

DOI: 10.19666/j.rlfed.202301005

# SCR 烟气脱硝系统氨氮双控新方法

李博航<sup>1</sup>, 卢志民<sup>1,2,3</sup>, 廖永进<sup>4</sup>, 李德波<sup>4</sup>, 谢子立<sup>1</sup>, 张 向<sup>5</sup>, 姚顺春<sup>1,2,3</sup>

(1.华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640;

2.广东省能源高效清洁利用重点实验室, 广东 广州 510640;

3.广东省能源高效低污染转化与工程技术研究中心, 广东 广州 510640;

4.南方电网电力科技股份有限公司, 广东 广州 510030;

5.广东省计量科学研究院, 广东 广州 510405)

[摘 要] 针对目前电厂实际选择性催化还原 (SCR) 烟气脱硝系统运行中存在的出口  $\text{NO}_x$  质量浓度分布不均以及氨逃逸超标等问题, 进行了数值模拟分析并基于此提出了一种氨氮双控的喷氨优化新方法。以某 660 MW 机组 SCR 烟气脱硝系统为例, 建立可视化流场和脱硝反应数值模型, 分析比较了不同氨氮摩尔比条件下出口各分区  $\text{NO}_x$  质量浓度、氨逃逸体积分数以及脱硝效率的变化规律。结果表明: 分区脱硝效率、出口  $\text{NO}_x$  质量浓度和氨逃逸体积分数与氨氮比之间的关系均呈由一拐点分隔的两段线性的变化规律, 拐点出现在氨氮摩尔比为 1.15 左右。据此, 提出了基于分段拟合函数与优化矩阵方程相结合的氨氮双控喷氨优化新方法, 分别预测了该 660 MW 机组使用 5 分区和 42 喷嘴进行喷氨调节优化, 优化后的总喷氨量相对均匀喷氨工况最多下降 7.2%, 同时出口  $\text{NO}_x$  质量浓度和氨逃逸体积分数的相对标准偏差分别下降至 9.4% 和 4.2%, 出口均匀性显著提高, 不存在局部超标现象。

[关 键 词] SCR; 烟气脱硝系统; 数值模拟; 氨氮双控;  $\text{NO}_x$  质量浓度; 氨逃逸

[引用本文格式] 李博航, 卢志民, 廖永进, 等. SCR 烟气脱硝系统氨氮双控新方法[J]. 热力发电, 2023, 52(11): 150-158.  
LI Bohang, LU Zhimin, LIAO Yongjin, et al. New optimization method for ammonia/ $\text{NO}_x$  dual control[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(11): 150-158.

## New optimization method for ammonia/ $\text{NO}_x$ dual control

LI Bohang<sup>1</sup>, LU Zhimin<sup>1,2,3</sup>, LIAO Yongjin<sup>4</sup>, LI Debo<sup>4</sup>, XIE Zili<sup>1</sup>, ZHANG Xiang<sup>5</sup>, YAO Shunchun<sup>1,2,3</sup>

(1.School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2.Guangdong Province Key Laboratory of Efficient and Clean Energy Utilization, Guangzhou 510640, China;

3.Guangzhou Province Engineering Research Center of High Efficiency and Low Pollution Energy Conversion, Guangzhou 510640, China;

4.China Southern Power Grid Power Technology Co., Ltd., Guangzhou 510030, China;

5.Guangdong Institute of Metrology, Guangzhou 510405, China)

**Abstract:** To solve the problems of uneven distribution of  $\text{NO}_x$  concentration at the outlet and excessive ammonia escape in the actual SCR operation of power plants, the SCR De $\text{NO}_x$  reactor was simulated numerically and a new ammonia injection optimization method for dual control of ammonia slip and nitrogen oxides emission was proposed. Taking the SCR De $\text{NO}_x$  system of a 660 MW unit as an example, a numerical model of visual flow field and De $\text{NO}_x$  reaction was established, and the change of the partitioned outlet  $\text{NO}_x$  concentration, ammonia slip and partitioned De $\text{NO}_x$  efficiency under different total ammonia nitrogen ratios were analyzed and compared. The results show that the relationship between partitioned De $\text{NO}_x$  efficiency, outlet  $\text{NO}_x$  and ammonia concentration, with the partitioned ammonia-nitrogen ratio is a two-parts linear relation separated by an inflection point, and the inflection point occurs when partitioned ammonia-nitrogen ratio is about 1.15. On this basis, the present study proposes a new

收稿日期: 2023-01-12

基金项目: 广东省科技计划项目 (2020A0505140001); 广东省自然科学基金 (2022A1515010741)

Supported by: Science and Technology Plan Project of Guangdong Province (2020A0505140001); Natural Science Foundation of Guangdong Province (2022A1515010741)

第一作者简介: 李博航 (1997), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为烟气脱硝技术模拟, 961704374@qq.com。

通信作者简介: 卢志民 (1979), 男, 教授, 主要研究方向为固体燃料高效低污染利用, zhmlu@scut.edu.cn。

optimization method for ammonia/nitrogen dual control optimization based on the combination of piecewise fitting function and optimization matrix equation. It is predicted that the 660 MW unit by using 5 zones and 42 nozzles for ammonia injection regulation, and the optimized total ammonia injection volume will decrease by 7.2% at the best compared with the uniform ammonia injection working condition. Relative standard deviation of outlet  $\text{NO}_x$  concentration and ammonia slip volume will decrease to 9.4% and 4.2% respectively, and the outlet uniformity will be significantly improved, and there is no locally over  $\text{DeNO}_x$  phenomenon.

**Key words:** SCR;  $\text{DeNO}_x$  system; numerical simulation; ammonia/ $\text{NO}_x$  dual control;  $\text{NO}_x$  concentration; ammonia slip

近年来,为了控制燃煤电厂烟气污染物的排放,国家逐步提高了其排放限值标准。2015 年国家三部委联合印发《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》,要求实施燃煤电厂超低排放,其中  $\text{NO}_x$  排放质量浓度不高于  $50 \text{ mg/m}^3$  (标况下,下同)。截止 2020 年,达到超低排放要求的燃煤机组约占全国总装机容量的 89%<sup>[1]</sup>。超低排放机组基本都采用了选择性催化还原 (SCR) 烟气脱硝技术,在实际运行中常以增加喷氨量的方式来保证足够的脱硝效率<sup>[2-3]</sup>。Yao 等人<sup>[4]</sup>针对 292 台燃煤锅炉 SCR 烟气脱硝系统的普查工作表明,300、600、1 000 MW 等级机组总氨氮比分别为 137.5%、126.7% 和 110.0%,表明燃煤机组喷氨过量现象普遍存在,容量小的老机组尤其如此。由于 SCR 烟气脱硝系统中氧化还原反应受各种参数非均匀分布的影响<sup>[5]</sup>,如烟气中氨氮的浓度比、烟气流速和温度以及催化剂结构与成分等,SCR 反应器内难免存在脱硝效率过高或过低的区域。当出口局部区域  $\text{NO}_x$  质量浓度超过排放限值时,通过过量喷氨的方式增加总体喷氨量,必然有局部区域  $\text{NH}_3$  未与  $\text{NO}_x$  反应而逃逸,且逃逸量随 SCR 烟气脱硝系统运行以及催化剂中毒、失活、堵塞等因素而加剧,甚至出现局部区域  $\text{NO}_x$  质量浓度已经趋近于 0 而氨逃逸率远远“超标”的现象,进一步导致实际 SCR 烟道出口截面  $\text{NO}_x$  和  $\text{NH}_3$  质量浓度分布均匀性降低<sup>[6-8]</sup>。

