

氢混天然气燃气轮机加湿低氮燃烧性能研究

吴锋¹, 杨承¹, 肖华², 马晓茜¹

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640; 2. 广州航海学院 船舶与海洋工程学院, 广东 广州 510725)

摘要: 为了解贫预混燃烧室天然气掺氢加湿燃烧时的性能变化和容许加湿范围, 解决氢混燃气轮机 NO_x 排放超标问题, 以某燃气轮机燃烧室为研究对象, 数值研究了掺氢比和加湿比对燃烧性能及污染物排放特性的影响。结果表明: 燃料无加湿条件下, 燃烧室出口 CO 和 CO_2 排放值随着掺氢比的增加而减小, 较高燃烧温度将导致热力型 NO_x 排放值增加, 掺氢比达到 0.2 以上时, NO_x 排放已超出环保限值; 燃料加湿条件下, 随着加湿程度增加, 燃气出口平均流速及水蒸气组分含量均增加, 燃烧筒内全局温度、 CO_2 和 NO_x 排放值均降低, CO 排放值先降低后增加; 掺氢天然气加湿可实现低氮燃烧, 考虑到低掺氢工况燃气轮机功率输出效能和高掺氢工况燃烧性能恶化问题, 水蒸气加湿量不宜过多, 当掺氢比为 0.3 时, 推荐燃料加湿比为 0.463。

关键词: 燃气轮机; 掺氢; 数值模拟; 加湿燃烧; 污染物排放

中图分类号: TK16

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2024.01.015

[引用本文格式] 吴锋, 杨承, 肖华, 等. 氢混天然气燃气轮机加湿低氮燃烧性能研究[J]. 热能动力工程, 2024, 39(1): 137-148. WU Feng, YANG Cheng, XIAO Hua, et al. Research on DeNO_x combustion performance of humidified natural gas with H_2 blending in gas turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(1): 137-148.

Research on DeNO_x Combustion Performance of Humidified Natural Gas with H_2 Blending in Gas Turbine

WU Feng¹, YANG Cheng¹, XIAO Hua², MA Xiao-qian¹

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou, China, Post Code: 510640;

2. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Guangzhou Maritime University, Guangzhou, China, Post Code: 510725)

Abstract: In order to understand the performance changes and allowable humidifying range of natural gas blended with hydrogen in a lean premixed combustor, and to solve the problem of NO_x emissions exceeding the standard in hydrogen blended gas turbine, taking a gas turbine combustor as research object, the influence of blending hydrogen ratio and humidification ratio on its combustion performance and pollutant emissions characteristics was numerically studied. The results show that under the condition of no humidification of the fuel, the CO and CO_2 emissions from the combustor outlet drop with the increase of hydrogen blending ratio. However, thermal NO_x emissions will increase because of higher combustion temperature. When the hydrogen blending ratio reaches above 0.2, NO_x emissions exceed the environmental protection limiting value; under fuel humidification conditions, the average gas outlet velocity and H_2O mass

收稿日期: 2023-09-04; 修订日期: 2023-10-25

基金项目: 广东省能源高效清洁利用重点实验室项目(2013A061401005); 广州市基础 research 计划基础与应用基础研究项目(SL2022A04J-00794)

Fund-supported Project: Guangdong Province Key Laboratory of Efficient and Clean Energy Utilization(2013A061401005); Basic and Applied Basic Research Projects of Guangzhou Basic Research Plan (SL2022A04J00794)

作者简介: 吴锋(1997-), 男, 华南理工大学硕士研究生.

通讯作者: 杨承(1972-), 男, 华南理工大学副教授.

fraction increase, and the global temperature decreases together with the emissions of CO_2 and NO_x in the combustor, whereas the CO emissions decrease first and then increase with the increment of humidification ratio; humidified natural gas with H_2 blending can achieve deNO_x combustion, but the amount of water vapor humidification ought to be moderate considering the following issues, such as the power output efficiency of gas turbine under low hydrogen blending ratio conditions and the deterioration of combustion performance under high hydrogen blending ratio conditions. The recommended fuel humidification ratio is 0.463 when the hydrogen blending ratio is 0.3.

Key words: gas turbine, hydrogen blending, numerical simulation, humidified combustion, pollutant emissions

引 言

在“双碳”生态战略目标背景下,能源消费清洁低碳化转型将深入推进,国家加快发展非传统可再生能源的需求日益迫切。氢能作为一种完全脱碳的可再生能源,被期望作为燃气轮机动力装置 CO_2 减排的清洁发电来源,向天然气燃料中部分掺混氢气可进一步挖掘碳减排潜力^[1-2]。

近年来,国内外学者对燃气机组掺氢燃烧性能已经开展了一些研究。耿卅捷等人^[3]研究表明,在贫燃条件下提高掺氢比能够降低甲烷/氢气混合燃料的 CO 排放浓度,提高当量比有助于降低 NO_x 污染物排放。宋权斌等人^[4]对某微型燃气轮机改烧氢气/氢气混合燃料后的喷嘴进行了优化改造,并利用 FLUENT 软件获得了改造后的燃烧流场分布及污染物排放情况。崔耀欣等人^[5]试验研究了 25% ~ 100% 负荷下不同掺氢比例对于燃烧器回火、燃烧振荡和 NO_x 排放影响,结果表明,在氢含量为 10% ~ 20% 内,燃烧器可安全稳定运行且污染物排放达标。相较于天然气,氢气具有高反应活性、低着火温度、高能量密度、可燃范围广、短点火延迟时间和高绝热燃烧温度等物化属性。当机组直接掺烧含氢天然气燃料时,因可燃气组分发生变化将导致燃烧脉动加剧,燃烧稳定性将面临巨大挑战^[6]。Rajpara 等人^[7]发现,提高掺氢比例有助于提高燃气速度和温度,缩短火焰长度,并降低燃气轮机出口 CO 排放,但火焰温度增加导致 NO_x 排放略有增加。李立新等人^[8]研究了天然气含氢量对燃烧火焰形态、着火特性的影响,指出回火风险及 NO_x 排放超标等问题严重制约高比例掺氢燃气轮机发展。

传统机组降低 NO_x 的方法是通过降低扩散燃

烧比例,相对提高预混燃烧的比例^[9-10],然而这样会直接引发燃烧振荡现象^[11],导致安全调整裕度空间不易控制。加湿燃烧方式因可以通过降低燃烧温度以显著减少燃烧过程 NO_x 排放而愈发受到关注^[12-14]。Reale 等人^[15]研究结果表明,水蒸气稀释是降低 NO_x 排放的有效方式之一,可以提高最大允许掺氢比例。李威等人^[16]分析了不同加湿比例对某型航空发动机环形燃烧室出口温度分布及污染物排放特性的影响,并推荐 1.5 作为最佳加湿比例。肖俊峰等人^[17]分析了湿空气对燃气轮机燃烧性能的影响,结果表明,进口空气加湿会影响燃烧流场结构和火焰形态,还会引起燃烧压力脉动振幅变化。

