

Review of SCR Flow Field Optimization Simulation

Tingting Liu

Shanghai Electric Power Generation Environment Protection Engineering Co. Ltd., Shanghai
Email: 845050290@qq.com

Received: Jun. 3rd, 2020; accepted: Jun. 25th, 2020; published: Jul. 2nd, 2020

Abstract

In the design stage of the selective catalytic reduction (SCR) denitration system, computational fluid dynamics (CFD) is a very significant tool. The use of CFD software to simulate the distribution of flue gas and reduction agent in the SCR system can continuously optimize the denitration system through the calculation results of the flow field. This paper enumerated and summarized the current simulation and optimization of structures such as deflectors, ammonia injection grids and rectifier grids, in order to provide some ideas for the simulation and optimization of the flow field of SCR systems.

Keywords

SCR, CFD, Simulation Optimization

SCR流场优化的模拟研究综述

刘婷婷

上海电气电站环保工程有限公司, 上海
Email: 845050290@qq.com

收稿日期: 2020年6月3日; 录用日期: 2020年6月25日; 发布日期: 2020年7月2日

摘要

在选择性催化还原技术(SCR)脱硝系统设计阶段, 计算流体力学(CFD)是十分重要的工具。使用CFD软件模拟SCR系统内烟气与还原剂的分布, 能够通过流场的计算结果不断优化脱硝系统。本文列举及总结了目前在导流板、整流格栅及喷氨格栅等结构上的模拟优化情况, 为SCR系统流场模拟优化工作提供一些思路。

关键词

SCR, CFD, 模拟优化

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

煤炭在我国能源需求和消耗中占据重要位置, 而燃煤所产生的氮氧化物是污染大气的主要有害物质之一[1], 所以燃煤电厂 NO_x 的排放成为了我国烟气污染物治理的重点。目前常用的脱硝技术有低氮燃烧、选择性非催化还原(SNCR)及选择性催化还原(SCR)技术, 其中 SCR 技术因具有受锅炉运行条件影响较小, 反应条件易于控制, 脱硝效率高(可达 90%以上)等优点得到了较广泛的应用[2] [3]。SCR 脱硝系统内部烟气流场不均匀时, 易造成还原剂与烟气混合程度低及氨逃逸过量等情况, 对脱硝效率产生消极影响。因此, 为保证脱硝系统的高效运行, 对其内部流场进行优化就显得十分重要。

目前 CFD 软件在脱硝系统优化中很受欢迎, 该软件通过建模、迭代计算及分析结果, 可以达到优化设计研究的目的, 具有可操作性强, 低成本, 可缩短产品周期及计算结果直观的优点, 是脱硝系统流场优化的重要工具。

本文以煤粉炉为例, 从 SCR 系统流场优化角度, 列举了目前 SCR 系统数值模拟优化的进展。

2. SCR 反应概述

选择性催化还原(SCR)技术是在烟气中加入氨和尿素等还原剂, 在 $320^\circ\text{C}\sim 420^\circ\text{C}$ 的温度窗口, 还原剂与烟气中的 NO_x 在催化剂表面发生反应, 生产氮气和水的结果, 反应示意图如图 1 所示。

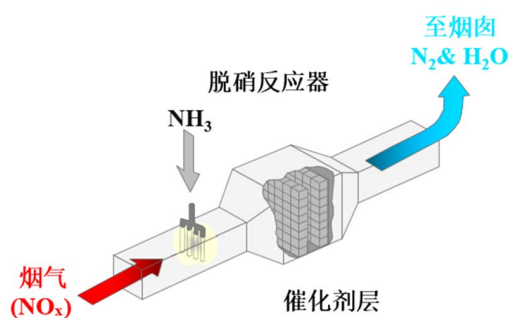
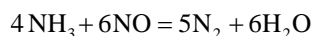
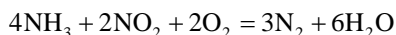
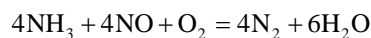
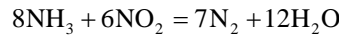


