

动态膜水处理 | 新技术

张亚雷 褚华强 周雪飞 董秉直◎著



科学出版社

动态膜水处理新技术

张亚雷 褚华强 周雪飞 董秉直 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以动态膜水处理新技术的运行过程为主线,全面阐述了动态膜技术所涉及的基本原理和关键技术。全书内容涵盖动态膜技术发展历程、动态膜技术基本理论、动态膜成膜过程、动态膜污染物去除、动态膜运行特性、动态膜结构、膜污染及反冲洗等方面,系统全面地展现动态膜技术的发展现状、运行原理及技术优缺点。同时,通过分析动态膜技术的运行特点,本书也展望了动态膜技术在生活污水及工业废水深度处理等领域的应用前景及需要解决的关键问题。

本书全面介绍了动态膜技术在水处理中的应用,可以为环境工程、市政工程、环境科学等领域的广大科研工作者、研究生及工程师提供技术参考。

图书在版编目(CIP)数据

动态膜水处理新技术 / 张亚雷等著. —北京: 科学出版社, 2014. 3

ISBN 978-7-03-039830-0

I. ①动… II. ①张… III. ①水处理-技术 IV. ①TU991.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第032420号

责任编辑: 杨婷婷 侯俊琳 白 丹 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 吕德静 / 封面设计: 铭轩堂

编辑部电话: 010-64035853

E-mail: houjunlin@mail.sciencep.com

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

http://www.sciencep.com

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年3月第一版 开本: 720×1000 1/16

2014年3月第一次印刷 印张: 12 1/2 插页4

字数: 228 000

定价: 68.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈科印〉)

前 言

动态膜是指通过预涂剂或反应池中混合液在基网（一般采用大孔支撑网）表面形成的新膜（泥饼）。动态膜技术作为一种新型水处理技术，具备传统膜分离技术的优点，且过滤通量大、反冲洗较方便，使其成为一种可能克服传统膜技术不足的潜在技术。近年来，国内外关于动态膜技术的研究逐渐增多。本书力图较全面地向读者展示动态膜技术的相关理论和已有研究成果，从而为水处理及污水和废水的深度处理回用提供高效、稳定、经济性好的新型处理技术。

动态膜技术实质是利用新形成的具有致密结构的泥饼层，提高廉价大孔支撑基网的固液分离性能，从而达到既使出水水质优良，又降低膜组件造价、减缓膜污染的目的。用来形成动态膜的待过滤混合液或添加的预涂剂，被称为动态膜基质；为动态膜提供支撑的组件材料，被称为动态膜基网。动态膜运行操作通常包括三个阶段：预涂、过滤和反冲洗。

本书系统介绍了动态膜水处理新技术的运行过程特性，并重点阐述动态膜技术所涉及的基本原理和关键技术。动态膜技术作为一种新出现的水处理技术，还需要广大学者对其进行更加深入系统的研究。在本书结尾，通过分析动态膜技术的运行特点和研究现状，作者展望了动态膜技术在生活污水及工业废水深度处理等领域的应用前景及需要解决的关键问题，希望起到抛砖引玉的作用。

本书是作者在总结课题组近年来研究成果的基础上撰写而成的，张海、孙小雅、王洪武、赵阳莹和杨黎彬参与了研究和本书的撰写和编辑工作。同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室为本项目研究提供了优良的条件，本书的出版得到了国家自然科学基金项目（项目编号：51138009、51208365）和国家科技支撑计划项目（项目编号：2012BAJ25B02、2012BAJ25B04）的资助，并得到科学出版社杨婊娟女士的大力支持，在此一并表示感谢。

作为一种新型的过滤技术，动态膜技术已有的研究还有很多不足之处，书中难免有不当之处，还需要进一步研究。希望本书的出版有助于引起更多学者对动态膜技术的关注，并推动其在环境保护领域的推广和应用。

| 目 录 |

前言

第 1 章 概论	1
1.1 膜技术概述	1
1.2 动态膜定义	2
1.3 动态膜技术发展历程	4
1.4 动态膜技术应用概述	5
1.4.1 动态膜在物理截留方面的应用	5
1.4.2 动态膜在污水生物处理方面的应用	8
1.4.3 费用分析	15
第 2 章 动态膜技术基本理论	16
2.1 动态膜分类	16
2.2 动态膜基网及基质	17
2.2.1 动态膜基网	17
2.2.2 动态膜基质	19
2.3 动态膜的形成及运行机理	20
2.3.1 动态膜过滤分析	20
2.3.2 动态膜形态结构特性	22
2.3.3 动态膜预涂影响因素	23
2.3.4 动态膜运行影响因素	24
2.3.5 动态膜污染	25
2.3.6 动态膜污染机理	26

