

蜂窝陶瓷固定化细胞气升式内循环生物反应器的水力学特性

张永明^{1,2}, 俞俊棠², 王建龙³, 施汉昌³, 钱易³ (1. 南昌航空工业学院环境与化学工程系, 南昌 330034, E-mail: zhangym@niat.jx.cn; 2. 华东理工大学生物反应器工程国家重点实验室, 上海 200237; 3. 清华大学环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084)

摘要:在鼓泡塔式(Bubble Columns, BC)和气升式循环(Airlift Loop, AL)生物反应器基础上, 于内循环管中加装蜂窝陶瓷载体, 开发出蜂窝陶瓷固定化细胞的气升式内循环生物反应器(Internal Airlift Loop Bioreactor with Cells Immobilized onto Ceramic Honeycomb Support, IALBR-CICHS). 采用示踪技术通过测定反应器的水力停留时间分布来考察上述 3 种反应器的有效工作体积和反应器内走旁路流体的比例. 实验和理论分析表明, IALBR-CICHS 可大大提高反应器的有效工作体积, 减少流体走旁路的比例.

关键词:生物反应器; 水力学; 停留时间分布; 鼓泡塔; 气升式循环

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2001)01-04-0053

Hydrodynamic Property of Internal Airlift Loop Bioreactor with Cells Immobilized onto Ceramic Honeycomb Support (IALBR-CICHS)

Zhang Yongming^{1,2}, Yu Juntang², Wang Jianlong³, Shi Hanchang³, Qian Yi³ (1. Department of Environmental and Chemical Engineering, Nanchang Institute of Aeronautical Technology, Nanchang, Jiangxi, 330034, China E-mail: zhangym@niat.jx.cn; 2. State Key Laboratory of Bioreactor Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 3. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: An internal airlift loop bioreactor with cells immobilized onto ceramic honeycomb support (IALBR-CICHS) was developed based on the bubble columns (BC) and airlift (AL) bioreactor by installing a ceramic honeycomb support in the draught tube. Their hydrodynamics were respectively studied by the tracer element to determine their retention time distribution (RTD). Experiment and theory analysis indicated that the IALBR-CICHS had more efficacious reactive volume rate (η) and less short-circuit rate (λ) for fluid flow compared with the BC and AL bioreactor.

Key words: bioreactor; hydrodynamics; retention time distribution; bubble columns; airlift loop

在好氧生物处理废水及有氧发酵过程中, 溶解氧量及其传递速率往往是一个限制性因素. 因此在反应器内增加搅拌装置是解决这一问题的手段之一, 现已普遍地应用于有氧发酵和好氧生物处理废水等许多工业领域^[1]. 但搅拌罐式生物反应器并非是好氧生物过程的最佳设计^[2,3], 这是因为搅拌浆所涉及的范围有限, 因而流体的流动存在死区. 鉴于搅拌罐式生物反应器所存在的一系列缺点, 各种形式的鼓泡

塔式(Bubble Columns, BC)^[4]以及在此基础上发展起来的气升式循环(Airlift Loop, AL)^[5,6]生物反应器应运而生并表现出很多优点, 在上述几个方面均优于搅拌罐式生物反应器.

蜂窝陶瓷固定化细胞气升式内循环生物反

基金项目: 清华大学环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 华东理工大学生物反应器工程国家重点实验室开放基金和江西省自然科学基金资助(9920015)

作者简介: 张永明(1958~), 男, 博士, 教授, 主要从事固定化细胞技术, 生物处理废水及生物反应器的研究.

收稿日期: 2000-04-19

反应器(Internal Airlift Loop Bioreactor with Cells Immobilized onto Ceramic Honeycomb Support, IALBR-CICHS)是在 BC 和 AL 基础上于反应器内循环管中间增加了一个蜂窝状的陶瓷载体.该载体的作用,一是固定化细胞增加生物相浓度以提高生物反应的速率;二是起到静态混合器的作用以提高气液传递速率.强化液体流动,减少反应器内的流动死区.增加蜂窝陶瓷载体对反应器的流体流动有何影响,是该生物反应器研究的一个重要方面.本文从反应器的水力学特性方面,通过建立数学模型来比较和评价上述 3 种反应器的水力学性能.

