DOI : 10.19666/j.rlfd.202303033

SGT-800 重型燃气轮机天然气掺氢燃烧数值模拟研究

李立新[1]，刘星雨[1]，曾过房[1]，白红涛[1]，于红伟[1]，李　靖[2]
（1.国家电投集团湖北分公司，湖北　武汉　430061；
2.华中科技大学电气与电子工程学院，湖北　武汉　430074）

［摘　　要］为了解贫燃预混燃气轮机燃烧室掺氢燃烧的性能变化及潜在风险，以西门子 SGT-800 型燃气轮机燃烧室为对象开展了天然气掺氢燃烧过程的数值模拟研究，考察了 0、5%、10%、15%、30%（体积分数，下同）5 种掺氢比例工况下燃烧室内的燃料着火、温度分布、火焰形态以及 NO_x 排放特性。研究表明：在当前燃烧室内开展掺氢燃烧，将导致燃料着火位置提前、温度峰值提高、火焰轴向长度变短，同时外侧值班火焰逐渐向中心混合管聚拢；在 15%掺氢比例以下时燃烧室内的温度分布以及火焰形态不会发生明显变化，但在 30%掺氢比例下混合管内燃料着火位置回缩严重，外侧值班火焰紧贴喷嘴出口，该工况存在回火风险；此外，燃烧室出口 NO_x 排放值随掺氢比提高而增大，在 30%掺氢比下 NO_x 排放值接近国内部分地区限值，表明高 NO_x 排放也是制约燃气轮机高比例掺氢的因素之一。

［关　键　词］燃气轮机掺氢；燃烧特性；火焰形态；NO_x 排放

［引用本文格式］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 Lixin, LIU Xingyu, ZENG Guofang, 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.

Numerical modeling of natural gas combustion with hydrogen blending in SGT-800 heavy-duty gas turbine

LI Lixin[1], LIU Xingyu[1], ZENG Guofang[1], BAI Hongtao[1], YU Hongwei[1], LI Jing[2]
(1.Hubei Branch of State Power Investment Group Co., Ltd., Wuhan 430061, China;
2.School of Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to understand the performance changes and potential risks of hydrogen assisted combustion in combustion chamber of a lean-combustion premixed gas turbine, a numerical simulation study of the hydrogen injection combustion process of natural gas was carried out in the combustion chamber of Siemens SGT-800 gas turbine. The fuel ignition, temperature distribution, flame formation and NO_x emission characteristics of the combustion chamber under five working conditions of 0, 5%, 10%, 15% and 30% were investigated. Studies have shown that hydrogen-doped combustion in the current combustion chamber will lead to an earlier ignition position of the fuel, an increase in temperature peaks, a shorter axial length of the flame, and a gradual convergence of the outer duty flame towards the central mixer. The temperature distribution and flame morphology in the combustion chamber will not change significantly when the hydrogen-doped ratio is below 15%, but the ignition position in the mixer tube is seriously retracted at 30% hydrogen-doped ratio, and the flame on the outside is close to the nozzle outlet, which has a risk of tempering. In addition, the NO_x emission value of the combustion chamber outlet increases with the hydrogen doping ratio, and the NO_x emission value exceeds the standard by nearly 1/3 at 30% hydrogen doping ratio, indicating that high NO_x emission is also one of the factors restricting the high proportion of hydrogen doping in gas turbines.

Key words: hydrogen mixing of gas turbine; combustion characteristics; flame formation; NO_x emission

收　稿　日　期：2023-03-11　**网络首发日期：**2023-04-23

第一作者简介：李立新（1965），男，硕士，教授级高级工程师，主要研究方向为新能源开发建设运营，2207903332@qq.com。

在“双碳”目标背景下，我国现有能源结构亟需向低碳化方向转型，一方面要提高可再生能源的利用效率，另一方面要减少对传统化石燃料的依赖。氢能来源广泛、能量密度高、可大规模压缩存储，既是绿色能源载体，又可作为零碳替代燃料，将其与传统化石燃料掺烧是解决可再生能源消纳与改善能源结构的重要技术途径。2022 年发布的《氢能产业发展中长期规划（2021—2035 年）》明确提出，氢能是未来我国能源体系的重要组成部分，并鼓励推动氢能在工业中的规模化利用[1]。对于燃气轮机发电行业而言，开展天然气掺氢燃烧改造既符合绿色低碳的要求，又能提高电厂的运行灵活性，具有重要意义。氢气与天然气相比分子扩散速度更快、着火点更低、火焰传播速度较高，导致天然气掺氢燃烧后火焰着火位置将向上游迁移，存在回火风险；同时温度峰值更高，且高温区更为集中，易出现氮氧化物（NO_x）排放值升高。因此，天然气燃气轮机掺氢燃烧需要重点解决回火和 NO_x 排放 2 个关键难题。

为深化对天然气燃气轮机掺氢燃烧的认识，国内外在天然气与氢气掺烧方面已开展了较多基础研究工作。Halter 等人[2]考察了压力和含氢量对甲烷/氢气混合燃料火焰传播速度的影响，发现氢气的添加将导致火焰传播速度显著提升，同时火焰厚度变窄。Bougrine 等人[3]研究了预热温度对甲烷/氢气混合燃料火焰传播速度的影响，指出 GRI 3.0 机理在描述 CH_4-H_2 混合物的火焰传播速度方面具有精度和效率双重优势。Li 等人[4]揭示了不同含氢量和压力下甲烷/氢气混合燃料的爆炸极限。Tuncer 等人[5]试验分析了不同甲烷掺氢比条件下的全预混火焰的回火、振荡以及 NO_x 排放特性。İlbaş 等人[6]试验研究指出提高掺氢比能够减少甲烷/氢气混合燃料的 CO 排放、提升火焰温度及 NO_x 排放，此外他们发现空气分级有助于降低 NO_x 排放[7]。上述基础研究均表明掺氢将对天然气的燃烧及排放特性产生显著影响，因此在实际应用前需要对燃烧设备开展兼容性评估与改造。

