

# 天然气再燃过程与排放特性数值研究

毕明树\*, 贾艳艳, 李 芳

(大连理工大学 化工学院, 辽宁 大连 116012)

**摘要:** 应用 CFD 计算软件 FLUENT6.1, 对煤粉炉天然气再燃烧过程进行了数值模拟. 分析了不同再燃烧工况下, NO<sub>x</sub>、CO<sub>2</sub>、CO 等污染物的排放量及飞灰含碳量与煤粉炉热效率之间的关系. 结果表明, 天然气再燃技术能够有效地降低 NO<sub>x</sub> 的排放量, 且燃料燃烧充分, 煤粉炉热效率较高. 给出了在保证煤粉炉较高热效率前提下, 有效降低 NO<sub>x</sub> 排放的天然气再燃量、天然气投射位置以及再燃烧区过量空气系数. NO<sub>x</sub> 排放浓度的计算值与试验值的变化趋势基本保持一致, 表明计算方法可用于工程实际. 对现有锅炉进行一定的结构改造, 通过天然气再燃可达到高效降低 NO<sub>x</sub> 排放的目的.

**关键词:** 热能动力工程; 天然气; 再燃; NO<sub>x</sub> 脱除; 数值模拟

**中图分类号:** TK121 **文献标志码:** A

## 0 引言

煤作为世界上大量消费的一次能源, 其利用方式主要是燃烧, 但已造成了严重的大气污染. 燃烧排放的污染物主要有 NO<sub>x</sub>、二氧化碳、固体粒子(包括未燃烧和部分燃烧)等, 其中 NO<sub>x</sub> 在大气中的含量, 从 19 世纪 50 年代起至少增加了 3 倍. 在各种降低 NO<sub>x</sub> 排放的技术中, 燃料再燃技术是最为行之有效的方... (text continues)

及炉膛中心温度沿炉膛长度分布的影响.

## 1 数学模型及数值方法

### 1.1 数学模型

煤粉在炉膛内燃烧是一个复杂的过程, 涉及气相流动和湍流燃烧、颗粒运动、挥发分析出、焦炭燃烧、辐射换热<sup>[12,13]</sup>等. 各模型的建立极大地影响着数值计算的结果.

气相的湍流流动采用标准 k-ε 方程模型, 微分方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \\ &G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + \\ &C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - \\ &C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \end{aligned}$$

其中  $G_k = -\rho \overline{u_i' u_i' \frac{\partial u_j}{\partial x_i}}$ ;  $G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}$ ;  $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ ;  $Y_M = 2\rho \epsilon M_t^2$ ,  $M_t = \sqrt{\frac{k}{a^2}}$ ;  $C_{1\epsilon} = 1.44$ ;  $C_{2\epsilon} = 1.92$ ;  $C_\mu = 0.09$ ;  $\sigma_k = 1.0$ ;  $\sigma_\epsilon = 1.3$ ;  $C_{3\epsilon} =$

$$S_e = S_k = 0.$$

气相湍流燃烧使用双混合分数概率密度函数(PDF)模型,选取 $\beta$ -PDF.天然气以二次流、非经验流形式注入.这一模型的优点是,可以预测中间成分,而且不要求解全部的组分输运方程,只需求解混合分数,然后根据混合分数再从PrePDF软件生成的查询表中查询各组分.双混合分数PDF模型与单混合分数PDF模型相比,PDF的积分是在FLUENT中进行的,因此它对计算机有更高的要求,而且计算时间也较长,但是相应地其计算精度也要高于单混合分数PDF模型.并且本文所研究的燃烧系统含有两种不同组成的燃料流和一种氧化剂流,因此双混合分数PDF模型才是有效的.

煤粉颗粒相流动采用随机轨道方法,计算中追踪了 $10 \times 10^6$ 个(取10个直径,每个直径取10个)粒子.

