

# 回转窑内生物质高温空气燃烧NO<sub>x</sub>生成模型与验证

楼波, 罗玉和, 马晓茜

(华南理工大学电力学院, 广东省广州市 510640)

## Model and Experimental Validation on NO<sub>x</sub> Emission of Biomass Combustion in Rotary Kiln With HTAC

LOU Bo, LUO Yu-he, MA Xiao-qian

(College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong Province, China)

**ABSTRACT:** Based on the existing forms and evolution of Fuel-N in biomass fuels during high temperature air combustion (HTAC), a model mainly considering fuel-NO<sub>x</sub> and thermal-NO<sub>x</sub> formation was established. Through numerical calculation, the NO<sub>x</sub> emission behaviors of biomass fuel, rice husk, in rotary kiln were studied. The calculated results show that NO<sub>x</sub> content increases with air temperature increasing, and this trend is accelerating after the air temperature 1000-1050°C, NO<sub>x</sub> content decreases with lowering of oxygen mole content in air. There is a remarkable drop when oxygen mole content is under the critical value, 8%, reducing of air consumption coefficient shapes the reductive atmosphere, and then inhibits NO<sub>x</sub> formation. At 1200°C, air consumption coefficient drops to 0.8 from 1.8, and NO<sub>x</sub> content decreases to 150 mL/m<sup>3</sup> from 400 mL/m<sup>3</sup> roughly. Comparing the data of NO<sub>x</sub> obtained from experiment with the values by numerical calculation, the results show that the rules of NO<sub>x</sub> emission appear the same trend, and the average relative error is about 7% between calculated values and experimental data. The proposed model is proved to be reliable and the NO<sub>x</sub> emission in HTAC can be lower.

**KEY WORDS:** high temperature air combustion; rotary kiln; biomass; fuel-NO<sub>x</sub>; numerical calculation

**摘要:** 根据生物质中燃料N的存在形式和燃烧中演变的特点,建立了其在高温空气燃烧(HTAC)条件下以燃料型NO<sub>x</sub>产生为主并考虑热力型NO<sub>x</sub>的生成模型。通过数值计算研究了回转窑内生物质燃料稻壳在HTAC下NO<sub>x</sub>的排放规律。计算结果表明: 燃烧后NO<sub>x</sub>的生成浓度随高温空气温度的增加而增大,在一定温度(1000~1050°C)以上,这一趋势更是有所加快;随着氧气体积分数的降低,NO<sub>x</sub>的生成浓度降低,当氧气体积分数低于临界值(8%)时,NO<sub>x</sub>的量显著下降;

空气消耗系数的降低形成还原性气氛,使NO<sub>x</sub>的生成降低,在空气温度1200°C时,空气消耗系数从1.8降到0.8,NO<sub>x</sub>的浓度大致从400 mL/m<sup>3</sup>降为150 mL/m<sup>3</sup>。通过实验测量的NO<sub>x</sub>值与相同工况下的数值计算值进行了比较,两者NO<sub>x</sub>排放规律的变化趋势相同,平均相对误差约为7%。验证了模型的可靠性,证实了高温空气燃烧技术与低氧燃烧结合能实现较低的NO<sub>x</sub>排放。

**关键词:** 高温空气燃烧; 回转窑; 生物质; 燃料型NO<sub>x</sub>; 数值计算

## 0 引言

随着煤、油等一次能源的日益减少,可再生能源的利用越来越受到各国的重视。生物质是已广泛应用的主要可再生能源之一,但因能量密度低、水分含量高,使用传统的燃烧技术需要较大的空燃比,排烟热损失较大,热利用效率较低,同时燃烧中产生的NO<sub>x</sub>数量也不容忽略<sup>[1]</sup>。

高温空气燃烧技术(HTAC)作为一种新型燃烧方式,最早源于日本。其改进了传统燃烧的一些不足,使得燃料的适应性更广,燃烧效率增高,而且将稳定燃烧的范围扩展到贫氧区域,使整个燃烧过程处于扩散控制反应,不再存在局部高温区,可有效降低NO<sub>x</sub>的生成与排放<sup>[2-5]</sup>。

