

# 焦炭气化反应对煤粉空气深度分级燃烧 $\text{NO}_x$ 生成的影响

罗 伟<sup>1,2,3</sup>

(1.煤科院节能技术有限公司,北京 100013;2.煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室,北京 100013;  
3.国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点实验室,北京 100013)

**摘要:**焦炭气化反应对空气深度分级工况下燃烧及污染物的生成具有重要影响。笔者采用滴管炉试验与数值计算相结合的方法,研究了主燃区过量空气系数  $\text{SR}_1$  在 1.2→0.6 变化过程中,焦炭气化对空气深度分级工况下煤粉燃烧和  $\text{NO}_x$  排放特性的影响规律。通过对比滴管炉试验数据与传统模型和改进模型(考虑焦炭气化)结果可知,传统模型对空气分级燃烧的还原性气氛预测存在一定缺陷,改进模型与试验结果较吻合。滴管炉试验及改进模型计算结果表明,空气深度分级工况下,主燃区极度缺氧,燃烧过程由最初的挥发分着火(R1和R2)和焦炭不完全氧化(R4)过渡到以焦炭气化反应(R5和R6)为主导的燃烧状态,大量CO生成,高浓度 $\text{CO}_2$ 逐渐被消耗,直至还原区段结束,随着燃尽风加入, $\text{O}_2$ 含量增加,CO被迅速消耗(以R2为主), $\text{CO}_2$ 生成。空气分级工况下 $\text{NO}_x$ 排放特性表现为:燃烧器附近 $\text{NO}_x$ 浓度高,伴随还原性气氛的形成,出现一定程度的下降后保持较低的 $\text{NO}_x$ 水平,随着燃尽风的加入,出现一定程度的“反弹”,这是因为还原区结束时,一部分未完全被还原的氮中间体在燃尽风加入后被迅速氧化造成的。

**关键词:**焦炭气化;空气深度分级;煤粉燃烧; $\text{NO}_x$ ;滴管炉;数值模拟

中图分类号:TK16 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2020)02-0093-09

## Effect of char gasification reactions on $\text{NO}_x$ formation in pulverized coal deep air-staged combustion

LUO Wei<sup>1,2,3</sup>

(1.China Coal Research Institute Company of Energy Conservation, Beijing 100013, China; 2.State Key Laboratory of High Efficient Mining and Clean Utilization of Coal Resources, Beijing 100013, China; 3.National Energy Technology & Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control, Beijing 100013, China)

**Abstract:** The gasification reactions of char have an important influence on combustion and pollutant formation under the condition of deep air-staging. In this paper, the influence of char gasification on the combustion and  $\text{NO}_x$  emission characteristics of pulverized coal under the condition of  $\text{SR}_1$  from 1.2 to 0.6 by the method of drop-tube furnace experiment and numerical calculation. Compared with the experimental data of the drop-tube furnace and the results of the traditional model and the improved model (considering char gasification), it can be seen that the traditional model has some defects in the prediction of reducing atmosphere of air-staged combustion, and the improved model is more consistent with the experimental results. The results of the experiment and the calculation of the improved model show that under the condition of deep air-staging, the main combustion zone is extremely anoxic, and the combustion process changes from the initial volatile ignition (R1 and R2) and incomplete char oxidation (R4) to the combustion state dominated by char gasification reaction (R5 and R6). At this time, a large amount of CO is generated, and the high concentration of  $\text{CO}_2$  is consumed gradually until the end of reduction zone. With the addition of exhausted air, the oxygen content increases, CO is rapidly consumed (mainly R2), and  $\text{CO}_2$  is gradually generated. The  $\text{NO}_x$  emission characteristics under the air classification condition are as follows: the  $\text{NO}_x$  concentration near the burner is high; With the formation of reducing atmosphere, the  $\text{NO}_x$  level remains low after a certain degree of decline; And with the addition of burnout air, there is a certain degree of "rebound", which is caused by the rapid oxidation of some nitrogen intermediates that are not completely reduced after the addition of burnout air when the reduction zone is end.

收稿日期:2020-03-03;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.20030301

基金项目:天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项项目重点项目(2018-TD-ZD001)

作者简介:罗 伟(1982—),男,湖北武汉人,副研究员,主要从事煤粉工业锅炉研究工作。E-mail:luoxiwei2008@163.com

引用格式:罗伟.焦炭气化反应对煤粉空气深度分级燃烧  $\text{NO}_x$  生成的影响[J].洁净煤技术,2020,26(2):93-101.

LUO Wei. Effect of char gasification reactions on  $\text{NO}_x$  formation in pulverized coal deep air-staged combustion[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(2): 93-101.



移动阅读

**Key words:** char gasification; deep air-staged; pulverized coal combustion;  $\text{NO}_x$ ; drop-tube furnace; numerical simulation

## 0 引言

2018年,我国 $\text{NO}_x$ 总排放量约1 197.15万 $\text{t}^{[1]}$ , $\text{NO}_x$ 排放不仅污染大气环境,还会危害人体。 $\text{NO}_x$ 来源多样,燃煤 $\text{NO}_x$ 排放量占比较大。对于电站锅炉和煤粉工业锅炉,降低 $\text{NO}_x$ 排放是当前研究的热点和难点。

空气分级低氮燃烧技术作为一种投资成本较低、效果显著的低氮燃烧技术,已广泛应用于各类锅炉中。影响空气分级 $\text{NO}_x$ 排放量的主要因素包括:主燃烧区过量空气系数(空气分级深度)、燃尽风通入位置、煤粉细度和燃尽风分级程度等,其中空气分级深度和燃尽风通入位置是影响空气分级低氮效果的关键因素。前人针对空气分级已进行了较多试验研究和数值模拟<sup>[2-6]</sup>。

