

Numerical Simulation of Flue Gas Denitrification with SCR

Naibo Yang, Fangqin Li, Jianxing Ren, Henan Li, Zhiwu Hao,

Energy and Environment Engineering Institute, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090

lfqpaper@163.com

Abstract: In this paper, according to the SCR reactor of a power plant in China, the numerical simulations have been conducted for the gas duct and internal gas flow of these SCR with different installation location and number of baffle plate by using of fluid simulation software. Established three-way model and numerical modeling. According to the simulation results, guide plates have been adjusted and arranged constantly, and by analyzing and contrasting these schemes simulation results, the reference basis for design of the SCR system has been suggested.

Keywords: SCR; flow field; numerical simulation

SCR 烟道流场数值模拟

杨乃博, 李芳芹, 任建兴, 李赫男, 郝志武

(上海电力学院 能环学院, 上海 200090)

摘要: 本文针对某电厂安装 SCR 的烟道流场, 改变导流板安装位置及数量, 采用流体模拟软件, 进行烟道流场数值模拟计算。建立三维模型, 确定合理的数学模型, 对烟道内气体流场进行了模拟计算。通过模拟结果对 SCR 系统的导流装置进行不断地调整和布置, 对各方案的流场分布情况进行了分析比较, 为今后电厂 SCR 的安装提供了参考依据。

关键词: SCR; 流场; 数值模拟

1 引言

氮氧化物(NO_x)是公认的主要大气污染物之一, 随着我国电力行业的蓬勃发展, 火电厂氮氧化物的排放量也日益增长。另外, 随着国家环境保护的力度加大, 火电厂上脱硝设备是大势所趋。选择性催化还原(SCR)烟气脱硝技术因其较高的脱硝率成为燃煤电站锅炉控制 NO_x排放的主要选择。目前, 对 SCR 反应机理及催化剂选择的研究较多, 而对安装 SCR 脱硝装置后的烟道内导流板安装情况的研究相对较少, 而导流板安装方法及数量对烟道内的流场影响较大, 直接影响脱硝效率, 因此, 有必要单独对其进行研究。

2 烟气脱硝技术

目前, 常用的几种烟气脱硝技术有:

*本文得到上海市教委重点学科(第五期 No.G51304)和上海市教委第三期本科教育高地建设项目资助。

2.1 选择性催化还原法(SCR)

SCR 脱硝技术是在催化剂作用下, 用选择性还原剂(氨或尿素)将 NO_x 还原为无害的氮气和水蒸气, 是目前国际上技术最成熟、应用最广泛的烟气脱硝技术, NO_x 脱除效率 80~90%, 但投资和运行成本较高。SCR 技术在德国、日本、奥地利、丹麦、美国等国应用广泛, 奥地利 AEE、鲁奇、日立、三菱、巴布考克等国外脱氨公司拥有较好的 SCR 业绩。AEE 公司于 2001 年投运的丹麦某电厂 325MW 机组脱氨效率达到 95%。目前国内大型机组也陆续投运 SCR 工程。

2.2 选择性非催化还原法(SNCR)

选择性非催化还原脱硝技术是在锅炉上烟温 850~1050℃ 处将还原剂(氨或尿素)均匀喷入炉膛内, 生成无害的氮气和水蒸气。SNCR 工艺不需要催化剂, 但需要较高的反应温度; 反应系统简单、投资较省、运

行成本低、脱氨效率一般仅有20~40%，应用较少。

2.3 电子束法脱硫脱硝

电子束法用高能电子加速器发射电子束激发烟气，产生的多种自由基在常温下将SO₂、NO等氧化为高价氧化物，与注入烟道的氨气反应，生成硫酸铵和硝酸铵等。优点是同时脱硫脱硝去除率高，系统简单，建设费用是同等规模FGD的70~80%，不使用催化剂，副产物是出路较好的化肥。缺点是耗电量大，运行费用高，目前电子辐射装置还不适用于大机组系统。

2.4 活性焦吸附法脱硫脱硝

烟气中的SO₂通过活性焦碳微孔的吸附催化作用生成硫酸，再热时生成浓度很高的SO₂气体，根据需要转化成硫磺、液态SO₂等产品，烟气中的NO_x在加氨条件下经活性焦催化还原，生成水和氮气。脱硫率几乎达100%，脱硝率在80%以上，反应在100~200℃低温进行，不需烟气升温装置，不存在吸附剂中毒，建设费用与电子束法相当，运行费用约电子束法一半。