中国广大农村地区生物质燃料较多,但有关生物质燃料燃烧后NO<sub>x</sub>排放的研究却较少<sup>[6]</sup>。本文通过数值计算和实验研究了回转窑内生物质燃料高温空气燃烧NO<sub>x</sub>的生成特性,为高温空气生物质焚烧回转窑炉的优化、开发及商业应用提供理论参考。

## 1 生物质燃烧的NO<sub>x</sub>生成模型

燃料燃烧过程中生成的NO<sub>x</sub>按其形成可分 3

种：热力型NO<sub>x</sub>、快速型NO<sub>x</sub>和燃料型NO<sub>x</sub>。一般认为，快速NO<sub>x</sub>因生成的比例较少，可以忽略<sup>[7]</sup>；燃料型NO<sub>x</sub>的生成机理极其复杂，其反应机理还未完全掌握，图 1 是以煤为例的一系列的化学反应<sup>[8-11]</sup>。而生物质中N的形态与煤不完全相同，因此本文在分析NO的生成途径时，做以下假设：

(1) N 在焦炭和挥发分中是均匀分布的，燃料 N 进入气相的释放率与挥发率成比例，焦炭 N 转化为 NO 的速度与焦炭燃尽率成比例。

(2) 生物质燃料中燃料N主要以胺的形态存在，受热后挥发分N瞬时以NH<sub>3</sub>的形式释放。

(3) 快速型NO<sub>x</sub>忽略不计。

基于以上的假设分析，其反应机理如图 2 所示，各基元反应的速率常数取  $k = AT^b \exp(-E/(RT))$ ，动力学模型中的反应式、速率表达式和常数等见表 1<sup>[7,12-13]</sup>。

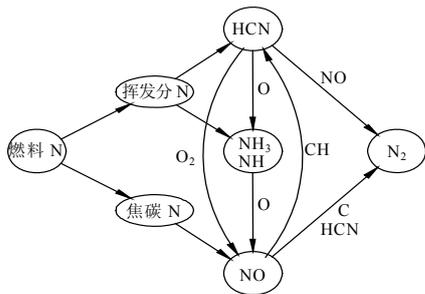


图 1 煤燃烧时燃料 N 的变化

Fig. 1 Transformation of Fuel-N in combustion of coal

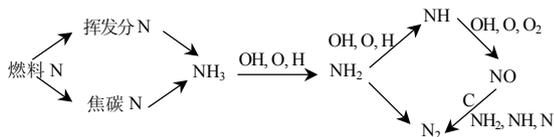


图 2 生物质燃料燃烧时燃料型 NO<sub>x</sub> 生成机理

Fig. 2 Fuel-NO<sub>x</sub> formed mechanism in HTAC of biomass

表 1 回转窑内 NO<sub>x</sub> 生成反应动力学模型参数

Tab. 1 Model parameter table of reaction Kinetic for NO<sub>x</sub> formation in rotary kiln

