

①

118-125

厌氧膨胀床反应器的研究及应用*

郭劲松 龙腾锐 X703
(城市建设学院)

摘要 将厌氧膨胀床生物膜反应器视为微生物固定化技术,讨论了与之相关的许多理论及应用问题,对反应器今后的发展提出了一些看法。

关键词 厌氧流化床, 厌氧膨胀床, 废水处理, 微生物固定化 反应器
中图分类号 X703

废水的厌氧生物处理已有了上百年的历史,但直至本世纪70年代初,由于世界范围内能源危机的加剧及环境问题的日益突出,其理论与应用技术才开始有了突破性的进展。经过众多研究者的努力,随着人们对厌氧消化微生物学机理及过程的深入了解,先后开发了一大批高效厌氧反应器(亦称第二代消化装置)。这些反应器包括厌氧接触法(anaerobic contact process, ACP);厌氧滤池(anaerobic filter, AF);升流式厌氧污泥床(upflow anaerobic sludge blanket, UASB);厌氧流化床(anaerobic fluidized bed, AFB);厌氧附着膜膨胀床(anaerobic attached film expanded bed, AAFEB);厌氧生物转盘(anaerobic biological rotating disc, ABRD)和厌氧折流板反应器(anaerobic baffled reactor, ABR)。这些反应器的特点是通过污泥回流或细胞固定化技术保持较长的固体停留时间(SRT,一般30~100 d,甚至更长),最大可能地提高反应器中的生物量(biomass 可达20~60 kg/m³或更高),而水力停留时间可缩短到十几小时甚至几小时,从根本上改变了人们通常认为的厌氧处理系统负荷低、效率低、水力停留时间长的传统观念。厌氧流化床反应器因其有许多的优点而倍受学术界和工程界的重视。世界各国对 AFB/AAFEB 反应器的实验研究及工业应用也日益增多。

1 AFB/AAFEB 反应器特点

厌氧流化/膨胀床反应器是固体颗粒流态化技术在废水处理中的应用,是一种厌氧固定膜反应器。70年代初,为了解决厌氧滤池中生物载体的结块,床层堵塞以及最大程度减少压力损失,提高有机负荷率等工艺问题,Jeris, Jewell 分别于1974年提出了厌氧流化床和厌氧膨胀床工艺^[1]。在已有的文献中,没有谁清楚地给出。被学术界公认的流化床和膨胀床的定义。但一般认为,床层体积膨胀率在5~20%为膨胀床,而大于25%为流化床^{[2][3]}。

这种反应器的典型结构是圆柱形,其中充填有载体粒子。载体粒径一般为0.3~3.0 mm^{[4][5]}。构成生物膜的厌氧微生物附着在其上生长而形成生物粒子。污水作为流化介质流

* 收稿日期:1995-03-17

郭劲松,男,1963年生,讲师,重庆建筑大学城市建设学院(630045)

经床层使生物粒子克服重力和液体阻力而“流态化”。由于载体粒径小,因而可供微生物生长的比表面积可高达 $3000\sim 10000\text{ m}^2/\text{m}^3$ ^[5],比生物滤池和生物转盘大 $100\sim 200$ 倍^[6]。同时由于形成的生物粒子密度高,生物量可高达 $10\sim 40\text{ g/L}$ ^[7],甚至 150 g/L ^[8]。生物粒子流化时,废水与微生物接触面积大,二者相对运动速度大(液体流速一般可达 $10\sim 30\text{ m/h}$),减少了液膜传质阻力,因此,生物膜活性高(一般比普通活性污泥法高 $10\sim 20$ 倍),与其它高效厌氧反应器相比,AFB/AAFEB反应器有如下一些基本优点:(1)生物量浓度高,活性好;(2)处理速率快,效率高;(3)运行稳定性好;(4)启动和再启动较容易。此外AFB/AAFEB基本上解决了堵塞问题以及具有对各种废水适应性强和结构紧凑、占地少等优点。当然AFB/AAFEB反应器也存在一些不足之处:主要是对载体性能要求高,设备成本较高,能耗较大,运行管理较复杂等。尽管存在这些不足,AFB/AAFEB的研究、开发和应用仍是十分有前途的。

