

美国水环境联合会 (WEF[®]) 环境工程实用手册系列

生物膜反应器设计与运行手册

Biofilm Reactors

[美] 美国水环境联合会 编著
曹相生 译

中国建筑工业出版社

美国水环境联合会（WEF®）环境工程实用

生物膜反应器设计与运行手册

[美] 美国水环境联合会 编著

曹相生 译

中国建筑工业出版社

著作权合同登记图字：01-2011-7574 号

图书在版编目（CIP）数据

生物膜反应器设计与运行手册 /（美）美国水环境联合会编著；曹相生译.
—北京：中国建筑工业出版社，2013.7
（美国水环境联合会（WEF[®]）环境工程实用手册系列）
ISBN 978-7-112-15291-9

I. ①生… II. ①美… ②曹… III. ①生物膜反应器-技术手册 IV. ①X7-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 059214 号

Copyright ©2011 by the Water Environment Federation.
All rights reserved.

The authorized Chinese translation edition is jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) and China Architecture & Building Press. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan.

Copyright ©translation 2013 by McGraw-Hill Education(Asia), a division of McGraw-Hill Asian Holdings (Singapore) Pte. Ltd. And China Architecture & Building Press.

本书由美国麦格劳-希尔图书出版公司正式授权我社翻译、出版、发行本书中文简体字版。

责任编辑：石枫华 程素荣
责任设计：董建平
责任校对：张颖 赵颖

美国水环境联合会（WEF[®]）环境工程实用手册系列
生物膜反应器设计与运行手册

[美]美国水环境联合会 编著

曹相生 译

*

中国建筑工业出版社出版、发行（北京西郊百万庄）
各地新华书店、建筑书店经销
华鲁印联（北京）科贸有限公司制版
北京中科印刷有限公司印刷

*

开本：787×1092毫米 1/16 印张：22³/₄ 字数：570千字
2013年7月第一版 2013年7月第一次印刷
定价：88.00元

ISBN 978-7-112-15291-9

（23130）

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）

中文版前言

生物膜法比活性污泥法更为古老的技术，在工业废水处理领域应用最为广泛，但现在正越来越多地用于城镇污水处理。曝气生物滤池（BAF）、反硝化生物滤池、移动床生物膜反应器（MBBR）、生物膜和活性污泥的组合工艺（IFAS）是城镇污水处理中生物膜法成功应用的典范，在中国的应用也越来越广泛。

虽然生物膜法的应用如此广泛，但遗憾的是我国尚无生物膜反应器设计的专业书籍。迄今为止，我国绝大部分污水处理技术人员对生物膜反应器的理解还是基于20世纪50、60年代的资料，即给水排水工程专业本科教材《排水工程》的知识。我国大部分污水处理技术人员对近20年以来生物膜技术的发展知之甚少。

美国水环境联合会（Water Environment Federation, WEF）成立于1928年，一直是全球水处理技术的领跑者。WEF出版的实践手册（Manual of Practice, MOP）是水处理领域的重要参考书，在全球享有很高的声誉。本手册是MOP的第35分册，由WEF的生物膜反应器专家组编写而成。该书囊括了污水处理领域各类生物膜反应器的设计和运行问题，是迄今为止全世界有关生物膜反应器设计的最权威书籍。

由此，把WEF的生物膜反应器设计手册译成中文，对我国污水处理领域的技术人员是大有裨益的。

本书对生物膜法的各种工艺从原理到设计方法进行了详细介绍。本书的特点如下：

（1）生物学基础知识是理解和掌握生物膜法的基础。本书对此进行了详细介绍，读者拥有此书则省去了查找生物学专著的麻烦。

（2）滴滤池在中国被认为是淘汰落后的工艺。本书则告诉读者滴滤池在北美地区有广泛的市场，滴滤池与活性污泥法的结合是城镇污水处理的常用工艺之一。

（3）迄今为止，我国的滴滤池和生物转盘设计还是基于大约50年前的资料。本书则提供了最新的滴滤池和生物转盘设计方法和资料。

（4）作为新型的生物膜反应器，移动床生物膜反应器（MBBR）和生物膜/活性污泥组合工艺（IFAS）在中国的应用越来越多。本书则提供了各种MBBR和IFAS的设计方法并提供了成功的案例。

