

风量配比影响循环流化床锅炉燃烧特性研究

陈小龙¹, 王建宁², 李宇翔^{1*}, 黄苑平³, 杨海东³, 高捷敏⁴, 徐洪涛⁴

¹榆林市特种设备检验检测院, 陕西 榆林

²长庆油田公司第九采油厂, 宁夏 银川

³榆能榆神热电有限公司, 陕西 榆林

⁴上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

收稿日期: 2021年7月29日; 录用日期: 2021年10月7日; 发布日期: 2021年10月14日

摘要

循环流化床(CFB)锅炉因其燃烧效率高、燃料适应性好和排放污染少等优点得到了广泛的应用。本文对某240 t/h循环流化床锅炉进行了数值模拟研究, 分析改变一二次风配比对内部流动和燃烧特性的影响, 结果表明: 一次风所占比例 θ 过小, 炉膛内部流化效果差; 一次风所占比例 θ 过大, 不能为炉膛中心的燃烧及时供氧。一次风占比 $\theta = 0.55$ 时(工况三)能得到较均匀的床料和温度场分布, 同时NO_x出口质量浓度最低。

关键词

循环流化床锅炉, 风量配比, 燃烧特性, 数值模拟

Study on the Combustion Characteristics of the Circulating Fluidized Bed Boiler Influenced by Air Volume Ratios

Xiaolong Chen¹, Jianning Wang², Yuxiang Li^{1*}, Yuanping Huang³, Haidong Yang³, Jiemin Gao⁴, Hongtao Xu⁴

¹Yulin Special Equipment Testing and Research Institute, Yulin Shaanxi

²The 9th Oil Production Plant of Changqing Oilfield Company, Yinchuan Ningxia

³Yuneng Yushen Thermal Power Co., Ltd., Yulin Shaanxi

⁴School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jun. 29th, 2021; accepted: Oct. 7th, 2021; published: Oct. 14th, 2021

*通讯作者。

文章引用: 陈小龙, 王建宁, 李宇翔, 黄苑平, 杨海东, 高捷敏, 徐洪涛. 风量配比影响循环流化床锅炉燃烧特性研究[J]. 建模与仿真, 2021, 10(4): 919-928. DOI: 10.12677/mos.2021.104091

Abstract

Circulating fluidized bed (CFB) boilers have been widely used due to the high combustion efficiency, good fuel adaptability and low pollutant emission. This paper conducted a numerical simulation analysis on a 240 t/h circulating fluidized bed boiler to analyze the influence of changing the ratio of primary and secondary air on the internal flow and combustion characteristics. The results show that the small proportion of primary air θ resulted in poor effect of fluidization inside the furnace; too large proportion of primary air θ cannot provide oxygen for the combustion in the center of the furnace timely; when the proportion of primary air θ is 0.55 (Condition III), the bed material and temperature distributions are even, and NO_x concentration at the outlet is the lowest.

Keywords

Circulating Fluidized Bed Boiler, Air Volume Ratio, Combustion Characteristics, Numerical Simulation

Copyright © 2021 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

本循环流化床燃烧技术指小颗粒的燃料和空气在炉膛内处在沸腾状态，是一种清洁燃煤技术，具有燃烧效率高和燃料适应性广等特点[1]，我国目前是世界上循环流化床锅炉数量最多、容量最大的国家。循环流化床锅炉内部的燃烧过程非常复杂，如何通过运行参数的调整，控制循环流化床锅炉内的流动与燃烧，实现燃煤的高效清洁利用是循环流化床锅炉研究的重要课题[2]。

目前循环流化床锅炉燃烧研究主要是提高能源利用率[3] [4]和降低污染物的排放[5] [6]等方面。肖卓楠[7]等以 480 t/h 的循环流化床锅炉为研究对象，对比分析了富氧燃烧与常规燃烧的热经济性，发现富氧燃烧的燃烧焓损失比常规气氛下低，但传热焓损失较高。张奇月[8]等将氧体积分数为 30% 的富氧燃烧循环流化床锅炉与汽水系统相耦合，并于空气燃烧的同等级循环流化床锅炉进行了对比，发现富氧燃烧循环流化床锅炉排烟损失大大减小，热效率高达 94.18%。柯希玮[9]等从循环流化床锅炉燃烧 NO_x 的生成机理出发，总结了众多因素对 NO_x 排放的影响，同时指出了强化循环流化床锅炉低氮燃烧，以尽可能低的成本实现 NO_x 超低排放仍然是未来的研究热点。

