

The background of the cover features a dynamic splash of water at the top, transitioning into a field of numerous water droplets of varying sizes. The color palette is a gradient of blues and greens, with a soft, ethereal glow. Two horizontal lines are positioned above and below the main title.

膜生物反应器 污水处理理论与应用

王志伟 吴志超 著



科学出版社

膜生物反应器污水处理 理论与应用

王志伟 吴志超 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

膜生物反应器(MBR)技术与传统生物处理工艺相比具有出水水质好、占地面积小、污泥产量低等优点,在污水处理与资源化领域具有广阔的应用前景。本书系统地介绍了MBR技术基本构成和基础知识、MBR的污染机理和膜清洗技术、抗污染膜材料制备、MBR市政污水处理性能、厌氧MBR技术、电化学MBR技术、正渗透技术、膜分离技术应用于污泥浓缩消化和MBR工程案例。

本书可供污水处理领域科研人员、工程技术人员、MBR运行管理人员和高等院校市政工程、环境工程专业的本科生、研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

膜生物反应器污水处理理论与应用/王志伟,吴志超著. —北京:科学出版社, 2018.9

ISBN 978-7-03-058785-5

I. ①膜… II. ①王… ②吴… III. ①生物膜反应器—污水处理—研究
IV. ①X703

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第209293号

责任编辑:万峰 朱海燕 / 责任校对:严娜 彭珍珍
责任印制:肖兴 / 封面设计:北京图阅盛世文化传媒有限公司

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>

天津市新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年9月第一版 开本:787×1092 1/16

2018年9月第一次印刷 印张:38 1/2

字数:900 000

定价:258.00元

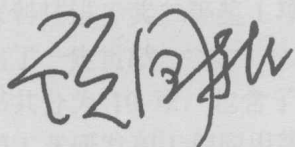
(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

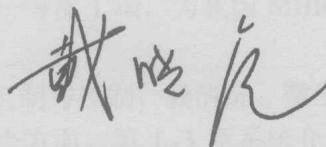
我国经济高速发展的同时，也带来了诸多环境问题，其中水资源短缺和水体污染是突出的环境问题之一。为解决我国的水资源危机和水环境污染问题，国家实施了“水体污染防治行动计划”重大战略，对水体污染防治的具体行动目标做出了全面部署。解决我国水体污染问题需要强有力的科技支撑，研发适用于我国国情的污水处理与资源化技术是科研工作者的孜孜追求。高等院校的环境工程专业和科研队伍在解决我国环境问题的进程中理应发挥重要作用。

膜生物反应器技术在近几十年来备受瞩目，是污水处理与资源化领域研究的热点之一，同时也是未来污水处理与再生利用的主导技术之一，具有广阔的应用前景。同济大学环境科学与工程学院是国内最早从事膜分离技术的研究单位之一。由王志伟教授、吴志超教授编著的《膜生物反应器污水处理理论与应用》是其团队十余年致力于膜生物反应器研究的结晶，是遵循基础研究—高技术研发—工程应用创新链获得重要科研创新成果的缩影。在国家大力实施水体污染防治行动计划的背景下，出版《膜生物反应器污水处理理论与应用》的专著显得恰合时宜。

《膜生物反应器污水处理理论与应用》这本著作包括了膜材料制备、膜污染机理与控制、膜清洗、微生物作用机制、膜工艺研发和工程应用等方面，是对膜生物反应器技术的系统总结和分析，相信该书的出版可以推动膜生物反应器技术成果的及时分享和交流，可以为从事膜生物反应器技术的研究人员、工程技术人员、运行管理人员及高等院校环境工程专业学生提供参考，对于推动我国膜生物反应器技术的研发与应用具有积极意义。在此，向该书的作者表示衷心的祝贺！希望作者及其团队再接再厉，能够做出更多、更好的成果，为我国水环境问题的解决做出应有贡献！



同济大学资深教授
原同济大学常务副校长



同济大学环境科学与工程学院院长
国家“千人计划”特聘教授
二〇一七年八月于同济大学

前 言

随着社会经济的快速发展,我国环境问题尤其是水污染问题日益严重。水污染与水资源短缺问题已成为制约我国社会、经济发展的重要因素。污水排放是造成水污染的最直接原因之一,开展污水处理与再生利用是控制水体污染、改善水体环境、缓解水资源危机的重要途径。膜生物反应器(membrane bioreactor, MBR)技术是将膜分离与生物处理有机结合的新型技术工艺,与传统活性污泥法工艺相比,具有出水水质好、占地面积小、污泥产量低等优点,是污水处理与再生利用的主导技术之一,具有广阔的应用前景。

我国 MBR 技术研发虽然晚于国外,但是在过去 10 余年间取得了快速发展与进步,成为世界上 MBR 技术研究和应用最活跃的国家之一。尤其是最近几年在 MBR 技术应用方面与国外几乎同步,部分领域处于世界领先水平。随着研究不断深入和技术持续优化,在高性能膜材料制备、系统降耗、膜污染控制以及运行管理优化等方面取得了长足的进步,支撑了 MBR 技术在污水处理与资源化领域的快速推广应用。据不完全统计,截至 2014 年年底,我国投入运行的 MBR 系统累计处理能力已达到 350 万 m^3/d 。可以预见,未来几年 MBR 技术在我国的应用将持续快速增加。

