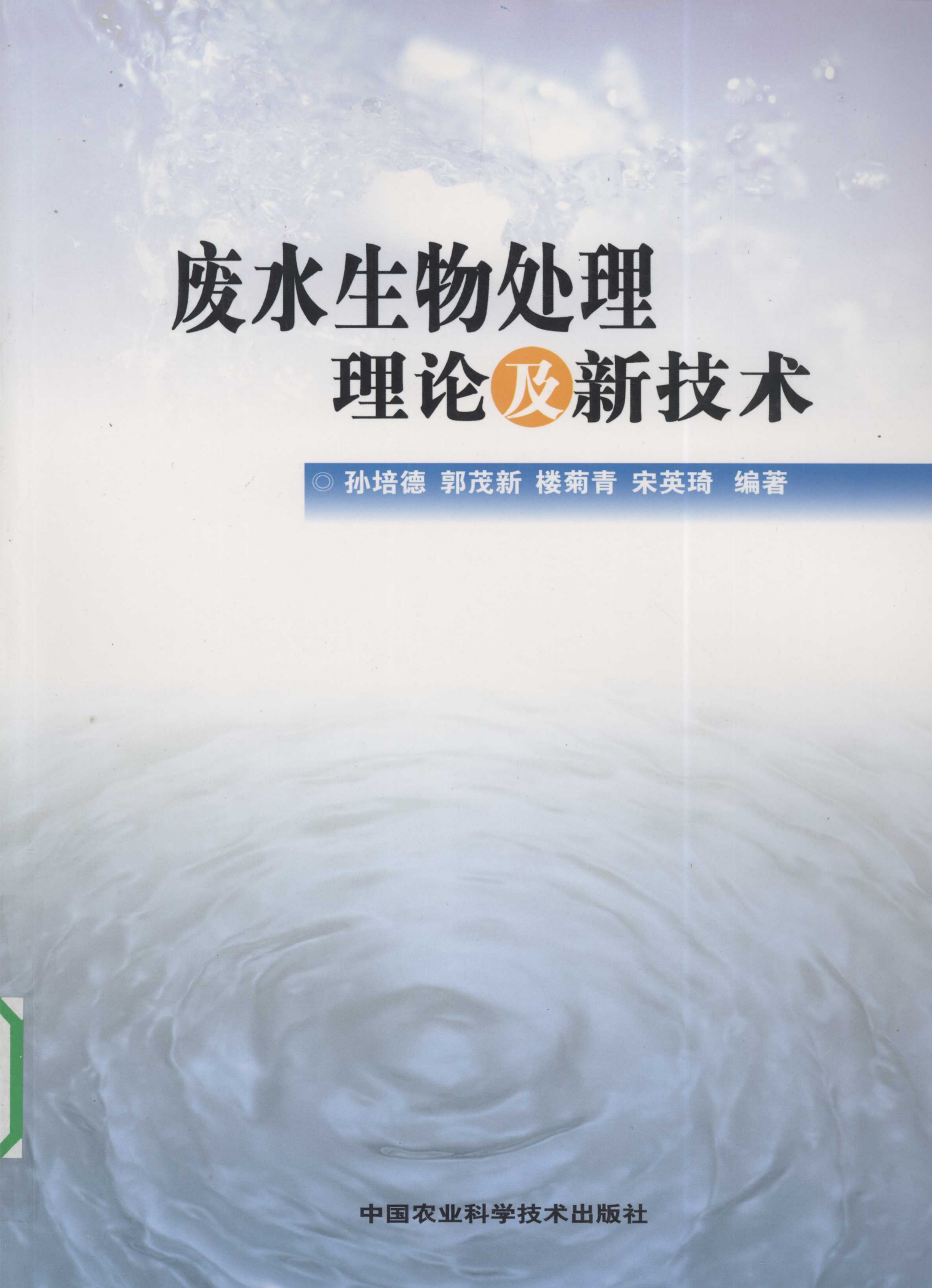




废水生物处理 理论及新技术

◎ 孙培德 郭茂新 楼菊青 宋英琦 编著

中国农业科学技术出版社

废水生物处理 理论及新技术

◎ 孙培德 郭茂新 楼菊青 宋英琦 编著

中国农业科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

废水生物处理理论及新技术 / 孙培德 郭茂新 楼菊青
宋英琦编著. —北京: 中国农业科学技术出版社, 2009. 1

ISBN 978-7-80233-593-6

I. 废… II. ①孙… ②郭… ③楼… ④宋…

III. 废水处理—生物处理 IV. X703.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 204307 号

责任编辑 李功伟 韩扬云

责任校对 贾晓红 康苗苗

整体设计 孙宝林 马 钢

出 版 者 中国农业科学技术出版社

北京市中关村南大街 12 号 邮编: 100081

电 话 (010) 68919704 (发行部) (010) 68919708 (编辑室)

(010) 68919703 (读者服务部)

传 真 (010) 68919709

网 址 <http://www.castp.cn>

经 销 者 新华书店北京发行所

印 刷 者 杭州杭新印务有限公司

开 本 889mm×1 194mm 1/16

印 张 19

字 数 500 千字

版 次 2009 年 1 月第 1 版

定 价 48.00 元

版权所有·翻印必究

前 言

水是生命之源，是地球万物赖以生存和发展的基础，水环境的质量直接关系到人类健康，对社会发展和文明的进步起着至关重要的作用。我国水资源紧缺形势日益加剧，而废水经过不同程度处理可成为人类的第二水资源，因此废水处理技术的发展日益得到重视。废水处理技术主要包括物理、化学、生物等方向，废水生物处理技术因其特有的经济性、适用广泛性而受到广大学者专家的青睐。废水生物处理技术研究是当前环境工程领域的主要研究方向。