第 3 章 动态膜成膜过程特性	29
3.1 试验装置及运行	29
3.1.1 城市生活污水动态膜装置及运行	29
3.1.2 微污染水动态膜装置及运行	31
3.2 检测指标及试验方法	33
3.3 支撑基网对动态膜预涂成膜过程的影响	34
3.3.1 平板式动态膜组件结构	34
3.3.2 支撑基网对预涂过程的影响	36
3.4 预涂条件对动态膜预涂效果的影响	41
3.4.1 重力水头对预涂效果的影响	41
3.4.2 曝气强度对预涂效果影响	47
3.5 动态膜预涂特性	49
第 4 章 动态膜运行特性	52
4.1 动态膜临界通量分析	52
4.1.1 临界通量的定义及意义	52
4.1.2 动态膜临界通量的确定	52
4.2 动态膜过滤特性分析	53
4.2.1 运行周期和最大周期通量	53
4.2.2 通量随时间变化分析	55
4.3 动态膜过滤阻力分析	61
4.3.1 非动态膜阻力分析	61
4.3.2 动态膜阻力分析	64
4.4 混合液特性分析	68
4.4.1 混合液胞外聚合物含量分析	68
4.4.2 混合液污染特性分析	70
第 5 章 动态膜对污染物的去除	75
5.1 动态膜反应器对污染物的去除效果及影响因素	75
5.1.1 动态膜反应器对微污染水中污染物的去除效果	75
5.1.2 动态膜反应器对生活污水中污染物的去除效果	80
5.1.3 动态膜反应器污染物去除影响因素	85

5.2	动态膜污染物的去除效果	99
5.3	动态膜去除污染物的机理分析	102
5.3.1	基于组分分离和分子量分布的分析	102
5.3.2	动态膜成膜基质吸附的分析	102
5.3.3	混合液微生物总量及脱氢酶活性分析	105
5.3.4	混合液微生物种群分析	107
第6章	动态膜结构、膜污染及反冲洗	111
6.1	动态膜结构特征分析	111
6.1.1	动态膜形态	111
6.1.2	动态膜泥饼的分层及粒径分析	119
6.2	动态膜组分及污染机理研究	122
6.2.1	动态膜泥饼层组分分析	122
6.2.2	混合液 EPS 中蛋白水解氨基酸各组分分析	129
6.2.3	进出水及混合液三维荧光光谱分析	135
6.2.4	动态膜组件污染分析	139
6.3	动态膜反冲洗效果研究	143
6.3.1	空气反冲洗	143
6.3.2	其他清洗方法	157
第7章	动态膜技术应用展望	159
7.1	动态膜组件基网及结构优化研究	159
7.2	动态膜成膜、结构及影响因素研究	160
7.3	动态膜污染物去除机理研究	160
7.4	动态膜运行优化研究	161
7.5	动态膜污染控制及反冲洗研究	162
7.6	动态膜应用范围及示范工程推广	163
	参考文献	164
	附录 A 单位	187
	附录 B 变量和符号	188
	附录 C 科学术语	189

第1章

概 论

1.1 膜技术概述

膜是指在不同驱动力作用下将两种不同相物质进行分离的介质 (Matteson and Orr, 1987; 刘茉娥, 1998; 张玉忠, 2004)。在驱动力作用下, 利用膜的透过性可使混合液中的离子、分子及某些微粒分离。压力驱动膜的截留机理主要是机械筛分作用, 吸附截留作用较弱。膜分离性能按膜孔径或截留分子量 (molecular weight compounds) 大小进行评价。而截留分子量是反映膜孔径大小的替代参数。膜分离的驱动力可以分为压力差、浓度差、电位差等。以压力差为驱动力的膜分离技术有反渗透 (reverse osmosis, RO)、纳滤 (nanofiltration, NF)、超滤 (ultrafiltration, UF) 和微滤 (microfiltration, MF) 等; 以浓度差为驱动力的膜分离技术有渗透气化 (pervaporation, PV) 等; 以电位差为驱动力的膜分离技术有电渗析 (electrodialysis, ED) 等。膜过程有死端过滤和错流过滤两种基本操作方式。死端过滤指在膜两侧压差作用下, 溶质和溶剂垂直于分离膜方向运动, 溶质被膜截留, 溶剂通过膜而被分离, 主体料液与透过液运动方向相同。错流过滤的主体料液与膜表面相切而流动, 料液中的溶质被膜截留, 透过液垂直于膜面而通过膜流出。

