

文章编号 : 1009 - 038X(2001)03 - 0323 - 07

新型高效废水厌氧生物处理反应器研究进展

陈 坚, 卫功元

(江南大学工业生物技术教育部重点实验室, 江苏无锡 214036)

摘 要: 近年来, 废水的厌氧生物处理工艺以其独特的技术优势受到人们的广泛关注, 并发展了以厌氧膨胀颗粒污泥床、内循环式厌氧反应器、厌氧上流污泥床-过滤器和厌氧序批式间歇反应器等为代表的第三代新型高效厌氧反应器。本文综述了这些厌氧反应器的形成、结构、工作原理以及典型应用, 比较了这些系统的运行特点及存在的问题, 最后展望了该研究领域的发展及这些系统的应用前景。

关键词: 厌氧反应器; 厌氧膨胀颗粒污泥床; 内循环; 厌氧上流污泥床-过滤器; 厌氧序批式间歇反应器

中图分类号: X703

文献标识码: A

Research Progress of Advanced High-Rate Anaerobic Reactor for the Treatment of Wastewater

CHEN Jian, WEI Gong-yuan

(Key Laboratory of Industrial Biotechnology, Ministry of Education, Southern Yangtze University, Wuxi 214036, China)

Abstract: Anaerobic process in the wastewater treatment, owing to its inherent priority in application, attracted people much attention in recent years. Followed that, the third generation of novel types of high rate anaerobic reactors, such as EGSB, IC, UBF and ASBR, was also invented. In this paper, the formation, structure, operating principles and typical application of these anaerobic reactors were summarized in details. The characteristics and shortcomings of these systems were discussed. Finally, the future development of this field and the application of these systems were also prospected.

Key words: anaerobic reactor; EGSB; IC; UBF; ASBR

1 厌氧处理工艺

废水厌氧处理工艺的实质是利用厌氧微生物的代谢特性, 将废水中有机物进行还原, 同时产生甲烷气体的一种经济而有效的处理技术。厌氧生物处理技术的发展起源于城市污水废污泥的处理, 至今已有 100 多年的历史^[1], 其间发展非常缓慢。直

到 20 世纪六七十年代, 随着经济的快速发展以及城市的迅猛增容, 环境污染和能源紧张问题变得越来越严重时, 厌氧处理工艺作为一种低能耗的有机废水生物处理方法, 才得到人们越来越广泛的重视。

在厌氧生物处理工艺发展过程中, 反应器是发展最快的领域之一。以厌氧消化池^[1]为代表的第一

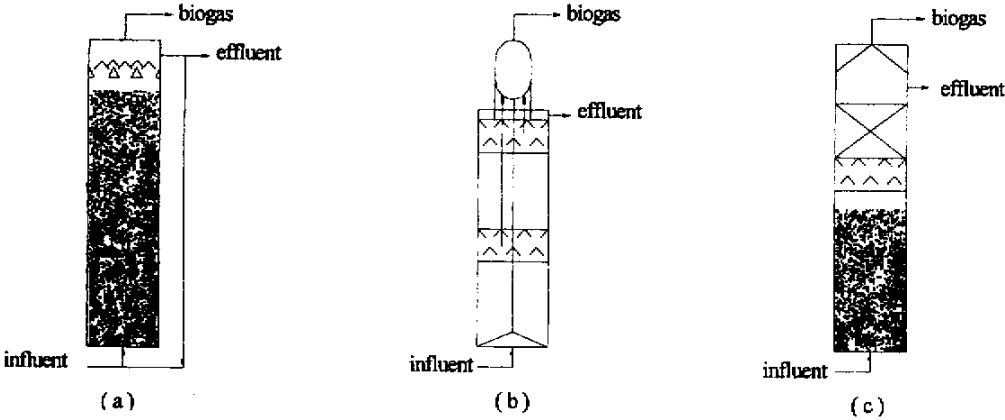
收稿日期: 2001 - 04 - 27; 修订日期: 2001 - 04 - 30.

基金项目: 教育部骨干教师资助项目.

作者简介: 陈坚 (1962 -), 男, 江苏无锡人, 工学博士, 教授, 博士生导师.

