

天然气高温空气燃烧特性数值研究

李星, 贾力, 张田田, 杨立新

(北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京市 海淀区 100044)

Numerical Study on High Temperature Air Combustion Characteristics of Natural Gas

LI Xing, JIA Li, ZHANG Tian-tian, YANG Li-xin

(School of Mechanical and Electronic Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Haidian District, Beijing 100044, China)

ABSTRACT: The combustion characteristics of natural gas with high-temperature air combustion technology in a U-type combustion chamber were studied numerically. The eddy dissipation combustion model (EDM) coupled with Speziale, Sarkar and Gatski Reynolds stress model (RSM) was applied to model turbulence combustion. The effect of radiation heat transfer was considered. The thermal and prompt NO formation models were employed to calculate NO emissions. Results of numerical simulation were in line with the corresponding experimental data. The effects of some key parameters such as combustion air temperature, excessive air ratio and oxygen concentration on combustion characteristics were systematic discussed. The gas temperature, average wall heat flux and NO increase with the combustion air temperature increasing. The maximum gas temperature and NO emissions increase with the combustion excessive air ratio increasing, the average gas temperature and heat flux increase at first and then decrease, and the maximum heat flux can be obtained when the excessive air ratio is 1.2. The uniformity of gas and average wall heat flux increase with the oxygen concentration of combustion air decreasing, and NO generation decreases significantly.

KEY WORDS: high temperature air combustion; natural gas; NO emission; numerical simulation

摘要: 运用数值方法对 U 型燃烧室内天然气高温空气燃烧进行研究, 其中湍流流动采用雷诺应力模型, 燃烧采用涡团耗散模型, 耦合辐射传热模型; NO 生成考虑了热力型 NO 生成机制和快速反应 NO 生成机制。其数值计算结果与相应实验结果吻合较好。分析了助燃空气温度、过量空气系数、助燃空气中氧浓度对燃烧特性的影响。研究表明: 随着助

燃空气温度增加, 燃烧室气体温度升高, 壁面平均热流和出口 NO 浓度增大; 随着过量空气系数的增加, 燃烧的最高温度和 NO 排放增加, 气体平均温度及热流密度先增加后减小, 过量空气系数为 1.2 时温度均匀性好, 传热量最大; 随助燃空气中氧浓度减小燃烧室温度均匀性增强, 壁面平均热流增大, NO 生成量显著减小。

关键词: 高温空气燃烧; 天然气; NO 排放; 数值模拟

0 引言

高效环保利用有限的能源是能源动力领域重要研究内容之一。高温空气燃烧(high temperature air combustion, HTAC)是一种新型的稳定燃烧技术^[1-3], 该技术利用高效陶瓷蓄热体充分吸收燃烧后烟气余热, 降低排烟温度, 并利用烟气放出热量加热助燃空气。燃烧过程中燃料由喷嘴喷入高温预热空气, 助燃空气温度高于燃料燃点, 燃料在高温预热空气中进行扩散燃烧。这种燃烧较普通燃烧稳定且混合充分, 燃烧温度场均匀; 燃烧过程中高温空气与燃烧室中烟气的混合有效的降低了燃烧区域氧浓度, 从而很好的抑制了燃烧过程中NO的生成, 降低NO排放。高温空气燃烧技术, 可使能源得到高效利用, 减少温室气体CO₂的排放, 并有效地降低污染物NO的排放。高温空气燃烧技术可用于气体燃料、液体燃料及固体燃料的燃烧^[4-14], 在大型冶金炉和加热设备上得到应用, 并有可能成为新一代动力发电设备锅炉的技术选择。国内外研究者对其开展了相关研究^[1-15]。

Gupta 等^[7]在由日本工业炉协会(Nippon Furnace Kogyo Kaisha Ltd, NFK)提供的U型炉上进行了大量实验研究。该实验炉中燃料喷嘴与空气流动入口垂直, 高温空气入口无旋流。实验研究了丙

基金项目: 国家 863 高技术基金项目(2006AA05Z228); 教育部重点项目(107113)。

Project Supported by the National High Technology Research and Development of China(863 Program)(2006AA05Z228).

