CO 在线监测在锅炉燃烧优化与调整中的应用

王燕明[1]，赵天亮[2]，王建东[1]，唐 勇[1]，朱宪然[2]，张艳宾[1]，
王 勇[1]，张 强[1]，马文韬[1]，杨 磊[2]
(1. 天津大唐国际盘山发电有限责任公司，天津 301900；
2. 中国大唐集团科学技术研究总院有限公司华北电力试验研究院，北京 100040)

摘 要： 为解决电站锅炉在汽温偏差燃烧调整中兼顾经济性和环保性的问题，在锅炉尾部烟道增加基于先进多点取样装置的 CO 及 NO_x 在线监测设备，并以此探索锅炉燃烧过程中多目标协同优化的效果。调整结果表明：多点取样装置能精确显示烟气中 CO 和 NO_x 浓度分布，实现了减小汽温偏差的同时为锅炉安全、经济运行提供可靠依据，为以后锅炉节能减排和安全运行提供新的思路。

关键词： 锅炉燃烧调整；CO 在线；多点取样；锅炉效率
中图分类号：TK223.2 **文献标志码：**A **文章编号：**1672-4763(2023)02-0075-06

0 前 言

由于环保要求日趋严格，各电厂均进行了超低排放改造[1-3]，主要原理为炉内分级燃烧，减少主燃区空气量，但是运行氧量过低就会给锅炉效率带来负面影响。如何兼顾 NO_x 浓度和运行经济性是各发电企业燃烧调整的重点。省煤器出口 CO 浓度大小可以作为反馈炉内燃烧状态的重要指标，相比于出口氧气浓度更具直观性[4]，也更加敏感。因为电站锅炉实际燃烧煤质多变，机组运行时的最佳氧量极难确定，而且传统依据运行氧量进行燃烧调整的方法也存在很大缺陷：(1)氧量测量误差(烟道漏风、烟气成分分布不均、热工测点为单一测点)，很难得到实际氧量大小；(2)运行氧量只能大致反应炉内燃烧空气量是否充足，无法反应炉内局部风粉混合不均导致燃烧恶化的情况；(3)烟道内飞灰成分复杂，氧化锆氧量计易受飞灰影响导致氧量的灵敏性较差[4]。因此，可以采用根据锅炉实际燃烧产生的 CO 含量以指导锅炉配风，来防止水冷壁高温腐蚀[5]并寻找兼顾燃烧效率和 NO_x 排放水平的运行方式。

本文重点介绍一种电化学式多点取样装置，可以避免由于测点单一引起的烟气成分测量误差，并配备反吹扫装置，确保得到精确的烟气中 CO 和 NO_x 含量，以此为依据对锅炉燃烧状态进行更为合理的诊断与调整。

1 设备概况

1.1 设备总貌

该锅炉为某公司制造的 600 MW 四角切圆锅炉，亚临界压力、一次中间再热、固态排渣、单炉膛、Π 型布置、平衡通风，全钢构架悬吊结构、半露天布置、控制循环汽包炉，摆动式燃烧器。设计燃料为准格尔烟煤，设计煤质情况见表 1。锅炉主要设计参数见表 2(BMCR 为锅炉最大连续出力，ECR 为锅炉经济连续出力，MCR 为最大连续蒸发量)。6 套制粉系统为正压直吹式制粉系统，额定负荷下五用一备。

表 1 设计煤种和校核煤种煤质分析

项目		参数		
		设计煤种(准格尔烟煤)	校核煤种 1(准格尔-黑岱沟煤)	校核煤种 2(晋北煤)
燃煤成分	$w(C_y)$/%	54.70	49.47	58.86
	$w(H_y)$/%	3.22	3.01	3.36
	$w(O_y)$/%	10.43	10.43	7.28
	$w(N_y)$/%	0.88	0.88	0.79
	$w(S_y)$/%	0.47	0.47	0.63
	$w(A_y)$/%	18.30	23.63	19.77
	$w(W_y)$/%	12.00	12.00	9.61
	$w(V_{daf})$/%	41.00	41.06	32.31
燃煤特性	哈氏可磨性指数	57.00	57.00	57.64
	低位发热量/($kJ \cdot kg^{-1}$)	20 480	18 493	22 441

