

基于数值计算的煤粉锅炉NO_x释放规律研究

李钧, 阎维平, 李春燕, 梁秀俊, 米翠丽

(电站设备状态监测与控制教育部重点实验室(华北电力大学), 河北省保定市 071003)

Study on NO_x Emission Characteristics of Pulverized Coal Fired Boiler

LI Jun, YAN Wei-ping, LI Chun-yan, LIANG Xiu-jun, MI Cui-li

(Key Laboratory of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment (North China Electric Power University),
Ministry of Education, Baoding 071003, Hebei Province, China)

ABSTRACT: Numerical simulation of the NO_x emission in the 300 MW tangentially pulverized coal fired boiler was performed using the software of COALFIRE based on TASCFLOW software platform. The influences of coal rank, coal particle size, boiler load and distribution of secondary air were discussed. The NO_x distribution along the height was put forward, which can be referenced for the optimal and safety operation of boiler. The results show that increased volatile and nitrogen content lead to increased NO_x density; decreased coal particle size leads to decreased NO_x formation; when boiler load reduces 20% and 40%, NO_x density drops 6.7% and 28% individually; the reverse tower type of distribution of secondary air is helpful for reducing the NO_x emission and the NO_x density is 11% lower when tertiary air running.

KEY WORDS: tangentially pulverized coal fired boiler; furnace process; numerical simulation; COALFIRE; NO_x emission

摘要: 运用基于TASCFLOW软件平台的四角切圆燃烧煤粉锅炉专用数值模拟计算软件COALFIRE, 对某电厂300 MW四角切圆煤粉锅炉NO_x排放特性进行数值模拟。讨论煤质、煤粉粒度、锅炉负荷、二次风配风方式的影响, 指出炉膛沿程NO_x的排放规律, 为锅炉的安全经济运行提供参考。模拟结果表明: 燃煤挥发分和含氮量高的煤, NO_x析出浓度也比较高; 较细的煤粉有利于降低NO_x的生成; 机组负荷下降20%, NO_x下降6.74%。机组负荷下降40%, NO_x下降到383 mg/m³, 下降了约28%; 倒宝塔配风有利于降低NO_x生成, 三次风投运时NO_x排放浓度比停运时低11%。

关键词: 四角切圆煤粉锅炉; 炉内过程; 数值模拟; COALFIRE软件; NO_x排放

0 引言

NO_x是造成大气污染的主要污染源之一, 其危

害在于NO与臭氧分子反应破坏臭氧层; 吸收中心波长7.78、8.56和169.98 μm的长波红外辐射, 是引起地表温度升高的主要温室气体之一; 排入大气平流层中形成硝酸, 是酸雨的重要成分之一; NO_x受太阳光照射会释放出活性氧原子, 形成强氧化物质, 对人、植物极为有害。而我国NO_x的排放70%以上来源于燃煤电站锅炉^[1-3]。煤粉燃烧十分复杂, 煤种、燃烧工况等因素对NO_x生成影响很大。迄今为止, 对锅炉的设计和运行缺乏成熟的理论经验, 往往需要冷态及热态试验来确定运行和设计参数, 这类试验周期长, 耗资巨大, 且很难得到全面、满意的数据^[4-8]。因此利用数值计算方法, 了解炉内过程, 全面模拟炉内的湍流流动、传热、燃烧和污染物释放规律等是很有必要的。

现有文献多利用FLUENT等通用数值软件对煤粉燃烧NO_x排放特性进行研究^[9-13], 由于该软件没有专门考虑四角切圆燃烧煤粉锅炉的特点, 在网格划分、设置求解器、残差曲线监视等方面还存在不足。TSACFLOW-CFX/COALFIRE炉内过程计算软件是由华北电力大学等3家国内研究机构与加拿大能源技术研究中心, 与CFX开发商AEA-T公司在国际合作CIDA项目资助下经过数年的研究开发, 专门针对四角切圆燃烧煤粉锅炉的燃烧特点与炉膛环境下NO_x的生成特点开发设计, 该软件基于具有较好计算精度的TSACFLOW-CFX平台^[14-17], 可以很详细地考虑四角切圆锅炉的结构细节, 计算模型精细化程度很高, 可以计算得到炉内温度、流速、烟气组分、颗粒、NO_x等的详细分布, 并已经得到大量实际数据的验证, 预测的各主要参数的变化趋势能够满足实际燃烧运行调整的需要。

COALFIRE 使 CFD 模拟计算的前后处理阶段大大简化, 并采用智能运算控制自动收敛计算。软件采用的自动网格生成程序, 将耗费大量人力的网格生成过程, 简化为只需在屏幕上输入相应的尺寸, 网格便会自动生成。同时, 软件也使得 CFD 模拟的后处理过程大大简化, 在计算结束后, 自动生成计算报告。各边界条件的输入, 燃煤特性的输入, 采用软件提示的方式, 方便而快捷。构建的燃煤特性及喷口数据库, 可以方便用户的选择, 使边界条件的输入更加容易。

