

预热解式煤粉工业锅炉大比例直燃耦合生物质的数值模拟研究

董 琨^{1,2}, 张瀚霖³, 谭厚章³, 张嘉烨³, 胡中发⁴, 程占军¹, 周月桂⁴, 王学斌³

(1. 天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300350; 2. 国家能源集团新能源技术研究院有限公司, 北京 102211; 3. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049; 4. 上海交通大学 热能工程研究所, 上海 200240)

摘 要: 燃煤耦合零碳的生物质是现阶段燃煤过程中减少 CO_2 排放成本最低和技术最成熟的技术。根据我国生物质资源分布国情, 受生物质资源收集成本限制, 在现有燃煤火电机组上只能进行低比例的耦合掺烧, 但分布式供能燃煤工业锅炉具备进行大比例耦合甚至全部改烧生物质燃料的条件。目前链条炉和流化床锅炉掺烧和全烧生物质在国内已得到较为广泛的应用, 然而相对更高效和自动化程度更高的煤粉工业锅炉大比例耦合生物质的研究和工业应用案例较少。针对近年来国内新发展的低 NO_x 预热解式煤粉工业锅炉大比例直燃耦合生物质甚至全烧生物质的可行性, 通过 CFD 数值模拟进行初步探索, 重点对大比例耦合生物质对预热解式煤粉工业锅炉温度场、壁面热流密度、气氛场和 NO_x 排放的影响进行评估。数值计算结果表明: 预热解式煤粉工业锅炉大比例耦合生物质后, 炉内的温度场、壁面热流密度和气氛场总体分布趋势与纯煤粉燃烧相似; 随着生物质耦合比例的增加, 主燃区燃烧过程得到强化, 但由于生物质含水量较高, 火焰总体存在着火延迟现象, 主燃区消耗氧气的速率有所降低, 挥发分与 CO 摩尔分数明显升高。受生物质燃料中含氮量高和火焰推迟的双重影响, 随着生物质耦合比例的增加, NO_x 排放先增加后减少。研究结果表明预热解式煤粉燃烧技术可实现煤粉工业锅炉大比例耦合生物质甚至全部改烧生物质, 在适当控制生物质燃料收到基氮含量的条件下, 大比例耦合生物质可显著降低锅炉 NO_x 排放。

关键词: 预热解燃烧技术; 煤粉燃烧; 工业锅炉; 生物质掺烧; NO_x 排放

中图分类号: TK16

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2023)03-1395-08

Numerical simulation of biomass high-ratioco-firing in a pre-pyrolysis pulverized coal industrial boiler

DONG Kun^{1,2}, ZHANG Hanlin³, TAN Houzhang³, ZHANG Jiaye³, HU Zhongfa⁴,
CHENG Zhanjun¹, ZHOU Yuegui⁴, WANG Xuebin³

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. CHN Energy New Energy Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 102211, China; 3. Department of Thermal Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 4. Institute of Thermal Energy Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Co-firing of carbon-neutral biomass with coal is the most economic and promising technology to reduce CO_2 emission from coal combustion currently. Limited by the biomass distribution feature and collection cost in China, the biomass co-firing in large-scale coal power plants can only be at a small ratio of biomass. However, for the industrial boilers used for distributing energy system, it is able to co-fire biomass at a high ratio and even purely burn biomass.

收稿日期: 2022-01-04 修回日期: 2022-01-28 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2022.0012

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2017YFB0603902)

作者简介: 董 琨 (1979—), 男, 天津人, 高级工程师。E-mail: 16800807@chnenergy.com.cn

通讯作者: 王学斌 (1984—), 男, 山东潍坊人, 教授。E-mail: wxb005@mail.xjtu.edu.cn

引用格式: 董琨, 张瀚霖, 谭厚章, 等. 预热解式煤粉工业锅炉大比例直燃耦合生物质的数值模拟研究[J]. 煤炭学报, 2023, 48(3): 1395-1402.

DONG Kun, ZHANG Hanlin, TAN Houzhang, et al. Numerical simulation of biomass high-ratioco-firing in a pre-pyrolysis pulverized coal industrial boiler[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(3): 1395-1402.



移动阅读

Biomass combustion in the grate furnace and circulated fluidized bed has been widely adopted, in contrast, the study and application of biomass co-firing in the pulverized coal industrial boilers of higher efficiency and automation degree at a high-ratio is rare. In this paper, the biomass high-ratio co-firing in a new developed pre-pyrolysis pulverized coal industrial boiler is studied. The effects of biomass co-firing ratio on temperature distribution, wall heat flux, specie distribution and NO_x emission are discussed. The CFD modeling results show that biomass co-firing or even pure combustion follows the similar temperature and specie distribution of pure coal combustion. With the increase of biomass co-firing ratio, the combustion in the primary zone is strengthened, however, due to the higher moisture content in biomass, the flame is overall delayed, the oxygen consumption rate decreases, and the volatile and CO concentrations increases in the primary combustion zone. Because of the dual effects from flame delay and higher nitrogen content in biomass, with the increase of biomass co-firing ratio, the NO_x emission increases first and then decreases. This study indicates that the pre-pyrolysis pulverized coal combustion technology is feasible to co-fire biomass at a high ratio and even hundred percent. When the nitrogen content of biomass is controlled, the NO_x emission can be significantly reduced by biomass co-firing.