收稿日期：2021-10-08
作者简介：王燕明(1963—)，男，高级工程师，主要从事火电厂管理工作。

万方数据

表2 锅炉主要设计参数

项目	设计参数		
	BMCR (660 MW)	ECR (600 MW)	64% MCR
过热蒸汽流量/(t·h⁻¹)	2 023	1 801	1 304
过热蒸汽压力/MPa	17.60	17.39	17.02
过热蒸汽温度/℃	540	540	540
再热蒸汽流量/(t·h⁻¹)	1 654	1 484	1 096
再热蒸汽进/出口压力/MPa	3.85/3.67	3.45/3.29	2.53/2.42
再热蒸汽进/出口温度/℃	325.4/540	314.3/540	291.4/540
给水温度/℃	281.3	273.8	254.3
给水压力/MPa	19.40	18.86	17.91
锅炉效率(按低位发热值)/%	93.73	94.10	94.20
燃煤量/(t·h⁻¹)	272.2	245.0	186.9
排烟温度/℃	128.6	120.6	108.1
总风量(标态)/(km³·h⁻¹)	1 674	1 510	1 281
炉膛过量空气系数/%	20.0	20.0	33.5
炉膛容积热负荷/(MJ·h⁻¹·m⁻²)	325.9	293.3	223.8
炉膛截面积热负荷/(GJ·h⁻¹·m⁻²)	18.96	17.03	13.06
煤粉细度(R_{90})/%	23	23	23
一次风速/(m·s⁻¹)	26.24	26.24	
二次风速/(m·s⁻¹)	50	50	
一次风温度(出/入口)/℃	309.3/26.1	318.8/26.1	
二次风温度(出/入口)/℃	326.1/22.8	331.3/22.8	
一次风率/%	25.3	25.3	
二次风率/%	69.7	69.7	
炉膛漏风率/%	5	5	
省煤器出口氧量/%	3.5	3.5	5.3

1.2 燃烧设备概述

锅炉采用正四角布置的切向摆动式燃烧器，按照炉膛尺寸的大小选取适当的燃烧器出口射流中心线同炉膛截面对角线的夹角 $\Delta\alpha$，由此确定的燃烧出口射流中心线和水冷壁中心线的夹角分别为39°和47°。在炉膛中心形成逆时针旋向的2个直径稍有不同的假想切圆。见图1。

燃烧器采用ABB-CE传统的大风箱结构，由隔板将大风箱分隔成若干风室，在各风室的出口处布置数量不等的燃烧器喷嘴。一次风喷嘴可上下摆动各27°，二次风及油喷嘴可作上下各30°的摆动。为了获得良好的炉内空气动力场，克服四角燃烧而引起炉膛温度偏差的弊病，其中上部2层辅助风室及2层燃尽风(OFA)风室设计成反切18°即与主喷嘴中心线有18°夹角，其目的就是要形成一个反切动量来平衡主燃烧气流的旋转动量，以达到减少炉膛出口烟温偏差的目的。顶部2层OFA风室在反切18°的同时又可以作手动12°水平摆动，增加了烟温偏差调节手段。每只燃烧器共有5种22个风室，22个喷嘴。

