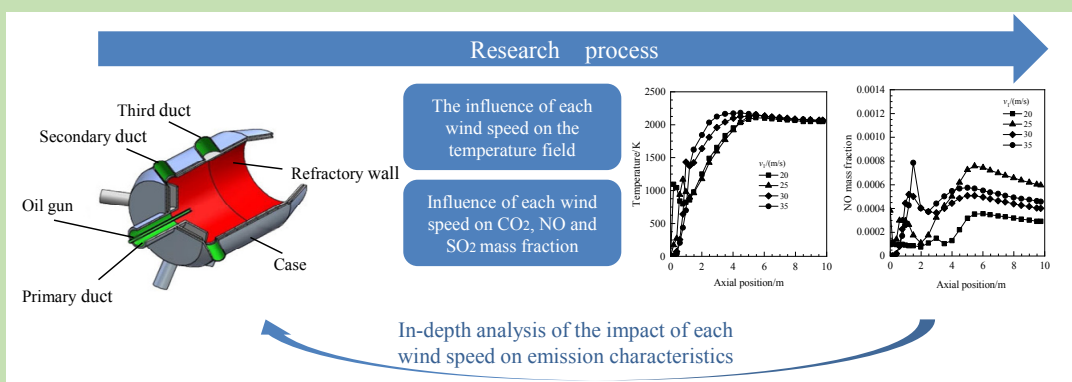


Effects of air velocity on emission characteristics of aggregate drying pulverized coal burner

Haiying CHENG, Jianxin LI, Yong ZHANG*, Jing WANG, Zhiyong HU

College of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot, Inner Mongolia 010051, China

Abstract: Since the use of pulverized coal as the fuel for the aggregate drying burner can greatly reduce the running cost of aggregate drying, a large amount of polluted



gas was generated during the operation, so how to reduce the pollution caused by the aggregate pulverized coal burner things were the key to burner development. The method of numerical simulation was used to analyze the effects of different air velocity on emissions characteristics of aggregate drying pulverized coal burner and the features of emissions was summarized. The control model of the internal field in aggregate drying pulverized coal burner was constructed, which was based on the mechanism of coal combustion and the crafts of aggregate drying. Then the combustion process was numerically simulated by using the Fluent software. Regarding the velocity of primary air, secondary air and tertiary air as influence factors and the mass fraction of CO, CO₂, NO, SO₂ at the central axis of pulverized coal burner as the evaluating indicators, the effects of the velocity of primary air, secondary air and tertiary air on emission characteristics were analyzed. The results showed that with the velocity of primary air, secondary air, tertiary air increasing the burning was more completely, the lower of the velocity of the primary air, secondary air, tertiary air, the less NO was produced, the mass fraction of SO₂ was least when the velocity of tertiary air was 40 m/s. The ranges of reasonable control parameters were 30~35 m/s for the velocity of primary air, 45~50 m/s for the velocity of secondary air, 30~40 m/s for the velocity of tertiary air.

Key words: air velocity; aggregate drying; pulverized coal burner; emission characteristics; numerical simulation

收稿: 2018-09-26, 修回: 2019-02-21, 网络发表: 2019-03-07, Received: 2018-09-26, Revised: 2019-02-21, Published online: 2019-03-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51665043); 内蒙古自治区重大基础研究开放课题资助

作者简介: 程海鹰(1973-), 女, 内蒙古自治区赤峰市人, 博士, 教授, 主要从事机电装备设计、流体控制和工程机械关键技术研究, E-mail: chynmgchy@sina.com; 张勇, 通讯联系人, E-mail: 409176551@qq.com.

引用格式: 程海鹰, 李建新, 张勇, 等. 风速对骨料烘干煤粉燃烧器排放特性的影响. 过程工程学报, 2019, 19(5): 1037-1046.

Cheng H Y, Li J X, Zhang Y, et al. Effects of air velocity on emission characteristics of aggregate drying pulverized coal burner (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2019, 19(5): 1037-1046, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.218293.

风速对骨料烘干煤粉燃烧器排放特性的影响

程海鹰, 李建新, 张勇*, 王京, 胡志勇

内蒙古工业大学机械学院, 内蒙古 呼和浩特 010051

摘要: 基于煤粉燃烧机理, 结合骨料烘干工艺, 建立了骨料烘干煤粉燃烧器内部场的控制模型, 采用 Fluent 软件模拟煤粉燃烧器内部燃烧状况, 考察了一、二、三次风的风速对煤粉燃烧器中心轴线处 CO , CO_2 , NO 和 SO_2 浓度的影响。结果表明, 在研究的风速范围内, 一、二、三次风风速越大燃烧越充分, 一、二、三次风风速越小, 产生的 NO 越少; 三次风风速为 40 m/s 时, SO_2 浓度最低; 较合理的控制参数为一次风风速 30~35 m/s, 二次风风速 45~50 m/s, 三次风风速 30~40 m/s。

关键词: 风速; 骨料烘干; 煤粉燃烧器; 排放特性; 数值模拟

中图分类号: TQ534 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2019)05-1037-10

1 前言

煤粉燃烧时会产生 SO_2 和 NO_x 等污染物。2015 年全国多个主要城市废气中主要污染物排放见表 1。2015 年国家要求氮氧化物排放量要在 2010 年的基础上降低 10%, 重点区域二氧化硫、氮氧化物排放量分别下降 12% 和 13%^[1]。骨料烘干煤粉燃烧器以煤粉为燃料, 用于搅拌站骨料加热烘干。我国煤炭资源丰富而原油价格不断攀升, 采用煤粉作为燃料可降低骨料烘干成本, 骨料烘干煤粉燃烧器应用前景广阔, 降低煤粉燃烧污染物排放是燃烧器开发的技术关键。

表 1 2015 年主要城市废气中主要污染物排放情况

Table 1 Emission of major pollutants from main cities in year 2015

| City | Industrial SO_2 emission/t | Industrial NO_x emission/t |
|--------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Tianjin | 154605 | 150210 |
| Shijiazhuang | 109015 | 115053 |
| Shanghai | 104852 | 121492 |
| Nanjing | 101021 | 95682 |
| Chongqing | 426800 | 159085 |

骨料烘干煤粉燃烧器是近年来新兴的加热设备, 骨料烘干煤粉燃烧器的各次风风速对其流场影响非常大, 从而影响燃烧工况、燃烧效率和排放特性^[2-5]。数值模拟^[6-10]不仅能准确预测燃烧、传热和风速对燃烧状况的影响, 且可减少实验次数, 降低开支, 目前多用于分析电站锅炉的燃烧效率与 NO_x 减排。本工作研究风速对煤粉燃烧排放特性的影响, 采用 Fluent 软件对煤粉燃烧器内部动力场进行数值模拟, 考察风速对排放特性的影响, 为骨料烘干煤粉燃烧器的设计提供理论依据。

2 骨料烘干煤粉燃烧器的三维模型

煤粉燃烧器是提供热量的设备, 烘干筒是骨料烘干及能量交换的场所, 两者可作为统一的热力学系统。在

UG 软件中建立骨料烘干煤粉燃烧器的三维模型(图 1)。煤粉燃烧器主要由各次风进风管、壳体、油枪和内衬耐火壁组成, 二次风和三次风的进风管呈周向布置, 与轴向夹角分别为 60° 和 45° , 如图 2 所示。煤粉在一次风携带下进入燃烧室, 二次风在燃烧器前端圆弧面吹入, 使燃料充分搅拌混合燃烧, 同时清扫煤灰和冷却墙壁, 三次风在燃烧器出口处吹入, 补充燃烧所需氧气, 增加火焰长度。

