半焦掺混生物质无焰富氧燃烧 NO_x 机理模拟研究

吴佳佳1,李鹏飞1,张富强1,成鹏飞1,彭学平2,赵 亮2,代中元2,柳朝晖1

(1.华中科技大学煤燃烧与低碳利用全国重点实验室,湖北武汉 430074;2.天津水泥工业设计研究院有限公司,天津 300131)

摘 要:随着煤化工行业的快速发展,产生了大量半焦,但其大规模低碳利用仍存在挑战。半焦挥发分 含量较低,在燃烧过程中常面临着火困难和燃尽率低的问题。掺混燃烧特性相对较好的生物质可望改 善半焦的燃烧性能,提高燃尽率。由于半焦固定碳含量较高,燃烧会产生大量 CO2。无焰富氧燃烧既 能实现高浓度 CO2 捕集,又能显著降低 NO 排放。但是目前半焦掺混生物质在无焰富氧氛围相关的研 究较少,氮转化特性尚不明确。为了研究无焰富氧气氛半焦和生物质掺烧的燃料氮转化特性,采用数 值模拟方法,在对模型进行详细验证的基础上,深入探讨生物质掺混比对掺烧过程氮转化特性的影响, 并对不同类型 NO 的单独贡献进行分析。结果表明,无焰富氧燃烧下,炉内烟气的卷吸效应始终保持 在较高水平。随着生物质掺混比增大,炉内高温区提前,峰值温度升高,同时低氧区范围扩大,挥发分 含量增加,CO含量增多并且分布区域更广;与纯半焦燃烧相比,纯生物质燃烧的峰值温度升高了 105 K。当生物质掺混比为 25% 时,出口总 NO 浓度显著降低;当生物质掺混比在 50% 到 100% 之间 时,出口总 NO 浓度无明显变化。出口总 NO 浓度主要由燃料型 NO 生成量和 NO 再燃量决定,其中 燃料型 NO 起主导作用。随着生物质掺混比由 0 增大到 75%, NO 再燃量由 5×10⁻⁶ 增加到 35×10⁻⁶。 当生物质掺混比小于 50% 时,燃料型 NO 生成量不断降低,其中半焦 NO 的生成减少占主导地位,生物 质 NO 的增加对燃料型 NO 的影响有限。推荐采用 25% 的生物质掺混比,在此条件下能有效抑制 NO 的生成;与纯半焦燃烧相比,此时出口总 NO 浓度降低了 33%,主要是因为燃料型 NO 生成量减少 了 30%, 而 NO 再燃影响相对较小。

关键词:半焦;生物质;无焰富氧燃烧;燃料氮;数值模拟

中图分类号:TK16 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2025)04-0085-12

Numerical simulation on NO_x mechanism in flameless oxy-fuel combustion of semi-coke and biomass blends

WU Jiajia¹, LI Pengfei¹, ZHANG Fuqiang¹, CHENG Pengfei¹, PENG Xueping², ZHAO Liang²,

DAI Zhongyuan², LIU Zhaohui¹

(1. State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Tianjin Cement Industry Design & Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300131, China)

Abstract: The coal chemical industry has expanded rapidly, producing a substantial amount of semi-coke. However, its large-scale, lowcarbon utilization remains challenging. Semi-coke has low volatile content, making it hard to ignite and burn completely. Blending semicoke with biomass, which exhibits superior combustion characteristics, is a promising approach to enhance combustion performance and increase burnout rates. Due to the high fixed carbon content of semi-coke, its combustion generates a significant amount of CO_2 . Flameless oxy-fuel combustion can realize both high concentration CO_2 capture and significantly reduce NO emissions. However, research on the co-combustion of semi-coke and biomass in flameless oxy-fuel atmospheres is limited, and the mechanisms of nitrogen conversion are not well understood. To study fuel nitrogen conversion in semi-coke and biomass co-combustion under flameless oxy-fuel conditions, numerical simulation is carried out based on detailed model validation. The effects of biomass blending ratio on nitrogen conversion

收稿日期: 2025-03-01;策划编辑: 白娅娜 ;责任编辑: 黄小雨	DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.CBJ25030102
---	--

作者简介:吴佳佳(2000—), 女, 湖北荆州人, 硕士研究生。E-mail: wjj2302267007@163.com

通讯作者:李鹏飞(1986—),男,湖北武汉人,教授,博士生导师。E-mail: pfli@hust.edu.cn

引用格式:吴佳佳,李鹏飞,张富强,等.半焦掺混生物质无焰富氧燃烧 NO_x机理模拟研究 [J].洁净煤技术,2025,31(4): 85-96.

WU Jiajia, LI Pengfei, ZHANG Fuqiang, et al. Numerical simulation on NO_x mechanism in flameless oxy-fuel combustion of semi-coke and biomass blends[J].Clean Coal Technology, 2025, 31(4): 85–96.



基金项目:湖北省自然科学基金重点资助项目(2025AFA096);国家重点研发计划资助项目(2024YFB4105805)

characteristics are thoroughly investigated, and the individual contributions of different NO types are analyzed. Results show that flameless oxy-fuel combustion maintains a high level of flue gas entrainment. As the biomass blending ratio increases, the high-temperature zone shifts forward, and the peak temperature rises. Additionally, the low-oxygen zone expands, volatile content increases, and CO concentration rises with a wider distribution. Compared to pure semi-coke combustion, pure biomass combustion increases the peak temperature by 105 K. When the biomass blending ratio is 25%, the total outlet NO concentration is significantly reduced. In contrast, when the biomass blending ratio is between 50% and 100%, there is no significant change in the total outlet NO concentration. The total NO concentration at the outlet is primarily determined by the generation of fuel NO and NO reburning, with fuel NO playing a dominant role. As the biomass blending ratio increases from 0% to 75%, the NO reburning amount rises from 5×10^{-6} to 35×10^{-6} . When the biomass blending ratio of fuel NO continuously decreases, driven mainly by the reduction in semi-coke NO, while the increase in biomass NO has a limited impact. A biomass blending ratio of 25% is recommended, as it can effectively suppress NO generation. At this ratio, the total outlet NO concentration is reduced by 33% compared to pure semi-coke combustion, mainly due to a 30% decrease in the generation of fuel NO, while the impact of NO reburning is relatively minor.

