

# 660 MW 燃煤机组 SCR 流场模拟优化与喷氨优化运行

李壮扬<sup>1</sup>, 苏乐春<sup>1</sup>, 宋子健<sup>2</sup>, 谭鹏<sup>2</sup>, 周旭<sup>1</sup>, 张成<sup>2</sup>, 孙路石<sup>2</sup>, 陈刚<sup>2</sup>

(1. 广东省粤电集团有限公司沙角C电厂, 广东 东莞 523936; 2. 华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**以某电厂660 MW亚临界燃煤机组SCR烟气脱硝系统为研究对象,对SCR反应器内烟气流场以及喷氨分布均匀性进行数值模拟研究。通过对比首层催化剂前烟气速度分布及NH<sub>3</sub>浓度分布,研究了SCR反应器内均流部件对烟气流场均匀特性的影响,并且在数值模拟的基础上对喷氨方式进行了优化调整研究。研究表明:优化调整烟道内均流部件对速度、浓度均匀性有显著改善作用;通过分析流场不均匀性得到的分区喷氨方法能够进一步优化NH<sub>3</sub>在烟道中分布;现场试验验证了调节喷氨格栅阀门可降低SCR反应器出口NO<sub>x</sub>浓度。本文研究可为燃煤机组SCR系统导流板优化及实际电厂喷氨优化调试提供参考。

**关键词:**燃煤电站;SCR;数值模拟;喷氨优化

中图分类号:X773 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2017)04-0047-07

## Optimization of flow and ammonia injection by numerical simulation of SCR for a 660 MW coal-fired unit

Li Zhuangyang<sup>1</sup>, Su Lechun<sup>1</sup>, Song Zijian<sup>2</sup>, Tan Peng<sup>2</sup>, Zhou Xu<sup>1</sup>, Zhang Cheng<sup>2</sup>, Sun Lushi<sup>2</sup>, Chen Gang<sup>2</sup>

(1. Shajiao C Power Plant of Guangdong Yuedean Group Co., Ltd., Dongguan 523936, China; 2. State Key Laboratory of Coal Combustion, School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Selective catalytic reduction (SCR) is the most widely used denitration technology. A numerical study was carried out to evaluate the uniformity of gas flow and ammonia injection in the SCR denitration system of a 660 MW coal-fired unit. The influence of arrangement and structure of deflector on flow field in the system was investigated through comparing the uniformity of flue gas velocity and NH<sub>3</sub> concentration distribution in the top catalyst layer. The optimized ammonia injection mode was also studied based on the numerical simulation. Results show that the optimization of arrangement and structure of deflectors significantly improved the uniformity of flue field and NH<sub>3</sub> concentration distribution. The distribution of NH<sub>3</sub> concentration in the top catalyst layer was further optimized by the partitional ammonia injection mode, which produced through the simulation results. And the site tests verify that the outlet NO<sub>x</sub> concentration of the SCR system was reduced by the control of the valve of ammonia injection grid. This paper aims to provide an optimized method of deflector and ammonia injection mode for the SCR system of power plant.

**Key words:** Coal-fired power plant; SCR; Numerical Simulation; Optimization of ammonia injection

## 0 引言

氮氧化物 NO<sub>x</sub> 是燃煤机组释放的主要污染物之一,严重危害着人类生存环境,因此目前燃煤机组均采取了有效的脱硝措施以降低 NO<sub>x</sub> 排放。选择

性催化还原(SCR)技术由于具有稳定高效的脱硝效率以及成熟的工艺流程,在火电厂中得到广泛的应用<sup>[1-4]</sup>。目前在SCR脱硝设备中,流场设计不合理会造成氨氮混合不均匀、烟道积灰及催化剂前速度分布不均等问题。催化剂的速度不均匀会导致催化

收稿日期:2017-04-18;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2017.04.007

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51676076);广东省科技厅产学研结合资助项目(2013B090500008)

作者简介:李壮扬(1966—),男,广东潮州人,高级工程师,从事发电厂热控自动化及保护工作。通讯作者:张成,副教授,从事燃煤电厂优化控制方面研究。E-mail:chengzhang@mail.hust.edu.cn

引用格式:李壮扬,苏乐春,宋子健,等.660 MW 燃煤机组 SCR 流场模拟优化与喷氨优化运行[J].洁净煤技术,2017,23(4):47-52,11.

Li Zhuangyang, Su Lechun, Song Zijian, et al. Optimization of flow and ammonia injection by numerical simulation of SCR for a 660 MW coal-fired unit[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(4): 47-52, 11.

