

燃煤电厂超净排放流场设计要点分析

杨丁, 叶兴联, 张楚城, 刘栋栋, 苏寅彪, 李立锋

(福建龙净环保股份有限公司工业烟尘净化国家地方联合工程研究中心, 福建龙岩 364000)

摘要: 在 SCR 脱硝装置、(低低温)电除尘器、湿法脱硫装置流场优化设计中, 往往仅关注是否满足相关设计标准, 较少考虑积灰、磨损及节能减阻等问题, 本文结合工程实际并采用数值模拟方法详细阐述了上述装置流场优化设计的要点, 通过比较不同形式下的流场均匀性及压力损失, 提出了流场优化中需注意的几个关键点, 这不仅有助于提高 CFD 模拟与工程实际的吻合性, 而且对保证设备高效稳定运行、减少积灰磨损、节能降耗等具有重要的工程意义。

关键词: CFD; SCR 脱硝; 电除尘器; 湿法脱硫

0 引言

近年来, 大气排放标准日渐严格, "超净排放 (NO_x<50 mg/m³、SO₂<35 mg/m³、烟尘<5 mg/m³)"对除尘、脱硫、脱硝等环保设备提出了更高的要求^[1], 流场是影响环保设备高效稳定运行的重要因素之一, 因此在设备运行前需要对其进行优化设计, 而 CFD 数值模拟作为流场优化的重要手段, 在工程中得到了广泛的应用。

计算流体力学 (CFD, Computational Fluid Dynamics) 是采用数值计算的方法对流体流动规律进行研究的学科, 通过计算机数值计算求解流体流动方程和图形显示技术来实现对包含有流体流动和热传导等相关物理现象的系统进行分析^[2]。由于其具有直观形象、适应性强、应用面广, 较实验更能缩短设计时间及节省成本等优点, 越来越受工程设计人员的青睐。但是, 目前的流场设计往往仅考虑设备本身的均匀性指标, 对于积灰、磨损及节能减阻等问题则容易被忽视, 本文以常见的 SCR 脱硝反应器、电除尘器和湿法脱硫塔三种环保设备为例, 结合工程实际阐述流场优化设计的技术要点, 为工程设计提供参考。

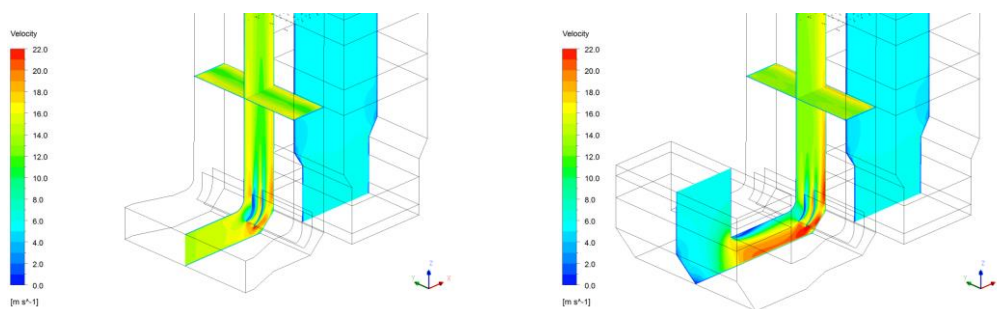
1 SCR 脱硝设备流场优化技术要点

选择性催化还原 (SCR) 脱硝技术是治理燃煤电站 NO_x 污染的最有效形式, 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^[3]。SCR 脱硝性能除了与催化剂活性有关外, 很大程度上决定于 SCR 装置内的流场。理想的流场可以减少催化剂冲刷磨损和积灰堵塞隐患, 延长催化剂的使用寿命; 可以使烟气与氨气在进入催化剂前混合均匀, 有利于氨气与 NO_x 充分反应以提高脱硝效率和减小氨逃逸率。

1.1 进口烟道的影响分析

为了使 CFD 数值模拟更贴合工程实际, 需合理选取模拟范围。图 1 a)、b) 分别是将模拟范围的进口边界选取在水平烟道和省煤器烟道上后的模拟结果, 通过对比可看出, 二者下游流场相差甚大, 故早期模拟时进口边界选在水平烟道^[4]忽略了上游转弯烟道的影响, 是不合理的; 而省煤器由于阻力大, 本身具有很强的整流作用, 该位置的气流分布是较为均匀的,