Key words: pre-pyrolysis combustion; pulverized coal combustion; industrial boiler; biomass co-firing; NO_x emission

生物质能源是一种可再生的零碳排放燃料,资源产量丰富,对其充分利用是实现我国“双碳”目标的重要途径。目前对生物质能源进行利用的方式主要有直燃、气化与热解 3 种,其中,直燃技术具有成本低、应用范围广等优势,是基于我国国情下的重点研究对象^[1]。纯烧生物质往往会产生炉内结渣与腐蚀等问题,相比之下,煤与生物质耦合燃烧能够充分利用已有的燃煤设备,是实现燃煤过程 CO_2 减排成本最低且最为成熟的技术。目前国内外关于煤与生物质耦合燃烧技术在燃煤电站锅炉上的应用研究已较为丰富,但受制于生物质收集成本高等约束,研究重点仍集中在低比例掺烧带来的各方面影响上。MUNIR 等^[2]在 20 kW 下行炉上进行生物质掺烧比例 15% 以内的实验研究,关注燃烧特性与污染物的排放情况,发现掺烧生物质有利于提高燃烧效率,并能降低 NO_x 排放。HELMUT 等^[3]在 0.5 MW 燃烧炉上进行煤与生物质的耦合燃烧实验,重点关注了掺烧比例等因素对炉内燃烬率与 NO_x 排放的影响,结果表明生物质掺烧比例在 20% 以下的工况均能实现 99% 的整体燃烬率,且生物质作为再燃燃料显著增强了 NO_x 的还原。

不同于集中供能的电站锅炉,现有分布式供能的燃煤工业锅炉具备进行大比例耦合甚至全部改烧生物质燃料的条件。目前链条炉和流化床锅炉掺烧和全烧生物质在国内已得到较为广泛的应用。陈拓等^[4]在 60 MW 循环流化床锅炉上开展大比例掺烧生物质实验,发现锅炉热效率升高,同时 NO_x 排放有所降低。然而,相比之下更高效且自动化程度更高的煤粉工业锅炉大比例直燃耦合生物质的研究和工业应用案例较少。目前煤粉工业锅炉所面临的主要挑战是 NO_x 排放控制,而预热解式燃烧技术已逐渐被认可

为解决低氮难题的有效手段之一。朱书骏等^[5]研究了难燃燃料在循环流化床内的预热解燃烧应用,其试验系统最终验证了预热解式燃烧技术的可行性与通用性,实现稳定燃烧的同时降低了 NO_x 排放。许鑫伟等^[6]设计了一种煤粉工业锅炉预热解式低氮燃烧器,实验结果表明,应用该燃烧器能够使得煤粉着火稳定,在最佳配风比下 NO_x 排放可达到相应标准。陈隆等^[7]以 6 t/h、采用旋流预热解式燃烧器的锅壳式小容量煤粉工业锅炉作为研究对象,研究了生物质掺烧比例对锅炉热效率与污染物排放的影响,结果表明随着生物质掺混比例的提高,燃料中挥发分升高, NO_x 排放降低。由此可见,若能利用预热解式的煤粉燃烧技术实现大比例耦合甚至纯烧生物质,将有效解决低氮难题,实现生物质能源的充分利用。

笔者对 25 t/h 预热解式煤粉工业锅炉内耦合燃烧生物质进行数值模拟研究,讨论大比例耦合生物质对炉内温度场、壁面热流密度、气氛场与 NO_x 排放的影响,以期对大比例直燃耦合生物质甚至全烧生物质在预热解式煤粉工业锅炉上的应用提供理论支撑。

1 模型与设置

1.1 模型验证与燃料特性

本文数值模拟依托某 25 t/h 预热解式煤粉工业锅炉展开。该锅炉炉膛呈 L 型布置,卧式炉为火焰燃烧的主要区域,立式炉为火焰燃烬区域。该煤粉工业锅炉的燃烧器为新型预热解式低氮燃烧器,由内到外包括中心风、一次风、旋流内二次风、预燃室、外二次风及燃烧区域等,一次风与内二次风之间设有分离套筒,使一次风射流与内二次风射流分离布置。内二次风出口与预燃室相连,预燃室上在圆周上均匀布置

16 个外二次风喷口,外二次风可通过风箱均匀布风送入炉膛。生物质将与煤质燃料耦合后经由一次风送入炉膛,通过改变 2 者的相对给粉量来调节生物质的掺烧比。锅炉的物理模型与燃烧器喷口的布置如图 1 所示。

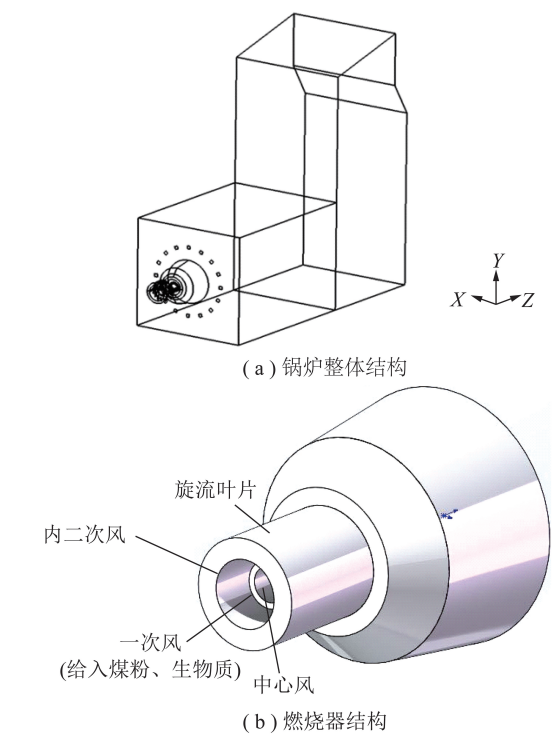


图 1 工业锅炉物理模型^[10]

Fig.1 Physical model of industrial boiler^[10]

