

## SCR 脱硝烟气-氨气强化混合措施

苏寅彪, 叶兴联, 温卿云, 郑好, 叶凯

(福建龙净环保股份有限公司, 福建龙岩 364000,)

**摘要** 以某燃煤电厂格栅喷氨型 SCR 脱硝装置为研究对象进行流场数值模拟, 针对该脱硝装置混合距离短难以使烟气与氨气在到达催化剂前充分混合的特点, 提出一种强化混合措施—在喷氨格栅后增设圆盘混合器来促进烟气与氨气的混合。通过数值模拟和物模试验验证, 增设圆盘混合器对强化混合效果作用明显, 有利于提高 SCR 系统脱硝效率。

**关键词** SCR 脱硝; 圆盘混合器; 数值模拟; 物模试验

## Mixing Enhancement of Ammonia and Flue Gas in the SCR DeNO<sub>x</sub> System

Su Yinbiao, Ye Xinglian, Wen Qingyun, Zheng Hao, Ye Kai

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

**Abstract:** The flow field and mass transfer in the SCR DeNO<sub>x</sub> system of a coal power plant are investigated by using numerical simulations and physical model experiments. As a significant measure to increase the DeNO<sub>x</sub> efficiency, a static disk mixer is installed after the ammonia injection grille (AIG) to promote the mixing efficiency of the ammonia and the flue gas in the short distance between the AIG and the catalyst. Through numerical simulation and physical model experiment, it is revealed that the disk mixer has great positive effect on enhancing the mixing process and will potentially improve the efficiency of SCR DeNO<sub>x</sub>.

**Key words:** SCR DeNO<sub>x</sub>, Disk mixer, Numerical simulation, Physical model experiment.

### 1 引言

燃煤电厂产生的氮氧化物 (NO<sub>x</sub>) 已成为我国大气主要污染物, 其过量排放对环境危害巨大, 容易引起光化学烟雾、酸雨、臭氧层破坏等一系列环境问题, 因此控制和治理氮氧化物污染是我国环保科技领域的一大重要任务<sup>[1-5]</sup>。目前, 选择性催化还原 (SCR) 脱硝技术是国际上应用最为成熟的烟气脱硝技术, 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<sup>[6,7]</sup>。

脱硝效率和氨逃逸率是衡量 SCR 脱硝性能的两大重要指标, 与到达催化剂前烟气的速度分布、喷入烟气中的氨气与烟气的混合程度有密切关系<sup>[8-10]</sup>。到达催化剂前烟气的速度分布越均匀、氨气与烟气混合效果越好, 越有利于氨气与氮氧化物催化还原反应。因此为了提高 SCR 脱硝效率和减小氨逃逸率, 在 SCR 脱硝设计时要求流场满足: ①首层催化剂前断面的烟气速度分布均匀, 速度相对标准偏差值小于 15%; ②首层催化剂前断面的氨浓度分布均匀, 氨浓度相对标准偏差值小于 5%<sup>[11]</sup>。相对标准偏差值用  $C_v$  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  $X_i$ —测点数据，如速度、浓度等； $\bar{X}$ —测试断面数据平均值； $n$ —测试断面测点数。 $C_v$  是定量评估测试数据均匀性的变量。较小的  $C_v$  表明测试数据更加均匀。

## 2 研究对象

某燃煤电厂 2×500MW 机组脱硝改造工程的 SCR 脱硝装置空塔结构如图 1 所示，烟气从省煤器出口进入 SCR 脱硝系统入口烟道，经过扩张烟道和转弯烟道到达喷氨区域，烟气与氨气在此开始混合，之后再通过一定距离的烟道及两个 90°转弯向下进入催化剂层，在催化剂的作用下烟气中的氮氧化物与氨气反应生成水和氮气，经过脱硝后的烟气由出口烟道进入空气预热器。该 SCR 脱硝装置采用格栅喷氨型式，如图 2 所示。使用空气稀释后的氨气从喷氨管进入喷氨格栅，通过喷氨口注入烟气中。由于脱硝改造时喷氨格栅布置场地的限制，喷氨格栅与催化剂的烟道距离较短，使得氨气与烟气混合距离短、难以在到达催化剂前混合均匀，因此如何使氨气与烟气进行充分混合成为该 SCR 脱硝装置设计的关键。本研究将采用 CFD 数值模拟软件 ANSYS-FLUENT 对 SCR 脱硝装置进行流场导流、整流装置设计，例如加设导流叶片、整流格栅，从而使流场符合 SCR 脱硝要求。

