

40 t/h 煤粉预热燃烧锅炉运行和低 NO_x 试验研究

满承波^{1,3}, 高超⁴, 欧阳子区^{1,3}, 潘清波⁴, 田继林⁵, 刘敬樟^{1,3}, 朱建国^{1,2,3}

(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 100045;

3.中国科学院洁净能源创新院, 辽宁 大连 116023;

4.兖矿中科清洁能源科技有限公司, 山东 济宁 273516;

5.大同市煤炭清洁高效利用研究所, 山西 大同 037305)

[摘要] 为应对日益严峻的大气污染形势, 实现煤粉高效低 NO_x 燃烧, 开发了煤粉预热燃烧技术。煤粉首先进入流化床预热燃烧器, 与较低当量比的空气发生部分燃烧反应产生热量将自身预热至 800 °C 以上, 在高温强还原性气氛下析出并脱除部分燃料氮, 预热后的燃料随后进入煤粉炉膛, 在炉内通过分级配风进一步控制 NO_x 生成。某 40 t/h 煤粉预热燃烧锅炉工业试验结果表明: 该锅炉可实现高效运行和低 NO_x 排放的协同控制; 锅炉 NO_x 排放质量浓度随锅炉负荷的提升而逐渐升高, 提高内二次风比例和延迟三次风配入等手段均有利于降低 NO_x 排放质量浓度; 二次风当量比在 0.4 左右时 NO_x 排放质量浓度最低; 锅炉热效率可达到 93.08%, 在 50%~100% 负荷范围内可实现 NO_x 原始排放质量浓度 ≤ 119 mg/m³ ($\varphi(\text{O}_2)=6\%$)。

[关键词] 煤粉; 预热燃烧; 锅炉; 高效燃烧; 低 NO_x 排放; 热效率

[中图分类号] TK227.1 **[文献标识码]** A **[DOI 编号]** 10.19666/j.rlf.202103046

[引用本文格式] 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 experimental research of a 40 t/h preheating combustion pulverized coal boiler[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(9): 160-166.

Operation and low NO_x experimental research of a 40 t/h preheating combustion pulverized coal boiler

MAN Chengbo^{1,3}, GAO Chao⁴, OUYANG Ziqu^{1,3}, PAN Qingbo⁴, TIAN Jilin⁵,
LIU Jingzhang^{1,3}, ZHU Jianguo^{1,2,3}

(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. Yankuangzhongke Clean Energy Technology Co., Ltd., Jining 273516, China; 5. Datong Institute of Coal Clean Efficient Utilization, Datong 037305, China)

Abstract: Facing the increasingly serious situation of air pollution, to realize high efficient low NO_x combustion of pulverized coal, the technical route of combustion with fuel preheating was put forward and developed. In this technology, the pulverized coal particles are preheated to over 800 °C in a CFB by partial combustion with equivalence ratio air, and then the resulting fuel gas and char particles are burned out in the furnace under air-staging conditions. Part of fuel nitrogen is removed at high temperature and in strong reducing atmosphere in the preheating process, and the NO_x generation can be further decreased by staged air distribution in the furnace. The results of industrial tests on a pulverized coal preheating combustion 40 t/h boiler showed that, this boiler could realize collaborative control of efficient operation and low NO_x emissions. The NO_x emission mass concentration increased with the boiler operating load, increasing the internal secondary air ratio and delaying the use of the tertiary air could both reduce the NO_x emission mass concentration. The NO_x emission mass concentration reached the lowest

收稿日期: 2021-03-22

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项变革性清洁能源关键技术与示范(XDA21040100)

Supported by: Transformational Technologies for Clean Energy and Demonstration, Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA21040100)

第一作者简介: 满承波(1986), 男, 博士, 主要研究方向为煤炭高效清洁利用技术, manchengbo@iet.cn。

when the equivalent ratio of the secondary air was 0.4. Generally, the thermal efficiency of the boiler could reach 93.08% and the original NO_x emission mass concentration could be controlled below 119 mg/m³ ($\phi(\text{O}_2)=6\%$) in the range of 50%~100% operating load.

