煤粉锅炉氮氧化物排放影响因素的数值模拟

夏小霞¹,王志奇^{1,2},徐顺生¹

(1. 湘潭大学 机械工程学院,湖南 湘潭,411105;

2. 中南大学 能源科学与工程学院,湖南 长沙, 410083)

摘 要:针对1台35 t/h 煤粉锅炉,应用数值模拟的方法,研究配风方式、煤粉粒径以及空气过量系数对 NO_x 排 放的影响。模拟结果表明:在计算的几种工况中,束腰型送风方式生成的 NO_x 浓度最低,倒塔型的次之,而均匀 型的最大;相比均匀型配风方式,束腰型配风方式的 NO_x 排放浓度可降低 15.6%;当三次风比例从 20%增大到 25% 时,NO_x 排放浓度可降低 20.5%;锅炉 NO_x 排放随着煤粉粒径的减小而明显降低;与设计工况相比,当煤粉粒径 由 90 μm 降低至 50 μm 时,NO_x 的排放浓度可降低 14.3%;随着过量空气系数的减小,锅炉出口处的 NO_x浓度减 小,合适的过量空气系数为 1.1,此时 NO_x 排放浓度可降低 5.8%。

关键词:煤粉锅炉;数值模拟;NO_x排放;配风方式

中图分类号: TK227 文献标志码: A 文章编号: 1672-7207(2010)05-2046-07

Numerical simulation on influence factors of NO_x emissions for pulverized coal boiler

XIA Xiao-xia¹, WANG Zhi-qi^{1, 2}, XU Shun-sheng¹

(1. Institute of Mechanical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China;
 2. School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The effects of air distribution, particle size and excess air rate on NO_x emissions for a 35 t/h pulverized coal boiler were researched by numerical simulation. The results show that the concentration of NO_x produced by girdled air distribution is the lowest, among the several combustion conditions, followed by the reverse-tower type, and the type of equal air distribution produces the highest concentration. There is a 15.6% decrease in NO_x emissions of girdled air distribution compared with the equal type. When the rate of third air increases from 20% to 25%, concentration of NO_x decreases by 20.5% compared with equal type. The concentration of NO_x decreases obviously with the decrement of pulverized coal size. Compared with the original condition, it can decrease by 14.3% when the average diameter of pulverized coal is 50 μ m. The concentration of NO_x decreases with the decrement of excess air rate. The proper excess air ratio is 1.1 for the boiler. In this condition, the concentration of NO_x can decrease by 5.8% compared with the original condition.

Key words: pulverized coal boiler; numerical simulation; NO_x emissions; air distribution type

目前,氮氧化物的排放问题越来越引起社会的重视。煤粉燃烧是氮氧化物排放的主要来源,而我国的产煤主要用于火力发电。据统计,2005年我国发电用煤约占总产煤量的 53.6%^[1]。火电厂中,除大型煤粉

锅炉外,我国还运行着大量的中小型燃煤锅炉。2005年,我国中小型煤粉锅炉的燃煤量约占锅炉总消耗量的 25%^[2]。这些锅炉一般不考虑排烟脱硝,从而造成 NO_x 排放浓度高、控制困难。因此,降低中小型煤粉

收稿日期: 2010-01-03; 修回日期: 2010-04-15

基金项目:湖南省教育厅科研基金资助项目(07C749);湖南省自然科学基金资助项目(07JJ5069);湖南省自然科学市州联合基金资助项目(09JJ9011) 通信作者:夏小霞(1980-),女,湖南常德人,讲师,从事热工设备的仿真与优化;电话:15897323160; E-mail:xxx620@xtu.edu.cn

锅炉的 NO_x 排放对缓解我国日益严峻的环境问题具有 重要意义。为降低煤粉锅炉 NO_x 排放量,近年来,国 内外学者从分级燃烧、煤粉再燃及三次风优化等方面 对炉内 NO_x 的生成情况进行了模拟研究,并提出一些 改进措施^[3-7]。然而,这些研究工作主要针对大型燃煤 锅炉,难以在中小型燃煤锅炉中推广应用。目前,关 于降低中小型煤粉锅炉 NO_x 排放的报道较少。本文作 者以一台 35 t/h 的煤粉锅炉为研究对象,运用 CFD 方 法针重点研究锅炉配风方式、过量空气系数及煤粉粒 径对 NO_x 排放的影响,为降低中小型燃煤锅炉的 NO_x 排放提供理论依据。

