩大后的预燃级喷嘴的无量纲面积分别为 3、6、9 和 12,喷嘴变化方案和其对应的无量纲面积如表 3 所示。

表 3 预燃级喷嘴变化方案

Tab. 3 Pre-combustion stage nozzle change programme

参数名称	基准	b1	b2	b3	b4
喷嘴无量纲面积	1	3	6	9	12

将值班级喷嘴面积分别扩大了 10、20、30 和 40 倍,扩大后的主燃级喷嘴的无量纲面积分别为 10、20、30 和 40,喷嘴变化方案和其对应的无量纲面积如表 4 所示。

表 4 值班级喷嘴变化方案

Tab. 4 Pilot stage nozzle change programme

喷嘴变化方案	基准	c1	c2	c3	4
喷嘴无量纲面积	1	10	20	30	40

1.4 燃烧室性能评价参数

本研究通过数值模拟方法,系统地分析了扩大燃烧室各级喷嘴面积对燃烧性能的影响。主要研究了温升、OTDF、污染物排放量以及燃烧效率 4 个指标随喷嘴面积变化的动态规律。温升反映了燃烧过程中燃料释放的热量转化为高温燃气的程度,其计算公式为:

$$\Delta T = T_{\text{out}} - T_{\text{in}}$$

(1)

式中: T_{out} 和 T_{in} —燃烧室出口和进口的平均温度。

OTDF 是燃烧室出口温度分布系数,其计算公式为:

$$\text{OTDF} = \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{out}}}{\Delta T}$$

(2)

式中: $T_{\max}$ —燃烧室出口的最大温度; T_{out} —燃烧室出口的平均温度。

燃烧效率反映了燃料在燃烧过程中转化为有用功的比例,其计算计算公式为:

$$\eta = \frac{[\text{CO}_2] + 0.53[\text{CO}] - 0.319[\text{CH}_4] - 0.397[\text{H}_2]}{[\text{CO}_2] + [\text{CO}] + [\text{UHC}]}$$

(3)

式中: $[\text{CO}_2]$ 、 $[\text{CO}]$ 、 $[\text{CH}_4]$ 和 $[\text{H}_2]$ —燃烧产物中 CO_2 、 CO 、 CH_4 和 H_2 的体积分数; $[\text{UHC}]$ —未完全燃烧的可燃成分的体积分数。

本研究通过数值模拟方法,系统地分析了扩大燃烧室各级喷嘴面积对燃烧性能的影响。主要研究了温升、OTDF、污染物排放量以及燃烧效率这四个指标随喷嘴面积变化的动态规律。

2 结果分析

2.1 主燃级喷嘴对燃烧室性能的影响

图 5 是主燃级喷嘴不同无量纲面积下燃烧室出口温升和 OTDF 的变化规律。

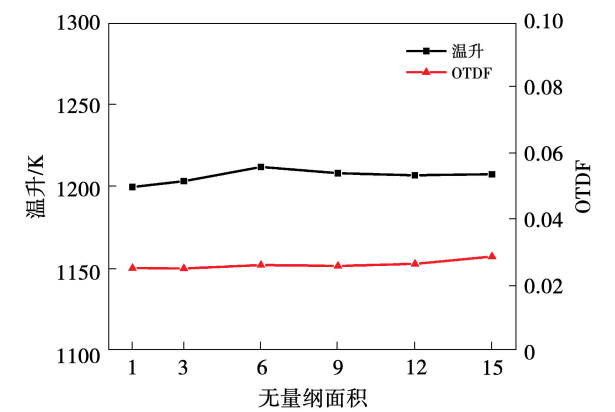


图 5 不同主燃级喷嘴无量纲面积下的燃烧室出口温升和 OTDF

Fig. 5 Temperature rise and OTDF at combustion chamber outlet for different dimensionless areas of main combustion stage nozzle

由图 5 可知,随着主燃级喷嘴无量纲面积的增大,燃烧室出口温升在1 199 ~ 1 212 K 之间变化,OTDF 基本不变,说明主燃级喷嘴无量纲面积的增大对燃烧室出口温升和 OTDF 影响很小。这主要是因为随着主燃级喷嘴无量纲面积的增加,燃烧室主燃级的气体流速降低,燃料在燃烧室内的停留时间

