

内循环生物流化床反应器的理论分析

周 平 钱 易

(清华大学环境工程系, 北京 100084)

摘要 从反应器理论、生物膜动力学及水力学的角度对内循环式三相生物流化床反应器的流态、生物膜降解有机物及启动挂膜特性进行了分析, 认为在内循环三相流化床中 $\frac{D}{uL} = \text{const}$, 对于一般城市污水处理系统求出了效率因子, 建立了内循环速度与反应器尺寸的关系, 同时提出了可能进一步提高反应器处理效率的优化途径。

关键词 内循环三相生物流化床, 反应器, 动力学, 水力学。

内循环三相生物流化床是一种新型的流化床反应器, 它的产生成为生物膜法的重要突破。其构造如图 1(a) 所示。反应器内装填有细小的惰性载体, 其表面被生物膜所覆盖, 当在 I 区(升流区)进行曝气充氧时, 由于升流区和降流区(II 区)的密度差使得流体夹带生物载体在 I 区和 II 区之间循环流动, 并完成对废水中有有机物的降解作用。三相生物流化床反应器最显著的特点是高效性, 如果能进一步提高其处理效率, 则这种新型反应器的潜力无疑将会得到更充分的发挥。

1 反应器流态

传统的好氧生物流化床是废水自下而上流动并使载体流化, 反应器内流态在较大程度上接近活塞流, 但其存在的一个问题是载体脱膜困难。随着载体表面生物膜不断增厚, 整个生物载体的比重变小, 导致载体大量流失。为解决这一问题, 大多采用专门设计的机械脱膜装置, 而使处理流程复杂化, 影响了生物流化床的推广使用。内循环三相生物流化床解决了传统三相流化床所存在的这个问题, 由于载体在升流区和降流区之间的循环流动造成的摩擦碰撞, 可通过合理的设计使得较厚的生物膜自行脱落而又不致过度脱膜, 有效地控制膜厚。内循环生物流化床内的流态更接近完全混合流。活塞流反应器(PFR)和完全混合反应器(CSTR)是 2 种理想化的极端模型, 实际的反应器都介于 PFR 和 CSTR 之间。其纵向存在不同程度的

混合现象一般可用分散数 D/uL 来衡量^[1], 其中 D 为分散系数(m^2/s), u 为液体流速(m/s), L 为反应器长度(m)。当 $D/uL \rightarrow 0$ 时, 分散可忽略, 反应器为 PFR, 而当 $D/uL \rightarrow \infty$ 时, 分散很大, 反应器接近 CSTR。显然, 内循环三相生物流化床的分散数比传统好氧流化床大。

众所周知, 在生化动力学参数和停留时间相同的条件下, PFR 的处理效率总是高于 CSTR, 可以推知, 当 D/uL 越小时反应器越接近于 PFR, 处理效率越高。因此通过改变内循环三相生物流化床的结构以减小其分散数 D/uL , 可以在保持流化床较高的体积负荷时达到较高的处理效率。增加反应器的内筒数, 即由一般的一根内筒改变成多根内筒而形式上类似于化工操作中的列管式反应器可能有助于达到此目的, 如图 1(b) 所示。其理论根据是: 在内循环三相生物流化床内, 紊动程度可用雷诺数 $Re = \frac{ud}{\nu}$ 来衡量, 其中 d 为内筒直径(m), ν 为水的动力粘滞系数(m^2/s)。根据资料及一些试验结

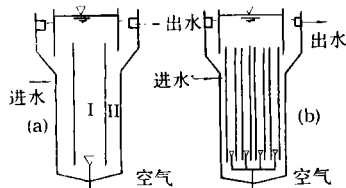


图 1 内循环流化床示意图

I. 升流区(内筒) II. 降流区(外筒)

(a) 内循环流化床 (b) 多个内筒内循环流化床

果^[2], 内循环流化床内的水流速度 u 一般小于 1 m/s ; d 一般在 10 m 以内, 在 20°C 时 ν 为 $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 其结果 Re 为 10^5-10^6 。根据有关文献^[1], 当 Re 为 10^5-10^6 时, 各种流体及不同管长时的 D/ud 趋于恒定, 认为, 在内循环三相生物流化床内有下列关系成立:

$$D/ud = \text{const} \quad (1)$$

如果将一根内筒改为多根内筒, 减小直径 d , 由式(1)可知 D/u 也将减小。如果内筒的长度 L 不改变, 则离散数 D/uL 将下降, 使反应器流态更接近 PFR, 从而处理效率可以得到提高。

