

文章编号:1001-2060(2023)09-0012-09

旋流预混燃烧室燃烧特性及排放特性的数值模拟研究

杨亚晶¹, 刘志鹏¹, 魏衍举²

(1. 西安交通大学 航天航空学院, 陕西 西安 710049; 2. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要:为了综合考察燃气轮机燃烧室在高稳定性、低排放以及燃料适应性等方面的新要求,基于旋流预混燃烧技术,通过三维数值模拟方法开展了甲烷/空气、丙烷/空气预混燃烧特性及排放特性研究。结果表明:在一定的预混气进气质量流量条件下,当量比增大易引发回火,燃烧温度更高,同时 NO_x 排放指数增大,增加预混气质量流量,可在一定程度上提高回/熄火极限;当量比固定,增加预混气进气质量流量可避免潜在的回火现象,且 NO_x 排放指数线性降低;旋流器的旋流数增大能形成强旋流,稳定火焰,降低 NO_x 排放指数,但过大的旋流强度会引发回火现象;相比于甲烷/空气预混燃烧,丙烷/空气预混燃烧温度偏高, NO_x 排放指数较大,但回火边界更宽,对应更广阔的稳定燃烧区间。

关键词:旋流预混燃烧; 甲烷; 丙烷; 当量比; 回火; 熄火; 排放指数

中图分类号:TK16 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.mdlgc.2023.09.002

[引用本文格式] 杨亚晶, 刘志鹏, 魏衍举. 旋流预混燃烧室燃烧特性及排放特性的数值模拟研究[J]. 热能动力工程, 2023, 38(9): 12-20. YANG Ya-jing, LIU Zhi-peng, WEI Yan-ju. Numerical simulation study on combustion and emission characteristics in a swirl premixed combustor[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(9): 12-20.

Numerical Simulation Study on Combustion and Emission Characteristics in a Swirl Premixed Combustor

YANG Ya-jing¹, LIU Zhi-peng¹, WEI Yan-ju²

(1. School of Aerospace Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049;
2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049)

Abstract: In order to comprehensively investigate the new requirements of gas turbine combustors in terms of high stability, low emissions and fuel adaptability, the methane/air and propane/air premixed combustion and emissions characteristics were studied through three-dimensional numerical simulation based on swirl premixed combustion technology. The results show that the increase of equivalence ratio will lead to flashback under certain air-intake mass flow rate of premixed air, the NO_x emission index increases due to higher combustion temperature, and the flashback/flameout limit tends to extend under higher premixed air mass flow rate; under constant equivalence ratio, potential flashback phenomenon will be avoided by increasing air-intake mass flow rate of premixed air, and the emission index decreases linearly; the increment of swirl number can generate strong swirl to stabilize flame and reduce NO_x emission index, but excessive swirl intensity will lead to flashback; compared with methane/air premixed

combustion, propane/air premixed combustion temperature is higher and NO_x emission index is bigger, but the boundary between flashback and flameout is wider, corresponding to wider stable combustion region.

Key words: swirl premixed combustion, methane, propane, equivalence ratio, flashback, flameout, emission index

引言

目前,燃气轮机已经被广泛应用于发电、独立能源和船舶发电,随着燃烧室设计温度的提高,同时受到污染物排放的限制^[1],G/H/J级重型燃气轮机燃烧室的技术特征主要体现在高稳定性、低排放以及燃料适应性等方面。

旋流预混燃烧技术具有燃烧效率高、燃烧室结构紧凑、燃烧室出口温度场品质高以及低 NO_x 、低 CO 排放等特点,被认为是燃气轮机众多低排放方案中最具潜力和前景的燃烧方式^[2-3]。但由于预混燃烧,特别是贫预混燃烧当量比偏离化学恰当比太远,燃烧过程极不稳定,通常面临回火(Flashback, FB)^[4-8]、吹熄(Lean Blowout, LBO)^[9-13]及燃烧不稳定^[14-17]等问题,无论哪种不稳定燃烧现象都会对燃烧室结构、燃烧性能、排放特性产生不良影响。因此,需要优化燃烧室结构参数及工作参数来保证预混燃烧的高效稳定。

本文针对甲烷/空气、丙烷/空气两种预混气,采用三维数值模拟开展旋流器结构及燃烧工况对旋流预混燃烧火焰特性及排放特性影响规律的研究。研究结果可指导燃烧室结构优化、燃料配比及运行工况的选择,为实际燃气轮机的稳定运行提供一定的理论基础。

1 计算方法

1.1 物理模型

燃烧室数值模型的结构以文献[9]中的旋流预混燃烧器为例,直径 60 mm,长 160 mm,在燃烧器头部设有旋流器,采用三入口形式。旋流器实物如图 1 所示。

旋流数 S_g 表征旋流的强度,其理论计算式为切向旋转动量矩 M (矢量)与轴向动量 I (矢量)和特征尺寸 r_0 乘积之比,即:

$$S_g = \frac{M}{I r_0} \quad (1)$$



图 1 旋流器实物模型

Fig. 1 Physical image of swirl

实验中的旋流数为:

$$S_g = \frac{\pi \times (d_0^2 - d_p^2)(d_i - b)}{4 \times n \times h \times d_0} \quad (2)$$

