

掺氢比对低排放燃烧室性能影响研究

秦琨^{1,2},王威^{1,2},李妍萍^{1,2},李名家^{1,2}

(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)

摘要:为了探究传统天然气燃气轮机对氢气燃料的适应性,基于现役某型工业低排放燃气轮机结构和性能,用数值模拟方法分析了燃料中氢气比例对低排放燃烧室性能的影响,确定了燃烧室燃用甲烷和氢气燃料的换用性能。研究表明:在1.0额定工况,掺氢比小于等于30%时,燃烧室不发生回火,喷嘴内部和火焰筒肩部回流区的温度以及燃烧室的总压损失随掺氢比的升高而升高,NO_x排放体积分数小幅升高,CO排放体积分数减少;当掺氢比大于30%时,燃烧室发生回火,喷嘴和火焰筒肩部回流区温度、总压损失、NO_x排放体积分数大幅升高,CO排放基本为零。在其他工况下,负荷变化对燃烧室边界条件影响较为复杂,对喷嘴回火边界影响无单调性变化规律。

关键词:工业燃气轮机;燃烧室;掺氢燃烧;预混燃烧

中图分类号:TK473 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2024.03.007

[引用本文格式]秦琨,王威,李妍萍,等.掺氢比对低排放燃烧室性能影响研究[J].热能动力工程,2024,39(3):47-56. QIN Kun, WANG Wei, LI Yan-ping, et al. Study on the influence of hydrogen blending ratio on low emission combustor performance[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(3): 47-56.

Study on the Influence of Hydrogen Blending Ratio on Low Emission Combustor Performance

QIN Kun^{1,2}, WANG Wei^{1,2}, LI Yan-ping^{1,2}, LI Ming-jia^{1,2}

(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)

Abstract: To explore the adaptability of traditional natural gas turbines to hydrogen fuel, based on the structure and performance of a certain type of industrial low-emission gas turbine, the influence of the proportion of hydrogen in the fuel on the performance of the low-emission combustion chamber was analyzed by numerical simulation method, and the conversion performance of methane and hydrogen fuel in the combustion chamber was determined. The results show that under the full load condition, when the hydrogen mixing ratio is less than 30%, the combustion chamber does not backfire, the temperature in the nozzle and the circulating zone of the flame tube shoulder and total pressure loss in the combustion chamber increase with the increase of the hydrogen mixing ratio, the NO_x emission volume fraction increases slightly, and the CO emission volume fraction decreases; when the hydrogen mixing ratio is more than 30%, the combustion chamber is tempered, and the temperature in the nozzle and the circulating zone of the flame tube shoulder, the total pressure loss and NO_x emission volume fraction increase significantly, and the CO emission is almost 0. Under other working conditions, the influence of the load varia-

收稿日期:2023-10-15; 修订日期:2024-01-03

基金项目:国家科技重大专项(2017-III-0006-0031, J2019-III-0012-0055); 黑龙江省“百千万”工程科技重大专项(2019ZX03A03); 中船集团自立科技项目(202109Z); 黑龙江省自然科学基金(TD2021E001)

Fund-supported Project: National Science and Technology Major Project (2017-III-0006-0031, J2019-III-0012-0055); Heilongjiang " Hundred-Thousand-Ten Thousand" Major Project in Engineering Science and Technology (2019ZX03A03); Self-supporting Technology Project of CSSC (202109Z); Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (TD2021E001)

作者简介:秦琨(1994-),男,中国船舶集团有限公司第七〇三研究所硕士研究生。

通信作者:李名家(1977-),男,中国船舶集团有限公司第七〇三研究所研究员。

tion on the combustion chamber boundary condition is complex, and the influence of the gas turbine working condition on the nozzle tempering boundary has no monotonicity variation.

Key words: industrial gas turbine, combustor, hydrogen blending combustion, premixed combustion

引言

面对全球气候变暖加剧,化石燃料资源紧张的局面^[1],世界各国开始发展低碳能源系统,氢气作为一种低碳、清洁,易于制取、储存和运输的二次能源,备受重视^[2]。制氢和储氢技术日益成熟,随着相关产业规模的扩大,用氢成本也在不断降低^[3]。在现有低 NO_x 排放燃气轮机动力系统基础上,换用或掺入氢气燃料,兼顾经济性的同时建立低碳、灵活的能源系统,是我国未来电力能源系统重要的发展方向^[4]。

对于传统燃烧天然气的燃气轮机,采用掺氢燃料后,由于燃料的理化性质发生显著变化,带来碳排放减少、燃烧范围变宽等优点的同时,也存在诸如回火、NO_x 排放升高以及燃烧振荡等亟需解决的问题^[5]。

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技术,并开始在一些水电站项目上得到了应用。2018 年 GE 公司推出了先进的微孔预混燃烧室 DLN2.6e,其将之前带有旋流器的大尺寸喷嘴替换为众多毫米级尺寸、不带旋流器的小喷嘴,从而使得预混更加充分,燃烧稳定性和回火预防能力增强^[6]。2022 年 GE 公司宣布其研制的 7HA.03 燃气轮机首次投入商业运行,由于应用了先进的燃烧室技术,使该燃机的氢气掺混率达到了 50%^[7]。西门子公司提出了在 2030 年实现 100% 纯氢燃烧的目标,研制过程中将高精度流体力学仿真、3D 打印与整机运行工况高压试验结合起来,共同应对燃气轮机系统设计的问题^[8]。日本的三菱重工公司正在研究可以支持 100% 燃氢能力的多簇喷嘴燃烧室,其工作原理与 GE 公司的 DLN2.6e 相似,通过小尺寸喷嘴代替大尺寸喷嘴增加空气喷射速度来降低回火风险,并通过减少高温气体停留时间以降低 NO_x 排放^[9]。三菱重工公司预计在 2025 年左右可以完成该种燃烧室的开发。

国内对于掺氢燃气轮机的研究,更多集中在反应机理上。吕煊^[10]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,并且基于此给出了燃烧室的改进方向。北京航空航天大