Key words: pulverized coal, preheating combustion, boiler, high efficient combustion, low NO_x emission, thermal efficiency

近年来,我国大型电站锅炉已基本完成了超低排放改造,但随着国家环保标准日趋严格,数量巨大、容量和技术水平参差不齐的燃煤工业锅炉也面临巨大的减排压力^[1-3]。目前国内燃煤工业锅炉主要依靠选择性催化还原(SCR)和选择性非催化还原(SNCR)等燃烧后烟气处理技术实现 NO_x 达标排放^[4-5],然而上述技术存在费用高、氨逃逸、影响燃烧效率、催化剂重金属等二次污染问题^[6]。因此,开发低 NO_x 燃烧技术,在燃烧过程中降低 NO_x 原始排放,是满足环保需求、推动燃煤工业锅炉技术提升的必然要求。

国内外对于煤粉低 NO_x 燃烧技术方向的研究主要集中在低 NO_x 燃烧器和低 NO_x 燃烧组织两个方向。我国曾经引进或正在使用的国外低 NO_x 燃烧器包括美国 B&W 公司的 DRB/XCL 燃烧器^[7]、FW 公司的 CF/SF 燃烧器^[8]、CE 公司的 WR 燃烧器^[9]、日本日立-Babcock 公司的 HT-NR 燃烧器^[10]、三井-Babcock 公司的 LNASB 燃烧器^[11];国内研发的低 NO_x 燃烧器包括清华大学“煤粉浓缩低氮燃烧器”^[12]、西安交通大学“强回流低温低氮燃烧器”^[13]、哈尔滨工业大学“中心给粉径向浓淡煤粉燃烧器”^[14]、中国煤炭科学技术研究院“中心逆喷双锥燃烧器”^[15]、烟台龙源电力技术股份有限公司“双尺度低 NO_x 燃烧技术”等。上述技术在研发人员的不断优化改进下,国内煤粉工业锅炉的 NO_x 原始排放已经可以降低至 200 mg/m³,其中西安交通大学开发的低 NO_x 旋流燃烧器在 30 t/h 煤粉工业锅炉上实现了 NO_x 原始排放 156 mg/m³^[16]。

国内外对低 NO_x 燃烧组织技术的研发则出现了多种路线。全俄热工研究院^[17]、西安交通大学^[18]、华中科技大学^[19]开发了使用气体燃烧先加热煤粉并初步脱氮后再配风燃烧的技术路线,德国 RWTH Aachen University 研发了煤粉无焰燃烧技术^[20],这两种技术相互配合,实现了 NO_x 原始排放 200~400 mg/m³。西安交通大学开发的另一技术路线的低 NO_x 旋流燃烧器在燃烧器尾部增加了耐火材料保温的预燃室^[21],通过煤粉的预燃烧和脱氮实现降低 NO_x 效果。

近几年发展起来的低 NO_x 燃烧组织技术大多

开始采用初期预热后再燃烧的技术理念,取得了较好的降氮效果。中国科学院工程热物理研究所早在 2004 年即提出了预热燃烧技术^[22],煤粉等燃料在循环流化床型式的燃烧器先进行预热并脱除部分燃料氮,再通入炉膛通过分级燃烧进一步控制 NO_x 生成,进而实现低 NO_x 排放。该技术已在 30 kW 小试实验台和 2 MW 中试实验台上分别实现了 31 mg/m³^[23]和 67 mg/m³^[24]的 NO_x 原始排放,降氮效果显著,具有良好的工程化应用前景^[25]。

本文介绍采用上述预热燃烧技术的 40 t/h 煤粉工业锅炉的设计、建设、调试情况,并通过工业试验研究了预热燃烧技术的工业化放大规律和实现低 NO_x 排放的参数调整原则。

1 锅炉设计

1.1 设计依据

中国科学院工程热物理研究所提出的预热燃烧技术,将煤粉的燃烧分为 2 个阶段:第 1 阶段为预热阶段,将煤粉通入流化床型式的预热燃烧器中,通入较低当量比的空气,煤粉在预热燃烧器中发生部分燃烧反应生成焦炭和煤气的混合物,反应放出热量将燃料自身加热至 800 °C 以上;第 2 阶段为燃烧阶段,将预热产生的高温焦炭与煤气混合物送入炉膛,与空气混合进行燃烧,实现燃料的燃尽。

传统的煤粉燃烧技术中,NO_x 的生成主要通过 3 条主要路径:1) 空气中的 N₂ 在 1 500 °C 以上温度下转化为热力型 NO_x; 2) 煤中挥发分氮先转化为前驱物 HCN 和 NH₃,然后在氧化性气氛下被氧化为 NO_x; 3) 煤中焦炭氮高温析出后被氧化为 NO_x。