Key words: semi-coke; biomass; flameless oxy-fuel combustion; fuel nitrogen; numerical simulation

0 引 言

随着我国煤化工行业的快速发展,产生了大量 煤热解和气化副产品半焦^[1]。尽管半焦在冶金、化 工、吸附剂等领域^[2]具有一定的应用潜力,但其产 量的快速增长可能超出这些领域的需求,导致半焦 储量持续累积。半焦燃烧是实现其大规模利用的重 要技术途径。由于其着火温度高、燃烧反应速率慢 以及燃尽时间长,半焦燃烧往往存在着火困难和燃 尽率低的问题^[3]。生物质具有高挥发分的特性,而 半焦则表现出较高的固定碳含量和较低的反应活 性。这种组分特征的显著差异使得两者在燃烧特性 上呈现出良好的互补性,将半焦与生物质掺烧有望 利用生物质的高挥发分特点改善半焦的反应活性^[4]。 另一方面,由于半焦固定碳含量高,半焦与生物质 掺烧仍然存在 CO₂ 排放高的问题; 而且, 虽然半焦 在热解过程中一部分燃料氮已经释放, 但燃烧过程 中释放的 NO_x 浓度仍然很高^[5]。

富氧燃烧技术^[6]利用空气分离获得的氧气和尾 部再循环烟气混合进行燃烧,可产生含有高浓度 CO₂的烟气,利于碳捕集、利用与封存(CCUS)。 半焦作为动力煤的替代燃料应用于燃烧领域^[7],结 合富氧燃烧技术,不仅可以有效缓解半焦产能过剩 问题,还能实现 CO₂大规模捕集。无焰燃烧技术^[8] 是一种利用高动量射流以及炉内烟气强烈卷吸的容 积燃烧方式,具有燃烧温度分布均匀、燃烧稳定性 高和低 NO_x 排放等特性^[9]。无焰富氧燃烧技术^[10] 通 过将富氧燃烧与无焰燃烧模式创新性结合,实现了 两种先进燃烧技术的优势互补,能更好改善燃烧性 能以及降低 NO_x 排放。将这一燃烧技术应用于半焦 与生物质掺烧,有望实现减污降碳的协同效应。这 一技术路线为半焦的清洁高效低碳利用提供了切实 可行的解决方案。

目前已有学者对半焦与生物质掺烧进行了研 究。武鹏魁等^[11]通过热重和动力学研究发现,半焦 掺混秸秆后,燃料的着火和燃尽温度下降,燃烧性 能提升,且掺烧效果与掺烧燃料的种类和比例有 关。WANG 等^[12] 研究了油页岩半焦与玉米秸秆的 相互作用及动力学分析,研究表明半焦与玉米秸秆 掺烧可以实现提前着火和燃尽,半焦挥发分燃烧提 前,玉米秸秆固定碳燃烧延迟。QIN 等^[13] 发现半焦 与糠渣掺烧的交互作用发生在燃烧过程中的每个阶 段。当糠渣掺混比高于80%时,两种燃料之间会相 互抑制。马仑等[14] 对富氧气氛半焦和秸秆掺烧的交 互作用进行了实验研究,发现掺混秸秆对挥发分燃 烧阶段交互作用影响相对较弱,对固定碳燃烧阶段 交互作用影响显著。张锦萍等^[15]研究了 O₂/CO₂条 件下半焦与生物质的掺烧及反应动力学特性,结果 表明 O₂/CO₂气氛下掺混生物质可以改善半焦的着 火特性,但会延迟半焦的燃尽。HU等⁹⁹对无焰燃 烧下木屑和残炭的掺混燃料进行了中试研究,将无 焰燃烧的燃料适应性扩展到固体废弃混合物,还证 明了无焰燃烧对燃料氮和 PM2.5 排放的抑制作用。

已有研究主要集中于空气氛围下半焦与生物质 掺烧的燃烧特性分析,而对于燃料氮的转化特性, 尤其是富氧气氛下的研究相对较少。本研究采用掺 混生物质的方式提高燃料挥发分含量,一定程度上 改善半焦的着火和燃尽,并耦合无焰富氧燃烧技术 实现减污降碳协同。借助数值模拟方法,本研究深 入探讨了无焰富氧氛围下半焦掺混生物质的燃料氮 转化机理,揭示了生物质掺混比对掺烧过程氮转化 特性的影响,分析了各 NO 生成路径的具体贡献, 并分别评估了半焦和生物质各自的挥发分 NO 与焦 炭 NO 对燃料氮的独立贡献。

1 研究方法

1.1 模拟对象及方法

本研究选取 0.58 MW 国际火焰研究基金会 (International Flame Research Foundation, IFRF) 燃烧炉^[16]作为模拟对象。该燃烧炉的具体结构如 图 1 所示,整个炉体长度为 6.25 m,横截面为 2 m× 2 m,燃料入口直径为 0.027 3 m,氧化剂入口直径 为 0.125 m,燃料入口与氧化剂入口相距 0.28 m。燃 烧炉共设有 7 个不同截面,沿 x 轴方向距离分别为 0.15,0.44,0.735,1.32,2.05,3.22 m 和 4.97 m, 用于在试验过程中进行数据采集。





