

DOI: 10.19666/j.rlfed.202406156

W 火焰锅炉低负荷燃烧调整数值模拟研究

郭子岗¹, 刘帆², 吴帅帅³, 张海龙³, 张纯³, 杨玉³, 张一帆³

(1.陕西榆林能源集团榆神煤电有限公司, 陕西 榆林 719000;

2.华能八〇三热电有限公司, 甘肃 兰州 732850;

3.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

[摘要] 针对 W 火焰锅炉在低负荷运行时再热汽温不达标问题, 对某台 W 火焰锅炉低负荷燃烧调整进行了数值模拟研究。从空气预热器(空预器)进口抽取总烟气温度的 16% 作为再循环烟气引入炉膛, 增大烟气温度, 提高对流受热面的换热量, 数值模拟分析了再循环烟气喷入位置和有/无贴壁风对炉内速度场和温度场的影响规律。研究表明: 再循环烟气从 SOFA 风喷口喷入炉膛, 对下炉膛主燃区的温度影响较小, 有利于低负荷时煤粉燃烧的稳定性; 将 40% 再循环烟气作为贴壁风从下炉膛的侧墙送入炉膛能够降低侧墙烟气温度, 同时把侧墙烟气变成氧化性气氛, 降低侧墙结焦和高温腐蚀的可能性。

[关键词] W 火焰锅炉; 低负荷; 燃烧; 再热汽温

[引用本文格式] 郭子岗, 刘帆, 吴帅帅, 等. W 火焰锅炉低负荷燃烧调整数值模拟研究[J]. 热力发电, 2025, 54(2): 118-125.
GUO Zigang, LIU Fan, WU Shuaishuai, et al. Numerical simulation of combustion adjustment of a W-flame boiler at low loads[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(2): 118-125.

Numerical simulation of combustion adjustment of a W-flame boiler at low loads

GUO Zigang¹, LIU Fan², WU Shuaishuai³, ZHANG Hailong³, ZHANG Chun³,
YANG Yu³, ZHANG Yifan³

(1. Shaanxi Yulin Energy Group, Yushen Coal and Electricity Co., Ltd., Yulin 719000, China;

2. Huaneng 803 Thermal Power Generation Co., Ltd., Lanzhou 732850, China;

3. Xi'an Thermal Engineering Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: When operating at low loads, W-flame boilers may encounter various problems, such as low reheated steam temperature, which requires combustion adjustments and other measures. To solve these problems, numerical simulations are conducted to investigate the combustion adjustment of a W-flame boiler under low load conditions. In order to deal with the low steam temperature at low loads, the influence of the position of the recycled flue gas injection and the presence of wall-attached air on the velocity field and temperature field inside the furnace were analyzed. The research results show that introducing recycled flue gas into the furnace by extracting 16% of the total flue gas flow at the air preheater inlet increases the amount of flue gas and improves the convective heat transfer on the heating surfaces. Combined with adjusting the opening of the reheater flue gas baffle, this approach can solve the problem of low reheated steam temperature at low loads. Injecting recycled flue gas from the SOFA air nozzle into the furnace has a minimal impact on the temperature in the primary combustion zone, which benefits the stability of coal combustion at low loads. Introducing 40% of the recycled flue gas as wall-attached air from the side walls of the lower furnace can lower the temperature of the side wall flue gas and transform it into an oxidizing atmosphere, reducing the possibility of side wall coking and high-temperature corrosion.

Key words: W-flame boiler; low load; combustion; reheat vapor

随着我国电力结构中新能源占比的逐步增加, 传统火电机组的角色已从“基础负荷”转变成“调

收稿日期: 2024-06-19

基金项目: 陕西省创新能力支撑计划项目(2023-CX-TD-18)

Supported by: Innovation Capability Support Program of Shaanxi Province (2023-CX-TD-18)

第一作者简介: 郭子岗(1984), 男, 工程师, 主要研究方向为能源利用与环境保护, 673018663@qq.com.

峰负荷”，火电机组低负荷运行成为常态。由于火电机组一般是按照其在额定负荷下运行而设计的，当机组在低负荷运行时，不仅机组的经济性变差，而且还会引发汽轮机末级叶片湿度大等问题^[1]。

W 火焰燃煤机组具有燃烧距离长、燃烧温度高、回流组织好等特点，在燃烧低阶煤方面具有显著优势^[2]。我国无烟煤、贫煤储量大，目前我国在运和在建的 W 火焰燃煤机组约为 100 台，总装机容量约为 45 000 MW^[3]。Li 等人^[4-8]对 W 火焰锅炉内的气固两相流场、温度场、污染物排放等方面开展了大量的研究工作，提出了可实现 W 火焰锅炉在 35% 负荷下稳燃的技术。Wang 等人^[9]研究了 W 火焰锅炉垂直水冷壁在低质量流率下的热敏感性。吕当振等^[10]研究了 W 火焰锅炉垂直水冷壁壁温分布特性，并提出了控制壁温偏差的燃烧调整方法。Ma 等人^[11]提出了一种分级分箱配风方法实现低阶煤在 W 火焰锅炉中的高效环保燃烧。

