



清华大学百年校庆  
TSINGHUA UNIVERSITY  
CENTENARY CELEBRATION

清华大学百年校庆环境科学与工程系列著作

# 水处理膜生物反应器原理与应用

黄霞 文湘华 著



科学出版社



**黄霞** 清华大学环境学院教授、环境模拟与污染控制国家重点联合实验室主任，长江学者奖励计划特聘教授，国家杰出青年科学基金获得者，国务院政府特殊津贴专家，国际水协会高级会士(IWA fellow)，IWA膜技术专业委员会委员，国际期刊 *Frontiers of Environmental Science & Engineering*

执行副主编。主要从事膜法水处理技术、生物电化学水处理技术、污水资源化等方面的研究工作。在国内外学术期刊上发表论文200多篇，其中SCI收录100多篇，授权国家发明专利24项。曾获国家科学技术进步奖二等奖2次，高等学校科学技术进步奖等省部级一等奖5次，国际期刊 *Environmental Science & Technology* 2009年度十佳论文奖和2011年度最佳审稿人奖。



**文湘华** 清华大学环境学院教授。主要研究领域为环境生物技术和水污染理论及控制技术。近年来的研究主要集中于可持续污水处理工艺、新型生物反应器如膜生物反应器、高效微生物和微生物群落特征等。承担与参加过多项国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、“863”项目、

中国工程院咨询项目。发表论文百余篇，其中SCI收录70余篇，主编或合作编著专著或教材4本、译著2本。曾获国家科学技术进步奖二等奖、中国科学院自然科学奖一等奖、高等学校科学技术进步奖和自然科学奖一等奖、北京市科学技术进步奖一等奖、美国ISI经典引文奖等奖励。

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

ISBN 978-7-03-036471-5

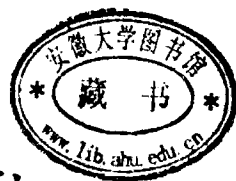


9 787030 364715 >

清华大学百年校庆环境科学与工程系列著作

# 水处理膜生物反应器原理与应用

黄霞 文湘华 著



科学出版社

北京



## 内 容 简 介

膜生物反应器(MBR)技术,由于具有出水水质优良稳定、装置占地面积小、剩余污泥产量低等优点,被誉为 21 世纪最有发展前途的水处理新技术。本书主要介绍水处理 MBR 的技术原理与应用。首先介绍 MBR 的基础知识,包括 MBR 的技术特征,膜污染概念、特征、分类及其控制策略以及 MBR 的设计与运行要点。然后介绍 MBR 的膜组件以及处理城市污水、微量有机污染物、工业废水、受污染水源水以及高浓度污水污泥的特性。最后介绍 MBR 的工程应用案例。

本书可供水处理领域科研人员、工程技术人员以及高等院校环境工程专业本科生、研究生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

水处理膜生物反应器原理与应用/黄霞,文湘华著.---北京:科学出版社,2012

(清华大学百年校庆环境科学与工程系列著作)

ISBN 978-7-03-036471-5

I. ①水… II. ①黄…②文… III. ①生物膜(污水处理)-生物膜反应器-研究 IV. ①X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 010694 号

责任编辑:杨 震 杨新改 / 责任校对:李 影

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:陈 敬

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2012 年 12 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2012 年 12 月第一次印刷 印张:24

字数:455 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 丛 书 序

环境问题已成为人类发展所面临的最严峻挑战之一。保护和改善生态环境,实现人类社会的可持续发展,是全人类紧迫而艰巨的任务。高水平的科技支撑和高层次的创新人才是实现上述战略目标的根本保障,高等学校在推进可持续发展战略的历史进程中具有举足轻重的作用。

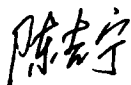
纵观世界著名大学的发展历史,与资源环境相关的学科始终是学校发展的重要支柱,当今的世界一流大学更将资源环境领域作为未来发展的主要推动力之一,资源环境问题的挑战为学科交叉和学科发展提供了宽广的创新平台。清华大学在建设世界一流大学的探索与实践,始终将环境科学与工程学科列为优先发展学科。1977年建立我国第一个环境工程专业,1984年成立环境工程系,1997年更名为环境科学与工程系,2011年发展为环境学院。建立了以环境工程、环境科学、环境管理、市政工程、辐射防护与环境保护为重点的学科体系;先后建立了“环境科学与工程研究院”、“环境模拟与污染控制国家重点联合实验室”和“联合国环境规划署巴塞尔公约亚太地区协调中心”等高水平的开放式研究基地。1998年率先在国内开展创建绿色大学的探索与实践,2008年成立了“全球变化研究院”。