学的昌运鑫等人^[11]基于 BASIS 实验平台对当量比和掺氢功率比等参数进行实验,为燃气轮机实际运行中避免热声振荡发生的燃料分级和匹配参数的选择提供参考。还有学者研究了燃烧方式等对掺氢燃气轮机性能的影响,中国科学院大学的王子叶^[12]结合实验和模拟仿真,分析了轴向分级二级燃烧区的关键参数对污染物排放以及燃烧室燃烧性能的影响。

本文利用数值模拟技术,基于现役某型低排放燃气轮机针对燃烧室燃烧掺氢燃料的性能进行模拟计算,研究燃料中氢气与天然气比例对燃烧室流场和性能影响规律,在燃气轮机部分特征工况下分析燃烧室掺氢燃烧回火性能,并通过模化试验验证了 0% ~ 30% 掺氢比范围内仿真方法的正确性,本研究为燃气轮机低碳燃氢改造提供了有力的理论基础。

1 研究对象

1.1 燃烧室结构

本文以某现役燃气轮机燃烧室为研究对象开展研究。该燃烧室为环管型燃烧室^[13],在燃烧室内外机匣所形成的空间中,沿圆周均匀分布 16 个火焰筒,每个火焰筒配装一个燃气喷嘴,燃烧室结构和喷嘴工作原理如图 1 所示。由图 1(a)可见,由压气机来流的高压空气经过扩压器减速,进入燃烧室内外机匣组成的环形空间尾端,一部分空气通过燃烧室火焰筒壁面孔结构进入火焰筒,用于冷却火焰筒壁面;另一部分空气通过燃气喷嘴与燃料混合并旋流,进入火焰筒燃烧。燃烧形成的高温燃气通过火焰筒尾部扇形出口进入涡轮。如图 1(b)所示,喷嘴头部采用两级径向旋流器结构,2 级旋流器在 1 级旋流器的径向外侧,1 路和 2 路燃料与空气在旋流器中发生掺混并喷射至火焰筒下游,每级均有独立的燃烧区,从而实现了燃烧室的分级分区燃烧。

1.2 燃料特性

表 1 给出氢气与甲烷燃料的特性对比。由氢气特殊燃烧性质可知,燃料掺氢后其燃烧特性将发生以下变化:氢气的增加会使燃料的燃烧范围变宽,同条件下增强了燃料燃烧的稳定性;氢气较高的传播和扩散速度减少了局部熄火的风险;掺氢后燃料燃烧温度升高,NO_x 的排放浓度随之升高;燃料中氢气的

掺入,使燃料燃烧速度进一步加快,当火焰传播速度大于气体流动速度时,火焰向上游传播,燃烧室易发生回火;掺氢后燃烧延迟时间的改变将对燃料空气预混气是否能在喷嘴掺混区内顺利燃烧产生影响。

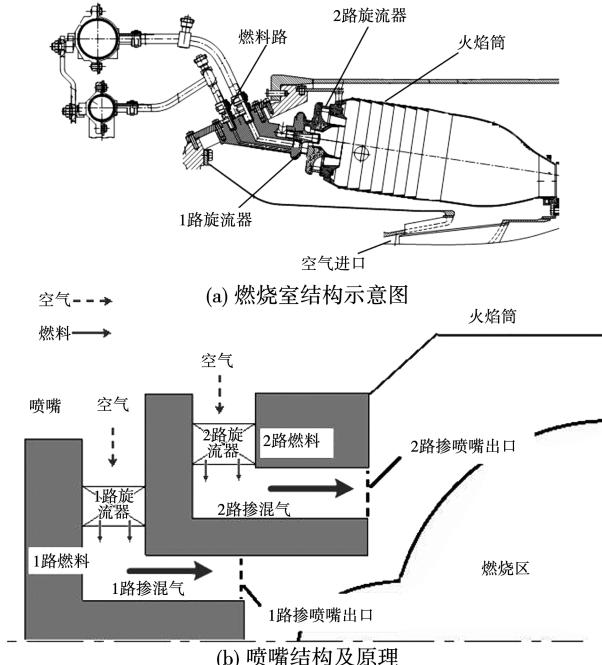


图1 燃气轮机燃烧室结构和喷嘴工作原理

Fig. 1 Gas turbine combustor structure and nozzle operating principle

表1 氢气与甲烷燃料特性对比

Tab. 1 Comparison of performance of H₂ and CH₄

参数	H ₂	CH ₄
最小点火能量/MJ	0.02	0.25
最小猝熄距离/mm	0.6	2.5
燃烧极限(体积分数)	4% ~ 75%	5% ~ 15%
燃烧火焰传播速度/cm·s ⁻¹	346	45
低热值/kJ·kg ⁻¹	119 896	50 050
扩散系数/cm ² ·s ⁻¹	0.63	0.16
最高绝热火焰温度/°C	2 103	1 950

在实际工程应用中,氢脆的影响同样不能忽略。大多数学者认为,氢脆是由于氢气的高扩散系数使之很容易与材料中的金属形成氢化物,进而形成断裂源,导致脆性断裂^[14]。掺氢燃料的应用也进一步提高了对燃烧室制造材料的要求。

图2反映了化学当量比相同条件下氢气点火延迟时间随工作环境的温度及压力变化的关系^[15]。如图2所示,随着工作环境温度和压力升高,氢气点火延迟时间缩短。通常燃气轮机整机高工况时喷嘴

工作环境压力和温度比低工况高,喷嘴回火风险升高,但气体流动速度比低工况快,回火风险降低。由此可见,燃机不同负荷工况条件下喷嘴的回火风险不同,天然气喷嘴换用含氢燃料时,需考察喷嘴在燃机全工况条件下的回火风险。

