

# 富氧下煤粉掺烧生物质气的NO<sub>x</sub>与CO<sub>2</sub>生成量协同排放研究

胡超<sup>1</sup>, 严祯荣<sup>1,2\*</sup>, 卫荆涛<sup>1</sup>, 俞银华<sup>3</sup>, 王文镔<sup>3</sup>, 殷铭<sup>3</sup>, 钟布依<sup>1</sup>, 钱钧<sup>1</sup>

<sup>1</sup>上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海

<sup>2</sup>机械工业锅炉低碳化技术重点实验室, 上海

<sup>3</sup>上海上电漕泾发电有限公司, 上海

收稿日期: 2023年5月9日; 录用日期: 2023年7月11日; 发布日期: 2023年7月18日

## 摘要

在富氧条件下, 煤粉掺烧生物质气既能实现低NO<sub>x</sub>排放, 也实现碳捕集从而达到减碳目的。本文以350 MW四角切圆锅炉为研究对象, 通过数值模拟研究了富氧下燃煤锅炉掺烧生物质气过程中生物质气掺烧比对NO<sub>x</sub>与CO<sub>2</sub>的协同排放控制规律。结果表明: 掺烧生物质气不影响燃煤锅炉的燃烧过程; 随着掺烧生物质气比例的增大, 炉膛出口的NO<sub>x</sub>与CO<sub>2</sub>体积分数有负向协同排放的趋势; 当生物质掺烧比例为20%时, 炉膛出口的NO<sub>x</sub>体积分数为396 ppm, CO<sub>2</sub>体积分数为80.9%, 生物质能的利用、CO<sub>2</sub>捕集及NO<sub>x</sub>污染物排放控制均能达到很好的协调。本文研究成果将对火力发电行业实现低氮燃烧和碳减排提供技术理论支撑。

## 关键词

富氧燃烧, 生物质气, 掺烧比, 数值模拟, 协同控制

# Research on the Synergistic Emission of NO<sub>x</sub> and CO<sub>2</sub> Generation from Pulverized Coal Blended Biomass Gas under Oxygen Enrichment

Chao Hu<sup>1</sup>, Zhenrong Yan<sup>1,2\*</sup>, Jingtao Wei<sup>1</sup>, Yinhua Yu<sup>3</sup>, Wenbin Wang<sup>3</sup>, Ming Yin<sup>3</sup>, Buyi Zhong<sup>1</sup>, Jun Qian<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai

<sup>2</sup>Mechanical Industrial Key Laboratory of Boiler Low-Carbon Technology, Shanghai

\*通讯作者。

文章引用: 胡超, 严祯荣, 卫荆涛, 俞银华, 王文镔, 殷铭, 钟布依, 钱钧. 富氧下煤粉掺烧生物质气的 NO<sub>x</sub> 与 CO<sub>2</sub> 生成量协同排放研究[J]. 建模与仿真, 2023, 12(4): 3756-3769. DOI: 10.12677/mos.2023.124344

<sup>3</sup>Shanghai Shangdian-Caojing Power Generation Co., Ltd, Shanghai

Received: May 9<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jul. 11<sup>th</sup>, 2023; published: Jul. 18<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

In oxygen-enriched conditions, pulverized coal blended with biomass gas can achieve both low NO<sub>x</sub> emissions and carbon capture to achieve carbon reduction. In this paper, we studied the synergistic emission control law of NO<sub>x</sub> and CO<sub>2</sub> in the process of biomass gas blending in a coal-fired boiler under oxygen-enriched conditions by numerical simulation using a 350 MW quadrangular cut-round boiler as the research object. The results show that the doping of biomass gas does not affect the combustion process of coal-fired boiler; with the increase of the doping ratio of biomass gas, the NO<sub>x</sub> and CO<sub>2</sub> volume fraction at the furnace outlet has a negative trend of synergistic emission; when the doping ratio of biomass is 20%, the NO<sub>x</sub> volume fraction at the furnace outlet is 396 ppm and the CO<sub>2</sub> volume fraction is 80.9%, and the utilization of biomass energy, CO<sub>2</sub> capture and NO<sub>x</sub> emission control can be well coordinated. The research results of this paper will provide technical and theoretical support for the thermal power industry to achieve low nitrogen combustion and carbon emission reduction.

## Keywords

Oxyfuel Combustion, Biomass Gas, Blending Ratio, Numerical Simulation, Cooperative Control

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

为实现双碳目标，响应国家节能降碳，优化能源结构，实现煤电机组超低排放，对火力发电行业进行燃煤锅炉低氮燃烧和减碳排放改造将是重要的研究领域之一。

富氧燃烧技术是主要的低氮燃烧技术之一[1]，又称为燃烧中碳捕集技术，是最具潜力的新型碳减排燃烧技术之一[2]。生物质能是一种重要的可再生能源，具有零碳特性，然而，生物质具有热值低、分布不集中、集中收集成本昂贵、供应受季节影响等特点，直燃生物质易造成炉内结焦，同时燃烧过程产生大量的氯元素和碱金属也会对炉膛造成腐蚀，危害锅炉运行，因此将生物质通过处理形成生物质气并与煤粉混燃，可以解决生物质利用存在的上述问题。

国内外针对富氧条件下生物质与煤粉混燃进行了广泛的研究。文献[3] [4] [5]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[6]利用顶烧式燃烧炉对比研究 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气氛与 O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 气氛下火焰燃烧温度，结果表明在 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气氛下 O<sub>2</sub> 浓度维持在 30%时煤粉燃烧效率与 O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 气氛中基本相同；Chen 等[7]对鼓泡流化床中煤与生物质在富氧下的混燃过程进行了研究，结果表明，与煤粉燃烧相比，在焦燃烧区，混燃的温度比煤粉的要低 10 K，同时，烟气出口有较低的 CO<sub>2</sub> 浓度；彭龙飞等[8]研究发现：在 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气氛下，炉膛温度由于 CO<sub>2</sub> 较大的比热容而下降，随着气氛中氧气浓度的提高，使煤粉燃烧强度增大，炉内温度上升，让煤粉燃烧特性得以改善。在生物质与煤粉混燃的 NO<sub>x</sub> 排放研究方面。Liu 等[9]计算结果表明，相比空气气氛，O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>