空气分级深度越深,说明从主燃烧区以外送入的助燃空气量占总助燃空气量的比例越大, $\text{NO}_x$ 排放量越低。研究表明,采用深度空气分级燃烧时,煤粉颗粒细度对于 $\text{NO}_x$ 排放浓度影响很小(除过大煤粉颗粒情况)<sup>[8]</sup>。Fan等<sup>[7]</sup>研究了大同烟煤在20 kW沉降炉(DTF)上进行深度空气分级燃烧过程中,CO浓度分布特性和 $\text{NO}_x$ 生成与还原机理。试验结果表明,深度空气分级燃烧下(过量空气系数为0.696),CO浓度最高达 $120\,000 \times 10^{-6}$ ,且还原区内 $\text{NO}_x$ 浓度几乎降至0。

对于常规煤粉燃烧,传统煤粉燃烧模型并不考虑焦炭气化反应,因为常规煤粉燃烧中,燃烧区域不存在氧气浓度远低于还原性气体的情况,而气化反应速率比氧化反应低2个数量级,因此一般忽略气化反应的影响<sup>[9]</sup>。但针对空气深度分级燃烧,还原区存在极强的还原性气氛,而传统数值模型无法合理预测强还原性气氛,因此无法刻画不同工况下还原性气氛对 $\text{NO}_x$ 还原的影响规律。

李振山等<sup>[10-11]</sup>开发了适于不同空气分级工况下的 $\text{NO}_x$ 预测模型,特别是考虑焦炭气化反应对均相 $\text{NO}_x$ 的定量还原预测,通过用户自定义函数对CO和 $\text{H}_2$ 的准确预测间接表征THC含量,从而定量计算最终 $\text{NO}_x$ 生成量。Li等<sup>[12]</sup>针对空气分级研究了考虑焦炭气化的煤粉空气分级燃烧的 $\text{NO}_x$ 预测,并将模拟结果与试验结果进行比较,得到了较好的预测趋势。

本文针对滴管炉内煤粉空气深度分级低氮燃

烧,基于传统煤粉燃烧模型,通过考虑焦炭气化反应,建立改进的煤粉燃烧模型,预测空气深度分级工况下还原性气氛以及 $\text{NO}_x$ 的生成特性,并通过滴管炉试验对改进模型的预测结果进行了验证。

## 1 试验系统及工况

### 1.1 滴管炉试验系统

滴管炉试验装置由炉本体、电加热元件、微量给粉器、配气系统、电控系统以及循环水系统组成,如图1所示。

上段炉体由一根长2 200 mm、内径50 mm的刚玉管和一个硅碳棒加热管组成,上段电加热元件可将炉膛温度由室温加热至1 600 $^{\circ}\text{C}$ ,并可保持长约1 200 mm的恒温区;下段炉体由一根长1 900 mm、内径100 mm的刚玉管和一个硅碳棒加热管组成,下段电加热元件可将炉膛温度由室温加热至1 000 $^{\circ}\text{C}$ ,并可保持长约900 mm的恒温区。炉体上、下段分别安装K型热电偶和S型热电偶用于测量炉膛内温度。

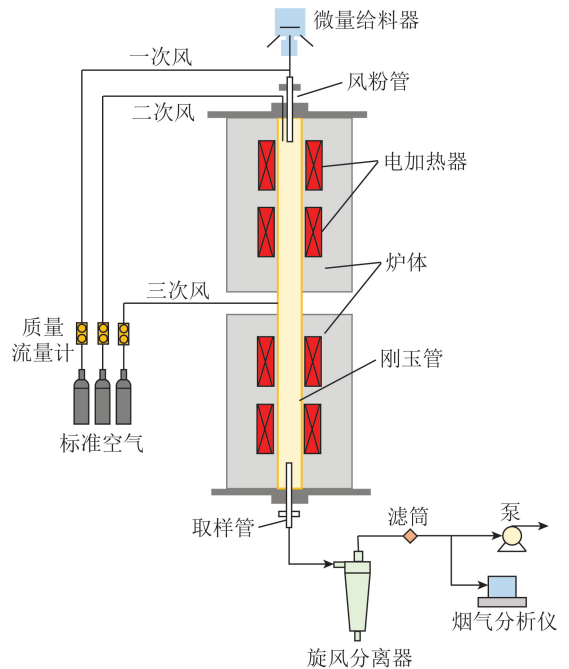


图1 滴管炉试验系统

Fig.1 Drop-tube furnace experiment system.

### 1.2 煤粉特性

采用神木烟煤作为试验和模拟煤种,其工业及元素分析见表1。

煤粉粒径分布按照R-R分布描述,其最小粒径为10 $\mu\text{m}$ ,最大粒径为100 $\mu\text{m}$ ,平均粒径为40 $\mu\text{m}$ 。

表 1 煤样工业分析和元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of coal sample

工业分析/%				元素分析/%					$Q_{\text{net,ar}} / (\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
$M_{\text{ar}}$	$A_{\text{ar}}$	$V_{\text{daf}}$	$FC_{\text{d}}$	$C_{\text{daf}}$	$H_{\text{daf}}$	$N_{\text{daf}}$	$O_{\text{daf}}$	$S_{\text{daf}}$	
5.50	6.06	31.18	57.26	80.00	4.51	1.00	13.94	0.55	27.27

### 1.3 试验与模拟工况

保持煤粉及供料量不变,维持滴管炉燃烧试验工况的稳定,对试验结果的准确性至关重要。为了反映煤粉实际燃烧情况,通过对滴管炉主燃区最高温度及实际双锥煤粉燃烧器内温度测量发现,设置滴管炉上、下段炉温分别为 1 200、1 000 °C 时,滴管炉上段烟气温度与实际燃烧器内接近。因此,本文设置上段炉温 1 200 °C、下段炉温 1 000 °C。

保持总过量空气系数 1.20 不变,探究深度空气分级对煤粉燃烧 NO<sub>x</sub> 排放特性的影响。一次风主要用于输送煤粉,只需将煤粉带入风粉管,且风量不宜过大。通过前期试验研究发现,一次风量为 1 L/min 即可满足正常运行,且试验系统气密性较好。二次风由上段炉膛顶部进入炉膛,二次风量根据试验方案调整,以满足不同主燃区过量空气系数。总助燃空气量减去一次风和二次风量即为三次风量,三次风位于上段炉膛与下段炉膛连接处,且保持不变。

