

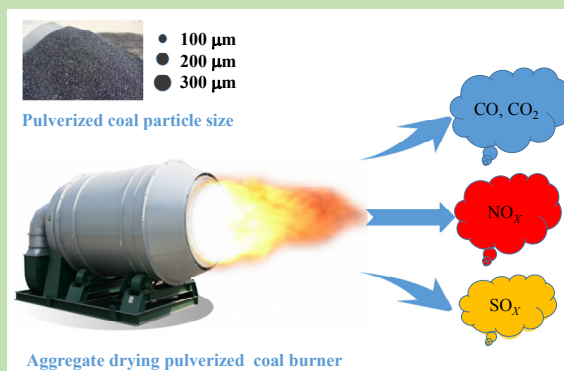


Effect of pulverized coal particles on emission characteristics of aggregate drying pulverized coal burner

Jing WANG, Haiying CHENG*, Zhiyong HU, Zhenliang WANG

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

Abstract: Pulverized coal used as fuel of burner in the process of aggregate drying had the significant economic and comprehensive benefits. However, pulverized coal combustion generated a variety of noxious gases which polluted the atmosphere. Effective reduction of pollutant emission was significant for pulverized coal burner's industrialization and became an important issue in coal combustion. Pulverized coal particle size affected the turbulence, diffusion and coupled motion of internal flow field in pulverized coal burner, thus affected its emission characteristics. Based on the technology of



aggregate drying and followed the essential mechanism of coal combustion, a three-dimensional physical model was established by the modeling software CREO. Computer aided engineering software Gambit was used to make unstructured mesh generation for the pulverized coal burner. Control model of pulverized coal combustion behavior was constructed to simulate the internal fields of aggregate drying pulverized coal burner in Fluent software. The standard $k-\varepsilon$ model was used to describe the turbulent motion of turbulent flow in the process of pulverized coal combustion, and the P1 radiation model was used to describe the phenomenon of thermal radiation and heat transfer between solid phase and air phase. The stochastic particle trajectory model was used to describe the dispersion of discrete phase and the eddy dissipation model was used to describe the motion and combustion of turbulent eddy. The kinetics/diffusion-limited model was chosen as the combustion model in process of pulverized coal combustion. The influence of pulverized coal particle size on emission characteristics during pulverized coal combustion process in aggregate drying was analysed with the pollutant mass fraction as the evaluation standard. The results showed that with the increase of particle size, because of incomplete combustion of pulverized coal, the CO emission increased and the CO₂ emission declined. With the increase of particle size, the emission of SO₂ grew, the optimal emission of NO was when pulverized coal particle size was 100 μm .

Key words: pulverized coal burner; combustion simulation; pulverized coal particle size; emission characteristics

收稿: 2017-11-29, 修回: 2018-03-22, 网络发表: 2018-08-22, Received: 2017-11-29, Revised: 2018-03-22, Published online: 2018-08-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51665043)

作者简介: 王京(1992-), 男, 内蒙古乌兰察布市人, 硕士研究生, 机械工程专业, E-mail: wj1355675390@163.com; 程海鹰, 通讯联系人, E-mail: nmgchynmg@gmail.com.

引用格式: 王京, 程海鹰, 胡志勇, 等. 煤粉粒径对骨料烘干煤粉燃烧器排放特性的影响. 过程工程学报, 2018, 18(6): 1245-1252.
Wang J, Cheng H Y, Hu Z Y, et al. Effect of pulverized coal particles on emission characteristics of aggregate drying pulverized coal burner (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2018, 18(6): 1245-1252, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.217425.

煤粉粒径对骨料烘干煤粉燃烧器排放特性的影响

王京, 程海鹰*, 胡志勇, 王振亮

内蒙古工业大学机械学院, 内蒙古 呼和浩特 010051

摘要: 构建骨料烘干煤粉燃烧器内煤粉燃烧行为的控制模型, 以污染物含量为评价标准, 研究了骨料烘干煤粉燃烧过程中煤粉粒径对排放特性的影响规律. 结果表明, 随煤粉粒径增大, 煤粉在燃烧器内燃烧不充分, CO 排放量增加, CO₂ 排放量逐渐减少, SO₂ 排放量增加, NO 排放量在煤粉粒径为 100 μm 时最小.

关键词: 煤粉燃烧器; 燃烧模拟; 煤粉粒径; 排放特性

中图分类号: TK223.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2018)06-1245-08

1 前言

骨料烘干工艺中, 以煤粉为燃料的燃烧器占有很大比例^[1], 采用煤粉作为燃烧器的能源可降低骨料烘干的运行成本, 具有显著的经济性, 综合效能较好. 煤粉燃烧产生 NO_x 和 SO_x 等污染物, 引起的污染日益严重并已受到重视, 在严格的国家污染物排放标准下, 控制骨料烘干煤粉燃烧器的污染物排放势在必行, 降低污染物排放成为煤粉燃烧的重要研究课题. 煤粉燃烧器的排放特性受燃烧器结构参数、燃烧工况及煤粉种类等各种因素影响^[2-7], 国内外学者对煤粉燃烧器的排放特性进行了研究, 为降低 NO_x 和 SO_x 等污染物的排放量, 提出了采用炉内脱氮脱硫技术、分级燃烧、烟气净化、低 NO_x 燃烧器、声波激励等新技术改善煤粉燃烧器的排放特性^[8-12]. 这些技术建立在对各污染物生成因素的分析上, 已对燃烧器各级风速、燃烧器结构尺寸、燃煤种类等影响污染物生成因素进行分析, 目前以煤粉粒径作为污染物生成因素的研究较少. 本工作分析了煤粉在燃烧器内部流场的行为, 着重研究煤粉粒径对煤粉燃烧器排放特性的影响.

