

660 MW 超超临界二次再热燃煤锅炉 运行特性试验研究

岳峻峰¹, 孔俊俊¹, 李旭升²

(1. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 四川 自贡 643001)

摘要:针对某 660 MW 超超临界二次再热旋流燃烧锅炉投产后锅炉燃烧均衡性较差, 锅炉热效率和一、二次再热汽温偏低, NO_x 排放质量浓度偏高等问题, 通过改变 O_2 体积分数、煤粉细度、一次风量、外二次风挡板开度、异层燃烧器风量分配方式、燃尽风直流风水平摆角和燃尽风量等参数对其进行了性能优化试验研究。结果表明:通过提高 O_2 体积分数运行和磨煤机动态分离器转速, 以及合理设置外二次风配风方式、燃尽风直流风水平摆角及燃尽风风门开度, 有效降低了灰、渣碳质量分数和 CO 排放浓度, 提高了一、二次再热蒸汽温度。在各影响因素中, 同层煤粉燃烧器外二次风风门开度和燃尽风直流风水平摆角的配置, 对锅炉燃烧均衡性的影响至关重要; 运行 O_2 体积分数和燃尽风量大小对 NO_x 排放影响最大。通过综合优化调整, 锅炉性能得到明显改善, 各项主要性能参数均达到或优于设计值。

关键词:超超临界锅炉; 二次再热; 旋流燃烧器; NO_x 排放; 锅炉热效率; 汽温; 燃烧均衡

中图分类号: TM621.2 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.11.016

[引用本文格式] 岳峻峰, 孔俊俊, 李旭升. 660 MW 超超临界二次再热燃煤锅炉运行特性试验研究[J]. 热能动力工程, 2023, 38(11): 130-140. YUE Jun-feng, KONG Jun-jun, LI Xu-sheng. Experimental study on operation characteristics of a 660 MW ultra-supercritical coal-fired boiler with double reheat cycle[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(11): 130-140.

Experimental Study on Operation Characteristics of a 660 MW Ultra-supercritical Coal-fired Boiler with Double Reheat Cycle

YUE Jun-feng¹, KONG Jun-jun¹, LI Xu-sheng²

(1. Jiangsu Frontier Electric Technology Co., Ltd., Nanjing, China, Post Code: 211102;

2. DongFang Boiler Group Co. Ltd., Zigong, China, Post Code: 643001)

Abstract: Aiming at some issues of the 660 MW ultra-supercritical swirl combustion pulverized-coal boiler with double reheat cycle put into production in a power plant, such as poor combustion balance of boiler, low thermal efficiency of boiler and primary and secondary reheat steam temperature as well as high mass concentration of NO_x emission, the boiler performance optimization tests were carried out by varying the parameters of O_2 volume fraction, pulverized coal fineness, primary air flow rate, the opening of external secondary air baffle, different layer burners' air distribution, horizontal swing angle of direct current (DC) air of over-fire air (OFA) and OFA flow rate. The test results show that by increasing the operation O_2 volume fraction and the rotating speed of the dynamic separator of the coal mill, and setting a reasonable external secondary air distribution mode, the horizontal swing angle of the DC air of OFA and the opening of OFA nozzle, the ash and slag carbon mass fraction and CO emission concentration can be effectively reduced, and the primary and secondary reheat steam temperatures can be increased. Among the various influence factors, the configurations of opening of external secondary air nozzle of pulverized-coal burner on the same layer and the horizontal swing angle of the DC air of OFA have a significant im-

pact on the combustion balance of the boiler; the operation O_2 volume fraction and OFA flow rate are the most sensitive to NO_x emission. Through the comprehensive optimization and adjustment, the boiler performance is significantly improved, and its main performance parameters are achieved or superior to the design values.

Key words: ultra-supercritical boiler, double reheat cycle, swirl burner, NO_x emissions, thermal efficiency of boiler, steam temperature, combustion balance

引 言

近年来,清洁能源得以快速发展。但是,大量新能源机组接入也对电网运行带来巨大挑战^[1-3]。而储能技术又在短期内难以满足电网的平衡需求。因此,在未来一定时期,煤电仍是电力稳定供应的基石^[4],高效低污染利用煤电也成为摆在国人面前的重要课题^[5]。二次再热作为一种洁净煤发电技术可使机组热效率较超超临界一次再热机组进一步提高,进而在相同参数下降低烟气污染物排放量,是未来我国火电机组发展的重要方向^[6-11]。

在此背景下,国内三大动力集团开发、生产了具有自主知识产权的超超临界二次再热机组,使我国大容量超超临界二次再热机组发电技术实现重大突破。然而,由于对超超临界二次再热机组特性掌握不足,部分投产后的超超临界二次再热机组运行效果欠佳,出现了诸如锅炉热效率和蒸汽参数偏低及水冷壁高温腐蚀等影响锅炉安全高效运行的问题。

针对这些问题,国内科研机构也做了相关研究。张恩先等人^[9]研究了 1 000 MW 超超临界二次再热锅炉汽温运行特性。岳峻峰等人^[10]进行了 1 000 MW 超超临界二次再热锅炉降低水冷壁高温腐蚀的试验研究。刘衍卉等人^[12]进行了 1 000 MW 超超临界二次再热锅炉优化运行试验研究。陈辉等人^[13]对 1 000 MW 超超临界二次再热锅炉进行了掺烧高硫煤的研究。于汭民^[14]研究了二次再热锅炉运行特性,并对再热汽温进行了调节优化。董亮等人^[15]对百万 π 型二次再热双切圆直流燃烧锅炉再热器壁温偏差进行了调整。叶青等人^[16]研究了超超临界二次再热锅炉尾部 3 烟道挡板调整对汽温动态特性的影响。

已有文献研究表明,当前对二次再热锅炉的运行优化研究多集中在直流燃烧锅炉,或为塔式炉或为 π 型布置,而对二次再热旋流燃烧锅炉的燃烧优化鲜有涉及。因此,研究并掌握超超临界二次再热

机组旋流燃烧锅炉的运行特性显得尤为必要。

本文以东方锅炉厂设计生产的某 660 MW 超超临界二次再热旋流燃烧锅炉为对象,针对投产后出现的锅炉热效率和蒸汽参数偏低问题,通过单因素轮换法^[17]对其进行燃烧优化调整研究,在确保锅炉出口低 NO_x 排放的同时,又实现了二次再热锅炉的高效运行。研究结果可为同类型超超临界二次再热机组锅炉提供有益的技术参考。

