

炉底漏风对某 600 MW 机组锅炉性能的影响

童家麟¹, 齐晓娟², 韩平², 关键³, 吕洪坤¹

(1. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014;
2. 杭州意能电力技术有限公司, 浙江 杭州 310014; 3. 浙江省能源集团有限公司, 浙江 杭州 310007)

[摘要] 针对风冷式干排渣系统, 采用数值模拟方法研究了各典型负荷下该系统炉底漏风对锅炉温度场、燃尽率、NO_x生成量等的影响。结果表明: 干渣机冷空气漏入后, 炉内整体温度水平降低, 对中下层燃烧器层的稳燃能力影响较大, 低负荷下底层燃烧器中心截面烟气温度可下降 100 K; 煤粉不完全燃烧损失增大, NO_x生成量亦有所增加, 特别是当系统密封不严时, 其影响不容忽视; 炉底漏风产生后, 空气预热器 X 比减小, 可使锅炉排烟温度大幅提高。

[关键词] 干渣机; 炉底漏风; 温度场; 燃尽率; NO_x生成量; 排烟温度; 数值模拟

[中图分类号] TK227.1 **[文献标识码]** A **[DOI 编号]** 10.19666/j.rifd.202006024

[引用本文格式] 童家麟, 齐晓娟, 韩平, 等. 炉底漏风对某 600 MW 机组锅炉性能的影响[J]. 热力发电, 2021, 50(4): 126-131. TONG Jialin, QI Xiaojuan, HAN Ping, et al. Influence of boiler bottom air leakage on performance of a 600 MW unit boiler[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(4): 126-131.

Influence of boiler bottom air leakage on performance of a 600 MW unit boiler

TONG Jialin¹, QI Xiaojuan², HAN Ping², GUAN Jian³, LYU Hongkun¹

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310014, China;
2. Hangzhou E-energy Technology Co., Ltd., Hangzhou 310014, China; 3. Zhejiang Energy Group Co., Ltd., Hangzhou 310007, China)

Abstract: Against air-cooled dry-type slag extractor system, numerical simulation is carried out to study the influence of boiler bottom air leakage on temperature field, burn-out rate, NO_x production at typical loads. The results indicate that, after the cold air leaks from dry-type slag extractor the overall temperature level in the furnace decreases, which has a great effect on combustion stability of the middle and lower burner layers, and the flue gas temperature at the center section of the bottom burner can be reduced by 100 K at low load. Meanwhile, the coal incomplete combustion loss and NO_x production also rises. The influence of air leakage can not be ignored especially when the system is poorly sealed. The exhaust gas temperature rises markedly because X ratio of the air preheater decreases after the boiler bottom air leakage happens.

Key words: dry-type slag extractor, boiler bottom air leakage, temperature field, burn-out rate, NO_x production, exhaust temperature, numerical simulation

风冷式干排渣系统是 20 世纪 80 年代意大利 MAGALDI 公司设计并研发的, 在国际上使用比例较低, 约占煤电总装机容量的 1%^[1]。与湿式排渣系统相比, 该系统具有耗水量低、底渣利用率高、对环境影响小等优势^[2], 该系统于 1999 年首次在河北三河电厂 350 MW 机组上得到应用, 但近年来应用推广非常迅速, 目前国内已有数百台燃煤机组采用干式排渣系统, 尤其在我国西北部缺水地区, 新建机组多数以干式排渣机为主要除渣设备^[3-4]。但国内多台机组实际运行经验表明, 干式排渣系统存在明显的炉底漏风问题, 对机组安全运行产生一定影响^[5-6]。

