

电站选择性催化还原系统速度场测量方法

雷达, 金保升

(东南大学能源与环境学院, 江苏省 南京市 210096)

Velocity Distribution Measuring Method Used in a Power Station Selective Catalytic Reduction System

LEI Da, JIN Bao-sheng

(School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: It is not satisfying that a pitot probe or a thermal anemometer was used to measure the velocity distribution at the catalyst layer inlet in a selective catalytic reduction (SCR) system conventionally. A novel measuring method was proposed, whose measuring procedure is: lay the catalyst layer in an environment where NH_3 to NO ratio is greater than unity, measure the NO concentration distributions at the catalyst layer inlet and outlet, then obtain the velocity distribution from the NO concentration distributions. At first two keys of the new measuring method were analyzed: the relationship between the velocity distribution at the catalyst layer inlet and the NO concentration distributions at the catalyst layer inlet and outlet, the determining of NH_3 to NO molar ratio upstream of the catalyst layer. Measuring procedure was presented according to the analyzed results. Subsequently, the velocity distribution of a power station SCR system was respectively measured by the new method and conventional one, and the measured results were investigated by computational fluid dynamics (CFD). Investigated results demonstrate the feasibility and validity of the new measuring method, and also show that in comparison with the conventional method, when using the new method the effect of the discrepancy of the measured location can be reduced.

KEY WORDS: denitrification; selective catalytic reduction; velocity distribution; measurement; computational fluid dynamics

摘要: 用皮托管或热线风速计等传统测速工具, 直接测量电站选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)系统中催化剂层入口速度场, 效果不能令人满意。提出一种将催化剂层置于氨氮摩尔比大于1的环境中, 测出催化剂层入口、出口 NO 浓度场, 再由浓度场算出催化剂层入口速度场的新

方法。研究新方法的2个要点: 催化剂层入口、出口 NO 浓度场与催化剂层入口速度场之间关系; 测量时催化剂层入口氨氮比的设定。根据研究结果制订测量方案。结合电站 SCR 系统实例, 用传统方法与新方法, 分别试验测出催化剂层入口速度场。通过计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)模型对测量结果进行分析。分析结果显示: 该方法是可行、有效的; 相对于传统测量方法, 新方法减轻了测量位置的偏差对测量结果的影响。

关键词: 脱硝; 选择性催化还原; 速度场; 测量; 计算流体力学

0 引言

选择性催化还原(SCR)烟气脱硝技术的脱硝效率可达90%以上。本世纪以来, SCR技术的应用得到了新一轮的发展^[1-6]。

SCR系统采用整体催化剂技术, 反应器内不均匀性对脱硝系统性能影响很大。不均匀性的消除是SCR反应器设计、建造的核心。以控制首层催化剂入口界面上的速度、氨氮摩尔比(氨氮比)、温度不均匀性作为SCR反应器设计的目标目前已获得广泛认可^[6-11]。

催化剂层入口速度场的测量是速度不均匀性控制的基础。通常用皮托管或热线风速计直接测量速度场。为了解催化剂层中气流分配的状况, 需要测量的是催化剂层入口界面上的速度场。直接测量方法通常将测量界面置于催化剂层上方0.5~1m处。测量位置的偏差对测量结果的影响较大。本文提出一种将催化剂层置于氨氮比大于1的环境中, 通过测量催化剂层入口、出口 NO 浓度场算出催化剂层入口界面上速度场的新方法(间接测量)。间接测量方法可减小测量位置的偏差对测量结果的影响。同

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(863 计划)(2008-AA05Z303)。

The National High Technology Research and Development of China (863 Program)(2008AA05Z303).

时,在传统的电站 SCR 系统的调试与验收中,既需采用直接测量法测量速度场,又需测量浓度场;而间接测量法只需测量 NO 浓度场,简化了测量程序,且减少了测量设备,具有良好的应用前景。

文中首先分析了间接测量法的 2 个要点:催化剂层入口、出口 NO 浓度场与催化剂层入口速度场之间的关系;测量时催化剂层入口氨氮比的设定。根据分析结果制订速度场测量方案。然后结合电站 SCR 系统实例,分别利用间接测量与直接测量的方法,试验得出催化剂层入口速度场。最后建立描述 SCR 系统内烟气流动、传热传质、复相催化反应的三维数值模型,利用数值模型分析、解释试验结果。