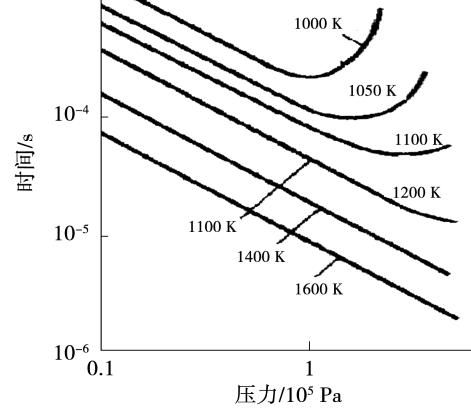


图2 化学当量比相同时氢气点火延迟时间与工作环境温度和压力的关系^[15]

Fig. 2 Relation diagram of H₂ ignition delay time, temperature and pressure under same chemical equivalent ratio^[15]

2 数值计算方法

2.1 结构模型

为节约计算资源,根据燃烧室结构特点,通过UG 9.0 建立包含一个完整火焰筒和燃气喷嘴的1/16燃烧室结构模型,如图3所示。计算中对燃烧室非敏感流动区域的结构细节进行简化,如联焰管、机匣安装螺栓螺母、部分圆角等结构。

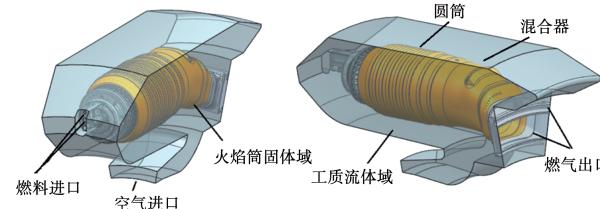


图3 燃烧室结构模型

Fig. 3 Combustor structure model

2.2 数学模型

燃烧室内质量、动量、能量及组分输运方程等基本控制方程参考文献[16]。通过气体混合物热力学状态方程封闭方程组进行求解,其中源项的确定采用RANS雷诺平均法,选用Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型。燃烧模型选用Finite Rate Chemistry and Eddy-dissipation(FR/ED)模型。

2.3 反应机理

燃料为天然气和氢气混合气,其中天然气的物性设定为甲烷,甲烷采用两步反应,氢气采用一步反应^[17],具体基元反应参数见表 2。

表 2 反应机理参数

Tab. 2 Parameters of reaction mechanism

反应机理	指前因子	活化能 J/kgmol	温度 指数
$2\text{CH}_4 + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO} + 4\text{H}_2\text{O}$	5.012×10^{11}	2×10^8	0
$2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$	2.239×10^{12}	1.7×10^8	0
$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	9.87×10^8	3.1×10^7	0

2.4 边界条件

计算采用温度和质量流量进口、压力出口,边界条件参考燃烧室满负荷工况下的实际参数,具体见表 3。表内数值为相对值,定义为对应参数在相应工况与 1.0 额定工况(Ne)下的数值之比。氢气在燃料中的体积占比,下文简称为掺氢比。计算时忽略重力、体积力、浮力、热辐射,只计算稳态燃烧场,采用 SIMPLE 算法进行流场迭代计算。

表 3 数值计算边界条件设定值

Tab. 3 Computational boundary condition settings

参数	工况				
	1.0 Ne	0.7 Ne	0.5 Ne	慢车	启动
空气流量比	1.00	0.87	0.76	0.21	0.05
空气温度比	1.00	0.94	0.90	0.59	0.43
空气压力比	1.00	0.83	0.70	0.16	0.06
燃料参考流量(甲烷)	1.00	0.76	0.59	0.09	0.07

计算过程中在 0~50% 范围内调整燃料掺氢比,间隔 5% 共划分 10 个计算方案。

燃料流量按等发热量原则折算,燃料流量计算公式^[18]为:

$$m_f = \frac{m_{\text{CH}_4} H_{\text{CH}_4}}{\eta_{\text{CH}_4} H_{\text{CH}_4} + \eta_{\text{H}_2} H_{\text{H}_2}} \quad (1)$$

式中: m_f —混合燃料流量,kg/s; m_{CH_4} —纯甲烷燃烧时燃料流量,kg/s; H_{CH_4} —甲烷热值,kJ/kg; H_{H_2} —氢气热值,kJ/kg; η_{CH_4} —燃料中甲烷质量占比,%; η_{H_2} —燃料中氢气质量占比,%。

2.5 目标参数

在燃烧室设计过程中,通常通过温度分布系数、总压损失、燃烧效率、污染物排放等目标参数考察燃烧室性能优劣。

(1) 温度分布

将总温度分布系数 θ_t 与径向温度分布系数 θ_r 作为燃烧室出口温度场均匀度的评价指标,其计算公式分别为:

$$\theta_t = \frac{T_{4\max} - T_{4\text{ave}}}{T_{4\text{ave}} - T_{3\text{ave}}} \quad (2)$$

$$\theta_r = \frac{T_{4r\max} - T_{4\text{ave}}}{T_{4\text{ave}} - T_{3\text{ave}}} \quad (3)$$

式中: $T_{4\max}$ —出口截面所有温度点中测得的最大值,K; $T_{4r\max}$ —出口径向温度分布沿周向平均值中的最大值,K; $T_{4\text{ave}}$ —出口平均温度,K; $T_{3\text{ave}}$ —进口平均温度,K。

(2) 总压损失

总压损失系数 δ^* 表征工质流经燃烧室时压力势能损失程度,定义为:

$$\delta^* = \frac{p_2^* - p_3^*}{p_2} \quad (4)$$

式中: p_2^* —燃烧室进口空气总压力,MPa; p_3^* —燃烧室出口燃气总压力,MPa。

(3) 燃烧效率

燃烧效率,即燃烧过程中实际的放热量和燃料理想的总放热量之比,是衡量燃烧室经济性能的指标。其可以用单位质量的燃料发热量有效利用程度表示为:

$$\eta = 1 - \frac{\sum Q}{H_u} \quad (5)$$

式中: H_u —燃料热值,kJ/kg; Q —燃料的发热量,kJ/kg。

(4) 污染物排放

燃烧室的工作需要考虑环保要求,针对气态污染物需要考虑 CO、NO_x、未燃烧碳氢化合物等排放情况,排放浓度用污染物体积与烟气体积之比来表示,其中所有浓度均换算为 15% O₂ 干基条件下。