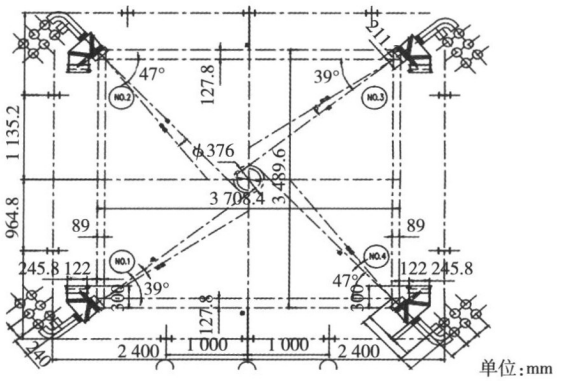

图1 四角燃烧器布置图

顶部OFA喷嘴是根据分级送风原理为降低 NO_x 生成量而设置的。OFA 2个风室内燃尽喷嘴由单独的专门的手动摆动机构驱动。喷嘴与摆动机构由水平连杆相连。转动手动摆动机构手柄可使喷嘴在左右摆动12°。OFA喷嘴在机组投运时，可调整炉膛出口两侧烟温偏差，控制两侧烟温偏差在合理范围。煤粉喷嘴通过同空气喷嘴相同的摆动连杆机构，驱动煤粉喷嘴绕固定于煤粉喷嘴体上的轴承，作上下各27°的摆动。

1.3 多点采样在线测量设备及布置方法

多点取样在线测量设备安装在省煤器出口和脱硝入口之间的烟道适当位置，左右侧烟道各安装1套德国沃森品牌的烟气在线监测设备。主机箱尺寸为950 mm×600 mm×350 mm的钢制机箱，包含反吹控制单元、温控单元、取样单元及分析单元。分析单元通过采样泵和冷凝器持续不断地把样气抽入仪器内部，然后采用交替工作的两(双)传感器对样气进行分析，从而有效延长传感器的寿命并提高精度。系统还会利用压缩空气对探头单元进行周期性地反向吹扫，防止其堵塞。系统具有诊断、设定、标

万方数据

定等工作模式，同时在运行中不断地自动进行自检、漂移修正以及故障检测。具体参数见表 3。

表 3　多点取样在线监测设备主要参数

参数	数值
主机运行温度/℃	−25～55
过滤器	不锈钢粉末烧结滤棒
采样探头温度/℃	<600
CO 量程/(×10^{-6})	0～20 000(可调)
NO_x/(mg·m^{-3})	0～1 000(可调)
分辨率/(×10^{-6})	1
重复性	±2%读数值
零点漂移	<2%满量程

