

流化床中废弃物颗粒的横向扩散特性¹⁾

王 阳^{*†} 魏小林^{*} 田文栋^{**} 盛宏至^{*}

^{*}(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

^{**}(中国科学院工程热物理研究所, 北京 100080)

[†](中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 在试验基础上计算得到内循环流化床和鼓泡床中 3 种轻质废弃物颗粒和两种重质颗粒的横向扩散系数, 发现废弃物颗粒的变形程度、密度、尺寸及布风板形状和布风方式均影响其扩散系数. 轻质颗粒的运动符合扩散规律, 重质粒子的运动则不符合该规律. 文中从流化床中气体颗粒流和不同物性废弃物相互作用的角度简要分析了物料的扩散特性.

关键词 流化床, 废弃物, 横向扩散系数

THE LATERAL DISPERSION CHARACTERISTICS OF SOLID WASTE PARTICLES IN ICFB

WANG Yang^{*†} WEI Xiaolin^{*} TIAN Wendong^{**} SHENG Hongzhi^{*}

^{*}(Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080, China)

^{**}(Institute of Engineering Thermophysics, CAS, Beijing 100080, China)

[†](Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In the present paper, based on the experimental data, the lateral dispersion coefficients of five kinds of solid waste particles are calculated in the ICFB and the bubbling bed. The results indicate that the following factors influence dispersion coefficients: the distortion extent, the density and the size of the particles; the shape of the air distributor and the mode of air distribution. The movements of light particles follow the law of diffusion; on the other hand, the movements of heavy particles do not. The particles' lateral dispersion characteristics are described and explained briefly by the interaction of gas-particle flows and waste particles with various matter properties.

Key words fluidized bed, solid waste particle, lateral dispersion coefficient

目前, 流化床作为一种反应器在化工、能源、石油、冶金等工业领域得到了广泛应用. 在流态化技术中, 流化床内各种物质的均匀混合是流化床反应器正常工作的一个重要问题. 一般的流化床具有较好的纵向均匀性, 横向上则存在较大的差异. 废弃物是一种尺寸不同、形状各异且密度变化大的混合物, 其在流化床中的扩散不完全跟随床料的运动. 目前一些学者^[1~8,10]研究了流化床中床料和气泡的运动以及一些示踪粒子的扩散性能. 但已有的研究很少考虑废弃物颗粒的物性对其横向扩散性能的影响. 因此, 本文在试验基础上计算得到 3 种轻质粒

子和两种重质粒子在鼓泡床、V 型布风板和 \wedge 型布风板内循环流化床中的横向扩散系数, 并分析了不同种类颗粒横向扩散系数不同的原因.

1 试验方法

V 型布风板、 \wedge 型布风板内循环流化床和鼓泡床 3 种试验装置及床料运动状态示意图见文献 [8]. 床料为平均当量粒径 $d_{ap} = 0.5 \text{ mm}$ 的河沙, 初始流化速度 u_{mf} 为 0.19 m/s . 床层有效截面积为 380 mm (横向) \times 130 mm (厚度), 静止床高 130 mm . \wedge 型布风板流化床两侧为高速风, 中心为低速风; V 型布风

2005-06-06 收到第 1 稿, 2006-02-15 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金项目 (59776023, 50376068) 资助.

板流化床两侧为低速风，中心为高速风，两种布风方式均形成床料的内循环流动。鼓泡床采用均匀布风。试验布风速度：内循环流化床高风区 $4.5u_{mf}$ ，低风区 $1.0u_{mf}$ ，鼓泡床 $4.0u_{mf}$ 。采用尼龙薄片、软塑料片和硬塑料片（密度分别为 $0.90 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ ， $0.91 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ ， $0.92 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ ）代表废弃物中可燃的轻质物质，铜片、铁片代表不可燃的金属和砖瓦等成分。将不同种示踪粒子瞬时放入床层表面中心，分别在 2s、5s、10s 和 120s 后停止供风，沿横向划分为多个小区域，数出每个区域内的各种粒子数目，通过示踪粒子与粒子总数之比得到各种示踪粒子沿布风板宽度方向的浓度分布 [11,12]。