经过几代人数十年的努力与攀登,清华大学在资源环境领域形成了一支具有国际影响力的学术带头人和中青年学术骨干队伍,他们在水环境、大气环境、持久性有机污染、危险废物、全球气候变化和循环经济等领域积累了大量的基础理论和工程技术方面的研究成果。不仅为国家培养了一大批环境保护工程技术、科学研究和行政管理人才,而且通过“水体污染控制与治理重大专项”、“北京奥运空气质量保障”和重

要国际环境公约谈判与履约等工作,为国家重大环境问题的解决和可持续发展战略的实施提供了理论支持、技术服务和决策支撑。

破解经济发展和环境保护这对矛盾的根本出路在于科学与技术进步,而成果和信息的广泛及时分享与交流是科技进步的重要方面。在清华大学迎来百年华诞之际,我们组织出版《清华大学百年校庆环境科学与工程系列著作》,以其求教于环境科学与工程领域的同行,并期望为探索我国社会经济与环境保护的协调发展之路做出新的贡献。

衷心感谢系列著作的各位作者以及所有关心、支持和帮助编辑出版的同志们,诚恳地欢迎读者对本系列著作提出宝贵的批评和建议。



清华大学校长



清华大学环境科学与工程研究院院长

中国工程院院士

2011年3月于清华大学

## 前 言

近年来,随着我国经济的快速发展、人口的增加以及人们生活水平的提高,工农业及生活用水量不断增加,与之相伴的污水排放量也与日俱增,由水污染和水资源短缺引发的水资源危机日益明显,已严重制约我国社会和经济的可持续发展。开展污水处理和水再生利用是解决水资源危机的有效对策之一。膜分离技术由于具有高效稳定、过程简单、易于控制等特点,在水处理中的应用受到广泛关注。其与生物反应器有机结合形成的膜生物反应器(membrane bioreactor, MBR)技术,由于具有出水水质优良稳定、装置占地面积小、剩余污泥产量低等优点,被誉为 21 世纪最有发展前途的水处理新技术,在全球范围受到广泛关注。

MBR 的研究始于 20 世纪 60 年代后期的美国。四十多年来,在众多科研人员和工程技术人员持续不懈的努力下,MBR 无论是在基础研究还是工程应用方面都取得了长足进步,越来越广泛地应用于各类污水处理与回用领域。我国有关 MBR 的研究始于 20 世纪 90 年代后期,与国外研究相比,虽然起步较晚,但得到了十分迅速的发展和推广应用。截至 2011 年底,据不完全统计,我国的 MBR 总处理能力已超过 200 万  $\text{m}^3/\text{d}$ ,成为世界上 MBR 研究和推广应用最为活跃的国家之一。

作者及其研究团队在钱易院士的率先倡导下,自 20 世纪末以来一直致力于 MBR 在水处理中的工作机理与应用研究,是国内最早开展 MBR 研究的单位之一。十多年来,主要针对 MBR 的构型及膜组件、新型 MBR 工艺及其处理各类污水的特性、膜污染机理与控制技术、工程应用等开展了系统研究。在国内外期刊上发表了 130 余篇研究论文,授权发明专利 10 项,多项技术获得实际应用,曾获国家科学技术进步奖二等奖、高等学校科学技术进步奖一等奖和自然科学奖一等奖、北京市科学技术进步奖三等奖等奖励。此外,与国际水协会(IWA)联合主办第五届膜技术国际大会暨展览会,在全国范围举办 MBR 培训班 3 次,为推动 MBR 技术的发展和行业进步做出了积极贡献。

本书是作者及其研究团队十多年来部分研究成果的总结。主要介绍 MBR 基础知识、MBR 处理各类污水的特性和工程应用案例,有关膜污染及其控制技术将在随后推出的另一本书《膜法水处理工艺膜污染机理与控制技术》中介绍。本书共 8 章,第 1 章“基础知识”在参考相关教科书和资料的基础上概述膜分离技术、生物处理技术以及 MBR 技术;同时结合多年的研究经历,系统总结了 MBR 的膜污染概念、特征、分类及其控制策略以及 MBR 的设计与运行要点,为本书其他章节的基础,可以帮助读者更好地理解 MBR 技术。第 2~7 章分别介绍 MBR 的膜组件

