文章编号:1674-7607(2026)02-0054-10 DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2026.240731

燃料孔布置方式对天然气旋流喷嘴燃烧性能影响的研究

邱成旭[1,2]， 刘佳琦[2,3]， 孙中伟[2]， 钱钰其[1,2]， 梁培培[2]， 王 辉[2,3]
(1. 哈尔滨汽轮机厂有限责任公司，黑龙江哈尔滨 150046；
2. 哈电发电设备国家工程研究中心有限公司，黑龙江哈尔滨 150028；
3. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院，黑龙江哈尔滨 150006)

摘 要：为提高重型燃气轮机的燃烧性能及降低污染物排放，探究了燃料孔布置方式对天然气旋流喷嘴燃烧及排放特性的影响。依据叶片形状，共设计 4 种开孔方案，2 种为布置于叶片中心，2 种布置相对分散。对比 4 种方案在 100%负荷工况下冷态燃料掺混性能及燃烧热态性能。冷态计算结果表明：当燃料孔集中布置于叶片中间位置时，其与空气混合效果较差，燃料主要集中于旋流器叶片根部区域而无法向周向分散；喷嘴出口当量比平均不均匀度可达 15.19%；而分散布置方案中，其燃料掺混性能良好，喷嘴出口当量比平均不均匀度仅为 1.49%。热态计算结果表明：当燃料孔集中布置时，其燃烧会产生局部高温区域，导致局部 NO_x 排放量增加；而分散布置方案中，燃烧温度未超过 1 800 K，其 NO_x 排放量处于较低水平。综合分析得出，燃料孔应尽量分散布置，外侧孔可贴近旋流叶片外缘，而内侧孔应适当远离叶片根部。

关键词：燃气轮机；旋流喷嘴；燃料掺混；燃烧特性；污染物排放
中图分类号：TK472 **文献标志码**：A **学科分类号**：470.30

Study on the Effect of Fuel Hole Arrangement on Combustion Performance of Natural Gas Swirl Nozzle

QIU Chengxu[1,2]， *LIU Jiaqi*[2,3]， *SUN Zhongwei*[2]， *QIAN Yuqi*[1,2]，
LIANG Peipei[2]， *WANG Hui*[2,3]
(1. Harbin Turbine Co., Ltd., Harbin 150046, Heilongjiang Province, China;
2. Hadian Power Generation Equipment National Engineering Research Center Co., Ltd., Harbin 150028, Heilongjiang Province, China; 3. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, Heilongjiang Province, China)

Abstract: To enhance the combustion performance and reduce pollutant emissions of heavy-duty gas turbines, the impact of fuel hole arrangement patterns on the combustion and emission characteristics of natural gas swirl nozzles was investigated. Based on the blade shape, four hole arrangement schemes were designed in total, with two schemes featuring centralized arrangement at the center of the blades and the other two adopting a relatively dispersed arrangement. A comparison was made among the four schemes re-

收稿日期：2024-11-21 **修订日期**：2024-12-16
作者简介：邱成旭(1996—)，男，黑龙江哈尔滨人，工程师，博士，主要从事燃气轮机燃烧方面的研究。
王 辉(通信作者)，男，高级工程师，硕士，E-mail：wangh040321@126.com。

garding corresponding cold state fuel mixing performance and combustion thermal state performance under 100% load condition. Cold state calculation results indicate that when the fuel holes are concentrated in the middle of blades, the mixing effect with air is poor, with the fuel mainly concentrated in the root area of the swirler blades and unable to disperse circumferentially. The average non-uniformity of the equivalence ratio at the nozzle outlet can reach 15.19%. In contrast, for the dispersed arrangement schemes, the fuel mixing performance is good, and the average non-uniformity of the equivalence ratio at the nozzle outlet is only 1.49%. Thermal state calculation results show that when the arrangement of fuel holes is concentrated, localized high-temperature regions are generated during combustion, leading to an increase in local NO_x emission. However, in dispersed arrangement schemes, the combustion temperature is no more than 1 800 K, and the NO_x emissions remain at a low level. A comprehensive analysis concludes that the fuel holes should be arranged as dispersedly as possible, with the outer holes positioned close to the outer edges of the swirl blades and the inner holes appropriately distanced from the blade roots.

Key words: gas turbine; swirl nozzle; fuel mixing; combustion characteristic; pollutant emission

随着全球能源需求的增长和环保要求的提升，燃气轮机因具有高效、低污染物排放的优势，成为能源领域的重要设备[1]。重型燃气轮机中的燃料喷嘴是决定燃烧效率、排放性能和系统整体稳定性的关键部件[2]。关于天然气喷嘴的设计优化和工作性能分析的研究不断深入，改善燃烧效率、减少污染物排放和提高燃烧稳定性等方面是研究重点。对于天然气旋流喷嘴，燃料孔通常布置于喷嘴旋流叶片表面，天然气经燃料管路进入叶片壳体内，由叶片表面燃料孔喷射而出，随后与来流旋流空气混合并在火焰筒内进行燃烧。因此，掺混效果将直接影响后续燃烧进程[3-8]。

燃料与空气的混合程度是决定燃烧效率和排放特性的重要因素。喷嘴设计中的燃料孔形状和排列方式直接影响燃料与空气的混合效果。若燃料孔孔径较小，会导致燃料出口处流速过高，令其射流深度偏高，发生掺混不均匀现象。若燃料孔孔径偏大，则导致燃料在空间内的分散性变差，容易聚集于旋流叶片根部，从而也会产生燃烧不均匀现象。

为描述天然气与空气混合均匀程度，Fric[9]提出了燃料掺混均匀性的概念，并且给出了燃料掺混不均匀度与 NO_x 排放量的关系。赵铁铮[10]发现增加燃料孔径会导致燃料射流深度降低，在燃料孔数量由 2 个增加至 10 个的过程中，燃烧室出口 NO_x 排放量先降低后升高。主燃级一级燃料孔位于中心及外侧时掺混性能最好；主燃二级燃料孔靠近叶片中心位置时，掺混均匀度升高。邵卫卫等[11]采用数值模拟方法研究了燃料孔径对掺混均匀性的影响规律，分析了掺混过程，并且重点从燃料/空气动量比对燃料射流深度的影响分析其对掺混性能的影响特征，获得了针对所研究燃烧器结构的射流深度拟合关系式。发现当射流深度约为 0.6 倍预混环腔半径时，可以获得最佳的燃料/空气掺混性能。

