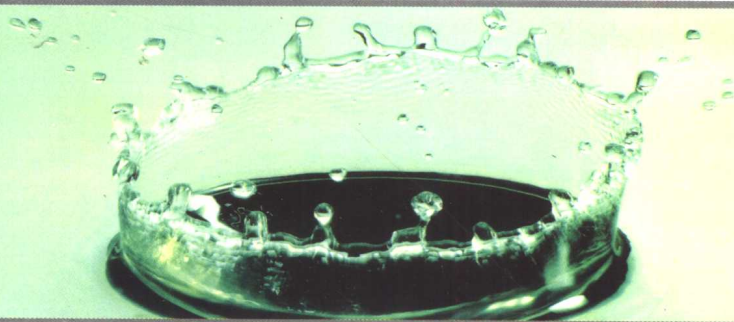


环境热点技术丛书

膜生物反应器技术



曾一鸣 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

环境热点技术丛书

膜生物反应器技术

曾一鸣 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

全书共分8章。第一章水资源回用的膜生物反应器,第二章高分子微孔滤膜——传质机制、孔结构和湿润性,第三章膜工艺的基本原理,第四章污染源和膜清洗,第五章膜组件的构造,第六章废水生物处理的化学计量学,第七章膜生物反应器的工艺设计,第八章膜生物反应器的应用。

本书适用于从事膜分离技术和污水治理领域的工程技术人员,也可供环境领域的研究生及老师阅读。

图书在版编目(CIP)数据

膜生物反应器技术/曾一鸣著. —北京:国防工业出版社,2007.1

(环境热点技术丛书)

ISBN 7-118-04863-1

I. 膜... II. 曾... III. 生物膜(污水处理)—反应器 IV. X703

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第136617号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 21½ 字数 384千字

2007年1月第1版第1次印刷 印数 1—4000册 定价 38.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

人类应用废水的微生物处理技术已经百年有余。在这一百多年间,各种形式的生物处理工艺都面临一个共同的主要问题,那就是微生物随出水流失并引起反应池内生物降解效率降低和出水水质变差。为了解决此问题人们发展了各种技术,如好氧活性污泥法的二沉池、厌氧工艺的生物滤池和上升流式厌氧污泥床等来延长微生物在反应器内的停留时间。毫无疑问,这些技术革新都曾经在历史上产生过里程碑式的深刻影响;但是,如果单从问题的解决这一角度而言,所有这些传统的微生物处理方法都未曾实现过彻底地截留反应池的微生物这一目标。以膜分离单元来实现泥水分离的尝试在 20 世纪九十年代迅速兴起,无论好氧还是厌氧膜生物反应器都在工业领域迅速推广并获得了广泛的应用。从技术的角度来看,膜生物反应器工艺彻底地解决了微生物随出水流失这一困扰人们达百年之久的历史难题,所以,它的生物降解效率和出水水质都远远优于传统的生物处理工艺。

虽然膜生物反应器具有如此明显的优势,但是,由于膜污染引起膜的水透率较低这一技术问题仍然制约着它在大规模的污水处理工程中的应用。此问题最初引起我的关注来自一位长期从事环境工程研究的前辈学者的一个前瞻性观点。他指出,如果膜分离单元的水通量能够达到甚至超过 $400\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (每平方米膜面积每小时产水量 400 升),那么在建造大规模污水处理厂时膜生物反应器将具有传统生物处理技术远远无法企及的经济技术优势。直觉地看,这一水通量并不算高,因为热致相分离法制作的微滤膜的水透率普遍超过 $1000\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar})$ (跨膜压差为 1 巴时每平方米膜面积每小时产水量 1000 升,纯水)。由笔者开发成功、并于 2006 年实现工业化规模生产的热致相分离法毛细管式微滤膜,它的水透率已经高达 $3200\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar})$ 。更为甚者,这一水透率($400\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)和工业规模制作的热致相分离法微滤膜的最高水平($21000\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar})$)相比简直有天壤之别。似乎要实现这位长者的梦想并非一件难事,使用过滤阻力极低的热致相分离法微滤膜就可以了。

但是,从膜工艺的角度进行细致分析后会发现这只是一个似是而非的结论,因为膜组件的水压损失现象、边界层的浓差极化现象和污染物在膜表面的吸附现象等诸多因素,制约着分离膜难以发挥其高水透率的优点。如何克服这些负面的制