SCR 氨泄漏 (ammonia slip) 会引发烟气处理系统中多个设备的运行异常,在  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  左右生成的硫酸氢氨 ( $\text{NH}_4\text{HSO}_4$ ) 和  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  左右生成的硫酸氨 ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ) 造成下游设备如空气预热器 (空预器)、除尘器等的压损增加及低温腐蚀。大唐集团科学技术研究院对脱硝机组的调查研究发现<sup>[9]</sup>,空预器烟气侧压差升高等问题已经成为大部分电厂空预器和引风机等设备正常运行的重大威胁。同时,氨气还是形成  $\text{PM}_{2.5}$  和雾霾的重要原因,是大气中气态污染物转变成颗粒态污染物的重要推手,脱硝系统氨泄漏可能引起环境的二次污染<sup>[10]</sup>。

目前,SCR 烟气脱硝反应优化问题的本质是空间上精准匹配,时间上紧密跟随。就前者而言,目前控  $\text{NO}_x$  达到  $50 \text{ mg/m}^3$  以下甚至更低均可行,但在不同区域间脱硝反应条件存在差异的情况下,如果一味追求低  $\text{NO}_x$  排放而不断增加整体喷氨量,容易导致出口截面某些分区脱硝过量局部氨逃逸严重“超标”的问题,这是影响机组运行的真正难题。因此,很有必要开展 SCR 烟气脱硝系统氨氮双控的喷氨优化研究,保证出口  $\text{NO}_x$  质量浓度和  $\text{NH}_3$  质量浓度分布均匀且压线排放,则可以同时减少喷氨量。

在催化剂反应活性、反应时间以及反应温度等变化不大的前提下,SCR 烟气脱硝系统喷氨优化研究的核心是要保证烟气中氮氧化物与还原气体氨气之间空间分布的匹配。对大尺度烟道内  $\text{NO}_x$  质量浓度分布的不均匀性进行针对性喷氨,实现 SCR 烟气脱硝系统稳定、压线运行。目前,通过数值模拟计算的方式建立 SCR 烟气脱硝系统模型进行烟气流场分析,是进行针对性喷氨优化的有效方式,能够为现场空间结构改造和调节喷氨量提供理论参考。Liu 等人<sup>[11]</sup>利用计算流体动力学 (CFD) 分析了各喷氨支管影响区域的  $\text{NO}_x$  通量权重系数及其敏感度,并对多个“关键”喷氨支管阀门进行改造,结果表明结合智能调整策略可以实现脱硝精准喷氨。计佳青等<sup>[12]</sup>通过数值模拟的方法对 SCR 脱硝系统流场分布进行了深入分析,并提出了一种基于权重思想的非均匀喷氨优化策略,结果表明喷氨优化后首层催化剂截面的氨浓度分布变得均匀,且非均匀喷氨策略可提高机组的脱硝性能。李源等<sup>[13]</sup>针对某 650 MW 机组 W 锅炉 SCR 烟气脱硝系统静态混合器在非均匀来流条件下的布置及喷氨优化进行了数值模拟研究,提出了分区喷氨优化方案,进一步改善了 SCR 烟气脱硝系统内氨氮匹配性,首层催化剂入口氨氮摩尔比相对偏差降至 3.83%。综上分析,通过调整“关键阀”的喷氨量或者分区喷氨的方式进行针对性喷氨,能够提高氮氧化物与还原气体氨气在空间上的分布匹配度。

本团队针对 SCR 烟气脱硝系统 (SCR 脱硝系统) 大尺度空间上的氨氮分布匹配度问题提出了一系列的喷氨优化方法。文献[14]指出采用性能试验的实测烟气数据作为模型的非均匀入口边界条件, 能够准确模拟实际脱硝系统烟道内烟气的流场、温度场和浓度场, 并提出以首层催化剂入口不同分区的氨氮摩尔比相对偏差最优为目标的分区喷氨模拟优化方法, 最终实现出口  $\text{NO}_x$  质量浓度相对偏差小于 20%。但该论文未能直接建立出口分区  $\text{NO}_x$  质量浓度与入口分区喷氨量的数学关系, 未能直接优化 SCR 脱硝系统出口  $\text{NO}_x$  质量浓度分布。文献[15]给出了基于动力学模型的喷氨优化策略, 通过直接求解 SCR 脱硝系统主反应的微分方程组确定喷氨格栅喷氨量与出口分区  $\text{NO}_x$  质量浓度的直接关系式, 弥补了文献[14]的不足, 直接以出口分区  $\text{NO}_x$  质量浓度相对标准偏差最小作为优化目标进行喷氨优化。但由于方程组的复杂性未能进一步考虑氨的氧化副反应对出口氨逃逸量的影响, 未能实现氨氮双控的模拟。

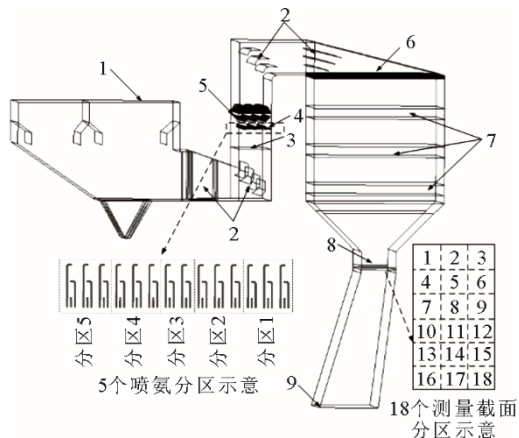
本文以某 660 MW 机组 SCR 脱硝系统为例, 并在前期研究经过可靠性验证后的 CFD 模型的基础上, 考虑 SCR 脱硝、氨氧化 2 个化学反应, 对 SCR 脱硝系统各分区的出口  $\text{NO}_x$  质量浓度和氨逃逸体积分数随氨氮摩尔比的变化趋势进行统计并建立拟合公式; 再根据该公式, 以出口  $\text{NO}_x$  浓度分布最均匀为优化目标, 结合分段拟合函数和优化矩阵方程定量求解喷氨量, 进行氨氮双控喷氨优化模拟, 同时实现了出口  $\text{NO}_x$  质量浓度和  $\text{NH}_3$  体积分数的均匀分布, 避免了局部氨逃逸率“超标”的同时减少了喷氨量。