是比较理想的进口选取位置。

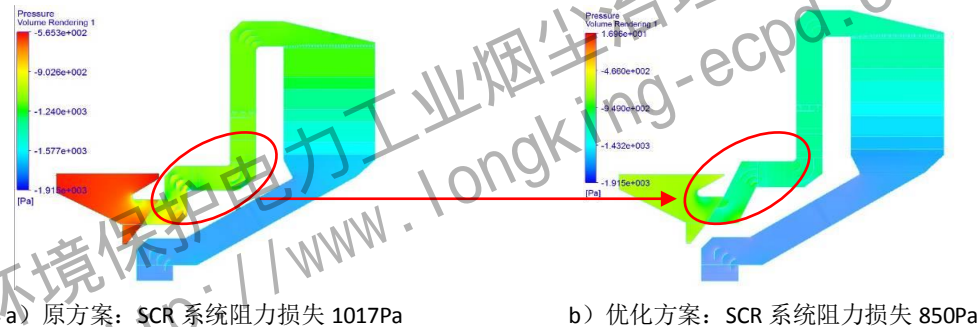


a) 进口边界选在水平烟道

b) 进口边界选在省煤器烟道

图 1 选取不同进口位置的模拟结果

在某些 SCR 脱硝工程中，尤其涉及到改造工程，由于省煤器、空预器以及电除尘器等的空间限制，导致加装 SCR 脱硝系统的难度大大增加，这时，烟道变径和拐弯往往在所难免。但是，设计烟道外形结构时也需要综合考虑烟道积灰/磨损、流场调整空间、系统阻力等因素。如图 2 所示，某电厂 SCR 脱硝改造工程由于省煤器出口至 SCR 上升烟道之间有横梁且由于荷载问题不能移动和更改，要求 SCR 进口烟道要避开该横梁。流体仿真工程师根据现场实际情况分析，合理地调整烟道的布置形式，通过 CFD 数值计算对比 SCR 系统的阻力，优化方案的系统阻力损失减少了 167Pa，有效地将系统阻力控制在设计要求范围内，降低了投运带来的能耗。因此，因地制宜合理设置烟道形式可一定程度上减小系统阻力损失。



a) 原方案：SCR 系统阻力损失 1017Pa

b) 优化方案：SCR 系统阻力损失 850Pa

图 2 烟道布置形式的减阻作用

1.2 首层催化剂上游断面速度分布指标

某些 SCR 脱硝系统运行一段时间后发生催化剂磨损，引起该现象的原因很多，其中一种可能就是流场分布问题。如图 3，某电厂停炉检修时发现 SCR 脱硝反应器中在锅炉外侧的首层催化剂出现严重磨损。通过 CFD 模拟还原当时导流措施下的流场分布情况（见图 4），结果表明，外侧催化剂区域的烟气流速过大，最大达到 11m/s，尽管整个断面满足 Cv 值小于 15%^[5]的设计指标，但是催化剂局部磨损的风险较大。对此，对模拟结果进行分析后，提出了在反应器顶部斜板上添加若干个气流缓冲小挡板的改善措施，有效地防止转弯外侧气流过大问题，将断面最大速度减小至 5.1m/s，减小了催化剂的磨损隐患。因此，为了保证 SCR 系统的稳定运行，减少积灰与磨损，进行流场优化时不能仅局限于首层催化剂上游断面的速度相对标准偏差（Cv 值）小于 15% 的指标，还应控制断面的最大速度。



