

350MW燃煤锅炉在富氧下掺烧生物质气的数值模拟

曹广懿德, 陈帅*, 胡超

上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海

收稿日期: 2023年6月29日; 录用日期: 2023年8月28日; 发布日期: 2023年9月4日

摘要

为了研究火力燃煤锅炉的碳减排与低氮燃烧技术, 本文通过数值模拟方法研究了不同 O_2/CO_2 体积分数比的富氧条件下四角切圆锅炉内生物质气与煤粉混燃情况。结果表明: 当 O_2 浓度高于29%时, 炉膛整体速度梯度提高, 有利于煤粉的充分混合燃烧, 从而改善了煤粉的燃烧特性; 随着 O_2/CO_2 体积分数比的增加, 炉膛内温度整体是提高的, 有利于提高炉膛内的换热性能; 随着 O_2/CO_2 体积分数比的增加, 炉膛内整体的 CO_2 浓度逐渐提高, 炉膛出口的 CO_2 浓度是70%~77%, 有利于 CO_2 的捕集, 同时, 炉膛内 NO_x 的浓度也逐渐提高, 主要原因是炉膛内的温度随着 O_2 浓度的增加而上升, 由此热力型 NO_x 的产生量更大。

关键词

富氧燃烧, 生物质气, 掺烧比, 数值模拟

Numerical Simulation of Biomass Gas Blending in 350MW Coal-Fired Boiler under Oxygen Enrichment

Guangyide Cao, Shuai Chen*, Chao Hu

School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai

Received: Jun. 29th, 2023; accepted: Aug. 28th, 2023; published: Sep. 4th, 2023

Abstract

In order to study the carbon reduction and low- NO_x combustion technology of thermal coal-fired boiler, this paper investigates the mixing and combustion of biomass gas and pulverized coal in a

*通讯作者。

four-corner cut circle boiler under oxygen-rich conditions with different O_2/CO_2 volume fraction ratios by numerical simulation, and analyzes the flow, heat transfer and combustion processes in the furnace. The results show that: when the O_2 concentration is higher than 29%, the overall velocity gradient in the furnace increases, which is favorable to the full mixed combustion of pulverized coal, thus improving the combustion characteristics of pulverized coal; with the increase of O_2/CO_2 volume fraction ratio, the overall temperature in the furnace is increased, which is favorable to the improvement of heat transfer performance in the furnace; with the increase of O_2/CO_2 volume fraction ratio, the overall CO_2 concentration in the furnace gradually increases. The CO_2 concentration at the furnace outlet is in the range of 70% to 77%, which is conducive to the capture of CO_2 . Meanwhile, the concentration of NO_x in the furnace chamber also gradually increases, mainly because the temperature in the furnace chamber increases with the increase of O_2 concentration, and thus the generation of thermal NO_x is greater.

Keywords

Oxyfuel Combustion, Biomass Gas, Blending Ratio, 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

火力燃煤锅炉的燃烧过程中产生大量的污染物 NO_x 、 SO_2 、 CO_2 以及粉尘等,对环境会造成严重的污染。其中 NO_x 的排放控制是电力行业的重点治理领域,近年来,随着国家双碳目标的提出, CO_2 的减排迫在眉睫[1]。为有效控制电站锅炉燃烧产生的 NO_x 与 CO_2 , 提出在燃煤锅炉中掺烧生物质气, 并采用富氧燃烧的方式来实现。富氧燃烧技术是主要的低氮燃烧技术之一[2], 它是将氧气与循环烟气混合后代替空气作为燃烧氛围, 能够使燃烧产生的烟气中 CO_2 体积分数达到 80% 以上, 便于电站锅炉经济、节能地实现大规模的碳捕集。从全生命周期来看, 生物质在生长过程中吸收的 CO_2 在燃烧过程中全部释放, 对环境而言具有零碳特性[3]。因此将生物质通过处理形成生物质气并与煤粉混燃, 使锅炉燃烧可以兼顾低氮燃烧和碳减排, 具有重要的工程实践意义。在国内外相关研究中, 文献[4] [5] [6] 研究表明, 生物质与煤在富氧条件下燃烧的最高反应温度比空气氛围的要低, 且生物质的加入可以改善煤的燃烧特性; Liu Hao 等[7] 利用顶烧式燃烧炉对比研究 O_2/CO_2 气氛与 O_2/N_2 气氛下火焰燃烧温度, 结果表明, 富氧气氛中氧浓度在 30% 时, 煤粉燃烧效率与 O_2/N_2 气氛中基本相同; Liu 等[8] 计算结果表明, 相比空气气氛, 富氧气氛中 NO_x 的排放量将大约减少 75%; Zhang 等[9] 研究表明, 在 CO_2/O_2 下挥发分氮在还原区 NO 的转化率增大, 而在氧化区抑制了 NO 的转化率。Stanger 和 Singh 等[10] [11] 研究表明在富氧条件下, 生物质气与煤粉混燃过程产生的 CO_2 随着氧气浓度的提高而提高, 可以采用碳捕集的手段进行收集。因此, 在富氧条件下煤粉中掺烧生物质气一方面可以改善煤粉燃烧特性, 增强燃烧强度, 另一方面, 能够提高炉膛出口的 CO_2 浓度, 有利于碳捕集。本文以 350MW 亚临界四角切圆燃烧锅炉为研究对象, 通过数值模拟研究不同氧浓度的富氧条件下生煤粉掺烧物质气过程中的炉内流动、传热与燃烧过程, 得到了炉膛内的速度场、温度场和气相组分浓度场分布。

