

DOI: 10.19666/j.rlfed.202502023

高炉煤气燃气轮机燃烧室综合性能研究

郑玮琳, 代佳奇, 宋雪松

(沈阳航空航天大学航空发动机学院, 辽宁 沈阳 110136)

[摘要] 根据高炉煤气组分及其热值波动较大的特点, 系统研究了某型燃气轮机燃烧室的燃料适应性。通过耦合详细化学反应机理数值模拟方法, 获得了不同热值和组分工况下燃气轮机燃烧室的综合性能特征, 重点分析了温度场和组分流场分布及其影响机制。研究表明: 在相同初始工况和燃料热值条件下, 随着燃气中 H_2 与 CO 体积分数比增加, 燃烧室出口平均温度从 1769.35 K 降至 1710.11 K、温度分布系数从 0.044 降至 0.016, 出口 NO_x 排放量从 $7.56 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$ 降至 $1.49 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$, CO 排放量从 $993.98 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$ 降至 $421.95 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$, 燃烧效率由 98.48% 提升至 99.14%; 随着燃气中 CO_2 与 N_2 体积分数比的增加, 燃烧室出口平均温度从 1739.30 K 降至 1694.99 K, 温度分布系数在 0.032~0.045 波动, 出口 NO_x 排放量从 $3.18 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$ 降至 $1.39 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$, CO 排放量从 $633.73 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$ 升至 $832.45 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$, 燃烧效率从 98.89% 降至 98.56%。此外, 随着燃料热值增加, 燃烧室出口平均温度显著升高, 从 1587.30 K 增至 1862.39 K, 温度分布系数呈下降趋势, NO_x 排放量从 $0.29 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$ 增至 $18.66 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$, CO 排放量从 $459.25 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$ 增至 $1030.61 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$, 燃烧效率从 99.14% 降至 98.33%。最后选用 20 组数据进行非线性曲面拟合, 对于热值范围 3~5 MJ/m^3 的高炉煤气, 该拟合方程 R^2 均大于 0.90, 可为燃气轮机燃烧室的低热值燃料调控提供理论依据。

[关键词] 高炉煤气; 详细反应机理; 燃烧性能; 污染物排放; 燃气轮机

[引用本文格式] 郑玮琳, 代佳奇, 宋雪松. 高炉煤气燃气轮机燃烧室综合性能研究[J]. 热力发电, 2025, 54(11): 12-23. ZHENG Weilin, DAI Jiaqi, SONG Xuesong. Research on comprehensive performance of combustion chamber of blast-furnace-gas-fired gas turbine[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(11): 12-23.

Research on comprehensive performance of combustion chamber of blast-furnace-gas-fired gas turbine

ZHENG Weilin, DAI Jiaqi, SONG Xuesong

(College of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: The fuel adaptability of a certain type of gas turbine combustion chamber is systematically investigated in response to the characteristics of blast furnace gas composition and its significant fluctuations in its calorific value. By coupling the detailed chemical reaction mechanism with numerical simulation methods, the comprehensive performance characteristics of the gas turbine combustion chamber under different calorific values and composition conditions were obtained, with a focus on analyzing the distribution of temperature and concentration fields and their influencing mechanisms. The results show that, under the same initial conditions and fuel calorific value, as the volume fraction ratio of H_2 to CO in the gas increases, the average temperature at the combustion chamber outlet decreases from 1769.35 K to 1710.11 K, the temperature distribution coefficient decreases from 0.044 to 0.016, the NO_x emission concentration at the outlet decreases from $7.56 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$ to $1.49 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$, and the CO emission concentration decreases from $993.98 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$ to $421.95 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$, and the combustion efficiency increases from 98.48% to 99.14%. As the volume fraction ratio of CO_2 to N_2 in the

收稿日期: 2025-02-18 网络首发日期: 2025-08-26

基金项目: 国防基础科研计划项目 (JCKY2021130B039)

Supported by: Defense Industrial Technology Development Program (JCKY2021130B039)

第一作者简介: 郑玮琳 (1989), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为燃烧室流动与反应动力学, wzheng@sau.edu.cn.

通信作者简介: 代佳奇 (2000), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为低热值燃料燃气轮机燃烧性能, 1974093737@qq.com.

gas increases, the average temperature at the combustion chamber outlet decreases from 1 739.30 K to 1 694.99 K, the temperature distribution coefficient fluctuates in the range of 0.032~0.045, the NO_x emission concentration at the outlet decreases from $3.18 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$ to $1.39 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$, the CO emission concentration increases from $633.73 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$ to $832.45 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$, and the combustion efficiency decreases from 98.89% to 98.56%. In addition, as the fuel calorific value increases, the average temperature at the combustion chamber outlet significantly increases from 1 587.30 K to 1 862.39 K, the temperature distribution coefficient shows a downward trend, the NO_x emission concentration increases from $0.29 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$ to $18.66 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$, the CO emission concentration increases from $459.25 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$ to $1 030.61 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$, and the combustion efficiency decreases from 99.14% to 98.33%. Finally, 20 sets of data are selected for nonlinear surface fitting. For the blast furnace gas with a heat value range of 3~5 MJ/m³, all the R^2 values of the fitting formula are greater than 0.90, indicating this formula can provide a theoretical basis for the control of low-heat-value fuels in gas turbine combustion chambers.

Key words: blast furnace gas; detailed reaction mechanism; combustion performance; pollutant emissions; gas turbine

钢铁企业在炼铁过程中会产生大量工业副产品气体, 如高炉煤气 (BFG) 和焦炉煤气 (COG) 等^[1]。其中高炉煤气作为典型低热值燃料, 被广泛应用于燃气轮机及其联合循环中^[2-3], 不仅有助于降低对环境的影响, 而且可以有效缓解我国能源结构供应紧张问题^[4]。然而, 高炉煤气具有热值低、组分波动大等特点, 这给燃烧室设计带来了巨大挑战。由于其较低的热值, 为保证燃烧室出口热负荷不变, 需要提高燃料流量, 这将使燃烧室内部流场结构发生变化; 同时, 高炉煤气组分的改变会导致燃烧不稳定性以及绝热火焰温度和局部热释放率发生变化, 且其含烟尘大且有毒等特点会影响污染物排放^[5]。综上所述, 高炉煤气燃气轮机燃烧室需要综合考虑燃料组分和热值变化对燃烧稳定性、污染物排放等各方面的影响, 具有较高的技术难度。

国内外学者已对低热值燃料燃气轮机燃烧室的燃烧特性进行了一定的研究。在国内, 燃料适应性研究主要采用数值模拟。王朝晖等^[6]通过对比研究某型燃气轮机燃烧天然气和中低热值燃料的性能, 发现这几种燃料均能满足设计要求, 但低热值燃料工况下燃烧室出口温度相对较低。何敏等^[7]研究发现, 低热值燃料的化学反应速率与其组分密切相关。随着气体燃料中惰性气体组分比例的增加, 化学反应速率显著降低, 导致燃烧效率下降, 并对燃烧室内的燃烧效率与燃烧室出口的温度分布产生重要影响。梁拯等^[8]采用不同合成组分的低热值气体开展燃烧试验。研究发现可燃组分中氢气能明显抑制低炉内 CO 和 NO_x 的生成。李涛等^[9]通过数值模拟研究某燃气轮机燃烧室的燃料适应性, 发现在等热负荷条件下, 燃烧室出口温度的均匀性随燃料热值的降低而下降, 且当燃烧室改烧煤制气时, 应适当降低负荷运行或对喷嘴结构进行相应调整

以保证燃烧室的长时间和稳定运行。国外研究方面, Battista 等人^[10]通过实验方法分别研究了 GE 公司 LM500 和 MS5001 机组改烧各类中低热值气体燃料的可行性。结果表明, 当燃料的热值在 $\pm 20\%$ 范围内波动时, 燃烧室仍能保持在足够高的性能状态。Yamamoto 等人^[11]采用数值模拟和试验测试对低热值燃料的燃烧过程进行了研究, 但未分析同热值不同组分低热值燃料燃烧特性的差异。

综上所述, 对于低热值燃气对燃气轮机燃烧室性能的影响研究已经成为热点。然而, 由于研究对象以及研究方法的差异性, 现有研究结论往往存在一定的分歧, 且缺少对燃料热值组分的系统深入研究。为获得某改型天然气燃气轮机燃烧室在改烧高炉煤气时的燃烧与排放特性, 本文针对不同燃料组分和热值的高炉煤气开展了系统研究, 并形成燃料组分比值与燃烧室出口参数的拟合公式, 旨在为低热值燃料燃气轮机燃烧室燃烧组织方法与优化提供理论依据。