孙宝成[12]研究了某圆柱体射流预混段中燃料与空气之间相互掺混的规律，总结了包含湍流度、当量比、温度等因素的预测圆柱形预混段混合不均匀度的函数关系。冯冲等[13]提出，均匀预混的本质是消除空间中的高温炽热点和瞬时的高温剧烈脉动，要求喷嘴出口处的稀相预混可燃混合物在空间各点的燃料浓度分布尽可能接近平均值，同时随时间的脉动幅度要很小。一般而言，时空非均匀度均应控制在 5%以下。谢刚等[14]利用模拟和实验手段研究了 R0110 燃气轮机燃烧室内的燃料/空气掺混过程和污染物排放性能。

因此，本文针对某型燃气轮机喷嘴进行结构优化，重点在于燃料孔布置方式。通过优化旋流喷嘴的结构和流体力学特性，确保燃料与空气充分混合，提高燃烧效率，从而实现低 NO_x 排放，同时减少其他有害气体的生成。通过控制火焰温度和燃料/空气混合比，减少热力型 NO_x 的产生，以期为提高燃气轮机燃烧性能提供技术支持。

1　数值模拟方法

1.1　物理模型

喷嘴单元结构如图 1 所示。喷嘴主要由喷嘴法兰、喷嘴旋流器组件、扩散燃料路、喷嘴罩壳等主要部件组成。其中，喷嘴旋流器由 10 个叶片组成，与旋流器中心呈偏心布置，叶片旋流角为 34°，每个叶片布置 7 个直径为 2.3 mm 的燃料喷射孔。沿气流

方向，在燃料喷射孔下游，每个叶片开 1 个冷却空气路，用以冷却中心体端面。喷嘴整体通过机械加工与焊接方式组装。

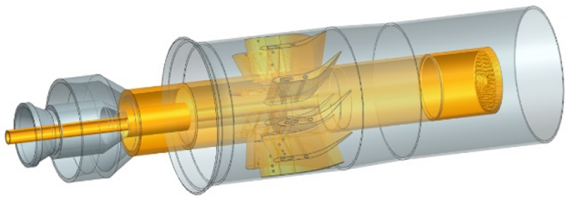


图 1 喷嘴单元结构

Fig. 1 Nozzle unit structure

需要保证燃料与空气掺混的均匀性，燃料在叶片出口位置处的横向射流速度与来流空气速度方向垂直。若大部分燃料聚集于喷嘴外圈边缘，可能导致燃料燃烧不充分。若大部分燃料聚集于内圈边缘，可能导致喷嘴出口位置燃烧温度过高，增加 NO_x 排放，同时有回火风险。若令燃料聚集于中心区域，则可能导致燃料掺混不均匀，仅聚集于中心，而无法向内外边缘运动，进一步造成局部燃烧温度过高。

图 2 为燃料孔布置的 4 种方案。方案 1 中，开孔位于叶片相对居中位置，其靠近叶片根部的燃料出口距叶片端面 33 mm。方案 2 中，燃料孔布置最集中，目的是尽可能减少喷嘴内外边界的燃料堆积。方案 3 中，燃料孔布置最分散，拟达到燃料掺混均匀度更高的效果。方案 4 为在方案 3 基础上将叶片根部燃料孔上移，拟减少燃料在叶片根部堆积。

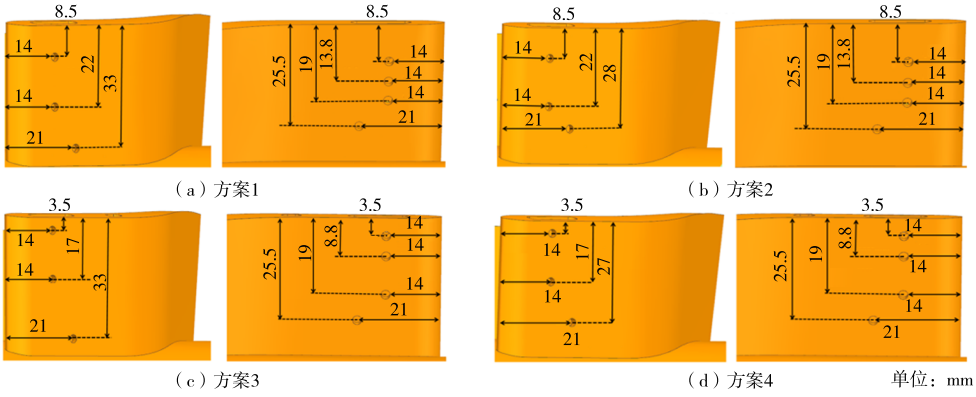


图 2 叶片燃料孔布置方案

Fig. 2 Arrangement scheme of fuel hole in blade

1.2 数学模型

天然气旋流喷嘴燃烧及流动过程包含了极其复杂的流动、传热、传质等物理过程，以及氧化、放热等化学过程，其中质量、动量与能量不断地在空气、燃料与高温燃气之间进行交换及传递。假设流体为理想气体，根据 Boussinesq 涡粘假设进行线性黏性处理，将湍流引发的脉动所带来的雷诺应力，类比于分子黏性应力，将其表示为平均速度梯度的线性函数，满足 Navier-Stokes 方程，并且忽略重力影响[15]。采用有限体积法对连续性方程、动量方程、能量方程和组分输运方程进行离散，然后通过求解线性方程组得出流场解。选择二阶迎风格式对控制方程中的对流项进行离散。控制方程中耦合的速度场与压力场采用 SIMPLE 算法用进行解耦。湍流模型选用 k-ω 剪切应力输运(shear-stress transport，SST)湍流模型。