代厌氧反应器由于无法对水力停留时间和污泥停留时间分离,造成处理废水的停留时间至少需要 20 ~ 30 d,因此处理效率极低. 20 世纪 50 年代诞生了厌氧接触工艺^[2], 20 世纪 60 年代出现厌氧滤池^[3] (AF),以及 1974 年荷兰 Lettinga 等人^[4] 开发出了 UASB 反应器,标志着厌氧反应器的研究进入了新的时代. 以这些反应器为代表的第二代厌氧反应器的共同特点,就是实现了污泥停留时间与水力停留时间相分离,从而提高了反应器内污泥的浓度.

高效厌氧反应器中不仅要分离污泥停留时间和水力停留时间,还应使进水与污泥之间保持充分的接触. 但是单纯地改善混合状况有时会出现污泥的流失,因此为了解决这一问题,20 世纪 90 年代国际上相继开发出了以厌氧膨胀颗粒污泥床 (EGSB)、内循环式厌氧反应器 (IC)、厌氧上流污泥床-过滤器 (UBF) 和厌氧序批式间歇反应器 (ASBR) 等为典型代表的第三代厌氧反应器,图 1 和图 3 为这些厌氧反应器的结构示意图.



(a)EGSB (b)IC (c)UBF
图 1 新型厌氧反应器结构示意图

Fig.1 The schematic diagram of novel types of anaerobic reactors

本文首先介绍近年来 EGSB、IC、UBF 和 ASBR 等新型高效厌氧反应器的产生、结构、工作原理以及典型应用,然后比较这几种厌氧反应器的特点,最后展望厌氧反应器的发展趋势及应用前景.

2 新型厌氧反应器

2.1 EGSB 反应器

20 世纪 90 年代初,荷兰 Wageningen 农业大学开始了厌氧膨胀颗粒污泥床 (Expanded Granular Sludge Bed,简称 EGSB) 反应器的研究. Lettinga 教授等人^[5] 在利用 UASB 反应器处理生活污水时,为了增加污水与污泥的接触,更有效地利用反应器的容积,改变了 UASB 反应器的结构设计和操作参数,使反应器中颗粒污泥床在高的液体表面上流速下充分膨胀,由此产生了早期的 EGSB 反应器.

EGSB 反应器实际上是改进的 UASB 反应器,区别在于前者具有更高的液体上升流速,使整个颗粒污泥床处于膨胀状态,这种独有的特征使其可以具有较大的高径比. EGSB 反应器主要由主体部分、进水分配系统、气-液-固三相分离器和出水循环等部分组成,结构如图 1(a) 所示. 其中,进水分配系统是将进水均匀分配到整个反应器的底部,产生一个

均匀的上升流速;三相分离器是 EGSB 反应器最关键的构造,能将出水、沼气和污泥三相有效分离,使污泥在反应器内有效持留;出水循环部分是为了提高反应器内的液体表面上升流速,使颗粒污泥与污水充分接触,避免反应器内死角和短流的产生.

EGSB 反应器实质上是固体流态化技术在有机废水生物处理领域应用的典范. 根据载体流态化原理^[6],当有机废水及其所产生的沼气自下而上流过颗粒污泥床层时,载体与液体间会出现不同的相对运动,床层呈现不同的工作状态. 见图 2.

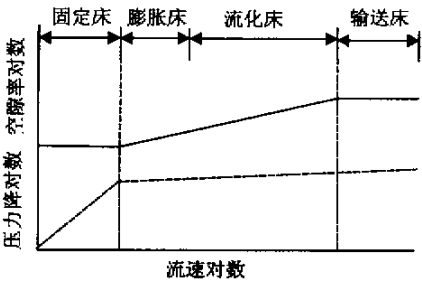


图 2 废水流速与床层空隙及压降的关系

Fig.2 Relationship between liquid velocity and bed interspace and pressure unloading

由图 2 可见,EGSB 的工作区为流态化的初期,即膨胀阶段,进水流速处于较低值,在充分保证进

水基质与污泥颗粒接触的条件下,加速生化反应,有利于减轻或消除静态床(如 UASB)中常见的底部负荷过重的状况,增加反应器对有机负荷,特别是对毒性物质的承受能力.

