

# 煤粉无焰燃烧的数值模拟

安恩科, 冯 祥, 张浏骏, 刘若晨

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

**摘要:** 用组分输运方法对煤粉的无焰燃烧进行了数值模拟, 湍流采用 Realizable  $k-\epsilon$  紊流模型, 颗粒相采用随机轨道模型, 挥发分的析出采用化学渗透模型(CPD), 湍流化学反应采用涡耗散模型(Eddy-Dissipation), 煤粉颗粒表面燃烧模拟采用内表面化学反应动力学模型, 辐射传热采用 P-1 辐射模型. 结果表明, 实验数据与数值模拟吻合良好; 煤粉无焰燃烧时, 燃烧反应发生在整个炉膛空间, 炉内温度分布较均匀, 温差为 200 K 左右, 燃烧呈现低  $O_2$  浓度特征,  $NO_x$  排放浓度较低.

**关键词:** 煤粉无焰燃烧; 数值模拟; 组分输运

**中图分类号:** TK224

**文献标志码:** A

## Numerical Simulation of Pulverized-coal Flameless Combustion

AN Enke, FENG Xiang, ZHANG Liujun, LIU Ruochen

(College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Numerical simulation of flameless combustion of pulverized coal was carried out by species transport method. Realizable  $k-\epsilon$  model was used to simulate gas phase turbulent. The solid phase was solved by particle stochastic trajectory model. Thermal volatilization was made by the CPD model. Turbulent chemical reaction was simulated via eddy dissipation model. Intrinsic model was used to simulate Particle of pulverized coal surface combustion. Radiation heat transfer simulation was carried out with P-1 radiation model. The result shows that experimental data are accurately predicted by the numerical simulation. Flameless combustion takes place in whole furnace, the maximum temperature difference is about 200K and the temperature is well-distributed in furnace. The flameless combustion is in low  $O_2$  concentration and low emission of  $NO_x$ .

**Key words:** flameless combustion of pulverized-coal; numerical simulation; species transport method

在我国, 煤炭消耗占一次能源总量的 70% 左右, 提高煤粉的燃烧效率, 降低其对环境的不利影响是煤粉燃烧领域关键问题之一. 煤粉无焰燃烧技术(Flameless Combustion) 是一种很有潜力的新型燃烧技术, 其特点是没有明显的火焰锋面, 反应在整个炉膛内进行, 温度分布较为均匀. 相比传统燃烧方式, 煤粉无焰燃烧的效率,  $NO_x$  排放浓度较低<sup>[1]</sup>.

欧洲国际火焰研究基金会(IFRF)于 20 世纪 90 年代早期开展了煤粉的高温空气燃烧(无焰燃烧)试验<sup>[2]</sup>, 虽然目前对无焰燃烧的试验研究较多, 但对于无焰燃烧机理方面的研究还比较欠缺<sup>[3]</sup>. 本文以文献[2]试验的物理模型为对象, 采用组分输运方法对煤粉的无焰燃烧过程进行了数值模拟. 根据文献[4-7]选用了合适的数学物理模型, 并对所建物理模型进行了合理的网格划分, 保证模拟的合理性.

## 1 物理模型

文献[2]的燃烧室结构如图 1 所示, 整个燃烧室尺寸为  $6\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2\text{ m}$ , 二次风入口位于入射面中心处, 直径为 125.0 mm, 两个携带煤粉的一次风入口分别位于距二次风入口中心两侧 280.0 mm 处, 且直径均为 27.3 mm, 出口直径为 750.0 mm. 实验条件如表 1 所示, 煤质资料如表 2 所示.

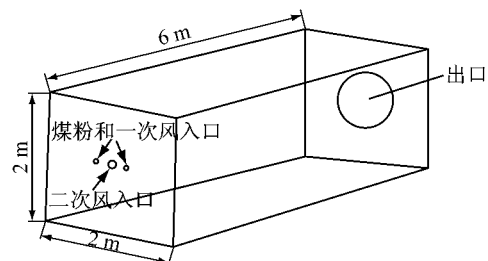


图 1 燃烧室结构简图

Fig. 1 Geometry of the IFRF furnace

收稿日期: 2013-07-10

第一作者: 安恩科(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为锅炉燃烧污染物控制及热力设备系统优化.