气氛中  $\text{NO}_x$  排放量将减少 75%左右, 且  $\text{NO}_x$  主要为燃料型  $\text{NO}_x$ ; Zhang 等[10]研究表明, 在富氧燃烧的还原性区域有更多的挥发分氮转变为  $\text{NO}$ , 而在氧化性区域  $\text{NO}$  的转化受到抑制, 但挥发性氮对其影响较小; 王鹏乾等[11]认为提高炉膛温度和  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  气氛中二氧化碳体积分数将增加  $\text{NO}_2$  浓度, 高体积分数的  $\text{CO}_2$  能促进  $\text{NO}_2$  的还原, 而高体积分数的  $\text{O}_2$  在一定程度上对  $\text{NO}_2$  的还原有抑制作用; 文献[12]研究了生物质与煤在循环流化床炉中富氧混合燃烧时污染物的生成机理, 表明, 与煤粉单独燃烧相比, 生物质/煤燃烧过程中, 燃料 N 转化率和  $\text{SO}_2$  排放量较低, 且随着生物质掺烧比升高, 燃烧 N 转化率不断降低,  $\text{SO}_2$  排放量不断降低; 文献[13] [14]表明, 与空气气氛相比, 21%  $\text{O}_2/79\%$   $\text{CO}_2$  气氛下  $\text{NO}$  的排放量较低, 燃料 N 转化率较低。Stanger 和 Singh 等[15] [16]研究表明在富氧条件下, 生物质气与煤粉混燃过程产生的  $\text{CO}_2$  随着氧浓度的提高而提高, 可以采用碳捕集的手段进行收集; Chowdhury 等[17]通过数值模拟研究了空气气氛与 30%  $\text{O}_2$  的富氧气氛下, 不同煤/生物质的混合比下混烧的燃烧与排放特性, 结果表明, 当增加了生物质的比重后, 炉内将产生更高浓度的  $\text{CO}$ , 从而产生更高浓度的  $\text{CO}_2$ 。

综上所述, 国内外对生物质与煤粉在富氧条件下的燃烧特性、 $\text{CO}_2$  与  $\text{NO}_x$  排放有深入研究, 但对于  $\text{CO}_2$  与  $\text{NO}_x$  协同控制排放上的研究还比较空白, 本文通过数值模拟与文献印证的方法系统研究了富氧下生物质气与煤粉混燃过程中生物质气掺烧比对  $\text{NO}_x$  与  $\text{CO}_2$  的协同排放控制。为我国优化能源结构, 提高热能动力系统的运行灵活性, 降低碳排放, 控制  $\text{NO}_x$  污染, 提供技术理论支撑。

## 2. 研究对象及物理模型

### 2.1. 350 MW 四角切圆锅炉概况

以某电厂 350 MW 四角切圆煤粉锅炉为研究对象, 此锅炉为亚临界压力、一次中间再热、平衡通风、燃烧器四角布置、双切圆悬浮燃烧、固态排渣、整体结构为全悬吊结构、露天布置及  $\Pi$  型布置的强制循环汽包锅炉。锅炉具体尺寸为宽度 14620 mm, 长度为 12430 mm, 高度为 55800 mm。燃烧器基本型号为 M-PM 低  $\text{NO}_x$  燃烧器, 布置于炉膛四角形成切向射流, 每组燃烧器高 13106 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), 其中一次风燃烧器(A-E)携带煤粉。一次风喷口的尺寸(宽 × 高)为 480 mm × 480 mm, 二次风喷口的尺寸(宽 × 高)为 640 mm × 520 mm, 燃尽风的喷口尺寸(宽 × 高)为 640 mm × 400 mm。锅炉燃烧的假想切圆直径分别为 1140 mm 和 1740 mm。锅炉本体尺寸、燃烧器布置和炉膛横截面如图 1 所示。

本文中富氧混燃下, 采用的煤种为神化混煤, 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。

Table 1. Proximate and elemental analysis of coal

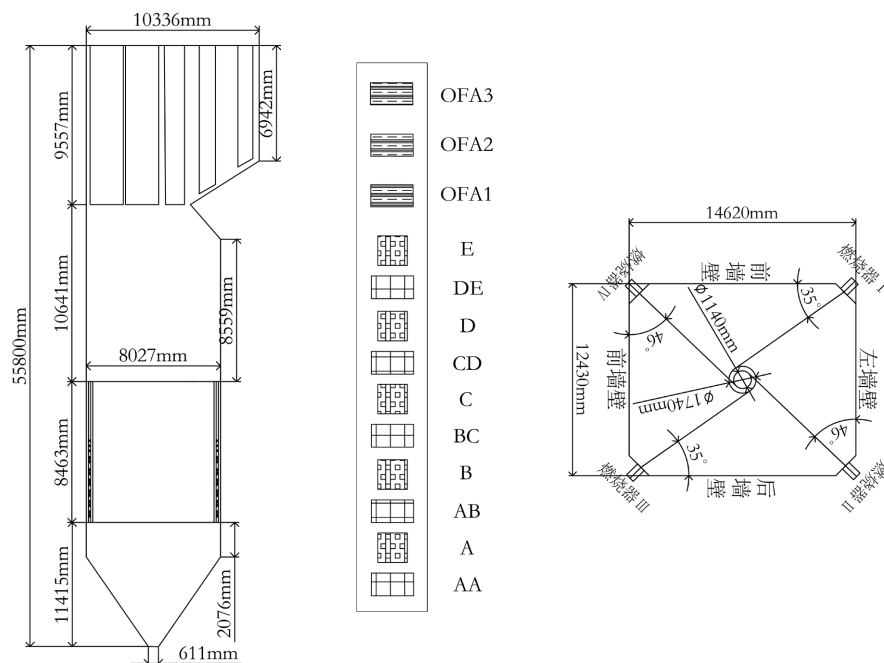
表 1. 煤的元素分析与工业分析

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	24320

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 (kg/Nm <sup>3</sup> )	显热 (kJ/m <sup>3</sup> )	空燃比	低位热值 (kJ/Nm <sup>3</sup> )
N <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O				
40.30	25.49	21.53	8.00	0.45	4.23	1.078	1126	1.6	5696