在燃烧模拟领域，火焰面生成流形(flamelet generated manifold，FGM)模型是一种重要的混合型燃烧模型，其广泛应用于高性能计算的流体动力学和燃烧模拟中。FGM 模型通过将燃烧过程的复杂化学反应和湍流流动分解为更简单的子问题，利用“火焰小体(flamelet)”的概念，提供了一个简化的计算框架来描述湍流燃烧现象。该模型的核心思想是，火焰结构在湍流中保持较稳定的形态，可以通过预计算获得火焰的燃烧特性表面，并且在实际模拟中通过参数化的火焰(flamelet manifold)进行近似。由于部分预混燃料分布的时空不均匀性较高，引入混合分数 f 及进程变量 c 作为参数化表单的变量。

混合分数[16]为

$$f=\frac{0.5\dfrac{Y_{\mathrm{H}}-Y_{\mathrm{H},2}}{M_{\mathrm{H}}}+2\dfrac{Y_{\mathrm{C}}-Y_{\mathrm{C},2}}{M_{\mathrm{C}}}}{0.5\dfrac{Y_{\mathrm{H},1}-Y_{\mathrm{H},2}}{M_{\mathrm{H}}}+2\dfrac{Y_{\mathrm{C},1}-Y_{\mathrm{C},2}}{M_{\mathrm{C}}}} \tag{1}$$

式中：Y 为各组分的质量分数；M 为各原子的相对原子质量；下标 C、H 分别代表碳和氢；1 和 2 分别代表燃料进口和氧化剂进口。

混合分数为标量，其输运方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho f)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \boldsymbol{u}_i f)=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho D \frac{\partial f}{\partial x_i}\right) \tag{2}$$

式中：ρ 为流体密度；i 表示空间方向；$\boldsymbol{u}_i$ 为当地速度矢量；D 为层流扩散系数；x_i 为位置；t 为时间。

反应进程变量 c 由温度决定，其表达式为

$$c=\frac{T-T_{\mathrm{u}}}{T_{\mathrm{b}}-T_{\mathrm{u}}} \tag{3}$$

式中：T_{u} 为初始反应物温度；T_{b} 为反应后产物温度；T 为当地温度。

反应进程变量控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \boldsymbol{u}_i c)=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho D \frac{\partial c}{\partial x_i}\right)+W_{\mathrm{source}} \tag{4}$$

$$W_{\mathrm{source}}=\sum_{j=1}^{J}\frac{W_{\mathrm{source},j}h_j}{c_{p,j}(T_{\mathrm{b}}-T_{\mathrm{u}})} \tag{5}$$

式中：W_{source} 为 c 的化学反应速率；$W_{\mathrm{source},j}$ 为组分 j 的化学反应速率项；h_j 为组分 j 的比焓；$c_{p,j}$ 为组分 j 的比定压热容；J 为组分数量。

上述表达式为层流火焰面模型，为描述湍流燃烧火焰面，需得到时空中混合分数及反应进程分布，进而将一系列层流火焰面进行叠加，得到湍流火焰面。化学反应机理选取 GRI Mech 3.0 软件中包含 53 个化学物种和 325 个基元反应的详细化学反应机理。

1.3　边界条件

图 3 为流体计算域。抽取喷嘴外壳内的流体域作为计算域。在喷嘴出口添加半径为 120 mm、长度为 900 mm 的延长段，保证流动及燃烧过程充分发展。

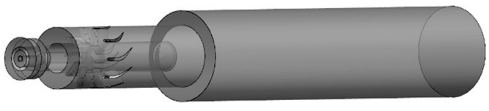


图 3　流体计算域

Fig. 3　Fluid computing domain

如图 4 所示，给定空气入口为均匀入口，其流经旋流叶片后与燃料混合，预混燃料入口位于燃料路最外环，天然气流入旋流叶片内部后从燃料孔喷出，与来流空气进行掺混。为便于计算，将叶片冷却空气路删除，同时为保证流通，在预混燃料入口内环添加冷却空气入口。中心路为扩散燃料路，在低工况运行过程中，扩散路燃料供应主要起到助燃及稳焰的作用。在 100%负荷工况下，扩散路燃料不进行燃料供应，而是供应吹扫空气，防止火焰逆流。

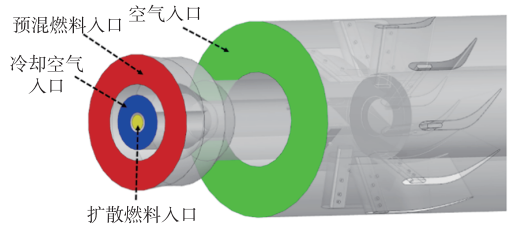


图 4　入口边界布置

Fig. 4　Arrangement of entrance boundary

根据 100%负荷工况设计参数，对单喷嘴供应空气量、燃料量进行核算。具体边界条件设置见表 1。

表 1　模拟边界条件

Tab. 1　Boundary conditions of simulation

参数	数值
运行压力/MPa	1.6
空气流量比	0.18
预混燃料流量比	0.2
冷却气质量流量/(kg·s^{-1})	0.01
扩散路空气质量流量/(kg·s^{-1})	0.000 2
空气温度/K	680
燃料温度/K	300

1.4　网格无关性验证

如图 5 所示，流体域整体采用非结构网格进行划分。对比单元尺寸分别为 10、5、2 mm，开启捕捉曲率功能，曲率最小尺寸分别为 0.10、0.05、0.02 mm，曲率标准角度为 18°，开启曲率近似。对比 3 种网格尺寸下，轴向 $X/d=0.4$（X 为轴向位置，d 为空间径向位置）处喷嘴热态速度及温度的径向分布。发现单元尺寸为 10 mm 时，对应单元数为 6 452 108，其燃烧速度偏高而温度偏低。单元尺寸分别为 5、2 mm 时，两者计算结果接近。综合计算资源及成本，最终选取了 5 mm 单元尺寸，其对应单元数为 9 143 510。

