

DOI: 10.19666/j.rlfed.202404076

# 高性能 SCR 喷氨混合技术研究与应用

严晓勇<sup>1</sup>, 谢新华<sup>2</sup>, 周健<sup>2</sup>, 李明磊<sup>2</sup>

(1.国能(福州)热电有限公司, 福建 福清 350309;  
2.苏州西热节能环保技术有限公司, 江苏 苏州 215153)

**[摘要]** 随着火电机组利用小时数不断下降, 调峰日益频繁, 现有喷氨混合技术已不能满足燃煤电厂新常态的需求, 超低排放对 SCR 反应器入口  $\text{NH}_3/\text{NO}_x$  摩尔比分布均匀性提出了更高的要求。通过 CFD 数值模拟和物理模型试验, 对格栅型 AIG 和静态混合器进行了优化研究, 提出了保证喷氨格栅布氨均匀、调节灵活、抗堵灰的设计方法和防堵型 AIG 喷嘴, 并研发出了一种三角形大范围烟气自混合装置, 提高了 SCR 反应器入口  $\text{NO}_x$  质量浓度场的均匀性, 从根源上提升了 SCR 脱硝装置的负荷适应性。某  $2 \times 600$  MW 机组的 SCR 脱硝装置采用本技术改造后, 高中低负荷下 SCR 反应器出口  $\text{NO}_x$  分布相对标准偏差达到了 8%~19%, 高负荷下氨逃逸下降了 51%。

**[关键词]** 燃煤电厂; 脱硝; 喷氨格栅; 静态混合器; 负荷适应性

**[引用本文格式]** 严晓勇, 谢新华, 周健, 等. 高性能 SCR 喷氨混合技术研究与应用[J]. 热力发电, 2024, 53(7): 129-134.  
YAN Xiaoyong, XIE Xinhua, ZHOU Jian, et al. Research and application of high performance SCR ammonia injection and mixing technology[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(7): 129-134.

## Research and application of high performance SCR ammonia injection and mixing technology

YAN Xiaoyong<sup>1</sup>, XIE Xinhua<sup>2</sup>, ZHOU Jian<sup>2</sup>, LI Minglei<sup>2</sup>

(1.CHN Energy (Fuzhou) Thermal Power Ltd., Fuqing 350309, China;  
2.Suzhou TPRI Energy & Environment Technology Co., Ltd., Suzhou 215153, China)

**Abstract:** The utilization hours of thermal power units continue to decline, and peak shavings become more frequent. Under this background, the existing ammonia injection mixing technology can no longer meet the new normal needs of coal-fired power plants, and ultra-low emissions put forward higher requirements for uniformity of the  $\text{NH}_3/\text{NO}_x$  molar ratio distribution at the SCR reactor inlet. The grid-type ammonia injection grid (AIG) and static mixer are optimized through CFD numerical simulation and physical model test. The design method and an anti-blocking nozzle are proposed to ensure the uniformity of ammonia distribution, adjustment flexibility, and anti-blocking performance of the ammonia injection grid. Moreover, a triangular large-scale flue gas self-mixing device is developed to improve the uniformity of the  $\text{NO}_x$  concentration field at inlet of the SCR reactor and enhance the load adaptability of the SCR denitrification device from the root. The relative standard deviation of  $\text{NO}_x$  distribution at the SCR outlet of a 600 MW unit under high, medium and low loads reached 8%~19% by using this technology, and the ammonia escape at full load decreased by 51%.

**Key words:** coal-fired power plant; denitrification; ammonia injection grid; static mixer; load adaptability

由于  $\text{NO}_x$  排放标准日趋严格, 燃煤电厂普遍安装了 SCR 烟气脱硝装置。在原有 SCR 脱硝系统的基础上通过提高脱硝效率实现  $\text{NO}_x$  超低排放时, 脱硝效率通常由原来的 60%~80% 提高到 85%~95%<sup>[1]</sup>。

SCR 反应器在高效率下运行时, 不仅需要增加催化剂用量, 同时对  $\text{NH}_3/\text{NO}_x$  混合均匀性要求也大幅提高。脱硝效率超过 85% 时, 通过增加催化剂体积提升 SCR 脱硝效率实现  $\text{NO}_x$  超低排放十分不经济<sup>[2]</sup>。