膜生物反应器 (membrane bioreactor, MBR) 是基于膜的分离特性, 采用膜技术与生物反应器相结合的一种工艺。膜生物反应器种类有膜分离生物反应器、膜曝气生物反应器、萃取膜生物反应器、膜渗透生物反应器和膜酶生物反应器等。污水处理中多采用微滤/超滤膜与活性污泥过程结合的膜分离生物反应器, 简称为膜生物反应器。膜组件相当于传统活性污泥处理中的二沉池, 进行固液分离。因致密的膜组件取代了传统的二沉池系统, MBR 技术所需占地面积和容器体积大大降低。截留的污泥和未降解的大分子物质将留在反应器中, 透过水离开体系。按膜组件和生物反应器的相对位置, MBR 可分为分置式和浸没式两种。在分置式 MBR 中生物反应器内的混合液由泵增压后进入膜组件, 滤液在压力驱动下透过膜, 被截留下来的浓缩液回流到反应池中。浸没

式膜生物反应器是将膜组件直接置于反应器内，通过泵抽吸使滤过液透过膜组件；反应器中充氧曝气除用来满足微生物生长和污染物去除的需要，还能控制和减缓膜污染。而浸没式厌氧膜生物反应器则通过搅拌或泵循环等方式来控制膜污染。分置式膜生物反应器通常用于规模较小、浓度较高的废水处理，如垃圾渗滤液、化工和石油工业废水等。浸没式膜生物反应器通常用于中到大量城市污水处理，且浸没式膜生物反应器比分置式膜生物反应器布置更紧凑，能耗更低。

与传统活性污泥法相比，MBR 既有优点也有缺点。MBR 相对于传统活性污泥法的主要优点有：①对污染物的去除率高，出水水质好；②利用膜的固液分离替代沉淀池的功能，既可节省基建费用，又可使处理单元结构紧凑；③膜的高效截留作用使得生物反应器内可保持较高的污泥浓度，可延长污泥龄，有利于世代周期长的硝化菌生长，提高对氨氮的去除效率，同时可降低剩余污泥的产量；④膜生物反应器实现了污泥龄和水力停留时间的彻底分离，设计、操作大大简化；⑤膜生物反应器易于实现自动控制，操作管理方便。同时，MBR 自身存在的不足也限制了其广泛应用，具体有：①整体膜组件造价仍太高；②日常运行所需能耗、维护运行费用高；③长期运行缺乏控制和恢复膜污染的有效方法。

动态膜反应器作为一种新型城镇污水深度处理技术，具备传统膜生物反应器的优点，且过滤通量大、反冲洗较方便，使其成为一种可能克服传统膜生物反应器不足的潜在技术。

1.2 动态膜定义

从文献资料可以看出，动态膜技术的发展有着很长的历史。早在 20 世纪 40 年代，美国就对硅藻土过滤技术进行了大量研究，并利用该技术在第二次世界大战期间为美国士兵提供安全的生活饮用水 (Black and Spaulding, 1944)。而这一技术的实质就是硅藻土动态膜技术，但当时动态膜的概念还没有被明确提出。1965 年，美国橡树岭国家实验室的 Marcinkowsky 等 (1966) 最早提出动态膜概念。他们在研究多孔物质进行海水脱盐时，误用了与 NaCl 不同的 $ZrOCl_2$ ，发现 $ZrOCl_2$ 在多孔板上能形成脱盐层，同样具有反渗透效能。这层薄膜是在压力作用下微粒就地沉积在多孔载体上，故称为原位形成膜或动力形成膜，简称动态膜。后来 Spencer 和 Thomas (1991) 把

动态膜的概念进一步具体化,提出“原位形成膜”(formed in place)概念。他们认为既然滤饼层在过滤中不可避免,那么有意识地在通过过滤某些特殊的悬浮料液,在膜表面事先形成一层适当厚度的滤饼,以滤饼取代膜介质的作用,这样可能反而能优化过滤工艺。当滤饼过滤阻力达到一定值后,必须进行反冲洗,把预制的滤饼和截留物质一同冲洗出系统,然后进行下一轮的制膜和过滤。这一过程也是现在动态膜研究的普遍流程。如今,比较认可的动态膜概念为:动态膜,又可以称为二次膜、次生膜(Kuberkar and Davis, 2000)或原位形成膜(Spencer and Thomas, 1991),是指通过预涂剂或反应池中混合液在基膜或支撑体(一般采用大孔支撑网)表面形成的新膜(泥饼)。

