

DOI: 10.19666/j.rlfed.202212174

330 MW 机组煤粉炉还原区喷入水煤浆 热解气还原 NO_x 数值模拟

白昊¹, 张忠孝^{1,2}, 李子祥², 郭欣维³, 张健¹, 乌晓江²

(1.上海理工大学环境与建筑学院, 上海 200093; 2.上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240;
3.华北水利水电大学乌拉尔学院, 河南 郑州 450045)

[摘要] 以 330 MW 机组煤粉锅炉为研究对象, 采用数值模拟方法研究了水煤浆热解气的脱硝作用, 重点讨论了主燃区过量空气系数 α_1 和热解气比例 β 对炉内燃烧特性和 NO_x 排放的影响规律。结果表明: 当 β 保持不变时, 随着 α_1 减小, 主燃区温度降低, 燃尽区及炉膛出口温度升高; 同时, α_1 的减小增强了主燃区的还原性气氛, 有利于提高热解气的脱硝速率, 从而降低炉膛出口的 NO_x 质量浓度, 但 α_1 的减小会影响煤粉的燃烧性能并使得炉膛出口 CO 增多; 随着 β 的增加, 炉膛火焰中心上移, 热解气对 NO_x 的还原速率升高; 当 β 从 5% 增至 20% 时, 炉膛整体的 NO_x 质量浓度呈现先减小后增大的趋势, $\beta=15%$ 时 NO_x 质量浓度最低, 热解气的 NO_x 还原效率为 44.35%。

[关键词] 煤粉锅炉; 热解气; 燃烧特性; NO_x 排放; 数值模拟

[引用本文格式] 白昊, 张忠孝, 李子祥, 等. 330 MW 机组煤粉炉还原区喷入水煤浆热解气还原 NO_x 数值模拟[J]. 热力发电, 2023, 52(5): 136-144. BAI Hao, ZHANG Zhongxiao, LI Zixiang, et al. Numerical simulation of NO_x reduction by injecting coal-water slurry pyrolysis gas into reduction zone of a 330 MW pulverized coal boiler[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(5): 136-144.

Numerical simulation of NO_x reduction by injecting coal-water slurry pyrolysis gas into reduction zone of a 330 MW pulverized coal boiler

BAI Hao¹, ZHANG Zhongxiao^{1,2}, LI Zixiang², GUO Xinwei³, ZHANG Jian¹, WU Xiaojiang²

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

3. Ural Institute, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: The denitrification effect of coal-water slurry pyrolysis gas is investigated by numerical simulation in a 330 MW power station pulverized coal boiler, focusing on the influence law of excess air coefficient α_1 in the primary combustion zone (PCZ) and pyrolysis gas ratio β on the combustion characteristics and NO_x emission in the furnace. The results show that, when β is kept constant, the temperature of the PCZ decreases and the temperature of over-fire air (OFA) zone and furnace outlet increases as α_1 decreases. Meanwhile, the decrease of α_1 enhances the reducing atmosphere in the PCZ, which is beneficial to improve the denitrification rate of pyrolysis gas and thus to reduce the NO_x mass concentration at the furnace outlet. But the decrease of α_1 will affect the combustion performance of the pulverized coal and increase the CO concentration at the furnace outlet. With the increase of β , the center of the furnace flame moves up and the reduction rate of NO_x by pyrolysis gas increases. When β increases from 5% to 20%, the overall mass concentration of NO_x in the furnace shows a trend of first decreasing and then increasing, and when $\beta=15%$, the NO_x mass concentration reaches the lowest and the NO_x reduction efficiency of the pyrolysis gas reaches 44.35%.

Key words: pulverized coal boiler; pyrolysis gas; combustion characteristics; NO_x emission; numerical simulation

修回日期: 2022-12-16

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFB0604202)

Supported by: Research and Development Program (2018YFB0604202)

第一作者简介: 白昊 (1994), 男, 博士研究生, 主要研究方向为燃煤污染物控制技术, baih123666@163.com。

通信作者简介: 张忠孝 (1959), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为洁净能源技术和煤气化技术, zhzhx222@163.com。

煤燃烧产生的氮氧化物 (NO_x) 是造成空气严重污染的重要来源。近年来我国火电机组普遍实施 NO_x 超净排放标准 (标况 ($\alpha(O_2)=6\%$) 下 NO_x ≤ 50 mg/m³)^[1]。为满足严格的环保要求,我国火电机组普遍同时采用炉内低 NO_x 燃烧技术与烟气选择性催化还原 (SCR) 技术,并且在常规 SCR 脱硝技术的基础上再增加 1 层催化剂来满足不同负荷下的脱硝需求,从而极大地增加了脱硝成本^[2]。同时,为实现锅炉长期稳定的 NO_x 超低排放要求,当 SCR 反应器入口 NO_x 质量浓度过高时,脱硝过程中的喷氨量通常高于设计值,使得机组运行成本增加,且时常导致空气预热器(空预器)堵塞、氨逃逸等问题发生^[3]。因此,在燃烧过程中降低炉膛初始 NO_x 质量浓度对实现燃煤 NO_x 超低排放具有重要意义。

气体燃料再燃技术因其脱氮效率高、改造费用低、不存在炉膛结渣等特点,被认为是一种极具发展潜力的炉内脱硝技术。再燃燃料的选择范围很广,可以是天然气、生物质气、工业废气和水煤浆热解气等^[4-6]。研究发现:天然气的脱硝效率最高,但存在成本昂贵等缺点;生物质气与工业废气存在应用场景及规模的局限性^[7-8];而将煤粉制成水煤浆进行热解后,产生多种具有还原活性的气体如 CH₄、H₂、CO 以及少量的 HCN、NH₃ 和烃类等^[9-10],具有较高的脱硝添加剂品质。Hampartsoumian E 等^[11]研究发现,再燃气体喷入位置的还原气氛越强,NO_x 还原效率越高。徐嘉叶^[12]利用高温预热解装置处理煤粉,通过将煤粉热解气喷入炉膛还原区可实现 46% 的脱硝效率。吴磊^[13]发现在 1 173~1 473 K 下,同质量煤制成水煤浆后的热解气产率远高于煤粉。董若凌等^[14]研究表明,水煤浆热解气中的水蒸气不仅可以促进生成更多的 CO 和 H₂,还提供了大量的