收稿日期: 2024-04-17

第一作者简介: 严晓勇 (1973), 男, 高级工程师, 主要从事锅炉、环保技术管理和研究, jyfpc@163.com。

通信作者简介: 谢新华 (1986), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为 SCR 烟气脱硝及高性能混流技术, xiexinhua\_0214@163.com。

增加催化剂还会造成  $\text{SO}_2/\text{SO}_3$  转化率升高, 加剧空气预热器(空预器)硫酸氢铵堵塞的风险。近年来新能源装机容量快速发展, 火电机组利用小时数不断下降, 调峰日益频繁, SCR 脱硝装置变工况适应性问题凸显。在燃煤电厂新常态下, 传统的喷氨格栅(AIG)技术工况适应性不足, 喷嘴容易堵塞, 造成 SCR 氨喷射不均匀, 氨逃逸率增加, 导致下游空预器堵塞严重<sup>[3]</sup>。因此, 亟需研发高性能 SCR 喷氨混合技术, 提升变工况适应性, 解决喷嘴堵塞问题, 减小  $\text{NH}_3/\text{NO}_x$  摩尔比分布偏差, 降低局部氨逃逸峰值, 缓解下游设备硫酸氢铵沾污堵塞风险。

孙克勤等<sup>[4]</sup>指出  $\text{NH}_3/\text{NO}_x$  的混合效果是 SCR 装置设计和运行中的重点和难点, 当装置设计脱硝效率较高时, 其难度更大。在工程设计时, 有限的可用空间和确定的烟道结构进一步增加了研发难度。韩发年等<sup>[5]</sup>、徐波等<sup>[3]</sup>总结分析了国内外主要的喷氨混合技术, 并指出现有喷氨格栅及分区控制喷氨格栅技术已不能满足燃煤电厂新常态的需求, 未来应研发高效低阻的静态混合器, 以降低 SCR 脱硝装置的运行管理成本, 提高操作弹性。宋玉宝等<sup>[6]</sup>通过 SCR 脱硝不均匀反应宏观模型研究发现, 超低排放下 SCR 反应器入口烟气参数分布偏差会降低催化性能 8%~10%。影响脱硝性能, 尤其是局部氨逃逸的主要因素是  $\text{NH}_3/\text{NO}_x$  摩尔比分布不均和催化剂活性局部劣化。黄庆华等<sup>[7]</sup>通过 CFD 数值模拟研究发现, 将直圆管 AIG 喷嘴改成四周出气可以提高催化剂入口氨浓度分布均匀性。周英贵等<sup>[8]</sup>采用 CFD 数值模拟方法, 对比了涡流混合板和多喷嘴格栅的喷氨混合效果, 揭示了非均匀入口条件下多喷嘴格栅的优越性。周健等<sup>[9]</sup>采用双向分区多喷嘴 AIG 改造, 解决了某电厂 SCR 反应器出口局部氨逃逸浓度大, 空预器硫酸氢铵堵塞严重的问题。许剑等<sup>[10]</sup>通过加装氨空混合器, 优化母管联箱尺寸, 采用流场分区混合对机组 SCR 脱硝系统进行了改造, 降低了氨耗量。

综上所述, 现有 SCR 喷氨混合技术已不能满足燃煤电厂新常态的需求, 导致国内燃煤发电机组普遍存在比较严重的空气预热器等下游设备硫酸氢铵沾污堵塞问题。高校和科研院所采用 CFD 数值模拟方法, 针对某个具体案例进行了分析和改进, 取得了不错的效果。理论和实践证明采用双向分区 AIG 和静态混合器可以获得更高的  $\text{NH}_3/\text{NO}_x$  混合效率。但如何进一步对格栅型 AIG 和静态混合器进

行优化, 解决喷嘴堵塞问题, 减小  $\text{NH}_3/\text{NO}_x$  摩尔比分布偏差, 提升 SCR 脱硝装置变工况适应性, 仍需继续进行研究。鉴于此, 本文采用 CFD 数值模拟和物理模型试验, 研发了一套高性能 SCR 喷氨混合技术, 并在工程应用取得了良好的改造效果, 促进了燃煤电厂新常态下的 SCR 喷氨混合技术发展。

