

350 MW 墙式切圆锅炉超低负荷稳燃优化

刘涛¹, 薛艳芳², 王云刚¹, 邹立¹, 张益嘉¹, 沈涛³, 赵钦新¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 中国核电工程有限公司, 100840, 北京;
3. 哈尔滨锅炉厂有限责任公司, 150046, 哈尔滨)

摘要: 为获得墙式切圆燃煤锅炉在 20% 额定负荷下燃烧和污染物排放特性, 以国内某台 350 MW 超临界墙式切圆燃煤锅炉为研究对象, 研究了其在 20% 超低负荷下不同燃烧器水平摆角和一次风中掺混不同比例氢气(以热量计算)共燃对烟气温度和烟气主要成分的影响。结果表明: 增大燃烧器水平摆角能够缓解 20% 负荷下锅炉近壁面空气流速较高的问题, 但会导致煤粉初期着火延迟, 推荐将水平摆角设置为 15°; H₂ 共燃比为 15% 时, 主燃区截面平均烟气温度最高达到 1 592 K, 比初始工况提高了 34 K, 共燃比的增加导致炉膛平均温度降低, 推荐 H₂ 共燃比取 15%; NO_x 排放随着 H₂ 共燃比的增加呈现先上升后下降的趋势, 共燃比为 20% 时 NO_x 排放比初始工况下降了 21.2%, CO₂ 排放也降低了 18.2%, 但出口烟气中 H₂O 的摩尔分数增加了 20.8%, 容易造成低温腐蚀, 需要对相关设备进行防腐处理。

关键词: 墙式切圆锅炉; 低负荷稳燃; 燃烧器水平摆角; H₂ 共燃比

中图分类号: TM621.2 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202503010 **文章编号:** 0253-987X(2025)03-0099-11

Optimization of Stable Combustion at Ultra-Low Load for 350 MW Wall Tangentially Fired Boiler

LIU Tao¹, XUE Yanfang², WANG Yungang¹, ZOU Li¹,
ZHANG Yijia¹, SHEN Tao³, ZHAO Qinxin¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. China Nuclear Power Engineering Company Limited, Beijing 100840, China; 3. Harbin Boiler Company Limited, Harbin 150046, China)

Abstract: To investigate the combustion and pollutant emissions characteristics of a wall tangentially fired pulverized-coal boiler operating at 20% of its rated load, this paper focus on a 350 MW supercritical wall tangentially fired pulverized-coal boiler in China. The research explores the impacts of varying burner horizontal swing angles and different proportions of hydrogen (calculated by calorific content) in the primary air on flue gas temperature and the main components of flue gas under a 20% ultra-low load. The findings suggest that increasing the horizontal swing angle of the burners can mitigate the issue of high air velocity near the boiler walls at 20% load. However, this adjustment may result in a delay in the initial ignition of pulverized coal. It is advised to set the horizontal swing angle to 15°. With an H₂ co-firing ratio of 15%, the average flue gas temperature at the main combustion zone cross-section reaches up to 1 592 K, marking a 34 K increase from the initial conditions. Nevertheless, a rise in the co-firing ratio leads to a decline in the average furnace temperature, with a recommended H₂ co-firing ratio of 15%. Regarding NO_x emissions, they exhibit an initial increase followed by a decrease with the rise in the H₂ co-firing ratio. At a

收稿日期: 2024-08-02。 作者简介: 刘涛(2000—), 男, 硕士生; 王云刚(通信作者), 男, 副教授, 博士生导师。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFC3001803)。

网络出版时间: 2024-10-24

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20241023.1726.011>

co-firing ratio of 20%, NO_x emissions decrease by 21.2% compared to the initial conditions, and CO₂ emissions also witness an 18.2% reduction. However, the molar fractions of H₂O in the outlet flue gas see a 20.8% increase, posing a risk of low-temperature corrosion. Hence, it is crucial to implement corrosion prevention measures for the relevant equipment.

Keywords: wall tangentially fired boiler; stable combustion at low load; burner horizontal swing angles; hydrogen cofiring ratios

近年来可再生能源发电发展迅速,但可再生能源固有的稳定性差、不可控制的特点,使得各地出现了高比例的“弃风弃光”现象^[1]。为了加快建设新能源体系,传统煤电逐步向基础保障性和系统调节性电源转型^[2],加速火电机组灵活性改造,提高机组深度调峰能力是保障电力系统安全运行的重要措施。

我国火力发电机组锅炉燃烧方式包括切圆燃烧、前后墙对冲燃烧和“W 型”火焰燃烧等,其中切圆燃烧占比 70% 以上^[3-4],这主要是由于切圆燃烧具有炉内火焰充满度高,气流刚性强,流场稳定等特点^[5-6]。按照燃烧器布置方式的不同,切圆燃烧可分为四角切圆燃烧和墙式切圆燃烧。虽然墙式切圆燃烧相较于四角切圆燃烧有着火焰充满度好,出口烟温偏差小等优势^[7],但墙式切圆燃烧方式决定了其火焰切圆直径易偏大,流场中心容易移动和局部水冷壁易超温等问题,这些现象在锅炉低负荷运行过程中更为凸显^[8-9]。

为了提高墙式切圆燃煤锅炉的深度调峰能力,增强低负荷下的燃烧稳定性,众多学者开展了相关研究。廖永浩等^[8]对 600 MW 超临界墙式切圆锅炉的燃烧特性展开了研究,通过数值模拟结果发现,每个燃烧器射流均会受到上游气流的横向推力,使得旋转切圆直径均有扩大的趋势。刘敦禹等^[10]对 600 MW 超超临界墙式切圆锅炉开展了研究,结果发现一次风截面近壁面处风速较高,烟气温度也较高,容易导致炉内结渣,提出了采用缩小假想切圆直径和增加一次风率的方法来改善燃烧状况。孙磊等^[11]针对 350 MW 墙式切圆燃烧锅炉在低负荷(50% 额定负荷)情况下容易出现局部水冷壁超温的现象进行研究指出,一次风切圆偏大是导致该问题的主要原因,通过将燃烧器整体偏置一定角度能够较好的解决这个问题。周凌宇等^[12]研究发现,调整锅炉各进风口的偏转角度能够缓解火焰刷墙现象并改善壁面气氛,同时 NO_x 排放也有所降低。

此外,已有的研究表明,机组在超低负荷下运行,投运下层相邻燃烧器有利于提高燃烧稳定性^[13-15]。赵星海等^[16]针对某 660 MW 超临界墙式切圆燃煤锅炉在 30% 负荷下无法长时间稳定燃烧的问题,提出了向一次风中间层通入富氧二次风的方法,使得主燃区温度提高了 200 K,增强了锅炉低负

