

DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.18136

# SCR 烟气脱硝系统出口烟道 NO<sub>x</sub> 测点技术改造

邹堃<sup>1</sup>, 王丹秋<sup>2</sup>

- (1. 上海上电漕泾发电有限公司, 上海市 金山区 201518;  
2. 南京新瓦特智控科技有限公司, 江苏省 南京市 210032)

## Technical Transformation of NO<sub>x</sub> Measuring Point for Outlet Flue of SCR System

ZOU Kun<sup>1</sup>, WANG Danqiu<sup>2</sup>

- (1. Shanghai Shang Dian Caojing Power Generation Co., Ltd., Jinshan District, Shanghai 201518, China;  
2. Nanjing Newatt Intelligent Measurement & Control Technology Co., Ltd, Nanjing 210032, Jiangsu Province, China)

**摘要:** 燃煤电站锅炉排放的氮氧化物是大气污染的一个重要来源, 控制 NO<sub>x</sub> 排放已成为当前电厂的重要工作。上海漕泾电厂分别于 2014 年和 2015 年实施了超低排放改造工程, 在改造后的长期运行过程中发现, 1 号机组选择性催化还原烟气脱硝法(SCR)装置出口 NO<sub>x</sub> 浓度值与烟囱出口数据有着较大偏差。通过对 SCR 所在烟道流场的数值模拟发现, 原有 SCR 进出口的测点在烟道入口 NO<sub>x</sub> 浓度分布不均匀时不能准确测量出 NO<sub>x</sub> 的浓度值, 因此对原有的 NO<sub>x</sub> 出口测点进行了技术改造, 变原来的 2 点平均测量为网格多点测量。技术改造后发现测点 NO<sub>x</sub> 与烟囱出口 NO<sub>x</sub> 数据变化趋势吻合, 为进一步的按需喷氨提供了基础。

**关键词:** 超低排放; 选择性催化还原(SCR); NO<sub>x</sub> 浓度; 网格多点测量

**ABSTRACT:** The nitrogen oxides emitted from coal-fired power plant boilers are an important air pollution source. Controlling NO<sub>x</sub> emission has become an important work of power plants at present. The Shanghai Caojing power plant carried out the ultra-low emission transformation project in 2014 and 2015 respectively. In the long run after retrofitting, it was found that the NO<sub>x</sub> data of the selective catalytic reduction (SCR) outlet were large different from that of chimney outlet in unit one. Through the numerical simulation of the flow field in the flue where SCR is located, it is found that the original measuring points at the inlet and outlet of SCR can not accurately measure the concentration value of NO<sub>x</sub> when the concentration distribution of NO<sub>x</sub> at the inlet of the flue is not uniform. And so, the technical transformation was made that the original two-point average NO<sub>x</sub> measurement at the SCR outlet was changed into the multi-point measurement of the grid. Finally, it is found that the change trend of the new NO<sub>x</sub> data coincides with the

NO<sub>x</sub> data change trend of the chimney outlet, which provides the basis for the further injection of ammonia.

**KEY WORDS:** ultra low emission; selective catalytic reduction (SCR); NO<sub>x</sub> concentration; multi-point measurement of the grid

## 0 引言

燃煤电站锅炉排放的氮氧化物是造成大气污染的一个重要因素<sup>[1-3]</sup>, 控制 NO<sub>x</sub> 排放已成为当前电力行业发展的重要工作环节<sup>[4-5]</sup>。目前最新标准要求燃煤电站超净排放 NO<sub>x</sub> 低于 50 mg/m<sup>3</sup>, 而配备 3 层催化剂的选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)烟气脱硝系统是燃煤电站烟气脱硝的主要选择<sup>[6-7]</sup>。