利用计算流体动力学（CFD）方法开展燃气轮机燃烧室的数值模拟是一种经济、高效的研究方法。在这个方面，Calabria 等人[8]考察了掺氢对 Turbec 公司 T100 微型燃气轮机燃烧室温度分布的影响，发现在 15%（体积分数，下同）掺氢比以上时将出现回火现象；Reale[9]研究了水蒸气稀释对 T100 微型燃气轮机燃烧室掺氢燃烧的影响，指出采用水蒸气稀释不仅可以提高最大掺氢比还可以显著减少 NO_x 排放；Abagnale 等人[10]利用 Fluent 软件对 C30 型微型燃气轮机燃烧室的空气喷嘴结构进行了优化研究，获得了高效与低 NO_x 排放的最优喷嘴布置方案；Meziane 等人[11]发现某燃气轮机燃烧室出口温度的均匀性随着掺氢比的提高而下降，并指出了对燃烧室尾部空气稀释孔改造的必要性；李祥晟等[12]研究了掺氢对某贫燃预混燃气轮机燃烧室燃烧和排放性能的影响，指出在掺氢比达到 40% 时将燃烧室产生较大回火风险；耿卅捷等[13]分析了不同掺氢比下某贫燃预混燃气轮机燃烧室内的温度分布和 NO_x 排放特性，并推荐 0.47 作为较优当量比以获得最低污染物排放。

目前，国外主要燃气轮机制造商均针对掺氢燃气轮机的燃烧室设计及改造开展了研究、开发及示范应用工作。德国西门子是天然气掺氢燃烧技术研发最活跃的制造商之一，其研究表明现有的天然气燃气轮机燃烧室在不做重大改动的情况下可直接使用含氢量 15%~20%的掺氢天然气。美国 GE 研发的多喷口燃烧室采用扩散燃烧方式，能够燃用 89% 含氢量的混合燃气，已在 E 级和 F 级燃气轮机上得到应用，但 NO_x 的排放问题较为突出。在 GE 公司所开发的干式贫燃低 NO_x 燃烧室中燃气含氢量最高只能到 15%，而为了避免回火风险，在实际运行中掺氢比也尽量控制在 5%以下[14]。日本三菱在掺氢燃气轮机燃烧室中多采用向扩散燃烧喷注蒸汽或氮气的方法降低 NO_x 排放，然而随着 NO_x 排放政策日益严格，掺氢燃气轮机燃烧室设计最终将向预混燃烧方向发展[15]。

从上述研究现状可知，虽然国外主要燃气轮机制造商已纷纷开展燃气轮机掺氢技术研发和应用测试，但目前还未见能够商业运行的机组。国家电投所属中国重型燃气轮机技术有限公司（中国重燃）承担着国家重型燃气轮机重大专项任务。2021 年 3 月，中国重燃牵头[16-17]，国家电投湖北分公司、上海上发院发电成套设备工程有限公司、上海舜华新能源系统有限公司、盈德气体集团有限公司以及湖北荆门市政府共同确定在国家电投荆门绿动燃气轮机电厂进行在役商用燃气轮机掺氢试验，掺氢比例 5%~30%，分阶段实施。这是全球首次在商业运行的燃气轮机上进行掺氢试验（之前国内外进行的一系列掺氢试验都是在试验台或中试基地进行的）。荆门

绿动燃气轮机掺氢项目从立项、可研到完成第 1 阶段实现机组运行现场 15%掺氢仅用了不到 9 个月，国家电投湖北分公司承担了大部分现场实操任务，并配合中国重燃取得了现场全部实时数据，打破了西方在此领域对我国的封锁。

从 2022 年 3 月起，启动第 2 阶段 30%掺氢的相关工作，为了稳妥起见，湖北分公司联合华中科技大学对 30%掺氢做了燃烧数值模拟，并对之前 15%掺氢燃烧模型进行了验证和完善，明晰掺氢后天然气燃气轮机燃烧室流动、燃烧及排放特性的具体变化，并进一步分析 30%掺氢状况下的回火概率。研究内容包括燃烧室内的热态 CFD 数值模拟，不同掺氢比条件下的着火、回火等燃烧特性，以及 NO_x 生成排放行为，有望为商业运行的燃气轮机掺氢改造提供参考。

2022 年年底实现了 SGT-800 燃气轮机 30%掺氢燃烧现场试验，成为全球首个在天然气商业运行机组中进行掺氢燃烧的联合循环、热电联供示范项目，打破了技术垄断，取得了宝贵的第一手资料，同时申报 5 项发明专利[18-22]和 2 项新型实用专利，为我国今后自主研发氢燃气轮机奠定了基础。

1 燃烧室物理模型及工况参数

1.1 机组与燃烧器概况

实施掺氢燃烧的机组为小 F 级燃气-蒸汽联合循环机组。燃气轮机型号为 SGT-800，额定功率为 54 MW，燃气-蒸汽联合循环机组功率 77 MW。SGT-800 燃气轮机是西门子公司目前的主力机型，燃烧室为环形结构，全貌如图 1a)所示。在燃烧室头部均匀布置了 30 支第 3 代 DLE 低 NO_x 燃烧器，燃烧器实物和结构示意分别如图 1b)和图 1c)所示。燃烧器采用部分预混燃烧方式，燃料分为中心燃料、主燃料和值班燃料 3 股送入燃烧室。中心燃料和主燃料位于上游，与助燃空气在混合管内混合形成预混火焰。值班燃料喷口位于混合管出口外沿，直接喷入主燃烧室，形成外侧火焰以稳定燃烧。