图3 首层催化剂出现严重磨损

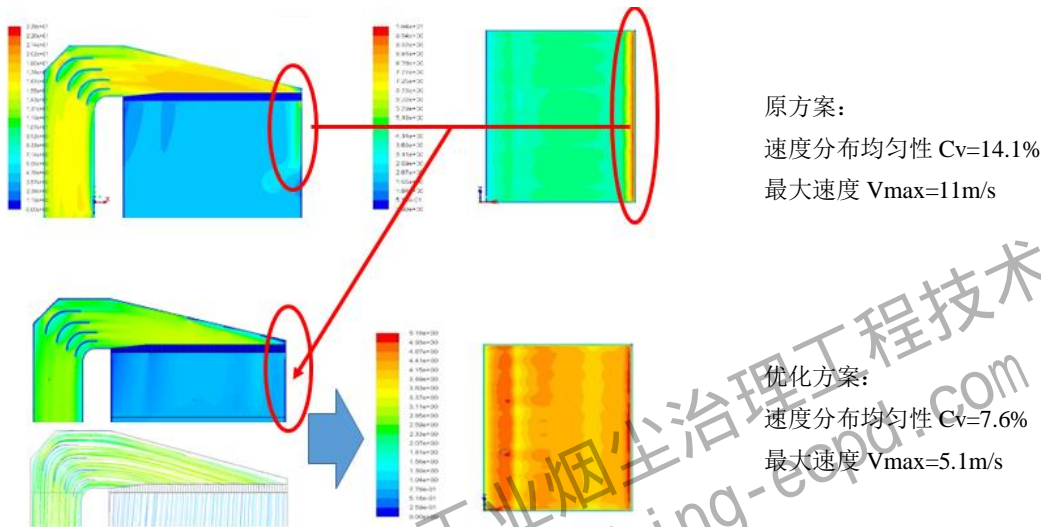


图4 优化前后首层催化剂上游断面的速度分布

1.3 空预器上游流场的重要性

SCR 脱硝设备对下游空预器的影响，现在的关注点仍停留在氨逃逸产生 NH_3HSO_4 后导致的空预器腐蚀、积灰堵塞等问题，忽略了 SCR 脱硝设备也改变了空预器入口烟道的流场，而流场的均匀性严重影响空预器的热力性能、换热元件的磨损和堵灰等。图 6 是某石油化工厂 SCR 脱硝改造工程流场优化前后空预器上游断面的速度分布，优化前空预器入口速度很不均匀，最大速度达 26.4m/s，优化后空预器入口速度变均匀，最大速度降为 11m/s，由此可见在空预器上游增加导流措施对减轻换热管磨损，提高换热效率并延长其使用寿命有积极意义。



图5 空预器的积灰堵塞

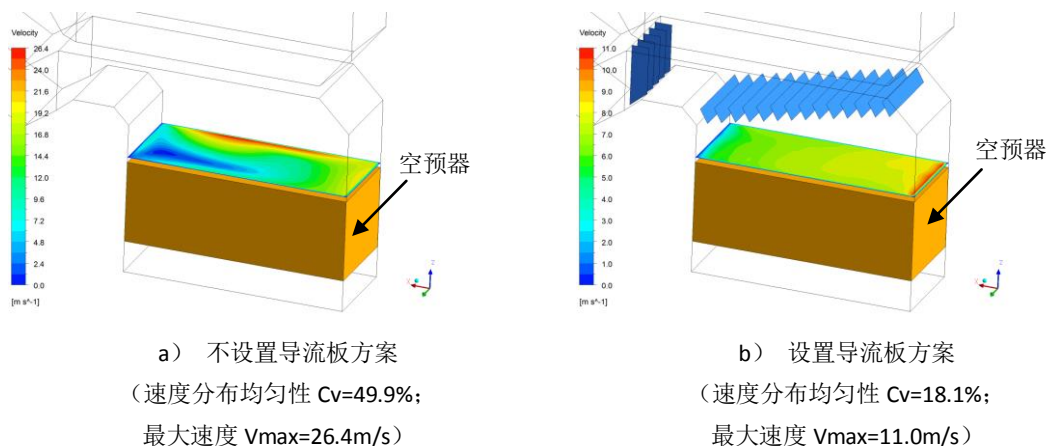


图 6 优化前后空预器上游断面的速度分布

2 电除尘设备流场优化技术要点^[6-10]

