

煤粉锅炉低氮燃烧及 SNCR 联合脱硝技术研究

张攀, 范祥子

(煤科集团杭州环保研究院有限公司, 浙江 杭州 311200)

摘要:为了解决煤粉锅炉脱硝改造中遇到的 NO_x 浓度高、受空间约束等问题, 选取包钢热电厂 1 台 130 t/h 煤粉锅炉为研究对象, 从技术原理、改造难点等方面分析, 提出了适合煤粉锅炉脱硝改造的“低氮燃烧+SNCR”工艺路线: 对主燃烧器进行低氮燃烧改造, 降低主燃烧器标高, 增加高位燃尽风口; 炉膛上方设置多层喷枪, 上下错落布置; 脱硝还原剂采用尿素; 选用大流量单孔喷嘴。结果表明: 该路线综合脱硝率 >70%, NO_x 排放质量浓度小于 180 mg/Nm³, 达到了环保要求。

关键词:低氮燃烧; SNCR; 脱硝; 煤粉炉

中图分类号: TQ534; TK229.6 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2018)01-0142-06

Low nitrogen combustion of pulverized coal furnace and SNCR denitration technology

ZHANG Pan, FAN Xiangzi

(Hangzhou Environmental Protection Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group, Hangzhou 311200, China)

Abstract: In order to solve problems of denitrifying pulverized coal furnace, such as high NO_x concentration and spatial constrains, a 130 t/h boiler of Baogang group thermal power plant was selected to analyze its technical principles and challenges in the denitrifying process, and finally a "low nitrogen combustion & SNCR" process route suitable for denitrifying pulverized coal furnace was proposed with features, such as low nitrogen combustion reconstruction of the main burner, reducing the elevation of the main burner and increasing over fire air outlets at high positions, installing multiple layers of spray guns above the combustion chamber in a scattered layout; using urea as the denitration reducing agent; using high-flow single-hole nozzles. The results show that this process route has an overall denitrifying rate above 70% and keeps the concentration of discharged NO_x below 180 mg/Nm³, which can effect satisfy the requirements on environmental protection.

Key words: low-nitrogen combustion; SNCR; denitrification; pulverized coal furnace

0 引 言

NO_x 是大气主要污染物之一, 其与碳氢化合物在强光下易造成光化学污染; NO_x 还是酸雨、臭氧、灰霾等污染形成的主要因素, 对人类健康和生存环境造成严重危害。为贯彻落实 GB 13223—2011《火电厂大气污染物排放标准》, 2003 年 12 月 31 日前建成投产的煤粉炉 NO_x 排放质量浓度必须低于 200 mg/Nm³, 之后建成的煤粉锅炉 NO_x 排放质量浓度必须低于 100 mg/Nm³。目前早期建成的煤粉锅

炉 NO_x 产生浓度在 500 ~ 800 mg/Nm³, 环保改造势在必行。

燃煤电厂的 NO_x 控制技术, 根据其在燃煤过程中所处的位置可分为 3 类: 燃烧前控制技术、燃烧中控制技术和燃烧后控制技术。① 燃烧前控制技术是降低燃料中的氮含量, 如采用选煤、配煤等方法减少煤中氮含量, 该技术投资和运行费用一般较高, 而且对热力型 NO_x 无明显效果, 应用有限^[1]。② 燃烧中控制技术是指改进燃烧系统减少 NO_x 的生成量, 即低氮燃烧技术, 但脱硝效率只有 40% 左右。在钢

收稿日期: 2017-09-18; 责任编辑: 李柏熹 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2018.01.025

作者简介: 张攀(1985—), 男, 河北邯郸人, 工程师, 主要从事废气废水环保研究。E-mail: wayne400@163.com

引用格式: 张攀, 范祥子. 煤粉锅炉低氮燃烧及 SNCR 联合脱硝技术研究[J]. 洁净煤技术, 2018, 24(1): 142-147.

ZHANG Pan, FAN Xiangzi. Low nitrogen combustion of pulverized coal furnace and SNCR denitration technology[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(1): 142-147.

