

深度脱硝流场优化工程案例分析

杨丁^{1,2}, 郭俊^{1,2}, 叶兴联^{1,2}, 苏寅彪², 刘栋栋²

(1 国家环境保护电力工业烟尘治理工程技术中心;

2 福建龙净环保股份有限公司) 作者邮箱: 13860223410@139.com

摘要 采用CFD数值模拟方法对某电厂400MW机组烟气脱硝装置流场进行了诊断,分析导致该脱硝装置现场脱硝效率低、烟道积灰及空预器磨损等问题的具体原因,之后对此脱硝装置流场进行优化。优化结果表明:在省煤器出口水平扩张段烟道增设导流板,消除了水平扩张段烟道的大范围涡流,有利于减轻烟道积灰,并使喷氨区域烟气速度分布均匀;将喷氨混合装置改成“喷氨格栅+圆盘混合器”型式,强化了氨氮混合,使催化剂入口氨氮浓度分布均匀性得到显著改善,有利于提高脱硝效率、降低氨逃逸率;在空预器上游烟道增设导流装置,提高了空预器烟气速度分布均匀性,有利于解决空预器磨损问题。通过流场优化进行深度脱硝改造后,此脱硝装置脱硝效率得到提高,烟道积灰及空预器磨损得以减轻和消除。

关键词 深度脱硝 数值模拟 流场优化

氮氧化物(NO_x)是大气环境问题的主要污染物,它是形成酸雨、光化学烟雾、破坏臭氧层的主要物质,具有很强的毒性,对人体健康、生态环境、社会经济都有很大的破坏力^[1]。燃煤电厂是NO_x的主要排放源,因此燃煤电厂NO_x减排成为了NO_x污染物控制的关键手段。

2011年国家环保部发布的《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223-2011)要求燃煤电厂氮氧化物排放值低于100mg/m³;后来,2014年国家三部委联合印发了“煤电节能减排升级与改造行动计划(2014-2020年)”将NO_x排放浓度限值降低至50mg/m³,这就要求燃煤电厂进行深度脱硝以实现超低排放。

选择性催化还原(SCR)脱硝技术是治理燃煤电厂NO_x污染物的最有效形式,其因装置结构简单、可靠性好、脱硝效率高等优点,在世界上得到了广泛的应用^[2]。在催化剂定型情况下,流场将对SCR脱硝性能起决定性作用,其影响着SCR脱硝装置脱硝效率、氨逃逸率及催化剂使用寿命^[3-5]。目前燃煤电厂SCR脱硝运行过程中容易出现脱硝效率低、氨逃逸量大、催化剂磨损与积灰、系统流动阻力大、烟道积灰、空预器堵塞与磨损^[6-8]等问题,这些问题的出现都与流场有关,如烟道导流板设置不合理,导致系统流动阻力大、烟道积灰;催化剂入口氨氮混合不均导致脱硝效率低、氨逃逸量大;催化剂层入口烟气速度不均,存在高烟速区和低烟速区,高烟速区容易导致催化剂磨损,低烟速区容易导致催化剂积灰;空预器入口速度分布不均,导致空预器堵塞和磨损,并影响空预器换热,而氨逃逸量大,生成的硫酸氢氨进一步导致空预器严重堵塞。

在排放标准不高的情况下,脱硝流场问题可能未引起足够重视,但现阶段国家要求燃煤电厂实现深度脱硝,此时对脱硝装置进行提效改造,流场优化至关重要。本文将结合某电厂400MW机组烟气深度脱硝改造工程进行流场优化案例分析。

1 工程对象

某电厂400MW机组烟气脱硝装置如图1所示,反应器共布置三层催化剂,喷氨装置由6根喷氨管和6个圆盘混合器组成,氨气由喷氨管喷到圆盘上,烟气流经圆盘时形成涡流使烟气与氨气产生混合。在原设计方案烟道中设置了部分导流装置对流场进行调整,如在竖直烟道底部和顶部两个弯头处设置了导流板,在催化剂上游设置了整流格栅使烟气竖直向下通过催化剂层,在整

