

“九五”国家重点科技攻关成果
给水和废水处理新技术丛书

建设部科技司组织编写 丛书总主编 聂梅生

●中国建筑工程出版社

生物膜法污水处理技术

刘雨 赵庆良 郑兴灿 编著

“九五”国家重点科技攻关成果
给水和废水处理新技术丛书

生物膜法污水处理技术

X7103.1

“九五”国家重点科技攻关成果
给水和废水处理新技术丛书

建设部科技司组织编写
丛书总主编 聂梅生

生物膜法污水处理技术

刘 雨 赵庆良 郑兴灿 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

生物膜法污水处理技术/刘雨, 赵庆良等编著. —北京:
中国建筑工业出版社
(给水和废水处理新技术丛书)
“九五”国家重点科技攻关成果
ISBN 7-112-04099-X

I.生… II.①刘…②赵… III.生物膜(污水处理)-技术 IV.X703.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 56007 号

责任编辑: 何苗 俞辉群

责任设计: 汤小平

“九五”国家重点科技攻关成果
给水和废水处理新技术丛书
生物膜法污水处理技术
建设部科技司组织编写
丛书总主编 聂梅生
刘雨 赵庆良 郑兴灿 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京市昌平新兴胶印厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 14¹/₄ 字数: 335 千字
2000 年 3 月第一版 2000 年 12 月第二次印刷
印数: 2501—3600 册 定价: 42.00 元

ISBN 7-112-04099-X

TU·3235 (9492)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

内容简介

以生物滤池的问世为标志的生物膜反应器技术已经走过了 100 多年的发展历程，与活性污泥法一起共同成为现代污水处理技术的最重要组成部分。研究与实践均已经表明，在许多情况下，生物膜法不仅能代替活性污泥法用于城市污水和工业废水的二级生物处理，而且还具有一些独特的优点，如运行稳定、抗冲击负荷、更为经济节能、无污泥膨胀问题、具有一定的硝化与反硝化功能、可实现封闭运转防止臭味等。随着配套技术与材料的突破性进展，近年来生物膜工艺得到了广大研究者和工程技术人员的极大关注，发展相当迅速，对生物膜特征的认识和基础理论研究不断加深，已有的实际工艺日臻完善，同时出现了多种新型的生物膜反应器工艺和各种组合工艺，逐步形成了一套较完整的生物膜法污水生物处理工艺系列。

针对生物膜技术发展迅速并得到国内外工程界高度重视的现实情况，以及国内读者迫切希望较全面了解生物膜技术的最新理论发展和应用实践的实际需要，本书全面、系统和深入地阐述了有关生物膜反应器的原理与实际应用，充分反映生物膜反应器技术在污水处理领域的国内外最新研究进展和应用，并根据作者多年研究经历和体会，系统介绍了生物膜反应器及反应过程的研究方法，本书对生物膜技术的工程应用和进一步研究具有重要的指导和参考作用，对进一步研究与开发高效、节能、省地、低成本、低费用的生物膜反应器新工艺可以起到积极的推动作用。

全书共 10 章，第 1 章概述了生物膜反应器的发展沿革、类型、特征和发展趋势；第 2 章阐述了微生物在载体表面的固定机理、特性和各种影响要素；第 3 章详细介绍了各种生物膜载体、载体选择和细胞固定技术；第 4 章论述了生物膜的净化机理、增长动力学、基质去除动力学及动力学参数；第 5 章介绍了生物膜微生物能量代谢的 PIRT 理论、HERBERT 理论、分离理论及数学模型；第 6 章详细描述了各种生物膜分析技术，包括生物膜的含量确定、组分测定、厚度测定、活性分析、结构观察和活性标记等；第 7 章全面分析了影响生物膜反应器运行的主要工艺参数和环境因素；第 8 章系统介绍了生物滤池、生物转盘和淹没式生物滤池等典型生物膜反应器工艺的原理、构造、池型、工艺流程及设计计算；第 9 章综合介绍了各种实用新型生物膜反应器工艺和复合式生物膜反应器工艺的原理、特性和应用；第 10 章系统介绍了生物膜/悬浮生长联合处理工艺的联合方式、工艺类型、工艺及相关处理设施的设计考虑等。

本书内容详尽、系统全面，既体现了国内外最新研究成果，具有先进性和理论深度，又展现了工程应用情况及前景，具有较高的针对性和实用性，可供从事水处理和环境保护的研究、设计与运行管理人员、高等院校教师和研究生、本科生以及其他与环境科学与工程有关的专业技术人员参考使用。