试验条件下,一次风(燃料入口)风速为26m/s. 风温为 313 K, 组成包括 21% 的 O₂和 79% 的 N₂。 二次风(氧化剂入口)风速为 65 m/s,风温为 1623 K, 组成包括 19.7% 的 O₂、57.1% 的 N₂、8.1% 的 CO₂ 和 15.1% 的 H₂O。采用高速直喷射流, 高动 量的气流有助于在炉内形成烟气的强烈稀释效果, 是实现无焰燃烧的关键条件之一。本研究选取粒径 为 74~98 μm 的神华烟煤制备的半焦, 生物质为橄 榄渣。为了精确地描述半焦和生物质的颗粒尺寸特 性,采用 Rosin-Rammler 分布来模拟粒径分布。该 分布模型涵盖了 20 个不同的粒径等级,其中半焦的 平均粒径为 77 μm, 生物质的平均粒径为 100 μm。 半焦低位热值为 27.14 MJ/kg, 生物质低位热值为 18.65 MJ/kg,两种燃料的元素分析和工业分析见 表1。本文模拟工况保持燃烧功率一定,将半焦和 生物质两种燃料按热量掺混。在保持当量比、一次 风比例以及二次风比例与试验条件一致的前提下, 将初始氧浓度设定为 30%, 以模拟接近空气环境下 的燃烧条件。具体模拟工况见表 2。

由于燃烧炉具有对称性,考虑到模拟计算量,

仅对炉体 1/4 进行建模。网格划分采用六面体结构 化网格,并对入口等区域进行局部加密,经过网格 无关性验证,采用的网格数量为 36 万。为了准确预 测高速气流中颗粒的湍流混合和扩散行为,湍流模 型选用 Realizable k-ε 模型耦合标准壁面函数。辐射 模型选择离散坐标(discrete ordinates, DO)模型 并采用郭军军等^[17]改进的适用于富氧燃烧的灰气体 加权和模型,可显著提高非等温非均质 CO₂/H₂O 混 合物辐射特性的模拟精度。

半焦的脱挥发模型采用双竞争速率模型^[18],该 模型通过考虑两个竞争反应路径来描述挥发分的释 放过程,能较为准确地刻画燃料的脱挥发特性。相 比之下,生物质的脱挥发过程更为复杂。不同类型 的生物质在化学组成上存在显著差异,其主要成分 包括纤维素、半纤维素和木质素等。这些成分在热 解过程中表现出不同的反应特性,使得整个热解过 程难以通过详细的化学反应进行精确描述。本文生 物质脱挥发模型采用单一动力学模型^[19],指前因子 *A*为 1.9×10[°] s⁻¹,活化能*E*为 1.27×10⁸ J/kmol。

半焦的挥发分燃烧模型采用涡耗散概念(eddy-

	表 1	半焦和生物质元素分析和工业分析
Table 1	Elementa	l and industrial analysis of semi-coke and bion

(株本)	元素分析/%				工业分析/%			粒径分布参数/µm				
70044	C _{ar}	H _{ar}	O _{ar}	N _{ar}	S _{ar}	$V_{\rm ar}$	FC _{ar}	A _{ar}	M _{ar}	$D_{\rm ave}$	D _{max}	D_{\min}
半焦	75.9	1.5	2.7	1.3	0.5	12.3	69.6	15.7	2.4	77	160	40
生物质	45.7	5.6	31.0	1.6	0.2	65.4	18.7	6.9	9.0	100	150	75

表 2 模拟工况 Table 2 Simulated conditions

т: УП	燃料进口质量流量 / (kg・s ⁻¹)			质量流量/			
上沉 -	半焦	生物质		O ₂	CO ₂	H ₂ O	$(\mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-1})$
00% 生物质	0.005.24		一次风	21	79	0	0.008 11
0%生物质	0.005 34	0	二次风	31.8	55.4	12.8	0.037 61
この生物氏	0.004.01	0.001.00	一次风	21	79	0	0.008 01
25% 生初灰	0.004 01	0.00196	二次风	31.8	55.4	12.8	0.037 12
500(上脚手	0.002.67	0.002.02	一次风	21	79	0	0.007 91
50%生初质	0.002 67	0.003 92	二次风	31.8	55.4	12.8	0.036 66
7504片枷舌	0.001.24	0.005.00	一次风	21	79	0	0.007 81
75% 主初灰	0.001 34	0.005 88	二次风	31.8	55.4	12.8	0.036 19
1000(上枷舌	0	0.007.02	一次风	21	79	0	0.007 71
100% 生物质	U	0.007 83	二次风	31.8	55.4	12.8	0.035 74

dissipation concept, EDC)模型耦合胡帆等^[20]优化的 JL-MO 总包机理。EDC 模型能够考虑湍流和化学反应的交互作用。JL-MO 机理考虑了无焰富氧燃烧下低 O_2 和高 CO_2 浓度影响,能够更精确地预测无焰富氧燃烧条件下的关键组分浓度。根据文献^[21],半焦的挥发分成分主要为 CH_4 、CO、CO₂,通过元素分析和工业分析计算得出半焦挥发分组成近似为 $CH_4/CO/CO_2 = 58/29/13$ 。在已有研究^[19,22-23]中生物质的挥发分均设定为单一组分 $C_xH_yO_z$,根据元素分析和工业分析,本研究生物质的挥发分近似为 $CH_{2.46}O_{0.87^\circ}$ 半焦的焦炭燃烧模型采用多步表面反应,考虑焦炭的两步气化反应与一步氧化反应,对

无焰富氧氛围焦炭的燃尽过程有较好的模拟效果。 生物质的焦炭燃烧模型采用本征模型^[22,24]。挥发分 和焦炭燃烧的具体动力学参数见表 3。

NO 模型考虑了热力型 NO、快速型 NO、燃料型 NO、N₂O 中间路径以及 NO 的再燃还原。HCN 和 NH₃ 作为挥发分氮演化过程中主要的中间物质,半焦挥发分氮转化为 HCN 与 NH₃ 的比例为 99 : 1^[25]; 焦炭氮转化为 HCN 与 NH₃ 的比例为 3 : 2^[26]。半焦的挥发分氮比例为 42%^[27]。生物质挥发分氮的中间体考虑为 NH₃^[23,28],焦炭氮以 NO 形式释放^[19]。