赵振宇等^[7]采用计算流体力学方法对炉底漏风

进入炉膛后火焰形态的变化规律进行了研究, 揭示了排烟温度大幅升高的原因。许华等^[8]研究认为干式除渣系统较湿式除渣系统对锅炉燃烧及效率影响更大。刘泰生等^[9]研究了干式除渣系统对锅炉效率的影响, 得出其漏风率过大时会明显提升锅炉高温受热面壁温和减温水量。以往国内学者往往通过现场试验的方式或者对满负荷下数值计算研究炉底漏风对锅炉运行的影响, 但现场试验存在着一定的不可预见性, 甚至可能影响机组的安全稳定运行, 而数值模拟技术已成为燃烧过程研究的重要方法, 并已得到了广泛的应用^[10]。基于此, 本文使用计算流体力学 (CFD) 技术进行了各典型负

修回日期: 2020-08-27

第一作者简介: 童家麟(1986), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电站锅炉性能优化及污染物排放控制技术, tongjialing@126.com。

荷下炉底漏风对某亚临界四角切圆燃烧锅炉温度场、燃尽率、NO_x生成量等全方位影响的数值模拟研究，并从空气预热器（空预器）X 比变化方面对排烟温度的影响进行了研究，以为同类型锅炉提供参考。

1 锅炉概况

某电厂 1 号锅炉是美国 CE 公司制造的亚临界、一次再热、强制循环、平衡通风、单汽包、半露天 2 008 t/h 四角切圆燃烧煤粉锅炉，配置 6 层共 24 只上海锅炉厂有限公司生产的超低 NO_x 燃烧器。为进一步降低 NO_x 排放，锅炉还在主燃烧器上部设置分离燃尽风（SOFA）喷口。锅炉燃用设计煤种为晋北烟煤，其煤质分析见表 1。

该锅炉配备 6 台 HP983 型中速磨煤机，并在综合升级改造中，将原湿式除渣系统改为干式除渣系统。干式除渣系统投运后，1 号锅炉夏季工况运行

时，空预器烟气侧进口温度较去年同期相同负荷时基本持平，而出口温度较去年同期相同负荷时高约 20 ℃，空预器换热量减小，一定程度上影响了机组的经济运行。另外，锅炉在综合升级改造中对空预器进行了检查和水冲洗，而改造后短期运行即出现空预器换热能力下降现象，故可排除空预器换热元件硫酸氢铵附着原因。分析认为，空预器换热量下降是由于干渣机炉底漏风引起，满负荷在炉膛压力控制为-100 Pa 的工况下，炉底漏风量可达 100 t/h。而干渣机设计最大冷却空气量不超过锅炉总风量的 1%，且满负荷下使用热线风速仪对各冷却风口测得的冷却风量总和约为 15~20 t/h。因此，该锅炉炉底漏风量过大可能与干渣机系统密封不严有关，理论上漏风量会随着锅炉负荷的降低而下降，但该锅炉的绝大部分漏风量无法通过关闭冷却风门进行调节，而受炉膛压力影响较大，若炉膛压力控制更低，漏风量则会更大。

表 1 锅炉设计煤种煤质分析
Tab.1 Quality analysis results of the design coal

工业分析 w/%			元素分析 w/%					低位发热量/(kJ kg ⁻¹)
V _{ar}	A _{ar}	M _{ar}	C _{ar}	H _{ar}	O _{ar}	S _{ar}	N _{ar}	
22.82	19.77	9.61	58.60	3.36	7.28	0.63	0.79	22 404

2 数值模拟

图 1 为该锅炉炉膛整体网格划分。整个炉膛采用结构化六面体网格进行划分，其中对燃烧、流动较为剧烈的燃烧器区域和燃尽风区域进行了局部网格加密，总网格数大约为 300 万，计算所采用模型的详细介绍参见文献[11]。

本文主要对 100%ECR（连续经济出力，economic continuous rating）、75%ECR、50%ECR 3 个负荷共 9 个工况下不同炉底漏风量对锅炉的影响进行了数值模拟研究，具体计算工况见表 2。计算时使用的煤质为锅炉常用的晋北烟煤，采用均等

