

选择性非催化还原法在电站锅炉上的应用

吕洪坤, 杨卫娟, 周志军, 黄镇宇, 刘建忠, 周俊虎, 岑可法
(能源清洁利用国家重点实验室(浙江大学), 浙江省 杭州市 310027)

Application of Selective Non-catalytic Reduction on a Power Plant Boiler

LÜ Hong-kun, YANG Wei-juan, ZHOU Zhi-jun, HUANG Zhen-yu, LIU Jian-zhong, ZHOU Jun-hun, CEN Ke-fa
(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization (Zhejiang University), Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: Selective non-catalytic reduction(SNCR) was applied to a HG-410/9.8-YW15 boiler on the base of conventional pulverized-coal reburning process which had been implemented before. The experimental data showed that NO_x could be 350 mg/m^3 (standard condition, 6% O_2 , dry gas) below under reburning only and 200 mg/m^3 below under hybrid reburning/SNCR with NH_3 slip lower than 7.6 mg/m^3 . NO_x reduction was much higher when SNCR operated at low load. When setting $\varphi(\text{NH}_3)/\varphi(\text{NO})$ to 1.0, NO_x reached 160 mg/m^3 at 51% boiler load, and the NH_3 slip was only 1.14 mg/m^3 . Further more, SNCR alone could achieved about 38.6% to 73.9% NO_x reduction efficiency on the base of reburning at experimental loads. The NH_3 slip around front wall was larger than that around back wall at the section of tail flue. The application of SNCR had almost no impact on unburned carbon, exit gas temperature and CO emission, but the amount of exit flue gas would be increased. So, there was a boiler efficiency loss of about 0.5% under the experimental conditions.

KEY WORDS: selective non-catalytic reduction; reburning; urea; NO_x ; NH_3

摘要: 对一台HG-410/9.8-YW15型煤粉锅炉, 在已进行常规煤粉再燃改造基础上进一步结合了选择性非催化还原(selective non-catalytic reduction, SNCR)的改造, 即对该锅炉采用了联合Reburning/SNCR技术。通过实验运行表明: 当仅有再燃投入运行时, NO_x 可以低于 350 mg/m^3 (标准状态, 6% O_2 , 干烟气); 而当结合了SNCR运行时, NO_x 则达到了 200 mg/m^3 以下, 同时尾部氨泄漏小于 7.6 mg/m^3 。低负荷情况下脱硝率较高, 对于 51% 负荷($\varphi(\text{NH}_3)/\varphi(\text{NO})$ 等于 1.0), NO_x 降至 160 mg/m^3 , 而此时的尾部氨泄漏只有 1.14 mg/m^3 。此外, 根据负荷及 $\varphi(\text{NH}_3)/\varphi(\text{NO})$ 的不同, 单独SNCR技术在再燃的基础上也实现了 38.2%~73.9%的脱硝率。尾部烟道中的氨分

布呈现出前墙高于后墙的现象。SNCR的投运对飞灰含碳量、排烟温度及CO排放等几乎没有影响, 但会造成尾部排烟量的增加, 即对锅炉效率造成了约0.5%的损失。

关键词: 选择性非催化还原; 再燃; 尿素; NO_x ; 氨

0 引言

随着我国经济的持续迅猛发展, 能源的消耗也越来越大。目前, 我国能源消耗中煤炭约占70%。而燃煤所带来的 NO_x 、 SO_x 、小颗粒等排放将造成酸雨、光化学烟雾等诸多环境问题, 影响到国家的可持续发展^[1-3]。燃煤电站锅炉作为主要 NO_x 排放源之一, 对其进行减排是必须的。现今世界上主要的 NO_x 减排手段有: 选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)、选择性非催化还原、低 NO_x 燃烧器、燃料/空气分级燃烧等^[4-10]。SCR技术虽然可以获得较高(80%~90%)^[11]的脱硝率, 但昂贵的成本影响到其推广应用。目前国内外针对SNCR的研究中考虑了氨气、尿素、异氰酸等多种还原介质, 大多数的实验室研究结果均表明还原温度在 $850\sim 1175 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间, 最高可获得90%以上的脱硝率^[12-15]; 此外还进行了各种碳氢基及金属基等的促进剂研究, 表明其对反应温度窗口具有不同的拓展作用, 可在一定程度上提高脱硝效率^[12,16-20], 但对SNCR技术进行从实验室向应用过度的具体工程示范研究却进行得很少。在本文的实践研究中, SNCR及更进一步的联合Reburning/SNCR技术^[21], 其投资、运行成本相对SCR低的多, 但仍可以获得中等乃至较高的脱硝率, 完全可以满足我国的 NO_x 排放标准, 符合我国目前的国情。