燃料量、配风量的波动使炉内温度发生变化,因此需维持燃烧工况的稳定性。改变配风量后,待尾排烟气氧含量稳定后开始测量。试验工况见表 2,保持总过量空气系数  $SR = 1.2$  不变,分级燃烧的主燃区过量空气系数  $SR_1 = 0.6 \sim 1.2$ ,模拟研究工况与试验工况一致。

表 3 简化的煤气相燃烧反应

Table 3 Simplified gas combustion reaction of coal

反应序号	反应方程	反应类型	$A / (\text{J} \cdot \text{kmol}^{-1})$	$E / (\text{J} \cdot \text{kmol}^{-1})$	参考文献
R1	$C_{1.28} H_{3.99} O_{0.6} N_{0.575} + 1.66 O_2 \rightarrow 0.64 CO + 0.64 CO_2 + 1.99 H_2O + 0.028 7 N_2$	体积反应	$2.119 \times 10^{11}$	$2.027 \times 10^6$	默认
R2	$CO + 0.5 O_2 \rightarrow CO_2$	体积反应	$2.239 \times 10^{12}$	$1.700 \times 10^7$	默认

对于煤粉燃烧,通常燃料型 NO<sub>x</sub> 占 60%~80%,热力型 NO<sub>x</sub> 占 25%左右,快速型 NO<sub>x</sub> 量很少,因此本模拟不考虑快速型 NO<sub>x</sub>。Fluent 软件通常采用后处理方式对 NO<sub>x</sub> 生成量进行预测,即燃烧过程完成后,通过燃烧计算结果预判 NO<sub>x</sub> 的生成特性。燃料中氮转化为 NO<sub>x</sub> 过程较复杂,最终 NO<sub>x</sub> 的生成取决于实际燃烧特性及含氮化合物的初始浓度。

煤粒受热时,燃料中含氮化合物变为气态,生成含氮中间体(HCN、NH<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>CN 和 NH),其与氧气反应生成 NO<sub>x</sub>。在 Fluent 模拟软件中,含氮中间体主

表 2 试验与数值模拟工况

Table 2 Experimental and numerical simulation conditions

工况	一次风量/ (L · min <sup>-1</sup> )	二次风量/ (L · min <sup>-1</sup> )	三次风量/ (L · min <sup>-1</sup> )	SR <sub>1</sub>
1	1.0	29	0	1.20
2	1.0	20	9	0.84
3	1.0	28	11	0.76
4	1.0	16	13	0.68
5	1.0	14	15	0.60

注:SR<sub>1</sub> 为主燃区过量空气系数。

## 2 数值计算模型及网格划分

### 2.1 数学模型

基于前人经验及 Fluent 数值模拟特点<sup>[13]</sup>,选取适宜的数学模型对煤粉燃烧过程进行模拟。流体流动过程在欧拉坐标系下进行求解。连续相方程为质量、动量、能量的连续性方程和时间均值的纳维斯托克斯方程。同时,在连续相方程中添加组分输运方程以求解反应流。本文湍流模型采用 Realizable  $k - \varepsilon$  双方程湍流模型,辐射模型选择 P1 辐射模型,煤粉颗粒采用随机颗粒轨道模型进行模拟。采用简化的煤燃烧两步法反应模拟煤粉气相燃烧过程见表 3。

要有 HCN 和 NH<sub>3</sub><sup>[14]</sup>。煤粉燃烧过程中,N 元素在挥发分及焦炭中的分布不一定相同,因此计算生成的 NO<sub>x</sub> 时需分开考虑。

李振山等<sup>[10]</sup>研究了不同煤种挥发分 N 及焦炭 N 在燃料 N 中的分配比例,并拟合出相应的的计算公式。针对本文所使用的煤种,计算得挥发分 N 含量为 27.85%,焦炭 N 质量分数为 72.15%。许多学者针对不同 N 的转化率进行研究,对不同燃料-空气当量比下挥发分 N 和焦炭 N 的转化率给出了确定数值,如图 2 所示,本文以此分别设置不同燃烧工

况下的挥发分 N 以及焦炭 N 的转化率。

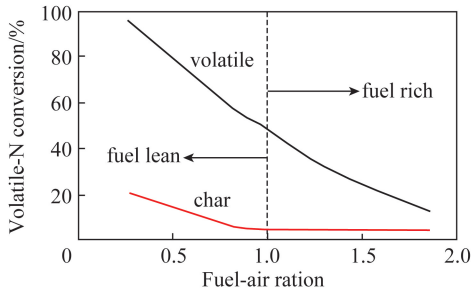


图2 挥发分 N 及焦炭 N 对  $\text{NO}_x$  形成的贡献  
与燃料空气当量比的关系<sup>[15]</sup>

Fig.2 Relationship between the contribution of volatile nitrogen and nitrogen in char to  $\text{NO}_x$  formation and fuel-air equivalent ratio<sup>[15]</sup>

通常氮析出转化成中间含氮物质,模型中设置挥发分 N 转化为  $\text{HCN}/\text{NH}_3$ , 2 者比例为 9 : 1; 焦炭 N 转化为  $\text{HCN}/\text{NH}_3/\text{NO}$ , 其中  $\text{HCN}$  与  $\text{NH}_3$  占比根据燃空比的不同而变化。

## 2.2 反应模型

一般认为煤粉燃烧步骤<sup>[15]</sup>为:①煤被快速加热,挥发分快速析出;②挥发分发生气相反应;③形成由剩余碳、灰分及剩余挥发分构成的炭,炭与  $\text{O}_2$ 、水蒸气及  $\text{CO}_2$  等发生非均相反应,其反应时间占煤颗粒燃烧总时间的 1/2 以上。基于此,本文针对煤粉燃烧采用组分输运模型,将煤粉燃烧过程分为挥发分析出、挥发分燃烧和固定碳燃烧等 3 部分,各部分选用的反应模型见表 4。

挥发分均相反应采用有限速率/涡耗散模型,该模型基于层流有限速率模型和涡耗散模型建立。层流有限速率模型忽略湍流脉动的影响,反应速率根

表 4 常规/考虑焦炭气化的煤粉燃烧反应模型

Table 4 Reaction model of pulverized coal combustion under constant and considering coke gasification