本书作者及其研究团队得益于同济大学顾国维先生的鼓励和倡导,自 20 世纪末开始开展膜生物反应器的理论与技术的研究工作,研究内容覆盖膜材料与膜组件制备、膜污染机制与控制、膜清洗、微生物作用机制、膜工艺技术开发、成果转化与应用等方面,团队在国内外权威期刊发表 150 余篇论文,其中 SCI 收录论文 100 余篇,申请国家发明专利 30 余项,获授权专利 20 项,所研发膜材料和膜技术在 100 多座(套)污水处理工程与装备中获得应用,研究成果获上海市科学技术进步三等奖(3 项)、中国膜工业协会科学技术奖二等奖(1 项)和中国国际工业博览会铜奖(1 项)等奖励,合作完成的成果获国家科技进步奖二等奖 1 项和教育部科技进步奖一等奖 1 项,为我国 MBR 技术的发展做出了一定贡献。

本书共分为 10 章,包含了膜材料制备、膜污染机制与控制、膜清洗、微生物作用机制、膜工艺研发和工程应用等 MBR 技术涵盖的各个方面。第 1~3 章系统介绍 MBR 技术基本构成和基础知识、MBR 的污染机制和膜清洗技术,这些章节的内容主要来源于本书作者和团队的长期研究工作,以及本书作者和团队所发表的有关膜污染、膜清洗的综述论文,为了使广大读者对 MBR 有清晰和系统的认知,在第 1~3 章中包含了部分教科书和已有文献的内容。第 4~9 章主要内容包括抗污染膜材料制备、MBR 市政污水处理性能、厌氧 MBR 技术、电化学 MBR 技术、正渗透技术、膜分离技术应用于污泥浓缩消化等内容,全部来自于本书作者和团队的研究成果。第 10 章主要介绍 MBR 技术的工程应用,主要遴选了处理市政污水、新农村分散型污水、餐饮废水、纺织工业废水、

垃圾渗滤液等 MBR 工程案例。

本书工作主要源于 20 余位研究生的研究工作，主要包括博士研究生张新颖、王巧英、王盼、马金星、梅晓洁、韩小蒙、于鸿光、张杰、张星冉、安莹、王新华、朱学峰、陈妹、王雪野、董莹，硕士研究生黄健、唐霁旭、黄菲、唐书娟、谢震方、Suor Denis、何磊，联合培养硕士研究生余杨波、陈海琴等，在此一并对所有做出贡献的研究生和团队其他成员表示衷心感谢！

本书的主要研究成果得到了国家自然科学基金优秀青年基金项目、国家自然科学基金面上项目、科技部国际合作课题、国家科技支撑计划课题、国家“863”计划子课题、国家水体污染控制与治理科技重大专项、上海市科学技术委员会科技计划课题、企业合作课题等的支持，在此深表谢意！同时，在本书作者和研究团队开展科研过程中，得到了本领域权威专家学者、技术合作单位和技术应用单位的同仁们的大力支持，在此一并感谢他们的帮助与支持！同时感谢作者和团队所在单位同济大学及协同创新中心在科研过程和书籍撰写过程中给予的大力支持！

希望本书相关内容能对我国 MBR 技术的研究与应用有所裨益。本书可供污水处理领域科研人员、工程技术人员、MBR 运行管理人员和高等院校市政工程、环境工程专业本科生、研究生参考。由于作者水平有限，书中难免有不足之处，敬请各位读者和同仁批评指正。

作者

2016 年 2 月于同济大学

目 录

序

前言

第1章 膜生物反应器基础知识	1
1.1 膜生物反应器技术简介	1
1.2 膜生物反应器的研究与发展历史	6
1.3 膜生物反应器操作运行	9
1.4 膜生物反应器工艺设计重点	15
1.5 膜生物反应器技术研究与应用驱动力	18
参考文献	18
第2章 MBR 污染机制及其控制	20
2.1 MBR 膜污染概述	20
2.2 MBR 污染物鉴定、表征及膜污染特性	38
2.3 不同膜材料及操作条件与膜污染的关系	80
2.4 MBR 污染控制方法	118
参考文献	151
第3章 MBR 膜清洗	153
3.1 膜清洗基础知识	153
3.2 膜清洗特点、参数、机制与效率	158
3.3 膜清洗方案的选择	164
3.4 膜化学清洗对膜的损伤	166
3.5 膜化学清洗对微生物活性影响	172
参考文献	199
第4章 膜材料制备及性能研究	201
4.1 膜材料制备的优化	201
4.2 抗污染共混膜的制备	233
4.3 有机/无机纳米颗粒共混膜的制备	237
4.4 相转化过程中纳米颗粒的表面聚集制备抗污染膜	246
4.5 抗菌/抗污染共混膜的制备	256
4.6 膜表面聚合制备抗菌膜	288
参考文献	293