## 1 模型建立

### 1.1 几何模型

某 660 MW 机组 SCR 脱硝系统三维全尺寸模型如图 1 所示。从图 1 可以看出, 烟气由省煤器出口进入脱硝系统, 经过多组导流板、喷氨格栅、静态混合器以及整流格栅, 最终进入催化剂层与还原剂氨气发生选择性催化还原反应。为了引导烟气在烟道内均匀流动, 系统内设置了多处的导流板和整流装置, 但这也将会烟道内的氨氮混合气划分为多个流动区域。在均匀喷氨的情况下, 烟道内氨氮混合匹配度差, 导致反应器出口  $\text{NO}_x$  质量浓度和氨体积分数的分布均匀性差。针对上述问题进行了喷氨控制

区域调整, 喷氨格栅共设置有 42 个喷嘴, 每个喷嘴有各自的调节阀控制喷氨流量。经过在线分区优化控制的改造后将喷氨格栅划分为 5 个喷氨分区, 分区 3 控制  $2 \times 3 = 6$  个喷嘴, 其他 4 个分区分别控制  $3 \times 3 = 9$  个喷嘴, 从而实现 5 分区或 42 个喷嘴单独控制。根据现场网格化采样测量的测孔分布, 将出口测量截面划分为 18 个分区进行脱硝反应后烟气数据监测和统计, 具体分区位置如图 1 所示。

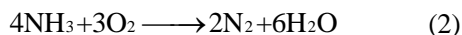
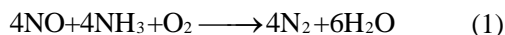


1—SCR 脱硝系统入口; 2—导流板; 3—入口测量截面; 4—喷氨格栅; 5—静态混合器; 6—整流格栅; 7—催化剂层; 8—出口测量截面; 9—SCR 系统出口。

图 1 SCR 脱硝系统全尺寸模型和喷氨格栅结构  
Fig.1 Full scale model of SCR DeNO<sub>x</sub> system and ammonia spray grid structure

### 1.2 模型设置

燃煤电厂 SCR 脱硝系统烟气流动为充分发展的湍流流动, 数值模拟计算主要是基于求解雷诺时均化方程, 湍流模型选用标准  $k-\varepsilon$  模型。氮氧化物 ( $\text{NO}_x$ ) 主要包括  $\text{NO}$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{N}_2\text{O}_5$ 、 $\text{NO}_2$  等, 其中  $\text{NO}$  占典型燃煤电厂  $\text{NO}_x$  的 95%, 故采用  $\text{NO}$  来代替实际的  $\text{NO}_x$ 。考虑烟道中烟气与  $\text{NH}_3$  的混合特性, 采用组分输运模型来模拟烟气中  $\text{NO}$ 、 $\text{NH}_3$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_2$  和  $\text{N}_2$  等 6 种气体组分的混合和输运, 且不考虑飞灰的影响。采用多孔介质模型来模拟催化剂层, 其中发生的化学反应包括标准 SCR 催化脱硝主反应和氨气氧化副反应:



上述数值模型中涉及的边界条件以及湍流模型、多组分模型、多孔介质模型以及化学反应动力学参数等数值设定参考文献[16]。该模型的准确性验证已在前期研究中完成, SCR 脱硝系统内温度场、速度场和浓度场的模拟值与实测值的相对误差

均小于 2%。本文在此 SCR 脱硝反应模型的基础上, 进行脱硝规律总结分析以及氨氮分布优化研究。

### 1.3 研究流程

本文提出以 NH<sub>3</sub>/NO<sub>x</sub> (氨泄漏和氮氧化物) 分布均匀化为目标的 SCR 脱硝系统优化新方法, 具体研究路线如图 2 所示。首先, 基于实际烟气数据和边界条件建立 SCR 脱硝反应模型, 通过 FLUENT 软件模拟不同喷氨量条件下, 烟道内 NO<sub>x</sub> 质量浓度分布和 NH<sub>3</sub> 体积分数分布规律; 通过统计催化剂进、出口烟气数据, 给出了脱硝效率与氨氮比之间的分段线性拟合公式; 结合基于喷氨流动影响系数的优化矩阵方程, 利用分段拟合公式进行了以出口 NO<sub>x</sub> 质量浓度分布最均匀且压线排放为目标的喷氨优化模拟, 定量计算出最优喷氨量来指导喷氨阀门调节; 与优化调整前均匀喷氨工况下的结果对比, 在满足优化要求的前提下, 给出喷氨阀最优调试方案, 最终实现出口 NO<sub>x</sub> 质量浓度和氨逃逸率均压线排放, 提高出口截面的 NO<sub>x</sub> 质量浓度和 NH<sub>3</sub> 体积分数分布的均匀性, 减少总体喷氨量节约运行成本。

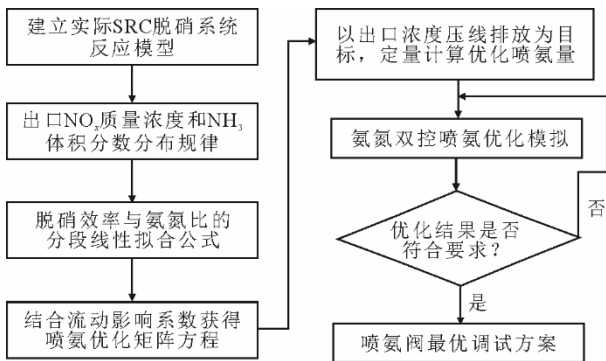


图 2 研究路线  
Fig.2 Research roadmap

### 1.4 评价指标

为评价优化效果, 采用相对标准偏差作为衡量标准<sup>[17-18]</sup>:

$$C_v = \frac{1}{x} \sqrt{\frac{1}{n-1} (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

式中:  $\bar{x}$  为数据的平均值;  $x_i$  为各分区测点的数据;  $n$  为截面的分区测点数。

根据超低排放标准, 出口 NO<sub>x</sub> 质量浓度要低于 50 mg/m<sup>3</sup>, 且氨逃逸体积分数低于 3 μL/L, 同时, 通常要求脱硝催化剂上游截面速度分布相对偏差小于 15%, 氨氮比相对偏差小于 5%, 入口温度相对偏差小于 ±10 K, 出口截面 NO<sub>x</sub> 质量浓度相对标准偏差小于 15%<sup>[19-22]</sup>。

