

掺氢对燃气轮机燃烧室燃烧和排放性能的影响研究

李祥晟, 郭菡, 郁鸿飞, 郑鹏飞

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了研究以天然气为燃料的干式低排放(DLE)贫预混(LP)燃烧室改用氢燃料时的性能变化和掺氢极限,满足低碳排放燃机安全可靠运行的要求,以某 F 级发电用重型燃气轮机燃烧室为研究对象,数值研究了天然气/氢气混合燃料不同掺氢比(H_2 体积分数 0~100% 共 6 种工况)对燃烧室燃烧和排放性能的影响,分析了燃烧室可能出现的问题。研究表明,燃用天然气的 LP 燃烧室在改用氢燃料时,存在着回火的巨大风险,在掺氢比达 40% 时回火导致的燃烧器喷口高温区域明显,在更高的掺氢比下存在烧毁的可能,且高氢条件下回火发生且向上游传播,为机组运行带来巨大的安全问题。中心以扩散方式工作的值班燃烧器不存在回火风险。产物中 CO 和 CO_2 的含量随掺氢比的增加而降低, H_2O 含量增加; NO_x 的排放量随氢含量的增加呈现增加的趋势,但增幅并不显著。

关键词: 氢燃气轮机;燃烧性能;燃烧室;燃料灵活性

中图分类号: TK26 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202206002 **文章编号:** 0253-987X(2022)06-0009-08



OSID 码

Study on Combustion and Emission Performance of
Hydrogen Fuel Gas Turbine Combustor

LI Xiangsheng, GUO Han, YU Hongfei, ZHENG Pengfei

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To meet the requirements of the safety and reliability for de-carbonization of gas turbine power systems, the performance changes and hydrogen admixture limits of the dry low emission (DLE) lean premixed (LP) combustor fueled with natural gas when switching to hydrogen fuel was numerically studied. The F-class heavy-duty gas turbine combustor for power generation was selected as the study object. Details of the actual combustor geometry were included in the simulations. The effects of different hydrogen admixture ratios of natural gas (6 working conditions of volume content for 0—100% H_2) on the combustion and emission performance of the gas turbine combustor are numerically studied. Potential problems in the combustion chamber during fuel switching are analyzed. The results have shown that there is a huge risk of flashback when significant amounts of hydrogen are added to fuel mixtures in the LP combustor fueled with natural gas. When the hydrogen content reaches 40%, the high temperature area of the burner nozzle caused by the flashback is obvious. With a higher hydrogen content, the head parts of the combustion chamber is at risk of being burned down and the high temperature flame may propagates upstream along the pipeline, which brings huge safety problems to the system. There is no risk

of flashback in the diffusion flame hold in the center pilot burners. The content of CO and CO₂ in the product decrease and the content of H₂O increase with the increase of the hydrogen mixing ratio. NO_x levels in the combustor outlet show an increasing trend with the increase of the hydrogen content, but the rate of increase is not significant.

Keywords: hydrogen gas turbine; combustion performance; combustor; fuel flexibility

日益严重的气候问题给人类带来的紧迫感日趋加强。针对碳排放,各国政府都提出了自己的脱碳目标。在2019年联合国气候峰会召开之际,66个国家已宣布打算在2050年前实现净零碳排放目标。一些国家的目标是深度脱碳,到2050年实现碳排放减少80%或更多^[1]。我国也在2020年政府工作报告上提出了“3060”(即在2030年实现“碳达峰”,2060年实现“碳中和”),并表示会持续投资于基于可持续技术的非化石燃料能源产业。

发电行业是全球温室气体排放的主要来源,因而被确定为二氧化碳减排的主要目标行业,当今发电市场正在经历着可再生能源和脱碳的重要变革。燃气轮机电站,无论是开式循环、联合循环还是热电联产,都具有最高的效率,可以适用于各种功率输出。发电市场对燃气轮机装置的要求一直是提高效率、增加功率和降低排放。迄今为止重型发电用燃气轮机主要燃用天然气和燃油,近年来燃气轮机制造商及相应领域的专家学者正在努力拓宽燃气轮机的燃料适用性,其中IGCC和天然气掺氢直至纯氢燃气轮机是关注的重点^[2]。

天然气是碳含量最低的化石燃料,作为主要燃料,其产生的每千瓦时二氧化碳排放量最低。同时,利用燃气轮机的燃料灵活性,用氢气完全或部分置换天然气可进一步使发电过程脱碳。由于氢是一种零碳燃料,它为燃气轮机提供了产生零碳发电的机会。作为能源载体,氢气是长期或季节性存储可再生能源的理想选择,而燃气轮机是实现零碳发电经济的推动者^[1]。

为了应对能源结构体系的变化以及未来能源的布局,需要逐步提高燃气轮机燃料中的含氢比例,直到完成纯氢燃烧。燃料中氢气的存在会改变燃料的火焰速度、点火迟滞、可燃极限等特性。不同天然气掺氢比例和不同氢/稀释剂混合物燃料的燃烧、热声、排放性能等与天然气有显著差异。同时,氢气具有高扩散性和高化学反应活性等特殊性质,高比例氢气会对燃烧化学反应过程和压力依赖关系产生非线性影响,影响到燃烧化学反应过程中自由基的分布和基元反应的竞争。氢气和富氢燃料强烈的组分

