

# 燃煤锅炉 PM 微尺度流体力学研究模型初探

赵海波 郑楚光 柳朝晖 陈胤密

(华中科技大学煤燃烧国家重点实验室)

**摘要:** 构建了燃煤锅炉及烟道内可吸入颗粒物的流动模型的框架, 模型包含颗粒碰撞、凝并、冷凝、成核、破碎、化学反应等物理化学过程. 提出了该模型的研究思路和研究方法, 列出了研究的重点和关键问题, 给出了颗粒数密度变化函数, 为研究可吸入颗粒物的流动模型奠定了基础.

**关键词:** 煤燃烧; 可吸入颗粒物; 概率密度函数模型; 雷诺应力模型; 颗粒数密度函数

**中图分类号:** TK121; O359 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-4512(2003)11-0072-04

PM<sub>10</sub> 指空气动力学直径小于或等于 10 μm 的大气颗粒物, 也就是通常所说的可吸入颗粒物, 简称 PM. 研究 PM 的微尺度流体力学将揭示燃煤锅炉一次颗粒物的生成、成核、生长与沉积机制, 是建立完善的燃煤锅炉可吸入颗粒物的形成与控制理论和技术的基礎. 本研究建立燃煤锅炉可吸入颗粒物的两相流动湍流模型, 提出建立此项研究计划的方案和策略, 为建立合理经济的数学模型奠定基础.

## 1 模型的几个关键问题

研究对象实际上是一个气固(可吸入颗粒物)两相流系统, 因为所研究固体颗粒的微观性 ( $\leq 10 \mu\text{m}$ ), 颗粒的驰豫时间尺度  $\tau_p$  要远远小于湍流的科尔莫戈罗夫时间尺度  $\tau_k$ , 而且, 颗粒的直径也要远远小于湍流的科尔莫戈罗夫空间尺度, 此时颗粒完全被流体湍流携带, 颗粒除与小尺度的湍流涡团相互作用, 还会受到因为周围流体分子无规则热运动所产生的布朗力的影响. 颗粒与颗粒之间的相互作用(如碰撞、凝并等)也显得非常重要, 不能忽略<sup>[1]</sup>.

文献 [2] 指出在湍流中有限大小的颗粒的平均凝并率由三个相互关联的过程决定: a. 几何碰撞率; b. 碰撞效率; c. 凝并效率. 在考虑颗粒之间相互作用的物理过程模型中, 最重要也是最基本的是考虑颗粒-颗粒几何碰撞率, 也就是颗粒之间在同一时刻轨道发生交叉的概率. 实际上, 因为颗粒与颗粒之间存在范德华力的影响, 加之颗粒

空隙之间湍流对颗粒的作用, 在理论上同一时刻轨道交叉的颗粒可能会相互滑移开来, 并不发生真正的碰撞, 所以同时需要考虑颗粒碰撞效率模型. 即使颗粒之间发生碰撞, 也可能存在弹性或非弹性碰撞、凝并、破碎, 这是一个非常复杂的过程. 一般考虑碰撞和凝并过程, 可以提出一个考虑颗粒之间各种相互作用力和颗粒流体粘性、温度等属性的凝并率模型, 认为能够实际碰撞的颗粒之间究竟碰撞还是凝并由凝并效率决定.

颗粒在碰撞过程中可能发生颗粒的破碎, 由破碎率模型描述<sup>[3]</sup>. 同时, 在烟道的高温气氛和温度下降过程中, 存在着颗粒的成核现象和冷凝现象, 分别由成核率模型和冷凝模型<sup>[4]</sup>所控制.

燃烧过程产生的可吸入颗粒物可能与气相或者其他颗粒发生表面化学反应<sup>[5]</sup>, 这些模型都是非常复杂的. 目前尚没见到合理解决方案.

实际上, 以上这些复杂的物理化学过程都将体现在颗粒的数密度变化上, 所以问题的关键可归结到发展一个颗粒的数密度变化函数, 可以先简化两相流场, 忽略掉一些次要因素, 建立起一个可扩充的数学模型, 然后由简单到复杂, 逐步把碰撞、凝并等各种过程的数学模型添加到可扩充的数学模型中去.

对于两相流模型的颗粒相模型, 要考虑颗粒受到的重力、浮力、阻力、布朗力、颗粒的碰撞冲力、虚假质量力、压力梯度力、Magnus 力、Saffman 力、Basset 力、热泳力等. 实际上, 因为具体工况的不同, 某些不重要的力可以忽略. 对于气相模型,

收稿日期: 2003-05-05.

