

燃气轮机天然气掺氢燃烧及排放特性 数值模拟研究

耿卅捷, 潘禾吉田, 杨欢, 熊瑶, 刘银河

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了解掺氢对贫预混燃气轮机的性能影响,采用数值模拟的方法研究了某燃气轮机天然气掺氢比(体积分数0~30%)对其燃烧及排放特性的影响,对比了燃料体积流量恒定和热负荷恒定的情况下,掺氢对燃烧温度、 NO_x 、CO和 CO_2 排放的影响规律。结果表明,在燃料体积流量恒定的情况下:如果固定燃料当量比,掺氢会降低燃烧室热负荷,并能够降低燃气中CO和 CO_2 浓度,但会导致出口燃气超温和 NO_x 排放超标;如果固定掺氢比,随着当量比的降低,燃烧温度降低, NO_x 和 CO_2 浓度降低,CO浓度先降低后升高,当掺氢比为30%时,推荐的燃料当量比为0.48。在热负荷恒定的情况下,如果固定燃料当量比,掺氢能够降低燃气中CO和 CO_2 浓度,并导致出口燃气超温和 NO_x 排放超标;如果固定掺氢比,随着当量比的降低,燃烧温度降低, NO_x 和 CO_2 浓度降低,CO浓度先降低后升高,当掺氢比为30%时,推荐的燃料当量比为0.47。天然气掺氢燃气轮机可以通过稀燃的方式降低燃烧温度,实现低 NO_x 排放,同时降低CO和 CO_2 排放。本研究可为燃气轮机掺氢设计与运行提供参考。

关键词: 燃气轮机;掺氢;燃烧特性;排放特性

中图分类号: TK16 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202212001 **文章编号:** 0253-987X(2022)12-0001-11

Numerical Study on Influence of H_2 Blending on Combustion and Emission Characteristics of Gas Turbine

GENG Sajie, PAN Hejitian, YANG Huan, XIONG Yao, LIU Yinhe

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: This paper examines the influence of hydrogen blending on the performance of a lean premixed gas turbine. Numerical simulation is carried out to study the influence of blending hydrogen at different volume fractions (from 0 to 30%) on the combustion and emission characteristics of the gas turbine. The effects of hydrogen blending on the combustion temperature, and NO_x , CO and CO_2 emissions are compared under a constant fuel flow rate and constant heat load. The numerical simulation shows the following results: At a constant fuel flow rate: If the fuel equivalence ratio remains constant, the thermal load in the combustor and the concentration of CO and CO_2 will decrease with hydrogen blending, but there will be overheated gas and excessive NO_x emissions at the outlet. If the hydrogen blending ratio remains constant, the combustion temperature will drop together with the concentration of NO_x and CO_2 , and the concentration of CO will first decrease and then increase with the drop of the fuel equivalence

收稿日期: 2022-04-25。 作者简介: 耿卅捷(1998—),女,硕士生;刘银河(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 陕西省重点研发计划资助项目(2021GXLH-Z-088)。

网络出版时间: 2022-08-04

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220804.0841.002.html>

ratio. The recommended fuel equivalence ratio is 0.48 when the hydrogen blending ratio is 30%. Under a constant thermal load; If the fuel equivalence ratio remains constant, the concentration of CO and CO₂ will decrease with hydrogen blending, but there will be overheated gas and excessive NO_x emissions at the outlet. If the hydrogen blending ratio remains constant, the combustion temperature will decrease together with the concentration of NO_x and CO₂, and the concentration of CO will first decrease and then increase with the drop of the fuel equivalence ratio. The recommended fuel equivalence ratio is 0.47 when the hydrogen blending ratio is 30%. In conclusion, blending hydrogen in gas turbines for lean combustion can reduce combustion temperature and achieve low emissions of NO_x, CO and CO₂. The research results can provide reference for the design and operation of hydrogen gas turbines.

Keywords: gas turbines; hydrogen blending; combustion characteristics; emission characteristics

燃气轮机被誉为制造工业“皇冠上的明珠”，在环保性、清洁性、灵活性等方面具有突出优势，中国燃机发电容量近年来不断升高^[1]。燃气轮机排放碳氧化物、未燃尽碳氢化合物和氮氧化物(NO_x)等污染物。为达到环保法规日益严格的污染物排放要求，燃机采用贫燃技术控制燃烧温度实现低 NO_x 排放^[2]，但严重偏离当量比又会引起燃烧不稳定^[3]，导致 CO 排放量增加、燃烧效率下降等问题。

文献[4]研究表明：氢气燃烧速度快，火焰温度高(如表 1 所示)，在工业生产中受到越来越多的关注。国际能源署数据显示，截至 2019 年，全球各国针对天然气管网掺氢输送的示范项目有 37 个^[5]，天然气中掺氢比高达 20%(体积分数，下文掺氢比均为体积分数)。近年来，掺氢燃烧技术因具有燃烧高效、清洁低碳等优点，已成为目前的研究热点。

表 1 常温常压下氢气和甲烷性质的对比

Table 1 Comparison of hydrogen and methane properties

参数	数值	
	氢气	甲烷
相对分子质量	2.016	16.043
密度/(kg·m ⁻³)	0.083	0.659
空气中最小点火能量/MJ	0.017	0.274
完全燃烧时的空燃比	2.38	9.52
低位质量热值/(MJ·kg ⁻¹)	119.93	50.02
低位体积热值/(MJ·m ⁻³)	10.22	35.90
燃烧热量温度/K	2 318	2 148
空气中的层流燃烧速度/(cm·s ⁻¹)	265~325	34~37

国内外学者对不同火焰及终端设备恒定热输入掺氢情况下的燃烧性能得出了不同结论。Patel 等^[6]研究结果表明，掺氢使得旋流火焰长度变短，CO 排放降低，NO_x 排放增加。Shih 等^[7]研究结果

表明，掺氢使得微型烟气轮机燃烧稳定性增强，燃烧温度和 NO_x 排放降低，火焰更宽更短，但 CO 排放大幅增加，燃烧效率下降。Rajpara 等^[8]对自行设计的燃气轮机燃烧室进行了掺氢的试验及模拟研究，结果表明，在较高的氢浓度下，火焰相对更宽更短。掺氢提高了火焰速度、温度及化学反应速率降低了 CO 排放，但火焰温度的升高带来了 NO_x 排放增高的问题。