1 计算模型和计算方法

1.1 物理模型

图 1 为燃气轮机燃烧室示意。该燃烧室为单头部双级旋流、三级供气结构。燃烧室头部由内向外分别为值班级喷嘴、预燃级喷嘴以及主燃级喷嘴。主燃级和预燃级喷嘴内燃料经过两级旋流器的作用与空气在预混段内预先混合后, 再进入火焰筒内燃烧, 值班级喷嘴内采用扩散燃烧方式, 可以稳定火焰并有效控制燃烧区火焰温度, 抑制 NO_x 的生成。双旋流器采用同向旋流的方式, 内外旋流器旋流数均为 0.8。外环为主燃级旋流器, 内环为预燃级旋流器。分别选取叶厚为 4 mm、叶宽为 25 mm、周向分布 18 个的直叶片, 以及叶厚为 2 mm、叶宽

为 23 mm 周向分布 8 个的直叶片。值班级喷嘴中间为主喷口，侧面有 10 个辅助进气口；预燃级喷嘴周向均布 4 个；主燃级喷嘴周向均布 20 个。燃料占比按主燃级 58%、预燃级 40%、值班级 2% 进行分配，空气分级比为 1.77，即主燃级旋流器空气流量与预燃级旋流器空气流量之比为 1.77。

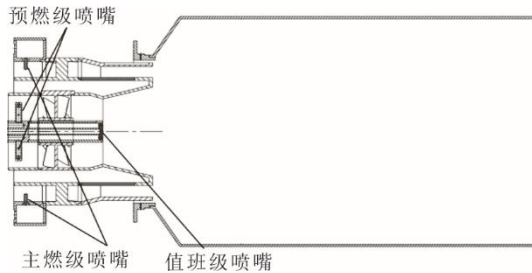


图 1 燃气轮机燃烧室示意

Fig.1 Schematic diagram of the gas turbine combustor

考虑到部分结构尺寸跨度较大，采用六面体-多面体核心网格对燃气轮机燃烧室进行空间离散化处理^[12-13]。为了保证计算精度，对燃气轮机燃烧室的喷嘴、旋流器、燃烧室主燃区以及燃烧室出口等流场复杂、化学反应迅速等区域进行局部网格加密处理。燃烧室结构及计算流体域网格如图 2 所示。

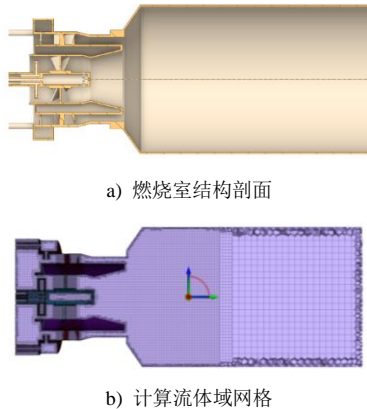


图 2 燃烧室结构及计算流体域网格

Fig.2 The combustion chamber structure and computational fluid domain mesh

1.2 计算方法

模拟软件采用 ANSYS Fluent，考虑到燃气轮机燃烧室流场的强旋流特征，基于雷诺平均 N-S 方程方法，湍流模型为 Realizable $k-\epsilon$ 方程模型^[14-15]，并耦合部分预混燃烧模型中的 FGM 燃烧模型，对湍流-燃烧相互作用进行模化^[16-17]。在生成火焰面数据库时，采用 GRI.Mech3.0 详细气相化学动力学机理，包含了 325 个基元化学反应，涉及 53 种化学物质。经过广泛的实验验证，该机理可较为精准地

预测燃烧产物的组成分布，并且主要针对温度范围 1 000~2 500 K、压力范围 0.001~1.000 MPa 以及当量比 0.1~5.0 的预混系统。相较于其他更复杂的机理模型，GRI-Mech 3.0 在保持较高精度的同时，计算效率相对较高，能够满足大规模数值模拟的需求^[18]。

辐射模型采用 P1 辐射模型，压力-速度耦合算法为 Coupled 算法，压力插值算法为二阶差分，其他空间离散方法均为一阶迎风格式。燃料和空气进口条件均设置为质量流量入口，边界条件采用绝热无速度滑移壁面，壁面处湍流参数为 0。上述计算方法已经与实验结果进行对比验证，燃烧性能计算与实验结果的误差介于 2.07%~6.25%，且曲线走势相同^[19]。

1.3 网格无关性验证

在保证计算方法相同的前提下，对比了 231 万、332 万以及 475 万 3 套网格的计算结果，选取燃烧室中心轴线上的轴向速度与温度数据进行对比分析，结果如图 3、图 4 所示（ D 为燃烧室剖面轴的直径）。其中 332 万和 475 万网格的计算结果非常接近，同时兼顾单个算例计算时间以及计算精度的准确性，最终选定网格数为 332 万。

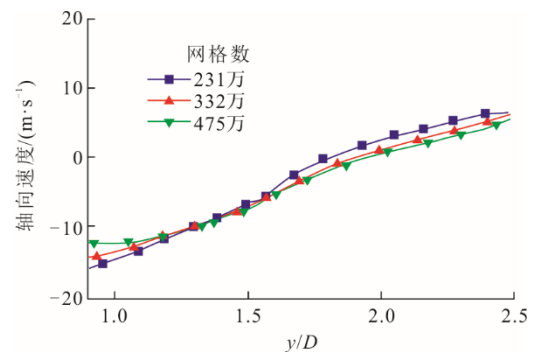


图 3 不同网格数下中心轴线的轴向速度

Fig.3 The axial velocity along the central axis for different mesh numbers

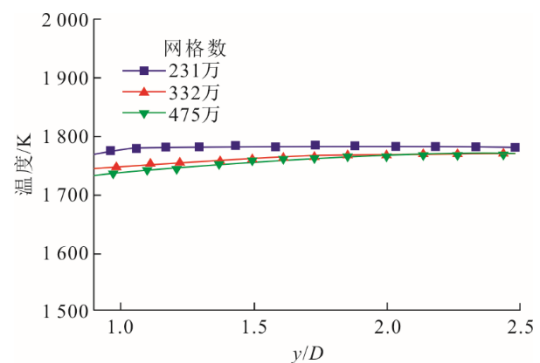


图 4 不同网格数下中心轴线温度分布

Fig.4 The temperature along the central axis for different mesh numbers

最后,采用验证后的网格划分及计算方法开展燃用高炉煤气的改型燃气轮机燃烧室综合性能的计算。模拟中所涉及的高炉煤气组分与热值见表 1。其中在进行等燃烧室热负荷工况模拟时,保证初始进口参数与基础试验工况相同^[20-23],将空气温度设为 690 K、压力 0.3 MPa;此外,在保持燃烧室热负荷(843.180 kW)及当量比($\phi=1$)不变的前提下,改变燃料热值以及组分时需要调整燃气流量及相应的空气流量。

为表征燃烧室的出口温度分布特征,引入燃烧室出口温度分布系数(ζ_{OTDF}),温度分布系数计算公式为:

$$\zeta_{\text{OTDF}} = \frac{T_{4\text{max}} - T_{4\text{ave}}}{T_{4\text{ave}} - T_{3\text{ave}}} \quad (1)$$

式中: $T_{4\text{max}}$ 为出口最高温度; $T_{3\text{ave}}$ 为进口温度; $T_{4\text{ave}}$ 为出口平均温度。

为衡量燃料在燃烧室内燃烧充分程度,引入燃烧效率,本文利用燃气分析法计算燃烧室的燃烧效率,由于本燃烧室含氢的未完全燃烧产物生成量特别小,可以忽略不计。故燃烧效率的计算公式为:

$$\eta = \frac{X_{\text{CO}_2} + 0.53X_{\text{CO}} - 0.397X_{\text{H}_2}}{X_{\text{CO}_2} X_{\text{CO}}} \quad (2)$$