2 AFB/AAFEB反应器的微生物学研究

典型的AFB/AAFEB反应器中维持着高浓度、严密而多孔的活性生物膜。有学者计算过当生物粒子直径为 1.5 mm ,AFB空隙率为 0.75 时,若活性生物膜厚度以 0.2 mm 计,含水率 95% ,则干生物量可达 10 g/L ^[6]。Gorris曾报道过生物膜为 $30\sim 40\text{ kg VSS}/\text{m}^3$ 的试验结果^[9]。Jewell和Pedro等人发现,生物量浓度甚至可高达 $100\text{ kg}/\text{m}^3$ 和 $150\text{ kg}/\text{m}^3$ ^{[10][8]}。生物膜活性好,成熟的生物膜可保持一年之久^[4]。Schraa和Jewell研究还指出在 $60\text{ g VVS}/\text{L}$ 的生物量浓度中,有 $90\%(\pm 5\%)$ 是附着生长的,生物膜厚度受控于有机负荷率和水力条件^[11]。一般床层上部生物膜较厚($60\text{ }\mu\text{m}$),下部较薄($20\sim 25\text{ }\mu\text{m}$)^[12~16]。当膜厚达到 $170\text{ }\mu\text{m}$ 时,传质将受到影响^[16]。

电子显微镜检查各种厚度生物膜的结果表明:膜厚度的增加主要依赖于产生的胞外聚合物,而不完全是微生物数目的增加^[17]。徐向阳等人最近研究了AAFEB中生物颗粒的特性发现^[18],在反应器启动一个月后即出现稳定成熟的生物膜,生物膜中大量含有G丝状菌、球菌、杆菌、螺菌,表面有许多类似火山口的孔洞。优势菌种是产甲烷丝菌(Methanothrix Soehngenii)。F₄₂₀分析表明生物相存在着分异现象。有学者用冲走生物粒子的临界水力条件试验,尽管出水COD浓度接近进水浓度,SS增加,但生物膜的显微结构并未损坏^[2]。在AFB启动阶段,微生物呈悬浮生长和附着生长共存状态,处于悬浮状的细菌主要是酸化菌,附着生长的主要是产甲烷菌,生物膜的结构形式很大程度上受载体的影响^[18]。

Bull等人的研究AFB中微生物活性的纵向分布发现:微生物活性在床的中部最强,无论是产酸菌还是产甲烷菌都是如此^[20]。Switzenbaum等人对UASB、AF、AFB的生物活性进行比较研究后指出,F₄₂₀的水平直接与表面面积有关,他们认为F₄₂₀对反应器的生物活性和操作并不是一个理想指标,它只反映出反应器中细菌的成分^[21]。他们把AFB有较高F₄₂₀以及生物膜有大量空腔,包囊,归因于AFB中有大量Methano-sacinea菌属,而这种菌有较高的“F₄₂₀池”(F₄₂₀ pools)。Morris和Jewell在研究处理纯纤维素粒状有机物时发现^[22],水解反应主要是由悬浮微生物完成而不是附着微生物。同时,微生物在种群上是共生的。胞外酶反应产生的溶解物质被附着微生物吸收,而附着微生物的分布又直接影响胞外酶的产生。Gorris及其合作者研究了反应器启动阶段生物膜与稳定阶段新增加的生物膜的形成过程^{[9][23]}。他们把膜形成过程分为三期:(1)滞留期(Lag phase), (2)生物膜增长长期(biofilm production

phase), (3) 稳定期 (steady-state phase)。对生物膜组成的分析表明, 无论接种如何, 无论采用何种基质, 在新增加的稳定生物膜内, *Mathanothrix* 菌属总占优势 (超过60%), 产甲烷活性以分解醋酸为主 (>55%), 其原因目前尚无一致解释^[23]。

3 微生物固定化与载体

由于历史的原因, 在相当长的时间内并没有把生物膜法与微生物固定化联系起来, 实际上它们之间的关系是密不可分的。固定化微生物 (immobilized Microbe IM) 是指将微生物限制或定位于取定的空间领域内, 并尽可能地保持微生物的活性, 使之可以反复、连续地使用。Karel 等人将微生物固定化方法分为四大类: 即表面附着、多孔基质包埋法、屏障法和自身聚集法^[24]。在 AFB/AAFEB 反应器中常用的是表面附着法, 包埋法也有研究者开始注意^{[25][26]}。