第 5 章 MBR 处理市政污水理论与技术	296
5.1 不同操作模式对 MBR 运行性能影响	296
5.2 不同 C/N 值污水对 MBR 运行性能影响	308
5.3 不同曝气强度对 MBR 运行性能影响	313
5.4 低碳源污水 MBR 处理性能研究	320
5.5 不同 MBR 工艺组合运行对比	342
参考文献	357
第 6 章 厌氧膜生物反应器污水处理理论与技术	359
6.1 厌氧动态膜 MBR 处理垃圾渗滤液	359
6.2 厌氧 MBR 处理城市生活污水	382
6.3 AnDMBR 处理生活污水研究	414
6.4 AnMBR 膜清洗研究	427
参考文献	438
第 7 章 新型电化学膜生物反应器原理与技术	440
7.1 EMBR 的基本原理与构型	440
7.2 外加电源型 EMBR 处理生活污水性能	444
7.3 生物电化学型 EMBR 处理生活污水特性	460
参考文献	486
第 8 章 正渗透膜分离技术污水处理性能	487
8.1 正渗透膜基本过滤行为	487
8.2 正渗透膜处理城市污水性能	500
8.3 正渗透膜处理垃圾渗滤液性能	522
8.4 正渗透的清洗方案研究	529
8.5 正渗透膜分离污水处理可能技术路线	539
参考文献	540
第 9 章 膜分离技术应用于污泥浓缩消化	541
9.1 平板膜应用于剩余污泥浓缩	541
9.2 平板膜应用于剩余污泥同步浓缩消化	557
9.3 厌氧动态膜生物反应器用于污泥发酵	562
参考文献	593
第 10 章 膜生物反应器技术工程设计与应用案例	594
10.1 MBR 工艺设计	594
10.2 MBR 工程应用案例	602
参考文献	607

第 1 章 膜生物反应器基础知识

1.1 膜生物反应器技术简介

1.1.1 膜生物反应器基本概念

污水处理用膜生物反应器 (MBR) 是指膜分离与传统生物处理工艺紧密结合的一种处理工艺技术。简言之, MBR 是利用膜分离设备代替了传统活性污泥法中的二次沉淀池, 实现固液分离(图 1.1), 又称为生物分离膜生物反应器 (biomass separation membrane bioreactor) (Wang et al., 2008)。

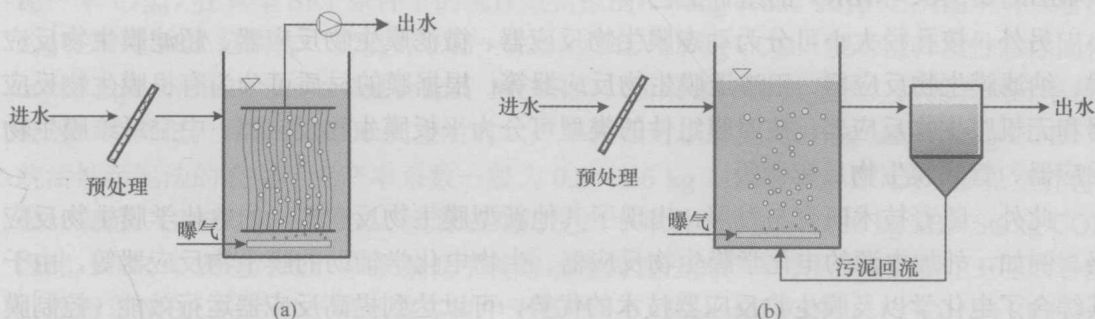


图 1.1 MBR 与传统活性污泥法的对比

(a) MBR; (b) 传统活性污泥法

1.1.2 膜生物反应器基本构成、分类与特点

1. 膜生物反应器基本构成与分类

膜生物反应器基本构成包括膜组件和生物反应器。根据膜组件与膜生物反应器的组合方式可将膜生物反应器分为: 分置式膜生物反应器 (recirculated membrane bioreactor, RMBR), 又称分体式 MBR; 浸没式膜生物反应器 (submerged membrane bioreactor, SMBR), 又称一体式 MBR。RMBR 把膜组件与生物反应器分开放置 [图 1.2 (a)], 生物反应器的混合液经泵增压后进入膜组件, 在压力驱动下混合液中的水分子及小分子物质透过膜得到系统出水, 活性污泥和大分子物质则被膜截留随浓缩液回流到生物反应器内。SMBR 是将膜组件直接置于反应器内 [图 1.2 (b)], 通过泵的抽吸得到过滤液; SMBR 通过鼓风机进行曝气供氧, 一方面满足微生物生长和污染物去除的需要, 另一方面在膜表面形成一定的水力紊动和膜面错流流速, 从而控制和减缓膜污染; SMBR 采用曝气等形式在膜表面产生一定剪切力, 以保证良好传质并控制膜污染。

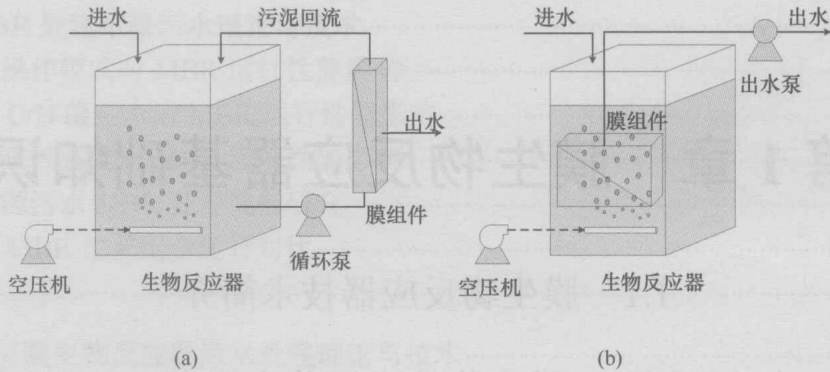


图 1.2 膜生物反应器示意图

(a) 分置式; (b) 浸没式

根据生物处理方式可分为好氧膜生物反应器和厌氧膜生物反应器。好氧膜生物反应器一般用于生活污水的处理，厌氧膜生物反应器一般用于高浓度或难降解有机废水的处理。为了达到特定的处理目标，也出现了厌氧-缺氧-MBR (A/O-MBR)、厌氧-缺氧-好氧-MBR (A/A/O-MBR) 的组合工艺。