上海上电漕泾发电有限公司(以下简称漕泾电厂)是国内首个以“上大压小”核准建成的百万 kW 超超临界燃煤电厂, 现有 2 台国内单机容量最大的 1 000 MW 超超临界燃煤发电机组, 分别于 2010 年 1 月和 4 月投产。漕泾电厂锅炉、汽轮机和发电机三大主设备和绝大多数辅机均采用国产设备, 国产化率达到 95% 以上。随着燃煤电站 NO<sub>x</sub> 超净排放的推行, 漕泾电厂分别于 2014 年和 2015 年实施了超低排放改造工程, 投运后性能试验表明, NO<sub>x</sub> 排放优于燃机排放标准。随着投运时间的延伸, 发现 1 号机组 SCR 系统的 NO<sub>x</sub> 监测存在以下问题: SCR 出口 NO<sub>x</sub> 与烟囱出口 NO<sub>x</sub> 数据经常有较大偏差, 且以 NO<sub>x</sub> 监测数据为依据进行喷氨调节, 难度大且效果不明显。本文对 SCR 所在烟道流场进行了数值模拟及 NO<sub>x</sub> 测点的技术改造。

## 1 存在问题及流场分析

在 1 号机组实施超低排放改造过程中, 长期运行过程中机组人员发现 SCR 系统出口 NO<sub>x</sub> 与烟囱出口 NO<sub>x</sub> 数据经常有较大偏差。

图 1 为 2017 年 2 月 15 日中午 11:15 开始的一组负荷在 500 MW 附近, SCR 入口、出口以及烟囱出口 NO<sub>x</sub> 测点的数据。从图 1 可以看出, 随着机组负荷在 500 MW 附近波动, SCR 入口和出口 NO<sub>x</sub> 数据的主要波峰和波谷都能吻合, SCR 出口 NO<sub>x</sub> 时间上略有滞后; 而从 20~30 min 机组负荷从 550 MW 降至 490 MW 这段时间来看, 烟囱 NO<sub>x</sub> 对负荷变化的跟随性最好, 而 SCR 出口和入口 NO<sub>x</sub> 虽然在这个时间段有下降趋势, 但不像烟囱出口 NO<sub>x</sub> 那样在 0~20 min 和 30 min 后有整体下降的趋势。另值得注意的是, SCR 出口的与烟囱出口 NO<sub>x</sub> 数据有较大差别, 以图 1 中 45 min 对应的数据为例, SCR 出口 NO<sub>x</sub> 浓度为 50.37 mg/m<sup>3</sup>, 超过超低排放标准的 50 mg/m<sup>3</sup>; 而烟囱出口的 NO<sub>x</sub> 浓度为 13.96 mg/m<sup>3</sup>, 小于超低排放标准的 50 mg/m<sup>3</sup>, 两者差值达到 36.41 mg/m<sup>3</sup>。

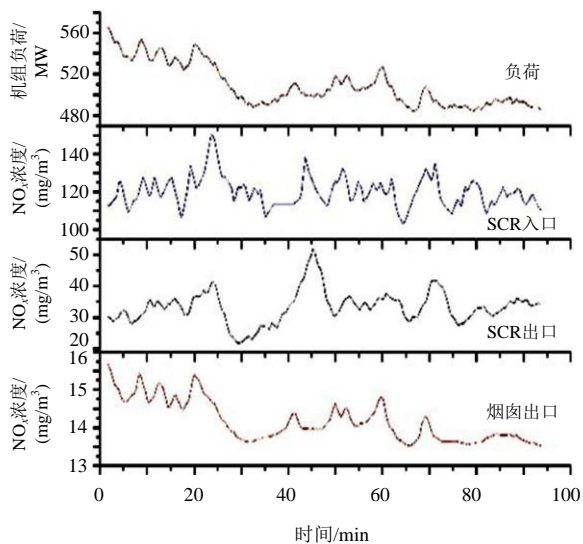


图 1 技改前 500 MW 负荷附近 NO<sub>x</sub> 浓度及负荷数据

Fig. 1 NO<sub>x</sub> content and load data under about 500 MW condition before technical transformation