1 锅炉简介

锅炉系HG-410/9.8-YW15型, 采用中间仓储式

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2006CB200303); 新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-04-0533)。

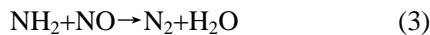
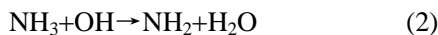
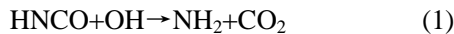
The National Basic Research Program of China(2006CB200303).

制粉系统，热风送粉，四角切圆燃烧。炉膛截面为 9.98 m×9.98 m 的正方形，炉膛总标高 39 m。锅炉燃用神华煤与准格尔煤的混煤。锅炉原始 NO_x 排放根据负荷的不同在 510~750 mg/m³ 左右。浙江大学对该锅炉进行常规煤粉再燃技术的改造后，在各个负荷下 NO_x 排放均能达到 350 mg/m³ 以下，同时分别在满负荷及 70% 负荷条件下达到了 51% 和 57% 的最高脱硝效果。但要达到 200 mg/m³ 以下的排放标准，单独靠再燃技术很难实现，因此浙江大学采用了在再燃的基础上进一步对该锅炉进行 SNCR 的技术改造，即在该锅炉上实施联合 Reburning/SNCR 技术。

2 SNCR 机理及系统简介

2.1 SNCR 机理

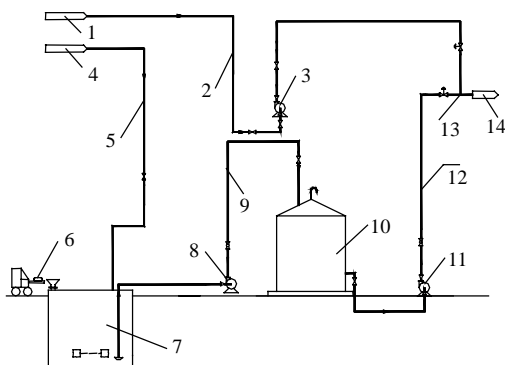
喷射尿素溶液的选择性非催化还原(SNCR)技术，在国外简称 NO_xOUT^[14,16]，是将一定浓度的尿素溶液喷入锅炉合适的温度区域即所谓的温度窗口中，与烟气进行混合。尿素受热分解为氨气、异氰酸等物质，这些物质再与烟气中的 NO_x 主要通过式(1)~(3)反应而生成氮气与水。



SNCR 整套系统根据各自功能的不同主要可以分为配药/稀释子系统及炉前喷射子系统两大部分，各自的介绍如下。

2.2 SNCR 配药/稀释子系统

SNCR 的配药/稀释子系统详见图 1。袋装尿素由叉车搬运倒入溶解池中，同时向溶解池中注入热水使尿素溶解。待尿素溶解完全后，通过尿素溶液



1—稀释水入口；2—稀释水管道；3—稀释水水泵；4—溶解水入口；5—溶解水管道；6—袋装尿素；7—溶解池；8—尿素溶液输送泵；9—尿素溶液管道 A；10—尿素溶液储罐；11—尿素溶液给料泵；12—尿素溶液管道 B；13—混合器；14—去喷射系统管道

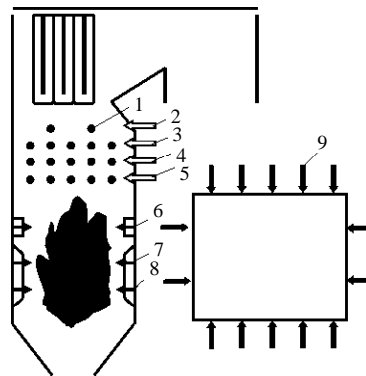
图 1 尿素溶液配制及稀释系统

Fig. 1 Urea dissolving and diluting system

输送泵将尿素溶液输送至尿素溶液储罐储存。当系统投运时，通过尿素溶液给料泵以一定流量输送尿素溶液至混合器处并经由稀释水泵输送过来的稀释水稀释后送往炉前喷射系统。

2.3 炉前喷射子系统

锅炉 SNCR 炉前喷射子系统的结构如图 2 所示。炉前喷射系统共分为上下 4 层，从下到上依次标记为第 1 喷射层、第 2 喷射层、第 3 喷射层、第 4 喷射层。每一喷射层均由尿素溶液、雾化蒸汽两路管道以及若干支喷枪组成。其中第 1、2、3 层，有单层喷枪 14 支；第 4 层有单层喷枪 7 支。每一层喷枪的布置位置均在炉膛折焰角附近。