总 序

聂梅生

我国水处理技术的发展历程是与不同历史时期的经济、社会发展及人民生活水平密切相关的。总体来看，在给水处理与废水处理技术方面曾经历了以解决量的需求为主要目标的第一阶段，此间的水处理技术主要是围绕着满足水量供应为主题展开；经济的快速发展引发了环境污染问题，随着水污染形势日趋严峻，水处理技术开始了以环境保护为背景的第二阶段，这期间的技术研究围绕着去除各类污染物以达到水质指标为目的而进行；全球性的环境污染和资源短缺引发了人们对发展问题的重新思考，可持续发展观念的提出使现阶段环境领域的技术逐步发生了战略性转折，这期间水处理技术不仅由单项技术走向综合集成并加速产业化、市场化转移，更重要的是逐步走向以人为本的发展道路，这正是可持续发展的最终目标。

本丛书作为国家“九五”重点科技攻关项目的成果之一，希望能反映我国水处理技术的前沿，并以此献给从事给水和废水处理事业的广大读者。

1999年11月

前 言

在当今世界，污水处理技术的不断发展和工程应用已经成为维系社会经济可持续发展的必要组成部分。基于物理、化学和生物学原理的各种污水处理工艺不断出现，其中生物处理技术的应用最为广泛，已经成为城市污水和有机工业废水处理的主流工艺。

在污水生物处理工艺的发展和应用中，活性污泥法和生物膜法一直占据主导地位。随着新型滤料的开发和配套技术的不断完善，与活性污泥法平行发展起来的生物膜工艺技术得以快速发展，既独立又几乎已经结合到污水处理的各种其他工艺中，这是因为生物膜法具有诸多优点，包括：处理效率高，耐冲击负荷；体积小，便于运行管理，困扰活性污泥法的污泥膨胀问题在此得以消除；可以维持较高的污泥龄，生物相相对稳定，具有较高微生物量，水力停留时间大为缩短；对毒性物质和冲击负荷具有较强的抵抗性；可以实现封闭式运转，解决臭味问题，等等。因此，近年来国内外许多研究者和工程技术人员无论从理论上还是实际应用方面都进行了大量的研究和工程实践，并取得了丰硕的成果。

本书作为“九五”国家重点科技攻关计划《污水处理与水工业关键技术研究》项目（编号 96-909）《城市污水处理技术集成与决策支持系统建设》专题（编号 96-909-01-01）的污水处理技术集成化系列研究成果之一，基于作者多年来在国内外从事生物膜反应器研究的最新成果与切身体会，旨在全面、系统和深入地阐述有关生物膜反应器的原理与实际应用，充分反映生物膜反应器技术在污水处理领域的国内外最新研究进展和应用，如生物膜在载体表面的固定机理、生物膜微生物的能量代谢理论、复合式生物膜反应器、生物膜/悬浮生长联合处理工艺等，并根据自身的多年研究经历，系统介绍了生物膜反应器及反应过程的研究方法，包括生物膜厚度、生物膜量、生物膜活性的各种测量、测定技术以及模型的选择等。我们期望本书的出版对进一步研究、探索和应用高效、节能、省地、低成本、低费用的生物膜反应器新工艺起到积极的作用。

本书第 2、3、4、5、6 章由刘雨编写，第 1、7、8、9 章由赵庆良编写，第 10 章由郑兴灿、晋荣编写。全书由赵庆良统稿、郑兴灿定稿。

本书的编写工作由建设部科技司组织领导，并得到国家城市给水排水工程技术研究中心的大力支持，在此谨表示衷心的感谢。

由于编著者水平有限，经验不足，书中错误和不当之处在所难免，热忱欢迎同行前辈和广大读者批评指正。

刘雨 赵庆良 郑兴灿

1999 年 11 月

目 录

第 1 章 污水处理中的生物膜与生物膜反应器.....	1
1.1 污水与污水生物处理.....	1
1.1.1 污水的来源与污染物.....	1
1.1.2 污水生物处理工艺.....	2
1.2 生物膜.....	3
1.2.1 生物膜及其形成过程.....	3
1.2.2 生物膜的微生物相.....	4
1.3 生物膜反应器.....	6
1.3.1 生物膜反应器的发展沿革.....	6
1.3.2 生物膜反应器的类型与技术现状.....	7
1.3.3 生物膜反应器的特征.....	11
1.3.4 生物膜反应器的发展趋势.....	12
第 2 章 微生物在载体表面的固定机理.....	14
2.1 微生物固定的一般过程.....	14
2.1.1 微生物向载体表面的运送.....	14
2.1.2 可逆附着过程.....	15
2.1.3 不可逆附着过程.....	15
2.1.4 固定微生物的增长.....	16
2.2 微生物固定动力学.....	16
2.2.1 可逆附着动力学.....	16
2.2.2 微生物不可逆附着模型.....	18
2.3 影响微生物固定的重要因素.....	20
2.3.1 悬浮微生物浓度.....	21
2.3.2 液相 pH.....	22
2.3.3 液相离子强度.....	23
2.3.4 悬浮微生物的活性.....	25
2.3.5 载体表面结构与性质.....	27
2.3.6 水力剪切作用.....	28
2.3.7 接触时间.....	31
2.4 硝化细菌在载体表面固定的措施.....	31
2.4.1 载体表面处理.....	31
2.4.2 微生物表面改良.....	34
第 3 章 生物膜载体的选择与细胞固定技术.....	36