式中: n —旋流器进气口数,取 $n = 3$; d_0 —旋流器进口前外径; d_i —旋流器进口后外径(本旋流器前后外半径相同); b —旋流器入口宽度; d_p —内径; h —进口的长度。

旋流器尺寸具体数值如表 1 所示。

表 1 旋流器的尺寸

Tab. 1 Size of swirl

| 参数 | 数值 |
|-----------------------|------|
| S_g | 1.16 |
| $d_i = d_0/\text{mm}$ | 28 |
| d_p/mm | 24 |
| b/mm | 3 |
| h/mm | 14 |

旋流数关系到预混燃料进入燃烧室中的轴向和径向速度,对燃烧及回流区形态有决定性的影响。基于此,本文采用三维数值模拟计算方法对旋流预混燃烧进行研究,其三维模型如图 2 所示。

1.2 计算模型

在三维模型的仿真模拟计算中,模型入口为旋流器的入口,计算中选取质量流量进口条件;模型出口为燃烧室的出口,采用压力出口条件;压力和速度的耦合方式选择 couple 算法;组分方程的离散格式和能量方程的离散格式选取二阶迎风格式。

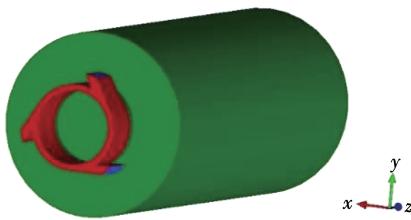


图 2 预混燃烧三维模型

Fig. 2 Three dimensional model of premixed combustion chamber

计算中采用考虑旋流修正的 Realizable $k - \varepsilon$ 湍流模型, 燃烧模型选取火焰面生成流型模型 FGM 子模型。FGM 模型考虑详细化学反应机理(GRI-Mech 3.0), 可以预测熄火与再点火效应, 计算效率高。在 FGM 模型中, 选取表征燃料与氧化剂混合状态的混合分数 Z 作为控制参数, 混合分数量化了燃料和氧化剂在火焰燃烧中的混合程度。点燃方式选择在旋流器出口与燃烧室入口处建立局部高温区。

1.3 模拟计算中的主要参数

排放指数(EI)是量化燃气轮机污染物生成量的参数, 定义为每千克质量燃料生成污染物的质量, 单位为 g/kg, 计算式为:

$$EI = \frac{\rho_{NO_x} \cdot q_{v,gas}}{q_{m,f}} \quad (3)$$

式中: ρ_{NO_x} — 燃烧室出口处 NO_x 污染物的平均密度, kg/m^3 ; $q_{v,gas}$ — 燃烧室出口处燃气的体积流量, m^3/s ; $q_{m,f}$ — 旋流器入口处预混气内燃料的质量流量, kg/s 。

1.4 网格划分与边界条件

基于图 2 的燃烧室模型进行混合网格划分, 旋流器几何结构不规则, 使用自动生成的四面体网格对旋流器进行非结构化网格划分。旋流器出口段和燃烧室的几何结构较为规则, 对其进行结构化的六面体网格划分, 对燃烧室前端进行局部加密, 分别为 25 万、37 万、66 万和 112 万。

图 3 显示 $z=0$ 截面轴向速度变化规律。从图 3 中可以看出, 25 万网格的变化规律与其他网格数的变化规律差别较大, 而 37 万以上网格的轴向速度变化趋势几乎一致。因此, 为提高计算效率选用 37 万网格进行旋流预混燃烧特性的模拟计算。

1.5 回/熄火判断

分析燃烧室工况参数对火焰形态、温度场分布、回/熄火边界及排放指数的影响规律。其中, 采用快速稳态模拟方法回/熄火边界获得的甲烷/空气预混

燃烧的吹熄模拟数据与实验结果整体趋势基本一致, 如图 4 所示。由此证明了稳态模拟对回/熄火边界的获取具备可靠性。

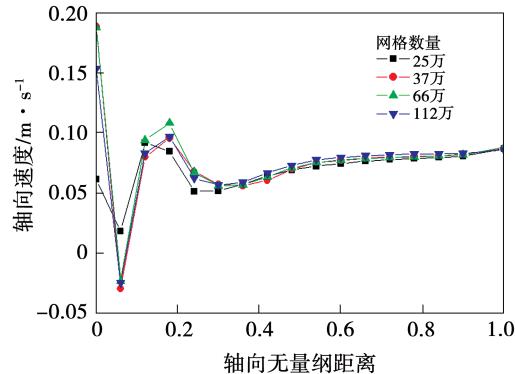
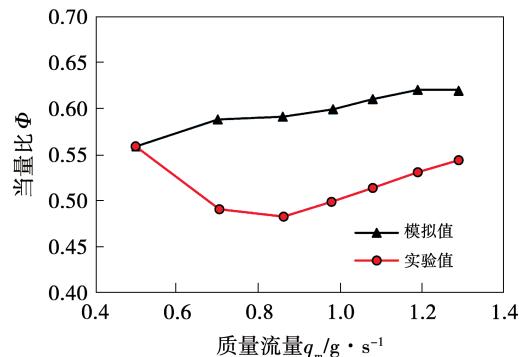
图 3 轴向速度变化规律($z=0$)Fig. 3 The variation law of axial velocity ($z=0$)