图 2 为 2017 年 2 月 18 日中午 11:15 开始, 负荷在 750 MW 附近, SCR 入口、出口以及烟囱出口 NO<sub>x</sub> 测点的数据。从图 2 可以看出, 随着负荷在 750 MW 附近波动, SCR 入口和出口 NO<sub>x</sub> 数

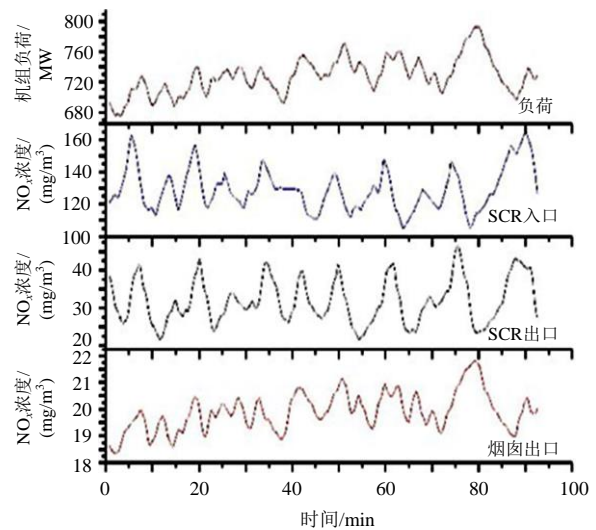


图 2 技改前 750 MW 负荷附近 NO<sub>x</sub> 浓度及负荷数据

Fig. 2 NO<sub>x</sub> content and load data under about 750 MW condition before technical modification

据的主要波峰和波谷都能吻合, SCR 出口 NO<sub>x</sub> 时间上略有滞后; 而从整个时间段来看, 后半时间(50~90 min)与前半时间(0~40 min)相比负荷整体上略有上升, 烟囱 NO<sub>x</sub> 能体现后半段整体略有上升趋势, 而 SCR 出口以及入口 NO<sub>x</sub> 没有整体上升趋势; 同样 SCR 出口与烟囱出口的 NO<sub>x</sub> 数据有较大差别, 以图 2 中 75 min 对应的数据为例, SCR 出口 NO<sub>x</sub> 浓度为 46.65 mg/m<sup>3</sup>, 接近超低排放标准的 50 mg/m<sup>3</sup>; 而烟囱出口的 NO<sub>x</sub> 浓度为 20.89 mg/m<sup>3</sup>, 小于超低排放标准的 50 mg/m<sup>3</sup>, 两者差值达到 24.56 mg/m<sup>3</sup>。

综上所述, 初步判断由于 SCR 入口和出口各只安装了 1 个 NO<sub>x</sub> 测点, 每个测点取 2 个取样点的平均值, 而在 SCR 的入口和出口均存在变径情况, 无法满足足够长的直管段条件使得 NO<sub>x</sub> 浓度分布充分扩散, 因此改造前 NO<sub>x</sub> 测点的布置无法代表真实的 NO<sub>x</sub> 浓度, 相对而言烟囱出口的 NO<sub>x</sub> 测点前有相对较长的直管段, 使得 NO<sub>x</sub> 有充分扩散的空间, 结果更加可信。