3.1 生物膜载体的种类.....	36
3.1.1 无机类载体.....	36
3.1.2 有机类载体.....	36
3.2 生物膜载体的选择原则.....	38
3.2.1 机械强度.....	38
3.2.2 物理形态.....	38
3.2.3 生物、化学及热力学稳定性.....	39
3.2.4 亲疏水性及表面电性.....	39
3.2.5 孔隙度及表面粗糙度.....	39
3.2.6 比重.....	39
3.2.7 对生物膜活性的影响.....	40
3.2.8 可再用性.....	40
3.2.9 价格.....	40
3.3 实用微生物固定技术.....	40
3.3.1 表面吸附固定技术.....	40
3.3.2 键联固定技术.....	41
3.3.3 细胞间自交联固定技术.....	41
3.3.4 多聚体包埋技术.....	42
3.3.5 孔网状载体截陷固定技术.....	44
3.4 各种固定技术的比较.....	44
第4章 生物膜增长及底物去除动力学.....	47
4.1 生物膜净化机理.....	47
4.2 生物膜增长的一般描述.....	48
4.3 生物膜增长动力学.....	50
4.3.1 生物膜增长速率方程.....	51
4.3.2 Capdeville 生物膜增长动力学体系.....	56
4.4 底物去除动力学.....	60
4.4.1 反应-扩散模式.....	60
4.4.2 表面反应模式.....	67
4.5 动力学参数的确定.....	73
4.5.1 生物膜的比增长率.....	73
4.5.2 底物比去除率 (q_{obs}).....	75
4.5.3 生物膜产率系数 (Y_{obs}).....	75
4.5.4 生物膜最大活性厚度(Th_a) _{max}	76
4.5.5 生物膜密度 (ρ).....	77
4.5.6 半级反应常数 ($k_{1/2}$).....	78
4.5.7 有效扩散系数 (D_e).....	78
4.5.8 生物膜理论最大活性厚度(Th_a) _{max} ^T	78
4.6 附录.....	79

4.6.1 Monod 方程的理论推导	79
4.6.2 底物在生物膜的扩散能力	81
4.6.3 生物膜理论中常用速率表达式	82
第 5 章 生物膜微生物的能量代谢理论	83
5.1 PIRT 维持能方程	83
5.2 修正的 PIRT 维持能方程	85
5.3 微生物内源呼吸代谢	86
5.4 PIRT 理论与 HERBERT 理论比较	87
5.5 微生物能量代谢分离理论	88
5.5.1 富底物培养的特性	88
5.5.2 底物过度利用动力学	88
5.5.3 富底物条件下微生物产率模型	89
5.5.4 富底物条件下能量分离模型	92
5.5.5 微生物能量代谢生物数学模型一览	93
5.5.6 模型验证	93
5.5.7 微生物能量分离理论的工程意义	97
第 6 章 生物膜分析技术	99
6.1 生物膜重量的确定	99
6.1.1 生物膜干重	99
6.1.2 生物膜 TOC	100
6.1.3 生物膜 COD	100
6.1.4 生物膜多聚糖	100
6.1.5 生物膜总蛋白质	100
6.2 生物膜厚度的确定	101
6.2.1 直接显微法	101
6.2.2 微米计阻力法	102
6.2.3 微米计电导法	102
6.2.4 膜侧线法	102
6.2.5 间接算法	102
6.3 生物膜活性分析	103
6.3.1 ATP 法	103
6.3.2 INT 法	104
6.3.3 TTC 法	105
6.3.4 DNA 法	105
6.3.5 总蛋白质法	106
6.3.6 耗氧率的测定	106
6.3.7 活性胞平板计数法	108
6.4 生物膜结构与活性观察	108
6.4.1 生物膜一般结构与种群分布	108

6.4.2 桔黄夹氮萘染色-荧光显微镜观察.....	109
6.4.3 生物膜结构的电镜观察.....	109
6.4.4 INT 标记活性生物膜法.....	110
6.5 附录.....	110
6.5.1 典型生物过程的测量参数.....	110
6.5.2 典型生物过程自动监控示意图.....	111
第7章 影响生物膜反应器运行的主要因素.....	112
7.1 进水底物浓度.....	112
7.2 营养物质.....	115
7.3 水力停留时间与负荷率.....	116
7.3.1 完全混合间歇反应器.....	117
7.3.2 完全混合连续反应器.....	117
7.3.3 完全混合连续串联反应器.....	118
7.3.4 推流反应器.....	118
7.3.5 扩散推流反应器.....	118
7.4 水力剪切力.....	120
7.5 溶解氧.....	123
7.6 pH 值.....	124
7.7 温度.....	124
7.8 抑制及毒性作用.....	125
第8章 典型生物膜反应器工艺.....	128
8.1 生物滤池.....	128
8.1.1 普通生物滤池.....	128
8.1.2 高负荷生物滤池.....	133
8.1.3 塔式生物滤池.....	138
8.1.4 厌氧生物滤池.....	140
8.1.5 活性生物滤池.....	142
8.2 生物转盘.....	143
8.2.1 好氧生物转盘.....	144
8.2.2 厌氧生物转盘.....	148
8.3 淹没式生物滤池.....	149
8.3.1 淹没式生物滤池的构造.....	149
8.3.2 淹没式生物滤池的池型.....	150
8.3.3 淹没式生物滤池的典型工艺流程.....	152
8.3.4 淹没式生物滤池的设计与计算.....	152
第9章 实用新型生物膜反应器工艺.....	155
9.1 生物流化床.....	155
9.1.1 两相流化床.....	155
9.1.2 三相流化床.....	158