目前在国内运行的 300 MW 及以上锅炉均采用了各种各样先进的低 NO_x 燃烧技术, 如低氮燃烧器、烟气再循环、燃烧分级技术等^[18-20]。 NO_x 的释放特性不仅与煤粉本身的物理化学特性有关, 还取决于燃烧过程中的环境因素, 所以随运行条件的改变, 如当燃用煤种及操作方式变化时, NO_x 排放值的变化很大, 在实验中很难找到规律性。因此, 有必要利用数值计算的方法, 以某 300 MW 四角切圆煤粉锅炉为研究对象, 对电站锅炉煤粉燃烧过程中 NO_x 排放规律进行试验研究, 以探讨 NO_x 析出规律, 为优化燃烧、控制污染物排放提供理论支持。

1 模拟对象

本文模拟的对象是由东方锅炉厂生产的 DG1025/18.2-IV 型亚临界、中间再热、自然循环、燃煤汽包锅炉。该锅炉为单炉膛 Π 型布置, 配有中储式制粉系统, 采用四角切圆燃烧, 直流摆动式燃烧器, 固态除渣。其结构示意图如图 1 所示。整组燃烧器设 5 层一次风喷口, 9 层二次风喷口和 1 层三次风喷口, 二次风和一次风间隔布置, 如图 2 所示。

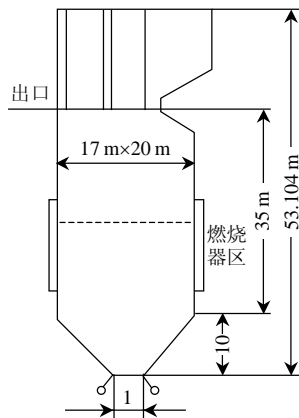


图1 炉膛结构示意图

Fig.1 Furnace structure

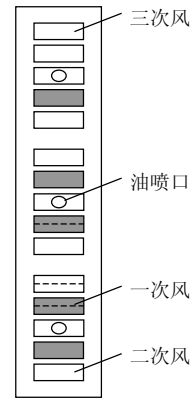


图2 燃烧器结构示意图

Fig.2 Burners structure

2 NO 生成特性模拟方法

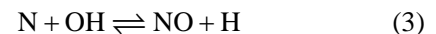
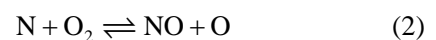
在通常的燃烧温度下, 煤燃烧生成的 NO_x 中, NO 约占 90% 以上, NO_2 占 5%~10%, 而 N_2O 只占 1%, 因而在研究燃煤锅炉 NO_x 的生成时, 一般主要讨论 NO 的生成机理^[21]。

目前数值模拟燃烧流场、预估污染物浓度的方法有 2 种: 一是建立确定污染物有限化学反应速率的污染物生成模型, 求解动量、能量组分及紊流输运等基本守恒方程, 得出污染物浓度分布; 二是 Mongia 和 Smith 等人推荐的经验分析法, 即在高维燃烧流场计算基础上, 使用经验或半经验关系式来计算污染物浓度, 预估污染物浓度分布。目前在还未完全掌握污染物生成机理以及污染物生成模型还不十分成熟的情况下, 经验分析法还是很有实用价值的^[22]。COALFIRE 计算软件考虑到相对于燃烧过程中的其他物质, NO 所占的浓度很小, NO 生成过程对气相物质的混合特性、热力学特性及燃烧产物的组分分布影响很小。所以对 NO 生成特性模拟采用后处理计算的办法, 即在计算完燃烧反应, 得到收敛后再计算 NO 生成反应。

3 NO 生成模型

3.1 热力型 NO 生成模型

热力型 NO 是空气中的氮气在高温下氧化生成的, 采用扩展的 Zeldovich 机理, 由以下 3 个反应描述, 即:



设 k_{R1} 为第 1 个反应的反应常数, 取 $3.6 \times 10^{11} e^{-38370/T}$, $\text{m}^3/(\text{kmol} \cdot \text{s}^{-1})$; k_{R2} 为第 2 个反应的反应常数, 取 $6.4 \times 10^9 e^{-3162/T}$, $\text{m}^3/(\text{kmol} \cdot \text{s}^{-1})$; k_{R3} 为

第 3 个反应的反应常数, 取 3.6×10^{13} , $\text{m}^3/(\text{kmol} \cdot \text{s}^{-1})$ 。

考虑式(2)、(3), 热力型 NO 生成速率为

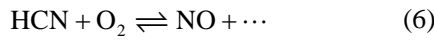
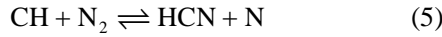
$$R_{\text{thermal}} = 2k_{R1}[C_{\text{O}_2}][C_{\text{N}_2}] \quad (4)$$