另外，按孔径大小可分为动态膜生物反应器、微滤膜生物反应器、超滤膜生物反应器、纳滤膜生物反应器、正渗透膜生物反应器等；根据膜的材质可分为有机膜生物反应器和无机膜生物反应器；按照膜组件的类型可分为平板膜生物反应器、中空纤维膜生物反应器、管式膜生物反应器等。

此外，随着技术研究与发展，出现了其他新型膜生物反应器，如电化学膜生物反应器。例如，外加电源的电化学膜生物反应器、生物电化学辅助的膜生物反应器等，由于其综合了电化学以及膜生物反应器技术的优势，可以达到提高反应器运行效能（控制膜污染）或者提升物质的降解或转化效率的目的（如提升难降解有机物去除效率、提高甲烷产率等）（见本书第 7 章）。

2. 膜生物反应器特点

与传统活性污泥法相比，由于 MBR 引入了膜分离，可以强化系统内的微生物、颗粒物、大分子有机物（根据膜的具体孔径大小）的分离去除效果，使 MBR 具有以下优点。

(1) 出水水质好。由于膜分离的引入，强化了固液分离效果，出水的悬浮颗粒物(SS)大幅度降低（即使是动态膜生物反应器出水 SS 也比传统活性污泥法低）。其次，膜分离使系统的生物相浓度大幅度提升，一般 MBR 工程混合液悬浮固体浓度 (mixed liquid suspended solids, MLSS) 浓度为 8~15 g/L（甚至达到 20 g/L），而传统活性污泥法污泥浓度仅为 2~4 g/L，因而 MBR 耐冲击负荷强，高污泥浓度使污泥负荷降低 (F/M ^①降低)，可以提升污染物的去除效果。膜分离同时使系统的水力停留时间 (HRT) 和污泥停留时间 (SRT) 分离，使操作更为灵活方便，MBR 可以应用比传统活性污泥法高数倍的 SRT，可以截留富集世代周期比较长的细菌（如硝化细菌等），可以提高对特定目标污染物的

① F/M ：基质的总投加量/微生物总量

去除能力。

(2) 占地面积小。由于系统可以维持较高的污泥浓度, 因而其容积负荷可以大大增加。根据我们的统计分析, MBR 容积负荷一般可以达到 $1.0 \sim 4.0 \text{ kg COD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 或者更高 (Wang et al., 2013), 占地面积可以大幅度缩小。另外, 一般 MBR 工艺可以省掉初沉池, 同时由于膜分离代替了二沉池, 因而 MBR 工艺的流程更为简短、布置更为紧凑, 节约占地面积。

(3) 剩余污泥量少。在长泥龄或者低 F/M 条件下会导致微生物出现维持代谢

(maintenance metabolism), 从而实现生物维持性代谢的污泥减量。根据我们统计, MBR 中的污泥负荷一般在 $0.04 \sim 0.31 \text{ kg COD}/(\text{kg MLSS} \cdot \text{d})$ (Wang et al., 2013a), 也有达到 $0.55 \text{ kg COD}/(\text{kg MLSS} \cdot \text{d})$ (黄霞和文湘华, 2012), 一般低于传统活性污泥法污泥负荷 $0.4 \sim 1.0 \text{ kg COD}/(\text{kg MLSS} \cdot \text{d})$ [传统活性污泥法去除碳源的污泥负荷为 $0.2 \sim 0.5 \text{ kg BOD}_5/(\text{kg MLSS} \cdot \text{d})$, 假定 COD 的 50% 为 BOD_5] (参见室外排水设计规范, GB50014—2006)。

当然, 对于短泥龄 MBR (如以获取生物质为目的), 其污泥负荷可以高达 $1.4 \text{ kg COD}/(\text{kg MLSS} \cdot \text{d})$ 。污泥产量或污泥产率与系统的污泥龄具有直接联系, 图 1.3 是 MBR 中表观污泥产率 (Y_{obs}) 在典型 SRT 条件下的统计数据范围 (Wang et al., 2013)。从图中可以看出, Y_{obs} 在常用 SRT 范围内, 其值为 $0.05 \sim 0.25 \text{ kg MLVSS}/\text{kg COD}$ (混合液挥发性悬浮固体, mixed liquid volatile suspended solids, MLVSS)。如果 SRT 继续延长, 污泥表观产率系数会进一步降低, 泥龄在 1000 天左右时, 产率系数可以达到 $0.01 \text{ kg MLVSS}/\text{kg COD}$ 。传统活性污泥法的表观污泥产率系数一般为 $0.3 \sim 0.6 \text{ kg MLVSS}/\text{kg BOD}_5$ (参见室外排水设计规范, GB50014—2006), 换算表观污泥产率系数为 $0.15 \sim 0.30 \text{ kg MLVSS}/\text{kg COD}$ 。因此, MBR 中表观污泥产率系数低于传统活性污泥法的产率系数, 且从图 1.3 可以看出, 一般而言 MBR 的污泥产率系数多集中于 $0.05 \sim 0.15 \text{ kg MLVSS}/\text{kg COD}$ (当 SRT 大于 20 天)。