9.1.3 厌氧流化床	158
9.2 厌氧生物膜膨胀床	159
9.3 微孔膜生物反应器	161
9.4 移动床生物膜反应器	162
9.5 复合式生物膜反应器	164
9.5.1 活性污泥-生物膜反应器	164
9.5.2 序批式生物膜反应器	166
9.5.3 升流式厌氧污泥床-厌氧生物滤池	168
9.5.4 附着生长污水稳定塘	171
第 10 章 生物膜/悬浮生长联合处理工艺	174
10.1 概述	174
10.2 生物膜/悬浮生长联合处理工艺类型	174
10.2.1 活性生物滤池 (ABF) 工艺	176
10.2.2 普通生物滤池/固体接触 (TF/SC) 工艺	177
10.2.3 粗滤池/活性污泥 (RF/AS) 工艺	177
10.2.4 生物滤池/活性污泥 (BF/AS) 工艺	178
10.2.5 普通生物滤池/活性污泥 (TF/AS) 工艺	178
10.2.6 其他联合处理工艺	179
10.3 联合处理工艺的设计要点	179
10.3.1 主要设计考虑因素	180
10.3.2 生物膜反应器	183
10.3.3 悬浮生长反应器	183
10.3.4 其他联合处理工艺	185
10.3.5 污泥产生与沉降	186
10.3.6 出水水质与氮、磷营养物去除	187
10.4 联合处理工艺处理设施的设计	191
10.4.1 生物膜反应器	191
10.4.2 悬浮生长反应器	192
10.4.3 其他联合处理工艺	192
10.5 生物膜出水澄清要求与能力	192
主要参考文献	194
索引	212

第1章 污水处理中的生物膜与生物膜反应器

任何一个地区或环境，只要有人类的日常生活和生产活动存在，就必然会产生污水，而这些污水如果未经任何处理就排放到水环境中，就不可避免地造成水环境的污染，危害人民身心健康，危害工农业生产。污水中的污染物质种类繁多，但主要是有机污染物，一般多采用生物处理法予以去除。在污水的生物处理工艺中，微生物根据其生长条件或处于悬浮生长状态，或处于附着生长状态，附着生长的微生物便形成了生物膜。自本世纪初污水生物处理技术出现以来，应用附着微生物的生物膜反应器就一直发挥着不可忽视的作用，在科技快速发展的今天，其作用亦愈来愈大，其应用也越来越广。本章将首先对污水的来源与污染物、生物膜及生物膜反应器分别加以简要阐述，使读者对此有一个概括性的了解。

1.1 污水与污水生物处理

1.1.1 污水的来源与污染物

污水是人们在生活与生产过程中使用过的含有各种污染物的水，主要来源于城镇的住宅、工厂和各种公共建筑设施。例如，在人们的日常生活中，盥洗、淋浴、洗涤和卫生设备等均排出生活污水；在工农业生产中，几乎所有的工厂、厂矿或车间亦均排出工业废水。我国的污水水量相当庞大，据统计，自1985年以来，我国污水年排放总量一直维持在350~400亿 m^3 左右，1997年污水排放量达到最高值416亿 m^3 ，其中工业废水排放量227亿 m^3 ，市政污水排放量189亿 m^3 ，污水中化学需氧量（COD）排放量达1757万t，其中工业废水COD排放量1073万t，市政污水COD排放量684万t。

一般说来，污水中的主要成分仍然是水，占99.9%或更高，而全部固体物质仅占0.1%或者更低些（秦麟源，1989）。这些固体物质在水中以悬浮态（粒径 $>1\ \mu\text{m}$ ）、溶解态（粒径 $<0.1\ \mu\text{m}$ ）和胶体状态（粒径介于 $0.001\sim 0.1\ \mu\text{m}$ 之间）的形式存在，其量的多寡，也就反映了水中污染物质的含量和水受污染程度的高低。