2 骨料烘干煤粉燃烧器控制模型

图 1 为骨料烘干煤粉燃烧器结构示意图. 一次风携带煤粉进入已被燃油预热的燃烧室, 使煤粉均匀扩散, 延长煤粉与空气的接触时间, 并提供燃烧初期所需的氧. 随后, 二次风与煤粉充分混合, 提供燃烧所需氧气并冷却燃烧器内壁面, 清除壁灰. 三次风冷却燃烧室外壁, 补充燃烧所需氧, 调节火焰长度及形状. 煤粉燃烧器内部流场具有复杂的耦合性, 燃烧过程伴随多种热传递现象和化学反应, 涉及燃烧学、传热学和流体力学等多个学科.

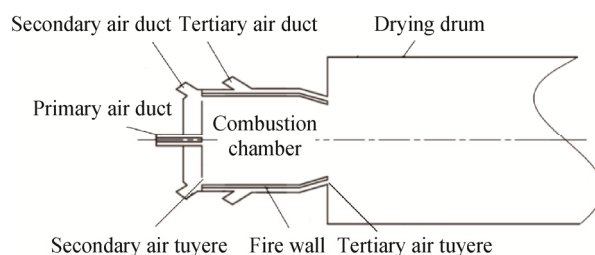


图 1 煤粉燃烧器原理示意图

Fig. 1 Principle diagram of the pulverized coal burner

燃烧过程中, 燃烧室内煤粉与空气进行强烈的湍流混合, 伴随着湍流作用场内部进行动量、热量及质量的传递, 遵循质量守恒定律、能量守恒定律、组分转换和守恒定律、牛顿第二定律. 目前已建立了适合的控制模型^[13-20].

在煤粉燃烧器的数值模拟中, 标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型可更好地模拟不同环境下污染物的运输扩散, 能准确反映燃烧器内流场, 收敛速度快. 标准 $k-\varepsilon$ 双方程主要求解湍流动能(k)方程和湍流耗散率(ε)输运方程, 并建立其与湍流涡粘系数的关系. 模型中湍流黏度 μ_t 计算如下:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (1)$$

式中, 经验常数 $C_\mu = 0.09$, 湍动能 $k = (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) / 2$, 湍动能耗散率 $\varepsilon = \mu(\partial \mu_i / \partial x_j)^2 / \rho$.

标准 $k-\varepsilon$ 双方程模型的湍动能 k 和湍动能耗散率 ε 的输运方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k \mu_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G + \rho \varepsilon, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon \mu_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} G - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon), \quad (3)$$

式中, t 为时间, μ, v, w 为流体在 x, y, z 方向的分速度, ρ 为流体密度, G 为由平均速度梯度引起湍动能 k 的产

生项，模型常数 $C_{1\varepsilon}=1.44$, $C_{2\varepsilon}=1.92$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$.

燃烧室内的剧烈燃烧以辐射为主，热辐射模拟考察煤颗粒、焦炭、灰分和空气互相耦合辐射换热作用，非常复杂，运用 P1 模型，可考虑散射和气固间辐射换热的影响，有利于提高模拟的准确性^[21,22]. 煤粉燃烧时，煤粉以随机运动涡团形式存在，燃烧发生在涡团表面，计算量较小，运用涡耗散模型描述涡团运动与燃烧. 模拟煤粉与空气间的相互作用应考虑煤粉燃烧过程中的蒸发和挥发现象，建立随机颗粒轨道模型模拟颗粒相. 影响煤粉颗粒表面反应速率的因素包括煤颗粒扩散和动力学反应参数，用动力扩散燃烧模型描述焦炭燃烧的表面现象.

假设煤粉颗粒直径均匀分布，并以入射面方式从一次风口喷入，为便于修改各次风的风速参数，一次、二次和三次风入口均设置为速度入口. 为保证计算精度，模拟求解器采用隐式压力基求解和 SIMPLE 算法，各物理量最后以二阶迎风格式求收敛解，对燃烧器模型进行网格划分和数值模拟. 网格划分时，需考虑计算机资源和运算量，将模型划分为若干部分，采用非结构化网格对各部分进行网格划分，可以准确全面地反映模型结构. 由于网格质量对模拟的准确性和收敛难易程度有重要影响，应考察长宽比和等角歪斜度等检查网格质量.

基于骨料烘干工艺，分析 LB2000 型沥青混合料搅拌站中烘干滚筒及燃烧器相关参数，确定骨料烘干煤粉燃烧器的结构参数，如表 1 所示. 建立物理模型见图 2.