设备形式和安装位置见图 2、图 3。

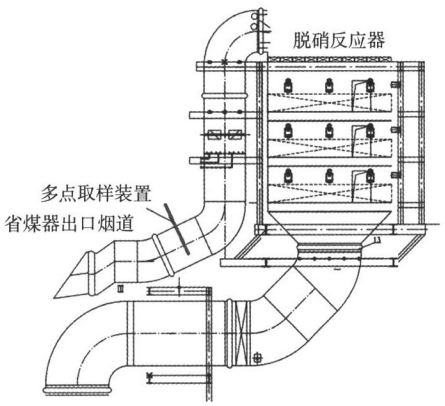

图 2　多点取样装置安装位置

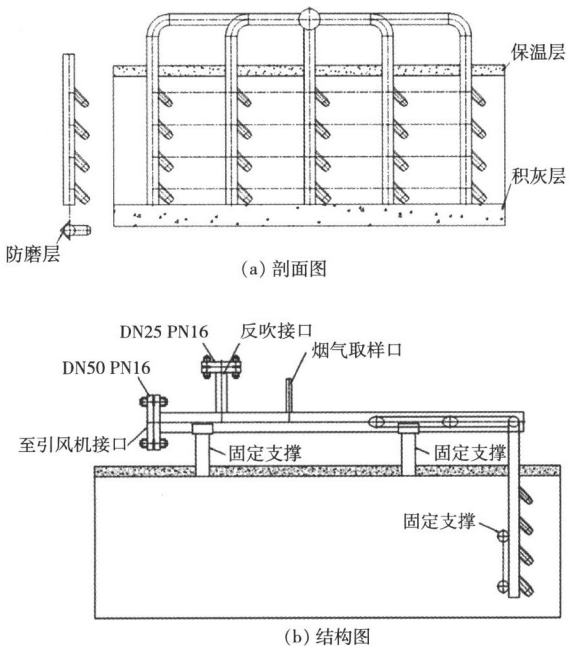

图 3　多点取样装置

1.4 多点在线取样装置可靠性

依据 GB 10184—2015《电站锅炉性能试验规程》的方法，采用网格法对满负荷脱硝入口烟气成分进行测量并与多点在线取样设备数据进行对比。测试时保持机组负荷、煤质稳定，不进行其他操作，测试结果见图 4。

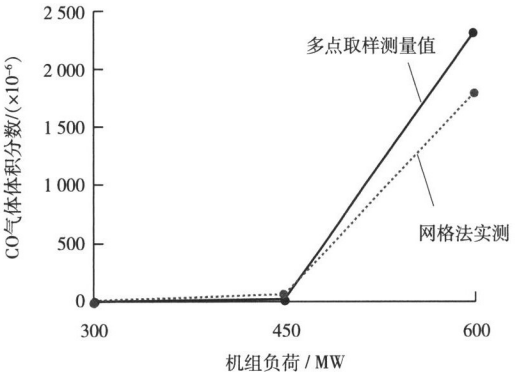

图 4　多点取样测试系统与网格法实测对比

如图 4 所示，2 种测试方法数值较为接近，多点取样设备沿烟道截面共计 20 个取样点，比移动烟气分析仪现场测试网格点更多，因此也更可靠且数值接近实际值。

2　基于多点采样在线监测的燃烧调整

2.1 机组目前存在的主要问题

机组中低负荷时主蒸汽、再热蒸汽汽温低，且两侧汽温偏差大，最高偏差可达 20 ℃以上，且尾部烟道未设烟气挡板，调节汽温手段较少。探索在现有设备条件下对该机组进行燃烧调整，期望在中低负荷时主蒸汽、再热蒸汽汽温达标，两侧汽温偏差控制在合理范围内。

在解决上述问题的同时也要兼顾锅炉效率和 NO_x 浓度水平。在大型锅炉炉膛内，燃料/空气比率及其分布不可能十分完善，因此对于炉内局部缺氧现象用在线多点取样设备对 CO 和 NO_x 进行监视十分必要，运行人员可实时依据在线监测数据对炉内燃烧进行调整，提高锅炉效率。

2.2 燃烧调整内容

2.2.1 调整前后屏底烟温

屏底烟温分布，能对分析炉内燃烧情况提供判断依据，此处烟气温度若有较大偏差能直接在汽温偏差上体现，300 MW 燃烧调整前后屏底烟温实测数据见图 5。

万方数据

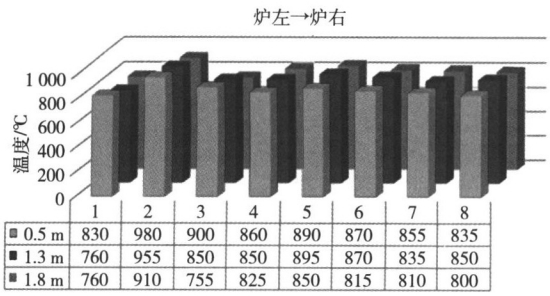

图5 网格测量屏底烟温分布

左侧屏底烟温变化幅度较大，炉内左侧燃烧情况相对于右侧不稳定，实测烟温时能明显感知到烟气流场波动和间歇性热烟气涌动。右侧则较为稳定，未出现烟温大幅波动现象，总体上左侧烟温高于右侧，这也导致汽温左右侧的偏差。因此我们认为主蒸汽、再热蒸汽汽温偏差主要是炉内烟气分布不均及消旋效果不佳造成的。

