

三相生物流化床膨胀特性方程的研究

潘 涛 邬扬善 王绍堂

(北京市环境保护科学研究院, 北京 100037)

摘要 研究建立了描写三相生物流化床床层膨胀特性的经验关联式. 当已知床内表观液速、表观气速和载体上生物膜厚度时, 能比较准确地预测床层膨胀高度, 为设计提供依据. 与以往不同的是, 本研究通过等效函数的设置和求解, 用一个方程将两相床和三相床的膨胀特性描述出来. 该方程能反映三相床低气速下的床层收缩行为, 在气速为零时可还原为两相床. 试验用反应器直径1.4m, 高6.5m, 载体为0.3—0.5mm的石英砂, 射流曝气体内充氧. 4种生物膜厚: 52, 80, 115, 137 μ m. 试验用生活污水BOD₅47.6—77.2mg/L.

关键词 三相生物流化床, 膨胀特性, 经验关联式, 等效函数, 生物膜厚度, 设计方法, 污水处理.

生物流化床是一项高效的污水生物处理工艺, 有着极其广泛的应用前景. 本研究试图通过试验, 建立描述三相生物流化床床层膨胀特性的经验关联式. 当已知床内表观液速、表观气速和载体上生物膜厚度时, 能比较准确地预测床层膨胀高度, 为设计提供依据.

1 床层膨胀的基本理论

1.1 液固两相床

液固两相流化床的床层膨胀特性, 通常用 Richardson-Zaki 方程来描述^[1]:

$$\epsilon^n = \frac{u_l}{u_i} \quad (1)$$

式中, ϵ 为床层空隙率,

$$\epsilon = \frac{\text{床层体积} - \text{固相真体积}}{\text{床层体积}}$$

$$u_l \text{ 为液体表观流速 (cm/s),}$$

$$u_i = \frac{\text{液体体积流量}}{\text{床层的截面积}}$$

u_i 为 $\epsilon = 1$ 时的 u (cm/s); n 为当 u_i 一定时的一个常数, 通常称为 Richardson-Zaki 常数. 式(1)中的 u_i 是一个反映固相颗粒特性的参数, 它近似等于颗粒在液相中的静置沉降终速度 u_s , 但略受颗粒直径和反应器直径之比 d_s/D 的影响, 在应用中一般忽略这一影响, 将(1)式写成:

$$\epsilon^n = \frac{u_l}{u_s} \quad (2)$$

值得一提的是, 尽管研究者们至今未能能为式(2)找到理论依据, 它只是一个经验方程式, 但研究发现, 用这个方程来描述液固两相流化床的膨胀行为是非常准确的^[2].

1.2 气液固三相床

通常在小颗粒载体(0.3—1.2mm)的三相生物流化床中, 开始引入气体时, 发生的不是床层膨胀而是收缩. 在达到某一临界气速之前, 增加气速会继续发生床层收缩, 且液速愈大, 收缩程度也愈大. 在临界点以后, 再增加气速则床层发生膨胀^[3,4].

国外许多研究者所提出的描述三相流化床膨胀特性的经验关联式^[4], 大多用在化工生产中, 其建立时的试验条件与三相生物流化床相比有较大差异, 而且它们本身存在诸多缺陷, 例如不能正确反映低气速下床层的收缩行为; 气速为0时不能还原为两相床关联式等等, 因此目前还不能直接运用它们进行三相生物流化床的设计.

2 试验原理和方法

2.1 试验装置

本试验在直径1.4m, 高6.5m的生物流化床工业装置上进行, 反应器构造见图1.