铁厂等具有焦炉煤气气源的情况下,可以采用气体再燃技术降低 NO_x 原始排放,但对锅炉的运行造成一定影响,例如导致炉膛内局部还原性气氛增强,影响灰渣的结渣,使 SO_2 还原生成腐蚀性的 H_2S ,影响水冷壁寿命^[2]。③ 燃烧后控制技术是采用非燃烧的方法把烟气中已经生成的 NO_x 还原成 N_2 。燃烧后控制技术主要有选择性催化还原法 (SCR)^[3]、选择性非催化还原法 (SNCR)、SNCR+SCR 联合脱硝^[4] 和氧化脱硝^[5] 等;其中 SCR 技术脱除效率最高 (>90%),但需要安装催化剂,占地大,改造投入高,且 SCR 脱硝装置催化剂运行有严格的温度范围,偏离该范围不能投运。因此,必须对现有机组进行技改,以提高低负荷时 SCR 脱硝装置进口烟温,满足 SCR 脱硝装置运行的最低温度限值^[6]。此外,SCR 催化剂对使用工况较为严格,遇到高温、高灰、高钙的工况会出现催化剂烧结、堵塞、失活的现象^[7]。SNCR 技术工艺简单,在循环流化床锅炉上应用良好,但应用于煤粉锅炉上脱硝效率较低,只有 30%~50%。吕洪坤等^[8] 研究提出,高负荷条件下 SNCR 脱硝效果较差,吸收剂难以均布在炉膛截面。

煤粉炉的燃烧温度一般为 1 200~1 500 °C,由于炉内燃烧温度过高,导致 NO_x 排放浓度较高,为 500~800 mg/Nm³。煤粉炉内水冷壁的炉墙围成一个较大空间即为炉膛,炉膛尺寸大,SNCR 喷出的溶液很难深入到炉膛中心,无法均匀覆盖整个炉膛截面。与循环流化床锅炉相比,煤粉锅炉的出口没有旋风分离器,难以实现烟气和氨气的良好混合。对于环保标准出台以前建造的锅炉,设计时未预留脱硝改造的位置,改造难度大。目前新建的煤粉炉多采用低氮燃烧+SCR 工艺,效率可达 90%;但对年代久远的锅炉采用 SCR 难度较大,因 SCR 占地空间大,需要布置在尾部烟道与布袋除尘器之间,很多电厂不具备这样的条件。针对各种脱硝技术或者组合工艺技术,脱硝路线的选择综合考虑了锅炉现状、要求目标、经济效益等多方面的因素。首先选择低氮燃烧工艺投资成本低、且后期运行成本较低,脱硝效率在 40% 左右,为后期 SNCR 的脱硝打好基础。同时锅炉燃烧后选用 SNCR 工艺,工艺简单,不改变锅炉结构,脱硝效率可以达到 30%~50%,不增加锅炉阻力,不需要安装脱硝反应器。燃烧过程脱硝最基本的思想是使炉内形成一个缺氧富燃料区域和一个富氧低燃料区域^[9]。在缺氧富燃料区,因为缺氧

火焰温度较低,热力型 NO_x 的生成就少,而且燃料热解产生的还原性物质能将燃料型的 NO_x 还原。在富氧区,因为空气量很大,同样火焰温度不高,热力型生成量减小^[10]。

SNCR 的工艺流程如图 1 所示。SNCR 工艺是一个燃烧后的脱硝过程,通过在锅炉中喷入适量的尿素/氨水等脱硝还原剂去除 NO_x 。脱硝还原剂喷入炉膛温度为 850~1 250 °C 的区域,无催化剂作用下, NH_3 或尿素等氨基还原剂可选择性地还原烟气中的 NO_x ^[11],反应公式为

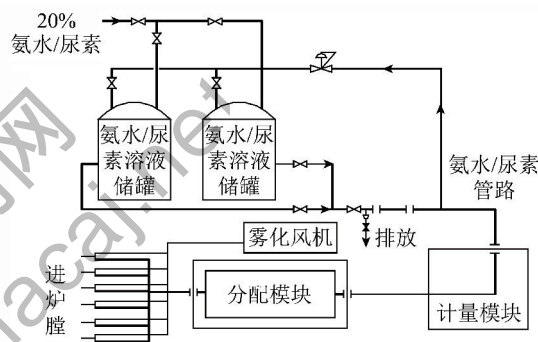
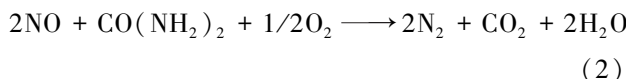
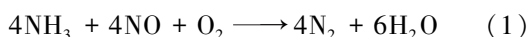