1 物理模型

1.1 研究对象及操作参数

以1台35 th 的燃煤锅炉为研究对象。炉膛横截 面面积为4200 mm×4200 mm,燃烧设备为四角布置 切向燃烧,在炉膛内形成直径为400 mm的假想切圆。 燃烧器由2层一次风喷口、3层二次风喷口、1层三次 风喷口组成,燃烧器的布置如图1所示。锅炉燃用的 是挥发分较高的烟煤,其平均粒径为 90 μm,煤的工 业分析及元素分析结果如表 1 所示。

1.2 网格划分

网格是数值计算的基础,网格质量直接影响数值 解的计算精度。在对锅炉进行网格划分时,需要重视 计算时产生的伪扩散问题。二维流动时,伪扩散系数 的表示式为^[8]:

$$\Gamma_{\rm f} = \frac{\rho U \Delta x \Delta y \sin 2\theta}{4(\Delta x \cos^3 \theta + \Delta y \sin^3 \theta)}$$
(1)

式中: Δx 和Δy 分别表征网格 x 方向和 y 方向的长度; ρ 为流体密度; U 为合速度; θ 为合速度与网格线方向 之间的夹角。从式(1)可知: 当流动方向与网格线方向 夹角为 45°时, 伪扩散最大; 当流动和网格线成 1 条 直线时, 伪扩散最小。

当采用 Paving 方法对燃烧器部分的炉膛横截面划 分网格时,能降低伪扩散对计算准确性的影响^[9]。在 生成炉膛横截面网格后,再将网格沿着高度方向延伸, 生成体网格。锅炉横断面及整体网格划分如图 2 所示, 网格数约为 25 万。从图 2 可以看出: Paving 方法生成 的辐射状网格线与四角射流的气流轨迹基本平行,减 小了网格线与流线的夹角,有助于降低伪扩散。



Fig.1 Sketch of boiler and burners

表1 煤的元素分析及工业	分析
--------------	----

Table 1 Fuel elemental and industrial analysis								
元素分析			工业分析			$O (I_{1}a^{-1})$		
w(C _{ar})/%	w(H _{ar})/%	w(O _{ar})/%	w(N _{ar})/%	w(S _{ar})/%	w(A _d)/%	w(C _d)/%	w(V _d)/%	Qnet,daf (J'g)
82.28	5.46	10.26	1.33	0.67	23.45	34.33	42.22	32 470

注: 下标 ar 表示收到基; d 表示干燥基; A 为灰分; V 为挥发分; Q_{net,daf} 为干燥无灰基时煤的低位发热量。



2 数学模型及边界条件

2.1 数学模型

采用三维稳态和 Simple 算法进行模拟计算。将气 相作为连续相介质,采用标准 k-ε 湍流模型模拟气相 湍流,用混合分数-概率密度函数模拟气相燃烧,用 P-1 辐射模型对空间的辐射传热进行模拟^[10-11]。将煤 粉颗粒看作离散相物质,颗粒相采用拉格朗日颗粒轨 道模型,颗粒直径分布遵循 Rosin Rammler 分布。采 用单步反应模型模拟挥发分的析出,煤粉颗粒的表面 燃烧采用动力/扩散反应速率模型模拟^[12-14]。

锅炉内三维气相流动、能量平衡的控制方程可写 成如下统一形式:

$$\frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w\phi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial\phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial\phi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial\phi}{\partial z}\right) + S_{\phi} + S_{p} \quad (2)$$

式中: Γ_{ϕ} 为扩散系数; S_{ϕ} 为气相引起的源项; S_{p} 为固体颗粒引起的源项; ϕ 为通量,分别代表速度 u, v和 w以及湍流动能 k、湍动能耗散率 ε 、时均混合分数 \bar{f} 、混合分数脉动均方值 g、焓 h和 i 组分的质量分数 Y_{i} 。当 ϕ =1 时,式(2)即为连续性方程。