（5）本书提供了曝气生物滤池和反硝化生物滤池的详细设计方法及成功案例。

（6）无论是活性污泥法还是生物膜法的设计，中国工程师往往只是重视生物反应池的设计而忽略二沉池的设计。读完本书后，读者会对二沉池设计的重要性有更深入的理解。本书对二沉池的细部结构及相应设计进行了详细介绍，对圆形二沉池和矩形二沉池做了比较。

（7）过滤是进一步提高出水水质的良好方式。本书对滤布滤池等各种滤池的设计及选择作了简单介绍。

（8）本书对厌氧氨氧化（Anammox）等新型的生物膜反应器进行了介绍。让读者了

中文版前言

解生物膜反应器的发展趋势和前沿技术。

(9) 数学模型历来不被中国水处理工程师所重视，常常被认为是不切实际的。事实上，数学模型对深刻理解工艺原理有着积极的作用。任何技术领域的进一步发展必然是数学模型的成熟应用。本书介绍了国际上一些知名的生物膜模拟软件，相信会让读者从中能领会到数学模型的实用性。

(10) 为了方便阅读，部分术语后面注明了英文。因此本书也可临时性充当辞典使用。

(11) 绝大部分数字给出了国际单位制和美制单位，另外也增加了单位换算表作为附录，便于大家与国外文献对照。

(12) 修订了原书的一些错误，中文译本应该比原书更加完善。

照顾到中文文献的习惯，有些术语没有直译，如“Suspended-growth System”没有直译为“悬浮生长系统”，而是翻译为“活性污泥法系统”。“Clarifier”没有直译为“澄清”而是翻译为“沉淀池”。

本书适合污水处理领域的设计、运行和管理人员使用。本书也可作为给水排水工程或环境工程专业的教学参考书。

本书的翻译历时一年，译者耗去了很多陪伴孩子和其他家人的时间。译者感谢妻子孟雪征博士的理解；感谢中国建筑工业出版社石枫华博士的理解、鼓励和支持。孟雪征、袁妮媛、何苗苗、赵林凌、牛贵龙、刘海建、刘冰玉、王亚军、盛韩微、李小冬、李奇峰等人仔细阅读了中文译本初稿。感谢她（他）们提出了宝贵的意见。

鉴于译者学识所限，恳请读者指出书中的错误和翻译不当之处。译者邮箱：caxish@163.com。

曹相生
2012年8月

原著前言

美国水环境联合会（Water Environment Federation, WEF）第35集实践手册（Manual of Practice, MOP）对生物膜法污水处理的各个方面进行了详细解释。本书通过背景分析回顾了生物膜处理系统的发展历史，而生物膜的微生物学一章则对更好地理解各种生物膜系统的设计和运行提供了背景知识。本书对各种生物膜系统和生物膜组合系统进行了详细介绍，这包括：滴滤池（Trickling Filters）、生物转盘、移动床生物膜反应器、生物膜与活性污泥的组合和生物滤池（Biological Filter）。本书对曝气生物滤池和缺氧生物滤池进行了介绍，滴滤池一章还讨论了生物膜和活性污泥工艺的组合。

各种新型生物膜工艺的介绍单列一章，这包括上向流厌氧污泥床反应器（Upflow Anaerobic Sludge blanket Beactors, UASB）和厌氧氨氧化生物膜反应器（Anammox Biofilm Reactors）。本书也讨论了各种工艺设计的影响因素、设计标准和步骤、模拟、设备和施工等。每种工艺的运行事宜，包括可能存在的问题和解决方法等，本书也包括在内。为了解释这些技术的应用，本书也给出了案例。书的最后对生物膜和生物膜工艺的模拟进行了详细讨论，对商业模型的应用也有述及。

