

文章编号:1000-582X(2009)10-1187-06

# 选择性催化还原脱硝系统烟道中导流板设计数值模拟

周志明,樊卫国,董立春  
(重庆大学 化学化工学院,重庆 400030)

**摘要:**采用 Fluent 对 4 种选择性催化还原(SCR, selective catalytic reduction)脱硝系统烟道弯曲段导流板设置方案进行了模拟,模拟过程基于标准 K- $\epsilon$  湍流模型和 2D 模型,通过对速度分布图和进出口压力降的分析,探讨了导流板设置对烟道出口速度分布、压差和能量损耗的影响,得出结论:在烟道中设置导流板,可以显著改善流场的分布。而合理的导流板设计不仅能使流速变得均匀,而且还可以降低烟道的能量损失和压降。当导流板设计过大时,虽能更好的改善流场,但因其本身对流体阻力的增大,将导致烟道的能量损失和压降增大。研究结果对 SCR 脱硝系统的研发提供了参考。

**关键词:**选择性催化还原;计算流体力学;导流板;数值模拟

**中图分类号:** X701.7

**文献标志码:** A

## Design and numerical simulation for flow deflector in the gas flue of selective catalytic reduction denitrification system

ZHOU Zhi-ming, FAN Wei-guo, DONG Li-chun

(College of Chemical and Chemistry Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

**Abstract:** Four design schemes of flow deflector in the gas flue of selective catalytic reduction (SCR) denitrification system are simulated based on K- $\epsilon$  turbulence model and 2D model by Fluent. By analyzing the speed profile and pressure drop of the import and export, the effects of the flow deflector on the import and export speed profile, pressure drop, and energy dissipation are studied. It can be concluded that flow field distribution could be significantly improved by putting the flow deflector into the gas flue. Reasonable flow deflector design can not only make the flow field distribution uniform but also reduce the pressure drop and the energy dissipation. With the increase of flow deflector dimensions, the flow field distribution will be more uniform. The pressure drop and the energy dissipation will increase because of the increase of resistance caused by flow deflector. The research results are helpful for designing selective catalytic reduction denitrification system.

**Key words:** selective catalytic reduction; computational fluid dynamics; flow deflectors; numerical simulation

在选择性催化还原 SCR (selective catalytic reduction) 脱硝系统烟道中,烟气中氨分布的不均匀对脱硝装置的脱硝效率和氨逃逸有显著影响;平均

脱硝效率随氨氮摩尔比相对偏差的增大而减少、平均氨逃逸随氨氮摩尔比偏差的增大而增加<sup>[1]</sup>,因此,为了使脱硝系统内烟气和氨混合均匀,提高脱硝效

收稿日期:2009-05-23

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2007BAC204B00)

作者简介:周志明(1963-),男,重庆大学副教授,博士,主要从事化学工程研究,(Tel)023-65105191;  
(E-mail)fanweiguol@gmail.com。

率,降低氨逃逸,必须在系统中设置导流板、静态混合器和整流器等设备。其中导流板对于调节脱硝系统内流场的分布具有至关重要的作用,合理的导流板设计将有效提高脱硝效率,降低氨逃逸,而采用 CFD 软件来进行数值模拟,能够快速、准确的分析导流板设计方案的优缺点,已在脱硝系统设计中得到广泛应用,采用数值模拟方法设计的导流板能够有效提高脱硝效率,具有重要的工程应用价值。

目前,已经有针对脱硝系统整体速度流场模拟的报道<sup>[2-6]</sup>,研究侧重于采用导流板调整脱硝系统流场分布,使反应器内流场较为均匀。但针对烟道弯曲段如何设置导流板的相关报道极少,由于脱硝系统烟道存在弯曲段,流体经过烟道弯曲段后流线发生突变,导致主流与管壁脱离,使烟道内流场不均匀<sup>[7]</sup>,这样的烟气分布不但会降低脱硝效率和静态混合器的工作效率(静态混合器被设置在本文中的烟道出口处),还会增加管道的老化速度,蔡晓峰等采用 ICFM CFD 对某种设计的 SCR 脱硝系统烟道流场进行了模拟,通过加入导流板有效的解决了烟气经过烟道弯曲段后速度分布不均匀的问题,并展示了烟道 3D 流场速度分布云图,但没有对出口速度和烟道压差进行定量分析<sup>[8]</sup>。

笔者采用 Fluent 6.2 对添加导流板的 SCR 脱硝系统烟道弯曲段流场进行了数值模拟,分别对等间距、逐渐增大间距、逐渐增大间距和弧长、逐渐增大间距和弧长并且增加尾部直板的四种导流板设计方案进行了流场分析,采用速度标准差定量的对烟道出口的烟气均匀程度做了评价,并对设计方案的压差和能量损失做了定量分析,深入探讨了不同的导流板设置对烟道流场的影响以及烟道出口流体均匀程度的影响。

## 1 计算模型

### 1.1 参数和假设

烟气中氮氧化物约 95% 是 NO,所以在模拟过程中选用 NO 做为烟道气体<sup>[9]</sup>。烟道入口气体流速为 15 m/s,属于低速气体,不考虑压缩性所引起的相对误差,可认为是不可压缩流体<sup>[10]</sup>,气体温度为 654 K,密度为 1 kg/m<sup>3</sup>。工作压力为 101 325 Pa,不考虑烟气中灰分对流场的影响。

### 1.2 湍流模型

计算过程中采用标准 K-ε 湍流模型<sup>[11]</sup>,在脱硝系统稳定工作过程中,气体的粘度较小,假设气体为理想气体,流动为定常流动,其控制方程如下:

质量守恒方程

$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0$ ,其中  $x_i$  为第  $i$  个坐标, $u_i$  为  $i$  方向的速度。

动量守恒方程  $\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right]$ ,其中  $\mu$  为层流粘度, $\mu_t$  为湍流粘度。

能量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_T} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right],$$

其中  $Pr = \frac{\mu C_p}{k}$ , $C_p$  为热容, $\sigma_T$  为能量的普朗特数(常数为 0.85)。

湍流动能方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] + G - \rho \epsilon,$$

其中: $\sigma_k$  为湍流动能的普朗特数(常数为 1.0); $k$  为湍流动能; $\epsilon$  为动能耗散系数; $G$  为由速度梯度产生的湍流动能。

湍流动能耗散速率方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho \epsilon),$$

其中  $\sigma_\epsilon$  为湍流动能耗散系数的普朗特数(常数为 1.3), $C_1$  为湍流模型中的经验常数(常数为 1.44), $C_2$  为湍流模型中的经验常数(常数为 1.92)。

研究表明,标准 K-ε 湍流模型能够比较准确的对脱硝系统中的烟气流场进行模拟。在模拟过程中采用 SIMPLE 算法进行求解<sup>[12]</sup>。为了提高计算精度,采用二阶迎风格式<sup>[13]</sup>。

## 2 烟道内导流板设计

### 2.1 烟道设计数据

烟道设计如图 1。AB 为进口,EF 为出口,P、Q 分别为 CD、MN 中点,烟道为正方形,图 1 中烟道各边长数据见表 1。

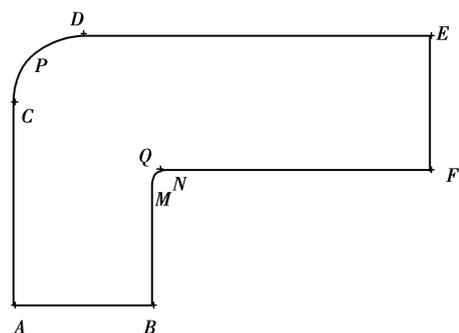


图 1 烟道设计

表 1 烟道设计数据 m

线段	长度	线段	长度
AB	10	FN	19.5
AC	15	BM	9.50
DE	25	CD	7.85
EF	10	MN	0.785

2.2 导流板设计方案

在某公司设计脱硝系统中,喷氨格栅和静态混合器依次被设置在图 1 烟道出口处,为了提高氨和烟气的混合均匀程度,必须通过设置导流板来调整烟道流场,使出口处烟气分布均匀;另外,不同的导流板设置会产生不同的压差和能量损耗,因此,导流板设计方案在保证出口烟气分布均匀的同时,必须尽量的减小压差和能量损耗。

方案 1:在弧度烟道内加入 8 块间距相等的导流板。导流板从烟道内侧开始设置,Q 点(Q 为 MN 中点)为第一块导流板的圆心,半径为 0.9 m,弧长为 1.41 m,第二块导流板的圆心为第一块导流板圆弧中点,间距为 0.9 m,大小与第一块相同,使用同样的方法设置剩余的 6 块导流板。通过模拟得出流场分布如图 2。

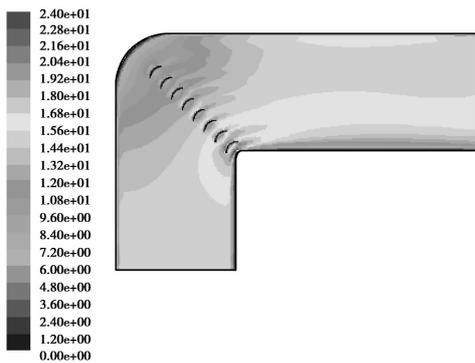


图 2 设计方案 1

方案 2:在弧度烟道内加入 8 块间距逐渐增大的导流板。导流板从烟道内侧开始设置,Q 点为第一块导流板的圆心,从第二块导流板开始逐渐增大间距,大小与第一块相同,导流板间距设计数据如表 2,通过模拟得流场分布如图 3。

表 2 设计方案 2 导流板的设计数据 m

导流板编号	导流板间距	导流板编号	导流板间距
1	0.90	5	0.96
2	0.57	6	1.09
3	0.70	7	1.22
4	0.83	8	1.35

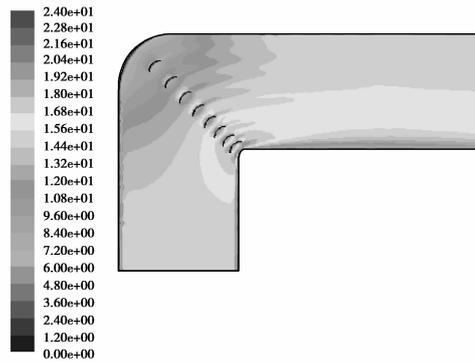


图 3 设计方案 2

方案 3:在弧度烟道内加入 8 块间距和面积都逐渐增大的导流板,从烟道内侧开始设置导流板,Q 点为第一块导流板的圆心,从第二块导流板开始弧长和间距逐渐增大,设计数据如表 3,通过模拟得出流场分布如下图 4。

表 3 设计方案 3 导流板的设计 m

导流板编号	导流板间距	导流板弧长
1	0.90	1.41
2	0.57	1.87
3	0.70	2.43
4	0.83	3.09
5	0.96	3.84
6	1.09	4.71
7	1.22	5.68
8	1.35	6.75

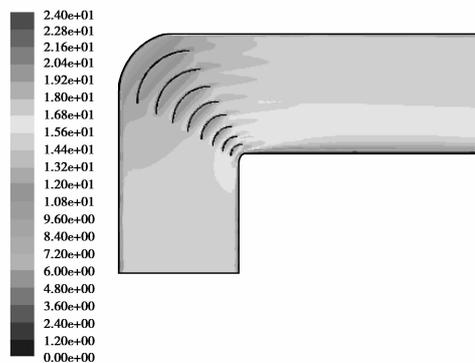


图 4 设计方案 3

方案 4:在设计方案 3 的基础上,在每块导流板尾部加一定长度的直板,构成弧度直板型导流板,设计数据如表 4,通过模拟得出流场分布如图 5。

表 4 设计方案 4 导流板尾部直板的设计 m

导流板 编号	直板 长度	导流板 编号	直板 长度
1	0.90	5	1.97
2	0.37	6	2.67
3	0.82	7	3.45
4	1.35	8	4.32

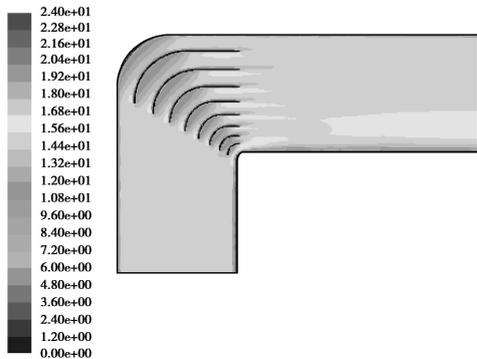


图 5 设计方案 4

### 2.3 网格化和边界条件

采用 Gambit2. 2. 30 绘图, 并将其网格化。入口处(In flow)采用 Velocity inlet, 出口处(Out flow)采用 Pressure outlet, 所有的 Wall 采用 Stationary wall, 设置为绝热, Roughness Constant 为 0. 5。

## 3 模拟结果分析与讨论

### 3.1 无导流板时的烟道流场数值模拟和结果分析

通过对没有设置导流板的烟道进行模拟, 可以得出流场速度分布图(图 6), 和烟道出口速度分布曲线(图 7), 曲线图的横坐标数值从小到大与烟道出口从最下端到最上端相对应。

由前部烟道过来的烟气经过弯道时, 其流线将发生弯曲, 由于惯性的作用, 流体会涌向外侧, 从而导致水平烟道上部和中下部流体的速度相差较大, 下部气体流速较小, 容易出现灰分颗粒的沉降, 而上部气体流速较大, 与烟道壁发生剧烈摩擦, 大幅降低烟道使用寿命, 造成大量的管道沿程能量损失。由于烟道弯曲段内外侧压力相差显著, 导致大量二次流产生, 造成大量的烟道能量局部损失<sup>[14]</sup>。

### 3.2 不同设计方案烟道流场速度分布图

图 2-5 是加入 4 种导流板后, 烟道的流场速度分布。

在设计 1 中, 导流板有效减缓了流动的分流, 与

没有导流板的烟道相比较, 流场发生了显著的改善, 水平烟道部分气体速度差异大幅下降。弯曲段内外侧速度差异明显减小。

在设计 2 中, 由于导流板 3-4、2-3、1-2 的间距相对于设计 1 减小, 从而使导流板在高流速区有更好的分流能力, 有效的减少了导流板烟道弯曲段内侧的高速区。因此, 设计 2 中的流速分布相对设计 1 更均匀(图 6-7)。

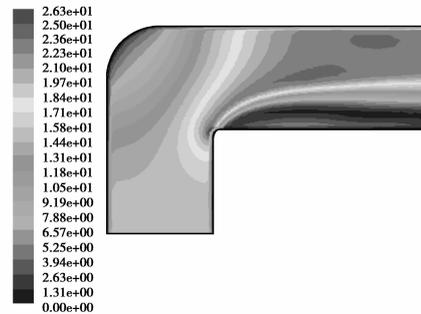


图 6 没有导流板的烟道流场速度分布图

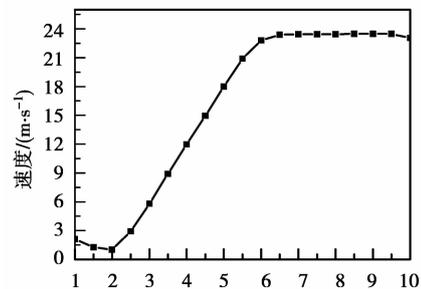


图 7 没有导流板的烟道出口速度分布曲线

设计 3 采用了导流板依次增大的设计, 设计 4 中, 在导流板尾部增加了直板。由图 5 可知, 增大的导流板使烟道弯曲段外侧流场更加通畅, 而导流板尾部直板的增加抑制了导流板尾部对速度场的扰动, 因此水平烟道的速度分布将更加均匀。

### 3.3 不同设计方案烟道出口速度分布

各种设计方案的出口速度分布曲线如图 8、9。从图 8 可以看出, 在烟道内增加导流板后, 出口速度分布出现显著变化, 与没有导流板的烟道出口速度分布相比较, 速度差异大幅减小; 另外, 从图 9 可以看出, 不同设计方案的出口速度分布具有相似性: 从出口下端开始, 速度逐渐增大, 达到最大值之后速度稍有下降, 之后速度变化较小, 逐渐趋于稳定。

为了进一步准确评价出口速度的分布差异, 采用  $D$  值(式(1), 其中  $i$  为出口各点速度)对出口速度分布做出定量分析,  $D$  值越小, 说明出口速度分布差异越小<sup>[15]</sup>, 从图 10 可以看出, 从设计 1 到设计 4  $D$  值

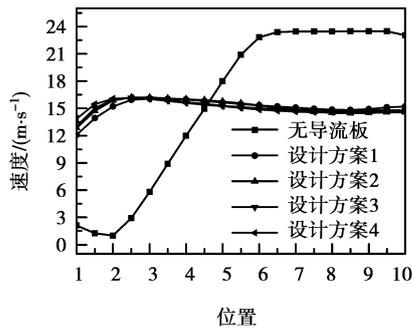


图 8 不同设计方案烟道和无导流板烟道出口速度分布比较图

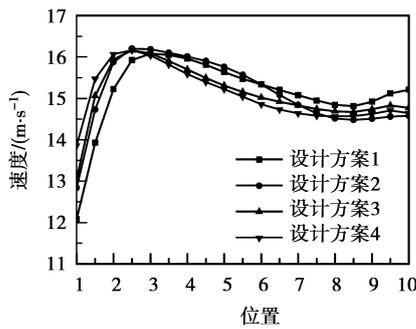


图 9 不同设计方案烟道出口速度

依次减小,相应的出口速度分布差异依次减小,这是因为改变板间距和增加板长提高了导流板的分流能力,使流场更加均匀,水平烟道速度分布差异减小。

$$D = \sqrt{\frac{n \sum V_i^2 - (\sum V_i)^2}{n(n-1)}} \quad (1)$$

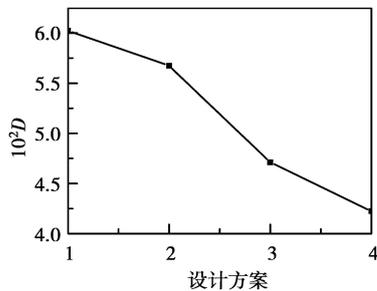


图 10 不同设计出口速度 D 值

### 3.4 不同设计方案的压差和能量损耗

在烟道设计过程中,一方面增加导流板的数量和长度会使导流板本身对烟道中流体的阻力增加,另一方面,合理增加导流板的数量和长度可以使烟道的流场均匀,气流通畅,显著的减小压降,降低流体动能损失。为了准确评价设计方案的能量损耗,采用  $E$ (式(2)),  $P_i$ 、 $V_i$  分别表示进口各点的压力和

速度,  $P_o$ 、 $V_o$  分别表示出口各点的压力和速度,  $L$  为出口处单位网格长度)对烟道气体能量损耗做出定量分析。

从图 11 和图 12 中右上方的对比图可以看出,与没有导流板相比,在加入导流板后,烟道内流体的压差和能量损失大幅减小,这是因为导流板显著改善了流场的分布,减小了因烟道弯曲而导致的内部二次流。

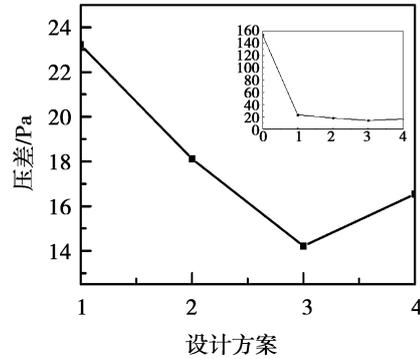


图 11 不同设计的压差

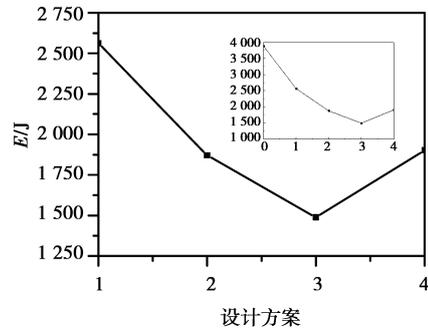


图 12 不同设计 E 值

从图 11 和图 12 可以看出,设计 1、设计 2 和设计 3 的压差和能量损失依次减小,但设计 4 的压差和能量损失与设计 3 相比,稍有增加,这是因为,在两个影响因素中,对设计 1、设计 2 和设计 3 的压差与能量损失影响较大的是导流板对烟道流畅分布的改善,而对设计 4 影响较大的是增加导流板而相应增加的阻力,也就是说,在一定范围内,合理的增加导流板会改善流场分布,降低能量损失和压降,如果进一步增加导流板,随着阻力的增大,压差和能量损失不会继续减小,反而会增大。

$$E = \sum [\rho V_i L (\frac{P_i}{\rho} + \frac{V_i^2}{2})] - \sum [\rho V_o L (\frac{P_o}{\rho} + \frac{V_o^2}{2})] \quad (2)$$

## 4 结 论

通过对速度分布图、出口速度分布曲线以及压

差与能量损耗的分析,可以得出以下几方面结论:

1)在烟道内加入导流板之后,流场分布得到了显著改善,相对于没有导流板的烟道,气体速度分布较为均匀。

2)烟道弯曲段内侧,流体的流速较快,在此高速区内减小导流板间距,增加单位空间内的导流板数,可以提高导流板分流能力,减少局部高速区。

3)采用逐渐增大导流板的设计,可以使弯曲段外侧流场更加通畅,有效的降低局部高压,减少局部低速区。而在导流板尾部增加直板,可以有效的减小导流板尾部对速度场的扰动,使水平烟道速度分布更加均匀。

4)增加导流板的大小不一定会增加烟道的压差和能损,在一定范围内,合理的增加导流板会改善流场分布,会减小能量损失和压降,但如进一步增加导流板的长度,随着导流板本身对流体阻力的增大,将会抵消因改善流场分布而引起的能量损失和压降减小,使总体的能量损失和压降增大。

#### 参考文献:

- [1] 董建勋,李辰飞,王松岭等. 还原剂分布不均匀对 SCR 脱硝性能影响的模拟分析[J]. 电站系统工程, 2007, 23(1):20-24.  
DONG JIANG-XIONG, LI CHEN-FEI, WANG SONG-LING, et al. Simulation of effect of non-uniformity of reagent distribution on SCR DeNO<sub>x</sub> performance[J]. Power System Engineering, 2007, 23(1): 20-24.
- [2] 沈丹,仲兆平,过小玲. 600MW 电厂 SCR 烟气脱硝反应器内不同导流板的流场数值模拟[J]. 电力环境保护, 2007, 23(1):42-45.  
SHENG DAN, ZHONG ZHAO-PING, GUO XIAO-LING. Numerical simulation of different guide plates in selective catalytic reduction denitrification reactor of 600 MW power plant [J]. Electric Power Environmental Protection, 2007, 23(1):42-45.
- [3] 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(3):58-62.  
YU YU, YANG CHEN, FAN LI. Design and numerical simulation for selective catalytic reduction system in power plant[J]. Modern Electric Power, 2007, 24(3): 58-62.
- [4] CHO JM, CHOI J W, HONG SH, et al. Application of computational fluid dynamics analysis for improving performance of commercial scale selective catalytic reduction[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2007, 23(1):43-56.
- [5] 隋莉莉,袁景淇. 火电 SCR 脱硝系统混合和均流 CFD 仿真[J]. 控制工程, 2008, 15(5):523-525.  
SUI LI-LI, YUAN JING-QI. CFD simulation for mixing and flow-uniforming in SCR-DeNO<sub>x</sub> system of coal-fired power plant [J]. Control Engineering of China, 2008, 15(5): 523-525.
- [6] LANG E, DRTINA P, STRIFF F, et al. Numerical simulation of the fluid flow and the mixing process in a static mixer[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1995, 38(12): 2239-2250.
- [7] 戴干策,陈敏恒. 化工流体力学[M]. 北京:化学工业出版社, 2005.
- [8] 蔡小峰. 基于数值模拟的 SCR 法烟气脱硝技术优化设计[D]. 北京:华北电力大学, 2006.
- [9] BUSCA G, LIETTI L, RAMIS G, et al. Chemical and mechanistic aspects of the selective catalytic reduction of NO<sub>x</sub> by ammonia over oxide catalysts: A review [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 1998, 18(21):1-36.
- [10] 邵雄飞,吴忠标. 旋流板内两相流场的 CFD 模拟与分析[J]. 中国化学工程学报(英文版), 2004, 12(2): 169-173.  
SHAO XIONG-FEI, WU ZHONG-BIAO. Simulation and analysis on the two-phase flow fields in a rotating-stream-tray absorber by using computational fluid dynamics[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2004, 12(2):169-173.
- [11] HARA T, KATO S. Numerical simulation of thermal plumes in free pace using the standard K-ε model[J]. Fire Safety Journal, 2004, 39(2): 105-129.
- [12] BIRKHOFF F, MEINGAST U, WASSERMANN P, et al. Modeling and simulation of the injection of urea-water-solution for automotive SCR DeNO<sub>x</sub> systems[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2007, 70(1/4): 119-127.
- [13] LEE H G, YOO J Y. Numerical simulation of turbulent cascade flows involving high turning angles [J]. Computational mechanics, 1997, 20(3): 247-260.
- [14] 贺礼清. 工程流体力学[M]. 北京:石油工业出版社, 2004:160-161.
- [15] CHO J M, CHO J W, HONG S H, et al. The methodology to improve the performance of a selective catalytic reduction system installed in HRSG using computational fluid dynamics analysis[J]. Environmental Engineering Science, 2006, 23(5):863-873.

(编辑 张小强)