## 2 模拟结果与分析

### 2.1 出口 NO<sub>x</sub> 质量浓度和氨逃逸体积分数变化规律

图 3 为均匀喷氨方式下 3 种不同喷氨量 (氨氮摩尔比 (氨氮比) 为 1.0、1.1、1.2) 的 SCR 脱硝系统 18 个分区脱硝反应模拟统计结果。

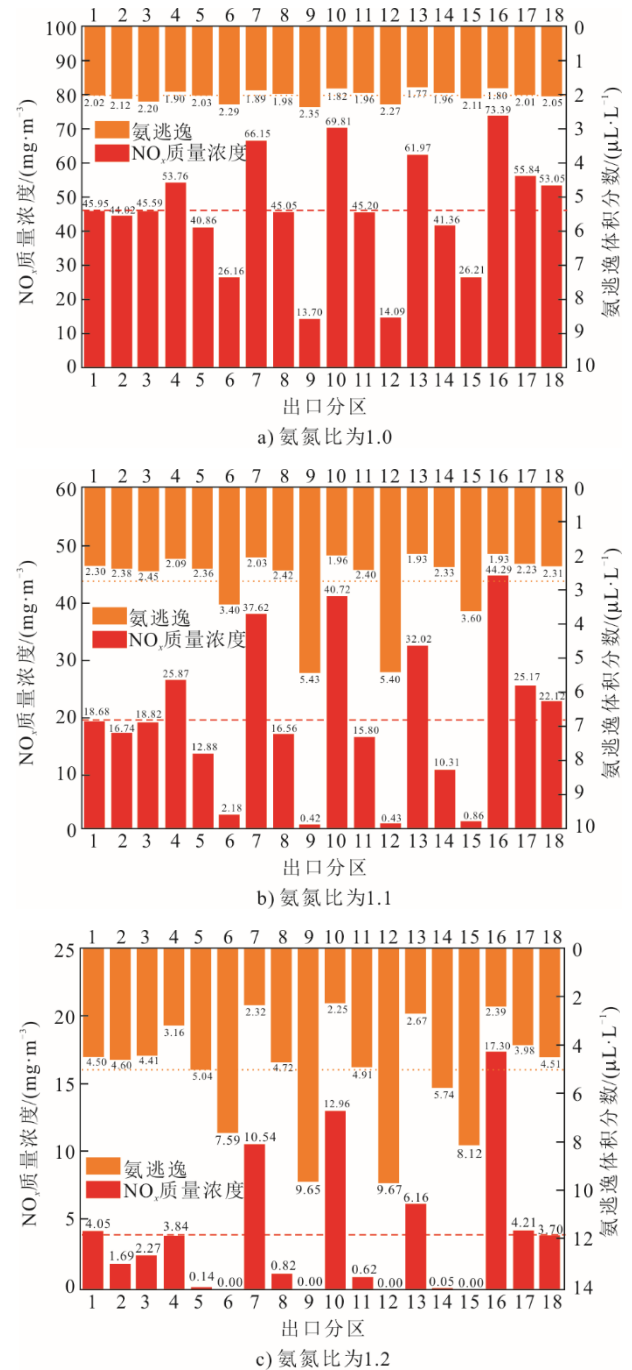


图 3 出口分区 NO<sub>x</sub> 质量浓度和氨逃逸体积分数统计结果  
Fig.3 Statistical results of NO<sub>x</sub> concentration and ammonia slip outlet partitioned zone under different total ammonia nitrogen ratio

图 3 中虚线表示出口截面 NO<sub>x</sub> 质量浓度和氨逃逸体积分数分区截面平均值。由图 3a) 可见, 当催化

剂上游截面总氨氮比为 1.0 时, 整体截面  $\text{NO}_x$  质量浓度平均值为  $45.7 \text{ mg/m}^3$ , 氨逃逸体积分数平均值为  $2.0 \text{ }\mu\text{L/L}$ , 满足氨逃逸体积分数低于  $2.5 \text{ }\mu\text{L/L}$  的要求。但从局部统计结果出发, 分区 7、10、13 以及 16 出口  $\text{NO}_x$  排放质量浓度均超过了  $60 \text{ mg/m}^3$ , 远超环保要求的  $50 \text{ mg/m}^3$  排放标准。这说明存在局部氨氮分布不均匀区域, 导致该分区还原气体氨的体积分数降低, 氨氮比低于平均值, 从而出现局部  $\text{NO}_x$  质量浓度偏高的现象, 出口截面  $\text{NO}_x$  质量浓度相对标准偏差为 37.9%。

为了提高脱硝效率, 降低  $\text{NO}_x$  排放质量浓度, 大部分机组通常采用增加总喷氨质量浓度的方式<sup>[23]</sup>, 将氨氮比提高到 1.1 或以上(图 3b))。整体截面  $\text{NO}_x$  质量浓度平均值为  $19.0 \text{ mg/m}^3$ , 氨逃逸体积分数平均值为  $2.7 \text{ }\mu\text{L/L}$ , 整体上  $\text{NO}_x$  排放质量浓度能够很好地符合排放要求, 但氨逃逸体积分数接近  $3.0 \text{ }\mu\text{L/L}$ , 存在局部氨逃逸率“超标”的风险。图 3b) 中第 6、9、12 和 15 分区  $\text{NO}_x$  质量浓度值接近于 0, 同时该部分区域出口氨逃逸体积分数大于  $3.0 \text{ }\mu\text{L/L}$  超标排放。这说明由于均匀喷氨方式的针对性不强, 烟道内氨氮分配不均匀, 容易导致局部氨逃逸“超标”现象。

由图 3c) 可见, 氨氮比为 1.2 时, 氨气过量率提高至 20%。整体截面  $\text{NO}_x$  质量浓度平均值低至  $3.8 \text{ mg/m}^3$ , 出现了多处分区出口  $\text{NO}_x$  质量浓度接近于 0, 氨逃逸体积分数平均值高达  $5.0 \text{ }\mu\text{L/L}$ , 氨逃逸“超标”现象严重。这说明了盲目地增加喷氨量以保证高脱硝效率的方式不可取, 但无止境地增加喷氨量也将造成未反应的还原气体氨增加, 从而导致氨逃逸率严重“超标”, 与其他反应物质生成的高黏性铵盐将造成催化剂层及其下游设备的堵塞和损耗, 从而降低了催化剂的脱硝效率, 进而又需要喷氨量的进一步增加, 这将形成恶性循环。

在上述 3 个不同喷氨量条件下, SCR 催化剂的 18 个分区进行出口  $\text{NO}_x$  质量浓度和氨逃逸体积分数的统计, 结果如图 4 所示。由图 4 可见, 在低氨氮比阶段(氨氮比分区  $< 1.15$ ), 氨逃逸体积分数随着氨氮比的增加而缓慢逐渐增加, 但在氨氮比分区增加到 1.15 以后, 氨逃逸规律曲线将出现 1 个拐点, 即烟道出口氨逃逸体积分数将会出现突增的情况, 氨逃逸体积分数大于电厂要求标准  $3.0 \text{ }\mu\text{L/L}$ 。同时, 对应在拐点氨氮比为 1.15 之前, 出口  $\text{NO}_x$  质量浓度随着氨氮比分区的增加而近似呈线性的快

速降低; 而氨氮比达到 1.15 拐点以后, 随氨氮比的增加出口  $\text{NO}_x$  质量浓度却趋于不变。从图 4 可以明显看出, SCR 反应器出口截面  $\text{NO}_x$  质量浓度的减少和氨逃逸体积分数的增加存在 1 个拐点, 为了尽可能减少总喷氨量和避免局部氨逃逸导致烟气尾部设备的运行风险, 对该机组而言, 实际的分区局部氨氮比应控制在 1.15 以内。