在循环流化床锅炉燃烧过程中，一次风与二次风都对炉内燃烧产生了重要的影响[10]，因而对一、二次风进行调节是改造和优化过程中最常见的方法。马有福[11]等对 CFB 锅炉的一次风均匀性进行了数值模拟研究，提出在进风口处装设导流锥使风量分配均匀，以提高炉膛内部流化质量；杨雪芬[12]等使用 CPFD 方法对 CFB 锅炉二次风穿透特性进行了研究，发现抬高二次风喷口位置有利于二次风的穿透效果，使燃烧更加充分；官伟[13]针对一台 90 t/h 循环流化床锅炉出现的排烟温度高、 NO_x 浓度高等问题进行了炉膛、配风系统改造，发现一、二次风系统改造，强化循环床锅炉分级燃烧的强度，从而降低 NO_x 原始排放量。彭丹[14]等使用数值模拟方法对某循环流化床锅炉的二次风系统中喷口位置、一、二次风配比等进行改进，发现当下二次风率降至 5%，中心喷口风率升为 9% 时，此时 NO_x 水平明显降低，温度场较为稳定。

综上所述，一、二次风可以有效调节炉内燃烧效果，降低 NO_x 排放，是目前循环流化床锅炉研究热点之一。本文对某 240 t/h 循环流化床电站锅炉进行数值模拟研究不同一、二次风风量配比对炉膛内部流动燃烧特性的影响，为实现循环流化床锅炉安全稳定、高效、清洁运行提供理论和技术支持。

2. 锅炉概况

本文研究的 240 t/h 循环流化床锅炉整体结构如图 1 所示。图 1(a) 为该锅炉的三维模型图，其中忽略布风板将炉膛底部设置为一次风入口；在炉膛下部前墙设置六个直径为 800 mm 的进煤口，如图 1(a) 中绿色部分所示；二次风口共有 25 个，前墙布置 12 个，后墙布置 13 个，直径均为 240 mm，如图 1(a) 中红色部分所示；两个出口设置在炉膛后墙顶部，如图 1(a) 中黄色部分所示；返料口设置在炉膛后墙下部，如图 1(a) 中紫色部分所示。图 1(b) 为密相区截面图，图中标注了返料口入口为水平方向和二次风入口角度 α 、煤入口角度为向下 30° 。

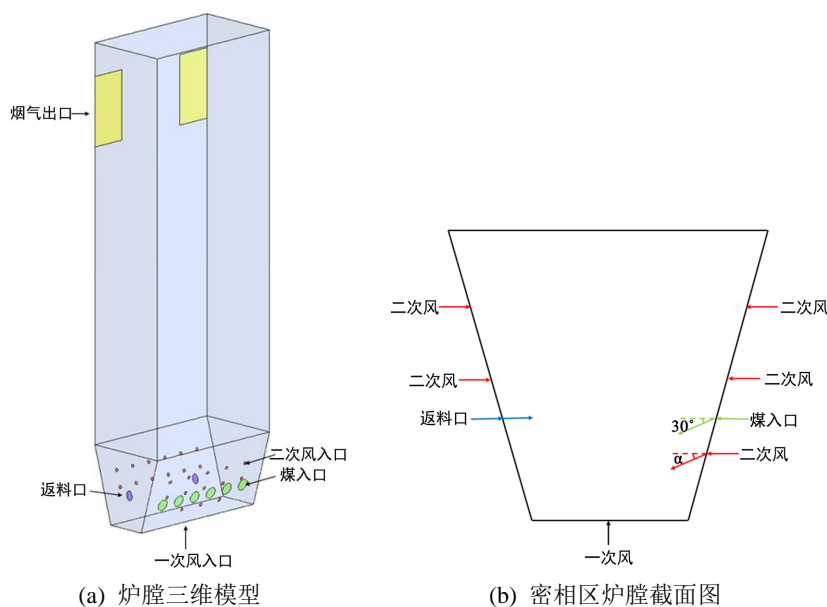


Figure 1. Furnace physical model diagram
图 1. 炉膛物理模型图

3. 数学模型及参数设置

3.1. 数学模型

此次模拟计算中设置一个气相为主相，气相中包含 O_2 、 CO 、 CO_2 、tar、 H_2O 、 NO 、 NH_3 和 N_2 共 8 种成分；设置固相 1 为煤颗粒，粒径大小为 3 mm，其中包括灰分、水分、固定碳以及挥发分四种成分，通过自定义各组分的密度、比热、标准焓和标准熵等参数使得固相 1 的物性接近所选定煤种；设置固相 2 为床料，粒径大小为 1 mm，密度大小为 1200 kg/m^3 ，设定其不参与燃烧反应。设置颗粒粘度模型为 syamlal-obrien 模型，颗粒体积粘度模型为 lun-et-al 模型，摩擦粘度模型为 schaeffer 模型，固相压力和径向分布模型为 syamlal-obrien 模型。

