

大气污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201711172 中图分类号 X701 文献标识码 A

叶兴联, 杨丁, 郭俊, 等. SCR脱硝超低排放工程改造流场优化[J]. 环境工程学报, 2018, 12(6): 1725-1732.

YE Xinglian, YANG Ding, GUO Jun, et al. Flow field optimization of SCR DeNO<sub>x</sub> project for ultra-low emission retrofit [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(6): 1725-1732.

# SCR脱硝超低排放工程改造流场优化

叶兴联<sup>1,2</sup>, 杨丁<sup>1,2</sup>, 郭俊<sup>1</sup>, 刘栋栋<sup>1,\*</sup>, 苏寅彪<sup>1</sup>, 安希忠<sup>2</sup>

1. 福建龙净环保股份有限公司, 龙岩 364000

2. 东北大学冶金学院, 沈阳 110819

第一作者: 叶兴联(1984—), 男, 博士研究生, 工程师, 研究方向: 大气污染防治技术. E-mail: yexinglian1228@163.com

\*通信作者, E-mail: liudd1985@163.com

**摘要** 采用CFD数值模拟方法对某电厂400 MW机组烟气脱硝装置流场进行了诊断, 分析了导致效率低、烟道积灰以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, 消除了该区域的大范围涡流, 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, 使首层催化剂入口氨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。通过流场优化后, 提高了此脱硝装置脱硝效率, 减轻和消除了烟道积灰及空预器磨损。

**关键词** SCR脱硝; 提效改造; 数值模拟; 速度分布; 氨浓度分布; 流场优化

氮氧化物(NO<sub>x</sub>)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<sup>[1]</sup>。燃煤电厂是NO<sub>x</sub>的主要排放源, 因此, 燃煤电厂NO<sub>x</sub>减排成为了NO<sub>x</sub>污染物控制的关键手段。

2011年, 国家环境保护部发布的《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100 mg·m<sup>-3</sup>; 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)》, 要求燃煤电厂实现超低排放, NO<sub>x</sub>排放浓度低于50 mg·m<sup>-3</sup>。

选择性催化还原(SCR)脱硝技术是治理燃煤电厂NO<sub>x</sub>污染物的最有效形式, 因其装置结构简单、可靠性好、脱硝效率高等优点, 得到了广泛的应用<sup>[2]</sup>。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<sup>[3-5]</sup>。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<sup>[6-8]</sup>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超低排放, 此时对脱硝装置进行提效改造, 流场优化至关重要。本文以某电厂400 MW机组烟气脱硝提效改造工程为研究对象对流场进行优化。

## 1 研究对象

某电厂 400 MW 机组烟气脱硝装置如图 1 所示, 反应器共布置 3 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 2 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。

该脱硝装置投运 1 年多时间后出现了脱硝效率低 ( $\text{NO}_x$  排放浓度测试值为  $113\sim 125 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 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  $\text{NO}_x$  排放浓度小于  $50 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  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, 本研究先采用 CFD (计算流体力学) 方法<sup>[9-13]</sup>对改造前流场进行模拟诊断, 分析流场存在的问题, 之后对流场进行优化, 用于指导脱硝提效改造。

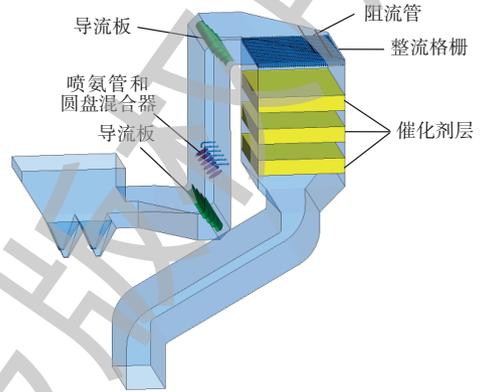


图 1 原设计方案脱硝装置 CFD 模型

Fig. 1 CFD model of original DeNO<sub>x</sub> reactor

## 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  $k-\varepsilon$  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<sup>[14]</sup>。

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 200 Pa 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

SCR 脱硝要求流场达到以下指标<sup>[15-16]</sup>。

- 1) 首层催化剂入口断面烟气速度分布均匀, 速度相对标准偏差小于 15%。
- 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 5%。

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:

$$C_v = \frac{1}{\bar{x}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \times 100\% \quad (1)$$