以及处理城市污水、微量有机污染物、工业废水、受污染水源水以及高浓度污水污泥的特性,全部为作者及其研究团队的研究成果。第8章是MBR的工程应用,主要介绍以作者及其研究团队的研究成果为技术支持的工程应用案例,包括我国最早建设的处理医院污水的MBR工程——海淀乡卫生院MBR工程、亚洲第一座日处理万吨级规模的MBR工程——密云县污水处理厂MBR工程等。本书内容源于数十位研究生、本科生和博士后的研究工作,主要包括博士生桂萍、刘锐、莫罹、吴盈嬉、吴金玲、刘春、魏春海、薛涛、张志超、陈健华、朱洪涛、赵文涛、肖康、徐美兰、杨宁宁,硕士生丁杭军、孙友峰、俞开昌、刘若鹏、卜庆杰、贺晨勇、王孟杰、隋鹏哲、汪舒怡、李舒渊、李海滔、周颖君、薛文超、沈悦啸、赛世杰,博士后范彬、王勇、陈福泰、曹斌、董良飞、崔志广,十多位本科生以及与外校联合培养的多名研究生(名字不再一一列出)。在此对所有做出贡献的同学表示衷心感谢!

本书的主要研究成果是在科技部“863”计划课题、国家杰出青年科学基金、国家自然科学基金项目和重大国际合作项目、国家“水体污染控制与治理”科技重大专项课题等的支持下完成的,在此表示感谢!研究工作曾受到国内外多家膜组件制造厂家和环保工程公司在膜组件或工程推广应用等方面提供的帮助和合作;在MBR工程案例的资料和监测数据收集中,得到MBR工程应用单位的热情帮助,在此一并深致谢意!

本书可供水处理领域科研人员、工程技术人员以及高等院校环境工程专业本科生、研究生参考。希望对从事MBR技术研究的读者有所帮助,以促进我国MBR技术的健康和快速发展。由于作者水平有限,并且有关MBR技术的研究还在不断发展之中,书中难免存在诸多不足和错误,敬请读者批评指正。

作 者

2012年9月于清华园



# 目 录

丛书序

前言

第 1 章 基础知识	1
1.1 膜分离概述	1
1.1.1 膜与膜分离过程	1
1.1.2 膜分离特点	3
1.1.3 膜工艺过程的基本参数与运行模式	3
1.2 生物处理概述	6
1.2.1 好氧生物处理原理	6
1.2.2 厌氧生物处理原理	6
1.2.3 生物脱氮原理	7
1.2.4 生物除磷原理	10
1.2.5 生物处理主要工艺参数	10
1.3 膜生物反应器简介	13
1.3.1 膜生物反应器的构成与分类	13
1.3.2 膜生物反应器的基本特点	15
1.3.3 膜生物反应器的研究与应用发展概要	16
1.3.4 膜生物反应器的膜组件	19
1.4 膜生物反应器的膜污染	23
1.4.1 膜污染的概念	23
1.4.2 膜污染的特征	24
1.4.3 膜污染的分类	25
1.4.4 膜污染的影响因素	26
1.4.5 膜污染综合控制策略	32
1.5 膜生物反应器的设计与运行要点	33
1.5.1 预处理	33
1.5.2 生物处理工艺的选择	34
1.5.3 生物动力学参数与工艺参数	34
1.5.4 基本工艺计算	35
1.5.5 膜污染清洗	38

