

# 浓缩环对旋流燃烧器 $\text{NO}_x$ 生成影响的数值模拟

毕明树 赵耀光

(大连理工大学 化机学院 辽宁 大连 116024)

**摘 要:** 运用 Fluent 软件对中心给粉旋流燃烧器进行了燃烧数值模拟,探讨了浓缩环对燃烧器  $\text{NO}_x$  生成的影响,分析了燃烧器燃烧时的温度场、氧浓度场以及包含热力  $\text{NO}_x$ 、燃料  $\text{NO}_x$  和快速  $\text{NO}_x$  在内的  $\text{NO}_x$  浓度场,比较了不同浓缩环结构下燃烧器出口沿轴向方向  $\text{NO}_x$  浓度曲线。模拟结果表明:浓缩环可降低旋流燃烧器的  $\text{NO}_x$  生成量 100 ~ 200  $\text{mg}/\text{m}^3$ ,  $\text{NO}_x$  的排放量也相应降低;调节浓缩环距端口距离和调节浓缩环间距,亦可降低燃烧器的  $\text{NO}_x$  排放量,两者调节的最佳值分别为 325 mm 和 80 mm。

**关 键 词:** 旋流燃烧器; 浓缩环;  $\text{NO}_x$ ; 数值模拟

中图分类号: X745 文献标识码: A

## 引 言

煤燃烧生成的  $\text{NO}_x$  对环境的影响已引起人们的高度重视。燃烧器作为锅炉的关键部件,对燃煤锅炉燃烧排放的  $\text{NO}_x$  含量有很大影响。中心给粉旋流燃烧器为国内开发的一种新型旋流燃烧器<sup>[1~2]</sup>,其结构如图 1 所示。靖剑平等对其进行了实验室内冷态实验和锅炉设备上的工业实验<sup>[3~4]</sup>,证明了中心给粉燃烧器的着火性和低负荷稳燃能力,以及较好的低  $\text{NO}_x$  排放性能,但是工业实验中其  $\text{NO}_x$  排放量要高于国家规定的 650  $\text{mg}/\text{m}^3$  的标准。李志强等证明了旋流燃烧器中煤粉浓缩器可有效降低  $\text{NO}_x$  的排放<sup>[5]</sup>。方月兰在对中心给粉旋流燃烧器内流场进行模拟后推测了浓缩环对其降低  $\text{NO}_x$  排放的效果<sup>[6]</sup>。对于中心给粉燃烧器中浓缩环对  $\text{NO}_x$  生成的影响规律尚未见报道。需要进一步开展研究,以降低中心给粉旋流燃烧器  $\text{NO}_x$  的排放。本研究运用 Fluent 软件,在与实验流场进行对比的基础上,对中心给粉旋流燃烧器出口的  $\text{NO}_x$  生成情况进行了热态模拟,探讨了燃烧器中浓缩环结构对其  $\text{NO}_x$  生成的影响。

## 1 计算方法

### 1.1 计算对象及网格划分

计算域为中心给粉旋流燃烧器及后边的燃烧室,如图 1 所示。该燃烧器由一次风通道、内二次风通道及叶片、外二次风通道及叶片等组成。其中一次风通道内安装有多个浓缩环,起到煤粉浓缩的作用。内二次风通道内含 16 个轴向叶片,外二次风通道内有 12 个切向叶片,起到将直流风变为旋流风的作用。煤粉与一次风从一次风通道进入燃烧室,二次风通过二次风通道进入,与文献 [7] 中实验流场进行对比,建立了与实验相同的模型,基本参数为:一次风通道直径 144 mm,内二次风通道直径 250 mm,外二次风通道直径 374 mm,燃烧室尺寸根据锅炉尺寸确定为 1.2 m × 2.5 m 的三维柱状区域。

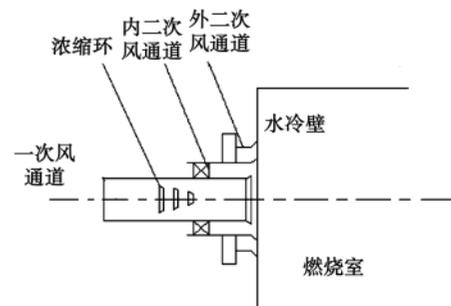


图 1 中心给粉旋流燃烧器

Fig. 1 Pulverized coal central feed swirling burner

由于旋流叶片的存在使得燃烧器二次风通道内结构变得复杂,因此将内二次风通道和外二次风通道内含旋流叶片的部分单独建模,网格划分如图 2 和图 3 所示,并对其进行了网格加密,再将计算结果采用 Profile 边界条件导入后边的燃烧器内外二次风通道中。其余模型包括一次风直流通、部分内

