

# 电厂 SCR 脱硝数值模拟技术研究进展

沈丹<sup>1</sup>, 李大梅<sup>2</sup>, 杨蕾<sup>1</sup>, 杨百忍<sup>1</sup>

(1.盐城工学院环境学院, 江苏盐城 224051; 2.南京博环环保有限公司, 江苏南京 210000)

**摘要:** 选择性催化还原法(SCR)是应用最为广泛的电厂脱硝方法。本文阐述了目前国内外采用 CFD 软件进行 SCR 脱硝数值模拟的各项研究, 探讨优化 SCR 脱硝设计的方法。

**关键词:** SCR 脱硝; 数值模拟; 优化设计

中图分类号: X701.7

文献标识码: A

文章编号: 1006-8759(2013)03-0010-04

## THE NUMERICAL SIMULATION TECHNOLOGY RESEARCH PROGRESS OF SCR DENITRATION IN POWER PLANT

SHEN Dan<sup>1</sup>, LI Da-mei<sup>2</sup>

(1. School of environmental science and engineering, Yancheng Institute of Technology, 2. Nanjing bohuan environmental protection technology co., LTD.)

**Abstract:** Selective catalytic reduction (SCR) is the most widely used plant denitration method. This paper describes the numerical simulation studies of CFD in SCR denitration, discusses the optimization SCR denitration design.

**Keywords:** SCR denitration; Numerical simulation; Optimization design

氮氧化物是大气污染的主要污染源之一, 其中火电厂排放的氮氧化物约占全国氮氧化物排放量的 35%~40%。2010 年全国氮氧化物排放量达到 2273.6 万 t, 成为世界第一氮氧化物排放国, 鉴于氮氧化物对大气环境的不利影响以及目前火电厂氮氧化物排放控制的严峻形势, 《国务院关于印发“十二五”节能减排综合性工作方案的通知》(国发 [2011]26 号)中<sup>[1]</sup>, 明确了“十二五”各地区氮氧化物排放总量控制计划, 至 2015 年全国氮氧化物排放量削减 10% 的总量控制目标, 即为 2046.2 万 t。

控制电厂 NO<sub>x</sub> 排放的技术可以分为三大类: 使用低氮燃料、低 NO<sub>x</sub> 燃烧技术、烟气脱硝。当前脱硝最有效、技术最成熟的方法就是烟气脱硝, 其主要方法有: 选择性催化还原法(SCR), 选择性非催化还原法(SNCR), SNCR/SCR 混合法, 液体吸收法, 微生物吸收法, 活性炭吸附法等, 目前, 工业

应用最为广泛的 SCR 法占实际运行的 90% 以上, 是目前唯一大规模投入商业应用并能满足严格环保排放要求的控制措施。

### 1 SCR 脱硝系统

SCR 脱硝系统处理的烟气是由锅炉燃烧燃料所产生的, 经空气预热器进入脱硝装置, 脱除氮氧化物后进入除尘器, 后经脱硫系统脱除硫氧化物, 最后净烟气进入烟囱排入大气。SCR 系统的工作原理是在 280℃~420℃ 温度下, 烟气中的 NO<sub>x</sub> 和上流烟道内喷入的还原剂 NH<sub>3</sub> 在催化剂作用下发生还原反应, 生成 N<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 等。SCR 系统在完成结构设计和选定催化剂的前提下, 烟气气流分布不均匀容易造成 NO<sub>x</sub> 与 NH<sub>3</sub> 的混合及反应不充分, 不但极易造成局部喷氨过量, 导致副反应的发生, 而且影响脱硝效果及经济运行。SCR 脱硝系统具有设备尺寸大、烟道布置局限性大等特点, 对烟气流速、氨氮比、温度及飞灰的负载分布提出

了相当高的要求,深入研究烟气脱硝系统,改善烟气和氨气的混合均匀程度,随着 CFD 软件应用的广泛,越来越多的研究与企业将 CFD 数值模拟作为优化烟气脱硝系统的设计提供指导,促进燃煤电厂的节能减排。实际工程设计中,工程师们对其仅具有定性的了解,很难对影响程度作准确定量的判断。越来越多的企业通过流体力学软件模拟其流场分布,优化反应系统内部各部件的布置,为脱硝反应系统结构参数的优化设计与运行调试提供参考。

