燃烧科学与技术
Journal of Combustion Science and Technology
2026,32(4):391-399
DOI 10.11715/rskxjs.R202509001

燃气轮机罐式燃烧室掺氢燃烧数值模拟

朱　瀚[1,2]，李　莉[1,2]，周乐平[1,2]，张　辉[1,2]，杜小泽[1,2]
（1. 华北电力大学能源动力与机械工程学院，北京 102206；
2. 华北电力大学电站能量转换与系统教育部重点实验室，北京 102206）

摘　要：针对以天然气为燃料的燃气轮机在高掺氢比条件下的燃烧及排放特性开展研究，基于雷诺应力模型（RSM）以及非预混燃烧模型，在恒定燃料质量流量条件下，分析不同掺氢比（体积分数 $\alpha_{H_2}=0\sim0.8$，共 5 组）对某罐式燃烧室性能的影响. 结果表明：当掺氢比增加到 0.8 时，燃烧室内部流速提升，但中心回流区面积受到压缩；燃烧室内部最高温度、壁面温度和出口温度均有升高，中心区域火焰宽度增加，出口温度均匀性得到改善（出口温度分布系数降低约 24%）；CO_2 排放降低 36.95%，同时 H_2O 和 NO_x 排放量显著增加. 本研究可为燃气轮机掺氢设计与运行提供参考.

关键词：燃气轮机；掺氢；燃烧特性；排放特性
中图分类号：TK16　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1006-8740(2026)04-0391-09

Numerical Simulation of Hydrogen-Blended Combustion in a Gas Turbine Can-Type Combustor

Zhu Han[1,2], Li Li[1,2], Zhou Leping[1,2], Zhang Hui[1,2], Du Xiaoze[1,2]
(1. School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Key Laboratory of Power Station Energy Transfer Conversion and System (North China Electric Power University), Ministry of Education, Beijing 102206, China)

Abstract: A study was conducted on the combustion and emission characteristics of a gas turbine fueled by natural gas at a high hydrogen-blending ratio. Based on the Reynolds stress model (RSM) and non-premixed combustion model, the impact of different hydrogen-blending ratios (volume fraction $\alpha_{H_2}=0$—0.8, five groups in total) on the performance of a can-type combustor was analyzed under constant fuel mass flow. The results show that when the hydrogen-blending ratio increases to 0.8, the internal flow velocity of the combustor rises, but the area of the central recirculation zone is compressed. The maximum internal temperature, wall temperature, and outlet temperature of the combustor all increase, with the flame width in the central region expanding and the outlet temperature uniformity improving (outlet temperature distribution factor decreases by approximately 24%). CO_2 emissions are reduced by 36.95%, while H_2O and NO_x emissions increased significantly. This study can serve as a reference for the design and operation of hydrogen-blended gas turbines.

Keywords: gas turbine; hydrogen-blended; combustion characteristics; emission characteristics

收稿日期：2025-09-01.
基金项目：国家储能产教平台资助项目（XM9980）.
作者简介：朱　瀚（2001—　），男，硕士研究生，15212478199@163.com.
通信作者：李　莉，女，博士，副教授，doubleli@ncepu.edu.cn.

近年来，世界经济快速增长，导致对能源尤其是电力的需求大幅增加. 传统化石燃料的大量使用加剧环境压力，各国去碳化目标驱动电力生产向低碳可持续转型，因此，鉴于日益严苛的排放法规要求，燃气轮机燃烧室作为核心部件，对其内部燃烧特性的研究愈发重要. 天然气是燃气轮机常用燃料，以其易得性、低成本和低废气排放而成为首选燃料[1-3]. 与天然气相比，氢气具有燃烧速度快、火焰温度高、点火时间短、燃烧热高、可燃极限宽、燃烧清洁等特点. 与天然气充分混合不仅能提高燃烧速度和效率，还能大大减少污染物的排放[4-8]. 因此，掺氢燃烧技术近年来成为热门研究课题，并在工业生产中受到越来越多的关注. 文献[9-11]中的研究表明，通过现有天然气管道输送氢浓度确定的天然气-氢混合物是可行的. 当前，全球范围内已有 37 个天然气掺氢输送示范工程投入运行，初步验证了该技术路线的可行性，为大规模氢气输送提供了有效解决方案[12].

研究发现，通过将天然气与氢气混合燃烧，可以提高混合燃料的燃烧速率，从而改善燃气轮机的燃烧和排放特性，同时缩短燃料的点火延迟时间，并提升了燃烧系统的反应活性[13-15]. Ma 等[16]发现，加入氢气可缩短火焰发展时间，加快火焰传播速度，从而有助于降低燃烧不稳定性. Wang 等[17]证明了火焰传播速度与氢气混合比例和湍流强度的关系，结果表明掺氢比和湍流强度越大，火焰燃烧速度越快. 谭宗洋等[18]发现，掺氢燃烧使得外回流区温度降低，中心回流区温度升高，放热区域向上游移动，放热速率增大而放热区域减小. Shih 等[19]的研究表明，在天然气中掺入氢气可降低燃烧室的热负荷，同时提高火焰温度. Rajpara 等[20]的研究结果表明，富氢燃烧提高了火焰温度，同时减小了燃气轮机燃烧室中的火焰尺寸.

但随着掺氢比的增加，燃烧室更易面临各种挑战，如回火等问题[21]. 王威等[22]开展了现役某型天然气燃气轮机燃烧室掺氢燃烧性能的试验研究，分析了燃烧室在不同掺氢比条件下的回火特性，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. 何磊等[23]针对自主研发的 F 级重型燃气轮机新型脱硝（$DeNO_x$）燃烧器，构建了涵盖全尺度和真实工况的试验平台，开展了宽域掺氢比例的燃烧特性研究. 试验结果表明，随氢气掺混比例提升，火焰转换发生在更低的负荷，有利于稳定提升负荷，同时燃烧器出口温度升高，但未发生回火.

