

基于尾部烟道 CO 在线监测的锅炉燃烧优化

张晨浩¹, 苏 胜¹, 常寿兵², 欧阳朱峰¹, 任强强¹, 江紫薇¹, 王 鹏²,
周 敬¹, 崔晓宁¹, 胡 松¹, 汪 一¹, 向 军¹

(1. 华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 武汉 430074; 2. 沃森能源技术(廊坊)有限公司, 廊坊 065000)

摘 要: 以某电厂低氮改造后的 600 MW 亚临界、前后墙对冲燃烧锅炉为研究对象, 基于 CO 在线测量以及燃烧调整试验, 通过调节不同的燃尽风开度, 改变省煤器出口的 CO 体积分数、NO_x 质量浓度, 计算出各工况下锅炉效率, 并建立了锅炉燃烧优化模型。研究结果表明, CO 体积分数与锅炉效率、烟气 NO_x 质量浓度以及综合成本相关性显著, 燃料成本对锅炉运行经济性的影响远高于脱硝成本, CO 体积分数最低的工况即为综合成本最低的工况。考虑到综合成本最低工况下的烟气 NO_x 质量浓度偏高, 以及由此造成的空预器检修周期、催化剂更换周期与机组停炉检修周期不一致, 因此应综合考虑锅炉效率与烟气 NO_x 质量浓度, 通过调节合适的 CO 体积分数, 使得在保证锅炉高效率运行的同时满足 NO_x 质量浓度的改造运行要求。

关键词: CO 在线监测; 锅炉效率优化; 烟气 NO_x 浓度优化; 综合燃烧优化模型

中图分类号: TK227.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-8740(2019)04-0347-06

Boiler Combustion Optimization Based on Online Monitoring of CO in Flue Gas

Zhang Chenhao¹, Su Sheng¹, Chang Shoubing², Ouyang Zhufeng¹, Ren Qiangqiang¹, Jiang Ziwei¹,
Wang Peng², Zhou Jing¹, Cui Xiaoning¹, Hu Song¹, Wang Yi¹, Xiang Jun¹

(1. State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Walsn Energy Technology(Langfang)Co., Ltd, Langfang 065000, China)

Abstract: A 600 MW sub-critical and front-rear wall opposed combustion boiler used in a power plant, which had been retrofitted using the low NO_x combustion technology, was adopted as the research object of this paper. CO online monitoring and combustion adjustment experiments revealed that the concentrations of CO and NO_x at the economizer outlet were changed by adjusting different burnout damper openings. The boiler efficiencies under various working conditions were calculated. On this basis, a boiler combustion optimization model was established. Research results show that the CO concentration was significantly correlated with the boiler efficiency, NO_x concentration in flue gas, and overall cost. The effect of fuel cost on the economical efficiency of boiler operation was much higher than that of denitrification cost, and the condition with the lowest concentration of CO was the one with the lowest comprehensive cost. Considering the high concentration of NO_x in flue gas at the lowest comprehensive cost, as well as the inconsistency among the maintenance cycle of air preheater, catalyst replacement cycle, and the maintenance cycle of unit shutdown, the boiler efficiency and NO_x concentration in flue

收稿日期: 2018-10-12.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0601802); 国家自然科学基金资助项目(51576081).

作者简介: 张晨浩(1992—), 男, 硕士研究生, zhang_chen hao@foxmail.com.

通信作者: 向 军, 男, 博士, 教授, xiangjun@hust.edu.cn.

gas should be considered comprehensively. By adjusting an appropriate CO concentration, the requirement of NO_x concentration during the retrofit operation can be satisfied while ensuring the high-efficiency operation of the boiler.

Keywords: CO online monitoring; boiler efficiency optimization; optimization of NO_x concentration in flue gas; integrated combustion optimization model

随着经济社会的发展,我国环保标准日益严格,电站锅炉低氮改造成为大势所趋^[1-4],而低氮改造往往以牺牲锅炉效率为代价^[5-8],因此,如何兼顾提高锅炉的运行效率和降低烟气 NO_x 浓度,进而保证锅炉运行的经济性和环保性成为当前研究的热门课题。

当前普遍在锅炉尾部烟道安装氧化锆氧量计测量省煤器出口 O₂ 量来反映锅炉整体燃烧状况,但由于飞灰成分复杂,氧化锆氧量计易受飞灰影响,且烟道侧漏风对 O₂ 量测量结果影响很大。