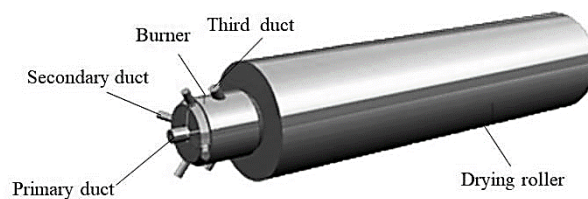


图 1 骨料烘干煤粉燃烧器的三维简化模型

Fig.1 Three dimensional simplified model of aggregate drying pulverized coal burner

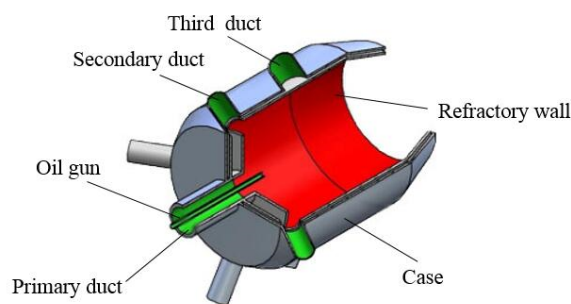


图 2 骨料烘干煤粉燃烧器的结构

Fig.2 Structure of aggregate drying pulverized coal burner

3 建立数学模型及求解参数

煤粉燃烧是气固耦合的复杂物理化学反应过程, 伴随热传递及湍流混合作用, 遵循质量守恒定律、能量守恒定律、动量守恒定律、化学组分转换和守恒定律, 需

建立合理的湍流流动方程、辐射方程、焦炭燃烧方程、离散相方程和污染物生成方程。煤粉燃烧过程中气固两相伴随强烈的湍流扩散作用,宜采用标准 $k-\varepsilon$ 双方程描述湍流混合过程。燃烧室内剧烈的辐射作用采用 P1 辐射模型,可准确模拟空气相和煤粉颗粒之间的辐射换热。煤粉颗粒的离散状态及运动轨迹用随机轨道模型描述。焦炭燃烧伴随对流与扩散,用对流扩散控制燃烧模型描述。混合物各组分的输运状态及混合分数用混合分数概率密度函数模型描述^[11-15]。具体控制模型如下。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho v_T \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho v_T \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \\ &\frac{\partial}{\partial z} \left(\rho v_T \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial \rho}{\partial x} \\ \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho v_T \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho v_T \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \\ &\frac{\partial}{\partial z} \left(\rho v_T \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial \rho}{\partial y} \\ \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho v_T \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho v_T \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \\ &\frac{\partial}{\partial z} \left(\rho v_T \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial \rho}{\partial z} \end{aligned} \quad (2)$$

能量守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \rho E + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[u_i (\rho E + p) \right] &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) - \\ &\sum h_j J_j + u_j (\tau_{ij})_{\text{eff}} + S_h \\ E &= h - \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

组分输运方程:

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial f}{\partial x} + \rho v \frac{\partial f}{\partial y} + \rho w \frac{\partial f}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(D_T \rho \frac{\partial f}{\partial x} \right) + \\ &\frac{\partial}{\partial y} \left(D_T \rho \frac{\partial f}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_T \rho \frac{\partial f}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

式中, u, v, w 为流体在 x, y, z 方向的分速度, ρ 为流体的密度, t 为时间, p 为压力, T 为温度, f 为组分分数, v_T 为粘性系数, D_T 为扩散系数, λ_T 为导热系数, 有效热传导系数 $k_{\text{eff}} = k + k_t$, k_t 为热传导系数, J_j 为组分 j 的扩散流量, S_h 包括了其它用户定义的体积热源项及化学反应热。 h_j 为组分为 j 流体的比焓值, $(\tau_{ij})_{\text{eff}}$ 为有效应力张量。

湍流方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \\ G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \\ C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - \rho \varepsilon - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (6)$$

式中, G_k 为层流速度梯度产生的湍流动能, G_b 为浮力产生的湍流动能, Y_M 为可压缩湍流中过渡扩散产生的波动, $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ 为常量, σ_k 和 σ_ε 为 k 方程和 ε 方程的湍流 Prandtl 数, S_k 和 S_ε 为常数, μ 为流体动力粘度。 μ_t 为湍流粘度, ε 为耗散率。

煤粉燃烧过程中存在散热作用及气相和固相之间的辐射换热作用,辐射方程如下:

$$q_r = -\frac{1}{3(a + \sigma_s) - C\sigma_s} \nabla G \quad (7)$$

式中, q_r 为辐射热流量, a 为吸收系数, σ_s 为散射系数, G 为入射辐射, C 为线性各向异性相位函数系数。

动力/扩散控制模型同时考虑了扩散过程与反应动力学对表面反应速率的影响,燃烧速率 R_c 为

$$R_c = \frac{6rp_{O_2}}{D} \frac{1}{(K_c^{-1} + K_d^{-1})} \quad (8)$$

式中, r 为半径, p_{O_2} 为氧气分压, K_c 为扩散系数, K_d 为动力系数, 其中 D 为氧气扩散系数。

煤粉燃烧过程存在气相和固相之间的相互耦合,影响离散相轨道和连续相流动,且炭颗粒的燃烧和污染物形成涉及离散相的表面反应。

煤粉离散相方程如下:

$$\begin{aligned} \frac{du_p}{dt} &= F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \\ F_D &= \frac{18\mu}{\rho_p D_p^2} \frac{C_D Re}{24} \end{aligned} \quad (9)$$

式中, u_p 为颗粒速度, ρ_p 为颗粒(骨架)密度, D_p 为颗粒直径, Re 为相对雷诺数, F_D 为离散相受到的拽力, F_x 为连续相对离散相的阻力, C_D 为阻力系数, g_x 为 x 方向的重力加速度。

NO_x 生成模型如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_{\text{NO}}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} Y_{\text{NO}}) &= \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{\text{NO}}) + S_{\text{NO}} \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_{\text{HCN}}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} Y_{\text{HCN}}) &= \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{\text{HCN}}) + S_{\text{HCN}} \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_{\text{NH}_3}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} Y_{\text{NH}_3}) &= \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{\text{NH}_3}) + S_{\text{NH}_3} \end{aligned} \quad (10)$$

式中, $Y_{\text{HCN}}, Y_{\text{NH}_3}$ 和 Y_{NO} 为气相中 HCN, NH_3 , NO 的含量, $S_{\text{HCN}}, S_{\text{NH}_3}$ 和 S_{NO} 为源项。 \bar{v} 为速度矢量, D 为扩散系数。

SO_x生成模型如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{\text{SO}_2}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{\text{SO}_2}) &= \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{\text{SO}_2}) + S_{\text{SO}_2} \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{\text{H}_2\text{S}}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{\text{H}_2\text{S}}) &= \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{\text{H}_2\text{S}}) + S_{\text{H}_2\text{S}} \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{\text{SO}_3}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{\text{SO}_3}) &= \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{\text{SO}_3}) + S_{\text{SO}_3} \end{aligned} \quad (11)$$