与传统 MBR 工艺相比,动态膜技术自诞生起就表现出很大优势。因物理截留主要由“次生膜”完成,支撑基网主要起到支撑动态膜泥饼层的作用,所以更加灵活和低廉的材料(如无纺布、不锈钢丝网和中空纤维等)可以用作支撑体(Lee et al., 2001)。同时通过预涂或自生形成在支撑体上的动态膜易于在线清洗和再生,使得其具有较高抗污染性能(Na et al., 2000; Sharp and Escobar, 2006)。如图 1-1 所示,动态膜对大分子物质和絮体具有良好的截留作用从而阻止其深入到支撑体表面。此外,涂膜材料造价通常也很低廉。硅藻土、高岭土、聚合氯化铝(PAC)、 MnO_2 、活性污泥等都被证明是理想的涂膜材料(Wu et al., 2005; Yang et al., 2011)。除了上述优势,动态膜还具有高通量、高截留率(Rumyantsev et al., 2000; Noor et al., 2002; Ye et al., 2006)、低能耗(Gunder and Krauth, 1998)、易清洗(Chu et al., 2008)等优点。自动态膜概念被提出以来已经过去了半个世纪,然而其发展和推广仍然有限(Yu and Dong, 2011; Sun et al., 2012)。

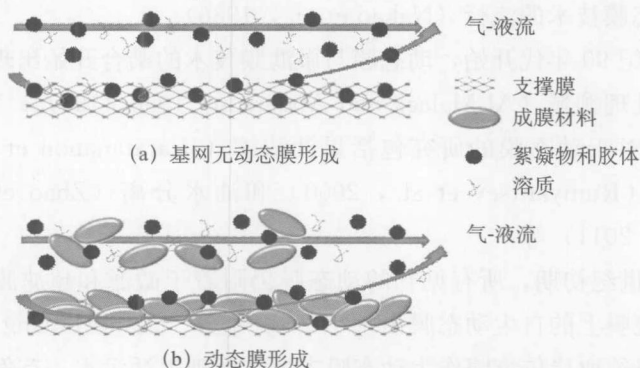


图 1-1 基网无动态膜和动态膜的形成

1.3 动态膜技术发展历程

现今的动态膜通常都形成在大孔材料上。然而,形成于微孔材料(如传统的微滤和超滤膜)上的动态膜也对过滤作用和减轻膜污染有着至关重要的作用。考虑到最早出现的动态膜均为后者,本书将微孔材料视为动态膜的支撑体之一。

动态膜技术的本质是通过泥饼层过滤,这和20世纪40年代美国对于硅藻土的应用不谋而合(Engineer Board, 1944a, 1944b)。对于硅藻土在过滤方面的应用最早由Heddle, Glen和Stewart在1886年申请专利(Deerr, 1921)。从那以后,硅藻土通常被用作食品、化工工业,继而水净化处理领域的过滤介质(Lowe and Brady, 1944)。

动态膜最早于1966年由美国橡树岭国家实验室应用于高压反渗透脱盐(Marcinkowsky, 1966)。起初人们对于动态膜研究的兴趣也局限于这一领域(Shor et al., 1968; Tanny and Johnson Jr, 1978)。效果最好的动态膜涂膜材料是将无机水合氧化物,尤其是Zr(IV)氧化物通过聚丙烯酸(PAA)预处理。这些动态膜以其高水通量和较明显的脱盐能力被关注。然而脱盐能力不足以应用于实际生产、难以反复涂膜和通量随过滤时间不断下降等缺陷使其没有得到广泛传播(Altamn et al., 1999)。

20世纪80年代后,对动态膜应用的关注被转移到处理工业废水,如聚合物制造、染料、印刷、纺织等的废水(Groves et al., 1983; Townsend et al., 1989)。也有些学者将动态膜技术应用于食品工业。动态膜与超滤膜技术的结合也起始于这一时期。尽管具有高截留效率,昂贵的涂膜材料和低渗透性能阻碍了动态膜技术的流行(Nakao et al., 1986)。

自20世纪90年代开始,动态膜与微滤膜技术的结合开始出现,主要应用于城镇污水处理领域(Al-Malack and Anderson, 1996, 1997c; Wang et al., 1998)。其他对于动态膜的研究包括果汁浓缩(Jiratananon et al., 1997)、蛋白质截留(Rumyantsev et al., 2000)和油水分离(Zhao et al., 2005; Yang et al., 2011)等。

直到21世纪初期,所有见刊的动态膜仍附着于微滤和超滤膜表面。首例不负载于传统膜上的自生动态膜出现于2002年(Fan and Huang, 2002)。研究人员使用涤纶取代传统膜作为动态膜支撑体处理生活污水。首例预涂动态膜产生于2006年(Ye et al., 2006)。活性炭(PAC)被用于在56 μ m涤纶布上

形成动态膜泥饼层处理生活污水。近来，数十例研究使用不同的涂膜和支撑材料建立动态膜生物反应器（DMBR）。研究表明，许多材料诸如金属网、编织布和无纺布可以达到或超过传统膜作为动态膜支撑体的性能（图 1-2）。