2.2.2 OFA水平摆角调整

由于分析认为炉内热烟气分布不均及残余旋转的存在导致汽温偏差，因此可利用OFA的消旋作用，消除残余旋转，主燃区燃烧器气流旋转方向为逆时针设计。OFA喷嘴则可以进行水平摆角的调整，调整方式为1号、4号角OFA水平摆角不变，仍然为反切10°，即顺时针旋转方向。2号、3号角OFA水平摆角由反切10°调整为顺切10°，即旋转方向为逆时针，由图6中曲线可以看出，水平摆角调整后两侧再热蒸汽汽温偏差大幅缩小。

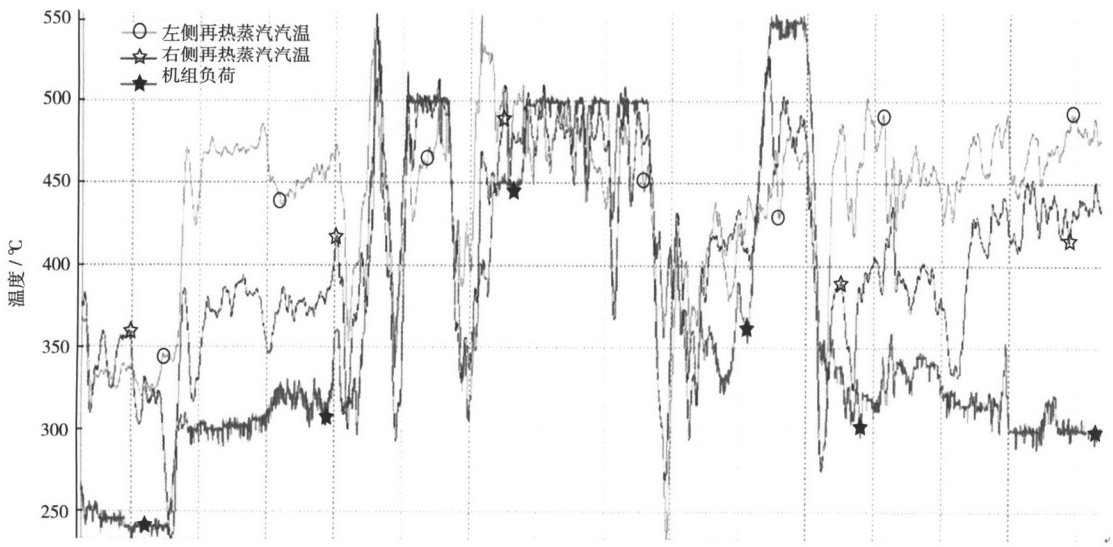

图6 OFA开度对再热蒸汽汽温影响

此时，多点采样设备对炉内CO和NO_x分析显示，调整过程中2种气体含量未有明显变化，DCS表盘显示排烟温度也基本保持不变。

2.2.3 OFA开度对汽温影响

OFA风门开度，可以调节主燃区空气量，对炉内燃烧影响较大，开度加大将会使主燃区空气量减少，CO生成量上升，NO_x生成量减少。可通过CO在线检测设备对不同风门开度下的CO含量进行分析，确保汽温好转的同时，CO含量没有显著上升。