本书的目的是让读者彻底理解各种生物膜和生物膜组合处理工艺，掌握其设计、性能和运行问题。

这本实践手册是由Rhodes R. Copithorn（注册工程师、注册环保师）负责完成。主要作者如下：

- | | |
|------|--|
| 第1章 | Rhodes R. Copithorn（注册工程师、注册环保师） |
| 第2章 | Stefan Wuertz（博士）
Edward D. Schroeder（博士） |
| 第3章 | Joshua P. Boltz（博士、注册工程师） |
| 第4章 | Joshua P. Boltz（博士、注册工程师） |
| 第5章 | James P. McQuarrie（注册工程师） |
| 第6章 | Rhodes R. Copithorn（注册工程师、注册环保师）
Dipankar Sen（博士、注册工程师） |
| 第7章 | Christine deBarbadillo（注册工程师）
Joseph A. Husband（注册工程师、注册环保师）
Frank Rogalla
Christopher W. Tabor（注册工程师）
Stephen Tarallo |
| 第8章 | Robert Nerenberg（博士、注册工程师） |
| 第9章 | Thomas E. Wilson（博士、注册工程师、注册环保师） |
| 第10章 | Joseph A. Husband（注册工程师、注册环保师） |

原著前言

第11章 Dipankar Sen（博士、注册工程师）

 Heather Phillips（注册工程师）

作者以及审阅者得到了以下单位的支持：

弗吉尼亚州亚历山大的AECOM公司

西班牙马德里的Aqualia公司

马里兰州盖瑟斯堡和密苏里州堪萨斯城的Black & Veatch公司

宾夕法尼亚州里丁的Brentwood工业公司

俄勒冈州波特兰和弗吉尼亚纽波特纽斯的CDM

宾夕法尼亚州费城、佛罗里达州坦帕、加利福尼亚州莱丁的CH2M Hill

弗吉尼亚州亚历山大的Earth技术公司

北卡罗来纳州查布尔希尔的Entex技术股份有限公司

马里兰州鲍威市的GHD公司

特拉华州威尔明顿市Greeley and Hansen有限责任公司

加拿大安大略省汉密尔顿市的Hydromantis公司

纽约州怀特普莱恩斯（白原）市、俄亥俄州哥伦布市Malcolm Pirnie股份有限公司

加拿大安大略省沃特卢市市政局

伊利诺伊州巴灵顿市Thomas E. Wilson环境工程师有限责任公司

加利福尼亚州戴维斯市加州大学

印第安纳州圣母玛利亚市圣母玛利亚大学

马萨诸塞州戴达姆市和康涅狄格州切舍尔市的Woodard & Curran

目 录

第1章 绪论	1
1.1 背景和目的.....	1
1.2 生物膜工艺的特点.....	1
1.3 历史发展.....	2
1.4 本手册的组织方式.....	6
第2章 生物膜的生物学原理	7
2.1 引言.....	7
2.2 生物的分类.....	7
2.3 非细菌微生物.....	9
2.4 细菌的特征.....	12
2.5 细菌代谢、营养和呼吸.....	17
2.6 细菌生长.....	27
2.7 生物膜细菌生长动力学.....	30
2.8 生物膜内主要的转化过程.....	36
2.9 生物膜内生物群落的特征.....	41
第3章 滴滤池及与活性污泥联合工艺的设计和运行	43
3.1 引言.....	43
3.2 简介.....	44
3.3 工艺流程和生物反应器构成.....	49
3.4 通风和空气供应方式.....	54
3.5 滴滤池工艺的模型.....	55
3.6 工艺设计.....	64
3.7 设计时的考虑因素.....	74
3.8 大型动物的控制机理.....	80

目 录

3.9 滴滤池的启动	86
3.10 滴滤池和活性污泥的联合工艺	88
第4章 生物转盘	93
4.1 引言	93
4.2 工艺设计	95
4.3 生物转盘的设计方法	99
4.4 生物转盘的硝化模型	105
4.5 生物转盘的反硝化	107
4.6 物理参数的设计	108
4.7 生物转盘设计举例	110
4.8 生物转盘的问题和解决办法	112
4.9 中试研究	114
第5章 移动床生物膜反应器 (MBBR)	115
5.1 引言	115
5.2 移动床反应器	115
5.3 MBBR 的设计	118
5.4 MBBR 的固液分离	129
5.5 设计 MBBR 时的考虑因素	129
5.6 案例	130
第6章 生物膜/活性污泥组合式工艺 (IFAS)	143
6.1 生物膜/活性污泥组合工艺 (IFAS) 简介	143
6.2 载体类型	144
6.3 IFAS 的历史	146
6.4 固定式载体 IFAS 的应用	147
6.5 自由漂浮式 (海绵) 载体 IFAS 的应用	150
6.6 IFAS 的生物量控制	151
6.7 IFAS 的设计	154
6.8 IFAS 的案例	161