图 4 甲烷/空气预混燃烧的吹熄极限实验值与数值模拟结果对比

Fig. 4 Comparison of experimental and simulation results on the blowing out limit of methane/air premixed combustion

如果旋流器出口处预混气流速小于燃烧室内的火焰传播速度, 将会导致火焰面向燃烧室上游传播, 燃烧脉动火焰产生回流, 火焰扩展进入角回流区, 造成角回流区回火, 或者燃烧火焰进一步向上游传播至预混管内, 造成预混管回火。燃烧室模型旋流器下游环形出口是一个重要截面, 如果火焰面扫过该截面, 说明发生了回火; 如果燃烧室没有高温燃烧区, 则可判定为发生熄火。

以甲烷/空气预混燃烧为例, 固定旋流数 $S_g = 1.16$, 改变当量比 Φ 为 1.57, 0.56 和 0.53, 模拟计算分别观察到回火、稳定燃烧、吹熄现象。当 $\Phi = 1.57$ 时, 燃烧室发生回火, 火焰经过旋流器传播到预混器内, 流场内的温度统一, 如图 5(a) 所示。在

发生吹熄之前,图5(b)的实验结果显示,燃烧室存在稳定的高温区,温度燃烧模拟结果火焰呈V型,为正常稳定燃烧火焰。当进一步降低当量比至 $\Phi=0.53$ 时,燃烧室内无法继续维持燃烧,最终导致火焰吹熄,燃烧室维持冷态流场,流场温度降低为进口

预混气温度,如图5(c)所示。相同旋流数条件下,吹熄/回火当量比边界的模拟结果与文献[9]的实验结果吻合一致,证明本文模型计算方法的可行性和准确性。

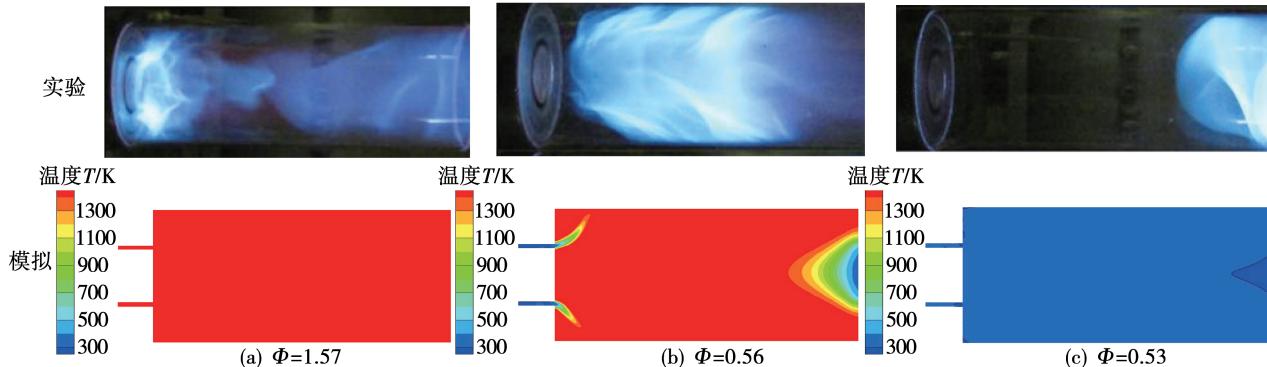


图5 甲烷/空气预混燃烧回/熄火特征的实验与数值模拟结果

Fig. 5 Experimental and numerical simulation results of flashback and flameout characteristics in methane/air premixed combustion

2 计算结果与讨论

基于三维预混燃烧模型,针对甲烷/空气、丙烷/空气预混燃烧开展回火、熄火及排放特性的研究。计算工况的参数范围如表2所示。

表2 数值模拟的计算条件

Tab. 2 Calculation condition of numerical simulation

| 参数 | 数值 | |
|---------------------------|---------------|---------------|
| | 甲烷/空气 | 丙烷/空气 |
| 当量比 Φ | 0.4 ~ 0.9 | 0.4 ~ 1.0 |
| 质量流量 $q_m/g \cdot s^{-1}$ | 0.2 ~ 1.4 | 0.3 ~ 1.0 |
| 旋流数 S_g | 0.855 ~ 1.910 | 0.855 ~ 1.910 |

2.1 当量比对甲烷/空气预混燃烧特性的影响

甲烷/空气的预混燃烧温度场如图6所示。由图6可知,固定预混气质量流量 $q_m = 0.23 g/s$, 旋流数 $S_g = 1.16$, 逐渐增加预混气当量比, 燃烧室平均温度逐渐升高, 从 $\Phi = 0.6$ 时的 1650 K 升高到 $\Phi = 0.8$ 时的 2030 K, 燃烧室角回流区逐渐扩张, 中心回流区被挤压变窄, 火焰长度逐渐变短。当 $\Phi = 1.0$ 时, 主回流区被角回流区完全覆盖, 火焰面接近旋流器出口并进入预混腔, 回火现象发生; 当量比 $\Phi = 0.4$ 时, 发生吹熄现象, 火焰被吹离旋流器出口位置稳定在后半段。因此, 燃烧室出口处的温度明