配煤、均等配风，且相同负荷下各工况炉膛出口氧量保持不变。



图 1 炉膛整体网格划分
Fig.1 Mesh generation of the furnace

表 2 数值模拟计算工况
Tab.2 The numerical simulation conditions

项目	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6	工况 7	工况 8	工况 9
负荷 (ECR) /%	100	100	100	75	75	75	50	50	50
投运磨煤机组	下 5 层	下 5 层	下 5 层	下 4 层	下 4 层	下 4 层	下 4 层	下 4 层	下 4 层
总煤量/(t h ⁻¹)	260	260	260	198	198	198	134	134	134
总风量/(t h ⁻¹)	2 318	2 248	2 178	1 902	1 832	1 762	1 349	1 279	1 209
炉膛出口氧量/%	3.0	3.0	3.0	4.5	4.5	4.5	5.5	5.5	5.5
燃尽风率/%	40	40	40	40	40	40	30	30	30
炉底漏风量/(t h ⁻¹)	0	70	140	0	70	140	0	70	140

3 计算结果

3.1 燃烧器区域烟气温度

为了定量判断炉底漏风对锅炉稳燃能力的影响,分别对9个工况下各燃烧器层中心截面烟气平均温度进行比较,沿炉膛高度方向,各燃烧器层排列顺序为A—F,燃烧器层中心截面烟气平均温度比较结果如图2所示。

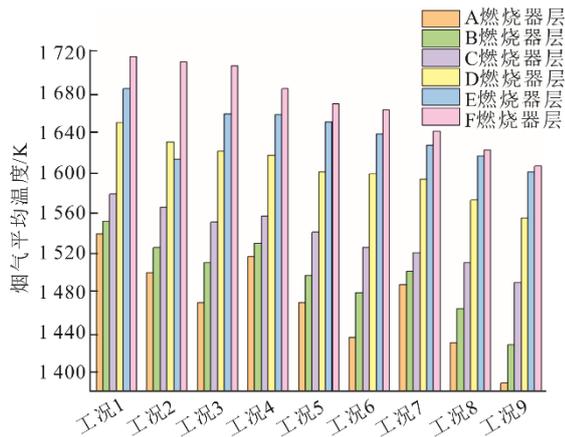


图2 燃烧器层中心截面烟气平均温度比较

Fig.2 The average flue gas temperature in cross section of each burner layer

由图2可以看出:随着负荷的降低,燃烧器层中心截面烟气温度随之下降,以最下层A燃烧器层为例,工况7该层截面烟气平均温度较工况1下降约100 K,锅炉稳燃能力有所降低;不同炉底漏风量对锅炉稳燃能力的影响亦有明显不同,总体上各燃烧器层烟气平均温度随着炉底漏风量的增大而降低,A燃烧器层最为明显,工况3较工况1该燃烧器层截面烟气平均温度下降约70 K,工况2较工况1下降约40 K,这与干渣机漏入空气温度较低有关,漏风量越大,对底层燃烧器烟气温度影响越明显;随着炉膛高度的增加,炉底漏风对烟气温度影响程度较弱,至最上层F燃烧器层,工况3和工况2较工况1该燃烧器层截面烟气平均温度分别下降约10 K和5 K;不同负荷下,相同漏风量对锅炉稳燃能力的影响亦有明显变化,同样以最下层A燃烧器层为例,工况9较工况7该燃烧器层截面烟气平均温度下降约100 K,而在该漏风量下,工况3较工况1下降约70 K,这说明在机组负荷较低时,炉底漏风对锅炉稳燃能力的影响更明显。因此,炉底漏风对中下层燃烧器层的稳燃能力影响最大,特别在机组低负荷运行时,更要注意中下层燃烧器烟气温

