

# 循环流化床氮氧化物排放预测模型及优化控制研究

高明明<sup>1</sup>, 于浩洋<sup>1</sup>, 吕俊复<sup>2</sup>, 于孝宏<sup>3</sup>, 李文瑞<sup>4</sup>, 李存怀<sup>4</sup>, 魏光<sup>4</sup>

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206; 2. 清华大学 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084; 3. 中国华电集团有限公司 天津分公司, 天津 300203; 4. 华电国际电力股份有限公司 天津开发区分公司, 天津 300270)

**摘要:**随着环保要求的日益严格, 为了降低 CFB 机组的 NO<sub>x</sub> 排放, 需要对炉内生成的 NO<sub>x</sub> 浓度进行准确估计并应用到控制中, 对此, 建立精确实用的机理控制模型显得十分必要。同时, 需要综合考虑降低炉内燃烧所生成的 NO<sub>x</sub> 与 SNCR 的优化控制, 利用该模型对炉内外 NO<sub>x</sub> 综合控制进行优化。通过对 NO<sub>x</sub> 的生成机理进行分析, 以 CFB 锅炉燃烧产生的燃料型 NO<sub>x</sub> 为主体, 应用数学建模与仿真的方法, 以给煤量、风量等作为模型输入, 建立炉膛出口 CO 浓度预测模型, 并以此模型为基础, 与即燃碳模型为输入, 建立可以用于控制的炉膛出口 NO<sub>x</sub> 浓度预测模型。利用上述方法建立了炉膛出口 CO 浓度预测模型和炉膛出口 NO<sub>x</sub> 浓度预测模型, 并根据实际运行数据对模型进行参数求取及仿真, 针对炉内燃烧控制与 SNCR 脱硝配合不佳, 导致 NO<sub>x</sub> 排放水平较高的问题, 根据所建立的炉膛出口 NO<sub>x</sub> 浓度预测模型, 提出了炉内外 NO<sub>x</sub> 综合控制技术路线, 设计了基于 NO<sub>x</sub> 浓度预测模型的一二次风量优化控制与 SNCR 优化控制思路。仿真证明了所建立的模型具有较好的精确度, 满足实际控制系统的精度要求, 并具有一定的预测效果。所设计的炉内外 NO<sub>x</sub> 综合控制技术路线与一、二次风量优化控制思路可以为今后循环流化床机组 NO<sub>x</sub> 低排放控制提供参考。

**关键词:**循环流化床; 氮氧化物; NO<sub>x</sub> 浓度预测模型; 机理模型; 优化控制

中图分类号: TK229.6; X511 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2020)03-0046-06

## Study on prediction model and optimal control of nitrogen oxides emission of circulating fluidized bed

GAO Mingming<sup>1</sup>, YU Haoyang<sup>1</sup>, LYU Junfu<sup>2</sup>, YU Xiaohong<sup>3</sup>, LI Wenrui<sup>4</sup>, LI Cunhuai<sup>4</sup>, WEI Guang<sup>4</sup>

(1. State Key Lab of Alternate Electric Power System With Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 2. State Key Laboratory of Power Systems, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Tianjin Branch, China Huadian Group Co., Ltd., Tianjin 300203, China; 4. Tianjin Development Area Branch, Huadian Power International Co., Ltd., Tianjin 300270, China)

**Abstract:** With the increasingly strict requirements of environmental protection, in order to reduce the NO<sub>x</sub> emission of CFB units, it is necessary to accurately estimate the NO<sub>x</sub> concentration generated in the furnace and apply it to the control. For this, it is necessary to establish an accurate and practical mechanism control model. At the same time, it is necessary to comprehensively consider the optimization control to reduce nitrogen oxide and SNCR generated in the furnace combustion, and the comprehensive control of nitrogen oxide inside and outside the furnace should be optimized by using this model. Based on the analysis of the formation mechanism of nitrogen oxides, the CO concentration prediction model at the furnace outlet was established with fuel NO<sub>x</sub> produced by CFB boiler combustion as the main body, the method of mathematical modeling and simulation, and coal feed, air flow, etc. used as model inputs. Based on this model, the prediction model of the NO<sub>x</sub> concentration at the furnace outlet could be established by using the model as the input of the burning coal model. The above method was used to establish a prediction model of CO concentration at furnace outlet, and the parameters of the model were obtained and simulated based on the actual operating data, and the furnace combustion control was not well coordinated with SNCR denitration, which led to the problem of high levels of nitrogen oxide emissions. Based on the established prediction model of NO<sub>x</sub> concentration at

收稿日期: 2020-03-05; 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.20030501

基金项目: 中国华电集团有限公司重大科技项目计划资助项目(CHDKJ19-01-88); 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0600205)

作者简介: 高明明(1979—), 男, 山西吕梁人, 副教授, 博士, 主要研究方向为大型循环流化床机组状态监测与控制。E-mail: gmm1@ncepu.edu.cn

引用格式: 高明明, 于浩洋, 吕俊复, 等. 循环流化床氮氧化物排放预测模型及优化控制研究[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(3): 46-51.

