

流化床焚烧炉中颗粒扩散特性理论研究

魏小林 田文栋 盛宏至

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

摘 要

本文建立了流化床焚烧炉中粒子扩散方程,通过求解方程,得到了鼓泡床和内旋流床中颗粒扩散特性,并与试验结果进行了对比,两者符合较好。结果表明鼓泡床横向扩散能力较差,而内旋流床有很好的横向扩散特性,非常有利于废弃物在床内的快速扩散。

关键词 流化床,颗粒扩散,理论研究

1 引 言

城市生活废弃物堆积时严重污染环境,占用大量土地,但这些物质同时又是一种特种燃料,可以对其进行焚烧处理。流化床焚烧炉燃烧稳定、温度易于控制,燃烧时间仅需数分钟,是一种新型高效的焚烧装置。按其气体流化速度的大小和分布可分为鼓泡床、内旋流床和循环流化床炉等。其中鼓泡床应用最多,而内旋流床也有较多应用,具有扩散迅速、传热可控等优点。

流化床中燃料的扩散非常重要,因为床内废弃物的快速扩散有利于提高燃烧速度和效率。目前,对于鼓泡床内的颗粒运动及扩散特性有很多试验研究和经验公式^[1~3],但对于内旋流床内的颗粒扩散研究较少。本文建立了流化床中的颗粒扩散方程,通过数值计算对比研究了鼓泡床和内旋流床中颗粒扩散特性,计算结果得到了试验的验证,该方法为将来预测大型流化床焚烧炉中的燃料扩散特性提供了新的理论途径。

2 内旋流床中颗粒循环的机理

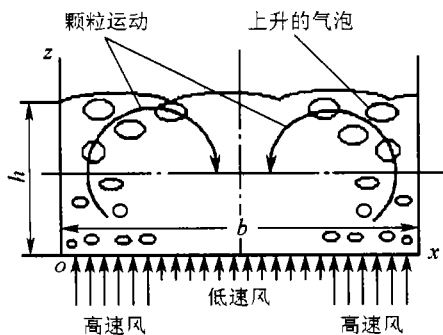


图 1 颗粒内旋流运动的原理

在流化床中,气泡运动的流型决定了颗粒运动的流型^[1],如果气泡能够被诱导沿横向运动,那么就能产生颗粒的横向扩散。利用非均匀布风就可以诱导气泡沿横向移动,从而产生颗粒的内旋流运动,大大地增强了流化床中的颗粒混合。图 1 是内旋流颗粒运动的简图,在床两侧布置有高速风区,在床中央布置有低速风区。所有的气泡在床两侧区域形成。颗粒随气泡向上运动,而在中心区域,颗粒向下移动,这就是所谓的“湾流”运动^[4]。这时颗粒连续地形成两个内旋流运动,并具有一定的流型。

本文得到国家自然科学基金和攀登 B 计划项目资助。

本文曾于 1998 年 10 月在合肥召开的中国工程热物理学会传热传质学学术会议上宣读。

修改稿于 1999 年 3 月 8 日收到。

流化床中的“湾流”循环是由特殊的气泡流型造成的。可以假设“湾流”运动是由气泡群作用于乳化相的一个涡运动, 从而导致简单的颗粒旋转运动, 这样就可以用理论对乳化相的运动进行分析^[4]。假设流化床中的乳化相及其间隙中的气相可以分开处理, 认为是一种连续的、不可压缩的流体, 忽略颗粒间作用力, 对于两维的乳化相运动, 涡量 ζ 垂直于运动平面, 且与流函数 ψ 有以下关系:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = \zeta \quad (1)$$

对于无粘性流体, 在图 1 中的两个旋转区中, 涡量的大小是一样的, 设在右半区为 ζ_0 , 则在左半区为 $-\zeta_0$, 可以假设:

$$\zeta = \zeta_0 \sin[2\pi(x - b/2)/b] \cos[\pi(z - h/2)/h] \quad (2)$$

这样颗粒相流函数可以由方程 (1) 和 (2) 求出:

$$\psi_p = -\frac{\zeta_0 b^2 h^2}{\pi^2(b^2 + 4h^2)} \sin \frac{2\pi(x - b/2)}{b} \cos \frac{\pi(z - h/2)}{h} \quad (3)$$

