330MW燃煤机组SCR流场优化及提效改造

文 _ 刘英进[1] 李杰义[1] 李兵[1] 王毅斌[2] 刘兴[2] 甄志广[1] 墨庆锋[1] 郑永利[1] 张强[1] 谭厚章[2]
1石家庄良村热电有限公司 2西安交通大学能源与动力工程学院

摘要：针对某330MW燃煤机组1#锅炉脱硝系统出口NO_x浓度偏差较大问题，本文采用软件Fluent对该机组SCR系统进行流场优化，以及确定最优改造方案。通过对比不同改造方案下SCR系统出口截面的速度均匀性指数和标准方差，最终提出增加脱硝进口渐扩区域挡板数量、优化挡板布置角度以及脱硝系统顶部转角同反应器进口斜面区域结构整体加高1m的最优改造方案。该方案已在该机组SCR脱硝系统进行了现场改造与施工。机组脱硝系统完成改造后，测试结果显示：同未改造SCR系统流场分布相比，改造后SCR反应器内低速区和回流区减少，流场均匀性显著提升。机组负荷为260MW时，改造后SCR脱硝系统出口截面NO_x浓度样本标准偏差由22.0mg/Nm_3降低至5.0mg/Nm^3。相同负荷与NH_3/NO_x摩尔比时，SCR系统总液氨消耗量由改造前190kg/h降低至109kg/h，降幅达40%以上，脱硝系统提效显著。

关键词：SCR脱硝系统；流场；优化；工程改造；数值模拟

特别感谢国家自然科学基金的大力支持。（Nos. 91544108, 51376147）

当前我国对燃煤电厂污染物排放限值的要求越来越严格，东部地区在役或新建燃煤机组NO_X、SO_2、粉尘排放浓度分别不高于50、35、10mg/Nm^3。我国燃煤机组主要采用炉内低氮燃烧和SCR脱硝工艺联合以实现NO_X超低排放。选择性催化还原脱硝技术具有工艺成熟、运行可靠、脱硝效率高等优点，在火力发电行业获得广泛应用。

脱硝效率和氨逃逸率是衡量SCR脱硝系统运行水平的两个重要指标。SCR脱硝系统进口流场分布不均、氨气浓度分布不均、催化剂失效或通道堵塞等均会造成脱硝效率降低与氨逃逸浓度升高。其中，流场均匀性是影响SCR脱硝性能的关键因素之一。

本文以某电厂330MW燃煤锅炉的SCR脱硝系统为研究对象，建立了三维数学模型，利用Fluent对该结构烟气流场进行数值模拟。针对原结构流场的不均匀性，通过合理设计和优化导流板的尺寸、数量以及安装角度，确定最佳工程改造方案。通过测试脱硝系统改造前后喷氨量，以及脱硝出口NO_X浓度以验证改造效果。

1 机组概况

该电厂装机容量2×330MW，锅炉为DG1110/17.4-∏12型锅炉，该炉为亚临界、中间一次再热、自然循环单炉膛、固态排渣、平衡通风、全钢架悬吊结构的汽包炉。该机组采用选择性催化还原脱硝方法，还原剂为液氨。模拟结构主要由省煤器出口烟道段和脱硝进出口烟道和反应器本体构成，共包括两组弧-直型导流板和两组直型导流板，还有脱硝反应器进口整流格栅。

2 物理与数学模型

2.1 几何模型与网格划分

采用Gambit对该机组SCR脱硝系统建立几何模型，如图1所示。模型中主要考虑烟道结构、导流板以及整流格栅对烟气流场的影响。改造前导流板组1和导流板组3的布置形式分别如图1(a)、(b)所示。由