剂局部区域流速过高或者过低以及流速偏角偏大等问题。流速过低容易发生积灰,加速催化剂堵塞;流速过高或流速偏角过大会造成灰分颗粒剧烈冲击催化剂,加剧了催化剂磨损,而催化剂堵塞和磨损又加剧了速度分布不均。只有良好的速度分布均匀性以及氨氮混合均匀性,才能保证反应器达到最佳的脱除效率、氨逃逸率和催化剂的寿命<sup>[5-6]</sup>。

首层催化剂前烟气速度分布及氨气与氮氧化物的混合均匀程度是衡量 SCR 反应器性能的 2 个重要指标,在很大程度上影响了 SCR 反应器的脱硝效率和氨逃逸率。研究反应器内部导流装置布置形式对烟气流场的影响规律,对优化反应器内流动及烟气混合的均匀性,提高脱硝效率,保障氨逃逸率,降低系统 NO<sub>x</sub> 排放具有重要的现实意义<sup>[7-9]</sup>。通过数值模拟研究可以对影响 SCR 反应器内流动均匀性的结构因素进行分析,对脱硝系统的布置安装提供良好的指导建议。陈莲芳等<sup>[5]</sup>以某 600 MW 机组 SCR 反应器为对象进行模拟研究,结果表明烟道内加装导流板可改善流场,布置双层喷氨格栅比单层排布的喷氨格栅更有利于 NH<sub>3</sub> 浓度场的均匀分布;雷达等<sup>[10]</sup>研究了燃煤电厂 SCR 反应器中喷氨格栅处的流场对首层催化剂前截面速度场及氨氮浓度比的影响,分析表明喷氨格栅处的速度场不均匀性会导致首层催化剂前截面的速度场和氨氮摩尔比的不均匀,且具有一定的相似性。

本文以某 660 MW 亚临界燃煤发电机组的 SCR 烟气脱硝系统为研究对象,采用数值模拟计算方法,研究了烟道内导流板优化布置形式及喷氨优化调整对 SCR 反应器内烟气流动的影响,为脱硝反应系统结构参数的优化设计提供参考。通过喷氨流量现场调试,研究了喷氨格栅阀门开度调整前后对 SCR 反应器出口 NO<sub>x</sub> 变化的影响,并验证了数值模拟的结论。

## 1 脱硝设备概况

某电厂 660 MW 亚临界燃煤发电机组脱硝系统采用 SCR 脱硝工艺,采用单炉体双 SCR 结构体布置在锅炉省煤器出口和空气预热器之间。脱硝还原剂采用液氨法方案,催化剂采用蜂窝式催化剂。SCR 装置内沿烟气流向在烟道不同位置设置导流板、静态混合器和整流格栅。氨与稀释空气混合后经喷氨格栅(AIG)进入 SCR 烟道,自格栅式喷嘴喷出,可通过手动蝶阀分区控制烟道截面上的氨喷射流量。

原始 SCR 系统总体结构(图 1)主要由进口烟道和反应器组成。SCR 系统喷氨格栅(AIG)沿炉膛宽度方向布置 14 根支管,每根支管最终连接 4 个喷孔,共 56 个喷孔。反应器内在弯头处及渐扩段总共布置有 4 组导流板。反应器有 2 层催化剂层,催化剂层上部安装整流格栅,使进入催化剂层的烟气更加均匀。脱硝系统入口烟气参数见表 1。

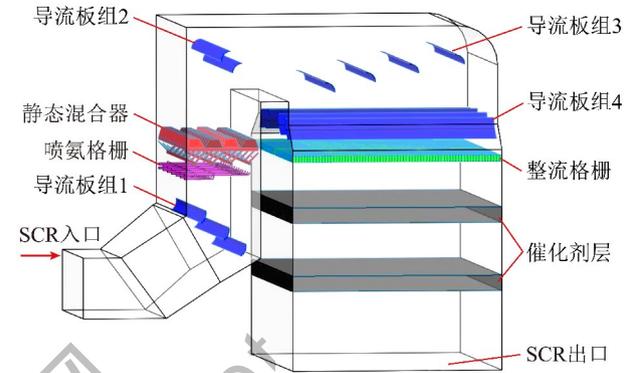


图 1 原始 SCR 系统结构

Fig. 1 Structural diagram of the original SCR system

表 1 脱硝系统入口烟气参数

Table 1 Parameters of flue gas of SCR inlet

参数	设计值
$w(\text{CO}_2)/\%$	11.83
$w(\text{O}_2)/\%$	6.25
$w(\text{N}_2)/\%$	74.69
$w(\text{SO}_2)/\%$	0.09
H <sub>2</sub> O(标态,湿烟气)/%	7.17
烟气量(标态,湿基,实际含氧量) (BMCR)/(Nm <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	2 395 655
烟气温度(BMCR)/°C	352

