

空气旋流数对甲烷燃烧 NO_x 生成影响数值模拟研究

曹文宣, 徐 杰, 王子兵, 秦培禾

(华北理工大学 冶金与能源学院, 河北唐山 063200)

摘 要: 为研究甲烷-空气非预混燃烧下空气旋流数对流动特性、温度分布及其对污染物 NO_x 生成的影响, 利用 CFD 软件, 采用标准的 $k-\varepsilon$ 湍流模型、P-1 辐射模型和涡流耗散模型进行数值模拟。结果表明: 空气旋流数从 0 提高到 0.8 的过程中, 形成的中心内回流区会强化燃料和空气混合, 中心火焰向燃烧室两侧逐渐扩散, 火焰长度变短, 且高温区移动到燃烧室的前端, 局部高温的产生得到了抑制, 燃烧室内的温度场更加均匀, 进而导致 NO_x 生成量的下降。同时研究燃烧器几何尺寸对气体停留时间及 NO_x 排放浓度的影响, 发现缩小空气入口孔隙半径 r 和燃烧室径向隔板间距 L 会导致气流速度增大, 促进反应更快地弥散到整个空间, 能够进一步抑制 NO_x 的产生。

关 键 词: 扩散燃烧; 旋流数; 回流区; 低 NO_x ; 数值模拟

中图分类号: TK16

文献标识码: A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2022.08.017

[引用本文格式] 曹文宣, 徐 杰, 王子兵, 等. 空气旋流数对甲烷燃烧 NO_x 生成影响数值模拟研究[J]. 热能动力工程, 2022, 37(8): 135-142. CAO Wen-xuan, XU Jie, WANG Zi-bing, et al. Numerical simulation research on effect of air swirl on NO_x generation during methane combustion[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(8): 135-142.

Numerical Simulation Research on Effect of Air Swirl on NO_x Generation during Methane Combustion

CAO Wen-xuan, XU Jie, WANG Zi-bing, QIN Pen-he

(School of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan, China, Post Code: 063200)

Abstract: In order to study the effect of the air swirl number on the flow characteristics, temperature distribution and pollutant NO_x generation during methane-air non-premixed combustion, the numerical simulations were carried out by using CFD software, the standard $k-\varepsilon$ turbulence model, P-1 radiation model and eddy current dissipation model. The results show that when the air swirl number is increased from 0 to 0.8, the combustion zone will form a central recirculation zone to enhance fuel and air mixing, the central flame spreads to both sides of the combustion chamber, the flame length becomes shorter, and the high temperature zone moves to the front end of the combustion chamber, local high temperatures are inhibited, and the temperature field in the entire combustion chamber becomes more uniform, which in turn leads to a decrease in NO_x generation. At the same time, the effect of the geometrical size of the burner on the gas residence time and NO_x emission concentration is studied. It is found that reducing the air inlet pore radius r and the fuel-air radial baffle spacing L will lead to the increase of air flow velocity, promote the reaction to spread to the entire space faster, and furtherly suppress the generation of NO_x .

Key words: diffusion combustion, swirl number, recirculation zone, low NO_x , numerical simulation

引 言

如何在保证燃烧效率的同时使污染物排放量最小化一直是燃烧研究的核心内容。其中,燃空混合均匀度和烟气在炉内的停留时间均是影响火焰形成和发展的关键因素^[1-2]。在扩散燃烧中,提高燃烧室入口气流的旋度可以有效促进燃料空气的混合^[3-4]。但随着旋度的加大,燃烧气体在炉内的停留时间也会逐渐增加,进而影响火焰的传播和污染物的形成^[5-6]。Chuang 等人^[7]研究了带有火焰稳定器的突扩式燃烧室中的旋流,发现流场、温度和气体体积分数受到涡流强烈的影响。Ylmaz I 等人^[8]采用数值模拟的方法研究了旋流数对天然气扩散火焰燃烧特性的影响,结果表明,旋流数不同,天然气扩散火焰的流体动力学行为也往往不同,其中包括轴向速度分布、中心回流区和外部回流区。Saqr 等人^[9]在甲烷-空气燃烧的湍流扩散火焰中针对自由流湍流对 NO_x 和烟灰形成的影响进行了数值分析,结果表明:升高的氧化剂湍流强度能够抑制一氧化氮形成和烟尘浓度。Rashwan 等人^[10]对比了不同旋流数下三种助燃气体(氧含量不同)对燃烧特性的影响,得出:随着旋流数的增加,可燃混合气混合水平不断提高,最多可减少 95% 的热力型 NO_x 产生。

综上所述,旋流对燃烧室中火焰动态和燃烧行为的影响显著,但以往研究中针对不同旋流数下燃烧行为对 NO_x 生成规律和在高旋流数下如何更大幅度地抑制 NO_x 生成缺乏细致分析。因此,为进一步分析旋流数对燃烧特性及 NO_x 生成的影响,本文采用数值模拟方法模拟不同旋流数对甲烷燃烧特性及 NO_x 生成的影响,同时进一步评价了燃烧器几何尺寸对烟气在炉内停留时间及 NO_x 生成的影响。

