

燃煤循环流化床模型与试验研究

(东南大学 热能工程研究所, 江苏 南京 210096) 沈来宏

摘 要: 利用循环流化床内气—固两相流动等基础方面的研究成果, 根据本文床内气固浓—淡流动模型, 建立适用不同结构参数的循环流化床燃烧模型, 考虑了床内气体、固体颗粒的返混、循环过程, 以及煤燃烧、NO 的生成和分解、颗粒磨损等因素。在循环流化床燃烧试验台上进行实验研究, 模型仿真结果和实验数据吻合良好, 表明气固两相浓—淡流动模型所建立的循环流化床燃烧系统模型可以正确地模拟循环流化床的燃烧过程。

关 键 词: 煤; 循环流化床燃烧; 数学模型; 实验研究

中图分类号: TK16 TK229.6⁺6 文献标识码: A

0 引言

目前国内外进行循环流化床锅炉总体模型研究工作的科研机构较多, 最具典型的有国际能源署 IEA-FBC 模型, 它以流化床燃烧室为对象, 建立起带有飞灰回送的流化床燃烧系统模型, 将燃烧室分为鼓泡床和悬浮段, 沿床高方向又将鼓泡床和悬浮段划分为若干小室, 鼓泡床又分为气泡相和乳化相, 分别列出三个区域的质量守恒方程, 能量守恒方程。德国济根大学组织开发的循环流化床(CFBC)模型^[1-2], 沿垂直方向将炉膛、分离器和副床划分为若干小室, 模型方程由小室内气体、固体质量守恒方程, 能量守恒方程组成。这些模型均忽略了小室内气体返混, 将小室内气体固体颗粒处理成均匀混合的悬浮状态, 这和循环床炉膛内气固两相流动真实情形有较大的偏差。本文根据 IEA-FBC 模型程序和作者已有循环流化床数学模型程序, 及循环床内气—固两相流动等基础方面的研究成果, 建立能正确描述循环流化床锅炉燃烧的数学模型, 并对所建立的模型在循环流化床燃烧试验台上进行实验研究。

1 循环流化床模型框架

循环流化床整体模型包括主燃烧室、分离器及副床三大部件的建模。模型中详细考虑了炉内气体

和固体的流动, 宽筛分煤颗粒的燃烧、磨损, 颗粒扬析夹带, 脱硫, 脱氮和传热等方面过程。将三大部件沿垂直方向分成若干个小室, 每个小室又分为浓相区(Dense)和淡相区(Lean)。相邻小室之间存在着气体、固体质量交换和能量交换, 小室内浓相区和淡相区之间存在着气体交换。

2 主要子模型简介

2.1 气固流动浓—淡模型

循环流化床内气固两相环—核(Core-Annulus)流动模型^[3]虽然在一定范围内被接受, 但和一些实验观测到的数据相悖^[4]。实际上床内颗粒团(浓相)可能会连续不断地被上升气流所撕裂, 使颗粒团不断地形成、离析, 因此床内任一位置处颗粒团的体积份额只是一个时均参数, 而无明显的环/核分界面。另外, 在床内气流的作用下, 颗粒团或弥散的颗粒会向壁面处飘移, 当到达壁面时由于气速较低, 气体对颗粒团的曳力较低, 颗粒团就会下落。

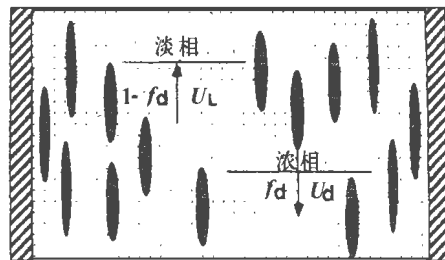


图 1 循环流化床内气固流动浓—淡模型

如图 1 所示, 本文将床内下降的颗粒团物料流定义为浓相(dense phase), 颗粒团周围向上运动的稀疏物料流定义

为淡相(lean phase), 床内任一位置处浓相和淡相共存, 下降的浓相存在于上升的淡相周围。图 2 为床内气固流动的浓—淡模型原理图, 在小室微元体内浓—淡两相之间进行气固质量交换和传递。淡相内气体和固体均向上运动; 浓相内颗粒向下运动, 气体流动方向取决于浓相区内颗粒向下运动的速度大