1 速度场测量方法

1.1 浓度场与速度场关系

SCR 催化剂通道入口氨氮比大于 1 时,单个通道脱硝效率为

$$\eta = 1 - \exp[-(k_0 / v_A)] \quad (1)$$

式中: η 为脱硝效率; k_0 为催化剂活性, m/s; v_A 为区域速度, m/s。

式(1)的推导见文献[12]。目前电站 SCR 工程实践中,基于式(1)的催化剂活性检测已得到广泛应用。因此将式(1)应用于电站 SCR 工程中速度场的测量是合适的。

v_A ^[13]可表示为

$$v_A = u_x^{\text{in}} D_h / (4L\varepsilon) \quad (2)$$

式中: u_x^{in} 为尚未进入催化剂层,通道入口界面上的轴向烟气流速, m/s; D_h 为催化剂通道水力直径, m; L 为催化剂长度, m; ε 为催化剂层的多孔性,用来修正烟气进入通道后流速的上升^[14]。

脱硝效率 η 定义为

$$\eta = (C_{\text{NO}}^{\text{in}} - C_{\text{NO}}^{\text{out}}) / C_{\text{NO}}^{\text{in}} \quad (3)$$

式中: $C_{\text{NO}}^{\text{in}}$ 为催化剂通道入口 NO 浓度, mol/m³; $C_{\text{NO}}^{\text{out}}$ 为催化剂通道出口 NO 浓度, mol/m³。

结合式(1)~(3)可得

$$(C_{\text{NO}}^{\text{in}} - C_{\text{NO}}^{\text{out}}) / C_{\text{NO}}^{\text{in}} = 1 - \exp[-(k_1 / u_x^{\text{in}})] \quad (4)$$

式中 k_1 为修正后的催化剂活性, m/s, $k_1 = (4k_0 L \varepsilon) / D_h$ 。

化简式(4)可得

$$u_x^{\text{in}} = k_1 / (\ln C_{\text{NO}}^{\text{in}} - \ln C_{\text{NO}}^{\text{out}}) \quad (5)$$

假设催化剂层中每一通道都完全相同,都有相同的 k_1 , 则对于由数以万计通道组成的催化剂层,由式(5)可得

$$\overline{u_x^{\text{in}}} = \overline{k_1 / (\ln C_{\text{NO}}^{\text{in}} - \ln C_{\text{NO}}^{\text{out}})} \quad (6)$$

式中“ $\overline{\quad}$ ”表示均值。

$\overline{u_x^{\text{in}}}$ 可理解为催化剂层入口界面上与界面垂直的平均烟气流速。对于通常的电站 SCR 系统(见图 1), $\overline{u_x^{\text{in}}}$ 可表达为

$$\overline{u_x^{\text{in}}} = Q / A \quad (7)$$

式中: Q 为烟气流量, m³/s; A 为催化剂层入口界面面积, m²。

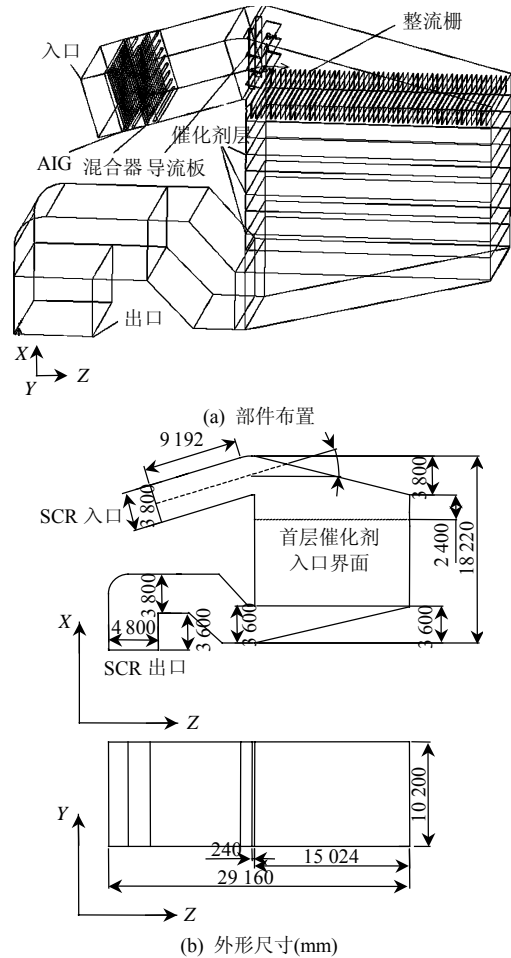


图 1 SCR 系统结构

Fig. 1 SCR system structure

由式(5)~(7)消去 k_1 , 得浓度场与速度场关系, 即

$$u_x^{\text{in}} = \frac{Q}{A \times 1 / (\ln C_{\text{NO}}^{\text{in}} - \ln C_{\text{NO}}^{\text{out}}) \times (\ln C_{\text{NO}}^{\text{in}} - \ln C_{\text{NO}}^{\text{out}})} \quad (8)$$