收稿日期: 2011 - 04 - 18; 修订日期: 2011 - 05 - 17

作者简介: 毕明树(1962 - ) 男,内蒙古赤峰人,大连理工大学教授,博士生导师。

外二次风通道及整个燃烧室区域,网格划分如图4所示。



图2 内二次风叶片区域网格

Fig.2 Grid in the inner secondary air blade domain



图3 外二次风叶片区域网格

Fig.3 Grid in the outer secondary air blade domain

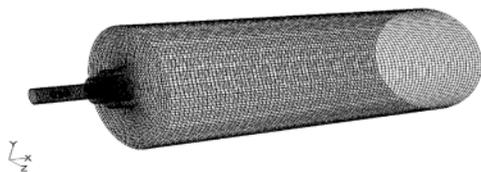


图4 一次风通道及燃烧室区域网格

Fig.4 Grid in the primary air duct and combustor domain

### 1.2 数学模型及边界条件

对气相采用 Euler 处理和颗粒相以 Lagrangean 描述为基础,建立了数学模型。由于旋流燃烧器有较强的旋流作用,湍流模型采用 realizable  $k - \epsilon$  模型<sup>[8]</sup>;煤粉颗粒的运动采用颗粒随机轨道模型;双平行竞争反应模型模拟挥发份的燃烧;采用动力 - 扩散控制燃烧模型模拟焦炭的燃烧;采用 P1 辐射模型模拟燃烧室内的辐射传热;气相湍流燃烧采用非预混燃烧模型<sup>[9]</sup>。

利用燃烧数值计算的后处理方法求解  $NO_x$  含

量,考虑了热力型  $NO_x$ 、快速型  $NO_x$ 、燃料型  $NO_x$  3 种  $NO_x$  的生成。对于热力型  $NO_x$  的生成采用 Zel-dovich 机理描述;快速型  $NO_x$  的生成采用 Fenimore 机理描述;对于燃料型  $NO_x$  的生成,采用 DeSoete 提出的 HCN 衰减的总体反应机理来描述<sup>[10]</sup>。

边界条件:一次风入口风温为 450 K,二次风入口风温为 680 K,一次风量和二次风量分别占总风量的 30% 和 70%,喷口边界采用速度入口。燃烧器部分壁面热流为零,燃烧室部分水冷壁为定温 850 K,其余壁面为定温 1 300 K。煤粉颗粒平均粒径为 60  $\mu m$ ,采用 Surface 方式从一次风进口喷入,进口温度为 450 K,进口流量为 0.08 kg/s。出口边界条件为自由出口。

### 1.3 煤种特性及模拟工况

计算所用煤种为神府烟煤,煤质分析结果如表 1 所示。

表1 煤质分析(%)

Tab.1 Analysis of coal quality

$FC_d$	$A_d$	$V_d$	$C_{daf}$	$H_{daf}$	$O_{daf}$	$N_{daf}$
45.88	30.65	23.47	78.79	4.86	14.18	1.42

首先对文献 [7] 中实验工况进行了模拟,以验证计算模型的有效性。在此基础上,模拟无浓缩环、浓缩环距燃烧器端口距离分别为 225、275、325 和 375 mm 时中心给粉旋流燃烧器的  $NO_x$  排放性能。接着固定浓缩环距端口距离,模拟浓缩环间距分别为 20、50、80 和 100 mm 时该燃烧器的  $NO_x$  排放性能。对上述几种工况模拟结果进行了对比。

## 2 模拟结果及分析

### 2.1 模型的验证

为验证模型有效性,在相同结构及工况下,与文献 [7] 实验结果进行了对比,燃烧器出口冷态流场的实验和模拟值对比结果如图 5 所示。

从图中可以看出数值模拟和实验所得到的燃烧器冷态流场基本相同,但模拟所得的回流区的起点要晚于实验时回流区,这是由于模拟时入口送风条件、煤质特性等难与实验完全一致造成的。同时考虑到整个燃烧室的长度,误差在可以接受的范围内,表明模型的建模、网格的划分等方案是可行的。