挥发分析出模型为双竞争反应热解模型.1977年Kobayashi等提出了用两个平行竞争的一级反应来描述热解过程,即



以上两个反应中的反应速率系数 $k_1$ 、 $k_2$ 服从Arrhenius定律:

$$k_n = k_{0n} \exp(-E/RT_p); n = 1, 2$$

这一模型的特点是认为,存在着两个反应活化能 $E_1$ 、 $E_2$ 和两个反应频率因子 $k_{01}$ 、 $k_{02}$ ,且 $E_2 > E_1$ ,  $k_{02} > k_{01}$ .这样,在低温时第一个反应起主要作用,高温时则第二个反应起主要作用,在中等温度时,两个反应均起主要作用.这就解决了单方程热解模型只适用于等温过程的限制,它可应用于较广的温度范围,这是一个很大的改进.其中 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $E_1$ 、 $E_2$ 、 $k_{01}$ 、 $k_{02}$ 均为实验系数.本文的计算煤种为烟煤,试验表明对于烟煤的挥发分析出过程各试验参数取以下各值比较合理<sup>[14]</sup>:

$$\begin{aligned} E_1 &= 104.6 \text{ kJ/mol}, E_2 = 167.4 \text{ kJ/mol}, \\ k_{01} &= 2 \times 10^5 \text{ s}^{-1}, k_{02} = 1.3 \times 10^7 \text{ s}^{-1}, \\ \alpha_1 &= 0.3, \alpha_2 = 1.0 \end{aligned}$$

焦炭燃烧采用动力/扩散控制燃烧模型.此

模型假定炭的表面反应速率由动力学速率或扩散速率确定.此模型假设颗粒大小不变,密度减小,其扩散速率方程为

$$D_0 = C_1 \frac{[(T_p - T_\infty)/2]^{0.75}}{d_p}$$

化学(动力学)反应速率常数为

$$R_0 = C_2 \exp(-E/RT_p)$$

根据二者不同的加权值得到焦炭的燃烧速率为

$$\frac{dm_p}{dt} = -\pi d_p^2 p_{\text{ox}} \frac{D_0 R_0}{D_0 + R_0}$$

用P-1辐射模型计算辐射传热.

在煤粉炉中生成的 $\text{NO}_x$ 中,主要是NO,约占95%,而 $\text{NO}_2$ 仅占5%左右,并且是由NO氧化而来, $\text{N}_2\text{O}$ 等的量极少,因此本文只考虑NO的生成,即文中 $\text{NO}_x$ 仅指NO. $\text{NO}_x$ 的生成分为3部分:热力型、快速型和燃料型.本计算中对 $\text{NO}_x$ 的生成采用后处理的方法.热力型 $\text{NO}_x$ 采用extended Zeldovich机理计算.利用DeSoete给出的通用动力学参数对快速型 $\text{NO}_x$ 进行计算.对于燃料型 $\text{NO}_x$ ,计算中认为煤粉颗粒中的氮均匀分布于挥发分和焦炭中,即在两者中浓度相同.采用图1的反应机理:燃料N首先转化为中间产物HCN,然后部分HCN转化为 $\text{NO}$ <sup>[15]</sup>.湍流对 $\text{NO}_x$ 生成的影响采用温度和氧浓度的 $\beta$ 型概率密度函数来模拟.

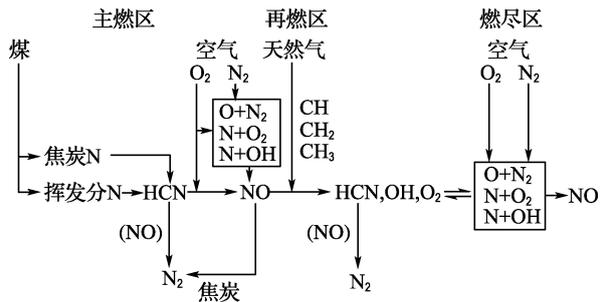


图1  $\text{NO}_x$ 生成反应机理

Fig. 1  $\text{NO}_x$  formation mechanisms

## 1.2 数值计算方法

用结构化四边形网格对二维计算区域进行离散,采用有限容积法来离散微分方程,使用二阶迎风格式,压力速度耦合采用SIMPLE算法.在直角坐标系下的交错网格系统中求解.采用TDMA法求解代数方程组.

入口条件按进口均匀分布取值,给出各进口

气固两相的流速、质量流量和温度. 进口处湍动能  $k$  取为进口处平均动能的 3%, 进口处湍流动能耗散率按进口处的  $k$  值和进口特征长度计算. 出口条件按压力出口条件取值, 壁面边界条件取无滑移条件, 对于流体近壁区域采用壁面函数法.

