

# 氢燃料微混燃烧器燃烧特性研究

史润<sup>1</sup>,胡宏斌<sup>2,3</sup>,杜娟<sup>2,3</sup>,关睿<sup>4</sup>

(1. 江苏大学流体机械工程技术研究中心,江苏 镇江 212013;

2. 中国科学院工程热物理研究所先进燃气轮机实验室,北京 100190; 3. 中国科学院大学,北京 100049;

4. 国家管网集团联合管道有限责任公司西部分公司,新疆 乌鲁木齐 830000)

**摘要:**针对带中心钝体的四喷嘴微混燃烧器,运用 ANSYS FLUENT 软件,采用热态小火焰生成流形的方法对燃烧器模型进行数值模拟,并与实验研究相结合,研究了甲烷/氢气混合燃料(体积组分 40% CH<sub>4</sub>-60% H<sub>2</sub>)微混燃烧条件下的燃/空掺混,流场、温度场、火焰形态及污染物排放等基础燃烧特性。研究结果表明:微混燃烧器采用空气和燃料径向进气的结构有利于燃/空掺混,在燃烧器出口的掺混均匀性指数达到 0.959;燃烧器钝体结构处存在较明显的小型中心回流区,有助于火焰稳定;当量比在 0.4~0.8 范围内,火焰根部稳定附着在微混喷嘴的出口,火焰彼此相互独立,实验中燃烧器火焰形态与仿真 OH<sup>\*</sup>场分布基本一致;绝热火焰温度在 1 500~2 050 K 范围内,模型燃烧室出口 NO<sub>x</sub> 排放浓度均低于  $16 \times 10^{-6}$ ,CO 排放浓度均低于  $11 \times 10^{-6}$ ,表明该微混燃烧器的污染物排放水平较低且燃烧效率极高。

**关键词:**燃气轮机;氢燃料;低污染燃烧;微混燃烧器;中心钝体结构

中图分类号:TK16

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2024.01.014

[引用本文格式]史润,胡宏斌,杜娟,等.氢燃料微混燃烧器燃烧特性研究[J].热能动力工程,2024,39(1):127-136. SHI Run, HU Hong-bin, DU Juan, et al. Study on combustion characterization of hydrogen fuel micro mixing burner[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(1): 127-136.

## Study on Combustion Characterization of Hydrogen Fuel Micro Mixing Burner

SHI Run<sup>1</sup>, HU Hong-bin<sup>2,3</sup>, DU Juan<sup>2,3</sup>, GUAN Rui<sup>4</sup>

(1. Research Center of Fluid Mechanical Engineering Technology, Jiangsu University, Zhenjiang, China, Post Code: 212013;

2. Key Laboratory of Light-duty Gas Turbine, Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100190; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100049;

4. Western Branch of National Pipe Network Group United Pipeline Co., Ltd., Urumqi, China, Post Code: 830000)

**Abstract:** Taking the four-nozzle micro mixing burner with a center blunt body as the object, the combustor model was numerically simulated by using ANSYS FLUENT software and the flamelet-generated maniflod method under thermal state, which was combined with experimental studies to investigate the fundamental combustion characteristics of micro mixing burner of methane-hydrogen mixed fuels with volume fraction of 40% CH<sub>4</sub> and 60% H<sub>2</sub>, such as fuel-air mixing, flow field, temperature field, flame morphology and pollutant emission. The results show that the structure of the micro mixing burner with radial air and fuel intake facilitates fuel-air mixing, and the doping uniformity index at the burner outlet reaches 0.959; there exists a small and obvious central reflux zone at the burner blunt body structure, which contributes to the flame stabilization; in the range of equivalence ratio from 0.4 to 0.8, the flame

收稿日期:2023-09-22; 修订日期:2023-10-12

基金项目:中国科学院战略先导科技专项(XDA29050500)

Fund-supported Project: Chinese Academy of Sciences Strategic Pilot Program for Science and Technology(XDA29050500)

作者简介:史润(1999-),男,江苏大学硕士研究生。

通讯作者:胡宏斌(1982-),男,中国科学院工程热物理研究所高级工程师。

roots stably adhere to the outlet of micro mixing nozzle, which are independent of each other, and the burner flame morphology photos in the experiment are basically consistent with the simulated OH<sup>\*</sup> field distribution; in the range of adiabatic flame temperature from 1 500 to 2 050 K, the NO<sub>x</sub> emissions at the model combustion chamber outlet are all lower than  $16 \times 10^{-6}$ , and the CO emissions are all lower than  $11 \times 10^{-6}$ , which indicates that the micro mixing burner has a low pollutant emission level and a very high combustion efficiency.

**Key words:** gas turbine, hydrogen fuel, low-pollution combustion, micro mixing burner, center blunt body structure

## 引言

我国正处于能源转型的重要时期<sup>[1]</sup>,迫切需要发展以新能源为主体的新型电力系统。燃用天然气、氢气等清洁燃料的燃气轮机具有快速启停、灵活调峰的优点,能够很好地匹配新能源的波动性,是能源转型期的重要稳定器。但是,氢气的物理性质和燃烧特性与天然气存在较大的差异,现有燃气轮机的燃烧系统无法直接应用于氢燃料,例如贫预混燃烧室在使用氢气燃烧时存在极大的回火和自燃风险<sup>[1-4]</sup>,而扩散燃烧又会带来过高的NO<sub>x</sub>排放,不满足环保要求。因此,迫切需要发展适用于氢燃料的低污染燃烧组织方法,为研发氢能燃气轮机燃烧系统提供理论和技术支撑<sup>[5]</sup>。

近十几年,在多个国家开展的氢燃气轮机燃烧组织方法研究中,“微混燃烧”因弥补了扩散燃烧和贫预混燃烧的劣势而进入主流视野。微混燃烧是通过数量众多、结构简化的微混喷嘴代替传统大喷嘴的燃烧技术,该技术减小了流动与混合尺度,强化了燃/空掺混均匀性;燃烧火焰长度短,烟气在高温区停留时间减小,可实现个位数超低NO<sub>x</sub>排放;未燃混合物在喷管出口高速射流,具有很强的抗回火能力。微混燃烧适用于氢气等高反应活性燃料,具备实现100%纯氢燃烧的潜力,也是最有前景的一种氢燃料燃烧技术<sup>[6-9]</sup>。国内外众多厂商与学校因而发展了多种微混燃烧技术<sup>[10-11]</sup>。三菱重工的“多簇燃烧器”通过多级燃料控制<sup>[12]</sup>,实现了灵活燃料调节,从而拓宽了燃烧室的稳定范围<sup>[13]</sup>。GE公司的多管混合燃烧器<sup>[14]</sup>,用交叉射流方式在短时间混合,运用高速气流防止回火,表现出低污染燃烧的优

