

DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.19084

低氮改造后再热汽温偏低的燃烧调整研究

胡胜林¹, 李源¹, 毛睿¹, 詹胜平¹, 任利明¹, 郭志成¹, 岑可法²

(1. 润电能源科学技术有限公司, 河南省 郑州市 450042;

2. 能源清洁利用国家重点实验室(浙江大学), 浙江省 杭州市 310027)

Study on Low Reheat Steam Temperature After Low

NO_x Retrofit Based on Combustion Adjustment

HU Shenglin¹, LI Yuan¹, MAO Rui¹, ZHAN Shengping¹, REN Liming¹, GUO Zhicheng¹, CEN Kefa²

(1. Rundian Energy Science and Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450042, Henan Province, China; 2. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization (Zhejiang University), Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

摘要: 针对某 330 MW 燃煤锅炉低氮改造后出现的再热汽温偏低问题, 从锅炉燃烧调整策略角度进行对策研究, 主要分析了燃烧器摆角、配风方式、燃烧器投运层分布、上层煤种、上层煤粉细度、水平烟道吹灰和机组自动调节品质等因素对再热汽温的影响。结果表明, 再热汽温偏低的现象主要出现在锅炉中低负荷 (250 MW 以下) 工况, 通过增加燃烧器仰角、采用倒宝塔配风方式、提高上层燃烧器利用率、加大上层入炉煤发热量、减小上层入炉煤粉细度、加强水平烟道吹灰和优化机组自动调节品质等手段可改善再热汽温偏低问题。提出的燃烧调整策略对同类锅炉改造问题具有重要借鉴意义。

关键词: 燃煤锅炉; 低氮改造; 再热汽温; 燃烧调整

ABSTRACT: To solve the problem of low reheat steam temperature after low NO_x retrofit in a 330 MW coal-fired boiler, the countermeasure study was conducted based on combustion adjustment strategies. The effects of burner angle, air distribution mode, burner layer distribution, coal type of upper layer, coal fineness of upper layer, ash blowing of horizontal flue, and automatic control quality on reheat steam temperature were analyzed. The results indicate that the low reheat steam temperature mainly occurs at medium-low load (lower than 250 MW). Increasing burner angle, using inverted tower air distribution, increasing utilization rate of upper burner, improving calorific of upper layer, decreasing coal fineness of upper layer, strengthening ash blowing of horizontal flue and optimizing automatic control quality are conducive to improving the reheat steam temperature.

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体项目(51621005)。

Project Supported by the Innovative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China (51621005).

The proposed combustion adjustment strategies provide important reference for the similar problem in boiler retrofit.

KEY WORDS: coal-fired boiler; low NO_x retrofit; reheat steam temperature; combustion adjustment

0 引言

在我国, 煤炭作为主要的一次能源占能源消费总量的 65%, 燃煤发电量占总发电量的近 70%^[1-2]。NO_x 是煤炭燃烧过程中形成的一种危害极大的污染物^[3]。近年来, 随着整个社会对生态环境的要求越来越高, 国家和地方都出台了环保政策法规, 对煤电机组的 NO_x 排放限制日益严格。为控制 NO_x 排放, 各燃煤电厂都进行了 NO_x 控制技术改造^[4-6], 包括低 NO_x 燃烧^[7]、选择性催化还原法(selective catalytic reduction, SCR)脱硝^[8-9]、选择性非催化还原法(selective non-catalytic reduction, SNCR)脱硝^[10]以及 SNCR-SCR 联合脱硝^[11]等。

低氮燃烧技术具有工艺成熟、运行可靠、投资和运行成本较低等优点, 已在燃煤机组的 NO_x 控制中得到广泛应用^[12]。但是, 燃煤锅炉在进行低氮改造后也产生了诸多问题^[13-17], 如锅炉效率降低, 机组主蒸汽压力和温度调节特性发生改变, 再热汽温偏低等。其中, 低氮改造后再热汽温偏低问题较为普遍, 且这种现象在低负荷时尤为明显, 严重影响机组的深度调峰能力。此外, 再热

