

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2020.07.007

35 t/h 纯燃超低挥发分碳基燃料预热燃烧锅炉运行特性研究

Study on operation characteristics of a 35 t/h preheating combustion boiler with pure ultra-low volatile carbon-based fuels

欧阳子区^{1,2}, 满承波¹, 李增林⁴, 李诗媛^{1,2,3*}, 庞青涛⁴, 朱建国^{1,2}, 范志刚⁴, 刘敬樟¹
OUYANG Ziqu^{1,2}, MAN Chengbo¹, LI Zenglin⁴, LI Shiyuan^{1,2,3*}, PANG Qingtao⁴,
ZHU Jianguo^{1,2}, FAN Zhigang⁴, LIU Jingzhang¹

(1. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院洁净能源
创新研究院, 辽宁 大连 116023; 4. 陕西煤业新型能源科技股份有限公司, 西安 710100)

(1. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese
Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Dalian National Laboratory for Clean Energy, Dalian 116023, China;
4. Shaanxi Coal Industry New Energy Technology Company Limited, Xi'an 710100, China)

摘 要: 低阶煤热解和气化后会产生热解半焦和气化残炭等超低挥发分碳基燃料,为解决超低挥发分碳基燃料着火稳燃难、燃尽难和污染物排放水平高等问题,在 35 t/h 工业煤粉锅炉上增加了预热燃烧器以及相关辅助系统,建成了 35 t/h 纯燃超低挥发分碳基燃料预热燃烧锅炉。在该锅炉上以神木烟煤、神木半焦和气化残炭为燃料进行试验,研究燃料种类、预热温度、二次风当量比和锅炉负荷对锅炉燃烧特性及污染物排放特性的影响。结果表明:3 种燃料在 35 t/h 纯燃超低挥发分碳基燃料预热燃烧锅炉中都可以稳定燃烧,即使干燥无灰基挥发分为 4.30% 的半焦粉也能稳定地纯燃,表明预热燃烧技术具有很好的燃料适应性;3 种燃料通过预热后进行燃烧,燃烧效率均超过 99%;随着预热温度的增加炉膛的整体温度有所升高,NO_x 排放呈现先降低后增加的趋势,说明预热温度升高有利于预热后的燃料在炉膛中燃烧放热,预热温度为 887 °C 时,NO_x 排放质量浓度达到最低值 110.6 mg/m³(标态,φ(O₂)=9%);预热燃烧锅炉低负荷下的稳燃特性较好,负荷越低 NO_x 排放质量浓度越低,最低可达 108.0 mg/m³(标态,φ(O₂)=9%),体现了预热燃烧技术在稳燃、燃尽和低 NO_x 排放上的优势。

关键词: 超低挥发分;碳基燃料;半焦;气化残炭;预热燃烧器;锅炉;NO_x 排放;燃烧效率

中图分类号: TQ 536

文献标志码: A

文章编号: 1674-1951(2020)07-0050-07

Abstract: Ultra-low volatile carbon-based fuels, such as semi-coke and gasified residual carbon, are produced in pyrolysis and gasification of low-rank coal. A preheating combustor and auxiliary systems were installed on a 35 t/h coal-fired boiler combusting pure ultra-low volatile carbon-based fuels, so as to stabilize and enhance the burning of ultra-low volatile carbon-based fuels and lower the emission of pollutants. In the experiments carried out on the boiler, using Shenmu bituminous coal, Shenmu semi-coke and gasified residual carbon, effects of fuel type, preheating temperature, secondary air equivalent ratio and boiler load on combustion characteristics and pollutant emission were studied. The results showed that the three fuels can burn stably, and so can the pure semi-coke powder with dry ash-free volatilization fraction of 4.30%, which indicated the good fuel adaptability of the boiler. Been preheated, all the combustion efficiencies of the three fuels exceeded 99%. With the rise of preheating temperature, the overall temperature of the furnace increased, and the NO_x emission mass concentration decreased first and then increased, indicating that the increase of preheating temperature was conducive to the combustion and heat release of preheated fuel in the furnace. When the preheating temperature was 887 °C, the minimum NO_x emission mass concentration was 110.6 mg/m³(standard state, φ(O₂)=9%). The preheated boiler has good combustion stability under low loads. As boiler load is lower, the NO_x emission decreased and bottomed at 108.0

mg/m³(standard state, φ(O₂)=9%), which reflects the advantages of preheating combustion technology in stabilizing combustion, burnout and low NO_x emission.