数值模拟的网格模型采用 ICEM 软件进行划分,采用六面体结构化网格,并在预燃室内部、炉膛主燃区等重要计算区域进行网格加密。经网格独立性验证,最终选择网格数量为 118.2 万。同时,对典型煤粉燃烧工况进行模拟计算,将计算结果与实验测量温度场进行对比,验证了模拟的可靠性,可参照文献[8]。实验结果与模拟结果对比如图 2 所示,误差为 $\pm 4.5\%$,小于工业常规要求的 10%。因此,可认为该模型能较为准确地预测炉膛内的燃烧情况。

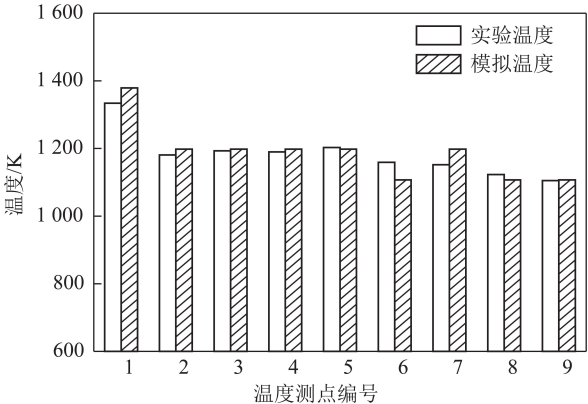


图 2 测点实验结果与模拟结果对比^[10]

Fig.2 Temperature comparison between experiment and modleing^[10]

数值模拟研究选用烟煤作为煤质燃料,生物质燃料为一种典型的通用生物质^[9]。2 种燃料的工业分析与元素分析见表 1。

表 1 燃料的元素分析及工业分析
Table 1 Ultimate and proximate analysis of fuels

燃料	工业分析/%				元素分析/%					收到基低位发热量/ (MJ·kg ⁻¹)
	M _{ar}	A _{ar}	V _{ar}	FC _{ar}	C _{daf}	H _{daf}	O _{daf}	N _{daf}	S _{daf}	
烟煤	5.1	12.5	31.2	51.2	75.8	5.3	17.4	1.2	0.3	25.1
生物质	9.0	6.9	65.4	18.7	54.3	6.6	36.9	2.0	0.2	18.3

1.2 计算方法与模型设置

固体燃料颗粒在锅炉内发生氧化、燃烧并释放热量的过程是一个复杂的物理化学过程,伴随着大量辐射、对流换热及热传导^[12]。

煤粉工业锅炉运行时,炉膛内部高温烟气的流动认为处于湍流状态,为了考虑湍流对流动带来的影响,本文采用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型进行求解^[10],该模型适用于模拟圆形旋转射流等带旋的湍流流动,与本文的燃烧器产生的流场十分贴合。对于固体燃料颗粒在炉膛内部的运动,采用离散相模型进行模拟,该模型分别采用欧拉法与拉格朗日法对连续相与离散相的运动过程进行求解。对于固体燃料颗粒内部的传热传质行为,结合实际工艺流程,煤、生物质燃料在

进入煤粉工业锅炉前已进行磨制处理,粒径较小,能较好地符合颗粒内部温度均匀假说的成立条件;同时,前人研究^[11]指出,当颗粒粒径在几百微米以下时,其内部的传热传质行为十分微弱,对燃烧过程的影响极小,因此,暂不考虑燃料颗粒内部的传热传质行为。

固体燃料颗粒在炉膛内部的燃烧过程是数值模拟的重点,包括热解、挥发分气相燃烧和焦炭燃烧 3 个过程。由于燃料特性差异,煤、生物质在燃烧过程中可能存在较大差别,在模型选择时需考虑。

对于烟煤燃烧过程,其热解过程采用两步竞争反应速率模型进行描述,考虑了挥发分析出速率受挥发分的影响。焦炭燃烧过程采用扩散/动力模型进行描述,该模型考虑了焦炭表面的反应速率和 O_2 向颗粒

表面的扩散速率对焦炭表面燃烧过程的影响,能够较好地模拟焦炭的实际燃烧状况^[12]。

对于生物质燃烧过程,考虑到其挥发分高且更易挥发的特点,参考前人研究^[13],采用单步反应速率模型对其热解过程进行描述,其中指前因子为 $4.310\ 6\times 10^7\ \text{s}^{-1}$,活化能为 $8.349\ 2\times 10^7\ \text{J/kmol}$ 。同时,由于生物质焦炭更易着火与燃烧,直接采用煤焦炭的模型参数将无法对生物质焦炭燃烧过程进行准确描述,因此采用 Intrinsic 模型对该过程进行模拟,参数选择参考文献^[14],参数包括控制质量扩散的系数为 5×10^{-12} ,控制动力反应的指前因子和活化能分别为 $0.66\ \text{s}^{-1}$ 和 $7.48\times 10^7\ \text{J/kmol}$,焦炭的孔隙率为 0.4,平均孔半径为 $1.6\times 10^{-6}\ \text{mm}$,比内表面积为 $4\times 10^5\ \text{m}^2/\text{kg}$ 。

对于固体燃料颗粒的挥发分气相燃烧过程,参考

文献[9],认为煤和生物质的挥发分为单一组分,并根据元素守恒假设其组成形式为 $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z$,经计算,本文煤和生物质的挥发分组成分别为 $\text{C}_{1.44}\text{H}_{2.75}\text{O}_{0.57}$ 和 $\text{C}_{1.02}\text{H}_{2.52}\text{O}_{0.88}$ 。采用有限速率/涡耗散模型对该过程进行描述,对于挥发分气相燃烧过程发生的化学反应,假设其为生成中间产物 CO 的两步反应,反应的化学方程式与动力学参数见表 2。对于炉膛内部的辐射作用,采用 WSGGM 模型计算三原子气体的吸收系数,并选择适用性更广的 DO 模型求解^[15]。

