

不同二次风角度影响循环流化床锅炉燃烧特性研究

高捷敏¹, 刘峰^{2*}, 廖晓炜², 徐洪涛¹

¹上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

²中国特种设备检测研究院, 北京

收稿日期: 2022年12月13日; 录用日期: 2023年1月23日; 发布日期: 2023年1月30日

摘要

针对循环流化床锅炉在实际运行过程中存在的流动不均匀和炉膛中心氧气供应不足的问题。本文对某240 t/h循环流化床锅炉进行了数值模拟分析, 分析不同二次风入射角度对内部流动和燃烧特性的影响, 结果表明: 二次风角度 α 过小时, 纵向穿透深度小, 不利于密相区的气固混合; 二次风角度 α 过大时, 横向穿透深度小, 不能及时的为炉膛中部的燃烧供氧。二次风角度为 $\alpha = 30^\circ$ (工况三)时, 床料和温度场分布较均匀。

关键词

循环流化床锅炉, 二次风, 燃烧特性, 数值模拟

Study on the Combustion Characteristics of the Circulating Fluidized Bed Boiler with Different Secondary Air Angles

Jiemin Gao¹, Feng Liu^{2*}, Xiaowei Liao², Hongtao Xu¹

¹School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing

Received: Dec. 13th, 2022; accepted: Jan. 23rd, 2023; published: Jan. 30th, 2023

Abstract

Aiming at the problems of uneven flow and insufficient oxygen supply in the center of the furnace

*通讯作者。

in the actual operation of circulating fluidized bed boiler. In this paper, a 240 t/h circulating fluidized bed boiler has been numerically simulated, and the influence of different secondary air inclination angles on the internal flow and combustion characteristics were analyzed. The results show that the small secondary air angle α resulted in a small vertical penetration depth, which is not conducive to the gas-solid mixing in the dense phase zone; when the secondary air angle α is too large, the horizontal penetration depth is small, and the combustion in the middle of the furnace cannot be supplied with enough oxygen in time. When the secondary air angle α is 30° (Condition III), the bed material and temperature distributions are even.

Keywords

Circulating Fluidized Bed Boiler, Secondary Air, Combustion Characteristics, Numerical Simulation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

循环流化床燃烧技术是一种清洁燃煤技术，燃烧过程涉及气固流动、燃烧反应以及相间传热传质等[1][2]，具有较高的燃烧效率和燃料适应性[3]。

二次风系统是循环流化床锅炉中研究重点之一[4][5]，其一方面能对密相区进行充分预混，有利于维持床温，另一方面让床料分布更加均匀，改善炉膛内壁磨损严重的情况[6]。杨建华等[7]对循环流化床锅炉进行二次风射程试验时，发现通过增加喷口直径、二次风速、喷入点位置可以提升二次风穿透能力。程乐鸣等[8]对循环流化床锅炉二次风射流进行 CFD 数值模拟，研究其二次风风速等对炉膛物料浓度的分布和射流深度的影响。彭建升等[9]以新疆某热电厂 320 t/h 循环流化床锅炉为研究对象，并对二次风系统进行改造，最终使 NO_x 排放值从 400 mg/m^3 降至到 50 mg/m^3 以下，同时床温、带负荷能力、减温水量等均有一定程度的改善。Zhang 等[10]研究发现不同二次风配风方式会影响燃烧过程以及炉膛内的温度分布。Yan 等[11]研究了二次风对烟气的影 响，结果表明沿着炉子宽度，侧壁附近的氧气消耗几乎是中间部分氧气消耗的两倍。Zheng 等[12]通过实验发现与一次风相比，二次风对床料的影响较小，但是随着二次风配比的增加会导致床料在密相区聚集。Xie 等[13]对工业循环流化床锅炉进行了模拟，结果表明二次风配比增加可以有效降低 NO_x 排放，但对 SO_2 的降低没有显著影响。

综上所述，二次风对炉内燃烧产生了重要的影响，但随着对大型循环流化床的可靠性要求越来越高，对锅炉布置要求也越来越高。在目前常用的二次风布置中，将面临二次风穿透能力不足导致炉膛中心氧气供应不足[14]、燃烧不充分[15]的问题。虽然通过加大二次风配比[16][17]可以改善锅炉燃烧和流动不均匀性，但是会导致风机耗能加大，且会影响颗粒的向上流动。本文针对循环流化床锅炉存在的流动不均匀、炉膛中心氧气供应不足的问题，通过数值模拟的方法，研究不同二次风入射角度对炉膛内部流动和燃烧特性的影响的研究，提出改进方案，帮助循环流化床锅炉实现高效和安全运行。