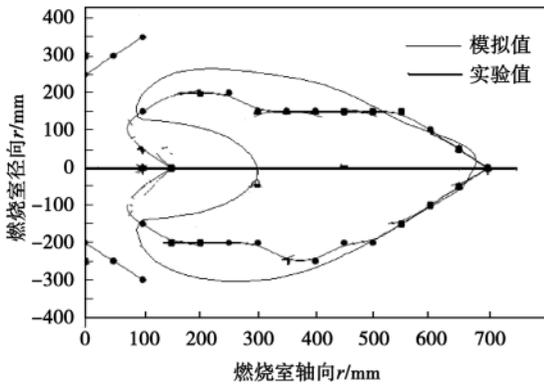


图 5 实验与数值模拟结果对比  
Fig. 5 Comparison of the test results with the numerically simulated ones

2.2 旋流燃烧器 NO<sub>x</sub> 排放性能总体分析

旋流燃烧器的 NO<sub>x</sub> 排放性能是由燃烧器燃烧状态决定的,图 6 ~ 图 8 分别为无浓缩环和有浓缩环时燃烧室部分的 x - y 截面温度场、NO<sub>x</sub> 浓度场和氧气浓度场。从图 6 温度场可以看出,在燃烧器入口区域,煤粉被一次风带入燃烧室后,在燃烧器出口两侧顺着回流区逐渐与二次风混合燃烧并形成局部高温,随着一二次风混合的完成而沿径向向外扩

展,这一区域也是局部缺氧区。同时有浓缩环时的燃烧室高温区持续长度要比无浓缩环时长一些,在氧气浓度场中低浓度 O<sub>2</sub> 区域持续段比较长,由于浓缩环将煤粉浓淡分离后进行燃烧,煤粉燃尽所需的时间要比较长,浓缩环降低 NO<sub>x</sub> 生成的过程也是在此时完成。从温度场与 NO<sub>x</sub> 浓度场的对比可看出,高温区域同时也是 NO<sub>x</sub> 高浓度区,这是因为煤粉在此区域迅速着火燃烧,生成大量 NO<sub>x</sub> 造成的。从 NO<sub>x</sub> 浓度场看出,有浓缩环时 NO<sub>x</sub> 浓度在急剧增大后又有所下降,这是由于附近煤粉与二次风尚未完全混合,处于富燃料燃烧状态,氧气不足而形成还原性气氛,从而将生成的一部分 NO<sub>x</sub> 还原为 N<sub>2</sub>,而无浓缩环时 NO<sub>x</sub> 在燃烧器前半段一直处于较高浓度,在后半段逐渐降低,这是因为没有浓缩环时煤粉进行燃烧的还原性气氛不强,燃烧产生的 NO<sub>x</sub> 被还原的很少,仅仅在后半段燃烧产物的稀释作用下 NO<sub>x</sub> 浓度才逐渐降低。燃烧器一次风通道内浓缩环的作用就是将煤粉进行浓淡分离,在燃烧器一次风通道中心部位形成煤粉高浓度区,而在通道边缘形成低浓度区,这样在燃烧器出口附近的区域即回流区中心为富煤粉燃烧,回流区边缘为富氧燃烧,都会因偏离理论空气比从而总体上降低 NO<sub>x</sub> 的生成。