反应过程	反应模型
挥发分析出	双反应竞争模型( $k-\varepsilon$ 模型)
挥发分燃烧	有限速率/涡耗散模型(finite-rate/eddy-dissipation model)
固定碳燃烧(常规)	异相反应模型(the kinetic/diffusion-limited model)
固定碳燃烧(焦炭气化)	异相复杂表面反应模型(multiple-surface-reactions)

据 Arrhenius 公式确定;涡耗散模型认为反应速率由湍流控制,避免繁琐的 Arrhenius 化学动力学计算,有限速率/涡耗散模型的计算按实际情况选择其中 1 项作为化学反应的限制步骤。

前人已对煤粉燃烧过程进行了大量研究,但目前广泛使用的数值模拟手段并未完全考虑煤粉燃烧过程中关键物质的生成,对于最终  $\text{NO}_x$  计算有较大影响。

李振山等<sup>[10]</sup>针对煤粉燃烧中  $\text{NO}_x$  的预测问题,开发了相关模型并采用 Fluent 软件实现了最终的预测,该研究主要是提出了以  $\text{CO}$  和  $\text{H}_2$  浓度间接表征气相碳氢化合物含量的方法。YU 等<sup>[12]</sup>通过引入 4 个焦炭表面反应以及 1 个氢气氧化反应对滴管炉进行数值模拟研究,得出了较好的预测效果。以上研究均表明焦炭气化反应生成  $\text{CO}$  和  $\text{H}_2$  对于模拟煤粉空气分级燃烧过程中还原性气氛非常重要,相关燃烧反应见表 5。

表 5 相关燃烧反应

Table 5 Related combustion reactions

反应序号	反应方程	反应类型	$A/(\text{J} \cdot \text{kmol}^{-1})$	$E/(\text{J} \cdot \text{kmol}^{-1})$	参考文献
R3	$\text{C}(\text{char}) + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}$	表面反应	$9.870 \times 10^8$	$3.100 \times 10^7$	9
R4	$\text{C}(\text{char}) + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO}$	表面反应	0.005 00	$7.396 \times 10^7$	10
R5	$\text{C}(\text{char}) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$	表面反应	0.006 35	$1.620 \times 10^8$	11
R6	$\text{C}(\text{char}) + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	表面反应	0.001 92	$1.469 \times 10^8$	11
R7	$\text{H}_2 + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	体积反应	0.002 00	$7.900 \times 10^7$	默认

## 2.3 网格划分及边界条件设置

### 2.3.1 模型建立及网格无关性检验

图 3(a) 为高温滴管炉 1 : 1 几何模型示意。采用 ICEM 软件对滴管炉模型进行几何拓补分块。ICEM 网格划分的基本思路是将实际几何结构借助虚构的几何拓补结构块分成不同部分,对不同结构块上的边划分节点而生成网格。使用 ICEM 划分结构化网格的关键在于建立合适的几何拓补结构块,

本文基于几何拓补学,采用 O 型网格技术,划分出合适的结构块。图 3(b) 为滴管炉计算域网格示意。

对拓扑结构的边划分不同的节点数,可生成不同数量的网格,为了排除网格数量对模拟结果的影响,对网格进行独立性检验。本文划分的网格数量为 6 万、10 万以及 15 万。采用冷态模拟检验方式,选取滴管炉中心轴线上 5 个点,对比 5 点速度和网格数量的关系,结果表明 6 万网格的预测结果与其

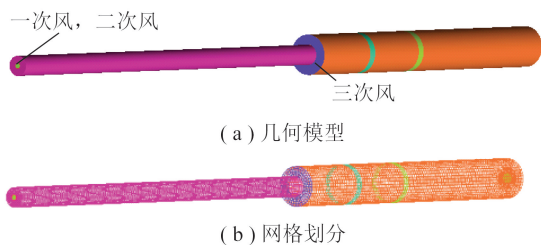


图 3 滴管炉几何模型及网格示意

Fig.3 Geometric model and grid diagram of drop-tube furnace

他 2 种相同。因此,本文选择网格数量为 6 万。

### 2.3.2 边界条件设置

#### 1) 滴管炉壁面边界条件

滴管炉试验中保持上、下段炉膛温度稳定在 1 200、1 000 ℃。为了将模拟结果与试验结果相对应,本文设置滴管炉壁面为恒定值,即分别将上、下段固定壁面温度设定为 1 473 和 1 273 K。壁面的内部发射率(internal emissivity)根据壁面光洁、沾污等情况设置在 0.6~0.8,本文设置为 0.8。

#### 2) 一、二、三次风入口边界条件

一次风入口条件设置为速度入口,数值为 2 m/s;二、三次风入口条件设置为质量流量入口,具体数值见表 2。湍动强度(turbulent intensity)使用默认设置 5%,湍流黏度比(turbulence viscosity ratio)使用默认设置 10%。一、二、三次风温度与试验条件一致,为 298 K。

#### 3) 出口边界条件

出口一般设置为压力出口条件,滴管炉试验中出口压力一般为微负压,设置为-100 Pa。为了提高计算收敛速度,预估烟气出口温度,设置为 1 273 K。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 还原性气氛

目前针对煤粉深度空气分级工况下,沿炉膛轴向方向上 CO 浓度变化研究较少,而 CO 浓度变化曲线对于理解主燃烧反应以及建立 NO<sub>x</sub> 后处理模型至关重要。图 4 为通过传统模型和考虑焦炭反应的模型得到的滴管炉沿炉膛轴向 O<sub>2</sub> 和 CO 浓度的变化,将滴管炉炉膛分为 2 个区域:左边区域为燃尽风加入前由于缺氧而形成的还原区,以及燃尽风加入之后形成的燃尽区(虚线右侧区域)。

由图 4 可知,2 种模型对 O<sub>2</sub> 体积分数沿轴向变化的预测趋势基本一致,且数值接近,而对于 CO 浓度预测却存在较大差异。随主燃烧区过量空气系数降低,在深度空气分级工况下 SR<sub>1</sub>=0.68、0.60 时,还原区结束位置处 O<sub>2</sub> 体积分数接近 0,而此时传统模型只有在 SR<sub>1</sub>=0.6 时有少量 CO,其他工况下 CO 体