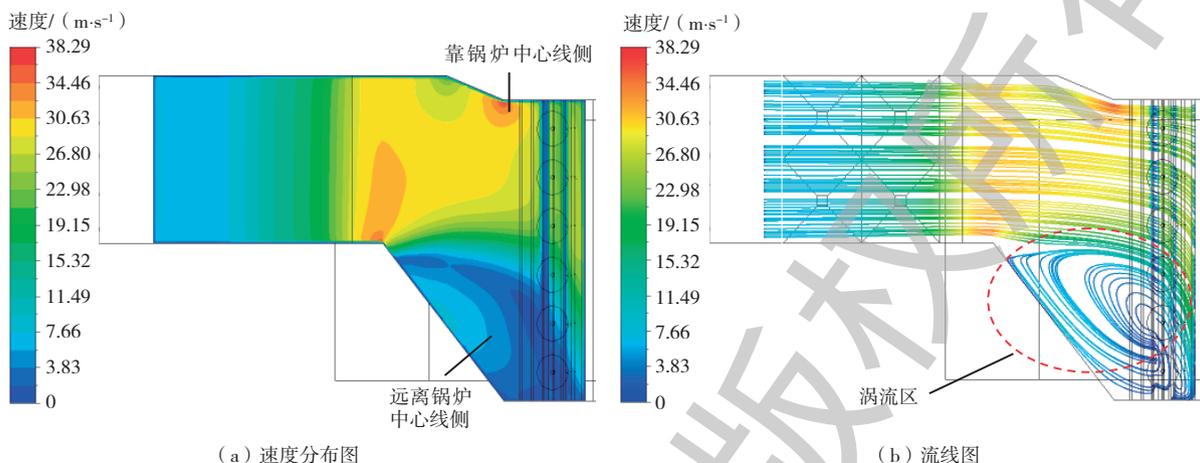
式中:  $C_v$  为相对标准偏差;  $x_i$  为测点数据, 如速度、浓度;  $\bar{x}$  为测点平均值;  $n$  为截面测点数。

## 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, 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。



(a) 速度分布图

(b) 流线图

图2 改造前省煤器出口扩张烟道流场(俯视图)

Fig. 2 Flow field of expansion section at economizer outlet before retrofit (top view)

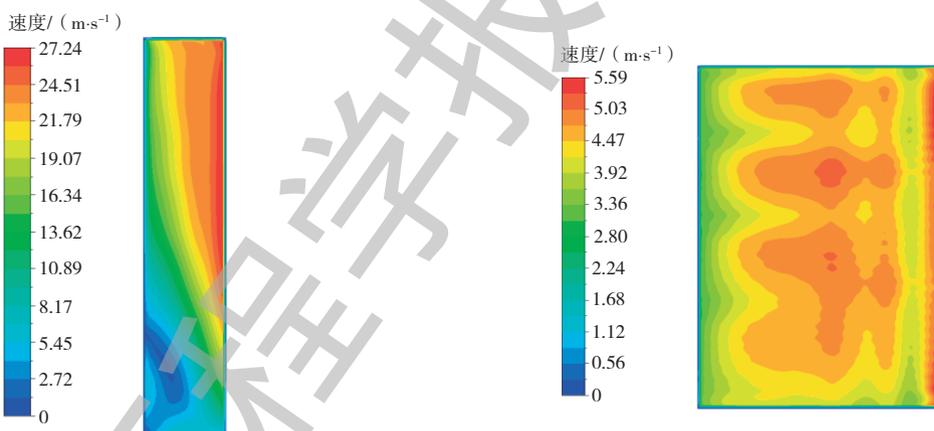


图3 改造前喷氨区域烟气速度分布(俯视图)

Fig. 3 Flue gas velocity distribution at the ammonia injection area before retrofit (top view)

图4 改造前首层催化剂入口烟气速度分布(俯视图)

Fig. 4 Flue gas velocity distribution at the first catalyst inlet before retrofit (top view)

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%,达到小于15%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,改造前出口转弯烟道处未设置导流板,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 $21.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,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。

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5%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2点: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。

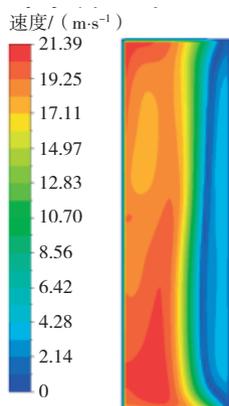


图5 改造前反应器出口烟气速度分布(俯视图)

Fig. 5 Flue gas velocity distribution at the reactor outlet before retrofit (top view)