输运、扩散和反应性会影响到层流火焰自身特性,包括火焰面内组分分布结构和自身不稳定性,从而影响湍流与燃烧化学反应耦合作用,进而对燃烧室内湍流燃烧和放热过程产生与传统碳氢燃料有显著差异的影响。

各燃机制造商的设计经验和实践与已有的研究表明,通过天然气加氢,可以提高天然气的燃烧速率,扩展天然气的稳定稀燃极限^[3]。而高混合比例的氢混燃料,需要面对回火、燃烧压力波动和氮氧化物排放等几大技术挑战,想要攻克仍需要一定时间。在向基于氢的能源系统过渡时,燃烧室需要应对各种各样的氢气/天然气混合物以及燃料成分的快速变化。在中期,需要开发能够燃烧氢气/天然气混合物的灵活燃料燃气轮机,其中氢气的含量要比现在更高。从长远来看,需要开发出具有完全燃料灵活性的燃气轮机(氢气和天然气混气以及纯氢气),这还需要进行长期的研发创新。

现今的大型燃气轮机中安装的干式低NO_x(DLN)燃烧室,普遍采用预混燃烧方式实现降NO_x排放。预混燃烧器的不足在于燃烧稳定范围比常规扩散燃烧器狭窄,并且容易出现回火现象。在燃气轮机燃烧器内,有可能烧损上游无冷却的部件,因此防止回火现象非常重要。

当前,我国正通过“航空发动机与重型燃气轮机”国家重大专项的实施,致力于开发具有自主知识产权的F级重型燃气轮机。在两机专项的重燃专项中,涉及了F级富氢燃料重型燃机的技术研究,F级富氢燃料重型燃机技术与验证是基于重燃专项300 MW级F级重型燃机产品,重点解决富氢合成气燃料所带来的关键技术问题,其研究成果可以极大地拓展F级燃气轮机的应用空间,为我国富氢合成气燃料发电领域的发展提供技术支撑。

近年来,针对氢燃气轮机的燃烧国内外已开展了一些研究。这些研究大多针对燃用氢燃料时的微混燃烧^[4-6]、阵列驻涡^[7-9]、低旋流燃烧器^[10-11]等新型燃烧方式或扩散稀释燃烧^[12]。实际工业燃气轮机贫预混燃烧室的燃烧性能变化以及掺氢容许极限的研究内容不多。文献^[13]对某F级燃气轮机燃

烧室不同掺氢比的燃烧性能进行了实验研究,结果表明所研究的燃烧室在掺氢比 10%~20%(体积分数)的范围内可实现稳定燃烧。本文以某实际的重型发电 F 级燃气轮机燃烧室为对象,数值研究不同天然气掺氢比条件下燃烧室的燃烧和排放性能。

1 数值模型和方法

1.1 形体和网格

燃气轮机由压气机、燃烧室和透平构成。压气机将气体压缩后供入燃烧室,在燃烧室中与燃料进行燃烧反应后产生高温高压的气体推动透平做功。F 级燃气轮机指透平进口温度大于 1 350 °C 的燃气轮机。计算采用某发电用 F 级重型燃气轮机燃烧室,该燃烧室采用环管型结构,上下两半燃烧室外壳与压气机和透平的外缸连接成一个整体,20 个燃烧器沿机组圆周均匀地斜插入燃烧室外壳里,燃料喷嘴由围成一圈的 8 个干式预混式主喷嘴和位于中心的 1 个值班喷嘴组成。

取 20 个燃烧器中的 1 个(周向区域为 18°)作为计算对象。所取计算域如图 1 所示,包含燃烧室外壳与外缸所构成的区域。对计算区域生成分块结构化和非结构化网格构成的混合网格,网格无关性验证共采用 3 套网格,通过 450、670、900 万网格的计算结果进行比较,考虑到计算消耗和计算精度,最终选定计算网格数为 670 万。

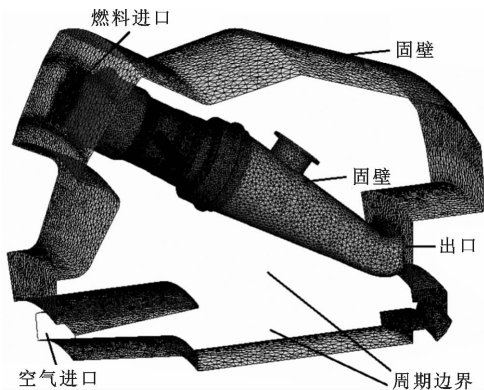


图 1 计算区域和计算网格

Fig. 1 Computational domain and mesh

1.2 数值模型和边界条件

1.2.1 数值模型

数值模拟采用商用 CFD 软件 ANSYS Fluent 19.2。湍流模型采用可实现的 Realizable $k-\epsilon$ 两方程模型,该模型对于流动具有强流线弯曲、涡流和旋流等特性时精度有明显改进,可获得平面和圆形射流的扩张,旋流、强逆压力梯度下的边界层分离和回