约因素,以实现低过滤阻力的微滤膜的高效使用呢?这成了笔者从事膜生物反应器工艺研究的首要问题。来自膜工艺理论的如下三大启示,即吸附性污染的界面热力学、临界流量假设和气液两相流的性质,为提高膜组件的水通量提供了指路明灯,而来自微生物学的知识则为我们阐明了污染源的性质。对于这些领域的研究只是为了试图解决那位长者的问题,以将热致相分离法制作的微滤膜高效地应用于膜生物反应器工艺,原先并没有发表的打算。承蒙长期从事膜污染和膜清洗研究的张国俊博士的热情鼓励,才使我决心将这些为了那个未竟的梦想而进行的理论分析,整理成书。如何提高水通量的见解,构成了本书前五章涉及膜工艺部分的主要内容,但愿它对于从事膜生物反应器工程设计的读者有所裨益。

如何协调经验和理性是自始至终贯穿于本书的主题,笔者坚信只有将经验的硕果镶嵌进自洽的理论大厦,才有可能展示它指引未来的光辉。目前,废水生物处理工艺正经历着深刻的变化,原先那种借助经验的设计方法逐步让位于基于化学计量学的定量分析。在膜生物反应器的工艺设计领域,已经出现了很多基于国际水协活性污泥模型的设计软件。废水微生物处理的化学计量学的优点在于,人们可以依据进水的水质成分定量地计算出最佳的工艺参数,而且还可以对进水波动的情形进行动态模拟。

本书第六章详细地阐述了废水生物处理的化学计量学,而第七章则应用化学计量学对一些重要的工艺流程进行了详细的分析。理论预测和实验数据之间的吻合程度相当良好,这说明活性污泥模型和厌氧消化模型的化学计量学完全适用于膜生物反应器工艺。第八章介绍了一些典型的学术探讨和工程实例。从这些案例已经可以看出膜生物反应器工艺研究仍然是一门飞快地发展着的前沿科学,新兴的技术发明和理论观点总是层出不穷,令人目不暇接。

本人试图总结以往的经验,并进而探讨如何更好地开拓未来,书中所见不可避免地受到本人见识的局限和当代思潮的影响,错误之处在所难免,希望读者多多见谅的同时不吝指正。回顾膜生物反应器工艺的发展史,新兴的技术总是不断地完善并超越旧的技术,浸没式工艺逐渐取代外置式工艺就是一个明证。今天我们认为中流砥柱般的信念,在未来都有可能被证明仅仅是浮光掠影甚或是海市蜃楼。但是,这不应当成为固步自封、裹足不前的理由,因为,“只有一条途径能够避免错误,那就是避开一切新事物、什么事情也不做;但是,这却是所有错误中最大的错误”。

伟大诗人屈原说,“路漫漫其修远兮,吾将上下而求索”,谨以此言与热爱这门学科的读者共勉。

曾一鸣

2006年8月18日

目 录

符号说明	1
第一章 水资源回用的膜生物反应器	3
1.1 膜生物反应器工艺的历史沿革	5
1.2 膜生物反应器工艺的优点	8
1.2.1 反应器的负荷	9
1.2.2 出水水质	10
1.2.3 污泥产率	11
1.2.4 生物降解的效率	11
1.2.5 厌氧膜生物反应器	13
1.3 膜生物反应器工艺的经济技术因素	16
1.4 膜生物反应器工艺的发展趋势	18
1.4.1 膜的制作技术	19
1.4.2 膜组件的设计	20
1.4.3 生物处理系统的工艺设计	20
1.5 本书的目标和内容	21
参考文献	22
第二章 高分子微孔滤膜——传质机制、孔结构和润湿性	25
2.1 膜分离现象	25
2.2 膜分离的传质机制	27
2.2.1 多孔模型——筛分机制	28
2.2.2 溶解—扩散机制	29
2.3 多孔膜制作技术简史	31
2.4 多孔膜的微孔结构	35
2.4.1 相变机理的微孔结构	36
2.4.2 溶致相分离机理的微孔膜	36
2.4.3 熔融拉伸法微孔滤膜	38
2.4.4 热致相分离机理的微孔膜	39
2.5 微孔膜的润湿性	41

