DOI: 10.19666/j.rlfd.202308135

60 t/h 煤粉预热燃烧锅炉宽负荷运行特性研究

田继林[1,2]，朱建国[1,3]，朱书骏[1]，刘敬樟[1,3]，曾雄伟[1]，欧阳子区[1,3]，吕清刚[1,3]
（1.中国科学院工程热物理研究所，煤炭高效低碳利用全国重点实验室，北京 100190；
2.大同市煤炭清洁高效利用研究所，煤灵活燃烧与热转化山西省重点实验室，山西 大同 037000；
3.中国科学院大学，北京 100049）

［摘 要］为满足国家“双碳”目标下煤炭清洁高效利用领域的迫切需求，在工业锅炉、电站锅炉等领域开发了煤粉预热燃烧技术。煤粉先进入流态化预热燃烧器中高温改性，再进入锅炉炉膛分级配风燃烧，从而实现了煤高效、低氮燃烧，并在 1 台 60 t/h 煤粉锅炉上进行了技术验证。锅炉侧墙对冲布置了 2 只预热燃烧器，单只预热燃烧器设计热功率为 26 MW，以烟煤为原料，在 10%~100%负荷范围开展了 6 个不同负荷的锅炉运行特性和 NO_x 排放特性试验研究，结果表明：该锅炉在各负荷下运行状态稳定、良好，无助燃条件下实现了 10%超低负荷稳定运行；预热燃烧器各参数合理、循环状态稳定，满足锅炉宽负荷的运行要求；负荷下锅炉燃烧效率均在 97%以上，10%、20%负荷下锅炉热效率大于 85%，30%及以上负荷锅炉热效率均在 90%以上；通过调整配风，锅炉各负荷下 NO_x 原始排放均低于 50 mg/m^3（$\phi(O_2)$=9%）。60 t/h 煤粉预热燃烧锅炉的成功示范，为煤粉高效清洁灵活燃烧技术的发展和应用提供了重要支撑。

［关 键 词］预热燃烧；煤粉锅炉；超低负荷稳燃；高效燃烧；超低 NO_x 排放

［引用本文格式］田继林，朱建国，朱书骏，等. 60 t/h 煤粉预热燃烧锅炉宽负荷运行特性研究[J]. 热力发电，2024，53(4): 133-140. TIAN Jilin, ZHU Jianguo, ZHU Shujun, et al. Wide load operation characteristics of a 60 t/h boiler with pulverized coal preheating[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(4): 133-140.

Wide load operation characteristics of a 60 t/h boiler with pulverized coal preheating

TIAN Jilin[1,2], ZHU Jianguo[1,3], ZHU Shujun[1], LIU Jingzhang[1,3], ZENG Xiongwei[1], OUYANG Ziqu[1,3], LYU Qinggang[1,3]
(1.State Key Laboratory of Coal Conversion, Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2.Shanxi Key Laboratory of Coal Flexible Combustion and Thermal Conversion, Datong Institute of Coal Clean and Efficient Utilization, Datong 037000, China;
3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Responding to the urgent needs of clean and efficient utilization of coal under the background of national “carbon peaking and carbon neutrality”, the pulverized coal preheating combustion technology has been developed in industrial boilers, power plant boilers and other fields. In this technology, pulverized coal is modified at high temperature in a fluidized preheating burner, then the preheated fuel enters the furnace for graded air distribution combustion, thus high efficiency and low NO_x combustion of pulverized coal is realized. Moreover, technical verification was carried out on a 60 t/h pulverized coal boiler, which adopts two preheating burners with side wall hedge arrangement, and one preheating burner is designed with thermal power of 26 MW. Using bituminous coal as raw material, the operation and NO_x emission properties of the boiler at 10%~100%

收 稿 日 期：2023-08-24
基 金 项 目：中国科学院战略性先导科技专项课题（XDA21040100，XDA29010200）
Supported by: Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA21040100, XDA29010200)
第一作者简介：田继林（1990），男，硕士，工程师，主要研究方向为煤炭高效清洁利用，tianjl@dt-iet.cn。
通信作者简介：朱建国（1977），男，博士，正高级工程师，主要研究方向为煤炭高效清洁利用，zhujianguo@iet.cn。

operating loads were studied experimentally, and the results showed that, the boiler operated stably and well at each load, it achieved stable operation of 10% ultra-low load without any auxiliary means. The preheating burners had reasonable operating parameters and stable circulation state, which can meet the requirements of wide load operation of the boiler. The combustion efficiency of the boiler at each operating load were all above 97%, the thermal efficiency of the boiler were above 85% at 10% and 20% operating load, and above 90% at 30% and above operating load. By adjusting the air distribution, the original NO_x mass emission of the boiler at each operating load can be controlled lower than 50 mg/m^3 ($\varphi(O_2)$=9%). The successful demonstration of the 60 t/h pulverized coal preheating combustion boiler provides important support for the development and application of clean, efficient and flexible combustion technology of pulverized coal.