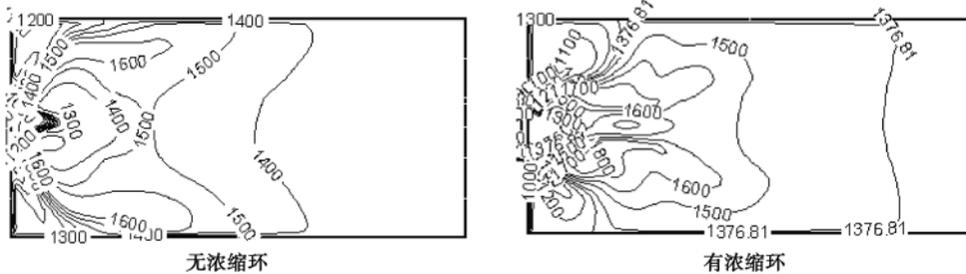


图 6 x - y 截面温度场 (K)  
Fig. 6 Temperature field in the x - y section

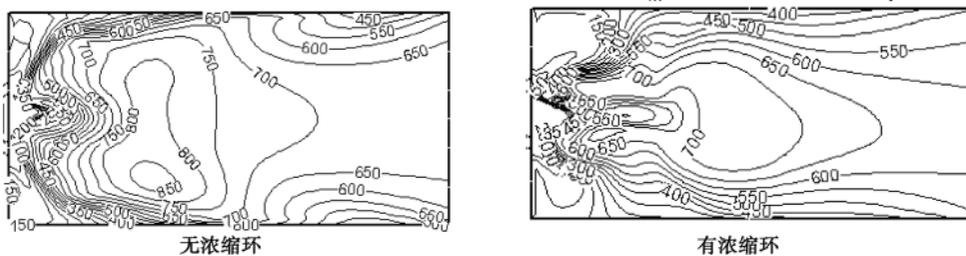


图 7 x - y 截面 NO<sub>x</sub> 浓度场 (mg/m<sup>3</sup>)  
Fig. 7 NO<sub>x</sub> concentration field in the x - y section

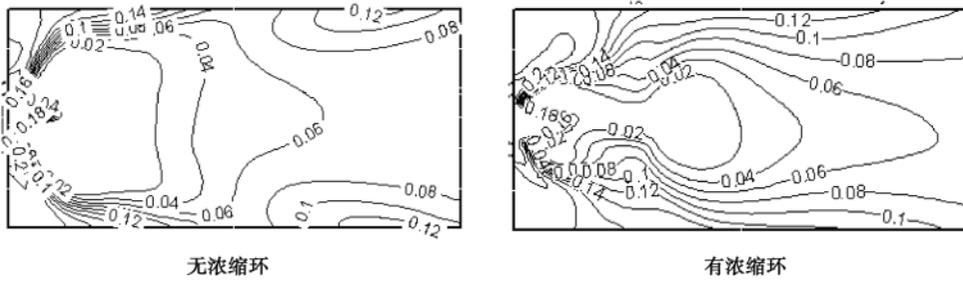


图8 x-y 截面 O<sub>2</sub>浓度场(%)

Fig. 8 Oxygen concentration field in the x-y section

### 2.3 浓缩环结构变化对燃烧器 NO<sub>x</sub> 排放性能的影响

图9、图10分别为几种工况下燃烧器出口沿着燃烧室轴向方向上 NO<sub>x</sub> 的浓度曲线图。从图中可以看出,沿着燃烧室轴向方向,NO<sub>x</sub> 浓度先增大再降低,接着急剧增大,最后缓慢降低并维持到一定水平。这是由于燃烧器出口煤粉的迅速着火燃烧,使 NO<sub>x</sub> 迅速生成,而后由于回流区内富燃料燃烧形成强还原气氛,使得 NO<sub>x</sub> 生成量降低,再随着一二次风的混合使得煤粉继续燃烧,并产生大量 NO<sub>x</sub>,后期由于一部分 NO<sub>x</sub> 被焦炭还原形成 N<sup>2</sup>,同时存在燃烧产物的稀释作用,使得 NO<sub>x</sub> 浓度逐渐降低并维持在一定水平。

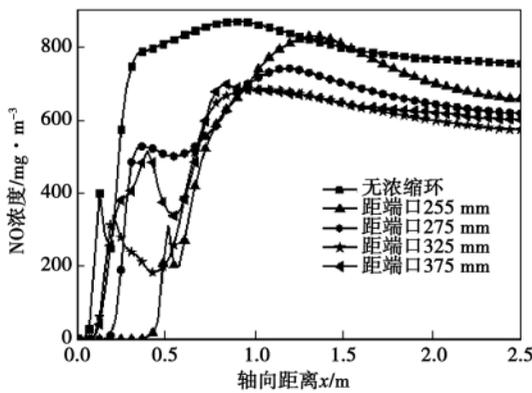


图9 不同浓缩环距端口距离下轴向 NO<sub>x</sub> 浓度

Fig. 9 NO<sub>x</sub> concentration along the axial direction at various distances away from the end port by various concentration rings

从图9中看出,随着浓缩环距燃烧器端口距离由225 mm增大到275 mm,再由275 mm增大到325 mm时,燃烧室出口 NO<sub>x</sub> 排放量都下降 50 mg/m<sup>3</sup>左右,但由325 mm增大到375 mm时,出口 NO<sub>x</sub> 含量反而上升约 30 mg/m<sup>3</sup>。说明浓缩环距燃烧器端口