式中, Y_{SO_2} , $Y_{\text{H}_2\text{S}}$ 和 Y_{SO_3} 为气相中 SO₂, H₂S, SO₃ 的含量, S_{SO_2} , $S_{\text{H}_2\text{S}}$ 和 S_{SO_3} 为源项。

模拟采用高挥发分霍林河褐煤, 煤粉基本特性见表2。初始温度为 343 K, 煤粉喷射速度与一次风风速相同, 煤粉质量流率为 0.674 kg/s, 离散相煤粉粒子追踪最大步数 400000, 追踪步长 0.0025 m。求解过程分为冷态和热态两步, 冷态求解过程中将压力、动量松弛因子设为 0.5, 湍流动能、湍流扩散率、湍流粘度松弛因子设为 0.8, 各项方程采用一阶精度计算。煤粉点火过程中由于温度突变造成流场湍流和速度变化快, 为避免求解发散, 将动量松弛因子降低为 0.2, 将辐射松弛因子设为 0.9, 各方程采用二阶精度进行计算, 压力速度耦合采用 SIMPLE 隐式算法^[16]求解, NO_x 和 SO_x 的生成采用后处理方法计算(Past-processing)。使用相同指标的高挥发分霍林河褐煤, 水分和灰分含量固定, 已考虑不同的元素成分及其性质(包括含水量和灰分)。

表2 煤粉基本特性

Table 2 Basic characteristics of coal

| Project | Huolinhe brown coal/% | |
|---------------------|------------------------------|-------|
| Industrial analysis | Ash _{ar} | 8.28 |
| | Volatile _{daf} | 55.02 |
| | Fixed carbon _{ad} | 36.7 |
| Elemental analysis | C _{ar} | 80.36 |
| | H _{ar} | 5.08 |
| | O _{ar} | 12.17 |
| | N _{ar} | 1.45 |
| | S _{ar} | 0.94 |
| Low calorific value | Q _{net,ar} /(MJ/kg) | 25.3 |

Note: ar is as received, daf is dry-ash-free, ad is air dry basis

4 骨料烘干煤粉燃烧器数值模拟

4.1 网格划分

在 Gambit 中对煤粉燃烧器和烘干滚筒进行网格划分, 采用六面体网格, 网格数为 684363。网格质量对模拟的准确性和收敛影响较大, 采用 EquiSize Skew 对网格质量进行检查。等尺寸失真 Q_{EVS} 的定义如下:

$$Q_{\text{EVS}} = \frac{S_{\text{eq}} - S}{S_{\text{eq}}} \quad (12)$$

式中, S_{eq} 为正四边形和正六面体的最大面积(2D)或体积

(3D), S 为网格面积(2D)或体积(3D)。

网格质量检查示意图见图3。一般情况下 $0 < Q_{\text{EVS}} < 1$, 数值越小网格质量越好。二维数值求解的网格 $Q_{\text{EVS}} < 0.1$, 三维数值求解的网格 $Q_{\text{EVS}} < 0.4$ 。骨料烘干煤粉燃烧器采用 3D 数值求解, 各结构网格 $Q_{\text{EVS}} \approx 0.08$, 网格划分质量良好。

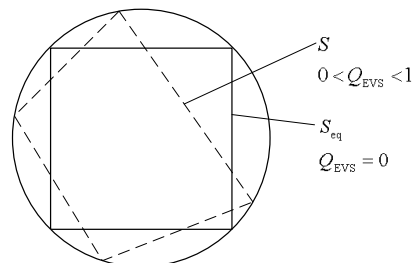


图3 网格质量检查示意图

Fig.3 The grid quality inspection diagram

4.2 边界条件设定

煤粉粒径 $d=74 \mu\text{m}$, 从入射面(Surface)一次风口进入。速度入口边界条件适用于流动入口边界速度和标量的定义, 一、二、三次风入口条件均为速度入口边界条件, 能方便定义及修改速度参数。一次风温 343 K, 氧气浓度 23.15%, 湍流强度设为 10%, 水力直径 0.1 m, 入口发散率 1.0; 二次风温 573 K, 氧气浓度 23.15%, 湍流强度 10%, 水力直径 0.15 m, 入口发散率 1.0; 三次风温 673 K, 氧气浓度 23.15%, 湍流强度 10%, 水力直径 0.20 m, 入口发散率 1.0; 速度入口边界条件类型均定义为逃逸类型。模拟过程有回流现象, 烘干滚筒出口设为压力出口以改善收敛状况, 压力出口回流温度 1000 K, 湍流强度 10%, 水力直径 2.20 m, 入口发散率 1.0。壁面采用固定壁无滑移剪切条件, 边界条件类型定义为反射, 入口发散率 1.0。

4.3 模拟结果分析

考察一、二、三次风风速对骨料烘干装置中心轴线速度场、温度场和污染物分布场的影响。

一、二、三次风风速分别为 v_1 , v_2 , v_3 。采用控制变量的方式(表3), 即控制两个变量不变, 第3变量在一定范围内变化。图4为煤粉燃烧计算区域。

表3 风速改变方案

Table 3 Scheme of air velocity change

| Variable | Wind speed/(m/s) | | |
|----------|------------------|----------------|----------------|
| v_1 | 20, 25, 30, 35 | 30 | 30 |
| v_2 | 50 | 40, 45, 50, 55 | 50 |
| v_3 | 40 | 40 | 30, 40, 50, 60 |