2 试验数据处理

分析试验数据发现：轻质粒子在床料中迅速扩散均匀，可以用扩散模型模拟计算其扩散系数；而重质粒子（铜片和薄铁片）受重力作用影响很大，容易沉积于床底，不符合扩散运动规律，计算得到的扩散系数仅具有参考意义。

采用一维扩散模型模拟计算流化床中的废弃物横向扩散系数， x 方向沿流化床横向，起点为流化床中心处。控制方程及初边界条件如下 [5]：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{sr} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

$$t = 0, 0 \leq x \leq L', C = 1$$

$$t = 0, L' \leq x \leq L_0, C = 0$$

$$x = 0, x = L_0, \frac{\partial C}{\partial t} = 0$$

其中 t 、 C 、 D_{sr} 分别表示时间、粒子的浓度和横向扩散系数。

方程解析解为

$$C(x, t) = \frac{L'}{L_0} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi L'}{L_0}\right) \cos\left(\frac{n\pi x}{L_0}\right) \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2}{L_0^2} D_{sr} t\right)$$

利用叠代法计算废弃物在流化床中的横向扩散系数。假设一个 D_{sr} ，代入上式计算废弃物沿流化床宽度方向的浓度分布，计算浓度与试验浓度之差的均方根最小时的 D_{sr} 即为所求的横向扩散系数。

3 结果与分析

计算结果如表 1 所示。图 1、图 2、图 3 是利用表中的 3 个扩散系数计算得到的颗粒浓度与实验浓度的比较。由图可知两者符合较好，说明计算结果比较可靠。

表 1 各种粒子的横向扩散系数

	^ 型床		V 型床		鼓泡床	
	$D_{sr} (\times 10^{-4} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$		$D_{sr} (\times 10^{-4} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$		$D_{sr} (\times 10^{-4} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	
尼龙片 (3mm×6mm×0.80mm)	8.44		5.84		3.29	
软塑料片 (3mm×6mm×0.80mm)	10.83		5.7		3.53	
软塑料片 (10mm×10mm×0.50mm)	—		6.8		—	
硬塑料片 (3mm×6mm×0.80mm)	9.32		5.65		3.94	
铜片 (3mm×6mm×0.80mm)	12.6		0.78		0.56	
铁片 (10mm×10mm×0.50mm)	—		0.01		—	