W 火焰锅炉在低负荷运行时存在再热汽温偏低的问题^[12-13]，严重影响机组的经济性。为了解决这个问题，王兴等^[14-15]通过受热面改造，重新分配各受热面吸热比例，解决再热汽温偏低问题。另外，可采用的方法还包括燃烧调整等手段^[15-17]。受热面改造方法工作量大、工期长、成本高，且原有的锅炉结构不一定有足够的空间来布置受热面。燃烧调整手段不改变原有受热面结构，相对容易实施，是汽温调节的常用手段。其中，烟气再循环方法通过抽取一部分尾部烟气送回炉膛参与燃烧过程，能够改变辐射受热面和对流受热面的吸热比例^[1,18-20]，是解决 W 火焰锅炉低负荷再热汽温偏低的简便易行的方案。但是目前针对 W 火焰锅炉烟气再循环对炉内流场和温度场的研究还比较少。

鉴于此，本文针对某台 W 火焰锅炉在低负荷时的烟气再循环燃烧调整进行了数值模拟研究，分析了再循环烟气的送入位置和有无贴壁风对炉内温度场、靠近侧墙壁面流场等的影响规律，最终推荐了解决 W 火焰锅炉再热汽温偏低的再循环烟气实施方案。

1 研究方法

1.1 研究对象

本文研究的 W 火焰锅炉结构如图 1 所示。锅炉为亚临界 600 MW、中间一次再热的自然循环锅炉，双拱形单炉膛，W 型火焰燃烧方式，尾部双烟道结构，采用挡板调节再热汽温。炉膛分为上下两部分，总

高度为 50.07 m，上炉膛尺寸为 34.48 m×9.91 m×30.30 m（宽×深×高），下炉膛尺寸为 34.48 m×16.01 m×19.77 m（宽×深×高）。整个炉膛四周为全焊膜式水冷壁。下炉膛呈双拱形，在其水冷壁上及炉拱附近敷设卫燃带。全炉膛采用 36 只高低速燃烧器，前后炉拱上分别错列布置 18 只，每个燃烧器配有 2 个浓煤粉喷口和 1 个淡煤粉喷口（图 2），喷口与竖直方向的夹角约为 10°。二次风分为拱上和拱下 2 部分：拱上二次风喷口有 36 个，喷口截面为矩形，拱上二次风垂直向下喷入炉膛；拱下二次风称为 F 风，约占总二次风量的 35% 以上，经下炉膛前后墙的喷口下倾 30° 喷入炉膛。SOFA 风位置布置在上炉膛的前后墙，SOFA 风口水平布置，可做上下 30° 摆动。为了防止侧墙的高温腐蚀，在下炉膛的设置了贴壁风喷口，贴壁风来自部分再循环烟气。

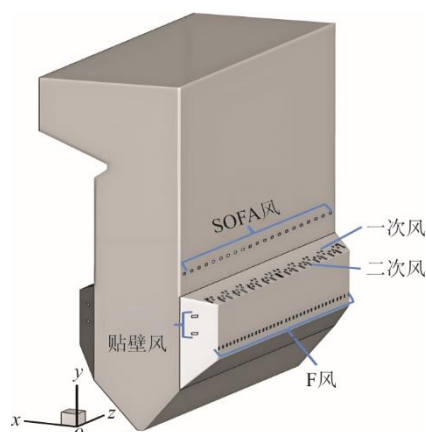


图 1 W 火焰锅炉模型和燃烧器喷口位置
Fig.1 Schematic diagram of a W-flame boiler and its burner location

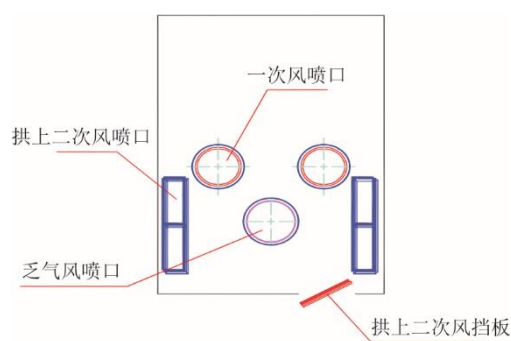


图 2 煤粉燃烧器喷口示意
Fig.2 Schematic diagram of the burner nozzle

锅炉采用双进双出钢球磨煤机冷一次风正压直吹式制粉系统，设计燃煤为无烟煤，煤质分析见表 1。满负荷 600 MW 燃用设计煤种时，投运 6 台磨煤机，设计煤粉细度 $R_{90}=7\%$ ；低负荷 330 MW 燃用设计煤种时，投运 5 台磨煤机。表 2 为 W 火焰锅

炉的主要运行参数。一次风、拱上二次风、F风和SOFA风的比率分别为18%、37%、20%和25%。拱上二次风风速为45 m/s, 具有足够的刚性, 避免与一次风过早混合, 还可增加煤粉气流在下炉膛的行程。F风的风速也为45 m/s, 可保证其下射刚性以提高煤粉气流下行, 增加下炉膛空间利用率, 同时延长煤粉气流在下炉膛的形成, 创造足够的还原区, 为全炉膛空气分级控制 NO_x 生成创造条件。表3为330 MW负荷下再循环烟气不同工况风率。