Key words: preheated combustion; pulverized coal boiler; ultra-low load stable combustion; high efficiency combustion; ultra-low NO_x emission

在国家“双碳”目标下，传统燃煤机组的深度灵活调峰将承担可再生能源大规模消纳的任务[1-2]，燃煤发电在电力保供中的地位短期内难以改变[3]。大型火电机组参与调峰，要求机组负荷调节范围宽、负荷变化速率快，传统燃煤锅炉负荷降到一定程度时燃烧稳定性变差，甚至引起熄火，这是低负荷稳燃的难点所在。目前，燃煤机组的整体不投油稳燃最低负荷多在30%~40%[4]，深度调峰改造技术的关键是解决锅炉20%及以下的低负荷稳燃问题，同时还要兼顾污染物的超低排放[5]。

目前，燃煤机组较为常用的低负荷稳燃调控措施包括燃烧过程优化调整、辅助助燃等。燃烧过程优化措施主要包括调整煤粉细度[6]、优化煤粉浓度[7]、煤种搭配[8]、优化磨煤机运行方式[9]、优化配风以及调整氧量[10]和加装卫燃带[11]等，上述手段可在一定程度上降低锅炉运行负荷。辅助助燃措施主要包括微油（气）助燃[12]、等离子体稳燃[13]等，这些手段可以促进煤粉着火及稳燃，但运行成本高。

提高锅炉低负荷稳燃性能，本质上要从燃烧设备入手，煤粉燃烧器在很大程度上决定着锅炉稳燃性能及NO_x排放水平。近30年来，国内外开发了多种稳燃效果较好的煤粉燃烧器，这些燃烧器主要通过煤粉浓缩、强化煤粉与高温烟气换热、高温空气燃烧等方式实现稳燃。如ABB-CE公司的WR燃烧器[14]、三菱重工的PM燃烧器[15]、B&W公司的DRB-XCL双调风旋流燃烧器[16]、日立-Babcock公司的HT-NR旋流燃烧器[17]、三井-Babcock公司的LNASB轴向旋流燃烧器[18]、清华大学的火焰稳定船型燃烧器[19]和预燃室燃烧器[20]、华中科技大学的钝体燃烧器[21]、哈尔滨工业大学的百叶窗式水平浓淡燃烧器[22]及中心给粉旋流煤粉燃烧器[23]等，这些燃烧器已大规模应用于我国的燃煤锅炉，并正在不断改进，在低负荷稳燃及降低NO_x排放方面效果显著，但若不采取辅助助燃措施，直接将锅炉负荷降到20%以下，仍有很大难度。

中国科学院工程热物理研究所提出的预热燃烧技术[24]具有燃料适应性广、NO_x排放低和负荷调节灵活等优点[25]。煤粉先进入预热燃烧器中热改性，再进入炉膛燃烧，改性后燃料的燃烧特性得到了显著改善，同时大幅度降低了NO_x排放。该技术已分别在30 kW小试装置和2 MW中试装置上实现了31[26]、49 mg/m^3[27]的NO_x原始排放，并在1台40 t/h的预热燃烧器底置煤粉锅炉[28]上实现了满负荷下锅炉热效率高于92%、NO_x原始排放低于100 mg/m^{3}的指标。同时，在1 MW中试装置上实现了25%~100%宽负荷稳定运行[29]。

本文在开发的60 t/h煤粉预热燃烧锅炉上开展了宽负荷运行特性和NO_x排放特性试验研究。

1 锅炉简介

1.1 锅炉设计参数

某 60 t/h 煤粉预热燃烧锅炉为 1 台单锅筒自然循环过热蒸汽锅炉，半露天 Π 型布置，额定蒸汽量 60 t/h，过热蒸汽温度 450 ℃，蒸汽压力 3.82 MPa，给水温度 105 ℃，排烟温度 150 ℃，设计燃料为III类烟煤。该锅炉采用 2 只预热燃烧器，单只设计热功率为 26 MW，采用侧墙对冲的布置形式，每只设置单喷口。预热燃烧器为绝热形式，表面为钢壳，内部采用耐火材料砌筑，运行中外表面温度不超过 80 ℃。整台锅炉全部采用膜式水冷壁结构，炉膛为方形截面，炉膛总高 20 500 mm，炉膛下部截面尺寸 4 640 mm×2 320 mm，上部截面尺寸 4 640 mm×4 640 mm。

1.2 工艺流程

锅炉的工艺流程如图1所示。锅炉主要包括煤粉储供系统、预热燃烧系统、烟风系统、余热回收系统、烟气净化系统、给水系统、点火燃烧系统和自动控制系统等。

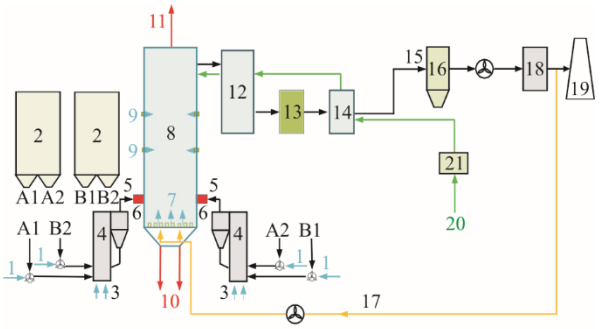

图 1 60 t/h 煤粉预热燃烧锅炉工艺流程
Fig.1 Process flow of the 60 t/h pulverized coal preheating combustion boiler

煤粉储供系统包括煤粉储备和输送系统。煤粉储备系统包括2个粉仓，单个粉仓容积300 m^3，粉仓设置了惰性气体安全保护装置，煤粉通过叶轮给粉机落入送粉管，由送粉风携带送入2只预热燃烧器。为确保锅炉的稳定运行，储仓和输送系统均设置2套，1用1备。