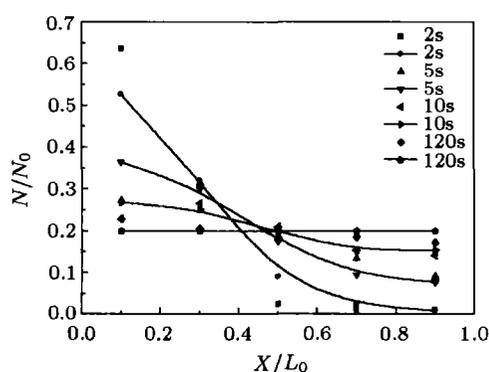


图 1 软塑料片在 V 型布风板流化床中的浓度分布，其中散点代表实验数据，点 - 实线代表计算值

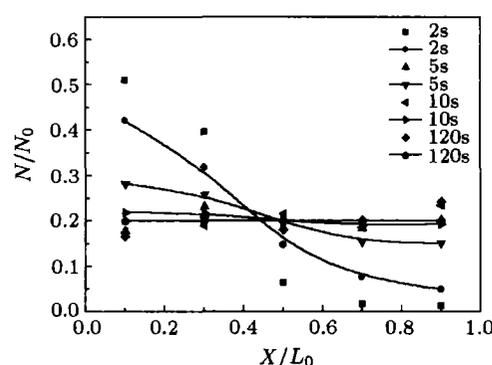


图 2 软塑料片在 ^ 型布风板流化床中的浓度分布，其中散点代表实验数据，点 - 实线代表计算值

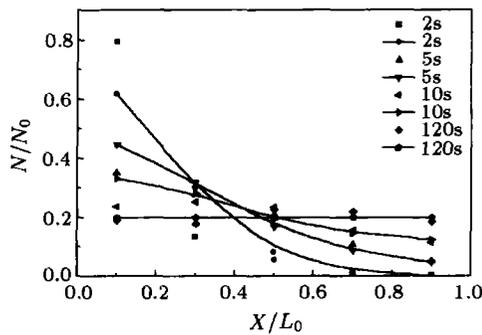


图3 硬塑料片在鼓泡床中的浓度分布,
其中散点代表实验数据,点-实线代表计算值

3.1 变形程度不同的轻质粒子扩散系数

由表1可知:相同尺寸的颗粒在 Δ 型床、V型床、鼓泡床中扩散系数依次减小。可见 Δ 型布风板最有利于颗粒的均匀扩散,这是由于其中间高、两头低的布风板结构便于中间加入的废弃物在床层底部借助重力和颗粒内循环运动迅速扩散至两侧;V型床中颗粒横向扩散必须从床层上部通过颗粒内循环运动进行,该过程需要克服自身重力影响,因而颗粒横向扩散较差;水平布风板鼓泡床中不存在宏观的颗粒内循环运动,故颗粒横向扩散最差。

V型床中尼龙片、软塑料片和硬塑料片的扩散系数依次减少;鼓泡床中三者扩散系数则依次增加; Δ 型床中,软塑料片扩散系数最大,硬塑料片次之,尼龙片最小。分析原因可能如下: Δ 型床和V型床中床料和颗粒存在大尺度的循环运动,而鼓泡床中没有大尺度循环运动,却存在许多局部的小循环。造成这一现象的因素可能有:气流和床料的运动与废弃物颗粒的相互作用以及不同废弃物组分的密度和易变形程度不同等。实验中颗粒投放在中部,中部的床料及颗粒的运动状态对扩散系数大小起主要作用。V型床中间为高速风,气流吹动床料和颗粒向上运动,然后向两侧扩散;相同尺寸的颗粒密度越小,需要克服的重力就越小,在同样的气流作用下就越容易向上运动,因此尼龙片、软塑料片和硬塑料片的扩散能力依次减少。 Δ 型床中间为低速风,风速向上,床料却带动颗粒向下运动,颗粒运动由沙粒作用力和风阻共同控制,而床中间位置的颗粒下降流对于颗粒扩散起主要作用;尼龙片材质柔软,受到沙粒碰撞后容易变形,从而减少了沙粒作用于废弃物颗粒的面积即减少了颗粒向下的作用力,故而向下运动较慢,扩散系数最小;软塑料片软硬度适中,受沙粒碰撞有一定变形从而减少了风阻,同时沙粒的作用力减少得不多,因此向下运动快,

扩散能力强;硬塑料片硬度最高,受到沙粒碰撞后变形很小,所以受到沙粒的向下作用力比尼龙片大,同时受到向上风阻也较大,两种力的联合作用令其扩散能力比尼龙片大,比软塑料片小(三者的变形示意图见图4)。鼓泡床中床料的运动可以类比水的沸腾,存在局部的循环运动,某些位置床料上升,其他位置则下降,而且沉降的速度较慢;上升区域(或下降区域)位置的出现具有随机性,因此床中间投料处床料的运动状态难以确定。所以气流、沙粒及轻质粒子自身物性如何相互作用,造成鼓泡床中尼龙片、软塑料片和硬塑料片的扩散系数依次增加的现象,其机理尚不明确,有待实验和理论工作的进一步研究。

