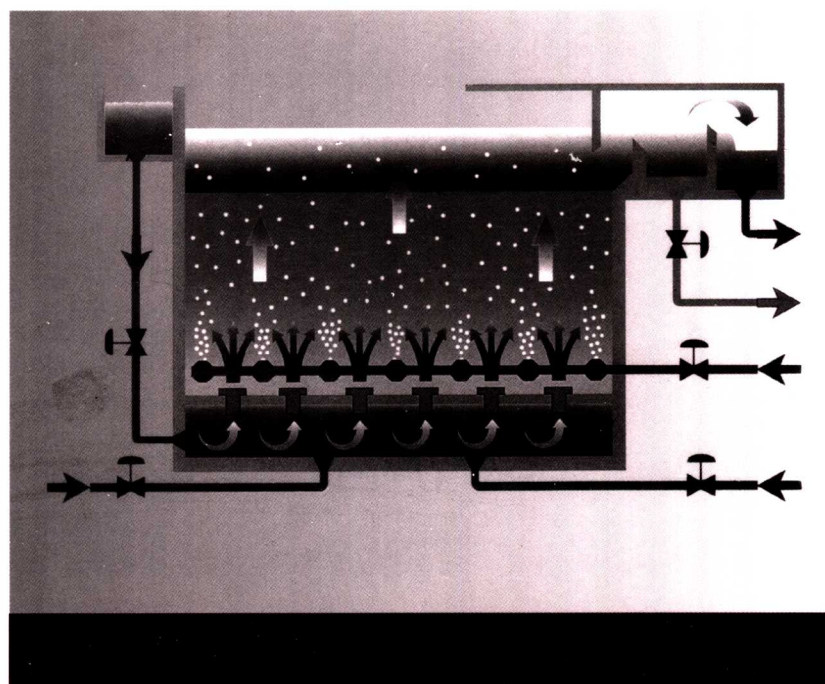


郑俊 吴浩汀 编著

# 曝气生物滤池工艺的理论 与工程应用



Chemical Industry Press



化学工业出版社  
环境科学与工程出版中心

# 曝气生物滤池工艺的理论 与工程应用

郑俊 吴浩汀 编著



化学工业出版社  
环境科学与工程出版中心

·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

曝气生物滤池工艺的理论与应用/郑俊, 吴浩汀  
编著. —北京: 化学工业出版社, 2004. 10  
ISBN 7-5025-6178-1

I. 曝… II. ①郑…②吴… III. 曝气池-工艺  
IV. X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 107100 号

---

曝气生物滤池工艺的理论与应用

郑俊 吴浩汀 编著

责任编辑: 陈丽 徐娟

文字编辑: 焦欣渝

责任校对: 李林

封面设计: 蒋艳君

\*

化学工业出版社 出版发行  
环境科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010)64982530

<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销

化学工业出版社印刷厂印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 26 $\frac{1}{4}$  字数 664 千字

2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6178-1/X·539

定 价: 60.00 元

---

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

## 前 言

随着现代工业和城市建设的发展,我国城市的环境污染特别是水污染问题日趋严重;同时我国是一个人均水资源占有量匮乏的国家,可以说水污染严重和水资源的短缺已经成为严重制约我国社会经济持续发展、危害生态环境、影响人民生活 and 身体健康的突出问题,迫切需要加以解决。

由于城市污水处理主要是一项侧重于环境效益和社会效益的工程,在建设和日常运行过程中常常受到资金的限制,同时随着城市发展步伐的加快及城市区域的拓展,地价上涨,土地使用也成为污水厂建设的制约因素之一。因此,开展经济有效的污水处理新工艺、新设备的研究与开发,研究一种适合我国国情的污水处理新工艺,从而降低污水处理的投资和运行费用,节省用地,方便管理,使出水能够回用,将对我国国民经济和社会发展及环境保护具有十分重要的意义,而且也必将有其巨大的应用范围和市场。实践表明,曝气生物滤池工艺是最为经济有效的城市污水处理方法之一。

虽然在污水生物处理工艺的发展和应用中,活性污泥法一直占据主导地位,但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,既独立又可以结合到污水处理的各种其他工艺中。这是由于生物膜法具有诸多优点:处理效率高,耐冲击负荷性能好;体积小,占地面积少,便于运行管理;不存在活性污泥法的污泥膨胀问题;可以维持较高的污泥龄,生物相相对丰富稳定,具有较高的微生物量,污水停留时间较短;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。因此,近年来国内外许多研究者和工程技术人员都进行了大量的研究和工程实践,并取得了丰硕的成果,而曝气生物滤池就是这样的生物膜法新工艺的代表。