1—喷射孔；2—第 4 喷射层；3—第 3 喷射层；4—第 2 喷射层；5—第 1 喷射层；6—燃尽风；7—再燃燃烧器；8—主燃烧器；9—尿素溶液喷枪

图 2 喷射系统简图

Fig. 2 Injection system diagram

3 测量项目、仪器及方法

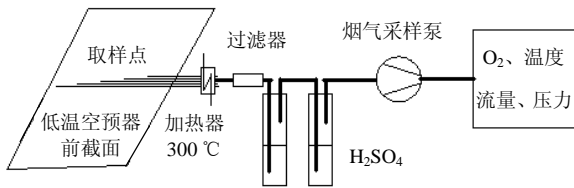
SNCR 技术的实施，主要关注的是 NO_x 的脱除率以及尾部的氨泄漏(NH₃ slip)^[12]等情况。由于锅炉尾气中的 NO_x 绝大多数以 NO 的形式存在^[13]，因此主要的测量项目即为：NO、O₂、NH₃。各测量项目的测量仪器如表 1 所述。该测试方法系西安热工研究院等国内权威鉴定单位常用的烟气测试方法，而且每次测试前仪器都需经过标定，因此测试得到的结果是可信的。

NO、O₂ 的测点布置在锅炉空气预热器后甲、乙两侧排烟通道，并采用网格法进行测量位置的布置。NH₃ 的测点及取样系统则如图 3 所示，NH₃ 测点布置在锅炉低温空气预热器前的炉膛截面上，烟

表 1 NO、O₂、NH₃ 测量仪器

Tab. 1 Test instruments of NO, O₂ and NH₃

项目	测量原理	精度	仪器公司
NO	红外	精度：<1%；线性：<1%	Rosemount
O ₂	顺磁	线性：<1%；重复性：<1%	Rosemount
NH ₃	气敏电极	采样 60 L 时，精度为 15 μg/m ³	美国热电

图3 NH₃测点布置及采样系统Fig. 3 Test points and sampling system of NH₃

气通过烟气采样泵抽取先经过过滤器对飞灰等物质进行过滤后再用稀硫酸溶液对其进行吸收。待吸收至一定量时，再采用氨分析包对其中的含量进行测量，并折算到标准状态下 $\varphi(\text{O}_2)=6\%$ 含量锅炉干烟气中的NH₃浓度(mg/m³)。

4 技术实施效果

4.1 联合Reburning/SNCR实施后NO_x排放

SNCR的技术改造在2007年机组小修期间得以同步实施，经过一段时间的运行，系统运行良好，NO_x排放显著降低，在各个负荷下均达到200 mg/m³以下的排放要求，同时尾部NH₃逃逸量也控制在7.6 mg/m³以下。

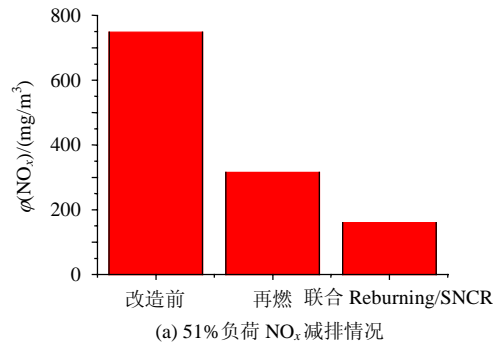
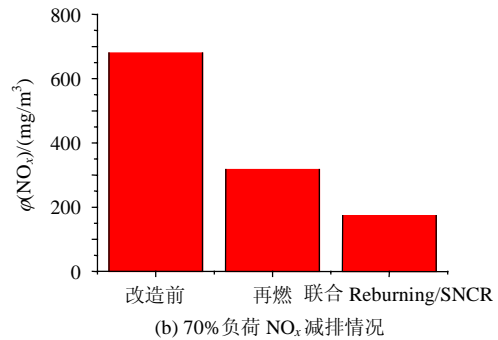
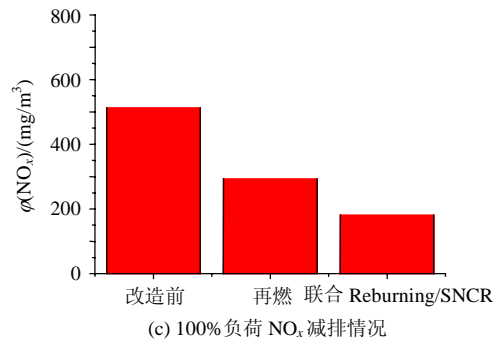
锅炉51%~100%负荷条件下，实施再燃及联合Reburning/SNCR后的NO_x排放详见图4，表2为各个实验工况下具体的喷射条件。

