

增湿活化脱硫反应器内流动、蒸发与碰撞过程数值计算

吴树志, 赵长遂, 段钰锋, 陈晓平

(东南大学 洁净煤电及燃烧技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘 要: 介绍了喷水增湿活化脱硫反应器中的气相流动、水滴运动和蒸发、水滴与脱硫剂颗粒碰撞及碰撞后形成的浆滴过程的模型研究方法和数值计算结果。其中, 气相湍流模型采用 $k-\epsilon$ 双方程模型进行数值模拟, 水滴运动和蒸发模型分别采用随机轨道模型和经 Ranz-Mashall 修正的水滴蒸发模型, 水滴与脱硫剂颗粒的碰撞则采用惯性沉聚模型进行。数值计算结果表明, 活化反应器内的气相速度场已经进入紊流充分发展区, 喷入反应器的雾化水滴及形成的浆滴在不长的一段距离内即蒸发完全, 脱硫剂捕集主要发生在雾化水滴喷入位置后的一段距离内, 此后捕集效率迅速降低。

关 键 词: 脱硫; 数值模拟; 蒸发; 碰撞

中图分类号: X511 文献标识码: A

符号说明

- \bar{c}_p — 水滴比热;
- \dot{m}, m_D — 质量变化率, 水滴质量;
- \vec{V}_D, \vec{V}_g — 水滴, 烟气速度;
- B_y — 挥发性参数;
- d_D, d_{DC} — 水滴直径, 浆滴临界直径;
- l_e — 随机涡团尺度;
- Nu, Re, Stk — 努谢尔特数, 雷诺数, Stokes 数;
- T_s, T_∞ — 水滴表面温度, 烟气温度;
- Y_{FS}, Y_∞ — 水滴表面, 气体环境蒸汽份额;
- k, ϵ — 湍动能, 湍流耗散率;
- η_d — 捕集效率;
- λ — 水滴导热系数;
- ρ_D — 水滴密度;
- τ_D, τ_c — 水滴驰豫时间, 涡团生存时间;
- τ_{int} — 作用时间。

1 概 述

在炉膛喷钙尾部增湿活化脱硫系统中, 增湿活化反应器是关键部分。脱硫剂在炉膛内煅烧生成的

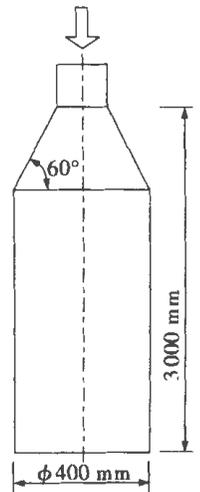
生石灰中未充分利用的部分在反应器内一部分与水滴碰撞, 形成浆滴, 脱硫活性增强, 进一步吸收 SO_2 , 脱硫效率有很大提高。其反应过程涉及到气固液三相流动、固液粒子碰撞、水滴与浆滴蒸发、水蒸气吸附和硫酸化反应等多因素的复杂物理化学过程^[1-4]。其中, 喷入活化器内的雾化水滴的运动、蒸发和脱硫剂颗粒的碰撞及碰撞形成的浆滴的蒸发过程是一个关键的环节, 为详细了解这一过程, 本文通过模型和数值计算, 对其进行了模拟。

2 模型研究

2.1 气相湍流运输模型

在研究的活化反应器中, 气相流场的浮力影响和流线弯曲较弱, 因此采用 $k-\epsilon$ 双方程模型进行数值模拟。

活化器几何结构为长径比较大(12.5)的圆柱结构, 采用轴对称坐标系对活化器内气相流动进行研究, 如图 1 所示。



2.2 颗粒与水滴运动模型

对水滴和浆滴的湍流扩散, 采用随机轨道模型, 直接由轨道形式的水滴瞬时方程出发, 考虑流体(本文中为气体)湍流对水滴和浆滴的作用, 跟踪其随机轨道及沿轨道的变化经历。由于实际反应器内的脱硫剂颗粒质量平均粒径小于 $40 \mu m$, 气体跟随性强, 其在烟气中均匀分布; 另外在稀相流中不考虑颗粒对流体的作用。