增加内筒数量后, 为了保证反应器内循环流动的均匀性, 每根内筒的供气量应相同。

2 生物膜动力学

内循环生物流化床反应器本质上是一种生物膜法工艺, 有机物在生物膜中的降解与传递速率的关系可用西勒数 Φ 来加以度量。

$$\Phi = r_m \sqrt{\frac{q_{\max}}{K_s} \cdot \frac{\rho}{D_0}} = r_m \sqrt{K\rho/D_0} \quad (2)$$

式中, r_m : 惰性载体半径(cm); $q_{\max}$: 最大有机物比降解速率($\text{mg BOD}_5/\text{mg SS} \cdot \text{d}$); K_s : 米氏常数($\text{mg BOD}_5/\text{L}$); ρ : 生物膜干密度(mg/ml); D_0 : 有机物在生物膜中的扩散系数(cm^2/s)。

有机物实际降解速率与无传质阻力时的降解速率之比为效率因子 η , η 与 Φ 的关系见图 2, 图 2 中 $\lambda = r_p/r_m$, r_p 为生物载体半径(cm)。

由图 2 可见, Φ 很小时 η 接近于 1, 传质阻力可忽略不计, 有机物降解速率正比于反应器内生物浓度 X , 而 X 直接与载体大小、密度及生物膜厚有关, 因而只要对这些参数加以适当的选择和控制即可达到反应器优化的目的。有 2 种情况可能导致较小的 Φ 值: ① 生物膜很薄, 此时为提高反应速率必须在反应器中增加载体量以达到增加 X 的目的; ② 废水有较小的 $\sqrt{K\rho/D_0}$ 值, 这意味着 K 很小或 D_0 很大, 废水一般较难降解, 处理效率不受传质速率所控制, 在这种情况下载体上的生物膜可适当厚些而不过多地增加载体量来提高 X 值。

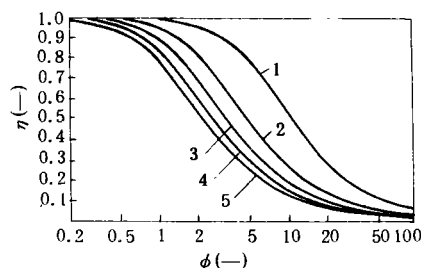


图 2 $\eta-\Phi$ 关系

1. $\lambda=1.2$ 2. $\lambda=1.5$ 3. $\lambda=1.8$

4. $\lambda=2.1$ 5. $\lambda=2.4$

当 Φ 较大时, η 很小, 此时传质阻力很大, 有机物的降解速率由生物膜内有机物的传递速率所控制, 这种情况的出现也有 2 种可能: ① 载体上的生物膜很厚, ② 废水的 $\sqrt{K\rho/D_0}$ 值很大, 即 K 很大或 D_0 很小, 此时废水比较容易降解, 为提高有机物的降解速率可增加载体的投加量和保持很薄的生物膜以减小传质阻力, 增加 η 值。

以上讨论的是 2 种极端情况, 对于一般的城市污水或与城市污水性质类似的有机废水, 其动力学常数^[3]: $q_{\max}$ 为 $2-10 \text{ mg BOD}_5/\text{mg VSS} \cdot \text{d}$, K_s 为 $25-100 \text{ mg BOD}_5/\text{L}$, 若 $\text{VSS}/\text{SS}=0.75$, 则 $q_{\max}$ 为 $1.5-7.5 \text{ mg BOD}_5/\text{mg SS} \cdot \text{d}$, $K=q_{\max}/K_s$ 为 $0.015-0.3 \text{ L}/\text{mg SS} \cdot \text{d}$ 。 20°C 时有机物在水中的扩散系数为 $10^{-5} (\text{cm}^2/\text{s})$ 数量级, 但在生物膜中, 由于生物膜结构与水不同, 故其中扩散系数与水中的不同。当生物膜密度较大时, 每单位生物膜体积的细胞数和胞外聚合物高, 膜中的弯曲程度高而孔隙率则低, 因此将增加生物膜中有机物的扩散阻力。考虑到以上因素, 假定生物膜干密度 ρ 取 75 mg/ml , 有机物在生物膜中的扩散系数 D_0 取 $5 \times 10^{-6} (\text{m}^2/\text{s})$, 当使用 $r_m=0.04 \text{ cm}$ 的载体时, 可求得 Φ 为 $2-10$, 由图 2 可查得 η 约为 $0.2-0.7$; 而如果选用 $r_m=0.02 \text{ cm}$ 的载体, Φ 为 $1.0-4.6$, 相应的 η 为 $0.4-0.85$ 。由此可见, 在一般情况下为进一步提高反应器负荷, 应同时提高效率因子与生物浓度值, 而采用小粒径的载体可达到这个目的。