## 1 研究对象与方法

### 1.1 研究对象

本文以最常见的  $\Pi$  型锅炉 SCR 脱硝装置为研究对象, 典型 SCR 脱硝装置三维模型如图 1 所示。省煤器出口的烟气经过水平烟道进入 SCR 反应器入口上升烟道, 与喷氨格栅喷出的  $\text{NH}_3$  混合。混合气体经过顶部 2 个  $90^\circ$  转向, 通过整流格栅后进入 SCR 反应器。在 SCR 催化剂的作用下,  $\text{NH}_3$  与烟气中的  $\text{NO}_x$  在  $280\sim 420^\circ\text{C}$  范围内反应, 生成无污染的  $\text{N}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ 。

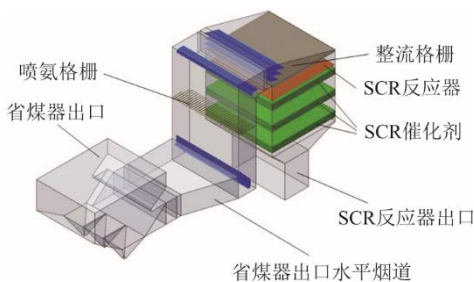


图 1 典型 SCR 脱硝装置三维模型  
Fig.1 Three-dimensional model of typical SCR-de $\text{NO}_x$  equipment

### 1.2 试验方法

本文采用 CFD 数值模拟试验和物理模型试验相结合的研究方法。数值模拟试验利用商用 CFD 软件, 采用可实现的  $\kappa\text{-}\varepsilon$  模型, 模拟分析喷氨格栅和 SCR 脱硝装置内的气流运动轨迹和混合效果, 再现 SCR 脱硝装置内的烟气流场, 比较各种喷氨混合技术方案。

物理模型试验基于相似理论开展, 试验系统包括风迹显示器、SCR 物理模型和引风机等。本文的 SCR 脱硝装置冷态物理模型按照 1:15 的比例制作, 物理模型试验系统如图 2 所示。试验中, 逐步增大引风机流量, 使 SCR 物理模型内的流场进入第二自模化区(雷诺数大于 120000, 欧拉数约为 0.66), 上升烟道内的气流速度达到设计值, 开始正式试验。风迹显示器放置在 SCR 脱硝装置物理模型入口左侧, 通过模型上的窗口观察气流经过静态混合器时的流线。



图 2 SCR 脱硝装置物理模型试验台

Fig.2 Physical model test bench of SCR-deNO<sub>x</sub> equipment

## 2 结果与分析

### 2.1 AIG 支管流量均匀性

格栅型 AIG 通过设置双向分区提升喷氨格栅的调节灵活性(图 3)。每个分区由一根格栅支管与母管相连。支管上设置流量调节阀,用于调整各分区的还原剂流量,去匹配 SCR 反应器入口 NO<sub>x</sub> 不均匀的质量浓度场和速度场。这种类型的喷氨格栅结构简单,存在明显的联箱效应。许剑等<sup>[10]</sup>发现,如果母管直径偏小,会造成近端支管氨流量偏低,若该支管对应烟道内该区域 NO<sub>x</sub> 质量浓度过高,且调小其余喷氨支管阀门开度后氨流量仍无法满足,则只能增大总喷氨量。

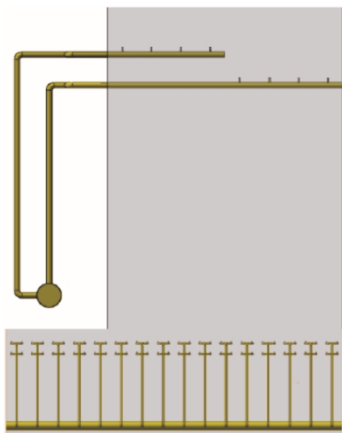


图 3 双向分区格栅型 AIG

Fig.3 The bidirectional partition grid type AIG

本文以一根内径 400 mm,长 14 m 的 AIG 母管为例,采用 CFD 数值模拟方法研究了内径和数量对支管流量均匀性的影响。母管入口流速 8 m/s,静压 4 000 Pa,温度 25 °C。支管内径 40~100 mm,支管数量 10~40 根。模拟结果见表 1。由表 1 可见,随着支管内径和数量的增加,支管间的流量偏差逐步增大。