显高于燃烧室前半段的温度。由此可知, 在固定旋流数和预混气质量流量条件下, 当量比增大会促进回火, 当量比减小会引发吹熄。

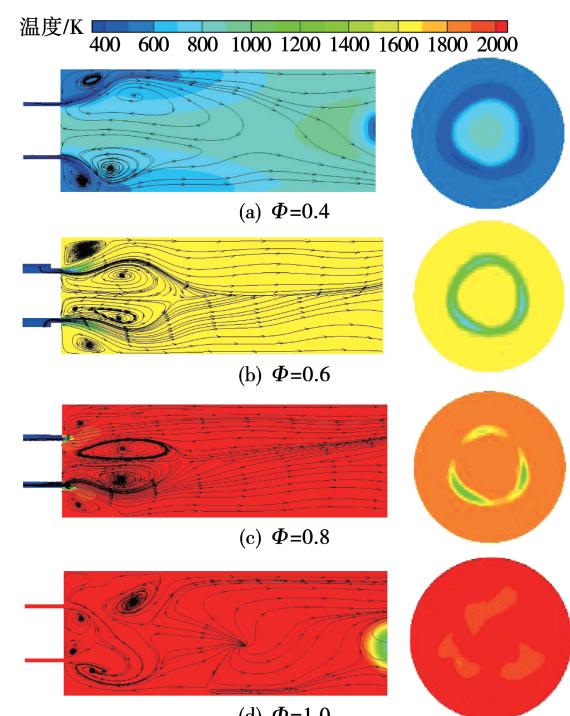


图6 甲烷/空气预混燃烧的温度场

Fig. 6 Temperature field of methane/air premixed combustion

图 7 和图 8 显示了甲烷/空气预混燃烧回/熄火边界模拟结果。由图 7 和图 8 可知, 随着预混气流量增加, 回火/熄火对应的临界当量比都呈增加趋势。这是因为预混气流量增大, 进入旋流器的速度增大, 火焰拉长, 需要更大的当量比才能抵达回火点。相反, 要捕捉吹熄状态, 需增大预混气流量, 同时增大当量比。

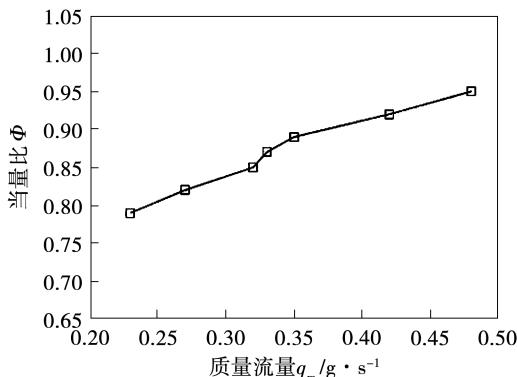


图 7 甲烷/空气预混燃烧的回火边界

Fig. 7 Flashback boundary of methane/air premixed combustion

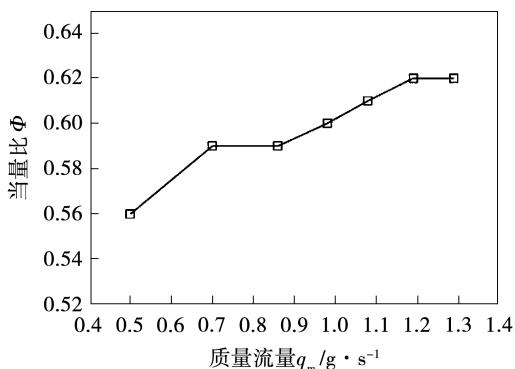


图 8 甲烷/空气预混燃烧的熄火边界

Fig. 8 Flameout boundary of methane/air premixed combustion

在同样的工况下($q_m = 0.23 \text{ g/s}$, $S_g = 1.16$), 增大预混气当量比, 燃烧室燃烧温度持续升高, 燃烧产物中热力 NO_x 浓度逐渐升高。图 9 给出了甲烷/空气预混燃烧的 NO_x 排放指数随当量比的变化规律。由图 9 可知, 随着当量比的升高, 排放指数逐渐增加, 在 $\Phi = 0.77$ 时达最大 8.16 g/kg , 之后当量比再增加, 排放指数略有下降。从当量比 $\Phi = 0.77$ 降到 $\Phi = 0.55$, NO_x 排放指数降低显著, 证明了贫预混燃烧技术清洁低排放的特点。

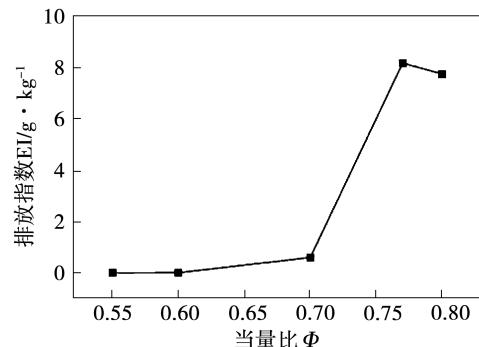


图 9 甲烷/空气预混燃烧的 NO_x 排放指数随当量比的变化规律

Fig. 9 Variation law of NO_x emission index of methane/air premixed combustion with equivalence ratio