## 2 SCR 脱硝系统的 CFD 数值模拟

在 SCR 脱硝装置运行过程中,为避免过高  $\text{NO}_x$  排放和过高的氨逃逸量、提高系统脱硝率,要求烟气的均匀分布,这很大程度上取决于系统内部装置,包括喷氨系统(喷氨格栅或喷嘴)、烟气混合系统(静态混合器或动态混合器)、反应器烟道(导流板、整流器)的布置与设计。

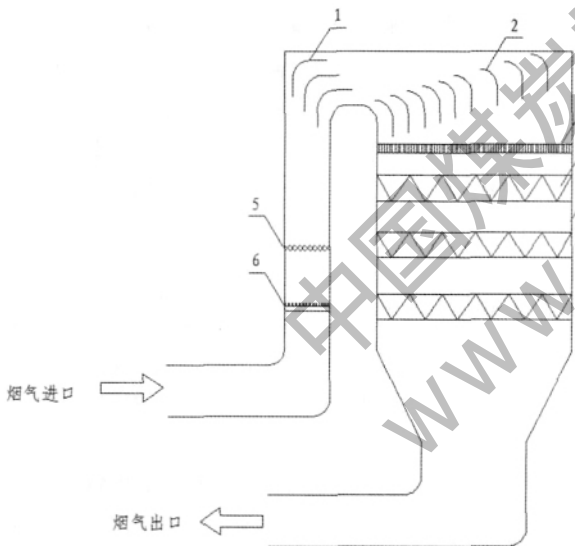


图 1 SCR 脱硝系统图

1.反应器前部烟道导流板;2.反应器上方导流板;3.整流器;4.催化剂层;5.混合器;6.喷氨装置;7.反应器本体;

### 2.1 SCR 反应器内部构件模拟

(1)导流板:导流板一般安装在 SCR 反应器上方与烟道转弯处,见图 1 所示,通过 CFD 软件建立模型后,可确定其最优布置方案,以便均匀流场分布。

美国 Alstom 公司的 Galen Richards<sup>[2]</sup>运用 CFD 模拟了 SCR 反应器部分的速度分布,出口截面中  $\text{NO}_x$  浓度分布,喷氨格栅上各个喷嘴的模

拟,催化剂层中氨氮比分布,通过 SCR 反应器出口处流速的均匀性比较,得出导流板设计的较好位置。蔡小峰等<sup>[3]</sup>使用 CFX5.7.1,采用标准  $k-\varepsilon$  湍流模型,模拟了 SCR 脱硝反应塔入口段烟气速度场,并分析比较了导流板对烟气速度场的影响,确有均匀 SCR 反应塔进口处烟气速度场的作用,但此模型较为简单,仅为初步尝试,与实际工程应用仍有差距;愈逾等<sup>[4]</sup>使用 Fluent 软件,采用标准的  $k-\varepsilon$  二方程湍流模型,典型的 Simple 算法预测某 600MW 电厂选择性催化还原法烟气脱硝系统内的流场状态,分析其在锅炉最大连续蒸发量(BMCR)工况下,不同导流设计的流场情况,对脱硝系统内不同的导流方法进行研究分析,最终针对某 SCR 系统自行设计导流装置,完成系统流场的优化;作者<sup>[5]</sup>以 600MW 电厂选择性催化还原反应器中导流板为研究对象,采用 Fluent 软件,以  $k-\varepsilon$  作为计算模型,Simple 算法,对反应器内三种不同形状导流板(烟道入口与反应器上方各为直板、弧度板、弧度直板的比较)进行反应器内流场的数值模拟,得出较合适的导流板形状及流场;同时还对反应器内加入整流器前后的流场进行比较,研究结果对优化脱硝系统内的导流板和整流器设计提供参考;浙江大学张彦军等<sup>[6]</sup>使用 Fluent 软件进行无导向板、有导向板、有导向板加折角与圆弧转角的比较,模拟实际运行过程中各种状态,具有一定的参考价值;华北电力大学周健<sup>[7]</sup>等人使用 Ansys-CFX10.0 对 7 种不同的导流板(无导流板、直形、弧形)设计和布置方案进行数值模拟,通过速度矢量图以及引入相对标准偏差的概念,定性和定量分析比较了模拟结果,确定出最优的导流板布置;长沙理工大学彭慧等<sup>[8]</sup>使用 Fluent 软件对 SCR 脱硝反应器内三种不同的导流板(烟道入口无导流板与烟道右上部均匀布置导流板、烟道入口二块导流板与烟道右上部不均匀布置导流板、烟道入口三块导流板与烟道右上部不均匀布置导流板)进行了反应器内烟气与氨均混的数值模拟,得出导流板最优布置方案。