由图4可知，在保证锅炉燃烧效率的前提下，通过控制不同的再燃燃料比及一、二次风，燃尽风配比等，再燃技术可以将NO_x排放降低到293~317 mg/m³。而当进一步结合SNCR技术后不同的锅炉负荷下NO_x排放均达到了200 mg/m³以下，尤其51%负荷时NO_x降到了160 mg/m³，整体脱硝率达到78.6%。锅炉负荷的增加使得炉内燃烧加剧、单位热容量增加，因此炉膛整体温度向高处移动。为了维持喷射温度基本不变以在SNCR的温度窗口之内，喷射层的选择就需向标高更高处移动，这与实验的结论是一致的。同时，可以发现在3个实验负荷下SNCR技术的脱硝效果随着锅炉负荷的增大分别为49.2%、45.2%和38.2%。很明显，高负荷条件脱硝的效果似乎要比低负荷条件的要差一些。而在实验条件下，喷射层的温度均维持在1000℃左右，初始NO_x浓度、 $\varphi(\text{NH}_3)/\varphi(\text{NO})$ 等也较接

表2 各实验工况具体喷射条件

Tab. 2 Injection conditions of experimental loads

负荷/%	喷射层	标高/m	稀释前溶液浓度/%	稀释前溶液流量/(m ³ /h)	稀释水流量/(m ³ /h)	稀释后溶液浓度/%	稀释后溶液流量/(m ³ /h)	雾化压力/MPa	$\varphi(\text{NH}_3)/\varphi(\text{NO})$
51	第1层	24	35	0.12	1.43	2.7	1.55	0.36	1.0
70	第2层	26	29	0.18	1.67	2.8	1.85	0.38	0.9
100	第3层	28.5	34	0.20	2.11	2.9	2.31	0.36	0.9

(a) 51%负荷NO_x减排情况(b) 70%负荷NO_x减排情况(c) 100%负荷NO_x减排情况图4 再燃及联合Reburning/SNCR实施后不同负荷下NO_x排放情况Fig. 4 NO_x emission of different loads after reburning and hybrid reburning/SNCR carried into execution

近，因此3个负荷下影响SNCR脱硝效果区别的就主要是还原剂停留时间、混合条件等。表3是根据锅炉温度及几何特性计算出的喷射点到烟温降至800℃处3个实验负荷下还原剂的停留时间和此时的烟气平均速度等。其中的相对喷射动量计算方法为：

$$P = P_{\text{in}} / P_{\text{gas}} \quad (4)$$

$$P_{\text{in}} = m_{\text{sol}} \cdot v_{\text{sol}} \quad (5)$$

$$P_{\text{gas}} = m_{\text{gas}} \cdot v_{\text{gas}} \quad (6)$$

式中： P 为相对喷射动量； P_{in} 为喷射溶液动量流量；

表 3 各负荷下停留时间、烟气平均流速及相对动量
Tab. 3 Reductant residence time, flue gas mean velocity and relative momentum at different loads

负荷/%	停留时间/s	平均流速/(m/s)	相对喷射动量/ 10^{-5}
51	5.2	2.3	14.6
70	2.9	3.4	8.3
100	2.0	5.4	3.4

P_{gas} 为烟气动量流量; m_{sol} 为喷射溶液质量流量; m_{gas} 为烟气质量流量; v_{sol} 为喷射速度; v_{gas} 为烟气流速。