省煤器出口 CO 浓度的高低是衡量炉内燃烧优劣的重要指标^[9-13],相比于 O₂ 量具有更高的敏感性,受烟道侧漏风影响显著低于 O₂ 量^[9,14-15],能够在整体上反映炉膛内风粉配比情况的好坏^[14,16],可用于指导调节以降低烟气 NO_x 浓度^[17-21];而且省煤器出口 CO 浓度与化学未完全燃烧热损失以及机械未完全燃烧热损失有很强的正相关性^[6],对锅炉效率的提高有重要参考意义。因此,省煤器出口 CO 浓度可以作为对于 O₂ 量的补充,从而作为锅炉燃烧调整的重要参考指标。当前一些学者^[15]基于 CO 进行了相关研究,但仅限于经验调节方面,并未对其经济性进行相关研究。

本文针对省煤器出口 CO 浓度建立了锅炉燃烧优化模型,基于 CO 浓度的变化对锅炉运行经济性进行了量化,从而在保证锅炉运行安全性的基础上,进一步提升其经济性及环保性。

1 设备概况

1.1 设备整体介绍

某 600 MW 亚临界锅炉为露天布置、自然循环、前后墙对冲燃烧、1 次中间再热、单炉膛平衡通风、固态排渣、尾部双烟道、全钢构架的 II 型汽包炉,主要设计参数如表 1 所示。该锅炉采用设计煤种运行,煤质分析如表 2 所示。设计煤种的煤粉细度为 R₉₀ = 16%。该锅炉采用中速磨正压直吹式制粉系统,共 6 台磨煤机,每台磨煤机带 1 层 5 只燃烧器,在 BMCR 工况下采用 5 投 1 备的运行方式。

1.2 燃烧器布置概况

图 1 为该锅炉进行低氮改造后的燃烧器布置方

式,前墙和后墙各布置 3 层煤粉燃烧器,每层 5 只 LNASB 燃烧器,共 30 只,最下层的 10 只为等离子点火燃烧器,区别在于没有中心风;在最上层煤粉燃烧器上方,前墙和后墙各布置 2 层燃尽风燃烧器,下层燃尽风共 10 只,上层燃尽风共 14 只;每层主燃烧器侧上方靠近左墙和右墙水冷壁区域分别布置贴壁风燃烧器,共 12 只,为直流风燃烧器。

表 1 锅炉主要设计参数

Tab.1 Main design parameters of boiler

参 数	数 值	
	BMCR	THA
过热蒸汽流量/(t·h ⁻¹)	2 030	1 930
过热蒸汽温度/	541	541
过热蒸汽压力/MPa	17.50	17.42
再热蒸汽流量/(t·h ⁻¹)	1 660	1 575
再热蒸汽进/出口温度/	324/541	322/541
再热蒸汽进/出口压力/MPa	3.96/3.78	3.77/3.61
给水温度/	280	277
省煤器出口烟温(低过侧/低再侧)/	364/348	361/346
排烟温度/	126	126
炉膛出口过量空气系数	1.18	1.18

注:BMCR 为锅炉最大连续蒸发量工况;THA 为汽轮机热耗率验收工况。

表 2 煤质分析

Tab.2 Coal quality analysis

元素分析/%				
W _{C, ar}	W _{H, ar}	W _{O, ar}	W _{N, ar}	W _{S, ar}
53.49	3.72	6.7	0.69	1.5
工业分析/%				热量/(MJ·kg ⁻¹)
A _{ar}	M _{ar}	F _{C, ar}	V _{ar}	Q _{ar, net}
21.8	12.1	41.39	24.71	21.06

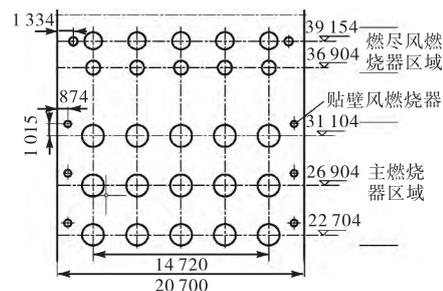


图 1 燃烧器分布(单位:mm)

Fig.1 Distribution of burners(unit: mm)