2.5.1	吸附性膜污染	41
2.5.2	表面和界面自由能	42
2.5.3	润湿现象	44
2.5.4	污染物在膜表面的吸附	45
2.5.5	常见膜材质的耐污染性	46
2.5.6	亲水化与膜污染	48
	参考文献	49
第三章	膜工艺的基本原理	51
3.1	滤饼层的形成	51
3.2	驱动力和阻力——形成滤饼层的理论	53
3.2.1	浓差极化现象	54
3.2.2	临界流量假设	57
3.2.3	临界流量的测定	59
3.2.4	亚临界区的吸附性污染	63
3.3	恒压过滤和恒流过滤	66
3.3.1	滤饼层的演化	66
3.3.2	滤饼层的阻力	67
3.3.3	恒流过滤	68
3.3.4	恒压过滤	70
3.4	膜污染的影响因素	71
3.4.1	膜表面的错流速度	72
3.4.2	微孔滤膜的孔径	74
3.4.3	污泥的沉降性	76
3.4.4	剩余污染	81
3.5	膜生物反应器的工艺方式	83
	参考文献	86
第四章	污染源和膜清洗	89
4.1	污染源的类别	89
4.1.1	无机物污染	89
4.1.2	有机物污染	90
4.1.3	胶体污染	91
4.1.4	微生物污染	91
4.2	微生物代谢产物	91
4.2.1	微生物代谢产物的分类	91
4.2.2	微生物代谢产物的提取	92

4.3	胞外聚合物	93
4.3.1	胞外聚合物的表面电荷和疏水性	94
4.3.2	影响胞外聚合物疏水性的工艺参数	95
4.4	溶解性微生物产物	97
4.5	活性污泥的性质	99
4.5.1	污泥性质的表征	99
4.5.2	絮凝原理	100
4.5.3	丝状菌的影响	101
4.5.4	活性污泥的脱水性	105
4.6	厌氧污泥的颗粒化	106
4.7	膜清洗	110
4.7.1	洗涤原理	111
4.7.2	清洗剂的种类和性能	112
4.7.3	膜清洗的注意事项和操作方法	115
	参考文献.....	117
第五章	膜组件的构造	122
5.1	概述	122
5.2	膜组件的设计原理	123
5.2.1	无膜污染情形的水压损失现象	125
5.2.2	膜污染情形的水压损失现象	126
5.2.3	膜组件的充填密度	129
5.3	气液两相流的基本原理	130
5.3.1	气泡的形状和在静态液体中的上升速度	131
5.3.2	流动模式对传质系数的影响	132
5.4	膜组件的曝气清洗	134
5.4.1	平板式膜组件	135
5.4.2	帘式膜组件	137
5.4.3	束式膜组件	139
	参考文献.....	142
第六章	废水生物处理的化学计量学.....	144
6.1	化学计量学基础	144
6.1.1	生化环境和生化反应	144
6.1.2	组分的单位和符号	148
6.1.3	微生物生长与基质的利用	152
6.1.4	溶胞再生长理论和内源代谢理论	155

6.1.5	生化反应的计量方法	158
6.2	好氧活性污泥工艺	161
6.2.1	活性污泥工艺的生物过程	161
6.2.2	影响活性污泥工艺的环境因素	166
6.3	厌氧消化工艺	168
6.3.1	厌氧消化的生物化学原理	168
6.3.2	生物化学反应的过程速率	171
6.3.3	影响厌氧工艺的环境因素	178
6.4	化学计量学的应用方法	187
6.4.1	描述工艺过程的微分方程组	187
6.4.2	稳态和动态	190
6.4.3	好氧活性污泥法——使用传统模式求解	191
	参考文献	194
第七章	膜生物反应器的工艺设计	195
7.1	好氧膜生物反应器	195
7.1.1	稳态分析	195
7.1.2	动态分析	205
7.2	膜生物反应器的脱氮工艺	210
7.2.1	Ludzack-Ettinger 改良工艺	210
7.2.2	工艺参数的设计	210
7.2.3	含生物载体的反硝化工艺	216
7.2.4	序批式工艺	217
7.3	膜生物反应器的脱氮除磷工艺	219
7.3.1	工艺流程	219
7.3.2	生物除磷工艺的工作原理	220
7.3.3	小结	222
7.4	厌氧膜生物反应器	223
7.4.1	稳定运行的厌氧消化超滤工艺	224
7.4.2	厌氧反应器的启动	237
7.4.3	厌氧反应器的监测和控制	240
7.4.4	小结	244
	参考文献	244
第八章	膜生物反应器的应用	247
8.1	应用于城市污水和生活污水的处理	247
8.1.1	英国 Porlock 污水处理厂	247