2.2 质量流量对甲烷/空气预混燃烧特性的影响

固定甲烷/空气预混气当量比 $\Phi = 0.8$, 旋流数 $S_g = 1.16$ 。图 10 给出了不同预混气质量流量对甲烷/空气预混燃烧特性的影响规律。

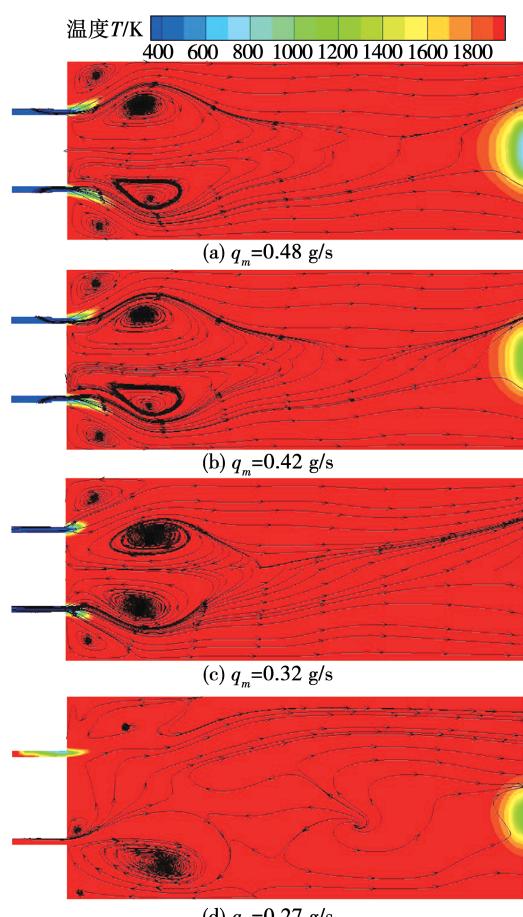


图 10 预混气质量流量对甲烷/空气预混燃烧温度场的影响

Fig. 10 Effect of mass flow rate of premixed air on temperature field of methane/air premixed combustion

从图中可以看出,随着质量流量的减小,燃烧室出口的卷吸回流涡变小,燃烧室中心回流区逐渐前移变得紧凑,角回流区相应收缩,火焰长度变短,火焰逐渐蔓延至整个燃烧室。当预混气质量流量 $q_m = 0.27 \text{ g/s}$ 时,火焰开始向旋流器内部蔓延,回火现象发生。

图 11 显示了燃烧区甲烷/空气预混燃烧的 NO_x 排放指数规律。由图 11 可知,随着质量流量的增加,进气速度增大,火焰拉长,高温区集中在后面, NO_x 分布向后延展,排放指数线性降低。当 q_m 从 0.35 g/s 增加到 0.48 g/s , NO_x 排放指数从 3.42 降到 2.59。

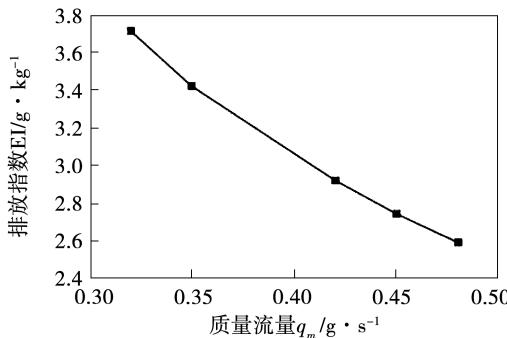


图 11 甲烷/空气预混燃烧的排放指数规律

Fig. 11 Emission index of methane/air premixed combustion

2.3 旋流数对甲烷/空气预混燃烧特性的影响

旋流器结构及旋流数的大小直接影响燃烧火焰的稳定情况。设定预混气当量比 $\Phi = 0.7$,质量流量 $q_m = 0.70 \text{ g/s}$,入口初温为 300 K,旋流器出口局部初温 1 000 K,改变旋流器内径尺寸及旋流数(如表 3 所示),重新划分网格对甲烷/空气预混燃烧进行计算分析。

图 12 为旋流数对甲烷/空气预混燃烧区火焰形态的影响规律。由图 12 可知,随着旋流数的增大,中心回流区增大,角流区被挤压缩小,火焰长度变短。可以明显观察到,火焰内部的低温区逐渐变小,但是低温区的半径不断变大,说明随着旋流数的增加火焰不断变短并向燃烧室壁面靠近,环形火焰半径不断变大。可以预见,在旋流数增加到一定程度时,会发生回火。Jerzak 等人^[9]对燃烧室中火焰特

性受旋流数影响的研究也得出,旋流数小于 0.4 为弱旋流,不会出现回流的现象;旋流数处于 0.4 ~ 0.6 之间为中等强度的旋流,有可能会出现回流区域;而旋流数大于 1.2 时旋流较强,一定会出现很强的回流区域,但也更容易造成回火现象。