式中: X 表示各组分的体积分数。

表 1 高炉煤气组分与热值
Tab.1 The components and calorific value of blast furnace gas

编号	BFG 组分体积分数/%				WI	燃料质量流量/(kg·s ⁻¹)	空气质量流量/(kg·s ⁻¹)	$Q_{\text{LHV}}/(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3})$
	H ₂	CO	CO ₂	N ₂				
a1	1.00	30.15	19.00	49.85	1.70	0.290 3	0.201 7	
a2	3.00	27.15	19.00	50.85	1.72	0.285 7	0.195 4	
a3	5.00	24.20	19.00	51.85	1.73	0.280 6	0.189 1	
a4	7.00	21.25	19.00	52.75	1.75	0.275 5	0.182 8	
a5	9.00	18.30	19.00	53.70	1.77	0.270 4	0.176 6	
b1	5.00	24.20	13.00	57.80	1.76	0.271 4	0.189 1	4.00
b2	5.00	24.20	16.00	54.80	1.75	0.276 0	0.189 1	
b3	5.00	24.20	19.00	51.80	1.73	0.280 5	0.189 1	
b4	5.00	24.20	22.00	48.80	1.72	0.285 1	0.189 1	
b5	5.00	24.20	25.00	45.80	1.71	0.289 7	0.189 1	
c1	1.00	37.05	19.00	42.95	1.88	0.238 2	0.202 3	
c2	3.00	34.10	19.00	43.90	1.90	0.234 2	0.197 1	
c3	5.00	31.10	19.00	44.90	1.91	0.230 3	0.192 0	4.87
c4	7.00	28.15	19.00	45.85	1.93	0.226 2	0.186 8	
c5	9.00	25.15	19.00	46.85	1.95	0.222 3	0.181 6	
d1	1.00	24.40	19.00	55.60	1.54	0.354 8	0.201 0	
d2	3.00	21.45	19.00	56.55	1.56	0.348 5	0.193 3	
d3	5.00	18.45	19.00	57.55	1.57	0.342 9	0.185 6	3.27
d4	7.00	15.45	19.00	58.55	1.58	0.337 3	0.177 9	
d5	9.00	12.50	19.00	59.50	1.60	0.331 0	0.170 2	

注: WI 为华白指数,是气体互换性指标,定义为燃料低热值(Q_{LHV})与燃料比重(SG)平方根的比率,即 $\text{WI} = \sqrt{Q_{\text{LHV}}/\text{SG}}$ 。

2 结果与分析

本节对比分析不同工况下的燃烧室流场、温度场及组分场等特征,并对燃烧室燃烧效率、出口排放及出口平均温度进行拟合,获得相应的拟合曲面和经验公式。

2.1 可燃气体组分的影响

高炉煤气中可燃气体组分为 H₂ 和 CO,在燃料燃烧时发挥着关键作用。在进口参数、出口热负荷、当量比及燃料热值保持不变前提下,燃料组分编号

a1—a5 对比了不同可燃气体的组分体积分数(标准状态下,下同)比($X_{\text{H}_2}/X_{\text{CO}}$)燃气轮机燃烧室的燃烧与排放性能。

图 5 为不同 $X_{\text{H}_2}/X_{\text{CO}}$ 比值下燃烧室出口平均温度和温度分布系数变化曲线。从图 5 可以看出,随着 $X_{\text{H}_2}/X_{\text{CO}}$ 比值的增加,燃烧室出口平均温度呈现明显的下降趋势,从 1769.35 K 降至 1710.11 K。同时,温度分布系数也随之从 0.044 降至 0.016,出口温度分布更加均匀。

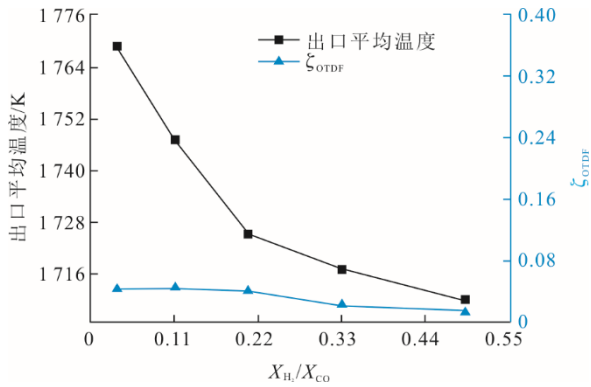


图 5 不同 X_{H_2} / X_{CO} 燃烧室出口平均温度及温度分布系数
Fig.5 The average temperatures at the combustor outlet and the temperature distribution coefficients under different volume fraction ratios of H_2 to CO

图 6 为不同 X_{H_2} / X_{CO} 比值下燃烧室出口 CO 和 NO_x 排放变化规律。随着 X_{H_2} / X_{CO} 比值的增加, 2 种污染物的排放量均呈现下降趋势。 NO_x 的排放量从 $7.56 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$ 降至 $1.49 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$, 满足污染物排放标准要求; CO 排放量从 $993.98 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$ 降至 $421.95 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$ 。燃烧室出口 CO 排放量较高, 主要可归结于两方面原因: 其一, 高炉煤气本身 CO 含量较高, 且该燃烧室属于轴向分级燃烧室, 其在精准控制 NO_x 排放方面性能出色, 不过在这一过程中, 会相应地提升 CO 排放量升高的风险; 其二, 鉴于高炉煤气热值较低的特性, 为满足燃烧需求, 必须增加高炉煤气的质量流量。然而, 气流速度的增大使得燃烧室内回流区长度出现增加, 进而导致燃烧室高温区向燃烧室出口靠近, 这一系列变化也是使 CO 排放量较高的关键因素。

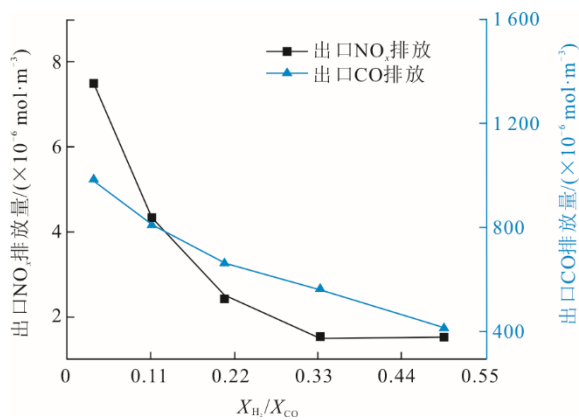


图 6 不同 X_{H_2} / X_{CO} 燃烧室出口 CO 和 NO_x 排放量变化
Fig.6 The changes of CO and NO_x emission concentration at the combustor outlet under different volume fraction ratios of H_2 to CO

图 7 为不同 X_{H_2} / X_{CO} 比值下燃烧室燃烧效率变化规律。由图 7 可见, 随着 X_{H_2} / X_{CO} 比值的增加, 燃烧室的燃烧效率从 98.48% 提升至 99.14%, 呈现上升趋势。

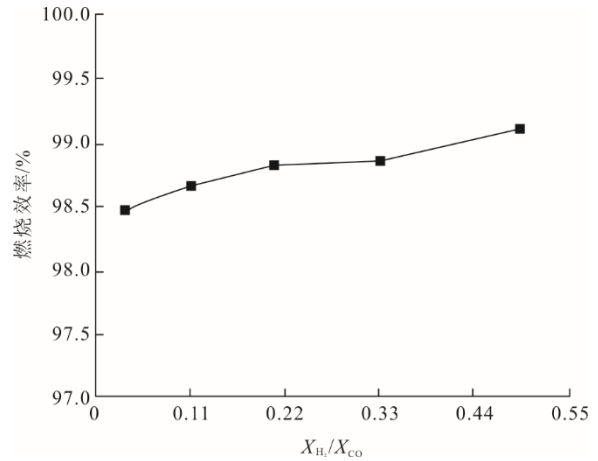
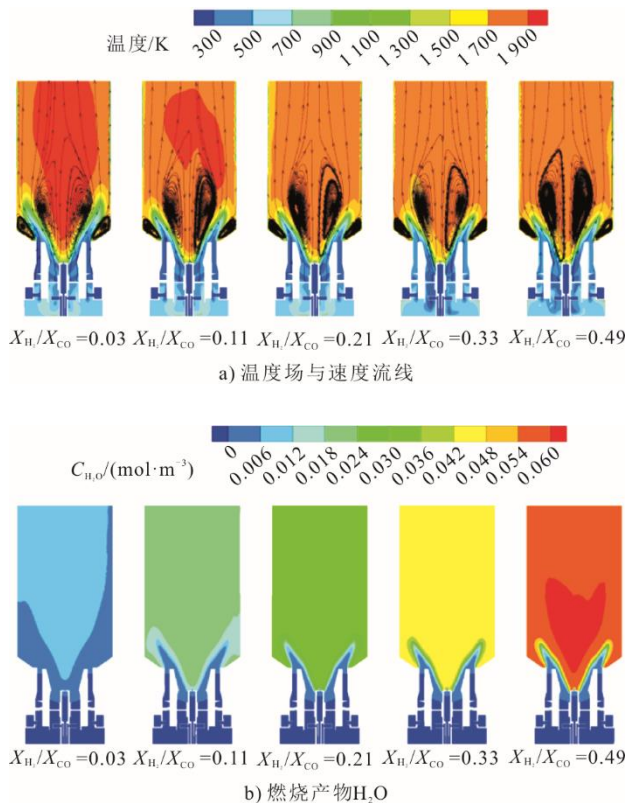