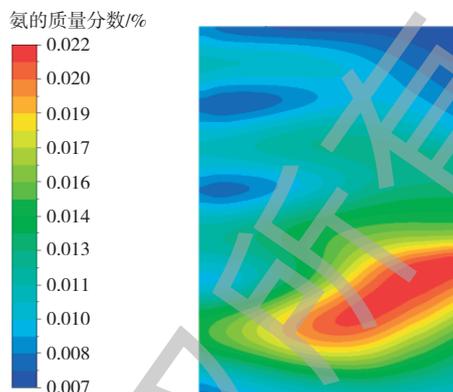


图6 改造前首层催化剂入口氨浓度分布(俯视图)

Fig. 6 Ammonia concentration distribution at the first catalyst inlet before retrofit (top view)

## 4.2 优化后模拟结果与分析

根据改造前流场存在的问题,提出优化脱硝装置措施(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2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。对优化后脱硝装置BMCR工况下流场进行数值模拟,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。

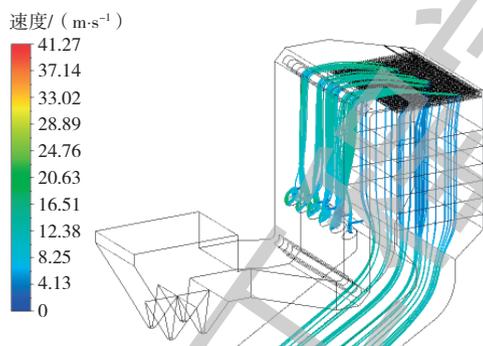


图7 改造前氨气流线

Fig. 7 Ammonia streamlines before retrofit

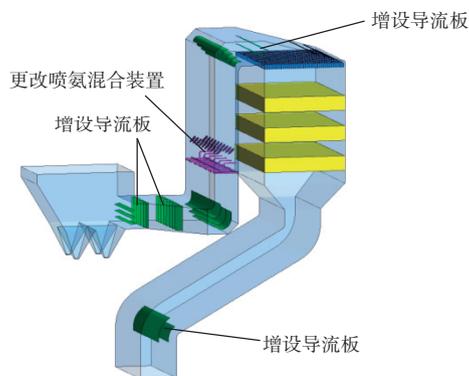


图8 优化后脱硝装置CFD模型

Fig. 8 CFD model of the DeNO<sub>x</sub> reactor after optimization

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。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,优化后在出口转弯烟道处设置了导流板,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 $21.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 降为 $13.23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,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。

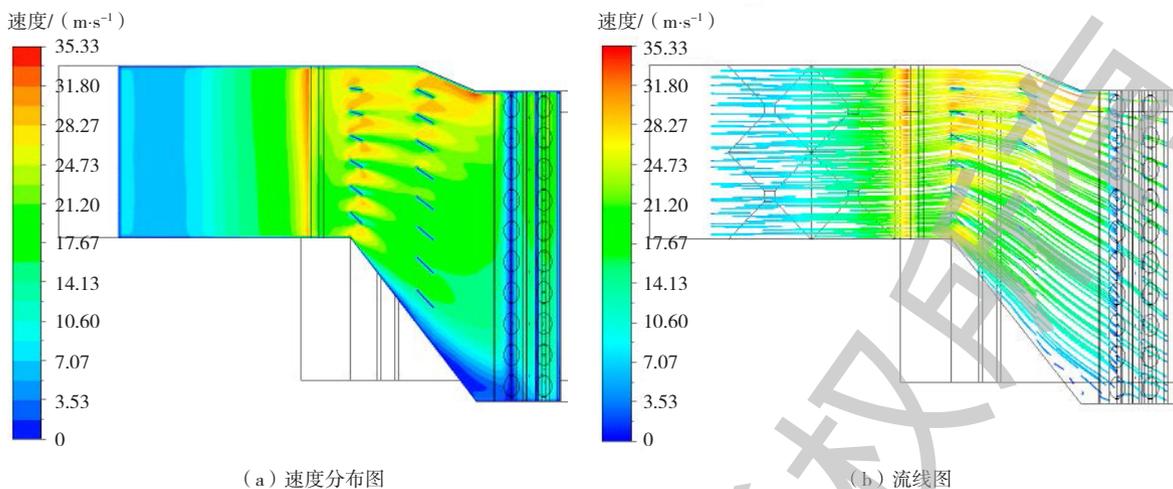


图 9 优化后省煤器出口扩张烟道流场 (俯视图)

Fig. 9 Flow field of the expansion section at the economizer outlet after optimization (top view)