表1 设计煤种工业分析和元素分析

Tab.1 Proximate and ultimate analyses of the designed coal

项目	设计煤种	
工业分析	$w_{\text{ar}}(\text{M})/\%$	6.21
	$w_{\text{ar}}(\text{A})/\%$	29.41
	$w_{\text{ar}}(\text{V})/\%$	8.71
	$w_{\text{ar}}(\text{FC})/\%$	55.67
元素分析	$w_{\text{ar}}(\text{C})/\%$	54.92
	$w_{\text{ar}}(\text{H})/\%$	2.26
	$w_{\text{ar}}(\text{O})/\%$	2.18
	$w_{\text{ar}}(\text{N})/\%$	0.96
$w_{\text{ar}}(\text{S})/\%$	4.06	
收到基低位发热量 $Q_{\text{net,ar}}/(\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	21.39	

表2 锅炉主要运行参数

Tab.2 Main operational parameters of the boiler

项目	数值
浓一次风风率/%	15
浓一次风风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	27
淡一次风风率/%	3
淡一次风风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	10
一次风温度/ $^{\circ}\text{C}$	330
拱上二次风风率/%	37
拱上二次风风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	45
F风风率/%	20
F风风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	45
SOFA风风率/%	25
SOFA风风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	45
二次风/SOFA风温度/ $^{\circ}\text{C}$	347
过量空气系数	1.2
空气量(标况下)/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	501.2
燃料量/($\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$)	259.8

表3 330 MW负荷下再循环烟气不同工况风率 单位: %

Tab.3 Different operating conditions of recirculated flue gas wind rates under 330 MW load

项目	SOFA风位置 送入	F风位置 送入	二次风位置 送入
浓一次风风率	12.9	12.9	12.9
淡一次风风率	2.6	2.6	2.6
拱上二次风风率	31.9	31.9	40.1
F风风率	17.3	25.5	17.3
SOFA风风率	29.8	21.6	21.6
贴壁风风率	5.5	5.5	5.5

该W火焰锅炉在500 MW以上负荷再热蒸汽温度随机组负荷的变化如图3所示。由图3可知, 锅炉在500 MW以上负荷再热蒸汽温度基本能达到 541°C , 在330 MW负荷下仅仅能达到 520°C 左右。为了解决该W火焰锅炉在低负荷再热蒸汽温不达标的问题, 本文拟从空预器入口抽取烟气总量16%作为再循环烟气送回炉膛, 从而提高对流受热面的换热量, 再配合再热器烟气挡板开度的调节, 以期实现再热蒸汽温度达标。再循环烟气可以从二次风喷口、F风喷口和SOFA风喷口送入炉膛, 为了确定最佳的方案, 本文将对上述3个方案开展数值模拟研究。同时, 为了防止两侧墙的结焦和高温腐蚀, 将再循环烟气的40%作为贴壁风从两侧墙送入。

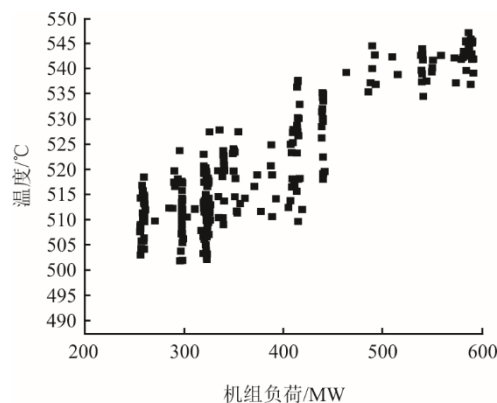


图3 再热蒸汽温度随机组负荷的变化

Fig.3 Variation of the reheated steam temperature with the unit load

1.2 模拟方法

采用商业软件Fluent对炉内湍流、颗粒运动和煤粉燃烧过程进行数值模拟。在进行工况变化研究之前进行了网格无关性检验: 炉膛的网格数量分别为 0.7×10^6 、 1.4×10^6 、 2.1×10^6 和 2.5×10^6 。结果表明, 当网格数量超过 2.1×10^6 时, 炉膛出口温度温度已不再发生显著变化, 因此本文的模拟中采用的网格数量约为 2.1×10^6 , 锅炉模型和网格如图4所示。

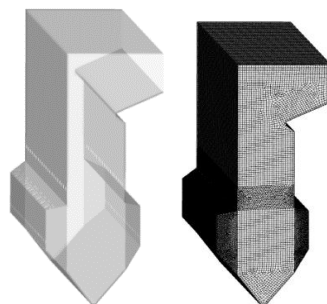


图4 W火焰锅炉模型和网格

Fig.4 Model and mesh of the W-flame boiler

湍流流动用 realisable $k-\epsilon$ 模型模拟, 采用 Lagrangian 方法模拟固体颗粒的运动。炉膛内的主要传热形式为辐射, 因此采用 DO 模型计算辐射传热。煤粉燃烧过程可分为以下两部分。

1) 挥发分从煤粉颗粒中析出, 然后以气态形式燃烧。挥发分的析出过程用被广泛使用的两步竞争模型计算, 两步竞争模型假设挥发分的析出速率取决于 2 个竞争的反应, 一个在低温时占主导地位, 一个在高温时占主导地位。挥发分的均相燃烧假设化学反应速率无限大, 只要混合就燃烧。瞬时的组分质量分数用瞬时混合物的组分表示, 单个组分的质量分数由平均混合组分和组分变量决定。化学反应和湍流之间的相互作用用 PDF 模型考虑。