图 7 不同 X_{H_2} / X_{CO} 燃烧室燃烧效率变化
Fig.7 The combustion efficiencies of the combustion chamber with different volume fraction ratios of H_2 to CO

为深入探究上述现象的内在机理, 本文对比分析了不同 X_{H_2} / X_{CO} 比值下燃烧室中心截面的温度场、速度场及各产物组分流场分布特征, 结果如图 8 所示。



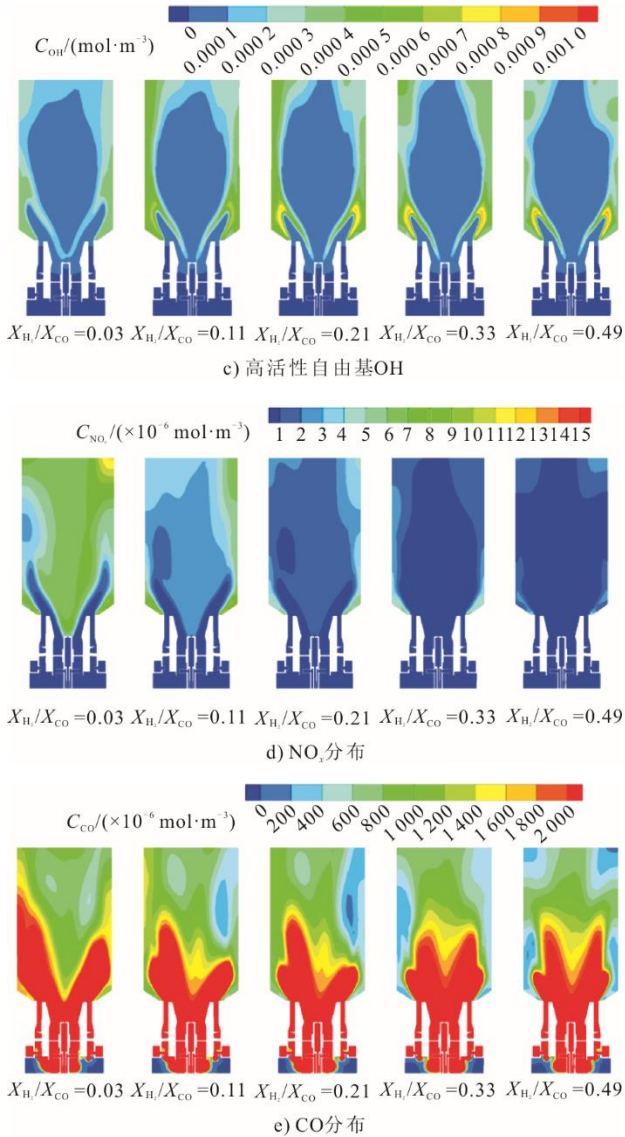


图 8 不同 X_{H_2} / X_{CO} 燃烧室中心截面流场对比

Fig.8 The flow fields in central cross-section of the combustor with different volume fraction ratios of H_2 to CO

由图 8 可见，随着 X_{H_2} / X_{CO} 比值的增加，燃烧室内部主回流区与角回流区的整体形态保持稳定（图 8a）。但由于燃料质量流量的减小，主回流区长度呈现逐渐缩短的趋势，高温区主要集中在值班级出口及回流区剪切层内部。随着 X_{H_2} / X_{CO} 比值逐渐增加，燃烧室高温区逐渐向头部移动，且燃烧室整体温度呈现下降趋势。这种现象是由于燃烧产物中比热容较高的 H_2O 含量明显升高（图 8b），会吸收部分燃烧热，降低了燃烧室的总体温度，这与图 5 所示的出口平均温度下降现象相吻合。

图 6 中燃烧室出口 NO_x 排放量的减少主要归因于燃烧室温度的降低（图 8d），而 CO 排放量的减少与燃气组分中 CO 含量的降低直接相关（图 8e），

这与图 8 所示燃烧内污染物分布相同。

图 7 中燃烧效率的提升一方面是由于燃料质量流量的降低导致燃烧室内气体流速减小，延长了燃料的驻留时间；另一方面，燃烧室头部的高活性自由基 OH 含量显著提升，而出口处 OH 含量相应减少（图 8c），燃气燃烧速率得到提高，最终促进燃烧效率的提升。

2.2 稀释气体组分的影响

高炉煤气中的 CO_2 、 N_2 作为稀释气体，既不参与燃烧放热过程，也不具备助燃作用。相反，这些稀释气体会吸收燃烧过程中产生的大量热量，导致混合气体升温速率降低，影响燃烧稳定性。因此，深入分析稀释气体组分对燃烧室性能影响也十分关键。在保证进口参数、出口热负荷、当量比以及燃料热值保持不变前提下，针对燃料组分编号 b1—b5 研究不同稀释气体组分比例（ X_{CO_2} / X_{N_2} 比值）下燃气轮机燃烧室的燃烧与排放性能。

图 9 为不同 X_{CO_2} / X_{N_2} 比值下的燃烧室出口平均温度和温度分布系数的变化曲线。从图 9 可以看出，随着 X_{CO_2} / X_{N_2} 比值的增加，燃烧室出口平均温度从 1 739.30 K 降至 1 694.99 K。而温度分布系数则在 0.032~0.045 波动，未表现出明显的变化规律。

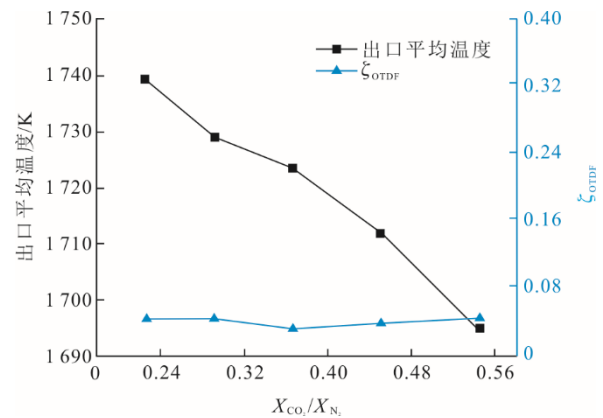


图 9 不同 X_{CO_2} / X_{N_2} 燃烧室出口平均温度及温度分布系数
Fig.9 The average temperatures at the combustor outlet and the temperature distribution coefficients under different volume fraction ratios of CO_2 to N_2

图 10 为不同 X_{CO_2} / X_{N_2} 比值下的燃烧室出口 CO 和 NO_x 排放变化规律。由图 10 可见，随着 X_{CO_2} / X_{N_2} 比值增加，燃烧室出口 CO 排放量从 $633.73 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$ 增加到 $832.45 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$ ，而 NO_x 排放量则从 $3.18 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$ 降低至 $1.39 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$ ，呈现相反的变化趋势。

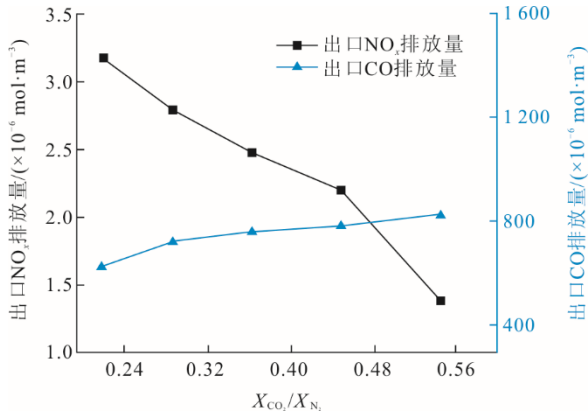


图 10 不同 X_{CO_2}/X_{N_2} 燃烧室出口污染物排放量

Fig.10 The pollutants emission concentrations at the combustor outlet with different volume fraction ratios of CO₂ to N₂