图 1 SNCR 工艺流程
Fig. 1 Process of SNCR

1 系统脱硝的工艺设计

1.1 设计参数

以包钢热电厂 130 t/h 煤粉锅炉脱硝工程为例说明“低氮燃烧+SNCR”联合脱硝工艺在煤粉锅炉的应用。包钢热电厂 1 号锅炉是 WGZ-130/39-1 型煤粉炉,由武汉锅炉厂设计制造,中温中压、自然循环、四角切向燃烧,锅炉整体采用“Π”型布置;制粉系统为钢球磨中储仓热风送粉系统。改造前 NO_x 排放质量浓度为 500~600 mg/Nm³。改造目标:在 100% 负荷不投用 SNCR 的情况下, NO_x 排放质量浓度 ≤ 380 mg/Nm³ (干基,6% O_2);投入 SNCR 时,出口 NO_x 质量浓度 ≤ 180 mg/Nm³ (设计值);氨的逃逸 $< 10 \times 10^{-6}$ 。

1.2 改造难点

首先煤粉炉的燃烧温度达 1 300 °C,锅炉改造前 NO_x 排放浓度较高,为 500~600 mg/Nm³;其次本项目锅炉炉膛尺寸为 6.2 m×7 m,SNCR 喷出的喷枪很难深入到炉膛中心,均匀覆盖整个炉膛截面;与循

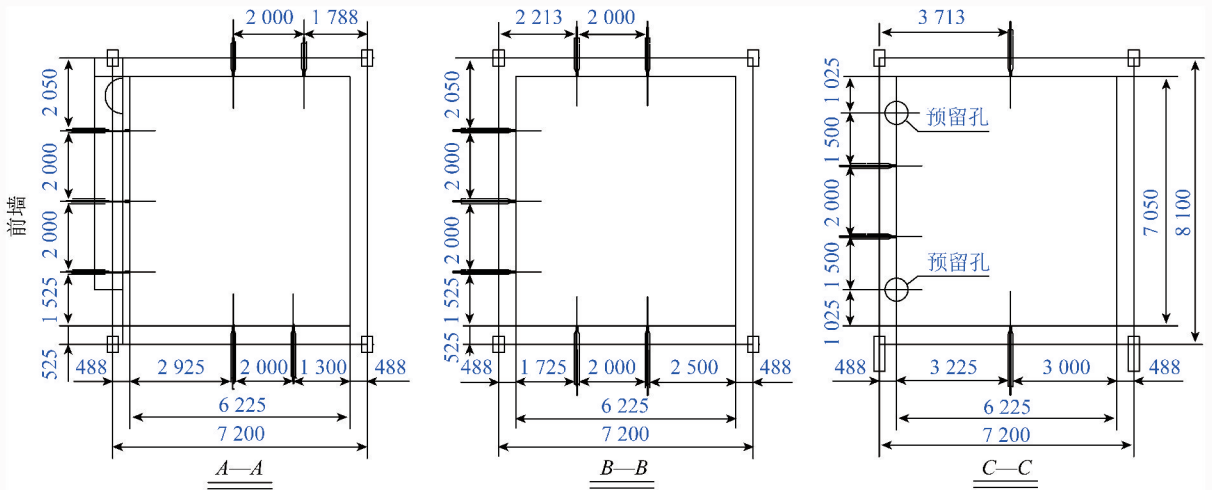


图 4 喷枪平面布置

Fig. 4 Plane layout of spray gun

2 脱硝系统运行调试优化

运行调试自 2016-11-26 T 9:00—2016-11-29 T 9:00, 分别进行 85 (65%)、110 (85%)、130 (100%) t/h 负荷的 12 个工况运行调试, 得到了单磨、双磨、高煤投用及各种负荷、各种氧含量运行时的运行方案及改造效果。