在燃料流量恒定的情况下，Meziane 等[4]研究了天然气-氢气混合物如何影响罐式燃烧器的燃烧性能和污染物排放. 研究发现，相较于燃烧纯天然气，向天然气燃料中混入 10% 氢气（H_2）可显著降低污染物排放，其中一氧化碳（CO）减少约 60%，氮氧化物（NO_x）降低约 14%. 然而，这种掺氢混合燃烧也带来了负面影响——微型燃气轮机的平均出口温度会随之下降，从而导致其输出功率降低. Rajpara 等[20]发现在富氢条件下反应区位于更上游，CO 排放也显著减少. Zareei 等[24]发现，当混合氢的比例为 30% 时，氢气的添加使未燃烧的碳氢化合物在完全燃烧时减少了 14%.

近年来，随着燃烧室-涡轮相互作用及相关问题成为研究热点，众多学者开展了燃烧器出口特性对高压涡轮机性能影响的大量研究. 燃烧室出口流体表现出如强旋流和非均匀热斑等明显的特征[25-26]. Yin 等[27-29]开展了旋流对气膜冷却效果影响的实验研究. 结果表明，旋流会增加叶片前缘气膜分布的不均匀性，从而恶化叶片下游的冷却效果. Khanal 等[30]和 Rahim 等[31]通过非稳态数值模拟证明，旋流和热斑的相互作用会对涡轮的气动特性和热负荷带来显著影响.

综上所述，本研究针对某燃气轮机罐式燃烧室，开展了掺氢燃烧数值模拟研究，量化分析了掺氢比（体积分数）在 0 ~ 0.8（共 5 组）变化下的燃烧特性与关键排放物（CO_2/H_2O/NO_x）的生成规律，旨在提升燃气轮机掺氢燃烧室的火焰稳定性、均匀性及排放控制能力.

1 模型介绍

1.1 燃烧室几何模型和数值模型介绍

本研究中使用的燃烧室几何模型如图 1 所示，参照 Bicen 等[32]和 Krieger 等[33]的研究和模拟中所用模型，使用 SolidWorks 三维建模软件，建立了罐式燃烧室简化模型. 头部旋流器由 18 片以 45°轴向安装角周向均布的叶片组成；混合燃料经由设置在 90°锥面上的 10 个均布喷孔（孔径 1.7 mm）喷入燃烧区，通过旋流器的气流有助于燃料的正常点燃和燃烧火焰的稳定；火焰筒壁面开设两排空气掺混孔：上游主燃区布置 6 个孔径 10 mm 的主燃孔，下游布置 12 个孔径 10 mm 的掺混孔，均周向均匀排列；燃烧后高温烟气最终通过变截面收缩段排出. 燃烧室长度为 225 mm，整体位于内径 150 mm 的圆柱形风道内，风道用于通入冷却空气，冷却燃烧室壁面.

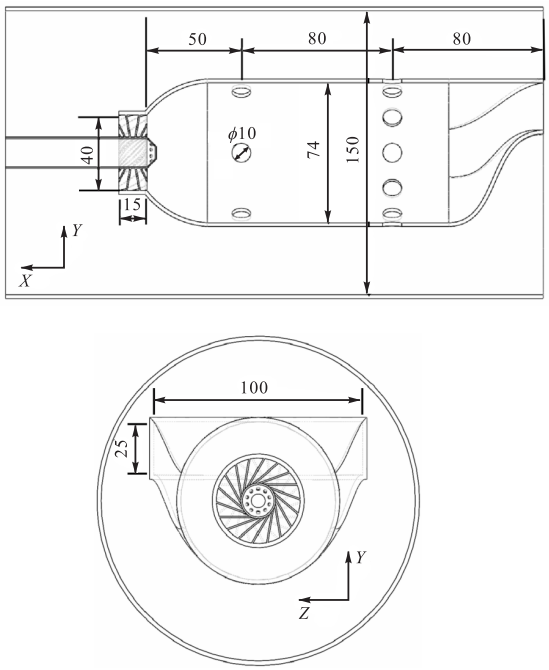


图 1　燃烧室结构(单位：mm)

Fig.1　Structure diagram of combustor(unit：mm)

本研究采用商业 CFD 软件 ANSYS Fluent 2020 对燃烧反应流开展数值模拟. 在数值模拟过程中采用雷诺应力模型(Reynolds stress model，RSM)[34]来模拟燃烧过程流场特征. 相较于大涡模拟(large eddy simulation，LES)及分离涡模拟(detached eddy simulation，DES)，RSM 在强旋流复杂流场模拟方面展现出更高的精度，同时具备较低的计算成本.

本次模拟采用非预混燃烧模型[35]，燃料与氧化剂经由独立入口分别进入反应区，其反应速率主要受燃料和氧化剂混合速率的控制，此过程产生的火焰也称为扩散火焰. 同时采用稳态扩散小火焰模型，所用燃烧模型包含了 200 多种燃烧化学反应，通过求解混合分数输运方程来模拟湍流扩散火焰，基于预测的混合分数分布，可推导出各组分的浓度. 模型采用概率密度函数(probability density function，PDF)表征湍流与燃烧化学反应之间的相互作用. 与有限速率模型相比，此类专为非预混燃烧设计的模型具有诸多优势，然而，该模型考虑了湍流对燃烧的影响，用户无法自定义反应机理.

在燃烧过程中，热量主要通过燃烧火焰发出的热辐射传递到燃烧器内壁，考虑热辐射对燃烧模拟的影响，本文选择较为全面的离散坐标(discrete ordinates，DO)辐射模型[36-37]. 离散坐标模型的优势在于：①它适用复杂几何和任意光学厚度，能够计算表面之间的辐射传热；②详细的辐射传热方程，考虑了特定位置和方向的吸收、发射和散射介质；③求解精度较高.