(2)导流+整流+混合器:单纯针对导流装置的模拟较多,故进一步对 SCR 脱硝系统中喷氨格栅、导流板、混合器、整流器的设计及合理配置等进行数值模拟,并为工程设计提供重要参考依据。

北京化工大学周丽丽等<sup>[9]</sup>使用 Fluent 软件,以  $k-\varepsilon$  作为计算模型对某 600MW 燃煤发电厂烟气

脱硝内不同布置方式的均流装置(喷氨格栅+静态混合器+导流板)进行数值模拟,考察对催化剂入口截面速度场、浓度场分布的影响,通过正交设计方法,模拟研究均流装置对速度场的影响,得到影响催化剂入口速度场分布的主要因素;国电龙源杨超等人<sup>[10]</sup>采用 Fluent 软件,以标准双方程模型、Simple 算法对某 600MW 燃煤机组 SCR 脱硝系统(导流叶栅、整流板与涡流混合器不同布置为几何模型)进行数值模拟,获得速度场,结果表明:加装导流叶栅和整流格栅,反应器内第一层催化剂入口断面烟气速度不均匀性小于 15%,在获得最佳流场的前提下,涡流混合器保证了氨与烟气在反应器中的充分掺混。

(3)催化剂:SCR 反应器的催化剂类型主要有平板状、蜂窝状和波纹状催化剂,见图 2 所示。

由于 SCR 需要消耗大量的催化剂,存在运行费用高(催化剂费用通常占到系统初始投资的 50%~60%),设备投资大的缺点,同时对改造机组亦有场地限制,对设计水平提出了更高的要求。

东南大学刘涛<sup>[11]</sup>使用 Fluent 软件,结合工业上运用较为广泛的蜂窝状、波纹状、斜板状催化剂结构,利用试验数据分析得出的化学动力学参数,模拟了实验室条件下不同结构催化剂的流场,并对几种不同结构催化剂阻力进行分析对比得出,结果表明使用蜂窝状催化剂效果最好。

## 2.2 数值模拟与冷态模型对比

单纯的 CFD 流场数值模拟远不能满足实际设计需要,针对投资费用高的电厂脱硝装置需有小试试验数据来验证数值模拟,越来越多的公司与科研机构都通用数值模拟与冷态物理模型的对比,更好的优化工程设计。

