

几何结构影响高温空气燃烧特性的数值分析

杨艳超, 苏亚欣

(东华大学 环境科学与工程学院, 上海 201620)

摘 要: 通过改变燃料喷嘴周围空气喷嘴分布夹角, 采用数值计算的方法研究了高温空气燃烧特性的变化, 包括燃烧温度场、速度场和 NO_x 的生成和出口排放情况。模拟结果说明, 减小空气分布夹角可以降低燃烧区最高温度和平均温度, 扩大燃烧室内低氧范围, 有效抑制热力型 NO_x 的生成和排放。所采用的计算模型和计算方法可以较好地模拟高温空气燃烧过程, 计算结果可信。

关键词: 工业炉; 高温空气燃烧; 数值模拟; NO_x

中图分类号: TF061.26 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6988(2009)01-0005-05

Numerical Analysis of High Temperature Air Combustion with Different Geometric Structure

YANG Yan-chao, SU Ya-xin

(College of Environment Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: By changing the angle between the central lines of air nozzles and fuel nozzle of the combustion facility, the variety of characteristics of high temperature combustion, including temperature field, velocity field, NO_x formation and concentration of NO_x at the outlet are gained using numerical simulation. The results indicate that by reducing the angle, the maximum temperature and average temperature in the combustion area can be reduced. It can also make the low O_2 area enlarged and efficiently suppress the formation and emission of NO_x . The numerical model and method can simulate well high temperature air combustion process, and the calculated results are convinced.

Key words: industrial furnace; high temperature air combustion; numerical simulation; NO_x

高温空气燃烧技术 (high temperature air combustion) 完全突破了几百年来人们对燃烧的传统认识, 通过极限回收烟气余热 (显热) 并高效预热燃烧空气, 实现了超高温 ($>1\,000\text{ }^\circ\text{C}$) 和超低氧浓度 (2%~5%) 条件下的燃烧。因此, 具有大幅度节能和大幅度降低烟气中 NO_x 排放的双重优越性。有效的组织炉内的空气射流和气体燃料射流的流动, 使燃烧烟气的回流混合稀释燃烧空气中的氧浓度, 并延缓扩散燃烧过程是实现高温低氧燃烧的关键。

蓄热烧嘴的结构和性能, 空燃比的控制, 炉膛结构等因素均影响低氧燃烧的控制。在组织炉内气流时, 燃气和助燃空气的流量、送入方式、炉膛的几何

参数等至关重要。朱彤等^[1]通过两种结构烧嘴的热态燃烧实验对比, 得出了烧嘴结构、燃气射流速度和过量空气系数与高温空气燃烧过程中氮氧化物排放的关系。另外, 朱尚龙等^[2]对不同几何结构的烧嘴进行了优化实验, 得出了具有最低 NO_x 排放量的烧嘴结构。

数值模拟研究已经成为深入研究高温空气燃烧过程的重要方法。W Yang 等^[3,4]用数值模拟方法研究了燃烧室、射流结构以及燃烧条件等对 NO_x 生成的影响, 得出了很多有参考价值的结果。本文借助于现代燃烧理论、湍流理论以及污染物生成理论研究的最新成果, 运用数值模拟方法, 对高温空气燃烧过程和 NO_x 排放进行了数值模拟, 研究和探索不同空气分布夹角条件下的燃烧特性变化的趋势和 NO_x 排放状况。

收稿日期 2008-08-18

作者简介 杨艳超 (1983—), 男, 硕士研究生。从事高温空气燃烧方面的研究工作。

1 数值模拟

1.1 流动控制方程

所采用的质量、动量和能量守恒方程如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \otimes \vec{V} - \mu \nabla \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{V})^T] \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho h_t)}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\rho \vec{V} h_t - \left(\frac{\lambda}{c_p} \right) \nabla h_t \right] = \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (3)$$

燃烧室内采用标准的 $k-\varepsilon$ 湍流模型求解湍流流动。其中湍流动能 k 和湍流耗散率 ε 的运输方程为:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - G_h - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_h) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (5)$$

式中: G_k 是平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项; G_h 是浮力引起的湍动能 k 的产生项; Y_M 代表可压湍流中脉动扩张的贡献; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数; σ_k 和 σ_ε 是与湍动能和耗散率对应的普朗特数; S_k 和 S_ε 是用户定义的源项。模型常数的取值为: $C_{1\varepsilon}=1.44$, $C_{2\varepsilon}=1.92$, $C_{3\varepsilon}=0.09$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$ 。

