

# 660MW燃煤机组脱硝系统灵活性改造与应用

杨兆兵<sup>1</sup> 杨军<sup>\*1</sup> 田爱军<sup>1</sup> 刘刚<sup>1</sup> 杨明宗<sup>1</sup> 兰亚军<sup>1</sup> 帕拉沙提<sup>1</sup> 赵守宝<sup>2</sup> 孔令超<sup>2</sup>

1. 华电新疆五彩湾北一发电有限公司; 2. 山东创宇环保科技有限公司

**摘要:** 采用SCR法工艺脱硝的火力发电厂在确保烟气排放达标的同时还要加强脱硝系统运行的可靠性、连续性和经济性。对喷氨量的限制, 将直接到脱硝的效果, 危害NO<sub>x</sub>和逃逸氨的达标排放量, 并会危害到催化的寿命, 进而危害整个的脱硝工作的可靠性和经济效益。

**关键词:** SCR; 脱硝优化; 氨逃逸; 分区同步测量系统

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2022.15.064

## 引言

为积极贯彻落实我国“碳中和、碳达峰”的战略目标、国家能源局《关于开展全国煤电机组改造升级的通知》(发改运行[2021]1519号), 进一步增强新能源消纳能力, 加快推进新疆维吾尔自治区电力低碳、洁净、绿色转换, 有效支撑新能源的高比例吸引到和高效发展, 自治区能源局将逐步完善基于火力发电灵活性改造与提升洁净燃料吸收到的协同发展体制, 调整优化全区以火力发电为主的用电发展架构, 给进行灵活性改造的公司根据改造后新增的调峰运行空间按一定比率合理分配洁净燃料装机容量, 并利用洁净能源发电公司补偿改造成本、给予合理利润。

随着国内环保排放标准的不断提高, 燃煤机组脱硝出口NO<sub>x</sub>浓度控制指标越来越低, SCR脱硝效率要求越来越高, 部分项目的实际脱硝效率已经接近其理论极限, 超排概率大幅增加。火电机组在调峰运行的AGC模式下, 温度随着压力变化很大, 火电厂内通常使用了过量喷氨以提高NO<sub>x</sub>的达标排放, 因而也就出现了一些催化剂在自然本体的表面积灰、阻塞严重等问题, 从而造成脱硝效果降低, 催化剂寿命缩短, 真空预器加热端阻塞严重等各种现象。

喷氨区域的优化控制器, 是指进行实时的监控从SCR装置中出口的NO<sub>x</sub>的含量情况, 从而进行控制在相应喷氨区域的喷氨量。是一个针对区域NO<sub>x</sub>含量情况, 实现在相应区域精确喷氨的管理方法。喷氨分区实时调整控制系统, 是对传统人工喷氨分区优化调控项目的重要技术提升。由于该工程的实施, 有效降低了出口NO<sub>x</sub>和

环保NO<sub>x</sub>在时间上波动和在空间上的误差, 有效降低喷氨量和氨逃逸。

## 一、设备概况

华电新疆五彩湾北一发电有限公司锅炉, 是由东方电气集团东方锅炉股份有限公司设研制、生产的DG1978.88/28.25/605/603-II12系列超超临界、一次中间再加热、单炉膛出口、前后壁对冲燃煤形式、固态排渣、均匀通气、全钢构、全挂吊构造的π式变压运行直流锅炉。脱硝设备一般是使用化学选择性催化还原法(SCR), 选择尿素用作还原剂; 在NO<sub>x</sub>入口浓度为250mg/Nm<sup>3</sup>时(标态, 干基, 6%O<sub>2</sub>)、设计煤种和校核煤种、锅炉最高状态(BMCR)、处置100%空气量的情况下, 脱硝效果大于85%, 每台炉设置1台反应器, 催化剂数按“2+1”布置。在机组负荷升降状况下, 脱硝设备中出口NO<sub>x</sub>的总含量都不得大于37.5mg/Nm<sup>3</sup>(标态, 6%O<sub>2</sub>), 允许连续投运最低温度为300℃, 最高温度420℃。