污水中的污染物质按其化学性质可以分为无机物和有机物。无机污染物主要包括无机盐（如 SO_4^{2-} 、 S^{2-} 和 Cl^- 等）、酸、碱、重金属（如Hg、Cd、Cr、Pb、Zn、Cu等）离子、毒性无机物（如CN和As等），以及氮（N）、磷（P）等植物性营养物质，这些污染物质大多数主要来源于生产或应用含这些物质的特种工业，在污水排入城市排水管网前多采用物理、化学或物理化学法进行去除该类污染物的特种处理。有机污染物主要包括以碳（C）元素为主要化学成分的植物性污染物质（如蔬菜、果皮及各种植物碎片等）和以C、N为主要化学成分的动物性污染物质（如人畜粪便和动物组织碎片等），对于中等强度的污水来讲，75%的悬浮固体和40%的可滤过性固体均为有机物质（Metcalf & Eddy, 1991）。

污水中的有机污染物质种类繁多，成分复杂，但对于生活污水来说，归纳起来主要有

蛋白质(40%~60%)、碳水化合物(25%~50%)和油脂(10%)，此外还含有一定量的尿素(Metcalf & Eddy, 1991)。蛋白质是构成动物体的主要成分，它除含有C、H和O外，还含有约16%的N，其分子量在2万至2千万之间，有的溶于水而有的则不溶于水，其来源主要是动物类食品(如瘦肉等)和植物类食品(如各种豆类等)。碳水化合物广泛存在于自然界中，主要有糖类、淀粉、纤维素和木质素，其化学组分主要是C、H和O，低分子量的糖类溶于水而其他高分子量的则不溶于水。油脂也是食物的主要组成成分，主要源于动植物油和动物的脂肪，多数不易溶于水。

有机污染物的共同特点就是不稳定，在水环境中进行氧化分解消耗水中的溶解氧，而在缺氧或厌氧的条件下则发生腐败发酵，释放出 H_2S 、 NH_3 和 CH_4 等有毒并具臭味的气体，恶化水质，破坏水体。在受到有机物严重污染的水体中，水中溶解氧接近于零，水生生态平衡遭到破坏，水生生物的生长受到抑制或死亡，如鱼类在溶解氧低于4 mg/L的水体中就不易生存。同时，有机物又是包括病原菌在内的很多微生物的食物，水中有机物增多，为微生物的繁衍创造了更为有利的条件，也就意味着水传播疾病增加的可能性。因此，控制与去除水中的有机污染物是污水处理工程中的主要任务之一，使污水中挟带的污染物质(主要是有机物)，通过微生物的代谢活动予以转化与稳定，正是污水生物处理的主要目的。

由于污水中的有机物的种类非常多，已有的分析技术难以将其逐一区分和定量，且在实际工程中似乎也没有这个必要，因而常采用以下几个综合污染指标来反映污水中有机污染物的浓度，即生化需氧量、化学需氧量、总需氧量和总有机碳等。生化需氧量(BOD)是在有氧的条件下微生物降解有机物所需的氧量，因该生化过程进行得很慢(如在20°C时需时120 d以上)，在实际中常采用20°C培养5 d的五日生化需氧量(BOD_5)作为检验指标， BOD_5 约等于全生化需氧量(BOD_{20})的70%~80%。化学需氧量(COD)是用 $K_2Cr_2O_7$ 等强氧化剂在酸性条件下氧化污水中的有机物所消耗的氧化剂量折合成的氧量(O_2)，因能有98%左右的有机物均可被氧化，故COD能够较完全地代表水中有机污染物的总量。总需氧量(TOD)是在900°C的高温条件下将污水中能被氧化的有机物质燃烧氧化生成稳定的氧化物(诸如 CO_2 、 H_2O 、 NO_2 和 SO_2 等)时所消耗的氧气量，多通过TOD分析仪测定。总有机碳(TOC)是以C元素含量来反映污水中有机物总量的一种水质指标，它是在950°C高温下以铂为催化剂使水样气化燃烧后测定气体中 CO_2 的含量，由此确定水样中的C元素总量，并在此总量中减去碳酸盐等无机C元素含量(通过低温150°C燃烧获得)即可得到总有机碳TOC的值，多通过TOC分析仪进行测定。对大多数污水来讲， BOD_5 、COD和TOC等指标之间都存在着一定的关系，它们之间的具体比值随不同性质的污水而异，对于生活污水，有机物污染指标之间的比值基本稳定，例如(秦麟源, 1989)， $BOD_5/COD = 0.40\sim 0.44$ ， $BOD_5/TOC = 1.38$ ， $COD/TOC = 3.13\sim 3.45$ 。此外， BOD_5/COD 的比值可以用来判断常规污水是否易于生化处理，一般认为 BOD_5/COD 大于0.3的污水才适合于采用生化处理。

1.1.2 污水生物处理工艺

污水生物处理的主要去除对象就是呈溶解态和胶体状态的有机污染物质，利用微生物的新陈代谢作用使之转化成为稳定的无害化物质。在发达国家，为控制水体的有机污染普遍采用二级生物处理工艺，如美国约有污水处理厂18000座，其中84%为二级处理厂；