不同热设备在恒定燃料体积流量掺氢下的燃烧性能也有所差异。Meziane 等^[9]研究了天然气-氢混合燃料对罐式燃烧器燃烧性能及污染物排放的影响，结果表明，向天然气中添加 10% 的氢气，CO 和 NO_x 排放量分别减小了约 60% 和 14%，然而平均出口温度的降低使得微型燃气轮机的输出功率降低。冷先银等^[10]研究发现，掺氢提高了发动机燃烧温度，提高了热效率，减少了 CO 排放，增加了 NO_x 排放。Shih 等^[7]的研究结果表明，掺氢使得火焰温度升高，燃烧室热负荷下降。Rajpara 等^[8]的研究结果表明，掺氢提高了燃气轮机燃烧室的火焰温度，降低了火焰尺寸，减少了 CO 排放，同时略微增加了 NO_x 排放。

氢气是一种反应活性较高的气体，天然气中加入氢气可以拓宽燃料贫燃极限。刘兵等^[11-12]研究发现，发动机在稀燃下可以得到较低的 HC、CO、CO₂ 和 NO_x 排放量。

综上所述可知，不同的掺氢工况会对燃烧产生不同的影响，不同终端设备掺氢之后的表现不尽相同，燃气轮机掺氢之后稀燃方面的研究还有待深入开展。因此，本文对某燃气轮机燃烧室掺氢燃烧进行数值模拟研究，分析掺氢比及燃料当量比对其燃烧及排放特性的影响，旨在对燃气轮机燃烧室的掺氢设计与使用提供一定参考。

1 燃烧室的几何结构

1.1 研究对象

本文以某型燃气轮机燃烧室为研究对象,该燃气轮机采用贫预混旋流燃烧技术^[13-14],燃料气分为两路进气(见图 1),分别为流量占比 2% 的值班燃料气和流量占比 98% 的主燃料气。其中,值班燃料气采用扩散燃烧方式,通过 8 个燃料喷嘴进入^[15],而助燃空气经轴向旋流器旋流进入。主燃料气(也称预混燃料气)采用预混燃烧方式。主燃料与助燃空气流经角向旋流器混合后经旋流器进入燃烧室燃烧^[16]。

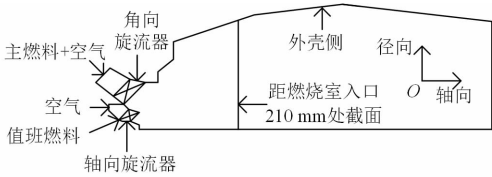


图 1 燃烧室示意

Fig. 1 Schematic diagram of the combustor

1.2 计算域

燃气轮机的结构具有周期性,故计算域选为单头部燃烧室扇形段。为了降低网格数量、节省计算资源,本文对燃烧室头部进行一定简化:

- (1) 值班燃料由 4 个燃料喷嘴进入,保证简化前后入口截面流速相同;
- (2) 从主燃料助燃空气入口处直接通入主燃料与助燃空气的预混气;
- (3) 通过在边界条件中设置径向速度分量来体现旋流器对气流流动的影响^[17]。

2 数值模拟

2.1 网格无关性验证

本文计算区域采用四面体网格,为了提高计算精度,对燃烧室头部区域进行了局部网格加密,如图 2 所示。正式计算前进行网格无关性验证,当网格

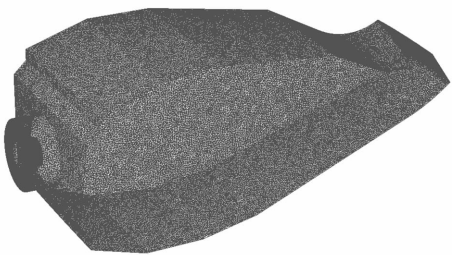
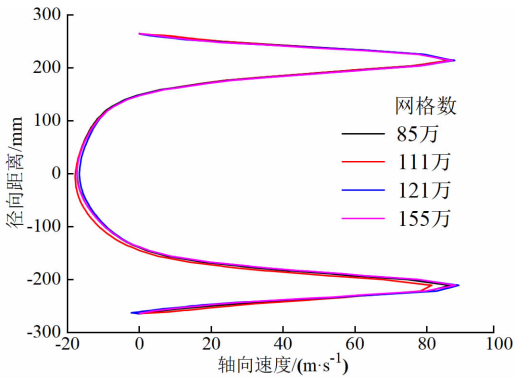


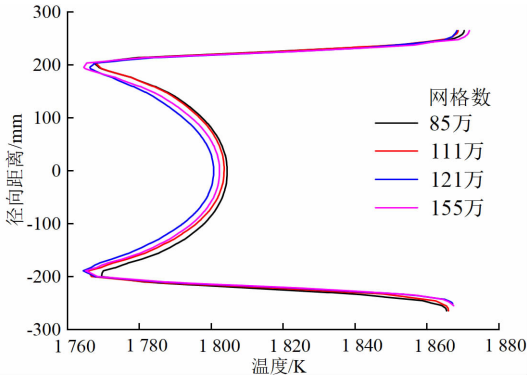
图 2 燃烧室的网格划分

Fig. 2 Grid generation of the of combustor

数超过 111 万时,距燃烧室入口 210 mm 处的轴向速度和温度分布不再随网格增加明显变化,详见图 3,因此本文采用 111 万网格进行计算。



(a) 距燃烧室入口 210 mm 处的轴向速度分布



(b) 距燃烧室入口 210 mm 处的温度分布

图 3 燃烧室网格无关性验证

Fig. 3 Grid independence verification of combustor

2.2 数学模型

采用 RANS(雷诺时均方法)模拟湍流平均速度、平均标量场以及平均作用力,选用 realizable $k-\epsilon$ 湍流模型模拟湍流流动,以提高对燃烧室中旋流流动预测的准确性,正确捕捉回流区范围。

燃气轮机燃烧室中发生的燃烧反应为快速反应,因此采用通用有限速度模型来模拟燃烧室气相湍流燃烧过程。本文使用能够综合考虑化学反应与湍流的相互作用的有限速率/涡耗散模型燃烧模型,可计算阿列尼乌斯反应速率与湍流反应速率并取两者较小值。燃烧机理采用文献[18]给出的 JL-2 甲烷 4 步燃烧反应机理。

由于 NO_x 生成反应的时间尺度比燃料燃烧的湍流混合时间尺度要大得多,且生成所产生的质量和热量对燃烧流场的影响较小^[19],因此本文基于稳定的燃烧流场采用后处理的方法来计算 NO_x 生成

