

# 废弃物颗粒在非均匀布风流化床中的横向扩散特性\*

魏小林<sup>1</sup>, 田文栋<sup>2</sup>, 黎 军<sup>1</sup>, 吴东垠<sup>1</sup>, 盛宏至<sup>1</sup>

(1. 中国科学院力学研究所能源与环境工程研究室, 北京 100080;

2. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100080)

**摘 要:** 在试验基础上, 分析了非均匀布风流化床中废弃物的横向扩散系数。表明配风方式对于燃料颗粒的扩散有很大影响,  $\Lambda$  字型布风板的横向扩散系数最大,  $V$  字型布风板较小, 鼓泡床最小。同时发现内旋流床中沿床宽的扩散系数值有较大不同, 并给出了不同布风方式流化床中废弃物的横向扩散系数公式。

**关键词:** 内旋流; 流化床; 废弃物; 扩散

中图分类号: O 359

文献标识码: A

文章编号: 1006-8740(2001)04-0290-04

## Characteristic of Lateral Diffusion of Waste Particles in Fluidized Bed with Uneven Air Distribution

WEI Xiao-lin<sup>1</sup>, TIAN Wen-dong<sup>2</sup>, LI Jun<sup>1</sup>, WU Dong-yin<sup>1</sup>, SHENG Hong-zhi<sup>1</sup>

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** The characteristics of lateral diffusion of waste particles in fluidized bed with uneven air distribution is analyzed based on the experimental results. The results indicate that the pattern of air distribution has strong influence on the diffusion of fuel particle. The lateral diffusion coefficients of " $\Lambda$ " type of air distributor are the greatest and those of " $V$ " type of air distributor are less and those of bubbling bed are the least. It is found that the diffusion coefficients are very different along the bed width in the internal circulating fluidized bed, and the lateral diffusion coefficients equations are induced for waste particles in fluidized bed with different patterns of air distribution.

**Keywords:** internal circulating flow; fluidized bed; waste; diffusion

处理生活废弃物的主要方法有填埋、堆肥和焚烧等。其中, 焚烧由于处理彻底, 能够保证很高的减容比和减量比, 日益获得重视。

焚烧采用的炉型一般有炉排炉、流化床炉以及滚转窑等。炉排炉作为传统的废弃物焚烧炉应用最广, 但它需要能够耐高温、耐腐蚀的特殊炉排, 而且炉排炉焚烧废弃物时的减容比也稍小。滚转窑炉的燃烧不彻底, 经常与炉排炉连接在一起进行废弃物焚烧。流化床焚烧炉是一种新型的焚烧装置, 焚烧后减容比大, 同时省

略了昂贵的特殊炉排, 只采用布风板结构。目前国内已有几家单位在研究开发流化床焚烧炉, 如中科院、浙江大学和清华大学等<sup>[1,2]</sup>, 各家的流化床均有其特点, 而我们主要研究非均匀布风流化床(即内旋流床)在垃圾焚烧中的应用及其机理<sup>[3]</sup>。

流化床中颗粒的扩散对于燃烧非常重要, 因为焚烧时必须保证废弃物在床内快速、均匀地横向扩散。鼓泡流化床内的颗粒横向扩散特性已有很多人研究过<sup>[4-6]</sup>, 得到了一些扩散系数的公式。但这些工作只是

\* 收稿日期: 2000-01-31; 修回日期: 2000-06-16

基金项目: 中国科学院重点项目(KY95T-03-02); 国家自然科学基金资助项目(59776023)。

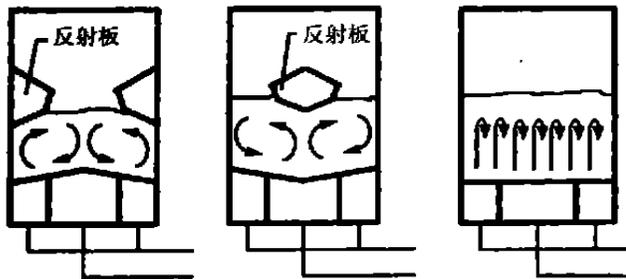
作者简介: 魏小林(1967-), 男, 博士, 副研究员。

针对与床料粒径和密度相同的示踪粒子来进行, 因此研究的只是床料本身的扩散系数, 未考虑燃料颗粒在尺寸及密度上与床料的不同。同时这些实验只针对均匀布风的鼓泡床, 未考虑采用非均匀布风时的扩散特性。文献[7]对非均匀布风内旋流床的颗粒扩散进行了理论分析, 但也假设示踪粒子完全跟随床料运动。