式中: T 为绝热温度, K ; C_i 为反应物 i 的浓度, kmol/m^3 。

3.2 快速型 NO 生成模型

当碳氢化合物燃料过浓燃烧时, 在反应区附近会快速生成 NO。快速 NO 和热力 NO、燃料 NO 不同, 它是燃料燃烧时产生的烃 CH_i 等撞击空气中的氮分子生成的 CN、HCN 等再被氧化而来。

快速型 NO 生成有以下几个过程, 即:



快速型 NO 生成速率为

$$R_{\text{prompt}} = A_{\text{prompt}} \left(\frac{W}{\rho}\right)^{1.5} [C_{\text{O}_2}]^{0.5} [C_{\text{N}_2}] [C_{\text{fuel}}] \exp\left(-\frac{E_{\text{prompt}}}{T}\right) \quad (7)$$

式中: A_{prompt} 为指数因子, $1/\text{s}$; W 为混合物分子质量, kg/kmol ; C_i 为反应物 i 的浓度, kmol/m^3 ; E_{prompt} 为反应物的活化温度, K 。

3.3 燃料型 NO 生成模型

在煤粉炉中, 燃料型 NO 可占总的 NO 生成的 75%~95%。实验证明, 在煤粉火焰温度小于 1650 K 时, 热力型 NO 所占比例很小。在温度相对较低、燃料含量高、燃料中氮键又比氮分子键能低的情况下, 燃料型 NO 就非常显著。

挥发分中的含氮化合物有 NH 、 NH_2 、 NH_3 、 CH 和 HCN , 主要是 HCN 和 NH_3 , HCN 和 NH_3 的含量不仅取决于煤的挥发分, 而且与 N 和碳氢化合物的结合状态等化学性质有关。燃烧过程中 HCN 和 NH_3 被氧化成 NO, 同时生成的 NO 被 HCN 和 NH_3 还原为 N_2 。本文选用的简化模型中忽略了 NH_3 的影响^[23]。

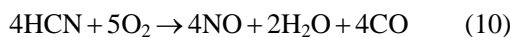
1) 挥发分中的氮转化为 HCN。

$$\frac{dY_{\text{HCN}}}{dt} = K_{\text{HCN}} m_{\text{vol}} \quad (8)$$

$$k_{\text{HCN}} = m_{\text{NV}} M_{\text{HCN}} / M_{\text{N}} \quad (9)$$

式中: m_{vol} 为挥发分的生成速率; m_{NV} 为挥发分中 N 所占的质量百分数; M 为分子量。

2) HCN 氧化成 NO。



$$\frac{dY_{\text{NO}}}{dt} = K_1 Y_{\text{O}_2}^a Y_{\text{HCN}} \quad (11)$$

$$K_1 = 1.0 \times 10^{11} \rho_1 e^{-33700/T_1} \quad (12)$$

式中 a 为与氧气浓度有关的常数, 取 1。

3) 焦炭中的氮转化为 NO。

$$\frac{dY_{\text{NO}}}{dt} = K_{\text{NO}} \gamma R_{\text{C}} \quad (13)$$

$$K_{\text{NO}} = m_{\text{NC}} M_{\text{NO}} / M_{\text{N}} \quad (14)$$

式中: R_{C} 为焦炭的消耗速率; γ 为焦炭中的氮转化为 NO 的效率因子, 取值范围常在 0.1 到 0.2 之间, 文中取 0.2; m_{NC} 为焦炭中 N 所占的质量百分数。

4 数值计算方法

计算区域选取从炉膛下部的冷灰斗到炉膛上部的折焰角之间的区域作为计算域, 采用非结构化四面体单元网格。取炉膛宽度方向为 X 方向, 炉膛深度方向为 Y 方向, 炉膛高度方向为 Z 方向。网格如图 3 所示, 在数值模拟计算中, 网格的划分是一个重要且棘手的问题。高质量的网格是实现数值模拟成功的首要条件, 网格过疏或过密都会对计算产生直接的影响。网格过疏会使计算结果不精确, 在一定情况下还会导致计算不收敛; 网格过密不仅使计算量大幅度增加, 而且对计算机的硬件要求也较高。在数值计算中为使求解结果更接近于实际, 网格的数目应足够大到随着网格数目的增加, 计算结果不再有显著的变化为止。在满足网格足够密的条件下, 应尽量减少计算量, 提高计算收敛的稳定性。经过试算, 共划分了 160 个单元区域, 508 896 个网格。数值模拟采用三维稳态计算。煤燃烧模型用拉格朗日颗粒跟踪方法来模拟煤粉的运动和挥发以及煤粉挥发后炭粉的氧化过程。使用单方程模型描述煤粉的挥发分释放过程。通过最终的煤分析结果直接指定煤燃烧模型中的物性参数。采用标准 $k-\varepsilon$ 双方程模型模拟湍流气相流动; 对辐射传热采用 P1 辐射模型; 对于焦炭的燃烧采用了扩散动力模型; 采用守恒标量的 PDF 模型模拟非预混燃烧;