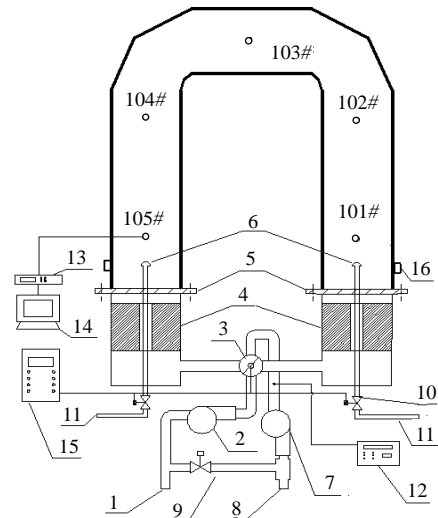
烷及乙炔高温空气燃烧火焰特性及NO排放,分析了高温空气燃烧热力学特性、空气预热温度对于燃烧温度场及NO生成的影响。Yang等^[8,11]在一台采用液化石油气(liquified propane gas, LPG)为燃料的矩形加热炉上对高温空气燃烧进行了数值和实验研究,得到了燃烧室内温度和组分分布及氧含量对于燃烧的影响。Galletti等^[12]对采用甲烷为燃料的开孔套管式高温空气燃烧器进行了数值研究,表明采用开孔套管可使烟气回流,实现烟气再循环以降低燃烧室氧浓度,提高燃烧室温度均匀性,燃烧产生的NO明显低于常规燃烧NO排放。Wu等^[6]在矩形工业炉上进行了重油为燃料的高温空气燃烧实验,证明以重油为燃料的高温空气燃烧显示了良好的燃烧效果。

近年来,天然气锅炉在节能环保方面的优势使其得到广泛应用。将高温空气燃烧技术应用于天然气锅炉,在节能环保上具有重大意义。本文采用数值模拟的方法,对配有空气旋流装置^[16-17]的U型炉内天然气高温空气燃烧这一复杂物理化学过程进行数值模拟,计算得到U型燃烧室温度分布、热量传递及NO生成,并探讨了助燃空气温度、过量空气系数及助燃空气中氧浓度对燃烧特性的影响。

1 实验系统及物理模型

天然气高温空气燃烧的燃烧室结构为U型,由直径200 mm、长3 000 mm的无缝钢管焊接而成,在燃烧室的两端分别布置有高效陶瓷蓄热体,在蓄热体前端布置有空气旋流板及燃烧器,其助燃空气流动方向与天然气流动方向一致。采用空气旋流装置可以稳定扩散火焰,并使烟气回流与入口附近高温助燃空气混合,降低燃烧区域内氧浓度,抑制NO生成^[16-17]。高温空气燃烧为蓄热式燃烧,一般都为2个燃烧器对称布置,采用U型燃烧室可减小整个装置的尺寸,提高热交换强度,同时便于燃烧器与风机布置。

整个实验系统及空气旋流板结构见图1、2。实验过程中通过电控装置控制气动四通换向阀,周期性切换助燃空气及天然气流动方向实现高温空气燃烧。在燃烧室的特征部位设置热电偶测温管,测量燃烧室内温度,在尾气排放处设置有采样点由烟气分析仪分析燃烧产物,在U型燃烧室的侧壁设有观火孔。实验研究中采用热电偶为镍铬-镍硅热电偶,温度采集使用HP34 900 A数字电压表和



1—空气进口; 2—鼓风机; 3—四通换向阀; 4—陶瓷蓄热体; 5—空气旋流板; 6—天然气烧嘴; 7—引风机; 8—烟气出口; 9—烟气回流调节阀; 10—天然气开关阀; 11—天然气; 12—烟气分析仪; 13—温度数据采集器; 14—电脑; 15—电控系统; 16—火焰观测孔; 101#~105#—热电偶。

图1 实验系统图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental test facility

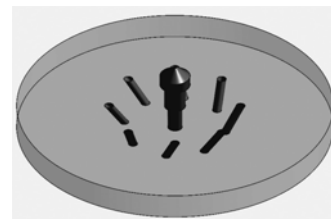


图2 空气旋流板

Fig. 2 Air swirling plane

HP34 901 A的20通路多路数字采集板,采用EX2000烟气成份分析仪对燃烧产生的烟气进行实时检测。

U型燃烧室高温空气燃烧过程由2个半周期组成,在上半周期常温空气流过陶瓷蓄热体吸收上半周期燃烧后烟气放出的热量,温度升高经旋流板中的小孔进入燃烧室,在燃烧室形成贴壁流动的旋流,天然气由喷嘴喷入燃烧室,在高温空气中进行扩散燃烧,通过燃烧室壁面与外界换热。燃烧后烟气流过陶瓷蜂窝体,将剩余显热释放到陶瓷蓄热体后,通过U型燃烧室另一端出口由烟道排出。经过半个换向周期后,在四通换向阀的作用下,高温空气和天然气分别由U型管另一侧进入燃烧室,进行燃烧反应,上半周期的入口成为下半周期的出口。利用高效陶瓷蓄热体的良好蓄热功能和四通换向阀的共同作用反复切换流动方向,使燃烧产物余热能得到最大利用,并形成高温助燃空气,实现高温空气燃烧。本实验研究额定工况为:标准状态