1 停留时间分布的数学描述

停留时间分布的原因是由于流体的摩擦而产生的流速分布不均匀,以及分子扩散及湍流扩散而引起.另外,由于搅拌或鼓泡而产生的强制对流,沟流和反应器内的死区也是停留时间分布存在的原因.所有这些都使反应器内的一部分流体流得快,而另一部分则流得慢,从而形成停留时间分布.

通常使用分布密度函数或分布函数来表示停留时间分布.分布密度函数 $E(t)$ 的定义为:从反应器流出的物料中,寿命在 t 和 $t + dt$ 之间的物料所占的分率为 $E(t) dt$.而分布函数 $F(t)$ 与 $E(t)$ 的关系为:

$$F(t) = \int_0^t E(t) dt \tag{1}$$

或
$$E(t) = \frac{dF(t)}{dt} \tag{2}$$

2 实验部分

2.1 生物反应器

本实验所用的生物反应器如图 1 所示.它主要由一个直径为 100 mm,高 250 mm 的有机玻璃管构成反应器壳体,中间有一直径 60 mm,高 150 mm 的有机玻璃管作为循环管,在循环管内可装置一个固定化细胞用的蜂窝陶瓷载体.由此而构成 IALBR-CICHS,当反应器中间的循环管和蜂窝陶瓷载体取出之后,就成为鼓泡塔

式生物反应器(BC),若只安装循环管时则成为气升式内循环生物反应器(AL).

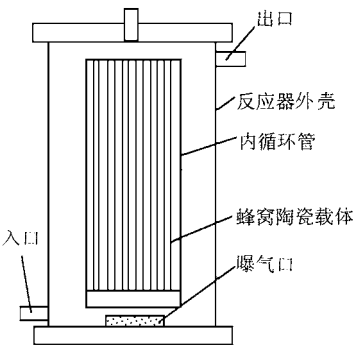


图 1 蜂窝陶瓷固定化细胞
气升式内循环生物反应器

2.2 蜂窝陶瓷载体

所用的蜂窝陶瓷载体如图 2 所示,其直径约为 58 mm,高 120 mm.横截面上分布着 2×2 mm 的方形小孔.

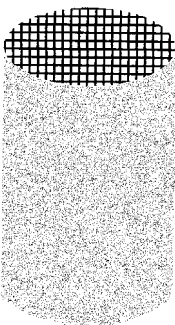


图 2 蜂窝陶瓷载体

2.3 实验方法

示踪元素为钾离子(KH_2PO_4 加去离子水配制),用脉冲法测定流体在反应器内的停留时间分布.实验对 3 种形式的反应器分别进行测定,即(a)有载体又有内循环(IALBR-CICHS),有效体积 1400 ml;(b)无载体但有内循环(AL),其有效体积 1500 ml;(c)无载体又无内循环(BC),有效体积 1500 ml.实验时先用去离子水以一定的流速通入反应器,当达到定常流动时,在某一瞬间突然加入一定量的含有 K^+ 溶液,每隔一定时间间隔取样,用 180-80 型偏振

塞曼原子吸收分光光度计分析出口中 K^+ 的浓度. 条件为波长: 766.5 nm; 灯电流: 10 mA; 通带宽度: 2.6 nm; 火焰: 空气-乙炔氧化型.

3 实验结果和数学模型的建立

反应器出口处的 K^+ 浓度随时间的变化如图 3 所示. 可以看出, 3 种形式反应器的停留时间分布曲线均接近完全混和流型. 即在示踪剂加入的瞬间, 其出口的示踪剂浓度就达到了最大浓度, 随后则呈指数下降. 若以整个反应器作为一个系统, 根据图 3 中的曲线形状来判断, 从总体上该反应器属于混合良好的反应器, 但也存在一部分死区和旁路. 因此可以用组合模型来描述该反应器的停留时间分布^[7]. 它由 2 个区域组成, 即一个全混流区和一个死区, 另外还有部分流体通过旁路流过反应器.