荷稳定燃烧的能力。总之,现有研究表明,燃烧器摆角、燃烧器投运方式和锅炉负荷对墙式切圆燃煤锅炉的燃烧和流动特性都有着较大的影响,适当改变入口空气成分能够显著提高锅炉低负荷稳燃能力。

此外,火电机组在深度调峰期间将富余的电力用于电解水制取 H₂ 和 O₂,再将产物用于改善煤粉燃烧状况是提高锅炉超低负荷下燃烧稳定性的有效途径。然而,目前针对墙式切圆锅炉低负荷燃烧的研究主要集中在额定负荷的 30% 以上,对于更低负荷下的燃烧和污染物排放特性的研究还不够深入。

本文以某 350 MW 超临界墙式切圆燃煤锅炉为研究对象,深入研究了改变燃烧器水平摆角和一次风掺混 H₂ 对锅炉 20% 超低负荷下燃烧和排放特性的影响规律,为该类型机组实现超低负荷下稳定燃烧提供指导与数据参考。

1 研究对象

研究对象为某电厂 350 MW 超临界直流燃煤锅炉,炉膛整体高度约为 59 m,炉膛断面尺寸为 14.627 m × 14.627 m(宽度 × 深度),炉膛容积 11 065 m³,锅炉最大连续蒸发量工况(BMCR)和汽机热耗验收工况(THA)的主要设计参数如表 1 所示。该锅炉采用一次中间再热,炉膛采用 π 型布置、平衡通风、固态排渣。在主燃烧区域配备有两组,共 6 层煤粉燃烧器,其周围均匀布置了 8 层二次风喷嘴。锅炉在 BMCR 工况运行时,机组投运下 5 层燃烧器,最上层燃烧器备用。锅炉燃用煤种的工业分析及元素分析见表 2。

表 1 锅炉设计参数汇总

Table 1 Summary of boiler design parameters

参数	数值	
	BMCR	THA
主蒸汽出口压力/MPa	25.40	25.14
主蒸汽出口温度/℃	571	571
主蒸汽流量/(t · h ⁻¹)	1 110.00	991.95
再热蒸汽出口压力/MPa	4.280	3.838
再热蒸汽出口温度/℃	569	569
再热蒸汽流量/(t · h ⁻¹)	932.37	839.10
再热蒸汽进口压力/MPa	4.480	4.018
再热蒸汽进口温度/℃	321.8	310.3

表 2 锅炉用煤工业和元素分析

Table 2 Elemental and industrial analysis of boiler coal

质量分数 $w/\%$									$Q_{\text{net,ar}}/$ ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)
工业分析				元素分析					
V_{ar}	FC_{ar}	A_{ar}	M_{ar}	C_{ar}	H_{ar}	O_{ar}	N_{ar}	S_{ar}	
24.77	43.64	19.84	11.75	54.82	2.68	10.26	0.52	0.13	16.31

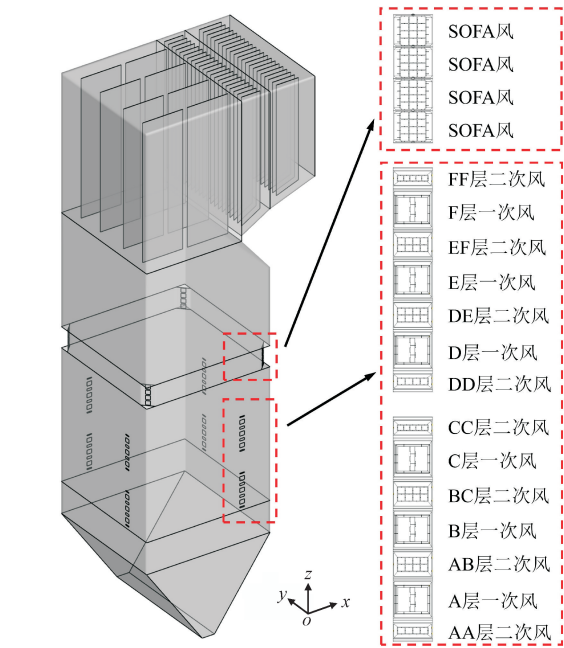
注:V、FC、A、M 分别为挥发分、固定碳、灰分和水分,C、H、O、N、S 分别为碳、氢、氧、氮和硫;下标 ar 为燃料收到基, O_{ar} 由差减法得到; $Q_{\text{net,ar}}$ 为收到基低位发热量。

该锅炉主燃烧区的燃烧方式为墙式切圆燃烧,4 套燃烧器分别安装在 4 个壁面上(#1 至 #4),二次风及一次风分别垂直于壁面及偏转 5° 射入炉内,形成两个旋转方向相同的虚圆。主燃烧区设置有 6 层一次风进口,自下而上分别为 A、B、C、D、E 和 F,同时一次风进口周围均匀布置有 8 层二次风进口,分别为 AA、AB、BC、CC、DD、DE、EF 和 FF。在主燃烧区上方设置有 4 层分离燃尽风(SOFA)喷嘴,布置于炉膛的 4 个角上,形成四角切圆。锅炉几何模型、燃烧器布置及炉膛横截面如图 1 所示。

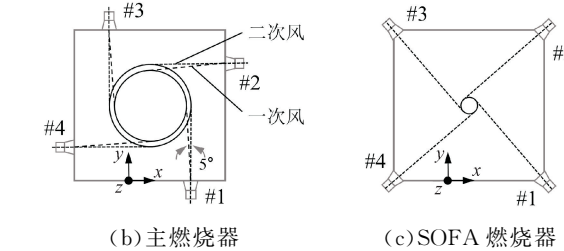
2 数值计算方法

2.1 网格划分

几何模型依据锅炉实际尺寸 1 : 1 建立,采用分区划分的方法将其划分为冷灰斗区、主燃烧区、SOFA 区和炉膛上部区等 4 个区域,并采用 ICEM 进行结构化网格划分,锅炉整体网格如图 2(a) 所示。针对存在强烈湍流和化学反应的主燃区和 SOFA 区的网格进行加密处理,同时为了防止出现数值伪扩散,SOFA 区绘制的网格线方向与流动方向近似一致,该区域网格横截面如图 2(c) 所示。经网格无关性验证之后,确定计算网格总数约为 109 万。