汽温低于一定限值后会严重侵蚀汽机末级叶片，降低汽机末级效率，诱发汽机轴系故障。因此，研究机组低氮改造后的再热汽温偏低问题具有重要意义。本文从锅炉燃烧调整策略角度对低氮改造后再热汽温偏低问题进行对策研究。

1 锅炉概况

某燃煤电厂#1机组330MW锅炉为东方锅炉厂制造的DG1025/18.2-II 12型亚临界自然循环汽包炉，为单炉膛D型布置、一次再热、平衡通风、钢构架、燃煤、固态排渣锅炉，采用四角布置、切向燃烧、固定直流式煤粉燃烧器，炉内假设切圆直径为790mm。采用中速磨(型号为ZGM95G)冷一次风正压直吹式制粉系统，共5套。机组额定负荷为330MW，额定主、再热汽温均为540℃。屏式过热器和壁式再热器布置在炉膛上部，为辐射换热面；高温过热器、中间再热器和高温再热

器均布置在水平烟道内，为对流换热面；低温过热器布置在尾部竖井烟道内，为对流换热面。表1为锅炉设计参数。锅炉设计煤种为晋东南贫煤，该煤种的主要特点为发热量较高、挥发份含量较低、燃尽性稍差，表2为该煤种的工业分析和元素分析。

表1 锅炉设计参数

Tab. 1 Boiler design parameters

参数	ECR	70%ECR	50%ECR
过热蒸汽流量/(t/h)	910.2	612.4	445.5
过热蒸汽出口压力/MPa	17.34	16.99	16.85
过热蒸汽出口温度/℃	540.2	540.3	540.0
过热器减温水流量/(t/h)	40.9	62.0	47.1
再热蒸汽出口压力/MPa	3.31	2.32	1.68
再热蒸汽出口温度/℃	540.2	539.7	511.8
壁再蒸汽进口温度/℃	313.9	285.3	266.2
再热器减温水流量/(t/h)	5.0	5.2	5.5
炉膛过剩空气系数	1.25	1.26	1.46
锅炉燃煤量/(t/h)	129.9	92.4	60.1

注：ECR为锅炉额定节能出力工况。

表2 设计煤种工业分析和元素分析

Tab. 2 Proximate analysis and ultimate analysis of designed coal

煤种	工业分析(收到基)/%					元素分析(收到基)/%				收到基低位
	M	VM	FC	A	C	H	O	N	S	发热量/(kJ/kg)
晋东南贫煤	12.10	20.96	52.13	14.81	60.80	3.52	7.26	0.88	0.63	23 060

#1机组于2013年进行了低氮改造。图1为燃烧器平面布置图，燃烧器布置在炉膛的四角位置。图2为低氮改造前、后燃烧器立面布置对比。可以看出，低氮改造后燃烧器布置较改造前更加紧凑，且燃尽风(overfire air, OFA)层高度也更低，燃烧器共布置16层喷口，其中5层煤粉一次风喷

口、6层二次风喷口、1层OFA喷口、4层分离燃尽风(separated overfire air, SOFA)喷口。煤粉一次风喷口可上下摆动20°(A层不参与摆动)；二次风喷口可上下摆动30°(AA层上翘5°，不参与摆动)。

2 再热汽温偏低现象

从图2可以看出，与低氮改造前相比，低氮改造后A层煤粉一次风喷口至E层煤粉一次风喷口之间的距离缩短了1980mm，炉内燃烧器喷口布置更集中，炉膛内煤粉浓度场及容积热负荷也更集中。E层煤粉一次风喷口的高度较改造前降低了1545mm，火焰中心高度有所下降。炉膛内的热负荷分布较改造前有较大幅度的下移，燃料颗粒及高温烟气在炉内停留的时间更长，炉膛内水冷壁及布置在炉膛上部的壁式再热器的吸热量均有明显增加，炉膛出口烟温有所下降，布置在炉膛顶部及水平烟道内的屏式过热器、中间再热