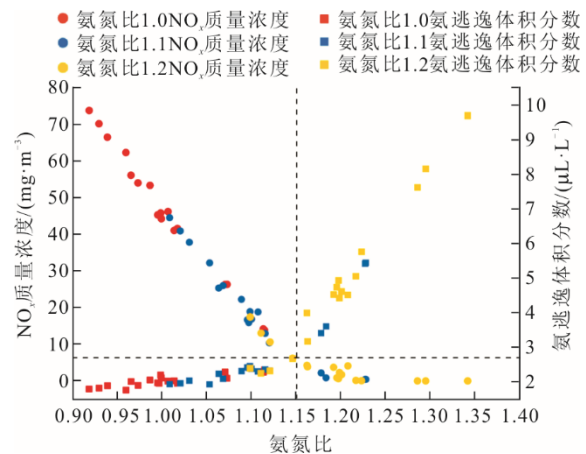


图 4 不同氨氮比各分区出口  $\text{NO}_x$  质量浓度和氨逃逸体积分数变化

Fig.4 The variation of  $\text{NO}_x$  and ammonia escape in different zones under different total ammonia nitrogen ratio

## 2.2 分段线性拟合函数建立和求解

通过统计不同氨氮比下催化剂入口截面 18 个分区的  $\text{NO}_x$  质量浓度、 $\text{NH}_3$  体积分数、氨氮比以及出口  $\text{NO}_x$  质量浓度分布数据, 计算对应分区的脱硝效率, 结果如图 5 所示。

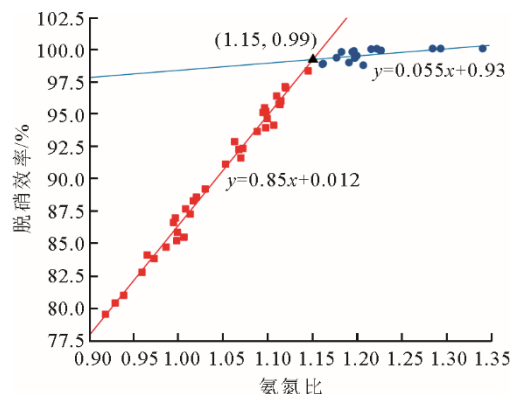


图 5 脱硝效率与氨氮比分段拟合关系

Fig. 5 Diagram of fitting relationship between SCR de $\text{NO}_x$  efficiency and ammonia nitrogen ratio

从图 5 可以看出, SCR 脱硝系统的脱硝效率与氨氮比的关系呈现非线性变化的规律。同样以氨氮比为 1.15 分界: 当氨氮比分区  $< 1.15$  时, 在其余反应条件相同的情况下(如反应温度、烟气流速和催

化剂状态相近), SCR 脱硝反应效率主要和氨氮比的大小呈线性增加的关系;随着喷氨量的增加,氨氮比达到拐点以后,SCR 脱硝反应效率达到极限值,即氨氮比局部>1.15 后,脱硝效率几乎不随氨氮比的增加而增加,此时加大喷氨量就会导致氨逃逸率迅速增加<sup>[24]</sup>。

本文采用不同的催化反应模型以及不同负荷边界条件计算,脱硝效率与氨氮比之间均有以上规律,说明该优化方法具有一定的普适性。故采用分段控制函数进行喷氨优化调整,具体分段函数线性表达式为:

$$\begin{aligned} y_1 &= 0.85x + 0.012 \\ y_2 &= 0.055x + 0.93 \end{aligned} \quad (4)$$

$$x = \frac{C_{NH_3}}{C_{NO_x}} \quad (5)$$

式中:  $y$  为脱硝效率;  $x$  为氨氮比。

$$a_i = \frac{m_i}{m} \quad (6)$$

式中:  $a_i$  为不同喷氨分区/喷嘴的影响系数;  $m_i$  为单个分区/喷嘴喷氨影响催化剂上游对应区域的氨质量浓度;  $m$  为单个分区/喷嘴喷氨总质量浓度。

喷氨影响系数定义的优化矩阵方程为:

$$\begin{bmatrix} a_{1,1}X_1 + a_{2,1}X_2 + \dots + a_{42,1}X_{42} \\ a_{1,2}X_1 + a_{2,2}X_2 + \dots + a_{42,2}X_{42} \\ \vdots \\ a_{1,5}X_1 + a_{2,5}X_2 + \dots + a_{42,5}X_{42} \\ \vdots \\ a_{1,18}X_1 + a_{2,18}X_2 + \dots + a_{42,18}X_{42} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_5 \\ \vdots \\ Y_{18} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:  $a_{i,j}$  为喷氨格栅第  $i$  分区/喷嘴喷氨对催化剂上游 18 个区域中的某  $j$  区域的影响系数;  $Y_j$  为催化剂上游 18 个区域中第  $j$  个区域氨浓度需求量;  $X_i$  为待求的喷氨格栅处对应分区/喷嘴的喷氨量。

规定出口截面 18 个分区  $NO_x$  质量浓度  $40 \text{ mg/m}^3$  为压线排放优化目标,计算对应分区的脱硝效率;利用不同分区脱硝效率的理论计算值,确定采用  $y_1$  分段公式进行计算催化剂入口分区氨氮比;计算出每个分区对应的氨氮比分布后,根据入口  $NO_x$  质量浓度分布情况从而确定各分区所需的氨质量浓度;结合喷氨格栅分区(喷嘴)喷氨流动影响系数<sup>[16]</sup>和催化剂上游 18 个分区氨质量浓度需求量,利用 MATLAB 软件计算喷氨优化矩阵方程,得出喷氨格栅处每个分区或喷嘴的喷氨量。

### 2.3 以出口 $NO_x$ 压线排放为目标的喷氨优化结果

以 Yao 等人<sup>[4]</sup>的调研结果要求最低氨氮比为

1.1 为例,进行 SCR 脱硝系统喷氨优化模拟,并以出口  $NO_x$  质量浓度分布最均匀为目标进行优化喷氨。规定出口  $NO_x$  质量浓度目标值为  $40 \text{ mg/m}^3$ ,通过 5 分区和 42 个喷嘴的优化方法进行喷氨优化模拟,结果如图 6—图 8 所示。