GAO Mingming, YU Haoyang, LYU Junfu, et al. Study on prediction model and optimal control of nitrogen oxides emission of circulating fluidized bed[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(3): 46-51.



移动阅读

furnace outlet, a comprehensive control technology route for nitrogen oxides inside and outside the furnace was proposed, and a primary and secondary air volume optimization and SNCR optimization control ideas were designed based on the  $\text{NO}_x$  concentration prediction model. The simulation proves that the established model has good accuracy, meets the accuracy requirements of the actual control system, and has a certain predictive effect. The design of the integrated nitrogen oxide control technology route and optimized control ideas inside and outside the furnace can provide a reference for the low-emission control of nitrogen oxides in circulating fluidized bed units.

**Key words:** CFB; nitrogen oxides;  $\text{NO}_x$  concentration prediction model; mechanism model; optimization control

## 0 引言

近年来,循环流化床锅炉因具有污染物排放低等优势而得到迅速发展<sup>[1]</sup>。据统计,我国现有 CFB 锅炉总容量超过 1 亿 kW,位居世界第一,超过全世界其他国家总和<sup>[2]</sup>。流化床系统是蓄能量大的热源,能够为新加入的冷燃料提供足够的热量,使其迅速加热到着火温度,只要保证床层温度稳定,即可实现稳定运行。该技术对煤炭质量的要求较低,可以燃烧劣质煤甚至部分垃圾。与此同时,还可保持较高的燃烧效率,且床温较低,不易生成氮氧化物,具有低排放的优势<sup>[3]</sup>。随着我国对环保愈发重视,循环流化床电厂的污染物排放指标越发严格,环保部门要求新建燃煤电厂的  $\text{NO}_x$  与  $\text{SO}_2$  的排放水平,需要达到燃气轮机组的排放限值,对循环流化床的污染物控制带来挑战。在此背景下,设计循环流化床机组低排放控制策略成为当务之急。氮氧化物在炉内反应过程相对于  $\text{SO}_2$  更为复杂,建立循环流化床氮氧化物控制模型的难度上升。许多电厂在实际运行中,炉内燃烧生成过量氮氧化物,导致 SCR 或 SNCR 脱硝压力过大,致使氮氧化物排放超标,因此,设计基于循环流化床控制模型的炉内外氮氧化物综合控制策略尤为重要。高建强<sup>[4]</sup>对 NO 与 CO 生成机理进行研究,建立了 NO 与 CO 生成物理模型,但模型较为复杂,无法直接应用在实际控制中;廖子昱<sup>[5]</sup>主要针对  $\text{N}_2\text{O}$  的生成与控制进行研究,分析了各工况下  $\text{N}_2\text{O}$  生成规律,提出了降低  $\text{N}_2\text{O}$  的控制手段,对于  $\text{NO}_x$  总量研究较少;刘慧敏<sup>[6]</sup>研究了富氧增压下  $\text{NO}_x$  的生成规律,但常规条件下循环流化床  $\text{NO}_x$  的生成规律并没有进行过多介绍。还有许多学者对炉内燃烧生成氮氧化物的生成类型、生成因素、影响因素等问题进行研究<sup>[7-12]</sup>,但鲜见应用于控制的控制机理模型。为此,笔者对 CFB 锅炉  $\text{NO}_x$  的生成机理进行研究,结合即燃碳模型与 CO 浓度预测模型,建立  $\text{NO}_x$  浓度的预测机理模型,并以此为基础,设计 CFB 低污染物排放控制策略,以期对循环流化床  $\text{NO}_x$  排放研究提供指导。

## 1 CFB 锅炉 $\text{NO}_x$ 生成机理及影响因素

### 1.1 CFB 中 $\text{NO}_x$ 生成机理

火电厂中煤在燃烧过程中生成的  $\text{NO}_x$  主要包括热力型  $\text{NO}_x$ 、快速型  $\text{NO}_x$  和燃料型  $\text{NO}_x$ <sup>[7-8]</sup>。热力型  $\text{NO}_x$  由高温下空气中的  $\text{N}_2$  与  $\text{O}_2$  发生氧化反应生成,特别是在 1 300 °C 下反应显著;快速型  $\text{NO}_x$  是燃烧过程中,火焰中的  $\text{CH}_i$  自由基与  $\text{N}_2$  反应生成中间产物 HCN 后,与其他基团发生氧化反应生成  $\text{NO}_x$ ;燃料型  $\text{NO}_x$  是煤在燃烧过程中,含氮化合物在一定条件下被氧化生成  $\text{NO}_x$ 。一般情况下,CFB 生成的  $\text{NO}_x$  主要来自于燃料中的 N,即生成的  $\text{NO}_x$  为燃料型  $\text{NO}_x$ 。煤中 N 在炉内的形成过程复杂,图 1 为煤中 N 在循环流化床锅炉燃烧中的反应过程<sup>[9]</sup>。