H 和 OH 自由基,从而促进中间活性物质 HCN、NH₃ 和 CH₄ 的形成,有助于降低 NO 的排放。Wu 等人^[15]在 75 t/h 四角切圆煤粉炉前加装 5 t/h 的水煤浆热解炉,将水煤浆热解气脱硝系统应用于实际工业锅炉中,通过在还原区喷射热解气实现了 51% 的脱硝效率。

电站锅炉一般采用空气分级来降低炉内燃烧产生的 NO_x。空气分级使得主燃区形成了富燃料还原性气氛,这为水煤浆热解气在还原区的喷入创造了条件。本文以 330 MW 机组锅炉为研究对象,对水煤浆热解气还原 NO_x 的特性进行数值模拟研究,并分析主燃区过量空气系数和热解气比例对炉膛燃烧和 NO_x 还原效果的影响,进而为实际工程中应用水煤浆热解气脱硝提供理论依据与指导。

1 建立模型

1.1 锅炉模型及网格划分

研究对象为某电厂亚临界 330 MW 机组四角切圆煤粉锅炉,设计蒸汽参数为 17.5 MPa/814 K/813 K,炉膛高度为 53.7 m,主燃区横截面尺寸为 14.022 m×13.640 m。主燃区炉膛四角交替安装了 5 层一次风煤粉喷口 (A—E) 和 7 层二次风喷口,最上层二次风喷口上方设置了 1 层紧凑燃尽风 (OFA) 喷口。在主燃区上方 3.8 m 和 7.5 m 处,安装了 2 组分离燃尽风 (SOFA) 喷口。锅炉实际燃煤为东胜褐煤,煤质分析见表 1。热解气参数根据本团队在 5 t/h 水煤浆热解炉热解试验结果确定,具体见表 2,详细制备流程见文献^[15]。锅炉结构与燃烧器喷口分布如图 1 所示。为研究水煤浆热解气的脱硝特性,本文在炉膛还原区(标高 22.83 m)增加 1 层热解气喷口,具体布置如图 1c) 所示。

表 1 煤质分析
Tab.1 Properties of pulverized coal

工业分析 w/%				元素分析 w/%					低位热值/(kJ·kg ⁻¹)
M	A	V	FC	C	H	S	N	O	
27.00	16.94	21.82	34.24	43.31	2.00	0.58	0.54	9.63	15 760

表 2 水煤浆热解气特性
Tab.2 Properties of coal-water slurry pyrolysis gas

水煤浆热解气体积分数/%						温度/K	低位热值/(kJ·m ⁻³)
CO ₂	CO	CH ₄	H ₂	H ₂ O	N ₂		
9.40	22.30	0.67	9.20	17.92	40.51	1 173	4 787.80

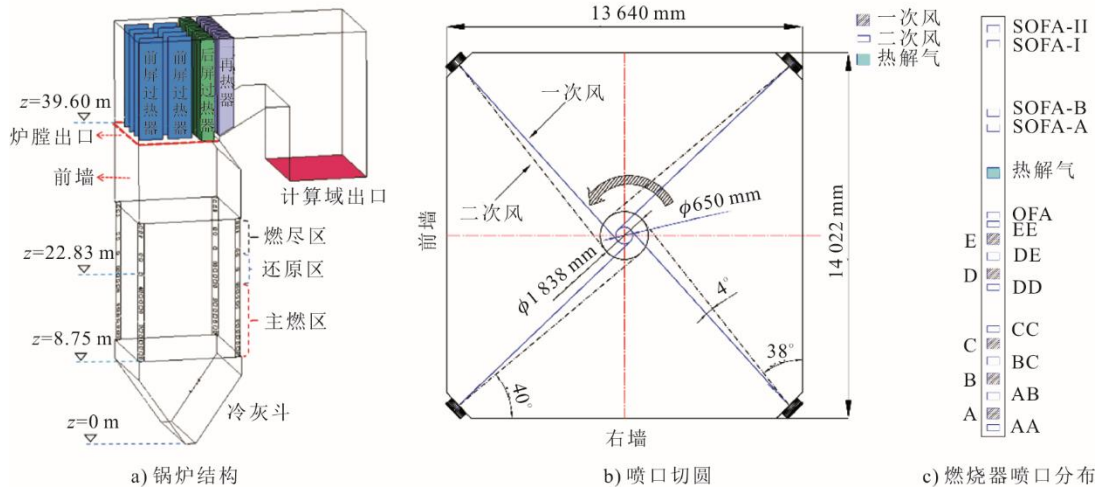


图1 锅炉结构与燃烧器喷口分布

Fig.1 The boiler structure and burner nozzle distribution

通过对锅炉几何形状的合理简化,建立三维模型,主要包括冷灰斗区、主燃区、燃尽区及悬挂受热面区。锅炉截面网格划分如图2所示。由于燃烧器区域流场及燃烧参数变化剧烈,网格划分时对此区域进行局部加密。为了降低伪扩散效应^[16],燃烧器区域横截面网格划分采用与流动方向一致的扇形网格,并将燃烧器入口附近的网格局部加密,具体如图2b)所示。经过网格无关性检验(所比较的网格数量为106.3万、187.6万、254.4万),确定最终的计算网格数为187.6万。

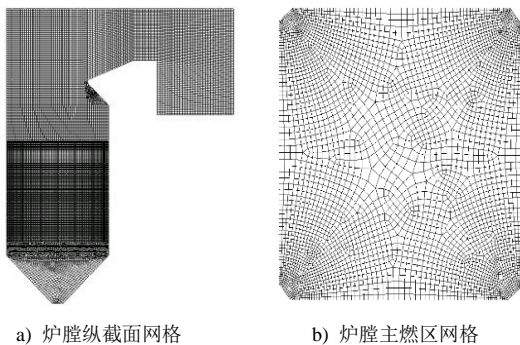


图2 锅炉截面网格划分

Fig.2 Mesh generation of the boiler section

1.2 数值模型

采用 ANSYS Fluent 2020 软件模拟炉内燃烧过程。模拟过程中所采用的计算模型如下:采用 Realizable $k-\epsilon$ 模型模拟气相湍流流动,采用随机离散相模型(DPM)计算颗粒的运动^[17-18];挥发分析出和气相湍流燃烧分别采用双竞速模型和有限速率/涡耗散(FR/EDM)模型模拟^[19-20],而焦炭燃烧由动力/扩散模型计算;辐射换热采用 DO 模型考虑,并通过 WSGG 模型获取气体吸收系数^[21]; NO_x