AIG 支管流量相对标准偏差与支管/母管流通截面比的关系曲线如图 4 所示。由图 4 可知,随着

支管总流通截面的增大,支管流量相对标准偏差快速增加。为保证各支管的流量相对标准偏差<5%,支管/母管流通截面比宜<1.2。

表 1 AIG 支管流量相对标准偏差 单位: %  
Tab.1 Relative standard deviation of flow in AIG branch pipes

管径/mm	数量/根			
	10	20	30	40
40	0.39	0.36	0.49	0.60
60	0.29	1.03	2.05	2.89
80	0.98	2.50	5.03	8.14
100	1.54	5.54	11.06	16.61

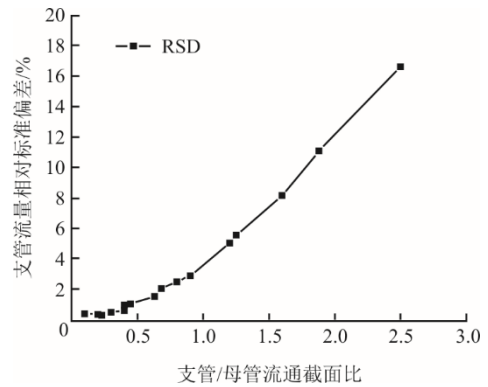


图 4 AIG 支管流量偏差与流通截面关系曲线

Fig.4 Relationship between the flow deviation and flow cross-section in AIG branch pipes

### 2.2 AIG 喷嘴流量均匀性

AIG 喷嘴安装在烟道内的喷氨管上。进行 SCR 喷氨混合装置设计时,均忽略了联箱效应,假设各分区内的喷氨流量相同<sup>[7-10]</sup>。本文以 1 根内径 60 mm 的喷氨管为例,采用 CFD 数值模拟方法研究了喷嘴内径和数量对其流量偏差的影响。喷氨管入口流速 8 m/s,静压 2 000 Pa,温度 25 °C。喷嘴内径 12~42 mm,数量 4~10 个。模拟结果见表 2。由表 2 可见,随着喷嘴内径和数量的增加,喷嘴间的流量偏差逐步增大。

表 2 AIG 喷嘴流量相对标准偏差 单位: %  
Tab.2 Relative standard deviation of flow in AIG nozzles

内径/mm	数量/个			
	4	6	8	10
12	2.78	2.76	2.88	2.47
18	1.60	3.07	4.37	6.98
24	4.38	8.77	15.48	22.81
30	11.00	22.24	34.37	48.33
36	23.91	42.36	60.21	73.23
42	41.12	63.37	80.88	93.25

AIG 喷嘴流量相对标准偏差与喷嘴/喷氨管流通截面比的关系曲线如图 5 所示。由图 5 可知,随

着喷嘴总流通截面的增大, 喷嘴流量相对标准偏差急剧增加。为保证各喷嘴的流量相对标准偏差 $<5\%$ , 喷嘴/喷氨管流通截面比宜 $\leq 0.7$ 。

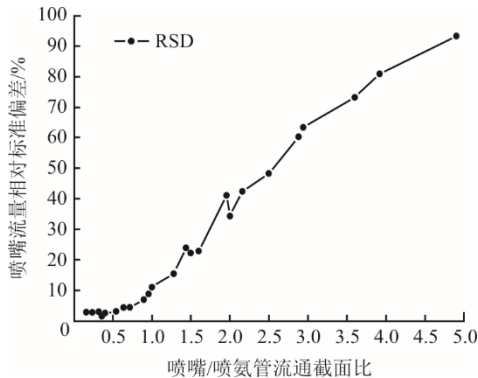


图 5 AIG 喷嘴流量偏差与流通截面关系曲线

Fig.5 Relationship between the flow deviation and flow cross-section in AIG nozzles

### 2.3 AIG 喷嘴布置方式

喷氨格栅的调节灵活性不仅受分区数量影响, 研究发现 AIG 喷嘴的布置方式也对格栅的调节灵活性有很大影响。格栅型 AIG 的喷嘴布置方式通常有 V 形布置和垂直布置 2 种。某 330 MW 机组, 单侧 SCR 反应器在垂直烟道的宽度方向上布置 7 组喷氨管, 4 根喷氨管共用一个联箱。原喷氨格栅采用长短 2 种类型的喷氨管在垂直烟道深度方向上形成了 2 个分区, 具体如图 6 所示。