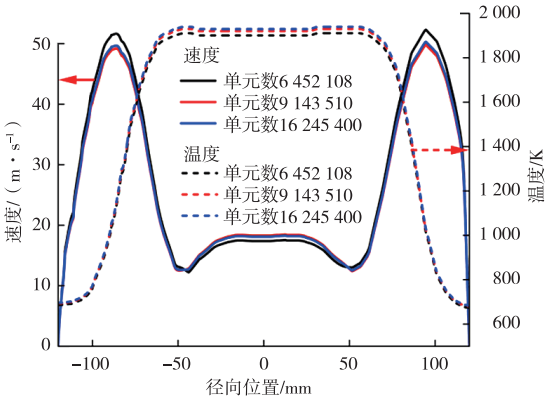


图 5　网格无关性验证

Fig. 5　Grid independence verification

2 结果与分析

2.1 喷嘴冷态性能

2.1.1 燃料轴向分布

图 6 为 4 种方案下的甲烷空间分布情况。由于方案 1、2 中，燃料出口布置于叶片中心位置且相对集中，导致燃料主要集中于掺混流道中心，未达到良好的分散效果。方案 3 中，燃料分散效果有所改善，但是其仍有部分集中于叶片根部位置。方案 4 中，将叶片根部燃料孔向上偏移 5 mm，其轴向掺混效果最佳。

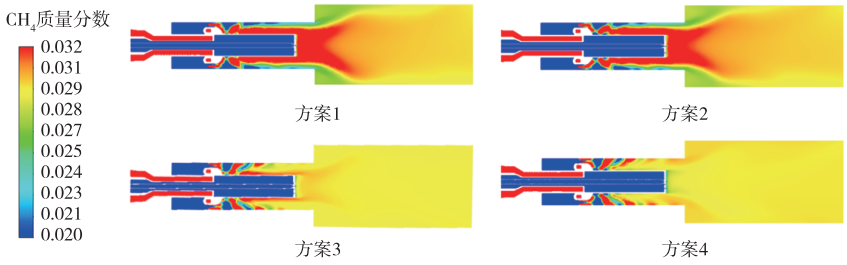


图 6 天然气轴向分布

Fig. 6 Axial distribution of natural gas

2.1.2 燃料径向分布

为明确各方案中燃料掺混的过程差异及燃料径向分布情况，提取燃料与空气掺混段过程中的当量比变化，如图 7 所示。方案 1 中，燃料孔距离旋流叶片外缘相对较远，燃料随旋流空气运动过程中仅有一小部分旋转至外缘，在 60 mm 截面位置处，燃料呈现根部面积大、顶部面积小的“正三角”形状，经过 80 mm 位置截面后，空气旋流运动保持稳定，燃料分布变化较小，进而出现了喷嘴旋流器外缘位置当量比低于根部区域的情况。方案 2 将根部燃料出口向外缘方向偏移 5 mm 后，在 80 mm 前可明显观察到叶片根部位置出现了当量比较低的区域，但是由于后续空气旋流卷吸作用，导致燃料依旧聚集于喷嘴中心区域。对于方案 3，最外侧两排燃料出口向旋流叶片外缘移动 5 mm 后，发现其在径向截面分布的均匀性大幅度提高，在 300 mm 位置处，其在旋流器根部仍有少量聚集。方案 4 针对这一问题进行了改进，将叶片根部的燃料孔移向远离根部 5 mm 后，燃料在根部聚集现象消失。

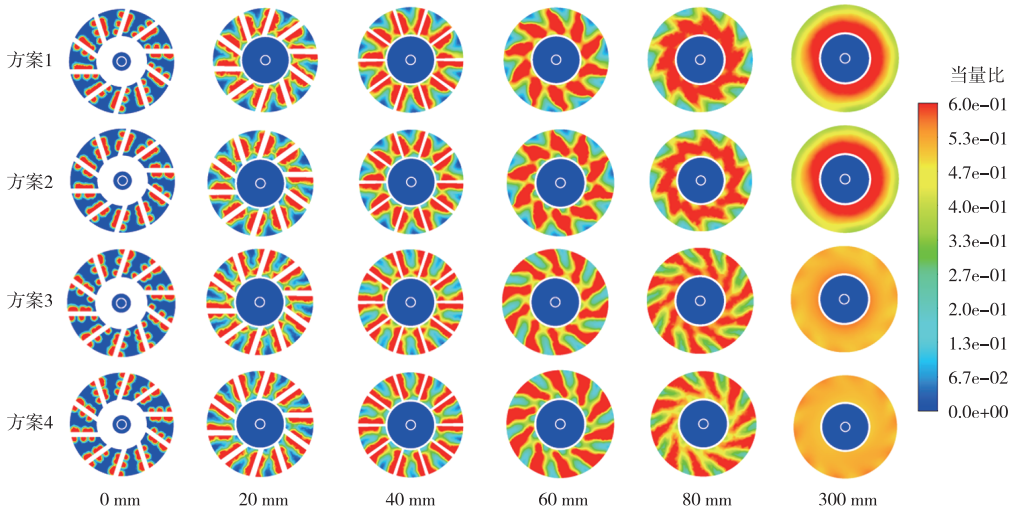


图 7 天然气径向分布

Fig. 7 Radial distribution of natural gas

对比 4 种方案喷嘴出口位置处不同径向位置的燃料当量比周向分布，如图 8 所示（R 为距叶片根部距离）。不同半径位置当量比之间的差异可以反映燃料在空间位置分布的均匀性，方案 1、2 与方案 3、4 呈现出较大差异。方案 2 在 $R=35$ mm（靠近叶片根部）处，其当量比低于方案 1；同理，方案 4 在 $R=35$ mm 处，其当量比低于方案 3。这说明将叶片根部附近燃料孔向叶顶方向偏移，可以降低该区域当量比。方案 1、2 中，当量比呈现分层分布，由内而外当量比逐渐降低。方案3、4中，各径向位置处当