表 1 煤粉燃烧器和烘干滚筒的主要结构参数
Table 1 Main parameters of coal pulverized burner and drying drum

| Item | Parameter | Value |
|------------------|--|-------|
| Drying drum | Drum length/mm | 8500 |
| | Drum diameter/mm | 2200 |
| Duct parameter | Inside diameter of primary air duct/mm | 50 |
| | Outer diameter of primary air duct/mm | 250 |
| | Diameter of secondary air duct/mm | 150 |
| | Diameter of tertiary air duct/mm | 200 |
| Tuyere parameter | Number of tuyere secondary air | 4 |
| | Number of tuyere tertiary air | 2 |
| Burner parameter | Diameter of combustion chamber/mm | 1200 |
| | Straight length of combustion chamber/mm | 1000 |
| | Front cone angle of burner/° | 30 |
| | Back-end cone angle of burner/° | 20 |

3 污染物排放特性评价指标

煤粉燃烧会排放 CO、CO₂、NO 和 SO₂ 等污染物. 煤粉燃烧的排放特性评价指标如下：骨料烘干煤粉燃烧器内部温度场能间接反映燃烧火焰形状及燃烧效果；各组份含量云图能反映燃烧烟气成分与浓度分布情况，碳氧化物污染物排放以 CO 和 CO₂ 含量分布云图进行分析，

氮氧化物污染物排放以 NO 含量分布云图进行分析，硫氧化物污染物排放以 SO₂ 含量分布云图进行分析；根据质量加权平均分数，表征燃烧器内流动区域中各物理量的平均值.

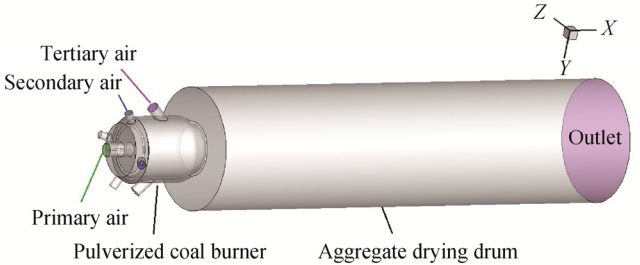


图 2 煤粉燃烧器和烘干滚筒三维简化模型
Fig.2 Simplified model of coal pulverized burner and drying drum

4 结果与讨论

模拟对象为粒径 $D=100, 200$ 和 $300\ \mu\text{m}$ 的霍林河褐煤，一次风风速设为 $30\ \text{m/s}$ ，二次风风速设为 $50\ \text{m/s}$ ，三次风风速设为 $40\ \text{m/s}$ ，不改变其它设置，分析骨料烘干煤粉燃烧器的排放特性.

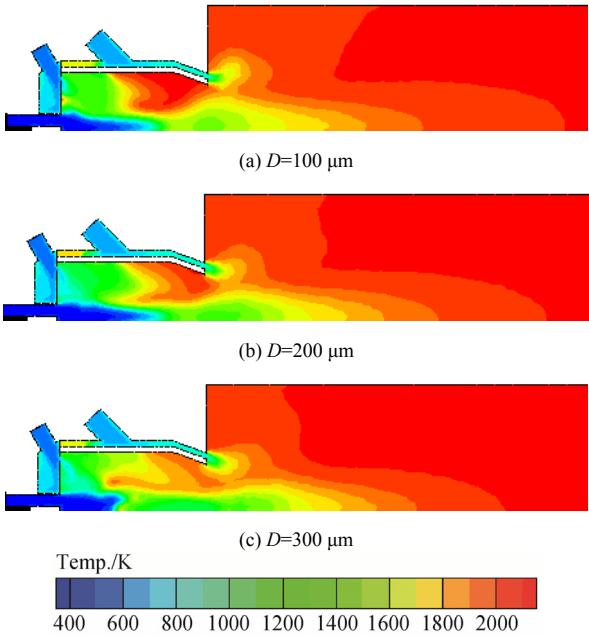


图 3 温度场分布
Fig.3 Temperature distribution

4.1 温度场分析

燃烧器内部温度场云图如图 3 所示，红色高温区域平均温度为 $2000\ \text{K}$ ，蓝色低温区域平均温度为 $500\ \text{K}$. 随煤粉粒径增大，燃烧器内部高温区域面积减小，烘干滚筒内部高温区域沿轴线方向逐渐向燃烧器出口靠近. 煤粉粒径为 $300\ \mu\text{m}$ 时，燃烧器内部高温区域面积最小，

平均温度最低, 粒径为 $100\ \mu\text{m}$ 时, 燃烧器及烘干滚筒内部高温区域面积最大. 燃烧器内部温度受煤粉燃尽率影响, 煤粉粒径越大, 煤粉颗粒在燃烧器主燃区越不易燃尽, 导致燃烧温度较低. 由图 3 对比分析几种粒径可知, 粒径为 $100\ \mu\text{m}$ 时, 煤粉燃烧最充分.

4.2 各组分含量分析

4.2.1 碳氧化物含量

由 CO 和 CO_2 含量云图(图 4)可知, CO 主要分布于燃烧器出口及烘干滚筒的加热区段, CO_2 主要分布于烘干滚筒内部. 图中组分含量越低的区域越接近蓝色, 而

含量越高的区域越接近红色. 随煤粉粒径增大, 煤粉燃烧器内 CO 分布区域扩大, CO_2 分布区域减小. 随煤粉粒径增大, 燃料燃尽时间增长, 导致不能完全燃烧的煤粉被吹入烘干滚筒, 粒径 $300\ \mu\text{m}$ 时, 煤粉颗粒在燃烧器主燃区不能充分燃烧, CO 浓度较高. 煤粉粒径越大, 颗粒的动量越大, 加剧对烘干滚筒内壁的磨损. 因 CO 浓度增加, 导致局部还原性氛围扩大, 易腐蚀内壁金属氧化膜. 燃烧器内的环形回流区因高温烟气发生卷吸, 加剧了煤粉燃烧, 故 CO 浓度减少, CO_2 浓度增加.