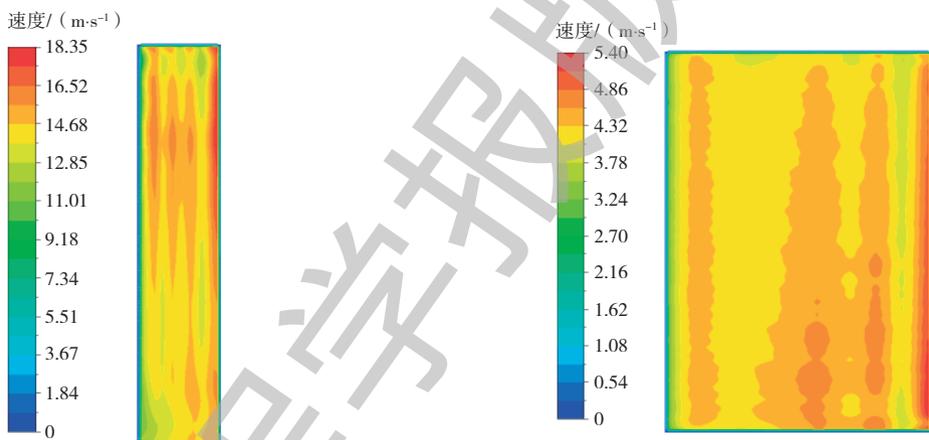


图 10 优化后喷氨区域烟气速度分布 (俯视图)

Fig. 10 Flue gas velocity distribution at the ammonia injection area after optimization (top view)

图 11 优化后首层催化剂入口烟气速度分布 (俯视图)

Fig. 11 Flue gas velocity distribution at the first catalyst inlet after optimization (top view)

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 5% 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 14 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 15 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。

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, 且改造前和优化后脱硝反应器总压降相当, 不会对系统运行产生影响。

表1 改造前和优化后模拟统计结果对比

Table 1 Comparison between simulation results before retrofit and after optimization

工况	喷氨区域速度均匀性 $C_v$ /%	首层催化剂入口速度均匀性 $C_v$ /%	首层催化剂入口氨浓度均匀性 $C_v$ /%	反应器出口速度均匀性 $C_v$ /%	脱硝反应器总压降/Pa
改造前	48.8	10.3	29.5	36.4	879
改造后	10.5	6.5	3.0	13.3	876

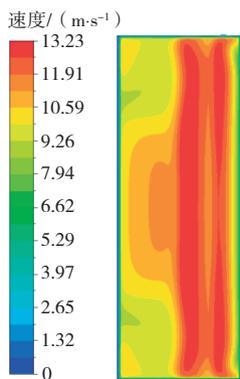


图12 优化后反应器出口烟气速度分布(俯视图)

Fig. 12 Flue gas velocity distribution at the reactor outlet after optimization (top view)

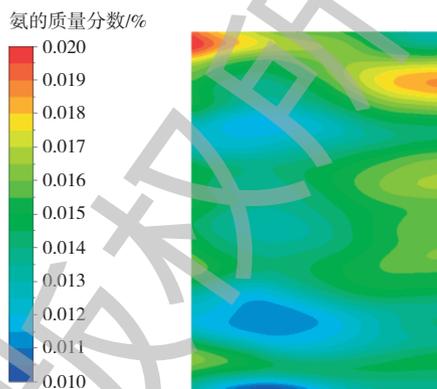
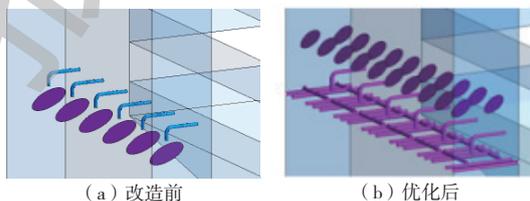


图13 优化后首层催化剂入口氨浓度分布(俯视图)

Fig. 13 Ammonia concentration distribution at the first catalyst inlet after optimization (top view)

## 5 改造后运行情况

按优化方案对脱硝装置进行了提效改造,现场3个月运行情况显示,NO<sub>x</sub>排放浓度稳定在35~45 mg·m<sup>-3</sup>,脱硝效率为88%~91%,烟道积灰不明显,空预器未出现磨损问题,达到了脱硝提效改造目的;另外,现场测得BMCR工况下脱硝反应器总压降为932 Pa,由于数值模拟时忽略了烟道内的管撑等内构件,故实际压降比模拟压降略大,属于正常现象。



(a) 改造前 (b) 优化后

图14 改造前和优化后喷氨和混合装置对比

Fig. 14 Ammonia injection grilles and mixers before retrofit and after optimization