2.6 敏感性分析

采用非结构网格进行网格划分,为保证计算精度,对火焰筒内燃烧区及小孔位置网格进行加密,并考察网格独立性。流域网格总数从 904 万增加到 4 060 万,燃烧室性能结果见表 4。由表 4 可以看出,当网格数从 904 万增加至 3 232 万时,NO_x 排放体积分数、 θ_t 和 δ^* 数值变化较大,燃烧室性能参数对网格有依赖性;当网格数从 3 232 万增加到 4 060 万时,燃烧室排放浓度、 θ_t 和 δ^* 数值变化较小,燃烧室性能对网格数不再敏感。考虑计算资源和精度要求,本文选用 3 200 万网格划分方案。

表4 不同网格数的燃烧室性能统计

Tab. 4 Combustor performance statistics with different grid numbers

网格数/万	$\text{NO}_x/10^{-6}$	$\theta_l/\%$	$\theta_r/\%$	$\delta^*/\%$
904	5.83	8.41	1.2	4.35
2 064	10.21	12.55	1.3	5.91
3 232	13.75	17.11	1.5	6.55
3 771	13.82	17.12	1.5	6.57
4 060	13.82	17.13	1.5	6.57

3 额定工况的计算结果与分析

本节通过对额定工况 Ne 下流场及燃烧室工作参数等计算结果的分析,评估了该型燃烧室在不同掺氢比时的工作性能,并得到回火边界。

3.1 流场分析

为考察燃烧室内部流场,选取的计算截面和中轴线位置如图4所示。其中,截面1和截面2在1级旋流器后和1路喷嘴出口处,截面3和截面4在2级旋流器后和2路喷嘴出口处,截面5~8在距离喷嘴出口 $0.40D, 0.68D, 0.97D, 1.25D$ 处(D 为火焰筒内径)。

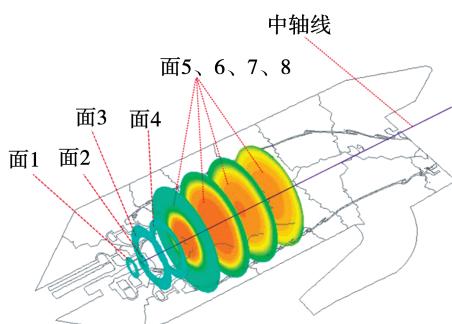


图4 计算截面和中轴线位置

Fig. 4 Diagram of calculated section and central axis

图5、图6分别给出回火前后典型掺氢比下的温度场和速度场分布。图7、图8分别给出典型掺氢比下燃烧室计算截面平均温度和中轴线的轴向速度分布图。其中,图8选取喷嘴喷射方向为正向,以便观察速度回流区的范围。由图5~图7可见,燃烧室的温度场和速度场分布均匀,内部形成了良好的流场分布,当燃料掺氢比在0~30%范围内,喷嘴内未出现局部高温区,无回火现象,且随着掺氢比升高,靠近反应区的1路和2路喷嘴内部和出口处以及火焰筒肩部回流区温度逐渐升高,同时主要反应区的温度也升高。当掺氢比超过30%时(计算范围为35%~50%),喷嘴内部发生回火。与掺氢比0~30%范围内相似,随着掺氢比提高,点火延迟时

间缩短,反应区位置前移,流经喷嘴气体减少,流经喷嘴和火焰筒气体流速升高。相比于无回火状态,回火后上述变化幅度增加。另外,由于气体在喷嘴内燃烧为高温燃气,高温燃气进入火焰筒肩部区域,导致该区域温度大幅升高。

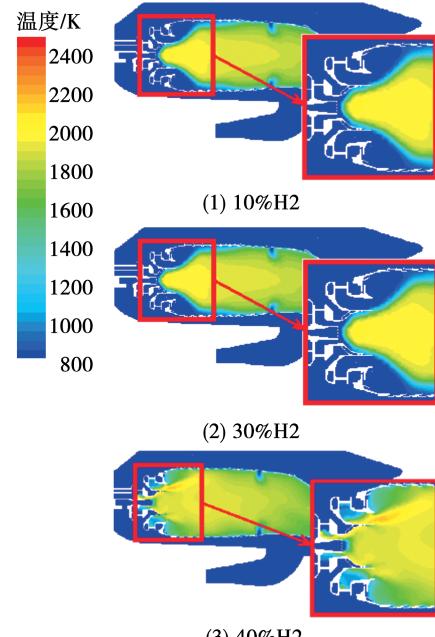


图5 典型掺氢比下中截面温度场

Fig. 5 Mid-section temperature field at typical hydrogen blending ratio

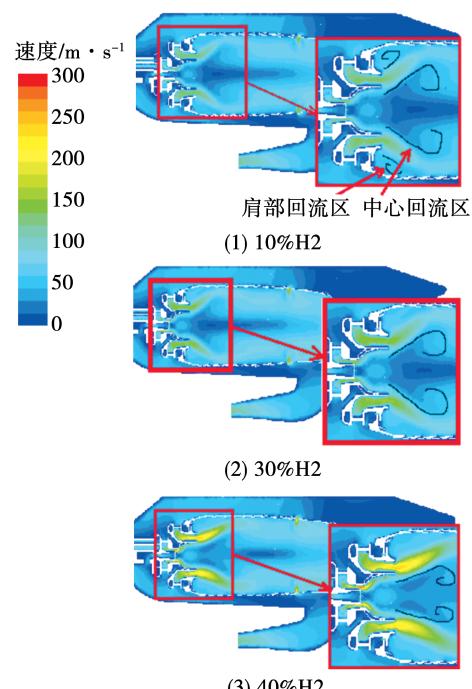


图6 典型掺氢比下中截面速度场

Fig. 6 Mid-section velocity field at typical hydrogen blending ratio

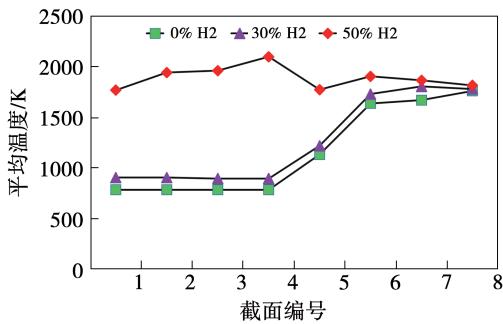


图 7 不同掺氢比下燃烧室计算截面燃气平均温度

Fig. 7 Average gas temperature on calculated section of combustor at different hydrogen blending ratios