在一定距离内时,增大这一距离可降低燃烧室出口的 NO<sub>x</sub> 含量,超出这一范围则可能会增大出口的 NO<sub>x</sub> 含量。比较图10中几种工况,随着浓缩环之间间距由20 mm增大到50 mm,由50 mm增大到80 mm时,燃烧室出口 NO<sub>x</sub> 含量依次下降约50和20 mg/m<sup>3</sup>,但由80 mm增大到100 mm时,两条浓度变化线在燃烧室的后半部分几乎重叠,燃烧室出口的 NO<sub>x</sub> 含量也几乎没有变化。说明随着浓缩环间距的增大,燃烧室出口的 NO<sub>x</sub> 排放量下降,到间距为80 mm左右时变化不再明显。而有浓缩环的各个工况与没有浓缩环的工况相比较,出口 NO<sub>x</sub> 浓度都有很明显的降低,无浓缩环时燃烧室出口 NO<sub>x</sub> 含量约 800 mg/m<sup>3</sup>,而有浓缩环时最高者约 700 mg/m<sup>3</sup>,最低者 600 mg/m<sup>3</sup>,降低量在 100 - 200 mg/m<sup>3</sup>左右,说明了浓缩环对降低 NO<sub>x</sub> 排放的显著作用。比较增大浓缩环距端口距离和增大浓缩环间距两种途径,可看到前者对降低 NO<sub>x</sub> 的效果较为显著。

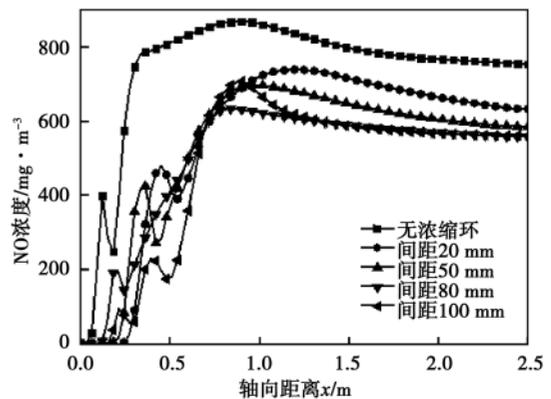


图10 不同浓缩环间距下轴向上 NO<sub>x</sub> 浓度

Fig. 10 NO<sub>x</sub> concentration along the axial direction at various distances away from the end port by various concentration rings

### 3 结 论

通过对无浓缩环、不同浓缩环距燃烧器端口距离及浓缩环之间不同间距下中心给粉旋流燃烧器燃烧情况的数值模拟,得出结论如下:

(1) 旋流燃烧器中浓缩环对降低燃烧生成的  $\text{NO}_x$  有显著效果,降低量在  $100 \sim 200 \text{ mg/m}^3$  左右,  $\text{NO}_x$  排放量也因此相应降低。

(2) 浓缩环与燃烧器端口距离存在极值 325 mm。小于 325 mm 时,增大这一距离可降低燃烧室出口的  $\text{NO}_x$  含量,超过该值时则可能会增大出口的  $\text{NO}_x$  含量。

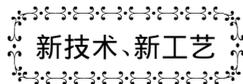
(3) 浓缩环之间的间距最佳值为 80 mm。小于 80 mm 时,随着浓缩环之间间距的增大  $\text{NO}_x$  排放量降低,超过 80 mm 时降低作用则不再明显。

#### 参考文献:

- [1] 李争起,孙悦,陈志超,等.一种中心给粉旋流煤粉燃烧器[P].中国专利 ZL03111101.7 2003.  
LI Zheng-qi, SUN Yue, CHEN Zhi-chao, et al. A pulverized coal central feed swirling burner [P]. China patent, ZL03111101.7 2003.
- [2] Chen Zhichao, Li Zhengqi, Wang Fuqiang, et al. Gas/particle flow characteristics of a centrally fuel rich swirl coal combustion burner [J]. Fuel 2008 87: 2102 - 2110.
- [3] 靖剑平,李争起.中心给粉燃烧器在燃用烟煤 1 025 t/h 锅炉上的应用[J].中国电机工程学报 2008 28(2): 1 - 7.  
JING Jian-ping, LI Zheng-qi. Application of a pulverized coal central feed burner in 1025 t/h boilers burning bituminous coal [J]. Journal of China electric machinery engineering 2008 28(2): 1 - 7.
- [4] Li Zhengqi, Jing Jianping, Chen Zhichao, et al. Combustion charac-