天然气流量 $1.8 \text{ m}^3/\text{h}$ ，空气流量 $23 \text{ m}^3/\text{h}$ ，额定燃烧功率 24 kW 。实验中通过调节换向时间可改变助燃空气进入燃烧室温度；调节风机阀门开度可改变进入燃烧室空气流量；通过烟气回流调节阀可改变进入燃烧室助燃空气氧浓度。

本文考察燃烧室内高温空气燃烧及燃烧后气体与燃烧室外界的换热过程。数值模拟计算的物理模型与实验模型一致，物理模型如图 3 所示，在 U 型燃烧室的左右两端分别有 8 个高温空气进口，中间为天然气进口。



图 3 燃烧室几何模型

Fig. 3 Physical model of natural gas high temperature air combustion

2 数学模型

2.1 湍流模型

湍流燃烧计算中湍流流动的模拟是数值计算的关键，以前学者研究的燃烧装置结构多为矩形结构^[8-11]或直管结构^[12]，且没有采用空气旋流装置，在数值研究中^[8-12]采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型。本研究中燃烧室几何结构复杂，通过空气旋流板的助燃空气在燃烧室内形成强旋流并在局部区域存在二次流。本文采用雷诺应力 (SSG) 湍流模型^[18-20]来计算燃烧室内气体流动。

雷诺应力输运方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho u_i u_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\overline{\rho U_k u_i u_j}) = D_{ij} + \varphi_{ij} + G_{ij} - \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

式(1)左端 2 项分别为雷诺应力的时间变化率和对流项， D_{ij} 、 φ_{ij} 、 G_{ij} 和 ε_{ij} 分别为雷诺应力的扩散项、压力项、产生项、和耗散项。Spezial、Sarker和Gatski在 φ_{ij} 的模拟中引入了雷诺应力各向异性张量 \mathbf{a}_{ij} 的平方项^[18,20]：

$$\varphi_{ij} = -C_1 \varepsilon \mathbf{a}_{ij} + C_2 \varepsilon (\mathbf{a}_{ik} \mathbf{a}_{kj} - \frac{1}{3} \mathbf{a}_{kl} \mathbf{a}_{kl} \delta_{ij}) + C_3 k (S_{ij} - \frac{1}{3} \langle S \rangle \delta_{ij}) + C_4 k (\mathbf{a}_{ik} S_{jk} - \frac{2}{3} \mathbf{a}_{kl} S_{kl} \delta_{ij}) + C_5 k (\mathbf{a}_{ik} \omega_{jk} + \mathbf{a}_{jk} \omega_{ik}) \quad (2)$$

该模型可以很好的描述 U 型燃烧室内复杂的旋流及二次流动，获得合理的流场。

2.2 湍流燃烧模型

高温空气燃烧过程是扩散燃烧，本文采用由 Magnussen 提出的涡团耗散模型^[20-21]。该模型不仅考虑了燃烧过程中的湍流混合还考虑了燃烧过程中燃料、氧化剂和产物浓度对于燃烧反应的影响，该模型的表达式为

$$R_{fu} = -\overline{\rho \varepsilon} / k \cdot \min[\overline{Am}_{fu}, \overline{Am}_{ox} / S, \overline{Bm}_{pr} / (1 + S)] \quad (3)$$

式中： $A=4$ ； $B=0.5$ ； S 为化学计量比。该模型既能用于描述预混火焰，也能用于描述扩散火焰。

2.3 辐射模型

高温空气燃烧过程中能量的传递，包括工质与燃烧室壁面的对流换热和工质与壁面的辐射换热。燃烧过程的基本能量方程为

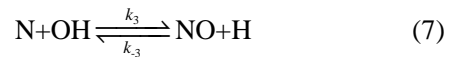
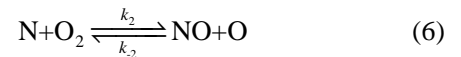
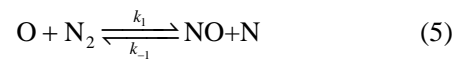
$$\nabla \cdot (\rho U H) = \nabla \cdot (\Gamma_T \nabla T) + S_Q \quad (4)$$

式中： $\nabla \cdot (\rho U H)$ 为焓的流动项； $\nabla \cdot (\Gamma_T \nabla T)$ 为焓的扩散项； S_Q 为源项，包括化学反应放热率和辐射换热放热率。在能量方程中，辐射项被处理为源项。辐射源项的确定涉及到整个波长在 4π 立体角上的积分，对于整个有限体积单元来说是非常复杂的，为简化计算可采用不同辐射传热模型，本文采用离散坐标法^[20]进行计算研究，其中烟气辐射特性采用灰气体加权模型^[22]。