2. 锅炉概述

本文以某 240 t/h 循环流化床锅炉为模拟研究对象按 1:1 的比例进行三维建模。考虑到模拟过程的复杂程度，对研究模型进行简化，仅保留炉膛部分，如图 1 所示。该锅炉将炉膛底部设置为一次风入口；在炉膛下部前墙设置六个进煤口，直径为 800 mm；二次风口共有 25 个，前墙、后墙分别布置 12、13 个，

直径均为 240 mm；两个烟气出口设置在炉膛后墙顶部；返料口设置在炉膛后墙下部。

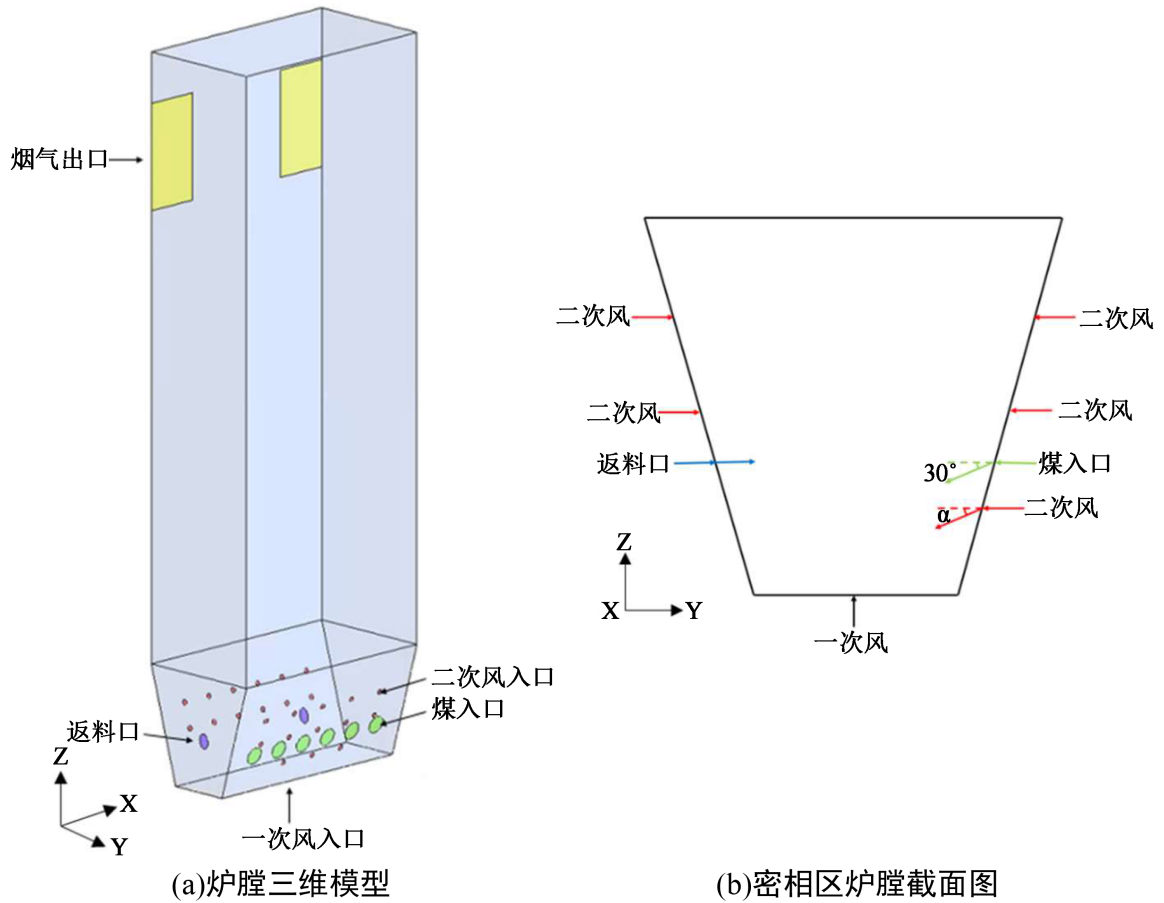


Figure 1. Furnace physical model diagram
图 1. 炉膛物理模型图

3. 数学模型及参数设置

3.1. 数学模型

本文主要模拟循环流化床锅炉内部的燃烧及各组分的分布，因此选择欧拉方法中的欧拉模型，其中包括气相和固相的连续性方程、动量守恒方程和能量守恒方程。

1) 连续性方程

气相：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \bar{v}_g) = \sum [\dot{m}_{sg} - \dot{m}_{gs}] + \dot{S}_g \quad (1)$$

固相：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \bar{v}_s) = \sum [\dot{m}_{gs} - \dot{m}_{sg}] + \dot{S}_s \quad (2)$$