量。考虑热力型 NO_x 及快速型 NO_x 的生成,其中热力型 NO_x 的 O 和 OH 基团摩尔分数基于部分平衡假设,采用 PDF 模型考虑湍流和化学反应的耦合作用。

2.3 边界条件

燃料及空气入口为速度入口,燃烧室外环为无滑移绝热壁面;两个周向边界设为周期性边界条件,燃烧室出口采用压力出口边界条件。工况条件见表 2。

表 2 工况条件
Table 2 Operational conditions

参数	数值
燃料质量流量/(kg·s ⁻¹)	0.717
值班燃料流量占比/%	2
空气压力/MPa	1.63
值班燃料设计当量比	0.36
预混燃料设计当量比	0.53
燃烧室压力损失/Pa	45 800

由管网掺氢试验及燃料互换性的相关计算^[20-24]可知,能够满足管道运输及 12T 天然气指标^[25]的燃料掺氢比约为 0~27%。所以,本文研究燃料掺氢比为 0~30%、间隔为 5%的各个工况下燃气轮机的燃烧特性及排放特性。掺氢比是指掺氢之后氢气的体积流量占总燃料体积流量的比例,公式为

$$\alpha(\text{H}_2) = \frac{q_v(\text{H}_2)}{q_v(\text{H}_2) + q_v(\text{CH}_4)} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\alpha(\text{H}_2)$ 为掺氢比; $q_v(\text{H}_2)$ 、 $q_v(\text{CH}_4)$ 分别为氢气和甲烷的体积流量。

因为值班燃料占比较少(仅占总燃料的 2%),值班燃料的助燃空气量很小,所以当燃料组分变化时,仅考虑值班燃料和主燃料组分和流量的变化、主燃料助燃空气量的变化,不讨论值班燃料助燃空气量的变化。针对燃气轮机的应用场景,考虑两个掺氢工况。

(1)掺氢前后燃料体积流量不变,此时燃料射流速度不变,掺氢前后燃料喷射压力相同,燃料输入热功率会有变化。

(2)掺氢前后燃料输入热功率不变,此时热负荷恒定,电力输出恒定,燃料体积流量需要调整。燃料输入热功率公式为

$$Q = q_v(\text{H}_2)q(\text{H}_2) + q_v(\text{CH}_4)q(\text{CH}_4) \quad (2)$$

式中: Q 为燃料输入热功率; $q(\text{H}_2)$ 、 $q(\text{CH}_4)$ 分别为氢气和甲烷的低位体积热值。

3 数值计算结果

3.1 计算结果验证

燃气轮机燃烧室的工作过程具有高温、高气流速度、高燃烧强度以及高过量空气系数等特点。将本文计算结果与文献[26]进行比较,结果如表 3 所示。可以看出,本文数值计算结果精度较好。

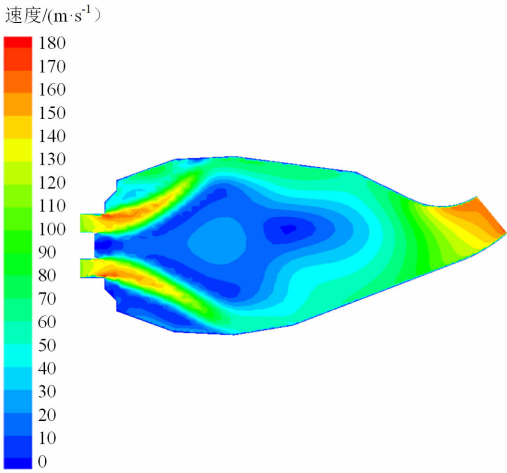
表 3 计算结果验证

Table 3 Validation of calculation results

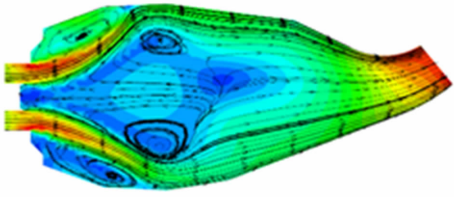
来源	出口截面平均燃气温度/K	出口截面平均燃气流速/(m·s ⁻¹)
文献[26]	1 832	170.0
本文计算	1 839	171.6
与文献值误差	0.38%	0.93%

3.1.1 燃料为纯甲烷时的速度分布

纯甲烷燃烧时,燃气轮机燃烧室中心截面的速度分布及流线如图 4 所示。可以看出,燃烧室存在两个回流区,分别为外部回流区和中心回流区^[27]。外部回流区是由于气体燃料和空气进入燃烧室后燃烧区域突扩形成的。中心回流区是燃料和空气旋流



(a)速度分布



(b)流线

图 4 纯甲烷燃烧时燃烧室中心截面的速度分布及流线
Fig. 4 Velocity distribution and streamline of central section in combustor of pure CH₄

进入,导致在燃烧室中心形成的一个大范围的回流区,其增加了高温燃气停留时间,有利于气体燃料的充分燃烧,减少未燃尽混合物排放。燃烧室尾部气体流通截面积的减小造成了燃气流速增加,出口截面燃气平均流速约为 171.6 m/s。

3.1.2 燃料为纯甲烷时的温度分布

纯甲烷燃烧时,燃气轮机燃烧室中心截面的温度分布如图 5 所示。可以看出,燃烧室内整体温度为 1 800~1 850 K。这是由于算例中直接通入预混燃料气,主燃料与助燃空气混合均匀。同时,燃烧室表面敷设耐热材料,从而大大降低了热损失。整个燃烧室温度均匀,仅在值班燃料入口处存在一个燃烧温度为 2 000 K 左右的局部高温区。

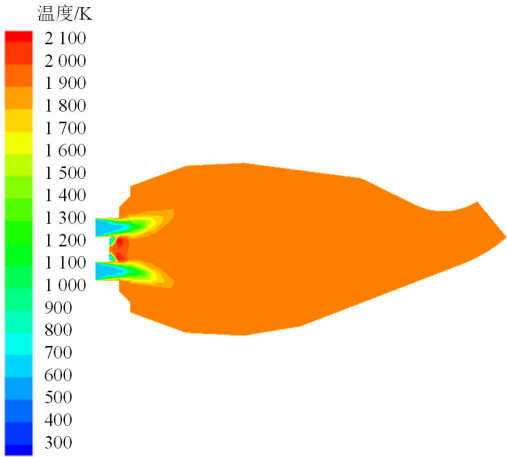


图 5 纯甲烷燃烧时燃烧室中心截面的温度分布
Fig.5 Temperature distribution of central section in combustor of pure CH₄