秀稳定性<sup>[15]</sup>。德国亚琛大学在近30年内持续发展一种微混扩散燃烧技术,缩小喷嘴尺寸且阵列布置喷嘴<sup>[16]</sup>,使得燃料/空气快速混合以实现燃烧器富氢燃料下的稳定低污染燃烧<sup>[17]</sup>。邵卫卫等人<sup>[18]</sup>设计一种“6+1”结构的微混阵列单元,对其火焰与排放特性进行了初步探索,在含氢量不超过60%的条件下,实现了个位数的NO<sub>x</sub>排放。

近年来,国外的燃气轮机厂商加速推进氢燃料燃气轮机的研发,预计在2030年推出100%纯氢重型燃气轮机产品。而国内研究更多处在对微混燃烧技术的基础研究阶段,主要研究微混喷嘴及燃烧器中的流动、掺混及燃烧组织等问题。中心钝体作为一种稳焰装置在燃烧室中较为常用<sup>[19]</sup>,但带有中心钝体的微混燃烧器目前尚未看到有公开报道。本文针对一种带有中心钝体结构的微混喷嘴及其四喷嘴燃烧器<sup>[20]</sup>开展了数值仿真和实验研究,获得了燃/空掺混、流场、温度场、火焰形态、污染物排放等基础燃烧特性,为后续开展微混燃烧技术攻关提供参考。

## 1 实验方法

### 1.1 实验系统

图1为四喷嘴微混燃烧器实验件的实验系统,由实验供给系统和测量系统组成。供给系统由甲烷燃料和氢燃料气瓶、减压阀、质量流量控制器、混气罐、空气压缩机、流量控制器、实验件组成。

实验供给系统分为燃料路和空气路。在燃料路中,气瓶中的氢/甲烷燃料经过减压阀后,在混气罐混合,并对燃烧器进行供给,每种燃料的流量可以单独控制。在空气路中,除湿后的干空气随管路进入集气腔,而后进入燃烧器与燃料进行混合。

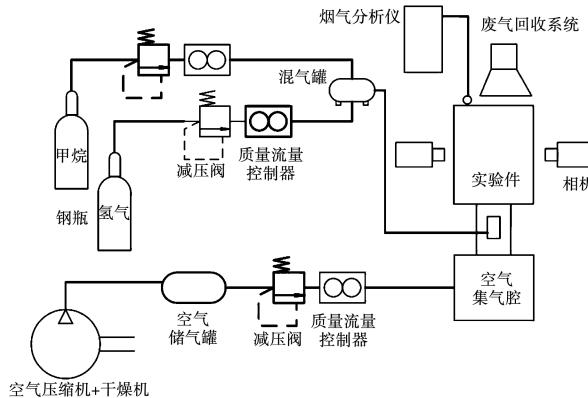


图1 实验系统图

Fig. 1 Experimental system diagram

部分仪器的主要参数如下:质量流量控制器中氢、甲烷、空气准确度都为满量程 $\pm 2\%$ 。满量程分别为氢100 L/min, 甲烷50 L/min, 空气1 000 L/min, 表示为标况下的气体体积流量。

空气压缩机为BLT-40A型号螺杆空压机, 功率30 kW, 额定排气压力0.7 MPa, 排气量为5.5 m<sup>3</sup>/min。

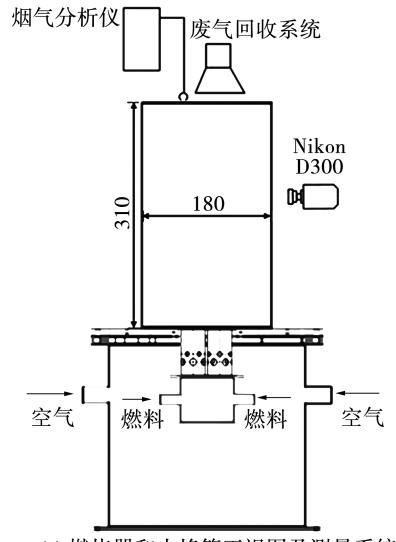
四喷嘴微混燃烧器实验件的测量系统, 包含用于采集设定流速下指定燃料类型及多个当量比下NO<sub>x</sub>和CO多组排放数据的烟气分析仪, 以及用于拍摄火焰图像的摄像机。实验设有1个直径为180 mm, 高度为310 mm的石英玻璃罩。

测量装置的主要参数如下:烟气分析仪为Testo350型号专业型烟气分析仪,O<sub>2</sub>准确度为满量程 $\pm 0.8\%$ , CO准确度的测量值 $\pm 5\%$ , NO准确度的测量值 $\pm 5\%$ , NO<sub>2</sub>准确度的测量值 $\pm 5\%$ , CO<sub>2</sub>(通过O<sub>2</sub>计算)的体积百分比为 $\pm 0.2\%$ ;图像采集摄像机为Nikon D300型号相机, 拍摄曝光时间为1 s, ISO为400。

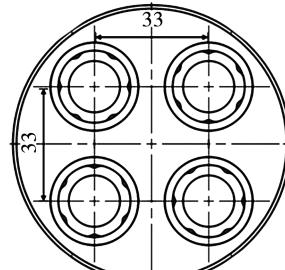
## 1.2 实验对象

为研究多个微混喷嘴组合后的稳焰机制和污染物排放特性, 设计如图2所示的四喷嘴燃烧器实验件。实验件采用径向供给燃料和空气的形式, 燃料和空气在喷嘴内部进行微混合, 使均匀性提高, 使燃烧器更易进行低排放燃烧。四喷嘴微混燃烧器的外径为20.8 mm, 燃烧器的微混尺度处于20 mm范围, 略高于传统意义上微混燃烧器尺度, 但远小于其他扩散燃烧器尺度。此设置可以给予喷嘴更高自由