1 模型的建立及验证

采用如图 1 所示的物理模型,其中燃料、空气均以二维、稳态和湍流状态进入燃烧室。该模型最早于 1989 年被 Wilkes 等人^[11]提出,至今仍被诸多学者^[9-10,12]用于探究入口旋流对甲烷-空气火焰燃烧特性的影响,而对于实际工业锅炉天然气燃烧,燃烧器结构尺寸对高旋流数下回流区的形成、演变及后续的 NO_x 生成与还原有重要影响。因此,本文重

点关注高旋流数下燃烧器的几何尺寸对回流区及 NO_x 生成的影响。

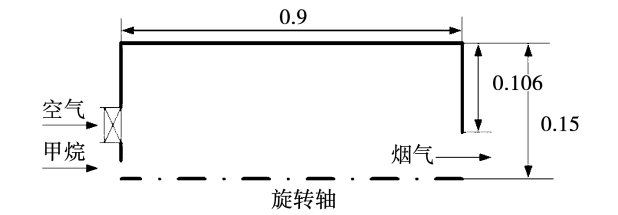


图 1 燃烧室物理模型 (m)

Fig. 1 Physical model of combustion chamber (m)

本文中旋流器采用平板叶片,基于切向和轴向速度比值定义了如式(1)所示的旋流数^[13],利用 CFD 软件模拟其对 NO_x 生成的影响,旨在评价和优化烟气内循环效果,为强化烟气内循环技术提供参考。

$$s = \frac{2}{3} \frac{v_t}{v_a} \times \left[\frac{1 - \left(\frac{R_i}{r_e}\right)^3}{1 - \left(\frac{R_i}{r_e}\right)^2} \right] \tag{1}$$

式中: $\frac{v_t}{v_a}$ —空气入口切向速度分量与轴向速度分量之比; R_i, r_e —空气入口的内径与外径。

1.1 边界条件

本文采用涡耗散模型(EDM)、甲烷-空气燃烧的两步式全局反应模型、标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型、P-1 辐射模型并应用 Zeldovich 机理^[13]模拟 NO 的生成。入口和出口分别设置为速度边界和压力边界,壁面采用无滑移假设。所有方程均采用二阶迎风格式求解,当所有残差均小于 10^{-6} 时,假定方程收敛,用 Coupled 求解有限差分方程。其初始参数如表 1 所示。

表 1 初始运行条件

Tab. 1 Initial operating condition

名称	燃气	助燃空气
入口范围/mm	0~6	16.5~27.5
轴向速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	15	12.8
径向速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0	0
旋流数	0	0.4
温度/K	295	295
甲烷体积分数	1	0
氧气体积分数	0	0.21
氮气体积分数	0	0.79

标准 $k-\varepsilon$ 模型中的经验系数和典型值如表 2 所示。

表 2 标准 $k-\varepsilon$ 模型的经验系数

Tab. 2 The empirical coefficient of the standard $k-\varepsilon$ model

参数	数值
C_μ	0.09
C_1	1.44
C_2	1.92
σ_k	1.0
σ_ε	1.3
σ_T	0.9~1.0

其经验系数对模拟结果的影响很大(如: C_1 或 C_2 变化 5% 就会对射流喷射率产生高达 20% 的影响^[14]), 由于旋流的存在, 本文对 C_μ, C_2, σ_T 进行了如下修正^[15~16]:

$$C_\mu = 0.09 - 0.04f \tag{2}$$

$$C_2 = 1.92 - 0.0667f \tag{3}$$

$$f = \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_{ax}}{\partial x} - \left| \frac{\partial U_{ax}}{\partial x} \right| \right) \delta / (U_{\max} - U_{\min}) \right\}^{0.2} \tag{4}$$

式中: U —主流方向的均流速度, m/s; 下标 ax —对称轴上的量; x —主流方向, m; δ —混合区的径向宽度, m。

$$\sigma_T = \begin{cases} 1.07, y^+ < 5 \\ 1 + 0.855 - \tanh[0.2(y^+ - 7.5)], 5 < y^+ \leq 30 \\ \frac{0.7}{(\frac{\eta_t}{\eta})Pr} + 0.85, y^+ > 30 \end{cases} \tag{5}$$

式中: y^+ —无量纲壁面距离; Pr —普朗特数; η_t —湍流脉动造成的湍流粘性系数, $\text{kg} \cdot \text{s}/\text{m}^2$; η —流体的动力粘度, $\text{kg} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 。