Keywords: ultra-low volatile; carbon-based fuel; semi-coke; gasified residual carbon; preheating combustor; boiler; NO_x emission; combustion efficiency

收稿日期:2020-05-19;修回日期:2020-06-12

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0602001);中国科学院战略性先导科技专项课题(XDA21040100);中国科学院青年创新促进会项目(2019148);西安市科技计划项目(201657SF/SF03);咸阳市科技计划项目(2016K02-31)

0 引言

“十三五”期间,我国将煤炭分级分质梯级利用列为煤炭清洁高效利用技术创新的战略方向之一。我国低阶煤探明储量巨大^[1],随着煤化工技术的不断发展,低阶煤分级分质转化过程中将产生大量的热解半焦和气化残炭,这类副产品作为高品位洁净燃料燃烧发电是煤炭梯级利用产业链的重要组成部分^[2]。热解半焦和气化残炭的挥发分极低,通常在10%以下,统称为超低挥发分碳基燃料。现有的煤粉锅炉燃用该类燃料通常存在着火稳燃困难、燃尽率低、 NO_x 排放质量浓度高等问题,实现其清洁高效燃烧难度很大。因此,如何清洁高效燃烧利用此类超低挥发分碳基燃料已成为制约整个产业发展的瓶颈。

目前,针对于低挥发分燃料燃烧技术的研究主要集中在W形火焰锅炉方面,燃料一般以无烟煤和贫煤为主,虽然可以实现稳定燃烧,但 NO_x 排放质量浓度普遍较高,目前国内技术能够达到的最低 NO_x 原始排放质量浓度约为 600 mg/m^3 (标态,下同)^[3-4]。

国内近年来针对热解半焦及气化残炭燃烧技术的研究逐渐兴起,科研人员在实验室中对不同煤热解及气化工工艺生成的半焦及残炭的燃烧特性和污染物排放特性进行了大量深入的研究,但仅局限于热重分析装置和中小型燃烧试验装置^[5-7]。

在燃烧技术开发方面,科研人员一方面是研发新型燃烧器以及燃烧装置,用于燃烧此类超低挥发分碳基燃料^[8],另一方面是尝试在大型电站煤粉锅炉中掺烧一定比例的超低挥发分碳基燃料以代替动力煤^[9]。

近年来,中国科学院工程热物理研究所对预热燃烧技术开展了相关研究,通过预热式燃烧器将燃料预热到 $800\sim 950\text{ }^\circ\text{C}$ 后送入锅炉炉膛中燃烧。目前,在热功率为0.2,0.4,2.0 MW的预热燃烧试验装置上燃烧神木半焦,都已经实现了燃烧效率达95%以上、 NO_x 原始排放质量浓度低于 200 mg/m^3 的目标^[10-13]。该项技术彻底解决了超低挥发分碳基燃料着火稳燃难、燃尽难和污染物排放水平高等问题。

在此基础上,中国科学院工程热物理研究所联合陕西煤业新型能源科技股份有限公司对35 t/h工业煤粉锅炉进行了改造,在该锅炉上增加了预热燃烧器以及相关的辅助系统,并以神木烟煤、神木半焦和气化残炭为燃料进行试验,探索该锅炉的燃烧特性及污染物排放特性。

1 锅炉燃烧试验

1.1 试验系统

35 t/h 纯燃超低挥发分碳基燃料预热燃烧锅炉是在原35 t/h煤粉工业锅炉的基础上改造而成的,该锅炉额定蒸发量为35 t/h,额定蒸汽压力为1.6 MPa,额定蒸汽温度为 $250\text{ }^\circ\text{C}$,设置有4个对喷旋流燃烧器,2个侧墙各设置2个燃烧器。改造主要内容为拆除4个旋流燃烧器,更换为底喷布置的预热燃烧器,并对二次风供风和给粉设备进行改造。

改造后的35 t/h 纯燃超低挥发分碳基燃料预热燃烧锅炉燃烧工艺流程如图1所示。系统主要包括烟风系统、物料系统、点火燃烧系统和尾部烟气处理系统。燃料燃烧用风分为一次风、二次风和三次风(燃尽风),即采用分级配风方式实现半焦的燃烧。一次风供风进入预热燃烧器底部,二次风经过预热后从炉膛底部供入炉内,三次风从炉膛中部供入炉内。炉前设置了半焦塔,半焦塔底部设置2台给粉机,分别由对应的送粉风机以气力输送的方式将半焦输送到预热燃烧器内。燃烧生成的高温烟气经余热回收和布袋除尘后由引风机引至烟囱排放。一次风机、二次风机、三次风机、引风机、送粉风机均为变频风机,以利于工况调整和系统节能。尾部烟气处理装置包括布袋除尘器、湿法脱硫装置和脱硝系统。布袋除尘器收集燃烧后的飞灰,除尘后的烟气由引风机引至烟囱排放。