的生成/还原过程由后处理计算模拟^[22],其中热力型 NO_x 由扩展的 Zeldovich 机理描述,燃料型 NO_x 采用 De Soete 模型描述,即挥发性氮首先转化为中间产物 HCN 和 NH_3 ,然后形成 NO 或 N_2 ;采用部分平衡模型预测热解气对 NO 的还原。

1.3 计算工况与边界条件

为研究不同主燃区过量空气系数 α_1 和热解气比例 β 对热解气脱硝特性的影响,设计了表3所示8组工况。所有工况锅炉负荷均为300 MW, A—D层燃烧器投运,一次风风率为25%,总过量空气系数 α 为1.18。通过调整 SOFA 比率来实现主燃区过量空气系数 α_1 的改变。由于各工况下热解气喷口面积不变,因此热解气喷口风速随其比例升高而增大。

将燃烧器喷口作为计算域的入口边界,一次风风温和二次风风温分别353 K和603 K,热解气温度为1173 K。煤粉颗粒速度与一次风保持一致,颗粒直径按 Rosin-rammler 方法分布,粒径为10~100 μm ,平均粒径为60 μm 。固体壁面上采用无速度滑移条件,按照饱和水温度加修正温差后取水冷壁壁面温度为733 K。锅炉出口设置为压力出口,出口压力为-100 Pa。

在模拟加入热解气的工况中,采用热解气等热量代替一部分煤粉在炉膛中燃烧。根据热解气单位体积所含热量可以计算出所需的热解气流量,即:

$$q_{\text{PG}} = \frac{B_{\text{coal}} Q_{\text{net,ar}} \beta}{3600 Q_{\text{PG}}} \quad (1)$$

式中: q_{PG} 为热解气流量, m^3/s ; B_{coal} 为纯煤燃烧时的煤粉消耗量, kg/h ; $Q_{\text{net,ar}}$ 为煤粉的低位发热量, β 为喷入的热解气比例(热量比),%; Q_{PG} 为单位体积热解气在1173 K温度下携带的总热量, kJ 。

表 3 工况参数
Tab.3 Parameters of the working conditions

参数	纯燃煤工况	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6	工况 7
热解气比例 β/%	0	15	15	15	15	5	10	20
热解气喷口速度/(m·s ⁻¹)	0	90.8	90.8	90.8	90.8	30.3	60.6	121.1
总煤量/(t·h ⁻¹)	185.0	157.3	157.3	157.3	157.3	175.8	166.5	148.0
总空气量 (标况下)/(km ³ ·h ⁻¹)	890.4	823.7	823.7	823.7	823.7	868.2	845.9	801.4
SOFA 风率/%	30.0	20.0	25.0	30.0	35.0	30.0	30.0	30.0
主燃区过量空气系数 α ₁	0.830	1.027	0.963	0.899	0.835	0.848	0.872	0.929

与纯煤燃烧相比，煤粉与热解气混燃时所消耗的空气质量会发生一定变化。热解气完全燃烧所需理论空气量与混燃工况下总空气量为：

$$V_{PG} = \frac{0.5\varphi(\text{CO}) + 0.5\varphi(\text{H}_2) + 2\varphi(\text{CH}_4)}{21} \times q_{PG} \quad (2)$$

$$V = \alpha \times (V_{\text{coal}} + V_{PG}) \quad (3)$$

式中：V_{PG} 为混燃工况下热解气完全燃烧所需理论空气量，m³/s；φ()表示体积分数；V 为混燃工况所需的总空气量，m³/s；V_{coal} 为混燃工况下煤粉燃烧所需空气量，m³/s；α 为总过量空气系数，取 1.18。

2 结果与讨论

2.1 模型验证

SOFA 风率为 30% 的纯燃煤工况为锅炉 300 MW 负荷下的常规运行工况。对该工况进行数值计算，并将模拟结果与锅炉常规运行的实测结果进行对比。锅炉的试验测点布置于屏式过热器底部位置（标高 39.6 m），采用截面多点网格法（6 孔×6 点）测量，取测量结果的算术平均值近似为该截面的面平均值，模拟结果则采用该位置处横截面上参数值的面积加权平均值。本文所有模拟及实测的 NO_x 值均已折算为干烟气、标况、氧量为 6% 下的 NO_x 质量浓度值，炉膛出口模拟结果与实测数据对比结果见表 4。

表 4 炉膛出口模拟结果与实测数据对比
Tab.4 Comparison between the simulated results and measured data for the furnace outlet

参数	实测值	模拟值
温度/K	1 429	1 445
CO 体积分数/(μL·L ⁻¹)	198	186
O ₂ 体积分数/%	3.17	3.36
NO _x 质量浓度/(mg·m ⁻³)	258	248

炉膛出口的烟温、CO 体积分数、O₂ 体积分数和 NO_x 质量浓度的模拟结果与实测数据的偏差分

别为 1.12%、6.06%、5.99% 和 3.88%。考虑到模拟时对炉膛结构的简化处理及实际测量数据的误差，模拟偏差均在可接受范围内。因此，可认为本文模型准确可靠，能够反应炉膛真实的燃烧情况。

2.2 主燃区过量空气系数 α₁ 的影响

2.2.1 对燃烧温度的影响

工况 1—工况 4 的热解气比例 β 为 15%，总煤量和总风量相同，随着 SOFA 风率从 20% 增至 35%，主燃区过量空气系数 α₁ 从 1.027 减至 0.835。图 3 和图 4 为不同 α₁ 下炉膛中心纵截面温度场分布和横截面平均温度沿炉膛高度方向的变化曲线。

