



环境工程实例丛书

HUANJI NG GONGCHENG SHILI CONGSHU

曝气生物滤池污水处理 新技术及工程实例

郑俊 吴浩汀 程寒飞 编著



化学工业出版社
环境科学与工程出版中心



环境工程实例丛书

曝气生物滤池污水处理 新技术及工程实例

郑 俊 吴浩汀 程寒飞 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

曝气生物滤池污水处理新技术及工程实例/郑俊, 吴浩汀, 程寒飞编著. —北京: 化学工业出版社, 2002. 5
(环境工程实例丛书)
ISBN 7-5025-3759-7

I. 曝… II. ①郑…②吴…③程… III. 曝气-生物滤池法-污水处理-新技术 IV. X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 016006 号

环境工程实例丛书

曝气生物滤池污水处理新技术及工程实例

郑 俊 吴浩汀 程寒飞 编著

责任编辑: 陈 丽 路金辉

责任校对: 蒋 宇

封面设计: 郑小红

*

化 学 工 业 出 版 社
环境科学与工程出版中心 出版发行

(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

北京云浩印刷厂印刷

三河市前程装订厂装订

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 15½ 字数 538 千字

2002 年 5 月第 1 版 2002 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-3759-7/X · 168

定 价: 34.00 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

出版者的话

环境保护是我国的基本国策之一，近年来呈蓬勃发展之势。尤其水污染控制工程、大气污染控制工程、固体废物处理处置工程、生态保护工程更是我国环保工作的重点。政府部门、科研院所及环境工程企业单位均投入了大量人力、物力从事这方面的研究与开发工作。对于环境工程设计人员、技术人员及大专院校学生来说，如何将环境工程专业技术理论合理地运用到具体的工程实践中去，是一个既现实又迫切的问题。为此，化学工业出版社环境科学与工程出版中心组织国内一批有丰富实践经验的专家、学者和工程技术人员精心编写了这套“环境工程实例”丛书，共计14册。

本套丛书具有以下特点。

(1) 系统性 本丛书既有《城市污水处理技术及工程实例》、《燃煤烟气脱硫脱硝技术及工程实例》、《垃圾处理处置技术及工程实例》等按专业划分的分册，又有《膜法水处理技术及工程实例》、《间歇式活性污泥法污水处理技术及工程实例》、《曝气生物滤池污水处理新技术及工程实例》等按方法划分的分册。全面性、系统性强，读者可按需选择。

(2) 实用性 本丛书是国内第一套将环境工程技术理论与具体的工程实例结合在一起的图书。理论部分系统、全面、先进、精炼；实例部分典型、实用、可操作性强，读者在阅读时可将理论部分与实例部分互相验证。

(3) 权威性 本丛书作者大多为本专业内的一线专家、学者和工程技术人员，很多实例均是作者亲自主持或参与设计的，从而使丛书具有较强的先进性与权威性。

多年来，化学工业出版社一直把环保图书作为主要出书方向之一。2000年6月、2001年6月我社成功地在全国各大、中城市举办了两届化工版环保图书展，2002年6月我社将在全国各大、中城市新华书店举办为期一个月的第三届化工版环保图书展。本套丛书在众多专家、学者的支持下将如期出版参展，希望能得到广大读者的认可，也希望广大读者对我社环保图书出版多提宝贵建议与意见。

化学工业出版社
环境科学与工程出版中心
2002. 3

前 言

近几十年来，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。我国是一个人均水资源占有量匮乏的国家，仅为世界人均值的 1/4，而且时空分布不均，开发利用难度大，许多地区和城市严重缺水。与此同时，全国年排污量为 350 亿立方米，但城市污水集中处理率仅为 7%，80% 的污水未经有效处理就排入江河湖海，使我国的水域污染十分严重，并进一步加剧了水资源的短缺。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。

对于我国这样一个污染严重、水资源短缺的国家，先进的污水处理工艺技术必须是适合我国国情的高效、低成本、低能耗的技术。效率高、投资省、运行费用低、可达到较好治理效果的污水处理新技术，对经济尚不够发达而污染急需治理的各地区，在一段时期内都将具有重要意义。

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新工艺不断出现，其中生物处理技术的应用仍最广泛，已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，水力停留时间较短；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对此都进行了大量的研究和工程实践，并取得了丰硕的成果，研究开发出了像曝气生物滤池这样的生物膜法新工艺。