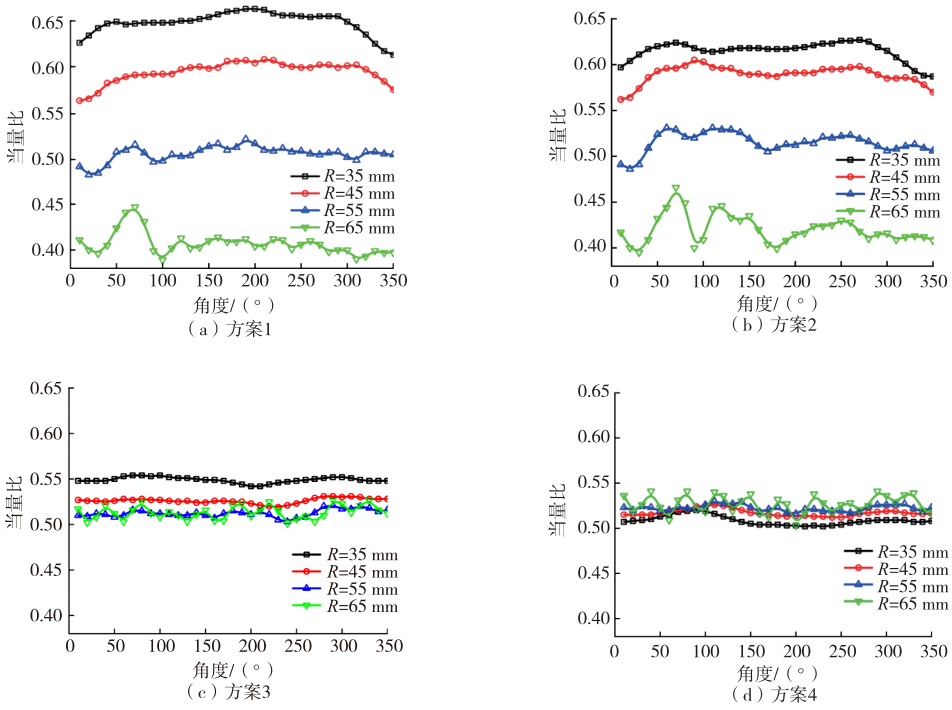


图 8　喷嘴出口当量比径向分布

Fig. 8　Radial distribution of equivalence ratio at nozzle outlet

量比差异很小，尤其是方案 4 中，其各直径间当量比分布曲线几乎重合。

2.1.3　喷嘴出口不均匀度

利用不均匀度定量评估喷嘴出口位置燃料混合的均匀程度。不均匀度为

$$\xi=\frac{\sqrt{(\phi-\phi_{ave})^2}}{\phi_{ave}}\times 100\% \tag{6}$$

式中：ξ 为不均匀度；ϕ 为当地区域当量比；ϕ_{ave} 为截面平均当量比。

图 9 为 4 种方案下喷嘴出口当量比分布情况。方案 1 的不均匀度最高，局部最大不均匀度可达 30%，高不均匀度区域主要集中于叶片根部及边缘位置。方案 2 通过更改根部燃料出口位置，使当量比不均匀度有所下降，但是整体平均不均匀度仍达到了 13.15%。方案 1、2 的不均匀度过高而不符合设计要求，而方案 3、4 整体不均匀度较低。方案 3 局部最高不均匀度出现在叶片根部位置，达到 5.7%。方案 4 通过调整叶片根部燃料孔位置，使喷嘴出口截面任意位置不均匀度均小于 5%，其截面平均不均匀度仅为 1.49%。

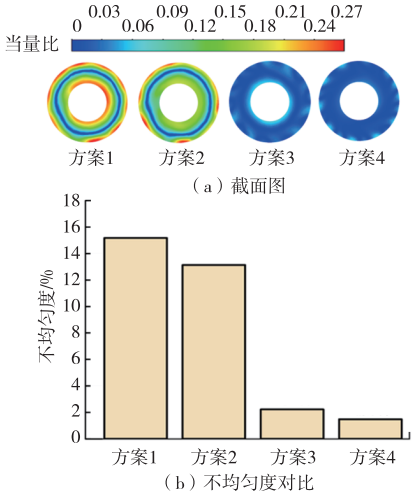


图 9　喷嘴出口当量比分布

Fig. 9　Distribution of equivalence ratio at nozzle outlet

2.2　喷嘴热态性能

2.2.1　喷嘴燃烧温度分布

图 10 为 4 种方案下喷嘴燃烧温度场及流场分布。温度分布与前文燃料空间分布相对应，方案 1 中燃料与空气混合不均匀，导致燃料主要聚集于旋流叶片根部位置，达到喷嘴出口后聚集于出口中心位置，而该局部当量比较高的区域对应燃烧温度偏高，其局部高温区可达 2 000 K，局部高温可能导致

