

60MW机组燃煤锅炉耦合生物质气再燃数值模拟

张小桃, 段佛元, 黄勇, 王爱军

(华北水利水电大学电力学院, 河南郑州450003)

摘要: 为了研究不同高度生物质气再燃喷口对锅炉燃烧过程等的影响, 基于Fluent软件, 搭建燃煤耦合生物质气模

型的排放量和烟气中各组分变化的影响。结果表明: 燃煤锅炉耦合生物质气再燃会导致炉膛烟气出口温度升高, 并且随着生物质气喷口高度的增加而增加; 生物质气再燃能降低 NO_x 的排放量, 生物质气喷口位于再燃区上部、中部、下部时 NO_x 排放的平均质量浓度分别为22.32、210.19、239.58 mg/m^3 其中生物质气喷口位于再燃区中部的效果最好, 与原始工况 NO_x 排放平均质量浓度291.96 mg/m^3 相比, 下降了2.01%; 生物质气再燃增加了烟气中CO的体积分数, 并且随着生物质气喷口位置的增高而增加。

生物质气和大型燃煤锅炉机组耦合发电, 不但能提高生物质利用效率, 还能降低污染物的排放^[1]。生物质与燃煤机组耦合运行是消纳秸秆和农林废弃物, 污泥垃圾等燃料的有效途径^[2]。李国林等^[3-5]结合我国实情, 阐述了生物质气耦合的必然性; 王一坤等^[6-8]研究分析了我国燃煤耦合生物质气发电的现状; 李振山等^[9-11]研究了生物质气还原 NO_x 的反应机理并验证了生物质气掺烧可以减少 NO_x 的生成量; 孙俊威等^[12]利用Fluent软件研究了生物质气再燃对污染物排放的影响, 发现生物质气再燃可以降低 NO_x 的排放; 殷仁豪等^[13-17]研究了生物质气再燃对污染物排放的影响, 发现生物质气对污染物中的 NO_x 有很高的还原率; 徐皓鹏等^[18]研究了燃煤与生物质气混燃的燃烧特性及对污染物排放的影响, 发现掺烧生物质气不仅可以降低污染物排放, 而且对锅炉运行影响较小; NihadHodzic等^[19]研究了煤与生物质、天然气共燃对污染物排放的影响, 发现通过燃料和空气分级可以降低 NO_x 的生成; 吴智泉等^[20]通过系统能流、烟流分析模型, 分析生物质气化-燃煤耦合发电系统能量流动及损失分布, 采用科学合理的燃气配气方式, 锅炉燃烧稳定性几乎不受影响。

本文基于Fluent软件, 对不同高度生物质气喷口对660MW机组煤粉锅炉耦合生物质气再燃过程进行数值模拟, 对比分析不同高度生物质气喷口对锅炉炉膛温度、烟气组分分布和 NO_x 排放的影响, 为燃煤耦合生物质气再燃提供参考数据。

1 实验对象及方法

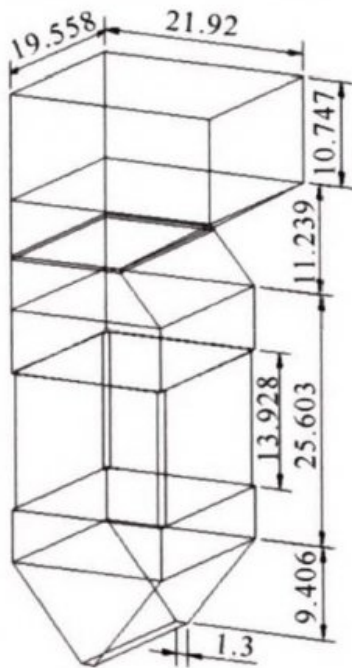
1.1 锅炉概况

本文研究对象为某660MW机组亚临界、一次再热、控制循环、四角喷燃燃煤锅炉。锅炉炉膛宽19.558m, 深16.44m, 高约为57m。燃烧器呈四角切圆布置, 一次风喷口总计24个, 二次风喷口总计28个, 一次风喷口与二次风喷口间隔布置, 燃尽风喷口总计8个。一次风喷口面积为 $0.6\text{m} \times 0.6\text{m}$, 二次风喷口面积为 $0.60\text{m} \times 0.75\text{m}$, 燃尽风喷口面积 $0.60\text{m} \times 0.75\text{m}$ 。锅炉主要设计参数见表1。利用GAMBIT软件对锅炉按1:1建模, 并划分网格数约为70万。炉膛结构、燃烧器喷口布置与网格划分如图1所示。

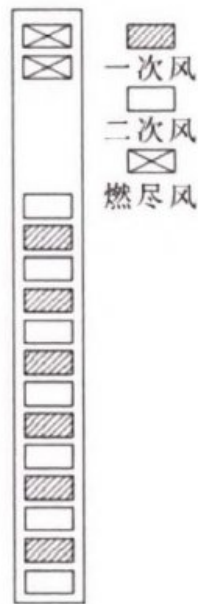
表 1 660 MW 机组燃煤锅炉设计参数

Tab.1 The design parameters of a 660 MW coal-fired boiler

项目	数值	项目	数值
主蒸汽流量/(t·h ⁻¹)	1 969.7	再热蒸汽温度/℃	543
再热蒸汽流量/(t·h ⁻¹)	1 733.4	给水压力/MPa	21
主蒸汽压力/MPa	18.1	给水温度/℃	275
主蒸汽温度/℃	540	燃料消耗量/(kg·h ⁻¹)	299 783.473
再热蒸汽压力/MPa	3.9		



a) 炉膛结构



b) 燃烧器喷口布置



c) 网格划分

图 1 炉膛结构、燃烧器喷口布置与网格划分 单位: m

Fig.1 Grid generation of the boiler and burner, and the nozzle arrangement

1.2 数学模拟与计算方法

燃煤耦合生物质气是一个复杂的燃烧过程。其数学模型既包含湍流流动、离散相运动和气固两相与炉膛壁面间的对流，也包含挥发分析出、焦炭燃烧和辐射传热。锅炉模拟流程如图2所示。