可见, 随着负荷的增加, 还原剂停留时间从 5.2s 降到了 2.0s, 而烟气流速则从 2.3 m/s 升到了 5.4 m/s, 同时相对喷射动量也大大下降了。因此, 高负荷条件 SNCR 脱硝效果相对低负荷差些的原因可以解释为: ① 负荷增加使得炉膛温度特性向高处移动, 从而须将喷射层上移, 但这就使得还原剂在炉内的行程变短即停留时间减少; ② 负荷增加时烟气流量增加, 从而炉内烟气流速加快, 一方面同样使得还原剂在炉内的停留时间减少, 另一方面烟气流速增加就相当于增加了单位炉膛容积的烟气动量, 从而喷射液滴对烟气的相对动量降低以致对烟气的穿透效果也下降, 即混合条件变差。综上, SNCR 技术在低负荷下由于停留时间及混合等的影响使脱硝效果要好于高负荷。

在实验条件下 $\varphi(NH_3)/\varphi(NO)$ 都保持在 0.9~1.0 的低值, 即通过增加 $\varphi(NH_3)/\varphi(NO)$ 在各个负荷下还可以大幅提高 SNCR 的脱硝效果。图 5 是在 51% 负荷下, 通过增大 $\varphi(NH_3)/\varphi(NO)$ 值所达到的脱硝率情况。从图中可知, 当 $\varphi(NH_3)/\varphi(NO)$ 从 1.0 增加至 1.7 时, NO_x 从 160.2 mg/m^3 降到了 82.2 mg/m^3 , 即整体脱硝率提升到了 89.0%。其中 SNCR 在再燃基础上的脱硝率从 49.2% 提高到 73.9%。可见, 在低负荷下通过增加 $\varphi(NH_3)/\varphi(NO)$, 对脱硝率的提高是很

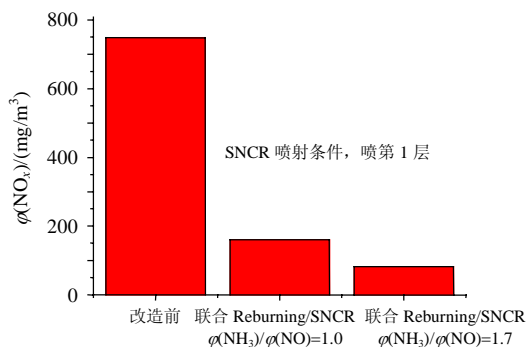


图 5 51% 负荷下 $\varphi(NH_3)/\varphi(NO)$ 增加时 NO_x 排放
Fig. 5 NO_x emission when $\varphi(NH_3)/\varphi(NO)$ increasing at 51% boiler load

明显的。因为, 增大 $\varphi(NH_3)/\varphi(NO)$ 无论是从还原剂

分子扩散、与 NO 碰撞几率还是脱硝反应平衡移动等角度都起到了促进脱硝反应进行的作用。

4.2 SNCR 实施后尾部 NH_3 泄漏情况

采用尿素溶液喷射的 SNCR 技术, 受限于炉内的混合及温度等条件, 喷入炉膛的还原剂可能没有完全与 NO_x 反应或是分解。因而, 常会有一些未利用的 NH_3 从锅炉尾气中排出, 即所谓尾部氨泄漏 (NH_3 slip)。

表 4 给出了在表 2 的喷射条件下, 空预器低温段入口的氨泄漏情况。可见, 在 3 个负荷下尾部氨泄漏值均小于 7.6 mg/m^3 。尤其是在低负荷条件下, 氨泄漏量值只有 1 mg/m^3 左右, 即意味着完全可以进一步增大 $\varphi(NH_3)/\varphi(NO)$ 值, 在获得更高脱硝率的同时保证氨泄漏量不超过 7.6 mg/m^3 。满负荷条件下, 氨泄漏量稍高, 但在保证氨泄漏量不超标的前提下仍有通过增大 $\varphi(NH_3)/\varphi(NO)$ 来提高脱硝率的空间。从表中还可以发现, 在满负荷条件下的 NH_3 泄漏要远高于低负荷情况, 这是因为, 如上文所述高负荷下喷射层的偏高、烟气流速的增加这些会使得 SNCR 反应的停留时间变短、混合条件变差, 而这些影响也使未反应的 NH_3 增加、 NH_3 的分解等反应变差, 即尾部的 NH_3 泄漏增加。