自 EGSB 反应器诞生以来,所进行的研究大部分集中于低温低浓度废水的处理.由于它能承受很高的有机负荷(最高可达 $30\text{ kg COD}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$),因此对于中高浓度污水同样能获得良好的处理效果.

表 1 EGSB 反应器的典型应用

Tab.1 Typical applications of EGSB reactor

序号	反应器 容积/L	废水类型	温度/ ℃	COD 容积负荷/ ($\text{kg COD}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$)	HRT/ h	总 COD 去 除率/%	文献
1	2.7	屠宰场废水	35	15	5	67	[7]
2	225.5	模拟乙醇废水	30	3.24~3.9	0.5~2.1	>90	[8]
3	116	生活污水	13	2.7	3.5	34	[9]
4	225.5	麦芽发酵废水	16	4.4~8.8	2.4	56	[10]
5	2.3	含硫酸盐废水	常温	10.4	1.9	96	[11]
6	-	甲醛甲醇废水	-	17	1.8	98	[12]
7	-	癸酸钠废水	常温	31.5	-	91	[13]
8	5	短链有机酸废水	35	10	6	98	[14]

2.2 IC 反应器

内循环式厌氧反应器 (Internal Circulation, 简称 IC) 是由荷兰 Paques 公司^[15] 于 20 世纪 80 年代中期在 UASB 反应器的基础上开发成功的高效厌氧反应器,并在 1986 年以后迅速把该项技术应用于生产中.由于这是一项重大的技术发明,发明者作了严格的技术保密,直到 20 世纪 90 年代以后才在有关杂志上见到 IC 反应器的研究报道.

IC 反应器实际上是由底部和上部两个 UASB 反应器串联叠加而成,包括 4 个不同的功能单元:混合部分、膨胀床部分、精处理部分和回流部分,如图 1(b)所示.反应器具具有两个三相分离器,使生物量得到有效滞留:一级(底部)分离器分离沼气和

不仅如此,由于 EGSB 反应器采用很高的出水循环比率,可以将废水中有毒物质稀释到微生物可以承受的浓度;同时废水与微生物之间能够充分接触,促进了微生物对基质的降解,因此采用 EGSB 反应器处理有毒或难降解废水也可取得较好的效果.此外,EGSB 反应器在处理硫酸盐废水方面也具有极大的应用潜力.运用 EGSB 反应器处理有机废水的典型应用总结于表 1.

部几乎不存在紊动,因此二级分离器不受高气体流速的影响,能有效分离出水中的颗粒污泥.进水和循环回流的泥水在膨胀床部分充分混合,使进水得到稀释和调节,并在此形成致密的厌氧污泥膨胀床.

IC 反应器内循环的结果使膨胀床部分不仅具有很高的生物量,很长的污泥停留时间,并具有很高的液体上升流速,使该部分内的颗粒污泥完全达到流化状态,大大增加了反应器内的传质效率,使生化反应速率明显提高,从而大大提高了反应器去除有机物的能力.

Paques 公司在 1985 年初建造了第一个 IC 中试反应器,处理高浓度的土豆加工废水^[16],1988 年建成了第一个生产性规模的 IC 反应器^[17],目前 IC 反应器已被运用于厌氧处理各种工业废水和低、中、高浓度农产品加工废水的实践中,见表 2.

表 2 IC 反应器的应用研究

Tab.2 Application studies of IC reactor

废水类型	反应器体积/ m^3	进水 COD 浓度/ (mg/L)	容积负荷/ ($\text{kg COD}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$)	总 COD 去除率/ %	文献
土豆加工废水	17	3 000~8 000	20~30	80~95	[16]
菊糖废水	1 100	7 900	31	60~85	[18]
奶酪废水	400	1 550	8~24	40~60	[19]
食品加工废水	400	4 500	5~42	70~90	[19]
啤酒废水	200	13 000	20~40	70~90	[19]
啤酒废水	70	4 300	25~30	80	[20]