- teristics and  $\text{NO}_x$  emissions of two kinds of swirl burners in a 300-MWe wall-fired pulverized-coal utility boiler [J]. Combustion Science and Technology 2008 180: 1370 - 1394.
- [5] 李志强,魏飞,金涌,等.旋流浓淡燃烧器中煤粉浓缩器对煤燃烧  $\text{NO}_x$  生成的影响[J].化工学报,2003,54(4): 564 - 569.  
LI Zhi-qiang, WEI Fei, JIN Yong, et al. Influence of the pulverized coal concentrator on the production of  $\text{NO}_x$  during coal combustion in a bias swirling burner [J]. Journal of chemical industry 2003, 54(4): 564 - 569.
- [6] 方月兰.旋流式燃烧器炉内空气动力场的数值模拟[D].北京:华北电力大学,2007.30 - 56.  
FANG Yue-lan. Numerical simulation of the aerodynamic flow field inside a swirling type burner boiler [D]. Beijing: North China University of Electric Power 2007: 30 - 56.
- [7] 徐斌.中心给粉旋流煤粉燃烧器在 300 MW 锅炉的应用及实验研究[D].哈尔滨工业大学,2007: 13 - 54.  
XU Bin. Application of the pulverized coal central feed swirling burner in 300 MW boilers and its experimental study [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology 2007: 13 - 54.
- [8] 孙学信.煤粉锅炉燃烧试验技术与方法[M].北京:中国电力出版社,2001: 413 - 449.  
SUN Xue-xin. Pulverized coal boiler combustion test technology and methods [M]. Beijing: China Power Press 2001: 413 - 449.
- [9] 李志强,魏飞,金涌,等.旋流数对旋流煤粉燃烧器  $\text{NO}_x$  生成影响的研究[J].燃烧科学与技术 2003 9(2): 148 - 151.  
LI Zhi-qiang, WEI Fei, JIN Yong, et al. Study of the swirling number on the  $\text{NO}_x$  production of a pulverized coal swirling burner [J]. Combustion science and technology 2003 9(2): 148 - 151.
- [10] 周立行.湍流气力两相流动和燃烧的理论及数值模拟[M].北京:科学出版社,1994: 126 - 195.  
ZHOU Li-hang. Theory and numerical simulation of the turbulent flow gas-particle two-phase flow and combustion [M]. Beijing: Science Press, 1994: 126 - 195.

(陈滨 编辑)



新技术、新工艺

## 余热锅炉启动时高压锅筒应力状态的特点

据《Теплоэнергетика》2011 年 8 月刊报道,俄罗斯 МЭИ(莫斯科动力学院)的专家深入研究了蒸燃联合装置中余热锅炉启动时高压锅筒应力状态的特性。

介绍了启动时余热锅炉高压锅筒壁应力状态的研究成果,并分析了压力增加速度对锅筒内最大应力的影响。

提出了余热锅炉的最佳加载速度范围值。

(吉桂明 摘译)

lation

富氧燃烧条件下煤焦特性研究 = **Study of the Characteristics of Coal Coke Under the Condition of Oxygen-enriched Combustion** [刊, 汉] SUN Shao-zeng, CHEN Hao, MENG Xian-yu, CAO Hua-li ( College of Energy Source Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27(2). - 192 ~ 196

With Datong-originated bituminous coal serving as an object of study, on a high temperature carry-over flow simulation reactor, coal coke in an atmosphere for real oxygen-enriched combustion was prepared by using Datong-originated bituminous coal and a horizontal flow flame combustor. An industrial analysis was performed of the coal coke prepared at various residence times with the influence of the residence time on the burn-out rate, fixed carbon and volatile content of the coal coke being discussed. When the residence time is over 94 ms, various parameters of the coal coke are kept unchanged. By using a thermogravimetric analyzer, a combustion test of coal coke was conducted and the influence of various atmospheres at different  $O_2/CO_2$  ratios ( 20/80, 30/70 and 40/60) on the combustion characteristics of coal coke was discussed. Furthermore, the Coats-Refern method was employed to calculate the activated energy, pre-exponential factor and other dynamic parameters of coal coke. When temperature ranges from 460 to 660 °C and  $O_2/CO_2$  ratio of the background atmosphere reaches 30/70, the activated energy and pre-exponential factor of coal coke attain their maximal values, thus offering a theoretical basis for further studying the combustion reaction of coal coke in the oxygen-enriched combustion atmosphere. **Key words:** oxygen-enriched combustion, coal coke, activated energy