## 2 模拟对象及网格划分

### 2.1 模拟对象

本文所计算的煤粉炉炉膛结构如图 2 所示(单位为 mm). 炉膛长 10 m, 宽 1.0 m, 煤粉与空气的速度比取 0.3. 煤粉炉为对称结构, 有一个供煤粉和一次风射入的喷嘴(直流)、两个二次风进气口、两个天然气再燃燃料进气口以及两个燃尽风进气口. 其中煤粉入口与天然气入口之间的区域为主燃烧区也称一级燃烧区; 天然气入口与燃尽风入口之间的区域为再燃区也称二级燃烧区; 燃尽风入口至煤粉炉出口区域为燃尽区也称三级燃烧区. 主燃料为烟煤, 煤质分析结果见表 1, 煤

粉的主要物性参数见表 2, 再燃燃料是体积分数为  $\text{CH}_4$  96% 和  $\text{C}_2\text{H}_6$  4% 的天然气, 炉膛计算参数见表 3.

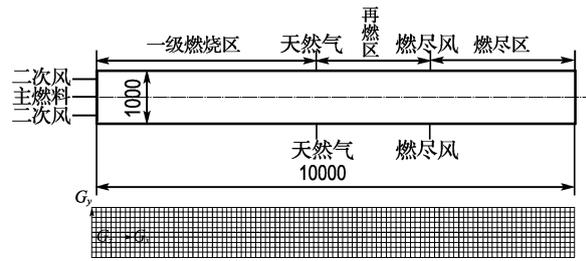


图 2 煤粉炉结构示意图及计算域网格划分

Fig. 2 The schematic diagram of coal-powder furnace and calculation mesh

表 1 煤质分析结果

Tab. 1 The results of the coal-quality analysis

工业分析/%			元素分析/%					$Q_{\text{daf,net}}/$
$\text{FC}_d$	$\text{A}_d$	$\text{V}_d$	C	H	O	S	N	( $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
64	8	28	89.3	5.0	3.4	0.6	1.7	35.3

表 2 煤样的物性参数

Tab. 2 Physical parameters of the coal

密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	比热容/( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	导热系数/( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	扩散系数/( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	膨胀系数	发射率	散射率
1 300	1 000	0.045 4	0.000 5	2	0.9	0.6

表 3 炉膛计算参数

Tab. 3 Furnace parameters

参数	数值	参数	数值
煤粉温度/ $^{\circ}\text{C}$	27	煤粉速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	15
一次风温度/ $^{\circ}\text{C}$	350	一次风风速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	50
二次风温度/ $^{\circ}\text{C}$	350	二次风风速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	15
燃尽风温度/ $^{\circ}\text{C}$	350	燃尽风风速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	25
天然气进气温度/ $^{\circ}\text{C}$	50	天然气进气速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	25
壁面温度/ $^{\circ}\text{C}$	927	煤粉颗粒平均粒径/ $\mu\text{m}$	90

### 2.2 网格独立性分析

煤粉炉网格划分采用了结构化四边形网格, 网格划分后的几何模型如图 2 所示. 在煤粉的质量流量为 0.08 kg/s, 再燃量  $R_{\text{ff}}$  (再燃天然气燃烧产生的发热量占总发热量的比值) 为 20%, 一级燃烧区长度  $L_1=6$  m, 再燃区长度  $L_2=2$  m, 燃尽区长度  $L_3=2$  m, 总的过量空气系数为 1.1, 一级燃烧区过量空气系数为 1.1, 再燃区过量空气系数为 0.8 的工况下, 计算了不同网格密度下的温度分布. 从图 3 不同网格密度中心线温度分布曲

线图可以看出, 当网格节点达到 22 011 时中心线温度分布曲线就趋于稳定了, 说明此时得到的数值解具有网格独立性. 因此, 本文拟采用网格节点为 22 011 时的网格划分方法划分模型, 此时既能满足计算精度要求, 也可节省大量的计算时间和计算机资源.