变长,燃料与空气的掺混均匀度提高,促进了燃料的燃烧,释放出更多的能量,导致燃烧室出口温升的略微增加。随着喷嘴无量纲面积的进一步增大,主燃级气流速度的进一步降低减弱了对预燃级和值班级气流的控制能力,燃料与空气的掺混均匀度开始下降,燃料燃烧的充分程度也随之降低,这使得燃烧室出口温升略有减小。

图 6 是主燃级喷嘴不同无量纲面积下燃烧室出口 NO_x 和 CO 排放的变化规律。由图 6 可知,随着主燃级喷嘴无量纲面积的增大,燃烧室出口 NO_x 和 CO 的排放值整体上呈先减小后增大的变化规律。 CO 排放值在喷嘴无量纲面积为 6 时达到最高值 2.54×10^{-4} ,这是因为此时燃烧室中空气与燃料掺混最为均匀燃烧充分,于是 CO 排放值低。 NO_x 排放值均在 1.3×10^{-5} 以下,低于低排放燃烧室标准 (4.08×10^{-5})^[21]; CO 排放值较高在 $2.54 \times 10^{-4} \sim 4.45 \times 10^{-4}$ 之间变化。

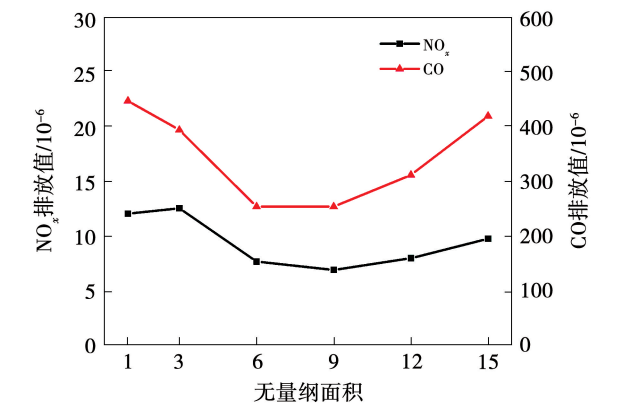


图 6 不同主燃级喷嘴无量纲面积下燃烧室的 NO_x 和 CO 排放值

Fig. 6 NO_x and CO emission values of combustion chamber for different dimensionless areas of main combustion stage nozzle

图 7 是不同主燃级喷嘴无量纲面积下的燃烧效率和旋流器出口截面燃料与空气掺混的均匀度。由图 7 可知,随着主燃级喷嘴无量纲面积的增大,燃烧效率先增大后减小。由图 7 可知,随着主燃级喷嘴无量纲面积增大,燃烧效率先增大后减小。燃烧效率在喷嘴无量纲面积为 6 时达到最高值 99.56%,造成这个现象的主要原因是燃烧室旋流器出口均匀度在此时达到了最高值 99.85%。

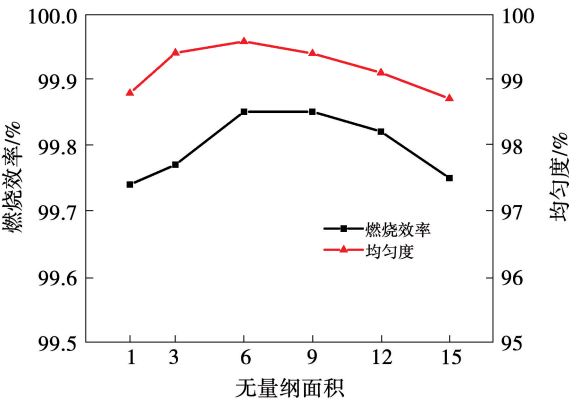


图 7 不同主燃级喷嘴无量纲面积下的燃烧效率和旋流器出口截面燃料与空气掺混的均匀度

Fig. 7 Combustion efficiency and uniformity of blended fuel and air on cyclone outlet cross section for different dimensionless areas of main combustion stage nozzle

这是因为,随着主燃级喷嘴无量纲面积的增加,燃烧室主燃级的气体流速降低,燃料在燃烧室内的停留时间变长,燃料与空气的掺混均匀度提高,促进了燃料的燃烧,释放出更多的能量,促进燃烧效率的升高。随着喷嘴无量纲面积的进一步增大,主燃级气流速度的进一步降低减弱了对预燃级和值班级气流的控制能力,燃料与空气的掺混均匀度开始下降,燃料燃烧的充分程度也随之降低,导致燃烧效率的降低。