图 11 为不同 X_{CO_2}/X_{N_2} 比值下的燃烧室燃烧效率变化。由图 11 可见，随 X_{CO_2}/X_{N_2} 比值的增加，燃烧室的燃烧效率呈现轻微下降趋势，从 98.89% 降至 98.56%，其变化幅度较小。

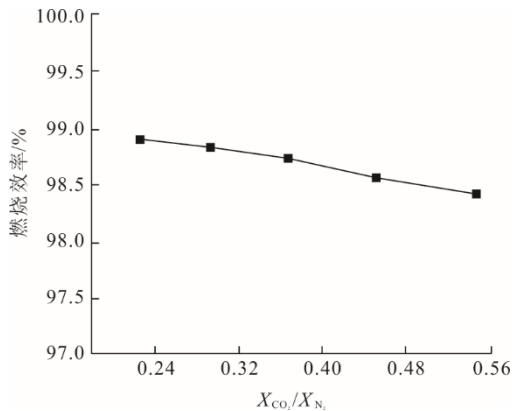
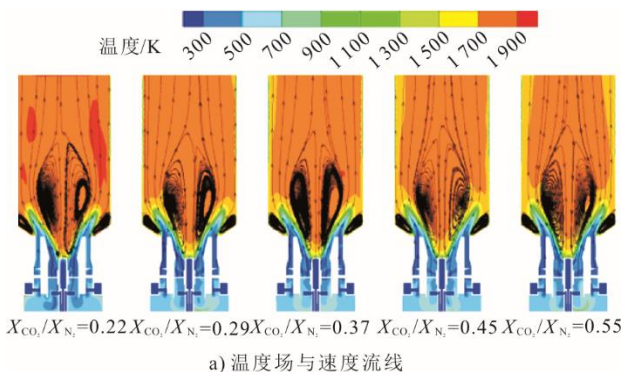


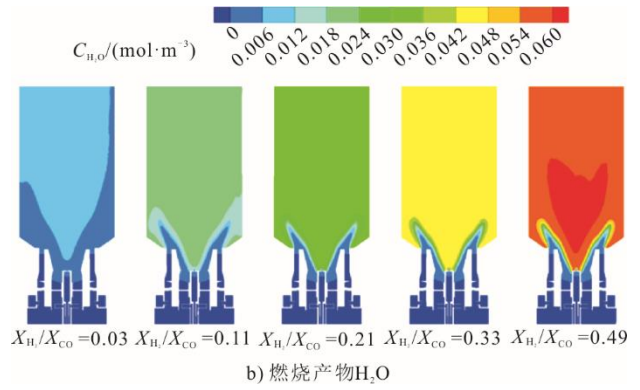
图 11 不同 X_{CO_2}/X_{N_2} 燃烧室燃烧效率变化

Fig.11 The combustion efficiencies of the combustion chamber with different volume fraction ratios of CO₂ to N₂

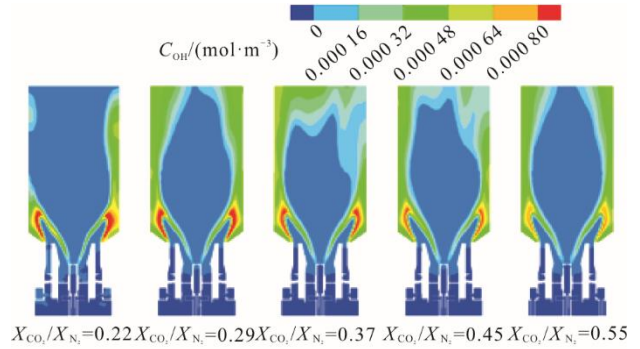
为深入探究上述现象的内在机理，本文对比分析了不同 X_{CO_2}/X_{N_2} 比值下燃烧室中心截面的温度场、速度流场及各产物组分流场分布特征，结果如图 12 所示。



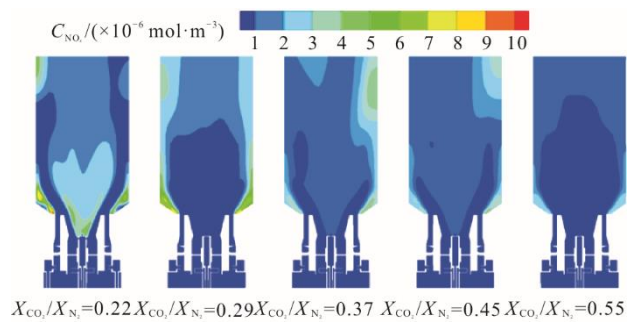
a) 温度场与速度流线



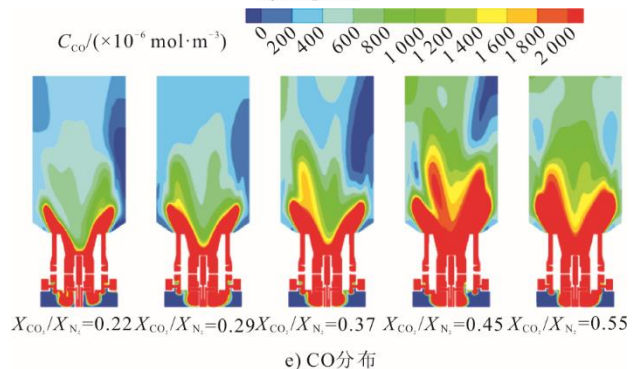
b) 燃烧产物H₂O



c) 高活性自由基OH



d) NO_x分布



e) CO分布

图 12 不同 X_{CO_2}/X_{N_2} 燃烧室中心截面流场对比

Fig.12 The flow fields in central cross-section of the combustor with different volume fraction ratios of CO₂ to N₂

由图 12 可见，随着 X_{CO_2}/X_{N_2} 比值的增加，燃烧室内气流速度呈现增加趋势，导致燃烧室回流区长度略有增加，燃烧室内整体温度降低（图 12a）。其原因在于：一方面， X_{CO_2}/X_{N_2} 比值的增大导致燃气质量流量增加，引起气流速度提升，从而减少了

燃料在燃烧室内的驻留时间。另一方面,虽然燃烧产物 H_2O 的变化不明显(图 12b)),但燃料中 CO_2 的增加对高活性自由基的生成产生了显著的抑制作用(图 12c)),从而降低了化学反应速率。上述因素综合作用不仅导致了燃烧室出口平均温度的降低(图 9),还直接影响了污染物的排放特性(图 10):一方面,温度降低有效抑制了燃烧室 NO_x (图 12d))的生成;另一方面,较低的温度环境减缓了 CO 的完全氧化过程,致使 CO 排放量增加(图 12e))。同时,上述变化也是导致燃烧效率下降(图 11))的主要原因。

2.3 燃料热值的影响

在燃料热值发生变化时,燃料的燃烧效率、绝热火焰温度及反应速率等关键参数均会发生相应变化,故有必要对燃烧室性能的变化进行评估。高炉煤气热值变化范围在 $2.5\sim 5.0\text{ MJ/m}^3$,在保持 CO_2 体积分数不变的前提下,调整可燃组分(H_2 、 CO)和 N_2 的体积分数来实现热值梯度变化。其中编号 c、a、d 组热值逐组降低。鉴于各组数据表现出相似的变化规律,本节选取具有代表性的 c3、a3 和 d3 工况,分析燃料热值变化对燃烧室性能的影响。

图 13 为不同燃料热值工况下燃烧室出口平均温度和温度分布系数变化情况。由图 13 可见,随着燃料热值的增加,燃烧室出口平均温度呈现显著上升趋势,从 1587.30 K 攀升至 1862.39 K ,而温度分布系数从 0.041 降至 0.032 。图 14 为不同燃料热值工况下燃烧室出口 CO 以及 NO_x 分布。由图 14 可见,随着燃料热值升高,燃烧室出口 NO_x 和 CO 排放量均增加, NO_x 排放量从 $0.29\times 10^{-6}\text{ mol/m}^3$ 增至 $18.66\times 10^{-6}\text{ mol/m}^3$, CO 排放量从 $459.25\times 10^{-6}\text{ mol/m}^3$ 增至 $1030.61\times 10^{-6}\text{ mol/m}^3$ 。