Figure 1. SCR response diagram

图 1. SCR 反应示意图

主要反应如下:





SCR 反应受温度、氨氮浓度等因素影响, 浓度低或者混合不充分都会影响脱硝效果及运行的经济性, 因此对 SCR 系统进行流场模拟就显得十分重要。流场模拟主要分为确定求解方程、前处理(建模及绘制网格)、Fluent 参数设置, 求解及后处理几个部分。

3. SCR 数值模拟概述

3.1. 控制方程

根据 SCR 运行特点, 在建模时可进行如下假设和简化:

1) 将烟气视为不可压缩流体; 2) 假设进口烟气速度分布均匀; 3) 催化剂层及整流装置等多孔结构采用多孔介质模型进行计算。基于以上假设及简化, SCR 系统烟气流场的连续性方程、动量方程、能量方程及组分守恒方程的通用形式可表示如下[4]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S \quad (1)$$

式中: S 为广义源项; Γ 为广义扩散系数; ϕ 为通用的因变量; ρ 为流体密度; t 为时间; u 为速度。

Fluent 多孔介质模型就是在定义为多孔介质的区域结合了一个根据经验假设为主的流动阻力。本质上是在动量方程上叠加了一个动力源项, 源项由两部分组成: 粘性损失项和内部损失项。且在主流方向和非主流方向相差不超过 1000 倍。

$$S_i = \frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \cdot \frac{1}{2} \rho |v_i| v_i \quad (2)$$

式中: μ 为流体粘度; v_i 为 i 方向 (X , Y 或 Z) 的速度分量; S_i 为 i 方向 (X , Y 或 Z) 动量源项; C_2 为内部阻力因子, α 为介质渗透性。

湍流模型采用 $k-\varepsilon$ 模型, 其连续性方程为[5]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0, i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

式中: ρ 为流体密度; t 为时间; x_i 为位移矢量; u_i 为 i 组分的速度矢量物质输运模型。

绝大多数 SCR 流场模拟时, 采用无反应的混合组分, 通过第 i 种物质对流扩散方程预估其质量分数 X_i [6]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho X_i) + \nabla(\rho u X_i) = -\nabla J_i + R_i + S_i, \quad (4)$$

式中: J_i 为物质 i 的扩散通量, 由浓度梯度产生; R_i 为化学反应净产生速率; S_i 为离散相和定义的源相导致的额外产生速率。此处 R_i 和 S_i 均取 0。无反应的混合组分, 只需考虑 i 种物质的湍流扩散通量 J_i [7]。

$$J_i = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_i}\right) \nabla X_i$$

式中: $D_{i,m}$ 是混合物中第 i 种物质的扩散系数。

Sc_i 是湍流施密特数, $Sc_i = \frac{\mu_t}{\rho D_i}$ 。

μ_t 是流体粘性系数, D_i 是扩散系数。

3.2. 建模及网格划分

流场模拟前处理软件可选择 Gambit, Workbench, Icem 等。建模时根据设备结构特点对内部装置进行合理简化,可大大提高计算效率,例如喷氨喷嘴可简化为喷口,忽略对流场影响较小的装置(构架、梁等)。

在弯头或者结构较复杂处建议采用非结构性网格。为同时兼顾计算的准确性及高效性,网格数量可通过网格无关性认证来确定。

3.3. Fluent 设置

在 Fluent 设置中,进出口烟道一般设置为速度入口及压力出口,烟气与氨气的混合选择多组分运输模型,催化剂、整流格栅等多孔结构可采用多孔介质设置,孔隙度根据结构参数确定。模拟时,不考虑氨和 NO_x 的化学反应,只考虑二者的混合。

