

环栅式动力除尘器的两相流数值模拟

林 枫¹, 林 龙¹, 胡启迪², 张石磊³

(1. 哈尔滨·第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036; 2 深圳美视电力工业有限公司, 广东 深圳 518000; 3 吉林石油集团有限公司热电厂, 吉林 138000)

摘 要: 为了开发、设计高性能产品, 针对环栅式动力除尘器进行了二维两相流数值模拟。模拟中使用了颗粒轨道模型。采用 $\kappa-\epsilon$ 模型对气相湍流进行模拟, 用 Stochas 模型描述颗粒相的湍流扩散。对灰尘颗粒及气体的流动情况以及除尘器的特性进行了分析研究。

关 键 词: 两相流; 数值模拟; 除尘; 空气净化

中图分类号: O359 文献标识码: A

1 前 言

目前工业上应用的除尘器中, 传统的机械式除尘器虽具有结构简单、造价低、维护方便等优点, 但存在着易磨损及效率低等缺点; 过滤式除尘器虽具有很高的效率, 但其阻力较大, 运行费用高, 且需经常更换滤袋, 维护费用较高; 湿式除尘器同样具有较高的效率, 但其占地面积大、能耗高且会产生二次污水; 电除尘器同样具有除尘效率高的特点, 且能耗较低, 但其主要缺点是耗钢材多, 占地面积大, 初投资高。

近期国外专利产品中出现了一种“空气动力除尘器”, 具有机械式除尘器结构简单、造价低、维护方便等优点, 同时还具有较高的除尘效率, 而且运行阻力小, 能耗性能得到很大改善。

环栅式动力除尘器是参考国外先进技术, 运用先进的现代计算流体力学的计算方法, 经过大量的两相流理论研究和实验研究, 在传统的惯性除尘器基础上开发出了“环栅式动力除尘器”。目前该产品已获国家专利。

为了能够设计出性能优异的产品, 对灰尘颗粒及气体在除尘器中的运动过程进行数值模拟是必备手段之一, 模拟中涉及到了固体颗粒在湍流气流中运动情况的计算分析。

研究气-粒两相流动, 一般采用如下模型和方法: (1) 欧拉-拉格朗日模型或称颗粒轨道模型。(2) 两流体模型或称欧拉方法。这两种模型到目前

为止都已得到广泛地应用, 且各有其优缺点。欧拉-拉格朗日方法因为能直接给出较多的颗粒相信息而受到广泛关注; 欧拉方法则因其计算上的经济性及其在某些情况下能给出较好的预报结果而受到重视。然而在某些情况下, 如颗粒相的颗粒尺寸沿轨道发生变化以至于单一分布颗粒尺寸假设不合适时, 欧拉-拉格朗日方法应视为首选。为了获得更多的颗粒相信息, 本文采用了欧拉-拉格朗日方法。

采用欧拉-拉格朗日方法进行气粒两相流数值分析时, 计算精度不仅依赖于对连续相的成功模拟, 而且还依赖于对颗粒相的成功模拟。通常对气相采用 $\kappa-\epsilon$ 模型进行封闭, 同时考虑颗粒相对气相湍流的影响。X-Q. Chen 等采用了雷诺应力模型(RST)来描述气相湍流, 并进一步对 $\kappa-\epsilon$ 模型和雷诺应力模型进行了比较, 结果表明 RST 模型仅在描述流动的各向异性方面优于 $\kappa-\epsilon$ 模型, 对其它特性的模拟两者并无明显差别。考虑颗粒相受湍流的影响时, 广泛采用的是 Stochas 湍流扩散模型; 早期的模型是将气相瞬时速度考虑到颗粒运动方程中, 脉动的气相速度采用随机取样法获得。近年来发展的时间相关扩散模型则能更好地描述各向异性效应给出更为精确的结果。