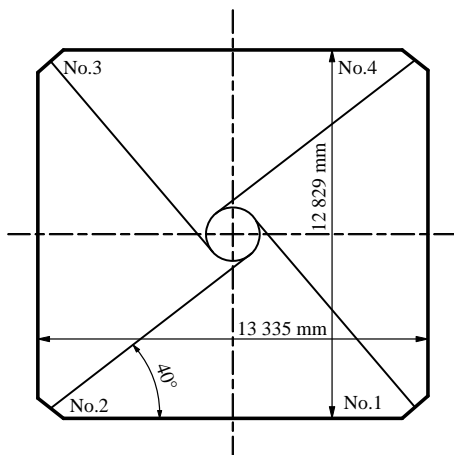
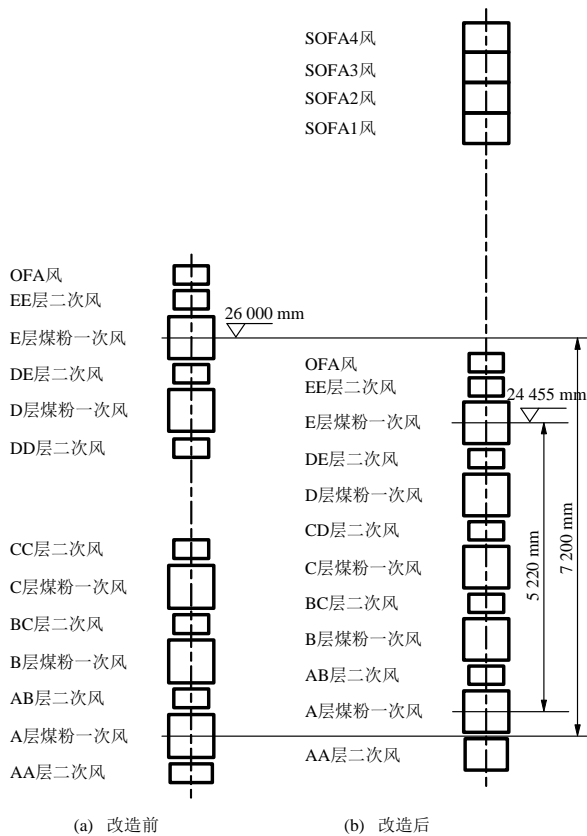


图1 燃烧器平面布置图

Fig. 1 Plane arrangement of burners



(a) 改造前 (b) 改造后
图 2 低氮改造前、后燃烧器立面布置对比

Fig. 2 Elevation arrangement of burners before and after low NO_x retrofits

器、高温再热器、高温过热器的吸热量均有所减少。另外，低氮运行方式下炉膛出口烟气量有一定的减少，这会进一步降低布置在水平烟道及后烟道内的对流换热面吸热量。以上变化对锅炉原设计各级受热面的吸热量分配造成了较大影响，直接导致了锅炉出现再热汽温偏低的问题。

表 3 为低氮改造后不同负荷下锅炉运行参数对比。可以看出，再热汽温偏低的现象主要出现在中低负荷工况。随着机组负荷的降低，炉膛出

表 3 不同负荷下锅炉参数对比

Tab. 3 Boiler parameter comparison under different loads

参数	机组负荷/MW		
	316	240	180
高过出口汽温/°C	534.46	538.37	532.64
后屏出口汽温/°C	498.32	504.53	505.88
大屏出口汽温/°C	446.31	450.35	454.22
低过出口汽温/°C	395.61	399.43	391.72
过热器减温水量/(t/h)	5.61	3.86	3.11
高再出口汽温/°C	537.98	525.26	498.75
壁再出口汽温/°C	385.12	369.31	361.80

口烟气量和烟温均有所降低，水平烟道内的对流换热面吸热量减少，再热汽温偏低的现象比较突出。由此可见，再热汽温偏低问题实际是由水平烟道内各级受热面的吸热量不足导致的。