图 8 反映了火焰筒中轴线燃气轴向速度的分布情况。由图 8 可见,在不同掺氢比下,在距喷嘴出口轴向位置 30 mm 附近形成了回流区。随着掺氢比增大,回流区面积随之增大,但是回流区变化趋势和位置均无明显差异。

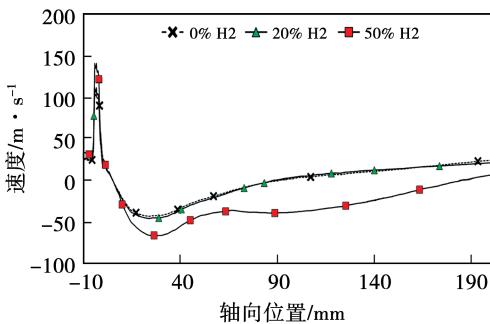


图 8 不同掺氢比下燃烧室中轴线燃气轴向速度分布

Fig. 8 Distribution of gas axial velocity in central axis of combustor at different hydrogen blending ratios

图 9 为各方案流经喷嘴气体的温度、流速以及预混空气占比随掺氢比的变化。其中预混空气占比指用于预混燃烧的空气占燃烧室总空气进气量的比值。通过对比图中冷态数据可见,冷态时掺氢比变化不会引起空气分配以及流速的变化。由热态数据可见,燃料和空气混合气在喷嘴内的升温膨胀导致喷嘴出口流速逐渐升高;由前文分析喷嘴出口温度升高,热阻提升,使喷嘴流量逐渐降低,喷嘴通流性下降,当燃料热值相同时,随着掺氢比升高,预混空气占比逐渐降低,掺氢比每升高 10%,无回火时预混空气占比降低约 0.7%,回火时降低约 3%。计算范围内 CO 排放体积分数均低于 5×10^{-6} 。

3.2 燃烧室性能参数分析

3.2.1 总压损失

图 10 为燃烧室总压损失随燃料掺氢比的变化

规律。由图 9 和图 10 可见,随着掺氢比升高,流经喷嘴和火焰筒的气流速度升高,燃烧室总压损失随之提高。

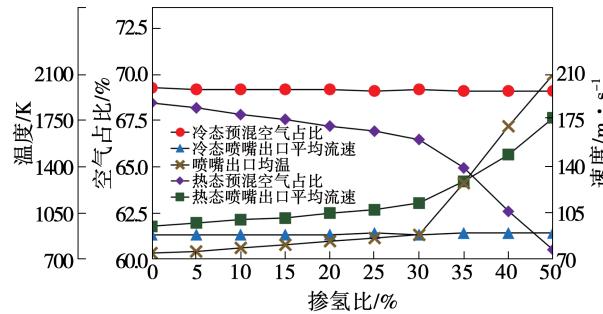


图 9 掺氢比对流经喷嘴气体的影响

Fig. 9 Influence of hydrogen blending ratio on gas flowing through nozzle

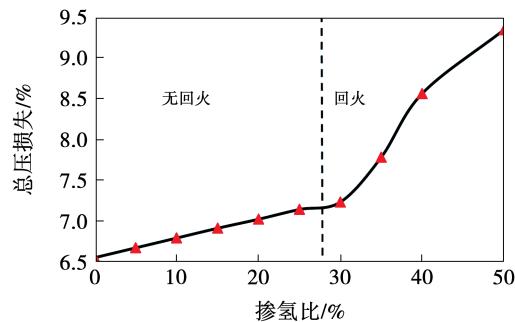


图 10 掺氢比对燃烧室总压损失的影响

Fig. 10 Influence of hydrogen blending ratio on total pressure loss of combustor

3.2.2 污染物排放

图 11 为掺氢比对燃烧室污染物排放的影响。随着掺氢比升高,预混空气减少,燃烧区温度升高, NO_x 排放升高, CO 减少。

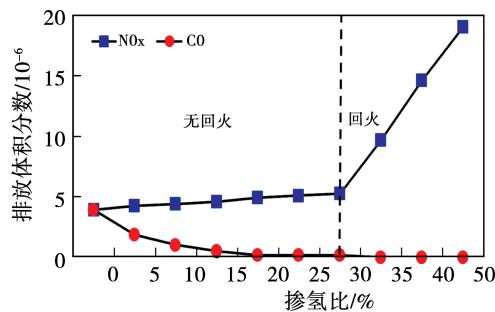


图 11 掺氢比对燃烧室排放性能的影响

Fig. 11 Influence of hydrogen blending ratio on combustor emission performance

3.2.3 燃烧效率及出口温度分布

燃料中掺氢比增加,燃烧室燃烧效率有所提高,燃烧效率接近 100%。

图12为典型掺氢比时出口温度场分布。由图可见,换用不同掺氢比燃料对出口温度均匀性影响较小,掺氢比在0~50%范围内, θ_t 约为17.5%, θ_r 约为1.5%。回火后由于燃烧区位置变化,偏离了火焰筒中心,导致下游出口温度分布发生波动。