## 2 SCR 所在烟道流场模拟

为了验证上述分析, 对 SCR 所在烟道内的流场及 NO<sub>x</sub> 的分布进行数值模拟, 烟道的三维模型结构如图 3 所示。

为简化计算, 进行如下假设: SCR 脱硝系统

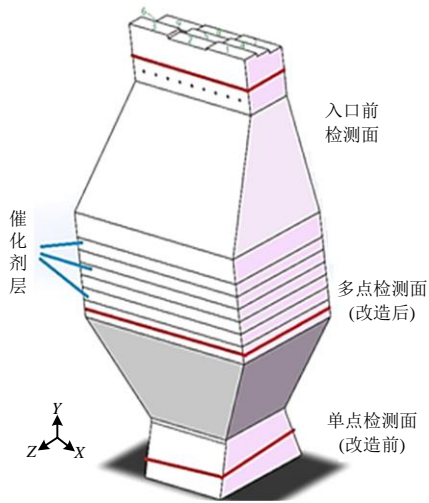


图3 SCR所在烟道三维外形图

Fig. 3 Three dimensional outside drawing of SCR's flue 所在烟道为绝热系统，忽略内部传热；烟气为定常流动的理想流体，物性参数为定值；不考虑化学反应以及灰分对流场的影响；烟气在催化剂层中的流动只考虑层流流动；系统漏风为零。另数值模拟的目的主要是验证 $\text{NO}_x$ 在流场中的扩散对测量结果的影响，为了便于测量SCR进出口 $\text{NO}_x$ 浓度场，假设经过催化层后 $\text{NO}_x$ 催化吸收的百分比一样，设为0。

边界条件的设定如下：

- 1) 入口：采用速度入口边界条件<sup>[8-9]</sup>，烟气温度 $T=670\text{ K}$ ；速度 $u=16.5\text{ m/s}$ ；密度为 $\rho=0.6064\text{ kg/m}^3$ 。
- 2) 出口：采用压力出口边界条件，出口烟气温度 $T=670\text{ K}$ ；压力 $P_{\text{out}}=0$ 。
- 3) 催化剂床层的边界条件设定：选用多孔质模型，流动方式选用层流区域，黏性阻力系数每个方向选取 $1.34\text{ m}^{-2}$ ，惯性阻力每个方向选取 $91\text{ m}^{-2}$ ，孔隙率为0.68。

4) 固体壁面和导流板均设为无滑移、无热传导的wall边界条件。

其中喷氨格栅部分相比于整体模型尺寸很小，为了提高网格质量，将喷氨格栅近似为具有相同水力直径的方管，如图4所示。喷氨格栅共9组，主管之间相距2000 mm，主管直径为260 mm；相邻支管相距450 mm，支管长850 mm；支管宽80 mm。

将喷氨格栅以上部分使用非结构网络，喷氨格栅以下部分使用结构网格划分。经过网格独立性校验，最终选取236万网格作为计算网格。选

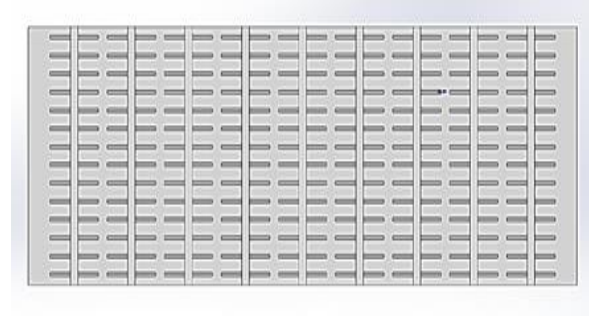


图4 喷氨格栅简化结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of simplified structure for ammonia spray grating

用重整化RNG  $k-\varepsilon$ 模型来模拟烟道流场，SCR脱硝系统烟道内 $\text{NO}_x$ 扩散模拟选择通用有限速率模型进行。离散采用一阶迎风格式，计算过程中选用压力基求解器，运行环境中的参考压力为1个标准大气压。

模拟工况如图3所示，将入口均匀划分为9个区，其中1区的 $\text{NO}_x$ 质量分数设为0.0100，2~9区设为0.0010，则入口截面平均质量分数为0.0020。

图5为图3中标出的SCR入口测点截面 $\text{NO}_x$ 浓度分布，其中2个“十”字的中心为改造前 $\text{NO}_x$ 2点平均取样的取样位置，从这2个点平均取样得到的 $\text{NO}_x$ 质量分数为0.0010，不能反应截面的平均质量分数0.0020。

图6为图3中标出的SCR出口测点截面 $\text{NO}_x$ 浓度分布，其中2个“十”字的中心为改造前 $\text{NO}_x$ 2点平均取样的取样位置，从这2个点平均取样得到的 $\text{NO}_x$ 质量分数为0.0017，不能准确反应截面的平均质量分数0.0020。