对近壁面网格点取壁函数近似, 在计算单元体内使用混合格式对微分方程进行积分, 从而得到有限差分方程, 其湍流近壁面边界条件由公式确定^[14]:

$$k = n * E_k \tag{6}$$

式中: k —湍动能, J; n —来流平均动能的百分数, 取 2%; E_k —单位质量的来流平均动能, J。

$$\varepsilon = \frac{C_\mu^{0.75} k^{1.5}}{l_m} \tag{7}$$

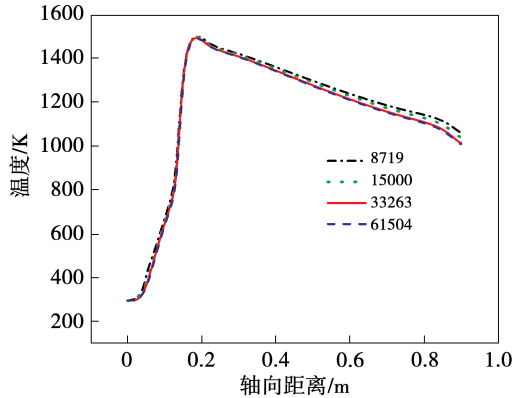
式中: ε —湍流耗散率; l_m —湍流尺度。

$$l_m = \delta y \left[1 - \exp \left(- \frac{y(\tau_w/\rho)}{A\nu} \right) \right], A = 26 \tag{8}$$

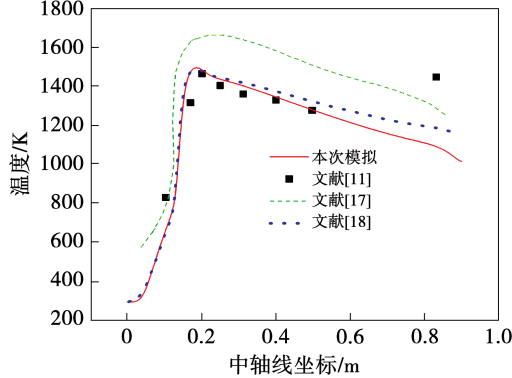
式中: δ —由实验测得的数据^[14], 取 0.03; y —与主流方向垂直的坐标, m; τ_w —壁面上的切应力, N; ρ —来流密度, kg/m^3 ; ν —来流黏度, m^2/s 。

1.2 网格无关性和结果验证

图 2 给出了不同网格数(8 719, 15 000, 33 263 和 61 504) 下中心轴线温度变化及模拟结果与文献的对比。从图 2(a) 可以看出, 当网格数增大至 33 263 后, 不同网格数间的最大相对误差从开始的 2.07% 降低到 0.57%, 其趋势与数值基本不再发生改变, 满足网格无关性验证。另外, 从图 2(b) 也可以看出采用网格 33 263 与文献[11] 实验数据吻合较好, 进一步验证模拟结果的可靠性。



(a) 网格无关性验证



(b) 结果验证

图 2 网格无关性和结果验证
Fig. 2 Grid independence and result verification

2 结果分析

2.1 旋流数对流动特性的影响

通过 Fluent 模拟研究, 结果如图 3 所示, 旋流数 S 对燃烧过程中压力分布和气流运动轨迹的影响显著。在无旋流的工况($S = 0$)下, 燃烧室的入口段处

会形成一个较大的外循环区。以涡心偏后的位置为分界线划分整个压力场,呈现前低后高的压力分布状态。当旋流数提高到 0.2 时,原有的外循环区面积缩小,气流受切向力影响增强,燃气入口的高压区变为低压区,在入口端的侧壁处形成新的回流区。旋流数进一步增大至 0.4 时,气流与燃烧室中心轴线向上偏离,原有外回流区会被扩大的壁面回流区和中心内回流区代替,这种现象与文献[18]研究结果相同。值得注意的是,燃烧室内的压力场也在发生变化,其分界线继续前移,压力分布依然呈前低后高。旋流数继续增加至 0.8,压力与速度分布的变化规律仍未发生变化;同时,切向速度分量的增强会使两涡流在壁面的交汇点不断前移,导致内循环区的尺寸增加以及外部循环区的尺寸减小,其结果使得炉内压力场分布更加均匀,这种思想同样可以在恒压室的通风换热中得到应用。但更高的旋流数 ($S > 0.8$) 意味着切向速度成为主流速,火焰变短,贴近燃烧器入口端燃烧,对热工况产生不利影响。因此,一般旋流数不大于 0.8。不同旋流数下压力分布和速度分布势必会进一步影响炉内温度的分布,对热力型及瞬速型 NO_x 的生成也会产生深远影响。