式中 ζ_0 通过试验确定。颗粒运动速度可由对流函数的求导得到。

3 颗粒扩散方程

为了研究流化床内的颗粒扩散特性, 假设示踪粒子随砂流一起运动, 砂流的内旋流流动由“湾流”理论给出, 忽略垂直于内旋流流动平面的颗粒宏观运动, 颗粒沿各方向的扩散由横向和纵向扩散系数考虑。对于鼓泡床, 忽略颗粒的宏观运动, 颗粒的混合由扩散系数考虑。研究不同流化时间时示踪粒子浓度的分布, 就可得到流化床中粒子扩散的规律。

流化床中示踪粒子扩散的方程为:

$$\frac{\partial C_p}{\partial t} + \frac{\partial(uC_p)}{\partial x} + \frac{\partial(wC_p)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (D_{sr} \frac{\partial C_p}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (D_{sr} \frac{\partial C_p}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (D_{sa} \frac{\partial C_p}{\partial z}) \quad (4)$$

式中 C_p 为示踪粒子的密度, kg/m^3 ; D_{sr} 为颗粒横向扩散系数, m^2/s ; D_{sa} 为颗粒轴向扩散系数, m^2/s 。

颗粒的横向扩散系数公式选择了 Berruti 提出的公式^[2]:

$$D_{sr} = 0.185 \left[1 - \left(0.44 + 2.87 \frac{h}{H_{mf}} \right) \left(\frac{l}{L} \right)^5 \right] \times (U_f - U_{mf}) d_p \left[\frac{(U_f - U_{mf}) d_p \rho_f}{\mu_f} \right]^{-0.25} \times \left(\frac{h}{d_p} \right)^{1.45} \times \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \right)^{-0.43} \quad (5)$$

式中 h 为距布风板的高度, m ; H_{mf} 为静止床高, m ; l 为横截面计算点到中心的距离, m ; L 为横截面的宽度, m ; U_f 为气体表观速度, m/s ; U_{mf} 为最小流化速度, m/s ; d_p 为颗粒平均直径, m ; ρ_s 为颗粒材料密度, kg/m^3 ; ρ_f 为气体密度, kg/m^3 ; μ_f 为气体动力粘性系数, $\text{kg/m}\cdot\text{s}$ 。

颗粒的轴向扩散系数选择了 Lee 提出的公式^[3]:

$$D_{sa} = 1.058 A_r^{-0.368} [g(U_f - U_m)]^{1/3} D_t^{4/3} \quad (6)$$

$$A_r = \frac{d_p^3 \rho_f (\rho_s - \rho_f) g}{\mu_f^2}$$

式中 g 为重力加速度, m^2/s ; D_t 为流化床当量平均直径, m 。

图 2 和图 3 是计算时的鼓泡床和内旋流床装置图。计算坐标如图所示, 床层有效截面积为 $380 \text{ mm} \times 130 \text{ mm}$, 静止床高为 130 mm 。采用黄砂作为床料, 计算粒径取为 0.5 mm 。内旋流床中颗粒的宏观运动速度由“湾流”理论公式计算。初始时刻在床中央加入示踪粒子, 浓度为 $38 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

4 数值计算结果

为了验证计算的准确性, 将计算结果与试验结果^[5]进行了对照。试验装置类似于图 2 和图 3。试验时, 在床层表面中央区域加入示踪粒子。进行了流化时间分别为 2 s 、 5 s 、 10 s 时扩散状况的试验, 统计出相对示踪粒子浓度 n/n_0 沿床宽方向的分布。图 4 和图 5 是鼓泡床和内旋流床中相对示踪粒子浓度 n/n_0 的计算结果和试验结果的对比,

可见两者是吻合的。只有流化时间为 2 s 时的试验结果扩散得慢一些, 这是由于试验时风机的启动到砂子的正常流化需要一定时间, 粒子的扩散有一些延迟。由图中可以看出在鼓泡床中, 流化时间为 10 s 时示踪粒子才扩散得比较均匀, 而对于内旋流床, 流化时间为 5 s 时示踪粒子已扩散得相当均匀, 10 s 时示踪粒子的分布已非常均匀, 说明内旋流床具有良好的横向扩散特性, 这是由于床中存在大尺度的颗粒循环, 使得示踪粒子很快地扩散至床内各区域。

