

四角切圆燃烧炉内颗粒湍流扩散数值模拟

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001) 王春刚 朱群益 吴少华 秦裕琨 尹向梅¹⁾

摘要: 基于四角切圆燃烧锅炉炉内湍流流动各向同性的假设, 得出炉内各点的特征频率。同时采用特征频率—频谱随机轨道模型及随机轨道模型对炉内颗粒的湍流扩散进行了数值模拟。计算结果表明, 特征频率—频谱随机轨道模型更能反映出颗粒湍流扩散中受涡结构影响的特征, 更接近实验结果。

关键词: 锅炉; 气固两相流; 紊流扩散; 数值模拟

中图分类号: TK224.1; O357.5⁺³ 文献标识码: A

1 问题的提出

气固两相流动数值模拟的关键在于颗粒相的模拟。目前应用较多的是随机轨道法。文献[1]认为一般的随机轨道模型未能考虑到各个湍流涡团不同的脉动频率、频谱、振幅和方向性。脉动频谱随机轨道模型, 即用随机的傅利叶级数来模拟气流的湍流脉动速度。文献[2~3]提出了通过对湍流脉动的特征频率和频率谱分析, 构造湍流频率谱分布函数, 借用频率谱指数的分数维特性, 确定频率谱函数, 结合湍流描述理论, 以湍流平均值计算特征频率, 建立脉动速度与研究对象特征频率之间的联系, 从而模拟颗粒的脉动速度, 给我们提供了新的思路。

2 特征频率—频谱随机轨道模型

在拉格朗日坐标系下, 煤粉颗粒瞬时的动量方程为:

$$m_p \frac{dV_p}{dt} = \Sigma F \quad (1)$$

式中 m_p 、 V_p 、 t 、 F 分别为煤粉颗粒的质量、速度、运动时间及所受到的力。由文献[1]对煤粉颗粒在炉内较典型的流动情况下各种力的数量级关系分析结果可知, 冷态炉内流动模拟过程中可以忽略颗粒的浮力、Magnus力、压力梯度力、Saffman力以及虚假质量力等。这样, 单位颗粒质量的动量方程为:

$$\begin{aligned} \frac{du_p}{dt} &= \frac{1}{\tau_r} (u_g + u'_g - u_p) \\ \frac{dv_p}{dt} &= \frac{1}{\tau_r} (v_g + v'_g - v_p) - g \\ \frac{dw_p}{dt} &= \frac{1}{\tau_r} (w_g + w'_g - w_p) \end{aligned} \quad (2)$$

式中 u_p 、 v_p 、 w_p 为颗粒的瞬时速度, u_g 、 v_g 、 w_g 为气相流场的时均速度, τ_r 为颗粒运动的驰豫时间; u'_g 、 v'_g 、 w'_g 是气相流的脉动速度。

颗粒湍流扩散的数值模拟关键在于气相脉动速度的模拟, 从而体现各个湍流涡团不同的脉动频

收稿日期: 1999-05-27; 修订日期: 1999-06-09 1) 哈尔滨锅炉厂

基金项目: 国家“九五”科技攻关项目(96-A19-01-01)及清华重点实验室开放基金资助课题。

作者简介: 王春刚(1972-), 男, 黑龙江杜尔伯特人, 哈尔滨工业大学能源科学与工程学院博士研究生。

4 总结

本文所建立的数学模型和开发的能够模拟计算舰船中压锅筒式锅炉启动及变工况运行的仿真软件对某舰船 110 t/h 主动力锅筒式锅炉进行了仿真计算。计算结果与舰船式锅筒锅炉一般实际运行数据比较相符, 表明所建立的模型及开发的软件可为舰船锅炉设计和运行提供有价值的指导性意见。

参考文献:

- [1] 章臣樾. 锅炉动态特性及其数学模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.
- [2] 唐世林. 电站计算机仿真技术[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [3] 韩璞, 刘长良, 李长青. 火电站仿真机原理及应用[M]. 天津: 天津科技出版社, 1998.
- [4] 周剑平. 舰船锅炉动态特性研究及仿真[D]. 江苏镇江: 华东船舶工业学院, 1998. 3.

