

DOI: 10.19666/j.rlfed.202212241

超超临界 1 000 MW 机组锅炉燃尽风对炉膛内燃烧及 NO_x 生成特性的影响

周 科¹, 刘明显², 陈胜军³, 陈 晟²

(1.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;

2.华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;

3.华能(浙江)能源开发有限公司玉环分公司, 浙江 台州 317604)

[摘 要] 针对 1 台 650 °C 等级超超临界 1 000 MW 机组旋流对冲锅炉的炉内低氮燃烧问题, 建立三维计算流体力学数值模拟, 探究其在燃尽风变化的情况下, 炉膛内流动、燃烧与传热变化以及燃尽风率对烟气中 NO_x 体积分数的影响。结果表明: 设置错位燃尽风, 并将前墙低位燃尽风向下 15° 喷入炉膛有利于降低 NO_x 体积分数, 提高燃尽率; 较低燃尽风率会造成炉内主燃区温度高、范围大, 受热面与炉内高温区距离减小; 炉膛出口 NO_x 体积分数随燃尽风率增加呈现先下降再升高的变化规律, 最佳燃尽风率约为 33.9%。

[关 键 词] 旋流对冲锅炉; 燃尽风率; 数值模拟; 燃烧特性; NO_x 排放

[引用本文格式] 周科, 刘明显, 陈胜军, 等. 超超临界 1 000 MW 机组锅炉燃尽风对炉膛内燃烧及 NO_x 生成特性的影响[J]. 热力发电, 2023, 52(9): 138-146. ZHOU Ke, LIU Mingyu, CHEN Shengjun, et al. Effect of overfire air on combustion and NO_x formation characteristics in a 1 000 MW ultra-supercritical boiler[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(9): 138-146.

Effect of overfire air on combustion and NO_x formation characteristics in a 1 000 MW ultra-supercritical boiler

ZHOU Ke¹, LIU Mingyu², CHEN Shengjun³, CHEN Sheng²

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

2. State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

3. Huaneng (Zhejiang) Energy Development Co., Ltd., Yuhuan Branch Company, Taizhou 317604, China)

Abstract: Three-dimensional computational fluid dynamics simulations are performed for a 650 °C grade 1 000 MW ultra-supercritical swirl-opposed firing boiler with low NO_x combustion in the furnace. The flow and combustion characteristics in the furnace and the NO_x concentration in the flue gas are investigated under various conditions of overfire air. It is shown that setting a staggered overfire air and injecting the lower OFA with the angle 15° downward into the furnace is helpful to reduce NO_x concentration and improve the burnout rate. A lower overfire air ratio results in a higher temperature in the region of the combustor and a shorter distance between the high-temperature region and the heating surface. As the overfire air ratio increases, the NO_x concentration of the flue gas at the exit of the furnace first decreases and then increases, and the optimal overfire air ratio is around 33.9%.

Key words: swirl-opposed firing boiler; overfire air ratio; numerical simulation; combustion characteristics; NO_x emission

近年来, 随着全球环境问题日趋严重, 我国对大功率燃煤发电机组的排放标准越来越苛刻。氮氧化物(NO_x)作为锅炉烟气中的主要污染物, 其排放

受到了更加严格的限制^[1-2]。对于煤粉锅炉, 目前主要采用低 NO_x 燃烧器、空气分级燃烧、烟气再循环及 SCR 脱硝等方法降低 NO_x 排放量^[3-6]。由于 SCR 脱硝

修回日期: 2022-12-14

基金项目: 中国华能集团有限公司总部科技项目(HNKJ20-H73)

Supported by: Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ20-H73)

第一作者简介: 周科(1984), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为锅炉燃烧与节能环保技术, zhouke@tpri.com.cn。

系统的成本较高并且存在氨逃逸的风险^[7-9],为降低SCR脱硝压力,国内外更多学者集中于从锅炉源头优化燃烧来降低NO_x排放量,并在通过调整燃尽风来降低锅炉NO_x排放方面取得了一系列进展^[10-17]。

已有研究关注燃尽风喷口布置及燃尽风风量2方面的影响,采用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)方法对炉内流动、传热、燃烧及NO_x等污染物生成特性进行模拟,可在较低成本下,获取最佳燃尽风喷口布置及燃尽风风量选择方案。Yang等人^[18]对1台600 MW火焰燃烧锅炉的研究表明,在炉拱上方3 m处设置燃尽风喷口,可有效降低NO_x排放。吕太等^[19]针对一台四角切圆锅炉开展了详细的数值模拟分析。针对该锅炉NO_x排放量过大的问题,通过将燃尽风口的高度相应提升,最终实现NO_x排放量降低40%。王顶辉等^[20]认为燃尽风喷口位置相当重要,其选取需综合考虑NO_x质量浓度、炉膛出口烟气温度等因素。当燃尽风率增大时,主燃区氧量减少,能够形成温度较低、氧量不足的燃烧区域,抑制NO_x生成;燃尽区则形成富氧氛围,使尚未燃尽的煤粉在炉膛内继续充分燃烧,但在燃尽风率过高时,由于煤粉在燃尽区的剧烈燃烧,燃尽区烟气温度较高且氧气充足,造成大量产生NO_x^[21]。肖寒等^[22]对某四角切圆塔式炉进行模拟,发现出口NO排放量随燃尽风率的增加先升高后降低。燃尽风率的改变还会影响锅炉热效率、燃尽率以及安全性等各方面因素,并且不同锅炉由于其自身结构与运行条件的不同,最佳的燃尽风率也各不相同^[21],因此,确定最佳燃尽风率对于降低NO_x的生成量具有重要意义。

本文针对1台超超临界1000 MW机组前后墙对冲锅炉进行数值模拟,该超超临界锅炉将蒸汽参数进一步提升至650℃等级,并设计了高低位错层布置的燃尽风,探究低位燃尽风喷入角度以及不同燃尽风率对炉内的流动、燃烧情况以及NO_x生成特性影响,为大功率超超临界燃煤机组的低NO_x排放以及安全稳定运行提供依据,研究结果有理论指导和实践应用意义。