图 2 锅炉模拟流程

Fig.2 The simulation flow chart for the boiler

气相湍流运动采用k- ϵ 模型；采用非预混燃烧模型，把化学反应速率计算问题转化为流动混合问题，进而也解决了化学反应速率难以求解的问题。其中，煤以主流、经验流的形式通入，生物质气以次要流、非经验流的形式通入P1模型求解煤粉燃烧的辐射传热较准确，因此采用P1模型；焦炭的燃烧采用动力/扩散限制模型；采用Simple算法求解计算离散方程组的压力和速度耦合，先冷态后热态，最后再计算NO_x排放质量浓度。

1.3 生物质气与燃煤再燃过程理论基础

生物

质气再燃，是

将生物质气作为二次燃料投

入主燃烧区与燃尽区之间的区域，在这里煤粉燃烧产生

的NO_x与炷根O₂i和不完全燃烧产物CO、H₂、C和C_nH_m发生还原反应，生成N₂，最终减少NO_x生成量。利用这一原理，把炉膛高度自下而上依次分为主燃区、再燃区和燃尽区。

根据燃煤锅炉设计参数, 燃煤消耗量的计算公式为

$$B_{\text{coal}} = \frac{100 Q_{yx}}{Q_{\text{net,ar}} \times \eta} \quad (1)$$

式中: B_{coal} 为纯煤燃烧时燃煤消耗量, kg/s; Q_{yx} 为锅炉有效吸收热, kJ/s; $Q_{\text{net,ar}}$ 为煤粉的低位热值, kJ/kg; η 为锅炉热效率, %。

生物质气与煤耦合发电所需要的生物质气由 20 t/h 循环流化床气化炉提供。在生物质气再燃过程中, 生物质气替代一部分煤粉在炉膛中进行燃烧。单位体积生物质气在温度 x ($^{\circ}\text{C}$) 下所携带的总热量 Q_{syngas} 为

$$Q_{\text{syngas}} = \frac{Q_x + Q_{\text{net,syngas}} \times V_{\text{syngas}}}{V_{x,\text{syngas}}} \quad (2)$$

式中: Q_x 为在温度 x ($^{\circ}\text{C}$) 下生物质气的显热, kJ; $Q_{\text{net,syngas}}$ 为标准状况下生物质气的低位热值, kJ/ m^3 ; V_{syngas} 为标准状况下生物质气体积, m^3 ; $V_{x,\text{syngas}}$ 为在温度 x ($^{\circ}\text{C}$) 下生物质气的体积, m^3 。

生物质气所携带热量占输入锅炉总热量的百分比为生物质气掺烧比 α , 其计算公式为

$$\alpha = \frac{V_q \times Q_{\text{syngas}}}{B \times Q_{\text{net,ar}}} \quad (3)$$

式中, V_q 为 20 t/h 气化炉单位时间内气化生物质所得温度 x ($^{\circ}\text{C}$) 下生物质气的总产量, m^3/s 。通过 Aspen 软件模拟得出每 kg 松木气化产生的松木气为 7.384 m^3 , 本文的 20 t/h 气化炉的掺烧比为 6.29%。

由于生物质气代替一部分燃煤参与燃烧, 使得燃煤消耗量减少。在耦合工况下, 所需要的燃煤消耗量的计算公式为

$$B_0 = B_{\text{coal}} \times (1 - \alpha) \quad (4)$$

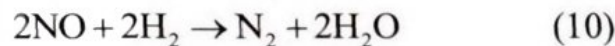
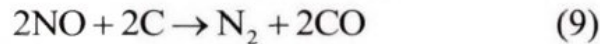
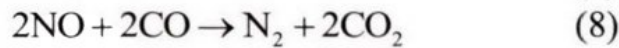
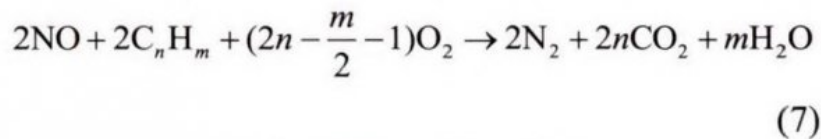
式中 B_0 为掺烧下的燃煤消耗量, t/h。

相比于纯煤燃烧, 生物质气与煤粉混燃在单位时间内输入炉膛的空气量有所降低。标准状况下单位时间内生物质气与煤混燃所需的实际空气量为

$$V = a \times (V_{\text{coal}}^0 + V_{\text{syngas}}^0) \quad (5)$$

式中: V 为生物质气和煤粉燃烧所需的实际空气量, m^3/s ; a 为燃烧所需空气的过量空气系数, 1.25; V_{coal}^0 为煤粉燃烧所需的理论空气量, m^3/s ; V_{syngas}^0 为生物质气燃烧所需的理论空气量, m^3/s 。

生物质气再燃降低 NO_x 排放的机理为: 将燃料分级送入炉膛, 在燃烧区火焰的上方喷入生物质气, 生物质气中 CH_4 、 CO 、 H_2 等物质和未完全燃烧产物 CO 、 H_2 、 C 、 C_nH_m 与生成的 NO_x 反应, 将生成的 NO_x 转化为 HCN , 并最终得到 N_2 。主要的反应式为:



本文基于 Fluent 软件自带的后处理污染物 NO_x 模型对 NO_x 生成进行模拟计算。只考虑燃料型 NO 和热力型 NO 的生成量。其中, 热力型 NO 中 $[\text{OH}]$ 和 $[\text{H}]$ 计算选择部分平衡模型; 燃料型 NO 分为挥发分产生的 NO 和焦炭产生的 NO 。通过 Fluent 软件求出 NO 的体积分数, 然后通过式(11)求出烟气中 NO_x 的质量浓度, 即

$$\rho(\text{NO}_x) = \frac{\phi(\text{NO})}{0.95} \times 2.05 \times \frac{21 - 6}{21 - \phi(\text{O}_2)} \quad (11)$$

