

专论与综述

固定化微生物流化床反应器的研究进展*

赵兴利 兰淑澄

(北京市环境保护科学研究院, 北京 100037)

摘要 综述了固定化微生物流化床反应器的发展及应用等. 包括生物流化床处理废水的特点及发展过程; 固定化微生物反应器的几种类型及特点; 在工业生产和废水处理方面的应用; 影响固定化微生物流化床反应器设计和操作的因素; 最后提出了固定化微生物流化床反应器今后的研究方向.

关键词 固定化微生物, 流化床反应器, 废水处理.

微生物固定化技术是生物工程领域中的一项新兴技术, 目前已广泛应用于制药、化工、食品发酵及环保等领域. 80 年代初, 国内外开始研究并将这种新技术用于有机工业废水处理, 而高效节能型反应器的研制是固定化微生物技术实用化的重点之一. 固定化微生物反应器的形式主要有流化床、固定填充床、搅拌槽式等. 其中流化床作为固定化微生物反应器有独到的优点.

1 生物流化床反应器的特点及发展

1.1 处理废水的特点

生物流化床根据生化反应的类型不同可分为厌氧流化床和好氧流化床, 本文重点介绍好氧床. 好氧床又可分为两相床和三相床, 两相床氧气通过预先曝气溶解于废水中, 反应器内的生化反应为液固两相反应. 而三相床内气体则以气泡的形式存在, 生化反应为气液固三相反应.

生物流化床内装有填料作为载体, 主要有砂、焦炭、活性炭和陶粒等. 废水与气体自下而上通过反应器, 使填料颗粒保持流化状态. 废水中的污染物与生长在填料颗粒表面的微生物接触达到降解去除的效果. 流化床出水除部分回流到充氧设备进口处外, 其余进入二次沉淀池, 泥水分离后排出合格的出水. 在采用空气作氧源时, 也可采用加大供气量使填料流化, 此时回流便可省去^[4].

流化床处理废水的特点为^[5,6]:

(1) 小粒径载体提供了微生物生长的巨大表面积, 使反应器内能维持较高的生物量, 因而提高了容积负荷;

(2) 由于填料处于流化状态并具有巨大的传质面积, 使传质速率可高于生化反应的速率;

(3) 反应器有较强的抵抗冲击负荷的能力;

(4) 三相床内由于气体的搅动, 载体表面生物膜更新快, 活性好, 在负荷不是很高时可省去脱膜设备;

(5) 氧的利用率高, 可达 30% - 40%;

(6) 三相分离容易, 使流程更加简单、实用;

(7) 占地面积小, 投资省.

但流化床反应器也存在着动力消耗大, 操作管理及放大设计难等缺点.

1.2 应用与发展

生物流化床处理污水的研究始于 70 年代初. 1971 年, Robert 等人首先以污水生物处理出水为实验对象, 结果表明, 有机碳去除率达 90%. 与此同时, Jeris 对该工艺进行了系统的研究, 先后进行了流化床工艺脱氮和去除 BOD 的实验. 美国 Dorr oliver 公司在加拿大 Orillia 建立了中试厂, 在流化床的布水系统及脱膜设备等方面取得了突破性进展.

70 年代中后期, 已有用生物流化床进行城市污水二级和三级处理及一些工业废水处理的研究及应用实例. 1980 年 4 月在英国曼彻斯特举行了“生物流化床处理废水”的国际学术会议, 认为生物流化床具有效率高、占地少、投资省、设备简单等优势. 目前, 许多国家都进行了生物流化床处理污水的研究, 并已兴建许多生物流化床污水处理厂.

我国对生物流化床的研究是从 70 年代末开始的. 先后有北京市环保所、中国市政工程西南院、哈尔滨建

* 国家自然科学基金资助课题

收稿日期: 1996-06-15

工学院、抚顺石油化工研究院等单位, 分别进行了生物流化床处理生活污水、城市污水和天然气脱硫废水的试验, 并从工艺、载体选择、操作方式、充气及脱膜等方面进行研究, 取得了一些有参考价值的研究成果^[9].

80 年代后期, 尤其进入 90 年代以来, 国内外对生物流化床的研究逐渐从探索性试验转向动力学机理和数学模式的研究.

2 固定化微生物流化床反应器

2.1 固定化微生物反应器的类型

固定化微生物反应器的开发, 最早为法国生物学家巴斯德设计了一种醋化器, 用木片固定醋酸杆菌属, 该醋化器是一种生物滤池, 这种反应器在今天醋的生产和污水处理方面仍可见到.

随着固定化微生物技术的发展, 反应器的研究也取得了进展, 其类型也有多种. 影响反应器类型选择的因素很多, 包括固定化方法、颗粒特性(形状、大小、密度、强度)、基质属性、抑制因素、水力学特性和经济条件等. 目前, 应用较多的是流化床生物反应器、固定填充床和搅拌槽式反应器^[1].