在考虑气相速度脉动对水滴运动的影响时, 假定湍流为各向同性, 且局部均匀, 因而可用气相湍流 $k-\epsilon$ 模型来提供湍流动能和湍流耗散率等湍流特

收稿日期: 2002-11-15; 修订日期: 2003-01-20

基金项目: 国家重点基础研究发展规划基金资助项目(G199022201-04); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(1998028615)

作者简介: 吴树志(1973-)男, 山东荣城人, 现为国电自动化研究院博士后

性参数。随机轨道模型的关键是确定湍流涡团特性及其与水滴的相互作用时间。

随机涡团尺度 (Kolmogorov 涡团尺寸) 可由 Hinze 的公式计算^[3]：

$$l_e = C_{\mu}^{3/4} k^{3/2} / \epsilon \quad (1)$$

则随机涡团生存时间 τ_e ：

$$\tau_e = l_e / (\overline{u}^2)^{1/2} \quad (2)$$

水滴穿越涡团的时间 τ_R 可由下式计算：

$$\tau_R = -\tau_D \ln \left[1 - \frac{l_e}{\tau_D \left| \vec{V}_g - \vec{V}_D \right|} \right] \quad (3)$$

水滴与流体涡团相互作用要求满足水滴和涡团的作用时间在涡团存在时间之内，因此相互作用时间 τ_{int} 可取为：

$$\tau_{int} = \min[\tau_e, \tau_R] \quad (4)$$

水滴与一个涡团作用的结束就是与另一个涡团作用的开始，这样不断计算至积分域出口，即完成一条水滴轨道的计算。对大量水滴的计算则可得到颗粒群统计特性及水滴运动和弥散规律。

2.3 水滴和浆滴的蒸发模型

直接研究运动流体中的水滴蒸发存在一定的困难，本文采用先研究静止环境中的单液滴蒸发模型，然后在静止蒸发模型基础上进行修正。静止环境中的单液滴蒸发模型可用下式表示^[4]：

$$\text{蒸发速率: } m = \frac{dm_D}{dt} = \pi d_D Nu^0 \frac{\lambda}{c_p} \ln(1 + B_y) \quad (5)$$

$$\text{半径变化: } \frac{d(d_D)}{dt} = \frac{2Nu^0 \lambda \ln(1 + B_y)}{\rho_D C_p d_D} \quad (6)$$

在实际活化器的水喷嘴出口等处，气流与水滴间相对速度较大，对水滴蒸发会产生较大影响，则必须将上述模型修正后才能应用^[5]。本文采用 Ranz - Mashall 修正得^[6~7]：

$$\frac{d(d_D)}{dt} = \frac{4\lambda}{\rho_D C_p d_D} \ln(1 + B_y) (1 + 0.327 Re^{1/2} Pr^{1/3}) \quad (7)$$

水滴捕集脱硫剂颗粒后成为含有固体的浆滴。根据浆滴蒸发理论，浆滴蒸发过程分为三个阶段：恒速干燥期、第一降速干燥期和第二降速干燥期。在恒速干燥期，浆滴表面有充分的非结合水，蒸发速度由水的表面汽化速度所控制，浆滴尺寸随蒸发进行而不断减小。当浆滴粒径缩小到使分散的悬浮颗粒相互接触以致浆滴内的小颗粒运动受限制时，物料表面已不再能维持全部湿润，部分表面汽化为结合

水分，蒸发过程由水分从浆滴内部向表面扩散的传质过程所控制，此时进入第一降速期，即不饱和表面干燥阶段。当浆滴全部表面都不再含有非结合水分时，第二降速阶段开始，此时蒸发速度受水分在物料中的运动速度所控制，汽化面由表面向浆滴内部移动，蒸发所需热量是通过已干燥的外层浆滴固体颗粒传递到汽化面^[8]。

脱硫剂有效成分 CaO、Ca(OH)₂ 和产物 CaSO₃ 在水中为微溶且含量较小，认为浆滴内的固体对蒸汽压降低的影响可以忽略，即对浆滴在恒速期的干燥过程没有明显影响^[9]。则恒速期的蒸发过程仍可以按纯液滴的蒸发过程进行计算。