2只预热燃烧器位于锅炉炉膛两侧墙下部，对冲布置，左侧为预热燃烧器A，右侧为预热燃烧器B。预热燃烧器为循环流化床式，包括提升管、分离器和返料器等关键部件。

锅炉采用分级配风方式，各路风均为冷风，一次风通入预热燃烧器提升管底部，送粉风携带煤粉通入提升管，2路风与煤粉在预热燃烧器中反应生成高温预热燃料，预热燃料经喷口通入炉膛下部，全截面的二次风均匀布置于炉膛底部，与预热燃料均匀混合后燃烧。为了避免局部高温，炉膛中上部设置2层燃尽风，实现空间分级燃烧，2层燃尽风距离喷口高度分别为6 500、12 500 mm。燃烧产生的高温烟气从炉膛出口依次流经凝渣管束、过热器、旗式受热面、SCR脱硝反应器和省煤器后，进入布袋除尘器，经引风机引至脱硫塔净化后排至烟囱。再循环烟气从引风机后引出送入炉膛底部，必要时与二次风混合后进入炉膛，以调节炉膛温度和NO_x排放。

每只预热燃烧器各配置1台液化气点火器，分别设置在预热燃烧器底部，单只预热燃烧器冷态启动点火消耗液化气量为80~120 m^3。

2 试验及测试

2.1 试验物料

试验使用的燃料为烟煤，煤质分析见表 1，粒径分布如图 2 所示，煤粉粒径为 0~120 μm，d50 和 d90 分别为 16、63 μm。预热燃烧器所用的启动床料为石英砂，粒径分布为 212~425 μm。

表 1 煤质分析
Tab.1 Proximate analysis and ultimate analysis of coal

项目	数值	项目	数值
w_{ar}(C)/%	73.01	w_{ar}(M)/%	0.94
w_{ar}(H)/%	4.68	w_{ar}(A)/%	8.93
w_{ar}(O)/%	11.25	w_{daf}(V)/%	39.24
w_{ar}(N)/%	0.93	w_{ar}(FC)/%	54.78
w_{ar}(S)/%	0.26	$Q_{net,ar}$/(MJ·kg^{-1})	27.93

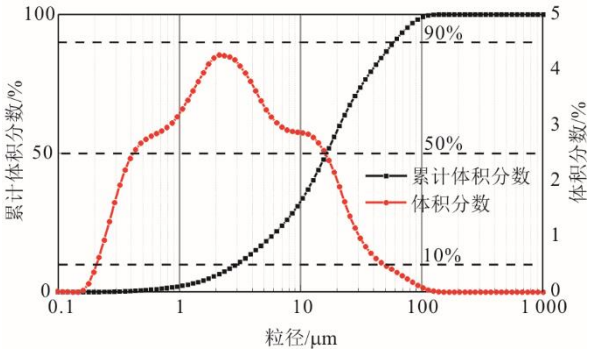

图 2 煤粉的粒径分布特性
Fig.2 Particle size distribution characteristics of pulverized coal

2.2 试验及测试

在 60 t/h 煤粉锅炉上开展了 6 个不同负荷下的预热燃烧器运行特性、锅炉运行特性和 NO_x 排放特性试验研究，并开展了能效和环保测试，测试时间均为 4 h。锅炉 10%、20%负荷运行时仅单只预热燃烧器运行，30%及以上负荷时 2 只预热燃烧器同时运行。试验过程中控制预热燃烧器温度在 850~950 ℃，控制炉膛温度不超过 1 200 ℃，同时，通过调整配风如二次风、燃尽风、烟气再循环风来降低 NO_x 排放，试验工况见表 2。

表 2 试验工况
Tab.2 The experimental conditions

项目	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6
锅炉负荷/%	10.4	19.6	30.8	50.0	71.2	92.9
投运预热燃烧器	A	B	A+B	A+B	A+B	A+B

试验过程实际给水温度为 102 ℃。锅炉能效测试执行《电站锅炉性能试验规程》（GB/T 10184—2015）、《工业锅炉热工性能试验规程》（GB/T 10180—2017），环保测试执行《锅炉大气污染物排放标准》

（GB 13271—2014）。本文试验过程中 NO_x 排放测试均在 SCR 入口前，且 NO_x 测试中炉内 SNCR 未投用，即 NO_x 排放数值为原始排放数值。

3 预热燃烧器运行特性

3.1 运行过程

在预热燃烧器运行过程中，一次风、送粉风提供床料和燃料流化所需空气，并与煤粉发生部分燃烧和气化反应，最初的升温及引燃过程完成后，煤粉通过循环稳定地实现自持预热。细颗粒燃料随气流带出预热燃烧器，从喷口送入炉膛，少量粗颗粒燃料随石英砂被旋风分离器分离，直至返送回提升管后再次预热。

为实时监测运行状态，单只预热燃烧器设置 4 个温度测点，分别位于提升管底部、中部、上部和返料器处，并在提升管底部设置 1 个压力测点。

单只预热燃烧器运行时，另一只处于压火备用状态，当需要 2 只同时运行时，处于压火备用状态的预热燃烧器快速启动，进入运行状态。为了保证炉膛两侧温度分布均匀，通过调整运行参数，使 2 只预热燃烧器的配风、给煤量接近。在上述调整下，6 个锅炉负荷分别对应 6 个预热燃烧器运行负荷，预热燃烧器的运行参数见表 3，预热燃烧器的运行工况 1—工况 6 分别与表 2 中锅炉的运行工况 1—工况 6 对应，工况 1—工况 2 为单只预热燃烧器的运行参数，工况 3—工况 6 为 2 只预热燃烧器运行参数的平均值，其中，预热燃烧器温度为提升管底部、中部和上部温度点的平均值。本次试验预热燃烧器的输入热功率范围为 5.5~23.5 MW，各工况下预热温度均在 900 ℃左右，运行状态满足要求。