AFB/AAFEB 反应器采用附着法固定化微生物常用小粒径的载体。常用的载体有砂、PVC 粒、玻璃球、颗粒活性炭、多孔陶粒、多孔矾土 (Al_2O_3)、无烟煤、硅藻土、沸石等^{[2][7][27~30]}。载体粒径直接影响到比表面积的大小和流化速度, 粒径愈小, 比表面积愈大, 同时临界流化速度也愈小。Sutton 用 0.2 mm 和 0.5 mm 砂研究指出, 使用较小粒径的载体, 反应器启动更快^[31]。Switzenbaum 等人的研究也证实了这一结论^[32]。但粒径也不能太小, 否则微生物量将会下降, 因为粒径太小造成单位体积颗粒数增加, 因而碰撞次数增大, 膜受损失。另一方面, 在膜厚度一定的条件下, 粒径太小时, 生物膜的总体积将下降。有学者指出载体粒径在 0.4~0.7 mm 较佳^[31]。多孔小载体在生物学性能上比无孔小载体更优越。C. J. Yee 报道, 多孔小载体比无孔小载体 (砂) 可以减少 50% 以上的启动时间, 固定的生物量前者是后者的 3 倍以上^[33]。Messing 等人从理论上指出, 载体的孔径为微生物尺寸的 1~5 倍时, 载体上固定的微生物最多^[34]。龙腾锐等人的试验结果也证实了这一结论^[35]。载体的表面物理特性及电性也极为重要。表面粗糙和带正电荷的载体更利于微生物的附着, 这可能是由于一般产甲烷菌带弱负电荷所致。龙腾锐等人最近研究成功了一种对微生物生长有促进作用的载体, 这种载体因能刺激微生物附着生长而可以很有效地缩短反应器的启动时间^[36]。

在用包埋法固定微生物方面, 国内外已有学者进行了研究, 先后报道了用 PVA-硼酸、海藻酸钙、琼脂等包埋固定厌氧微生物处理高浓度有机废水的成果, 效果令人满意^{[25, 26][36, 37]}。但该方法要用于工业 AFB 反应器中, 还有许多技术性问题须研究解决。

4 用 AFB/AAFEB 处理有机废水性能

近几年来, 有关 AFB/AAFEB 处理有机废水的成果多见报道, 表 1 和表 2 分别列出了国外和国内的部分小试、中试研究结果。从表中可以看出, AFB/AAFEB 处理有机废水的适用范围是相当广泛的, 既有高浓度废水, 又有低浓度废水。即可用于易厌氧降解的工业废水, 也可用于难降解的工业废水。

表1 国外 AFB/AAFEB 处理废水研究的部分成果

废水类型	处理温度 (°C)	进水 COD (mg/L)	容积负荷 kgCOD/m ³ ·d	COD 去除率 (%)	运行方式	参考文献
人工配制废水	20~30	200~600	8	80	AAFEB 小试	[3]
乳清废水	25~31	10000	8.9~60.0	80	AAFEB 小试	[38]
酸化葡萄糖	35	12000	12	80	AFB 小试	[39]
葡萄糖	35	500~9000	50	90	AFB 小试	[40]
糖厂废水	35	6560	13	83	AFB 小试	[41]
制糖废水	33~35	3000~6000	150	90	AFB 小试	[7]
制糖废水	33~35	3000~6000	36	85	AFB 中试	[7]
制糖废水	10	300~1560	9~15	70	AFB 小试	[42]
奶酪制品废水	35	5000	13.4~37.6	83.6~72	AFB 中试	[43]
工业废水	35~37	7000~9500	3.3~24	86~75	AAFEB 中试	[44]
化工废水	35~37	12000	3.5~24	68~93	AAFEB 中试	[44]
啤酒废水	24	30000~45000	80	70	AFB 小试	[29]
啤酒废水	35°C±1	1000~3500	2.4~14.6	74	AFB 中试	[45]
碳酸钙废水	37	8000~25000	28	90	AFB 小试	[46]
醋酸钾废水	35	5000~22000	12	85	AFB 小试	[28]
造纸废水	37	7000~12000	6.0~6.3	82~85	AAFEB 小试	[30]
含酚废水	35±1	2000~3000	10	90	AFB 小试	[47]
城市污水	20	186	4	81	AAFEB 小试	[48]
城市汇水	10~15	760	9~15	70	AFB 小试	[49]
城市污水	13~31	557~700	—	62~71	AFB 小试	[50]
城市污泥	35	11000	1.66	40	AFB 小试	51