## 2 数值模拟和评价指标

### 2.1 模拟方法

对 SCR 反应器进行流场优化模拟是基于 N-S 流动控制方程的求解。采用标准  $k-\varepsilon$  模型模拟气体湍流流动。采用 Species 物质输运模型模拟 NH<sub>3</sub> 在烟气中的混合与扩散,但不涉及化学反应。催化剂结构模拟采用多孔介质模型,流动方向黏性阻力和惯性阻力设置较大,另 2 个方向阻力设置相同且较小,保证模拟阻力与实际阻力接近。本模拟假设烟气为单相气体,不考虑粉尘对流场的影响;将烟气视为不可压缩流体,且为定常流动;假设 SCR 系统进口处烟气速度分布均匀。由于左右两侧 SCR 脱硝反应器结构及入口烟气条件相同,且沿锅炉中心

线呈对称布置,故仅以单侧反应器(A侧),即从入口方向看左侧作为研究对象。模型网格划分影响模拟结果的合理性,为同时保证计算结果的正确性和计算效率,此次模拟 SCR 反应器模型总网格数目约 214 万。其中,喷氨格栅区域由于结构复杂且不规则,故采用小尺寸四面体加密网格,数量约 100 万。

烟道入口采用速度进口边界条件,根据烟气流量、成分和入口尺寸得到烟气速度为 9.17 m/s;烟道出口为 Outflow 边界条件;固体壁面、导流板和整流板均设为壁面条件,采用标准壁面方程,无滑移边界条件;喷氨入口为速度入口,速度为 20 m/s,温度 313 K,喷射角度与烟气流动方向相同。喷氨成分为 5% 的  $\text{NH}_3$  和 95% 的空气。

## 2.2 指标参数

采用相对标准偏差系数  $C$  来衡量首层催化剂前速度及  $\text{NH}_3$  体积分数分布的均匀程度。通过 Fluent 软件导出首层催化剂前速度及  $\text{NH}_3$  体积分数云图,经过相关数据处理,得到截面样本点速度或浓度值  $x_i$  ( $i$  为样本点数目,  $i=0 \sim n, n=2\ 000$ )。

$$\delta = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

$$C = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left( 1 - \frac{x_i}{\bar{x}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

式中,  $C$  为相对标准偏差系数,  $C = \delta/\bar{x}$ ,  $\delta$  为标准偏差;  $\bar{x}$  为上层催化剂层入口截面样本平均速度或平均浓度。相对标准偏差系数  $C$  值越小,速度、体积分数分布均匀性越好。在实际应用中,通常要求脱硝反应器中最上层催化剂前速度分布均匀系数小于 15%,浓度均匀系数小于 5%。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 SCR 系统流场分析

原始 SCR 反应器布置有 4 组导流板用于调节烟气流场,在入口水平烟道和竖直烟道的转向段布置有导流板组 1,包含 3 块弧形导流板;在竖直烟道顶部的 2 个  $90^\circ$  转向处布置有导流板组 2 和导流板组 3,分别包含 2 块和 4 块弧形导流板。导流板组 4 布置在整流格栅上游渐扩段部分,包含 4 块折板型导流板。通过建立现有 SCR 装置系统全尺度三维模型,并利用 Fluent 进行数值模拟计算,获得了现有 SCR 装置系统烟道及反应器内的速度流场和  $\text{NH}_3$  浓度分布。图 2(a) 为 SCR 系统原始工况对称

剖面速度分布。可以看出,烟气由烟道进入 SCR 反应器后,流动较为混乱,高速烟气主要集中在后墙侧,在上部导流板后出现了严重的回流区,在转向段,烟气流速分布极其不均,反应器入口到首层催化剂入口段速度偏斜也较为严重。这是由于烟气在转角处流过弧形导流板下侧时具有一定速度,产生了向心力,生成负压区,使得部分流体产生回流现象。并且原始 SCR 反应器内部导流板较少,不能达到抑制回流,修正速度场偏差的目的。图 2(b) 为 SCR 反应器原始工况首层催化剂前速度分布,可以看出原始工况催化剂前速度分布极不均匀,高速区集中在截面中间部位,且整体流速较大,截面平均流速为 7.12 m/s,会导致烟气与催化剂接触时间较少,不利于反应气体在催化剂内的反应,脱硝反应程度低,降低脱硝效率。高速区域速度接近 10 m/s,局部区域速度过大会增大气流对催化剂的冲刷,影响该区域催化剂的寿命。