目前,国内外关于燃气轮机掺氢天然气加湿燃烧特性变化的研究内容不多,水蒸气对氢气在燃烧室内污染物排放特性的影响规律,以及掺氢工况下的容许加湿范围还有待进一步研究。因此,本文以某 F 级重型燃气轮机燃烧室为研究对象,数值模拟研究掺氢天然气加湿燃烧过程,分析不同掺氢比及加湿比对燃烧特性及污染物排放特性的影响规律,从而为掺氢燃气轮机降碳及低 NO_x 排放提供理论参考。

1 数值模拟方法

1.1 研究对象

该燃气轮机燃烧室布置类型为逆流环管方式,主要由 20 个沿外壳表面均匀周向斜插分布的干式低 NO_x 燃烧筒组成。除进入燃烧室头部参与反应的空气外,该环管型燃烧室火焰筒及过渡段部分采用双层结构,并设有大量冷却孔(冷却空气量约占压气机总进气量的 10% ~ 20%)。此外每个燃烧筒配有空气旁路阀门,以调节部分低负荷下进入过渡段的空气量,调整燃烧同时起到维持火焰稳定性的

作用。

单个燃烧筒上分布有 8 个主级燃料预混喷嘴和 1 个中心值班级扩散喷嘴,其燃烧喷嘴结构如图 1 所示。值班火焰的作用主要是作为稳定点火源以保障外围预混火焰燃烧,避免机组低负荷运行时熄火^[18]。

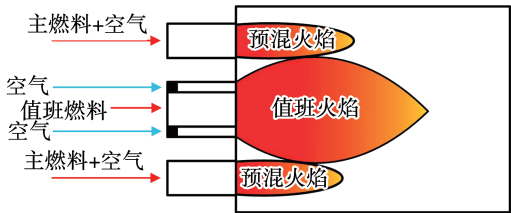


图 1 燃烧喷嘴结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of combustor nozzles

考虑到燃烧室结构复杂,为节约计算资源及成本,在燃烧模拟中作以下合理简化:(1) 天然气燃料为纯甲烷;(2) 忽略燃烧筒内部双层冷却具体结构,将外壁边界条件设置为恒温绝热无滑移边界;(3) 忽略火焰筒和过渡段外部壁厚,仅取燃烧筒内部流体域作为数值模拟燃烧对象;(4) 机组高负荷区间运行时,空气旁路阀可完全关闭,故忽略旁路阀具体结构建模^[12];(5) 简化进口旋流器对混合气体的复杂流动混合过程,预混喷嘴燃料进口边界条件设置为燃料和空气的混合气。

鉴于燃烧室结构具有旋转周期性且结构尺寸庞大,仅取其周向分布的单只燃烧筒作为模拟计算域。图 2 为简化后燃烧筒三维模型图,包含火焰筒、过渡段以及燃气出口段。

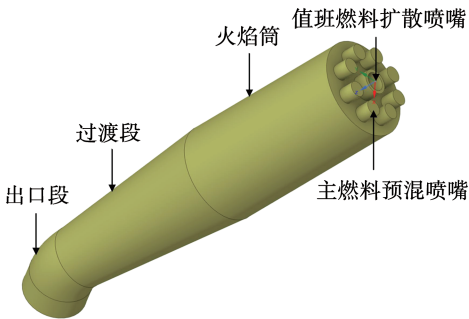


图 2 燃烧筒三维模型

Fig. 2 Three-dimensional model of combustor

1.2 网格无关性验证

燃烧筒模型划分采用 Poly-Hexcore 混合网格布置方式,对于值班喷嘴孔、预混喷嘴孔及出口段连接处等速度梯度较大的复杂流动区域采用四面体非结构网格进行局部网格加密,火焰筒及过渡段内部流体域采用六面体结构化网格。图 3 为燃烧筒网格划分情况。

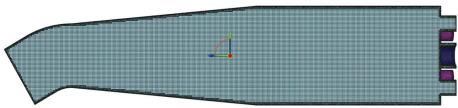


图 3 燃烧筒网格划分

Fig. 3 Combustor grid division

通过对燃烧流场敏感区域进行多次局部加密,用于网格无关性验证的单元数范围为 116 万~702 万的 7 套网格划分方案。图 4 为不同网格数量下模拟得到的燃烧区最大温度及出口平均温度。由图可知:116 万网格得到的温度较低;随着网格加密程度提高温度逐渐升高并趋于稳定,当网格数为 500 万时燃烧区最大温度达到 2 064 K 出口平均温度为 1 705 K;进一步提高网格数量,温度参数曲线没有明显变化。综合考虑计算资源,最终选定 500 万的网格单元数用于模拟分析。

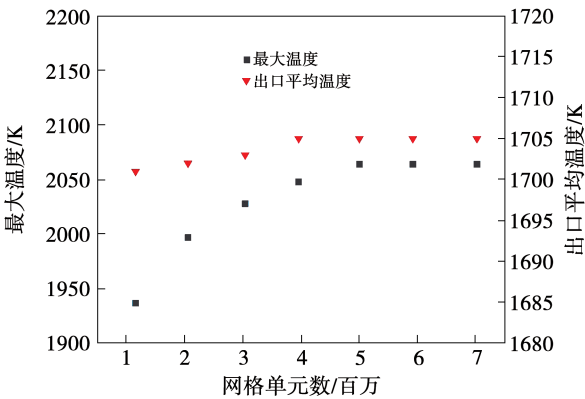


图 4 燃烧筒网格无关性验证

Fig. 4 Grid independence verification of combustor

1.3 模型设置

基于 FLUENT 对燃烧室内燃烧过程进行模拟,湍流流动模型采用 realizable $k-\varepsilon$ 双方程模型^[19]。

为精准捕捉燃料与空气来流湍流/化学反应强耦合作用下燃烧特性,选择部分预混燃烧中 FGM 燃烧模型^[20],采用由 53 种组分及 325 个基元反应组成的详细化学反应机理 GRI3.0^[21]生成火焰面模型,同时引入假定混合组分 PDF 用以表征湍流-燃烧反应的相互影响。压力速度耦合数值方式采用 Coupled 算法。与 SIMPLE 算法将每个控制方程独立求解方式不同,Coupled 算法将动量和连续性方程以耦合方式同时求解,解的收敛速度相对分离算法显著提升,且具有较好的稳定性和收敛性。压力插值使用二阶差分格式,空间离散方式均调整为精度更高的二阶迎风格式。燃料及空气进口设置为质量流边界,燃气出口端设置为压力边界出口,燃烧筒壁面设置为绝热无滑移边界。燃烧过程中 NO_x 生成途径主要有 3 种:燃料型 NO_x、热力型 NO_x 和快速型 NO_x。但本文所研究的甲烷混氢燃料中没有含氮化合物,依据实际燃烧筒内气相燃烧组织过程,污染物生成模型仅考虑后两者。鉴于生成的 NO_x 浓度较低,对于燃烧温度场、流场及碳氢化合物反应浓度场的影响可忽略不计,因而可基于稳态温度场及流场结果,再采用后处理叠加计算方式来预测 NO_x 生成。