英国共有处理厂约 3000 座，几乎全部是二级生物处理厂；日本有城市污水处理厂 630 座，村镇污水处理厂 2000 座，其中二级生物处理厂和深度处理厂占 98% 左右；瑞典人口虽少，但却有 1540 座城市污水处理厂，其中有 91% 为二级生物处理厂（钱易与米祥友，1993）。以上这些数字均表明，污水生物处理工艺在改善水体卫生状况及水污染控制方面起着不容低估的作用。

按照反应过程中有无氧气的参与，污水生物处理可分为好氧处理工艺和厌氧处理工艺两大类，前者多用于处理中等浓度以下的城市污水，而后者则多用于处理高浓度的有机污水和污水生物处理中所产生的污泥。

按照污水处理生物反应器中微生物的生长状态，污水生物处理还可划分为悬浮生长工艺和附着生长工艺（固定膜），前者以活性污泥法为代表，微生物在曝气池内以活性污泥的形式呈悬浮状态，而后者则以生物膜法为代表，微生物以膜状固着在某种载体的表面上。活性污泥法是当今世界范围内应用最为广泛的一种生物处理工艺，具有处理能力高、出水水质好等优点，但传统活性污泥法的基建与运行费用较高、能耗较大、管理也较复杂、易出现污泥膨胀和污泥上浮等问题，对 N、P 等营养物质去除效果有限，因而近 20 多年来研究者们在对活性污泥法本身改进的同时，又致力于寻找活性污泥法的替代工艺或革新与代用处理技术。生物膜法作为与活性污泥法平行发展起来的生物处理工艺，在许多情况下不仅能代替活性污泥法用于城市污水的二级生物处理，而且还具有一些独特的优点，如运行稳定、抗冲击负荷、更为经济节能、无污泥膨胀问题、具有一定的硝化与反硝化功能、可实现封闭运转防止臭味等。正是因为如此，自 70 年代以来，生物膜工艺又引起广大研究者和工程师们的极大兴趣（Marshall, 1984）。

1.2 生物膜

1.2.1 生物膜及其形成过程

微生物细胞几乎能在水环境中的任何适宜的载体表面牢固地附着，并在其上生长和繁殖，由细胞内向外伸展的胞外多聚物使微生物细胞形成纤维状的缠结结构，便被称之为生物膜。可见，生物膜是由固定在附着生长载体上的并经常镶嵌在有机多聚物结构中的细胞所组成。

生物膜是在惰性载体表面形成的，有时均匀地分布在整个载体表面，而有时却非常不均匀；有时仅由单层的细胞所组成，而有时却相当厚，随着营养底物、时间和空间的改变而发生变化。由于生物膜主要是由微生物细胞和它们所产生的胞外多聚物所组成，因而生物膜通常具有孔状结构，并具有很强的吸附性能。结果，我们所观察到的生物膜通常还含有大量被吸附和镶嵌于内的溶质和无机颗粒，从这个角度上说，生物膜是由有生命的细胞和无生命的无机物所组成的结构。

按照 Characklis (1990) 的研究，生物膜的累积形成是以下物理、化学和生物过程综合作用的结果：

1. 有机分子从水中向生物膜附着生长载体表面运送，其中有些被吸附便形成了被微生物改良的载体表面（图 1-1a）；
2. 水中一些浮游的微生物细胞被传送到改良的载体表面，其中碰撞到载体表面的细

胞一部分在被表面吸附一段时间后因水力剪切或其他物理、化学和生物作用又解吸出来，而另一部分则被表面吸附一定时间后变成了不可解吸的细胞（图 1-1b）；

3. 不可解吸的细胞摄取并消耗水中的底物与营养物质，其数目增多；与此同时，细胞可能产生大量的产物，有些将排出体外。这些产物中有一些就是胞外多聚物，将生物膜紧紧地结合在一起，由此，微生物细胞在消耗水中底物能量进行新陈代谢时便使得生物膜形成累积（图 1-1c）；