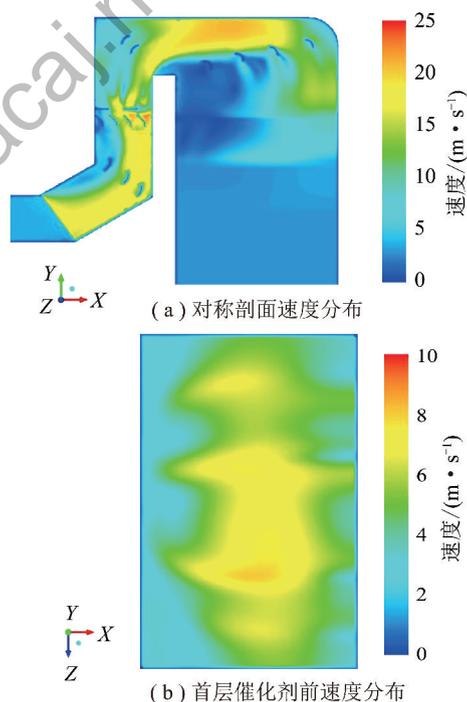


图 2 原始 SCR 反应器速度分布

Fig. 2 Velocity field of original SCR reactor

图 3(a) 为 SCR 反应器原始工况喷氨格栅(AIG)下游截面  $\text{NH}_3$  体积分数分布。结果显示,由于原始工况速度分布不均匀,导致 AIG 下游截面部分喷口后  $\text{NH}_3$  体积分数过高,因此造成反应器内  $\text{NH}_3$  体积分数分布均匀性较差。图 3(b) 给出了首层催化剂前  $\text{NH}_3$  的体积分数分布。可以看出,原始工况的  $\text{NH}_3$  体积分数分布极不均匀,表现出部分区

域浓度过高而部分区域偏低的现象。需要对 SCR 反应器内均流部件进行结构优化设计。

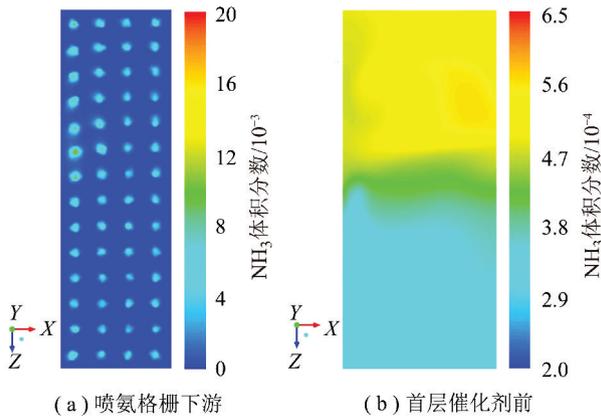


图3 原始 SCR 反应器 NH<sub>3</sub> 体积分数分布

Fig. 3 NH<sub>3</sub> concentration distribution of original SCR reactor

### 3.2 SCR 流场优化研究

优化后 SCR 系统的总体结构如图 4 所示。喷氨格栅及静态混合器形式保持不变,在 SCR 入口烟道渐扩段增设一组导流板组 1,包括 8 块直板型导流板;导流板组 2、3、4 在原有位置上,分别由原来的 3、2 和 4 块导流板增加到 4 块、4 和 9,并将导流板形式由原来的弧型改为直-弧-直型以解决回流问题;导流板组 5 将导流板数量增加到 11 块,并将折板型导流板改为直板型导流板。SCR 反应器均流优化工况速度分布如图 5 所示。可以看出,均流部件优化后反应器速度场分布区域均匀,消除了死区和回流。弯道中增加导流板数目可以改善弯道内的速度场,不仅可以改善流体流经弯道时的分离现象,还能减小流体流经弯道时所产生的二次流带来的阻力。改造后系统的压降仅由原始的 321 Pa 增至 331 Pa,不会明显增加引风机的能量损耗。