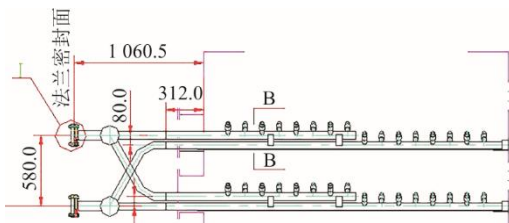


图 6 V 形布置 AIG 喷嘴 (mm)

Fig.6 The V-shaped arrangement AIG nozzles (mm)

CFD 模拟结果显示, 将烟道外联箱一分为二, 使宽度方向分区增加一倍后, 平衡喷氨下顶层催化剂入口  $\text{NH}_3$  分布相对标准偏差 CV 仅从 7.5% 下降到了 6.3%。将 V 形布置喷嘴改成垂直布置时, 平衡喷氨下顶层催化剂入口  $\text{NH}_3$  分布 CV 可下降到 4.3%。研究表明, V 形布置喷嘴适合早期宽度方向上分区较少的 AIG。为增加 AIG 调节灵活性, 宜垂直布置喷嘴。

### 2.4 AIG 喷嘴防堵设计

飞灰堵塞 AIG 喷嘴的方式主要有 AIG 喷氨背风侧积灰埋没堵塞喷嘴、上方积灰坍塌堵塞喷嘴、喷嘴边缘积灰搭桥堵塞喷嘴 3 种。为了解决 AIG 喷

嘴堵塞问题, 需对这 3 种堵塞形式进行针对性设计。本课题提出的 SCR 脱硝防堵型 AIG 喷嘴 (CN 2020010074028.5) 由喷氨管、迎风面防磨角钢、喷嘴管座、喷嘴本体构成。

为减少喷氨管背风面积灰高度, 喷氨管采用不锈钢无缝钢管制作, 迎风面安装的防磨角钢的水平宽度与喷氨管外径同宽。喷嘴管座的长度大于喷氨管背风面积灰极限高度, 通常为 300~350 mm, 以防止喷氨管背风侧积灰埋没堵塞喷嘴。

为预防 AIG 上方积灰坍塌堵塞喷嘴, 喷嘴本体设计为宝塔形螺旋线喷嘴。喷嘴本体的前视图和俯视图如图 7 所示。从俯视图看, 管座中心的气流通道被喷嘴出口的宝塔形螺旋线覆盖。上方坍塌的积灰下落至宝塔形喷嘴顶端时, 被喷嘴尖端破碎, 向四周散落, 从而避免了喷嘴出口堵塞。

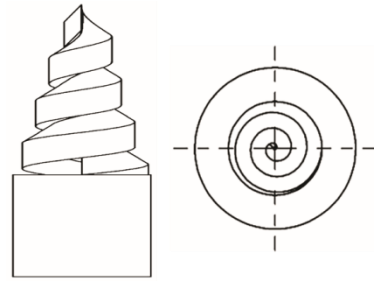


图 7 防堵型 AIG 喷嘴本体前视图和俯视图

Fig.7 Front view and top view of the anti-blocking type AIG nozzle body

为预防喷嘴边缘积灰搭桥堵塞喷嘴, 宝塔形螺旋线喷嘴的螺旋线截面设计成菱形。菱形顶角为  $45^\circ\sim 60^\circ$ , 上表面向下倾斜, 减少飞灰沉积。菱形螺旋线之间的气流通道也向下倾斜。在喷嘴出口气流的吹扫下, 可有效避免喷嘴边缘积灰现象的发生。

### 2.5 全烟道混流技术与装置

机组负荷、磨煤机组合变化和燃烧调整均会导致 SCR 反应器入口  $\text{NO}_x$  质量浓度分布发生明显改变, 催化剂入口  $\text{NH}_3/\text{NO}_x$  混合均匀性变差。燃煤电厂新常态下, 调峰日益频繁, SCR 脱硝装置变工况适应性问题的凸显。常规的 SCR 静态混合器掺混范围较小 ( $\leq 3\text{ m}$ )。当 SCR 反应器入口  $\text{NO}_x$  质量浓度分布变化较大时, 传统的喷氨混合装置保证稳定的  $\text{NH}_3/\text{NO}_x$  混合均匀性变差。