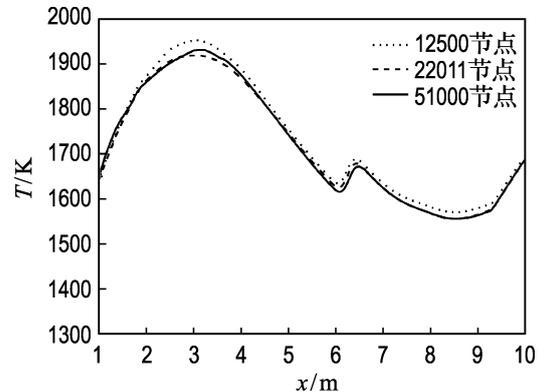


图 3 不同计算网格下中心线温度曲线

Fig. 3 Example of centre temperature profiles for meshes with different nodal densities

### 3 计算结果与分析

下文所述飞灰含碳量  $w(\text{UBC})$  为未燃碳质量占飞灰质量的百分比。 $\text{NO}_x$  脱氮率  $\eta$  由下式定义：

$$\eta = \frac{\rho_{\text{ini}}(\text{NO}_x) - \rho_{\text{reb}}(\text{NO}_x)}{\rho_{\text{ini}}(\text{NO}_x)} \times 100\%$$

式中  $\rho_{\text{ini}}(\text{NO}_x)$  为无再燃常规燃烧下的  $\text{NO}_x$  排放浓度值,  $\rho_{\text{reb}}(\text{NO}_x)$  为天然气再燃工况下的  $\text{NO}_x$  排放浓度值。

#### 3.1 数值计算的有效性考核

利用上述数学模型和数值计算方法对文献[11]中所述物理问题进行描述, 并与试验数据进行比较, 结果见图4。从图中可以看出, 在改变天然气占总燃料配比的情况下,  $\text{NO}_x$  出口浓度的计算值与试验值的变化趋势基本保持一致, 说明数学模型与数值计算方法有效, 其计算结果具有工程应用价值。

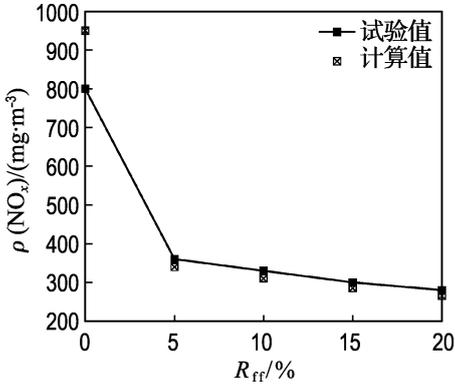


图4 数值结果与试验结果的对比

Fig. 4 Comparison of numerical and experimental results

#### 3.2 再燃量对燃烧过程的影响

在总燃料发热量不变, 再燃区长度  $L_2 = 2 \text{ m}$ , 燃尽区长度  $L_3 = 2 \text{ m}$ , 总的过量空气系数为 1.1, 一级燃烧区过量空气系数为 1.1, 再燃区过量空气系数为 0.8 的情况下, 改变天然气发热量占总燃料发热量的百分比, 分别取 0、10%、20%、30%、40%。在上述参数下, 计算出口烟气平均温度,  $\text{NO}_x$ 、CO、 $\text{CO}_2$  排放的平均值以及  $w(\text{UBC})$ , 并给出炉膛中心温度沿炉膛长度的分布, 探讨不同再燃量对燃烧过程的影响, 结果如图5与图6所示。

从图5可以看出, 随着再燃量的增大,  $\text{NO}_x$

排放浓度单调减小,  $\text{NO}_x$  脱除率单调增大, 变化幅度逐渐减小。由于再燃量的增大, 有较多的 CHi 基团与  $\text{NO}_x$  反应生成  $\text{N}_2$ , 有效降低了  $\text{NO}_x$  的排放量; 另外, 天然气本身基本不含氮元素, 其在总燃料中所占的比例越大, 总的燃料中含氮量就越少, 燃烧产生的燃料型  $\text{NO}_x$  量就越少, 又因为燃料型  $\text{NO}_x$  在煤粉炉产生的总的  $\text{NO}_x$  中所占份额很高, 因此最后生成的  $\text{NO}_x$  量会降低。当再燃量进一步增大时, 由于一级燃烧区内生成的  $\text{NO}_x$  已经大部分被还原,  $\text{NO}_x$  的降低幅度变得不明显。