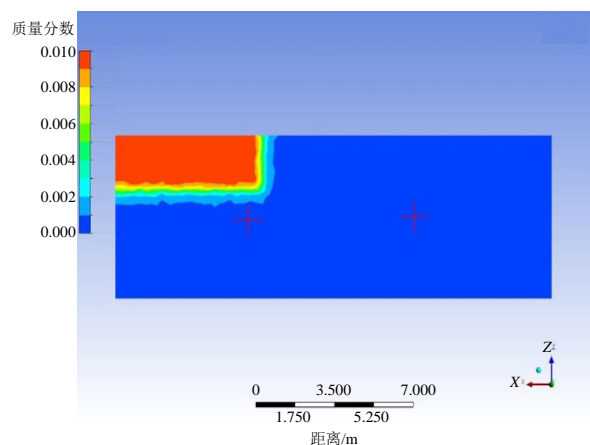


图5 技改前SCR入口测点截面 $\text{NO}_x$ 浓度分布

Fig. 5  $\text{NO}_x$  concentration distribution at SCR inlet section before technical transformation



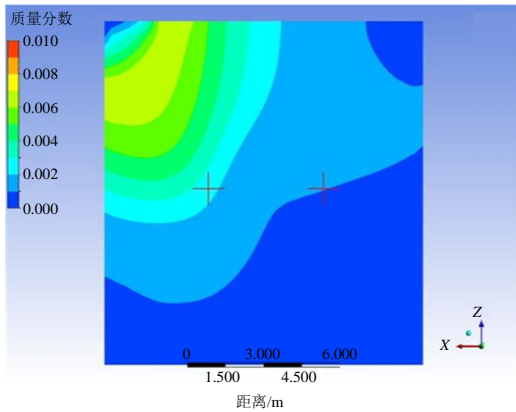


图 6 技改前 SCR 出口测点截面 NO<sub>x</sub> 浓度分布  
 Fig. 6 NO<sub>x</sub> concentration distribution at SCR outlet section before technical transformation

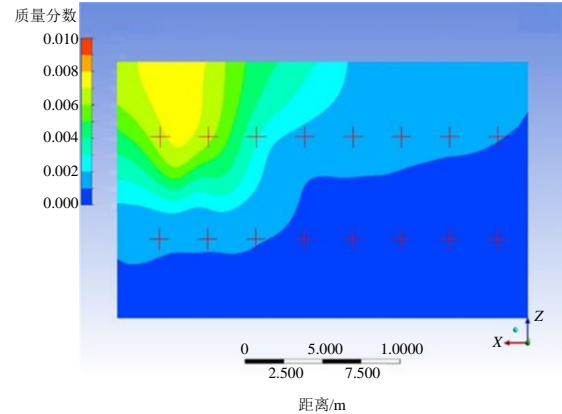


图 8 技改后 SCR 出口测点截面 NO<sub>x</sub> 浓度分布  
 Fig. 8 NO<sub>x</sub> concentration distribution at SCR outlet section after technical modification

### 3 技术改造

根据上述模拟分析，显然 2 点平均取样无法满足测量的要求。国家标准 GBT 16157—1996 规定：固定污染源排气污染物采用等截面多点式采样方法<sup>[10-15]</sup>，因此变单点 NO<sub>x</sub> 测量为网格多点测量，在采样截面上布置多点取样点将能有效改善测量精度。

图 7 是在原 SCR 入口测点所在截面采用网格多点分区的方法，设置 16 个取样点，则这 16 个取样点的平均值为 0.002 3，与改造前的 0.001 0 相比更加接近截面的平均质量分数 0.002 0。

考虑到改造前 SCR 入口和出口 NO<sub>x</sub> 测点所在截面的面积不一致，为了更具对应性，在 SCR 催化剂层下方选取一截面采用网格多点分区的方法