本书重点介绍了笔者近年来在曝气生物滤池技术的研究和工程应用上的探索和实践。首先对生物膜法的发展进行了介绍,然后着重介绍了近年来笔者对该技术的理论研究,并且对该技术的特点、工艺机理、工程计算和设计、自动控制系统、运行调试和管理也进行了详尽的叙述,同时通过工程实例对该技术在不同行业实际工程中的应用进行了介绍和分析。我们期望本书的出版对国内有关人员进一步研究和应用曝气生物滤池技术起到积极的作用,以产生较大的经济效益和社会效益。

本书第一、二、三、四、六、七、十一、十三、十五、十六章由郑俊编写,第五章由吴浩汀、徐亚明、郑俊编写,第八章由叶昌明编写,第九章由郑俊、陈祥宏编写,第十章由吴浩汀、朱建文、郑俊编写,第十二章由郑俊、陈庆军编写,第十四章由任德胜、徐忠、柯文军编写。全书由郑俊统编、定稿。

本书在编写过程中,安徽工业大学的蔡建安教授、王健副教授和马鞍山市华骐环保科技发展有限公司的刘光春、王爱斌等同志对本书的编写提供了大量资料并给予了很大的帮助;同时本书的编写也得到了马鞍山市华骐环保科技发展有限公司、龙科信环保投资控股(香港)有限公司、深圳市清泉水系统工程设备有限公司、南京龙源环保有限公司、济南捷丰环

境科技有限公司、北京汇恒环保工程有限公司等单位的大力支持，谨在此表示衷心感谢。

本书涉及曝气生物滤池技术的许多新工艺，由于作者水平有限、经验不足，书中难免存在不妥之处，热忱欢迎同行和广大读者批评指正，联系方式为手机：13305551660，Email：zhengjun 6642@163.com，hq@hqhb.com。

编著者

2004年6月于安徽工业大学

# 目 录

<b>第一章 生物膜法工艺的发展</b> .....	1
<b>第一节 污水的生物处理</b> .....	1
一、活性污泥法.....	1
二、生物膜法.....	2
<b>第二节 生物膜法的历史及其发展</b> .....	2
<b>第三节 生物膜法类型及技术现状</b> .....	5
一、生物膜反应器的发展沿革.....	5
二、生物膜反应器的类型与技术现状.....	6
<b>第四节 普通生物滤池</b> .....	9
一、普通生物滤池的构造.....	9
二、普通生物滤池法的工艺流程.....	11
三、普通生物滤池的机理.....	13
四、其他形式的生物滤池.....	14
五、普通生物滤池的计算.....	15
六、普通生物滤池系统的功能设计.....	16
七、普通生物滤池的运行及其经验.....	17
<b>第五节 厌氧生物滤池</b> .....	18
一、厌氧生物膜的形成及其作用.....	18
二、厌氧生物膜法和厌氧生物滤池的特点.....	18
三、厌氧生物滤池的结构与工作原理.....	19
四、厌氧生物滤池中的微生物.....	20
五、厌氧生物滤池的主要影响因素.....	21
六、厌氧生物滤池的工艺设计.....	22
<b>第六节 曝气生物滤池</b> .....	23
一、我国曝气生物滤池技术开发的背景、意义.....	24
二、曝气生物滤池的构造.....	24
三、曝气生物滤池与普通生物滤池的工艺性能比较及其工作机理.....	29
四、曝气生物滤池与其他处理工艺的比较.....	31
<b>第二章 曝气生物滤池中的微生物膜</b> .....	34
<b>第一节 微生物膜及其特性</b> .....	34
一、微生物膜及其形成过程.....	34
二、微生物膜的特性.....	35
三、生物膜的界面特征.....	37
<b>第二节 微生物膜在滤料载体表面的固定</b> .....	37
一、微生物膜固定的过程.....	38

