

错流移动床的压降特性

陈允华, 朱学栋, 吴勇强, 朱子彬

(华东理工大学化学工艺研究所, 上海 200237)

摘要: 在矩形移动床内考察了颗粒下移速度、颗粒堆积状态及空腔生成和长大发展过程等因素对压降的影响. 在错流气体速度为 0.09~1.35 m/s、颗粒下移速度为 0.95~9.68 cm/min 的较大变化范围内进行了实验研究. 结果表明, 颗粒下移速度对压降几乎没有影响; 当错流流速足够大时移动床内将出现“空腔”和“贴壁”等现象, 空腔的发展过程造成压降随时间出现稳定、微波脉动和大幅波动 3 种变化; 欧根公式适用于低错流流速时的移动床压降; 高错流流速下空腔出现了“生成-长大-塌落-流化”的循环变化过程. 在实验基础上建立了有空腔时的移动床压降模型, 并对空腔尺寸进行了无因次关联, 其床层压降的计算结果与实验值相符.

关键词: 错流移动床; 空腔; 压降

中图分类号: TQ051.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2006)05-0697-06

1 前言

错流移动床技术由于其低压降、高通量、操作连续等优点广泛应用于炼油催化重整、脱硫、除尘等场合. 气体通过床层的压降是移动床设计和操作中的重要参数. 流体通过颗粒床层的压降计算应用最广泛的是欧根公式^[1,2]. 但移动床颗粒层处于不断移动状态中, 并受到错流气体的影响, 当错流流速超过一定值时, 移动床内将出现“空腔”或“贴壁”等现象, 影响移动床的操作. 国内外对移动床压降的研究以及对移动床内颗粒移动、空腔等因素影响的报道并不多见. 张立平等^[3]、赵建涛等^[4]在研究移动床除尘时分别对欧根公式进行修正用以计算移动床压降, 宋续祺等^[5,6]也比较了移动床与固定床的压降. 但是前人的工作仅是在低流速和低 Reynolds 数 (Re) 下的研究, 如文献^[3]中 Re 范围为 2~12.5, 文献^[4]中错流气体表观流速小于 0.3 m/s. 而一般催化重整移动床反应器内气体径向速度通常大于 0.5 m/s, $Re > 40$, 因而上述研究结论难以直接应用于移动床反应器压降的计算.

本工作以 2 种颗粒为物料, 在错流流速为 0.09~1.35 m/s, Re 为 10~200 的较大变化范围内对移动床压降进行研究, 考察了颗粒下移速度、堆积状态、床内空腔的生成和长大变化过程等因素对压降的影响.

2 实验装置与流程

如图 1 所示, 实验装置由料斗、移动床层主体以及排料机组成. 为方便观察床层内颗粒状态, 移动床主体材料使用透明的有机玻璃. 错流区床层高度 H 为 430

mm, 上下均有料封段, 其中上部料封段高 H 为 420 mm, 下部料封高 H' 为 700 mm, 床厚度 D 为 120 mm, 沿气流方向的床层长度 L 为 400 mm. 为保证流入床层的气速均匀, 在床层进气面(称为上流面)设置了文丘里式渐扩段及整流格栅. 颗粒排料采用星形排料器, 由步进电机带动, 变频装置控制电机转速以控制床内颗粒流速.