1.3 CO 测量设备布置情况及灰渣取样方法

锅炉分为左、右两个烟道，两个烟道的省煤器出口分别装有 2 只型号 CEA-100 的 CO 测量仪，测量仪带有多级烟尘过滤器、气水分离器和化学过滤器，量程为 $0 \sim 4000 \times 10^{-6}$ ，步长 50×10^{-6} ，精度 $\pm 2\%$ ，正常工作压力为 ± 2.5 kPa，取样探头带有防腐耐磨保护管，能耐受 600 以下的高温恶劣环境，安装深度为 1500 mm，探头位置与氧化锆氧量计取样位置接近，采用压缩空气对探头进行定时吹扫。

采用网格法对左、右烟道的飞灰进行多点等速取样并混合，且同步在碎渣机后对炉渣进行等时间间隔、等质量取样并混合^[22]。

2 锅炉燃烧优化模型

为构建锅炉燃烧优化模型，在设计煤质（即当前燃用煤质）下对锅炉满负荷进行了 10 个工况的性能试验，工况 1~10 的区别在于增大燃尽风风箱开度以提高燃尽风量，分别监测省煤器出口 CO 浓度（折算到 O₂ 含量 6% 的标态，下同）和 NO_x 浓度（折算到 O₂ 含量 6% 的标态，下同）的变化，对各工况的飞灰含碳量和炉渣含碳量进行了测量，计算出不同工况下的锅炉效率。建立 CO 浓度与锅炉效率的关联关系、CO 浓度与 NO_x 浓度的关联关系；将由于锅炉效率降低造成的煤耗增加成本作为燃料成本，NO_x 浓度升高而增加的喷氨成本作为脱硝成本，以燃料成本和脱硝成本之和作为综合成本，以 CO 浓度与综合成本的关联关系建立综合燃烧优化模型。

2.1 CO 浓度与锅炉效率的关联关系

2.1.1 锅炉效率计算

研究过程中，计算各工况下锅炉的各项热损失，并以此计算相应的锅炉效率^[23]。

2.1.2 结果分析

CO 浓度取左、右侧尾部烟道共 4 个 CO 浓度测量值的平均（下同），CO 浓度和锅炉效率的关联关系如图 2 所示，从工况 1~10，锅炉效率由 94.02% 下降到 93.30%，相应的 CO 体积分数从 390×10^{-6} 升高到 1570×10^{-6} ，CO 浓度与锅炉效率负相关性显著，这是因为：燃尽风风门开度增大，导致主燃烧区不完全燃烧程度上升，虽然燃尽风区域风量增大，但时间上不足以使煤粉和可燃气体燃尽，因此，使得固体未完全燃烧热损失 q_4 和化学未完全燃烧热损失 q_3 增大，从而导致锅炉效率降低。此外，CO 浓度升高，表明炉膛内风粉混合不均匀的程度增大，进一步影响了煤粉颗粒的燃尽，从而导致固体未完全燃烧热损失 q_4 增

大，即 CO 浓度与 q_4 具有一定的正相关关系。

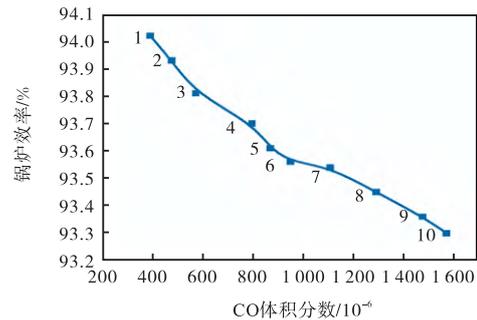


图 2 CO 体积分数与锅炉效率的关联关系

Fig.2 Correlation between CO concentration and boiler efficiency

图 3 为 $q_3 + q_4$ 随 CO 浓度的变化趋势，可以看出 CO 浓度与 $q_3 + q_4$ 显著正相关。对比图 2 和图 3 发现，工况 1~10 锅炉效率降低 0.72%，而 $q_3 + q_4$ 升高了 0.48%，其他损失产生的原因为：工况 1~10 逐渐开大燃尽风调门，使得部分燃料的燃尽推迟，从而导致排烟温度由 130 升高到 136，进而使排烟热损失 q_2 和灰渣物理热损失 q_6 升高了 0.24%，但是 q_6 的增大程度很小。因此为了提高锅炉运行效率，在保证排烟温度不发生较大变动的情况下，应尽可能降低尾部烟道的 CO 含量。