1.2　边界条件设置

边界条件设置是从 Rajpara 等[20]进行的实验和数值研究中提取的. 燃烧室计算域中，燃料入口与冷却空气入口均定义为质量流量入口，燃料流混合分数指定为 1，空气流混合分数指定为 0，出口采用压力出口边界条件. 模型的热功率设置为 70 kW 时，在纯甲烷燃烧条件下，燃料喷嘴可在垂直于燃烧室的方向提供 0.001 4 kg/s 的稳定燃料流，针对燃气轮机的应用场景，甲烷和氢气混合作为燃料通入，考虑掺氢前后燃料质量流量不变，此时燃料输入热功率会有变化. 在恒定质量流量条件下，通过改变掺氢比观察燃烧和排放特性改变. 掺氢比定义为掺混氢气体积占燃料混合气总体积的百分比，其数学表达式为

$$\alpha_{H_2}=\frac{V_{H_2}}{V_{H_2}+V_{CH_4}}\times 100\% \tag{1}$$

式中：V_{H_2} 为燃料中氢气的体积；V_{CH_4} 为燃料中甲烷的体积，具体边界条件参数见表 1.

表 1　边界条件

Tab.1　Boundary conditions

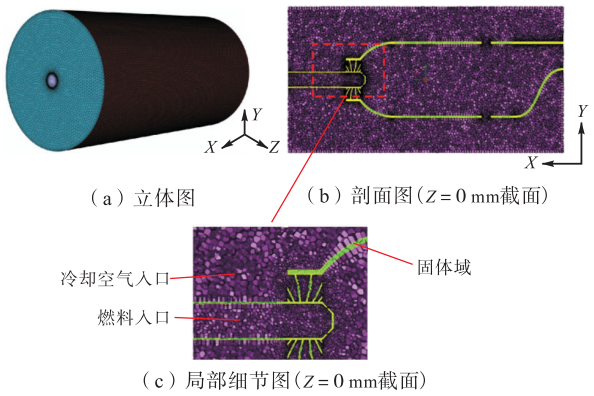
参数	数值
燃料质量流量/(kg/s)	0.001 4
压力/Pa	101 325
空气温度/K	300
燃料温度/K	300
空气湍流强度/%	10
燃料湍流强度/%	5
空气湍流长度尺度/mm	10
燃料湍流长度尺度/mm	1
燃料入口速度/(m/s)	12 ~ 41

1.3　网格划分及模型验证

使用 ANSYS Fluent Meshing 软件对燃烧室模型进行网格划分. 在将几何域导入 Fluent Meshing 前，使用 Space Claim 软件完成流体域和固体域区域划分，并完成入口、出口及壁面边界命名. 为保证网格质量和模拟结果精确的同时，节约计算时间，计算区域采用多面体网格划分，并在网格划分过程中对旋流器、主燃孔和掺混孔等区域进行局部网格加密，同时在整个壁面上添加一个边界层，以研究固体域对流体流动和传热的影响. 具体网格划分如图 2 所示，燃料进口和冷却空气进口位置与方向见图 2(c).

为确保模拟精度的同时兼顾计算效率，进行网格无关性验证. 共设置了由疏到密的 5 组网格，使用 1.2 节给出的纯甲烷燃烧边界条件对 5 组网格进行模

拟，不同网格模型模拟得到的燃烧室峰值温度对比如图 3 所示. 结果表明，当网格数量增至 186 万以上时，温度结果的波动显著收敛，基于此，选定 186 万网格模型用于后续的实验验证及燃烧模拟. 使用 Bicen 和 Jones[32]在等温流条件下获得的横向速度(横向速度指气体在燃烧室截面内垂直于主流方向的流动速度分量)实验数据验证了该数值模型. 图 4 显示了燃烧室内部主燃孔位置的横向速度分布. 使用数值模拟计算的横向速度分布与实验数据相似，实验和数值结果在 $Z=-15$ mm 处的最大横向速度的偏差为 9.8%，偏差在可接受范围内.



(a) 立体图　(b) 剖面图($Z=0$ mm截面)　(c) 局部细节图($Z=0$ mm截面)