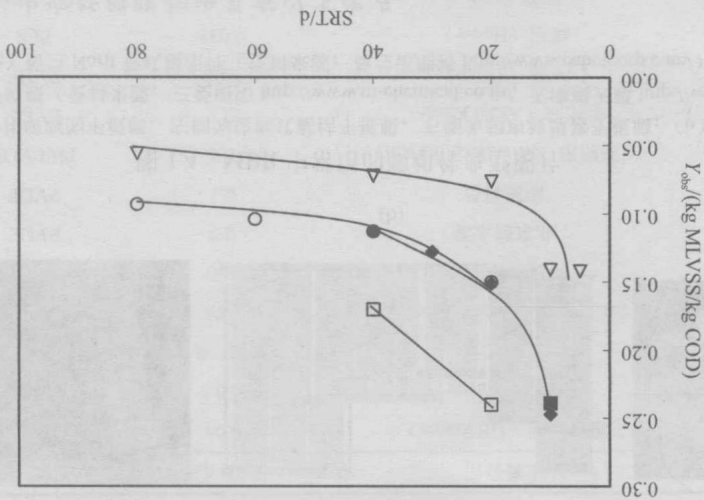


图 1.3 MBR 中污泥产率范围及与污泥龄 (SRT) 之间的关系

有关表观污泥产率、净污泥产率的概念请参阅其他相关生物处理书籍

数据来源: ◆ (王志伟, 2007); ■ (Teck et al., 2009); △ (Huang et al., 2001); □ (Yoon et al., 2004); ○ (Police et al., 2008)

当然，MBR 技术也存在一定的缺点，如能耗高、膜更换成本高和管理要求高等。能耗高主要与膜池曝气相关，随着技术的发展，MBR 的能耗大幅度降低，现阶段国际先进水平吨水处理能耗可以达到 $0.5 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ 以下。此外，目前膜的寿命一般处于 5~8 年（中空纤维膜 5 年、平板膜 8 年），当组件达到使用寿命时，需要进行膜更换。由于 MBR 采用大量监测仪表，同时鉴于 MBR 存在的膜污染问题，需要进行相关仪表维护、监测以及膜清洗维护操作，增加了运行管理工作量。

3. 膜生物反应器常用膜材料与膜组件

MBR 中常用的膜材料有聚偏氟乙烯 (PVDF) 和聚醚砜 (PES)，是 MBR 应用广泛的膜材料。其他的膜材料有聚丙烯腈 (PAN)、聚丙烯 (PP)、聚乙烯 (PE)、聚苯乙烯 (PS)、聚氯乙烯 (PVC)、聚四氟乙烯 (PTFE) 等。就材料本身而言，PAN 为亲水性材质，PVDF、PES、PS 等为疏水性材质，在 MBR 应用中需要进行亲水改性。在 MBR 实际应用中，除考虑膜材料的选择外，还应考虑膜的制备方法，如相转化法 (non-solvent induced phase separation, NIPS) 和热致相分离法 (thermally induced phase separation, TIPS)。特别是在中空纤维膜的制备中，TIPS 方法制作的膜往往具有较高的强度，膜的使用寿命也相对较长。随着膜制备技术的发展，依据材料本身性能，也相继开发了其他新型的膜制备方法，如相转化法与热致相分离法的结合等。此外，自组装法及电纺丝法等主要用于膜材料的制备。

MBR 中常用的膜组件包括平板膜组件和中空纤维膜组件，这两种膜组件是浸没式 MBR 应用最为广泛的组件形式。在分体式 MBR 中，膜组件常采用管式膜组件。三种膜组件的典型图片如图 1.4 所示。MBR 中应用的膜组件孔径一般为 $0.01\sim 0.4 \mu\text{m}$ ，即以超滤膜和微滤膜为主。当然，随着技术研究的不断深入，其他类型的膜组件也应用到 MBR 中，如正渗透膜组件 (forward osmosis)。

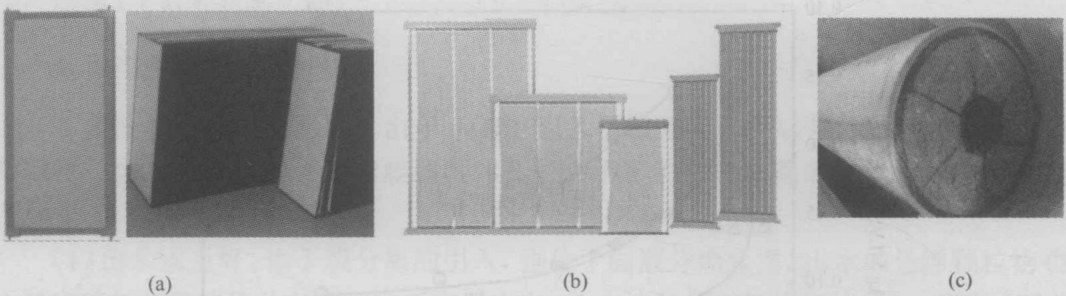


图 1.4 MBR 中常用的膜组件典型图片

(a) 作者与相关公司合作研制的平板膜，左侧为边框式黏结平板膜，右侧为超声波焊接平板膜；(b) 三菱丽阳中空纤维膜和天津膜天膜中空纤维膜（资料来源：三菱丽阳 <http://www.m-chemical.co.jp/>；天津膜天膜 <http://www.motimo.com/>）；
(c) 荷兰 Norit 管式膜组件（资料来源：荷兰诺瑞特 <http://www.cabotcorp.com/>）