机组400 MW运行BCDEF 5台磨煤机，在其他条件不变时不同OFA风门开度下对主蒸汽、再热蒸汽汽温的影响，结果见图7。

可以直观看到第二种配风方式对于消除汽温偏差效果比较明显，且CO含量控制在500 mg/m³以内，4种工况下排烟温度基本不变。

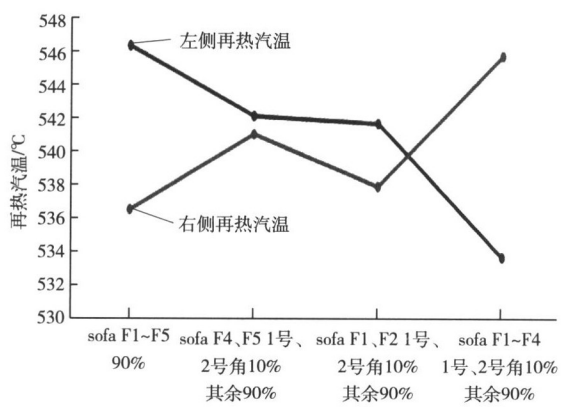

图7 OFA开度对再热汽温影响

万方数据

2.3 基于 CO 在线监测的炉内燃烧优化

现阶段大型煤粉锅炉的控制优化与性能提升受到几个方面的限制，导致锅炉整体性能严重偏离设计值和优化值。一是炉膛内的燃烧复杂多变，其状态的监测严重缺乏手段；二是目前大型煤粉锅炉优化控制严重依赖人工经验且多为定性的经验，对于锅炉燃烧这种大滞后、强耦合、多输入、多输出的系统，传统技术更是缺乏有效手段，人工经验和技术水平的参差不齐给锅炉的优化控制和性能提升带来了更大的困难。

由于机组一般在高负荷工况下才会出现较高的 CO 浓度，因此我们进行了满负荷 8 个工况下锅炉效率试验并得到相应的数值。8 个工况的区别在于，在保证脱硝出口 NO_x 排放标准的前提下，增加燃尽风开度，利用尾部烟道两侧的 CO 在线监测设备记录各工况下 CO 实时值。建立 CO 与锅炉效率关联曲线，结果见图 8。

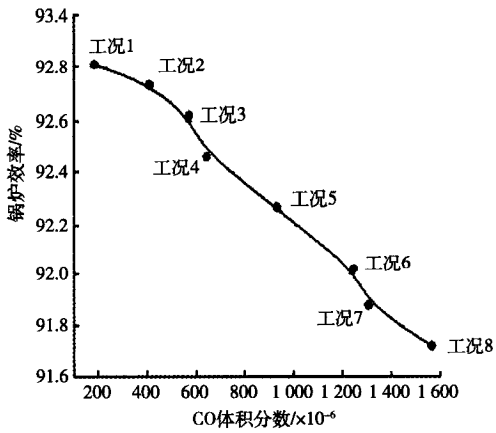

图 8　CO 含量与锅炉效率的相关性

如图 8 所示，从工况 1～工况 8，锅炉效率由 92.81%下降到 91.72%，相应的 CO 体积分数从 186×10^{-6} 升高到 $1\ 568\times10^{-6}$，CO 体积分数与锅炉效率负相关性显著，原因为 OFA 风门开度增大，在总风量不变的前提下主燃烧区空气量减少，不完全燃烧程度增加，OFA 风量增大虽然会提高燃尽率，但时间上不足以使增加的煤粉和可燃气体全部燃尽，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[6-9]。运行人员可依据 CO 在线监视设备，实时关注炉内燃烧状况，针对性配风调整，使炉内燃烧尽量保持在较好的状态。

在线监视系统数值显示，左右侧 CO 含量偏差很大，炉内燃烧依旧存在偏烧现象，分析认为炉内空气动力场气流组织较差，应尽快组织炉内冷态空气动力场试验来解决偏烧现象。目前运行人员依据两侧 CO 实时数据，采取四角燃尽风门开度不一致的方法来修正偏差，同时也对汽温偏差起到了缓解作用。

图 9 为尾部烟道 CO 体积分数和烟气 NO_x 浓度的相关性关系，从工况 1～工况 8，烟气 NO_x 质量浓度由 342 mg/m³ 降低到 212 mg/m³，CO 体积分数从 186×10^{-6} 升高到 $1\ 568\times10^{-6}$，CO 体积分数与烟气 NO_x 质量浓度具有明显的负相关性。原因为 OFA 风门开度增大，在总风量不变的前提下主燃烧区风量减少，主燃烧区域缺氧燃烧且燃烧温度降低，从而热力型和燃料型 NO_x 生成量均降低，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 含量的负相关关系来评估主燃区缺氧燃烧程度。虽然两者负相关，但不能片面追求低 NO_x 而使 q_3、q_4 显著上升，牺牲锅炉效率。运行人员可依据 CO 实时在线监视设备，根据实际情况，在 CO 和 NO_x 两者之间做个平衡，寻求最佳工况点。