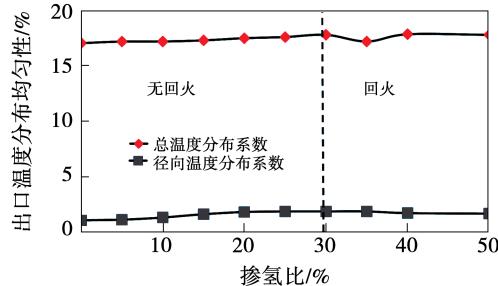


图12 掺氢比对燃烧室出口温度场的影响

Fig. 12 Influence of hydrogen blending ratio on temperature field at the outlet of combustor

3.2.4 火焰筒壁面温度

图13给出典型掺氢比时火焰筒高温区域温度。火焰筒由圆筒和混合器两部分组成,靠近喷嘴的部分为圆筒,靠近燃烧室出口端为混合器。

掺氢比由0升高至30%时无回火情况下,火焰筒平均温度升高,高温区出现在混合器部分,圆筒部分平均温度随掺氢比升高缓慢升高。这是由于火焰位置略有提前且火焰长度缩短,导致圆筒部分受热加强。混合器温度较高是由于该部分冷却较弱,同时火焰对混合器转弯位置热冲击较强,另外火焰缩短前移降低了混合器受热,所以混合器平均温度有所降低。

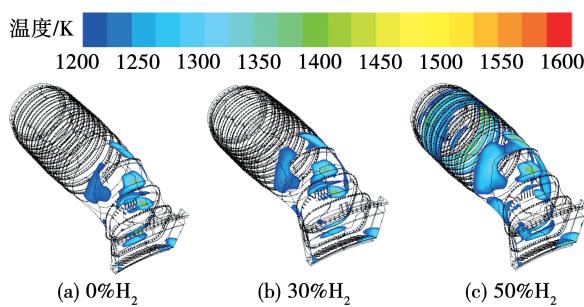


图13 火焰筒壁面温度场

Fig. 13 Temperature fields on the wall of flame tube

掺氢比升至30%时,虽然圆筒部分温度仍在升高,但混合器温度持续降低,最终导致火焰筒壁面平均温度和最高温度降低。

掺氢比高于30%时,由于火焰筒内近壁区燃气温度升高,火焰筒圆筒部分出现大面积高温区。混合器部分温度也随近壁流体温度升高而逐步升高。

4 变负荷工况的计算结果与分析

本节考察喷嘴在燃气轮机起动点火、慢车、0.5Ne、0.7Ne、1.0Ne 5个特征负荷工况的回火特性。由仿真计算结果得到进口空气温度、压力和流速随工况变化情况如图14所示。图中各工况的温度和压力为相对值。在纯甲烷燃料时点火、慢车、0.5Ne、0.7Ne、1.0Ne工况的总空燃比分别为57、108、61、55、48,掺氢时的空燃比按照等发热量折算。0.5Ne、0.7Ne、1.0Ne工况下,1路和2路同时供给燃料,慢车工况和起动点火工况仅1路供给燃料。由图可知,燃烧室进口空气相对温度、相对压力和流速均随着工况降低而降低。

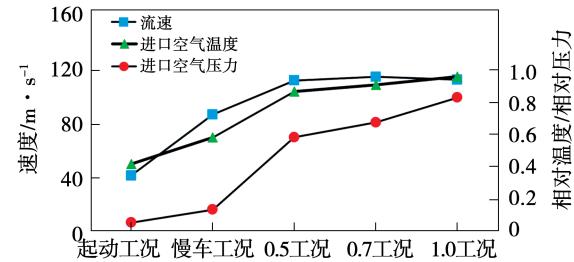
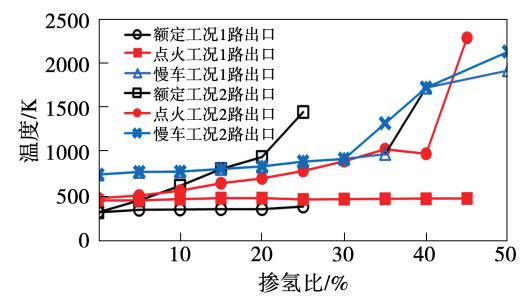


图14 燃气轮机各工况下燃烧室基本性能参数

Fig. 14 Basic performance parameters of gas turbine combustor at various working loads

图15给出各特征工况下不同掺氢比时喷嘴出口截面平均温度。



(a) 点火、慢车和1.0工况喷嘴出口平均温度

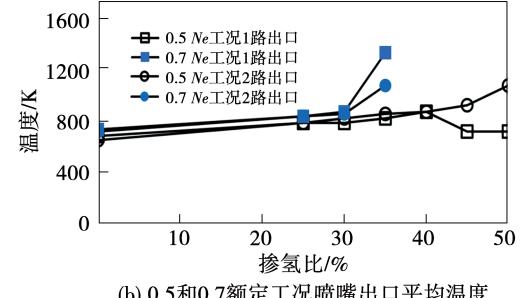


图15 各工况条件下不同掺氢比对喷嘴出口温度影响

Fig. 15 Influence of different hydrogen blending ratios on nozzle outlet temperature at various working loads

图 16 是各工况回火边界的对比,其中起动点火工况没有明显的回火边界。随着燃料中掺氢比增加,1 路喷嘴出口截面的温度不断升高,2 路喷嘴不发生回火。

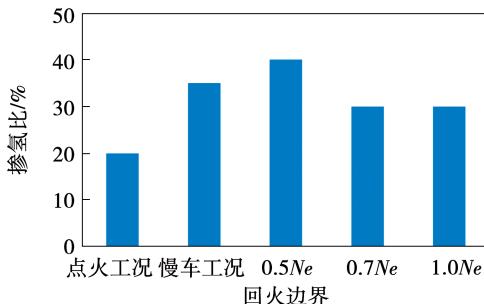


图 16 各工况不同掺氢比下回火边界

Fig. 16 Boundary of backfire under different hydrogen blending ratios at various working loads