E-mail: axa@tongji.edu.cn

表 1 实验条件

Tab.1 Experimental conditions

入口	温度/K	速度/ (m·s <sup>-1</sup> )	流量/ (kg·h <sup>-1</sup> )	体积分数
煤			66	
一次风	313	26	130	$\phi_{O_2}=0.23, \phi_{N_2}=0.77$
二次风	1 623	65	675	$\phi_{O_2}=0.22, \phi_{H_2O}=0.095,$ $\phi_{CO_2}=0.125, \phi_{N_2}=0.56$

表 2 煤的工业分析和元素分析

Tab.2 Coal proximate analysis and ultimate analysis

工业分析(ad)		元素分析(daf)	
参数	数值	参数	数值
$w_V$	0.371	$w_C$	0.816
$w_{Fc}$	0.567	$w_H$	0.055
$w_M$	0.029	$w_O$	0.107
$w_A$	0.033	$w_N$	0.041 5
低位发热量/(MJ·kg <sup>-1</sup> )	31.74	$w_S$	0.006

注:ad 表示空干基,daf 表示干燥无灰基;下标 V 表示挥发分,Fc 表示固定碳,M 表示水分,A 表示灰分。

## 2 计算方法

气相紊流采用 Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型,无滑移边界条件,煤粉颗粒采用离散相模型.挥发分的析出采用化学渗透析出模型(CPD),该热解模型建立在分析煤粉结构在快速加热析出过程中的物理和化学变化基础上,计算简单,能较好地模拟煤粉挥发分的析出过程.表面焦炭反应采用内表面化学反应动力学模型(Intrinsic-model).NO<sub>x</sub> 模型中采用了热力学、快速型、燃料型 NO<sub>x</sub> 以及 NO<sub>x</sub> 再燃模型.

对流项采用一阶迎风差分格式,速度和压力的耦合采用求解收敛性好的 SIMPLE 算法进行求解.

## 3 网格划分和边界条件

### 3.1 网格划分

计算模型纵切面和横切面的网格划分如图 2 和 3 所示,网格划分为非结构六面体网格,网格数目为 98 万.

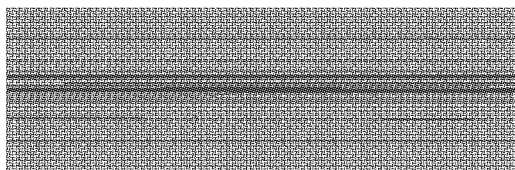


图 2 纵切面网格划分

Fig.2 Mesh generation in longitudinal section

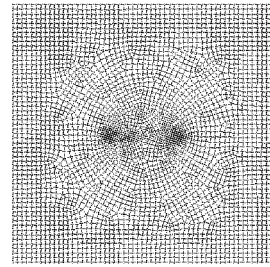


图 3 横切面网格划分

Fig.3 Mesh generation in transverse section

### 3.2 边界条件

气相进口为速度进口,颗粒相为面射流源发出.出口设置为压力出口,壁面按标准壁面函数处理,壁面温度设为 1 000 °C,内部发射率取为 1.

## 4 数值模拟结果

数值模拟选取与文献[2]相同的试验点,如图 4 所示.在炉膛中选取 7 个截面,在所取截面上考察沿 Z 方向的速度、温度、O<sub>2</sub> 浓度、CO<sub>2</sub> 浓度、CO 浓度和 NO<sub>x</sub> 浓度分布.

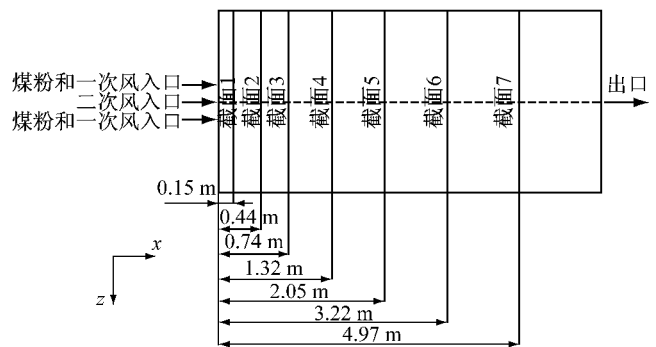


图 4 测量截面位置分布

Fig.4 Location of the measurement traverses

### 4.1 计算速度场及分析

图 5 是各截面沿 Z 方向的速度分布曲线.从图 5 可以看出,二次风速度的计算值略大于测量值,一次风速度的计算值小于测量值,这是由于两相流作用的结果,在截面 4 处,速度分布变成单峰型,截面 6 以后,沿 Z 方向速度分布趋于均匀.数值模拟的速度分布能反映测量所得速度的变化规律,二者吻合良好.