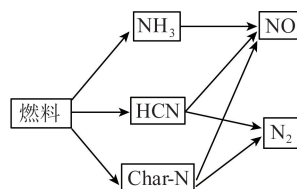
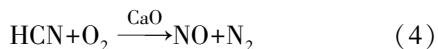
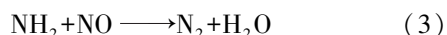
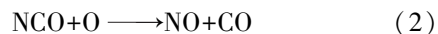
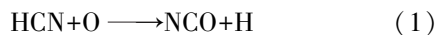


图 1 CFB 燃料型  $\text{NO}_x$  的生成与还原过程

Fig.1 Fuel  $\text{NO}_x$  generation and reduction process in CFB boiler

挥发分中的 HCN、 $\text{NH}_3$  等含氮小分子物质与  $\text{O}_2$  发生氧化反应,由于高温下 NO 的热稳定性远高于  $\text{NO}_2$ ,因此,生成的  $\text{NO}_x$  以 NO 为主,在化学反应式中以 NO 代替  $\text{NO}_x$ 。一般认为,挥发分中的含氮化合物发生均相反应,其反应路径为式(1)~(4)<sup>[10]</sup>。



首先挥发分中的含一氮化合物与一空气中的 O 等自由基反应生成 NCO, NCO 继续氧化生成 NO。同时, NCO 与  $\text{NH}_i$  基团反应生成 NO。但式(1)、(2)反应生成的氮氧化物,会发生还原反应生成稳定的  $\text{N}_2$ , 反应过程结束。NO 也可与  $\text{NH}_i$  反应生成  $\text{N}_2$ (式(3))。焦炭与 NO 的还原反应过程复杂,其中包括若干物理与化学反应,整体还原反应主要是 NO 与

CO 或 CO<sub>2</sub> 进行反应生成氮气的过程。

煨烧石灰石对 NO<sub>x</sub> 的异相生成和还原均具有催化作用,而对 NO<sub>x</sub> 异相生成影响更大(式(4)),即 CFB 锅炉 NO<sub>x</sub> 排放随钙硫摩尔比的升高而增大<sup>[11]</sup>。

## 1.2 NO<sub>x</sub> 生成影响因素

1) 煤种。煤质是影响循环流化床燃烧过程中生成 NO<sub>x</sub> 量的关键因素。据统计,最终 NO<sub>x</sub> 排放与煤中的挥发分呈正相关<sup>[12-14]</sup>。

2) 床温。随炉内床温升高,NO<sub>x</sub> 的生成反应减弱,同时还原反应增强,导致 NO<sub>x</sub> 生成量减少<sup>[15]</sup>。

3) 过量空气系数。O<sub>2</sub> 浓度的增加使挥发分和焦炭中 N 的氧化速度加快,但还原效应减弱,因此造成总体 NO<sub>x</sub> 排放增加<sup>[12-13]</sup>。

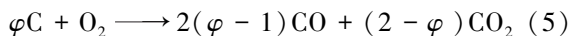
4) 分级送风。NO<sub>x</sub> 排放浓度随二次风比例的提高而降低。

## 2 炉膛出口 NO<sub>x</sub> 浓度预测模型建立

### 2.1 CO 浓度预测模型

在循环流化床内部,CO 浓度影响 NO<sub>x</sub> 在焦炭表面还原反应的剧烈程度,且与 NO<sub>x</sub> 浓度直接相关,因此,建立精准的 CO 浓度预测模型对于 NO<sub>x</sub> 浓度预测模型的建立具有重要作用。

循环流化床燃烧过程中,CO 和 CO<sub>2</sub> 同时生成,2 者的平衡关系为



其中,  $\varphi$  为化学反应的机械因子,主要与温度和粒径等有关。该模型已应用于多个试验<sup>[16-17]</sup>。直径为  $d_c$  的焦炭颗粒可采用文献[16]的计算方法。

焦炭颗粒的燃烧速率可表示为

$$r_c = 12\pi d_c^2 k_c C(O_2) \quad (6)$$

其中,  $C(O_2)$  为 O<sub>2</sub> 浓度;  $k_c$  为燃烧速率常数,与床温  $T$  有关,可根据经验公式<sup>[4]</sup> 计算,即

$$k_c = 0.513T \exp(-9160/T) \quad (7)$$

O<sub>2</sub> 浓度可近似取平均值,由入炉风量  $q_v$  决定。

$$C(O_2) = k(O_2)q_v \quad (8)$$

式中,  $k(O_2)$  为氧量与总风量的相关系数。

设定蓄积的焦炭总量均为由平均粒径  $d_c$  的焦炭颗粒组成,焦炭颗粒为微观概念,在焦炭总量计算过程中,可采用炉内的即燃碳量<sup>[19]</sup> 计算。本文将储存大量能量并于炉膛中燃烧的碳称为即燃碳,则即燃碳的总燃烧反应速率  $W_{RC}$  (kg/s) 为