1.2 燃烧模型

根据燃料和氧化剂分别供入的特点, 可认为燃烧按照扩散燃烧方式进行, 因此采用扩散燃烧模型, 即混合分数的 PDF 模型。标量 ϕ (温度、密度和化学组分的质量分数) 由燃料和氧化剂的混合分数 f 的函数来确定, 并假定混合分数的脉动可以用 β 形式的概率密度函数来描述。

平均混合分数 $\bar{f}$ 及其均方根 $\bar{f}^2$ 的守恒方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{f}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \bar{f}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_f} \nabla \bar{f} \right) + S_m + S_{\text{user}} \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{f}^2) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \bar{f}^2) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_f} \nabla \bar{f}^2 \right) + C_d \mu_t (\nabla^2 \bar{f}) - C_d \rho \frac{\varepsilon}{k} \bar{f}^2 + S_{\text{user}} \quad (7)$$

式中: $\bar{f}' = f - \bar{f}$; 常数 σ_f 、 C_g 和 C_d 分别取 0.85、2.86 和 2.0; S_{user} 为用户定义源项。

1.3 辐射传热模型

由离散坐标 (discrete ordinates) 辐射模型求解

有限数量离散立体角的辐射强度。在该模型中, 辐射输运方程的个数与空间坐标系中的方向矢量个数相同。其数学表达式为:

$$\frac{d(I_{si})}{d\chi_i} = -(a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) + a n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' \quad (8)$$

1.4 NO_x 生成模型

燃烧过程中生成的 NO_x 有 3 个来源: 热力 NO_x、燃料 NO_x 和快速 NO_x [5]。由于本文所用燃料中不含氮, 故这里不考虑燃料型 NO_x。NO_x 是燃烧产物中各氮氧化物的总称, 其中主要的氮氧化物为 NO 和 NO₂, 而 NO 占 90% 左右。因此, 对于热力型和快速型 NO_x, 只需求解关于 NO 质量分数的传输方程, 即:

$$\frac{\partial \rho m_{\text{NO}}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i m_{\text{NO}}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_s \frac{\partial m_{\text{NO}}}{\partial x_i} \right) + R_{\text{NO}} \quad (9)$$

式中, 源项 R_{NO} 为热力型与快速型 NO 之和:

$$R_{\text{NO}} = R_{\text{Thermal, NO}} + R_{\text{Prompt, NO}} = M_{\text{NO}} \frac{d[\text{NO}]_{\text{Thermal}} + d[\text{NO}]_{\text{Prompt}}}{dt} \quad (10)$$

式中, M_{NO} 表示 NO 的分子量。

1.5 计算条件

本文的三维数值模拟对象取自文献[2], 燃烧室内部尺寸为 800 mm × 800 mm × 1 400 mm。烧嘴布置于炉膛底部中心, 烧嘴结构如图 1 所示, 燃气喷口位于中心, 两个空气喷口分布其周围, 燃料射流和空气射流平行喷入燃烧室, 燃气喷口与空气喷口中心距为 70 mm。两个空气喷口分别与燃料喷口的中心线之间的夹角 (空气分布夹角) β , 分别设定为 180°、120°、60°, 用以观察不同条件下高温空气燃烧特性的变化趋势。炉膛顶部有烟气排放口。燃烧室周围壁面铺有水冷壁, 其余壁面均为绝热壁面。

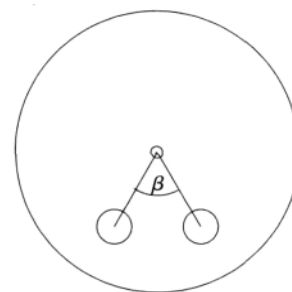


图1 烧嘴结构图 (中心为燃料喷口, 下面为两个空气喷口)

燃料为甲烷与氮气的混合气体, 通过燃气喷嘴匀速喷入燃烧室内。其中甲烷的体积浓度为 35%, 流量为 10 m³/h, 空气过量系数为 1.1, 氧气浓度 12%

(体积百分数), 预热温度 1 273 K。保持空气射流速度不变, 改变燃气喷口直径, 得到不同的空燃速度比条件下的计算结果, 计算工况如表 1 所示。进口边界采用速度边界条件, 给定空气和燃料射流速度。出口采用压力出口边界条件, 出口压力设为 $P=1.013 \times 10^5$ Pa。燃烧室周围壁面的散热条件为恒定热流, 其余壁面采用绝热边界条件^[6]。计算采用数值计算软件 FLUENT 6.3。