2.2 预燃级喷嘴对燃烧室性能的影响

图 8 是不同预燃级喷嘴无量纲面积下燃烧室出口温升和 OTDF 的变化规律。从图中可以看出,随着预燃级喷嘴无量纲面积的增大,燃烧室温升由 1 208 K 降低至 1 054 K,OTDF 在 0.017 ~ 0.030 之间变化。喷嘴无量纲面积的增加对燃烧室内燃料与空气的掺混产生了显著的负面影响,这导致了燃料燃烧的充分程度下降,进而使燃烧室出口温升下降。

图 9 是不同预燃级喷嘴无量纲面积下燃烧室出口 NO_x 和 CO 排放值的变化规律。由图 9 可知,随着预燃级喷嘴无量纲面积的增大,燃烧室出口 NO_x 排放值变化较小且均在 1.0×10^{-5} 以下,远低于低排放燃烧室 4.08×10^{-5} 的标准^[21],随着预燃级喷嘴无量纲面积的增大,燃烧室出口 CO 排放值呈明显上升的趋势,由 2.54×10^{-4} 增加至 1.289×10^{-3} 。

由于喷嘴无量纲面积的增加对燃烧室内燃料与空气的掺混产生了显著的负面影响,导致了燃料燃烧的充分程度下降,使得 CO 排放值增加。

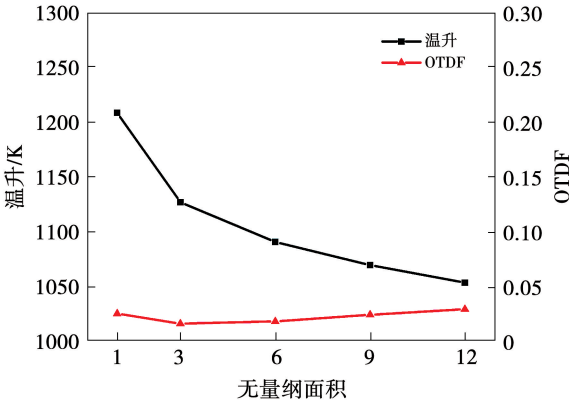


图 8 不同预燃级喷嘴无量纲面积下的燃烧室出口温升和 OTDF

Fig. 8 Temperature rise and OTDF at combustion chamber outlet for different dimensionless areas of pre-combustion stage nozzle

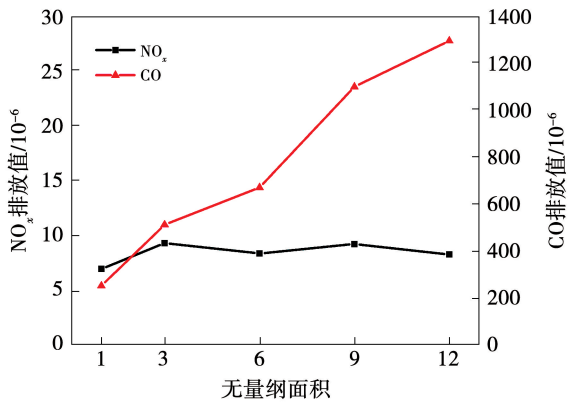


图 9 不同预燃级喷嘴无量纲面积下的燃烧室 NO_x 和 CO 排放值

Fig. 9 NO_x and CO emission values of combustion chamber for different dimensionless areas of pre-combustion stage nozzle

图 10 是不同预燃级喷嘴无量纲面积下燃烧效率和旋流器出口截面燃料与空气掺混的均匀度随喷嘴无量纲面积变化的规律。由图 10 可知,随着预燃级喷嘴无量纲面积的增加,燃烧效率由 99.85% 降低至 99.23%。这是因为喷嘴无量纲面积的增加使得燃烧室内的燃料与空气的掺混恶化,导致了燃烧效率的降低。

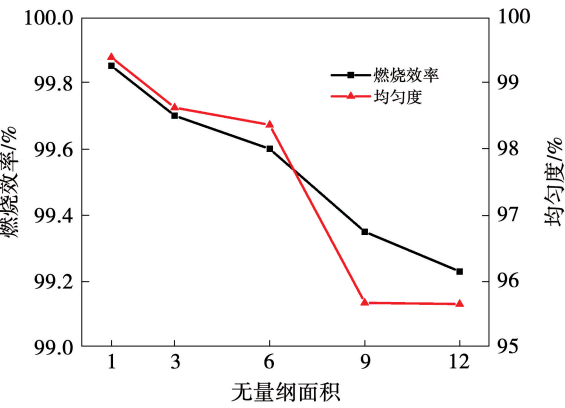


图 10 不同预燃级喷嘴无量纲面积下的燃烧效率和旋流器出口截面的均匀度

Fig. 10 Combustion efficiency and uniformity of cyclone outlet cross section for different dimensionless areas of pre-combustion stage nozzle