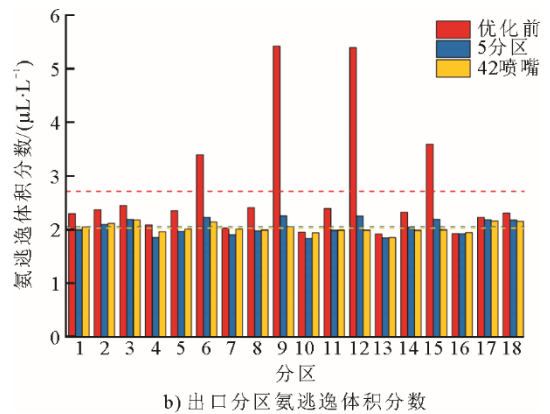
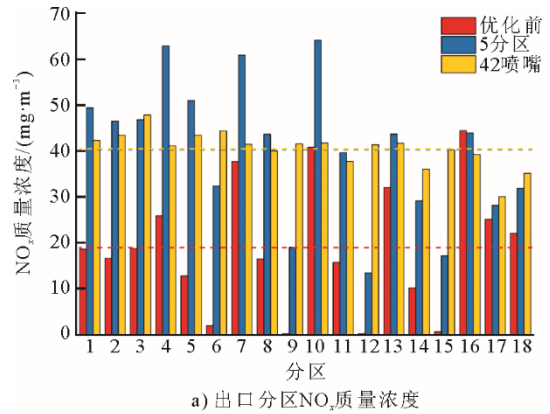


图 6 采用压线排放目标优化后 SCR 系统出口分区  $NO_x$  质量浓度和氨逃逸体积分数统计  
Fig.6 Statistical chart of SCR outlet  $NO_x$  concentration and ammonia slip concentration after optimized by pressure line emission target

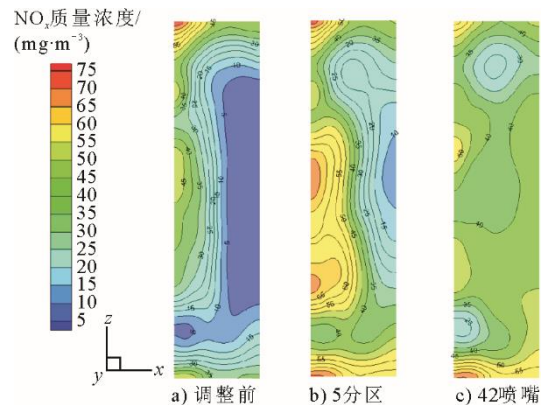


图 7 优化调整前后 SCR 系统出口  $NO_x$  质量浓度分布比较  
Fig.7 Comparison of nephogram of  $NO_x$  concentration distribution at SCR outlet

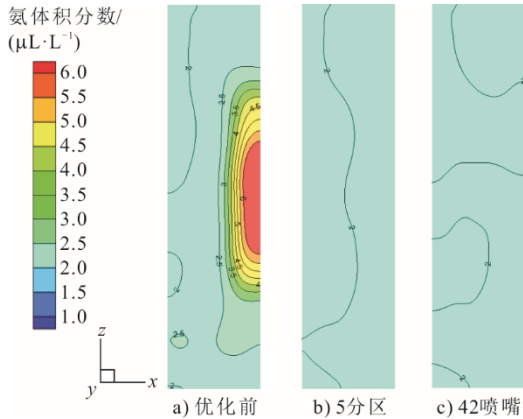


图8 优化调整前后 SCR 系统出口氨逃逸体积分数分布  
Fig.8 Cloud map of ammonia slip concentration distribution at SCR outlet

从5个分区优化结果可见：出口 $\text{NO}_x$ 质量浓度均值为 $40 \text{ mg/m}^3$ 时，存在3个出口分区 $\text{NO}_x$ 质量浓度超过排放标准（ $50 \text{ mg/m}^3$ ），但出口氨逃逸体积分数18个分区质量浓度值均在 $2.5 \text{ }\mu\text{L/L}$ 以下，不存在氨逃逸率“超标”的现象；42个喷嘴单独喷氨控制，出口氨逃逸体积分数均值由 $2.7 \text{ }\mu\text{L/L}$ 降低至 $2.0 \text{ }\mu\text{L/L}$ ，截面平均值为 $40 \text{ mg/m}^3$ 和 $2.0 \text{ }\mu\text{L/L}$ ，

能够满足出口 $\text{NO}_x$ 质量浓度低于 $40 \text{ mg/m}^3$ 以及氨逃逸体积分数低于 $2.5 \text{ }\mu\text{L/L}$ 的要求，能够很好地实现压线排放，保证了 $\text{NO}_x$ 质量浓度和氨逃逸率不超标排放。由图7可见，出口 $\text{NO}_x$ 质量浓度相对标准偏差由优化调整前的70%下降至5分区喷氨的36%，最后经过42个喷嘴优化后相对标准偏差达到9%，说明分区优化和分喷嘴优化都有很好的效果。同时，从图8氨逃逸体积分数分布云图可以看出，5分区和42喷嘴优化结果云图显示不存在氨逃逸“超标”区域，截面相对标准偏差也由原来的38%降低至4%，优化效果显著提高。可见，采用以出口 $\text{NO}_x$ 质量浓度压线排放为目标的42个喷嘴优化方法，每个分区出口的 $\text{NO}_x$ 质量浓度和氨逃逸体积分数都分布均匀，保证 $\text{NO}_x$ 质量浓度维持在均值 $40 \text{ mg/m}^3$ ，同时出口氨逃逸体积分数减少至 $2.0 \text{ }\mu\text{L/L}$ ，满足 $\text{NO}_x$ 排放要求且不存在局部氨逃逸“超标”的风险。

#### 2.4 不同喷氨优化方法效果对比

采用2种不同的喷氨优化方法进行喷氨调整后，与优化调整前均匀喷氨模拟结果对比，结果见表1。

表1 优化方法模拟效果对比  
Tab.1 Comparison of simulation results of optimization methods

项目	优化调整前	5分区压线优化	42个喷嘴压线优化
脱硝效率/%	94.3	88.0	88.0
喷氨总量/( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ )	117.6	108.9	109.1
氨逃逸体积分数/( $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ )	2.7	2.0	2.0
出口 $\text{NO}_x$ 质量浓度/( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	19.0	40.1	40.4
入口氨氮比	1.1	1.0	1.0
出口 $\text{NO}_x$ 相对偏差/%	69.8	36.5	9.4
出口氨逃逸相对偏差/%	38.4	6.9	4.2
入口氨氮比相对偏差/%	5.6	4.9	1.4

电厂SCR系统要求 $\text{NO}_x$ 脱除率达到80%以上，出口 $\text{NO}_x$ 质量浓度低于 $50 \text{ mg/m}^3$ ，氨逃逸体积分数不超过 $3.0 \text{ }\mu\text{L/L}$ 。本文以更低的标准要求出口截面 $\text{NO}_x$ 质量浓度和 $\text{NH}_3$ 体积分数相对标准偏差小于10%，出口 $\text{NO}_x$ 质量浓度低于 $40 \text{ mg/m}^3$ 以及 $\text{NH}_3$ 逃逸体积分数低于 $2.5 \text{ }\mu\text{L/L}$ 。喷氨优化调整前，喷氨总量为 $118 \text{ kg/h}$ ，氨氮比达1.1，属于喷氨过量情况，脱硝效率达到94%，出口 $\text{NO}_x$ 质量浓度均值为 $19 \text{ mg/m}^3$ ，氨逃逸体积分数截面均值为 $2.7 \text{ }\mu\text{L/L}$ 。采用以出口 $\text{NO}_x$ 质量浓度均值为 $40 \text{ mg/m}^3$ 压线排放为目标的42喷嘴喷氨优化方法，经优化调整后，SCR脱硝系统总体脱硝效率为88%，能够满足电厂脱硝系统运行要求，总喷氨量从 $118 \text{ kg/h}$ 降低至 $109 \text{ kg/h}$ ，

