

微型燃气轮机改烧氨气/氢气混合燃料的 数值模拟研究

宋权斌, 赵仙娟, 宋彦庆, 刘 瑞

(长沙理工大学 能源与动力工程学院, 湖南 长沙 410000)

摘 要:通过数值模拟对某 80 kW 微型燃气轮机环形低氮燃烧室进行适当的改造并对其燃烧及 NO_x 生成特性进行研究。研究表明:将烧天然气燃料的燃烧室改烧氨/氢混合燃料,在输出功率相同时燃料体积流量增大,通过增加燃料进气喷嘴的直径来降低燃料的进气速度;当掺氢比为 0.3 时,该结构的燃烧室燃烧不充分,燃烧效率达不到要求;当掺氢比在 0.35~0.5、燃料华白数在 19.9~21.7 范围内变化时,该燃烧室可以实现高效稳定的燃烧,性能接近燃烧天然气燃料;氨/氢混合燃料中掺氢比增大,则 NO_x 排放量也快速增大;由于燃料型 NO_x 排放量占主导地位,该微型燃气轮机燃烧室不能实现低 NO_x 燃烧, NO_x 排放远超国家标准,需要加装脱硝装置才能实际应用。

关 键 词:微型燃气轮机燃烧室;氨气/氢气混合燃料;掺氢比;数值模拟; NO_x 排放

中图分类号:TK16

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.05.018

[引用本文格式]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 Quan-bin, ZHAO Xian-juan, SONG Yan-qing, 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.

Numerical Simulation of Micro-combustion Engine to Burn Ammonia/Hydrogen Mixed Fuel

SONG Quan-bin, ZHAO Xian-juan, SONG Yan-qing, LIU Rui

(College of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, China,
Post Code:410000)

Abstract: The annular low-nitrogen combustion chamber of an 80 kW micro gas turbine was appropriately modified, and its combustion and NO_x formation characteristics were studied by numerical simulation. The research results show that the combustion chamber based on natural gas fuel is changed to burn the ammonia/hydrogen mixed fuel, the fuel volume flow increases when the output power is the same, and the fuel intake speed is reduced by increasing the diameter of the fuel intake nozzle; when the hydrogen blending ratio is 0.3, the combustion chamber of the structure is not fully burned, and the combustion efficiency cannot meet the requirements; when the hydrogen blending ratio is 0.35 to 0.5 and the fuel white number changes between 19.9 and 21.7, the combustion chamber can achieve efficient and stable combustion, and the performance is close to that of burning natural gas fuel; as the hydrogen blending ratio in ammonia/hydrogen mixed fuel increases, NO_x emissions also increase rapidly; due to the domi-

收稿日期:2022-10-07; 修订日期:2022-11-09

基金项目:长沙理工大学研究生科研创新项目(CX2021SS61);国家自然科学基金应急管理项目(51541601)

Fund-supported Project: Changsha University of Science and Technology Graduate Research and Innovation Project(CX2021SS61); National Natural Science Foundation of China Emergency Management Project(51541601)

作者简介:宋权斌(1973-),男,长沙理工大学副教授.

nance of fuel-based NO_x emissions, the combustion chamber of the micro-combustion engine cannot achieve low NO_x combustion, NO_x emissions far exceed the national standard, and a denitrification device is required for practical application.

Key words: micro-combustor of gas turbine, ammonia/hydrogen mixed fuel, hydrogen blending ratio, numerical simulation, NO_x emissions

引言

我国在2020年提出了碳达峰、碳中和的生态战略目标^[1]。实现“双碳”目标的关键方法之一是在燃烧系统中使用无碳燃料,其中氢气作为一种可再生清洁能源被认为是减少温室气体排放的潜在能源载体^[2]。然而,氢气存在储存和运输困难等问题,尚未得到广泛推广和使用^[3]。因此,大量的研究正尝试通过使用各种含氢燃料来实现能量的储存和氢能的有效利用^[4-6]。

氨气含氢量高,能量密度大,易液化,便于储存和运输^[7],所以氨作为无碳高氢燃料替代传统的化石能源受到了广泛认同,并期望作为燃气轮机、内燃机等动力装置的燃料^[8]。但在实际燃烧中,氨气存在燃烧特性差、火焰传播速度低、燃烧过程中产生的 NO_x 浓度高等问题。为使氨气得到更广泛的应用,现阶段采取的措施主要是在氨气中掺混 H_2 、 CH_4 等燃料来强化氨火焰的稳定性^[9]。

添加剂(H_2 、 CH_4 等)的掺混能够有效改善氨气的燃烧特性。范卫东等人^[10]总结了多种强化氨气燃烧的策略,如掺混其他燃料、部分预分解燃烧、过氧燃烧等都能够有效改善氨气的燃烧特性。Han等人^[11]通过数值模拟方法对比了氨掺混 H_2 、 CH_4 后的层流燃烧速度,研究指出,在增强氨燃烧速度方面,添加氢气加强效果最为明显,而甲烷对氨火焰的加强效果较弱。随着添加量的增多,氢气掺混比例和层流燃烧速度呈指数关系,而甲烷对层流燃烧速度的影响则呈线性关系。边志坚等人^[12]通过实验研究了不同掺氢比对氨/氢混合气体火焰传播特性的影响,结果表明,掺混氢气能够有效提高氨/氢混合燃料的火焰稳定性,且随着掺氢比的提高,火焰传播速度和燃烧强度均得到提高。