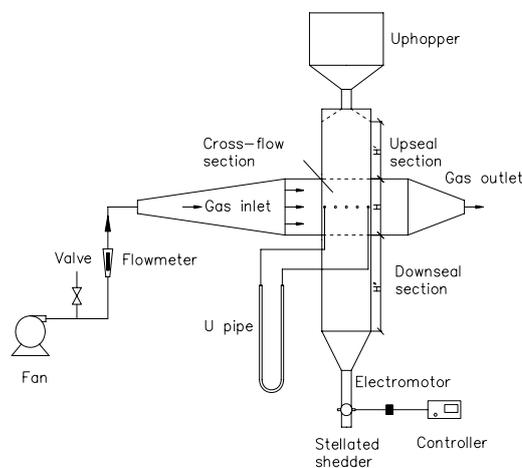


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of apparatus

实验以小米、催化剂 2 种颗粒为物料, 平均直径分别为 1.92 和 2.22 mm, 自然堆积密度分别为 803 和 1104 kg/m³. 颗粒物料从装置顶部储槽流入矩形床层, 在重力作用下垂直下移穿过床层; 气体则由风机沿水平方向输入, 在装置内与下移的颗粒物料形成错流. 气体流量由校正的转子流量计测量, 并将体积流量与床层截面积之商作为错流气体速度 u_p . 测压仪测量气流过床层的压

降, 由于测量均在床层内进行, 故可忽略壁面材料的影响.

3 结果与讨论

3.1 颗粒下移速度对床层压降的影响

考察颗粒下移速度对过床压降的影响, 颗粒下移速度范围为 0.95~9.68 cm/min, 错流风速范围 0.09~0.56 m/s. 实验测定结果如图 2 所示, 在上述实验条件下颗粒下移速度对过床压降几乎没有影响, 即可不考虑颗粒下移速度变化对移动床层空隙率的影响.

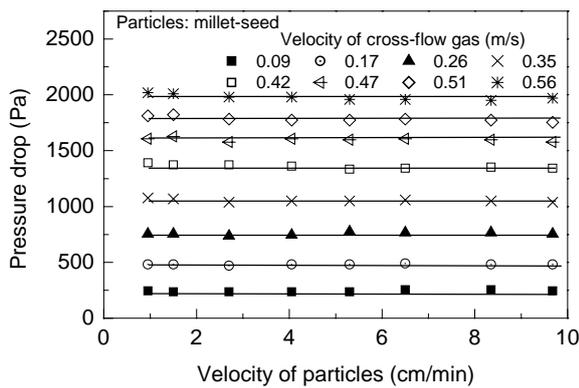


图 2 颗粒下移速度对压降的影响
Fig.2 Effect of particle speed on pressure drop

3.2 压降随时间的波动

由于移动床中颗粒的移动与气体的流动方向相垂直, 当错流风速足够大时, 将会对颗粒层的移动产生影响, 可出现 2 种不正常的现象: (1) 随着错流风速的增加, 上流面处的颗粒与上流壁面相脱离而形成“空腔”, 空腔的形成将使气体沿床层轴向分布不均; (2) 如果错流风速达到足够大时, 气流作用使颗粒床层与下流面的摩擦力足以支撑部分床层重量, 则颗粒将停止移动而形成“贴壁”, 贴壁的出现使床层形成死区^[5,6].

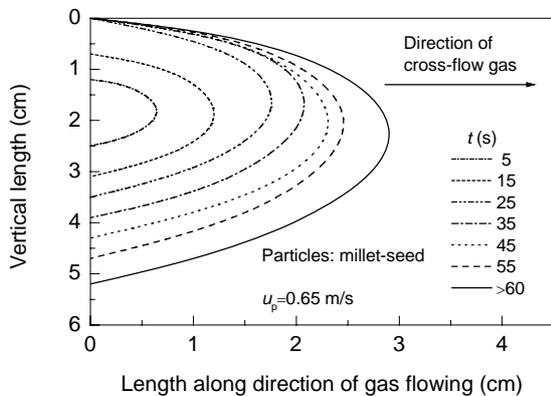


图 3 空腔的生成和长大过程
Fig.3 The process of forming and developing of a cavity

空腔总是出现在上流面顶端, 形状近似为半圆形, 一定错流风速下只能形成一定大小的空腔. 空腔是一种动态过程, 图 3 所示为空腔发展过程, 图中曲线为实验开始后不同时刻的空腔边界, 从形成空腔后经过大约 1~2 min 后达到最大. 但由于颗粒床层处于不断运动状态中, 移动床内的空腔不能长久保持稳定, 一定时间后将会塌落, 在上流面顶端形成局部流化, 而后重新生成空腔, 即空腔存在“生成-长大-塌落-流化”的循环过程.

