

文章编号:0253-9993(2009)03-0394-06

燃煤电站 SCR 内烟气流场及还原剂 浓度场模拟与优化

雷 达, 金保升

(东南大学 洁净煤发电与燃烧技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘 要: 利用数值方法对燃煤电站 SCR 内烟气流场与还原剂浓度场的改进进行研究, 依次定量研究了喷氨格栅 (AIG)、导流板; AIG、导流板、整流栅; AIG、导流板、整流栅、混合器 3 种方案在氨氮比不均匀性、速度不均匀性、温度不均匀性、压降、入射角 5 方面性能的变化. 结果显示, AIG、导流板的配置中, 涡旋与二次流造成催化剂入口界面上速度不均匀性及入射角过大. 催化剂上方增加整流栅可抑制涡旋与二次流. AIG 后增加混合器, 可在保持流场稳定的基础上, 减小氨氮比不均匀性. 最后通过冷态模型及电厂现场反馈信息验证了数值模型的正确性与可靠性.

关键词: 燃煤电站; 烟气脱硝; 均流与混合技术

中图分类号: TM621 文献标识码: A

Numerical simulation and optimization of flue gas flow field and reagent concentration field in coal fired power station SCR system

LEI Da, JIN Bao-sheng

(MOE's Key Lab. of Clean Coal Fired Power Generation and Combustion Technology, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The study that the flow field and the reagent concentration field in a coal fired power station SCR system were optimized by calculated fluid dynamics was presented. Three component configurations—AIG/guide vanes, AIG/guide vanes/rectifier, AIG/guide vanes/rectifier/mixer were quantitatively evaluated in five aspects—velocity maldistribution, NH_3/NO_x molar ratio maldistribution, temperature maldistribution, pressure loss and incidence angle. The results indicate that in AIG/guide vanes configuration, at the first catalyst layer inlet the vortex and the secondary flow bring about excessive velocity maldistribution and unduly big incidence angle. The vortex and the secondary flow can be oppressed by adding a rectifier upon the first catalyst layer. Adding a mixer after AIG can decrease NH_3/NO_x molar ratio maldistribution while keeping the flow field stable. Finally, the correctness and reliability of the CFD model are demonstrated by cold flow model comparison test and feedback information from power station site.

Key words: coal fired power station; denitrification; flow uniformizing and mixing technology

电站选择性催化还原烟气脱硝系统 (SCR) 采用整体催化剂, 反应器内不均匀性对 SCR 性能影响很大. 本文以某 600 MW 燃煤机组 SCR 为原型, 利用计算流体动力学 (CFD), 依次定量对喷氨格栅

收稿日期: 2008-04-15 责任编辑: 柳玉柏

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 基金资助项目 (2008AA05Z303)

作者简介: 雷 达 (1971—), 男, 江苏南京人, 博士研究生. E-mail: satum@yeah.net

(AIG)、导流板；AIG、导流板、整流栅；AIG、导流板、整流栅、混合器 3 种方案，在氨氮比不均匀性、速度不均匀性、温度不均匀性、压降、入射角 5 方面性能的优化进行了研究，着重描述了增加混合器与整流栅后烟气流场与还原剂浓度场的改进。同时建造了冷态模型，验证了所用数值模型的正确性与可靠性。

1 研究对象及理论

某 600 MW 燃煤机组 SCR 系统由 2 套同样的反应器及辅助烟道子系统组成，未设省煤器旁路与 SCR 旁路。喷氨系统中，氨与稀释空气体积比为 1/20，AIG 出口气体温度 300 K。反应器及辅助烟道外形如图 1 所示。研究要求在 SCR 反应器及辅助烟道中布置部件，优化 SCR 内烟气流场与反应物浓度场。烟气成分与机组变工况参数见表 1。在表 1 中的 4 种工况下，催化剂入口界面上烟气流速的不均匀性、氨氮比不均匀性、温度不均匀性、烟气入射角，以及 SCR 入口至催化剂入口界面压降 5 方面性能要求达到表 2 中第 1 行所示的指标。假定入口 NO_x 浓度均匀^[1]。

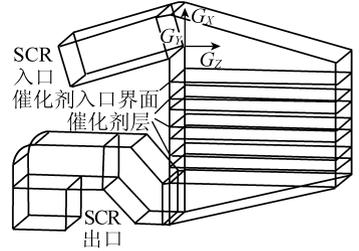


图 1 SCR 反应器及连接烟道的外形

Fig. 1 Outline of reactor and associated ductwork

表 1 烟气成分和 SCR 入口烟气参数

Table 1 Composition of flue gas and inlet parameters in variable condition

项 目	入口烟气参数				烟气体积含量/%					
	BMCR	75% MCR	50% MCR	30% MCR	$\varphi(N_2)$	$\varphi(O_2)$	$\varphi(CO_2)$	$\varphi(SO_2)$	$\varphi(H_2O)$	$\varphi(NO)$
烟气流量/(m ³ ·h ⁻¹)	4 500 592	3 464 501	2 394 016	1 245 405	73.3	3.2	14.4	0.04	9.03	0.03
烟气温度/K	651	623	588	532						

注：BMCR 为锅炉设计连续最大蒸发量；MCR 为锅炉连续最大蒸发量。

表 2 不同布置方案性能

Table 2 Performance of various configurations

项 目	$C_{v_v}, 90\%$ 范围/%	$C_{v_r}/\%$	温差/K	Y 向入射角超 过 20° 比例/%	Z 向入射角超 过 20° 比例/%	全压 降/Pa
性能要求, 4 种负荷	<20	<5	±10	<10.00	<10.0	300
AIG、导流板, BMCR	95	2.1	±1	25.00	73.0	170
AIG、导流板、整流栅, BMCR	18	5.8	±1	1.00	9.5	210
AIG、导流板、混合器、整流栅, BMCR	19	3.3	±1	1.00	8.9	220
AIG、导流板、混合器、整流栅, 75% MCR	19	3.0	±1	1.00	8.9	160
AIG、导流板、混合器、整流栅, 50% MCR	18	2.5	±1	1.00	9.3	90
AIG、导流板、混合器、整流栅, 30% MCR	18	1.5	±1	0.85	9.5	55

1.1 不均匀性评价

参照美国石油协会 API 标准及我国 SCR 内流动设计技术规范^[1-2]，氨氮比、流速的不均匀性采用不均匀系数 C_{v_m} 定量评价，其定义为

$$C_{v_m} = \sigma_m / \bar{m}, \tag{1}$$

式中， σ_m 为 m 变量多测点标准差； \bar{m} 为 m 变量多测点均值， m 分别代表氨氮比 r 、与催化剂层垂直的 X 向流速 v ；温度不均匀性采用测点温差表示。

1.2 CFD 模型

SCR 系统中除催化剂层外，烟气湍流流动。控制方程为连续性方程、组分质量守恒方程、动量守恒方

程、能量守恒方程、 k 方程、 ε 方程。控制方程的通用形式为

$$\operatorname{div}(\rho \mathbf{u} \varphi) = \operatorname{div}(\Gamma \operatorname{grad} \varphi) + S, \quad (2)$$

式中, ρ 为烟气密度; \mathbf{u} 为速度矢量; φ 为通用变量; Γ 为广义扩散系数; S 为广义源项。

烟气在催化剂层中层流流动。催化剂层看作多孔介质, 催化剂层中控制方程为多孔介质中的连续性方程、组分质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程。多孔介质控制方程的表达式见文献 [3]。

催化剂层中动量守恒方程需增加一附加源项, 即

$$S_i = - \left(\frac{\mu u_i}{a} + \frac{C_2 \rho u_{\text{mag}} u_i}{2} \right), \quad (3)$$

式中, μ 为烟气黏滞系数; u_i 为烟气 i 方向流速; u_{mag} 为烟气速度; $1/a$ 为黏性阻力系数; C_2 为惰性阻力系数。

黏性阻力系数与惰性阻力系数的确定考虑烟气在催化剂层中流动的 2 个特点: ① 烟气层流流动^[4], 压降与速度成正比; ② 催化剂层中流动阻力各向异性, X 方向的阻力远小于 Y, Z 方向的阻力。

多孔介质能量守恒方程需在通用能量守恒方程基础上修正热传导量与暂态项。本研究只考虑 4 种稳定工况下的温度场, 没有暂态项, 催化剂的热惯性无需单独考虑; 热传导量的修正体现在有效热传导率的计算上。

$$k_{\text{eff}} = \varepsilon k_f + (1 - \varepsilon) k_s, \quad (4)$$

式中, k_f 为烟气的热传导率; k_s 为催化剂的热传导率; ε 为介质的多孔性。

利用 Fluent 进行 3 维数值模拟, 壁面为绝热条件, 出口为湍流充分发展段, 速度场与压力场耦合采用 SIMPLEC 算法。在混合烟气密度、黏滞系数、导热系数、比热的计算中, 将混合烟气看作表 1 中多种理想不可压气体间混合。AIG、混合器、整流栅等部件几何形状复杂且不规则, 图 2 中最终布置方案的网格数量共计 6 010 355 个。

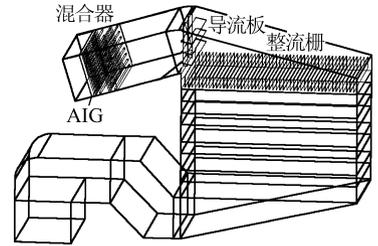


图 2 SCR 内部件的布置

Fig. 2 Components layout in SCR and associated ductwork

2 计算结果与讨论

利用 CFD 布置流场、浓度场调节部件, 首先实现 BMCR 工况下均流与混合性能达标, 而后在 75% MCR, 50% MCR, 30% MCR 的 3 种低负荷下检验布置方案能否满足要求, 最后建造 SCR 冷态模型, 验证 CFD 模型的有效性。

2.1 AIG、导流板的方案

对于脱硝效率较低的系统, 布置喷氨格栅、导流板的组合有可能达到预定要求。研究首先从喷氨装置、导流板的方案开始。喷氨装置选用纵横管 AIG, 它由纵、横 2 层布有喷嘴的钢管组成, 钢管与烟道垂直, 喷嘴与烟气流动方向一致。横管 8 根, 每根管上均布 15 个喷嘴; 纵管 16 根, 每根管上均布 7 个喷嘴。AIG 后至催化剂的烟道越长混合效果越好^[5], 然而 AIG 过度地接近 SCR 入口会带来 AIG 处流速不均匀性过大, 影响催化剂入口界面上浓度场的设计与调试, 综合 2 方面因素, 最终将 AIG 放在距 SCR 入口 1 680 mm 处。SCR 前部烟道与反应器接口处布置 3 块导流板。

图 3 反映了 AIG、导流板方案的均流与混合性能, 性能参数见表 2 中第 2 行。由图 3 (a) 所示流线可以看出, 烟道拐角处流体与壁面发生脱离, 形成一个很大的涡旋。涡旋造成图 3 (b) 中催化剂入口界面上 X 方向流速左正右负的强烈变化的格局, C_{v_x} 达到 95%。文中所有催化剂入口界面上的坐标选取同图 3 (b) 所示。由图 3 (a) 中流线还可以看出: 图 3 (e) 中过大的 Z 向入射角同样由拐角处涡旋导致。涡旋内烟气的低流速使得涡旋区温度、浓度不易得到稀释, 图 3 (c), (g) 显示出涡旋区内比区外氨浓度高、温度低的现象; 反映在催化剂入口界面上, 即为图 3 (d), (h) 中左侧氨氮比比右侧高、左侧温度比右侧低。

由于系统未设省煤器旁路，温度与浓度的不均匀性都是由于 AIG 喷出与烟气不同温度与组分的气体造成的。图 3 (c), (d) 与 (g), (h) 极为相似，是符合传质与传热相似比拟的。由于未设省煤器旁路，表 2 各方案中催化剂入口界面上温度不均匀性均为 ± 1 K，远小于性能要求 ± 10 K。考虑到本 SCR 系统的 2 个特点：温度场与浓度场具有相似性、温度不均匀性远小于设计指标，以下不再贴出温度不均匀性的截面图。前部烟道与反应器夹角为 73° ，图 3 (f) 中催化剂入口界面上出现双螺旋二次流，二次流造成 Y 向入射角不均匀性过大。由表 2 中第 1, 2 行的对比可知，布置 AIG、导流板方案的浓度场与温度场的均匀性符合要求，而在 C_{v_1} 及入射角方面性能远低于要求的指标。该方案中烟气的严重偏流会造成催化剂劣化速度加快。

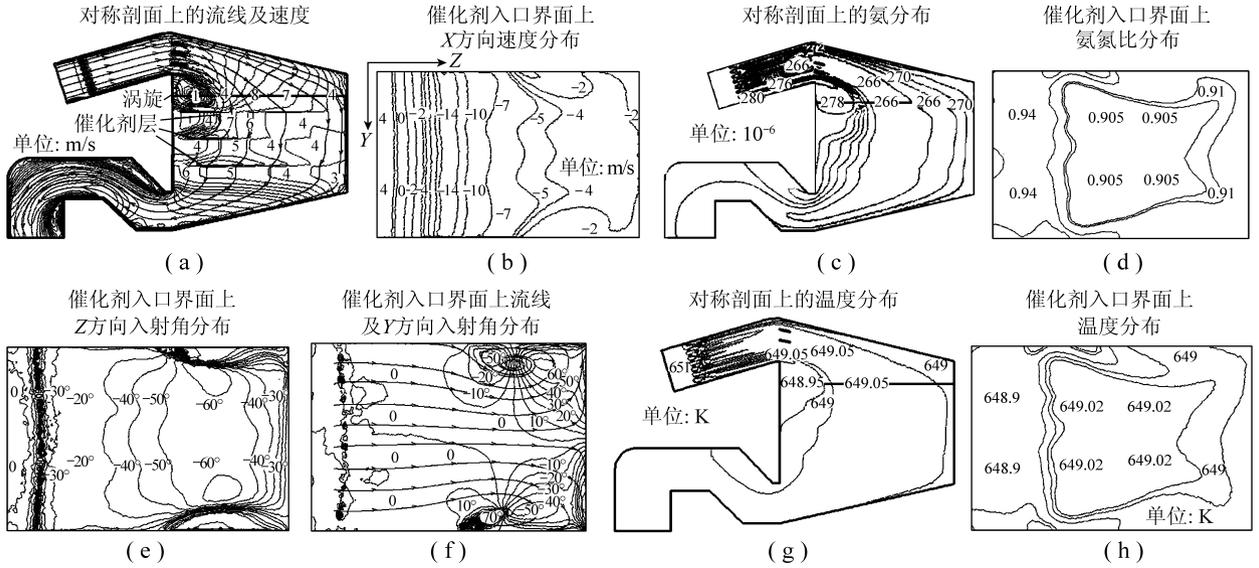


图 3 AIG、导流板方案性能

Fig. 3 Performance of AIG/guide vanes configuration

2.2 AIG、导流板、整流栅的方案

浓度场受流场调整影响大，而流场受浓度场调整影响较小。优化从流场开始，首先实现 C_{v_1} 及入射角的达标。针对涡旋与二次流对流场的不良影响，在催化剂入口界面上部布置具有多块 Y 向栅片的整流栅。AIG、导流板、整流栅方案的性能预测如图 4 所示，性能参数见表 2 中第 3 行。对比图 3 (a)，图 4 (a) 中反应器拐角处涡旋得到了很大的抑制。对比图 3 (b)，图 4 (b) 中界面上烟气流速更加均匀， C_{v_1} 由 95% 下降为 18%。对比图 3 (e)，图 4 (c) 中 Z 向入射角大幅降低，超过 20° 的比例由 73% 下降为 9.5%。对比图 3 (f)，图 4 (d) 中 Y 向速度几乎完全消失，双螺旋二次流不再存在，Y 向入射角由 25% 下降为 1%。可见，整流栅不但抑制了涡旋而且消除了二次流。由表 2 中第 1, 3 行对比可知， C_{v_1} 及入射角的控制已经满足性能要求，烟气流场改进已实现。然而由于涡旋的消失，混合效果下降， C_{v_1} 由 2.1% 上升为 5.8%，浓度场均匀性还需改进。

2.3 AIG、导流板、整流栅、混合器的方案

AIG 下游增加混合器是均匀浓度场的方案之一。针对纵横管 AIG，配置纵横管混合器，除无喷嘴外，该混合器与 AIG 完全相同。AIG 喷出的混合物直接击打在相应混合管中心。布置 AIG、导流板、整流栅、混合器的改进方案结构如图 2 所示。该方案的性能预测如图 5 所示，性能参数见表 2 中第 4 行。由图 4 (a)，图 5 (c) 对比可见，催化剂入口界面处，氨浓度由 266 ~ 290 减少成为 267 ~ 284，氨浓度场有了改善。由表 2 中第 3, 4 行对比可见， C_{v_1} 由不符合要求的 5.8% 减少为 3.3%，而系统压降只增加了 10 Pa。图 4 (a) ~ (d) 与图 5 (a), (b), (e), (f) 极为相似，同时表 2 中第 3, 4 行的 C_{v_1} 及入射角方面的性

能差异都不大. 由此可知, 增加混合器后浓度场的改进是建立在流场基本稳定的基础上进行的. 这同时说明了先改进流场、后改进浓度场优化顺序的可行性. 由表 2 中第 1 行与第 4~7 行对比可知, AIG、混合器、导流板、整流栅方案可以在 BMCR, 75% MCR, 50% MCR, 30% MCR 的 4 种工况下, 满足氨氮比不均匀性、速度不均匀性、温度不均匀性、压降、入射角 5 方面性能要求. 表 2 中数据结合文献 [6] 中不均匀性对脱硝效率的影响曲线, 可预测出各方案对脱硝效率的影响.

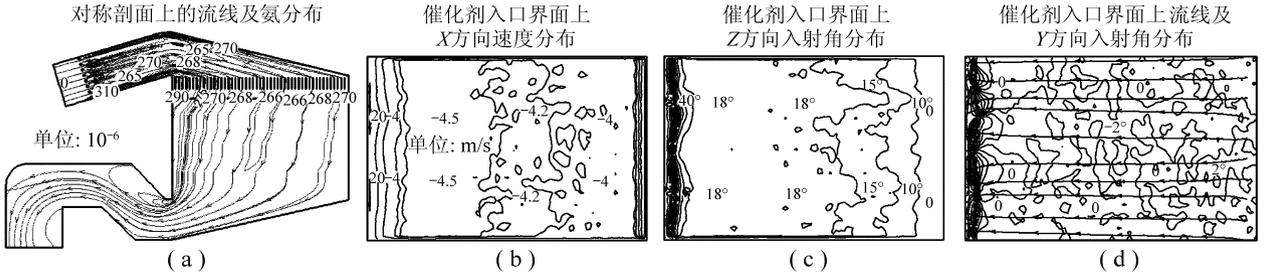


图 4 AIG、导流板、整流栅的方案性能

Fig. 4 Performance of AIG/guide vanes/rectifier configuration

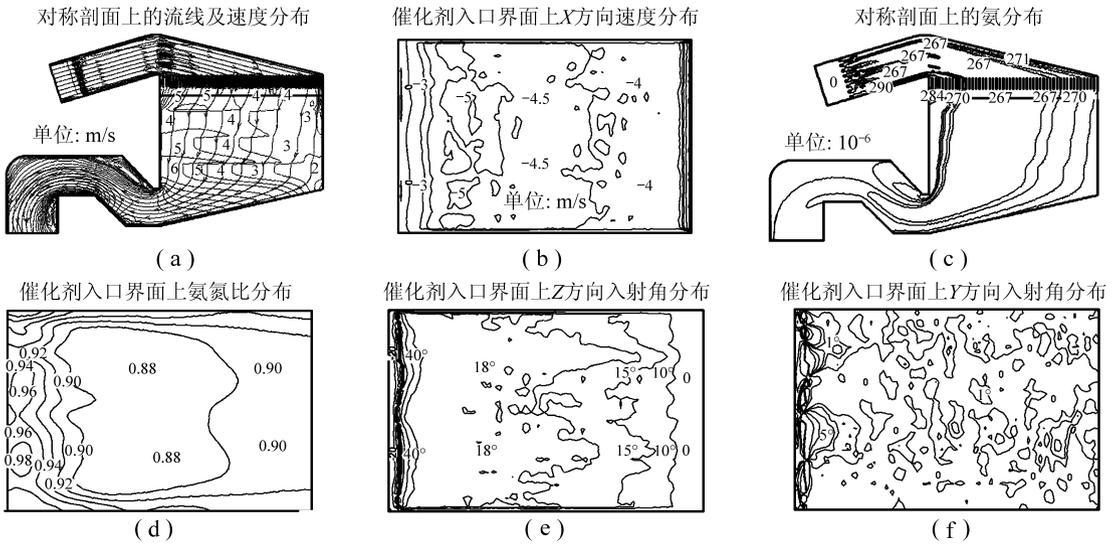


图 5 AIG、导流板、整流栅、混合器的方案性能

Fig. 5 Performance of AIG/guide vanes/rectifier/mixer configuration

3 冷态模型与现场反馈信息验证

为了验证数值模型的正确性及烟气流场与还原剂浓度场改进的有效性, 研究中建立了 SCR 冷态模型. 冷模建造考虑几何形状比例相似、运动相似、动力相似原则. 实验时, 反应器中 $Re = 250\ 000$, 在自模区. 采用热线风速仪测量催化剂入口界面速度场; CO 为示踪气体, 采用烟气分析仪测量界面浓度场; 根据传热与传质的相似比拟确定界面温度场. 方向角采用飘带检验. 全压测量采用皮托管, 压降测量采用微压计. 在数值模型中输入测得的 SCR 冷模入口处气体相对速度分布进行修正. 通过表 3 与图 6 可知, 数值计算结果与冷态模型实验数据吻合良好. 本文中利用数值模型对烟气流场与还原剂浓度场改进的结果是可信的.

SCR 检修中发现反应器第 3 层催化剂外侧有灰沉积, 这与图 5 (a) 中反应器外侧 2 m/s 的局部烟气低流速的预测是一致的.

表3 CFD与实验对比
Table 3 Comparison of CFD and experimental

项 目	温差/K	Y方向入射角超过20°比例/%	Z方向入射角超过20°比例/%	全压降/Pa
CFD	±1	5	9	220
实验	±1	<10	<10	240

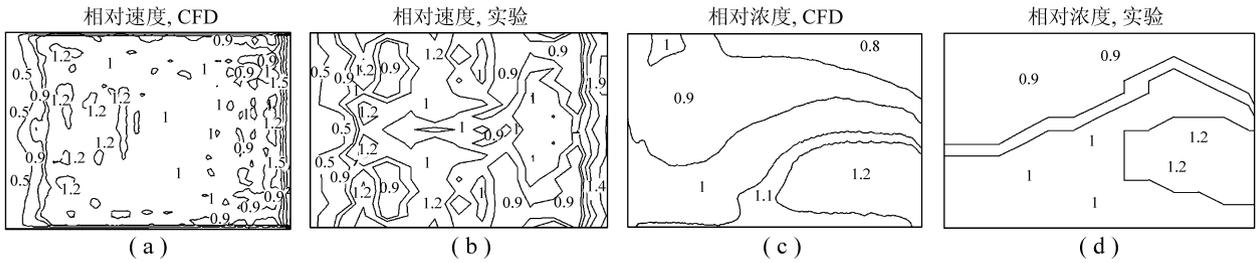


图6 催化剂入口界面上相对速度与相对浓度分布

Fig. 6 Relative velocity contours and relative concentration contours at the catalyst layer inlet

4 结 论

- (1) AIG、导流板的方案中， C_{v_y} 与Z向入射角过大是由拐角处涡旋造成的，Y向入射角过大是由二次流造成的。
- (2) 催化剂上方布置整流栅可以抑制拐角处的涡旋及消除二次流，实现流速不均匀性及入射角的控制。但涡旋与二次流的削弱，降低了混合性能，氨氮比不均匀性增大了。
- (3) AIG后布置混合器，可减小氨氮比不均匀性，在流场稳定的基础上实现了还原剂浓度场的改进。
- (4) 本研究中，AIG、导流板方案与AIG、导流板、整流栅方案无法满足均流与混合性能要求。AIG、混合器、导流板、整流栅方案可以在BMCR，75% MCR，50% MCR，30% MCR的4种工况下，满足氨氮比不均匀性、速度不均匀性、温度不均匀性、压降、入射角5方面性能要求。
- (5) 先改进流场、后改进浓度场的优化顺序是可行的。

参考文献：

- [1] API recommended practice 536 [S]. 2005.
- [2] 中国华电工程有限公司. 望亭发电厂烟气脱硝工程流体模型试验招标技术规范书 [R]. 北京: 2007.
China Huadian Corporation. Technical specification of cold flow testing for Wangting power station SCR system [R]. Beijing: 2007.
- [3] Fluent Inc.. Fluent 6.1 user's guide [M]. USA: Fluent Inc., 2003.
- [4] Enrico Tronconi, Pio Forzatti. Adequacy of lumped parameter model for SCR reactors with monolith structure [J]. AICHE Journal, 1992, 38 (2): 201-209.
- [5] Rogers K J, Milobowski M G, Wooldridge B L. Perspectives on ammonia injection and gaseous static mixing in SCR retrofit applications [A]. EPRI-DOE-EPA Combined Utility Air Pollutant Control Symposium [C]. Atlanta: EPRI, 1999.
- [6] Rogers K J, Nolan P S. SCR reactor performance profiling and result analysis [A]. EPA/DOE/EPRI Combined Power Plant Air Pollutant Control Symposium: "The Mega Symposium" [C]. Chicago: EPRI, 2001.