法，设置 16 个取样点，如图 8 所示，则这 16 个取样点的平均值为 0.002 1，已经非常接近截面的平均质量分数 0.002 0。

针对上述分析，采用如图 7 和图 8 所示的网格多点取样方案进行 NO<sub>x</sub> 测量显然更能反应截面真实的 NO<sub>x</sub> 值。

经技术论证，为降低技术风险性，同时节约改造成本，最终技术改造方案为：只在 SCR 出口将单点 NO<sub>x</sub> 测量改为网格多点 NO<sub>x</sub> 测量。如图 3 所示，多点取样枪安装在 SCR 出口第 3 层催化剂下方 1.5 m 处，该截面尺寸为 15 200 mm×26 440 mm，为了能更有代表性地取到各个区域的烟气，如图 9 所示，将整个烟道截面分为 16 个区域，每个区域设置一杆取样枪。每个取样枪对应一个等截面分区，该分区的烟气经等速抽取经控温伴热管路进入测量气室的 NO<sub>x</sub> 表(使用原有的 NO<sub>x</sub> 表)，测量完毕后，将烟气排入到采样截面下游的烟气管道中。

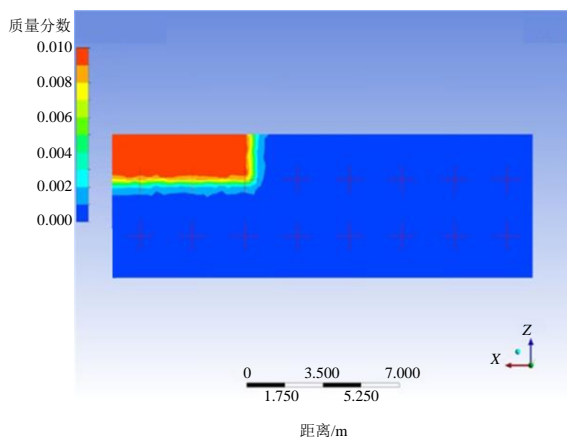


图 7 技改后 SCR 入口测点截面 NO<sub>x</sub> 浓度分布  
 Fig. 7 NO<sub>x</sub> concentration distribution at SCR inlet section after technical modification

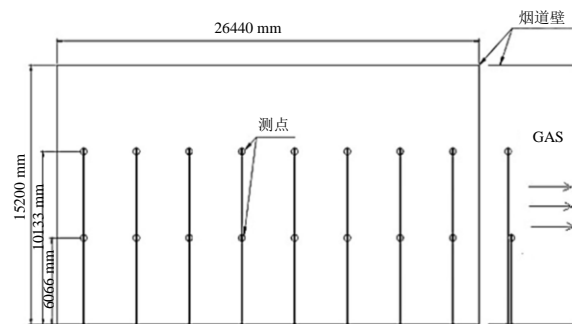


图 9 取样枪安装布置图  
 Fig. 9 Installation plan of sampling gun

## 4 改造效果分析

上述技术改造完毕后,效果比较显著。为便于对比,选取了500 MW附近和840 MW附近的2组工况,此时SCR出口NO<sub>x</sub>数据为16个分区的平均值。

图10为2018年5月17日下午14:15开始,负荷在500 MW附近,SCR入口、出口以及烟囱出口NO<sub>x</sub>测点的数据。

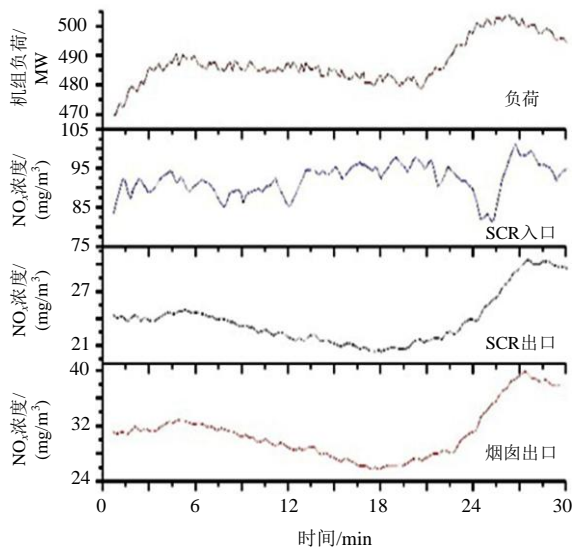


图10 技改后500 MW负荷NO<sub>x</sub>测点数据

Fig. 10 NO<sub>x</sub> data under about 500 MW condition after technical modification