表 3 预热燃烧器的运行参数

Tab.3 Operating parameters of the preheating burner

参数	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6
输入热功率/MW	5.50	9.52	7.77	12.62	17.62	23.49
单只预热燃烧器负荷/%	21.15	36.62	29.88	48.54	67.77	90.35
预热燃烧器平均温度/℃	895	907	898	896	904	888

3.2 运行特性

图 3 为预热燃烧器在不同负荷下的运行温度曲线，各负荷下预热燃烧器各点温度分布稳定、均匀，预热空气当量比在 0.15~0.21 时可保证将煤粉稳定连续地预热至 850~950 ℃。

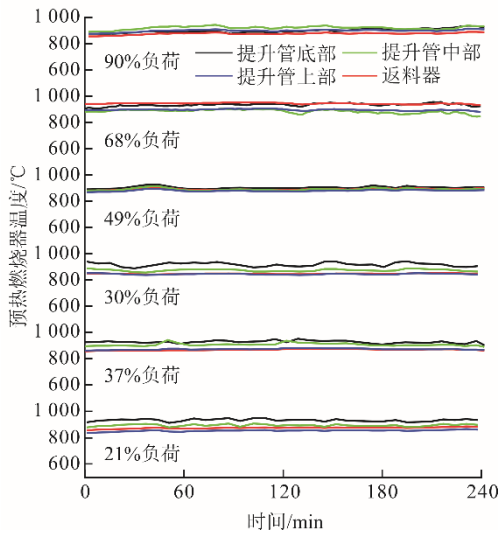

图 3 预热燃烧器在不同负荷下的运行温度变化

Fig.3 Temperature changing in the preheating burner at different loads

预热燃烧器在各负荷下料层压差曲线如图 4 所示，主要集中在 2~3 kPa，稳定的料层压差表明预热燃烧器内气、固流动特性和物料循环状态良好。

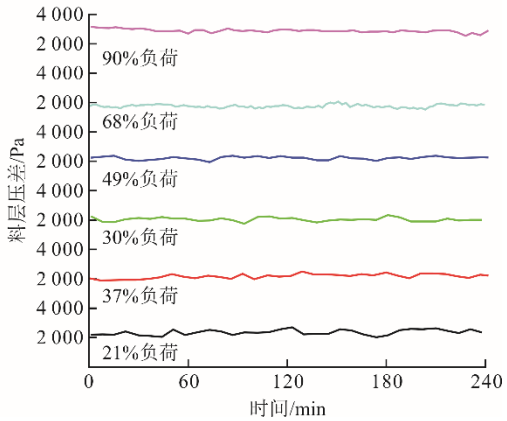

图 4 预热燃烧器在不同运行负荷下的料层压差变化

Fig.4 Pressure difference changing in the preheating burner at different loads

煤粉在预热燃烧器中生成了大量的可燃气体和焦炭等，由一元固体燃料转化为二元高温气固混合燃料，挥发分释放率达到了 80%~92%。分别对各稳定工况的可燃气体进行取样分析，主要可燃气

体组分 CO、CH_4、H_2 的体积分数和热值如图 5 所示，由于在实际调节过程中不同负荷下预热燃烧器的预热空气当量比、预热温度、反应停留时间等的差异，导致燃料在预热燃烧器中发生的部分燃烧和气化的份额不完全一致，从而进一步导致可燃气体的相对组分差异，在冷干基下可燃气体的热值集中在 2.3~2.9 MJ/m^3。同时，固体燃料的特性也发生了变化，经过预热后预热焦炭的孔隙结构变得发达、活性点位增加[26,30-31]。

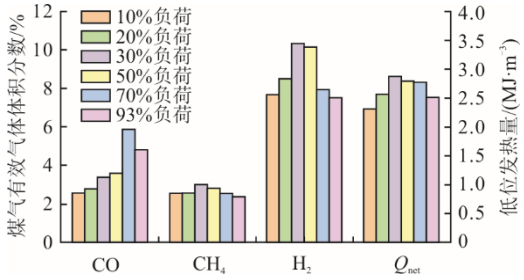

图 5 不同预热燃烧器负荷煤气有效气体体积分数及发热量
Fig.5 The effective gas volume fractions and calorific values at different preheating burner loads

4 锅炉运行特性

4.1 低负荷运行温度特性

炉膛温度是判断锅炉燃烧是否稳定最直接的参数之一[32]，该锅炉炉膛共布置有 9 个温度测点，距离预热燃料喷口 5 个不同高度布置分别为–500、1 500、6 500、10 500、15 500 mm，其中–500 mm 处有 1 个温度测点，其余高度位置有 2 个温度测点，15 500 mm 处为炉膛出口。图 6 为锅炉 10%、20%负荷的炉膛温度分布。由图 6 可以看出，各负荷下炉膛温度变化平稳，波动较小，进一步验证了预热燃烧技术在超低负荷运行的优越性。高活性的预热燃料喷入炉膛后自身温度已经达到 800 ℃以上，高于预热燃料自身的着火点，喷入炉膛后与全截面的二次风在该处发生主要的燃烧反应，无需强烈掺混即可实现着火和稳燃，2 个工况均在距离喷口 1 500 mm 高度处出现炉膛温度的最高点，平均温度分别为 871、1 015 ℃。综合可燃气体的易燃性、高热值与焦炭的高物理显热、丰富的孔隙结构、碳活性点位的增加，预热过程有利于提高燃料在低负荷下的着火稳定性。