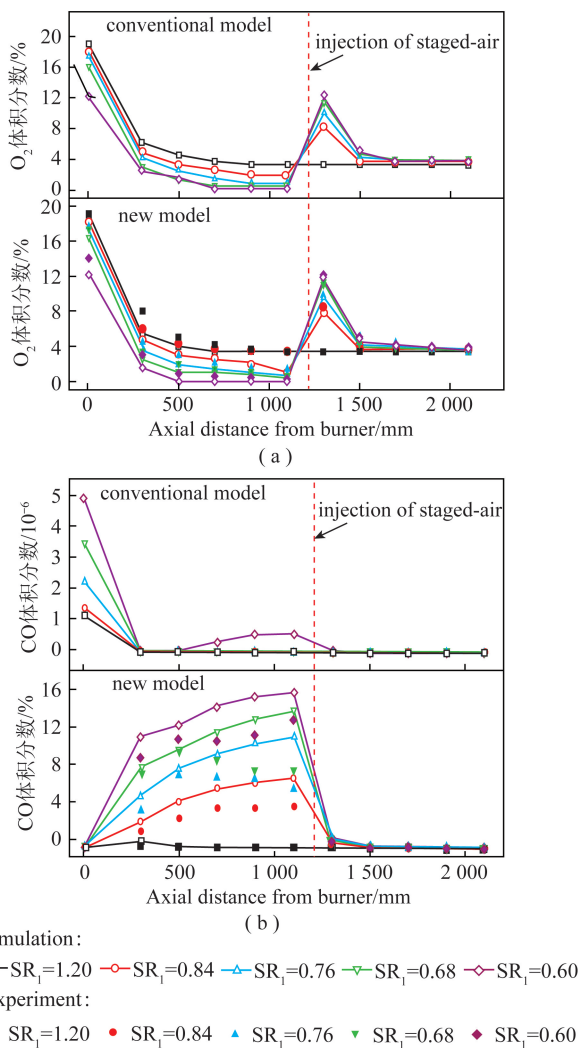


图 4 沿炉膛轴向 O<sub>2</sub> 和 CO 浓度分布

Fig.4 Concentration distribution of O<sub>2</sub> and CO along furnace axis

积分数基本为 0;对于考虑焦炭气化反应的模型,SR<sub>1</sub>=0.6 时,CO 体积分数最高达 200 000×10<sup>-6</sup>。

从反应模型角度分析可知,不考虑气化反应的传统模型,CO 仅来源于挥发分两步燃烧过程中的第 1 步(R1),若 O<sub>2</sub> 较充足,生成的 CO 立即被氧化为 CO<sub>2</sub>(R2)。但在 SR<sub>1</sub> 较小时,燃烧器附近 CO 体积分数较低,即传统模型对煤粉燃烧过程中 CO 的预测存在一定缺陷,没有与实际燃烧过程相联系,特别是深度空气分级时,还原性气氛强烈,气化反应对燃烧过程的影响更重要,改进模型可弥补该缺陷。由图 4 可以看出,改进模型 CO 预测明显优于传统模型。根据改进模型反应机理可知,CO 来源于 4 个反应,分别为挥发分第 1 步燃烧反应(R1)、焦炭燃烧(R4)、焦炭气化反应(R5 和 R6)。这 4 个反应对最终 CO 贡献率不同,通过传统模型仅有 R1 对 CO 的贡献可知,挥发分第 1 步燃烧反应生成的 CO 很

少,且主要集中在燃烧器喷嘴附近区域;焦炭燃烧(R4)反映焦炭与O<sub>2</sub>发生不完全氧化反应生成CO,该过程可能主要发生在燃烧器喷嘴附近区域至还原区的过度空间内,因为对于空气弱分级,该过度区域还存在一定量未被消耗的O<sub>2</sub>,反应温度也较适宜,但对于空气深度分级,该过程较微弱,主要由于燃烧器附近区域O<sub>2</sub>仅可用于挥发分燃烧,并不存在剩余的O<sub>2</sub>供焦炭发生不完全氧化。因此,对于空气深度分级,焦炭气化反应(R5和R6)是CO的主要来源,即R5和R6对CO的形成占主导地位。

改进模型对空气分级工况的CO预测具有较高的准确性,说明R5和R6反应动力学参数的设置较恰当,且具有较宽的适用范围。

### 3.2 燃烧特性

炉膛温度分布规律是煤粉整体燃烧特性的重要体现,也是反应机理的决定因素之一。数值计算中炉膛壁面温度与滴管炉试验工况一致,即上、下段炉膛壁面温度分别为1473、1273K。沿炉膛轴向的温度分布如图5所示。SR<sub>1</sub> ≤ 0.76时,传统模型计算的炉膛温度略高于改进模型,这是由于改进模型在深度空气分级时气化反应占主要地位,气化反应是吸热反应,使炉膛温度略低于传统计算模型,但整体温度值与试验结果基本一致。而且,考虑吸热的气化反应,对于空气深度分级工况下保护燃烧器喷嘴、降低还原区热型NO<sub>x</sub>浓度具有一定的积极作用。