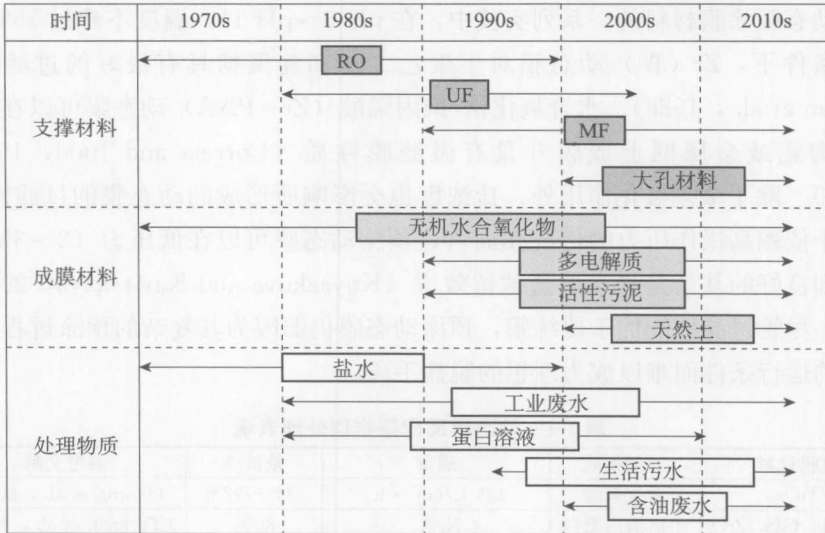


图 1-2 动态膜发展简图

除了好氧系统中的应用，动态膜技术同样也被应用于厌氧系统中。首例厌氧动态膜生物反应器出现在 90 年代中期。根据 Pillay 等（1994）的报道，与传统膜生物反应器相比，动态膜对于 BOD^①、COD、SS 的去除效率同样令人满意。对于两种动态膜生物反应器的研究证实它们具有经济友好性。

近年来，动态膜的研究更加复杂多样化，同时，人们关注更多的是实际应用而不是纯理论研究，预示着这一技术拥有巨大的发展前景。

1.4 动态膜技术应用概述

1.4.1 动态膜在物理截留方面的应用

动态膜反应器在物理方面的应用表现归纳见表 1-1。表 1-1 中，大多数对于动态膜在物理方面的应用研究集中于过滤效率和成膜条件（材料和运行参数

① BOD 为生化需氧量。本书其余科学术语含义参见附录 C。

等)。动态膜研究的先驱者们将其应用于反渗透脱盐, 但是不稳定的动态膜形成条件使研究结果差强人意 (Shor et al., 1968; Tanny and Johnson Jr, 1978)。0.8MPa 下在多孔陶瓷管超滤膜表面以 Zr (IV)、Al (III) 和 Fe (III) 作为动态膜涂膜材料的一系列实验中, 在 pH 3~pH 11, 温度不超过 353K 的实验条件下, Zr (IV) 动态膜对于聚乙二醇和葡聚糖具有最好的过滤性能 (Nakao et al., 1986)。水合氧化锆-聚丙烯酸 (Zr-PAA) 动态膜可以在低压下在陶瓷或金属网上成膜并具有微滤膜性质 (Correia and Judd, 1996a, 1996b)。除了浓差极化作用外, 盐浓度也会影响所形成的动态膜的过滤性能。相对于依赖高操作压力的传统膜而言, 预涂动态膜可以在低压力 (2~3MPa) 下达到良好的甚至是最高的盐截留效率 (Knyazkova and Kavitskaya, 2000)。然而, 尽管过滤性能优于传统膜, 预涂动态膜仍旧因为其复杂的预涂过程和不稳定的运行条件而难以成为理想的脱盐手段。