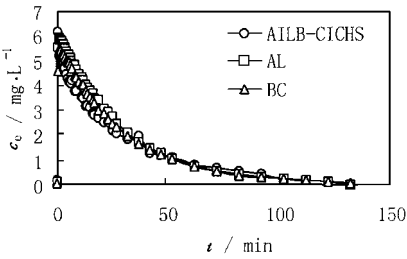


图 3 停留时间分布曲线

由于有旁路, 并假定其并不占体积, 所以脉冲输入的旁路部分马上出现在输出物流中. 其余部分按简单指数递减, 如图 3 所示. 在本实验中, 假设总体积 V 的一部分 (分率为 η) 属于完全混合区, 其余的为“死区”. 此外总加料流量 (q) 的一部分 (分率为 λ) 从完全混合区旁路流过. 只有脉冲的一部分 $(1 - \lambda)$ 进入完全混合区的体积 ηV 内.

对完全混合区进行物料衡算. 设在与旁路充分混合之前, 离开完全混合区示踪剂的浓度为 c_m . 则有: 流入 - 流出 - 反应 = 累积

即:
$$0 - \frac{q(1 - \lambda)}{\eta V} - 0 = \frac{dc}{dt} \tag{3}$$

边界条件: $t = 0 ; c = c_0$ 和 $t = t ; c = c_m$

对(3)式积分求解, 得:

$$\frac{c_m}{c_0} = \exp \left[- \frac{q(1 - \lambda)}{\eta V} t \right] \tag{4}$$

再考虑从完全混合区出来的物流与旁路混合后得到的最后出口示踪剂的浓度 c_e .

$$q(1 - \lambda) c_m + q\lambda c_0 = qc_e \tag{5}$$

所以有:
$$\frac{c_e}{c_0} = \lambda + (1 - \lambda) \frac{c_m}{c_0} \tag{6}$$

将(4)式代入(6)式有:

$$\frac{c_e}{c_0} = \lambda + (1 - \lambda) \exp \left[- \frac{q(1 - \lambda)}{\eta V} t \right] \tag{7}$$

设无因次时间:
$$\theta = \frac{q}{V} t \tag{8}$$

将(8)式代入(7)式, 得:

$$\frac{c_e}{c_0} = \lambda + (1 - \lambda) \exp \left[- \frac{(1 - \lambda)}{\eta} \theta \right] \tag{9}$$

因为:
$$F(\theta) = \frac{c_0 - c_e}{c_0} = 1 - \frac{c_e}{c_0} \tag{10}$$

所以:

$$F(\theta) = 1 - \lambda - (1 - \lambda) \exp \left[- \frac{(1 - \lambda)}{\eta} \theta \right] \tag{11}$$

根据(2)式, 有:

$$E(\theta) = \frac{(1 - \lambda)^2}{\eta} \exp \left[- \frac{(1 - \lambda)}{\eta} \theta \right] \tag{12}$$

将(12)式两边取对数, 得:

$$\ln [E(\theta)] = - \frac{(1 - \lambda)}{\eta} \theta + [2 \ln (1 - \lambda) - \ln \eta] \tag{13}$$

以 $\ln [E(\theta)]$ 对 θ 作图, 可得到一条直线, 由直线的截距和斜率可求得 λ 和 η .

将有关实验数据代入, 结果如表 1 所示. 所求得的 η 和 λ 分别是 3 种反应器中完全混合区的体积分率和通过反应器时流体走旁路的分率. 据此可得到 3 种反应器停留时间的分布密度 (E) 函数, 如表 2 所示.

表 1 3 种反应器的旁路流率 λ 和有效体积分率 η

反应器	IALB-CICHS	AL	BC
$\eta / \%$	85.42	45.31	43.16
$\lambda / \%$	0.68	22.91	23.16

表 2 3 种反应器的分布密度函数

反应器	IALB-CICHS	AL	BC
$E(\theta)$	$1.15477e^{-1.1627\theta}$	$1.31154e^{-1.7014\theta}$	$1.36807e^{-1.7803\theta}$

图 4 所示是根据理论计算所得结果与实验值的比较,从图 4 可以看到,2 者十分吻合,说明本实验所用的反应器的水力学特性可以用前述的组合模型来描述.