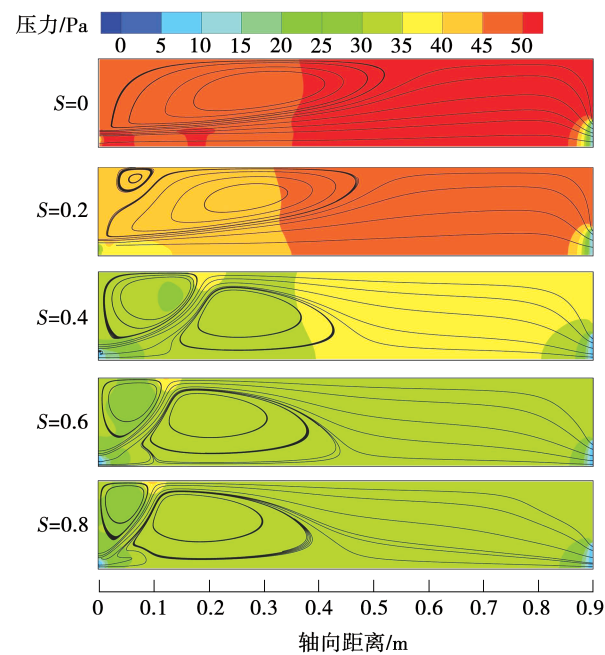


图 3 旋流数对炉内流场的影响

Fig. 3 Influence of swirl number on flow field in furnace

2.2 旋流数对温度分布的影响

通过 Fluent 模拟研究不同旋流数下燃烧室的温

度分布,结果如图 4 所示,燃烧室内温度分布随旋流数 S 的变化而变化。在旋流数不断增大的过程中,火焰长度逐渐缩短,高温区逐渐向气流入口端移动。当 $S = 0.2$ 时,燃烧室中心轴线处仍会形成高温火炬;继续增大旋流数 ($S = 0.4$),原本的中心火焰会扩散到燃烧室的两侧,长度变短的同时将高温区移动到燃烧室的前部,让整个温度场的分布更加均匀;这种趋势一直维持到 $S = 0.8$ 。出现这种情况主要归因于高压区的前移,与图 3 中压力场的变化一致,即增加旋流数,切向速度增大,在燃烧室前端出现低压回流区,导致燃烧向两侧扩散。同时可以看出,旋流数对燃烧后的温度分布产生了重要影响。切向速度分量的增强使燃料空气混合更加均匀,更大的中心回流区让反应弥散到整个空间中,同时减小局部高温区,一定程度上破坏了热力型 NO_x 的生成条件。此外,高旋流数能够降低燃烧室的出口温度,增强换热效率,减少热损失。(这种均匀的温度分布在隧道式烘焙炉等应用中至关重要^[6]) 这种燃烧状态对工业炉的生产和污染物减排也有着重要意义,但在实际的应用过程中也需要考虑火焰充满度及炉口温度对燃烧器前端的耐温要求。

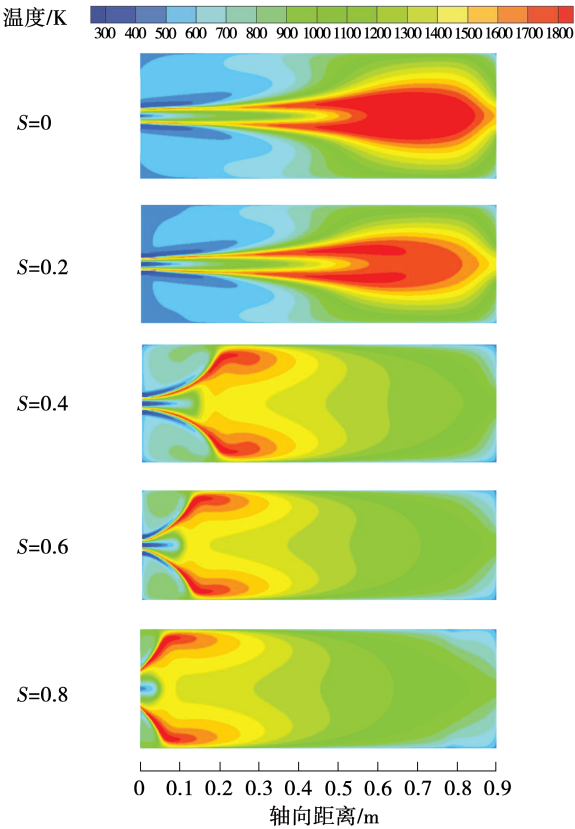


图 4 不同旋流数下燃烧室的温度分布云图

Fig. 4 Nephogram of temperature distribution of combustor with different swirl number

2.3 旋流数对 NO_x 生成的影响

从以上分析可以看出,旋流数对炉内流场和温度分布有重要影响,而这种影响对热力型为主导的 NO_x 也有重要意义。图 5 反映了旋流数与 NO_x 质量分数之间关系。可以看出,随着旋流数增大,NO_x 质量分数沿炉膛中轴线呈现下降趋势:相比于 $S = 0$, $S = 0.8$ 时 NO_x 生成量降低达 84. 71%,与文献 [18 – 19] 结论相似。其主要原因是,随着旋流数的增加,压力场和温度场的变化直接导致燃烧火焰锋面发生变化,局部高温区减小,炉内温度分布更加均匀,有效降低了热力型 NO_x 的生成。在 $S = 0.4$ 时,NO_x 生成量会急剧下降,达到 78. 12%;旋流数继续增加,会使得火焰更加紧凑,火焰长度缩短,但同时也会使得燃烧室径向模态稳定性恶化^[20] 且旋流抑制 NO_x 生成的经济性变差。