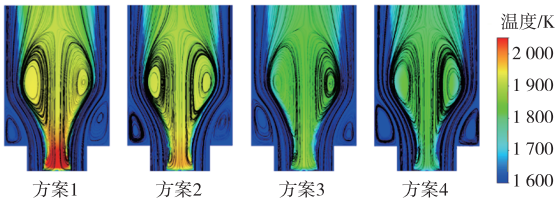
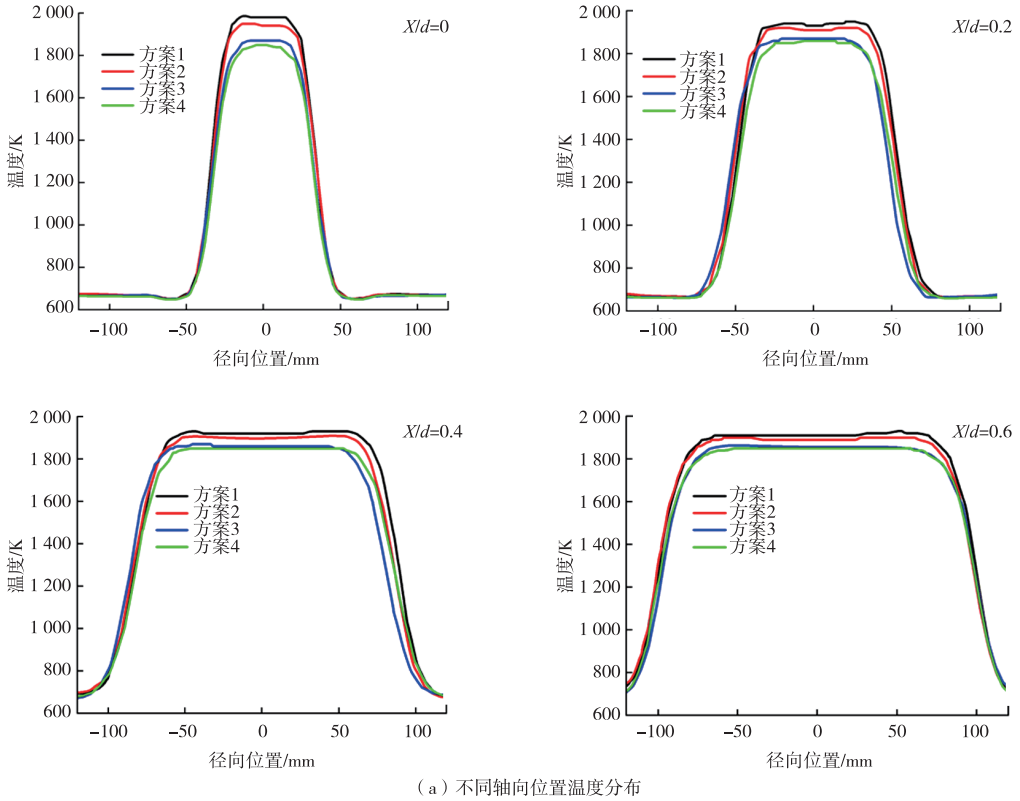


图 10　喷嘴燃烧温度场及流场分布

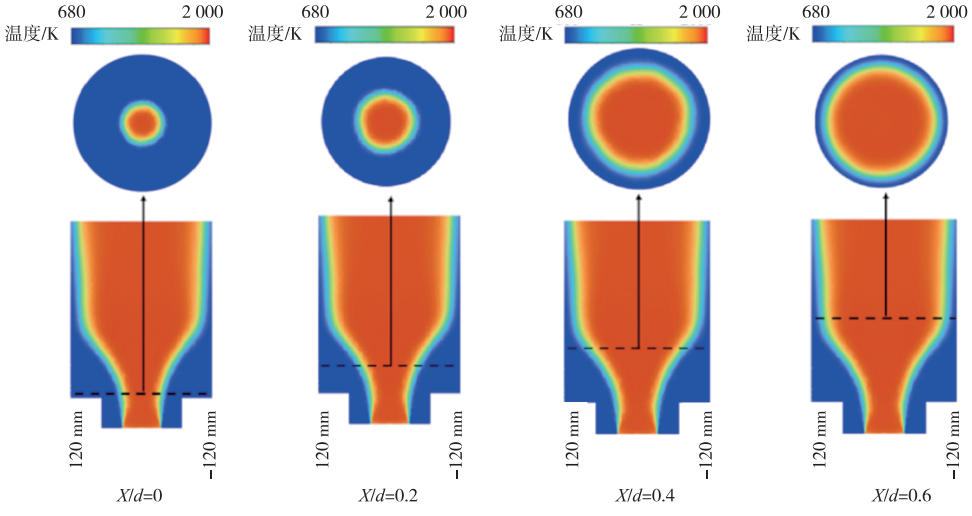
Fig. 10　Distribution of combustion temperature and flow fields in nozzle

NO_x 生成速率偏高。不同开孔方案对燃烧回流区形状及大小的影响不大。

图 11 为 4 种方案下喷嘴沿轴向燃烧温度分布。沿气流流动方向，燃烧高温区面积增加。在喷嘴出口位置，燃烧区宽度约为 100 mm，沿气流流动方向，在 $X/d=0.6$ 位置处已经增加至 200 mm。4 种方案的燃烧均未发生异常，角回流区未发生着火，同时喷嘴出口位置未发生回火。但是，各方案的整体燃烧温度有一定差异。开孔位置直接影响了燃料喷射至燃烧室内的空间分布，进而影响了燃烧温度分布。方案 1、2 中，燃料主要集中于喷嘴轴心区域，其燃烧中心区燃料浓度偏高，导致燃烧温度偏高；方案 3、4 中，燃料空间掺混相对均匀，即使其角回流区燃料浓度偏高，但是未影响整体燃烧效率。同时，与喷嘴相匹配的燃烧室尺寸足够保证燃烧充分。



