

# 穹顶之下，CFD 能做些什么？

叶兴联

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

**摘要：**近几年，全国大范围内持续出现的雾霾天气要求着更加稳定高效的除尘、脱硫、脱硝等环保设备，此时，CFD 数值模拟技术越来越受到重视，成为了环保设备优化设计的主要乃至必要手段之一。那么，穹顶之下，CFD 能做些什么呢？本文结合工程实际应用介绍了 CFD 模拟技术在大气污染物排放设备优化设计过程中所起到的作用。应用结果表明，CFD 数值模拟技术对于提高设备运行效率、减少污染物排放具有重要的工程意义。

**关键词：**CFD 数值模拟，静电除尘，电袋复合除尘，SNCR 脱硝，SCR 脱硝，湿法脱硫，流场优化设计

随着国民经济的稳步快速发展，我国的能源需求不断加大，燃煤锅炉（电站锅炉和工业锅炉）数量也相应地不断增加，使得大气污染物的排放呈现快速增长的趋势，由此引发了一系列环境问题，如酸雨、臭氧层破坏等，尤其是近几年全国大范围内持续出现的雾霾天气，严重影响了我国经济的发展和人民的生活健康。燃煤锅炉排放的大气污染物主要有粉尘颗粒、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>等有害物质，其过量排放是造成我国大气污染严重的主要因素，为了有效控制粉尘颗粒、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>等污染物的排放，除尘、脱硫、脱硝等环保设备的合理设计是关键，CFD 数值模拟技术在近几年来作为环保设备优化设计的主要手段之一起到了重要的作用。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。由于除尘脱硫脱硝设备运行效率与流体流动传热等过程密切相关，因此采用 CFD 数值模拟技术对燃煤锅炉污染控制设备进行优化设计越来越受工程设计人员的重视。通过多年研究与经验积累，CFD 数值技术在龙净环保产品优化设计已具有成熟的应用体系。在典型的燃煤电站锅炉烟气治理流程中，CFD 数值模拟优化的应用范围主要如图 1 所示；在典型的工业炉窑烟气治理流程中，CFD 数值模

拟优化的应用范围主要如图 2 所示。

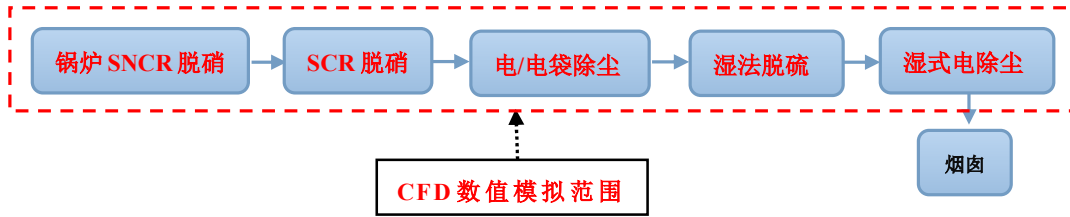


图 1 CFD 在燃煤电站烟气治理中的应用范围

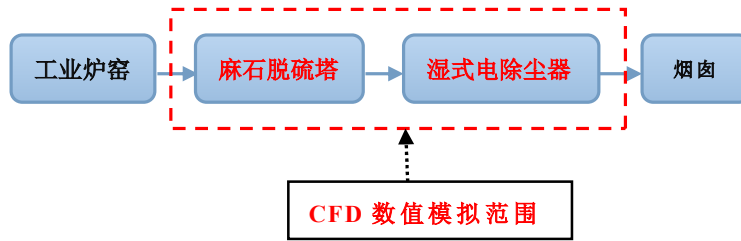


图 2 CFD 在工业炉窑烟气治理中的应用范围

## 1. CFD 技术在除尘设备中的优化设计应用

### 1.1 静电除尘器流场优化设计的 CFD 数值模拟

电除尘器利用高压静电作用实现烟气除尘，具有阻力小、除尘效率高、处理烟气量、工作稳定可靠等优点，是燃煤锅炉进行烟气除尘的最重要、最有效的环保设备之一。

大多数工业规模的 ESP 系统包含若干个相同的除尘室，并由进出口烟道系统连接。为了使各个室流量分配尽可能均匀（通常设计要求各个室的流量偏差控制在 5% 以内），需要在烟道内设置导流板。图 3 是印度某  $7 \times 660\text{MW}$  燃煤锅炉配套电除尘器及烟道内部导流板三维图，电除尘器流场数值模拟和物模试验如图 4 所示，流量分配对比结果如表 1 所示。结果表明：电除尘器流量偏差得到了有效的改善，数值模拟结果和物模试验结果吻合较好。