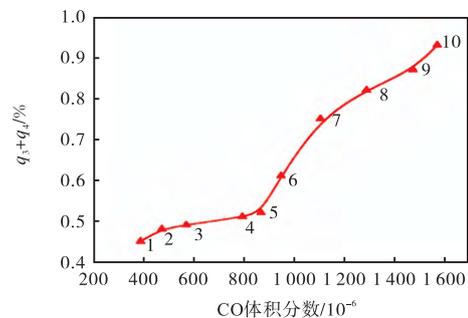


图 3 CO 体积分数与 $q_3 + q_4$ 的关联关系

Fig.3 Correlation between CO concentration and $q_3 + q_4$

2.2 CO 浓度与 NO_x 浓度的关联关系

图 4 为尾部烟道 CO 浓度和烟气 NO_x 浓度的关联关系，从工况 1~10，烟气 NO_x 质量浓度由 306 mg/m^3 降低到 224 mg/m^3 ，CO 体积分数从 390×10^{-6} 升高到 1570×10^{-6} ，CO 体积分数与烟气 NO_x 质量浓度显著负相关。分析原因为：燃尽风风门开度增大，导致主燃烧区风量减少，进而主燃烧区域的不完全燃烧程度增大且燃烧温度降低，从而热力型 NO_x 产生量减少，且更多的 NO_x 被还原，使得烟气 NO_x 质量浓度降低。

因此，可根据 CO 浓度和烟气 NO_x 含量的负相关关系，通过控制 CO 浓度间接降低烟气 NO_x 含量。

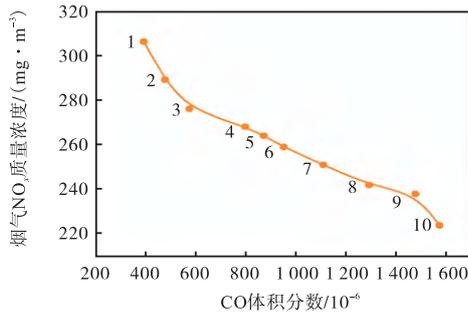


图 4 CO 体积分数与烟气 NO_x 质量浓度的关联关系
Fig.4 Correlation between CO concentration and NO_x concentration in flue gas

2.3 综合燃烧优化模型

通过上述 CO 浓度与锅炉效率和烟气 NO_x 浓度的关联关系,发现 CO 浓度与锅炉效率和烟气 NO_x 浓度整体均呈负相关关系.因此,CO 浓度的升高伴随着锅炉效率的降低,即伴随着煤耗量的增大;CO 浓度的升高伴随着烟气 NO_x 浓度的降低,即伴随着喷氨量的降低.可见提高锅炉效率和降低烟气 NO_x 浓度是一对矛盾,关键在于如何平衡好这一对矛盾以更好地提高经济性,为此需构建综合燃烧优化模型.

2.3.1 燃料成本

负荷和煤种不变的情况下,锅炉效率的降低意味着燃料消耗量的增加,因此定义在一定时间内按此负荷和煤种运行时相对最高效率多消耗的燃料成本作为燃料成本(单位:元),即

$$C_c = \left(\frac{\eta_{gl,max}}{\eta_{gl}} - 1 \right) B_0 P_c t$$

式中: $\eta_{gl,max}$ 为该负荷下锅炉最高效率; η_{gl} 为当前锅炉效率; B_0 为最高效率下的燃料量, t/h; P_c 为煤价, 元/t; t 为全年该负荷运行时长, h.

对于当前燃烧调整试验, $\eta_{gl,max}$ 取所有工况下的最高效率 94.02% (工况 1), 从安全仪表系统(SIS)获得工况 1 的煤耗量为 251 t/h, 试验批次的煤价为 730 元/t, 该厂全年满负荷运行时长为 3000 h, 按各工况运行 3000 h 的燃料成本如图 5 所示, 由 0 万元上升

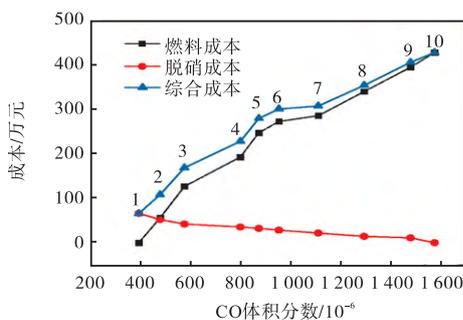


图 5 CO 体积分数与成本的关联关系
Fig.5 Correlation between CO concentration and cost

到 425.5 万元,可见,随着锅炉效率的降低,燃料成本显著上升,尾部烟道 CO 浓度与燃料成本正相关性显著.