度,以免出现影响煤粉稳定燃烧的情况。

3.2 炉膛出口烟气温度

图3为9个工况下的炉膛出口烟气温度比较。由图3可以看出:随着炉底漏风量的增大,炉膛出口烟气温度呈上升趋势,这是因为干渣机漏入冷风后,炉内整体烟气温度降低,进而导致燃烧器区煤粉燃烧推迟,炉膛内火焰中心上升;不同负荷下,炉底漏风量对炉膛出口烟气温度的影响不同,负荷越低,对炉膛出口烟气温度的影响越大,漏风量140 t/h工况与漏风量0工况相比,100% ECR负荷时炉膛出口烟气温度升高约12 K,50% ECR负荷时炉膛出口烟气温度升高可达40 K。这与锅炉负荷降低,其容积热负荷下降有关。由上述分析可知,锅炉容量越小,相同漏风量下对炉膛出口烟气温度的影响越大。

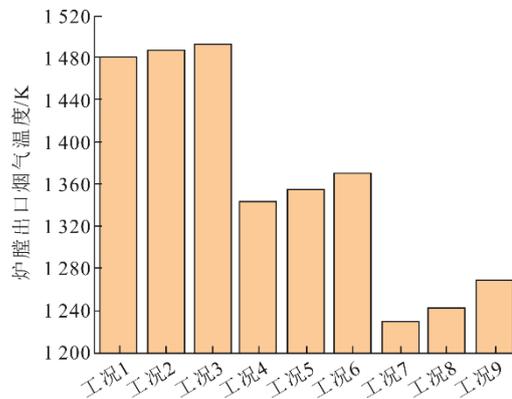


图3 炉膛出口烟气温度比较

Fig.3 The flue gas temperatures at furnace outlet under different conditions

3.3 煤粉燃尽率

图4和图5分别为9个工况下炉膛出口CO体积分数和固体可燃物质量浓度比较。

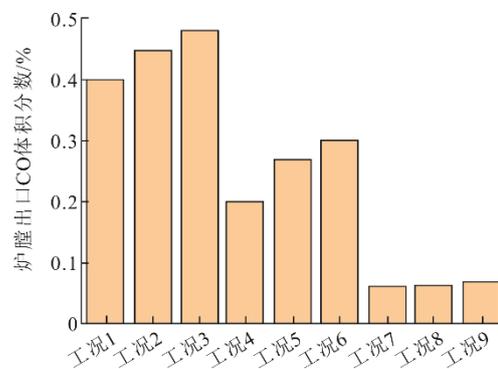


图4 炉膛出口CO体积分数比较

Fig.4 The CO volume fractions at the furnace outlet under different conditions

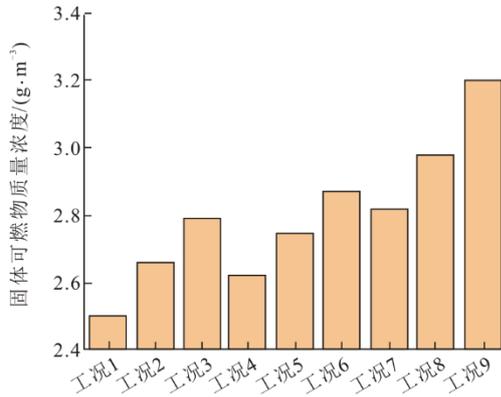


图5 炉膛出口固体可燃物质量浓度比较

Fig.5 The solid combustibles mass concentrations at the furnace outlet under different conditions

由图4和图5可以看出:随着炉底漏风量的增大,炉膛CO体积分数和固体可燃物质量浓度均呈上升趋势,这与炉底漏风量增大后煤粉燃烧推迟、炉膛内火焰中心上升有关,未燃尽的煤粉在炉内停留时间减少,不利于煤粉的燃尽;随着负荷的降低,炉膛出口CO体积分数呈下降趋势,但固体可燃物反而有所上升。