1 研究对象

1.1 设备概述

试验对象为东方锅炉厂设计制造的 DG1785.49/32.45-II14 型超超临界参数二次再热 π 型直流炉,表 1 为设计参数表。

表 1 设计参数
Tab.1 Design parameters

参数	最大连续出力	额定出力
过热蒸汽流量/ $t \cdot h^{-1}$	1 785.49	1 733.48
过热蒸汽温度/ $^{\circ}C$	605	605
过热蒸汽压力/ MPa	32.45	32.36
一次再热器出口蒸汽温度/ $^{\circ}C$	623	623
二次再热器出口蒸汽温度/ $^{\circ}C$	623	623
给水温度/ $^{\circ}C$	314	314
省煤器出口过量空气系数	1.16	1.16
空气预热器进口烟温/ $^{\circ}C$	372	371
空气预热器出口烟温(修正)/ $^{\circ}C$	118	118
NO_x 排放浓度/ $mg \cdot m^{-3}$	180	—
$q_2/\%$	4.71	4.72
$q_3/\%$	0	0
$q_4/\%$	0.25	0.25
计算热效率/ $\%$	94.77	94.76
保证热效率/ $\%$	—	94.65

注: q_2 为排烟热损失; q_3 为化学不完全燃烧热损失; q_4 为机械未完全燃烧热损失。

锅炉尾部设计 3 烟道结构以调节再热汽温,燃烧方式为前后墙对冲燃烧。前、后墙各布置 3 层外浓内淡型低 NO_x 旋流煤粉燃烧器,每层 6 只。燃烧

器上方为 2 层燃尽风喷口,每层 6 只。燃尽风中心和外部区域分别为直流和旋转气流,以实现气流的穿透性和扩散性。每层主燃烧器靠侧墙位置设置贴壁风喷口以预防水冷壁高温腐蚀。

表 2 煤质分析
Tab.2 Quality analysis of coal

参 数	设计煤种	大矿高热煤	张北矿煤	神华华东煤	高灰熔点神华煤
收到基碳 C _{ar} /%	54.80	52.55	57.46	54.52	57.66
收到基氢 H _{ar} /%	3.88	3.51	3.84	3.62	3.60
收到基氧 O _{ar} /%	7.16	6.91	6.95	7.42	8.62
收到基氮 N _{ar} /%	0.91	0.93	0.97	0.96	0.95
收到基硫 S _{t,ar} /%	0.70	0.58	0.51	0.45	0.58
全水分 W _t /%	8.25	6.80	6.00	6.80	14.00
空干基水分 W _{ad} /%	2.20	1.39	0.95	1.36	3.95
收到基灰分 A _{ar} /%	24.30	28.72	24.27	26.23	14.59
干燥无灰基挥发分 V _{daf} /%	38.64	40.66	41.02	41.14	36.18
收到基低位发热量 Q _{net,ar} /MJ·kg ⁻¹	21.43	20.47	22.60	21.25	22.11

2 试验方法

2.1 测点布置及试验方法

试验研究参照标准 ASME PTC 4.1 执行。其中,空气预热器进、出口烟气温度按等截面面积网格法测试,测量元件为经校验合格的 I 级精度 T 型热电偶,温度信号接入 IMP 分散式数据采集系统记录显示。空气预热器出口和省煤器出口烟气 O₂ 体积分数、CO 体积分数也均按等截面面积网格法测试。采集到的烟气经前处理装置清洁、除湿、冷却后接入 ROSEMOUNT 烟气分析仪进行分析。原煤取自给煤机上方落煤管,炉渣来自冷渣器排渣,飞灰则在尾部烟道通过等速取样方式获取。其他参数均来自运行数据。

2.2 试验内容

试验工况为额定负荷工况。试验研究内容主要有基准工况试验、变运行 O₂ 体积分数试验、变煤粉细度试验、变一次风量试验、变外二次风挡板开度试验、变异层燃烧器风量分配方式试验、变燃尽风直流风水平摆角试验、变燃尽风风量试验等,最后进行了优化工况试验。

3 试验分析

3.1 基准工况试验

基准工况试验中,配风方式为习惯配风,运行

1.2 燃料特性

煤质分析见表 2。试验煤种均为烟煤、混煤,其中,大矿高热煤、神华华东煤与设计煤种煤质特性接近。

O₂ 体积分数为 2.45%,上、下层燃尽风门开度为 32% 和 60%。基准工况试验数据结果如表 3 所示。表中数据显示,锅炉主蒸汽、一次再热蒸汽、二次再热蒸汽温度均未达到设计值,NO_x 排放质量浓度也高于设计值,锅炉热效率 93.15%,低于锅炉厂保证值。蒸汽参数未达设计值,原因是锅炉高温过热器、一次高温再热器、二次高温再热器局部管屏温度偏高限制了整体汽温,这与燃烧不均衡有关。

表 3 基准试验数据
Tab.3 Benchmark test data

参 数	数值
基准温度/℃	34.3
运行 O ₂ 体积分数/%	2.45
主蒸汽温度/℃	590.2
一次再热蒸汽温度/℃	609.4
二次再热蒸汽温度/℃	602.0
空气预热器入口烟温/℃	359.5
实测/修正后排烟温度/℃	141.5/132.6
飞灰/炉渣碳质量分数/%	1.74/4.37
空气预热器出口 φ(CO)/μL·L ⁻¹	1 266
脱硝装置进口 NO _x 排放质量浓度/mg·m ⁻³	222
q ₂ /%	4.95
q ₃ /%	0.48
q ₄ /%	0.97
锅炉热效率/%	93.15

图 1 显示的是沿省煤器出口宽度方向断面 O_2 浓度分布和 CO 浓度分布不均衡,这一偏差情况也进一步佐证了锅炉的不均衡燃烧状态。燃烧不均衡也是 NO_x 排放质量浓度高于设计值的主要原因。锅炉热效率低主要有 3 个原因:(1) 排烟 CO 体积浓度高,引起的 q_3 为 0.48%,远高于设计值;(2) 炉渣、飞灰碳质量分数偏高,为 4.37% 和 1.74%,导致 q_4 高达 0.97%;(3) 在空预器进口烟气温度比设计值低的情况下,修正后的排烟温度仍比设计值高 14.6℃,主要是制粉系统掺冷风量大且冷风门特性较差所致。针对以上问题,开展有针对性的燃烧优化试验研究。