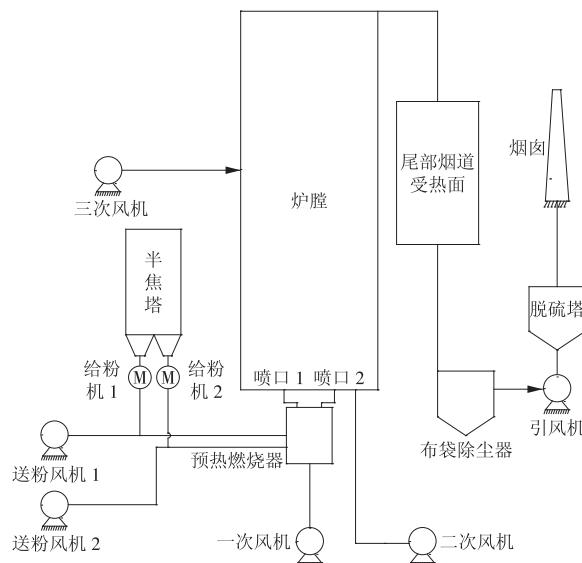


图1 35 t/h 纯燃超低挥发分碳基燃料预热燃烧锅炉燃烧工艺流程

Fig. 1 Process flow of a 35 t/h preheating combustion boiler with pure ultra-low volatile carbon-based fuels

预热燃烧器设有5个温度测点,分别位于预热燃烧器底部、中部、上部和2个出口。炉膛内设有3

个温度测点,分别距离喷口 1.0,2.5,10.0 m。

预热燃烧器是实现半焦预热的重要设备,半焦粉在预热燃烧器中通过缺氧气氛下的部分气化和燃烧放出热量,将自身稳定地预热到 900 ℃以上,不需要外界热量的输入。预热燃烧器为绝热的小型循环流化床,安装在炉膛的正下方,其与炉膛的安装位置关系如图 2 所示。预热燃烧器有 2 个喷口,预热后的燃料从炉膛底部向上喷入炉膛。炉膛底部设置有 4 个排渣口,用于将运行过程中炉膛内的结渣排出炉膛。预热燃烧器的具体原理及运行条件可参考文献[10]。

锅炉尾部烟道有 1 个烟气取样口和 1 个飞灰取样口,烟气取样口设置在选择性催化还原(Selective Catalytic Reduction, SCR)脱硝装置之前,飞灰取样口设置在布袋除尘器之前。运行过程中,通过德国 350 烟气分析仪对烟气进行在线测量,对典型工况的飞灰进行等速取样,进行含碳量分析,在炉膛底部的排渣口收集渣样进行含碳量分析。



图 2 预热燃烧器与炉膛安装位置示意

Fig. 2 Installation positions of the preheating combustor and furnace

1.2 试验燃料

本研究所用燃料为神木烟煤、神木半焦以及神木半焦和气化残炭的混合燃料,混合燃料中气化残炭的掺混比例为 6%,干燥无灰基挥发分为 4.26%,燃料分析结果见表 1。其中:神木烟煤的粒径为 0~120 μm,中位粒径为 40 μm;神木半焦的粒径为 0~200 μm,中位粒径为 82 μm;气化残炭的粒径为 0~108 μm,中位粒径为 24 μm。

进入煤粉塔之前,称取相应比例的半焦和气化残炭,加入罐车中对两者进行掺混。掺混后的燃料以气力输送的方式从罐车进入半焦塔,再通过直吹

送粉的方式进入到预热燃烧器中。

表 1 燃料分析结果

Tab. 1 Fuel analysis results

项目	神木烟煤	神木半焦	气化残炭	混合燃料
元素分析	$w(C_{ar})/\%$	62.97	86.18	66.17
	$w(H_{ar})/\%$	3.88	1.80	0.57
	$w(O_{ar})/\%$	10.18	0.00	1.09
	$w(N_{ar})/\%$	0.98	0.49	0.61
	$w(S_{ar})/\%$	0.40	0.37	1.03
工业分析	$w(M_{ar})/\%$	11.80	3.66	3.46
	$w(FC_{ar})/\%$	52.67	82.22	52.90
	$w(V_{daf})/\%$	30.57	4.30	3.63
	$w(A_{ar})/\%$	9.82	7.87	43.14
$Q_{net,ar}/(kJ\cdot kg^{-1})$				
24 195 30 809 19 339 30 139				