当前国内外关于微型燃气轮机环形燃烧室内氨/氢混合燃料燃烧特性的研究较少,氢气对氨气在环形燃烧室内的稳定性的影响尚不明确。本文主要研究氨/氢混合燃料在某80 kW微型燃气轮机环形

燃烧室中的燃烧特性及污染物排放情况。

1 计算模型及边界条件

本文采用SolidWorks软件建立某80 kW微型燃气轮机环形燃烧室三维物理模型,燃烧室及火焰筒三维实体模型如图1所示。该模型中心以火焰筒最底端所在平面中心为坐标原点,以空气进口方向为Z轴正方向建立直角坐标系。燃烧室主要参数如表1所示。

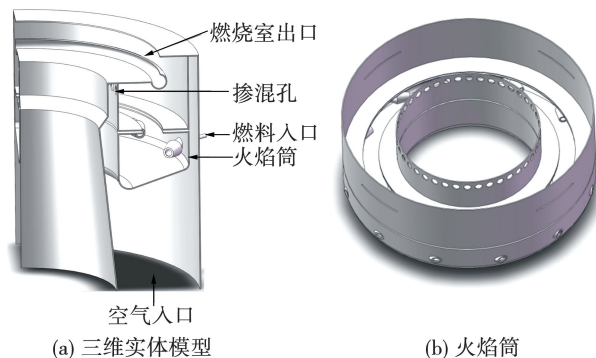


图1 微型燃气轮机三维实体模型及其内部火焰筒结构

Fig. 1 3D solid model of micro gas turbine and its internal flame tube structure

利用Mesh软件对模型进行非结构化网格划分。燃烧室结构沿周向具有周期性,为减少网格数量和计算量,根据疏密程度建立了4种不同的计算模型,网格数量分别为315万、419万、517万和650万。模拟计算不同数量网格情况下,当掺氢比为0.35时环形燃烧室火焰筒主燃区轴向面平均速度分布情况如图2所示。由图可知,当网格数量为315万时计算所得的面平均速度分布与另外3种网格的计算数据趋势大致相同,但在数据上偏差较大,而这3种网格的计算结果数据契合度较高,趋于重合状态。当网格数量高于419万时,计算结果受网格数量变化的影响很小。因此,可以认为在网格数量高于419万时,网格数已呈无关性变化。为了减少计算资源,最终选取419万网格进行之后的

仿真模拟,图 2 为不同网格数据据轴向面平均速度对比图。

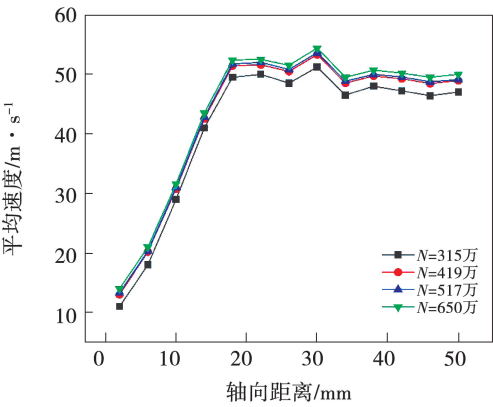


图 2 不同网格数量轴向面平均速度对比图

Fig.2 Comparison of axial plane average velocity with different grid numbers

表 1 微型燃气轮机环形燃烧室主要参数

Tab.1 Main parameters of annular combustor for micro gas turbine

参数	数值
喷嘴数量	12
喷嘴直径/mm	1.3
喷嘴长度/mm	30.5
火焰筒内、外直径/mm	157.6/277.5
火焰筒高度/mm	116
燃料喷管内径/mm	6
冷却孔直径/mm	8
掺混孔直径/mm	3.6
大、小隔板直径/mm	235/199.61
火焰筒壁厚/mm	1
燃气轮机外壳内、外直径/mm	127.42/297
燃气轮机外壳高度/mm	206.4
燃气轮机外壳厚度/mm	1

原型天然气燃烧室的燃料为 CH₄, 热值为 50 MJ/kg,其中边界条件选用质量流量入口和压力出口,如表 2 所示。

表 2 原型燃烧室边界条件

Tab.2 Boundary conditions of prototype combustor

参数	CH ₄
空气质量流量/kg·s ⁻¹	0.202 5
空气温度/K	813.3
燃料质量流量/kg·s ⁻¹	0.001 625
燃料温度/K	288
操作压力/Pa	390 000