2.1 低氮燃烧系统调试

低氮燃烧技术实施改造后, 锅炉 NO_x 原始浓度显著降低, 经过合理调整, 各负荷都能够在设计的锅炉效率及固体未完全燃烧损失下达到 $<380 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ 排放量, 某些工况甚至达到 $<250 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ 。结果见表 1。

表 1 NO_x 控制结果Table 1 Results of NO_x control

负荷/ ($\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$)	NO_x 质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{Nm}^{-3})$	
	单磨制粉系统	双磨制粉系统
130	230(6% O_2)	275(6% O_2)
110	325(6% O_2)	360(6% O_2)
85	374(6% O_2)	—

正常情况下的低氮燃烧原理: 锅炉负荷越高 NO_x 排放越高, 负荷越低 NO_x 排放越低, 根据此原理及满调试结果可判断: 中低负荷的 NO_x 控制还有很大的潜力空间, 之所以没有进一步降低, 是因为炉膛及制粉系统尤其是炉底漏风严重, 运行氧含量很大, 调试初期运行氧含量达 11% 以上, 经过局部堵漏处理, 运行氧含量下降至 9% 左右, NO_x 质量浓度

相比调试初期下降 $100 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ 以上, 效果明显, 但漏风点很多没有封堵, 现阶段 9% 运行氧含量仍偏大, 抑制了 NO_x 进一步降低。

2.2 SNCR 系统运行调试

1) 130 t/h 负荷运行调试

调试主要包括单双磨运行调试、ABC 层喷枪投运调试和压缩空气压力调试, 调试结果见表 2。

投用高炉煤气, 氧含量从 6% 降到 5.1%, NO_x 质量浓度从 $168 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ 降至 $154 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ 。未投尿素时, 从双磨调整为单磨运行, NO_x 质量浓度从 $275 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ 降至 $230 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ 。因而氧含量的波动对实际工程项目一般影响不大。投用尿素后, 在设计尿素投用量下, 脱硝出口 NO_x 达标, 无氨逃逸。负荷在 130 t/h, 投用 ABC 层喷枪, 效果好于 BC 层、AB 层喷枪。尿素为还原剂时温度窗口 $855 \sim 1055 \text{ }^\circ\text{C}$ 。高负荷下, A 层喷枪位置烟温过高, BC 两层温度在 $1055 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下, 反应温度较为适合。分配柜内调节压缩空气在 $0.1 \sim 0.2 \text{ MPa}$, 脱硝效果较好。喷嘴的流量特性依然满足普遍的变化规律, 即当液压一定时, 喷嘴流量、喷射距离和雾化角随气压的降低而增大。压缩空气压力低时, 还原剂液滴的粒径大, 有利于增长反应时间, 使还原剂更好地深入炉膛中心。较大的流量和较大颗粒的液滴有利于还原剂均匀覆盖整个炉膛截面。

2) 110 t/h 负荷运行调试

110 t/h 负荷运行调试结果见表 3。单双磨运行调试: 未投尿素情况下, 未投用高炉煤气, 单磨运行

时 NO_x 质量浓度为 325 mg/Nm^3 , 双磨运行时为 360 mg/Nm^3 , 氧含量从 7.4% 增至 7.9% ; 投用尿素后, 在设计尿素投用量下, 脱硝出口 NO_x 质量浓度稳定达标, 无氨逃逸。分配柜内调节压缩空气为

