

基于反扩散火焰的低 NO_x 旋流燃烧器数值模拟

徐传义, 邵亚丽, 卢平, 宋涛

(南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏南京 210023)

摘要:采用非预混稳态小火焰模型(Steady Flamelet Model, SFM)耦合110步甲烷燃烧简化机理和Realizable $k-\varepsilon$ 模型对反扩散-旋流低氮燃烧器进行模拟, 对比分析了不同旋流角度(30° , 45° 和 60°)及过量空气系数(1.05, 1.10, 1.15和1.20)下燃烧时燃烧室内各截面轴向速度分布、中心截面温度及 NO_x 质量浓度分布。详细研究了燃烧室内天然气与空气的燃烧特性及 NO_x 的排放规律。模拟结果表明:随着旋流叶片角度逐渐增大, 燃烧室内回流作用逐渐增强, 导致火焰长度变短、燃烧室内最高温度及出口NO质量浓度逐渐降低;在旋流叶片角度为 60° 时, 出口NO质量浓度仅为 114 mg/m^3 ;随着过量空气系数逐渐增大, 火焰末端温度逐渐提高, 导致燃烧室出口NO排放量逐渐增大;在过量空气系数为1.2时, 出口NO质量浓度达到 294 mg/m^3 , 相比于过量空气系数为1.05时, 其NO排放量增加153%。

关键词:反扩散-旋流燃烧器;天然气燃烧;过量空气系数;数值模拟;旋流角度

中图分类号:TK16

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.05.021

[引用本文格式]徐传义, 邵亚丽, 卢平, 等. 基于反扩散火焰的低 NO_x 旋流燃烧器数值模拟[J]. 热能动力工程, 2023, 38(5): 170-178. XU Chuan-yi, SHAO Ya-li, LU Ping, et al. Numerical simulation of low NO_x swirl combustor with inverse diffusion flame[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(5): 170-178.

Numerical Simulation of Low NO_x Swirl Combustor with Inverse Diffusion Flame

XU Chuan-yi, SHAO Ya-li, LU Ping, SONG Tao

(School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing, China, Post Code:210023)

Abstract: The non-premixed steady-state small flamelet model (SFM) coupled with the 110-step methane combustion simplification mechanism and the Realizable $k-\varepsilon$ model were used to simulate the inverse-diffusion-swirl low-nitrogen burner. The axial velocity distribution, central section temperature and NO_x mass concentration distribution on each section in the combustion chamber were compared and analyzed under different swirl angles (30° , 45° and 60°) and excess air coefficients (1.05, 1.10, 1.15 and 1.20). The influence law on the combustion characteristics of natural gas and air in the combustion chamber and NO_x emission was studied in detail. The simulation results show that with the increase of swirl blade angle, the recirculation effect in the combustion chamber is gradually enhanced, resulting in shorter flame length, lower maximum temperature in the combustion chamber and lower outlet NO mass concentration. When the swirl blade angle is 60° , the outlet NO mass concentration is only 114 mg/m^3 ; with the increase of excess air coefficient, the flame end temperature gradually increases, resulting in the

收稿日期:2022-06-29; 修订日期:2022-10-13

基金项目:国家自然科学基金(51906113);江苏省高等学校基础科学(自然科学)面上项目(21KJB470006)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (51906113); Natural Science Fund of Colleges and Universities in Jiangsu Province (21KJB470006)

作者简介:徐传义(1997-),男,南京师范大学硕士研究生.

通讯作者:宋涛(1987-),男,南京师范大学教授.

increase of NO emission at the outlet of combustion chamber; when the excess air coefficient is 1.2, the outlet NO mass concentration reaches 294 mg/m³, compared with the excess air coefficient of 1.05, the NO emission is increased by 153 %.

Key words: inverse-diffusion-swirl burner, natural gas combustion, excess air coefficients, numerical simulation, swirl angle

引言

天然气是一种清洁能源,相较于煤炭,其燃烧过程中产生的燃料型 NO_x 较少^[1]。然而,天然气燃烧温度较高,导致热力型 NO_x 的排放量较高^[2-3]。近年来,我国新建燃气锅炉 NO_x 排放标准愈加严格,允许排放的 NO_x 质量浓度已由 2010 年的 400 mg/m³ 降低至 2020 年的 200 mg/m³ (本文中 NO 质量浓度均按 3.5% 氧含量折算)。因此,为了满足日趋严厉的环保标准,降低燃气锅炉 NO_x 排放量迫在眉睫。

反扩散火焰^[4] (Inverse Diffusion Flame, IDF) 是一种内部为空气喷流、外部为燃料喷流的燃烧方式。在 IDF 研究中,一方面需关注氧化剂注入口的雷诺数、当量比或燃烧器的几何形状^[5-7], 另一方面应关注在燃料中的添加剂 (如氢气) 的使用^[8]。Dong 等人^[9] 研究了 7 种不同结构的火焰,结果表明,7 种火焰中最突出的是由扩散基础火焰和火焰颈连接的顶部预混合火焰组成,火焰具有较少的烟尘排放和较低的污染物排放。Sze 等人^[10] 研究了射流反扩散火焰的 NO_x 排放量,结果表明,在当量比为 1.2 时 NO_x 排放达到最大值 3.2 g/kg。Song 等人^[11] 研究不同燃烧器入射角对反扩散火焰的影响,结果表明,入射角为 45° 的燃烧器产生的火焰高度高于入射角为 60°, 75° 和 90° 的燃烧器。随着入射角的减小,火焰的径向剪切速度增加,火焰趋于稳定。在 IDF 数值研究中, Kaplan 等人^[12] 比较了 IDF 和扩散火焰在层流状态下的烟尘形成,得出 IDF 比扩散火焰的烟尘排放更少。Li 等人^[13] 采用消耗散概念模型 (EDC 模型) 和详细的化学反应机理 GRI 3.0 对合成气湍流 IDF 进行了数值研究,结果表明,在中等或强烈的低氧燃烧过程中, IDF 对燃烧过程的稳定性至关重要。