3 再热汽温的影响因素及调整策略

针对再热汽温偏低问题，提出了基于燃烧调整的改善措施，主要有以下 2 方面：

1) 改善锅炉蒸发吸热面和蒸汽升温吸热面热量分配不合理的现状，减少炉膛区域蒸发受热面的吸热量，提高炉膛出口以后的各级蒸汽升温换热面的吸热量；

2) 改善水平烟道区域内受热面的换热效果，主要是增大烟气换热系数。

3.1 燃烧器摆角

表 4 为 200 MW 负荷时不同燃烧器摆角下锅炉运行参数对比。可以看出，通过增加锅炉燃烧器仰角，可在一定程度上提高再热汽温。这是因为燃烧器喷口上仰时，炉内火焰中心高度有一定幅度的增加，炉内热负荷向上部偏移，减少了中下部水冷壁区域的吸热量，提高了炉膛出口烟温，使水平烟道内各级受热面的吸热量均有一定程度的增加，锅炉热量分配不合理的状况得到了改善。

表 4 不同燃烧器摆角下锅炉参数对比(200 MW)

Tab. 4 Boiler parameter comparison under different burner angles (200 MW)

参数	主燃烧器摆角/(°)		
	0	10	15
高过出口汽温/°C	534.84	536.07	537.46
后屏进口汽温/°C	509.37	511.34	513.25
大屏出口汽温/°C	450.12	453.28	455.19
低过出口汽温/°C	385.52	391.47	393.67
过热器减温水量/(t/h)	2.69	7.21	7.76
高再出口汽温/°C	513.32	518.46	523.43
壁再出口汽温/°C	359.52	369.34	371.41

3.2 配风方式

表 5 为 200 MW 负荷时不同配风方式下锅炉运行参数对比。可以看出，正宝塔配风方式使再热汽温下降，而倒宝塔式配风方式可提高再热汽

温。其原因是：在采用正宝塔配风方式时，总风量保持不变，炉膛下部供风量加大，使得炉膛中下部的燃烧反应更剧烈，燃料在燃烧区域的放热量增加，水冷壁吸热量也相应增加，炉膛出口烟温降低，导致水平烟道内受热面的吸热量有所减少，从而使再热汽温偏低的现象恶化；在采用倒宝塔配风方式时，总风量保持不变，炉膛下部供风量减小，燃料在炉膛中下部的放热量减小，水冷壁区域内的总吸热量减小，炉膛出口烟温升高，导致炉膛出口以后的各级换热面的吸热量增加，从而改善了再热汽温偏低的现象。

表 5 不同配风方式下锅炉参数对比(200 MW)

Tab. 5 Boiler parameter comparison under different air distribution modes (200 MW)

参数	配风方式		
	均等配风	正宝塔配风	倒宝塔配风
高过出口汽温/℃	532.95	508.01	537.51
后屏出口汽温/℃	509.70	480.16	513.41
大屏出口汽温/℃	453.08	426.13	455.16
低过出口汽温/℃	392.45	381.68	393.88
过热器减温水量/(t/h)	4.44	0	6.01
高再出口汽温/℃	518.66	489.45	524.48
壁再出口汽温/℃	367.54	349.32	371.47

3.3 燃烧器投运层分布

炉膛内火焰中心高度直接影响蒸发吸热面和蒸汽升温吸热面的热量分配比例。燃烧器高度越高，喷入炉膛内的燃料燃烧放出的热量对蒸汽升温吸热面产生的影响越大，下层燃烧器对汽温的影响呈逐级递减趋势，下面以 E 层燃烧器投运对再热汽温的影响为例进行分析。