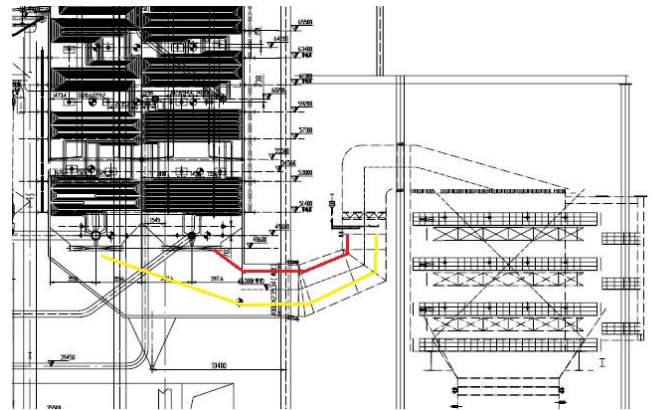


图1 脱硝装置示意图

### (一) 深度调峰各工况下烟气温度

试验期间264MW负荷下SCR出口烟温均值为336.5℃, 最低点位置烟温为326.5℃; 132MW负荷下SCR出口烟温均值为324.4℃, 最低点位置烟温为318.6℃, 20%ECR工况下最低点温度均超过最低连续运行温度300℃, SCR入口烟气温度分布见表1、表3。

表1 264MW负荷下SCR入口实测烟温分布(℃) (左→右)

深度	1	2	3	4	5	6	7	8
1	330.5	330.1	322.5	328.2	327.5	330.1	330.8	331.1
2	338.7	322.5	330.5	322.5	335.4	321.3	332.2	331.0
3	320.0	319.7	317.9	320.5	338.7	320.5	333.1	330.8
4	335.5	325.5	323.3	326.6	334.8	324.0	330.2	327.3

表2 264MW负荷下SCR出口实测烟温分布(°C) (左→右)

深度	1	2	3	4	5	6	7	8
1	326.5	333.4	334.8	334.4	341.8	339.3	338.8	339.1
2	328.0	329.5	337.2	337.0	344.0	336.5	340.2	339.0
3	330.0	334.0	336.9	335.5	341.1	335.7	341.1	338.8
4	332.2	334.1	335.5	336.8	340.6	337.7	339.8	337.7

表3 132MW负荷下SCR入口实测烟温分布(°C) (左→右)

深度	1	2	3	4	5	6	7	8
1	313.4	322.4	322.3	294.7	283.5	304.5	323.0	324.5
2	315.5	313.8	316.0	309.0	313.4	314.0	327.4	321.2
3	318.0	314.7	316.7	314.4	309.0	311.2	320.8	326.0
4	319.0	315.6	313.8	311.0	310.9	316.0	319.5	324.1

表4 132MW负荷下SCR出口实测烟温分布(°C) (左→右)

深度	1	2	3	4	5	6	7	8
1	325.1	324.6	320.0	318.6	323.4	326.3	329.2	327.2
2	328.5	321.8	320.7	321.4	322.3	326.6	328.2	329.3
3	327.5	323.7	322.3	321.9	323.7	325.1	324.6	327.3
4	324.5	324.6	321.3	319.6	324.5	324.8	325.4	327.1

(二) 脱硝烟气成分分析

锅炉折算后SCR入口NO<sub>x</sub>生成量随负荷降低升高, 660MW负荷下折算后SCR入口NO<sub>x</sub>含量为133.6mg/m<sup>3</sup>, 132MW工况下折算后SCR入口NO<sub>x</sub>含量到达388.5mg/m<sup>3</sup>, 远超设计值250mg/m<sup>3</sup>, 脱硝效率为96.69%, 氨逃逸9.48ppm。

表5 机组各负荷工况下NO<sub>x</sub>生成量

项目(°C)	单位	660MW	330MW	试验 264MW	试验 198MW	试验 132MW
SCR入口实测烟温	°C	-	-	336.5	-	324.4
运行氧量	%	1.9	4.1	5.2	8.2	10.2
SCR入口折算后NO <sub>x</sub>	mg/m <sup>3</sup>	133.6	122.6	183.6	247.5	388.5
SCR出口折算后NO <sub>x</sub>	mg/m <sup>3</sup>	-	-	36.78	20.46	12.86
氨逃逸率	ppm	-	-	2.00	2.42	9.48
脱硝效率	%	62.57	59.22	79.97	91.03	96.69

