

天然气低排放燃烧室掺氢燃烧性能试验研究

王威^{1,2,3}, 武萍^{1,2,3}, 齐秀龙^{1,2,3}, 任艳平^{1,2,3}

(1. 中国船舶集团有限公司第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150078;

2. 船舶与海洋工程特种装备和动力系统国家工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150078;

3. 先进船舶发动机技术全国重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150078)

摘要:为探究传统天然气燃气轮机对氢气燃料的适应性,开展了现役某型天然气燃气轮机燃烧室掺氢燃烧性能试验研究。通过试验结果分析了燃烧室在使用量不同掺氢比燃料时的性能,设计了一种监测燃烧室回火的方法,测得了燃烧室掺氢燃烧的回火特性试验结果、污染物排放量、出口温度分布和总压损失系数等性能。试验结果表明:随着燃料中掺氢比增加,喷嘴回火风险升高;受到燃气轮机整机参数的影响,在低工况下燃气轮机更容易出现回火;100%负荷工况下,当燃料中掺氢比由0%增加至30%,燃烧室总压损失系数升高24.9%, NO_x 排放量升高24%,CO排放量减少,火焰筒壁面温度有所升高,但分布规律几乎没有变化;在试验范围内,燃料中掺氢对燃烧室出口温度的均匀性和压力脉动几乎没有影响。

关键词:燃气轮机;低排放;掺氢燃烧;试验研究

中图分类号:TK473

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2025.06.015

[引用本文格式]王威,武萍,齐秀龙,等.天然气低排放燃烧室掺氢燃烧性能试验研究[J].热能动力工程,2025,40(6):133-139. WANG Wei, WU Ping, QI Xiulong, et al. Experimental study on blended hydrogen performance in natural gas low emission combustor [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(6): 133-139.

Experimental Study on Blended Hydrogen Performance in Natural Gas Low Emission Combustor

WANG Wei^{1,2,3}, WU Ping^{1,2,3}, QI Xiulong^{1,2,3}, REN Yanping^{1,2,3}

(1. No. 703 Research Institute of CSSC, Harbin, China, Post Code: 150078; 2. National Engineering Research

Center of Special Equipment and Power System for Ship and Marine Engineering, Harbin, China, Post Code: 150078;

3. National Key Laboratory of Marine Engine Science and Technology, Harbin, China, Post Code: 150078)

Abstract: To explore the adaptability of traditional natural gas turbines to hydrogen fuel, experimental research was conducted on the combustion performance of a certain type of natural gas turbine combustor mixed with hydrogen. Through the experimental results, the performance of the combustor when using fuels with different hydrogen blending ratios was analyzed, and a method for monitoring combustor tempering was designed. The tempering characteristic results, pollutant emissions, outlet temperature distribution, total pressure loss coefficient and other properties of the combustor during hydrogen blending combustion were measured. The experimental results show that as the hydrogen blending ratio in the fuel increases, the risk of nozzle tempering increases. Affected by the overall parameters of the gas turbine, tempering is more likely to occur under low operating conditions of the gas turbine. Under the 100% load condition, the hydrogen blending ratio in the fuel increases from 0% to 30%, resulting in a 24.9% in-

收稿日期:2024-11-11; 修订日期:2025-02-10

基金项目:国家科技重大专项(J2019-III-0012-0055);中国船舶集团有限公司第七〇三研究所创新课题项目(CX220102)

Fund-supported Project: National Science and Technology Major Project (J2019-III-0012-0055); Innovation Project of No. 703 Institute of CSSC (CX220102)

作者简介:王威(1988-),女,中国船舶集团有限公司第七〇三研究所高级工程师。

crease in total pressure loss coefficient in the combustor and a 24% increase in NO_x emissions, CO emissions decrease, and the wall temperature of the flame tube increases, but the distribution pattern remains almost unchanged. Within the experimental range, the addition of hydrogen to the fuel has almost no effect on the uniformity of the combustor outlet temperature and pressure pulsation.