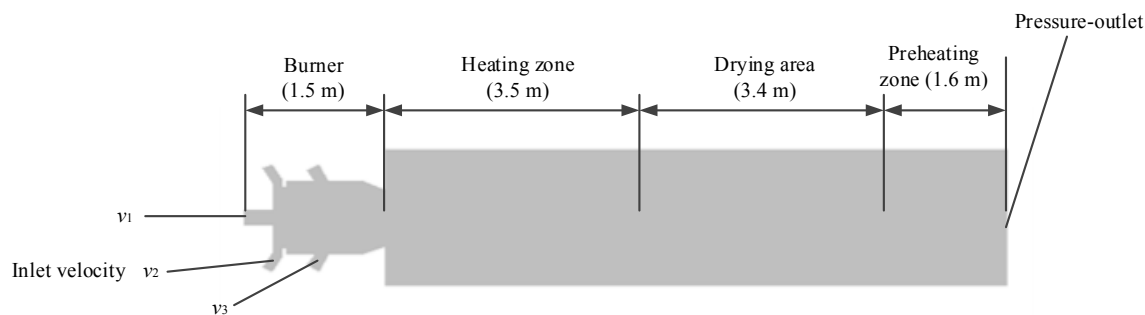


图4 煤粉燃烧计算区域

Fig.4 Calculation area of pulverized coal combustion

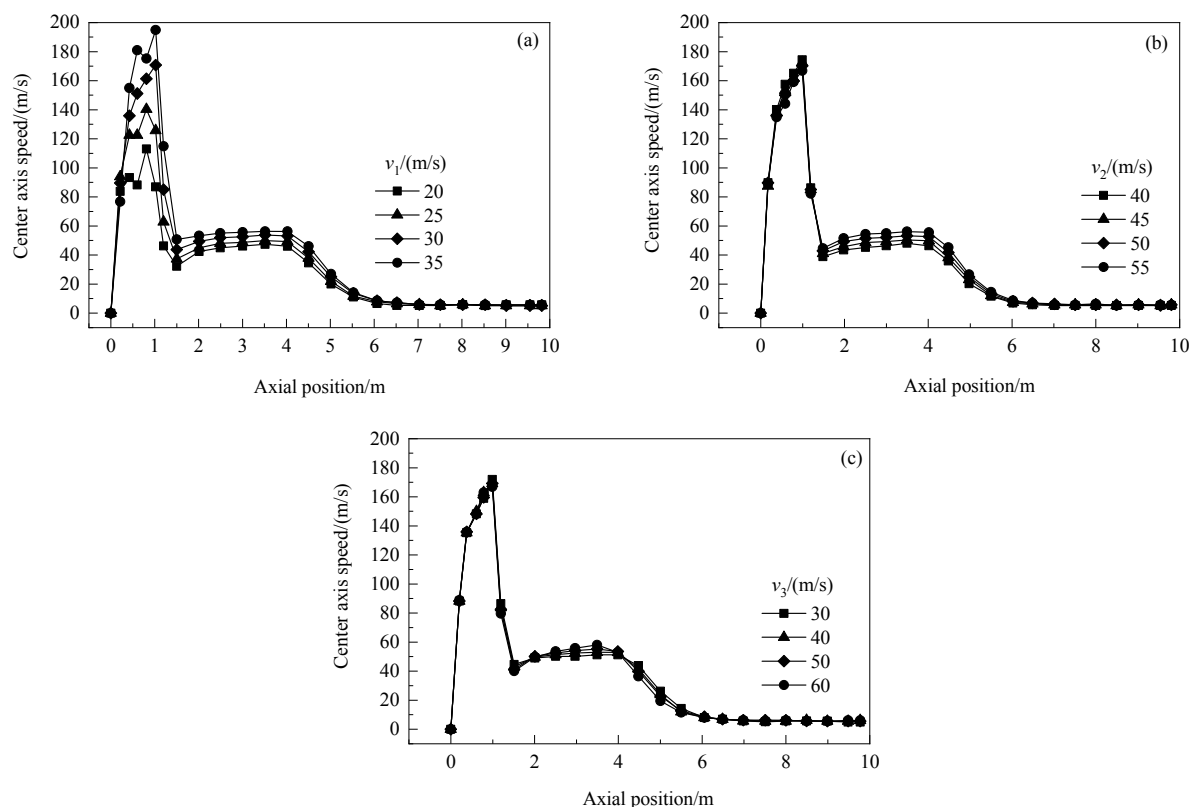


图5 不同各次风风速下中心轴线上的流体速度分布

Fig.5 Fluid velocity distribution along center axis with different air velocities

4.3.1 各次风风速对轴线速度场和温度场的影响

不同各次风风速下中心轴线上的流体速度分布如图5。 $v_1=20\sim 35$ m/s时, 燃烧计算区域轴线位置0~1.5 m处即燃烧器喷口附近, 流体刚射入燃烧室, 燃烧室内部湍流流动剧烈并形成回流区, 导致射流速度变化明显。沿燃烧器轴线方向流体速度先增大后减小, 并在燃烧器出口位置(1.6 m)附近速度衰减至最低, 之后在烘干滚筒内部速度再次先增大后减小, 此时湍流强度较缓和, 流体速度缓慢衰减至较小值。 $v_2=40\sim 55$ m/s时, 骨料烘干筒中心轴线上速度分布曲线见图5(b)。 $v_3=30\sim 60$ m/s时,

骨料烘干筒中心轴线上速度分布曲线见图5(c)。随风速增加, v_2 和 v_3 对燃烧器轴线上流体速度的影响不明显。随 v_2 和 v_3 增大煤粉燃烧计算区域轴线位置1.5~6 m处风速增加, 6~10 m处几乎无变化, 表明 $v_1\sim v_3$ 均会影响烘干筒内部速度场分布, v_1 对燃烧器内部速度场影响最明显。

不同各次风风速下煤粉燃烧计算区域轴线上的温度分布见图6。由图6(a)可知, 随 v_1 增大轴线位置0~5 m处温度变化明显, 大量冷空气进入燃烧室参与煤粉初期的燃烧, 燃烧区域轴线高温区向轴线后方推移。 v_1 增大