式(8)可理解为, 催化剂层入口界面上每一点速度 u_x^{in} 可由相应的入口 NO 浓度 $C_{\text{NO}}^{\text{in}}$ 与出口 NO 浓度 $C_{\text{NO}}^{\text{out}}$ 计算得出。

1.2 氨氮摩尔比的设定

催化剂层入口界面上存在氨氮比不均匀性, 为保证测量时催化剂层的每一通道入口氨氮比大于 1, 需增大催化剂层入口界面上氨氮比的均值。然而过大的入口氨氮比, 不但增加了测量成本、而且

污染环境。根据催化剂层入口氨氮比不均匀性设定入口处氨氮比均值，可得到最优的测量环境。

要保证入口界面上 99.9% 的区域内氨氮比 e 大于 1，其概率表达为

$$P\{e < 1\} \leq 1 \times 10^{-3} \quad (9)$$

催化剂层入口界面上氨氮比假设符合正态分布 $N[\mu_e, \sigma_e^2]$ [15-16]， μ_e 为 e 变量的期望， σ_e 为 e 变量标准差。由式(9)可得

$$1 \times 10^{-3} \geq P\{(e - \mu_e) / \sigma_e < (1 - \mu_e) / \sigma_e\} = \Phi[(1 - \mu_e) / \sigma_e] \quad (10)$$

式中 $\Phi(x) = 1 / \sqrt{2\pi} \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} dt$ 。

求解式(10)，可得

$$\mu_e \geq 1 / (1 - 3.1 C_{v_e}) \quad (11)$$

式中氨氮比不均匀系数 $C_{v_e} = \sigma_e / \mu_e$ 。

当催化剂层入口界面上氨氮比平均值达到 $1 / (1 - 3.1 C_{v_e})$ 时，入口界面上 99.9% 的区域内氨氮比大于 1。

1.3 测量方案

根据 1.1 与 1.2 节结论，催化剂层入口界面上与界面垂直的 X 方向烟气速度场测量步骤如下：

- 1) 使催化剂层入口氨氮比平均值达到 $1 / (1 - 3.1 C_{v_e})$ 。
- 2) 测量催化剂层入口、出口 NO 浓度场。
- 3) 利用式(8)计算催化剂层入口速度场。

表 1 运行参数

Tab. 1 Operation parameters

$Q / (m^3/s)$	参数				烟气成分/%						AIG 喷出气体成分/%	
	SCR 入口 烟气温度/K	AIG 喷出 烟气温度/K	AIG 喷出 烟气流量/(m ³ /s)	催化剂层 入口 C_{v_e} /%	$\varphi(N_2)$	$\varphi(CO_2)$	$\varphi(H_2O)$	$\varphi(O_2)$	$\varphi(SO_2)$	$\varphi(NO)$	$\varphi(NH_3)$	空气
625	651	300	2.59	5	73.3	14.4	9.03	3.2	0.04	0.03	3.95	96.05

NO 浓度场测量界面设置在 $F=0.5$ m 处，出口 NO 浓度场测量界面设置在 $B=0.5$ m 处， B 为测量界面距催化剂层出口的距离。入口、出口浓度场测量界面也都被划分为 17×14 块区域，入口、出口测量界面各布置 238 个浓度测点。首层催化剂入口 C_{v_e} 为 5%，根据式(11)，NO 浓度场测量时入口界面上氨氮比平均值需达 1.18，据此调整 AIG 喷出气体中氨的体积浓度为 3.95%。