表 1 计算工况

空燃速度比	空气分布夹角 β	空气喷口直径/mm	空气速度 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	燃气喷口直径/mm	燃气速度 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
0.6	180°	38	33.26	8	55.2
	120°	38	33.26	8	55.2
	60°	38	33.26	8	55.2
0.93	180°	38	33.26	10	35.4
	120°	38	33.26	10	35.4
	60°	38	33.26	10	35.4
1.34	180°	38	33.26	12	24.6
	120°	38	33.26	12	24.6
	60°	38	33.26	12	24.6

2 计算结果与分析

空气分布夹角 β 定义为两个空气喷口分别与燃料喷口中心线之间的夹角。在高温空气燃烧过程中, 通过改变燃烧器空气分布夹角的大小可以在燃烧室中形成不同的流场, 从而改变可燃物和助燃空气的混合过程, 形成燃烧室内高温低氧的燃烧过程, 最终实现低 NO_x 燃烧。图 2 表示 3 种不同空气分布夹角 β 的喷嘴在空燃速度比为 0.6 时, 燃烧室中心平面的速度矢量图。由图所示, 3 种不同工况下, 燃烧室内都存在较大的回流, 并且随着空气分布夹角 β 的减小, 燃烧室内回流区域逐渐扩大, 回流范围由燃烧室的后半段扩大到整个燃烧室空间。回流范围的扩大, 使空气射流和燃料射流不断被高温烟气稀释, 降低了燃烧室内可燃物与氧气的浓度, 燃烧过程变得缓慢, 燃烧区域扩大, 迫使燃料在较大的范围内释放热量, 减少了燃烧室内局部热点, 使得燃烧室内温度分布更加均匀, 从而有效抑制了热力型 NO_x 的生成。另外, 高温烟气大量回流, 增加了烟气在燃烧室内的停留时间, 对燃烧室内低氧环境的形成和稳定燃烧起到了积极作用。

温度场的特点, 主要从两个方面来考虑: 一是温度梯度; 二是最高火焰温度。从满足工业应用的角度来看, 很多工况不需要梯度过分集中的温度场和过高的火焰温度。均匀的火焰温度一直以来都是人

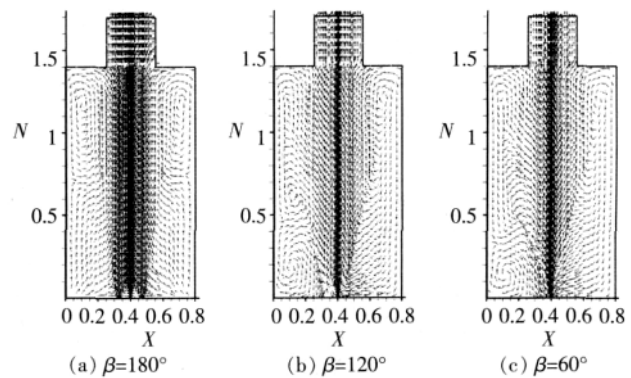


图 2 3 种不同空气分布夹角的速度矢量图

们追求的目标。从控制污染物的生成, 特别是 NO_x 生成的角度来看, 最高火焰温度在一定程度上代表了燃烧过程中污染物排放的水平。火焰温度越高, 越不利于控制 NO_x 的生成, 因为随着最高火焰温度的升高, 热力型 NO_x 的生成会加剧。所以工业应用中理想的温度场应该是在满足工艺及节能要求的前提下, 温度梯度和最高火焰温度要尽可能的低。

图 3 给出了不同空气分布夹角 β , 空燃速度比为 0.6 的条件下, 燃烧室中心平面的温度分布云图。这些图直观的反应了空气分布夹角 β 不同时温度场的分布特征。由图所示, 所有工况下燃烧室内温度分布比较均匀, 温度梯度较小, 并且随着空气分布夹角的减少, 燃烧温度分布更加均匀。图 4 描述了 3 种空燃速度比条件下, 燃烧火焰最高温度和燃烧室内平均温度随空气分布夹角 β 的变化情况。可以看出, 随着空气分布夹角 β 的减小, 火焰最高温度和燃烧室内平均温度不断下降, 且两者的温差保持在 100 K 左右。这是由于在空气分布夹角 β 较小的情况下, 燃烧室内高温烟气的回流较大, 并且烟气在燃烧室内停留时间较长, 有效抑制了助燃空气和燃料的混合, 使得燃烧几乎充满整个炉内空间, 燃料在燃烧室内大范围内释放化学热, 使得燃烧温度梯度减小, 火焰最高温度下降。