(1) 搅拌槽式反应器(stirred tank reactors, STR) 搅拌槽式生化反应器多采用分批式运行. 但由于其强大的剪切力, 对包埋固定化法或交联固定化法制成的颗粒, 易导致破裂. 改良后的 STR 是将固定化颗粒固定多孔的筛板孔眼中, 与起搅拌作用的筛板一起转动^[1].

(2) 固定填充床反应器(Fixed packed bed reactor, FPB) 固定填充床反应器在实验室范围内应用较多, 适用于反应产物有抑制作用、水力停留时间较短的生化反应过程.

推流式固定填充床反应器, 污水从反应器底部进入, 顶部排出, 出水不回流. 该反应器在高基质浓度时具有较高的反应速度, 但低液体流速导致低传质效率.

循环式固定填充床反应器, 出水有部分回流、可克服推流式传质效率低的缺点, 循环回流可使基质与固定化微生物颗粒接触机会增多.

固定填充床生物反应器存在以下缺点: 由于颗粒的重量与流体压力, 而使固定化微生物相互挤压、甚至破裂, 降低颗粒与液体接触面, 颗粒内微生物活力下降. 也可能在气液固三相运行时产生大气泡, 运行不佳^[2].

(3) 流化床反应器(Fluidized bed reactors, FBR) 流化床反应器是目前固定化微生物反应器应用的主要形式. 它借助上升流相(通常为气体、液体混合相)的

作用使固定化颗粒呈悬浮状态. 流化床反应器具 STR 和 FPB 的优点, 却少有它们的缺点. 它具有良好的混和、传质特性, 有较高的氧传质系数. 但流化床也存在操作要求较严和处理废水成本较高的缺点^[1].

此外, 还有气体混合反应器, 厌氧反应器, 膜生物反应器和筛板生物反应器等.

Venkatasubramanian 和 Karkare(1983) 定性地比较了几种生物反应器的优缺点, 如表 1. 可以看出, 流化床作为固定化微生物反应器有一些独到的优点^[3].

2.2 固定化微生物流化床反应器的应用

(1) 工业生产上的应用^[3] 以固定化微生物颗粒作为载体的三相流化床反应器目前已应用于乙醇、抗生素和酶的生产中.

Moebus 和 Tenber(1982) 将 CO₂ 连续气相的逆流三相流化床反应器应用于从酒酵母生产乙醇. Davidso 和 Scott(1984) 研究了用卡拉胶包埋发酵单胞菌, 在锥形的生物反应器内发酵, 进行生产乙醇的可操作性和可行性的研究.

在抗生素的生产方面, Berk 等用实验室规模的三相流化床反应器生产棒曲霉素. Zndo 等(1986) 试图用三相流化床生物反应器生产青霉素.

Fukuda 等(1984) 使用气液固流态化发酵罐, 研究由固定在 6mm 球形微孔颗粒上的绿色木霉, 连续生产纤维素酶的过程.

表 1 不同类型固定化微生物反应器特点比较

反应器类型	固定床反应器	机械搅拌式反应器	流化床反应器
操作难易程度	易	易	难
阻力损失	高	低	低
细胞移出难易程度	难	易	易
混合程度	不好	好	好
氧传递	不好	好	好
活细胞分布	不均匀	均匀	均匀
固定化颗粒磨损程度	低	高	低
放大难易程度	易	易	难
成本	低	低	高
对产物抑制动力学适用性	好	不好	一般
对基质抑制动力学适用性	不好	好	一般

(2) 废水处理方面的应用 目前, 用流化床作为固定化微生物反应器处理各种废水, 在国内外已有许多报道.

日本武田 雄^[7]采用容积为 10L, 固定化微生物颗粒填充率为 20% 的流化床反应器, 对炼油废水进行了研究, 提出了最佳工艺条件为: HRT 10h, 温度 35 - 38 , 原水 pH6.5 - 7.8.

日本市村等人^[8]用以 PVA 为主链的光架桥性预聚物(PVA-SBQ)与海藻酸钠结合包埋固定硝化菌, 在有效容积为 1.78L 的内循环式流化床中进行了 250d

的连续硝化试验, 可将 $\text{NH}_4\text{-N}$ 从 80mg/L 降至 20mg/L , $\text{NH}_4\text{-N}$ 容积负荷达 $2\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。

作为日本建设省 90 年代计划中的一部分, 日本下水道事业团在横滨, 用固定化硝化菌在流化床中进行一年半生产性试验, 规模为 $3000\text{m}^3/\text{d}$, 在 HRT 为 6h, 水温为 8 的低温条件下, $\text{NH}_4\text{-N}$ 去除率达到 90% 以上^[10]。