2.1 流量分配

根据 JB/T 7671 《电除尘器气流分布模拟试验》标准，电除尘器各室的流量分配相对偏差不得超过 5%。若该偏差太大，不仅会使得风量大的烟道磨损，还会（因电场风速高于设计值）导致除尘效率下降，另外也不利于除尘器排输灰系统的正常稳定运行。目前的数值模拟一般采用单相流，仅仅统计烟气的流量分配，其实还应考虑粉尘的流量分配是否均匀。图 7 是某电厂电除尘器前烟道流场优化前后的流量分配比较，由此可见，粉尘量分配偏差大于烟气流量偏差，这是因为粉尘密度大于烟气密度，粒径大的粉尘惯性大，气流的携带作用较弱。因此，在工程实际中还应注意粉尘的粒径分布。

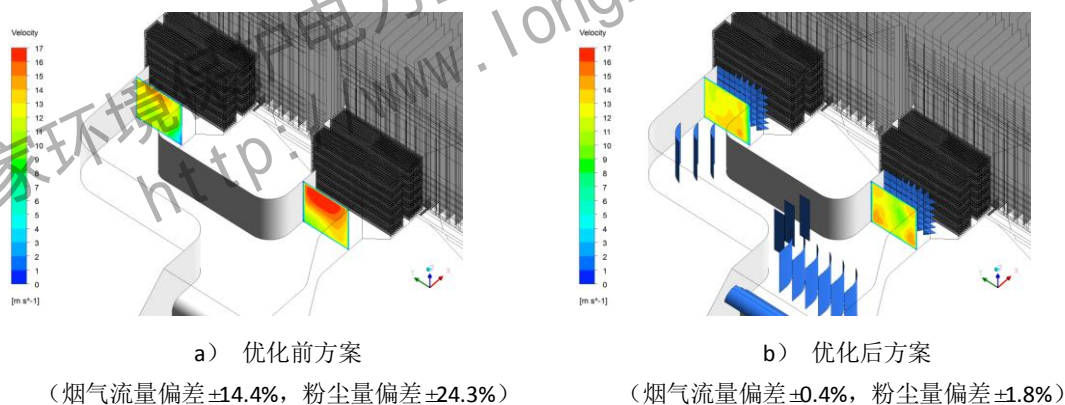


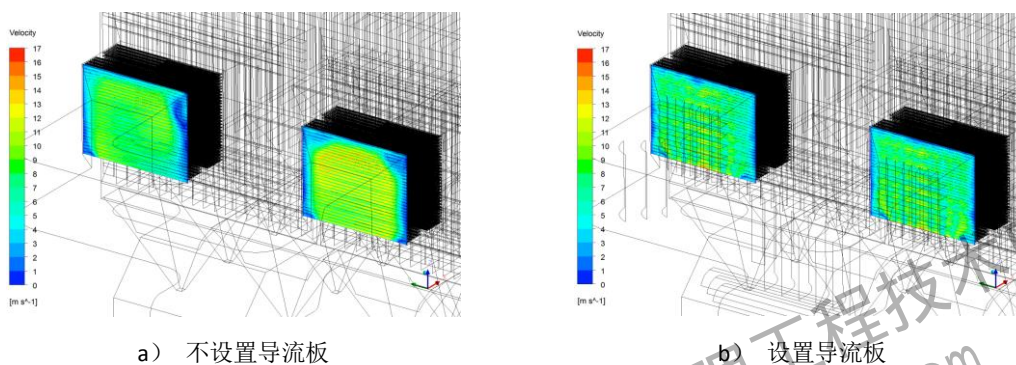
图 7 优化前后电除尘器入口烟道的速度分布

2.2 换热器上游流场的重要性

随着我国节能减排政策执行力度的进一步加大，很多电厂采用了低低温电除尘器，即在常规电除尘器的进口烟道上布置换热器（低温省煤器或热媒体气气换热装置），降低电除尘器入口烟温至酸露点温度以下，大幅度降低粉尘的比电阻，避免反电晕现象，从而提高除尘效率。但从目前运行来看，情况不容乐观，一些电厂安装的低低温省煤器出现了换热效果差、管壁磨损等问题，此时最可能的原因是流场分布不均。图 9 是某电厂低低温电除尘器改造工程流场优化前后换热器上游断面的速度分布，可见，通过在烟道内增设导流措施，换热器上游断面的流场有明显改善，这有利于减轻换热管的磨损并提高换热效率。