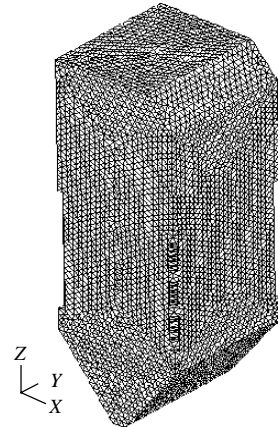


图 3 炉膛网格划分示意图

Fig. 3 Furnace mesh

对气相流场则采用非交错网格的 SIMPLE 方法求

解。根据残差判断收敛，以所有计算量的相对误差都必须小于 1.0×10^{-4} 作为收敛准则。

COALFIRE中热力型NO_x采用扩展的Zeldovich机理；燃料型NO_x的简化模型中忽略NH₃的影响；考虑到相对于燃烧过程中的其余物质，NO_x所占的

浓度非常小，NO_x生成过程的模拟对与气相物质的混合特性、热力学特性及燃烧产物的组分分布影响很小。对NO_x生成特性模拟采用后处理计算的办法，即在计算完燃烧反应，得到收敛后再计算NO_x生成反应。其中燃烧反应模型重要参数如表1所示。

表1 燃烧反应模型重要参数
Tab. 1 Parameter of combustion reaction model

名称	煤粉挥发分开始释放, 焦炭开始燃烧的起始温度/K	挥发分反应的频率因子/s ⁻¹	挥发分反应的活化能/(kJ/mol)	煤粉在炉膛释放的挥发分的质量份额
烟煤	773	200 000	49.86	0.587 5
贫煤	873	200 000	49.86	0.086 4

名称	煤粉的膨胀系数	燃烧方式指数(取等密度燃烧)	焦炭反应的频率因子/(kg/(m ² ·s·Pa))	焦炭反应的活化能/(kJ/mol)
烟煤	1.1	0.333 3	0.115 600	67.41
贫煤	1.0	0.333 3	0.000 234	62.85

5 计算工况

考虑煤质、煤粉细度、负荷、二次风配风方式、

三次风停投等变化时NO_x的排放特性。表2为锅炉燃用的2煤种的元素分析，表3为各工况数值模拟条件汇总表。

表2 锅炉燃用煤种元素分析
Tab. 2 The ultimate analysis of coals

煤种	w(C _{ar})/%	w(H _{ar})/%	w(O _{ar})/%	w(N _{ar})/%	w(S _{ar})/%	w(A _{ar})/%	w(M _{ar})/%	Q _{net,ar} /(kJ/kg)	w(V _{daf})/%
烟煤	56.8	4.5	6.5	1.2	0.8	22.6	7.6	23 110	22.3
贫煤	60.3	2.4	1.8	0.7	2.3	26.5	6.0	22 846	15.8

表3 各工况数值模拟条件汇总表
Tab. 3 Summary sheet of different operating mode

煤种	负荷/%	煤粉细度/ (R ₉₀ /R ₂₀₀)	每个喷口煤粉 质量流率/(kg/s)	一次风速/ (m/s)	煤粉浓度	二次风速/(m/s)				三次风速/ (m/s)	燃烧器投运
						上二	中上二	中二下	下二		
烟煤	100	22% /2%	2.05	28.2	0.45	53	45	34	40	34	1、2、3、4、5层
贫煤	100	22% /2%	2.25	31.0	0.45	53	45	34	40	37	1、2、3、4、5层
贫煤	100	22% /2%	2.25	31.0	0.45	43	43	43	43	37	1、2、3、4、5层
贫煤	100	22% /2%	2.25	31.0	0.45	43	43	43	43	0	1、2、3、4、5层
贫煤	100	22% /2%	2.25	31.0	0.45	34	40	45	53	37	1、2、3、4、5层
贫煤	100	22% /2%	2.25	31.0	0.45	53	45	40	34	37	1、2、3、4、5层
贫煤	80	22% /2%	1.80	25.0	0.45	43	36	27	32	27	1、2、3、4、5层
贫煤	60	22% /2%	1.35	18.6	0.45	32	27	21	24	23	1、2、3、4、5层
贫煤	100	15% /2%	2.25	31.0	0.45	53	45	34	40	37	1、2、3、4、5层