2 物理数学模型

2.1 物理模型

环栅式动力除尘器的结构及系统组成如图 1 所示: 含有粉尘的气流由除尘器入口进入导流罩, 流经内部环栅, 沿气流方向环栅的直径渐缩, 灰尘颗粒在气动力、惯性力及与环栅碰撞力的综合作用下沿环栅内壁向环栅锥顶运动, 随一定量气体一起由连接锥顶的排尘管排入集尘器。气体则由环与环之间的空隙流到环栅的外侧并由除尘器出口排出。

环栅式动力除尘器其内部的流动理论上可视为

轴对称流动, 从减少计算量和提高计算精度角度出发, 采用二维模型进行计算是合理的。图 2 为二维物理模型。

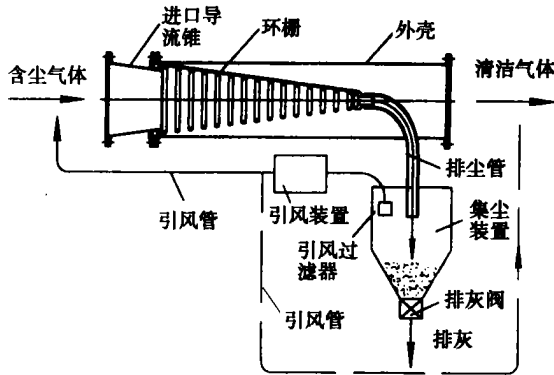
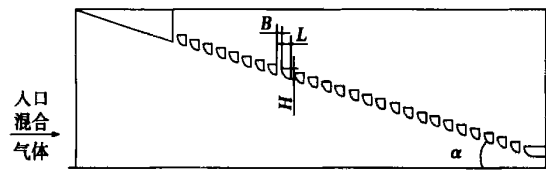


图 1 环栅式动力除尘器系统图



B-栅距; L-环高; H-环厚; α -锥角

图 2 环栅式动力除尘器二维模型

2.2 数学模型

对气相采用湍流时均方程组, 并用 κ - ϵ 模型封闭。二维稳态 Euler 型质量、动量及能量方程组可写为:

$$\frac{\partial \rho v_j}{\partial x_j} = S_m^p \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j \cdot v_i) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\mu \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \rho v_i' v_j'] + S_{v_i}^p \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho v_j H}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} [\frac{\mu}{Sc} \frac{\partial Y}{\partial x_j} - v_j Y'] + S_m^p \quad (3)$$

根据 κ - ϵ 模型, 并考虑颗粒相所产生的源相, 湍流动能 k 及其耗散率 ϵ 的方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} (\frac{\mu_e}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_i}) + G_k - \rho \epsilon + S_k^p \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} (\frac{\mu_e}{\sigma_\epsilon} \cdot \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i}) + \frac{\epsilon}{k} (C_1 G_k - C_2 \rho \epsilon) \quad (5)$$

式中: $G_k = \mu T (\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}) \frac{\partial v_i}{\partial x_i}$

$$\mu_e = \mu + \mu T \quad \mu T = C_\mu \sigma k^2 / \epsilon$$

式中各常数见表 1。对于所有壁面处, 均采用壁面函

数法进行处理, 使得边界处 κ - ϵ 模型能得以应用。

表 1 κ - ϵ 模型常数取值

σ_k	C_μ	σ_ϵ	C_1	C_2
1.0	0.09	1.314	1.44	1.92

颗粒相计算通过在计算区域内跟踪颗粒簇来进行。每一颗粒簇代表具有相同尺寸和初始条件的一组颗粒。颗粒簇的数目应足够大, 以保证 Stochastic 模型有效性。在本文所研究的问题中, 颗粒相在两相中所占的体积百分数约在 10^{-5} 量级, Lavieville 等的研究表明 (以固体颗粒为例) 对于体积百分含量在 10^{-3} 量级的情况, 内部颗粒的相互碰撞对两相流动无显著影响。当气相和颗粒相密度之比非常小时, 作用在颗粒上力除阻力之外均可忽略。在上述条件下, 颗粒运动方程可以写为:

$$\frac{d v_{pi}}{dt} = \frac{v_i - v_{pi}}{\tau \rho} + F_{pi} \quad (6)$$

$$\tau_p = \frac{\rho_p D_p^2}{C_D \times 18} \quad (7)$$

$$C_D = 1 + 0.15 Re_p^{0.687} \quad (0 < Re < 1000)$$

$$Re_p = \frac{\rho \sqrt{(v_{pi} - v_i)^2} D_p}{\mu} \quad (8)$$

颗粒轨迹方程:

$$\frac{dx_{pi}}{d\tau} = u_{pi} \quad (9)$$

颗粒的湍流扩散:

在式(7)中, 气相瞬时速度由两部分组成:

$$v_i = v_i + v_i' \quad (10)$$

v_i' 为脉动速度, 由 Gaussian PDF 统计分布规律

随机取样为 $v_i' = \epsilon \sqrt{\frac{2}{3}} k$, ϵ 为随机数。颗粒与随机涡的相互作用时间取为 $\tau = \min(\tau_{rk}, \tau T)$ 。

颗粒相的初始条件包括颗粒的尺寸分布、初始速度分布等。从本文的研究目的出发, 对颗粒相采用了单一尺寸分布及速度分布。

2.3 数值求解方法

采用欧拉-拉格朗日方法进行两相流计算时, 对气相流场可用类似于单相流流场的算法求解。本文采用 Simple 算法求解气相流场。求解过程中采用了欠松弛因子。颗粒相流场的计算通过在计算区域内跟踪颗粒簇来实现。具体求解步骤是:

(1) 计算 Lagrangian 时间步长 dt 。时间步长的确定应保证颗粒不跳过每一计算单元, 在边界处或

内物体表面, 通过减小时间步长而使颗粒置于单元边界上。

(2) 移动颗粒簇。

(3) 在新位置上计算颗粒物性及相关参数(速度、温度等)。

(4) 计算两相之间的源相。

进行两相流场求解时, 由于两相之间的相互耦合, 需用迭代的方法进行求解。

2.4 计算结果及分析

图 3 为环栅处局部流场情况, 图 4 为灰尘颗粒在环栅处的流动轨迹。从中可清楚地看到该除尘器的除尘机理。

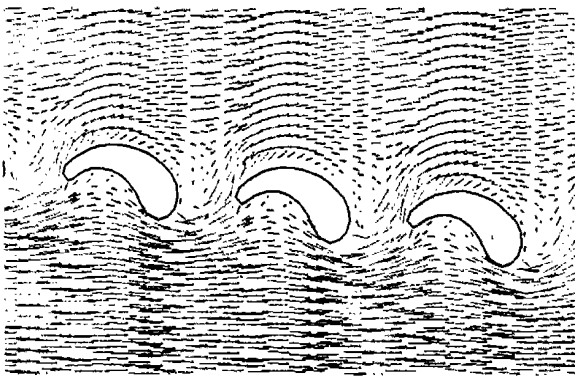


图 3 环栅处的流场

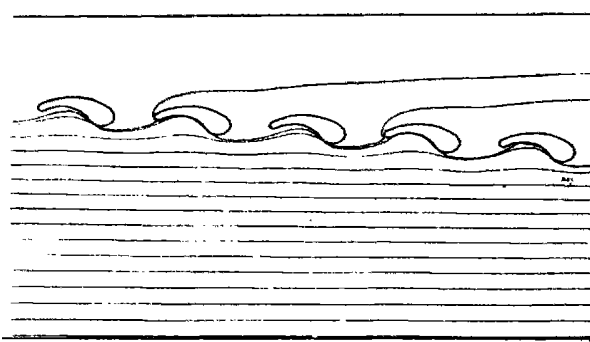


图 4 灰尘颗粒的流动轨迹

图 5 为保持除尘器其它几何参数及入口气体流速不变的情况下, 环栅的锥角 α 变化时, 除尘效率的变化情况。从图中可见, 对于具有一定型线的环栅, 存在一最佳锥角, 在此锥角下效率最佳。