80年代初以来,国外已建成了一些处理清凉饮料、大豆加工、食品加工等废水的生产性 AFB 反应器,国内这方面还少见报道。表3列出了部分生产性 AFB 反应器运行结果。从表中可以看出两相 AFB 工艺比单相工艺在负荷率和处理效率方面都更高。由此可见在生产性反应器中发展两相工艺十分有前景。

5 冲击负荷对工艺稳定性的影响

Jewell 等人在研究温度、有机物负荷率、HRT 对 AAFEB 处理能力的影响时观察到:温度

的变化对其性质有一些影响,但不很显著。有机负荷、HRT 则有重要影响^[64]。Switzenbaum 报道到:温度从35℃降低到10℃,负荷率从1.3增加至24 kgCOD/m³·d, HRT 从9.5 h 降低至0.5 h 时, COD 去除率从90%降至45%,而且发生生物膜小量流失,但冲击负荷一解除,6天内处理效果便得到恢复,这说明冲击负荷并不能给 AAFEB 产生永久的不良后果^[66]。Bull. M. A 等人试验在 HRT 不变的情况下,冲击负荷为原设计负荷的3倍,并持续1 h, AFB 效率仍很高^[66]。当冲击负荷为设计负荷的10~20倍,此时 AFB 出水 BOD 增高, VFA 增大, pH 降低, 悬浮物增多,但经过12 h 左右则可基本恢复正常。pH 值变化在6~8范围内对反应器影响极小,当进水 pH 值在8 h 内上升到10时,出水 pH 值增加0.18,出水碱含量增加5%,而挥发酸增加400%,但因原来挥发酸不高,不会发生甲烷抑制。进水 pH 在8 h 内下降到3.0时,出水 pH 值只下降0.1,唯一受到重大影响的参数是碱度^[67]。Bull. M. A 同时指出反应器温度在4 h 内从20℃下降到10℃,或从20℃上升至35℃时,仅出水 COD 浓度, SS 有轻微上升。而当温度回到20℃时,在4 h 内反应器则完全恢复正常^{[66][67]}。Boening 和 Larsen 在35℃~12.5℃范围内观察到^[6],温度下降,生物量增加,补偿了温度降低时细菌反应速率的降低,因而 AFB 反应器对温度变化并不十分敏感。黄汝常等人发现随着基质溶解性的增高,温度影响随之减小^[68]。I. Saiz 也证实缓慢地降温,温度变化对 AFB 反应器影响很小^[42]。

表2 国内 AFB/AAFEB 处理废水研究的部分成果

废水类型	处理温度 (°C)	进水 COD (mg/L)	容积负荷 kgCOD/m ³ ·d	COD 去除率 (%)	运行方式	参考文献
葡萄糖废水	27~35°	2200	7.58	80	AFB 小试	[52]
缫丝废水	21	2000	5.37	65	AFB 小试	[53]
土霉素废水	35	8000~13000	8.48	73~80	AFB 小试	[54]
豆制品废水	35	6000~12000	10	90	AFB 小试	[54]
啤酒废水	25	2000~3000	27~30	85	AFB 小试	[55]
啤酒糖化废水	25	2000~3000	33~36	93	AFB 小试	[55]
啤酒废水	28	3800~13770	33.76	86.9	AAFEB 小试	[56]
化粪池模拟废水	16~30	300~2500	9.1	88~95	AAFEB 小试	[58]
屠宰废水	26~33	5000	16	>80	DAFB 小试	[59]
苕麻废水	25~36	10000	3.33	50	AFB 小试	[61]
含酚废水	30±1	1560	1.59	94	AFB 小试	[62]
柠檬酸废水	35	15200	30.5	86.2	AFB 中试	[63]

反应器停止运行后再启动,也没什么明显的问题。Jewell 为了证实早年的试验结果,将已停动6年的 AAFEB 再次启动,经24 h (HRT=2 h) 处理城市污水,其去除率即可接近早期报道的结果^[27]。Pedro. A. G. N 等报告^[8],在高浓度生物量情况下,即使有机负荷率超过100 gCOD/L·d, AAFEB 也能稳定运行。在停运一周或一个季度,再启动也分别只需要18 h 和70 h 就能达到90%和98%的去除率。龙腾锐等人分别用高浓度和低浓度的不同基质污水对停运

半年至一年的 AFB 进行驯化再启动,其时间也不超过30天^{[61][69]}。他们还从动力学关系上对 AFB 很好的稳定性进行了探讨。一般地不管是温度波动、有机负荷率变化、或是偶然的空气进入,AFB/AAFEB 都表现出良好的稳定性。