8.1.2	澳大利亚 Magnetic 岛淡水回收处理厂	250
8.1.3	无污泥排放的反硝化工艺	252
8.1.4	生物除磷工艺	255
8.1.5	英国 Wehrle Werk AG 公司的 Biomembrat 工艺	257
8.2	在饮用水领域的应用	259
8.2.1	膜生物反应器、反渗透组合工艺	259
8.2.2	饮用水源的脱氮	261
8.2.3	从被污染的地表水源获取饮用水	262
8.3	应用于工业废水的处理	264
8.3.1	果汁和饮料加工厂过程废水的回用	264
8.3.2	染坊废水的回用	267
8.3.3	纸浆蒸发冷凝液的水回用	269
8.3.4	含油废水的处理	270
8.3.5	电镀厂脱脂溶液的回用	272
8.3.6	制革废水的处理	274
8.4	厌氧消化超滤工艺的应用	276
8.4.1	Membratex 的 ADUF® 工艺	276
8.4.2	Bioscan Engineering A/S 的 BIOREK® 工艺	281
8.4.3	啤酒废水的处理	285
8.4.4	含高浓度有机物的废水处理	287
	参考文献	291
附录一	一些污染物的分子结构	293
附录二	活性污泥模型(I)——溶胞再生长模式	295
附录三	活性污泥模型(II)——内源代谢模式	298
附录四	厌氧模型	307
附录五	常见水质指标的分析方法	319

符号说明

P_{H_2}	氢气分压
P, PO ₄ -P	磷, 磷酸态磷
NO ₃ -N	硝态氮
EDTA	乙二胺四乙酸
SDS	月桂基(十二烷基)磺酸钠(sodium dodecyl sulfate)
COD	化学需氧量(chemical oxygen demand)
RBCOD	易生物降解的化学需氧量
SS, TSS, VSS, MLSS	悬浮固体, 总悬浮固体, 挥发性悬浮固体, 混合液悬浮固体
SRT	污泥停留时间(sludge retention time)
EGSB	膨胀式厌氧污泥床(expanded granular sludge bed)
NOM	自然有机物(natural organic matter)
SMP	溶解性微生物产物(soluble microbial products)
EPS	胞外聚合物(extracellular polymeric substance)
UAP	基质利用伴随产物(utilization-associated products)
BAP	生物量伴随产物(biomass-associated products)
SVI	污泥体积指数(sludge volume index)
ZSV	区域沉淀速度(zone settling velocity)
MGD	兆加仑/天 1MGD = 3.785 × 10 ³ m ³ /d, 1 加仑 (gal) = 3.7854L
PVDF	聚偏氟乙烯
MBR	膜生物反应器
ASM1, ASM2, ASM2D, ASM3	国际水质协会活性污泥 1 号模型、2 号模型、2D 号模型和 3 号模型(activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3)
ADM1	国际水协会厌氧消化 1 号模型(anaerobic digestion model No. 1)
UASB	上流式厌氧污泥床(up-flow anaerobic sludge bed)

ADUF	厌氧消化超滤工艺(anaerobic digestion ultrafiltration)
TKN	总凯氏氮
TP	总磷
NTU	浊度单位
F/M	比负荷率=进水污染物负荷/生物量或称食物与微生物比 (feed/microorganism)
HRT	水力停留时间(hydraulic retention time)
SRT	污泥停留时间(sludge retention time)
MBR	膜生物反应器(membrane bioreactor)
CAS	传统活性污泥法(conventional activated sludge processes)
ADUF	厌氧消化超滤工艺
CSTR	中温厌氧接触工艺
IAWQ	国际水质协会
IWA	国际水协会(IAWQ 已经并入 IWA)
TOC	总有机碳
BOD、BOD ₅	生化需氧量(可生物降解的化学需氧量)、5d 生化需氧量
VFA	挥发性脂肪酸(volatile fatty acids, C ₂ ~C ₇)