3 SCR 烟气脱硝技术原理

选择性催化还原法(Selective Catalytic Reduction, 简称SCR)是指将氨、烃类等还原剂(电厂多用氨)喷入烟气中，利用催化剂将烟气中的NO_x转化为N₂和H₂O。在氨选择催化反应过程中，NH₃可以选择性地和NO_x发生反应，而不是被O₂氧化，因此，反应又被称为“选择性”。其反应基本过程如图1所示。

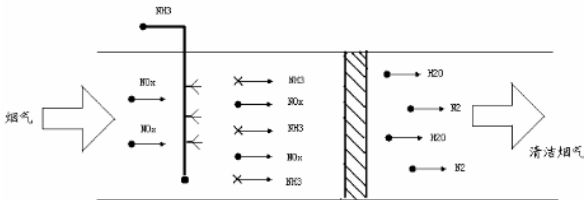
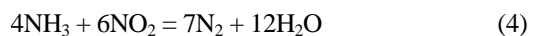
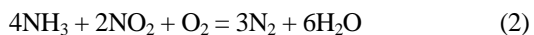
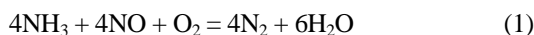


Figure 1. The basic process of SCR
图 1. SCR 基本过程

在整个反应过程中，除了NH₃与NO_x的催化还原反应外，中间涉及其他复杂的化学反应，主要有：

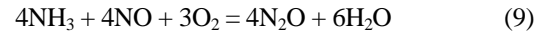
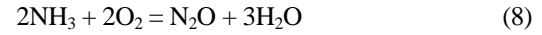
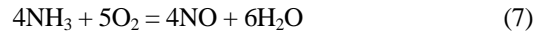
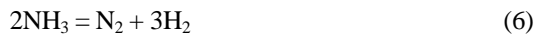
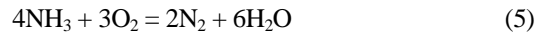
主反应



因为锅炉烟气中的大部分NO_x都是以NO的形式存

在的，NO₂一般约占NO浓度的5%，影响并不显著。所以，反应以(1)、(2)为主。

由于氨具有挥发性，很有可能逃逸。此外，在反应条件改变时，还可能发生氨的氧化，反应如下：



在SCR反应中，主要发生的是反应(1)，副反应(6)、(7)在350℃以上进行，450℃以上进行激烈，在450℃以下可以假设其进行缓慢，以主反应为主。在适当的催化剂下，反应(1)~(4)可以在200~400℃范围内进行，因此催化剂的作用主要是降低主反应的活化能，使其能在较低温度下进行，加快主反应速率的同时抑制副反应的进行。

4 SCR 烟气脱硝数值模拟

SCR系统设计与运行的关键技术之一就是如何保证SCR反应器入口的烟气流速分布、烟气温度分布以及NO_x与喷入氨的浓度分布相一致，以得到较高的脱硝效率并避免氨逃逸。由于SCR系统复杂、设备庞大，如果采用常规的研究方法进行试验台研究，或对已投运装置进行实物试验都是不经济也不现实的。下面利用流场数值计算软件对SCR反应器相关烟道系统的一系列烟气流场变化进行数值模拟，确保速度分布最佳，压力降低最小，实现SCR装置的预期性能目标。

4.1 数学模型的建立

在数值模拟中做了如下假设：(1)考虑流经催化剂的气相流体流动充分发展，已经完全达到稳定状态了，即流动为定常流动；(2)不考虑烟气中灰分的影响；(3)不考虑流动中的化学反应及影响；(4)整个系统绝热；(5)烟气各组分与氨气为理想气体。

4.2 基本方程

流体整个流动过程要受到物理守恒定律的支配，基本守恒定律包括质量守恒和动量守恒。(1)

4.2.1 质量守恒定律的表述 (2)

单位时间内流体微元体中质量的增加，等于同一时间间隔内流入该微元体的净质量。(3)按照这一定律，可以得出质量守恒方程，又称连续方程：(4)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (9)$$

式中， ρ 是密度； t 是时间； u_i ($i=1, 2, 3$)是速度矢量在三个坐标方向的速度分量。

4.2.2 动量守恒定律的表述

微元体中流体的动量对时间的变化率等于外界作用在该微元体上的各种力之和。动量守恒方程如下：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}[\mu(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})] + \rho g_i + F_i \quad (10)$$