在降速期，浆滴内的颗粒已经发生接触，浆滴粒径保持不变，但水分仍在蒸发，浆滴密度发生变化。

$$d_D = d_{DC} \quad (8)$$

$$-u_D \frac{\pi}{6} d_D^3 \frac{d\rho_D}{d(d_D)} = D\pi d_D^2 (Y_S - Y_{\infty}) \rho_g \quad (9)$$

式中： d_{DC} 为浆滴临界直径。临界直径与固体类型和含量有关，可按相对水分质量含量为 29.2% 来进行计算^[10]。

2.4 水滴 - 脱硫剂颗粒碰撞模型

从微观上看，水滴与固体颗粒的碰撞结果可以分为四种模式：完全捕捉、击穿、气泡和水滴破裂。根据实际情况，水滴高速离开水喷嘴时，雷诺数很大，可能处于穿过或形成气泡模式区域内；但在气动阻力影响下，碰撞模式转而进入完全捕捉区，水滴将捕捉脱硫剂颗粒。另外，从随机轨道模型计算看，水滴的驰豫时间很小，很快滞止。因此，假设活化器内的水滴与脱硫剂颗粒的碰撞结果为脱硫剂颗粒被水滴捕捉，碰撞过程中水滴无质量损失，并且，水滴中已捕集的脱硫剂颗粒对后续碰撞没有影响^[11]。

单个水滴捕集脱硫剂颗粒的效率 η_d ，定义为被捕集的颗粒数与水滴所经过的体积内最初所含颗粒数的比。脱硫剂颗粒由于惯性，使运动轨迹与气体流线偏离。当气流遇到水滴拐弯时，颗粒由于惯性作用，其拐弯程度要弱，就可能沉聚在水滴表面。

当 $Re_D = \frac{u_{\infty} d_D}{\nu_{\infty}} \ll 1$ (Re_D 为水滴绕流 Reynolds 数)，且 $d_p / d_D \ll 1$ 时，捕集效率按下式给出：

$$\eta_d = \left[1 + \frac{0.75 \ln(4Stk)}{2Stk - 7.214} \right]^2 \quad (10)$$

$$(Stk)_{min} = 1.2 \quad (11)$$

如果 $Re \gg 1$ ，并忽略边界层的影响，得：

$$\eta_d = \frac{(Stk)^2}{(Stk + 0.06)^2} \quad (12)$$

$$(Stk)_{\min} = 0.08 \quad (13)$$

边界层的存在将使捕集效率略有降低。对气体这一减小量为:

$$\Delta\eta_d = 1.4Re_D^{1/2} \sim 2.1Re_D^{1/2} \quad (14)$$

3 数值计算

3.1 气相控制方程组的数值计算

数值计算在圆柱坐标二维同位网格体系中,采用有限差分法基础上的 SIMPLE 算法求解动量方程和压力方程。

3.2 浆滴随机轨道、浆滴浓度和捕集效率数值计算

在实际的颗粒随机轨道模型计算中,只能跟踪有限数量的水滴,每个水滴代表一定数量、具有相同性质和变化经历的水滴。我们将水滴按初始粒径分组,并确定各组水滴群的质量份额,每组选取有限几个进行跟踪,其入射角在水喷嘴雾化角内随机选取。每组所跟踪的水滴轨道代表一定数量的水滴群的运动和变化经历。

每一步水滴轨道跟踪计算完成后,即可根据该步水滴蒸发计算对应位置的水滴浓度和水滴捕集的脱硫剂数量。通过统计进入所对应的控制容积的各组水滴数量及其穿过控制容积所用的时间来计算该控制容积中所含有的水滴数量和质量,进而得到该位置的水滴浓度。

4 计算结果与分析

4.1 入口条件

入口条件以试验装置入口条件计算,反应器为一直径 400 mm 的圆筒,入口扩张段角度为 60° ,其设计参照了南京下关电厂 LIFAC 的设计参数^[12],其中入口烟气速度按 2 m/s 计算。