收稿日期: 1999-03-16; 修订日期: 1999-04-16

基金项目: 国家“九五”科技攻关资助项目(96-A19-03)

作者简介: 沈来宏(1965-)男, 江苏泰县人, 东南大学副教授。

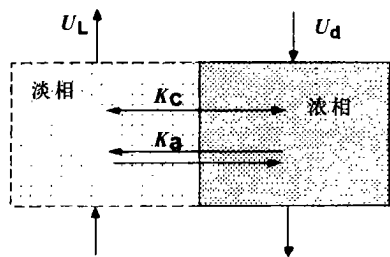


图 2 床内气固流动原理图

$$K_C = \frac{\partial}{\partial h} (U_d f_d \epsilon_a) \quad (1)$$

近年来已发表的文献表明循环流化床底部区域的流动特性可用有气泡存在作为基本特征来加以描述,许多用来描述低速鼓泡床内气泡模型公式经修正后均可用于湍流床^[3,9]。

2.2 循环流化床燃烧模型

煤颗粒燃烧模型包括一次爆裂、挥发份析出和燃烧过程,以及焦炭燃烧、气体燃烧反应等过程的模型。煤颗粒进入高温炉膛后,被急速加热并热解释放出挥发份,其热解产物由气体和焦油组成。循环流化床内 NO 形成主要来源于燃料 N,同时 NO 还和焦炭颗粒以及其它固体颗粒起还原反应。根据脱硫剂 CaCO₃ 与 SO₂ 之间的反应动力学确定 SO₂ 的吸收量。

2.3 小室模型

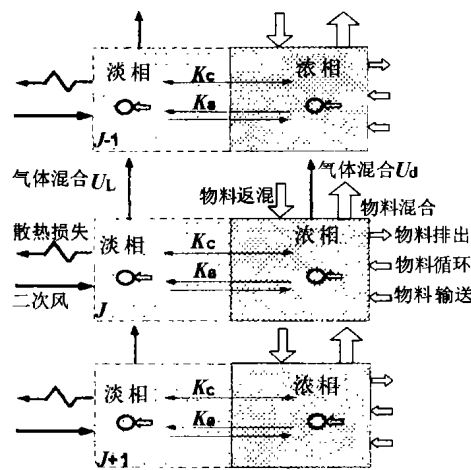


图 3 小室模型示意图

恒方程, 及一个能量守恒方程。

如图 3 所示, 小室分成左右两部分, 左小室是淡相区, 右小室为浓相区, 浓淡两相区内固体物料均呈

小。床内浓相的体积份额 f_d 随着床高的增加而逐渐衰减, 因此浓-淡相之间气体除了质量交换过程 (mass exchange) K_a 之外, 还存在着

对流交换过程 (convective exchange) K_C , 单位体积内气体对流交换

悬浮状态, 但两相内的空隙率不同。小室内固体物料存在着向上流动和向下的返混过程, 用一指向颗粒的箭头符号表示化学反应。稀相区 (Lean) 内气体平衡方程:

$$A_t(j+1)U_L(j+1)[1-f_d(j+1)]C_L(j+1) - A_t(j)U_L(j)[1-f_d(j)]C_L(j) + A_t(j)\Delta h K_a(j)[C_d(j) - C_L(j)] - A_t(j)\Delta h K_C(j)C_C(j) + f_{L,r}(j) + A_t(j)\Delta h[1-f_d(j)]R_{VL}(j) = 0 \quad (2)$$

式中各项分别为进、出 j 小室 Lean 相内气体, Lean 相和 Dense 相之间的质量交换项, 对流项, 外界气体进入 j 小室项, j 小室 Lean 相内化学反应生成或消耗的气体流率。