炉膛出口CO体积分数主要与过量空气系数有关,负荷越低,炉膛出口过量空气系数越大,CO体积分数越低。而炉膛出口固体可燃物质量浓度与炉内燃烧温度和过量空气系数密切相关^[12],炉内燃烧温度越低,炉膛出口固体可燃物质量浓度越高。对该锅炉而言,炉内燃烧温度较过量空气系数对炉膛出口固体可燃物质量浓度的影响更大,炉内燃烧温度随着负荷的降低而下降,而炉底漏风的加入,可进一步降低炉内燃烧温度。因此,低负荷下需要特别关注炉底漏风对炉膛出口固体可燃物质量浓度的影响。

图6为9个工况下炉膛底部渣量质量流量比较。

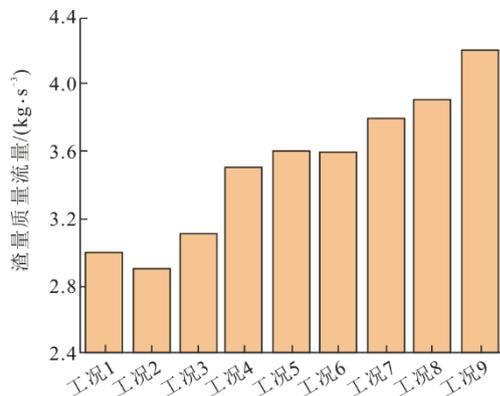


图6 炉膛底部渣量质量流量比较

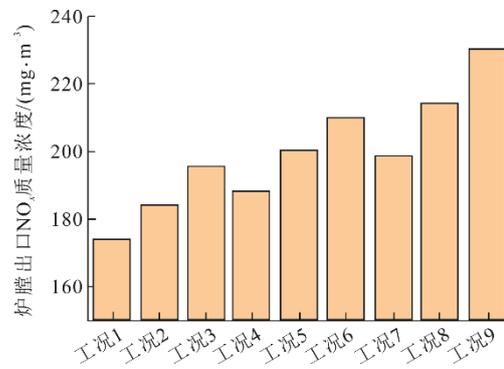
Fig.6 The slag mass flow rates at boiler bottom under different conditions

由图6可以看出,炉底漏风量对炉膛底部渣量质量流量的影响较为复杂,总体上,炉膛底部渣量质量流量随着漏风量的增加而增大。其原因有二:1)与炉底漏风对炉膛出口固体可燃物质量浓度的影响机理相同,漏入的冷空气降低了煤粉燃尽率,进而提高了炉膛底部渣量质量流量;2)炉底漏风尽管可增大炉膛底部风量,具有改善未燃尽颗粒下沉燃烧的作用^[13],但由于漏入的冷空气差压、比热容较小,而进口面积相对较大,导致漏风风速较低,难以穿透黏稠的火焰,对未燃尽颗粒的承托作用有限。

综上,随着炉底漏风量的增加,炉膛出口CO体积分数和固体可燃物质量浓度呈上升趋势,尽管部分漏风量下炉膛底部渣量可能略有改善,但程度有限,且锅炉出渣量只占灰渣总量的10%^[14],因此,煤粉不完全燃烧损失会随着炉底漏风量的增加而增大。此外,由于漏入的冷空气量一般与炉膛负压关系较为密切^[15],在相同的炉膛负压下,负荷越低,冷空气量占总风量的比例越大,其对煤粉燃尽率的影响也愈加明显。

3.4 炉膛出口NO_x质量浓度

图7为9个工况下炉膛出口NO_x质量浓度比较。由图7可以看出,随着漏风量的增加,折算至6%氧量下,炉膛出口NO_x质量浓度总体呈上升趋势,且在低负荷时,增大幅度更为明显。究其原因,有以下几点:1)漏入的冷空气降低了炉膛温度水平,但对炉膛温度的降低作用有限,至炉膛中上部,温度已相差无几,因此对热力型NO_x生成作用有限;2)燃烧器区煤粉燃烧推迟,炉膛内火焰中心上升,导致空气分级燃烧效果下降,一定程度上又会使SOFA对NO_x的抑制作用减弱^[16];3)煤粉燃尽的推迟,又使得主燃烧区运行氧量提高,进而促进燃料型NO_x的生成。

