

流化床流动和燃烧特性对 SNCR 脱硝的影响研究

王威, 金保昇, 王晓佳, 张勇
(东南大学能源与环境学院, 江苏南京 210096)

摘要: 为研究循环流化床炉内流动和燃烧产生的 NO_x 的不均匀性对 SNCR(选择性非催化还原) 脱硝效率的影响, 针对炉内燃烧、喷氨和 SNCR 脱硝反应等一系列过程, 建立了稠密气固流动耦合化学反应的数学模型, 全面模拟了 CFB(循环流化床) 锅炉的气固流动、燃烧反应、 NO_x 生成和脱硝反应过程, 重点研究了非均匀入口时不同喷氨方式对脱硝效率和氨逃逸率的影响。结果表明: CFB 锅炉燃烧后在水平烟道出口存在明显的 NO_x 通量不均匀; 通过改变喷氨点结构参数和操作参数, 能显著提高脱硝效率, 当采用第一列喷氨、垂直入射等措施且氨氮比为 1.2 时, 脱硝效率能达到 68% 以上。

关键词: 循环流化床; 旋风分离器; 选择性非催化还原; 脱硝; 数值模拟

中图分类号: TK224.1; X701.3 文献标识码: A
DOI: 10.16146/j.cnki.mdjgc.2016.06.011

引言

SNCR(选择性非催化还原) 脱硝作为循环流化床锅炉控制氮氧化物的主要方式, 目前在大量循环流化床锅炉中应用^[1-2]。随着国家对氮氧化物排放标准的日趋严格, 现有很多循环流化床锅炉已不能满足排放要求^[3-4]。为了进一步挖掘 SNCR 系统的脱硝潜力, 需要对其进行优化, 而数值模拟方法对燃煤锅炉 SNCR 脱硝系统的优化具有重要作用^[5]。

目前已有一些研究者采用数值模拟方法对 CFB 锅炉 SNCR 脱硝系统进行了优化。李穹等对国内某 100 t/h 的循环流化床锅炉的旋风分离器部分进行了 SNCR 脱硝数值模拟^[6], 研究均匀烟气速度入口条件下温度、氨氮摩尔比等对 SNCR 脱硝效率和氨逃逸率的影响, 结果发现脱硝效率和氨逃逸率随氨氮摩尔比增加而增加; 莫桂源对国内某 75 t/h 循环流化床进行 SNCR 脱硝数值模拟^[7], 文中单独对旋风分离器进行了模拟, 并且给定旋风进口烟气温度、

组分浓度和速度的值, 重点研究了喷枪安装位置对脱硝效率和氨逃逸率的影响, 结果发现喷枪安装在旋风入口水平烟道下侧时, 脱硝效率最高达到 57.6%, 但氨逃逸率也较高。

从以上分析可以看出, 目前的数值模拟研究均集中于均匀 NO_x 入口条件下旋风分离器内流场流动和脱硝反应特性, 没有考虑炉内复杂稠密气固流动和燃烧所产生的 NO_x 分布不均匀性。而循环流化床锅炉是典型的稠密气固流动体系, 气固两相流动非常复杂^[16], 气固两相之间的相互作用会极大地影响炉内的均相和非均相反应, 并进一步影响生成物的分布^[15]; 倪建明和韩静等的计算结果都验证了炉膛出口 NO_x 浓度是不均匀的, 而速度场和浓度场的不均匀性导致了氮氧化物通量在水平烟道出口截面的不均匀性^[8-9]。因此, 采用均匀入口条件来模拟 SNCR 脱硝反应是不够准确的, 很有必要从源头上考虑炉内燃烧和流动及结构变化引起的非均匀性, 这一工作为 SNCR 喷氨优化提供突破口。

本文针对某电厂循环流化床锅炉 SNCR 脱硝过程, 将循环流化床锅炉和旋风分离器作为一个整体, 全面模拟了气固流动、燃烧反应、 NO_x 生成和脱硝反应过程, 根据燃烧反应计算得到的旋风分离器入口不均匀的 NO_x 通量分布, 采用不同的喷氨位置、喷氨角度和氨氮摩尔比来进行 SNCR 脱硝反应, 使脱硝模拟工况更接近实际情况, 并研究氨氮的混合均匀性对脱硝效率的影响, 得到最佳的喷氨方式, 提高脱硝效率, 降低氨逃逸率。

1 数学模型与计算

1.1 基本控制方程

欧拉双流体模型的颗粒流的流动特性是应用分

收稿日期: 2015-07-10; 修订日期: 2015-07-26

作者简介: 王威(1988-), 男, 江苏南京人, 东南大学硕士研究生。
通讯作者: 金保昇(1961-), 男, 东南大学教授。

子运动理论来求得的。气相湍流模型采用标准 $k - \epsilon$ 模型, 固相应用颗粒动力学理论, 分别建立连续方程和动量守恒方程。

1.1.1 连续方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho) + \nabla \cdot (\alpha\rho\vec{v}) = \dot{m} \quad (1)$$

式中: α, ρ 和 \vec{v} 一气固两相的体积分数、密度, kg/m^3 和速度, m/s ; \dot{m} 一质量源项, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

1.1.2 动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho\vec{v}) + \nabla \cdot (\alpha\rho\vec{v}\vec{v}) = -\alpha\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} + \alpha\rho\vec{g} + K|\vec{v}_s - \vec{v}_g| + \dot{m}\vec{v} \quad (2)$$