本书针对活性污泥工艺、生物膜工艺、厌氧处理技术的机理、模型、最新工艺进行了系统而深入的介绍，旨在使广大读者对废水生物处理技术有更深入系统的了解。本书的特点在于不仅可使读者了解到最新的废水生物处理工艺技术，还突出了生物处理理论的介绍，强调了生物模型的作用。本书共分为十章：第一章绪论，主要概括性介绍最新的废水处理理论研究进展与废水处理工艺进展；第二章废水生物处理的基本过程，深入介绍了生物处理系统的有机物转化过程、硝化过程、反硝化过程、生物除磷过程以及厌氧过程主要影响因素和影响机理；第三章活性污泥基本模型，介绍了目前国际水协推出的活性污泥系列模型 ASM_s 的特点与主要结构；第四章活性污泥营养物质去除模型，介绍了国际上其他广泛应用的及最新研究推出的活性污泥模型的主要概况和过程结构；第五章活性污泥法处理技术新进展，介绍了活性污泥主流工艺的最新演变技术；第六章生物膜模型，介绍了生物膜的主要模型特点与结构；第七章生物膜法处理技术新进展，主要介绍了当前生物膜法的最新工艺；第八章介绍了厌氧消化模型的主要特性与主要过程构成；第九章厌氧处理技术新进展介绍了最新的厌氧处理技术；第十章生物脱氮除磷技术新进展主要介绍了最新的脱氮除磷工艺如短程硝化反硝化工艺等。

本书由浙江工商大学环境科学与工程学院孙培德教授主编，郭茂新、楼菊青、宋英琦参与编写。其中第一章、第二章、第三章、第四章由孙培德、宋英琦编写，第五章、第六章、第七章由楼菊青编写，第八章、第九章、第十章由郭茂新编写。

本书可作为高等院校环境工程学科、环境科学学科以及其他相关学科的研究生教学用书，也可供本科生教学以及科研、设计及管理人员参考使用。由于编者水平有限，加以时间仓促，书中存在一定疏漏和不妥之处，恳切希望读者批评指正并热切希望与有关教师和专家共同探讨研究。

编 者

2008 年 10 月于浙江工商大学

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 废水处理理论进展	(1)
1.2.1 活性污泥法机理研究进展	(1)
1.2.2 生物膜法机理研究进展	(3)
1.2.3 厌氧处理机理研究进展	(5)
1.3 废水处理工艺进展	(6)
1.3.1 活性污泥处理工艺进展	(6)
1.3.2 生物膜处理工艺进展	(7)
1.3.3 厌氧处理工艺进展	(8)
参考文献	(9)
第二章 废水生物处理的基本过程	(13)
2.1 生物处理系统的生物学	(13)
2.1.1 生物种群	(13)
2.1.2 选择作用	(15)
2.2 生物处理系统中的转化过程	(16)
2.2.1 生物增长	(16)
2.2.2 水解过程	(17)
2.2.3 衰减过程	(18)
2.3 有机物的好氧异养转化	(18)
2.3.1 好氧异养转化的反应过程	(18)
2.3.2 好氧异养转化的产率系数	(19)
2.3.3 好氧异养转化中的营养物	(20)
2.3.4 好氧异养转化的动力学	(20)
2.3.5 异养微生物的好氧转化	(21)
2.3.6 环境因素对好氧异养转化的影响	(21)
2.4 硝化过程	(24)
2.4.1 硝化反应	(24)
2.4.2 碱度	(25)

2.4.3 硝化动力学	(25)
2.4.4 环境因素对硝化的影响	(25)
2.5 反硝化过程	(29)
2.5.1 反硝化反应	(30)
2.5.2 反硝化的产率系数	(30)
2.5.3 营养物	(31)
2.5.4 碱度	(31)
2.5.5 反硝化动力学	(31)
2.5.6 环境因素对反硝化的影响	(31)
2.6 生物除磷过程	(33)
2.6.1 生物除磷反应	(34)
2.6.2 生物除磷的产率系数	(34)
2.6.3 碱度	(35)
2.6.4 生物除磷动力学	(35)
2.6.5 生物除磷的环境因素	(35)
2.7 厌氧过程	(36)
2.7.1 厌氧反应	(37)
2.7.2 厌氧过程的产率系数	(37)
2.7.3 厌氧过程中的有机物	(38)
2.7.4 厌氧过程中的碱度	(38)
2.7.5 厌氧过程的动力学	(38)
2.7.6 产气过程	(39)
2.7.7 厌氧过程的环境影响因素	(39)
参考文献	(40)

第三章 活性污泥基本模型

3.1 概述	(41)
3.1.1 活性污泥模型概述	(41)
3.1.2 活性污泥模型格式与符号	(42)
3.2 ASM1 模型	(43)
3.2.1 ASM1 模型概述	(43)
3.2.2 ASM1 模型矩阵	(43)
3.3 ASM2 模型	(45)
3.3.1 ASM2 模型概述	(45)
3.3.2 ASM2 模型矩阵	(46)
3.4 ASM2d 模型	(49)
3.4.1 ASM2d 模型概述	(49)
3.4.2 ASM2d 模型矩阵	(50)
3.5 ASM3 模型	(53)
3.5.1 ASM3 模型概述	(53)
3.5.2 ASM3 模型矩阵	(53)

参考文献	(57)
第四章 活性污泥营养物质去除模型	(58)
4.1 概述	(58)
4.2 UCTPHO 模型	(58)
4.2.1 模型概述	(58)
4.2.2 模型动力学和化学计量学	(59)
4.3 B&D 模型	(64)
4.3.1 模型概述	(64)
4.3.2 模型动力学和化学计量学	(66)
4.4 TUDP 模型	(73)
4.4.1 模型概述	(73)
4.4.2 模型动力学和化学计量学	(73)
4.5 ASM3 Bio—P 模型	(75)
4.5.1 模型概述	(75)
4.5.2 模型动力学和化学计量学	(75)
4.6 两步硝化模型	(78)
4.6.1 模型概述	(78)
4.6.2 模型动力学与化学计量学	(79)
4.7 活性污泥全耦合模型 FCASMs	(81)
4.7.1 模型概述	(81)
4.7.2 FCASM2 模型	(82)
4.7.3 FCASM3 模型	(89)
参考文献	(102)
第五章 活性污泥法处理技术新进展	(104)
5.1 概述	(104)
5.2 氧化沟处理技术新工艺	(104)
5.2.1 概述	(104)
5.2.2 Carrousel 型氧化沟	(105)
5.2.3 Orbal 型氧化沟	(106)
5.2.4 交替式氧化沟	(107)
5.2.5 其他氧化沟系统	(108)
5.3 SBR 处理新技术	(111)
5.3.1 概述	(111)
5.3.2 间歇循环延时曝气法(ICEAS)	(113)
5.3.3 循环式活性污泥法(CAST)	(114)
5.3.4 周期循环活性污泥法(CASS)	(116)
5.3.5 DAT—IAT 法	(117)
5.3.6 改良型序批活性污泥法(MSBR)	(119)
5.3.7 Unitank 废水处理方法	(121)