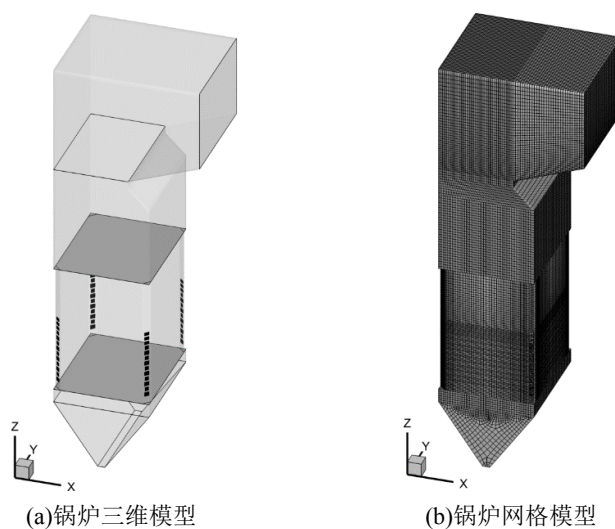
**Figure 1.** The schematic diagram of boiler body dimensions, burner arrangement and furnace cross-section

**图 1.** 锅炉本体尺寸、燃烧器布置和炉膛横截面示意图

## 2.2. 物理模型

根据 350MW 四角切圆锅炉的具体结构尺寸，建立锅炉三维物理模型，如图 2(a)所示。由于本文重点研究富氧条件下煤粉在炉内流动与燃烧特性，故在建立物理模型的过程中可不考虑锅炉炉膛上部的过热器与再热器部分，这样处理虽会导致炉膛出口的温度上升，但不影响炉膛出口的组分浓度。

本文采用分区划分网格方法，使用高质量六面体网格。为准确的模拟和描述燃烧器区域的速度、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，锅炉网格模型如图 2(b)所示。



**Figure 2.** Boiler 3D and mesh model  
**图 2.** 锅炉三维和网格模型

分别采用网格数为 69 万、92 万和 113 万来进行网格无关性检验,从图 3(a)与图 3(b)中可以看出,直线  $\alpha$  ( $x = 6.215 \text{ m}$ ,  $y = 7.31 \text{ m}$ ,  $z = 0 \sim 55.8 \text{ m}$ )沿炉膛高度方向的温度与速度在三种网格下的变化趋势一致,且误差较小,因此为保证计算精度,同时节省计算时间,采用 92 万网格进行模拟计算。

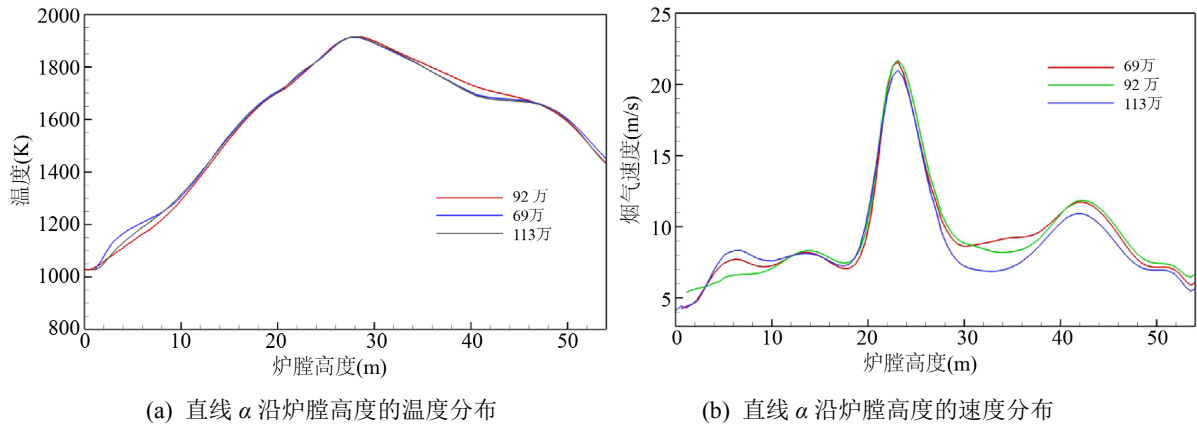


Figure 3. Grid independence test results  
图 3. 网格无关性检测结果

### 3. 数值计算方法与模拟工况

#### 3.1. 数学模型

富氧条件下  $\text{CO}_2$  替代了空气中的  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$  的化学物理特性与  $\text{N}_2$  有明显不同,同时生物质气具有低热值和高流动性,且含有还原性气体  $\text{CO}$  与  $\text{H}_2$ , 两者的共同作用导致富氧下四角切圆锅炉内煤粉掺烧生物质气与纯煤粉燃烧在炉内流动、辐射换热、煤粉热解及气相物质的燃烧,以及  $\text{NO}_x$  生成等方面均有显著差异,因此,通过研究富氧混燃机理,选择合适的数学模型及数值计算方法,对提高数值模拟的准确性至关重要。

##### 1) 煤粉颗粒运动

基于生物质气与煤粉富氧混燃的特点以及四角切圆锅炉炉内的流动特性,炉内煤粉颗粒的运动采用欧拉-拉格朗日坐标下的随机轨道模型计算,与空气相比,富氧气氛的密度与粘度发生改变,导致煤粉颗粒的运动方式也相应发生变化,采用公式(1)来描述煤粉颗粒在富氧氛围中的运动,其中煤粉颗粒运动主要考虑气体阻力与重力影响[18]

$$m_p \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{1}{2} C_D \rho_g A_p |\mathbf{u} - \mathbf{v}| (\mathbf{u} - \mathbf{v}) + (\rho_p - \rho_g) V_p G \quad (1)$$

式中,  $m_p$  为煤粉颗粒质量,  $\text{kg}$ ;  $C_D$  为阻力系数;  $\rho_g$  与  $\rho_p$  为富氧气体与煤粉颗粒密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $A_p$  为煤粉颗粒投射面积,  $\text{m}^2$ ;  $\mathbf{u}$  与  $\mathbf{v}$  分别为富氧气体与煤粉颗粒速度,  $\text{m/s}$ ;  $V_p$  为煤粉颗粒体积,  $\text{m}^3$ ;  $G$  为重力加速度,  $\text{m/s}^2$ 。

##### 2) 气相湍流流动

煤粉富氧混燃与煤粉空气燃烧在气相湍流流动的建模中区别不大[19],采用 Realizable  $\kappa - \varepsilon$  模型所得到的模拟结果与实验结果十分接近。