式中: $\vec{\tau}$ 一压力应变张量, N ; K 一曳力系数; p 一压力, N 。

1.1.3 能量方程

气固两相能量守恒方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho H) + \nabla \cdot (\alpha\rho v H) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + h|T_s - T_g| + \dot{m}H \quad (3)$$

式中: H 一气相或固相的总焓, kJ/kg ; λ 一导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; h 一气固两相间换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; $\dot{m}H$ 一气固非均相化学反应的能量源项, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

1.2 燃烧化学反应模型

固相包括焦炭、碳酸钙 (CaCO_3) 和煤, 气相包括 H_2 、 HCN 、 CH_4 、 H_2O 、 NO 、 NH_3 、 CO 、 CO_2 、 O_2 和 N_2 。其中, 煤的气化燃烧过程主要包括: 煤的热解和脱挥发分; 非均相的气固反应, 包括焦炭燃烧和焦炭气化; 均相的气相之间的反应, 包括挥发分和焦炭气化气体的燃烧。

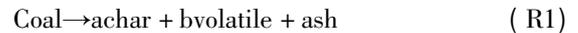
煤热解产物主要由煤的工业分析及元素分析所确定, 本文中电厂用煤煤质分析如表 1 所示。

表 1 煤质分析

Tab.1 Approximate and ultimate analysis of coal

元素分析/%					$Q_{ar,dw}$	工业分析/%			
C_{ar}	H_{ar}	O_{ar}	N_{ar}	S_{ar}	$/(MJ/kg)$	M_{ar}	A_{ar}	V_{ar}	C_{ar}
45.5	3.18	10.7	0.58	0.53	17.66	24.74	14.77	24.21	36.28

燃烧过程中气相燃烧的均相反应 (R5 - R7)、焦炭的燃烧 (R2) 和气化的非均相反应 (R3、R4) 如下所示:



其中, 煤热解动力学模型采用一对平行的、一级不可逆反应模型^[10]。煤热解反应速率可表示为:

$$r_1 = (Y_a k_a + Y_b k_b) C_{rawc} \quad (4)$$

其中,

$$k_{a(b)} = A_{a(b)} \exp(-E_{a(b)}/(RT_s)) \quad (5)$$

$A_a = 0.2 \mu\text{s}^{-1}$, $A_b = 13 \mu\text{s}^{-1}$, $E_a = 104\ 600 \text{ J/kmol}$, $E_b = 167\ 400 \text{ J/kmol}$, $Y_a = 0.3$, $Y_b = 1.0$, T_s 一颗粒温度, $^\circ\text{C}$ 。

焦炭燃烧速率可表示为^[11]:

$$r_2 = 0.554 \exp(-10\ 824/T_s) C_{\text{O}_2} \quad (6)$$

焦炭气化速率可表示为^[12]:

$$r_{3,4} = \frac{k_1 p_{\text{react}}}{1 + k_2 p_{\text{react}} + k_3 p_{\text{prod}}} \quad (7)$$

式中: p_{react} 一 气态反应物 H_2O 或 CO_2 的压力, Pa ; p_{prod} 一 气态反应产物 H_2 或者 CO 的压力, Pa ; k_1 、 k_2 和 k_3 一 反应动力学常数, 分别如表 2 所示。

均相的气相反应包括 R5、R6 和 R7, 它们的反应速率分别如式 (8) ~ 式 (10) 所示。

$$r_5 = 1.0 \times 10^{15} \exp\left(\frac{-16\ 000}{T_g}\right) C_{\text{CO}} C_{\text{O}_2}^{0.5} \quad (8)$$

表 2 焦炭气化动力学常数

Tab.2 Gasification kinetic constants for char

	H_2O			CO_2		
	$k_{1,\text{H}_2\text{O}}/\text{s}^{-1}\text{MPa}^{-1}$	$k_{2,\text{H}_2\text{O}}/\text{s}^{-1}\text{MPa}^{-1}$	$k_{3,\text{H}_2\text{O}}/\text{s}^{-1}$	$k_{1,\text{CO}_2}/\text{s}^{-1}\text{MPa}^{-1}$	$k_{2,\text{CO}_2}/\text{s}^{-1}\text{MPa}^{-1}$	$k_{3,\text{CO}_2}/\text{s}^{-1}$
	526	2.81×10^{-5}	8.1×10^{-9}	4.53×10^4	3.28×10^{-6}	1.84×10^{-6}
$E/\text{J} \cdot \text{kmol}^{-1}$	95 100	-135 100	-218 500	160 100	-158 500	-157 600

$$r_6 = 5.159 \times 10^{15} \exp\left(\frac{-3430}{T_g}\right) T^{-1.5} C_{H_2}^{1.5} C_{O_2} \quad (9)$$

$$r_7 = 3.552 \times 10^{14} \exp\left(\frac{-15700}{T_g}\right) T^{-1} C_{CH_4} C_{O_2} \quad (10)$$

1.3 NO_x 生成和 SNCR 脱硝反应模型

1.3.1 煤燃烧过程中 NO_x 生成模型

循环流化床锅炉中由于温度低,燃料浓度高等因素,快速型和热力型 NO_x 生成量很少。因此本研

究只考虑燃料型 NO_x 的生成。煤热解过程中,挥发分中的氮主要生成 NH₃ 和 HCN,焦炭氮在焦炭燃烧中生成氮氧化物。反应方程和反应速率如表 3 所示^[13]。