流流动的准确预测^[14]。为了进一步提升预测精度,按照 Dally 等^[15]对旋流射流火焰的建议,将湍流模型常数改为 $C_{\epsilon 1}=1.6$ 。

火焰机制决定了火焰的湍流-化学反应相互作用,在任何模拟中,了解火焰机制对于选择 CFD 燃烧模型都是至关重要的。为了考虑数值模拟所采用的湍流燃烧模型的有效性,首先在经典的 Borghi 图上给出其燃烧机制,图 2 给出了本研究的燃气轮机贫预混燃烧室的图形位置(运行于 1 700 kPa)^[16]。

图中 Da 和 Ka 分别为 Damköhler 数和 Karlovitz 数,其定义为^[17]

$$Da = \frac{\tau_{\text{turb}}}{\tau_{\text{ch}}} = \frac{S_L^0 l_0}{\delta_L u'} \quad (1)$$

$$Ka = \frac{\tau_{\text{ch}}}{\tau_{\eta}} = \frac{\delta_L}{S_L^0} \frac{v}{\eta^2} = \frac{\sqrt{Re_T}}{Da} \quad (2)$$

式中: τ_{ch} 为化学反应时间尺度; S_L^0 为层流火焰速度; δ_L 为层流火焰厚度; τ_{turb} 为湍流时间尺度; l_0 为湍流积分长度尺度; u' 为湍流速度的函数; τ_{η} 为 Kolmogorov 时间尺度; v 为分子运动黏度; η 为 Kolmogorov 微观尺度函数; Re_T 为湍流雷诺数。

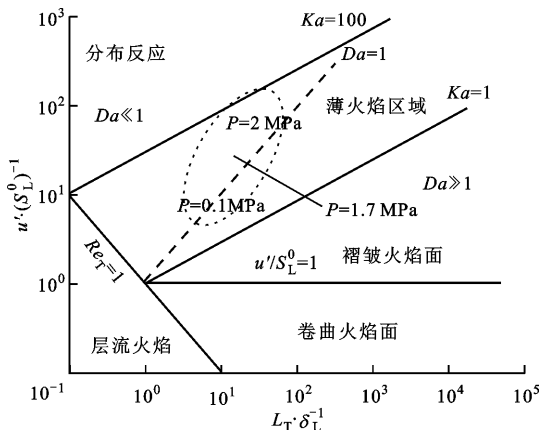


图 2 贫预混燃烧室的湍流燃烧机制

Fig. 2 Diagram of turbulent combustion regime in the lean premixed combustor

与天然气的燃烧相比,氢燃料火焰的特征是高的 Da 和低 Ka ,因为它们层流火焰速度高于甲烷。高的 Da 数意味着高反应速度的火焰,混合过程决定火焰的传播。 Ka 数是反应时间与 Kolmogorov 湍流尺度(湍流耗散的长度尺度)的特征时间之比, Ka 小意味着湍流耗散的速度比化学反应的消耗速度慢,故火焰面模型可用于本文的数值研究工作。

本文的湍流燃烧模型采用 ANSYS Fluent 中部分预混燃烧模型中实现的火焰面生成流形模型

(FGM),FGM 模型具有较低的计算成本,在过去的十年中广泛应用于燃烧室的碳氢燃料的燃烧^[4-5]。该燃烧模型假定湍流火焰可以由一系列的火焰面表示,将它们的热力学和化学状态参数化建表并用于三维火焰。通过概率密度函数(PDF)描述湍流-化学反应相互作用,可考虑由于湍流物质在火焰前沿内部传输而引起局部火焰熄灭的可能性。

本文共对甲烷掺氢比为 0~100% 的 6 种工况进行了研究,在纯 H₂ 条件下,根据 Marcos 等^[4,18]的建议,通过将 PDF Schmidt 数从默认值 0.7 更改为 0.25 来修改扩散特征,以适应与碳氢燃料相比更高的氢气的质量扩散率。

1.2.2 边界条件

机组的已知设计参数见表 1。天然气按 100% 纯 CH₄ 计算,其热值 $H_u=50\ 108\text{ kJ/kg}$ 。燃料需要量为

$$G_f=\frac{P\times 1\ 000}{\eta H_u}\tag{3}$$

式中: P 为机组功率; η 为装置效率。不同 CH₄ 掺氢比燃料的热值在表 2 中给出。进行燃料切换时,假定机组的输出功率维持不变,通过式(3)可获得不同掺氢比时的燃料需要量,其计算值在表 2 中给出。同时,机组总燃料量的 85% 用于主燃烧器,15% 用于

表 1 机组的初始设计条件

Table 1 Original design parameters of the unit

参数	数值
机组功率 P/MW	270.30
机组效率 $\eta/\%$	38.20
空气流量/ $(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	651.00
压比	17.00
压气机效率/ $\%$	0.89
透平进口温度/ $^{\circ}\text{C}$	1 400.00