由于 IDF 具有不回火、可燃性范围广、在湍流燃

烧中不需要值班火焰、燃烧稳定等优点,在商业燃烧器、废气及废液燃烧、炼铁、煤燃烧的污染物控制以及煤气化等方面得到了广泛的应用。IDF 中燃料/空气在局部区域混合度不高,因此改善燃料/空气的混合是提高 IDF 燃烧效率的重要方向。例如,采用不同数量的燃料入口或在空气射流入口添加旋流叶片,加快燃料空气的混合。

本文设计了一种新型反扩散 - 旋流燃气燃烧器,采用非预混 - 稳态小火焰模型耦合甲烷燃烧简化机理 (23 种组分, 110 步反应机理) 详细描述 CH₄ 燃烧过程,并研究不同旋流强度和过量空气系数对流场、温度场及 NO_x 排放的影响规律,为反扩散 - 旋流燃烧器在燃气锅炉中合理运行与优化提供参考。

1 物理模型、数值模拟方法及边界条件

1.1 物理模型

燃烧器物理模型如图 1 所示。模拟对象为天然气反扩散 - 旋流燃烧器,其燃烧室是 1.8 m × 10 m 的圆柱体。燃烧器中心为空气进口,围绕中心空气进口均匀分布 8 个燃料进口。中心空气进口分布着 8 片旋流叶片,叶片根部固定在外径为 76 mm 的枢轴上,叶片边缘固定在内径为 300 mm 的管壁上。燃气管是一段直径为 32 mm、长度为 294 mm 顶端为椭圆切口的圆管。图 1 (b) 中,椭圆切口表面有 57 个直径为 6 mm 的喷孔,模拟中将其简化为等面积椭圆切口,即燃气通过椭圆切口喷入燃烧室。

1.2 数值方法

连续性方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: u, v 和 w — x, y 和 z 方向上气体燃料的分速度, m/s。

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \rho f_i \quad (2)$$

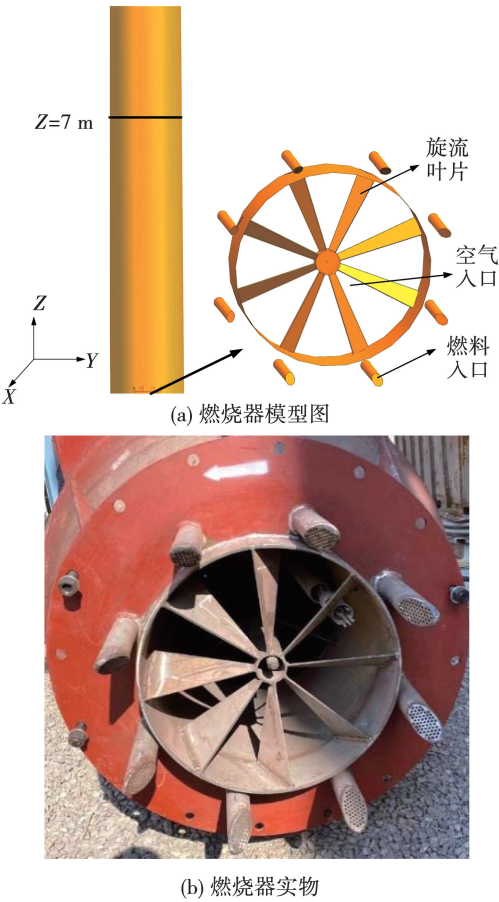


图 1 物理模型
Fig.1 Physical model

式中: x_i, x_j — i, j 方向坐标; u_j — j 方向气体燃料速度, m/s ; u_i — i 方向速度, m/s ; ρ —气体密度, kg/m^3 ; p —压强, Pa ; μ —动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; f_i —单位质量流体所受到的质量力, N/kg 。

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho u h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v h)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w h)}{\partial z} = -p \cdot \text{div} U + \text{div}(\lambda \cdot \text{grad} T) + \Phi + Q \tag{3}$$

式中: λ —流体换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; h —比焓, J/kg ; T —温度, K ; U —内能, J ; Q —单位微元体燃料燃烧放热量, W/m^3 ; Φ —流体粘性作用, W/m^3 。

采用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型描述气体的湍流运动^[14-15]; 采用灰体 DO 辐射模型^[16]、非预混稳态小火焰模型^[17-18]和包含 23 种组分、110 步基元反应的简化机理来描述 CH_4 和空气燃烧反应。

1.3 边界条件设置

计算边界条件设置为:空气入口选用速度入口, 水力直径为 224 mm, 温度为 493 K, 湍流强度为

3%, 定义混合分数为零。燃气入口选用速度入口, 水力直径为 41.52 mm, 温度为 300 K, 湍流强度为 4%, 定义混合分数为 1。烟气出口选用压力出口。各工况入口速度如表 1 所示。

表 1 入口边界条件
Tab.1 Inlet boundary conditions

工况	叶片角度/ (°)	旋流 强度	过量空 气系数	燃气速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	空气速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
1	30	0.40	1.05	100.68	46.52
2	45	0.69	1.05	100.68	46.52
3	60	1.18	1.05	100.68	46.52
4	60	1.18	1.10	100.68	48.73
5	60	1.18	1.15	100.68	50.95
6	60	1.18	1.20	100.68	53.17