预热燃烧技术构建了煤中燃料氮转化的新路径:1) 煤中挥发分氮在预热燃烧器中析出并转化为 HCN 和 NH₃,但由于析出反应发生在预热燃烧器提供的高温强还原性气氛下,因此这些前驱物不会转化为 NO_x; 2) 煤中焦炭氮在预热燃烧器和炉膛中均会发生析出,预热装置中析出的焦炭氮在强还原性气氛下发生向 N₂ 的转化,未析出的焦炭氮通过高温燃料喷口技术和深度分级控制技术在炉膛内大部分转化为 N₂; 3) 通过热燃料全炉膛调控技术,实现无明显高温区的全炉膛空间燃烧,最高燃烧温

度不高于 1 200 ℃，避免了热力型 NO_x 的生成。本研究依托的 40 t/h 锅炉采用了预热燃烧技术进行设计，并遵循预热燃烧的降氮理念开展调试和试验，力争实现高效燃烧和低 NO_x 排放的协同控制。

1.2 设计参数

某 40 t/h 煤粉工业锅炉使用的燃料为神木烟煤，其工业分析、元素分析和发热量见表 1，锅炉主要设计参数见表 2。

表 1 燃料分析
Tab.1 Proximate and ultimate analysis of the coal

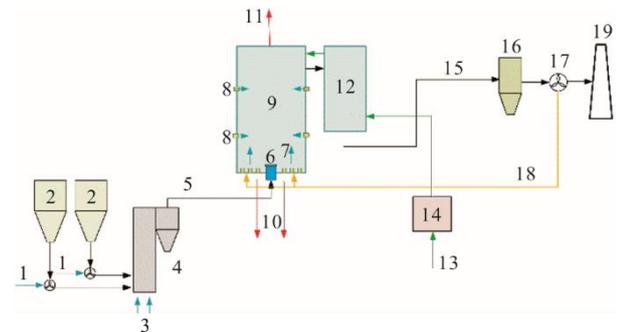
项目	数值	项目	数值
w _{ar} (C)/%	69.74	w _{ad} (M)/%	2.50
w _{ar} (H)/%	4.06	w _{ad} (A)/%	58.33
w _{ar} (O)/%	13.79	w _{ad} (FC)/%	30.58
w _{ar} (N)/%	0.93	w _{ad} (V)/%	8.59
w _{ar} (S)/%	0.39	Q _{net,ar} /(MJ·kg ⁻¹)	27.56

表 2 锅炉主要设计参数
Tab.2 Main design parameters of the boiler

项目	数值
燃料消耗量/(kg·h ⁻¹)	4 734
额定蒸发量/(t·h ⁻¹)	40
过热蒸汽压力/MPa	3.82
过热蒸汽温度/℃	450
给水温度/℃	120
排烟温度/℃	140

1.3 工艺流程

该锅炉为过热蒸汽锅炉，额定蒸汽量为 40 t/h，额定温度和压力分别为 450 ℃、3.82 MPa，设计燃料消耗量为 4 734 kg/h。锅炉的工艺流程如图 1 所示。主要包括煤粉储供系统、烟风系统、水系统、点火燃烧系统和尾部烟气处理系统。



1—送粉风；2—煤粉仓；3—一次风；4—预热燃烧器；5—预热燃料；6—燃料喷嘴；7—二次风；8—三次风；9—炉膛；10—灰渣；11—主蒸汽；12—尾部烟道；13—给水；14—除氧器；15—尾部烟气；16—烟气净化；17—除尘器；18—再循环烟气；19—烟囱。

图 1 锅炉工艺流程
Fig.1 Technical process of the boiler

煤粉储供系统包括煤粉储备和煤粉输送系统。煤粉储存在 2 个 100 m³ 的煤粉仓中，煤粉仓设置惰性气体安全保护装置。供粉时煤粉通过给粉机落入送粉管，由送粉风携带送入预热燃烧器。为了确保锅炉的稳定运行，储仓和输送系统均设置 2 套，一用一备。

煤粉在预热燃烧器中与一次风、送粉风混合后实现流态化高温预热反应，形成高温煤气和焦炭混合的高温预热燃料。高温预热燃料从预热燃烧器流出后经过一段连接段进入炉膛，由于预热燃料温度高于 800 ℃，因此预热燃烧器和连接段均采用耐火保温材料制成，控制外表面温度 < 60 ℃，预热和输送过程完全密封，可保证析出的煤气和焦炭全部进入炉膛参与燃烧，因此不会造成煤粉的热值损失和散热损失，即不会因为预热而造成经济性降低。