3 反应器内水力学

在流化床内,循环的动力来源于升流管和降流管之间的压差,此压差应等于流体流动的动能、沿程阻力损失、局部阻力损失之和,根据能量方程,显然有下列关系成立:

$$(1 - \epsilon_d)L + \frac{u_d^2}{2g} = (1 - \epsilon_r)L + \frac{u_r^2}{2g} + \sum \zeta_i \frac{u_r^2}{2g} \quad (3)$$

式中, ϵ : 气体滞留量(-); u : 液体流速(m/s); L : 反应器内筒高度(m); $\sum \zeta_i$: 沿程阻力和局部阻力系数之和(-); d, r : 下标, 分别表示降流区和升流区。

由于在升流区进行曝气,大量气体在升流区顶部向上逸出,故降流区所夹带的气体滞留量很小,与升流区相比可忽略不计,即 $\epsilon_d \approx 0$, 则由式(3)可得:

$$\epsilon_r L = \sum \zeta_i \frac{u_r^2}{2g} + \frac{u_r^2}{2g} - \frac{u_d^2}{2g} \quad (4)$$

$$\because U_d = \frac{A_r}{A_d} u_r$$

$$\therefore \epsilon_r = \frac{1}{L} \cdot \frac{u_r^2}{2g} (\sum \zeta_i + 1 - \frac{A_r^2}{A_d^2}) \quad (5)$$

式中 A_r 与 A_d 分别为升流区和降流区的截面积(m^2)。

假定升流区气体滞留量 ϵ_r 与流化床供气量 Q_g 成正比, 即 $\epsilon_r = kQ_g$ (6)

式(6)代入式(5)可得:

$$kQ_g = \frac{1}{L} \cdot \frac{u_r^2}{2g} (\sum \zeta_i + 1 - \frac{A_r^2}{A_d^2}) \quad (7)$$

由式(7)知,在流化床中,供气量对液体的循环、反应器内的混合影响很大。当供气量 Q_g 与内筒长度 L 一定时,循环速度和阻力损失系数与升流管和降流管的面积之比有关,而影响阻力系数 ζ_i 的主要因素是内筒底和反应器底部之间的距离,因为外筒的下向流动流体在内筒底部经 180° 转弯后进入内筒而向上流动,这种流动方向改变造成的水头损失极大,故它是阻力损失的主要部分。可推论内筒底与流化床底

部的距离越大,则阻力越小、循环速度越大。如果固定内筒底与底部的距离、内筒面积与外筒面积之比 A_r/A_d , 而增大内筒的长度(即增大反应器的高度),虽然 L 的增大导致了流体沿程阻力损失的增大,但 $\sum \zeta_i$ 的增大幅度小于 L 的增大,故随反应器高度增加,循环速度也增大。

显然,反应器内的循环速度较大,有利于通过流体的剪切作用脱除过厚的生物膜,保持较高的生物活性。但如果循环速度过大,则载体表面的生物膜很薄,大部分生物以悬浮状态存在,生物总量不能增加,影响生物流化床高生物浓度优势的发挥,而且在反应器的启动初期,会造成挂膜困难。反之,当循环速度较小时,就不能有效地控制过厚的生物膜。

影响挂膜的另1个因素是反应器内流动的均匀性,在内循环三相生物流化床中,特别是在增加内筒数量的情况下,流动的均匀性是至关重要的。反应器内流速分布不均可能造成流速大的区域脱膜过度而流速小的区域膜厚得不到控制。

在内循环三相生物流化床中,由于内筒曝气使得内筒紊动剧烈,故内筒以脱膜为主,而外筒流动则相对稳定,有利于挂膜。

4 结论

(1) 采用多根内筒的内循环流化床可减小反应器的离散数、提高处理效率。

(2) 小粒径的载体可同时提高生物浓度和效率因子。

(3) 内筒底与反应器底部的距离、供气量和反应器的高度是影响内循环速度的主要因素。

(4) 内循环生物流化床的循环速度与流动的均匀性对挂膜与反应器的效率影响很大。

参考文献

- 1 许保玖等. 当代给水与废水处理原理. 北京: 高等教育出版社, 1991: 85-86
- 2 Heijnen J J et al. . Water Science and Technology. 1991, 23, 1427
- 3 秦麟源. 废水生物处理. 上海: 同济大学出版社, 1989: 71

toxic organics in suspended solid and sediment. More attention should be paid to the fact.