第一章 水资源回用的膜生物反应器

孔子说：“仁者乐山，智者近水”，古往今来，水一直以她独具的魅力和对人类生存、繁衍的特殊重要性吸引着那些关注人类前途和命运的人们的思考。

古希腊的泰勒斯说：“万物源于水”。如果仅仅把“万物”理解为生命，那么两千多年前泰勒斯的断言至今仍然无需修正。近代的科学研究已经阐明，大约 25 亿年前，地球上所有生命的祖先就是这样诞生于原始的海洋：“在生命产生以前，地球是个荒凉的地方，到处都是岩石，只有浅浅的海和一层薄薄的气体，主要是二氧化碳、一氧化碳、分子氮、硫化氢和水蒸气”，在这个环境如此恶劣的星球，来自太阳的辐射“毫不留情地轰击着原始地球的表面，届时——几百万年以后——化学和物理的作用不知怎样首次产生了生命的迹象：无定形的、果冻状的团块。这些团块能从环境中采集能量，制造出和自身一样的东西”（《大不列颠百科全书》第 14 卷）。正是原始生命的产生、繁衍和进化，才将原先那个恶劣的环境改造成今天这样充满生机的地球生物圈。作为原始生命源于海洋的一个直接的后果是，直至今日，地球上的生命都还含有大量的水分，哺乳类约有 65% 的水分、鱼类 75%、藻类 95%，水母则多达 95%~98%。几乎所有地球上的生命都需要依靠水作为载体来维持基本的新陈代谢。

水孕育了生命同时也孕育着文明。古代文明大多发源于大河流域，因为那里可以为农耕和畜牧提供充足的水源，而且在古代水道也是最便利的运输方式。四大文明古国中，埃及的尼罗河、印度的恒河、中东的底格里斯河和幼发拉底河，还有中国的黄河、长江，都曾孕育过伟大的古代文明，并在两岸崛起大批繁华的城镇。我国古代文献里“市”“井”相连，于此亦可见水资源对于人类生存和繁衍的重要性。

环境恶化、淡水资源枯竭往往是众多古文明衰落的重要原因。曾盛极一时的西域重镇、古代“丝绸之路”的楼兰古城，曾经是东西方文化交流的枢纽。早在公元前 77 年，楼兰地区已是西域农业发达的绿洲；但是今天的楼兰古城，四周断壁残垣、旷古凝重，建筑遗址了无生机，真不禁使人发出“西风残照，汉家陵阙”的苍凉感叹，只有荒漠里的那一枝枝胡杨树还在诉说着那一段段令人伤心的“人与水的历史”。

尽管地球水圈的总水量大约有 $1.4 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ，但是其中 97.22% 是含盐量极高的海洋水，对人类意义重大的淡水资源，如河川水、湖泊水、浅层地下水 and 地表水以及土壤水，仅占全球总水量的 0.32% 左右（王守荣等，2003）。水资源在地球生物圈内循环往复，这一点在古代文献里就已被提及。和泰勒斯同时代的一位东方

思想家——老子，也深深地思考着水的秘密。但是和泰勒斯关注万物的起源不同，他似乎更在意水的回环往复的特征：“大一生水，水返辅大一，是以成天，天返辅大一，是以成地……”。透过水资源回环往复的思考，他甚至赋予天地之道以回还的色彩，所以说“道曰大，大曰逝，逝曰远，远曰反”。此段论述就完全类似当今的水循环观念了，难怪老子说水几于道。水循环的观念在先秦典籍《吕氏春秋》中有进一步发展：“云气西行，云云然，冬夏不辍；水泉东流，日夜不休；上不歇，下不满，小为大，重为轻，圜道也”。值得注意的是，《吕氏春秋》除了认识到蒸发、水汽输运、降水和径流等水循环的过程外，还认识到了各种水资源的水量平衡。从水量平衡的观念可以知道，可供人类利用的淡水资源在全球的水循环圈里不会自然地大幅度增加。