$$W_{RC} = \frac{6B}{\pi d_c^3 \rho_c} r_c \quad (9)$$

其中,  $B$  为炉内的即燃炭量,kg;  $\rho_c$  为焦炭颗粒密度。根据质量守恒定律,在 CFB 锅炉燃烧过程中,送入

炉膛的燃料(包括煤颗粒、煤泥等)一部分即刻燃烧并释放出热量,另一部分积蓄在锅炉的床料中,其中没有燃烧完全的,作为损失存在于飞灰和底渣中。对该部分建立模型,可得

$$\frac{dB}{dt} = W_c X_c - R_c - W_{PZ} X_{c,p} - W_{FL} X_{c,f} \quad (10)$$

式中,  $W_c$  为给煤量,kg/s;  $X_c$  为燃料量的收到基碳质量分数,%;  $R_c$  为 CFB 炉内碳的燃烧反应速率,kg/s;  $W_{PZ}$  为排渣流率,kg/s;  $X_{c,p}$  为底渣含碳量,%;  $W_{FL}$  为飞灰流率,kg/s;  $X_{c,f}$  为飞灰含碳量,%。

即燃碳燃烧生成 CO 的速率  $Y_{CO}$  可表示为

$$Y_{CO}(t) = 2\left(1 - \frac{1}{\varphi}\right) \frac{6B(t)}{\pi d_c^3 \rho_c} r_c \quad (11)$$

将式(8)、(9)代入式(11)得

$$Y_{CO}(t) = 2\left(1 - \frac{1}{\varphi}\right) \frac{72B(t)k(O_2)k_c q_v}{\rho_c d_c} \quad (12)$$

其中,  $q_v$  为总风量。对式(12)进行整理可得

$$Y_{CO}(t) = K(CO)B(t)q_v \quad (13)$$

式中,  $K(CO)$  为即燃碳燃烧生成 CO 速率模型系数。

即燃碳燃烧产生的 CO 继续反应生成 CO<sub>2</sub>, 其纯气相下的反应速率  $r(CO)$  计算式<sup>[14]</sup> 为

$$r(CO) = 3 \times 10^{13} \left(\frac{P}{RT_b}\right)^{1.8} e^{\left(\frac{-6.699 \times 10^4}{8.319T_b}\right)} Y^{0.5}(H_2O) \times Y(CO) \frac{17.5Y(O_2)}{1 + 24.7Y(O_2)} \quad (14)$$

式中,  $T_b$  为床温,K;  $R$  为气体常数(8.319 kJ/(mol·K));  $P$  为大气压强,Pa;  $Y(H_2O)$  为水蒸气浓度;  $Y(CO)$  为 CO 的体积分数,与摩尔浓度转换的计算方法可见文献[4]。

对式(14)进行改进后,提出适用于循环流化床燃烧条件的 CO 燃烧速率计算方法<sup>[18]</sup>, 即

$$r^c(CO) = r(CO) [1 - K_{cd}^3(1 - \varepsilon)] \quad (15)$$

式中,  $r^c(CO)$ 、 $K_{cd}$ 、 $\varepsilon$  为改进的 CO 燃烧速率(mol/(m<sup>3</sup>·s))、当量直径比( $K_{cd}=1.7$ )、空隙率。

体积为  $V$  (m<sup>3</sup>) 的燃烧室中, CO 的消耗量  $R(CO)$  (kg/s) 为

$$R(CO) = 28r^c(CO)V \quad (16)$$

炉膛出口 CO 量为单位时间内炉膛内生成的 CO 总量与炉内 CO 继续反应生成 CO<sub>2</sub> 量之差,即

$$q_v \alpha Y'_{CO}(t) = Y_{CO}(t) - R_{CO}(t) \quad (17)$$

其中,  $\alpha$  为剩余风量系数,  $\alpha = 1 - \alpha'$ ,  $\alpha'$  为漏风系数;  $Y'_{CO}(t)$  为单位时间烟气 CO 质量浓度,kg/m<sup>3</sup>;  $Y_{CO}(t)$  为单位时间煤燃烧生成 CO 量,kg/s;  $R_{CO}(t)$  为 CO 反应生成 CO<sub>2</sub> 量,kg/s。整理可得

$$Y'_{\text{CO}}(t) = \frac{Y_{\text{CO}}(t) - R_{\text{CO}}(t)}{q_v \alpha} \quad (18)$$