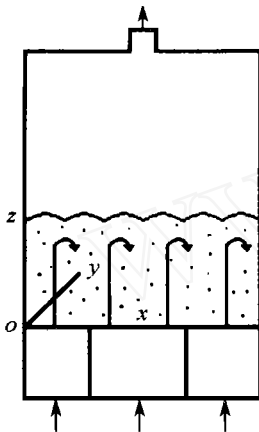


图 2 鼓泡床装置图

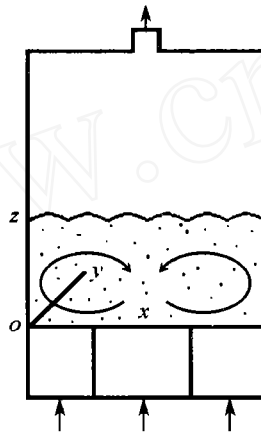


图 3 内旋流床装置图

图 6 是鼓泡床中流化时间为 2 s 时沿高度三个位置横截面的示踪粒子扩散状况。可见示踪粒子在床内已扩散开来, 但床边缘区域粒子浓度与床区中央的浓度还相差很大, 床中央区域的粒子浓度为 $4 \text{ kg}/\text{m}^3$ 左右。三个截面中的粒子向四周的扩散速度也不一样, 床上层的粒子比下层的扩散稍快一些, 这反映了均匀布风鼓泡床的扩散特性, 即示踪粒子由上层向下层, 由中心向四周逐渐扩散。图 7 是内旋流床中流化时间 2 s 时沿高度三个位置横截面的示踪粒子扩散情况, 可见示踪粒子比在鼓泡床中扩散得要快, 床中央区域的粒子浓度为 $2 \text{ kg}/\text{m}^3$ 左右。三个横截面中的粒子向四周的扩散速度特性与鼓泡床有所不同, 床下层的粒子比上层的扩散稍快一些, 这是由于在非均匀布风的内旋流床中, 在床区中央砂粒向下运动, 而在床下层砂流向两侧运动。当示踪粒子在床中央加入时, 粒子向下扩散得较快, 同时下层的粒子向两侧的扩散也较快。