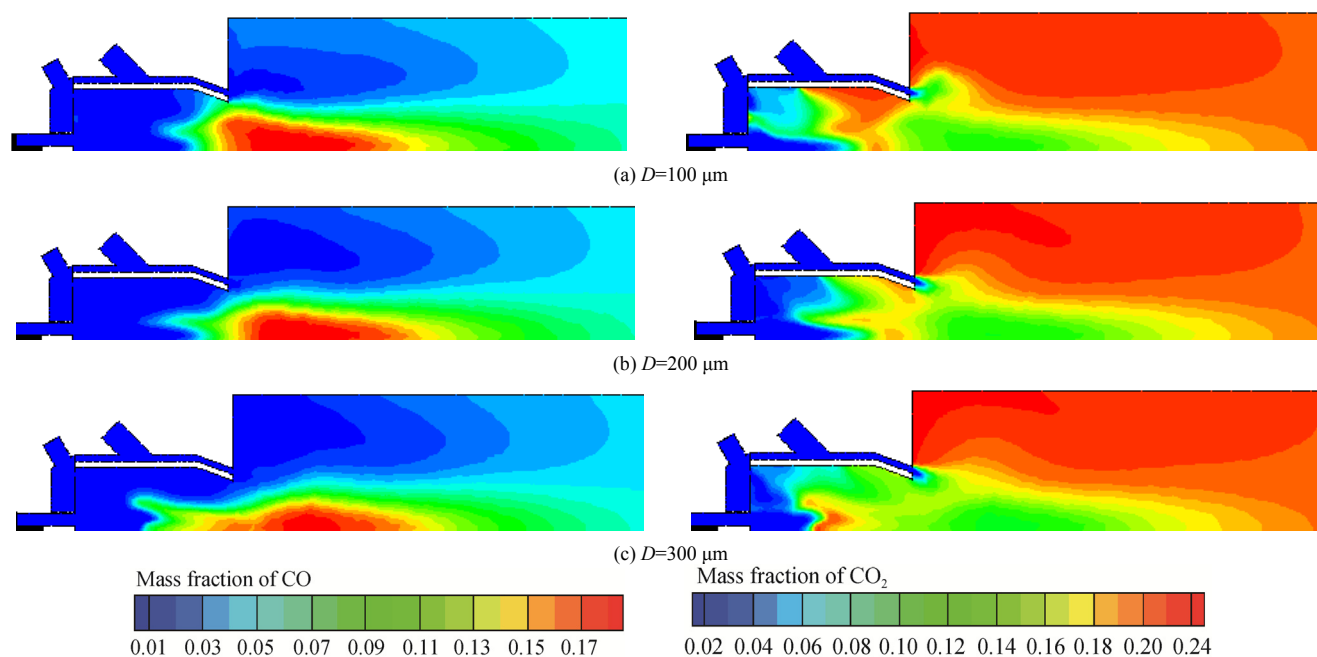


图 4 CO 和 CO_2 含量分布云图

Fig.4 The color-map of CO and CO_2 contents distribution

4.2.2 NO_x 含量

煤粉燃烧过程形成的氮氧化物 NO_x 主要分为热力型、快速型和燃料型. 其中火焰后区域内分子氮的氧化形成热力型 NO_x , 火焰锋面内的碳氢基与分子氮形成快速型 NO_x , 燃料中所含氮被氧化而形成燃料型 NO_x . NO_x 中燃料型约占 75%~80%, 热力型约占 15%~20%, 快速型约占 5%. 燃料型和热力型 NO_x 是煤粉燃烧研究的重点. 煤粉燃烧设备高温燃烧产生的 NO_x 主要为 NO 和 NO_2 , 其中 NO 占 90%, NO_2 占 10%^[23-26].

NO 含量分布云图如图 5 所示. 由图可知, 在燃烧器内部, 随煤粉粒径增加, NO 含量减小, 而在烘干滚筒内部, 随煤粉粒径增加, NO 含量逐渐增大, 粒径为 $100\ \mu\text{m}$ 时 NO 浓度最低. 因 CO 还原性较强, 易将 NO_x 还原成 N_2 , CO 浓度高的区域, NO 浓度很低. 煤粉燃

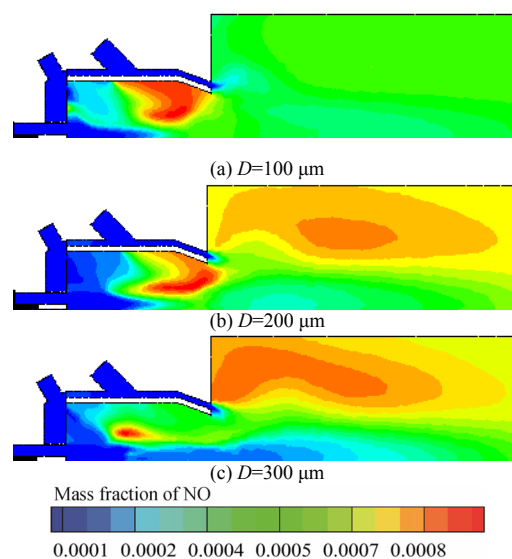


图 5 NO 含量分布云图

Fig.5 The color-map of NO contents distribution

烧器出口位置及烘干滚筒加热段内的中心轴处 CO 富集, NO 浓度非常低. 烘干段及加热段因局部温度较高产生大量的热力型 NO_x , NO 浓度增加. 在烘干滚筒左侧的环形回流区域, NO 浓度也较高.