基于收敛的热态场对炉膛内部的 NO_x 生成进行计算,同时考虑热力型 NO_x 和燃料型 NO_x 的生成。针对煤和生物质不同的燃烧特性,参考 YIN 等^[16]研究,认为煤的挥发分氮直接转化为 HCN,生物质的挥发分氮转化为 NH_3 ,2 者的焦炭氮均直接转化为 NO。

表 2 气相反应方程
Table 2 Reaction of gas-phase

化学反应及指数	指前因子/ $10^{11}\ \text{s}^{-1}$	活化能/ $(10^8\ \text{J}\cdot\text{kmol}^{-1})$
$[\text{C}_{1.44}\text{H}_{2.75}\text{O}_{0.57}]^{0.2} + 1.2576[\text{O}_2]^{1.3} = 1.44[\text{CO}]^0 + 1.37[\text{H}_2\text{O}]^0$	2.119	2.027
$[\text{C}_{1.02}\text{H}_{2.52}\text{O}_{0.88}]^{0.2} + 0.7024[\text{O}_2]^{1.3} = 1.02[\text{CO}]^0 + 1.26[\text{H}_2\text{O}]^0$	2.119	2.027
$[\text{CO}]^1 + 0.5[\text{O}_2]^{0.25} = [\text{CO}_2]^0$	22.39	1.700

完成各模型设置后,根据耦合燃烧生物质的比例设计不同工况,对其边界条件进行相应调整后模拟计算。最终模拟结果采用 TECPLOT 进行后处理,以便后续分析讨论。

1.3 模拟工况与边界条件

L 型煤粉工业锅炉中变比例耦合燃烧生物质的数值模拟研究,按照生物质掺烧比例分为了 6 个工

况。模拟锅炉额定设计参数,并计算燃料的理论燃烧空气量,按照过量空气系数 1.65 送入过量空气,燃料经由燃烧器的一次风送入。为保证一定的炉膛输入热量与过量空气系数,在不同工况中根据掺烧比例计算得到生物质的需求量,并通过调节其质量流量实现掺烧比例的改变。

不同工况的编号与参数见表 3。

表 3 不同工况编号及参数

Table 3 Numbers and conditions parameters of different cases

工况	生物质	烟煤		生物质	
	掺烧比例/%	质量流量/ $(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	送粉温度/K	质量流量/ $(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	送粉温度/K
1	0	0.522	300	0	300
2	10	0.470	300	0.069 5	300
3	20	0.418	300	0.139 0	300
4	30	0.366	300	0.209 0	300
5	50	0.261	300	0.348 0	300
6	100	0	300	0.695 0	300

2 模拟结果及分析

2.1 温度场与壁面热流密度分布

2.1.1 温度场分布

不同工况下锅炉内部的温度场分布云图如图 3 所示。从图 3 可以看出,各工况下炉膛内部火焰充满

程度较好,且高温区域集中在预燃室与卧式炉的主燃区,而在立式炉燃尽区内,随着炉膛高度的增加,温度迅速降低。同时,随着耦合燃烧生物质比例的增加,卧式炉内的高温区域逐渐扩大,火焰呈变大的趋势。其原因在于:生物质的挥发分较高,初期受热后大量释放,而且生物质焦的着火特性优于烟煤,因此卧式

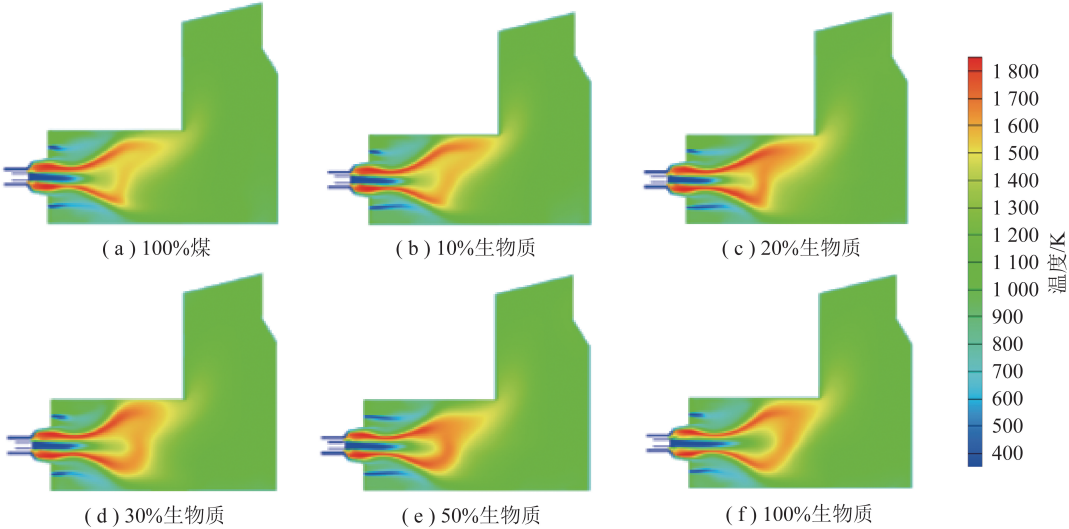


图 3 不同工况下炉膛温度分布云图

Fig.3 Temperature distribution in furnace

炉主燃区内的燃烧随着耦合生物质比例的增加而得到强化。

结合图 4 可知,随着耦合生物质比例的增加,卧式炉中心的最高温度位置存在延后现象,纯生物质燃烧与纯煤粉燃烧相比,卧式炉中心最高温度位置后移约 0.9 m,其主要原因:所选生物质燃料含有更高的水分,当掺烧比例增大时会影响燃料的着火特性。