2) 动量守恒方程

气相：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g \bar{v}_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \bar{v}_g \bar{v}_g) = -\alpha_g \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_g + \alpha_g \rho_g g + K_{sg}(\bar{v}_s - \bar{v}_g) + \sum(\dot{m}_{sg} \bar{v}_{sg} - \dot{m}_{gs} \bar{v}_{gs}) \quad (3)$$

固相:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \bar{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \bar{v}_s \bar{v}_s) = -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \bar{\tau}_s + \alpha_s \rho_s g + K_{gs}(\bar{v}_g - \bar{v}_s) + \sum(\dot{m}_{gs} \bar{v}_{gs} - \dot{m}_{sg} \bar{v}_{sg}) \quad (4)$$

3) 能量守恒方程

气相:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g h_g) + \nabla \cdot [(\alpha_g \rho_g h_g + p_g) \bar{v}_g] = \bar{\tau}_g \cdot \nabla \bar{u}_g - \nabla \cdot \bar{q}_g + \dot{S}_{g,q} + Q_{sg} + \sum[\dot{m}_{sg} h_{sg} - \dot{m}_{gs} h_{gs}] \quad (5)$$

固相:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s h_s) + \nabla \cdot [(\alpha_s \rho_s h_s + p_s) \bar{v}_s] = \bar{\tau}_s \cdot \nabla \bar{u}_s - \nabla \cdot \bar{q}_s + \dot{S}_{s,q} + Q_{gs} + \sum[\dot{m}_{gs} h_{gs} - \dot{m}_{sg} h_{sg}] \quad (6)$$

式中: α_g 、 α_s 分别为气固相的体积分数; ρ_g 、 ρ_s 分别为气固相的密度; \bar{v}_g 、 \bar{v}_s 分别为气固相的速度; K_{sg} 、 K_{gs} 分别为气固相间的曳力系数; p_g 、 p_s 分别为气固相的压力; $\bar{\tau}_g$ 、 $\bar{\tau}_s$ 分别为气固相应力应变张量; \dot{m}_{gs} 、 \dot{m}_{sg} 分别为气固相间质量交换; h_g 、 h_s 分别为气固相的焓值; $S_{g,q}$ 、 $S_{s,q}$ 为包含化学反应热和其他体积热源的源项。

该模拟为三维非稳态气固两相流, 采用半隐格式压力关联方程算法(SIMPLE)实现压力与速度耦合计算, 湍流模型选择 Realizable k- ϵ 模型, 气固相间曳力模型选择 Gidaspow 曳力模型, 选择 Syamlal 模型作为颗粒相间曳力模型; 使用 UDF 定义了燃煤反应中的挥发分析出反应以及焦炭燃烧反应, 用有限速率/涡耗散模型实现可燃气体燃烧反应; 根据循环流化床锅炉内部复杂的光学环境, 选择了 P1 辐射模型作为辐射换热模型, 并使用 Gunn 模型描述相间传热模型。模拟时间步长为 0.003 s, 模拟至炉内流动与燃烧较为稳定后进行数据分析。

使用 ICEM 软件对该模型进行网格划分, 考虑到下炉膛部分有颗粒浓度较高, 且相间作用较为剧烈, 而上炉膛部分颗粒浓度较低, 相间作用较弱, 因此需要对下炉膛部分进行网格加密。上炉膛部分采用结构化六面体网格, 并对下炉膛各进口进行加密, 最终得到网格数为 1,076,888。

3.2. 边界条件

该模拟参数如表 1 所示, 将一次风、二次风入口设置为气相速度入口边界条件, 给煤口设置为质量流量入口边界条件, 将二次风的总风量和给煤口的总流量进行均匀分配; 壁面温度为定温边界条件, 上、下炉膛分别设置为 800 K 和 1000 K。

Table 1. Coal quality parameters

表 1. 煤质参数

| 模拟参数 | 一次风 | | 二次风 | | 给煤口 | |
|------|-------------------|-----|-------------------|-----|-------|-----|
| | 总风量 | 风温 | 总风量 | 风温 | 总流量 | 风温 |
| 单位 | m ³ /h | K | m ³ /h | K | t/h | K |
| 数值 | 148,283 | 503 | 121,322 | 463 | 51.39 | 373 |