第7章 生物活性滤池 (BAF)	184
7.1 引言.....	184
7.2 BAF及设备.....	185
7.3 BAF的滤料.....	193
7.4 反冲洗和空气擦洗.....	195
7.5 BAF的设计.....	197
7.6 设计应考虑的因素.....	212
7.7 案例.....	215
第8章 新型生物膜工艺	223
8.1 引言.....	223
8.2 悬浮载体或悬浮颗粒的生物膜反应器.....	223
8.3 厌氧氨氧化 (Anammox) 生物膜反应器.....	225
8.4 膜-生物膜反应器 (MBfR).....	226
第9章 沉淀 (澄清)	228
9.1 引言.....	228
9.2 固体分离方式的选择.....	229
9.3 沉淀池设计的基础.....	230
9.4 沉淀池各部分的设计.....	238
9.5 圆形和矩形沉淀池的比较.....	249
9.6 设计计算举例.....	249
9.7 沉淀池的实际出水效果.....	256
9.8 沉淀池设计时的其他考虑因素.....	257
第10章 过滤	259
10.1 滤池种类.....	259
10.2 滤池的性能.....	260
第11章 生物膜反应器模型的应用和发展	264
11.1 引言.....	264

目 录

11.2 生物膜的半经验方程	267
11.3 一维和二维生物膜扩散模型的数值解法	284
11.4 模型应用及模拟所用的 IFAS 污水处理厂	289
11.5 Aquifas 模拟 IFAS 污水处理厂	293
11.6 BioWin 模拟 IFAS 污水处理厂	300
11.7 MBBR 污水处理厂介绍及模拟	304
11.8 IFAS 和 MBBR 模拟的结论	314
参考文献	316
附录 A 单位换算表	351

第1章 绪 论

1.1 背景和目的

位于弗吉尼亚州亚历山大市的美国水环境联合会（Water Environment Federation）在2000年出版了《好氧固定生长反应器（Aerobic Fixed Growth Reactors）》。本实践手册是《好氧固定生长反应器（Aerobic Fixed Growth Reactors）》的再版。自2000年后，我们对污水处理的生物膜工艺、技术和法规的理解已经改变，因此决定重写这本手册。近年来，分子生物学领域技术的发展也加深了我们对生物膜动力学和微生物生态学的理解。而相关法规对污染物浓度的限值，尤其是对营养物质浓度限值的要求越来越严格，其中氮和磷的要求极大改变了污水处理设施的设计和运行。这些改变促进了污水处理技术的发展，相应地也导致生物膜工艺发生了重大改变。

本手册的名字由《好氧固定生长反应器（Aerobic Fixed Growth Reactors）》改为《生物膜反应器（Biofilm Reactors）》也反映了这些变化。这本手册包括了生物除碳和生物脱氮在内的好氧和厌氧生物膜处理工艺。

1.2 生物膜工艺的特点

在污水处理厂去除碳和氮的生物系统中，无论是生物膜系统还是活性污泥系统，尽管其基本代谢过程是相同的，但也有一些本质上的不同，使生物膜系统具有一些优点和挑战。在本手册中，会明显地看到每种生物膜工艺都有其各自的优点和缺点，因此，要对生物膜工艺进行全面总结是困难的。但在这里，概括一下不同点还是有意义的。