### 4.2 计算温度场及分析

图 6 是炉内温度的分布曲线.从图 6 可以看出,在燃烧器一次风入口附近,由于一次风温度较低,以及挥发分的析出着火和煤粉燃烧,温度梯度较大,其余区域温度分布较均匀,约为 1 600 K 左右.均匀的温度分布是煤粉无焰燃烧的特征,可以改善

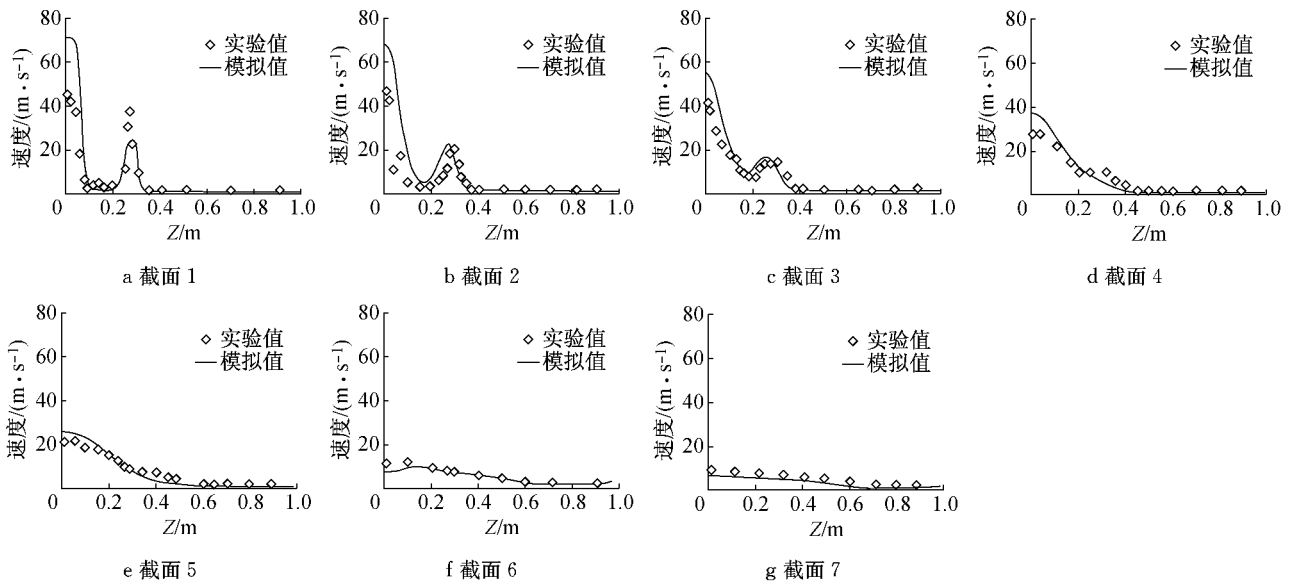


图 5 各截面上的速度分布

Fig.5 Velocity distribution in different sections

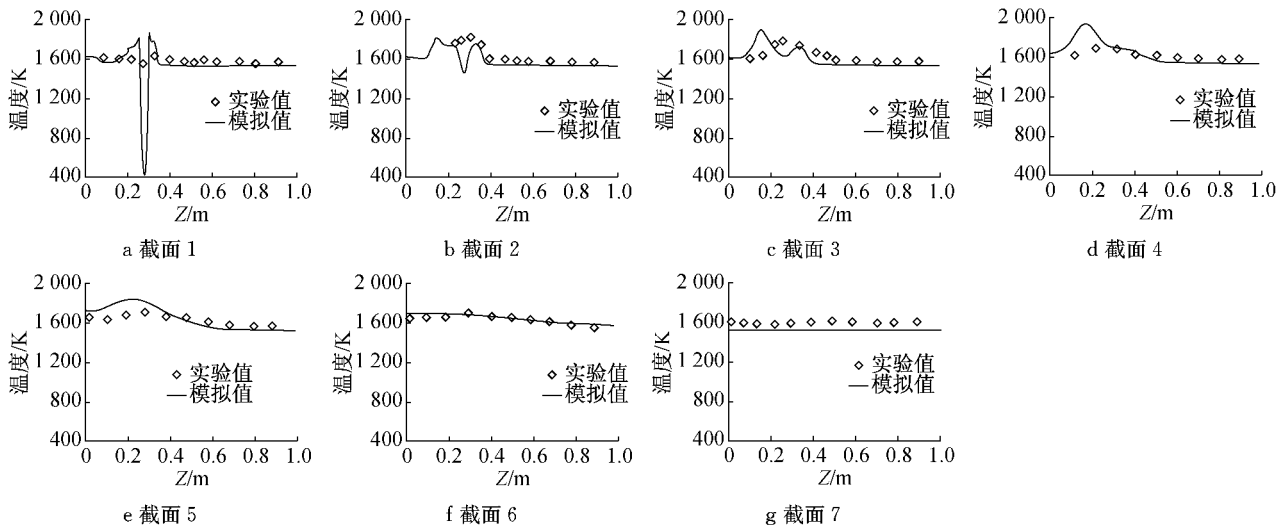


图 6 各截面上温度分布

Fig.6 Temperature distribution in different sections

炉膛内部燃烧环境,使燃烧稳定并提高煤粉的燃烧效率<sup>[8]</sup>.数值模拟温度值和测量值吻合良好,说明数学模型和计算方法正确.

### 4.3 计算 O<sub>2</sub> 质量分数分布及分析

图 7 为 O<sub>2</sub> 质量分数的数值模拟变化曲线.从图 7 可以看出,数值模拟与试验值吻合良好.截面 1 处的 O<sub>2</sub> 质量分数为双峰型,截面 2~5 的为单峰型,截面 6~7 的 O<sub>2</sub> 质量分数分布较均匀.截面 2 处一次风入射口附近 O<sub>2</sub> 质量分数接近于零,这是挥发分在截面 2 处开始大量析出并且快速燃烧消耗大量的 O<sub>2</sub> 的结果.单峰分布是挥发分着火、焦炭燃烧和组分扩散的结果,除射流出口和回流区外,炉膛内绝大