3.3. 煤质参数

本文中使用的煤质参数如表 2 所示。

Table 2. Coal quality parameters
表 2. 煤质参数

| 参数名称 | 符号 | 单位 | 数值 |
|-------|-----------|-------|-------|
| 收到基碳 | C_{ar} | % | 42.22 |
| 收到基氢 | H_{ar} | % | 2.32 |
| 收到基氧 | O_{ar} | % | 3.56 |
| 收到基氮 | N_{ar} | % | 0.51 |
| 收到基硫 | S_{ar} | % | 0.20 |
| 收到基灰份 | A_{ar} | % | 37.79 |
| 收到基水份 | W_{ar} | % | 13.40 |
| 挥发份 | V_{daf} | % | 21.39 |
| 低位发热量 | Q_{net} | kJ/kg | 15960 |

3.4. 数学模型验证

为保证本文数值模拟的准确性,使用文献[18]中的模拟参数,结合本文的数值模拟方法对文献的循环流化床燃烧实验装置进行了数值模拟,其模拟结果如图 2 所示。

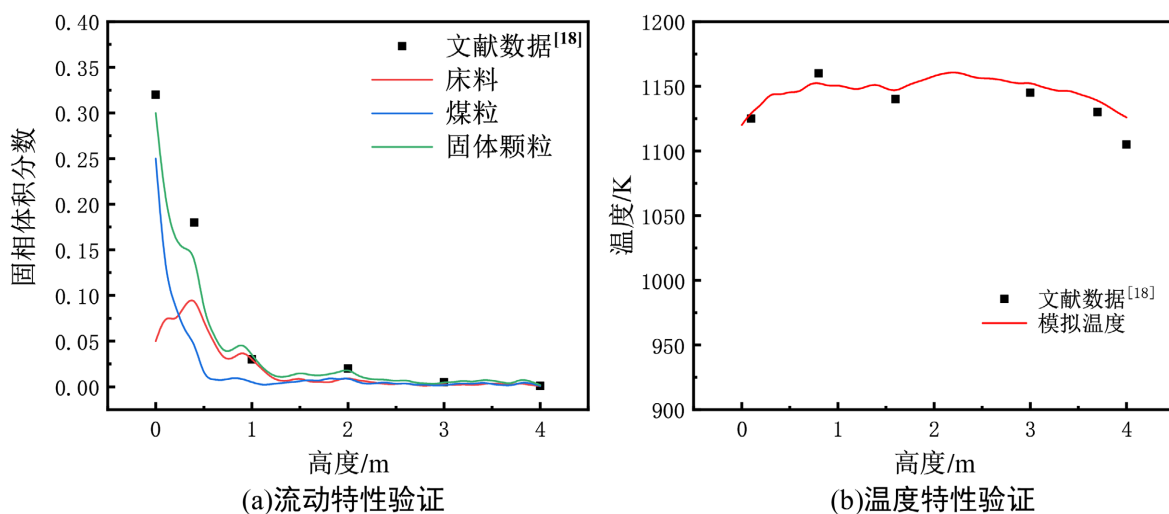


Figure 2. Numerical simulation method verification

图 2. 数值模拟方法验证

其中图 2(a)为流动特性的对比,红色曲线为床料体积分数,出现了先增大后减小的趋势,床料大部分聚集于密相区;蓝色曲线为煤粒体积分数,由于煤粉大量参与反应因此煤粒体积分数迅速下降;绿色为总固体颗粒的体积分数,其大致趋势以及数值均与文献中数据相近。图 2(b)为温度值的对比,可以看到模拟的结果与文献中的实验结果较为接近,温差均在 15 K 以内。因此我们认为本文中的数值模拟方法与实验结果吻合良好,增加了该数值模拟方法的可信度。

4. 结果与讨论

二次风在炉膛内主要起到补充燃烧以及增强炉膛内的扰动的作用,工况一到五分别对应 α 为 $0^\circ, 15^\circ,$

30°, 45°以及 60°。

4.1. 流动特性分析

由图 3 可知, 随着 α 的增大, 二次风入口区域风速逐渐减小, 这是因为 α 增大二次风进入时的纵向速度不断增大, 而这个速度与一次风速度方向相反, 故出现了入口区域的气相速度较小。此外, 随着 α 的增大, 逐渐出现了炉膛中心处气相速度较小而近壁面处速度较大的情况, 这是因为 α 的增大使得二次风的横向穿透深度逐渐减小。