5.4 投料活性污泥法	(125)
5.4.1 概述	(125)
5.4.2 多孔悬浮载体活性污泥法	(126)
5.4.3 投加混凝剂(或助凝剂)的活性污泥法工艺	(128)
5.4.4 投加细颗粒流动载体的活性污泥工艺	(131)
5.5 膜生物反应器污水处理新技术	(136)
5.5.1 概述	(136)
5.5.2 固液分离膜-生物反应器	(136)
5.5.3 曝气膜-生物反应器	(141)
5.5.4 萃取膜-生物反应器	(142)
参考文献	(142)

第六章 生物膜模型

6.1 概述	(143)
6.2 生物膜增长及净化机理	(143)
6.2.1 生物膜净化机理	(143)
6.2.2 生物膜增长的一般描述	(144)
6.3 生物膜模型的质量平衡	(146)
6.3.1 微观(局部或微分)质量平衡	(147)
6.3.2 宏观(全面或整体)质量平衡	(150)
6.3.3 不同模型间的关系	(152)
6.4 解析模型(A)	(155)
6.4.1 模型概述	(155)
6.4.2 定义和方程式	(155)
6.5 准解析模型(PA)	(157)
6.5.1 模型概述	(157)
6.5.2 准解析模型应用于多种类型模型	(158)
6.5.3 多种类模型	(159)
6.6 一维数值动态模型(N1)	(161)
6.6.1 模型概述	(162)
6.6.2 定义和方程式	(163)
6.7 一维数值稳态模型(N1s)	(165)
6.7.1 模型概述	(165)
6.7.2 定义和方程式	(166)
6.8 多维数值模型(N2 和 N3)	(166)
6.8.1 模型概述	(166)
6.8.2 模型的分类	(167)
6.8.3 连续空间上的离散生物量和溶质的 2d 和 3d 模型(N2a,N2b,N3a,N3b,N3c)	(168)
6.8.4 不连续生物量和不连续溶解物的二维模型(细胞的自动控制模型 N2c,N2d,N2f)	(178)
参考文献	(180)

第七章 污水生物膜法处理技术新进展	(181)
7.1 概述	(181)
7.2 生物膜固定化技术	(181)
7.2.1 表面吸附固定技术	(181)
7.2.2 键联固定技术	(182)
7.2.3 细胞间自交联固定技术	(182)
7.2.4 多聚体包埋技术	(183)
7.2.5 孔网状载体截陷固定技术	(185)
7.2.6 各种固定技术的比较	(185)
7.3 生物膜反应器新技术	(187)
7.3.1 生物流化床	(187)
7.3.2 厌氧生物膜膨胀床	(190)
7.3.3 微孔生物膜反应器	(191)
7.3.4 移动床生物膜反应器	(192)
7.3.5 复合式生物膜反应器	(193)
参考文献	(199)
第八章 厌氧消化模型	(201)
8.1 概述	(201)
8.1.1 厌氧消化的转化过程	(201)
8.1.2 ADM1 变量定义	(202)
8.2 厌氧消化模型生化子过程	(205)
8.2.1 ADM1 中生化反应的结构	(205)
8.2.2 生化反应速率矩阵	(206)
8.2.3 分解和水解	(208)
8.2.4 产酸	(208)
8.2.5 产乙酸	(210)
8.2.6 产甲烷	(212)
8.2.7 抑制和毒性	(212)
8.2.8 温度的影响	(215)
8.3 厌氧消化模型物化子过程	(216)
8.3.1 液-液交换过程	(216)
8.3.2 液-气交换过程	(218)
8.3.3 温度的影响	(219)
8.4 厌氧消化模型的应用	(219)
8.4.1 液相方程	(220)
8.4.2 气相方程	(220)
参考文献	(222)
第九章 厌氧处理技术新进展	(223)
9.1 概述	(223)

9.2 升流式厌氧污泥床反应器	(223)
9.2.1 UASB 反应器的构造	(223)
9.2.2 UASB 反应器的运行性能	(225)
9.2.3 UASB 反应器基质降解动力学模型	(233)
9.2.4 UASB 反应器的设计	(237)
9.2.5 设计实例	(248)
9.3 膨胀颗粒污泥床反应器	(250)
9.3.1 EGSB 反应器的基本构造与工作原理	(250)
9.3.2 EGSB 反应器的运行性能	(251)
9.4 内循环厌氧生物反应器	(251)
9.4.1 IC 反应器的基本构造与工作原理	(252)
9.4.2 IC 反应器的运行特性	(252)
9.4.3 IC 反应器的国内外发展前景	(253)
9.5 厌氧流化床	(254)
9.5.1 厌氧流化床的研究现状	(254)
9.5.2 固体流态化的原理	(255)
9.5.3 流化床上升流速的控制	(256)
参考文献	(259)
第十章 生物脱氮除磷技术新进展	(261)
10.1 概述	(261)
10.2 短程硝化-反硝化工艺	(261)
10.2.1 Sharon 工艺的概念	(261)
10.2.2 Sharon 工艺的原理	(261)
10.2.3 Sharon 工艺的技术要点	(266)
10.3 厌氧氨氧化工艺	(274)
10.3.1 厌氧氨氧化工艺的概念	(274)
10.3.2 厌氧氨氧化工艺的原理	(274)
10.3.3 厌氧氨氧化工艺的技术要点	(285)
10.4 其他生物脱氮新工艺	(285)
10.4.1 好氧脱氮工艺	(286)
10.4.2 Canon 工艺	(289)
10.4.3 Oland 工艺	(290)
10.5 废水生物除磷工艺进展	(290)
10.5.1 概述	(290)
10.5.2 UCT 工艺	(290)
10.5.3 M-UCT 工艺	(290)
10.5.4 BCFS 工艺	(291)
10.5.5 A ² N 工艺	(291)
10.5.6 PASF 工艺	(292)
参考文献	(292)