3 SCR 系统计算流体力学(CFD)模型

3.1 催化剂层外 CFD 模型

图 1 中催化剂层外的区域，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

2 试验部分

在图 1 所示的电站 SCR 系统中，通过直接、间接 2 种测量方法得出首层催化剂入口界面速度场。SCR 系统外形尺寸如图 1(b) 所示。喷氨格栅(ammonia injection grid, AIG) 置于入口下游 1.68 m 处。AIG 由纵、横 2 层布有喷嘴的钢管组成，钢管与烟道垂直，钢管为 150ASCH80，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，每根管上均匀分布 7 个喷嘴，每个喷嘴开口直径为 0.024 m。混合器置于 AIG 下游 1.284 m 处，除无喷嘴外，混合器与 AIG 完全相同。前部烟道与反应器接口处布置 3 块尺寸为 $10.2 \text{ m} \times 0.924 \text{ m} \times 0.06 \text{ m}$ 导流板。整流栅置于首层催化剂入口界面上游 2.1 m 处，每根栅片高 0.98 m。反应器内布置了 3 层整体催化剂，每层催化剂高 1 m，2 层催化剂间隔 1.5 m。氨气与空气的混合气体通过 AIG 上的喷嘴注入烟道与需脱硝的烟气混合。混合后的烟气通过混合器、导流板、整流栅等多个部件的调节后，在催化剂层入口界面上实现流速、温度及氨氮比的均匀。试验时 SCR 系统运行参数见表 1。

直接测量用皮托管测速，测量界面设置在 $F=0.5$ m 处， F 为测量界面在催化剂层上方的高度。测量界面划分为 17×14 块区域，共布置 238 个速度测点。间接测量用烟气分析仪测 NO 浓度。入口

的通用形式为

$$\text{div}(\rho u \Phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \Phi) + S \quad (12)$$

式中： ρ 为气体密度， kg/m^3 ； u 为流速， m/s ； Φ 为通用变量； Γ 为广义扩散系数； S 为广义源项。各控制方程中 Φ 、 Γ 、 S 的特定形式见文献[17]。

3.2 催化剂层中 CFD 模型

催化剂层可看作具有壁面反应的多孔介质。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具体表达见文献[14]。

1) 催化剂层中动量守恒方程。

动量守恒方程需增加一附加源项，即

$$S_i^m = -(C_1 \mu_0 u_i + \frac{C_2 \rho u_{\text{mag}} u_i}{2}) \quad (13)$$

式中: S_i^m 为 i 方向动量方程附加源项, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})^2$; u_i 为 i 方向烟气流速, m/s ; C_1 为粘性阻力系数, m^{-2} ; C_2 为惰性阻力系数, m^{-1} ; μ_0 为烟气粘滞系数, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$; u_{mag} 为烟气速度, m/s 。 C_1 、 C_2 的确定考虑烟气在催化剂层中流动的 2 个特点: 烟气层流流动^[13], 压降与速度成正比; 催化剂层中流动阻力各向异性, 与催化剂入口界面垂直的 X 向阻力远小于 Y 、 Z 向阻力。

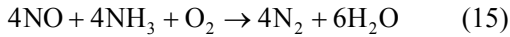
2) 催化剂层中组分质量守恒方程。

组分质量守恒方程的附加源项为 SCR 反应中组分生成量, 即

$$S_j^{\text{sp}} = R_j^{\text{g}} M_j \quad (14)$$

式中: S_j^{sp} 为 j 组分守恒方程附加源项, $\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{s})$; R_j^{g} 为 j 组分反应速率, $\text{mol}/(\text{m}^3\cdot\text{s})$; M_j 为 j 组分分子量, kg/mol 。

SCR 化学反应方程式为



间接测量在氨氮比大于 1 的环境中进行, 催化剂内本征反应速率^[12]为

$$R_{\text{NO}} = k_C C_{\text{NO}} \quad (16)$$

式中 k_C 为反应速率常数, s^{-1} 。

内扩散采用等温薄片颗粒模型^[12,18], 效率因子^[19]为

$$\eta_1 = \text{th}(N\sqrt{k_C/D_e}) / (N\sqrt{k_C/D_e}) \quad (17)$$

式中: η_1 为效率因子; N 为催化剂壁厚度的一半, m ; D_e 为 NO 有效扩散系数, m^2/s 。

相间扩散速率等于膜内化学反应速率, 即

$$R_{\text{NO}}^{\text{g}} = k_{\text{NO}} a_m (C_{\text{NO}}^{\text{g}} - C_{\text{NO}}^{\text{s}}) = (\rho_b / \rho_p) \eta_1 k_C C_{\text{NO}}^{\text{s}} \quad (18)$$

式中: R_{NO}^{g} 为催化剂层内 NO 平均反应速率, $\text{mol}/(\text{m}^3\cdot\text{s})$; a_m 为比表面积, m^{-1} ; k_{NO} 为 NO 传质系数, m/s ; C_{NO}^{g} 为气相主体 NO 浓度, mol/m^3 ; ρ_b 为催化剂层密度, kg/m^3 ; ρ_p 为催化剂密度, kg/m^3 ; C_{NO}^{s} 为催化剂固体壁面 NO 浓度, mol/m^3 。