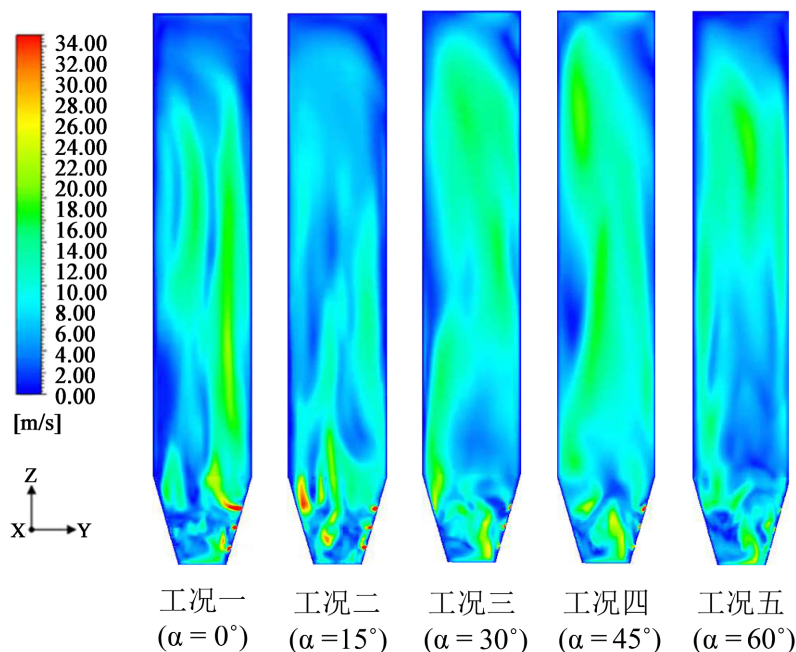


Figure 3. Vapor velocity distribution of X = 0 section under different conditions
图 3. 不同工况下 X = 0 截面气相速度分布

从图 4 中可以看出, 随着 α 的增大, 床料在炉膛内受到的影响越大, 其原因为二次风的角度增大使得二次风对床料的作用更靠下, 影响了更多的床料, 增强了扰动。工况一的二次风入口为水平方向, 因此对床料的作用极小, 不利于炉膛内部的流动与传热; 工况二类似于工况一, 最底部的床料分布几乎没有改变, 工况三、四拥有较好的床料分布, 工况五存在部分床料堆积在底部炉膛近壁面处的现象。

图 5 为不同二次风入口角度下的 Z = 1 m 床料体积分数分布云图。由图可知, 工况一图下方出现了高浓度床料堆积, 这是因为 α 为 0° 的情况下, 二次风直接将一部分床料吹至炉膛壁面处; 工况二、工况三和工况四中炉膛中心有较多的床料分布, 整个平面上的分布较为平均; 工况五中的床料分布整体体积分数较低。

结合图 4 与图 5 可知工况一、二受到二次风的影响小, 不利于密相区的气固混合, 工况三、四表现较为相似, 床料分布均匀, 工况五出现了部分床料堆积的现象。从流动特性分析可知, 工况三($\alpha = 30^\circ$)、工况四($\alpha = 45^\circ$)都表现了良好的流动特性。

4.2. 温度场分布

图 6 为不同二次风入口角度下的 x 方向中心截面处温度分布云图。由图可见, 工况一中下炉膛温度

低，其原因为该工况下二次风对没有作用到密相区底部的床料，进入的煤颗粒不能较好的完成破碎、燃烧的过程，同时没有为底部的燃烧提供充足的氧气，导致低温区域较多；工况二在炉膛中部出现高温区域，但该工况下二次风对床料的作用较为有限，因此高温区的温度较低；工况三在较低高度处就出现高温区域，高温区域温度较高，整体温度分布平均；工况四在炉膛上部出现了较大面积的高温区域；工况五的下炉膛同样出现较大的低温区域，而近壁面处高温区域较多，不利用炉内高效燃烧，其原因为该工况下二次风的横向穿透深度较小，在运行过程中不能为炉膛中心提供充足的氧气。

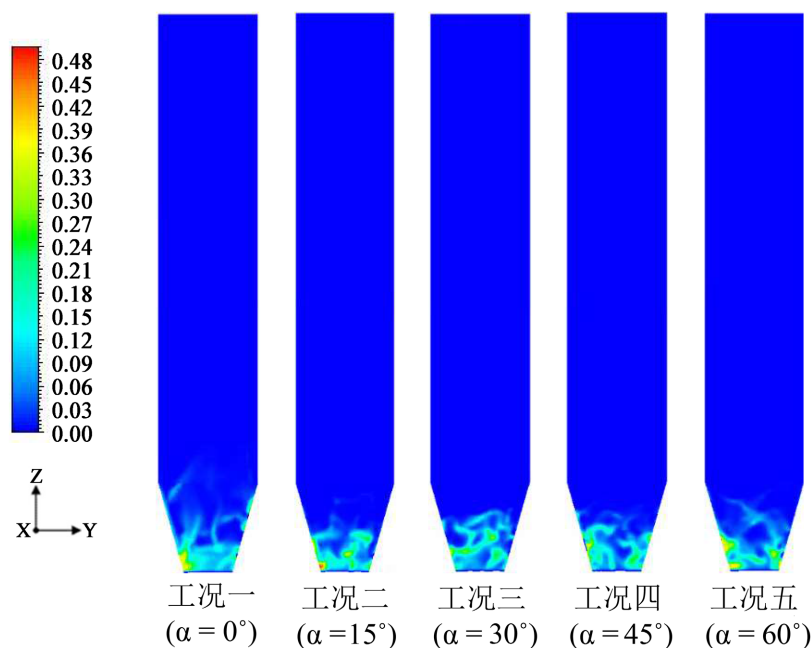


Figure 4. Distribution of bed material volume fraction of $X = 0$ section under different conditions