图7 炉膛出口NO_x质量浓度比较Fig.7 The NO_x mass concentrations at the furnace outlet under different conditions

3.5 数值模拟与实测结果对比

为了验证数值模拟计算结果的准确性,本文在满负荷、炉膛压力控制为-100 Pa、此时炉底漏风量约为 100 t/h 工况下,对炉膛出口 CO 体积分数和 NO_x 质量浓度的实测值和模拟值进行了比较,结果见表 3。由于锅炉实际运行中未使用设计煤种,表中的 N 质量分数采用实际运行煤种的加权值。由表 3 可见,实测值和模拟值偏差在 20% 内,说明数值模拟结果较为准确。

表 3 实测值和模拟值比较
Tab.3 The measured and simulated values

项目	实测值	模拟值	偏差/%
CO 体积分数/%	0.55	0.46	16.3
煤中 N 质量分数/%	0.79	0.85	7.6
NO _x 质量浓度(标准状态)/(mg m ⁻³)	211	192	9.0

4 炉底漏风对排烟温度的影响

由上文分析结果结合文献[7]可知,漏风量 140 t/h, 100% ECR 工况下炉膛出口烟气温度可升高约 12 K,但空预器烟气侧进口温度与漏风量 0 时基本持平,而出口温度则上升约 20 K。由此可知,空预器自身的换热量变化成为影响其出口温度的主要因素。参考文献[17],本文利用空预器 X 比对上述现象进行研究分析。空预器 X 比的定义为

$$X = \frac{m_a c_{p,a}}{m_g c_{p,g}} \quad (1)$$

式中: m_a 为空预器入口空气量, $c_{p,a}$ 为空预器空气侧入口温度至空预器出口温度之间的空气平均比热容, m_g 为空预器入口烟气量, $c_{p,g}$ 为空预器烟气侧入口温度至空预器出口温度之间的空气平均比热容。一般可认为 $c_{p,a}$ 和 $c_{p,g}$ 均为常数。

若不考虑空预器漏风和散热等因素,则空预器出口烟气温度为

$$T_1 = T_2 - X(T_{11} - T_{22}) \quad (2)$$

式中, T_2 为空预器入口烟气温度, T_{11} 为空预器出口空气温度, T_{22} 为空预器入口空气温度。

若考虑空预器漏风,则空预器最终出口烟气温度为

$$T_o = T_1 - \alpha K(T_1 - T_{22}) \quad (3)$$

式中, α 为空预器漏风率, K 为 $c_{p,a}$ 和 $c_{p,g}$ 的比值。

一般认为,当炉底漏风产生时,锅炉运行氧量可保持不变,因此炉底漏风产生后,通过空预器的空气量相应减小,空预器出口温度则随之改变。而

炉底漏风产生后, T_2 、 T_{11} 、 T_{22} 、 α 变化较小,若认为上述变量均不发生变化,则空预器出口烟气温度变化仅与 X 比改变有关。

图 8 为空预器出口烟气温度与 X 比的关系,其中 T_2 、 T_{11} 、 T_{22} 均取 100% ECR 工况锅炉设计参数, α 取漏风率 6%。由图 8 可以看出,炉底漏风产生后,可导致空预器 X 比减小,对于该锅炉而言,在 6% 漏风率下,炉底漏风量占总风量的比重增加 10%,则可提高空预器出口烟气温度约 27 K,若空预器漏风率增大,其出口烟气温度增幅则相应减小。