6 模拟结果及分析

6.1 煤质变化的影响规律

图4是燃用烟煤和贫煤时炉膛中的NO沿炉膛沿程的浓度分布曲线，可以看出NO浓度分布曲线上存在2个较明显的波峰。出现在炉膛15和40m附近，其峰值分别达到750和640mg/m³。这是由于在煤粉燃烧的过程中，煤中的氮不断析出，NO_x不断生成与破坏，其中氮的析出可分为2个阶段：挥发分析出阶段和焦炭燃烧析出阶段，因此燃料中的氮生成NO_x可分为2个阶段：挥发分均相生成阶段和焦炭异相生成阶段^[24]。在挥发分析出阶段，析出的氮主要以HCN和NH₃的形式从煤中释放出来，并大量被氧化成NO_x；在焦炭燃烧阶段，焦炭N被

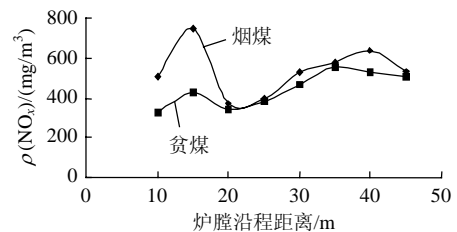


图4 不同煤种在炉中的NO_x浓度分布曲线
Fig. 4 NO_x concentration distributions of different kinks of coals in the furnace

氧化成NO_x。这2个波峰就是煤中的氮在不同阶段释放的结果。

第1个波峰比较陡，主要是由于挥发分的析出和燃烧过程非常迅速，NO_x生成量比较集中。而焦炭的燃烧过程相对缓慢，所以第2个波峰比较平缓。

在第 2 个波峰后，曲线缓慢下降，主要是由于焦炭的还原作用使生成的 NO_x 部分还原。在第 1 个 NO_x 峰值出现后，由于此时挥发分析出量相应增加，燃烧处于动力区，与之匹配的氧量供应不足，从而导致不完全燃烧产生的 CO 浓度升高。析出的 CO 浓度越高，对 NO 的催化还原能力越强，所以 NO_x 浓度又出现了比较大的下降过程。

煤中的氮在这 2 个阶段的分配比例与煤质和热解温度有关。锅炉燃用煤种元素分析如表 2 所示。煤种不同，煤中挥发分含量、氮含量等均有不同程度的差异，从而导致了 NO_x 生成量的不同。通常，挥发分含量、氮含量高的煤种生成的 NO_x 也相对较多。这是因为：煤中的 N 大都以芳香环结构存在^[25]，其释放与挥发分有很大关系。煤粉中挥发分含量少时，芳香环结构中杂环键断裂所需的温度较高，所以在较高的温度下才能释放出大量 NO_x；煤粉中挥发分含量多时，煤粉着火提前，温度峰值会有所提高，局部高温产生的热力型 NO_x 增加、燃料型 NO_x 亦略有提高，NO_x 的析出峰值前移，释放量增加。通常认为配风合理时，烟煤 NO 低。而当烟煤的含氮量高于贫煤时，如图 4 所示，烟煤的 NO_x 析出峰值要明显高于贫煤。

图 5 为烧烟煤时炉膛内 X-Y 中心截面沿炉膛高度方向 NO_x 的浓度分布图。由图可知，炉内 NO_x 的浓度随燃烧温度、四角煤粉气流流量偏差和火焰偏斜的影响比较大。

对于该四角切圆燃烧煤粉锅炉来说，由于燃烧器射流受邻角气流的撞击和射流两侧“补气”条件的影响，产生了气流偏斜。同时由于燃烧切圆直径比较大，火焰旋转强烈，产生的旋转动量矩大，到达炉膛出口处残余旋转较大，使得炉膛出口烟温分布不均匀程度加大，造成炉膛出口截面处 NO_x 的分

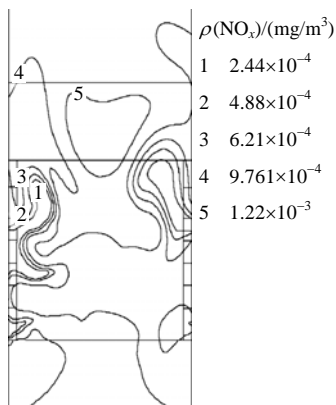


图 5 炉内 NO_x 浓度分布

Fig. 5 NO_x concentration distribution in the furnace

布出现较大的不均匀。煤质不同时，其不均匀程度也不相同。图 6 为烧烟煤时炉膛出口 NO_x 浓度分布。烧烟煤时炉膛内燃烧温度水平高，气流偏斜较大，在炉膛出口 NO_x 浓度分布不均比较明显。