本书首次全面和详细地介绍了由作者主持、参与研究开发的具有我国自主知识产权、具有较大发展潜力的高效污水处理新工艺——曝气生物滤池处理。本书着重对该工艺的特点、工艺机理、工程计算和设计、应用问题的探讨、运行管理和工程应用实例进行了详尽的叙述，充分反映了该技术在我国污水处理领域的最新研究和应用。我们期望本书的出版对进一步研究开发和推广高效、省地、投资省、能耗低的曝气生物滤池新工艺起到积极的作用，并使该技术能够在我国的污水处理领域迅速推广应用，以产生较大的经济效益和社会效益。

本书第一、二章由吴浩汀、郑俊编写，第三章由吴浩汀、徐亚明编写，第四、五、七、八章由郑俊、王晓焱编写，第五章由程寒飞、陈祥宏编写，第九、十章由程寒飞编写。全书由郑俊统编、定稿。

本书在编写过程中，得到了中冶集团马鞍山钢铁设计研究总院以及汪旭、卫卫、徐开

达、石有枝、甘露等同志给予的大力支持和帮助，谨在此表示感谢。

由于编者水平有限，经验不足，书中难免存在错误和不当之处，热忱欢迎同行和广大读者批评指正。

编 者

2002 年 2 月

目 录

第一章 生物膜法污水处理技术	1
第一节 生物膜法净化污水机理	2
第二节 生物膜法类型及技术现状	9
第三节 影响生物膜法功能的主要因素	14
第二章 普通生物滤池与曝气生物滤池	18
第一节 普通生物滤池	18
第二节 曝气生物滤池	26
第三章 曝气生物滤池工艺流程	39
第一节 曝气生物滤池的基本类型	39
第二节 曝气生物滤池污水处理工艺流程	45
第三节 曝气生物滤池问题探讨	54
第四章 曝气生物滤池工艺设计	56
第一节 曝气生物滤池处理流程及其选择	56
第二节 曝气生物滤池处理系统及结构	58
第三节 曝气生物滤池的计算	60
第四节 曝气生物滤池设计中必须考虑的影响因素	76
第五章 曝气生物滤池应用的有关问题探讨	78
第一节 曝气生物滤池运行周期的探讨	78
第二节 曝气生物滤池去除有机物特性探讨	85
第三节 曝气生物滤池脱氮有关问题探讨	90
第四节 曝气生物滤池除磷有关问题探讨	96
第五节 曝气生物滤池常规试验内容、分析项目与方法	98
第六章 曝气生物滤池工艺污水处理厂的运行管理	110
第一节 污水处理工程的竣工验收	110
第二节 污水处理厂运行管理概述	111
第三节 曝气生物滤池工艺污水处理厂运行管理	113
第四节 污水处理厂的运行管理制度	143
第七章 曝气生物滤池处理城市污水工程实例	148
第一节 项目背景	148
第二节 污水处理厂建设规模和治理目标	149
第三节 项目的技术分析	150
第四节 水解(酸化)-上向流曝气生物滤池工艺的工程设计	163
第八章 曝气生物滤池处理啤酒废水工程实例	188
第一节 啤酒工业废水	188
第二节 国内现有的啤酒废水处理工艺	191

第三节	水解(酸化)-曝气生物滤池处理啤酒废水工程实例	194
第九章	曝气生物滤池处理小区生活污水工程实例.....	208
第一节	小区污水处理特点	208
第二节	国内外小区污水处理工艺综述	209
第三节	曝气生物滤池工艺应用实例	210
第四节	一体化反应器研究	218
第十章	曝气生物滤池处理其他污水工程实例.....	220
第一节	猪场粪便污水处理工程	220
第二节	印染废水处理工程	230
第三节	肠衣加工废水处理工程	231
第四节	淀粉废水处理工程	233
参考文献		235

第一章 生物膜法污水处理技术

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，而且还能转化有毒有机物。实际上，在工业废水的无害化过程中，不但利用微生物处理有机毒物，还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有毒害作用，但组成这些物质的元素，有些是微生物营养所需，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，创造有利于微生物的生长、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。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要在有氧的情况下进行，而厌氧生物处理则需保证无氧环境。由于好氧生物处理效率高，使用比较广泛，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，厌氧处理比好氧处理使用得少些。