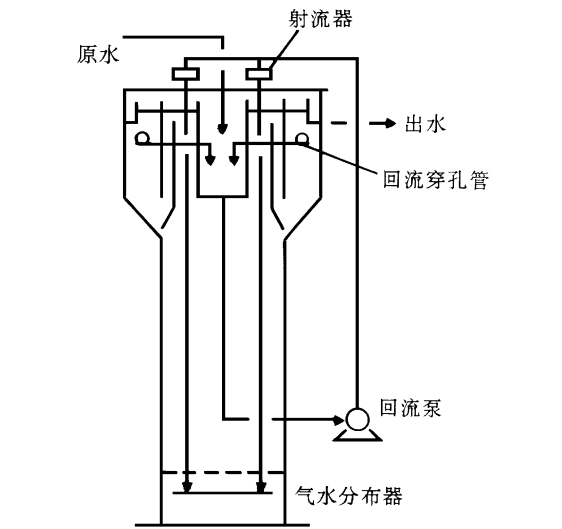


图1 本试验所用流化床反应器

2.2 试验原理

本试验所建立的床层膨胀经验关联式基于下述的假设:

- (1) 忽略反应器内壁产生的粘滞作用对床层膨胀特性的影响. 本试验所用反应器内径较大, 达1.4m, 因此这样假定是足够精确的.
- (2) 射流器结构和吸气量的大小不影响床内气泡的特性.
- (3) 忽略污水性质(如粘度和表面张力)的变化对床层特性的影响.

作出上述假定以后, 可以将三相生物流化床膨胀关联式写成: $\epsilon = f(u_l, u_g, \text{颗粒性质})$ 式中, u_g 为床内气体的表观流速 (cm/s), $u_g = \frac{\text{标态下气体的体积流量}}{\text{床层截面积}}$; 颗粒性质主要指固相颗粒的粒径与密度.

为了使三相床在气速 $u_g = 0$ 时准确地还原为两相床, 引入一个等效函数 Y , 并比照(2)式, 把三相床的膨胀关联式写成:

$$\epsilon^n = \frac{u_l}{u_t} Y \tag{3}$$

式中 n 反映了固体颗粒的性质, 它的数值等于 $u_g = 0$ 时两相床的 n 值.

假设等效函数 Y 只与表观液速 w 和表观气速 u_g 有关, 而与颗粒终沉速 u_t 无关, 即:

$$Y = f(u_l, u_g)$$

显然, 当 $u_g = 0$ 时, 三相床还原为两相床, 这时 $Y = 1$. 结合小颗粒三相床所表现的床层均匀膨胀的特性, 可以确定 Y 随 u_l 和 u_g 的变化趋势(如图2所示). 本试验通过改变 u_l 和 u_g , 测得相应的 Y 值, 然后用曲线拟合的方法得到经验关联式(3).

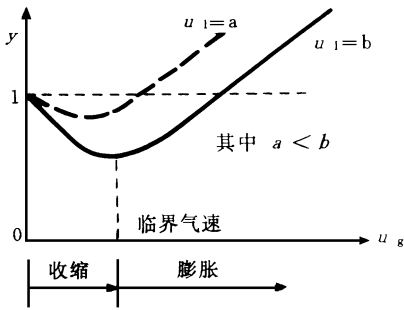


图2 等效函数 Y 与 u_l 、 u_g 的关系

2.3 试验方法

- (1) u_g 和 u_l 的测定 分别用热球风速仪和涡轮流量计直接测出气液两相的流量, 然后换算成床内的表观气速 u_g 和表观液速 u_l .
- (2) 床层空隙率 ϵ 的测定 测出床层膨胀后的高度 H_B , 计算床层空隙率.
- (3) 载体平均粒径 d_s 、湿生物颗粒平均粒径 d_{pw} 和湿生物膜厚 δ_w 的测量 d_s 的测量采用排水法. 测量 d_{pw} 时, 从床层的中部取样, 在显微镜下测量随机选取的50粒湿颗粒的直径, 求其算术平均值作为 d_{pw} , 则湿生物膜厚 $\delta_w = (d_{pw} - d_s) / 2$.
- (4) 载体的真密度 ρ_s 和载体空隙率 ϵ_0 的测量 称取一定量载体样品并采用排水法测量其真体积, 计算 ρ_s . ϵ_0 是通过测量载体的堆密度 ρ'_s 后计算得到.