图 6 是满负荷喷射条件下, 尾部烟道位置处 NH_3 排放沿截面分布情况。可见, 靠后墙部分烟道中的 NH_3 泄漏量要比靠前墙部分烟道的量小许多。虽然整体上 NH_3 泄漏只有 5.39 mg/m^3 , 但个别区域的泄漏量已大大超过 7.6 mg/m^3 的限值。因此, 在实际运行中不仅要注意整体的 NH_3 泄漏量, 也要注意个别区域的泄漏量, 特别是靠尾部前墙烟道, 以

表 4 各负荷下氨泄漏情况
Tab. 4 NH_3 slip at different loads

负荷/%	51	70	100
氨泄漏/ (mg/m^3)	1.14	0.99	5.39

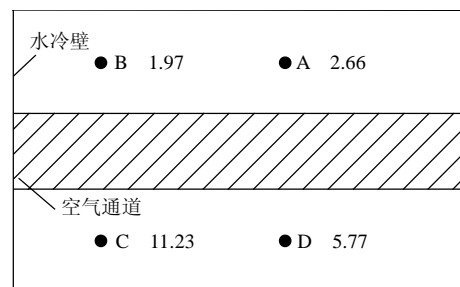


图 6 NH_3 沿测量截面分布情况 (mg/m^3)
Fig. 6 NH_3 distribution among the measuring section at 100% boiler load (mg/m^3)

防止其对空气预热器造成影响。这个现象的原因,

可能是由于炉膛前墙及附近喷射的还原剂跟随着烟气，主要是流向尾部烟道的后墙，其流程相对于由炉膛后墙及附近喷射并流至尾部烟道前墙的还原剂路径要长即停留时间也会较长，故而这些烟气中的 NH_3 能够较充分的进行还原反应或者自分解等副反应，即 NH_3 含量会相对靠尾部烟道前墙区域的要低一些。

4.3 SNCR 实施后对锅炉效率的影响

由于将尿素溶液喷入炉内的同时，也带入了溶解水和雾化蒸汽等其他介质，而其中对锅炉的主要影响是溶解水会降低喷射当地的烟气温度的增加尾部的排烟量等。

图 7 是满负荷情况下喷入水量对喷射当地烟气温度及尾部排烟量的影响。计算是在假设喷入水量均匀分布于喷射截面烟气中的前提下，通过热平衡及质量守恒进行的。显然，随着喷入水量的增加，当地烟温的降低值及尾部所增加的排烟量都线性增加。当地烟温的降低，既降低了能量的品质，也影响到了燃料的燃尽。但由于降低的温度值相对于原始温度很小，因此对锅炉效率的影响是次要的。如表 5 所示，SNCR 投运前后的飞灰含碳量、排烟温度以及尾部 CO 含量等并没有发生显著的变化。

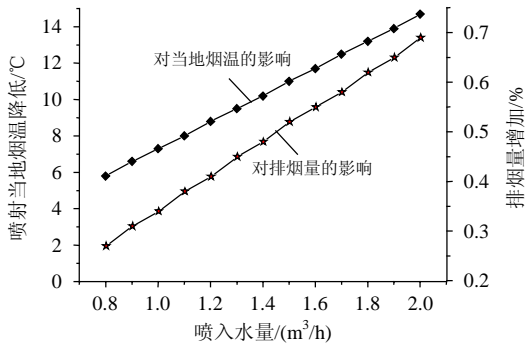


图 7 喷入水量对当地烟温及排烟量的影响

Fig. 7 Impact of injection water amount on local gas temperature and the amount of exit flue gas

表 5 飞灰含碳量、排烟温度及 CO 排放情况

Tab. 5 Unburned carbon, exit flue gas temperature and CO emission at different loads

负荷/%	SNCR 投停	飞灰含碳量/%	排烟温度/°C	$\varphi(\text{CO})/(\text{mg}/\text{m}^3)$
51	停	2.4	129	13
	投	2.4	130	14
70	停	3.0	145	9
	投	2.3	146	10
100	停	2.6	148	6
	投	1.7	150	10

因此，在实际运行中主要的能量损失是将所喷

入的水加热成排烟烟温的水蒸气所需的热量，因这部分热量是随烟气一起被放掉。图 8 描述的是上述 3 个实验负荷下实际测量的 SNCR 投运前后锅炉效率情况。可见，由于喷入水量对排烟量、燃尽等的负面影响，SNCR 投运后锅炉效率都不同程度地降低了 0.52%~0.68%。因此，SNCR 实际运行中应尽可能在满足混合等要求的前提下，减小喷入水量以降低其对锅炉效率的影响。