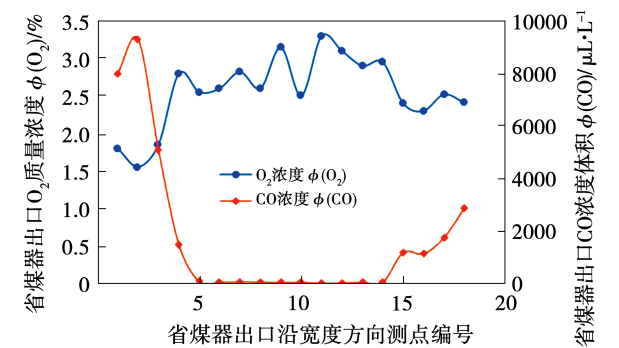


图 1 调整前省煤器出口 O_2 浓度和 CO 浓度分布
Fig. 1 Distribution of O_2 and CO concentrations at the outlet of economizer before adjustment

3.2 运行 O_2 体积分数对锅炉性能的影响

660 MW 负荷试验结果如图 2、图 3 所示。3 个工况下运行 O_2 体积分数分别为 2.5%、3.0% 和 3.5%。

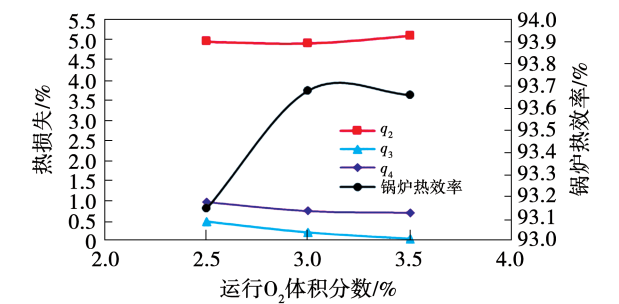


图 2 O_2 体积分数对各项热损失及锅炉热效率的影响
Fig. 2 Influence of O_2 volume fraction on various heat losses and boiler thermal efficiencies

由图 2 可知,随着 O_2 体积分数增加,锅炉燃尽效果转好, q_3 、 q_4 逐渐下降, q_2 则因烟气量的增加而不断增加。当运行 O_2 体积分数在 3.0% 左右时, q_2 ,

q_3 、 q_4 热损失降到最低,锅炉热效率也最高,此后随着行 O_2 体积分数的继续增加,锅炉热效率则逐渐减小。

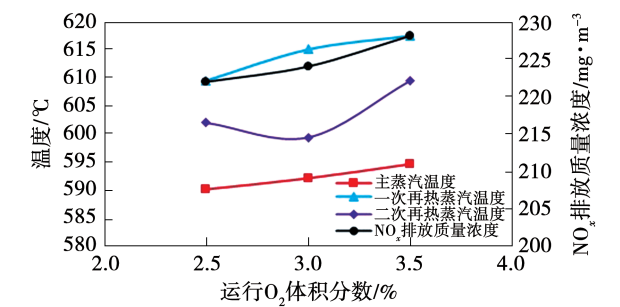


图 3 O_2 体积分数对 NO_x 排放质量浓度和蒸汽温度的影响

Fig. 3 Influence of O_2 volume fraction on NO_x emission mass concentration and steam temperature

由图 3 可知,随着 O_2 体积分数增加, NO_x 排放质量浓度随之升高。一般而言,随着 O_2 体积分数的增加,燃料型 NO_x 和热力型 NO_x 将大量生成^[18-22], NO_x 排放质量浓度会增加。 NO_x 排放质量浓度增加不多,除了因为试验煤种 N 元素含量与设计煤种接近外,主要与燃烧器的分级配风设计有关。新型的一次风外浓内淡布置,稳焰齿环及一次风出口的宽厚度和扩锥设计均和稳燃有关。实现锅炉低 NO_x 排放的主要因素是燃烧器本身内二次风与外二次风在不同时间喷入形成的径向分级燃烧、炉膛靠侧墙位置的贴壁风引起的横向分级燃烧以及主燃烧器上方布置的燃尽风带来的垂直方向分级燃烧。3 种模式的分级燃烧综合运用与一次风的稳燃设计相结合,在保证锅炉燃烧稳定的同时,也抑制了 NO_x 的生成。运行 O_2 体积分数增加形成的烟气量增长也加强了对流受热面的换热能力,因此,主蒸汽、一次再热蒸汽、二次再热蒸汽温度均有不同程度的升高。

综上分析,660 MW 负荷工况下,锅炉运行 O_2 体积分数宜设定在 3.0% ~ 3.2% 区间。

3.3 煤粉细度对锅炉性能的影响

新建大型燃煤发电锅炉多配备正压直吹式制粉系统,并设计有动态分离器,通过动态分离器转速升降调节煤粉细度。由于煤粉细度无法准确在线测量,因此,通常以动态分离器转速或变频器频率的高

低来判断煤粉粗细。动态分离器转速或变频器频率越高意味着煤粉越细,反之越粗。保持锅炉参数稳定,在 660 MW 负荷下对煤粉细度的影响进行了试验研究,3 个试验工况对应的动态分离器变频器转速分别为 19.2、22.0 和 24.5 Hz。

煤粉细度对锅炉燃烧效果的影响如图 4、图 5 所示。

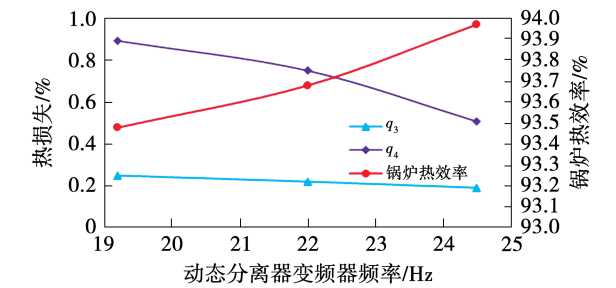


图 4 煤粉细度对各项热损失及锅炉热效率的影响
Fig.4 Influence of pulverized-coal fineness on various heat losses and boiler efficiencies

由图 4 可知,动态分离器变频器频率增加,分离器快速的离心旋转增强了煤粉的分离效率^[23],煤粉细度减小,煤粉接触比表面积增加,焦炭粒子较易燃尽^[18],飞灰、炉渣含碳质量分数降低。燃烧速率、效率的提升也促使可燃气体的 CO 加速燃尽, q_3 、 q_4 进一步减小,使得锅炉热效率提升。