式中， p 是静压； μ 是动力粘度； ρg_i 、 F_i 是重力体积力和其它体积力。动量守恒方程也称作运动方程，还称为Navier-Stokes方程。

4.3 模拟计算结果与分析

4.3.1 无导流板时的 SCR 烟道流场

图2为无导流板SCR系统在BMCR工况下纵剖面的流场图，图3为催化剂层入口截面烟气速度分布图。由于烟气通过烟道拐角时的离心作用，烟气速度分布不均从图1中可见，烟气在烟道拐角处的最高流速达到19m/s，最低只有2m/s左右。烟气进入反应器后，部分烟气以16m/s左右的速度贴壁快速通过反应器，部分烟气以4m/s的速度缓慢通过反应器，有少量烟气速度低于2m/s，并有漩涡存在。图3中可以看出，在催化剂层入口处烟气速度分布不均，速度梯度相差很大，这样的小均匀速度容易造成 NO_x 和 NH_3 反应不充分，催化剂得不到充分利用。不能满足SCR系统的设计要求。因此，根据烟气在SCR系统内的流动情况。增设导流板装置，从而提高脱硝效率。

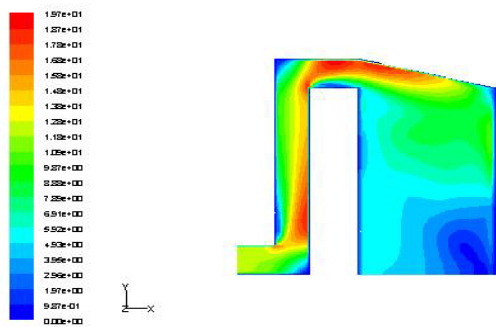


Figure 2. Section velocity distribution without deflector
图2. 无导流板 SCR 系统剖面速度分布图

4.3.2 SCR 反应器左上弯道上设置 1 块弧形导流板

通过模拟得到速度分布图3-5如下：

4.3.3 SCR 反应器左上弯道上设置 2 块弧形导流板

在左上弯道居中设置2弧形导流板，其速度分布图如图6、图7。

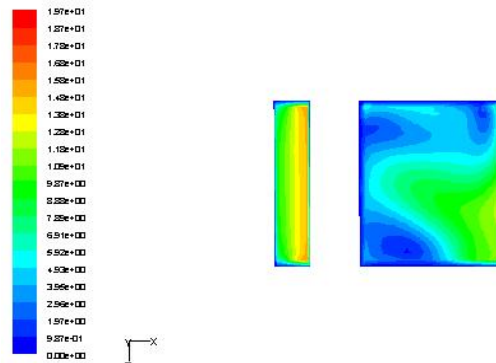


Figure 3. Inlet velocity distribution of catalyzer without deflector

图3. 无导流板SCR系统催化剂入口速度分布图

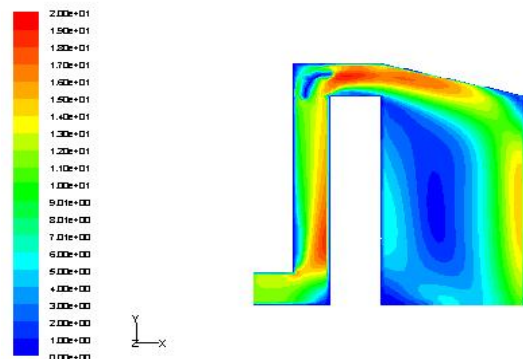


Figure 4. Section velocity distribution with 1 deflector

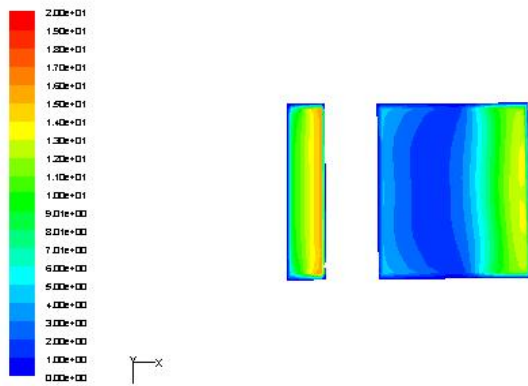


Figure 5. Inlet velocity distribution of catalyzer with 1 deflector
图5. 1块导流板催化剂入口速度分布图

4.3.4 SCR 反应器左上弯道上设置 3 块弧形导流板

在左上弯道居中设置3弧形导流板，其速度分布图如图8、图9。

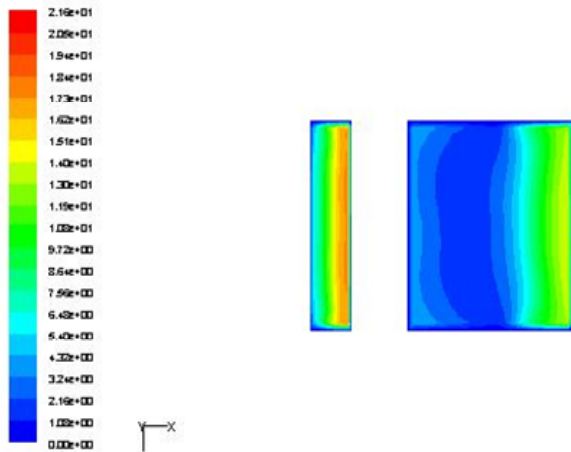


Figure 7. Inlet velocity distribution of catalyzer with 2 deflectors
图 7. 2 块导流板催化剂入口速度分布图