表 6 为 220 MW 负荷时不同燃烧器层投运方式下锅炉运行参数对比。可以看出，投运 E 层燃烧器能有效提升再热汽温，且 E 层燃料投入比例越大，再热汽温提升幅度越大。这是因为在中低负荷工况下，投运 E 层燃烧器及增大 E 层燃料投入比例，可有效提升炉内火焰中心高度，炉内热负荷向上部集中，减少了中下部水冷壁区域的吸热量，提高了炉膛出口烟温，使炉膛出口热量分配不足的情况得到改善，水平烟道内受热面的吸热量相应增加，从而使再热汽温得到提升。

表 6 不同燃烧器层投运方式下锅炉参数对比(220 MW)

Tab. 6 Boiler parameter comparison under different burner layer operation modes (220 MW)

参数	燃烧器层投运方式		
	未投运 E 层	投运 E 层	加大 E 层出力
燃烧器出力/(t/h)	D 层 30.3	E 层 21.2	E 层 28.7
	C 层 29.4	D 层 19.8	D 层 16.1
	B 层 30.0	C 层 24.3	C 层 24.2
		B 层 27.8	B 层 24.2
高过出口汽温/℃	535.95	538.23	539.01
后屏出口汽温/℃	511.24	509.50	512.79
大屏出口汽温/℃	454.32	448.71	543.22
低过出口汽温/℃	386.38	389.71	389.48
过热器减温水量/(t/h)	0	2.25	7.61
高再出口汽温/℃	515.40	523.00	528.54
壁再出口汽温/℃	378.66	383.31	388.56

3.4 上层入炉煤种

表 7 为 210 MW 负荷时不同上层入炉煤种下锅炉运行参数对比。可以看出，E 层燃烧器投入热值较高的煤种时，再热汽温有一定程度的升高。这是因为上层燃烧器投入热值较高的煤种时，炉膛上部火焰中心温度升高，使炉膛上部燃烧放热比例增大，改善了炉膛出口热量分配不足的情况，提高了炉膛出口烟温，从而使再热汽温偏低的现象得以改善。在电厂实际运行中，可以根据实际情况调整配煤方案，使炉膛上层燃烧器尽可能投入热值相对较高的煤种。

表 7 不同上层煤种下锅炉参数对比(210 MW)

Tab. 7 Boiler parameter comparison under different coal types of upper layer (210 MW)

参数	E 层燃料热值/(kJ/kg)	
	18 480	22 040
高过出口汽温/℃	534.35	536.28
后屏出口汽温/℃	506.72	507.33
大屏出口汽温/℃	454.20	456.54
低过出口汽温/℃	393.77	395.63
过热器减温水量/(t/h)	8.68	13.80
高再出口汽温/℃	515.25	525.67
壁再出口汽温/℃	371.43	375.44

3.5 上层入炉煤粉细度

通过对锅炉的运行情况进行观察，发现锅炉在中低负荷运行时炉膛上部燃烧情况较差，炉膛出口烟温较低，飞灰含碳量较高。表 8 为 230 MW

负荷时不同上层煤粉细度下锅炉运行参数对比。可以看出, E层煤粉细度减小后, 飞灰含碳量明显降低, 说明炉膛上部的燃烧放热总量有所增加, 相应地, 供给炉膛出口以后各级受热面的总热量也得以增加, 再热汽温明显升高。炉膛上部燃烧情况的优劣对炉膛出口烟温影响较大, 在炉膛上部燃烧状况不佳的情况下, 通过减小上层煤粉细度, 可以有效改善炉膛上部煤粉的燃尽率, 提高炉膛出口烟温, 增大水平烟道内受热面的吸热量, 从而有效改善再热汽温偏低的问题。

表8 不同上层煤粉细度下锅炉参数对比(230 MW)

Tab. 8 Boiler parameter comparison under different coal fineness of upper layer (230 MW)

参数	E层煤粉细度 $R_{90}/\%$	
	24.9	12.3
飞灰含碳量/%	5.0~6.5	1.9~2.7
高过出口汽温/ $^{\circ}\text{C}$	535.35	536.33
后屏出口汽温/ $^{\circ}\text{C}$	505.33	508.26
大屏出口汽温/ $^{\circ}\text{C}$	454.72	454.15
低过出口汽温/ $^{\circ}\text{C}$	394.44	396.84
过热器减温水量/(t/h)	7.56	14.32
高再出口汽温/ $^{\circ}\text{C}$	516.24	528.38
壁再出口汽温/ $^{\circ}\text{C}$	372.25	376.85