由图 15(a)和图 16 可见,慢车工况回火边界的掺氢比为 35%。即使未发生回火,慢车工况喷嘴出口温度随掺氢比升高明显升高,掺氢比从 0 升至 35%,喷嘴出口温升 575 K;当掺氢比超过 35%~40% 时,1 路喷嘴出口温度大幅波动;当掺氢比超过 40% 时,1 路喷嘴出口温度大幅升高,2 路喷嘴无燃料供入,出口温度不变。起动点火工况回火边界的掺氢比为 20%。与慢车工况相似,未回火时,点火工况喷嘴出口温度随掺氢比增大明显升高,掺氢比

从 0 升至 20%,喷嘴出口温升 589 K。

由图 15(b)和图 16 可知,0.7Ne 工况下,当掺氢比在 0~30% 范围内,随着掺氢比升高,喷嘴出口温度缓慢升高;当掺氢比超过 30% 时,1 路和 2 路喷嘴回火。0.5Ne 工况下,当掺氢比低于 40% 时,随着掺氢比升高,喷嘴出口温度缓慢升高;当掺氢比达到 40%~50% 时,2 路喷嘴温度突升回火,由于 2 路喷嘴热阻增大,2 路空气流量减少,1 路空气流量增加,导致 1 路喷嘴出口温度下降;当掺氢比超过 50% 时,1 路喷嘴回火。

根据理论和计算结果综合分析,对于该预混燃烧室,低工况时回火风险更高,即使未发生回火,喷嘴也有较大温升,易出现超温问题。

5 模型验证

5.1 目的和内容

为验证本文建立模型的准确性,针对该型燃烧室进行模型验证,即在 1.0 工况甲烷燃料燃烧条件下进行模化燃烧试验,并将试验得到的各项指标与仿真结果对比。

5.2 试验设备

验证试验的模化燃烧试验台主要由空气系统、燃料系统、水系统、雾化空气系统、数据采集及测控系统等组成,试验台系统组成如图 17 所示。

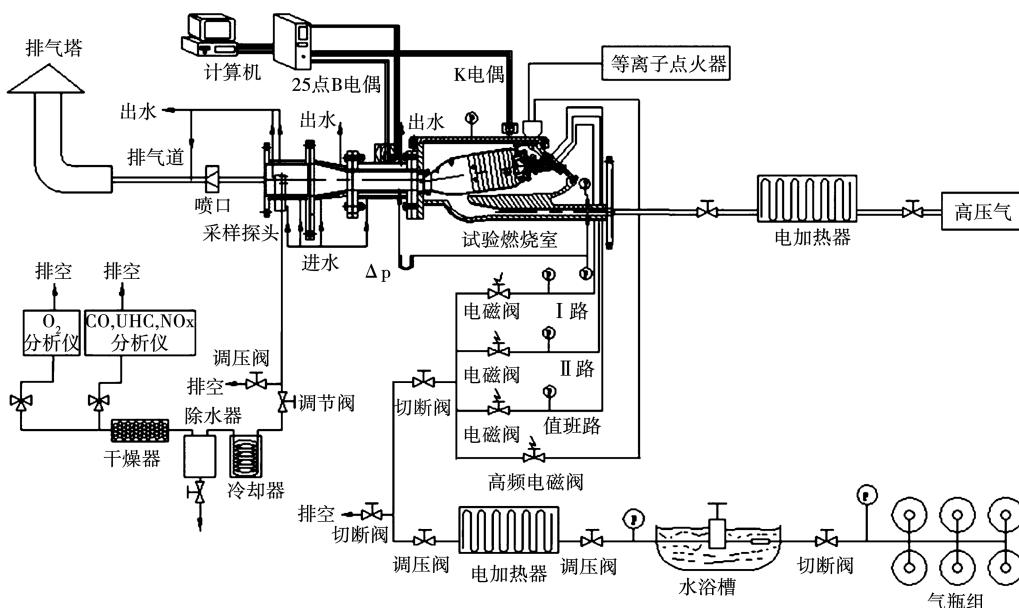


图 17 试验台系统示意图

Fig. 17 Schematic diagram of test bench system

验证试验使用的燃烧室试验装置实物见图 18,其中试验件包括火焰筒、燃气喷嘴、点火器及试验壳体等。火焰筒及燃气喷嘴的实物见图 19。

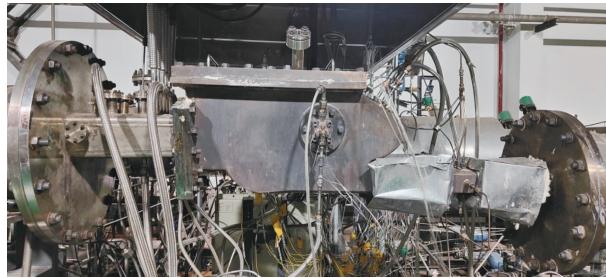


图 18 燃烧室试验装置

Fig. 18 Combustor test device



(a) 火焰筒



(b) 喷嘴

图 19 试验件

Fig. 19 Test pieces

5.3 试验过程

试验开始前,为扫除试验系统内部残余废气及灰尘等杂质,打开燃烧室进口空气系统,吹扫 5 分钟;调节进口空气至需求压力和流量;起动点火器,5 s 后打开起动燃料阀,再稳定 5 s。

供入主燃料,调节燃气喷嘴 1 气路流量,点火成功后关闭点火器,若持续点火时间超过 10 秒,判定为点火失败,重新进行试验;之后开启燃烧室下游通道的冷却水供给,并调节燃烧室进口空气压力、流量及燃料流量至 1.0 额定工况试验参数,待火焰筒壁温和燃烧室出口温度稳定(燃烧室出口燃气温波动均在 10 ℃ 以内)后开始数据采集,数据稳定时间至少 1 分钟;

数据采集结束后,先停止燃料供应,将燃烧室进口空气参数调节至吹扫状态吹扫燃烧室,吹扫 3 分

钟后关闭燃烧室进口空气、仪表气和冷却水供给。

5.4 试验验证结果

表 5 给出 1.0 工况下的仿真结果与试验数据对比。由表可见,通过所建立仿真模型对该型燃气轮机燃烧室进行计算所得的燃烧效率、 NO_x 排放浓度、CO 排放浓度,以及总压损失的误差均在可接受范围内,该仿真结果较为合理,具有参考意义。