二次风和三次风均经过高温空气预热器和低温空气预热器预热，预热后的二次风从炉膛底部配入，与高温预热燃料混合进行燃烧；三次风分 2 层在炉膛 4 000 mm、8 000 mm 2 个高度位置水平送入炉内，用于实现煤粉燃尽。燃烧产生的高温烟气经余热回收及废气处理系统后由引风机送至烟囱。再循环烟气从袋式除尘器后面抽出，在必要时送入炉底，与二次风混合进入炉膛，以调节燃烧温度和 NO_x 排放。

1.4 炉膛配风

传统煤粉燃烧时，煤粉进入炉膛的温度较低，小型工业煤粉锅炉一次风温一般不高于 200 ℃，采用热风送粉的锅炉一次风温度一般为 300~400 ℃。传统煤粉燃烧器在喷口区域须构建“三高”区，即高温、高煤粉浓度、较高氧浓度，煤粉射流卷吸高温烟气带来热量加热低温的煤粉，使其在较高氧浓度下实现稳定的着火和燃烧。“三高”中的高温和较高氧浓度，均对 NO_x 的生成起到一定的促进作用，因此一直以来煤粉的“高效稳定燃烧”和“低 NO_x”都是一对矛盾体，很难同时实现。因此研究人员提出了空气分级技术，力图在喷口区域建立还原区以降低 NO_x，但目前最低只能将喷口区域的空气当量降至 0.8，否则将影响燃烧稳定性。

40 t/h 锅炉煤粉预热为基础，煤粉在预热燃烧器中经过高温预热，进入炉膛时温度达到 800 ℃ 以上，已高于自身着火点，无需强烈掺混即可实现着火和稳燃。另外，煤粉在预热燃烧器中通过预热实现了的燃料改性，煤粉的孔隙增加，反应活性提高^[23]，更加有利于着火和燃尽。因此，采用预热燃烧技术可摆脱传统煤粉燃烧的稳燃和燃尽要求限

制, 无需建立“三高”区, 可以更灵活地进行燃烧组织。基于上述理念, 本文提出二次风在炉膛底部预热燃料喷口四周均匀配入, 三次风分上下2层配入。二次风当量比可在0.2~0.6灵活调节, 主燃烧区总空气当量比最低可低至0.4, 依然有望实现良好的着火和稳燃效果。

2 锅炉运行情况

作为世界首台用于发电的基于预热燃烧技术路线的煤粉锅炉, 该锅炉建成后首先进行了调试, 验证了系统的运行稳定性。

需要指出的是, 本文介绍的锅炉运行数据均为工况连续稳定运行24 h后, 连续4 h测量的平均值, 温度数据记录间隔为1 min, 烟气成分数据记录间隔为5 min。

2.1 燃烧器运行情况

40 t/h 锅炉的燃烧器为循环流化床结构的预热燃烧器。送粉风携带煤粉进入燃烧器, 一次风提供床料和燃料的流化所需空气, 送粉风和一次风共同提供了预热燃烧器内煤粉化学反应所需氧气, 二者总的空气当量比不高于0.2。在最初升温引燃过程完成后, 煤粉可以稳定地实现自持预热。预热燃烧器中设置4个K型热电偶, 分别位于预热燃烧器提升管的底部、中部和上部, 另一个在U型返料器内。在168 h运行考核过程中, 锅炉按照考核要求在90%以上负荷运行, 4个点测得的温度曲线如图2所示。由图2可以看出, 在运行过程中, 4个温度点温度相近且曲线平滑, 说明预热燃烧器运行稳定、温度均匀, 反映出循环流化床内物料循环正常, 证明了0.2左右的空气当量比可保证煤粉发生部分燃烧、气化、热解等反应所放出的总热量将煤粉稳定连续地预热至900℃左右。

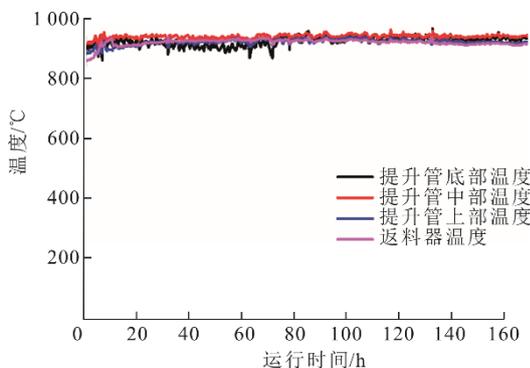


图2 预热燃烧器内的温度变化 (168 h)