角野 立夫等^[11]以聚丙烯酰胺凝胶作为固定化材料, 用包埋法固定硝化菌, 并以 7.5 的填充率将固定化微生物颗粒投入到流化床反应器中, 在 HRT 3.2h 情况下, $\text{NH}_4\text{-N}$ 的去除率达到 86%。

国内周定等^[12]在三相流化床中, 对固定化微生物处理含氰废水进行了研究, 发现固定化细胞处理系统的负荷相当于活性污染法的 1 倍, 而污泥的形成量却只有后者的 1/10。此外, 李月中等在流化床反应器中, 对固定化微生物法处理含氰废水进行了研究^[13]。欧阳平凯等在流化床反应器中, 对固定化微生物处理醋酸废水进行了研究^[14]。

3 流化床固定化微生物反应器设计和操作的影响因素

(1) 流体力学应力 固定化微生物承受流体力学应力的能力(主要是剪切力), 是设计生物反应器时要考虑的一个重要物理学因素。这一承受能力常常决定了微生物培养过程和生产过程中所能采用的操作条件。

(2) 生物反应动力学的影响 ① Monod 型动力学的影响: 在基质不抑制反应和反应动力学遵从 Monod 型关系式的条件下, 生物反应器最好在高基质浓度下操作。在连续操作时, 可使液流呈推流式, 以实现高基质浓度的条件。气液固流化床应选择较大的高/径比, 以近似实现推流型。② 基质抑制动力学: 当反应中发生基质抑制时, 可采用带机械搅拌的流化床。小高/径比的三相流化床也可获得良好的液相混合程度。此外, 也可在反应器中放置一根导流筒以实现良好的液相混合。③ 产物抑制动力学: 对于产物抑制动力学的反应系统, 采用推流式反应器比完全混合式反应器更有利于实现基质的高转化率。但最有效方法就是及时移走任何抑制组分, 这可采用固体颗粒吸附或中空纤维膜分离方法来实现。

(3) 氧传递 有效的氧传递对于生物量负荷大的体系尤为关键。三相流化床中的氧传递与许多操作参数有关。如不使用纯氧, 可以采用提高空气流速, 提高传质系数或增大相界面积的方法来改善氧的传递。

(4) 固定化微生物颗粒的稳定性和强度 固定化的耐久性和稳定性, 是三相流化床生物反应器能否成功操作的重要因素之一。除了固定化微生物颗粒的物理性质外, 颗粒的完整性主要受颗粒间的碰撞、摩擦以及气流发生的液体湍动剪切力的影响, 颗粒不完整将会导致过程操作的失败^[3]。

(5) 固定化微生物颗粒的大小 Dstergaard 和 Ostergaard 在丹麦做了在三相生物流化床反应器中的研究。通过 1mm、3mm、6mm 3 种不同粒径的气体停留时间和气泡大小的实验。发现在颗粒直径为 6mm 的反应器中气液传递较好。由于气体滞留和气泡破裂等问题, 把颗粒大小作为一个设计参数进行了研究。

(6) 固定化微生物颗粒密度的影响 颗粒密度是影响动力消耗和传质系数的一个重要参数。Riba 通过研究表明: 传质系数取决于颗粒和介质的密度差。可用 $(\rho_s - \rho) / \rho$ 来表达这种差值 (ρ_s 为颗粒密度、 ρ 为液体密度)。通过大量实验, 这个系统确定为 0.37。因此, 选择密度大的载体, 对液固相传质有好处^[1]。

4 未来研究方向

固定化微生物三相流化床反应器的研究目前仍处于初期, 关于它的一些基本特性, 如细胞生理特征, 反应动力学, 固定化技术和流体力学行为之间的相互关系, 传质及混合特性等, 还未进行深入研究。对于固定化微生物系统中粘性介质的流变特性, 也需进行研究, 以准确地确定氧的传递和动力的消耗。

参 考 文 献

- Forster C F. Environmental Biotechnology. London: Academic Press Inc, 1987: 350
- 徐向阳. 固定化细胞技术在废水处理中的应用. 中国给水排水, 1992, 8(2): 39
- [美] L. S. 范著, 蔡平等译. 气液固流态化工程. 北京: 中国石化出版社, 1993: 260
- 许保玖. 当代给水与废水处理原理. 北京: 高等教育出版社, 1990: 392
- 唐传祥. 污水处理的生物流化床工艺. 西南给排水, 1992, 2: 16
- Iza J. Fluidized Bed Reactor for Anaerobic Wastewater Treatment. wat. sci. Tech., 1991, 24(8): 109
- 武田 雄. 包括担体流动床开发. 造水技术, 1991, 17(2): 20
- 周定等. 固定化细胞在废水处理中的应用及前景. 环境科学, 1993, 14(5): 51
- 辛亮明, 刘念曾. 用三相生物流化床处理炼油废水. 化工环保, 1986, 6(4): 194
- 多田 一. 固定化微生物を用いた硝化促進型循環変法による下水の窒素処理について. 环境技术, 1991, 20(3): 205
- 角野 立夫等. 包括固定化微生物を用いた排水处理. 特集/最新の废水处理技术(2). 用水と废水, 1990, 34(11): 27
- 周定等. 环境科学, 1990, 11(1): 1
- 李月中等. 固定化微生物细胞法处理含氰废水的研究. 上海环境科学, 1991, 10(12): 2
- 欧阳平凯等. 固定化细胞处理乙醛和醋酸废水的研究. 环境工程, 1993, 11(4): 3