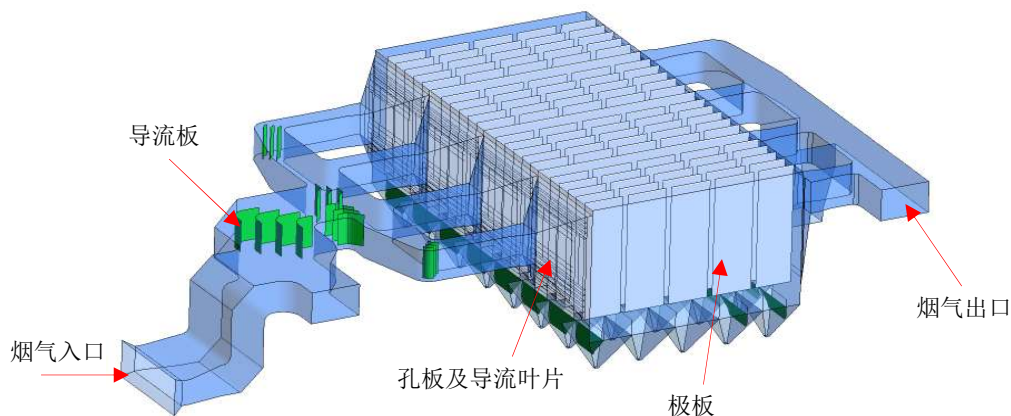


图3 电除尘器 CFD 模型

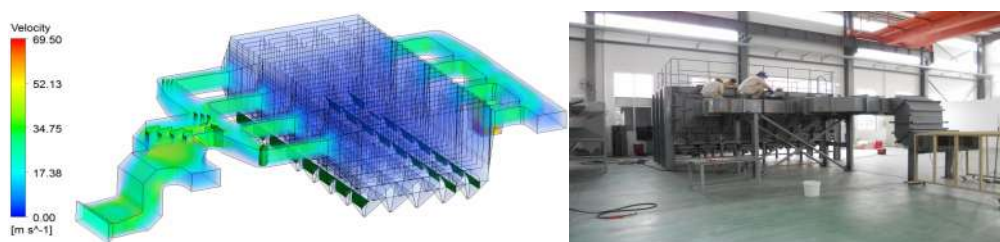


图4 电除尘器流场数值模拟和物模试验

表1 流量分配的数值计算及物模试验结果对比

平均速度	烟道 1	烟道 2	烟道 3	烟道 4
数值计算	29.71	29.61	29.78	29.99
物模试验	29.52	29.77	29.11	29.31

气流分布对电除尘器的收尘效率具有重要影响，其可使除尘效率变化20~30%。当烟气进入除尘器电场时，气流速度不均匀容易造成冲刷，使收尘极板上和灰斗里的粉尘大量扬起，并且高速区粉尘颗粒难以被捕集，进而降低除尘效率。为使电除尘器内气流均匀分布以提高除尘效率，电除尘器进口喇叭的合理优化设计是关键。图5是福建某600MW机组配套电除尘器内部流线图，电场第一断面气流分布数值模拟和试验对比结果如图6所示，数值模拟很好地预测了电场内部气流分布趋势，通过数值模拟优化设计对于改善电场内部气流分布，提高电除尘器性能具有重要参考价值。