二、存在问题

在空预热器烟气环境下, SO<sub>3</sub>和NH<sub>3</sub>会反应生成硫酸铵和硫酸氢铵, 硫酸铵在空预器区域通常呈一种固体颗粒状, 并不会造成空气预热器的腐蚀堵塞, 造成空预器腐蚀堵塞的主要是硫酸氢铵。

对燃煤锅炉, 硫酸氢氨在146°C~207°C的工作温度区间内呈液态, 因此极易对空气中的飞灰造成空预器的阻塞现象, 其工作温度范围一般在空预热器的中间。液态硫酸氢铵的产生与烟气中的SO<sub>3</sub>、NH<sub>3</sub>、排烟温度、空气预热器环境温度、空气预热器本体(分区、冷端长度、换热器材质、蓄热元件形式)等相关。一般来说, NH<sub>3</sub>浓度和SO<sub>3</sub>含量越低、空气预热器分区越小、冷端距离越长、换热元件形状为闭式、蓄热元件冷侧壁温越高时, 空气预热器堵塞的概率就越小。

表6 影响空预器ABS堵塞的因素

影响因素	数值区间	预防措施
SO <sub>3</sub>	<2-3ppm >2-3ppm	堵塞可能性小 与煤中硫份大、催化剂活性高相关。
NH <sub>3</sub>	<1-2ppm >1-2ppm	NH <sub>3</sub> 分布均匀, 堵塞可能性小 进行燃烧优化; 喷氨优化; 检测催化剂活性是否降低, 必要时更换催化剂
换热元件分区	3段 2段	层间区域烟气扰动容易堵塞 不容易堵塞(沉积区控制在冷端, 有利于吹扫)
换热元件材质	搪搪瓷材料	较低的沉积率和腐蚀率
蓄热元件冷端壁温	/	冷端综合壁温越高, 发生ABS堵塞的风险越小。

空预器ABS堵塞过程有化学、物理影响因素, 理论上空预器ABS堵塞不可完全避免, 目前主流的解决方案主要通过控制烟气中氨逃逸、SO<sub>3</sub>含量, 优化设计空预器蓄热元件结构、提升冷端蓄热元件壁温等多种技术措施一定程度缓解堵塞的速度、程度。

目前北一电厂锅炉蓄热元件为两段式、冷端为度搪瓷材料、冷端综合温度可200°C以上。

三、改造必要性

132MW工况下折算后SCR入口NO<sub>x</sub>含量到达388.5mg/m<sup>3</sup>, 远超设计值250mg/m<sup>3</sup>, 脱硝效率为96.69%, 氨逃逸9.48ppm。

2020年3月进行了机组性能考核试验空预器阻力为1543.25Pa, 2020年11月份空预器570MW负荷工况下空预器阻力为2.94kPa, 空预器运行阻力远高于空预器阻力设计值1.43kPa, 考虑到未来低负荷运行的新常态, 空

预器阻力还会进一步增大。空预器ABS堵塞带来的主要问题有：

(1) 空预器阻塞也会导致系统电阻增大，引风机等装置耗电量增大；

(2) 空预器堵塞本身会造成换热效果变差，同时长时吹灰一方面会造成蓄热元件损毁，加剧堵塞的同时会进一步恶化换热效率，排烟温度升高增加煤耗；

(3) 空预器堵塞也会造成尾部引风不足，从而降低了机组的负载性能；

(4) 空预器堵塞会引起锅炉欠氧燃烧，降低煤粉燃尽性；

(5) 空预器堵塞可能炉膛负压的波动影响锅炉燃烧稳定性；

(6) 空预器阻塞情况较为严重时，电厂必须不定期地对空预器实施在线清洗，增加检修工作量，在清洗期间因没有及时对换热片进行烘干也会造成换热片腐蚀，影响换热效果。

#### 四、改造方案

##### (一) 改造目标

(1) 在催化水平达到标准的条件下，烟道脱硝出口 $\text{NO}_x \leq 50\text{mg}/\text{Nm}^3$ （稳定指数）； $\text{NO}_x$ 的动态波动区间为 $\leq 10\text{mg}/\text{Nm}^3$ （CCS及AGC变负荷动态指数）；