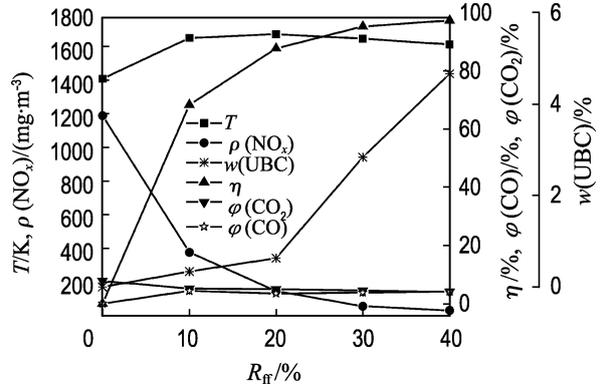


图5  $\text{NO}_x$  排放浓度、 $\text{NO}_x$  脱除率、CO 与  $\text{CO}_2$  体积分数、 $w(\text{UBC})$  及温度在出口处随再燃量的变化

Fig. 5 The influences of reburning fuel fraction on  $\rho(\text{NO}_x)$ ,  $\eta$ ,  $\varphi(\text{CO})$ ,  $\varphi(\text{CO}_2)$ ,  $w(\text{UBC})$  in the outlet

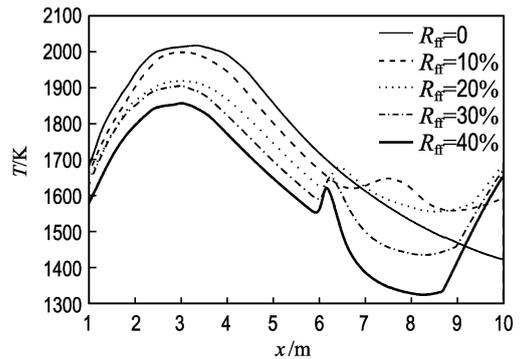


图6 不同再燃量下炉膛中心温度沿炉膛长度变化

Fig. 6 The furnace centre temperature distribution along the length with different reburning fuel fractions

燃料再燃使部分燃料从主燃区分离出来在炉膛中部的再燃区二次燃烧, 使炉膛中心温度沿着炉膛长度变化的曲线在再燃区出现第二个峰值

(如图 6 所示). 燃料再燃还减少了燃料在炉膛的停留时间, 推迟了燃料的燃尽, 使炉膛出口烟气温增高, 并增加了飞灰含碳量. 由于天然气有较好的燃尽性, 当再燃量控制在 10%~20% 时, 不但可以大幅度降低  $\text{NO}_x$  的排放量, 使  $\text{NO}_x$  脱除率最高可达到 87.6%, 而且炉膛内高温区域增大(如图 6 所示), 出口烟气温升较小,  $w(\text{UBC})$  在一个很小的值 0.63% 以下, 整个炉膛燃烧情况较好, 燃烧效率较高. 由于炉膛内高温区域增大, 控制得当可以提高煤粉炉的热效率.

### 3.3 再燃燃料喷射位置对燃烧过程的影响

在总燃料发热量不变, 天然气发热量占总燃料发热量 20%, 总的过量空气系数为 1.1, 一级燃烧区过量空气系数为 1.1, 再燃区过量空气系数为 0.8, 燃尽区长度  $L_3=2$  m 的情况下, 改变再燃燃料喷口距主燃料喷口的距离, 即一级燃烧区长度  $L_1$  分别取 3、4、5、6、7、8 m. 由于燃尽风进气口固定, 那么对应的再燃区长度  $L_2$  分别为 5、4、3、2、1、0 m. 在上述参数下, 计算出口烟气平均温度,  $\text{NO}_x$ 、CO、 $\text{CO}_2$  排放的平均值以及  $w(\text{UBC})$ , 并给出炉膛中心温度沿炉膛长度的分布, 探讨不同再燃燃料喷射位置对燃烧过程的影响, 结果如图 7 与图 8 所示.