2.4 NO 生成模型

天然气燃烧过程中生成的 NO_x 主要是 NO 。在本文研究中考虑热力型 NO 和快速型 NO 2 种 NO 生成机制^[23-24]。

热力型 NO 的生成是由于燃烧过程中空气中氮在高温下氧化生成 NO ，其过程可由扩展 Zeldovich 机制描述：



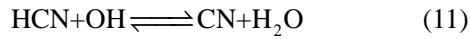
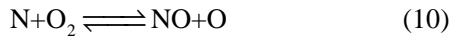
根据扩展 Zeldovich 机制助燃空气中氮在高温下氧化生成 NO ，其 NO 生成率可按式(8)计算：

$$\frac{d[\text{NO}]}{dx} = 2k_1[\text{O}][\text{N}_2] \cdot \frac{1 - [\text{NO}]^2 / k[\text{O}_2][\text{N}_2]}{1 + k_{-1}[\text{NO}] / (k_2[\text{O}_2] + k_3[\text{OH}])} \quad (8)$$

式中： $k=(k_1/k_{-1})/(k_2/k_{-2})$ 为反应 $\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{NO}$ 的平衡常数。

快速型 NO 的生成是由于燃烧时燃料中碳氢化

合物分解生成CH和C等原子团与空气中N₂经过一系列化学反应而得到的,其主要反应如下:



研究表明,NO的生成率受控于CH的反应,可以认为快速NO的生成率可按式(13)计算:

$$d[\text{NO}]_{\text{pr}}/dt = d[\text{HCN}]/dt = k_4[\text{CH}][\text{N}_2] \quad (13)$$

2.5 网格与计算求解

数值计算中守恒方程采用控制容积法,对流项的离散采用高分辨率格式。离散方程组压力和速度耦合采用SIMPLER算法求解,代数方程求解采用多重网格加速不完全LU分解,对于收敛残差的设置,取均方根残差=10⁻⁴。

计算几何模型较为复杂,计算域划分为非结构化四面体网格,近壁处区域网格进行了加密,计算网格如图4所示,图5为空气入口及燃料入口网格加密图。



图4 数值计算网格

Fig. 4 Grids of numerical simulation

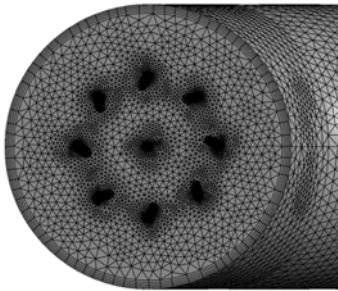


图5 空气入口及燃料入口网格加密图

Fig. 5 Advanced mesh for air and fuel inlets

高温空气和天然气的入口给定速度、温度和组分条件,出口给定压条件,燃烧过程的主要散热是通过燃烧室的外壁面,数值研究中燃烧室边界采用第3类边界条件。考虑到不同网格密度对于数值计算结果的影响,首先进行网格独立解的验证。划分4组网格,进行相同工况的计算,通过对比不同网格数

值计算结果,选择一个高质量网格进行数值研究,数值计算采用网格的节点数为226 448,网格数为1 081 138。

3 计算结果与分析

3.1 能量平衡及温度分布

取整个燃烧装置为研究对象,其能量方程为

$$Q_i + Q_a = Q_o + Q_r + Q_f + Q_s \quad (14)$$

式中:Q_i为燃烧功率;Q_a为预热空气带入热功率;Q_o为燃烧室散热功率;Q_r为蓄热体蓄热功率;Q_f为排烟热损失;Q_s为不完全燃烧导致的热量损失。

将过量空气系数为1.0时实验数据代入,得燃烧室散热量为15 kW,而相应的数值计算结果为16 kW,可见数值计算结果与实验值较吻合。

图6为过量空气系数为1.0时相应温度测点处实验与数值计算温度值的比较,其中2和8对应燃烧室入口及出口,3~7对应101#~105#热电偶。由于燃烧过程2个燃烧器周期性切换及U型燃烧室结构对称,测点温度呈M状分布,同时可见计算结果和实验结果的差别在10%以内,数值计算结果与实验值较吻合。

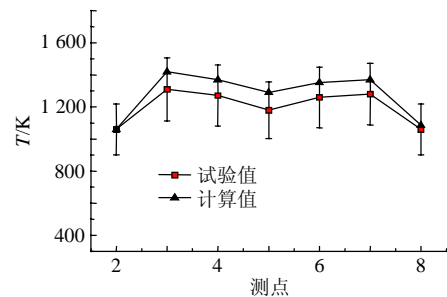


图6 实验与数值测点温度比较

Fig. 6 Comparison between predicted and measured temperatures of measuring points