2 网格无关性验证及模型验证

2.1 网格无关性验证

不同网格数量对模拟结果的影响如图 2 所示。

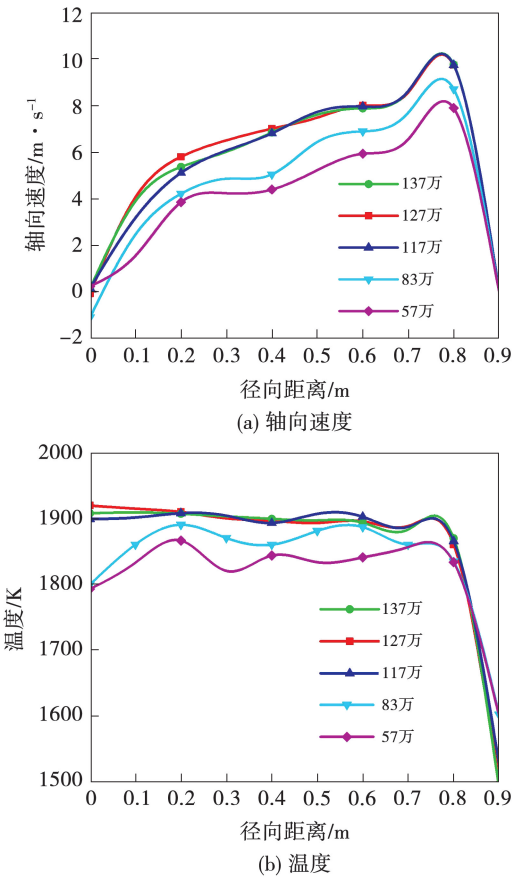


图 2 5 种网格数量对模拟结果的影响
Fig.2 Effects of five mesh quantities on simulation results

图 2(a)和图 2(b)分别为 $Z = 7\text{ m}$ 处(图 1)轴向速度和温度分布,其中 Z 轴是炉膛的中心轴线。从图中可以看出,网格数为 57 万、83 万及 117 万模拟计算结果差距较大;网格数为 117 万、127 万及 137 万模拟计算结果差距较小。综合考虑计算数量及精度,选取 117 万网格数量进行研究。

2.2 模型验证

为获得准确模拟结果,进行了模型可靠性验证。选取德国埃尔朗根-纽伦堡大学 Sommerfeld^[19] 燃烧器模型,并将模拟结果与实验数据相对比。

实验与模拟所得轴向速度沿轴线的分布如图 3 所示。轴向速度在轴向距离为 $0.08 \sim 0.38\text{ m}$ 范围内小于零,说明该区域内存在回流区。随着轴向距离增加,回流区结束,轴向速度逐渐增加至正值,在出口处达到 3 m/s 。在大部分区域模拟结果与实验数据吻合较好,表明建立的数值模型能够对天然气反扩散燃烧过程进行较为精确的模拟。

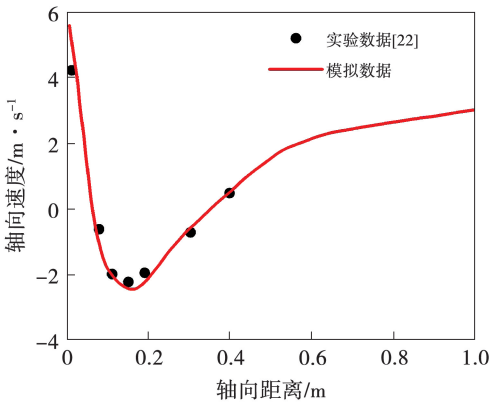


图 3 实验与模拟轴向速度沿中心轴线分布比较
Fig.3 Comparison of experimental and simulated axial velocity distribution along the central axis

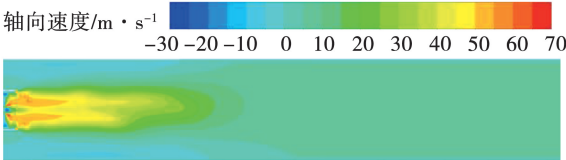
3 结果与讨论

3.1 基本工况数值模拟

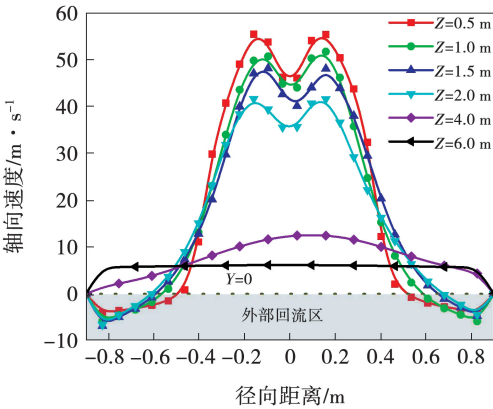
将工况 3 作为基本工况,研究反扩散-旋流燃烧过程中的速度场、温度场及组分场的分布特性。

冷态时燃烧室内流场分布如图 4 所示。最大速度位于燃料喷口附近,最大值约为 67 m/s 。在空气入口处,速度沿 Z 轴负方向,最大值约为 -25 m/s 。由于空气入口存在旋流,在燃烧室入口区域形成局部回流区,即外部回流区。外部回流区以燃烧室壁

面为界,流动边界的扩张受到限制,导致燃烧室内与壁面接触的气流被分成两股,一股沿初始方向继续向前流动至出口,另一股沿相反方向形成回流。外部回流区通过卷吸高温烟气,对混合气体进行加热,稳定燃烧。在截面 z 为 $0.5, 1, 1.5$ 和 2 m 时,轴向速度在中心区域大于零,而近壁面处小于零。随着轴向距离增加,速度为负值区域逐渐减小,说明回流影响逐渐减弱。在 z 为 4 和 6 m 时,速度全部变为正值,表明回流区在燃烧室尾部已消失。由于燃料进口速度较大,形成更大的外部回流区,使中心回流区受到较大的压力,导致中心回流区在旋流气体出口处停滞,造成在燃烧室中心区域燃气/空气混合较差。由于中心空气流速较小,导致轴向速度在中心区域较小,因此速度分布呈现 M 型。