从图 7 中可以看出,  $\text{NO}_x$  排放浓度随再燃燃料喷口距主燃料喷口距离的增大先减小后增大, 存在一个最佳再燃燃料喷射位置 ( $L_1=6$  m). 如果再燃燃料喷口离主燃料喷口太近, 主燃烧区空间缩短, 会造成主燃料燃烧不充分, 主燃烧区较多的剩余氧量进入再燃区, 削弱了再燃区的还原性气氛, 致使  $\text{NO}_x$  被还原效果减弱; 但当再燃燃料喷口离主燃料喷口太远, 由于燃尽风进气口固定, 离燃尽风喷口就会太近, 即主燃烧区空间过长, 再燃区空间过短, 再燃燃料远离炉膛局部高温区, 并且固定氮类化合物 ( $\text{NH}_3$ 、 $\text{HCN}$ 、 $\text{NO}$ 、焦炭氮) 在还原区停留的时间缩短, 一方面较低的温度不利于  $\text{NO}_x$  的还原反应, 另一方面烟气在氧化性气氛中的停留时间增加, 使  $\text{NO}_x$  的生成量增加, 再一方面由于固定氮类化合物在还原区停留的时间缩短,  $\text{NO}_x$  还原反应不够充分, 也增加了  $\text{NO}_x$  的生成量.

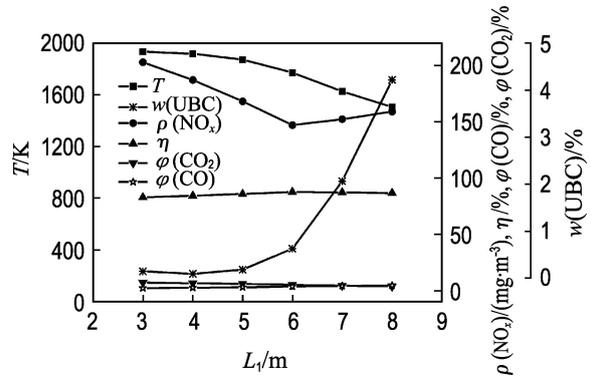


图 7  $\text{NO}_x$  排放浓度、 $\text{NO}_x$  脱除率、CO 与  $\text{CO}_2$  体积分数、 $w(\text{UBC})$  及温度在出口处随  $L_1$  的变化

Fig. 7 The influences of  $L_1$  on  $\rho(\text{NO}_x)$ ,  $\eta$ ,  $\phi(\text{CO})$ ,  $\phi(\text{CO}_2)$ ,  $w(\text{UBC})$  and temperature in the outlet

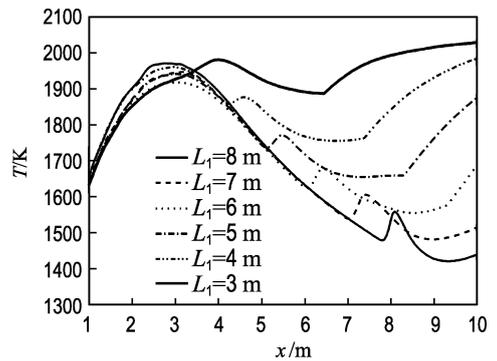


图 8 不同  $L_1$  下炉膛中心温度沿着炉膛长度变化

Fig. 8 The furnace centre temperature distribution along the length with different  $L_1$

再燃燃料喷口距主燃料喷口距离的增大, 会缩短天然气在炉膛的停留时间, 导致不完全燃烧产物 CO 的排放量和 UBC 的增加. 虽然再燃燃料喷口距主燃料喷口距离的减小会带来燃烧效率的大幅度提高而使炉膛内高温区显著增大(如图 8 所示), 增加煤粉炉的热效率, 但综合考虑  $\text{NO}_x$  脱除率, 再燃燃料喷口距主燃料喷口的距离即一级燃烧区长度  $L_1$  为 5.0~6.0 m, 再燃区长度  $L_2$  为 2.0~3.0 m 时, 较为合适.