流格栅上游斜烟道上设置了阻流管以防止烟道外侧速度过大。

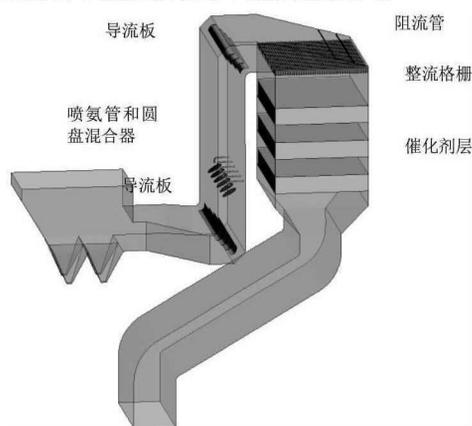


图1 原设计方案脱硝装置布置图

该脱硝装置投运一年多时间后出现了脱硝效率低 (NO_x 排放浓度测试值为 $113\sim 125\text{mg}/\text{m}^3$, 脱硝效率仅有 $68\sim 71\%$)、烟道积灰、空预器磨损严重等问题, 致使电厂必须停炉对整个脱硝系统进行改造。改造目的在于提高脱硝效率, 达到 NO_x 排放浓度小于 $50\text{mg}/\text{m}^3$ 要求, 并减轻或消除烟道积灰及空预器磨损问题, 使脱硝装置高效、稳定运行。

由于此脱硝装置出现的问题与流场紧密相关, 本文先采用 CFD (计算流体力学) 方法^[9~12]对改造前流场进行模拟诊断, 分析其流场存在的问题, 之后对流场进行优化, 用于指导脱硝提效改造。

2 流场模拟数学模型及边界条件

脱硝烟气流动遵循质量守恒、动量守恒、能量守恒方程, 湍流模型采用标准双方程模型、压力-速度耦合采用 SIMPLE 算法, 氨氮混合采用组分输运模型^[13]。

假设流动处于稳态、入口速度均匀, 入口边界采用速度入口边界, 速度值由 BMCR 工况烟气流流量计算得到; 出口边界采用压力出口边界; 催化剂层采用多孔介质模型, 按催化剂实际压降为 200Pa 设置阻力系数; 导流板、整流格栅等均采用壁面边界。

3 流场评价指标

深度脱硝流场优化指标严于常规脱硝流场设计指标^[14], 要求如下:

- ①首层催化剂入口断面速度分布均匀, 速度相对标准偏差小于 10% ;
- ②首层催化剂入口断面氨浓度分布均匀, 浓度相对标准偏差小于 4% ;

相对标准偏差值是定量评价测试断面数据均匀性的依据, 其值越小表明数据越均匀, 采用 C_v 表示:

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

式中, C_v —相对标准偏差; x_i —测点数据, 如速度、浓度; \bar{x} —测点平均值; n —截面测点数。

4 数值模拟结果与分析讨论

4.1 改造前模拟结果与分析

对改造前脱硝装置 (如图 1 所示) BMCR 工况下的流场进行数值模拟, 得到结果如图 2~图

7 所示。图 2 显示, 改造前省煤器出口水平扩张烟道未设置导流板, 烟气无法在整个烟道内均匀扩张, 烟气主要从靠锅炉中心线侧流过, 在远离锅炉中心线侧存在大范围涡流, 这是导致该区域烟道积灰严重的主要原因。改造前省煤器出口水平扩张烟道未设置导流板也使喷氨区域烟气速度分布不均匀 (如图 3 所示), 截面速度分布 C_v 值为 48.8%, 靠锅炉中心线侧烟气速度大, 远离锅炉中心线侧烟气速度小, 喷氨区域烟气速度分布与喷氨量难以匹配, 不利于催化剂入口氨浓度均匀分布。