Key words: gas turbine, low emissions, hydrogen blending combustion, experimental research

引 言

随着环境保护意识的增强和污染物排放标准的日益严格,世界各国对燃气轮机排放的标准愈发严苛^[1-2]。为深入贯彻“双碳”发展战略,开展燃氢燃气轮机研发和现役燃气轮机氢燃料适应性改造以及掌握燃气轮机氢燃料燃烧特性,已成为我国未来电力能源系统的重要发展方向^[3]。

从上世纪末开始,美国电气通用公司(GE)就开始在常规燃烧器和多喷嘴静音燃烧器的基础上进一步开发燃氢燃烧技术,并开始在一些水电站项目中得到了应用。2018年GE推出了先进的微孔预混燃烧室DLN2.6e,将原带有旋流器的大尺寸喷嘴替换为多个不带旋流器的毫米级小尺寸喷嘴,从而实现预混更加充分,提升燃烧稳定性和回火的预防能力^[4]。2022年GE宣布其旗下的7HA.03燃气轮机首次投入商业运行,应用先进的燃烧室技术,该燃气轮机的氢气掺混率达到了50%^[5]。西门子公司提出了在2030年实现100%氢气燃烧的目标,结合高精度流体力学仿真,3D打印和整机运行工况高压试验,共同应对燃气轮机系统设计的问题^[6]。日本三菱重工正在研究可以支持100%燃氢能力的多簇喷嘴燃烧室,其原理和GE公司的DLN2.6e类似,通过小尺寸喷嘴代替大尺寸喷嘴,增加空气喷射速度以降低回火风险,同时通过减少高温停留时间降低 NO_x 排放量^[7]。三菱预计在2025年左右完成该燃烧室的开发。

国内对于产氢燃气轮机的研究更多集中在反应机理方面。吕焯^[8]对无焰燃烧机理进行研究,分析了不同掺氢比例合成气无焰燃烧的动态特性,并给出了燃烧室的改进方向。昌运鑫等人^[9]基于贝塞斯(BASIS)实验平台对当量比和掺氢功率比等参数对燃烧室排放和燃烧稳定性影响进行实验研究,给出了避免热声振荡的燃气轮机实际运行的燃料分

级和匹配参数选择参考。还有学者研究了燃烧方式等对掺氢燃气轮机性能的影响。结合实验和模拟仿真,王子叶^[10]分析了轴向分级二级燃烧区的关键参数对 NO_x 和CO排放量以及燃烧室出口温度均匀性的影响。

国外掺氢燃烧室研究已面向实际燃气轮机结构与运行参数,但国内掺氢燃烧室研究仍以简化燃烧室或机理研究用参数为主。本文针对某型现役低排放燃气轮机燃烧室实际结构与各负荷工况运行参数,通过试验研究燃烧室掺氢燃烧性能,测试燃烧室使用掺氢燃料时的温度、压力、 NO_x 及CO排放量等性能参数,分析燃料中氢气与天然气比例对燃烧室性能的影响规律。

1 天然气低排放燃烧室掺氢燃烧试验

1.1 试验装置及原理

试验台通过压缩空气站向试验台供应压缩空气,试验台启动空气系统中的电加热器对来流的压缩空气进行加热;启动水系统对试验台高温设备及管道进行冷却;启动点火系统,点火成功后燃料系统投入并调节各流路的燃料量。当试验件的入口参数满足试验要求且试验状态持续稳定时,对相关参数进行采集和测量。试验台试验原理如图1所示,实物如图2所示。