4.2.3 SO_x 质量分数

煤粉燃烧时产生的 SO_x 源自煤中的含硫组分, 分为有机硫、黄铁矿硫和硫酸盐硫. 有机硫和黄铁矿硫均能参与燃烧反应, 称为可燃硫. SO_2 分别在挥发分析出及燃烧和焦炭燃烧两个阶段形成, 在挥发分析出及燃烧阶

段, 有机硫和黄铁矿硫(可燃硫)燃烧生成 SO_2 ; 在焦炭燃烧阶段, 不可燃硫酸盐在与碳氢还原性物质共存时分解产生 SO_2 . 生成的 SO_2 将全部进入烟气中, 其中约有 0.5%~5% 继续氧化形成 SO_3 [27,28].

SO_x 排放物中 SO_2 排放量最高, 中间产物 H_2S 及不稳定产物 SO_3 排放量较少. SO_2 含量分布云图如图 6 所示, SO_2 集中分布于煤粉燃烧器后半部区域及燃烧器出口的等腰三角形区域内, 随煤粉粒径增大, SO_2 生成区域面积逐渐扩大.

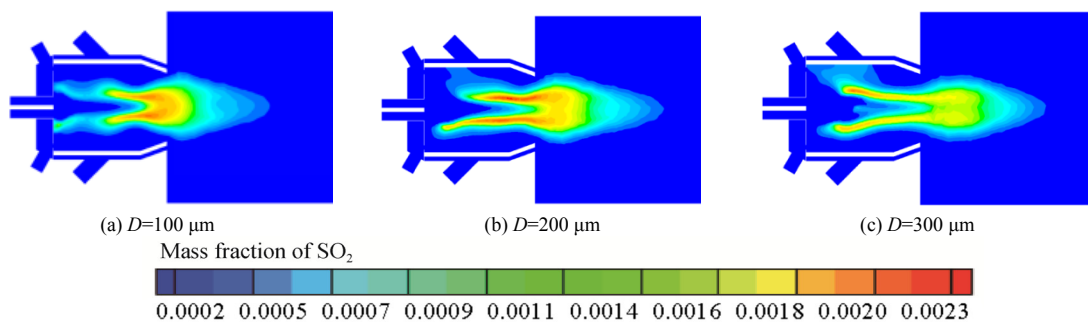


图6 SO_2 含量分布云图

Fig.6 The color-map of SO_2 contents distribution

4.3 煤粉粒径影响燃烧器排放特性的机理

骨料烘干煤粉燃烧器与烘干滚筒中心轴线上煤粉粒径对温度场、污染物分布的影响如图 7 所示. 由图 7(a) 可知, 燃烧器内部温度迅速上升且烘干滚筒加热段温度最高, 随煤粉粒径增大, 煤粉燃烧器内温度降低, 煤粉粒径 300 μm 时温度在加热区先降低, 然后加速上升, 到达烘干滚筒后逐渐接近粒径为 100 和 200 μm 时的温度. 由图 7(b) 可知, 煤粉粒径 300 μm 时 CO 含量在燃烧器出口处和加热区明显高于煤粉粒径为 100 和 200 μm 时, 但在烘干滚筒的中后段相差不大. 图 7(c) 和 7(e) 中, CO_2 和 SO_2 在燃烧器出口附近分布最多, 此后 CO_2 含量先下降再上升到最高点并保持稳定. CO_2 和 SO_2 含量随粒径变化均不明显, 煤粉粒径 100 μm 时, 在燃烧器出口处和加热区 CO 和 SO_2 含量最低, 表明该条件下排放量最少. NO 含量如图 7(d) 所示, 当燃烧器内部温度迅速升高时, 煤粉粒径 300 μm 时 NO 含量先缓慢增长再迅速增至峰值, 煤粉粒径为 100 和 200 μm 时, NO 含量迅速增长至峰值, 再小幅降低随后再上升. 煤粉粒径 100 μm 时, 燃烧器出口处 NO 含量最高, 烘干滚筒出口处最低. 随煤粉粒径增大, NO 含量后期的上升速度增快.

对各种污染物的排放数据进行后处理, 得到质量加权平均质量分数(Mass-weighted Average Mass Fraction),

结果见表 2. 对表中数据作方差分析, 可得出煤粉粒径对各种污染物排放量影响程度的显著性, 见表 3 和 4. 统计分析上可通过 P -value 判断组间的差异显著性, 通常当 $P < 0.05$ 时有显著差异. 也可通过 F 值判断差异显著性, 当 $F > F_{\text{crit}}$ 时, 有显著(或极显著)差异. 表 4 分析结果中 $F = 21003.55 > F_{\text{crit}}$, 表明煤粒径对污染物排放量影响显著.