1.4 边界条件

华白指数表征燃烧室应对不同燃气互换时的适应性能力,当天然气燃料掺混不同比例氢气时,其华白指数将发生变化。掺氢比是指氢气占总可燃混合气流量的体积比例,其公式为:

$$Y = \frac{Q_{H_2}}{Q_{H_2} + Q_{CH_4}} \tag{1}$$

式中:Y—掺氢比;Q_{H₂}—可燃混合气中 H₂ 的体积分数,%;Q_{CH₄}—可燃混合气中 CH₄ 的体积分数,%。

燃机厂家为保证燃气轮机燃烧稳定性,防止燃料气质特性波动过大引发燃烧振荡、回火等安全隐患,在不进行系统升级改造的基础上,通常限制燃料的华白指数变动范围为 ±5%^[22-23],华白指数定义为可燃混合气低位热值与空气相对密度的平方根之比^[24],公式如下:

$$G = \frac{YC_h + (1 - Y)C_m}{\sqrt{\frac{Y\rho_h + (1 - Y)\rho_m}{\rho_a}}} \tag{2}$$

式中:G—华白指数,MJ/m³;C—燃料低位体积热值,MJ/m³;ρ—物质密度,kg/m³;下标字母含义如下:h—氢气;m—甲烷;a—空气。

图 5 为不同掺氢比例下燃料华白指数及质量热值变化趋势。由图中可以看出,随着氢气体积比例增加,华白指数先降低后升高。当掺氢比例为 0%~20%,燃料华白指数偏差量均小于 5%,不过当掺氢比例为 30% 时,其偏差量达到 8.05%。由于氢气质量热值远高于甲烷,因而掺氢天然气质量热值会随之增加,且当氢气体积占比大于 80% 时,热值增速明显加快。

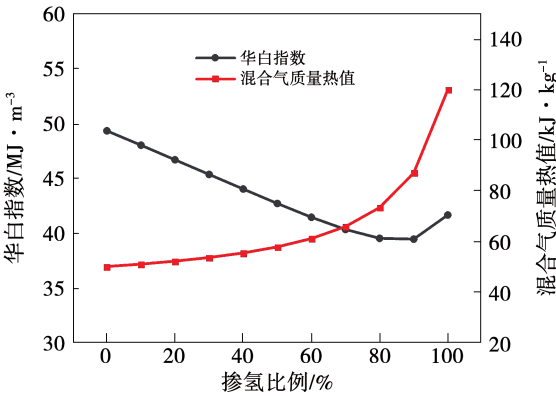


图 5 燃料华白指数和热值变化随掺氢比例变化趋势
Fig.5 Variation of Wobbe index and calorific value of fuel with hydrogen blending ratio

以 10% 为步长,选取不同体积分数在 0%~30% 的掺氢比例范围进行模拟。已知燃烧室内运行压力为 1.7 MPa,燃料预热至 484 K 后进入燃烧室,与压气机出口温度为 704 K 的来流压缩空气反应燃烧。不同掺氢工况模拟时调节机组的总热负荷输出,使其始终维持在原设计工况下的 708.26 MW 不变。总燃料量的 6.7% 用于值班喷嘴扩散燃烧,其余燃料量用于主级燃料喷嘴形成均相预混燃烧。同时设定各主级、值班级燃料空燃比按设计工况策略运行。表 1 给出了维持机组相同热负荷下不同掺氢工况所对应的进口边界流量信息。

表 1 不同掺氢比例工况下进口流量信息

Tab.1 Inlet flow information under different hydrogen blending ratios

掺氢比 Y/ %	氢气质量分数/ %	机组总燃料流量/ kg·s ⁻¹	单只燃烧筒进口流量/kg·s ⁻¹		体积热值 / MJ·m ⁻³	当量比
			主燃料量	值班燃料量		
0	0	14.13	0.082 42	0.047 35	35.8	0.456
10	1.377	13.87	0.080 88	0.046 46	33.29	0.462
20	3.046	13.56	0.079 08	0.045 43	30.78	0.470
30	5.110	13.20	0.076 97	0.044 22	28.27	0.479

1.5 模拟结果验证

燃气轮机工作条件比传统锅炉燃烧设备严苛,其主要工作特性包括高温高压、强气流速度、高热量释放密度以及贫燃料燃烧等^[25]。选取广东某电厂 F 级重型燃气轮机满负荷下实际运行检测参数,对数值模拟结果准确性进行验证,对比结果如表 2 所示。

表 2 模拟结果验证

Tab.2 Validation of simulation results

名称	负荷率/%	温度/K	流速/m·s ⁻¹	NO _x 浓度/mg·m ⁻³
模拟值	100	1 705	140	26.37
实际值	100	1 694	130	27.42
误差/%	100	0.64	7.69	-3.82

以纯甲烷工况为例,图 7 为燃烧筒主流区流线矢量图。

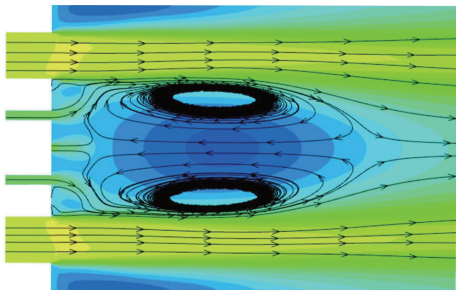


图 7 燃烧筒主流区流线矢量图

Fig.7 Streamline vector diagram of mainstream area in combustor

2 结果分析与讨论

2.1 掺氢对燃烧特性及排放的影响

2.1.1 掺氢对速度流场的影响

图 6 为不同掺氢比下燃烧筒中心剖面速度分布云图。从图中可知,当燃料中加入氢气参与反应,各工况下燃烧区内的速度分布趋势大体相似,随着氢气比例的增加,中心回流区逐渐缩小。

当值班燃料气流在经喷嘴射出后迅速向周围膨胀并被甩入中心回流区时,由于双涡旋低速流场区的存在,给混合可燃燃气在火焰筒径向方向的高速运动带来明显迟滞影响,由此避免了火焰因流速过高而被吹熄,为稳定着火点生成提供了基础。同时,燃烧筒内回流区中存在火焰传播速度与相对气流法向速度相同的某点,故而火焰前锋可得以驻定在该涡旋区,并向下游未燃混合气传递热量和活化分子。

图 8 给出了不同掺氢工况下值班喷嘴速度分布曲线。由图 8 可知,不同工况下的变化主要集中在喷嘴附近,值班喷嘴出口气流速度从掺氢比 0 时的 50.14 m/s 提升到掺氢比 30% 时的 63.53 m/s。这是因为维持同热负荷输出时,体积热值随着掺氢比例增加而减小,因而燃料体积流量随之增加,以致喷嘴附近混合燃料气流射速提升。气体在值班喷嘴附近逐渐衰减至负值,即形成局部回流,气体通过中心回流区后,流速逐渐提升,由于出口段横截面积缩小,流速进一步加快,各掺氢工况下出口平均流速均处于 140 ~ 150 m/s。