2.3.2 脱硝成本

采用 SCR 脱硝系统,以液氨作为还原剂,对于该燃烧调整试验,在负荷和煤种不变的情况下,因烟气 NO_x 浓度未达到最低而多消耗的液氨成本定义为脱硝成本(单位:元),即

$$C_N = (C_{NO_x} B V_{gy} - C_{NO_x,min} B_0 V_{gy0}) P_N t \times 1000$$

式中: C_{NO_x} 为当前 NO_x 质量浓度, mg/m³; $C_{NO_x,min}$ 为该负荷下最低 NO_x 质量浓度, mg/m³; B 为当前燃料量, t/h; V_{gy} 为当前 1 kg 煤不完全燃烧的干烟气体积, m³/kg; V_{gy0} 为最低烟气 NO_x 含量下 1 kg 煤不完全燃烧的干烟气体积, m³/kg; P_N 为单位脱硝成本, 元/kg.

对于当前燃烧调整试验, $C_{NO_x,min}$ 为 224 mg/m³ (工况 10), 该厂购置的液氨价格为 3500 元/t, 考虑到模型的一致性,按照 1 : 1 的氨氮摩尔比进行折算,得出每千克 NO_x 消耗的液氨成本为 1.9833 元,按各工况运行 3000 h 的脱硝成本如图 5 所示,由 65.5 万元降低到 0 万元,可见随着烟气 NO_x 浓度的降低,脱硝成本显著降低,尾部烟道 CO 浓度与脱硝成本显著负相关.

2.3.3 综合成本

将锅炉未达到最高效率多消耗的燃料成本与未达到最低烟气 NO_x 含量多消耗的喷氨成本之和定义为综合成本,即 $C = C_c + C_N$.

图 5 为按各工况运行 3000 h 的综合成本,由 65.5 万元上升到 425.5 万元,可见,尾部烟道 CO 浓度与综合成本正相关性显著,当前模型条件下,燃料成本对锅炉运行经济性的影响明显大于脱硝成本.但当前脱硝成本模型中未考虑由于喷氨导致的空预器堵塞、催化剂失活等原因而造成的脱硝成本的提高,在实际运行过程中,考虑上述因素后,脱硝成本对最终综合成本的影响可能会有所增加.

2.3.4 综合优化策略

在当前综合燃烧优化模型下,对于该锅炉,低氮改造要求烟气 NO_x 质量浓度不高于 280 mg/m³,而工况 1 和 2 的 NO_x 质量浓度分别为 306 mg/m³、289 mg/m³,显然不符合要求,因此选取工况 3 作为最优运行工况,此工况的 CO 体积分数为 445 × 10⁻⁶,烟气 NO_x 质量浓度为 276 mg/m³,锅炉效率为 93.81%,综合成本为 167.5 万元.即对于当前煤质和负荷,可以通过调节燃尽风量从而调整 CO 体积分数在 445 × 10⁻⁶ 附近,进而间接达到锅炉高效低 NO_x 运行.

当前已有的研究成果^[3-5, 6-7, 9-19]基于 CO 对提高锅炉效率进行了相关研究或者基于 CO 对降低 NO_x 浓度进行了相关研究, 仅有少量基于 CO 对提高锅炉效率和降低 NO_x 浓度进行了定性的综合研究, 而本文的锅炉燃烧优化模型采取指标量化的方法对提高锅炉效率和降低 NO_x 进行了综合研究, 能够更直观地反映锅炉运行的经济性。

3 结 论

本文基于尾部烟道 CO 在线监测和燃烧调整试验, 通过调节燃尽风的比例获得不同工况下的 CO 浓度和烟气 NO_x 浓度, 并对各工况下的效率进行了计算, 进而对各工况的经济性进行了量化。研究结果表明, 在当前满负荷、燃烧设计煤种的运行工况下:

(1) 从工况 1~10, CO 体积分数从 390×10^{-6} 上升到 1570×10^{-6} , 锅炉效率由 94.02% 下降到 93.30%, 烟气 NO_x 质量浓度由 306 mg/m^3 降低到 224 mg/m^3 , 因此由工况 1~10 形成了多烧煤与少喷氨的矛盾。