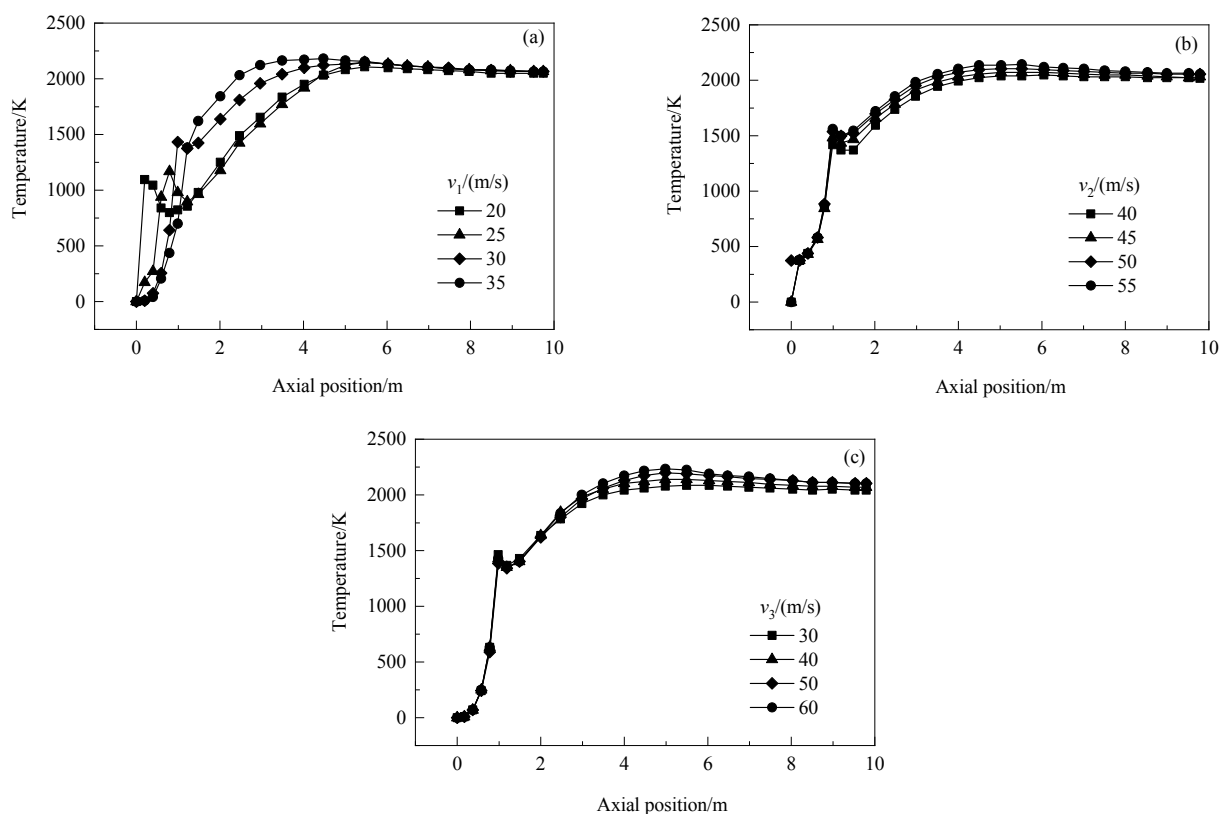


图6 不同各次风风速下中心轴线上的温度分布

Fig.6 Temperature distribution along center axis with different air velocities

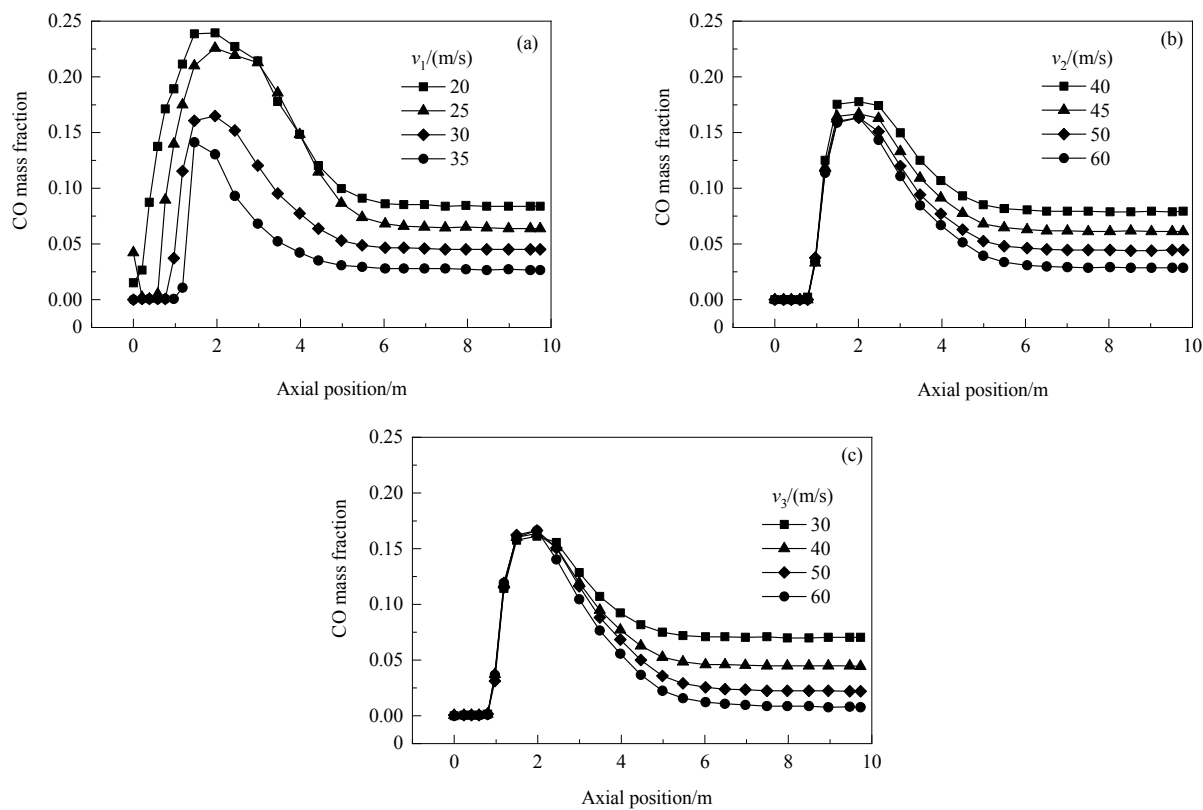


图7 不同各次风风速下中心轴线上CO含量分布

Fig.7 Distribution of CO mass fraction along center axis with different air velocities

会使燃烧器内部回流区尺寸增加,有利于冷燃料和热燃料之间的对流换热,使烘干筒整体温度上升。燃烧区域轴线位置 6~10 m 处, v_1 对温度的影响几乎消失,烘干筒温度稳定在约 2000 K。由图 6(b)和 6(c)可知,由于二、三次风布置于燃烧器出口即烘干筒入口处,分别补充煤粉燃烧中期及末期所需氧气量,风速对燃烧器内部温度几乎无影响,但会影响烘干筒内轴线温度。二、三次风使煤粉的燃尽更充分,产生的热量更高,随风速增加烘干筒内轴线温度升高。二次风在轴线位置 1.5~10 m 处对温度的影响较明显,三次风在轴线位置 3~10 m 处对温度的影响较明显。

4.3.2 各次风风速对 CO 和 CO₂ 含量的影响

不同各次风风速下煤粉燃烧计算区域轴线上 CO 含量见图 7。随一、二、三次风风速增大,提供的氧气越

充足,燃烧越完全,燃烧中间产物 CO 减少。轴向位置约 6 m 处煤粉燃烧完全,CO 全部转化为 CO₂,CO 含量趋于稳定。随 v_1 增大,CO 含量分布向轴线后方推移。二、三次风布置于燃烧器出口截面的周向边缘,补充煤粉燃烧中后期所需氧气,风速对燃烧器轴线上 CO 含量几乎无影响,对烘干筒轴线上 CO 含量影响明显。一、二、三次风风速越大,煤粉燃烧越充分,CO 生成量越少。

不同各次风风速下煤粉燃烧计算区域轴线上 CO₂ 含量分布见图 8。随 $v_1 \sim v_3$ 增大 CO₂ 含量增大,且基本在约 6 m 处趋于稳定。随一次风风速增大,CO₂ 含量分布向轴线后方推移。 v_2 和 v_3 对烘干筒轴线上 CO₂ 含量影响明显。 $v_1 \sim v_3$ 增大,带入的氧气量增加,有利于煤粉充分燃烧。