第一章 绪 论

1.1 概述

水是地球上的宝贵资源，是一切生命赖以生存的基本物质。地球表面的 70% 被水覆盖。但当中 97.5% 是咸水，余下的大部分是冰山、冰川或终年的积雪。支撑着全人类生存的淡水，只占全球水量不到 1%。在 20 世纪，全世界用水量的增长率是人口增长的两倍。目前全世界有十多亿人没有洁净的饮用水，每年有 220 万人死于与污水或恶劣卫生条件相关的疾病；到 2050 年，预计全世界会有大约 70 亿人面临用水短缺。联合国把 2003 年定为国际淡水年，就是希望提高人们对这个问题的了解和重视，改变现行的、不可持续发展的做法和政策。正如联合国前秘书长安南所说，水是我们 21 世纪生存与可持续发展的生命线。

保护水环境、进行水污染控制与废水资源化，以及提高淡水资源利用率研究，是解决水资源、水环境危机并实现社会、经济、环境协调可持续发展的重要途径。废水处理技术是水污染控制的重要方面，是实现废水资源化，保护水环境的重要手段。

废水处理技术根据处理方法分类，主要可分为化学处理技术、物理处理技术、生物处理技术等。而废水生物处理技术是目前世界上废水处理最有效方法之一，本书将主要阐述废水生物处理技术及其机理。

1.2 废水处理理论进展

在自然界中，微生物种类繁多，分布极广。水体中含有微生物所需的各种营养，因此也是微生物的天然生长环境。水体中微生物除天然栖居者外，也有外来者，其中包括某些病原微生物。由外界进入水体的微生物，可因环境条件不适应而逐渐死亡，也有部分微生物较长期地生存下来。微生物在其生命活动过程中，不断地从外界环境中摄取营养物质，并通过代谢作用，将废水中污染物质去除。废水生物处理技术即通过采用一定的人工措施，创造有利于微生物生长繁殖的环境，使微生物大量繁殖，以提高微生物氧化分解有机物能力的技术。目前废水生物处理方法可分为好氧处理法和厌氧处理法。好氧处理法可根据微生物的状态（即悬浮状态或是附着于某种填料）又可分为活性污泥法和生物膜法。

1.2.1 活性污泥法机理研究进展

(1) 活性污泥法去除有机物质的生物机理 从 19 世纪 20 年代开始，出现了很多活性污泥法去除污水中有机物质机理的理论假设。Arden 和 Locke 等人在初期研究中认识到物理、化学和生物过程，对有机物的去除均起到了不同程度的作用。现已被证实的理论，如絮凝理论、吸附理论、胶体理论、微生物理论、酶化学理论等都可以对这些假设进行解释。虽然早期吸附理论在一段时间内占据废水处理理论的主导地位，但在 1923 年，Buswell 和 Long 等人提出了生物去除机理。他们认为活性污泥是由各种胶集的丝状和单细胞细菌及其他生物组成，微生物通过对污染物

中可利用物质的摄取和同化,来完成对污水中有机污染物的转化过程。他们的理论后来广泛得到接受,至今仍未受到本质上的质疑。McKee 和 Fair 等人于 1942 年提出,污染物质的去除是由相互区别但又相互联系的物理过程和生物过程组成的。就生物机理而言,废物中有机物质的去除是多种机理作用的结果。

①维持理论:该理论认为基质的消耗是用于生物的生长和维持,由 Duleaux 在 1898 年提出。50 年之后,Monod (1950) 第一次在实验的基础上证明了基质与微生物生长速率的依赖关系。1965 年, Pirt 的实验结果进一步地证实了维持理论。

②贮存-代谢理论:该理论认为并非所有被结合到生物絮体中的底物,都转化为细胞物质,其中有一部分是以贮存物质的形式存在。转移过程可能是通过生物絮体的捕集、粘附等严格的物理过程实现,然后被活性生物体吸附和吸收成为贮存物质,逐渐通过生长过程被降解利用。

③内源呼吸理论:1953 年, Porges 等发现微生物在无基质存在的情况下也能消耗氧气。他们提出内源呼吸理论,也就是微生物依赖自身组织进行氧化作用。1958 年, Herber 同样在发现的基础上提出了微生物生长与内源呼吸表达式。由于它与 Pirt 所提出的表达式很相似,所以就被命名为 Herbert-Pirt 方程。1962 年 Dawes 和 Ribbon 进一步阐述内源呼吸理论。经过一系列的实验研究,他们认为当无外在基质时,微生物内源呼吸实质是消耗胞内贮存物,如糖源及聚羟基烷酸 (PHA),以达到维持的目的。

④存活-非存活理论:存活-非存活细胞代谢理论由 Jones 于 1973 年提出。该理论认为活性污泥系统中的微生物大都处于静止生长或内源呼吸阶段,细胞自溶和丧失存活力的现象极为普遍。存活力并非生物活性的先决条件,生物活性可因细胞破裂、酶的溢出而得到增强。较大程度的生物活性是由这些非存活细胞提供的。非存活细胞的代谢作用使有机物的降解可在不伴随微生物量增加的情况下发生。