活性污泥系统由生物絮体组成，但理论上所有溶解性底物对所有细胞都是可用的。对生物膜系统，基质必须扩散进生物膜才能被利用。利用扩散的方式，基质从流体主体通过静止边界层转移到生物膜内部。这一扩散过程可能成为限制性因素。另外，代谢终端产物必须反方向扩散出去。因此，在一个完整生物膜的断面上会表现出不同的环境和动力学特征。一个生物膜内可能会有好氧、缺氧和厌氧过程同时发生，限制性基质可能会随着生物膜厚度而改变。由此来看，生物膜工艺的模拟非常复杂。

生物膜工艺的一些共同优点总结如下：运行费用和能耗低、反应器容积小、对沉淀要求低、运行简单。生物膜工艺的共同缺点如下：前面的固液分离不足导致载体堵塞；过度生长堵塞载体或导致漂浮性载体下沉；混合不完全或短流导致载体利用率不高。

1.3 历史发展

19世纪末期，污水生物处理所基于的科学还处于原始状态。但迄今为止，污水生物处理已经得到迅猛发展，其推动力很大部分来自于市中心变得越来越拥挤和缺少公共卫生知识而导致的伤寒爆发。在科学发展的早期，人们认为对污水曝气是有益的。关于生物膜处理工艺的缘起和发展可参见Alleman和Peters（1982）的综述。本领域早期实验的结果无足轻重，这很可能是不知道活性生物量所导致的。由于生物量的存在，对生物膜工艺的曝气产生了良好的结果。20世纪初期，英国曼彻斯特大学的Gilbert J. Fowler和他的同事Edward Ardern、William T. Lockett对各种工艺进行实验，使我们理解了活性污泥（Cooper，2001）。

随着粗矿石代替木板条以增加可利用表面积试验的进行，生物膜工艺不断发展。这些工作很多都是在英国的曼彻斯特污水公司和曼彻斯特劳伦斯市的劳伦斯实验中心（现在为威廉姆十世议员沃尔实验中心，Senator William X. Wall Experiment Station）完成的。

生物滤池（Biological Filters）是由位于曼彻斯特的劳伦斯实验中心研发的（Mills，1890）。它采用砾石作为生物载体。研究表明，这个工艺对污染物的去除不仅仅是机械过滤，也包括载体上的生物生长作用。实验结果认为载体体积和能够处理的污水体积之间存在相关性。从这开始直到20世纪50年代，生物滤池发展成为美国以及其他地区二级污水处理的主要工艺。20世纪50年代，合成载体的使用发展了生物膜的概念，对生物滤池持续不断的研究导致了高负荷工艺的产生。这些高负荷工艺包括曝气生物滤池、移动床生物膜反应器和集合了活性污泥和生物膜系统优点的生物膜系统。

1.3.1 接触床

19世纪90年代曼彻斯特的劳伦斯实验中心的研究在英国引起广泛关注。Corbett（1902）开发了滴滤池（Trickling Filter），也就是如今滴滤池系统的先驱。滴滤池包括位于卵石床表面的进水分布装置和底部通风装置。

与此同时，Crimp（1890）和Dibdin（1903）分别进行研究工作，研发了接触床（Contact Bed）工艺并投入应用。Crimp和Dibdin建造了里面填充炉渣载体水池，然后把污水喷洒在上面，经过大约1h接触后，处理后的水慢慢渗出水池。之后池子空置4~6h，让载体表面的有机物能够被氧化。为了防止炉渣堵塞，事前需要对污水进行过滤或化学沉淀。接触床在水里负荷为 $1.2\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 时，能够去除75%的可氧化有机物。

接触床工艺后来发展到分级工艺，然而堵塞问题依然很难解决。当皇家委员会的污水处置报告（Royal Commission on Sewage Disposal Report）（1908）发布后，接触床工艺便宣告终结。这份报告指出滴滤池的体积负荷是两级接触床的2倍。

1.3.2 滴滤池

滴滤池（Tricking Filter）的出现得益于布水方法的发展。Caink（1987）和Candy（1898）将劳伦斯实验中心Mills的概念发展成一种水喷射驱动的旋转臂布水系统。与此同时出

现了用于矩形池的往复布水器。1904年，使用电动发动机驱动的机械布水器开始使用 (Stanbridge, 1972)。滴滤池工艺不断发展的过程中出现了很多描述该工艺构造的术语。