通过 FLUENT 软件对氨/氢混合燃料在微型燃气轮机燃烧室内的燃烧情况进行数值模拟,采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型、涡耗散概念模型(EDC)耦合 Xiao-2016 机理^[13]以及 P-1 辐射模型,压力速度耦合采用 SIMPLE 算法,其他变量的离散均采用二阶精度迎风插值。

为了验证数值计算方法和数学模型的准确性,对模拟结果与实际测试值进行比较验证。选取氨/氢混合燃料掺氢比为 0.40 的燃烧工况,首先,对同一种燃料(CH₄)的实验测试结果与模拟结果进行对比,从而验证该模型的准确性;之后,对氨/氢混合燃料模拟结果数据与甲烷为燃料的实验测试数据进行对比。表 3 为燃烧室出口实验测试结果与模拟数据对比。由表 3 可知,实验和模拟的数据相差在 10% 以内,模拟数据和实验测试结果基本符合。

表 3 燃烧室出口实验测试结果与模拟数据对比

Tab.3 Comparison of combustion chamber outlet test results and simulated data

参数	平均温度/K	平均速度/m·s ⁻¹
实验测试结果(甲烷燃料)	1 144.15	68.67
模拟结果(甲烷燃料)	1 132.52	67.83
模拟结果(氨/氢混合燃料)	1 101.37	69.58

2 结构改造及验证

燃气轮机燃烧室设计需要着重考虑的是燃烧室内燃烧的稳定性,燃烧室结构是重要的影响因素之一。在不改变火焰筒结构的前提下,喷嘴的设计就成为主要的研究方向。

相同条件下,氢气的火焰传播速度是甲烷的 8 倍,是氨气的 40 倍,因此掺混一定比例的氢气必定提高燃料的燃烧速度^[2]。氨/氢掺混后,单位体积的热值降低,要保证燃料总体的热流量相同,需要增加燃料体积流量。与甲烷相比,进口的燃料气流速度增加,促使燃料直接喷射到火焰筒壁面上,导致燃料燃烧不充分,降低了燃烧效率,且易导致火焰筒壁面损坏。因此,火焰筒喷嘴设计最主要的问题就是选取合适的燃料喷射速度,最直接的方法就是改变喷嘴的面积来改善火焰稳定性,将原本直径为 1.3 mm 的喷嘴扩大到两倍以适应氨/氢混合燃料的燃烧,其余结构保持不变。

由于氨气的热值较低(18.6 MJ/kg),经数值模拟发现,纯氨气在燃烧室中不能稳定燃烧,会发生

火焰熄火现象。为改善氨气的燃烧特性,需要在氨气中掺混一定比例的氢气。本文选取氨气中掺混不同比例的氢气作为燃料,燃料的华白数(Wobbe Number, WN)会发生变化,华白数是气态燃料互换性的指标,用于比较组成不同的气态燃料释放的能量。

华白数定义为燃料的热值除以燃料相对于空气比重(Specific Gravity, SG)的平方根,通常采用低位热值(Lower Heating Value, LHV, MJ/kg)^[14],计算华白数,也有标准采用燃料的高位热值(Higher Heating Value, HHV, MJ/kg),即:

$$WN = \frac{LHV}{\sqrt{SG}} \text{ 或 } WN = \frac{HHV}{\sqrt{SG}}$$

(1)

掺氢比(X)是指在氨/氢混合燃料中氢气燃料所占混合燃料的体积分数,即:

$$X = \frac{V_{H_2}}{V_{H_2} + V_{NH_3}}$$

(2)

式中: V_{H_2} , V_{NH_3} —氨/氢混合燃料中燃料(H_2/NH_3)的体积分数。

为了研究不同掺氢比对氨/氢混合燃料在微型燃气轮机内的燃烧特性,选取 4 个工况作为模拟工况来研究。为了保证原型燃烧室以氨/氢掺混作为燃料燃烧的总发热量不变,经计算所选工况华白数介于 19.9~21.7 之间,燃烧室不同工况下进口燃料流量如表 4 所示。

表 4 不同工况下燃烧室氨氢比及进口燃料流量

Tab.4 Inlet fuel flow of combustor under different working conditions

工况	掺氢比	进口燃料质量流量/ kg·s ⁻¹
1	0.30	0.003 46
2	0.35	0.003 29
3	0.40	0.003 13
4	0.50	0.002 78

图 3 是原型燃烧室及改造后的燃烧室在燃用掺氢比为 0.40 的氨/氢混合燃料时在 $Z = 30\text{ mm}$ 处的速度分布及温度分布图。从图 3(a)可以看出,采用原型喷嘴喷射氨/氢混合燃料,燃烧室内局部流动速度过快,尤其喷嘴处速度达到了 500 m/s 。从图 3(c)可以看出,原型燃烧层温度场分布不均匀,局部温度较高,高温区接近火焰筒内壁,容易烧毁火焰

筒。改造后的燃烧室,如图 3(b)和 3(d)所示,在喷嘴处速度最快约为 120 m/s ,高温区域分布均匀,与原型燃烧室燃烧天然气的速度场和温度场类似。燃烧室喷嘴改造后,流场结构和燃烧得到了改善。