实际中的煤燃烧反应非常复杂，其中的多相流动以及传热传质过程，包含多个均相反应及非均相反应，本文中主要针对煤燃烧过程中三个过程进行模拟，三个过程分别为：煤的挥发分析出、焦炭燃烧和可燃气体燃烧。

1) 挥发分析出的反应式为:



其中, tar 为焦油, 阿伦尼乌斯挥发常数(Arrhenius_devolatilization)为 $1.1\text{e}+05$, 挥发分挥发活化能 E 为 $8.86\text{e}+07$ kJ/mol, 速率计算公式如下:

$$\text{prod} = y_i * C_R / mw \quad (2)$$

$$*rr = 0.01 \text{ Arrhenius_devolatilization} * e^{(E/(8.314*T))} * \text{prod} * C_VOF \quad (3)$$

式中: *prod* 为摩尔分数; *y_i* 为质量分数; *mw* 为摩尔质量; *C_R* 为密度宏; *C_{VOF}* 为体积分宏; **rr* 为反应速率(kmol/(m³·s))。

2) 焦炭燃烧反应式为:



UDF 中涉及的计算有脱附速率(*Rd*)、扩散系数(*diff*)、雷诺数(*Re*)、正反应速率系数(*k_f*)、逆反应速率系数(*k_r*)以及中间变量(*rr'*), 各计算过程不再赘述, 最终反应速率公式[15]为:

$$*rr = \frac{rr' * p_{o2} * 6 * C_VOF}{D_p * 3200} \quad (5)$$

式中: *p_{o2}* 为氧气分压; *D_p* 为颗粒直径。

由于 Fluent 中不自带多相流的反应模型, 因此其中煤燃烧反应中涉及的挥发分析出反应以及焦炭燃烧反应使用用户自定义函数进行设定; 可燃气体燃烧反应为气相间反应, 可通过组分模型进行定义。

3.2. 边界条件设置

为研究不同风量条件下循环流化床锅炉的内部流动和燃烧特性, 如炉膛速度、温度云图分布以及各分组的云图分布, 不同风量配比如表 1 所示。

Table 1. Circumstances of different air volumes

表 1. 不同风量分配情况

工况	一次风占比 θ	一次风风量(m ³ /h)	二次风风量(m ³ /h)
工况一	0.45	121,322	148,283
工况二	0.5	134,802	134,802
工况三	0.55	148,283	121,322
工况四	0.6	161,763	107,842
工况五	0.65	175,243	94,362

其中一次风入口设置为气相速度入口, 进口温度 503 K, 入口方向竖直向上; 二次风入口同样设置为气相速度入口, 进口温度为 463 K, 入口方向为水平向下 30°; 燃料入口设置为质量流量入口, 质量流量为 51.39 t/h, 均匀分配至每个燃料入口, 入口方向为水平向下 30°, 进口入温度为 373 K, 进入组分按工业分析比例输入; 返料口设置为质量流量入口, 使用 UDF 将出口处的颗粒质量流量返回至返料口; 炉膛出口设置为压力出口, 压力值为大气压。

壁面设置为气相采用无滑移, 固相采用部分滑移, 设置镜面反射系数为 0.01, 温度设置为定温条件, 上炉膛设置为 800 K, 下炉膛设置为 1000 K。

初始化时设置床层(固相 2)高度为 0.8 m, 体积分数为 0.55; 设置燃料高度为 0.8 m, 体积分数为 0.3, 其中组分按工业分析比例输入, 温度为 1200 K, 用以引燃。

4. 结果与讨论

4.1. 流动特性研究

图 2 为不同工况下 $X=0$ 截面处气相速度分布。由图可知, 随着一次风量的增加, 炉膛内整体流速呈增加趋势, 这是因为炉膛内部整体流速主要受到一次风速影响; 此外, 随着 θ 的增加, 炉膛内的高速区域的分布逐渐偏向炉膛壁面, 这是因为 θ 的增加使得二次风速逐渐减小, 二次风很难达到炉膛中部, 在一次风作用下在炉膛的近壁面处出现了高速区域。