(2) 从工况 1~10, CO 体积分数从 390×10^{-6} 上升到 1570×10^{-6} , 各工况运行 3000h 的燃料成本由 0 万元上升到 425.5 万元, 脱硝成本由 65.5 万元降低到 0 万元, 综合成本由 65.5 万元上升到 425.5 万元, 在当前模型下, 燃料成本对锅炉运行经济性的影响明显大于脱硝成本, 考虑由于喷氨导致的对于空预器堵塞、催化剂失活等影响后, 脱硝成本对最终综合成本的影响可能会有所增加。

(3) 在当前综合燃烧优化模型下, 综合考虑锅炉效率与烟气 NO_x 质量浓度并结合两者与 CO 体积分数的关联关系, 认为 CO 体积分数控制在 445×10^{-6} 左右可以间接达到锅炉高效低 NO_x 运行, 该运行方式下 NO_x 质量浓度满足不高于 280 mg/m^3 的低氮改造要求。

文中模型的不足之处在于: 未对满负荷之外的其他负荷进行建模; 燃料成本计算仅考虑了锅炉效率, 未考虑机组总体效率; 脱硝成本仅考虑了氨成本, 未考虑其他脱硝方面的投资。后续工作将针对这些不足之处进行进一步的模型优化, 以获得负荷适应范围更宽、准确性更高的燃烧优化模型。

参考文献:

[1] 中华人民共和国环境保护部. GB 13223—2011 火电厂大气污染物排放标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.

Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. GB 13223—2011 Emission Standard of Air Pollutants for Thermal Power Plants[S]. Beijing: The Standards Press of China, 2011(in Chinese).

- [2] Díez Luis I, Cortés Cristóbal, Pallarés Javier. Numerical investigation of NO_x emissions from a tangentially-fired utility boiler under conventional and overfire air operation[J]. *Fuel*, 2008, 87(7): 1259-1269.
- [3] 赵斯楠, 方庆艳, 马 仑, 等. 燃烧初期化学当量比对锅炉 NO_x 生成与排放特性的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2017, 23(3): 236-241.
- Zhao Sinan, Fang Qingyan, Ma Lun, et al. Influence of stoichiometric ratio at initial combustion stage on NO_x formation and emission characteristics of a utility boiler [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2017, 23(3): 236-241(in Chinese).
- [4] 王 康, 许开龙, 张 海, 等. 煤粉细度对 NO_x 生成的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2018, 24(1): 34-38.
- Wang Kang, Xu Kailong, Zhang Hai, et al. Effect of pulverized coal size on NO_x formation[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2018, 24(1): 34-38(in Chinese).
- [5] 周 平, 张广才, 严晓勇, 等. 600 MW 机组对冲燃煤锅炉尾部 CO 浓度偏高的调整试验[J]. 热力发电, 2014, 43(12): 82-88.
- Zhou Ping, Zhang Guangcai, Yan Xiaoyong, et al. Operation optimization on high CO emissions of a 600 MW unit swirl-opposed firing boiler after low-NO_x burner retrofitting[J]. *Thermal Power Generation*, 2014, 43(12): 82-88(in Chinese).
- [6] 方庆艳, 汪华剑, 陈 刚, 等. 燃尽风对超超临界锅炉燃烧特性影响的数值模拟[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(11): 92-95.
- Fang Qingyan, Wang Huajian, Chen Gang, et al. Numerical simulation on effects of over fire air on the combustion characteristics in an ultra-supercritical boiler[J]. *Journal of Huazhong University of Science & Technology: Natural Science Edition*, 2010, 38(11): 92-95(in Chinese).
- [7] 刘泰生, 周 武, 叶恩清. 燃尽风对炉内流动和燃烧过程影响的数值模拟[J]. 动力工程, 2006, 26(1): 116-120.
- Liu Taisheng, Zhou Wu, Ye Enqing. Numerical simulation of the effects of over-fire air on flow and combustion in furnaces[J]. *Journal of Power Engineering*, 2006, 26(1): 116-120(in Chinese).
- [8] Backreedy R I, Jones J M, Ma L, et al. Prediction of