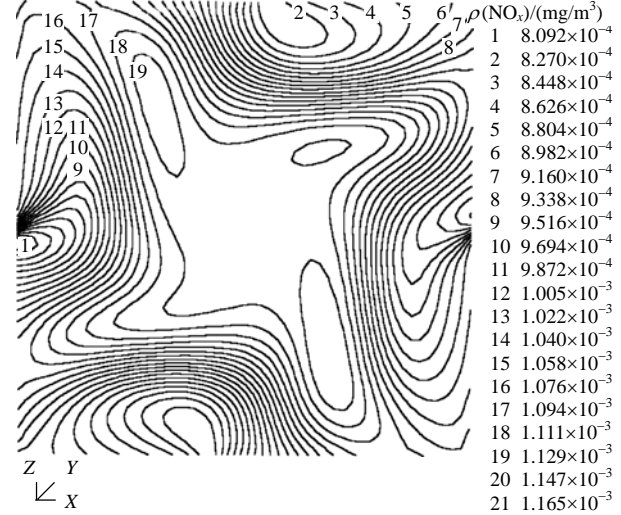


图 6 炉膛出口截面 NO_x 浓度分布

Fig. 6 NO_x concentration distribution in the section of furnace outlet

6.2 煤粉细度的影响

图 7 为煤粉细度 1 (R90/R200 为 22%/2%) 和煤粉细度 2 (R90/R200 为 15%/2%) 时 NO_x 的浓度分布。可以看出，煤粉粒径较小时，初期 NO_x 浓度较低，在 NO_x 浓度峰值出现以后，生成的 NO 的浓度偏高。这是因为煤粉越细，燃料中的氮越容易释放，在富燃条件下，燃料氮首先转化为 N₂。在挥发分析出阶段，煤粉越细，可以有更多的 CO 气体参与反应过程，以 CO 为主的还原性气氛减少了氮的中间产物向 NO_x 的转化；煤粉越细，还可以使煤中更多的含氮官能团随挥发分析出，生成更多以挥发分形式析出的氮，而使以焦碳氮形式析出的氮随之减少。同时，细煤粉由于其反应表面积增大，焦碳对 NO_x 的还原能力增强，而且细煤粉着火提前，相应地延长了 NO_x 分解还原的时间。在炉膛出口处煤粉细度 1 时 NO_x 平均浓度为 532 mg/m³，而煤粉细度 2 的 NO_x 平均浓度为 473 mg/m³，故细煤粉对降低 NO_x

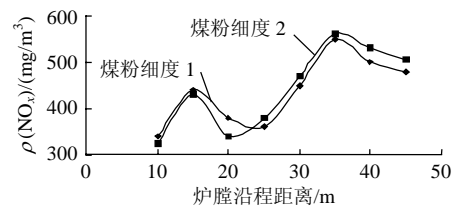


图 7 煤粉粒度与 NO_x 浓度的变化关系

Fig. 7 NO_x concentration distribution the furnace for the size of pulverized coal

排放有利。

6.3 锅炉负荷变化的影响规律

锅炉负荷的影响,实际上是氧浓度、炉膛温度等多种因素的影响。当锅炉负荷降低较多时, NO_x 浓度总体呈下降趋势,机组负荷从 300 MW 下降至 240 MW, 负荷下降 20%, NO_x 由 532 mg/m^3 下降到 496.1 mg/m^3 , 下降了 6.74%。机组负荷从 300 MW 下降至 180 MW, 负荷下降 40%, NO_x 下降到 383 mg/m^3 , 下降了约 28%。这是由于锅炉负荷降低时炉膛温度也下降, 因此热力型 NO_x 的生成量降低。而负荷降低较多时, 空气量也随着降低, 炉内燃料型 NO_x 的生成量也降低。2 方面的综合结果总的 NO_x 浓度降低。

6.4 二次风配风方式的影响规律

不同的配风方式, NO_x 排放浓度也不相同。图 8 为 3 种配风方式下炉膛出口 NO_x 平均浓度: 均等配风在 541 mg/m^3 左右; 倒宝塔配风在 449 mg/m^3 左右; 正宝塔配风在 550 mg/m^3 左右。由图可知, 倒宝塔配风时最有利于减少 NO_x 的生成, 而均等配风和倒宝塔配风要好于正宝塔配风, 这是因为倒宝塔配风时, 其下部燃烧器区域的氧浓度降低, 形成缺氧燃烧, 抑制了挥发分析出的 NH_3 和 HCN 氧化生成 NO_x , 也有利于形成还原性气氛来破坏已生成的 NO_x , 同时上部燃烧区域为富氧气氛, 使炉膛温度降低, 热力型 NO_x 的生成亦有所降低。从而使 NO_x 总的生成量减少。符合分级燃烧降低 NO_x 排放的原理。而正宝塔配风正相反, 燃烧时氧气得到及时补充, 使得燃料型 NO_x 能够大量释放而得不到抑制。