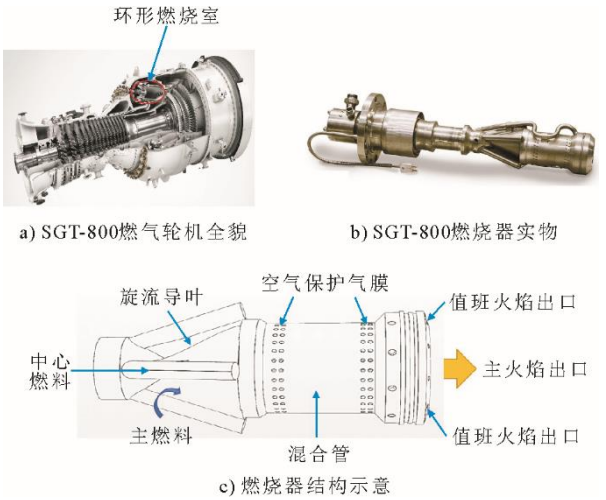


图 1 SGT-800 燃气轮机燃烧器及其进气入口布置
Fig.1 Layout of gas turbine burner and inlet

1.2 数值模拟工况参数

机组在 100%ISO 工况下进行了 15%和 30%掺氢比的燃烧试验。为了解掺氢对燃烧室性能带来的影响，以天然气（掺氢比为 0，假设为纯甲烷）燃烧作为对照工况，考虑了 5%、10%和 15% 3 种低掺氢比及 30%高掺氢比工况进行数值模拟。5 个工况下燃气-蒸汽联合循环机组的负荷维持在 69 MW，运行压力为 2.2 MPa，燃气和空气平均分配至 30 支燃烧器中。根据现场资料，燃烧器入口（压气机后）空气温度为 753 K，燃料为常温 300 K。表 1 给出了不同掺氢比工况下单只燃烧器的入口流量信息，将其作为数值模拟的边界条件。

表 1 单支燃烧器不同掺氢比工况下的进口流量信息
Tab.1 Inlet flow information of single burner at different hydrogen blending ratios

项目	掺氢比/%				
	0	5	10	15	30
空气量/(kg·s^{-1})	3.112 424	3.095 141	3.076 668	3.056 883	2.988 081
中心燃料量/(kg·s^{-1})	0.006 337	0.006 261	0.006 179	0.006 092	0.005 789
主燃料量/(kg·s^{-1})	0.079 843	0.078 884	0.077 861	0.076 762	0.072 945
值班燃料量/(kg·s^{-1})	0.004 469	0.004 415	0.004 358	0.004 297	0.004 083
燃料温度/K	300	300	300	300	300
空气温度/K	753	753	753	753	753
着火温度①/K	885	878	871	864	844

①着火温度根据 Olchewsky 等人[23]的试验测量结果进行插值估算。

2 数值模拟方法

2.1 数值模型

使用 Fluent 软件进行稳态燃烧过程的数值模拟。考虑到燃烧室存在旋流和回流，采用 realizable k-ε 双方程模型求解流动和湍流脉动。由于燃气轮机燃烧室内湍流和化学反应之间存在强烈的耦合相互作用效应，为此采用涡耗散概念 EDC 模型。该模型能够更为准确地描述每个网格内的化学反应时间与涡耗散时间。在甲烷和氢气的燃烧化学反应方面采用了 GRI 1.2 反应机理，该机理包含 32 种燃烧产物和 177 步基元反应，能够提供火焰中关键基元物质（如 O、OH、CH 等）的浓度分布。在燃烧高温下，烟气与燃烧室壁面之间将产生大量的辐射换热，本研究采用了离散坐标 DO 模型对辐射传热进行求解。

需要说明的是，本研究中所使用的 GRI 1.2 机理不包含跟 NO_x 相关的基元反应，因此 NO_x 的求解是通过后处理方法获得的。由于在燃烧室中 NO_x 的体积分数在 0.1%以下，因此采用 NO_x 后处理方法对温度、流场及主要组分的分布影响较小。考虑到 CH_4/H_2 混合物的 NO_x 主要来源于热力型路径，因此在后处理过程中仅求解了热力型 NO_x，且 O 和 OH 中间产物来自于 GRI 1.2 机理求解的实际值。

2.2 网格划分

由于 SGT-800 燃气轮机燃烧室为环形，具有中心旋转对称结构，且 30 支燃烧器结构完全相同，因此本文仅对单只燃烧器的掺氢燃烧过程进行数值模拟，所取计算域为燃气轮机燃烧室的 1/30。这种简化在燃气轮机环形燃烧室的数值模拟中为常用手段。

利用 Gambit 软件对计算域进行网格划分，在空气进口区域和燃烧室大部分区域采用结构化网格，在燃烧器区域采用混合结构网格，同时考虑了 size-function 对喷嘴和燃烧器根部区域进行网格加密。通过改变最小网格尺寸，形成了单元数分别为 358 万、543 万和 836 万 3 种网格，并对纯天然气燃烧工况开展了数值模拟工作。图 2 比较了 3 种不同网格在燃烧室中心轴线上的温度预测结果。由图 2 可见，3 种网格的预测趋势基本一致，但 358 万网格预测得到的温度峰值比 543 万网格的高近 100 K，而 543 万与 836 万网格预测的温度峰值十分接近。综合考虑数值模拟的计算成本与网格独立性，本文采用了 543 万中等网格进行后续的数值模拟。该网格最小单元尺寸为 0.1 mm，已接近湍流积分尺度。图 3 分别给出了整体计算域、中心平面、燃烧器进口和燃烧器混合管不同角度的网格。数值模拟中各入口采用质量流量进口边界条件，具体入口流量信息见表 1。