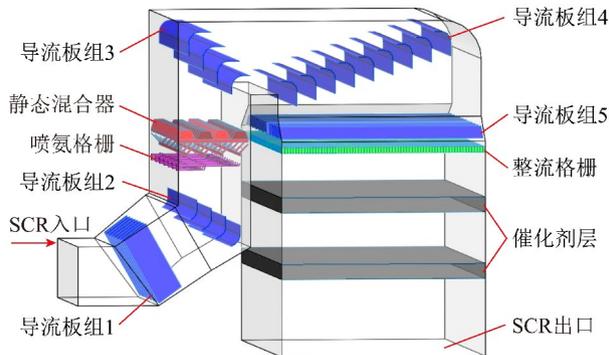


图4 优化后 SCR 系统结构

Fig. 4 Structural diagram of the SCR system with optimization

导流板优化后烟气到达首层催化剂前截面的速

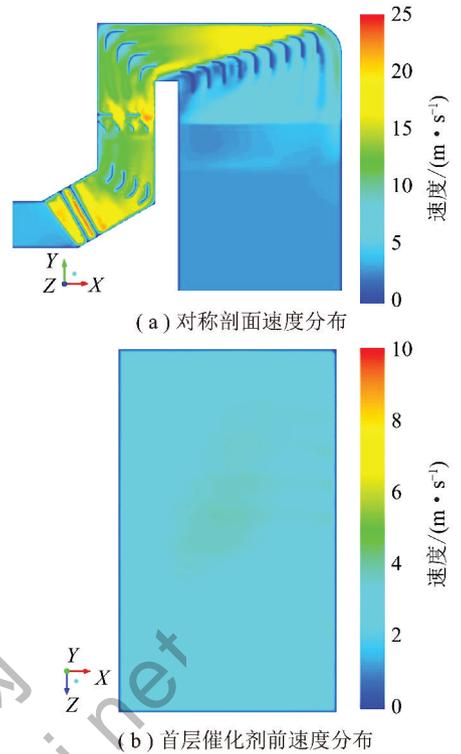


图5 SCR 反应器导流优化工况速度分布

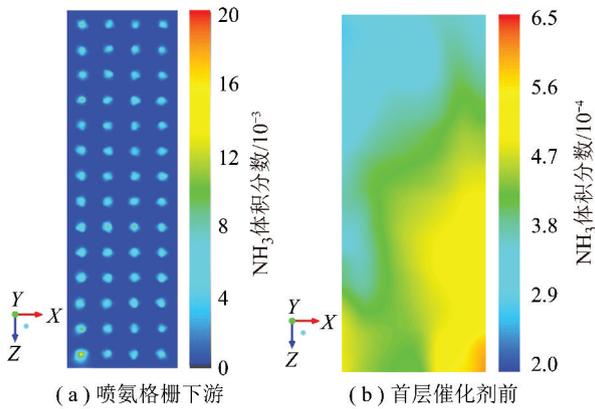
度均匀性大大提高,截面平均流速降低为 3.21 m/s (图 5(b))。经计算,速度相对标准偏差系数  $C$  由原始的 26.85% 降到均流优化后的 6.93%,满足小于 15% 的技术要求。

均流优化后(图 6(a)),喷氨格栅(AIG)下游截面 NH<sub>3</sub> 体积分数分布得到了明显改善。这是因为在入口烟道进口处增设了导流板组 1,并将第 1 个弯头处导流板组 2 数量增加,导流板在弧形板后还有一段竖直直板,进一步引导烟气弧形板后流动方向,减小烟气回流作用,使得烟气进入竖直时更加均匀,最终使 AIG 下游截面喷口后 NH<sub>3</sub> 体积分数优于原始工况。

均流部件优化后,首层催化剂前 NH<sub>3</sub> 体积分数分布均匀性得到了一定的改善。经计算,原始工况首层催化剂前截面的 NH<sub>3</sub> 体积分数分布的相对标准偏差系数高达 20.61%,而均流部件改造后的相对标准偏差系数为 15.24%,由此可见,均流部件优化对反应器的 NH<sub>3</sub> 体积分数分布具有一定的矫正作用,但仍不能满足小于 5% 的要求,对喷氨格栅的喷氨量进行进一步分区优化可解决这一问题。

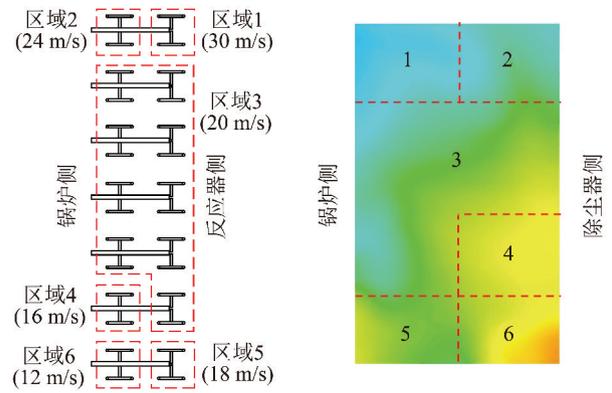
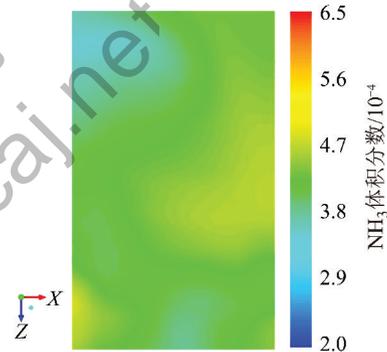
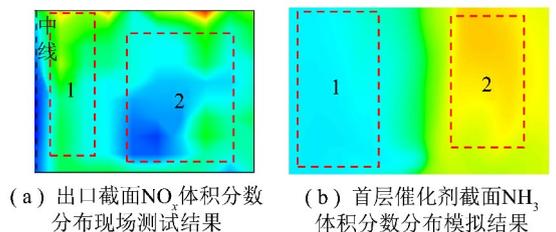
### 3.3 SCR 喷氨优化研究

喷氨格栅布置在进入 SCR 反应器前的竖直烟

图 6 SCR 反应器均流优化工况  $\text{NH}_3$  体积分数分布Fig. 6  $\text{NH}_3$  concentration distribution of SCR reactor with deflector optimization