3 试验结果与数据处理

3.1 载体特性

本试验所用载体为福建晋江所产0.3—0.5mm 的石英砂滤料. 载体特性测量结果为: $d_s = 0.415\text{mm}$, $\rho_s = 2.63\text{g/cm}^3$, $\epsilon_0 = 0.445$.

3.2 生物膜的厚度

生物颗粒上生物膜厚度除了在水力学特性

上受床内气速和液速的影响之外,主要取决于所处理污水的流量和水质,而生物膜的厚度不同,生物颗粒的密度、沉降终速度等方面的特性也不相同,因而其膨胀特性也不同。

在试验中,生物膜厚度的改变是通过改变进水的水质水量来实现的.在每一种水质水量条件下,反应器持续运行15d左右,使生物膜成长和稳定,然后从床层1/2高度处取固体颗粒样品,测量生物膜厚度,最后做床层的膨胀试验以建立经验关联式。

表1是不同阶段所处理污水的水质水量及相应的膜厚,表中同时还列出了相应的有机物去除效果。

表1 测试期间(1995年)不同阶段的水质水量及处理效果

测试时间/月-日	11-05	11-23	12-07	12-20
水温/℃	19.3	20.5	20.0	20.2
$d_{pw}/\mu\text{m}$	519	575	645	689
$\delta_w/\mu\text{m}$	52	80	115	137
进水流量 $Q/\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	4.23	6.35	6.29	5.08
BOD ₅ 进水浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	47.6	63.9	70.0	77.2
BOD ₅ 出水浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	12.5	18.6	17.6	77.2
BOD ₅ 去除率/%	74	71	75	90

3.3 床层膨胀试验

3.3.1 n 和 w 的确定

在反映两相床膨胀特性的 Richardson-Zaki 方程中, n 和 w 的值体现了固相颗粒对膨胀特性的影响,与操作条件(液速 w 和气速 u_g 的大小)无关.将式(2)取对数得: $\ln w = n \ln \epsilon + \ln u_1$ 控制气速 $u_g = 0$,在不同的 u_1 条件下测 ϵ ,并将 $\ln w$ 和 $\ln \epsilon$ 进行线性最小二乘拟合,即得到 n 和 w .表2是不同膜厚时 n 和 u_1 的测试结果。

表2 令气速 $u_g = 0$ 时, n 和 u_1 的确定^[1]

$\delta_w/\mu\text{m}$	0	52	80	115	137
n	3.87	3.98	4.03	4.10	4.12
u_1	8.47	6.45	5.70	4.95	4.59
r	0.9953	0.9916	0.9960	0.9999	0.9972

r 为 $\ln \epsilon$ 与 $\ln u_1$ 的线性相关系数

研究表明, n 和 u_1 之间存在着下述关系^[1, 2]:

$$n = a \text{Re}^b \tag{4}$$

式中 Re 为颗粒沉降雷诺数, a 、 b 均为常数。

$$\text{Re} = (d_{pw} u_1 \rho) / \mu \tag{5}$$

其中 μ 为污水绝对粘度 ($\text{g}/\text{cm}\cdot\text{s}$),在精度要求不高时,可用纯水的绝对粘度来代替; ρ 为液体密度 (g/cm^3)。

将式(4)取对数可知, $\ln n$ 和 $\ln \text{Re}$ 呈线性,这样可以确定 a 和 b 的值.本试验所得 n 的计算公式为:

$$n = 32.2 \text{Re}^{-0.597} \tag{6}$$

3.3.2 三相床的膨胀经验关联式的建立

前已述及,三相生物流化床膨胀特性可由式(3)所示的经验关联式描述,而等效函数 Y 的变化趋势如图2所示.三相床膨胀试验得到的数据证实了图2是可信的.从 Y 的趋势上看,可以用二次曲线进行拟合.因为有 u_1 和 u_g 两个变量影响 Y 值,所以拟合函数为二元二次函数,即:

$$Y = k_1 u_g^2 + k_2 u_1^2 + k_3 u_g u_1 + k_4 u_g + k_5 u_1 + k_6 \tag{7}$$

式中 $k_i (i = 1-6)$ 为常数.根据式(3),当系统中不引入气体,即 $u_g = 0$ 时,三相床还原为两相床,这时 $Y = 1$.将边界条件 $u_g = 0, Y = 1$ 代入(7)式,立即得到: $k_2 u_1^2 + k_5 u_1 + k_6 = 1$ 将上式代入(7)式,得:

$$Y = 1 + k_4 u_g + k_3 u_g u_1 + k_1 u_g^2$$

亦即: $Y = 1 + K_1 u_g + K_2 u_g u_1 + K_3 u_g^2$ (8) 式中 $K_i (i = 1-3)$ 为常数.将(7)式简化为(8)式以后,拟合的工作量大大减少了。

本研究所采用的拟合方式为最小二乘拟合,即寻找系数 K_1 、 K_2 、 K_3 的数值,使得为最小。

$$I(K_1, K_2, K_3) = \sum_{i=1}^N (Y - Y_i)^2 = \sum_{i=1}^N (1 + K_1 u_{g,i} + K_2 u_{g,i} u_{1,i} + K_3 u_{g,i}^2 - Y_i)^2 \tag{9}$$

式(9)中 I 为测量值与拟合值之间偏差的平方和,是 K_1 、 K_2 、 K_3 的函数; Y 为拟合值,即由式(8)计算得到的值; Y_i 为测量值,即由式(3)计算得到的数值. N 表示所需拟合的数据有多少组。

简单地讲,要寻找 K_1 、 K_2 和 K_3 ,使由(8)式得到的 Y 值与实测值之间的偏差最小.问题归结为求(9)式中 I 的极小值.将(9)式分别对

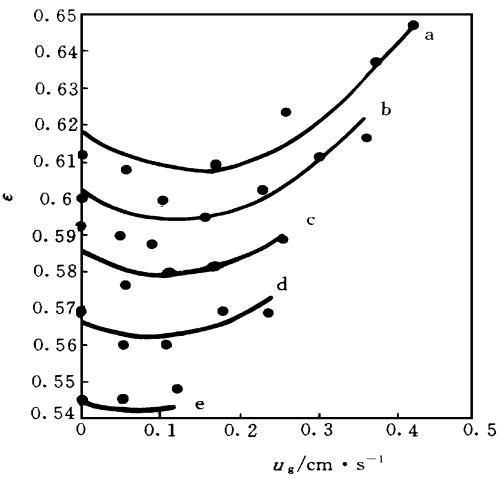


图3 拟合空隙率和实测空隙率
线条表示拟合值,散点表示实测值;流速 $u_l/\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$;
 $a=0.954$ $b=0.858$ $c=0.763$ $d=0.667$ $e=0.572$
 K_1 、 K_2 、 K_3 求偏导数,并令其等于0,得到一个

表3 三相床膨胀经验关联式拟合结果

$\delta_w/\mu\text{m}$	n	$u_l/\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	K_1	K_2	K_3	关联式	拟合残差/ $\times 10^{-2}$
52	3.98	6.45	0.171	-1.21	3.49	$\epsilon^{3.98}=u_l/6.45(1+0.17u_g-1.21u_gu_l+3.49u_g^2)$	2.16
80	4.03	5.70	0.574	-1.57	2.88	$\epsilon^{4.03}=u_l/5.70(1+0.574u_g-1.57u_gu_l+2.88u_g^2)$	2.08
115	4.10	4.95	0.267	-1.02	2.06	$\epsilon^{4.10}=u_l/4.95(1+0.267u_g-1.02u_gu_l+2.06u_g^2)$	0.546
137	4.12	4.59	0.531	-1.27	1.65	$\epsilon^{4.12}=u_l/4.59(1+0.531u_g-1.27u_gu_l+1.65u_g^2)$	0.712

这就是所得到的三相生物流化床膨胀经验关联式,可以用这个关联式进行三相生物流化床的设计.