由式(17)、(18), 可得

$$R_{\text{NO}}^{\text{g}} = \frac{C_{\text{NO}}^{\text{g}}}{\frac{1}{k_{\text{NO}} a_m} + \frac{N\sqrt{k_C/D_e}}{k_C \text{th}(N\sqrt{k_C/D_e})(\rho_b/\rho_p)}} \quad (19)$$

式中: k_{NO} 的计算见文献[18]; k_C 的计算见文献[20]。

根据式(15)得出其他组分的 R_j^{g} , 完成其他组分的质量守恒方程。

3) 催化剂层中能量守恒方程。

SCR 反应放出的热量作为能量守恒方程的源

项处理。多孔介质能量守恒方程在通用能量守恒方程基础上修正热传导量与暂态项。测量在稳定状况下进行, 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, 即

$$\lambda_{\text{eff}} = \varepsilon \lambda_f + (1 - \varepsilon) \lambda_s \quad (20)$$

式中: λ_{eff} 为有效热传导率, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; λ_f 为烟气的热传导率, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; λ_s 为催化剂的热传导率, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

4) 边界条件。

反应器壁面为绝热条件, SCR 出口为湍流充分发展段, 速度场与压力场耦合采用 SIMPLEC 算法。烟气密度、粘滞系数、导热系数、比热的计算中, 将混合烟气当作多种理想不可压气体间混合。催化剂参数见表 2。采用 FLEUNT UDF 编程。

表 2 催化剂参数

参数	数值
N/m	2.6×10^{-4}
a_m/m^{-1}	480
$\lambda_s/(\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$	0.6
X 方向 C_2/m^{-1}	0
$D_e/(\text{m}^2/\text{s})$	9×10^{-7}
ε	0.81
X 方向 C_1/m^{-2}	5.8×10^5
ρ_b/ρ_p	0.19

4 结果与分析

4.1 测量结果对比

图 2(a) 为直接测量得到首层催化剂入口的速度场, 图 2(b) 为间接测量得到速度场。图 1 中前部烟道与反应器之间夹角为 73° , 呈“L”形结构, “L”形结构是速度不均匀性产生的主要原因。图 2(a)、(b) 具有相似性, 图 2(a) 中相对速度由从左向右依次为 0.5、1.2、0.9、1.5, 图 2(b) 中相对速度由从左向右依次为 0.95、1.05、0.8、1.2。对比可见, 图 2(a)、(b) 均反映出烟气流速从左向右升高、降低、再升高的分布状况。

然而图 2(a)、(b) 的差异也很明显, 图 2(a) 明显比图 2(b) 具有更大的不均匀性。不均匀系数的定义为多测点标准差与均值的比值, 速度不均匀系数 C_{v_u} 可作为速度不均匀性量化指标。表 3 列出了不同方法得出的催化剂层入口的速度不均匀系数, 表 3 中直接测量得到 C_{v_u} 为 0.25, 间接测量的 C_{v_u} 为 0.13, 2 者之间差距达 0.12。

4.2 差异原因分析

用 CFD 模型分析直接测量和间接测量所得的

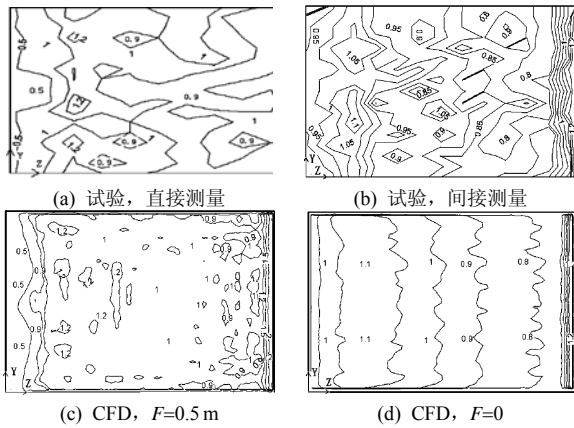


图 2 首层催化剂入口的相对速度分布

Fig. 2 Relative u_x contours at first catalyst layer inlet

表 3 催化剂层入口速度不均匀性

Tab. 3 Velocity maldistribution at catalyst layer inlet

参数	直接测量, 试验	间接测量, 试验	CFD, $F=0.5\text{ m}$	CFD, $F=0$	由NO浓度场计算, CFD, $F=0.5\text{ m}, B=0.5\text{ m}$
C_{v_u}	0.25	0.13	0.21	0.12	0.11