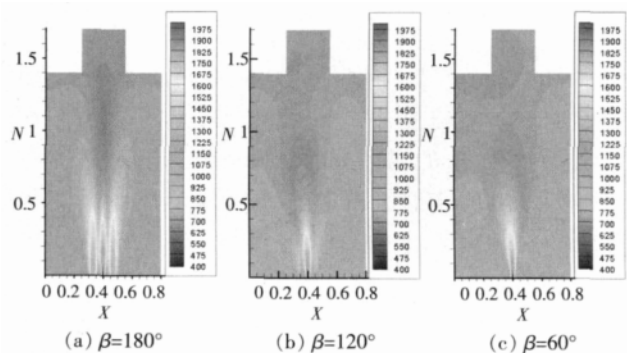


图 3 不同空气分布夹角的温度分布图

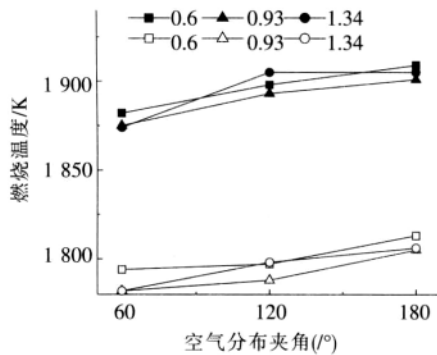


图4 燃烧温度随空气分布夹角 β 的变化图
(实心表示火焰最高温度,空心表示燃烧室内平均温度)

燃烧室内大范围低氧区域的获得是实现高温低氧燃烧的关键。图5表示空燃速度比为0.6,3种不同空气分布夹角 β 下,氧气浓度在燃烧室中心平面的分布情况。由图所示,由于燃烧室内大量高温烟气的掺混,助燃空气中氧气浓度在离开喷口很短距离内迅速降低,在燃烧室的大部分区域内,氧气浓度都在2%以下,并且随着空气分布夹角 β 的减小,燃烧室内低氧范围不断扩大。燃烧室内较大低氧范围的存在,使燃料在贫氧环境下燃烧,燃烧过程属于一种扩散控制式反应,过量空气系数偏离化学当量比,燃烧放热较小,将不存在传统燃烧过程中出现的局部高温高氧区,使热力型 NO_x 的生成得到了有效抑制,燃烧室内温度分布更加均匀。

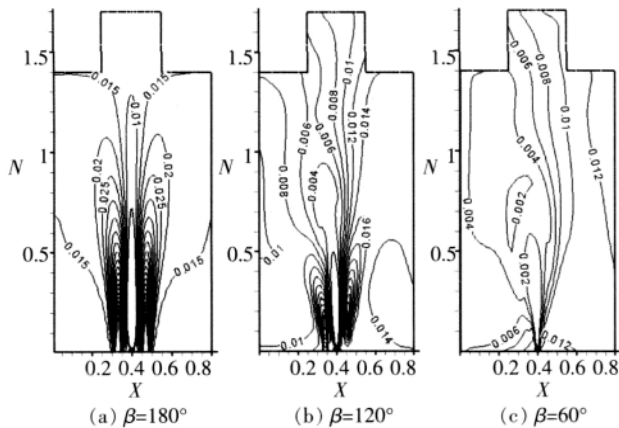


图5 氧气浓度的分布图

图6表示空燃速度比为0.6,不同 β 条件下,燃烧室内 NO_x 浓度在中心平面的分布情况。由图所示,与相应工况的温度分布云图(图3)相比,高 NO_x 区域并没有跟高温区域重叠,燃烧室内 NO_x 的最大值出现在喷嘴附近,这是由于燃烧室内有限烟气的回流导致的^[7]。另外,热力型 NO_x 的生成速度主要与燃烧过程中的火焰最高温度、炉内气氛中氮、氧的浓度及高温烟气在炉内的停留时间有关。由燃烧室温