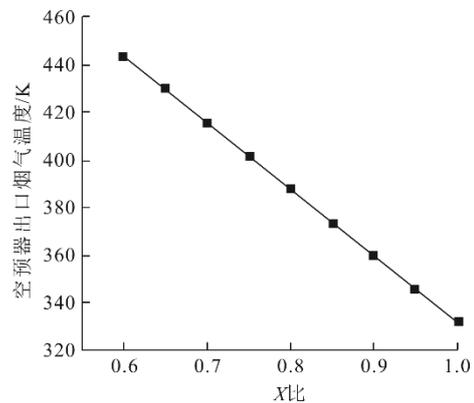


图 8 空预器出口烟气温度与 X 比的关系
Fig.8 The relationship between air preheater outlet flue gas temperature and X ratio

5 结 论

1) 干渣机冷空气漏入后,特别是对于因系统密封不严等原因导致的大量冷空气漏入时,炉内整体温度水平降低较多,对中层燃烧器层的稳燃能力影响较大,在机组低负荷运行时,更应注意中层燃烧器烟气温度,以免出现影响煤粉稳定燃烧的情况。

2) 干渣机冷空气漏入后,煤粉不完全燃烧损失会随着炉底漏风量的增加而增大,负荷越低,其对煤粉燃尽率的影响越明显;同时炉膛出口 NO_x 质量浓度亦随着漏风量的增加而增大,特别是锅炉处于低负荷运行或对于容积热负荷较小的锅炉,其影响更为明显。

3) 炉底漏风产生后,可导致空预器 X 比减小,对于特定锅炉而言,可通过空预器出口温度的上升情况判断炉底漏风情况。

[参 考 文 献]

- [1] 范仁东. 从实测数据分析风冷干排渣系统对锅炉效率的影响[J]. 电力技术, 2010, 19(4): 63-68.
FAN Rendong. Analysis of influence of air cooled dry-type slag removal system on boiler efficiency using