Determination of Trace Fe, Cu, Pb and Mn in Water Using FAAS with Reverse Flow Injection Extraction System. Chen Shuyu, Wu Ronghu et al. (The Center of Structural and Elemental analysis, University of Science and Technology of China, Hefei 230026): *Chin. J. Environ. Sci.*, **18**(1), 1997, pp. 70–72

FAAS with reverse flow injection analysis technology of on-line extraction was used to make the determination of trace Cu, Fe, Pb and Mn in drink water and environmental water. APDC and DDTC, MIBK were used as chelating, extracting agent respectively. The sensitivity of determination increase 35.7, 34.3, 48.7 and 41.6 times for Cu, Fe, Pb and Mn respectively. The detection limits for Cu, Fe, Pb and Mn are 1.6, 7.5, 3.3 and 2.1 $\mu\text{g/L}$ respectively. The results are satisfactory. **Key words** FAAS, reverse flow injection extraction, copper, iron lead, manganese.

Beijing Water Resource Database Management System. Li Da and Su Wenhui (Beijing Municipal Research Academy of Environ. Protection, 100037): *Chin. J. Environ. Sci.*, **18**(1), 1997, pp. 73–75

This paper described the outline of Beijing Water Resource Database Management System. A water resource macroscopic database management system with space character was developed. The system can offer various information involving in social economic activities, water resource exploitation, city drainage, water environmental quality and so on.

Key word: water resource, database, management system, grid net.

Research on Environment Management Information System in Nanshan District, Shenzhen City. Pan Yaozhong, Li Xiaobing et al. (Dept. of Resources and Environmental Science, Beijing Normal University, Beijing, 100875), Li Jixun, Hujing et al. (Environment Protect Agency of Nanshan District, Shenzhen City, Shenzhen, 518059): *Chin. J. Environ. Sci.*, **18**(1), 1997, pp. 76–79

An region environment management information system (REMIS) was designed and implemented on network of microcomputer based on database and geography information system (GIS) software. The system software with the characteristics of friendly interface common needs for hardware configuration can rapidly extract the results on assessment of environment quality. The system included different level model, such as, database model, basic service management model, environment quality assessment model, statistics and analysis model and spacial analysis model. In the end of

the research, some applications of REMIS were given.

Key word: environment management, database, GIS.

The Design and Some Technical Characteristics of Environmental Multimedia Information Management System in Longgang District, Shengzhen City. Li Ya et al. (Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012): *Chin. J. Environ. Sci.*, **18**(1), 1997, pp. 80–82

In this paper, the design thought, the design methodology, the research content and the main function of the Environmental Multimedia Information System in Longgang Region, Shenzhen City was described in details. Some technical characteristics was also analyzed.

Key words: environmental multimedia information system, multimedia design, longgang region, Shenzhen City.

Research Progress in Fluidized Bed Reactor for Immobilized Microbial Cell. Zhao Xingli and Lan Shucheng (Beijing Municipal Research Academy of Environmental Protection, Beijing 100037): *Chin. J. Environ. Sci.*, **18**(1), 1997, pp. 83–85

A review was given on the development and application of fluidized bed reactor for immobilized microbial cell. Including the attribute and development of fluidized bed reactor in waste water treatment; several types and attribute of immobilized microbial cell reactor; the application of fluidized bed reactor in industrial production and waste water treatment; a multiplicity of fluidized bed reactor for immobilized microbial cell; trend of needed research.

Key words: immobilized microbial cell, fluidized bed reactor, wastewater treatment.

Cumulative Impacts Research and Its Significance. Peng Yingdeng (Beijing Municipal Research Academy of Environmental Protection, Beijing 100037), Wang Huadong (Institute of Environmental Science, Beijing Nomoal University, 100875): *Chin. J. Environ. Sci.*, **18**(1), 1997, pp. 86–88

The recognition of cumulative impact can be largely attributed to the development in environmental impact assessment. This article reviews definitions and conceptual frameworks of cumulative impact and describes analytical approaches to cumulative impacts assessment (CIA). Based on this review, the flexible application of CIA to policies, plan or programs were proposed and some immediate research needs were suggested.

Key words: cumulative impacts, cumulative impact assessment, environmental impact assessment.