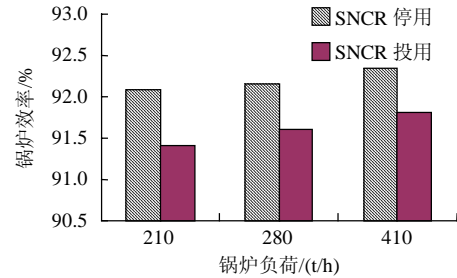


图 8 实测 SNCR 对锅炉效率的影响

Fig. 8 Impact of SNCR on boiler efficiency

5 结论

在 410 t/h 锅炉上进行 SNCR 技术改造并结合已实施的再燃技术， NO_x 排放放在各个负荷下均能达到 $200 \text{ mg}/\text{m}^3$ 以下的要求，同时氨泄漏小于 $7.6 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。

(1) 根据负荷的不同，在较低 $\varphi(\text{NH}_3)/\varphi(\text{NO})$ 下联合 Reburning/SNCR 技术可获得 64.7%~78.6% 的脱硝效果。在 51% 负荷下通过增大 $\varphi(\text{NH}_3)/\varphi(\text{NO})$ 到 1.7 获得了高达 89.0% 的脱硝率。

(2) 低负荷条件相对高负荷条件更易获得较高脱硝率并保持较低的氨泄漏量，可能是由于低负荷条件下炉内烟气流速相对较低，还原剂在炉内的混合较好及停留时间较长等造成的。

(3) 由于炉膛内喷枪布置及锅炉结构的关系，使得同一层喷射的还原剂在炉内的停留时间等不一致，因而在尾部烟道氨气测量截面中靠尾部前墙的烟气中氨含量要较靠尾部后墙的大一些。

(4) SNCR 的投运对飞灰含碳量、排烟温度及尾部 CO 排放并没有显著影响，即其对燃烧的影响是较小的。

(5) SNCR 过程需要喷入溶解尿素并提供喷射动量用的水，因而会降低喷射当地烟温、增加尾部排烟量等，使锅炉效率在实验过程中降低了 0.52%~0.68%。

参考文献

- [1] 王自发, 高超, 谢付莹. 中国酸雨模式研究回顾与所面临的挑战[J]. 自然杂志, 2007, 29(2): 78-82.