⑤死亡-再生理论: Kountz 和 Forney (1959)、Mckinney (1960)、Washington 和 Symons (1962) 都在各自的研究基础上提出了死亡-再生理论,认为微生物增殖过程是微生物先衰亡,然后细胞的衰亡产物被微生物生长所利用。1974 年, Grady 和 Roper 提出微生物衰亡包括死亡和溶菌两个过程,可同时或先后发生。1980 年, Dold 等人就以死亡-再生理论为基础建立了活性污泥模型,同时他们意识到维持或内源呼吸也可能起到作用。

(2) 活性污泥法生物脱氮机理 脱氮是当今污水处理中的一项重要内容。早在 19 世纪末,就首次报道过有关微生物氨氧化 (1890) 以及硝酸盐或亚硝酸盐的还原作用 (1892)。20 世纪初 Kluyver、Donder (1926) 以及 Beijerinck、Minkman (1910) 分别提出了硝化和反硝化概念,之后这一机理得到了全面的发展,成为公认的常规脱氮理论。

尽管对于有关微生物的研究长达 1 个世纪,但是有关氮转化的争论和推测的报道仍然不断出现。早在 1975 年, Voets 等在处理高浓度氨氮废水的研究中,发现了硝化过程中 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累的现象,首次提出了短程硝化反硝化生物脱氮的概念。其基本原理是将氨氮氧化控制在亚硝化阶段,然后通过反硝化作用将亚硝酸氮还原为氮气,经 $\text{NH}_4^+ - \text{N} \rightarrow \text{NO}_2^- - \text{N} \rightarrow \text{N}_2$ 这样的途径完成。短程硝化反硝化过程,因具有时间短、耗能低、泥量少等优点,引起了国内外有关学者的关注。此外还涌现出较多新报道,例如:好氧反硝化和异养硝化 (Robertson 和 Kuenen, 1990; Muller 等, 1995)、厌氧氨氧化 (Mulder 等, 1995)、硝化自养菌的反硝化 (Bock 等, 1995; Schmidt 和 Bock, 1997) 以及同步反硝化理论等。

(3) 活性污泥法除磷机理 传统的活性污泥生物除磷方法主要就是使污水分别通过厌氧阶段和好氧阶段,利用厌氧释磷和好氧大量吸磷的过程,达到除磷的目的。20 世纪 60 年代, Levin 和 Shapiro 首次提出一种描述污水生物过渡除磷现象的生化机理,认为除磷现象通过 Emden-Meyerhof 途径和三羧循环实现,同时以长链无机聚磷的形式被生物过量贮存。1966 年, Harold 提出了

Harold 假说,认为微生物对聚磷的合成与分解是在聚磷酶催化作用下进行的,而且聚磷产生有可能是微生物受到厌氧抑制的结果。1979年,Nichols 和 Osborn 发展了 Harold 的假说,同时还发现聚 β -羟基丁酸 (PHB) 对微生物在厌氧区的生存起着重要作用。之后,人们逐渐发现存在一类特殊的兼性细菌,能在好氧条件下过度吸磷,并将之命名为聚磷菌 (简称 PAO)。

20 世纪 80 年代,生物除磷机理研究进一步发展,其中主要的就是 Comeau-Wentzel 模式和 Mino 模式。这两种模式对生物除磷系统中聚磷菌主要生化途径的描述是一致的。聚磷菌在厌氧或好氧条件下,吸收或分解胞内物质,使细胞内 ATP 和 ADP 的质量比下降或增加,从而引起聚磷酸盐发生分解或合成。但他们的主要区别是 PAO 能否在厌氧条件下利用糖原为乙酸转化成 PHB 提供还原力。

20 世纪 90 年代后,人们不仅逐渐开始进行以葡萄糖作为主要基质的相关研究 (Carucci 等, 1999 年; Jeon 等, 2000 年; Wang 等, 2002 年),而且更关注系统中其他菌种的存在对除磷的影响,提出了聚糖菌和反硝化除磷菌。Cech 和 Hartman 发现并提出存在一种聚糖菌 (简称 GAO) 与聚磷酸菌发生厌氧有机碳积累的竞争 (Cech 和 Hartman, 1993 年),但这种 GAOs 抑制模式也存在很大争议 (Liu 等, 1996 年; Fang, 2002 年; Suguru Okunuki 等, 2004 年)。2003 年, Zeng 等研究发现存在反硝化聚糖菌 (DGAO),在厌氧阶段发生着与聚糖菌相似的过程,缺氧条件能利用硝酸盐或亚硝酸盐作为电子受体进行 PHA 的氧化作用。

随着人们对聚磷菌自身对硝酸盐的作用的思考和研究,从 20 世纪 80 年代后期开始逐渐发现存在着反硝化除磷菌,简称 DPB (Gerber 等, 1987; Comeau 等, 1987; Kerrn-Jespersen 和 Henz, 1993)。DPB 在缺氧 (无氧气但有硝态氮) 条件下,能利用硝态氮作为电子受体,同好氧状态一样产生吸磷的作用。在吸磷的同时硝酸盐被还原为氮气。荷兰 Delft 工业大学的 Kuba 等人对 DPB 做了一系列的研究工作 (Kuba 等, 1993, 1994, 1996, 1997; Wachtmeister 和 Kuba 等, 1997)。

Lopez (2006) 等对长期处于饥饿状态下的强化生物除磷内源过程的研究结果表明,好氧和厌氧条件下出现了不同的现象:好氧条件下聚磷菌会发生 PHA、糖原和聚磷的先后利用以维持细胞,同时出现了明显的 PAO 衰减现象;厌氧条件下发生聚磷和糖原的先后分解以维持能量的需要。但在整个实验过程中,磷的吸收和释放、MLVSS 浓度和损坏的细胞数等,仍是一个常数。其结论认为,糖原的分解是经由“3HV 发酵”过程转化成 PHA 的,应该用不同的机理和模型描述强化生物除磷系统中好氧和厌氧条件下的内源过程。2006 年, Lopez-Vazquez 等及 Filipe (2001)、Zeng (2003) 的研究,均提出聚糖菌能在厌氧条件下发生糖原水解成 PHB 和 PHV 的作用以达到维持的目的。