对应于空腔的发展, 移动床压降表现出随时间的波动. 移动床压降-时间曲线在不同风速范围内可出现 3 种类型, 图 4 以小米颗粒为例说明: (1) 在低错流风速下, 如图中 $u_p < 0.84$ m/s 时, 压降保持稳定, 随时间几乎没有变化; (2) 在稍高的错流风速下, 如 $u_p = 1.05$ m/s, 此时移动床内的空腔较大, 已能影响压降, 空腔塌落后的流化状态通常能维持较长时间, 因而相应的压降随时间在某一值上下微波脉动; (3) 在高错流风速下, 如 $u_p > 1.21$ m/s 时, 随着空腔的循环发展, 压降-时间曲线出现周期性大幅波动, 其间隔时间约为 50~100 s.

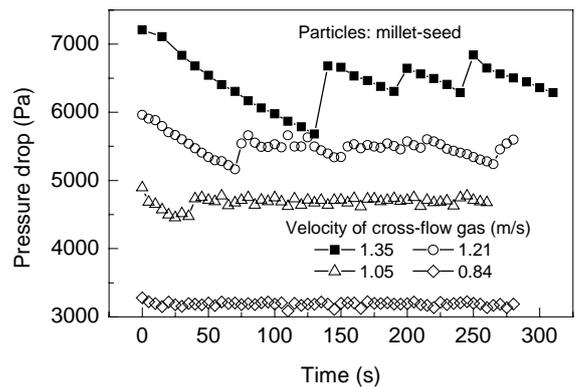


图 4 移动床过床压降随时间的变化
Fig.4 Variation of pressure drop on time

3.3 移动床与固定床压降的比较

图 5 表示了固定床与移动床的压降-风速关系, 固定床 A 表示颗粒刚填装后的情况, 相当于颗粒自然堆积状态; 固定床 B 表示将床层颗粒堆实的情况, 相当于颗粒的紧密堆积状态. 移动床压降由于受到空腔影响不断波动, 取其最小值, 即空腔最大时的压降值.

图 5(a)是以小米为颗粒介质的实验, 由图可见, 固定床 A 的压降与固定床 B 相比差别明显, 即颗粒层自然堆积状态的压降小于紧密堆积状态, 而移动床的压降更低于紧密堆积的固定床 B 的情况. 在较低错流风速下 ($u_p < 0.4$ m/s), 移动床的压降与固定床 A 相近, 但更低一些, 相差不到 5%; 随着错流风速的增加, 当错流风速

大于某一值时, 如 $u_p > 0.6 \text{ m/s}$, 移动床的压降明显小于同样气速下固定床 A 的压降, 说明此时移动床内颗粒状态发生了较大变化. 其原因是, 随着错流气速的增加, 移动床内出现空腔, 初始空腔很小, 对压降影响不大; 空腔尺寸随错流气速的增大而增大, 因而移动床压降与固定床 A 相差越来越大, 当错流气速超过一定值时, 二者的差别变得明显, 这一气速可以作为空腔临界气速的一种判断方法^[6], 但比空腔临界气速稍大一些.

以催化剂为颗粒介质的实验也有类似情况, 见图 5(b). 由于物性的差别, 空腔发生的临界气速也有差异, 当错流气速 $u_p < 0.8 \text{ m/s}$ 时, 移动床压降与固定床 A 相近, 与固定床 B 相差较大; 当 $u_p > 0.9 \text{ m/s}$ 时, 移动床的压降才明显小于同样气速下固定床 A 的压降.

由上可见, 移动床与固定床不同, 其压降的计算必须分别考虑无空腔出现和有空腔 2 种状态, 以及空腔的变化和长大对床层压降的影响.