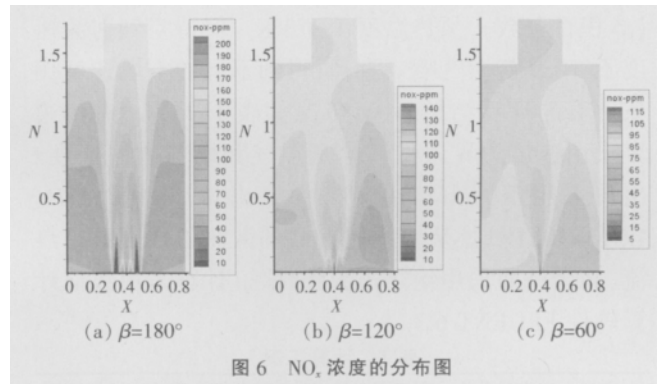


图6 NO_x 浓度的分布图

度分布云图和氧气浓度分布情况可知,在燃烧室高温区域内,氧气浓度较低;而在燃烧室高氧区域,燃烧温度较低,这都在一定程度上抑制了热力型 NO_x 的生成。图7表示在3种空燃速度比情况下,燃烧室内 NO_x 最大值和燃烧室出口 NO_x 值随空气分布夹角的变化情况。由图所示,燃烧室内 NO_x 最大值和燃烧室出口 NO_x 值随 β 的减少不断降低,表明减少燃烧器空气分布夹角可以有效降低 NO_x 的生成和排放。

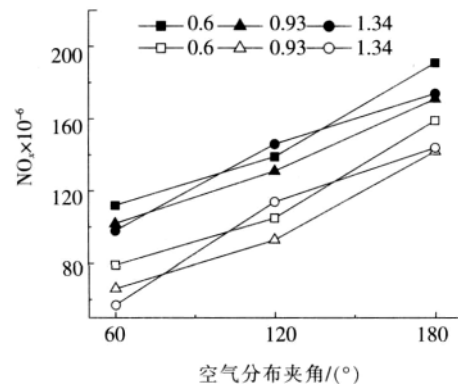


图7 燃烧室内 NO_x 最大值和燃烧室出口 NO_x 值随燃烧器空气分布夹角 β 的变化图(实心表示最大值,空心表示出口)

3 结论

本文将混合分数的PDF模型和热力型 NO_x 生成模型与湍流流动的 $k-\varepsilon$ 方程相结合,数值模拟了具有不同空气分布夹角的3种结构喷嘴,得出以下结论:

- (1) 采用的计算模型和计算方法能较好地数值模拟高温空气燃烧条件下的燃烧流场,结果可信。
- (2) 计算结果验证了高温低氧燃烧的特性,即燃烧火焰无明显的前峰,体积几乎充满整个燃烧空间,温度分布均匀,平均温差较小,氧气浓度较低。
- (3) 随着空气分布夹角的减小,燃烧室内回流区域和低氧范围扩大,燃烧区最高温度和平均温度

降低, NO_x 的排放量大幅降低。

参考文献:

- [1] 朱 彤,朱尚龙,曹甄俊,等.高温空气燃烧 NO_x 排放特性的实验研究[J].工程热物理学报,2006,27(5):894-896.
- [2] 朱尚龙,朱 彤.高温空气烧嘴参数对 NO_x 排放影响的试验研究[J].动力工程,2007,27(2):287-291.
- [3] YANG W, BLASIAK W.Mathematical modelling of NO emissions from high-temperature air combustion with nitrous oxide mechanism[J]. Fuel Processing Technology, 2005, 86(9):943-957.
- [4] YANG W, Blasiak W.Numerical simulation of properties of a LPG flame with high-temperature air [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2005,44:973-985.
- [5] 苏亚欣,毛玉如,徐 璋.燃煤氮氧化物排放控制技术[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [6] 李 伟,析海鹰,李宇红.几何结构与高温空气燃烧特性的关系[J].工业加热,2002(6):14-16.
- [7] 饶文涛,朱 彤.高温空气燃烧 NO_x 生成规律研究[J].工业炉,2003,25(4):1-4.

《CIMS 论文的天地》

本站免费向大家提供论文全文,本站论文除了特别说明的以外都是从作者手中征集得到的。

欢迎您参加我站提供的邮件列表

希网提供的列表 分类首页/科学技术/另类科学

<http://www.cn99.com/cgi-bin/catalog?viewcat=58>

为您提供《CIMS 论文的天地》更新通知,以及有关的论文和学术信息,每月至少发送一次。