边界条件采用速度进口、压力出口和壁面温度 边界类型。本次模拟采用基于压力-速度耦合的

表 3 化学反应及动力学参数

 化学反应	速率指数	指前因子A/(s ⁻¹)	活化能 <i>E/</i> (J・kmol ⁻¹)				
$CH_{2.46}O_{0.87} + 0.065O_2 \rightarrow CO + 1.23H_2$	[CH _{2.46} O _{0.87}][O ₂]	3.80×10 ⁷	5.55×10 ⁷				
$\mathrm{CH}_4 + 0.5\mathrm{O}_2 {\rightarrow} \mathrm{CO} + 2\mathrm{H}_2$	$[CH_4]^{0.5}[O_2]^{1.25}$	7.82×10 ¹³	3.00×10 ⁴				
$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$	[CH ₄][H ₂ O]	3.00×10 ¹¹	3.00×10 ⁴				
$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	[CO][H ₂ O]	2.75×10 ¹²	2.00×10 ⁴				
$CO_2 + H_2 \rightarrow CO + H_2O$	[CO ₂][H ₂]	6.45×10 ¹³	2.70×10 ⁴				
$\mathrm{H}_{2} + 0.5\mathrm{O}_{2} {\rightarrow} \mathrm{H}_{2}\mathrm{O}$	$[H_2]^{0.25}[O_2]^{1.5}$	9.97×10 ¹²	3.30×10 ⁴				
$H_2O {\rightarrow} H_2 + 0.5O_2$	$[H_2]^{0.75}[O_2][H_2O]$	2.60×10 ¹⁴	9.53×10 ⁴				
$C + CO_2 \rightarrow 2CO$	[CO ₂]	0.006 35	1.62×10 ⁸				
$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	[H ₂ O]	0.001 92	1.47×10 ⁸				
$C + 0.5O_2 \rightarrow CO$	[O ₂]	0.005	7.40×10^{7}				

Table 3 Chemical reaction and kinetic parameters

SIMPLE 求解器,对于压力场的插值计算,选择了 预压交错(pressure staggering option, PRESTO)格 式,而对于其他流体动力学变量,如速度和能量 等,则采用二阶迎风离散格式。

1.2 数值模拟验证

为验证本研究选用模型的准确性,对炉膛出口和截面数据与 SCHAFFEL 等^[16]的试验数据进行了详细验证。SCHAFFEL 等^[16]在其研究中采用煤粉作为燃料,使用涡耗散模型(eddy-dissipation model,

EDM)与试验数据进行了对比验证。在此基础上,本研究在模型验证部分采用与原文一致的煤粉作为燃料,进一步将 EDC模型结果与试验数据及 EDM 模型结果进行对比验证。验证参数包括速度、温度、组分浓度等,验证结果如图 2 和表 4 所示。

由图 2a 所示,模拟总体上较好地预测了炉内 $x \ge 2.05 \text{ m}$ 处的速度场。图 2b 中对于 $x \le 1.32 \text{ m}$ 的情况,预测温度在 $z \approx 0.28 \text{ m}$ 处达到局部最小值,这是因为携带燃料的一次风没有预热,入口温度仅







为 313 K,因此燃料在炉内的加热需要一定的时间 或距离才能完成,并且试验过程中存在一定的测量 误差^[29]。其余位置对于温度的预测结果都较为准 确,并且 EDC 模型比 EDM 模型的模拟结果与试验 结果更加符合。图 2d 中 EDC 模型对 CO₂ 浓度的预 测结果与试验结果更加接近。图 2e 对于 CO 浓度的 预测,在 *x* = 3.22 m 处与试验结果一致接近 0,表明 此处 CO 几乎完全燃烧。图 2f 中 EDC 模型预测的 NO 浓度与试验值吻合良好。总体来看,选用的 EDC 模型与试验结果拟合得较好,并且比 EDM 模 型显示出更高的模拟精度。

根据表 4 所示的 EDC 模型模拟结果与试验出口数据对比分析,排烟温度以及烟气中 O₂、CO₂、CO 和 NO 的预测值与试验值的误差控制在 5% 以

表 4 模拟和试验出口数据对比

Table 4Comparison between the simulation results and
experimental data of furnace export

数据	试验值	模拟值	误差/%
温度/K	1 503.0	1 526.2	1.5
O2体积分数/%	3.1	3.2	3.2
CO2体积分数/%	25.5	25.2	1.2
CO体积分数/10-6	<50	40.6	
NO体积分数/10 ⁻⁶	320.0	324.5	1.4

内。这一结果表明,模拟结果与试验结果具有较高的一致性,验证了模型的准确性和可靠性。

2 模拟结果与讨论

2.1 生物质掺混比对温度的影响

图 3 为牛物质不同掺混比下炉膛内的温度变 化。生物质掺混比为生物质质量流量占总燃料质量 流量的比例。随着生物质掺混比从 0 增加到 100%, 炉膛内峰值温度升高, 高温区提前。纯半焦 燃烧时峰值温度最低,为1782K。与纯半焦燃烧相 比,当生物质掺混比为25%时,峰值温度升高了 16 K; 当生物质掺混比为 50% 时,峰值温度升高了 49 K; 纯生物质燃烧时峰值温度达到了 1887 K, 比 纯半焦燃烧时升高了105K。纯半焦燃烧时炉膛温 度较低,这一现象主要归因于以下几个因素:首 先,半焦的挥发分含量较低,这使得其着火和燃尽 过程相对延迟。正如图 3 所示,纯半焦燃烧工况下 的高温区距离入口位置最远。其次,半焦的反应活 性较低,导致其反应速率较慢,进一步影响了热量 的释放速率。再者,半焦具有较高的 C/H 比,在炉 内掺烧更多半焦时,会增加总气体供给量,从而降 低炉膛温度。这些因素共同作用,导致纯半焦燃烧 时炉膛温度更低。WANG等^[27]的研究也表明煤粉 中掺烧半焦会降低炉温。随着生物质掺混比增大, 掺混燃料的挥发分含量增大,在入口处快速着火, 挥发分迅速燃烧。生物质的快速着火和燃烧为半焦 提供了热量,有助于半焦的着火。原本难以点燃的 半焦在生物质的带动下能够更容易达到着火条件, 从而与生物质一起参与到燃烧反应中。