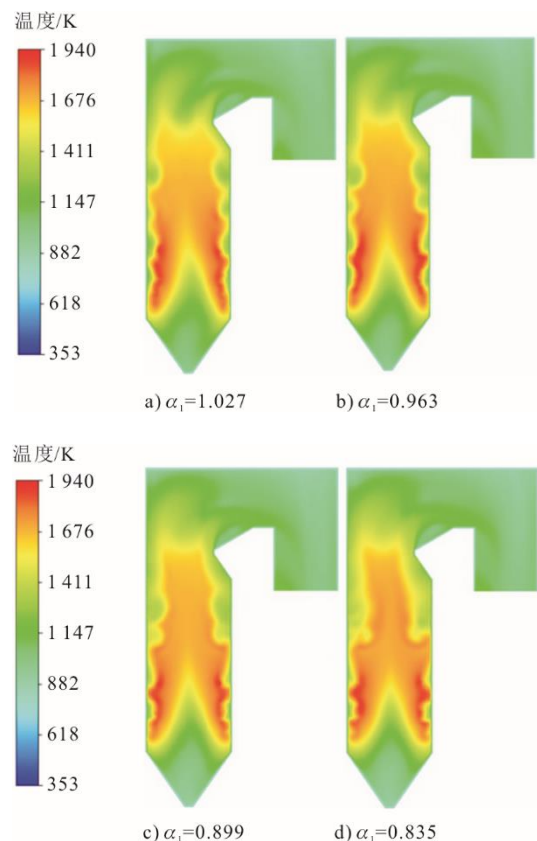


图 3 不同 α₁ 下炉膛中心纵截面温度场分布
Fig.3 Temperature field distribution in the center longitudinal section of the furnace at different α₁s

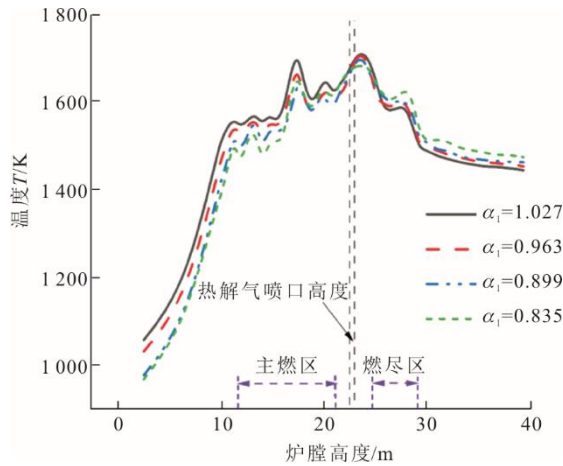


图4 不同 α_1 下截面平均温度沿炉膛高度方向变化
Fig.4 Variations of cross-sectional average temperature along the furnace height direction at different α_1 s

从图3和图4可以看出：冷灰斗区域的温度最低，煤粉颗粒进入主燃区后挥发分受热析出并着火，随之引燃焦炭释放大量的热量形成高温烟气流；在炉膛高度为17.4m时各工况的截面平均温度在主燃区达到峰值，工况1—工况4的峰值温度分别为1724、1693、1670、1665K。同时，由于煤粉燃烧主要发生在喷口气流所形成的切圆上，靠近壁面的温度远高于炉膛中心区域。主燃区未完全燃烧的可燃物在燃尽区继续燃烧，导致此处温度略微上升。随着 α_1 的减小，主燃区氧量减少，使得燃烧强度降低并推迟了煤粉在主燃区的放热过程，从而降低了主燃区的烟气温度水平。当 α_1 从1.027减至0.835时，主燃区平均温度从1613K降至1574K，炉膛出口温度从1449K升至1479K。 α_1 越低，主燃区温度越低，燃尽区温度越高，并使得炉膛出口的温度越高。

2.2.2 对 O_2 、CO体积分数的影响

热解气(CH_4 、 H_2 、CO)在炉内与 NO 发生还原反应的同时也与 O_2 发生氧化反应。因此，降低热解气喷射位置的 O_2 体积分数，有利于增强热解气的还原效率。图5为不同 α_1 下截面 O_2 、CO体积分数沿炉膛高度的变化曲线。由图5可见： α_1 越小，炉膛主燃区横截面的 O_2 体积分数越低，使得还原区热解气喷射层的还原气氛越强，对热解气还原 NO_x 越有利； α_1 越小，主燃区CO体积分数越高，表明 α_1 减小后主燃区煤粉的燃烧效率降低。还原区热解气的喷入使得CO体积分数大幅升高，在相同的热解气喷射比例下， α_1 为0.835时CO体积分数最高。这是因为该工况下主燃区产生的CO体积分

数本身高于其他工况，且还原区 O_2 体积分数较低，喷入的CO不易被消耗。在燃尽区， O_2 的补充使得CO体积分数迅速降低。就总体燃烧而言， α_1 越低，炉膛出口CO体积分数越高，在 α_1 为0.899时炉膛出口CO体积分数可达376 $\mu L/L$ 。

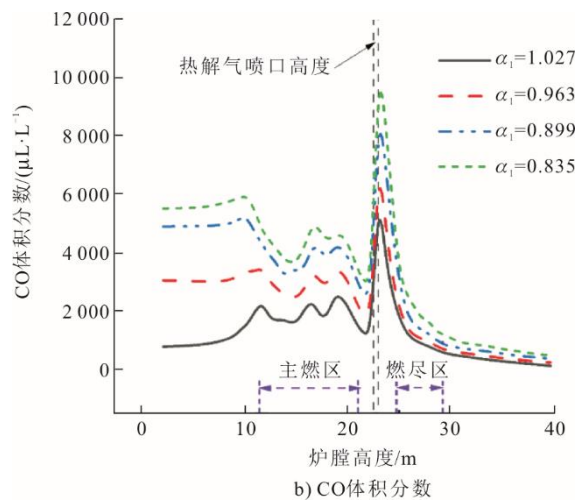
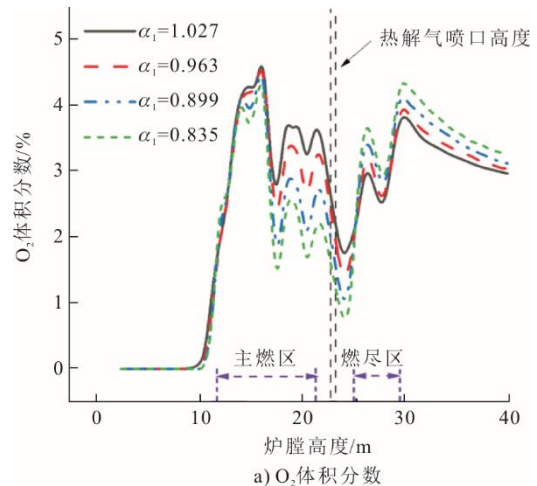


图5 不同 α_1 下截面 O_2 、CO体积分数的变化
Fig.5 Variations of cross-sectional O_2 and CO volume fraction along the furnace height direction at different α_1 s