采用单步反应模型来模拟挥发分的析出,该模型 假设挥发分析出速率与颗粒中保持的挥发分含量呈一 次幂的关系,可用下式表示:

$$\frac{dm_{\rm p}}{dt} = K \Big[m_{\rm p} - (1 - f_{\nu 0}) m_{\rm p0} \Big]$$
(3)

$$K = A_1 e^{-E/(RT)} \tag{4}$$

式中: m_p 为煤粉颗粒质量, kg; f_{v0} 为煤粉颗粒初始挥 发分的质量分数; m_{p0} 为煤粉颗粒的初始质量, kg; K为反应速率常数; A_1 为指前因子, A_1 =492 000; E 为 活化能, E=7.4×10⁷ kJ/mol。

NO_x的生成机理有 3 种: 热力型 NO_x, 快速型 NO_x 和燃料型 NO_x。一般地,在煤粉燃烧炉内生成的快速 型 NO_x的量很少,可以忽略不计。热力 NO_x可根据广 义的 Zeldovich 机理计算^[15], NO 的变化率为:

$$\frac{dx(NO)}{dt} = 2\rho_1 k_1 Y_{N_2} x(O) \frac{M_{NO}}{M_{N_2}}$$
(5)

式中: M_i 为 *i* 种组分的物质的量; Y_i 为 *i* 种组分的质量分数; k_1 为反应常数,为 $1.8 \times 10^8 e^{38 370/T}$; x(NO)为NO的摩尔分数; x(O)为氧原子的摩尔分数; ρ_1 为NO的密度, kg/m⁻³。

燃料型 NO_x生成机理如图 3 所示。热解中间产物 为 HCN,挥发分中的氮首先转化为 HCN,HCN 可以 被 O₂氧化成 NO,也可以被 NO 还原为 N₂;焦炭中的 氮直接转化为 NO^[16]。NO_x采用后处理方法,用 PDF 模型求解湍流下 NO_x的生成特性,即在整个炉膛流动、 传热和燃烧过程计算出收敛结果后再进行计算。 焦炭N 推发份N→ HCN 1: O₂ NO 3: 焦炭 ↓ 2: NO N₂ 图 3 NO_x生成机理

Fig.3 NO_x emission mechanisms

2.2 边界条件

2.2.1 入口条件

对于连续相,其入口边界条件为燃烧器各层喷口 的速度和温度,各层喷口的操作参数如表2所示。对 于离散相,煤粉颗粒由一次风喷口喷入炉膛,假定喷 口处颗粒的速度和温度与一次风的一致。

表2 燃烧器喷口参数

Table 2 Parameters of burner injectors

风类型	风速/(m·s ⁻¹)	风温/K	风率/%
一次风	22	623	25
二次风	42	623	55
三次风	45	353	20

2.2.2 出口条件

假定出口平面的流动为充分发展流,即所有变量 在流动方向上的梯度为 0。

2.2.3 壁面边界条件

对于气相,将炉膛壁面处理为无滑移和无质量渗 透条件,对近壁面区域采用标准壁面函数处理。对于 煤粉颗粒,假定颗粒与壁面之间为弹性碰撞。

3 计算结果及分析

3.1 配风方式对 NO_x 排放的影响

表 3 列出了不同工况下的配风方式,其中:工况 I为设计工况,采用均匀型的配风方式。在不同工况 下,煤粉锅炉内不同截面的平均温度、O₂浓度、CO 浓度及 NO₂浓度随高度的变化情况如图 4~7 所示。

从图 4 可以看出: 在不同配风方式下,截面平均 温度随炉膛高度的变化规律基本相同。沿炉膛高度方 向,当一次风和煤粉喷入时(y=1.2 m),炉内的温度迅 速增高。随着燃尽风的喷入,煤粉得到充分燃烧,炉 膛的温度进一步升高,截面平均最高温度出现在中二 次风喷口处(y=1.9 m)。随着炉膛高度的升高,燃烧逐