图 2　燃烧室计算域网格生成

Fig.2　Grid generation for the combustor computational domain

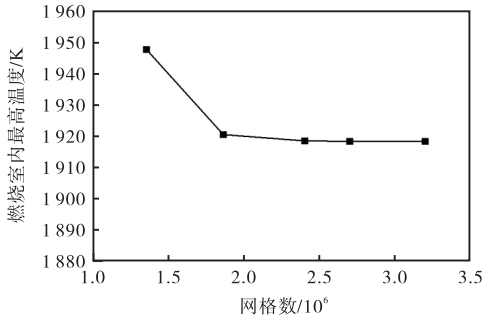


图 3　网格无关性验证

Fig.3　Grid independence verification

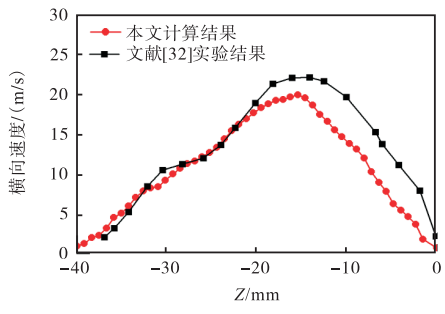


图 4　模型验证

Fig.4　Model validation

2　模拟结果分析

2.1　燃烧室内部流场分析

在燃烧室燃烧过程中，旋流器气流对提升燃烧性能至关重要，图 5 展示了从入口延伸至出口的 $Z=0$ mm 截面的速度云图与流线分布. 由旋流器进入的空气受到离心力的影响，向主燃区大范围扩散，同时，混合燃料经由旋流器后部锥面上的 10 个小孔均匀喷射入燃烧室内部. 这些空气-燃料混合射流与主燃孔通入燃烧室的空气在主燃区交汇，产生剧烈碰撞，并在燃烧过程中，因主燃区形成的显著压差而产生强回流区，这一因燃烧室中心区压差而形成的高温燃气强回流区称为中心回流区[38]. 在燃烧室内部，中心回流区强化了氧化剂和燃料的混合，同时高温燃气持续预热新鲜混合气，主燃孔保障充足的氧化剂汇入，三者相互作用延长高温燃气在反应区的停留时间，有助于促进气体燃料的完全燃烧，同时避免了燃烧压力振荡现象并稳定燃烧. 中心回流主要存在于主燃区，高温燃气通过主燃区后向次燃区推进，促进未燃混合物充分燃烧，最终被掺混孔通入气流冷却.

图 5 同时展示了掺氢对燃烧室内部流动特性的影响. 结果发现：随着掺氢比的增加，燃烧室内流速持续提升且回流区逐渐缩小. 由于氢气和甲烷相比有着较高的热值和扩散能力，随着掺氢比的增加，混合燃料燃烧过程中热膨胀效应和扩散能力增强，局部反应放热更加剧烈，气体体积膨胀加速，使得燃烧室内部流速增加. 同时由于氢气和甲烷密度相差较大，在恒定燃料质量流量入口条件下，随着氢含量的增加，混合燃料的密度减小，燃料进口速度增加[4]，这也是燃烧室内部流速持续提升的原因之一.

2.2　燃烧室内部温度场分析

图 6 展示了不同掺氢比工况下，燃烧室 $Z=0$ mm 截面温度场分布. 观察可知，燃料与空气预混形成的锥状喷雾进入燃烧室后，点火生成的高温燃气持续向下游发展，致使高温区形态沿喷雾轨迹呈显著的锥形扩展特征. 同时可以观察到被高温区域环绕的中心回流区温度相对较低，其原因在于，位于该区域的高温燃气持续预热燃料喷嘴喷出的新鲜燃料，自身热量被消耗，从而导致该区域温度降低. 由于燃烧室整体存在于圆柱形风道内，不断通入的冷却空气使得主燃区壁面附近形成一层相对低温的空气层，可保护壁面免受高温侵蚀. 高温燃气进入主燃区后，不断向出口推进，在此过程中，受主燃孔和掺混孔氧化剂射流的作用，燃气在燃烧室中心区域汇聚，因此燃烧

室内的高温区域主要集中在主燃区及中心轴线附近. 同时可以看到，随着掺氢比增加，位于中心轴线位置的火焰宽度不断增加，并沿径向扩展，分析原因如下：由于氢气的扩散能力强于甲烷，因此当氢气从旋流器中注入时，随着掺氢比的不断提高，其整体扩散能力逐渐加强，高温区的径向宽度随着氢气的加入而逐渐增大，当掺氢比 $\alpha_{H_2}=0.8$ 时，模拟得到最大径向扩展范围.

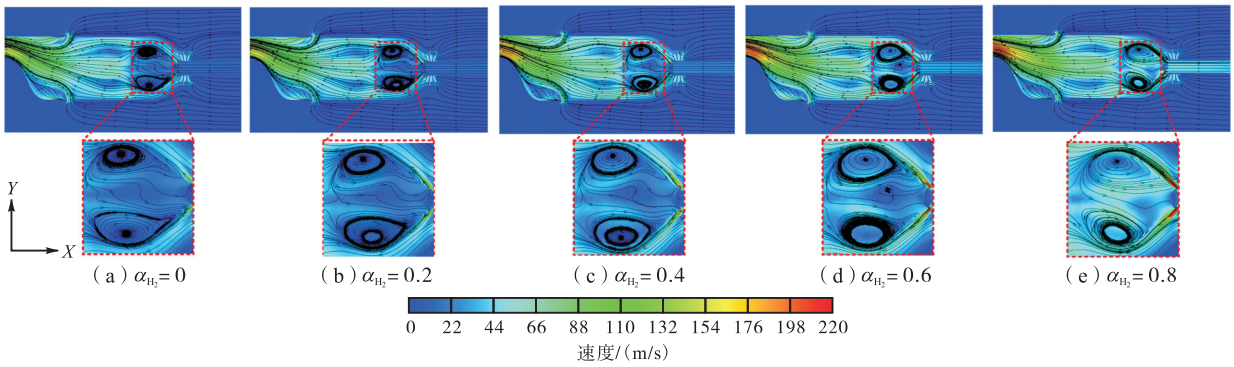


图 5　不同掺氢比下燃烧室内速度分布云图和流线分布（$Z=0$ mm 截面）

Fig.5　Velocity distribution cloud and streamline distribution in the combustor with different hydrogen blending ratios（$Z=0$ mm cross section）

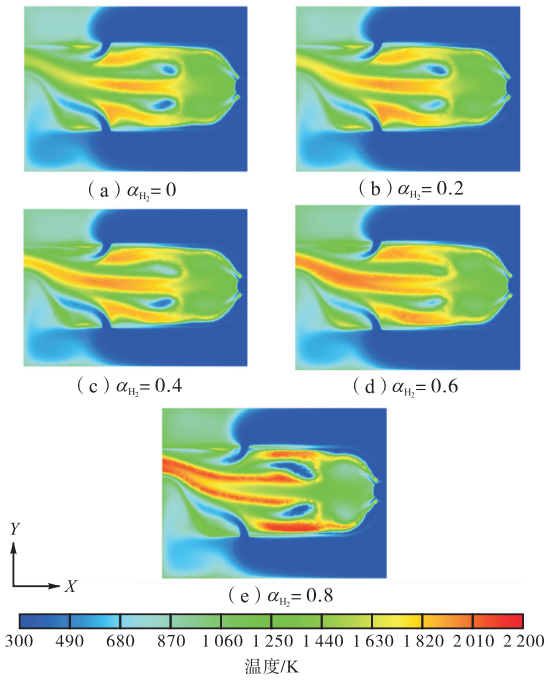


图 6　不同掺氢比下燃烧室温度分布（$Z=0$ mm 截面）

Fig.6　Temperature distribution of combustor with different hydrogen blending ratios（$Z=0$ mm cross section）