1) 平板膜与中空纤维膜相比具有以下优点

(1) 平板膜组件水力学条件易于控制，其抗污染能力强；而中空纤维膜在实际应用中易发生杂质缠绕、污泥沉积等问题；

(2) 平板膜组件应用于 MBR 中, 能够在高污泥浓度条件下运行 (如 15~20 g/L), 而中空纤维膜一般要求污泥浓度在 10 g/L 以下;

(3) 平板膜组件比中空纤维膜组件的运行通量高;

(4) 平板膜组件比中空纤维膜组件的运行压力低;

(5) 由于平板膜是有机高分子材料与无纺布的复合, 其强度高, 寿命长, 而中空纤维膜一般仅有高分子材料层 (目前也有采用有机高分子层和无纺布复合制作中空纤维膜的报道), 其强度低, 在运行过程中易发生断丝等问题;

(6) 平板膜 MBR 其应用范围相对较为广泛, 如应用到高浓度废水处理中。

2) 平板膜与中空纤维膜相比具有以下缺点

(1) 平板膜组件的装填密度较小, 膜区占地面积比中空纤维膜占地面积大;

(2) 平板膜组件不能进行在线反冲洗 (德国迈纳德 BIO-CEL 平板膜可以进行在线反冲洗), 而中空纤维膜组件可以进行在线反冲洗;

(3) 平板膜组件的价格比中空纤维膜相对较贵;

(4) 中空纤维膜可应用于大型 MBR, 而平板膜比较适合中小规模的 MBR。

管式膜组件主要用于分置式膜生物反应器, 如用于垃圾渗滤液等高浓度有机废水的处理。管式膜组件的主要优点是能耐受悬浮固体等物质, 对料液的前处理要求相对较低, 可有效地控制浓差极化, 并能大范围地调节料液的流速, 对料液进行高倍浓缩, 膜生成污垢后容易清洗; 其缺点是投资和运行费用较高, 单位体积内膜的比表面积较低, 膜区占地面积相对较大。

目前, 在 MBR 实际工程中主要应用的膜材料、膜组件及膜供应商列于表 1.1 (郑祥等, 2015)。

表 1.1 MBR 中膜材料和膜组件应用情况

膜的分类	代表公司	孔径 / μm	材料	膜产地
中空纤维	通用泽能 (GE Zenon)	0.04	PVDF	匈牙利
中空纤维	美能 (Memstar)	<0.1	PVDF	新加坡
中空纤维	海南立升	0.02~0.1	PVDF/PVC	国产
中空纤维	西门子 (Seimens Memcor)	0.02	PVDF	澳大利亚
中空纤维	科氏 (Koch)	0.03	PES	美国
中空纤维	北京碧水源	0.3	PVDF	国产
中空纤维	津膜科技	0.1	PVDF	国产
中空纤维	三菱丽阳 (Mitsubishi Rayon)	0.4	PE/PVDF	日本
中空纤维	旭化成 (Asahi Kasei)	0.1	PVDF	日本
平板膜	东丽 (Toray)	0.08	PVDF	日本
平板膜	琥珀 (Huber)	0.038	PES	德国
平板膜	久保田 (Kubota)	0.2	氯化 PVC	日本
平板膜	斯纳普 (Sinap)	0.1	PVDF	国产
平板膜	阿法拉伐 (Alfa laval)	0.2	PVDF	瑞典

1.2 膜生物反应器的研究与发展历史

1.2.1 国外 MBR 研究与发展

膜生物反应器技术起源于 20 世纪 60 年代的美国,其研究和发展大致经历以下三个阶段:

第一阶段(1966~1980年),即膜生物反应器的研究和开发的起步阶段。1966年,美国的 Dorr-Oliver 公司首先将膜生物反应器用于废水处理的研究,开发了 MST 工艺(membrane sewage treatment)。1968年,Smith 等将好氧活性污泥法与超滤膜相结合的膜生物反应器用于城市污水处理,其研究结果发表在废弃物处理的年会报告中(Smith et al., 1969),结果表明该工艺具有减少活性污泥产量、能够维持较高污泥浓度、占地面积小等优点。1969年,Budd 等的分离式膜生物反应器技术获得了美国专利(Budd, 1969)。20 世纪 70 年代初期,好氧膜生物反应器处理城市污水的试验规模进一步扩大,同时,厌氧膜生物反应器研究也相继开始进行(Grethlein, 1978)。但是限于当时落后的膜生产技术,膜的使用寿命短、通量小,加之当时对水处理排放出水水质要求不严,使膜生物反应器技术在此阶段仅仅停留在实验室研究规模,未能投入实际应用。