3.1.3 燃料为纯甲烷时的 NO_x 分布

纯甲烷燃烧时,燃烧室中心截面的 NO_x 分布如图 6 所示。图中,φ(NO_x)为 NO_x 的体积分数。可以看出,在值班燃料入口处,NO_x 含量最高,出口截面燃气 NO_x 含量较低,约为 2.64 μL/L。NO_x 排放主要受燃烧温度、燃烧均匀性、停留时间共 3 方面因素影响^[28]。在值班燃料入口处,温度分布不均匀,所以 NO_x 含量最高;在燃烧室内,温度分布均匀,所以 NO_x 含量较低。

3.2 燃料体积流量不变时掺氢对燃烧及排放特性的影响

3.2.1 设计当量比下的掺氢燃烧特性

本文研究了当燃料的体积流量恒定(0.062 m³/s)且燃料当量比为设计值 0.53 时,掺氢对燃烧以及排放特性的影响。

不同掺氢比下的燃烧特性如图 7 所示。可以看

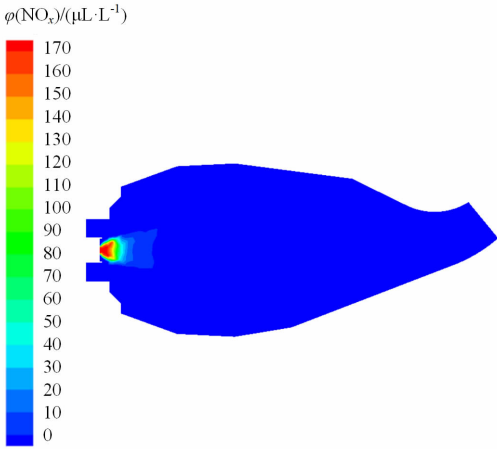


图 6 纯甲烷燃烧室中心截面的 NO_x 分布
Fig.6 NO_x distribution of central section in combustor of pure CH₄

出:随着掺氢比的增加,燃烧室内的最高燃烧温度 T_{max} 和燃烧室的出口截面燃气平均温度 T_{out,avg} 均升高;燃烧室最高燃烧温度升高速率减缓,出口截面的燃气平均温度随掺氢比的增加呈近似线性升高的趋势。在控制燃料入口体积流量恒定的前提下,掺氢导致燃烧室热负荷随着掺氢比的增加而线性减小。

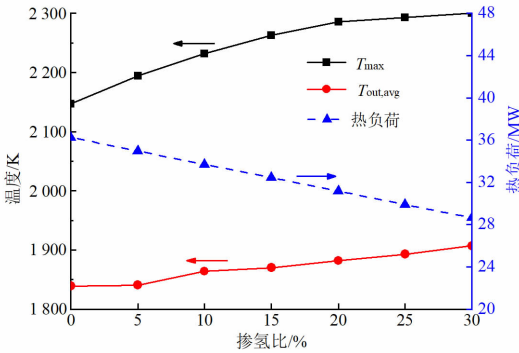


图 7 恒定燃料体积流量下掺氢设计当量比的燃烧特性
Fig.7 Combustion characteristics at a constant fuel flow rate,designed equivalence ratio

燃烧温度的升高可能造成燃气超温,导致对涡轮叶片等热部件的损坏,同时会带来燃烧室的冷却问题。氢气的体积热值低于甲烷的,导致燃料的输入热量随着掺氢比的增加而线性减小,燃烧室出口的热负荷降低。维持设计当量比,掺氢之后空气体积流量减小。因此,随着掺氢比的增加,燃料和空气总体积流量减小,燃气的体积流量减小。

不同掺氢比下的排放特性如表 4 所示。可以看出:随着掺氢比的增加,燃气中的 CO₂ 含量显著下降,CO 含量略微下降,NO_x 含量明显升高,排放总量升高,相同热负荷(100 MW,下同)下的排放量升

高。当掺氢比从 0 变为 30% 时,燃气中 CO₂ 含量降低 15%,NO_x 含量升高 362.07%,NO_x 排放总量升高 326.97%,相同热负荷下的 NO_x 排放总量升高 438.79%。

表 4 恒定燃料体积流量下掺氢设计当量比的污染物排放量

Table 4 Pollutant emissions at a constant fuel flow rate,
designed equivalence ratio

$\alpha(\text{H}_2)/\%$	$\varphi(\text{NO}_x)/(\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1})$	NO _x 排放总量/ (kg·h ⁻¹)	相同热负荷下的 NO _x 排放量/ (kg·h ⁻¹)	CO 排放摩尔份额 /10 ⁻⁷	CO ₂ 排放摩尔份额 /10 ⁻²
0	2.639	0.419	0.116	1.461	5.231
5	3.130	0.464	0.133	1.413	5.072
10	3.871	0.644	0.191	1.405	5.015
15	4.905	0.819	0.253	1.386	4.917
20	6.472	0.989	0.317	1.351	4.757
25	9.017	1.310	0.438	1.317	4.582
30	12.194	1.789	0.625	1.299	4.432

氢气掺混起到了降碳的作用,同时其较高的反应活性促进了 CO 燃烧转化,使得燃气中 CO 浓度下降。氢气燃烧速度快,在燃烧室的停留时间短,有利于 NO_x 减排,但是掺氢之后温度的升高导致热力型 NO_x 排放的升高占主导地位,因此掺氢导致了 NO_x 浓度上升,NO_x 排放总量升高,相同热负荷下产生的 NO_x 总量升高。

综上可知,在燃料体积流量恒定的条件下,掺氢使得燃烧温度上升,导致燃气中 NO_x 排放增加。但是,由于氢气掺混可以拓宽传统碳氢燃料的贫燃极限,使得掺氢天然气能够实现在稀薄条件(低于燃机设计当量比)下的稳定燃烧,因此本文进一步探究了掺氢时稀燃下的燃烧及排放特性。

3.2.2 掺氢后的稀燃特性

氢气掺混得越多,燃料能够达到的贫燃极限就越低,即掺氢比越大,研究的当量比变化的范围就越大。为使研究结果具有普适性,本文选取了较宽的当量比范围。工况条件如表 5 所示。其中,下限选定为在燃料及空气恒定体积流量下掺氢时的折算当量比 φ_z ,上限选定为设计当量比,间隔选为 0.01。