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、生物转盘等，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，它于 1914 年在英国建成试验厂以来，已有 70 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和净化机理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，形成了氧化沟、AB 法、SBR 法、A/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，但也存在工程投资高、占地面积大、能耗大及运行费用高、管理也较复杂等缺点，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 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，当污水流经载体表面和生物膜接触的过程中，污水中的有机污染物即被微生物吸附、稳定，最终转化为 H_2O 、 CO_2 、 NH_3 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，其主要设施是生物滤池、接触氧化池和生物转盘等。

第一节 生物膜法净化污水机理

一、生物膜及其降解有机物的机理

在生物膜净化污水过程中，关键是要培养好生物膜。生物膜是由细菌（好氧、兼性、厌氧）、真菌、藻类、原生动物、后生动物以及一些肉眼可见的蠕虫、昆虫的幼虫等组成。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，由细胞内向细胞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。

污水长期与滤料或某种载体流动接触，就会在其表面形成生物膜，并逐渐成熟，其标志是：生物膜沿水流方向的分布、生物膜上由细菌及各种微生物组成的生态系、对有机物的降解功能都达到了平衡和稳定状态。从开始到成熟，生物膜要经过潜伏和生长两个阶段，生物膜有时均匀地分布在载体表面，而有时却非常不均匀；有时仅由单层的细胞组成，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他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。

生物膜的构造见图 1-1。

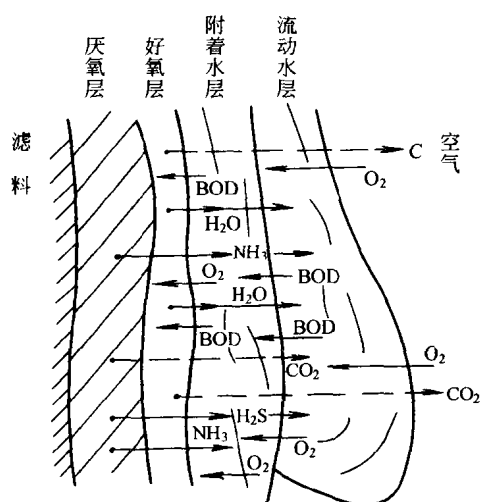


图 1-1 生物膜的构造

生物膜附着在载体的表面，是高度亲水的物质，在污水不断流动的条件下，在其外侧总是存在着一层附着水层。生物膜又是微生物高度密集的物质，在膜的表面上和一定深度的内部生长繁殖大量的各种类型的微生物和微型动物，并形成有机污染物→细菌→原生动物（后生动物）的食物链。污水在流过载体表面的过程中，污水中的有机污染物被生物膜中的微生物吸附，并通过氧向生物膜内部的扩散，在膜中发生生物氧化等作用，从而完成对有机污染物的分解。扩散过程在生物膜动力学行为中是一个必须考虑的因素，污染物、溶解氧及各种必须营养物首先要经过液相扩散到生物膜表面，进而到生物膜内部，只有扩散到生物膜表面或内部的污染物才能有会被生物膜微生物所分解与转化，最终形成各种代谢产

物。生物膜表层生长的是好氧和兼氧微生物，其厚度约 2mm，在这里，有机污染物经微生物好氧代谢而降解，终点产物是 H_2O 、 CO_2 、 NH_3 等。由于氧在生物膜表层已耗尽，而在好氧层的深部由于扩散作用制约了溶解氧的渗透，往往形成厌氧区，使生物膜内层的微生物处于厌氧状态，在这里，进行的是有机物的厌氧代谢，终点产物为有机酸、乙醇、醛和 H_2S 等。由于微生物的不断繁殖，生物膜逐渐增厚，超过一定厚度后，吸附的有机物在传递到生物膜内层的微生物以前，已被代谢掉。当厌氧层还不够厚时，它与好氧层保持着一种平衡稳定的关系，好氧层能够保持良好的净化功能，当厌氧层逐渐加厚时，其内层微生物因得不到充分的营养而进入内源代谢，这些代谢产物向外逸出时，必然要透过好氧层，从而破坏了好氧层生态系统的稳定性，同时厌氧层气态代谢产物的不断逸出又减弱了生物膜在载体