图 4. 不同工况下 $X = 0$ 截面床料体积分数分布

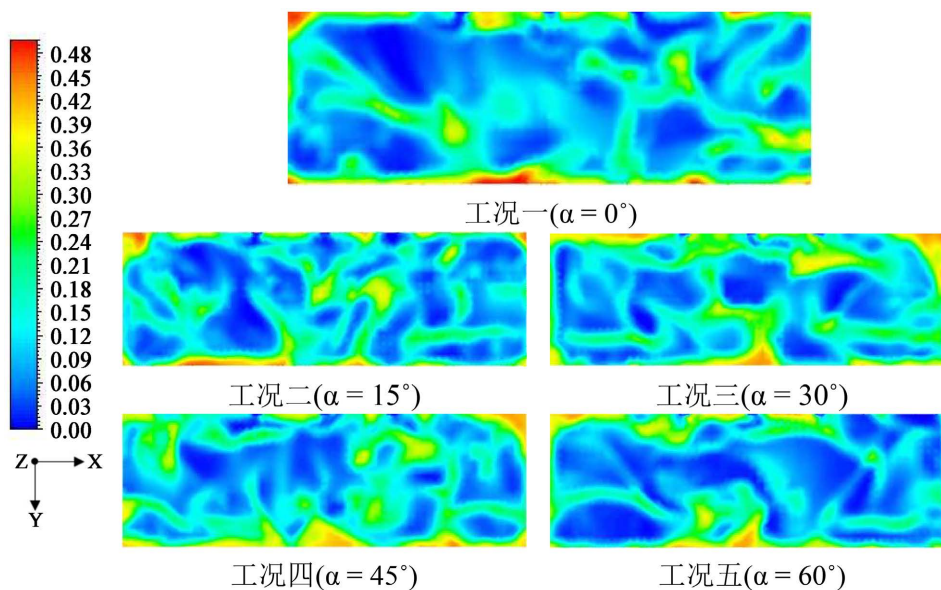


Figure 5. Distribution of bed material volume fraction of $Z = 1$ m section under different conditions

图 5. 不同工况下 $Z = 1$ m 截面床料体积分数分布

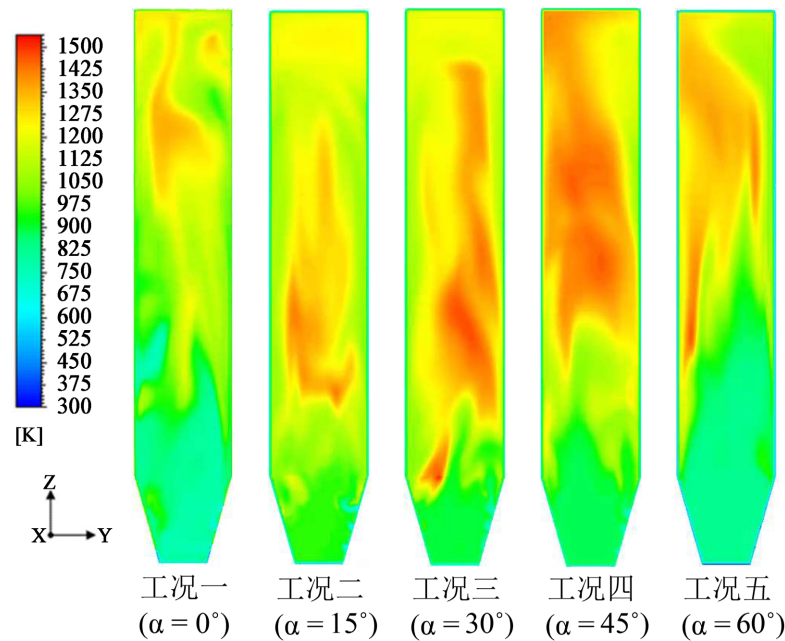


Figure 6. Temperature distribution of Y-Z section under different conditions
图 6. 不同工况下 Y-Z 截面温度分布