2) 残留的焦炭颗粒进行非均相氧化过程。反应过程用 Field 模型计算, 其中反应速率取决于化学动力学速率和外部氧气扩散到焦炭表面的速率。

图 5 为满负荷时的炉内温度分布情况。由图 5 可知, 炉膛出口烟气温度约为 1 300 K, 与设计值 1 367 K 相差不大, 因此可认为数值模型是可靠的。

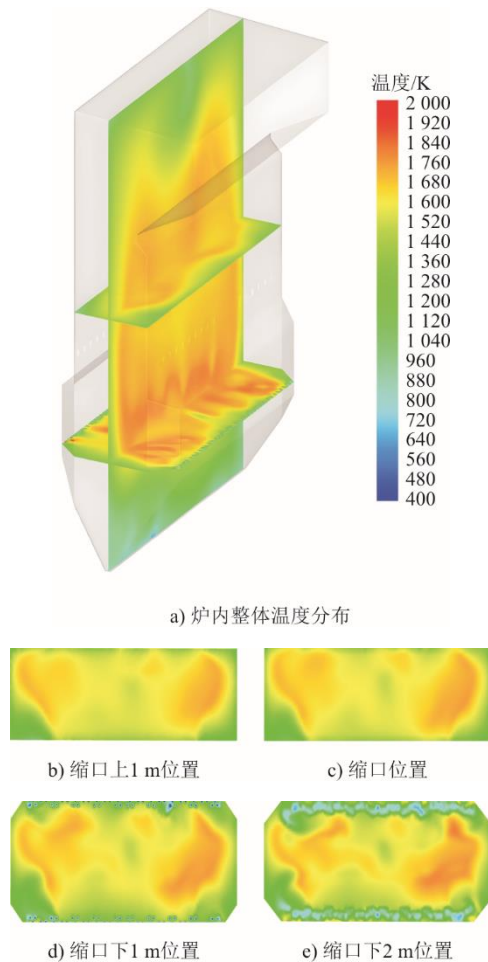


图 5 炉内温度分布

Fig.5 Temperature distribution in the furnace

2 结果与讨论

2.1 再循环烟气从 SOFA 风位置送入

图 6 为机组 330 MW 负荷下, 再循环烟气从 SOFA 风喷口送入炉膛时有无贴壁风时的炉内温度对比, 图中 SOFA 为无贴壁风工况, SOFA+T 为有贴壁风工况。从图 6 可知, 有贴壁风的引入, 下炉膛烟气温度约下降了 373 K, 但出口烟气温度略有 343 K 的上升, 可能与煤粉颗粒燃烧有一定的推迟有关。

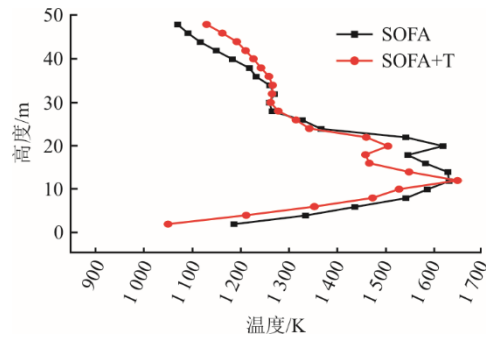


图 6 有无贴壁风时炉内烟气温度沿高度分布
Fig.6 Flue temperature distribution along the furnace height with and without wall blowing air

图 7 展示了再循环烟气从 SOFA 风喷口引入炉膛, 以及在此基础上将 40% 的再循环烟气作为贴壁风引入炉膛共 2 个工况下的炉内近壁面速度场分布情况。在无贴壁风时, 下炉膛上部区域在靠近侧墙区域的烟气流速较高, 约为 10 m/s, 主要为煤粉燃烧产物, 由于下炉膛属于还原性气氛, 该区域容易导致高温腐蚀。增加贴壁风后, 下炉膛上部区域明显为贴壁风射流, 将该区域烟气气氛变为氧化性气氛, 从而降低高温腐蚀的可能性。