上的固着力,促进了生物膜的脱落,失去其粘附在载体上的性能,脱落下来随水流出反应器,载体表面再重新生长出新的生物膜。生物膜的周期更新,是维持生物膜净化功能的重要因素,因此,加快生物膜的更新,是生物膜技术进步的重要研究方向。生物膜脱落的速度与有机负荷、水力负荷有关。此外,在生物膜反应器中,由于微生物被固着在载体上,因此与污水的水力停留时间没有直接的影响关系,增殖速度慢的微生物也能够生长繁殖,例如硝化细菌等。正因如此,生物膜上的微生物在种属上是多种多样的,而且可以形成稳定的生态系统。

综上所述,在生物膜法中,污水中的有机污染物及其他污染物的去除是依靠生物膜的正常代谢活动和保持好氧膜层的生物活性,因此底物及溶解氧与生物膜接触并扩散到生物膜中,是保证生物膜发挥生物氧化作用的前提条件。

二、生物膜中的生物相及参与净化的微生物群

(一) 生物膜中生物相的种类与分布

1. 生物相的作用

生物膜中的微生物是以生物膜形态附着在固体填料表面上,因此种类繁多的微生物是生物膜法的工作主体。处理后出水水质的好坏与微生物生物相密切相关,在生物膜反应器各个位置,都有特定的生物相。生物相的组成与性质特点,在生物膜法处理工艺中起着重要作用,对生物相的研究与分析可以从微生物角度考虑工艺设计的条件和参数;并为工艺合理化运行管理及技术革新提供依据;通过控制环境条件来控制池中的优势菌群,可做到增加或减少某一菌种类型的数目。

2. 生物相的分析

曝气生物滤池的生物膜是由滤料表面和滤料空隙之间截留的悬浮物、吸附胶体和繁殖的微生物所形成的。生物膜主要是由细菌组成的。1g 生物膜有 10^{12} 个细菌,其表面积 1200m^2 。生物膜的菌种组成取决于污水中的污染物。曝气生物滤池中的生物膜是在明显的好气氧化过程中形成的,除了异氧菌外,在其中有大量的自氧菌,如亚硝化菌、硝化菌;除单细胞细菌外,生物膜中还生长着少量的丝状菌、酵母和个别的霉菌菌丝体。生物膜中的微型动物大部分是单细胞的原生动物,如肉足虫、鞭毛虫、纤毛虫和吸管虫。但在生物膜中还有构造比较复杂的后生动物,如轮虫、圆形蠕虫。

生物膜的所有微生物都积极参与有机物的矿化作用。细菌是有机物主要的矿化微生物。肉足虫吞食污泥颗粒,把一系列复杂的物质转化为简单的、方便其他种类微生物食用的物质。纤毛虫和其他原生动物起着细菌发展调节者的作用,从而为矿化过程造就有利条件,依靠往介质中分泌粘液,有助于细颗粒分散悬浮物的絮凝作用。

由于各种类型微生物的不同生理特性,他们之间形成了相互关联和互相制约的动态平衡体系,而这个体系直接影响、决定着处理效率。在曝气生物滤池的挂膜过程中,先出现新生指状菌胶团和丝状菌,出水 COD_{Cr} 去除率 40% 左右,外观有浊度。随着时间的延续,先后出现原生动物,出水 COD_{Cr} 、 $\text{NH}_3\text{—N}$ 去除率分别为 80%、90% 左右,出水外观清澈,镜检可观察黄色生物膜,周围有浅色菌胶团、丝状菌和固着型纤毛虫,生物膜成熟,系统运行稳定。

(1) 原生动物的指示与代谢作用 由于原生动物对环境的要求不同,一种生物体在环境适宜的情况下就大量繁殖。所以可以利用原生动物的种类、数量及形态上的变化来判断污水处理系统内运行状况。

从曝气生物滤池运行初期到运行一段时间观察，生物膜上的生物均是由低等向高等演化的，其原因是低等生物对环境适应性强。因此，系统刚刚运行时，只见到大量的细菌，其他微生物很少或不出现。系统正常运行和生物膜降解良好时，相应地出现许多较高等的微生物。生物相中占优势的原生动物以固着型的纤毛虫为主，如钟虫、小口钟虫、等枝虫等。其次还有游泳性纤毛虫（如豆形虫）和匍匐性纤毛虫（如盾纤虫）等。系统运行稳定后，生物膜上的生物相也相对稳定，细菌与原生动物之间存在着制约关系。这是因为原生动物吞噬细菌群体的蔓延，而细菌被破坏又要不断生长，需要以水源中的有机物为食料，进而达到净化水质的目的。如果进水的营养状况有较大的改变，即系统非正常运行时，则原生动物中的游动型纤毛虫突然增加，固着型纤毛虫减少，或表现不正常（尾柄脱落，虫体消失），伴随着丝状菌稀少和菌胶团松散，此时出水水质变差。