表 3 模拟计算中的旋流器内径尺寸及旋流数

Tab. 3 Swirler internal diameter size and swirl number in simulated calculation

| 模拟 | 内径 d_p/mm | 旋流数 S_g |
|----|--------------------|-----------|
| 1 | 25 | 0.885 |
| 2 | 24 | 1.160 |
| 3 | 23 | 1.420 |
| 4 | 22 | 1.670 |
| 5 | 21 | 1.910 |

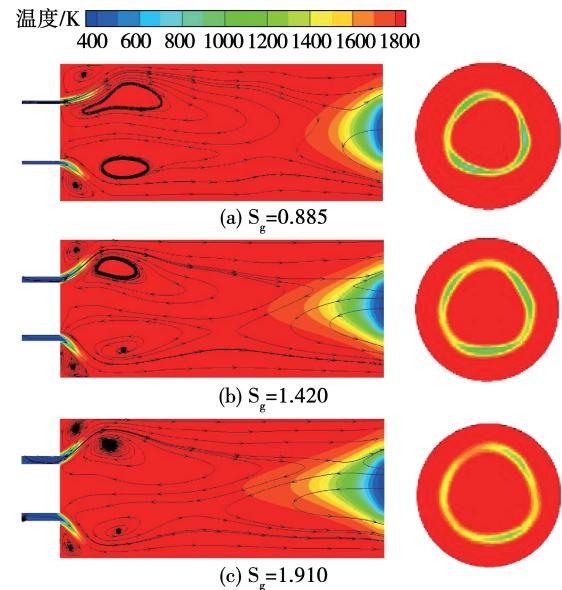


图 12 旋流数对甲烷/空气预混燃烧的火焰形态的影响规律

Fig. 12 Effect of swirl number on flame shape of methane/air premixed combustion

图 13 给出了旋流数对甲烷/空气预混燃烧排放指数的影响规律。由图 13 可知,随着旋流数的增大,排放指数不断降低。原因是轴向和径向速度分量较大,燃烧室出口卷吸回流的空气量随着旋流数的增大而增多,进而影响燃烧室内的平均温度,回流的外界空气越多,则会导致燃烧室平均温度越低,热

力 NO_x 排放指数整体呈降低趋势。当 $S_g = 1.16 \sim 1.42$ 时, 排放指数略微升高, 之后迅速下降, 根据式(3), 燃烧室出口处的 NO_x 密度和燃气体积流量随旋流数的变化规律直接影响排放指数的变化。

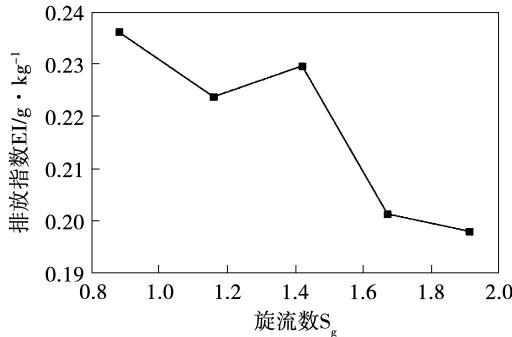


图 13 旋流数对甲烷/空气预混燃烧排放指数的影响规律

Fig. 13 Effect of swirl number on emission index of methane/air premixed combustion

2.4 丙烷/空气预混燃烧特性规律

为探究燃气轮机燃料的适应性, 针对丙烷/空气预混燃烧进行了数值模拟研究。相较于甲烷燃料, 丙烷在常温下化学性质稳定, 更易加压液化、储存和运输更安全。相对于更长碳链的烷烃和非烷烃类碳氢燃料, 丙烷碳链短, 相对含氢量高, 燃烧热值大, 产生不完全燃烧产物并造成污染的相对量也较少。因此, 丙烷也是燃气轮机领域正在研究的气体燃料之一。

模拟计算中固定进气质量流量 $q_m = 0.6 \text{ g/s}$, 旋流数 $S_g = 1.16$ 。图 14 显示了丙烷/空气预混燃烧温度场随当量比 Φ 的变化规律。由图 14 可知, 当 $\Phi = 0.4$ 时发生吹熄, 而 $\Phi = 1.0$ 时出现回火现象, 相比甲烷/空气预混燃烧的回火/吹熄极限, 丙烷/空气预混燃烧具有更宽广的稳定区间。

图 15 为丙烷/空气预混燃烧的排放指数规律。由图 15 可知, 相较于同样工况下的甲烷/空气预混燃烧排放, 丙烷/空气的 NO_x 排放指数有增大, 且随当量比 Φ 增大呈增加趋势, 随进口质量流量增大而减小。其原因是甲烷/空气预混气的燃烧室最高温度在 1980 K 左右, 而丙烷/空气预混气的燃烧室最高温度在 2200 K 左右, 相应会产生更多的 NO_x 污染物。