##### 3) 辐射传热

炉内的辐射传热采用 DO 模型,与空气相比,富氧中高浓度的  $\text{CO}_2$  促进了煤粉燃烧过程中的辐射传热,因此通过修正的富氧 WSGG 模型来计算气体的吸收系数,其中气体混合物的总发射率  $\varepsilon$  为:

$$m_p \frac{dv}{dt} = \frac{1}{2} C_D \rho_g A_p |\mathbf{u} - \mathbf{v}| (\mathbf{u} - \mathbf{v}) + (\rho_p - \rho_g) V_p G \quad (2)$$

式中,  $a_{\varepsilon,i}(T_g)$  为基于气体温度下第  $i$  组灰气体的发射率加强系数, 通过式(3)计算;  $k_i$  为第  $i$  组灰气体的吸收系数;  $P$  为所有吸收性气体的分压的总和, atm;  $L$  为辐射的行程长度, m。

$$a_{\varepsilon,i} = \sum_{j=1}^J b_{\varepsilon,i,j} \left( \frac{T_g}{T_{ref}} \right)^{j-1} \quad i=1, \dots, N \quad (3)$$

式中,  $b_{\varepsilon,i,j}$  为关于富氧气体温度的多项式的系数, 系数  $k_i$  与  $b_{\varepsilon,i,j}$  的值参照文献[20]来设置。

#### (4) 煤粉热解

煤粉的热解采用单速率方程模型, 挥发分析出的速率表达式如(4), 其中指前因子  $A$  为  $4.68 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$ , 活化能  $E_a$  为  $1.559 \times 10^8 \text{ J/kmol}$ 。文献[21]通过热重分析研究了烟煤在富氧与空气中的热解过程, 从图 4 中可看出两种气氛下煤粉的热解与挥发分析出差异不大。因此适用于煤粉空气燃烧的单速率方程模型也同样适用于富氧燃烧, 其表达式为:

$$-\frac{1}{W} \frac{dW}{dt} = K = A e^{-E_a/RT} \quad (4)$$

式中,  $W$  为挥发分质量, kg;  $K$  为挥发分析出速率,  $\text{s}^{-1}$ ;  $R$  为理想气体常数;  $T$  为反应温度, K;  $A$  为指前因子;  $E_a$  为反应活化能, J/kmol。

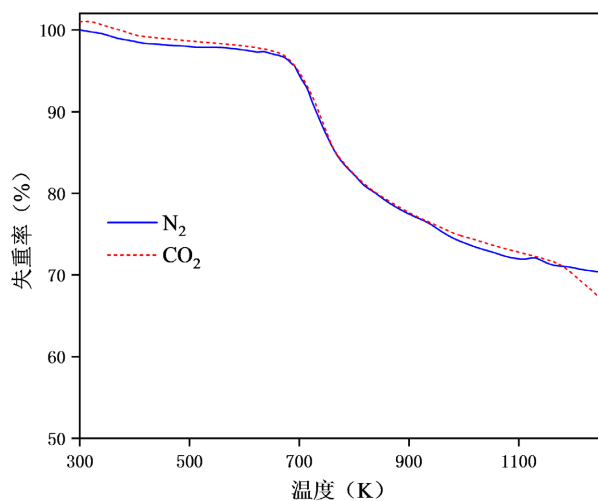
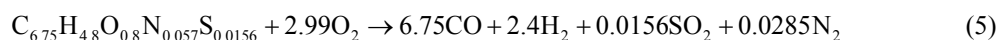


Figure 4. Pyrolysis of bituminous coal in  $N_2$  and  $CO_2$

图 4. 烟煤在  $N_2$  与  $CO_2$  中的热解

#### 5) 煤粉热解挥发分及生物质气的气相燃烧

煤粉热解挥发分与生物质气的燃烧采用有限速率/涡耗散模型, 煤粉挥发分燃烧的反应如式(5)~(7), 生物质气燃烧的反应如式(7)和(8), 对应的指前因子  $A$  与活化能  $E_a$  见表 3。





## 6) 焦炭燃烧

焦炭燃烧过程主要进行气化与氧化反应，采用多表面反应模型模拟焦炭的非均相燃烧，多表面反应通过动力/扩散模型进行建模，相关反应如下：



其中，反应(9)~(11)的速率由公式(12)~(14)来计算，相应的指前因子和活化能见表3。

$$r_{char} = -A_p p_{ox} \frac{D_O \mathfrak{R}}{D_O + \mathfrak{R}} \quad (12)$$

$$D_O = C_1 \frac{[(T_p + T_\infty)/2]^{0.75}}{d_p} \quad (13)$$

$$\mathfrak{R} = A e^{-E_a/RT_p} \quad (14)$$

式中， $r_{char}$  为焦炭颗粒的消耗速率，kg/s； $P_{ox}$  为氧化剂(即  $CO_2$ 、 $H_2O$ 、 $O_2$ )分压，Pa； $D_O$  为反应扩散速率系数， $m^2/s$ ； $\mathfrak{R}$  为焦炭的化学反应速率， $kg/(m^2 \cdot Pa \cdot s)$ ； $C_1$  为扩散速率常数； $T_p$  与  $T_\infty$  分别为焦炭颗粒温度与环境温度，K； $d_p$  为焦炭颗粒直径，m。

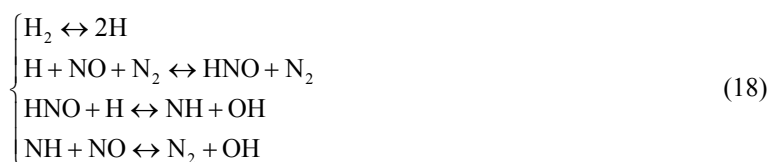
**Table 3.** Kinetic parameters of pulverized coal volatile fraction and char combustion  
**表 3.** 煤粉挥发分与焦炭燃烧的动力学参数