（2）微型后生动物的指示与代谢作用 在曝气生物滤池中的生物膜上存在着大量后生动物如轮虫、线虫、瓢体虫等。这些以食肉为主的动物，能软化生物膜、促使生物膜脱落，从而经常保持生物膜的活性和良好的净化功能。一方面他们对溶解氧和毒性特别敏感，可以作为监测处理系统稳定运行的标志，另一方面他们的捕食关系可以维持处理系统的生态平衡，保证处理出水水质稳定。

（3）特殊动物的指示与代谢作用 菌胶团是指能凝聚呈绒粒的细菌，由低等细菌建立的胶粘物。菌胶团具有很强的吸附能力和分解能力，使有机物无机化。它对有机物的吸附和分解为原生动物和微型后生动物提供了良好的生存环境和附着场所。新生菌胶团颜色浅、透明、结构紧密、生命力旺盛、吸附和氧化能力强，而老化的菌胶团则与之相反。通过镜检观察菌胶团的颜色、透明度等外观情况可以判断生物膜中微生物的生长情况。

累枝虫对毒性的耐受力较一般钟虫强，通过镜检观察累枝虫和钟虫的数量、比例和活跃状况可以判断曝气生物滤池处理系统毒性物质情况。

有肋盾纤虫对缺氧非常敏感，它的存在说明生物体供氧良好，狭缩盖虫、铃兰钟虫、钟兰钟虫、吸管虫对缺氧也较敏感，同样是曝气生物滤池处理系统供氧良好的标志。而豆形虫和油钵钟虫只有在高负荷缺氧情况下才大量出现，它们可作为供氧缺乏的标志。

线虫对氧不是非常敏感，而对有机质比较敏感。生物膜内层缺氧、外层好氧，在生物膜的中部可以为线虫提供良好的生存条件，同时，它的存在可以为内层提供更多的氧，因此线虫成为生物膜特有的代表。在曝气生物滤池中出现线虫，说明有机质已大量降解，生物膜也成熟了，但大量出现线虫，标志着生物膜过厚，滤料堵塞，要反冲洗。

轮虫是好气动物，对缺氧和有机质非常敏感，只有当溶解性有机质基本分解为无机物，即 BOD 极低， H_2S 、 CO_2 含量也很低，氮元素也转化为硝酸盐，溶解氧也正常时，才会出现一些轮虫，如玫瑰旋轮虫。因此轮虫可以作为曝气生物滤池系统处理出水水质稳定的标志性指示动物。

（二）生物膜中参与净化的微生物群

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。这些微生物群体，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。

