

循环流化床气固两相流颗粒分布的数值模拟

蔡杰, 凡凤仙, 袁竹林

(东南大学洁净煤发电及燃烧技术教育部重点实验室, 江苏省南京市 210096)

Numerical Simulation on Solids Fraction Distribution in Straw Burned Circulating Fluidized Beds

CAI Jie, FAN Feng-xian, YUAN Zhu-lin

(Key Laboratory of Clean Coal Power Generation and Combustion Technology of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: To make the suspended straws burn completely in the riser of circulating fluidized beds, lean phase zone should be high and suitable enough in straw burned circulating fluidized bed boilers. The influence of solids fraction distribution of inert materials in riser on original scale of various diameter particles was studied, which is significant to design straw burning circulating fluidized beds. Based on the actual size and experiment parameters of cold position circulating fluidized bed, the gas-solid two-phase flows in the riser was simulated. The effect of original scale of various diameter particles on solids fraction distribution in the riser was revealed through simulation and analysis. The results indicate that original scale of various diameter particles rationally contributes to the solids fraction distribution, and with changing the original scale of various diameter particles, solids fraction distribution can be changed but height of dense phase zone can't be changed.

KEY WORDS: straw burned circulating fluidized bed; solids fraction distribution; inert material; original scale of various diameter particles; numerical simulation

摘要: 对于秸秆燃烧循环流化床锅炉, 需要有足够高的悬浮段并且悬浮段有一定的颗粒数量浓度以保证易悬浮的秸秆能够在提升管内充分燃烧。因此, 了解惰性物料在提升管内的颗粒数量浓度分布随级配的变化规律对秸秆燃烧循环流化床的设计有指导意义。文中根据实际冷态循环流化床的尺寸和实验参数, 采用蒙特卡罗方法对提升管内气固两相流进行了数值模拟, 通过改变石英砂颗粒的级配并进行相应计算分析, 揭示了提升管内石英砂的颗粒浓度分布随级配的变化特性。结果表明, 通过改变级配可以改变提升管内颗粒数量浓度分布, 但不能改变密相区高度。

关键词: 秸秆燃烧循环流化床; 颗粒浓度分布; 惰性物料; 级配; 数值模拟

0 引言

农作物秸秆是最大的生物质资源之一, 占我国生物质资源总量的近一半^[1-6], 利用丰富的秸秆资源发电, 在我国已开始展现出广阔的应用前景^[7]。燃烧秸秆的循环流化床技术是将生物质作为清洁能源加以开发利用的有效途径之一, 循环流化床能很好适应秸秆的挥发分析出速度快、固定碳难以燃尽的特点, 克服了固定床、鼓泡床燃烧效率低的弊端^[8]。流化床燃烧和层燃及煤粉燃烧有很大不同, 任何时候其炉内都需有大量的高温惰性物料(灰, 石灰石或沙子等)的储备, 这些惰性物料占全部炉内固体物料的 97%~98%, 大量的高温惰性物料保证在 850~900℃的低温条件下流化床锅炉能稳定和高效地燃烧任何燃料^[9]。因此, 定量分析循环流化床中高温惰性物料在不同级配条件下的颗粒数量浓度分布, 对深入研究秸秆燃烧循环流化床技术有重要指导意义。但实现以上目的需要大量的时间和物力, 因此, 本文采用数值模拟方法, 计算模拟循环流化床中不同粒径的石英砂在不同级配条件下的颗粒数量浓度分布, 得出了相应结论。

1 数学模型的建立

1.1 物理模型

循环流化床床体结构如图 1 所示, 空气由风室经过床底部的布风板送入床层, 将在布风板上的由燃料及惰性颗粒组成的固体颗粒吹起来, 在重力的作用下, 被吹起升到一定高度的固体颗粒又会落下。在一定的空气流速下, 布风板上的一部分或全部固体颗粒就会产生双向运动, 即在风压的作用下颗粒