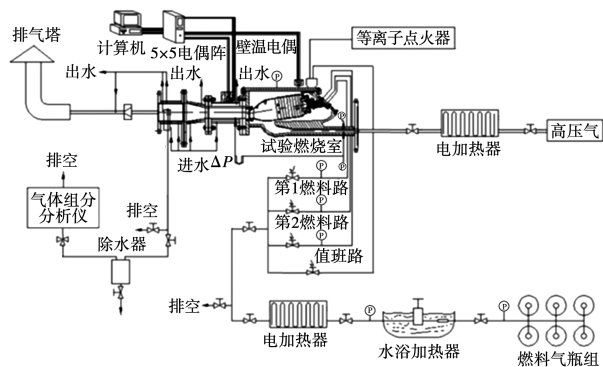


图1 试验原理图

Fig. 1 Experimental principle diagram

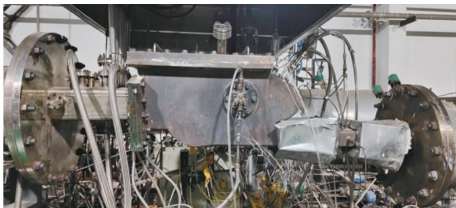


图 2 燃烧室部件试验台

Fig.2 Combustor component test bench

1.2 试验件及测点布置

本试验包含一套燃烧室试验件,为实时检测燃烧室是否出现回火和火焰筒温度分布,在燃烧室喷嘴和点火器上均安装热电偶,热电偶布置如图 3 和图 4 所示。

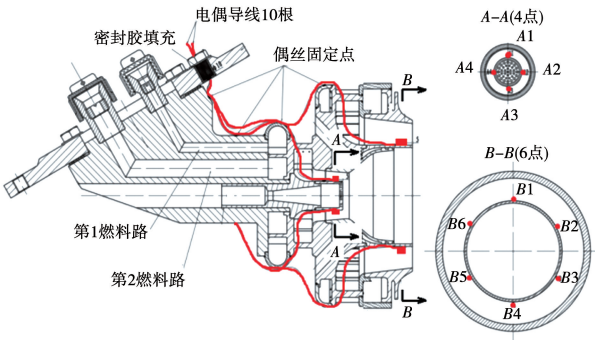


图 3 燃料喷嘴测点布置图

Fig.3 Layout of fuel nozzle measuring points

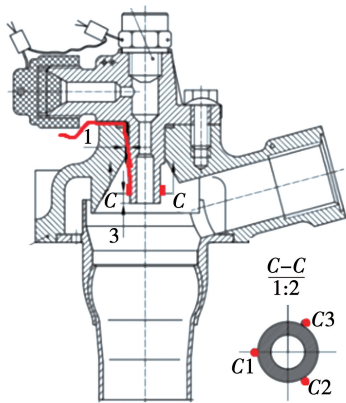


图 4 点火器测点布置图

Fig.4 Layout of igniter measuring points

根据试验需求,燃烧室试验段测点布置如图 5 所示。点火器布置在截面 A 上;燃烧室空气进口温度、压力和流量等参数分别由测量点 C、B 和 D 位置确定;燃烧室出口压力由点 F 测定;出口温度分布

由截面 G 5×5 热电偶阵测得,如图 6 所示;压力脉动由点 K 测量;NO_x 和 CO 排放量由点 H 测定。

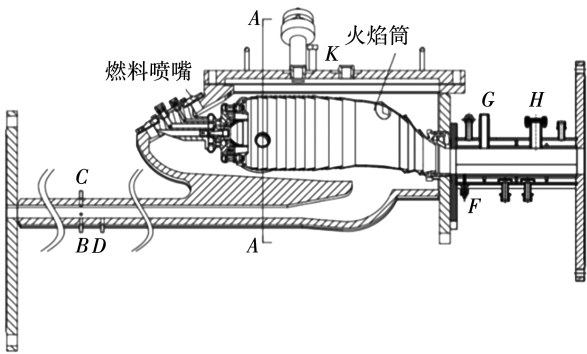


图 5 燃烧室试验段测点布置图

Fig.5 Layout of measuring points in combustor test section



图 6 截面 G 5×5 热电偶阵

Fig.6 5×5 thermocouple array on section G

1.3 试验方法

试验中采用 1:1 全尺寸单个火焰筒,试验对象为 22.5°扇形燃烧室外壳(整圆 1/16),试验参数采用等折合流量和等当量比的模化准则,另外保证空气进口温度相同,在空气和燃料性质相同的条件下,燃烧室入口流速和燃烧室内燃烧温度将与实际参数一致^[11]。

$$\frac{m_{3M} \sqrt{T_{3M}}}{p_{3M}} = \frac{m_{3R} \sqrt{T_{3R}}}{p_{3R}} \tag{1}$$

$$T_{3M} = T_{3R} \tag{2}$$

$$\frac{m_{fM}}{m_{3M}} = \frac{m_{fR}}{m_{3R}} \tag{3}$$

式中: m —质量流量,kg/s; T —总温温度,K; p —总压压力,MPa;下标 3—燃烧室空气进口数值;下标 M—试验时的模化数值;下标 R—原设计数值;下标 f—