首先随着负荷在500 MW附近波动,SCR入口NO<sub>x</sub>的跟随负荷变化的趋势依然不明显,而SCR出口和烟囱出口NO<sub>x</sub>的变化趋势基本一致,跟随负荷变化的趋势也相对比较明显。另SCR出口与烟囱出口NO<sub>x</sub>数据差别较小,以图9中15 min对应的数据为例,SCR出口NO<sub>x</sub>浓度为21.27 mg/m<sup>3</sup>,烟囱出口NO<sub>x</sub>浓度为27.49 mg/m<sup>3</sup>,均小于超低排放标准的50 mg/m<sup>3</sup>,两者差值为6.22 mg/m<sup>3</sup>。

图11为2018年5月7日下午14:15开始,负荷在840 MW附近,SCR入口、出口以及烟囱出口NO<sub>x</sub>测点的数据。随着负荷在840 MW附近波动,SCR入口NO<sub>x</sub>跟随负荷的趋势依然不明显,而SCR出口和烟囱出口NO<sub>x</sub>的变化趋势基本一致,但与负荷变化的跟随性不明显。此时,SCR出口与烟囱出口的NO<sub>x</sub>浓度数据差别较小,以

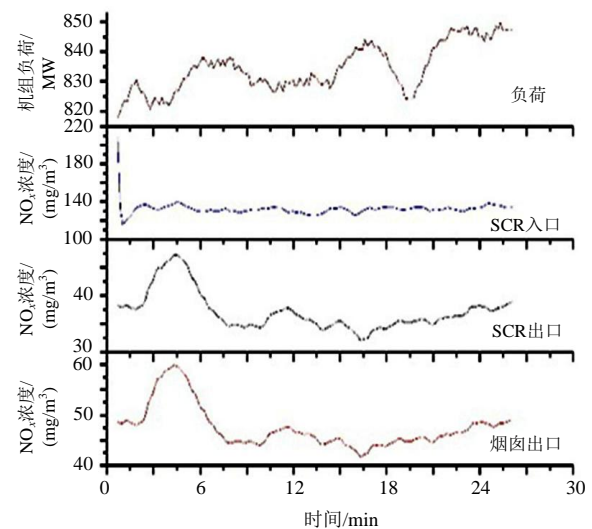


图11 技改后840 MW负荷NO<sub>x</sub>测点数据

Fig. 11 NO<sub>x</sub> data under about 840 MW condition after technical modification

图10中15 min对应的数据为例,SCR出口的NO<sub>x</sub>浓度为32.18 mg/m<sup>3</sup>,烟囱出口的NO<sub>x</sub>浓度为41.83 mg/m<sup>3</sup>,均小于超低排放标准的50 mg/m<sup>3</sup>,两者差值为9.65 mg/m<sup>3</sup>。

综上所述,经技术改造后,SCR出口与烟囱出口NO<sub>x</sub>数据趋势吻合,差值减小到10 mg/m<sup>3</sup>以内,为SCR系统喷氨量的调节提供了更直观的数据,减少了改造前为确保NO<sub>x</sub>排放达标而加大喷氨量的情况。