减少了 $9 \text{ kg/h}$ 。按机组年利用小时数4000h计算，每年可节省液氨耗量36t，节省费用约15万元（液氨价格按4250元/t计）<sup>[25]</sup>。同时，SCR脱硝系统出口 $\text{NO}_x$ 质量浓度和氨逃逸体积分数分别为 $40 \text{ mg/m}^3$ 和 $2.0 \text{ }\mu\text{L/L}$ ，均满足压线排放的环保要求，且出口 $\text{NO}_x$ 质量浓度和氨逃逸体积分数的相对标准偏差值分别下降至9.4%和4.2%，分布均匀，不存在局部超标现象。

#### 2.5 喷氨阀调节指导方案

假设调整前均匀喷氨条件下初始阀开度为90，阀门开度范围为0~100。将该模拟工况下42个喷嘴优化后的喷氨量与均匀喷氨情况下对比，得到优化后42个喷氨阀的开度调整相对值见表2。由表2可

见, 相对于调整前 42 个阀门的开度大小, 阀门 A4-3 需要减小开度 28.6, 即该阀门为最小开度 61.4, 阀门 A14-1 需要增大开度为 9.8, 即该阀门为最大开度 99.8。

表 2 喷氨格栅 42 个喷氨阀开度调整相对值  
Tab.2 Relative value of opening adjustment of 42 ammonia injection valves of ammonia injection grid

喷氨阀编号	A1-1	A1-2	A1-3	A2-1	A2-2	A2-3	A3-1	A3-2	A3-3
开度调整值	-10.0	0.3	-10.8	-9.3	-5.2	-19.4	-6.2	-7.2	-25.5
喷氨阀编号	A4-1	A4-2	A4-3	A5-1	A5-2	A5-3	A6-1	A6-2	A6-3
开度调整值	-4.1	-6.2	-28.6	-3.4	-1.7	-26.8	-3.2	1.1	-24.3
喷氨阀编号	A7-1	A7-2	A7-3	A8-1	A8-2	A8-3	A9-1	A9-2	A9-3
开度调整值	-3.3	3.4	-21.7	-1.2	5.4	-19.6	2.7	1.2	-14.1
喷氨阀编号	A10-1	A10-2	A10-3	A11-1	A11-2	A11-3	A12-1	A12-2	A12-3
开度调整值	6.4	-5.5	-9.0	0.6	-12.3	-5.0	-7.6	-10.3	-2.8
喷氨阀编号	A13-1	A13-2	A13-3	A14-1	A14-2	A14-3			
开度调整值	-3.2	-2.8	0.8	9.8	4.9	0.8			

### 3 结 论

针对目前电厂实际喷氨运行调整中存在的喷氨过量、出口  $\text{NO}_x$  质量浓度分布不均以及氨逃逸率“超标”等问题, 本文以某 660 MW 机组 SCR 脱硝系统为例, 采用数值模拟研究方法进行了 SCR 脱硝系统脱硝规律分析, 并基于此提出了一种氨氮双控的喷氨优化新方法。

1) 适当的过量喷氨可以减少 SCR 脱硝系统出口  $\text{NO}_x$  质量浓度, 满足环保排放要求, 但超过一定的氨氮比之后, 增加喷氨量将造成未反应的还原剂氨的逃逸“超标”现象严重。均匀喷氨方式喷氨的空间针对性不强, 烟道内氨氮浓度分配不匹配, 出口截面各分区之间的  $\text{NO}_x$  质量浓度和  $\text{NH}_3$  体积分数相对标准偏差大, 分布均匀性变差。

2) SCR 脱硝系统的脱硝效率与氨氮比的关系呈非线性变化规律, SCR 脱硝系统出口截面  $\text{NO}_x$  质量浓度的减少和氨逃逸体积分数的增加过程中存在 1 个拐点。为尽可能减少总喷氨量和避免氨逃逸“超标”的风险, 应通过分区或喷氨阀调节的方法保证局部氨氮比也在一定的氨氮比以内 (本文为 1.15)。

3) 与调整前均匀喷氨工况对比, 采用以出口  $\text{NO}_x$  压线排放为目标的优化方法, 优化后总喷氨量下降了 7.2%, 同时出口  $\text{NO}_x$  质量浓度和氨逃逸体积分数分别为  $40 \text{ mg/m}^3$  和  $2.0 \text{ }\mu\text{L/L}$ , 均满足压线排放的要求, 且相对标准偏差值分别下降至 9.4% 和 4.2%, 出口均匀性显著提高, 不存在局部“超标”排放问题。

#### [参 考 文 献]

- [1] 黄俊, 李兴磊, 阮斌, 等. 300 MW 燃煤电站 SCR 脱硝

系统流场优化[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(6): 159-167.

HUANG Jun, LI Xinglei, RUAN Bin, et al. Research on flow field optimization of SCR-De $\text{NO}_x$  system in a 300 mw coal-fired power plant based on numerical simulation[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(6): 159-167.

- [2] 苏跃进, 周念昕. 氨法脱硝中未参与还原反应氨气产生的氨排放问题研究[J]. 科学与管理, 2019, 39(6): 68-75.

SU Yuejin, ZHOU Nianxin. Ammonia emission without participating in the reduction reaction of denitrification[J]. Science and Management, 2019,39(6): 68-75.

- [3] 王卫群, 张磊, 黄治军, 等. 基于 CFD 模拟计算的 SCR 脱硝系统喷氨优化试验方法[J]. 中国电力, 2020, 53(6): 185-190.

WANG Weiqun, ZHANG Lei, HUANG Zhijun, et al. Test method for ammonia injection optimization of SCR denitrification system based on cfd simulation calculation[J]. China Electric Power, 2020, 53(6): 185-190.

- [4] YAO X, ZHANG M, KONG H, et al. Investigation and control technology on excessive ammonia-slipping in coal-fired plants[J]. Energies, 2020, 13: 4249.

- [5] 梁胜莹. 锅炉 SCR 脱硝系统内流动与化学反应模拟研究[D]. 华北电力大学, 2019: 1.

LIANG Shengying. Simulation research of flow and chemical reaction in SCR De- $\text{NO}_x$  system for coal-fired boiler[D]. North China Electric Power University, 2019: 1.

- [6] 唐潇, 徐仁博, 张发捷, 等. SCR 脱硝氨转化、吸附及飞灰氨脱除技术研究现状[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(4): 75-85.

TANG Xiao, XU Renbo, ZHANG Fajie, et al. Research status of SCR ammonia conversion, adsorption and ammonia removal technology from fly ash[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(4): 75-85.