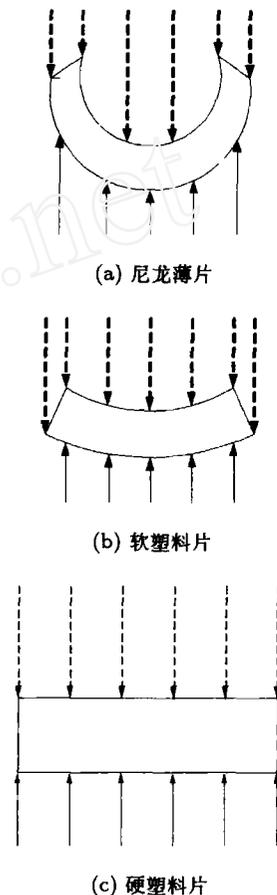


图4 3种轻质粒子在下降区域的变形示意图

(其中上部带箭头虚线表示沙粒的作用力,
下部带箭头实线为风的阻力)

3.2 尺寸大小对扩散系数的影响

10 mm×10 mm×0.5 mm 和 5 mm×5 mm×0.5 mm 的软塑料片在V型布风板内循环流化床中的横向扩散系数分别为 $6.58 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $5.7 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 表明V型布风板内循环流化床中同种颗

粒尺寸大的扩散系数可能较大。尺寸大的废弃物颗粒受到床中间上升气体 - 颗粒流的作用力也较大,因而容易向两侧扩散。但是,显然不是废弃物颗粒尺寸越大其扩散越快;过大的物料将无法均匀扩散,文献 [10] 讨论了大块物在内循环流化床中的偏析特性。为保证良好的扩散,废弃物颗粒尺寸应该有一最大上限。本文所做的关于尺寸对扩散系数影响的实验次数有限,该规律需要进一步的实验验证。

3.3 金属片的扩散系数

由表 1 可看出,铜片在 \wedge 型布风板内循环流化床、V 型布风板内循环流化床和鼓泡床中的扩散系数分别为 $12.6 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $0.78 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $0.56 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。铜片在 \wedge 型布风板内循环流化床的扩散系数之所以很大,是由于物料颗粒从中心处投放,由颗粒下降流带动很快下降,并沿着中间高、两侧低的倾斜布风板向两侧滑动,最后完全聚集到布风板两侧最低处,因此该系数不能说明铜片可以在床料中均匀扩散;而 V 型布风板内循环流化床和鼓泡床中,铜片从中部投放,最后主要聚集在布风板底部的中央位置,所以计算得到的扩散系数很小。实验和计算结果都表明:重质粒子在流化床中易于沉积到底部,其运动不符合扩散规律。

4 结 论

\wedge 型布风板内循环流化床、V 型布风板内循环流化床、鼓泡床中颗粒的横向扩散性能依次减少。轻质粒子在流化床中很快均匀分布开来,重质粒子则很快偏离析出。轻质粒子自身物性对其扩散系数有影响:V 型床中尼龙片、软塑料片和硬塑料片的扩散系数依次减少;鼓泡床中三者扩散系数则依次增加; \wedge 型床中,软塑料片扩散系数最大,硬塑料片次之,尼龙片最小。V 型布风板内循环流化床中,同种材质粒子尺寸大的扩散系数大。由于不同类型内循环流化床的横向扩散系数是由其内部流场和颗粒碰撞等复杂因素决定的,因此本文的结论尚需在更大的适用范围内加以检验。