序号	反应式	A	b	E/(kJ/mol)	反应速率表达式
1	NH <sub>3</sub> +OH=NH <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O	4.0×10 <sup>10</sup>	0.68	1100	R <sub>1</sub> =k <sub>1</sub> ·C <sub>NH3</sub> ·C <sub>OH</sub>
2	NH <sub>3</sub> +O=NH <sub>2</sub> +OH	1.5×10 <sup>12</sup>	0	6000	R <sub>2</sub> =k <sub>2</sub> ·C <sub>NH3</sub> ·C <sub>O</sub>
3	NH <sub>3</sub> +H=NH <sub>2</sub> +H <sub>2</sub>	5.0×10 <sup>11</sup>	0.50	1900	R <sub>3</sub> =k <sub>3</sub> ·C <sub>NH3</sub> ·C <sub>H</sub>
4	NH <sub>2</sub> +OH=NH+H <sub>2</sub> O	3.0×10 <sup>10</sup>	0.68	1300	R <sub>4</sub> =k <sub>4</sub> ·C <sub>NH2</sub> ·C <sub>OH</sub>
5	NH <sub>2</sub> +O=NH+OH	9.2×10 <sup>11</sup>	0.50	0	R <sub>5</sub> =k <sub>5</sub> ·C <sub>NH2</sub> ·C <sub>O</sub>
6	NH <sub>2</sub> +H=NH+H <sub>2</sub>	1.0×10 <sup>11</sup>	0.67	4290	R <sub>6</sub> =k <sub>6</sub> ·C <sub>NH2</sub> ·C <sub>H</sub>
7	NH+O <sub>2</sub> =NO+OH	7.6×10 <sup>10</sup>	0	1530	R <sub>7</sub> =k <sub>7</sub> ·C <sub>NH</sub> ·C <sub>O2</sub>
8	NH+O=NO+H	5.0×10 <sup>11</sup>	0.50	5000	R <sub>8</sub> =k <sub>8</sub> ·C <sub>NH</sub> ·C <sub>O</sub>
9	NH+OH=NO+H <sub>2</sub>	1.6×10 <sup>12</sup>	0.56	1500	R <sub>9</sub> =k <sub>9</sub> ·C <sub>NH</sub> ·C <sub>OH</sub>
10	NH+NO=N <sub>2</sub> +OH	1.0×10 <sup>12</sup>	0	0	R <sub>10</sub> =k <sub>10</sub> ·C <sub>NH</sub> ·C <sub>NO</sub>
11	NH <sub>2</sub> +NO=N <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O	6.2×10 <sup>15</sup>	-1.30	0	R <sub>11</sub> =k <sub>11</sub> ·C <sub>NH2</sub> ·C <sub>NO</sub>
12	NH+H=N+H <sub>2</sub>	3.2×10 <sup>13</sup>	0	646	R <sub>12</sub> =k <sub>12</sub> ·C <sub>NH</sub> ·C <sub>H</sub>
13	NH+OH=N+H <sub>2</sub> O	5.0×10 <sup>11</sup>	0.50	1987	R <sub>13</sub> =k <sub>13</sub> ·C <sub>NH</sub> ·C <sub>OH</sub>
14	NH+O=N+OH	6.0×10 <sup>13</sup>	0.50	20940	R <sub>14</sub> =k <sub>14</sub> ·C <sub>NH</sub> ·C <sub>O</sub>
15	N+NO=N <sub>2</sub> +O	3.3×10 <sup>12</sup>	0.30	334	R <sub>15</sub> =k <sub>15</sub> ·C <sub>N</sub> ·C <sub>NO</sub>

生物质燃料中N的释放速率  $R_{\text{Bio} \rightarrow \text{NH}_3}$  正比于生物质燃料在热解及焦炭燃烧时的质量衰减速率  $S_p$ ，即

$$R_{\text{Bio} \rightarrow \text{NH}_3} = \frac{17}{14} (S_p Y_{\text{Bio}}^{\text{N}}) \quad (1)$$

式中：17 为 NH<sub>3</sub> 的分子量；14 为 N 的原子量； $Y_{\text{Bio}}^{\text{N}}$  为燃料中氮的质量分数，%。

生物质热解的化学反应速率满足 Arrhenius 方程，即

$$\frac{dw}{dt} = A \exp(-E/(RT_g))(1-w)^b \quad (2)$$

式中： $w$  为反应的失重率，%； $t$  为升温时间，min； $A$  为指前因子； $E$  为活化能，kJ/mol； $R$  为摩尔气体常数，8.314 J·mol<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>； $T_g$  为反应温度，K； $b$  为反应级数，对生物质热解而言，可认为是一级反应， $b=1$ 。

回转窑内焦炭燃烧的反应速率  $R_C$  同时受到化学反应动力学和氧气扩散的控制，对于直径  $d$  的碳颗粒为<sup>[14]</sup>

$$R_C = m(1/(\frac{1}{k} + \frac{1}{\alpha_d}))c_{\text{O},\infty} \quad (3)$$

其中， $k = 3.22 \times 10^5 \exp(\frac{-149440}{R T_g})$  (4)

$$\alpha_d = d/(Nu^* \times D) \quad (5)$$

$$Nu^* = 2 \frac{\sqrt{Re}}{1 - \exp(-0.35\sqrt{Re})} \quad (6)$$

$$D = 0.18 \times (\frac{T_g}{298})^{1.75} \quad (7)$$

式中： $m$  为碳氧消耗当量比， $m=3/8$ ； $k$  为燃烧时氧气反应速率； $\alpha_d$  为燃烧时氧气扩散消耗速率； $c_{\text{O},\infty}$  为碳颗粒远处周围介质中氧浓度，mol/cm<sup>3</sup>； $d$  为焦炭直径，cm； $Nu^*$  为传质努谢尔数； $D$  为扩散系数； $Re$  为雷诺数。