4.2 浆滴轨道计算结果

图2为各个尺寸组浆滴粒径在蒸发过程中的变化,浆滴终止直径为临界直径,当浆滴粒径达到临界直径时,恒速干燥期结束,随后进入降速干燥期。根据文献[11,13],降速期内脱硫反应对总脱硫效率的贡献小于1%,因此从脱硫反应角度看,浆滴蒸发可以认为结束。由图可见,粒径较小的浆滴蒸发较快,粒径较大的浆滴可以到达更远的地方。喷入反应器的浆滴在烟气环境下迅速蒸发,到约 1.3 m 处已经基本蒸发完全,与试验测量情况吻合。

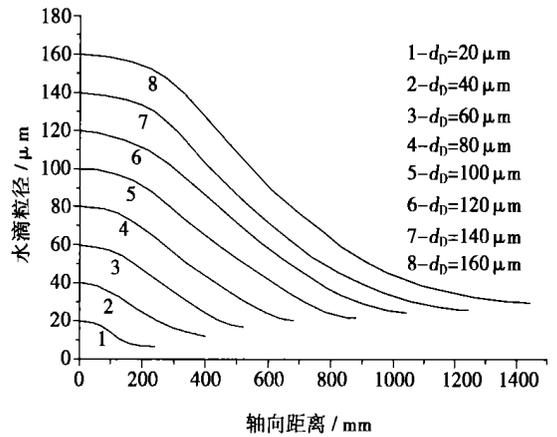


图2 蒸发过程中浆滴粒径变化

4.3 浆滴浓度场计算结果

考虑蒸发后,反应器沿程的水滴浓度变化见图3所示。由图可见,随着水滴运动,反应器沿程水滴浓度迅速减小,到 1.3 m 处已基本蒸发完全。另外,由不同喷水量的对比可以发现,喷水量大,水滴浓度较高,且完全蒸发距离也较长。

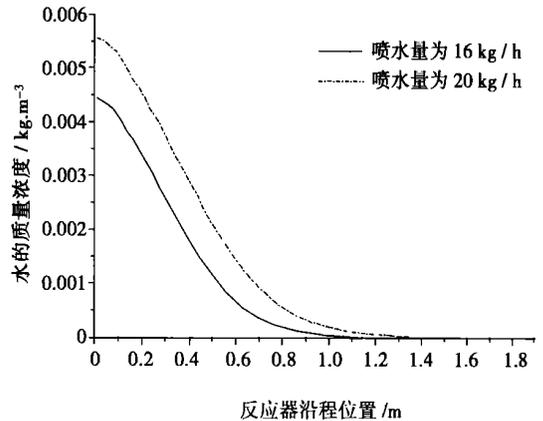


图3 反应器沿程水滴浓度变化

4.4 脱硫剂捕集效率变化

反应器沿程不同位置的捕集效率计算结果示于图4。可以看出,在喷嘴附近,由于此时水滴速度很高,与脱硫剂颗粒的相对速度比较大,捕集效率很高,随着水滴在烟气中的速度衰减和蒸发,与烟气的相对速度很快降低,水滴粒径逐渐减小,捕集效率迅速减小,到 0.8 m 处,已经接近于零。尤其与水滴浓度计算结果对照可以发现,尽管到 0.8 m 位置时,还有一定的水滴浓度,但此时的捕集效率已接近于零,说明由于水滴和脱硫剂颗粒间相对速度很小,捕集效率很低。由此可以推断,在相同喷水量条件下,可

以通过采用分级喷水增湿, 来提高脱硫剂捕集效率

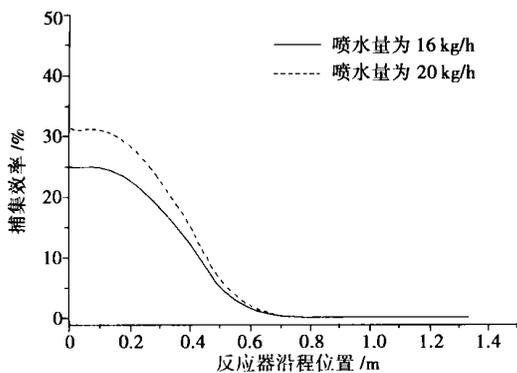


图 4 反应器沿程捕集效率变化

5 结 论

通过增湿活化反应器内流动、蒸发与碰撞过程数值模拟计算, 可以得出以下结论:

气相速度场计算表明, 反应器内的气相速度场已经进入紊流充分发展区, 反应器扩张段后不远距离, 气相时均速度在横截面上分布比较平坦。

浆滴蒸发过程计算表明, 喷入反应器的雾化水滴及形成的浆滴在不长的一段距离内即蒸发完全, 与试验中反应器沿程温度测量所反映的情况一致, 这说明, 从完全蒸发角度考虑, 试验用反应器高度满足蒸发时间要求。

水滴和浆滴轨迹跟踪及脱硫剂颗粒捕集效率计算表明, 脱硫剂捕集主要发生在雾化水滴喷入位置后不长的一段距离内, 进入反应器的水滴在烟气速度场作用下, 与气相相对速度迅速减小, 使水滴与脱硫剂颗粒渐趋滞止, 从而使捕集效率迅速降低。

参考文献:

- [1] GERAID H NEWTON. Modeling the SO₂-slurry droplet reaction[J] . **AICHE**, 1990, **36**(12): 1865-1872.
- [2] WU S Z. Investigation on desulfurization mechanism of activation by water spraying in humidification activator [D] . Nanjing, Southeast University, 2001.
- [3] CEN K F, FAN J R. Theory and calculation of gas and solid multiphase flow[M] . Hangzhou: Zhejiang University Press, 1990.
- [4] XU X C. Combustion theory and equipment[M] . Beijing: Machine Industry Press, 1990.
- [5] HUGHES R R, GILLILAND E R. The mechanics of drops[J] . **Chemical Engineering Progress**, 1952, **48**(10): 497-504.
- [6] RANZ R R, MARSHALL W R. Evaporation from drops(Part D [J] . **Chemical Engineering Progress**, 1952, **48**(3): 141-146.
- [7] RANZ W E, MARSHALL W R. Evaporation from drops(Part II) [J] . **Chemical Engineering Progress**, 1952, **48**(4): 173-180.
- [8] IRABIEN A. Thermal dehydration of calcium hydroxide; 2. surface area evolution[J] . **Ind Eng Chem Res**, 1990, **29**(3): 1606-1611.
- [9] CHARLESWORTH D H, MARSHALL W R. Evaporation from drops containing dissolved solids[J] . **AICHE J**, 1960 **6**(1): 9-23.
- [10] PARTRIDGE G P. A mechanistically based mathematical model of sulfur dioxide absorption into a calcium hydroxide slurry in a spray dryer[J] . **Chem Eng Commu**, 1990, **96**(1): 97-112.
- [11] ZHOU L X. Numerical simulation of turbulent two phase flow and combustion[M] . Beijing: Tsinghua University Press, 1992.
- [12] 周 全, 马果骏. 下关电厂 LIFAC 脱硫技术, 火力发电厂脱硫脱氮技术资料选编[R] . 南京: 国电环保研究所, 1997.
- [13] DANTULURL S R. Mathematical model of sulfur dioxide absorption into a calcium hydroxide in a spray dryer[J] . **Separation Science and Technology**, 1990, **25**(13-15): 1843-1855.

(渠 源 编 辑)

SMGT 样机在神户进行试验

据《Diesel & Gas Turbin Worldwide》2002 年 12 月号报道, 新的 2.5 MW SMGT(超级船舶燃气轮机)的试验目前正在日本进行。该燃气轮机是由日本的 Daihatsu 柴油机公司、石川岛——播磨重工业公司、川崎重工业公司、Niigata 工程公司和 Yanmar 公司合作开发的小功率回热式船舶燃气轮机。

自 IMO(国际海事组织)制定防止海上航行船舶引起大气污染基本方针以来, SMGT 的设计和研制工作已进行了 5 年。新发动机研制工作目前正处在最后一年, 并且试验正在神户附近的川崎 Akashi 工厂的试验装置上进行。