3.6 水平烟道吹灰

表9为210 MW负荷时锅炉水平烟道吹灰前后锅炉运行参数对比。可以看出, 通过加强水平烟道吹灰, 可明显提高再热汽温。这是因为加强水平烟道吹灰, 可以改善再热器受热面表面清洁度, 增强水平烟道区域内过热器及再热器的换热能力, 在从炉膛飞出烟气所携带的总热量不变的情况下有效增大再热器吸热量, 从而改善了再热

表9 水平烟道吹灰前后锅炉参数对比(210 MW)

Tab. 9 Boiler parameter comparison before and after ash blowing of horizontal flue (210 MW)

参数	吹灰前	吹灰后
高过出口汽温/ $^{\circ}\text{C}$	533.91	538.74
后屏出口汽温/ $^{\circ}\text{C}$	505.85	508.78
大屏出口汽温/ $^{\circ}\text{C}$	455.50	454.99
低过出口汽温/ $^{\circ}\text{C}$	395.19	396.14
过热器减温水量/(t/h)	11.18	15.04
高再出口汽温/ $^{\circ}\text{C}$	510.21	531.89
壁再出口汽温/ $^{\circ}\text{C}$	365.96	374.23

汽温偏低的问题。

3.7 机组自动调节品质

图3为锅炉运行参数曲线。可以看出, 在机组协调投入自动发电控制(automatic generation control, AGC)模式下, 当机组负荷出现小幅波动时, 再热汽温波动较大。这是因为机组自动品质不佳, 当机组负荷小幅波动时, 给煤量波动幅度较大, 直接引起再热汽温剧烈波动, 尤其当上层燃料波动较大时这一情况更为明显。通过对机组自动调节品质进行优化调整, 将负荷波动引起的加减燃料自动控制优化调整为不对称速率控制, 当机组在AGC模式下负荷出现小幅波动时, 在保持自动加燃料的速率及频率不变的情况下, 单独减小自动减燃料的速率及频率, 使再热汽温的下波动量减小, 从而使再热汽温始终维持在一个相对较高的水平。此外, 在投入制粉系统自动控制时, 将投入的上层燃料设定为手动控制, 尽量维持上层燃料稳定, 也可有效改善再热汽温的波动问题。

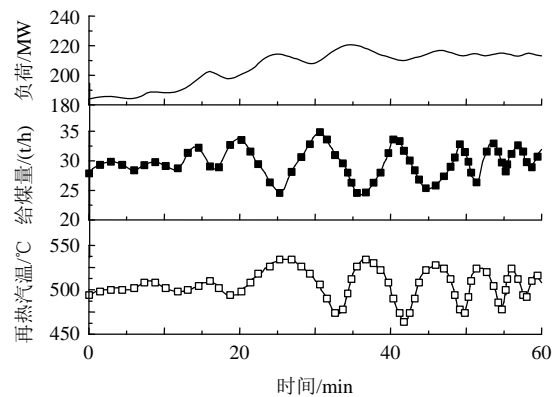


图3 锅炉运行参数曲线

Fig.3 Operation parameter curves of the boiler

4 结论

基于燃烧调整策略对锅炉低氮改造后再热汽温偏低问题进行了研究, 得到的主要结论如下:

1) 通过增加燃烧器喷口角度、采用倒宝塔配风方式、增大上层燃料投入比例、改善上层投入煤种和减小上层煤粉细度等手段, 提升了火焰中心高度, 使炉膛出口烟温升高, 从而有效提升了再热汽温;

2) 通过加强水平烟道吹灰, 增强了水平烟道

区域内受热面的换热能力,有效提升了再热汽温;