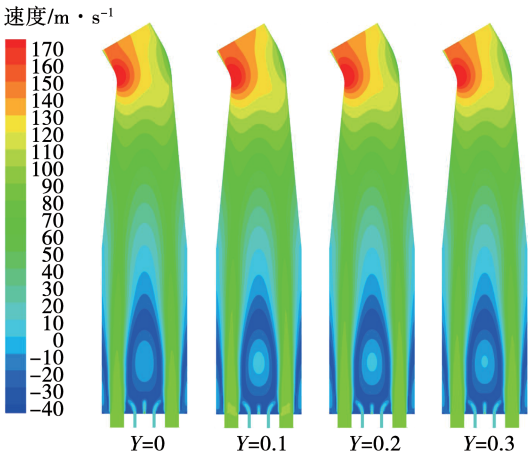


图 6 燃烧筒剖面速度分布云图

Fig.6 Distribution of velocity in combustor profile

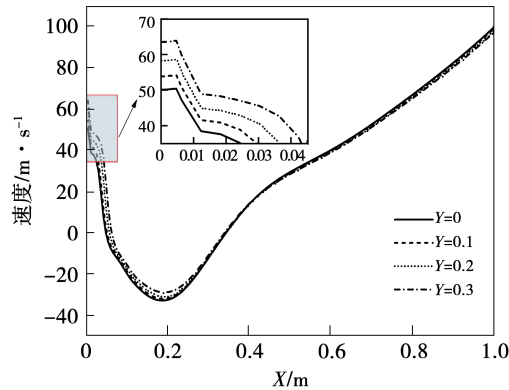


图 8 值班喷嘴中心轴线速度分布

Fig.8 Distribution of velocity at central axis of pilot nozzle

2.1.2 掺氢对温度流场的影响

图 9 为 0,0.1,0.2 和 0.3 掺氢比例工况下燃烧筒中心剖面温度分布云图。由图 9 可知,各工况下值班喷嘴附近双涡旋区均出现了局部高温区,这是因为扩散燃烧方式火焰温度较高所形成的,且燃烧区最高温度随氢气体积分数增加持续升高。当燃料为纯甲烷时,燃烧筒内最高温度为 2 064.88 K,而当燃料掺氢比例切换至 30% 时,最高温度达到了 2 160.93 K,中心高温区明显随着掺氢比例增加而向火焰上游延伸,4 个工况下出口平均温度分别为 1 705.5,1 722.7,1 743.3 和 1 772.3 K。

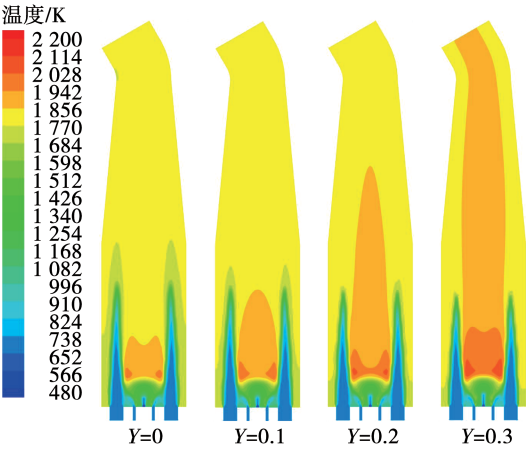


图 9 燃烧筒剖面温度分布

Fig.9 Distribution of temperature in combustor profile

图 10 和图 11 分别为不同掺氢比下主燃烧喷嘴和值班喷嘴轴向方向上的温度分布曲线。明显可以看出,随着掺氢比增加预混燃烧高温区沿着 X 轴坐

标减小的方向移动,且温度峰值逐渐增加,即预混火焰长度缩短。这是因为,氢气含量增加会使混合气点火延迟时间缩短并导致着火点提前,故温度峰值坐标前移。扩散火焰平均温度呈现出“单峰”形状,且最大温度峰值和温升梯度随着掺氢比的提高而增加,这在温度云图上则体现为中心高温区向燃烧筒下游后移。

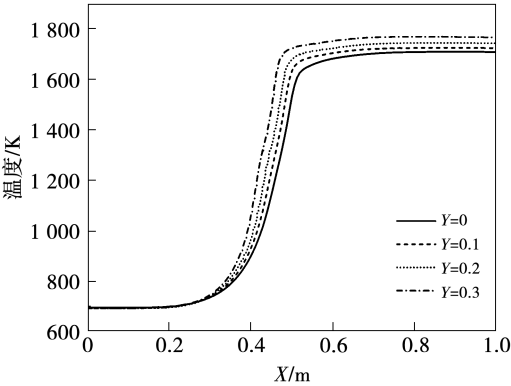


图 10 主燃烧喷嘴中心轴线温度分布

Fig.10 Distribution of temperature at central axis of main combustion nozzle

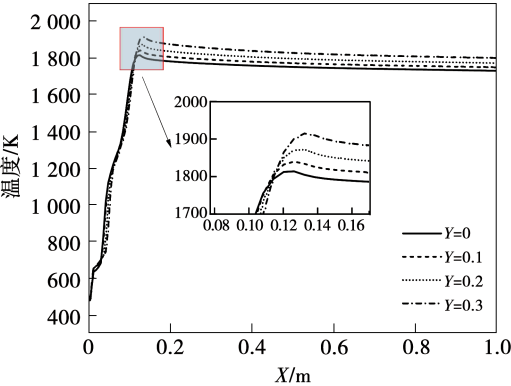


图 11 值班喷嘴中心轴线温度分布

Fig.11 Distribution of temperature at central axis of pilot nozzle

2.1.3 掺氢对污染物排放的影响

燃烧筒中心剖面 NO 摩尔分数分布如图 12 所示。由图可知,随着燃料中氢气掺混增多,NO 污染物生成摩尔分数也逐渐增多,且污染物大多在中心主燃回流区及火焰下游至出口段处生成。其中,高浓度 NO 主要在温度处于 1 800~2 200 K 的值班喷嘴出口附近主燃区。在掺氢比例越高的情况下,火焰燃烧温度越高的区域,其 NO 生成越严重。结合

图 9 温度分布云图认为,NO 生成趋势与温度场分布趋势一致,由于掺氢天然气不含氮化合物,且热力型 NO_x 中 90% 以上污染物为 NO,可见与温度密切相关的热力型 NO_x 是导致此处 NO 含量迅速增加的主要原因。

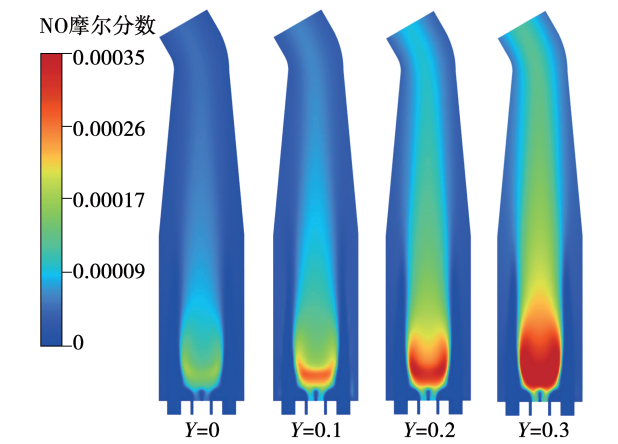


图 12 燃烧筒剖面 NO 摩尔分数分布云图
Fig. 12 Distribution of NO molar fraction in combustor profile