道的中下游,5%的氨与空气的混合气经过稀释风分配到达各个支管的喷口,在 SCR 系统中以一定的速度喷出。本文中 SCR 反应器喷氨格栅的布置为:烟道深度方向上 7 组喷管,烟道宽度方向上 2 组喷管,共 14 组喷管,每根喷管上均匀布置着 4 个喷口,共 56 个喷口,为保证总流量不变,设置平均喷氨速度为 20 m/s。原始流场的不均匀使得同一速度喷出的氨气不能够均匀的到达催化剂层,将喷氨格栅进行分区能够改善这种情况。本文在均流部件优化后的工况基础上,根据首层催化剂前  $\text{NH}_3$  体积分数分布,浓度相近部分分为一个区域,总共分为 6 个区域。图 7 给出了首层催化剂前的  $\text{NH}_3$  体积分数区域划分。首层催化剂前  $\text{NH}_3$  平均体积分数大小依次为:区域 6 > 区域 4 > 区域 5 > 区域 3 > 区域 2 > 区域 1。根据首层催化剂前  $\text{NH}_3$  体积分数分布,同时将喷氨格栅划分为对应的 6 个区域(图 7)。由于喷氨量与喷口面积均已给定,通过调节喷口速度来进行喷氨优化。将  $\text{NH}_3$  体积分数偏大(区域 4,5,6)对应的喷氨格栅区域喷口速度减小,体积分数偏小(区域 1,2)对应的喷氨格栅区域喷口速度调大。同时为保证喷氨总流量不变,将 14 组喷口平均速度保持为 20 m/s 不变。图 8 显示了分区喷氨优化后 SCR 反应器首层催化剂前  $\text{NH}_3$  体积分数分布。可以看出,首层催化剂前  $\text{NH}_3$  体积分数分布均匀性得到了极大改善。经计算,首层催化剂前截面的  $\text{NH}_3$  体积分数分布的相对标准偏差系数由均流部件优化工况的 15.24% 迅速降低为 4.92%,满足 SCR 反应器技术要求。

图 9(a)为 630 MW 工况下 B 侧 SCR 反应器出

图 7 SCR 反应器喷氨格栅与首层催化剂前  $\text{NH}_3$  体积分数分布分区Fig. 7 Partition diagram of ammonia injection grid and  $\text{NH}_3$  concentration distribution in the top of catalyst layer of SCR reactor图 8 喷氨优化后 SCR 反应器首层催化剂前  $\text{NH}_3$  体积分数分布Fig. 8  $\text{NH}_3$  concentration distribution in the top of catalyst layer of SCR reactor with ammonia injection optimization图 9 SCR 反应器出口  $\text{NO}_x$  体积分数分布云图与首层催化剂前  $\text{NH}_3$  体积分数分布云图Fig. 9  $\text{NO}_x$  concentration distribution of SCR outlet and  $\text{NH}_3$  concentration distribution in the top of catalyst layer

口  $\text{NO}_x$  体积分数分布现场测试结果。可以看出,反应器出口  $\text{NO}_x$  体积分数分布标准偏差较大,区域 1 浓度偏高,区域 2 浓度偏低,偏差系数  $C$  为 46.81%,说明反应器出口的  $\text{NO}_x$  体积分数分布不均匀性较为明显。图 9(b)显示了首层催化剂前截

面  $\text{NH}_3$  体积分数分布模拟结果,结果显示首层催化剂前截面区域1的  $\text{NH}_3$  体积分数偏低,导致对应的出口区域1的  $\text{NO}_x$  值偏大。区域2的  $\text{NH}_3$  体积分数偏高,导致对应出口区域2的  $\text{NO}_x$  值偏小。模拟结果与现场测试结果相吻合。

在550 MW工况下进行了喷氨格栅现场调试实验,将B侧反应器对应的1号、2号喷氨格栅阀门开

度从(5,6)调节到(10,10)。表2为将B侧反应器喷氨格栅阀门调节前后,该区域SCR出口截面  $\text{O}_2$  体积分数和  $\text{NO}_x$  质量浓度分布,可以看出,在喷氨格栅阀门调节后出口截面的  $\text{NO}_x$  质量浓度得到显著改善,由调节前的截面平均质量浓度  $63.54 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  减少至调节后的  $43.39 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ ,  $\text{NO}_x$  质量浓度大幅度降低(图10)。

表2 增大喷氨量SCR出口截面  $\text{O}_2$  体积分数度及  $\text{NO}_x$  质量浓度分布 (550 MW)

Table 2  $\text{O}_2$  and  $\text{NO}_x$  concentration distribution of SCR outlet (550 MW)

测点	$\text{O}_2$ 体积分数/%						$\text{NO}_x$ 质量浓度/( $\text{mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$ )					
	调节前			调节后			调节前			调节后		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	4.4	3.9	4.5	4.6	3.6	5.2	101.88	82.72	111.82	63.75	45.95	112.88
2	4.2	4.1	3.8	4.3	3.6	4.3	60.40	63.68	53.63	25.78	33.58	57.08
3	3.8	3.7	3.7	4.1	3.6	4	37.54	58.66	49.77	23.65	33.58	37.99
4	3.9	3.6	3.6	4.4	3.7	3.8	57.54	49.48	35.34	22.23	30.22	33.97