注:下标 ar 表示收到基,daf 表示干燥无灰基。

1.3 试验工况

本试验研究了燃料种类、预热温度和锅炉负荷对锅炉燃烧特性和 NO_x 排放特性的影响,其中预热温度为预热燃烧器内最高温度。不同燃料对比试验工况参数见表 2,不同预热温度对比试验工况参数见表 3,不同负荷对比试验工况参数见表 4。

表 2 不同燃料对比试验工况参数

Tab. 2 Experimental conditions of different fuels

项目	单位	工况 1	工况 2	工况 3
燃料		神木烟煤	神木半焦	混合燃料
负荷	t/h	24.5	29.0	29.0
给煤量	kg/h	2 710	2 586	2 615
送粉风量	m ³ /h	1 611	1 689	1 721
预热温度	℃	872	886	880
尾部 φ(O ₂)	%	7.7	8.0	5.7

表 3 不同预热温度对比试验工况参数

Tab. 3 Experimental conditions at different preheating temperatures

项目	单位	工况 4	工况 5	工况 6
燃料		混合燃料	混合燃料	混合燃料
负荷	t/h	17.5	19.3	20.0
给煤量	kg/h	1 548	1 711	1 781
送粉风量	m ³ /h	827	846	836
预热温度	℃	855	887	942
尾部 φ(O ₂)	%	9.6	8.8	8.7

2 锅炉运行特性分析

整个试验持续约 240 h,试验期间预热燃烧器温度变化趋势如图 3 所示,试验过程中预热燃烧器温度平稳,调整工况时温度有所波动,但基本都在 800~950 ℃ 范围内波动。在整个试验过程中通过调

表 4 不同负荷对比试验工况参数
Tab. 4 Experimental conditions under different loads

项目	单位	工况 7	工况 8	工况 9
燃料		混合燃料	混合燃料	混合燃料
负荷	t/h	13.3	19.3	28.0
给煤量	kg/h	1 178	1 711	2 491
送粉风量	m ³ /h	855	846	857
预热温度	℃	910	887	876
尾部 φ(O ₂)	%	12.8	8.8	6.1

整一次风对给煤量进行匹配,保证预热燃烧器的温度保持在 850~950 ℃。

试验过程中炉膛底部温度变化如图 4 所示,随着锅炉负荷的调整,给煤量发生变化,炉膛底部温度有所波动,最低为 520 ℃,最高达 1 250 ℃。

由图 3、图 4 可以看出,3 种不同燃料在 35 t/h 纯燃超低挥发分碳基燃料预热燃烧锅炉中都可以稳定燃烧,即使干燥无灰基挥发分为 4.30% 的半焦粉也能稳定地纯然,说明预热燃烧锅炉具有很好的燃料适应性,这是传统煤粉锅炉燃烧技术的突破。

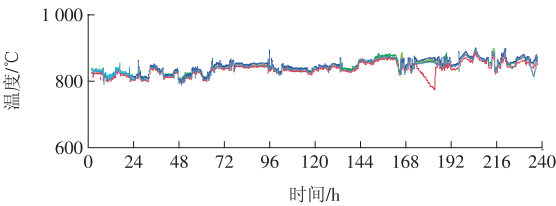


图 3 试验全程预热燃烧器温度变化趋势
Fig. 3 Temperature change trend of the preheating burner during the whole test

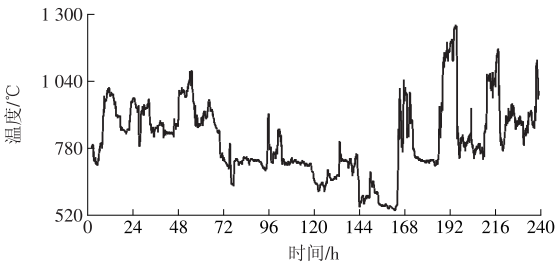


图 4 试验全程炉膛底部温度变化趋势
Fig. 4 Temperature change trend of the bottom of the furnace during the whole test

2.1 不同燃料的预热燃烧特性

工况 1—3 的锅炉负荷都在 24.0 t/h 以上,试验过程中由于受较多外部因素的限制,无法做到 3 种燃料的运行参数完全一样,但 3 个工况除了燃料不一样,其余的运行参数已经非常接近。