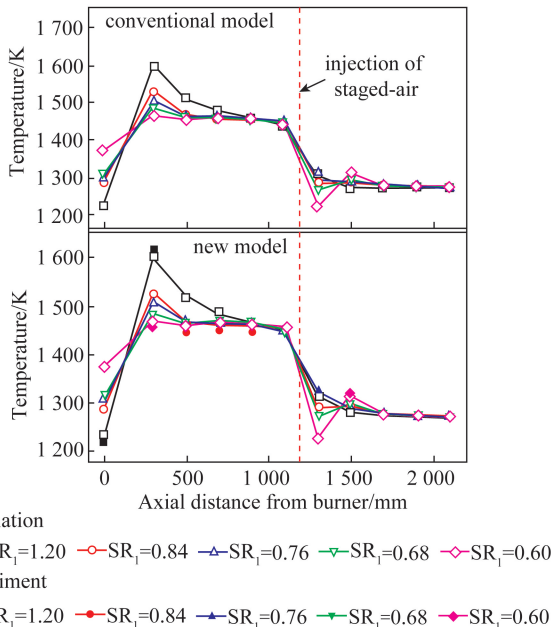


图5 沿炉膛轴向的温度分布

Fig.5 Temperature distribution along furnace axis

图6为沿炉膛轴向的反应速率变化曲线。可以看出,挥发分燃烧第1步反应(R1)主要在燃烧器喷

嘴附近区域发生,且随空气分级深度加深,R1反应速率降低;挥发分第2步燃烧反应(R2)主要在燃尽风存在的区域发生,O<sub>2</sub>体积分数越高,反应速率越大,这也是燃尽风加入后CO被迅速消耗的原因;对于消耗H<sub>2</sub>的反应(R3),主要发生在空气分级工况下的燃尽风通入区域;空气不分级时,焦炭燃烧反应(R4和R7)的反应速率明显高于空气分级工况下,且反应主要发生在过渡区间,焦炭经受热过程后燃烧,空气分级时,特别是空气深度分级,气化反应(R5和R6)占主导地位,燃尽风通入前,随空气分级深度加深,气化反应速率越大,且反应在燃烧空间的范围较宽。

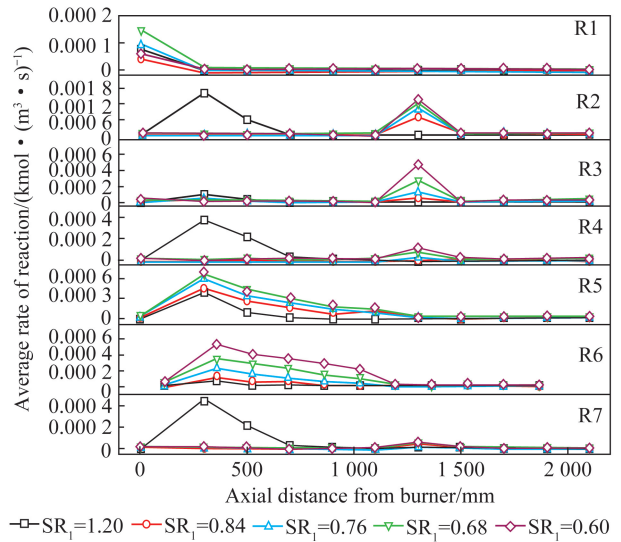


图6 沿炉膛轴的反应速率变化

Fig.6 Change of reaction rate along furnace axis

### 3.3 反应云图

图7为SR<sub>1</sub> = 0.6时炉膛截面温度、速度、O<sub>2</sub>、CO、CO<sub>2</sub>和颗粒浓度变化云图。

由图7可以看出,燃烧器喷嘴附近存在一个高温区域,这是挥发分析出、着火区域,该区域的O<sub>2</sub>迅速被消耗(R1),CO开始生成(R2);随着燃烧进行,空气深度分级使上段炉膛极度缺氧,燃烧过程开始由挥发分着火(R1和R2)和焦炭不完全氧化(R4)过渡到以焦炭气化反应(R5和R6)为主,此时CO大量生成(图7左侧CO的第1段炉膛)。同时,CO<sub>2</sub>由高浓度→低浓度→保持稳定,这与挥发分燃烧生成CO<sub>2</sub>(R1)以及气化反应(R5)消耗CO<sub>2</sub>密切相关,燃烧器喷嘴附近以R1为主,所以CO<sub>2</sub>存在一个高浓度区,经过渡区,气化反应(R5)开始占主导地位,因此CO<sub>2</sub>浓度下降。当上段炉膛空间利用完成后,还原区段结束,随着燃尽风的加入,O<sub>2</sub>含量增加,此时CO被迅速消耗(以R2为主),随着O<sub>2</sub>的加