(a) $X=0$ 截面轴向速度分布



(b) 不同轴向截面上轴向速度沿径向分布

图 4 冷态时流场分布

Fig.4 Flow field distribution in cold state

热态运行时不同截面轴向速度分布如图 5 所示。相对于冷态轴向速度分布,热态下的轴向速度分布曲线形状并未发生变化,即速度分布仍呈现 M 型。在热态条件下,外部回流区仍然存在,但回流区面积相对于冷态时有所下降。在 $Z = 0.5\text{ m}$ 截面处,轴向速度在燃料喷口 ($R = 0.15\text{ m}$) 附近达到最大值,最大速度为 65 m/s ,相对于冷态时有明显提高。这是因为在燃烧过程中释放出大量热量,加热了炉内气体,导致气体速度明显增大。

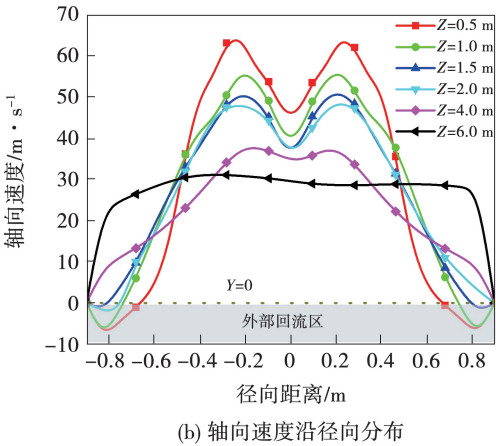
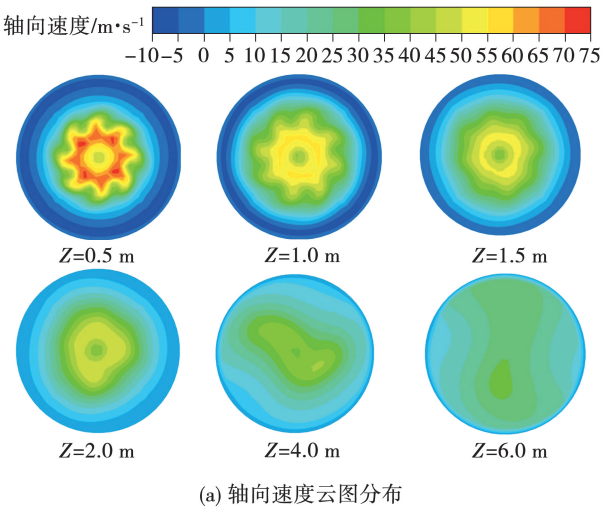


图 5 热态运行时不同截面轴向速度的分布
Fig. 5 Axial velocity distribution on different cross-sections in hot state

热态运行时温度分布如图 6 所示。燃烧室内温度分布关于 Z 轴对称,最高温度为 1 914 K。高温区域主要分布在外部回流区与中心轴线交界处、燃烧室头部和尾部区域。由于中心轴线与外回流区交界处是火焰边缘,导致此处温度较高,温度在 1 900 K 左右。燃烧室头部存在高温区是由于此处气体受到回流烟气加热,温度升高至 1 800 K 左右。由于中心回流区停滞,燃气与空气在燃烧室前端混合较差,导致燃烧反应主要集中在燃烧室中后段(Z 在 6.5 ~ 7.5 m 范围内),此处温度为 1 900 K。由图 6(b)可知,随着轴向距离增大,火焰温度在 Z = 3 m 处逐渐升高。在燃烧室尾部,旋流作用逐渐减弱,射流速度也逐渐减小,在壁面冷却作用下,火焰温度有所下降。

燃烧室内 NO 质量浓度分布如图 7 所示。可以看出,NO 质量浓度沿着轴向先增大后减小,在 Z = 7 m 附近达到最大值,约为 516 mg/m³。在燃烧室头

部温度较低区域 NO 质量浓度较低,是因为燃气和空气在该区域尚未充分混合燃烧。在燃烧室头部高温区域,回流烟气使该区域氧含量降低,抑制部分热力型 NO_x 形成。在中心轴线附近,NO 质量浓度较大,这是因为此处为火焰锋面,大量热力型 NO 生成,之后受到燃烧室壁面的冷却作用,NO 的生成量降低。

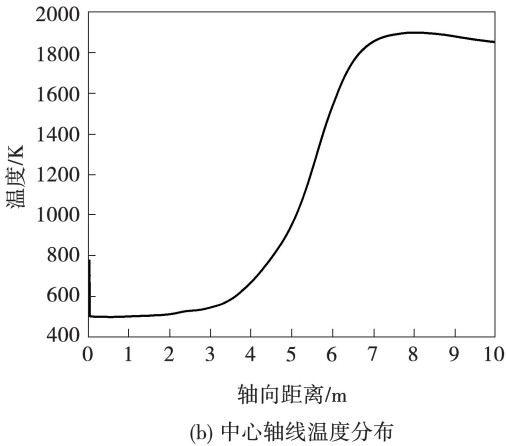
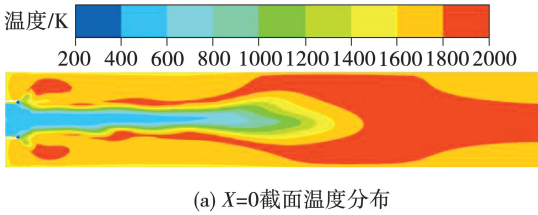