5 结论

利用 FLUENT 软件对煤粉燃烧器的燃烧过程进行模拟, 通过分析燃烧器内部的温度场及各污染物的浓度场, 研究了煤粉粒径对煤粉燃烧器排放特性的影响, 得出以下结论:

- (1) 随煤粉粒径增大, CO 浓度增加, CO_2 浓度减少. 煤粉粒径为 300 μm 时 CO 排放量最高, 粒径为 100 μm 时 CO 排放量最低. 在烘干滚筒内部 CO_2 浓度随煤粉粒径增大而降低, 粒径为 100 μm 时 CO_2 浓度最高. 表明煤粉粒径越大, 在燃烧器内部越不容易充分燃烧.
- (2) 煤粉粒径为 100 μm 时 NO 排放量最低, 粒径为 300 μm 时 NO 排放量最高.
- (3) 煤粉粒径 100 μm 时 SO_2 排放量最低, 粒径 300 μm 时 SO_2 排放量最高.

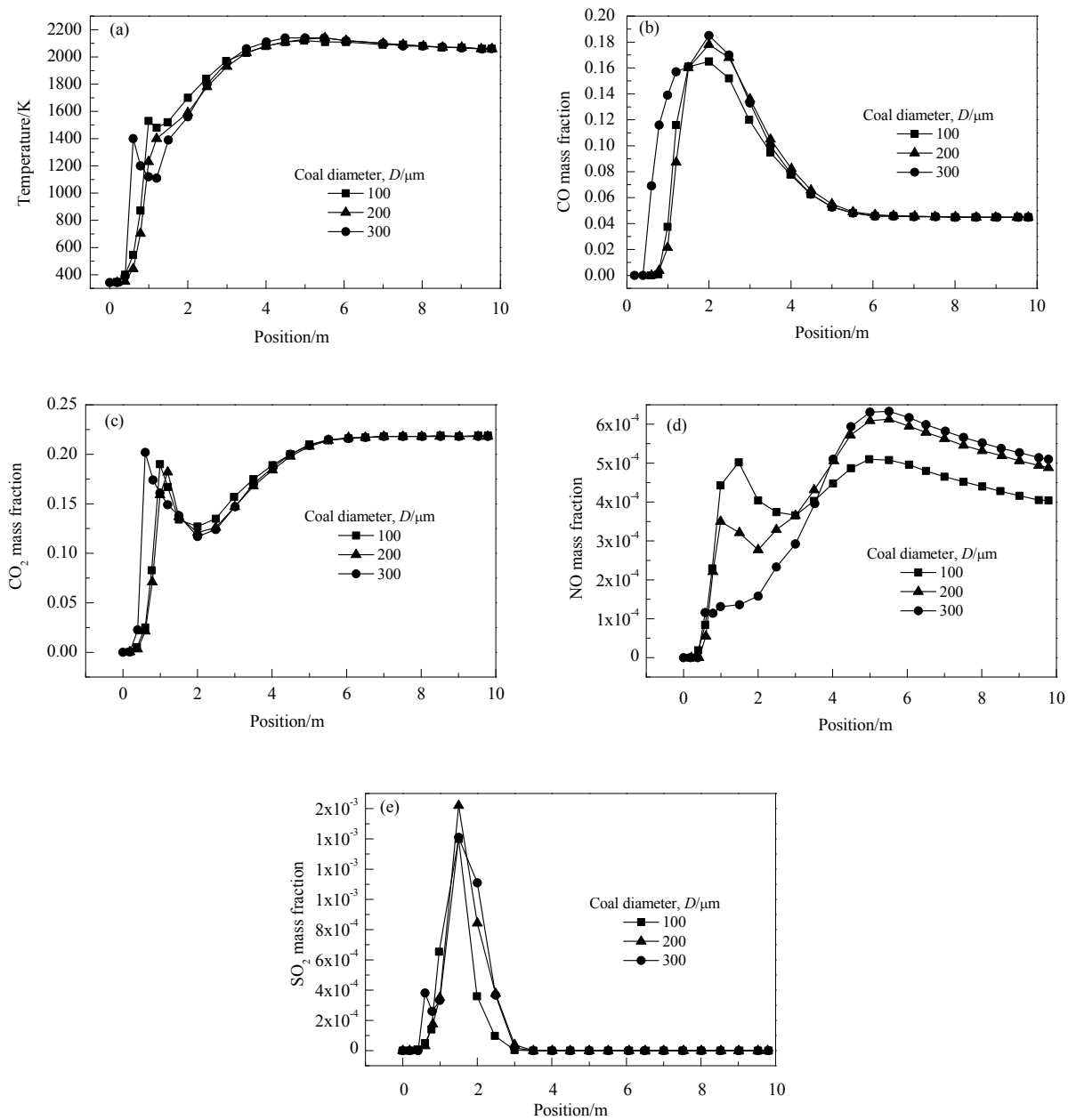


图7 中心轴线上各物理场分布曲线
Fig.7 Physical field distribution curves of the central axis

表2 不同煤粉粒径下各种污染物的质量加权平均质量分数

Table 2 Mass-weighted average mass fraction of pollutants under different coal diameters