(2) 当改造后的自动系统投运时，任一烟道氨逃逸 $\leq 3\text{ppm}$ ；

(3) 稳态工况下，出口 $\text{NO}_x$ 空间分布不均匀度长期不高于20%。

(4) 精准喷氨控制投运后，相对投运前，同工况下喷氨量节约 $\geq 5\%$ 。

##### (二) 工艺设计

##### (1) $\text{NO}_x$ 分区测量系统

SCR出口取样装置应尽可能布置在靠近SCR出口位置，加强出口各个分区 $\text{NO}_x$ 浓度与喷氨格栅对应性，降低SCR和空预器之间因烟道弯头扰流造成的分区不对应性。采用流场模拟技术，对烟道口实施合理分组，在各区设置“稀释法”采样设备（15个分区），将烟雾同步抽取后经过样气管道传送到烟雾解析仪。调整每一路样气的输送距离和流速，使各路样气达到分析仪之间有准确的时间差，并根据设计控制器程序逻辑来控制电磁阀开断，并由此获得相同时刻、相同烟气口界面的含量分布数据组。

##### (2) $\text{NO}_x$ 快速测量系统

$\text{NO}_x$ 快速测量系统主要由测量探头和分析控制仪两部分组成。测量探头主要包括：高温反吹气容器、多级反吹管，双级过滤器、量程可调测量腔、高效反射光学系统、光学分析仪恒温器、耐高温射流器等。检测的光探针直接插入烟道，与探测器中的光源所产生的紫外线相互耦合后通过光缆，再经由光缆传送到位于通风机内的有量程的气房中，然后再通过在气房末端镀铝的紫外熔融石英反射镜，反射到装有光缆接头的分光仪内，在其内部进行光栅分光，再通过CCD将分光后的光信息转化为电信号，并利用差分吸收光谱技术完成分析测量。

整个系统结构更为简单、紧凑，更为重要的是省去

预处理系统避免由于抽取过程中取样烟气和烟道中原有烟气状态不一致所造成的测量误差，在实时性要求上有着更好的保障，使测量具有超快的时间响应、高保真、极大的解决脱硝系统测量严重滞后的难题。

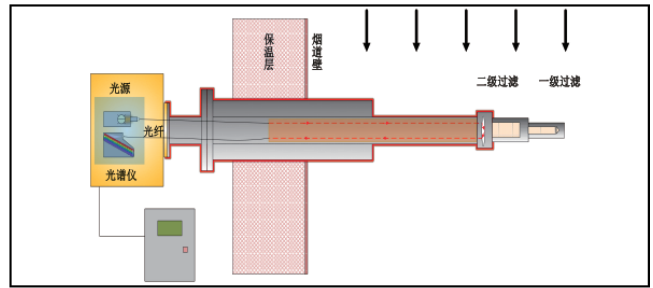


图2  $\text{NO}_x$ 快速测量示意图

##### (3) 智能喷氨格栅均衡控制器

通过均衡控制算法，可以调整和实时监控不同区域的喷氨比例，进而达到出口 $\text{NO}_x$ 空间中的分布平衡。具体方法如下：

A、将原在喷氨格栅处的手动喷氨格栅进行了智能化改造，并采用内部流场仿真技术对喷氨格栅进行了网格法分割，将烟气入口分割成十五个网格，分别由新改装的十五个手动调节阀进行管理，并与SCR出口新增的15个 $\text{NO}_x$ 分区测点对接；

B、分区阀门，主要调控手段是对氨空混合器后的混合还原药物加以分配调整，使进入喷氨格栅各个区的还原药物含量按相对比例关系变化，但并不对总喷氨量加以调整，总喷氨量调整由喷氨总管上的流动调节阀完成；