4. SCR 内部装置模拟优化

通过数值模拟优化 SCR 系统的内部装置,例如导流板,喷氨格栅及整流格栅等,可改善 SCR 脱硝系统内烟气流场,从而提高脱硝效率。

4.1. 导流板的优化

陈东林等人[8]对湖南一台 300 MW 燃煤机组进行导流板优化模拟,发现在喷氨后布置导流板对首层催化剂速度流场产生较大影响,而喷氨前的导流板布置对首层催化剂层氨浓度场分布影响较大,对导流板位置优化提供了一定参考。

王汉青等人[9]对某 300 MW 机组脱硝装置进行模拟,通过分析速度相对偏差等五个参数,发现距离反应器最近处的导流板尺寸对流场影响最大,而且在反应器顶部安装整流格栅,可使流场更均匀。为使某 330 MW 机组首层催化剂入口速度偏差小于 15%,改善系统压降,杨松等[10]发现反应器与水平烟道连接处安装直板、两个转弯烟道安装弧形导流板时脱硝装置速度场及浓度场分布较均匀。

大部分学者进行流场模拟时都选择忽略了脱硝系统中的灰尘,为使模拟结果更有现实指导意义,朱天宇等[11]对某 600 MW 燃煤机组脱硝装置进行模拟时加入了飞灰颗粒的离散项,发现该装置流场受飞灰影响不大,但考虑到催化剂堵塞及使用寿命,在灰量较大的 SCR 脱硝系统中建议安装吹灰装置。还得出弧形板后连接一段竖直板导流效果更好的结论,该结论与文献[10]都提出了弧形板与竖直板的配合,可为导流板的结构优化提供新的设计依据。

于玉真等[12]在前人的基础上,以某 660 MW 燃煤超临界锅炉为研究对象,利用正交实验法,证明了安装导流板并不会增加脱硝系统的压力损失,氨烟气混合器会增加一定的压降,但其整流效果显著。毛剑宏等[13]发现添加导流板后脱硝系统的压降减少很多,并将模拟结果与冷态试验数据进行对比分析,进一步验证了模拟结果,具有一定的参考价值。综上,可以发现导流板不仅能使流场更均匀,还能降低系统压降,因此合理添加导流板就显得尤为重要。

4.2. 喷氨格栅及整流格栅的优化

吴学智等[14]提出不均匀喷氨法,将喷氨格栅划分成若干个区域,根据各区域的氨浓度分布来调节喷氨格栅的开度,使氨氮混合更充分,增强了反应效率。在实际工况中,大型燃煤锅炉省煤器出口烟气流场呈不均匀分布,但当前大部分学者对 SCR 系统进行模拟时采用了均匀入口边界,故周英贵[15]决定对非均匀入口条件的 SCR 氨喷射做模拟研究,针对脱硝入口烟气的非均匀性调整喷氨量,更符合工程实际。

王乐乐等[16]使用数值模拟的方法对某电厂的喷氨格栅结构优化方案进行了验证, 得出了该双向调节(横向烟道与纵向烟道)方案具有可行性的结论, 该评估方法对火电厂脱硝系统优化具有一定的借鉴作用。

张巍等[17]对某 600 MW 机组整流格栅进行了优化模拟, 发现该系统整流格栅的压力损失为 100 Pa 时, 首层催化剂入口速度偏差及浓度偏差最小。陶立新等[18]将整流格栅结构优化为阶梯式, 发现整流效果增强。徐劲等[19]发现, 整流格栅及首层催化剂高度都会对首层催化剂入口烟气速度及氨浓度分布造成影响。格栅高度变化时, 需相应改变催化剂的安装高度。高建强等[20]通过模拟研究确定了某 1000 MW 燃煤机组 SCR 脱硝反应器整流格栅的最佳间距以及整流格栅与催化剂安装高度的比值对流场的影响。整流格栅与催化剂安装高度的耦合研究, 进一步为脱硝反应器流场优化提供了新的思路和方向。