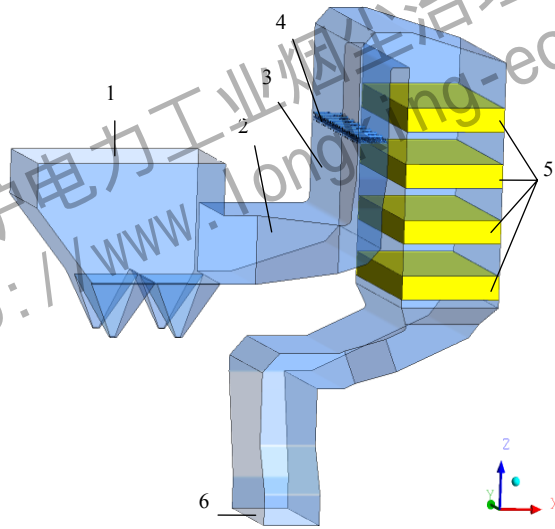


图 1 SCR 脱硝装置空塔结构

1-省煤器；2-扩张烟道；3-垂直烟道 4-喷氨格栅；5-催化剂层；6-出口

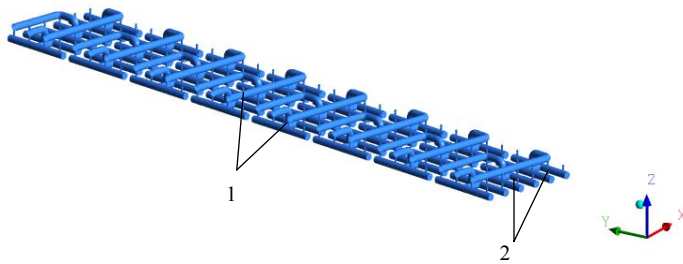


图 2 喷氨格栅示意图

1-喷氨管；2-喷氨口

### 3 流场数值模拟研究

#### 3.1 初步设计方案数值计算结果

为使流场满足 SCR 脱硝关于首层催化剂前断面烟气速度分布均匀、氨浓度分布均匀的要求，流场调整的主要措施是在转弯烟道和扩张烟道分别设置圆弧导流板和平板导流板，使烟气平滑通过，如图 3 所示。在斜坡烟道设置小挡板，可以缓冲气流，防止斜坡外侧的烟气速度过大；在催化剂前设置格子板整流格栅，使烟气竖直向下进入催化剂层。

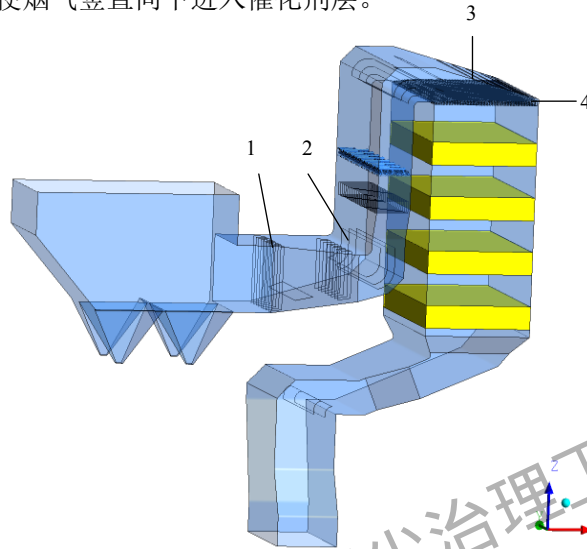
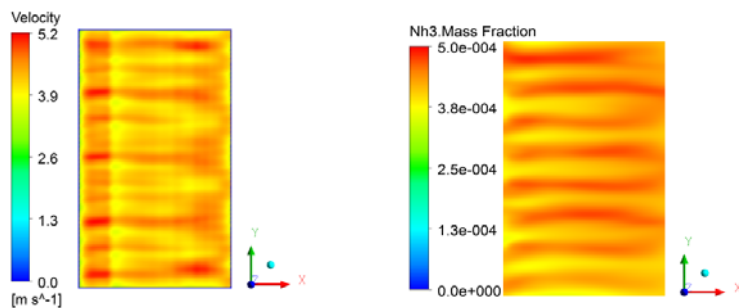