入和氧化反应充分,燃尽区 CO<sub>2</sub>浓度增加并保持均匀分布。煤粉颗粒浓度分布与燃烧进程密切相关,燃烧器喷嘴附近区域颗粒浓度较高,随着反应进行,

颗粒被消耗,且在燃尽区基本无颗粒存在,即燃尽区仅需完成未燃尽化学组分的燃烧,可保证煤粉较高的燃烧效率和低氮燃烧。

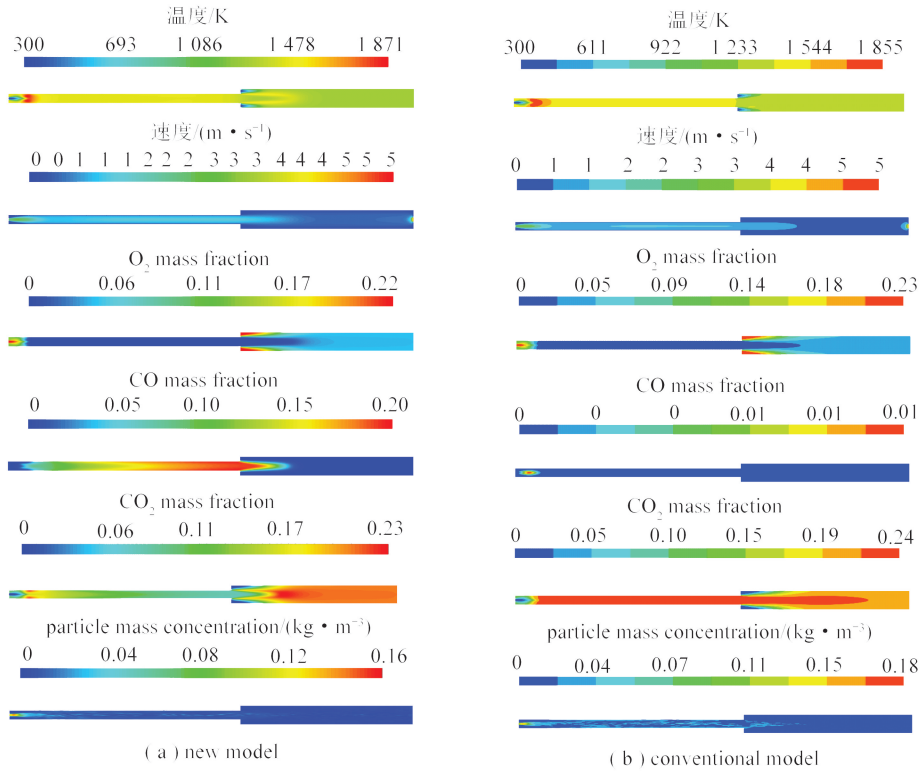


图7 沿炉膛轴向云图

Fig.7 Cloud chart along furnace axis

### 3.4 NO<sub>x</sub>排放特性

图8为沿炉膛轴向NO浓度变化,可知,SR<sub>1</sub> = 1.2、0.6时,传统模型计算的NO浓度处于较高水平,这与试验结果相差较远,主要是传统模型未考虑气化反应,缺乏应有的还原性物质对NO的均相还原过程,因此,传统模型无法直接用于燃烧过程主要物质组成及NO<sub>x</sub>形成预测。改进模型预测的NO<sub>x</sub>与试验结果较接近,说明考虑气化反应对于空气分级工况下煤粉燃烧生成NO<sub>x</sub>浓度预测的重要性。

对比2种模型对NO<sub>x</sub>的预测,除SR<sub>1</sub> = 1.2、SR<sub>1</sub> ≥ 0.68时传统模型沿炉膛轴向的NO<sub>x</sub>浓度均为升高到一个稳定的水平后,随着燃尽风加入,NO<sub>x</sub>浓度小幅上升,最后基本保持稳定。但对于改进模型,所有工况下NO<sub>x</sub>均为由燃烧器附近高浓度的NO<sub>x</sub>先下降,后在还原区内保持很低的NO<sub>x</sub>水平,最后随燃尽风的加入出现一定幅度的上升。燃尽风加入后,NO<sub>x</sub>浓度上升幅度随燃尽风量的增加而增加,SR<sub>1</sub> = 0.6时,2个模型预测的NO<sub>x</sub>浓度均有最大幅度升高,即传统模型与改进模型除了在燃烧器喷嘴附近区域对NO<sub>x</sub>预测存在较大差异外,在过渡区、还原区、燃尽区的预测规律一致,仅数值不同,这主要与

CO的预测有较大关系。由图4(b)可知,对燃烧器喷嘴附近的CO浓度预测,2个模型出现完全相反的趋势,这与NO<sub>x</sub>的预测趋势相对应,传统模型预测燃烧器喷嘴附近CO浓度极高,随着燃烧进行,CO迅速下降至接近0;改进模型在燃烧器喷嘴附近区域,开始CO浓度均较低,随着气化反应的发生,CO大量生成。传统模型对燃烧器喷嘴附近NO<sub>x</sub>预测规律说明,CO浓度的准确预测对于最终NO<sub>x</sub>预测至关重要,CO浓度高的区域NO<sub>x</sub>浓度偏低,即由高浓度CO所形成的强还原性气氛对NO<sub>x</sub>的均相还原较重要,其机理仍有待探究。

2种模型下,燃尽风通入后NO<sub>x</sub>浓度均发生“反弹”现象,这与其他研究者的滴管炉试验结果一致<sup>[12]</sup>,目前学者认为,NO<sub>x</sub>浓度升高与氮的中间体HCN和NH<sub>3</sub>有关。图9为沿炉膛轴向HCN与NH<sub>3</sub>的变化趋势,还原区中较强的还原性气氛使生成的NO<sub>x</sub>被还原,除了NO<sub>x</sub>被还原为N<sub>2</sub>外,还存在HCN和NH<sub>3</sub>等的还原产物,这些中间体在还原区不能进一步向N<sub>2</sub>转化,而以氮的中间体形式存在。通入燃尽风后,这些中间体被迅速氧化生成NO<sub>x</sub>,导致NO<sub>x</sub>“反弹”现象发生。