2.3 UBF 反应器

上流污泥床-过滤器 (Upflow Blanket Filter, 简称 UBF) 是加拿大 Guio^[21] 于 1984 年在 UASB

和 AF 的基础上开发成功的新型复合式厌氧反应器.该新型反应器可以充分发挥 UASB 和 AF 两种高效反应器的优点,是一项极具开发应用价值的

型生物处理技术.其底部是高浓度颗粒污泥组成的污泥床,上部是填料及其附着的生物膜组成的滤料层,结构如图 1(c)所示.反应器上部的填料层既增加了无效容积的生物总量,又可防止污泥的突然洗出,而且对 COD 有 20% 左右的去除率^[22].研究表明,UBF 反应器可处理的有机负荷(OLR)直接正比例于系统的生物量浓度,这可以通过改变水力停留时间(HRT)来加以控制.

UBF 反应器在运行时,废水从反应器的底部进入,顺序经过污泥床、填料层进行生化反应后,从其顶部排出.标准 UBF 反应器的高径比为 6,且填料层一般位于反应器上部的 1/3 体积处.UBF 反应器

所用的填料可根据废水生物反应特性及水力学特征而进行选择,常用的有:聚氨酯泡沫填料、聚丙烯填料、半软性纤维填料、聚乙烯拉西环、塑料环、活性炭、浮石以及砾石等,其中应用最多的是聚氨酯泡沫填料^[23].因为其比表面积大、空隙度高,具有网状结构,厌氧菌群可以在其表面迅速生长.

许多学者^[24~27]对 UBF 反应器的填料选择进行了研究,发现填料并不是影响总 COD 去除率和颗粒污泥沉降性能的关键因素.在对高浓度有机废水和城市废弃物的处理中,发现 COD 去除率受生物量的增殖、OLR 和 HRT 影响最大^[28].表 3 列出了 UBF 反应器部分应用实例.

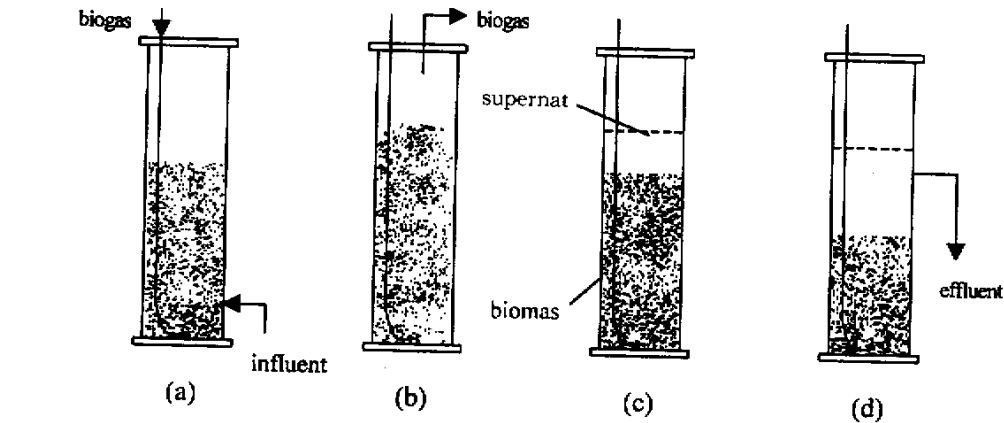
表 3 UBF 反应器的部分应用实例

Tab.3 Parts of application examples of UBF reactor							
填料类型	反应器容积/L	处理对象	温度/℃	COD 容积负荷/(kg COD/(m ³ ·d))	HRT	总 COD 去除率/%	文献
聚氨酯	3	饮料废水	35	10~12	<1 d	>80	[24]
塑料介质	-	制酒废水	-	1~3	-	91~94	[26]
聚氨酯泡沫	-	屠宰废水	35	10.41	1.5 d	90.2~93.4	[29]
-	30	城市废弃物	常温	10	9 个月	>85	[30]
聚乙烯拉西环	17	含丙酸、丁酸和乙醇废水	35	12	48 h	>95	[27]