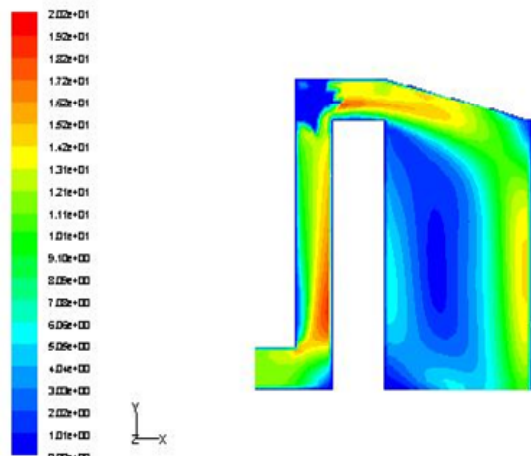


Figure 8. Section velocity distribution with 3 deflectors
图 8.3 块导流板剖面速度分布图

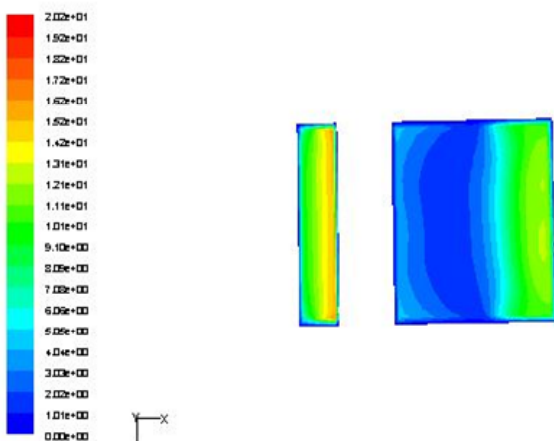


Figure 9. Inlet velocity distribution of catalyzer with 3 deflectors
图 9. 3 块导流板催化剂入口速度分布图

由上图可以看出，在左端烟道弯道加装导流板后，混合气体流场得到了很好的改善。随着导流板数量的增加，烟气速度漩涡明显减少，但同时也增大了流动阻力，致使催化剂入口处烟速过低。

5 结论

通过模拟计算可以看出，未安装任何导流装置的 SCR 反应器内部烟气流动情况并不理想，不符合工作要求，因此需要选择合适的导流装置。分别对烟道拐角进行了导流板设置，流场情况有所改善。对不同位置 and 不同数量的导流板设置进行了模拟，结果表明，导流板的安放位置不同，导流板对烟气速度分布的改善情况也不同，随着导流板数量的增多，烟气分布也更加均匀，但优化作用呈递减趋势，并且设置过多的导流板会明显增加流动阻力，降低了通过催化层的烟气流速，增加了系统负荷。

致 谢

本文得到上海市教委重点学科（第五期 No.G51304）和上海市教委第三期本科教育高地建设项目资助。

References（参考文献）

- [1] Cao Qingxi, Wu Shaohua, Liu Hui. Numerical simulation of furnace of 600MW ultra-supercritical boiler with SNCR technology [J]. Power Engineering, 2008, 28(3): 349-354
曹庆喜, 吴少华, 刘辉. 采用选择性非催化还原脱硝技术的 600MW 超超临界锅炉炉内过程的数值模拟[J]. 动力工程, 2008, 28(3): 349-354
- [2] Dong Jianxun. Experimental investigations and mathematical model building of SCR flue gas de NO_x in coal-fired power station[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2007
董建勋. 燃煤电厂 SCR 烟气脱硝试验研究及数学模型建立[D]. 保定: 华北电力大学, 2007
- [3] Huang Zhuqing. Discussion of SCR de NO_x technology in coal-fired power station[J]. Energy of China, 2005, (12): 36-39
黄竹青. 关于大型燃煤电站锅炉选择性催化还原脱硝技术的探讨[J]. 中国能源, 2005, (12): 36-39
- [4] Jia Shuangyan, LU Tao, Li Xiaoyun, Ning Xianwu. SCR denitrification technology and its application in our country[J]. Electric Power Environmental Protection, 2004, 20(1): 19~21
贾双燕, 路涛, 李晓芸, 宁献武. 选择性催化还原烟气脱硝技术及其在我国的应用研究[J]. 电力环境保护, 2004, 20(1): 19~21