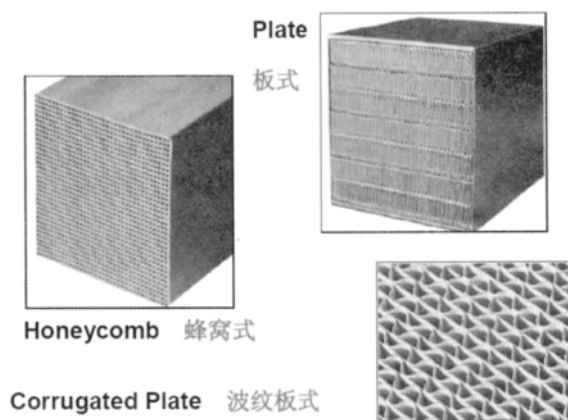


图 2 SCR 脱硝反应的工业催化剂

美国 B&W 公司 Walter Nischt 等<sup>[12]</sup>使用数值模拟和 1/12 AES Somerset 电厂的 SCR 物理模型拟了侧面速度,温度,氨氮比,压力分布,烟气速度,其中物理模型的压力分布与实际很吻合,且用数值模拟会使温度,氨氮比更加精确;A.N. Sayre, M.G. Milobowski<sup>[13]</sup>使用 Fluent 软件模拟与 1/10 的台湾电厂的 SCR 物理模型进行对比研究,SCR 催化剂为多孔平板物质,模拟结果也表明 CFD 对压力的模拟不如物理模型精确;Kevin Rogers, Mel Albrecht, Michael Varner 等<sup>[14]</sup>以 1/10 实物的物理模型与数值模拟出的侧面流速、温度、氨氮比、压力的数值模拟做了数据比较,并提出通过数值模拟可以对 SCR 反应器进行优化设计,如优化侧面流速,最小化压力,优化氨氮比及可接收的温度;上海海事大学徐圆圆等人<sup>[15]</sup>使用 Fluent6.3 软件进行了 300 MW 燃煤发电厂 SCR 脱硝系统三种不同导流板、整流格栅布置方式的模拟,得出改进后的 SCR 脱硝系统布置方式,确保催化剂入口速度均匀分布,得出混合器厚度为 350mm,并通过 1/12 比例设计的冷态试验结果定性验证了数值模拟结果;浙江大学蒋新伟等人<sup>[16]</sup>采用 Fluent 软件,以 k-ε 计算模型对某电厂 660MW 燃煤锅炉 SCR 脱硝系统中整流格栅、多孔板、导流板的设计方案进行了速度场和浓度场分布及压降的研究,结果表明数值模拟结果和 1/12 比例设计的冷态试验结果较为吻合,其中喷氨格栅上游速度分布 CV(标准偏差)值为 15.4%,催化剂入口速度分布 CV 值为 8.1%,浓度场 C<sub>v</sub> 值为 5.7%,满足系统设计要求;国电龙源郭婷婷等<sup>[17]</sup>使用 Fluent 软件、结合多孔介质模型和组分输运方程对某 1000MW 燃煤机组 SCR 脱硝系统(导流叶栅、整流板与涡流混合器不同布置为几何模型)进行数值模拟,获得速度场和浓度场,模拟结果表明:加装导流叶栅和整流格栅获得最佳流场后,涡流混合器保证了氨与烟气在反应器中的充分掺混,并且通过 1/15 比例设计的冷态模型试验验证了数值模拟的可靠性,模拟计算结果与试验数据较吻合;博奇电力张如意等<sup>[18]</sup>采用 Fluent 软件,以 k-ε 计算模型,Simple 算法对某电厂 600 MW 燃煤锅炉 SCR 脱硝系统(含导流叶片、整流格栅、静态混合器等主要部件)进行了数值模拟,结果表明,数值模拟结果和 1/12 比例设计的冷态物理模型试验结果较为吻合;催化剂入口速度分布 CV(标准偏差)值以及浓度场

$C_v$  值均满足设计要求。

### 2.3 加入化学反应

流场数值模拟与冷态物理模型模拟都未加入化学反应,越来越多针对加入化学反应的 CFD 软件模拟的研究。

B. Bolton, X. Fan, N. Hakim, K. Sisken, H. Zhang<sup>[19]</sup>使用 CFD 模拟了一维和三维的 SCR 反应器中 NO 与 NO<sub>2</sub> 与 NH<sub>3</sub> 在催化剂中的反应时,NO 与 NO<sub>2</sub> 浓度随温度变化的关系,并使用 CFD 与 Chemkin 软件联合模拟了以钒为催化剂的 NO 具体反应,得出出口温度为 260℃时,NO,NO<sub>2</sub> 与 NH<sub>3</sub> 的浓度分布;美国 Fuel Tech 公司的 Joseph R. Comparato, John M. Boyle, William F<sup>[20]</sup>等人使用 CFD 软件与 chemkin 联合模拟了 SCR 与 SNCR 混合系统中,共模拟了 10 个 CFD 模型,包含了 31 中物质中的 90 个反应的 Chemkin 模拟,得出两种不同浓度 CO 下,随温度升高的最终 NOX 浓度以及随时间变化的温度值;王健等人<sup>[21]</sup>以 600MW 火电机组 SCR 脱硝装置(反应器内部含导流板、整流格栅、出灰斗)为研究对象,应用 Fluent 软件完成建立模型,以  $k-\varepsilon$  计算模型,并加入化学反应模型 Laminar Finite-Rate 的体积反应 Volumetric Reactions,最终得出 SCR 脱硝系统流速分布均匀、偏差符合设计要求,NH<sub>3</sub> 与烟气混合均匀,氨逃逸浓度低。该研究结果引入有限速率化学反应模型,使计算流体力学软件完成对 SCR 脱硝系统烟气中各组分进出口浓度的模拟。

### 3 结语

SCR 脱硝系统的数值模拟中,以 Fluent 软件最为常用,通过 Gambit 建立模型,模型中可包含导流、整流、混合器等装置的设置,经  $k-\varepsilon$  气体紊流模型、能量守恒定律、边界条件的设定后进行迭代计算,得出反应器内部相应的压力、速度、浓度场的分布;通过计算流体力学软件模拟的结果经 1/10~1/15 比例不等的物理模型进行定性对比研究,可更好的指导 SCR 脱硝系统的前期设计;结合化学反应的 CFD 软件数值模拟,更有效的得出气体浓度分布与氨逃逸率,优化 SCR 脱硝系统设计,但由于 SCR 反应为气固两相反应,较为复杂,仍有待于进一步定量研究。因此,在常规 SCR 脱硝系统设计前期,利用 CFD 软件对脱硝反应器内部流场及脱硝效果进行模拟分析是优化工程设计