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

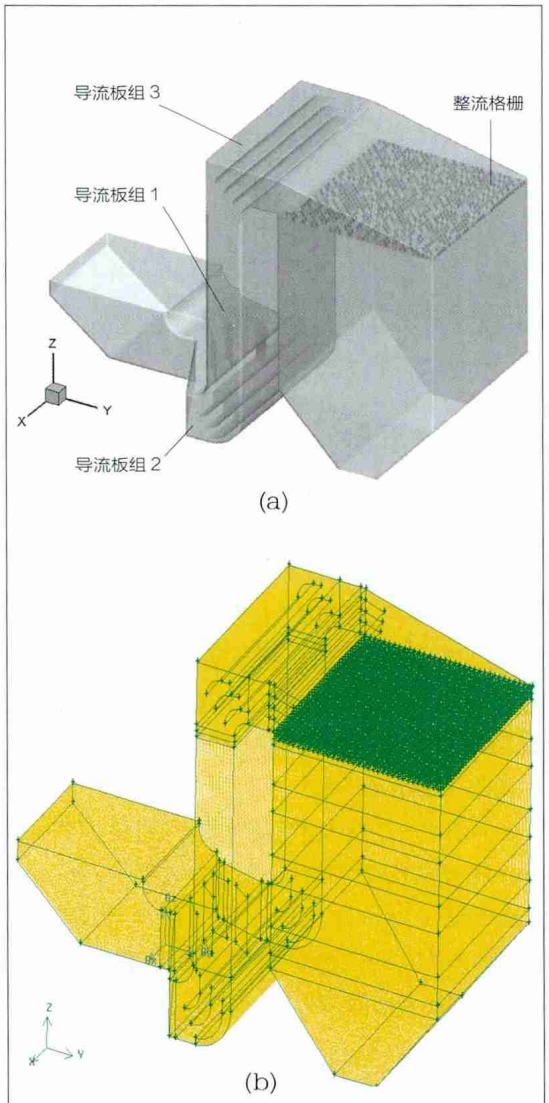


图1 SCR脱硝系统模型及网格划分

于导流板、整流格栅和烟道其他部分的尺寸差异较大，对它们进行局部网格加密，该模型网格总数约为300万，如图1(b)所示。

2.2 控制方程

质量方程：$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho\vec{v})=0$ (1)

动量方程：$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{v})+\nabla\cdot(\rho\vec{v}\vec{v})=-\nabla p+\nabla\cdot(\bar{\bar{\tau}})+\rho\vec{g}+\vec{F}$ (2)

湍流控制方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M+S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k+C_{3\varepsilon}G_b)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}+S_\varepsilon \quad (4)$$

式中：湍流粘度计算由 $\mu_t=\rho C_\mu k^2/\varepsilon$；模型中各参数采用软件默认值，即$C_{1\varepsilon}$=1.44，$C_{2\varepsilon}$=1.92，$C_\mu$=0.09，σk=1.0，σε=1.3。

2.3 边界条件

SCR反应器模型入口采用速度入口，根据烟气体积流量、成分和模型入口尺寸得到模型入口（即省煤器出口）速度为8.5m/s；烟道出口为压力出口，设为-1000Pa，回流湍流强度为5%，回流湍流粘度比为10；烟道壁面、导流板和整流格栅设为壁面，采用标准壁面方程、无滑移边界条件。

2.4 评价指标

采用脱硝反应器进口(即第一层催化剂上方)速度分布的面积加权均匀性指数和标准方差来评价烟气进入催化剂层前截面流速的分布均匀性。均匀性指数的计算公式为：

$$\gamma_a=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}\left[\left(\left|\phi_i-\overline{\phi_a}\right|\right)A_i\right]}{2\left|\overline{\phi_a}\right|\sum_{i=1}^{n}A_i} \quad (5)$$

式中：ϕ_a为脱硝进口截面的平均速度；A_i为进口截面单个面网格的面积；n为进口截面总的单元面网格数目。入口面积加权速度均匀性指数数值介于0与1之间，其值越大代表所选择截面速度分布越均匀。

本文采用的另一个评价指标标准方差的计算如下：

$$m=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-x_0)^2}{n}} \quad (6)$$