3.2 出口NO浓度

图7为不同过量空气系数α时出口NO浓度变化,对比可见数值计算结果在趋势及定量上都与实

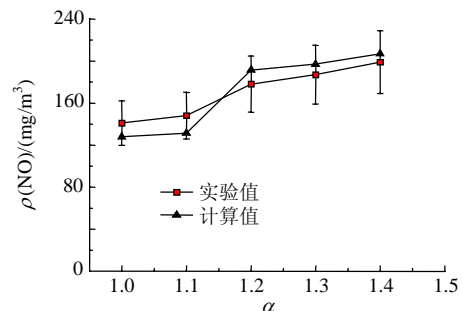


图7 不同过量空气系数出口NO浓度

Fig. 7 Variation of NO emission with excessive air ratio

验较为吻合，计算结果和实验结果的差别在 15% 以内。可见，本文采用的数学模型可以较好模拟天然气高温空气燃烧这一物理化学过程。

3.3 燃烧室气体流动及温度分布

图 8 及图 9 为过量空气系数为 1.0 时气体流线和气体截面温度分布图，可以看到高温空气通过旋流板中小孔进入燃烧室，其小孔的法线与旋流板的平面形成一定空间夹角，这一结构使通过小孔的气流在燃烧室内形成绕中心轴线的旋流。旋流空气贴壁旋转流动并向前推进，与入口附近燃烧后烟气充分混合。天然气由处于旋流板中心处的喷嘴喷入，喷嘴出口比空气入口较靠前。喷入的天然气在周围空间扩散，并发生燃烧反应放出热量。燃烧后的混合气体，继续旋转流动通过燃烧室外壁面与外界换热。对比Gupta等^[7]的研究可见，由于采用了空气旋流装置，空气在燃烧室内形成旋转流动，加剧了气体间的混合作用，进入燃烧室的高温空气与燃烧后气体产物充分混合，有效降低燃烧区域单位体积氧浓度，燃烧反应在整个空间进行，燃烧反应区域加大，温度分布均匀，这可有效抑制NO的生成，且空气贴壁旋流使得在靠近壁面处燃烧反应剧烈，靠近壁面处气体温度高，强化燃烧室气体与外部换热。Gupta在文献[7]的研究中，通过在助燃空气中加入氮气来降低入口氧浓度，以扩大燃烧反应区域，提高温度均匀性。

图 10 给出了沿气体流动方向 19 个截面气体平均温的变化。由图可见，沿流动方向截面平均温度先急剧升高，在燃料入口处前端达到最大值，后缓慢降低在出口降到最低。这是由于，入口附近气体流速较高且天然气与氧充足，燃烧化学反应较为剧烈，在入口后约 0.5 m 处温度增加到最高，燃烧反应基本在这一区域完成。燃烧后混合气体通过燃烧室壁面向外散热，温度不断降低，在出口处烟气温

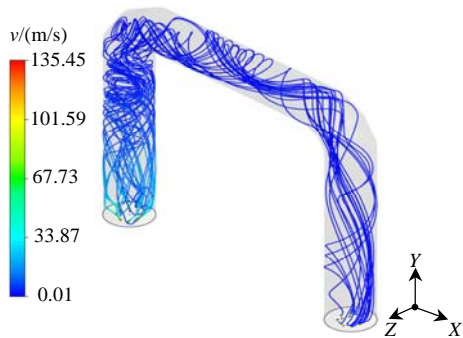


图 8 气体流线图
Fig. 8 Streamline of gas

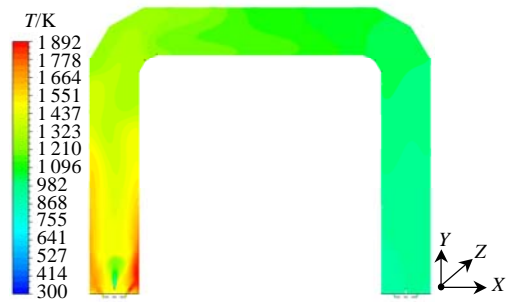


图 9 气体水平截面温度分布图
Fig. 9 Cross-section temperature distribution of gas

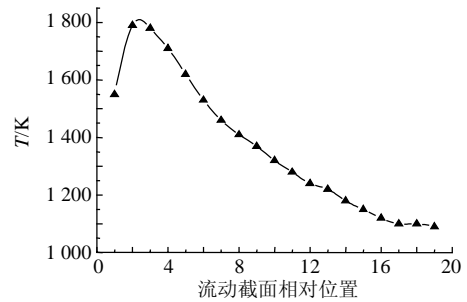


图 10 气体平均温度沿流动方向变化
Fig. 10 Longitude means temperature distribution in the combustor

