

基于逆向 Monte Carlo 法的腔内小接受体红外辐射传递研究

黄群星, 王 飞, 刘 冬, 严建华

(浙江大学 能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 针对 MC 方法在计算三维大辐射腔内小接受体所受到辐射时存在的耗时长难收敛等问题, 采用三维逆向能束跟踪 Monte Carlo 方法(BMC), 结合 CFD 数值模拟技术, 分析了不同介质参数以及燃烧工况下, 腔体内不同高度上红外辐射能传感器所接受的辐射能特性, 并与正向 MC 方法进行了对比。模拟计算结果表明: BMC 方法对于处理小接受体大发射源辐射传递问题具有明显的时间优越性, 同时该方法可以用于基于辐射能的腔体内燃烧过程分析。

关 键 词: 逆向 Monte Carlo; 三维辐射腔; CFD 模拟

中图分类号: TK224. 1 文献标识码: A

引 言

腔体内高温弥散介质辐射传递的精确计算具有广泛的应用与研究前景, 包括锅炉燃烧过程优化, 炉膛温度场分布测量等^[1~3]。基于概率统计模型的 MC(Monte Carlo)法由于通过能束在介质内的穿越来模拟辐射换热过程, 使得该方法能够用于精确计算含有吸收、发射和各向异性散射介质的辐射传递问题。考虑我们实际问题的模型, 如图 1 所示。

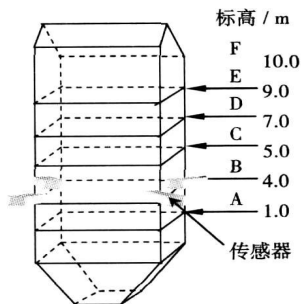


图 1 传感器布置

红外辐射传感器的接受面积(10~20 mm²), 对

于大的腔体(1.6 m×1.6 m×10 m)来说是一个非常小的检测单元, 介质的辐射只有很小的一部分, 这使得 MC 模拟求解的时间与空间复杂度非常大, 过程很难收敛。针对这种大发射源到小接受体的辐射传递问题, Modest 提出了基于能量传递过程互易原理的逆向 Monte Carlo 求解模型^[4], 并模拟计算了二维各向同性散射介质中小传感器所接受到的入射辐射强度。文献[5~7]用类似的模型计算了二维参与性介质的辐射特性, 并用逆向 MC 方法分析了轴对称柱体腔内高温自由流的辐射传递问题。本文在 Modest 研究的基础上首先讨论了三维锅炉腔体内 BMC 能束跟踪模型, 然后结合 CFD 模拟技术, 对比计算了正逆两种能束跟踪模型下不同高度布置红外传感器所接受炉内三维各向异性散射介质辐射能特性, 并分析了炉内介质辐射特性的变化以及炉内燃烧工况变化与辐射能之间的影响关系。

1 BMC 模型

与传统的基于辐射源发射能束的模型相反, 逆向 Monte Carlo 方法采用了能束传递过程中的互易定理, 其统计能束的发射由接受端开始, 如图 2 所示, 其数学描述如下:

$$\int_{\Omega} \int_{\Omega'} [I_{w\lambda 2}(r_w, s^{\wedge}) I_{\lambda 1}(r_w, -s^{\wedge}) - I_{w\lambda 1}(r_w, s^{\wedge}) I_{\lambda 2}(r_w, -s^{\wedge})] (n^{\wedge}, s^{\wedge}) \Omega dA = \int_{\Omega} \int_{\Omega'} [k_{\lambda 1} I_{\lambda 2}(r, -s^{\wedge}) I_{b\lambda 1}(r, s^{\wedge}) - k_{\lambda 2} I_{\lambda 1}(r, s^{\wedge}) I_{b\lambda 2}(r, -s^{\wedge})] \Omega dA \quad (1)$$

其中: $I_{\lambda 1}$ 、 $I_{\lambda 2}$ —辐射传递方程两个不同的解; $I_{w\lambda 1}$ 、 $I_{w\lambda 2}$ —边界条件。