(a) 锅炉模型及单套燃烧器布置

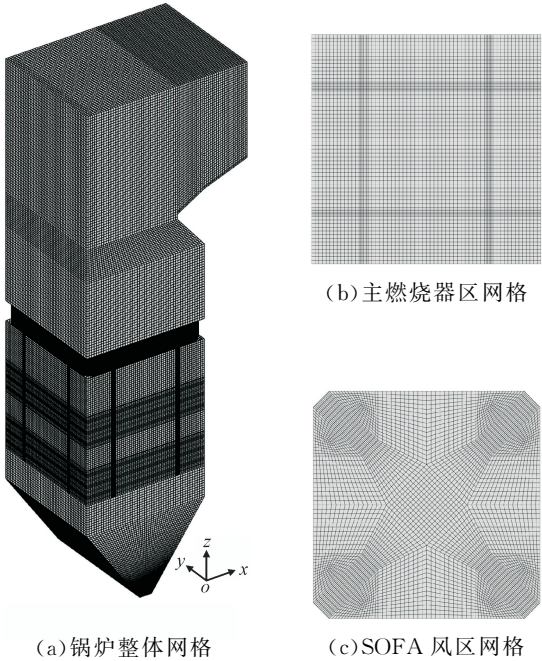


(b) 主燃烧器

(c) SOFA 燃烧器

图 1 锅炉几何模型及燃烧器布置示意图

Fig. 1 Geometric model of the boiler and schematic diagram of the burner arrangement



(a) 锅炉整体网格

(c) SOFA 风区网格

图 2 锅炉模型网格划分

Fig. 2 Grid division of the boiler

2.2 数学模型

模拟煤粉燃烧过程中所选取的物理和化学模型对模拟的准确性有较大的影响。计算过程中,采用了包含旋流修正的 realizable $k-\epsilon$ 模型^[17] 来求解湍

流问题,气相燃烧模型选取有限速率/涡耗散模型,炉内辐射换热计算采用 P-1 辐射模型^[18]。煤粉颗粒的移动过程采用随机轨道模型进行描述,采用双方程竞争反应模型模拟挥发分析出过程,焦炭的燃烧采用动力/扩散控制反应速率模型^[19-21]。烟气吸收系数由基于域的灰度气体加权和模型(WSGGM)确定^[21],采用压力耦合方程组的半隐式(SIMPLE)算法来求解速度场和压力场的耦合^[22]。

由于快速型 NO_x 相比于燃料型和热力型 NO_x 对总排放贡献较小,所以忽略快速型 NO_x 的生成。热力型 NO_x 的生成与反应温度相关,反应过程采用泽尔多维奇(Zeldovich)机理进行模拟^[23],而燃料型 NO_x 的生成过程采用氰化氢衰减总反应(De Soete)机理模拟^[24]。

2.3 边界条件及工况设置

一次风、二次风和 SOFA 风喷口设置为速度入口,炉膛出口设置为压力出口;壁面及加热表面均采用无滑移壁面边界条件,煤粉颗粒的粒径分布服从罗辛-拉姆勒分布(Rosin-Rammler)算法,分布指数取 1.5^[25],平均粒径为 60 μm。

为了探讨燃烧器水平摆角和 H₂ 共燃比(以 H₂ 替代部分煤粉燃烧时,H₂ 燃烧释放热量占总热量的比例)对锅炉 20%超低负荷下燃烧特性的影响,总共设置了 10 个工况。工况 1(100%额定负荷)、工况 2(45%额定负荷)为基本工况,用以验证数值模拟的可靠性,工况 3 为机组 20%负荷下的基准工况,不同负荷下的燃烧系统运行参数见表 3。

表 3 不同负荷下燃烧系统运行参数
Table 3 Operating parameters of the combustion system at different loads

参数	数值		
	工况 1	工况 2	工况 3
运行负荷/MW	350	165	70
总燃煤量/(t·h ⁻¹)	193.50	105.00	64.76
一次风量/(t·h ⁻¹)	390.05	266.54	171.40
一次风温度/K	338	337	338
二次风量/(t·h ⁻¹)	533.72	387.95	299.95
二次风温度/K	639	613	639
燃烧器投运层	A,B,C,D,E	C,D,E,F	A,B

表 4 给出了优化 20%负荷工况燃烧稳定性的改造方案,其中工况 3~工况 6 用以研究燃烧器水平摆角分别向内偏置 5°、10°、15°和 20°对燃烧稳定性的影响。工况 7~工况 10 是在最佳水平摆角工

况下,向一次风中混入 H₂,H₂ 共燃比从 5%到 20%变化。

表 4 20%负荷下各工况边界条件设置
Table 4 Boundary conditions for various operating conditions at 20% load

工况	负荷/MW	燃烧器水平摆角/(°)	H ₂ 共燃比/%
3	70	5	0
4	70	10	0
5	70	15	0
6	70	20	0
7	70	15	5
8	70	15	10
9	70	15	15
10	70	15	20

3 模拟结果与分析

3.1 模型可靠性验证

为了验证所选择的计算模型的准确性,通过将 100%负荷(350 MW)和 45%负荷(165 MW)条件下的模拟结果和相应的运行实测数据进行了比较,结果如表 5 所示。通过计算可知,在两种工况下模拟所得出口烟气温度、出口 O₂ 体积分数和 NO_x 排放的最大误差分别为 2.15%、8.28%和 6.47%。可见,实测值和模拟值间相对误差较小,所建立的锅炉燃烧模型能够对 20%负荷下锅炉的燃烧和排放特性进行模拟研究。

表 5 100%和 45%负荷测量结果与模拟结果对比
Table 5 Comparison of measurement and simulation results at 100% and 45% loads

参数	来源	数值	
		350 MW	165 MW
炉膛出口烟气温度/K	实测值	1 273	1 164
	模拟值	1 290	1 189
炉膛出口 O ₂ 体积 分数/%	实测值	3.38	5.48
	模拟值	3.66	5.72
炉膛出口 NO _x 排放 质量浓度/(mg·m ⁻³)	实测值	206.42	235.46
	模拟值	219.79	243.29

3.2 燃烧器水平摆角对燃烧的影响

图 3 显示了工况 1 及工况 3~6 底层燃烧器截面的速度分布,图上数值为速度等高线。由图 3(a)可以看出,在满负荷工况下,一次风气流在底层燃烧

器截面形成了一个较为均匀的环状区域。随着负荷的急剧下降,20%负荷下,一次风粉气流流速降低;从图 3(b)可以看出,随着负荷下降,形成的切圆直径相较于满负荷工况更大。这是由于,进入炉膛风量减少使得煤粉气流刚性减弱,在上游气流的冲击作用下切圆直径有向外扩大的趋势。这直接导致煤粉气流更大面积地冲刷水冷壁,壁面处最高气流流速达到 14 m/s。较高流速的煤粉气流冲刷水冷壁将加速管壁的腐蚀和磨损,不利于锅炉的安全稳定运行。随着燃烧器水平摆角的增大,煤粉气流形成的切圆直径逐渐缩小,由图 3(d)可以看出,当燃烧器水平摆角为 15°时形成的切圆较为均匀,壁面处最高气流流速仅为 10 m/s;随着摆角进一步增大至 20°,上下游气流对抗作用增强,流场均匀性降低,不利于煤粉的稳定燃烧。