表 2 不同掺氢比时燃料热值及质量流量计算值
Table 2 Calculated mass flow rate of fuel calorific value at different hydrogen admixture ratios

掺氢比/ $\%$	$H_u/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	$G_f/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	主喷嘴流量/ $(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	值班喷嘴流量/ $(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$
0	50 108	14.13	12.01	2.12
20	52 221	13.54	11.51	2.03
40	55 472	12.76	10.85	1.91
60	61 118	11.59	9.85	1.74
80	73 352	9.64	8.19	1.45
100	119 840	5.92	5.04	0.89

中心的值班燃烧器。总空气流量为 651 kg/s,其中 83% 供入燃烧室,17% 用于透平冷却,因而进入单个燃烧室的空气流量为 27 kg/s,温度由压气机的压比和效率计算,其值为 691 K。

1.2.3 计算设置

指定燃烧室运行压力 1 700 kPa。根据不同掺氢比燃料流量的计算结果(见表 2),在燃料和空气进口分别指定质量流量及温度值,出口指定压力。不同掺氢比甲烷氢气的热物性使用 Cantera 计算结果确定,尤其是得到参考温度为 691 K 时的未燃混合物的密度、热导、无拉伸的绝热层流火焰速度等值。图 3 示例性地给出了所考虑的计算条件下不同掺氢比混气的层流火焰速度计算值。

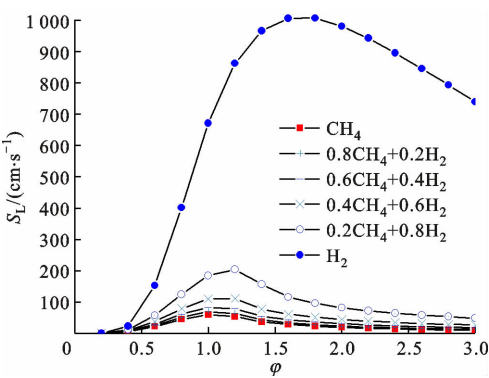


图 3 $p=1\ 700\text{ kPa}$ 、 $T_u=691\text{ K}$ 条件下,不同掺氢比混气层流火焰传播速度 S_L 随当量比 φ 的变化

Fig. 3 Variations of laminar lame propagation velocity S_L with equivalence ratio φ at different hydrogen admixture ratios when $p=1\ 700\text{ kPa}$ and $T_u=691\text{ K}$

使用 SIMPLEC 算法求解内部的压力速度耦合。压力方程选择线性离散,以保证具有较小的数值耗散,与其他的离散方案比能够得到更精细的火焰前锋。动量和过程变量方程使用中心差分方案,用于保证线性方案的稳定性。

2 反应机理和模型验证

本文的数值研究使用 Miller 等提出的包含氮氧化的 54 组分、251 步的反应机理^[19]。为考察机理及模型的可靠性,采用 Sydney 钝体火焰 HM1e 的实验装置及数据进行验证^[15]。如图 4 所示,装置由方形管中放置的直径 $D=50\text{ mm}$ 的圆形钝体喷嘴构成,有关实验装置和实验数据的更多细节,可参考文献^[15,20]。

选择该模型燃烧室一方面是由于其实验所用燃料为 H₂、CH₄ 体积比为 1:1 的混合物,另一方面,该

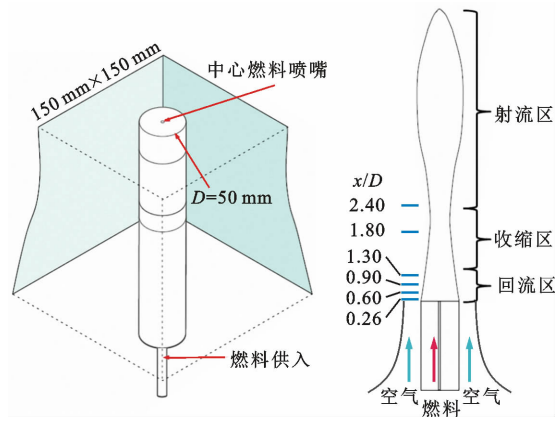


图 4 Sydney 钝体火焰 HM1e 实验装置及火焰结构^[15]

Fig.4 Experimental setup and flame structure of Sydney bluff body flame HM1e^[15]

燃烧室可以再现工业燃烧室中所具有的射流、回流区等复杂特性^[21]。

图 5 给出了不同轴向位置处 O_2 、 H_2O 、 CO 和 NO 的质量分数沿径向分布的数值模拟结果与实验结果的比较,其中所取的轴向位置在图 4 右图中示出。由图 4 可以看出,采用上述的反应机理和数值模型所获得的温度、主要反应物 O_2 、主要产物 H_2O 、中间产物 CO 的质量分数的预测值均与实验结

果吻合良好。微量产物 NO 的预测结果与实验结果在火焰根部位置和后部射流区有些许偏差。应该说明的是,本文对 H_2 、 CH_4 、 CO_2 、 OH 等其他组分以及速度场的预测值与实验值均进行了比较,结果均给出了良好的吻合性。