## 2.2 炉膛出口 NO<sub>x</sub> 预测模型

模型假设循环流化床内 NO<sub>x</sub> 的主要成分为 NO, 且 NO 的生成反应全部发生在密相区。燃料 N 生成 NO 的转化率与煤中挥发分有关, 其经验式<sup>[4,16]</sup>为

$$\lambda(\text{NO}) = -2.8412 \times 10^{-4} X^3 + 0.01364 X^2 - 0.3063 X + 15.756$$

$$X = h_n - 30.637 \quad (19)$$

其中,  $\lambda(\text{NO})$  为 NO 转化率, %;  $h_n$  为挥发分, %。在煤质稳定状况下,  $\lambda(\text{NO})$ 、煤中 N 含量可视为常数。

$t$  时刻生成的氮氧化物浓度, 炉膛内 NO 的生成总量为

$$Y_{\text{NO}}(t) = m_N \lambda(\text{NO}) k(\text{CaO}) \zeta F(t - \tau) = k_1 F(t - \tau) \quad (20)$$

其中,  $F(t)$  为给煤量, kg/s;  $k(\text{CaO})$  为脱硫剂催化影响系数;  $m_N$  为煤中 N 含量, %;  $\tau$  为煤中挥发分燃烧生成 NO 的时间, s;  $\zeta$  为一、二次风配比对 NO 生成的影响系数;  $k_1$  为 NO 生成系数。生成 NO 的同时, 在焦炭表面会发生还原反应, 其速率计算公式<sup>[4]</sup>为

$$r^c(\text{NO}) = 120 \pi d_c^2 e^{\left(-\frac{15800}{T_c}\right)} Y(\text{NO}) Y^{0.3}(\text{CO}) \quad (21)$$

其中,  $T_c$  为焦炭表面温度, K;  $Y(\text{NO})$  为炉膛内 NO 浓度;  $Y(\text{CO})$  为焦炭表面 CO 浓度。则 NO 的还原反应消耗量为

$$R(\text{NO}) = 28 \left[ \frac{6B}{\rho_c \pi d_c^3} r^c(\text{NO}) \right] \quad (22)$$

式中,  $R(\text{NO})$  为参与还原反应的 NO 总量, kg/s。

将式(21)代入式(22)并进行简化得

$$R(\text{NO}) = k_2 B Y(\text{NO}) Y^{0.3}(\text{CO}) \quad (23)$$

式中,  $k_2$  为 NO 还原量计算系数;  $Y(\text{CO})$  可由式(14)得到。

因此,  $t$  时刻烟气中排放 NO 含量为煤颗粒燃烧生成 NO 量与即燃碳颗粒表面还原 NO 量之差, 即

$$q_v \alpha Y'_{\text{NO}}(t) = Y_{\text{NO}}(t) - R_{\text{NO}}(t) \quad (24)$$

$$Y'_{\text{NO}}(t) = \frac{Y_{\text{NO}}(t) - R_{\text{NO}}(t)}{q_v \alpha} \quad (25)$$

## 2.3 炉膛出口 NO<sub>x</sub> 预测模型仿真

在 290 MW 稳定工况下, 改变给煤量, 计算炉膛出口 NO<sub>x</sub> 浓度, 结果如图 2 所示。可知, 计算值与试验值平均误差为 5.76%, 说明计算值有一定预测效果, 可提前 3~5 min 计算出炉膛出口 NO<sub>x</sub> 浓度。

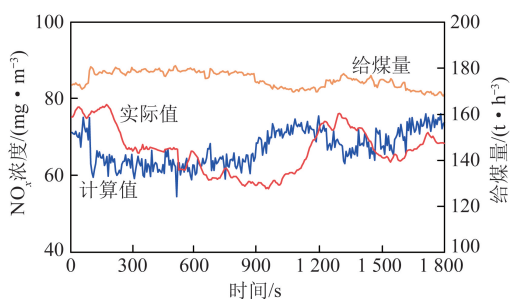


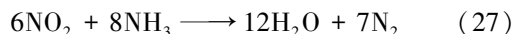
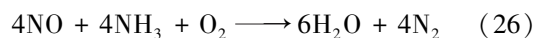
图2 炉膛出口 NO<sub>x</sub> 浓度计算值与试验值对比

Fig.2 Comparison of calculated value and experimental value of NO<sub>x</sub> concentration at furnace outlet

## 3 CFB 氮氧化物炉内外综合排放控制

随着国家环保标准越发严格, 通过炉内低氮燃烧与 SCR、SNCR 相互配合, 降低污染物排放, 达到环保要求成为循环流化床发展的重要方向。

CFB 锅炉内 NO<sub>x</sub> 生成量降低的方式主要有控制床温、分级送风等。床温升高, 导致 CO 浓度降低, 且焦炭表面的 NO 异相还原反应减少, 使 NO<sub>x</sub> 浓度升高<sup>[21]</sup>; 通过调整一、二次风量<sup>[5-6,22]</sup> 提升二次风比率, 可形成较强的还原性气氛, 抑制 NO 的生成。循环流化床锅炉 NO<sub>x</sub> 生成浓度较低, 一般选用 SNCR 作为炉外脱硝设备。SNCR 脱硝过程中, 以氨为还原剂<sup>[23]</sup>, 发生的还原反应有