在设计时,生物膜厚 δ_w 作为经验参数,由设计者选定.事实上,在载体确定以后 u_t 是 δ_w 的函数.试验所得到的 w 与 d_{pw} 的关系见图4,其中 $d_{pw}=d_s+2\delta_w$.当 δ_w 选定以后,计算求得 d_{pw} ,然后由图4中可读出对应的 w ,再由式(6)计算常数 n ,这样,式(11)所表示的膨胀关联式便完全确定了.

4 结语

本研究得到的式(11)使用的前提是,载体为0.3—0.5mm,平均粒径0.415mm,密度2.63g/cm³的石英砂,且用射流器进行曝气.当上述前提不能满足时,三相生物流化床的膨胀关联式,尚需作进一步研究.

线性方程组,通过编制计算机程序可求出 K_1 、 K_2 、 K_3 .图3以 $\delta_w=52\mu\text{m}$ 为例表示了拟合空隙率与实测空隙率的偏差.

表3是所得到的拟合关联式,这些关联式仅限于几个固定膜厚的情形.在应用中,若所选膜厚与这几个值较为接近,最好简单地采用内插法来确定空隙率.当对精度要求不高时,可以从表3中总结出一个统一的关联式.不同膜厚时, K_3 与 u_t 呈现良好的线性.计算得到:

$$K_3=0.995u_t-2.87$$

线性相关系数为0.9971.而 K_1 和 K_2 变化基本没有规律,用其算术平均值来代表.这样:

$$\epsilon^n=\frac{u_l}{u_t}(1+0.386u_g-1.27u_gu_l-2.87u_g^2+0.995u_tu_g^2)\tag{11}$$

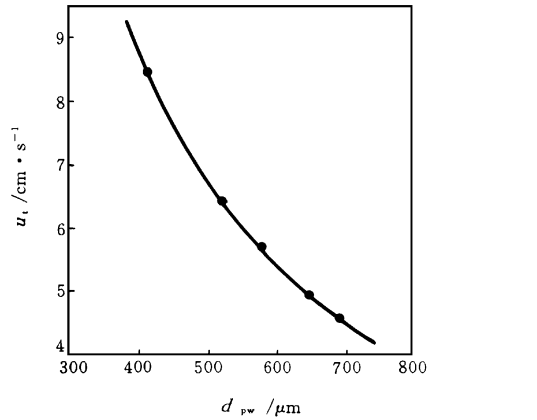


图4 颗粒终端速 u_t 与粒径 d_{pw} 的关系

参 考 文 献

1 Iza J. Wat. Sci. Tech., 1991, **24**(8): 109
2 Mulcahy L T, Shieh W K. Wat. Res., 1987, **21**(4): 451
3 Cooper P F, Atkinson B. Biological Fluidised Bed Treatment of Water and Wastewater. West Sussex, England: Ellis Horwood Limited, 1981: 63
4 蔡平等译. 气液固流态化工程. 北京: 中国石化出版社, 1993: 28—34

leached for ten years are more than 7, except the brown earth which become acid under pH 2 in the fourth year. The total losses of the leached base ions are: After ten years leaching, lime concretion black soil > salt-affected soil > chao soil > brown earth. The sensitivity of base ions to acid rain are: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+, \text{Na}^+$. The simulated acid rain has activation to the aluminium in the soils. There is no active aluminium in the four types of soils except the brown earth which the active aluminium appears in pH2. It has obvious improvement effect to apply lime to the acid brown earth.

Key words: simulated acid rain, simulated earth volume test, physical and chemical properties of soil, active aluminium.