图 6 为环栅式除尘器内, 气流阻力与某种灰尘除尘效率的对应关系。从中可以看出, 高阻力对应高除尘效率。因为, 高阻力对应高气体流速, 而此时由于高速气流的携带作用, 颗粒相速度增加, 惯性增强, 除尘效率提高。

经过理论计算表明: 环栅式除尘器的性能与环栅的几何尺寸(如图 2 中的 B 、 L 、 H 、 α 等参数), 环栅型线, 灰尘的粒度、比重等参数的有密切关系。图 7 为保持除尘器入口气体流速、环栅型线及锥角 α 不变, 环栅节距 D 变化时, 除尘器效率的变化情况。可见随着 D 值减小, 除尘效率有所提高, 但 D 值减小到一定程度时, 效率提高幅度不明显, 此时进一步减小 D 值, 将明显使得除尘的造价提高、阻力增大。而当 D 值过大时, 除尘效率下降较快。

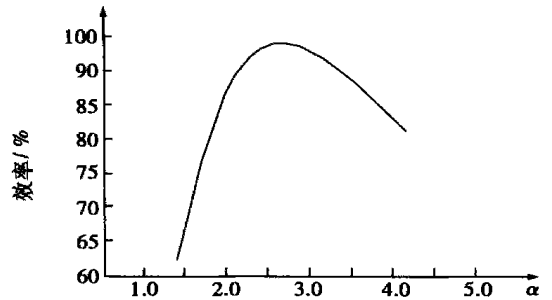


图 5 锥角与效率变化关系

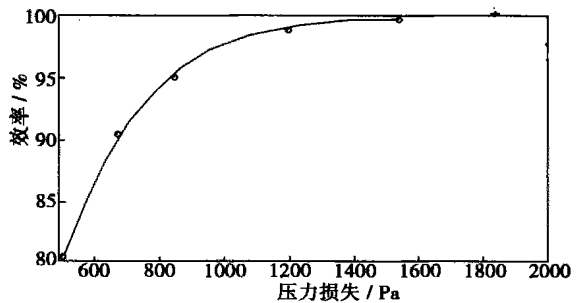


图 6 阻力与效率变化关系

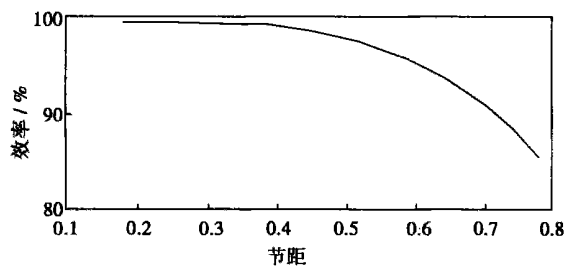


图 7 节距 D 对除尘效率的影响

理论计算还表明, 灰尘的粒度、密度对除尘的影响较大, 粒度增加后密度增大将使得颗粒的惯性增强、除尘效率提高, 而其中粒度变化对除尘效率的影响大于密度变化前产生的影响。如图 8 所示。

(下转第 190 页)

率的跟踪速度较快,并使机前压力的变化较小。另外,由于采用了预见前馈补偿(预见信息是作为前馈补偿使用的,因此不影响整个系统的稳定性),使锅炉燃率提前动作,有效地补偿了锅炉的延迟和惯性;同时使汽轮机调门提前动作,充分利用了机组的内部蓄热,从而大大提高火电机组的负荷跟踪性能。与现有的火电单元机组负荷控制方法相比,该方法在负荷跟踪性能上具有明显的优点。