表3 不同工况下的配风方式

 Table 3
 Air distribution rate for boiler under

....

different conditions							
工况	下二次 风率/%	中二次 风率/%	上二次 风率/%	三次 风率/%	配风 方式		
Ι	18.3	18.3	18.3	20.0	均匀型		
II	20.0	15.0	20.0	20.0	束腰型		
III	16.0	18.0	21.0	20.0	倒塔型		
IV	18.0	14.0	18.0	25.0	束腰型		
V	13.0	17.0	20.0	25.0	倒塔型		

注:所有工况的一次风率均为25%。















height of boiler







渐减弱,同时,由于水冷壁的吸热,炉膛温度逐渐降低。配风方式对炉内温度有一定影响。几种方式中, 均匀型送风的截面平均温度最高,最高平均温度为 1645 K;束腰送风及倒塔型送风的最高截面平均温度 分别为1542 K 和1582 K。此外,三次风率也会对炉 内温度造成一定影响。当三次风率增加时,炉膛内的 截面最高平均温度有所降低。工况IV和工况V对应的 最高平均温度分别为1532 K 和1563 K。

从图 5 可以看出:沿炉膛高度方向,炉内各截面 的平均 O₂浓度明显出现了 2 个峰值,一个位于下二次 风 截 面 (y=1.0 m), 另一个位于上二次风 截 面 (y=2.27 m)。在一次风喷入的区域,由于煤粉燃烧消耗 了大量的氧气,因此,出现一个低氧区。在这 5 种工 况中,工况 I 的氧气浓度最高,因此,煤粉燃烧充分, 炉膛温度高。在燃烧器区域,由于送入的中二次风率 较少,束腰型送风的氧气浓度低于倒塔型送风的氧气 浓度。

从图 6 可以看出: CO 浓度沿高度方向出现 1 个 明显的峰值,峰值位于上一次风喷口处的低氧区 (y=1.5 m)。在主燃烧区域,工况 I 的 CO 浓度最低, 而其他几种工况下的 CO 浓度都比较高;随着三次风 率的增加,不同送风方式下的最高 CO 浓度有所增大。

从图 7 可以看出: NO_x的低浓度区位于燃烧器区 域(y=1.5 m)。这主要是由于该区域 O₂浓度低, CO 浓 度高,形成了还原性气氛,抑制了燃料型 NO_x的生成。 而随着燃尽风的喷入,炉内的 O₂含量迅速增加,NO_x 浓度也迅速增加。其原因可能是温度急剧升高,高温 促进热力型 NO_x的生成。在采用均匀送风的设计工况 下,炉膛出口处的 NO_x浓度为 1 017.8×10⁻⁶,这与文 献[17]中的结果一致。对于工况 II 和工况III,出口截 面的平均 NO_x浓度分别为 858.8×10⁻⁶和 906.1×10⁻⁶。 可以看出: 配风方式对 NO_x 排放浓度有较大影响。3 种送风方式中,均匀型送风生成的 NO_x浓度最高,这 与 O₂含量高是对应的,倒塔型送风次之,而束腰型送 风最低;与均匀型送风相比,束腰型送风的 NO_x排放 浓度可降低 15.6%。

当三次风率从 20%增加到 25%时,工况IV和工况 V 对应的 NO_x浓度分别为 808.5×10⁻⁶ 和 864.4×10⁻⁶, 锅炉的 NO_x排放进一步降低。这主要是由于三次风率 增加时, 膛燃烧温度降低, 减少了热力型 NO_x的生成; 同时, 燃烧器区域的 O₂浓度降低,降低了燃料型 NO_x 的生成。相比均匀型配风方式(工况 I),倒塔型(工况 V)和束腰型配风方式(工况IV)的 NO_x排放浓度分别降 低了 15.1%和 20.5%。