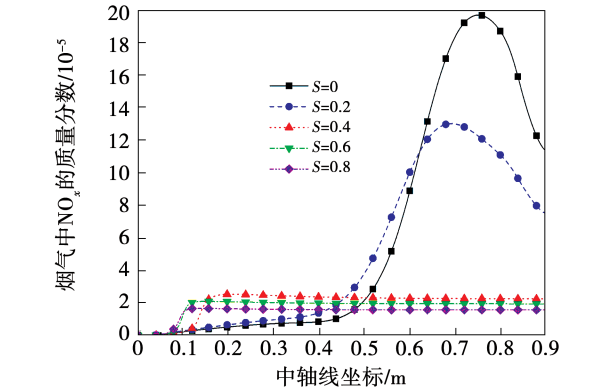


图 5 不同旋流数下沿炉膛轴线 NO_x 的分布

Fig. 5 NO_x distribution along the furnace axis under different swirl number

图 6 给出了不同旋流数下 NO_x 在炉内的分布。可以看出,NO_x 主要集中在火焰锋面高温附近,随着火焰锋面的变化,NO_x 质量分数分布也随之变化。研究表明,热力型 NO_x 对温度的变化比较敏感,温度高于 1 500 K 时,NO_x 呈现几何式增长^[21]。随着旋流数增加,当 $S > 0.2$ 时,火焰向炉膛两侧扩散(如图 4 所示),高温区尺寸明显减小,这导致炉内整体温度下降,进而有效降低 NO_x 的生成。这与图 5 的结果一致。

2.4 几何尺寸对 NO_x 生成的影响

上述研究中可知,高旋流数能够保证炉内的温度分布更加均匀,但也会影响烟气在炉内的停留时间,进而影响 NO_x 生成。为了进一步明确它们之间的关系,进一步探讨了空气入口孔隙半径 r 、燃空径向隔板间距 L 对烟气停留时间及 NO_x 质量分数的影响规律。为了保证火焰稳定性不受破坏, r 或 L 变化范围分别选取为 8 ~ 14 mm 和 6.5 ~ 14.5 mm。图 7 给出了旋流数 S 为 0.8 时温度分布随几何尺寸的变化,结果表明,随着 r 或 L 的减小,逐渐增大的空气入口流速强化燃料空气的混合,加快了反应进程,缩短了燃烧时间,同时局部高温区尺寸不断减小,导致反应在炉膛高温区停留减小,减少 NO_x 的生成。