2.2 生物质掺混比对炉内烟气再循环的影响

无焰燃烧的一个关键特性是其显著的烟气再循环。WÜNNING 等^[30] 定义了烟气再循环率 K_v 来表征反应物的稀释程度,该值定义如下:

$$K_{\rm v} = \frac{M_{\rm E}}{M_{\rm F} + M_{\rm A}} \tag{1}$$



Fig. 3 Temperature distribution in the furnace

式中: *M*_E 为再循环烟气的质量流量; *M*_F、*M*_A分别 为燃料和氧化剂的质量流量。根据质量守恒定律, 在炉膛内部的每个横截面上,燃料和氧化剂射流夹 带的烟气(*M*_E)的质量流量等于下游再循环烟气的 质量流量。通过局部 *x* 速度的负值可以很好地辨别 下游再循环烟气。因此,不同横截面处的 *M*_E 可由 下式计算:

$$M_{\rm E}(x) = \iint A_x \rho v_x(y, z) \mathrm{d}y \mathrm{d}z \qquad (2)$$

式中, A_x 为 $v_x(y,z) < 0$ 时的面积。

图 4 显示了生物质不同掺混比下 6 个横截面处 的 K_v 值(烟气的再循环率)。高 K_v 值是实现无焰 燃烧的必要条件,这意味着烟气可以完全稀释燃料 和氧化剂^[30]。从图 4 中可以观察到,随着轴向距离 增加,炉内K,值逐渐增大。随着生物质掺混比增 大, K_{v} 值略有下降,但下降幅度较小。在截面 x =0.15 m 处, K, 值仅下降了 1.84%, 随着轴向距离增 加,下降幅度逐渐增大,但在截面 x = 3.22 m 处, K,值的下降幅度仅为 5.59%。由此可见, 生物质掺 混比对 K, 值的影响有限。值得注意的是, 在生物质 不同掺混比下,炉膛中部 x = 3.22 m 处 K_v 值均高于 5.5, 表明炉内烟气产生了强烈的卷吸效应, 这与无 焰燃烧的特性一致。无焰燃烧下,炉内热烟气的强 烈夹带可以增强半焦的预热,有助于减少半焦的着 火延迟。此外, 高速射流的强烈夹带可以形成炉内 稳定的大尺度循环区,延长半焦在炉内的停留时间 以提高其燃尽率。在本研究的无焰富氧燃烧条件 下,纯半焦基本实现了完全燃尽。当半焦与牛物质 掺烧时,掺混燃料的燃尽率接近100%。在不同生 物质掺混比下,燃料几乎都能够完全燃尽。

2.3 生物质掺混比对组分分布的影响

图 5 显示了生物质不同掺混比下氧气的分布情



Fig. 4 The value of K_v in the furnace

况。如图 5a 所示,氧气分布主要分为 3 个阶段^[19]:

在第一阶段(掺混生物质工况的轴向距离在1m之前,纯半焦工况在1.3m之前),燃料被加热和点燃,随着挥发分的析出,氧气逐渐被消耗。在第二阶段,析出的挥发分迅速燃烧,在很短的时间内急剧消耗氧气,并且焦炭也在同步燃烧消耗氧气。然而此时二次风来不及与一次风混合,氧气供给不足,因此产生了一个强还原区,如图5b中的低氧区所示。在第三阶段,二次风逐渐与一次风混合,导致沿燃料入口中心轴的氧气含量增加,并最终维持在较低水平,体现出无焰燃烧的低氧特性。随着生物质掺混比逐渐增大,第二阶段的低氧区逐渐扩大,这是因为生物质挥发分含量更高,挥发分快速燃烧形成抢氧反应造成高缺氧环境。





图 6a 为生物质不同掺混比下挥发分释放速率的 变化曲线。在第一阶段结束时,挥发分释放速率达 到最大值。随后随着挥发分的燃烧消耗,其释放速 率逐渐降低直至完全耗尽。生物质燃烧性能更好, 挥发分迅速释放带动半焦着火,随后半焦的挥发分 析出。根据图 6b 挥发分释放速率分布云图可以看 出,生物质掺混比越大,燃料的挥发分释放速率越 快。具体而言,纯半焦工况下挥发分释放速率峰值 只有 4.10×10⁻⁶ kg/s;当生物质掺混比为 25% 时,挥 发分释放速率峰值达到 1.08×10⁻⁵ kg/s;当生物质掺





混比提升至 50% 时,挥发分释放速率峰值进一步增加至 2.02×10⁻⁵ kg/s;当生物质掺混比达到 75% 时,挥发分释放速率峰值升至 2.67×10⁻⁵ kg/s;而在纯生物质燃烧工况下,挥发分释放速率峰值达到最大值 2.95×10⁻⁵ kg/s。

图 7a 为生物质不同掺混比下, CO 沿燃料入口的轴向分布。在第一阶段,挥发分燃烧形成抢氧反应,导致燃料燃烧不完全产生大量 CO。同样是在第一阶段结束时, CO浓度达到最大值,随后 CO浓度逐渐降低。随着生物质掺混比增大, CO浓