反应式	A	$E_a$ (J/kmol)	参考文献
(5)	$1.6 \times 10^6$	$5.065 \times 10^7$	[22]
(6)	$5.42 \times 10^9$	$1.26 \times 10^8$	[22]
(7)	$1 \times 10^{15}$	$1 \times 10^8$	[23]
(8)	$5.16 \times 10^{13}$	$1.3 \times 10^8$	[24]
(9)	$5 \times 10^{-3}$	$7.4 \times 10^7$	[22]
(10)	$6.351 \times 10^{-3}$	$1.62 \times 10^8$	[22]
(11)	$1.92 \times 10^{-3}$	$1.47 \times 10^8$	[22]

7)  $NO_x$  的排放

采用后处理的方法计算炉内  $NO_x$  的生成，对于煤粉空气燃烧， $NO_x$  的生成一般采用基于自由基 O 和 OH 浓度的部分平衡法来计算。基于 Zeldovich 机制， $NO_x$  的生成有主要为反应(15)和(17)，当处于富氧环境下，可能存在 NO 的再燃反应(17)。同时，生物质气中存在还原气体 CO 与  $H_2$ ，能够还原煤粉燃烧过程中产生的 NO，从而降低炉膛中  $NO_x$  生成量，反应为(18)~(20)。





### 3.2. 边界条件

各一次风燃烧器及二次风入口设置为质量入口边界；出口设置为-40 Pa 压力出口边界。壁面设置为无滑移边界条件，设置壁面温度为 700 K，壁面发射率为 0.6。设置离散项的类型为 reflect，其中，冷灰斗底面温度设置为 460 K，壁面发射率设置为 1，离散相类型设置为 trap。假定煤粉的粒径服从 Rosin-Rammler 分布，平均粒径为 56  $\mu\text{m}$ ，分布指数为 1.5。

### 3.3. 模拟工况

本文为研究富氧下煤粉掺烧生物质气过程中生物质气掺烧比对  $\text{NO}_x$  与  $\text{CO}_2$  的协同排放规律，在 29%  $\text{O}_2$ /71%  $\text{CO}_2$  氛围下，采用生物质气热值掺烧的方式，在保证进入炉内总热值不变的情况下，设置生物质气的掺烧比例分别为 0%、5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%，且生物质气从燃烧器 C 层喷口射入，具体工况设置如表 4 所示。

模拟方案 1~8 中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。

**Table 4.** Simulation of working conditions

**表 4.** 模拟工况

方案	掺烧比	煤粉量 (kg/s)	生物气量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	总风量 (kg/s)	一次风量 (kg/s)	二次风量 (kg/s)	燃尽风量 (kg/s)
1	0	34.72	0	323	81	137	105
2	5%	32.98	7.41	317	81	137	99
3	10%	31.25	14.82	310	81	137	92
4	15%	29.51	22.24	304	81	137	86
5	20%	27.78	29.65	297	81	137	79
6	25%	26.04	37.06	291	81	137	73
7	30%	24.30	44.47	285	81	137	67
8	35%	22.57	51.88	278	81	137	60

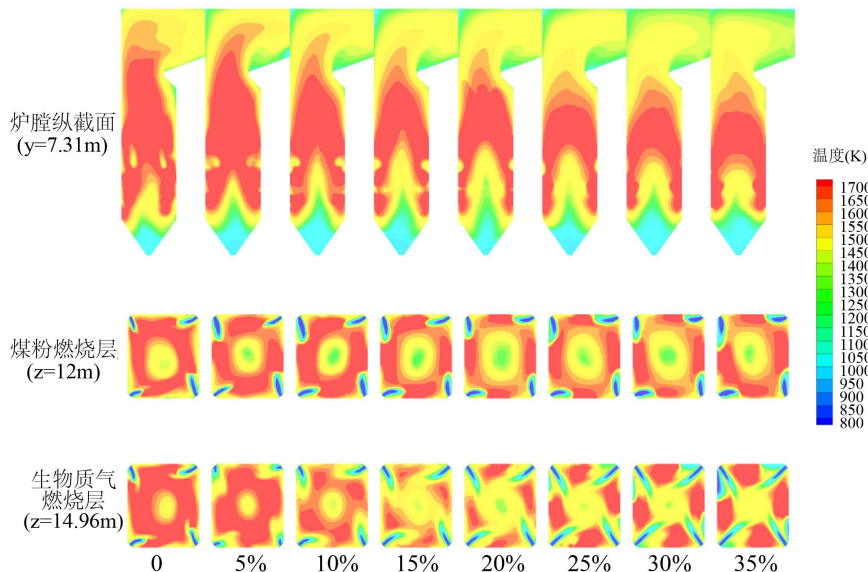
## 4. 计算结果与分析

### 4.1. 温度分析

图 5 和图 6 分别为不同生物质气掺烧比下炉膛纵截面、煤粉燃烧层和生物质气燃烧层温度云图和沿炉膛高度方向截面平均温度分布图。从图中可以看出，在不同生物质气掺烧比例下，炉膛内的温度分布特点是相同的，高温区域主要分布在燃烧器区域和燃尽区域。燃煤锅炉掺烧生物质气后，在煤粉与生物

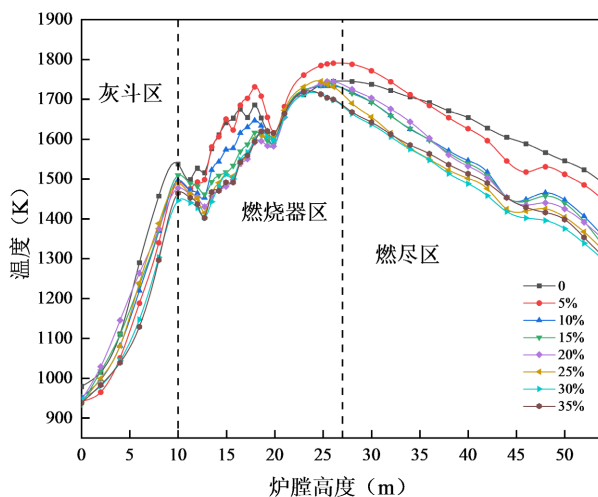


质气层均能形成良好切圆，使燃烧过程趋于稳定。



**Figure 5.** The temperature clouds of the longitudinal section of the furnace, pulverized coal combustion layer and biomass gas combustion layer with different biomass gas blending ratios

