

凝结水节流技术 在燃煤机组灵活性改造中的应用

钟祎劼, 孙阳阳, 姚国鹏, 李 杨, 王剑钊

(中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司煤基清洁能源国家重点实验室, 北京 102209)

[摘 要] 介绍了基于先进控制技术的协调控制调频、凝结水节流调频、供热机组短期抽汽调频、凝汽器冷却工质背压调频等 4 种提高燃煤机组灵活性的策略, 结合实际工作, 将凝结水节流技术与某电厂原协调控制相结合并在现场应用。运行结果表明, 系统整体运行稳定, 机组负荷能够快速响应 AGC 指令变化, 仅凝结水节流对负荷调节速率可增加 1.6%Pe/min, 25 s 内快速跨出 AGC 调节死区, 调节性能良好。经测算, 机组平均调节性能综合指标提高约 10%, 降低煤耗约 0.93 g/(kW h), 机组经济性提高, 调峰能力增强。

[关 键 词] 灵活性; 可再生能源; 协调控制调频; 凝结水节流调频; 供热抽汽调频; 冷却工质背压调频
[中图分类号] TM734 **[文献标识码]** B **[DOI 编号]** 10.19666/j.rld.201805141

[引用本文格式] 钟祎劼, 孙阳阳, 姚国鹏, 等. 凝结水节流技术在燃煤机组灵活性改造中的应用[J]. 热力发电, 2018, 47(12): 77-81. ZHONG Yiqing, SUN Yangyang, YAO Guopeng, et al. Application of condensation water throttling technology in flexibility transformation of coal-fired units[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(12): 77-81.

Application of condensation water throttling technology in flexibility transformation of coal-fired units

ZHONG Yiqing, SUN Yangyang, YAO Guopeng, LI Yang, WANG Jianzhao

(State Key Laboratory of Coal-Based Clean Energy, Huaneng Clean Energy Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: Four strategies for improving the flexibility of coal-fired units are introduced in detail, which are coordinated control frequency modulation (FM) based on advanced control technology, throttle frequency modulation in condensate water, short-term FM of heating unit, and FM in condenser's back pressure. Combined with the actual work, the condensation water throttle fast load technology is integrated with the original coordinated control of a power plant. After the project is implemented, the whole system runs steadily. The unit load can quickly respond to the change of AGC instruction, only the condensation water throttling can increase the load regulation rate by 1.6%Pe/min, and AGC adjustment dead zone can be quickly stepped out within 25 s, the regulation performance is good. According to the calculation, the comprehensive index of the average adjustment performance of the unit has been improved by about 10%, the coal consumption is reduced by about 0.93 g/(kW h), and the economy and peak regulating capacity of the unit are further improved.

Key words: flexibility, renewable energy, coordinated control frequency modulation, condensation water throttling frequency modulation, heating pumping frequency modulation, cooling working medium back pressure frequency modulation

随着可再生能源比例增高, 燃煤机组的灵活性要求也逐步提高^[1]。以光伏发电和风力发电为代表的可再生能源发电发展迅速, 传统火电行业面临新的挑战。国外火电机组灵活性运行技术已经比较成熟: 德国火电厂(燃煤和生物质)的深度调峰最低

负荷可达到 20%, 变负荷能力 4%Pe/min; 丹麦风力发电量占比达 42%, 2020 年或将达到 50%, 其煤电机组的深度调峰最低可达 20%, 变负荷能力达 4%Pe/min, 预计到 2050 年, 丹麦发电将全部依靠可再生能源^[2]。

收稿日期: 2018-05-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0601900)

Supported by: National Key Research and Development Program (2017YFB0601900)

第一作者简介: 钟祎劼(1981—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为工业管理过程及系统优化、大型能源系统控制与优化, zhongyiqing@hnceri.com。

国家能源局要求加快提升燃煤发电机组的灵活性和调峰潜能,通过技术创新,全面提高机组调峰和新能源消纳能力。将约 2 亿 kW h 燃煤发电机组的灵活性改造纳入“十三五”规划^[3-4]。燃煤发电机组的灵活性改造包括 2 个方面,一方面是机组适应燃料的灵活性,另一方面是机组运行的灵活性^[5]。燃料的灵活性要求通过改造,锅炉或者辅助设备可以适应不同的煤质或掺烧一定量的生物质、城市生活垃圾等;运行的灵活性要求通过对锅炉、汽轮机、辅机、控制系统等的改造,达到机组变负荷过程中的快速性和深度性,并保证机组的经济性和安全可靠性的不受影响。本文重点探讨热控技术在灵活性改造中的应用情况。