式中: $\rho(\text{NO}_x)$ 为标准状态下含氧量为 6% 的干烟气中 NO_x 的质量浓度, mg/m^3 ; $\phi(\text{NO})$ 为干烟气中 NO 的体积分数, $\mu\text{L}/\text{L}$; $\phi(\text{O}_2)$ 为干烟气中 O_2 的体积分数, %^[21]。

1.4燃料分析及边界条件设定

试验选取煤种为阜新烟煤，其工业分析和元素分析见表2。生物质气采用4509的松木气，松木气成分基于Aspen软件根据松木特性模拟获得^[22]，结果见表3。

表 2 煤的工业分析和元素分析
Tab.2 The proximate and ultimate analysis results of the coal

工业分析 w _{ad} /%				元素分析 w _{ad} /%					低位热值/(kJ·kg ⁻¹)
M	A	V	FC	C	H	O	N	S	
15.00	22.95	25.44	36.61	77.90	5.30	13.91	1.31	1.58	18 645

表 3 松木气特性
Tab.3 The properties of pine gas

松木气体积分数/%						温度 <i>T</i> /°C	低位热值/ (MJ·m ⁻³)
CO	H ₂	CH ₄	CO ₂	N ₂	H ₂ O		
26.20	21.02	0.39	6.89	41.90	3.60	450	5.771

所有入口设为速度入口，并根据各喷口数量分配风量；出口设为压力出口，负压为-80Pa；壁面采用无滑移边界条件，主燃烧区域壁面温度为1000K，再燃区域壁面温度为950K，燃尽区域壁面温度为900K。炉膛主要计算参数设置见表4。

表 4 入口和出口边界条件参数设置
Tab.4 The boundary condition parameter setting for entrance and exit

边界条件	温度/K	湍流强度/%	水力直径/m
一次风喷口	571	3.35	0.60
二次风喷口	581	2.99	0.67
燃尽风喷口	581	2.94	0.67
生物质气喷口	723	3.36	0.48
烟气出口	1 000	2.83	12.30

1.5研究工况

将生物质气通入锅炉再燃区域，再燃区位于锅炉的主燃区和燃尽区之间。为了保证通入的生物质气不影响锅炉切圆燃烧，生物质气通入口位于锅炉炉膛四个角落，通入角度与锅炉燃烧器一二次风通入角度一致。

本文针对不同高度生物质气喷口对煤粉炉影响的数值模拟。一二次风和燃尽风的位置保持不变，在再燃区设置生物质气喷口。原工况和3种不同掺烧工况生物质气喷口布置如图3所示。各工况下一二次风、燃尽风和生物质气喷口的流速设置见表5。

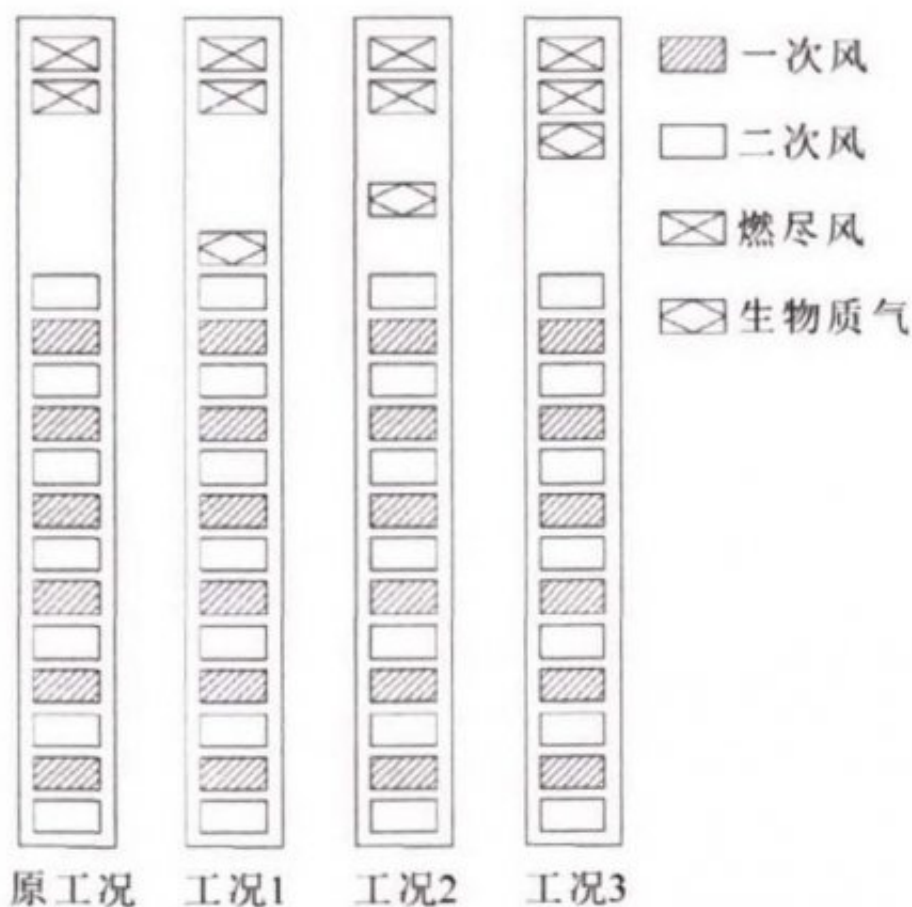


图 3 各工况下燃烧器喷口位置

Fig.3 The positions of burner nozzles under each working condition

表 5 不同工况下风速及生物质气流速设置 单位：m/s

Tab.5 The biomass gas flow rate and air speed setting under different working conditions