依据《火电厂大气污染排放标准》(GB13223—2011)所述,实测污染物体积排放浓度需折算为基准氧含量(15% O₂)状态下去除水分的干态燃气污染物排放值,其修正公式如下^[26]:

$$\alpha_{\text{NO}_x} = 2.05 \times \frac{I_{\text{NO}_x} \times 10^6}{1 - I_{\text{H}_2\text{O}}} \times \frac{21\% - 15\%}{21\% - I_{\text{O}_2}} \quad (3)$$

式中: α_{NO_x} —归一化后 NO_x 排放浓度,mg/m³; I_{NO_x} , $I_{\text{H}_2\text{O}}$, I_{O_2} —出口燃气中 NO_x, H₂O 和 O₂ 的摩尔体积含量,μL/L。

图 13 比较了不同掺氢工况下出口 NO_x 排放量。当无掺氢时,出口排放浓度为 26.37 mg/m³,当掺氢比为 30% 时,排放值提高至 74.43 mg/m³,增加了约 1.8 倍,已远超出国内固定式天然气燃气轮机组所规定的 50 mg/m³ 环保排放执行限值,因而过多的氢气掺混量对于 NO_x 排放十分不利。

表 3 给出了不同掺氢工况下出口 CO 排放量以及 CO₂ 减排量结果。可以看出,随氢气体积的增加,燃烧过程中 CO 生成受到抑制,这是由于 CO 污染物主要是由于燃烧室中的燃料不完全燃烧而产生的,高化学反应活性氢气的混入使得反应物质在燃烧筒内发生强烈复杂的湍流交换,有利于混合燃料与空

气的混合,促使 CO 反应转化为 CO₂。同时,燃烧温度增加将提高整体化学反应速率,减少了燃烧不完全现象出现,因而出口未燃尽 CO 污染物含量减小。出口 CO₂ 体积浓度也随着燃料掺氢比增加而减小,原因主要在于燃料中碳元素占比下降。与同等热负荷下的纯甲烷燃烧工况相比,30% 的掺氢比例可减少燃烧筒出口 9.91% 的 CO₂ 排放,CO 排放浓度减少量达到 5.32%。

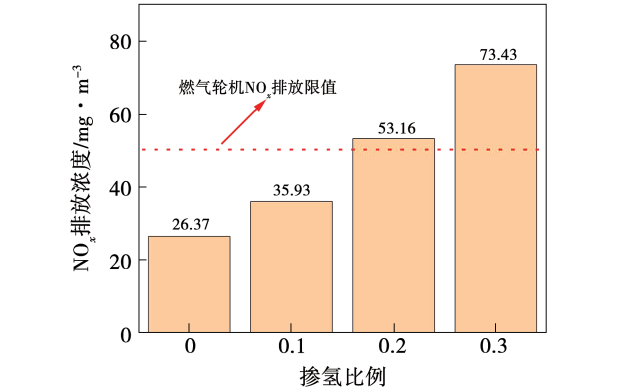


图 13 不同掺氢工况下燃烧筒出口 NO_x 排放量
Fig. 13 NO_x emission at the outlet of combustor under different hydrogen blending ratios

表 3 燃烧筒出口 CO 和 CO₂ 排放量
Tab. 3 CO and CO₂ emissions at the outlet of combustor

Y/ %	CO ₂ 摩尔分数	CO 摩尔分数	CO ₂ 减排量/ %	CO 减排 量/%
0	4.66	3.61	0.00	0.00
10	4.49	3.55	3.66	1.70
20	4.34	3.48	7.00	3.71
30	4.20	3.42	9.91	5.32

2.2 掺氢后的加湿特性

为解决天然气掺氢所带来的污染物排放超限问题,将来源于余热锅炉的高参数水蒸气和掺氢天然气进行预混。为量化掺氢天然气燃料预混加湿程度,引入水蒸气加湿比 λ , 其定义为可燃混合气加湿预混后水蒸气所占体积摩尔分数,公式如下:

$$\lambda = \frac{Q_{\text{H}_2\text{O}}}{Q_{\text{H}_2\text{O}} + Q_{\text{H}_2} + Q_{\text{CH}_4}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: λ —水蒸气加湿比; $Q_{\text{H}_2\text{O}}$ —加湿掺氢天然气中水蒸气的体积分数,%; λ 取为 0~0.5。

掺氢天然气加湿系统如图 14 所示。该系统主要由 3 部分组成:(1) 氢气通过调压阀将压力调整为规定值,随后经流量计控制掺混氢气比例后送入掺混单元;(2) 来源于管线输送的高压天然气燃料依次通过前置过滤器、调压阀,最后通过性能加热器进行预热后进入掺混单元;(3) 用于加湿的高温高压水蒸气取自余热锅炉过热器,经减压阀降压后注入掺混单元。

氢气、天然气和水蒸气按照一定比例在掺混单元中进行充分均匀混合后经涤气器除去大颗粒杂质,进入燃烧室参与反应。

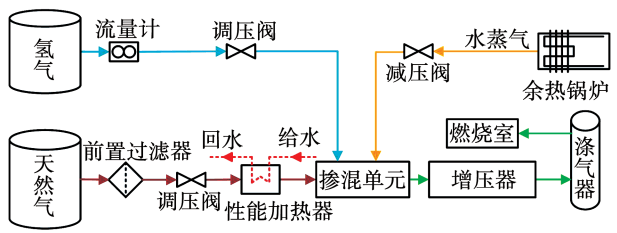


图 14 天然气掺氢加湿燃烧系统示意图
Fig. 14 System diagram of humidified natural gas combustion with H₂ blending

2.2.1 加湿对掺氢燃烧温度的影响

图 15 为水蒸气加湿比对燃烧筒内燃气最高温度的影响规律。可以看出,不同掺氢比下,随着加湿程度的提高,燃烧筒温度峰值持续下降,这是因为,在掺氢天然气释放热负荷一定情况下,由于水蒸气的热容量较大导致燃气的混合比热相对增加,其吸热量随加湿比提高而增加,故燃料反应区燃气温度下降。例如水蒸气加湿比为 0 时,4 种掺氢工况下最高温度分别为 2 064. 88,2 097. 64,2 136. 22 和 2 160. 93 K,然而当水蒸气加湿比增加到 0.5 时,各掺氢工况下最高温度依次降为 1 937. 68,1 983. 84,2 051. 75 和 2 090. 46 K。

图 16 为出口平均温度随水蒸气加湿比的变化曲线。可以看出,在相同掺氢比例下,出口平均温度随着水蒸气加湿比的增加呈单调减小趋势,其变化趋势原因与图 15 是类似的。以掺氢比为 0.3 为例,加湿比从 0 增加至 0.5,温度从 1 772. 32 K 降低至 1 745. 62 K。此外,掺氢比例较低时,温降速度越快。以掺氢比为 0 为例,加湿比从 0 增加至 0.5,出口平均温度从 1 705. 54 K 减少至 1 656. 12 K。两个