为了解决 SCR 脱硝装置的变工况适应性问题, 亟待研发新型静态混合器, 以较低的阻力实现 SCR 反应器入口 10~20 m 宽烟道全截面的烟气相互掺混。本文采用 CFD 数值模拟和物理模型试验, 研发了一种三角形大范围烟气自混合装置, 提高了 SCR

反应器入口  $\text{NO}_x$  质量浓度场和催化剂入口  $\text{NH}_3/\text{NO}_x$  摩尔比分布的均匀性。加装三角形大范围烟气自混合器前后的烟气流线如图 8 所示。由图 8 可知，常规 SCR 脱硝装置内烟气以柱塞流形式沿烟道流动，不利于烟道截面上不同位置的烟气大范围混合（图 8a）。加装三角形大范围烟气自混合装置后，烟气经过混合器后发生了大幅度偏转，从一侧向整个宽度烟道截面分散，从而实现了烟道两侧宽度方向上烟气的大范围转移与混合（图 8b）。

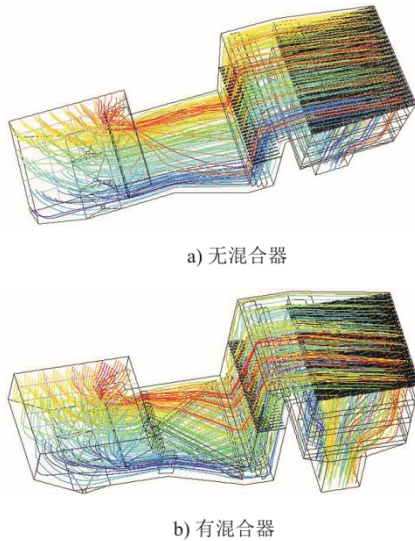


图 8 安装混合器前后的烟气流线

Fig.8 Streamlines of flue gas in SCR equipment before and after installing of the mixer

加装三角形大范围烟气自混合装置前后的物理模型烟花示踪试验结果如图 9 所示，风迹显示器放置在 SCR 物理模型入口左侧。无混合器时，烟花主要集中在物理模型左侧；加装混合器后，烟气从一侧向整个宽度烟道截面分散，烟花在 SCR 反应器内充满度良好，在整个宽度方向上分布比较均匀。

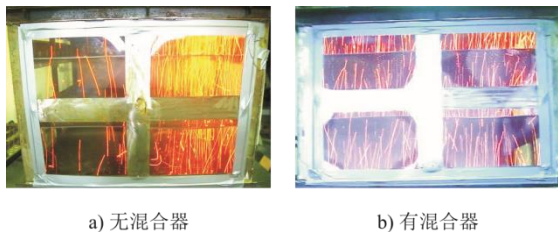


图 9 物理模型烟花示踪试验

Fig.9 The fireworks trace test results of the physical model

工程验证在 1 台 600 MW 的 II 型露天布置的 W 火焰炉上进行。混合器布置在省煤器出口一段长 8 m 的矩形截面（16.2 m×3.2 m）水平烟道中，AIG 布置在下游截面尺寸为 15.5 m×3.0 m 的竖直烟道中。CFD 模拟结果显示，加装三角形大范围烟气自混合

装置后，高负荷下 AIG 入口的  $\text{NO}_x$  质量浓度分布相对标准偏差从 17.5% 降低到了 6.6%，下降幅度 62%。

改造前后 AIG 入口  $\text{NO}_x$  质量浓度分布网格法测试结果如图 10 所示，图中绿、红、蓝分别为取样枪沿反应器深度方向从后向前 3 个不同深度下的测量数据。加装三角形大范围烟气自混合装置后，高负荷下 A、B 反应器 AIG 入口的  $\text{NO}_x$  质量浓度分布相对标准偏差分别下降了 53%、50%。工程验证表明，本文研发的三角形大范围烟气自混合装置突破了传统 SCR 静态混合器烟气混合范围小（≤3 m）的局限，提高了 SCR 反应器入口  $\text{NO}_x$  质量浓度场的均匀性，从根源上提升了 SCR 脱硝装置的负荷适应性。