1 研究对象

研究对象为超超临界1000 MW机组参数变压运行直流锅炉,炉膛宽度30.39 m,深度16.83 m,高度69.00 m,采用Π型布置,前后墙对冲燃烧,折焰角上方布置过热器,水平烟道布置再热器。在

炉膛的前、后墙各布置3层燃烧器,每层布置8只低NO_x旋流燃烧器,具有多层风口结构以形成空气分级,降低NO_x生成。共布置6台磨煤机,每台磨煤机为1层燃烧器输送煤粉,满负荷时5台磨煤机投运,1台磨煤机备用。

为降低NO_x的排放量,该前后墙对冲锅炉在燃烧器上部设置了错层布置的燃尽风,燃尽风示意如图1所示。上层对冲布置高位旋流燃尽风,下层错层布置低位直流燃尽风,并调整前墙低位直流燃尽风的入射角度使其向下15°喷入炉膛,从而加强燃尽风和未燃尽煤粉的混合,提高煤粉的燃尽率和燃烧效率。

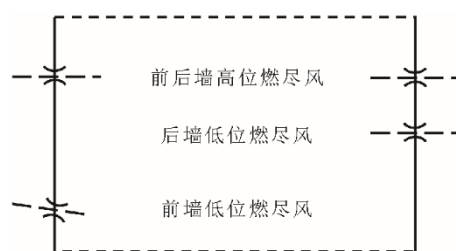


图1 错层布置燃尽风示意

Fig.1 Schematics of the staggered overfire air

2 模型构建

2.1 计算模型

锅炉内煤粉燃烧是一个复杂的过程,包括了颗粒流动、湍流流动、煤粉挥发分释放、煤焦燃烧、气相化学反应、辐射换热等物理化学过程。本文利用Fluent软件,选用Simple算法对速度和压力进行耦合求解。湍流模型采用Realizable $k-\epsilon$ 模型,其对强旋流有较好的修正作用^[23];辐射换热模型采用P1模型,该模型简单有效,在锅炉模拟中得到广泛应用^[24];气相化学反应模型采用非预混模型(混合分数模型),该模型使用一个混合分数 f 替代求解化学平衡中的物质运输和反应方程,各反应物的时均浓度值由概率密度函数(PDF)积分得到^[25];煤粉颗粒热解选用双方程平行反应模型计算;采用扩散/动力控制反应速率模型模拟煤焦的非均相氧化反应^[25]。NO选用后处理的方法对热力型NO与燃料型NO进行计算,忽略生成量较少的快速型NO^[26]。

2.2 网格划分

依据实际锅炉尺寸1:1构建炉膛主体的几何模型,对炉膛采用分区划分网格的方法,自下而上依次将炉膛划分为冷灰斗区、主燃区、燃尽区、过热器区及再热器区。

对炉膛采用高质量的结构化六面体网格划分, 根据几何模型和流动特性, 对速度、温度、气体组分浓度等物理量变化梯度较大的燃烧器入口附近区域网格进行加密, 并使网格线方向趋近流体流动方向, 以减少计算误差^[27]。网格无关性验证结果见表 1, 网格数量为 680 万和 811 万的结果无明显变化, 最终确定主燃区网格数量约为 468 万, 整个炉膛网格数约为 680 万, 锅炉模型及 CFD 网格示意如图 2 所示。

2.3 参数设置

边界条件根据锅炉设计参数进行设置, 主燃烧器与燃尽风喷口设置为质量流量入口, 炉膛出口设置为压力出口。煤粉颗粒随一次风喷入炉膛, 煤粉颗粒直径范围为 10~200 μm , 平均直径为 65 μm , 服从 Rosin-Rammler 分布, 分布指数为 1.15^[28]。锅炉设计煤种为伊泰 4 号, 其煤质分析结果见表 2。

表 1 模型网格无关性验证
Tab.1 Grid independence of the simulation

网格数量	315 万	680 万	811 万
出口 NO 体积分数/ $(\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1})$	140	131	133
出口烟温/K	1 071	1 065	1 064
出口 O ₂ 体积分数/%	2.84	3.12	3.15

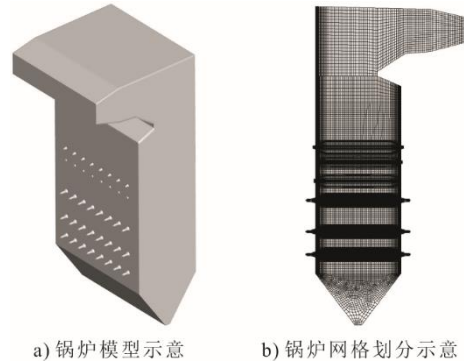


图 2 锅炉模型及 CFD 网格示意
Fig.2 Boiler model and grid for CFD simulation

表 2 设计煤种煤质分析
Tab.2 Proximate and ultimate analysis

工业分析/%			元素分析/%					$Q_{\text{net,ar}}/(\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1})$
$w_{\text{ar}}(\text{M})$	$w_{\text{ar}}(\text{A})$	$w_{\text{daf}}(\text{V})$	$w_{\text{ar}}(\text{C})$	$w_{\text{ar}}(\text{H})$	$w_{\text{ar}}(\text{O})$	$w_{\text{ar}}(\text{N})$	$w_{\text{ar}}(\text{S})$	
17.30	11.99	38.29	56.02	3.50	9.88	0.81	0.50	21.12

采用锅炉设计工况 (燃尽风率为 33.9%) 进行计算, 得到烟气出口温度约为 1 060 K, 在合理范围内。模拟得到烟气出口处 NO_x 排放质量浓度约为 158 mg/m³ (标准状态, 下同; $\varphi(\text{O}_2)=6\%$), 接近锅炉设计值 160 mg/m³ ($\varphi(\text{O}_2)=6\%$), 证明该模型模拟计算的可靠性。

本文在基准工况 (BMCR 工况, 5 台磨煤机运行, 各燃烧器出力和配风均匀) 的基础上, 保证炉膛的总过量空气系数 ($\alpha=1.15$) 不变, 改变燃尽风与外二次风之间的比例, 研究燃尽风率对炉膛内速度场、温度场、组分体积分数和 NO_x 分布的影响。一次风率、二次风率、燃尽风率及主燃区过量空气系数 (φ) 设置见表 3。

表 3 各工况参数
Tab.3 Parameters of simulation cases

工况	一次风率/%	二次风率/%	燃尽风率/%	主燃区过量空气系数 φ
1	22.8	39.2	38.0	0.71
2	22.8	43.3	33.9	0.76
3	22.8	47.2	30.0	0.81
4	22.8	52.2	25.0	0.86
5	22.8	57.2	20.0	0.92

3 模拟结果分析

3.1 低位燃尽风喷入角度对 NO_x 及燃尽率的影响

前墙低位燃尽风水平喷入与向下倾斜 15° 喷入时, 燃尽区速度矢量图如图 3 所示。

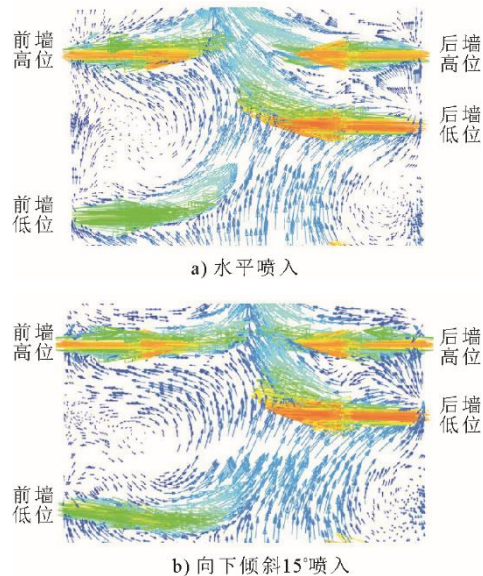


图 3 错位燃尽风不同喷入角度时燃尽区速度矢量图
Fig.3 Velocity vector diagram in the burnout zone for different injection angles of the overfire air

由图3可知:设置前后墙错位燃尽风后,在前墙低位燃尽风的上方形成了明显的旋转区域,这将有利于延长煤粉以及NO_x的停留时间;而将前墙低位燃尽风向下倾斜15°后喷入炉膛,在燃尽区形成的旋转面积更大,气流速度更快,气流旋转更强。表4为前墙低位燃尽风2种不同的喷入角度对炉膛出口NO体积分数以及煤粉燃尽率的影响。

表4 不同燃尽风布置下炉膛出口NO体积分数及煤粉燃尽率
Tab.4 NO concentration at the furnace outlet and burn-out rate of coal under different arrangement

燃尽风布置	炉膛出口NO体积分数/($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)	煤粉燃尽率/%
对冲,水平喷入	140	98.85
错位,水平喷入	159	99.06
错位,向下15°喷入	131	99.38

由表4可见:相比于燃尽风对冲布置,设置错位燃尽风有利于提高煤粉燃尽率提高锅炉效率,但由于燃尽风较早的引入,NO体积分数也有所升高;而使前墙低位燃尽风向下15°喷入炉膛提高了煤粉燃尽率的同时降低了炉膛出口的NO体积分数,同时达到了提高锅炉效率以及低NO_x排放的效果。这是由于调整前墙低位燃尽风的喷入角度,使其向下喷入炉膛,前后墙低位燃尽风之间形成旋转气流,延长NO_x在还原区的停留时间,达到低NO_x的效果。同时,将燃尽风向下通入炉膛时,也加快了焦炭与燃尽风的混合,延长了煤粉在燃尽区的停留时

间,煤粉燃尽率增加,提高了锅炉的燃烧效率。因此,采用错位燃尽风,并将低位燃尽风向下15°喷入炉膛有利于减低NO_x体积分数,提高煤粉燃尽率。不同的燃尽风倾斜角度对炉内燃烧以及NO_x排放的影响将在后续工作中进行进一步研究。

3.2 燃尽风率对炉膛内速度场的影响

炉膛中心竖直截面($y=13.59\text{ m}$)速度分布如图4所示。从图4可以看出:各工况炉膛速度场相似,主燃区和燃尽区流场发展较为充分,煤粉颗粒在主燃区和燃尽区能停留较长时间,有利于强化燃烧,使得炉膛内火焰充满度较好;工况4与工况5燃烧器的射流刚性^[29]较强,工况2与工况3次之,工况1较弱;燃尽风的射流刚性正好相反,这是由于随着燃尽风比例的增加,主燃区风量减少,燃烧器的射流刚性减弱。燃尽风率增加,燃尽风射流刚性较强时,煤粉颗粒由于受到更强的湍流影响,将在燃尽区滞留较长时间,这将促进煤粉颗粒燃烧过程的传热传质,增强煤粉的后期燃烧情况,提高煤粉的燃尽率以及燃烧效率^[30]。

高燃尽风工况下,主燃区风量较少,射流刚性较弱,主燃区不利于煤粉的燃烧,有利于提高主燃区CO体积分数,增强还原性气氛,增强主燃区对NO的还原能力。同时从图4e)中可以看出,燃尽风率较低的情况下(工况5),主燃区个别燃烧器的二次风出现了贴壁现象,这将对锅炉的实际运行造成不良影响。

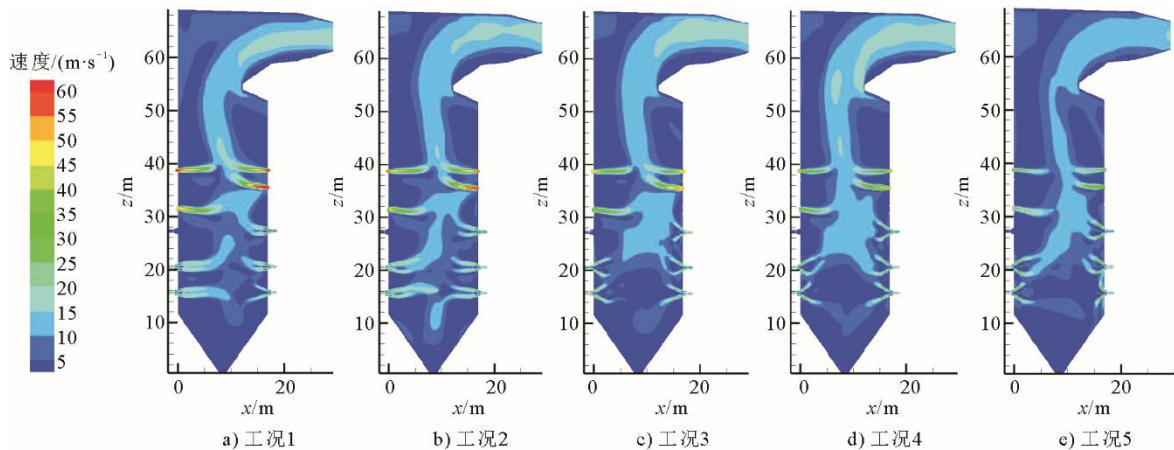


图4 各工况下炉膛中心竖直截面($y=13.59\text{ m}$)速度分布

Fig.4 Velocity distribution in the center section of the furnace ($y=13.59\text{ m}$) for each simulation case

3.3 燃尽风率对炉膛温度场的影响

不同工况下炉膛中心竖直截面($y=13.59\text{ m}$)温度分布如图5所示,中层燃烧器中心水平截面($z=20.58\text{ m}$)温度分布如图6所示,炉膛高度各截

面平均温度分布如图7所示。由图7可知,各工况沿高度截面温度平均值变化趋势相同,其中,在下层、中层、上层燃烧器中心截面($z=15.64、20.58、27.28\text{ m}$),下层、上层燃尽风中心截面($z=31.44、$

38.70 m) 处存在温度下降现象, 这是由于燃烧器及燃尽风送入的低温风使该平面烟气平均温度下降。在主燃区及燃尽区, 高燃尽风工况下的炉膛平均温度低于低燃尽风工况, 这表明高燃尽风情况有利于降低炉膛燃烧温度, 减少热力型 NO_x 的生成。

在燃尽风进入后 ($z=31.44$ m) 炉膛内温度短暂

上升后又迅速下降, 其原因为未燃尽的焦炭在燃尽风补充氧气后燃烧使温度上升, 而后随着焦炭的不断燃尽以及各受热面对炉膛内烟气的吸热作用, 炉膛内烟气温度不断下降。高燃尽风工况炉膛出口烟气温度略高于低燃尽风工况, 但变化幅度较小, 各工况出口温差在 20 K 以内。

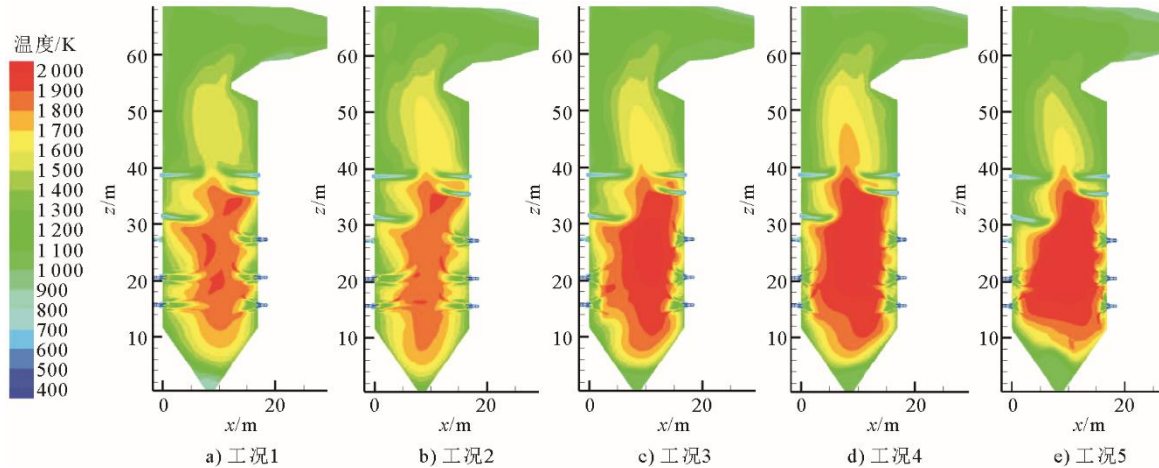


图5 各工况下炉膛中心竖直截面 ($y=13.59$ m) 温度分布

Fig.5 Temperature distribution in the center section of the furnace ($y=13.59$ m) for each simulation case

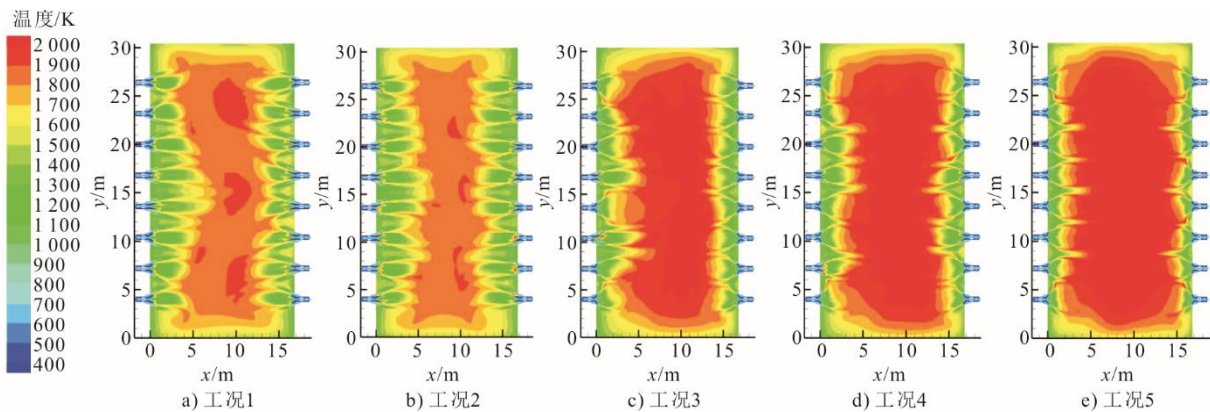


图6 各工况下中层燃烧器中心水平截面 ($z=20.58$ m) 温度分布

Fig.6 Temperature distribution in the horizontal cross section ($z=20.58$ m) of the middle burner section

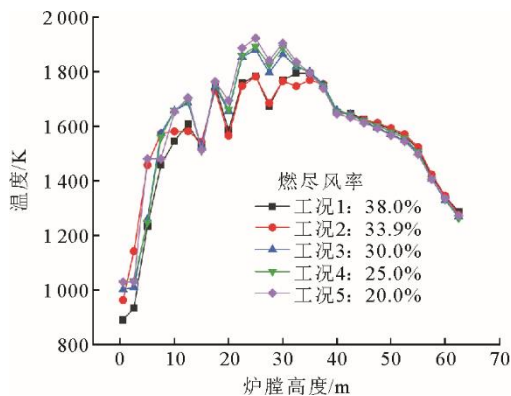


图7 各截面平均温度沿炉膛高度变化曲线

Fig.7 Average temperature of each cross section along the furnace height

由图5可知, 工况4和工况5在主燃区温度比较高, 高温范围比较大, 工况3次之, 工况2与工况1主燃区温度较低。这是由于随着燃尽风量增加, 主燃区过量空气系数降低, 增加了煤粉颗粒的不完全燃烧程度, 减小了煤粉在燃烧过程中释放的热量, 主燃区的温度水平降低。未燃尽碳在燃尽风中继续燃烧, 高燃尽风工况下燃尽区燃烧更加剧烈, 因此各工况在过热器、再热器区域温度相差较小。

由图6可知, 从火焰充满度看, 在主燃区, 工况4与工况5的高温区域面积更大, 火焰充满度较好, 工况1、工况2、工况3的火焰充满度较差。同时, 综合分析图5、图6可知, 燃尽风比例减小后,

主燃区过量空气系数增加, 煤粉燃烧更加充分剧烈, 火焰燃烧区域向墙体靠近, 在工况 5 的后墙处尤为明显, 炉内火焰与受热面的距离减少, 增加了该部分受热面结焦与被烧坏的可能性, 加剧受热面的高温腐蚀情况^[31], 存在一定安全隐患。

3.4 燃尽风率对炉膛内 O₂、CO 体积分数分布影响

各截面 O₂ 体积分数沿炉膛高度变化曲线如图 8 所示。由图 8 可知, 不同工况下各截面 O₂ 平均体积分数沿炉膛高度变化趋势相似, 在下层、中层、上层燃烧器中心截面 (z=15.64、20.58、27.28 m), 下层、上层燃尽风中心截面 (z=31.44、38.70 m) 处氧量迅速增加, 这是由于燃烧器及燃尽风送入的空气引起的。煤粉的快速剧烈燃烧消耗大量的氧量, 又使得氧量迅速降低。由于高燃尽风工况主燃区过量空气系数较低, 因此其主燃区氧量较少, 但随着燃烧器及燃尽风的不断补氧, 其氧量逐渐高于低燃尽风工况, 并在过热器、再热器区域不断下降, 出口处各工况氧量相差不大。

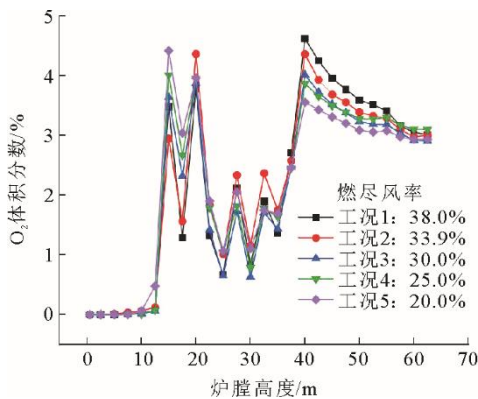


图 8 各截面 O₂ 体积分数沿炉膛高度变化曲线
Fig.8 O₂ concentration of cross section along the furnace height

图 9 为各截面 CO 体积分数沿炉膛高度变化曲线。由图 9 可知, 各工况 CO 主要分布在主燃区, 在炉膛出口的 CO 体积分数几乎为 0。由于主燃区 $\alpha < 1$, 煤粉在主燃区缺氧燃烧, 生成 CO, 而在燃尽区, CO 几乎完全燃烧生成 CO₂。燃尽风率较高的工况主燃区风量减少, 煤粉不完全燃烧程度增大, CO 体积分数增加。主燃区的 CO 体积分数较高时, 其还原性气氛更强, 更有利于将 NO 转化为 N₂, 有利于降低该区域的 NO_x 生成量。富燃料燃烧情况下, NO 还原为 N₂ 的相关反应方程式为^[32]:

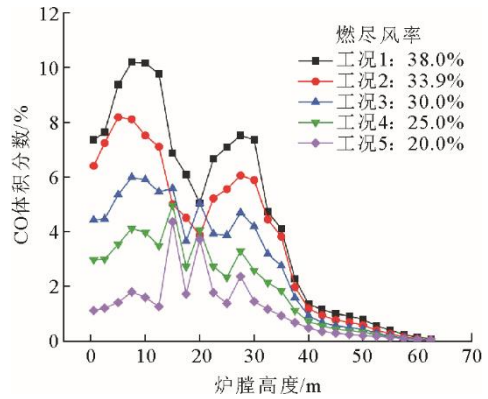
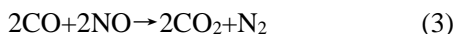


图 9 各截面 CO 体积分数沿炉膛高度变化曲线
Fig.9 CO concentration of cross section along the furnace height

3.5 燃尽风率对炉膛内 NO_x 生成特性影响

图 10 为沿炉膛高度各截面 NO_x 体积分数分布曲线。由图 10 可知, 根据 NO_x 体积分数分布变化情况, 大体可分为低燃尽风工况与高燃尽风工况 2 种变化趋势: 工况 1 与工况 2 为高燃尽风工况, 变化趋势基本相似; 工况 3、工况 4、工况 5 为低燃尽风工况, 变化趋势基本相似。高燃尽风工况在主燃区的 NO_x 体积分数随炉膛高度先升高再降低, 在中层燃烧器附近区域 NO_x 体积分数达到峰值, 在燃尽区 NO_x 体积分数再度出现升高; 而低燃尽风工况在主燃区的 NO_x 体积分数随炉膛高度的升高而升高, 在接近下层燃尽风处达到峰值, 随即在燃尽区出现下降。所有工况在折烟角后 NO_x 体积分数基本保持不变。

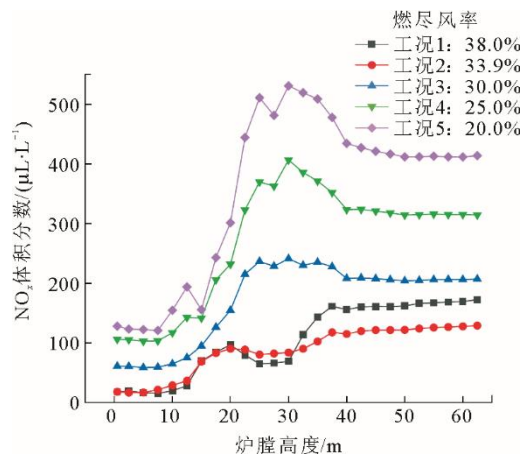


图 10 各截面 NO_x 体积分数沿炉膛高度变化曲线
Fig.10 NO_x concentration of cross section along the furnace height

在低燃尽风情况下 (工况 3—工况 5), 主燃区供给 O₂ 量更多, 煤粉颗粒燃烧更充分、剧烈, 不能形成较好的还原性气氛。同时, 低燃尽风工况下炉

膛内烟气温度更高, 热力型 NO_x 生成量更多, 因此炉膛内整体 NO_x 体积分数较高。

高燃尽风情况下(工况1、工况2), 由于主燃区空气量更少, 煤粉颗粒燃烧更不完全, 生成更多 CO , 能够在主燃区形成更强的还原性气氛, 增强了对 NO_x 的还原能力。结合上文对炉膛内温度场的分析, 高燃尽风工况的主燃区温度明显低于低燃尽风工况, 生成的热力型和燃料型 NO_x 量都较少, 因此其主燃区 NO_x 体积分数较低。当补入燃尽风之后, 部分未燃尽碳在较高的 O_2 体积分数下继续燃烧, 使 NO_x 的生成量有所增加^[22], 且燃尽风率越大(工况1), 燃尽区的煤粉燃烧更加剧烈, 炉膛温度水平也更高, 导致燃尽区 NO_x 的生成量更高。综合来看, 工况1与工况2出口的 NO_x 体积分数较低。

为确定该锅炉中的最佳燃尽风率, 在工况2(燃尽风率=33.9%)附近增加燃尽风率为32.0%和36.0% 2种不同的工况, 各工况下炉膛出口 NO_x 体积分数如图11所示。由图11可以看出, 炉膛出口 NO_x 体积分数随燃尽风率的增加呈现先下降再升高

的变化趋势, 在燃尽风率为32.0%~36.0%时, 出口 NO_x 体积分数较低, 并存在降低尾部烟气 NO_x 体积分数的最佳燃尽风率。在本文研究的所有工况中, 燃尽风率为33.9%时, NO_x 排放体积分数为 $131 \mu\text{L/L}$, 即 158 mg/m^3 (标准状态, 下同, $\varphi(\text{O}_2)=6\%$), NO_x 排放水平较低, 已基本满足燃煤锅炉的 NO_x 排放限值。

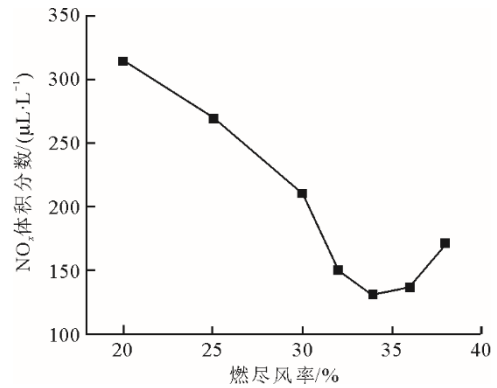


图11 炉膛出口处 NO_x 体积分数
Fig.11 NO_x concentration at the furnace outlet

各工况下炉膛宽度中心竖直截面 ($y=13.59 \text{ m}$) NO_x 体积分数分布如图12所示。

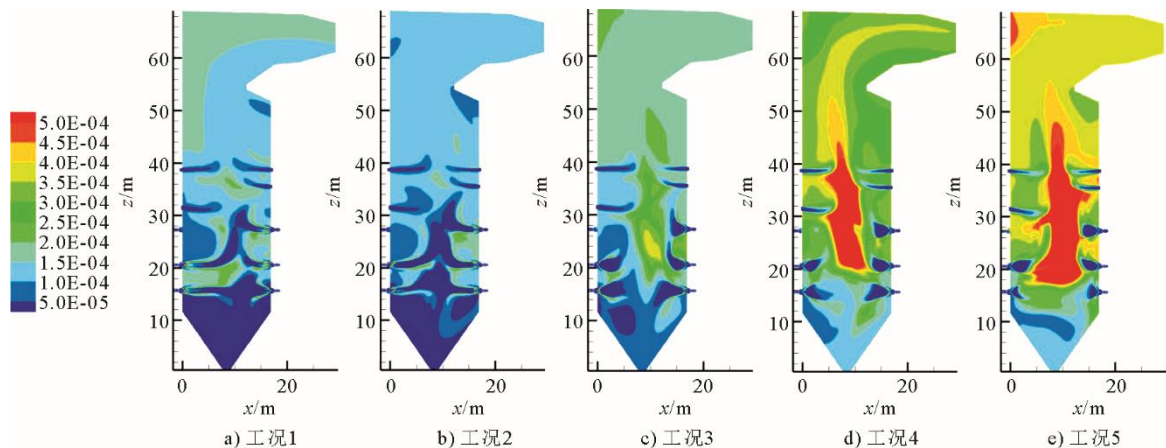


图12 各工况下炉膛中心竖直截面 ($y=13.59 \text{ m}$) NO_x 体积分数分布
Fig.12 Distribution of NO_x concentration in the center vertical section ($y=13.59 \text{ m}$) of the furnace

由图12可以看出, 燃烧器出口区域的 NO_x 体积分数较低, 主要是在燃烧的初期阶段大量地释放挥发分, 造成一个缺氧的还原性区域以抑制热力型 NO_x 的生成。低燃尽风工况下, 主燃区射流刚性更强, 煤粉的混合与燃烧更加充分, 大量 NO_x 在炉膛中心区域生成; 高燃尽风工况下, 主燃区焦炭没有充分燃烧、还原性气氛较强, 因此 NO_x 在主燃区的体积分数相对较低。

4 结 论

本文对1台 $650 \text{ }^\circ\text{C}$ 等级超超临界 1000 MW 机

组前后墙旋流对冲锅炉展开了数值模拟研究工作, 在额定工况基础上, 探究了燃尽风率对炉内速度、温度、各重要组分体积分数以及 NO_x 生成特性的影响, 主要结论如下:

1) 设置错位燃尽风并将前墙低位燃尽风向下摆动 15° 喷入后, 在前墙低位燃尽风上方形成了明显的旋转气流, 有利于提高煤粉燃尽率, 提高锅炉效率, 也会使炉膛出口 NO_x 体积分数出现一定降低。

2) 燃尽风率对炉膛内温度场及 O_2 、 CO 体积分数影响较大。随着燃尽风率增加, 炉膛内温度下降, 燃烧前期 O_2 体积分数较低, CO 体积分数升高, 燃

烧后期 O₂ 体积分数较高。低燃尽风工况下, 存在炉膛内部分燃烧器二次风贴壁以及火焰区域向墙体靠近的现象, 这会导致炉膛水冷壁出现局部过热, 增加其结焦以及被烧坏的可能性。

3) 随着燃尽风率的不断增加, 炉膛出口烟气的 NO_x 体积分数出现先降低再升高的趋势。这是因为当燃尽风率增加时, 主燃区过量空气系数较小, 形成了较强的还原性气氛, NO_x 在还原性气氛中大量还原。当燃尽风率过高时, 燃尽区焦炭燃烧更加剧烈, 温度与 O₂ 体积分数也较高, 产生了大量 NO_x。因此在该锅炉中, 燃尽风率为 33.9% 时, NO_x 体积分数处于较低水平, NO_x 排放体积分数为 131 μL/L。

【参考文献】

- [1] 李军, 雷鑫, 王皓, 等. 锅炉氮氧化物排放标准对比与低氮燃烧技术[J]. 区域供热, 2018(1): 70-74.
LI Jun, LEI Xin, WANG Hai, et al. Comparison of the NO_x emission standard and low-NO_x combustion technology for boilers[J]. District Heating, 2018(1): 70-74.
- [2] 王晶, 廖昌建, 王海波, 等. 锅炉低氮燃烧技术研究进展[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(2): 99-114.
WANG Jing, LIAO Changjian, WANG Haibo, et al. Research progress of low-NO_x combustion technology for boilers[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(2): 99-114.
- [3] 吕旭阳. 330 MW 燃煤锅炉低 NO_x 燃烧技术及数值模拟研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015: 1.
LYU Xuyang. Investigation of Low NO_x combustion technology and numerical simulation of a 330 MW coal-fired boiler[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015: 1.
- [4] 陈冬林, 叶托, 李恒. 低 NO_x 燃烧技术研究现状及进展[J]. 热力发电, 2017, 46(3): 1-6.
CHEN Donglin, YE Tuo, LI Heng. Review on low NO_x combustion techniques[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(3): 1-6.
- [5] 崔军. 燃料分级低 NO_x 燃烧技术数值研究[D]. 南京: 东南大学, 2006: 1.
CUI Jun. Numerical research on deNO_x technology of fuel staged combustion[D]. Nanjing: Southeast University, 2006: 1.
- [6] 李婷. 高效煤粉工业锅炉低氮控制技术[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(3): 107-109.
LI Ting. NO_x emission reduction technology of efficient pulverized coal fired industrial boiler[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(3): 107-109.
- [7] 刘通浩. 中国电力行业 NO_x 排放控制成本效益分析[D]. 北京: 清华大学, 2012: 1.
LIU Tonghao. Cost-benefit analysis of the NO_x emission control of power industry in China[J]. Beijing: Tsinghua University, 2012: 1.
- [8] 姜大维, 孔祥鹏, 衣贺昌, 等. 燃煤电厂烟气脱硝氨逃逸的试验研究及应用[J]. 电站系统工程, 2014, 30(2): 63-64.
JIANG Dawei, KONG Xiangpeng, Yi Hechang, et al. Experimental study and application of ammonia escape in flue gas deNO_x system[J]. Power System Engineering, 2014, 30(2): 63-64.
- [9] 杨建国, 胡劲逸, 赵虹, 等. 660 MW 超超临界机组运行方式对 SCR 系统氨逃逸率的影响[J]. 动力工程学报, 2015, 35(6): 476-480.
YANG Jianguo, HU Jinyi, ZHAO Hong, et al. Effect of boiler control mode on ammonia escape of the SCR system in a 660 MW ultra-supercritical unit[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2015, 35(6): 476-480.
- [10] 吕旭阳, 张勇胜, 李春曦, 等. 燃尽风率对锅炉燃烧特性影响的数值模拟[J]. 热力发电, 2015, 44(5): 108-112.
LYU Xuyang, ZHANG Yongsheng, LI Chunxi, et al. Effect of over fire air rate on boiler combustion performance: a numerical simulation[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(5): 108-112.
- [11] 王志平, 石黎, 彭德其, 等. 燃尽风率对四角切圆锅炉燃烧及 NO_x 生成特性的影响[J]. 工业锅炉, 2020(2): 17-20.
WANG Zhiping, SHI Li, PENG Deqi, et al. Effect of burnout air rate on combustion and pollutant NO_x formation generation characteristics of tangentially fired boiler[J]. Industrial Boilers, 2020(2): 17-20.
- [12] 童家麟, 赵振宁, 叶学民, 等. 某300 MW 机组锅炉 NO_x 排放特性数值模拟[J]. 热力发电, 2013, 42(6): 51-57.
TONG Jialin, ZHAO Zhenning, YE Xuemin, et al. Numerical simulation on NO_x emission from a 300 MW unit boiler[J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(6): 51-57.
- [13] 方庆艳, 汪华剑, 陈刚, 等. 燃尽风对超超临界锅炉燃烧特性影响的数值模拟[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(11): 92-95.
FANG Qingyan, WANG Huajian, CHEN Gang, et al. Numerical simulation on effects of over fire air on the combustion characteristics in an ultra-supercritical boiler[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2010, 38(11): 92-95.
- [14] HENG L J, DUAN K J, HE C Z. Study on mathematical simulation of nitrogen oxides(NO_x) formation of coal-fired boiler[C]. Advanced Materials Research, 2012, 354: 319-324.
- [15] 林海翔, 赵有生, 杨荣, 等. 燃烧器对冲布置 330 MW 煤粉炉配风数值研究[J]. 上海理工大学学报, 2017, 39(3): 210-216.
LIN Haixiang, ZHAO Yousheng, YANG Mo, et al. Numerical study on the air distribution for a 330 MW pulverized coal fired boiler with oppose-firing arrangement[J]. University of Shanghai for Science and Technology, 2017, 39(3): 210-216.
- [16] 肖寒, 蒙晨玮, 吴玉新, 等. 燃尽风率对二次再热锅炉热量分配及 NO_x 的影响[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(4): 80-86.
XIAO Han, MENG Chenwei, WU Yuxin, et al. Influence of over fire air ratio on heat absorption and NO_x of a double reheated boiler[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(4): 80-86.
- [17] 钟礼今, 张殿平, 田登峰, 等. 700 MW 四角切圆锅炉低 NO_x 燃烧的数值模拟[J]. 热能动力工程, 2015, 30(1): 118-123.
ZHONG Lijin, ZHANG Dianping, TIAN Dengfeng, et al. Numerical simulation of low NO_x combustion of a 700 MW tangentially-fired boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2015, 30(1): 118-123.
- [18] YANG W, WANG B, LEI S, et al. Combustion optimization and NO_x reduction of a 600 MWe down-fired

- boiler by rearrangement of swirl burner and introduction of separated over-fire air[J]. 2019, 210: 1120-1130.
- [19] 吕太, 赵世泽. 燃尽风位置高度对 NO_x 生成的影响[J]. 环境工程学报, 2016, 10(5): 2541-2546.
LYU Tai, ZHAO Shize. Influence of over-fire air height on NO_x emission characteristics[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(5): 2541-2546.
- [20] 王顶辉, 王晓天, 郭永红, 等. 燃尽风喷口位置对 NO_x 排放的影响[J]. 动力工程学报, 2012, 32(7): 523-527.
WANG Dinghui, WANG Xiaotian, GUO Yonghong, et al. Influence of OFA nozzle position on NO_x emission[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2012, 32(7): 523-527.
- [21] 檀哲林. 旋流对冲锅炉低 NO_x 燃烧优化数值模拟[J]. 山东化工, 2020, 49(18): 232-237.
TAN Zhelin. Numerical Simulation of swirling boiler with opposed burners and optimization of low NO_x combustion[J]. Shandong Chemical Industry, 2020, 49(18): 232-237.
- [22] 肖寒, 蒙晨玮, 吴玉新, 等. 燃尽风率对二次再热锅炉热量分配及 NO_x 的影响[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(4): 80-86.
XIAO Han, MENG Chenwei, WU Yuxin, et al. Influence of over fire air ratio on heat absorption and NO_x of a double reheated boiler[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(4): 80-86.
- [23] 由长福, 祁海鹰, 徐旭常, 等. 采用不同湍流模型及差分格式对四角切向燃烧煤粉锅炉内冷态流场的数值模拟[J]. 动力工程, 2001, 21(2): 1128-1131.
YOU Changfu, QI Haiying, XU Xuchang, et al. Numerical simulation of flow field in tangentially fired boiler using different turbulence models and discretization schemes[J]. Power Engineering, 2001, 21(2): 1128-1131.
- [24] 刘丽萍. 四角切圆煤粉炉炉内燃烧及配风的数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2009: 1.
LIU Liping. Numerical simulation of combustion process and air distribution of tangentially pulverized coal-fired boiler[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009: 1.
- [25] 方庆艳, 陈刚, 张成, 等. 煤粉低 NO_x 燃烧数值模拟[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017: 302.
FANG Qingyan, CHEN Gang, ZHANG Cheng, et al. Numerical simulation of low NO_x combustion of pulverized coal[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2017: 302.
- [26] 李剑宁, 熊显巍, 施鸿飞. 超临界塔式炉燃尽风对 NO_x 生成的影响[J]. 动力工程学报, 2016, 36(7): 513-518.
LI Jianning, XIONG Xianwei, SHI Hongfei. Effects of SOFA ratio on NO_x generation characteristics in a supercritical tower boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2016, 36(7): 513-518.
- [27] 方庆艳. 燃烧数值模拟方法与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017: 244.
FANG Qingyan. Numerical simulation methods and applications of combustion[M]. China Electric Power Press, 2017: 244.
- [28] 郑钢鏢, 康天合, 柴肇云, 等. 运用 Rosin-Rammler 分布函数研究煤尘粒径分布规律[J]. 太原理工大学学报, 2006, 37(3): 317-319.
ZHENG Gangbiao, KANG Tianhe, CHAI Zhaoyun, et al. Applied the Rosin-Rammler distribution function to study on the law of coal dust particle-size distribution[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2006, 37(3): 317-319.
- [29] 张泽, 吴少华, 秦裕琨, 等. 炉内喷嘴射流刚性的理论模型及试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(9): 104-110.
ZHANG Ze, WU Shaohua, QIN Yukun, et al. Theoretical model and experimental study of burner nozzle jet rigidity in furnace[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(9): 104-110.
- [30] 张耿范. 前后墙旋流对冲燃烧锅炉燃尽特性优化数值模拟[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021: 1.
ZHANG Gengfan. Numerical simulation of optimization of burnout characteristics for a swirl-opposed firing boiler[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021: 1.
- [31] 邹磊, 王健, 岳峻峰, 等. 低氮燃烧方式下锅炉水冷壁高温腐蚀研究现状[J]. 电站系统工程, 2018, 34(2): 6-10.
ZOU Lei, WANG Jian, YUE Junfeng, et al. Research status of high temperature corrosion of boiler water wall under low-nitrogen combustion[J]. Power System Engineering, 2018, 34(2): 6-10.
- [32] 陆方. 切圆煤粉锅炉低 NO_x 燃烧技术的研究与应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2009: 1.
LU Fang. Study and application of low NO_x combustion technology in tangential-firing pulverized coal boiler[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009: 1.

(责任编辑 邓玲惠)