2.4 ASBR 反应器

ASBR 即厌氧序批间歇式反应器 (Anaerobic Sequencing Batch Reactor),近年来成为厌氧反应器领域新的研究热点,是 20 世纪 90 年代美国 Iowa 州立大学 Richard R Dague 教授^[31]提出并发展的一种新型高效厌氧反应器. ASBR 法的主要特征是以序

批式间歇的方式运行,通常由一个或几个 ASBR 反应器组成.运行时,废水分批进入反应器,与其中的厌氧颗粒污泥发生生化反应,直到净化后的上清液排出,完成一个运行周期. ASBR 法一个完整的运行周期按次序应分为四个阶段:进水期、反应期、沉降期和排水期,如图 3 所示.



(a) 进水期 (b) 反应期 (c) 沉降期 (d) 排水期

图 3 ASBR 反应器及其操作周期

Fig.3 ASBR reactor and its operating cycle

单个 ASBR 反应器就是一个能顺利完成运行周期的处理系统.对于间歇排放的废水,只要排水间歇期足够长,使进水、反应、沉降、排水等一连串操作能够完成,用一个反应器就能达到处理要求.对于连续排放的废水,可用几个反应器轮流接纳废

水,分批进行处理.目前,ASBR 反应器的研究者很少,主要的研究工作是由 Dague 教授等人完成的.近 10 年来,他们对 ASBR 反应器的设计方法、操作要点、工艺特性、颗粒污泥的微观结构以及各种影响因素进行了深入研究,取得了一些研究成果.

ASBR 反应器的启动受接种污泥的种类和浓度影响较大,最好是采用颗粒污泥接种^[32].颗粒污泥的构成及微观结构除依赖于基质的性质外,还与操作温度有关.ASBR 反应器可以在 5 ~ 65 ℃ 范围内进行有效操作,尤其能在低温和常温(5 ~ 25 ℃)下处理低质量浓度(COD < 1 g/L)废水^[33-35].中温 35 ℃ 时,在所有基质浓度和 HRT 下,溶解性 COD 的去除率可达到 92% ~ 99%.业已开发出用高温(55 ℃)-中温(35 ℃)两段式 ASBR 反应器来处理含高悬浮固体的养牛厂废水^[36].另外,将中温 ASBR 反应器同高温厌氧滤膜反应器组合起来处理废水,可充分发挥前者 SRT 长,后者反应速度快的优势,比单独运行两者之一的处理效果都要好^[37].

废水中高浓度的 NH₃-N 和 NO₃-N 能够影响 ASBR 反应器的正常运行^[38].研究表明,ASBR 反应器在 NH₃-N 质量浓度小于 1 500 mg/L 以及 NO₃-N 质量浓度为 160 ~ 320 mg/L 范围内可以正常运行,不会因脱氮作用与甲烷化作用发生竞争而影响甲烷的产量^[39].应用 ASBR 法能够处理谷物加工厂、食品加工厂、饲料厂、屠宰厂、制药厂等排放的废

水.对流量、水质波动大的废水及苯酚废水、煤转化废水等特殊废水,ASBR 法也有很好的处理效果.

3 新型厌氧反应器特点比较

厌氧反应器的处理效率主要决定于反应器所能保有的微生物浓度及其生化反应速率,而传质条件对生化反应速率起着重要的作用.新型厌氧反应器的开发和研究主要是为了解决这两方面的问题,因此,这些反应器具有一些共同的特性:1)微生物均以颗粒污泥固定化的方式存在于反应器中,单位容积达微生物持有量更高;2)能承受更高的水力负荷,具有较高的有机污染物净化效能;3)具有较大的高径比,占地面积小,动力消耗小;4)颗粒污泥与有机物之间具有更好的传质,使反应器的处理能力大大提高.

由于各种厌氧反应器在结构上有差异,因此各自的处理范围以及处理能力也不尽相同.表 4 总结了 EGSB、IC、UBF 和 ASBR 等几种新型厌氧反应器的主要特点,同时指出了它们各自的不足.