由图 5 可知, NO_x 排放质量浓度随煤粉细度的减小而下降,这主要是缘于细煤粉对 NO_x 存在还原作用^[19]。当动态分离器变频器转速升高即煤粉变细时,主蒸汽和一次再热蒸汽、二次再热蒸汽温度均有所下降。煤粉变细,煤粉更易燃烧,火焰行程缩短,火焰中心下移,炉膛上部释放的热量也相应减少,因此蒸汽温度随之降低。当变频器转速升至 22 Hz 以后,这种影响更加明显。主要是此时高温过热器和一次再热蒸汽两侧出现了较大的蒸汽温度偏差,一方面与锅炉长期高负荷运行形成的积灰有关,另一方面也可能是动态分离器的特性所致,变频器频率增加后,煤粉分配均匀性没有显著改善。

因此,从兼顾锅炉热效率、蒸汽温度和 NO_x 排放质量浓度的角度出发,建议磨煤机动态分离器频率置于 22 Hz 左右。

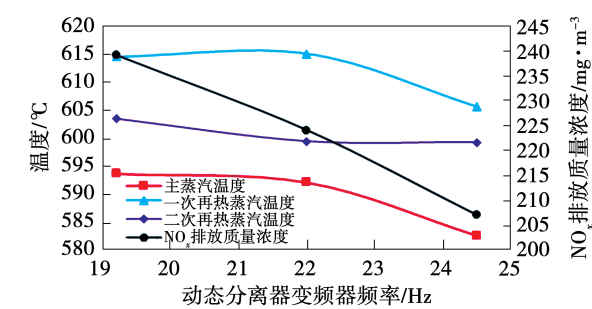


图 5 煤粉细度对 NO_x 排放质量浓度和蒸汽温度的影响
Fig.5 Influence of pulverized-coal fineness on NO_x emission mass concentration and steam temperature

3.4 一次风量对锅炉性能的影响

保持锅炉参数稳定,在 660 MW 负荷下对磨煤机进口一次风量的影响进行试验研究,两个试验工况下,磨煤机进口一次风量分别维持在 102 t/h 和 86 t/h 左右,试验结果如表 4 所示。

表 4 一次风量调整前后试验结果
Tab.4 Test results before and after flow rate adjustment of primary air

参 数	工况 1	工况 2
磨煤机进口一次风量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	102	86
一次风压/kPa	10.9	10.55
主蒸汽温度/℃	589.0	587.7
一次再热蒸汽温度/℃	605.0	606.8
二次再热蒸汽温度/℃	601.0	602.4
空气预热器出口 $\phi(\text{CO})/\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$	333	155
飞灰碳质量分数/%	1.14	1.78
修正后排烟温度/℃	129.4	124.9
脱硝装置进口 NO_x 排放质量浓度/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	256	222
q_2 /%	5.01	4.71
q_3 /%	0.13	0.06
q_4 /%	0.59	0.83
锅炉热效率/%	93.82	93.87

由表 4 可知,减小一次风量时飞灰含碳质量分数有小幅上升。通常来说,一次风量减少相当于变相提高了煤粉浓度,降低了煤粉燃烧所需的着火,从而有利于燃烧。但是,一次风量减少会降低一次风

的刚性,弱化一次风的卷吸能力,从而导致炉内扰动变弱、锅炉燃尽效果变差,且伴随着一次风量减少,磨煤机电流也会升高。燃料不完全燃烧程度增加,也与燃烧器本体采用径向分级燃烧设计有关,一次风量减小使煤粉早期燃烧更加欠氧,一、二次风比率的变化相当于强化了分级燃烧,因此,燃烧效果变差。对于排烟温度,一次风量降低带来的影响则是正面的,制粉系统掺冷风量减少,增加了经过空气预热器的空气流量,提高了其对空气预热器的冷却能力,从而使排烟温度下降。总体上,一次风量降低导致的排烟温度降幅略大,故锅炉热效率有小幅提升。

炉膛出口 NO_x 排放质量浓度则随一次风量的减少而下降。如前所述,一次风量降低会导致煤粉浓度相应提高,煤粉着火点进而下降,从而增加 NO_x 的生成。但是,一次风量减少实际上也起到加强分级燃烧的效果,而这又超越了煤粉着火点下降带来的影响。因此, NO_x 排放质量浓度下降。一次风量对蒸汽温度参数的影响则较小。主要是与旋流燃烧器燃烧原理有关,不像直流燃烧器需要彼此相互支撑,旋流燃烧器运行的独立性较强,彼此可以独立形成各自的动力场,因此每个旋流燃烧器的影响只在局部范围,一次风量的适度增减不至引起蒸汽温度的显著变化。

综合分析,660 MW 负荷工况下,根据实际情况,为了保证磨煤机对煤种变化的适应性,避免磨煤机堵塞及一次风压波动,一次风量又不宜过低,建议每台磨煤机一次风量控制在 94 t/h 左右。

3.5 同层煤粉燃烧器外二次风门开度对锅炉性能的影响

基准试验显示,锅炉省煤器出口两侧 O_2 浓度低 CO 浓度高,中间区域 O_2 浓度高、 CO 浓度低,说明炉内 O_2 浓度分布不均匀、燃烧不均衡。对于该型旋流燃烧器,外二次风量占燃烧器区域风量比重较大,且随着外二次风门开度关小,外二次风量减少、旋流强度增强。外二次风门开度开大,结果则相反。因此,有必要对旋流燃烧器外二次风量的影响进行研究。根据旋流燃烧器风箱静压从两侧到中间逐渐升高的原理^[5,24],调整方法为“开两头关中间”配风策略。

调整前,各层外二次风门开度均为 50°。调整过程中,先对同层单侧墙 6 只燃烧器进行编号。其中,1 号和 6 号燃烧器位于两边最外侧,2 号和 5 号燃烧器位于次外侧;3 号和 4 号燃烧器,位置居中。燃烧位置布置编号与燃尽风相同,具体见图 7。调整后,1/6,2/5,3/4 号燃烧器外二次风开度分别置于 60°~70°,40°~45°,30°~40°。以在省煤器出口沿炉膛宽度方向布置的 6 个运行氧表测量数据为参考,调整效果显著。调整前后 6 个运行氧表测量得到的省煤器出口 O_2 浓度分布如图 6 所示。

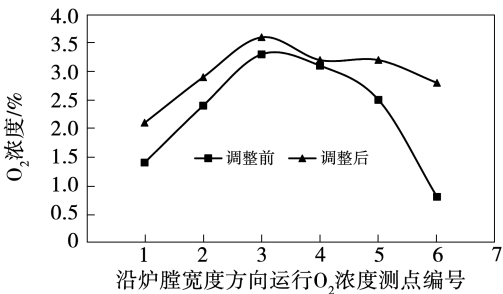


图 6 调整前后省煤器出口 O_2 浓度分布
Fig. 6 O_2 concentration distribution at economizer outlet before and after adjustment