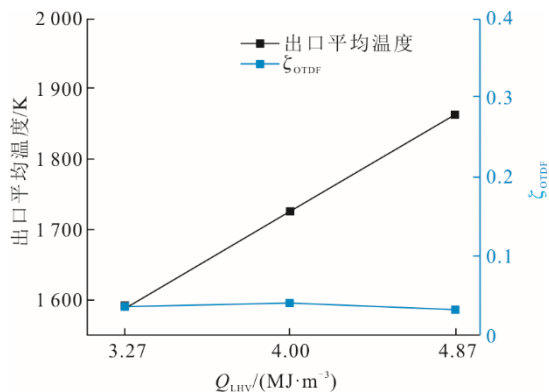


图 13 不同燃料热值燃烧室出口平均温度及温度分布系数
Fig.13 The average temperatures at the combustor outlet and the temperature distribution coefficients with different lower heating values of fuel

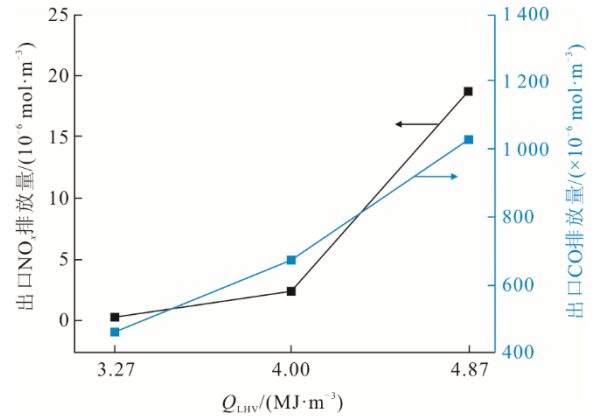


图 14 不同燃料热值燃烧室出口污染物排放
Fig.14 The pollutants emission concentrations at the combustor outlet with different lower heating values of fuel

图 15 为不同燃料热值工况下燃烧室燃烧效率变化。由图 15 可见,随着燃料热值的升高燃烧室燃烧效率明显下降,从 99.14% 降低到 98.33% 。排放污染物的明显增加,表明燃烧过程中未完全燃烧的可燃物逐渐累积,导致了燃烧室燃烧效率的降低。

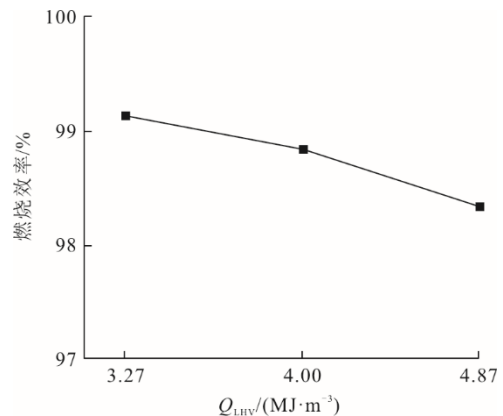
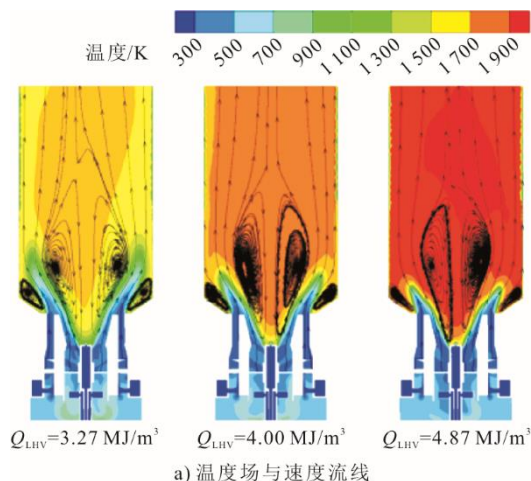


图 15 不同燃料热值燃烧室燃烧效率变化
Fig.15 The combustion efficiencies of the combustion chamber with different lower heating values of fuel

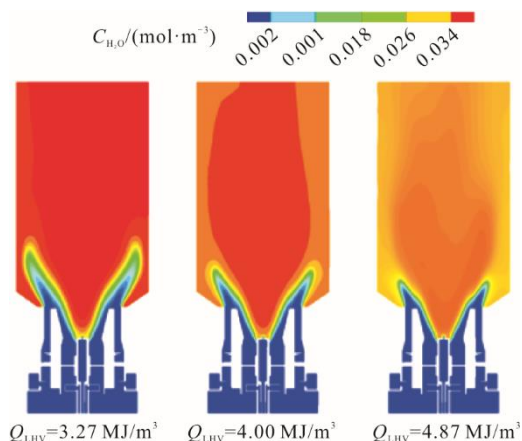
图 16 对比分析了不同燃料热值下燃烧室中心截面的温度场、流场及浓度场分布特征。由图 16 可见,随着高炉煤气热值的增加,燃烧室内温度发生显著变化。这种现象主要归因于燃料热值增加导致的绝热火焰温度升高,并且燃烧室内燃烧产物 H_2O 含量下降(图 16b))会进一步导致整体温度的升高。值得注意的是,燃烧室高温区向头部值班级喷嘴移动,这增加了值班级喷嘴被烧蚀的风险。此外,由于燃料质量流量的减少,混合气射流速度的降低,导致燃烧室内流场发生明显变化,燃烧室主回流区尺度(包括长度和宽度)以及角回流区均呈现收缩趋势(图 16a))。

图 14 中燃烧室出口污染物排放的升高是由于燃料热值的增加导致燃烧室内整体温度的增加, 进而引起污染物 NO_x 排放量升高(图 16d), 而 CO 排放量增加与燃料中 CO 含量升高有关(图 16e)。

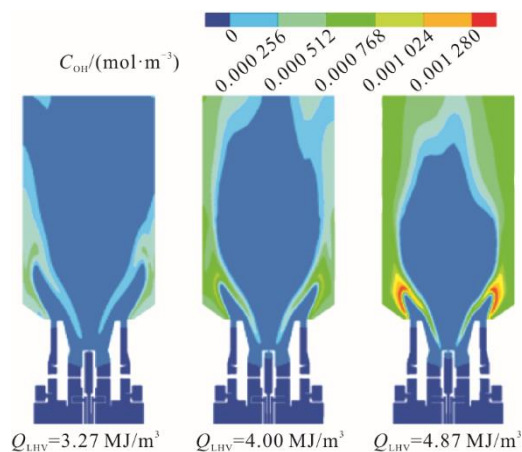
随着高炉煤气热值的增加, 燃烧室污染物排放量升高, 出口未完全燃烧的中间产物含量也呈现增加的趋势(图 16c), 反映出燃烧过程的不充分性, 与图 15 中燃烧室燃烧效率的降低相一致。



a) 温度场与速度流线



b) 燃烧产物 H_2O



c) 高活性自由基 OH

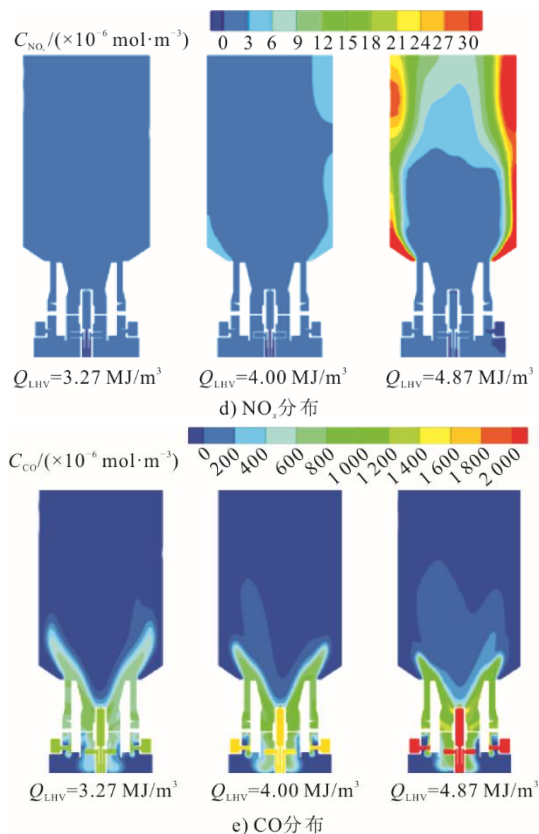


图 16 不同燃料热值燃烧室中心截面流场与组分变化
Fig.16 The flow field and component changes in central cross-section of the combustor for fuels with different calorific values