表 4 新型厌氧反应器特点比较		
Tab.4 The novel types of anaerobic reactors comparison characteristics and shortcomings		
反应器类型	特点	不足
EGSB	● 较大的高径比,可达到 20 或更高; ● 采用出水循环,更适合处理含悬浮固体和有毒物质的废水; ● 极高的上升流速(5 ~ 10m/h)和有机负荷率(~ 40kg COD/(m³·d)); ● 具有高活性、沉降性能良好的颗粒污泥,且粒径较大,强度较好,SRT 较长; ● 颗粒污泥床层充分膨胀,污泥与污水充分混合,可用于处理低温低浓度废水; ● 具有三相分离器,使出水、沼气和污泥三相有效分离,使污泥在反应器中有效持留; ● 紧凑的空间结构使占地面积大为减少.	● 需要培养颗粒污泥,启动时间较长; ● 为使污泥膨胀,采用出水循环,需要更高的动力.
IC	● 高径比较大,占地面积小,建设投资省; ● 有机负荷率高,液体上升流速大,水力停留时间短; ● 出水稳定,耐冲击负荷能力强; ● 适用范围广,可处理低、中、高浓度废水以及含有毒物质的废水.	● 启动时间较长; ● 反应器内平均剪切速率较高; ● 颗粒污泥的强度相对较低.
UBF	● 水流与产气上升方向一致,堵塞机会小,有利于进水同微生物充分接触,也有利于形成颗粒污泥; ● 反应器上部的填料层既增加了生物总量,又可防止生物量的突然洗出,还可加速污泥与气泡的分离,降低污泥流失; ● 反应器积累微生物能力大为增强,有机负荷更高; ● 启动速度快,处理率高,运行稳定; ● 高径比较高,一般为 6.	● 填料价格昂贵.
ASBR	● 固液分离效果好且出水澄清; ● 对于不同的水质和水量,可调整一个运行周期中各工序的运行时间及 HRT、SRT 来满足出水要求; ● 不需布水系统和澄清沉淀池,工艺简单,占地面积少,建设费用低; ● 受温度影响小,耐冲击负荷,对各种废水的适应性强; ● 具有比产甲烷活性高、沉降性能良好的颗粒污泥,对有机污染物有很强的去除能力;	● 启动受接种污泥的种类及浓度影响很大; ● 需要搅拌装置; ● 高质量浓度的 NH₃-N 和 NO₃-N 会影响反应器的正常运行.

万 勇 魏 巍 比 5.6 左右.

4 展望

厌氧生物处理反应器技术的研究和开发主要集中在欧美等发达国家,我国还无自主开发的报道.目前,我国厌氧反应器的研究与应用仍然处于第二代厌氧反应器的实践探索阶段,在第三代厌氧反应器迅速发展的今天,如何缩小与世界先进水平之间的差距,是摆在我们面前的挑战性的课题.

随着城市人口的急剧膨胀,城市生活污水已成为水环境污染的最重要污染源.为了达到可持续发展的要求,必须不断开发和利用新型高效的反应器.我国的《城市水资源可持续利用》中提出了控制水污染发展的对策^[40]:为了实现在 2010 年基本控制我国水污染,到 2030 年使我国水环境质量有所

改善,到 2050 年有较大改善的目标,今后的工作重点为提高城市污水处理率.通过因地制宜,多方面筹资建立小型城镇污水处理厂,特别强调采用高效低耗电革新技术和天然净化技术以降低造价、节约运行费用,同时获得十分良好的出水水质,在气温较高的南方,应优先采用厌氧生物处理技术.”可见为了适应我国环境规划和发展的需要,研究和开发新型厌氧反应器具有广阔的应用和发展前景.

针对目前我国环境污染的严峻形势以及污染的治理现状,近几年来,作者所在的研究室对 EGSB 和 IC 反应器进行了大量研究,并在国内首先实现了 EGSB 反应器的工业化^[41-42].今后的工作应积极开发各种厌氧处理工艺,加大投入开发研制新型高效厌氧反应器,并且将新成果、新技术尽快应用到实践中去.

参考文献:

[1] MCCARTY P L. One hundred years of anaerobic treatment[C]. Proc of the 2nd Int Symp on Anaerobic Digestion, 1981.