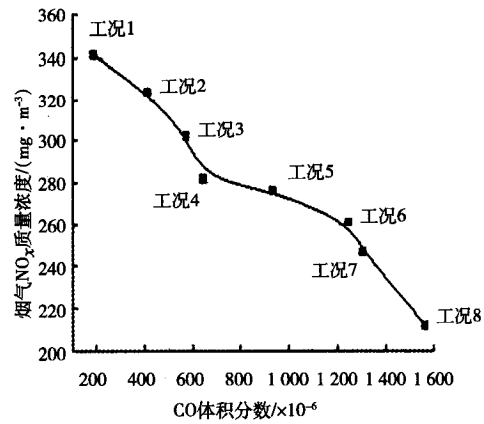

图 9　CO 体积分数与 NO_x 含量的相关性

3　结　语

本文通过对一种新型的 CO 在线多点取样设备的简介，并结合燃烧调整试验阐述了尾部烟道 CO 在线监测设备的应用在锅炉燃烧优化中的积极作用。

(1)尾部 CO 在线监视设备能实时反馈烟气中 CO 浓度和分布情况，可为运行人员和燃烧调整工作提供直观的参考，对提升锅炉效率和精确

万方数据

配风十分有效。多点取样原理也保证了取样准确性，克服了其他单点测量设备测试效果不佳的缺陷，且系统简单、维护方便。

(2)由于CO与NO_x呈显著的负相关性，因此可通过控制CO含量来调整NO_x水平，根据实际情况，在炉效与NO_x之间做个平衡，得到最好的经济性。

(3)尾部CO在线监视设备也可作为一项智能燃烧控制系统的重要反馈，参与整个燃烧智能控制过程，实时指导系统精确配风，使锅炉在较长时期内处于良好的运行状态，减少了人为因素、个人经验差距对燃烧系统的影响。

参考文献：

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

[2] DÍEZ L I, CORTÉS C, PALLARÉS J. 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.

[4] 张晨浩，苏胜，常寿兵，等. 基于尾部烟道CO在线监测的燃烧优化[J]. 燃烧科学与技术. 2019，25(4)：347-352.

[5] 张效源，沈迎，孙凯，等. 基于CO在线监测的锅炉燃烧状态诊断与调整[J]. 新型工业化. 2020，10(7)：155-158.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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.

Application of CO Online Monitoring in Boiler Combustion Optimization and Adjustment

WANG Yanming[1], ZHAO Tianliang[2], WANG Jiandong[1], TANG Yong[1], ZHU Xianran[2], ZHANG Yanbin[1], WANG Yong[1], ZHANG Qiang[1], MA Wentao[1], YANG Lei[2]

(1. Tianjin Datang International Scenic Mountain Power Generation Co., Ltd., Tianjin 301900, China;
2. North China Electric Power Test and Research Institute, China Datang Corporation Science and Technology General Research Institute Co., Ltd., Beijing 100040, China)

Abstract: In order to solve the problem of economy and environmental protection in the steam temperature deviation combustion adjustment of power station boilers, an online monitoring equipment for CO and nitrogen oxides based on advanced multi-point sampling device is added to the rear pass of the boiler, and the effect of multi-objective collaborative optimization in the boiler combustion process is explored. The adjustment results show that the multi-point sampling device can accurately display the distribution of CO and nitrogen oxide concentration in flue gas, which can reduce the steam temperature deviation and provide a reliable basis for the safe and economic operation of the boiler, and provide new ideas for the energy saving, emission reduction and safe operation of the boiler in the future.

Key words: boiler combustion adjustment; CO online; multi-point sampling; boiler efficiency

万方数据