掺氢工况下分别降低 26. 7 和 49. 42 K。值得注意的是,低掺氢工况(0~0.1)继续提高水蒸气加湿量将导致燃气出口平均温度明显下降,然而透平进气温度降低将影响燃气轮机功率输出^[27],使得燃气做功能力下降,因此将低掺氢工况下满足出口平均温度为设计值 1 700 K 时的加湿比定为推荐加湿比 λ_1 ,例如当掺氢比为 0 时 λ_1 为 0.115,而当掺氢比提高至 0.1 时 λ_1 则增至 0.372。

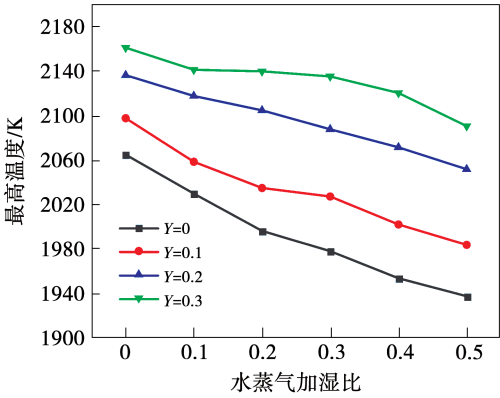


图 15 水蒸气加湿比对燃烧筒最高温度的影响
Fig. 15 Influence of water vapor humidification ratio on the maximum temperature of combustor

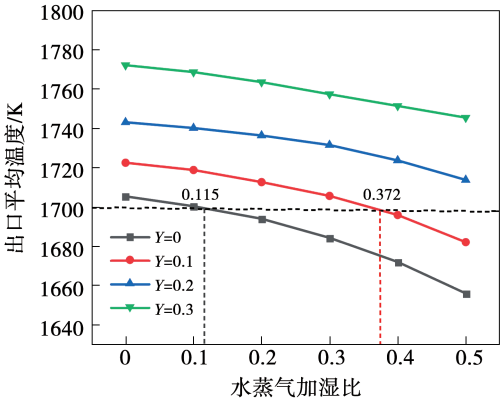


图 16 水蒸气加湿比对出口平均温度的影响
Fig. 16 Influence of water vapor humidification ratio on the outlet average temperature

2.2.2 加湿对出口燃气流速的影响

图 17 为燃烧筒出口燃气平均流速随掺氢比和水蒸气加湿比的变化情况。由图可知,同一掺氢比下,燃气流速随加湿比的增加而增大,且水蒸气混入对燃气流速的影响较大;当掺氢天然气无加湿情况时,燃气流速随掺氢比的增加而减小,这是因为氢气

完全反应燃烧时所需空气量小于甲烷,从而导致掺氢后燃气总流量下降,出口燃气流速变小。而在高加湿比工况下(约大于 0.3),水蒸气混入量的增多造成燃气密度增加抵消了掺氢比例增加带来的流速下降,因此燃气流速随掺氢比的增加而增加。以掺氢比为 0 为例,燃气流速从加湿比为 0 时的 143.91 m/s 增至加湿比为 0.5 时的 146.27 m/s,增幅约为 1.64%,然而当掺氢比增加至 0.3 时,燃气流速从 140.65 m/s 增加到 154.99 m/s,增幅高达 10.99%。

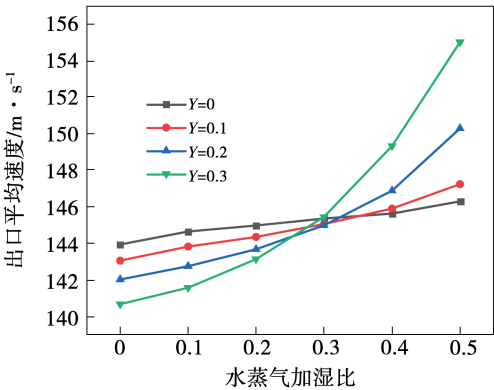


图 17 水蒸气加湿比对燃烧筒出口平均速度的影响
Fig. 17 Influence of water vapor humidification ratio on average velocity at the outlet of combustor

2.2.3 加湿对出口燃气水蒸气组分含量的影响
图 18 为不同掺氢比例下,燃烧筒出口燃气中水蒸气组分随加湿比的变化情况。

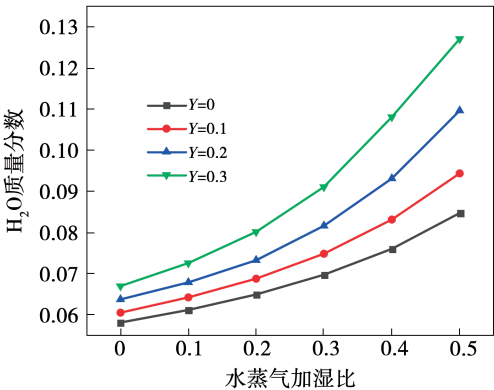


图 18 水蒸气加湿比对燃烧筒出口 H₂O 质量分数的影响
Fig. 18 Influence of water vapor humidification ratio on H₂O mass fraction at the outlet of combustor

由图可知,燃气中的水蒸气质量分数随加湿比的升高而呈现上升趋势,且高掺氢比情况下的增加

幅度尤为明显。当加湿比从 0 增加至 0.5 过程中,如掺氢比为 0 时燃气水蒸气组分从 5.81% 增至 8.47%,而掺氢比提升至 0.3 时燃气水蒸气组分则从 6.69% 大幅增加到 12.71%,两种掺氢比例工况下增幅分别为 45.78% 和 89.98%。

可见,随着燃气侧水蒸气含量增多,燃气物性的变化必将影响透平级膨胀焓降、透平排气温度以及余热锅炉烟气侧的换热特性,进而影响联合循环机组的变工况性能和经济性。

2.2.4 加湿对污染物排放的影响

燃料混氢加湿燃烧时,燃烧室出口 CO₂ 排放特性如图 19 所示。由图可知,在同一掺氢比下,随着加湿比的增加,出口燃气中的 CO₂ 体积浓度下降,且下降速率逐渐加快。以掺氢比为 0.3 为例,当加湿比从 0 增加至 0.5 时,出口 CO₂ 体积分数从 4.2% 减小到 3.46%,出口 CO₂ 排放相对减少了 17.61%。主要原因是加湿掺氢燃料中氢气和 水蒸气含量增多。

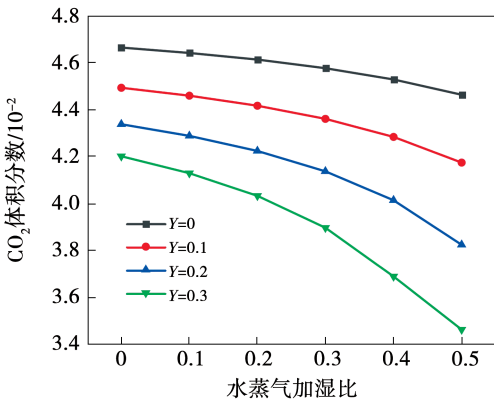


图 19 水蒸气加湿比对燃烧筒出口 CO₂ 体积分数的影响
Fig. 19 Influence of water vapor humidification ratio on CO₂ volume fraction at the outlet of combustor