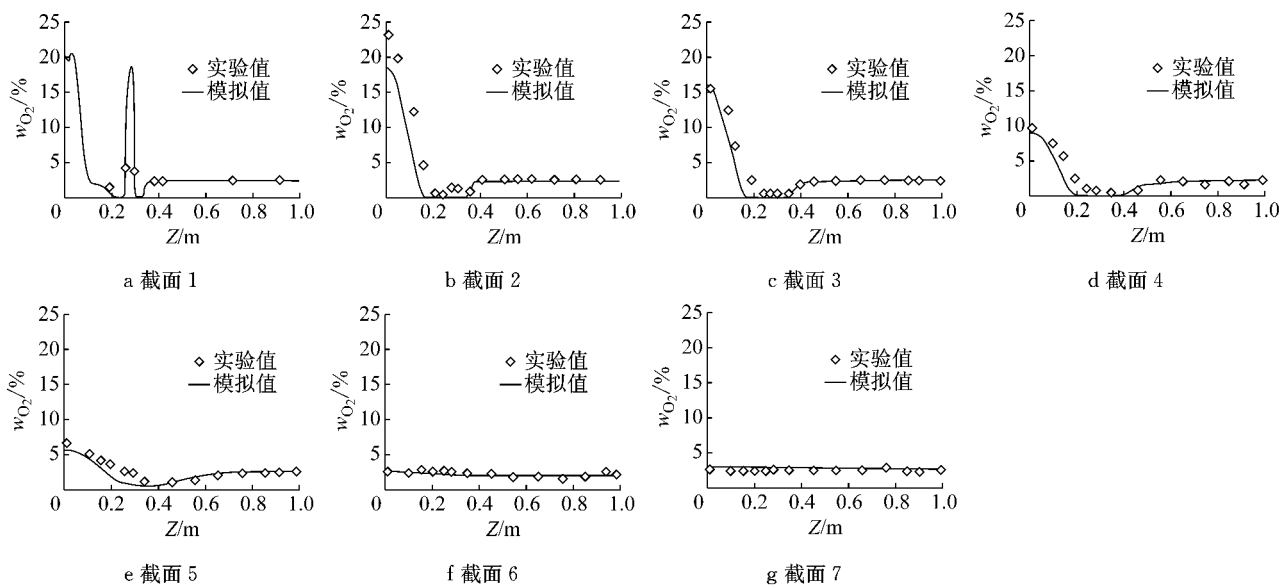
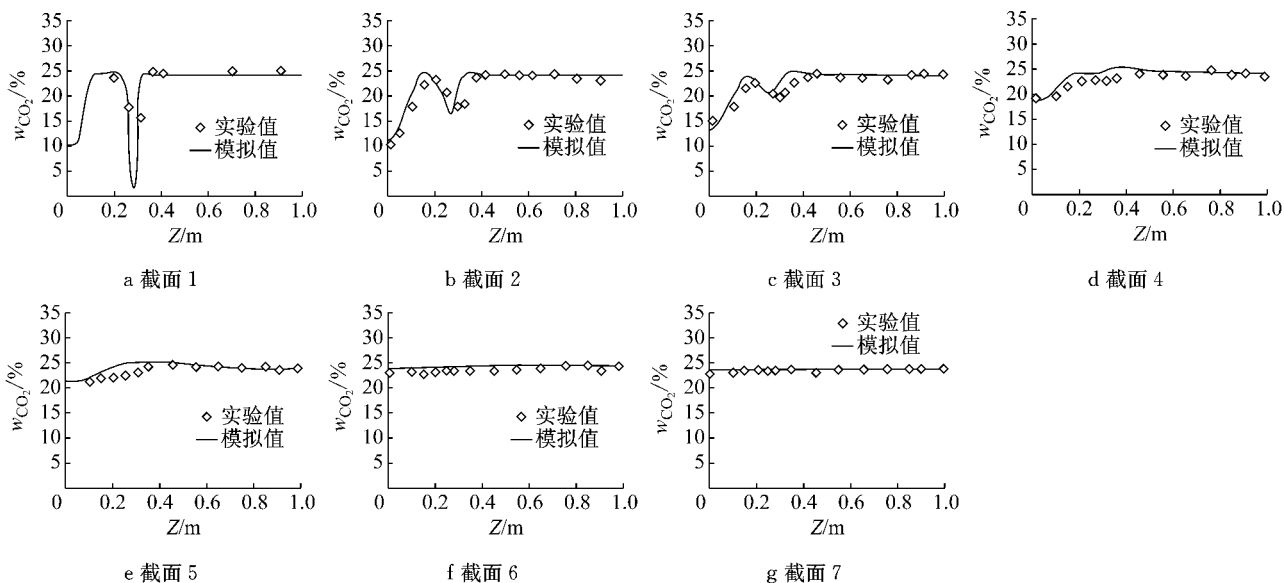
部分区域的 O<sub>2</sub> 质量分数保持在一个较低水准,约为 3%,说明煤粉无焰燃烧具有低氧燃烧的特征,从而减小了燃料型 NO<sub>x</sub> 的生成.

### 4.4 计算 CO<sub>2</sub> 质量分数分布及分析

图 8 是 CO<sub>2</sub> 质量分数的数值模拟结果.从图 8 可以看出,数值模拟和测量值吻合良好.射流进口的 CO<sub>2</sub> 质量分数较低,其余绝大部分区域的 CO<sub>2</sub> 质量分数在 24%左右,说明煤粉无焰燃烧具有弥散空间燃烧的特征.

### 4.5 计算 CO 质量分数分布及分析

图 9 是 CO 质量分数的数值模拟曲线.从图 9 可以看出,数值模拟与测量值吻合良好.CO 质量分数

图 7 各截面上  $O_2$  的质量分数分布Fig.7  $O_2$  concentration in different sections图 8 各截面上  $CO_2$  的质量分数分布Fig.8  $CO_2$  concentration in different sections

为单峰型,截面 2~4 上煤粉射流的中心线附近  $CO$  质量分数较大,约为 5%,这是由于射流中心煤粉质量分数较高且煤粉的着火燃烧始发于截面 2 和 3 之间.其余区域  $CO$  质量分数接近于零,这是由于燃烧发生在整个弥散空间,炉膛内煤粉和燃烧气混合均匀,燃烧反应稳定,故  $CO$  的生成量低<sup>[9]</sup>,说明煤粉无焰燃烧具有较高的燃烧效率.