稳定运行时预热式燃烧器内温度变化趋势如图 5 所示。3 个工况下预热燃烧器的温度基本不变,说明预热燃烧器运行稳定;3 个工况下预热燃烧器内温度分布均匀,说明预热燃烧器内建立了稳定的

循环且循环量非常大,导致预热燃烧器内部温差很小。

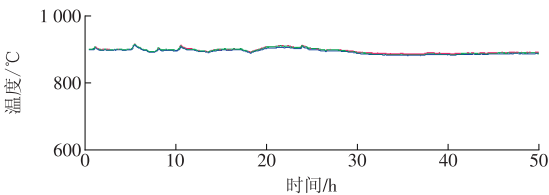


图 5 稳定运行时预热式燃烧器内温度变化趋势
Fig. 5 Temperature change of the preheating burner during its stable operation

工况 1—3 下燃烧室内温度沿轴向的分布如图 6 所示。3 个工况下炉膛的温度分布情况基本相同,由于工况 1 的锅炉负荷最低,因此炉膛内的平均温度最低。为了控制炉膛内不结焦,通过调整二次风和三次风的配风,使 3 个工况下燃烧室内的最高温度都未超过 1 200 ℃。运行过程中通过观火孔观察炉膛内部的火焰形态,2 个喷口的火焰长度和宽度基本一致,炉膛的火焰充满度也比较好的,火焰整体长度为 3.0 m 左右,没有明显的偏斜。试验过程中对尾部飞灰进行取样及可燃物含量检测,检测结果及燃烧效率计算结果见表 5。

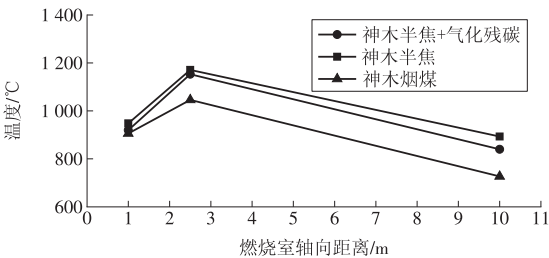


图 6 燃用不同燃料时燃烧室温度沿轴向的分布
Fig. 6 Temperature profiles along the axis of combustion chamber with different fuels

燃烧效率 η_{cf} 计算公式为

$$\eta_{cf} = 100 - (q_3 + q_4), \tag{1}$$

$$q_3 = 236(w(C_y) + 0.375w(S_y)) \times$$

$$\frac{\rho(CO)}{\rho(RO_2) + \rho(CO)} \frac{100 - q_4}{Q_r}, \tag{2}$$

$$q_4 = \frac{327w(A_y)}{Q_r} (w(a_{fh}) \frac{w(C_{fh})}{100 - w(C_{fh})} +$$

$$w(a_{hz}) \frac{w(C_{hz})}{100 - w(C_{hz})}) \times 100, \tag{3}$$

式中: q_3 为化学未完全燃烧损失; q_4 为机械未完全燃烧损失; $w(a_{fh})$ 为飞灰质量分数,90%; $w(a_{hz})$ 为炉渣质量分数,10%; $w(C_{fh})$ 为飞灰中可燃物的质量分数; $w(C_{hz})$ 为灰渣中可燃物的质量分数; Q_r 为煤的收到基低位发热值; $w(C_y)$ 为煤的收到基含碳量; $w(S_y)$ 为煤的收到基硫分; $w(A_y)$ 为煤的收到基灰分; $\rho(CO)$

为烟气中 CO 的质量浓度; $\rho(\text{RO}_2)$ 为烟气中 CO_2 , SO_2 , NO_2 质量浓度之和。

不同燃料的飞灰含量及燃烧效率见表 5。由表 5 可见,3 个工况的燃烧效率都在 99.0% 以上,表明燃料的燃尽性都很好。

表 5 不同燃料的飞灰含量及燃烧效率
Tab. 5 Fly ash content and combustion efficiency of different fuels

项目	单位	神木烟煤	神木半焦	混合燃料
$w(\text{C}_{\text{th}})$	%	4.56	3.27	4.28
$w(\text{C}_{\text{th}})$	%	3.10	2.50	2.98
$\rho(\text{CO})$	mg/m^3	235	210	123
η_{cf}	%	99.3	99.5	99.4

试验过程中对尾部烟气中的 NO_x 进行了在线分析,工况 1—3 下尾部烟气中 NO_x 质量浓度随时间的变化如图 7 所示。由图 7 可见,尾部烟气的成分在各工况下均比较稳定。