图 8 换热器的磨损

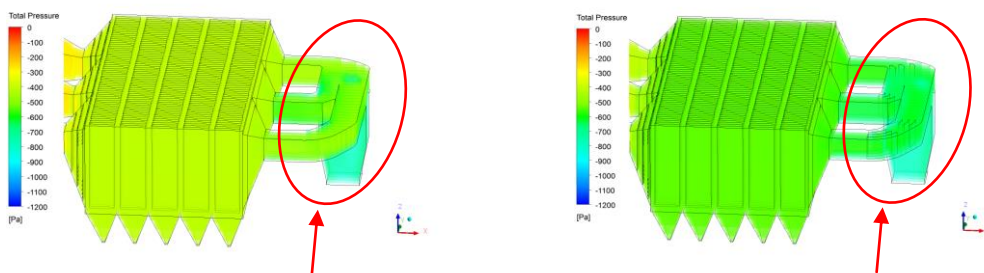


a) 不设置导流板 (速度分布均匀性: 左室 Cv=41.1%; 右室 Cv=44.2%) b) 设置导流板 (速度分布均匀性: 左室 Cv=21.3%; 右室 Cv=21.8%)

图 9 优化前后换热器上游断面的速度分布

2.3 出口烟道流场的减阻作用

由于电除尘器本体喇叭出口至引风机入口之间并没有其他环保设备,该区间的烟道流场分布对设备本身的效率并不会产生影响,因此这部分的烟道流场往往容易被忽视。图 10 给出了电除尘器进口烟道流场优化前后的阻力损失对比情况,统计结果表明,优化后烟道部分的阻力损失减少 110Pa,这有利于减少风机荷载,由此可见,电除尘器尾部烟道流场设计对于节能降耗有一定的工程意义。



a) 不设置导流板方案: 出口烟道阻力损失 280Pa b) 设置导流板方案: 出口烟道阻力损失 170Pa

图 10 电除尘器出口烟道流场优化的减阻作用

3 湿法脱硫设备流场优化技术要点

3.1 进口烟道

湿法脱硫设备(吸收塔)进口烟道的数值模拟研究以往仅关注最佳入口倾角,常忽视引风机出口到吸收塔入口范围内的烟道流场。比较图 11-a 和图 11-b, 可发现: CFD 模拟过程

中忽略吸收塔入口前的烟道时，吸收塔内的流场分布变化非常明显，因此，在工程中为了得到尽可能准确的流场数据，入口前的烟道不可忽略。比较图 11-a 和图 11-c 可知，通过对吸收塔进口烟道的流场进行优化，两者塔内的流场分布基本相近；统计导流板设置前后的烟道阻力损失，设置导流板后压力损失减少了 40Pa。因此，脱硫塔入口导流板的合理设置不但有利于流场分布，也有利于降低系统阻力。