2.2.3 对 NO_x 质量浓度的影响

图6为截面 NO_x 质量浓度沿炉膛高度的变化曲线。在燃烧器喷口区域，煤粉剧烈燃烧使得此处局部温度高于1623K，导致生成较多的热力型 NO_x 。同时，随着挥发分的燃烧大量挥发分N转化为燃料型 NO_x ，因此，主燃区 NO_x 质量浓度迅速升高。随着 α_1 的减小，燃烧区域的还原性气氛加强，含N基团被氧化成 NO_x 的比例减少，且燃烧过程中的含N中间产物HCN和 NH_3 在还原性气氛下会与已生成的NO反应生成 N_2 ^[23]，主燃区的 NO_x 质量浓度逐渐降低。

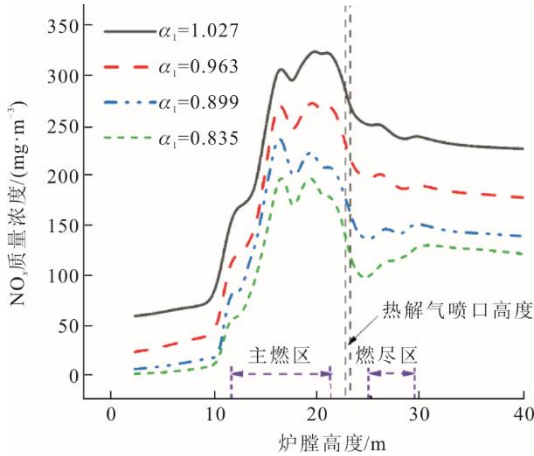
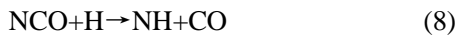
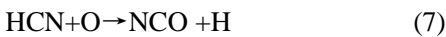
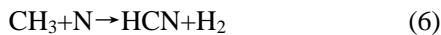
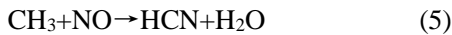
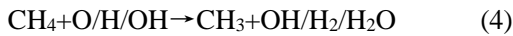


图 6 不同 α_1 下截面 NO_x 质量浓度沿炉膛高度方向变化
Fig.6 Variations of cross-sectional NO_x mass concentration along the furnace height direction at different α_1 s

当烟气上升至还原区后，喷入的热解气将对主燃区生成的 NO_x 进行还原。CH₄ 为热解气中对还原过程影响最大的组分，其发生的主要反应如为^[8]：



热解气中 H₂ 主要通过反应(11)产生 H 自由基和中间产物 HNO，从而实现 NO 的还原^[24]。CO 直接与 NO 发生还原反应（反应(12)），但其反应速率低，对 NO 的还原效率低于 CH₄ 和 H₂^[25]。可以发现， α_1 越低，烟气经过热解气后 NO_x 降低的幅度越大。图 7 为不同 α_1 下截面 NO 再燃还原速率沿炉膛高度方向的变化。由图 7 可见，NO 再燃还原速率的变化也可以反映出这一规律，即相同热解气比例下， α_1 越低，NO 再燃还原速率越高，说明 α_1 的降低更有利于热解气对 NO 的还原。相对于纯燃煤工况，工况 1—工况 4 的脱硝效率分别为 9.3%、28.6%、44.4%、51.6%。随 α_1 的减小，炉膛整体脱硝效率的提升幅度逐渐减小。这主要是因为 α_1 降低后更多未燃尽碳在燃尽区域继续燃烧，从而导致燃尽区内部分 NO_x 的二次生成。

2.3 热解气比例 β 的影响

2.3.1 对燃烧温度的影响

工况 5、工况 6、工况 3 和工况 7 研究了相同

SOFA 比率条件下，热解气比例 β 的变化对脱硝特性的影响。图 8 为不同 β 下炉膛高度方向截面平均温度的变化曲线。从图 8 可知，随着 β 的增加，炉膛主燃区温度降低，而燃尽区及炉膛出口的温度升高。这是因为 β 的增大导致主燃区煤粉量减少，因此，主燃区燃烧强度降低、放热量减少。同时，更多的热解气在还原区投入并燃烧放热，使得热解气喷口上部的温度升高，整体火焰中心上移。火焰中心的上移导致炉膛出口温度升高，工况 5、工况 6、工况 3 和工况 7 的炉膛出口温度分别为 1 450、1 459、1 468、1 480 K， β 每增加 5%，炉膛出口温度平均增加 10 K。

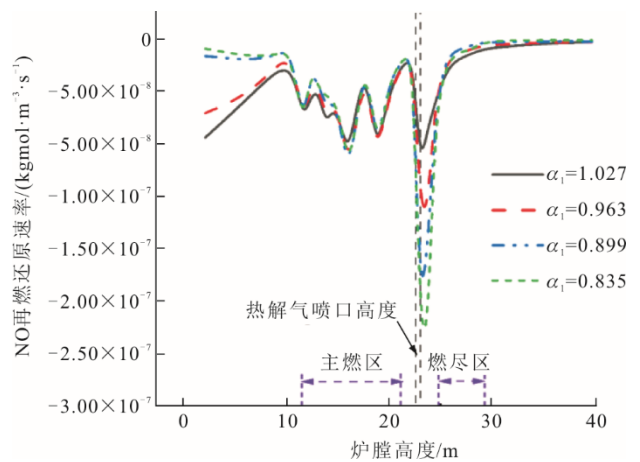


图 7 不同 α_1 下截面 NO 再燃还原速率沿炉膛高度方向变化
Fig.7 Variations of cross-sectional NO reburn reduction rate along the furnace height direction at different α_1 s

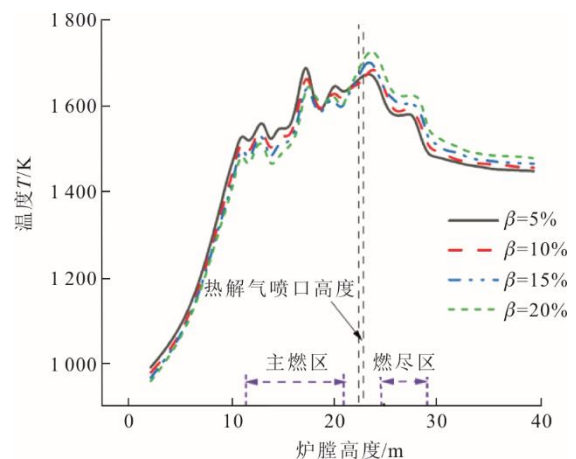


图 8 不同 β 下截面平均温度沿炉膛高度方向变化
Fig.8 Variations of average temperature of the cross section along height direction of the furnace at different β s