2. 研究对象

以某电厂 350MW 亚临界四角切圆煤粉锅炉为研究对象, 锅炉几何尺寸为 $12.43\text{ m} \times 14.62\text{ m} \times 55.8\text{ m}$

(长 × 宽 × 高)。采用四角切圆的燃烧方式, 燃烧器布置于炉膛四角形成切向射流, 每组燃烧器高 13,106 mm, 并配有 13 层喷口, 分别为五层一次风燃烧器(A-E)、五层二次风燃烧器(AA-DE)和三层燃尽风燃烧器(OFA1-OFA3), 其中 C 层一次风携带生物质气, 其余一次风燃烧器携带煤粉。锅炉燃烧的假想切圆直径分别为 1140 mm 和 1740 mm。燃烧器布置和切圆示意图如图 1 所示。锅炉燃烧采用神化混煤, 其特性参数见表 1, 生物质气采用秸秆气, 其燃料特性见表 2。

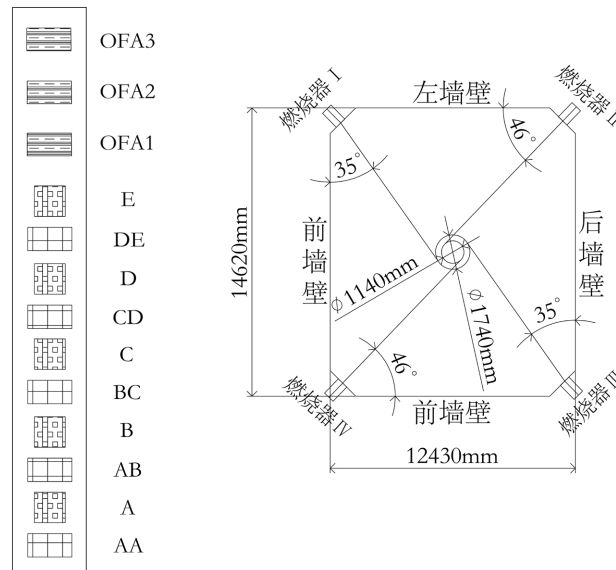


Figure 1. The schematic diagram of boiler burner arrangement and circle cutting

图 1. 锅炉燃烧器布置和切圆示意图

Table 1. Proximate and ultimate analyses of coal

表 1. 煤的元素分析与工业分析

工业分析 w ar/%				元素分析 w ar/%					低位热值/ (kJ/kg)
w (M)	w (A)	w (V)	w (FC)	w (C)	w (H)	w (O)	w (N)	w (S)	
16.00	5.04	28.05	50.91	64.00	3.78	10.08	0.67	0.43	24.320

Table 2. Biomass gas characteristics

表 2. 生物质气的燃料特性

生物质气体积分数/%						密度/ (kJ/Nm ³)	显热/ (kg/Nm ³)	空燃比	低位热值/ (kJ/m ³)
N ₂	CO	H ₂	CO ₂	CH ₄	H ₂ O				
40.30	25.49	21.53	8.00	0.45	4.23	1.078	1126	1.6	5696

3. 建立模型

3.1. 网格划分

基于研究锅炉的实际尺寸在 Gambit 中建立三维模型, 由于本文重点研究富氧下炉膛中煤粉与生物质

气的燃烧过程，以及炉膛出口的烟气排放情况，故而简化了锅炉炉膛上部的过热器与再热器部分。对三维模型采用分区划分网格方法，整体使用高质量六面体网格。针对燃烧器部分容易出现伪扩散的情况，对燃烧器部分采用 *Pave* 方法[12]，此方法能够将射流方向与网格线方向基本保持一致，可以有效减小伪扩散问题。同时，燃烧器区域的速度、温度和组分等物理量变化梯度大的特性，对燃烧器区域的网格进行适当加密以保证其模拟精度。分别采用网格数为 78 万、103 万和 130 万来进行网格无关性检验，采用 103 万网格进行模拟计算，既能保证计算精度，又能节省计算时间。锅炉纵截面与燃烧器横截面网格如图 2 所示。

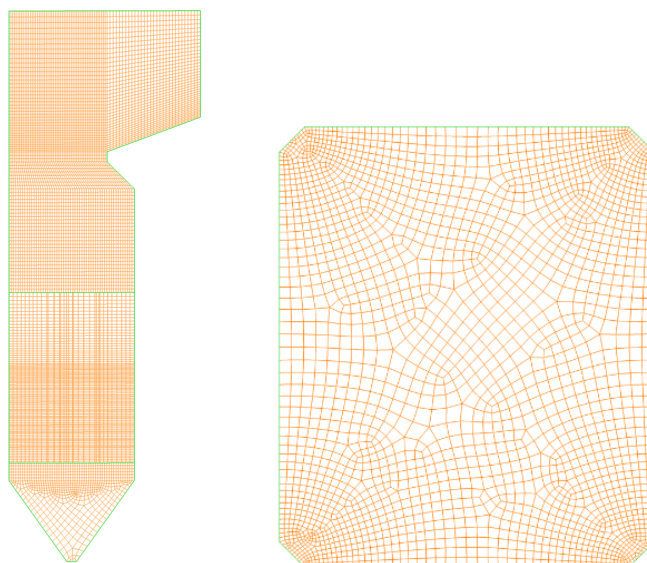


Figure 2. The grid of boiler longitudinal section and burner cross section
图 2. 锅炉纵截面与燃烧器横截面网格