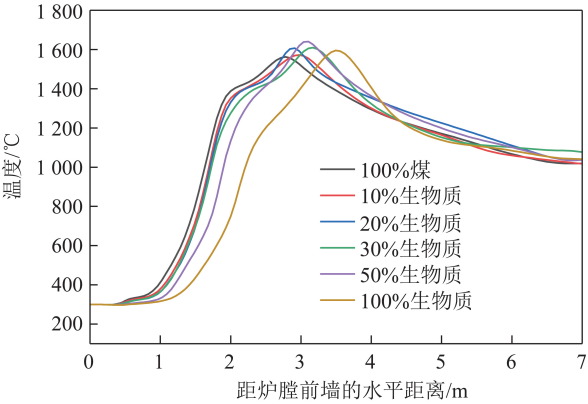


图 4 不同工况下卧式炉中心温度的变化曲线

Fig.4 Variation of temperature distribution in horizontal furnace center under different conditions

2.1.2 壁面热流密度分布

图 5 为不同工况下炉膛左墙的壁面热流密度分布对比。从图 5 可看出,不同工况下的炉膛左墙壁面热流密度呈基本相同的分布规律:在卧式炉内,沿着水平方向壁面热流密度呈先升高、后降低的分布,结合温度分布特点可知,这是由于卧式炉的主燃区处于炉膛前中段,在该区域内燃烧最为剧烈、烟气温度最高,同时随着内、外二次风的进入,烟气流动速度有所增加,因此辐射传热与对流传热均得到强化。而在立式炉燃烬区,随着炉膛高度的增加,燃烧已基本完全,

烟气温度逐渐降低,因此壁面热流密度也逐渐减小。对比不同工况下炉膛左墙的壁面热流密度分布,随着耦合直燃生物质比例的增加,高传热量的区域延后,这与生物质的含水量所造成的着火延迟有直接关系。

2.2 组分分布

2.2.1 O₂分布

炉膛内部 O₂ 体积分数可用以分析燃烧规律与烟气流动情况。不同工况下卧式炉中心 O₂ 摩尔分数的变化如图 6 所示。从图 6 可以发现,各工况下 O₂ 摩尔分数沿卧式炉中心具有相似的变化规律:在预燃室与卧式炉主燃区,燃料将发生剧烈燃烧,O₂ 被迅速消耗,形成低氧区域;而在卧式炉后半段,随着内、外二次风的喷入,O₂ 摩尔分数逐渐升高,使燃料完全燃烧。对比不同工况下的变化曲线,可以发现,随着生物质掺烧比例的增加,预燃室与卧式炉主燃区消耗 O₂ 的速率有减慢趋势,且所形成的低氧浓度区域也存在滞后现象。分析认为,这是因为生物质中的 O 元素质量分数高于烟煤,在各工况输入热量相同的条件下,其需氧量更低;同时,结合温度场分布规律,认为低氧浓度区域滞后与着火延迟相符,卧式炉内主燃区后移将使得低氧浓度区域形成滞后。

2.2.2 挥发分分布

图 7 为不同工况下的炉膛内部挥发分分布云图。从图 7 可以发现,随着生物质掺烧比例的增加,炉膛内部的挥发分摩尔分数明显增大,且在预燃室存在集中的趋势。因为生物质燃料的挥发分高,约为煤质燃料的 2 倍,因此,在耦合燃烧生物质时,生物质掺烧比例越大,混合燃料的挥发分越高。同时,相比于煤质燃料,生物质燃料由于挥发分高、热值低,在预燃室内更易脱除挥发分并参与燃烧,因此,随着生物质掺烧