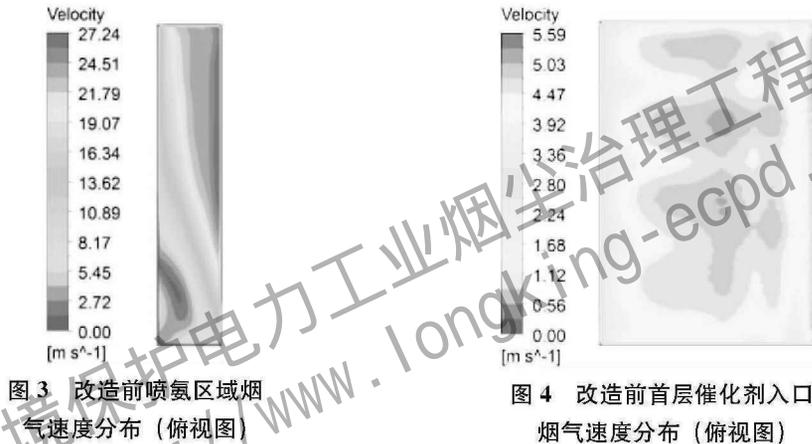
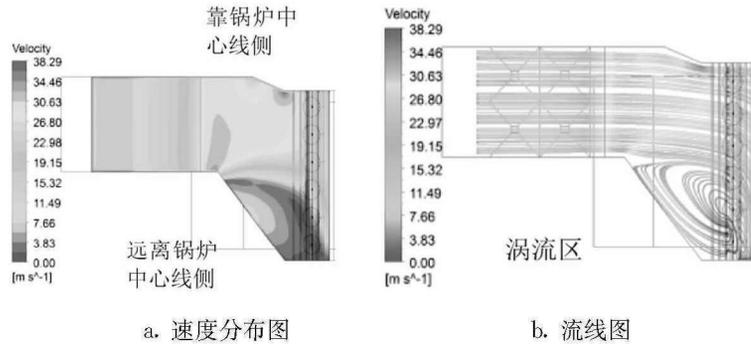


图 3 改造前喷氨区域烟气速度分布 (俯视图)

图 4 改造前首层催化剂入口烟气速度分布 (俯视图)

图 2 改造前省煤器出口扩张烟道流场 (俯视图)

改造前首层催化剂入口烟气速度分布如图 4 所示, 截面烟气速度分布均匀性良好, C_v 值为 10.2%, 接近于 10% 的流场指标要求, 但均匀性可以进一步优化。

图 5 示出了反应器出口 (即空预器入口) 烟气速度分布, 改造前出口烟道弯头处未设置导流板, 导致反应器出口烟气分布很差, 截面速度分布 C_v 值为 36.4%, 左侧速度高、右侧速度低, 速度最大值达到 21.4 m/s, 从而导致了空预器磨损严重问题的出现。脱硝反应器出口烟气速度分布虽然对脱硝本身不会造成影响, 但对于空预器运行却影响很大。

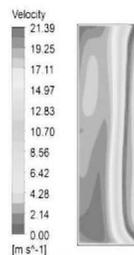


图 5 改造前反应器出口烟气速度分布 (俯视图)

改造前首层催化剂入口氨浓度分布如图 6 所示, 截面氨浓度分布均匀性很差, 氨浓度 C_v 值

为 29.5%，无法满足小于 4% 流场指标要求，从而导致改造前脱硝效率低。造成首层催化剂入口氨浓度分布均匀性差的原因有两点，分别是 (1) 喷氨区域烟气速度分布不均匀，导致喷氨区域烟气速度分布与喷氨量不匹配；(2) 喷氨装置的喷氨口和混合器数量太少，仅有 6 个喷氨口和 6 个混合器。改造前氨气流线如图 7 所示，喷氨过于集中且混合器间距太大，难以使烟气与氨气充分混合。

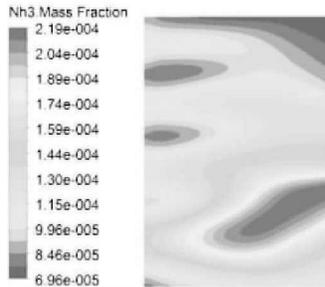


图 6 改造前首层催化剂入口氨浓度分布 (俯视图)