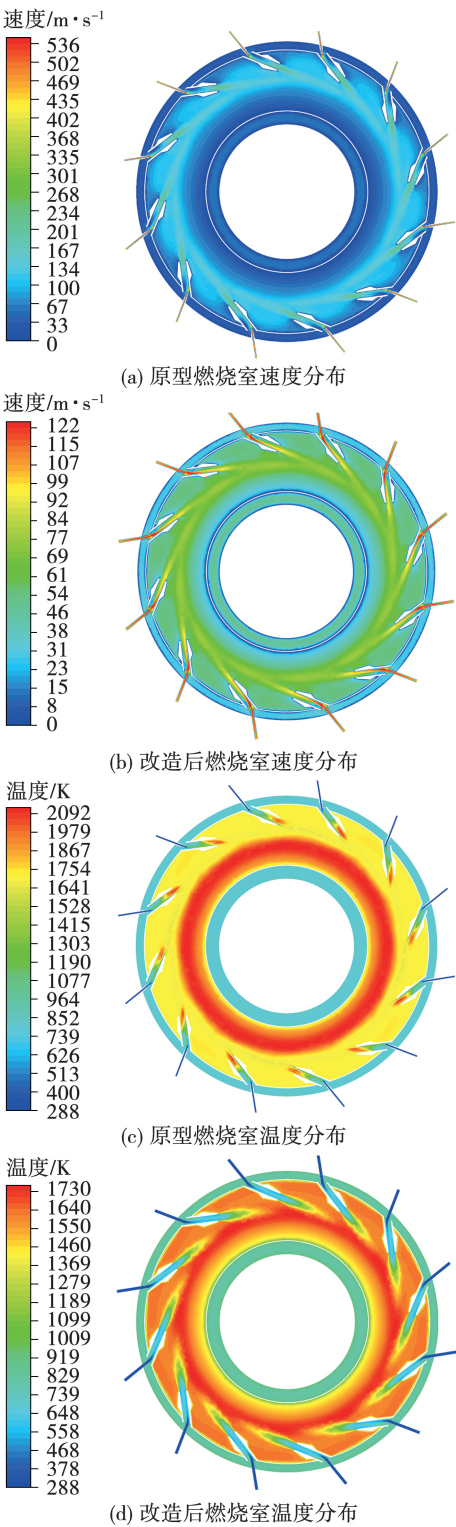


图 3 $Z = 30\text{ mm}$ 处速度分布及温度分布对比图

Fig.3 Comparison diagram of velocity distribution and temperature distribution at $Z = 30\text{ mm}$

为获得合理有效的微型燃气轮机燃烧室模型,对模拟结果进行数据分析,得到满足设计要求的模型。选取燃烧室总压损失系数、燃烧效率、出口温度分布系数等评价参数对该燃烧室模型进行性能分析,从而确定该模型的合理性,为之后的研究提供良好的理论基础。燃烧室的总压损失 ξ_c 是指燃烧室进出口截面平均总压的变化量^[15],燃烧室总压损失会影响燃气轮机的整机性能,燃烧室的压力损失增加,燃气对涡轮做功能力下降,从而降低其运行效率,因此要控制好燃烧室总压损失,并尽量降低该系数,如式(3)所示;通过模拟测出燃烧室出口燃烧产物中 NH_3 、 H_2 组分的含量,按照公式 4 确定燃烧效率 η_c ^[15]。

$$\xi_c = \frac{p_{i3} - p_{i4}}{p_{i3}} \tag{3}$$

$$\eta_c = 1 - \frac{\text{EI}_{\text{NH}_3} \text{LHV}_{\text{NH}_3} + \text{EI}_{\text{H}_2} \text{LHV}_{\text{H}_2}}{Y_{\text{NH}_3 + \text{H}_2} \text{LHV}} \tag{4}$$

式中: p_{i3} 、 p_{i4} ——燃烧室进口截面和出口截面的平均总压,Pa;EI—未燃烧完全的燃料排放指数,用质量分数与总质量流量的乘积表示; $Y_{\text{NH}_3 + \text{H}_2}$ — NH_3 和 H_2 在未燃混合气中的质量流量,kg/s。

分析发现,出口温度分布因子偏高,燃烧室其余性能基本达到设计要求,计算结果如表 5 所示。

表 5 不同工况下燃烧室进口燃料流量

Tab.5 Inlet fuel flow of combustor under different working conditions

工况	掺氢比	总压损失	OTDF	燃烧效率
1	0.30	0.055	0.071	41.08
2	0.35	0.056	0.163	98.76
3	0.40	0.054	0.134	99.28
4	0.50	0.052	0.133	99.56
设计要求	—	<0.07	<0.3	>99

3 结果与分析

3.1 掺氢比对燃烧速度场的影响

氢气的掺混提高了氨气的反应速度和稳定性。图 4 和图 5 分别给出不同掺氢比下燃烧室周向截面和燃烧室 $Z = 30\text{ mm}$ 处的速度分布云图。燃料在喷嘴内与空气进行预混后进入燃烧室,预混气体在燃烧室主燃区充分燃烧后进入掺混区与空气进行掺