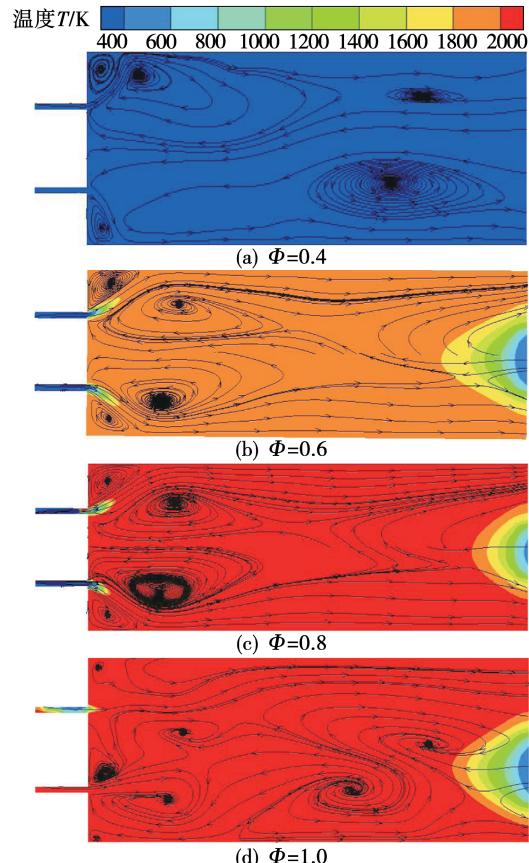
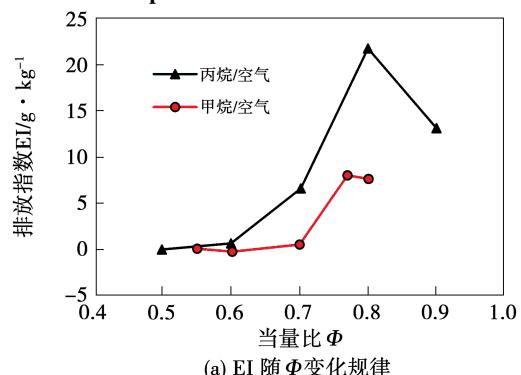
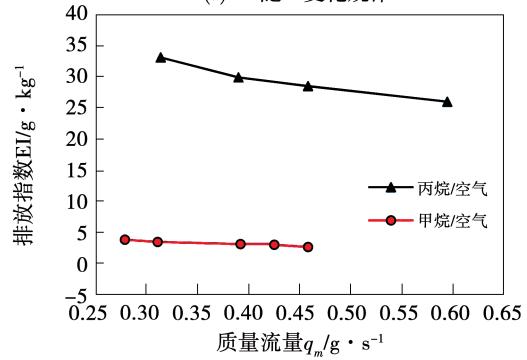


图 14 丙烷/空气预混燃烧温度场

Fig. 14 Temperature field of propane/air premixed combustion



(a) EI 随 Φ 变化规律



(b) EI 随 q_m 变化规律

图 15 甲烷/空气与丙烷/空气预混燃烧的排放指数规律

Fig. 15 Emission index of methan/air and propane/air premixed combustion

3 结 论

针对旋流预混燃烧开展了三维数值模拟研究,主要研究了甲烷/空气、丙烷/空气预混气的燃烧特性及排放特性,得到结论:

(1) 在预混气进气质量流量一定的条件下,增加当量比易引发回火,且当量比增加,燃烧温度升高, NO_x 排放指数升高。因此,为降低污染物排放,需采用贫预混燃烧技术。增加预混气进入质量流量,可在一定程度上提高回/熄火极限;

(2) 预混气进口质量流量直接影响其经过旋流器的速度大小和分布。基于同一旋流燃烧室,固定预混气当量比,随着甲烷/空气预混气质量流量的增加,会避免潜在的回火现象且排放指数线性降低;

(3) 旋流器是稳定燃烧的重要部件,在一定的当量比条件下,增大旋流数可增强回流,稳定火焰,降低排放指数,但过大的旋流强度会引发回火。

(4) 丙烷/空气预混燃烧温度较高, NO_x 排放相比于甲烷/空气预混气高,但具有更广阔的稳定燃烧区间,是潜力很大的燃气轮机用气体燃料。

基于以上结论,在实际燃气轮机使用过程中,需合理选择旋流器类型及尺寸、燃料种类、预混气进气量及当量比等参数来保证燃烧室的有效稳定燃烧及排放指标。

参考文献:

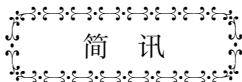
- [1] ZOU Bo-wen, XU Quan-hong, CAO Wen-yu, et al. Lean blowout mechanism of coupled recirculation zone in concentric staged combustor [J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28 (8): 1759 – 1763.
- [2] YI T, GUTMARK E. Lean blowout features and control in a swirl-stabilized, partially premixed gas turbine combustor [C]//Nevada: 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2006.
- [3] FOUST M J, THOMSEN D, STICKLES R, et al. Development of the GE aviation low emission TAPS combustor for next generation aircraft engines [C]//Nashville: 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2012.
- [4] 郭乔轩,雷福林,田文栋,等. 贫燃预混旋流燃烧器回火边界数值模拟[J]. 热力发电, 2020, 49(11): 82 – 88.
GUO Qiao-xuan, LEI Fu-lin, TIAN Wen-dong, et al. Simulation of

flash back and blow-off limits in lean premixed swirl combustor [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(11): 82 – 88.