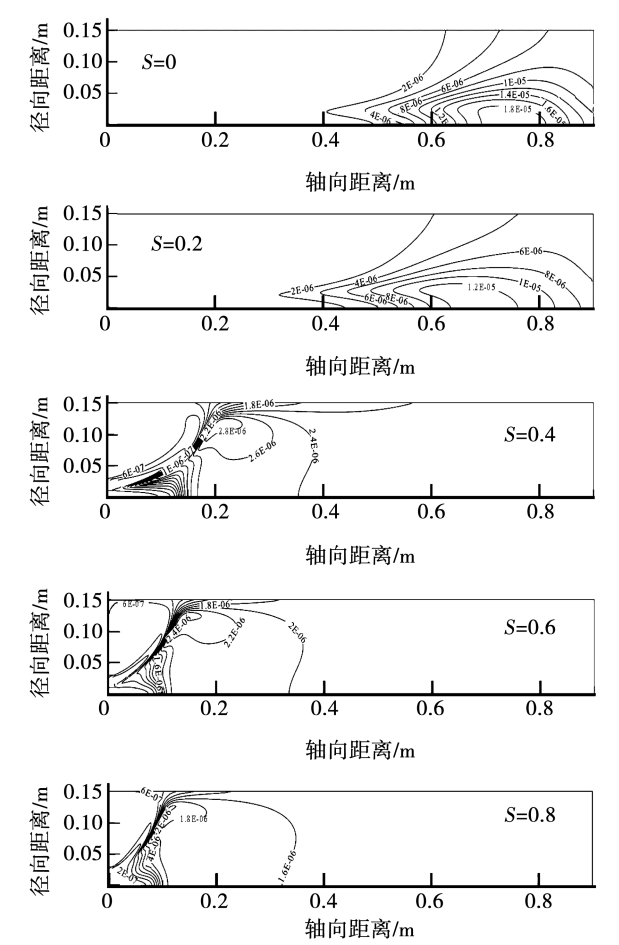


图 6 不同旋流数下燃烧室内的 NO_x 分布

Fig. 6 NO_x distribution in combustion chamber under different swirl number

图 8 显示了不同几何结构下 NO_x 沿炉膛轴线的平均分布云图。结果表明,随着 d 或 L 的减小, NO_x 质量分数沿轴线分布整体下降,且质量分数最高点前移。在 $d = 8 \text{ mm}$ 、 $L = 6.5 \text{ mm}$ 时, NO_x 生成量最低,相比于 $d = 14 \text{ mm}$ 时,可降低达 63.81%。但 d 和 L 并不能无限小,因为这会导致过大的空气流速使燃烧不稳定,甚至发生脱火。

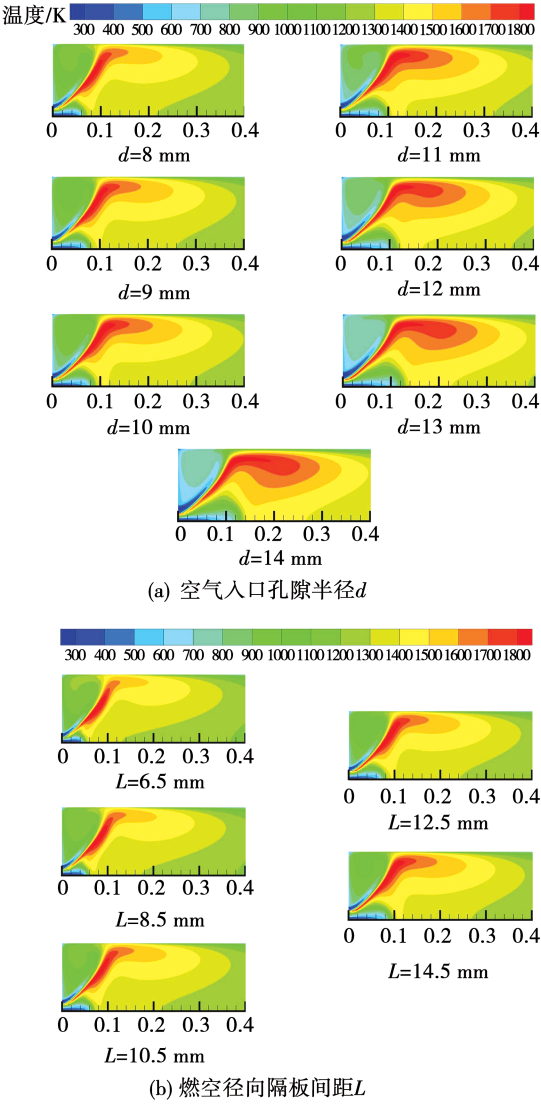


图 7 几何尺寸对燃烧室温度分布的影响 ($S = 0.8$)

Fig. 7 Influence of geometrical dimensions on the temperature distribution of the combustion chamber ($S = 0.8$)

几何尺寸 (d 和 L) 的变化,直接导致空气流速的改变,进而影响反应在炉内停留时间,对最终 NO_x 生成量产生重要影响。图 9 给出了反应停留时间与 NO_x 质量分数的关系。可以看出,停留时间

对 NO_x 的产生影响显著,随停留时间的增长, NO_x 会呈指数型增长,这与热力型 NO_x 生成机理相吻合^[22]。这进一步表明减小停留时间有利于 NO_x 的降低,最终在旋流数 ($S = 0.8$) 和几何尺寸 ($d = 8 \text{ mm}$ 、 $L = 6.5 \text{ mm}$) 的综合影响下降低 NO_x 产量达 94.47%,为低氮燃烧技术的进一步实现提供了良好的理论依据。

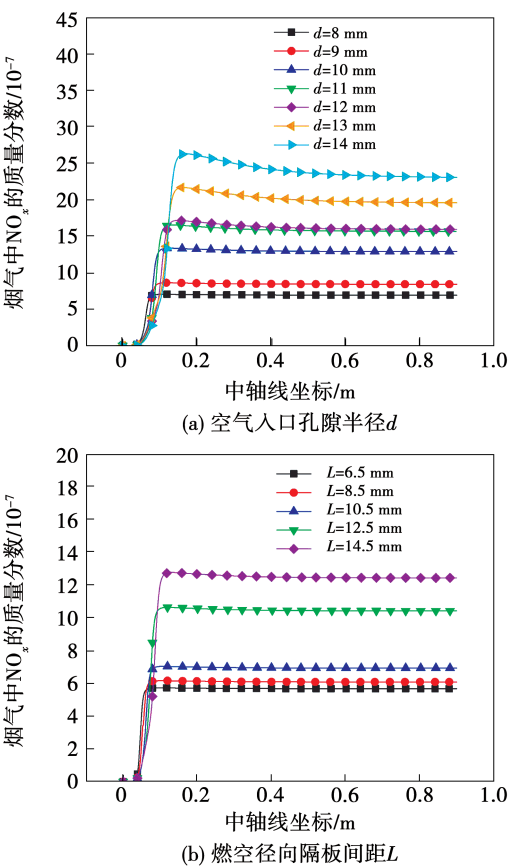
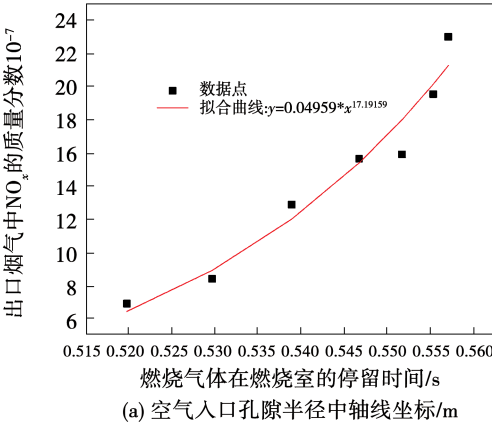