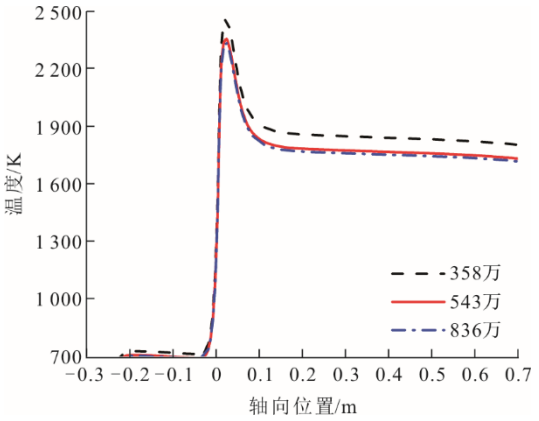


图 2 不同网格预测的中心温度曲线

Fig.2 Predicted center temperature profiles by different meshes

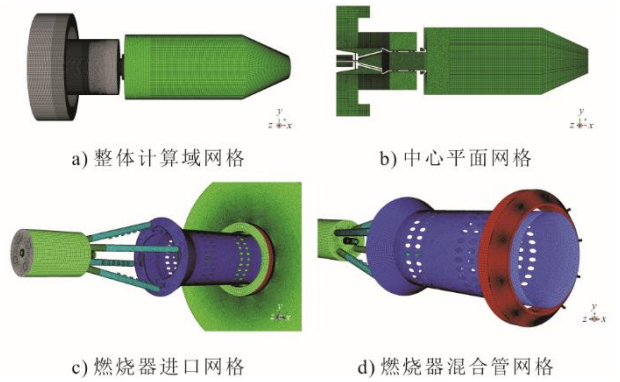


图 3 不同区域的网格

Fig.3 Grid map of different areas

2.3 化学反应机理验证

为了验证 GRI 1.2 化学反应机理的可靠性，首先利用反应动力学模拟软件 Chemkin-Pro 对不同甲烷掺氢比和压力下的层流火焰传播速度进行了计算，计算结果与试验测量结果[2]的比较如图 4 所示。图 4 中，曲线为计算值，散点为试验测量值。由图 4 可知，在掺氢比为 10%时，计算得到的层流火焰传播速度与试验测量值较为一致，但在 20%掺氢比下的误差较大。需要说明的是，当 Halter 等人[2]采用更加详细的化学反应机理进行计算时，计算值与试验值之间的误差有所减小，但仍然较为明显。虽然采用更加详细的化学反应机理能够一定程度上改进预测精度，但将导致 CFD 数值模拟的计算量指

数增加，严重制约计算效率。由于采用更为详细的化学反应机理并没有显著改进预测结果，为提高计算效率，本研究仍然使用了基元反应步数较少的 GRI 1.2 反应机理进行求解燃烧反应。

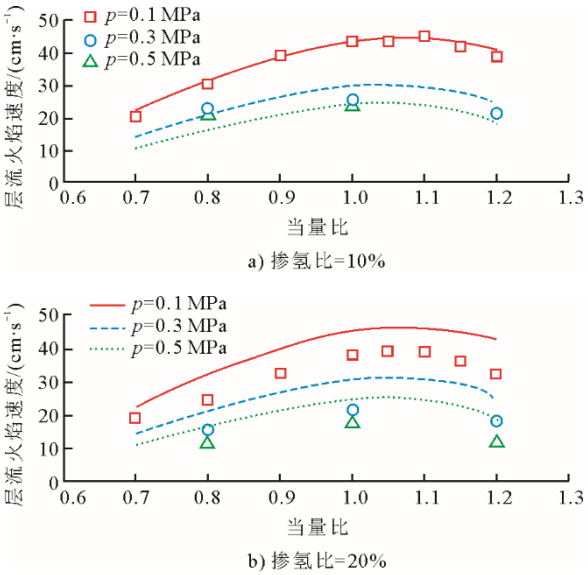
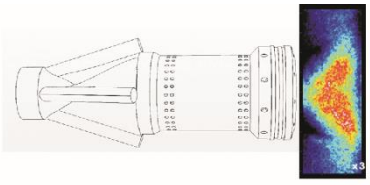


图 4 不同掺氢比和压力下甲烷/氢气混合燃料层流火焰速度的预测和试验对比结果

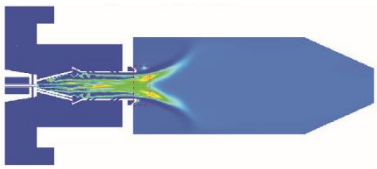
Fig.4 The prediced and experimental results of laminar flame velocity of methane/hydrogen blends at different hydrogen blending ratios and pressures

2.4 燃烧模型验证

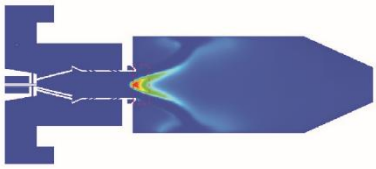
西门子公司和瑞典隆德大学对 SGT-800 燃气轮机单支燃烧器已开展过试验研究[24]，通过搭建光学试验平台，对天然气燃烧工况下燃烧器出口的火焰 OH^*自由基分布进行了拍摄，结果如图 5a)所示。为了选择更适用于此次数值模拟的燃烧模型，在保证其他条件一致的前提下，本文分别使用 Flamelet 火焰面模型和 EDC 模型进行迭代求解，得到的中心平面 OH^*分布如图 5b)和图 5c)所示。



a) OH^*（试验测试）



b) OH^*（Flamelet模型）



c) OH^*（EDC模型）

图 5 天然气工况下燃烧室内 OH^*分布试验与模拟结果比较

Fig.5 The experimental and simulation results of OH* distribution in combustion chamber under natural gas conditions

对比图 5b)和图 5c)可以发现，使用 2 种燃烧模型得到的 OH^*分布在形态上较为类似，都呈现喇叭状，且高浓度 OH^*都位于中心区域。然而在燃烧室内的红色虚线范围内，Flamelet 模型预测得到的 OH^*自由基分布较为分散，这与实际拍摄的 OH^*分布差距较大。更为重要的是，Flamelet 模型下混合管内出现了严重的回火，这也与实际情况完全不符合。相比而言，EDC 模型模拟得到的 OH^*高浓度区的形态更贴合于试验测试的结果，故最终选择了 EDC 模型作为本次模拟的燃烧模型。