焦炭对 NO 发生异相还原反应，使 NO 的浓度降低。焦炭还原反应的速率  $R_{\text{char}}$  表达式<sup>[15]</sup>为

$$R_{\text{char}} = 4.8 \times 10^4 A_E p_{\text{NO}} \exp(-142\ 500/(RT_g)) \quad (8)$$

式中： $A_E$  为焦炭颗粒的外比表面积，m<sup>2</sup>/g； $p_{\text{NO}}$  为烟气中 NO 的分压力。

热力型 NO<sub>x</sub> 的生成机理由 Zeldovich 提出，其生成速率表达式<sup>[7]</sup>为

$$R_{\text{ther-NO}} = 3 \times 10^{14} c_{\text{N}_2} c_{\text{O}_2}^{1/2} \exp(-542\ 000/(RT_g)) \quad (9)$$

式中  $c_{\text{N}_2}$ 、 $c_{\text{O}_2}$  分别为烟气中 N<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 的物质浓度，mol/cm<sup>3</sup>。

## 2 计算说明

### 2.1 初始浓度

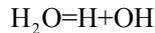
实验与计算物料均为稻壳,其收到基成分见表2。根据燃烧过程中的物质平衡,可计算出 $H_2O$ 、 $O_2$ 的初始浓度 $c_{H_2O}^0$ 和 $c_{O_2}^0$ 。

表2 物料的收到基成分

Tab. 2 Element content of biomass as received basis

$w_{ar}/\%$									$Q_{net,ar}/(kJ/kg)$
C	H	O	N	S	A	W	V		
37.4	4.79	32.62	1.88	0.017	16.92	6.1	51.98		13358

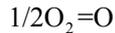
计算 OH、H 初始浓度的反应为



标准平衡常数为

$$K_1^0 = \frac{(p_H/p^0)(p_{OH}/p^0)}{p_{H_2O}} \quad (10)$$

计算 O 初始浓度的反应为



标准平衡常数为

$$K_2^0 = \frac{(p_O/p^0)}{(p_{O_2}/p^0)^{1/2}} \quad (11)$$

式(10)、(11)中: $p_i$ 为烟气中组分*i*的分压力; $p^0$ 为标准压力。

由此可求出 OH、H 和 O 初始浓度 $c_{OH}^0$ 、 $c_H^0$ 和 $c_O^0$ 。其他各组分初始浓度均为0。

### 2.2 停留时间计算

物料在回转窑内的平均轴向速度 $u$ 和平均停留时间 $t_m$ 为<sup>[16]</sup>

$$u = [(8\pi r n \tan \beta / 3) / (\Phi_f / \sin \frac{\Phi_f}{2}) \sin \theta] \times (1 + W) \quad (12)$$

$$t_m = L / u \quad (13)$$

式中: $r$ 、 $L$ 为回转窑筒体的半径、长度, m;  $n$ 为筒体的转速, r/min;  $\beta$ 为回转窑筒体的倾角, (°);  $\theta$ 为物料的运动休止角, (°);  $\Phi_f$ 为物料在筒体内径向位移所对应的角度, rad;  $\Phi_f$ 为物料在筒体内的充满角, rad;  $W$ 为物料与筒壁相对运动的影响因子。

### 2.3 温度场计算

回转窑内传热模型采用一维分区传热模型,如图3所示<sup>[17]</sup>。将回转窑分为3个区间:加热干燥区、热解焚烧区、残碳燃尽区。通过对炉内炉壁与物料间导热、烟气与物料间对流传热、炉壁和烟气与固体物料间辐射传热的分析,得出了各区的热量平衡方程组。采用四阶龙格-库塔算法求解上述方程组,即可得到炉内烟气的温度分布。