3.2 煤粉粒径对 NO_x 排放的影响

锅炉出口 NO_x浓度随煤粉粒径的变化规律如图 8 所示。

从图 8 可以看出: 煤粉粒径对生成的 NO_x浓度有 较大的影响。随着煤粉粒径的减小,锅炉 NO_x的排放 浓度明显降低。当煤粉粒径从 130 μ m 减小到 50 μ m 时, NO_x的排放浓度从 1.12×10⁻³降低至 0.87×10⁻³, 降低了 22.3%。相比设计工况所采用的 90 μ m 煤粉, 当粒径降低至 50 μ m 时, NO_x的排放浓度可降低 14.3%。这主要是由于随着煤粉颗粒的细化,其燃烧 速率提高,O₂的消耗加速,使颗粒表面附近的氧气分



压力迅速降低,有效抑制了燃料型 NO_x的生成。另一 方面,燃烧速率提高增加了挥发分的析出量,使单位 质量焦炭参与化学反应的比表面积增大,NO 与焦炭 间的还原过程增强。

3.3 过量空气系数对 NO_x 排放的影响

采用不同过量空气系数时,锅炉出口处的 NO_x浓度及 CO 浓度如图 9 所示。



变化情况

Fig.9 Average NO_x and CO concentration at outlet versus excess air rate

从图 9 可以看出:过量空气系数对 NO_x 的生成产 生了明显的影响;随着过量空气系数的减小,炉膛出 口处的 NO_x浓度明显减小;当 α =1.2 时,出口处 NO_x 的浓度为 1.02×10⁻³;当 α =0.8 时,NO_x 的浓度为 0.71×10⁻³,降低了 30.4%。此外,当过量空气系数降 低时,炉膛出口处的 CO 浓度逐渐增大,不完全燃烧 损失增大,将降低锅炉的燃烧效率。合适的过量空气 系数可取 1.1。此时,NO_x浓度为 0.96×10⁻³,比设计 工况(α =1.2 时)降低了 5.8%。

4 结论

(1) 配风方式对 NO_x 生成有较大影响。3 种配风 方式中,束腰型配风方式炉内温度和生成的 NO_x浓度 最小,倒塔型配风方式次之,而均匀型配风方式生成 的 NO_x浓度最大。与均匀型配风方式相比,束腰型配 风方式可有效减小 NO_x排放浓度。

(2) 适当增大三次风的送风比例能降低 NO_x 的排 放浓度。当三次风比例从 20%增大到 25%时,与均匀 型配风方式相比,束腰型配风方式的 NO_x 排放浓度可 降低 20.5%。

(3) 煤粉粒径对 NO_x 排放浓度产生明显的影响。 与设计工况相比,当粒径降低至 50 μm 时, NO_x 的排 放浓度可降低 14.3%。

(4) 随着过量空气系数的减小,炉内整体温度降低,NO_x的排放浓度减小。对所研究的锅炉,合适的过量空气系数为 1.1,此时,煤粉燃烧较充分,NO_x的排放可降低 5.8%。

参考文献:

- WANG H, Nakata T. Analysis of the market penetration of clean coal technologies and its impacts in China's electricity sector[J]. Energy Policy, 2009, 37(1): 338-351.
- [2] YU Zhao, WANG Shu-xiao, LEI Duan, et al. Primary air pollutant emissions of coal-fired power plants in China: Current status and future prediction[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(36): 8442-8452.
- [3] 苟湘,周俊虎,周志军,等.•三次风对四角切圆锅炉燃烧和 NO_x排放的影响[J].中国电机工程学报,2008,28(8):7-12.
 GOU Xiang, ZHOU Jun-hu, ZHOU Zhi-jun, et al. Tertiary-air effects on combustion and NO_x emission in tangentially fired furnace[J]. Proceeding of the CSEE, 2008, 28(8): 7-12.
- [4] Srdjan B, Miroslav S, Dragan T, et al. A numerical study of a utility boiler tangentially-fired furnace under different operating conditions[J]. Fuel, 2008, 87(15): 3353-3361.
- [5] 贾艳艳, 毕明树, 柳智. 煤种对超细煤粉再燃脱硝效率影响 的数值研究[J]. 热能动力工程, 2007, 22(5): 542-548. JIA Yan-yan, BI Ming-shu, LIU Zhi. A numerical study of the influence of coal ranks on reburning based denitration efficiency of superfine pulverized coal[J]. Journal of Engineering for

Thermal Energy & Power, 2007, 22(5): 542-548.