1.2.2 生物膜法机理研究进展

生物膜法被作为一种高效的废水处理方法,其结构形态特征直接影响着处理功能的发挥。20 世纪 70 年代以前,生物膜法处理仅在实验室进行技术性探索,80 年代后逐渐由“技术性”转入对生物膜的结构及传质特性的研究,特别是生物膜的传质理论是近年关注的热点研究领域。

(1) 生物膜的组成与微生物种群分布特征 生物膜被定义为一种活跃地生长发育着的单一或混合微生物群体,并不可逆地附着在一种活跃或非活跃的表面。生物膜一般由微生物细胞和胞外聚合物所组成。1998 年, Jahn 等对三个不同重力的下水管道生物膜生物量组成,进行的研究表明,细胞生物量仅仅是生物膜中有机物质的微小部分,70%~90% 总有机碳存在于细胞外。胞外聚合物的主要组分是蛋白质和多糖,不同环境条件下形成的胞外聚合物的化学组成不同。在污水生物膜中,胞外聚合物可以由细菌产生,可能为水解产物,或是从废水中吸附的离子,也可能是来自废水的有机纤维物。胞外多聚物作为支撑物质使多种微生物能长时间地固定在膜的某一特定

位置,使不同微生物在底物的选择和利用方面专一性更强,并使一些具有互利关系的微生物相互接近,实际上形成了一种功能多样化、协同分工的微生物共生体,包括细菌、真菌和藻类(在有光条件下)、原生动物和后生动物,这些微生物聚集在一起形成了一种复杂稳定的生态体系。

微生物在胶体基质的某一位置停留时间较长,可形成较稳定的生态,这种营养关系使食物链延长,生物相更加多样化,种类多样的微生物聚集在一起形成微生物群体。研究表明,在不添加接种污泥的条件下,载体上微生物的附着生长主要可分为适应期、增长期以及稳定期3个阶段,不同阶段微生物相的种群分布不同,各有其特征微生物存在。适应期阶段的填料上基本上无生物膜生长,仅有少量丝状菌开始繁殖;增长期以丝状真菌为主,同时有少量短杆菌,出现以累枝虫属为主的原生动物和少量的线虫属、轮虫属等后生动物,生物膜所特有生物群落分布逐渐形成;处于稳定期阶段的生物膜则由大量丝状菌组成,累枝虫属等原生动物的量也有明显增加,微生物种群分布进一步完善,相对稳定的生物群落分布逐渐形成。

生物膜作为一个功能化的有机体,其种群的分布是按照系统的各种功能需求而优化组成的。生物膜的种群分布不是种群间的一种简单组合,而是根据生物整体代谢功能最优化原则的有机组成而配置的。生物膜系统中种群分布具有如下特征:厌氧和兼性厌氧菌的比例高;丝状微生物数量较多;存在较高等的微型动物,如轮虫、线虫、蜗牛等,它们具有松散生物膜和促进生物膜脱落的功能,从而使生物膜不断更新,经常保持良好的活性和净化功能;成层分布,即随着反应器内负荷的变化(污染物浓度的变化),其中微生物(细菌、原生动物、后生动物等)的种类逐渐增多,但个体数量减少。

(2) 生物膜形态与结构 生物膜在载体表面的分布是不连续和非均相的,孔洞、沟渠结构在生物膜中是普遍存在的,其厚度分布也是不均匀的。用光学显微镜观察,发现生物流化床中的生物膜发育成熟前后的形态明显不同。发育成熟后,生物膜均匀分布于载体颗粒表面,越靠近载体上的颗粒越致密。根据比例尺测得的膜厚度约为 $60\sim 80\mu\text{m}$ 。扫描电镜照片显示,成熟生物膜的形态和微生物种类具有一定的多样性,生物膜表面有一些可能深入到内部的孔洞或沟渠结构。

Villaseñor 等研究了不同碳源基质对生物膜形成的影响,发现生物膜的结构取决于培养基质的类型。Hermanowicz 认为,浓度和水力边界层的厚度对生物膜结构的影响非常重要,当外部传质限制显著时,生物膜会发育成开放的结构,当浓度边界层减小、外部传质加强时则生物膜的厚度增加。

(3) 生物膜形成影响因素 生物膜发育形成的条件和时间序列大致为:①存在着清洁的可用于聚居的固体表面;②一种有机分子膜快速形成;③聚结的细胞松散地附着;④聚居的细菌牢固地附着;⑤微生物群落形成,产生胞外聚合物;⑥群落向上和向外扩展,形成规则和不规则结构;⑦生物膜成熟,新的菌种进入生物膜并生长,有机和无机碎片被结合,并且溶液梯度形成,导致了生物膜空间的异相结构;⑧生物膜可能被噬细菌的原生动物捕食;⑨成熟的生物膜可以脱落,使这种循环交替地重复进行;⑩形成了一种顶级群落。

水文条件、基底类型、营养水平、光照、温度等是水环境中形成生物膜的最主要的影响因素。高流速使生物膜易于形成单层结构,而低流速使生物膜形成复杂结构,基底粗糙性和河水高流速相结合,可以极大地增加生物膜的生物量。在水库淡水系统中,光照条件下(120h)的生物膜厚度从 $52\mu\text{m}$ 增加到 $128\mu\text{m}$,而无光照条件下的生物膜厚度为 $17\sim 30\mu\text{m}$ 。生物膜内颗粒物大小的分布也存在显著差异:无光照生物膜中,小颗粒物分布较多,光照生物膜的生物量、叶绿素和其他组分较高,硅藻的数目也较多。此外,随着水深度增加,膜上主要化学物质的含量也在逐渐降低,说明光是影响生物膜形成的主要因素之一。自然水体温度低于 4°C 时,很难形成生物膜,随着水体温度的增加,膜上的生物量越来越多。不同水体培养的生物膜,由于水体环境的差异,膜上主要化学物质(金属氧化物、有机质等)的组成差异也很大。