| Mass-weighted average mass fraction | Coal diameter, $D/\mu\text{m}$ | | |
|-------------------------------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | 100 | 200 | 300 |
| CO | 0.03677202 | 0.03590127 | 0.03632298 |
| CO ₂ | 0.2065228 | 0.2030066 | 0.2020089 |
| NO | 0.0004805455 | 0.0005733066 | 0.0005974182 |
| HCN | 6.173484×10^{-6} | 7.146569×10^{-6} | 1.06394×10^{-5} |
| NH ₃ | 4.939467×10^{-7} | 4.05752×10^{-7} | 6.550689×10^{-7} |
| SO ₂ | 1.252355×10^{-5} | 2.0039×10^{-5} | 2.042785×10^{-5} |
| H ₂ S | 1.232399×10^{-6} | 2.39204×10^{-6} | 3.641792×10^{-6} |
| SO ₃ | 6.786125×10^{-9} | 1.788032×10^{-8} | 2.429815×10^{-8} |

表 3 煤种粒径实验结果分析

Table 3 The experimental results analysis table of coal particles diameter

| Group | Number of observations | Sum | Average | Variance |
|------------------|------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| CO | 3 | 0.108996 | 0.036332 | 1.9×10^{-7} |
| CO ₂ | 3 | 0.611538 | 0.203846 | 5.62×10^{-6} |
| NO | 3 | 0.001651 | 0.00055 | 3.81×10^{-9} |
| HCN | 3 | 2.4×10^{-5} | 7.99×10^{-6} | 5.52×10^{-12} |
| NH ₃ | 3 | 1.55×10^{-6} | 5.18×10^{-7} | 1.6×10^{-14} |
| SO ₂ | 3 | 5.3×10^{-5} | 1.77×10^{-5} | 1.99×10^{-11} |
| H ₂ S | 3 | 7.27×10^{-6} | 2.42×10^{-6} | 1.45×10^{-12} |
| SO ₃ | 3 | 4.9×10^{-8} | 1.63×10^{-8} | 7.85×10^{-17} |

表 4 煤种粒径方差分析结果

Table 4 Factor analysis of coal particles diameter

| Source of variation | SS | df | MS | F | P-value | Fcrit |
|---------------------|---------------------|----|---------------------|----------|----------------------|----------|
| Between groups | 0.106884 | 7 | 0.015269 | 21003.55 | 1.74×10^{-30} | 2.657197 |
| Within the group | 1.16×10^{-5} | 16 | 7.27×10^{-7} | | | |
| Total | 0.106896 | 23 | | | | |

参考文献

[1] 王庆. 我国煤粉锅炉直流与旋流燃烧器的发展概况及特点分析 [J]. 长沙大学学报, 2008, (2): 40–43.
Wang Q. Development and characteristic analysis of impellerless and swirl pulverized coal burners [J]. Journal of Changsha University, 2008, (2): 40–43.

[2] 冯兆兴, 安连锁, 李永华, 等. 煤粉燃烧污染物排放特性的实验研究 [J]. 动力工程, 2007, (3): 427–431.
Feng Z X, An L S, Li Y H, et al. Experimental study on pollutant emission characteristics [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2007, (3): 427–431.

[3] 王雪瑶. 四通道煤粉燃烧器流场数值模拟研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006: 1–40.
Wang X Y. Numerical simulation research of the flow field with four-channel coal burner [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006: 1–40.

[4] 程海鹰, 彭亚洲, 王振亮, 等. 煤粉种类对骨料烘干煤粉燃烧器排放特性的影响分析 [J]. 煤炭技术, 2016, 35(9): 209–211.
Cheng H Y, Peng Y Z, Wang Z L, et al. Analysis of effect of pulverized coal type on emission characteristics of aggregate drying pulverized coal burner [J]. Coal Technology, 2016, 35(9): 209–211.

[5] 程海鹰, 王振亮, 许立州. 骨料烘干煤粉燃烧器一次风参数设计与分析 [J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版), 2014, 33(2): 105–111.
Cheng H Y, Wang Z L, Xu L Z. Design and analysis of primary air parameters for aggregate dry pulverized coal burners [J]. Journal of Inner Mongolia University of Technology (Natural Science Edition), 2014, 33(2): 105–111.

[6] 王振亮, 程海鹰, 张语涵, 等. 二次风口个数对煤粉燃烧器燃烧效率的影响 [J]. 煤矿机械, 2015, 36(11): 128–130.
Wang Z L, Cheng H Y, Zhang Y H, et al. Influence of number of secondary air vents on pulverized coal burner combustion efficiency [J]. Coal Mine Machinery, 2015, 36(11): 128–130.

[7] 田建成. 面向骨料烘干的煤粉燃烧器结构设计与造型 [J]. 科技创新与应用, 2016, (19): 73.
Tian J C. Structural design and molding of pulverized coal burners for aggregate drying [J]. Technology Innovation and Application, 2016, (19): 73.

[8] 王晓琴. 新型煤粉燃烧器的结构优化及数值模拟 [D]. 重庆: 重庆大学, 2011: 30–42.
Wang X Q. Structural optimization and numerical simulation of new pulverized coal burner [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011: 30–42.