3) 通过优化调整机组自动调节品质,减少了燃料量和再热汽温的波动量,有效改善了再热汽温偏低的问题。

参考文献

- [1] Leung G C K, Cherp A, Jewell J, et al. Securitization of energy supply chains in China[J]. Applied Energy, 2014, 123: 316-26.
- [2] 戴德立. BP 世界能源统计年鉴[Z/OL]. 北京: BP 集团, 2017. https://www.bp.com/zh_cn/china/reports-and-publications/_bp_2017-.html.
- [3] 王志轩, 赵毅, 潘荔, 等. 中国燃煤电厂 NO_x 排放估算方法及排放量研究[J]. 中国电力, 2009, 42(4): 59-62.
- [4] 游松林, 罗洪辉, 王振, 等. 燃煤电厂 SCR 脱硝系统氨逃逸率控制技术研究[J]. 华电技术, 2019, 41(2): 55-59.
- [5] 吴跃明, 吴智泉. 660 MW 超临界燃煤锅炉引入生物质气再燃方案及运行特性分析[J]. 分布式能源, 2018, 3(1): 14-20.
- [6] 唐艳梅, 闫华光, 朱彬若, 等. 基于自适应遗传算法的分布式综合能源系统优化设计[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(2): 30-35, 42.
- [7] Zheng L, Zhou H, Cen K, et al. A comparative study of optimization algorithms for low NO_x combustion modification at a coal-fired utility boiler[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(2): 2780-2793.
- [8] Shi R, Lin X, Zheng Z, et al. Selective catalytic reduction of NO_x with NH₃ over Sb modified CeZrO_x catalyst[J]. Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis, 2018, 124(1): 217-227.
- [9] 李二欣, 王特, 韦飞. 燃煤电厂 SCR 脱硝系统尿素热解制氨技术节能改造[J]. 广东电力, 2018, 31(3): 27-31.
- [10] Fu S, Song Q, Yao Q. Mechanism study on the adsorption and reactions of NH₃, NO, and O₂ on the CaO surface in the SNCR deNO_x process[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 285: 137-143.
- [11] Gullett B K, Groff P W, Lin M L, et al. NO_x removal with combined selective catalytic reduction and selective noncatalytic reduction: pilot-scale test results[J]. Air & Waste, 1994, 44(10): 1188-1194.
- [12] Liu X, Tan H Z, Wang Y B, et al. Low NO_x combustion and SCR flow field optimization in a low volatile coal fired boiler[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 220: 30-35.
- [13] 胡志宏, 李德功, 邵红军, 等. 600 MW 机组锅炉低氮燃烧改造[J]. 热力发电, 2014, 43(4): 131-134.
- [14] 刘志江. 低氮燃烧器改造及其存在问题处理[J]. 热力发电, 2013, 42(3): 77-81.
- [15] 李翠翠, 郑国宽, 陈广林. 600 MW 级燃褐煤直流锅炉超低排放技术路线分析[J]. 电力科学与工程, 2017, 33(3): 68-73.
- [16] 党黎军, 杨辉, 应文忠, 等. 660 MW 超超临界锅炉再热汽温偏低问题分析及技术改造[J]. 动力工程学报, 2017, 37(4): 261-266.
- [17] 肖琨, 张建文, 王振东. 600 MW 亚临界锅炉低氮改造后汽温特性研究[J]. 动力工程学报, 2015, 35(9): 699-703.

收稿日期: 2019-05-22。

作者简介:



胡胜林

胡胜林(1983), 男, 工程师, 研究方向为火力发电厂系统调试与超低排放, hushenglin@crpower.com.cn;

李源(1990), 男, 博士, 工程师, 研究方向为能源清洁高效利用, liyuan355@crpower.com.cn;

岑可法(1935), 男, 中国工程院院士, 主要从事化石燃料的能源高效清洁利用、城市生活垃圾等废弃物资源化、能源化、生物质燃烧气化制油、水煤浆代油技术等方面的研究工作。

(责任编辑 尚彩娟)