

燃用贫煤的 130 t/h CFB 锅炉低氮燃烧技术改造

金森旺¹, 陈久全², 曾贯虹², 孙 广²

(1. 中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司, 北京 102209; 2. 四川泸天化股份有限公司, 四川 泸州 646300)

摘 要:以某台燃用贫煤的 130 t/h 循环流化床(CFB)锅炉为研究对象,制定了锅炉低氮燃烧技术改造方案,预计通过低氮燃烧将 NO_x 最大排放值由 230 下降到 120 mg/m^3 以下。风帽结构优化改造后,锅炉临界流化风量降低了 11.6%, NO_x 最大排放值由 230 降至 186.66 mg/m^3 ,较改造前降低了 18.8%;锅炉旋风分离器改造方案实施后,分离器入口烟气流速由 18.7 提高到 24.2 m/s ,悬浮段压差由 635 升至 943 Pa,炉膛温度下降了 18 $^{\circ}\text{C}$, NO_x 最大排放值由 186.66 降至 80.74 mg/m^3 ,较改造前降低了 56.7%;燃烧调整试验后,炉膛出口氧体积分数由 3.48% 减小到 2.73%, NO_x 排放值由 59.8 降至 47.61 mg/m^3 ,较调整试验前下降了 20.3%。根据锅炉煤质条件,运行参数和结构参数制定的低氮燃烧技术方案实施后, NO_x 最大排放值降低了 64.8%。锅炉 90% 负荷以下时,不进行 SNCR 脱硝也可实现 NO_x 超低排放,实现了低氮燃烧的目标,应用效果优于预期。

关 键 词:CFB 锅炉; NO_x ; 低氮燃烧; 风帽; 旋风分离器; 入炉煤粒径

中图分类号:TK221 文献标识码:B DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2021.08.022

[引用本文格式]金森旺,陈久全,曾贯虹,等. 燃用贫煤的 130 t/h CFB 锅炉低氮燃烧技术改造[J]. 热能动力工程,2021,36(8): 152-157. JIN Sen-wang, CHEN Jiu-quan, ZENG Guan-hong, et al. Reconstruction of low NO_x combustion technology for 130 t/h CFB boiler burning lean coal[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(8): 152-157.

Reconstruction of Low NO_x Combustion Technology for 130 t/h CFB Boiler Burning Lean Coal

JIN Sen-wang¹, CHEN Jiu-quan², ZENG Guan-hong², SUN Guang²

(1. Clean Energy Technology Research Institute of China Huaneng Group Co., Ltd, Beijing, China, Post Code: 102209; 2. Sichuan Lutianhua Share-holding Co., Ltd, Luzhou, China, Post Code: 646300)

Abstract: Taking a 130 t/h circulating fluidized bed(CFB) boiler burning lean coal as the research object, the low nitrogen combustion technical reconstruction scheme of the boiler was developed. It was planned to reduce the maximum NO_x emission value from 230 mg/m^3 to less than 120 mg/m^3 through low NO_x combustion technology. After the optimization of hood structure, the critical fluidization air volume of the boiler was reduced by 11.6%, and the maximum NO_x emission value was reduced from 230 mg/m^3 to 186.66 mg/m^3 , which was 18.8% lower than before. After the implementation of the reconstruction scheme of boiler cyclone separator, the flue gas velocity at the inlet of the separator increased from 18.7 m/s to 24.2 m/s , the pressure difference in the suspension section increased from 635 Pa to 943 Pa, the furnace temperature decreased by 18 $^{\circ}\text{C}$, and the maximum NO_x emission value decreased from 186.66 mg/m^3 to 80.74 mg/m^3 , which was 56.7% lower than that before modification. The combustion adjustment test shows that the oxygen volume fraction at the outlet of the furnace is reduced from

收稿日期:2020-01-06; 修订日期:2020-02-04

基金项目:中国华能集团有限公司总部科技项目(HNKJ18-H13)

Fund-supported Project: Science and Technology Project of China Huaneng Group Limited(HNKJ18-H13)

作者简介:金森旺(1979-),男,河南舞阳人,中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司高级工程师。

3.48% to 2.73%, and the NO_x emission value is reduced from 59.8 mg/m^3 to 47.61 mg/m^3 , which is 20.3% lower than that before the adjustment test. After the implementation of the low nitrogen combustion technology scheme based on the coal quality conditions, operation parameters and structural parameters of the boiler, the maximum NO_x emission value has been reduced by 64.8%. Under 90% load of the boiler, without SNCR denitrification, the ultra-low NO_x emission can be achieved, and the goal of low- NO_x combustion can be achieved. The application effect is better than expected.