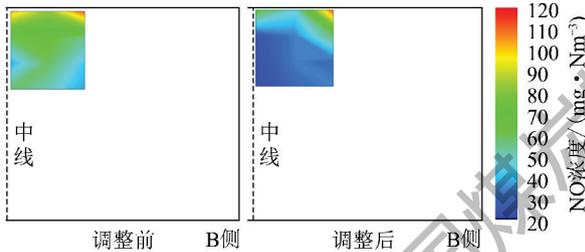


图10 增大喷氨量SCR出口截面  $\text{NO}_x$  质量浓度分布云图(550 MW)

Fig. 10  $\text{NO}_x$  concentration distribution of SCR outlet after increase of injected ammonia (550 MW)

在分区喷氨的形式下,通过CFD模拟得到了良好的效果,通过调整不同区域的喷射速度,即喷氨量,使得到达催化剂前截面  $\text{NH}_3$  体积分数分布的均匀性得到显著改善,本文在理论上验证了分区喷氨优化的作用。通过现场调试试验,发现调节喷氨小阀可有效降低  $\text{NO}_x$  排放浓度,验证了数值模拟中分区调节喷氨格栅可提高催化剂前氨氮浓度分布均匀性,以增加催化反应效率,降低SCR出口  $\text{NO}_x$  质量浓度的结论。

## 4 结 论

1)通过在SCR入口烟道渐扩段增设导流板、在原有导流板组基础上增加板数并将导流板形式改为直-弧-直型后SCR反应器速度场分布更加均匀,首层催化剂前截面速度分布和  $\text{NH}_3$  体积分数分布相

对标准偏差系数分别降低为6.93%和15.24%,均流装置部件优化对速度分布矫正效果显著,对  $\text{NH}_3$  体积分数分布有一定的改善。

2)通过流场数值模拟获得首层催化剂前  $\text{NH}_3$  浓度场的分布,为获得更好的混合效果,分析模拟结果提出了分区域喷氨的优化措施,在不同区域以不同的速度喷出,利用CFD模拟获得了很好的效果,到达催化剂层前截面的氨浓度分布的均匀性显著提高,首层催化剂前  $\text{NH}_3$  体积分数偏差从15.24%降低为4.92%。

3)现场试验得到SCR出口反应器截面的部分  $\text{NO}_x$  质量浓度分布及氧量分布,对喷氨格栅阀门调节后出口截面的  $\text{NO}_x$  质量浓度得到了改善,由调节前的截面平均浓度  $63.54 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  减少至调节后的  $43.39 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ 。对比模拟结果看出,试验较好地验证了CFD数值模拟的结果。

## 参考文献 (References):

- [1] 赵宗让. 电厂锅炉SCR烟气脱硝系统设计优化[J]. 中国电力, 2005, 38(11): 69-74.  
Zhao Zongrang. Design optimization of SCR system for coal-fired boilers[J]. Electric Power, 2005, 38(11): 69-74.
- [2] 崔凯, 冯岩. 锅炉运行对SCR脱硝系统的影响[J]. 电站系统工程, 2012, 29(3): 68-69.  
Cui Kai, Feng Yan. Influence of boiler operation on SCR[J]. Power System Engineering, 2012, 29(3): 68-69.

(下转第11页)