参 考 文 献

- Shi YF, Fan LT. Lateral mixing of solids in batch gas-solids fluidized beds. *Ind Eng Chem Process Des Dev*, 1984, 23: 337~341
- Berruti F, Soott DS, Rhodes E. Measuring and modeling lateral solid mixing in a three-dimensional batch gas-solid fluidized bed reactor. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1986, 64: 48~56
- Cho YJ, Kim SD. Radial solid mixing characteristics in shallow gas fluidized beds. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 1994, 27(4): 541~544
- 路春美, 尹薇, 栾涛. 光导纤维测量流化床内颗粒的运动特性. 山东工业大学学报, 1998, 28(1): 28~32 (Lu Chunmei, Yin Wei, Luan Tao. The movement characteristics of the particle in the fluidized bed measured by optical fiber. *Journal of Shandong University of Technology*, 1998, 28(1): 28~32 (in Chinese))
- 尹斌, 章明川, 唐春捷等. 内循环流化床气泡运动特性的可视化研究. 动力工程, 2003, 23(1): 2143~2145, 2153 (Yin Bin, Zhang Mingchuan, Tang Chunjie, et al. Visualized research on movement characteristics of bubbles in an internally circulating fluidized bed. *Power Engineering*, 2003, 23(1): 2143~2145, 2153 (in Chinese))
- 田文栋, 魏小林, 孙满弟等. 图像技术在非均匀布风流化床颗粒运动分析中的应用. 力学与实践, 2001, 23(3): 35~38 (Tian Wendong, Wei Xiaolin, Sun Mandi, et al. Application of digital image technology in analysis of particle movement in fluidized bed with uneven air distribution. *Mechanics in Engineering*, 2001, 23(3): 35~38 (in Chinese))
- 尹斌, 章明川, 范浩杰等. 内循环流化床颗粒流动特性的直接数值模拟. 动力工程, 2004, 24(2): 249~253, 275 (Yin Bin, Zhang Mingchuan, Fan Haojie, et al. Direct numerical simulation on particles flow in the internally circulating fluidized bed. *Power Engineering*, 2004, 24(2): 249~253, 275 (in Chinese))
- 魏小林, 田文栋, 黎军等. 废弃物颗粒在非均匀布风流化床中的横向扩散特性. 燃烧科学与技术, 2001, 7(4): 290~293 (Wei Xiaolin, Tian Wendong, Li Jun, et al. Characteristic of lateral diffusion of waste particles in fluidized bed with uneven air distribution. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2001, 7(4): 290~293 (in Chinese))
- 路春美, 许炳松. 内循环流化床颗粒动力特性的研究. 热能动力工程, 1997, 12(5): 335~338 (Lu Chunmei, Xu Bingsong. The research on the particle's movement characteristics in the ICFB. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 1997, 12(5): 335~338 (in Chinese))
- 尹斌, 章明川, 唐春捷等. 大块物在内循环流化床中停留时间的试验研究. 电站系统工程, 2003, 19(1): 41~43 (Yin Bin, Zhang Mingchuan, Tang Chunjie, et al. Experimental research on residence time of bulk noncombustibility of waste in a cold position device of ICFB. *Power System Engineering*, 2003, 19(1): 41~43 (in Chinese))
- 王柏麟, 田文栋, 戚隆溪. 非均质垃圾燃料的扩散与偏析特性 I: 三种流化床型的对比试验结果. 中国科学院力学研究所研究报告, IMCAS STR-93008, 1993. 1~34 (Wang Boyi, Tian Wendong, Qi Longxi. Dispersion and segregation characteristics of different sorts of solid waste fuel (I): Comparison of experimental results of three kinds of fluidized beds. Report of Institute of Mechanics, CAS, IMCAS STR-93009, 1993. 1~34 (in Chinese))
- 盛宏至, 田文栋, 黎军. 非均质垃圾燃料的扩散与偏析特性 II: 不同密度不同尺度示踪粒子的对比试验结果. 中国科学院力学研究所研究报告, IMCAS STR-93009, 1993. 1~19 (Sheng Hongzhi, Tian Wendong, Li Jun. Dispersion and segregation characteristics of different sorts of solid waste fuel (II): Comparison of experimental results of tracer particles with various density and size. Report of Institute of Mechanics, CAS, IMCAS STR-93009, 1993. 1~19 (in Chinese))