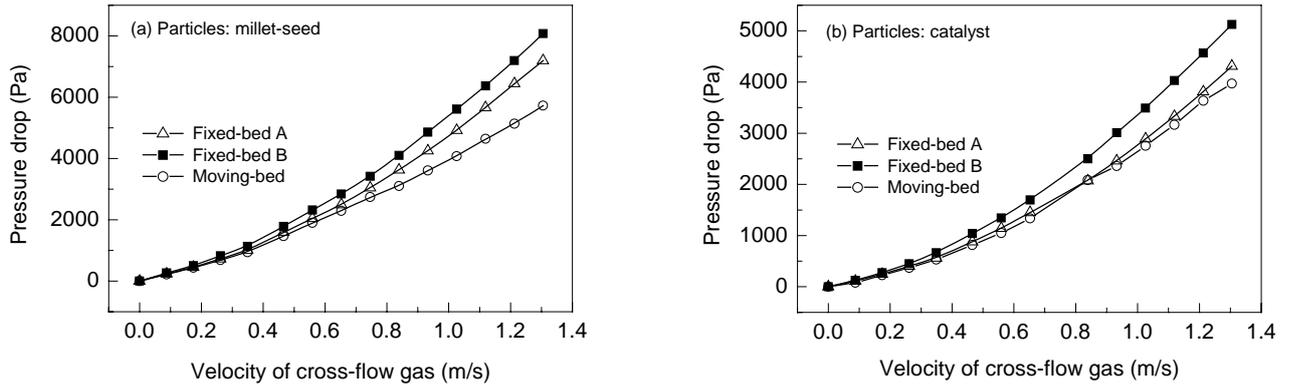


图 5 移动床与固定床的压降比较
Fig.5 Pressure drop profiles of fixed beds and moving bed

3.4 无空腔时移动床压降的计算

对于气体通过颗粒层压降的计算, 常应用欧根公式:

$$\frac{\Delta p}{L} = \alpha \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{u_p}{D_p^2} + \beta \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{\rho_g u_p^2}{D_p} \quad (1)$$

在错流气速为 $0.09 \sim 0.56 \text{ m/s}$ 范围内, 此时移动床内未出现贴壁和明显的空腔, 移动床压降实验值与欧根公式的比较如图 6 所示, 以 $\alpha=150$, $\beta=1.75$ 作为系数计算仍能得到可以接受的结果^[7], 误差一般小于 15%. 文献^[3, 4]为计算移动床压降对欧根公式进行了修正, 分别

提出了不同的 α, β 值, 但修正的结果计算值与实验值相差较大, 当错流气速较大时误差超过 30% 甚至更大.

3.5 有空腔时移动床压降分析

空腔通常发生在上流面顶端, 将其形状简化为半圆形. 根据实验结果, 提出以下假设: (1) 空腔未生成前, 错流区内气速均匀分布, 速度矢量垂直于上、下流面; (2) 在空腔生成后, 空腔内气速是均匀的^[8]. 气速为 u_B , 空腔下部颗粒仍与上流面接触的部位错流气速为 u_c , u_c 小于空腔处的气速 u_B , 但是经过一段距离(记为 r_0)后, 错流气速在床层中分布又变为均匀, 此时床内气体流速为床内错流气体流速 u_p . 为简化, 将空腔形状简化为半圆形, 半径为 R , 气体流动限于错流区内, 如图 7 所示.

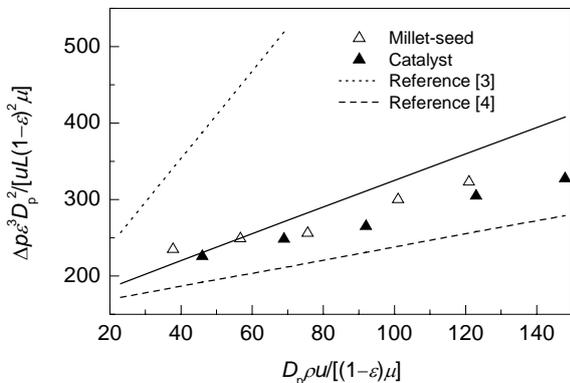


图 6 移动床压降实验值与欧根方程的比较
Fig.6 Comparison of Ergun's equation and experimental results