燃料体积流量不变,掺氢后稀燃情况下的燃烧特性见图 8。可以看出,在相同掺氢比下,燃烧温度随着当量比降低而降低。燃烧室最高燃烧温度在当量比为 0.50~0.53 时变化不大。随着当量比进一

步降低,燃烧室最高燃烧温度呈现出明显降低趋势。出口截面燃气平均温度随着当量比的降低呈现出近线性降低的趋势。这是因为在相同的掺氢比下,当量比降低意味通入的空气量增多,从而稀释了燃烧,降低了燃烧温度,使得燃烧最高温度和燃烧室出口截面燃气平均温度降低,而且稀释作用会随着当量比的降低而逐渐显著。

表 5 燃料及空气恒定体积流量下掺氢时的折算当量比

Table 5 Converted equivalent ratio at a constant fuel and air
flow rate

$\alpha(\text{H}_2)/\%$	0	5	10	15	20	25	30
φ_z	0.53	0.51	0.49	0.47	0.45	0.43	0.41

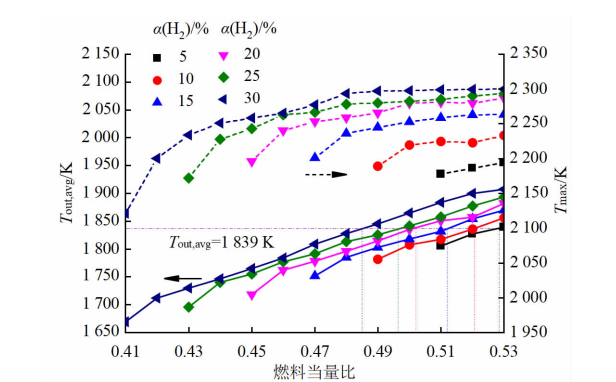


图 8 恒定燃料体积流量掺氢稀燃下的燃烧特性
Fig. 8 Combustion characteristics at a constant fuel flow rate with lean combustion

掺氢之后调整当量比进行燃烧。当出口截面燃气平均温度低于或等于纯甲烷燃烧的出口截面燃气平均温度 1 839 K 时,可解决燃气超温的问题,将满足该条件的最大当量比定义为推荐当量比 φ_t 。不同掺氢比下的推荐当量比如表 6 所示。

表 6 恒定燃料体积流量不同掺氢比下的推荐当量比

Table 6 Recommended equivalent ratio at a constant fuel
flow rate

$\alpha(\text{H}_2)/\%$	0	5	10	15	20	25	30
φ_t	0.53	0.52	0.52	0.51	0.50	0.49	0.48

恒定燃料体积流量掺氢稀燃的排放特性见图 9。可以看出,在相同的掺氢比下,随着当量比的降低,燃气中 NO_x 浓度呈现出指数型下降的趋势,CO₂ 浓度呈现出近似于直线下降的趋势,CO 浓度先降低后升高。

在相同的掺氢比下,当量比降低时空气量增加,

燃烧温度降低,因此 CO_2 和 NO_x 浓度下降。但是,贫燃降低了燃烧稳定性,加剧了燃料的不完全燃烧,故 CO 浓度呈现先降低后升高的趋势。

出,与纯甲烷燃烧时相比,掺氢使得 NO_x 浓度及排放总量下降,相同热负荷下 NO_x 排放总量降低。这表明掺氢后应该控制燃料当量比小于或等于推荐当量比。

3.3 热负荷不变时掺氢对燃烧及排放特性的影响

3.3.1 设计当量比下的掺氢燃烧特性

在恒定热负荷(364 MW)、当量比维持设计值 0.53 时,不同掺氢比下燃烧室中心截面的温度分布见图 10,燃烧特性见图 11。结合两幅图可以看出,掺氢对燃烧室中的温度分布均匀性影响较小,但随着掺氢比的增加,燃烧开始的位置提前,燃烧室内的燃烧温度升高,燃烧室最高燃烧温度和出口截面的燃气平均温度随掺氢比的增加而呈现近线性升高的趋势,且燃烧室内的最高温度始终出现在值班燃料入口处的局部高温区中。

当掺氢比从 0 变化到 5% 时,主燃料进入后形成的低温区的形状未产生较大变化;当掺氢比从 5% 变化到 30% 时,该低温区的形状明显变小,说明掺氢比提高使得燃烧位置提前,同时伴随着局部高温区的燃烧温度升高。氢气的体积热值低于甲烷。由式(2)可知,掺氢之后需增加燃料体积流量,才能保证燃气轮机热负荷不变。同时,氢气完全燃烧时,化学计量比小于甲烷,掺氢之后所需空气体积流量减小。最终,这二者导致随着掺氢比的增加,燃料和空气总体积流量减小,燃气的体积流量减小。

恒定热负荷、设计当量比下的排放特性见表 8。随着掺氢比的增加,燃气中的 CO_2 含量显著下降, CO 含量略微下降, NO_x 含量明显升高。当掺氢比从 0 变化为 30% 时,出口燃气中的 CO_2 含量降低 21%, NO_x 含量升高 313.57%, NO_x 排放总量升高 289.50%。

表 8 恒定热负荷、设计当量比下的污染物排放
Table 8 Pollutant emissions at a constant thermal load, designed equivalence ratio

$\alpha(\text{H}_2)/\%$	$\varphi(\text{NO}_x)/(\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1})$	NO_x 排放总量/ ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)	CO 排放 摩尔份额 / 10^{-7}	CO_2 排放 摩尔份额 / 10^{-2}
0	2.639	0.419	1.461	5.231
5	3.281	0.517	1.405	5.031
10	4.149	0.649	1.383	4.816
15	5.294	0.819	1.368	4.683
20	6.875	1.056	1.322	4.411
25	9.286	1.410	1.308	4.254
30	10.914	1.632	1.272	4.108