锅炉 10%、20%负荷时单只预热燃烧器运行，炉膛两侧温差较大，投运预热燃烧器对侧的炉膛温度偏高，单只预热燃烧器运行时，烟气存在一定的偏斜，预热燃烧器 A 运行射流如图 7 所示。由图 7 可以看到，A 侧墙的热电偶位于燃料射流的回流区内，测得的温度较低，而 B 侧墙的热电偶被射流冲刷到，测得了较高的温度。沿烟气流向炉膛温度、两侧炉膛温差逐渐降低，沿炉膛沿程高度越向上，烟气在炉膛中的充满度越好，炉膛两侧温度趋于均匀。

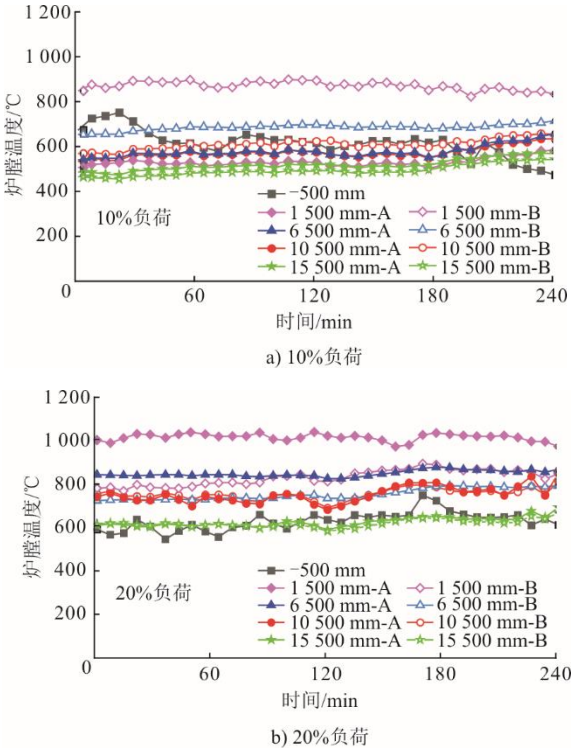

图 6 锅炉 10%、20%负荷炉膛内的温度变化
Fig.6 Temperature changing in combustion chamber at 10% and 20% boiler loads

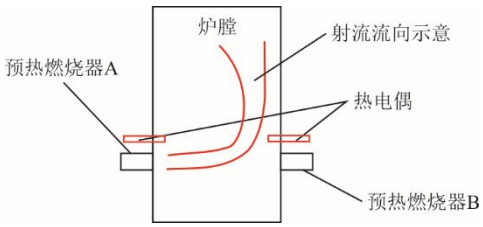

图 7 单侧运行时预热燃烧器 A 射流示意
Fig.7 Schematic diagram of preheating burner A jet flow during single-side running

4.2 宽负荷运行温度特性

锅炉在不同负荷下炉膛沿程的温度分布如图 8 所示。10%、20%负荷取较高一侧的炉膛温度，30%及以上负荷运行时，由于 2 只预热燃烧器的运行负荷相当，炉膛两侧温度偏差较小，因此取炉膛两侧温度的平均值。由图 8 可以看出，随着锅炉负荷的提升，炉膛温度逐渐上升，炉膛沿程的温度逐渐趋于均匀。

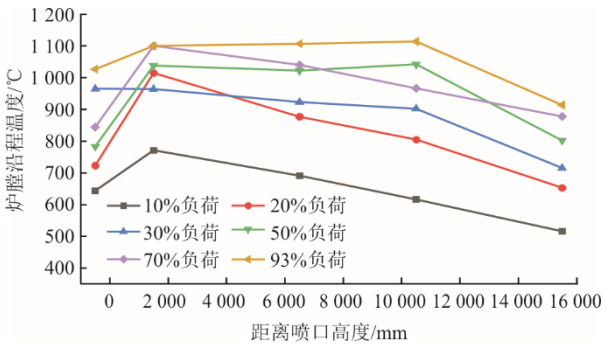

图 8 不同锅炉负荷下炉膛温度沿轴向的分布
Fig.8 Temperature profiles along the axis of combustion chamber at different boiler loads

传统煤粉锅炉主燃烧区的火焰中心温度一般超过 1 400 ℃，为确保煤粉能够实现着火和稳燃，二次风当量不低于 0.6～0.8，主燃烧区总空气当量比在 1.0 左右[33]，虽然实现了煤粉的高温高氧燃烧，但也容易促进热力型 NO_x 生成。该锅炉炉膛各负荷下温度整体偏低，锅炉的配风方式不同，各负荷下二次风当量比集中在 0.35～0.50，主燃区总空气当量比在 0.5～0.7 之间，经过预热后燃料的反应活性整体提升，高热量可燃气体的燃烧有利于预热焦炭的进一步引燃，在较低的二次风比例下便可实现较大份额的燃烧，同时能够维持合理的还原区气氛和相对较低的炉膛温度水平。锅炉各负荷下温度参数见表 4。由表 4 可知，随着锅炉负荷的提升，炉膛出口烟温、排烟温度逐渐趋于升高。