目前,对有关生物膜的许多机理和作用的研究还不甚成熟,生物膜内的物质循环、生物膜的群落结构和功能,以及影响生物群落的物理化学和生物学因素等方面的研究,都有待继续深入探索。随着生物膜研究的深入和进步,生物膜在自然环境和废水生物处理中将发挥越来越重要的作用。

1.2.3 厌氧处理机理研究进展

废水的厌氧生物处理,国际上称厌氧消化,有机物厌氧消化过程分为酸性发酵和碱性发酵两个阶段。

在第一阶段,复杂的有机物,如糖类、脂类和蛋白质等,在产酸菌(厌氧和兼性厌氧菌)的作用下被分解成为低分子的中间产物,主要是一些低分子有机酸,如乙酸、丙酸、丁酸等,和醇类,如乙醇等,并有 H_2 、 CO_2 、 NH_4^+ 和 H_2S 等产生。因为该阶段中,有大量的脂肪酸产生,使发酵液的 pH 值降低。所以,此阶段被称为酸性发酵阶段,或称产酸阶段。

在第二阶段,产甲烷菌(专性厌氧菌)将第一阶段产生的中间产物继续分解成 CH_4 和 CO_2 等。由于有机酸在第二阶段不断地被转化为 CH_4 和 CO_2 ,同时系统中有氨时,使发酵液的 pH 值不断升高。所以,此阶段被称为碱性发酵阶段,或称产甲烷阶段。

厌氧消化过程两阶段理论这一观点,几十年来一直占统治地位,在国内外有关厌氧消化的专著和教科书中一直被广泛应用。随着厌氧微生物学研究不断进展,人们对厌氧消化的生物学过程和生化过程的认识不断深化,厌氧消化理论得到不断发展。

M. P. Bryant (1979) 根据对产甲烷菌和产氢产乙酸菌的研究结果,认为两阶段理论不够完善,提出了三阶段理论。三阶段理论如图 1-1 所示。

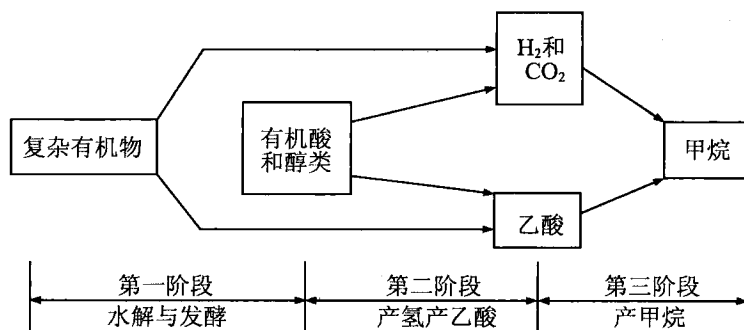


图 1-1 三阶段厌氧消化过程示意图

该理论认为产甲烷菌不能利用除乙酸、 H_2 和 CO_2 、甲醇等以外的有机酸和醇类,长链脂肪酸和醇类必须经过产氢产乙酸菌转化为乙酸、 H_2 和 CO_2 等后,才能被产甲烷菌利用。三阶段理论包括:

第一阶段为水解与发酵阶段。在该阶段,复杂的有机物在厌氧菌胞外酶的作用下,首先被分解成简单的有机物,如纤维素经水解转化成较简单的糖类;蛋白质转化成较简单的氨基酸;脂类转化成脂肪酸和甘油等。继而这些简单的有机物在产酸菌的作用下经过厌氧发酵和氧化转化成乙酸、丙酸、丁酸等脂肪酸和醇类等。参与这个阶段的水解发酵菌主要是厌氧菌和兼性厌氧菌。

第二阶段为产氢产乙酸阶段。在该阶段,产氢产乙酸菌把除乙酸、甲酸、甲醇以外的第一阶段产生的中间产物,如丙酸、丁酸等脂肪酸,和醇类等转化成乙酸和氢,并有 CO_2 产生。

第三阶段为产甲烷阶段。在该阶段中,产甲烷菌把第一阶段和第二阶段产生的乙酸、 H_2 和 CO_2 等转化为甲烷。

几乎与 Bryant 提出三阶段理论的同时, J. G. Zeikus (1979) 在第一届国际厌氧消化会议上提

出了“四种群说”理论，该理论认为复杂有机物的厌氧消化过程有四种群厌氧微生物参与，这四种群即是：水解发酵菌、产氢产乙酸菌、同型产乙酸菌（又称耗氢产乙酸菌）以及产甲烷菌。图 1-2 表达了“四种群说”关于复杂有机物的厌氧消化过程。

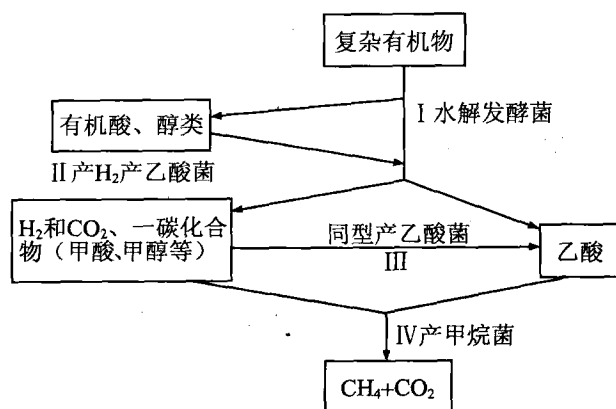


图 1-2 “四种群说”有机物厌氧降解示意图

由图 1-2 可知，复杂有机物在第 I 类种群水解发酵菌作用下被转化为有机酸和醇类。第 II 类种群产氢产乙酸菌把有机酸和醇类转化为乙酸、 H_2 和 CO_2 、一碳化合物（甲醇、甲酸等）。第 III 类种群同型产乙酸菌能利用 H_2 和 CO_2 等转化为乙酸，一般情况下这类转化数量很少。第 IV 类种群产甲烷菌把乙酸、 H_2 和 CO_2 和一碳化合物（甲醇、甲酸）转化为 CH_4 和 CO_2 。