二、影响微生物膜固定的因素 .....	39
第三节 微生物膜净化污水机理 .....	40
一、微生物膜中的生物相及参与净化的微生物群 .....	40
二、微生物膜及其降解有机物的机理 .....	45
三、液相中物料的传递 .....	46
四、生物膜内的传递与反应 .....	47
五、微生物增殖动力学 .....	49
六、生物膜法的特征 .....	49
七、生物膜法运行中的指标生物 .....	51
第四节 微生物膜分析技术 .....	51
一、生物膜的剥落 .....	51
二、生物膜干重 .....	52
三、生物膜总有机碳含量 .....	52
四、生物膜化学需氧量 .....	52
五、生物膜多聚糖 .....	52
六、生物膜总蛋白质 .....	52
七、生物膜中的磷脂测定方法 .....	53
八、生物膜厚度的确定 .....	54
第五节 影响生物膜法功能的主要因素 .....	55
一、温度 .....	55
二、pH值 .....	55
三、有机负荷及水力负荷 .....	55
四、溶解氧 .....	56
五、载体表面结构与性质 .....	56
六、生物膜量及活性 .....	56
七、有毒物质 .....	57
八、营养物质 .....	57
九、进水底物浓度 .....	58
十、水力剪切力 .....	58
第三章 曝气生物滤池中生物滤料的选择 .....	59
第一节 生物滤料的种类及性能 .....	59
一、无机类滤料 .....	59
二、有机类滤料 .....	62
第二节 生物滤料的选择原则 .....	63
一、生物滤料的物理特性 .....	63
二、生物滤料的物理化学特性 .....	63
三、水力学特性 .....	64
四、滤料的经济性 .....	64
第三节 球形轻质多孔生物陶粒的研发及产业化生产 .....	64
一、滤料的研制 .....	65

二、陶粒滤料的产业化生产 .....	67
第四节 生物陶粒与进口火山岩滤料的性能对比研究 .....	68
一、试验所用滤料的物理化学性能 .....	68
二、试验条件与方法 .....	69
三、试验装置及设备参数 .....	70
四、生物滤柱的启动 .....	70
五、对比试验结果 .....	71
六、分析与结论 .....	73
第五节 生物滤料的性能测试 .....	73
一、理化性能指标的测定 .....	73
二、物理力学性能指标的测定 .....	76
第四章 曝气生物滤池工艺流程 .....	82
第一节 曝气生物滤池工艺的发展简介 .....	82
第二节 曝气生物滤池的基本类型 .....	83
一、BIOCARBONE 生物滤池 .....	83
二、BIOSTYR 生物滤池 .....	86
三、BIOFOR 生物滤池 .....	88
第三节 曝气生物滤池处理污水工艺流程 .....	89
一、除碳工艺 .....	89
二、除碳/硝化工艺 .....	90
三、除碳/硝化/反硝化工艺 .....	92
四、除碳/除磷/脱氮工艺 .....	93
五、国外流行的完整 BIOFOR 工艺流程 .....	95
第五章 曝气生物滤池的脱氮研究 .....	97
第一节 生物除氮原理 .....	97
一、污水中氮的存在形式及来源 .....	97
二、污水中氮的去除方法 .....	97
三、曝气生物滤池中对硝化作用有关的影响因素 .....	101
四、曝气生物滤池反硝化作用的有关影响因素 .....	104
第二节 BAF 的同步硝化和反硝化工艺研究 .....	106
一、同步硝化和反硝化的理论 .....	106
二、BAF 的同步硝化和反硝化工艺研究 .....	106
第三节 BAF 的前置反硝化工艺研究 .....	112
一、研究方法 .....	113
二、试验研究结果 .....	113
三、前置反硝化工艺对 COD、NH <sub>3</sub> -N、TN 的去除分析 .....	114
四、影响出水水质的因素分析 .....	116
五、前置反硝化工艺去除有机物的动力学分析 .....	124
六、BAF 的同步硝化反硝化和前置反硝化工艺比较 .....	126
第六章 曝气生物滤池的除磷研究 .....	128