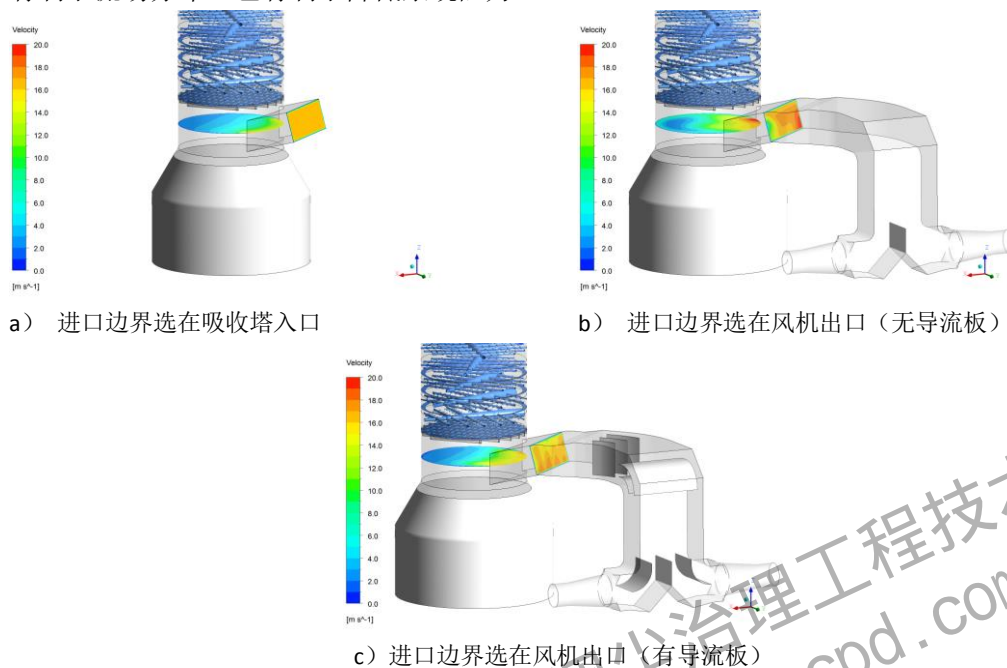


图 11 吸收塔进口烟道流场优化前后的速度分布

3.3 多孔托盘

吸收塔是湿法脱硫系统的关键部分，为了使吸收塔内喷淋区域烟气均匀分布，以强化气液两相的传质、传热和化学反应，在塔内常布置有多孔托盘（或气流均布板）^[11,12]。工程中多孔板的开孔率一般是均匀布置，未考虑托盘开孔率和托盘位置的影响。图 12 给出了托盘优化前后吸收塔内断面的流场分布均匀性情况，数值模拟结果表明，优化前后吸收塔断面流场均匀性得到了很大的改善，这有利于烟气和将液滴充分混合，从而达到提高脱硫效率的目的。可见，调整托盘的开孔率和设置位置对流场改善具有积极意义。

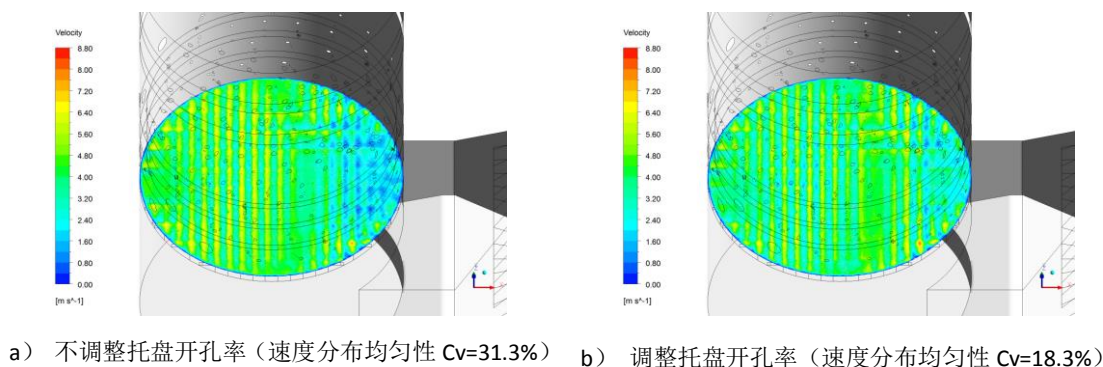
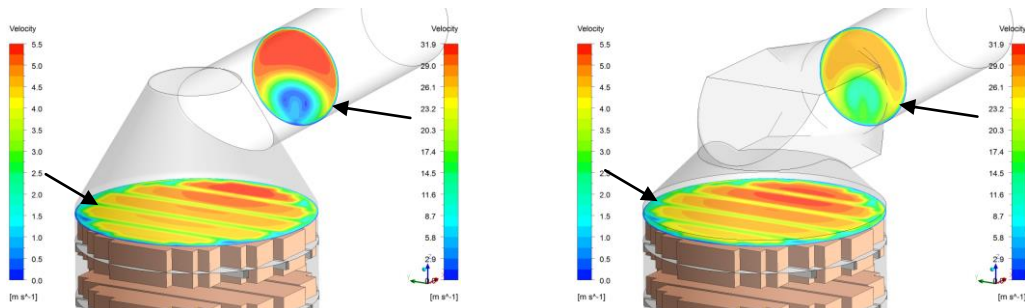