率、频谱、振幅和方向性对颗粒的湍流扩散所起的作用不同, 其中最重要的是湍流涡团的特征频率, 采用特征频率 - 频谱随机轨道模型可以部分地考虑湍流涡团的作用, 即通过炉内空间各点的脉动主频来考虑各点不同的脉动特性, 从而更好地模拟颗粒的湍流扩散特性。炉内流场依旧遵循气相均匀、各向同性的假设, 近似采取下式计算各点的特征频率 f_0 ;

$$f_0 = \frac{1}{C_\mu} \frac{\epsilon}{k} \quad (3)$$

式中 k 为气相湍流动能; ϵ 为湍流耗散率; $C_\mu = 0.09$ 。

本文采用文献[2]中所构造的湍流频率谱分布函数来模拟气流的脉动速度:

$$\frac{u'_g}{u_{g0}} = \sum_0^N A(f) [\cos(2\pi \cdot ft) + \sin(2\pi \cdot ft)]$$

$$\Gamma(X+1) = \sqrt{2\pi \cdot x} \cdot x \cdot e^{-x} \left\{ 1 + \frac{1}{12x} + \frac{1}{288x^2} - \frac{1}{51840x^3} + \dots \right\} \quad (9)$$

τ_r 表示气流脉动微团能够曳引颗粒从静止或匀速直线运动状态下离开所需的时间, 其计算公式^[4] 为

$$\tau_r = \rho_p d_p^2 / (18\mu C_D / Re / 24) \quad (10)$$

式中 C_D 为颗粒的阻力系数。许多学者对不同情况下

$$C_D = \frac{24}{Re} \left\{ (1 + 0.19Re^{0.62}) [1 + 0.095 \left(\frac{f_0 Re}{\sigma}\right)^{0.287}] \right\} \quad (1 < Re < 300) \quad (12)$$

式中 σ 是拟合常数, 取 150。

$$Re = \frac{\rho |v_g - v_p| d_p}{\mu} \quad (13)$$

应用四阶 Runge-Kutta 法, 以一定的时间步长积分颗粒运动微分方程(2), 得到炉内煤粉颗粒的运动速度。随机轨道模型的关键是决定湍流涡团的特性和颗粒与涡团相作用时间。该时间步长小于旋涡寿命和颗粒穿过旋涡的特征时间, 按文献[5] 假定旋涡的特征尺寸与耗散长度相当, 即 $L_e = C_\mu^{0.75} k^{1.5} / \epsilon$, 故穿过旋涡的特征时间为 $\tau_l = L_e / v_p$, 这里 v_p 是颗粒进入旋涡的速度, 旋涡的寿命为 $\tau_e = L_e / (2k/3)^{0.5}$ 。考虑颗粒与壁面的非弹性碰撞, 其反弹后的公式见文献[6]。当颗粒反复碰撞壁面时, 若颗粒的撞击速度降低到一定程度后, 认为颗粒沉积在壁面上。

颗粒的轨迹方程为

$$dx_p / dt = u_p$$

$$dy_p / dt = v_p$$

$$\frac{v'_g}{v_{g0}} = \sum_0^N A(f) [\cos(2\pi \cdot ft) + \sin(2\pi \cdot ft)] \quad (4)$$

$$\frac{w'_g}{w_{g0}} = \sum_0^N A(f) [\cos(2\pi \cdot ft) + \sin(2\pi \cdot ft)]$$

$$u_{g0} = v_{g0} = w_{g0} = \sqrt{u'^2} = \sqrt{v'^2} = \sqrt{w'^2} = \sqrt{\frac{2}{3}k} \quad (5)$$

式中 $\sqrt{u'^2}$ 、 $\sqrt{v'^2}$ 、 $\sqrt{w'^2}$ 为气相湍流脉动速度的平均平方根值, f 为以主频 f_0 为中心符合正态分布的频率。

$$A(f) = \sqrt{E(f)} \quad (6)$$

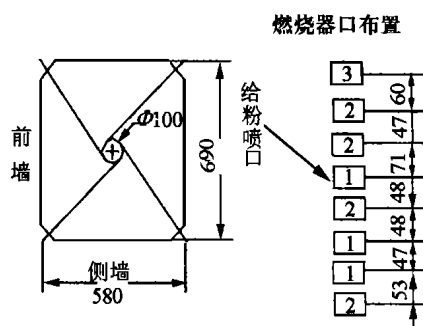
$$E(f) = \frac{Bf^\beta}{f_0^{\beta+1} \left\{ 1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^\beta \right\}} \quad (7)$$

$$B = \frac{\beta \cdot \Gamma(2)}{\Gamma\left(\frac{\beta+1}{\beta}\right) \Gamma\left(\frac{\beta-1}{\beta}\right)} \quad (8)$$