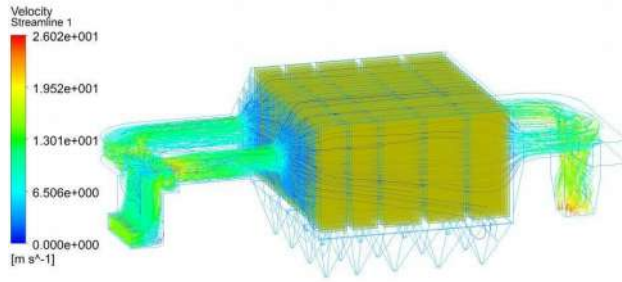


图 5 电除尘器内部流线图

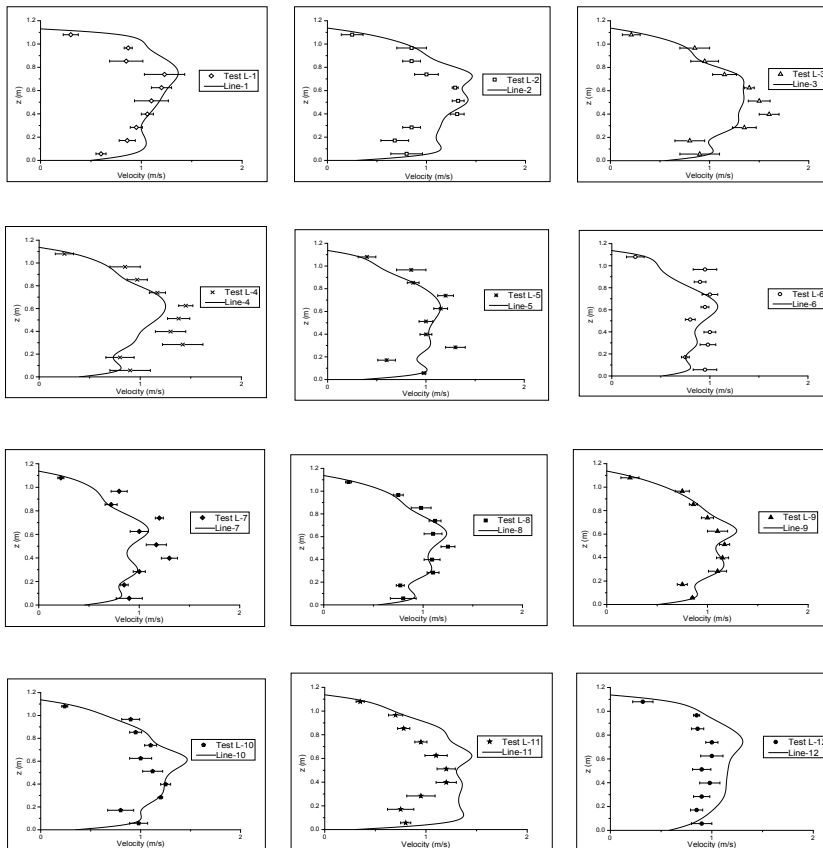


图 6 电除尘器电场第一断面气流分布数值模拟和试验对比结果

## 1.2 电袋复合除尘器流场优化 CFD 模拟

电袋复合除尘器是电除尘、袋除尘捕集机理有效结合而延伸出来的一种高效除尘设备，其结合了电除尘器和袋式除尘器的优点，可使排放浓度长期稳定在  $20\text{mg}/\text{Nm}^3$  以下，并且具有对煤种变化适应性强及占地面积小等优点。电袋复合除尘器大型化应用中气流流场分布是关键技术问题之一，直接影响电袋复合除尘器的性能。电袋复合除尘器内气流均匀分布可以减少气流冲刷、使各个滤袋单元气流分配均匀，同时使滤袋单元内流场均匀平缓，降低设备运行阻力和能耗。图 7 是山东某 150MW 机组配套电袋复合除尘器三维示意图，通过采取增设和调整

导流板、孔板、导流叶片的优化措施，电袋除尘器内的气流分布得到了改善，结果如图 8~10 所示，良好的气流分布有利于降低高浓度粉尘对袋区的冲刷以及运行阻力损失，并延长滤袋寿命。