度逐渐上升,这是因为挥发分迅速燃烧消耗大量的 氧气,形成高度缺氧的还原气氛,导致 CO 浓度增 大。如图 7b 所示,随着生物质掺混比增大,CO 生 成逐渐提前,分布范围更广且浓度更高。定量分析 结果表明,在纯半焦工况下,CO 峰值浓度仅为 4.17%;当生物质掺混比提升至 25% 时,CO 峰值浓 度上升至 15.51%;当生物质掺混比达到 50% 时, CO 峰值浓度进一步增加至 28.34%;当生物质掺混 比为 75% 时,CO 峰值浓度达到 33.74%;而在纯生 物质燃烧工况下,CO 峰值则升高至 35.98%。





通过比较图 5-7 中氧气、挥发分和 CO 的分布 曲线可以看出,在第三阶段燃料几乎完全燃烧,氧 气的含量变得稳定。

2.4 生物质掺混比对 NO 排放的影响

图 8 显示了生物质不同掺混比下 NO 沿燃料入口的轴向分布曲线。第一阶段氧气过量,为氮氧化物的形成产生了一个强氧化区,NO 逐渐生成,在第一阶段结束时 NO 达到最大值。在第二阶段产生了一个强还原区,此时第一阶段产生的氮氧化物可





以被模型中涉及的还原性气体(包括碳氢化合物、 氮氧化物前体、CO和H₂)和炭颗粒大量还原为 N₂,导致 NO浓度逐渐降低并达到最低值。

随着生物质掺混比的增加,NO最低值逐渐降低。这一现象主要归因于生物质的高挥发分含量, 其燃烧过程中产生的强烈抢氧反应抑制了燃料氮中 间产物的转化。同时,随着生物质掺混比的提高, 燃料氮中间产物 NH₃的浓度上升,进而增强了对已 生成 NO 的还原作用。在第三阶段,仍有大量未燃 烧的炭颗粒和挥发分存在。此阶段由于二次风与一 次风混合,来自二次风的氧气和一次风中的未燃烧 物质的混合导致该区域中残留的挥发分氮和焦炭氮 氧化形成氮氧化物。在该阶段,NO 浓度逐渐上升 并最终趋于平稳。

图 9 展示了出口总 NO 浓度随生物质掺混比的 变化规律。当生物质掺混比为 25% 时,出口总 NO 浓度显著降低,较纯半焦燃烧时下降了 33%。 然而,随着生物质掺混比进一步增加至 50% 和 75%,出口总 NO 浓度下降幅度较小。在纯生物质 燃烧条件下,出口总 NO 浓度略有上升。总体而 言,当生物质掺混比在 50% 到 100% 之间时,出口 总 NO 浓度未表现出明显差异,表明在此范围内生





物质掺混比对出口总 NO 浓度的影响较小。

为了进一步明确半焦掺混生物质燃烧中氮氧化 物的形成机制,本文单独考虑了热力型 NO、快速 型 NO、燃料型 NO 以及 NO 再燃的影响,图 10 为 不同类型 NO 释放量。生物质不同掺混比下,热力 型 NO 和快速型 NO 的释放量极低,均不足 10-°, 可以忽略不计。这是因为在富氧氛围下 N2 被分 离, N₂通过热力型和快速型路径氧化为 NO 的量极 大减少^[25]。出口总 NO 浓度主要取决于燃料型 NO 生成量以及 NO 再燃量。





NO 再燃主要通过以下反应实现:

 $NO + CH_2 \rightarrow HCN + OH$ (3)

$$NO + CH \rightarrow HCN + O$$
 (4)

$$NO + C \rightarrow CN + O$$
 (5)

LI等^[31]的研究表明, CH2在再燃过程中对 NO 的还原作用不容忽视,尤其是在无焰燃烧条件 下,其重要性更为突出。基于此,模拟中考虑将平 衡组分设定为 CH, 的情形。随着生物质掺混比由 0% 增大到 75%, NO 再燃量由 5×10⁻⁶ 增加到 35× 10⁻⁶。随着生物质掺混比增大再燃量增加,这是因

为生物质掺混比达到一定程度后,燃料中挥发分含 量相对较高, Ch_i浓度较大, 增强了再燃式(3)和 式(4)。当生物质掺混比达到75%时,NO再燃 量与纯生物质燃烧工况下的数值十分接近。这一现 象表明在一定掺混比下,掺混燃料的 NO 再燃特性 已近似于纯生物质燃料的燃烧状态。

半焦与生物质掺烧能有效降低燃料型 NO 的排 放。相比纯半焦燃烧,当生物质掺混比为25%时, 燃料型 NO 生成量降低了 30%; 当生物质掺混比为 50% 时,燃料型 NO 生成量达到最小值,较纯半焦 燃烧降低了 34%; 当生物质掺混比为 75% 时, 燃料 型 NO 生成量略有回升。总体而言, 生物质掺混比 为 25% 时即可较大程度降低燃料型 NO 释放量, 生 物质掺混比为 50% 时燃料型 NO 释放量达到最低水 平,随着生物质掺混比进一步增加,燃料型 NO 生 成量变化趋于平缓。纯半焦燃烧时燃料型 NO 浓度 较高,这是因为半焦挥发分含量低导致着火延迟, 第一阶段挥发分析出缓慢,导致第二阶段更短。所 以在第三阶段燃料与二次风混合后,半焦中大量的 未燃烧焦炭得到充分燃烧,在这种氧化气氛中,大 量燃料型 NO 被释放出来。并且半焦含有更多的焦 炭氮, 焦炭氮比挥发分氮更容易生成氮氧化物^[25]。