度降到最低。可以看到除燃烧反应区，在流动方向上气体温度变化较均匀。

3.4 助燃空气温度对于燃烧特性的影响

为研究助燃空气温度对燃烧特性的影响，对额定燃烧功率下，不同助燃空气温度天然气燃烧进行了数值计算。图 11 反映了燃烧最高温度与平均温度随助燃空气温度变化。可以看到随着助燃空气温度的增加，燃烧的最高温度和平均温度都增加。这是由于随着助燃空气温度的增加使燃烧过程的化学反应速率加快，且由空气带入的焓随着温度的增加而增加。然而在不同空气入口温度的工况下，燃烧的最高温度和平均温度的差值基本维持在 700 K

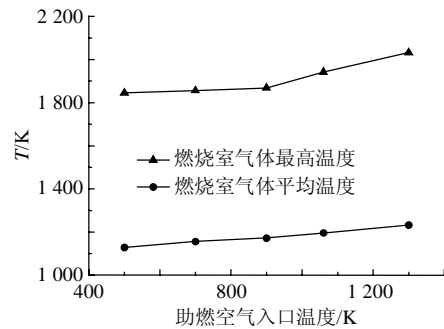


图 11 燃烧最高温度与平均温度随助燃空气温度变化
Fig. 11 Variation of the maximal temperature and average temperature with the air temperature at the inlet of combustor

左右。可见空气的旋转流动加剧了燃烧室内气体的流动混合,使燃烧内气体温度场具有良好的均匀性。

图12为燃烧室出口NO浓度及燃烧室壁面平均热流密度 \dot{q} 随助燃空气温度变化。出口NO的浓度及燃烧室壁面热流密度都随着助燃空气温度的增加不断增加。在600~1060 K范围NO的生成随助燃空气温度的升高变化缓慢,呈线性变化趋势;而当温度大于1060 K后随着温度的提高NO的生成迅速增加,这一变化趋势与[7]中实验结果一致。这是由于燃烧温度升高到一定范围后,高温环境促使热力型NO的产生会显著增加。炉内燃烧过程中辐射传热占主导地位,虽然不同助燃空气温度时燃烧室气体平均温度差别不是很显著,但随着助燃空气温度的增加壁面平均热流密度显著增加。

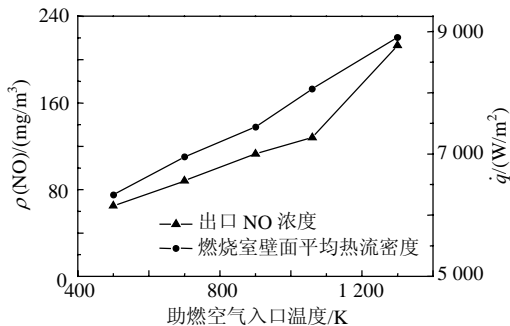


图12 出口NO浓度及壁面热流随助燃空气温度变化
Fig. 12 Variation of NO emission and wall heat flux with air temperature at the inlet of combustor

3.5 过量空气系数对于燃烧特性的影响

通过数值计算得到额定燃烧功率下不同过量空气系数时,天然气高温空气燃烧特性。图13为燃烧最高温度与平均温度随过量空气系数变化。燃烧气体最高温度随过量空气系数的增加而增加,这是由于实际空气量大于理论空气量,局部氧浓度增大,燃烧充分进行。燃烧的平均温度随过量空气系数先增加后减小,在过量空气系数1~1.2,燃烧反应随空气量增加加剧,气体平均温度升高,在过量空气系数1.2~1.4,虽然燃烧加剧了,但随着过量系数的增加空气质量流量显著增加,导致气体平均温度下降。

图14为出口NO浓度及壁面平均热流密度随过量空气系数变化。燃烧过程中NO生成量随过量空气系数的增加而增加,在小于1.1时NO的增加较慢,在大于1.1后NO的排放增加显著,这是由于随着过量空气系数的增加燃烧室中氧浓度增加。随着过量空气系数的增加燃烧室壁面平均热流密

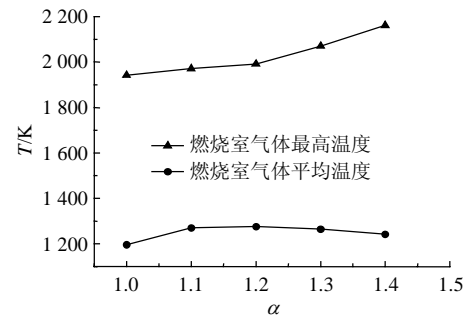


图13 燃烧最高温度与平均温度随过量空气系数变化
Fig. 13 Variation of the maximal temperature and average temperature with the excessive air ratio