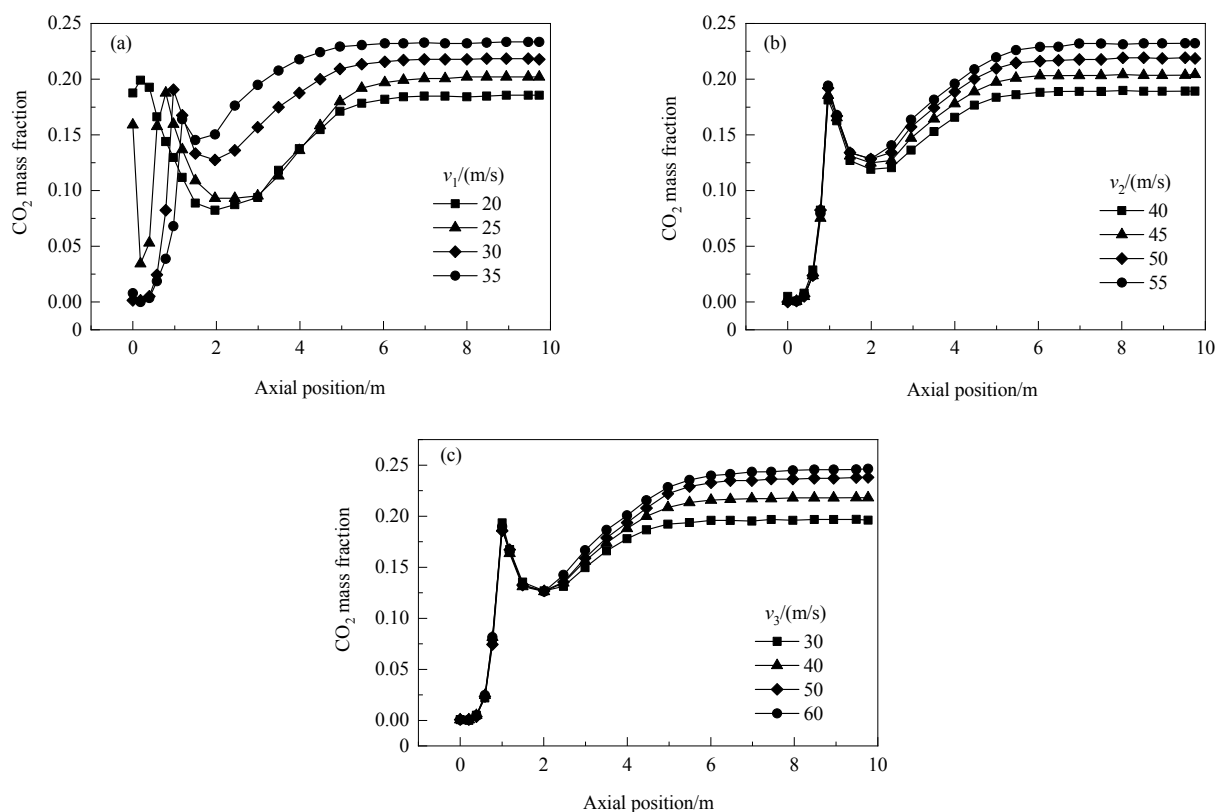


图 8 不同各次风风速下中心轴线上 CO₂ 含量分布

Fig.8 Distribution of CO₂ mass fraction along center axis with different air velocities

4.3.3 各次风风速对 NO 含量的影响

一、二、三次风的合理搭配能有效增加空气和煤粉的混合程度,增加接触时间,形成稳定燃烧火焰。选取合理的各次风风速能使燃烧室内形成局部富燃料贫氧区和富氧贫燃料区,即形成局部氧化区、还原区等区域,保证燃烧高效,减少不完全产物 CO 还原 NO,降低有害气体排放。

不同各次风风速下煤粉燃烧计算区域轴线上 NO 含量的分布见图 9。由图可知, v_1 对 NO 含量影响显著,在轴线 0~3 m 区域内,随 v_1 增大,冷空气量增加,燃烧温度降低,热力型 NO 生成量减少,NO 含量分布曲线向后方推移;在轴线 3~4.5 m 区域内,NO 含量分布无明显规律, $v_1=25$ m/s 时 NO 含量最大;在轴线 4.5~10 m 处, $v_1=20, 30, 35$ m/s 时,随 v_1 增大,NO 含量增大,这

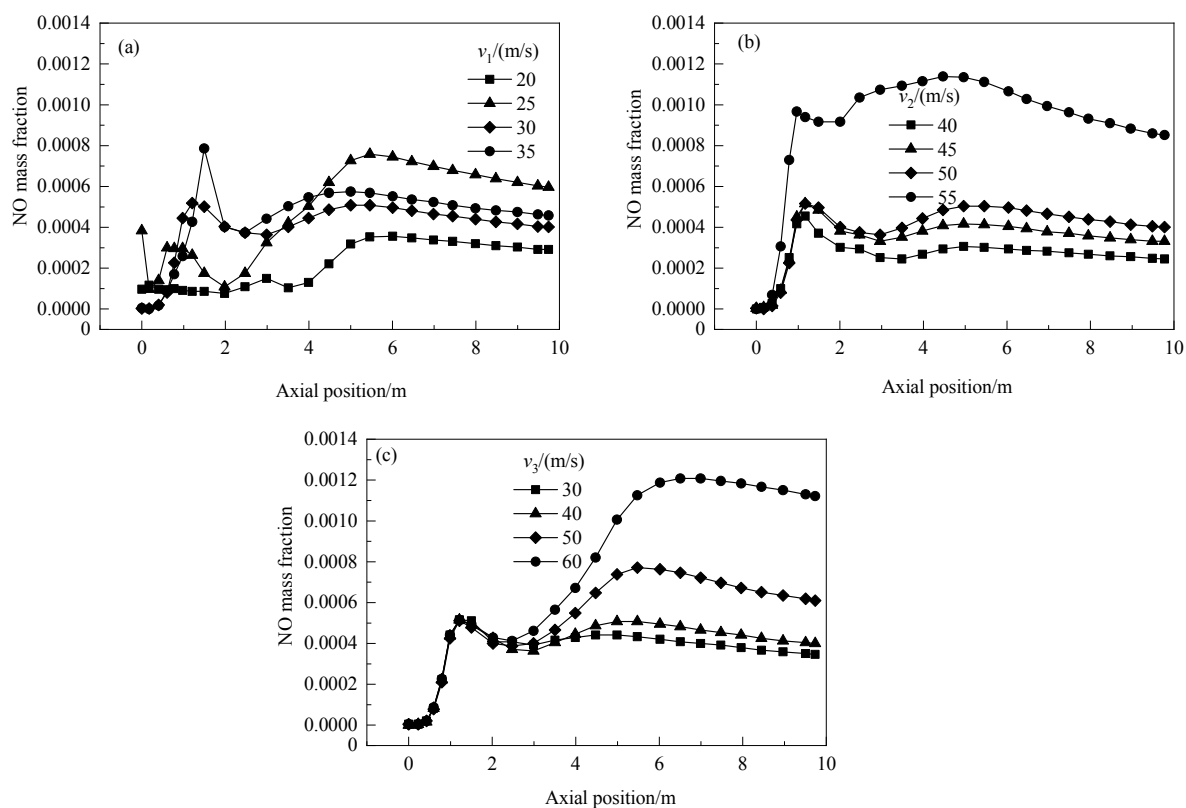
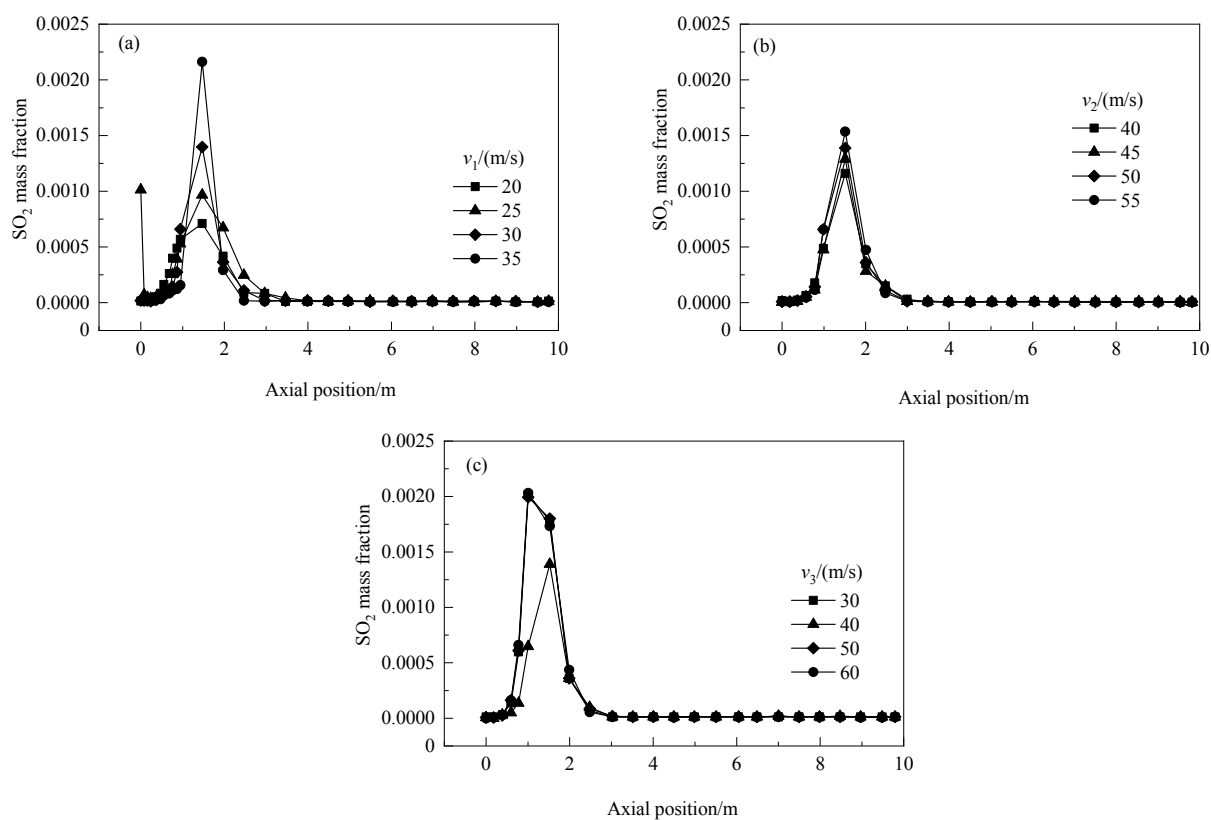