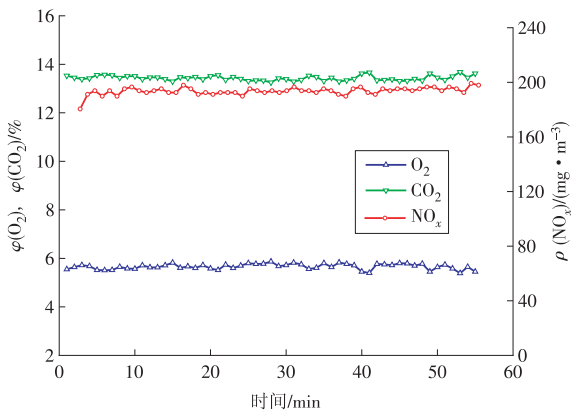


图 7 尾部烟气中 NO_x 质量浓度随时间的变化
Fig. 7 Mass concentration of NO_x in discharged flue gas varying with time

该锅炉执行 GB 13271—2017《锅炉大气污染物排放标准》,因此进行 NO_x 折算时,基准 O_2 体积分数 $\varphi(\text{O}_2)$ 选 9%。3 个工况下的 NO_x 排放质量浓度见表 6,由表 6 可见:神木烟煤的 NO_x 排放质量浓度最低,为 $145.8 \text{ mg}/\text{m}^3$ ($\varphi(\text{O}_2)=9\%$),而以神木半焦和神木半焦掺混气化残炭为燃料时, NO_x 排放质量浓度都超过了 $200.0 \text{ mg}/\text{m}^3$ ($\varphi(\text{O}_2)=9\%$)。

表 6 工况 1—3 下 NO_x 排放质量浓度
Tab. 6 Mass concentration of NO_x discharged under working condition 1—3

项目	单位	工况 1	工况 2	工况 3
$\varphi(\text{O}_2)$	%	7.7	8.0	5.7
$\rho(\text{NO}_x)(\varphi(\text{O}_2)=9\%)$	mg/m^3	145.8	283.9	234.2

2.2 预热温度对燃烧及 NO_x 排放的影响

试验过程中保证给煤量和送粉风量不变,通过

改变一次风量来改变预热温度,工况 4—6 的预热温度分别为 855, 887, 942 $^{\circ}\text{C}$ 。可以看到,预热燃烧器空气当量比越高,预热燃烧器的温度越高。

3 个工况下燃烧室内温度沿轴向的分布如图 8 所示。随着预热温度的升高,炉膛底部的温度明显升高,当预热温度为 855 $^{\circ}\text{C}$ 时炉膛底部的温度为 840 $^{\circ}\text{C}$,当预热温度升高到 942 $^{\circ}\text{C}$ 后炉膛底部的温度也升高到 894 $^{\circ}\text{C}$;另外,随着预热温度的升高炉膛的整体温度也有所升高,说明预热温度升高有利于预热后的燃料在炉膛中燃烧放热,可提升炉膛内的燃烧份额,使预热燃料燃尽性更好,有助于提升锅炉的整体热效率。

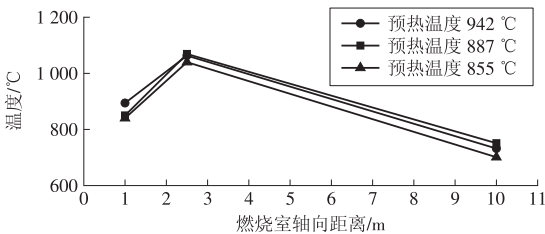


图 8 不同预热温度下燃烧室温度沿轴向的分布
Fig. 8 Temperature profiles along the axis of combustion chamber with different preheating temperatures

不同预热温度下的 NO_x 排放质量浓度见表 7,3 个工况下 NO_x 排放质量浓度都比较低,尾部烟气中的 CO 质量浓度也比较低。随着预热温度的升高, NO_x 排放质量浓度呈现先降低后增加的趋势,当预热温度为 887 $^{\circ}\text{C}$ 时, NO_x 排放质量浓度最低,为 $110.6 \text{ mg}/\text{m}^3$ ($\varphi(\text{O}_2)=9\%$)。

该试验结果与在 30 kW 预热燃烧试验台以神木半焦和阳泉无烟煤为燃料进行试验时得到的试验结果相同^[14],这是因为预热温度升高有利于预热过程中燃料 N 的还原,但当预热温度过高时,预热燃料的空隙会坍塌,对后续燃烧过程中焦炭对 N 的还原造成影响。