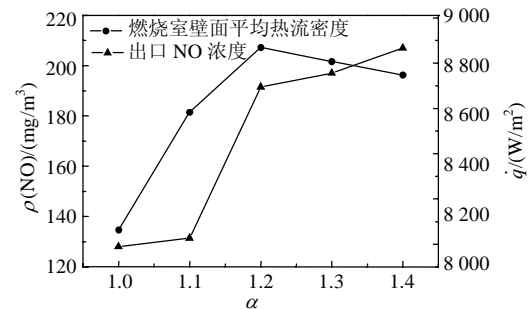


图14 出口NO浓度及壁面热流随过量空气系数变化
Fig. 14 Variation of NO emission and wall heat flux with the excessive air ratio

度是先增加后减小的。对比图13和14,可以观察到在燃烧过程中当过量空气系数1.2时,燃烧温度的均匀性好且传热量较大NO排放相对较低。Yang等在文献[8]中对采用LPG为燃料矩形炉的数值研究也得到了燃烧气体最高温度和出口NO浓度随过量空气系数的增加而增加的结果。

3.6 空气中氧浓度对于燃烧特性的影响

烟气再循环可有效的降低燃烧过程中NO的生成^[2],本研究中通过在空气进口和烟气出口间设置管路实现外部烟气再循环,通过烟气回流调节阀可调节回流烟气量,改变进入燃烧室空气氧浓度。通过数值计算研究了不同助燃空气氧浓度时的燃烧特性。

图15和16给出了燃烧过程温度及NO浓度和平均热流密度随助燃空气含氧量的变化。燃烧过程中化学反应速率受环境温度及燃料和氧浓度影响,故燃烧的最高温度随着助燃空气中氧体积分数减小而显著减小。随着助燃空气中氧体积分数的减小,助燃空气流量增加,因此带入燃烧室的焓也显著增加,燃烧的平均温度随着空气中氧体积分数减小而增加,壁面平均热流也增加。可以看到,燃烧过程最高温度与平均温度的差值随着助燃空气中氧体积分数的减小不断减小,燃烧室温度均匀性提

高。而随着助燃空气中氧含量的减小，燃烧过 NO 生成显著减少。

对比表明，通过降低助燃空气中氧浓度可提高温度均匀性，降低NO并增加传热量。Gupta^[7]中通过在助燃空气中加入过量氮气来降低空气中氧浓度，其实验结果显示降低氧浓度可极大抑制NO生成，与本文研究结论一致。对比可见采用空气旋流，可在降低氧浓度的基础上进一步抑制NO生成。

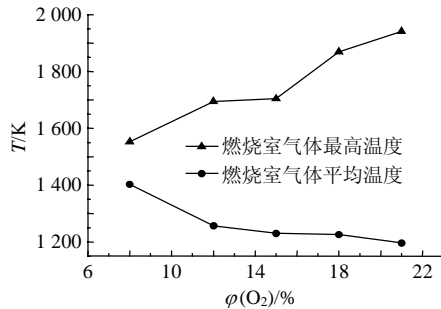


图 15 燃烧最高温度与平均温度随助燃空气含氧量变化
Fig. 15 Variation of the maximal temperature and average temperature with the oxygen concentration

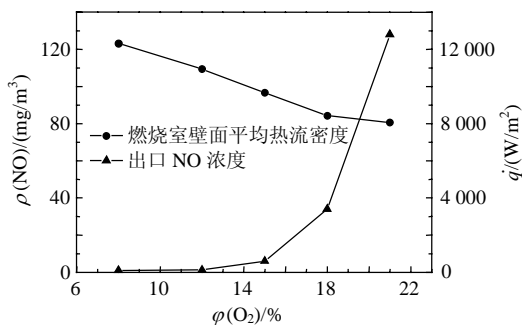


图 16 出口 NO 浓度及壁面热流随助燃空气含氧量变化
Fig. 16 Variation of NO emission and wall heat flux with the oxygen concentration

4 结论

本文建立了天然气高温空气燃烧数学模型，通过数值计算，得到了燃烧室温度分布、壁面热流密度及出口 NO 浓度，其数值计算结果与相应的实验结果符合较好，本文建立的数学模型可以很好的模拟天然气高温空气燃烧这一复杂的物理化学过程；通过数值研究得到以下结论：

1) 天然气高温空气燃烧中采用入口空气旋流装置可使燃烧室气体充分混合，获得均匀的温度场，抑制 NO 生成。

2) 天然气高温空气燃烧的最高温度、平均温度及燃烧室壁面平均热流密度随入口空气温度增加呈线性增加，燃烧过程 NO 生成量随温度升高显

著增加。

3) 随过量空气系数的增加，气体最高温度略有升高，NO 的生成量增加，燃烧平均温度及壁面平均热流密度先增加后减小。在过量空气系数为 1.2 时温度均匀性好，传热量较大，NO 排放浓度相对较小。