图 6 热态运行时温度分布
Fig. 6 Temperature distribution in hot state

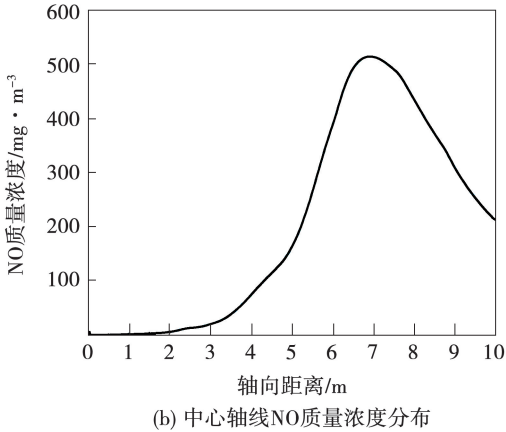
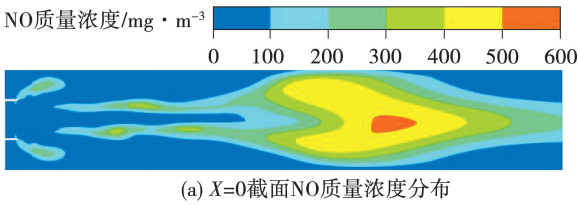


图 7 NO 质量浓度分布
Fig. 7 NO mass concentration distribution

3.2 旋流角度影响

旋流角度对轴向速度分布的影响如图 8 所示。在 Z 为 0.5,1.0,1.5 和 2.0 m 截面处,轴向速度在燃料喷口附近达到最大值。对比不同旋流叶片角度下速度分布曲线可以发现,旋流叶片角度为 30° 和 45° 时,在 $Z=6$ m 截面处速度分布仍能保持 M 型,而 60° 旋流叶片下 $Z=6$ m 截面处速度分布已不符合 M 型,可见旋流强度越强,轴向速度在燃烧室后端分布越平缓。

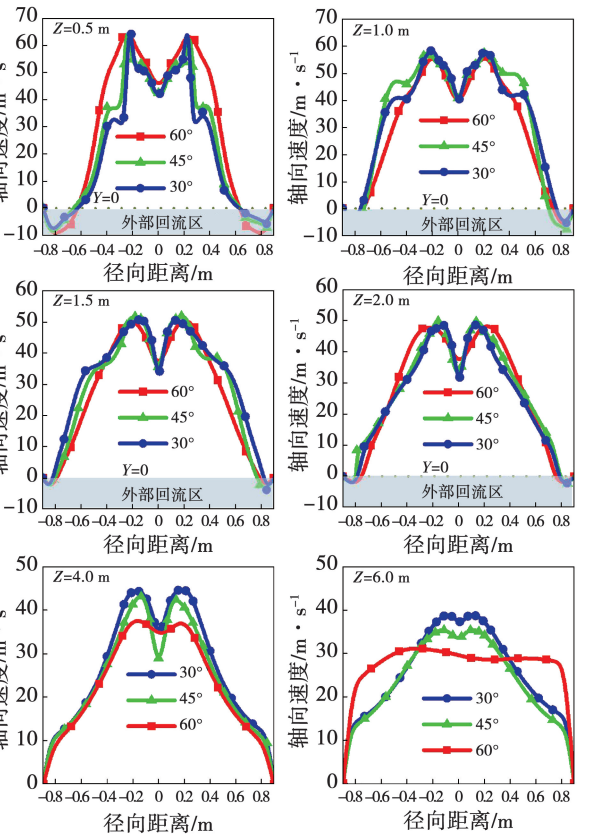


图 8 旋流角度对不同截面轴向速度沿径向分布的影响

Fig.8 Effect of swirl angle on axial velocity distribution on different cross-sections along radial direction

空气射流旋流强度的改变将影响燃料与空气间的混合度,并进一步影响燃烧效果。旋流角度对温度分布的影响如图 9 所示。低旋流强度下,火焰较细长,而高旋流强度条件下则较饱满,这是因为旋流强度较低时,天然气和空气混合程度较低,导致燃料在前端不完全燃烧的比例较高,未燃尽的燃料需要

经过更长的时间才能被消耗^[20]。由图 9(b)可知,随着旋流叶片倾角增大,火焰表面温度抬升的位置逐渐提前,中心轴线最高温度逐渐增大,这是因为随着旋流强度增大,燃料和空气之间更好地混合,从而导致快速燃烧,中心线温度急剧升高。