浓相区 (Dense) 内气体平衡方程:

$$A_t(j+1)U_d(j+1)f_d(j+1)C_d(j+1) - A_t(j)U_d(j)f_d(j)C_d(j) + A_t(j)\Delta h K_a(j)[C_L(j) - C_d(j)] + A_t(j)\Delta h K_C(j)C_C(j) + A_t(j)\Delta h f_d(j)R_{VD}(j) = 0 \quad (3)$$

式中各项分别为进、出 j 小室 Dense 相内气体, Dense 相和 Lean 相之间的质量交换项, 对流项, j 小室 Dense 相内化学反应生成或消耗的气体流率。式 (2) 和 (3) 适用于小室内所有气体质量平衡方程, 其中 Lean 相和 Dense 相之间对流项, 气体既可从 Lean 相流向 Dense 相, 亦可从 Dense 相流向 Lean 相, 气体流向取决于常数 K_C 的正负。

$$C_C = \begin{cases} C_L & \text{for } K_C > 0 \\ C_d & \text{for } K_C < 0 \end{cases} \quad (4)$$

3 模型结果与试验数据的比较

实验装置如图 4 所示, 该系统主要由循环流化床燃烧系统和测量分析系统组成。燃烧系统整个装置由电加热透明石英玻璃构成, 炉膛内径 $\Phi 22$ mm, 高 2300 mm。实验所用床料为石英沙, 煤质为大同烟煤, 采用小型绞笼给料机从炉膛底部给煤, 二次风的注入高度 600 mm, 工况参数如表 1 所示。

表 1 实验工况参数

床层温度	1123 K	给煤粒度	0~8 mm
一次风流量	1.139 m ³ /h	石英沙粒度	0~3 mm
二次风流量	0.285 m ³ /h	密相床高度	0.4 m
给煤速率	0.144 kg/h	钙硫比 Ca/S(-)	0.0

注: 表中 m³ 为立方米每小时

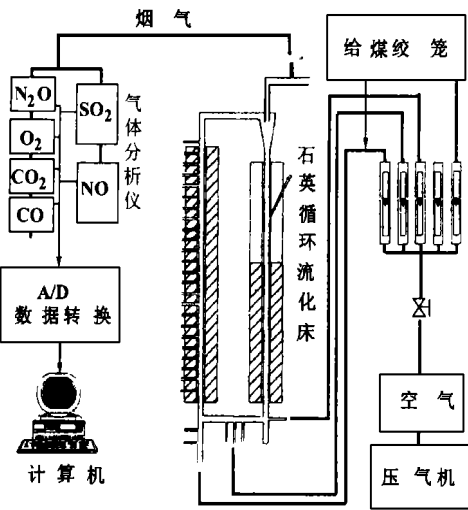


图 4 试验装置系统图

密相床内煤颗粒的燃烧反应很剧烈，与之相应的是 CO₂ 浓度增加很快。在密相床界面处附近由于二次风的加入，使得在密相床界面处氧浓度出现一个小峰值。从密相床界面到炉膛出口处焦炭颗粒进一步燃烧，且挥发份以及 CO 燃烧需要消耗一部分氧量。

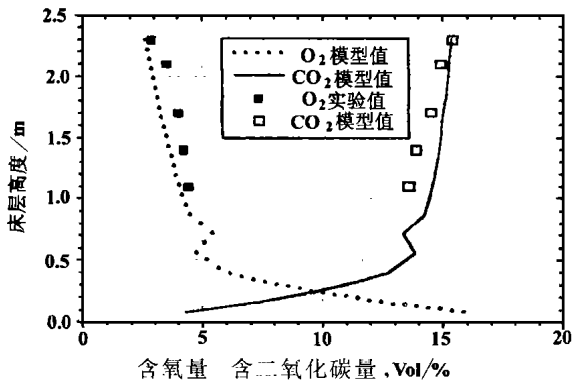


图 5 炉膛内 O₂、CO₂ 浓度测量值和模型结果的比较

图 6 为床内浓相区、淡相区内氧浓度分布曲线以及相应的平均氧浓度曲线。可见，炉膛上部淡相区占主导地位，炉膛下部浓相区的作用明显加强；与之相对应的是，稀相床内平均氧浓度主要取决于淡相区氧浓度的大小，密相床内浓相区氧浓度对床内平均氧浓度有着显著的影响。模型预测的氧浓度和实测数据比较一致，可见床内浓-淡两相流动模型能准确地预测床内气体浓度分布。