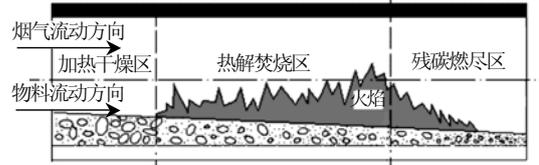


图3 回转窑一维分区传热模型

Fig. 3 Thermal model of zone for the rotary kiln

### 2.4 浓度换算

为了使不同出口含氧量下的 $NO_x$ 浓度可以相互对比,统一以烟气中氧体积浓度6%为标准,对其他浓度的 $NO_x$ 值进行转换,

$$C'_{NO_x} = \frac{21-6}{21-Y_{O_2}} C_{NO_x} \quad (14)$$

式中: $C'_{NO_x}$ 为折算后的 $NO_x$ 的体积浓度, mL/m<sup>3</sup>;  $Y_{O_2}$ 为烟气中 $O_2$ 的质量分数, %;  $C_{NO_x}$ 为折算前的 $NO_x$ 的体积浓度, mL/m<sup>3</sup>。

### 2.5 计算方法

本文针对回转窑炉型,结合高温空气燃烧特点,通过改变高温预热空气的温度、含氧量和空气消耗系数等参数,根据以上反应机理,用Matlab7.0编程,选用步长0.001s,反复迭代计算,直到计算时间达到物料的平均停留时间 $t_m$ 为止。

## 3 计算结果及分析

图4是稻壳在不同氧体积分数(空气消耗系数均为 $\alpha=1.1$ )下燃烧时, $NO_x$ 的生成浓度与高温空气温度 $T$ 的关系。由图可知, $NO_x$ 的生成浓度随高温空气温度的增加而增加。 $NO_x$ 生成与挥发分着火是同步的,对初期析出挥发分的燃烧反应,因为着火初期存在足够的氧供其燃烧之用,并在极短时间内造成局部的温度升高,故有利于 $NO_x$ 的生成,这时的挥发分燃烧大多属动力控制。当挥发分燃烧后期,固定碳开始着火,过程就转为扩散控制。随着温度的升高,稻壳燃烧后 $NO_x$ 的排放量呈单调增加,特别在一定温度(1000~1050℃)以后, $NO_x$ 浓度增加有加快趋势。A. Brink<sup>[18]</sup>研究了生物质燃料在常规燃烧方式(氧气体积浓度为21%)下的燃烧,结果表明入口温度1300K时, $NO$ 体积浓度接近1000mL/m<sup>3</sup>。而采用高温空气燃烧,该温度下 $NO_x$ 的浓度不超过150 mL/m<sup>3</sup>,可见高温空气燃烧技术用于生物质燃烧能大大降低 $NO_x$ 的排放。

空气消耗系数 $\alpha=1.1$ 时,不同高温空气温度下 $NO_x$ 的生成浓度与高温空气中氧体积分数变化的曲线见图5。随着高温空气中氧体积分数的升高,燃烧后生成的 $NO_x$ 的含量都有增加。氧体积分数在

8%附近时，增长的曲线斜率变陡，超过 9%以后，NO<sub>x</sub>的生成浓度随高氧体积分数的增加趋势又有所减缓，把曲线分成上下 2 个区域，这与文献[19]的试验结果类似。高温空气温度 800 °C，氧体积分数为 8%以下时，NO<sub>x</sub>生成量不超过 30 mL/m<sup>3</sup>，仅为正常氧量时的 1/6 左右。可见在生物质燃料燃烧时，如果采用高温低氧空气，氧体积分数要保持在 8% 以下才能大大降低燃烧后NO<sub>x</sub>的排放。

图 6 是在不同高温空气温度(氧体积分数均为 10%)下，回转窑内空气消耗系数 $\alpha$ 对NO<sub>x</sub>的生成浓度的影响。随着消耗空气系数的降低，NO<sub>x</sub>生产量一直降低。因为空气消耗系数的降低会造成氧浓度的降低，形成还原反应气氛，有利于NO<sub>x</sub>还原成N<sub>2</sub>，从而有效降低NO<sub>x</sub>的生成。但有研究表明<sup>[13,20]</sup>，挥发分N向NO<sub>x</sub>的转化对氧浓度很敏感，而焦炭中的N对氧浓度不敏感，因此，存在着一个利用还原

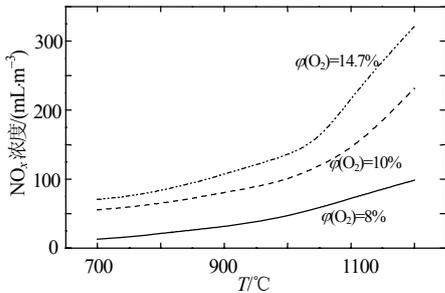


图 4 NO<sub>x</sub>浓度与高温空气温度的关系  
Fig. 4 Relation between NO<sub>x</sub> concentration and air temperature