“开两头关中间”配风方式,即是通过开大静压较低的两侧燃烧器风门开度,关小静压较高的中间区域燃烧器风门开度,以实现进入同层各燃烧器的二次风量的均衡。炉膛两侧外二次风量增加,旋流强度降低,二次风射流将更远,更好地实现了“风包火”的功能,其对内侧一次风气流的卷吸使煤、焦粒子降低向两侧墙区域扩散,两侧墙附近的 O_2 浓度消耗得以弱化。因此,通过合理配风,改善了沿炉膛宽度方向 O_2 浓度分布的均匀性^[21]。沿炉膛宽度方向缺氧区域减小甚至消失,各只旋流燃烧器热负荷变得更加均匀,炉内燃烧更加均衡,从而提高了煤、焦粒子燃尽率,弱化了炉膛两侧水冷壁还原性氛围。局部高温区域的减少降低了热力型 NO_x 的生成,燃烧均衡的改善也降低了受热面壁温偏差,从而有助于提高锅炉主蒸汽、一次再热蒸汽和二次再热蒸汽温度。

因此,同层旋流燃烧器外二次风门不宜采取开度一致的运行模式,应采取“开两头关中间”配风方式。

3.6 异层煤粉燃烧器二次风配风方式对锅炉性能的影响

针对锅炉运行中出现的问题,通过改变异层燃烧器风量分配的方式来研究其对锅炉性能的影响。配风方式分别为均等配风、正塔配风和束腰配风,具体数据见表 5。

表 5 异层煤粉燃烧器配风方式变化试验结果
Tab.5 Test results obtained at air flow rate distribution characteristics of different layer pulverized-coal burner

参数	均等	正塔	束腰
上/中/下风门开度/%	70/70/70	65/70/80	78/63/75
主蒸汽温度/℃	594.4	593.5	595.7
一次再热蒸汽温度/℃	612.1	606.4	608.1
二次再热蒸汽温度/℃	611.1	607.3	610.5
空气预热器出口 $\phi(\text{CO})/$ $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$	1 076	400	150
飞灰碳质量分数/%	1.47	0.83	1.20
炉渣碳质量分数/%	3.07	5.62	0.64
修正后排烟温度/℃	122.5	123.6	122.9
脱硝装置进口 NO_x 排放 质量浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	196	193	206
$q_2/\%$	4.86	5.02	4.96
$q_3/\%$	0.44	0.17	0.06
$q_4/\%$	0.36	0.28	0.25
锅炉热效率/%	94.00	94.22	94.41

试验结果表明,在维持运行 O_2 体积分数和燃尽风比率大体不变的前提下,采用束腰配风方式的锅炉热效率最高,正塔配风次之,均等配风最低。主要原因是采用束腰配风方式,一方面下部风量增加使下层燃烧器的卷吸和燃烧能力得以加强,同时又对上部未燃尽坠落碳粒子起到了浮托作用,有助于炉渣燃尽,炉渣碳质量分数下降^[24];另一方面,上层燃烧器二次风开大,补充了后期燃烧所需氧量,有助于煤粉燃尽,抑制了飞灰碳质量分数升高,但也导致炉膛出口 NO_x 排放质量浓度小幅升高。中间层煤粉燃烧器二次风的减少并没有对锅炉燃烧产生不利影响,反而起到平衡通风的作用。该层燃烧器燃烧能力的弱化,被上、下层煤粉燃烧器二次风的增加而补充、抵消。总体上,束腰配风方式下锅炉的燃烧效果最好。与正塔配风相比,由于均等配风排烟 CO 体积分数偏高而锅炉热效率略低。

由于各只旋流燃烧器运行时具有相对独立性,因此理论上只要保持各只旋流燃烧器处于较佳燃烧状态,那么锅炉的燃烧工况也将处于较佳运行水平。但是,660 MW 超超临界二次再热机组锅炉一般配备 6 套制粉系统,采用 5 用 1 备运行方式。而对于前后墙对冲旋流燃烧锅炉,上下层旋流燃烧器的旋流方向互为相反方向,以实现互相“消旋”的功能。额定负荷运行时,有一层燃烧器将独立运行而无“消旋搭档”,看似均等的配风则无助于“消旋”,以致燃烧失衡。另外,均等配风工况下运行 O_2 体积分数相对较低,此时主燃烧器整体上处于欠氧燃烧状态,各层主燃烧器相互支撑不足。虽然正塔配风在主燃烧区为下大上小供风模式,但在包含燃尽风在内的整个燃烧区,整体上又是束腰配风方式。因此,正塔配风燃烧效果居中。对于蒸汽参数的影响,均等配风则略占优势。总体而言,几种配风方式的影响均不是特别显著。综合考虑,在异层煤粉燃烧器中二次风配风方式宜采用束腰配风。

3.7 燃尽风直流风水平摆角的影响

燃尽风由两股相互独立的气流组成,其中心的直流风速度高、刚性强,能穿透上升烟气进入炉膛中部进行扰动、燃烧,外圈旋转气流离开燃尽风喷嘴后向四周扩散,与上升烟气混合补充前后墙水冷壁附近燃烧所需空气。两股气流相互配合,既实现了煤粉后期燃尽,又能达到预防高温腐蚀的目的。

试验中,对上层燃尽风之直流风进行水平摆动。各喷口从原有 0° 向两边交叉对摆至 $\pm 20^\circ$,摆动示意如图 7 所示,试验结果见表 6。

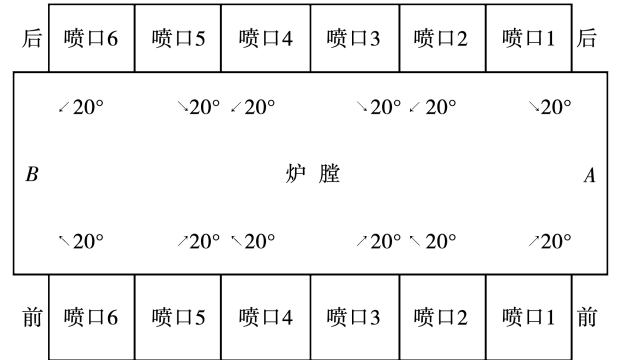


图 7 燃尽风之直流风喷口水平摆动示意图
Fig.7 Schematic diagram of horizontal swing of direct current air nozzle of over-fire air