废弃物是一种尺寸不同、形状各异且密度变化大的混合物, 它在流化床中的扩散特性与一般燃料是不相同的。其中轻质成分(可燃物质, 塑料、纸张等)为片状, 在流化床中扩散时将滞后于床料运动, 而重质成分(不燃物质, 金属、砖瓦等)易沉积于床底, 基本不随床料运动, 只存在局部的横向移动, 可见废弃物在流化床中的扩散不完全跟随床料的运动。本文在已有试验数据的基础上, 分析并计算了内旋流床中废弃物横向扩散系数, 得到了废弃物在非均匀布风流化床中的扩散规律。

### 1 试验方法

采用了 3 套试验装置, 分别为  $\Lambda$  字型布风板 V 字型布风板流化床(非均匀布风)以及鼓泡流化床(均匀布风)研究燃料的横向扩散特性, 试验装置见图 1。采用平均当量粒径  $d_p = 0.5 \text{ mm}$  的河砂作为床料, 初始流化速度  $u_{mf}$  为  $0.19 \text{ m/s}$ 。床层的有效截面积为  $380 \text{ mm}$  (横向)  $\times 130 \text{ mm}$  (厚度), 静止床高  $130 \text{ mm}$ 。



(a)  $\Lambda$  型布风板 (b) V 型布风板 (c) 鼓泡

图 1 3 种冷态模型试验装置示意图

3 个试验装置均使用分段布风, 风室分为 3 部分, 两侧风室面积相等且等于中心风室面积的一半。 $\Lambda$  字型布风板, 两侧为高速风, 中心为低速风; V 字型布风板, 两侧为低速风, 中心为高速风, 两种布风方式均形成床料内旋流。鼓泡床采用均匀布风。试验布风速度为: 内旋流流化床高风区  $4.5u_{mf}$ , 低风区空气流速为  $1.0u_{mf}$ , 鼓泡床  $4.0u_{mf}$ , 三种流化床的总风量一致。

为了模拟废弃物中的不同成分, 选用了比较轻的尼龙薄片、软塑料片和硬塑料片(密度为  $0.8 \times 10^3 \sim$

$1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ )代表纸张、食品袋、塑料、橡胶、食品、草木等这一类可以燃烧的轻质物质, 用金属铜片代表不可燃的金属和砖瓦等成分。以上各种示踪粒子尺寸均为  $3 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 。

将 4 种示踪粒子各 200 粒瞬时放入到床层表面对称线处, 分别在 2, 5, 10 和 120 s 后停止供风, 沿横向划分为多个小区域, 见图 2, 数出每个小区域内的各种粒子的数目, 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方向的浓度分布<sup>[8,9]</sup>。

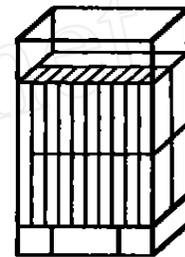


图 2 取样区域

### 2 试验数据处理

对试验结果的分析发现, 不同种类轻质粒子的扩散速度非常接近, 处理数据时对三种轻质粒子的浓度分布数据进行了平均。另外, 由于重质粒子的扩散受重力的影响很大, 容易沉积于床底, 不符合扩散运动的规律, 因此未对重质粒子的数据进行分析。

采用一维扩散模型来分析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。控制方程如下<sup>[4]</sup>

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{sr} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \tag{1}$$

初始及边界条件为

$$t = 0, 0 \leq x \leq L_0, C = 1 \tag{2}$$

$$t = 0, L_0 < x \leq L_0, C = 0 \tag{3}$$

$$x = 0, x = L_0, \frac{\partial C}{\partial x} = 0 \tag{4}$$

采用分离变量法求解上面的方程, 并利用给出的初始边界条件, 得到

$$C(x, t) = \frac{L_0'}{L_0} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi x}{L_0}\right) \cos\left(\frac{n\pi x}{L_0}\right) \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 D_{sr} t}{L_0^2}\right) \tag{5}$$