表 1-1 动态膜反应器物理处理表现

成膜材料	处理物质	通量	截留率	参考文献
TiO ₂	对氯苯酚	125 L/(m ² ·h)	33%~92%	(Horng et al., 2009)
Ca-oleate, CdS, ZrO ₂	牛血清白蛋白	N. A.	80%	(Turkson et al., 1989)
黏土矿物	合成 Co (II) 离子	N. A.	<98%	(Kryvoruchko et al., 2004)
PVA PEG	合成染料	260~440 L/(m ² ·h) 76~84 L/(m ² ·h)	28%~46% 65%~77%	(de Amorim and Ramos, 2006)
高岭土	CH ₃ COONa 聚合物	N. A.	≈100%	(Wang et al., 1998)
PVA	蛋白溶液	N. A.	83%~99%	(Na et al., 2000)
Zr-PAA	NaNO ₃ 溶液	50 L/(m ² ·h)	98%	(Correia and Judd, 1996a)
卵白蛋白 γ-球蛋白	卵白蛋白溶液	N. A.	>80%	(Matsuyama et al., 1994)
Zr (IV), Al (III), Fe (III)	胶体溶液	N. A.	N. A.	(Nakao et al., 1986)
水合 Zr (IV) 胶体	葡萄糖-牛血清白蛋白溶液	16.5~34.2L/(m ² ·h·bar)	>90%	(Chen and Chiang, 1998)
高岭土- MnO ₂	含油废水	120.1~153.2L/(m ² ·h)	>99%	(Yang et al., 2011)
Zr-dextran	血红蛋白溶液	7.7 L/(m ² ·h·bar)	70%~100%	(Wang et al., 1999)
Fe (OH) ₃ - MnO ₂ ·2H ₂ O	合成含油废水	100 L/(m ² ·h)	>98%	(Zhao et al., 2005)
非凝固-热凝固型聚合物	Na ₂ SO ₄	21.6~23 L/(m ² ·h)	75%~98%	(Knyazkova and Kavitskaya, 2000)
水合 Zr (IV) 胶体	卵白蛋白溶液	N. A.	80%~95%	(Rumyantsev et al., 2000)
Zr-PAA	卵白蛋白溶液	10~50L/(m ² ·h·bar)	>95%	(Altman et al., 1999)
固体颗粒	凤梨汁	6.37 m ³ /(m ² ·h)	84%~87%	(Jiraratananon et al., 1997)

注: N. A. 表示无数据

20世纪90年代后期,许多学者应用动态膜技术(通常与传统超滤膜结合)处理蛋白质溶液。Rumyantsev等(2000)使用Zr氧化物悬浮液形成了具有类似超滤膜性质的动态膜。他们发现在pH、Zr浓度和离子强度等成膜条件中,pH起最重要的作用。另一例研究中,Zr氧化物动态膜被形成于SS-316多孔管上以研究其对血红蛋白(Hb)溶液的浓缩作用(Wang et al., 1999)。对Hb的截留率随动态膜被葡聚糖的改善而改变,从70%到100%不等。此外,也有研究证实对于形成于无纺布上的Zr氧化物动态膜,1000ppm浓度下的血清蛋白去除率为85%,50ppm浓度下的血清蛋白去除率可达95%(Altman et al., 1999)。

自2000年以来,有数例使用动态膜处理含油废水的研究已见刊。 MnO_2 动态膜被用于处理炼油废水,并且呈现超过98%浊度去除率的稳定表现(Cai et al., 2000)。而 $Mg(OH)_2$ 或 $Fe(OH)_3$ 动态膜则有至少98%的TOC去除率(Zhao et al., 2005, 2006)。另外,一种高岭土- MnO_2 混合动态膜对于油的去除率可达99%(Yang et al., 2011)。但是,如大多数针对动态膜的研究一样,上述研究仍然是随机的、不系统的,对于未来的大规模应用的贡献十分有限。

相比较超滤膜而言,负载于微滤膜上的动态膜稳定水通量和截留效率较差,但是稳定性和抗膜污染性能优良(Jiraratananon et al., 1997)。通过一系列以凝胶动态膜去除聚乙二醇的实验,Tsapiuk(1996)指出动态膜的形成会提高溶质的截留率。以聚醚砜动态膜截留印染废水的系列实验也证实了动态膜在一定条件下可以改善过滤通量及不可逆污染(de Amorim and Ramos, 2006)。这一结论证实了动态膜比超滤膜拥有更好的通量,且对DOC、硬度和 UV_{254} 有更好的去除效率,与另一实验相一致(Sharp and Escobar, 2006)。对于动态膜应用的一项特例是通过对戊二醛共价偶联将 α 淀粉酶固定在动态膜上。实验证明固定化的淀粉酶较游离态的淀粉酶有更好的酶活性(Tien and Chiang, 1999)。

动态膜与生物反应器的联用同样适宜于污泥浓缩和二级废水深度处理。一个污泥浓缩包括附载于金属网上的自生动态膜系统曾被用于研究(Park et al., 2004)。对于较高的进水污泥浓度(SS为3000~9000mg/L),该系统的出水SS很低,污泥消减率可达85%~95%。该研究同时证实了对于动态膜生物反应器来说,处理前的污泥沉降是非必要的,这就使该系统能在更加多变的条件下运行。另一个安装有金属网过滤膜组件的SBR反应器被用于剩余污泥的好氧生物降解。进水的SS分别为4000~6000 mg/L,出水的SS低于57 mg/L(Wang et al., 2006)。在短期实验中,预涂在微滤膜上的 MnO_2 动态膜可以将浊度从22 NTU降至0.2 NTU(Al-Malack and Anderson, 1997c)。 MnO_2 动态膜通过提高通量、延长运行时间和提高去除率等改善了微滤膜的运行(Al-Malack and