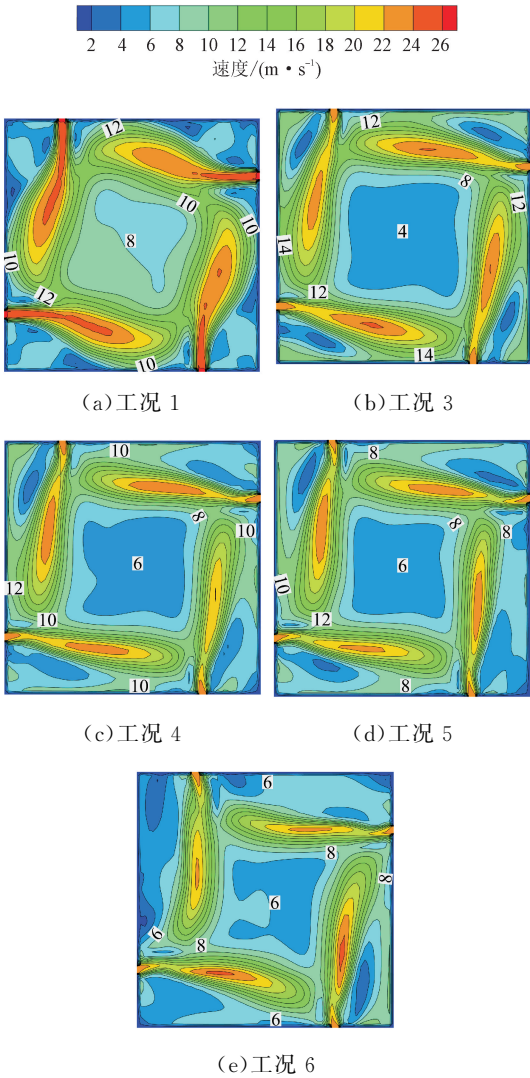


图 3 底层燃烧器截面速度分布

Fig. 3 Cross-sectional velocity distribution of the bottom burner

炉内温度场是影响低负荷下煤粉燃烧稳定性的重要因素。图 4 显示了工况 1 及工况 3~6 炉膛中心截面的烟气温度分布情况。从中可以看到,随着锅炉负荷的急剧降低,炉内烟气高温区域面积出现较大范围的减少。这是由于负荷降低,投入的燃料量减少,进而导致燃料燃烧释放的热量减少。对比工况 3~6 的温度场可以看出,适当增加燃烧器水平摆角,主燃区烟气温度分布更加均匀,但当摆角进一步增大至 20°,烟气温度场开始变得紊乱。此外,摆角的增大使得投运燃烧器(A、B 层)高度附近区域烟气高温面积减少,而在主燃区上部烟气高温面积增大。这是因为,燃烧器水平摆角增大,上、下游煤粉气流对抗作用逐渐增强导致烟气湍流强度增加,煤粉初期着火延迟,未燃尽的可燃物在主燃区上部区域进一步燃烧释放热量。

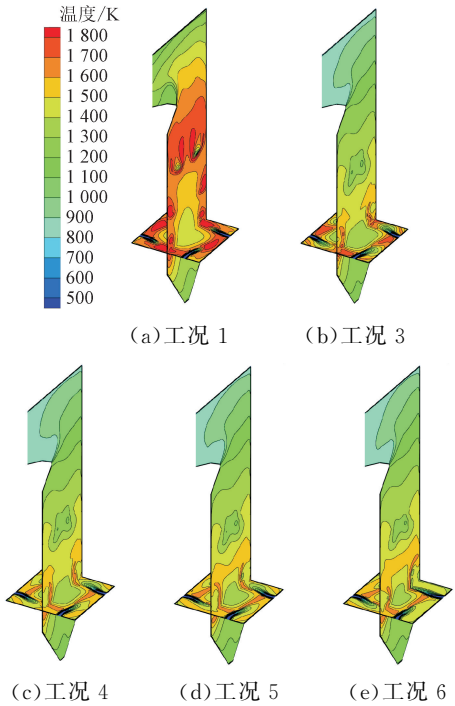


图 4 炉膛中心截面温度分布

Fig. 4 Temperature distribution in the center cross-section of the furnace

不同燃烧器水平摆角下沿炉膛高度方向的温度、O₂ 及 NO_x 分布曲线如图 5 所示。具体来看,随着水平摆角的增大,沿炉膛竖直方向不同高度(Z)的烟气温度分布趋势不同,主燃区下部区域(12.5~16 m)烟气平均温度逐渐降低,温度波动有所缓解。在主燃区上部(18~23.5 m)及炉膛上部区域,烟气平均温度逐渐增加,这与图 4 呈现的结果一致。其中,工况 6 在主燃区下部,烟气平均温度相较于工况 3 最大下降了 22 K,而工况 5 对应的烟气平均温度

在主燃区上部存在最大值,达到 1 559 K,相较于工况 3 增加了 14 K。因此,增大燃烧器水平摆角虽然为煤粉初期着火带来了一定的不利影响,但通过该措施能够缓解高温火焰大面积冲刷水冷壁,减小烟气温度波动,有利于机组安全稳定运行。

沿炉膛高度方向 O_2 和 NO_x 的浓度分布呈现近似相反的规律。由于一、二次风的加入,使得主燃区 O_2 的摩尔分数有明显的上升,煤粉燃烧消耗大量 O_2 ,使得其摩尔分数随着炉膛高度的增加而逐渐降低,氧化性氛围减弱,有利于增强 NO_x 的还原过程。不同工况下 NO_x 质量浓度在主燃区达到峰值,其中工况 3 对应的 NO_x 质量浓度最大达到了 352 mg/m^3 。

这是因为,在工况 3 的条件下,主燃区下部烟气温度较高,而热力型 NO_x 对温度较为敏感,煤粉燃烧产生燃料型 NO_x 的同时也产生大量的热力型 NO_x 。随着燃烧器水平摆角的增大,主燃区上部 NO_x 质量浓度出现一定的下降趋势。分析其原因,水平摆角增大导致煤粉初期不完全燃烧产生的未燃尽炭和 CO 含量上升,更多的 NO_x 在还原性气氛中被消耗。在燃尽区,SOFA 风的加入,对 NO_x 产生稀释作用的同时促进了未燃尽可燃物的燃烧, NO_x 质量浓度出现先下降后上升的趋势。各工况下炉膛上部 NO_x 相对质量浓度变化不大,其中工况 6 对应的质量浓度为 287 mg/m^3 ,相较于工况 3 下降了 7 mg/m^3 。