图 7 为不同二次风入口角度下的 z 方向平均温度变化曲线。从图中可以看出 $\alpha = 0^\circ$ 时, 整体温度很低, 最高温度仅有 1250 K; $\alpha = 30^\circ$ 时最早出现高温区域, 在 8 m 处就出现了约 1300 K 的高温区域; $\alpha = 45^\circ$ 时出现最高温度, 最高温度约为 1450 K; $\alpha = 60^\circ$ 时最晚出现高温区域, 12 m 处才出现 1200 K 的温度。所以根据温度场分析, 可知工况 3 燃烧效果最好, 温度分布最均匀。

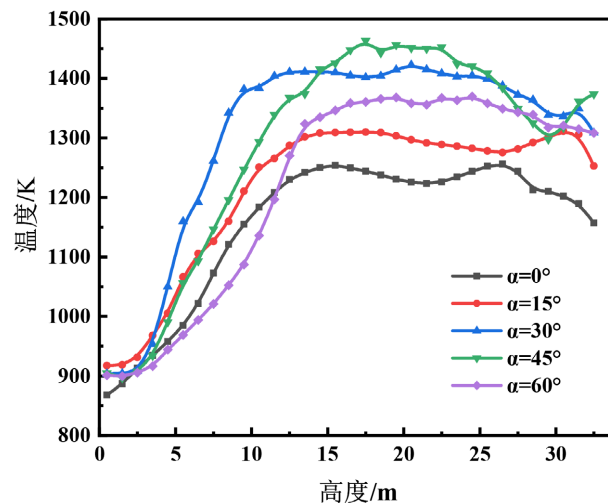


Figure 7. Average temperature change curve in z direction under different working conditions
图 7. 不同工况下 z 方向平均温度变化曲线

4.3. NO_x 质量浓度分析

图 8 为不同工况下 NO_x 质量浓度曲线。由图可见, 随着 α 的增大炉膛下部的 NO_x 质量浓度逐渐增加, 但随着高度的增加, NO_x 的质量浓度相差逐渐变小。其原因是 α 较大时, 炉膛下部氧气浓度较高, 形成

了富氧燃烧区域。

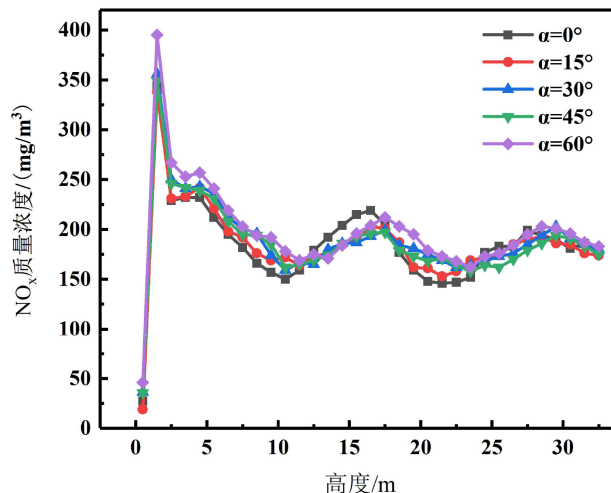


Figure 8. Variation curve of average mass concentration of NO_x in z direction under different conditions
图 8. 不同工况下 Z 方向 NO_x 质量浓度变化曲线

综合流动特性、温度场分布以及 NO_x 排放的特点可知, 工况一、二的二次风纵向穿透深度小, 对床料作用小, 不利于密相区的气固混合; 工况五的二次风横向穿透深度过小, 不能及时补充炉膛中心燃烧需要的氧气, 致使炉膛下部温度过低; 工况三、四床料分布都较为均匀, 工况四最高温度略高于工况三, 但工况三温度分布更加均匀。综上所述, 工况三($\alpha = 30^\circ$)为最佳二次风角度。

5. 结论

本文利用数值模拟的方法探究了不同二次风入射角度对炉膛内部流动和燃烧特性的影响, 其结论如下:

- 1) 随着 α 的增大, 二次风入口区域风速逐渐减小, 且出现中间速度低而近壁面处速度高的现象。
- 2) 随着 α 的增大, 纵向分速度增大, 纵向穿透深度增大; 初始时大量的床料位于炉膛底部, 纵向穿透深度大会对更多的床料产生作用, 有利于气固混合效果。
- 3) 当 α 过小时, 其纵向穿透深度小, 影响煤颗粒的破碎和燃烧过程; 当 α 过大时, 其横向穿透深度小, 不能及时的辅助炉膛中心部分的燃烧, 易造成较大的气体不完全燃烧损失。