从密歇根州米德兰Dow化学公司1954~1955年的评估开始 (Bryan, 1955; Dow Chemical Company, 1955)，在俄亥俄州代顿Mead公司、得克萨斯州欧文Fluor公司和Dow化学公司的联合推动下，于20世纪50年代研发和应用了随机和束状 (Bundle) 合成载体。塑料载体的发展历史参见Bryan (1982)、Peters和Alleman (1982) 的综述。不同载体构形的表面积不同，直至今日，载体还在不断发展之中。

1.3.3 生物转盘

生物转盘 (rotating biological contacts, RBC) 由滴滤池演化而来，其目的是降低污水处理的能耗。Steels (1974) 认为最早的生物转盘概念出现在1900年左右。内填树枝灌木、壁上有板条的木制圆柱一半淹没在水中并缓慢旋转。德国进行了大量的生物转盘工艺试验。1900年，Weigand注册了一个木板条组成的旋转圆柱专利 (Alleman和Peters, 1982)。

20世纪50年代研究人员首次使用了石棉板。20世纪60年代早期，开始使用膨胀聚苯乙烯载体。使用这种轻型材料可以把承载载体的轴做得很长，从而使生物转盘的使用在20世纪60~70年代迅速增加。这一时期仅在欧洲和美国就有超过700座采用生物转盘工艺的工厂投产。但这一增长势头随后被生物转盘出现的一系列问题所遏止。这些问题包括生物转盘性能低于设计预期、过多的生物量聚集、轴断裂、生物量不平衡导致的盘子脉动和生长不良的生物等。

大多数早期出现的问题都已经解决，很多生物转盘工艺正在成功运行。但设计工程师和业主却不再像过去那样认为生物转盘是一种有效的处理工艺。

20世纪80年代出现了淹没式生物转盘，或者说是淹没式生物接触器 (SBC)。淹没式生物转盘的盘子有70%~90%处于淹没状态，轴是空气驱动的。这样做的目的是降低轴的负荷、增加生物量的控制，并可用于改造原有的活性污泥池。淹没式生物转盘也曾用在缺氧反应器内以进行反硝化的试验。然而，淹没式生物转盘的实际应用却很少。

1.3.4 滴滤池和活性污泥联合工艺

尽管缺乏权威性的报道，联合工艺应始于20世纪50年代。塑料载体的发展使滴滤池得以在高负荷 (粗处理) 模式下运行，这尤其适合高浓度的市政和工业废水。Byran和Moeller (1960) 报道了最初的联合工艺是为了在条件不好时提高活性污泥出水水质。很快就有人发现粗滴滤池 (Roughing Tricking Filter, RTF) 处于活性污泥工艺前非常好，这样粗滴滤池能起到消减高峰负荷和稳定工艺的作用，还可以保护活性污泥系统免受来自工业废水的毒物和负荷冲击。Gehm和Gellman (1965) 证明，联合式的RTF/AS (粗滴滤池/活性污泥) 工艺能够抑制膨胀生物、提高污水处理厂的整体性能。

在活性污泥系统前设置滴滤池时，一个经常提及的原因是能减少污泥指数SVI (Gehm和Gellman, 1965)。能耗低、能应对冲击负荷也被认为是该联合工艺的优点。很多接收食品、饮料和其他高浓度碳水化合物的污水处理厂发现，在活性污泥系统处理之前采用滴滤池对污水进行局部处理是有益的，可提高整体处理效果。

第1章 绪 论

在20世纪70年代初期，市场上出现了一种采用木板作为载体的改良型滴滤池。这一概念称之为活性生物滤池（activated biofilter, ABF）工艺。Egan和Sandlin（1960）首次对其进行了报道：塑料载体出水沉淀的污泥回流到塔前。Bryan（1962）报道了位于美国密歇根州萨吉诺市的萨吉诺湾和城市服务设施的设计：通过设置一些措施使回流活性污泥通过介质滤池。在这个工艺中，脱落的滴滤池生物量以很高的速度回流到滤池。滤池采用了开放式载体（使用最多的是木板）。后来，在美国俄勒冈州康瓦利斯城，滴滤池的这一概念与短时（15~30min）活性污泥系统（ABF/AS）结合，继而被广泛用于市政和工业废水的处理。