混,掺混后温度比较均匀的烟气进入透平进行做功。随着掺氢比的增加,燃烧反应速度加快,主流区温度增高,主流速度相应提高。从图 4 中可以明显看到,从主燃区进入掺混区的烟气流速随掺氢比的提高而增加。

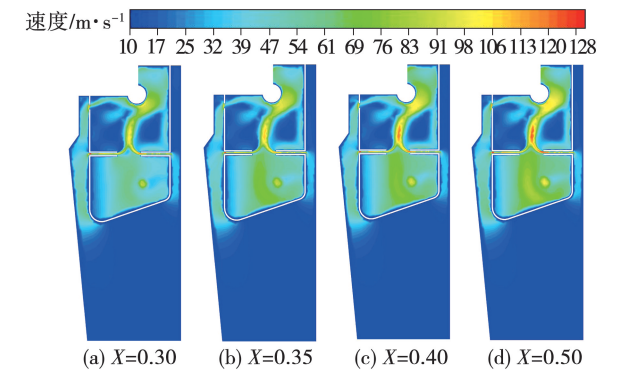


图 4 周向截面速度分布

Fig.4 Velocity distribution on circumferential section

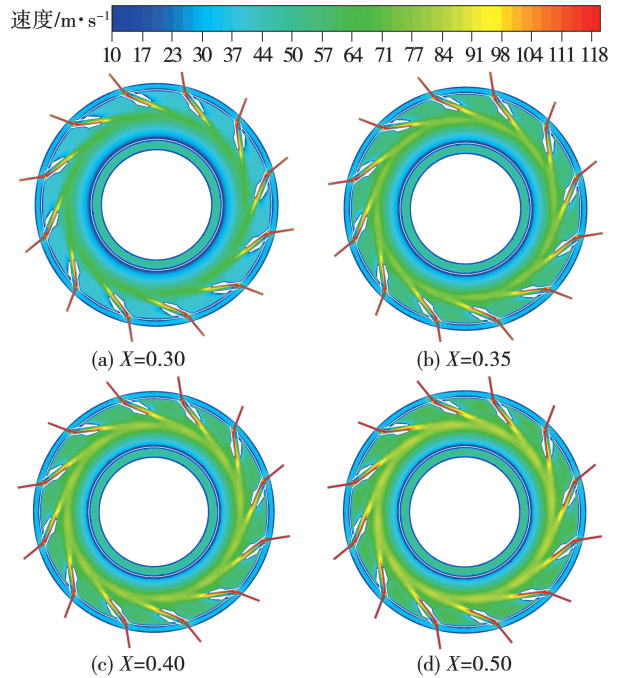


图 5 $Z = 30\text{ mm}$ 处速度分布

Fig.5 Velocity distribution at $Z = 30\text{ mm}$

图 6 为不同掺氢比下火焰筒主燃区气流截面平均速度曲线图。从图中可以看出,不同掺氢比的平均速度变化趋势趋于一致,先是迅速上升,当 $Z = 18\text{ mm}$ 时趋于平缓,并在 $Z = 30\text{ mm}$ 处达到峰值。峰值位置为喷嘴所在截面,即燃料进入燃烧室的截面,为燃料与空气充分燃烧区域,因此气流速度达到

峰值之后速度变化趋于平缓。而且预混气体的反应速度随着氨/氢混合燃料掺氢比的提高而提高,同一截面反应更加充分,气流温度更高,相应的流动速度也更快。

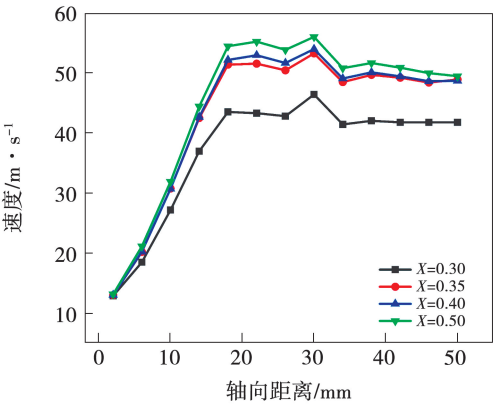


图 6 火焰筒主燃区气流截面平均速度

Fig.6 Average surface velocity of main combustion zone of flame tube

3.2 掺氢比对温度分布的影响

图 7 和图 8 分别表示不同掺氢比下燃烧室周向截面的温度分布和燃烧室 $Z = 30\text{ mm}$ 处的温度分布。从图中可以发现,燃烧室内高温区域主要集中在主燃区中心及偏上方区域,随着氨/氢混合燃料中掺氢比的提高,燃烧室内的高温区域逐渐增大,这是由于燃料中含有易燃烧的氢气,随着掺氢比的增加,燃烧反应速度加快,使得燃料与空气能够充分预混燃烧。当掺氢比为 0.30 时,燃烧室内燃烧产生的高温区域偏向燃烧室内壁面,且燃烧区域较小,是由于混合燃料中的氢气的含量较少,而氨气燃烧速度较慢,点火能量比较高,燃烧出现局部的吹熄,未能够完全燃烧。