Key words: circulating fluidized bed boiler, NO_x , low- NO_x combustion, hood, cyclone separator, coal particle size in boiler

引言

近三十年间,循环流化床(CFB)锅炉技术在我国得到迅速发展,其工程应用已发展到660 MW 超临界等级^[1]。CFB 锅炉设计炉膛温度一般在850 ~ 920 °C,具有低氮燃烧的优势。根据煤种的差异和燃烧工况的变化,CFB 锅炉 NO_x 排放质量浓度一般可控制在 250 mg/m^3 以下^[2]。现阶段,我国推行燃煤电厂污染物超低排放政策,多数 CFB 锅炉采用低氮燃烧技术+选择性非催化还原(SNCR)脱硝工艺能够满足锅炉净烟气 NO_x 质量浓度不高于 50 mg/m^3 的要求^[3-5]。

我国 CFB 锅炉机组发电容量近1亿千瓦^[6], CFB 锅炉总台数大于3 000 台,其中410 t/h 以上等级的大容量 CFB 锅炉400 余台,占比不足15%。容量较小的 CFB 锅炉广泛分布在化工、造纸等行业。这部分小容量 CFB 锅炉由于设计缺陷、行业差异及认识不足等原因,未能充分发挥 CFB 锅炉低污染物排放的优势。本文结合化工行业某130 t/h CFB 锅炉低氮燃烧改造工程实例,研究了燃用贫煤 CFB 锅炉低氮燃烧技术,并对技术应用中存在的问题进行了分析讨论。

1 CFB 锅炉低氮燃烧技术

燃料氮通常是以有机氮和低分子氮存在于挥发分和焦炭中,燃烧形成的 NO 占 CFB 锅炉燃烧方式 NO_x 总排放的95%以上。因此,CFB 锅炉低氮燃烧主要方法为抑制燃料型 NO 的生成。燃料氮向 NO 的转化率主要受到燃煤含氮量、挥发分含量、炉膛温度^[7]和富裕氧浓度等因素的影响。燃烧温度较低

时,NO 的排放量主要源于挥发分燃烧,焦炭中存在的燃料氮析出量较少。随着温度的升高,不仅挥发分燃烧生成 NO,更多的焦炭氮伴随燃烧生成 NO,使得 NO 总排放量升高。因此,含氮量和挥发分含量低的煤在低温燃烧时 NO 的生成量会处于较低水平。

NO_x 排放量与煤的燃烧速率有关。同一温度下,小颗粒煤燃烧时 NO_x 排放浓度高于大颗粒煤;同一粒径下,温度越高, NO_x 析出的延续越短,即燃料型 NO_x 的析出速度和浓度与燃烧速率成正比^[8]。因此,降低燃烧温度可减少 NO_x 的排放。

挥发分氮向 NO 的转化受氧浓度影响很大,还原性气氛可有效降低挥发分氮的氧化反应速度,减少挥发分型 NO 的排放量。焦炭氮虽然对氧浓度不敏感,但是还原性气氛会降低焦炭的燃烧速率,从而间接减少焦炭型 NO 的排放量。因此,低氧燃烧和空气分级营造还原性气氛可减少 NO_x 的排放。

2 某台130 t/h CFB 锅炉低氮燃烧技术方案

2.1 锅炉概况及运行参数分析

锅炉型号为 YG-130/4.7-M 型,中压、单汽包、自然循环的循环流化床锅炉。锅炉主要性能参数如表1所示。设计燃料为当地无烟煤,实际燃料以贫煤为主。 NO_x 最大排放值 230 mg/m^3 。为实现 SO_2 超低排放,锅炉设置烟气氨法脱硫系统,原炉内干法脱硫系统作为备用。

分析锅炉满负荷运行参数发现:(1) 锅炉设计炉膛温度 892 °C,额定负荷下一、二次风比为 50%:50%。由于该炉型为我国早期生产的 CFB 锅炉,受热面布置存在问题,以及燃煤特性的变化,导致实际额定负荷条件下,炉膛平均温度达到 966 °C,

最高单点床温 1 008 ℃。锅炉在高负荷运行时,炉膛温度过高是造成 NO_x 排放值较大的一个重要原因。(2) 一、二次风比约 60%:40%。一方面是由于风帽阻力偏小且入炉煤颗粒度偏大,保证床层物料正常流化所需的一次风量较大;另一方面,运行中为了防止床温过高,采用大一次风量对床层物料进行冷却,减小床面结焦风险。(3) 炉膛悬浮段差压值为 635 Pa 偏低,同等容量 CFB 锅炉在相同负荷条件下,炉膛悬浮段压差值一般能够达到 1 000 ~ 1 500 Pa。炉膛悬浮段差压值间接反映了锅炉旋风分离器效率,较低的悬浮段差压值表明锅炉旋风分离器效率偏低^[9]。

表 1 锅炉主要性能参数表

Tab. 1 Main performance parameters of boiler

参数	数值
额定蒸发量/t·h ⁻¹	130
额定蒸汽压力/MPa	4.7
额定蒸汽温度/℃	450
燃料消耗量/t·h ⁻¹	17.26
燃料颗粒径要求/mm	≤13
灰渣比率	65:35
石灰石粒径/mm	≤2
设计钙硫比	2.0~2.5
脱硫效率/%	90
炉膛温度/℃	892
额定负荷一、二次风比/%	50:50

2.2 入炉煤特性分析

入炉煤取样进行了元素分析和工业分析,结果表明:入炉煤收到基氮含量 N_{ar} 为 0.74%,干燥无灰基挥发分含量 V_{daf} 为 14.17%,收到基灰分 A_{ar} 为 26.09%,收到基低位发热量 $Q_{net,ar}$ 为 21.75 MJ/kg。入炉煤属于贫煤, N_{ar} 中等, V_{daf} 较低,低氮燃烧技术应用有降低 NO_x 排放值的潜力。

入炉煤筛分分析可知,最大粒径 d_{max} > 13 mm;中位粒径 d_{50} = 5.167 mm; A_{ar} > 20% 的贫煤,电力行业标准推荐入炉煤粒径特征值: d_{max} = 7 mm, d_{50} = 0.8 ~ 1.0 mm。

锅炉入炉煤 d_{max} 和 d_{50} 均大于电力行业标准中入炉煤粒径推荐值^[10]。大颗粒物料过多不利于传

热,易造成床面流化不良^[11-12],为保证床层物料的流化均匀性需要采用较高的一次风量。

2.3 130 t/h CFB 锅炉低氮燃烧技术方案制定

根据某台 130 t/h CFB 锅炉运行参数和入炉煤特性分析,结合锅炉布风装置和旋风分离器的结构参数制定了锅炉 NO_x 低氮燃烧技术改造方案:步骤一,风帽结构优化改造;步骤二,分离器提效改造;步骤三,锅炉燃烧调整。采用低氮燃烧技术将锅炉 NO_x 最大排放值控制在 120 mg/m³ 以下。

在锅炉低氮燃烧的基础上,新建 SNCR 脱硝系统进一步脱除 NO_x,采用锅炉低氮燃烧技术 + SNCR 最终实现 NO_x 的超低排放。

3 锅炉低氮燃烧技术方案实施

锅炉低氮燃烧技术方案需根据计划停炉周期分步实施。进行 NO_x 的测试时,各试验工况锅炉主要参数波动范围如表 2 所示。

表 2 锅炉主要参数波动范围

Tab. 2 Fluctuation range of boiler main parameters

参 数	允许偏差
锅炉蒸发量/%	±5
入炉燃料量/%	±5
炉膛出口氧体积分数/%	±0.3
床温/℃	±10
床压/Pa	±50

为便于讨论,将 NO_x 排放的实测值折算到标态、干基及氧体积分数为 6% 下 NO₂ 的质量浓度进行对比。

3.1 风帽结构优化改造

首先进行以优化空气分级燃烧为目的的风帽改造,将原阻力较小的普通钟罩型风帽改造为迴流式钟罩型风帽,并对风帽结构参数进行了优化,方案如图 1 所示。方案适当提高了布风装置的阻力,保证床层物料正常流化的条件下,降低一次风比例,优化空气分级减小 NO_x 的生成。

改造后的冷态试验结果表明:临界流化风量为 38 000 m³/h,相比于改造前临界流化风量降低了 11.6%。

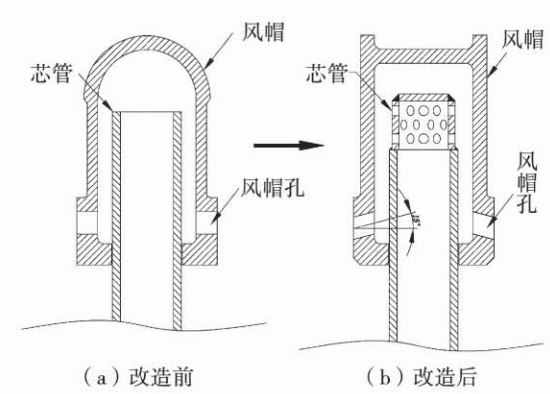


图 1 风帽结构改造方案

Fig. 1 Modification scheme of air hood structure

锅炉满负荷一次风比例由 60% 降至 55%, NO_x 最大排放值为 186.66 mg/m^3 , 较改造前下降了 18.8%。进一步降低一次风比例会出现床温偏差大,冷渣器喷渣等问题。这是由于锅炉入炉煤颗粒度偏大限制了空气分级燃烧。

3.2 分离器提效改造

提高分离器效率可提高锅炉循环倍率,增加了炉膛悬浮段焦炭浓度,焦炭对于 NO 还原反应的作用可降低 NO_x 的浓度^[13];还可增加了外循环灰量,降低炉膛温度减少 NO_x 的生成^[7]。还原反应如式 (1) 所示。



研究表明,在一定范围内提高分离器入口烟气流速能够有效提升分离效率。近几年的工程应用中,分离器入口烟气流速 v 值有进一步提高的趋势^[14]。同类型 CFB 锅炉设计时,额定负荷工况 v 值一般按照 $24 \sim 30 \text{ m/s}$ 选取。该锅炉近满负荷工况 v 值为 18.7 m/s ,处于较低水平,通过提高 v 值可提升分离器效率。

基于上述分析,制定了锅炉旋风分离器改造方案:对旋风分离器入口烟道进行缩口改造,额定工况 v 值提升至 24 m/s ,方案如图 2 所示。锅炉分离器入口烟道改造前后 NO_x 排放对比测试,主要运行参数对比如表 3 所示。由表 3 可知:在锅炉满负荷运行条件下,分离器改造后,入口烟气流速由 18.7 提高到 24.2 m/s ;炉膛悬浮段压差由 635 升至 943 Pa。

由于入炉煤细颗粒占比较小,悬浮段差压值未达到同等容量 CFB 锅炉正常水平,但较改造前提高 48.5%,表明分离器效率明显改善;炉膛温度下降了 18°C ,这不仅有利于降低 NO_x 的生成量,也为锅炉燃烧调整创造了有利条件。

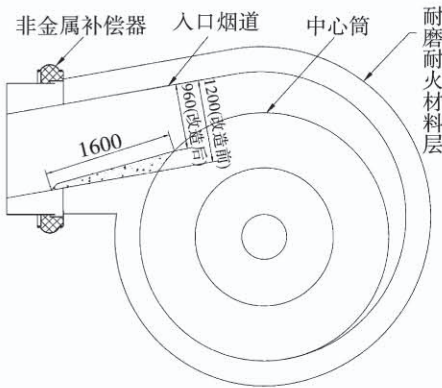


图 2 锅炉分离器改造方案

Fig. 2 Reconstruction scheme of boiler separator

表 3 分离器改造前后锅炉主要参数对比表

Tab. 3 Comparison table of main parameters of boiler before and after separator reconstruction

参 数	改造前	改造后
负荷/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	128.2	127.1
给煤量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	20.2	19.6
炉膛温度/ $^\circ\text{C}$	966	948
炉膛悬浮段差压/Pa	635	943
氧体积分数/%	2.75	3.01
一、二次风比率/%	55:45	55:45
分离器入口烟气流速计算值/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	18.7	24.2

分离器改造前后,不同负荷 NO_x 排放值对比结果如图 3 所示。试验中炉膛出口氧体积分数按 3% 控制,无炉内脱硫工况。

图 3 表明:分离器改造前,锅炉负荷由 55 升高到 118 t/h , NO_x 排放值由 36.94 升至 186.66 mg/m^3 。分离器改造后,锅炉负荷由 60 升高到 128 t/h , NO_x 排放值由 11.93 升至 80.74 mg/m^3 。与改造前相比, NO_x 最大排放值下降了 56.7%。

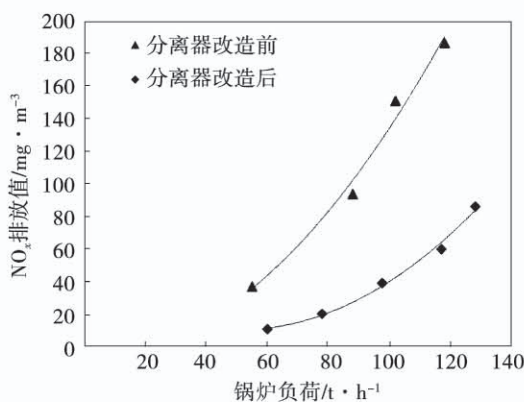


图3 分离器改造前后 NO_x 排放值随负荷变化曲线

Fig.3 Variation curves of NO_x emission value with load before and after separator reconstruction

3.3 燃烧调整试验

为了进一步降低 NO_x 的排放值,进行了锅炉燃烧调整试验。因日常运行中该锅炉负荷率一般不超过 90%,试验在 90% 锅炉负荷进行。由于调温手段有限,入炉煤颗粒度较大也限制了一次风量的调整幅度,试验通过降低锅炉炉膛出口总氧体积分数进行对比。试验为无炉内脱硫工况,一、二次风比率维持不变,结果如图 4 所示。

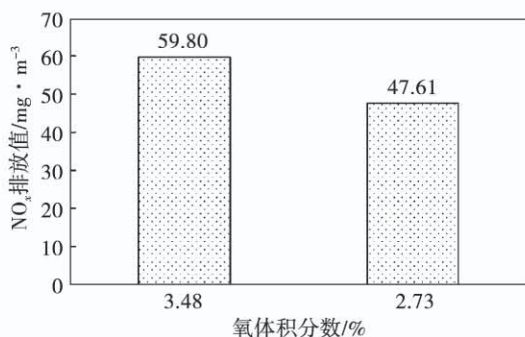


图4 NO_x 排放值与锅炉氧体积分数关系图

Fig.4 Relationship graph of NO_x emission value and boiler $\varphi(\text{O}_2)$

由图 4 可知,锅炉在 90% 负荷时,氧体积分数由 3.48% 下降到 2.73%,NO_x 排放值由 59.8 降至 47.61 mg/m³,NO_x 排放值比燃烧调整前下降了 20.3%。表明燃用贫煤 CFB 锅炉降低氧体积分数能够有效减少 NO_x 的排放。

4 结 论

(1) 燃用贫煤的 130 t/h CFB 锅炉,以优化空气分级燃烧为目的的布风装置改造技术方案实施后,锅炉临界流化风量降低了 11.6%,NO_x 最大排放值由 230 降至 186.66 mg/m³,较改造前降低了 18.8%。入炉煤颗粒径较大限制了空气分级的低氮燃烧效果。

(2) 以提高锅炉循环倍率,降低炉膛温度为目的的锅炉旋风分离器提效技术方案实施后,锅炉近满负荷工况,分离器入口烟气流速由 18.7 提高到 24.2 m/s,悬浮段压差由 635 升至 943 Pa,炉膛温度下降了 18 ℃,NO_x 最大排放值由 186.66 降至 80.74 mg/m³,较改造前降低了 56.7%。

(3) 锅炉旋风分离器提效改造后,进行了 90% 负荷工况燃烧调整试验,炉膛出口氧体积分数由 3.48% 减小到 2.73%,NO_x 排放值由 59.8 降至 47.61 mg/m³,较调整试验前下降了 20.3%。

(4) 根据 130 t/h CFB 锅炉煤质条件,运行参数和结构参数制定的低氮燃烧技术方案分步实施后,NO_x 最大排放值降低了 64.8%。锅炉 90% 负荷以下,不投 SNCR 脱硝可实现 NO_x 超低排放,实现了低氮燃烧的目标,应用效果优于预期。

参考文献:

- [1] 苗苗,张曼,吕俊复,等. 流化床燃烧中 N₂O 生成机理与减排技术[J]. 清华大学学报(自然科学版),2020,60(6): 507-517.
MIAO Miao, ZHANG Man, LYU Jun-fu, et al. N₂O formation mechanism and control in circulating fluidized beds[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2020, 60(6): 507-517.
- [2] 金森旺,刘彬,惠艳,等. 300 MW CFB 锅炉提高 SO₂ 超低排放经济性试验研究[J]. 洁净煤技术,2017,23(4): 77-83.
JIN Sen-wang, LIU Bin, HUI Yan, et al. Experimental study on improving the SO₂ ultra low emission economy of 300 MW CFB boiler[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(4): 77-83.
- [3] 李影平,辛胜伟,王凤君. 660 MW 超超临界循环流化床锅炉超低 NO_x 排放研究[J]. 洁净煤技术,2019,25(5): 86-92.
LI Ying-ping, XIN Sheng-wei, WANG Feng-jun. Study on ultra-low NO_x emission technology of 660 MW ultra-supercritical circulating

- fluidized bed boiler[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(5): 86-92.
- [4] 段守保. 300 MW CFB 锅炉大气污染物超低排放改造技术研究[J]. 洁净煤技术, 2016, 22(6): 88-94.
- DUAN Shou-bao. Technical route of air pollutants ultra low emission modification for 300 MW CFB boilers[J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(6): 88-94.
- [5] 孙献斌, 时正海, 金森旺. 循环流化床锅炉超低排放技术研究[J]. 中国电力, 2014, 47(1): 155-157.
- SUN Xian-bin, SHI Zheng-hai, JIN Sen-wang. Research on ultra-low emission technology for CFB boilers[J]. Electric Power, 2014, 47(1): 155-157.
- [6] 岳光溪, 吕俊复, 徐 鹏, 等. 循环流化床燃烧发展现状及前景分析[J]. 中国电力, 2016, 49(1): 1-13.
- YUE Guang-xi, LYU Jun-fu, XU Peng, et al. The up-to-date development and future of circulating fluidized bed boiler combustion technology[J]. Electric Power, 2016, 49(1): 1-13.
- [7] 孙献斌, 黄 中. 大型循环流化床锅炉技术与工程应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- SUN Xian-bin, HUANG Zhong. Technology and engineering application of large circulating fluidized bed boiler[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.
- [8] 岑可法, 倪明江, 骆仲泱, 等. 循环流化床锅炉理论设计与运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- CEN Ke-fa, NI Ming-jiang, LUO Zhong-yang, et al. Theoretical design and operation of circulating fluidized bed boiler[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [9] 茹 宇, 许 杰, 任朝晖, 等. 循环流化床锅炉分离器中心筒改造对锅炉性能的影响[J]. 热力发电, 2020, 49(6): 26-31.
- RU Yu, XU Jie, REN Zhao-hui, et al. Effect of retrofitting of separator vortex finder on CFB boiler's performance[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(6): 26-31.
- [10] 国家能源局. DL/T1744-2017. 循环流化床锅炉煤制备系统选型导则. [S].
- National Energy Administration. DL/T1744-2017. Guide on selection of coal preparation system for circulating fluidized bed boiler[S].
- [11] 孙献斌, 刘海峰, 王海涛, 等. 高温型循环流化床锅炉炉膛传热系数的试验研究[J]. 动力工程学报, 2014(5): 351-354.
- SUN Xian-bin, LIU Hai-feng, WANG Hai-tao, et al. Experimental study on heat-transfer coefficient in furnace of high-temperature CFB boilers[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering 2014(5): 351-354.
- [12] 黄 中, 吴 涛, 刘冠杰等. CFB 锅炉破碎筛分系统改造研究与工程应用[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(增刊): 181-184.
- HUANG Zhong, WU Tao, LIU Guan-jie, et al. Research and retrofit of CFB boiler coal screening system correction[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(supplement): 181-184.
- [13] 孙献斌, 林伟荣, 韩 应, 等. 高温型 CFB 锅炉关键技术与设计方案研究[J]. 热力发电, 2020, 49(5): 1-6.
- SUN Xian-bin, LIN Wei-rong, HAN Ying, et al. Research on key technologies and design plan of high-temperature CFB boiler[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(5): 1-6.
- [14] 李 楠, 张世鑫, 赵鹏勃, 等. 循环流化床锅炉低氮燃烧技术试验研究[J]. 洁净煤技术, 2018, 24(5): 84-89.
- LI Nan, ZHANG Shi-xin, ZHAO Peng-bo, et al. Experimental study on low-nitrogen combustion technology of circulating fluidized bed boiler[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(5): 84-89.

(姜雪梅 编辑)