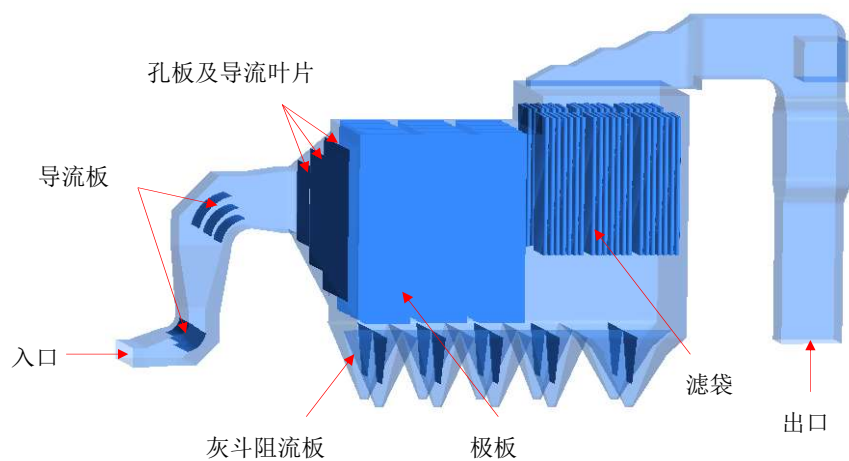


图 7 电袋复合除尘器 CFD 模型

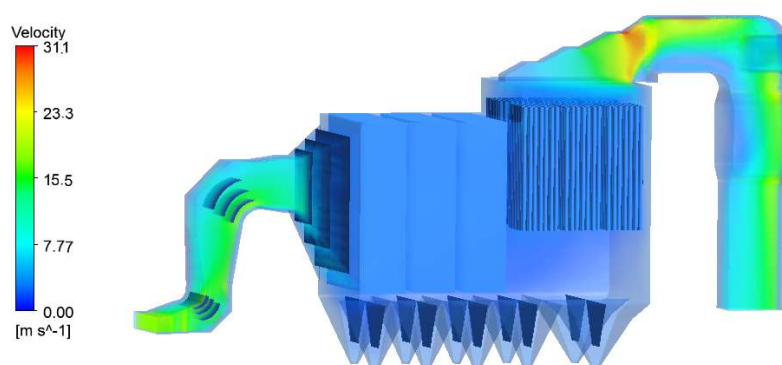


图 8 电袋复合除尘器速度分布

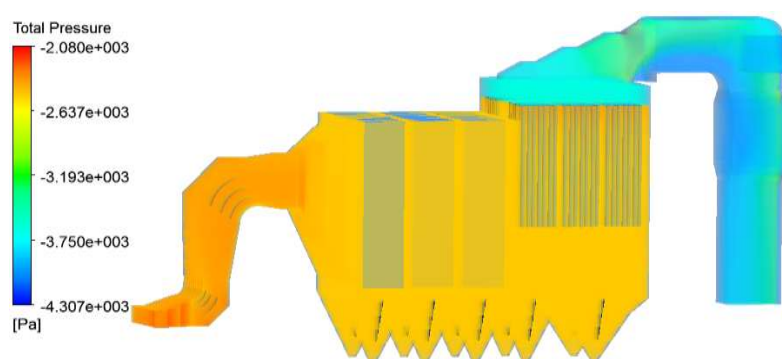


图 9 电袋复合除尘器压力分布

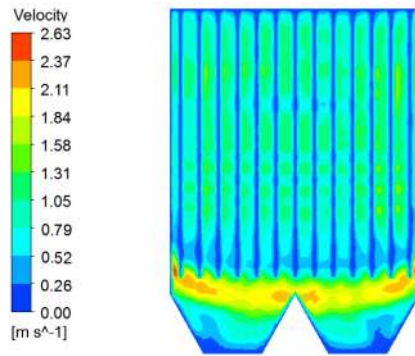


图 10 电袋复合除尘器电场前断面速度分布

## 2. CFD 技术在脱硝中的优化设计应用

### 2.1 SNCR 脱硝氨喷射的优化

SNCR 脱硝技术因其系统简单、投资低、周期短、不需单独设备等优点得到广泛应用，也是环保部为火电厂推荐的两种烟气脱硝技术之一。尽管还原剂与  $\text{NO}_x$  的反应时间很短，但反应窗口很小，所以还原剂的喷射位置对 SNCR 脱硝来说是关键。图 11 是某 150MW 机组 CFB 锅炉 SNCR 脱硝 CFD 模型内部流场分布模拟结果，通过建立炉内烟气流动、传热和组分输运等三维数值模型，图 12 给出了不同的喷射角度条件下还原剂浓度分布的模拟结果，不同喷枪布置方案的还原剂浓度分布模拟结果对比如表 2 所示。结果表明不同的喷射位置和喷射角度对还原剂的混合效果影响较大，通过数值模拟可以为 SNCR 脱硝工程还原剂的设计找到最佳喷射位置和喷射角度。