3 结果分析和讨论

图 6 给出了掺氢比为 0~100% 的 6 种工况下,燃烧室沿火焰筒纵向中心截面的温度分布等值线。由图 6 可知,由于氢气的反应活性大,随掺氢比增加,燃料混合气体的化学反应点火时滞减小,混合气可以在更短的时间内被点燃,因而反应发生在更上游的位置,火焰高温区位置向喷嘴方向移动。同时,由于反应活性大,氢气的燃烧相比甲烷更加快速,使得火焰长度缩短。此外,由图 3 可以看到,在所研究的计算条件下,混合气体的层流火焰传播速度随掺氢比的增加而增大,当预混器喷出的混气的气流速度低于火焰向上游的传播速度时,出现回火现象^[22-24]。

图 7 给出了随燃料中氢含量的增高,燃烧室头部燃烧器壁温分布情况。由图 7 可以看出,当燃料为天然气时(以 100% CH_4 表征),燃烧器头部最高

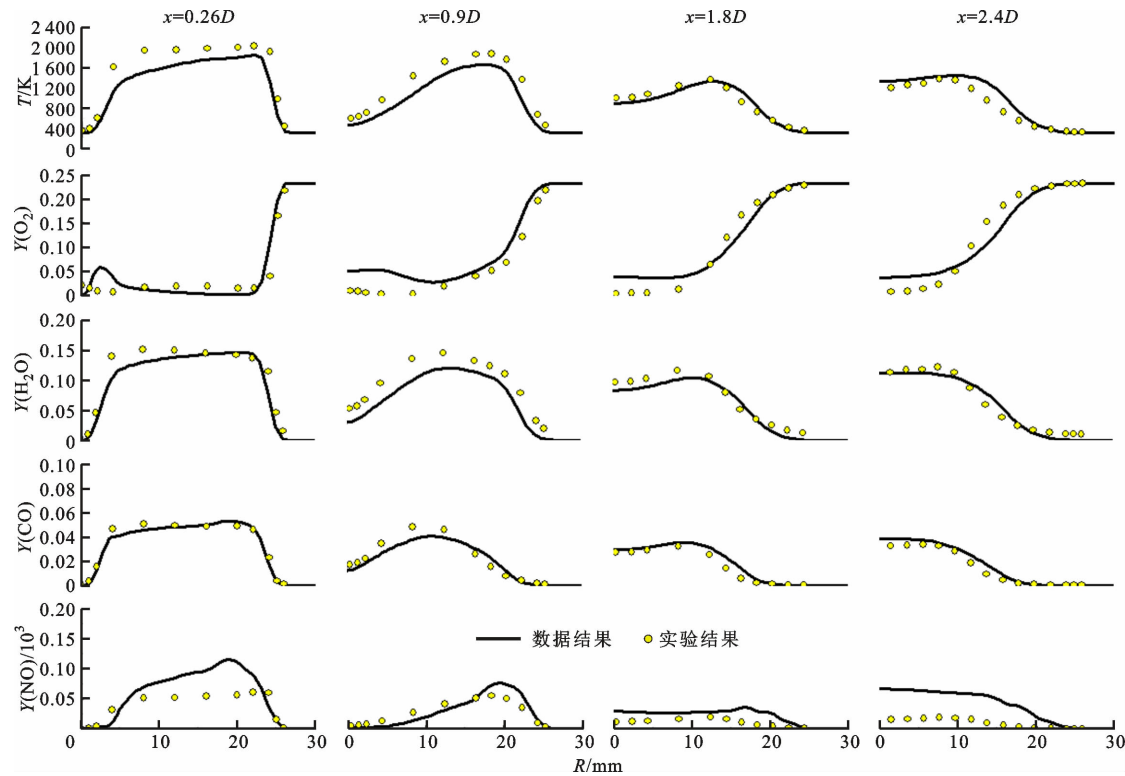


图 5 不同轴向位置处温度 T 和 O_2 、 H_2O 、 CO 、 NO 的质量分数 $Y(O_2)$ 、 $Y(H_2O)$ 、 $Y(CO)$ 、 $Y(NO)$ 沿径向分布的比较

Fig.5 Comparisons of numerical and experimental results for the temperature and mass fractions of O_2 , H_2O , CO , NO ($Y(O_2)$, $Y(H_2O)$, $Y(CO)$ and $Y(NO)$) at different axial positions

壁温约为 800 K,且高温区域仅存在于预混器出口段边缘的较小区域。随掺氢比增加,高温区域向上游移动,预混燃烧器出口出现大范围高温区域,随掺氢比增加,高温区域扩大且温度增加。掺氢比达到 60% 体积含量时,最高壁温达 1 700 K,超过金属材料的耐热极限。当燃用纯 H_2 时,燃烧反应在预混段已经发生,预混燃烧器所有区域均处高温环境中,最高壁温达 2 000 K 以上,预混燃烧器无法正常工作。