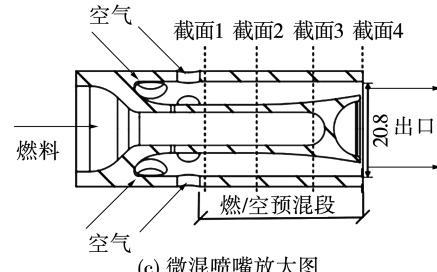
度, 用于调整燃烧器形状及多个微混燃烧器间的布置方式, 以完成更高效稳定的燃烧。同时, 也可以减少装配在燃气轮机上的燃烧器数量, 进而降低机械装配难度。



(a) 燃烧器和火焰筒正视图及测量系统



(b) 四喷嘴燃烧器俯视图



(c) 微混喷嘴放大图

图2 实验件结构及测量系统示意图(mm)

Fig. 2 Schematic diagram of experimental component structure and measurement system (mm)

为研究微混燃烧器中心钝体对火焰稳定性和传播特性的影响, 根据文献[10~19]设计微混喷嘴, 结构如图2(c)所示。由图2(c)可知, 单元微混喷嘴有6个燃料喷射孔, 空气孔分为两排并交错布置, 上下排均有6个小孔。采用燃料/空气交叉射流的结构, 空气孔、燃料孔进口方向为径向。

### 1.3 实验工况

四喷嘴微混燃烧器实验件的实验工况如表 1 所示。此工况的火焰形态较稳定且便于观察流场, 是真实燃机环境中常见的工况。燃烧实验在常温常压下进行, 燃料类型为 40% CH<sub>4</sub> - 60% H<sub>2</sub> 的混合燃料, 燃料热值为 19 728 kJ/m<sup>3</sup>。燃烧器出口空气流速  $V_0 = 20 \text{ m/s}$ , 雷诺数  $Re > 30 000$ , 满足模化准则流速, 同时保证了足够的湍流强度。实验工况对应的绝热燃烧温度均在真实燃烧室出口温度范围内。通过固定空气流量和燃料流量, 设定实验中的当量比为 0.6, 在此工况下火焰稳定且便于分析, 有助于开展燃料燃烧特性实验。数值仿真的工况也与实验保持一致。

表 1 实验件实验和数值仿真工况

Tab. 1 Experimental and numerical simulation conditions of experimental component

工况	数值范围
空气温度/K	298
空气压力/Pa	$1.01 \times 10^5$
空气流量/L·min <sup>-1</sup>	805.3
燃烧器出口流速 $V_0 / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	20
燃烧器出口雷诺数	30 050
燃料体积百分数	40% CH <sub>4</sub> - 60% H <sub>2</sub>
当量比	0.6
热功率/kW	30.3

## 2 数值仿真方法

### 2.1 仿真模型及边界条件

考虑到不可压缩理想气体的假设基础, 求解雷诺平均纳维 - 斯托克斯方程, 使用雷诺平均法的数值模拟方法, 运用 ANSYS FLUENT 软件对燃烧室流场进行了数值仿真计算。因燃烧器产生回流区, 故在近壁区域增强壁处理并采用 Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型, 能够获取燃烧器模型的主要流动特性。

燃/空掺混的热态模拟, 化学反应采用部分预混燃烧 PDF 模型, 使用广泛应用于甲烷燃烧和微混合燃烧<sup>[21]</sup>的小火焰生成流形方法对湍流火焰进行建模, 采用 GRI-Mech3.0 机理<sup>[21]</sup>的燃烧模型进行计算。将计算方法进行耦合以提高计算收敛性, 并利用二阶迎风方法解决对流项离散化问题。当组分、

能量和进展变量的方差均方根残差分别小于  $10^{-6}$ ,  $10^{-5}$  和  $10^{-4}$  时, 视为该求解收敛。

设置计算的边界条件, 空气及燃料进口采用质量流量边界条件, 采用预估总压损失给出压力出口边界条件的方式设置燃烧室出口, 其他工况按照表 1 的基准工况进行设置。

计算过程中给出的所有条件均与实验对应一致, 帮助实验与仿真模拟结果进行有效对比。

### 2.2 网格划分

为捕获燃烧器精细的燃烧流动特性, 采用 Unigraphics NX 软件对微混燃烧器建立几何模型。在 SpaceClaim 软件中对模型绘制流体域, 定义空气进口和燃料进口区域。空气进口、燃料进口和燃烧器出口当量直径分别为 100, 20 和 120 mm。将处理好的结构运用 ANSYS FLUENT Meshing 软件进行网格绘制与加密, 为保证计算结果的精准, 本研究采用多面体网格<sup>[22]</sup>。采用局部网格加密方法, 对燃烧器模型进行加密。参照微混喷嘴速度场及 OH<sup>\*</sup> 场的模拟结果<sup>[23]</sup>, 对四喷嘴燃烧器模型内区域、燃烧器出口的剪切层区域和反应区域等(即速度变化较大的区域及其火焰边界区域)进行了不同尺度的局部网格处理, 通过合理配置节省计算资源。考虑到细化区和非细化区网格的连续性, 网格的增长率保持在 1.1, 不同区域之间过渡区的网格层数至少为 5 层。四喷嘴燃烧器几何模型的网格划分如图 3 所示, 图中数字对应不同加密区域的网格尺寸。

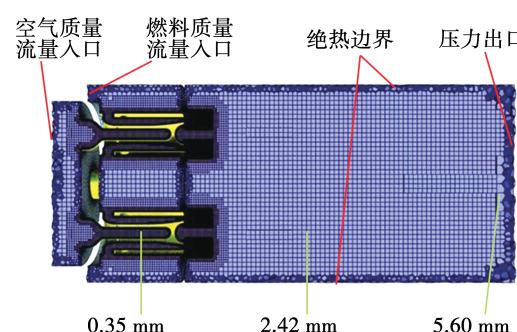


图 3 燃烧器网格方案

Fig. 3 Burner grid scheme

### 2.3 网格无关性验证

为兼顾整体计算精度和减少计算资源, 在

ANSYS FLUENT Meshing 软件中改变燃烧器网格的局部加密尺寸,得到多套不同数量的网格。为探究网格数量对计算结果的影响,选取其中的 3 套网格进行无关性验证,网格数量分别为 250 万、352 万和 431 万。图 4 和图 5 分别为 3 套网格沿中心线上轴向速度分布和温度分布。由图 4 可知,3 套网格的轴向速度分布规律趋势一致,轴向速度  $V_y$  在燃烧器内部随轴向位移  $Y$  的提高而先升高后降低,并持续降低直到燃烧器出口。但对比可发现,3 套网格在速度的精度上有所差别。由图 5 可知,3 套网格的温度分布规律趋势一致,轴向温度  $T_y$  在燃烧器内部轻微下降,在离开燃烧器出口后温度升高并稳定在一定值。分析发现,352 万数量的网格在轴向速度及温度分布与其他几套网格趋势相同的情况下网格数更低,故选取 352 万的网格进行四喷嘴燃烧器仿真计算。