4.3 锅炉效率和 NO_x 排放

对不同负荷的锅炉热效率和 NO_x 原始排放进行了测试，测试结果见表 5。锅炉在各负荷下燃烧效率均在 97%以上，与传统煤粉锅炉相比，低负荷下锅炉热效率得到了显著提升，在 10%的超低负荷下锅炉热效率仍高于 85%，30%及以上负荷锅炉热效率均在 90%以上，但从气体和固体未完全燃烧热损失来看，该锅炉在燃烧组织、燃料热改性方面依然有较大的优化空间。NO_x 排放随着锅炉负荷的提升而升高，这与锅炉氮总输入量的增加、炉膛温度的升高有关，但锅炉在各工况下 NO_x 原始排放质量浓度均低于 50 mg/m^3（$\varphi(O_2)$=9%），主要原因包括以下 3 方面。

表 4 不同负荷下锅炉温度参数 单位：℃
Tab.4 Temperature parameters of the boiler at different loads

项目	设计值	10%负荷	20%负荷	30%负荷	50%负荷	70%负荷	93%负荷
炉膛最高温度	1 200	887	1 040	1 050	1 038	1 101	1 114
炉膛出口烟温	918	516	653	715	802	878	914
排烟温度	150	104	123	128	136	149	155

表 5 锅炉热效率和 NO_x 排放质量浓度
Tab.5 Thermal efficiency and NO_x emission mass concentration of the boiler

项目	10%负荷	20%负荷	30%负荷	50%负荷	70%负荷	93%负荷
锅炉热效率 η/%	85.98	89.56	90.91	91.42	92.80	91.87
锅炉燃烧效率 η_c/%	97.63	97.89	98.08	97.55	98.21	98.13
尾气 CO 质量浓度/(mg·m^{-3})	281.00	265.00	178.00	243.00	165.00	656.00
排烟热损失 q_2/%	3.87	4.56	4.87	4.81	4.49	5.21
气体未完全燃烧热损失 q_3/%	0.12	0.12	0.08	0.11	0.07	0.28
固体未完全燃烧热损失 q_4/%	2.25	1.99	1.84	2.34	1.72	1.59
散热损失 q_5/%	7.68	4.09	2.60	1.60	0.81	1.00
灰渣物理热损失 q_6/%	0.04	0.05	0.05	0.05	0.11	0.05
尾部氧体积分数/%	4.99	4.03	4.10	2.48	0.86	1.72
NO_x 原始排放质量浓度/(mg·m^{-3})	21.00	20.00	20.00	44.00	43.00	46.00
预热过程氮的转化率/%	71.40	82.42	52.26	62.29	44.48	72.27

首先，各工况下炉膛温度水平整体较低，抑制了热力型 NO_x 的生成，此时主要生成燃料型 NO_x。其次，预热过程的强还原型气氛有利于炉前脱氮，利用灰平衡法[34]对预热焦炭中的氮含量进行了计算，通过差减可以得到预热过程中挥发份中氮的释放率，计算表明 45%~83%的燃料氮以挥发分形式析出，由于预热燃烧器内为强还原性气氛，主要产物为 N_2、HCN 和 NH_3，大部分以 N_2 形式存在[35]。最后，燃料进入炉膛主燃区后含氮物质将进行氧化和还原反应。氧化反应主要包括高温预热煤气中 HCN、NH_3 以及焦炭氮的氧化过程（式(1)—式(2)）；还原反应主要分为同相还原和异相还原[36]，同相还

原为气体之间发生的还原性反应（式(3)—式(5)），异相还原为在焦炭表面上氮进行的还原反应（式(6)），而主燃区为强的还原性气氛进一步促进了挥发分和焦炭氮向 N_2 的还原。

$$NH_3,HCN+O_2\rightarrow NO+\cdots \quad (1)$$

$$N_f+O_2\rightarrow NO \quad (2)$$

$$NO+CH_i\rightarrow HCN+\cdots \quad (3)$$

$$NO+CO\rightarrow CO_2+1/2\,N_2 \quad (4)$$

$$NO+HCN\rightarrow N_2+\cdots \quad (5)$$

$$NO+C_f\rightarrow C(O)+1/2\,N_2 \quad (6)$$

5 结　论

以烟煤为燃料，在 60 t/h 煤粉预热燃烧锅炉上开展了宽负荷运行特性研究，获得了不同锅炉负荷下的预热燃烧器运行特性、锅炉运行特性和 NO_x 排放特性。主要结论如下：

1）26 MW 预热燃烧器在 20%~100%负荷范围内运行状态稳定、气固流动特性和循环状态良好，能够满足锅炉宽负荷的运行要求；

2）60 t/h 煤粉预热燃烧锅炉 10%~100%宽负荷运行稳定、炉膛温度分布合理，实现了 10%超低负荷稳定运行，验证了预热燃烧技术在煤粉锅炉超低负荷稳燃方面的优越性；

3）各负荷下 60 t/h 煤粉预热燃烧锅炉的燃烧效率均在 97%以上，10%负荷时锅炉热效率大于 85%，30%负荷以上锅炉热效率均大于 90%；

4）60 t/h 煤粉预热燃烧锅炉在 10%~100%负荷范围 NO_x 原始排放质量浓度均低于 50 mg/m^3（$\varphi(O_2)$=9%），低氮燃烧效果显著。

［参 考 文 献］

［1］ 谢和平, 任世华, 谢亚辰, 等. 碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2197-2211.
XIE Heping, REN Shihua, XIE Yachen, et al. Development opportunities of the coal industry towards the goal of carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2197-2211.