但是人类的繁衍和生产活动则有可能影响周围环境的水循环，更有甚者破坏了水资源更新的自然过程。如果说，前工业时代人类的生产活动并未严重到破坏地球上的淡水资源的循环使用，古代思想家关于水资源有限性的认识并未曾对世俗社会产生过明显的影响；那么工业时代的情况就完全不同了，工业化、城市化增加了对淡水资源的需求，同时也产生了大量工业废水和城市污水。以我国为例，1980年—1993年间，城市水消费量增长了350%，工业水消费量也翻了一番；同时，废水、污水的排放量也急剧增加：“20世纪70年代初全国城镇日排放污水量为 $3 \times 10^7 \text{ t} \sim 4 \times 10^7 \text{ t}$ ，1980年日排放污水量已经达到 $77.5 \times 10^7 \text{ t}$ ，到1996年日排放废污水已超过 $1 \times 10^8 \text{ t}$ ，其中80%以上未经处理排入水域”（王守荣等，2003）。到1999年，市政源产生的污水总量与污染负荷已经超过了工业源（世界银行，2001）。这些有机污染物如果未经处理就直接排放进入周围的水体，除了直接污染地表水、地下水资源外，还会产生更严重的后果：污染物负荷超过了周围水体、土壤和植被的自净能力，引起生态平衡的破坏、影响淡水资源的再生，甚至引起水资源短缺、植被破坏和土地退化。所有这一切都会影响到人类的生存。在今天，水资源短缺已经成了人类社会“迫在眉睫的生存危机”（Marq de Villiers, 2001）。

目前，我国水资源严重短缺。据1996年对世界上149个国家和地区的调查，我国人均水资源占有量仅有 2460 m^3 ，排在第109位，仅为世界平均水平的1/4（王守荣等，2003）。全国669座城市中有400座供水不足、110座严重缺水。与此同时，我国水资源利用率低，用水严重浪费，比如2002年我国每万元国民生产总值取水量为 537 m^3 ，是世界平均水平的4倍。我国工业用水重复利用率不足60%，比发达国家低15%~25%。今后，随着我国人口的增加、经济的快速增长和城市化进程的加快，水资源需求量将持续上升，水资源的供需矛盾将更为突出。

地球水圈的海水含量占绝大多数，通过海水淡化以获得更多的淡水资源似乎具有很大的发展潜力。海湾地区由于淡水资源极其缺乏，反渗透膜分离、多级闪蒸等海水淡化技术能够获得广泛应用。但是，由于目前海水淡化技术的能耗大、成本高，在我国还难于大范围地推广以作为重要的淡水资源（Zhou & Tol, 2004）。

从城市生活污水和工业废水回用淡水以节约有限的淡水资源的观念近年来获

得广泛支持,膜生物反应器(Membrane Bioreactor, MBR)工艺正是这一观念的技术体现。膜生物反应器是结合传统的生物处理工艺和膜分离技术基础上发展起来的。传统的生物处理源自“治理、排放”的环保理念:污水要经过治理达到一定的要求,然后才能排放进入自然水域,否则会破坏生态环境并影响到人类的长远利益。由于环保意识的增强和对人类健康的关注、更出于对病原性微生物的防治,各国的给水、排水都日趋严格。传统的生物处理无法达到直接或间接的饮用水要求,为了达到回用的目的就必须经过消毒、过滤等三级处理。膜生物反应器工艺除了可以降解各种污染物外,还直接消除了各种病原性微生物进入水体、并对人类健康产生的潜在威胁,从而确保出水达到使用标准,所以更充分地体现了“治理、回用”的节约淡水资源的理念。技术的进步也体现了观念的变革,膜生物反应器工艺的发展正是与节约淡水资源这一观念紧密相连。

1989年日本政府启动了为期6年的“90年代水再生计划(Aqua Renaissance Programme'90)”,企图解决水污染问题的同时回用淡水资源(Kimura, 1991; 岑运华, 1990)。这一计划促进了一些专业的膜生物反应器制造公司的发展,如制造浸没式平板膜组件的日本Kubota公司和制造浸没式中空纤维膜组件的日本Mitsubishi Rayon公司等(Churchouse & wildgoose, 2004)。早在1998年,美国内政部就已经对膜生物反应器在节约淡水资源和污水回用等方面的潜力展开了细致调查(见Adham & Gagliardo的报告)。报告显示了膜生物反应器过程在水回用和反渗透预处理等方面有着广阔的应用前景,还展示了这种技术具有广泛的应用领域,如饮用水、生活污水、工业废水、垃圾沥滤液、市政污水处理和豪华建筑物的循环使用水等。由于膜生物反应器工艺的明显优点,可以预测它在解决人类未来的水资源短缺问题方面将发挥更大的作用(Howell, 2004a)。