2.4 非线性曲面拟合

在燃料热值发生变化时, 鉴于编号 a、b、c、d 4 组工况, 共 20 组数据的 $X_{\text{H}_2} / X_{\text{CO}}$ 与 $X_{\text{CO}_2} / X_{\text{N}_2}$ 值均存在差异, 对应燃烧室的出口性能参数也不同。将可燃气体的比值 $X_{\text{H}_2} / X_{\text{CO}}$ 记为 x , 稀释气体比值 $X_{\text{CO}_2} / X_{\text{N}_2}$ 记为 y , 选取燃烧室燃烧效率 z_1 (%)、燃烧室出口 CO 体积分数 z_2 (%)、燃烧室出口平均温度 z_3 (K) 以及燃烧室出口 NO_x 体积分数 z_4 (%) 4 个出口关键参数与上述 2 个燃料组分参数进行非线性拟合, 得到如图 17 所示拟合曲面, 形成相应拟合方程, 并利用相关系数 R^2 进行评估^[23-25]。

$$z_1 = a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5xy + a_6y^2 \quad (3)$$

式中: a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 、 a_5 、 a_6 为常参数。

经拟合, $a_1=102.0388$, $a_2=-16.5519$, $a_3=-7.7011$, $a_4=1.6785$, $a_5=49.1482$, $a_6=-5.6572$, 相关系数 $R^2=0.9570 > 0.90$ 。

$$z_2 / 100 = b_0 + b_1x + b_2y + b_3x^2 + b_4xy + b_5y^2 + b_6x^3 + b_7x^2y + b_8xy^2 + b_9y^3 \quad (4)$$

式中: b_0 、 b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 、 b_5 、 b_6 、 b_7 、 b_8 、 b_9 为常参数。

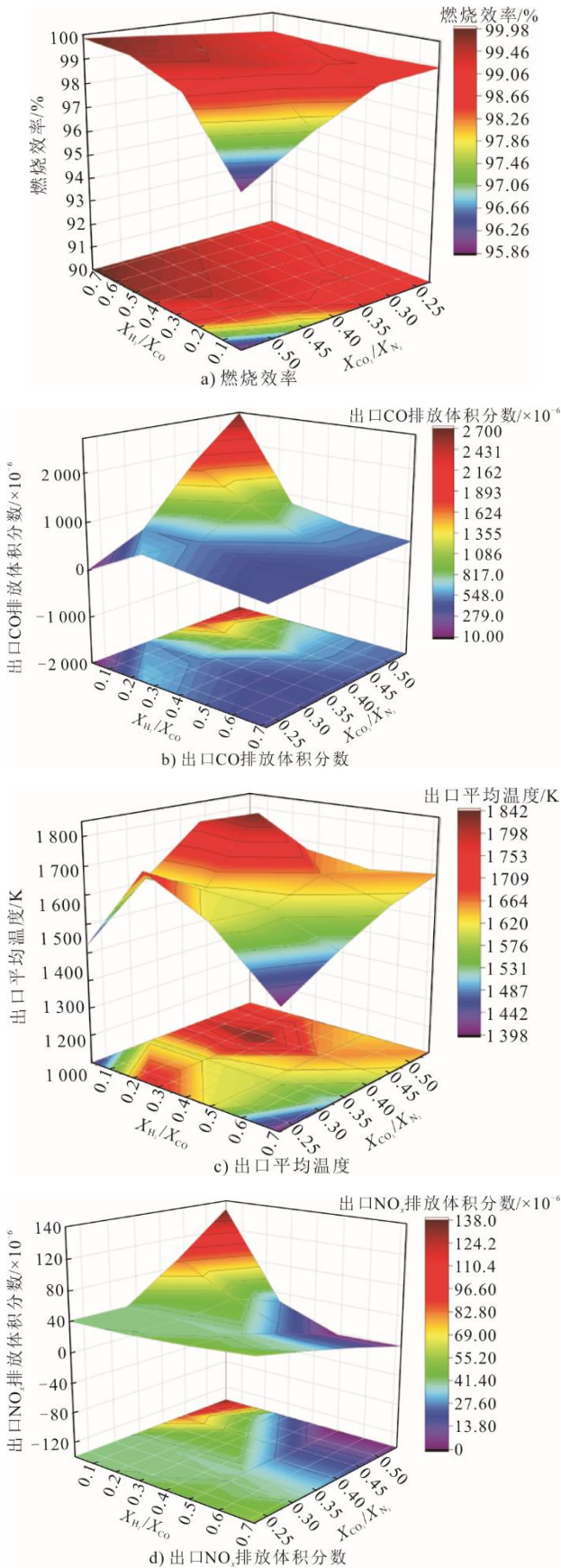


图 17 燃烧室参数与组分比值数学拟合曲面

Fig.17 Mathematical fitting surface of combustion chamber parameters and composition ratio

经拟合, $b_0=-68.400\ 4$, $b_1=75.752\ 1$, $b_2=131.644\ 8$, $b_3=-944.575\ 2$, $b_4=-2\ 974.300\ 8$, $b_5=5\ 462.000\ 2$, $b_6=174.978\ 7$, $b_7=2\ 299.065\ 5$, $b_8=2\ 529.627\ 3$, $b_9=-946.252\ 2$, 相关系数 $R^2=0.969\ 7 > 0.90$ 。

$$z_3 / 100 = c_0 + c_1x + c_2y + c_3x^2 + c_4xy + c_5y^2 + c_6x^3 + c_7x^2y + c_8xy^2 + c_9y^3 \quad (5)$$

式中: c_0 、 c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 、 c_5 、 c_6 、 c_7 、 c_8 、 c_9 为常数。

经拟合, $c_0=25.951\ 6$, $c_1=128.067\ 2$, $c_2=-157.512\ 2$, $c_3=-262.580\ 4$, $c_4=-414.329\ 2$, $c_5=557.743\ 8$, $c_6=54.727\ 4$, $c_7=615.660\ 0$, $c_8=226.052\ 6$, $c_9=-532.210\ 3$ 。相关系数 $R^2=0.941\ 4 > 0.90$ 。

$$z_4 = d_0 \cdot \exp(d_1x + d_2y + d_3x^2 + d_4xy + d_5y^2 + d_6x^3 + d_7x^2y + d_8xy^2 + d_9y^3) \quad (6)$$

式中: d_0 、 d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 、 d_5 、 d_6 、 d_7 、 d_8 、 d_9 为常数。

经拟合, $d_0=0$, $d_1=55.453\ 4$, $d_2=110.044\ 3$, $d_3=-51.501\ 4$, $d_4=-70.457\ 7$, $d_5=-25.653\ 5$, $d_6=-4.679\ 3$, $d_7=-52.696\ 2$, $d_8=-87.589\ 2$, $d_9=-96.157\ 1$, 相关系数 $R^2=0.928\ 7 > 0.90$ 。

在实际高炉煤气燃气轮机燃烧室运行时, 此拟合方程对于热值范围在 3~5 MJ/m³ 的高炉煤气组分比值的调控具有一定的参考价值。

3 结 论

以某型燃气轮机燃烧室为研究对象, 在保证燃烧室出口热负荷、当量比、初始温度以及初始压力不变的前提下, 采用验证后的数值模拟方法, 系统研究了高炉煤气的组分及热值变化对燃气轮机燃烧室综合性能的影响规律, 通过对温度场、组分流场、污染物排放特性等多维度指标的深入分析, 得出以下结论。

1) 高炉煤气中 X_{H_2} / X_{CO} 比值的增加导致燃烧室性能参数发生以下变化: 燃烧室出口平均温度呈下降趋势 (从 1 769.35 K 降至 1 710.11 K)、出口温度分布均匀性明显优化, 温度分布系数从 0.044 降至 0.016, 污染物排放水平整体改善, 其中 NO_x 排放量从 7.56×10^{-6} mol/m³ 降至 1.49×10^{-6} mol/m³, CO 排放从 993.98×10^{-6} mol/m³ 降至 421.95×10^{-6} mol/m³, 燃烧效率显著提升 (从 98.48% 增至 99.14%)。

2) 高炉煤气中 X_{CO_2} / X_{N_2} 比值的增加, 导致燃

烧室性能参数发生以下变化：燃烧室出口平均温度逐步降低（从 1 739.30 K 降至 1 694.99 K）、温度分布系数在 0.032~0.045 变化，无明显规律，出口 NO_x 排放呈现明显下降趋势（从 $3.18 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$ 降至 $1.39 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$ ），而 CO 排放则显著增加（从 $633.73 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$ 升至 $832.45 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$ ），燃烧效率略有降低（从 98.89% 降至 98.56%）。