- [7] 谢新华, 何金亮, 赵宁波, 等. 墙式燃烧炉提高 SCR 烟气脱硝装置工况适应性试验[J]. 热力发电, 2020, 49(11): 75-81.

XIE Xinhua, HE Jinliang, ZHAO Ningbo, et al. Experimental study on improving the adaptability of SCR flue gas denitrification equipment for opposite wall fired furnace[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(11): 75-81.

- [8] 王乐乐, 杨敏, 吴善森, 等. 典型燃煤电厂 SCR 脱硝

- 系统超低排放运行优化[J]. 热力发电, 2020, 49(9): 156-162.
- WANG Lele, YANG Min, WU Shansen, et al. Operation optimization for SCR denitration system in ultra low emission situation for typical coal-fired power plants [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(9): 156-162.
- [9] 陈熙, 王涵. 燃煤电厂空预器堵塞原因及改善措施分析[J]. 山东工业技术, 2022(4): 88-91.
- CHEN Xi, WANG Han. Analysis on causes and improvement measures of air preheater blockage in coal-fired power plants[J]. Shandong Industrial Technology, 2022 (4): 88-91.
- [10] 唐坚, 杨建辉, 陈鸥, 等. 氨逃逸过大成为加重大气雾霾的又一成因[J]. 中国能源, 2020, 42(10): 39-41.
- TANG Jian, YANG Jianhui, CHEN Ou, et al. Excessive escaping of ammonia has been another factor to aggravate atmospheric haze[J]. Energy of China, 2020, 42(10): 39-41.
- [11] LIU G F, BAO W Y, ZHANG W, et al. An intelligent control of  $\text{NH}_3$  injection for optimizing the  $\text{NO}_x/\text{NH}_3$  ratio in SCR system[J]. Journal of the Energy Institute, 2019, 92(5): 1262-1269.
- [12] 计佳青, 王琦, 沈德魁, 等. 660 MW 燃煤机组 SCR 系统流场及喷氨优化[J]. 中国计量大学学报, 2020, 31(2): 257-265.
- JI Jiaqing, WANG Qi, SHEN Dekui, et al. Optimization of flow field and ammonia injection in SCR system for 660 MW coal-fired units[J]. Journal of China Jiliang University, 2020, 31(2): 257-265.
- [13] 李源, 毛睿, 任利明, 等. 非均匀来流条件下 SCR 系统静态混合器布置及喷氨优化数值模拟研究[J]. 热能动力工程, 2021, 36(6): 78-85.
- LI Yuan, MAO Rui, REN Liming, et al. Numerical simulation of static mixer layout and ammonia injection optimization of a SCR system under non-uniform intake flow conditions[J]. Thermal Power Engineering, 2021, 36(6): 78-85.
- [14] 卢志民, 李文庆, 廖永进, 等. 基于影响因子的 SCR 脱硝系统喷氨量优化模拟[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 4923-4930.
- LU Zhimin, LI Wenqing, LIAO Yongjin, et al. Influential factors-based optimization simulation of ammonia injection in SCR De $\text{NO}_x$  system[J]. Journal of Electrical Engineering of China, 2021, 41(14): 4923-4930.
- [15] 卢志民, 闫超, 唐雯, 等. 基于 SCR 反应动力学模型的喷氨优化方法、装置及介质: CN115346610A[P]. 2022-11-15[2023-01-11].
- LU Zhimin, YAN Chao, TANG Wen, et al. Optimization Method, Device, and Medium for Ammonia Injection Based on SCR Reaction Kinetics Model: CN115346610A[P]. 2022-11-15[2023-01-11].
- [16] 李文庆. 燃煤电厂 SCR 脱硝系统分区喷氨优化模拟研究[D]. 华南理工大学, 2021: 1.
- LI Wenqing Optimization simulation research on partition ammonia injection of SCR denitrification system in coal-fired power plant[D]. South China University of Technology, 2021: 1.
- [17] 刘一帆, 董建宁, 田煜昆, 等. 大型火电机组 SCR 烟气脱硝全流场数值模拟分析与优化[J]. 热力发电, 2022, 51(9): 103-110.
- LIU Yifan, DONG Jianning, TIAN Yukun, et al. Numerical simulation and optimization for SCR flue gas denitration full flow field of large thermal power units [J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(9): 103-110.
- [18] 孙桐, 卢平, 蔡杰, 等. SCR 脱硝反应器流场的数值模拟及结构优化[J]. 电站系统工程, 2015, 31(4): 6-8.
- SUN Tong, LU Ping, CAI Jie, et al. Simulation and Structure Optimization of a SCR Reactor [J]. Power Plant Systems Engineering, 2015, 31 (4): 6-8.
- [19] 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 Fannian, YAN Zhiyong. Advances in ammonia injection and mixing device of SCR-De $\text{NO}_x$  system[J]. Chemical Industry Progress, 2015, 34(12): 4151-4157.
- [20] 内蒙古电力科学研究所. SCR 烟气脱硝技术及工程应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014: 70-74.
- Inner Mongolia Electric Power Research Institute. SCR flue gas denitrification technology and engineering application[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2014: 70-74.
- [21] 周智健, 王信, 常剑, 等. 660 MW 燃煤电厂 SCR 脱硝系统 CFD 模拟优化研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(19): 6688-6699.
- ZHOU Zhijian, WANG Xin, CHANG Jian, et al. CFD simulation and optimization of SCR De $\text{NO}_x$  system in a 660 MW coal-fired power plant[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2021, 41 (19): 6688-6699.
- [22] 朱天宇, 李德波, 方庆艳, 等. 燃煤锅炉 SCR 烟气脱硝系统流场优化的数值模拟[J]. 动力工程学报, 2015, 35(6): 481-488.
- ZHU Tianyu, LI Debo, FANG Qingyan, et al. Flow field optimization for SCR of coal-fired power plants[J]. Journal of Power Engineering, 2015, 35(6): 481-488.
- [23] 胡耘, 张明, 朱法华, 等. 超低排放背景下煤电机组氨管控存在的问题及对策探析[J]. 中国环境管理, 2021, 13(1): 76-79.
- HU Yun, ZHANG Ming, ZHU Fahua, et al. Problems and countermeasures of ammonia emission control in coal-fired power plants under ultra-low emission[J]. China Environmental Management, 2021, 13(1): 76-79.
- [24] 孙克勤, 钟秦, 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, ZHONG Qin, HUA Yulong, et al. Research on  $\text{NH}_3/\text{NO}_x$  mixing in short and straight inlet of SCR reactor[J]. China Environmental Protection Industry, 2007(3): 10-13.
- [25] 郭磊, 刘艇安, 王靓, 等. 600 MW 燃煤机组脱硝系统喷氨优化调整效果分析[J]. 电力科技与环保, 2022, 38(1): 49-55.
- GUO Lei, LIU Dingan, WANG Liang, et al. Effect of ammonia-injection optimization for a 600 MW coal-fired power plant SCR system[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2022, 38(1): 49-55.

(责任编辑 杨嘉蕾)