1.3.2 SNCR 脱硝反应模型

Nguyen 改进了 Brouwer 等人简化的 7 步反应模型^[14]。

化学反应速率为 $r = kC_1C_2T^{-b}$, 其中 $k = Ae^{-E/(RT)}$, M 为反应的中间体。反应动力学参数如表 4 所示。

表 3 含氮化合物的氧化反应方程及速率

Tab.3 Oxidation reaction equation and rate of nitrogen compounds

反应方程	反应速率	反应动力学常数
$HCN + 0.5O_2 \rightarrow CNO + H$	$kC_{O_2}C_{HCN}$	$k = 2.14 \times 10^5 \exp(-10000/T)$
$CNO + 0.5O_2 \rightarrow NO + CO$	$kC_{O_2}C_{HCN} (k_1 / (k_1 + k_2 C_{NO}))$	$k_2/k_1 = 1.02 \times 10^9 \exp(-25460/T)$
$CNO + NO \rightarrow N_2O + CO$	$kC_{O_2}C_{HCN} (k_2 C_{NO} / (k_1 + k_2 C_{NO}))$	$k_2 = 2.93 \times 10^{11} \exp(-22709/T)$

表 4 SNCR 过程的化学反应动力学参数

Tab.4 Chemical kinetic parameters in the SNCR process

反应方程式	指前因子 $A/m^3 \cdot s^{-1} \cdot k^{-b}$	温度指数 b	活化能 $E/J \cdot (kmol)^{-1}$
$NH_3 + NO \rightarrow N_2 + H_2O + H$	2.13×10	5.30	2.43×10^8
$NH_3 + O_2 \rightarrow NO + H_2O + H$	8.83×10^3	7.65	5.86×10^8
$HNCO + M \rightarrow H + NCO + M$	1.39×10^{13}	0.85	3.45×10^8
$NCO + NO \rightarrow N_2O + CO$	2.26×10^{15}	0	-2.6×10^7
$NCO + OH \rightarrow NO + CO + H$	3.68×10^9	0	0
$N_2O + OH \rightarrow N_2 + O_2 + H$	8.6×10^4	0	8.37×10^7
$N_2O + M \rightarrow N_2 + O + M$	8.5×10^7	0	3.39×10^8

网格, 网格总数为 47 万多。

2 物理模型及边界条件

所选模型为某电厂 75 t/h 循环流化床锅炉如图 1 所示, 该锅炉高 21.4 m, 燃烧室 XY 截面沿 Y 方向长 $L = 5.6$ m, X 方向宽 $W = 3.43$ m, 底部布风板沿 Y 方向长 4.8 m, X 方向宽 3.43 m, 旋风分离器轴向高度 11.3 m, 最大筒身直径 3 m, 上部出口烟道直径 1.45 m。

本研究的三维模型计算域同时采用结构化和非结构化网格, 由于给煤口、一二次风入口区域流场变化剧烈, 因此对炉膛底部附近区域的网格适当加密。同时, 为了提高旋风分离器区域计算精度, 对旋风分离器网格采用分区域划分, 部分区域采用非结构化

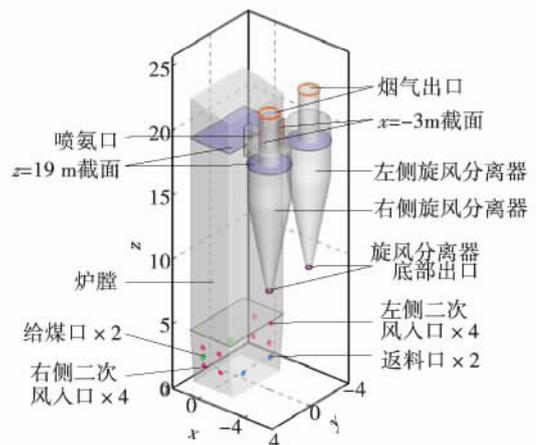


图 1 循环流化床锅炉物理模型

Fig.1 Structure diagram of the CFBB

计算中采用速度入口边界条件,出口采用压力出口,壁面采用无滑移边界条件。因为该电厂多数运行在 80% 负荷的工况下,因此本次计算主要针对该负荷下运行数据进行模拟,此时的总煤量为 3 kg/s,物料为石灰石(CaCO_3),循环倍率为 20,过量空气系数为 1.2,一、二次风配比为 7:3,并假设固体最大堆积密度为 0.63,喷氨采用 5% 氨水溶液。模拟中先进行煤的热解燃烧反应,待稳定后再将 SNCR 脱硝反应代入。

3 计算结果与讨论

3.1 气固流动特性

图 2 展示了不同截面的固相浓度分布,其中两个纵截面分别经过两个旋风分离器的中心。从图中可以看出,无论是在纵截面上,还是在横截面上,固相浓度分布都存在较大的差别,尤其是在纵截面,在床层底部存在典型的密相区,在床层上部存在明显的稀相区,这与文献 [15 ~ 16] 中描述的规律一致。

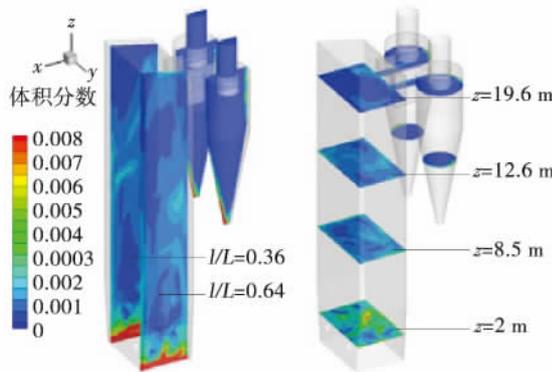


图 2 固相体积分数云图

Fig. 2 Structure diagram of the CFBB

为进一步验证模型准确性,我们对模拟得到的平均物料浓度分布与文献 [15] 中现场测试结果进行了定量比较。图 3 展示了不同床高的平均物料浓度,该浓度值由床层压降和孔隙率等计算而得。其中,文献 [15] 中 75 t/h 循环流化床锅炉床高 21.56 m,床层截面积 18.2 m^2 ,空床风速 5 m/s,运行负荷 78%;而本模拟所采用循环流化床锅炉床高 21.4 m,床层截面积 19.2 m^2 ,空床风速 4.8 m/s,运行负荷 80%。由图中可知,两种情况下的平均物料浓度最大偏差低于 5%,这进一步证明了模拟的准确性。