工况	一次风风速	二次风风速	燃尽风风速	生物质气流速
原始	24.09	55.40	49.69	0
工况 1	22.59	51.97	59.48	42.73
工况 2	22.59	51.97	59.48	42.73
工况 3	22.50	51.97	59.48	42.73

2实验结果分析

2.1模型结果验证

通过对比文献[23]中，满负荷运行时炉膛出口烟气温度和 NO_x 平均质量浓度，来确保数值模拟的准确性。实验结果与数值模拟结果对比见表6。

表 6 实验结果与数值模拟结果对比
Tab.6 Comparisons between the simulation results and experimental data

项目	炉膛出口烟温/ $^{\circ}\text{C}$	炉膛出口 NO_x 质量浓度/ $(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$
模拟结果	1 158	291
实验数据	1 135	298

由表6可见，两者的炉膛出口烟气温度偏差和炉膛出口 NO_x 质量浓度偏差分别为2.03%和2.35%，数值模拟结果较为准确。

2.2不同生物质气喷口位置对温度场的影响

在不同工况下，锅炉中心截面的温度场分布如图4所示。锅炉各水平截面烟气平均温度随炉膛高度分布如图5所示。

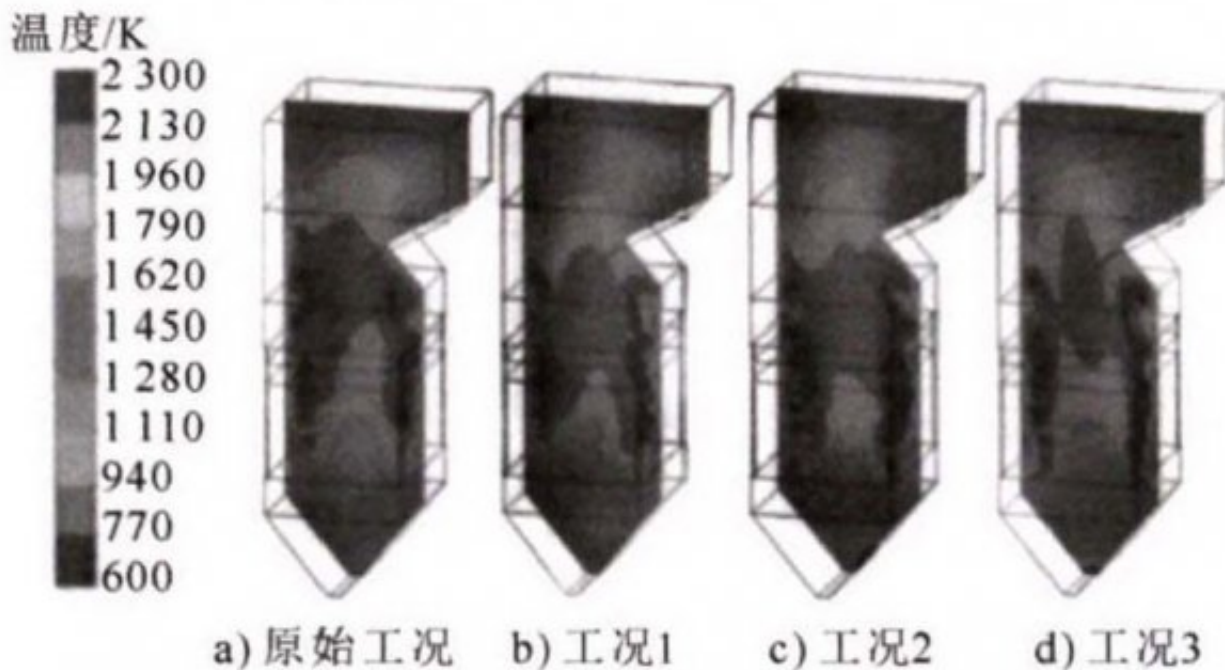


图 4 锅炉中心截面的温度场分布

Fig.4 The distribution of temperature field on vertical cross-sections along the furnace height direction

结合图4和图5可以看出，炉膛的高温区主要集中在主燃烧区的上部。原始工况从炉膛底部到主燃烧区最下层燃烧器部分，温度快速上升，到达主燃烧区温度上升变缓，到达主燃烧区最上层温度升到最高，温度为1981.9K；由于燃尽风的通入使得未完全燃烧产物CO、H₂、C、C_nH_m

减少，之后随着炉膛高度的增加，辐射和对流传热使得温度逐渐降低；工况1—工况3沿炉膛高度出现2个峰值，一个在主燃烧器区，一个在再燃区，这是因为煤粉和生物质气在主燃烧器区上部，煤粉迅速燃烧，温度升高，由于再燃将部分煤粉用生物质气所替代，使得主燃烧区中煤粉比原始工况要少，故在到达最上层燃烧器之前这3个工况的温度比原始工况要低，其主燃烧区最上层温度分别为1983.4、2026.8、1982.6K；再燃区由于生物质气的送入燃烧，使得再燃区温度有所升高；之后又由于燃尽风的通入，使得炉膛温度降低，未燃尽碳和生物质气在这里再次燃烧，温度有小幅上升；随着生物质气喷口位置增高，生物质气在炉膛停留时间变短，推迟了燃料的燃尽位置，使炉膛出口烟气温度升高，其中原始工况、工况1—工况3的炉膛出口烟气温度分别为1431.7、1454.4、1459.5、1462.3K。