图 8 不同几何尺寸下沿炉膛轴线 NO_x 的分布
Fig. 8 NO_x distribution along the furnace axis under different geometrical dimensions



(a) 空气入口间隙中轴线坐标/m

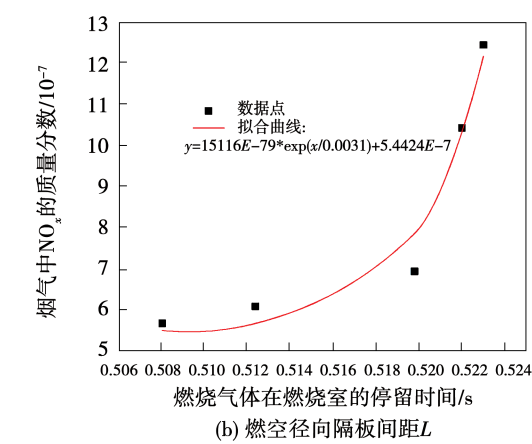


图 9 不同几何尺寸下燃烧气体在炉内停留时间对污染物的影响

Fig.9 Influence of residence time of combustion gas in furnace on pollutants under different geometrical dimensions

3 结 论

通过 CFD 模拟,研究了空气旋流数和几何因素对燃烧室内流动特性、温度场及污染物 NO_x 生成的影响,结论如下:

- (1) 空气旋流数显著影响甲烷燃烧流动特性及 NO_x 生成。旋流数增加,压力场的改变导致局部高温区减小,温度分布更加均匀,有效降低 NO_x 的生成。
- (2) NO_x 主要分布在火焰锋面附近的高温区域,降低局部高温可以有效降低热力型 NO_x 的生成。
- (3) 降低空气入口孔隙半径 d 和燃空径向隔板间距 L ,可以降低燃烧停留时间,使 NO_x 生成量减小。

参考文献:

[1] 宋少鹏. 基于烟气再循环的工业锅炉天然气低氮燃烧研究 [D]. 北京:清华大学热能工程系,2016 .
SONG Shao-peng. Study on low nitrogen combustion of natural gas in industrial boilers based on flue gas recirculation [D]. Beijing: Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, 2016.

[2] 霍爱玺,于海龙,王奕雅,等. 双旋流撞击式超低氮气体燃烧器低氮燃烧实验研究[J]. 热能动力工程,2021,36(1):80-86.

HUO Ai-xi, YU Hai-long, WANG Yi-ya, et al. Experimental research on low nitrogen combustion of dual swirl impingement ultra-low nitrogen gas burner [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(1):80-86.

[3] CHEN Y, LI X, SHI S, et al. Effects of intake swirl on the fuel/air mixing and combustion performance in a lateral swirl combustion system for direct injection diesel engines [J]. Fuel, 2021, 286:119376.

[4] ZARGAR O A. Improving combustion performance of swirling double-concentric jets flames with rich equivalence ratios [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2020, 20:100648.

[5] 汪 军,马其良,张振东. 工程燃烧学 [M]. 北京:中国电力出版社,2008.
WANG Jun, MA Qi-liang, ZHANG Zhen-dong. Engineering Combustion [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.

[6] PATEL V, SHAH R. Effect of hydrogen enrichment on combustion characteristics of methane swirling and non-swirling inverse diffusion flame [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44 (52):28316-28329.

[7] CHUANG S H, YANG C S, WU N J. Predictions of swirling flow in sudden-expansion dump combustor with flameholder side-inlet using two-step combustion model [J]. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 1999, 9(7):764-787.

[8] YILMAZ I. Effect of swirl number on combustion characteristics in a natural gas diffusion flame [J]. Journal of Energy Resources Technology, 2013, 135(4):042204-042211.