2.3 值班级喷嘴对燃烧室性能的影响

图 11 是不同值班级喷嘴无量纲面积下温升和 OTDF 的变化规律。由图 11 可知,随着值班级喷嘴无量纲面积的增大,燃烧室出口温升和 OTDF 变化很小,温升变化在 1 206 ~ 1 214 K 之间,OTDF 值在 0.025 左右。与主燃级和预燃级相比,值班级喷嘴的直径相对较小,其喷嘴面积的调整对燃烧室内燃料与空气的掺混影响有限,不足以显著改善燃烧室内燃料与空气的掺混的均匀性,使温升变化幅度很小。

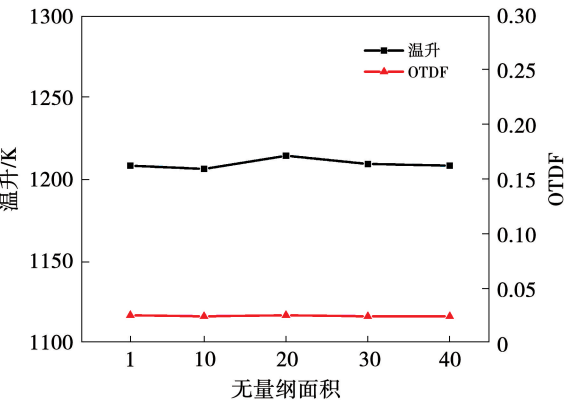


图 11 不同值班级喷嘴无量纲面积下的燃烧室出口温升和 OTDF

Fig. 11 Temperature rise and OTDF at combustion chamber outlet for different dimensionless areas of pilot stage nozzle

图 12 是不同值班级喷嘴无量纲面积下燃烧室出口 NO_x 和 CO 排放值的变化规律。

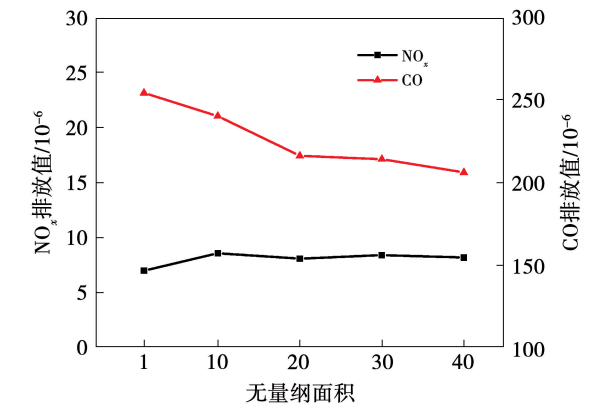


图 12 不同值班级喷嘴无量纲面积下的燃烧室 NO_x 和 CO 排放值

Fig. 12 NO_x and CO emission values of combustion chamber for different dimensionless areas of pilot stage nozzle

由图 12 可知,随着值班级喷嘴无量纲面积的增大,燃烧室出口 NO_x 排值放变化很小且均在 9×10^{-6} 以下,燃烧室出口 CO 排放值呈明显下降趋势。值班级喷嘴面积的增加导致燃料喷出速度显著降低,延长了燃料在燃烧室内的停留时间,有利于燃料的完全燃烧,CO 排放值明显减少。

图 13 是不同值班级喷嘴无量纲面积下燃烧室燃烧效率和旋流器出口截面燃料与空气掺混均匀度随喷嘴面积的变化规律。

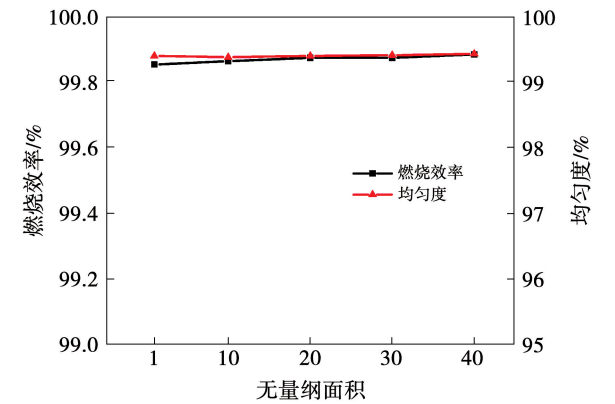


图 13 不同值班级喷嘴无量纲面积下的燃烧效率和旋流器出口截面的均匀度

Fig. 13 Combustion efficiency and uniformity of cyclone outlet cross section for different dimensionless areas of pilot stage nozzle