2.3.2 对 O₂、CO 体积分数的影响

不同 β 下炉膛横截面的 O₂、CO 体积分数沿炉膛高度的变化如图 9 所示。由图 9 可见，随着 β 的

增加,主燃区 O₂ 体积分数小幅增加,CO 体积分数则减小。 β 增加后炉膛主燃区投入的煤粉量减少,作为替代燃料的热解气从还原区进入,但这部分热解气燃烧所需的空气仍由主燃区二次风喷口送入。因此, β 增加后主燃区煤粉量减少,但燃烧空气量并未明显减少,导致主燃区过量空气系数变大。当含有 CO 的热解气进入炉膛后,炉内 CO 体积分数迅速升高,且其升高幅度随 β 增大而增大。同时, β 升高后热解气喷射速度增大,CO 更易进入炉膛中心区域,从而有利于还原已生成的 NO_x。然而,由于切圆锅炉炉内旋转流场的存在,燃尽区氧气主要集中在近壁面附近^[26],此时进入到炉膛中心区域的 CO 的消耗速率降低。因此, β 越大,炉膛出口的 CO 体积分数越高,当 β 增至 20% 时,炉膛出口的 CO 体积分数升高至 442 $\mu\text{L/L}$ 。

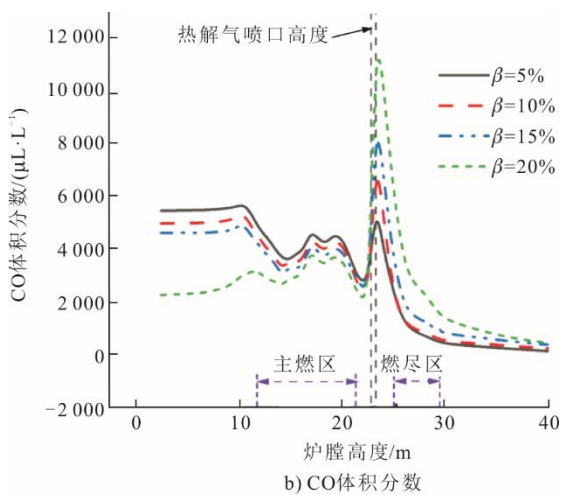
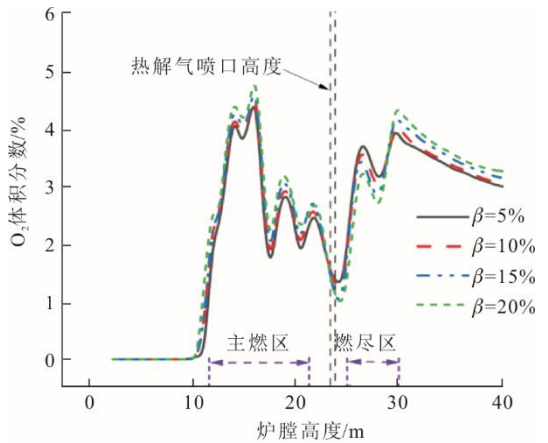


图9 不同 β 下截面 O₂、CO 体积分数沿炉膛高度方向变化
Fig.9 Variations of cross-sectional O₂ and CO volume fraction along the furnace height at different β s

2.3.3 对 NO_x 质量浓度的影响

图 10 为不同 β 下燃烧器喷口纵截面上的 NO_x

质量浓度分布,图 11 为不同 β 下截面 NO_x 质量浓度沿炉膛高度方向的变化曲线。

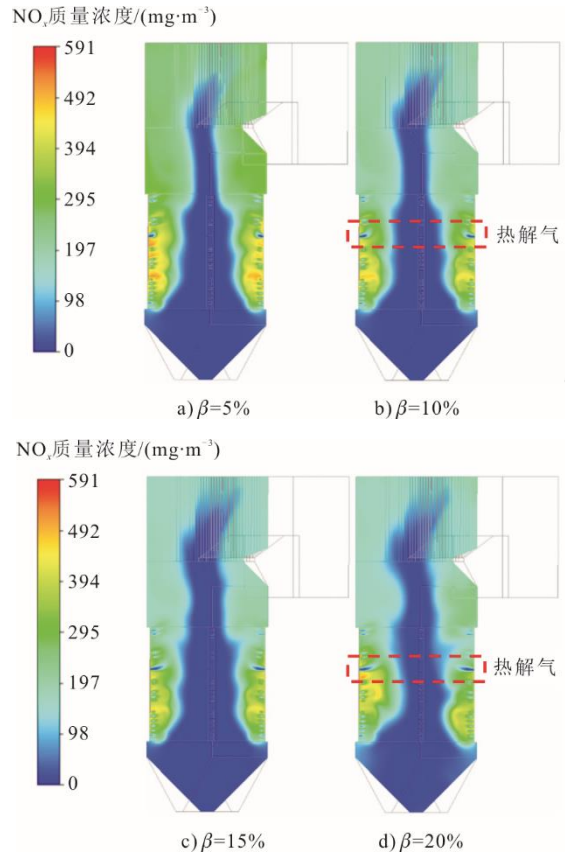


图 10 不同 β 下燃烧器喷口纵截面 NO_x 质量浓度分布
Fig. 10 Distribution of NO_x mass concentration in longitudinal section of the burner nozzle at different β s

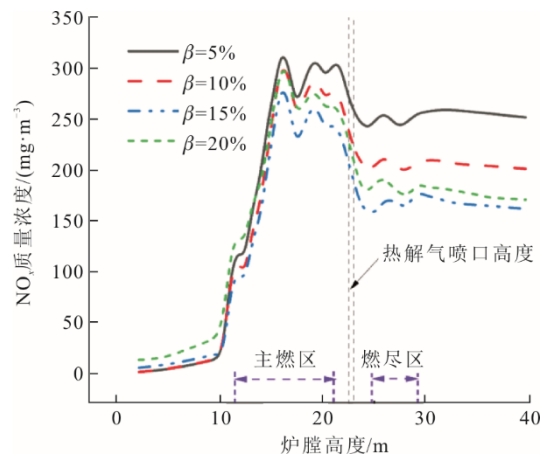


图 11 不同 β 下截面 NO_x 质量浓度沿炉膛高度方向的变化
Fig.11 Variations of cross-sectional NO_x mass concentration along the furnace height direction at different β s