- [6] Luis D, Cristobal C, Javier P. Numerical investigation of NO_x emissions from a tangentially-fired utility boiler under conventional and overfire air operation[J]. Fuel, 2008, 87(7): 1259-1269.
- [7] Mana C, Gibbinsa J R, Witkamp J G, et al. Coal characterisation for NO_x prediction in air-staged combustion of pulverised coals[J]. Fuel, 2005, 84(17): 2190–2195.
- [8] 王志刚, 禚玉群, 陈昌和, 等. 四角切圆锅炉流场伪扩散效应
 网格的研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(5): 22-28.
 WANG Zhi-gang, ZHUO Yu-qun, CHEN Chang-he, et al. Mesh investigation about crossflow diffusion of computational flow dynamics in tangential combustion flow field[J]. Proceeding of the CSEE, 2007, 27(5): 22-28.
- [9] 刘向军, 徐旭常. 采用不同网格比较伪扩散对四角切圆型炉 膛流场计算的影响[J]. 燃烧科学与技术, 1997, 3(2): 114-117. LIU Xiang-jun, XU Xu-chang. Comparison of the influence of pseudo diffusion on the numerical simulation of flow field in a tangential firing furnace with different grid systems[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 1997, 3(2): 114-117.
- [10] Srdjan B, Miroslav S, Simeon O, et al. Three-dimensional modeling of utility boiler pulverized coal tangentially fired furnace[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(7): 1970-1978.
- [11] 张家元,周孑民,闫红杰. 煤粉锅炉膜法富氧局部助燃技术
 [J]. 中南大学学报:自然科学版,2007,38(5):857-862.
 ZHANG Jia-yuan, ZHOU Jie-min, YAN Hong-jie. Technology of local supporting-combustion by membrane oxygen-enrichment for pulverized coal boiler[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2007, 38(5): 857-862.

- [12] 阎维平, 刘亚芝, 黄景立. 300 MW 四角切圆煤粉锅炉燃烧和 NO_x排放的数值模拟[J]. 电站系统工程, 2007, 23(2): 11-13. YAN Wei-ping, LIU Ya-zhi, HUANG Jing-li. Numerical simulation of combustion and NO_x generation process in a 300 MW tangentially pulverized coal fired boiler[J]. Power System Engineering, 2007, 23(2): 11-13.
- [13] SU Sheng, XIANG Jun, SUN Lu-shi, et al. Application of gaseous fuel reburning for controlling nitric oxide emissions in boilers[J]. Fuel Processing Technology, 2008, 90(3): 1–7.
- [14] 刘泰生,周武,叶恩清. 燃尽风对炉内流动和燃烧过程影响 的数值模拟[J]. 动力工程, 2006, 26(1): 116-120.
 LIU Tai-sheng, ZHOU Wu, YE En-qing. Numerical simulation of the effect of over-Fire air on flow and combustion in furnaces[J]. Power Engineering, 2006, 26(1): 116-120.
- [15] LI Kang, Steve T, PENG Jian-xun. Modeling and prediction of NO_x emission in a coal-fired power generation plant[J]. Control Engineering Practice, 2004, 12(6): 707–723.
- [16] 张颉, 吴少华, 孙锐, 等. 350 MW 燃煤锅炉燃烧过程和 NO. 排放的数值研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(9): 1239-1244.

ZHANG Jie, WU Shao-hua, SUN Rui, et al. Numerical study on combustion process and NO_x emissions in a 350 MW pulverized coal fired boiler[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004, 36(9): 1239–1244.

[17] 柳智. 超细煤粉再燃技术降低 NO_x 的数值模拟[D]. 大连: 大 连理工大学化工学院, 2006: 65-66.

LIU Zhi. The numerical simulation on micronized coal reburning technology for reducing NO_x emission[D]. Dalian: Dalian University of Technology. College of Chemical Engineering, 2006: 65–66.

(编辑 赵俊)