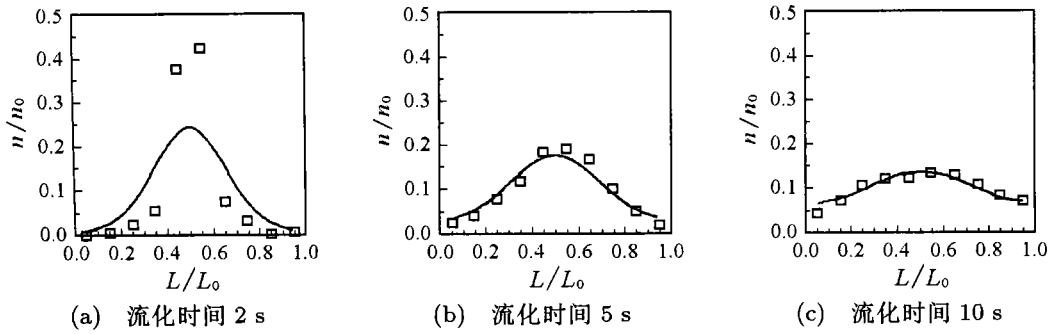


图 4 鼓泡床计算与实验结果比较

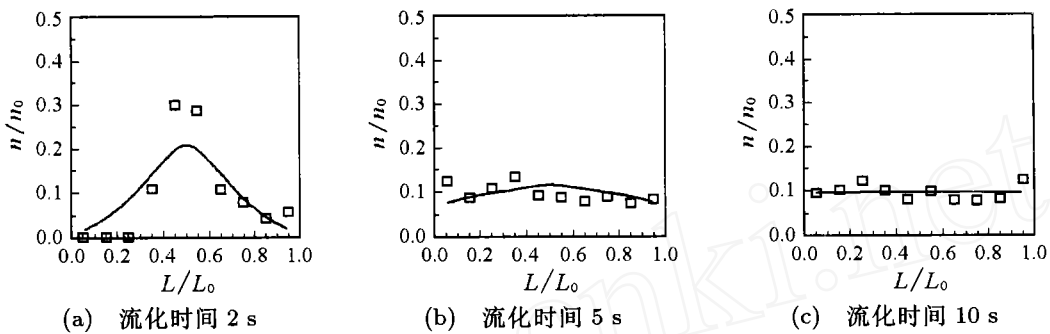


图 5 内旋流床计算与实验结果比较

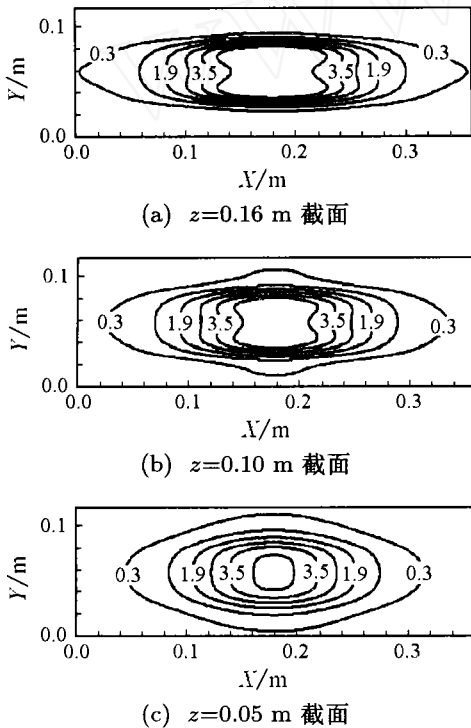


图 6 鼓泡床中流化时间 2 s 时沿三个横截面的示踪粒子扩散情况

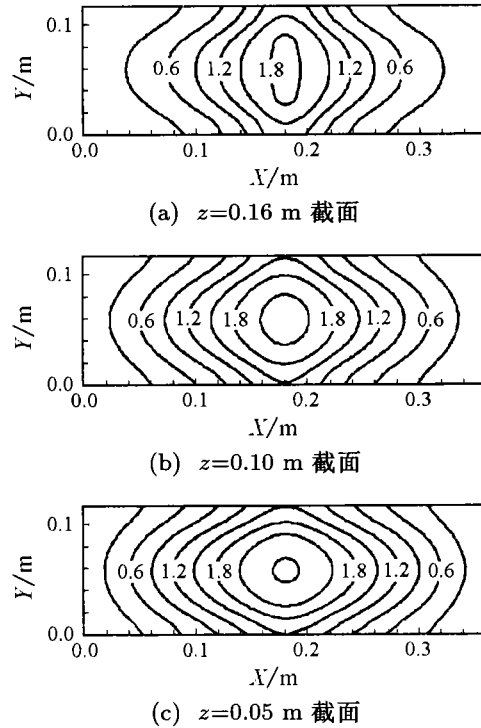


图 7 内旋流床中流化时间 2 s 时沿三个横截面的示踪粒子扩散情况

5 结 论

本文建立并求解了流化床中颗粒的扩散方程, 得到了鼓泡床和内旋流床中的粒子扩散特性。结果表明鼓泡床横向扩散能力较差, 对于所研究的对象, 需要 10 s 示踪粒子才扩散得相对均匀, 而内旋流床横向扩散能力较强, 对于所研究的对象, 仅需要 5 s 示踪粒子就扩散得相当均匀, 10 s 时示踪粒子的分布已非常均匀, 可见大尺度内旋流砂流运动对于颗粒的扩散非常有利。将计算结果和试验结果进行了对比, 两者基本吻合, 表明该方法可以用来预测实际流化床焚烧炉床内的颗粒扩散特性。

参 考 文 献

- [1] Davidson J F, Harrison D. 流态化. 北京: 科学出版社, 1981, 76-96
- [2] Berruti F, Scott D S, Rhodes E. Measuring and Modelling Lateral Solid Mixing in a Three-Dimensional Batch Gas-Solid Fluidized Bed Reactor. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1986, 64: 48-56
- [3] Lee G S, Kim S D, Baird M H I. Axial Mixing of Fine Particles in Fluidized Beds. *The Chemical Engineering Journal*, 1991, 47: 47-50
- [4] Merry J M D, Davidson J F. Gulf Stream Circulation in Shallow Fluidized Beds. *Trans Instn Chem Engrs*, 1973, 51: 361-368
- [5] 王柏懿, 田文栋, 戚隆溪. 非均质垃圾燃料的扩散与偏析特性, 第 I 部分: 三种流化床炉型的对比实验结果. 北京: 中国科学院力学研究所科技报告, 1993, IMCAS-STR 93008

THEORETICAL STUDY OF PARTICLE DIFFUSION CHARACTERISTICS IN FLUIDIZED BED INCINERATORS

WEI Xiaolin TIAN Wendong SHENG Hongzhi

(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*)

Abstract

In this paper, a particle diffusion equation has been developed and solved for fluidized bed incinerators. And the characteristics of particle diffusion is obtained for a bubbling bed and internally circulating fluidized bed (ICFB). The theoretical results are been compared with the experimental results and they coincide fairly with each other. The results show that there is a bad lateral particle diffusion characteristics in bubbling bed. However, there is a good lateral diffusion characteristics in ICFB, which is very useful to the fuel quick diffusion in the bed.

Keywords fluidized bed, particle diffusion, theoretical study