C、分区控制的主要任务，是使电热调整机的各个 $\text{NO}_x$ 分区测点水平达到相同程度，即调平作用；

D、在测试过程，会采用实验方法判断各种调节阀的阀位-流量- $\text{NO}_x$ 浓度的相对值，作为阀门控制参数的依据；

E、分区调节阀在自动控制时，需要依据各个 $\text{NO}_x$ 区域浓度的历史变化趋势、及相应情况来控制，相应较大的区域相应的调控阀则按照计算往高阀位操作，而相应较小的区域相应的调控阀则按照计算往低阀位操作；

F、分区调节阀在调整时，重要的防护技术参数是SCR区段稀释风流速，因此整个系统上全部的区间调节阀会保持在适当开度上，以避免因SCR区稀释风流速过低而造成的SCR区脱离事故产生。同样，还会根据各个区间的氨气流量值以及相应出口 $\text{NO}_x$ 量值，对脱硝层的部分活力作出检测，并在部分催化剂完全失活状况下，不会发生分区喷氨严重过度的状况。

##### (4) 总量控制系统

一方面，通过采用入口 $\text{NO}_x$ 的软检测方法，预测了进口 $\text{NO}_x$ ，并成为喷氨前馈的关键数据，加入到喷氨总量的闭环监控中，从而克服了对进口 $\text{NO}_x$ 检测滞后的困难。另外，可以通过测试得到在各种压力下的SCR反应器的热传递函数，从而有针对性设计先进的调节算法模型。该系统通过逐步积累试验所得的信息，并进行机器学习，从而逐渐满足与蓄热燃烧器组合、能源不同时的

情况快速进行调试，（可以通过统计趋势及时发现SCR设备的阻塞和磨损失效等主要问题，并及时调整运行模式）并逐步降低现场检测的频次，最后完成对SCR系统的精确管理。改善控制系统对脱硝系统具有时滞性的问题，提高整个脱硝系统的控制效果。

### （5）喷氨格栅分区精准自动喷氨改造

喷氨分区管路改造以及分区电动调阀系统的安装主体，是为喷氨格栅区域的控制安装主体，在本工程中主要表现为喷氨自动化阀门控制系统，本工程中为通风管分为十五个区域；通过改变喷氨格栅的闸门控制形式，将原有自动闸门控制系统变更为气动阀门控制系统，从而达到喷氨格栅的分区和控制。

## 五、技术论证

SCR精准喷氨脱硝工艺原理：采用空预器的烟气氨逃逸控制，从源头上减少硫酸氢铵产数，从而解决空预器ABS堵塞现象。

精准喷氨脱硝解决的措施主要是采用喷氨分区管理、多点NO<sub>x</sub>监测、喷氨量的先进管理等技术手段，开发的脱硝一体化改造方案。产品包含三种大部分：先进测试设备、先进控制器和执行机构。测量信息可以直接上传给DCS系统，而履行机制，还有新加入的分区和控制功能，也直接受到了DCS的指令。采用控制算法策略的优化系统可以使用OPC和MODBUS与DCS通信。

先进计量技术包括：NO<sub>x</sub>分区计量技术。

先进控制器包含：喷氨总量先进控制器、喷氨格栅均衡分区精准先进喷氨控制器。新增喷氨分区控制现场实施：喷氨分区管道改造与分区自动调阀的安装（烟道加装15个气动调门）。