浓缩环对旋流燃烧器  $NO_x$  生成影响的数值模拟 = **Numerical Study of the Influence of Concentration Rings on the Formation of  $NO_x$  Produced By Swirl Burners** [刊, 汉] BI Ming-shu, ZHAO Yao-guang ( College of Chemical Industry Machinery, Dalian University of Science and Technology, Dalian, China, Post Code: 116024) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27(2). - 197 ~ 201

By using the CFD software Fluent, a combustion numerical simulation was performed of a centrally-fed pulverized coal swirl burner. In this connection, the influence of the concentration rings on the formation of  $NO_x$  produced by the burner was investigated, the temperature field, oxygen concentration field and  $NO_x$  concentration field, including thermal  $NO_x$ , fuel  $NO_x$  and prompt  $NO_x$ , were analyzed when the burner was in its combustion and the  $NO_x$  concentration curves along the axial direction at various concentration ring configurations were compared. The simulation results show that the concentration rings can lower the  $NO_x$  production capacity of the burner by 100 ~ 200 mg/ $m^3$ . To adjust both distance of the concentration rings to the port and their intervals can reduce  $NO_x$  emissions of

the burner optimum values of which are 325 mm and 80 mm respectively. **Key words:** swirl burner, concentration ring,  $\text{NO}_x$ , numerical simulation

低热值煤层气燃烧器结构优化的实验研究 = **Experimental Study of the Structural Optimization of a LHV (low heating value) Coal-bed Gas Burner** [刊, 汉] CAI Song, ZHANG Li, PU Ge, ZHOU Jin (Education Ministry Key Laboratory on “Low Quality Energy Source Utilization Technologies and Systems”, Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27(2). - 202 ~ 206

Optimized and designed was a LHV coal-bed gas burner with guiding vanes being mounted in the gas tube and a once-through air tube being additionally installed between the swirling flow air tube and the gas tube. Finally, a cold-state and hot-state test were performed respectively of the burner under discussion. The optimized burner has a smoother and slower swirling flow intensity descending along the center axes than the original one and the intensity of the optimized one at a same location on the center axes is bigger than that of the original. The former has a maximal swirling flow intensity of 0.53 and a combustion temperature rise quicker than the latter along the center axes. At a distance of 0.55 m on the center axes, the combustion temperature attains its maximal value of 1440 K. At a same heat load, the temperature peak value of the former is more close to the spout and also bigger than the latter. Furthermore, the original has a higher tail portion flame temperature, a longer flame and a lower local volumetric heat intensity. **Key words:** swirling flow intensity, flame temperature, burner, LHV (low heating value) coal-bed gas burner

多孔介质回热微燃烧器预混燃烧特性研究 = **Study of the Pre-mixed Combustion Characteristics of a Porous Medium Heat Recuperation Micro-burner** [刊, 汉] CAO Hai-liang, ZHANG Kai, ZHANG Suo-guo, ZHAO Ji-na (College of Chemical Engineering and Energy Source, Zhengzhou University, Zhengzhou, China, Post Code: 450001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27(2). - 207 ~ 211

Designed was a porous medium heat recuperation micro-burner and experimentally studied and numerically simulated were its  $\text{H}_2/\text{A}_k$  premixed combustion characteristics. The test results show that when the excess air factor falls in a range of  $1.0 < \alpha < 3.0$ , the burner has a relatively high combustion efficiency and outlet flue gas temperature and a relatively low combustion heat loss. Furthermore, the higher the combustion heat power  $P$ , the bigger the  $\alpha$  and the smaller the heat loss rate. When  $P = 100 \text{ W}$ , the maximum outlet flue gas temperature can hit 1232 K. When  $\alpha = 3.0$ , the combustion efficiency still can reach 96.85% while the heat loss rate is only 14.87%. The numerical simulation results show that due to an adoption of a heat recuperation interlayer and porous medium heat recuperation