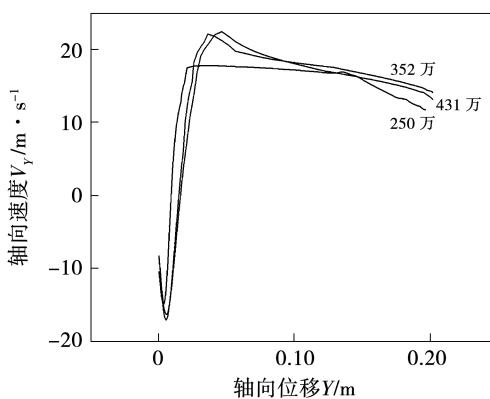


图 4 中心线轴向速度分布

Fig. 4 Axial velocity distribution on centerline

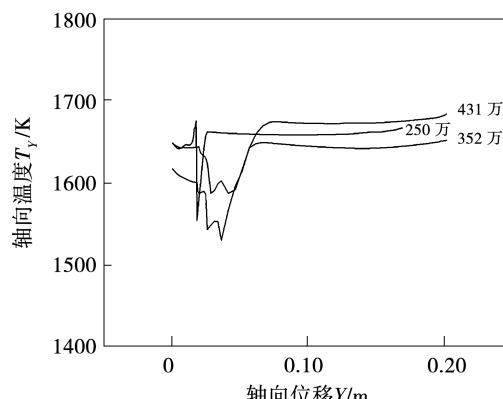


图 5 中心线温度分布

Fig. 5 Temperature distribution on centerline

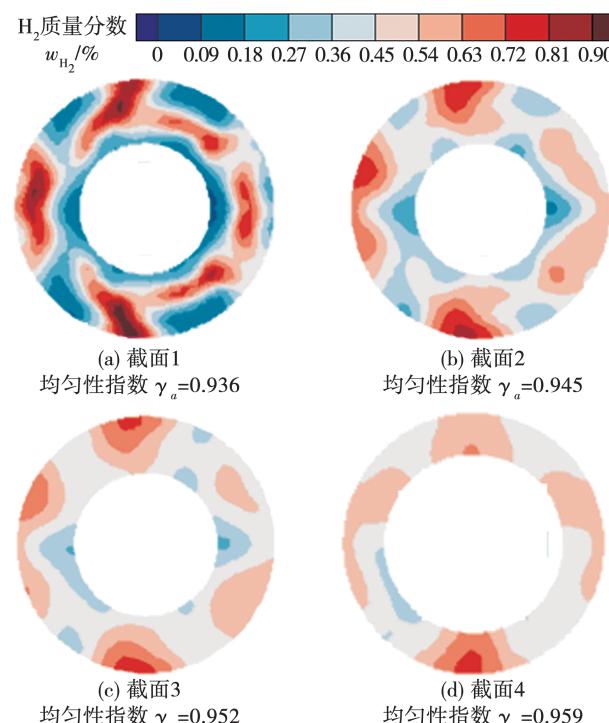
### 3 结果与分析

#### 3.1 燃/空掺混均匀性

燃烧器具有良好掺混水平会使燃烧排放更低,燃烧效率更高,也会影响火焰的传播稳定性。采用均匀性指数  $\gamma_a$  描述燃烧器通道内部的掺混情况,  $\gamma_a$  区间为  $[0,1]$ ,  $\gamma_a$  越接近 1, 表示燃料与空气的掺混均匀性越好。通常在低排放燃烧室设计中要求预混喷嘴出口处的  $\gamma_a > 0.950$ 。均匀性指数用面积通量和加权平均表示。

四喷嘴燃烧器由 4 个相同结构微混喷嘴阵列组合形成,先研究微混喷嘴的掺混均匀性,而后整体分析四喷嘴燃烧器均匀性情况。选取同实验一致的 40%  $\text{CH}_4$  - 60%  $\text{H}_2$  混合燃料,按表 1 所示基准工况进行模拟。进行计算前的理论与实际燃烧器出口面平均流速对比,得到两者近似相等的结果,保证了数值模拟中边界条件的准确性。

图 6 为单元微混喷嘴预混段中燃料/空气掺混过程截面  $\text{H}_2$  燃料质量分数  $w_{\text{H}_2}$  的分布云图。

图 6 微混喷嘴预混段掺混过程截面  $\text{H}_2$ 

质量分数分布云图

Fig. 6  $\text{H}_2$  mass fraction distribution contours on cross-sections of the mixing process in the premixed section

可以看到,燃料开始从燃料孔中喷出,随气体向

喷嘴下游及出口处移动过程中,混合气体的浓度梯度变小,气体均匀存在于微混通道中,燃料与空气在预混段中完成混合,掺混均匀性有所提高。出口截面处燃料浓度分布梯度较为合理,无明显浓度差异,也表明了在 40% CH<sub>4</sub> - 60% H<sub>2</sub> 混合类型燃料下的喷嘴掺混效果良好,喷嘴出口处掺混均匀性系数  $\gamma_a$  可达 0.959,比传统微混喷嘴掺混更均匀。空气和燃料径向进入燃烧器,结构内流动截面的逐渐收窄可以增加流速,强化湍流。微混喷嘴总压损失较少,而喷嘴内也呈现良好流动状态,能更好促进内部燃/空掺混。