0.1 MPa 时, 出口 NO_x 质量浓度为 166 mg/Nm^3 ; 压缩空气调至 0.3 MPa 时, 出口 NO_x 质量浓度为 200 mg/Nm^3 , 因此压缩空气调节至 0.1 MPa , 脱硝效率更高。

表2 130 t/h 负荷调试数据
Table 2 Debug data in 130 t/h

时刻	喷枪投入情况			磨机运行		压缩空气 压力/MPa	二次风门 开度/%	焦炉煤气/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	高炉煤气/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	NO_x / ($\text{mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$)	O_2 / %	尿素流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	氨逃逸/ 10^{-6}	备注
	AB层	BC层	ABC层	单	双									
11:05					√	0.1	5	6 000	0	275	5.8	0	0	未投尿素
11:20					√	0.1	5	6 000	0	230	5.2	0	0	未投尿素
11:30			√		√	0.1	5	6 000	0	135	6	0.156	0	投入尿素
14:20			√		√	0.1	5	6 000	0	168	6	0.143	0	投入尿素
14:25			√		√	0.1	5	6 000	4 000	154	5.1	0.143	0	投入尿素
14:40		√			√	0.1	5	6 000	4 000	168	5.2	0.143	0	投入尿素
14:50	√				√	0.1	5	6 000	4 000	182	5.2	0.143	0	投入尿素
14:55			√		√	0.1	5	6 000	4 000	190	7	0.143	0	投入尿素

表3 110 t/h 负荷调试数据
Table 3 Debug data in 110 t/h

时刻	喷枪投入情况			磨机运行		压缩空气 压力/MPa	二次风门 开度/%	焦炉煤气/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	高炉煤气/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	NO_x / ($\text{mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$)	O_2 / %	尿素流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	氨逃逸/ 10^{-6}	备注
	AB层	BC层	ABC层	单	双									
17:25					√	0.1	10	6 000	0	325	7.4	0	0	未投尿素
17:55						0.1	0/10	6 000	0	360	7.9	0	0	未投尿素
18:27			√		√	0.1	0/0	6 000	0	166	6.8	0.145	0	投入尿素
18:40			√			0.3	0	6 000	0	200	6.8	0.144	0	投入尿素

3) 85 t/h 负荷运行调试

85 t/h 负荷运行调试结果见表4。高炉煤气投用调试: 投用高炉煤气时, 氧含量从 10.7% 降低到 9.6% , NO_x 质量浓度从 234 mg/Nm^3 降至 128 mg/Nm^3 ; 投用 AB 层喷枪, 投用少量尿素时, 出现氨逃逸。增加尿素投用量, NO_x 质量浓度在维持 160 mg/Nm^3 左右, 但氨逃逸增加很快; 投用 A 层喷枪, 在 NO_x 下降的同时, 氨逃逸也随之下落。稳定

后 NO_x 质量浓度为 155 mg/Nm^3 , 氨逃逸为 4.4×10^{-6} 。由于负荷的下降, 锅炉的烟气量也随之减少, 烟气量的减少使得烟气向上的速度也下降, 在合适温度区域的还原剂的停留时间增加, 还原剂与烟气之间的混合变好, 从而提高了脱硝效率。分配柜内调节压缩空气调节为 0.2 MPa 时, 出口 NO_x 质量浓度为 166 mg/Nm^3 , 低于压缩空气在 0.3 MPa 时的出口 NO_x 质量浓度。

表4 85 t/h 负荷调试数据
Table 4 Debug data in 85 t/h

时刻	喷枪投入情况			磨机运行		压缩空气 压力/MPa	二次风门 开度/%	焦炉煤气/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	高炉煤气/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	NO_x / ($\text{mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$)	O_2 / %	尿素流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	氨逃逸/ 10^{-6}	备注
	AB层	BC层	ABC层	单	双									
10:32					√	0.2	0	1 000	7 000	370	9.1	0	0	未投尿素
10:38	√				√	0.2	0	1 000	7 000	145	8.3	0.15	10	投入尿素
10:50		√			√	0.3	0	1 000	7 000	188	9.5	0.17	3	投入尿素
11:23		√			√	0.2	0	1 000	7 000	155	8.1	0.17	4.4	投入尿素

3 结 论

1) 从实际工程运行效果看,“低氮燃烧+SNCR”联合脱硝技术综合脱硝率大于 70%, NO_x 排放浓度小于 $180 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ (6% O_2 , 干基), 解决了单独使用低氮燃烧或 SNCR 脱硝效率不高的问题, 适应了环保要求。

2) 锅炉高负荷时投用 3 层喷枪, 效果好于单独 1 层或 2 层喷枪。锅炉低负荷下, 投用最下层喷枪效率最高, 而投用上层喷枪, 会产生较多氨逃逸。

3) 对于煤粉炉脱硝, 喷枪压缩空气调节在 $0.1 \sim 0.2 \text{ MPa}$, 脱硝效率更高。较大的流量和较大颗粒的液滴有利于还原剂均匀覆盖整个炉膛截面。