## 5 结论

针对上海漕泾电厂1号机组SCR系统出口与烟囱出口NO<sub>x</sub>测量数据差别较大,且与负荷波动的跟随趋势不明显的问题进行了分析,并对SCR所在烟道内的流场进行了模拟。结果显示,原SCR入口和出口的NO<sub>x</sub>测点不能准确测量截面的NO<sub>x</sub>,如改为网格多点测量可改善测量结果的准确性。根据模拟结果进行技术改造,变SCR出口的单点NO<sub>x</sub>测量为16个等截面分区的网格多点分区测量,取其平均值作为SCR出口的NO<sub>x</sub>数据。结果表明:与技术改造前相比,SCR出口与烟囱出口NO<sub>x</sub>数据趋势吻合,500 MW和840 MW负荷时两者差值可减小到10 mg/m<sup>3</sup>以内。

技术改造达到了预期的目的。如进一步将

SCR 入口的单个 NO<sub>x</sub> 测量改为与出口 NO<sub>x</sub> 等截面分区网格多点 NO<sub>x</sub> 测量, 配合各喷氨支管的独立调节, 将可能实现 SCR 系统按需精准喷氨的功能, 在提高脱硝效率的同时减少氨逃逸率。

## 致 谢

本技术改造工作得到了南京理工大学新能源科学与工程实验室的大力协助, 在此表示衷心的感谢。

## 参考文献

- [1] 李春雨. 我国火电厂 SCR 烟气脱硝技术研究及应用综述[J]. 能源环境保护, 2015, 29(5): 8-12.
- [2] 杨泽伦. SCR 烟气脱硝工程设计原则与关键设计技术[J]. 中国电力, 2015, 48(4): 27-31.
- [3] 杨延龙. 火电厂氮氧化物减排及 SCR 烟气脱硝技术浅析[J]. 能源环境保护, 2017, 31(2): 31-35, 39.
- [4] 时光, 张杨, 裴煜坤, 等. 某 2×600MW 机组“W”火焰锅炉氮氧化物超低排放改造方案分析[J]. 发电技术, 2017, 38(3): 6-9.
- [5] 宋华伟, 李允超, 李凯. 1000 MW 超超临界燃煤锅炉低 NO<sub>x</sub> 燃烧优化试验研究[J]. 发电技术, 2017, 38(4): 23-28.
- [6] 段传和, 夏怀祥. 燃煤电站 SCR 烟气脱硝工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [7] 郭楠. SCR 烟气脱硝系统运行技术规范研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [8] 赵乾. SCR 烟气脱硝系统模拟优化及喷氨量最优控制[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [9] 周昊. 大型电站锅炉氮氧化物控制和燃烧优化中若干关键性问题的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [10] GBT 16157—1996. 固定污染源排气中颗粒物和气态污染物采样方法[S]. 1996.
- [11] 董玉亮, 袁家海, 马丽荣. 面向灵活性发电的燃煤机组大气排放特性分析[J]. 发电技术, 2018, 39(5): 425-432.
- [12] 何建乐. 某 200MW 循环流化床锅炉 NO<sub>x</sub> 排放试验研究[J]. 发电与空调, 2017, 38(05): 22-25, 15.
- [13] 唐树芳, 唐郭安, 喻小伟, 等. 六角切圆锅炉改造后 NO<sub>x</sub> 排放特性研究[J]. 发电技术, 2018, 39(6): 533-536.
- [14] 王丰吉, 王东, 冯前伟. 超低排放形势下 CFB 锅炉低氮燃烧和 SNCR 联合脱硝提效研究[J]. 发电与空调, 2017, 38(5): 6-10.
- [15] 马彦斌, 唐郭安, 陈广伟, 等. 1000 MW 电站锅炉 SCR 喷氨优化试验分析[J]. 发电与空调, 2017, 38(4): 13-17.

收稿日期: 2018-10-31.

作者简介:



邹堃

邹堃(1963), 男, 工程师, 研究方向为电能质量控制、电厂新技术应用及新能源发电技术, zouk@sdjpc.com;

王丹秋(1975), 男, 工程师, 研究方向为气固两相流测控新技术, gon@188.com.

(责任编辑 杨阳)