利用叠代法计算废弃物在流化床中的横向扩散系数, 首先假设一个  $D_{sr}$ , 然后计算一个废弃物沿流化床宽度的浓度分布, 当计算浓度与试验浓度之差的均方根值为最小时的  $D_{sr}$ , 即为所要求解的横向扩散系数。

### 3 结果与分析

影响流化床中的颗粒横向扩散系数的因素很多, 诸如表观气流速度、床料厚度、颗粒直径和密度以及气体密度和粘度等, 可以采用下式来表示鼓泡流化床中的颗粒横向扩散系数<sup>[4]</sup>

$$\frac{D_{sr}}{(u - u_{mf})h_{mf}} = 0.46 \left[ \frac{(u - u_{mf})d_p \rho_f}{\mu_f} \right]^{-0.21} \cdot \left[ \frac{h_{mf}}{d_p} \right]^{-0.24} \cdot \left[ \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f} \right]^{-0.43} \quad (6)$$

表 1 给出了废弃物在不同流化床中的横向扩散系数实验值以及用式 (6) 计算得到的相同流化速度下的鼓泡床横向扩散系数。

表 1 废弃物与砂粒的横向扩散系数

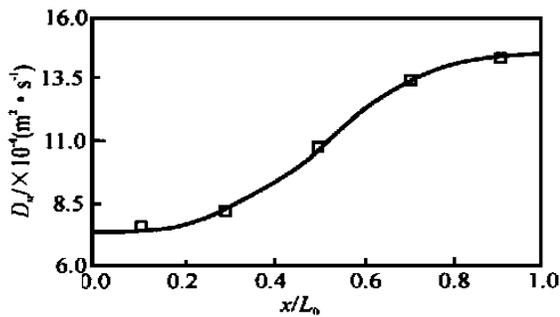
流化床类型	流化速度 / (m · s <sup>-1</sup> )	废弃物的 D <sub>sr</sub> / (m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> )	砂粒的 D <sub>sr</sub> / (m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> )
Δ 字型布风板	0.2~0.93	(7.65~14.2) × 10 <sup>-4</sup>	18.5 × 10 <sup>-4</sup>
V 字型布风板	0.2~0.93	(4.30~5.69) × 10 <sup>-4</sup>	18.5 × 10 <sup>-4</sup>
普通鼓泡床	0.4	3.92 × 10 <sup>-4</sup>	11.7 × 10 <sup>-4</sup>

从表 1 可看出废弃物的 D<sub>sr</sub> 比砂粒的要小, 表明废弃物的扩散滞后于砂粒。在流化床中, 当废弃物进入砂床后, 在砂流的作用下, 不断地运动和扩散, 由于废弃物的尺寸远大于砂粒的直径, 在扩散过程中受到一定的阻力, 因此废弃物的扩散可能会滞后于砂粒的扩散。

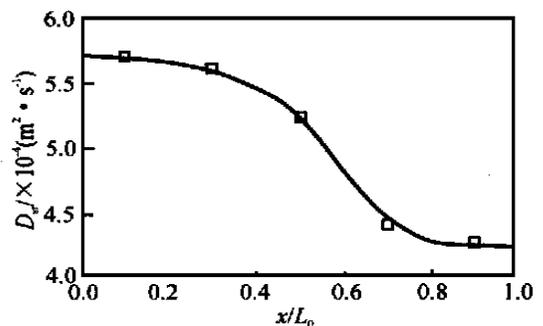
结果还表明布风方式对于流化床的 D<sub>sr</sub> 有较大影响, 鼓泡床的废弃物扩散系数最小 (D<sub>sr</sub> = 3.92 × 10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/s), 而两种内旋流床的扩散系数较大 (表中给出的

系数是 D<sub>sr</sub> 的变化范围), 对于 Δ 字型布风板, 其平均扩散系数为 10.8 × 10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/s, 对于 V 字型布风板, 其平均扩散系数为 5.05 × 10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/s, 显然非均匀布风增强了废弃物的扩散。Δ 字型布风板的配风方式为两侧高中心低, 有利于中心的废弃物向下扩散, 然后经过两侧高速风的鼓冲, 使得废弃物颗粒扩散较快。而 V 字型布风板的配风方式为中心高两侧低, 使得中心的废弃物不利于与砂流的混合与扩散, 而两侧的风速较小, 扩散能力有限, 可见 V 字型布风板没有充分发挥内旋流增强扩散的作用。鼓泡床由于不存在内旋流, 因此其横向扩散能力最差。