SNCR 脱硝效率在 30%~50%, 电厂实际操作中, 脱硝过程中的喷氨量并未得到有效控制, 造成氨逃逸或脱硝效果不佳。因此, 在 NO<sub>x</sub> 预测模型基础上, 有必要设计炉内外 NO<sub>x</sub> 综合控制策略。以炉膛出口 NO<sub>x</sub> 浓度预测模型为基础设计的炉内外 NO<sub>x</sub> 综合优化控制技术路线如图 3 所示。该技术路线应用 NO<sub>x</sub> 浓度预测模型, 对一、二次风量进行优化, 同时作为 SNCR 喷氨量的前馈, 对 SNCR 喷氨量进行优化, 达到炉内低氮燃烧与炉外脱硝的综合控制。

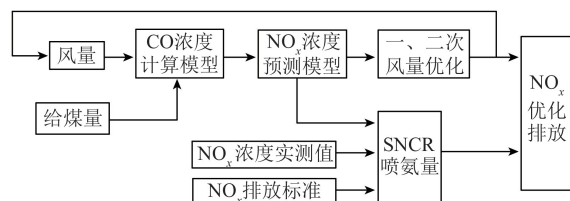


图3 炉内外 NO<sub>x</sub> 综合控制技术路线

Fig.3 Technical route of comprehensive control of NO<sub>x</sub> inside and outside the furnace

### 3.1 基于 NO<sub>x</sub> 浓度预测模型的一、二次风量控制

通过风量、给煤量、CO 浓度建立 CFB 炉膛出口

$\text{NO}_x$ 浓度预测模型。炉内一、二次风量配比不合理是导致SNCR脱硝控制效果不佳的原因之一。建立 $\text{NO}_x$ 浓度预测模型,可有效反映炉内的燃烧状况、床温和一、二次风量配比等,快速对机组进行调节。也可作为SNCR的前馈值对喷氨量进行快速修正,达到CFB机组 $\text{NO}_x$ 综合优化排放的目的。

传统的二次风控制策略,未考虑一、二次风量对于 $\text{NO}_x$ 污染物生成的影响,仅由锅炉主控经过氧量校正后形成二次风量指令,直接作用于二次风机。图4为优化后的二次风控制策略,将炉膛出口 $\text{NO}_x$ 浓度加入控制逻辑中,通过预测值与试验值的偏差对二次风量指令进行修正,在预测值偏高时,适当增加二次风量,使炉内生成较强的还原性气氛,有效抑制炉内 $\text{NO}_x$ 的生成。

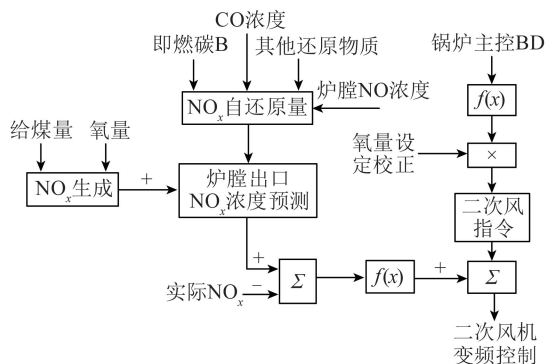


图4 二次风优化控制思路

Fig.4 Secondary air optimization control idea

传统的一次风量控制策略由锅炉主控形成,主要考虑床温、负荷等因素。为尽量降低炉内 $\text{NO}_x$ 生成量,在调整二次风量的同时,也要对一次风量进行修正。优化的一次风控制思路如图5所示。

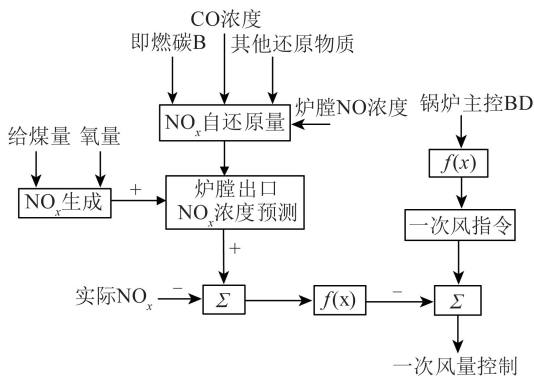


图5 一次风优化控制思路

Fig.5 Primary air optimization control idea

图4将炉膛出口 $\text{NO}_x$ 浓度预测模型引入控制中,作为一次风指令的修正。若 $\text{NO}_x$ 预测值较高,则适当减少一次风量,增加二次风量,增强炉内的还原性气氛,减少 $\text{NO}_x$ 生成。