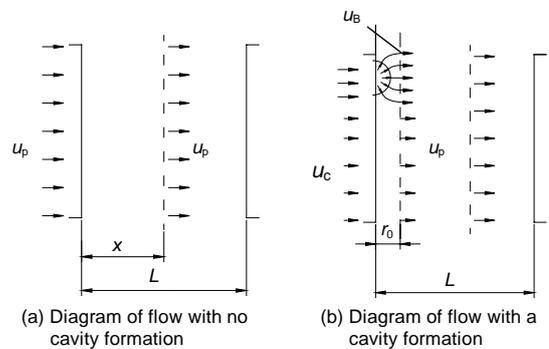


图 7 气体流动示意图
Fig.7 Diagrams of flow

空腔内气速 u_B 由于向外流动半径增大, 气速从 u_B 经过 r_0 距离后减为平均气速 u_p , 之后将以此速度流动至下流面, 如图 8 所示, 假设空腔部位的气体均来自空腔内, 则

$$u_B \pi R = u_p \pi r_0,$$

及

$$u_B \pi R + (H - 2r_0)u_c = Hu_p,$$

故

$$u_c = \frac{H - \pi r_0}{H - 2r_0} u_p. \quad (2)$$

可见, 当 R 或 r_0 很小时, $u_c \approx u_p$.

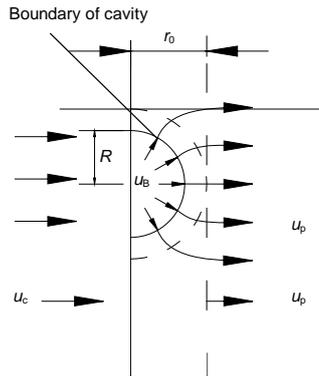


图 8 空腔处的气体流动
Fig.8 Diagram of flow in a cavity

实验结果表明错流区沿纵向的压降总是相等. 由于假设离上流面 r_0 距离后流速相等, 因此认为空腔部位气体从上流面至 r_0 面的压降 Δp_1 与未有空腔部位高度气体流至 r_0 面的压降 Δp_2 相等.

由欧根公式

$$-(dp/dr) = K_1 u_r + K_2 u_r^2, \quad (3)$$

式中 $u_r = u_B \frac{R}{r}$, $K_1 = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu}{D_p^2}$, $K_2 = 1.75 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{\rho_g}{D_p}$.

空腔部位气体向四周扩散的压降 Δp_{11} 为

$$\begin{aligned} \Delta p_{11} &= \int_R^{r_0} (K_1 u_r + K_2 u_r^2) dr \\ &= \int_R^{r_0} \left(K_1 u_B \frac{R}{r} + K_2 u_B^2 \frac{R^2}{r^2} \right) dr \\ &= K_1 u_B R \ln \frac{r_0}{R} + K_2 u_B^2 R \frac{r_0 - R}{r_0}. \end{aligned} \quad (4)$$

水平流动的压降为

$$\Delta p_{12} = (K_1 u_p + K_2 u_p^2) \bar{L} = (K_1 u_p + K_2 u_p^2) \frac{4-\pi}{4} r_0. \quad (5)$$

由此可以求得空腔部位气体到达 r_0 垂直面的压降为

$$\Delta p_1 = \Delta p_{11} + \Delta p_{12} =$$

$$\begin{aligned} &K_1 u_B R \ln \frac{r_0}{R} + K_2 u_B^2 R \frac{r_0 - R}{r_0} + (K_1 u_p + K_2 u_p^2) \frac{4-\pi}{4} r_0 = \\ &K_1 u_B R \left(\ln \frac{r_0}{R} + \frac{4-\pi}{4} \right) + K_2 u_B^2 R \left(\frac{r_0}{r_0} - \frac{\pi}{4} \right) = \\ &K_1 u_p r_0 \left(\ln \frac{r_0}{R} + \frac{4-\pi}{4} \right) + K_2 u_p^2 r_0 \left(\frac{r_0}{R} - \frac{\pi}{4} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