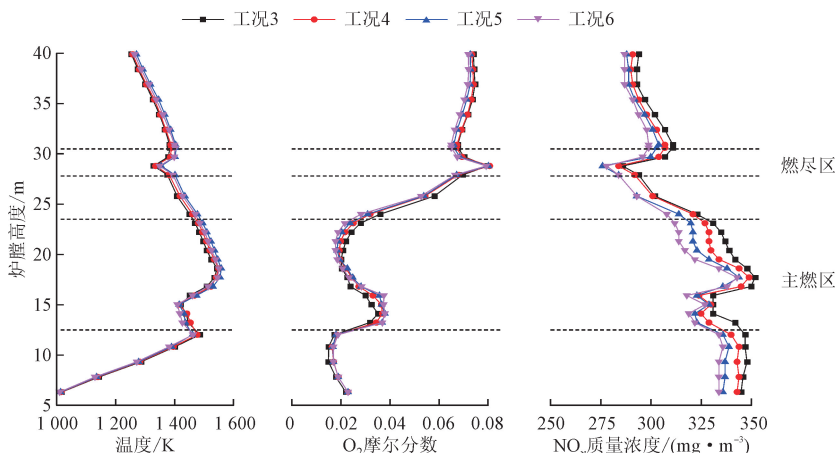


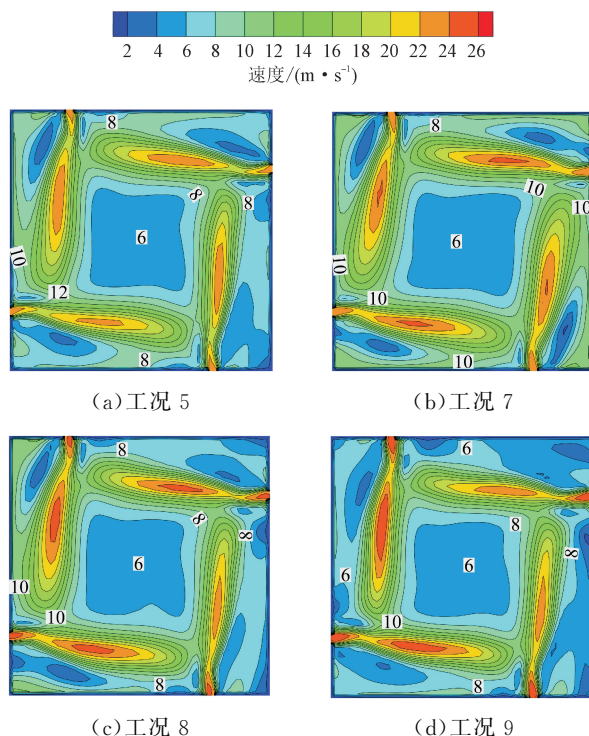
图5 不同燃烧器水平摆角下的截面平均温度和烟气组分分布

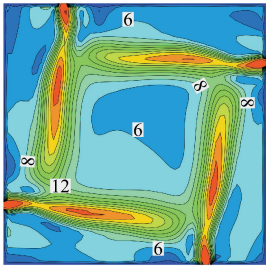
Fig. 5 Cross-sectional average temperature and flue gas composition distribution at different horizontal swirl angles of the burner

由以上分析可知,适当增大燃烧器水平摆角,能够改善炉内速度场的同时也会导致煤粉初期燃烧推迟,但对 NO_x 的排放影响较小。从机组低负荷下安全稳定运行的角度出发,燃烧器水平摆角设置为 15° 是推荐的改造方案。

3.3 H_2 共燃比对燃烧的影响

为了提高主燃区烟气温度,将 H_2 与煤粉进行掺混燃烧,以增强超低负荷下煤粉燃烧的着火供热。基于工况 5,得到了燃烧器水平摆角为 15° 时,不同 H_2 共燃比下底层燃烧器截面的速度和温度分布如图 6、图 7 所示。当 H_2 共燃比为 5% 时,煤粉气流形成的切圆直径呈现出略微的增大,但随着共燃比的进一步增大,切圆直径朝着缩小的趋势发展。此外,掺入 H_2 共燃的情况下,燃烧器截面烟气最高流速有所提高,速度场均匀性也得到改善。当共燃比为 15% 时,气流形成的切圆最为均匀,近壁面处气流速度也较低。当共燃比进一步增大至 20%,流场均匀性下降,切圆出现一定的畸变。





(e) 工况 10

图 6 不同 H₂ 共燃比下的底层燃烧器截面速度分布
Fig. 6 Cross-sectional velocity distribution of the bottom burner at different H₂ co-firing ratios

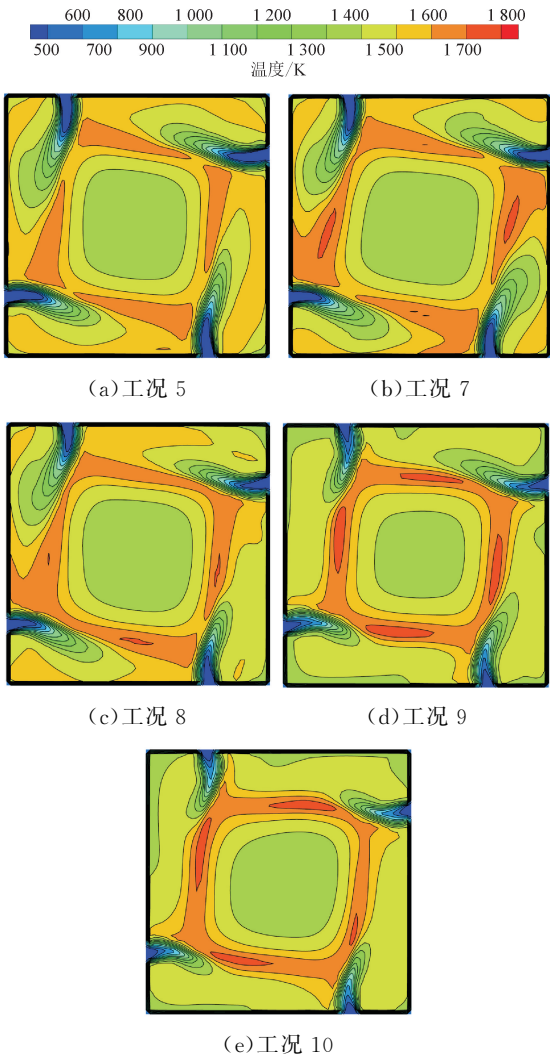


图 7 不同 H₂ 共燃比下的底层燃烧器截面温度分布
Fig. 7 Cross-sectional temperature distribution of the bottom burner at different H₂ co-firing ratios

为了解释出现上述现象的原因,结合图 7 进行分析可知,工况 7 掺混少量 H₂ 共燃,煤粉初期着火条件得到改善,火焰充满度提高,进而导致流场切圆

出现一定的膨胀。随着共燃比从 10% 增大至 20%, H₂ 燃烧产生的大量 H₂O 吸收热量使火焰的充满度降低,所以速度场切圆直径有所减小。掺入 H₂ 共燃的情况下,煤粉着火条件得到改善的同时烟气最高温度也有所提高,流动阻力降低,进而导致截面烟气流速有所增加,流场均匀性增加,这也有利于改善温度场并提高燃烧稳定性。当 H₂ 共燃比为 15% 时,温度场分布较为均匀,上游气流能够较好地引燃下游气流,实现低负荷下煤粉的稳定燃烧。当共燃比为 20% 时,燃烧产生大量的 H₂O,起到降低温度的作用,燃烧条件恶化导致流场均匀性下降。