表 5 燃烧室结果对比数据表(1.0 工况)

Tab. 5 Comparative data sheet of combustor results
(under full load condition)

参数	仿真数据	试验数据
NO_x 排放体积分数/ 10^{-6}	4.1	5.27
CO 排放体积分数/ 10^{-6}	3.75	3.35
总压损失/%	6.6	5.73
燃烧效率/%	>99	>99

6 结 论

本文针对现役某型低 NO_x 排放燃气轮机燃烧室燃用掺氢燃料情况下的性能进行模拟计算和模化试验验证,通过相应数据分析了天然气燃料的掺氢比对燃烧室内流场和燃烧室关键性能的影响,得出以下结论:

(1) 额定工况下掺氢比 30% 以下时,喷嘴不发生回火,随着掺氢比的升高,喷嘴内部和火焰筒肩部温度逐渐升高,总压损失、 NO_x 排放体积分数缓慢升高,CO 排放体积分数随之减少;

(2) 额定工况下掺氢比超过 30% 时,喷嘴发生回火,喷嘴温度迅速升高,总压损失迅速升高至 7% 以上, NO_x 排放体积分数大幅升高而 CO 排放体积分数基本为零。燃烧室出口温度均匀性随掺氢比变化不大,仅在 30% 掺氢比以上时有小幅波动;

(3) 额定工况时,该燃烧室最高可以实现掺氢 30% 条件下稳定工作,此时燃烧室不发生回火,总压损失约为 7.2%, NO_x 排放体积分数约为 5.2×10^{-6} ,CO 排放基本为零,出口温度分布较均匀;

(4) 在其他工况时,燃烧室的回火边界随工况变化没有单调性变化规律,其中,0.7 额定工况和额定工况回火边界的掺氢比为 30%,0.5 额定工况为 40%,慢车工况为 35%,起动点火工况为 20%。

(5) 后续需要进一步试验判断该型燃烧室稳定

工作的最高掺氢比,更高比例氢含量条件下可能需要对燃烧室结构进行修改。

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] IRENA. Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition [R]. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency (IRENA), 2018.
- [4] 赵永志,蒙 波,陈霖新. 氢能源的利用现状分析 [J]. 化工进展, 2015, 34(9):3248–3255.
- ZHAO Yong-zhi, MENG Bo, CHEN Lin-xin. Utilization status of hydrogen energy [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(9):3248–3255.
- [5] 吕光普,刘 萧,张志浩,等. 氢燃气轮机燃烧技术研究进展 [J]. 燃气轮机技术, 2022, 35(1):1–15.
- LYU Guang-pu, LIU Xiao, ZHANG Zhi-hao, et al. Research progress of combustion technology in hydrogen gas turbine [J]. Gas Turbine Techonlogy, 2022, 35(1):1–15.
- [6] GOLDMEER J. Power to gas; Hydrogen for power generation-fuel flexible gas turbines as enablers for a low or reduced carbon energy ecosystem [J]. GE Power, Feb., 2019.
- [7] ROBB D. Gas and steam turbines adapt [J]. Turbomachinery International, 2022, 63(3):16–26.
- [8] 周业涛. 西门子能源氢燃机进展与应用简介 [R]. 珠海:中国电机工程学会, 2021.
- ZHOU Ye-tao. Progress and application of Siemens energy hydrogen gas turbine [R]. Zhuhai: Chinese Society for Electrical Engineering, 2021.
- [9] NOSE M, KAWAKAMI T, ARAKI H, et al. Hydrogen-fired gas turbine targeting realization of CO₂-free society [J]. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 2018, 55(4):1–7.
- [10] 吕 煒. 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: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (Institute of Engineering Thermophysics), 2010.
- [11] 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):182–195.
- CHANG Yun-xin, 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):182–195.
- [12] 王子叶. 天然气轴向分级预混燃烧特性研究 [D]. 北京:中国科学院大学(工程热物理研究所), 2019.
- WANG Zi-ye. Emissions characteristics of axial fuel staged combustor for gas turbine applications [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Engineering Thermophysics), 2019.
- [13] 杨 强,王 威,任艳平. 模化试验中空气温度对贫燃预混燃烧室性能影响的试验与分析 [J]. 热能动力工程, 2021, 36(1):55–59.
- YANG Qiang, WANG Wei, REN Yan-ping. Influence of inlet air temperature on the performance of lean-burn and premixed combustion chamber [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(1):55–59.
- [14] 李玉星,张 睿,刘翠伟,等. 掺氢天然气管道典型管线钢氢脆行为 [J]. 油气储运, 2022, 41(6):732–742.
- LI Yu-xing, ZHANG Rui, LIU Cui-wei, et al. Hydrogen embrittlement behavior of typical hydrogen-blended natural gas pipeline steel [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(6):732–742.
- [15] DONOHOE N, HEUFER A, METCALFE W K, et al. Ignition delay times, laminar flame speeds, and mechanism validation for natural gas/hydrogen blends at elevated pressures [J]. Combustion and Flame, 2014, 161(6):1432–1443.
- [16] 赵坚行. 燃烧的数值模拟 [M]. 北京:科学出版社, 2002.
- ZHAO Jian-xing. Numerical simulation of combustion [M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [17] 焦树建. 燃气轮机燃烧室 [M]. 北京:机械工业出版社, 1981.
- JIAO Shu-jian. Gas turbine combustor [M]. Beijing: China Machine Press, 1981.
- [18] 陈 雷,王彦滑,马洪安,等. 甲烷掺氢稀释燃烧的燃烧及排放特性试验 [J]. 沈阳航空航天大学学报, 2014, 31(4):12–16.
- CHEN Lei, WANG Yan-hua, MA Hong-an, et al. Experimental research of combustion and emission characteristics of CH₄–H₂ blended fuel with CO₂ dilution [J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2014, 31(4):12–16.

(湛 鑫 编辑)