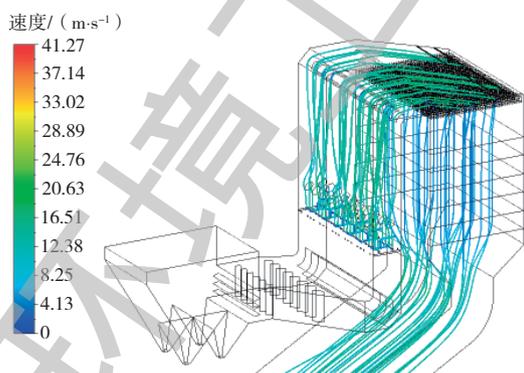


图15 优化后氨气流线

Fig. 15 Ammonia streamlines after optimization

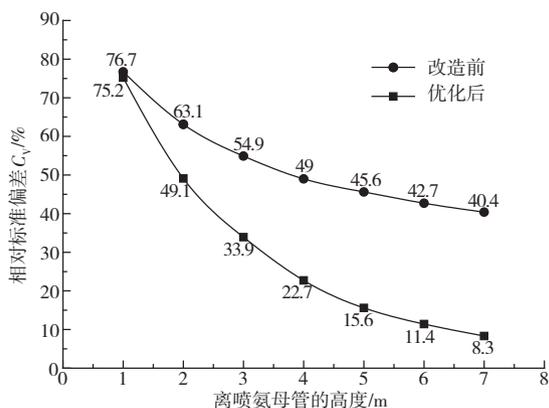


图16 改造前和优化后氨浓度分布均匀性沿竖直烟道截面的变化

Fig. 16 Changes of ammonia concentration distribution uniformity of cross section along vertical duct before retrofit and after optimization

## 6 结论

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提效改造,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. DOI:10.3969/j.issn.1672-0792.2016.11.011.
- [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. DOI:10.12030/j.ejee.201508193.
- [6] 罗闽,赵伶俐,李偲宇. 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. DOI:10.3969/j.issn.1674-7607.2016.11.005.
- [7] 胡永锋,梁新磊. 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] GAO Y H, LIU Q C, BIAN L T. Numerical simulation and optimization of flow field in the SCR denitrification system on a 600 MW capacity units[J]. Energy Procedia,2012,14:370-375. DOI:10.1016/j.egypro.2011.12.944.
- [10] DAKSHINAMOORTHY D, GUPTA A. Consider advanced modeling to control air emissions[J]. Hydrocarbon Processing,2009,88(9):81-86.
- [11] CHO J M, CHOI 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<sub>x</sub> catalysts[J]. AIChE Journal,2013,59(6):1919-1933.
- [13] 张文志,曾毅夫. CFD 技术在 SCR 脱硝系统中的应用 [J]. 中国环保产业,2015(12):57-60.
- [14] 温正,石良辰,任毅如. 流体计算应用教程 [M]. 北京:清华大学出版社,2009.
- [15] 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.
- [16] 周健,阎维平,石丽国,等. 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.

(本文责任编辑:郑晓梅)

# Flow field optimization of SCR DeNO<sub>x</sub> project for ultra-low emission retrofit

YE Xinglian<sup>1,2</sup>, YANG Ding<sup>1,2</sup>, GUO Jun<sup>1</sup>, LIU Dongdong<sup>1,\*</sup>, SU Yinbiao<sup>1</sup>, AN Xizhong<sup>2</sup>

1. Fujian Longking Co. Ltd., Longyan 364000, China

2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China

**Abstract** Flow field in the flue gas denitrification reactor of a 400 MW unit in a coal-fired power plant was diagnosed by numerical simulation. Possible reasons were detailed for the current issues such as low denitrification efficiency, dust deposition in ducts as well as abrasion of air preheaters. Then the flow field of denitrification reactor could be optimized and the results demonstrated that installing guide plates in the horizontal expansion section at the economizer outlet could eliminate the large-scale eddies in the duct, which was beneficial to reduce the dust deposition in the duct and uniformly distribute the flue gas velocity profile in the AIG area. After changing the original ammonia-nitrogen mixer into AIG + disk mixer type, the ammonia-nitrogen mixing effect was enhanced, and the distribution uniformity of the ammonia concentration in the first catalyst layer inlet can be improved remarkably, which can improve the denitrification efficiency and reduce the ammonia escape rate. Installing guide plates upstream the air preheater could improve the uniformity of flue gas velocity distribution, which was helpful to solve the problem of air preheater abrasion. By optimizing the flow field, the efficiency of the denitrification reactor can be improved, and the dust deposition in the duct and the abrasion of the air preheater can be reduced and eliminated.

**Key words** SCR DeNO<sub>x</sub>; efficiency improving retrofit; numerical simulation; velocity distribution; ammonia concentration distribution; flow field optimization