结合图 10、图 11 可以看出,NO_x 生成位置基本位于炉膛近壁面气流形成的旋转切圆上,炉膛中心区域的 NO_x 质量浓度很低。随着 β 的增大,炉内 NO_x 生成整体呈先减小后增大的趋势,存在脱硝效

率最佳的 β 值。当 β 从0逐渐增加至15%时,主燃区煤粉量减少,燃烧强度和烟气温度的降低,燃烧器喷口周围NO_x的高质量浓度区域逐渐减小,导致NO_x质量浓度降低。而当 β 继续增大至20%时,主燃区NO_x质量浓度反而升高,即主燃区煤粉量减少后NO_x生成量并未降低。原因在于 β 大幅增加后,主燃区煤粉燃烧的过量空气系数变大,燃烧过程中的还原性气氛减弱,煤粉燃烧的含氮中间产物HCN和NH₃更倾向于发生氧化反应生成NO,因而燃烧气氛变化导致的NO_x增加量大于煤粉量减少导致的NO_x减少量。

图12为不同 β 工况的NO再燃还原速率变化曲线。由图12可见,喷入热解气后NO的再燃还原速率随 β 的增大而升高。 β 的增大提高了CH₄等还原性组分的质量浓度和热解气气流的刚性,当 β 从5%增至20%时,热解气喷口速度从30.3 m/s升至121.1 m/s,热解气喷口的高速射流有利于热解气组分与烟气中NO_x的混合与接触,从而加快了反应(4)~反应(11)的进行,使已生成的NO_x在还原区降低到一定的水平。但由于 $\beta=20\%$ 时主燃区生成了更多的NO_x,该条件下炉膛出口NO_x质量浓度仍高于 $\beta=15\%$ 的工况。因此, $\beta=15\%$ 时脱硝效率最高,炉膛出口NO_x质量浓度为138 mg/m³,相对于纯燃煤工况,热解气的还原效率为44.35%。

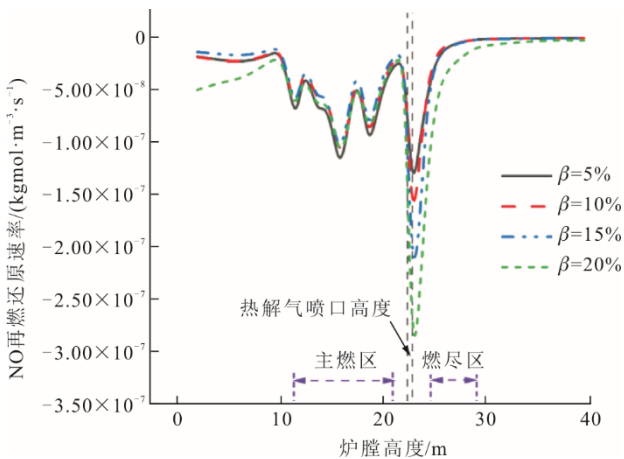


图12 不同 β 下NO再燃还原速率变化

Fig.12 Variations of NO reburn reduction rate at different β s

3 结 论

本文以330 MW机组锅炉为研究对象,采用数值模拟方法研究了喷射水煤浆热解气对燃烧特性和NO_x排放的影响。通过将模拟结果与现场运行数据对比验证了模型的可靠性,并据此分析了主燃区

过量空气系数 α_1 和热解气比例 β 对热解气脱硝效果的影响。

1) 当 β 保持不变时, α_1 越小,主燃区温度越低,燃尽区温度及炉膛出口的温度越高。 α_1 的减小可以增强主燃区的还原性气氛,但会影响煤粉的燃烧性能, α_1 越小,炉膛出口的CO体积分数越高。

2) 相同 β 条件下, α_1 的减小可以降低主燃区的NO_x生成量,同时提高热解气对NO_x的还原速率。但随着 α_1 的持续减小,燃尽区二次生成的NO_x量逐渐增加,导致整体脱硝效率的提升幅度逐渐减小。

3) 随着 β 的增大,主燃区煤粉量减少,炉膛整体火焰中心上移, β 每增加5%,炉膛出口温度平均增加10 K。主燃区O₂体积分数随 β 的增大小幅增加,而主燃区CO体积分数则随之减小。同时, β 越大,喷入炉膛中心区域的CO体积分数越多,使得炉膛出口的CO体积分数越高。

4) 当 β 从5%增至20%时,炉膛整体的NO_x质量浓度呈现先减小后增大的趋势。 $\beta=15\%$ 时炉膛出口NO_x质量浓度达到最低值138 mg/m³,相对于纯燃煤工况,热解气的NO_x还原效率为44.35%。

[参 考 文 献]

- [1] 中国知网. 环境保护部, 国家发展和改革委员会, 国家能源局. 关于印发《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》的通知: 环发〔2015〕164号 [EB/OL]. (2015-12-11)[2017-08-12]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201512/t20151215_319170.htm. Ministry of Environmental Protection, National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Notice on the issuance of the *Work plan for ultra-low emission and energy saving renovation of coal-fired power plants*: HF[2015]No.164[EB/OL]. (2015-12-11)[2017-08-12]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201512/t20151215_319170.htm, 2015-12-11.
- [2] 徐嘉叶, 朱晓磊, 李剑宁, 等. 全负荷脱硝技术的应用与分析[J]. 动力工程学报, 2020, 40(7): 580-585. XU Jiaye, ZHU Xiaolei, LI Jianing, et al. Theoretical analysis and application of a denitration technology over the whole load range[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2020, 40(7): 580-585.
- [3] 王修文, 李露露, 孙敬方, 等. 我国氮氧化物排放控制及脱硝催化剂研究进展[J]. 工业催化, 2019, 27(2): 1-23. WANG Xiuwen, LI Lulu, SUN Jingfang, et al. Analysis of NO_x emission and control in China and research progress in denitration catalysts[J]. *Industrial Catalysis*, 2019, 27(2): 1-23.
- [4] 方斌, 罗永浩, 陆方, 等. 燃煤锅炉再燃技术中再燃燃料的特性与选择[J]. 热能动力工程, 2004, 19(5): 443-446. FANG Bin, LUO Yonghao, LU Fang, et al. The characteristics and selection of reburned fuels involved in the reburning technology of a coal-fired boiler[J]. *Journal*