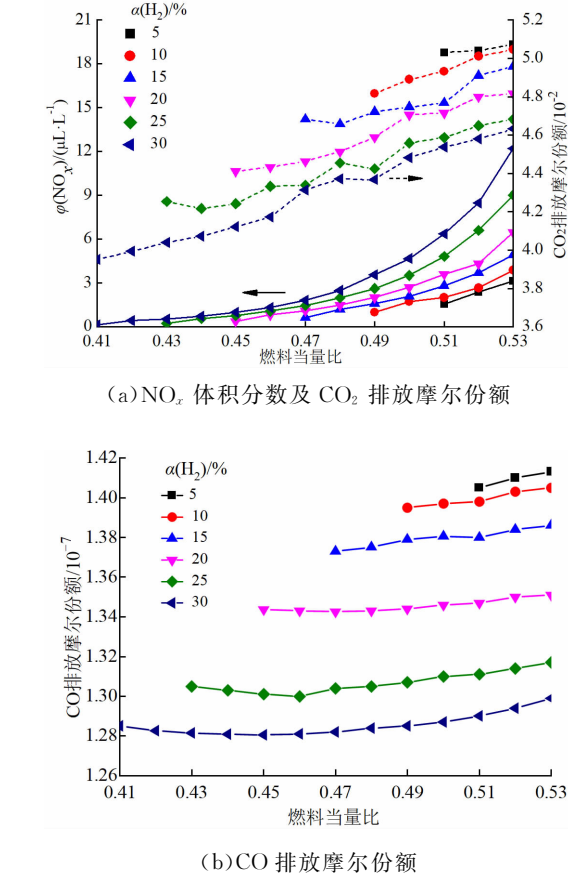


图 9 恒定燃料体积流量掺氢稀燃下的排放特性
Fig. 9 Emission characteristics at a constant fuel flow rate with lean combustion

恒定燃料体积流量掺氢时,不同掺氢比下按照推荐当量比燃烧时的 NO_x 排放特性见表 7。可以看表 7 恒定燃料体积流量下掺氢推荐当量比的 NO_x 排放量

Table 7 NO_x emission at a constant fuel flow rate, recommended equivalence ratio

$\alpha(\text{H}_2)/\%$	$\varphi(\text{NO}_x)/(\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1})$	NO_x 排放总量/ ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)	相同热负荷下 NO_x 排放量/($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)
0	2.639	0.419	0.116
5	2.366	0.379	0.100
10	2.658	0.375	0.111
15	2.812	0.364	0.112
20	2.703	0.332	0.106
25	2.625	0.291	0.097
30	2.493	0.261	0.091

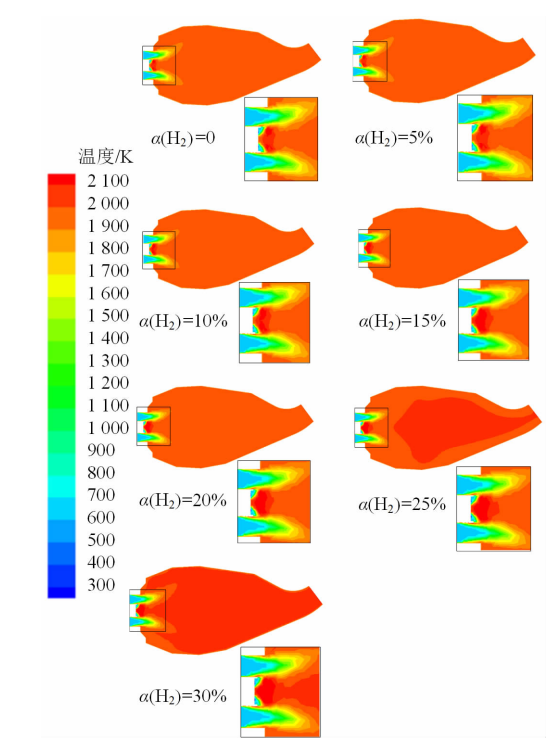


图 10 恒定热负荷、设计当量比下的燃烧室中心截面温度分布
Fig. 10 Temperature distributions of central section in combustor at a constant thermal load, designed equivalence ratio

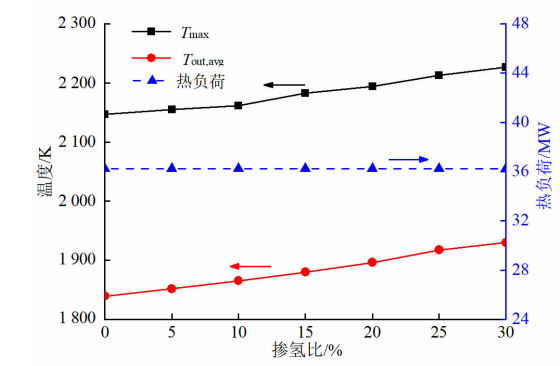


图 11 恒定热负荷、设计当量比下的燃烧特性
Fig. 11 Combustion characteristics at a constant thermal load, designed equivalence ratio

在恒定热负荷、维持设计当量比燃烧的掺氢工况下,掺氢使得燃烧温度升高,燃气中 NO_x 排放升高,因此考虑减小当量比降低燃烧温度以保护叶片,同时减少 NO_x 排放。

3. 3. 2 掺氢后稀燃的特性

恒定热负荷、变当量比时的燃烧特性见图 12。可以看出,在相同的掺氢比下,随着当量比降低,燃烧室内的燃烧温度降低,且燃烧室最高燃烧温度和出口截面的燃气平均温度呈现近线性降低的趋

势。在相同当量比下,随着掺氢比的增大,燃烧室内的燃烧温度升高,燃烧室最高燃烧温度和出口截面的燃气平均温度随掺氢比的增加而增高。不同掺氢比下的推荐当量如表 9 所示。

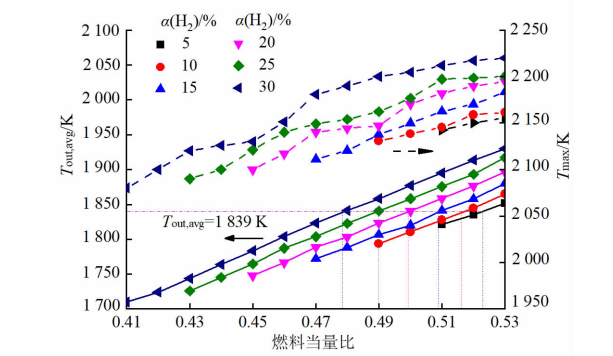


图 12 恒定热负荷稀燃下的燃烧特性
Fig. 12 Combustion characteristics at a constant thermal load with lean combustion