### 3.2 微混燃烧特性

选择四喷嘴微混燃烧器作为主体,选定表 1 的基准工况进行数值模拟。在该工况下进行燃烧器热态流场仿真,探究燃烧器流场主要特征及火焰传播特性。

图 7 为热态模拟的轴向速度场分布云图。由图 7 的燃烧器内部中心截面图可以看到,各燃烧器出口钝体结构处存在较明显的小型中心回流区(负速度区),可用于帮助稳定火焰。火焰向下游传播过程中,在靠近燃烧室壁面的 4 个燃烧器火焰间有外回流区产生,有利于高温烟气再循环流动,帮助燃烧室内火焰稳定传播。各燃烧器流场及回流区分布情况基本一致,都形成了各自的速度区,高速区在燃烧器中、下游较为集中,维持了较长区域。各燃烧器速度场削减程度相似,均是沿速度场轴向方向、从上游至下游过程逐渐减速。

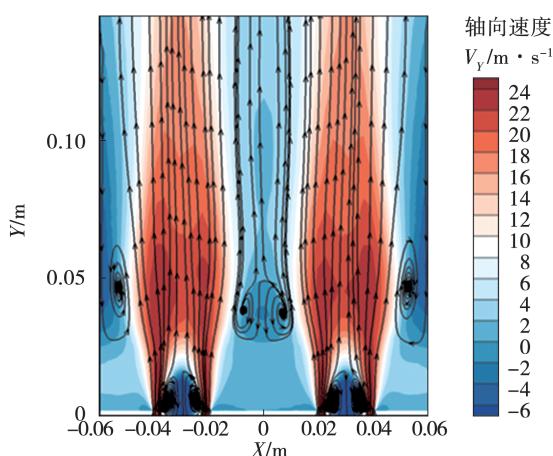


图 7 热态模拟轴向速度场分布云图 ( $V_0 = 20 \text{ m/s}$ )

Fig. 7 Simulation of axial velocity reaction distribution contour under thermal state ( $V_0 = 20 \text{ m/s}$ )

从图 7 中的流线分布可以看出,燃烧器流场在下游较为均匀,高速区流场没有出现扩张,呈类似射流流场的分布。随着流场从上游至下游发展,燃烧器射流宽度变大,速度有所衰减。

图 8 为燃烧器径向速度场分布云图。可以看到,除燃烧器出口上游处存在轻微径向速度  $V_x$  外,其余空间均保持速度均匀,这与轴向速度场的分布相似。结合轴向速度场与径向速度场发现,流场沿燃烧器出口中心线基本对称,表明燃烧器射流几乎无摆动。各单元微混喷嘴的径向速度较弱,只在各单元喷嘴间存在微弱变化的剪切层,在下游逐渐消失。剪切层主要存在于燃料孔出口处、燃烧器出口处和中心钝体附近,在各单元喷嘴间存在变化微弱的剪切层。流场的分布证明钝体结构可帮助稳定火焰。

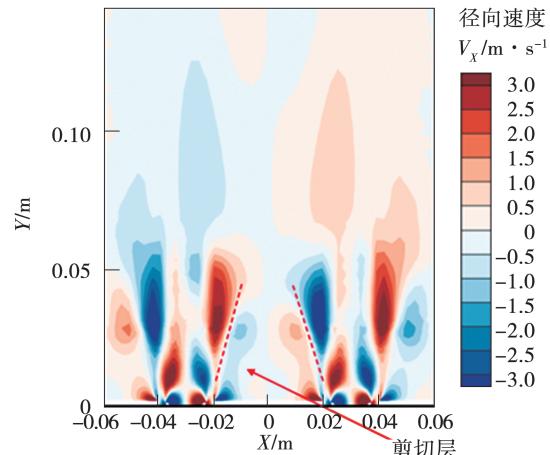


图 8 热态模拟径向速度场分布云图 ( $V_0 = 20 \text{ m/s}$ )

Fig. 8 Simulation of radial velocity reaction distribution contour under thermal state ( $V_0 = 20 \text{ m/s}$ )

选取同表 1 的基准工况进行数值模拟。图 9 左侧为燃烧器模拟热态 OH\* 场分布图,右侧为使用相机拍摄的燃烧器出口火焰形态。OH\* 场分布图弥补了数值模拟中绝热壁面的缺点,可以清晰观察到火焰位置,协助分析火焰的传播。由 OH\* 摩尔分数  $X_{\text{OH}^*}$  分布可看到,在燃烧器出口形成了相互独立的较宽、较短柱状火焰。各单元喷嘴出口区域内存在间隙,在火焰传播至下游的过程中,火焰逐渐融合。结合图 9 左右侧的仿真 OH\* 场与火焰形态照片两者对比可以看出,模拟仿真火焰形态及速度场分布与开放空间实验拍摄的火焰基本契合。从

火焰最宽处来看,40%  $\text{CH}_4$  – 60%  $\text{H}_2$  的混合燃料燃烧火焰较宽,长度较短。燃烧器受钝体影响产生中心回流区,无明显的火焰抬升,有助于燃烧稳定。

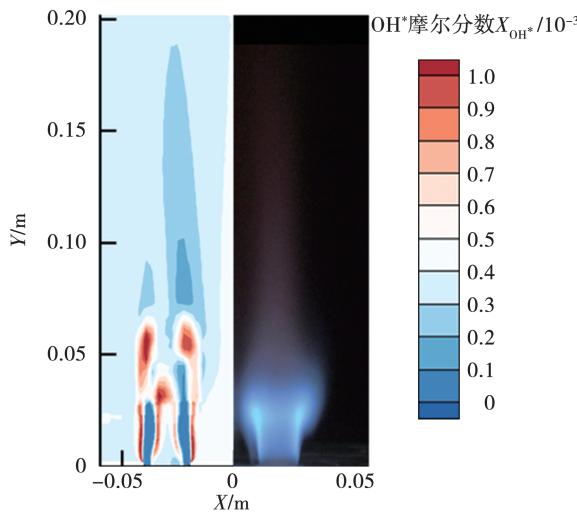


图9 仿真  $\text{OH}^*$  场与火焰形态照片对比

Fig. 9 Comparison of simulated  $\text{OH}^*$  contour and flame morphology photo

图10为四喷嘴燃烧器在实验工况下模拟的温度分布云图。从整体看,燃烧室内的温度  $T$  较为均匀,火焰均匀分布在由钝体产生的各单元喷嘴中心回流区处。火焰筒内部中心处的温度最高可达1 982 K。