式中：X_i为截面某面网格位置的速度；X_0为截面平均速度；n为选择截面的面网格数目。

2.5 求解方法

模拟计算中做如下简化：不考虑系统漏风；飞灰对流场影响较

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

小，烟气视为气态不可压缩流体，连续介质，且为定常流动；流体物性参数为常数；进口速度分布均匀。采用湍流k-ε双方程模型计算烟气流动；催化剂结构模拟采用多孔介质模型，依据实际压降计算多孔介质内的粘性阻力系数和惯性阻力系数，并选择合适的孔隙率。该模型中主要设置Z方向的粘性阻力和惯性阻力系数，X和Y方向的阻力较小，均视为相同。

3 SCR 结构流场计算与改造方案分析

3.1 原始结构流场计算结果

计算得到SCR系统原烟道结构下不同特征截面的速度分布，如图2、图3和图4所示。图2为脱硝系统进口Z方向XY截面速度流场。该入口烟道宽度由5.7m单边渐扩至10.7m，该处折形导流板和渐扩斜面偏向角度过大，导致流体经大角度转向后，导流板背面和转向角区域易形成低速与回流区，直接引起脱硝入口（整流格栅进口Z=15.131m）截面的速度分布不均。

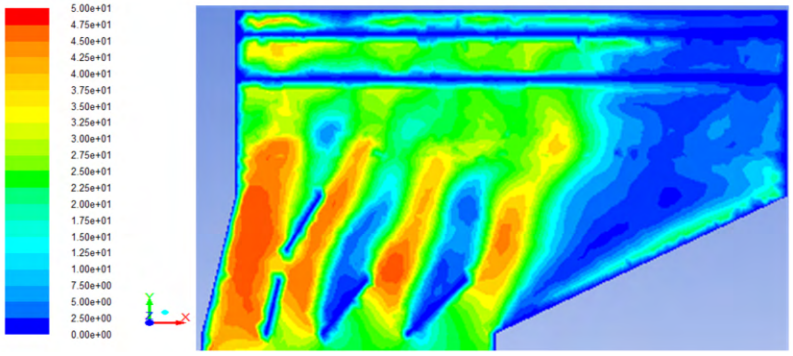


图2 改造前SCR系统入口Z截面速度云图

图3为不同X方向截面的速度分布，进口烟气流速偏差造成SCR反应器(整流格栅进口前)进口前烟气流速也出现较大偏差(图3)。由图4可知，SCR反应器进口截面在X方向上存在较大偏差，最大值与最小值相差接近高于10m/s，其严重影响反应器中脱硝效率。因此，该速度偏差不仅影响烟气与氨气混合的均匀程度，也造成催化剂层烟气流速存在较大偏差。

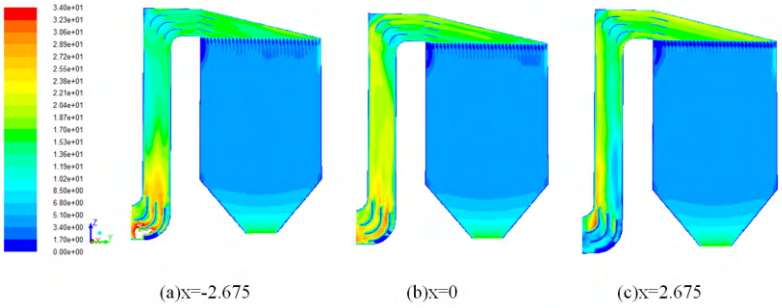


图 3 改造前SCR反应系统纵截面速度云图

入口烟道位置导流板布置由于转向角过大，造成脱硝入口截面X方向上出现较大偏差，即两侧面速度较大，中间速度较小(图4)。此外，脱硝顶部位置圆弧形挡板与平面挡板未能较好的分配来流，入口截面沿Y方向的速度偏差仍然存在。因此，该SCR脱硝系统需合理调整导流板布置结构，以减小各区域烟气速度的不均匀性。