的颗粒阻力系数进行了理论和试验研究, 各种文献给出了许多适用于不同情况下的阻力系数, 其中较常用的有文献[1] 推荐的阻力系数公式

$$C_D = \frac{24}{Re} + 4.5 \quad (Re \ll 1) \quad (11)$$

$$dz_p / dt = w_p \quad (14)$$



1—一次风; 2—二次风; 3—三次风

图 1 实验简图

根据计算所得的颗粒速度再次进行积分计算, 就可得到颗粒运动的轨迹。

对单位时间内所经过的计算单元内煤粉颗粒的数量进行统计, 就可

得出各单元内的颗粒浓度。设每条颗粒轨迹代表一群直径相同的颗粒的运动情况。如果用一组离散为直径不同的颗粒(i) 来表示颗粒尺寸连续分布, 则沿第 j 条轨迹运动的颗粒质量 m_{pji} (kg/s) 为:

$$m_{pji} = m_{p0} X_{jo} Y_{io}$$

式中 m_{p0} 为颗粒的总流入速率, (kg/s); X_{j0} 是初始处第 j 站颗粒的质量份数; Y_{i0} 为初始处直径为 d_p 的颗粒的质量份数。而沿第 j 条轨迹运动的初始直径为 d_p 的这一群颗粒的数目流量 n_{ij} (颗 / s) 为:

$$n_{ij} = \dot{m}_{p_{ij}} / m_{p_j}$$

式中 $m_{p_{ij}}$ 为单颗粒的质量。

在每一个计算单元内, 颗粒总的数密度

(n)_{kcell} (颗 / s) 可由下式确定

$$(n)_{kcell} = \left[\sum_i \sum_j (n_{ij} \Delta\tau_{ij}) / \Delta V \right]_{kcell}$$

式中 $\Delta\tau_{ij}$ 是颗粒在单元内的停留时间。

3 实验结果及计算结果:

图 1 为四角切圆燃烧炉膛气固两相冷态模化实验台, 炉膛高度为 2 400 mm。实验中单角单只燃烧器给粉, 物料为玻璃微珠, 给粉浓度 2.62 kg/kg, 采用 PDA 测量系统。实验参数见表 1。以给粉一次风喷口的中心截面为测量截面, 截面上的颗粒数密度 (单位立方厘米内颗粒个数, $10^4 / \text{cm}^3$) 如图 2 所示。这里侧墙为 x 轴, 前墙为 y 轴。

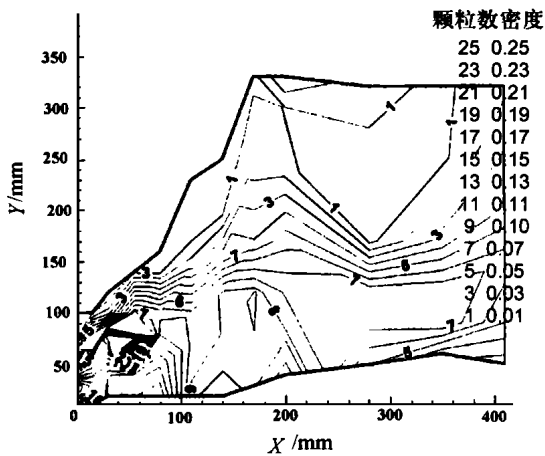


图 2 实验结果

表 1 实验参数

	一次风	二次风	三次风
风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	5.1	7.7	11
截面(宽×高)/mm	34×38	40×36	40×50

图 3 图 4 分别为采用不同计算模型得到的喷口中心截面上的颗粒数密度分布图, 可见, 由于特征频率—频谱随机轨道模型考虑了计算各点脉动主频的作用, 结果体现了射流背火侧尾迹涡对浓度扩散的主控作用, 即颗粒环绕尾迹涡的运动, 图中可以近似

得出尾迹涡的几何形状, 这与实验的结果相符。

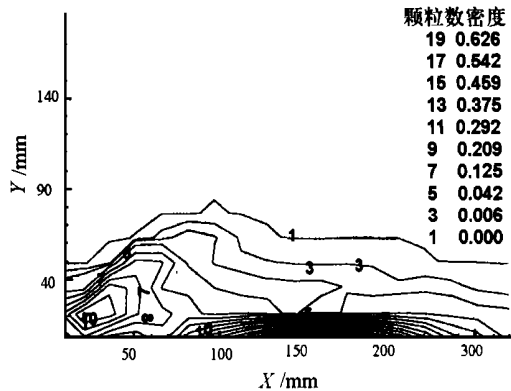


图 3 随机轨道计算结果

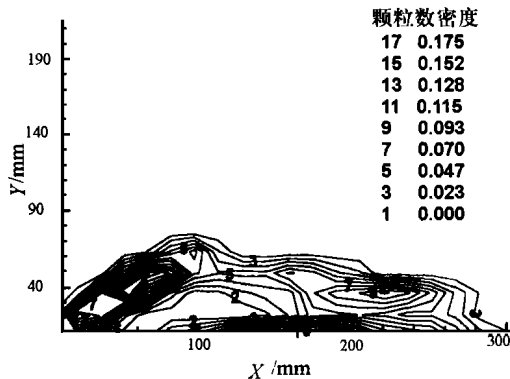


图 4 特征频率—频谱随机轨道计算结果

4 结论

本文基于四角切圆燃烧锅炉炉内湍流流动各向同性的假设, 计算得到炉内各点的特征频率。将其应用到本文的特征频率—频谱随机轨道模型中, 计算结果表明了颗粒湍流扩散受大涡拟序结构影响的特征, 并与实验结果相吻合。证明了特征频率—频谱随机轨道模型用以模拟颗粒湍流扩散的可行性。