[9] SAQR K M, ALY H S, SIES M M, et al. Effect of free stream turbulence on NO_x and soot formation in turbulent diffusion CH₄-air flames [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2010, 37(6):611-617.

[10] RASHWAN, SHERIF S. The effect of swirl number and oxidizer composition on combustion characteristics of non-premixed methane flames [J]. Energy & Fuels, 2018, 32(2):2517-2526.

[11] WILKES N S, GUILBERT P W, SHEPHERD C M, et al. The application of Harwell-flow 3D to combustion models [J]. Atomic Energy Authority Report, Harwell, UK, Paper No. AERE - R13508, 1989.

[12] SKJØTH-RASMUSSEN M S, HOLM-CHRISTENSEN O, ØSTBERG M, et al. Post-processing of detailed chemical kinetic mechanisms on-to CFD simulations [J]. Computers & Chemical Engineering, 2004, 28 (11):2351-2361.

[13] SCHLUCKNER, CHRISTOPH, M. DEMUTH et al. Scrutiny of residual nitrogen content and different nozzle designs on NO_x formation during oxy-fuel combustion of natural gas [J]. Fuel, 2020,

277;118065.

[14] 陶文铨. 数值传热学[M]. (第二版). 西安:西安交通大学出版社,2001.

TAO Wen-quan. Numerical heat transfer[M]. (Second Edition). Xi'an:Xi'an Jiaotong University Press,2001.

[15] KAYS W M. Turbulent Prandtl number-where we are[J]. ASME J HeatTransfer,1994,116:284 – 295.

[16] 仇性启,毛 羽,时铭显,等. 燃气燃烧器空气旋流对回流区尺寸的影响[J]. 石油化工设备技术,1999(2):41 – 44.

QIU Xing-qi,MAO Yu,SHI Ming-xian,et al. The influence of air swirl of gas burner on the size of recirculation zone[J]. Petrochemical Equipment Technology,1999(2):41 – 44.

[17] KERAMIDA E P,LIAKOS H H,FOUNTI M A,et al. Radiative heat transfer in natural gas-fired furnaces[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2000,43(10):1801 – 1809.

[18] HOSSEINI A A,GHODRAT M,MOGHIMAN M,et al. Numerical study of inlet air swirl intensity effect of a methane-air diffusion flame on its combustion characteristics[J]. Case Studies in Thermal Engineering,2020,18:100610.

[19] ØYSTEIN S. Experimental and theoretical studies of a low NO_x swirl burner[D]. Trondheim:Norwegian University of Science and Technology,2004.

[20] 李家松. 旋流强度对 F 级燃气轮机燃烧稳定性影响分析[J]. 热力透平,2021,50(3):161 – 165,199.

LI Jia-song. Analysis of the influence of swirl intensity on the combustion stability of F-class gas turbine[J]. Thermal Turbine, 2021,50(3):161 – 165,199.

[21] 杨禹坤. 燃气锅炉烟气再循环低氮技术研究[D]. 郑州:郑州大学,2018.

YANG Yu-kun. Research on low nitrogen technology of gas boiler flue gas recirculation[D]. Zhengzhou:Zhengzhou University,2018.

[22] Turns Stephen R. 燃烧学导论:概念与应用[M]. (第二版). 北京:清华大学出版社,2009.

TURN S R. An introduction to combustion:concepts and applications[M]. (Second Edition). Beijing:Tsinghua University Press,2009.

(金圣迪 编辑)

(上接第 134 页)

[16] 陈镇超. 基于尿素还原剂的选择性非催化还原高效脱硝技术的实验研究[D]. 杭州:浙江大学,2012.

CHEN Zhen-chao. Experimental study on the efficient selective non-catalytic reduction based on urea reductant[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2012.

[17] LYON R K,HARDY J E. Discovery and development of the thermal DeNO_x process[J]. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals,1986,25(1):19 – 24.

[18] 沈伯雄,刘 亭,韩永富. 选择性非催化还原脱除氮氧化物的影响因素分析[J]. 中国电机工程学报,2008,28(23):53 – 59.

SHEN Bo-xiong,LIU Ting,HAN Yong-fu. Analysis on impact factors for removal of NO_x with selective non-catalytic reduction[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(23):53 – 59.

[19] 韩奎华. 先进再燃脱硝优化试验与机理研究[D]. 济南:山东大学,2007.

HAN Kui-hua. Optimizing experimental and mechanism study on advanced reburning for NO_x reduction[D]. Jinan:Shandong University,2007.

[20] ZAMANSKY V M,LISSIANSKI V V,MALY P M,et al. Reactions of sodium species in the promoted SNCR process[J]. Combustion and Flame,1999,117(4):821 – 831.

[21] DAOOD S S,YELLAND T S,NIMMO W. Selective non-catalytic reduction-Fe-based additive hybrid technology[J]. Fuel,2017,208:353 – 362.

(金圣迪 编辑)