表 6 燃尽风之直流风喷口水平摆动试验数据

Tab.6 Test data of horizontal swing of direct current air nozzle of over-fire air

参 数	0°	交叉对摆 20°
主蒸汽温度/℃	595.9	592.2
一次再热蒸汽温度/℃	607.6	610.9
二次再热蒸汽温度/℃	610.5	609.3
飞灰碳质量分数/%	1.20	<1.0

上层燃尽风直流风交叉对摆后,再热蒸汽温度有所提高,飞灰碳质量分数稳定在 1.0% 以下,锅炉运行特性得到改善。一方面,通过改变靠近水冷壁两侧墙上层燃尽风之直流风向两侧喷射,刚性强、流速高的直流风穿透烟气后到达两侧墙附近,增加了两侧墙附近烟气的 O₂ 含量,促进了大量未燃尽气体 CO 的燃烧,降低了两侧墙附近烟气 CO 体积浓度,减缓了侧墙水冷壁的高温腐蚀。另一方面,通过上层燃尽风的直流风喷口的成组交叉对摆,除靠近两侧墙的燃尽风喷嘴外,其他燃尽风的直流风均向炉膛中部穿透,且相邻两组燃尽风燃烧器气流互相激荡,增强了炉内扰动和燃烧强度,延长了煤焦粒子在炉内的停留时间,促进煤粉后期燃烧,提高了煤粉燃尽率,同时也使烟气更加均匀,提高再热蒸汽温度的同时,也降低了热力型 NO_x 的生成。

3.8 燃尽风量对锅炉性能的影响

燃尽风量调整试验共 3 个工况。调整工况 1、调整工况 2 和调整工况 3 中的上、下层燃尽风风门开度分别为 35/55%、55/65% 和 80/60%,且调整工况 1 和调整工况 2 的燃尽风风门开度均保持上小下大,调整工况 3 则为上大下小,结果如表 7 所示。

试验结果表明,燃尽风风门在工况 1 和工况 2 上小下大的调整过程中,随着燃尽风量的增加,NO_x 排放质量浓度降低,灰渣平均碳质量分数也随之走低,飞灰碳质量分数维持在较低水平。NO_x 排放质量浓度下降是由于锅炉燃烧系统在炉膛水平、垂直方向上设计为深度分级燃烧,燃尽风比率提高后,将导致主燃烧区域过量空气系数降低,燃料型 NO_x 的生成随之减少;燃尽风比率的增加,又导致主燃烧区的燃烧强度下降,减少了热力型 NO_x 的生成,同时

燃尽风对炉内 NO_x 又发挥着稀释的作用^[24-25];此外,燃尽风比率增加也增强了燃尽风喷入前还原空间的还原性氛围,来自主燃烧区的氮氧化合物被大量还原^[5],几方面的多重影响致使 NO_x 排放质量浓度随燃尽风比率的增加而得以下降。上层燃尽风直流风的交叉对摆,则对煤粉的后期扰动、均衡燃烧发挥了作用,而燃尽风量的增加,又及时补充了未燃尽组分继续燃烧所需的空气,灰渣平均碳质量分数得以维持在较低水平。

表 7 燃尽风量调整工况及试验结果试验数据

Tab.7 Test results of over-fire air under different adjustment conditions

参 数	工况 1	工况 2	工况 3
上层燃尽风风门开度/%	35	55	80
下层燃尽风风门开度/%	55	65	60
运行 O ₂ 体积分数/%	3.25	3.28	3.01
过热蒸汽温度/℃	594.8	590.4	599.9
一次再热蒸汽温度/℃	617.2	611.8	615.8
二次再热蒸汽温度/℃	611.3	611.3	608.5
空气预热器出口 φ(CO)/(μL·L ⁻¹)	125	180	100
脱硝装置进口 NO _x	201	192	203
排放质量浓度/mg·m ⁻³			
飞灰碳质量分数/%	1.05	0.95	1.30
炉渣碳质量分数/%	3.40	1.00	3.40
修正后排烟温度/℃	120.2	119.8	121.2
q ₂ /%	4.84	4.74	4.69
q ₃ /%	0.05	0.07	0.04
q ₄ /%	0.28	0.21	0.34
锅炉热效率/%	94.47	94.62	94.55

调整工况 3 在调整工况 2 的基础上开大燃尽风风门开度,且上层燃尽风风门开度较下层更大,灰渣平均碳质量分数略有反弹,NO_x 排放质量浓度略有波动。这说明,燃尽风的继续增加使主燃烧区域更加缺氧,其导致的煤焦粒子不完全燃烧程度无法在后期大量供氧中得以弥补。NO_x 排放质量浓度有所起伏,则为煤质变化和工况波动所致。

总体而言,在燃尽风量增加过程中,燃尽风在炉膛宽度和深度方向的扰动迟滞了烟气在炉内的停

留,起到了压火作用,一、二次再热汽温受到了抑制。

3.9 优化后试验

调整后省煤器出口 O_2 浓度和 CO 浓度分布,如图 8 所示,锅炉燃烧更加均衡,省煤器出口 O_2 浓度偏低值较少, CO 浓度偏高值消失,飞灰、炉渣碳质量分数和空气预热器出口 CO 浓度均有效下降。额定负荷工况下,飞灰碳质量分数稳定在 1.0% 以下,炉渣碳质量分数稳定在 2.9% 左右,空气预热器出口 CO 浓度稳定在 $130\ \mu\text{L/L}$ 左右。对制粉系统风门消缺和开度优化后,排烟温度也得到有效降低。优化后,修正后锅炉热效率为 94.80%,比基准工况提高 1.65%,达到设计值要求; NO_x 排放质量浓度下降 19.4%,为 $179\ \text{mg/m}^3$,满足设计值要求。过热蒸汽、一次再热蒸汽、二次再热蒸汽温度分别为 605,623.4 和 $623.3\ ^\circ\text{C}$,达到设计值要求。

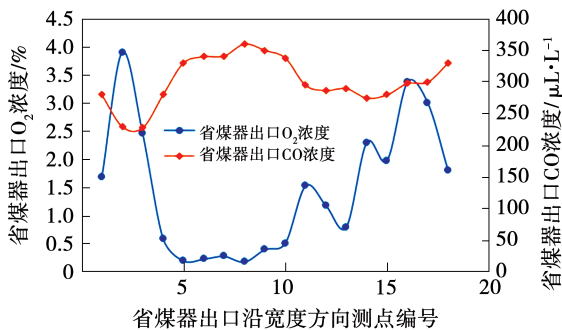


图 8 调整后省煤器出口 O_2 浓度和 CO 浓度分布

Fig. 8 Distribution of O_2 and CO concentrations at the outlet of economizer after adjustment