速度场差异的原因。直接测量得到的是 $F=0.5\text{ m}$ 处速度场。由式(8)可知：间接测量得到的是 $F=0$ 处速度场，2者在求取位置上存在差异。

图 2(c)为CFD模型得到的 $F=0.5\text{ m}$ 处速度场。图 2(a)与图 2(c)相似，2者相对流速从左向右依次近似为 0.5、1.2、0.9、1.5 分布状况。表 3 中CFD模型在 $F=0.5\text{ m}$ 处 C_{v_u} 为 0.21 与直接测量得到的 0.25 近似相等。由此可知CFD模型中 $F=0.5\text{ m}$ 处速度场与直接测量所得速度场非常吻合。图 2(d)为CFD模型得到的 $F=0$ 处速度场；图 2(b)与图 2(d)相似，2者相对流速从左向右依次近似为 1、1.1、0.8、1.2 分布状况。表 3 中 CFD 模型在 $F=0$ 处 C_{v_u} 为 0.12 与间接测量得到的 0.13 近似相等。由此可知 CFD 模型中 $F=0$ 处速度场与间接测量所得速度场非常吻合。综上所述，直接测量与间接测量所得速度场在 CFD 模型中得到统一，直接测量与间接测量结果产生差异主要源于测量求取的位置不同。

对间接测量所得速度场的对比、分析，显示出间接测量方法的可行性与有效性。

4.3 测量位置的偏差对测量结果的影响

速度场测量的目标是 $F=0$ 处速度场，直接测量方法是测量 $F=0.5\text{ m}$ 处的速度场并以此代替 $F=0$ 处速度场。表 3 中CFD预测的 $F=0、0.5\text{ m}$ 处 C_{v_u} 分别为 0.12、0.21，2者相差 9%。间接测量中，需要测量 $F=0、B=0$ 处NO浓度场，并由 $F=0、B=0$ 处NO浓度场计算 $F=0$ 速度场，实际测量的是 $F=0.5\text{ m}、B=0.5$

m 处的NO浓度场。CFD模型中利用 $F=0.5\text{ m}、B=0.5\text{ m}$ 处的NO浓度场计算出的速度场如图 3 所示，图 3 与图 2(d)非常吻合。表 3 中 CFD 预测利用 $F=0.5\text{ m}、B=0.5\text{ m}$ 处浓度场计算出的 C_{v_u} 为 0.11，与 $F=0$ 处 C_{v_u} 相差 1%。对比可知，测量位置的偏差对直接测量的影响比对间接测量大得多，原因分析如下。

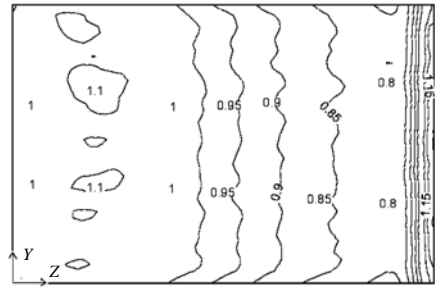


图 3 相对速度分布, $F=0.5\text{ m}, B=0.5\text{ m}$, CFD

Fig. 3 Relative u_x contours computed from C_{NO} distributions, $F=0.5\text{ m}, B=0.5\text{ m}$, CFD

图 4 显示了SCR反应器内流线，图中反应器入口拐角有 1 个旋涡。 $F=0.5\text{ m}$ 处受旋涡的影响大于 $F=0$ 处，旋涡会使得界面上左侧速度降低，右侧速度升高，从而增大 C_{v_u} 。 $F=0.5\text{ m}$ 的图 2(c)与 $F=0$ 的图 2(d)对比中，图 2(c)中左壁相对流速为 0.5，小于图 2(d)中左壁的 1；图 2(c)中右侧相对流速从左向右依次为 1.2、1、0.9、1.5，大于图 2(d)中右侧的 1.1、1、0.8、1.2，旋涡对 $F=0.5\text{ m}$ 处影响明显。综上所述直接测量中由于旋涡的作用，测量位置的偏差对测量结果影响较大。

间接测量选择浓度场测量替代速度场测量，浓度场测量位置在 $F=0.5\text{ m}, B=0.5\text{ m}$ 处，这与计算需要的 $F=0、B=0$ 处也存在偏差。图 5 为不同位置催化剂入口、出口NO浓度场对比。图 5(a)为 $F=0.5\text{ m}$ 处的NO浓度场，图 5(b)为 $F=0$ 处的NO浓度场，图 5(a)与图 5(b)非常相似，表 4 列出了催化剂层入口、出口NO浓度不均匀系数。表 4 中 $F=0$ 与 $F=0.5\text{ m}$