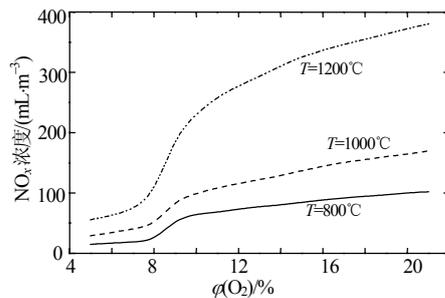


图 5 NO<sub>x</sub>浓度与高温空气含氧量的关系  
Fig. 5 Relation between NO<sub>x</sub> concentration and oxygen content in air

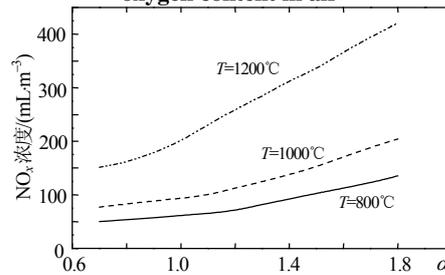


图 6 NO<sub>x</sub>浓度与空气消耗系数 $\alpha$ 关系  
Fig. 6 Relation between NO<sub>x</sub> concentration and air consumption coefficient

性气氛降低NO<sub>x</sub>生成的下限。

## 4 实验测量与验证

### 4.1 实验装置

图7为实验台结构图，整个实验台主体部分由高温空气发生器<sup>[21]</sup>、回转窑、加料斗、回转窑可调支架、排风机和各个热电偶测点等组成。*a*、*b*、*c*、*d* 4点分别为热电偶测温点，测得的分别是：*a*为蓄热室内空气温度；*b*为回转窑进口烟气温度；*c*为回转窑中间段烟气温度；*d*为回转窑室排气温度的。

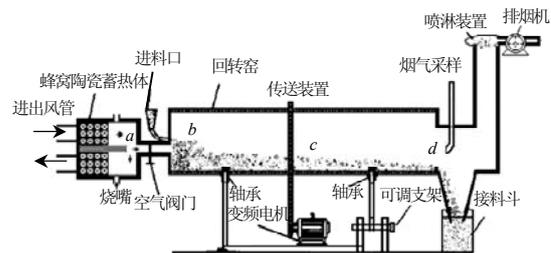


图 7 高温空气回转窑生物质燃料燃烧实验台  
Fig. 7 Biomass incineration set-up in rotary kiln with HTAC

### 4.2 测量方法

本实验中温度由热电偶测得，在*a*、*b*、*c*、*d*处分别布置温度测量点。以*b*点的温度最高作为NO<sub>x</sub>产生的温度依据。物料以恒定速率加入到窑内。NO<sub>x</sub>成分用德国的Testo350XL烟气分析测量仪测得，每个工况点测量时间在 4 min 以上，同一种工况数据测量重复 10 次，然后取其平均值。由于高温空气发生时也可能产生NO<sub>x</sub>，分别在*a*点和*d*点处测量空气和烟气的NO<sub>x</sub>成分，用 2 者的差值作为高温空气与生物质燃烧后生成的NO<sub>x</sub>量。高温空气量在高温空气发生器中测量，通过测量高温空气发生器进出口空气的质量流量差得到。高温空气含氧量可在*a*点测得，通过高温空气量和含氧量可计算出回转窑内生物质燃烧时的空气消耗系数。

实验中，同一工况测量 10 次取其平均值，有效避免测量的偶然性，减小其测量和读数误差。因此误差主要由测量仪器的系统误差引起：①实验用的Testo350XL烟气分析仪的精度是 0.1 mL/m<sup>3</sup>，对于NO<sub>x</sub>排放浓度在 100 mL/m<sup>3</sup>以上时，该误差小于 0.1%，精度很高；②测量温度的热电偶误差为± 0.5 °C，相对于实验中的温度(800~1200 °C)，由此引起的误差可以忽略不计。