[9] 唐家毅, 卢啸风, 刘汉周, 等. 国外低 NO_x 煤粉燃烧器的研究进展及发展趋势 [J]. 热力发电, 2008, 37(2): 13–18.
Tang J Y, Lu X F, Liu H Z, et al. Research progress and development trend of foreign low NO_x pulverized coal burners [J]. Thermal Power Generation, 2008, 37(2): 13–18.

[10] 周俊虎, 赵玉晓, 刘建忠, 等. 低 NO_x 煤粉燃烧器技术的研究进展与前景展望 [J]. 热力发电, 2005, 37(8): 1–6.
Zhou J H, Zhao Y X, Liu J Z, et al. Research progress and prospect of low NO_x pulverized coal combustor technology [J]. Thermal Power Generation, 2005, 37(8): 1–6.

[11] 沈国清, 师云泽, 王彦博, 等. 声波激励对煤粉燃烧 NO_x 生成的影响 [J]. 燃烧科学与技术, 2015, 21(6): 506–510.
Shen G Q, Shi Y Z, Wang Y B, et al. Effect of acoustic excitation on NO_x generation of coal combustion [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2015, 21(6): 506–510.

[12] 王琳俊. 超细煤粉热解机理与燃烧过程 NO_x 排放特性研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2015: 51–71.
Wang L J. Study on pyrolysis mechanism and NO_x emission characteristics of superfine pulverized coal during combustion [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2015: 51–71.

[13] 张宏博, 秦国彤, 纪任山. 煤粉燃烧过程的数值模拟 [J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(5): 536–539.
Zhang H B, Qin G T, Ji R S. Numerical simulation of pulverized-coal combustion [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(5): 536–539.

[14] 李永华, 陈鸿伟, 刘吉臻, 等. 煤粉燃烧排放特性数值模拟 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 166–169.
Li Y H, Chen H W, Liu J Z, et al. Numerical simulation on emission characteristics of pulverized coal combustion [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 166–169.

[15] Coimbra C F M, Azevedo J L T, Carvalho M G. 3-D numerical model for predicting NO_x emissions from an industrial pulverized coal combustor [J]. Fuel, 1994, 73(7): 1128–1134.

[16] Li Z Q, Sun R, Sun S R, et al. Experimental study on characteristics of gas–particle flows with the radial bias combustion (RBC) swirl

- pulverized coal burner and influence of the characteristics on combustion [J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 1999, 19(5): 18–23.
- [17] Jiang X M, Liu H, Yan C, et al. NO_x and SO_2 emission and combustion characteristics of super fine pulverized coal particle [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2004, 55(5): 783–787.
- [18] Bai T, Sun B M, Guo Y H, et al. Effects of tertiary air staged combustion on NO_x emission characteristic in a pulverized-coal boiler with swirl burner [J]. Lect. Notes in Electr. Eng., 2012, 155: 255–263.
- [19] Wang M Y, Liao B, Liu Y Q, et al. Numerical simulation of oxy-coal combustion in a rotary cement kiln [J]. Appl. Therm. Eng., 2016, 103: 491–500.
- [20] Fiveland W A, Latham C E. Use of numerical modeling in the design of a low NO_x burner for utility boiler [J]. Combust. Sci. Tech., 1993, 93(1): 53–72.
- [21] Ha M J, Park J H, Kim K H, et al. Simulation of hot gas flow in a high voltage circuit breaker with P1 radiation model [J]. Br. J. Surg., 2013, 79(6): 592–594.
- [22] Lu X J, Wang T. Investigation of radiation models in entrained-flow coal gasification simulation [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2013, 67(4): 377–392.
- [23] Xue S, Hui S E, Liu T S, et al. Experimental investigation on NO_x emission and carbon burnout from a radially biased pulverized coal whirl burner [J]. Fuel Process. Technol., 2009, 90(9): 1142–1147.
- [24] 周继军, 彭伟功. 氮氧化物的生成机理及控制技术 [J]. 内江科技, 2006, 27(6): 127–128.
Zhou J J, Peng W G. Formation mechanism and control technology of nitrogen oxides [J]. Neijiang Science and Technology, 2006, 27(6): 127–128.
- [25] 王海涛. 低氮燃烧技术在煤粉锅炉上的应用分析 [J]. 广东科技, 2013, 22(14): 191.
Wang H T. Application analysis of low nitrogen combustion technology in pulverized coal boiler [J]. Guangdong Science & Technology, 2013, 22(14): 191.
- [26] 王顶辉. 煤粉锅炉燃烧特性及降低氮氧化物生成的技术研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2014: 13–31.
Wang D H. Study on combustion characteristics and lower- NO_x technology for pulverized coal boiler [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014: 13–31.
- [27] 聂虎, 余春江, 柏继松, 等. 生物质燃烧中硫氧化物和氮氧化物生成机理研究 [J]. 热力发电, 2010, 39(9): 21–26.
Nie H, Yu C J, Bai J S, et al. Study on formation mechanisms of sulphide and nitrogen in combustion of biomass [J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(9): 21–26.
- [28] 刘伟军, 马其良. SO_x 污染控制技术的现状与发展 [J]. 能源研究与信息, 2003, 19(1): 1–9.
Liu W J, Ma Q L. Current situation and development of SO_x pollution control technology [J]. Energy Research and Information, 2003, 19(1): 1–9.