图 9 是不同掺氢比下火焰筒主燃区面平均温度曲线图。从图中可以看出,当掺氢比介于 0.35 ~ 0.50 之间时,温度变化趋于一致,面平均温度分布曲线呈“M”型。这是因为火焰中心温度较低,外围温度逐渐升高,燃料在此充分燃烧,外围两侧温度逐渐下降。当掺氢比为 0.3 时,整体温度较其他掺氢比时低很多,而且变化趋势不同。这是因为氨/氢混合燃料中掺氢比较小,燃烧不充分,且未能在喷嘴喷射区域外围达到燃烧条件,直到靠近火焰筒夹板间隙才发生燃烧。

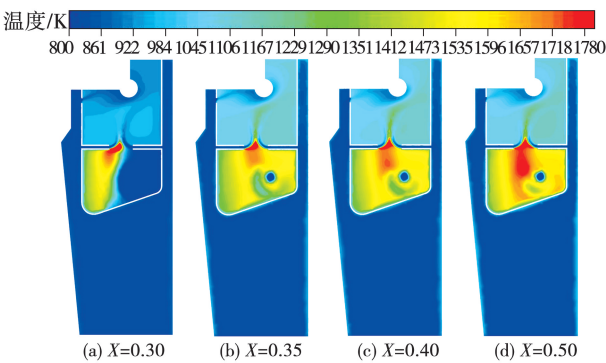


图 7 周向截面温度分布

Fig.7 Temperature distribution on circumferential section

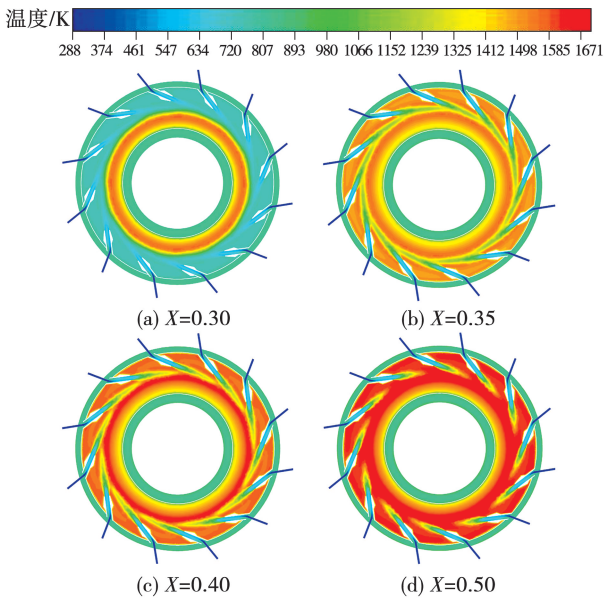


图 8 $Z = 30\text{ mm}$ 处温度分布

Fig.8 Temperature distribution at $Z = 30\text{ mm}$

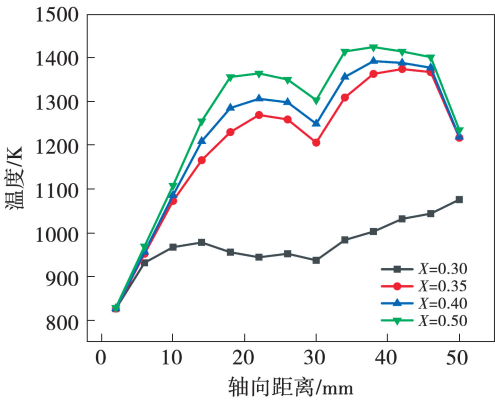


图 9 火焰筒主燃区面平均温度

Fig.9 Average surface temperature of main combustion zone of flame tube

出口温度分布因子 (OTDF) 是衡量燃气轮机性能的重要因素^[16]。其计算公式为:

$$OTDF = \frac{T_{out,max} - T_{out,ave}}{T_{out,ave} - T_{in,ave}} \tag{5}$$

式中： $T_{out,max}$ 、 $T_{out,ave}$ 和 $T_{in,ave}$ —燃烧室出口的最高温度、平均温度和入口平均温度，K。

OTDF 的值越小表示出口温度分布越均匀，在不同的掺氢比下出口的温度分布如表 6 所示。掺氢比的大小与出口温度分布因子成反比关系。当掺氢比为 0.30 时，温度分布因子相对较小，是由于掺氢量较少未能使燃料充分燃烧，燃烧室出口温度变化区间非常小，所以温度分布因子很小。

表 6 燃烧室出口温度分布

Tab.6 Temperature distribution at combustor chamber outlet

工况	掺氢比	平均温度/K	最高温度/K	OTDF
1	0.30	923.10	967.92	0.071
2	0.35	1098.46	1230.16	0.163
3	0.40	1101.37	1210.36	0.134
4	0.50	1108.98	1218.18	0.133