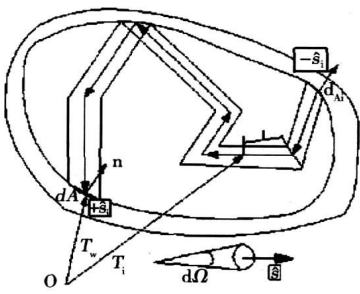


图 2 辐射能束传递模型图

从式 (1) 可以得到, 为了求解在 r_i 处指向 $-s_i$ 的辐射强度值, 也就是传感器所接受到的辐射强度值, 可以通过求解单位辐射强度源在 r_i 处发出的指向 $+s_i$ 的辐射强度分布来获取, 此时: $I_{w\lambda 2}(r_w, s) = 0$, $I_{\lambda 2}(r_i, s) = \frac{\delta(s - s_i)}{dA_i}$, 其中: $\delta(s - s_i)$ —狄拉克函数, 满足: $\delta(r - r_i) = \begin{cases} 0, & r \neq r_i \\ \infty, & r = r_i \end{cases}$, 这样, 则得到基于逆向跟踪的 Monte Carlo 方法的求解公式:

$$I_{\lambda 1}(r_i, -s_i) = \int_{An \cdot s > 0} \int I_{w\lambda 1}(r_w, s) I_{\lambda 2}(r_w, -s) (\hat{n} \cdot \hat{s}) \delta\Omega dA + \int_{V/4\pi} S_{\lambda 1}(r, s) I_{\lambda 2}(r, -s) \delta\Omega dV \quad (2)$$

对于离散后三维腔体网格:

$$I_{\lambda n}(r_i, -s_i) = \epsilon_{\lambda} I_{b\lambda}(r_w, -s'(r_w)) e^{-\sum_{i=1}^n \kappa_{\lambda}(r') \Delta l'} + \sum_{j=1}^{n'} \kappa_{\lambda}(r') I_{b\lambda}(r') e^{-\sum_{k=1}^{n'} \kappa_{\lambda}(r'') \Delta l''} \quad (3)$$

其中: κ_{λ} —当地光谱吸收系数; Δl —能束在三维网格中的穿越距离。然后统计得到传感器所接受的单色辐射能:

$$I_{\lambda}(r_i, -s_i) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I_{\lambda n}(r_i, -s_i) \quad (4)$$

最后, 在视场角范围内积分得到传感器所接受到的视场角范围内的辐射热流:

$$q_{det} = \int_{\Omega_{min}}^{\Omega_{max}} \epsilon_{\lambda} I_{\lambda, n}(r, -s) \cos\theta d\Omega = \int_{\Psi_{min}}^{\Psi_{max}} \int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} \epsilon_{\lambda} I_{\lambda, n}(r, -s) \cos\theta \sin\theta d\theta d\Psi = (\Psi_{max} - \Psi_{min}) (\cos^2\theta_{max} - \cos^2\theta_{min}) \sum_{n=1}^N \epsilon_{\lambda} \times I_{\lambda, n}(r_{det}, -s_{det}) \quad (5)$$

其中: (Ψ_{min}, Ψ_{max}) 、 $(\theta_{min}, \theta_{max})$ —传感器视场角。基于上面的算法, 则以不同高度上的传感器为起点,

通过反向能束发射统计得到传感器所接受的辐射能强度。

2 腔体介质辐射特性的处理

2.1 介质分布特性的计算

无论采用那种计算方法, 在分析腔体内辐射能传递过程之前, 首先要得到介质物性参数的分布情况, 包括浓度、温度、压力等。而这些参数对于我们所模拟的锅炉炉膛腔体来说还无法实际测量, 一种解决方法是按照运行经验人为设定其浓度和温度等的分布特性^[5]; 另一种解决方法是使用流行的 CFD 方法, 对介质的分布特性进行模拟计算。

本文从电厂 DCS 实时运行数据中获取锅炉运行参数, 采用三维稳态隐式非耦合的 $\kappa - \epsilon$ 模型计算得到炉膛腔体内介质浓度、温度、压力等数据的三维分布。其中燃烧过程采用了 Kinetic/diffusion-limited 模型。

2.2 腔体内介质辐射特性的计算

2.2.1 固体颗粒

当能束遇到固体颗粒时, 可能会被吸收或散射。其中被介质吸收的概率可以表达为: $\alpha_{\lambda} = 1 - \exp(-\int_0^S \kappa_{\lambda} ds)$, $R_{\kappa} = \exp(-\int_0^S \kappa_{\lambda} ds)$, 如果 $\alpha_{\lambda} < R_{\kappa}$, 则能束将被吸收, 否则能束将被散射。考虑本文研究的颗粒特性和波长范围, 为降低计算时间复杂度, 散射相函数可以用线性模型来近似^[8]:

$$\Phi(s \cdot s') = 1 + A_1 s \cdot s' = 1 + A_1 \cos\theta' \quad (6)$$

$$R_{\theta} = \frac{1}{2} (1 - \cos\theta' + \frac{A_1}{2} \sin^2\theta')$$

其中: $\theta' = \sin^{-1} \sqrt{R_{\theta}}$ 。

2.2.2 气体成分的处理

弥散介质中的气体成分的处理比较复杂, 因为气体不是像颗粒一样在全波段范围内都对辐射能有作用, 而只是在特定的波长段才发射和吸收辐射能, 这样精确计算发散概率函数往往是不可能的, 一般采用谱带模型, 计算得到气体的在谱带内的平均 Plank 吸收和发射率, 此时介质的单色吸收系数变为:

$$\kappa_{\lambda} = \kappa_{p\lambda} + \bar{\kappa}_{g\lambda}$$

其中: $\bar{\kappa}_{g\lambda} = (S/d)_{\lambda}$ —谱带平均吸收系数。

而发射波长的概率函数则成为:

$$R_{\lambda} = \frac{\pi}{(\kappa_{pp} + \kappa_{gp}) \sigma T^4} \int_0^{\lambda} (\kappa_{p\lambda} + \bar{\kappa}_{g\lambda}) I_{b\lambda} d\lambda$$

$$\lambda = \lambda(R_\lambda) \tag{7}$$

当能束在介质中穿越时被吸收的概率则可以表示为:

$$R_\kappa \approx \exp\left(-\kappa_p \lambda S - \frac{\tau}{\sqrt{1+\tau/\beta}}\right) \tag{8}$$

其中: $\tau = \bar{\kappa}_g \lambda S$, β —气体吸收线型的重叠系数。

3 结果讨论

3.1 辐射特性计算结果

以浙江某电厂 300 MW 切圆燃烧锅炉炉膛为模化对象, 模化后腔体最大尺寸为: 10 m × 1.6 m × 1.6 m。采用 Fluent 为计算工具, 计算网格划分为: 200 × 64 × 64。燃料量 50 kg/s, 腔体壁面设定为恒温 600 °C, 燃料的元素分析数据如表 1 所示。

表 1 浙江某电厂燃料分析数据 (%)

C _{ar}	H _{ar}	O _{ar}	N _{ar}	S _{ar}	Q _{net,ar} /kJ·kg ⁻¹
61.13	3.81	9.44	1.142	0.61	23 070

计算后腔体不同高度平均烟气颗粒浓度及温度分布如图 3~图 5 所示。

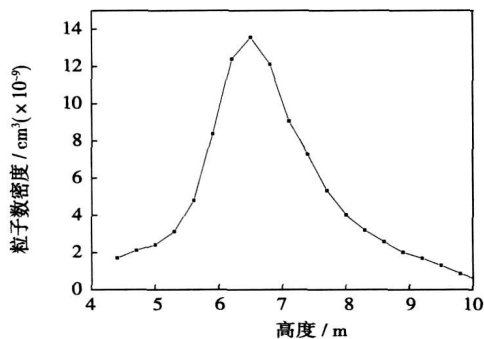


图 3 不同高度上固体颗粒浓度

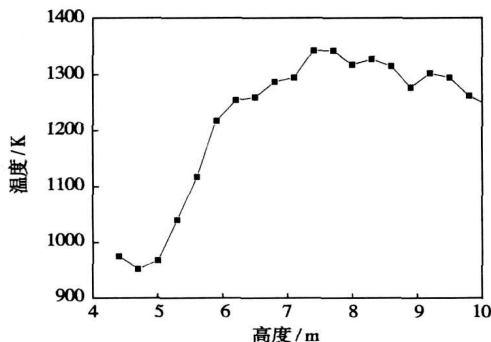


图 4 不同高度上平均温度

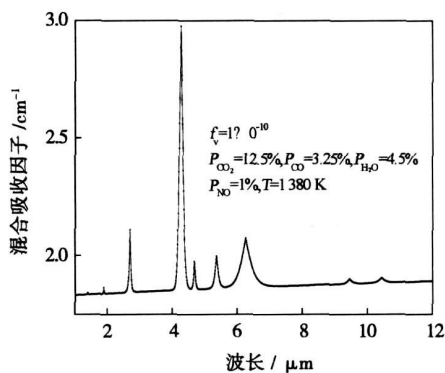


图 5 混合介质吸收系数

3.2 MC 与 BMC 计算比较

在介质辐射特性计算的基础上, 采用 MC 与 BMC 分别计算了安装于 4 m 以上不同高度的传感器所接受辐射能。传感器的接收面积为 10 mm², 视场角 85°。辐射能计算中网格划分为 100 × 10 × 10。

图 6 给出了不同网格发射能束数下, 7.5 m 层传感器接受到的辐射能的变化情况。对于 MC 方法单个网格发射能束数必须大于 1E8 结果才开始收敛。而对于 BMC 方法累计发射能束数大于 2E9 即开始收敛。

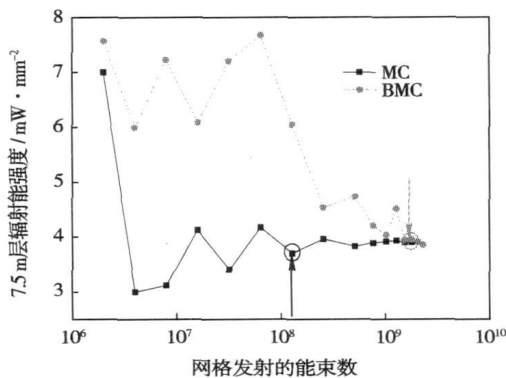


图 6 能束数

表 2 耗时比较

正向能束数	正向/s	逆向能束数	逆向/s
5.00E+09	34	1.00E+07	0.3
5.00E+10	408	1.00E+08	3.9
5.00E+11	4 488	1.00E+09	44
5.00E+12	53 856	1.00E+10	598
1.00E+13	150 797	1.00E+11	6 136

表 2 比较两种方式计算耗时情况。从表中可以

看出, MC 的统计路径是由源到接受体, 因此计算耗时明显高于 BMC 方法, 相同的计算精度要求下耗时比大于 200。

图 7 给出了不同高度传感器接受辐射能的比较曲线, 可以看出两种能束跟踪模式下的结果非常接近, 最大误差为 7.3%, 出现在传感器所接受到的最高辐射能附近, 这是由于该处的介质温度以及浓度都是最高的, 使得能束在穿越网格过程中出现的统计误差增强。

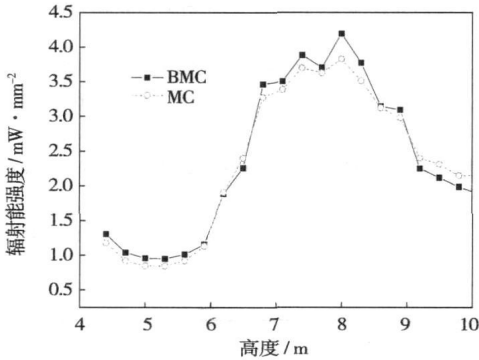


图 7 正向与逆向方法辐射能比较

图 8 给出了传感器所接受到的辐射能的光谱分布情况。从图中可以看出, 大部分发射能束的光谱范围在 2 ~ 5 μm 之间, 以 CO₂ 的 4.3 μm 附近的最大, 两种方法的结果比较是一致的。

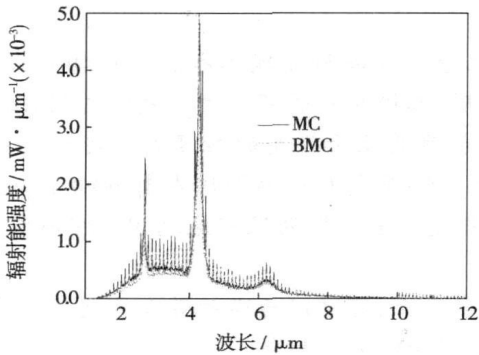


图 8 正向与逆向方法辐射能分布比较

3.3 颗粒复折射率的影响

颗粒的复折射率 $m = n - jk$ 是影响介质辐射的一个重要参数, 尤其是虚部 k 的大小。改变颗粒的复折射率, 详细计算了对辐射能的影响。如图 9 所示, 在所计算的各种粒子中, 差异主要体现在 6 μm 以外的波长, 最大为 11.6%, 并且主要影响炉膛中上部区域的传感器, 而对于下部的影响较小。

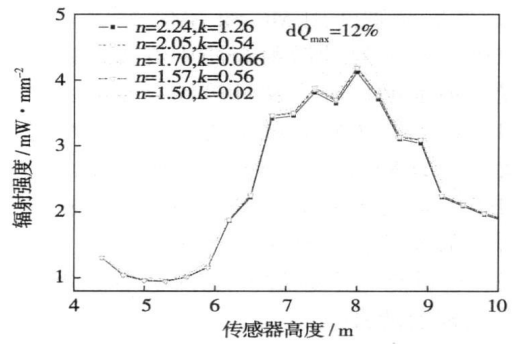


图 9 不同复折射率下辐射能强度曲线

3.4 燃烧工况的影响

根据上面的计算结果, 采样 BMC 算法, 考察了传感器所接受到的辐射能与燃烧过量空气系数之间的关系, 因为过量空气系数的大小直接影响燃烧效率。

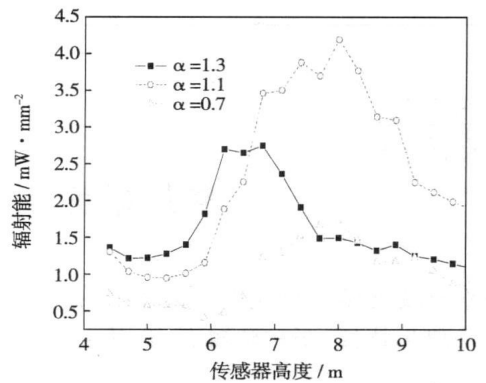


图 10 过量空气系数对辐射能的影响

从图中可以看出, 当 $\alpha = 1.1$ 时, 沿腔体高度辐射能最大, 最大值出现在 8 m 的位置; 当 $\alpha = 1.3$ 时候, 过多的空气降低了腔体的温度水平, 导致辐射能降低, 并且辐射能峰值向下部移动, 这主要是由于空气的增加, 使完全燃烧点下降。当 $\alpha = 0.7$ 时, 由于燃料得不到足够的氧, 腔体内燃烧不完全, 温度较低, 因此辐射能明显偏低。

从前面的分析中可以发现, 辐射能强度的变化较好地反应了腔体内燃烧工况变化, 这就为基于辐射能的燃烧过程分析提供了有力的依据。

4 结论

大发源小接受体的辐射计算应用广泛, 本文首先应用 CFD 方法得到了腔体内介质的浓度与温

度分布,然后分别使用MC和BMC方法模拟计算了三维腔体内各向异性散射介质中红外辐射能传感器所接受辐射能的情况。从计算结果来看:

(1)对于本文研究的问题模型,在相同的计算精度要求下,BMC的计算速度远优于MC方法。

(2)在本文研究的计算工况下,固体粒子复折射率对辐射能的影响在12%左右;

(3)过量空气系数过大或者过小都会降低腔体内的平均辐射能强度。

(4)从计算结果来看,BMC方法可以用于基于红外辐射能的炉内燃烧过程分析。

参考文献:

- [1] 蔡小舒,季琨,苏明旭,等.基于光谱分析的煤粉火焰复合判据和燃烧诊断研究[J].中国电机工程学报,2004,24(1):211-215.
- [2] 张师帅,周怀春,黄勇理,等.采用辐射能反馈信号的火电单元

机组负荷控制系统仿真研究[J].中国电机工程学报,2001,21(2):85-88.

- [3] 黄群星,马增益,王飞,等.应用插值滤波反投影算法快速重300 MW电站锅炉准三维温度场[J].中国电机工程学报,2005,26(6):134-138.
- [4] MODEST M F. Backward monte carlo simulations in radiative heat transfer[J]. ASME Journal of Heat Transfer, 2003(1):57-62.
- [5] DONG SHI KUI. Computation of radiative heat transfer in participating media using Backward Monte Carlo method[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004, 36(12): 1602-1604.
- [6] LIU LIN HUA. Backward Monte Carlo method based on radiation distribution factor[J]. AIAA Journal of Thermo Physics and Heat Transfer, 2004, 18(1): 151-153.
- [7] 帅永,董士奎,刘林华,等.高温含粒子自由流红外辐射特性的反向蒙特卡罗法模拟[J].红外与毫米波,2005,24(2):100-104.
- [8] MODEST M F. Radiative heat transfer[M]. New York: McGraw-Hill, 1992.

(编辑 柴舒)

新技术

兖州矿区煤泥电厂粉煤灰特性分析

山东科技大学利用现代测试技术,详细分析了兖州矿业(集团)有限责任公司所属3个煤泥发电厂粉煤灰的一些理化特性,如矿物组成、化学成分、微量元素含量、颗粒类型等,并且以此为基础,提出了今后粉煤灰利用的途径。

此项研究表明,3个煤泥发电厂所排粉煤灰的矿物相基本上分为非晶质玻璃体和晶体矿物两大类。非晶质玻璃体含量居多;晶体矿物以石英为主,同时含有少量磁铁矿、赤铁矿和长石。由于浸润作用,湿排灰中微量元素的含量普遍低于干排灰中微量元素的含量。湿排灰的粒度要比干排灰的粒度大。粉煤灰中有毒、有害元素的含量未超过农用粉煤灰污染控制标准。经过调查,3个煤泥发电厂的粉煤灰有60%存放在贮灰场、30%回填塌陷区,只有10%运往附近的砖厂做掺合料,总体来说并没有得到很好地利用。根据前述的粉煤灰特性,可以选择性地拓宽其利用途径:

(1)用粉煤灰代替粘土进行井下防火注浆,不仅可以节约大量粘土,还可以为煤矿带来可观的经济效益。

(2)粉煤灰是一种活性材料,加入一定量的石灰,可以用作井下胶结充填材料。

(3)有的粉煤灰中SiO₂含量很高,可以用作建筑胶凝材料。

(4)粉煤灰加石灰配料经过蒸汽养护以后低温煅烧合成的粉煤灰水泥,既有硅酸盐水泥的长期稳定性又有铝酸盐水泥的早强性,并且吃灰量达到70%以上,对煤粉灰成分无特殊要求,配料要求不严,煅烧温度低(800℃左右),产品用途广泛。

(5)生产粉煤灰粘土烧砖,既可以节约大量的粘土和能源,又能够处理大量的粉煤灰,有利于环境保护。

(6)分选品质好的粉煤灰用作土壤改良剂,并且开展粉煤灰对土壤—地下水—作物系统的环境影响评价,确保不会出现二次污染的问题。

(李剑峰 供稿)

基于逆向 Monte Carlo 法的腔内小接受体红外辐射传递研究 = **A Study of the Infrared Radiative Transfer of an In-chamber Small-sized Detector Based on a Backward Monte Carlo Method**[刊, 汉] / HUANG Qun-xing, WANG Fei, LIU Dong, et al (National Key Laboratory on Clean Utilization of Energy Source, Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(4). — 564 ~ 568

There exist a variety of problems, such as a long duration needed and the difficulty in effecting a convergence etc. when Monte Carlo method is used to calculate the radiation being subjected by a small detector in a three-dimensional radiation chamber. A backward Monte Carlo (BMC) method featuring three-dimensional inverse energy beam tracking has been employed. Meanwhile, in combination with the CFD (computational fluid dynamics) numerical simulation technology, analyzed were the characteristics of radiative energy received by the infrared radiative-energy sensors at different heights in the chamber and under different working media parameters and combustion conditions. A comparison with the results of direct Monte Carlo method has been made. The results of simulation calculation show that the BMC method has an obvious time advantage in dealing with the radiative transfer problems of a large emission source for small-sized detectors. In the meantime, the method can also be used for analyzing the in-chamber combustion process based on the radiative energy. **Key words:** backward Monte Carlo method, three-dimensional radiative chamber, CFD (computational fluid dynamics) simulation

选择性催化还原烟气脱硝过程数学模拟研究 = **Mathematical Simulation Study of a Selective Catalytic-reduction-based Flue-gas Denitration Process**[刊, 汉] / DONG Jian-xun, WANG Song-ling, LI Yong-hua (College of Energy Source and Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding, China, 071003), LI Chen-fei (National Research Center of Power Plant Combustion Engineering Technology, Shenyang, China, Post Code: 110034) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(4). — 569 ~ 573

The mathematical models for SCR (selective catalytic reduction) flue-gas denitration reaction process can provide a basis for the design, operation and control of catalytic reactors. An experimental study was performed of the SCR flue-gas denitration reaction process along with an investigation of the influence of relevant parameters on the denitration performance. The data showing the relationship between the denitration performance and these parameters have been obtained. On the basis of the relevant mechanism of SCR flue-gas denitration reaction process, a mathematical model for such a reaction process was set up and the Eley-Rideal mechanism model quantitatively used as the surface reaction dynamic model of a catalyst with due consideration of the in-wall mass transfer of the catalyst. The method for the calculation of chemical-reaction dynamic parameters in the model by use of SCR flue-gas denitration macro reaction data was studied and the above-mentioned parameters were computed by utilizing the data from small-scale tests. The numerical solutions to the mathematical model were sought by employing the finite difference method. The numerical simulation results are in good agreement with the test ones, thus indicating that the model is rational. **Key words:** thermal power plant, nitrogen oxide, denitration, selective catalytic reduction (SCR), mathematical model