不同掺氢比条件下，燃烧室内部温度分布特性由图 7 所示. 可以看出，随着掺氢比的增大，燃烧室内部的最高温度呈持续上升趋势. 这一现象主要源于氢气低反应活化能与高反应速率等特性的协同作用，使得热释放更集中、更剧烈，从而使燃烧室内部的最高温度不断提高. 图 8 展示了燃烧室壁面温度分布随掺氢比变化的云图. 由图可知，燃烧室半球形壁面因靠近冷却气流入口，且旋流器的强旋流效应诱导大量空气形成近壁流态，有效衰减了高温燃气对壁面的直接热流冲击，致使该区域整体温度水平较低. 壁面温度沿轴向（$-X$ 方向）呈现梯度上升，其机理在于：①掺混孔射流扰动强化换热：掺混孔空气射流引发高温燃气剧烈扰动，显著增强高温区域与壁面间的对流换热；②过渡段高温堆积效应：在圆柱段至收缩截面的过渡区域，流动分离导致高温燃气滞留，引发局部温度陡升. 结合图 7 和图 8 分析可知，氢气的加入导致燃烧室壁面温度持续升高，且温度显著变化区域主要集中在出口过渡段附近. 由于出口过渡段本身具有强换热、易形成高温堆积的特性，氢气的加入进一步强化了这一特性，给燃烧室出口壁面的冷却设计带来了更大挑战.

图 9 与图 10 展示了不同掺氢比工况下燃烧室出口截面的温度场分布及特性. 结果表明，高温核心区显著集中于出口截面中部，壁面附近呈现低温特征，随着掺氢比不断增加，混合燃料中氢气的高反应活性与低活化能特性使得燃烧反应更剧烈、更集中，造成

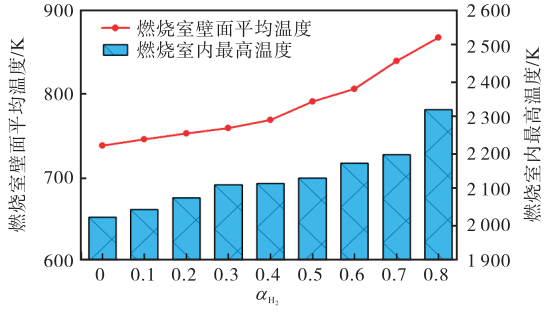


图 7　不同掺氢比燃烧室内部温度特性

Fig.7　Internal temperature characteristics of combustor with different hydrogen blending ratios

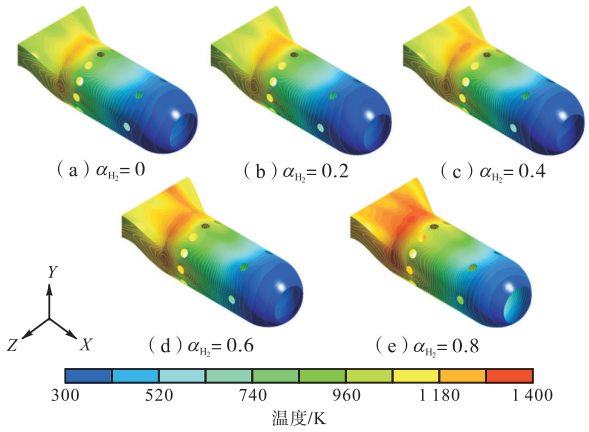


图 8　不同掺氢比下燃烧室壁面温度分布

Fig.8　Wall temperature distribution of combustor with different hydrogen blending ratios

出口高温区域面积扩大和温度升高现象. 在燃气轮机运行过程中，较高且均匀分布的涡轮入口温度对于提高整体热效率至关重要. 出口烟气的温度均匀性通常用出口温度分布系数(outlet temperature distribution factor，OTDF)定义，燃烧室出口处的出口温度分布函数越小，温度分布越均匀，定义为

$$\alpha_{\mathrm{OTDF}}=\frac{T_{\mathrm{out,max}}-T_{\mathrm{out,ave}}}{T_{\mathrm{out,ave}}-T_{\mathrm{in}}} \tag{2}$$

式中：下标 out 和 in 分别代表燃烧室出口和进口部位；T_{max} 和 T_{ave} 分别代表相应位置的最高温度和平均温度. 由图 10 可知，随着掺氢比的增加，燃烧室出口温度分布系数呈降低趋势，且高掺氢比下出口温度分布系数降低显著. 当掺氢比 α_{H_2} 由 0 增加到 0.3 时，出口温度分布系数仅降低 1.76%，但当掺氢比 α_{H_2} 由 0.4 增加到 0.8 时，出口温度分布系数降低 19.13%，说明高掺氢比下，燃烧室出口温度均匀性更好，烟气品质更高，有效抑制高温区域的局部堆积，降低下游设备烧蚀风险，保障机组运行安全性与结构完整性.