图 20 为水蒸气加湿比变化对出口 CO 排放特性的影响。可以看出,与图 19 中 CO₂ 排放趋势明显不同,各掺氢工况下随着水蒸气加湿比的增加,CO 排放体积分数均呈现先降低后升高的趋势。这是因为在水蒸气混入的初始阶段,燃料体积流量得以进一步增加,中心回流区速度增加将加强反应物掺混程度,有效促进了 CO 的燃烧;当水蒸气混入量继续增多,在燃料完全燃烧所需热量增加和燃气射流过

大的共同作用下,燃烧稳定性出现恶化甚至出现局部火焰吹熄现象,燃烧连锁反应中断,出口处未燃尽燃料增加,不完全燃烧加剧,故 CO 浓度转而上升。此外,在高掺氢工况条件下,CO 浓度上升趋势受燃料加湿比影响更加显著,这意味着燃烧稳定性变差。

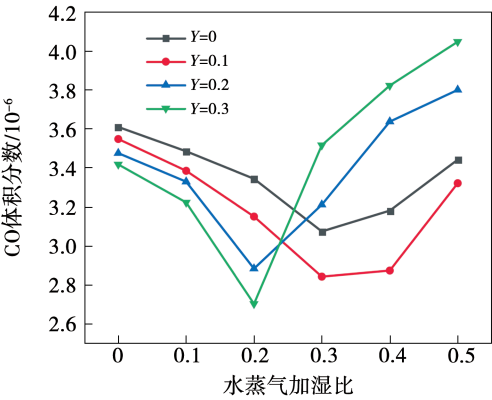


图 20 水蒸气加湿比对燃烧筒出口 CO 体积分数的影响
Fig. 20 Influence of water vapor humidification ratio on CO volume fraction at the outlet of combustor

图 21 为水蒸气加湿比对燃烧室出口 NO_x 排放浓度的影响规律。由图可知,在相同掺氢比例下,出口 NO_x 排放随水蒸气加湿比的增大而降低,其原因主要在于热力型 NO_x 生成规律与燃烧温度变化趋势有较强关联性。

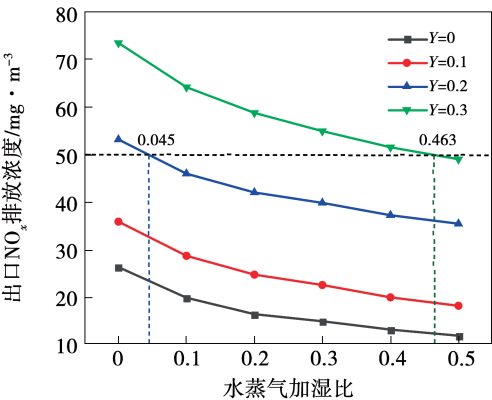


图 21 水蒸气加湿比对 NO_x 排放浓度的影响

Fig. 21 Influence of water vapor humidification ratio on NO_x emission concentration

燃料加湿会降低燃烧筒全局温度,因此 NO_x 排放浓度也相应降低。例如,在掺氢比为 0.3 情况下,出口排放浓度从燃料无加湿时的 73.43 mg/m³ 下降

到加湿比为 0.5 时的 49.02 mg/m³。此外,对于高掺氢工况(0.2~0.3),由于含氢量较高导致 NO_x 排放超标,为达到电厂实行的 NO_x 排放标准,掺氢燃料需要预混更多水蒸气,考虑到 CO 排放和燃烧性能,水蒸气加湿量不宜过多,本文同样将高掺氢工况下满足出口 NO_x 排放浓度为 50 mg/m³ 的加湿比定为推荐加湿比 λ₁。例如当掺氢比为 0.2 时 λ₁ 为 0.045,而当掺氢比增至 0.3 时 λ₁ 则为 0.463。

3 结 论

针对某 F 级燃气轮机燃烧室天然气掺氢加湿燃烧工况,开展数值模拟研究。考察了天然气燃料以 0~30% 比例掺混氢气后的燃烧特性和污染物生成特性;同时,为解决天然气掺氢所带来的污染物排放超限问题,深入探究了水蒸气加湿比对燃烧性能及污染物排放的影响规律,主要结论如下:

(1) 在燃气轮机天然气燃料中掺混氢气,对于燃烧速度流场的变化并不显著;但是,随着氢气体积分数的增加,燃烧参数场全局温度增加,中心高温区扩大并向燃烧筒下游移动,同时可有效改善 CO 和 CO₂ 排放性能;随着值班喷嘴扩散火焰温度明显提高,这将造成热力型 NO_x 生成量也显著增加,当掺氢比介于 0~0.1 之间时,出口 NO_x 排放浓度小于 50 mg/m³;而当掺氢比达到 0.2 以上时,燃气轮机出口 NO_x 排放浓度已超出环保执行限值。

(2) 掺氢天然气加湿燃烧结果表明,燃料加湿可以实现低氮燃烧。在同一掺氢比下,随着燃料加湿程度的增加,燃气出口流速增加,且高掺氢比例时水蒸气加湿量对流速的变化更为敏感,燃气水蒸气组分含量增加,燃烧筒内最高温度、出口平均温度、CO₂ 和 NO_x 排放浓度均降低;CO 排放先降低,但随着水蒸气加湿比增加到一定程度,CO 排放重新升高。

(3) 掺氢燃料燃烧时不应仅满足降低 NO_x 排放浓度而持续加大加湿程度,还需综合考虑低掺氢工况下燃气轮机功率输出效能和高掺氢工况下燃烧性能,因此本文给出了 4 种掺氢工况下的推荐水蒸气加湿比分别为 0.115,0.372,0.045 和 0.463。

燃气轮机采用加湿掺氢燃料运行时,由于燃气

成分发生变化,实际运行工况点将偏离原设计工况点,后续工作将着重于探究富含水蒸气条件下的燃气物性和传热性质,耦合联合循环系统各部件和热力过程特性,求解掺氢燃烧模式下的系统全工况运行性能。

参考文献:

- [1] 陈晓利,陈希叶,邱朋华,等. 添加 H_2 对 9F 级燃气-蒸汽联合循环机组效率的影响[J]. 热能动力工程, 2022, 37(9): 12-21.
CHEN Xiao-li, CHEN Xi-ye, QIU Peng-hua, et al. Effect of hydrogen addition on the efficiency of 9F class gas-steam combined cycle unit [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(9): 12-21.
- [2] 胡道明,李 蛟,杜晓东,等. 碳中和背景下含氢综合能源系统碳排放和经济性分析[J]. 热能动力工程, 2023, 38(4): 111-120.
HU Dao-ming, LI Jiao, DU Xiao-dong, et al. Carbon emissions and economic analysis of integrated energy system containing hydrogen using for carbon neutrality [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(4): 111-120.
- [3] 耿卅捷,潘禾吉田,杨 欢,等. 燃气轮机天然气掺氢燃烧及排放特性数值模拟研究[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(12): 1-11.
GENG Sa-jie, PAN He-jitian, YANG Huan, et al. Numerical study on influence of H_2 blending on combustion and emission characteristics of gas turbine [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(12): 1-11.
- [4] 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.
- [5] 崔耀欣,刘晓佩,陈明敏. F 级重型燃气轮机燃烧器天然气掺氢全压试验研究[J]. 燃气轮机技术, 2021, 34(2): 38-42.
CUI Yao-xin, LIU Xiao-pei, CHEN Ming-min. Experimental study of natural gas mixed with hydrogen under full pressure of F-class heavy duty gas turbine burner [J]. Gas Turbine Technology, 2021, 34(2): 38-42.
- [6] 吕光普,刘 潇,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 Technology, 2022, 35(1): 1-15.
- [7] 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.
- [8] 李立新,刘星雨,曾过房,等. SGT-800 重型燃气轮机天然气掺氢燃烧数值模拟研究[J]. 热力发电, 2023, 52(12): 70-78.
LI Li-xin, LIU Xing-yu, ZENG Guo-fang, et al. Numerical modeling of natural gas combustion with hydrogen blending in SGT-800 heavy-duty gas turbine [J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(12): 70-78.
- [9] 刘 石,蔡 笋,邓小文,等. 基于 CRN 方法的重型燃气轮机燃烧室排放研究[J]. 广东电力, 2019, 32(3): 37-44.
LIU Shi, CAI Sun, DENG Xiao-wen, et al. Study on emission of heavy duty gas turbine combustor based on CRN approach [J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(3): 37-44.
- [10] 隋永枫,张宇明,臧 鹏,等. 次级燃烧对轴向分级燃烧室燃烧特性影响的试验研究[J/OL]. 上海交通大学学报: 1-15 [2023-08-21].
SUI Yong-feng, ZHANG Yu-ming, ZANG Peng, et al. Experimental study on the influence of secondary combustion on combustion characteristics of axial staged combustor [J/OL]. Journal of Shanghai Jiao Tong University: 1-15 [2023-08-21].
- [11] 李锦峰. M701F3 燃气轮机改进燃烧筒优化燃烧的分析与应用[J]. 燃气轮机技术, 2017, 30(1): 64-67.
LI Jin-feng. Analysis and application of upgrading the combustor baskets to optimize combustion for M701F3 gas turbine [J]. Gas Turbine Technology, 2017, 30(1): 64-67.
- [12] 杨 承,丁 苏,任洪运,等. 天然气燃料预混水蒸气的燃气轮机低氮燃烧研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4): 1111-1118, 1288.
YANG Cheng, DING Su, REN Hong-yun, et al. Study on $deNO_x$ combustion of gas turbine by natural gas premixed with steam [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4): 1111-1118, 1288.
- [13] 王城景,李智聪,刘 冰,等. 乙烯加湿燃烧特性与碳烟生成机理研究[J]. 热力发电, 2021, 50(11): 107-114.
WANG Cheng-jing, LI Zhi-cong, LIU Bing, et al. Study on humidified combustion characteristics of ethylene and the soot formation mechanism [J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(11): 107-114.
- [14] 王纪晔,赵亚笛,罗志云,等. 不同稀释剂对燃气锅炉 NO_x 排放及燃烧稳定性的影响[J]. 环境工程, 2019, 37(8): 148-153.
WANG Ji-ye, ZHAO Ya-di, LUO Zhi-yun, et al. Effect of different diluents on NO_x emission and combustion stability of boilers fueled by natural gas [J]. Environmental Engineering, 2019, 37(8): 148-153.
- [15] REALE F. Effects of steam injection on the permissible hydrogen

content and gaseous emissions in a micro gas turbine supplied by a mixture of CH₄ and H₂: A CFD analysis [J]. Energies, 2022, 15(8): 2914.

[16] 李 威, 张哲巅. 某航空发动机燃烧室天然气湿燃烧数值模拟研究[J]. 热能动力工程, 2021, 36(5): 126 – 133.

LI Wei, ZHANG Zhe-dian. Numerical investigation on a jet-engine combustor fueled by humidified natural gas [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36 (5): 126 – 133.

[17] 肖俊峰, 王 玮, 胡孟起, 等. 空气含湿量对燃气轮机燃烧性能影响[J]. 热力发电, 2019, 48(4): 84 – 89.

XIAO Jun-feng, WANG Wei, HU Meng-qi, et al. Effect of humidity ratio on combustion performance of gas turbine combustor [J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(4): 84 – 89.

[18] 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 Zhong-guang, SHI Li, LIU Bing-han, 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.

[19] 李 涛, 郑祥龙, 张哲巅, 等. 某燃气轮机燃烧室燃料适应性数值研究[J]. 热力发电, 2022, 51(3): 70 – 78.

LI Tao, ZHENG Xiang-long, ZHANG Zhe-dian, et al. Numerical study on fuel flexibility of a gas turbine combustor [J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(3): 70 – 78.

[20] 范瑞虎, 张 腾, 李井华, 等. 基于 FGM 模型的同轴射流非预混火焰大涡模拟[J]. 热能动力工程, 2023, 38(5): 42 – 49.

FAN Rui-hu, ZHANG Teng, LI Jing-hua, et al. Large eddy simulation of co-axial jet non-premixed combustion using FGM model [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(5): 42 – 49.

[21] SMITH G P, GOLDEN D M, FRENKLACH M, et al. GRI-Mech version 3.0 [EB/OL]. [2023 – 08 – 20]. <http://combustion.berkeley.edu/gri-mech/version30/text30.html>.

[22] 潘志明, 乐增孟, 李爱玲, 等. 燃气轮机天然气组分变化应对措施研究与探讨 [J]. 燃气轮机技术, 2020, 33 (4): 34 – 39, 56.

PAN Zhi-ming, YUE Zeng-meng, LI Ai-ling, et al. Research and discussion on the measures to deal with the change of natural gas components in gas turbine [J]. Gas Turbine Technology, 2020, 33(4): 34 – 39, 56.

[23] 李立新, 张昭昭. 某型号 F 级燃气轮机混氢燃烧的性能分析和工程实践[J]. 动力工程学报, 2022, 42(10): 912 – 918.

LI Li-xin, ZHANG Zhao-zhao. Combustion performance analysis and engineering practice of a F-class gas turbine with hydrogen addition [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(10): 912 – 918.

[24] TAAMALLAH S, VOGIATZAKI K, ALZHRANI F M, et al. Fuel flexibility, stability and emissions in premixed hydrogen-rich gas turbine combustion: Technology, fundamentals, and numerical simulations [J]. Applied Energy, 2015, 154: 1020 – 1047.

[25] 焦树建, 孙守林, 张艳春. 燃气轮机与燃气 – 蒸汽联合循环装置 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

JIAO Shu-jian, SUN Shou-lin, ZHANG Yan-chun. Gas turbine and gas-steam combined cycle unit [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.

[26] 黄亚军. 简论废气氮氧化物 (NO_x) 浓度单位 PPm 与 mg/m³ 的换算系数关系 [J]. 四川环境, 2010, 29(1): 24 – 25, 46.

HUANG Ya-jun. Brief discussion on conversion coefficient between the concentration units ppm and mg/m³ of nitrogen oxides (NO_x) [J]. Sichuan Environment, 2010, 29(1): 24 – 25, 46.

[27] 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.

(姜雪梅 编辑)