［2］ 吕清刚, 柴祯. “双碳”目标下的化石能源高效清洁利用[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 541-548.
LYU Qinggang, CHAI Zhen. Highly efficient and clean utilization of fossil energy under carbon peak and neutrality targets[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(4): 541-548.

［3］ 朱法华, 徐静馨, 潘超, 等. 煤电在碳中和目标实现中的机遇与挑战[J]. 电力科技与环保, 2022, 38(2): 79-86.
ZHU Fahua, XU Jingxin, PAN Chao, et al. Opportunities and challenges of coal power industry in the achievement of carbon neutrality goal[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2022, 38(2): 79-86.

［4］ 宋民航, 黄云, 黄骞, 等. 旋流煤粉燃烧器低负荷稳燃技术探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(13): 4552-4565.
SONG Minhang, HUANG Yun, HUANG Qian, et al. Discussion on low-load stable combustion technology of swirl pulverized-coal burner[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4552-4566.

［5］ 毛健雄. 中国煤电机组转型改造的两大技术方向: “深度调峰”和“生物质耦合发电”[EB/OL]. (2021-06-15)[2023-03-24]. http://www.chinapower.com.cn/xw/sdyd/20210615/81281.html.
MAO Jianxiong. Two major technical directions for the transformation and transformation of China's coal-fired power units: “deep peak shaving” and “biomass coupling power generation”[EB/OL]. (2021-06-15)[2023-03-24]. http://www.chinapower.com.cn/xw/sdyd/20210615/81281.html.

［6］ 陈占军, 金晶, 钟海卿, 等. 超细化煤粉气流着火特性的试验研究[J]. 热力发电, 2004, 33(4): 45-47.
CHEN Zhanjun, JIN Jing, ZHONG Haiqing, et al. Experimental study on ignition behavior of superfine pulverized coal and air mixture flow[J]. Thermal Power Generation, 2004, 33(4): 45-47.

［7］ WANG X B, TAN H Z, YAN W P, et al. Determining the optimum coal concentration in a general tangential-fired furnace with rich-lean burners: from a bench-scale to a pilot-scale study[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 73(1): 371-379.

［8］ 胡平凡, 尹俊俊, 张成, 等. 300 MW 机组锅炉贫煤改烧烟煤的试验研究[J]. 热力发电, 2009, 38(8): 79-82.
HU Pingfan, YIN Junjun, ZHANG Cheng, et al. Test study on converting lean-coal fired boiler for 300 MW unit to burn bituminous coal[J]. Thermal Power Generation, 2009, 38(8): 79-82.

［9］ 董信光, 孙健, 孔庆雨, 等. 超临界 350 MW 机组直流锅炉深度调峰能力试验[J]. 热力发电, 2018, 47(7): 105-112.
DONG Xinguang, SUN Jian, KONG Qingyu, et al. Experimental study on depth peak-load regulation capacity of once through boiler for a supercritical 350 MW unit[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(7): 105-112.

［10］ 张广才, 周科, 鲁芬, 等. 燃煤机组深度调峰技术探讨[J]. 热力发电, 2017, 46(9): 17-23.
ZHANG Guangcai, ZHOU Ke, LU Fen, et al. Discussions on deep peaking technology of coal-fired power plants[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(9): 17-23.

［11］ 陈晓萌. 提高燃煤锅炉燃烧稳定性的方法与数值模拟研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011: 9-10.
CHEN Xiaomeng. The method and numerical simulation on the improvement of stable combustion in boiler[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011: 9-10.

［12］ LIU C L, LI Z Q, KONG W G, et al. Bituminous coal combustion in a full-scale start-up ignition burner: influence of the excess air ratio[J]. Energy, 2010, 35(10): 4102-4106.

［13］ MESSERLE V E, KARPENKO E I, USTIMENKO A B. Plasma assisted power coal combustion in the furnace of utility boiler: numerical modeling and full-scale test[J]. Fuel, 2014, 126: 294-300.