- unburned carbon and NO_x in a tangentially fired power station using single coals and blends[J]. *Fuel*, 2005, 84(17): 2196-2203.
- [9] Bettles N D, Stuart D D. Improving combustion efficiency by incorporating CO monitoring[J]. *Modern Power Systems*, 2001(5): 47-51.
- [10] 许传凯. 燃煤锅炉燃烧优化技术[J]. 热力发电, 1989, 17(2): 55-56.
Xu Chuankai. The coal-fired boiler combustion optimization technology[J]. *Thermal Power Generation*, 1989, 17(2): 55-56(in Chinese).
- [11] 孙亦鹏, 曹红加, 张清峰. 电厂烟气 CO 检测技术的应用[J]. 电站系统工程, 2012, 28(6): 41-43.
Sun Yipeng, Cao Hongjia, Zhang Qingfeng. Application of CO detection technology in power plant flue gas[J]. *Power System Engineering*, 2012, 28(6): 41-43(in Chinese).
- [12] Yukio Innami, Akihiro Murata, Yoshitaka Yuki, et al. Real-time CO measurement in a coal fired boiler with a TDLS analyzer[C]// *SICE Annual Conference 2011*. Tokyo, Japan, 2011: 92-96.
- [13] Yoshitaka Yuki, Akihiro Murata. Optimum combustion control by TDLS200 tunable diode laser gas analyzer[J]. *Yokogawa Technical Report English Edition*, 2010, 53(1): 19-22.
- [14] 赵宁, 曹洪涛, 李晓金, 等. 基于 O_2 和 CO 信号修正的燃烧优化控制[J]. 电力科学与工程, 2004(3): 23-25.
Zhao Ning, Cao Hongtao, Li Xiaojin, et al. Optimizing combustion control system based on O_2 and CO signals[J]. *Electric Power Science and Engineering*, 2004(3): 23-25(in Chinese).
- [15] 裘立春, 张建华. 基于 CO 的燃煤锅炉燃烧优化[J]. 浙江电力, 2005, 3(3): 10-12.
Qiu Lichun, Zhang Jianhua. Coal fired boilers combustion optimization technology based on carbon monoxide[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2005, 3(3): 10-12(in Chinese).
- [16] 黄伟珍. 超超临界百万机组基于 CO 控制的锅炉燃烧优化调整[J]. 江西电力, 2017(6): 58-60.
Huang Weizhen. Boiler combustion optimization adjustment based on CO control for ultra-supercritical million units[J]. *Jiangxi Electric Power*, 2017(6): 58-60(in Chinese).
- [17] 洪荣坤, 沈跃良, 赵振峰. 600 MW 超临界对冲燃烧锅炉 CO 和 NO_x 排放特性的研究[J]. 动力工程学报, 2012, 32(12): 922-927.
Hong Rongkun, Shen Yueliang, Zhao Zhenfeng. Emission characteristics of CO and NO_x from opposed firing boiler in a 600 MW supercritical unit[J]. *Chinese Journal of Power Engineering*, 2012, 32(12): 922-927(in Chinese).
- [18] 姚卫刚, 韦红旗, 何长征. 600 MW 四角切圆锅炉 CO 排放特性的试验研究[J]. 电站系统工程, 2015, 31(5): 13-16.
Yao Weigang, Wei Hongqi, He Changzheng. Experimental study of CO emission characteristics in a 600 MW tangentially fired boiler[J]. *Power System Engineering*, 2015, 31(5): 13-16(in Chinese).
- [19] 高小涛, 黄磊, 张恩先, 等. 600 MW 前后墙布置燃烧器锅炉的 NO_x 排放特性及其影响因素的分析[J]. 动力工程, 2009, 29(9): 806-812.
Gao Xiaotao, Huang Lei, Zhang Enxian, et al. NO_x emission and influence factors of 600 MW boilers with burners arranged in front and back walls[J]. *Journal of Power Engineering*, 2009, 29(9): 806-812(in Chinese).
- [20] Andreas Berger, Gerd Rotzoll. Kinetics of NO reduction by CO on quartz glass surfaces[J]. *Fuel*, 1995, 74(3): 452-455.
- [21] Thomas Le Bris, Francisco Cadavid, Sebastien Caillat, et al. Coal combustion modelling of large power plant, for NO_x abatement[J]. *Fuel*, 2007, 86(14): 2213-2220.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 10184—2015 电站锅炉性能试验规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T10184—2015 Performance Test Code for Utility Boiler[S]. Beijing: The Standards Press of China, 2015(in Chinese).
- [23] 樊泉桂, 阎维平, 闫顺林, 等. 锅炉原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
Fan Quanguai, Yan Weiping, Yan Shunlin, et al. *Boiler Principle*[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008(in Chinese).