床内 NO 浓度沿床高分布曲线如图 7 所示，NO 浓度在密相床界面附近达到最大值，然后随着床高

图 5 是炉膛内 O₂、CO₂ 沿炉高方向测量值和模型计算结果的比较，O₂ 在密相床内沿炉高衰减很快，表明

增加而逐渐衰减。本文认为这和循环流化床的运行特性相关，循环流化床由于床层底部处于缺氧区，NO 主要产生于床层底部，随后虽然稀相床内挥发份和焦炭的燃烧也释放出的一部分 NO，但循环流化床内稀相区的颗粒浓度要比鼓泡流化床大得多，稀相区内细颗粒焦炭对 NO 的分解起主要作用，而且其它固体物料还与 NO 起原反应，因而 NO 浓度一直下降。可见，模型计算出气体浓度分布曲线和实验数据一致。

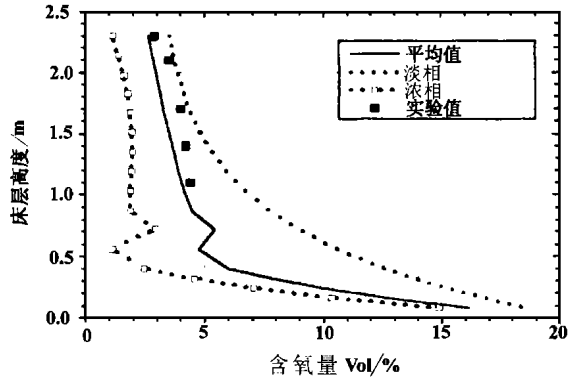


图 6 床内浓相区、淡相区 O₂ 浓度分布曲线和平均值的比较

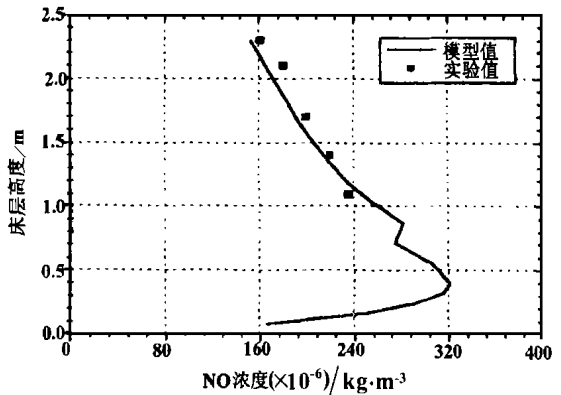


图 7 床内 NO 浓度测量值和模型结果的比较

图 8 给出了床内 CO、SO₂ 浓度沿床高分布曲线，CO 在密相床浓度较高，说明密相床内处于缺氧状态，随着床高的增加，CO 逐渐被氧化而衰减。由于没有向床内添加脱硫剂，显然易见，SO₂ 的浓度沿床高方向是增加的；在密相床界面上附近，SO₂ 浓度有一峰谷，这是由于床内二次风的投入，造成床内气体

(下转 259 页)

喷射时,水滴群则要经过较长一段距离后才能分散开来。于是造成两种喷射方向下蒸发效果有着较明显的差别。

4 结论

对于雾化式蒸发冷却器,喷嘴的雾化角、雾化粒度等因素对蒸发/冷却效果有较明显的影响,当雾化角较小时,应采取逆向喷射的方案。

对雾化式蒸发冷却器的喷水量应进行合理控制。喷水量过小,达不到最大蒸发冷却效果,而喷水量过大,则起不到改善的作用。

参考文献

[1] NOLAN I B, TWOMBLY V J. Gas turbine performance improvement

direct mixing evaporative cooling system. American Atlas Cogeneration Facility Rifle, Colorado, ASME 90-GT-368.