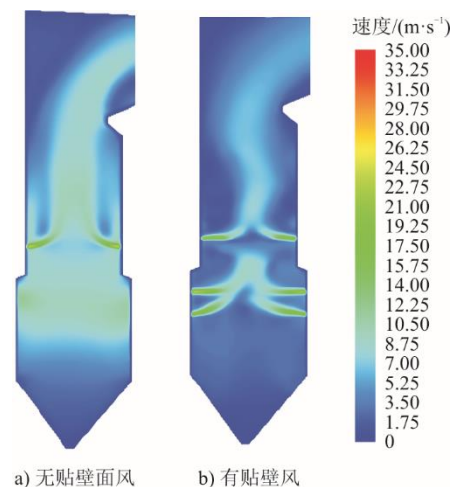


图 7 炉内侧墙附近速度场分布

Fig.7 Velocity distribution in the furnace adjacent to the side wall

图 8 为再循环烟气从 SOFA 风喷口引入炉膛, 以及在此基础上将 40% 的再循环烟气作为贴壁风引入炉膛共 2 个工况下的炉内温度场分布情况。缩口下方 2 m 位置属于燃烧核心区域, 该标高位置烟气温度最高, 随着高度的增加, 炉内烟气温度逐渐降低。再循环烟气从 SOFA 风喷口引入炉膛, 使得 SOFA 风风速增加, 和上行烟气的混合扰动强度增强, SOFA 风风率增加, 有更多的未燃尽碳在燃尽区燃烧, 无贴壁风时, 炉膛内存在 2 个靠近侧墙的高温区域, 这也是导致侧墙高温腐蚀的原因之一, 这种温度分布可能与投运的磨煤机数量有关。有贴壁风时, 炉膛高温区域集中在炉膛中心区域, 两侧墙的温度因贴壁风的存在而较低, 进一步降低了侧墙高温腐蚀的可能性。

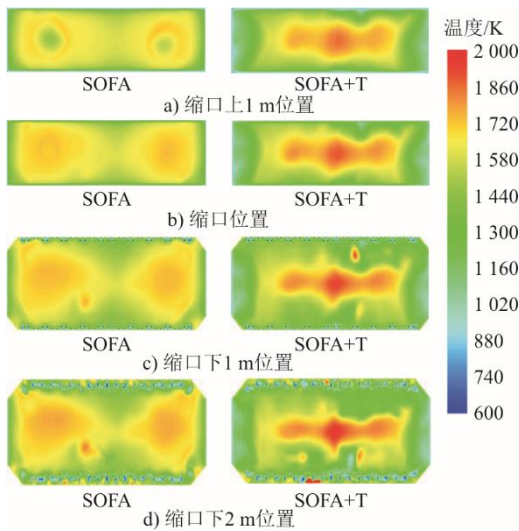


图 8 炉内温度分布
Fig.8 Temperature distribution in the furnace

2.2 再循环烟气从 F 风位置送入

图 9 为再循环烟气从 F 风喷入炉膛时有无贴壁风时炉内温度沿标高的分布情况, 图中 F 为无贴壁风工况, F+T 为有贴壁风工况。

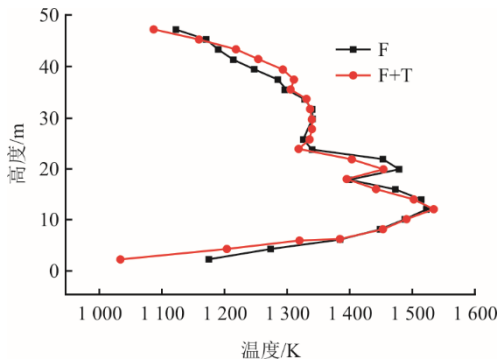


图 9 有无贴壁风时炉内烟气温度沿高度分布
Fig.9 Flue temperature distribution along the furnace height with and without wall blowing air

从图 9 可以看出: 下炉膛最高温度约为 1 540 K, 低于再循环烟气从 SOFA 风喷口送入炉膛时的 1 640 K, 较低的主燃区温度不利于火焰的稳定性; 还可以看出, 有无贴壁风对炉内横截面平均温度的温度影响相对较小, 因为侧墙贴壁风喷口与 F 风喷口都位于下炉膛, 标高接近, 送入的再循环烟气对炉内整体温度水平的影响较小。

图 10 为再循环烟气从 F 风位置送入炉膛时靠近侧墙的烟气流速分布。从图 10a) 可以看出, 由于再循环烟气从 F 风喷口送入, 增加了下炉膛的速度, 使得下炉膛的近壁面烟气流速较高, 且下炉膛除了冷灰斗区域的近壁面流速都达到了 8 m/s 以上, 近壁面高烟气流速区域远大于图 7a) 中的情况, 燃烧后的还原性气氛冲刷侧墙强烈, 增加了侧墙高温腐蚀的风险。将 40% 的贴壁风从侧墙喷口送入炉膛, 一方面确保了侧墙附近的氧化性气氛, 另一方面减少了主燃区的风量, 降低了主燃区还原性气氛对侧墙的冲刷能力。

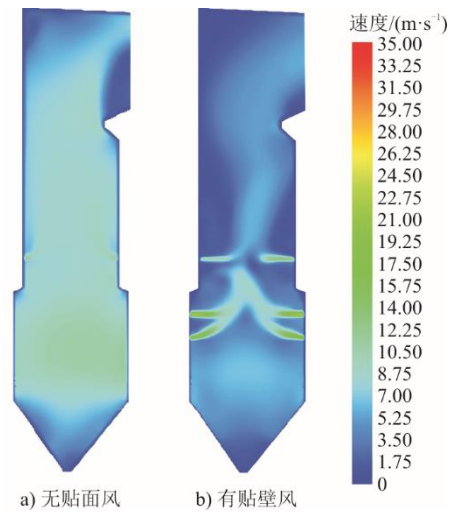


图 10 炉内侧墙附近速度场分布
Fig.10 Velocity distribution in the furnace adjacent to the side wall