综合考虑流动与燃烧的结果, 工况三($\alpha = 30^\circ$)的角度设置最为适宜。

基金项目

国家重点研发计划项目(2021YFF0600605)。

参考文献

- [1] Liu, Z.C., Zhong, W.Q., Shao, Y.J. and Liu, X.J. (2020) Exergy Analysis of Supercritical CO_2 Coal-Fired Circulating Fluidized Bed Boiler System Based on the Combustion Process. *Energy*, **208**, Article ID: 118327. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118327>
- [2] 张文忠. 循环流化床锅炉技术的现状及发展前景[J]. 科技创新导报, 2019, 16(5): 66-67.
- [3] 刘雪敏, 尹炜迪, 汪佩宁, 杨海瑞. 循环流化床锅炉床压降对其燃烧效率的影响[J]. 煤炭学报, 2016, 41(10): 2484-2489.
- [4] 苗苗, 张纆, 吕俊复, 杨海瑞, 张凯. 流化床燃烧中 N_2O 生成机理与减排技术[J]. 清华大学学报(自然科学版),

- 2020, 60(6): 507-517.
- [5] Li, J.-J., Zhang, M., Yang, H.-R., Lu, J.-F., Zhao, X.-X. and Zhang, J.-C. (2016) The Theory and Practice of NO Emission Control for Circulating Fluidized Bed Boilers Based on the Re-Specification of the Fluidization State. *Fuel Processing Technology*, **150**, 88-93. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.05.004>
- [6] 陈继辉, 卢啸风, 刘汉周, 刘佳. 循环流化床二次风射程的数值模拟和实验[J]. 动力工程, 2007, 27(6): 895-898.
- [7] 杨建华, 杨海瑞, 岳光溪. 循环流化床二次风射流穿透规律的试验研究[J]. 动力工程, 2008, 28(4): 509-513.
- [8] 郑成航, 程乐鸣, 周星龙, 等. 300MW 单炉膛循环流化床锅炉二次风射程的数值模拟[J]. 动力工程, 2009, 29(9): 801-805+812.
- [9] 彭建升, 王家兴, 程昌业, 杨勇军. 循环流化床锅炉燃用准东煤 NO_x 超低排放技术研究[J]. 热能动力工程, 2020, 35(10): 65-71.
- [10] Zhang, Y., Zhu, J.G., Lyu, Q.G. and Pan, F. (2020) Experimental Study on Combustion Characteristics of Pulverized Coal Based on Partial Gasification of Circulating Fluidized Bed. *Energy & Fuels*, **34**, 989-995. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b03733>
- [11] Yan, J., Lu, X.F., Wang, Q.H., Kang, Y.H., Li, J.B., Xu, Z., et al. (2019) Study on the Influence of Secondary Air on the Distributions of Flue Gas Composition at the Lower Part of a 600 MW Supercritical CFB Boiler. *Fuel Processing Technology*, **196**, Article ID: 106035. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.03.028>
- [12] Zheng, W.J., Zhang, M., Zhang, Y., Lyu, J.F. and Yang, H.R. (2019) The Effect of the Secondary Air Injection on the Gas-Solid Flow Characteristics in the Circulating Fluidized Bed. *Chemical Engineering Research and Design*, **141**, 220-228. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.10.038>
- [13] Xie, J., Zhong, W.Q., Shao, Y.J., et al. (2017) Simulation of Combustion of Municipal Solid Waste and Coal in an Industrial-Scale Circulating Fluidized Bed Boiler. *Energy & Fuels*, **31**, 14248-14261. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b02693>
- [14] 张吕鸿, 刘萌萌, 孙永利, 周雪松, 姜斌. 基于 CFD 的循环流化床锅炉二次风入口结构的改进设计[J]. 化工进展, 2013, 32(10): 2518-2522.
- [15] Qi, G.L., Zhang, S.S., Liu, X.M., et al. (2017) Combustion Adjustment Test of Circulating Fluidized Bed Boiler. *Applied Thermal Engineering*, **124**, 1505-1511. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.005>
- [16] 彭丹, 王贲, 李威, 许超. 基于空气分级的循环流化床锅炉低氮燃烧模拟[J]. 锅炉技术, 2020, 51(5): 30-36.
- [17] 史丹君, 张建. 循环流化床锅炉低氮燃烧的 CFPD 数值模拟[J]. 锅炉技术, 2020, 51(1): 30-36.
- [18] Zhou, W., Zhao, C.S., Duan, L.B., Qu, C.R. and Chen, X.P. (2011). Two-Dimensional Computational Fluid Dynamics Simulation of Coal Combustion in a Circulating Fluidized Bed Combustor. *Chemical Engineering Journal*, **166**, 306-314. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.09.048>