1 4 种灵活性改造技术

灵活性改造中热工技术主要有:1)基于先进控制技术的协调控制调频;2)凝结水节流调频;3)供热机组短期抽汽调频;4)凝汽器冷却工质背压调频。

文献[6-8]对先进控制在协调控制调频中相关应用进行了研究。其中:文献[6]提出一种新型单元机组协调控制策略,采用神经网络预测控制,提高了调节系统的速度、精度以及抗干扰能力;文献[7]提出一种基于遗传算法的机组协调控制系统模型的多变量鲁棒 PID 参数整定方法,使控制器输出可以更好地跟踪设定值且具有良好的鲁棒性;文献[8]采用预测控制算法,建立基于模型预测控制的互联网 AGC 控制系统,提高了 AGC 系统的鲁棒性和响应速度。

文献[9-11]对凝结水节流调频技术进行研究。其中:文献[9]分析了凝结水节流利用汽轮机蓄能快速改变机组负荷的机理,设计了汽轮机锅炉协调与凝结水节流结合的串级控制系统,并结合某 1 000 MW 机组对控制策略仿真,结果表明,该方法可大幅提高机组 AGC 性能考核指标,且在调节过程中除氧器水位波动在允许范围内;文献[10]在热力学分析基础上利用蓄能系数的概念,提出基于凝结水节流的超超临界机组调频控制方法,并仿真验证该方法提高了机组调频响应能力,使机组运行参数更加稳定;文献[11]提出了一种快速响应电网 AGC 指令的凝结水节流策略,在源网联合仿真系统上对该策略进行评估,仿真结果表明,该控制策略可长期稳定运行,并可改善机组 AGC 考核指标。

文献[12-13]对供热机组短期抽汽调频技术进

行了研究。其中:文献[12]提出一种利用供热机组储热特性的深度调峰方法,该方法建立的供热模型可预估蓄热和放热时间以及深度调峰能力,且不影响热用户体感温度;文献[13]提出一种基于气象数据的供热机组调峰能力预测方法并进行验证,在不影响供暖品质的情况下,提高了电网消纳清洁能源的能力。

文献[14]对凝汽器冷却工质背压调频技术进行了研究,并建立了冷端系统模型,研究冷却水流量变化对机组背压及负荷的影响,提高了机组深度调峰能力。

2 应用实例

2.1 实施方案

某 660 MW 机组 DCS 选用 Ovation 控制系统,由于机组汽包炉自身的特点,锅炉侧迟延和惯性较大,无法快速跟踪电网 AGC 指令变化,在兼顾主蒸汽压力控制品质的同时,很难短时间内快速跨出调节死区提升机组负荷。将凝结水节流技术与协调控制结合,提高机组对电网响应的快速性。凝结水节流与原协调控制回路耦合原理如图 1 所示。

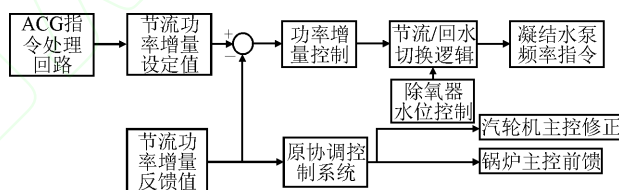


图 1 凝结水节流技术与原协调控制回路耦合原理
Fig.1 The principle of the condensate throttle technology coupling with the original coordinated control circuit

2.2 安全保护

机组各设备保护参数见表 1,运行参数设置三重限制。

表 1 机组各设备保护参数
Table 1 Protection parameters of the unit equipments

参数	节流允许		节流切除	
	高限	低限	高限	低限
除氧器水位/mm	1 900	1 800	1 900	1 600
凝汽器水位/mm	1 700	1 100	1 700	1 100
凝结水流量/(t h ⁻¹)	PV-SP>-150	PV-SP<150	1 700	550
凝结水泵出口压力/MPa	3.0	0.7	3.0	0.7
背压/kPa	40	2	40	2
机组负荷/MW	600	300	600	300

注: PV 为目标值, SP 为设定值。

系统安全保护特征为:

当运行参数在凝结水节流允许条件范围内时，允许系统进入节流模式；

当运行参数超出回水切换条件的参数范围时，禁止系统进入节流模式，节流系统维持在回水模式；

当运行参数超出节流允许条件范围时，凝结水节流系统投入锁死，禁止投入凝结水节流控制。

2.3 稳态工况扰动试验

分别在 581.4、500.9、445.9、400.6 MW 负荷下进行凝结水节流扰动试验，试验结果见表 2。当

负荷在 581.4 MW 时，投入凝结水节流，凝结水流量在 45 s 内由 1 458 t/h 降至 823 t/h，负荷在 30 s 内上升了 7.341 MW，1 min 内上升了 15.3 MW。当凝结水流量稳定后机组负荷最终稳定在 596.7 MW 左右，升速率约 2.6%。机组功率快速响应电网 AGC 指令变化，在 25 s 内跨出 AGC 调节死区，1 min 内使功率达到理论计算值，完成凝结水流量调节，且机组实际功率越高，凝结水流量越大，节流时间越长，对响应电网 AGC 指令越有益。

表 2 稳态工况下凝结水节流扰动试验结果

Table 2 The closed loop disturbance test results of condensate throttling under steady state condition

节流前负荷/MW	节流前流量/(t h ⁻¹)	节流后负荷/MW	节流后流量/(t h ⁻¹)	流量增量/(t h ⁻¹)	功率增量/MW	流量负荷增益
400.6	1 050	405.5	680	370	4.9	0.013 2
445.9	1 151	452.6	668	483	6.7	0.013 8
500.9	1 169	509.9	598	571	9.0	0.015 8
581.4	1 458	596.7	823	635	15.3	0.024 1

2.4 实际运行效果

图 2 为 2016 年 11 月 3 日 06:30—09:00 机组一次升降负荷过程各参数变化曲线，过程中 AGC 指令有效变化 60 余次，凝结水节流调节动作 20 多次，

投入率约 38%，平均响应时间在 20 s 以内。凝结水节流调节在机组连续升降负荷时频繁动作，且在动作过程中，除氧器水位均保持在 1 700~1 900 mm 的安全范围。

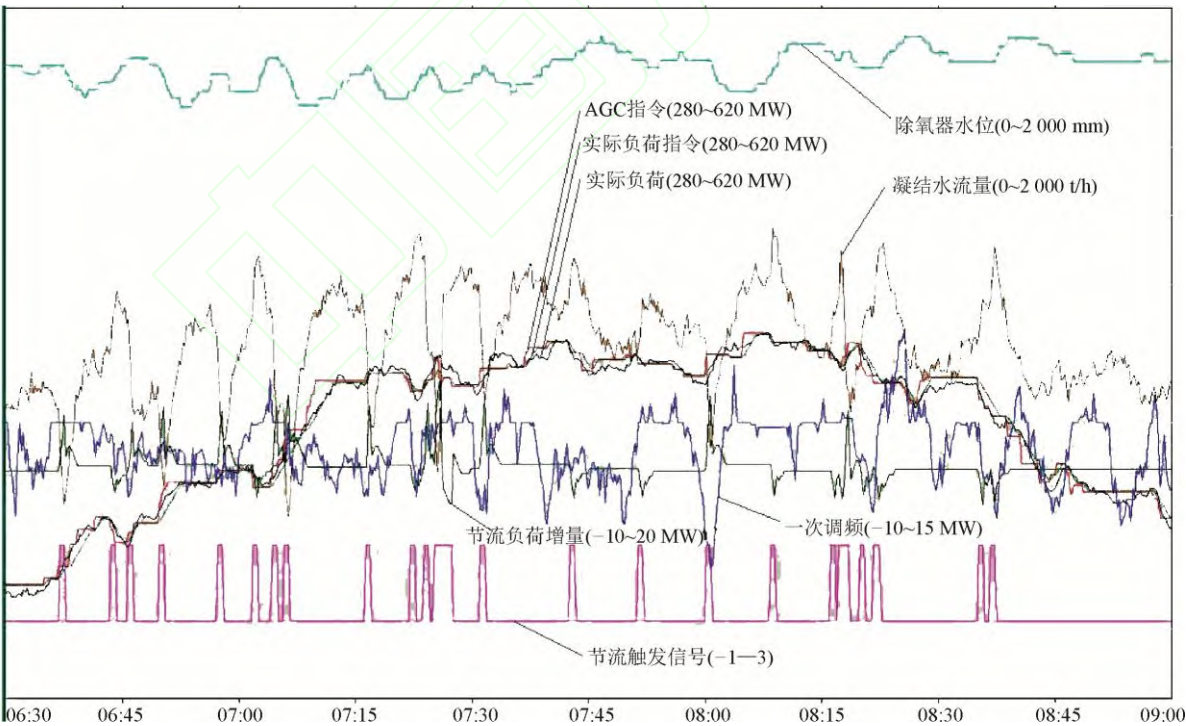


图 2 凝结水节流升降负荷过程

Fig.2 The load ascending and descending process during the condensate water throttling

图 3 为 2016 年 11 月 4 日 09:50—10:00 凝结水节流变负荷过程。由图 3 可见，10 min 内电网 AGC

指令动作 6 次，凝结水节流调节动作 4 次，平均响应时间 12 s，负荷平均变动 10.483 MW/min，仅凝

节水节流调节速率约 1.6%，机组对电网 AGC 指令的跟踪能力明显增强。经测算，投入凝结水节流前

后，机组平均调节性能综合指标 (KP) 值较之前提高约 10%，降低煤耗约 0.93 g/(kW h)。

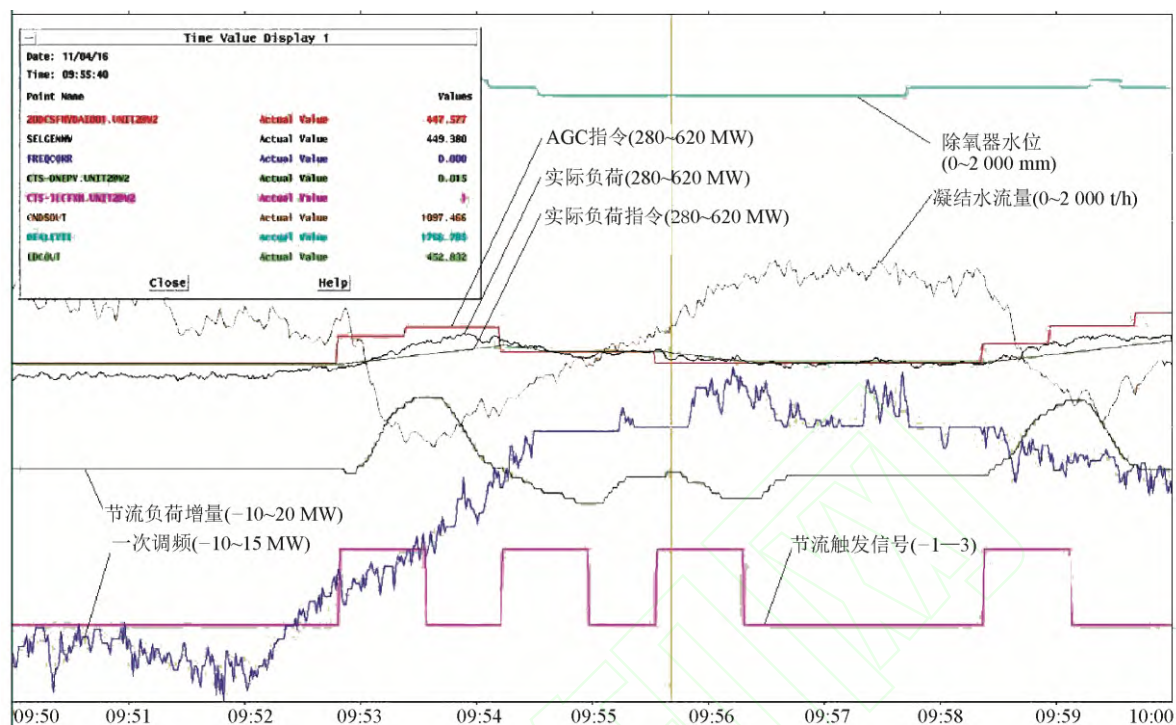


图 3 凝结水节流运行效果

Fig.3 The operation effect of condensate throttling

凝结水节流连续调节过程中对除氧器水位、凝汽器水位影响较大，运行过程中应密切注意凝结水泵出口压力变化。若超过机组保护逻辑限制，应立刻切除凝结水节流控制。

3 结 论

投入凝结水节流后，机组可以快速响应电网 AGC 指令变化，调频能力明显增强；机组负荷增加，相当于原机组滑压曲线下移，主蒸汽调节阀节流损失减小，高压缸效率提高；同时，充分利用了除氧器及低压加热系统中部分储能，使汽轮机整体效率提升。

【参 考 文 献】

- [1] 张媛媛. 火电灵活性改造在试点中铿锵前行[N]. 中国电力报, 2018-01-29(5).
ZHANG Yuanyuan. Thermal power flexibility transformation in the pilot clang forward[N]. China Electric Power, 2018-01-29(5).
- [2] 杨豫森. 北欧及德国火电灵活性技术方案介绍[EB/OL]. (2016-10-31)[2018-05-23]. http://www.360doc.com/content/16/1031/10/36219584_602727350.shtml.
YANG Yusen. Introduction of thermal power flexibility technical schemes in Nordic and German thermal power plants[EB/OL]. (2016-10-31)[2018-05-23]. http://www.360doc.com/content/16/1031/10/36219584_602727350.shtml.
- [3] 国家能源局. 国家能源局正式启动提升火电灵活性改造示范试点工作[EB/OL]. (2016-06-20)[2018-05-23]. http://www.nea.gov.cn/2016-06/20/c_135451050.htm.
National Energy Administration. The national energy administration has officially launched the pilot project to upgrade the flexibility of thermal power plants[EB/OL]. (2016-06-20)[2018-05-23]. http://www.nea.gov.cn/2016-06/20/c_135451050.htm.
- [4] 国家能源局. 能源局启动提升火电灵活性改造示范试点工作[EB/OL]. (2016-06-22)[2018-05-23]. http://www.nea.gov.cn/2016-06/22/c_135456540.htm.
National Energy Administration. Energy administration starts upgrading thermal power flexibility demonstration pilot work [EB/OL]. (2016-06-22)[2018-05-23]. http://www.nea.gov.cn/2016-06/22/c_135456540.htm.
- [5] 宫广正. 超临界火电机组运行灵活性提升控制策略研究及应用[J]. 中国电力, 2017, 50(8): 22-26.
GONG Guangzheng. Research on and application of control strategy for operation flexibility of supercritical fossil-fired power units[J]. Electric Power, 2017, 50(8): 22-26.
- [6] 张建华, 董菲, 侯国莲, 等. 基于神经网络预测控制的单元机组协调控制策略[J]. 动力工程, 2006, 26(3): 392-395.
ZHANG Jianhua, DONG Fei, HOU Guolian, et al. Coordinated control strategy of block units based on neural network predictive control[J]. Journal of Power Engineering, 2006, 26(3): 392-395.
- [7] 谢, 曾德良, 刘吉臻, 等. 基于遗传算法的协调控制系统鲁棒 PID 参数寻优[J]. 动力工程学报, 2010, 30(12): 937-940.
XIE Xie, ZENG Deliang, LIU Jizhen, et al. Optimization

- of robust PID controllers for a coordinated control system based on genetic algorithm[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2010, 30(12): 937-940.
- [8] 付鹏武. 基于模型预测控制的电网 AGC 系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013: 9-10.
FU Pengwu. Research on AGC system of power grid based on model predictive control[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013: 9-10.
- [9] 杨巍, 龙东腾, 牛玉广. 基于凝结水节流串级控制的新型协调控制[J]. 热力发电, 2017, 46(4): 125-131.
YANG Wei, LONG Dongteng, NIU Yuguang. A novel coordinated control strategy based on condensate throttling cascade control[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(4): 125-131.
- [10] 刘吉臻, 王耀函, 曾德良, 等. 凝结水节流参与的超超临界机组一次调频控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7216-7222.
LIU Jizhen, WANG Yaohan, ZENG Deliang, et al. A primary frequency regulation method of USC units based on condensate throttling[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7216-7222.
- [11] 刘吉臻, 王耀函, 曾德良, 等. 基于凝结水节流的火电机组 AGC 控制优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6918-6925.
LIU Jizhen, WANG Yaohan, ZENG Deliang, et al. An AGC control method of thermal unit based on condensate throttling[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6918-6925.
- [12] 李邓超. 基于供热系统热惯性供热机组短时深度参与电网调峰及风电消纳研究[D]. 长春: 长春工程学院, 2017: 6-8.
LI Dengchao. Research on the heating system of the thermal inertia of heating unit short depth in grid and wind power consumption based on peak shaving[D]. Changchun: Changchun Institute of Technology, 2017: 6-8.
- [13] 李晓莉. 供热机组调峰能力预测方法研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2016: 5-6.
LI Xiaoli. Study on the prediction method about peak regulation capacity of thermal power unit[D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2016: 5-6.
- [14] 年中华. 基于火电机组冷端系统的负荷快速响应研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013: 6-7.
NIAN Zhonghua. Research on output rapid response based on cold-end system of thermal power unit[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013: 6-7.

(责任编辑 杜亚勤)

(上接第 71 页)

- [7] 许霖杰, 程乐鸣, 邹阳军, 等. 1 000 MW 超临界循环流化床锅炉炉膛气固流动特性数值模拟[J]. 中国机电工程学报, 2015, 35(10): 2480-2485.
XU Linjie, CHENG Leming, ZOU Yangjun, et al. Numerical study of gas-solids flow characteristics in a 1 000 MW supercritical CFB boiler octagonal furnace[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 2480-2485.
- [8] 李德波, 宋景慧, 徐齐胜. 50 MW 生物质循环流化床锅炉三维冷态流动和磨损规律的数值模拟[J]. 动力工程学报, 2014, 34(2): 97-102.
LI Debo, SONG Jinghui, XU Qisheng. Numerical simulation on 3D cold flow field and wear of a 50 MW biomass CFB boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2014, 34(2): 97-102.
- [9] WANG Q, FENG J T, SUN B Z, et al. Numerical simulation research on gas-solid two phase flow in oil shale circulating fluidized bed[J]. Energy Procedia, 2012(17): 851-860.
- [10] 吴斌, 吴凯. 75 t/h 循环流化床锅炉炉膛气固流场的数值模拟[J]. 节能, 2014(6): 18-22.
WU Bin, WU Kai. Numerical simulation of gas-solid hydrodynamics in the 75t/h CFB boiler[J]. Energy Conservation, 2014(6): 18-22.
- [11] 王超, 程乐鸣, 周星龙, 等. 600 MW 超临界循环流化床锅炉炉膛气固流场的数值模拟[J]. 中国机电工程学报, 2011, 31(14): 1-7.
WANG Chao, CHENG Leming, ZHOU Xinglong, et al. Numerical simulation of gas-solid hydrodynamics in a 600 MW supercritical circulating fluidized bed boiler furnace[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(14): 1-7.
- [12] PENG B, XU J, ZHU J, et al. Numerical and experimental studies on the flow multiplicity phenomenon for gas-solids two-phase flows in CFB risers[J]. Powder Technology, 2011, 214(2): 177-187.
- [13] 刁海量. 循环流化床锅炉掺烧煤矸石炉内磨损的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011: 38.
DIAO Hailiang. Analysis on attrition of CFB in mixture combustion of coal and coal gangue[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011: 38.
- [14] 温山, 阎维平, 吴威, 等. 循环流化床锅炉炉内传热研究[J]. 电站系统工程, 2012, 28(5): 5-7.
WEN Shan, YAN Weiping, WU Wei, et al. A study of circulating fluidized bed heat transfer[J]. Power System Engineering, 2012, 28(5): 5-7.
- [15] 史丹君, 卢玫, 唐昭帆. 循环流化床锅炉气固流动特性的 CPFD 数值模拟[J]. 热能工程, 2018(2): 65-71.
SHI Danjun, LU Mei, TANG Zhaoan. CPFD simulation of gas-solid flow in circulating fluidized bed boilers[J]. Energy Engineering, 2018(2): 65-71.
- [16] 柳行, 姚著, 张克伟. 循环流化床锅炉烟风系统控制优化[J]. 热力发电, 2017, 46(3): 127-130.
LIU Hang, YAO Zhu, ZHANG Kewei. Optimization on air and flue gas control system for circulating fluidized bed boilers[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(3): 127-130.
- [17] 谭志茜, 邝伟, 苟建兵, 等. 300 MW 循环流化床锅炉上部差压及床压优化试验[J]. 热力发电, 2014, 43(4): 128-130.
TAN Zhiqian, KUANG Wei, GOU Jianbing, et al. Optimization of bed pressure and its upper pressure difference for a 300MW CFB boiler[J]. Thermal Power Generation 2014, 43(4): 128-130.
- [18] 陈红, 周安鹏, 耿向瑾, 等. W 火焰锅炉低负荷条件下掺烧煤泥的数值模拟[J]. 广东电力, 2018, 31(3): 15-20.
CHEN Hong, ZHOU Anli, GENG Xiangjin, et al. Numerical simulation on burning blended coal slime under the condition of low load in W-flame boiler[J]. Guangdong Electric Power 2018, 31(3): 15-20.

(责任编辑 李园)