燃料数值。

等折合流量模化准则需保证燃烧室内流动雷诺数 Re_M 大于临界值 Re_{cr} , 即:

$$Re_M > Re_{cr} = (2 \sim 3) \times 10^5 \quad (4)$$

$$Re_M = \left(\frac{v_3 D \rho}{\mu} \right)_M \quad (5)$$

$$D_M = D_R = 4A/S \quad (6)$$

式中: v_3 —燃烧室内流体速度, m/s; D —水力直径, m; ρ —流体密度, kg/m³; μ —粘性系数; A —截面面积, m²; S —燃烧室进口截面湿周长, m。

此外, 燃烧室模化试验参数通常还要求燃烧室压力应在 0.3 ~ 0.5 MPa^[11]。

燃料质量流量按单位时间燃料等发热量原则计算, 即:

$$m_{FM} H_M = m_{FR} H_R \quad (7)$$

式中: H —燃料热值, MJ/kg。

在试验中, 同一工况下保持总燃料量与空气条件一定, 调节第 1 燃料路和第 2 燃料路燃料流量在总燃料中的占比, 保持稳定 5 ~ 8 min, 待测试参数稳定后记录试验数据。

2 试验结果分析

2.1 试验数据处理原则

2.1.1 燃烧室总压损失系数

总压损失系数和流体阻力系数是衡量工质压力势能损失的经济性指标。总压损失系数 δ 、总压恢复系数 σ 和流体阻力系数 ψ 计算式如下:

$$\delta = \frac{p_3^* - p_4^*}{p_3^*} \quad (8)$$

$$\sigma = 1 - \delta \quad (9)$$

$$\psi = \frac{p_3^* - p_4^*}{\frac{1}{2} \rho_{ref} v_{ref}^2} \times 10^6 \quad (10)$$

式中: 下标 4—燃烧室出口燃气数值; 下标 ref—参考截面数值; p^* —工质总压, Pa; v —燃烧室内工质速度, m/s。

试验中, 通过在燃烧室进/出口段设置压力传感器来测量静压。测试系统根据燃烧室进口处孔板流量计和热电偶测得的流量和温度计算进口动压, 并与进口静压相加得到燃烧室进口总压。在出口管道壁面开孔处测量出口静压, 并根据燃气流量、温度和

出口面积等计算出口动压, 最终得到出口静压。根据公式计算燃烧室总压损失系数、总压恢复系数和流体阻力系数, 其中, 由于燃烧室参考截面较难确定且难以测量, 通常由燃烧室进口参数代替。空气的密度、速度和出口总压计算式为:

$$\rho_{ref} = \frac{p_3^*}{R_g T_3} \quad (11)$$

$$v_{ref} = \frac{\dot{m}_a}{\rho_{ref} A_{ref}} \quad (12)$$

$$v_4 = \frac{\dot{m}_a}{\rho_4 A_4} \quad (13)$$

$$p_4^* = p_4 + \frac{1}{2} \rho_4 v_4^2 \quad (14)$$

式中: p_4 —燃烧室出口燃气静压, Pa; $\dot{m}_a$ —空气质量流量, kg/s; R_g —气体常数, J/(kg·K)。

2.1.2 燃烧效率

采用燃气分析法, 通过燃气分析仪采样得到燃气成分, 计算燃烧效率, 计算公式如下:

$$\eta = \frac{\varphi_{CO_2} + 0.531\varphi_{CO_2} - 0.319\varphi_{CH_4} - 0.397\varphi_{H_2}}{\varphi_{CO_2} + \varphi_{CO} + \varphi_{UHC}} \quad (15)$$