### 4.3 实验结果与分析

在空气消耗系数 $\alpha=1.14$ ，氧浓度 17.4%时不同温度下进行实验，测得了稻壳燃烧时的NO<sub>x</sub>浓度，

再以相同的工况输入模型中,得到了计算值,2者的比较见图8。比较实验和计算值,850℃以下的工况实验测量值比计算值高一些,而850℃以上工况的计算值则相对高一些。对于两者的差异,可能实验台散热损失有差别,温度越高实验台的散热比例越大,导致d点温度比计算时的温度偏差也越大,因而测量值在温度高的时候比计算值低一些。但从2者的比较来看,随着高温空气温度的升高,NO<sub>x</sub>排放量增加的趋势是相同的,2者的平均差异为7%左右,模型有一定的精度。

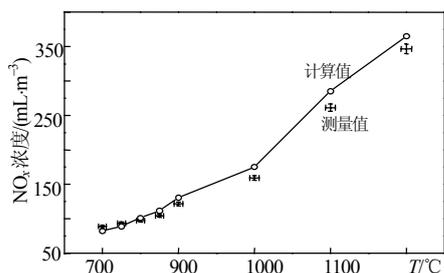


图8 回转窑出口NO<sub>x</sub>浓度的实验测量值与计算值的比较  
Fig. 8 Comparison between experimental data and calculated values of NO<sub>x</sub> concentration in the outlet of rotary kiln

## 5 结论

(1) 数值计算与实验表明,生物质燃料稻壳燃烧时,NO<sub>x</sub>的生成浓度随高温空气温度的增加而增加,在一定温度(1000~1050℃)以后,NO<sub>x</sub>浓度增加更是有加快趋势。但与同温度的常温空气燃烧比较,NO<sub>x</sub>生成浓度要低,这因为高温能够实现低氧燃烧,抑制了NO<sub>x</sub>生成。

(2) 随着高温空气中氧气体积分数的增加,燃烧后生成的NO<sub>x</sub>的量也增加,氧体积分数超过一临界值时,NO<sub>x</sub>的量有一跳跃。例如在空气温度800℃,氧体积分数在8%以下时,NO<sub>x</sub>生成量低于30 mL/m<sup>3</sup>,但氧体积分数超过9%以后,NO<sub>x</sub>的生成浓度剧增,达到80 mL/m<sup>3</sup>以上。可见,高温与低氧燃烧技术结合更能降低NO<sub>x</sub>的生成。

(3) 消耗空气系数对生物质燃烧中NO<sub>x</sub>生成也有较大影响。空气消耗系数的降低会造成氧浓度的降低,形成还原性气氛,有利于NO<sub>x</sub>的还原,从而有效降低NO<sub>x</sub>的生成。

(4) 通过相同工况下NO<sub>x</sub>实验测量值与计算值比较发现,随着高温空气温度的变化,NO<sub>x</sub>排放规律的变化趋势相同,平均相对误差约为7%,本模型具有一定的可信度,建立的燃料型NO<sub>x</sub>生成的动力学模型能描述HTAC回转窑内生物质燃烧的NO<sub>x</sub>