4. 进入水中，或者细胞在增殖时亦可以向水中释放出游离的细胞（图 1-1d）。

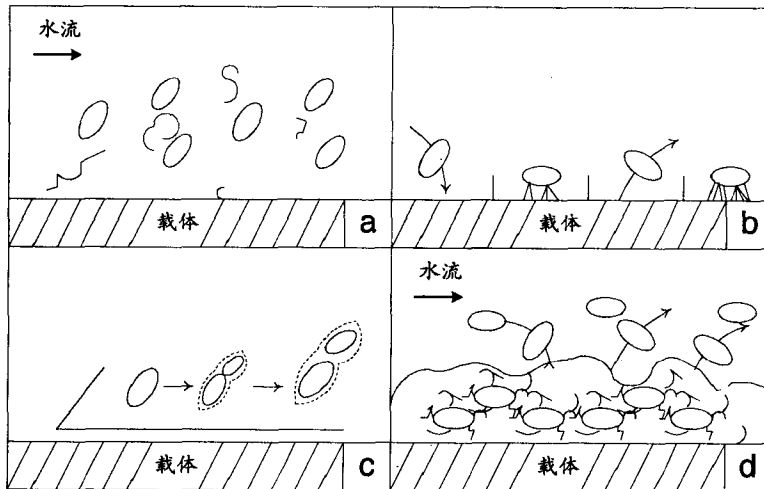


图 1-1 生物膜在附着生长载体表面的形成过程

1.2.2 生物膜的微生物相

如前所述，生物膜主要是由微生物及其胞外多聚物所组成，这些只有在光学显微镜下才能观察到具体形态的微生物，形态迥异，种类繁多，但归纳起来主要有细菌、真菌、藻类（在有光条件下）、原生动物和后生动物等，此外还有病毒。这些微生物体，有的细胞结构简单（如原核生物），有的细胞结构则较复杂（如真核生物），而病毒只是非细胞的组织结构。

1. 细菌

细菌是生物膜的主体，而其产生的胞外多聚物为生物膜结构的形成奠定了基础。生物膜上细菌的种类取决于其生长速率和生物膜所处的环境，诸如水中营养状况、附着生长状况、细菌在生物膜中所处的位置和温度等环境条件。根据所需营养的不同，细菌可分为无机营养型的自养菌和有机营养型的异养菌，其中异养菌是生物膜中的主要细菌类型，能够从流经生物膜表面的水中获得足够的能量底物。

按照细菌的生存是否需要和有无氧气，异养菌又可分为好氧异养菌、厌氧呼吸型异养菌、厌氧异养菌和兼性厌氧菌四类。好氧异养菌只能在有氧气存在的条件下生长，它们在呼吸过程中分解复杂的有机分子并从中获得能量，并将电子通过一系列电子受体最终传给氧气，氧气便形成水。化学能以这种形式被转化成三磷酸腺苷（ATP）形式，以便于用于微

生物合成,在呼吸过程中,每个分子葡萄糖约形成 38 个分子的 ATP (Brock *et al.*, 1984)。呼吸是最为有效的能量代谢过程,底物中的 C 除了用于细胞自身合成外,其余的 C 均以 CO₂ 的形式释放出来。厌氧呼吸型异养菌是在厌氧条件下用氧以外的物质作为电子受体,如硝酸盐等,电子通过电子传递系统转移给硝酸盐并使硝酸盐还原成 N₂。尽管每 mol 葡萄糖释放出的 ATP 少于有氧的情况,但厌氧呼吸仍是一个有效的能量产生过程。厌氧异养菌仅在没有氧气的条件下生长,这些细菌从发酵反应中获得能量,使有机化合物部分分解成低分子的化合物如乙醇、乳糖、乙酸、琥珀酸等及释放一些 CO₂。与好氧呼吸相比,发酵反应是不完全的,每分子的葡萄糖仅产生 2 个分子的 ATP (Brock *et al.*, 1984)。其他厌氧菌还能进一步发酵分解低分子的有机物,如硫酸盐还原菌,在更低氧化还原电位和没有硫酸盐存在的条件下,甲烷菌亦可以利用这些低分子产物(包括 CO₂ 和 H₂)并从中获得能量,最终产生甲烷。兼性厌氧菌既能在厌氧条件下进行发酵反应,也能在有氧的条件下利用电子传递链将电子传递给氧,这类细菌的数量亦相当大。

生物膜中常出现的细菌种类有(俞辉群等, 1988): 球衣菌、动胶菌、硫杆菌属、无色杆菌属、产碱菌属、甲单胞菌属、诺卡式菌属、色杆菌属、八叠球菌属、粪链球菌、埃希式大肠杆菌属、副大肠杆菌属、亚硝化单胞菌属和硝化杆菌属等。

2. 真菌

真菌是具有明显细胞核而没有叶绿素的真核生物,大多数具有丝状形态,包括单细胞的酵母菌(在一定条件下亦形成菌丝)和多细胞的霉菌。真菌可利用的有机物范围很广,特别是多碳类有机物,故有些真菌可降解木质素等难降解有机物。当污水中有机物的成分变化、负荷增加、温度降低、pH 降低和溶解氧水平下降时,很容易滋生丝状菌。

生物膜中常出现的丝状菌有(俞辉群等, 1988): 瘤胞属、灿烂微重真菌、红色浆霉、水镰刀霉、白地霉、皮状丝胞酵母等;此外,有时也出现茎点霉属、乳节水霉、纤细腐霉、红酵母属、毛霉属和水霉属等。

3. 藻类

藻类是受阳光照射下的生物膜中的主要成分,如在明渠和溪流的岩石上就经常发现有藻类,普通生物滤池表层滤料的生物膜中及附着生长污水稳定塘的填料上(Zhao & Wang, 1996)亦有大量的藻类。一些藻类如海藻是肉眼可见的,但绝大多数却只有在显微镜下才能观察到,有的只是单细胞,而有的则是多细胞结构。由于藻类含有叶绿素,故藻类能够进行光合成,亦即将光能转化成化学能。尽管藻类不是生物膜主要的微生物类群,但藻类却作为水生环境中生产者受阳光照射下水体中的生物膜微生物的主要构成部分。由于出现藻类的地方只限于生物膜反应器中表层很小部分,因而对污水净化不起很大作用。