在未有空腔的床层高度上, 气体水平流动. 假设错流流速由 u_c 经过 r_0 距离后线性增加至 u_p , 因此 $u_x = u_c + [(u_p - u_c)/r_0]x$, 其中 $0 < x < r_0$.

$$\begin{aligned} \Delta p_2 &= \int_0^{r_0} (K_1 u_x + K_2 u_x^2) dx = \\ &\int_0^{r_0} K_1 \left(u_c + \frac{u_p - u_c}{r_0} x \right) dx + \int_0^{r_0} K_2 \left(u_c + \frac{u_p - u_c}{r_0} x \right)^2 dx = \\ &\frac{K_1}{2} (u_p + u_c) r_0 + \frac{K_2}{3} (u_p^2 + u_p u_c + u_c^2) r_0. \end{aligned} \quad (7)$$

方程(2), (4), (7)可计算有空腔时床内的压降分布. 由 $\Delta p_1 = \Delta p_2$, 得

$$\begin{aligned} K_1 u_p \left(\ln \frac{r_0}{R} + \frac{4-\pi}{4} \right) + K_2 u_p^2 \left(\frac{r_0}{R} - \frac{\pi}{4} \right) &= \frac{K_1}{2} (u_p + u_c) + \\ &\frac{K_2}{3} (u_p^2 + u_p u_c + u_c^2). \end{aligned} \quad (8)$$

整个床层长度的压降为

$$\begin{aligned} \Delta p &= \frac{K_1}{2} (u_p + u_c) r_0 + \frac{K_2}{3} (u_p^2 + u_p u_c + u_c^2) r_0 + \\ &(K_1 u_p + K_2 u_p^2) (L - r_0) = (K_1 u_p + K_2 u_p^2) L + \\ &\left[\frac{K_1}{2} (u_c - u_p) + \frac{K_2}{3} (u_p u_c + u_c^2 - u_p^2) \right] r_0. \end{aligned} \quad (9)$$

从式(9)可见, 有空腔时的移动床压降比相同气速下固定床的压降低, 空腔尺寸随错流气速增大而增大, 因而二者间差别越来越大.

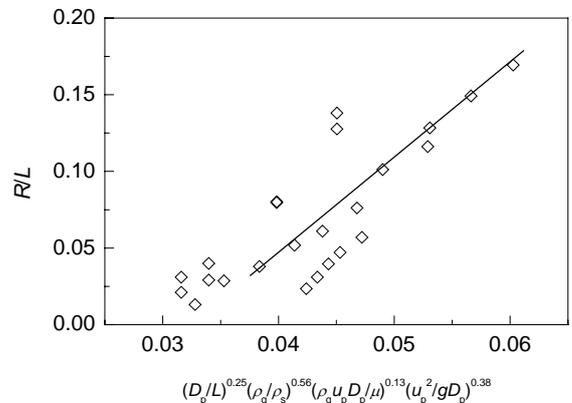


图 9 对空腔尺寸的关联
Fig.9 The dimensionless relationship of cavity size

对于空腔尺寸可进行如下无因次分析^[9,10]:

$$\frac{R}{L} = f\left(\frac{D_p}{L}, \frac{\rho_g}{\rho_s}, \frac{\rho_g u_p D_p}{\mu}, \frac{u_p^2}{g D_p}\right),$$

其中 $\rho_g u_p D_p / \mu$ 是颗粒 Reynolds 数, $u_p^2 / (g D_p)$ 为 Froude 数. 根据实验数据有如下关联式, 见图 9.

$$\frac{R}{L} = 9.782 \left(\frac{D_p}{L}\right)^{0.25} \left(\frac{\rho_g}{\rho_s}\right)^{0.56} \left(\frac{\rho_g u_p D_p}{\mu}\right)^{0.13} \left(\frac{u_p^2}{g D_p}\right)^{0.38} - 0.2528. \quad (10)$$