[14] 匡江红, 丁士发, 焦国成. 低负荷稳燃直流燃烧器攻关技术的研究[J]. 动力工程, 2000, 20(2): 611-614.
KUANG Jianghong, DING Shifa, JIAO Guocheng. Research on a new kind of burner for stable combustion at low load[J]. Power Engineering, 2000, 20(2): 611-614.
[15] 黄新元, 刘长振, 宋行强, 等. 黄台电厂 PM 型燃烧器结构优化研究及应用[J]. 中国电力, 2004, 37(7): 44-46.
HUANG Xinyuan, LIU Changzhen, SONG Xingqiang, et al. Study on the optimum configuration of PM type burner and its application in Huangtai Power Plant[J]. Electric Power, 2004, 37(7): 44-46.
[16] 张海, 吕俊复, 崔凯, 等. 旋流煤粉燃烧器低 NO_x 排放的设计分析[J]. 热力发电, 2010, 39(11): 32-36.
ZHANG Hai, LYU Junfu, CUI Kai, et al. Analysis of design for swirling pulverized coal burners with low NO_x emission[J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(11): 32-36.
[17] ZHOU C Y, WANG Y Q, JIN Q Y, et al. Mechanism analysis on the pulverized coal combustion flame stability and NO_x emission in a swirl burner with deep air staging[J]. Journal of the Energy Institute, 2019, 92(2): 298-310.
[18] ZENG L Y, LI Z Q, ZHAO G B, et al. The influence of swirl burner structure on the gas/particle flow characteristics[J]. Energy, 2011, 36(10): 6184-6194.
[19] 梁勇军, 徐旭常. 船型体煤粉燃烧器流场的数值模拟[J]. 工程热物理学报, 1996, 17(1): 101-105.
LIANG Yongjun, XU Xuchang. Numerical simulation of the flow field in the boat-sharped burner[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1996, 17(1): 101-105.
[20] 刘鹏中, 周建明, 牛芳, 等. 我国预燃室旋流煤粉燃烧器研究进展[J]. 煤质技术, 2021, 36(1): 20-26.
LIU Pengzhong, ZHOU Jianming, NIU Fang, et al. Research progress of swirl pulverized coal burner with pre-combustion chamber in China[J]. Coal Quality Technology, 2021, 36(1): 20-26.
[21] 马晓茜, 钱壬章, 靳世平, 等. 锅炉稳燃技术的发展及开缝钝体燃烧器的研究[J]. 热力发电, 1995, 24(4): 15-19.
MA Xiaoqian, QIAN Renzhang, JIN Shiping, et al. Study of boiler flame stability and development of burner with slitting bluff-body[J]. Thermal Power Generation, 1995, 24(4): 15-19.
[22] 管晓艳. 水平浓淡煤粉燃烧器内气固流动特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 2-7.
GUAN Xiaoyan. Study on characteristics of gas-solid flow in horizontal bias combustion pulverized coal burners[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011: 2-7.
[23] 李松. 燃用低挥发分煤中心给粉旋流燃烧技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 99-117.
LI Song. Investigation of central-fuel-rich swirling combustion technology with low volatile coal[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016: 99-117.
[24] 吕清刚, 朱建国, 牛天钰, 等. 煤粉高温预热方法: 200710175526.3[P]. 2008-04-09[2023-03-24].
LYU Qinggang, ZHU Jianguo, NIU Tianyu, et al. High temperature pulverized coal preheating method: 200710175526.3[P]. 2008-04-09[2023-03-24].
[25] 吕清刚, 朱书骏, 朱建国, 等. 煤粉预热燃烧技术研发进展[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18): 6535-6546.
LYU Qinggang, ZHU Shujun, ZHU Jianguo, et al. Research and development on preheated combustion of pulverized coal[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6535-6546.
[26] ZHANG Y, ZHU J G, LYU Q G, et al. The ultra-low NO_x emission characteristics of pulverized coal combustion after high temperature preheating[J]. Fuel, 2020, 277: 118050.
[27] LIU J Z, LIU Y H, ZHU J G, et al. Bituminous coal deep regulated ultra-low NO_x flameless combustion with fluidized self-preheating fuel: a 2 MW experimental study[J]. Fuel, 2021, 294: 120549.
[28] 满承波, 高超, 欧阳子区, 等. 40 t/h 煤粉预热燃烧锅炉运行和低 NO_x 试验研究[J]. 热力发电, 2021, 50(9): 160-166.
MAN Chengbo, GAO Chao, OUYANG Ziqu, et al. Operation and low NO_x research of a 40t/h preheating combustion pulverized coal boiler[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(9): 160-166.
[29] ZHU S J, HUI J C, LYU Q G, et al. Experimental study on pulverized coal combustion preheated by a circulating fluidized bed: Preheating characteristics for peak shaving[J]. Fuel, 2022, 324: 124684.
[30] ZHU S J, LYU Q G, ZHU J G, et al. Experimental study on NO_x emissions of pulverized bituminous coal combustion preheated by a circulating fluidized bed[J]. Journal of the Energy Institute, 2019, 92(2): 247-256.
[31] SU K, DING H L, OUYANG Z Q. Experimental study on effects of multistage reactant and air jet velocities on self-preheating characteristics and NO_x emission of burning pulverized coal[J]. Fuel, 2022, 325: 124879.
[32] 王东风, 刘千, 赵文杰, 等. 基于炉膛参数场测量的电站锅炉燃烧稳定性和经济性状态模糊综合评判[J]. 动力工程学报, 2015, 35(6): 437-444.
WANG Dongfeng, LIU Qian, ZHAO Wenjie, et al. Fuzzy comprehensive evaluation on combustion stability and economy of a power plant boiler based on furnace parameters measurement[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2015, 35(6): 437-444.
[33] 满承波, 朱建国, 吕清刚, 等. 100 t/d 气化飞灰预热燃烧锅炉设计与运行[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(3): 88-93.
MAN Chengbo, ZHU Jianguo, LYU Qinggang, et al. Design and operation of a 100 t/d gasification fly ash boiler[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(3): 88-93.
[34] ZHANG Y, ZHU J G, LYU Q G, et al. Experiment study on combustion characteristics of pulverized coal based on partial gasification of circulating fluidized bed[J]. Energy & Fuels, 2020, 34(1): 989-995.
[35] ZHU S J, LYU Q G, ZHU J G. Experimental investigation of NO_x emissions during pulverized char combustion in oxygen-enriched air preheated with a circulating fluidized bed[J]. Journal of the Energy Institute, 2019, 92(5): 1388-1398.
[36] MAN C B, ZHU J G, OUYANG Z Q, et al. Experimental study on combustion characteristics of pulverized coal preheated in a circulating fluidized bed[J]. Fuel Processing Technology, 2018, 172: 72-78.

（责任编辑 邓玲惠）