**图 5.** 不同生物质气掺烧比下炉膛纵截面、煤粉燃烧层和生物质气燃烧层温度云图



**Figure 6.** The average temperature distribution of the cross section along the height of the furnace

**图 6.** 沿炉膛高度方向截面平均温度分布

随着生物质气掺烧比例的增加，炉膛内峰值温度整体为逐渐下降的趋势。主要由于生物质气的单位热值低于煤粉，相同质量的生物质气燃烧产生的热量小于煤粉燃烧产生的热量，导致炉内温度呈现下降的趋势。但当掺烧 5%的生物质气时，出现最大的峰值温度，原因可能是生物质气燃烧所产生的热量虽然低于煤粉，但随着生物质气的掺烧改善煤粉的燃烧状况，使其比纯煤粉燃烧更为充分，释放出更多热量，从而使掺烧 5%生物质气的炉膛峰值温度高于纯煤粉燃烧的炉膛峰值温度。随着生物质气掺烧的比例增

大, C 层, 即生物质气燃烧层的切圆面积是逐渐减小的, 当掺烧比例为 0~20%时, 截面的温度梯度逐渐变小, 且变化明显, 当掺烧比例为 25%~35%时, 温度梯度变化基本不变, 说明当生物质气掺烧比例大于等于 25%时, 随着掺烧比例的增大对炉膛温度影响不大, 说明生物质气的掺烧虽然产生的热值小于煤粉, 但其高流动性改善了煤粉的燃烧效率, 与文献[8]结论一致。

#### 4.2. O<sub>2</sub> 体积分数分析

图 7 沿炉膛高度方向截面平均 O<sub>2</sub> 体积分数分布。从图中可以看出, 各工况下炉膛高 O<sub>2</sub> 浓度区域均在燃烧器区域, 到燃尽区域后 O<sub>2</sub> 浓度均下降, 主要原因在于燃烧器区随着富氧气流的进入使氧气浓度增加, 然后随着煤粉与生物质气的燃烧消耗了富氧气氛中的氧气, 导致氧气浓度的降低。随着掺烧生物质气比例的增加, 燃烧器区域的高氧气浓度区域下降得越快, 原因是在保证输入炉内相同热值的情况下, 生物质气燃烧相比于煤粉燃烧所需要的氧气量更多。同时, 当掺烧生物质比例增大时, 炉膛内流动速度加大, 炉膛出口的烟气流速增加, 导致炉膛内 O<sub>2</sub> 浓度更低, 有利于抑制 HCN 和 NH<sub>3</sub> 向 NO 的转化[25]。

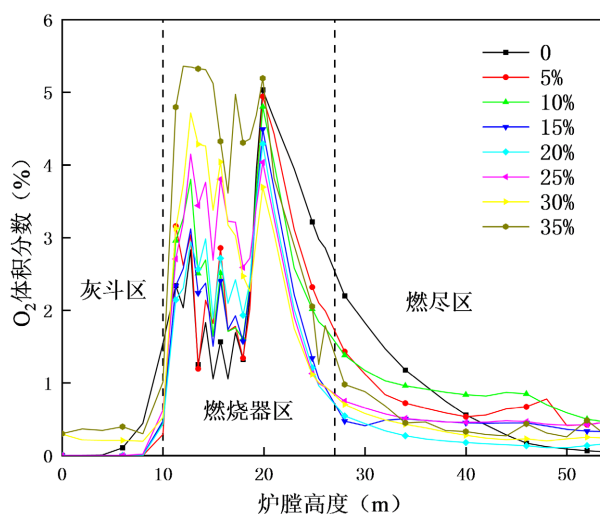


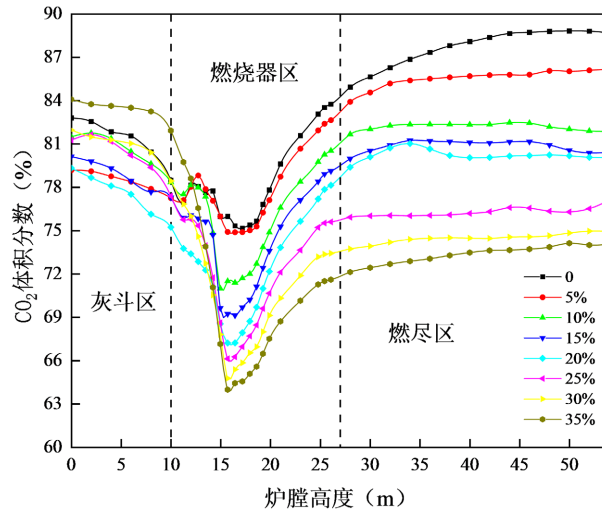
Figure 7. The distribution of the average O<sub>2</sub> volume fraction of the cross-section along the height of the furnace

图 7. 沿炉膛高度方向截面平均 O<sub>2</sub> 体积分数分布

#### 4.3. CO<sub>2</sub> 体积分数分析

图 8 沿炉膛高度方向截面平均 CO<sub>2</sub> 体积分数分布。从图中可以观察到, 纯煤粉燃烧炉内 CO<sub>2</sub> 体积分数高, 煤粉中掺烧生物质气后锅炉内 CO<sub>2</sub> 生成量减少, 且随着生物质气掺烧比例的增加, 炉膛内 CO<sub>2</sub> 浓度是逐渐降低的。原因可能是当煤粉中掺烧生物质气后, 一方面生物质气中的低浓度 CO<sub>2</sub> (8%)对富氧气氛中的高浓度 CO<sub>2</sub> (71%)有稀释作用, 另一方面生物质气的加入, 增加了炉内烟气量和烟气速度, 导致煤粉可能没有完全燃烧, 而使 CO<sub>2</sub> 生成量减少[26]。因此, 当掺烧过高比例的生物质气时, 炉膛出口的 CO<sub>2</sub> 浓度较低, 不利对 CO<sub>2</sub> 的捕集。当掺烧比例为 0~20%时, 炉膛出口的 CO<sub>2</sub> 浓度是整个炉膛内 CO<sub>2</sub> 浓度最高的位置, 当掺烧比例为 25%~35%时, 炉膛出口的 CO<sub>2</sub> 浓度要低于灰斗区域的, 表现在灰斗区域有 CO<sub>2</sub> 的富集。原因可能是当掺烧比例为 0~20%时, 由于掺烧生物质气的比例不高, 生物质气使流场速度增加有助于改善煤粉燃烧状况, 使其燃烧更为充分, 产生更多的 CO<sub>2</sub>; 当掺烧比例为 25%~35%时, 炉膛中 CO<sub>2</sub> 浓度呈现下降趋势, 原因是同等质量下煤的含 C 量大于生物质气, 生物质气掺烧比例越高, 燃烧产生的 CO<sub>2</sub> 越少[27], 同时也增加了锅炉的机械不完全燃烧热损失, 因此当掺烧生物质气的比例更多时,