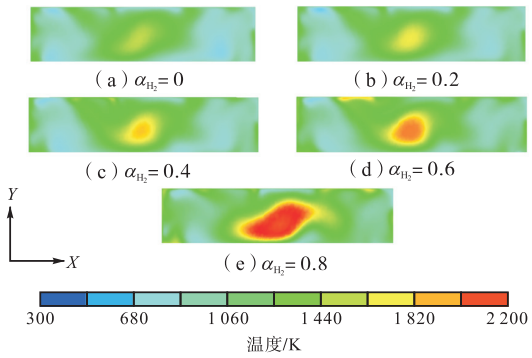


图 9　不同掺氢比下燃烧室出口截面温度分布

Fig.9　Temperature distribution at the outlet of combustor with different hydrogen blending ratios

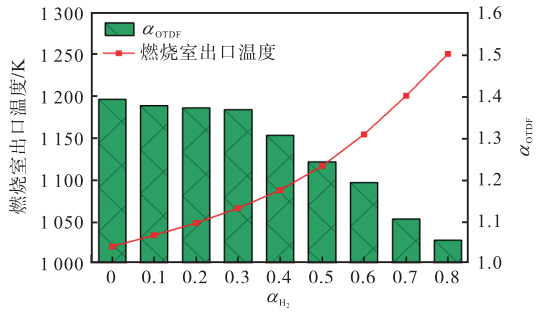


图 10　不同掺氢比下燃烧室出口温度特性

Fig.10　Temperature distribution characteristics at the outlet of combustor with different hydrogen blending ratios

2.3　燃烧室出口排放特性分析

掺氢燃烧和传统燃烧相比，燃料中掺混一定比例的清洁能源氢气，其主要特点是有良好的降碳效果，达到清洁燃烧目的. 图 11 和图 12 分别展示了在恒定燃料质量流量入口的条件下，α_{H_2} 为 0、0.2、0.4、0.6 和 0.8 共 5 种工况下燃烧室出口截面 CO_2 和 H_2O 平均质量分数分布云图. 与图 9 对比可知，CO_2 和 H_2O 平均质量分数分布与出口温度分布区域高度对应，即温度越高，燃烧强度越高，因而对应区域的出口物质排放量越高. 同时对比观察图 11 和图 12 可知，从不同掺氢比工况下的燃烧器出口截面的 CO_2 和 H_2O 平均质量分数分布云图的颜色深浅和高排放区域的面积占比可以看出，掺氢比越高，出口截面的 CO_2 排放量越低，H_2O 排放量越高，直观说明掺氢燃烧有着降低碳排放和清洁燃烧的特点.

图 13 定量分析了掺氢比对主要燃烧产物(CO_2、H_2O)的影响规律，给出不同工况下出口截面平均质量分数的分布特性. 随着掺氢比例的增加，混合燃气中甲烷(CH_4)的含量相应降低，其含量的减少直接导致燃气中碳(C)元素总量的降低，燃烧反应产物中

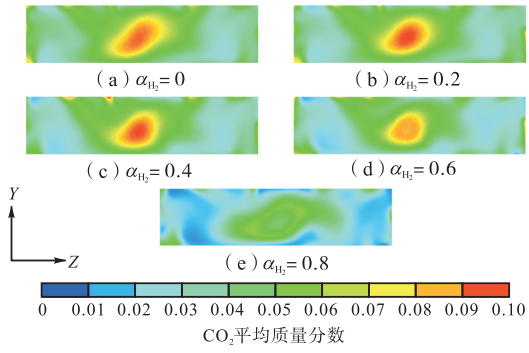


图 11　不同掺氢比下燃烧室出口 CO_2 平均质量分数分布云图

Fig.11　Distribution of average mass fraction of CO_2 at combustor outlet with different hydrogen blending ratios

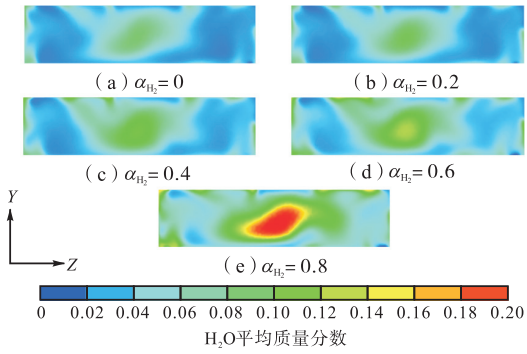


图 12　不同掺氢比下燃烧室出口 H_2O 平均质量分数分布云图

Fig.12　Distribution of average mass fraction of H_2O at combustor outlet with different hydrogen blending ratios

CO_2 的生成量相应减少. 当掺氢比 α_{H_2} 由 0 增加到 0.8 时，出口 CO_2 排放量降低 36.95%. 同时随着掺氢比例的增加，燃气中氢元素(H)的含量随之升高，氢元素主要转化为 H_2O，当掺氢比 α_{H_2} 由 0 增加到 0.8 时，出口 H_2O 排放量显著增加(增幅接近 100%)，导致燃气组分变化，进而影响下游透平焓降及换热过程[39]. 因此，尽管掺混氢气可实现降低碳排放的目标，但同时亦对机组的运行效率与安全性构成挑战.

在天然气掺氢燃烧过程中，氮氧化物(NO_x)是排放污染物的重要成分，因燃料中无含氮物质，为了简化模型，不考虑燃料型 NO_x 生成，并用以下参数衡量燃烧室出口 NO_x 排放标准(@15% of O_2)，公式如下：

$$\varphi_{NO_x}=\frac{\varphi_{NO,mf}\times10^6}{1-\varphi_{H_2O,mf}}\times\frac{0.21-0.15}{0.21-\varphi_{O_2,mf}} \tag{3}$$

式中：$\varphi_{NO,mf}$、$\varphi_{H_2O,mf}$ 和 $\varphi_{O_2,mf}$ 分别表示燃烧室出口 NO、H_2O 和 O_2 的平均摩尔分数，φ_{NO_x} 表示基准含氧量修正为 15% 时的排放值.