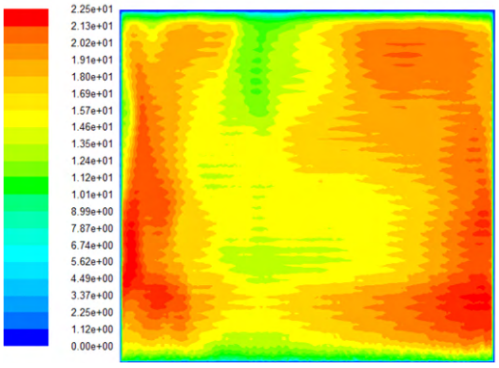


图 4 改造前SCR反应器进口截面速度云图

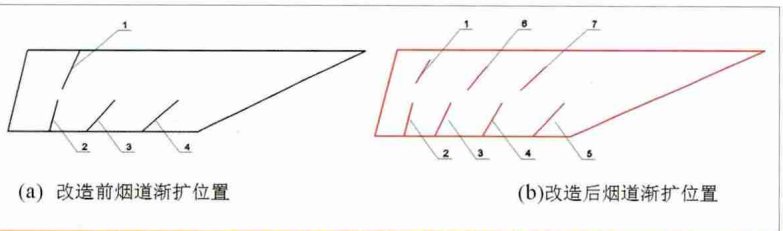
3.2 改造方案及改造后流场分析

通过对比不同导流板转向角度和布置方式，获得合理的改造方案。最终方案描述如下：

①入口烟道渐扩区域主要依靠调整导流板转向角度和增加导流板的方式，合理分配流体在扩口区域的流量。

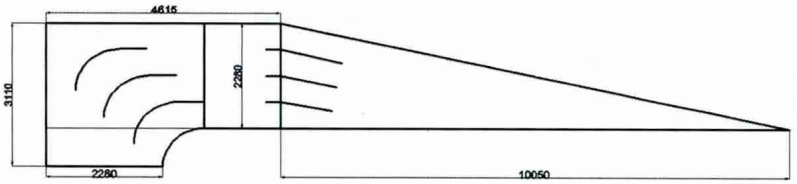
②脱硝顶部位置主要采取加高烟道的方式以增加流通面积和整流格栅进口前斜面转向角，通过合理设计圆弧形挡板半径与平面挡板长度，对比优化安装位置，以使流体转向后截面速度分布较为均匀。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

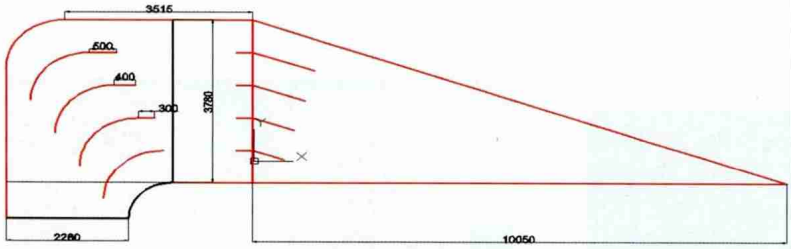


(a) 改造前烟道渐扩位置　　(b)改造后烟道渐扩位置

图5 改造前后SCR系统喷氨装置上游入口截面导流板方案



(a) 脱硝装置顶部区域尺寸（改造前）



(b) 脱硝装置顶部区域尺寸（改造后）

图6 改造前后SCR系统喷氨装置下游转角区域方案

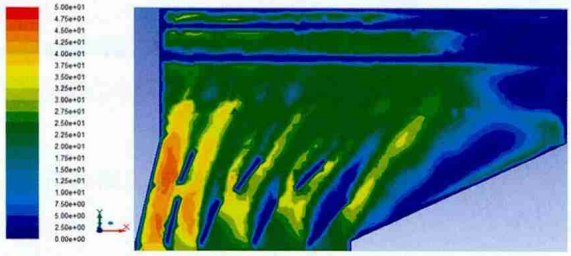


图7 改造后SCR脱硝系统入口z方向截面

如图5所示，改造后SCR入口渐扩区域的导流板数量、安装位置与角度进行了调整。导流板数量由原先4块增加至7块，且降低了第一排导流板的转向角。如图6所示，脱硝系统顶部转向区域的烟道结构和导流板布置也进行了调整，烟道在垂直方向上整体抬高1m。烟道高度提升后，圆弧导流板的半径相应增大，原折形导流板需重新设计调整。该位置的圆弧性导流板和折型导流板均等间距布置。