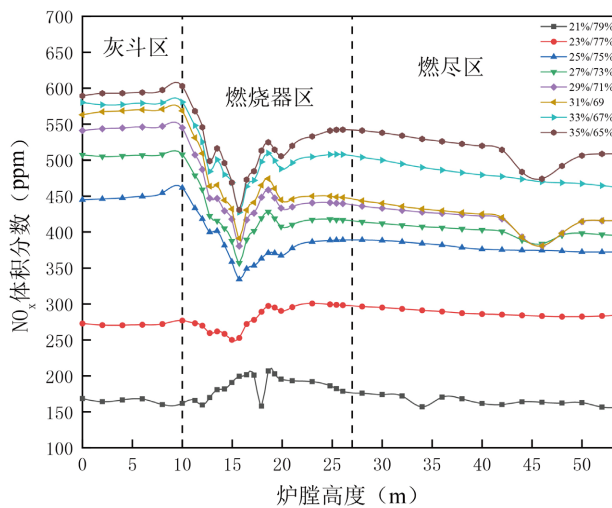
可能会破坏炉膛良好的燃烧状况，从而影响锅炉热效率。



**Figure 8.** The distribution of the average CO<sub>2</sub> volume fraction of the cross-section along the height of the furnace  
**图 8.** 沿炉膛高度方向截面平均 CO<sub>2</sub> 体积分数分布

#### 4.4. NO<sub>x</sub> 体积分数分析

图 9 沿炉膛高度方向截面平均 NO<sub>x</sub> 体积分数分布。从图中可以观察到，富氧气氛下纯煤粉燃烧的 NO<sub>x</sub> 体积分数分布与煤粉与生物质气混燃的 NO<sub>x</sub> 分布是不同的，纯煤粉燃烧时，高 NO<sub>x</sub> 浓度区域主要在燃烧器区域，而掺烧了生物质气后，高 NO<sub>x</sub> 浓度区域主要在灰斗区域和燃烧器区域，主要原因可能是掺烧生物质气后加强炉内的扰动，使部分燃料流向了灰斗区，使该区域的 NO<sub>x</sub> 浓度也偏高。随着掺烧生物质气的比例增加，炉膛出口的 NO<sub>x</sub> 体积分数呈现增加的趋势，主要原因是富氧氛围下燃烧，其温度比空气氛围下燃烧的温度要高，当掺烧了生物质气后，在高温环境下生物质气燃烧产生了大量的快速型 NO<sub>x</sub>，而导致炉内整体的 NO<sub>x</sub> 含量上升[28]。当掺烧比例在 10%~35%，炉膛出口的 NO<sub>x</sub> 浓度变化不大，因此，



**Figure 9.** The distribution of the average NO<sub>x</sub> volume fraction of the cross-section along the height of the furnace  
**图 9.** 沿炉膛高度方向截面平均 NO<sub>x</sub> 体积分数分布

为了更大规模地利用生物质，缓解能源短缺压力，可以稍微提高掺烧比例，对炉膛出口污染物的排放影响不大。

#### 4.5. NO<sub>x</sub> 与 CO<sub>2</sub> 协同排放分析

图 10 炉膛出口 NO<sub>x</sub> 与 CO<sub>2</sub> 体积分数。从图中可以看出随着掺烧比例的增加，炉膛出口的 NO<sub>x</sub> 浓度呈现逐渐增大的趋势，而 CO<sub>2</sub> 浓度变化则相反。这表明在掺烧不同比例的生物质气下，炉膛出口的 NO<sub>x</sub> 与 CO<sub>2</sub> 体积分数有负向协同的趋势。在保证捕集 CO<sub>2</sub> 所需能耗较低的同时也应控制好锅炉燃烧产生的 NO<sub>x</sub> 污染物，因此，在富氧下，向四角切圆煤粉燃烧锅炉中掺烧生物质气的比例最好为 20%，此时炉膛出口的 CO<sub>2</sub> 体积分数为 80.9%，NO<sub>x</sub> 浓度为 396 ppm，当生物质气掺烧比例低于 20% 时，对生物质气的利用较低，不能更大范围地使用生物质能，当掺烧比例大于 20% 时，炉膛出口过低的 CO<sub>2</sub> 浓度不利于 CO<sub>2</sub> 捕集，过高的 NO<sub>x</sub> 浓度增加了污染处理的费用。

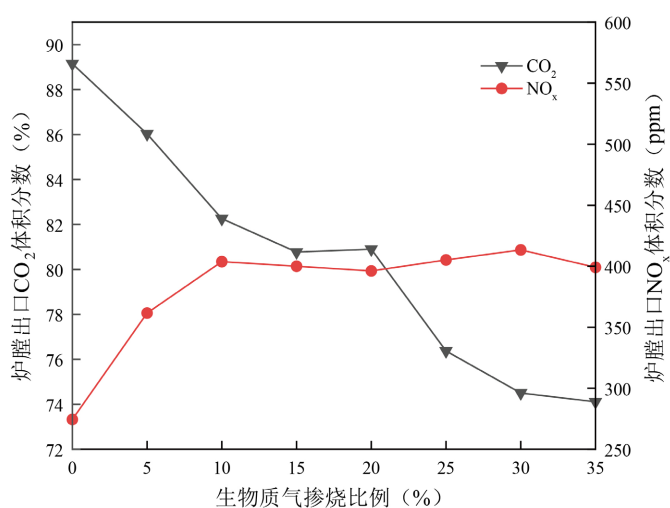


Figure 10. NO<sub>x</sub> and CO<sub>2</sub> volume fraction at the furnace exit  
图 10. 炉膛出口 NO<sub>x</sub> 与 CO<sub>2</sub> 体积分数