表 3 生产型厌氧流化床反应器实例

序 号	1	2	3	4	5
废水类型	清凉饮料	食品加工	大豆加工	酵母发酵	啤酒加工
废水量(m ³ /d)	380	318	770	1200	750
进水 COD 浓度 (mg/L)	6900	9200	12000	3600	5600
COD 容积负荷 (kg COD/m ³ ·d)	9.6	16.0	11.0	20	9.8
COD 去除率(%)	77	70	76	75	93.5
AFB 相数	单相	单相	二相	二相	二相
AFB 所在地	美国	美国	美国	法国	日本
建造公司名称	Ecolotrol Birmingham	FIDCO Connecticut	Dorr-oliver Muscatine	Gistbrocades	Asahi

6 结束语及应继续研究的问题

综上所述,AFB/AAFEB 反应是一种效率高、稳定性好、适应性强、结构紧凑的废水新型处理装置。但欲使 AFB/AAFEB 工艺在废水处理中得到成熟、广泛地生产性应用,尚有一段距离。为此,笔者认为以下一些问题还需进一步研究。

(1) AFB/AAFEB 中有关的动力学行为进行研究,以获得有机物降解动力学关系,水力学行为与反应器效率之间的关系。

(2) 研究微生物形态学及生理学与反应器性能变化的规律。

(3) 反应器放大设计的相似理论问题。

(4) 微生物固定化载体。快速、高活性的固定化技术,以缩短启动时间。

(5) 以降低系统能耗,保证微生物高活性为目标,进行反应器结构的优化研究。

(6) 反应器性能检测技术、设备研究,以实现自控操作。

参 考 文 献

- 1 McCarty, P. L. In 2th International Symposium on Anaerobic, Germany, 1981. Hughes, et al Eds
- 2 S M Stronach, et al. Anaerobic Digestion Process in Industrial Wastewater. Treatment. New York, 1986
- 3 Switzenbaum M S, et al. J. WPCF, 52(3), 1980. 226
- 4 Henze M, et al. Wat Sci Tech 15, 1983. 1
- 5 P H Boening. Biotechnol Bioeng, 24, 1982. 2539
- 6 郑元景等.《污水厌氧生物处理》,中国建筑工业出版社,1988
- 7 J M Iza, et al. In 5th International Symposium on Anearobic Digestion, Italy, 1988