式中: φ_{CO_2} 、 φ_{CO} 、 φ_{CH_4} 、 φ_{H_2} 、 φ_{UHC} —测得燃气中 CO_2 、 CO 、 CH_4 、 H_2 和 UHC (未燃碳氢) 的体积百分浓度。

2.1.3 燃烧室出口温度分布

燃烧室出口温度分布由出口温度分布系数 (OTDF) 和径向温度分布系数 (RTDF) 两个指标决定, 各系数的计算式如下:

$$OTDF = \frac{T_{4max} - \bar{T}_4}{\bar{T}_4 - \bar{T}_3} \quad (16)$$

$$RTDF = \frac{T_{r4max} - \bar{T}_4}{\bar{T}_4 - \bar{T}_3} \quad (17)$$

式中: $\bar{T}_4$ —出口燃气平均温度, K; T_{4max} —出口燃气温度最大值, K; $\bar{T}_3$ —燃烧室进口平均温度, K; T_{r4max} —燃烧室出口径向温度沿周向的最大平均值, K。

2.1.4 污染物排放量

污染物排放量是表征燃烧室燃烧产生污染物的情况。燃气中污染物通常换算为干基燃气的 15% 含氧量条件下的排放量, 换算式为:

$$EV_{i,15,干} = \frac{20.95 - 15}{20.95 - \lambda_{O_2,干}} \cdot \theta_{i,干} \quad (18)$$

式中: $EV_{i,15,\text{干}}$ —换算到干基 15% 含氧量条件下的排放量, mg/m^3 ; $\lambda_{\text{O}_2,\text{干}}$ —实际排放的干基氧浓度百分数, %; $\theta_{i,\text{干}}$ —实际排放的干基排放量, mg/m^3 , 本试验中烟气分析仪带有除水功能, 测得数值即为干基浓度。

2.1.5 喷嘴回火判定

根据喷嘴壁面平均产生温度现象与基础温度差值是否超过 100 ℃ 来判断喷嘴是否产生回火现象。基础温度为燃气路喷嘴燃烧纯天然气时的平均温度 (即掺氢 0% 时的温度), 计算式为:

$$t_o = \sum_{i=1}^{i=n} t_i / n$$

(19)

式中: t_o —燃气路的基础温度, ℃; t_i —相应燃气路布置的热电偶测量值, ℃; n —相应燃气路内部面布置的热电偶数量。

2.2 燃烧室性能分析

2.2.1 回火特性试验结果

在燃用掺氢 0%, 20% 和 30% 的天然气燃料时, 各试验状态点喷嘴壁面平均温度与基础温度对比如图 7 所示。

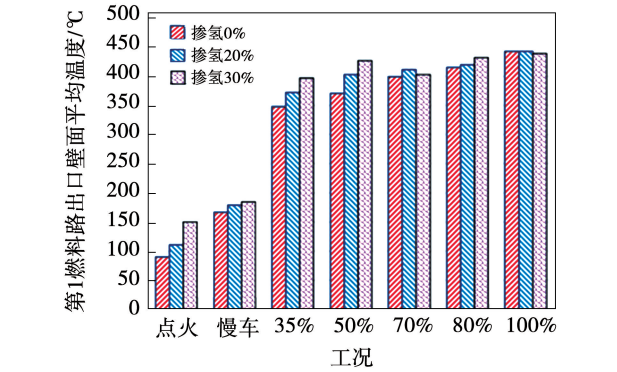


图 7 不同比例掺氢条件下喷嘴壁面平均温度对比
Fig. 7 Comparison of average wall temperatures of nozzles at different hydrogen blending ratios

70% 负荷工况以下, 随着掺氢比增加, 喷嘴壁面平均温度升高; 70% 及以上负荷工况下, 随着掺氢比的提高, 喷嘴壁面平均温度变化不明显。其中, 燃用掺氢 30% 的天然气燃料时, 在点火状态点, 喷嘴壁面平均温度比基础温度高 60 ℃, 各试验状态点的喷嘴壁面平均温度均未比基础温度高出 100 ℃, 因此, 以掺氢 0% ~ 30% 的天然气为燃料时, 在试验状态点不存在回火现象。低工况下掺氢比例升高, 喷嘴温度升高越多, 说明低工况下的回火风险更大。