不同 H₂ 共燃比下沿炉膛高度方向的温度、O₂ 及 NO_x 分布如图 8 所示。可见,随着 H₂ 共燃比的增加,炉膛烟气平均温度整体呈现升高的趋势,主燃区烟气平均温度变化较为明显。这是由于,掺混的 H₂ 进入炉膛之后迅速燃烧并释放大量热量,煤粉着火条件得到改善,在主燃区释放的热量增加,同时可以看出,共燃比为 15% 时,主燃区烟气平均温度取得最大值,最高温度达到 1 592 K,相较于不加入 H₂ 提高了 34 K,有益于稳定燃烧。当共燃比进一步增加 20%,烟气平均温度反而呈现下降趋势,最高温度仅为 1 588 K。这和图 7 所示的结果相对应,说明共燃比增大虽然能够提高主燃区烟气平均温度,但较高的共燃比下, H₂ 燃烧会产生大量的 H₂O,反而不利于低负荷运行时煤粉的稳定燃烧。

随着 H₂ 共燃比的增加,NO_x 排放呈现先上升后下降的趋势。这是由于加入 H₂ 共燃,提升了炉膛温度,生成的热力型 NO_x 增加,但另一方面,投入炉内的煤量减少,导致燃料型 NO_x 的生成量下降。在共燃比为 5% 时,温度升高对 NO_x 总排放的影响占主导作用,炉膛上部 NO_x 质量浓度为 290 mg/m³,相较于工况 5 增加了 2 mg/m³。随着共燃比的增大,煤量的减少对 NO_x 总排放的影响占主导作用,共燃比为 15% 和 20% 时炉膛上部 NO_x 质量浓度分别下降了 12.8% 和 21.2%。

为了更进一步探究加入 H₂ 共燃对锅炉排放的影响,对锅炉中心截面 CO₂ 和 H₂O 的分布情况进行了分析,结果如图 9、图 10 所示。从图中可见,随着 H₂ 共燃比的增加,炉内 CO₂ 和 H₂O 的摩尔分数都呈现单调的变化趋势。H₂ 燃烧不产生 CO₂,共燃比的增大使得投入炉内的燃煤量减少,燃烧产生的 CO₂ 的摩尔分数减少。当共燃比为 20% 时,炉膛出口截面 CO₂ 的平均摩尔分数为 0.112,相较于工况 5 减少了 18.2%。

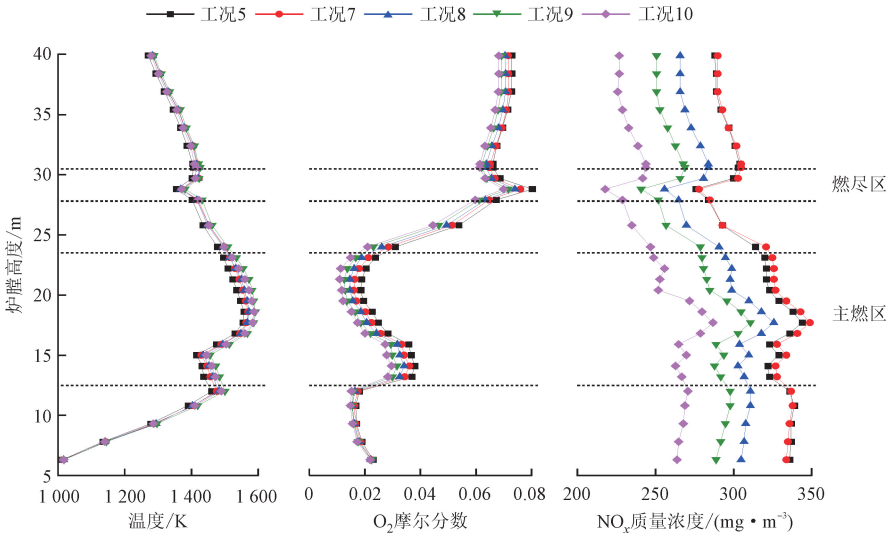


图 8 不同 H_2 共燃比下的截面平均温度和烟气组分分布

Fig. 8 Cross-sectional average temperature and flue gas composition distribution at different H_2 co-firing ratios