Fig.2 Temperature changes in the preheating burner (168 h)

2.2 炉膛运行情况

锅炉炉膛中沿高度方向布置了9个温度测点, 168 h运行过程中(负荷90%), 测得炉膛内的各点温度时间均值分布如图3所示。从图3可以看出, 炉膛内温度在650~950℃, 最高温度未超过1000℃。传统煤粉锅炉主燃烧区的火焰中心温度一般超过1400℃, 较高的燃烧温度是为了促进煤粉燃尽, 但也容易促进热力型NO_x的生成。该锅炉较传统煤粉锅炉内的温度明显偏低, 主要原因是该锅炉的炉膛采取了较为均匀的配风方式, 较低的炉膛温度基本杜绝了热力型NO_x的生成。168 h内烟气平均氧体积分数为3.68%, CO平均质量浓度为117 mg/m³, 验证了本锅炉均匀的炉膛布风方式能够实现锅炉的稳定运行。

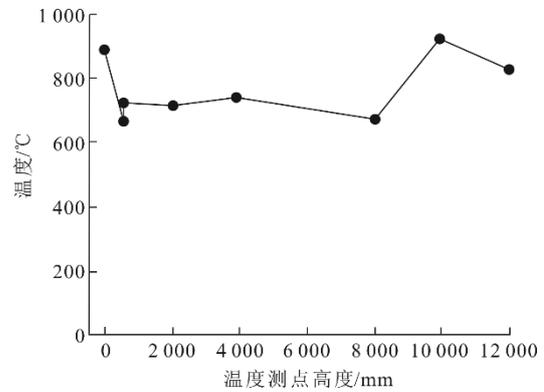


图3 炉膛内沿高度方向温度分布

Fig.3 Temperature distribution in the furnace along the height direction

3 低 NO_x 试验

本研究在40 t/h 锅炉上开展了工程试验, 探讨了锅炉负荷、二次风当量比、内外二次风比例、三次风配入位置等因素对NO_x排放的影响, 本文的NO_x原始排放均按照氧体积分数6%进行折算。

3.1 二次风当量比对NO_x的影响

图4为不同二次风当量比条件下的NO_x排放情况。各工况均是在60%负荷、预热空气当量比0.2, 只开启上层三次风的条件下进行。从图4可以看出, 各工况排放最低的点在二次风当量比0.41, 可以推测NO_x排放最低的二次风当量比区间在0.35~0.50, 可能在0.40左右。造成这一现象的原因可能是在0.40左右的二次风当量比下, 炉膛底部能够维持合理的还原区气氛, 同时足够高的燃烧份额可以提供NO_x还原所需要的足够高的温度。当二次风当量比提高时, 还原区的还原性气氛减弱, 可能出现更多

的局部氧化性气氛；当二次风当量比降低时，尽管还原气氛更强，但还原区的温度不够高，还原反应减弱。因此，比此最佳值更高或者更低的二次风当量比都无法获得最低的 NO_x 排放。

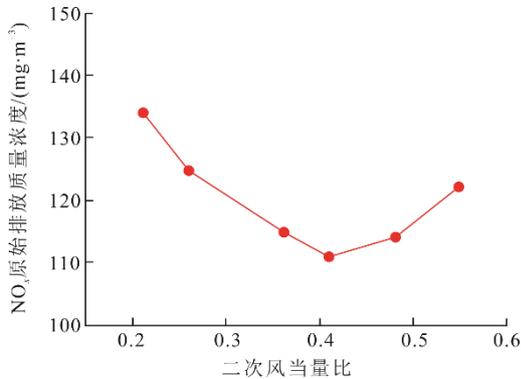


图4 不同二次风当量比下的 NO_x 原始排放质量浓度
Fig.4 The original NO_x emission mass concentrations at different secondary air ratios

3.2 内外二次风比例对 NO_x 的影响

本锅炉的二次风配风形式与传统煤粉燃烧器不同，预热燃料喷口位于炉膛底部中心，将预热燃料从下向上喷入炉膛，二次风在喷口四周由4根风管均匀配入炉膛，其中靠近喷口的2根为内二次风，远离喷口的为外二次风，内外二次风均可以单独调节和控制风量（图5）。