生物膜中常出现的藻类有(俞辉群等, 1988): 小球藻属、绿球藻属、席藻属、颤藻属、毛枝藻属和环丝藻属等。

4. 原生动物

原生动物是动物界中最低等的单细胞动物,在成熟的生物膜中它们不断捕食生物膜表面的细菌,因而在保持生物膜细菌处于活性物理状态方面起着积极作用。原生动物或者以胞饮方式(一部分细胞壁凹入摄取外部环境大分子并夹紧形成其体内液泡)摄取有机物质,或者以噬菌的方式吞噬细菌、藻类和其他粒子并消化作为它们的营养物质。在诸如滴滤池的污水处理生物膜反应器中经常可以观察到原生动物捕食并因此而影响生物膜累积和

性能的情况。从微观角度上讲,浮游的原生动物甚至通过在生物膜内运动产生紊动而影响生物膜的深处的传质情况。原生动物主要包括鞭毛类、肉足类、纤毛类和孢子类。

生物膜中经常出现的原生动物有(俞辉群等,1988):鞭毛类,气球屋滴虫、圆珠背钩虫、粗袋鞭虫、尾波豆虫、粗尾波虫、侧弹跳虫和活泼锥滴虫等;肉足类,变形虫属、简便虫属和表壳虫属等;纤毛虫类,侧盘盖虫、螳状独缩虫、沟钟虫、钩刺斜管虫、集盖虫、巧盖虫、八条纹钟虫、有肋盾纤虫和珍珠映毛虫等。在1 mL的生物滤池的生物膜污泥中通常可见肉足类100~4600个,鞭毛虫类200~13000个,纤毛虫类500~10000个,无论在种属和个数方面,纤毛虫类都占有很大比例。

5. 后生动物

后生动物是由多个细胞组成的多细胞动物,属无脊椎型。生物膜中经常出现的有轮虫类(旋轮虫和蛭型轮虫等)、线虫类(如双胃线虫和杆线虫属)、寡毛类(爱胜蚓、颤蚓属和水丝蚓属)和昆虫(如毛蠓属)及其幼虫类。

综上所述可见,生物膜上的微生物相十分丰富,形成了由细菌、真菌和藻类到原生动物和后生动物的复杂的生态体系,这些微生物的出现与是否占优势常与污水水质和生物膜所处的环境条件相关,如负荷适当时常出现独缩虫属、聚缩虫属、累枝虫属、集盖虫属和钟虫等;负荷过高,真菌类增加,纤毛虫类在绝大多数情况下消失,可以见到的有屋滴虫属、波豆虫属、尾波虫属等鞭毛类;负荷较低时可观察到盾纤虫属、尖毛虫属、表壳虫属和鳞壳虫属。后生动物如轮虫和线虫等大量出现时,能使生物膜快速更新,生物膜中的厌氧层减少,不会引起生物膜肥厚,且生物膜脱落量也少;如果扭头虫属、新态虫属和贝日阿托氏菌属等出现时,表明生物膜中的厌氧层增厚等。可见,微生物膜上的生物相可以起到指示生物的作用,由此可以检查、判断生物膜反应器的运转情况及污水处理效果。

1.3 生物膜反应器

如前所述,污水和其中的污染物的产生是不可避免的,只要存在有机污染物,就会滋生和繁衍大量以细菌为主体的微生物,在合适的环境条件下只要有附着生长载体存在,细菌等微生物就会在此载体表面形成生物膜,而生物膜上的微生物通过其自身的新陈代谢就会分解水中的有机污染物。通过人工强化技术将生物膜引入到污水处理反应器中便形成了生物膜反应器。从广义上来讲,凡是在污水生物处理的各工艺中引入微生物附着生长载体(或称之为滤料、填料等,视具体工艺而言)的反应器,本书中均定义为生物膜反应器,包括以生物膜为主体的生物膜反应器,还包括引入生物膜的复合式生物膜反应器。下面简要阐述有关生物膜反应器的发展沿革、生物膜反应器的类型与技术现状、生物膜反应器的技术特征和生物膜反应器的发展趋势,以使读者对此有一个全面而系统的了解。

1.3.1 生物膜反应器的发展沿革

生物膜反应器是污水生物处理主要技术之一,它与活性污泥法并列,既是古老的、又是发展中的污水生物处理技术。

在19世纪末期的1893年,英国进行将污水在粗滤料上喷洒进行净化试验取得了良好的净化效果,作为生物膜反应器的生物滤池开始问世,并从此开始用于污水处理的实践。

在20世纪20~30年代,开始建造了许多生物膜反应器系统,其主要形式就是生物滤