第二阶段(1980~1995年),即膜生物反应器的发展阶段:在该阶段,膜生物反应器在日本发展较快。日本受制于国土面积小,地面水体由于流程较短而导致自净能力差和水体易受污染等问题。膜生物反应器技术由于其占地面积小、出水水质优良和布置紧凑等优点在日本备受关注。自 1983~1987 年,日本有 13 家公司使用好氧膜生物反应器技术处理大楼废水,经处理后的水作为中水回用。1985 年日本建设省牵头组织了“水综合再生利用系统 90 年代计划”,其内容涉及新型膜材料的开发、膜分离装置的构造设计和膜生物反应器运行系统研究等,该计划把膜生物反应器的研究在污水处理对象及规模两个方面大大推进了一步,主要采用的膜生物反应器的形式为分置式。另外,加拿大的 Zenon 公司(目前已并入 GE 公司)推出了该公司的分置式膜生物反应器,用于生活污水的好氧处理。从 80 年代后期到 90 年代初,Zenon 公司开发了用于处理工业废水的膜生物反应器系统。Zenon 公司的商业化产品 Zeno Gem™ 于 1982 年投入使用。有关膜技术与厌氧反应器的组合使用在 80 年代初也受到一定的关注。1982 年 Dorr-Oliver 公司开发了 MARS 工艺(membrane anaerobic reactor system)用于处理高浓度有机工业废水。同时 80 年代初,英国也开发了类似的工艺,该工艺在南非进一步发展为 ADUF 工艺(anaerobic digester ultrafiltration process)。在 1989 年,日本学者 Yamamoto 等将膜组件直接置入生物反应器内,提出了运行能耗低、占地更为紧凑的浸没式膜生物反应器(submerged membrane bioreactor, SMBR)(Yamamoto et al., 1989)。

第三阶段(1995 年至今),即膜生物反应器技术的快速发展和应用阶段:进入 20 世纪 90 年代中后期,国际上对膜生物反应器在生活污水、工业废水等处理方面进行了大量的研究,出现了以加拿大 Zenon 公司(被 GE 公司收购)、US Filter 公司(被西门子公司收购)、日本 Mitsubishi Rayon 公司、日本 Kubota 公司等为代表的膜生物反应器

膜组件供应商。在该阶段,国内外的研究者开展了大量的、卓有成效的有关膜生物反应器膜材质、操作运行条件以及污泥性质的研究,深入研究了膜污染特性以及污染机制,进而提出了相关膜污染控制措施,这些研究有力地推进了膜生物反应器的应用和发展。据估计,到2015年底,全球投入运行及在建的大小 MBR 工程超过 2 万套,MBR 处理对象包括市政污水、工业废水以及其他特种废水的处理等。

图 1.5 为过去 20 年国际上有关 MBR 的 SCI 论文发文量逐年变化情况(来源于 Web of Science 数据库,检索关键词“membrane bioreactor”)。从图 1.5 中可以看出,国际上 SCI 论文发表量逐年增加,尤其是 2005 年之后,论文发表数量急剧增加,表明 MBR 技术在 2005 年前后受到世界范围内的广泛关注,MBR 技术的研究和应用迈入了快速发展阶段。目前有关 MBR 论文的年发表量在 600 篇以上。

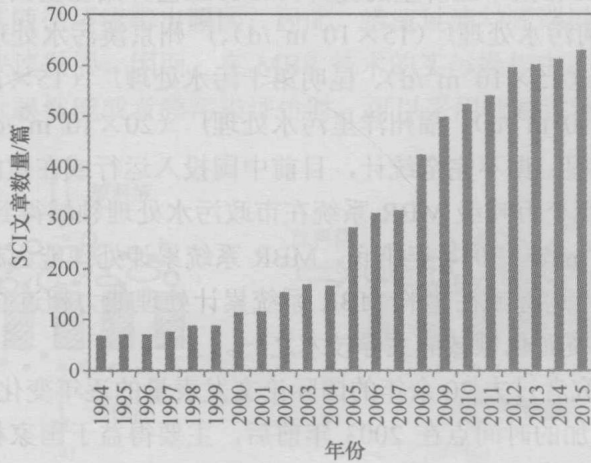


图 1.5 国际有关 MBR 论文年发表量变化

资料来源: Web of Science 数据库

1.2.2 国内 MBR 研究与发展

我国对 MBR 的研究起步较晚,从 20 世纪 90 年代初开始对分置式膜生物反应器进行研究。但是,最近几年在技术应用方面与国外几乎同步,甚至在部分领域处于世界领先水平。MBR 在中国的研究与应用大致可以分为 4 个阶段(郑祥等,2015)。

第一阶段(1990~2000 年),初始实验室研究阶段:1991 年岑运华介绍了 MBR 在日本的研究状况(岑运华,1991)。此后,相关高校和研究机构开始了 MBR 技术的研究。1996 年,国家“九五”攻关开始资助研究 MBR 工艺研究,清华大学、同济大学、天津大学、浙江大学、中国科学院生态环境研究中心等开始实验室小试、中试研究。我国第一个采用 MBR 工艺的中水回用装置于 1998 年由大连大器公司设计,处理量为 200 m³/d,用于处理市政污水和回用。

第二阶段(2001~2005 年),深入研究及小型工程应用阶段:2001 年国家推出膜产业化政策,2002 年国家“863”重大专项资助 MBR 研究,清华大学、天津大学、

浙江大学同时获得资助，MBR 工艺进入了深入研究阶段。与此同时，主要应用于小区楼宇建筑中水、小型城镇污水和工业废水等领域的数百至数千立方米/天的实际工程开始建造。

第三阶段（2006~2009 年），规模工程应用阶段：2005 年国家推出节能减排和污水资源化利用政策促进了 MBR 的应用发展，开始出现每天万吨级规模工程的设计和建设，MBR 应用由中小型向大型污水处理设施延伸。北京密云再生水工程（ $4.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ）为国内首个万吨以上处理规模的 MBR 工程。在此阶段，MBR 工程主要集中在北京地区和江苏无锡。