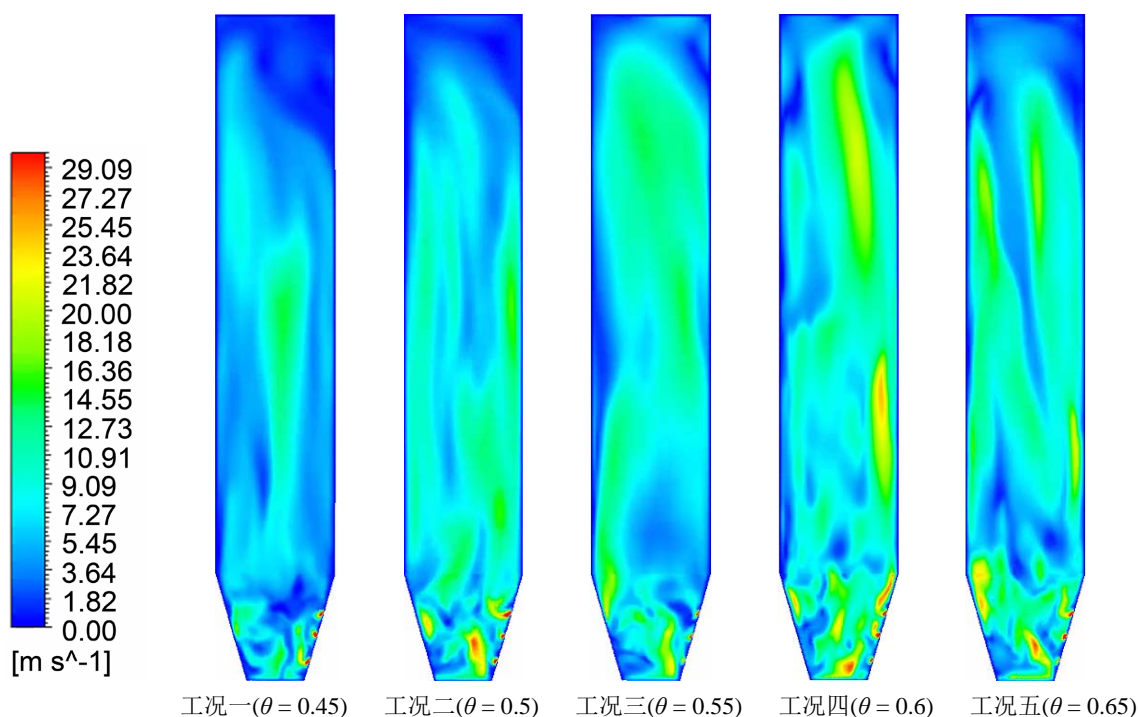


Figure 2. Vapor velocity distribution of $X=0$ section under different conditions

图 2. 不同工况下 $X=0$ 截面处气相速度分布

图 3 不同工况下 $X=0$ 截面床料体积分数分布。从总体趋势可以看出, 随着一次风量的增加, 工况三、四分布较为均匀, 工况一、二出现了炉膛壁面处床料浓度高而炉膛中部较少的情况, 这是因为高速的二次风冲击床料使其大部分分布在炉膛壁面处, 工况五底部床料浓度高, 是因为二次风对床料的扰动不够, 使其在一次风作用下底部堆积了较多床料。

图 4 为不同工况下 $Z=1$ m 截面床料体积分数分布, $Z=1$ m 平面为最下层二次风水平高度。由图可知, 各工况下都表现出了中间床料体积分数高, 四周床料体积分数低的“环-核”结构, 但在 θ 较小时, 壁面处堆积的床料较多, 如工况一与工况二, 再次说明了二次风风速过大会造成大量床料堆积在近壁面处, 不利于密相区的气固混合, 随着 θ 的增大, 图中床料体积分数不断降低。图中工况三与工况四表现出了较为均匀的床料体积分数分布。

图 3 可以得出工况三、四、五的床料分布较为均匀, 但工况五底部堆积了较多的床料, 不利于炉膛内部的流动与换热。图 4 同样印证了工况三与工况四的床料分布较为均匀。综上所述, 从流动特性考虑,

工况三、四的分配比例相对较为适宜。

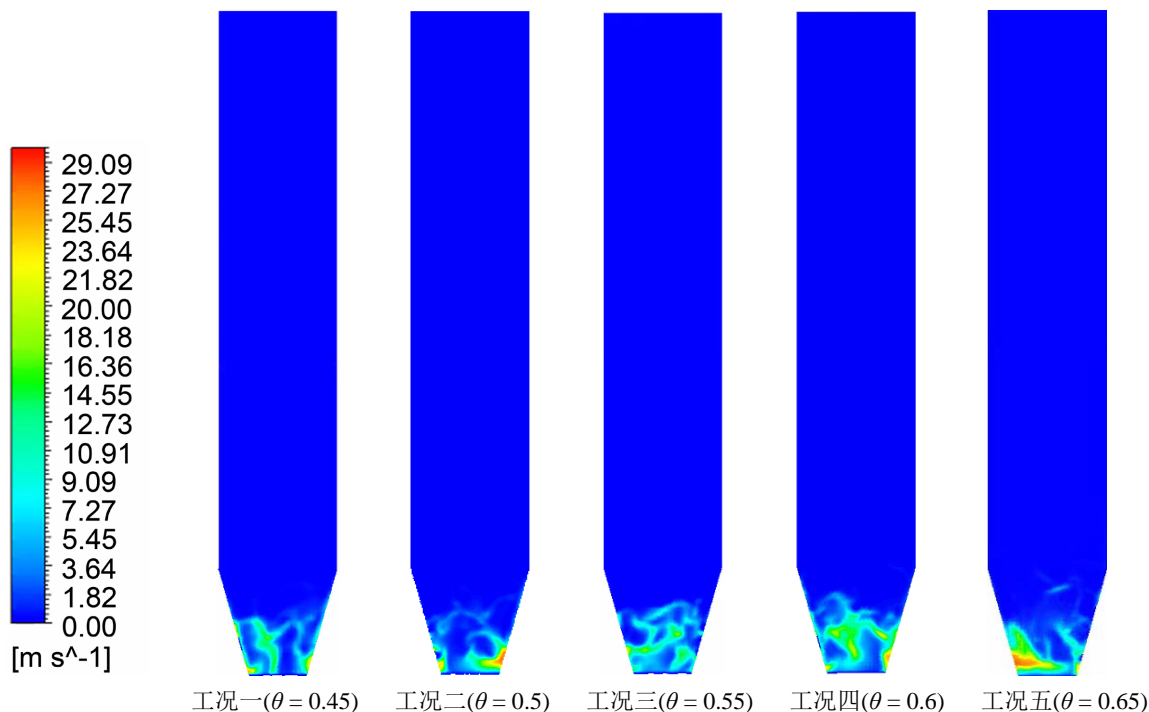


Figure 3. Vapor velocity distribution of $X = 0$ section under different conditions

图 3. 不同工况下 $X = 0$ 截面处气相速度分布

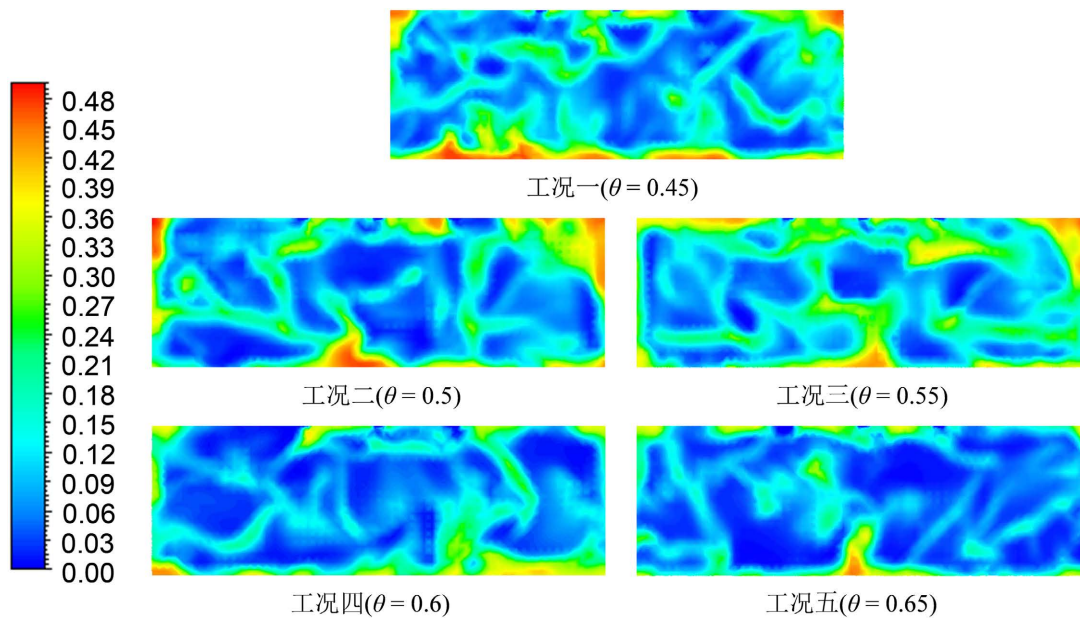


Figure 4. Distribution of bed material volume fraction of $Z = 1$ m section under different conditions

图 4. 不同工况下 $Z = 1$ m 截面床料体积分数分布

4.2. 温度场分布

图 5 为不同工况下 $X = 0$ 截面温度分布。由图可知，炉膛下部温度约为 900~1000 K，随着高度的增

加, 在炉膛中部出现温度最高值, 到了炉膛顶部, 温度由于大量高温气体从出口离开而降低。炉膛内出现高温区域的高度随着 θ 的增加而增大, 这是因为一次风风量的增大, 炉膛内的煤颗粒以及反应生成的 CO 等会被吹浮至更高处发生反应, 如工况五, 炉膛下部有较大的低温区, 高温区出现在较高处, 会导致炉膛下部接收到的热量少, 不利于炉膛内部的传热。

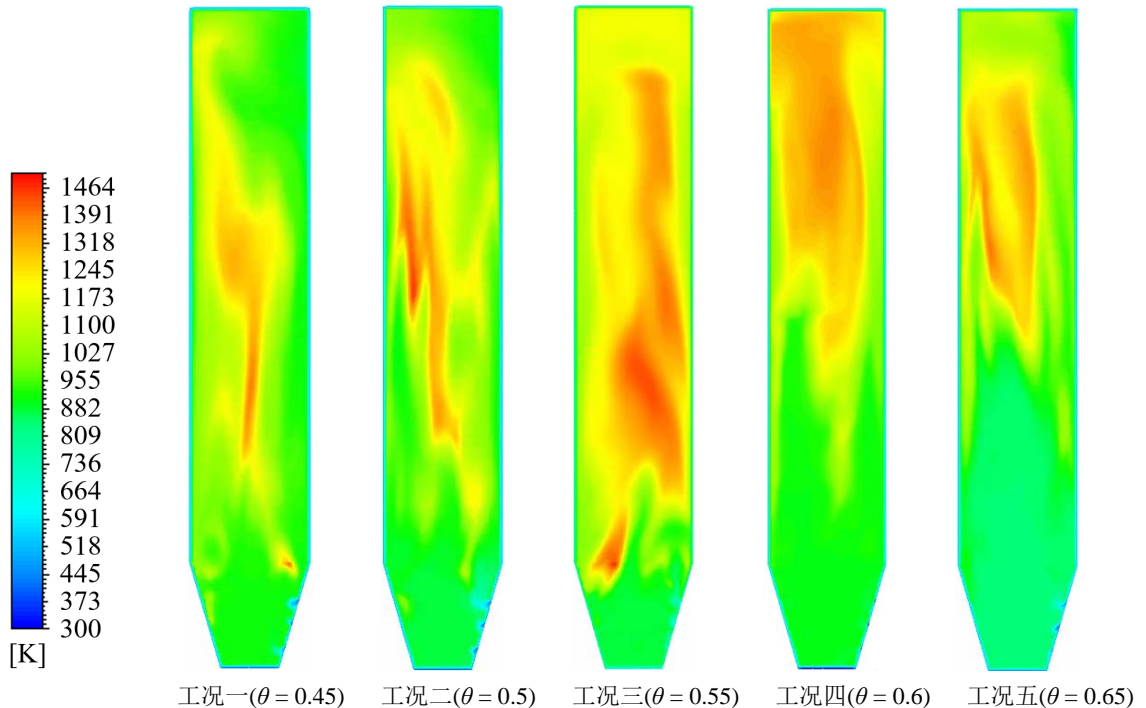


Figure 5. Temperature distribution of $X = 0$ section under different conditions

图 5. 不同工况下 $X = 0$ 截面温度分布

图 6 为不同工况下 Z 方向平均温度变化曲线, 由图可知, θ 为 0.45 时, 虽然密相区的床料分布不均,

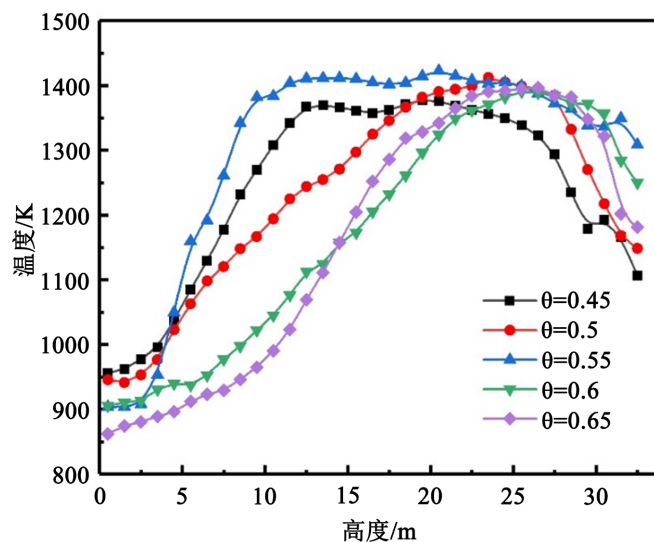


Figure 6. Average temperature change curve in Z direction under different working conditions

图 6. 不同工况下 Z 方向平均温度变化曲线

不利于煤颗粒的破碎和燃烧过程,但此时二次风速度大,大量氧气注入炉膛底部,因此在炉膛底部温度迅速升高。 θ 为 0.5 时,其密相区床料分布同样不均匀,二次风量相较于工况一较小,因此炉膛下部升温速率小于工况一。 θ 为 0.55 时,温度在炉膛中部达到最高温度,约为 1400 K,但随着高度的增加,温度比较稳定,表明该工况下温度分布较为均匀。 θ 为 0.6 与 0.65 的温度分布出现了相似的规律,均为炉膛下部温度低,在炉膛上部出现高温区域,接近 1400 K,其原因为二次风风速过小,对炉膛内的燃烧反应供给氧气不足,导致炉膛下部温度低,而在炉膛顶部出现了温度累积作用,出现了高温区域。

综上所述,随着 θ 的增加,炉膛内出现高温区域的高度不断增加,炉膛下部会出现大面积的低温区域,如工况四、五,不利于对水冷壁的传热。综合温度分布结果,工况三的温度分布较为均匀,且温度较高,因此认为工况三($\theta = 0.55$)为最佳配比方案。

4.3. NO_x 质量浓度分析

图 7 为不同工况下 Z 方向 NO_x 质量浓度变化曲线。由图可知, NO_x 质量浓度在高度入煤口后开始迅速升高,随后下降至 0.002 左右。此外, θ 为 0.45, 0.5, 0.55 的变化规律相似且数值相差很小,而 θ 为 0.6 和 0.65 时 NO_x 质量浓度略高,其原因是 θ 为 0.6 和 0.65 时二次风量较小,燃烧主要发生在炉膛近壁面处,对炉膛内 NO_x 还原性低。图 8 为不同工况下出口 NO_x 平均质量浓度。由图可知,炉膛出口 NO_x 的平均质量浓度相差很小,且没有明显随着 θ 变化而变化的规律,图中显示 θ 为 0.55 时炉膛出口 NO_x 质量浓度最低, θ 为 0.65 时炉膛出口 NO_x 质量浓度最高。

综合流动特性、温度场分布以及组分场分布的特点可知,工况一、二均因一次风速较小而二次风速过大导致密相区流动效果差,从而影响了燃料的破碎、燃烧过程;工况四、五则由于一次风速过大,燃料炉内停留时间短,高温区集中在炉膛上部,炉膛下部温度较低,不利于炉膛的传热;工况三密相区床料分布均匀,炉膛内部高温区域主要分布在炉膛中部且较为均匀,其 NO_x 平均质量浓度同样为各工况下最低。综上所述,工况三($\theta = 0.55$)为最佳配风方案。

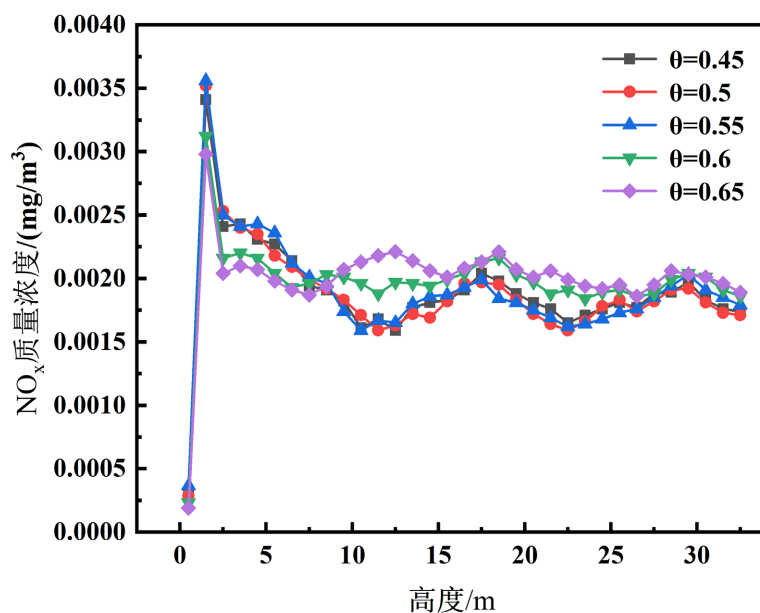


Figure 7. Variation curve of average mass concentration of NO_x in Z direction under different conditions
图 7. 不同工况下 Z 方向 NO_x 质量浓度变化曲线

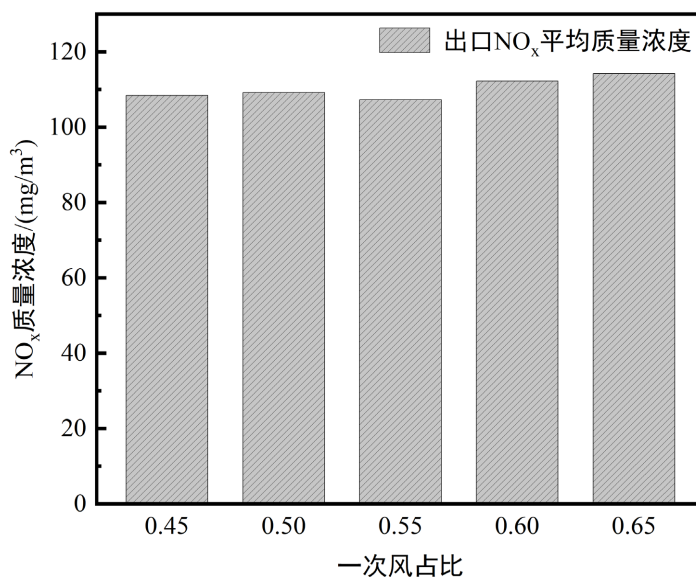


Figure 8. Export NO_x average mass concentration under different conditions

图 8. 不同工况下出口 NO_x 平均质量浓度

5. 结论

本文对某 240 t/h 循环流化床电站锅炉进行数值模拟, 研究不同二次风入射角度对炉膛内部流动燃烧特性的影响, 从流动特性、温度分布和 NO_x 排放进行了分析, 其主要结论如下:

1) 在流动过程中, 一次风起到流化炉膛内部各物料的作用, 二次风起到增强炉膛内部的扰动作用; 在燃烧过程中, 一次风在决定燃料炉内停留时间中起主要作用, 二次风主要起到补充燃烧的作用。

2) θ 过小, 对炉膛内部流化效果差, 不利于密相区的气固混合; θ 过大, 此时二次风风速较低, 难以对炉膛中心提供足量的氧气辅助燃烧。

3) 模拟结果显示, 当 $\theta = 0.55$ 时, 炉膛内部床料、温度分布均匀, 炉膛中部出现较大的高温区域, 且出口 NO_x 质量浓度低, 为最佳配风方案。

基金项目

榆林市 2020 年科技计划项目(YF-2020-017)。

参考文献

- [1] 徐旭常, 吕俊复, 张海. 燃烧理论与燃烧设备[M]. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 2012.
- [2] 姚禹歌, 黄中, 张缙, 杨海瑞, 吕俊复, 岳光溪. 中国循环流化床燃烧技术的发展与展望[J/OL]. 热力发电: 1-8[2021-09-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1111.TM.20210528.1721.002.html>
- [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] Liu, Z., Zhong, W., Shao, Y. and Liu, X. (2020) Exergy Analysis of Supercritical CO₂ Coal-Fired Circulating Fluidized Bed Boiler System Based on the Combustion Process. *Energy*, **208**, 118327. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118327>
- [5] 苗苗, 张缙, 吕俊复, 杨海瑞, 张凯. 流化床燃烧中 N₂O 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.
- [6] 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>

- [7] 肖卓楠, 徐鸿, 陈伟鹏, 张智羽. CFB 锅炉采用富氧燃烧与常规燃烧方式下的热经济性分析对比[J]. 锅炉技术, 2019, 50(1): 26-31.
- [8] 张奇月, 颜勇, 段元强, 段伦博. 超超临界 350 MW 富氧燃烧循环流化床设计[J]. 热力发电, 2020, 49(5): 73-80.
- [9] 柯希玮, 张缦, 杨海瑞, 吕俊复, 郭学茂, 李军, 等. 循环流化床锅炉 NO_x生成和排放特性研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41 (8): 2757-2771.
- [10] 孙经雷. 浅谈循环流化床锅炉一次风与二次风的使用[J]. 煤炭科技, 2016(4): 64-66.
- [11] 马有福, 王凡, 袁益超, 吕俊复, 王子睿. 循环流化床锅炉一次风布风均匀性数值研究[J]. 锅炉技术, 2018, 49(6): 35-41.
- [12] 杨雪芬, 鲁佳易, 薛大勇, 韦立校. 基于 CFPD 模型的循环流化床二次风穿透特性研究[J]. 机电信息, 2020(35): 22-24.
- [13] 官伟. 90 t/h 循环流化床锅炉节能改造优化方案[J]. 中国设备工程, 2020(8): 81-82.
- [14] 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.
- [15] Syamlal, M. and Wittmann, C.V. (1985) Continuous Reaction Mixture Model for Coal Liquefaction Kinetics. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, **24**, 82-90. <https://doi.org/10.1021/i100017a014>