5 结 论

多模型鲁棒负荷预见控制方法通过对负荷区间进行模糊划分,然后在每个模糊子区间使用鲁棒预见控制方法设计控制器。由于每个鲁棒预见控制器都可以兼顾标称模型及其附近的多个线性模型,从而有效地减少了控制器的数量,降低了多模型方法中模型选择问题的难度。通过仿真研究可以看出,

该方法能够使负荷系统在全局范围内都获得良好的跟踪性能。

参考文献:

[1] 王东风, 翟永杰. 多模型自适应广义控制及其在电厂汽温系统中的应用仿真[J]. 工业仪表与自动化装置, 2001(1): 34- 39.
 [2] 袁向阳, 施颂椒. 一种多模型自校正控制算法及其在醋酸蒸发器液位控制中的应用[J]. 信息与控制, 2000, 29(2): 187- 192.
 [3] 俞立. 不确定离散系统的最优保性能控制[J]. 控制理论与应用, 1999, 16(5): 639- 642.
 [4] 薛安克, 孙优贤. 不确定线性系统保代价控制的鲁棒分析[J]. 自动化学报, 2001, 27(3): 346- 352.
 [5] 李益国, 沈 炯, 吕震中. 不确定离散系统最优保性能控制的改进[J]. 东南大学学报, 2002 32(3): 424- 426.
 [6] 吕跃飞, 黎中伟. 航空发动机多变量 PI 型鲁棒控制器[J]. 航空学报, 1997, 18(4): 412- 416.
 [7] 胡克定, 汪自勤, 钱钟韩. 单元机组协调控制的一种频域设计方法[J]. 东南大学学报, 1989 19(1): 69- 77.

(渠 源 编辑)

(上接第 136 页)

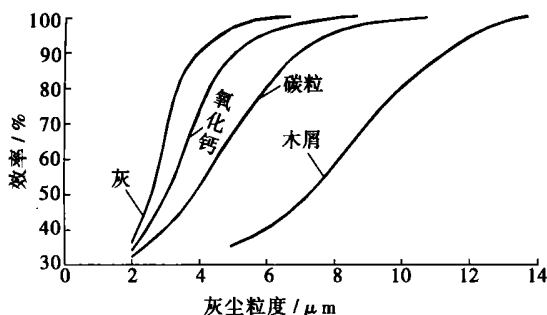


图 8 颗粒密度、粒径与除尘效率变化关系

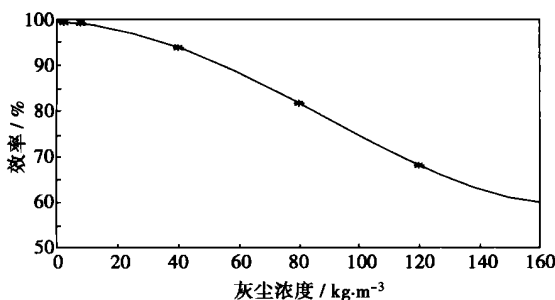


图 9 灰尘浓度与除尘效率变化关系

图 9 为气流中含尘浓度对除尘效率的影响,当含尘浓度较大时,由于在环栅处空气对灰尘颗粒的轴向携带能力减弱,颗粒惯性减弱,使得除尘效率下降。

我们在理论计算的基础上,开发出了阻力较小、除尘效率高的 CRM-250A 型环栅式动力除尘器。

实验室的测定结果表明,该型除尘器具有理想的除尘效果。实验用灰包括燃烧热电厂烟道粉尘,玉米粉及卷烟厂灰等。

3 结 语

环栅式动力除尘器作为一种惯性除尘器,在对其进行结构参数的优化设计后,可具有较高的除尘效率,同时具有结构简单、阻力低的优点。运用现代流体力学计算技术对其进行两相流数值模拟,是进行优化设计的必备和有效手段。

参考文献:

[1] FASHOLA A ADENIJI, CHEN C P. Modeling of confined turbulent fluid particle flows using eulerian and lagrangian schemes[J]. Int J Heat Mass Transfer. 1990, 33(4): 691- 701.
 [2] 周力行. 气粒两相流动和燃烧的理论及数值模拟[M]. 北京: 科学技术出版社, 1994.
 [3] 刘大有. 二相流体动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.
 [4] SHANG H M. Numerical studies of droplet turbulence interactions[J]. Appl Math Comput 1994, 65(1- 3): 63- 78, 15.
 [5] 张殿印, 张学义. 除尘技术手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
 [6] 谭天佑, 梁凤珍. 工业通风除尘技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988.

(渠 源 编辑)

was accomplished by the use of a gas-solid drag force. By way of simulations a transformation process was obtained of the generation, movement and explosion/cracking of gas bubbles, which has been found to be in full agreement with experimental results. By using different drag force models a simulation was performed of the fluidized bed dense two-phase flows. A comparison with Kuipers experimental results shows that the use of a Gidaspow drag force model can result in a more accurate description of the dense two-phase flows in the fluidized bed. **Key words:** Eulerian model, gas-solid two-phase flow, gas bubble, fluidized bed

环栅式动力除尘器的两相流数值模拟 = **Numerical Simulation of Two-phase Flows of a Cascade-ring Type of Aerodynamic Dust Collector** [刊, 汉] / LIN Feng, LIN Long (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036), HU Qi-di (Shenzhen Meishi Electric Power Industrial Co. Ltd., Shenzhen, China, Post Code: 518000), ZHANG Shi-lei (Thermal Power Plant of Jilin Petroleum Group Co. Ltd., Jilin, China, Post Code: 138000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(2). — 134 ~ 136, 190

A numerical simulation of two-dimensional two-phase flows was conducted of a cascade-ring aerodynamic dust collector in an effort to enhance its performance through an improved design. During the simulation a particle trajectory model has been employed with a $k-\epsilon$ model being used to simulate gas-phase turbulent flows and a Stochastic model used to describe the turbulent diffusion of a particle phase. The flow conditions of ash particles and gas, and the characteristics of the dust collector were studied and analyzed. **Key words:** two-phase flow, numerical simulation, dust removal, air purification

二阶全展开 ETG 有限元方法在方腔自然对流模拟中的应用 = **The Application of a Second-order and Full-extension ETG Finite Element Method for the Simulation of Natural Convection in a Square Cavity** [刊, 汉] / WEI Ying-jie (Astronautics Engineering and mechanics Department & Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150090), HE Zhong-yi (School of Municipal & Environmental Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150090) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(2). — 137 ~ 139

A second-order and full-extension ETG finite element method was employed to carry out a discrete solution for a N-S equation and an energy equation. With a square-cavity natural convection problem of zero initial value serving as an example a numerical simulation was conducted. The flow and temperature fields of natural convection in a square cavity at different Rayleigh numbers were calculated. The steady-state results being finally attained are in very good agreement with those of a standard numerical solution. Moreover, the time evolution process depicting the flow and temperature fields has been reflected quite well. Especially worth mentioning here is the capture of the change of vortex structure in the flow field before and after bifurcation. All the above shows that the second-order and full-extension ETG finite element method features a relatively fair stability and precision, and has its definite merits when used to evaluate the time evolution process of temperature and flow fields. **Key words:** second-order and full-extension ETG finite element, square cavity, natural convection

表面活性剂减阻流体湍流空间结构试验研究 = **Experimental Research on the Turbulent Spatial Structure of a Drag Reducing Fluid with a Surfactant being Added** [刊, 汉] / WANG De-zhong, HU You-qing, WANG Song-ping, ZHOU Rong-sheng (Institute of Mechanical and Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(2). — 140 ~ 143

An experimental study was conducted of the turbulent flow field of a CTAC drag reducing fluid in a two-dimensional flow