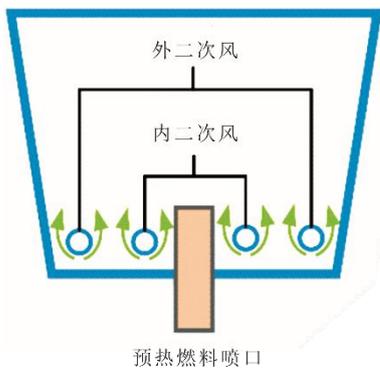


图5 二次风配风形式
Fig.5 The secondary air distribution mode

图6为内外二次风不同配比下的 NO_x 排放情况。各工况均是在60%负荷、预热空气当量比为0.2，二次风当量比约为0.4，三次风开启上下2层的条件下进行。从图6可以看出，外二次风比例越高， NO_x 排放质量浓度越高，即内二次风较外二次风更有利于降低 NO_x 排放量。这是由于喷口区域的总空气当量比在0.6~0.7，属于还原性气氛，但如果预热燃料和二次风掺混不佳，依然可能出现局部氧化区，不利于抑制 NO_x 生成，而二次风距离喷口较近，

有利于燃料与二次风的掺混，外二次风距离预热燃料喷口过远，无法及时掺混，掺混不均匀容易造成局部氧化区，对 NO_x 的生成无法起到足够的抑制作用。

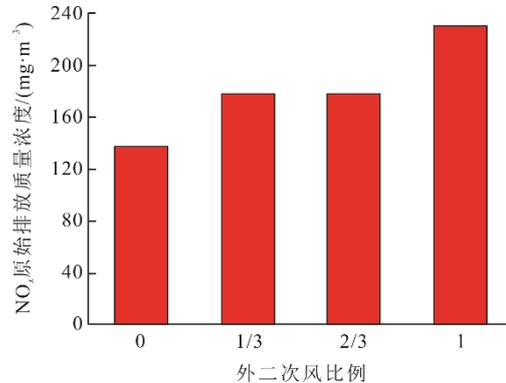


图6 不同内外二次风配比的 NO_x 原始排放质量浓度
Fig.6 The original NO_x emission mass concentrations with different secondary air distributions

3.3 三次风配入位置对 NO_x 的影响

本锅炉的三次风分2层配入，分别在喷口以上4000 mm和8000 mm高度的位置，三次风配入位置的变化将改变炉内还原区的高度，对 NO_x 的生成也有一定影响。本研究分别开展了2个不同三次风配入位置工况的对比研究，其中工况1的三次风在4000 mm和8000 mm配入，工况2的三次风只在8000 mm配入，两者的 NO_x 原始排放质量浓度分别为178 mg/m^3 和90 mg/m^3 。这说明当三次风延迟配入炉膛时，在炉膛内造成了更大区域的还原区，更加有利于降低 NO_x 排放。

3.4 锅炉负荷变化对 NO_x 的影响

图7为3种不同负荷下锅炉的 NO_x 原始排放质量浓度。由图7可以看出， NO_x 原始排放质量浓度随锅炉负荷的提高而逐渐升高，这主要是由于锅炉负荷升高后，炉膛内的燃料和空气掺混均匀性变差所致。

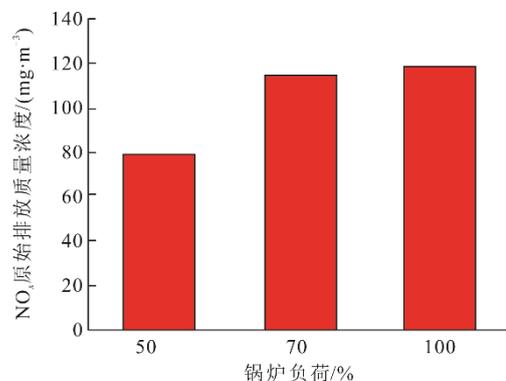


图7 不同锅炉负荷下的 NO_x 原始排放质量浓度
Fig.7 The original NO_x emission mass concentrations at different operating loads

3个工况虽然负荷不同,但预热燃烧器内的脱氮效果是相同的。这是由于预热燃烧器的运行温度与空气当量比是相对应的,要保持良好的预热改性和脱氮效果,就必须将预热燃烧器内的温度维持在800℃以上,而决定预热温度的,是煤粉与空气发生反应的燃烧份额,因此在不同锅炉负荷下,保持相同的预热空气当量比,其脱氮效果也就基本保持一致。