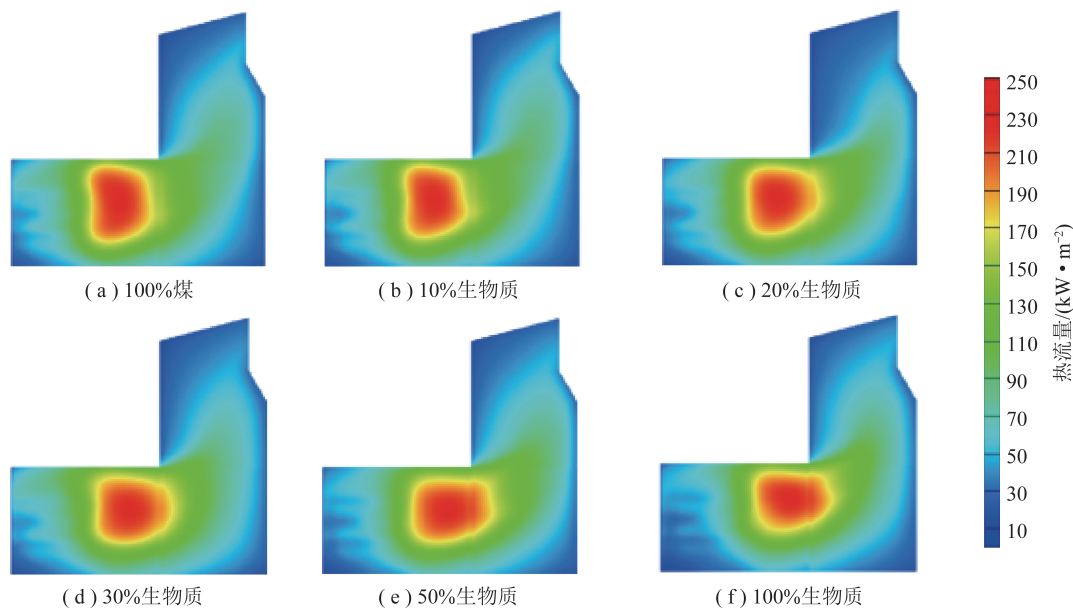


图 5 不同工况下炉膛左墙壁面热流密度分布云图
Fig.5 Heat flux distribution on left wall of furnace

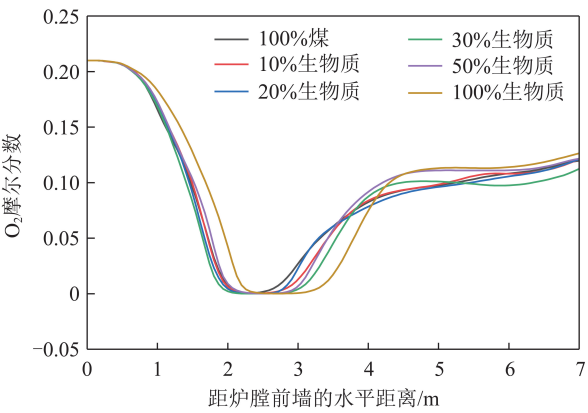


图 6 不同工况下炉膛中心氧气摩尔分数分布
Fig.6 Distribution of oxygen concentration along the central direction of furnace

比例的增加,预燃室内挥发分沿一次风流道析出量不断增加,并在水平炉膛前段高温区呈集中的趋势。

2.2.3 CO 分布

图 8 为不同工况下炉膛内部的 CO 摩尔分数分布。由图 8 可知,炉膛内 CO 主要分布在预燃室与卧式炉主燃区,且在预燃室出口分布更为集中,而立式炉燃尽区的 CO 摩尔分数已基本降至 0,其原因在于:部分燃料在预燃室内剧烈燃烧,使得 O₂ 摩尔分数迅速降低,导致该区域发生不完全燃烧,CO 摩尔分数明显升高;部分预燃室出口的高温烟气与一次风混合后,将会迅速加热一次风所携燃料并与 O₂ 反应,促使燃料在低氧浓度的还原性气氛中生成大量 CO;而随着外二次风的喷入,主燃区内将逐渐拥有充足的 O₂,使得燃烧进行完全,CO 摩尔分数逐渐降低。

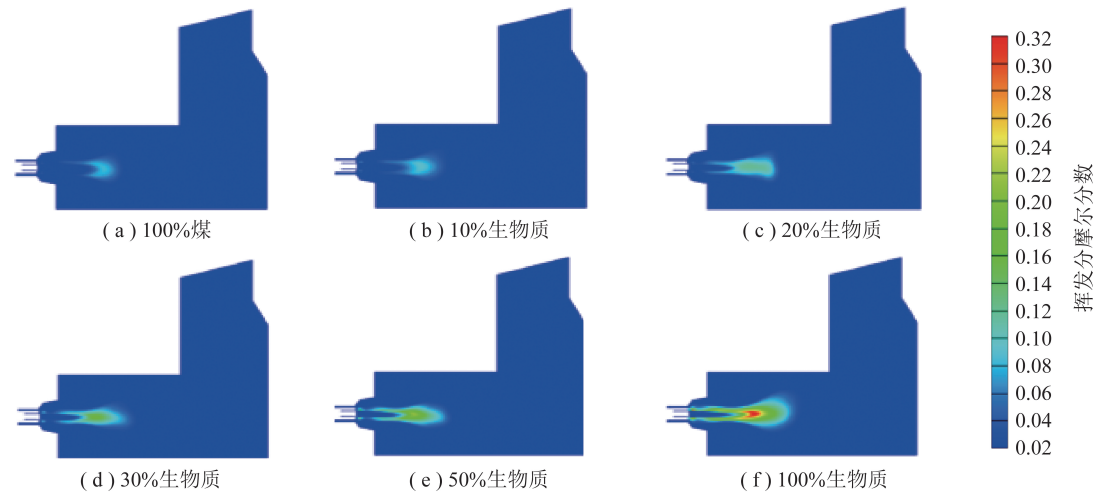


图 7 不同工况下炉膛内挥发分分布云图
Fig.7 Volatile distribution of volatile in furnace at different conditions

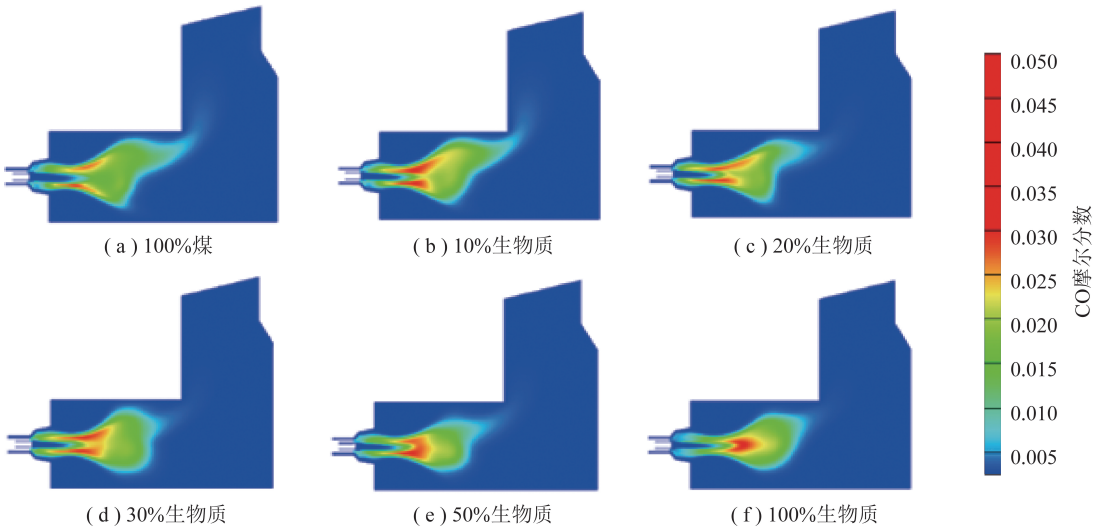


图 8 不同工况下炉膛内 CO 浓度分布云图

Fig.8 CO distribution in furnace at different conditions

结合图 9 发现,随着耦合燃烧生物质比例增加,上述分布规律更为明显,且预燃室出口 CO 摩尔分数逐渐增大,这是由于生物质的挥发分远高于烟煤,随着生物质掺烧比例的增加,混合燃料的挥发分逐渐升高,更易着火并燃烧,炉膛内 O_2 被迅速消耗,低氧区域将会发生更多不完全燃烧,导致 CO 摩尔分数上升。

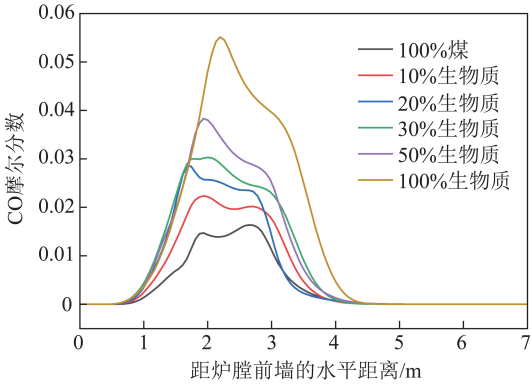


图 9 不同工况下炉膛中心 CO 分布

Fig.9 Distribution of CO concentration along the central direction of furnace at different conditions

2.3 氮氧化物排放

由于煤质燃料与生物质燃料的性质差异,在煤粉工业锅炉中大比例耦合燃烧生物质将会显著影响炉膛内部 NO_x 的生成,造成最终污染物排放的差异。由于以往研究所选取生物质 N 元素含量较低,在燃烧过程中生成的燃料型 NO_x 较少,因此最终 NO_x 排放量下降。本文选取的生物质 N 元素含量高于烟煤,分析其不同掺混比例耦合燃烧工况下 NO_x 排放的规律,将进一步完善耦合燃烧应用的理论支撑。

图 10 为 6 个不同掺烧比例工况下炉膛出口 NO_x 的变化规律。在生物质掺烧比例从 0 增至 20%时,炉

膛出口 NO_x 质量浓度呈上升趋势;而随着掺烧比例的进一步增加,炉膛出口 NO_x 质量浓度逐渐下降,纯烧生物质工况较纯烧煤粉工况下降了 23%。分析认为,生物质的掺烧对于 NO_x 的生成主要产生 2 个影响:① 由于所选生物质 N 元素含量较高,随着其掺烧比例的增加,混合燃料中 N 元素含量相应提高,生成的燃料型 NO_x 较多,在掺烧比例较低时导致最终 NO_x 排放浓度上升;② 生物质燃料具有燃点低、挥发分高的特点,其受热分解后析出的碳氢化合物等与 NO_x 发生还原反应,有效降低了 NO_x 排放^[17],而在本文新型预热解式低氮燃烧器中,在预燃室内易形成还原性氛围,更利于在燃烧初期反应,实现 NO_x 的高效还原。

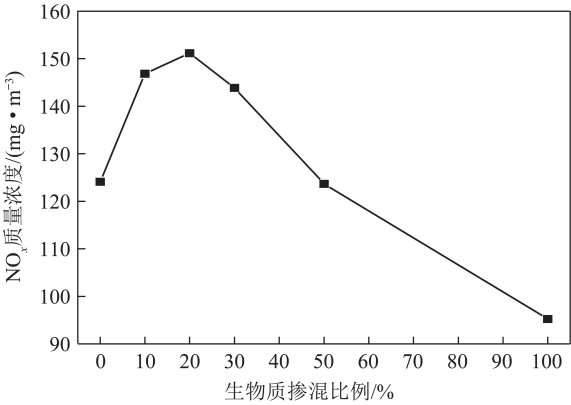


图 10 NO_x 出口排放浓度

Fig.10 NO_x emissions at furnace outlet

从图 10 可以看出,随着生物质掺烧比例增加,生物质燃料热解产生的还原性气氛对 NO_x 生成的影响强于 N 元素含量的影响,但在低比例掺烧条件下,生物质燃料 N 元素含量同样也会显著影响 NO_x 生成。因此,在实际应用中,可通过对生物质燃料中 N 元素含量和燃烧气氛的控制实现较显著的 NO_x 控制。

3 结 论

(1) 针对分布式供热的工业锅炉, 预热解式煤粉燃烧技术可实现煤粉工业锅炉大比例耦合生物质甚至全部改烧生物质, 在适当控制生物质燃料含水量与收到基氮含量的条件下, 大比例耦合生物质具备良好的炉内燃烧特性, 同时可显著降低锅炉 NO_x 排放。预热解式煤粉燃烧技术是实际工程上实现耦合生物质供能的有效技术手段之一。