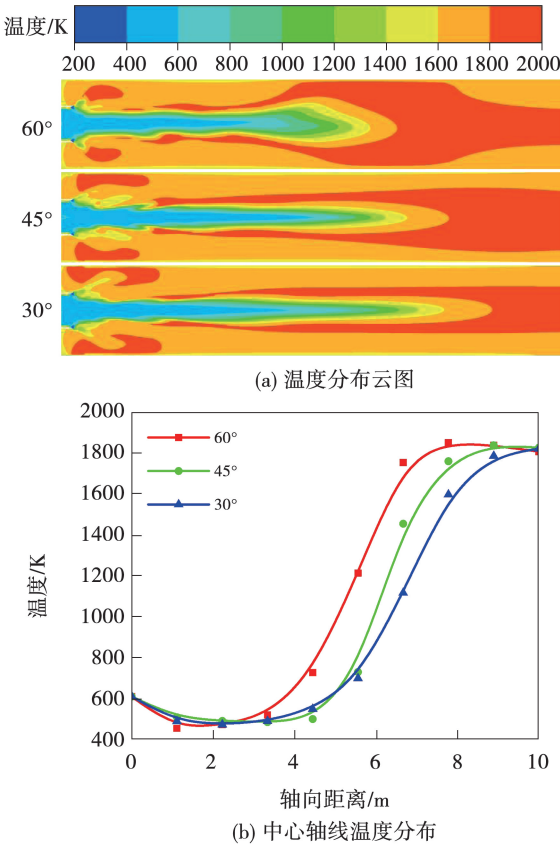


图 9 旋流角度对温度分布的影响

Fig.9 Effect of swirl angle on temperature distribution

图 10 为旋流角度对 NO 质量浓度分布的影响。叶片倾角为 30° , 45° 及 60° 时,燃烧室内 NO 最高质量浓度分别为 1 100,1 000 及 516 mg/m^3 。在燃烧室头部区域,NO 质量浓度较低,这是由于旋流强度较强,使得大量的烟气回流,导致此处含有未完全燃烧产生的 CO 将部分 NO 还原为 N_2 。由表 2 出口 NO 质量浓度可知,在叶片角度为 30° 和 45° 时,出口 NO 质量浓度较高,分别为 171 和 152 mg/m^3 ,这是由于炉内反应物混合度较低,燃烧反应区向后移,造成出口 NO 质量浓度上升。

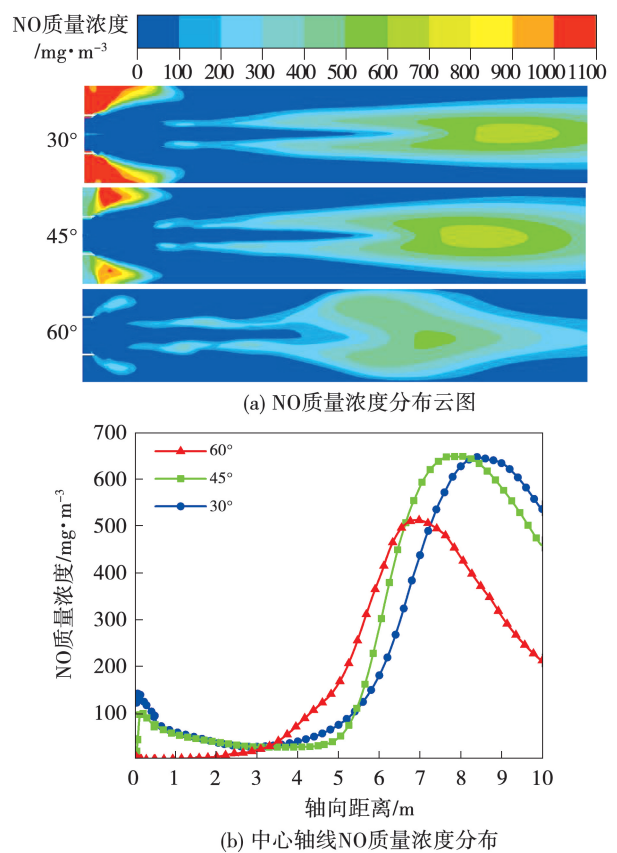


图 10 旋流角度对 NO 质量浓度分布的影响

Fig. 10 Effect of swirl angle on NO mass concentration distribution

表 2 旋流角度对燃烧室出口 NO 质量浓度的影响

Tab. 2 Effect of swirl angle on NO mass concentration at combustor outlet

叶片角度/(°)	NO 质量浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$
30	171
45	152
60	114

3.3 过量空气系数影响

过量空气系数是指实际输入空气量与理论计算空气量之比,若过量空气系数过低,将导致燃料不完全燃烧,若过量空气系数过大,过量的冷空气不参与燃烧,将导致热效率降低。在旋流叶片倾角为 60° 时,研究不同过量空气系数 α 对燃烧特性的影响规律,具体参数设置见表 1 中的工况 3 ~ 6。

过量空气系数对温度分布的影响如图 11 所示。

由图可知,在 $\alpha = 1.05$ 时,炉膛出口温度为 1 914 K;当 $\alpha = 1.2$ 时,炉膛出口温度为 1 945 K。这是因为空气喷射对燃气的夹带程度随着过量空气系数增大逐渐提高,火焰末端燃气/空气混合更加充分,导致火焰末端燃烧方式变为预混燃烧,进而火焰末端温度升高^[21 - 22]。随着过量空气系数增大,燃烧室内高温区域面积逐渐增大。

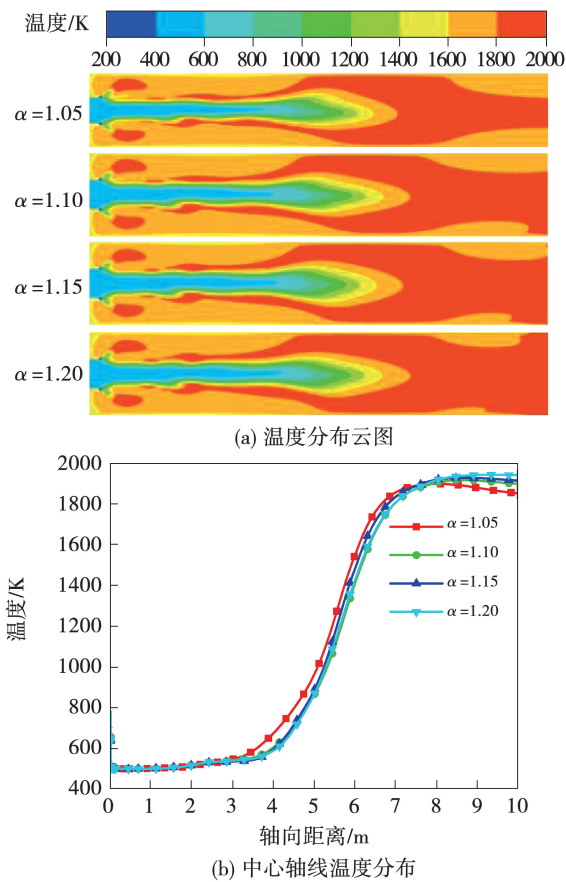


图 11 过量空气系数对温度分布的影响

Fig. 11 Effect of excess air coefficient on temperature distribution along central axis