4 结 论

(1) 通过优化调整,锅炉各项主要性能指标明显提升,均达到设计要求。

(2) 在各影响因素中,运行 O_2 体积分数和燃尽风量大小对 NO_x 排放最为敏感;同层煤粉燃烧器外二次风风门开度和燃尽风直流风水平摆角的配置,则对锅炉燃烧均衡性影响显著。

(3) 通过提高运行 O_2 体积分数、提高磨煤机动态分离器转速、对燃尽风中的直流风水平摆角进行交叉对摆、设置外二次风为“开两头关中间”配风方式、调整适度的燃尽风风门开度,均可有效降低灰、

渣碳质量分数和 CO 排放浓度,提高一、二次再热蒸汽温度。

(4) 根据燃烧器特性,机组在额定负荷,运行 O_2 体积分数宜控制在 3.0% ~ 3.2%。

参考文献:

- [1] 文孝强,许 洋. 基于 EMD 分解的风力机功率特性分析与预测建模[J]. 太阳能学报,2021,42(11):293-298.
WEN Xiao-qiang, XU Yang. Analysis and prediction modeling of wind power characteristics based on EMD decomposition[J]. Acta Energaie Solaris Sinica,2021,42(11):293-298.
- [2] 杨丽薇,高晓清,蒋俊霞,等. 基于小波变换与神经网络的光伏电站短期功率预测[J]. 太阳能学报,2020,41(7):152-157.
YANG Li-wei, GAO Xiao-qing, JIANG Jun-xia, et al. Short-term photovoltaic output power prediction based on wavelet transform and neural network [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2020, 41(7):152-157.
- [3] 黄 畅,张 攀,王卫良,等. 燃煤发电产业升级支撑我国节能减排与碳中和国家战略[J]. 热力发电,2021,50(4):1-6.
HUANG Chang,ZHANG Pan,WANG Wei-liang, et al. The upgradation of coal-fired power generation industry supports China's energy conservation, emission reduction and carbon neutrality [J]. Thermal Power Generation,2021,50(4):1-6.
- [4] 唐 健,仇 敏. “双碳”背景下浙江省煤电转型应对措施及路径建议[J]. 上海节能,2022(3):260-264.
TANG Jian, QIU Min. Countermeasures and path suggestions for thermal power evolution in Zhejiang province under "dual carbon" background [J]. Shanghai Energy Conservation, 2022 (3): 260-264.
- [5] 岳峻峰,秦 鹏,邹 磊,等. 600 MW 超临界旋流燃烧烟煤锅炉 NO_x 排放特性试验[J]. 中国电力,2012,45(3):62-67.
YUE Jun-feng, QIN Peng, ZOU Lei, et al. Experimental study on the characteristics of NO_x emissions from 600 MW supercritical bituminous coal fired boiler with swirl burner [J]. Electric Power, 2012,45(3):62-67.
- [6] 殷亚宁. 二次再热超超临界机组应用现状及发展[J]. 电站系统工程,2013,29(2):37-38.
YIN Ya-ning. Application status and development of USC unit with double reheat cycles [J]. Power System Engineering,2013,29(2):37-38.
- [7] 杨新民,吴恒运,茅义军. 超超临界二次再热机组再热汽温的控制[J]. 中国电力,2016,49(1):19-22.
YANG Xin-min, WU Heng-yun, MAO Yi-jun. Reheat steam tem-

- perature control of an ultra supercritical unit with second reheat cycle[J]. Electric Power, 2016, 49(1): 19–22.
- [8] 赵世飞,徐 钢,王春兰,等. 一种普适性电厂节能技术:原煤低温预干燥[J]. 动力工程学报, 2016, 36(6): 486–492.
- ZHAO Shi-fei, XU Gang, WANG Chun-lan, et al. A universal energy-saving technology in coal-fired power plant: low-temperature coal pre-drying[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2016, 36(6): 486–492.
- [9] 张恩先,岳峻峰,王亚欧,等. 1 000 MW 超超临界二次再热锅炉汽温运行特性试验研究[J]. 热能动力工程, 2020, 35(7): 114–122.
- ZANG En-xian, YUE Jun-feng, WANG Ya-ou, et al. Experimental study on steam temperature operation characteristics of a 1 000 MW ultra supercritical coal-fired boiler with double reheat cycles[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(7): 114–122.
- [10] 岳峻峰,邹 磊,张恩先,等. 1 000 MW 超超临界二次再热锅炉降低水冷壁高温腐蚀影响的试验研究[J]. 动力工程学报, 2018, 38(10): 773–781.
- YUE Jun-feng, ZOU Lei, ZHANG En-xian, et al. High-temperature corrosion tests for the water wall of a 1 000 MW ultra supercritical coal-fired boiler with double reheat cycles[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2018, 38(10): 773–781.
- [11] 王克锋,王 体,徐 龙,等. 二次再热锅炉的技术发展及优化[J]. 锅炉技术, 2019, 50(5): 26–30.
- WANG Ke-feng, WANG Ti, XU Long, et al. Technical development and optimization of ultra-supercritical double-reheat boilers[J]. Boiler Technology, 2019, 50(5): 26–30.
- [12] 刘衍卉,王 勇,宋修齐,等. 1 000 MW 超超临界二次再热机组锅炉优化运行试验研究[J]. 锅炉技术, 2022, 53(4): 62–67.
- LIU Yan-hui, WANG Yong, SONG Xiu-qi, et al. Experimental study on optimal operation of 1 000 MW ultra-supercritical double reheat unit boiler[J]. Boiler Technology, 2022, 53(4): 62–67.
- [13] 陈 辉,周晓骅,蔡 培,等. 1 000 MW 超超临界二次再热机组掺烧高硫煤的研究[J]. 锅炉技术, 2019, 50(3): 24–29.
- CHEN Hui, ZHOU Xiao-wei, CAI Pei, et al. Research on blending high-sulfur coal in 1 000 MW ultra-supercritical unit with double reheat cycle[J]. Boiler Technology, 2019, 50(3): 24–29.
- [14] 于洵民. 二次再热锅炉运行特性和再热汽温调节优化研究[D]. 北京:华北电力大学, 2021.
- YU Rui-min. Research on operation characteristics of double reheat boiler and optimization of reheat steam temperature adjustment[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [15] 董 亮,郭 森,郭 拯. 某百万 π 型二次再热锅炉再热器壁温偏差调整[J]. 锅炉制造, 2021(1): 1–4.
- DONG Liang, GUO Sen, GUO Zheng. Adjustment of reheater metal temperature imbalances of a 1 000 MW π type secondary reheat boiler[J]. Boiler Manufacturing, 2021(1): 1–4.
- [16] 叶 青,王朝阳,易广宙,等. 超超临界二次再热尾部三烟道锅炉汽温动态特性及协同优化控制[J]. 动力工程学报, 2023, 43(2): 117–125, 184.
- YE Qing, WANG Chao-yang, YI Gang-zhou, et al. Dynamic characteristics and coordinate control optimization of steam temperatures for an ultra-supercritical double-reheat boiler with three rear ducts[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(2): 117–125, 184.
- [17] 沈跃云,高小涛,孟 硕. 600 MW 墙式燃烧锅炉氮氧化物排放浓度与主要运行因素的多元线性回归研究[J]. 热能动力工程, 2011, 26(6): 726–731.
- SHEN Yue-yun, GAO Xiao-tao, MENG Shuo. Study of a multivariable linear regression of the NO_x emissions concentration and main operating factors of a 600 MW wall-type boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2011, 26(6): 726–731.
- [18] 白 涛,郭永红,孙保民,等. 1 025 t/h 旋流燃烧器煤粉炉降低 NO_x 生成的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(29): 16–23.
- BAI Tao, GUO Yong-hong, SUN Bao-min, et al. Numerical simulation of decreasing NO_x emission in a swirling combustion pulverized coal boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(29): 16–23.
- [19] 高小涛. 大型燃煤电站锅炉低 NO_x 燃烧及其排放特性的研究[D]. 南京:东南大学, 2009.
- GAO Xiao-tao. Study on low- NO_x combustion and emission characteristics in large-scale coal-fired power plant boilers[D]. Nanjing: Southeast University, 2009.
- [20] 肖海平,张 千,王 磊,等. 燃烧调整对 NO_x 排放及锅炉效率的影响[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(8): 1–6.
- XIAO Hai-ping, ZHANG Qian, WANG Lei, et al. Effect of combustion adjustment on NO_x emission and boiler efficiency[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(8): 1–6.
- [21] CHOI C R, KIM C N. Numerical investigation on the flow, combustion and NO_x emission characteristics in a 500 MWe tangentially fired pulverized-coal boiler[J]. Fuel, 2009, 88(9): 1720–1731.
- [22] 邹 磊,梁绍华,岳峻峰,等. 1 000 MW 超超临界塔式锅炉 NO_x 排放特性试验研究[J]. 动力工程学报, 2014, 34(3): 169–175.