3.3 掺氢比对 NO_x 浓度的影响

氨/氢混合燃料的污染物主要以 NO_x 为主，而 NO_x 中 NO 占绝大部分^[17]，因此本文主要研究的污染物为 NO。由于燃料中含有 N 元素，因此燃料型 NO_x 成为主导，热力型其次，快速型可忽略不计。

图 10 是不同掺氢比下火焰筒主燃区面平均 NO 摩尔分数分布曲线图。由图中可知，燃烧室内 NO 摩尔分数随着掺氢比的增加而增加，这是因为随着掺氢比的增加，燃烧室内的温度也在逐渐提高。在燃烧过程中，NO 受温度影响很大，所以其含量会随燃烧室中温度的变化而变化，温度越高，燃烧室中 NO 含量就越多。

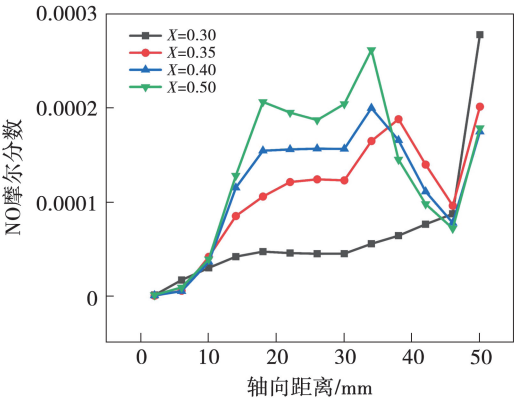


图 10 火焰筒主燃区面平均 NO 摩尔分数

Fig. 10 Average surface NO mole fraction of main combustion zone of flame tube

当掺氢比介于 0.35 ~ 0.5 时，NO 摩尔分数随着掺氢比的增加而增加。当掺氢比为 0.3 时，变化趋势有所不同，呈直线上升趋势，这是因为在喷嘴处刚进入火焰筒的空气和燃料较多，火焰传播速度较慢，燃烧不充分，进入的氧气与刚燃烧完高温燃气中的中间产物反应生成 NO。当掺氢比为 0.35 时，温度分布均匀度较好，说明 H₂ 掺混量的改变直接影响火焰燃烧稳定性及 NO 的排放。

主燃区高温烟气进入掺混区，通过掺混冷却，有效降低平均温度并提高温度均匀性，进而达到透平做功所需。燃烧室出口平均参数如表 7 所示。

表 7 燃烧室出口平均参数

Tab.7 Average parameters at combustor chamber outlet

工况	掺氢比	速度/m·s ⁻¹	出口温度/K	NO 摩尔分数/ 10 ⁻⁶
1	0.30	58.12	923.10	378
2	0.35	69.11	1 098.46	1 355
3	0.40	69.58	1 101.37	1 983
4	0.50	69.91	1 108.98	2 375
CH ₄	-	67.83	1 132.52	10.59

由表 7 可见，当掺氢比介于 0.35 ~ 0.50 时，氨/氢混合燃料能够稳定燃烧，燃烧效率高；随着掺氢比的增加，燃烧室出口的平均温度、速度及 NO 的排放浓度都随之提高。通过对比原型燃烧室天然气燃料模拟数据及改造后氨/氢混合燃料燃烧室出口平均参数发现，当掺氢比为 0.35 ~ 0.50 时，其性能接近燃烧天然气燃料。当掺氢比为 0.30 时由于掺氢量较少，燃烧室未能稳定燃烧，燃烧效率较低，因此不予考虑。

随着掺氢比的增加，NO 摩尔分数从 378 × 10⁻⁶ 增加到 2 375 × 10⁻⁶，不能满足微型燃气轮机小于 15 × 10⁻⁶ 的要求，需要进一步改进燃烧室结构以降低 NO_x 排放。

4 结 论

将天然气燃烧室经过改造结构以适应氨/氢混合燃料的燃烧特性，对改造后的燃烧室进行了燃烧特性及 NO_x 排放情况的数值模拟，结果总结如下：

- (1) 将基于天然气燃料的燃烧室改烧氨/氢混合燃料，在输出功率相同时燃料体积流量增大，通过增加燃料进气喷嘴的直径来降低燃料的进气速度；
- (2) 在氨气中掺混氢气提高了火焰传播速度、

火焰温度及燃烧效率;当掺氢比为 0.30 时,该结构的燃烧室燃烧不充分,燃烧效率达不到要求;当掺氢比在 0.35 ~ 0.50,燃料华白数在 19.9 ~ 21.7 范围内变化时,该燃烧室可以实现高效稳定的燃烧,性能接近燃烧天然气燃料;

(3) 氨/氢混合燃料中掺氢比提高,则 NO_x 排放量也快速增大;由于燃料型 NO_x 排放占主导地位,该微型燃气轮机燃烧室不能实现低 NO_x 燃烧, NO_x 排放远超国家标准,需要加装脱硝装置才能实际应用。