3 结果与讨论

3.1 掺氢对着火位置的影响

温度分布是考察燃料燃烧性能的重要指标，根据模拟结果绘制了不同掺氢比工况下燃烧器中心截面上的温度分布云图，具体如图 6 所示。

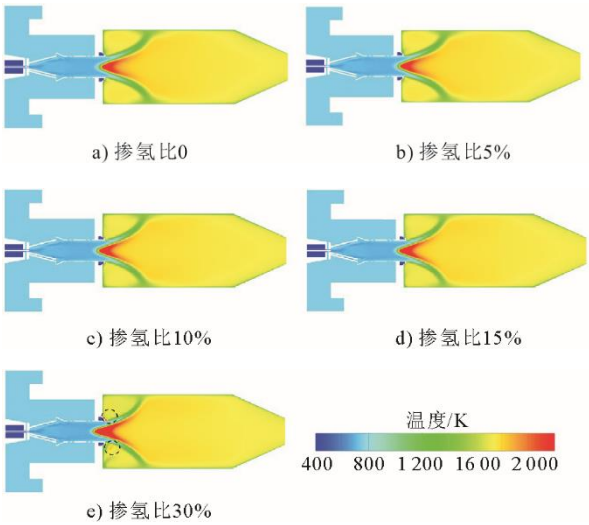


图 6 不同掺氢比工况下燃烧室中心平面温度分布云图

Fig.6 Temperature distribution diagram of combustion chamber centre plane at different hydrogen blending ratio

从图 6 可以看出：在 0~15%掺氢比范围内燃烧室内的温度分布均呈现出“喇叭口”形状，即典型

的 V 型火焰，但各工况下的温度分布差异并不明显；然而在 30%掺氢比工况下，值班火焰出口出现了零星高温区（图中虚线圈），这是由于值班火焰的着火能降低以及空气流量减少增加了燃料停留时间 2 方面原因所致。从图 6 还可知，在当前燃气轮机燃烧室实施 15%以下的掺氢燃烧并不会显著影响燃烧室内的温度分布，但在 30%掺氢比下值班火焰出口将产生高温区，影响喷嘴的使用寿命。

由表 1 可知，混合燃料的着火温度随着掺氢比的提高而逐渐下降，这在空间上则体现为着火位置的提前。在燃烧学上通常利用热释放速率峰值位置或者温度梯度峰值位置作为燃料的着火位置，本研究采用后者来定量比较不同掺氢比条件下燃料的着火行为。

根据数值模拟结果将燃烧室中心线上的温度曲线绘制于图 7a)，同时利用 Origin 软件对图 7a)中的 5 条温度曲线进行梯度变换，所得温度梯度曲线绘制于图 7b)。为提高图形的可读性，将曲线在炉膛轴线方向的取值范围设定为−0.1~0.1 m，具体的位置分布可参考图 7c)。

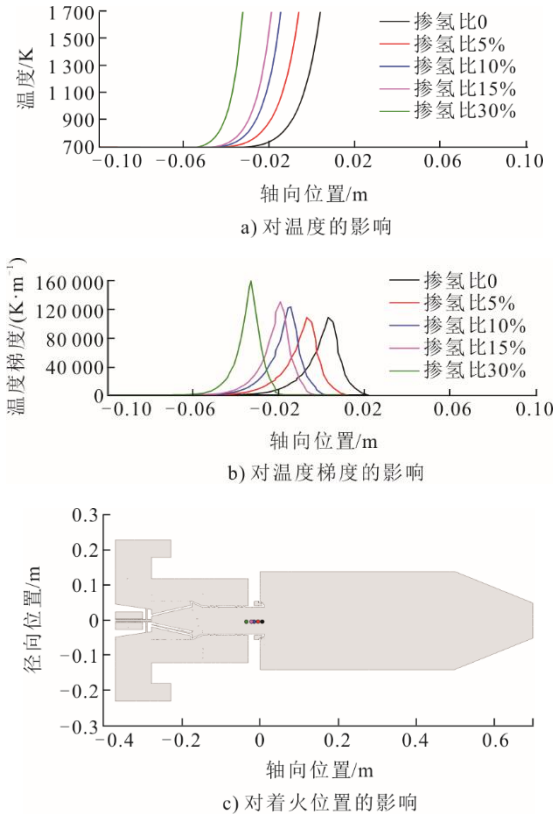


图 7 不同掺氢比对燃烧室中心线温度曲线、温度梯度曲线、燃料着火位置的影响

Fig.7 Effects of different hydrogen blending ratios on the centreline temperature curve of combustion chamber, temperature gradient curve and fuel ignition position

分析比较图 7a)和图 7b)可知：掺氢比的提高一方面会加速燃烧室内温度的提升，使燃料着火位置提前；另一方面会提高温升的梯度峰值，且热释放区的厚度逐渐变薄。根据图 7b)可将具体的燃料着火位置在图 7c)中按照颜色相应标记出来，不难看出当掺氢比从 0 提高到 30%时，燃料的着火位置从 0.007 m 逐渐退回至−0.035 m，此时火焰回缩距离已接近混合管长度的 1/3。结合图 6 所示的温度分布推测可知，30%掺氢工况具有较大的回火风险。

3.2 掺氢对火焰结构的影响

火焰形态与尺寸是表征火焰结构的重要参数特征，燃烧学中常以燃烧中间产物（CO 或者 OH^*）浓度峰值的 1%作为火焰边缘[25]。为了探究掺氢对于火焰结构的影响，以各工况下 OH^*浓度峰值的 1%创建等值面，该等值面即为对应工况下的火焰轮廓面。图 8 绘制了不同掺氢比工况下的火焰结构，并利用温度标尺对 5 个火焰轮廓面进行了彩色渲染。由图 8 可知：在纯天然气工况下值班火焰出现在中心主火焰的外侧，且与喷嘴距离较远；随着掺氢比的提高，中心主火焰的长度逐渐缩短，火焰尾部直径增大，同时外侧值班火焰逐渐向喷嘴靠近。在 30%掺氢比工况下，值班火焰紧贴喷嘴出口。结合图 7 中的温度分布以及着火位置变化，可以推测出该工况下易出现回火问题。此外，从图 8 也可以看出火焰的厚度随着掺氢比的提高而变薄，这与图 7b)呈现的规律完全一致。