由图 13 可知,随着值班级喷嘴无量纲面积的增加,燃烧效率基本不变。值班级喷嘴的直径相对于主燃级和预燃级来说相对较小,其喷嘴面积的调整对燃烧室内燃料与空气掺混的影响有限,不足以显著改善燃烧室内燃料混合的均匀性,导致燃烧效率的变化幅度很小。

与主燃级和预燃级相比,值班级喷嘴的直径相对较小,其喷嘴面积的调整对燃烧室内燃料与空气混合的影响有限,不足以显著改善燃烧室内燃料混合的均匀性,这导致图 11 中温升和 OTDF 以及图 13 中燃烧效率的变化幅度很小。此外,值班级喷嘴面积的增加导致燃料喷出速度显著降低,延长了燃料在燃烧室内的停留时间,有利于燃料的完全燃烧,这使得图 12 中 CO 排放值明显减少。

3 结 论

以单头部中心分级燃烧室为研究对象,旨在分析不同喷嘴无量纲面积对燃烧室性能的影响,重点关注无量纲面积改变对温升、OTDF、排放特性和燃烧效率的影响,得到主要结论如下:

(1) 随着主燃级喷嘴无量纲面积的增大,燃烧室出口温升在 1 199 ~ 1 212 K 之间变化,OTDF 基本不变;燃烧室出口 NO_x 和 CO 的排放值整体上呈先见减小后增大的变化规律, NO_x 排放值均在 1.3×10^{-5} 以下,CO 排放值在 $2.54 \times 10^{-4} \sim 4.45 \times 10^{-4}$ 之间变化,CO 排放值较高;燃烧效率先增大后减小。

(2) 随着预燃级喷嘴无量纲面积的增大,燃烧室温升由 1 208 K 降低至 1 054 K,OTDF 在 0.017 ~ 0.030 之间变化;燃烧室出口 NO_x 排放值变化较小且均在 10×10^{-6} 以下,燃烧室出口 CO 排放值呈明显上升的趋势,由 2.54×10^{-4} 增加至 1.289×10^{-3} ;燃烧效率由 99.85% 降低至 99.23%。

(3) 随着值班级喷嘴无量纲面积的增大,温升变化在 1 206 ~ 1 214 K 之间,OTDF 值在 0.025 左右;燃烧室出口 NO_x 排放值变化很小且均在 9×10^{-6} 以下,燃烧室出口 CO 排放值呈明显下降趋势;燃烧效率基本不变。

参考文献:

- [1] 宋权斌,赵仙娟,宋彦庆,等. 微型燃气轮机改烧氨气/氢气混合燃料的数值模拟研究[J]. 热能动力工程,2023,38(5): 146 - 153.
SONG Quanbin,ZHAO Xianjuan,SONG Yanqing,et al. Numerical simulation of micro-combustion engine to burn ammonia/hydrogen mixed fuel[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2023,38(5):146 - 153.
- [2] 刘国库,刘 潇. 天然气燃气轮机燃烧室点火特性研究[J]. 应用科技,2023,50(4):96 - 102.
LIU Guoku,LIU Xiao. Research on ignition characteristics of natural gas turbine combustor[J]. Applied Science and Technology, 2023,50(4):96 - 102.
- [3] 杨 旸,陈明敏,刘 潇,等. 天然气低排放旋流燃烧室头部结构性能研究[J]. 燃气轮机技术,2020,33(1):25 - 31.
YANG Yang,CHEN Mingmin,LIU Xiao,et al. Research on design and performance of swirl combustor for low emission natural gas turbine[J]. Gas Turbine Technology,2020,33(1):25 - 31.
- [4] 周驯黄,陈荣钱,李怡庆,等. 椭圆形超燃燃烧室内燃料喷射和掺混性能研究[J]. 推进技术,2017,38(3):637 - 645.
ZHOU Xunhuang,CHEN Rongqian,LI Yiqing,et al. Injection and mixing performance in an elliptical scramjet combustor[J]. Journal of Propulsion Technology,2017,38(3):637 - 645.
- [5] 李 涛,杜晓东,黄汉林. 某燃气轮机焦炉气喷嘴的数值模拟研究[J]. 燃气轮机技术,2021,34(1):21 - 26.
LI Tao,DU Xiaodong,HUANG Hanlin. Numerical simulation of coke oven gas nozzle for a gas turbine[J]. Gas Turbine Technology,2021,34(1):21 - 26.
- [6] 陈炫任,刘爱璇,杨宇东,等. 微型燃气轮机燃烧室燃料空气预混特性对燃烧特性的影响[J]. 沈阳航空航天大学学报,2020,37(1):8 - 16.
CHEN Xuanren,LIU Aiguo,YANG Yudong,et al. Effect of fuel-air premixed characteristics on combustion characteristics of micro-gas turbine combustor[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2020,37(1):8 - 16.
- [7] 孙付军,郭璐华,李 辉,等. 多点喷射贫预混喷嘴燃料/空气混合特性研究[J]. 推进技术,2023,44(2):217 - 227.
SUN Fujun,GUO Luhua,LI Hui,et al. Fuel/air premixing characteristics of lean premixed injectors with multi-points injection[J]. Journal of Propulsion Technology,2023,44(2):217 - 227.
- [8] 李 涛,张哲巖,雷福林. 燃气轮机改烧焦炉煤气的适应性研究[J]. 燃气轮机技术,2022,35(1):42 - 47.
LI Tao,ZHANG Zhedian,LEI Fulin. Study on adaptability of gas turbine to coke oven gas[J]. Gas Turbine Technology, 2022,