3个工况不同的是炉膛内预热燃料与空气的掺混情况。在不同的工况下,燃料量和空气量均有所不同,负荷越高预热燃料量越大,燃料与空气的掺混就越难达到均匀,就会在整体还原性气氛中形成局部氧化性气氛,导致NO_x的生成。但即使在100%负荷下,本锅炉依然实现了119 mg/m³以下的NO_x原始排放,这说明预热燃烧系统尽管受到诸多参数的影响,但其在降低NO_x排放方面,较传统煤粉燃烧方式仍然有明显优势。

3.5 锅炉热效率和NO_x排放

NO_x与锅炉热效率尤其是CO的质量浓度有较为紧密的联系,若CO质量浓度过高,则NO_x的排放数据参考意义将大打折扣。本文测试了3个不同负荷工况的锅炉热效率和CO质量浓度,结果见表3。由表3可见,3个工况的锅炉热效率都在92%以上,CO质量浓度在350 mg/m³以下,NO_x原始排放质量浓度<119 mg/m³的结果是在较高的锅炉热效率和较低的CO质量浓度下获得的,说明预热燃烧技术的降氮效果可以在不牺牲锅炉效率的前提下获得。

表3 锅炉热效率和NO_x排放质量浓度
Tab.3 The boiler thermal efficiency and NO_x emission mass concentration

项目	工况1	工况2	工况3
运行负荷/%	50	70	100
锅炉热效率/%	92.19	92.46	93.08
CO排放质量浓度/(mg·m ⁻³)	339	227	235
NO _x 原始排放质量浓度/(mg·m ⁻³)	79	115	119

4 结 论

1) 某40 t/h煤粉预热燃烧锅炉的NO_x排放随锅炉负荷的提高而逐渐升高,能够在50%~100%负荷实现NO_x原始排放质量浓度低于119 mg/m³(φ(O₂)=6%),同时满负荷热效率可达到92%以上。

2) 在锅炉目前的设备状态和二次风配风组织形式下,NO_x排放存在1个最优的二次风当量比区间,在0.35~0.50范围内。

3) 加强预热燃料和二次风的掺混,如提高内二次风比例降低外二次风比例,有利于降低NO_x排放。

4) 开启上层三次风关闭下层三次风,即延迟三次风配入,有利于降低NO_x排放。

[参 考 文 献]

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020: 275-293.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook: 2020[M]. Beijing: China Statistics Press, 2020: 275-293.
- [2] 周勇. 找准致霾根本原因实现低成本快速精准治霾的路径与对策[J]. 科学与管理, 2019(3): 1-9.
ZHOU Yong. Finding the primary cause for haze, deal with the haze in an economic, fast, accurate way[J]. Science and Management, 2019(3): 1-9.
- [3] 锅炉大气污染物排放标准: GB 13271—2014[S]. 北京: 中国环境出版社, 2014: 3.
Emission standard of air pollutants for coal-burning oil-burning gas-fired boiler: GB 13271—2014[S]. Beijing: China Environmental Press, 2014: 3.
- [4] 王禹苏, 张蕾, 陈吉浩, 等. 大气中氮氧化物的危害及治理[J]. 科技创新与应用, 2019(7): 137-138.
WANG Yusu, ZHANG Lei, CHEN Jihao. Harm and treatment of nitrogen oxides in the atmosphere[J]. Technology Innovation and Application, 2019(7): 137-138.
- [5] 杨延龙. 火电厂氮氧化物减排及SCR烟气脱硝技术浅析[J]. 能源环境保护, 2017, 31(2): 31-35.
YANG Yanlong. Emissions reduction of NO_x in coal-fired power plant and simple analysis of SCR flue gas denitration technology[J]. Energy Environmental Protection, 2017, 31(2): 31-35.
- [6] SUN Y X, ZWOLINSKA E, CHMIELEWSKI A G. Abatement technologies for high concentrations of NO_x and SO₂ removal from exhaust gases: a review[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2016, 46(2): 119-142.
- [7] 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.
- [8] 周俊虎, 赵玉晓, 刘建忠, 等. 低NO_x煤粉燃烧器技术的研究进展与前景展望[J]. 热力发电, 2005, 34(8): 1-6.
ZHOU Junhu, ZHAO Yuxiao, LIU Jianzhong, et al. Research advancement and future prospect of low NO_x burners for pulverized coal[J]. Thermal Power Generation, 2005, 34(8): 1-6.
- [9] 白月娟, 王永英. 低NO_x煤粉燃烧器技术研究进展[J]. 煤质技术, 2018(2): 42-47.
BAI Yuejuan, WANG Yongying. Research development of typical low NO_x burners for pulverized coal[J]. Coal Quality Technology, 2018(2): 42-47.
- [10] 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.
- [11] ZENG L Y, LI Z Q, ZHAO G B, et al. The influence of swirl burner structure on the gas/particle flow character-