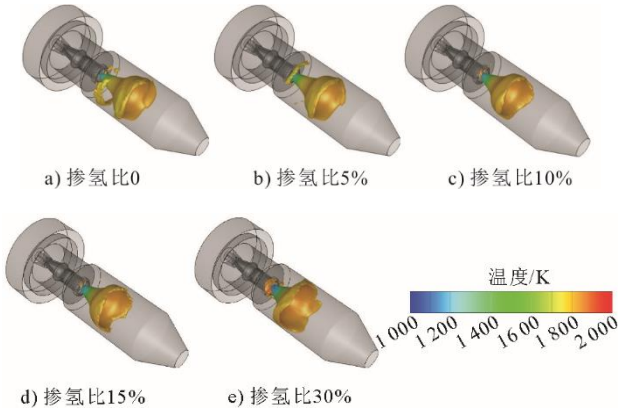


图 8 不同掺氢比工况下的三维火焰形貌对比

Fig.8 The three-dimensional flame morphologies at different hydrogen doping ratios

回火的出现不仅会严重影响燃烧器的正常使用寿命，还可能会造成安全事故。为了减少回火造成的损坏，在开展高比例掺氢（例如 30%）时，必须要对燃烧器进行改造，如提高值班火焰喷射速

度、减小混合管直径等，以降低回火风险；此外，混合管内必须增加回火监控传感器，实时探测混合管内的温度变化情况。

3.3 掺氢对 NO_x 排放的影响

对于掺氢天然气来说，热力型 NO_x 是最为主要的污染物，其中 90%以上为 NO。目前针对燃气轮机的 NO_x 排放标准日益严格，因此有必要了解掺氢对燃气轮机燃烧室 NO_x 生成与排放特性的影响机制。图 9 展示了不同掺氢比工况下燃烧室中心平面上的 NO 生成速率云图。由图 9 可知，NO 的主要生成区域与燃烧室内的高温区基本重合，且位于高温区的前沿。随着掺氢比例的提高，NO 生成区域逐渐扩大，同时速率峰值增大，这是由于燃烧温度峰值升高和火焰面的温度梯度增大 2 方面原因所致。图 10 进一步给出了不同掺氢比工况下燃烧室内的 NO 摩尔分数分布云图。显然，在更高掺氢比条件下燃烧室内 NO 摩尔分数峰值增大，且中心高 NO 摩尔分数区域扩大，这与图 9 中 NO 生成速率的变化趋势一致。

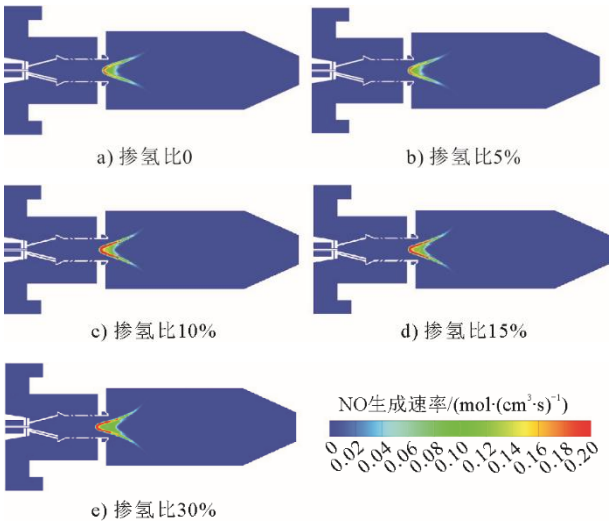
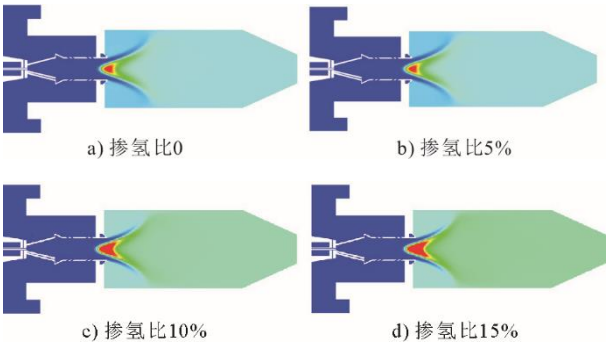


图 9 不同掺氢比工况下燃烧室中心平面 NO 生成速率云图

Fig.9 NO generation rate diagram in the central plane of combustion chamber at different hydrogen blending ratios



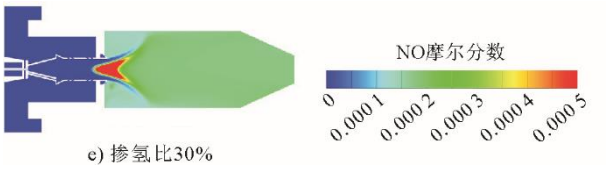


图 10 不同掺氢比工况下燃烧室中心平面 NO 摩尔分数分布云图

Fig.10 NO concentration distribution in the central plane of the combustion chamber at different hydrogen blending ratios

为了定量对比各工况下的 NO 排放数据，将 NO 的原始排放结果转换成氧气体积分数 $\varphi(O_2)$=15%及标准状况下的数据，转换公式为：

$$Y_{NO}=Y_{NO,0}\times\rho\times\frac{21\%-15\%}{21\%-Y_{O_2,0}}\times\frac{300}{T}\times 1\,000\,000 \quad (1)$$