- practically measured data[J]. Electric Power Technology, 2010, 19(4): 63-68.
- [2] 张华兰, 田华. 干排渣系统在澳大利亚 MUJA 电厂的应用[J]. 机电信息, 2014(3): 138-139.
ZHANG Hualan, TIAN Hua. The application of dry-type slag extractor system for MUJA power station in Australia[J]. Mechanical and Electrical Information, 2014(3): 138-139.
- [3] 吕明, 李双江. 干式排渣机锅炉烟风系统设计优化方法[J]. 热能动力工程, 2013, 28(3): 288-291.
LYU Ming, LI Shuangjiang. Optimization methods for design the flue gas and air system of a boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2013, 28(3): 288-291.
- [4] 岳新喜. 大型燃煤电站锅炉干式与湿式排渣系统对比分析[J]. 华电技术, 2012, 34(6): 22-29.
YUE Xinxi. Comparative analysis on dry-type and wet-type deslagging system for large size coal-fired boiler[J]. Huadian Technology, 2012, 34(6): 22-29.
- [5] 李媛园, 赵振宁, 李金晶, 等. 炉底漏风对四角切圆锅炉燃烧的影响[J]. 电站系统工程, 2018, 34(2): 17-20.
LI Yuanyuan, ZHAO Zhenning, LI Jinjing, et al. The influence of boiler bottom air leakage on corner tangential firing boiler[J]. Power System Engineering, 2018, 34(2): 17-20.
- [6] 胡建根, 童家麟, 茅建波, 等. 典型燃煤锅炉深度调峰能力比较研究[J]. 锅炉技术, 2019, 32(6): 59-64.
HU Jiagen, TONG Jialin, MAO Jianbo, et al. The research of the comparison of deep peak regulation capacity of typical coal-fired boilers[J]. Boiler Technology, 2019, 32(6): 59-64.
- [7] 赵振宁, 李媛园, 张清峰, 等. 炉底漏风对火焰形态和排烟温度的影响[J]. 中国电力, 2016, 49(5): 91-96.
ZHAO Zhenning, LI Yuanyuan, ZHANG Qingfeng, et al. Impact of air leakage from furnace bottom on flame style and exhaust flue gas temperature[J]. Electric Power, 2016, 49(5): 91-96.
- [8] 许华, 张华伦, 王仕能, 等. 干、湿式除渣系统对锅炉效率影响的研究[J]. 中国电力, 2013, 46(6): 1-4.
XU Hua, ZHANG Hualun, WANG Shineng, et al. Study on the impact of dry and wet bottom ash handling system on boiler efficiency[J]. Electric Power, 2013, 46(6): 1-4.
- [9] 刘泰生, 周棋, 张秀昌, 等. 干式除渣系统对锅炉性能影响的研究[J]. 锅炉制造, 2018(3): 1-4.
LIU Taisheng, ZHOU Qi, ZHANG Xiuchang, et al. The effect study of dry-type deslagging system on boiler performance[J]. Boiler Manufacturing, 2018(3): 1-4.
- [10] 郑树, 周怀春. 三维、动态、实时数字化锅炉技术发展探讨[J]. 中国科学: 技术科学, 2016, 46(1): 20-35.
ZHENG Shu, ZHOU Huaichun. Discussion on the development of a 3D, dynamic and real-time digital boiler[J]. Scientia Sinica: Technologica, 2016, 46(1): 20-35.
- [11] 李明, 王雪彩, 孙树翁, 等. 燃尽风射流形式对墙式对冲煤粉锅炉低氮燃烧改造的影响[J]. 动力工程学报, 2015, 35(4): 263-269.
LI Ming, WANG Xuecai, SUN Shuweng, et al. Influence of overfire air jet form on low NO_x retrofit effect on an opposed firing boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2015, 35(4): 263-269.
- [12] 王小华, 陈宝康, 陈敏. 低 NO_x 燃烧器改造后飞灰可燃物高原原因分析及优化调整[J]. 热能动力工程, 2012, 27(3): 342-349.
WANG Xiaohua, CHEN Baokang, CHEN Min. Analysis of the causes for a high combustable content of the flying ash after a reconstruction of a low NO_x burner and its optimization adjustment[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2012, 27(3): 342-349.
- [13] 李汝萍, 樊印龙, 童家麟, 等. 某 600 MW 锅炉低 NO_x 燃烧数值模拟研究及优化[J]. 中国电力, 2018, 51(10): 164-170.
LI Ruping, FAN Yinlong, TONG Jialin, et al. Numerical simulation and optimization of low NO_x combustion characteristics for a 600 MW boiler[J]. Electric Power, 2018, 51(10): 164-170.
- [14] 赵振宁, 张清峰, 赵振宙. 电站锅炉性能试验原理方法及计算[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 24.
ZHAO Zhenning, ZHANG Qingfeng, ZHAO Zhenzhou. The methods and calculations of performance test for utility boilers[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010: 24.
- [15] 刘铭媛, 陈国庆, 戴维葆, 等. 炉底漏风对炉内燃烧及 NO_x 生成排放特性的影响[J]. 机械工程学报, 2019, 55(24): 210-215.
LIU Mingyuan, CHEN Guoqing, DAI Weibao, et al. Influence of air leakage on the NO_x emission and combustion characteristics[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(24): 210-215.
- [16] 高正阳, 吉硕, 吕少昆, 等. 燃尽风对锅炉燃烧及脱硝经济性的影响[J]. 热力发电, 2015, 44(9): 1-8.
GAO Zhengyang, JI Shuo, LYU Shaokun, et al. Effect of over fired air on combustion performance and denitration efficiency of a coal fired boiler[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(9): 1-8.
- [17] 张知翔, 郭睿, 王慧青. 空气预热器 X 比对排烟温度的修正方法[J]. 热力发电, 2014, 43(11): 116-119.
ZHANG Zhixiang, GUO Rui, WANG Huiqing. Effect of X ratio on correction method of exhaust temperature in air heaters[J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(11): 116-119.

(责任编辑 马昕红)