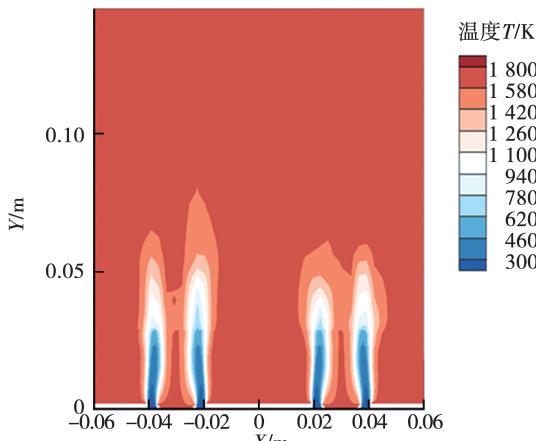


图10 在40%  $\text{CH}_4$  – 60%  $\text{H}_2$  燃料类型下的温度分布云图

Fig. 10 Temperature distribution contour at 40%  $\text{CH}_4$  – 60%  $\text{H}_2$

在实验工况下燃烧器的燃烧效率<sup>[24]</sup>为

99.71%。由模拟情况可知,火焰筒内基本达到完全燃烧,燃烧效率较高,燃料剩余较少。燃烧器出口的局部温差小,温度分布均匀。

图11为在表1实验工况下微混燃烧器的轴向截面的  $\text{H}_2$  的质量分数分布云图。可以看到,  $\text{H}_2$  质量分数  $w_{\text{H}_2}$  在燃烧器内部差异较小,说明  $\text{H}_2$  混合掺混较为充分。

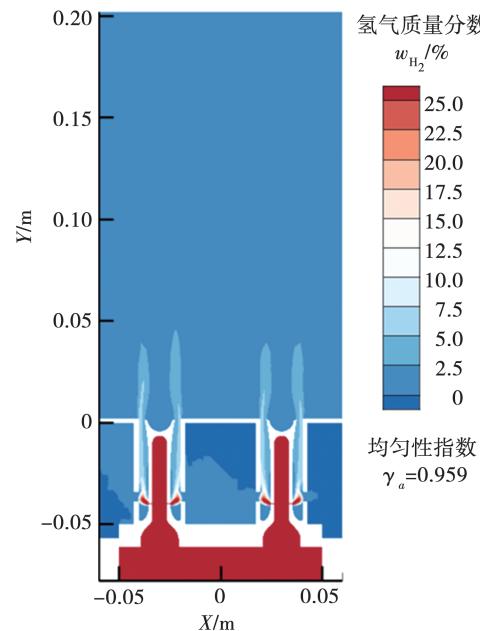


图11 在40%  $\text{CH}_4$  – 60%  $\text{H}_2$  燃料类型下的轴向截面  $\text{H}_2$  质量分数分布云图

Fig. 11  $\text{H}_2$  mass fraction distribution contour on axial section at 40%  $\text{CH}_4$  – 60%  $\text{H}_2$

结合图11的微混喷嘴轴向截面燃料组分场可以看到,混合气体在喷嘴出口附近被点燃。根据数值模拟的燃烧室出口面平均燃料质量分数值可知,各燃料类型下燃烧室内的燃料均基本燃尽。

### 3.3 污染物排放特性

燃烧器会在某些当量比下出现燃烧不稳定和热声振荡等问题,当量比过高或过低均会导致燃烧效率低及火焰吹熄问题,故燃烧室只能在某些固定当量比范围内稳定运行。

选取如表2所示污染物排放特性实验工况进行火焰形态与污染物排放的分析。此工况为在指定燃烧器出口流速下保证火焰无抬升或吹熄的稳定情况,便于实验观察。

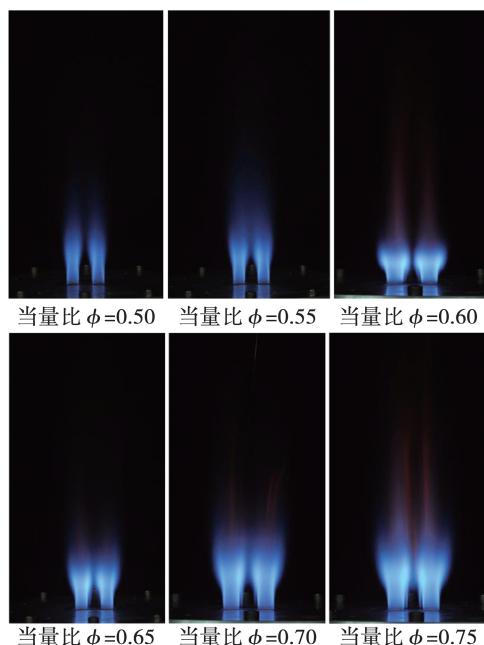
表 2 污染物排放特性实验工况

Tab. 2 Experimental conditions of pollutant emission characteristics

工况设置	数值范围
空气温度/K	298
空气压力/Pa	$1.01 \times 10^5$
空气流量/L·min <sup>-1</sup>	805.3
燃烧器出口流速 $V_0$ /m·s <sup>-1</sup>	20
燃烧器出口雷诺数	30 050
燃料成分	40% CH <sub>4</sub> - 60% H <sub>2</sub>
当量比	0.4 ~ 0.8
热功率/kW	20.2 ~ 40.5

通过流量计改变空气和燃料的体积来实现对同一燃料类型下当量比的改变。设定实验过程的当量比  $\phi$  范围为 0.4 ~ 0.8, 保持燃烧器出口速度不变, 对当量比进行调控, 来探究四喷嘴微混燃烧器的特性。