4) 助燃空气中氧浓度对天然气燃烧特性有显著影响，随着空气中氧浓度的减小气体最高温度减小，平均温度及壁面平均热流密度增大，温度均匀性增强，NO 生成量显著减少。

参考文献

- [1] Tsuji H, Gupta A K, Hasegawa T, et al. High temperature air combustion: from energy conservation to pollution reduction [M]. New York: CRC Press, 2003: 21-49.
- [2] Wiinning J A, Wiinning J G. Flameless oxidation to reduce thermal NO-formation[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1997, 23(1): 81-94.
- [3] Cavaliere A, Joannon M. Mild combustion[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2004, 30(4): 329-366.
- [4] Weber R, John P S, Willem K. On the (MILD) combustion of gaseous, liquid, and solid fuels in high temperature preheated air [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(2): 2623-2629.
- [5] Zhang H, Yue G X, Lu J F, et al. Development of high temperature air combustion technology in pulverized fossil fuel fired boilers [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(2): 2779-2785.
- [6] Wu S R, Chang W C, Jack C. Low NO_x heavy fuel oil combustion with high temperature air[J]. Fuel, 2007, 86(5-6): 820-828.
- [7] Gupta A K, Bolz S, Hasegawa T. Effect of air preheat temperature and oxygen concentration on flame structure and emission[J]. Journal of Energy Resources Technology, 1999, 121(3): 209-216.
- [8] Yang W H, Blasiak W. Numerical simulation of properties of a LPG flame with high-temperature air[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2005, 44(10): 973-985.
- [9] Blasiak W, Yang W H, Rafidi N. Physical properties of a LPG flame with high-temperature air on a regenerative burner[J]. Combustion and Flame, 2004, 136(10): 567-569.
- [10] Yang W H, 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.
- [11] Yang W H, Blasiak W. Numerical study of fuel temperature influence on single gas jet combustion in highly preheated and oxygen deficient air[J]. Energy, 2005, 30(2-4): 385-398.
- [12] Galletti C, Parente A, Tognotti L. Numerical and experimental investigation of a mild combustion burner[J]. Combustion and Flame, 2007, 151(4): 649-664.
- [13] 吕清刚, 朱建国. 煤粉在循环流化床高温空气下的燃烧与NO_x排放 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(32): 9-14.
Lü Qinggang, Zhu Jianguo. Pulverized coal combustion and NO_x emissions in high temperature air from circulating fluidized bed[J].

- Proceedings of the CSEE, 2007, 27(32): 9-14(in Chinese).
- [14] 楼波, 罗玉和, 马晓茜. 回转窑内生物质高温空气燃烧 NO_x 生成模型与验证[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(29): 68-73.
Lou Bo, Luo Yuhe, Ma Xiaoqian. Model and experimental validation on NO_x emission of biomass combustion in rotary kiln with HTAC [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(29): 68-73(in Chinese).
- [15] 曹小玲, 蒋绍坚, 吴创之, 等. 高温空气发生器热态实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(2): 109-113.
Cao Xiaoling, Jiang Shaojian, Wu Chuangzhi, et al. Hot-state experiment research of high temperature air generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(2): 109-113(in Chinese).
- [16] Hwang C H, Lee S, Kim J H, et al. An experimental study on flame stability and pollutant emission in a cyclone jet hybrid combustor [J]. Applied Energy, 2009, 86(7-8): 1154-1161.
- [17] Tummers M J, Hübner A W, Veen E H, et al. Hysteresis and transition in swirling nonpremixed flames[J]. Combustion and Flame, 2009, 156(2): 447-459.
- [18] Gatski T B, Jongen T. Nonlinear eddy viscosity and algebraic stress models for solving complex turbulent flows[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2000, 36(8): 655-682.
- [19] Jawarneh A M, Vatishtas G H. Reynolds stress model in the prediction of confined turbulent swirling flows[J]. Journal of Fluids Engineering, 2006, 128(6): 1377-1382.
- [20] 解茂昭. 内燃机计算燃烧学[M]. 2版. 大连: 大连理工大学出版社, 2005: 6-64.
- [21] Denis V, Luc V. Turbulent combustion modeling[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2002, 28(3): 193-266.
- [22] Modest M F. The weighted-sum-of-gray-gases model for arbitrary solution methods in radiative transfer[J]. ASME Journal Heat Transfer, 1991, 13(3): 650-656.
- [23] Hill S C, Smoot L D. Modeling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2000, 26(4-6): 417-458.
- [24] 赵坚行. 燃烧的数值计算[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 272-295.



李星

收稿日期: 2009-08-14.

作者简介:

李星(1984—), 男, 博士研究生, 从事燃烧数值计算、传热传质研究, 07121828@bjtu.edu.cn;

贾力(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事传热传质研究。

(责任编辑 王庆霞)