(2) 数值模拟结果表明, 预热解式煤粉工业锅炉大比例耦合生物质后, 炉内的温度场和壁面热流密度总体分布趋势与纯煤粉燃烧相似。随着生物质耦合比例增加, 主燃区燃烧过程得到强化, 但由于生物质水分较高, 火焰总体存在火延迟现象, 生物质燃烧与纯煤粉燃烧相比, 炉膛中心最高温度推迟。预热解式煤粉工业锅炉大比例耦合生物质后, 主燃区消耗 O_2 的速率有所降低, 挥发分与 CO 含量明显上升, 且在预燃室内呈集中趋势。

(3) 在生物质耦合比例低于 20% 时, 受生物质燃料中氮含量高和火焰推迟的双重作用影响, NO_x 排放浓度随生物质耦合比例的增加逐渐上升; 而当耦合比例进一步增大甚至全烧生物质时, 还原性氛围的快速形成使 NO_x 排放浓度逐渐降低, 纯生物质燃烧相较于纯煤粉燃烧下降 23%。

参考文献 (References):

- [1] 马文超, 陈冠益, 颜蓓蓓, 等. 生物质燃烧技术综述[J]. 生物质化学工程, 2007(1): 43-48
MA Wenchao, CHEN Guanyi, YAN Beibei, et al. Review on biomass combustion technologies[J]. Biomass Chemical Engineering, 2007(1): 43-48.
- [2] MUNIR W S, NIMMO B M Gibbs. The effect of air staged, co-combustion of pulverised coal and biomass blends on NO_x emissions and combustion efficiency[J]. Fuel, 2010, 90(1): 126-135.
- [3] RÜDIGER H, KICHERER A, GREUL U, et al. Investigations in combined combustion of biomass and coal in power plant technology[J]. Energy & Fuels, 1996, 10(3): 789-796.
- [4] 陈隆, 谭静, 王乃继. 小容量煤粉工业锅炉掺烧生物质粉现场试验研究[J]. 煤炭技术, 2021, 36(5): 23-30.
CHEN Long, TAN Jin, WANG Naiji. Field experimental study of low capacity industrial pulverized coal boiler co-fire with biomass power[J]. Coal Quality Technology, 2021, 36(5): 23-30.
- [5] 朱书骏, 吕清刚, 朱建国, 等. 基于循环流化床预热的半焦燃烧试验研究[J]. 工程热物学报, 2018, 39(4): 887-892.
ZHU Shujun, LÜ Qinggang, ZHU Jianguo, et al. Experimental study on pulverized char combustion preheated by a circulating fluidized bed[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(4): 887-892.

- [6] 许鑫玮, 谭厚章, 王学斌, 等. 煤粉工业锅炉预燃式低氮燃烧器试验研究与开发[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(5): 36-41.
XU Xinwei, TAN Houzhang, WANG Xuebin, et al. Experimental study and development on a pre-burning low- NO_x burner for pulverized coal industry boiler[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(5): 36-41.
- [7] 陈拓, 李德波, 曾庭华, 等. 循环流化床锅炉生物质掺烧试验研究[J]. 发电设备, 2020, 34(6): 404-408.
CHEN Tuo, LI Debo, ZENG Tinghua, et al. Experimental study on coal-biomass co-combustion of a CFB Boiler[J]. Power Equipment, 2020, 34(6): 404-408.
- [8] 王小龙, 张飞龙, 王里, 等. 一次风速对高浓度煤粉预燃式低氮燃烧器性能影响的数值模拟[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(4): 132-138.
WANG Xiaolong, ZHANG Feilong, WANG Li, et al. Numerical simulation of the effect of primary air velocity on the performance of high-concentration pulverized coal pre-combustion low-nitrogen burner[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(4): 132-138.
- [9] WANG X, ZHANG J, XU X, et al. Numerical study of biomass Co-firing under Oxy-MILD mode[J]. Renewable Energy, 2020, 146: 2566-2576.
- [10] SHIH T H, LIOU W W, SHABIR A, et al. A new eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows model development and validation[J]. Computers Fluids, 1995, 24(3): 227-238.
- [11] YANG Y B, SHARIFI V N, SWITHENBANK J, et al. Combustion of a single particle of biomass[J]. Energy & Fuels, 2008, 22(1): 306-316.
- [12] WANG S, LUO K, HU C S, et al. CFD-DEM Study of the effect of cyclone arrangements on the gas-solid flow dynamics in the full-loop circulating fluidized bed[J]. Chemical Engineering Science, 2017, 172: 199-215.
- [13] ZHANG Jiaye, ZHENG Shijie, CHEN Chongming, et al. Kinetic model study on biomass pyrolysis and CFD application by using pseudo-Bio-CPD model[J]. Fuel, 2021, 293:
- [14] SMITH I W. The combustion rates of coal chars: A review[J]. Symposium (International) on Combustion, 1982, 19(1): 1045-1065.
- [15] 尚天坤. 贫煤低 NO_x 旋流燃烧器的试验及模拟研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.
SHANG Tiankun. Experimental study and numerical simulation on a low- NO_x semi-anthracite coal swirl burner[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [16] ÁLVAREZ L, GHAREBAGHI M, JONES J M, et al. Numerical investigation of NO emissions from an entrained flow reactor under oxy-coal conditions[J]. Fuel Processing Technology, 2012, 93(1): 53-64.
- [17] 王廷旭, 匡思维, 方庆艳, 等. O_2/CO_2 气氛下煤与生物质混燃 NO_x 的排放特性[J]. 煤炭转化, 2017, 40(2): 36-41.
WANG Tinxu, KUANG Siwei, FANG Qingyan, et al. NO_x emission characteristics of coal and biomass co-firing in O_2/CO_2 atmosphere[J]. Coal Conversion, 2017, 40(2): 36-41.