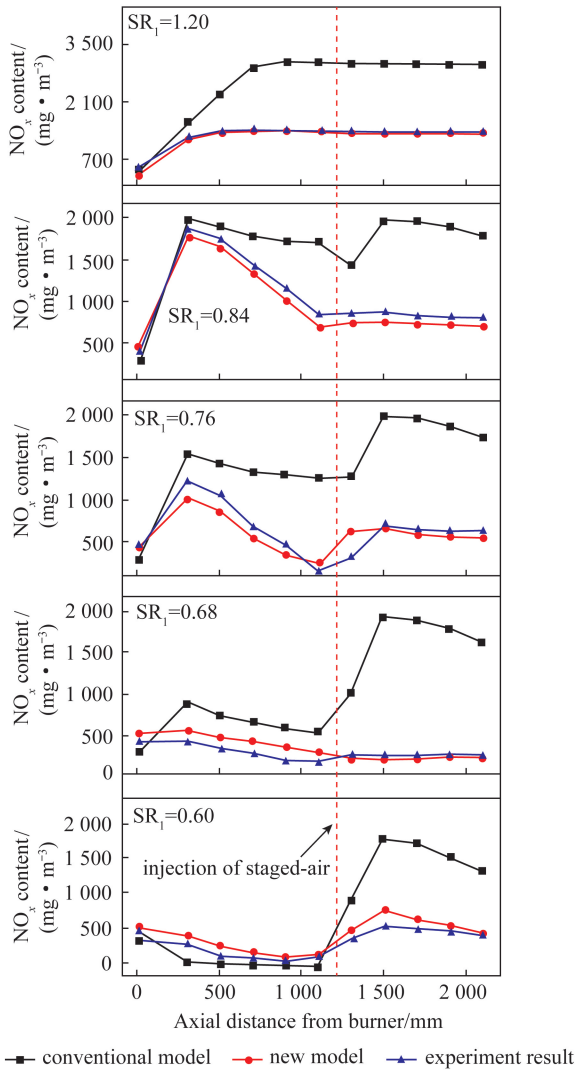


图8 沿炉膛轴向 NO<sub>x</sub>变化趋势

Fig.8 Change trend of NO<sub>x</sub> content along furnace axis

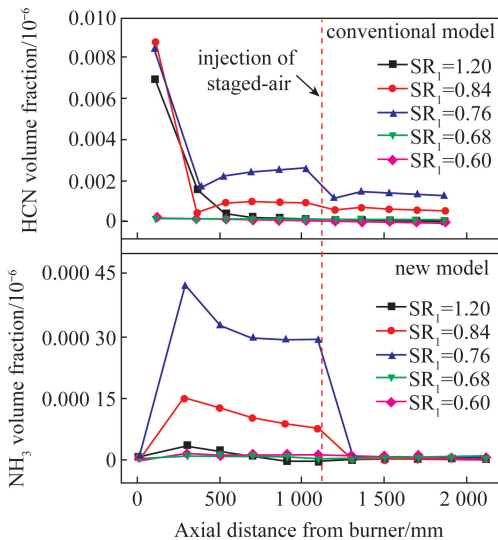


图9 沿炉膛轴向 HCN 与 NH<sub>3</sub>变化趋势

Fig.9 Change trend of HCN and NH<sub>3</sub> along furnace axis

## 4 结 论

1) 空气深度分级工况下焦炭气化反应具有重要作用,特别是对还原性气氛的形成及定量预测具有重要意义。

2) 滴管炉试验验证了改进模型对滴管炉内煤粉深度空气分级预测的准确性。

3) 滴管炉试验结果和改进模型模拟结果说明,煤粉深度空气分级工况下,沿炉膛空间还原性气氛的生成与变化特性。空气深度分级时,挥发分燃烧两步反应和焦炭的不完全燃烧反应对 CO 贡献量有限,主要的是焦炭气化反应对 CO 的贡献。

## 参考文献 (References) :

- [1] 国家统计局. 环境保护效果持续显现生态文明建设日益加强——新中国成立70周年经济社会发展成就系列报告之五 [EB/OL]. (2019-07-18) [2020-02-02]. [http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201907/t20190718\\_1677012.html](http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201907/t20190718_1677012.html).
- [2] YANG J, SUN R, SUN S, et al. Experimental study on NO<sub>x</sub> reduction from staging combustion of high volatile pulverized coals. Part 1. Air staging [J]. Fuel Processing Technology, 2014, 126: 266-275.
- [3] LISANDY K Y, KIM J W, LIM H, et al. Prediction of unburned carbon and NO formation from low-rank coal during pulverized coal combustion; Experiments and numerical simulation [J]. Fuel, 2016, 185: 478-490.
- [4] FAN W, LI Y, GUO Q, et al. Coal-nitrogen release and NO<sub>x</sub> evolution in the oxidant-staged combustion of coal [J]. Energy, 2017, 125: 417-426.
- [5] 王鹏涛, 王乃继, 程晓磊, 等. 煤粉工业锅炉空气深度分级数值模拟研究 [J]. 洁净煤技术, 2018, 24(5): 72-80.  
WANG Pengtao, WANG Naiji, CHENG Xiaolei, et al. Numerical simulation of deep air-staged technology in pulverized coal industrial boiler [J]. Clean Coal Teechnology, 2018, 24(5): 72-80.
- [6] 王鹏涛, 王乃继, 梁兴, 等. 气体燃料再燃脱硝机理及工程应用进展 [J]. 洁净煤技术, 2019, 25(6): 51-60.  
WANG Pengtao, WANG Naiji, LIANG Xing, et al. Denitration mechanism and engineering application progress of gas fuel re-burning [J]. Clean Coal Teechnology, 2019, 25(6): 51-60.
- [7] FAN Weidong, LIN Zhengchun, LI Youyi, et al. Effect of Air-staging on anthracite combustion and NO<sub>x</sub> Formation [J]. Boundary Value Problems, 2009, 23(1): 111-120.
- [8] SHEN J, LIU J X, ZHANG H, et al. NO<sub>x</sub> emission characteristics of superfine pulverized anthracite coal in air-staged combustion [J]. Energy Conversion and Management, 2013, 74: 454-461.
- [9] ZHOU Chaoyang, WANG Yongqiang, JIN Qiye, et al. Mechanism analysis on the pulverized coal combustion flame stability and NO<sub>x</sub> emission in a swirl burner with deep air staging [J]. Journal of the Energy Institute, 2018, 92(2): 452-500.
- [10] 李振山, 陈登高, 张志, 等. 煤粉燃烧中 NO<sub>x</sub> 的预测: 参数数据库及 CFD 实践 [J]. 煤炭学报, 2016, 41(12): 3142-3150.



- LI Zhenshan, CHEN Denggao, ZHANG Zhi, et al. Prediction of NO<sub>x</sub> during pulverized coal combustion: Parameter database and CFD application [ J ]. Journal of China Coal Society, 2016, 41 (12) :3142-3150.
- [ 11 ] 李振山, 张志, 陈登高, 等. 煤粉燃烧中 NO<sub>x</sub> 的预测: 模型开发及 Fluent 实现 [ J ]. 煤炭学报, 2016, 41 (10) :2426-2433.
- LI Zhenshan, ZHANG Zhi, CHEN Denggao, et al. Prediction of NO<sub>x</sub> during pulverized coal combustion: Model development and its implementation with Fluent [ J ]. Journal of China Coal Society, 2016, 41 (10) :2426-2433.
- [ 12 ] LI Y, FAN W. Effect of char gasification on NO<sub>x</sub> formation process in the deep air-staged combustion in a 20 kW down flame furnace [ J ]. Applied Energy, 2016, 164:258-267.
- [ 13 ] JONES W P, LINDSTEDT R P. Global reaction schemes for hydrocarbon combustion. combust flame [ J ]. Combustion & Flame, 1988, 73 (3) :233-249.
- [ 14 ] FIELD M. Rate of combustion of size-graded fraction of char from a low rank coal between 1 200 K and 2 000 K [ J ]. Combust Flame, 1969, 13:237-252.
- [ 15 ] Smoot L D, Pratt D J. 粉煤燃烧与气化 [ M ]. 傅维标译. 北京: 清华大学出版社, 1979.
- Smoot L D, Pratt D J. Pulverized coal combustion and gasification [ M ]. FU Weibiao trans. Beijing: Tsinghua University Press, 1979.