第一节 污水中磷的去除方法	128
一、物化法除磷	128
二、生物法除磷	130
第二节 曝气生物滤池中磷的去除方式	132
一、曝气生物滤池中的生物除磷现象	132
二、曝气生物滤池中的化学除磷	133
第三节 曝气生物滤池中的化学除磷研究	134
一、前置化学除磷试验研究	134
二、BAF 中的化学除磷试验研究	137
三、化学除磷药剂	139
<b>第七章 曝气生物滤池工艺设计</b>	<b>141</b>
第一节 曝气生物滤池处理流程及其选择	141
一、一段曝气生物滤池法	141
二、两段曝气生物滤池法	142
三、三段曝气生物滤池	143
第二节 曝气生物滤池处理系统及结构	144
第三节 曝气生物滤池的计算	145
一、待处理污水必须具备的基本条件	145
二、DC 曝气生物滤池的设计与计算	146
三、N 曝气生物滤池的设计与计算	155
四、DN 反硝化生物滤池的设计与计算	158
第四节 曝气生物滤池设计中必须考虑的影响因素	161
一、有机负荷	161
二、pH 值	162
三、水温	162
四、溶解氧	163
第五节 曝气生物滤池工艺设计和仿真运行的计算机虚拟设备	163
一、水环境工程的虚拟设备	163
二、曝气生物滤池的虚拟设备	166
<b>第八章 曝气生物滤池的自控系统</b>	<b>170</b>
第一节 BAF 工艺的运行控制特点	170
一、BAF 工艺控制的意义	170
二、BAF 对自动控制的基本要求	170
三、不同的 BAF 工艺组合对控制的要求	172
第二节 自控系统常用控制方法	173
一、集中式控制	173
二、分布式控制	174
三、分散式控制	174
第三节 BAF 自控系统设计	174
一、BAF 工艺控制原理	174

二、系统结构和组成	176
三、控制方式和主要测控点	178
四、配置及说明	178
第四节 采用BAF工艺的全厂自控系统	180
一、预处理及辅助处理工艺的控制原理	180
二、组成和结构	181
三、自控系统主要部分功能	183
四、自控系统主要设备、仪表选型	184
第九章 曝气生物滤池污水处理厂的运行调试和管理	187
第一节 污水处理工程的验收	187
一、工程验收组织与程序	187
二、工程初步验收的准备	187
三、工程验收的内容	187
第二节 工程的初步验收和调试	188
一、初步验收和单体试车的目的	188
二、初步验收和单体试车的条件	188
三、初步验收和单体试车内容	189
四、清(污)水联动试车	192
五、生化系统试车	194
第三节 曝气生物滤池污水处理厂的运行管理	195
一、污水处理厂工艺流程	195
二、项目组织机构、人员组成及分工	195
三、污水处理厂各处理单元的运行管理	196
四、水质分析与管理	209
五、污泥出泥管理	211
六、设备、管道、阀门的运营管理与维护	212
七、自动控制	222
八、系统更新和更换计划	223
九、安全管理	224
十、污水处理厂的技术经济指标	224
第四节 曝气生物滤池常规试验内容、分析项目与方法	225
一、曝气生物滤池常规试验内容	225
二、试验分析项目	225
三、分析方法	225
第五节 污水处理厂的运行管理制度	235
第十章 水解-曝气生物滤池工艺处理市政污水的研究	240
一、研究背景	240
二、水解-曝气生物滤池工艺基本原理及特点	241
三、试验研究工艺流程及研究内容	242
四、研究方法	244

五、水解工艺处理生活污水的研究·····	245
六、水解-曝气生物滤池工艺处理生活污水的研究·····	252
七、曝气生物滤池动力学模型·····	260
八、研究结论·····	262
<b>第十一章 水解-曝气生物滤池处理市政污水工程实例</b> ·····	263
实例一 广东省新会市东郊污水处理厂工程·····	263
实例二 江苏省宜兴市丁蜀污水处理厂工程·····	304
实例三 天钢东丽污水处理厂工程·····	312
<b>第十二章 曝气生物滤池在中水回用处理中的应用</b> ·····	319
第一节 水资源与水污染现状·····	319
一、全球水资源状况·····	319
二、我国水资源及其污染现状·····	320
第二节 国内外污水回用现状·····	321
一、国外城市污水回用现状·····	321
二、我国污水回用历程与现状·····	324
第三节 中水回用的目的和意义·····	325
一、“水贫困”制约经济发展·····	326
二、中水回用是缓解水资源紧张的重要途径·····	326
三、中水回用的发展前景·····	326
第四节 中水回用的原水水质分析·····	327
一、污水再生回用分类·····	327
二、水质指标的确定·····	328
第五节 中水回用的处理工艺选择·····	331
一、中水工艺流程特点·····	331
二、中水工艺流程适用性分析·····	332
三、中水处理工艺流程·····	333
第六节 中水回用处理工程实例·····	335
实例一 山西平朔煤炭公司中水回用工程·····	335
实例二 中国乐凯胶片集团中水回用工程·····	336
实例三 济南数码港小区污水处理回用工程·····	339
实例四 山东省卫生学校污水处理回用工程·····	341
实例五 北京市富海中心污水处理回用工程·····	343
<b>第十三章 曝气生物滤池处理小区生活污水工程实例</b> ·····	349
第一节 小区污水处理特点·····	349
第二节 国内外小区污水处理工艺综述·····	350
第三节 曝气生物滤池工艺应用实例·····	351
一、辽河油田机械修造公司红村污水处理工程概况·····	351
二、设计水量、水质及排放要求·····	351
三、处理工艺·····	352
四、工艺设计·····	353