流化床中的非均匀布风方式对其横向扩散系数的分布也有很大影响。图 3 给出了 Δ 字型和 V 字型布风板的 D<sub>sr</sub> 沿床宽的分布状况, 图中方块表示用试验数据分析得到的 D<sub>sr</sub> 值, 而曲线为这些数据的拟合线。对于 Δ 字型布风板, 中心区域的扩散系数稍小, D<sub>sr</sub> = 7.65 × 10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/s, 进入高风区, D<sub>sr</sub> 很快上升至两倍于中心区域的 D<sub>sr</sub> 值, 达到 14.2 × 10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/s。对于 V 字型布风板, 侧壁处的风速较小, 因此 D<sub>sr</sub> 的值也较小, 只有当 4.30 × 10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/s, 而中心区域的 D<sub>sr</sub> 达到 5.69 × 10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/s。可见非均匀布风对于流化床中沿床宽的 D<sub>sr</sub> 分布有很大影响, 在高速风区, 由于流化速度较高, 则 D<sub>sr</sub> 较大; 在低速区由于流化床速度接近 u<sub>mf</sub>, 则 D<sub>sr</sub> 较小; 而在高速风和低速风区之间, 由于两个区域的相互作用和空气的相互渗透, 形成了床内砂流的循环运动, 因此在两区之间存在着 D<sub>sr</sub> 急剧变化的过渡区, 这就是内旋流床与鼓泡床扩散特性的不同之处。



(a) Δ 字型布风板流化床



(b) V 字型布风板流化床

图 3 废弃物的横向扩散系数沿床宽的分布特性

本文研究内旋流流化床中的废弃物扩散状况, 主要针对不同布风方式对于流化床中燃料颗粒横向扩散系数的影响, 其它因素的影响利用上面的经验公式 (6) 考虑。考虑到内旋流床中非均匀布风对于扩散系数的影响, 可以将 D<sub>sr</sub> 拟合为下式:

Δ 字型布风板流化床

$$D_{sr} \Big|_{x/L_0} = (0.08325 \frac{u}{u_{mf}} + 0.3389) \times (D_{sr})_b \quad (7)$$

V 字型布风板流化床

$$D_{sr} \Big|_{x/L_0} = (0.01819 \frac{u}{u_{mf}} + 0.2196) \times (D_{sr})_b \quad (8)$$

式中:  $D_{sr}|_{x/L_0}$  为不同区域的废弃物横向扩散系数;  $u$  为不同区域的流化速度;  $(D_{sr})_b$  为对于过渡区流化速度用公式(6)计算的鼓泡床砂粒的横向扩散系数。

利用式(7, 8, 6)计算得到了  $\Lambda$  字型、V 字型布风板流化床和鼓泡床的横向扩散系数, 并利用横向扩散

系数得到了每个采样区域内示踪粒子数  $N$  和总示踪粒子数  $N_0$  之比(如图4中曲线所示), 与试验值进行了比较, 两者吻合良好, 说明文中得到的  $D_{sr}$  值能够较好地表达废弃物在流化床中的扩散状况。