A Study on the Treatment of Black Liquor from Bamboo Pulping Process with Sequencing Batch Reactor Biological Technique. Yan Shanguhua, Chen Min et al. (Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090): *Chin. J. Environ. Sci.*, **18**(3), 1997, pp. 30_33

In this paper, the treatment of bamboo pulping black liquor in which lignin has been separated by acid with sequencing batch reactor (SBR) was investigated. The experimental results showed that BOD₅ and COD in black liquor increased remarkably with the treatment of SBR, BOD₅ removal rate is 70%—83%, COD removal rate is 54.5%—63%, the effluent BOD₅ and COD after the treatment are 76—101 mg/L and 419—500mg/L respectively when influent COD is 1090—1170mg/L. The technology of combining internal decomposition with SBR is more efficient for treatment of black liquor, BOD₅ and COD removal rate are 67%—68% and 71.4%—76.9% respectively, the effluent BOD₅ and COD from this system are 33—48mg/L and 242—315mg/L respectively when influent COD is 1046—1100mg/L. It is in keeping with GB8978-88 effluent standard. The internal decomposition remarkably increase the effectiveness of follow-up SBR treatment. In addition, the kinetics of first order degradation reaction of COD was studied. The kinetic constant and undegradable COD had been calculated. Simulated data tally with experimental data well.

Key words: SBR, biological technique, internal decomposition, bamboo pulp, black liquor, biological degradation, sequencing batch reactor.

Study on the Formula of Expansion Characteristic of Three-phase Biological Fluidized Bed. Pan Tao, Wu Yangshan, Wang Shaotang

(Beijing Municipal Research Academy of Environmental Protection, Beijing 100037): *Chin. J. Environ. Sci.*, **18**(3), 1997, pp. 34_37

The formula of expansion characteristic in the three-phase biological fluidized bed has been founded in this study. When the empty-bed velocity of liquid and gas as well as the thickness of bio-film are known, the high of bed expansion is determined rather precisely, which provided basis for design. It is unusual that the expand ruler in both the two-phase bed and three-phase fluidized bed are reflected by using one equivalent function; the relationship of the dynamic in biochemical reaction and behavior of hydromechanics has been set up by the thickness of bio-film. The behavior of shrink in bed under the low velocity of gas can be reflected by this formula, and the formula in three-phase bed can be restored to one in two phase bed when the velocity of gas is zero. The tested bed is 1.4m of diameter and 6.5m of high, in which the diameter of media made of quartz sand is 0.3—0.5mm, using air jet for aeration inside the reactor. The test is within the bio-film thickness of 52, 80, 115, 137m, respectively. The BOD₅ concentration in the sewage tested are 47.6—77.2mg/L.

Key words: three-phase biological fluidized bed, rate of expansion, formula based on experimental data, equivalent function, thickness of bio-film, method for design, wastewater treatment.

Study on the Operation Characters of a Modified Two-Phase Anaerobic Digestion System. Guo Yanghao, Men Chun, Shi Xianai et al. (Dept. of Biotechnology, Fuzhou University, Fuzhou 350002): *Chin. J. Environ. Sci.*, **18**(3), 1997, pp. 38_40

In this work the operation characters of the two-phase anaerobic digestion system incorporated by a packed bed acidification reactor and an UASB methanorization reactor were studied. The packed bed acidification reactor started up easily and possessed of a high acidification rate and a good resistance against hydraulic impulsion and pH fluctuation. The COD volume charge was higher than 200 kg/(m³·d). Adopting a preadjusting alkalinity technology, the two-phase system could operate normally and effectively for treating brewing wastewater. Under the conditions of COD concentration 1000—7000 mg/L in the feed and COD charge 40 kg/(m³·d), the COD concentration was less than 200 mg/L in the effluent. The system possessed also a rather good capacity for treating antibiotics wastewater.

Key words: packed bed acidification reactor, two-phase anaerobic digestion system, brewing wastewater of high concentration.

An Investigation of the Subjective Response to the Traffic Noise of an Elevated Highway or