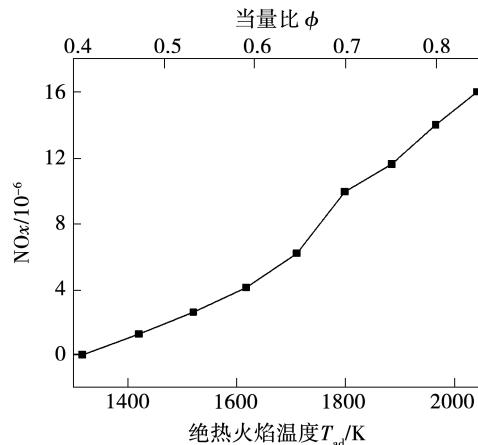
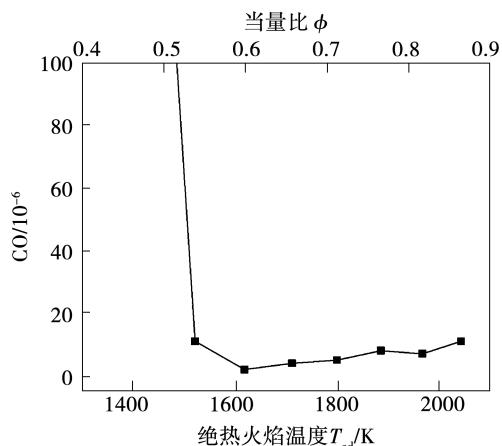
图 12 为 40% CH<sub>4</sub> - 60% H<sub>2</sub> 的混合燃料燃烧时, 相机所拍摄的开放空间火焰形态图。可以观测到, 当量比在 0.5 ~ 0.75 范围内的火焰处于稳定状态, 该燃料类型的火焰向下游传播过程中, 火焰亮度有所削弱。

图 12 40% CH<sub>4</sub> - 60% H<sub>2</sub> 混合燃料在不同当量比下的火焰形态Fig. 12 Flame morphology of 40% CH<sub>4</sub> - 60% H<sub>2</sub> mixed fuel at different equivalence ratios

从图中看到, 高速射流火焰依靠中心钝体产生的弱回流区来稳定火焰, 燃烧器火焰根部所有区域基本附着在出口处, 火焰无抬升, 未发现火焰吹熄与熄火的现象, 进一步验证了钝体发挥了稳焰机制作用, 与传统的无钝体微混燃烧器有本质不同。

通过观察不同当量比下的火焰形态发现, 在宽工况下的火焰长度较短, 火焰在高温区的停留时间缩短, 从而抑制了热力型 NO<sub>x</sub> 产生。

图 13 和图 14 为四喷嘴微混燃烧器在表 2 工况下的 NO<sub>x</sub> 和 CO 燃烧排放情况。

图 13 微混燃烧器在 40% CH<sub>4</sub> - 60% H<sub>2</sub> 燃料类型下燃烧的 NO<sub>x</sub> 排放浓度Fig. 13 NO<sub>x</sub> emission concentration of micro mixing burner combustion at 40% CH<sub>4</sub> - 60% H<sub>2</sub>图 14 微混燃烧器在 40% CH<sub>4</sub> - 60% H<sub>2</sub> 燃料类型下燃烧的 CO 排放浓度Fig. 14 CO emission concentration of micro mixing burner combustion at 40% CH<sub>4</sub> - 60% H<sub>2</sub>

图中的排放为实测值折算为 15% O<sub>2</sub> 浓度下的值,折算方法如下:

$$c' = c \frac{21 - 15}{21 - c_{O_2}} \quad (1)$$

式中:c<sub>O<sub>2</sub></sub>—氧气排放浓度,%;c—实际排放浓度,mg/m<sup>3</sup>。

由图 13 可知,绝热火焰温度  $T_{ad}$  随燃烧当量比  $\phi$  的增加而增加,因高温环境使得更多的热力型 NO<sub>x</sub> 产生,故 NO<sub>x</sub> 排放量有所升高。当量比在 0.4 ~ 0.8 的实验范围内,NO<sub>x</sub> 排放浓度均低于  $16 \times 10^{-6}$ ,表明四喷嘴微混燃烧器相较于扩散燃烧具有良好的燃烧低排放特性<sup>[25]</sup>。

由图 14 可知,CO 排放受到燃烧温度和当量比的影响。随燃烧温度变高,CO 排放呈先下降后略有上升的趋势;燃烧温度低,可能带来燃烧不充分的问题,表现为 CO 排放急剧上升。而在过高或过低的当量比下,燃烧器燃烧会发生热声振荡或贫熄火现象,也会导致 CO 排放急剧升高。在当量比为 0.5 ~ 0.8 的范围内,燃烧器在如表 2 工况下的全部 CO 排放浓度低于  $11 \times 10^{-6}$ ,表明四喷嘴微混燃烧器具备低排放燃烧的潜力<sup>[25]</sup>。

## 4 结 论

通过单元微混喷嘴及微混燃烧器的数值模拟和实验,开展燃烧器火焰形态及污染物排放的燃烧特性研究,主要结论如下:

(1) 在 40% CH<sub>4</sub> - 60% H<sub>2</sub> 的混合燃料下,微混燃烧器具有良好的燃/空混合均匀性,采用空气径向进气、燃料轴向进气且设有径向进气燃料孔的喷嘴结构有利于燃/空掺混。

(2) 对四喷嘴燃烧器进行热态模拟分析表明,钝体会令燃烧器出口处产生回流区,并依托相邻燃烧器间作用使火焰稳定。实验中燃烧器火焰形态与仿真 OH<sup>\*</sup> 场基本一致,燃烧器在当量比为 0.6、燃料体积成份为 40% CH<sub>4</sub> - 60% H<sub>2</sub> 的情况时具有良好的燃烧火焰稳定性。

(3) 开展燃烧器在不同当量比下的 NO<sub>x</sub> 和 CO 排放采集。得到 NO<sub>x</sub> 排放浓度随当量比增加而增大;CO 排放浓度随当量比增加呈先降低后略有增大的规律。钝体结构可以帮助燃烧器在宽工况下实