上升和浮起，又在重力的影响下下落，类似于液体在沸腾时的状态一样，固体颗粒床层也膨胀起来，此时称固体颗粒(床料)进入流化状态^[9]。当有固体颗粒从上部溢出时，会通过循环装置重新由底部进入提升管内。

图 1 循环流化床结构示意图

Fig. 1 The structure of the circulating fluidized bed

1.2 数学模型

循环流化床提升管内气体采用欧拉方法处理，由于固体颗粒在提升管内的浓度相对较稀，并且固体颗粒的大小远大于气体分子，因此采用拉格朗日方法计算跟踪离散的固体颗粒，气相场对固体颗粒单向耦合，即只考虑气相场对固相场的耦合，而忽略固相场对气相场的影响^[10-12]。气相场与边壁之间采用边界条件。

(1) 气相场数学模型。

$N-S$ 方程：

(1)

湍流 $k-\epsilon$ 模型：

(2)

气相场边界条件采用固体边界条件，气相场使

用 Fluent 商业软件计算。

(2) 离散相数学模型。

用直接模拟蒙特卡罗(DSMC)方法^[13]计算在稳定气相场作用下的离散颗粒场。为了避免过大的计算量，以一定量的取样颗粒代替数目庞大的真实颗粒，通过跟踪计算每一个取样颗粒求解离散相颗粒场，并将计算区域划分成若干个网格，在同一网格内部通过概率判断颗粒之间是否发生碰撞^[14]。

对于单个颗粒，运动方程为

(3)

式中： a 为颗粒的加速度； m 为颗粒质量； g 为重力加速度； f_c 为颗粒受到的流体力。

模型中考虑的力有：重力、气流对颗粒的携带力 F_D 和马格努斯力 F_M ，相关计算公式为^[15]

(4)

式中： C_D 为阻力系数； u_c 为流场速度； d 、 ρ 、 ω 、 u_p 分别为颗粒的直径、浓度、角速度和速度。

颗粒碰撞在各个网格内进行，颗粒 i 和同一网格内其它所有颗粒碰撞的概率为^[14]

(5)

式中： n 为真实颗粒数； N 为取样颗粒数； D_p 为颗粒 i 直径； $G_{i,j}$ 为颗粒 i 和 j 的相对速度； Δt 为时间步长。

在颗粒 i 总碰撞概率 P_i 小于1的前提下，利用随机数 $r(0 < r < N)$ 选取网格内任一颗粒 $j(j = \text{int}(RN)+1)$ ，如果满足 $R > (j/N - P_{i,j})$ ，则发生碰撞，根据动量守恒定律获得颗粒 i 和 j 的碰撞结果为^[14]

当 \dots 时，

(6)

当 \dots 时，

(7)

式中： f 为摩擦系数； e 为恢复系数；
；
。

颗粒与壁面碰撞采用镜面碰撞边界条件。本离散相数学模型采用 c 语言编程。

2 计算参数及数据处理方法

2.1 计算参数

流化风速分别取 4、6、8 和 10m/s，入口颗粒初速为 0~2m/s，颗粒直径分别为 0.1、0.25、0.5 和 1mm 4 种，级配按表 1 百分比分配。数值计算其他条件如表 2 所示。

表 1 级配分布

Tab. 1 Distribution of original scale of various diameter particles

颗粒直径/mm	级配 1	级配 2	级配 3	级配 4	级配 5
0.10	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4
0.25	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4
0.50	0.4	0.2	0.25	0.2	0.1
1.00	0.4	0.2	0.25	0.2	0.1

表 2 计算参数

Tab. 2 Calculation parameters

参数	数值	参数	数值
空气浓度/(kg/m ³)	1.29	石英砂浓度/(kg/m ³)	2.6×10 ⁻³
空气运动粘度/(m ² /s)	23.8×10 ⁻⁶	颗粒恢复系数	0.8
颗粒摩擦系数	0.25	计算时间步长/s	0.002