过量空气系数对 NO 质量浓度分布的影响如图 12 及表 3 所示。当过量空气系数为 1.05 时,NO 质量浓度在 $Z = 4$ m 开始逐渐上升,在 $Z = 7$ m 附近达到最大值,最大值为 516 mg/m^3 。中心轴线 NO 质量浓度在达到峰值前较为接近,达到峰值后随着 α 减小 NO 质量浓度逐渐减小。随着 α 逐渐增大,燃烧室内火焰温度逐渐上升,出口 NO 质量浓度逐渐升高。

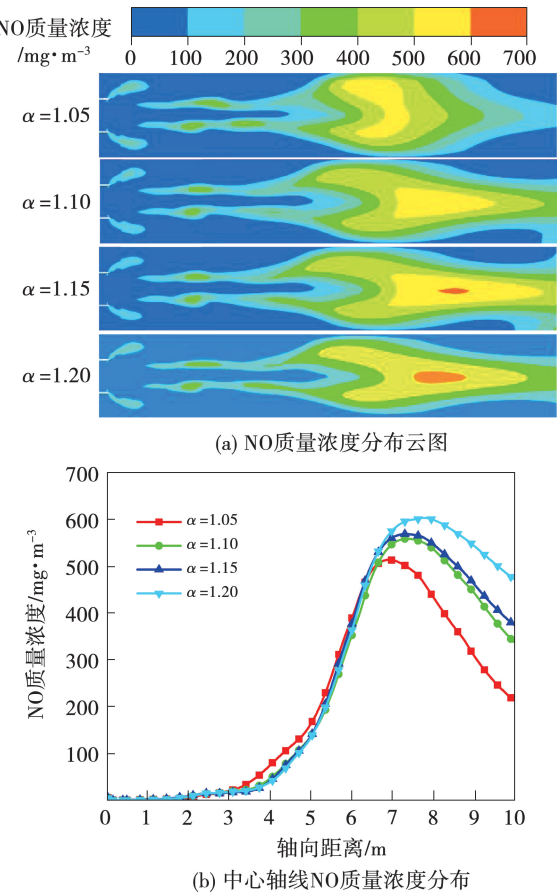


图 12 过量空气系数对 NO 质量浓度分布的影响
Fig. 12 Effect of excess air coefficient on NO mass concentration distribution

表 3 过量空气系数对燃烧室出口 NO 质量浓度的影响
Tab. 3 Effect of excess air coefficient on NO mass concentration at combustor outlet

过量空气系数	NO 质量浓度/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
1. 05	114
1. 10	172
1. 15	221
1. 20	294

4 结 论

本文针对反扩散 – 旋流燃烧器,采用非预混稳态小火焰模型 (Steady Flamelet Model) 耦合 110 步甲烷燃烧简化机理和 Realizable $k - \varepsilon$ 模型描述甲烷燃烧过程,研究了旋流强度和过量空气系数对流场及燃烧特性的影响规律,主要结论如下:

- (1) 通过燃烧器旋流作用,在壁面附近形成外部回流区,通过卷起高温烟气稳定燃烧。当空气进气速度较大时,其燃烧方式趋于预混燃烧,火焰末端温度较高。当空气进气速度较低时,其燃烧方式趋于扩散燃烧,火焰末端温度较低。
- (2) 当叶片旋流叶片角度为 60° 时,燃烧室内外部回流区面积最大,轴向速度衰减更快。此时燃烧室内气体混合效果较好、火焰较短且 NO 排放量较低,出口 NO 质量浓度为 114 mg/m^3 。
- (3) 随着过量空气系数由 1.0 增加到 1.2,火焰末端燃气/空气混合更加充分,火焰末端趋于预混燃烧方式,其温度升高,导致 NO 排放量增加,当 $\alpha = 1.2$ 时,出口 NO 质量浓度最大,为 294 mg/m^3 。

参考文献:

[1] 赵钦新,商俊奇,倪永涛,等. 我国燃气锅炉的差距和突破[J]. 工业锅炉,2017(5):1 – 16.
ZHAO Qin-xin, SHANG Jun-qi, NI Yong-tao, et al. The gap and breakthrough on domestic gas-fired boilers[J]. Industrial Boiler, 2017(5):1 – 16.

[2] 靳苏毅,王登辉,惠世恩,等. 天然气低氮氧化物燃烧研究进展与展望[J]. 节能技术,2021(4):291 – 298.
JIN Su-yi, WANG Deng-hui, HUI Shi-en, et al. Research progress and prospects of Low-NO_x combustion of natural gas[J]. Energy Conservation Technology, 2021(4):291 – 298.

[3] SHI Bao-lu, HU Jie, PENG Hong-wei, et al. Effects of internal flue gas recirculation rate on the NO_x emission in a methane/air premixed flame[J]. Combustion and Flame, 2018, 188: 199 – 211.

[4] WEI Zhong-lin, WANG Xue-cheng, et al. A state-of-the-art review of lab-scale inverse diffusion burners & flames: from laminar to turbulent[J]. Fuel Processing Technology, 2021, 222: 106940.

[5] ABDULAZIZ A M. Study of effects of burner configuration and jet dynamics on characteristics of inversed diffusion flames[J]. Journal of Mechanical Engineering Research, 2013, 5(7): 128 – 144.

[6] DONG L L, CHEUNG C S, LEUNG C W. Heat transfer characteristics of an impinging swirling inverse diffusion butane/air flame jet [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2021, 49: 182 – 192.