- ristics[J]. Energy, 2011, 36(10): 6184-6194.
- [12] 杨根盛, 李忠, 杨定华, 等. 煤粉预热燃烧原理分析与实验研究[J]. 锅炉制造, 2014(1): 6-9.
YANG Gensheng, LI Zhong, YANG Dinghua, et al. A new pulverized coal combustion concept-pulverized coal preheating combustion[J]. Boiler Manufacturing, 2014(1): 6-9.
- [13] 许鑫玮, 谭厚章, 王学斌, 等. 煤粉工业锅炉预燃式低氮燃烧器试验研究与开发[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(5): 36-41.
XU Xinwei, TAN Houzhang, WANG Xuebin, et al. Experimental study and development on a pre-burning low-NO_x burner for pulverized coal industry boiler[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(5): 36-41.
- [14] 梁冬. 应用浓缩型XCL旋流燃烧器的600 MW褐煤锅炉低氮排放的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 5.
LIANG Dong. The research on low nitrogen emission for concentrated XCL swirl burners used for a 600 MW Boiler burning lignite coal[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016: 5.
- [15] 程晓磊. 低氮燃烧技术在煤粉工业锅炉上的应用[J]. 洁净煤技术, 2018, 24(4): 109-113.
CHENG Xiaolei. Application of low-NO_x combustion technology on pulverized coal industrial boiler[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(4): 109-113.
- [16] 王帅, 龚彦豪, 牛艳青, 等. 煤粉预热-燃烧耦合过程中NO生成研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2951-2959.
WANG Shuai, GONG Yanhao, NIU Yanqing, et al. Study on NO formation during preheating-combustion coupling of pulverized coal[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2951-2959.
- [17] RABOVISTER J, BRYAN B, KNIGHT R, et al. Development and testing of a novel coal preheating technology for NO_x reduction from pulverized coal-fired boilers[J]. Gas, 2003, 1(2): 4-8.
- [18] LIU C C, HUI S E, PAN S, et al. The influence of air distribution on gas-fired coal preheating method for NO emissions reduction[J]. Fuel, 2015, 139: 206-212.
- [19] MA L, FANG Q Y, YIN C G, et al. A novel corner-fired boiler system of improved efficiency and coal flexibility and reduced NO_x emissions[J]. Applied Energy, 2019, 38: 453-465.
- [20] STADLER H, RISTIC D, FORSTER M, et al. NO_x-emissions from flameless coal combustion in air, Ar/O₂ and CO₂/O₂[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(2): 3131-3138.
- [21] 龚彦豪, 许鑫玮, 王登辉, 等. 新型低氮旋流燃烧器NO_x排放特性[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(6): 118-125.
GONG Yanhao, XU Xinwei, WANG Denghui, et al. NO_x emissions characteristics of a novel low-NO_x swirl burner[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(6): 118-125.
- [22] 吕清刚, 朱建国, 牛天钰, 等. 煤粉高温预热方法: CN200710175526.3[P]. 2008-04-09[2021-02-24].
LYU Qinggang, ZHU Jianguo, NIU Tianyu, et al. High-temperature preheating method for pulverized coal: CN200710175526.3[P]. 2008-04-09[2021-02-24].
- [23] 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.
- [24] OUYANG Z Q, SONG W H, LI S Y, et al. Experiment study on NO_x emission characteristics of the ultra-low volatile fuel in a 2 MW novel pulverized fuel self-sustained preheating combustor[J]. Energy, 2020, 209: 118448.
- [25] OUYANG Z Q, ZHU J G, LYU Q G. Experimental study on preheating and combustion characteristics of pulverized anthracite coal[J]. Fuel, 2013, 113: 122-127.

(责任编辑 马昕红)