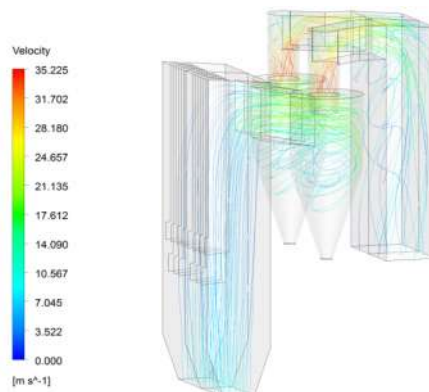


图 11 CFB 锅炉内部流场

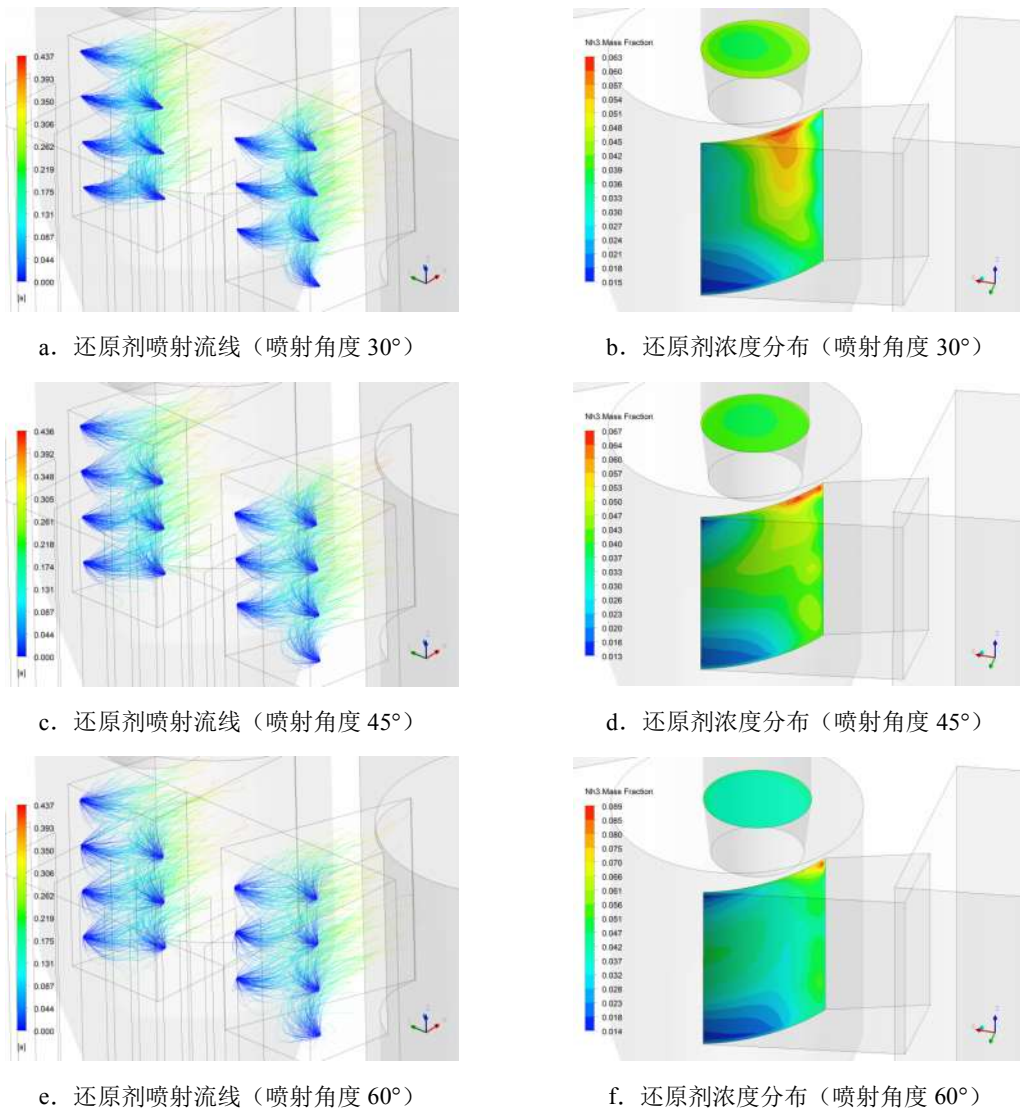


图 12 不同喷射角度数值模拟结果

表 2 不同喷射方案模拟结果

工况		方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6
喷枪数量		14 支			12 支		
喷射角度		30°	45°	60°	30°	45°	60°
监测断面还原剂浓度分布相对标准偏差	旋风筒入口	26.1%	22.1%	21.4%	21.3%	18.4%	19.6%
	旋风筒出口	1.83%	1.19%	0.96%	0.31%	0.43%	0.56%