图 11 将半焦与生物质各自的挥发分 NO 和焦 炭 NO 进行了分离。纯半焦燃烧时其焦炭 NO 高于 挥发分 NO; 然而, 随着生物质掺混比增大, 半焦 的挥发分 NO 逐渐成为其 NO 生成的主要贡献源, 说明半焦的焦炭 NO 比挥发分 NO 下降幅度更大。 生物质挥发分 NO 始终高于其焦炭 NO, 这是由于 生物质挥发分含量高, 焦炭含量低。当生物质掺混 比小于 50% 时, 燃料型 NO 生成量不断降低, 其中 半焦 NO 的生成减少占主导地位, 生物质 NO 的增



Fig. 11 Volatile NO and char NO distributions for each of semi-coke and biomass

94

加对燃料型 NO 的影响有限。然而,当生物质掺混 比超过 50% 时,燃料型 NO 生成量仅略有上升,并 无明显变化。

单独考虑挥发分 NO 和焦炭 NO 的总和要明显 高于燃料型 NO。例如,纯半焦燃烧时,独立计算 的挥发分 NO 和焦炭 NO 分别为 252 和 257×10⁻⁶, 而燃料型 NO 为 326×10⁻⁶。产生这种区别的原因如 下:当同时考虑挥发分和焦炭的燃烧时,由于挥发 分的燃烧速度比焦炭快很多,因此,一部分已经生 成的挥发分 NO 通过与焦炭氮的燃料氮前驱体及其 他还原性物质的化学反应被还原,与此同时焦炭 NO 也会相应减少。当分别计算挥发分 NO 和焦炭 NO 时,挥发分和焦炭之间没有相互作用。

3 结 论

1)在无焰富氧燃烧条件下,随着生物质掺混比 增大,炉内高温区提前,峰值温度升高。这是因为 生物质挥发分含量较高,挥发分燃烧迅速,燃烧更 剧烈并且燃烧效率更高。纯半焦燃烧时峰值温度最 低,纯生物质燃烧的峰值温度比纯半焦升高了105 K。

2) 生物质掺混比对烟气再循环率 K_v 的影响有限。在不同生物质掺混比下,炉内烟气始终保持较高的卷吸效应。随着生物质掺混比增大,K_v值略有下降,但下降幅度较小。在截面 x = 0.15 m 处, K_v 值仅下降了 1.84%;随着轴向距离增加,下降幅 度逐渐增大,但在截面 x = 3.22 m 处,K_v 值的降幅 仅为 5.59%。生物质不同掺混比下,炉膛中部 x = 3.22 m 处 K_v 值均高于 5.5。

3)随着生物质掺混比增大,炉内低氧区范围扩 大,挥发分含量增加,CO含量更多并且分布区域 更广。炉膛内氧气、挥发分和CO等组分的分布曲 线大致可以划分为3个阶段:第一阶段挥发分析 出,CO生成,氧气逐渐被消耗;第二阶段氧气供 给不足,产生了一个强还原区,挥发分和CO含量 逐渐下降;第三阶段氧气含量回升并最终维持在较 低水平,此时燃料几乎完全燃烧。

4)当生物质掺混比为 25% 时,出口总 NO 浓度显著降低;而生物质掺混比在 50~100% 之间时,出口 NO 浓度并无明显变化,在此范围内生物质掺混比对出口总 NO 浓度的影响较小。由于热力型 NO 和快速型 NO 释放量极低,可忽略不计,因此出口总 NO 浓度主要由燃料型 NO 生成量和 NO 再燃量决定,其中燃料型 NO 起主导作用。随着生物质掺混比由 0 增大到 75%, NO 再燃量由 5×10⁻⁶ 增加到 35×10⁻⁶。当生物质掺混比在 0~50% 时,燃料型 NO 生成量不断降低,其中半焦

NO的生成减少占主导地位,生物质 NO 的增加对燃料型 NO 的影响有限;而当生物质掺混比在50%~100%时,燃料型 NO 生成量仅略有上升,且变化并不显著。

5) 推荐采用 25% 的生物质掺混比,在此条件 下能够显著抑制 NO 的生成。当生物质掺混比为 25% 时,与纯半焦燃烧相比,出口总 NO 浓度降低 了 33%,这主要归因于燃料型 NO 生成量减少了 30%,而 NO 再燃影响相对较小,同时峰值温度仅 升高了 16 K。随着生物质掺混比进一步增大,对 NO 生成的抑制效果提升有限,并且炉内峰值温度 持续升高。

参考文献 (References):

- [1] ZOU C, YU N, MA C, et al. Effects of pyrolysis temperature and atmosphere on grinding properties of semicoke prepared from Shenmu low-rank coal[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2023, 173: 106059.
- [2] LI X C, SHANG J W, GAN X R, et al. Recent advances in environmental applications of semi-coke: Energy storage, adsorption and catalysis[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024, 12(2): 112430.
- XIAO Y, SONG G L, SONG W J, et al. Influence of feeding position and post-combustion air arrangement on NO_x emission from circulating fluidized bed combustion with post-combustion[J].
 Fuel, 2020, 269: 117394.
- [4] 张锦萍,陈磊,沈靖淳,等. O₂/N₂和 O₂/CO₂ 气氛下煤半焦-生物 质的混燃特性及影响因素 [J]. 节能技术, 2024, 42(1): 3-12.
 ZHANG Jinping, CHEN Lei, SHEN Jingchun, et al. Combustion characteristics and influencing factors of coal semi-cokea nd biomass blends under O₂/N₂ and O₂/CO₂ atmospheres[J]. Energy Conservation Technology, 2024, 42(1): 3-12.
- [5] GONG Z Q, ZHOU T, LU Q G, et al. Combustion and NO_x emission characteristics of Shenmu char in a circulating fluidized bed with post-combustion[J]. Energy & Fuels, 2016, 30(1): 31–38.
- [6] 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):1197-1208,1526. GUO Junjun, ZHANG Tai, LI Pengfei, et al. Industrial demonstration progress and trend in pulverized coal oxy-fuel combustion in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2021,41(4):1197-1208,1526.
- [7] LIU L L, KUANG S B, GUO B Y, et al. Combustion characteristics of charcoal, semicoke, and pulverized coal in blast furnace and their impacts on reactor performance[J]. Powder Technology, 2024, 433: 119243.
- [8] LI P F, CHENG P F, WANG G C, et al. MILD combustion of solid fuels: Its definition, establishment, characteristics, and emissions[J]. Energy & Fuels, 2023, 37(14): 9998–10022.
- [9] HU F, LI P F, CHENG P F, et al. A pilot-scale experimental study on MILD combustion of sawdust and residual char solid waste blend using low-temperature preheating air[J]. Fuel, 2023, 342:

127768.