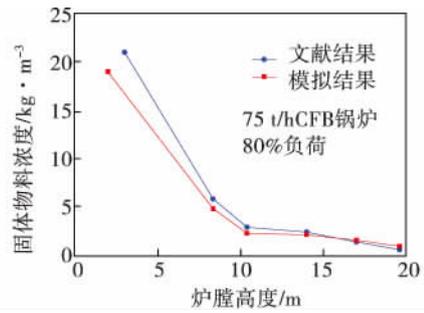


图 3 实际和模拟状态下物料浓度沿高度分布

Fig. 3 Distribution of actual and simulated material concentration along the height

图 4 展示了在循环流化床炉膛内不同高度截面上,沿 Y 方向的平均固相浓度值分布,显示了颗粒分布呈现中心区域固体体积浓度低,近壁处固体体积浓度高的“环-核”流动,且随着炉膛高度增加,平均固体体积浓度逐渐降低,且截面的固体体积浓度的分布趋于均匀。这与文献 [16] 的研究规律相符。

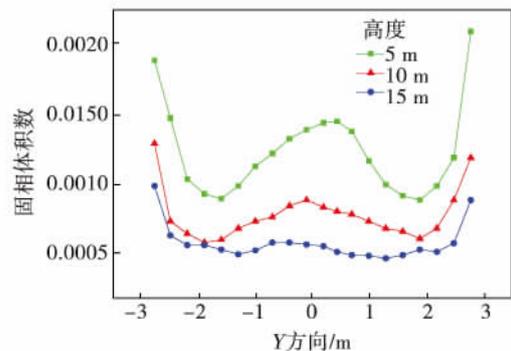


图 4 不同高度的沿 Y 方向的平均固相浓度值分布

Fig. 4 Solid volume fraction at different heights with x -averaged values along y direction

图 5 为循环流化床炉膛内不同高度截面上的轴向速度分布。可以看出,颗粒在床中心向上流动,在近壁区向下流动,且近壁处颗粒向下速度值随着高度增加而减小。这与文献 [16] 的研究规律相符。图 4 和图 5 都证实了循环流化床的“环-核”流动结构。

3.2 燃烧特性

图 6 分别展示了 $l/L = 0.64$ 截面的 O_2 、 NO 和 CH_4 的浓度分布云图,图 7 展示了沿炉膛高度方向

不同水平截面的 O₂、CO₂和 NO 的体积分数分布趋势图。

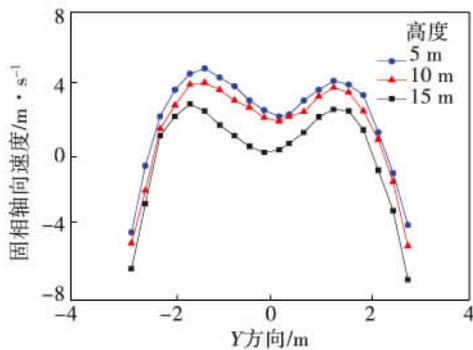


图 5 不同高度的 Y 方向的平均固相轴向速度分布

Fig. 5 Distribution of average axial velocity of solid phase along Y-direction of different heights

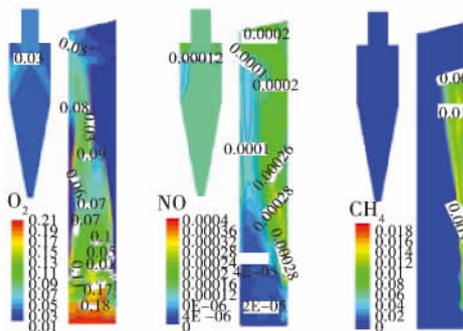


图 6 l/L=0.64 截面不同气体浓度分布
Fig. 6 Concentration of different gases in the cross section of l/L = 0.64

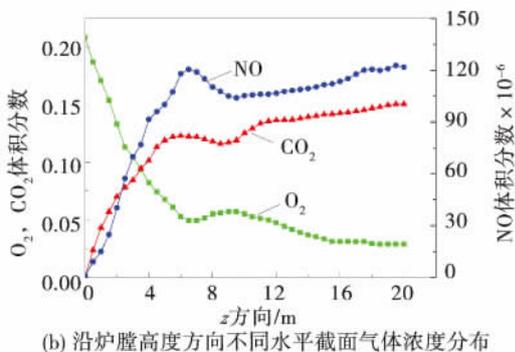


图 7 沿炉膛高度方向不同水平截面气体浓度分布

Fig. 7 Concentration of different gases in the horizontal section along the height

从 O₂、CO₂的浓度分布趋势图可以看出,炉膛底部区域氧气体积分数快速降低,而在上部区域氧气的体积分数缓慢降低。底部 O₂的快速减少和 CO₂的快速增加,主要是由于底部存在高浓度的 CO、CH₄和焦炭使得燃烧反应比较剧烈,随着二次风的注入, O₂体积分数上升, CO₂被冲淡导致体积分数略有下降,后随着焦炭和挥发分的燃烧, O₂体积分数缓慢下降, CO₂体积分数缓慢上升。由图 7 可知, NO_x在底部区域大量生成,这是由于底部煤快速热解释放的大量的含氮化合物被氧化,使得 NO_x浓度快速上升,随着二次风的注入, NO 被稀释致浓度下降,随着氧化反应的继续, NO 体积分数缓慢上升。