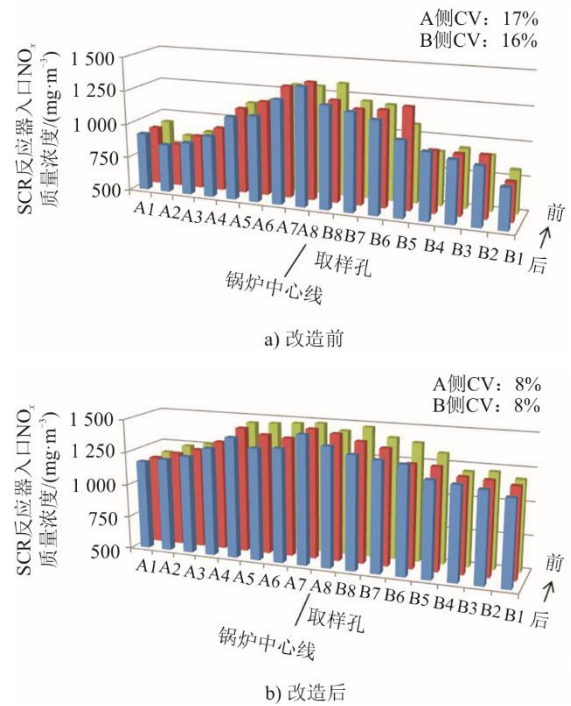


图 10 改造前后 SCR 反应器入口  $\text{NO}_x$  分布网格法测试结果  
Fig.10 The  $\text{NO}_x$  distribution at the SCR denitration system inlet by grid method before and after the technical retrofit

### 3 SCR 全负荷自适应喷氨改造

2018 年，某 2×600 MW 机组前后墙对冲燃烧锅炉采用本文研发的高性能喷氨混合技术，进行了 SCR 全负荷自适应喷氨改造。在 SCR 反应器入口竖直烟道中布置了一组 12×2 分区的格栅型 AIG，单侧反应器设置 88 个喷嘴。在格栅下游 1.5 m 处布置了 1 个三角形大范围烟气自混合装置（15.2 m×3.1 m×6.2 m）。CFD 优化设计结果表明，在实测入口烟气条件下，保持喷氨格栅流量分配相同，高中低负荷下顶层催化剂入口  $\text{NH}_3/\text{NO}_x$  摩尔比分布相对标准偏差达到了 1.6%~3.2%，均<4%。

改造完成后,脱硝出口与烟囱处的 $\text{NO}_x$ 质量浓度偏差从 $18\text{ mg/m}^3$ 降到了 $5\text{ mg/m}^3$ 左右,在常规PID控制逻辑下实现了全负荷脱硝自动喷氨运行。现场性能试验结果(表3)显示,改造后SCR脱硝装置出口 $\text{NO}_x$ 质量浓度分布均匀性大幅提高,高中低负荷下A、B反应器出口 $\text{NO}_x$ 分布相对标准偏差为8%~19%,变工况适应性良好。高负荷下,A反应器出口氨逃逸量从改造前的 $3.57\text{ }\mu\text{L/L}$ 下降到 $1.55\text{ }\mu\text{L/L}$ ,B反应器出口氨逃逸量从改造前的 $3.35\text{ }\mu\text{L/L}$ 下降到 $2.28\text{ }\mu\text{L/L}$ ,高负荷下氨逃逸量下降了51%。现场实测满负荷下三角形大范围烟气自混合装置的阻力为 $189\text{ Pa}$ ,比CFD模拟结果高1/3。这主要是因为混合器现场安装时需要增加支撑和防磨结构。

表3 改造后SCR装置性能试验结果  
Tab.3 Performance test results of the retrofitted SCR equipment

项目	机组负荷/ MW	入口 $\rho(\text{NO}_x)$ / ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	出口 $\rho(\text{NO}_x)$ / ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	氨逃逸量/ ( $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ )	出口 $\text{NO}_x$ 分布 CV/%
A 反应器	580	250	47	1.22	14
	560	269	43	1.67	11
	480	249	51	1.19	8
	360	319	40	2.51	15
B 反应器	580	274	44	1.55	13
	560	297	40	2.28	8
	480	261	32	2.47	12
	360	320	37	2.77	19

## 4 结 论

针对传统SCR喷氨混合技术在燃煤电厂新常态下存在的问题,本文对格栅型AIG和静态混合器进行了优化研究,以解决喷嘴堵塞问题,减小 $\text{NH}_3/\text{NO}_x$ 摩尔比分布偏差,提升SCR脱硝装置变工况适应性。