式中：$Y_{NO,0}$ 和 $Y_{O_2,0}$ 分别为烧室出口的原始 NO 体积分数和 O_2 体积分数；ρ为燃烧室出口氧气密度，kg/m³；T 为排烟温度，K。

目前，国内燃气热电联产项目在环保数据排放方面，普遍执行《火电厂大气污染物排放标准》（GB 13223—2011）。该标准规定的 NO_x 排放限值为 50 mg/m³（标准状态，下同）。而北京和江苏等地则制定了更为严格的地方标准，例如北京的标准《固定式燃气轮机大气污染物排放标准》（DB 11847—2011），对固定式燃气轮机规定的 NO_x 排放限值为 30 mg/m³。随着环保政策的日益严格，未来可能会有更多的地区执行更加严格的污染物排放标准。

图 11 比较了 5 种掺氢比工况下燃烧室出口的 NO 排放数据。当掺氢比在 10%以下时，NO 排放值基本可控制在 30 mg/m³ 以内；但掺氢比提高至 15%时，NO 排放明显增加；当掺氢比进一步提高到 30%时，NO 排放值接近 40 mg/m³，该排放数据超出国内部分地区的环保限值要求。根据 NO 排放数据分析可知，除了回火风险外，高 NO 排放也将成为制约燃气轮机高比例掺氢的关键挑战之一。由于本研究数值模拟工况参数完全基于现场试验数据，燃料分配份额（表 1）未调整优化。未来将进一步探索富氢燃料分配策略对本燃气轮机燃烧室燃烧及 NO 排放性能的影响规律，以获得更优的操作条件。

3.4 30%掺氢运行试验

根据上述数值模拟结果和分析，在实际 SGT-800 型燃气轮机上开展了天然气掺混 15%和 30%氢气的运行试验，结果见表 2。其中，15%掺氢工况下的燃气轮机负荷为 46%（25 MW），30%掺氢工况下的燃气轮机负荷为 81%（44 MW）。

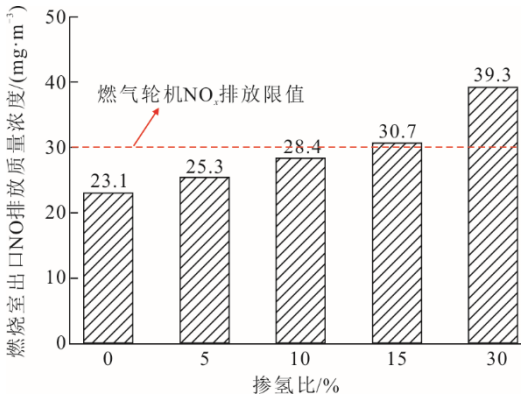


图 11 $\varphi(O_2)$=15%时不同掺氢比工况下 NO 排放情况
Fig.11 NO emission at different hydrogen blending ratios

表 2 SGT-800 燃气轮机掺氢燃烧试验数据
Tab.2 Experimental data during hydrogen blending combustion in SGT-800 gas turbine

项目	15%掺氢工况	30%掺氢工况
燃气轮机负荷率/%	46	81
掺氢比例/%	15	30
NO_x 排放质量浓度/(mg·m^{-3})	39	49
燃烧器回火监测温度/℃	414	473

表 2 还给出了 2 种工况下的燃烧器回火监测温度（位于混合管外侧）和 NO_x 排放。由表 2 可见，试验结果与数值模拟结果一致，高比例掺氢燃烧将导致燃料着火提前，进而提升混合管内的温度，使燃烧器回火监测温度提高。对于 NO_x 排放，试验数据和数值模拟得到的趋势同样是一致的，进一步说明本研究中的数值预测结果具有一定的参考价值。

4 结　论

本研究针对 SGT-800 型燃气轮机单燃烧室掺氢燃烧过程开展了数值模拟研究，考察了 0、5%、10%、15%和 30%不同掺氢体积比工况下燃烧室内的燃料着火特性、温度分布、火焰结构以及 NO_x 生成排放规律。主要研究结论如下：

1）在维持燃烧室输入热负荷恒定的条件下，天然气中的掺氢比例在 15%以下时燃烧室内的温度分布不会发生显著变化；但掺氢比例提高到 30%时值班火焰出口将出现明显的高温区，对喷嘴的使用寿命产生不利影响。随着燃料中掺氢比例的提高，混合燃料的着火点逐渐降低，燃烧室内混合燃料的着火位置不断提前，同时温度梯度不断增大，火焰面厚度变薄。从着火位置与火焰结构形态共同分析可知，掺氢比在 15%以下时燃烧室仍然可以正常工作；但掺氢比提高至 30%时，燃料着火位置回缩距离达到混合室长度的近 1/3，且混合室出口值班火焰紧贴喷嘴，具有较大的回火风险，应考虑对燃烧器进行调整改造。

2）掺氢比例的增大会提高燃烧室内的温度峰值，扩大高温区域的体积，加速热力型 NO_x 的生成速率，增大燃烧室出口 NO_x 的排放值。在当前燃烧室内，当掺氢比不超过 10%时，燃烧室出口的 NO_x 排放值小于 30 mg/m^3，当掺氢比达到 15%时，燃烧室出口 NO_x 排放在 30 mg/m^3 左右；而当掺氢比达到 30%时，燃烧室出口 NO_x 排放将超出国内部分地区的排放限值。因此，NO_x 排放也是制约燃气轮机高比例掺氢的因素之一。

［参 考 文 献］

［1］ 国家发展改革委 国家能源局. 氢能产业发展中长期规划（2021—2035 年）[R/OL]. (2022-03-23) [2023-03-11]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220323_1320038.html.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. The Medium and Long Term Plan for the Development of Hydrogen Energy Industry (2021—2035) [R/OL]. (2022-03-23) [2023-03-11]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220323_1320038.html.

［2］ HALTER F, CHAUVEAU C, DJEBAÏLI-CHAUMEIX N, et al. Characterization of the effects of pressure and hydrogen concentration on laminar burning velocities of methane–hydrogen–air mixtures[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(1): 201-208.