Anderson, 1997b)。尽管动态膜可以对生活污水中的杂质颗粒进行物理截留，其在处理生活污水的应用中通常与生物反应器联合使用，如下节所述。

1.4.2 动态膜在污水生物处理方面的应用

在水处理应用领域，动态膜过滤技术通常与生物反应器结合，构成动态膜生物反应器进行污染物降解和固液分离。大体说来，对于动态膜生物反应器的使用可以分为两大类：好氧动态膜生物反应器和厌氧膜生物反应器（表 1-2）。

表 1-2 动态膜生物反应器在市政污水处理中的表现

成膜材料	处理物质	通量/ (L/ (m ² · h))	处理效率	参考文献
聚四氟乙烯	厌氧	4~12	< 30mg/L (出水 COD) < 10mg/L (出水 SS)	(Ho et al., 2007)
活性污泥	厌氧	0.5~3	>99% (SS)	(Jeison et al., 2008)
活性污泥	好氧	14.8~33.3	84.2% (COD) 98.03% (NH ₃ -N)	(Fan and Huang, 2002)
硅藻土	好氧	8.6~130	8.1~28.1 mg/L (出水 COD) 0.08~0.53mg/L (出水 NH ₃ -N) 100% (SS)	(Chu et al., 2008)
活性污泥	厌氧	5	77.5±29.5 mg/L (出水 COD) 27.6±12.5 mg/L (出水 NH ₃ -N)	(An et al., 2009)
活性污泥	好氧	20.8~31.6	5 mg/L (出水 BOD) 1.5mg/L (出水 SS) 80% (TN)	(Kiso et al., 2000)
PAC	好氧	417.6~543.6	4~5.76NTU (出水浊度)	(Xu et al., 2009b)
活性污泥	厌氧-好氧	16.7	91.6% (COD) 93.5% (SS) 66% (TN)	(Seo et al., 2003)
活性污泥	厌氧	65	57.3±6.1% (COD) 68~250 mg/L (出水 SS)	(Zhang et al., 2010b)
活性污泥	好氧	150	24~45mg/L (出水 COD) < 5 mg/L (出水 BOD) < 12mg/L (出水 SS)	(Fuchs et al., 2005)
PAC	好氧	18.6	97.09% (COD) 94.16% (NH ₃ -N)	(Ye et al., 2006)

大多数对好氧动态膜生物反应器的应用都是处理生活污水或模拟配水。在污染物浓度较低的前提下，动态膜生物反应器可以达到与传统 MBR 反应器相

同的高生物去除效率和高物理截留效率。一个以 $100\mu\text{m}$ 涤纶网为支撑体的自生动态膜生物反应器曾被用来处理生活污水 (Fan and Huang, 2002)。在运行阶段, 平均出水 COD 浓度为 28.2 mg/L , 去除率为 84.2% , 平均出水 NH_4^+-N 浓度为 0.8 mg/L , 去除率为 98.03% 。另一实验中, COD 和 NH_4^+-N 去除率分别为 $72\%\sim 89\%$ 和 $66\%\sim 94\%$, 而水阻力比微滤或超滤膜低 $2\sim 3$ 个数量级 (Chu and Li, 2006)。尽管不同实验结果间的差异不可避免, 研究者们对好氧动态膜生物反应器比传统污水处理系统可以更有效地去除 COD 和 NH_4^+-N 已达成共识 (Kiso et al., 2000; Fuchs et al., 2005; Kiso et al., 2005)。对于含磷污染物, 好氧动态膜生物反应器对 TP 的去除有限 (Seo et al., 2003; Ren et al., 2010b), 而添加 PAC 后可将 TP 去除率提高至 85% (Seo et al., 2007)。动态膜自身对于有机物的去除更大程度上依赖于物理截留而非生物降解。作为迄今为止唯一一例运用好氧动态膜生物反应器处理工业废水的研究, Satyawali 和 Balakrishnan (2008) 使用以 $30\mu\text{m}$ 尼龙网为支撑体的动态膜生物反应器处理蒸馏废水。不同于处理生活污水, 蒸馏废水的难降解性 (BOD/COD: 0.14) 使 COD 的去除率明显降低 ($22\%\sim 41\%$)。