将模拟所得的部分值与该 75 t/h 循环流化床锅炉电厂的实际运行数据进行了比较可知:在相似工况下,炉膛出口 NO_x的实测值为 260 mg/m³,而模拟结果 NO_x为 246 mg/m³,两者相差约 5%;当过量空气系数为 1.2 时,该电厂实测的出口氧浓度为 3.4%,计算的结果为 3.2%,两者相差约 5%。以上分析表明,本次计算通过选择合适的模型,能够准确模拟炉内的燃烧特性,这为准确预测旋风分离器入口 NO_x通量分布提供了基础。

3.3 污染物生成特性

图 1 中的 z = 19 m 截面和 x = -3 m 旋风入口截面上的气体速度矢量图和 NO_x浓度如图 8 所示,可以看到在旋风入口截面上 NO 的浓度分布相对较均匀,略微呈现中间高,上下两侧浓度低的现象,且 z = 19 m 截面上气体速度分布不均匀,呈现旋风分离器入口烟道内侧速度高,外侧速度低的现象。

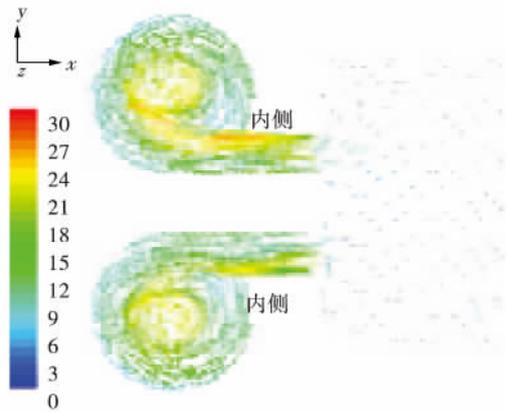
NO 通量公式为:

$$G_{NO} = v_g y_{NO} \rho_g \tag{11}$$

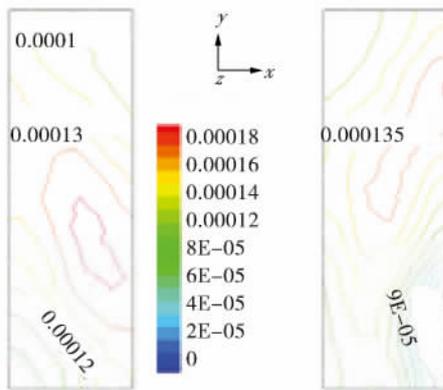
式中: v_g —烟气速度, m/s; y_{NO} —NO 的质量分数; ρ_g —气体密度, kg/m³; NO 通量在旋风入口截面,呈现内侧高,外侧低的不均匀现象。本文根据燃烧计算结果,通过设置不同喷氨点、喷氨角度和氨氮摩尔比等条件,模拟相应工况下的氨氮混合均匀性与脱硝效率,研究最合适的喷氨方式。

3.4 喷氨点结构参数对脱硝效率的影响

左侧旋风水平烟道内侧喷氨口布置如图 9 所示。每个旋风分离器内侧入口区域共设计了 4 层 × 4 列共计 16 个喷口,喷口直径为 40 mm 的圆形入口。



(a) z=19 m 截面速度矢量图



(b) x=-3 m 截面 NO_x 浓度图

图 8 气相速度矢量图和 NO_x 浓度分布

Fig. 8 Vector diagram of gas phase velocity and concentration distribution of NO_x

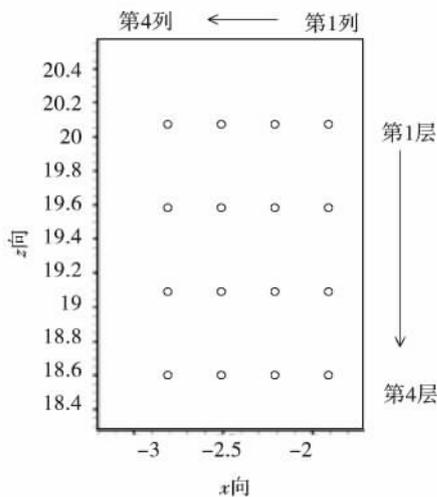


图 9 左侧水平烟道喷氨口布置

Fig. 9 Layout of the ammonia injection positions on the horizontal flueway in the left side

为了研究不同喷氨方法对 NH₃、NO 混合程度的影响,我们引入不均匀系数方程:

$$C_x = \sqrt{\frac{1/n - 1}{\bar{x}} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (12)$$

式中: x—氨氮摩尔比 NSR; C_x—不均匀系数。不均匀性系数越小,氨氮比分布越均匀,则 NH₃、NO 混合越均匀。

本次计算分别投运第 1 到第 4 层,第 1 到第 4 列喷氨口 8 种喷氨位置。其中第 1 到第 4 列喷氨口位置只是距离旋风分离器入口距离不同,当依次采用第 1 列到第 4 列喷氨时,脱硝效率逐渐降低。而第 1 到第 4 层的喷氨位置对旋风入口的氨氮均匀性有很大影响,因此本研究着重对比第 1 到第 4 层和第 1 列 5 种喷氨位置对脱硝效率和不均匀系数的影响。定义不同喷氨方式下的不均匀系数与 NSR = 1.2 时第 1 层喷氨后的不均匀系数之比为相对不均匀系数。