## 2.2 SCR 脱硝流场优化设计

目前，选择性催化还原（SCR）脱硝技术是治理燃煤电站 NO<sub>x</sub> 污染的最有效形式，其以装置结构简单、可靠性好、脱硝效率高等优点占据了世界 80% 的烟气

脱硝市场。除了与催化剂活性有关外，SCR 脱硝性能很大程度上决定于 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  $\text{NO}_x$  充分反应以提高脱硝效率和减小氨逃逸率。图 13 是唐山某 300MW 锅炉 SCR 脱硝装置 CFD 模型网格划分及数值模拟结果，图 14 是优化前后催化剂入口断面速度分布和浓度分布对比的模拟结果。优化后的方案按 1:10 比例搭建物理模型（图 15），并进行了物模试验验证，对比统计结果表 3 所示。研究表明：SCR 脱硝系统没有优化措施时，第一层催化剂上游速度偏差很大，最大流速超过 12m/s，浓度分布极不均匀；优化后第一层催化剂上游的速度分布和氨浓度分布都得到了改善，有利于减少催化剂层磨损、堵塞和氨逃逸，并提高脱硝效率；数值模拟结果和物模试验结果吻合进一步保证了优化设计的可靠性。

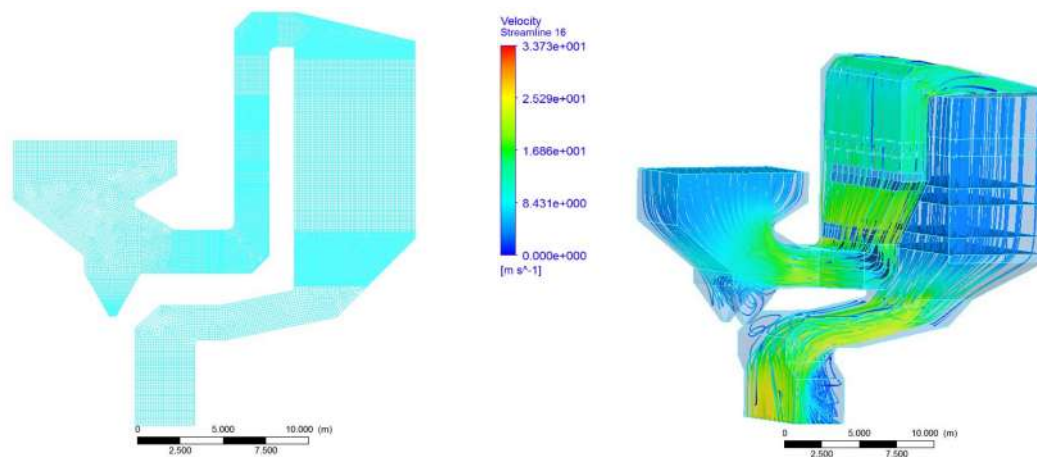


图 13 SCR 脱硝装置 CFD 模型网格划分及数值模拟结果

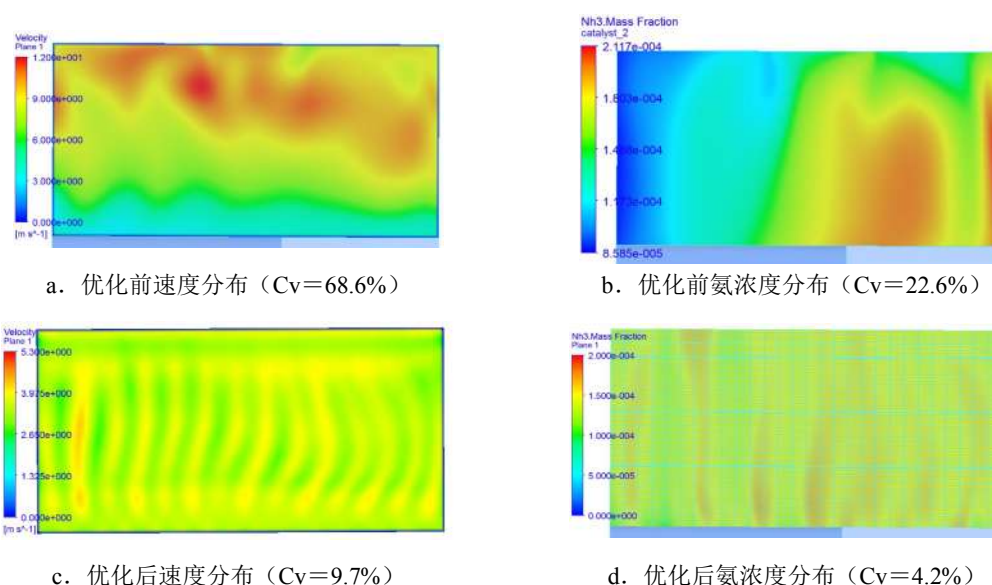