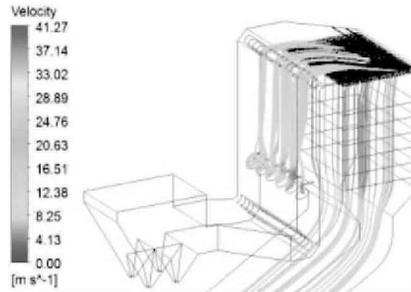


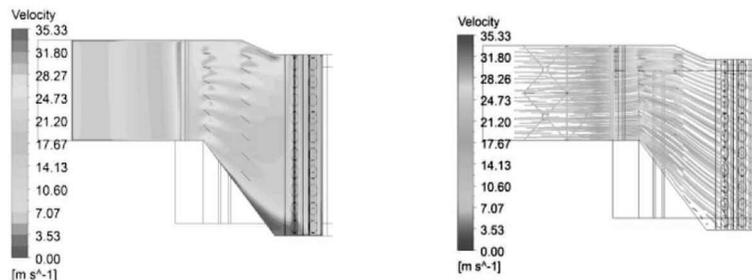
图 7 改造前氨气流线

4.2 优化后模拟结果与分析

根据改造前流场存在的问题，对脱硝装置提出优化措施 (如图 8 所示)，包括 (1) 在省煤器出口水平扩张烟道合理设置导流板；(2) 在整流格栅上游增设两片导流板；(3) 将喷氨装置由改造前的“喷氨管+圆盘混合器”型式改为“喷氨格栅+圆盘混合器”型式；(4) 在反应器出口上游转弯烟道增设导流板。



图 8 优化后脱硝装置布置图



a. 速度分布图

b. 流线图

图 9 优化后省煤器出口扩张烟道流场 (俯视图)

对优化后脱硝装置 BMCR 工况下流场进行数值模拟，得到结果如图 9~图 14 所示。从图 9 可看出，优化后在省煤器出口水平扩张烟道段合理地设置导流板，烟气在整个烟道内均匀扩张，

消除了大范围涡流，能有效减轻烟道积灰；在省煤器出口水平扩张烟道设置导流板也使喷氨区域烟气速度分布变均匀（如图 10 所示），截面速度分布 C_v 值由改造前的 48.8% 降为 10.5%，有利于催化剂入口氨浓度均匀分布。

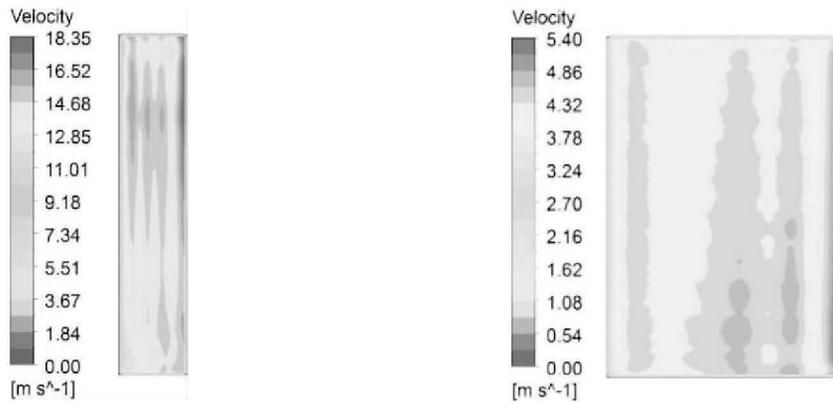


图 10 优化后喷氨区域烟气速度分布（俯视图） 图 11 优化后首层催化剂入口烟气速度分布（俯视图）

优化后首层催化剂入口烟气速度分布如图 11 所示，截面烟气速度分布均匀性良好， C_v 值为 6.5%，速度分布均匀性优于改造前。图 12 示出了反应器出口烟气速度分布，优化后在出口烟道弯头处设置了导流板，使反应器出口烟气分布得到改善，截面速度分布 C_v 值由改造前的 36.4% 降为 13.3%，速度最大值由改造前的 21.4m/s 降为 13.23m/s，可有效消除空预器磨损问题。因此，很有必要在反应器出口烟道弯头处合理设置导流板使空预器入口速度分布均匀，但这在脱硝工程中往往容易被忽视。