[2] SCHROEPFER G L. The anaerobic contact process as applied to packing house wastes[J]. *Sewage and Ind Wastes*, 1955, 27(4):460~486.

[3] YOUNG J, MCCARTY P L. Treatment of domestic strength wastewater with anaerobic hybrid reactors[J]. *Water Pollut Contrl Fed*, 1969, 41:160~173.

[4] LETTINGA G. Use of upflow sludge blanket(USB) reactor concept for biological wastewater treatment[J]. *Biotech Bioeng*, 1980, 22:699~734.

[5] LETTINGA G. Anaerobic treatment of sewage and low strength wastewater[C]. Proc of the 2nd Int Symp on Anaerobic Digestion, 1981.

[6] 化学工程手册编委会. 化学工程手册[M]. 北京:化学工业出版社, 1987.

[7] NUNEZ L A. Anaerobic treatment of slaughter house wastewater in an expanded granular sludge bed(EGSB) reactor[J]. *Wat Sci Tech*, 1999, 40(8):99~106.

[8] KATO M T. The anaerobic treatment of low strength soluble wastewaters[D]. The Nitherland:Wageningen Agricultural University, 1994.

[9] VAB DER LAST A R M, LETTINGA G. Anaerobic treatment of domestic sewage under moderate climatic(Dutch) conditions using upflow reactors at increased superficial velocities[J]. *Wat Sci Tech*, 1992, 25(7):167~178.

[10] REBAC S. High-rate anaerobic treatment of malting wastewater in a pilot-scale EGSB system under psychrophilic conditions[J]. *J Chem Tech Biotechnol*, 1997, 68:135~146.

[11] DRIES J. High rate biological treatment of sulfate-rich wastewater in an acetate-fed EGSB reactor[J]. *Biodegradation*, 1998(9):103~111.

[12] ZOUTBERG G R. The Biobed® EGSB system covers shortcomings of the upflow anaerobic sludge blanket reactor in the chemical industry[J]. *Wat Sci Tech*, 1997, 35(10):183~188.

[13] RINZEMA A. Anaerobic digestion of long-chain fatty acids in UASB and expanded granular sludge bed reactors[J]. *Process Biochemistry*, 1993, 28:527~537.

[14] RICHARD M D, FRED A R H, DENNIS L H. Anaerobic digestion of short chain organic acids in an expanded granular sludge bed reactor[J]. *Water Res*, 2000, 34(9):2433~2438.

[15] LETTINGA G, FIELD J, VAN LIER J, et al. Advanced anaerobic wastewater treatment in the near future[J]. *Wat Sci Tech*, 1997, 35(10):5~12.

[16] HACK J P M, VELLINGA S H J, HABETS L H A. Growth of granular sludge in the BIOPAQ IC-reactor[J]. *Technologi-*

cal aspects, 1986 :211 ~ 215.