［3］ BOUGRINE S, RICHARD S, NICOLLE A, et al. Numerical study of laminar flame properties of diluted methane-hydrogen-air flames at high pressure and temperature using detailed chemistry[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(18): 12035-12047.

［4］ LI Y C, BI M S, LI B, et al. Effects of hydrogen and initial pressure on flame characteristics and explosion pressure of methane/hydrogen fuels[J]. Fuel, 2018, 233: 269-282.

［5］ TUNCER O, ACHARYA S, UHM J H. Dynamics, NO_x and flashback characteristics of confined premixed hydrogen-enriched methane flames[J]. International Journal of hydrogen energy, 2009, 34(1): 496-506.

［6］ İLBAŞ M, YILMAZ İ. Experimental analysis of the effects of hydrogen addition on methane combustion[J]. International Journal of Energy Research, 2012, 36(5): 643-647.

［7］ İLBA M, YILMAZ İ, KAPLAN Y. Investigations of hydrogen and hydrogen–hydrocarbon composite fuel combustion and NO_x emission characteristics in a model combustor[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2005, 30(10): 1139-1147.

［8］ CALABRIA R, CHIARIELLO F, MASSOLI P, et al. CFD analysis of Turbec T100 combustor at part load by varying fuels[C]. American Society of Mechanical Engineers, 2015: V008T23A020.

［9］ REALE F. Effects of steam injection on the permissible hydrogen content and gaseous emissions in a micro gas turbine supplied by a mixture of CH_4 and H_2: a CFD analysis[J]. Energies, 2022, 15(8): 2914.

[10] ABAGNALE C, CAMERETTI M C, ROBBIO R D, et al. CFD study of a MGT combustor supplied with syngas[J]. Energy Procedia, 2016, 101: 933-940.

[11] MEZIANE S, BENTEBBICHE 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.

[12] 李祥晟，郭菡，郁鸿飞，等. 掺氢对燃气轮机燃烧室燃烧和排放性能的影响研究[J]. 西安交通大学学报，2022, 56(6): 8.
LI Xiangsheng, GUO Han, YU Hongfei, et al. Effect of hydrogen mixing on combustion and emission performance of gas turbine combustor[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(6): 8.

[13] 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 Sajie, PAN Hejitian, YANG Huan, et al. Numerical simulation of hydrogen blending combustion and emission of gas turbine[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(12): 1-11.

[14] 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 Guangpu, LIU Xiao, ZHANG Zhihao, et al. Research progress on hydrogen gas turbine combustion technology[J]. Gas Turbine Technology, 2022, 35(1): 1-15.

[15] 邹昆. 日本氢燃气轮机的技术特点[J]. 东方汽轮机，2022(4): 1-5.
ZOU Kun. Technical characteristics of Japan's hydrogen gas turbine [J]. Dangfang Turbine, 2022(4): 1-5.

[16] 面向 30.60 目标的氢混燃机发展前景研究[R]. 北京: 电力规划设计总院中国联合重型燃气轮机技术有限公司, 2021: 9.
Research on development prospect of hydrogen hybrid gas turbine for target 30.60[R]. Beijing: Electric Power Planning and Design Institute, China United Heavy Gas Turbine Technology Co., Ltd, 2021: 9.

[17] 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 Lixin, ZHANG Zhaozhao. 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.

[18] 静大亮，曾过房，白红涛，等. 掺氢/纯氢燃气轮机的直接点火方法、装置和电子设备[P]. ZL 2022 11 065133.8[2022-09-01].
JING Daliang, ZENG Guofang, BAI Hongtao, et al. Method, device and electronic equipment for direct ignition of hydrogen doped/pure hydrogen gas turbine[P]. ZL 2022 11 065133.8[2022-09-01].

[19] 静大亮，辛芳，曾过房，等.防回火喷嘴和燃气轮机[P]. ZL2022 11 062993.6 [2022-09-01].
JING Daliang, XIN Fang, ZENG Guofang, et al. Anti-tempering nozzle and gas turbine[P]. ZL2022 11 062993.6 [2022-09-01].

[20] 静大亮，刘星雨，彭晓中，等. 燃气轮机及其回火监测方法、装置和设备[P]. ZL 2022 11 684092.0[2022-12-27].
JING Daliang, LIU Xingyu, PENG Xiaozhong, et al. Gas turbine and its tempering monitoring method, device and equipment[P]. ZL 2022 11 684092.0[2022-12-27].

[21] 静大亮，辛芳，赵光军，等. 值班燃料喷嘴头、值班喷嘴和燃气轮机[P]. ZL 202211063311.3 [2022-09-01].
JING Daliang, XIN Fang, ZHAO Guangjun, et al. Watch fuel nozzle head, watch nozzle and gas turbine[P]. ZL202211063311.3 [2022-09-01].

[22] 静大亮，白红涛，刘强，等. 燃气轮机及其回火监测方法、装置和设备[P]. ZL 202211684093.5 [2022-12-27].
JING Daliang, BAI Hongtao, LIU Qiang, et al. Gas turbine and its tempering monitoring method, device and equipment [P]. ZL 202211684093.5 [2022-12-27].

[23] OLCHEWSKY K, FULLER C, HOLTON M, et al. Autoignition temperature measurements of hydrogen mixtures[C]//10th U.S. National Combustion Meeting. 2017: 1-6.

[24] MOËLL D, LÖRSTAD D, BAI X S. Numerical investigation of methane/hydrogen/air partially premixed flames in the SGT-800 burner fitted to a combustion rig[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2016, 96(4): 987-1003.

[25] XIE Mengqian, DAI Fangqin, TU Yaojie. A numerical study of accelerated moderate or intense low-oxygen dilution (MILD) combustion stability for methane in a lab-scale furnace by off-stoichiometric combustion technology[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2021, 32: 108-118.

（责任编辑　刘永强）