第四阶段（2010 年至今），全面推广应用阶段：从 2010 年开始，处理规模在万吨以上的 MBR 工程迅速增加。随着排放标准的严格和民众对环境保护意识的提高，以及膜材料价格的下降和 MBR 技术经济型的提升，MBR 工艺开始在全国多地大规模的商业化应用，出现了北京清河污水处理厂（ $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ）、广州京溪污水处理厂（ $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ）、南京城东污水处理厂（ $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ）、昆明第十污水处理厂（ $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ）、武汉三金潭污水处理厂（ $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ）、福州洋里污水处理厂（ $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ）等超 10 万吨以上处理规模的 MBR 工程。据不完全统计，目前中国投入运行或在建的 MBR 系统已经超过 1000 套且已有近百个万吨级 MBR 系统在市政污水处理领域得到应用。2010 年总处理能力接近 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。2014 年年底，MBR 系统累计处理能力超过 $450 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。到 2015 年年底，投入运行或在建的 MBR 系统累计处理能力超过 $700 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。MBR 技术成为污水处理与资源化领域的主导技术之一。

图 1.6 是我国研究者过去 20 余年的国际论文发表量的逐年变化情况。从研究论文的发表量来看，快速增加的时间点在 2003 年前后，主要得益于国家相关重大研究计划的实施，凝聚培养了一批从事 MBR 技术研究的专业人才队伍。在 2005 年之后，年论文发表量在 50 篇以上；2015 年论文发表量达到 200 篇以上，并呈现持续增加的趋势，研究点拓展到 MBR 技术与其他新型技术的结合（如电化学膜生物反应器、正渗透膜生物反应器、以能源/资源回收为目标的膜生物反应器等）。

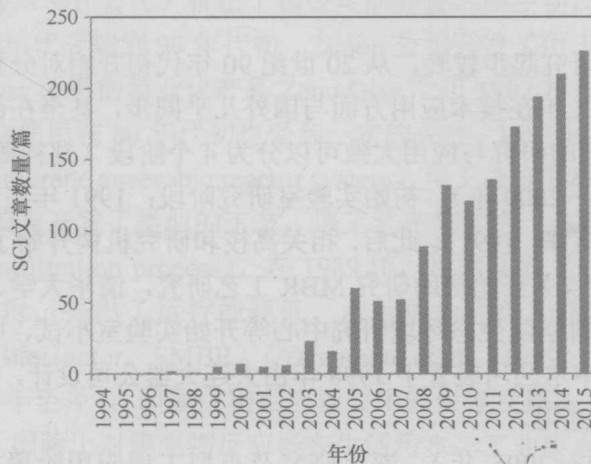


图 1.6 我国研究者有关 MBR 论文年发表量变化

资料来源：Web of Science 数据库

1.3 膜生物反应器操作运行

1.3.1 膜过滤模式与基本参数

1. 膜过滤模式

膜过滤操作模型可以分为死端过滤和错流过滤，死端过滤为进料流体的流动方向与膜面方向垂直，而错流过滤中料液平行于膜面流动，两种过滤方式如图 1.7 所示。在错流过滤中，料液流经膜表面时产生剪切力，固体颗粒的运动受沿膜面平行流动的剪切流和垂直膜面的过滤渗透流的共同作用，渗透流趋向于将固体颗粒拉向膜面，剪切流力图保持颗粒悬浮，将其随循环流带出膜区。因此，错流过滤与死端过滤相比，一定程度上能够控制膜污染的快速发展。因而，在 MBR 技术的实际操作中，一般均采用错流过滤模式；在实验室进行膜性能或者膜污染评价时，可以采用死端过滤方式进行。

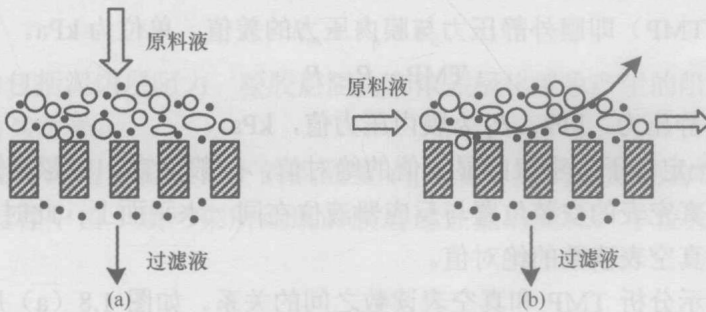


图 1.7 死端过滤和错流过滤示意图

(a) 死端过滤；(b) 错流过滤

从过滤过程中膜通量或膜压力是否维持恒定可以分为两种操作模式，即恒流过滤与恒压过滤。在恒流过滤过程中，膜通量保持恒定，而随着膜污染的发生操作压力逐渐上升；在恒压过滤中，膜通量逐渐下降。一般而言，工程上多采用恒流过滤模式。

此外，MBR 的过滤操作也可以分为泵出流方式与重力出流方式。工程上一般用泵出流为主，也有实际工程采用重力出流的方式进行，当运行通量衰减到一定值时进行膜的清洗。

2. 基本评价参数

1) 膜通量

膜通量是指单位时间内透过单位面积膜的水的体积，一般习惯用单位为 $L/(m^2 \cdot h)$ 。膜通量又可以分为瞬时通量和有效通量（净通量）。瞬时通量（抽吸通量）是单位面积膜在单位抽吸时间内通过水的体积，见式 (1.1)。

$$J = \frac{V}{At} \quad (1.1)$$