图 3 初步设计方案中的导流、整流装置布置

1-扩张烟道平板导流板；2-转弯烟道圆弧导流板；3-斜坡小挡板；4-整流格栅

对 SCR 脱硝装置进行 CFD 建模，采用结构化网格和非结构化网格相结合的方式对整个模型进行网格划分，总网格数量为 1033 万。

通过多次调整导流板、整流格栅尺寸及位置，得到初步设计方案，结构如图 3 所示。数值计算得到初步设计方案首层催化剂前断面速度分布和氨浓度分布如图 4 所示，整个断面速度平均值为 4.32m/s，速度相对标准偏差值为 6.8%；氨气平均质量分数为 0.043%，浓度相对标准偏差值为 9.5%。



(a) 烟气速度分布云图

(b) 氨浓度分布云图

图 4 初步设计方案首层催化剂前断面数值计算结果

在初步设计方案中，首层催化剂前断面烟气速度分布满足设计要求，但氨浓度相对标准偏差值大于 5%，未达到设计要求。由于氨气与烟气在到达催化剂前的混合距离短，仅仅依靠调整导流板难以使氨气-烟气充分混合。催化剂前氨气浓度不够均匀，不利于脱硝反应的进行，因此需采取新措施来强化氨气和烟气的混合。

### 3.2 优化方案数值计算结果

在优化方案中，提出一种强化混合措施—在喷氨格栅后增设圆盘混合器来促进烟气与氨气的混合，如图 5 所示和图 6 所示。当烟气到达圆盘混合器区域时，气流对圆盘混合器产生绕流，形成强烈的涡流效应，进而促进氨气与烟气的混合。

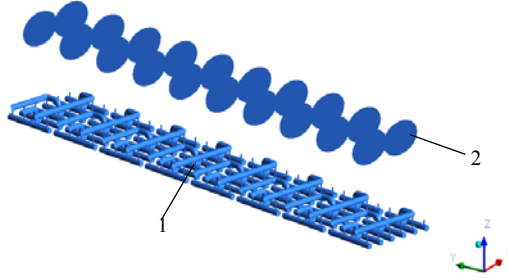


图 5 喷氨格栅与圆盘混合器示意图

1-喷氨格栅；2-圆盘混合器

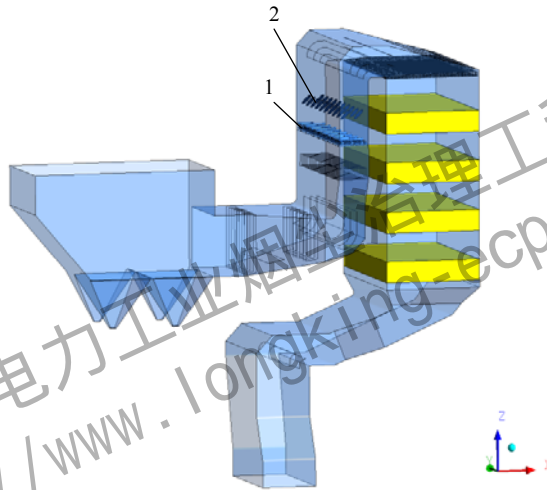
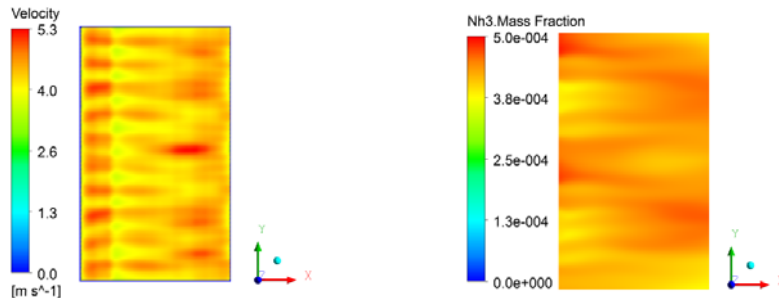


图 6 增设圆盘混合器后的优化方案结构

1-喷氨格栅；2-圆盘混合器

通过数值计算，得到增设圆盘混合器后首层催化剂前断面烟气速度分布、氨气浓度分布的如图 7 所示，整个断面烟气速度平均值为 4.32m/s，速度相对标准偏差值为 6.9%；氨气平均质量分数为 0.043%，浓度相对标准偏差值为 4.1%。增设圆盘混合器后速度、浓度分布能够满足 SCR 脱硝设计要求。