图 14 优化前后催化剂入口断面速度分布和浓度分布对比





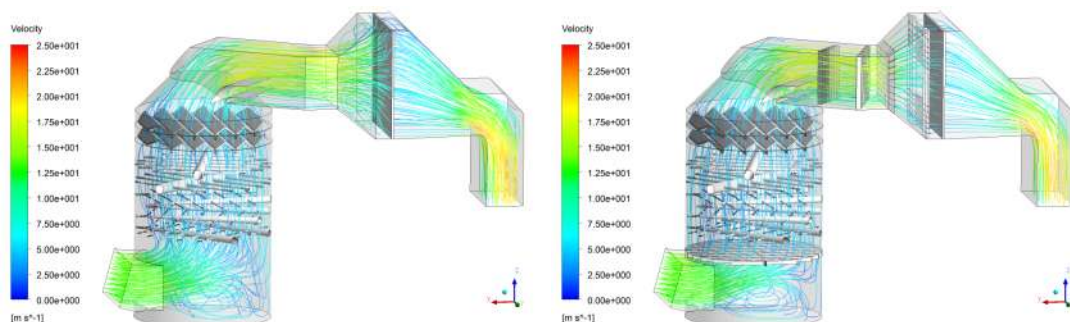
图 15 SCR 物模试验

表 3 CFD 数值模拟和物模试验结果对比

项 目	CFD 数值模拟	物模试验
第一层催化剂上游速度分布	Cv=9.7%	Cv=11.8%
第一层催化剂上游浓度分布	Cv=4.2%	Cv=3.5%
系统阻力	682Pa	665Pa

### 3. CFD 技术在湿法脱硫中的应用

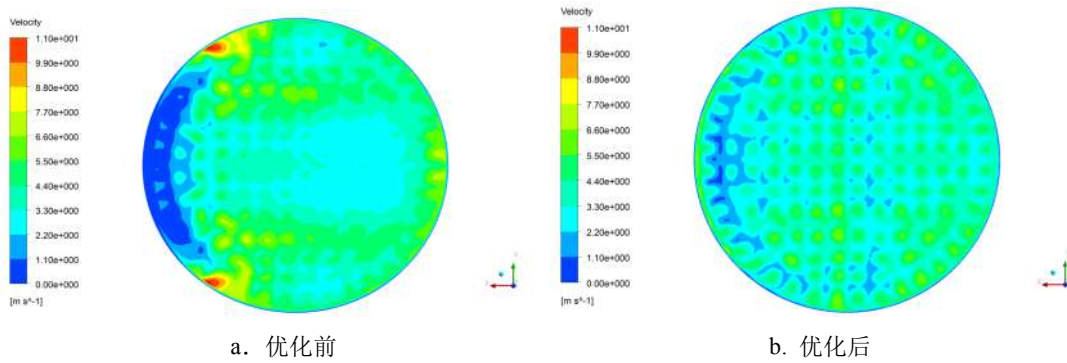
湿法烟气脱硫（WFGD）是当前大型燃煤电厂烟气脱硫的主导技术，吸收塔为 WFGD 系统的核心设备，塔内流场的合理分布对于强化烟气与浆液之间的混合与传质、延长气液在吸收区的接触时间、增大气液接触面积并尽量降低系统阻力有着重要的意义，此外，塔内流场的均匀性还会影响除雾器的除雾效果。图 16~18 是优化前后脱硫塔内流场分布的数值模拟结果，从图中可以看出优化前，塔内吸收区域的流场不均，这会导致在吸收塔横截面上不同区域的 SO<sub>2</sub> 去除效率也各不相同，其结果是造成吸收塔的总体脱硫效率降低；出口烟道除雾器前气流很不均匀，将会降低除雾器的除雾效率。优化后，在多孔托盘的均流作用下，塔内吸收区域的流场得到了改善；通过设置导流板，出口烟道除雾器前气流分布均匀性良好。