图 11 为再循环烟气从 F 风喷口送入炉膛后的炉内温度分布情况。无贴壁风时, 再循环烟气与 F 风一起参与煤粉燃烧过程, 炉内温度分布较为均匀, 且温度值显著低于再循环风送入 SOFA 风喷口工况的温度值; 当有贴壁风时, 炉膛内贴墙位置温度降低, 不如炉膛中心位置燃烧充分, 所以炉膛高温区域集中在炉膛中心, 可以保证煤粉着火的稳定性, 两侧墙的烟气温度较低, 且属于氧化性气氛, 可以减缓侧墙高温腐蚀和结焦的发生。

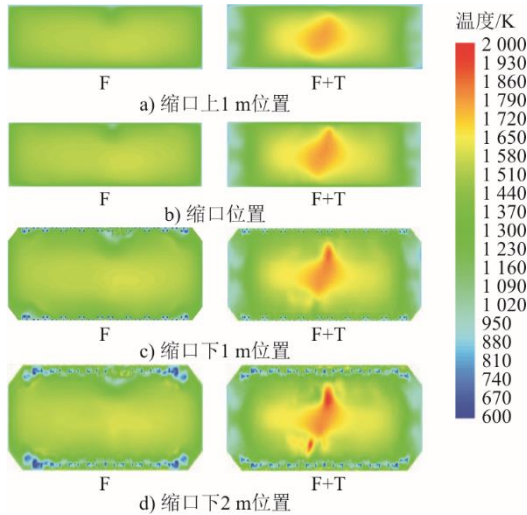


图 11 炉内温度分布

Fig.11 Temperature distribution in the furnace

2.3 再循环烟气从二次风位置送入

图 12 为再循环烟气从二次风喷口送入炉膛时有无贴壁风时的炉内温度沿标高的分布情况，图中 S 为无贴壁风工况，S+T 为有贴壁风工况。从图 12 可以看出，下炉膛最高温度约为 1 555 K，略高于从 F 风位置送入的工况，低于从 SOFA 风喷口送入的工况。有贴壁风时，下炉膛横截面平均温度降低，主要原因是主燃区过量空气系数降低，燃烧不充分所致。但是在上炉膛，随着烟气混合和燃烧的充分进行，有无贴壁风的炉膛出口温度趋于一致。

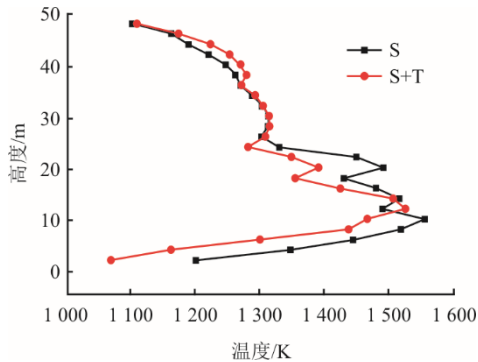


图 12 有无贴壁风时炉内烟气温度沿高度分布

Fig.12 Flue temperature distribution along the furnace height with and without wall blowing air

图 13 为再循环烟气从二次风位置送入炉膛时靠近侧墙的烟气流速分布。从图 13a)可以看出，再循环烟气从二次风喷口位置送入使得侧墙附近烟气流速达到 20 m/s 左右，大于再循环烟气从 SOFA 风和 F 风送入炉膛的工况，表明还原性烟气对缩口上下的侧墙有比较强烈的冲刷。同样地，引入贴壁风能够降低还原性烟气对侧墙的冲刷，图 7b)、图 10b)和图 13b)中的侧墙附近流速分布规律相似。

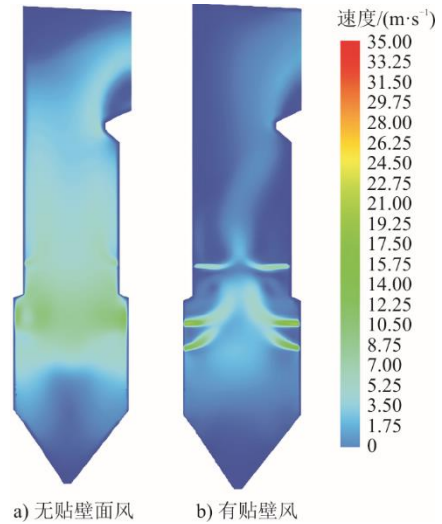


图 13 炉内侧墙附近速度场分布

Fig.13 Velocity distribution in the furnace adjacent to the side wall

图 14 为再循环烟气从二次风喷口送入炉膛后的炉内温度分布情况。无贴壁风时，再循环烟气与二次风一起参与煤粉燃烧过程，主燃区燃烧比较充分，烟气平均温度相对较高，但是低于再循环烟气从 SOFA 风送入的工况。引入贴壁风后，侧墙的烟气温度降低，主燃区由于燃烧不充分，烟气温度略低于无贴壁风的工况。