图 10 列出不同喷氨位置时脱硝效率和相对不均匀系数柱状图,分别研究了旋风入口 x = -3 m 截面和旋风分离器烟气出口截面相对不均匀系数。

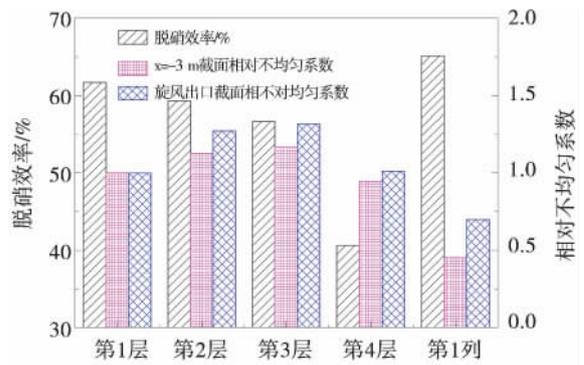


图 10 不同喷氨位置的脱硝效率与相对不均匀系数

Fig. 10 Denitration efficiency and relatively nonuniform coefficient in different ammonia injection positions

由图 10 可以看出,从第 1 到第 3 层喷氨位置,随着相对不均匀系数增加,脱硝效率逐渐下降,说明一般情况下氨氮混合越均匀,脱硝效率越高。但图 9 中第 4 层喷氨时的相对不均匀系数近似等于方案 1,并低于方案 2、方案 3,但是脱硝效率却最低,这可

能是由于第 4 层喷氨口位置低于旋风分离器烟气排出管的底端 ($z = 19.2 \text{ m}$) ,使得部分 NH_3 进入旋风后直接从排气管排出而造成氨逃逸量增大、脱硝效率降低。当采用第 1 列喷氨时,发现不均匀系数大大降低,同时脱硝效率也高于第 1 到第 4 层喷氨,这说明 NO 通量沿着 z 轴方向分布比较均匀,采用按列喷氨能够使 NH_3 与 NO 混合更均匀,因此脱硝效率更高。下面以第 1 列为喷氨为基础来研究其它喷氨工况。

3.5 喷氨点操作参数对脱硝效率的影响

3.5.1 不同喷射角度对 SNCR 脱硝效率的影响

以氨溶液射流由喷口处垂直喷入水平烟道的角度为零度,以向烟气来流方向偏转的角度为喷射角度,来计算采用第一列喷氨,氨氮比 1.2,喷射角度分别为 0° 、 20° 、 40° 和 60° 下的反应情况。

由图 11 可知,随着角度增加,相对不均匀系数逐渐上升,脱硝效率逐渐降低。说明随着角度增大, NH_3 和 NO 混合均匀性变差,脱硝效率降低,这是由于氨溶液射流垂直喷入烟道内时的穿透性最强,当垂直入射且氨氮比为 1.2 时,此时的射流速度能将氨溶液送至 NO_x 浓度较高的区域,使得氨氮相对混合较好,脱硝效率较高。

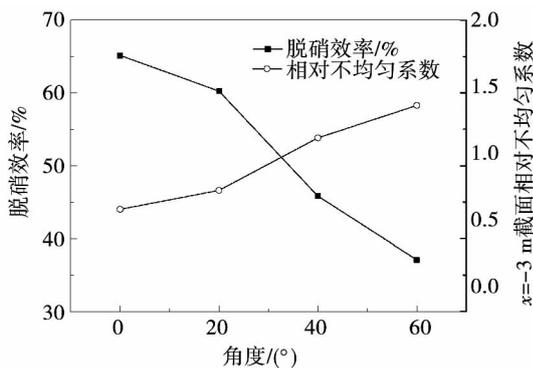


图 11 不同角度的脱硝效率与相对不均匀性系数

Fig. 11 Denitration efficiency and relatively nonuniform coefficient at different angles

3.5.2 不同氨氮摩尔比对 SNCR 脱硝效率的影响

图 12 采用第 1 列垂直入射喷氨,并采用不同氨氮比 NSR 时的脱硝效率和氨逃逸率

因为喷口大小和氨溶液浓度一定,所以随着 NSR 增大,喷入的还原剂增多,喷射速度变快。NSR 大于 1.2 后漏氨量加速增大,一方面是由于过量喷

氨,另一方面也可能是由于氨溶液射速较高,穿过了较高通量 NO 区域,使得不均匀系数增加,漏氨量增加速度大于脱硝效率增加速度。在保证脱硝效率的前提下,为减少漏氨量应选择合适的氨氮比。

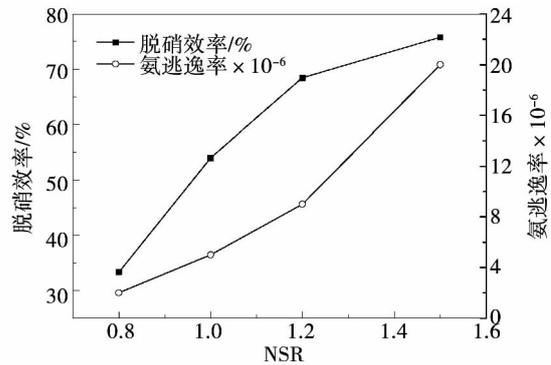


图 12 不同氨氮比的脱硝效率与相对不均匀性系数

Fig. 12 Denitration efficiency and relatively nonuniform coefficient of different NSR