ZOU Lei, LIANG Shao-hua, YUE Jun-feng, et al. Experimental study on NO_x emission of a 1 000 MW ultra supercritical tower type boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2014,34(3):169-175.

[23] 岳峻峰,黄磊,陈华桂. MPS 磨煤机工作特性试验研究[J]. 热能动力工程,2005,20(1):65-68.

YUE Jun-feng, HUANG Lei, CHEN Hua-gui. Experimental investigation of the operating characteristics of a MPS coal pulverizer [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2005, 20(1):65-68.

[24] 岳峻峰,邹磊,张恩先,等. 超超临界旋流燃烧锅炉低 NO_x 高效燃烧试验研究[J]. 锅炉技术,2015,46(6):46-51,68.

YUE Jun-feng, ZOU Lei, ZHANG En-xian, et al. Experimental study on low NO_x and high efficiency of a ultra-super critical boiler with swirl burner[J]. Boiler Technology, 2015,46(6): 46-51,68.

[25] 刘建全,孙保民,白涛,等. 稳燃特性对 1 000 MW 超超临界 锅炉 NO_x 排放特性影响的数值模拟[J]. 机械工程学报, 2011,47(22):132-139.

LIU Jian-quan, SUN Bao-min, BAI Tao, et al. Numerical simula- tion of NO_x emission of 1 000 MW ultra supercritical swirl com- bustion boiler on different combustion stability conditions [J]. Journal of Mechanical Engineering,2011,47(22):132-139.

(姜雪梅 编辑)

(上接第 129 页)

[11] HALTER F, CHAUVEAU C, DJEBAIEL-CHAUMEIX N, et al. Characterization of the effects of pressure and hydrogen concen- tration on laminar burning velocities of methane-hydrogen-air mixtures [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(1):201-208.

[12] MEHRA R K, DUAN H, JUKNELEVIIUS R, et al. Progress in hy- drogen enriched compressed natural gas (HCNG) internal com- bustion engines—a comprehensive review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017,80:1458-1498.

[13] GARCÍA-AMINGOL T, BALLESTER J. Operational issues in pre- mixed combustion of hydrogen-enriched and syngas fuels [J]. In- ternational Journal of Hydrogen Energy, 2015, 46(2): 1229-1243.

[14] MAO Run-ze, WANG Jin-hua, ZHANG Wei-jie, et al. Effect of high hydrogen enrichment on the outer-shear-layer flame of con- fined lean premixed CH₄/H₂/air swirl flames [J]. International Journal of Hydrogen Energy,2021,46(34):17969-17981.

[15] 马向阳,黄小美,吴嫦. 天然气掺氢对家用燃气灶燃烧特性 的影响研究 [J]. 可再生能源,2018,36(12):1746-1750.

MA Xiang-yang, HUANG Xiao-mei, WU Chang. Study on the in- fluence of natural gas hydrogenation on combustion characteristics of domestic gas cooker [J]. Renewable Energy Resources,2018, 36(12):1746-1750.

[16] ZAREEI J, GHADAMKHEIR K, FARKHONDEH S A, et al. Nu- merical investigation of hydrogen enriched natural gas effects on different characteristics of a SI engine with modified injection mechanism from port to direct injection [J]. Energy, 2022, 255:124445.

[17] KHANAFER A K, AITHAL S M. Fluid-dynamic and NO_x compu- tation in swirl burners [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2011,54(23/24):5030-5038.

[18] 车光兰. 天然气锅炉低氮氧化物燃烧技术研究 [J]. 工业加 热,2020,49(3):13-16.

CHE Guang-lan. Research on low nitrogen oxide combustion tech- nology of natural gas boiler [J]. Industrial Heating, 2020, 49(3):13-16.

(姜雪梅 编辑)