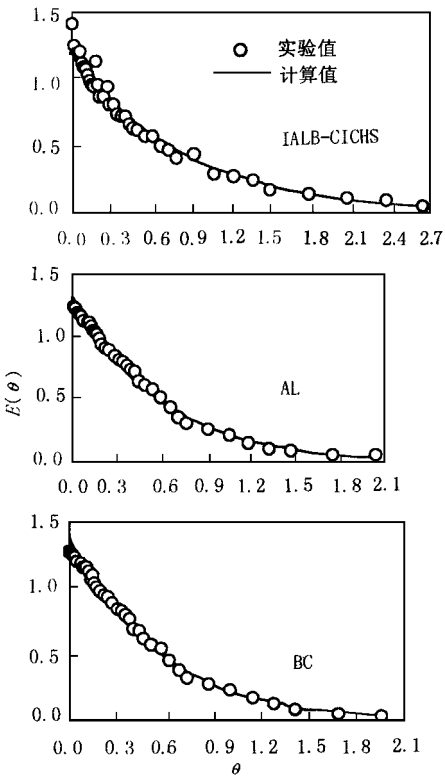


图 4 $E(\theta)$ 的计算值与实验值

由实验结果可以看出,根据流体停留时间分布的计算,鼓泡塔内(BC)的完全混合区只占工作容积的 43.16%,而旁路流率高达 23.16%.在此基础上发展起来的气升式内循环生物反应器(AL)可以提高完全混合区和减少旁路流率的分率,但改善不是很明显,完全混合区的容积占 45.31%,旁路流率减少到

22.91%.而带有蜂窝陶瓷载体的气升式内循环生物反应器(IALB-CICHS),则大大提高了反应器的混合效率,完全混合区提高到 85%以上,更重要的是走旁路的流体不到 1%.

从实验中还可以注意到,对相同体积的反应器,由于加入了固定化细胞用的蜂窝陶瓷和内循环管,尽管使其工作体积减少了 100 ml,但完全混合区高达 85%以上,有效容积还是比鼓泡塔高出 548 ml;比气升式生物反应器高出 516 ml.

实践证明,在连续流动的反应器中,因为实际反应器内流体的流动状态不同,很容易造成旁路的存在,使得一部分流体迅速离开反应器,从理论上说该部分流体在反应器内的停留时间可以忽略,基本没有参与反应,这就大大降低了反应器的效率.而蜂窝陶瓷气升式内循环生物反应器中由于增加了起到静态混合器作用的蜂窝陶瓷,强化了流体在反应器内的流动,既提高了反应器的有效体积又减少了走旁路流体的比例.可以认为该反应器效率将会大大提高.

参考文献:

- 1 Bailey J E. Biochemical reaction engineering and biochemical reactors. Chem. Eng. Sci., 1980, 35:1854 ~ 1886.
- 2 Chisti M Y, Fujimoto K, Moor Young M. Hydrodynamic and Oxygen mass transfer studies in bubble columns and airlift bioreactors, Paper 117a presented at the AIChE Annual Meeting. Miami Beach:1986, 2 ~ 7.
- 3 Royse S. Scaling up for mammalian cell culture. The Chemical Engineer, 1987, (11):12 ~ 13.
- 4 Schügerl K, Lücke J, Oels U. Bubble column bioreactors. Adv. Biochem. Eng., 1977, 7:1 ~ 84.
- 5 Blenke H. Loop reactors. Adv. Biochem. Eng., 1979, 13:121 ~ 214.
- 6 Chisti M Y, Moor Young M. Airlift reactors: Characteristics, applications and design considerations. Chem. Eng. Commun., 1987, 60:195 ~ 242.
- 7 Levenspiel O. Chemical Reaction Engineering, 2nd ed. Wiley:1972