4 结 论

通过对 75 t/h 循环流化床锅炉 80% 负荷下的炉膛和旋风分离器内的流动、燃烧及 SNCR 脱硝过程的数值模拟,研究了循环流化床锅炉炉膛和旋风分离器内颗粒气固流动特性、燃烧特性和 NO_x 生成特性,并研究了不同喷氨位置、喷射角度和氨氮摩尔比对 NO_x 还原率的影响,得到以下结论:

(1) 本研究所采用的数学模型能够较好的预测 75 t/h 循环流化床炉内的颗粒流动和煤燃烧过程。模拟结果显示炉内有浓相区和稀相区,且有明显的环-核流动结构;

(2) 旋风分离器入口的 NO_x 通量是不均匀的,因此不同喷氨方式对于氨氮的混合均匀性有很大影响;

(3) 当分别采用不同喷氨位置时,发现不同喷射位置对旋风分离器入口截面和烟气出口截面的氨氮摩尔比的不均匀系数有很大影响,当采用第一列喷氨不均匀系数最低,脱硝效率最高;

(4) 氨溶液的入射角度不同对不均匀性系数和脱硝效率有影响。当 $\text{NSR} = 1.2$,氨溶液采用垂直入射时,氨氮混合效果最好,脱硝效率最高;

(5) NSR 越高, 脱硝效率越高, 漏氨量越大, 综合考虑氨泄漏的危害和国家环保法规, 该循环流化床锅炉运行中 NSR 应控制在 1.2 以内。

参考文献:

- [1] 韩 应, 高洪培, 王海涛, 等. SNCR 烟气脱硝技术在 330 MW 级 CFB 锅炉的应用[J]. 洁净煤技术 2013(6): 85-88.
HAN Ying, GAO Hong-pei, WANG Hai-tao, et al. Application of SNCR flue gas denitration technology in 330 MW CFB boiler[J]. Clean coal technology 2013(6): 85-88.
- [2] 杨玉环, 侯致福, 任继德. 新型 SNCR 烟气脱硝工艺在 300MWCFB 锅炉的应用[J]. 电站系统工程 2015, 1:015.
YANG Yu-huan, HOU Zhi-fu, REN Ji-de. Application of novel SNCR flue gas denitration technology In 300 MW CFB boiler[J]. Power system engineering 2015, 1:015.
- [3] Yang H, Zhang H, Yue G. The influence of the new emission standard on the CFB boiler in China and the solutions [C]. IEA FBC Meeting 2012.
- [4] 2011GB13223. 火电厂大气污染物排放标准[S]. 2011.
2011 GB13223. Emission Standard of Air Pollutants for Thermal Power Plants [S]. 2011.
- [5] Nguyen TDB, Kang T, Lim Y, et al. Application of urea-based SNCR to a municipal incinerator: On-site test and CFD simulation [J]. Chemical Engineering Journal: 2009, 152(1): 36-43.
- [6] 李 穹, 吴玉新, 杨海瑞, 等. SNCR 脱硝特性的模拟及优化 [J]. 化工学报 2013, 64(5): 1789-1796.
LI Qiong, WU Yu-xin, YANG Hai-rui, et al. Simulation and optimization of SNCR process [J]. CIESC Journal 2013, 64(5): 1789-1796.
- [7] 莫桂源. 气固两相流及氮氧化物控制的数值模拟研究 [D]. 浙江大学 2012.
MO Gui-yuan. Numerical simulation of gas-solid two-phase flow and NO_x reduction [D]. Zhejiang University 2012.
- [8] 倪建民. 75 t/h 电站循环流化床锅炉的数值模拟研究 [D]. 浙江大学 2003.
NI Jian-min. Numerical simulation of a 75 t/h circulation fluidized bed boiler of power plant [J]. Zhejiang University 2003.
- [9] 韩 静. 循环流化床垃圾焚烧炉燃烧和污染物生成的数值模拟 [D]. 2011.
HAN Jing. Numerical simulation of combustion and pollutant to circulating fluidized bed waste incinerator [D]. North China Electric Power University 2011.
- [10] Wang X F, Jin B S, Zhong W Q. Three-dimensional simulation of fluidized bed coal gasification [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification 2009, 48(2): 695-705.
- [11] Desroches-Ducarne E, Dolignier J C, Marty E, et al. Modelling of gaseous pollutants emissions in circulating fluidized bed combustion of municipal refuse [J]. Fuel, 1998, 77(13): 1399-1410.
- [12] Cuadrat A, Abad A, Gayún P, et al. Theoretical approach on the CLC performance with solid fuels: Optimizing the solids inventory [J]. Fuel 2012, 97: 536-551.
- [13] Gungor A, Eskin N. Two-dimensional coal combustion modeling of CFB [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2008, 47(2): 157-174.
- [14] Nguyen T D B, Lim Y I, Kim S J, et al. Experiment and computational fluid dynamics (CFD) simulation of urea-based selective noncatalytic reduction (SNCR) in a pilot-scale flow reactor [J]. Energy & Fuels 2008, 22(6): 3864-3876.
- [15] 马素霞, 张建春, 牛建斌, 等. 75 t/h 循环流化床锅炉变工况热态试验研究 [J]. 动力工程 2005, 25(3): 348-351.
MA Su-xia, ZHANG Jian-chun, NIU Jian-bin, et al. Test study a 75 t/h circulating fluidized bed boiler under various modes of hot state operation [J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2005, 25(3): 348-351.
- [16] Zhang N, Lu B, Wang W, et al. 3D CFD simulation of hydrodynamics of a 150 MW e circulating fluidized bed boiler [J]. Chemical Engineering Journal 2010, 162(2): 821-828.