作者简介: 赵海波(1977-), 男, 博士研究生; 武汉, 华中科技大学煤燃烧国家重点实验室(430074).

基金项目: 国家重点基础研究专项经费资助项目(2000CB211602).

则需要重点考虑颗粒对流体作用, 两相之间的耦合包括质量、动量和能量之间的双向耦合<sup>[6]</sup>。

颗粒相互作用的动力学模型是决定颗粒的碰撞冲力、颗粒碰撞之后质量、速度、能量等的关键, 需要尽可能完善地考虑<sup>[6]</sup>。

在数值解法方面, 目前存在着几种现实可行的方法, 包括有限差分法、随机轨道方法、分区法、矩方法、DNS 和 LES 等<sup>[7]</sup>。因为可以发展概率形式的颗粒几何碰撞率、物理碰撞率、凝并率、破碎率、成核率、沉积率等模型, 所以采用计算代价比较经济的 Monte-Carlo 算法求解模拟颗粒相的联合 PDF 输运方程, 联合采用欧拉方法的气相模型, 求解气粒两相流<sup>[8]</sup>。

## 2 模型框架

在现阶段能够应用到工程上的两相流模型仍然是统观模型, 细观模型因为计算条件的限制, 还只能应用于一些简单工况下的两相流模拟。考虑到微小颗粒物的碰撞凝并等行为涉及到颗粒轨道经历效应, 也考虑到颗粒的几何碰撞率、物理碰撞率和凝并率这几个概率函数, 采用欧拉-拉氏模型更便于处理一些, 该模型将流体视为连续介质, 采用传统的雷诺应力模型描述, 颗粒视为分散介质, 沿颗粒轨道跟踪计算颗粒的位置、速度、能量等参量。考虑到数值模拟的计算代价, 采用概率密度函数模型描述颗粒相。

鉴于研究对象为非等温、气相多组分、颗粒相多分散性、颗粒存在自旋等的两相流, 因此关注颗粒的位置  $x_{i,p}$ 、速度  $u_{pi}$ 、质量  $m_p$ 、温度  $T_p$ 、旋转速度  $\omega_p$  以及颗粒所见气体微团速度  $u_{gi,p}$ 、温度  $T_{g,p}$ 、组分  $Y_{s,p}$  这几个量, 类似于文献[9~11]的数学方法, 可以得到联合 PDF 输运方程如下:

$$\begin{aligned} \partial n_{pf_{gp}} / \partial t + \partial V_{pin_{pf_{gp}}} / \partial x_i = & (-\partial / \partial V_{pi}) \cdot \\ & [n_{pf_{gp}} \langle du_{pi} / dt | \Sigma \rangle] - (\partial / \partial M_p) [n_{pf_{gp}} \langle dm_p / \\ & dt | \Sigma \rangle] - (\partial / \partial V_{gi,p}) [n_{pf_{gp}} \langle du_{gi,p} / dt | \Sigma \rangle] - \\ & (\partial / \partial \tilde{\omega}_p) [n_{pf_{gp}} \langle d\omega_p / dt | \Sigma \rangle] - (\partial / \partial \Theta_p) \cdot \\ & [n_{pf_{gp}} \langle dT_p / dt | \Sigma \rangle] - (\partial / \partial \Theta_{g,p}) [n_{pf_{gp}} \langle dT_{g,p} / \\ & dt | \Sigma \rangle] - (\partial / \partial \zeta_{s,p}) [n_{pf_{gp}} \langle dY_{s,p} / dt | \Sigma \rangle] + \\ & f_{gp}(dn_p / dt) | \Sigma, \end{aligned}$$

式中,  $\Sigma = \{V_{pi}, M_p, \Theta_p, \tilde{\omega}_p, V_{gi,p}, \Theta_{g,p}, \zeta_{s,p}\}$  为随机变量  $\{u_{pi}, m_p, T_p, \omega_p, u_{gi,p}, T_{g,p}, Y_{s,p}\}$  所对应的相空间;  $n_p$  为颗粒数密度。此拉氏 PDF 输运方程模型可以采用 Monte-Carlo 法求解。

中考考虑颗粒-流体的双向耦合, 经过推导, 得到精确时平均方式的气相连续性方程、速度  $U_{gi}$  方程、温度  $T_g$  方程、气体组分方程  $Y_s$  分别如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\alpha}_g \rho_{gm}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\alpha}_g \rho_{gm} U_{gk}}{\partial x_k} = & \bar{S}; \\ \frac{\partial \bar{\alpha}_g \rho_{gm} U_{gi}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\alpha}_g \rho_{gm} U_{gk} U_{gi}}{\partial x_k} = & \\ - \frac{\partial (\bar{\alpha}_g \rho_{gm} \overline{u_{gk} u_{gi}})}{\partial x_k} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \bar{\alpha}_g \mu \left[ \frac{\partial U_{gi}}{\partial x_k} + \right. \right. & \\ \left. \left. \frac{\partial U_{gk}}{\partial x_i} \right] \right) + \bar{\alpha}_g \rho_{gm} g_i \beta \Delta T_g - \sum_l \frac{\rho_{pm,l}}{\tau_{ip,l}} (\bar{\alpha}_p l U_{gi} - & \\ \bar{\alpha}_p l U_{pi,l} + \bar{\alpha}_p l \overline{u_{gi,p,l}} + \bar{\alpha}_p l \overline{u_{gi}} - \bar{\alpha}_p l \overline{u_{pi,l}}) - & \\ \frac{\partial (\bar{\alpha}_g P)}{\partial x_i} - \sum_l (\bar{\alpha}_p l \rho_{gm} \overline{iF_{other,i,l}} + & \\ \rho_{gm,l} \bar{\alpha}_p l \overline{iF_{other,i,l}}) + \bar{S} (U_{gi} + \overline{u_{gi,p,l}}) + \overline{S u_{gi}}; & \\ \frac{\partial \bar{\alpha}_g \rho_{gm} c_g \overline{T_g}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\alpha}_g \rho_{gm} U_{gk} c_g \overline{T_g}}{\partial x_k} = & \\ - \frac{\partial \bar{\alpha}_g \rho_{gm} c_g \overline{u_{gk} T_g}}{\partial x_k} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \bar{\alpha}_g \lambda_g \frac{\partial \overline{T_g}}{\partial x_k} \right) + & \\ \bar{\alpha}_g \overline{w_{sg}} Q_{sg} - \bar{\alpha}_g Q_{rg} + \sum_l \frac{\rho_{pm,l}}{\tau_{i,l}} c_p (\bar{\alpha}_p l \overline{T_{p,l}} - & \\ \bar{\alpha}_p l \overline{T_g} - \bar{\alpha}_p l \overline{T_{g,p,l}} + \bar{\alpha}_p l \overline{T_{p,l}} - \bar{\alpha}_p l \overline{T_g}) + & \\ c_g (\overline{T_g} + \overline{T_{g,p,l}}) \bar{S} + c_g \overline{T_g S}; & \\ \frac{\partial \bar{\alpha}_g \rho_{gm} \overline{Y_s}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\alpha}_g \rho_{gm} U_{gk} \overline{Y_s}}{\partial x_k} = & \\ - \frac{\partial \bar{\alpha}_g \rho_{gm} \overline{u_{gk} Y_s}}{\partial x_k} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left( D \rho \frac{\partial \overline{Y_s}}{\partial x_k} \right) - & \\ \bar{\alpha}_g \overline{w_{sg}} + \bar{\alpha}_s \bar{S}, & \end{aligned}$$

式中,  $S$  为多相流单位体积内相变质量源的体积平均值,  $S = \sum_l \left[ n_p \frac{dm_p}{dt} + m_p \frac{dn_p}{dt} \right]$ , 下标  $l$  表示颗粒组群编号;  $\bar{\alpha}_g, \bar{\alpha}_p$  分别表示流体和颗粒所占的体积份额的平均值;  $\rho_{gm}, \rho_{pm}$  分别表示流体和颗粒材料密度;  $\overline{u_{gi,p}}, \overline{T_{g,p}}$  表示颗粒所见的平均气体速度脉动和平均气体温度脉动, 这是由于颗粒和流体微团之间的轨道差异产生的量, 通常称为漂移速度和漂移温度;  $w_{sg}, Q_{sg}, \alpha_s$  分别为流体相第  $s$  组分的反应率、反应放热和相变中的贡献分数;  $Q_{rg}$  为流体相辐射传热量;  $\tau_{ip}, \tau_i$  分别为颗粒速度脉动弛豫时间尺度和颗粒温度脉动弛豫时间尺度;  $c_g$  为流体等压比热容。为了求解, 上述方程组还需要进一步封闭, 其合理封闭将是下一步的一项重要任务。此雷诺应力方程模型采用有限差分法求解。

用 Monte Carlo 法求解颗粒-气体微团联合

PDF 输运方程,并统计得到颗粒-雷诺应力、两相速度脉动关联和颗粒所见的平均气体速度脉动等统计关联量,作为源项返回气相的输运方程,用有限差分方法求解气相输运方程,于是构成了封闭的雷诺应力-拉氏 PDF 两相湍流模型。

### 3 颗粒数密度变化函数

在 PDF-雷诺应力两相湍流模型的框架下,最关键的问题为颗粒数密度变化函数。通过参考文献[1~5,12],综合考虑颗粒的碰撞、凝并、破碎、成核、冷凝及化学反应等物理化学过程,提出颗粒数密度变化函数(GDE)如下:

$$\begin{aligned} \frac{dn_{p,l}(x,t)}{dt} = & \frac{\partial}{\partial x_k} \left( D \frac{\partial}{\partial x_k} n_{p,l}(x,t) \right) + \\ & \frac{\partial (u_{pk,l} - u_{gk} - v) n_{p,l}(x,t)}{\partial x_k} + \left\{ \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{i-1} \xi_{l,j} \cdot \right. \\ & \left. \xi_{l-j,j} \beta_{l-j,j} n_{p,l-j}(x,t) n_{p,j}(x,t) - n_{p,l}(x,t) \cdot \right. \\ & \left. \sum_{j=1}^{\infty} \xi_{l,j} \zeta_{l,j} \beta_{l,j} n_{p,j}(x,t) \right\} + \left\{ \sum_{j=1}^{\infty} \nu_{l,j} \cdot \right\} \\ & S_j n_j(x,t) - S_{ml}(x,t) + \{J(t) \delta(l)\} + \\ & \{ \beta_{l,l-1} n_{l-1}(x,t) n_{l-1}(x,t) - \beta_{l,l} n_l(x,t) \cdot \\ & n_l(x,t) \} + \{ N_{av} \omega_l \delta_{l,j} \} + R_{n_{p,l}(x,t)}, \quad (1) \end{aligned}$$

式中,  $n_{p,l}(x,t)$  表示时刻  $t$ , 位置  $x$  处单位体积内第  $l$  种粒径的颗粒的数密度分布;  $l, j$  表示的是按粒径划分的颗粒群的标号;  $\beta_{l,j}$ ,  $\xi_{l,j}$ ,  $\zeta_{l,j}$  分别为颗粒的几何碰撞率、碰撞率、凝并率;  $u$  为气流速度;  $D$  为 Fick 颗粒扩散系数;  $v$  为由外部作用力如重力引起的颗粒迁移速度;  $S_l$  为颗粒破碎率;  $n_l$  为从第  $l$  种粒径的颗粒中因为破碎而产生的平均颗粒数目;  $\nu_{l,j}$  为从第  $j$  种粒径的颗粒中因为破碎而产生的颗粒的粒径分布函数;  $J(t)$  为成核率;  $N_{av}$ ,  $\omega$  分别为平均颗粒数和化学反应速率。需要发展模型来描述这些过程。

方程(1)右边第1项代表扩散项,第2项代表外力场和颗粒轨道滑移导致的颗粒产生源项,右边剩下部分为各种物理化学过程导致的颗粒产生源项,其中第3项代表凝并,第4项代表破碎,第5项代表成核,第6项代表冷凝,第7项代表化学反应,第8项代表未考虑的其他过程导致的颗粒产生源项,如热泳、电泳、光泳等产生的颗粒数密度变化。

为了相对简化问题,通过分析可以作出一些假设,比如可以暂时不考虑颗粒的化学过程;颗粒的物理过程当中,只考虑颗粒的两两碰撞,不考虑

碰撞破碎;认为碰撞率和凝并率为常数等。

在以上构建的模型框架体系之下,进行数值模拟,分析模拟结果,可望揭示燃煤锅炉 PM 的湍流经历,从而实现了对燃煤锅炉可吸入颗粒物的生成与生长机制的描述。但是,本文仅仅是本项研究的一个起点,仍然存在大量的问题需要解决,如双向耦合,颗粒的各个物理化学过程模型,数值解法等。另外,统观模型模拟的结果因为忽略了小尺度时间和空间尺度信息,必然存在着模拟误差,鉴于可吸入颗粒物的微观性,下阶段应该发展 DNS/LES 等细观模型来进行模拟。

### 参 考 文 献

- [1] Alipchenkov V M, Zaichik L I. Particle collision rate in turbulent flow. *Fluid Dynamics*, 2001, 36(4): 608~618
- [2] Wang L P, Wexler A S, Zhou Y. Statistical mechanical descriptions of turbulent coagulation. *Phys. Fluids*, 1998, 10(10): 2647~2651
- [3] Stephen J, Harris M, Matti Maricq. The role of fragmentation in defining the signature size distribution of diesel soot. *Journal of Aerosol Science*, 2002, 33: 935~942
- [4] Kim D, Gautam M, Gera D. Parametric studies on the formation of diesel particulate matter via nucleation and coagulation modes. *Aerosol Science*, 2002, 33: 1609~1621
- [5] Lee B W, Jeong J I, Hwang J Y, et al. Analysis of growth of non-spherical silica particles in a counterflow diffusion flame considering chemical reactions, coagulation and coalescence. *Aerosol Science*, 2001, 32: 165~185
- [6] Lun C K K. Numerical simulation of dilute turbulent gas-solid flows. *International Journal of Multiphase Flow*, 2000, 26: 1707~1736
- [7] Barrett J C, Webb N A. A Comparison of some approximate methods for solving the aerosol general dynamic equation. *J. Aerosol Sci.*, 1998, 29(1/2): 31~39
- [8] Balthasar M, Mauss F, Knobel A, et al. Detailed modeling of soot formation in a partially stirred plug flow reactor. *Combustion and Flame*, 2002, 128: 395~409
- [9] 柳朝晖. 湍流气粒两相流的 SOM-PDF 输运方程模型和 PDPA 实验研究: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学能源与动力工程学院, 2002.
- [10] 赵海波, 柳朝晖, 郑楚光等. 湍流两相流的脉动速度联合 PDF 输运方程. *力学学报*, 2002, 34(5): 675~681
- [11] 赵海波, 柳朝晖, 郑楚光等. 颗粒-气体脉动速度联合 PDF 输运方程的封闭. *华中科技大学学报(自然科学*

版), 2003, 31(4): 58~ 60

flames. Fuel Processing Technology, 2000, 65~ 66: 439~ 457

[12] Lockwood F C, Yousif S. A model for the particulate matter enrichment with toxic metals in solid fuel

## Microscale hydromechanical model of particulate matter originating from coal-combustion boiler

Zhao Haibo Zheng Chuang Liu Zhaohui Chen Yinmi

**Abstract:** A framework of two phase turbulent model of particulate matter (PM) in health and flue of coal-combustion boiler was formed. Such physical and chemical process as particle collision, coagulation, coalescence, nucleation, break-up, chemical reactions, and so on were included. The idea and method of the model forming were put forward, the emphases and key point were listed out, the number density function of particle was given. These will provided a basis for flowing simulation of PM.

**Key words:** coal combustion; particulate matter; probability density function; Reynolds stress model; particle number density function

**Zhao Haibo** Doctoral Candidate; State Key Lab. of Coal Combustion, Huazhong Univ. of Sci. & Tech., Wuhan 430074, China.

### 我校水液压技术研究取得重大进展

水液压技术是当前国际上液压技术一个十分重要的发展方向,可满足现代社会与环境友善、与产品相容、不燃烧、安全生产以及清洁卫生等多方面的要求.华中科技大学(原华中理工大学)自上世纪 80 年代开始就致力于水介质液压传动技术的研究,取得了一系列重大进展.

2003 年 9 月 15~ 17 日,教育部与有关主管部门在武汉联合主持召开了“海水液压动力系统”及“新型高压容积式海(淡)水泵”样机及成果鉴定会.鉴定委员会认为:华中科技大学在水液压技术的研究方面取得了一系列有创造性的研究成果,这些研究成果为国内首创,达到了国际先进水平,对推动和促进我国水液压技术的发展具有重大的意义;在国内率先提出了海(淡)水液压元件关键摩擦副的设计理论和设计方法、正确的选材原则以及摩擦副对偶材料的优化配对方案;首次研制了海(淡)水轴向柱塞泵(马达)关键摩擦副模拟试验台、海(淡)水液压阀口流动特性试验台以及海(淡)水液压元件综合性能试验台;研制出工作压力 14MPa、流量 40L/min 的轴向柱塞式海(淡)水液压泵、海(淡)水调速阀、海(淡)水压力控制阀、海(淡)水液压马达、海(淡)水液压缸等产品,其技术性能达到了国际先进水平,填补了国内空白.这些水液压元件在军用和民用部门推广应用必将产生巨大的军事、经济和社会效益.