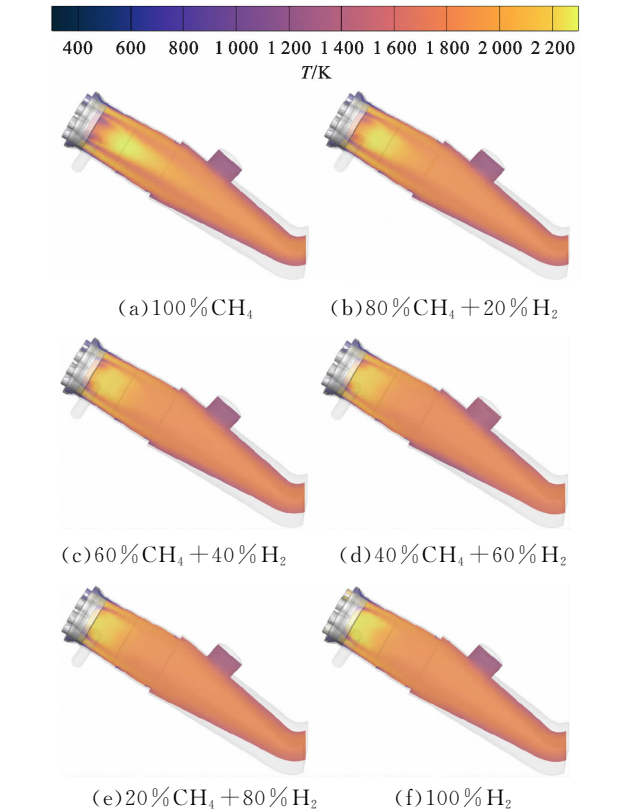


图 6 不同掺氢比时燃烧室中心截面温度分布等值线
Fig. 6 Contours of Temperature Distribution in the Center Section of the Combustion chamber with different hydrogen admixture ratios

由图 7 可知,当燃料中加入 H_2 时,由于中心值班喷嘴以扩散燃烧的方式进行,即燃料与空气并非事先混合,因此不具备燃烧条件,火焰不会向上游传播。图 7 中值班喷嘴壁面温度随着燃料中掺氢比的提高并未出现回火所导致的高温区域。

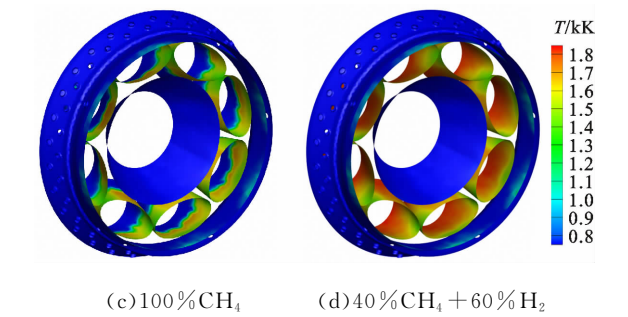
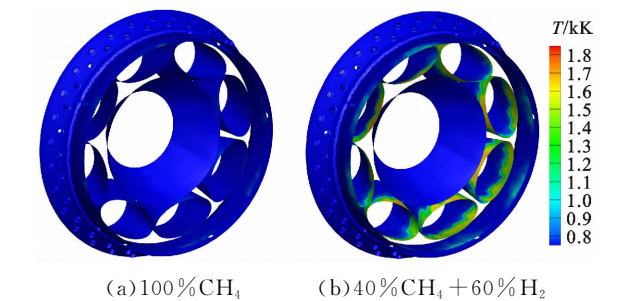


图 7 预混燃烧器出口段温度分布
Fig. 7 Temperature distribution in the outlet section of the premixed burner

图 8 给出了不同燃料掺氢比条件下的燃烧室出口温度分布情况。由图 8 可以看出,掺氢比发生变化时,燃烧室出口的温度分布大体相似,氢气的加入对燃烧室出口的温度分布几乎不产生影响。高温区域位于燃烧室出口中部,最高温度位于后部透平叶片约 $2/3$ 叶高位置,叶尖叶片薄、强度差,而叶根通常应力较大,燃烧室出口的这种温度分布趋势可为叶片的安全工作提供保障。

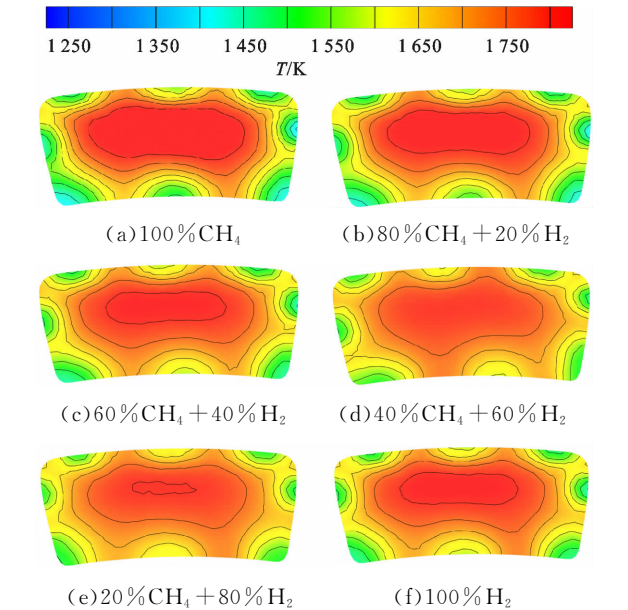


图 8 不同燃料掺氢比燃料的燃烧室出口温度分布等值线
Fig. 8 Outlet temperature contour for fuels with different hydrogen admixture ratios