## 5. 结论

本文以某 350 WM 亚临界参数四角切圆锅炉为研究对象，采用数值模拟研究了不同生物质气掺烧比对富氧下生物质气与煤粉混燃的 NO<sub>x</sub> 与 CO<sub>2</sub> 协同控制的影响，分别分析了各工况下炉膛温度分布、O<sub>2</sub> 浓度分布、CO<sub>2</sub> 与 NO<sub>x</sub> 生成特点以及炉膛出口 NO<sub>x</sub> 与 CO<sub>2</sub> 协同控制规律，得出结论如下：

1) 燃煤锅炉掺烧生物质气后，煤粉与生物质气燃烧均能形成良好切圆，且火焰分布均匀，表明，掺烧生物质气后不影响燃煤锅炉燃烧过程。

2) 随着掺烧生物质气比例的增大，炉膛出口的 NO<sub>x</sub> 与 CO<sub>2</sub> 体积分数有负向协同的趋势，表明，可以通过生物质气掺烧比来协同控制 NO<sub>x</sub> 与 CO<sub>2</sub> 的排放。

3) 当生物质掺烧比例为 20% 时，炉膛出口 CO<sub>2</sub> 体积分数为 80.9%，NO<sub>x</sub> 体积分数为 396 ppm，此时生物质能的利用、CO<sub>2</sub> 捕集及 NO<sub>x</sub> 污染物排放控制均能达到很好的协调。

本文研究成果可为实现燃煤电站锅炉的低氮燃烧与碳捕集提供技术理论支撑。

## 基金项目

国家自然科学基金重点项(51736007)，国家重点研发计划项目课题(2021YFF0600604)。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 郑楚光, 赵永椿, 郭欣. 中国富氧燃烧技术研发进展[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(23): 3856-3864.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **123**, 1643-1655. <https://doi.org/10.1007/s10973-015-5067-1>
- [6] Liu, H., Zailani, R. and Gibbs, B.M. (2005) Comparisons of Pulverized Coal Combustion in Air and in Mixtures of  $O_2/CO_2$ . *Fuel*, **84**, 833-840. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.11.018>
- [7] 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>
- [8] 彭龙飞, 赵星海, 辛国华. 600MW 四角切圆燃烧锅炉富氧燃烧的数值模拟[J]. 黑龙江电力, 2013, 35(3): 220-223, 228.
- [9] Liu, H. and Okazaki, K. (2003) Simultaneous Easy  $CO_2$  Recovery and Drastic Reduction of  $SO_x$  and  $NO_x$  in  $O_2/CO_2$  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)
- [10] 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>
- [11] 王鹏乾, 王长安, 杜勇博, 等.  $O_2/CO_2$  燃烧条件下  $NO_2$  还原特性的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(5): 16-22, 141.
- [12] 张啸天. 生物质与煤富氧混合燃烧污染物生成机理和成灰特性研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [13] 段伦博, 周骛, 屈成锐, 等. 50kW 循环流化床  $O_2/CO_2$  气氛下煤燃烧及污染物排放特性[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(5): 7-12.
- [14] Jia, L., Tan, Y., Mccalden, D., et al. (2012) Commissioning of a 0.8MW<sub>th</sub> CFBC for Oxy-Fuel Combustion. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **7**, 240-243. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2011.10.009>
- [15] Stanger, R., Wall, T., Sporl, R., et al. (2015) Oxyfuel Combustion for  $CO_2$  Capture in Power Plants. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **40**, 55-125. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.06.010>
- [16] 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>
- [17] Chowdhury, M.S.R., Azad, A.K., Karim, M.R., Naser, J. and Bhuiyan, A.A. (2019) Reduction of GHG Emissions by Utilizing Biomass Co-Firing in a Swirl-Stabilized Furnace. *Renewable Energy*, **143**, 1201-1209. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.103>
- [18] Maxey, M.R. and Riley, J.J. (1983) Equation of Motion for a Small Rigid Sphere in a Nonuniform Flow. *Physics of Fluids*, **26**, 883-889. <https://doi.org/10.1063/1.864230>
- [19] Yin, C.G. and Yan, J.Y. (2016) Oxy-Fuel Combustion of Pulverized Fuels: Combustion Fundamentals and Modeling. *Applied Energy*, **162**, 742-762. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.149>
- [20] Yin, C., Johansen, L.C.R., Rosendahl, L.A. and Kær, S.K. (2010) New Weighted Sum of Gray Gases Model Applicable to Computational Fluid Dynamics (CFD) Modeling of Oxyfuel Combustion: Derivation, Validation, and Implementation. *Energy & Fuels*, **24**, 6275-6282. <https://doi.org/10.1021/ef101211p>
- [21] Alvarez, L., Yin, C., Riaza, J., et al. (2013) Oxy-Coal Combustion in an Entrained Flow Reactor: Application of Specific Char and Volatile Combustion and Radiation Models for Oxy-Firing Conditions. *Energy*, **62**, 255-268. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.08.063>
- [22] Toporov, D., Bocian, P., Heil, P., et al. (2008) Detailed Investigation of a Pulverized Fuel Swirl Flame in  $CO_2/O_2$  Atmosphere. *Combustion and Flame*, **155**, 605-618. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2008.05.008>
- [23] Warzecha, P. and Boguslawski, A. (2014) LES and RANS Modeling of Pulverized Coal Combustion in Swirl Burner for Air and Oxy-Combustion Technologies. *Energy*, **66**, 732-743. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.12.015>
- [24] Zhou, M.M., Wang, S., Luo, K. and Fan, J.R. (2022) Three-Dimensional Modeling Study of the Oxy-Fuel Co-Firing of

---

Coal and Biomass in a Bubbling Fluidized Bed. *Energy*, **247**, Article ID: 123496.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123496>

- [25] 范宝田, 严祯荣, 苏厚德, 等. 煤粉耦合生物质气协同降低 NO<sub>x</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的排放技术[J/OL]. 化工进展: 1-11, 2023-05-08. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2022-2189>
- [26] 金旭东. CO<sub>2</sub> 热物理化学效应对煤粉颗粒富氧燃烧特性影响的机理研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [27] 刘沁雯. 煤/生物质流态化富氧燃烧特性实验及数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2019.
- [28] 孙倩倩, 刘迎春, 卿山, 等. 600 MW 机组煤粉混燃生物质气锅炉燃烧特性研究[J]. 热力发电, 2021, 50(5): 75-80.