对比改造前后SCR入口截面速度云图可知(图2与图7)，入口烟道渐扩区域经导流板调整后，基本消除了导流板背面的低速体区，显著减小了由于截面突变造成的低速回流区。此外，SCR顶部位置区域整体抬高1m后，由图8可知，在不同X位置截面烟气经顶部转向后流场更加均匀。

同时SCR催化剂层进口前截面烟气速度在X方向上的较大偏差明显减少，其有利于提高烟气和氨气的混合程度（对比图4和图9）。经过改造后，SCR系统整流格栅进口前截面的速度场标准偏差降低至2.12m/s（图4中截面速度的标准偏差为2.39m/s)。

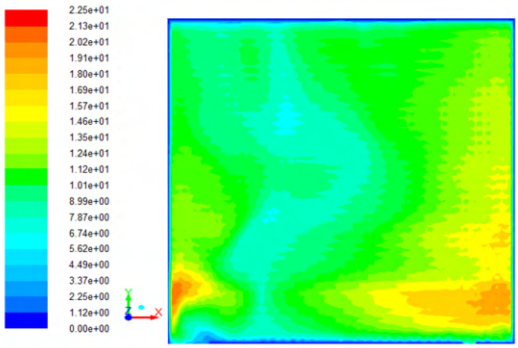


图9 SCR脱硝反应器整流格栅进口前截面速度场分布

4 工程提效分析

该机组脱硝系统结构改造完成后，采用烟气分析仪测试SCR脱硝出口NO_x浓度分布特性。图10为机组负荷为260MW时改造前后SCR反应器的喷氨量。可以发现，机组经过SCR系统流场改造后，液氨消耗量由改造前190kg/h降低至109kg/h，降幅达到40%以上，改造后SCR脱硝系统喷氨量显著减小。

图11为SCR系统流场优化前后脱硝出口NO_X浓度的测量结果。图中数据点1、2、3为脱硝装置出口截面的NO_X浓度。可以发现，改造后NO_X浓度样本标准偏差由22.0mg/Nm^3