越来越重要的技术手段之一。

### 参考文献

- [1] 国家下达“十二五”各地区氮氧化物排放总量控制计划[J]. 节能与环保[J],2012, 05:16.
- [2] Galen Richards. CFD Modeling Of Utility Boiler Components at ALSTOM Power Inc. <http://www.alstom.com>
- [3] 蔡小峰,李晓芸. SCR 反应塔入口段烟气速度场的数值模拟[J]. 电力环境保护 2006, 22(5):18-19.
- [4] 俞逾,杨晨,范莉. 电厂 SCR 烟气脱硝系统流场的数值模拟[J]. 计算机仿真, 2007, 24(12):222-225.
- [5] 沈丹,仲兆平,过小玲. 600MW 电厂 SCR 烟气脱硝反应器内不同导流板的流场数值模拟[J]. 电力环境保护, 2007, 23(1):42-45.
- [6] 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( 1): 15- 17.
- [7] 周健,阎维平,石丽国,孔凡卓. SCR 反应器入口段流场均匀性的数值模拟研究[J]. 热力发电, 2009, 38(4): 22-25.
- [8] 彭慧,姜昌伟,陈冬林. SCR 脱硝反应器内烟气与氨混流的数值模拟[J]. 电力与能源, 2011, 32(4): 335-337.
- [9] 周丽丽,刘辉,雷志刚. 选择性催化还原反应器气体预分布器内速度场和浓度场模拟[J]. 化工进展,2009, 28(增): 194-198.
- [10] 杨超,张杰群,郭婷婷. SCR 烟气脱硝装置烟气流场数值模拟[J]. 东北电力大学学报, 2012, 32(1): 66-70.
- [11] 刘涛. SCR 多元催化剂脱硝性能试验研究及数值模拟[D]. 东南大学硕士论文, 2006, 19-38.
- [12] Walter Nischt, Jeff Hines, Kevin Robison. Update of Selective Catalytic Reduction Retrofit on a 675 MW Boiler at AES Somerset. ASME International Joint Power Generation Conference, 2000, 1-8.
- [13] A.N. Sayre, M.G. Milobowski. Validation of Numerical Models of Flow Through SCR Units. EPRI-DOE-EPA Combined Utility Air Pollutant Control, 1999.
- [14] Kevin Rogers, Mel Albrecht, Michael Varner. Numerical Modeling for Design Optimization of SCR Applications. ICAC NOx Forum, 2000.
- [15] YuanYuan Xu, Yan Zhang, Jingcheng Wang, JingQi Yuan. Application of CFD in the optimal design of a SCR-DeNOx system for a 300 MW coal-fired power plant Computers and Chemical Engineering 49 (2013) :50- 60.
- [16] 蒋新伟,施平平,钟毅等. 电站锅炉 SCR 系统流场的冷态试验与数值模拟的研究[J]. 能源与环境, 2010(3):51-55.
- [17] 郭婷婷,刘汉强,杨勇平,路光杰. 基于数值模拟的 1000 MW 燃煤机组 SCR 脱硝系统设计 [J]. 电站系统工程, 2010, 26 ( 5): 61- 64.
- [18] 张如意,毕江涛,王家鹏. 燃煤机组 SCR 脱硝系统的数值模拟与冷态模型试验[J]. 能源研究与利用, 2012(4) :30-32.
- [19] B. Bolton, X. Fan, N. Hakim, K. Sisken, H. Zhang. Update on Modeling for Effective Diesel Engine After treatment Implementation - Master Plan, Status and Critical Needs Master Plan, Status and Critical Needs. <http://www.babcock.com/>
- [20] Joseph R. Comparato, John M. Boyle, William F. Michels. Commercial SNCR/SCR Hybrid Applications On Large Utility Boilers. <http://www.ftek.com/>
- [21] 王健,朱彤,王俩等. 引入化学反应的 600MW 机组 SCR 脱硝系统模拟[J]. 电力科技与环保, 2012, 28(4):31-33.