4) 喷枪多层布置, 上下错落, 喷嘴选用大流量单孔喷嘴, 可以适应不同的负荷工况, 使得还原剂与烟气的混合更加均匀。

参考文献 (References):

[1] 马凤哪, 程伟琴. 国内火电厂氮氧化物排放现状及控制技术探讨[J]. 广州化工, 2011, 39(15): 57-59.
MA Fengna, CHENG Weiqin. The discharge status and controlling measures of NO_x of thermal power plants in China[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2011, 39(15): 57-59.

[2] 侯祥松, 张海. 焦炉煤气再燃降低 NO_x 排放技术研究[J]. 煤炭转化, 2007, 30(1): 39-42.
HOU Xiangsong, ZHANG Hai. Study on technology of NO_x emission reduction by coke oven gas reburning[J]. Coal Conversion, 2007, 30(1): 39-42.

[3] 王浩宇, 王三平. 山西省低热值燃煤电厂煤粉炉 SO_2 和 NO_x 超低排放工艺技术路线探讨[J]. 环境科学与管理, 2016, 41(10): 95-98.
WANG Haoyu, WANG Sanping. Investigation on SO_2 and NO_x ultra-low emission technology route of low calorific value coal plants of pulverized boiler in Shanxi province[J]. Environmental Science and Management, 2016, 41(10): 95-98.

[4] 仇云霞, 王一东. SNCR+SCR 联合脱硝技术在煤粉炉的应用

[J]. 聚焦脱硫脱硝技术, 2016(3): 63-65.
QIU Yunxia, WANG Yidong. Application of SNCR & SCR combined denitration technology in pulverized coal boiler[J]. Focus on Desulfurization and Denitration Technologies, 2016(3): 63-65.

[5] 江厚月. 工业锅炉烟气臭氧法脱硝应用技术浅析[J]. 山东化工, 2016, 45(20): 150-153.

[6] 康学占. 提高 SCR 脱硝装置负荷适应性的可行性分析[J]. 发电设备, 2015, 25(3): 225-230.
KANG Xuezhao. Feasibility analysis on improving load adaptability of SCR denitrification systems[J]. Power Equipment, 2015, 25(3): 225-230.

[7] 肖雨亭, 陆金丰, 汪德志, 等. 脱硝催化剂的影响因素与选型[J]. 节能与环保, 2012(10): 48-50

[8] 吕洪坤, 杨卫娟, 周志军, 等. 选择性非催化还原法在电站锅炉上的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(23): 14-19.
LYU Hongkun, YANG Weijuan, ZHOU Zhijun, et al. Application of selective non-catalytic reduction on a power plant boiler[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2008, 28(23): 14-19.

[9] 刘洪宪, 史梦蕊. 某 300 MW 锅炉不同工况低氮燃烧优化[J]. 东北电力大学学报, 2016, 36(6): 43-48.
LIU Hongxian, SHI Mengyi. Optimization analysis of low nitrogen combustion under different air distribution modes[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2016, 36(6): 43-48.

[10] 胡敏. 大型电站锅炉深度低氮燃烧耦合 SNCR 和 SCR 脱硝研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.

[11] 陈镇超. SNCR/SCR 联合脱硝的应用及对锅炉运行的影响[J]. 能源与环境, 2016(2): 48-55.
CHEN Zhenchao. The application of hybrid SNCR/SCR system and its effect on the boiler operation[J]. Energy & Environment, 2016(2): 48-55.

[12] 吴升潇, 杨会民, 张健. 燃煤烟气氮氧化物控制技术研究与分析[J]. 煤炭加工与综合利用, 2016(6): 33-36.

[13] 刘义, 孙皓, 张广才. 600 MW 机组锅炉低氮燃烧器运行特性分析[J]. 广西电力, 2016(1): 42-45.
LIU Yi, SUN Hao, ZHANG Guangcai. Analysis of operation performance of boiler low nitrogen burner in 600 MW unit[J]. Guangxi Electric Power, 2016(1): 42-45.