为提高数值模拟计算结果的准确性，选择合适的数学模型十分重要。富氧下煤粉与生物质气的混燃过程中是一个十分复杂的气固耦合燃烧过程，包括气相湍流流动与燃烧，煤粉的热解、挥发分与生物质气的燃烧、焦炭的燃烧、辐射传热以及煤粉的运动等过程。本文在进行模拟时，针对燃烧的各个过程选择的数学模型如表 3 所示。其中，气相湍流燃烧采用的混合分数 PDF 模型是把燃烧简化为一个混合问题，流体的瞬时热化学状态与一个守恒量即混合分数 f 相关。本文模拟的对象包含 2 种燃料(煤粉和生物质气)，使用二混合分数方法，把煤粉流定义为燃料流，生物质气定义为二次流。混合分数的输运方程如下所示：

平均(时间平均)混合分数 f 的方程为：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{f}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{f}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_f} \nabla \bar{f} \right) + S_m \quad (1)$$

式中： ρ 为物质密度； v 为平均速度； μ_t 为湍流黏性系数，常数 σ_f 取 0.85；源项 S_m 仅指质量由燃料颗粒(如煤)传入气相中。

平均混合分数方差的守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{f'^2}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \overline{f'^2}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_f} \nabla \overline{f'^2} \right) + C_g \mu_t (\nabla^2 \bar{f}) - C_d \rho \frac{\epsilon}{K} \overline{f'^2} \quad (2)$$

式中： $f' = f - \bar{f}$ ；常数 σ_f 、 C_g 和 C_d 分别取 0.85、2.86 和 2.0； ϵ 为耗散率； κ 为湍流动能。

Table 3. Mathematical models in numerical simulations**表 3.** 数值模拟中的数学模型

类型	模型
气相湍流流动	RNG $k-\varepsilon$ 模型
气相湍流燃烧	混合分数 PDF 模型
煤粉热解	双步竞争热解模型
焦炭燃烧	动力/扩散模型
煤粉运动	欧拉 - 拉格朗日模型
辐射传热	P-1 模型

3.2. 边界条件与模拟工况

结合 350MW 四角切圆锅炉的实际运行情况设置边界条件，如表 4 所示。

Table 4. Setting of boundary conditions**表 4.** 边界条件的设定

项目	参数	
入口设置	质量入口边界	
出口设置	压力出口边界	-40 Pa
壁面	温度	700 K
	发射率	0.6
	离散相类型	reflect
冷灰斗	温度	460 K
	发射率	1
	离散相类型	trap
煤粉粒径	分布类型	Rosin-Rammler 分布
	平均粒径	56 μm
	分布指数	1.5

本文为研究不同氧浓度的富氧条件下生物质气与煤粉混燃过程中的炉膛流动、燃烧与传热过程，设置了 8 种不同工况，其中 O_2/CO_2 体积分数比分别为 21%/79%、23%/77%、25%/75%、27%/73%、29%/71%、31%/69%、33%/67%、35%/65%，以热量掺烧的方式，从燃烧器 C 层喷口射入热量掺烧比为 30% 的生物质气，生物质气量为 44.47 m^3/s 。8 种工况下生物质气的温度均为 363 K，一次风温均为 337 K，二次风和燃尽风风温均为 484 K，过量空气系数保持为 1.12，具体设置如表 5 所示。

Table 5. Simulation of working conditions

表 5. 模拟工况

工况	$\varphi(\text{O}_2)/\varphi(\text{CO}_2)$	煤粉量(kg/s)	总风量(kg/s)	一次风量(kg/s)	二次风量(kg/s)	燃尽风量(kg/s)
1	21%/79%	24.3	296	74	126	96
2	23%/77%	24.3	270	68	115	88
3	25%/75%	24.3	249	62	106	81
4	27%/73%	24.3	230	58	98	75
5	29%/71%	24.3	215	54	91	70
6	31%/69%	24.3	201	50	85	65
7	33%/67%	24.3	189	47	80	61
8	35%/65%	24.3	178	45	75	58