生物膜中的生物群与活性污泥中的生物群几乎没有大的差别，图 1-2 所示是活性污泥和

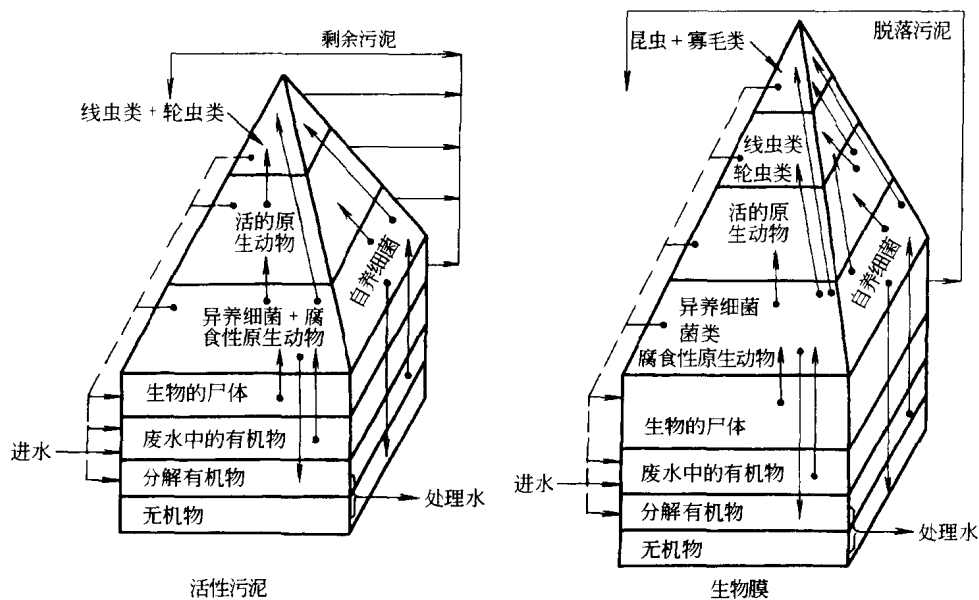


图 1-2 活性污泥和生物膜食物链的比较

生物膜食物链的比较。从中可以看出，生物膜中微生物的食物链比活性污泥的长而且复杂。

1. 细菌、真菌类、藻类

(1) 细菌 细菌是微生物膜的主体，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微生物膜所处的环境，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营养底物。

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，他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。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，区域其余的 C 均以 CO_2 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 N_2 。尽管每摩尔葡萄糖释放出的 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 CO_2 。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。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，甲烷菌可以利用这些低分子产物（包括 CO_2 和 H_2 ），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。

细菌类中有生枝动胶菌、浮游球衣菌、白色贝氏硫细菌大量存在，而且在显微镜下都能观察到。在生物滤池生物膜调查报告中记录了属名的种类有球衣菌、动胶菌、硫杆菌属、无色杆菌属、产碱杆菌属、黄杆菌属、假单胞菌属、诺卡氏菌属、色杆菌属、八叠球菌属、粪链球菌、埃希氏大肠杆菌、副大肠杆菌属、亚硝化草胞菌属、硝化杆菌属等。

生物膜中常见到的菌丝体有瘤胞属、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、水霉属等。

(2) 真菌类 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 值降低和溶解氧水平下降时，很容易滋生丝状菌。

生物膜上的真菌类和活性污泥不同，繁殖很快，在营养和生物环境方面和细菌有竞争关系。如真菌类过分地占有优势，生物膜得以较快增殖并变厚。真菌类占优势的条件是温度、pH 值、废水的性质、负荷等因素。一般来说，生物膜中还是以细菌占优势为宜。

生物滤池在冬季一般多见于真菌类大量增长而生物膜增厚现象，这是因为在真菌类中也有比其他微生物繁殖的最适合温度低的种属，而且在低温时原生动物的捕食活力也随之下落的缘故。

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，即能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小球藻属、绿球藻属、席藻属、颤藻属、毛枝藻属和环丝藻属等。

2. 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中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到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。

生物膜中常出现的原生动物有鞭毛类，包括气球屋滴虫、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，包括变形虫属、简便虫属和表壳虫属

等；纤毛虫类，包括侧盘盖虫、螭状独缩虫、沟钟虫、沟刺斜管虫、集盖虫、巧盖虫、八条纹钟虫、有肋盾纤虫和珍珠映毛虫等。在 1mL 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。

3. 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后生动物有轮虫类（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。

（1）轮虫类 生物膜中出现的轮虫类的种属大体上和活性污泥相同，但个体数比活性污泥中的轮虫多得多。旋轮虫、轮虫属等的蛭型轮虫可以获得能够活动的场所，所以有时比原生动物增长得还快，而成为优势菌属。

（2）线虫类 生物膜中出现的线虫类的种属远比活性污泥中为多，在生物膜中经常都可以见到。生物膜中出现比较多的线虫有小杆属、Pelodera、似杆线虫属、Mesorhabditis、Rhabditonema、Mononchoides、双胃（线虫）属、杆线虫属等。

综上所述，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，这些微生物的出现和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标生物的作用，由此可以检查、判断生物膜反应器的运转情况和污水处理效果。

在实际应用中，由于生物膜反应器所处理污水的组成通常不是单一的组分，故生物膜的生物相是相当丰富的，形成了有细菌、真菌等一系列微生物群体所组成的较为稳定的生态体系。这些不同菌种随生物膜厚度的变化有一定的分布，例如上层多为异养菌，而下层多为各种自氧菌。毫无疑问，细菌是生物膜中对有机物氧化分解起重要作用的微生物，在生物膜中所观察到的细菌种类基本有硝酸盐还原菌，蛋白质 H_2S 生成菌，白朊分解菌，硫酸还原菌，硫细菌、氨氧化菌、硝化细菌等。除细菌外，在生物膜中发现真菌也是较为普遍的，其中主要有镰刀霉属、地霉属等。真菌对某些细菌难于降解的人工合成有机物有一定的降解能力。与活性污泥系统相比，在生物膜反应器中原生动物及后生动物的出现与否与反应器类型密切相关。通常，原生动物及后生在生物滤池及生物接触氧化法中载体表面存在，然而对于三相流化床或是生物扰动床这类生物膜反应器，生物相中原生动物及后生动物量非常少。