表 7 不同预热温度下 NO_x 排放质量浓度
Tab. 7 Mass concentration of NO_x discharged at different preheating temperatures

项目	单位	工况 4	工况 5	工况 6
预热温度	$^{\circ}\text{C}$	855	887	942
$\rho(\text{CO})$	mg/m^3	210	176	174
$\varphi(\text{O}_2)$	%	9.6	8.8	8.7
$\rho(\text{NO}_x)(\varphi(\text{O}_2)=9\%)$	mg/m^3	118.5	110.6	122.6

2.3 锅炉负荷对燃烧及 NO_x 排放的影响

不同锅炉负荷的试验中分别选取了 13.3, 19.3, 28.0 t/h 负荷进行研究,3 个工况下预热燃烧器空气当量比和预热温度基本相同,由于试验中需要综合考虑运行安全和生产要求,3 个工况中二次

风当量比相差较大,试验结果可为实际运行和下一步的锅炉设计提供参考。

不同负荷下炉膛温度分布如图 9 所示。从图 9 可知,3 个工况下燃烧室内的温度分布曲线基本相同,温度不同主要是由负荷不同引起的。锅炉负荷为 13.3 t/h 时炉膛内的最高温度只有 846 ℃,炉膛出口温度只有 579 ℃,虽然燃烧温度较低但运行比较稳定,说明预热燃烧技术对于低负荷下的锅炉稳燃有较好的作用。

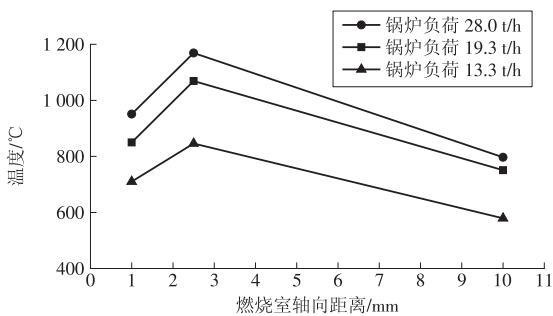


图 9 不同负荷下燃烧室温度沿轴向的分布

Fig. 9 Temperature profiles along the axis of combustion chamber with different boiler loads

不同负荷下的 NO_x 排放质量浓度见表 8,3 个工况下 NO_x 排放质量浓度都低于 200 mg/m³(φ(O₂)=9%)。随着锅炉负荷的增加,尾部烟气中 O₂ 的体积分数降低,CO 质量浓度增加,NO_x 排放质量浓度增加。值得注意的是,锅炉负荷越低,NO_x 排放质量浓度越低,这是因为低负荷下预热燃料的射流刚度较小,预热燃料射流与二次风掺混更加容易且掺混更均匀,使 NO_x 排放质量浓度降低,同时燃烧加强,CO 的质量浓度也降低。

表 8 不同负荷下 NO_x 排放质量浓度
Tab. 8 Mass concentration of NO_x discharged under different loads

项目	单位	工况 7	工况 8	工况 9
负荷率	%	38	55	80
ρ(CO)	mg/m ³	51	176	255
φ(O ₂)	%	12.8	8.8	6.1
ρ(NO _x)(φ(O ₂)=9%)	mg/m ³	108	110	117

3 结论

针对 35 t/h 纯燃超低挥发分碳基燃料预热燃烧锅炉,以神木烟煤、神木半焦及神木半焦掺混 6% 的气化残炭为燃料进行了热态试验,研究了燃料种类、预热温度、二次风当量比以及负荷对预热燃烧特性及 NO_x 排放的影响,结论如下。

(1) 预热燃烧锅炉具有较好的燃料适应性,烟煤、半焦和气化残炭都能实现稳定、高效的燃烧。

(2) 研究了不同燃料的预热燃烧及 NO_x 排放特性,结果表明:3 种燃料通过预热后进行燃烧,燃烧效率都超过 99%;神木烟煤的 NO_x 排放质量浓度最低,其余 2 种燃料的 NO_x 排放质量浓度都超过 200 mg/m³(φ(O₂)=9%)。

(3) 以神木半焦掺混气化残炭为燃料,研究了预热温度对燃烧及 NO_x 排放特性的影响,研究结果表明:随着预热温度的升高,炉膛整体温度有所升高,说明预热温度升高有利于预热后的燃料在炉膛中燃烧放热;随着预热温度的升高,NO_x 排放质量浓度先降低后增加,当预热温度达到 887 ℃ 时,NO_x 排放质量浓度达最低值 110.6 mg/m³(φ(O₂)=9%)。

(4) 以神木半焦掺混气化残炭为燃料,研究了锅炉负荷对燃烧及 NO_x 排放特性的影响,研究结果表明:预热燃烧锅炉低负荷下稳燃特性较好,锅炉负荷越低 NO_x 排放质量浓度越低,最低可达到 108 mg/m³(φ(O₂)=9%)。

参考文献:

[1] NIMMO W, JAVED M T, GIBBS B M. NO_x control by ammonium carbonate and ammonia with hydrocarbons as additives [J]. Journal of the Energy Institute, 2018, 81: 131-134.