- 8 Pedro A G N, et al. *Wat Res*, 21(11), 1987. 1329
- 9 L G M Gorris, et al. *Biotechnol Bioeng*, 33, 1989. 687
- 10 Jewell W J. In: Cooper P F, Atkinson, B(Eds), *Biological Fluidized Bed Treatment of Water and Waste-Water*. Ellis Horwood, Chichester. 1981. 251
- 11 Schraa G, et al. *J. WPCF*, 56(3), 1984. 226
- 12 Gerhard Zellner, et al. *Biotechnol Lett*, 13(9), 1991. 687
- 13 T R Srekrishnan, et al. *Biotechnol Bioeng*, 37, 1991. 557
- 14 F Ehlinger, et al. *Wat Sci Tech*, 41, 1989. 157
- 15 Yen Hsu, et al. *Biotechnol Biogen*, 41, 1993. 347
- 16 张建丽等. *环境污染与防治*. 13(6), 1991. 27
- 17 Salkinoja-Salonen, M S, et al. *Wat Sci Tech*, 15, 1983. 305
- 18 徐向阳等. *环境科学*. 1989, 10(2): 10
- 19 汪昭群. *中国给水排水*. 1988, 4(2): 33
- 20 Bull M A, et al. *Wat Res*, 1984, 18(8): 1017
- 21 Switzenbaum M S, et al. *Environ Technol Lett*, 1987, 8: 21
- 22 Morris J W, et al. In *36th Ind Waste Conf. Purdue Univ.* 1981. 621
- 23 L G M Gorris, et al. *Appl Microbiol Biotechnol*, 1988, 29: 95
- 24 Steven F Karel, et al. *Chem Eng Sci*, 1985, 40: 1321
- 25 本田繁. *下水道协会志*, 1988, 29(7): 419
- 26 林荣忱等. *中国给水排水*, 1991, 7(3): 9
- 27 徐向阳. *中国给水排水*, 1988, 4(2): 39
- 28 Weiland P, et al. In: *Poster Paper 5th International Symposium on Anaerobic Digestion, Italy, 1988*
- 29 Keim P. et al. In: *Poster Paper 5th International Symposium on Anaerobic Digestion, Italy, 1988*
- 30 P Vogel, et al. In: *Poster Paper 5th International Symposium on Anaerobic Digestion, Italy, 1988*
- 31 Sutton P M. et al. *Proceeding of the 36th Purdue Industry Waste Conference, 1982*
- 32 Switzenbaum M S, et al. *Environ Technol Lett*, 1984, 5: 189
- 33 Carl J Yee, et al. *Wat Res*, 1992, 26(8): 1119
- 34 Messing R A. *American Chemical Society Symposium Series*, 1979, 106: 13
- 35 龙腾锐等. *废水处理新型填料特性研究*, 1994
- 36 Susumu Hashimoto, et al. *Biotechnol Bioeng*, 1987, 15: 52
- 37 罗志腾等. *城市环境与城市生态*. 1990, 3(2): 1
- 38 Switzenbaum M S, et al. In *36th Ind Waste Conf. Purdue Univ.* 1981. 414
- 39 Bull M A, et al. *Biotechnol Bioeng*, 1984, 26: 1054
- 40 Shui J Chen, et al. *J Chem Tech Biotechnol*, 35B, 1985. 101
- 41 J J Heijnen, et al. *FWPCA Conference on Anaerobic Water Treatment, Amsterdam, 1986*
- 42 I Sanz, et al. In *Poster Paper 5th International Symposium on Anaerobic Digestion, Italy, 1988*
- 43 Hickey R F, et al. *Biotechnol Bioeng Symp*, 1982, 11: 399
- 44 John S Jeris. *Wat Sci Tech*. 1983, 15(4)
- 45 I Ozturk et al. *Wat Sci Tech*, 1989, 21: 1681
- 46 A Pellegrini, et al. In *Poster Paper 5th International Symposium on Anaerobic Digestion, Italy, 1988*
- 47 Sheng Shung Cheng, et al. In *6th International Symposium on Anaerobic Digestion, Brazil, 1991*
- 48 Jewell W J, et al. *J. WPCF*, 1981, 53(3): 482
- 49 钱易等. *现代废水处理新技术*. 中国环境科学出版社, 1993, 174

- 50 A L F C Maragno, et al. In 6th International Symposium on Anaerobic Digestion, Brazil, 1991
- 51 Yao-Jiang Huang, et al. J Environ Eng, 1989, 15(5): 1139
- 52 朱广汉等. 轻工环保. 1984, 3
- 53 中国科学院成都生物研究所科研报告, 1985
- 54 同济大学科研报告, 1988
- 55 清华大学科研报告, 1989
- 56 郑平等. 环境科学, 1989, 10(1): 44
- 57 刘双江. 浙江农业大学硕士学位论文, 1987
- 58 田为勇. 天津大学硕士学位论文, 1988
- 59 龙腾锐等. 重庆建筑工程学院学报, 1990, 12(4): 28
- 60 龙腾锐等. 中国给水排水, 1991, 7(1): 17
- 61 龙腾锐等. 重庆建筑工程学院学报, 1994, 16(3): 31
- 62 劳善根. 环境污染与防治, 1993, 15(2): 13
- 63 杨立新等. 中国沼气, 1990, 8(2): 12
- 64 Jewell, W J. et al. In 36th Waste Conf. Purdue Univ. 1981. 655
- 65 Switzerbaum M S, Proc IAWPR Specialized Seminar, 1982. 399
- 66 M A Bull, et al. Wat Res, 1983, 17(11): 1563
- 67 M A Bull, et al. J Chem Technol Biotechnol, 1983, 33B. 221
- 68 黄汝常等. 中国给水排水, 1987, 3(3): 17
- 69 龙腾锐等. 中国给水排水, 1993, 9(1): 17

(编辑: 胡玲)

RESEARCH AND APPKICATION OF ANAEROBIC EXPANDED BED REACTORS

Guo Jingsong Long Tengrui
(Faculty of Urban Construction)

ABSTRACT This paper treats anaerobic expanded bed biofilm reactors as a technology of immobilization microbes, reviews and discusses the related theories and application. Research for this techiques further improvement is pointed out.

KEYWORDS anaerobic fluidized bed, wastewater treatment, immobilization microbes