（a）不同轴向位置温度分布



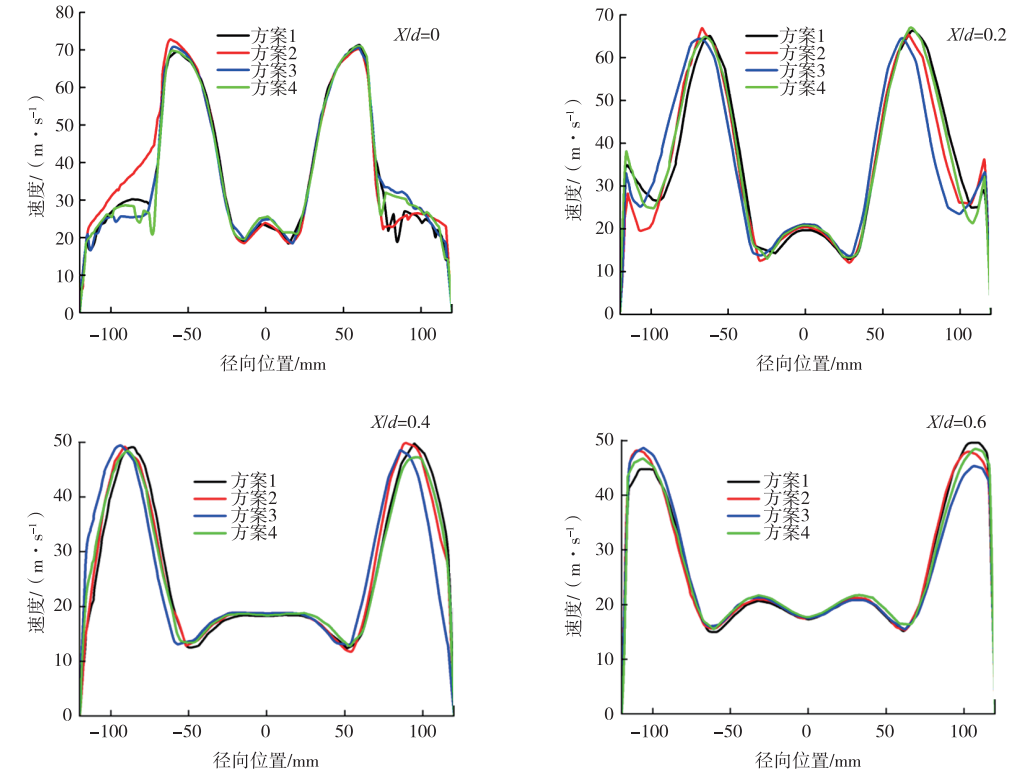
（b）方案1温度分布

图 11 不同开孔方案下燃烧温度分布对比

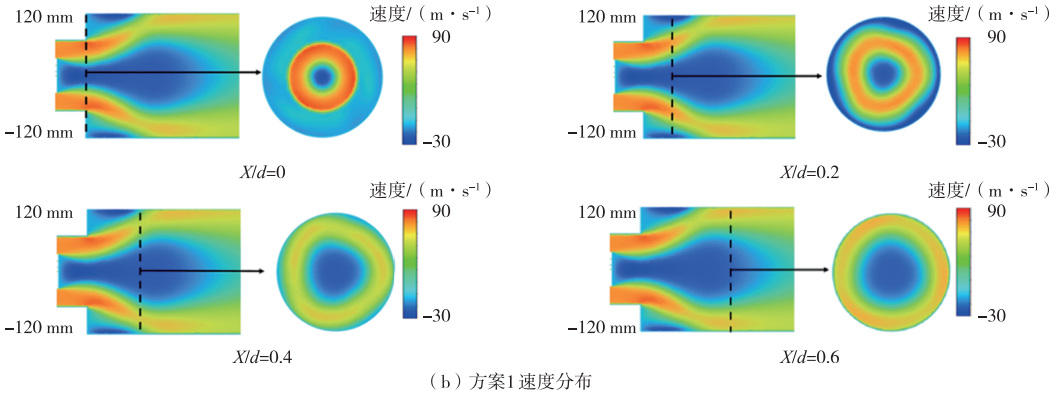
Fig. 11 Comparison of combustion temperature distribution under different hole arrangement schemes

2.2.2　喷嘴燃烧速度特性

图 12 为不同开孔方案下沿喷嘴轴线方向燃烧速度分布情况。对比不同方案发现其沿程速度分布差别不大，虽然开孔方式影响了整体燃烧温度分布，但该温度差异还未对速度分布造成明显影响。沿流动方向，速度峰值位置逐渐向边缘接近，速度峰值位置代表了旋流剪切层区域的位置，燃烧过程中旋流剪切运动逐渐扩展，导致旋流运动范围增加，旋流范围增加则导致了速度峰值下降。因此，由 $X/d=0$ 至 $X/d=0.4$ 的过程中，剪切层速度在逐渐降低。在 $X/d=0.6$ 位置处，剪切层已充分发展，其速度峰值基本保持不变。在 $X/d=0$、0.2 位置处，其径向两侧存在明显速度波动，该位置对应燃烧角回流区涡旋运动。而在 $X/d=0.4$、0.6 位置处，角回流区涡旋已经不存在。在径向 0 mm 位置处的速度波动对应燃烧中心回流区涡旋运动。综上所述，4 种开孔方案对燃烧速度空间分布的影响不明显。



（a）不同轴向位置速度分布



（b）方案1速度分布

图 12　不同开孔方案下截面速度分布

Fig. 12　Cross-sectional velocity distribution under different hole arrangement schemes

2.2.3　喷嘴燃烧污染物排放特性

图 13 为燃烧污染物 NO_x 空间分布情况。污染物排放空间分布与燃烧温度具有相似对应关系，局部燃烧温度过高会加速热力型 NO_x 产生。因此，对于方案 1，其燃烧中心的 NO_x 含量最高，随燃料浓度的下降，燃烧温度下降，其 NO_x 生成速率沿程降低。

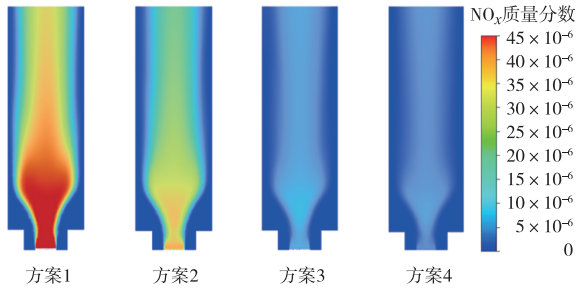


图 13 燃烧污染物 NO_x 空间分布情况

Fig. 13 Spatial distribution of combustion pollutant NO_x

对于方案 4，由于燃料混合相对均匀，其局部 NO_x 质量分数均低于 10×10^{-6}，污染物排放量最低。

图 14 为各开孔方案下燃烧出口 NO_x 含量。发现各方案 NO_x 质量分数均低于 25×10^{-6}，但该结果不能作为整机排放的鉴定标准。计算中，单喷嘴空气量为均匀给定，而在整机中空气经整流罩后向喷嘴及消声器供应空气，进入单喷嘴的空气量可能不是完全均匀的。对比各方案之间的排放量仍然具有择优意义，方案 4 中 NO_x 质量分数最低，仅为 4.99×10^{-6}。综合以上分析，得出方案 4 在各方面的性能均为最优。