表 3 给出了不同掺氢比条件下燃烧区域火焰最高温度、出口平均温度、出口最高温度以及出口温度分布不均匀系数的计算值。由表 3 可以看出:不同掺氢比燃料均获得了所要求的透平进口温度 1 700 K;出口温度分布不均匀系数 δ 也均满足小于 10% 的要求,随掺氢比增加,出口温度场趋于更加均匀;纯氢气燃烧时,出口温度分布不均匀系数略有增加。

表 3 不同掺氢比时燃烧室出口温度分布均匀性

Table 3 Uniformity of temperature distribution at the outlet with different hydrogen admixture ratios

掺氢比/%	燃烧区最高温度/K	出口平均温度/K	出口最高温度/K	不均匀系数 δ /%
0	2 435	1 701	1 861	9.4
20	2 359	1 698	1 830	7.8
40	2 276	1 700	1 815	6.8
60	2 259	1 702	1 798	5.6
80	2 288	1 700	1 800	5.9
100	2 420	1 703	1 818	6.8

表 4 给出了燃烧室出口的主要产物组分 CO、CO₂、H₂O 质量分数及 NO_x 的排放计算结果。其中 NO_x 的排放值 I_1 为修正到干基 15% 氧气浓度气态污染排放物的值,计算公式为^[25]

$$I_1 = \frac{5.9\bar{\chi}_1}{20.9 - \bar{\chi}_2}$$

(4)

式中 $\bar{\chi}_1$ 、 $\bar{\chi}_2$ 分别取计算获得的燃烧室出口处 NO_x 和 O₂ 的摩尔浓度平均值。

表 4 燃烧室出口主要产物质量分数及 NO_x 排放特性

Table 4 Mass fraction of main products and NO_x emission characteristics at the outlet of the combustion chamber

掺氢比/%	$Y(\text{CO})/10^{-6}$	$Y(\text{CO}_2)/10^{-2}$	$Y(\text{H}_2\text{O})/10^{-2}$	I_1
0	5.38	7.08	5.79	72
20	4.32	6.56	6.04	73
40	3.40	5.89	6.43	73
60	2.79	4.89	7.01	74
80	1.98	3.24	7.94	76
100	0	0	9.80	86

由表 4 可以看出,随燃料掺氢比的提升,燃烧室出口 CO 和 CO₂ 浓度下降,H₂O 的浓度增加。随着燃料中掺氢比的增加,燃烧室出口 H₂O 含量增加。燃气组分的变化会导致透平焓降的变化和换热特性的改变。此外,随掺氢比的增加,燃烧室出口 CO 和 CO₂ 排放值降低,且在所研究的工作条件下,CO 生成量很少,燃烧进行完全,可达到接近 100% 的燃烧效率。在 NO_x 的排放方面,由于所研究的燃烧室的工作条件为贫燃料条件,同时燃料中不包含固定 N,因而 NO_x 的排放主要为热力型 NO。可以看到,NO_x 的排放随 H₂ 的增加呈增加的趋势,但增幅不大,纯氢气时具有较高的排放值。

4 结 论

本文对某 F 级燃气轮机燃烧室在不同掺氢比条件下的燃烧和排放性能进行了数值研究和分析。结果表明:在维持机组输出功率不变的条件下(以当量热量的 H₂ 代替 CH₄),当燃料中掺入 H₂ 时,燃烧室中的最高火焰温度不发生显著变化;出口平均温度及温度分布均可满足机组的原始参数要求;燃料中 H₂ 的加入会使以贫预混方式工作的燃烧器产生回火问题。对于本文的研究对象,当掺氢比大于 40% 时,在预混段内出现因回火产生的高温区域。以扩散方式工作的燃烧器可大大降低回火风险。

在污染物排放方面,燃料中 H₂ 的加入会降低燃烧室出口 CO 和 CO₂ 排放量;NO_x 的排放量随着燃料掺氢比的增加呈增加的趋势,但变化并不显著,纯氢气燃烧时有较高的 NO_x 排放值。随燃料掺氢比的增加,产物中 H₂O 含量增加,将对后部透平的做功能力和换热特性产生较大影响。

参考文献:

[1] WELCH M. Decarbonizing power generation through the use of hydrogen as a gas turbine fuel [C]// ASME 2019 Power Conference. New York, NY, USA: ASME, 2019: V001T01A001.

[2] IEA. The future of hydrogen: seizing today's opportunities [EB/OL]. (2019-06-14)[2021-10-12]. <https://www.iea.org/events/the-future-of-hydrogen-seizing-todays-opportunities>.