### 3.2 基于 $\text{NO}_x$ 浓度预测模型的SNCR控制方案

炉内一、二次风量进行优化的同时,需根据 $\text{NO}_x$ 浓度预测模型,设计新的SNCR喷氨量优化控制方案。传统的SNCR控制方式仅通过 $\text{NO}_x$ 的设定值与SNCR尾部测得的实际值做偏差后,利用PID控制,但负荷波动时, $\text{NO}_x$ 排放常超标,控制效果不佳,因此电厂中的SNCR设备并未使用自动控制。

图6为基于 $\text{NO}_x$ 浓度预测的SNCR控制方案,将 $\text{NO}_x$ 浓度预测模型作为SNCR的前馈,使SNCR提前调节喷氨量。炉膛出口烟温对SNCR的脱硝效率有一定影响。炉膛出口烟温低于 $900\text{ }^\circ\text{C}$ 时,温度越高,脱硫效率越高;高于 $900\text{ }^\circ\text{C}$ 时,温度越高,脱硝效率降低。即燃碳热量信号反映炉内的热量波动,当即燃碳热量信号取微分后为正数时,即炉内热量加速上升,且烟温高于 $900\text{ }^\circ\text{C}$ 时,脱硫效率偏低,需调节喷氨量。

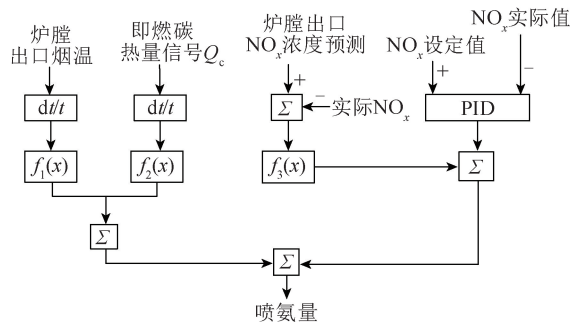


图6 基于 $\text{NO}_x$ 浓度预测的SNCR控制方案

Fig.6 SNCR control scheme based on  $\text{NO}_x$  concentration prediction

## 4 结论

1) 本文分析了循环流化床机组炉内 $\text{NO}_x$  (主要为NO)与CO的生成与自还原反应动力学,并分析了CFB操作对 $\text{NO}_x$ 生成的影响因素,建立了CO生成模型与燃烧模型。

2) 根据2个CO模型建立 $\text{NO}_x$ 的生成模型与还原模型,最终建立了循环流化床机组炉膛出口 $\text{NO}_x$ 浓度的预测模型。

3) 根据模型提出了炉内外 $\text{NO}_x$ 综合控制技术路线,通过炉膛出口 $\text{NO}_x$ 浓度预测模型对SNCR喷氨量与炉内一、二次风量优化提供指导,提出基于 $\text{NO}_x$ 预测模型的一、二次风量优化控制与SNCR优化控制思路,为CFB机组 $\text{NO}_x$ 低排放控制提供参考。

### 参考文献(References):

- [1] 岳光溪,吕复俊,徐鹏,等. 循环流化床燃烧发展现状 & 前景分析[J]. 中国电力,2016,49(1):1-13.