- [91] Zeng H, Jin F, Guo J. Removal of elemental mercury from coal combustion flue gas by chloride-impregnated activated carbon[J]. Fuel, 2004, 83(1): 143-146.
- [92] 赵毅, 刘松涛, 马宵颖, 等. 改性钙基吸附剂的汞吸附特性实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(8): 50-54.  
Zhao Yi, Liu Songtao, Ma Xiaoying, et al. Experimental investigation on mercury adsorption characteristics by modified Ca-based sorbent[J]. Proceeding of the CSEE, 2009, 29(8): 50-54.
- [93] 骆骏. 浸溴改性钙基/矿物吸附剂脱除烟气中汞的实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [94] 高洪亮, 王向宇, 周劲松, 等. 改性沸石对气态汞吸附的实验研究[J]. 化学工程, 2008, 36(4): 9-11.  
Gao Hongliang, Wang Xiangyu, Zhou Jinsong, et al. Experimental study on mercury vapor adsorption with modified zeolite[J]. Chemical Engineering, 2008, 36(4): 9-11.
- [95] 王顺, 李多松, 田立江. 直流电晕氧化联合石灰浆液吸收烟气脱硫脱硝汞工艺[J]. 环境工程, 2014, 32(4): 59-62.  
Wang Shun, Li Duosong, Tian Lijiang. Combined process of simultaneous removal of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and Hg from flue gas by oxidation over DC corona and absorption with lime slurry[J]. Air Pollution Control, 2014, 32(4): 59-62.
- [96] 徐飞. 脉冲放电电凝并结合碱液吸收烟气多种污染物协同脱除研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [97] Galbreath K C, Zygarlicke C J, Tibbetts J E, et al. Effects of NO<sub>x</sub>, α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and HCl on mercury transformations in a 7-kW coal combustion system[J]. Fuel Processing Technology, 2005, 86(4): 429-448.
- [98] Li Y, Murphy P D, Wu C Y, et al. Development of silica/vanadia/titania catalysts for removal of elemental mercury from coal-combustion flue gas[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(14): 5304-5309.
- [99] 毛健雄, 毛健全, 赵树民. 煤的清洁燃烧[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 1-414.
- [100] 张军营, 魏凤, 赵永椿, 等. PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 排放的一维炉煤燃烧实验研究[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(S1): 257-260.  
Zhang Junying, Wei Feng, Zhao Yongchun, et al. Experiment research of emissions of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> during coal combustion in one dimensional furnace[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(S1): 257-260.
- [101] 黄卫, 毕新慧, 张国华, 等. 民用蜂窝煤燃烧排放颗粒物的化学组成和稳定碳同位素特征[J]. 地球化学, 2014, 43(6): 640-646.  
Huang Wei, Bi Xinhui, Zhang Guohua, et al. The chemical composition and stable carbon isotope characteristics of particulate matter from the residential honeycomb coal briquettes combustion[J]. Geochimica, 2014, 43(6): 640-646.
- [102] 李庆, 段雷, 蒋靖坤, 等. 我国民用燃煤一次颗粒物的减排潜力研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(16): 4408-4414.  
Li Qing, Duan Lei, Jiang Jingkun, et al. Investigation of reducing potential for primary particulate emission from residential coal combustion in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(16): 4408-4414.

## (上接第 52 页)

- [3] 程星星, 金保升, 钟文琪, 等. 加装 SCR 脱硝装置的锅炉系统数值模拟[J]. 热力发电, 2009, 38(6): 51-54, 91.  
Cheng Xingxing, Jin Baosheng, Zhong Wenqi, et al. Numerical simulation of additionally installed SCR denitrification equipment[J]. Thermal Power Generation, 2009, 38(6): 51-54, 91.
- [4] 张彦军, 高翔, 骆仲决, 等. SCR 脱硝系统入口烟道设计模拟研究[J]. 热力发电, 2007, 36(1): 15-17, 23.  
Zhang Yanjun, Gao Xiang, Luo Zhongyuan, et al. Simulation study on design of inlet flue duct for SCR denitrification cation system[J]. Thermal Power Generation, 2007, 36(1): 15-17, 23.
- [5] 陈莲芳, 周慎杰, 王伟. 选择性催化还原烟气脱硝反应器流场的模拟优化[J]. 动力工程学报, 2010, 30(3): 224-229.  
Chen Lianfang, Zhou Shenjie, Wang Wei. Simulation optimization on flow field of SCR denitrification reactors[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2010, 30(3): 224-229.
- [6] 刘小波, 陈冬林, 姜昌伟, 等. 燃煤锅炉选择性催化还原脱硝反应器结构的模拟优化[J]. 动力工程学报, 2010, 30(5): 384-389.  
Liu Xiaobo, Chen Donglin, Jiang Changwei, et al. Simulation optimization of a SCR denitrification reactor for coal-fired boilers[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2010, 30(5): 384-389.
- [7] 陈冬林, 刘欢, 邹婵, 等. 300 MW 燃煤锅炉烟气 SCR 脱硝系统流场的数值模拟与优化设计[J]. 电力科学与技术学报, 2013, 28(1): 103-108.  
Chen Donglin, Liu Huan, Zou Chan, et al. Numerical modeling and optimal designing of flow field for a 300 MW coal-fired boiler SCR deNO<sub>x</sub> system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2013, 28(1): 103-108.
- [8] 朱天宇, 李德波, 方艳艳, 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, 508.  
Zhu Tianyu, Li Debo, Fang Qingyan, et al. Flow field optimization for scr system of coal-fired power plants[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2015, 35(6): 481-488, 508.
- [9] 凌忠钱, 曾宪阳, 胡善涛, 等. 电站锅炉 SCR 烟气脱硝系统优化数值模拟[J]. 动力工程学报, 2014, 34(1): 50-56.  
Ling Zhongqian, Zeng Xianyang, Hu Shantao, et al. Numerical simulation on optimization of scr denitrification system for coal-fired boilers[J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2014, 34(1): 50-56.
- [10] 雷达, 金保升. 氨氮比不均匀性对电站 SCR 系统脱硝效率的影响[J]. 锅炉技术, 2010, 41(6): 72-74.  
Lei Da, Jin Baosheng. Effect of ammonia nitrogen ratio on denitrification efficiency of SCR system in power station[J]. Boiler Technology, 2010, 41(6): 72-74.