(姜雪梅 编辑)

This study investigated the effect of the corrosive SO_2 in gas flue on erosion wear of 20 carbon steel which is widely used in rear heat recovery surfaces in coal-fired boilers. The hot-state experimental study of fly-ash erosion of 20 carbon steel was carried out in the atmosphere containing corrosive gas SO_2 at a temperature range of $250\text{ }^\circ\text{C} \sim 450\text{ }^\circ\text{C}$. The results show the relative erosion wear of 20 carbon steel in the atmosphere containing corrosive gas SO_2 is more serious than in the compressed air flow atmosphere, as a result of the interrelation between wear and corrosion. The influence is more significant at the low-temperature section than at the high-temperature section in the tested temperature range. The hot-state erosion characteristic of 20 carbon steel is no change; the erosion rate increases first and decreases afterwards as the temperature goes up, but the critical temperature is higher, up to $375\text{ }^\circ\text{C}$. **Key words:** power station boiler, fly-ash erosion, 20 carbon steel, corrosive wear, SO_2

基于热力学第二定律的热电厂低真空供热能耗分析 = **Energy Consumption Analysis of Thermal Power Plant Using Low Vacuum Heating based on the Second Law of Thermodynamics** [刊, 汉] GAO Xin-yong, SUN Shi-en, HE Xiao-hong, ZHENG Li-jun (Huadian Electric Power Research Institute, Hangzhou, Zhejiang, China, Post Code: 310029) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. . - 2016, 31(6). - 59 ~ 65

Based on the thermodynamics law and “unit consumption analysis” theory, the energy consumption analysis method of thermal power plant using low vacuum heating is deduced. Using the method, the energy consumption of a power plant is evaluated. The results show that the total energy consumption of thermal power plant could be ranked from good to bad as pure condensing condition, extraction steam heating condition and extraction steam and low vacuum heating condition. The values of exergy efficiency and additional unit consumption could be ranked from good to bad as low vacuum heating subsystem, extraction steam heating subsystem and electricity production subsystem. When thermal power plant uses low vacuum heating, back pressure and terminal temperature difference of condenser have optimum values. In the power plant example, back pressure reaches the optimum when exhaust steam temperature is $65\text{ }^\circ\text{C}$, and the optimum value of terminal temperature difference is $3\text{ }^\circ\text{C}$. When power plant uses low vacuum to replace extraction steam heating, the amount of extraction steam has an optimum value, which is 283.96 t/h in the power plant example. So, using extraction steam heating and low vacuum heating to reform power plant is very necessary under the premise that the power plant has heat users. **Key words:** thermodynamics law, unit consumption analysis, cascade utilization of thermal energy, exergy efficiency, low vacuum heating

流化床流动和燃烧特性对 SNCR 脱硝的影响研究 = **Effects of the Flow and the Combustion Characteristics of Circulating Fluidized Bed on SNCR Denitrification** [刊, 汉] WANG Wei, JIN Bao-sheng, WANG Xiao-jia, ZHANG Yong (Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education, School of Energy and Environment (Southeast University), Nanjing, Jiangsu, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering

for Thermal Energy & Power. . -2016 31(6). -66~73

To investigate the effect of NO_x inhomogeneity caused by flow and combustion in the circulating fluidized bed on SNCR denitration efficiency, this article establishes a mathematical model of dense gas-solid flow coupled with chemical reaction, to comprehensively simulate the gas-solid flow, combustion reaction, NO_x formation and denitration reaction process in the CFB boiler, aiming at the processes of furnace combustion, ammonia spraying and SNCR denitration reaction. And it focuses on the influence of different ammonia injections on the denitration efficiency and the rate of ammonia escape with the non-uniform entrance. Results show that the NO_x flux distributes inhomogeneously at outlet of horizontal flue after combustion. The denitration efficiency can be significantly increased by changing the structure and operation parameters of ammonia injection points. The efficiency reaches above 68% when using the first column to vertically spray ammonia and the mole ratio of NH_3/NO_x is 1.2. **Key words:** circulating fluidized bed, cyclone separator, selective non-catalytic reduction, denitration, numerical simulation

分布式能源站三联供系统优化运行策略研究 = **Optimization Strategies for the Operation of CCHP System in Distributed Energy Station** [刊, 汉] QIAN Hong, YANG Ming, CHEN Dan, CUI Cheng-gang (Shanghai University of Electric Power, Shanghai, China, Post Code: 200090) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. . -2016 31(6). -74~79

The optimal operation strategy for CCHP system in distributed energy station is the key to guarantee its excellent operating. Based on a CCHP system combined with energy storage system, this paper established a model targeting the optimal operation strategy for overall output in a scheduling cycle. Improved genetic algorithms were utilized to solve the model for the best operation strategy so that energy station is operated at optimum efficiencies under different load conditions. **Key words:** CCHP, load demand at every time interval, Energy Storage, unit operation mode, optimal operation strategy

搜寻者优化算法在锅炉主汽压控制系统中的应用 = **Application of Seeker Optimization Algorithm in the Main Steam Pressure Control System for Boiler** [刊, 汉] CHENG Jia-tang, AI Li, XIONG Yan (The Engineering College of Honghe University, Mengzi, Yunnan, China, Post Code: 661199) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. . -2016 31(6). -80~84

The main stream pressure is an important parameter reflecting the state of boiler operation. For the main stream pressure control system, a method for optimizing the parameters of PID controller based on seeker optimization algorithm (SOA) was proposed. In this algorithm, the time integral of absolute error performance index is taken as the fitness function, and then a set of optimized parameters is obtained. Simulation results show that SOA has better searching