2.2.2 总压损失系数

燃烧室各工况点的总压损失系数如图 8 所示, 从总压损失系数曲线上可以看出, 随着掺氢比例的提高, 燃烧室总压损失系数增大。100% 负荷工况下, 掺氢由 0% 升高至 30%, 总压损失系数由 3.45 升高至 4.31%, 增长了 24.9%。

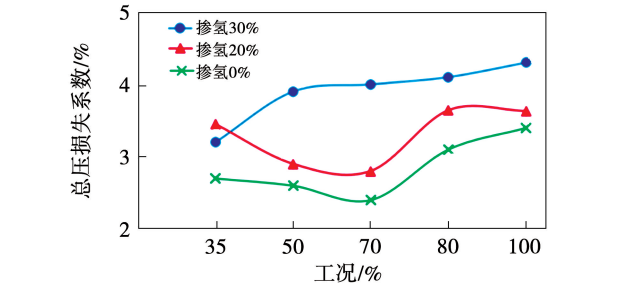


图 8 不同比例掺氢条件下燃烧室各工况点总压损失系数对比
Fig. 8 Comparison of total pressure loss coefficients of combustor at each working condition point at different hydrogen blending ratios

2.2.3 出口温度分布

燃烧室燃用不同比例掺氢燃料, 在 100% 负荷工况条件下的出口温度、OTDF 和 RTDF 如表 1 所示。由表 1 可知, 以天然气燃料对应的燃烧室出口最高温度和出口平均温度为基准值, 燃用掺氢 20% 和 30% 的燃料, 燃烧室出口最高温度的变化幅度为 -0.21% ~ 0.35%, 出口平均温度的变化幅度为 -0.48% ~ 0.16%, 变化幅度范围较小。同时, OTDF、RTDF 的数据结果也表明, 燃用掺氢 0% ~ 30% 的天然气燃料对燃烧室的出口温度品质基本无影响。

表 1 燃烧室出口温度场数据表 (100% 负荷工况)
Tab. 1 Combustor outlet temperature field data table (100% load condition)

参 数	掺氢比例/%		
	0	20	30
出口最高温度/℃	1 416	1 413	1 421
出口平均温度/℃	1 252	1 248	1 254
OTDF/%	21.78	21.88	21.59
RTDF/%	6.57	6.99	7.01