[7] ZHEN H S, CHOY Y S, et al. Effects of nozzle length on flame and emission behaviors of multi-fuel-jet inverse diffusion flame burner [J]. Applied Energy, 2011, 88(9): 2917 – 2924.

[8] MIAO J, LEUNG C W, CHEUNG C S, et al. Effect of H₂ addition on OH distribution of LPG/air circumferential inverse diffusion flame [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(22): 9653 – 9663.

[9] DONG L L, CHEUNG C S, et al. Heat transfer characteristics of an impinging inverse diffusion flame jet – part I: free flame structure [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2007, 50(25/26): 5108 – 5123.

[10] SZE L K, CHEUNG C S, et al. Appearance, temperature, and

- NO_x emission of two inverse diffusion flames with different port design[J]. Combustion & Flame, 2006, 144: 237–248.
- [11] SONG Xu-dong, WU Run-min, ZHOU Ying, et al. Understanding the influence of burner structure on the stability and chemiluminescence of inverse diffusion flame[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(48): 24461–24471.
- [12] KAPLAN C R. Flow-field effects on soot formation in normal and inverse methane-air diffusion flames[J]. Combustion and Flame, 2001, 124(1/2): 275–294.
- [13] LI Xin-yu, DAI Zheng-hua, XU Yue-ting, et al. Inverse diffusion flame of CH₄ – O₂ in hot syngas coflow[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(46): 16104–16114.
- [14] 陈景仁. 湍流模型及有限分析法[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1989.
- CHEN Jing-ren. Turbulence modeling and finite analysis method [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1989.
- [15] 任志安, 郝 点, 谢红杰. 几种湍流模型及其在 FLUENT 中的应用[J]. 化工装备技术, 2009, 30(2): 38–40.
- REN Zhi-an, HAO Dian, XIE Hong-jie. Several turbulence models and their applications in FLUENT [J]. Chemical Equipment Technology, 2009, 30(2): 38–40.
- [16] FIVELAND W A. Discrete ordinate solutions of the radiative heat transport equation for rectangular enclosures[J]. Heat Transfer, 1984, 106(2): 699–706.
- [17] PITTSCH H, PETERS N A. Consistent flamelet formulation for non-premixed combustion considering differential diffusion effects [J]. Combustion & Flame, 1998, 114(2): 26–40.
- [18] EMAMI M D, FARD A E. Laminar flamelet modeling of a turbulent CH₄/H₂/N₂ jet diffusion flame using artificial neural networks [J]. Applied Mathematical Modelling, 2012, 36(5): 2082–2093.
- [19] SOMMERFELD M, QIU H H. Characterization of particle-laden, confined swirling flows by phase-doppler anemometry and numerical calculation [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1993, 19(6): 1093–1127.
- [20] VIPUL P, RUPESH S, et al. Experimental investigation on flame appearance and emission characteristics of LPG inverse diffusion flame with swirl[J]. Applied Thermal Engineering Design Processes Equipment Economics, 2018, 137: 377–385.
- [21] 王宝璐, 额日其太. 甲烷反扩散火焰光谱特性实验研究[J]. 推进技术, 2016, 37(1): 105–111.
- WANG Bao-lu, Eriqitai. Experiment study of inverse methane/air diffusion flame emission spectrum properties[J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(1): 105–111.
- [22] 李新宇, 代正华, 徐月亭, 等. 甲烷/氧气层流反扩散火焰形态及滞后特性研究[J]. 物理学报, 2015, 64(2): 337–344.
- LI Xin-yu, DAI Zheng-hua, XU Yue-ting, et al. Study on flame morphology and hysteresis characteristics of methane/oxygen laminar counter diffusion [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(2): 337–344.

(姜雪梅 编辑)

(上接第 169 页)

- [17] LIU En-hui, LIU Xiao, ZHENG Hong-tao, et al. Investigation on mixing characteristics of methane fuel in low emission combustor [C]//London, England: ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 2020.
- [18] WANG S J, MUJUMDAR A S. A numerical study of flow and mixing characteristics of three-dimensional confined turbulent opposing jets; unequal jets[J]. Chemical Engineering and Processing, 2005, 44: 1068–1074.
- [19] 葛 臣, 付忠广, 石 黎, 等. 旋流数对某环管型燃烧室内燃烧及 NO_x 生成特性的影响[J]. 热能动力工程, 2018, 33(12): 65–71.
- GE Chen, FU Zhong-guang, SHI Li, et al. Effect of swirl number on combustion and NO_x formation in can-annular combustion chamber[J]. Journal of Engineering for the Thermal Energy and Power, 2018, 33(12): 65–71.
- [20] ANSYS Inc. ANSYS FLUENT theory guide [M]. Canonsburg, PA: ANSYS Inc., 2018.
- [21] LIU En-hui, LIU Xiao, ZHAO Ma-jie, et al. Turbulent fuel-air mixing study of jet in crossflow at different velocity ratios using LES [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2020, 85: 108633.
- [22] 闵亚能. 实验设计(DOE)应用指南[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- MIN Ya-neng. Application guide of design of experiments (DOE) [M]. Beijing: Mechanic Industry Press, 2011.
- [23] 张志浩, 刘 潇, 吕光普, 等. 低排放塔式同轴分级燃烧室旋流器性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(15): 12.
- ZHANG Zhi-hao, LIU Xiao, LYU Guang-pu, et al. Research on swirler performance of the low emission tower-type coaxial-staged combustor[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(15): 12.
- [24] 刘 刚. 同轴分级燃烧室燃料分布与燃烧特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
- LIU Gang. Study on fuel distribution and combustion characteristics of coaxial staged combustor[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021.
- [25] 常建龙. 横向射流涡环及流动特性研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- CHANG Jian-long. Investigation of the vortex and flow characteristics for jet in crossflow [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.

(姜雪梅 编辑)