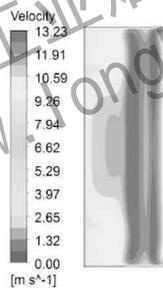


图 12 优化后反应器出口烟气速度分布（俯视图）

优化后首层催化剂入口氨浓度分布如图 13 所示，截面氨浓度分布均匀性得到显著改善，氨浓度 C_v 值由改造前的 29.5% 降至 3.0%，满足小于 4% 流场指标要求，可很大程度上提高脱硝效率。一方面优化方案在省煤器出口水平扩张烟道合理设置导流板后，喷氨区域烟气速度分布变均匀，有利于催化剂入口氨浓度均匀分布；另一方面优化方案将喷氨装置由改造前的“喷氨管+圆盘混合器”型式改为“喷氨格栅+圆盘混合器”型式（如图 15 所示），每个喷氨格栅上开有 8 个喷氨口，喷氨口数量由改造前 6 个增加至 48 个，喷氨不会过于集中而是均匀分散在整个截面上（如图 14 所示），相应地混合器数量由改造前的 6 个增加至 20 个，强化了烟气与氨气的混合，从而使催化剂入口氨气浓度分布均匀。图 16 示出了改造前和优化后氨浓度分布均匀性沿竖直烟道截面的变化情况（Z 表示沿高度方向，喷氨母管高度位置为 0），优化后各截面的氨浓度分布 C_v 都比改造前小，说明优化后氨浓度分布更快趋于均匀。

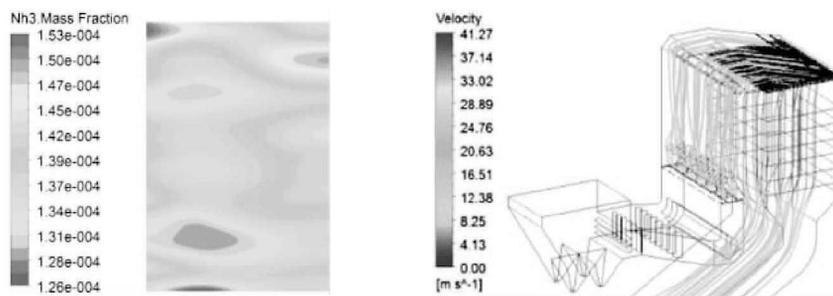
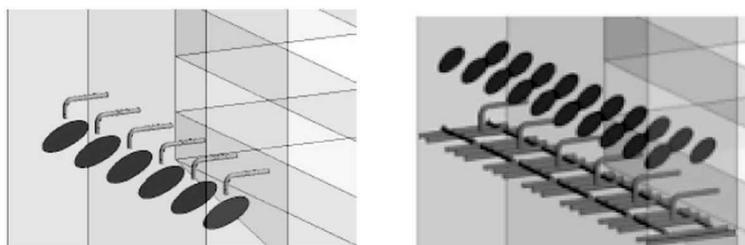


图 13 优化后首层催化剂入口氨浓度分布 (俯视图)

图 14 优化后氨气流线



a. 改造前

b. 优化后

图 15 喷氨混合装置

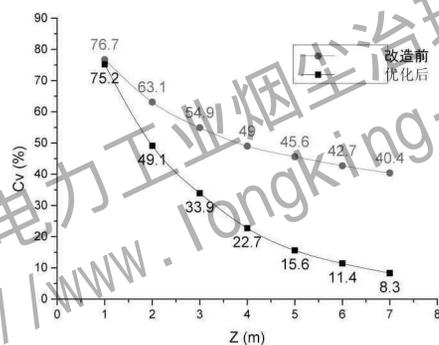


图 16 改造前和优化后氨浓度分布均匀性沿竖直烟道截面变化情况

改造前和优化后的流场数值模拟结果对比如表 1 所示, 优化后脱硝装置流场得到了显著改善。

表 1 改造前和优化后模拟统计结果对比

	改造前	优化后
喷氨区域速度 C_v	48.8%	10.5%
首层催化剂入口速度 C_v	10.3%	6.5%
首层催化剂入口氨浓度 C_v	29.5%	3.0%
反应器出口速度 C_v	36.4%	13.3%