SMGT 计划就是要开发一型取代高排放柴油机能在近海应用的下一代小功率船舶燃气轮机, 它的 NO_x 排放很低, 热效率又能与当今的船用高速柴油机相当。

对新的 SMGT 研制所制定的目标包括使用重燃油生产 2.5 MW 功率, 并且燃油消耗比同类功率等级的船舶燃气轮机减少 30%。此外, NO_x 排放预期低于 1.0 g/(kWh), 是现有柴油机排放的十分之一和现有工业燃气轮机排放的三分之一。按照伦敦的日本船舶中心的说明, 在样机上的试验至今是成功的, 核心的研究和开发阶段接近完成。下一阶段将包括耐久性试验。

(吉桂明 供稿)

增湿活化脱硫反应器内流动、蒸发与碰撞过程数值计算 = **Numerical Calculation of the Process of Flows, Evaporation and Collision in a Desulfurization Reactor Activated through Humidification** [刊, 汉] / WU Shu-zhi, ZHAO Chang-sui, DUAN Yu-feng, et al (Education Ministry Key Laboratory on Clean Coal Power Generation and Combustion Technology under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(5). — 471 ~ 474

Model study methods and numerical calculation results are described of the process in an activated (through spray water humidification) desulfurization reactor concerning the following: gas phase flows, water drop motion and evaporation, collision of water drops with particles of desulfurizing agents, as well as serous drops formed after the collision. The numerical simulation of a gas-phase turbulent flow model was conducted by the use of a $k-\epsilon$ dual-equation model. Water-drop motion and evaporation model was respectively simulated with the use of a random trajectory model and a water-drop evaporation model after a Ranz-Mashall modification. The collision between water drops and particles of desulfurizing agent was simulated by way of an inertia sedimentation model. The results of the numerical calculation indicate that the gas-phase velocity field in the activated reactor has evolved to a fully developed zone of turbulent flows. The atomized water drops injected into the reactor and the serous drops formed have completely evaporated within a short distance. The capture of desulfurizing agents mainly occurred in a section not far behind the location where water drops have been injected, followed by a drastic reduction of the capture efficiency. **Key words:** desulfurization, numerical simulation, evaporation, collision

介质特性对介质阻挡放电脱除 NO 影响试验研究 = **Experimental Research on the Impact of Dielectric Characteristics on NO Removal by a Dielectric-barrier Discharge** [刊, 汉] / YU Gang, GU Fan, XU Yi-qian, et al (Education Ministry Key Laboratory on Clean Coal Power Generation and Combustion Technology under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(5). — 475 ~ 477

The impact of dielectric characteristics on NO removal is studied under the presence of dielectric-barrier discharge plasma. First, a NO removal test system with the use of the dielectric-barrier discharge plasma was set up. An experimental study was conducted of the NO removal efficiency by using various dielectrics, such as Al_2O_3 , CaO, MgO and glass, etc. Then, a theoretical analysis was performed of the mechanism of such an impact. The results of experiment and theoretical analyses indicate that the electric field intensity of gas discharge formed by various barrier dielectrics are different with the energy provided to activated particles also being different. This results in a different influence on the NO removal rate. **Key words:** NO, dielectric-barrier discharge, dielectric constant, plasma

非对称渐开线直齿轮齿廓设计与有限元分析 = **Tooth Profile Design for and Finite Element Analysis of Asymmetrical Involute Spur Gears** [刊, 汉] / JIANG Li-dong, CHANG Shan, SHI Yu-quan, et al (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(5). — 478 ~ 481

Asymmetrical involute spur gears have different pressure angles on the drive side and coast side. A rational design of the tooth profile of such gears can lead to an increase in gear load capacity, a reduction in noise and vibration levels and a significant enhancement in bending strength. The authors have developed tooth-profile equations for the above-mentioned spur gears and relevant computer programs with calculation examples being given. In addition, a three-dimensional solid model of the spur gears was set up and a finite element analysis of the latter performed. **Key words:** asymmetrical involute spur gear, tooth profile design, finite element analysis

闭式内可逆中冷回热布雷顿循环的功率优化 = **Power Optimization of a Closed Brayton Cycle with Endoreversible Intercooling and Regenerative Heating** [刊, 汉] / WANG Wen-hua, CHEN Lin-gen, SUN Feng-rui (Department of Nuclear Energy Science and Engineering, Naval Engineering University, Wuhan, China, Post Code: 430033) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(5). — 482 ~ 485