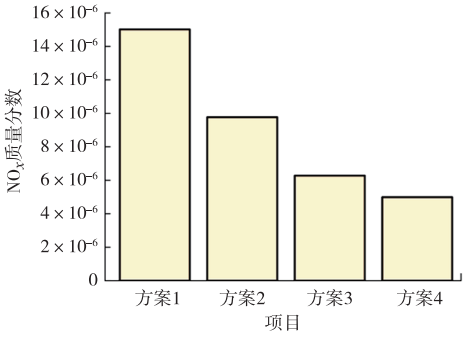


图 14 各方案下燃烧出口 NO_x 含量

Fig. 14 NO_x content at combustion outlet in each scheme

3 结论

探究了燃料孔布置方式对天然气旋流喷嘴燃烧及排放特性的影响。通过冷态及热态性能分析，探究了喷嘴燃料掺混均匀性、燃烧温度特性、燃烧速度特性及污染物排放特性。具体结论如下：

(1) 当燃料孔集中布置于叶片中间位置时，其与空气混合效果较差，燃料主要集中于旋流器叶片根部区域而无法向周向分散；喷嘴出口当量比平均不均匀度可达 15.19%。而分散布置方案中，其燃料掺混性能良好，出口当量比平均不均匀度仅为 1.49%。

(2) 当燃料孔集中布置时，其燃烧会产生局部高温区域，导致局部 NO_x 排放量增加。而分散布置方案中，燃烧温度未超过 1 800 K，其 NO_x 排放量处于较低水平。不同燃料孔布置方案的燃烧速度差异较小。

(3) 综合旋流喷嘴冷态及热态性能分析，燃料孔应尽量分散布置，外侧孔可贴近旋流叶片外缘，而内侧孔应适当远离叶片根部。

参考文献：

[1] 张斌，王光磊，徐震，等. 集成恒压压缩空气储能的燃气轮机 CCHP 系统特性研究[J]. 动力工程学报，2024，44(3)：369-375.
ZHANG Bin，WANG Guanglei，XU Zhen，et al. Study on system characteristics of gas turbine CCHP integrated with constant-pressure compressed air energy storage[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2024，44(3)：369-375.

[2] 钱文翰，刘培，薛亚丽，等. 储能与燃气轮机联合调频的经济性分析[J]. 动力工程学报，2023，43(5)：543-549.
QIAN Wenhan，LIU Pei，XUE Yali，et al. Economic analysis of the coordinated frequency regulation for energy storage and gas turbine system[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2023，43(5)：543-549.

[3] 王子叶. 天然气轴向分级预混燃烧特性研究[D]. 北京：中国科学院大学(中国科学院工程热物理研究所)，2019.

[4] 梁恩广，张辰杰，余志健，等. 燃气轮机轴向贫燃分级燃烧技术进展[J]. 动力工程学报，2024，44(9)：1328-1339.
LIANG Enguang，ZHANG Chenjie，YU Zhijian，et al. Progress in axial staged lean premixed combustion technology of gas turbines[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2024，44(9)：1328-1339.

[5] 陈毅，高原，王志强，等. 同轴分级低排放燃烧室头部适应性设计研究[J]. 燃气轮机技术，2024，37(2)：28-36.
CHEN Yi，GAO Yuan，WANG Zhiqiang，et al. Research on the adaptive design of the head of coaxial graded low emission combustor[J]. Gas Turbine Technology，2024，37(2)：28-36.

[6] 张宇明，臧鹏，贾玉良，等. 轴向分级燃烧室低压模化燃烧特性试验研究[J]. 工程热物理学报，2024，45(6)：1589-1597.
ZHANG Yuming，ZANG Peng，JIA Yuliang，et al. Experimental study on low pressure modeling combustion characteristics of axial staged combustor[J]. Journal of Engineering Thermophysics，2024，45(6)：

1589-1597.

[7] PARK Y, CHOI M, CHOI G. Thermodynamic performance study of large-scale industrial gas turbine with methane/ammonia/hydrogen blended fuels[J]. Energy, 2023, 282: 128731.

[8] ALLAUDDIN U, UDDIN N, ANSARI H R, et al. CFD-based parametric study of swirl effects on combustion in industrial natural gas combustor[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 30(1): 75-102.

[9] FRIC T F. Effects of fuel-air unmixedness on NO_x emissions[J]. Journal of Propulsion and Power, 1993, 9(5): 708-713.

[10] 赵铁铮. 同轴分级天然气低排放燃烧室流动与燃烧特性研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2023.

[11] 邵卫卫，赵岩，刘艳，等. 燃气轮机燃烧室预混燃烧器天然气燃料/空气掺混均匀性研究[J]. 中国电机工程学报，2017，37(3)：795-802.
SHAO Weiwei, ZHAO Yan, LIU Yan, et al. Investigation of fuel/air mixing uniformity in a natural gas premixed burner for gas turbine combustor applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(3): 795-802.

[12] 孙宝成. 燃气轮机燃料/空气掺混规律的数值研究[D]. 北京：清华大学，2007.

[13] 冯冲，祁海鹰，谢刚，等. 干式低 NO_x 燃气轮机燃烧室的燃料/空气预混均匀性问题分析[J]. 中国电机工程学报，2011，31(17)：9-19.
FENG Chong, QI Haiying, XIE Gang, et al. Analysis on the issue of fuel/air premixing uniformity of the dry low NO_x gas turbine combustor[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(17): 9-19.

[14] 谢刚，祁海鹰，李宇红，等. R0110 重型燃气轮机燃烧室污染排放性能研究[J]. 中国电机工程学报，2010，30(20)：51-57.
XIE Gang, QI Haiying, LI Yuhong, et al. Emission peformance of the dry low NO_x combustors for R0110 heavy-duty gas turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(20): 51-57.

[15] NICOUD F, DUCROS F. Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 1999, 62(3): 183-200.

[16] BILGER R W. Future progress in turbulent combustion research[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2000, 26(4/5/6): 367-380.