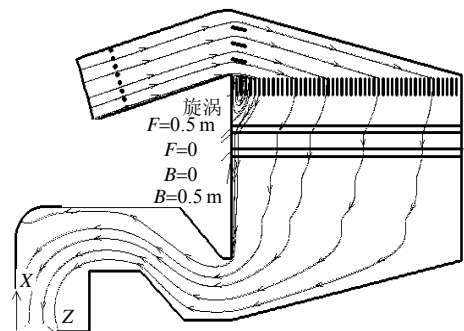


图 4 对称剖面上流线

Fig. 4 Streamlines at the symmetric cross section

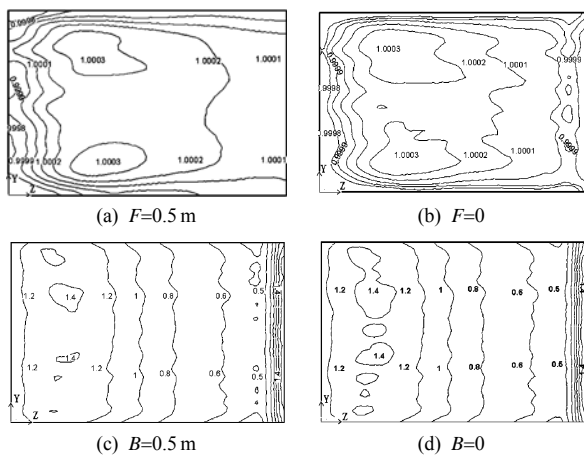


图5 相对浓度分布

Fig. 5 Relative NO concentration contours

表4 催化剂层入口、出口NO浓度不均匀性, CFD
Tab. 4 NO concentration maldistribution at catalyst layer inlet and outlet, CFD

项目	$F=0.5\text{ m}$	$F=0$	$B=0.5\text{ m}$	$B=0$
$C_{v_{NO}}$	8×10^{-5}	6×10^{-5}	0.325 4	0.325 6

处, NO浓度不均匀系数 $C_{v_{NO}}$ 相差只有 2×10^{-5} 。这是由于NO浓度在催化剂层入口上方的区域内已很均匀, 拐角处旋涡对浓度场的影响不大。入口处的对比说明 $F=0.5\text{ m}$ 处与 $F=0$ 处NO浓度场差异很小。图5(c)为 $B=0.5\text{ m}$ 处的NO浓度场, 图5(d)为 $B=0$ 处的NO浓度场, 图5(c)与图5(d)也非常相似, 表4中 $B=0$ 与 $B=0.5\text{ m}$ 处, $C_{v_{NO}}$ 相差只有 2×10^{-4} 。这是由于催化剂层具有整流作用, 图4中流线在催化剂层出口均匀、稳定。出口处的对比说明 $B=0.5\text{ m}$ 处与 $B=0$ 处NO浓度场差异很小。综上所述, 间接测量方法中, 旋涡的作用被削弱了, 测量位置的偏差对测量结果的影响较小。

5 结论

1) 提出一种间接测量电站SCR系统中催化剂层入口速度场的新方法。测量步骤为: 将催化剂层置于氨氮摩尔比大于1的环境中, 测出催化剂层入口、出口NO浓度场, 再由浓度场算出入口速度场。

2) 间接测量的方法是可行、有效的。

3) 间接测量得到的是催化剂层入口界面上的速度场, 直接测量得到的是催化剂层入口界面上方约0.5 m处的速度场。因此间接测量与直接测量测得的速度场整体上是相似的, 但也有明显的差异。

4) 直接测量中由于旋涡作用, 测量位置的偏差对测量结果影响较大; 间接测量方法中, 旋涡的作用被削弱了, 测量位置的偏差对测量结果的影响

较小。

5) 传统的电站SCR系统的调试与验收中, 既需采用直接测量法测量速度场, 又需测量浓度场; 间接测量方法只需测量NO浓度场, 简化了测量程序, 减少了测量设备。

参考文献

- [1] 朱崇兵, 金保升, 仲兆平, 等. $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ 烟气脱硝催化剂的载体选择[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(11): 41-47.
Zhu Chongbing, Jin Baosheng, Zhong Zhaoping, et al. Selection of carrier for $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ DeNO_x catalyst[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(11): 41-47(in Chinese).
- [2] 朱崇兵, 金保升, 李锋, 等. 蜂窝状 $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ 催化剂脱硝性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(29): 45-50.
Zhu Chongbing, Jin Baosheng, Li Feng, et al. Study on DeNO_x performance of honeycomb $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ catalysts[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(29): 45-50(in Chinese).
- [3] 沈伯雄, 杨婷婷, 刘亭, 等. 纳米负载型选择性催化还原反应催化剂的制备和性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(35): 27-32.
Shen Boxiong, Yang Tingting, Liu Ting, et al. Study of preparation and activity of selective catalytic reduction nano-loading Catalysts [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(35): 27-32(in Chinese).
- [4] 赵清森, 孙路石, 向军, 等. $CuO/\gamma-Al_2O_3$ 和 $CuO-CeO_2-Na_2O/\gamma-Al_2O_3$ 催化吸附剂的脱硝性能[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(8): 52-57.
Zhao Qingsen, Sun Lushi, Xiang Jun, et al. Selective catalytic reduction of NO over $CuO/\gamma-Al_2O_3$ and $CuO-CeO_2-Na_2O/\gamma-Al_2O_3$ catalysts[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(8): 52-57(in Chinese).
- [5] 王松岭, 董建勋, 李辰飞, 等. 火电厂SCR烟气脱硝反应器设计方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(25): 289-293.
Wang Songling, Dong Jianxun, Li Chenfei, et al. A study on the design method of the design method of reactor of SCR DeNO_x system for coal-fired power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(25): 289-293(in Chinese).
- [6] 孙克勤, 钟秦, 徐延忠. 大型高温选择性还原反应器的结构设计[J]. 动力工程, 2007, 27(3): 432-437.
Sun Keqin, Zhong Qin, Xu Yanzhong. Structural design essentials of large and high temperature selective catalytic reduction reactors [J]. Journal of Power Engineering, 2007, 27(3): 432-437(in Chinese).
- [7] American Petroleum Institute. Recommended practice 536 [S]. Washington: API, 2005.
- [8] Rogers K J, Nolan P S. SCR reactor performance profiling and results analysis[C]. The U. S. EPA/DOE/EPRI Combined Power Plant Air Pollutant Control Symposium: "The Mega Symposium", Chicago, 2001.
- [9] Adams B. Improving design of SCR systems with CFD modeling [C]. DOE Environmental Controls Conference, Pittsburgh, 2006.
- [10] Rogers K, SCR inlet maldistribution-their effects & strategies for their Control[C]. NETL 2002 Conference on SCR & SNCR for NO_x Control, Pittsburgh, 2002.
- [11] Gretta W J, Greenhut D. The design and operation of the unit 1 SCR at the CP&L ROXBORO plant[C]. Electric Power Conference, Houston, 2003.

- [12] Buzanowski M A, Yang R T. Simple design of monolith reactor for selective catalytic reduction of NO for power plant emission control[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1990, 29(10): 2074-2078.
- [13] Tronconi E, Forzatti P. Adequacy of lumped parameter model for SCR reactors with monolith structure[J]. AIChE Journal, 1992, 38(2): 201-209 .
- [14] Fluent Inc. Fluent 6.1 user's guide[M]. Pittsburgh: Ansys, 2005: 693-699.
- [15] Sigling R. Enhance ammonia distribution for maximum SCR performance[C]. Institute of Clean Companies Forum, Nashville, 2003.
- [16] Rutherford S. Coal-fired SCR applications in the US—challenges and strategies for successful operation and emission compliance[C]. VGB Workshop Flue Gas Cleaning, Vienna, 2007.
- [17] Jin M C, Jeong W C, Sung H 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.
- [18] Beeckman J W, Hegedus L L. Design of monolith catalysts for power plant NO_x emission control[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1991, 30(5): 969-978.
- [19] 罗康碧, 罗明河, 李沪萍. 反应工程原理[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 118-175.
- [20] Bai H, Lee S H, Lin C H, et al. Field study, design, and catalyst cost of selective catalytic reduction process[J]. Journal of Environmental Engineering, 2001, 127(8): 735-740.



雷达

收稿日期: 2008-12-08。

作者简介:

雷达(1971—), 男, 博士研究生, 工程师, 从事烟气脱硝方面研究, satum@yeah.net;

金保升(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事洁净煤电及固体废弃物资源化科学研究。

(编辑 张媛媛)