[2] Kolp D A, Flye W M, Guidotti H A. Advantage of air conditioning and Supercharging an LM600 gas turbine inlet. Journal of Engineering for Gas Turbine and power 1995, 117: 513 ~ 527.

[3] Irwin Stambler. Spray cooling inlet and compressor flow increases hot day plant rating. Gas Turbine World, 1997, 27(3): 37 ~ 42.

[4] 'KHUS' Water Curtain cuts inlet temperatures by 10 degrees. Gas Turbine World, 1995, 25(6): 43.

[5] Johnson R. S. The theory and operation of evaporative Coolers for industrial gas turbine installations. Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 1989, 111:327 ~ 334.

[6] 林枫, 闻雪友. 压气机的湿压缩特性及计算模型初步研究. 热能动力工程, 1998 13(6): 402 ~ 404.

[7] Zou Baifang, Denbulck E. Van. Fuel oil evaporation in swirling hot gas streams. Int. J. Heat Mass Transfer, 1998, 41(12): 1807 ~ 1820.

(复 编辑)

(上接 251 页)

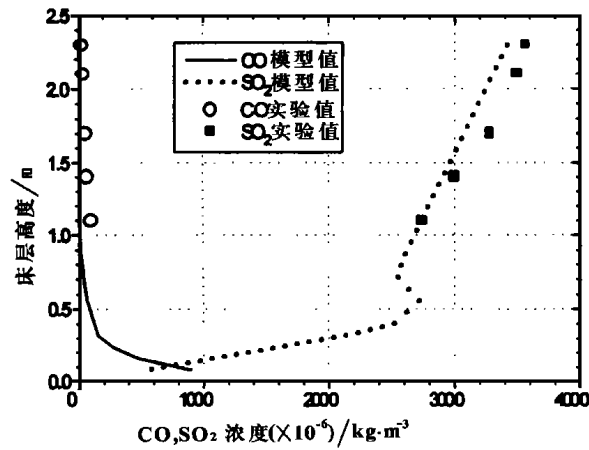


图 8 床内 CO, SO₂ 浓度测量值和模型结果的比较

流量瞬段增大而形成的。

4 结论

本文建立循环流化床内气固流动浓—淡模型,下降的浓相存在于上升的淡相周围,浓—淡两相之间进行气固质量交换和传递。淡相内气体和固体均向上运动;浓相内固体颗粒向下运动,气体流动方向取决于浓相区内颗粒向下运动的速度大小。建立床内各种气体、各种组份物料、各种组份物料的含碳量的质量平衡,以及小室总的能量平衡。在循环流化床燃烧试验台上进行实验研究,模型结果和试验数据总体上吻合良好。

符号说明

- A_t —床层截面积, m^2
- f_d —浓相(dense)的体积份额, —
- K_a —气体质量交换速率常数, l/s
- U —速度, m/s
- Φ —焦炭颗粒燃烧时过程因子, —
- 下标
- d —浓相(dense)
- f —给料(feed)
- C —物料浓度, $kmol/m^3$, kg/m^3
- h —高度, m
- K_C —气体对流交换速率常数, l/s
- 希腊字母
- ϵ —孔隙率,
- c —对流交换 (convective transfer)
- L —淡相(Lean)

参考文献

[1] Weß V. Mathematische modellierung zirkulierender wirbelschicht-eten fuer die kohleverbrennung. Ph D thesis, Universitat-Gasamthochschule-Siegen Gemany, 1987.

[2] 沈来宏. 循环流化床锅炉数学模型研究. [硕士论文]. 北京: 清华大学, 1992.

[3] Basu P, Takikdar J, Song W. Experimental validation of an one and half dimensional model of char combustion in a circulating fluidized bed. AIChE Symp Ser, 1994, 301:114.

[4] Horio M, Hatano H, Ogasawara etc. Local gas and cluster velocities in a large-scale circulating fluidized bed test rig. Chem Eng Sci, 1996, 70: 861.