从两阶段说发展到三阶段说和“四种群说”过程，是人们对有机物厌氧消化不断深化认识的过程。这也从侧面反映出，有机物厌氧消化过程是一个由许多不同微生物菌群协同作用的结果，是一个极为复杂的生物化学过程，涉及厌氧微生物，厌氧生物化学和能量代谢等问题。

1.3 废水处理工艺进展

1.3.1 活性污泥处理工艺进展

1914 年英国学者 Arden 和 Locket 发现，把曝气后的污水静止沉淀，只倒去上层清液，留下瓶底污泥供下次处理使用，可大大缩短处理废水的时间。他们将这些污泥命名为活性污泥。这个试验的工艺化便是 1916 年建成的第一个活性污泥法污水处理厂。活性污泥法是世界各国普遍采用的传统废水生物处理工艺，对水体污染的防治发挥着良好的作用。但由于近年来废水量的急剧增加以及对废水排放标准日益严格，传统工艺对处理的多功能性、高效稳定性和经济合理性方面已难以满足不断提高的要求，改进并完善现有工艺、发展高效节能新技术已经成为当今世界上废水处理技术的发展方向。氧化沟、SBR、AB 及在以上工艺发展起的一批新工艺克服了传统工艺的功能单一缺陷，使废水处理更高效、稳定和节能，更具实用性，自动化水平也日趋完善。近年来，活性污泥法污水处理技术取得很大进展，但人们仍在不断地致力于高效、低耗、占地少的新工艺的开发研究。

20 世纪 60 年代初，由荷兰卫生工程研究所的帕斯维尔博士通过研究和设计，首先开发了氧化沟技术，它是常规活性污泥法的一种改型和发展。世界各地的实践表明，氧化沟技术既适用于城市污水的处理，也适用于工业废水的处理；既适用于小型污水处理厂，也可用于大中型污水处理厂。氧化沟工艺又有多种变型，包括奥贝尔（Orbal）型氧化沟、Carrousel 氧化沟及改良型 Carrousel 氧化沟、DE 型氧化沟及双沟 DE 型氧化沟、三沟式氧化沟及改进型三沟式氧化沟等。

20 世纪 70 年代初, 美国 Natre Dame 大学 R. Irvine 教授, 采用实验室规模装置对间歇式活性污泥法的运行特性, 作了系统的比较研究, 详细定义和描述了序批式间歇反应器 (SBR)。典型 SBR 工艺是一个间歇运行的污水处理工艺, 分为 5 个运行阶段: 进水阶段、反应阶段、沉淀阶段、排水阶段和闲置阶段, 污水进入反应池后需要依次经过这 5 个阶段。随着科技水平的发展和人们对于水质要求的提高, 又先后研发出一系列 SBR 衍生工艺, 如 ICEAS、如间歇循环延时曝气活性污泥法 (ICEAS), 循环式活性污泥法 (CAST), 周期循环活性污泥法 (CASS), DAT—IAT 法, MSBR 法, UNITANK 系统等。

目前废水生物脱氮除磷技术得到了较快的发展, 已有研究发现 SBR、氧化沟具有脱氮除磷的功能, 但是效果并不是非常明显, 须在合适因素的调控下, 才可实现良好的脱氮除磷效果。国内外研究者根据生物污染物去除机理, 改良已有的生物法使其脱氮除磷功能更加完善, 并正在越来越多地应用于废水处理过程, 包括有 A/O 工艺、A/A/O 工艺、Phostrip 工艺、Bardenpho 工艺、Phoredox 工艺、UCT 工艺等。其中 A/O 工艺和 A/A/O 工艺目前被广泛地应用于污水处理厂。

1.3.2 生物膜处理工艺进展

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, 1893 年, 英国在粗滤料上喷洒污水进行净化试验, 取得良好的净化效果, 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。

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池。与微生物处于悬浮生长状态的活性污泥法相比, 生物滤池具有生物量高和净化效果较好等优点。但由于其水量负荷和 BOD 负荷均较低、环境卫生条件也较差、处理构筑物占地面积较大且有可能被脱落的生物膜堵塞等缺点, 在 40~50 年代生物滤池有逐渐被活性污泥法取代的趋势。

在此期间, 生物滤池的填料主要是碎石、卵石、炉渣和焦炭等实心拳状的无机性天然滤料, 一般具有比表面积小、空隙率低等缺点。到了 20 世纪 60 年代, 新型有机合成材料开始大量生产, 广泛使用的有用聚乙烯、聚苯乙烯和聚酰胺等制成的波纹板状、列管状和蜂窝状等有机人工合成填料, 其比表面积、空隙率大大增加。到了 70 年代, 除了普通生物滤池 (Trick Filters, 也称滴滤池) 外, 生物转盘 (RBC)、淹没式生物 (Submerged Biofilm Reactor) 和生物流化 (Fluidised Bed) 技术, 都得到了比较多的研究应用。近年来, 生物膜反应器以其独特的优势更受广大研究者和工程师们的关注, 又涌现出大量新型的单一或复合式生物膜反应器 (Hybnd bio-reactor), 如微孔膜生物反应器 (Membrane Biofilm Reactor)、气提式生物膜反应器 (Air-lifts)、移动床生物膜反应 (Moving Bed Biofilm Reactor)、复合式活性污泥生物膜反应器 (Hybrid Activated Sludge-Biofilm Reactor)、序批式生物膜反应器 (Sequencing Batch Biofilm Reactor)、升流式厌氧污泥床—厌氧生物滤池 (UASB—AF) 及附着生长稳定塘 (Attached-growth Ponds) 等。

由此可见, 生物膜反应器发展迅速, 由单一到复合, 有好氧也有厌氧, 逐步形成一套较完整的污水生物处理工艺系列, 可将其系统划分如下: