

# 锅炉一次风通过节流孔板时的数值模拟

(上海电力学院, 上海 200090) 潘卫国 李扬 郑莆燕

(同济大学) 魏敦崧

(浙江大学) 池作和 岑可法

**摘要:** 本文对锅炉燃烧系统水平一次风管道内装了可调节节流孔板后的空气-煤粉多相流动情况进行了数值模拟, 通过数值模拟发现: 采用  $k-\epsilon$  双方程模型描述气相湍流模型, 应用 SIMPLE 算法计算气相速度场, 然后采用 FSRT 模型, Lagrange 法计算颗粒场特性, 这是一种计算管内气固多相流动的行之有效的数值模拟的方法。

**关键词:** 气固多相流动; 数值模拟

中图分类号: O242.1+TK223.2 文献标识码: A

## 1 引言

气固多相流广泛存在于能源、化工和冶金等行业, 电站锅炉一次风管内煤粉与空气的混合物是典型的气固多相流动, 对其进行研究有着重要的理论意义和工程应用价值。

在气固多相流动研究过程中, 早期主要靠实验手段<sup>[1,2]</sup>, 然后随着计算机技术和计算技术的不断发展, 多相流动进入一个新领域, 数值模拟开始部分替代实验, 各种计算模型不断涌现, 先后出现了湍流粘性模型、拟流体模型以及 Spalding 等人提出的现在被广泛使用的  $k-\epsilon$  双方程模型。另外, 对于管壁附近的流动, 先后有低  $Re$  数的  $k-\epsilon$  双方程模型、壁面函数法以及 Gibson M M 和 Dafa'Alla A A<sup>[3]</sup> 等人提出的  $q-\xi$  模型, 而且他们各自分别对不同的流动状况进行了数值模拟, 取得了令人满意的结果。虽然流动模型是多样的, 但由理论上综合, 不外乎分成四种模型, 即: 无滑移模型、小滑移模型和滑移-扩散模型、颗粒群轨道模型。其中无滑移模型、小滑移模型和滑移-扩散模型都把颗粒相当作连续介质, 其一般采用双流体模型(Two-Fluid Model)计算; 颗粒轨道模型求解一般采用 Crowe<sup>[4]</sup> 提出的单元内粒源法(PSCI法), 该算法是在 Euler 坐标系中考察流体相的运动,

而在 Lagrange 坐标系中研究颗粒群的运动。

尽管双流体模型和轨道模型被广泛采用, 且有许多好的结果, 但两者还不能很好地反映实际情况, 尤其象不同颗粒尺寸下产生的不同湍流扩散效果等问题。为此, 有些学者在 PSIC 方法的基础上, 提出了 FSRT 模型, 并用此模型计算了气固两相射流问题, 结果更接近于实际工况<sup>[5]</sup>。本文将采用相应的数学模型通过数值模拟的方法对气粉混合物流过带有不同节流开度孔板的一次风管时的流动情况进行研究。

## 2 气固多相流动数值模拟的基本方法

现在对 Navier-Stokes 方程组的求解一般使用的方法是压力修正法中的 SIMPLE 算法, 即在单相流动中, 利用连续性方程来对压力进行修正, 从而得出速度的校正值和新的流场分布; 然后对于气固多相流动, 利用前面算出的速度分布、相应的多相流体流动模型和颗粒与壁面碰撞反弹模型, 用 Lagrange 法算出颗粒场的运动特性, 并进行气相场与固相场的藕合计算。

本文采用在工程上被广泛应用的湍流模型  $k-\epsilon$  双方程模型, 其封闭在直角坐标系下的偏微分方程组可写成如下通用形式:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x\phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_y\phi) = \\ \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y}) + S_\phi \end{aligned} \quad (1)$$

其中  $\phi$ ,  $\Gamma_\phi$ ,  $S_\phi$  各项的意义见参考文献[6]。

采用考虑颗粒群湍流扩散的脉动频谱随机颗粒

收稿日期: 1999-03-01; 修订日期: 1999-04-26

基金项目: 上海市青年科技“启明星”计划和高等学校科学技术发展基金资助项目(98QF14040),

作者简介: 潘卫国(1967-), 男, 江苏启东人, 博士, 上海电力学院副教授。

轨道模型来模拟气固两相流动, 采用由 Tabakoff 等人由大量试验得出的碰撞—反弹恢复比经验关系式 (Beacher & Tabakoff, 1982) 来模拟煤粉颗粒与壁面的碰撞:

$$\alpha_2 = \text{ctg}^{-1} \left[ \left( \frac{0.95 + 0.0005\alpha_1}{1.0 - 0.02108\alpha_1 + 0.0001417\alpha_1^2} \right) \text{ctg}\alpha_1 \right] \quad (2)$$

$$V_{p2}/V_{p1} = (1.0 - 0.02108\alpha_1 + 0.0001417\alpha_1^2) \sqrt{\frac{1 + \text{ctg}^2\alpha_2}{1 + \text{ctg}^2\alpha_1}} \quad (3)$$

其中  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  分别为碰撞角和反弹角;  $V_{p1}$  和  $V_{p2}$  分别为颗粒碰撞前后的速度。

### 3 对带有可调节流孔板的水平直管中空气—煤粉混合气流的数值模拟

#### 3.1 数值模拟内容和条件

在采用四角切圆燃烧方式的电站锅炉燃烧系统中, 为了保证锅炉炉内四角切圆不发生偏斜, 以便获得一个稳定的燃烧动力工况, 往往在一次风水平管道上装有用于均衡各管道内流量和阻力特性的可调缩孔。为此首先利用  $k-\epsilon$  双方程模型, 基于 SIMPLE 算法的有限差分方法计算带有不同节流度月牙型孔

板的水平管内气相速度场, 然后用 FSRT 模型拉格朗日方法跟踪颗粒运动模拟水平管截面内颗粒运动轨迹, 得出相应的浓度场, 最后分析其主要影响因素和原因。

为了便于数值计算, 对于带有阻力件的直管内气固多相流动情况作如下假定:

- (1) 在颗粒所受的各作用力中, 在紊流核心区只考虑气流和颗粒相相对运动的作用力以及颗粒重力; 在边界层附近还计及颗粒所受的 Saffman 升力;
- (2) 气固两相是稀相的, 忽略颗粒间的相互作用;
- (3) 颗粒相在进入直管前呈均匀分散的悬浮流动状态, 且各处颗粒分布服从同一规律。

数值计算原始参数为: 一次风管径 300 mm, 节流孔板的节流度 1/4 和 1/2, 煤粉颗粒直径 20 和 50  $\mu\text{m}$ , 煤粉密度为 2500  $\text{kg}/\text{m}^3$ , 气流速度 20  $\text{m}/\text{s}$ 。

#### 3.2 数值模拟结果及分析

(1) 纯气相流过带有可调节流孔板时直管内流场模拟结果及分析

从数值模拟的结果 (图 1, 2) 可以看出, 在水平管中加入可调孔板后管内流场发生了明显的变化, 节流孔板后产生了明显的回流区, 并且随节流孔板的开度的增加而增加, 回流区大小基本上是节流孔

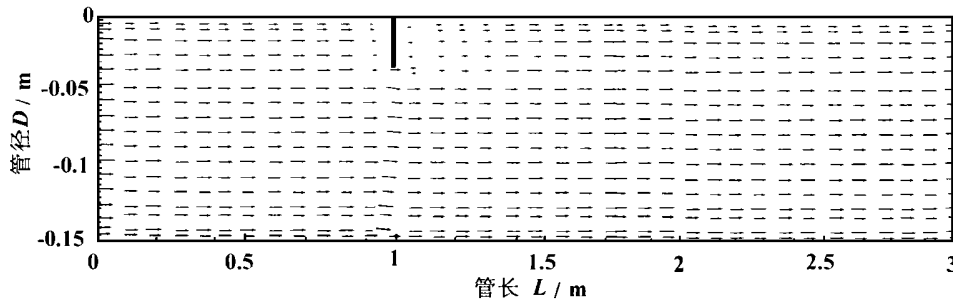


图 1 纯空气以 20  $\text{m}/\text{s}$  速度流过带有 1/4 节流度孔板时管内流动情况

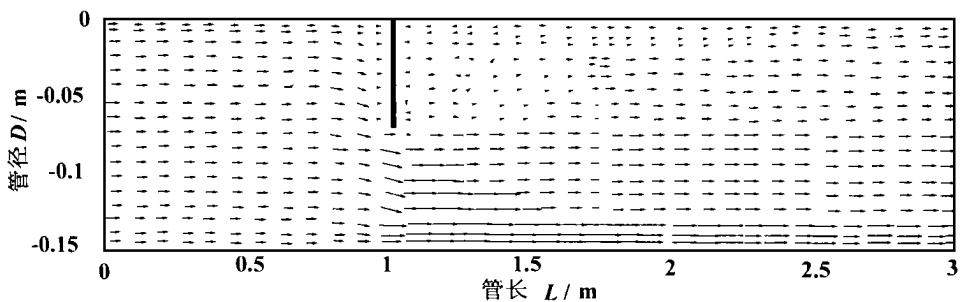


图 2 纯空气以 20  $\text{m}/\text{s}$  速度流过带有 1/2 节流度孔板时管内流动情况

板高度的 10 ~ 15 倍; 同时, 由计算结果 (图 3) 可知, 加了节流孔板后, 管道进出口压损随节流度的增加而呈指数增长。

(2) 颗粒相在带有可调节流孔板的直管内运动情况

可调式节流孔板的开度不仅对气流场产生影响, 同时对颗粒场也产生影响。由不同直径的颗粒流过带有相同节流度节流孔板的水平直管内颗粒流场模拟结果看 (图 4~6), 颗粒群经节流孔板后在水平管内的沉降

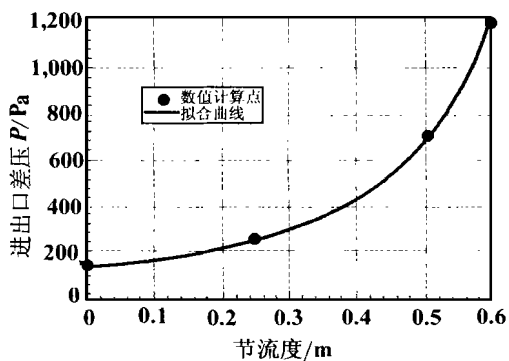


图3 纯空气流过不同节流开度孔板时管道进出口压差模拟结果 (管长  $L=6\text{ m}$ , 流速  $v=20\text{ m/s}$ )

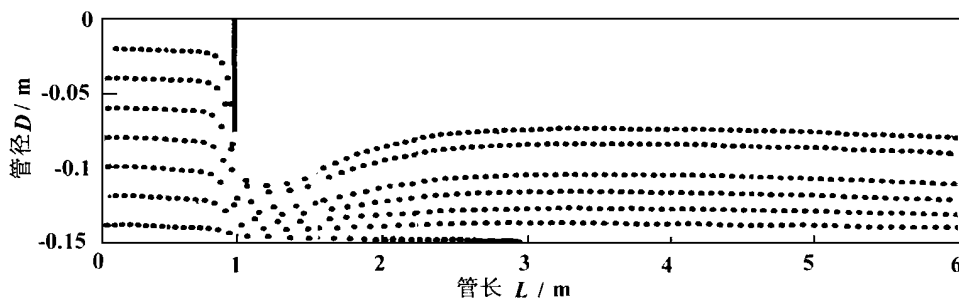


图4 直径为  $20\text{ }\mu\text{m}$  的颗粒在带有节流度为  $1/2$  孔板的管内运动情况

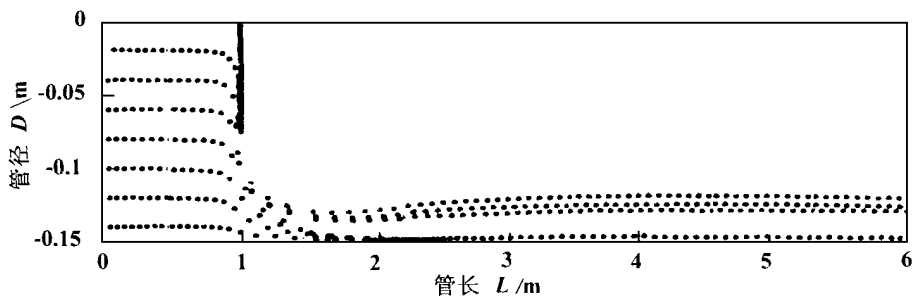


图5 直径为  $50\text{ }\mu\text{m}$  的颗粒在带有节流度为  $1/2$  孔板的管内运动情况

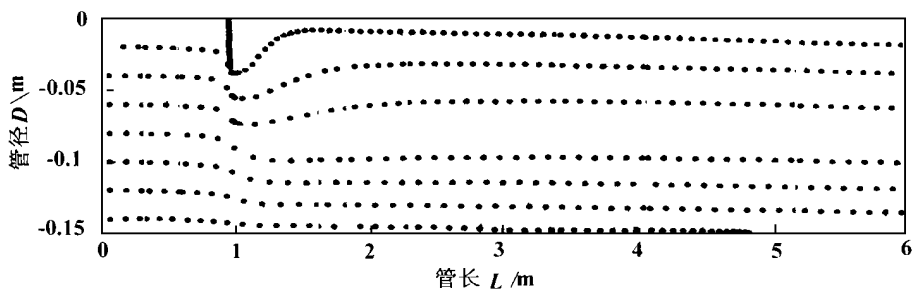


图6 直径为  $50\text{ }\mu\text{m}$  的颗粒在带有节流度为  $1/4$  孔板的管内运动情况

同直径的颗粒流过带有不同节流开度节流孔板的水平直管时的情况,由数值模拟结果(图 4、5)可知,颗粒群沉降随节流度的增加而呈明显增加趋势。

### 4 结论

本文用  $k-\epsilon$  双方程模型,在直角坐标系里描述了带有可调缩孔的直管内气相场湍流流动,用 FS-RT 模型和壁面碰撞反弹模型描述了其颗粒相运动,通过相互耦合计算得出了相应的数值模拟结果。具体结论如下:

带有不同节流度的节流孔板对水平管内气固两相流场有明显的影响,节流孔板后回流区的大小是节流孔板高度的  $10 \sim 15$  倍;安装节流孔板后直管进出口两端压差明显增加,并随节流度的增加呈指数关系;颗粒相绕流孔板后其沉降趋势增加,并随节流度、颗粒直径的增加其沉降趋势越明显。

### 参考文献

- [1] Metha N C, Smith J M, et al. Pressure drop in air-solid flow system. *Inc. and Engng. Chem.*, 1957, 49(6).
- [2] Cham S M, Rempl D, et al. A one-dimension model of plug flow pneumatic conveying. *The Can. J. Chem. Engng.*, 1983, 60.
- [3] Gibson M M, Dafa Ata A A. Two-equation model for turbulent wall flow. *ALAAJ.*, 1995, 33(8)
- [4] Growe C T, Sharma M P et al. The particle source in cell model for gas-droplet flows. *ASME J. Fluid Eng.*, 1997, 99(12).
- [5] 岑可法,樊建人等.气固两相射流的数值模拟. *浙江大学学报*, 1987, 12(6).
- [6] 潘卫国.管内气固多相流动、传热及检测的试验研究与数值模拟.[博士学位论文].浙江大学, 1997.

(何静芳 编辑)

有增强趋势,并且随颗粒的直径增加而增加;对于相

ent will be beneficial for decreasing transverse flow losses. The analysis of vorticity isolines shows that the horse-shoe vortex and passage vortex measure and strength in the positively-curved blades have been found to be smaller than those in the straight blades. Furthermore, from the distribution picture of energy loss factors one can see that the use of positively-curved blades can bring about a decrease in energy loss of a cascade inner-flow field.

**Key words:** positively-curved blade, energy loss, secondary flow

基于过程系统工程理论的热力系统性能模拟 = **Thermal System Performance Simulation Based on a Process System Engineering Theory** [刊, 汉] / Ding Yanjun, Wang Peihong, Lu Zhengzhong, et al (Southeastern University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(2). — 153 ~ 155

Based on the introduction of a process system engineering (PSE) theory this paper sets up a process unitary model and a system model for a power plant steam turbine thermodynamic system through the use of a sequential-module method of the PSE theory. A performance simulation has been conducted using a loop fracture and convergence algorithm, and the accuracy of the above-cited model verified. Finally, analyzed and discussed is the feasibility and importance of applying PSE theory for the power plant performance simulation, analysis, optimization and diagnosis. **Key words:** process system engineering, sequential-module method, thermodynamic system, performance simulation

浅析《统一建筑法规》地震荷载的计算与应用 = **A Preliminary Analysis of Seismic Load Calculation on the Basis of “Uniform Building Code of 1997” and its Practical Use** [刊, 汉] / Wang Jianhua, Yue Xue, Zhou Chengli (Harbin Boiler Co. Ltd.) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(2). — 156 ~ 159

This paper describes a seismic load calculation method as set forth in “Uniform Building Code of 1997”. The selection of various factors in the seismic load calculation is discussed and practical engineering-calculation examples given. **Key words:** seismic-proof design, basic seismic design, sole shear

过热器管束断裂分析 = **Superheater Tube-Bank Fracture Analysis** [刊, 汉] Li Ming, Wang Yanbin (Harbin No.703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(2). — 160 ~ 161

With the help of a finite-element method a thermal stress calculation and analysis was performed of a heat recovery boiler superheater tube-bank and an outer tube network system. It is noted that during a boiler start-up the superheater tube-bank is subjected to a most unfavorable load-bearing condition. Moreover, the layout rigidity of the outer tube network can influence the service life and safe operation of the superheater tube bank. **Key words:** superheater, thermal stress, outer tube network, rigidity

锅炉一次风通过节流孔板时的数值模拟 = **Numerical Simulation of a Boiler Primary-Air Flow through a Throttle Orifice-plate** [刊, 汉] / Pan Weiguo, Shen Feng, Zheng Puyan, et al (Shanghai Electric Power Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(2). — 162 ~ 164

A numerical simulation was conducted of the air and pulverized-coal multi-phase flow pattern after an adjustable throttle orifice-plate was installed in the pulverized-coal horizontal feed-pipe of a boiler combustion system. It has been found through the above-mentioned simulation that an effective numerical simulation method consists in the following: a gas-phase turbulent flow model is first described by the use of a  $K-\epsilon$  dual-equation model and with the help of SIMPLE algorithm the gas-phase speed field can be calculated. Then, a FSRT model and Lagrange method are employed to calculate the particle field characteristics. **Key words:** gas-solid multiple-phase flow, numerical simulation

利用一维热膜探针对旋流燃烧器出口冷态旋流流场的测量 = **Measurements of Cold-state Rotating Flow**