5 改造后运行情况

按优化方案对脱硝装置进行了深度脱硝改造, 现场三个月运行情况显示 NO_x 排放浓度稳定在 $35\sim 45\text{mg}/\text{m}^3$, 脱硝效率为 $88\sim 91\%$, 烟道积灰不明显, 空预器未出现磨损问题, 达到了深度脱硝改造目的。

6 结论

本文采用 CFD 方法对某电厂 400MW 机组烟气脱硝改造工程流场进行了诊断,分析了改造前脱硝装置运行问题的原因,并提出流场优化措施,指导了脱硝提效改造,结论如下:

(1) 改造前省煤器出口水平扩张烟道未设置导流板,使烟道存在大范围涡流,产生了烟道积灰;改造前喷氨区域烟气速度分布严重不均以及喷氨管和圆盘混合器数量太少,使催化剂入口氨浓度分布不均,导致脱硝效率低;改造前反应器出口烟道弯头处未设置导流板,使空预器入口速度分布均匀性很差,形成了局部高速区导致空预器磨损严重。

(2) 优化后在省煤器出口水平扩张烟道合理设置导流板,消除了该区域的大范围涡流,能有效减轻积灰;优化后喷氨区域的速度分布均匀性大幅改善,有利于该区域均匀喷氨,加上增加喷氨口和圆盘混合器的数量后,大大强化了氨气和烟气的混合,使得催化剂入口氨浓度分布均匀,很大程度上提高了脱硝效率;优化后在反应器出口烟道弯头处设置了导流板,空预器入口速度分布变均匀,无明显高速区,解决了空预器磨损严重的问题。

(3) 按优化方案对脱硝装置进行了深度脱硝改造,实际运行表明通过流场优化,脱硝效率得到了显著提升,烟道积灰和空预器磨损问题得以解决,使脱硝装置高效、稳定运行。

参考文献

- [1] 杨颢. 烟气脱硫脱硝净化工程技术与设备 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [2] 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
- [3] 陈鸿伟, 徐劲, 李丽等. SCR 脱硝催化剂磨损及堆灰治理 [J]. 电力科学与工程, 2016, 32 (11): 60—65
- [4] 张翠珍, 赵学葵. 大型燃煤机组 SCR 脱硝系统优化 [J]. 环境工程学报, 2015, 9 (12): 5997—6004
- [5] 周英贵, 金保昇. 基于非均匀入口条件 SCR 系统气固相组分的分布特性优化 [J]. 环境工程学报, 2017, 11 (1): 421—426
- [6] 罗闽, 赵伶俐. 空气预热器硫酸氢铵积灰的数值研究 [J]. 动力工程学报, 2016, 36 (11): 883—888
- [7] 胡永锋, 赵伶俐. 燃煤电厂 SCR 法烟气脱硝装置常见问题及原因分析 [J]. 华电技术, 2015, 37 (11): 62—79
- [8] 魏学静, 安世辉, 刘巍. 燃煤电厂 SCR 烟气脱硝技术改造后空气预热器堵塞问题处理 [J]. 河北电力技术, 2016, 35 (6): 39—41
- [9] Yanhong Gao, Qingcai Liu, Lingtao Bian. Numerical Simulation and Optimization of Flow Field in the SCR Denitrification System on a 600 MW Capacity Units [J]. Energy Procedia, 14 (2012): 370—375
- [10] D. Dakshinamoorthy. Consider advanced modeling to control air emissions—Computational fluid dynamics methods improve designs for NO_x reduction applications [J]. Hydrocarbon Processing, September, 2009; 81—86.
- [11] Cho J. M., Cho J. W., Hong S. H., et al. Application of computational fluid dynamics analysis for improving performance of commercial scale selective catalytic reduction [J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2006, 23 (1): 43—56
- [12] HEIREDAL M L, JENSEN A D, THOGERSEN J R, et al. Pilot—scale investigation and CFD modeling of particle deposition in low—dust monolithic SCR DeNO_x catalysts [J]. AICHE Journal, 2013, 59 (6): 1919—1933
- [13] 成明涛, 钟俊. 基于流场多变的 SCR 脱硝系统喷氨优化调整试验 [J]. 热力发电, 2016, 45 (12): 130—136
- [14] 周强强. SCR 脱硝系统烟道气动流场数值模拟研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2015.