1.1 膜生物反应器工艺的历史沿革

废水生物处理技术的应用要追溯到19世纪末,到了20世纪30年代,好氧活性污泥法已经成了标准的废水处理方法(Rittmann, 1987)。自那以后,各种好氧或厌氧生物处理工艺相继得到开发,并广泛地应用于家庭生活污水和工业废水的处理。

活性污泥法源自自然水体的自净过程:可生物降解的有机物进入自然水体,被水体中的细菌利用作为生长的碳源和能源(电子),有机污染物被降解,一部分转化为新细胞合成的能源,另一部分则转化为二氧化碳;在这一过程中,水体的溶解氧由于电子的转移被消耗;只有排入水体的污染物足够少时,水体的溶解氧才可能以空气中氧的溶解来补充,自净过程才可能进行;一旦溶解氧被过度地消耗,水体里的鱼类和其他微生物就会被窒息而死。

活性污泥法通过向污水供氧来强化这一过程。在这些工业过程中,颗粒状有

有机物被沉淀分离,溶解性有机污染物被生物降解为水、二氧化碳、铵离子、硝酸根离子、亚硝酸根离子、细菌的代谢产物和细胞物质等。无论采用何种生物处理工艺,主要由细菌及其代谢产物组成的污泥都是进水的溶解性有机物被生物降解后的最终产物。为了获得较好的出水质量和避免细菌伴随出水流失,通常在生物反应池后设置一个沉淀池和污泥回流系统以实现这一个目标(图 1-1(a))。这样可以将工艺过程中新产生的一部分生物量从出水里分离出来以提高出水的质量;另一方面,由于部分污泥从二沉池回流重新进入生物反应池,从而维持生物反应池的生物量的浓度和反应池的降解效率。显而易见,污泥的沉降性和沉淀池的水力特性直接影响到出水的质量和生物处理系统的降解效率。对于活性污泥系统,为了提高污泥沉降性首要考虑的因素是如何避免丝状菌增殖和促进菌胶团的形成;而对于厌氧工艺,比如上升流式厌氧污泥床(UASB)和膨胀式厌氧污泥床(EGSB),如何实现污泥颗粒化以实现更好的沉降性也是相当重要的设计因素。

由于水资源的消耗量增加和自然界淡水资源的短缺,废水的再生或回用成为迫切要求。二沉池的排放出水尚无法达到中水回用的标准,所以二沉池的出水还需要经过进一步过滤、活性炭吸附、杀菌消毒甚至反渗透等三级处理(Mills,1996)。这样的工艺较为复杂,而且还有化学处理产生的沉淀污泥。膜制作技术的进步促进了用超滤或微滤膜取代三级处理以简化工艺过程的尝试(图 1-1(b)),工艺的进一步发展最终导致了用超滤或微滤膜取代二沉池的工艺方法(图 1-1(c))(Smith 等,1969;Hardt 等,1970),该工艺被称为外置式膜生物反应器。在 Hardt 等处理合成废水的好氧膜生物反应器里,采用终端超滤来实现泥水分离,污泥浓度(MLSS)高达 30000mg/L,是通常好氧系统的 23 倍,膜的水通量为 $7.5\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