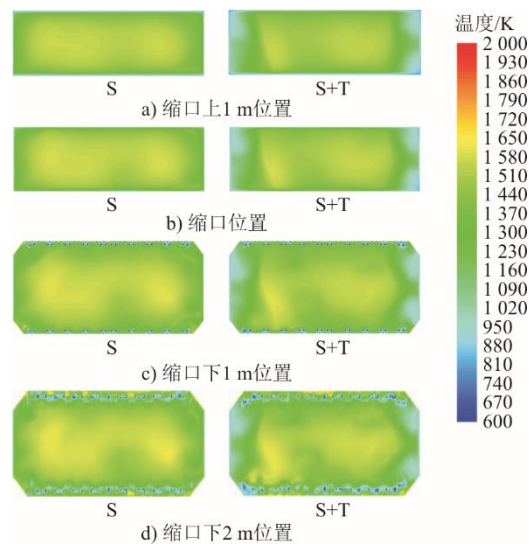


图 14 炉内温度分布

Fig.14 Temperature distribution in the furnace

2.4 方案比选

图 15 为 50% 负荷下炉膛出口烟气平均温度的对比。引入贴壁风后，炉膛出口温度会提升 50~60 °C，主要是因为贴壁风从侧墙喷口喷入后，下炉膛主燃区过量空气系数相对降低，下炉膛燃烧不充分。未

燃尽的可燃物进入上炉膛与 SOFA 风混合后继续燃烧, 从而导致上炉膛温度升高。炉膛出口烟气温度的升高, 能够增加对流受热面的传热量, 有利于解决低负荷时再热汽温不达标的问题。与此同时增加贴壁风能够解决还原性气氛对侧墙的冲刷, 减缓锅炉侧墙高温腐蚀的问题, 因此应选择增加贴壁风。

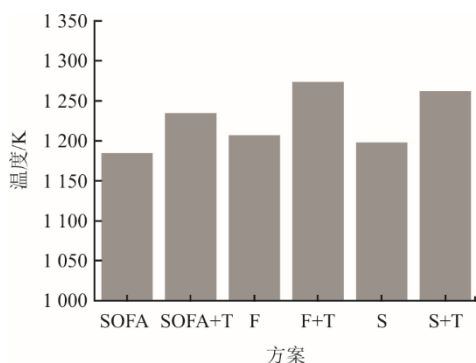


图 15 炉膛出口烟气平均温度对比

Fig.15 Comparison of average temperature at the furnace outlet between different cases

再循环烟气从 F 风喷口和二次风喷口送入炉膛, 一方面会降低下炉膛主燃区的温度, 不利于低负荷稳燃, 另一方面会降低下炉膛高温火焰位置, 对于下炉膛水冷壁的安全性有一定影响。因此将再循环烟气从上炉膛的 SOFA 风喷口送入炉膛是更好的选择。

综上所述, 采用 SOFA+T 的再循环烟气引入方式是该 W 火焰锅炉低负荷燃烧调整比较好的方案。

3 结 论

本文对某台 W 火焰锅炉低负荷燃烧调整进行了数值模拟研究, 针对低负荷时再热蒸汽温度不达标问题, 分析了再循环烟气喷入位置和有否贴壁风对炉内速度场和温度场的影响规律, 给出了合理的低负荷燃烧调整方案, 主要结论如下。

1) 从空预器进口抽取总烟气量的 16% 作为再循环烟气的引入炉膛, 在增加对流受热面换热量的同时, 也提高了炉膛近壁面处的烟气流速, 还原性烟气对近壁面处有比较强烈的冲刷。

2) 再循环烟气从 SOFA 风喷口喷入炉膛, 对下炉膛主燃区的温度影响较小, 有利于低负荷时煤粉燃烧的稳定; 再循环烟气从 F 风或二次风喷口送入炉膛会降低下炉膛主燃区的温度, 不利于煤粉气流的着火与燃烧。

3) 将 40% 的再循环烟气作为贴壁风从下炉膛侧墙送入炉膛能够降低侧墙烟气温度, 同时把侧墙

烟气变成氧化性气氛, 降低侧墙结焦和高温腐蚀的可能性。

[参 考 文 献]

- [1] 李汝萍, 何曙勇, 李志坚. 锅炉再热汽温偏低的原因分析及对策研究[J]. 浙江电力, 2013(4): 38-41.
LI Ruping, HE Shuyong, LI Zhijian. Research on causes and countermeasures against low reheated steam temperature of boiler[J]. Zhejiang Electric Power, 2013(4): 38-41.
- [2] KUANG M, LI Z Q. Review of gas/particle flow, coal combustion, and NO_x emission characteristics within down-fired boilers[J]. Energy, 2014, 69: 144-178.
- [3] LI Z Q, LIU Z, HUANG H L, et al. The effects of key parameters on the gas/particle flows characteristics in the furnace of a Foster Wheeler down-fired boiler retrofitted with novel low-load stable combustion technology[J]. Energy, 2024, 288: 129736.
- [4] DU H, LI Z Q, LIU Z, et al. Industrial measurement of combustion and NO_x formation characteristics on a low-grade coal-fired 600 MWe FW down-fired boiler retrofitted with novel low-load stable combustion technology[J]. Fuel, 2022, 321: 123926.
- [5] LI X G, ZENG L Y, ZHANG X, et al. Effects of the fuel/lean coal/air flow damper opening on combustion, energy conversion and emissions in a supercritical down-fired boiler[J]. Fuel, 2021, 292: 120319.
- [6] SONG M H, ZENG L Y, ZHAO Y, et al. Secondary air distribution in a 600 MWe multi-injection multi-staging down-fired boiler: a comprehensive study [J]. Journal of the Energy Institute, 2020, 93: 1250-1260.
- [7] LI X G, ZENG L Y, ZHANG N, et al. Effects of the gas/particle flow and combustion characteristics on water-wall temperature and energy conversion in a supercritical down-fired boiler at different secondary-air distributions[J]. Energy, 2022, 238: 121983.
- [8] WANG Q X, CHEN Z C, LI L K, et al. Achievement in ultra-low-load combustion stability for an anthracite and down-fired boiler after applying novel swirl burners: from laboratory experiments to industrial applications[J]. Energy, 2020, 192: 116623.
- [9] WANG W S, ZHU X J, BI Q C, et al. Heat sensitivity of vertical water wall at low mass velocity in supercritical pressure W-shaped flame boiler[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2012, 53: 202-208.
- [10] 吕当振, 周延华, 刘帅, 等. 600 MW 超临界 W 火焰锅炉垂直水冷壁壁温分布特性及偏差控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11): 3312-3319.
LYU Dangzhen, ZHOU Yanhua, LIU Shuai, et al. Study on distribution characteristics and deviation control of vertical membrane waterwall temperature of a 600 MW subcritical down-fired boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3312-3319.
- [11] MA L, FANG Q Y, YIN C G, et al. More efficient and environmentally friendly combustion of low-rank coal in a down-fired boiler by a simple but effective optimization of staged-air windbox[J]. Fuel Processing Technology, 2019, 194: 106118.
- [12] 杨辉, 梁仕铤, 杨玉, 等. 某 2 030 t/h W 火焰锅炉低负荷下再热汽温偏低原因分析及对策[J]. 热力发电, 2020, 49(9): 114-120.
YANG Hui, LIANG Shimang, YANG Yu, et al. Reason