5. 结论

1) 导流板的安装位置, 数量及结构对导流效果存在影响, 且距离反应器最近处的导流板尺寸对导流效果影响最大。安装位置一般位于烟道转角处, 安装数量可参考相近功率机组的脱硝系统, 结构上采用弧形导流板配合竖直直板效果更好。对导流板进行模拟优化发现该装置不仅能够改善流场分布, 提高脱硝效率, 而且合适的导流优化措施会减小系统压降。

2) 不均匀喷氨技术的应用进一步增强了还原剂与 NO_x 的反应, 提高了脱硝效率, 降低了氨逃逸率。

3) 对导流板、喷氨格栅及整流格栅的进行优化时, 要考虑到各结构之间的耦合优化。在安装导流板的基础上, 同时在反应器入口配以整流格栅, 整流格栅间距、高度和结构的优化及整流格栅与催化剂安装高度的耦合都会使流场更加均匀。

参考文献

- [1] 蒋扬虎, 丁翠娇, 郑兆平, 等. 燃烧 NO_x 生成机理及抑制方法[J]. 武钢技术, 2000, 38(6): 17-21.
- [2] 董建勋. 燃煤电厂 SCR 烟气脱硝试验及数学模型建立[D]: [博士学位论文]. 保定: 华北电力大学, 2007: 36-38.
- [3] Bris, T.L., Cadavid, F., Caillat, S., et al. (2007) Coal Combustion Modelling of Large Power Plant for NO_x Abatement. *Fuel*, **86**, 2213-2220. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.05.054>
- [4] 王福军. CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [5] 刘波, 高歌. 使用 GAO-YONG 方程组对湍流边界层拟序结构特性的研究[J]. 航空动力学报, 2003, 18(3): 313-321.
- [6] 郑淑芳. 氨肥法烟气脱硫、脱硝、除尘一体化技术的研究[D]: [硕士学位论文]. 保定: 华北电力大学, 2005: 36-38.
- [7] 张净玉. 球形离散颗粒抑制热喷流红外辐射规律研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2007: 76-78.
- [8] 陈冬林, 刘欢, 邹婵, 等. 300MW 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.
- [9] 王汉青, 易检长, 李端茹等. SCR 脱硝系统导流板优化设置的数值模拟[J]. 湖南工业大学学报, 2015, 29(2): 1-7.
- [10] 杨松, 丁皓姝, 黄越. SCR 脱硝系统流场数值模拟与优化[J]. 热力发电, 2014, 43(9): 71-75.
- [11] 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.
- [12] 于玉真, 李伟亮, 王绍龙, 等. SCR 脱硝系统流道均流装置数值模拟与优化[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24): 7304-7457.
- [13] 毛剑宏, 宋浩, 吴卫红, 等. 电站锅炉 SCR 脱硝系统导流板的设计与优化[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, 45(6): 1124-1129.
- [14] 吴学智, 聂会建, 鞠付栋, 等. SCR 脱硝系统不均匀喷氨方案的数值模拟研究[J]. 电力科技与环保, 2014, 30(5): 26-29.
- [15] 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.
- [16] 王乐乐, 周健, 姚友工, 等. 烟气脱硝 SCR 氨喷射系统调整效果评估[J]. 中国电力, 2015, 48(4): 16-22.

- [17] 张巍, 刘国富, 沈德魁等. 基于 CFD 方法的 SCR 系统多孔板优化布置研究[J]. 科技创新导报, 2016, 13(14): 48-50.
- [18] 陶正新, 韦红旗, 李文霞, 周诗齐. 基于 CFD 模拟的 SCR 脱硝装置优化改造[J]. 发电设备, 2019, 33(3): 178-181.
- [19] 徐劲. SCR 流场及飞灰浓度分布优化数值模拟和实验研究[D]: [硕士学位论文]. 保定: 华北电力大学, 2017.
- [20] 高建强, 梁胜莹, 危日光. SCR 整流格栅高度与催化剂安装耦合影响分析[J]. 中国电力, 2019, 52(4): 144-150.