参考文献:

- [1] 岑可法, 樊建人. 工程气固多相流动的理论及计算[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1990.
- [2] 徐江荣, 姚强. 湍流脉动的特征频率和频率谱分析[C]. 工程热物理学会, 多相流学术会议, 1998 III—35—38.
- [3] 徐江荣, 姚强. 颗粒湍流扩散的数值模拟[C]. 工程热物理学会, 多相流学术会议, 1998 II—107~110.
- [4] 刘大有. 二相流体力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.
- [5] Shuen J.S. et al. Evaluation of a stochastic model of particle dispersion in a turbulent round jet[J]. *AIChE*, 1983, 29(1): 167—170.
- [6] Lockwood F.C., Abbas A.S. et al. Prediction of a corner-fired power station combustor[J]. *Combust. Sci and Tech.*, 1988, 58: 5—10.

(复 编)

舰船中压锅筒式锅炉蒸发系统运动特性及仿真= **Operating Characteristics and Simulation of the Evaporating System of a Naval Medium-pressure Drum Boiler** [刊, 汉] / YAO Shou-guang, ZHU De-shu, ZHOU Jian-pin (Eastem China Marine Engineering Institute, Zhenjiang, Jiangsu, China, Post Code: 212003), ZHU Kuan-ren (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power . — 2000, 15(4). — 399 ~ 402

Based on the mechanism features of the work process of a targeted object under investigation and its basic physical equations the authors have set up an analytical model for the start-up and off-design operating process of a naval medium-pressure drum boiler. A software has been developed, which can simulate the whole start-up process of the above-cited naval boiler, beginning from its ignition up to the steam parameters attaining a rated power, as well as the variation of the dynamic characteristics of its evaporating system. An analysis of the operation characteristics of the boiler evaporating system indicates that the established model and the software developed along with it can provide valuable reference data and materials for the design and operation of the naval boiler under discussion. **Key words:** boiler, operating characteristics, simulation

四角切圆燃烧炉内颗粒湍流扩散数值模拟= **Numerical Simulation of Particle Turbulent-flow Diffusion in a Tangentially Fired Boiler Furnace** [刊, 汉] / WANG Chun-gang, ZHU Qin-yi, WU Shao-hua, QIN Yu-kun (College of Energy Science and Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001 // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power . — 2000, 15(4). — 402 ~ 404

On the basis of a hypothesis that the turbulent flow in a tangentially fired boiler furnace assumes an isotropic character obtained is the eigenfrequency of various points within the furnace. Meanwhile, a numerical simulation has been conducted of the turbulent flow diffusion of the in-furnace particles with the use of the eigenfrequency - frequency spectrum stochastic trajectory model and a stochastic trajectory model. The calculation results indicate that as compared with experimental results the eigenfrequency-frequency spectrum stochastic trajectory model has been found to produce results reflecting better the effect of the in-furnace eddy on the particle turbulent-flow diffusion. **Key words:** boiler, gas-solid dual-phase flow, turbulent flow diffusion, numerical simulation

500 MW 超临界压力直流锅炉机组实时仿真数学模型= **Mathematical Model of Real-time Simulation for a 500 MW Supercritical-pressure Once-through Boiler** [刊, 汉] / XU Er-shu, LI Shu-kang (Northeast University of Electrical Power Engineering, Baoding, Hebei, China, Post Code: 071003), MA Gang (Baoding Electrical Power Bureau, Baoding, Hebei, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power . — 2000, 15(4). — 405 ~ 407

The authors have set up an algorithm for in-furnace heat transfer and algorithms for various in-boiler processes. These algorithms have been prepared on the basis of an analysis of the structure and properties of a 500 MW supercritical-pressure once-through boiler and in compliance with the mass, energy and momentum conservation law. In addition, by the use of a modularized model building technique, set up is a mathematical model of real-time simulation for a Russian-made 500 Mw supercritical-pressure once-through boiler. With the help of the above-cited model it is possible to accurately simulate the static and dynamic characteristics of any specific boiler units. **Key words:** once-through boiler, real time simulation, simulation

变频调速装置在电站锅炉辅机上的应用= **The Application of a Frequency Conversion-based Speed Regulation Device in Utility Boiler Auxiliaries** [刊, 汉] / PIAO Yun-feng, SUN Xu-ping, ZHANG Yu-hui (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power . — 2000, 15(4). — 408 ~ 409

Described in this paper are the working principles, specific features and prospects of development of frequency conver-