- YUE Guangxi, LYU Junfu, XU Peng, et al. Analysis on the status and prospects of CFB combustion development [J]. *China Power*, 2016, 49(1): 1-13.
- [2] 蔡润夏, 吕俊复, 凌文, 等. 超(超)临界循环流化床锅炉技术的发展[J]. *中国电力*, 2016, 49(12): 1-7.
- CAI Runxia, LYU Junfu, LING Wen, et al. Development of super (super) critical circulating fluidized bed boiler technology [J]. *China Power*, 2016, 49(12): 1-7.
- [3] 吕俊复, 柯希玮, 蔡润夏, 等. 循环流化床燃烧条件下焦炭表面  $\text{NO}_x$  还原机理研究进展[J]. *煤炭转化*, 2018, 41(1): 1-12.
- LYU Junfu, KE Xiwei, CAI Runxia, et al. Research progress of  $\text{NO}_x$  reduction mechanism on coke surface under circulating fluidized bed combustion conditions [J]. *Coal Conversion*, 2018, 41(1): 1-12.
- [4] 高建强. 大型循环流化床锅炉实时仿真模型与运行特性研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2005.
- GAO Jianqiang. Study on real-time simulation model and operating characteristics of large circulating fluidized bed boiler [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2005.
- [5] 廖子昱. 循环流化床锅炉  $\text{N}_2\text{O}$  生成与控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- LIAO Ziyu. Study on  $\text{N}_2\text{O}$  generation and control of circulating fluidized bed boiler [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [6] 刘慧敏. 增压富氧流化床燃烧下  $\text{NO}_x$  的生成模型[D]. 保定: 华北电力大学, 2014.
- LIU Huimin.  $\text{NO}_x$  generation model in a pressurized oxygen-enriched fluidized bed combustion [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2014.
- [7] HULGAARD T, DAM-JOHANSEN K. Homogeneous nitrous oxide formation and destruction under combustion conditions [J]. *AIChE J.*, 1993, 39: 1342-1354.
- [8] LIU H, GIBBS B M. The Influence of limestone addition at different positions on gaseous emissions from a coal-fired circulating fluidized bed combustor [J]. *Fuel*, 1998, 77(14): 1569-1577.
- [9] ARMESTO L, BOERRIGTER H, BAHILLO A, et al.  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from fluidised bed combustion; the effect of fuel characteristics and operating conditions [J]. *Fuel*, 2003, 82(15/17): 1845-1850.
- [10] NII Arai. 燃烧生成物的发生与抑制技术[M]. 赵黛青, 译. 北京: 科学出版社, 2001: 68, 75.
- Combustion products generation and suppression technology [M]. ZHAO Daiqing, trans. Beijing: Science Press, 2001: 68, 75.
- [11] HAYHURST A N, LAWRENCE A D. The amounts of  $\text{NO}_x$  and  $\text{N}_2\text{O}$  formed in a fluidized bed combustor during the burning of coal volatiles and also of char [J]. *Combustion and Flame*, 1996, 105(3): 341-357.
- [12] 侯祥松, 李金平, 张海, 等. 石灰石脱硫对循环流化床中  $\text{NO}_x$  生成和排放的影响[J]. *电站系统工程*, 2005, 21(1): 5-7.
- HOU Xiangsong, LI Jinping, ZHANG Hai, et al. Effect of limestone desulfurization on  $\text{NO}_x$  generation and emissions in a circulating fluidized bed [J]. *Power Plant System Engineering*, 2005, 21(1): 5-7.
- [13] HAMPARTSOUMIAN E, GIBBS B M.  $\text{NO}_x$  formation and reduction in fluidized bed combustors [J]. *Journal of the Institute of Energy*, 1984, 57: 402-410.
- [14] 吕清刚, 雍玉梅, 那永洁, 等. 循环流化床燃煤锅炉的  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  排放的试验和数值计算[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(1): 142-146.
- LYU Qinggang, YONG Yumei, NA Yongjie, et al. Test and numerical calculation of  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}_x$  emissions from circulating fluidized bed coal-fired boilers [J]. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2005, 25(1): 142-146.
- [15] ZHAO J, GRACE J R, LIM C J, et al. Influence of operating parameters on  $\text{NO}_x$  emissions from a circulating fluidized bed combustor [J]. *Fuel*, 1994, 73(10): 1650-1657.
- [16] LUIS F, LONDONO C A, WANG X S, et al. Influence of operating parameters on  $\text{NO}_x$  and  $\text{N}_2\text{O}$  axial profiles in a circulating fluidized bed combustor [J]. *Fuel*, 1996, 75(8): 971-978.
- [17] 李政. 循环流化床通用整体数学模型、仿真、与性能预测[D]. 北京: 清华大学, 1994.
- LI Zheng. General integral mathematical model, simulation and performance prediction of circulating fluidized bed [D]. Beijing: Tsinghua University, 1994.
- [18] LA Nauze R D. Mass transfer considerations in fluidized combustion with particular reference to the influence of system pressure [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 1985, 64(4): 219-229.
- [19] 高明明. 大型循环流化床锅炉燃烧状态监测研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2013.
- GAO Mingming. Study on combustion monitoring of large CFB boiler [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2013.
- [20] 王智微, 李定凯, 沈幼庭, 等. 一氧化碳在循环流化床燃烧室中的燃烧模型[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2000, 40(2): 110-113.
- WANG Zhiwei, LI Dingkai, SHEN Youting, et al. Combustion model of carbon monoxide in circulating fluidized bed combustion chamber [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2000, 40(2): 110-113.
- [21] 张磊, 杨学民, 谢建军, 等. 循环流化床燃煤过程  $\text{NO}_x$  和  $\text{N}_2\text{O}$  产生-控制研究进展[J]. *过程工程学报*, 2006(6): 1004-1010.
- ZHANG Lei, YANG Xuemin, XIE Jianjun, et al. Research progress of  $\text{NO}_x$  and  $\text{N}_2\text{O}$  production and control in circulating fluidized bed coal combustion [J]. *Journal of Process Engineering*, 2006(6): 1004-1010.
- [22] 李竞岚. 循环流化床锅炉氮氧化物生成机理的实验与模型研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.
- LI Jinglan. Experimental and model study on the formation mechanism of nitrogen oxide in a circulating fluidized bed boiler [D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [23] 刘吉臻, 洪峰, 高明明, 等. 循环流化床机组快速变负荷运行控制策略研究[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(14): 4130-4137, 4292.
- LIU Jizhen, HONG Feng, GAO Mingming, et al. Study on control strategy of fast load changing operation of CFB Unit [J]. *Journal of China Electrical Engineering*, 2017, 37(14): 4130-4137, 4292.