Key words: organic pollutants, sediment, suspended solid.

HPLC Determination of Trace Phenols in Surface Water by Using a Concentration Technique Based on a Macromolecular Porous Resin GDX-502.

Bao Nan et al. (Center of Experiment, Shandong Univ., Jinan 250100): *Chin. J. Environ. Sci.*, **16**(2), 1995, pp. 73–77

A simple method was described for the quantitative determination of phenols in surface water. The resin concentration technique was used instead of solvent extraction, by taking a macromolecular porous resin GDX-502 as an excellent adsorbent and dioxane as an excellent eluant. The eluate was analysed by a reversed-phase HPLC equipped with a UV detector. Recoveries of nine phenols were higher than 90%, except for 2, 4-dinitrophenol, and the average relative standard deviation ($n=5$) was 2.4%. The detection limits of nine phenols were 2.0–8.6 ng. Trace concentration at $\mu\text{g/L}$ level of these phenols pollutants can be determined. The developed method has been applied to determining phenols of urban lake water and river water with satisfactory results.

Key words: phenols, GDX resin, concentration, analysis by HPLC.

Study on the Economic Legal System for China's Sustainable Development.

Wang Mingyuan et al. (Center of Environmental Science, Peking University, Beijing 100087): *Chin. J. Environ. Sci.*, **16**(2), 1995, pp. 78–82

Economic instruments were pointed out to have a very important role to play in the process towards sustainable development in China, and in essence, to allow the environmental resources to be used on a charged basis and the principle of polluter pays to be actually performed. The economic instruments for use in the sustainable development should mainly include an environmental fees imposing system, an environmental taxation system, financial incentives systems, emission permits trade systems, assurance systems on obligation to environmental damage, and the like. A detailed discussion was made on the concepts, natures, roles, current statuses, perfections and implementations of both environmental fees imposition and taxation systems, and the relationship between both. The issues of the application of financial subsidization and emission permits trade systems to the sustainable development

in China were also analyzed. Finally, it was stressed that the related environmental legislations should be further perfected so as to make strengthened economic instruments and compulsory environmental management.

Key words: sustainable development, economic instrument, environmental fees, environmental taxation.

Study on the Ecological and Environmental Effects of Constructing a Long Oil Pipe Work.

Mu Congru and Yang linsheng (Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101): *Chin. J. Environ. Sci.*, **16**(2), 1995, pp. 83–87

The effects of constructing a long oil pipe work on the ecological and environmental elements, such as natural vegetation, forest, grasslands, farmlands, oasis, soils and wild animal habitats, were analyzed. The models for calculating the losses of 7 ecotypes caused by such a pipe work construction were developed. In studying the response strategies for environmental protection, 3 indicators representing the ability of ecological restorage were suggested to describe the extent to which a damaged surface ecosystem can be rehabilitated after the completion of such a work. Based on this, the measures were suggested to minimize the losses by such a pipe work and to speed up the rehabilitation of a damaged ecosystem.

Key words: long oil pipe work, environmental impact, damaged ecosystem, ecological rehabilitation.

Theoretical Analysis of an Internal Circulating Bio-Fluidised Bed Reactor.

Zhou Ping, Qian Yi (Dept. of Environ. Eng., Tsinghua Univ., Beijing 100084): *Chin. J. Environ. Sci.*, **16**(2), 1995, pp. 88–90

An analysis on the flow pattern, the organic matter degradation by biofilm, and the biofilm forming in an internal circulating three-phase biofluidised bed was conducted, based on the reactor theory, biofilm kinetics and hydrodynamics. It was found that D/ud was constant in the reactor and the efficiency factor was calculated for a general municipal wastewater treatment system and the relationship between circulating velocity and reactor size was established. Some possible optimization ways to increase the reactor efficiency was also suggested.

Key words: internal circulating three-phase biofluidized bed, reactor, kinetics, hydrodynamics.