图9 不同各次风风速下中心轴线上 NO 含量分布

Fig.9 Distribution of NO mass fraction along center axis with different air velocities

图10 不同各次风风速下中心轴线上 SO₂ 含量分布Fig.10 Distribution of SO₂ mass fraction along center axis with different air velocities

是因为一次风增大了氧气含量, 煤中氮氧化, NO 生成量增加。轴线 0~1.5 m 处, 当 $v_2=40\sim50$ m/s 时, 轴线上 NO 含量无明显变化, $v_2=55$ m/s 时, NO 含量明显升高; 轴线 1.5~10 m 处 NO 含量随 v_2 增大而升高; 轴线 0~2 m 处, 随 v_3 增大 NO 含量无明显变化; 轴线 2~10 m 处, 随 v_3 增大 NO 含量升高, v_3 从 40 m/s 增至 50, 60 m/s 时, 轴线上 NO 含量急速上升。

4.3.4 各次风风速对 SO_2 含量的影响

不同各次风风速下煤粉燃烧计算区域轴线上 SO_2 含量分布见图 10。由 SO_2 的生成机理可知, SO_2 的生成量与燃烧温度和氧气含量有关。随 v_1 和 v_2 增大, SO_2 含量分布向后方推移。 v_1 比 v_2 对 SO_2 含量的影响更大, 随风速增加, SO_2 质量分数增加; $v_3=30, 50$ 和 60 m/s 时对 SO_2 含量几乎无影响, $v_3=40$ m/s 时 SO_2 含量明显降低。 SO_2 主要产生在轴线 1~3 m 处, SO_2 含量的高点主要出现在轴线 1.5 m 处, 即煤粉燃烧器与骨料烘干筒的结合处, 轴线 3~10 m 处 SO_2 含量不随风速改变, 均为 0。

综合各次风速对骨料烘干煤粉燃烧器各参数的影响, 较合理的参数为一次风风速 30~35 m/s, 二次风风速 45~50 m/s, 三次风风速 30~40 m/s。

4.3.5 模拟结果验证

Stöllinger 等^[17]利用 PDF 模型对 IFRF(International Flame Research Foundation)设计的煤粉锅炉燃烧进行了数值模拟。采用文献^[17]的运行条件及计算域对 IFRF 设计的煤粉锅炉进行数值模拟。煤粉锅炉横截面尺寸为 $1.9\text{ m}\times 1.9\text{ m}$, 长为 6.25 m, 一次风和煤粉通过直径为 0.0703 m 的圆管进入锅炉, 风温 463 K, 一次风流量为 434 kg/h, 煤粉流量为 212 kg/h, 二次风管与一次风管同轴, 呈圆环状, 外径为 0.399 m, 风温 773 K, 二次风流量为 2334 kg/h, 锅炉出口直径 0.784 m, 以高挥发分烟煤为燃料。模拟结果与实验结果的对比见图 11。由图可知, 模拟结果与实验结果趋势一致, 但存在一定误差, 原因是点火位置及 CFD 软件求解控制模型系数的不确定性均会造成偏差。