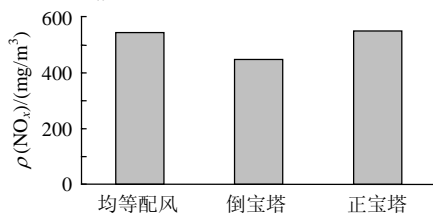


图 8 不同配风方式对 NO_x 浓度的影响
Fig. 8 NO_x concentration at different air distribution modes

6.5 三次风投停对 NO_x 排放的影响规律

三次风的投与不投对 NO_x 排放有很大影响。三次风投运时 NO_x 排放浓度较低, 炉膛出口处约为 $3.09 \times 10^{-4} \text{ mg/m}^3$; 三次风停运时炉膛出口处 NO_x 排放浓度约为 $3.47 \times 10^{-4} \text{ mg/m}^3$ 。三次风投运时 NO_x 排放浓度比停运时低 11%。这是因为和三次风投运时相比, 二次风量要相应减少, 相当于增加了燃尽风量, 而且三次风还带有少量很细的乏气粉, 这近似

于煤粉分级燃烧系统。细煤粉的挥发分脱出速度加快, 挥发分中的 NH_3 、 HCN 等物质可以还原主燃区内生成的 NO_x , 从而降低锅炉的 NO_x 排放浓度。而且三次风量温度较低, 会降低炉内温度水平, 从而减少热力型 NO_x 的生成。

7 结论

运用基于 TASCFLOW 软件平台的四角切圆燃烧煤粉锅炉专用数值模拟计算软件 COALFIRE, 对某电厂 300 MW 四角切圆煤粉锅炉 NO_x 排放特性进行了数值模拟。结果表明, 在四角切圆燃烧煤粉锅炉中, 煤种不同, 煤中挥发分含量、氮含量等均有不同程度的差异, 从而导致 NO_x 生成量的不同。通常, 挥发分含量、氮含量高的煤种生成的 NO_x 也相对较多, 反之则越少。煤粉越细, 燃料中的氮越容易释放。当锅炉负荷降低较多时, 由于炉膛温度下降, 因此热力型 NO_x 的生成量降低。而负荷降低较多时, 空气量随着降低, 炉内燃料型 NO_x 的生成量也降低。倒宝塔配风时最有利于减少 NO_x 的生成, 而均等配风和倒宝塔配风要好于正宝塔配风方式。三次风投运时 NO_x 排放浓度较低。

参考文献

- [1] 李振中, 冯兆兴, 王阳, 等. 煤粉双级垂直浓淡燃烧降低 NO_x 排放及稳燃技术的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 184-188. Li Zhenzhong, Feng Zhaoxing, Wang Yang, et al. Study on a dual vertical dense/lean combustion of pulverized coal in order to decrease NO_x emission and stabilize combustion[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 184-188(in Chinese).
- [2] 聂其红, 孙绍增, 吴少华, 等. 新型水平浓淡风低 NO_x 煤粉燃烧器在贫煤锅炉的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 155-159. Nie Qihong, Sun Shaozeng, Wu Shaohua, et al. Study on application of new type HBC-SSA burners with low NO_x emission in a lean coal fired boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 155-159(in Chinese).
- [3] 程俊峰, 曾汉才, 熊蔚立, 等. 降低 300 MW 贫煤锅炉 NO_x 排放的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 157-160. Cheng Junfeng, Zeng Hancan, Xiong Weili, et al. Research and test for reducing NO_x emission of a 300 MW lean coal-fired boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 157-160(in Chinese).
- [4] 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: 1-9.
- [5] Baxter L L, Mitchell R E, Fletcher T H, et al. Nitrogen release during coal combustion[J]. Energy and Fuels, 1996, 10(1): 188-196.
- [6] Van der Lans R P, Glarborg P, Dam-Hohansen K. Influence of process parameters on nitrogen oxide formation in pulverized coal burners[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1997, 23(4): 349-357.
- [7] 翁安心, 周昊, 张力, 等. 不同煤种混煤燃烧时 NO_x 生成和燃尽特