- [17] 王凯军. 厌氧工艺的发展和新型厌氧反应器[J]. 环境科学, 1998, 19(1) :94 ~ 96.
- [18] HABETS L H A, ENGELAAR A J H H, GROENEVELD N. Anaerobic treatment of inuline effluent in an internal circulation reactor[J]. **Wat Sci Tech**, 1997, 35(10) :189 ~ 197.
- [19] DRIESSEN W, YSPEERT P. Anaerobic treatment of low medium and high strength effluent in the ago-industry[J]. **Wat Sci Tech**, 1999, 40(8) :221 ~ 118.
- [20] 吴允, 张勇, 刘红阁. 啤酒生产废水处理新技术——内循环反应器[J]. 环境保护, 1997(9) :18 ~ 19.
- [21] GUIOT S R, VAN DER BERG L. Performance and biomass retention of an upflow anaerobic reactor combining a sludge blanket and filter[J]. **Biotechnol Lett**, 1984(6) :161 ~ 164.
- [22] MORVAL L. Application of UASB-reactors to industrial wastewater treatment :performance data and results in granulation control[J]. **Acta Biotech**, 1991, 11(5) :409 ~ 418.
- [23] TAREK A ELMITWALLI. Low temperature treatment of domestic sewage in upflow anaerobic sludge blanket and anaerobic hybrid reactors[J]. **Wat Sci Tech**, 1999, 39(5) :177 ~ 185.
- [24] KALYOZHNYI S V. The anaerobic treatment of soft drink wastewater in UASB and hybrid reactors[J]. **Appl Biochem Biotech**, 1997, 66 :291 ~ 301.
- [25] Hashemian S J, James A. Proc of the international symposium on anaerobic digestion[M]. Italy :Bologna, 1988. 281 ~ 284.
- [26] CHUNG Y C, CHOI Y S. Microbial activity and performance of an anaerobic reactor combining a filter and a sludge bed[J]. **Wat Sci Tech**, 1993, 27(1) :187 ~ 194.
- [27] VINCENT O FLAHERTY. Effect of sulphate addition on volatile fatty acid and ethanol degradation in an unacc-limatised anaerobic hybrid reactor :process disturbance and remediation[J]. **Biorecour Tech**, 1999, 68 :101 ~ 107.
- [28] KENNEDY K J. Media effects on performance of a anaerobic hybrid reactors[J]. **Wat Res**, 1989, 23(11) :1397 ~ 1405.
- [29] RAFAEL BORJA. Anaerobic digestion of slaughterhouse wastewater using a combination sludge blanket and filter arrangement in a single reactor[J]. **Biorecour Tech**, 1998, 65 :125 ~ 133.
- [30] PETER J KEENAN. Inorganic solids development in a pilot-scale anaerobic reactor treating municipal solid waste landfill leachate[J]. **Wat Environ Res**, 1993, 65 :181 ~ 188.
- [31] DAGUE R R. Anaerobic activated sludge[J]. **J Water Poll Control Fed**, 1996, 38(2) :220 ~ 226.
- [32] MORRIS DAMON, SUNG SHIHWU. Comparison of performance of ASBR systems seeded with granular and flocculent biomass in the treatment of beef slaughter house wastewater[J]. **Adv Filtr Sep Technol**, 1997(11) :584 ~ 589.
- [33] GOURANGA C BANIK, RICHARD R DAGUE. ASBR treatment of low strength industrial wastewater at psychrophilic temperatures[J]. **Wat Sci Tech**, 1997, 36(2 ~ 3) :337 ~ 344.
- [34] NDON U J, DAGUE R R. Ambient temperature treatment of low strength wastewater using ASBR [J]. **Biotechnol Lett**, 1997, 19(4) :319 ~ 323.
- [35] SUNG SHIHWU, DAGUE R R. Labpratory studies on the anaerobic sequencing batch reactor[J]. **Wat Environ Res**, 1995, 67(3) :294 ~ 301.
- [36] PRINCE N DUGBA, RUIHONG ZHANG. Treatment of dairy wastewater with two-stage ASBR system-thermophilic versus mesophilic operations[J]. **Biores Tech**, 1999, 68 :225 ~ 233.
- [37] WELPER LANA L, SUNG SHIHWU. Laboratory studies on the temperature-phased ASBR system(Proc WEFTEC '96)[J]. **Annu Conf Expo**, 1996, 69(3) :375 ~ 382.
- [38] TRGYER STEVE J, SUNG SHIHWU. Effects of ammonia on an ASBR treating swine wastes[J]. **Adv Filtr Sep Technol**, 1997, 11 :590 ~ 595.
- [39] REDLA V K, SUNG SHIHWU. Nitrate effects on ASBR treatment of swine wastes[J]. **Adv Filtr Sep Technol**, 1997(11) :596 ~ 601.
- [40] 刘鸿亮, 钱易. 中国江河湖海防治减灾对策[C]. 中国工程院第五次院士大会, 北京, 2000.
- [41] 任洪强. 厌氧膨胀颗粒污泥床反应器工作特性研究[D]. 无锡 无锡轻工大学, 2000.
- [42] 丁丽丽. 厌氧内循环(IC)反应器的研究[D]. 无锡 无锡轻工大学, 2000.

(责任编辑 秦和平)