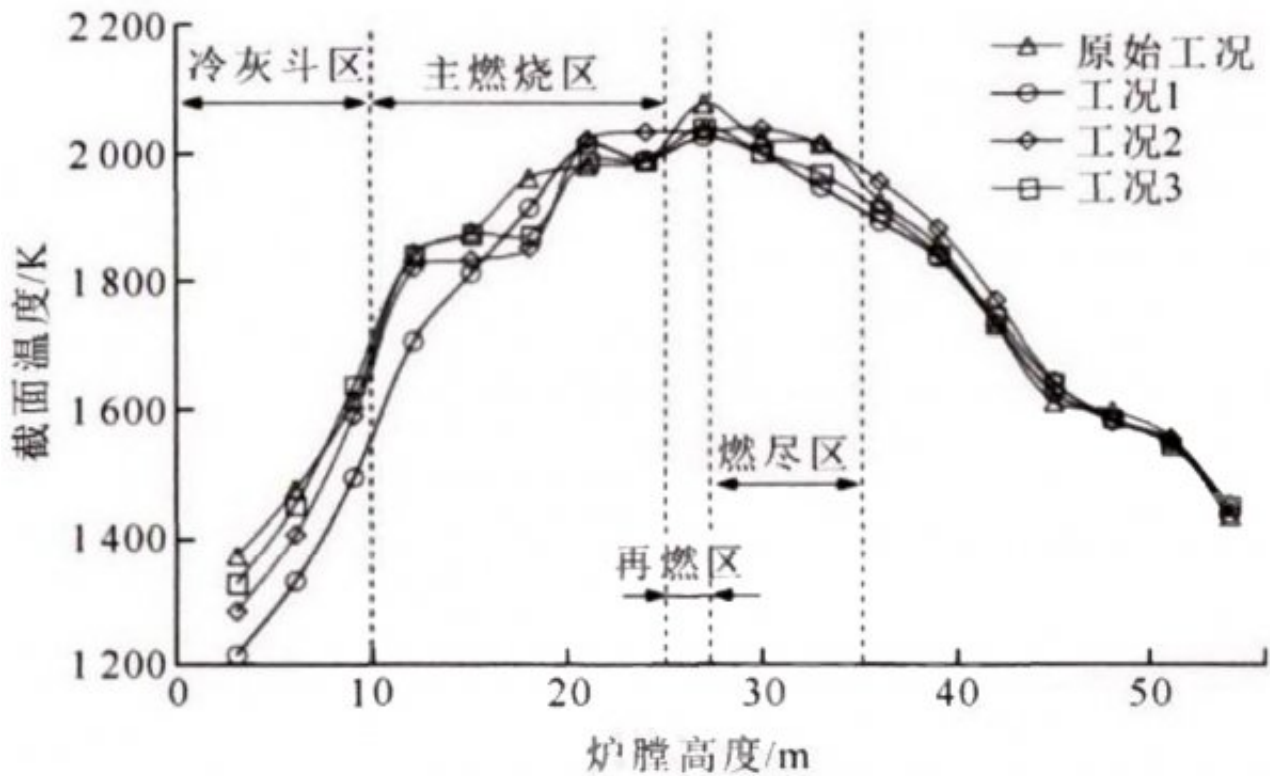


图 5 炉膛各水平截面烟气平均温度分布

Fig.5 The distribution of mean temperature on horizontal cross-sections along the furnace height direction

2.3不同生物质气喷口位置对炉膛出口 NO_x 的影响

不同工况下炉膛各水平截面 NO_x 的平均质量浓度随炉膛高度分布如图6所示。

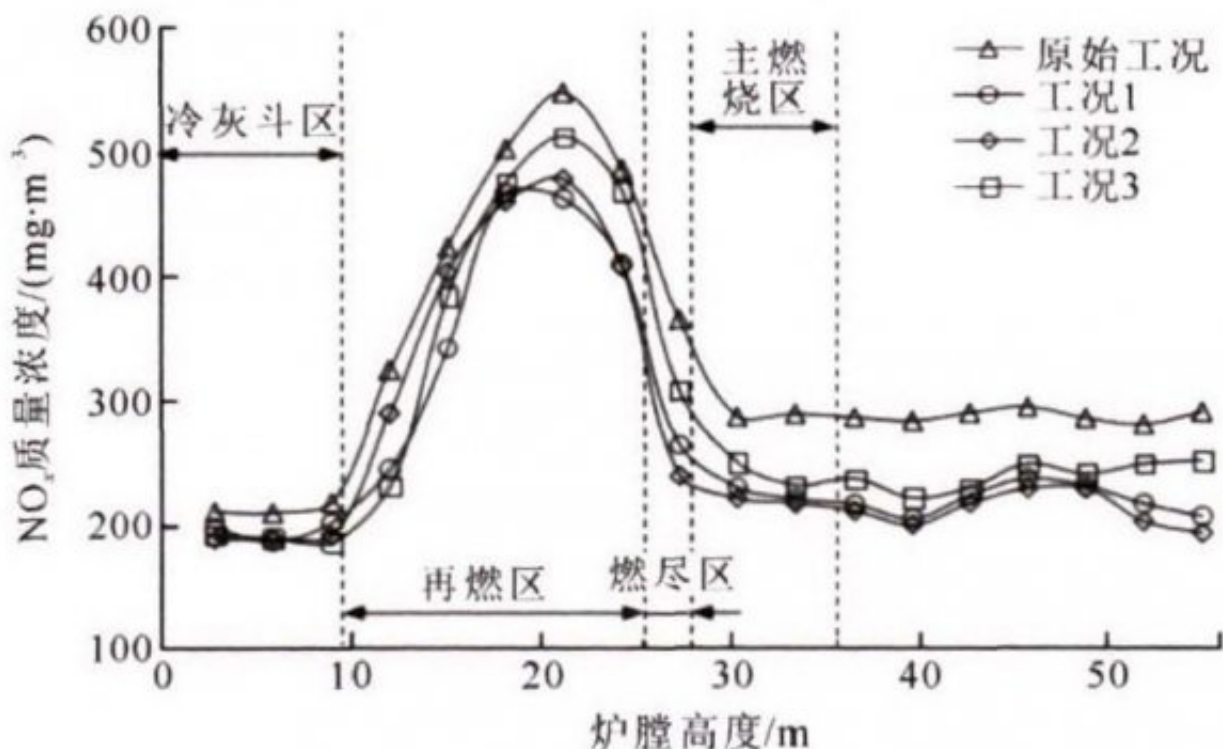


图 6 炉膛各水平截面 NO_x 平均质量浓度分布

Fig.6 The distribution of mean NO_x mass concentration on horizontal cross-sections along the furnace height direction