[2] YI L, FENG J, LI W Y. Evaluation on a combined model for low-rank coal pyrolysis [J]. Energy, 2018, 169: 1012-1021.

[3] 周江华,况敏,朱群益,等. 超临界 600 MW 机组英巴 W 火焰炉偏斜气固两相流和不对称燃烧研究[J]. 热力发电, 2017, 46(9): 65-71.

ZHOU Jianghua, KUANG Min, ZHU Qunyi, et al. Deflected gas/particle flow characteristics and asymmetrical combustion performance of a supercritical 600 MW MBEL W-shaped flame boiler [J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(9): 65-71.

[4] WANG Q, CHEN Z, WANG L, et al. Application of eccentric-swirl-secondary-air combustion technology for high-efficiency and low-NO_x performance on a large-scale down-fired boiler with swirl burners [J]. Apply Energy, 2018, 223: 358-368.

[5] 申春梅. 煤拔头半焦燃烧反应特性的基础研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

[6] 杜杰,戴高峰,李帅帅,等. 气化细渣基础燃烧特性试验研究 [J]. 洁净煤技术, 2019, 25(2): 83-88.

DU Jie, DAI Gaofeng, LI Shuaishuai, et al. Experimental study on the fundamental combustion characteristics of fine slag from gasification[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25 (2): 83-88.

- [7]李慧,杨石,周建明.半焦空气分级燃烧降低 NO_x 排放的试验研究[J].洁净煤技术,2020,26(2):109-114.
LI Hui, YANG Shi, ZHOU Jianming. Experimental study on semi-coke air-staged combustion to decrease NO_x emission [J]. Clean Coal Technology, 2020, 26 (2) : 109-114.
- [8]柳公权.新型拱式燃烧技术在W火焰锅炉的应用[J].锅炉技术,2018,49(4):52-56.
LIU Gongquan. New arch firing technology and its application to W flame boiler[J]. Boiler Technology, 2018, 49(4): 52-56.
- [9]刘家利,杨忠灿,王志超,等.兰炭作为动力用煤的燃烧性能研究[J].洁净煤技术,2016,33(3):84-88.
LIU Jiali, YANG Zhongcan, WANG Zhichao, et al. Combustion characteristics of combustion characteristics of blue-coke as fuel for pulverized coal boiler [J]. Clean Coal Technology, 2016, 33(3): 84-88.
- [10]欧阳子区.无烟煤预热及其燃烧和污染物生成特性实验研究[D].北京:中国科学院大学,2014.
- [11]么瑶.细粉半焦预热燃烧及 NO_x 生成特性实验研究[D].北京:中国科学院大学,2016.
- [12]YAO Y, ZHU J G, LYU Q G. Experimental study on nitrogen transformation in combustion of pulverized semi-coke preheated in a circulating fluidized bed [J]. Energy and Fuels, 2015, 29: 3985-3991.
- [13]周祖旭,么瑶,朱建国,等.煤气化残炭的预热燃烧试验研究[J].锅炉技术,2015,46(5):39-43.
ZHOU Zuxu, YAO Yao, ZHU Jianguo, et al. Experimental study on combustion characteristics of residual carbon of coal gasification [J]. Boiler Technology, 2015, 46(5): 39-43.
- [14]OUYANG Z Q, ZHU J G, LU Q G. Particle characteristics of anthracite powder preheated quickly in circulating fluidized bed [C]//International Conference on Materials for Renewable Energy& Environment, 2013: 796-801.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

欧阳子区(1987—),男,山东菏泽人,副研究员,工学博士,从事固体燃料清洁高效燃烧研究工作(E-mail: ouyangziqu@iet.cn)。

李诗媛*(1979—),女,内蒙古赤峰人,研究员,教授,博士生导师,工学博士,从事固体燃料清洁高效燃烧研究工作(E-mail: lishiyuan@iet.cn)。