2.2.4 污染物排放量

通过对燃烧室燃用不同比例掺氢燃料的排放物检测数据进行处理分析, 获得各工况条件下的污染

物 NO_x 和 CO 排放量变化情况如图 9、图 10 所示。

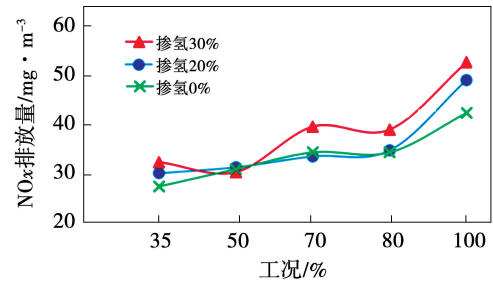


图 9 不同工况条件下 NO_x 排放量变化

Fig. 9 Variation of NO_x emissions under different working conditions

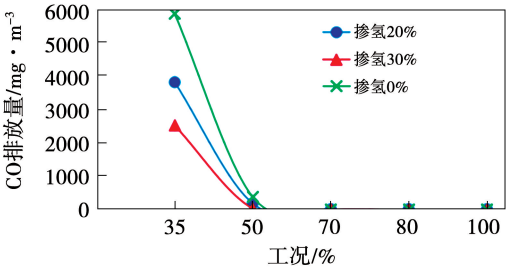


图 10 不同工况条件下 CO 排放量变化

Fig. 10 Variation of CO emissions under different working conditions

由图 9 可知,掺氢比例由 0% 升高至 30% 时, NO_x 排放量由 42.3 mg/m³ 升高至 52.6 mg/m³, 升高 24%。同时,随试验工况由低到高的变化过程, NO_x 排放量呈逐渐上升趋势,在 35% 负荷工况条件下的 NO_x 排放量为最低点,燃用掺氢 20% 和 30% 燃料在该工况对应的 NO_x 排放量分别是 29.8 和 32.2 mg/m³。由图 10 可知,随着试验工况由低到高的过程,CO 排放量呈下降趋势,随着掺氢比例的提高,同一工况条件下的 CO 排放量呈降低趋势,35% 负荷工况掺氢比例由 0% 升高至 30% 时,CO 排放量由 5 890 mg/m³ 降低至 2 530 mg/m³,降低了 57%,在 50% 及以上负荷工况的 CO 排放量接近于零。

2.2.5 火焰筒壁温分布

利用 45 个电偶测量火焰筒壁面温度。在 100% 负荷工况下燃烧室燃用不同比例掺氢燃料,测得火焰筒的壁面温度如图 11 所示。由图 11 可知,燃用不同掺氢燃料时,火焰筒的最高壁面温度点位未发生变化,最高温处在顺气流方向,火焰筒最高壁

面温度出现在 10 号电偶位置,该电偶位于距喷嘴出口界面约 171 mm,距联焰管中心所在界面后方约 115 mm。

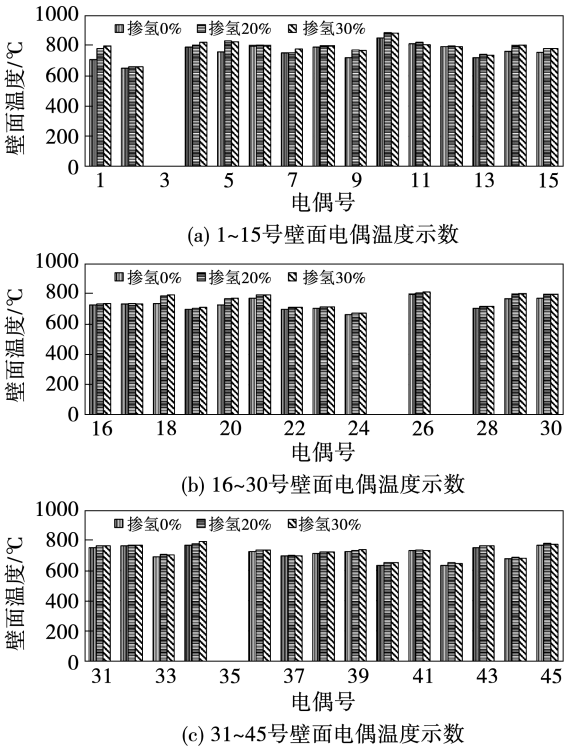


图 11 火焰筒壁面温度

Fig. 11 Wall temperatures of flame tube

燃用掺氢 20% 燃料对应的最高壁面温度为 876 ℃,燃用掺氢 30% 燃料对应的最高壁面温度为 872 ℃,两者相差不明显,比燃用天然气对应的最高壁面温度(844 ℃)高约 30 ℃。

利用 45 个火焰筒壁面电偶测量的温度值求出平均值,得到火焰筒壁面平均温度。燃用掺氢 20% 燃料对应的平均壁面温度为 749 ℃,燃用掺氢 30% 燃料对应的平均壁面温度为 750 ℃,两者基本相当,比燃用天然气对应的平均壁面温度(730 ℃)高约 20 ℃。

2.2.6 动态压力

燃烧室燃用掺氢比例 0% ,20% 和 30% 的天然气,获得各工况下的燃烧室压力脉动数值,压力脉动对比如图 12 所示。可以观察到,燃用 3 种不同掺氢比例的天然气燃料,各工况下的燃烧室压力脉动数值偏差不明显,最大值不超过 0.6 kPa。在 100% 负荷工况条件下,燃用掺氢 20% 的天然气燃料时,燃烧室压力脉动最大值为 0.597 kPa。