由图6可以看出：不同工况下 NO_x 生成
的变化趋势基本相同；由于
在主燃烧器区中部分煤被生物质气所
替代，故工况1—工况3在主燃烧器区的 NO_x
的生成量要远低于原始工况；之后由于燃尽风的送入，增高了燃尽区氧体积分数，使得未燃尽的煤粉可以继续燃烧，
促进了 NO_x
的生成；但由于工况1-工况3中生物质气的投入
，又将部分NO还原为 N_2
，其中工况1由于生物质气喷口位于主燃烧器区最顶层二次风之上，使得部分生物质气直接燃烧，没有起到很好的降低 NO_x 生成量的作用，故工况1在燃尽风区 NO_x
生成
量较高；
工况3中生物质气
喷口位于最下层燃尽风之下，部分
生物质气直接燃烧，也没有起到很好的降低 NO_x
生成量的作用，但由于部分生物质气直接燃烧，造成
燃尽风中 O_2
体积分数的减少，使得部分未燃尽的碳没
有继续燃烧，降低了燃尽风区 NO_x 的生成量；不同工况出口 NO_x
的平均质量浓度分别为291.96、228.32、210.19、239.58mg/
 m^3 ，其中工况1—工况3的 NO_x
平均质量浓度分

别下降了21.80%、28.01%、17.94%

。由此可见，生物质气再燃的确可以起到降低NO_x排放量的作用，而且工况2的减排效果最好。

2.4不同生物质气喷口位置对烟气组分的影响

图7为不同工况下，各炉膛截面O₂、CO、CO₂体积分数分布。

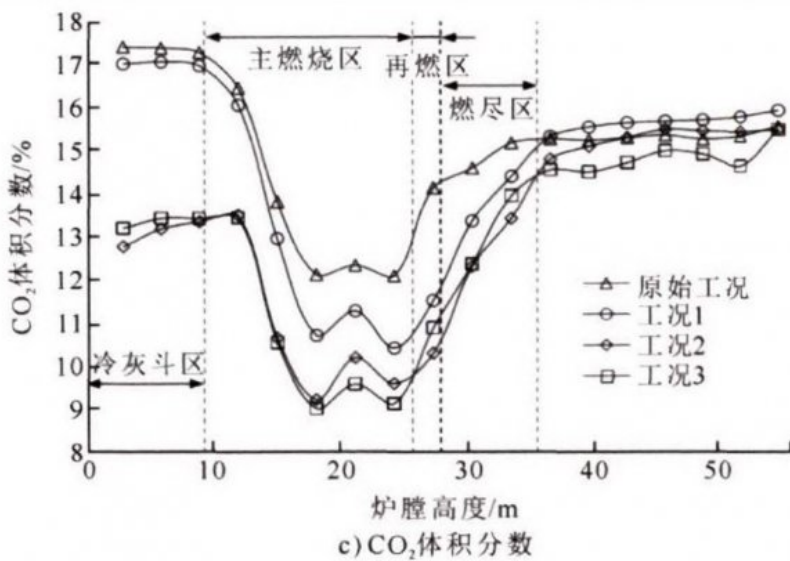
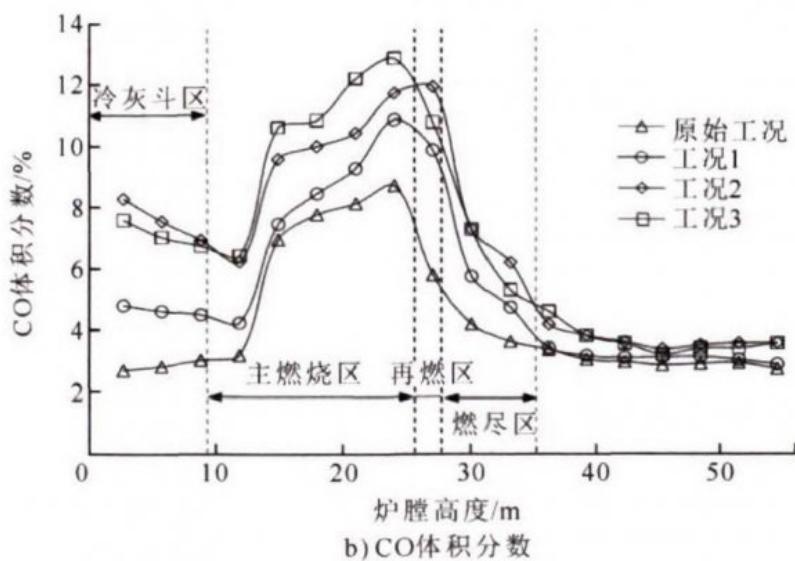
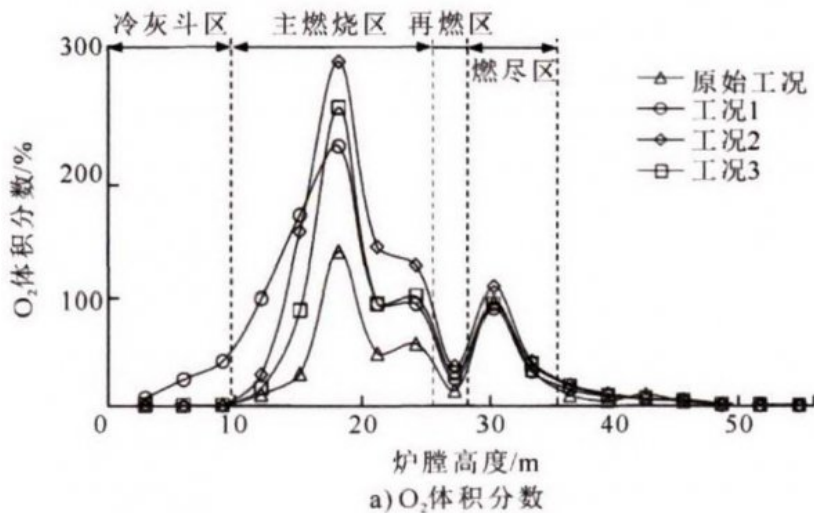