美国俄勒冈州康瓦利斯城在20世纪70年代后期的研究最终导致在1979年出现了滴滤池/固体接触工艺的概念（Norris等，1982）。这一工艺按照去除大多数溶解性有机物质来设计滴滤池的大小，并且在滴滤池后面设置曝气的固体接触渠（池）和二沉池。二沉池沉淀的污泥回流到固体接触渠。设置固体接触渠的主要目的是使滴滤池出水中的悬浮固体絮凝，然后在二沉池将其去除。

1.3.5 生物滤池

生物滤池（Biological Filter）的基本概念就是在有限的空间里给微生物提供大的比表面积以供其生长。生物滤池在利用生物去除基质的同时还能截留颗粒物质，而截留下来的这些颗粒物则通过周期性反冲去除。生物滤池已被用于好氧、缺氧和厌氧工艺中。

曝气生物滤池（BAF）是20世纪80年代在欧洲研发的，随后获得广泛应用，被用于碳和氮的去除等。自1982年以来，已经建造了超过500座各种各样的曝气生物滤池（Stephenson等，2004）。虽然曝气生物滤池的载体和形式各种各样，但总的来说，大家普遍认可的优点如下：由于负荷高，所以对空间需求相对较小；可处理低浓度污水；不必考虑污泥沉降问题；臭气的收集相对容易。

曝气生物滤池可分为上向流和下向流；固定床和流化床；好氧、缺氧和厌氧等形式。

1.3.6 组合式工艺

在曝气反应器内采用生物膜载体是一个古老的观念。最近几年，这一观念被扩展为组合式生物膜活性污泥（integrated fixed-film activated sludge, IFAS）。作为提高已有活性污泥设施处理能力和营养物去除能力的手段，IFAS的应用越来越广泛。

20世纪40年代以前，Hays和Griffith工艺（Wilford和Conlon，1957）在曝气池内使用了挡板、石棉水泥板、木板或其他建筑材料以提高处理效果。通过对淹没式碎石滤池的强制曝气，Hays和Griffith工艺比原有工艺的性能有了提高（Hays，1931）。这些工艺称之为淹没接触曝气工艺（submerged contact aeration processes）。1940~1945年之间，美国陆军营地修建了大约60个Hays接触工艺（Packham，1988）。在曝气池内固定木板、石棉板和塑料板的目的是为细菌提供栖息之地。

该污水处理流程由初沉池和曝气池组成。曝气池分为大小相等的两个，并附带有中间和最终沉淀池。该工艺实际运行时并没有污泥回流。石棉板垂直悬挂在曝气池内，一般比水面低10cm且刚好高于曝气管，沿着曝气池长方向间隔3.8cm排列。这样的布置方式

能够使可漂浮物顺着板间空隙漂到上部。曝气器除了提供氧气外还起到混合作用，而处理效果则受到石棉板上生物膜生长的影响。两个曝气池典型的总水力停留时间在1.7~3.0h之间。国家研究报告（the National Research Council Report）（1946）提出了接触曝气工艺的设计标准，同时也提出了活性污泥工艺和滴滤池工艺的设计标准。但接触曝气工艺最终失败了，在20世纪60年代被彻底抛弃，其原因是曝气费用较高且出水水质比活性污泥工艺要差。

据Steels（1974）报道，20世纪20年代曾进行了在曝气池内滞留小颗粒物以提高运行效果的各种尝试。曾经使用的颗粒物包括粗砂、灌木、木材和软木。这些颗粒物在处理高浓度污水时非常有效。Hays和Griffith工艺以各种形式重新露面，有的使用了相似的概念并冠以活性淹没式生物膜生物反应器（activated submerged fixed-growth bioreactor）的名字（Hamoda和Abd-El-Bary，1987）。在曝气池内使用淹没式生物转盘则是这一概念的另一种应用形式。