五、污水处理站土建、设备	355
六、主要技术经济指标	355
七、运行结果	356
八、曝气生物滤池运行结果分析及相关问题探讨	356
<b>第十四章 曝气生物滤池在电厂污水处理回用中的研究及应用</b>	<b>360</b>
<b>第一节 概述</b>	<b>360</b>
一、电厂污水水质分析	360
二、电厂污(废)水处理的对策	362
<b>第二节 曝气生物滤池对电厂污水处理及回用试验</b>	<b>364</b>
一、试验背景	364
二、试验意义	364
三、试验工艺流程及规模	365
四、试验主要设备	365
五、试验内容和结果	365
六、问题讨论	369
七、中试结论	370
<b>第三节 曝气生物滤池在电厂污水处理回用中的应用实例</b>	<b>371</b>
实例一 青岛发电厂污水处理回用工程	371
实例二 北仑发电厂污水处理改造及回用工程	374
实例三 阜新发电厂污水处理改造及回用工程	374
<b>第十五章 曝气生物滤池处理啤酒废水工程实例</b>	<b>380</b>
<b>第一节 国内现有的啤酒废水处理工艺</b>	<b>383</b>
一、好氧处理工艺	383
二、水解(酸化)-曝气生物滤池处理工艺	385
<b>第二节 水解(酸化)-曝气生物滤池处理啤酒废水工程实例</b>	<b>386</b>
一、工程概况	386
二、方案选择	387
三、工程建设规模及水质要求	387
四、废水处理工艺流程	387
五、各处理单元的计算和设计	389
<b>第十六章 曝气生物滤池处理其他污水工程实例</b>	<b>400</b>
<b>第一节 猪场粪便污水处理工程</b>	<b>400</b>
一、国内外猪场粪污处理工程概况	400
二、猪场粪便污水处理的说明	401
三、上海东方种畜养猪场粪便污水处理工程介绍	402
<b>第二节 印染废水处理工程</b>	<b>409</b>
一、工艺流程的确定	409
二、主要处理构筑物及设备	409
三、处理效果	410
<b>第三节 肠衣加工废水处理工程</b>	<b>410</b>

一、工艺流程的确定.....	411
二、主要处理构筑物及设备.....	411
三、处理效果.....	412
第四节 淀粉废水处理工程.....	412
一、工艺流程的确定.....	412
二、处理效果.....	413
三、污水处理厂主要土建、设备.....	413
参考文献.....	414

# 第一章 生物膜法工艺的发展

## 第一节 污水的生物处理

在自然界中，存在着大量依靠有机物生活的微生物。它们不但能分解、氧化一般的有机物，并将其转化为稳定的化合物，而且还能转化部分有毒有机物。实际上，在工业废水的无害化处理过程中，不但可利用微生物处理有机毒物，还可用于处理由微生物营养元素构成的无机毒物。这些物质本身对微生物可能有一定的毒害作用，但组成这些物质的元素，有些是微生物自身生长所需，因此它们对微生物具有两重性，通过对其浓度的控制，毒物可以成为微生物的养料。

生物处理就是利用微生物分解氧化有机物的这一功能，并采取一定的人工措施，创造有利于微生物生长、繁殖的环境，使微生物大量增殖，以提高其分解氧化有机物效率的一种污水处理方法。根据微生物生存的环境是否需要氧的存在，污水的生物处理法分为好氧和厌氧两大类。好氧生物处理的前提是必须在有氧的情况下进行，而厌氧生物处理则必须保证无氧环境。由于好氧生物处理效率高，使用比较广泛，所以多用于处理中等浓度以下的城市污水和工业废水；厌氧处理对象主要是中、高浓度有机物废水和污水处理中所产生的污泥，污水在厌氧处理中所需停留时间比好氧处理要长。

污水好氧生物处理的主要去除对象是污水中溶解的和胶体状态的有机污染物，通过微生物的代谢作用予以转化和稳定，达到无害化。按照污水好氧生物处理反应器中微生物的生长状态，好氧生物处理还可划分为悬浮生长工艺和附着生长工艺。前者以活性污泥法为代表，包括氧化沟、SBR等变形工艺，微生物在曝气池内以呈悬浮状态的活性污泥的形式存在；而后者则以生物膜法为代表，包括生物滤池、接触氧化池、生物转盘等，微生物以膜状固着在某种载体的表面上。

### 一、活性污泥法

活性污泥法是依据污水的自净作用原理发展而来，污水在经过沉砂、初沉等预处理工艺后，去除了其中大部分悬浮物和其他无机物质（如砂粒等）后进入曝气池。池内生存有无数能氧化分解污水中有机污染物的微生物，采用人工强制供氧措施，以提供微生物所需的氧分，污水中的有机物被微生物吸附、氧化分解成无机物，随后进入后续的沉淀池，使呈絮状的微生物絮体——活性污泥下沉，与净化后的出水分离，上清液即可达标排放。

为了使曝气池保持高的反应速率，必须使曝气池内维持足够高的微生物浓度，为此沉淀后的微生物一部分又被回流到曝气池前端，使之与进入曝气池的污水接触，以重复吸附、氧化分解污水中的有机物。在这一正常连续生产（连续进水）条件下，活性污泥中微生物不断吸收污水中的有机物进行新陈代谢。由于合成作用的结果，微生物不断增殖，活性污泥数量不断增长，因此曝气池中活性污泥的量越积越多，当超过一定浓度时，应排掉部分剩余的活性污泥。

曝气池中水流是纵向混合的推流式，在曝气池前端，活性污泥同刚进入的污水相接触，有机物浓度相对较高，即供给活性污泥中微生物的食料较多，所以微生物的生长一般处于生

长曲线的对数生长期后期或稳定期。由于活性污泥法曝气时间较长，当活性污泥继续向前推进到曝气池末端时，污水中的有机物基本被耗尽，活性污泥中的微生物进入内源代谢期，其活动能力也相应减弱，因此比较容易在沉淀池中沉淀分离，其一部分沉淀污泥被回流至曝气池前端，另一部分污泥则被排出系统外。处于饥饿状态的污泥回流入曝气池后又能强烈吸附和氧化有机物，所以活性污泥法工艺对有机物的去除率较高。

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，自从它于1914年在英国建成试验厂以来，已有近90年的历史。随着该工艺在生产实践中的应用和不断改进，特别是近几十年来在对其生物反应、净化机理、运行管理等进行广泛深入研究的基础上，活性污泥法得到了很大的发展，其工艺流程也不断有所改进和创新，并派生出许多变形工艺，如氧化沟、AB法、SBR法、A/O法、A<sup>2</sup>/O法等派生工艺，这些工艺都具有处理效率高、出水水质好等优点，但同时也存在工程投资高、占地面积大、能耗大及运行费用高、管理较复杂等缺点，而且在运行中易出现污泥膨胀和污泥上浮等问题，因而近20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。

## 二、生物膜法

19世纪末，在研究土壤净化污水的过滤田基础上，创造了生物过滤法，并将此应用于生产。与20世纪才出现的活性污泥法相比，生物过滤法体积负荷和BOD去除率都较低，运行时的环境卫生条件也较差，会滋生大量滤池蝇和蚊虫等。特别是由于当时滤池均以碎石为填料，没有更合适的填料载体，所以处理构筑物非常易堵塞，导致滤池不能正常运行，于是在20世纪40~60年代有逐渐被活性污泥法替代的趋势。但到了60年代后，由于新型合成材料的不断产生，使得合适滤料的选择有了可能，生物膜法又获得了新的发展。

生物膜法是与活性污泥法平行发展起来的生物处理工艺，是一大类生物处理法的统称。在生物膜法中，微生物附着在载体表面生长而形成膜状，污水流经载体表面和生物膜接触过程中，污水中的有机污染物即被微生物吸附、稳定和氧化，最终转化为H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub>和微生物细胞物质，污水得到净化。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20世纪70年代以来，生物膜法引起了广大研究者和工程师们的极大兴趣，于是属于生物膜法的塔式生物滤池（好氧或厌氧滤池）、生物转盘、生物接触氧化法等得到了较多的研究和工程应用。

在生物膜法处理工艺中，生物滤池是最具有代表性的结构形式，根据生物滤池在运行中是否需要供氧，生物滤池又可分为厌氧生物滤池和好氧生物滤池。而在好氧生物滤池中，根据滤池池型结构和供氧方式以及是否具有反冲洗系统，好氧生物滤池又可分为普通生物滤池和新近才兴起的曝气生物滤池。

## 第二节 生物膜法的历史及其发展

古罗马人和古希腊人都很注意将局部沼泽地排干，并用他们简陋的雨水道和下水道系统将废物冲走，虽然他们并没有正确的微生物学知识来指导这些行动。

在中世纪的欧洲，已记载有具有古代卫生措施的城市发展情况。个别的城镇和乡村还通过了一些针对有排出物的屠宰场、制革厂以及针对来自市区及水源上游的其他污染源的法律，那时，人们仍不了解有关微生物和其他污染物的特殊作用。

到了文艺复兴时代，在荷兰和意大利北部已可见到完善的明渠系统；在英格兰开始了沼泽排水；在伦敦已有截断人工河道来补充供水。在整个这一时期，人们已能懂得一些简单的水处理工艺，在个别家庭有供水澄清的砂容器，特别是用砂做的水井；在浑浊河道的岸边用向下挖入砂层以获得清水的方法也很普遍，这些行动可以说是水处理的萌芽，但这些行动还只是局限于给水处理。

18世纪中叶，在欧洲兴起了产业革命，产业革命的工业化要求开辟了西欧人口增长的新区域，出现了许多新城镇。这些新的城镇最初是有助于解决由于人口的重新分布而引起的水和人口的比例问题，但在后来，产业革命从各方面增大了城市的密度，随之便出现了亟待解决污水处理问题的局面。

到了19世纪30年代，由于工业化的结果推动了世界贸易的发展，把长期在亚洲流行的霍乱病带到了欧洲，并逐渐蔓延。例如在开罗，爆发一次霍乱病的死亡率竟高达31%，随后伦敦也开始出现霍乱。19世纪30年代和40年代，霍乱在伦敦反复流行，霍乱的流行最终有助于1858年控制污水排放法律（有害物去除条例）的制定。此后，许多皇家委员会被指定来专门研究有关污水处理问题，但当时的处理工艺水平可以归纳为不是灌溉就是化学沉淀和过滤。过滤和灌溉通常都与土地处理有关，但当时这些技术没有一项涉及生物处理。

当水通过过滤使伦敦有效地消除了霍乱之后，人们的注意力便集中于该技术工程上的最优化。19世纪50年代末和60年代初，随着砂滤饮用水的普及，开始了过滤对污水处理效果的研究。除了污水造成的公害（如霍乱等）之外，还有一些原因使人们意识到污水必须处理，这就直接导致了污水处理工作的开展，并很快形成了三种主要的处理技术：化学沉淀、灌溉和过滤。

当时，化学沉淀在美洲是比较重要的工艺，但在欧洲则较少使用，欧洲较多的还是采用灌溉的方法。在当时看来，用灌溉的方法来处理污水较为便利，初看起来只是延伸了农民用动物废料给土地施肥的古老方法。但是在实践上，由于19世纪城市的扩大，其所需的灌溉规模也增大，这就导致了如下问题：首先，由于城市的扩大，将废水从城市运往农村所需的运输费增加了；其次，由于污水量的增大，大量这样的污水灌溉引起了土壤的饱和、地面漫流和恶臭等问题，特别是雨量充沛和土壤孔隙性小的地区常常如此。因此，在初期强烈的兴趣过后，灌溉的应用就趋于下降了。

当1865年德国杰出的科学家 Alexandex Mueller 在演示带有活微生物的过滤柱可以净化污水时，生物过滤便显现出是一个重要的方法。在英国，1868年 Edward Frankland 发现了装有各种卵石、砂和土壤的过滤柱具有净化污水的作用，他的工作建立在过滤净化过程中曝气的作用，同时模拟了若干间隙式过滤方式。但上述两种方法大多数都涉及灌溉的利用，正因如此，他的工作没能持续多久。紧接着上述两项开拓性的工作之后，英国和德国的研究人员弄清楚了细菌在过滤柱中的作用，使环境卫生与微生物学相互联系起来。1890年，美国 Allan Hazen 发表的研究成果确切地证明：通过间隙投配污水，在过滤池中生长的需氧性微生物可以完成污水在有氧环境中的降解，使出流污水达到完全卫生，这一结果导致了美国广泛采用间隙过滤法。在美国，土壤的渗透性通常要比欧洲好，并由于土地价格便宜，采用较大型的滤池也就变得可行。同时，在欧洲则普遍采用较粗糙的过滤填料做试验来解决空隙率的问题，其中有些过滤填料如碎焦炭本身就是工业化的副产品。滴滤池就是利用这种粗糙过滤材料而建造的。

在欧洲，Edward Frankland 还进行了砾石过滤性能的研究。他利用伦敦的原污水，在充填粗过滤填料的实验室过滤柱中，成功地进行了4个月以上的过滤性能演示试验，污水投



配频率为每天2次。Edward Frankland工作的重要意义在于：确定了间隙过滤要求在两次污水投加之间要有一个曝气时间，其结果受到了皇家专门调查委员会的极大注意，并被许多设计工程师所接受。与此同时，美国也在更进一步地研究过滤技术，各式各样的过滤方法均有使用。这样，美国对欧洲大量采用过的传统慢滤池做了重要的改进，诸如旋转的或固定的喷射臂、上向流辅助动力装置和反冲洗等改革措施。所有这些都提高了工艺过程的速率，并且节省了劳力和资本。

在这一时期，欧洲的研究是采用过滤填料（焦渣、煅烧黏土、砾石等）来提高过滤效率。例如 Scott-Moocrief 和 J. Worbett 进行了污水通过填料床的过滤研究；F. Wallis Stoddart 进行了经粗填料滤池连续滴流的应用研究。1891年，由 W. J. Didbin 首先提出了接触床的概念，他们将经化学处理后的污水注入粗填料过滤床，16h后再排放，发现焦渣处理污水的能力令人满意，而砂则由于经常会堵塞而不十分令人满意。这些试验促成了用较小填料的一级床和二级床这种两级接触方法的发展，其中第一级作为粗滤池使用。这种接触床的安装和运行在技术上都受到英国皇家委员会的支持。之后，Waring 和 Lowcock 对流量分布均衡性和间歇滤池负荷均匀性方面做了改善；Stoddart 开发了具有对称排水孔口的波形金属板填料；Corbeff 开发了开缝木槽和固定喷嘴；Carfiel 开发了经虹吸投配池的固定布水装置；另外，这一时期如旋转臂布水器、带有气压扬水器的喷水装置和旋转木槽等都引入了污水处理中。这些（如接触床、间隙过滤池和滴滤池）便是生物滤池的雏形，都属于固定生物膜法。

1901年，美国威斯康星州的 Madison 市市政局率先将滴滤池应用于市政工程中。早期的滴滤池通常都采用固定喷嘴和虹吸投配池进行布水，虽然有几个社区采用了旋转布水器，但当时这种布水在美国没有引起多少注意，在欧洲却很受欢迎。当时美国使用的滴滤池采用了粗过滤填料，所以运行时可以采用较高的负荷，这大大降低了标准过滤所需的占地面积，同时也出现了一些描述这些滴滤池的数学模型。1925~1950年间，由于人们对滴滤池的兴趣增大，自然对接触床、间隙过滤池的兴趣大大减少了。而滴滤池采用的旋转布水器因布水均匀而逐渐受欢迎，同时由于滴滤池具有运行方便、结构简单、费用-效益性能良好、能耗较低等特点，最终使滴滤池被广泛应用。当然，滴滤池在当时的运行过程中也经常出现由于出现厌氧状态使出水水质变差，同时悬浮物和微生物膜经常堵塞过滤填料等问题。经过分析，当时人们认为上述问题的产生主要是由填料引起的，所以为解决堵塞等问题，人们又将眼光投向填料的改进上，并不断开发出一些塑料合成填料。20世纪50年代，美国 Dow 化学公司的研究者们开始生产和利用塑料合成填料进行滤池试验，当时试验中选用了改良的“马鞍型”和嵌套的波形板捆扎组件填料分别试验，并取得了良好的去除效果。从石料填料改变到塑料填料生物滤池，首次满足了对高浓度废水处理的要求，并使生物滤池的堵塞问题得到了大大改善。当时塑料填料与石料填料相比具有高比表面积和高孔隙率的优点，同时由于质量轻而降低了结构上的投资，并在受冲击负荷时运行稳定性高。

20世纪70~80年代，生物滤池在我国也逐渐兴起，并被广泛应用于一些工业废水处理（如印染废水、啤酒废水、化工废水处理以及部分城市污水处理）中，而采用的生物滤池形式主要是滴滤池和塔式生物滤池，填料主要还是以碎石、卵石和废焦渣为主，也有一些工程采用纸蜂窝、交错木格板等。

由于滴滤池和塔式生物滤池在运行中生长在填料表面的微生物膜增厚后不能很好地脱落更新，使得微生物膜表层的活性变差，所以长时间运行后处理效率会有所下降。同时，由于