- Wang Zifa, Gao Chao, Xie Fuying. Modeling studies of acid rain in China: progress and challenge[J]. Chinese Journal of Nature, 2007, 29(2): 78-82(in Chinese).
- [2] 付晓萍, 田大伦. 酸雨对植物的影响研究进展[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(4): 23-27, 53.
Fu Xiaoping, Tian Dalun. Research progress of the effect of acid rain on plant[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2006, 21(4): 23-27, 53(in Chinese).
- [3] 刘峻峰, 李金龙. 大气光化学烟雾反应机理比较(I)O₃和NO_x的比较[J]. 环境化学 2001, 20(4): 305-312.
Liu Junfeng, Li Jinlong. A comparison of atmospheric photochemical mechanisms(I) O₃ and NO_x[J]. Environmental Chemistry, 2001, 20(4): 305-312(in Chinese).
- [4] 金晶, 张忠孝, 李瑞阳. 超细煤粉再燃的模拟计算与试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 215-218.
Jin Jing, Zhang Zhongxiao, Li Ruiyang. Numerical simulation and experimental study on micronized coal reburning[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 215-218(in Chinese).
- [5] 郭永红, 孙保民, 刘彤, 等. 褐煤的超细粉再燃中NO_x的生成与还原的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 94-98.
Guo Yonghong, Sun Baomin, Liu Tong, et al. Numerical simulation of NO_x formation and deoxidization with micro-pulverized coal reburning technology for lignite[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(9): 94-98(in Chinese).
- [6] 张忠孝, 姚向东, 乌晓江, 等. 气体再燃低NO_x排放试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 99-102.
Zhang Zhongxiao, Yao Xiangdong, Wu Xiaojiang, et al. Experimental study on low NO_x emission using gas reburning[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(9): 99-102(in Chinese).
- [7] 曹红加, 唐必光, 许洪波. 煤粉浓淡燃烧方式对电站锅炉NO_x排放影响的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 229-232.
Cao Hongjia, Tang Biguang, Xu Hongbo. The influence of coal bias combustion mode on NO_x emission from power station boiler [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 229-232(in Chinese).
- [8] 秦明, 吴少华, 孙绍增, 等. 六角切圆燃烧褐煤煤粉锅炉低NO_x燃烧技术研究[J]. 中国电机工程学报 2005, 25(1): 158-162.
Qin Ming, Wu Shaohua, Sun Shaozeng, et al. Low NO_x emission study for six point tangential burning of PC boiler firing lignite coal[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 158-162(in Chinese).
- [9] 张惠娟, 惠世恩, 周屈兰, 等. 300MW煤粉锅炉低NO_x正反切同轴燃烧试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 116-120.
Zhang Huijuan, Hui Shien, Zhou Qulan, et al. Experiment study of low NO_x positive/opposing concentric tangential firing system in a 300 MW pulverized fuel boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 116-120(in Chinese).
- [10] 周俊虎, 宋国良, 刘建忠, 等. 高浓度煤粉燃烧低NO_x排放特性的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(2): 42-47.
Zhou Junhu, Song Guoliang, Liu Jianzhong, et al. Experimental study on characteristics of low NO_x emission during the dense phase pulverized coal combustion[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(2): 42-47(in Chinese).
- [11] 毛健雄, 毛健全, 赵树民. 煤的清洁燃烧[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [12] Javed M T, Irfan N, Gibbs B M. Control of combustion-generated nitrogen oxides by selective non-catalytic reduction[J]. Journal of Environmental Management, 2007, 83(3): 251-289.
- [13] Furrer J, Deuber H, Hunsinger H, et al. Balance of NH₃ and behavior of polychlorinated dioxins and furans in the course of the selective non-catalytic reduction of nitric oxide at the TAMARA waste incineration plant[J]. Waste Management, 1998, 18(6-8): 417-422.
- [14] Rota R, Antos D, Zanoelo E F, et al. Experimental and modeling analysis of the NO_xOUT process[J]. Chemical Engineering Science, 2002, 57(1): 27-38
- [15] Caton J A, Narney I, Cariappa C, et al. The selective non-catalytic reduction of nitric oxide using ammonia at up to 15% oxygen[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1995, 73(3): 345-350.
- [16] Rota R., Zanoelo E F. Influence of oxygenated additives on the NO_xOUT process efficiency[J]. Fuel, 2003, 82(7): 765-770.
- [17] Zamansky V, Lissianski V, Maly P, et al. Reactions of sodium species in the promoted SNCR process[J]. Combustion and Flame, 1999, 117(4): 821-831.
- [18] Han K, Lu C. Kinetic model and simulation of promoted selective non-catalytic reduction by sodium carbonate[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2007, 15(4): 512-519.
- [19] Hemberger R, Muris S, Pleban K U, et al. An experimental and modeling study of the selective noncatalytic reduction of NO by ammonia in the presence of hydrocarbons [J]. Combustion and Flame, 1994, 99(3-4): 660-668.
- [20] Lee S, Park K, Park J W, et al. Characteristics of reducing NO using urea and alkaline additives[J]. Combustion and Flame, 2005, 141(3): 200-203.
- [21] Han Xiaohai, Wei Xiaolin, Schnell U, et al. Detailed modeling of hybrid reburn/SNCR processes for NO_x reduction in coal-fired furnaces[J]. Combustion and Flame, 2003, 132(3): 374-386.



吕洪坤

收稿日期: 2008-01-31。

作者简介:

吕洪坤(1981—), 男, 博士研究生, 从事 SNCR 等低 NO_x 技术的研究, yangwj@zju.edu.cn;

杨卫娟(1976—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为 NO_x 控制机理和技术, 本文通讯作者, yangwj@zju.edu.cn。

周志军(1969—), 男, 副教授, 研究方向为煤粉与水煤浆燃烧技术、多相流及燃烧过程数值计算等;

黄镇宇(1957—), 男, 教授, 主要从事沸腾燃烧技术, 油煤浆、油焦浆、水煤浆和煤粉燃烧理论和技术的教学和科研工作;

刘建忠(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为煤的高效低污染利用;

周俊虎(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事燃烧理论、新能源开发、能源清洁利用等领域的研究;

岑可法(1935—), 男, 教授, 院士, 研究方向为工程热物理学和环境工程。

(责任编辑 王庆霞)