- of Engineering for Thermal Energy & Power, 2004, 19(5): 443-446.
- [5] 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): 2032-2045.
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): 2032-2045.
- [6] 贾彦兵, 周托, 王志宁, 等. 工业可燃废气再燃低 NO_x 排放实验研究及工程应用[J]. 煤炭转化, 2022, 45(3): 80-86.
JIA Yanbing, ZHOU Tuo, WANG Zhining, et al. Experimental study its application of low NO_x emission using combustible exhaust gas reburning[J]. Coal conversion, 2022, 45(3): 80-86.
- [7] HODZIC N, KAZAGIC A, SMAJEVIC 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(15): 38-47.
- [8] 王鹏涛, 王乃继, 梁兴, 等. 气体燃料再燃脱硝机理及工程应用进展[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(6): 51-60.
WANG Pengtao, WANG Naiji, LIANG Xing, et al. Denitration mechanism and engineering application progress of gas fuel reburning[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(6): 51-60.
- [9] 冯帆, 于娟, 张曜, 等. 水煤浆快速热解特性及影响因素研究[J]. 热能动力工程, 2021, 36(11): 133-140.
FENG Fan, YU Juan, ZHANG Yao, et al. Study on characteristics and influencing factors of coal-water slurry rapid pyrolysis[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(11): 133-140.
- [10] LI Q, WANG Z H, HE Y, et al. Pyrolysis characteristic and evolution of char structure during pulverized coal pyrolysis in drop tube furnace: influence of temperature[J]. Energy & Fuels, 2017, 31: 4799-4807.
- [11] HAMPARTSOUMIAN E, FOLAYAN O O, NIMMO W, et al. Optimisation of NO_x reduction in advanced coal reburning systems and the effect of coal type[J]. Fuel, 2003, 82(4): 373-384.
- [12] 徐嘉叶. 预热解气燃烧方式数值模拟及对锅炉性能影响研究[D]. 上海: 上海发电设备成套设计研究院, 2020: 1.
XU Jiaye. Numerical simulation of preheated decomposed combustion mode and its impact on boiler performance[D]. Shanghai: Shanghai Power Equipment Research Institute Co., Ltd., 2020: 1.
- [13] 吴磊. 水煤浆快速热解过程及热解焦气化特性研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2013: 1.
WU Lei. Study on the rapid pyrolysis and the char gasification reactivity of coal water slurry[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2013: 1.
- [14] 董若凌, 周俊虎, 孟德润, 等. 再燃区水煤浆脱硝反应特性的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(4): 56-59.
DONG Ruoling, ZHOU Junhu, MENG Derun, et al. Experimental investigation on NO_x reduction performance of coal water slurry in the reburning zone[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(4): 56-59.
- [15] WU X J, GUO X W, LI Z X, et al. Effects of ammonia solution and pyrolysis gas on NO_x emission from a 75 t/h pulverized coal boiler[J]. Catalysts, 2022, 12(2): 2-17.
- [16] 王志刚, 褚玉群, 陈昌和, 等. 四角切圆锅炉流场伪扩散效应网格的研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(5): 22-28.
WANG Zhigang, ZHUO Yuqun, CHEN Changhe. Mesh investigation about cross flow diffusion of computational flow dynamics in tangential combustion flow field[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(5): 22-28.
- [17] ZHOU H, MO G, SI D, et al. Numerical simulation of the NO_x emissions in a 1 000 MW tangentially fired pulverized-coal boiler: influence of the multi-group arrangement of the separated over fire air[J]. Energy & Fuels, 2011, 25(5): 2004-2012.
- [18] ZHANG J, WANG Q Y, WEI Y J, et al. Numerical modelling and experimental investigation on the use of brown coal and its beneficiated semicoke for coal blending combustion in a 600 MWe utility furnace[J]. Energy & Fuels, 2015, 29(2): 1196-1209.
- [19] KOBAYASHI H, HOWARD J B, SAROFIM A F. Coal devolatilization at high temperatures[J]. Symposium on Combustion, 1977, 16(1): 411-425.
- [20] KIM K M, KIM G B, LEE B H, et al. Methane gas cofiring effects on combustion and NO_x emission in 550 MW tangentially fired pulverized-coal boiler[J]. ACS Omega, 2021, 6(46): 31132-31146.
- [21] SMITH T, SHEN Z, Friedman J. Evaluation of coefficients for the weighted sum of gray gases model[J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1982, 104: 602.
- [22] XU M H, AZEVEDO J, CARVALHO M G. Modelling of the combustion process and NO_x emission in a utility boiler[J]. Fuel, 2000, 79(13): 1611-1619.
- [23] TANIGUCHI M, KAMIKAWA Y, OKAZAKI T, et al. A role of hydrocarbon reaction for NO_x formation and reduction in fuel-rich pulverized coal combustion[J]. Combustion & Flame, 2010, 157(8): 1456-1466.
- [24] 张小桃, 张程俞, 刘昊明, 等. 660 MW 燃煤锅炉掺烧再燃气燃烧数值模拟[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(3): 72-81.
ZHANG Xiaotao, ZHANG Chengyu, LIU Haoming, et al. Numerical simulation on combustion of reburning gas co-firing in a 660 MW coal-fired boiler[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(3): 72-81.
- [25] 张小桃, 段佛元, 黄勇, 等. 660 MW 机组燃煤锅炉耦合生物质气再燃数值模拟[J]. 热力发电, 2020, 49(3): 38-44.
ZHANG Xiaotao, DUAN Foyuan, HUANG Yong, et al. Numerical simulation on biomass gas re-burning in a 660 MW coal fired boiler[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(3): 38-44.
- [26] 张健, 刘毅成, 刘薇, 等. 高速燃尽风射流对 NO_x 与 CO 协同控制的模拟研究[J]. 燃烧科学与技术, 2021, 27(5): 507-513.
ZHANG Jian, LIU Yicheng, LIU Wei, et al. Numerical simulation research on the hybrid control of NO_x and CO emissions through high-speed SOFA injecting[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2021, 27(5): 507-513.

(责任编辑 杨嘉蕾)