- [10] SUN Z J, WU Q N, ZHAO C X, et al. A review of NO_x control by MILD-oxy combustion[J]. Journal of the Energy Institute, 2024, 113: 101502.
- [11] 武鹏魁,韩奎华. 兰炭和秸秆掺混燃料热重分析及动力学研究
 [J]. 洁净煤技术, 2022, 28(5): 134-142.
 WU Pengkui, HAN Kuihua. Thermogravimetric Analysis and
 - Kinetics of Blended Fuel of Semi-coke and Straw[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(5): 134–142.
- [12] WANG Q, ZHAO W Z, LIU H P, et al. Interactions and kinetic analysis of oil shale semi-coke with cornstalk during co-combustion[J]. Applied Energy, 2011, 88(6): 2080–2087.
- [13] QIN H, WANG W L, LIU H P, et al. Thermal behavior research for co-combustion of furfural residue and oil shale semi-coke[J].
 Applied Thermal Engineering, 2017, 120: 19–25.
- [14] 马仑,陈鑫科,方庆艳,等. 富氧下半焦/秸秆混燃交互作用实验研究 [J]. 燃烧科学与技术, 2022, 28(3): 247–253.
 MA Lun, CHEN Xinke, FANG Qingyan, et al. Experimental Study on Interaction of Semi-coke/Straw Co-combustion under Oxy-fuel Conditions[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2022, 28(3): 247–253.
- [15] 张锦萍,陈磊,王长安,等. O₂/CO₂ 条件下煤半焦-生物质的混燃 特性及动力学分析 [J]. 煤炭转化, 2024, 47(3): 1–12.
 ZHANG Jinping, CHEN Lei, WANG Chang'an, et al. Co-combustion Characteristics and Kinetic Analysis of Coal Semi-coke and Biomass under O₂/CO₂ Conditions[J]. Coal Conversion, 2024, 47(3): 1–12.
- [16] SCHAFFEL N, MANCINI M, SZLE, K A, et al. Mathematical modeling of MILD combustion of pulverized coal[J]. Combustion and Flame, 2009, 156(9): 1771–1784.
- [17] GUO J J, LI X Y, HUANG X H, et al. A full spectrum k-distribution based weighted-sum-of-gray-gases model for oxy-fuel combustion[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 90: 218–226.
- [18] WANG C A, HOU Y J, FENG Q Q, et al. Numerical simulation on co-firing ultra-low volatile carbon-based fuels with bituminous coal under oxy-fuel condition[J]. Fuel, 2023, 332: 126087.
- [19] WANG X B, ZHANG J Y, XU X W, et al. Numerical study of biomass co-firing under oxy-MILD mode[J]. Renewable Energy,

2020, 146: 2566-2576.

- [20] HU F, LI P F, GUO J J, et al. Global reaction mechanisms for MILD oxy-combustion of methane[J]. Energy, 2018, 147: 839–857.
- [21] 曾光. 我国典型低挥发分煤热解成分的定量分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [22] BHUIYAN A A, NASER J. Computational modelling of co-firing of biomass with coal under oxy-fuel condition in a small scale furnace[J]. Fuel, 2015, 143: 455–466.
- [23] L Á, YIN C, RIAZA J, et al. Biomass co-firing under oxy-fuel conditions: A computational fluid dynamics modelling study and experimental validation[J]. Fuel Processing Technology, 2014, 120: 22–33.
- [24] GUBBA S R, INGHAM D B, LARSEN K J, et al. Numerical modelling of the co-firing of pulverised coal and straw in a 300MWe tangentially fired boiler[J]. Fuel Processing Technology, 2012, 104: 181–188.
- [25] GLARBORG P, MILLER J A, RUSCIC B, et al. Modeling nitrogen chemistry in combustion[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2018, 67: 31–68.
- [26] SUN L T, YAN Y H, SUN R, et al. Effect of bluff body addition in fuel-rich stream on reaction behaviours of large-proportion semicoke rich/lean blended combustion[J]. Fuel, 2022, 308; 122020.
- [27] WANG P Q, WANG C A, DU Y B, et al. Experiments and simulation on co-combustion of semicoke and coal in a full-scale tangentially fired utility boiler[J]. Energy & Fuels, 2019, 33(4): 3012–3027.
- [28] SPLIETHOFF H, HEIN K R G. Effect of co-combustion of biomass on emissions in pulverized fuel furnaces[J]. Fuel Processing Technology, 1998, 54(1-3): 189–205.
- [29] MEI Z F, LI P F, WANG F F, et al. Influences of reactant injection velocities on moderate or intense low-oxygen dilution coal combustion[J]. Energy & Fuels, 2014, 28(1): 369–384.
- [30] WÜNNING J A, WÜNNING J G. Flameless oxidation to reduce thermal no-formation[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1997, 23(1): 81–94.
- [31] LI P F, LI W H, WANG K, et al. Experiments and kinetic modeling of NO reburning by CH₄ under high CO₂ concentration in a jet-stirred reactor[J]. Fuel, 2020, 270: 117476.