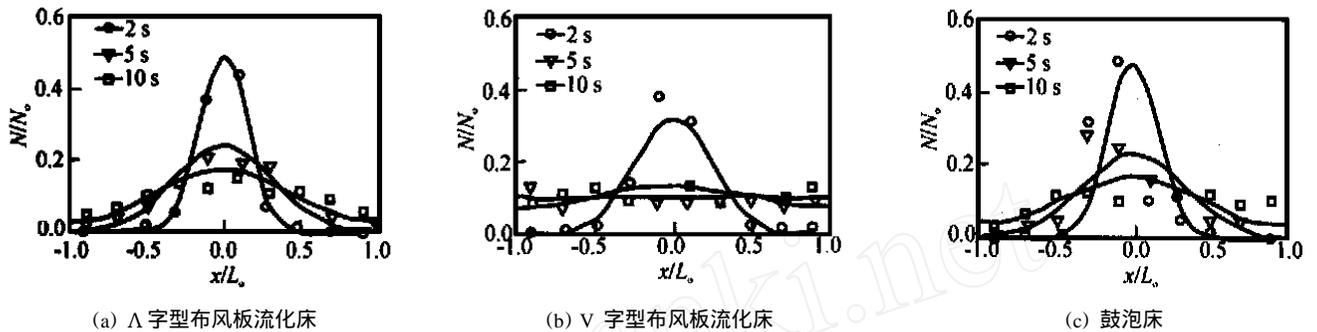


图4 浓度分布计算值与试验值的比较

## 4 结论

本文分析了非均匀布风流化床(即内旋流床)中废弃物的横向扩散系数, 结果表明废弃物的扩散系数小于相同流化速度下的砂粒的扩散系数, 说明废弃物在流化床中的扩散滞后于砂粒。布风方式对于燃料颗粒的扩散也有很大影响,  $\Lambda$  字型布风板的横向扩散系数最大, V 字型布风板的扩散系数较小, 而鼓泡床的扩散系数最小。同时发现非均匀布风对于流化床中沿床宽的  $D_{sr}$  分布有较大影响, 高速风区的  $D_{sr}$  较大; 低速风区的  $D_{sr}$  较小; 而在高速风和低速风区之间, 存在  $D_{sr}$  急剧变化的过渡区, 这就是非均匀布风流化床与均匀布风流化床(即鼓泡床)扩散特性的不同之处。最后, 给出了不同布风方式流化床中废弃物的横向扩散系数公式。

### 符号说明:

- $C$ ——颗粒浓度(示踪颗粒与床料的体积比);  
 $D_{sr}$ ——颗粒横向扩散系数,  $m^2/s$ ;  
 $d$ ——颗粒直径,  $m$ ;  
 $h$ ——床高,  $m$ ;  
 $L_0$ ——流化床的半宽度,  $m$ ;  
 $L'$ ——放置废弃物颗粒的半宽度,  $m$ ;  
 $t$ ——时间,  $s$ ;  
 $u$ ——流化介质速度,  $m/s$ ;  
 希腊字母:  
 $\mu$ ——动力粘性系数,  $kg/(m \cdot s)$ ;  
 $\rho$ ——密度,  $kg/m^3$ ;

下标:

- f——流体;  
 mf——最小流化状态;  
 p——固体颗粒。

### 参考文献:

- [1] 杨振良, 方建华, 曹俊斌, 等. 垃圾焚烧炉的设计原则及应用[A]. 北京: 中国工程热物理学会燃烧学学术会议论文集[C]. 1998, VII: 63-68
- [2] 蒋旭光, 池涌, 李晓东, 等. 生活垃圾/煤混烧流化床焚烧试验研究[A]. 北京: 中国工程热物理学会燃烧学学术会议论文集[C]. 1998, III: 1-16
- [3] 盛宏至, 黎军, 魏小林, 等. 燃烧高水分低热值燃料的内旋流化床燃烧技术研究[J]. 燃烧科学与技术, 1997, 3(3): 309-315
- [4] Shi Y F, Fan L T. Lateral Mixing of Solids in Batch Gas-Solids Fluidized Beds[J]. Ind Eng Chem Process Des Dev, 1984, 23: 337-341.
- [5] Berruti F, Soott D S, Rhodes E. Measuring and Modeling Lateral Solid Mixing in a Three-dimensional Batch Gas-Solid Fluidized Bed Reactor[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1986, 64: 48-56
- [6] Cho Y J, Kim S D. Radial Solid Mixing Characteristics in Shallow Gas Fluidized Beds[J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 1994, 27(4): 541-544
- [7] 魏小林, 田文栋, 盛宏至. 流化床焚烧炉中颗粒扩散特性理论研究[J]. 工程热物理学报, 1999, 20(5): 462-466
- [8] 王柏懿, 盛宏至, 戚隆溪, 等. 废弃物燃烧及流化床焚烧炉冷模实验研究[J]. 工程热物理学报, 1994, 15(4): 453-456
- [9] 盛宏至, 黎军, 田文栋. 非均匀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实验结果[R]. 北京: 中国科学院力学研究所科技报告 MCA-S-STR 93009, 1993: 1-10