如图 13 所示，随着掺氢比的不断提高，燃烧室出口 NO_x 排放量不断升高，当掺氢比 α_{H_2} 由 0 增加到 0.6 时，燃烧室出口 NO_x 排放量增加 244.78%，并且在高掺氢比条件下还会显著提升. 高掺氢比条件下导致的 NO_x 排放增加与火焰温度升高有关，正如 Zeldovich 机理[40-41]所述，更高的火焰温度会加速生成热力型 NO_x. 与此同时，在固定燃料质量流量入口条件下，氢比例的增加会提升自由基 O、H 和 OH 的摩尔浓度，这些自由基浓度的增加提高了燃烧反应强度和燃烧过程中的传热速率，这也是热力型 NO_x 在高掺氢比条件下激增的原因之一. 鉴于国内燃气轮机污染物排放的严苛标准，为满足要求，需对掺氢燃烧的氢气比例进行调控，以抑制氮氧化物排放并维持机组清洁运行.

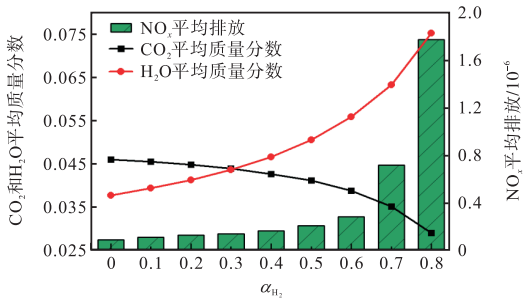


图 13　不同掺氢比下燃烧室出口排放特性

Fig.13　Combustor outlet emission characteristics at different hydrogen blending ratios

3　结　论

本文通过数值模拟方法，对某罐型燃气轮机燃烧室的掺氢燃烧特性进行了研究. 在恒定燃料质量流量入口条件下，通过改变掺氢比 α_{H_2} 由 0 ~ 0.8(体积分数)，分析了燃烧室内部温度场、速度场和流动特性的变化，同时分析了掺氢比对出口温度和排放特性的影响，可为燃气轮机燃烧室的掺氢设计与运行提供参考. 研究发现：

(1) 由于氢气和甲烷相比有着较高的热值和扩散能力，掺氢比的增加会导致燃烧室内部流速持续提升，但会压缩中心回流区面积，导致高温燃气回流减少，削弱了来自喷嘴的新鲜混合燃料的预热效果.

(2) 在燃烧特性方面，掺氢比的增加会使燃烧室内部最高温度和壁面温度不断增加，由于掺混孔和出口收缩截面的影响，壁面温度显著提升区域主要集中在出口过渡段附近. 给燃烧室出口壁面的冷却设计带来了更大挑战. 同时，位于中心轴线位置的火焰宽度随掺氢比不断增加，高温区范围显著扩大. 在燃烧室出口范围内，掺氢比的增加使得出口温度升高，但出口温度分布系数降低，说明高掺氢比下，燃烧室出口温度均匀性更好，烟气品质更高，避免了高温集中现象，保护了下游机组的运行安全.

(3) 对于燃烧产物排放问题，当掺氢比 α_{H_2} 由 0 增加到 0.8 时，出口 CO_2 排放量降低 36.95%，达到降碳排放效果，但 H_2O 排放量的增加会影响内部燃烧进程和下游设备换热特性，与此同时，在高掺氢比条件下，环境污染物 NO_x 的含量也会迎来激增.

因此，为综合考虑掺氢对下游设备的影响以及整体污染物排放控制，保障燃气轮机洁净运行，需对掺氢燃烧的氢气比例进行合理控制.

参考文献：

[1] 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.

[2] Karlis E，Liu Y，Hardalupas Y，et al. H_2 enrichment of CH_4 blends in lean premixed gas turbine combustion：an experimental study on effects on flame shape and thermoacoustic oscillation dynamics[J]. *Fuel*，2019，254：115524.

[3] Cuneo A，Zaccaria V，Tucker D，et al. Gas turbine size optimization in a hybrid system considering sofc degradation[J]. *Applied Energy*，2018，230：855-864.

[4] 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.

[5] Hussain T，Talibi M，Balachandran R. Investigating the effect of local addition of hydrogen to acoustically excited ethylene and methane flames[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*，2019，44(21)：11168-11184.

[6] Ruan C，Chen F，Yu T，et al. Experimental study on flame/flow dynamics in a multi-nozzle gas turbine model combustor under thermo-acoustically unstable condition with different swirler configurations[J]. *Aerospace Science and Technology*，2020，98：105692.

[7] Chai W S，Bao Y，Jin P，et al. A review on ammonia，ammonia-hydrogen and ammonia-methane fuels[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*，2021，147：111254.

[8] Wei Z，Zhen H，Leung C，et al. Effects of unburned gases velocity on the $CO/NO_2/NO_x$ formations and overall emissions of laminar premixed biogas-hydrogen impinging flame[J]. *Energy*，2020，196：117146.

[9] Witkowski A，Rusin A，Majkut M，et al. Analysis of compression and transport of the methane/hydrogen mixture in existing natural gas pipelines[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*，2018，166：24-34.

[10] Wang S，Xiao G，Feng Y，et al. Investigation of premixed hydrogen/methane flame propagation and kinetic characteristics for continuous obstacles with gradient barrier ratio[J]. *Energy*，2023，267：126620.

[11] Abdelhameed E，Tashima H. Experimental study on the effects of methane-hydrogen jet as direct injected fuel in marine diesel engine[J]. *Energy*，2023，267：126569.

[12] Pellegrini M，Guzzini A，Saccani C. A preliminary assessment of the potential of low percentage green hydrogen blending in the Italian natural gas network[J]. *Energies*，2020，13(21)：5570.

[13] Ma F，Wang Y，Wang M，et al. Development and validation of a quasi-dimensional combustion model for SI engines fuelled by HCNG with variable hydrogen fractions[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*，2008，33(18)：4863-4875.