a. 优化前

b. 优化后

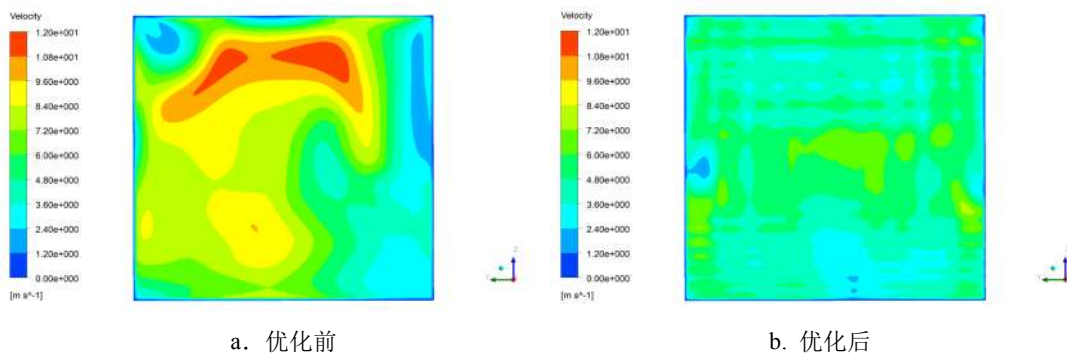
图 16 脱硫塔内流线图



a. 优化前

b. 优化后

图 17 脱硫塔内首层喷淋层上游断面速度分布



a. 优化前

b. 优化后

图 18 脱硫塔出口烟道除雾器上游断面速度分布

#### 4. 工业炉窑脱硫—湿法电除尘一体化优化设计 CFD 模拟

尽管单个工业炉窑排放量相对较低，但由于工业炉窑数量众多，排放总量仍不可忽视，工业炉窑污染物的优化设计仍具有重要的实际意义。图 19 是山东某企业链条炉后麻石脱硫塔内流场优化数值模拟结果，通过在塔内设置合理的导流叶片，强制烟气在塔内做旋流运动，延长了烟气在塔内的停留时间，从而达到提高脱硫效率的目的。湿法电除尘器作为粉尘颗粒精处理设备，也可作为工业炉窑脱硫设备的电除雾器，防止酸水雾逃逸等现象的产生。图 20 是某工业炉窑湿法电除尘器流场优化数值模拟结果，通过在入口烟道设计导流板，在进口喇叭设置合理的整流措施，使得烟气均匀平稳通过收尘区域；设计倒喇叭型出气方式防止水雾逃逸和偏流现象。

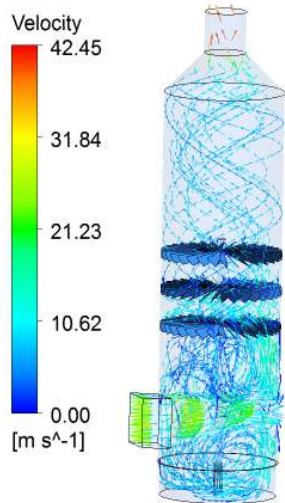


图 19 麻石脱硫塔内烟气流线

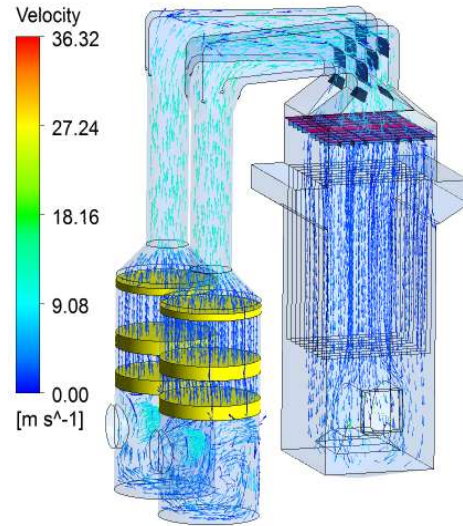


图 20 工业炉窑湿法电除尘器内烟气流线

## 5. 总结

CFD 数值模拟技术在除尘、脱硫、脱硝中的应用，几乎涵盖了燃煤锅炉污染物治理的所有领域。同传统经验设计相比，CFD 具有明显的优势：减少了物理模型试验，缩短了研发周期，为工程设计和优化提供了科学的指导。工程实践表明 CFD 数值模拟技术在大气污染控制设备优化设计具有不可替代的作用。