2.2 数据处理方法

为定量分析各种粒径颗粒在循环流化床提升管中的颗粒分布情况随级配的分布规律及其变化，本文在循环流化床 15 个高度位置处设取样点，在整个循环流化过程达到稳定状态时，分别对不同取样点进行颗粒数量统计，并根据不同的颗粒级配和流化风速，确定颗粒数量浓度在提升管内分布的规律及其变化。

3 数值模拟结果分析

3.1 气相场与颗粒相场模拟结果

图 2 为气相场数值模拟结果，可以看出，从下面入口处往上到出口处，风场速度逐渐减小，并且

提升管管壁处的流化风速小于提升管中心位置处的流化风速。图 3 为不同风速条件下，离散颗粒分布模拟计算结果。可以看出，在管壁处，由于流化风速较小及边壁效应，大粒径粒子团沿管壁下沉，而提升管中心的粒子团向上运动，从而形成了固体颗粒的内循环。

图 2 循环流化提升管内气相场模拟结果
Fig. 2 Simulation results of gas-phase field distribution in CFB

v=4m/s v=6 m/s v=8 m/s v=10 m/s

图 3 颗粒数量浓度分布模拟结果
Fig. 3 Simulation result of granule number density distribution

3.2 颗粒数量浓度分布的模拟结果

3.2.1 不同流化风速条件下颗粒数量浓度分布模拟结果

由于不同级配下的颗粒数量浓度很难测量，为验证方法的正确性，本文先进行了不同流速下颗粒数量密度分布的模拟。由于床层底部颗粒的加速度较大，颗粒无法在此聚集，因此颗粒最大数量浓度并不在床层的最底部，而在最底层上面略高位置处。在床内 0.7~1.263m 高度处，由于管径不断增大，流

化风速也跟着不断减小,一些粒径较大颗粒在此高度区域达到临界流速,从而导致此处颗粒大量集中,颗粒数量分布变化比较明显,且数量浓度很大。随着流化风速的不断加大,各种颗粒都能够在提升管内顺畅地循环流化。由图4可以看出:①随着流化风速的不断加大,颗粒数量密度在提升管内径向分布越来越均匀,此结论与文献[16]一致。②随着流化风速的不断加大,悬浮段颗粒数量密度越来越大,这与文献[17]结论一致。

图4 颗粒数量浓度随流化风速变化曲线
Fig. 4 Change curve of granule number density with change of fluidization velocity

3.2.2 不同粒径颗粒数量浓度分布

图5为床料中4种粒径颗粒的数量浓度在提升管内沿径向分布曲线。由图可以看出,由于4种粒径颗粒的临界流速不同,因此,小粒径颗粒已经完全循环流化,而大粒径颗粒还停留于床层底部。在床层底部,由于靠近风帽和入口,因此流化风速较大且碰撞较为频繁,从而导致床层底部颗粒分布呈现一定的不规则性。对于提升管内已经完全流化的较小粒径颗粒,由于可以在提升管内悬浮段较顺畅的循环流动,因此,沿径向方向1.5m高度以上位置处的颗粒数量浓度比与初始物料级配趋于一致。

图5 不同粒径颗粒数量浓度变化比较
Fig. 5 Comparison of particle number density of different diameter particles