现高效燃烧,明晰了微混燃烧器污染物低排放燃烧特性规律。

## 参 考 文 献:

- [1] 李苏辉,张归华,吴玉新.面向未来燃气轮机的先进燃烧技术综述[J].清华大学学报(自然科学版),2021,61(12):1423 - 1437.  
LI Su-hui, ZHANG Gui-hua, WU Yu-xin. Advanced combustion technologies for future gas turbines [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(12): 1423 - 1437.
- [2] 苏 贺,郭志辉.分级旋流火焰的燃烧不稳定性及火焰动力学[J].航空动力学报,2021,36(4):806 - 815.  
SU He, GUO Zhi-hui. Combustion instability and flame dynamics of staged swirl flame [J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(4): 806 - 815.
- [3] 于 丹,郭志辉,杨甫江.贫燃预混燃烧室中的分布式火焰传递函数分析[J].推进技术,2016,37(12):2210 - 2218.  
YU Dan, GUO Zhi-hui, YANG Fu-jiang. Experimentally study on distribution of flame transfer function in a lean premixed combustor [J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37 ( 12 ): 2210 - 2218.
- [4] 王译晨,朱 民.火焰动力学及其对热声稳定性的影响[J].清华大学学报(自然科学版),2022,62(4):785 - 793.  
WANG Yi-chen, ZHU Min. Flame dynamics and their effect on thermoacoustic instabilities [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62(4): 785 - 793.
- [5] NOBLE D, DAVID W, EMERSON B, et al. Assessment of current capabilities and near-term availability of hydrogen-fired gas turbines considering a low-carbon future [J]. Gas Turbines Power, 2021, 143(4):141 - 152.
- [6] LEONARD G, STEGMAIER J. Development of an aero-derivative gas turbine dry low emissions combustion system [C]//ASME 1993 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, Cincinnati, Ohio, 1993.
- [7] JOSHI N D, EPSTEIN M J, DURLAK S, et al. Development of a fuel air premixer for aero-derivative dry low emissions combustors [C]//ASME 1994 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, Hague, Netherlands, 1994.
- [8] HERNANDEZ S R, WANG Q, McDONELL V, et al. Micro mixing fuel injectors for low emissions hydrogen combustion[C]// ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea, and Air, Berlin, Germany, 2008.
- [9] ASAI T, DODO S, KARISHUKU M, et al. Multiple-injection dry low-NO<sub>x</sub> combustor for hydrogen rich syngas fuel: Testing and evaluation of performance in an IGCC pilot plant [J]. Mechanical Engineering Journal, 2014, 1(5):14 - 24.
- [10] YORK W D, ZIMINSKY W S, YILMAZ E, et al. Development and

- testing of a low NO<sub>x</sub> hydrogen combustion system for heavy duty gas turbines [J]. Gas Turbines Power, 2013, 135(2) :22 – 31.
- [11] LIU Xiao, SHAO Wei, LIU Ce, et al. Cold flow characteristics of a novel high-hydrogen micro-mix model burner based on multiple confluent turbulent round jets [J]. Hydrogen Energy, 2021, 46(7) :76 – 89.
- [12] ASAI T, AKIYAMA Y, DODO S. Development of a state-of-the-art dry low NO<sub>x</sub> gas turbine combustor for IGCC with CCS [J]. Recent Advances in Carbon Capture and Storage, 2017, 62(1) :39 – 47.
- [13] AKIYAMA Y, DODO S. Part load operation of a multiple-injection dry low NO<sub>x</sub> combustor on hydrogen-rich syngas fuel in an IGCC pilot plant [J]. Recent Advances in Carbon Capture and Storage, 2015, 59(3) :77 – 82.
- [14] BASSAM S, MOHAMMAD K, ANTHONY B. Hydrogen enrichment impact on gas turbine combustion characteristics [J]. Recent Advances in Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 2020, 52(2) :24 – 31.
- [15] WILLIAM D, DERRICK W, YONG Q. Operational flexibility of GE'S F-class gas turbines with the DLN2.6 + combustion system [J]. Recent Advances in Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 2018, 44(4) :241 – 246.
- [16] FUNKE H, BECKMANN N, ABANTERIBA S. An overview on dry low NO<sub>x</sub> micro-mix combustor development for hydrogen-rich gas turbine applications [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(2) :6978–6990.
- [17] DANIEL K, HARALD H, TSUYOSHI K. Experimental and numerical investigation on the effect of pressure on micro-mix hydrogen combustion [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 13(6) :224 – 235.
- [18] 邵卫卫,扈学超,毕笑天,等. 氢燃料微预混火焰燃烧不稳定性实验研究 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2023, 63(4) :572 – 584.
- SHAO Wei-wei, HU Xue-chao, BI Xiao-tian, et al. Study of combustion characteristics and flame stabilization mechanism of hydrogen-containing micromix jet flames [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2023, 63(4) :572 – 584.
- [19] 全照旭,韩启祥. 钝体火焰稳定器后燃烧不稳定数值模拟 [J]. 航空发动机, 2023, 49(1) :81 – 88.
- TONG Zhao-xu, HAN Qi-xiang. Numerical simulation of combustion instability behind bluff body flame holder [J]. Aeroengine, 2023, 49(1) :81 – 88.
- [20] 张苏,魏林慧,王金贵. 甲烷 - 空气预混燃烧数值模拟仿真实验设计及教学应用 [J]. 化工高等教育, 2023, 40(3) :113 – 119.
- ZHANG Su, WEI Lin-hui, WANG Jin-gui. Experimental design and teaching application of numerical simulation of methane-air premixed combustion [J]. Higher Education in Chemical Engineering, 2023, 40(3) :113 – 119.
- [21] LIU X, SHAO W, TIAN Y, et al. Investigation of H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>-air flame characteristics of a micromix model burner at atmosphere pressure condition [C]//ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Osio, Norway, 2018.
- [22] 刘贵闯. 稀释剂对合成气微混合燃烧特性影响的数值模拟研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2020.
- LIU Gui-chuang. Numerical simulation of the effect of diluent on the combustion characteristics of syngas micro-mixing [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [23] 刘耘州. 射流喷嘴特性对天然气柔燃燃烧器燃烧特性影响研究 [D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院工程热物理研究所), 2018.
- LIU Yun-zhou. Effect of jet nozzle characteristics on combustion characteristics of natural gas soft burner [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences), 2018.
- [24] 陈昊. 富氢燃料微混燃烧组织方法研究 [D]. 北京:华北电力大学, 2023.
- CHEN Hao. Study on micromixing combustion of hydrogen-rich fuel [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023.
- [25] 张杰,郎兴华,杨璟铁,等. 国内外燃气轮机排放标准对比分析 [J]. 环境保护与循环经济, 2020, 40(9) :71 – 74.
- ZHANG Jie, LANG Xing-hua, YANG Jing-qi, et al. Comparative analysis of gas turbine emission standards at home and abroad [J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2020, 40(9) :71 – 74.

(刘颖 编辑)