35(1):42-47.

[9] 徐海成,徐文燕,杨强,等. 双燃料喷嘴气体燃料路数值模拟与结构优化[J]. 燃气轮机技术,2020,33(3):43-50.

XU Haicheng,XU Wenyan,YANG Qiang,et al. Numerical simulation and structural optimization of gas fuel path for dual fuel nozzles[J]. Gas Turbine Technology,2020,33(3):43-50.

[10] 何敏,吉洪湖,钟华贵,等. 不同气体喷嘴的燃气轮机燃烧室性能对比[J]. 航空动力学报,2018,33(6):1290-1297.

HE Min,JI Honghu,ZHONG Huagui,et al. Comparison of combustion performance for different nozzles in gas turbine combustor[J]. Journal of Aerospace Power,2018,33(6):1290-1297.

[11] 邱朋华,卢成,张林瑶,等. 氢燃料微混燃烧技术研究进展[J]. 热能动力工程,2023,38(5):14-23.

QIU Penghua,LU Cheng,ZHANG Linyao,et al. Research progress of hydrogen micromix combustion technology[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2023,38(5):14-23.

[12] 范洪武. 低热值燃料燃气轮机燃烧特性及技术优化[J]. 现代经济信息,2019(10):370-371.

FAN Hongwu. Combustion characteristics and technology optimization of gas turbine with low calorific value fuel[J]. Modern Economic Information,2019(10):370-371.

[13] JUNG J,KIM M,HWANG J,et al. Combustion instability characteristics via fuel nozzle modification in a hydrogen and natural gas cofiring gas turbine combustor[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2024,79:962-973.

[14] LIAW K L,KURNIA J C,LAI W K,et al. Optimization of a novel impulse gas turbine nozzle and blades design utilizing Taguchi method for micro-scale power generation[J]. Energy,2023,282:129018.

[15] SZYMON F,MACIEJ C,MARIAN G. Variable geometry in miniature gas turbine for improved performance and reduced environmental impact[J]. Energies,2020,13(19):5230.

[16] BAKLANOV A V,VAKHITOV A R. Influence of nozzle design on the basic combustion-chamber characteristics in a gas-turbine engine[J]. Russian Engineering Research,2019,39:472-476.

[17] DO H K,KIM T,HAN Y,et al. Investigation on flow distribution of the fuel supply nozzle in the annular combustor of a micro gas turbine[J]. Energy,2017,126:361-373.

[18] 郑玮琳,张世杰,庞历瑶,等. 温度和压力对低热值燃料层流燃烧特性的影响[J]. 航空动力学报,2021,36(8):1578-1585.

ZHENG Weilin,ZHANG Shijie,PANG Liyao,et al. Effects of temperature and pressure on laminar flame characteristics of low heat value fuel[J]. Journal of Aerospace Power,2021,36(8):1578-1585.

[19] 秦风华. 钢铁厂高炉煤气燃烧数值研究[J]. 节能,2018,37(4):47-51.

QIN Fenghua. Numerical study on BFG combustion in steel plant[J]. Energy Conservation,2018,37(4):47-51.

(姜雪梅 编辑)