因材料和运行环境的差异性, 目前暂无预涂和自生动态膜反应器的对比研究。然而, 一些研究比较了动态膜生物反应器和传统 MBR 反应器。依据对 PAC 预涂动态膜生物反应器和传统中空纤维膜生物反应器的对比, 对 COD 的去除率分别为 97.09% 和 76.13% , 表明动态膜生物反应器去除有机污染物有一定优势 (Ye et al., 2006)。

一些学者研究了动态膜自身对于污染物的去除效果。Fan 和 Huang (2002) 指出在其实验中自生动态膜对 COD 的去除率为 90% , 但是因为固液分离的特性, 其对于 NH_4^+-N 的去除效果极小。这一发现也被其他学者证实。通过一系列实验, 硅藻土自生动态膜生物反应器对于 COD_{Mn} , TN, DOC 和 UV_{254} 的去除效果显著, 而动态膜自身对上述污染物的去除贡献很小, 因此主要在反应器中对有机污染物的生物降解作用占主导地位 (Chu et al., 2008; Chu et al., 2010; Yu et al., 2012)。

厌氧动态膜生物反应器用于处理生活污水或污泥。以灵活的编织布为自生动态膜支撑体的厌氧动态膜生物反应器可以通过延长 SRT 增强厌氧消化作用 (Pillay et al., 1994)。动态膜有效地提高了反应器的过滤效果 (Jeison et al., 2008)。超过 99% 的固体被动态膜截留。然而, 反应器通量偏低 (最高 $3\text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$), 运行不稳定是其存在的主要问题。通过研究厌氧动态膜生物反应器的污染特性, 研究者发现膜污染物中的胞外聚合物主要由蛋白质和腐植酸组

成；Mg, Al, Ca, Si 和 Fe 是主要的无机污染物；生物聚合物和无机污染物间的架桥作用可以使污染物更加紧密 (An et al., 2009)。在高通量下 (65 L/(m² · h))，渗透作用超过了反向运输力使得微粒相比于大颗粒更容易沉积于膜表面 (Zhang et al., 2011)。上述研究更注重动态膜污染而非运行条件，证明了动态膜的存在可以大幅减轻膜污染。

1. 基膜材料对动态膜的影响

动态膜生物反应器在污水处理中的运行要考虑的因素很多，研究主要集中在以下几个方面：基膜材料的选择与影响；反应器及曝气方式的影响；混合液浓度的影响；动态膜作用压力和动态膜膜通量大小的影响等。

表 1-3 概述了部分动态膜生物反应器处理生活污水时的基本运行情况。

表 1-3 部分动态膜生物反应器运行情况

动态膜类型	组合方式	曝气方式	MLSS/(mg/L)	膜通量/(L/(m ² · h))	出水 SS/浊度	参考文献
100μm 涤纶 自生膜	浸没式	单侧+下方	7500	14.9	未检出	(Fan and Huang, 2002)
100μm 尼龙 自生膜	浸没式	双侧	9000	20.8~31.6	SS<1.5mg/L	(Kiso et al., 2000)
30μm 尼龙 自生膜	浸没式	下方	4000	50~150	SS<12mg/L	(Fuchs et al., 2005)
108μm 不锈 钢自生膜	浸没式	单侧+下方	5000	15~60	<1.2NTU	(吴志超等, 2008)
30μm 涤纶 自生膜	浸没式	双侧	<6000	100	<9.5NTU	(Chu and Li, 2006)

在污水处理中，动态膜基膜材料一般选用柔性大孔材料（如无纺布、尼龙网和涤纶网等）和刚性不锈钢网。从表 1-3 中，我们可以看到，动态膜基膜材料孔径一般为 30~100μm，较传统膜生物反应器中的微滤膜或超滤膜要大很多。动态膜基膜材料，如尼龙网、涤纶或不锈钢网，材料丰富，成本低。Kiso 等 (2000) 选用孔径分别为 100μm、200μm 和 500μm 的尼龙网做成不同的动态膜组件。试验发现基膜孔径可以影响动态膜的成膜时间和动态膜出水 SS 含量。活性污泥在孔径为 100μm 的基膜表面可快速形成动态膜，10min 后动态膜出水 SS 低于 10mg/L；活性污泥虽然可以在孔径 200μm 和 500μm 的基膜上形成有效动态膜，但出水 SS 较高，且过滤 1h 后动态膜出水 SS 仍大于 80mg/L。Kiso 得出孔径为 100μm 的基膜适于做动态膜基膜。邱宪锋 (2007) 通过试验发现，筛绢和单滑面无纺布比筛网和双滑面无纺布更适合用作动态膜的基膜，易于形成动态膜。另有学者发现，基膜的质地（不锈钢丝网和尼龙网）对动态膜的形成没有影响，但基膜孔径大小对动态膜的形成有显著影响，