生成规律。

## 参考文献

- [1] 田贺忠,郝吉明,陆永琅,等. 中国生物质燃烧排放SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>量的估算[J]. 环境科学学报, 2002, 22(2): 204-208.  
Tian Hezhong, Hao Jiming, Lu Yongqi, et al. Evaluation of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions resulted from biomass fuels utilization in China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2002, 22(2): 204-208(in Chinese).
- [2] Hasegawa T, Tanaka R, Niioka T. Combustion with high temperature low oxygen air in regenerative burners[C]. The First Asia-Pacific Conference on Combustion, Osaka, Japan, 1997.
- [3] Mortberg M, Rafidi N, Blasiak W. Measurements of temperature, heat flux and flue gas composition in HTAC flame[C]. Challenges in Reheating Furnaces, London, UK, 2002.
- [4] Mori K. Outline of R&D and field test demonstration projects of high performance industrial furnace[C]. Proceedings of the Forum on High Temperature Air Combustion Technology, Josui Kaikan, Tokyo, 2001.
- [5] Mortberg M, Rafidi N. Technical Report No. 1: HTAC test furnace with burner systems[C]. Division of Heat and Furnace Technology, S-100 44, Stockholm, 2001.
- [6] Duan F K, Liu X D, Yu T, et al. Identification and estimate of biomass burning contribution to the urban aerosol organic carbon concentrations in Beijing[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(9): 1275-1282.
- [7] 曾汉才. 燃烧和污染[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1992.
- [8] 金晶, 张忠孝, 李瑞阳. 煤粉燃烧炉膛沿程NO<sub>x</sub>释放规律的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(1): 35-39.  
Jin Jing, Zhang Zhongxiao, Li Ruiyang. Study on the NO<sub>x</sub> release rule along boiler during pulverized coal combustion[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(1): 35-39(in Chinese).
- [9] 张磊, 杨学民, 谢建军, 等. 粉煤和石灰石加入位置对循环流化床燃煤过程NO<sub>x</sub>与N<sub>2</sub>O排放的影响[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21): 92-98.  
Zhang Lei, Yang Xuemin, Xie Jianjun, et al. Effect of coal and limestone addition position on emission of NO<sub>x</sub> and N<sub>2</sub>O during coal combustion in a circulating fluidized bed combustor[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 92-98(in Chinese).
- [10] 周俊虎, 宋国良, 刘建忠, 等. 高浓度煤粉燃烧低NO<sub>x</sub>排放特性的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(2): 42-47.  
Zhou Junhu, Song Guoliang, Liu Jianzhong, et al. Experimental study on characteristics of low NO<sub>x</sub> emission during the dense phase pulverized coal combustion[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(2): 42-47(in Chinese).
- [11] 郭永红, 孙保民, 刘彤, 等. 褐煤的超细粉再燃中 NO<sub>x</sub>的生成与还原的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 96-98.  
Guo Yonghong, Sun Baomin, Liu Tong, et al. numerical simulation of NO<sub>x</sub> formation and deoxidization with micro-pulverized coal reburning technology for lignit[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 96-98(in Chinese).
- [12] Jiachun Zhou. Fuel-bound nitrogen evolution during biomass gasification[D]. University of Hawaii, US, 1998.
- [13] 岑可法, 姚强, 骆仲泱, 等. 燃烧理论与污染控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [14] 任泽霖, 蔡睿贤. 热工手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [15] Levy J M, Chan L K, Sarofim A F, et al. NO/char reactions at pulverized coal flame conditions[C]. the 18th Symposium

- (International) on Combustion Institute, Pittsburg, 1981.
- [16] 彭思众, 马晓茜, 赵绪新. 回转窑内物料流动模型研究[J]. 工业炉, 2002, 24(4): 6-9.  
Peng Sizhong, Ma Xiaoqian, Zhao Xuxin. Researching on the model of solid flow in rotary kiln[J]. Industrial Furnace, 2002, 24(4): 6-9(in Chinese).
- [17] Peng Sizhong, Ma Xiaoqian, Sun Zhengang. The analysis of heat transfer in heating and drying zone of rotary kiln-simplified model [C]. 3rd International Symposium on Heat Transfer Enhancement and energy Conservation, Guangzhou, China, 2004.
- [18] Brink A, Kilpinen P. Development of reduced mechanisms applicable to CFD modeling of  $\text{NO}_x$  emission from biomass combustion [R]. Åbo Akademi Combustion Chemistry Research Group, Åbo, Finland, 1999.
- [19] Szewczyk D, Olsson H, Lilie S, et al. The emission of nitric oxides and carbon oxide from burning of single jet of propane in highly preheated oxidiser[C]. 2nd International Seminar on High Temperature Combustion in Industrial Furnaces, Stockholm, Sweden, 2000.
- [20] Miller J A, Bowman C T. Mechanisms and modeling of nitrogen chemistry in combustion progress[J]. Energy Combust Sci. 1989, 15(4): 287-338.
- [21] 罗玉和, 楼波, 马晓茜. 高温空气发生器蓄热体换热性能的实验研究[J]. 工业炉, 2005, 27(6): 9-11, 23.  
Luo Yu-he, Lou Bo, Ma Xiaoqian. Experimental study on heat transfer efficiency of honeycomb ceramics regenerator used in the high temperature generator[J]. Industrial Furnace, 2005, 27(6): 9-11, 23(in Chinese).
- 
- 收稿日期: 2007-05-14。  
作者简介:  
楼 波(1965—), 男, 浙江义乌人, 副教授, 从事燃烧技术与环境保护研究, loubo@scut.edu.cn。
- (编辑 王庆霞)