图 7 炉膛各水平截面的 O_2 、CO 和 CO_2 体积分数

Fig.7 The distribution of volume fractions of O_2 , CO and CO_2 on horizontal sections along the furnace height direction

由图7a)可以看出,不同工况下 O_2 体积分数变化趋势相似,工况1—工况3的 O_2 体积分数均大于原始工况的 O_2 体积分数,在主燃区,其差别较为明显。随着炉膛高度的增加, O_2 体积分数逐渐增大,在主燃区中部达到峰值,工况1—工况3的 O_2 体积分数均高于原始工况值。在燃尽区, O_2 体积分数又出现一个较小的峰值,在次处,工况1—工况3的 O_2 体积分数与原始工况下的 O_2 体积分数接近。原始工况和其他3个工况炉膛出口 O_2 体积分数分别为0.0962%、0.0934%、0.0404%、0.0438%。这是因为在主燃区一部分燃煤被生物质气所替代,导致生物质气掺烧工况下主燃区的 O_2 体积分数增加;在再燃区,生物质气作为二次燃料投入,生物质气再燃也需要空气,使得工况1—工况3总体的 O_2 体积分数与原始工况接近。

由图7b)可以看出:由于生物质气再燃过程中,部分煤粉会被生物质气所替代作为二次燃料在再燃区投入,主燃烧器区所投入的煤粉减少,主燃烧区燃烧温度降低,燃料燃烧不充分,导致主燃区CO体积分数增多,但随着炉膛高度增加,燃烧过程继续完成,使得不同工况下的CO体积分数逐渐接近。原始工况和其他3个工况炉膛出口CO体积分数分别为2.42%、2.56%、3.09%、3.11%。

由图7c)可以看出:工况1—工况3中产生的 CO_2 体积分数在主燃区均低于原始工况,在燃尽区,主燃区的未完全燃烧产物和部分未反应的生物质气继续燃烧,生成 CO_2 ,工况1—工况3的 CO_2 体积分数上升速度明显高于原始工况,其差别逐渐减小。在炉膛出口,原始工况和其他3个工况 CO_2 体积分数分别为15.31%、16.01%、15.67%、15.10%;在再燃区由于生物质气的投入,使得CO体积分数有所增加,这部分CO又与NO反应生成 N_2 和 CO_2 ,这使得再燃区中 CO_2 体积分数增加。

3结论

1)与原始工况相比,生物质气再燃使得主燃烧器区温度降低,而从再燃区开始温度升高。

2)随着生物质气喷口位置升高,出口烟气温度升高,其中工况1—工况3分别升高23、28、31K;生物质气喷口位置靠近主燃烧器区或靠近燃尽区,都有可能由于部分生物质气直接燃烧,造成局部中心火焰温度增高;生物质气喷口位置位于再燃区中间,要比靠近主燃烧器区和靠近燃尽区降低 NO_x 排放效果好, NO_x 排放质量浓度为210.19mg/m³,与原始工况相比 NO_x 排放质量浓度降低了28.01%。

3)由于一部分燃煤被生物质气所替代,所生成 CO_2 体积分数降低,但是会增加烟气中CO的体积分数。

[参 考 文 献]

- [1] 刘滋武, 黄滔, 巩馨骏, 等. 生物质型煤发展综述[J]. 洁净煤燃烧, 2014, 20(3): 98-102.
LIU Ziwu, HUANG Tao, GONG Xinjun, et al. Development review of bio-briquette[J]. Clean Coal Combustion, 2014, 20(3): 98-102.
- [2] 毛健雄. 燃煤耦合生物质发电[J]. 分布式能源, 2017, 2(5): 47-54.
MAO Jianxiong. Co-firing biomass with coal for power generation[J]. Distributed Energy, 2017, 2(5): 47-54.
- [3] 李国林, 孔岩, 范振兴, 等. 生物质气化耦合发电炉型选择及应用分析[J]. 能源与环境, 2019(1): 63-65.
LI Guolin, KONG Yan, FAN Zhenxing, et al. Biomass gasification coupling electric furnace type selection and application analysis[J]. Energy and Environment, 2019(1): 63-65.
- [4] 王刚, 曲红建, 吕群. 我国生物质气化耦合发电技术及应用探讨[J]. 环境管理, 2018(1): 16-19.
WANG Gang, QU Hongjian, LYU Qun. Discussion on biomass gasification coupling power generation technology and its application in China[J]. Environmental Management, 2018(1): 16-19.
- [5] 吴国强, 倪浩. 生物质气化耦合燃煤锅炉对燃烧安全性的影响[J]. 科技创新与应用, 2017(19): 68-69.
WU Guoqiang, NI Hao. Influence of biomass gasification coupled coal burning boiler on combustion safety[J]. Technology Innovation and Application, 2017(19): 68-69.
- [6] 王一坤, 张广才, 王晓旭, 等. 生物质气化耦合发电提升燃煤机组灵活性分析[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 77-82.
WANG Yikun, ZHANG Guangcai, WANG Xiaoxu, et al. Analysis of flexibility improvement of coal-fired power plant by biomass gasification coupled power generation[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 77-82.
- [7] 吴跃明, 吴智泉. 660 MW 超临界燃煤锅炉引入生物质气再燃方案及运行特性分析[J]. 分布式能源, 2018, 3(1): 14-20.