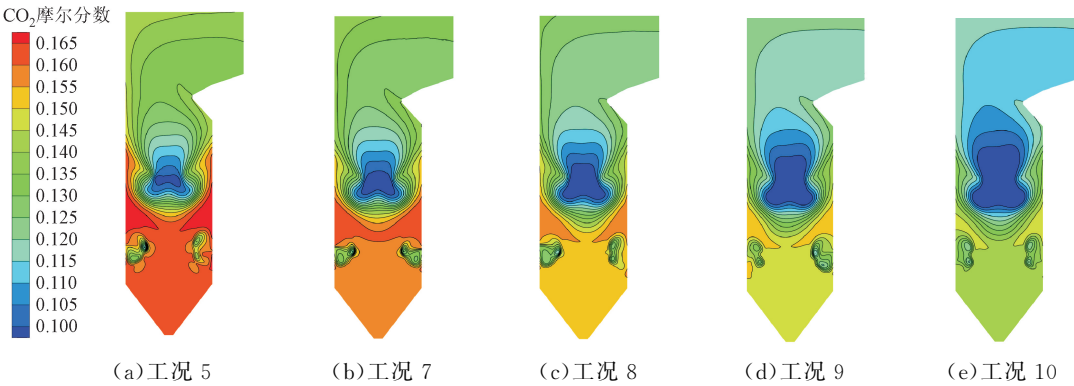


图 9 不同 H_2 共燃比下的 CO_2 分布情况

Fig. 9 Distribution of CO_2 at different H_2 co-firing ratios

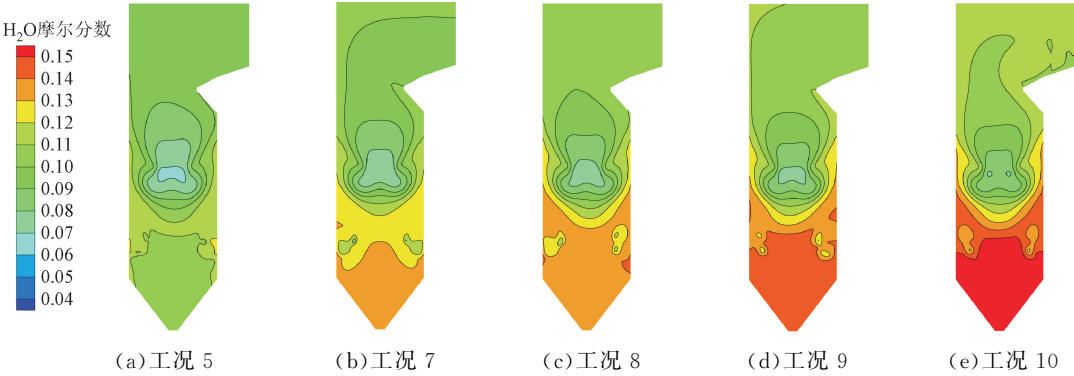


图 10 不同 H_2 共燃比下的 H_2O 分布情况

Fig. 10 Distribution of H_2O at different H_2 co-firing ratios

烟气中 H_2O 的摩尔分数的变化趋势和 CO_2 相反,随着共燃比的增加,炉内烟气中 H_2O 的摩尔分数大幅增加。当 H_2 共燃比达到 20% 时,主燃区

H_2O 摩尔分数的峰值达到 0.18,炉膛出口截面 H_2O 的平均摩尔分数为 0.116,相较于工况 5 增加了 20.8%。烟气中 CO_2 和 H_2O 摩尔分数的变化将

导致烟气的比热容发生变化,这也是导致不同共燃比下烟气温度分布情况不同的主要原因^[26-27]。煤粉燃烧后,烟气中的 SO_3 和 H_2O 的摩尔分数是影响低温腐蚀的关键因素。已有研究表明,烟气中水蒸气摩尔分数的提高会导致烟气的酸露点温度升高,因此在烟气冷却过程中更容易在设备表面形成酸性冷凝物,增加了低温腐蚀的风险^[28-29],所以需要对相关设备进行防腐处理。此外,由于 H_2 的存在将会增加相关管道设备发生氢脆的风险^[30-31],同时氢气燃烧释放大量热量可能导致燃烧器附近存在局部高温区域,这对管道设备抗氢脆性能和燃烧器耐高温性能提出了更高的要求。

由以上分析可知,加入 H_2 共燃能够进一步提升炉内速度场的均匀性,改善煤粉初期的着火条件。同时,由于投入煤量的减少也能降低 CO_2 和 NO_x 的排放,但 H_2 燃烧产生的 H_2O 在共燃比较高时对低负荷燃烧有不利影响。从提升锅炉低负荷燃烧稳定性及减少 NO_x 排放的角度出发,推荐的 H_2 共燃比为 15%。

4 结 论

本文建立了 350 MW 墙式切圆燃煤锅炉的数值模拟模型,利用 100%、45% 负荷下机组实际运行数据验证了模型的可靠性。同时,进一步对锅炉 20% 负荷工况进行了数值模拟,着重分析了燃烧器水平摆角和加入 H_2 共燃对低负荷下流场分布、燃烧稳定性及污染物排放的影响规律,得出结论如下。

(1)适当增加燃烧器水平摆角能够改善炉内流场,缓解墙式切圆燃煤锅炉 20% 负荷下高速气流冲刷水冷壁的现象,会导致煤粉初期着火延迟,火焰中心上移。此外,摆角的变化对 NO_x 的排放影响较小。水平摆角设置为 15° ,流场分布较为均匀,主燃区截面烟气最高平均温度取得最大值 1 559 K,是推荐的燃烧器偏斜角度。随着摆角增大至 20° ,流场开始变得紊乱,燃烧稳定性降低。

(2)加入 H_2 共燃能够提高炉内烟气温度水平,改善煤粉着火条件,温度场的优化也提升了流场的均匀性。共燃比为 15%,主燃区烟气平均温度取得最大值 1 592 K,相较于不掺混 H_2 提高了 34 K,有益于低负荷下的稳定燃烧。共燃比增加至 20%,燃烧产生的大量 H_2O 对炉膛起到降温作用,炉内烟气温度水平开始下降,不利于煤粉低负荷稳燃。

(3)随着 H_2 共燃比的增加, NO_x 排放相较于不加入 H_2 呈现先上升后下降的趋势。在共燃比为

5% 时,热力型 NO_x 对总排放的影响占主导作用,炉膛上部 NO_x 质量浓度为 290 mg/m^3 ,相较于不掺混 H_2 增加了 2 mg/m^3 。当共燃比大于 5% 时,燃料型 NO_x 对总排放的影响占主导作用,共燃比增加至 20%,炉膛上部 NO_x 质量浓度下降了 21.2%。

(4)加入 H_2 共燃使投入炉内的煤量减少,20% 共燃比下出口烟气中 CO_2 排放相较于不加入 H_2 降低了 18.2%,但 H_2O 摩尔分数增加了 20.8%。锅炉低负荷运行排烟温度较低,加入 H_2 共燃将导致烟气中 H_2O 摩尔分数提高,进而造成低温受热面腐蚀的问题,因此需要对相关设备进行一定的防腐处理。

参考文献:

- [1] 穆延非,史绍平,段正,等. 利用火焰推举距离判定燃煤锅炉低负荷稳燃性能的研究 [J]. 热能动力工程, 2019, 34(12): 54-61.
MU Yanfei, SHI Shaoping, DUAN Zheng, et al. Determination of stabilization performance of coal-fired boilers by using flame push distance [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(12): 54-61.
- [2] 中国电力联合会. 中电联发布《中国电力行业年度发展报告 2023》[J]. 现代建筑电气, 2023, 14(7): 67.
China Electricity Council. CEC releases《China Power Industry Annual Development Report 2023》[J]. Modern Architecture Electric, 2023, 14(7): 67.
- [3] 张殿军. 哈锅超临界锅炉技术的发展及展望 [J]. 电站系统工程, 2011, 27(1): 1-2.
ZHANG Dianjun. The development plan of HBC's supercritical boiler technology [J]. Power System Engineering, 2011, 27(1): 1-2.
- [4] 姜青松,李争起,吴少华. 哈三电厂 2008t/h 锅炉二次风反切对烟温及汽温的影响 [J]. 电站系统工程, 2003, 19(6): 15-16.
JIANG Qingsong, LI Zhengqi, WU Shaohua. Influence of arc-tangent of secondary air at flue gas/steam temperature for 2008t/h boiler [J]. Power System Engineering, 2003, 19(6): 15-16.
- [5] 吴泽君. 630 MW 四角切圆煤粉炉燃烧及 NO_x 生成过程的数值模拟 [D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [6] 田登峰. 燃烧器竖直摆角对一台 700 MWe 四角切圆锅炉燃烧过程影响的数值模拟 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [7] 杜磊. 680 MW 超临界墙式切圆锅炉燃烧数值模拟 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [8] 廖永浩,路昆,刘维岐. 600 MW 机组墙式切圆锅炉