3.2.3 颗粒数量浓度分布随级配变化模拟结果

由于磨损,循环流化床工作一段时间后,提升管内颗粒级配分布情况将会发生变化,因此,了解不同级配条件下的颗粒数量浓度分布差异对改善燃

烧有非常重要的意义。图6为颗粒数量浓度在提升管内随级配变化曲线,级配情况如表1所示。与文献[18]中颗粒数量浓度沿提升管高度向上逐渐减小结论相比,本文中颗粒数量浓度在提升管一高度段呈急剧上升,而其它部分则呈逐渐下降趋势。这是由于在本实验提升管中有一段渐扩管部分,渐扩管段流化风速逐渐下降,导致颗粒在此处大量汇聚。由图6可以看出:①随着小粒径颗粒所占份额的不断加大,颗粒数量浓度沿提升管内径向的分布就越紊乱;②在小粒径床料和大粒径床料的份额相差较大时,提升管内悬浮段的颗粒数量浓度会增加明显,因此,要想明显增加悬浮段的颗粒数量浓度,级配中小粒径颗粒所占份额就要很大;③随着级配的变化,尽管密相区的数量浓度发生了变化,但密相区高度并没有发生变化,因此,密相区高度与级配基本没有关系;④大粒径颗粒级配份额较大时,悬浮段颗粒数量浓度变化呈线性下降,与文献[19]关于粗重颗粒数量浓度分布特性基本一致。

图6 颗粒数量浓度随级配变化曲线
Fig. 6 Change curve of granule number density with change of original scale of various diameter particles

4 结论

本文通过直接模拟蒙特卡罗(DSMC)方法计算模拟了石英砂惰性颗粒在循环流化提升管内的分布情况,对石英砂惰性物料在不同级配条件下的颗粒浓度分布规律进行了探讨,得到结论如下:

(1) 充分循环流化的不同粒径颗粒,在床高1.5m以上区域,沿径向其数量浓度比与初始物料级配趋于一致。

(2) 在级配中大粒径颗粒份额比小粒径颗粒份额大很多时,提升管内颗粒数量浓度会产生比较明显的下降。

(3) 流化风速对密相区的高度影响较大,而级配对密相区的高度没有明显影响。

(4) 大粒径颗粒级配份额较大时,悬浮段颗粒数量浓度变化呈线性下降。

参考文献

- [1] 段凤魁, 鲁毅强, 狄一安. 秸秆焚烧对北京市空气质量的影响[J]. 中国环境监测, 2001, 17(3): 8-11.
Duan Fengkui, Lu Yiqiang, Di Yian. Influence of straw burning on the air quality in Beijing[J]. Environment Monitoring in China, 2001, 17(3): 8-11(in Chinese).
- [2] 杭维琦, 陈建江. 野外燃烧秸秆对环境的影响与防治[J]. 环境监测管理与技术, 2000, 12(2): 36-37.
Hang Weiqi, Chen Jianjiang. Effect on environmental quality of and of control setting straw on fire on field[J]. Environment Monitoring Supervising and Technology, 2000, 12(2): 36-37(in Chinese).
- [3] Duan Fengkui, Liu Xiande, Yu Tong, et al. Identification and estimate of biomass burning contribution to the urban aerosol organic carbon concentration in Beijing[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(9): 1275-1282.
- [4] 高先声. 生物质的热化学反应特性和秸秆气化问题[J]. 研究与试验, 2004, 114(2): 26-29.
Gao Xiansheng. The thermochemical reactivity features of biomass and in issue on crop straw gasification[J]. 2004, 114(2): 26-29(in Chinese).
- [5] 华旭, 阿敏, 阿英. 用秸秆块取代煤碳做燃料[J]. 节能技术, 2005, 23(3): 283-285.
Hua Xu, A Ming, A Ying. Making the fuel with the straw stalk substitution coal[J]. Energy Conversation Technology, 2005, 23(3): 283-285(in Chinese).
- [6] 林木森, 蒋剑春. 生物质快速热解技术现状[J]. 生物质化学工程, 2006, 40(1): 21-26.
Lin Musen, Jiang Jianchun. A review on fast pyrolysis of biomass[J]. Biomass Chemical Engineering, 2006, 40(1): 21-26(in Chinese).
- [7] 程骏. 秸秆发电有望成为我国一种新能源[J]. 水电与农村电气化, 2004, 11(10): 50-51.
Chen Jun. Straw stalk power generation is expected to be a new energy[J]. China Water Resource, 2004, 11(10): 50-51(in Chinese).
- [8] 张卫杰, 孙立, 徐健. 稻壳在循环流化床中燃烧现象的分析[J]. 可再生能源, 2006, (2): 23-27.
Zhang Weijie, Sun Li, Xu Jian. Analysis of rice huck combustion phenomena in calculating fluidized bed[J]. Renewable Energy, 2006, (2): 23-27(in Chinese).
- [9] 冯俊凯, 岳光溪, 吕俊复. 循环流化床燃烧锅炉[J]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [10] 陈敏, 袁竹林, 郇时旺. 移动床过滤除尘的直接数值模拟研究及实验对比[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 195-199.
Chen Min, Yuan Zhulin, Gao Shiwang. Direct numerical simulation and experiment contrast of the moving granular bed dust filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 195-199(in Chinese).
- [11] 蔡桂英, 袁竹林. 用离散颗粒数值模拟对陶醇过滤器过滤特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 203-207.
Cai Guiying, Yuan Zhulin. A study on the filtration performance of ceramic filter by numerical simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 203-207(in Chinese).
- [12] 袁竹林. 流化床中颗粒流化运动的直接数值模拟[J]. 燃烧科学与技术, 2001, 7(2): 120-122.
Yuan Zhulin. Study on fluidized region of particals using direct simulation method[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2001, 7(2): 120-122(in Chinese).
- [13] 王娴, 王秋旺, 陶文铨. 直接蒙特卡罗方法在微通道流动模拟中的应用[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(增): 125-128.
Wang Xian, Wang Qiuwang, Tao Wenquan. Application of direct simulation monte carlo method to gas flow in microchannels [J]. Journal of Engineering Thermalphysics, 2002, 23 (supplement): 125-128(in Chinese).
- [14] Tsuji Y, Tanaka T. Cluster patterns in circulating fluidized beds predicted by numerical simulation(discrete particle model versus two-fluid model)[J]. Powder Technology, 1998, 95(3): 254-264.
- [15] 郭烈锦. 两相与多相流动力学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [16] 段小平, 漆小波, 黄卫星. 粗重颗粒在循环流化床提升管内的局部颗粒浓度分布[J]. 四川大学学报, 2004, 36(2): 46-50.
Duan Xiaoping, Qi Xiaobo, Huang Weixing. Investigation on local solid concentration of coarse particles in circulation fluidized bed risers[J]. Journal of Sichuan University, 2004, 36(2): 46-50(in Chinese).
- [17] 杨小明, 刘文光, 何屏. CFB 局部颗粒浓度的试验研究与对比[J]. 能源与环境, 2005, 27(3): 27-29.
Yang Xiaoming, Liu Wenguang, He Ping. Experiment study and comparison on local solids fraction distribution in CFB[J]. Energy and Environment, 2005, 27(3): 27-29(in Chinese).
- [18] 黄卫星, 易彬, 杨颖等. 循环床气固提升管中颗粒浓度的轴向分布[J]. 四川大学学报, 2000, 32(6): 38-41.
Huang Weixing, Yi Bin, Yang Ying, et al. Axial distributions of averaged solids holdups in a 16m high CFB riser[J]. Journal of Sichuan University, 2000, 32(6): 38-41(in Chinese).
- [19] 林海波, 黄卫星, 漆小波, 等. 循环床提升管中粗重颗粒浓度的轴向分布[J]. 高校化学工程学报, 2005, 19(3): 327-331.
Lin Haibo, Huang Weixing, Qi Xiaobo, et al. Axial distributions of averaged solids holdups for coarse particles in CFB riser[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2005, 19(3): 327-331(in Chinese).

收稿日期: 2007-01-15.

作者简介:

蔡 杰(1978—), 男, 博士研究生, 研究方向为秸秆燃烧循环流化床气固两相流数值模拟, ya_green78@163.com.

(编辑 王庆霞)