### 3.4 再燃区过量空气系数对燃烧过程的影响

在总燃料发热量不变, 天然气发热量占总燃料发热量 20%, 再燃区长度  $L_2=2$  m, 燃尽区长度  $L_3=2$  m, 总的过量空气系数为 1.1, 一级燃烧

区过量空气系数为 1.1 的情况下,改变再燃区过量空气系数  $SR_2$ ,分别取 0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0、1.1.在上述参数下,计算出口烟气平均温度,  $NO_x$ 、CO、 $CO_2$  排放的平均值以及  $w(UBC)$ ,并给出炉膛中心温度沿炉膛长度的分布,探讨不同再燃区过量空气系数对燃烧过程的影响,结果如图 9 与图 10 所示.

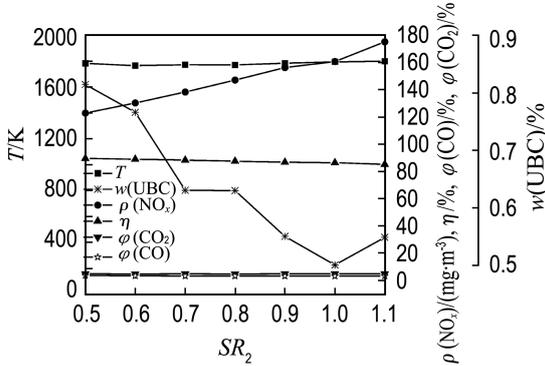


图 9  $NO_x$  排放浓度、 $NO_x$  脱除率、CO 与  $CO_2$  体积分数、 $w(UBC)$  及温度在出口处随  $SR_2$  的变化

Fig. 9 The influences of  $SR_2$  on  $\rho(NO_x)$ ,  $\eta$ ,  $\varphi(CO)$ ,  $\varphi(CO_2)$ ,  $w(UBC)$  and temperature in the outlet

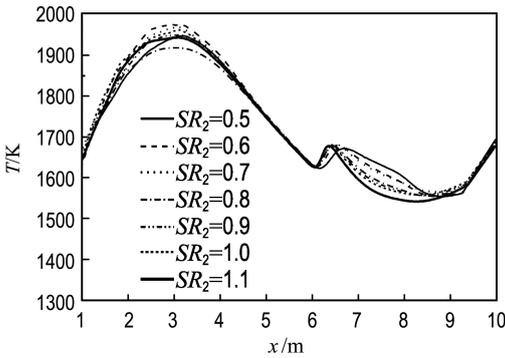


图 10 不同  $SR_2$  下炉膛中心温度沿着炉膛长度变化

Fig. 10 The furnace centre temperature distribution along the length with different  $SR_2$

从图 9 可以看出,  $NO_x$  排放浓度随再燃区过量空气系数  $SR_2$  的增大而增大.这是由于再燃区空气量的增加,增加了再燃区内的氧气量,不利于  $NO_x$  的还原,导致  $NO_x$  的排放量增大.再燃区过量空气系数  $SR_2$  的减小会导致燃料在再燃区燃烧不充分,使炉灰含碳量增加.在本例中,  $w(UBC)$  的

变化幅度较小,炉膛出口烟气温度与  $CO$ 、 $CO_2$  排放量变化不大,炉膛中心温度沿炉膛长度的分布变化亦不大(如图 10 所示),这主要是由于天然气良好的燃尽性和燃尽风的射入,使燃料燃烧完全,保证了炉膛整体的放热率.综合考虑以上各因素,再燃区过量空气系数控制在 0.8~0.9 时,燃烧效果较好.

## 4 结 论

(1) 本文采用 FLUENT 软件选用适当的模型对煤粉炉天然气再燃烧过程进行了数值模拟,计算结果与试验结果吻合,表明了所用数学物理模型和几何结构模型的合理性.其计算结果具有工程应用价值.

(2) 对影响  $NO_x$  排放因素进行了分析,得到了再燃量、再燃燃料投射位置和再燃区过量空气系数与  $NO_x$  排放的关系.随着再燃量的增加  $NO_x$  的排放浓度减小;  $NO_x$  排放浓度随再燃燃料喷口距主燃料喷口距离的增大先减小后增大,存在一个最佳再燃燃料投射位置  $L_1 = 6$  m; 在再燃区过量空气系数逐渐增大的过程中,  $NO_x$  的排放量逐渐增大.