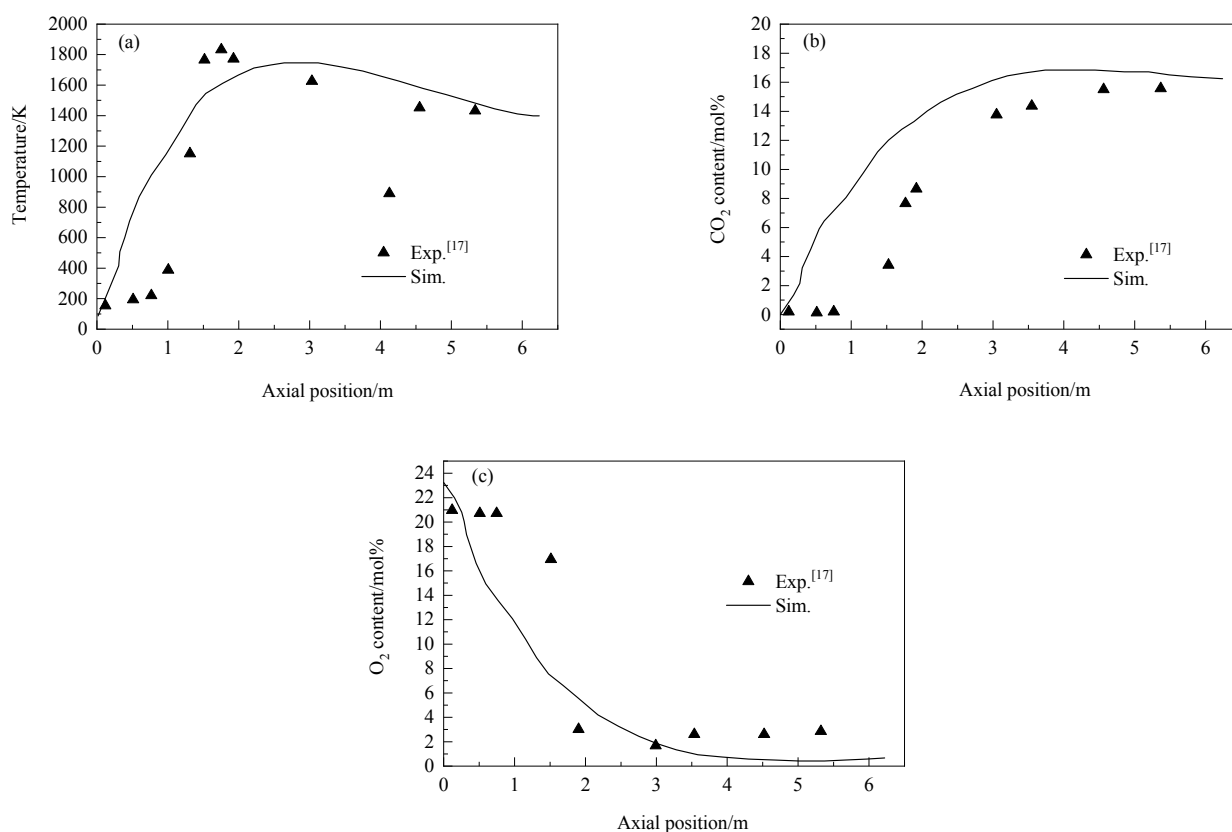


图 11 模拟结果与实验结果的对比

Fig.11 Comparison of simulation results and experimental results

5 结论

基于煤粉燃烧机理结合骨料烘干工艺,研究了骨料烘干煤粉燃烧器煤粉燃烧污染物排放特性,考察了各次风速对燃烧器中心轴上 CO、CO₂、NO 和 SO₂ 含量的影响,得出以下结论:

(1) 一次、二次、三次风风速越大, CO 含量越低, CO₂ 含量越高, 燃烧越充分。一次风影响煤粉燃烧器和骨料烘干筒内部流场, 而二、三次风风速对煤粉燃烧器内部流场影响很小, 对骨料烘干滚筒内部流场的速度和温度分布略有影响, 主要影响 CO 和 CO₂ 含量。

(2) 一、二、三次风风速越小, 产生的 NO 越少。一次风风速为 25 m/s 时或二次风风速为 55 m/s 时, NO 含量较高。

(3) SO₂ 主要产生在轴线 1~3 m 处, 含量随一次风和二次风风速增加而增加, 一次风对 SO₂ 含量的影响更大。三次风风速为 40 m/s 时, SO₂ 含量最低。

(4) 较合理的参数为一次风风速 30~35 m/s, 二次风风速 45~50 m/s, 三次风风速 30~40 m/s。

参考文献

- [1] 李超慈. 基于 SO₂、NO_x、CO₂ 排放总量控制的电力系统管理规划模型研究 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2015: 1-2.
Li C C. Study on power system management planning model based on total emission control of SO₂, NO_x and CO₂ [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2015: 1-2.
- [2] 郑阳. 大型煤粉燃烧锅炉 NO_x 排放控制系统的运行特性及其优化 [D]. 南京: 东南大学, 2017: 21-28.
Zheng Y. Operational characteristics of NO_x emission control system of a large-scale pulverized coal-fired utility boiler and the optimization [D]. Nanjing: Southeast University, 2017: 21-28.
- [3] 梅振锋, 王飞飞, 张健鹏, 等. 一次风风速对高温预热空气下的煤粉 MILD 燃烧的影响 [J]. 工程热物理学报, 2014, 35(4): 782-786.
Mei Z F, Wang F F, Zhang J P, et al. Effect of primary air stream velocity on MILD combustion of pulverized coal in high temperature preheated air [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(4): 782-786.
- [4] 陈立军, 宫永立, 崔俊洁, 等. 火电厂一次风速及煤粉浓度的数据采集系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(11): 3842-3845.
Chen L J, Gong Y L, Cui J J, et al. Design of data acquisition system of primary air velocity and coal dust concentration in thermal power plant [J]. Computer Measurement & Control, 2015, 23(11): 3842-3845.
- [5] 徐顺生, 李罗军, 黄日升, 等. 分解炉内混煤燃烧最佳三次风速的模拟研究 [J]. 过程工程学报, 2013, 13(2): 181-185.
Xu S S, Li L J, Huang R S, et al. Simulation study on the best tertiary air velocity of coal blend combustion in a calciner [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2013, 13(2): 181-185.
- [6] 周志军, 周丛丛, 邵杰, 等. 旋流燃烧器中二次直流风速对 NO_x 生成的影响 [J]. 热力发电, 2010, 39(3): 23-29.
Zhou Z J, Zhou C C, Shao J, et al. Influence of secondary air straight flow velocity in the swirl burner upon formation of NO_x [J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(3): 23-29.
- [7] 张文学, 郭彩, 武建新. 三次风速对煤粉燃烧器燃烧效率的影响 [J]. 热力发电, 2015, (4): 39-43.
Zhang W X, Guo C, Wu J X. Effect of tertiary air speed on combustion efficiency of pulverized coal burners [J]. Thermal Power Generation, 2015, (4): 39-43.
- [8] 吕太, 王泽民, 吴红峰, 等. 600 MW 机组锅炉分层掺烧神华煤的混煤燃烧数值模拟 [J]. 电站系统工程, 2015, 31(1): 29-31.
Lü T, Wang Z M, Wu H F, et al. Numerical simulation of layered-combustion shenhua coal in 600 MW boiler [J]. Power System Engineering, 2015, 31(1): 29-31.
- [9] Cui K, Liu B, Wu Y X, et al. Numerical simulation of oxy-coal combustion for a swirl burner with EDC model [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2014, 22(2): 193-201.
- [10] Rahmanian B, Safaei M R, Kazi S N. Investigation of pollutant reduction by simulation of turbulent non-premixed pulverized coal combustion [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 73: 1222-1235.
- [11] Cui K, Zhang H, Wang W L, et al. Comparison between realizable κ - ϵ and RSM model in the simulation for a swirl burner [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(11): 2006-2009.
- [12] Zhou L. Advances in studies on turbulent dispersed multiphase flows [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2010, 18(6): 889-898.
- [13] Guan X Y, Dong Z G, Cheng D L. Experimental study and numerical simulation of the single-phase flow field in a louver coal concentrator [J]. Science Technology & Engineering, 2014, 5(13): 49-55.
- [14] Cui K, Liu B, Zhang H, et al. Modeling of pulverized coal combustion in turbulent flow with the consideration of intermediate reactions of volatile matter [J]. Energy & Fuels, 2013, 27(4): 2246-2254.
- [15] 李振山, 张志, 陈登高, 等. 煤粉燃烧中 NO_x 的预测: 模型开发及 Fluent 实现 [J]. 煤炭学报, 2016, 41(10): 2426-2433.
Li Z S, Zhang Z, Chen D G, et al. Prediction of NO_x during pulverized coal combustion: model development and its implementation with Fluent [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(10): 2426-2433.
- [16] 刘喜宁. 基于 SIMPLE 方法下的三维湍流流场数值分析 [D]. 西安: 西北工业大学, 2005: 1-24.
Liu X N. Numerical study of three-dimension turbulent flow based on SIMPLE method [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005: 1-24.
- [17] Stöllinger M, Naud B, Roekaerts D, et al. PDF modeling and simulations of pulverized coal combustion. part 2: application [J]. Combustion & Flame, 2013, 160(2): 396-410.