[5] Schoenfelder H, Hinderer J, Werther J, Keil F. Methanol to olefins—prediction of the performance of a circulating fluidized bed reactor on the basis of kinetic experiments in a fixed bed reactor. Chem Eng Sci, 1994, 49: 5377.

(渠 源 编辑)

Meanwhile, an investigation was conducted of the effect of blade curving on the location of horseshoe vortex and passage vortex formation. A positive curving of the blades has been found to be conducive to a decrease in the transverse pressure gradient at the end wall and a weakening of the end wall secondary flows. Moreover, the blade positive curving will lead to a shift of the initial separation point of the horseshoe vortex to the middle of the flow passage, bringing about a generation of the passage vortex ahead of the anticipated time. The differential scheme selected in this paper is a Godunov one of the third-order precision with TVD properties. The turbulent flow model is a B-L algebraic one after a correction. **Key words:** positive-curved blade, flow field parameter, numerical simulation

中心扩口对径向浓淡旋流煤粉燃烧器出口气固流动特性的影响 = **The Effect of a Central Flared Angle on the Gas-solid Flow Characteristics at the Outlet of a Radial Bias and Pulverized-coal Swirl Burner** [刊, 汉] / Wang Le, Wu Shaohua, Hao Jinbo, *et al* (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(3). — 243 ~ 246, 263

Under the condition of different central flared angles and through the cold-state particle dynamic analyzer (PDA) testing of a radial bias and swirl burner a study was conducted of the burner outlet velocity, pulverized coal particle diameter and concentration distribution. As a result, obtained was the mechanism of the effect of the central flared angle on the gas-solid flow characteristics at the burner outlet. Also analyzed was the influence on the burner performance of the central flared angle. All the above work can provide some reference data and serve as a basis for the engineering application and optimized design of the above-mentioned burners. **Key words:** pulverized-coal swirl burner, pulverized-coal combustion, gas-solid dual-phase flow, particle dynamic analyzer (PDA)

复合型热管长度比的优化计算 = **Optimization Calculation of Length Ratios for a Composite Heat Pipe** [刊, 汉] / Adel M, Hu Yacai, Yuan Hai, *et al* (Energy Source Engineering Department, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang, China, Post Code 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(3). — 247 ~ 248, 255

A heat exchanger composed of gravity heat pipes with two kinds of cooling fluids has some specific features and merits in engineering applications. This paper presents a brief description of the method for determining the length ratios between the heating and cooling sections. In addition, several calculation examples are also given. **Key words:** composite heat pipe, heat pipe, length ratio

燃煤循环流化床模型与试验研究 = **Experimental Study and Simulation of a Coal-fired Circulating Fluidized Bed** [刊, 汉] / Shen Laihong (Thermal Energy Engineering Research Institute under the Southeastern University, Nanjing, Jiangsu, China, Post code 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(3). — 249 ~ 251, 259

Based on the basic research results concerning the gas-solid dual-phase flow of a circulating fluidized-bed and an in-bed gas-solid bias flow model the author has set up a circulating fluidized-bed combustion model suited for different construction parameters. The model has taken into account the return mixing and the circulation process of gas and solid particles in the bed. Also considered are such a variety of factors as coal burning, the generation and dissolution of nitrogen oxides and particle wear action, etc. The results of the experimental study and model simulation on a circulating fluidized-bed combustion test rig are in good agreement with the experimental data. This fully demonstrates that the circulating fluidized-bed combustion system set up on the basis of the gas-solid dense-lean flow model can accurately simulate the combustion process of a circulating fluidized bed. **Key words:** coal, circulating fluidized bed combustion, mathematical model, experimental study

流化床风帽温度分布及其耐热性的试验研究 = **Experimental Study of the Temperature Distribution of a Nozzle Button in a Fluidized Bed and Heat Resistance of the Nozzle Button** [刊, 汉] / Wu Xin, Zhao Changsui, Duan Yufeng, *et al* (Thermal Energy Engineering Research Institute under the Southeastern University, Nanjing, Jiangsu,