参考文献:

- [1] 习近平. 继往开来,开启全球应对气候变化新征程[N]. 人民日报,2020-12-13(2).
XI Jin-ping. Carrying forward the past and forging ahead, starting a new journey to global response to climate change [N]. People's Daily, 2020-12-13(2).
- [2] KOBAYASHI H, HAYAKAWA A, SOMARATHNE K, et al. Science and technology of ammonia combustion[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(1): 109-133.
- [3] 钟绍华, 万桂芹, 严利群. 氨燃料燃烧性能数值模拟与分析[J]. 内燃机工程, 2014, 35(3): 46-51.
ZHONG Shao-hua, WAN Gui-qin, YAN Li-qun. Numerical simulation and analysis of ammonia fuel combustion performance[J]. Engineering of Internal Combustion Engine, 2014, 35(3): 46-51.
- [4] 武辉, 穆克进, 王岳, 等. 氢含量对氢气/甲烷混合气扩散燃烧特性的影响研究[J]. 热能动力工程, 2010, 25(1): 102-106, 125-126.
WU Hui, MU Ke-jin, WANG Yue, et al. Study on the influence of hydrogen content on the diffusion combustion characteristics of hydrogen/methane mixture[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2010, 25(1): 102-106, 125-126.
- [5] VALERA-MEDINA A, PUGH D G, MARSH P, et al. Preliminary study on lean premixed combustion of ammonia-hydrogen for swirling gas turbine combustors[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(38): 24495-24503.
- [6] 马勤勇, 钱白云, 董利江, 等. 掺氢比例对氢混天然气燃气轮机运行特性影响的研究[J]. 热能动力工程, 2022, 37(9): 41-49.
MA Qin-yong, QIAN Bai-yun, DONG Li-jiang, et al. Research on the influence of hydrogen blending ratio on the operating characteristics of hydrogen blended fuel gas turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(9): 41-49.
- [7] 周上坤, 杨文俊, 谭厚章, 等. 氨燃烧研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4164-4182.
ZHOU Shang-kun, YANG Wen-jun, TAN Hou-zhang, et al. Research progress of ammonia combustion[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4164-4182.
- [8] JUANGSA F B, IRHAMNA A R, AZIZ M. Production of ammonia

as potential hydrogen carrier; review on thermochemical and electrochemical processes[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(6): 14455-14477.

- [9] BERWAL P, KUMAR S, KHANDELWAL B. A comprehensive review on synthesis, chemical kinetics, and practical application of ammonia as future fuel for combustion[J]. Journal of the Energy Institute, 2021, 99: 273-298.
- [10] 范卫东, 陈钧. 氨气燃烧强化措施及 NO_x 控制策略研究进展[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(7): 14-23.
FAN Wei-dong, CHEN Jun. Research progress of ammonia combustion enhancement measures and NO_x control strategy[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(7): 14-23.
- [11] HAN X, WANG Z, COSTA M, et al. Experimental and kinetic modeling study of laminar burning velocities of NH_3/air , $\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{air}$, $\text{NH}_3/\text{CO}/\text{air}$ and $\text{NH}_3/\text{CH}_4/\text{air}$ premixed flames[J]. Combustion and Flame, 2019, 206: 214-226.
- [12] 边志坚, 王金华, 赵浩然, 等. 氨/氢气湍流预混火焰传播特性实验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2020, 26(6): 551-557.
BIAN Zhi-jian, WANG Jin-hua, ZHAO Hao-ran, et al. Experimental study on flame propagation characteristics of ammonia/hydrogen turbulent premixing[J]. Combustion Science and Technology, 2020, 26(6): 551-557.
- [13] XIAO H, HOWARD M, VALERA-MEDINA A, et al. Study on reduced chemical mechanisms of ammonia/methane combustion under gas turbine conditions[J]. Energy & Fuels, 2016, 30(10): 8701-8710.
- [14] 王冀玮. 100 kW 微型燃烧室设计及变燃料燃烧特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
WANG Ji-wei. Design of 100 kW micro combustor and research on variable fuel combustion characteristics[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [15] 张群, 黄希桥. 航空发动机燃烧学(第二版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020.
ZHANG Qun, HUANG Xi-qiao. Aero-engine combustion science (second edition)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2020.
- [16] 迟志伟, 王文欢, 黄阳, 等. 进气温度对微型燃气轮机燃烧室燃烧与排放特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2022(23): 8600-8607.
CHI Zhi-wei, WANG Wen-huan, HUANG Yang, et al. Effect of inlet air temperature on combustion and emission characteristics of combustion chamber of micro gas turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2022(23): 8600-8607.
- [17] 席中亚, 胡晓天, 付忠广. 燃气轮机燃烧室中快速型 NO 形成的数值计算[J]. 热能动力工程, 2018, 33(12): 59-64.
XI Zhong-ya, HU Xiao-tian, FU Zhong-guang. Numerical calculation of rapid NO formation in gas turbine combustor[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 33(12): 59-64.