1) 为保证格栅型AIG的布氨均匀性、调节灵活性和长期运行可靠性,支管/母管流通截面比宜小于1.2,喷嘴/喷氨管流通截面比宜 $\leq 0.7$ ,并采用竖直布置的防堵型AIG喷嘴。

2) 通过大范围烟气自混合装置,可以大幅提高SCR反应器入口 $\text{NO}_x$ 质量浓度场的均匀性和不同工况下分布规律的一致性,从根源上提升了SCR脱硝装置的负荷适应性。

3) 某 $2\times 600\text{ MW}$ 机组的SCR脱硝装置采用本技术改造后,高中低负荷下SCR反应器出口 $\text{NO}_x$ 分布相对标准偏差达到了8%~19%,高负荷下氨逃逸下降了51%。

## [参 考 文 献]

- [1] 王乐乐,孔凡海,何金亮,等.超低排放形势下SCR脱硝系统运行存在问题与对策[J].热力发电,2016,45(12):19-24.  
WANG Lele, KONG Fanhai, HE Jinliang, et al. Difficulties and countermeasures of SCR denitration system operation in ultra low emission situation[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(12): 19-24.
- [2] CZARNECKI L, OLIVEIRA P. Emerging challenges and design strategies for SCR systems[C]//Proceedings of the ASME 2014 Power Conference, July 28-31, 2014, Baltimore, Maryland, USA.
- [3] 徐波,陈锋,孙漪清,等.燃煤电厂SCR烟气脱硝喷氨静态混合技术研究[J].能源与节能,2017,22(10):86-88.  
XU Bo, CHEN Feng, SUN Yiqing, et al. Study on static mixing technology of ammonia injection in SCR flue gas denitration in coal-fired power plants[J]. Energy and Energy Conservation, 2017, 22(10): 86-88.
- [4] 孙克勤,秦钟,华玉龙,等.SCR反应器短直进口段混氨技术研究[J].中国环保产业,2007(3):10-13.  
SUN Keqin, QIN Zhong, HUA Yulong, et al. Study on ammonia mixing technology in short straight inlet section of SCR reactor[J]. China Environmental Protection Industry, 2007(3): 10-13.
- [5] 韩发年,闫志勇.SCR烟气脱硝工艺喷氨混合装置研究进展[J].化工进展,2015,34(12):4151-4157.  
HAN Fanian, YAN Zhiyong. Advances in ammonia injection and mixing device of SCR-de $\text{NO}_x$  system[J]. Chemical Industry and Engineering Process, 2015, 34(12): 4151-4157.
- [6] 宋玉宝,赵鹏,姚燕,等.SCR脱硝不均匀反应宏观模型研究[J].中国电力,2019,52(5):176-184.  
SONG Yubao, ZHAO Peng, YAO Yan, et al. Study on the macro non-uniform catalytic de- $\text{NO}_x$  reaction model for SCR system[J]. Electric Power, 2019, 52(5): 176-184.
- [7] 黄庆华,宋丽云,何洪.一种SCR脱硝装置喷氨混合系统的结构优化设计[J].环境工程,2016,34(5):59-64.  
HUANG Qinghua, SONG Liyun, HE Hong. Structural optimization of a SCR de- $\text{NO}_x$  unit with ammonia spray mixing system[J]. Environmental Engineering, 2016, 34(5): 59-64.
- [8] 周英贵,金保昇.基于非均匀入口条件的SCR氨喷射方法[J].华中科技大学学报(自然科学版),2016,44(4):121-126.  
ZHOU Yinggui, JIN Baosheng. Ammonia injection method for SCR based on non-uniform inlet condition[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2016, 44(4): 121-126.
- [9] 周健,梁俊杰,黄飞,等.应用SCR氨喷射技术解决空预器硫酸氢铵堵塞问题[J].电站系统工程,2018,34(3):46-48.  
ZHOU Jian, LIANG Junjie, HUANG Fei, et al. Application study of ammonia injection technology on solving ABS block problem of air heater[J]. Power System Engineering, 2018, 34(3): 46-48.
- [10] 许剑,尚桐,刘斌,等.基于氨空混和技术的SCR脱硝系统氨耗量控制[J].热力发电,2019,48(8):76-80.  
XU Jian, SHANG Tong, LIU Bin, et al. Control of SCR denitrification system based on ammonia air mixing technology[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(8): 76-80.

(责任编辑 邓玲惠)