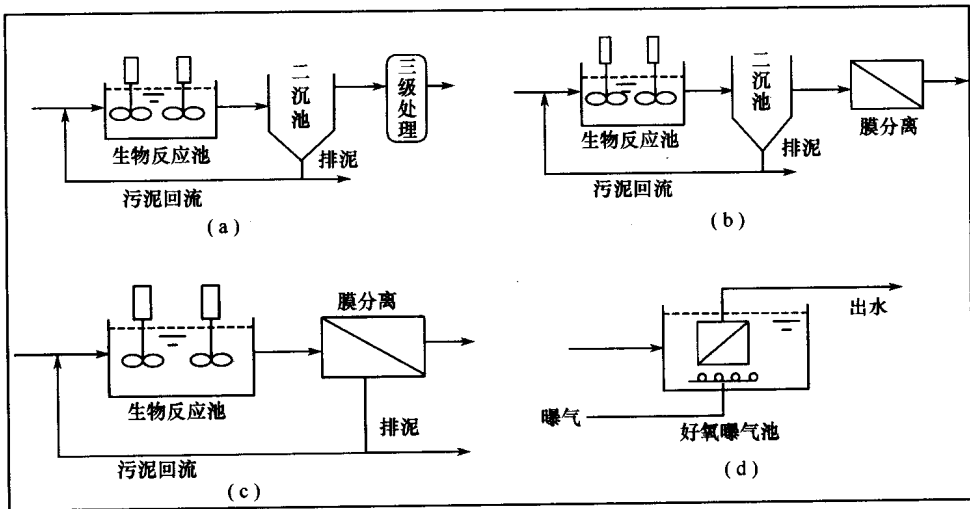


图 1-1 膜生物反应器工艺的历史沿革

外置式膜生物反应器工艺的概念为 Dorr-Oliver 公司在 20 世纪 60 年代发展成为商业化的污水处理系统(Bemberis 等,1971)。在该系统中,污水先通过一个鼓型筛网,然后进入悬浮生长式生物反应器,最后通过板框式超滤膜组件实现泥水分离,膜的进出口压力分别为 345kN/m^2 和 172kN/m^2 ,膜的水通量为 $16.9\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。1982 年,Dorr-Oliver 公司开发了外置式厌氧膜生物反应器系统来处理高浓度的食品工业废水,系统的总负荷为 $8\text{kg}(\text{COD})/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,化学需氧量(COD)的去除率高达 99%(Stephenson 等,2000)。外置式厌氧膜生物反应器的概念在南非(1987 年)得到进一步发展而形成厌氧消化超滤工艺(ADUF),该系统采用管式聚醚砜超滤膜,膜在稳定状态的水通量为 $37.3\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,固体悬浮物的浓度为 $50\text{g}(\text{MLSS})/\text{L}$ (Botha 等,1992)。厌氧膜生物反应器在丹麦进一步发展成 BIOREK[®] 工艺,它由厌氧消化超滤工艺、气提纯化单元、气提单元和反渗透单元等组成,主要应用于农场猪粪的处理(Norrdahl & Rohold,2000)。

外置式工艺需要较高的能耗($2\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3 \sim 10\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$)。一方面,因为污染物容易在膜表面沉积,所以需要较高的错流速度,这就要求循环泵应有较大的水力循环;另一方面,外置式工艺通常在 $1 \times 10^5\text{Pa}$ 以上的压力下运行,较高的操作压力亦增加了运行的能耗。外置式工艺的膜分离系统还有可能给生物处理带来不利的影响,当生物反应池的污泥经过循环泵时,污泥颗粒的生物活性容易被循环泵破坏(Ghyoot 等,1999;Kim 等,2001),从而减弱了膜生物反应器工艺的生物降解效率。

为解决外置式工艺高能耗的缺点,浸没式膜生物反应器被发展起来(图 1-1(d))(Yamamoto 等,1989;Chiemchaisiri 等,1992)。在浸没式工艺里,微滤或超滤膜直接浸没于生物反应池,并安置在曝气器的上方,借助曝气流引起的上升的气水混合流擦洗膜表面以去除滤饼层。浸没式工艺采用负压式抽吸的方法实现泥水的膜分离,运行压力一般低于 $5 \times 10^4\text{Pa}$,所以系统的能耗可以低至 $0.2\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3 \sim 0.4\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,要比外置式工艺少 30 倍以上。浸没式工艺的能耗主要来自曝气,它占总能耗的 90%以上;而外置式工艺系统里,曝气仅占总能耗的 20%(Gander 等,2000)。和外置式工艺相比,浸没式工艺的膜的水通量都较低,因为后者一般在更低的压力下运行;但是如果将水通量换算为比膜通量(即水通量除以跨膜压差)进行对比的话,浸没式工艺的比膜通量要比外置式工艺的高 2 倍~4 倍(Stephenson 等,2000)。

浸没式工艺可以在较短的水力停留时间和较高的污泥浓度下运行。在建造污水处理厂时,浸没式工艺要比外置式工艺节省 75%(大型水厂)和 50%(小型水厂)的体积。较高浓度的污泥还提供了反硝化菌生长的缺氧环境,所以能够更好地实现硝化、反硝化等除氮过程。这些现象体现了膜和生物协同的效果。在外置式工艺和传统好氧活性污泥法都未见如此(硝化和反硝化)的协同作用。(Côté 等,2004)