(a) 烟气速度分布云图

(b) 氨气质量浓度分布云图

图 7 优化方案首层催化剂前断面数值计算结果

### 3.3 初步设计方案和优化方案结果对比

对比图 4(b)和图 7(b)中氨气浓度分布可知, 增设圆盘混合器后氨气浓度分布得到明显改善, 整个断面氨气浓度分布变均匀, 浓度相对标准偏差值由 9.5%降低到 4.1%。图 8、图 9 和图 10 是初步设计方案无圆盘混合器时和优化方案有圆盘混合器时竖直烟道的烟气速度矢量、流线及氨气浓度分布之间的比较, 可以看出无圆盘混合器时烟气直接竖直向上流动, 而有圆盘混合器时烟气在圆盘背面形成涡流, 涡流的搅动作用促进了氨气与烟气迅速混合, 从而使首层催化剂前断面的氨气浓度变均匀。

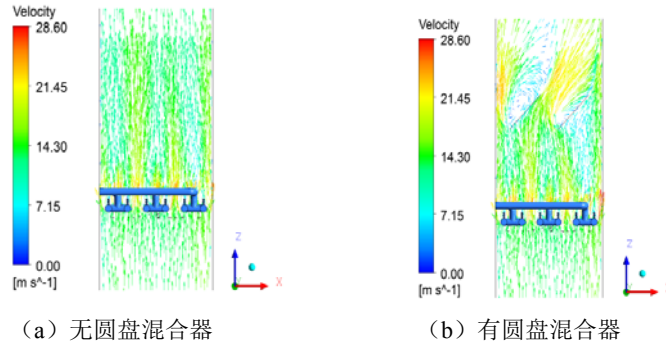


图 8 竖直烟道烟气速度矢量分布

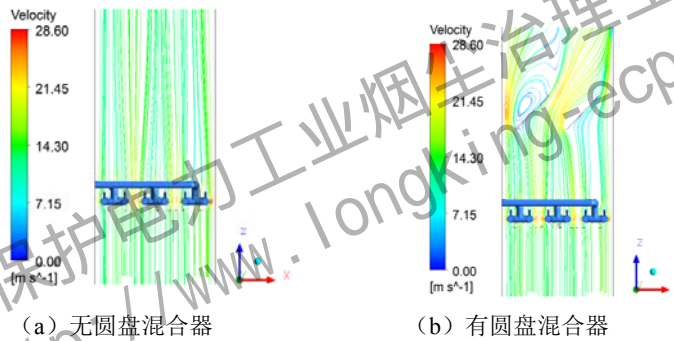


图 9 竖直烟道烟气流线图

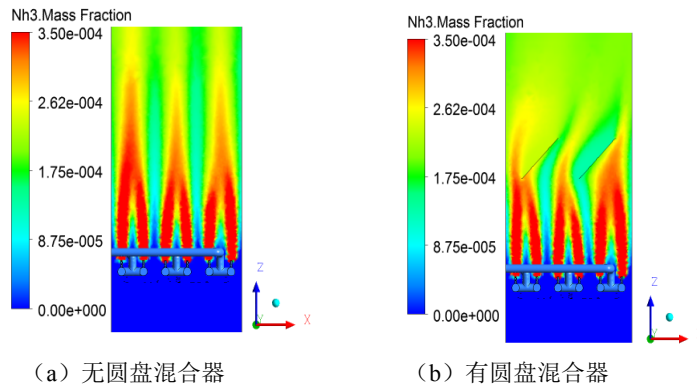


图 10 沿着竖直烟道氨浓度分布图

对圆盘混合器的混合效果进行定量分析, 图 11 给出了在竖直烟道沿着 Z 轴高度方向氨气浓度分布的  $C_v$  值。 $Z=0$  是喷氨口所在的水平面, 圆盘混合器的顶部和底部分别位于  $Z=2.1\text{m}$  和  $Z=1.5\text{m}$  处。在图 11 中,  $C_v$  随着 Z 递减, 表明氨气和烟气在流动过程中混合且氨气浓度分布趋于均匀。当 Z 小于 1.5m 时, 有无圆盘混合器的  $C_v$  值基本相同; 当 Z 大于 1.5m 时, 有圆盘混合器的  $C_v$  值比无圆



盘混合器的  $C_v$  值更小。在  $Z=1.5\text{m}$  到  $Z=2.1\text{m}$  范围内，圆盘混合器对氨气和烟气的混合起着重要的作用，因此有圆盘混合器比无圆盘混合器  $C_v$  值下降得更多。

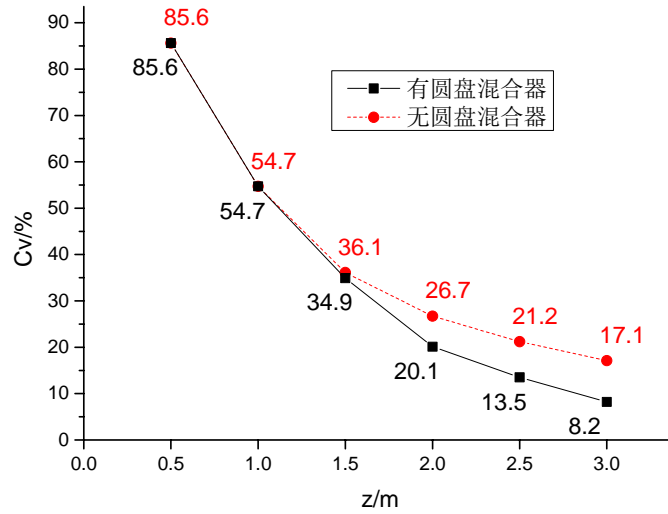


图 11 氨气浓度分布  $C_v$  值沿着竖直烟道的变化

另外，对比图 4(a)和图 7(a)中速度分布，它们的相对标准偏差分别为 6.8%和 6.9%，二者差别小，因此圆盘混合器对首层催化剂前断面烟气速度分布的影响较小。

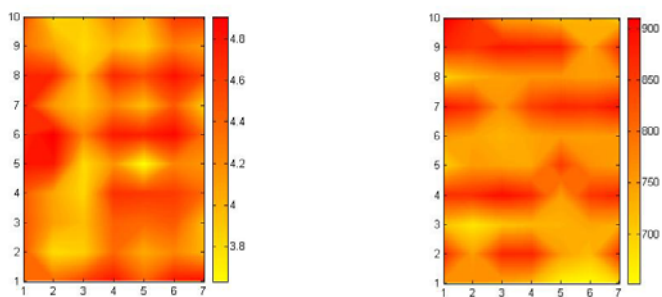
#### 4 流场物模试验

根据数值模拟的初步设计方案和优化方案，搭建 1:10 缩小比例的 SCR 脱硝流场试验模型，如图 12 所示。为便于观察，物模主体结构采用有机玻璃材料制作。在首层催化剂前断面一共布置 7 个测孔，用于测试首层催化剂前速度、浓度分布，测孔编号为孔 1~孔 7，每个测孔布置 10 个测点，整个测试断面均匀布置 70 个测点。采用日本加野 A531 风速仪测试首层催化剂前断面气流速度分布； $\text{CH}_4$  作为氨气的替代示踪气体从喷氨格栅喷入系统中，采用日本新宇宙 XP-3160  $\text{CH}_4$  浓度分析仪测试首层催化剂前断面  $\text{CH}_4$  浓度分布。

试验测得初步设计方案和优化方案首层催化剂前断面速度、 $\text{CH}_4$  浓度分布如图 13 和图 14 所示。初步设计方案首层催化剂前断面气流平均速度为 4.34m/s，速度相对标准偏差为 8.0%， $\text{CH}_4$  平均浓度为 783PPM，浓度相对标准偏差值为 9.0%；增设圆盘混合器的优化方案首层催化剂前断面气流平均速度为 4.31m/s，速度相对标准偏差值为 7.5%， $\text{CH}_4$  平均浓度为 745ppm，浓度相对标准偏差值为 3.9%。从物模试验结果可知：在喷氨格栅后增设圆盘混合器，首层催化剂前断面浓度分布确实得到改善，因此物模试验证实圆盘混合器确实对强化氨气与烟气的混合具有明显作用。



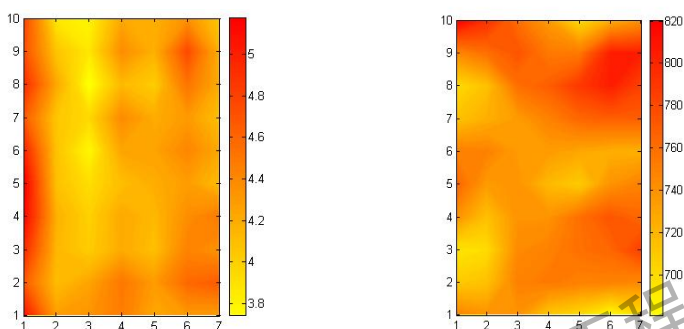
图 12 物理试验模型



(a) 首层催化剂前断面气流速度分布

(b) 首层催化剂前断面 CH<sub>4</sub> 浓度分布

图 13 初步设计方案物模试验结果



(a) 首层催化剂前断面气流速度分布

(b) 首层催化剂前断面 CH<sub>4</sub> 浓度分布

图 14 优化方案物模试验结果

将图 4 和图 7 中的数值模拟结果与图 13 和图 14 中的物模试验结果进行对比并列于表 1，可以看出数值模拟获得的速度和浓度分布趋势与物模试验是相近的，物模试验验证了数值计算结果的可靠性。

表 1 数值模拟结果和物理模型试验结果对比

$C_v$	无圆盘混合器速度分布	有圆盘混合器速度分布	无圆盘混合器浓度分布	有圆盘混合器浓度分布
数值模拟	6.8%	6.9%	9.5%	4.1%
物模试验	8.0%	7.5%	9.0%	3.9%

## 5 结论

在格栅型喷氨装置后增设圆盘混合器能使烟气通过时产生涡流，进而促进氨气与烟气的混合。数值模拟和物理模型试验结果共同证明了喷氨后增设圆盘混合器强化了氨气与烟气的混合。因此在喷氨格栅后增设圆盘混合器能够解决 SCR 脱硝工程中碰到混合距离短、氨气与烟气难以充分混合的困难问题，有利于提高 SCR 脱硝系统的脱硝性能，具有重要的实际应用价值。目前，这种低成本且高效率的混合措施成功应用于全国超过 20 个燃煤电厂的 SCR 脱硝装置中，工程应用效果显著。

## 参考文献

- [1] Rutherford, Scott. Coal-Fired SCR Applications in the US—Challenges and Strategies for Successful Operation and Emission Compliance[C]. VGB Workshop Flue Gas Cleaning, Austria. 2007.
- [2] Dhanushkodi S R, Mahinpey N, Wilson M. Kinetic and 2D reactor modeling for simulation of the catalytic reduction of NO<sub>x</sub> in the monolith honeycomb reactor[J]. Process Safety and Environmental Protection. 2008, 86(4): 303-309.
- [3] Dakshinamoorthy D, Gupta A. Consider advanced modeling to control air emissions[J]. Hydrocarbon Processing, 2010:81-86.

- [4]俞逾, 杨晨, 范莉. 电厂 SCR 系统的设计与数值模拟[J]. 现代电力. 2007(24) 222-225
- [5]金强等. 基于 CFD 仿真的烟气脱硝装置混合格栅优化设计[J]. 控制工程. 2011(18) 94-96
- [6]罗睿等. 火电厂 SCR 烟气脱硝反应器模拟系统设计与应用[J]. 热力发电. 2011(2) 44-47
- [7] Liu Hanqiang, Guo Tingting, Yang Yongping, Lu Guangjie. Optimization and Numerical Simulation of the Flow Characteristics in SCR System[J]. Energy Procedia. 2012(17): 801-812.
- [8]周健, 阎维平, 石丽国, 孔凡卓. 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) 22-25
- [9] Sigling R, Khalaf C. Enhance ammonia distribution for maximum SCR performance[C]. Institute of Clean Air Companies Forum. 2003.
- [10] Jia Mi. CFD for SCR design[J]. Southern Company Inc..Atlanta.
- [11] Rogers, Kevin, Mel Albrecht, Michael Varner. Numerical modeling for design optimization of SCR applications[C]. ICAC NOx Forum. Washington.2000:59-63.
- [12] Rogers K J, Nolan P S. SCR reactor performance profiling and results analysis[C].The US EPA/DOE/EPRI Combined Power Plant Air Pollutant Control Symposium:" The Mega Symposium",Chicago.200

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>