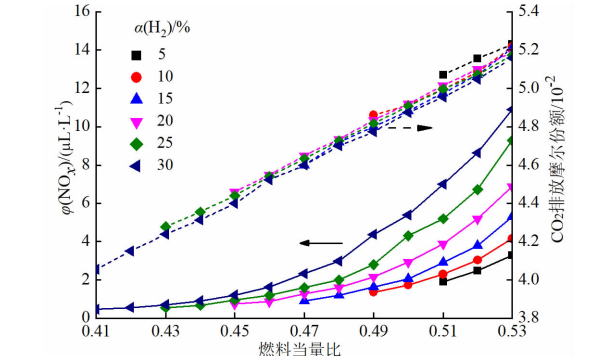
表 9 恒定热负荷不同掺氢比下的推荐当量比

$\alpha(\text{H}_2)/\%$	0	5	10	15	20	25	30
φ_t	0.53	0.51	0.51	0.50	0.49	0.48	0.47

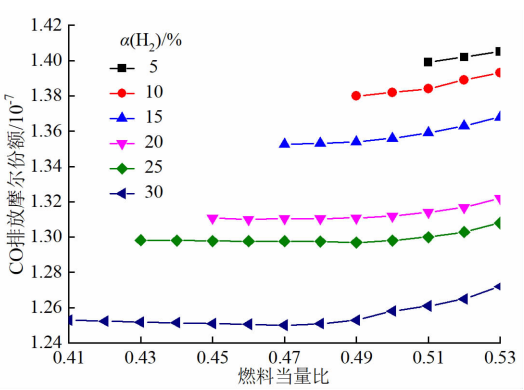
恒定热负荷、变当量比时的排放特性见图 13。可以看出,在同一掺氢比下随着当量比的降低,燃气中 NO_x 浓度和 CO_2 浓度降低, CO 浓度先降低后升高,其中, NO_x 浓度随着当量比的降低呈现出近似指数型下降的趋势。 CO_2 浓度随着当量比的降低呈现出线性降低的趋势。

恒定热负荷掺氢时,不同掺氢比下按照推荐当量比燃烧时的 NO_x 排放特性见表 10。可以看出,掺氢之后控制燃料当量比为推荐当量比时可以减少 NO_x 排放。

综合分析可知,维持热负荷恒定时,掺氢天然气



(a) NO_x 体积分数及 CO_2 排放摩尔份额



(b)CO 排放摩尔份额

图 13 恒定热负荷掺氢稀燃下的排放特性

Fig. 13 Emission characteristics at a constant thermal load with lean combustion

可以通过稀燃的方式降低燃烧温度,降低燃气中的 NO_x 、 CO 、 CO_2 浓度。

表 10 恒定热负荷、推荐当量比下的 NO_x 排放量

Table 10 NO_x emission at a constant thermal load, recommended equivalence ratio

$\alpha(\text{H}_2)/\%$	$\varphi(\text{NO}_x)/(\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1})$	NO_x 排放总量/ $(\text{kg} \cdot \text{h}^{-1})$
0	2.639	0.419
5	1.896	0.296
10	2.292	0.347
15	2.059	0.305
20	2.158	0.316
25	2.162	0.309
30	2.323	0.324

4 结 论

在天然气中掺入氢气可以拓宽贫燃极限、提高燃烧效率,具有降低 NO_x 的潜力,也是减少燃气轮机碳排放的一种新兴方法。本文对某燃气轮机中掺氢燃烧进行了数值模拟研究,预测了燃用掺氢天然气之后的燃烧特性及排放特性,分析了氢气在混合燃料中的作用,可为燃气轮机燃烧室的掺氢设计与运行提供参考。

(1)维持燃料体积流量恒定,掺氢之后燃气轮机热负荷下降。维持设计当量比燃烧时,掺氢使得最高燃烧温度和出口截面平均温度升高。燃气中 NO_x 含量升高, CO 和 CO_2 含量降低。当掺氢比从0变为30%时, CO_2 含量降低15%, NO_x 含量升高362.07%, NO_x 排放总量升高326.97%,相同热负荷下的 NO_x 排放总量升高438.79%。掺氢后,燃

机运行有超温和 NO_x 排放超标的风险。

(2)维持燃料体积流量恒定,在相同的掺氢比下,随着当量比的降低,最高燃烧温度及出口截面燃气平均温度降低。燃气中 NO_x 浓度降低, CO_2 浓度降低, CO 浓度先降低后上升。

(3)维持燃料输入热量不变,掺氢之后燃气轮机热负荷不变。维持设计当量比燃烧时,掺氢使得最高燃烧温度及出口截面燃气平均温度升高,增加了燃气超温的风险。燃气中 NO_x 含量升高, CO 和 CO_2 含量降低。当掺氢比从0变为30%时,燃气中的 CO_2 含量降低21%, NO_x 含量升高313.57%, NO_x 排放总量升高289.50%。

(4)维持燃料输入热量不变,相同的掺氢比下,随着当量比的降低,燃烧室最高燃烧温度及出口截面燃气平均温度降低。燃气中 NO_x 含量降低, CO_2 含量降低, CO 含量先降低后上升。掺氢之后可以通过稀燃的方式降低燃烧温度,降低燃气中 NO_x 、 CO 、 CO_2 含量,降低 NO_x 排放总量。

参考文献:

[1] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴 2021 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.

[2] 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 Suhui, ZHANG Guihua, WU Yuxin. Advanced combustion technologies for future gas turbines [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(12): 1423-1437.

[3] 李祥晟, 丰镇平. 贫油预混燃烧室燃烧稳定性的数值研究 [J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(5): 502-505, 526.

LI Xiangsheng, FENG Zhenping. Numerical study on combustion instability in a lean premixed combustor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(5): 502-505, 526.

[4] 李敬法, 苏越, 张衡, 等. 掺氢天然气管道输送研究进展 [J]. 天然气工业, 2021, 41(4): 137-152.

LI Jingfa, SU Yue, ZHANG Heng, et al. Research progresses on pipeline transportation of hydrogen-blended natural gas [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(4): 137-152.

[5] 谢萍, 伍奕, 李长俊, 等. 混氢天然气管道输送技术研究进展 [J]. 油气储运, 2021, 40(4): 361-370.

XIE Ping, WU Yi, LI Changjun, et al. Research progress on pipeline transportation technology of hydro-

- gen-mixed natural gas [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2021, 40(4): 361-370.
- [6] PATEL V, SHAH R. Effect of hydrogen enrichment on combustion characteristics of methane swirling and non-swirling inverse diffusion flame [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(52): 28316-28329.
- [7] SHIH H Y, LIU Chirong. A computational study on the combustion of hydrogen/methane blended fuels for a micro gas turbines [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(27): 15103-15115.
- [8] RAJPARA P, SHAH R, BANERJEE J. Effect of hydrogen addition on combustion and emission characteristics of methane fuelled upward swirl can combustor [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(36): 17505-17519.
- [9] MEZIANE S, BENTEBICHE A. Numerical study of blended fuel natural gas-hydrogen combustion in rich/quench/lean combustor of a micro gas turbine [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(29): 15610-15621.
- [10] 冷先银, 葛琪琪, 何志霞, 等. 预燃室式天然气掺氢发动机燃烧及排放模拟 [J]. *内燃机学报*, 2021, 39(1): 26-33.
- LENG Xianyin, GE Qiqi, HE Zhixia, et al. Numerical study on the combustion and emission characteristics of a pre-chamber engine fueled with hydrogen enriched compressed natural gas [J]. *Transactions of CSICE*, 2021, 39(1): 26-33.
- [11] 刘兵, 黄印玉, 黄佐华, 等. 天然气掺氢火花点火发动机性能与排放研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2006, 40(11): 1268-1271, 1284.
- LIU Bing, HUANG Yinyu, HUANG Zuohua, et al. Experimental study on performance and emissions of a spark ignition engine fuelled with CNG-hydrogen mixtures [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2006, 40(11): 1268-1271, 1284.
- [12] 刘兵, 黄佐华, 曾科, 等. 天然气掺氢火花点火式发动机排放性能研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2008, 42(2): 243-247.
- LIU Bing, HUANG Zuohua, ZENG Ke, et al. Experimental investigation on emissions of a spark-ignition engine fuelled with hydrogen enriched natural gas [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2008, 42(2): 243-247.
- [13] 付忠广, 石黎, 刘炳含, 等. 某重型燃机环形燃烧室内 NO_x 生成的数值研究 [J]. *热能动力工程*, 2016, 31(4): 52-58, 144.
- FU Zhongguang, SHI Li, LIU Binghan, et al. Numerical simulation of NO_x formation in a heavy duty gas turbine annular combustion chamber [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2016, 31(4): 52-58, 144.
- [14] 张栋芳, 崔耀欣, 何磊. SGT5-4000F 型燃气轮机燃烧室介绍 [J]. *热力透平*, 2010, 39(4): 248-250, 263.
- ZHANG Dongfang, CUI Yaoxin, HE Lei. Introduction of combustor for Siemens SGT5-4000F gas turbine [J]. *Thermal Turbine*, 2010, 39(4): 248-250, 263.
- [15] SENGISSEN A X, GIAUQUE A V, STAFFELBACH G S, et al. Large eddy simulation of piloting effects on turbulent swirling flames [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(2): 1729-1736.
- [16] DARBYSHIRE O R, WILSON C W, EVANS A, et al. CFD based analysis of burner fuel air mixing over a range of air inlet and fuel pre-heat temperatures for a Siemens V94.3A gas turbine burner [C] // *ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea, and Air*. New York, NY, USA: ASME, 2006: 709-714.
- [17] FU Zaiguo, GAO Huanhuan, ZENG Zhuoxiong, et al. Numerical analysis on multi-field characteristics and synergy in a large-size annular combustion chamber with double swirlers [J]. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2020, 122(3): 805-830.
- [18] 石黎. 高压燃烧室内湍流燃烧过程的大涡模拟与实验研究 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2017.
- [19] 薛瑞, 胡春波, 石硕, 等. 水蒸气对非预混燃烧室 NO_x 排放数值模拟研究 [J]. *推进技术*, 2015, 36(2): 238-245.
- XUE Rui, HU Chunbo, SHI Shuo, et al. Numerical investigation of steam diluent effect on flow field and NO_x emissions for diffusion combustors [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(2): 238-245.
- [20] 罗子萱, 徐华池, 袁满. 天然气掺混氢气在家用燃气具上燃烧的安全性及排放性能测试与评价 [J]. *石油与天然气化工*, 2019, 48(2): 50-56.
- LUO Zixuan, XU Huachi, YUAN Man. Safety and emission performance test and evaluation of natural gas mixed with hydrogen combustion on domestic gas appliances [J]. *Chemical Engineering of Oil & Gas*, 2019, 48(2): 50-56.
- [21] 严荣松, 高文学, 张杨竣, 等. 含氢天然气在家用天然气燃具上的燃烧性能测试 [J]. *天然气工业*, 2018, 38(2): 119-124.
- YAN Rongsong, GAO Wenxue, ZHANG Yangjun, et al. Combustion performance tests of hydrogen-natural gas mixtures as fuels in domestic gas appliances [J].

- Natural Gas Industry, 2018, 38(2): 119-124.
- [22] 马向阳, 黄小美, 吴嫦. 天然气掺氢对家用燃气灶燃烧特性的影响研究 [J]. 可再生能源, 2018, 36(12): 1746-1751.
- MA Xiangyang, HUANG Xiaomei, WU Chang. Study on the influence of natural gas hydrogenation on combustion characteristics of domestic gas cooker [J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36 (12): 1746-1751.
- [23] 黄明, 吴勇, 文习之, 等. 利用天然气管道掺混输送氢气的可行性分析 [J]. 煤气与热力, 2013, 33(4): 39-42.
- HUANG Ming, WU Yong, WEN Xizhi, et al. Feasibility analysis of hydrogen transport in natural gas pipeline [J]. Gas & Heat, 2013, 33(4): 39-42.
- [24] GE Bing, JI Yongbin, ZHANG Zilai, et al. Experiment study on the combustion performance of hydrogen-enriched natural gas in a DLE burner [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44 (26): 14023-14031.
- [25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 城镇燃气分类和基本特性: GB/T 13611—2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [26] 朱杰文, 刘江, 翁培奋, 等. F 级燃气轮机环形燃烧室设计方法的研究 [J]. 上海电力大学学报, 2020, 36 (2): 168-172, 178.
- ZHU Jiewen, LIU Jiang, WENG Peifen, et al. Design method of annular combustor for F-class heavy duty gas turbine [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2020, 36(2): 168-172, 178.
- [27] 蔡季雨, 陈明敏. 燃气轮机环形燃烧室热态性能研究 [J]. 热力透平, 2017, 46(2): 111-116.
- CAI Jiyu, CHEN Mingmin. Study on thermal performance of gas turbine annular combustor [J]. Thermal Turbine, 2017, 46(2): 111-116.
- [28] 徐溥言. 氢内燃机 NO_x 生成及控制策略研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2020.

(编辑 陶晴 亢列梅)