- analysis and countermeasures for low reheat steam temperature of a 2030 t/h W-flame boiler at low load[J]. *Thermal Power Generation*, 2020, 49(9): 114-120.
- [13] 张海龙, 苏林, 杨辉, 等. “W”火焰锅炉低负荷再热蒸汽温提效研究[J]. *电站系统工程*, 2021, 37(1): 16-20.
ZHANG Hailong, SU Lin, YANG Hui, et al. Research on improving reheat steam temperature of “W” flame boiler under low load[J]. *Power System Engineering*, 2021, 37(1): 16-20.
- [14] 王兴, 齐保新, 马庆中, 等. 某2 030 t/h 超临界锅炉再热蒸汽温偏低原因分析及改造措施[J]. *电站系统工程*, 2020, 36(4): 47-51.
WANG Xing, QI Baoxin, MA Qingzhong, et al. Cause analysis and modification measures for low reheat steam temperature in 2 030 t/h supercritical boiler[J]. *Power System Engineering*, 2020, 36(4): 47-51.
- [15] 党黎军, 杨辉, 应文忠, 等. 660 MW 超超临界锅炉再热蒸汽温偏低问题分析及技术改造[J]. *动力工程学报*, 2017, 37(4): 261-266.
DANG Lijun, YANG Hui. Analysis and technical retrofit on low reheat steam temperature of a 660 MW ultra-supercritical boiler[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2017, 37(4): 261-266.
- [16] 黄思林, 李德波, 苗建杰, 等. 燃煤电厂锅炉受热面超温燃烧调整试验研究与工程应用[J]. *环境工程*, 2023, 41(增刊): 812-818.
HUANG Silin, LI Debo, MIAO Jianjie, et al. Experimental study and engineering application of overtemperature combustion adjustment of boiler heating surface in coal-fired power plant[J]. *Environmental Engineering*, 2023, 41(Suppl.1): 812-818.
- [17] 陈辉, 黄林滨, 李朝兵, 等. 二次再热锅炉30%负荷下燃烧优化调整研究[J]. *电力科技与环保*, 2022, 39(2): 129-137.
CHEN Hui, HUANG Linbin, LI Chaobin, et al. Study on combustion optimization and adjustment of secondary reheat boiler at 30% load[J]. *Electric Power Technology and Environmental Protection*, 2022, 39(2): 129-137.
- [18] 元泽民, 柯希玮, 黄中, 等. 烟气再循环对大型循环流化床锅炉低负荷运行特性的影响研究[J]. *热力发电*, 2023, 52(9): 58-64.
YUAN Zemin, KE Xiwei, HUANG Zhong, et al. Influence of flue gas recirculation on operation characteristics of large scale CFB boiler under low load[J]. *Thermal Power Generation*, 2023, 52(9): 58-64.
- [19] 张秀昌, 刘一, 叶恩清, 等. 烟气再循环对二次再热锅炉参数影响试验研究[J]. *电站系统工程*, 2023, 39(5): 8-11.
ZHANG Xiuchang, LIU Yi, YE Enqing, et al. Experimental study on the effect of FGR on double reheat boiler parameters[J]. *Power System Engineering*, 2023, 39(5): 8-11.
- [20] 毕克刚, 蔡玲, 毕永江, 等. 锅炉烟气再循环调节再热蒸汽温特性方法研究[J]. *能源与环保*, 2023, 45(1): 210-214.
BI Kegang, CAI Ling, BI Yongjiang, et al. Study on method of boiler flue gas recirculation regulating reheat steam temperature[J]. *China Energy and Environmental Protection*, 2023, 45(1): 210-214.

(责任编辑 邓玲惠)