#### 4.6 计算 $NO_x$ 质量分数分布及分析

图 10 为  $NO_x$  质量分数分布的数值模拟曲线.从图 10 可以看出,与煤粉常规燃烧一样,煤粉无焰燃烧的  $NO_x$  质量分数在煤粉着火区域较大,这是因

为煤燃烧  $NO_x$  主要成因是燃料型和热力型,其中燃料型占 80%~90%,燃料型  $NO_x$  又分为挥发分  $NO_x$  和焦炭  $NO_x$ ,焦炭  $NO_x$  份额较低.由前面  $O_2$  质量分数分布的分析可以看出,截面 2~4 中间区域为挥发分析出并快速着火燃烧的区域,故  $NO_x$  在截面 2 处开始出现一个先增大后减小的过程,是挥发性 N 的生成以及  $NO_x$  的还原这两个过程的综合作用结果.图 10b  $NO_x$  质量分数的最大值与实验值偏差较大,约 35.5%,说明  $NO_x$  计算模型机理有待进一步改进,其出口截面  $NO_x$  质量分数为  $304 \times 10^{-6}$ ,这和实验值的  $320 \times 10^{-6}$  比较接近,反映了  $NO_x$  数

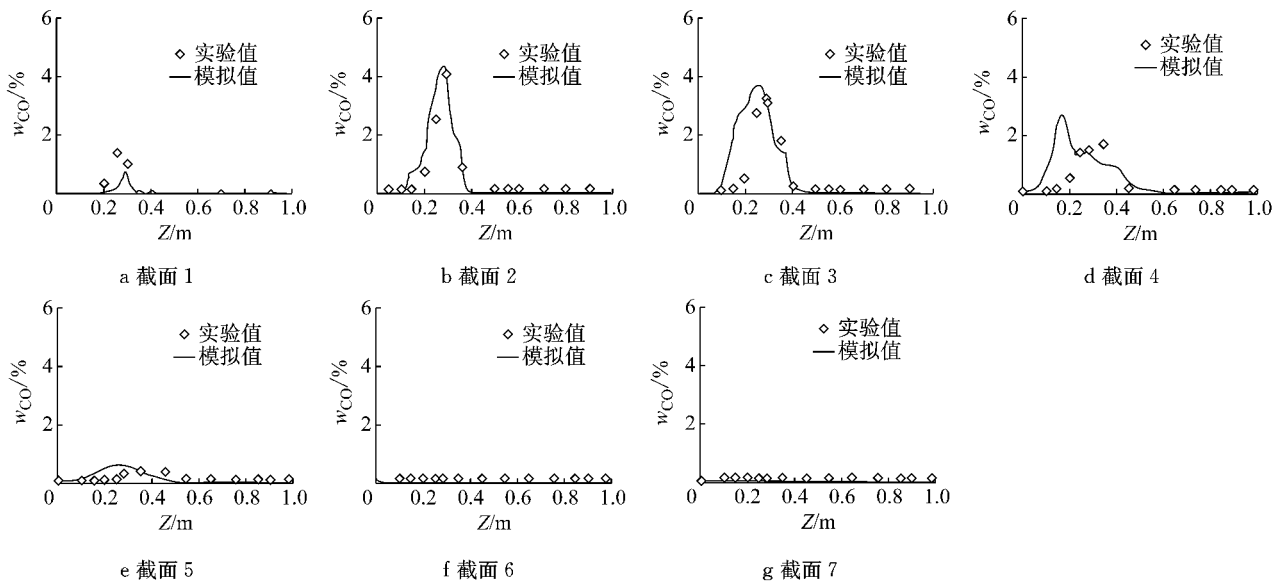


图 9 各截面上 CO 的质量分数分布

Fig.9 CO concentration in different sections

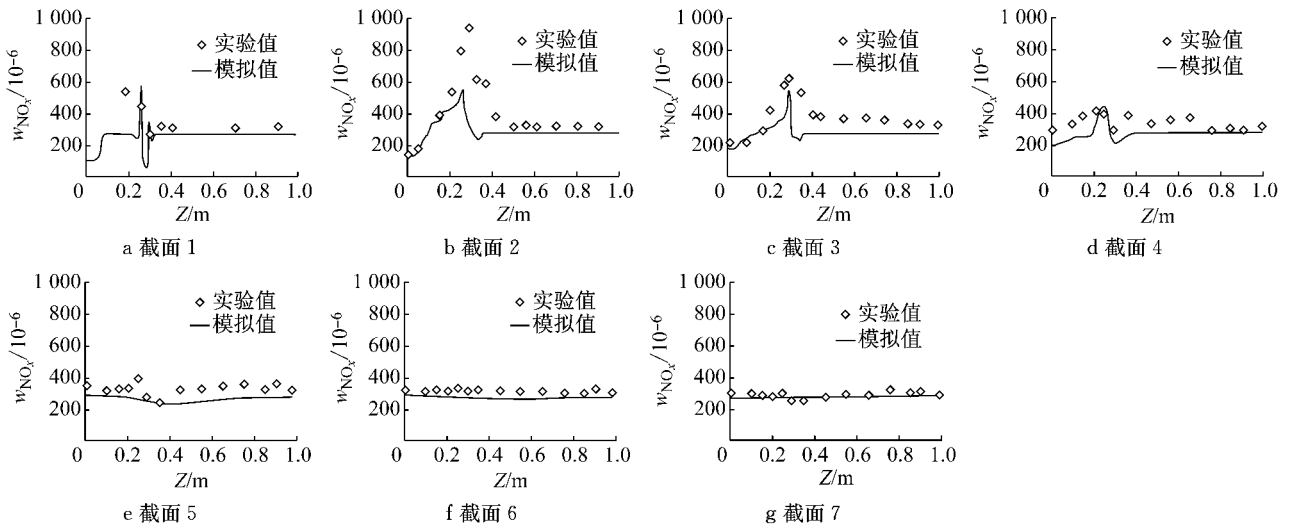


图 10 各截面上  $NO_x$  的质量分数分布

Fig.10  $NO_x$  concentration in different sections

值模拟总体上的合理性。

煤粉无焰燃烧温度较均匀,且最高温度比煤粉常规燃烧的最高温度要低(约 300 °C)。燃料型和热力型  $NO_x$  比常规燃烧的生成要小,同时,在本文模拟的无焰燃烧工况下,炉膛整体  $O_2$  质量分数较低,反应没有明显的火焰锋面且温度分布较均匀,这都有利于减小热力型  $NO_x$  的产生,所以,相对于有焰燃烧,煤粉无焰燃烧的  $NO_x$  排放质量分数较低。

## 5 结论

本文对煤粉无焰燃烧的速度场、温度场、 $O_2$  及

$NO_x$  的质量分数分布等进行了数值计算,并与实验数据进行了比较,结果表明:

(1)数值模拟所得炉膛内速度分布、温度分布以及各组分质量分数与实验数据吻合良好,反映本文采用的数值模型方法能够较准确地模拟煤粉的无焰燃烧过程。

(2)整个燃烧空间温度分布均匀,燃烧过程稳定,最高温度与平均温度之差为 200 K 左右,这是煤粉无焰燃烧的特征。

(3) $O_2$  的质量分数在炉膛空间大部分区域维持在 3%左右,即煤粉无焰燃烧呈现低氧浓度的特性。

## 参考文献:

- [1] 安恩科,余晓艳,刘若晨. 锅炉氧煤无焰燃烧技术分析[J]. 锅炉技术, 2012, 43(1):42.  
AN Enke, YU Xiaoyan, LIU Ruochen. Analysis of the technology about flameless combustion for pulverized coal in boiler [J]. Boiler Technology, 2012, 43(1):42.
- [2] Schaffel N, Mancini M, Szle K A, *et al.* Mathematical modeling of MILD combustion of pulverized coal [J]. Combustion and Flame, 2009(156): 1771.
- [3] 余跃,温冶,楼国锋,等. 无焰燃烧技术的研究现状[J]. 金属热处理, 2012, 37(10): 65.  
YU Yue, WEN Ye, LOU Guofeng, *et al.* Research status of flameless combustion technology [J]. Heat Treatment of Metals, 2012, 37(10): 65.
- [4] 周力行,李力,李荣先,等. 炉内两相流动和煤粉燃烧的双流体-轨道模型[J]. 工程热物理学报, 2001(11):771.  
ZHOU Lixing, LI Li, LI Rongxian, *et al.* Numerical modeling of 3-D gas-partical flows and coal combustion in a tangentially-fired-furnace using a two-fluid-trajectory model [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2001 (11): 771.
- [5] 范贤振,郭烈锦,高晖,等. 200 MW 四角切向燃烧煤粉炉炉内过程的数值模拟[J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(3):241.  
FAN Xianzhen, GUO Liejin, GAO Hui, *et al.* Numerical simulation of flow and combustion process in the Tangentially-Fired-Furnace of a 200MW pulverized coal boiler [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2002, 36(3):241.
- [6] 周力行. 湍流气粒两相流动和燃烧的理论及数值模拟[M]. 北京:科学出版社, 1994.  
ZHOU Lixing. Theory and numerical modeling of turbulent gas-particle flows and combustion [M]. Beijing: Science Press, 1994.
- [7] 郭印诚,林文漪,周力行. 煤粉燃烧过程中 NO<sub>x</sub> 生成的数值模拟[J]. 燃烧科学与技术, 1998, 4(1): 18.  
GUO Yincheng, LIN Wenyi, ZHOU Lixing. Numerical modeling of NO<sub>x</sub> formation in the process of pulverized coal combustion [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 1998, 4(1): 18.
- [8] Weber R, Smart J P. 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.
- [9] 邢献军,林其钊. 常温空气无焰燃烧中 CO 生成的研究[J]. 热能动力工程, 2006, 21(6):38.  
XING Xianjun, LIN Qizhao. Study of the CO emission in normal temperature air flameless combustion [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2006, 21(6):38.

(上接第 1104 页)

## 参考文献:

- [1] Go Nagaya, Yasumichi Wakao, Akihiko Abe. Development of an in-wheel drive with advanced dynamic-damper mechanism[J]. JSAE Review, 2003 (24):477.
- [2] Gashi R. Electrical steering system for vehicle; USA, WO2007/006776[P]. 2006-11-07.
- [3] 海棠. 电动汽车革命性技术的创新设计:米其林“主动车轮”新技术[J]. 汽车与配件, 2008(52):36.  
HAI Tang. Revolutionary design for EV Michelin “Active Wheel”[J]. Automobile & Parts, 2008(52):36.
- [4] 陈辛波,卢志坚,唐峰. 一体化单纵臂减速式轮边电驱动系统仿真分析[J]. 机电一体化, 2011(9):22.  
CHEN Xinbo, LU Zhijian, TANG Feng. Simulation and analysis of an integrated electric wheel drive system with reducer for single trailing arm [J]. Mechatronics, 2011(9):22.
- [5] 陈辛波,张擎宇,唐峰. 单摆臂轮边电驱动系统平顺性及接地性研究[J]. 机电一体化, 2012(9):22.  
CHEN Xinbo, ZHANG Qingyu, TANG Feng. Research on ride comfort and ground adhesion of an electric wheel drive system for single trailing arm [J]. Mechatronics, 2012(9):22.
- [6] 梁锐,余卓平,宁国宝. 基于吸振原理的轮边驱动电动车垂向振动负效应的抑制[J]. 机械设计, 2008(1):28.  
LIANG Rui, YU Zhuoping, NING Guobao. Restraint of negative effect on vertical vibration of wheel rim driven motor vehicle based on shake absorption principle [J]. Journal of Machine Design, 2008(1):28.
- [7] 陈辛波,陆承超,唐峰,等. 电机作为动力吸振质量的减速式轮边驱动系统;中国, CN10255771A[P]. 2012-07-11.  
CHEN Xinbo, LU Chengchao, TANG Feng, *et al.* Deceleration type wheel drive system with motor as dynamic damper; China, CN10255771A[P]. 2012-07-11.
- [8] 靳晓雄,张立军,江浩. 汽车振动分析[M]. 上海:同济大学出版社, 2002.  
JIN Xiaoxiong, ZHANG Lijun, JIANG Hao. Auto vibration analysis [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2002.
- [9] 余志生. 汽车理论[M]. 5 版. 北京:机械工业出版社, 2009.  
YU Zhisheng. Automobile theory [M]. Beijing: China Machine Press, 2009.