3) 高炉煤气热值的增加导致燃烧室的性能参数发生以下变化：出口平均温度大幅升高（从 1 587.30 K 升至 1 862.39 K）、温度分布系数有所下降，污染物排放量明显增加，其中 NO_x 排放量从 $0.29 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$ 激增至 $18.66 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$ 、CO 排放量从 $459.25 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$ 升高至 $1 030.61 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$ ，燃烧效率呈现下降趋势（从 99.14% 降至 98.33%）。

4) 以 $X_{\text{H}_2} / X_{\text{CO}}$ 与 $X_{\text{CO}_2} / X_{\text{N}_2}$ 2 个燃料组分参数为自变量，以燃烧室燃烧效率、出口平均温度、CO 与 NO_x 排放量 4 个燃烧室出口关键参数为因变量进行曲面拟合，拟合公式适用于热值范围 3~5 MJ/m³ 的高炉煤气，经评估拟合效果良好， R^2 值均在 0.9 以上。

[参考文献]

- [1] 冯怡然, 周逸帆, 魏震鸿, 等. 面向燃气轮机燃料适应性和燃烧稳定性问题的一种新型涡管燃烧技术[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(9): 2512-2517.
FENG Yiran, ZHOU Yifan, WEI Zhenhong, et al. A novel tubular combustion technology for fuel flexibility and combustion stability of gas turbine[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2022, 43(9): 2512-2517.
- [2] KARYEYEN S, ILBAS M. Turbulent diffusion flames of coal derived-hydrogen supplied low calorific value syngas mixtures in a new type of burner: an experimental study[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42: 2411-2423.
- [3] ILBAS M, BEKTAS A, KARYEYEN S. Effect of oxy-fuel combustion on flame characteristics of low calorific value coal gases in a small burner and combustor[J]. Fuel, 2018, 226: 350-364.
- [4] 邓清华, 胡乐豪, 李军, 等. 大型发电技术发展现状及趋势[J]. 热力透平, 2019, 48(3): 175-181.
DENG Qinghua, HU Lehao, LI Jun, et al. State-of-art and tendency on technologies of large electric power generation[J]. Thermal Turbine, 2019, 48(3): 175-181.
- [5] 冯静, 段丽平, 彭红文. 中低热值燃料燃气轮机的应用分析[J]. 能源与节能, 2022(10): 183-187.
FENG Jing, DUAN Liping, PENG Hongwen. Application of gas turbine with medium or low calorific value fuel[J]. Energy and Energy Conservation, 2022(10): 183-187.
- [6] 王朝晖, 王成军, 王丹丹, 等. 燃气轮机燃烧室燃烧气体燃料的数值模拟[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2010, 27(2): 11-14.
WANG Chaohui, WANG Chengjun, WANG Dandan, et al. Combusting gas fuel simulation for the combustor of gas turbine engine[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2010, 27(2): 11-14.
- [7] 何敏, 蔡文祥, 赵坚行, 等. 数值研究低热值燃料环管燃烧室燃烧流场[J]. 航空动力学报, 2013, 28(2): 324-330.
HE Min, CAI Wenxiang, ZHAO Jianxing, et al. Numerical investigation of combustion flow fields in low heating value fuel cannular combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(2): 324-330.
- [8] 梁拯, 周俊虎, 曹欣玉. 气体组分对低热值气体 MILD 燃烧性质的影响[J]. 能源工程, 2021(6): 1-7.
LIANG Zheng, ZHOU Junhu, CAO Xinyu. Effects of gaseous composition on MILD combustion properties of low calorific value gas[J]. Energy Engineering, 2021(6): 1-7.
- [9] 李涛, 郑祥龙, 张哲巖, 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 Xianglong, ZHANG Zhedian, et al. Numerical study on fuel flexibility of a gas turbine combustor[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(3): 70-78.
- [10] BATTISTA R A, PANDALAI R P, HILT M B. Low heating value fuel burning capabilities of general electric industrial gas turbines[C]. ASME 1982 International Gas Turbine Conference and Exhibit. London, England, 1982.
- [11] YAMAMOTO T, FURUHATA T. Low heating value fuel combustion: flamelet combustion and NO formation models[J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22(1): 136-144.
- [12] 李海峰, 吴冀川, 刘建波, 等. 有限元网格剖分与网格质量判定指标[J]. 中国机械工程, 2012, 23(3): 368-377.
LI Haifeng, WU Jichuan, LIU Jianbo, et al. Finite element mesh generation and decision criteria of mesh quality[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(3): 368-377.
- [13] CHEN X, WANG Z, LIU Y, et al. A neural network approach for unstructured mesh quality evaluation[J]. Engineering Computations, 2024(25): 43-44.
- [14] 何念, 陈明敏, 高贤智, 等. 低压模化对燃气轮机燃烧室工作特性影响的数值分析[J]. 航空发动机, 2017, 43(2): 10-16.
HE Nian, CHEN Mingmin, GAO Xianzhi, et al. Numerical analysis on influence of low pressure modeling on operation characteristics of gas turbine combustor[J]. Aeroengine, 2017, 43(2): 10-16.
- [15] 吴鑫楠, 于宗明, 冯永志, 等. 合成气注氮燃烧室的数值模拟与实验研究[J]. 推进技术, 2016, 37(7): 1287-1294.
WU Xinnan, YU Zongming, FENG Yongzhi, et al. Experimental and numerical study of a syngas combustor with N_2 injection[J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(7): 1287-1294.
- [16] 朱彤, 张毅勳, 刘敏飞, 等. 低热值煤气高温空气燃烧数值模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2002(8): 932-937.
ZHU Tong, ZHANG Yimeng, LIU Minfei, et al. Numerical simulation of high temperature air combustion of low calorific value coal gas[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2002(8): 932-937.
- [17] 张健. 低热值煤气燃烧过程的数值模拟与实验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010: 1.
ZHANG Jian. Numerical simulation and experimental study on burning process of low calorific value coal

- gas[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010: 1.
- [18] 杨诏, 李祥晟. 高压环境下高炉煤气化学反应机理敏感性分析及机理简化[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(11): 39-43.
YANG Zhao, LI Xiangsheng. Chemical reaction mechanism sensitivity analysis and simplification of blast furnace gas in elevated pressure environment[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(11): 39-43.
- [19] 郑玮琳, 郑一萍, 李洁, 等. 初始条件对燃气轮机 DLE 燃烧室性能影响研究[J]. 热能动力工程, 2023, 38(11): 40-48.
ZHENG Weilin, ZHENG Yiping, LI Jie, et al. Study on effect of initial condition on performance of gas turbine DLE combustion chamber[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(11): 40-48.
- [20] 郑玮琳, 李晓东, 李洁, 等. 旋流器流量分配对燃气轮机燃烧性能的影响研究[J]. 热能动力工程, 2023, 38(5): 103-110.
ZHENG Weilin, LI Xiaodong, LI Jie, et al. Study on the effect of swirling flow distribution on combustion performance of gas turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(5): 103-110.
- [21] 宫鹏. 中低热值燃料燃气轮机热力性能建模与分析[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021: 1.
GONG Peng. Thermal performance modeling and analysis of medium and analysis of low-medium heating value gas turbine[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021: 1.
- [22] 庞历瑶. 高炉煤气与天然气混合燃料层流燃烧特性研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2020: 1.
PANG Liyao. Study on the laminar combustion characteristics of blast furnace gas and natural gas mixed fuel[D]. Shenyang: Shenyang University of Aeronautics and Astronautics, 2020: 1.
- [23] 张宇, 王奉明, 王彦红, 等. 一体化加力燃烧室燃烧特性模拟与机器学习燃烧性能预测[J/OL]. 北京航空航天大学学报 [2025-08-19]. DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0213.
ZHANG Yu, WANG Fengming, WANG Yanhong, et al. Simulation of combustion characteristics and prediction of combustion performance using machine learning in an integrated after burner[J/OL]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics [2025-08-19]. DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0213.
- [24] 顾颀, 钟文琪, 石岩, 等. 基于 CFD 数值模拟和 AI 算法的燃气轮机燃烧优化[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(3): 545-554.
GU Qi, ZHONG Wenqi, SHI Yan, et al. Combustion optimization of gas turbines based on CFD numerical simulation and AI algorithm[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2020, 50(3): 545-554.
- [25] 李贝贝, 李勇, 李家栋. 分级燃烧低排放燃烧器数值模拟与参数优化[J]. 轧钢, 2023, 40(5): 68-75.
LI Beibei, LI Yong, LI Jiadong. Numerical simulation and parameter optimization of staged combustion low emission burners[J]. Rolling, 2023, 40(5): 68-75.

(责任编辑 杜亚勤)