图 12 托盘开孔率调整前后托盘下游断面的速度分布

3.4 吸收塔出口

图 13 给出了两种吸收塔出口布置形式及设置导流板后对流场的影响，从图 13-a 和 13-b 两种不同的烟气出口方式可看出：（1）吸收塔顶部区域的系统阻力有明显的区别；（2）弯头

没有设置导流板时,除雾器出口断面流场速度分布偏向一侧,这不利于除雾器发挥最佳性能。从图 13-c 可看出,增设合理的导流板后,除雾器下游断面流场分布得到了明显的改善,同时,该区域阻力也在图 13-b 的基础上进一步降低,由此可见,设置合理的出口方式和导流板,不但有利于减小系统阻力,也有利于改善流场分布,从而提高脱硫塔的性能。另外,增设导流板后,除雾器内流场的改善对于除雾器发挥最佳效果也具有积极意义。



a) 出口布置形式一
(两断面间的烟道阻力 $\Delta P=194\text{Pa}$)

b) 出口布置形式二
(两断面间的烟道阻力 $\Delta P=120\text{Pa}$)

c) 出口布置形式二加设导流板 (两断面间的烟道阻力 $\Delta P=71\text{Pa}$)

图 13 吸收塔出口烟道流场优化的减阻作用

4 小结

本文采用数值模拟方法并结合工程实际详细阐述了 SCR 脱硝装置、(低低温)电除尘器、湿法脱硫装置流场优化设计的要点,通过比较不同情形下的流场分布及压力损失,得出如下结论:(1) 优化设计不仅要满足相关设计标准,还应考虑积灰、磨损、压损等问题;(2) 须选择合理的模拟范围,提高数值模拟与实际工程的吻合性;(3) 适当调整烟道形式,并在进出口烟道设置合理的导流板,可以起到节能减阻的效果;(4) 为减轻催化剂及换热器等磨损,应提高断面速度均匀性并降低最大速度;(5) 调整吸收塔内托盘的开孔率和设置位置,可以进一步改善流场提高脱硫效率。

参考文献

[1] 赵永椿, 马斯鸣, 杨建平. 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] 王福军. 计算流体动力学分析—CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004
 [3] 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
 [4] Yanhong Gao, Qingcai Liu, Lingtao Bian.Numerical Simulation and Optimization of Flow Field in the SCR Denitrification System on a 600 MW Capacity Units. Energy Procedia, 14 (2012): 370-375
 [5] 杜云贵,余宇,吴其荣等.烟气脱硝系统流场模拟与实验研究[J]. 环境工程.2009, (27):255-272
 [6] B.Y. Guo, X.L.Ye, D.D. Liu and A.B. Yu, “Application of multi-scale approach in the gas flow simulation

- through electrostatic precipitators”, Ninth Int. Conf. on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia, 10-12 Dec 2012.
- [7] B.Y.Guo, Q.F.Hou, A.B.Yu, L.F.Li and J.Guo, “Numerical modelling of the gas flow through perforated plates”, Chem. Eng. Res. Des., 91 (2013), 403-408
- [8] B.Y. Guo, S.Y. Yang, M. Xing, K.J. Dong, A.B. Yu, J. Guo, “Towards the development of an integrated multiscale model for electrostatic precipitation”, I&ECR, 52 (2013):11282-93
- [9] 李立锋,叶兴联,杨丁.湿式电除尘器系统流场数值模拟分析[J].环境工程学报.2015,9(10):4959-4964
- [10] 叶兴联,郭宝玉,杨丁,苏寅彪,郑好. 电除尘器气流分布多尺度数值模拟方法应用. 2014ANSYS 中国技术大会. 苏州
- [11] Thomas W. Strock, W. F. Gohara. Experimental approach and techniques for the evaluation of wet flue gas desulphurization scrubber fluid mechanics. Chemical Engineering Science 49(24):4667-4679 , Jan 1994
- [12] S.J. Wang, P. Zhu, G. Zhang, Q. Numerical simulation research of flow field in ammonia-based wet flue gas desulfurization tower. Journal of the Energy Institute 88(3):294-291, August 2015

国家环境保护电力工业烟尘治理工程技术中心
<http://www.longking-ecpd.com>