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

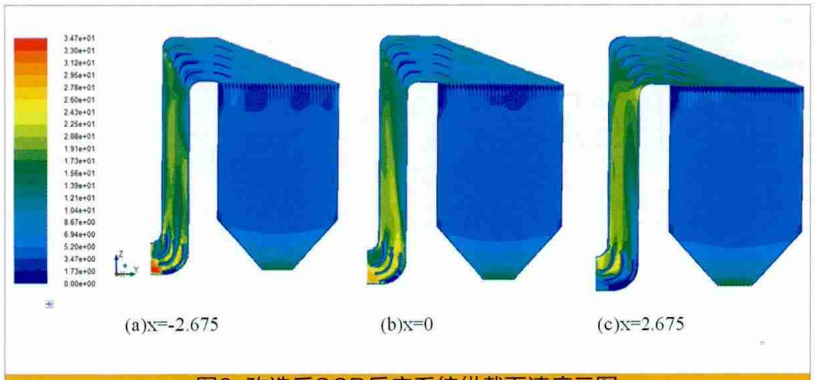


图8 改造后SCR反应系统纵截面速度云图

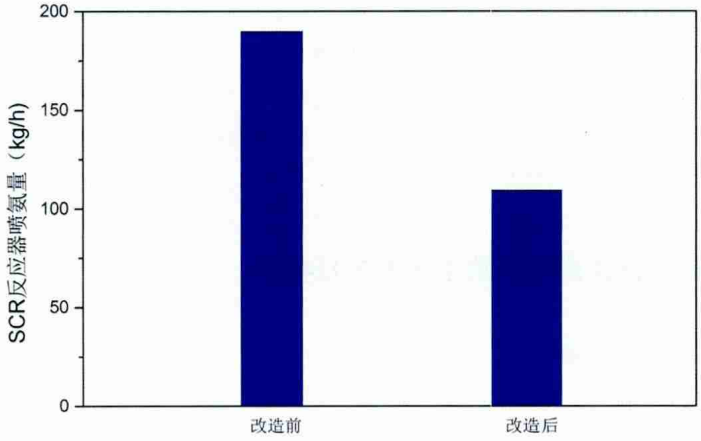


图10 改造前后相同氨氮摩尔比下喷氨量对比

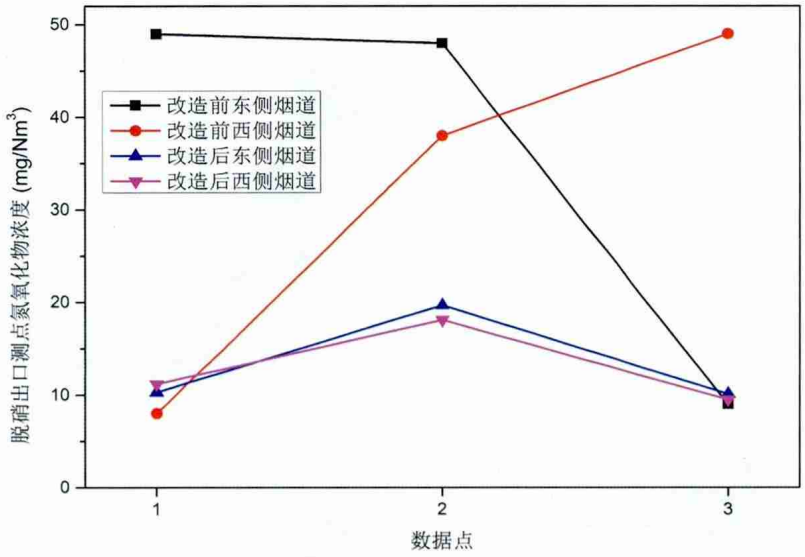


图11 改造前后脱硝出口NO_x浓度测量值

降至5.0mg/Nm³，NO_x浓度分布均匀性显著提高。

5 结语

通过对某330MW机组1#锅炉SCR脱硝反应器开展烟气流场数值模拟，发现合理布置导流板数量、尺寸、安装角度，可明显降低脱硝系统烟道转向与渐扩区域的流场不均。机组脱硝系统改造后，SCR反应器流场均匀性提高，相同氨氮摩尔比下，脱硝系统总液氨耗量降幅显著，脱硝成本大大降低。

参考文献

[1] 赵永椿，马斯鸣，等. 燃煤电厂污染物超净排放的发展及现状 [J]. 煤炭学报，2015, 40(11): 2629-2640.

[2] 樊庆锌，王明轩，等. 某燃煤电厂 300MW 机组 SCR 烟气脱硝装置结构优化 [J]. 化工进展，2014, 33(10): 2806-2814.

[3] 姜烨，高翔，等. 选择性催化还原脱硝催化剂失活研究综述 [J]. 中国电机工程学报，2013, 33(14): 18-31.

[4] 朱天宇，李德波，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 ISTIC, 2015, 35(6).

[5] 凌忠钱，曾宪阳，等. 电站锅炉 SCR 烟气脱硝系统优化数值模拟 [J]. 动力工程学报，2014, 34(1): 50-56.

[6] 雷达，金保升. 燃煤电站 SCR 内烟气流场及还原剂浓度场模拟与优化 [J]. 煤炭学报，2009, 34(3): 394-399.

[7] 刘小波，陈冬林，等. 燃煤锅炉选择性催化还原脱硝反应器结构的模拟优化 [J]. 动力工程学报，2010 (5): 384-389.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net