- 燃烧特性分析[J]. 热力发电, 2014, 43(10): 51-57.
- LIAO Yonghao, LU Kun, LIU Weiqi. Numerical simulation on combustion characteristics of a 600 MW unit wall type tangentially fired boiler [J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(10): 51-57.
- [9] 李应保, 王东风. 超临界墙式切圆锅炉燃烧优化方案的仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(9): 1930-1937.
- LI Yingbao, WANG Dongfeng. Simulation analysis of combustion optimization scheme for ultra supercritical wall arrangement tangential circle boiler [J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(9): 1930-1937.
- [10] 刘敦禹, 秦明, 孙巧群, 等. 600 MW 超超临界墙式切圆锅炉燃烧过程数值模拟[J]. 热能动力工程, 2011, 26(1): 89-93.
- LIU Dunyu, QIN Ming, SUN Qiaoqun, et al. Numerical simulation of the combustion process of a 600 MW ultra-supercritical wall type tangentially-fired boiler [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2011, 26(1): 89-93.
- [11] 孙磊, 刁云鹏, 赵树龙, 等. 350 MW 超临界墙式切圆锅炉低负荷燃烧系统优化[J]. 锅炉技术, 2021, 52(4): 38-42.
- SUN Lei, DIAO Yunpeng, ZHAO Shulong, et al. Optimization of low load combustion system for 350 MW supercritical wall tangential boiler [J]. Boiler Technology, 2021, 52(4): 38-42.
- [12] 周凌宇, 刘辉, 周平, 等. 300 MW 墙式切圆锅炉水冷壁超温的数值模拟与燃烧优化[J]. 热能动力工程, 2022, 37(3): 129-135.
- ZHOU Lingyu, LIU Hui, ZHOU Ping, et al. Numerical simulation and combustion optimization on the water wall overtemperature in 300 MW wall-tangentially fired boiler [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(3): 129-135.
- [13] 袁来运, 钟文琪, 陈曦, 等. 面向深度调峰的超临界煤粉锅炉变负荷燃烧三维数值模拟[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(3): 535-541.
- YUAN Laiyun, ZHONG Wenqi, CHEN Xi, et al. Three-dimensional numerical simulation of variable load combustion of supercritical coal-fired boiler for deep peak load regulation [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2019, 49(3): 535-541.
- [14] 王嘉奇. 基于灵活性运行的墙式切圆锅炉燃烧特性研究[D]. 沈阳: 沈阳工程学院, 2020.
- [15] MA Dafu, ZHANG Shouyu, HE Xiang, et al. Combustion stability and NO_x emission characteristics of three combustion modes of pulverized coal boilers under low or ultra-low loads [J]. Applied Energy, 2024, 353: 121998.
- [16] 赵星海, 白贵生, 贺楠, 等. 不同富氧配风方式下墙式切圆锅炉低负荷燃烧特性数值模拟[J]. 热能动力工程, 2018, 33(7): 64-69.
- ZHAO Xinghai, BAI Guisheng, HE Nan, et al. Numerical simulation of the low load combustion characteristics of tangentially fired boiler with different oxygen-enriched air distributions [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 33(7): 64-69.
- [17] HODŽIĆ N, SMAJEVIĆ I, KAZAGIĆ A. Concept of co-firing coal with biomass and natural gas; on track of sustainable solution for future thermal power plants [J]. Thermal Science, 2016, 20(4): 1171-1184.
- [18] GANDHI M B, VUTHALURU R, VUTHALURU H, et al. CFD based prediction of erosion rate in large scale wall-fired boiler [J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 42: 90-100.
- [19] 孟涛, 邢小林, 张杰, 等. 配风方式对燃煤锅炉掺烧污泥影响的数值模拟研究[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(1): 263-271.
- MENG Tao, XING Xiaolin, ZHANG Jie, et al. Numerical simulation study on the effect of air distribution on combustion of coal-fired boiler blended with sludge [J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(1): 263-271.
- [20] 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.
- [21] JIN Wei, SI Fengqi, KHEIRKHAH S, et al. Numerical study on the effects of primary air ratio on ultra-low-load combustion characteristics of a 1 050 MW coal-fired boiler considering high-temperature corrosion [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 221: 119811.
- [22] SMOOT L D, SMITH P J. Chemistry and turbulence of gaseous fuels [M]//SMOOT L D, SMITH P J. Coal Combustion and Gasification. Boston, MA, USA: Springer US, 1985: 267-298.
- [23] TURNS S R. An introduction to combustion: concepts and applications [M]. Boston, MA, USA: McGraw-Hill, 2000: 559-567.
- [24] DE SOETE G G. Overall reaction rates of NO and N_2

formation from fuel nitrogen [J]. Symposium (International) on Combustion, 1975, 15(1): 1093-1102.

[25] TIAN Dengfeng, ZHONG Lijin, TAN Peng, et al. Influence of vertical burner tilt angle on the gas temperature deviation in a 700 MW low NO_x tangentially fired pulverised-coal boiler [J]. Fuel Processing Technology, 2015, 138: 616-628.

[26] WANG Chang'an, CHEN Meijing, ZHAO Pengbo, et al. Investigation on co-combustion characteristics and NO_x emissions of coal and municipal sludge in a tangentially fired boiler [J]. Fuel, 2023, 340: 127608.

[27] 邓世丰, 乐明, 邵怀爽, 等. 富氢燃气锅炉冷凝换热系统及装置的双碳重构设计和优化 [J]. 工业锅炉, 2023(1): 1-9.

DENG Shifeng, YUE Ming, SHAO Huaishuang, et al. Double carbon reconfiguration design and optimization of condensation heat exchange system and device of hydrogen-rich gas-fired boiler [J]. Industrial Boiler, 2023(1): 1-9.

[28] LI Zhimin, SUN Fengzhong, SHI Yuetao, et al. Experimental study and mechanism analysis on low temperature corrosion of coal fired boiler heating surface [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 80: 355-361.

[29] JIN Wei, SI Fengqi, CAO Yue, et al. Numerical research on ammonia-coal co-firing in a 1 050 MW coal-fired utility boiler under ultra-low load: effects of ammonia ratio and air staging condition [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 233: 121100.

[30] 刘方, 杨宏伟, 邓付洁. 掺氢天然气输送用 X65 管线钢的氢脆行为 [J]. 油气储运, 2024, 43(3): 289-295.

LIU Fang, YANG Hongwei, DENG Fujie. Hydrogen embrittlement behavior of X65 pipeline steel for transmitting hydrogen-enriched compressed natural gas [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(3): 289-295.

[31] 李鑫, 韦博鑫, 鲁仰辉, 等. 临氢环境下管线钢氢损伤机理研究进展 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2024, 44(5): 1125-1133.

LI Xin, WEI Boxin, LU Yanghui, et al. Research progress on hydrogen damage mechanism of pipeline steel in contact with hydrogen environment [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2024, 44(5): 1125-1133.

(编辑 杜秀杰)