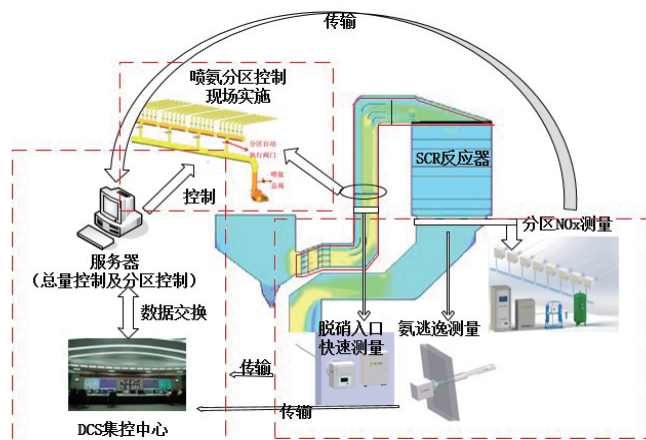


图3 精准喷氨脱硝改造示意图

（1）SCR脱硝设备将原有的氨注射系统布置在进口烟道上，所有氨注射系统的喷头均布置在进口烟道的散射截面上，在连接喷头的各根母管上都设置有具备调整能力的手动阀门，当对SCR脱硝设备实施性能调试时，可以调节自动阀调整所喷射烟雾中的氨量，使喷射的氨量和该喷头在对应范围内烟雾中的NO<sub>x</sub>含量相符。系统设计合理、运转条件良好，所以本方案仅在原喷氨管道上加以分区改造，并添加了适当的检测设备和管理，根据不同机组负荷以及对NO<sub>x</sub>含量的检测反馈，通过调节

氨气分配，以缓解脱硝入口内部流场和NO<sub>x</sub>含量的偏差问题。

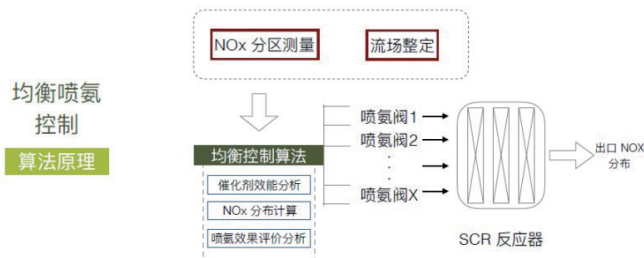


图4 喷氨分区优化控制逻辑示意图

建立锅炉燃烧模型，采用数据预测方式，提高脱硝系统入口NO<sub>x</sub>的预测精度。不单设精准喷氨智能预测分析站，相应控制算法策略均在DCS实现。采用先进控制算法进行NO<sub>x</sub>的检测，克服由于检测仪器落后造成无法准确喷氨的困难。从而改善脱硝系统的控制质量，更适合于高效脱硝。

本系统改造方案优点：

- （1）投资成本相对较低，使用简单，施工工期较短。
- （2）喷氨量调节反应速度快，实现精准喷氨，可适应能适应锅炉负荷急剧变化的工况。

## 六、喷氨优化项目改造后效果展示及结论

本项目自2022年5月25日喷氨优化项目改造完成。喷氨自动投入率≥98%；喷氨自动投入运行时，总排口NO<sub>x</sub>浓度的小时均值>35mg/Nm<sup>3</sup>；正常运行中，自动调节的过渡时间≤10分钟，未出现等幅震荡或发散性震荡；总排口NO<sub>x</sub>浓度的变化幅度≤±10mg/Nm<sup>3</sup>；脱硝反应器的出口NO<sub>x</sub>浓度（平均值）之间的偏差≤10mg/Nm<sup>3</sup>；脱硝反应器出口NO<sub>x</sub>浓度CV值<20%；脱硝反应器出口氨逃逸（平均值）≤3ppm。

对本次SCR喷氨系统进行优化改造后，通过各项数据分析计算得出本次机组经过喷氨优化后氨耗量每小时大约可以节省20%左右。同时这样可以有效的延长空预器的运行周期；延长空预器蓄热元件使用寿命；节省因空预器堵塞可能引起的引风机电耗上升和对电除尘极板腐蚀等一系列后果产生的间接经济损失。为祖国打赢“绿水青山保卫战”贡献一份力量！

## 参考文献

- [1] 《自治区发展改革委关于推进我区煤电机组改造工作的通知》
- [2] 郭江源，张志勇，郝素华，火电厂机组负荷调整对SCR脱硝效果的影响分析[J]. 环境保护科学，2020，3
- [3] 高畅，金保昇，张勇，等.非均匀入口条件下SCR脱硝系统精准喷氨策略[J]. 东南大学学报（自然科学版），2017，47（2）：271-276.
- [4] 郝正，胡小夫，王云，等.火电机组SCR脱硝系统精准喷氨优化研究[J]. 华电技术，2019，41（10）：5.

通讯作者：杨军