[3] TANIGUCHI K. Current status and future perspective of MHPS gas turbine development for power generation [C/OL] // 7th International Conference on Power Engineering [2021-10-12]. <http://dx.doi.org/10.1115/POWER2019-1821>.

[4] ZGHAL M, SUN X, GAUTHIER P Q, et al. Comparison of tabulated and complex chemistry turbulent-chemistry interaction models with high fidelity large eddy simulations on hydrogen flames [C] // ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. New York, NY, USA: ASME, 2020: V003T03A014.

[5] BIANCHINI C, DA SOGHE R, ANDREINI A, et al. CFD investigation of a lean premixed burner redesign for high hydrogen content syngas operation [C] // ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition. New York, NY, USA: ASME, 2015: V04AT04A035.

- [6] 刘勋伟. 含氢燃料多微混射流火焰的燃烧特性与稳焰机制研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.
- [7] 于宗明, 吴鑫楠, 邱朋华, 等. 燃气轮机富氢燃料预混燃烧实验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1426-1433.
YU Zongming, WU Xinnan, QIU Penghua, et al. Experimental study on premixed combustion for gas turbines burning high hydrogen fuels [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1426-1433.
- [8] MENON S, BOUTEN T, WITHAG J, et al. Numerical investigation of 100% premixed hydrogen combustor at gas turbines conditions using detailed chemistry [C] // ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. New York, NY, USA: ASME, 2020: V003T03 A016.
- [9] 于宗明, 贺红娟, 王岳, 等. 阵列驻涡预混器内流抗挂火机理研究 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3231-3241.
YU Zongming, HE Hongjuan, WANG Yue, et al. Study on the anti-flame holding mechanism of internal flow in an arrayed-vanes premixer [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3231-3241.
- [10] 陈立, 李祥晟. 低旋流 CH_4/H_2 火焰的燃烧特性及稳定性机制研究 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(1): 72-78.
CHEN Li, LI Xiangsheng. Study on the combustion characteristics and stabilization mechanism of low swirl CH_4/H_2 flame [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(1): 72-78.
- [11] 陈立, 李祥晟, 杨诏, 等. 气流入口条件对低旋流燃烧火焰稳定性的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(5): 114-119.
CHEN Li, LI Xiangsheng, YANG Zhao, et al. Effects of inlet conditions on low swirl combustion flame stability [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(5): 114-119.
- [12] 吴鑫楠. 燃气轮机含氢燃料稀释燃烧技术研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2016.
- [13] 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 Yaixin, LIU Xiaopei, CHEN Mingmin. 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.
- [14] ANSYS INC. ANSYS FLUENT theoretical manual [CP]. 2019.
- [15] DALLY B B, FLETCHER D F, MASRI A R. Flow and mixing fields of turbulent bluff-body jets and flames [J]. Combustion Theory and Modelling, 1998, 2(2): 193-219.
- [16] ANDREINI A, BIANCHINI C, INNOCENTI A. Large eddy simulation of a bluff body stabilized lean premixed flame [J]. Journal of Combustion, 2014, 2014: 710254.
- [17] POINSOT T, VEYNANTE D. Theoretical and numerical combustion [M]. 2nd ed. Philadelphia: Edwards, 2005.
- [18] LÓPEZ-JUÁREZ M, SUN Xiaoxiao, SETHI B, et al. Characterising hydrogen micromix flames: combustion model calibration and evaluation [C] // ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. New York, NY, USA: ASME, 2020: V003T03A008.
- [19] MILLER J A, BOWMAN C T. Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1989, 15(4): 287-338.
- [20] DALLY B B, MASRI A R, BARLOW R S, et al. Instantaneous and mean compositional structure of bluff-body stabilized nonpremixed flames [J]. Combustion and Flame, 1998, 114(1/2): 119-148.
- [21] LYSENKO D A, ERTESVÅG I S, RIAN K E. Numerical simulation of non-premixed turbulent combustion using the eddy dissipation concept and comparing with the steady laminar flamelet model [J]. Flow Turbulence and Combustion, 2014, 93(4): 577-605.
- [22] 周永浩, 张宗岭, 胡思彪, 等. NH_3/H_2 预混旋流火焰稳定性及燃烧极限实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2021, 42(1): 246-253.
ZHOU Yonghao, ZHANG Zongling, HU Sibiao, et al. Experimental studies on flame stability and combustion limit of premixed NH_3/H_2 swirl combustion [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42(1): 246-253.
- [23] 田晓晶. 氢燃料旋流预混火焰燃烧诱导涡破碎回火特性研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2015.
- [24] 陈明敏, 李耀强, 黄亮, 等. 富氢燃料贫预混燃烧回火研究进展 [J]. 热力透平, 2017, 46(4): 245-251.
CHEN Mingmin, LI Yaoqiang, HUANG Liang, et al. Progress of flash back in lean premix combustion with hydrogen-enriched-fuel [J]. Thermal Turbine, 2017, 46(4): 245-251.
- [25] LEFEBVRE A H, BALLAL D R. Gas turbine combustion: alternative fuels and emissions [M]. 3rd ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2010.

(编辑 赵炜 杜秀杰)