三、生物膜法的特征

1. 微生物相方面的特征

（1）参与净化反应的微生物的多样化 生物膜法的各种处理工艺，都具有适宜于微生物生长栖息、繁殖的安静稳定环境，生物膜中的微生物不需像活性污泥那样承受强烈的搅拌冲击，易于生长增殖。生物膜一般都是固着在滤料、载体或填料上的，其“污泥龄”较长，因此在生物膜上可以生长时代时间较长的微生物，如硝化菌等。在生物膜上还可能大量出现丝状菌，而且不会产生污泥膨胀。线虫类、轮虫类、寡毛类等微型动物出现的频率较高。

综上所述，在生物膜上生长繁育的生物类型丰富、种属繁多，食物链长且复杂。表 1-1 所列举的是生物膜和活性污泥出现的微生物在类型、种属和数量上的比较。

表 1-1 生物膜及活性污泥出现的微生物比较

微生物种类	活性污泥法	生物膜	微生物种类	活性污泥法	生物膜
细菌	大量	大量	其他纤毛虫	一般	多量
真菌	少量	多量	轮虫	少量	多量
藻类	极少	一般	线虫	少量	一般
鞭毛虫	一般	多量	寡毛类	极少	一般
肉足虫	一般	多量	其他后生动物	极少	少量
纤毛虫缘毛类	大量	大量	昆虫类	极少	一般
纤毛虫吸管虫类	少量	少量			

(2) 微生物量多，处理能力大，净化功能显著提高 由于微生物附着生长并使生物膜具有较低的含水率，单位反应器内的生物量可高达活性污泥法的 5~20 倍，因而生物膜反应器具有较高的处理能力。又由于有时代时间较长的硝化菌生长繁殖，生物膜反应器不仅能够去除有机污染物，而且更具有一定的硝化功能，因而其净化功能显著提高。

(3) 在每层（段）都自然形成自己独特的优势微生物 生物膜法都分段处理，在每段都生长繁育与进入本段污水水质相适应的微生物，并自然地成为优势菌种，这种现象对有机污染物的降解是非常有利的。

(4) 生物的食物链长 在生物膜上生长繁育的生物中，动物性营养者所占比例较大，微型动物的存活率也高，在生物膜上能够生息高层次营养水平的生物，在捕食性纤毛虫、轮虫类、线虫类之上还生长栖息着寡毛类和昆虫，因此，在生物膜上形成的生物链要长于活性污泥法，产生的生物污泥量也少于活性污泥法。

(5) 能够生长硝化菌 硝化菌和亚硝化菌的世代时间都比较长，其比增殖速率很小，如亚硝化单胞菌属和硝化杆菌属的比增殖速率分别为 $0.21d^{-1}$ 和 $1.12d^{-1}$ 。在活性污泥法系统中，这类细胞是难以存活的，但在生物膜法中，生物膜的污泥龄与污水的停留时间无关，因此，像硝化细菌这样时代时间比较长的细胞也得以增殖。

2. 处理工艺方面的特征

(1) 对水量、水质变动有较强的适应性 生物膜法中的各种工艺，对流入水水质、水量的变动都具有较强的适应性，这已为多数运行的处理设备所证实，即使中间停止一段时间进水，对生物膜的净化功能也不会带来明显的障碍，系统能够很快地得到恢复。

(2) 在低水温条件下也能保持一定的净化功能 由于生物膜生物相的多样性，在低水温条件下，生物膜仍能够保持较为良好的净化功能，温度变化对它的影响较小。

(3) 易于固液分离 从生物膜上脱落下来的生物污泥，所含动物成分较多，密度较大，易于固液分离，即使大量增殖丝状菌，也没有产生污泥膨胀之虑。

(4) 能够处理低浓度污水 活性污泥法处理系统，如进水 BOD 在 50~60mg/L 以下，絮凝体由于营养物质不足而形成恶化，处理水水质低下；但是，生物膜法处理系统对有机物浓度低的污水，也能够取得较好的处理效果，可使进水 BOD 为 20mg/L 的污水降至出水 BOD 为 5~10mg/L。