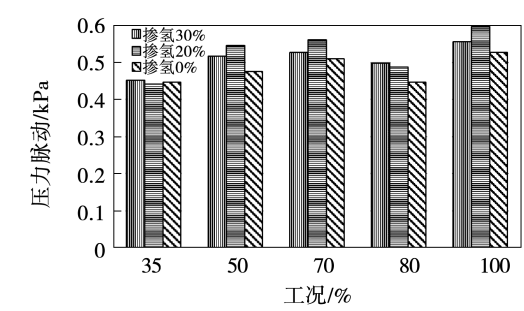


图 12 不同工况条件下压力脉动对比

Fig. 12 Comparison of pressure pulsations under different working conditions

3 结 论

- (1) 在保持燃料发热量不变的情况下,随着天然气中氢气比例的增加,喷嘴喷口壁温升高,火焰位置发生迁移,回火风险增大。在本试验范围内,喷嘴未出现回火现象。受整机参数影响,点火工况下的喷嘴壁面温度与基础温度差值最大,回火风险相对较高。
- (2) 燃料中掺氢比例增加导致燃烧室总压损失系数升高。在 100% 负荷工况下,当掺氢比例由 0% 升高至 30% 时,总压损失系数升高 24.9%。
- (3) 随着燃料中掺氢比例的增加,NO_x 排放量升高,CO 排放量降低。由 100% 负荷工况下,掺氢比由 0% 升高至 30%,NO_x 排放量升高 24%。
- (4) 随着燃料中掺氢比例增加,火焰筒壁面温度有所升高,但温度分布规律几乎没有变化。
- (5) 在试验范围内,掺氢燃料对燃烧室出口温度均匀性和压力脉动几乎没有影响。

参考文献:

[1] IEA. World energy outlook 2020 [R]. Paris: International Energy Agency, 2020.

[2] IEA. The future of hydrogen: Seizing today's opportunities [R]. Paris: International Energy Agency, 2019.

[3] 付强,杨洸,金辉,等. 中国氢能产业链技术现状及发展趋势[J]. 油气与新能源, 2024, 36(4): 19–30.

FU Qiang, YANG Guang, JIN Hui, et al. Technical status and de-

velopment trends of hydrogen industry chain technology in China [J]. Petroleum and New Energy, 2024, 36(4): 19–30.

[4] GOLDMEER J. Power to gas: Hydrogen for power generation [R]. GEA33861, General Electric Company, 2019.

[5] ROBB D. Gas and steam turbines adapt [J]. Turbomachinery Magazine, 2022, 63(3): 16–26.

[6] 周业涛. 西门子能源氢燃气机进展与应用简介 [R]. 珠海: 中国电机工程学会, 2021

ZHOU Yetao. Progress and application of Siemens energy hydrogen gas turbine [R]. Zhuhai: Chinese Society for Electrical Engineering, 2021.

[7] 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.

[8] 吕焯. 适用于微小型燃气轮机富氢燃料的无焰燃烧技术 [D]. 北京: 中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2010.

LYU Xuan. Investigation of flameless combustion technology for hydrogen-rich fuels in micro gas turbine [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Engineer Thermophysics), 2010.

[9] 昌运鑫, 宋恒, 韩猛, 等. 掺氢功率比对富氢甲烷燃烧振荡特性的影响 [J]. 推进技术, 2023, 44(1): 187–200.

CHANG Yunxin, SONG Heng, HAN Meng, et al. Effects of hydrogen power ratio on combustion oscillation characteristics of hydrogen-enriched methane [J]. Journal of Propulsion Technology, 2023, 44(1): 187–200.

[10] 王子叶. 天然气轴向分级预混燃烧特性研究 [D]. 北京: 中国科学院(工程热物理研究所), 2019.

WANG Ziyi. Emissions characteristics of axial fuel staged combustor for gas turbine applications [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Engineer Thermophysics), 2019.

[11] 张宇明, 臧鹏, 贾玉良, 等. 轴向分级燃烧室低压模块化燃烧特性试验研究 [J]. 工程热物理学报, 2024, 45(6): 1589–1597.

ZHANG Yuming, ZANG Peng, JIA Yuliang, et al. Experimental study on low pressure modular combustion characteristics of axial staged combustor [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2024, 45(6): 1589–1597.

(王治红 编辑)