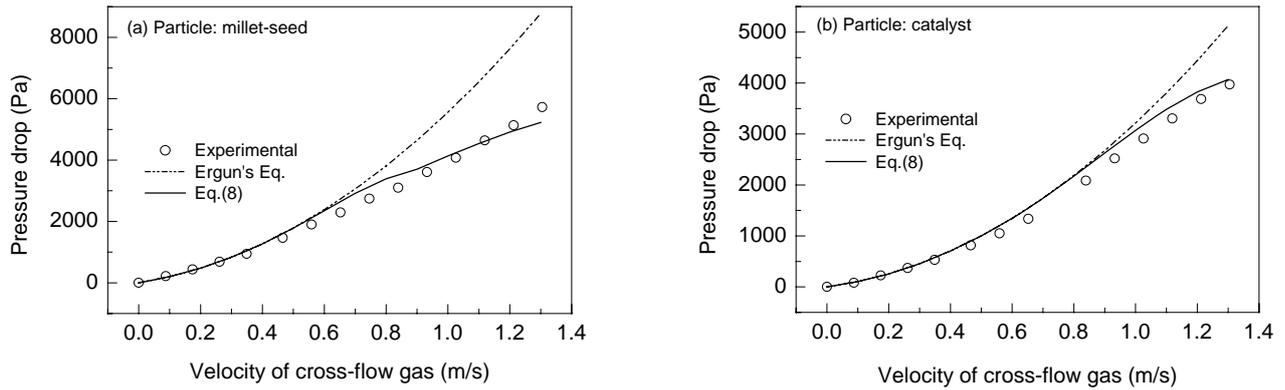


图 10 移动床压降理论值与实验值的比较
Fig.10 Comparison of theoretical calculation and experimental results

4 结论

考察了颗粒下移速度、颗粒堆积状态及空腔生成和长大的变化过程等因素对移动床压降的影响, 结果表明, 移动床颗粒层下移速度对压降几乎没有影响; 在错流气速 0~1.35 m/s、颗粒 Reynolds 数 10~200 的范围内考察了移动床、固定床的压降与错流气速的关系, 当错流气速超过一定值时移动床内形成空腔, 将导致移动床压降减小, 在空腔现象出现前移动床压降仍适用欧根公式计算; 对空腔尺寸以颗粒 Reynolds 数、Froude 数等准数进行了无因次关联, 并建立了有空腔时移动床的压降模型, 其计算结果与实验值基本相符.

符号表:

D	床层厚度 (m)	D_p	颗粒直径 (m)
H	错流区高度 (m)	H'	上部料封段高度 (m)
H''	下部料封段高度 (m)		
K_1, K_2	欧根方程参数, $K_1=150\{[(1-\varepsilon)^2/\varepsilon^3](\mu/D_p^2)\}$, $K_2=1.75\{[(1-\varepsilon)/\varepsilon^3](\rho_g/D_p)\}$		
L	沿气流方向床层长度 (m)		
\bar{L}	空腔处气体水平流至 r_0 垂直面的平均距离 [$\bar{L}=(4-\pi)r_0/4$] (m)		
Δp	压降 (Pa)		
Δp_1	空腔部位气体到达 r_0 垂直面的压降 (Pa)		
Δp_{11}	空腔部位气体向四周扩散的压降 (Pa)		
Δp_{12}	空腔部位气体从控制体外缘水平流动至 r_0 面的压降 (Pa)		
Δp_2	未有空腔的床层高度上气体水平流动至 r_0 垂直面的压降 (Pa)		
r	半径 (m)		

按式(10)计算的空腔尺寸与实验值相差大多在 25% 以内. r_0/R 可由式(2)和(8)计算, 近似可取 $r_0=1.8R$.