这些工艺的基本点，正如现在所做的，就是增加单位体积的生物量。通过在活性污泥反应器内的生物膜载体上滞留生物量，处理效果得以提高而二沉池的固体负荷却未增加。各种各样的IFAS系统结合了生物膜和活性污泥系统的明显优点。

20世纪60年代，日本兴起了在曝气池内使用生物膜载体的方法。Kato和Sekikawa（1967）开发了一种称之为固定活性污泥（Fixed Activated Sludge）的工艺并将其大量应用于工业废物的处理。这个工艺在曝气池内垂直悬挂开孔的塑料模板，一般有污泥回流。日本在20世纪60年代修建了60多个这样的装置。

固定的和自由漂浮的载体均被研发出来。日本开发了一种放在曝气池内的、安装在支架上的绳状载体。这种载体被用来放在原有曝气池内以提高CBOD的去除效果（Iwai，1990）。随后德国用绳状载体以提高硝化效果。之后，北美利用绳状载体提高CBOD的去除效果，也用于提高硝化效果。绳状载体主要用于好氧池或交替好氧和缺氧的池子。美国在20世纪90年代早期对绳状载体进行了试验，之后用于工程（Randall和Sen，1996）。绳状载体的形式多样，已经商业化。

自由漂浮载体就是塑料和海绵。20世纪70年代后期，欧洲研发了使用海绵载体的两种基本工艺。一种称之为Captor工艺（Atkinson等，1979），由Simon-Hartley在英国的曼彻斯特大学研发而成。这一概念由Simon-Hartley与一些大学、英国伯明翰的水环纯水务局（Sewer Trent Water Authority）、英国威尔特郡斯温顿的水研究中心（Water Research Center）合作将其商业化。另外一种海绵载体系统由LinderAG公司在20世纪70年代中期开发（Hegemann，1984）。位于纽约Mount Kisco的Lotepro公司将其以Linpor系统的名义在欧洲和北美商业化（Morper和Wildmoser，1990；Reimann，1990）。

圆柱形塑料载体最早由Kaldnes Miljoteknologi在挪威研发而成（Odegaard和Rusten，1990；Odegaard等，1994）。现在有不少厂家可生产这种类型的载体。

自由漂浮载体已经被用于IFAS和移动床生物膜反应器（MBBR）。MBBR与IFAS的区别在于MBBR没有污泥回流，因此MBBR是纯粹的生物膜工艺而非组合工艺。Kaldnes Miljoteknologi的塑料载体最早是为MBBR开发的，并申请了专利。其专利名称为Annox Kaldnes MBBR（Odegarrrd，2006）。

1.4 本手册的组织方式

本节简单介绍本手册的组织方式和内容。

第2章是与生物膜有关的污水处理微生物学。本章的目的是为其他章节讨论单元技术的动力学和最后一章讨论模拟提供基础知识。

第3章和第4章分别介绍滴滤池和生物转盘工艺。第5章介绍移动床反应器。每章均介绍工艺和机械设计以及运行问题。每章均给出针对每种工艺的经验模型和动力学模型等各种设计方法。对每种工艺，给出在碳和营养物去除方面的应用和实例。

第6章介绍组合工艺，其重点在于IFAS。本章讨论用于IFAS的各种载体以及设计时的考虑因素。本章也会给出应用实例。

第7章介绍生物滤池。本章讨论各种好氧和缺氧生物滤池的设计、建造和运行问题以及生物滤池在除碳、硝化和反硝化方面的应用。讨论的生物滤池类型有淹没式载体的上向流和下向流BAF、漂浮载体的上向流BAF、开放结构载体滤池、连续反冲洗滤池等。

第8章介绍在实验室或小型现场试验证明是有前途、但未商业化的新型技术。

位于生物膜之后的澄清，与工艺能否达到较高的处理水平有关。后面的两章对其讨论。其中第9章讨论重力沉淀和膜分离，第10章讨论出水的各种过滤技术。

最后，第11章全面介绍模拟的概念。前面的每章会介绍每个特定工艺的模拟，但本章介绍一般概念的动力学、模拟技术、各种纯粹的生物膜和生物膜系统的模型应用问题。