(5) 动力费用低 生物膜法中的生物滤池、生物转盘等工艺，都是节省能源的，其动力费用都较低，使去除单位重量的 BOD 的耗电量较少。

(6) 产生的污泥量少 和活性污泥相比,在生物膜中出现了比较大型的生物,如营养水平较高的生物生长繁殖,因而食物链也比活性污泥的长。在一般情况下,从细菌中原生动物的产率多为 0.5 左右。生物膜中存在着大量的轮虫类、吸管虫类、寡毛虫类、线虫类等,它们都摄食细菌和原生动物。这些富营养水平的生物对于食物的摄取率比原生动物低得多,因而,富营养水平的生物越多,产生的污泥量就越少。另外,在生物膜中,因较多栖息着高层次营养水平的生物,食物链较长,故剩余污泥量明显减少,特别是在生物膜较厚时,底部厌氧层的厌氧菌能够降解好氧过程合成的剩余污泥,从而使总的剩余污泥量大大减少。正是这些原因,使生物膜法产生的污泥量比活性污泥法少得多,因而可减轻污泥处理与处置的费用。产生的污泥量少,是生物膜法各种工艺的共同特征,并已为实践所证实,一般来说,产生的污泥量较活性污泥法能够少 25%~30%。

(7) 具有较好的硝化与脱氮功能 生物膜法的各项工艺具有良好的硝化功能,采取措施适当,还有进行脱氮的性能。

(8) 易于运行管理,无污泥膨胀问题 生物膜反应器具有较高的生物量,不需要污泥回流,易于维护与管理。另外,在活性污泥法中,因污泥膨胀问题而导致的固液分离困难和处理效果降低一直困扰着操作管理者,而生物膜反应器由于微生物附着生长,即使丝状菌大量生长,也不会导致污泥膨胀,相反还可利用丝状菌较强的分解氧化能力,提高处理效果。

四、生物膜法运行中的指标生物

生物膜法如生物滤池中的生物分类为生物膜生物、中间型生物膜生物、非微生物膜生物、生物膜清扫生物等,而且这些生物的多少成为表示滤池维护的好坏、处理水水质是否良好的指标。生物膜生物、中间型生物膜生物、非微生物膜生物是与活性污泥的指标生物如活性、中间性与非活性相对应的。滤床清扫生物是指抑制生物膜的过度增长中起作用的轮虫类、线虫类、寡毛虫类、昆虫类等等。生物膜法运行中的指标性生物分述如下。

(1) 高负荷的生物膜 真菌类显著增加,纤毛虫类在绝大多数情况下消失,可见到屋滴虫属、波豆虫属、尾波虫属等鞭毛虫类。此时处理水水质极坏。

(2) 处理水水质恶劣时的生物膜 在高负荷的生物膜中已经介绍过的鞭毛虫类和草履虫属、豆形虫属、裸口虫属、瞬目虫属等游泳性生物增多。

(3) 负荷适当、处理水水质良好的生物膜 此时会出现独缩虫类、聚缩虫属、累枝虫属、集盖虫属等大的群体,而且钟虫也增多。

(4) 低负荷的生物膜 除了可以看到(3)中所提出的生物以外,还可观察到盾纤虫属、尖毛虫属、表壳虫属、鳞壳虫属等。这些生物多时处理水的 BOD 往往在 10mg/L 以下。

(5) 快速更新的生物膜 轮虫类、线虫类、寡毛虫类、昆虫类等等多的时候,厌氧性层减少,不会引起生物膜肥厚,而且膜的脱落量也少。

(6) 厌氧性层厚的生物膜 厌氧性层厚的生物膜中会出现扭头虫属、新态虫属、贝日阿托氏菌属等。当出现这些生物时,生物膜会出现恶臭。

第二节 生物膜法类型及技术现状

生物膜法用于处理污水技术源远流长,近年来,其各种类型又得到比较多的研究与应用,这主要是因为它与传统的活性污泥法相比操作方便、剩余污泥少、抗冲击负荷和适用于中、小型污水处理厂等(Fitch et al, 1998)。除上节所介绍的特征外,普通生物膜反应器也存在着不足,如需要较多的填料和支撑结构,出水常常携带较大的脱落的生物膜片,大量非