4. 计算结果与分析

4.1. 速度场分析

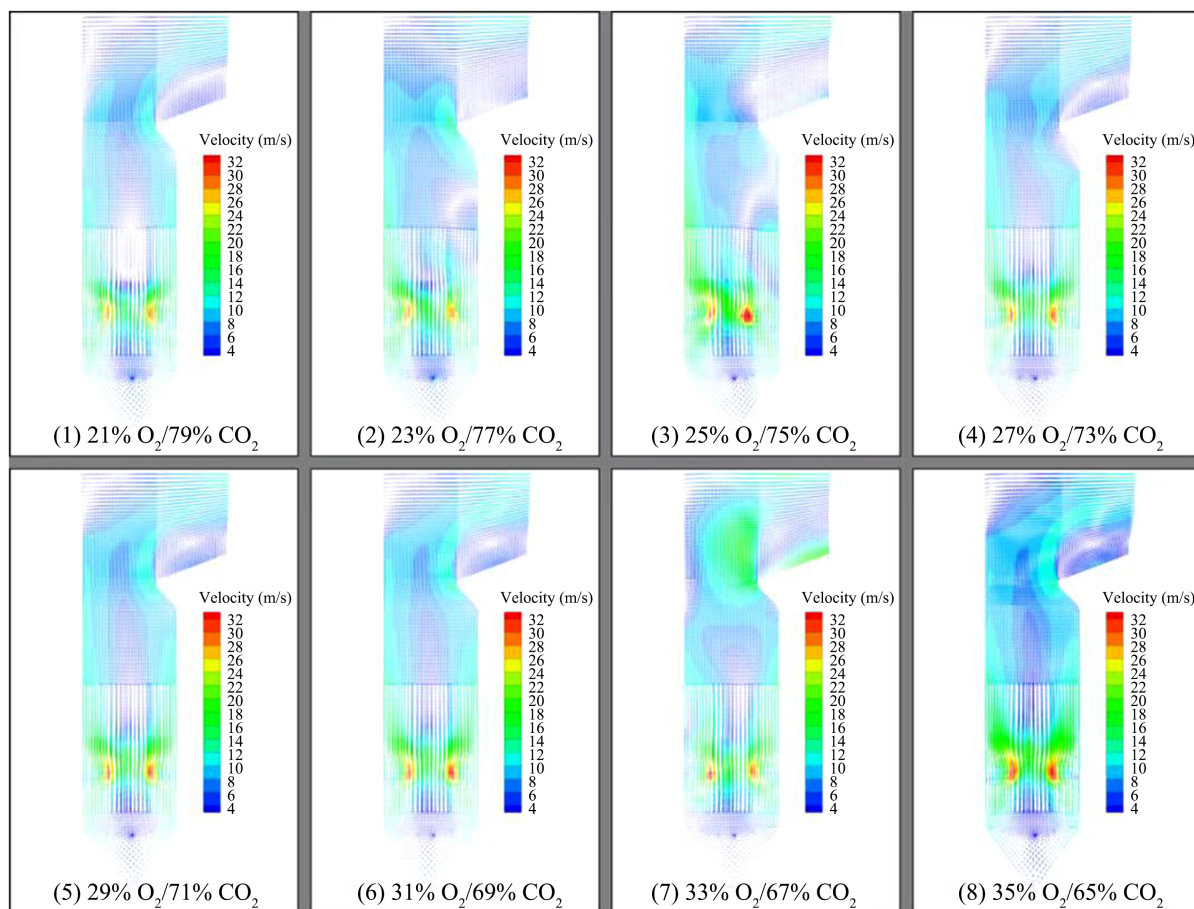
Figure 3. Velocity vector diagram (m/s) of section in furnace ($y = 7.31 \text{ m}$) for different O_2 to CO_2 volume fraction ratios图 3. 不同 O_2/CO_2 体积分数比下炉膛中截面($y = 7.31 \text{ m}$)速度矢量图(m/s)

图3为不同 O_2/CO_2 体积分数比下炉膛中截面($y = 7.31\text{ m}$)的速度矢量图。从图中可以看出,在八种工况下炉内的速度场的分布趋势相同,即炉膛中部的燃烧器区域有较大的速度梯度,主要原因是生物质气的喷入提高了速度梯度,炉膛上部燃尽区与下部灰斗区的生物质气与煤粉燃尽区域速度梯度较小,整体速度场的分布情况与四角切圆锅炉富氧燃烧时的速度分布情况是一致的[13][14]。当 O_2 浓度小于29%时,炉膛纵截面速度场梯度变化相近,当 O_2 浓度高于29%时,速度场梯度变化逐渐增加,主要原因是 CO_2 密度大于 O_2 密度,当 O_2 浓度过大时,整体燃烧气氛密度减小,导致速度场梯度变化增大,有利于煤粉、生物质气与氧气的混合,改善煤粉的燃烧特性[15]。

4.2. 温度场分析

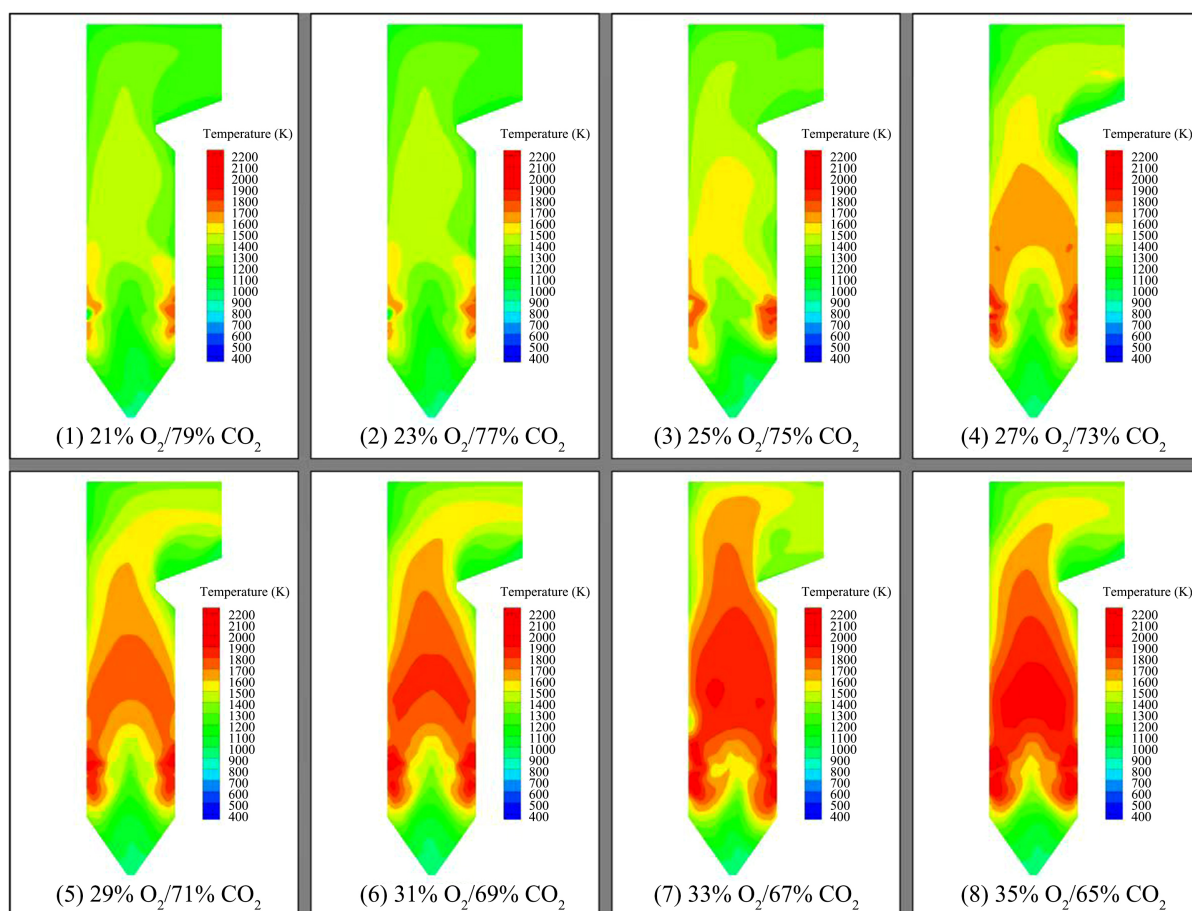


Figure 4. Cloud diagram (K) of temperature distribution in the middle section of furnace ($y = 7.31\text{ m}$) for different O_2 to CO_2 volume fraction ratios

图4. 不同 O_2 与 CO_2 体积分数比下炉膛中截面($y = 7.31\text{ m}$)温度分布云图(K)

图4与图5分别为不同 O_2/CO_2 体积分数比下炉膛中截面($y = 7.31\text{ m}$)温度分布云图和沿炉膛高度方向截面平均温度分布图。从两图中可以看出,八种工况下,生物质气与煤粉在富氧下混燃的温度变化趋势相同,高温区域出现在炉膛中部的燃烧器区域及上部燃尽区域,且平均温度峰值均出现在燃烧器区域的上部,在燃烧器区域,C层,即生物质气燃烧层的温度达到最低,这是由于生物质气的热值低,相同质量的生物质气燃烧温度低于煤粉燃烧温度,从C层向上,可以看到温度在逐步上升,结合各工况速度场的分析可知,生物质气层燃烧的速度场梯度变化大,加强了上部煤粉与富氧气氛的混合扰动效果,促进

了煤粉燃烧, 温度从 C 层开始上升。随着 O_2/CO_2 体积分数比的逐步变大, 即富氧氛围中氧气浓度逐步提高, 炉内整体的燃烧温度升高, 峰值温度也逐步增大, 有利用炉内换热, 提高了锅炉热效率[16], 同时, 炉膛出口的排烟温度也随着氧气浓度增大而升高, 导致排烟热损失的增大。

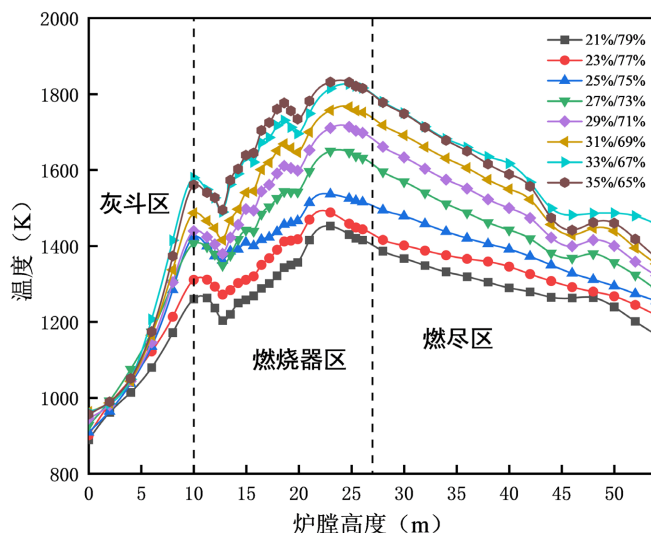


Figure 5. The average temperature distribution of the cross section along the height of the furnace for different O_2 to CO_2 volume fraction ratios

图 5. 不同 O_2 与 CO_2 体积分数下沿炉膛高度方向截面平均温度分布

4.3. O_2 浓度分析

图 6 分别是不同 O_2/CO_2 体积分数比下沿炉膛高度方向截面平均 O_2 体积分数分布。从图中可以看出, 八种工况下 O_2 浓度在燃烧器区出现两次峰值, 在燃尽区上部折焰角附近出现一次峰值。主要原因是由于最底层二次风的喷入导致 O_2 体积分数的增加, 随着炉膛高度的增加, 煤粉燃烧消耗了氧气, 致使其浓度降低, 到 C 层生物质气喷口处, 一方面该喷口只有生物质气进入而无氧气, 另一方面生物质气与氧气混合燃烧更加充分, 燃烧速度更快, 导致氧气浓度下降最快, 后面随着 C 层上部的一次和二次风的进入, 氧气浓度又逐渐增加, 在最上层一次风喷口附近氧气浓度到达另一个峰值; 从图 3 炉膛中截面的速度场中可以看到在炉膛上部折焰角附近, 速度梯度明显变大, 导致氧气浓度出现增加, 使该位置呈现氧气浓度峰值的现象[17] [18]。随着氧气浓度的增加, 燃烧器区域的氧气浓度整体出现逐步增加的现象, 在高氧气浓度的氛围中, 可能会促进燃料氮的中间产物 HCN、 N_2O 、 N_2 向 NO 方向转化, 导致炉膛中 NO_x 的生成量增加[19] [20]。

4.4. CO_2 浓度分析

图 7 为不同 O_2/CO_2 体积分数比下沿炉膛高度方向截面平均 CO_2 体积分数分布。从图中可以看出, 各工况下炉膛下部的灰斗区 CO_2 浓度是最高的, 主要原因是该区域速度场梯度非常小, 形成了一定程度的滞留区, 同时该区域的温度也是最低的, 相比其他高温区域, 气氛密度相对较高, 容易富集 CO_2 , 使该区域的 CO_2 浓度最高; 同理, 由于燃烧器区域的速度场梯度大, 区域温度高, 导致该区域的 CO_2 浓度较小, C 层生物质气燃烧层, 其速度梯度最大, 使该层附近更快地上升至炉膛上部, 因此在 C 层附近出现 CO_2 浓度最低的现象。通常, 在空气燃烧氛围下, 炉膛出口 CO_2 浓度一般在 15%~20%左右, 较低的 CO_2 浓度使得 CO_2 捕集过程需要消耗大量的能量[21] [22], 在富氧氛围下燃烧时, 各工况炉膛出口 CO_2 浓度

在 70%~77%，有利于 CO_2 在工业上实现大规模捕集[23]，且随着 O_2 浓度的增加，出口 CO_2 浓度整体上是上升的，主要由于 O_2 浓度的增加有利于炉膛内煤粉与生物质气更加充分地燃烧，产生了更多的 CO_2 ，从而使炉膛出口的 CO_2 浓度变高。

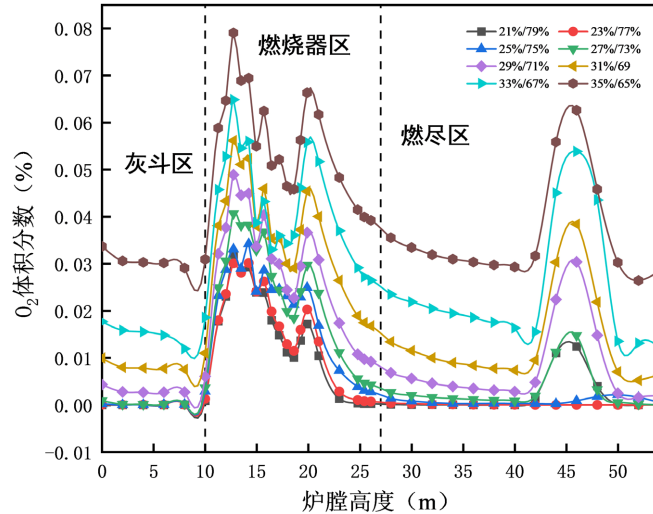


Figure 6. The distribution of the average O_2 volume fraction of the cross-section along the height of the furnace for different O_2 to CO_2 volume fraction ratios
图 6. 不同 O_2 与 CO_2 体积分数下沿炉膛高度方向截面平均 O_2 体积分数分布

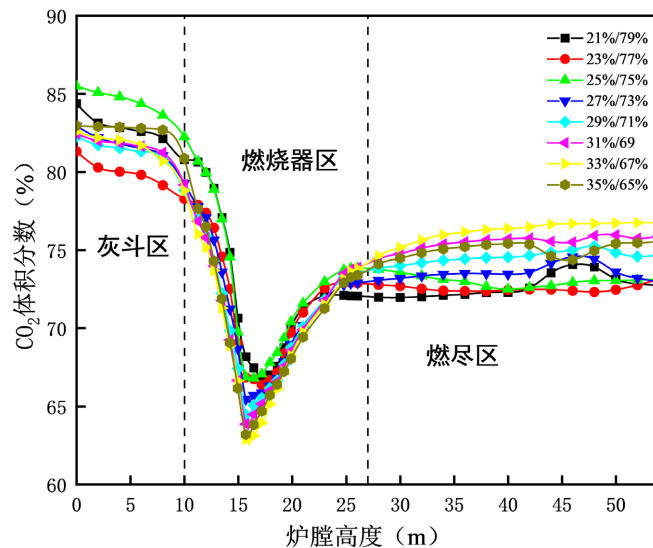


Figure 7. The distribution of the average CO_2 volume fraction of the cross-section along the height of the furnace for different O_2 to CO_2 volume fraction ratios
图 7. 不同 O_2 与 CO_2 体积分数比下沿炉膛高度方向截面平均 CO_2 体积分数分布

4.5. NO_x 浓度分析

图 8 为不同 O_2 与 CO_2 体积分数比下沿炉膛高度方向截面平均 NO_x 体积分数分布云图。从图中可以看出，随着富氧气氛中 O_2 浓度的增加，炉膛内 NO_x 整体的浓度是逐渐提高的，这与文献[24]的研究结论一致，原因是 60%~80%的 NO_x 是由挥发性氮的氧化所贡献的[25]，随着 O_2 浓度的增加，富氧环境下，

燃料中的挥发性氮易于被氧化催化转化为 NO_x [26],因此炉膛内 NO_x 的浓度随着 O_2 浓度的增加而增加。因此在实际中,锅炉从空气氛围燃烧向富氧氛围燃烧的改造过程中,富氧氛围中 O_2 的浓度应该保持一个合理的水平,防止炉膛出口的 NO_x 浓度过高。

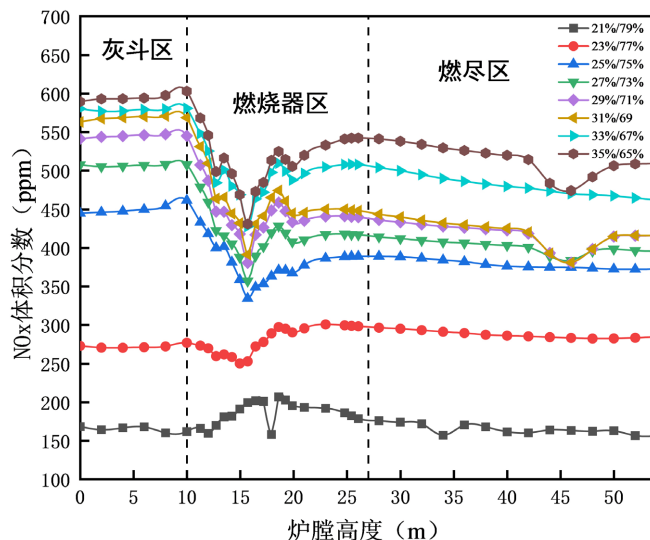


Figure 8. The distribution of the average NO_x volume fraction of the cross-section along the height of the furnace for different O_2 to CO_2 volume fraction ratios

图 8. 不同 O_2 与 CO_2 体积分数比下沿炉膛高度方向截面平均 NO_x 体积分数分布

5. 结论

本章以某 350MW 四角切圆锅炉为研究对象,从燃烧器 C 喷口掺烧 30% 的生物质气,数值模拟了不同 O_2/CO_2 体积分数比下炉膛内流动、温度、 CO_2 浓度及 NO_x 浓度分布的情况,结果表明:

1) 当 O_2 浓度低于 29% 时,炉膛内的速度梯度分布相近,当 O_2 浓度高于 29% 时,炉膛整体速度梯度提高,有利于煤粉的充分混合燃烧,改善了煤粉的燃烧特性。

2) 随着 O_2/CO_2 体积分数比的增加,炉膛内温度整体是提高了,有利于提高炉膛内的换热性能,但过高的温度对炉膛材料的耐热要求更高,也增加炉膛出口的排烟损失。

3) 随着 O_2/CO_2 体积分数比的增加,炉膛内整体的 CO_2 浓度是逐渐提高的,主要原因是由于 O_2 浓度的增加有利于炉内燃料的充分燃烧,从而产生更多的 CO_2 ,炉膛出口的 CO_2 浓度是 70%~77%,有利于 CO_2 的捕集。

4) 随着 O_2/CO_2 体积分数比的增加,炉膛内 NO_x 的浓度是逐渐提高,主要原因是炉膛内的温度随着 O_2 浓度的增加而上升,由此热力型 NO_x 的产生量更大。

参考文献

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 2017-2021 年全国生态环境统计年报[EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthtjnb/>, 2023-01-18.
- [2] 郭军军,张泰,李鹏飞,等. 中国煤粉富氧燃烧的工业示范进展及展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(4): 1197-1208.
- [3] 中国产业发展促进会生物质能产业分会. 3060 零碳生物质能发展潜力蓝皮书[R]. 北京, 2021.
- [4] 赵伶俐, 方博, 贾青, 等. 流化床 O_2/CO_2 气氛木屑与煤混燃的数值模拟研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(1): 178-184.

- [5] 寿恩广, 李诗媛, 任强强, 等. 生物质与煤富氧混合燃烧特性研究[J]. 可再生能源, 2014, 32(10): 1551-1558.
- [6] Contreras, M.L., Garcia-Frutos, F.J. and Bahillo, A. (2016) Study of the Thermal Behaviour of Coal/Biomass Blends during Oxy-Fuel Combustion by Thermogravimetric Analysis. *Thermal Analysis and Calorimetry*, **123**, 1643-1655. <https://doi.org/10.1007/s10973-015-5067-1>
- [7] Liu, H., Zailani, R. and Gibbs, B.M. (2005) Comparisons of Pulverized Coal Combustion in Air and in Mixtures of O₂/CO₂. *Fuel*, **84**, 833-840. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.11.018>
- [8] Liu, H. and Okazaki, K. (2003) Simultaneous Easy CO₂ Recovery and Drastic Reduction of SO_x and NO_x in O₂/CO₂ Coal Combustion with Heat Recirculation. *Fuel*, **82**, 1427-1436. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(03\)00067-X](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00067-X)
- [9] Zhang, Y.C., Zhang, J., Sheng, C.D., *et al.* (2011) Reduction of Recycled NO_x by Simulated Coal Volatiles in Oxy-Fuel Combustion. *Energy & Fuels*, **25**, 2608-2615. <https://doi.org/10.1021/ef200368v>
- [10] Singh, R.I. and Kumar, R. (2016) Current Status and Experimental Investigation of Oxy-Fired Fluidized Bed. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, **61**, 398-420. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.021>
- [11] Stanger, R., Wall, T., Sporn, R., *et al.* (2015) Oxyfuel Combustion for CO₂ Capture in Power Plants. *Greenhouse Gas Control*, **40**, 55-125. <https://doi.org/10.1016/j.jggc.2015.06.010>
- [12] 范宝田. 生物质气与煤粉混烧锅炉燃烧及 NO_x 生成的数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海工程技术大学, 2022.
- [13] 李宁, 葛家楠, 汪健生. 300MW 四角切圆锅炉在 O₂/CO₂ 气氛下的燃烧与传热特性数值模拟研究[J]. 电力学报, 2022, 37(2): 121-129.
- [14] 董龙, 孟永彪. 四角切圆锅炉富氧燃烧对 NO_x 生成影响的数值模拟[J]. 广东化工, 2018, 45(10): 55-57.
- [15] 张小桃, 李柯颖, 赵伟, 等. 燃煤锅炉掺烧生物质气运行效率及污染物排放模拟[J]. 农业工程学报, 2018, 34(11): 194-202.
- [16] Chen, C., Zhao, L.L., Wu, X., and Wang, J.F. (2019) Numerical and Experimental Study on Oxy-Fuel Coal and Biomass Co-Firing in a Bubbling Fluidized Bed. *Energy & Fuels*, **33**, 5829-5839. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b04163>
- [17] 王鹏乾, 王长安, 杜勇博, 等. O₂/CO₂ 燃烧条件下 NO₂ 还原特性的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(5): 16-22, 141.
- [18] 张小桃, 张卫东, 慕昊良, 等. 600MW 机组燃煤锅炉耦合生物质气再燃污染物排放研究[J]. 热力发电, 2021, 50(6): 26-32.
- [19] Bhuiyan, A.A., Blicblau, A.S., Islam, A.K.M.S. and Naser, J. (2018) A Review on Thermo-Chemical Characteristics of Coal/Biomass Co-Firing in Industrial Furnace. *The Energy Institute*, **91**, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2016.10.006>
- [20] Bhuiyan, A.A., Blicblau, A.S. and Naser, J. (2017) Co-Firing of Biomass and Slagging in Industrial Furnace: A Review on Modelling Approach. *The Energy Institute*, **90**, 838-854. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2016.08.010>
- [21] Xu, G., Wu, Y., Yang, Y.P., Zhang, K. and Song, X.N. (2013) A Novel Integrated System with Power Generation, CO₂ Capture, and Heat Supply. *Applied Thermal Engineering*, **61**, 110-120. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.07.016>
- [22] Xu, G., Hu, Y., Tang, B.Q., *et al.* (2014) Integration of the Steam Cycle and CO₂ Capture Process in a Decarbonization Power Plant. *Applied Thermal Engineering*, **73**, 277-286. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.07.051>
- [23] 杨开宇. 燃煤电厂二氧化碳捕捉技术进展研究[J]. 能源与节能, 2022(1): 49-53.
- [24] Kazanc, F., Khatami, R., Manoel Crnkovic, P. and Levendis, Y.A. (2011) Emissions of NO_x and SO₂ from Coals of Various Ranks, Bagasse, and Coal-Bagasse Blends Burning in O₂/N₂ and O₂/CO₂ Environments. *Energy & Fuels*, **25**, 2850-2861. <https://doi.org/10.1021/ef200413u>
- [25] 杨建成. 高挥发分煤分级燃烧 NO_x 减排实验及应用研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [26] 游卓. 富氧燃烧过程中 NO_x 控制及其系统效率研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2013.