- [5] FRITZ J, KRONER M, SATTELMAYER T, et al. Flashback in a swirl burner with cylindrical premixing zone [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2004, 126(2): 276 – 283.
- [6] 吴泽俊,何小民,葛佳伟,等. 甲烷/空气预混火焰回火特性数值模拟[J]. 推进技术, 2015, 36(9): 1347 – 1354.
WU Ze-jun, HE Xiao-min, GE Jia-wei, et al. Numerical simulation of flashback of premixed CH_4/air flame [J]. Journal of Propulsion Technology, 2015, 36(9): 1347 – 1354.
- [7] 张 欣,王 俊,李雅军,等. 低排放燃烧室值班喷嘴改进设计研究[J]. 热能动力工程, 2017, 32(8): 43 – 50, 147.
ZHANG Xin, WANG Jun, LI Ya-jun, et al. Study on pilot nozzle improvement for low emission combustor [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2017, 32(8): 43 – 50, 147.
- [8] SYRED N, GILES A, LEWIS J, et al. Effect of inlet and outlet configurations on blow-off and flashback with premixed combustion for methane and a high hydrogen content fuel in a generic swirl burner [J]. Applied Energy, 2014, 116: 288 – 296.
- [9] JERZAK W, KUZNIA M. Experimental study of impact of swirl number as well as oxygen and carbon dioxide content in natural gas combustion air on flame flashback and blow-off [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 29: 46 – 54.
- [10] 樊艳娜. 贫燃旋流预混燃烧室回火行为实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
FAN Yan-na. Experimental study on flashback of lean premixed swirl-stabilized combustor [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [11] SAYAD P, SCHÖNBORN A, KLINGMANN J. Experimental investigation of the stability limits of premixed syngas-air flames at two moderate swirl numbers [J]. Combustion and Flame, 2016, 164: 270 – 282.
- [12] 段润泽,赵若霖,刘联胜,等. 稳焰器结构对贫燃预混燃烧火焰不稳定性的影响[J]. 动力工程学报, 2018, 38(12): 983 – 987, 1015.
DUAN Run-ze, ZHAO Ruo-lin, LIU Lian-sheng, et al. Effects of stabilizer structure on the instability of lean premixed flame [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2018, 38(12): 983 – 987, 1015.
- [13] SOMMERE Y, GALLEY D, POINSOT T, et al. Large-eddy simulation and experimental study of flashback and blow-off in a lean partially premixed swirled burner [J]. Journal of Turbulence, 2004, 5: 61 – 68.
- [14] XU L, ZHENG J, WANG G, et al. Effects of swirler position on

- flame response and combustion instabilities [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35 (3) : 345 – 355
- [15] 杨亚晶, 李晓亚, 谢伟. 贫预混燃烧室燃烧稳定性的数值研究 [J]. 推进技术, 2017, 38 (11) : 2562 – 2571.
YANG Ya-jing, LI Xiao-ya, XIE Wei. Numerical study on combustion stability in a lean premixed combustor [J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38 (11) : 2562 – 2571.
- [16] TAAMALLAH S, LABRY A Z, SHANBHOGUE S J, et al. Thermo-acoustic instabilities in lean premixed swirl-stabilized combus-
- tion and their link to acoustically coupled and decoupled flame macrostructures [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35 : 3273 – 3282.
- [17] TEMME J E, ALLISON P M, DRISCOLL J F. Combustion instability of a lean premixed pervaporated gas turbine combustor studied using phase-averaged PIV [J]. Combustion and Flame, 2014, 161 (4) : 958 – 970.

(刘颖 编辑)



第一太阳能公司计划在美国建立第 5 家工厂

据官网报道, 美国第一太阳能技术公司(First Solar)宣布, 计划在美国建立第五家制造工厂, 以增加 7 系列太阳能组件的产量。

First Solar 将在扩建项目上投资高达 11 亿美元, 预计到 2026 年, 美国的太阳能产能将增加 3.5 GW, 达到 14 GW。

该工厂生产的 First Solar 7 系列组件, 采用 100% 美国制造的部件, 均在美国财政部发布的现行国内指导内容中得到了确认。First Solar 利用薄膜碲化镉(CadTel)光伏技术, 与晶体硅等材料相比, 它提供了更高的能量产量, 并具有更好的再循环能力。7 系列具有更大的外形尺寸、新的后导轨安装系统和增强的光伏项目终身能源性能。

First Solar 此前宣布, 将投资约 13 亿美元, 用于在阿拉巴马州新建一座 3.5 GW 的制造工厂、将俄亥俄州的现有生产基地扩大 0.9 GW 以及在俄亥俄州佩里斯堡建立一个专门的研发创新中心, 预计将于 2024 年完工。

作为欧盟太阳能战略的一部分, 欧洲的目标是到 2030 年太阳能光伏装机容量达到 750 GW。然而, 麦肯锡公司表示, 这一目标面临着潜在的供应弹性风险, 因为欧洲目前所需的太阳能光伏板几乎完全依赖从一个国家进口——中国。麦肯锡公司指出, 全球近 95% 的晶片生产都在中国, 中国也是价值链各环节排名前五的公司(德国瓦克除外)的所在地。

(孙嘉忆摘译自 www.powerengineeringint.com)