上述理论计算结果是空腔最大时移动床的压降值, 空腔塌落后的压降值在其与欧根公式计算值之间波动. 图 10 是计算值与实验值的比较, 从图可以看出, 无论何种颗粒, 由于考虑了空腔的影响, 在较高气速下计算的移动床压降比使用欧根公式计算的值低, 与实验值基本吻合.

r_0	气体作用于空腔的最大范围 (m)		
R	空腔尺寸 (m)	u	气体速度 (m/s)
u_B	空腔内气体速度 (m/s)		
u_c	未有空腔部位上流面的气体速度 (m/s)		
u_p	气体空床速度 (m/s)		
u_r	空腔处半径为 r 时的气体速度 (m/s)		
u_x	未有空腔部位距上流面 x 处的气体速度 (m/s)		
x	沿气流方向距离 (m)	α, β	欧根公式的系数
ε	颗粒空隙率	μ	流体的粘度 (Pa·s)
ρ_g	气体密度 (kg/m^3)	ρ_s	固体密度 (kg/m^3)

参考文献:

- [1] Macdonald L F, El-Sayed M S, Mow K, et al. Flow through Porous Media—The Ergun Equation Revisited [J]. Ind. Eng. Chem. Fundam., 1979, 18(3): 199–208.
- [2] 王奎升. 工程流体与粉体力学基础 [M]. 北京: 中国计量出版社, 2002. 154–161.
- [3] 张立平, 林爱光, 蒋维钧. 气体通过颗粒移动床除尘器压降的计算 [J]. 高校化学工程学报, 1999, 5(4): 302–308.
- [4] 赵建涛, 黄戒介, 张建民, 等. 气固错流移动颗粒床过滤器压降特性研究 [J]. 高校化学工程学报, 2003, 17(2): 216–220.
- [5] 宋续祺, 金涌, 俞芷青, 等. 移动床径向反应器中气体离心流动对颗粒移动状况的影响 [J]. 化工学报, 1993, 44(4): 433–441.
- [6] 宋续祺. 移动床径向反应器中气固两相流体力学行为的研究 [D]. 北京: 清华大学, 1993. 41–42.
- [7] 陈敏恒, 从德兹, 方图南. 化工原理, 第 2 版 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1999. 162–165.
- [8] Rajneesh S, Gupta G S. Importance of Frictional Forces on the Formation of Cavity in a Packed Bed under Cross Flow of Gas [J].

- Powder Technol., 2003, 134: 72–85.
- [9] Wen C Y, Deole N R, Chen L H. A Study of a Jet in a Three-dimensional Gas Fluidized Bed [J]. Powder Technol., 1982, 31: 175–184.
- [10] MacDonald J F, Bridgewater J. Void Formation in Stationary and Moving Beds [J]. Chem. Eng. Sci., 1997, 52(5): 677–691.

The Investigation of Pressure Drop in a Moving Bed

CHEN Yun-hua, ZHU Xue-dong, WU Yong-qiang, ZHU Zi-bin

(Institute of Chemical Technology, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: The pressure drop of gas flowing through the cross-flow moving-bed was investigated in a two-dimension rectangular apparatus. The effects of particles flow rate, superficial gas velocity, formation and development of cavity/raceway and voidage of particles on the pressure drop were investigated experimentally with the operation conditions of 0~1.35 m/s of superficial gas velocity and 0.95~9.68 cm/min of particle velocity. The experimental results show that the particle velocity has little influence on the pressure drop; the phenomena of cavity and pinning occur when the cross-flow velocity is high enough. The development of a cavity or a raceway can cause three types of pressure drop with time, which are stabilization, slight fluctuation and severe fluctuation. The pressure drop of moving-bed can be calculated by Ergun's equation at low velocity of cross-flow gas. Cavity appears in a process cycle of “formation–growing up–collapsing–fluidization” at high gas velocity. On the basis of experimental results, a model for calculating the pressure drop when a cavity occurs and a dimensionless relationship of cavity size is conducted, which agree with the experimental data.

Key words: cross-flow moving bed; cavity; pressure drop