(3) 天然气再燃烧能显著降低  $NO_x$  的排放量,并且炉膛的热效率较高,燃料燃烧充分.本计算中,当再燃量在 10%~20%,再燃燃料喷口距主燃料喷口的距离即一级燃烧区长度  $L_1$  为 5.0~6.0 m,再燃区长度  $L_2$  为 2.0~3.0 m,再燃区过量空气系数  $SR_2$  为 0.8~0.9 时,综合燃烧效果较好.

## 参考文献:

- [1] SMOOT L D, HILL S C, XU H.  $NO_x$  control through reburning [J]. **Progress in Energy and Combustion Science**, 1998, **24**(5):385-408
- [2] TREE D R, CLARK A W. Advanced reburning measurements of temperature and species in a pulverized coal flame [J]. **Fuel**, 2000, **79**(13): 1687-1695
- [3] WASEEM A N, ROBERT E J, JACOB A P, *et al.* Detailed measurements in a pulverized coal flame with natural gas reburning [J]. **Fuel**, 1999, **78**(6): 689-699

- [4] MACAHEY S, MCMULLAN J T, WILLIAMS B C. Techno-economic analysis of NO<sub>x</sub> reduction technologies in p.f. boilers [J]. **Fuel**, 1999, **78**(14):1771-1778
- [5] HAN Dong-hee, MUNGAL M G, ZAMANSKY V M. Prediction of NO<sub>x</sub> control by basic and advanced gas reburning using the two-stage Lagrangian model [J]. **Combustion and Flame**, 1999, **119**(4):483-493
- [6] 张强,刘艳华,许晋源. 再燃烧技术中燃料的选取原则[J]. 工业炉, 2000, **21**(3):9-10
- [7] MALY P M, ZAMANSKY V M. Alternative fuel reburning [J]. **Fuel**, 1999, **78**(3):327-334
- [8] SHEN Bo-xiong, YAO Qiang. Kinetic model for natural gas reburning [J]. **Fuel Processing Technology**, 2004, **85**:1301-1315
- [9] SU S, XIANG J, SUN L, *et al.* Numerical simulation of nitric oxide destruction by gaseous fuel reburning in a single-burner furnace [J]. **Proceedings of the Combustion Institute**, 2007, **31**(2):2795-2803
- [10] 张忠孝,姚向东,乌晓江,等. 气体再燃低NO<sub>x</sub>排放特性试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, **15**(9):99-102
- [11] 刘汉周. 天然气再燃降低NO<sub>x</sub>排放的试验研究与数值模拟[D]. 重庆:重庆大学, 2006
- [12] 岑可法,姚强,骆仲泱,等. 燃烧理论与污染控制: 1版[M]. 北京:机械工业出版社, 2004:410-450
- [13] HILL S C, SMOOT L D. Modeling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems [J]. **Progress in Energy and Combustion Science**, 2000, **26**(4):417-458
- [14] 傅维镛. 煤燃烧理论及其宏观通用规律[M]. 北京:清华大学出版社, 2003:13-17
- [15] Fluent Inc. **FLUENT User's Guide Version 6.1** [M]. Lebanon:FLUENT Inc, 2003

## Numerical study of process and emissions characteristics of natural gas reburning

BI Ming-shu\*, JIA Yan-yan, LI Fang

( School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116012, China )

**Abstract:** The numerical simulation with CFD software FLUENT6.1 on natural gas reburning in coal-powder furnace was conducted to study the relationship between pollutants (NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> and CO) emissions, unburned carbon in fly ash (UBC) and heat efficiency of coal-powder furnace. The results indicate that natural gas reburning can effectively reduce NO<sub>x</sub> emission while keeping fuel fully burning and high heat efficiency. The optimum range of natural gas fraction, injection location of reburning fuel and stoichiometric ratio in rich zone are proposed. The computational results are in good agreement with the experimental ones, which indicates that the numerical calculation method has practical value of application in engineering. It is suggested that through a certain extent reconstruction to boilers, the gas reburning technology can reach a low level of NO<sub>x</sub> emission.

**Key words:** thermal power engineering; natural gas; reburning; NO<sub>x</sub> reduction; numerical simulation