- 性的试验[J]. 热能动力工程, 2004, 19(3): 242-245.
- Weng Anxin, Zhou Hao, Zhang Li, et al. Experimental research of the NO_x generation and burnout characteristics during the combustion of blended coals[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2004, 19(3): 242-245(in Chinese).
- [8] Wendt J L. Mechanisms governing the formation and destruction of NO and other nitrogenous species in low NO coal combustion system [J]. Combustion Science and Technology, 1995, 108(4): 323-344.
- [9] 李永华, 陈鸿伟, 刘吉臻, 等. 800 MW 锅炉混煤燃烧数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 101-104.
- Li Yonghua, Chen Hongwei, Liu Jizhen, et al. Numerical simulation of blending coals combustion of 800 MW boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(6), 101-104(in Chinese).
- [10] 林鹏云, 罗永浩. 燃煤电站锅炉 NO_x 排放影响因素的数值模拟分析 [J]. 热能动力工程, 2007(5): 530-533.
- Lin Pengyun, Luo Yonghao. Numerical simulation analysis of influence factor for the NO_x emission of coal fired boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2007(5): 530-533(in Chinese).
- [11] 安恩科, 于娟. 350 MW 电站燃煤锅炉 NO_x 反应特性研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007(6): 801-805.
- An Enke, Yu Juan. Study of NO_x reaction in 350 MW utility coal fired boiler[J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2007(6): 801-805(in Chinese).
- [12] 邢菲, 樊未军, 崔金雷, 等. 某 200 MW 四角切圆锅炉燃烧器改造降低 NO_x 数值模拟[J]. 热能动力工程, 2007(5): 534-538.
- Xing Fei, Fan Weijun, Cui Jinlei, et al. Numerical simulation for the reducing the NO_x on a 200 MW tangential firing boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2007(5): 534-538(in Chinese).
- [13] 阎维平, 刘亚芝. 300 MW 四角切圆煤粉锅炉燃烧工况的数值模拟及优化研究[J]. 锅炉技术, 2007(6): 14-19.
- Yan Weiping, Liu Yazhi. Numerical simulation of combustion and nitrogen oxides generation process in a 300 MW tangential pulverized coal fired boiler[J]. Boiler Technology, 2007(6): 14-19(in Chinese).
- [14] CFX-TASCFLOW User Documentation Version 2.10[M]. Waterloo: AEA Technology Engineering Software Limited, 2000: 24-28.
- [15] CFX-TASCFLOW Theory Documentation Version 2.1[M]. Waterloo: AEA Technology Engineering Software Limited, 2000: 32-34.
- [16] Toshio H, Guo Zenglin, Gordon K R. Application of computational fluid dynamics analysis for rotating machinery. Part II: Labyrinth seal analysis[J]. Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 2005(127): 820-826.
- [17] Hylton L D, Mihelc M S, Turner E R. Analytical and experimental evaluation of the heat transfer distribution over the surface of turbine vanes[R]. NASACR 168015, 1983: 68-78.
- [18] 宋洪鹏, 周屈兰, 惠世恩, 等. 过量空气系数对燃气燃烧中 NO_x 生成的影响[J]. 节能, 2004(1): 12-13.
- Song Hongpeng, Zhou Qulan, Hui shien, et al. The influence of NO_x produces in the gas combustion by the excessive air coefficient[J]. Energy Conservation, 2004(1): 12-13(in Chinese).
- [19] 毕玉森. 低氮氧化物燃烧技术的发展状况[J]. 热力发电, 2000(2): 2-9.
- Bi Yusen. Present status of low-NO_x combustion technology[J]. Thermal Power Generation, 2000(2): 2-9(in Chinese).
- [20] 毕玉森, 陈国辉. 控制电厂锅炉氮氧化物排放的对策和建议[J]. 中国电力, 2004(6): 12-15.
- Bi Yusen, Chen Guohui. The advice of the NO_x emission control in power plant[J]. Eelectric Power, 2004(6): 12-15(in Chinese).
- [21] 李争起, 吴少华, 孙锐, 等. 配风方式对旋流煤粉燃烧器 NO_x 的排放及煤粉燃尽的影响[J]. 动力工程, 1997, 17(2): 27-31.
- Li Zhengqi, Wu Shaohua, Sun Rui, et al. The influence of air supply on NO_x formation and burn off rate when using swirl burners and pulverized coal[J]. Power Engineering, 1997, 17(2): 27-31(in Chinese).
- [22] 赵坚行. 燃烧的数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 272-278.
- [23] 杨冬, 路春美, 王永征. 不同种类煤粉燃烧 NO_x 排放特性试验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(5): 18-21.
- Yang Dong, Lu Chunmei, Wang Yongzheng. Experimental study on the characteristics of NO_x emission with different pulverized coal combustions[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(5): 18-21(in Chinese).
- [24] 岑可法, 姚强, 骆仲泐, 等. 高等燃烧学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002: 587-590.
- [25] 范贤振, 郭烈锦, 高慧, 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): 241-245.
- Fan Xianzhen, Guo Liejin, Gao Hui, et al. Numerical simulation of flow and combustion process in the tangentially fired furnace of a 200 MW pulverized coal boiler[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2002, 36(3): 241-245(in Chinese).



李钧

收稿日期: 2008-09-03。

作者简介:

李钧(1974—), 男, 博士研究生, 研究方向为高效低污染煤燃烧技术, lj2110271@163.com;

阎维平(1955—), 男, 教授, 博士生导师, 从事高效低污染煤燃烧理论、电站锅炉煤粉燃烧技术和锅炉安全经济运行等方面的教学和研究工作。

(编辑 张媛媛)