[14] Ma F，Wang Y. Study on the extension of lean operation limit through hydrogen enrichment in a natural gas spark-ignition engine[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*，2008，33(4)：1416-1424.

[15] Ferrarotti M，De Paepe W，Parente A. Reactive structures and NO_x emissions of methane/hydrogen mixtures in flameless combustion[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*，2021，46(68)：34018-34045.

[16] Ma F，Wang Y，Liu H，et al. Effects of hydrogen addition on cycle-by-cycle variations in a lean burn natural gas spark-ignition engine[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*，2008，33(2)：823-831.

[17] Wang Y，Zhang X，Li Y. Numerical simulation of methane-hydrogen-air premixed combustion in turbulence[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*，2023，48(19)：7122-7133.

[18] 谭宗洋，王丹阳，许建国，等. 氢气掺混甲烷对湍流燃烧及 NO 生成排放的影响[J]. 燃烧科学与技术，2024，30(2)：157-168.
Tan Zongyang，Wang Danyang，Xu Jianguo，et al. Effect of hydrogen enrichment of methane on turbulent combustion and NO emission[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*，2024，30(2)：157-168(in Chinese).

[19] Shih H Y，Liu C R. A computational study on the combustion of hydrogen/methane blended fuels for a micro gas turbines[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*，2014，39(27)：15103-15115.

[20] 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.

[21] 储 旭，丁思宇，李嘉斌，等. 甲烷掺氢旋流预混燃烧回火特性研究[J]. 工程热物理学报，2024，45(6)：1570-1578.
Chu Xu，Ding Siyu，Li Jiabin，et al. Flashback characteristics in CH_4/H_2-air premixed swirl-stabilized combustion[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*，2024，45(6)：1570-1578(in Chinese).

[22] 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(in Chinese).

[23] 何　磊，张富诚，颜　伟，等. F 级重型燃气轮机新型 DeNO$_x$ 燃烧器掺氢燃烧试验研究[J]. 动力工程学报，2024，44(9)：1370-1377.
He Lei，Zhang Fucheng，Yan Wei，et al. Experimental study on hydrogen-blended natural gas combustion of a new DeNO$_x$ burner for F-class heavy-duty gas turbine[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*，2024，44(9)：1370-1377(in Chinese).

[24] Zareei J，Rohani A，Mazari F，et al. Numerical investigation of the effect of two-step injection(direct and port injection) of hydrogen blending and natural gas on engine performance and exhaust gas emissions[J]. *Energy*，2021，231：120957.

[25] Jacobi S，Mazzoni C，Rosic B，et al. Investigation of unsteady flow phenomena in first vane caused by combustor flow with swirl[J]. *Journal of Turbomachinery*，2017，139(4)：041006.

[26] Huang J，Zhang S，Zhao J. Review of investigation of inlet hot streak on turbines[J]. *Aerodynamic Missle Journal*，2007，2007(10)：47-50.

[27] Yin H，Qin Y，Ren J，et al. Effect of inlet swirl on the model leading edge of turbine vane[C]//*Turbo Expo：Power for Land，Sea，and Air*. American Society of Mechanical Engineers，2013，55232：V06BT38A004.

[28] Yin H，Liu S，Feng Y，et al. Experimental test rig for combustor-turbine interaction research and test results analysis[C]//*Turbo Expo：Power for Land，Sea，and Air*. American Society of Mechanical Engineers，2015，56635：V02AT38A001.

[29] Yin H，Ren J，Jiang H D. Effects of inlet swirl condition on the flow and heat transfer performance of gas turbine vane[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*，2012，33(11)：1868-1871.

[30] Khanal B，He L，Northall J，et al. Analysis of radial migration of hot-streak in swirling flow through high-pressure turbine stage[J]. *Journal of Turbomachinery*，2013，135(4)：041005.

[31] Rahim A，He L. Rotor blade heat transfer of high pressure turbine stage under inlet hot-streak and swirl[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*，2015，137(6)：062601.

[32] Bicen A F，Jones W P. Velocity characteristics of isothermal and combusting flows in a model combustor[J]. *Combustion Science and Technology*，1986，49(1-2)：1-15.

[33] Krieger G C，Campos A P V，Takehara M D B，et al. Numerical simulation of oxy-fuel combustion for gas turbine applications[J]. *Applied Thermal Engineering*，2015，78：471-481.

[34] Xia J L，Yadigaroglu G，Liu Y S，et al. Numerical and experimental study of swirling flow in a model combustor[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*，1998，41(11)：1485-1497.

[35] Zhang K，Ghobadian A，Nouri J M. Comparative study of non-premixed and partially-premixed combustion simulations in a realistic tay model combustor[J]. *Applied Thermal Engineering*，2017，110：910-920.

[36] Tamang S，Park H. Numerical investigation of combustion characteristics for hydrogen mixed fuel in a can-type model of the gas turbine combustor[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*，2023，48(30)：11493-11512.

[37] Tamang S，Park H. An investigation on the thermal emission of hydrogen enrichment fuel in a gas turbine combustor[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*，2023，48(100)：40071-40087.

[38] 蔡季雨，陈明敏. 燃气轮机环形燃烧室热态性能研究[J]. 热力透平，2017，46(2)：111-116.
Cai Jiyu，Chen Mingmin. Study on thermal performance of gas turbine annular combustor [J]. *Thermal Turbine*，2017，46(2)：111-116(in Chinese).

[39] 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)：9-16.
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)：9-16(in Chinese).

[40] Rajpara P，Dekhatawala A，Shah R，et al. Influence of fuel injection method on performance of upward swirl can-type combustor[J]. *Applied Thermal Engineering*，2018，130：319-330.

[41] Rajpara P，Dekhatawala A，Shah R，et al. Thermal and emission characteristics of reverse air flow can combustor[J]. *International Journal of Thermal Sciences*，2018，128：175-183.