- WU Yueming, WU Zhiqian. Introduction of biomass gas reburning scheme and operation characteristics of 660 MW supercritical coal-fired boilers[J]. Distributed Energy, 2018, 3(1): 14-20.
- [8] 胡鹏龙, 于强, 周昊, 等. 燃煤耦合生物质气化发电技术研究[J]. 锅炉制造, 2018(6): 32-36.
HU Penglong, YU Qiang, ZHOU Hao, et al. Coal coupled biomass gasification power generation technical solutions[J]. Boiler Manufacturing, 2018(6): 32-36.
- [9] 李振山, 陈登高, 张志, 等. 生物质气化燃气耦合煤粉低氮燃烧的 CFD 数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 32-45.
LI Zhenshan, CHEN Denggao, ZHANG Zhi, et al. CFD Modeling of pulverized coal low-NO_x combustion coupling with biomass syngas firing[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 32-45.
- [10] 刘春元, 罗永浩. 含焦油生物质气还原 NO 的总包反应机理模型及其数值模拟[J]. 上海应用技术学院学报(自然科学版), 2014, 14(2): 142-146.
LIU Chunyuan, LUO Yonghao. Global chemical kinetic mechanism and numerical simulation on NO reduction by biomass gasification syngas with tar[J]. Journal of Shanghai Institute of Technology (Natural Science), 2014, 14(2): 142-146.
- [11] 马先良. 生物质气再燃降低 NO_x 的可行性研究[J]. 科技创新的导报, 2018, 15(20): 93-95.
MA Xianliang. Feasibility study on reducing NO_x by biomass gas recombination[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2018, 15(20): 93-95.
- [12] 孙俊威, 闫维平, 赵文娟, 等. 600 MW 超临界燃煤锅炉生物质气体再燃的数值研究[J]. 动力工程学报, 2012, 32(2): 89-95.
SUN Junwei, YAN Weiping, ZHAO Wenjuan, et al. Numerical study on biomass gas reburning in a 600 MW supercritical coal-fired boiler[J]. Power Engineering, 2012, 32(2): 89-95.
- [13] 殷仁豪, 罗永浩, 刘春元, 等. 含焦油生物质气再燃还原燃煤锅炉 NO_x 的试验研究[J]. 动力工程学报, 2012, 32(7): 552-557.
YIN Renhao, LUO Yonghao, LIU Chunyuan, et al. Experimental study on NO_x reduction in a coal-fired boiler by reburning biomass syngas with tar[J]. Power Engineering, 2012, 32(7): 552-557.
- [14] HU X Y, WANG T, DONG Z H, et al. Research on the gas reburning in a circulating fluidized bed (CFB) system integrated with biomass gasification[J]. Energies, 2012, 5(9): 3167-3177.
- [15] WERLE S Nitrogen oxides emission reduction using sewage sludge gasification gas reburning process[J]. Nephron Clinical Practice, 2015, 22(1): 83-94.
- [16] HRYCKO P, LASEK J, MATUSZEK K. Biomass gasification and Polish coal-fired boilers for process of reburning in small boilers[J]. Journal of Central South University, 2013, 20(6): 1623-1630.
- [17] SHU Y, ZHANG F, WANG H C, et al. An experimental study of NO reduction by biomass reburning and the characterization of its pyrolysis gases[J]. Fuel, 2015, 139: 321-327.
- [18] 徐皓鹏, 任少辉, 邵敬爱, 等. 对冲锅炉生物质气与煤粉混燃模拟研究[J]. 洁净煤燃烧, 2018, 24(5): 61-67.
XU Haopeng, REN Shaohui, SHAO Jingai, et al. Numerical study on co-combustion process of biomass gas and pulverized coal in an opposed boiler[J]. Clean Coal Combustion, 2018, 24(5): 61-67.
- [19] HODŽIĆ N, KAZAGIĆ A, SMAJEVIĆ I. Influence of multiple air staging and reburning on NO_x emissions during co-firing of low rank brown coal with woody biomass and natural gas[J]. Applied Energy, 2016, 168: 38-47.
- [20] 吴智泉, 韩中合, 向鹏, 等. 生物质气化与燃煤耦合发电系统能流和烟流分析[J]. 分布式能源, 2017, 2(6): 8-14.
WU Zhiqian, HAN Zhonghe, XIANG Peng, et al. Energy and exergy flow analysis of biomass gasification-coal coupling power generation system[J]. Distributed Energy, 2017, 2(6): 8-14.
- [21] 张小桃, 闻猛, 王爱军, 等. 燃煤锅炉掺烧松木气燃烧过程数值模拟研究[J]. 可再生能源, 2017, 35(11): 1595-1600.
ZHANG Xiaotao, WEN Meng, WANG Aijun, et al. Numerical study of the combustion process of pine gas co-firing in a coal-fired boiler[J]. Renewable Energy Resources, 2017, 35(11): 1595-1600.
- [22] 张小桃, 黄明华, 王爱军, 等. 生物质气化特性研究及烟分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 282-286.
ZHANG Xiaotao, HUANG Minghua, WANG Aijun, et al. Characteristics of biomass gasification and exergy analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 282-286.
- [23] 李德波, 徐齐胜, 沈跃良, 等. 660 MW 四角切圆锅炉低氮改造后变磨煤机组合方式下燃烧特性数值模拟[J]. 动力工程学报, 2015, 35(2): 89-95.
LI Debo, XU Qisheng, SHEN Yueliang, et al. Numerical simulation on combustion characteristics of a 660 MW tangentially-fired boiler after low-NO_x retrofit under different coal mill combinations[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2015, 35(2): 89-95.

原文地址: <http://www.china-nengyuan.com/tech/165694.html>