1.5.6	混合液调控	40
<b>第2章</b>	<b>膜生物反应器的膜组件</b>	<b>42</b>
2.1	气冲柱式中空纤维膜组件	42
2.1.1	膜组件构型	42
2.1.2	膜组件临界通量	42
2.1.3	不同通量下的膜污染发展特性	44
2.2	过滤/曝气双功能膜组件	48
2.2.1	膜组件与工艺特征	48
2.2.2	微孔管曝气的充氧性能	50
2.2.3	微孔管的清水过滤性能	50
2.2.4	微孔管曝气对膜污染的清洗效果	51
2.2.5	过滤/曝气双功能型 MBR 处理生活污水	53
2.2.6	过滤/曝气双功能膜组件的膜污染	56
2.3	动态膜组件	62
2.3.1	微网基材的选择	62
2.3.2	动态膜过滤周期及其影响因素	65
2.3.3	动态膜功能分析	71
2.3.4	动态膜生物反应器处理城市污水的中试	78
<b>第3章</b>	<b>膜生物反应器处理城市污水的特性</b>	<b>83</b>
3.1	膜生物反应器与传统活性污泥法的比较	83
3.1.1	工艺特征	83
3.1.2	污染物去除效果	84
3.1.3	出水组成分析	86
3.1.4	溶解性微生物产物的时间变化	87
3.2	工艺参数对膜生物反应器性能的影响	89
3.2.1	工艺特征	89
3.2.2	工艺参数对污染物去除效果的影响	89
3.2.3	进水容积负荷对污染物去除效率的影响	96
3.2.4	污泥龄对 MBR 活性污泥性质的影响	98
3.2.5	MBR 微生物增殖特征与反应动力学	102
3.3	不排泥条件下膜生物反应器的长期运行特性	108
3.3.1	去除有机物的稳定性	109
3.3.2	污泥增殖特性	109
3.3.3	溶解性微生物代谢产物的长期变化	112

3.4	膜生物反应器强化除磷 .....	114
3.4.1	污泥龄对膜生物反应器生物除磷的影响 .....	114
3.4.2	胞外多聚物对膜生物反应器生物除磷的影响 .....	120
3.4.3	膜组件对磷的截留特性 .....	126
3.4.4	溶解性微生物产物对膜生物反应器生物除磷的影响 .....	130
3.5	膜生物反应器去除肠道病毒 .....	135
3.5.1	城市污水中噬菌体的浓度与衰减 .....	135
3.5.2	活性污泥中噬菌体的衰减 .....	137
3.5.3	膜生物反应器中活性污泥对噬菌体的去除特性 .....	140
3.5.4	膜生物反应器中膜组件对噬菌体的截留效果 .....	142
<b>第4章</b>	<b>膜生物反应器去除微量有机污染物</b> .....	<b>148</b>
4.1	目标微量有机污染物的选取 .....	149
4.2	MBR 和 SBR 去除典型内分泌干扰物的对比 .....	152
4.2.1	工艺特征 .....	153
4.2.2	内分泌干扰物去除效果的对比 .....	154
4.2.3	内分泌干扰性去除效果的对比 .....	157
4.2.4	内分泌干扰物去除途径的对比 .....	159
4.3	污泥龄对 MBR 去除典型内分泌干扰物的影响 .....	164
4.3.1	工艺特征 .....	164
4.3.2	污泥龄对典型内分泌干扰物去除效果的影响 .....	164
4.3.3	污泥龄对内分泌干扰活性去除效果的影响 .....	166
4.3.4	污泥龄对典型内分泌干扰物去除途径的影响 .....	167
4.4	A <sup>2</sup> /O-MBR 工艺对微量有机污染物的去除特性 .....	168
4.4.1	工艺特征 .....	168
4.4.2	目标微量有机污染物的去除效果 .....	169
4.4.3	目标微量有机污染物的迁移行为 .....	171
4.4.4	各单元污泥对微量有机污染物的吸附与降解特性 .....	178
4.5	MBR 中膜及凝胶层对微量有机污染物的吸附特性 .....	186
4.5.1	试验方法 .....	186
4.5.2	微滤膜对 4 种 EDCs 的吸附效果 .....	187
4.5.3	膜上凝胶层对目标物的吸附特性 .....	187
4.6	纳滤与 MBR 组合工艺对内分泌干扰物的去除特性 .....	191
4.6.1	工艺特征 .....	191
4.6.2	BPA 和 NPnEO 的去除效果 .....	193
4.6.3	雌激素类 EDCs 的去除效果 .....	195

4.6.4	EDCs 去除效果的比较	197
4.6.5	雌激素活性的去除效果	197
4.6.6	常规污染物的去除效果	198
4.6.7	污染物在纳滤与 MBR 组合系统中的迁移行为	199
<b>第 5 章</b>	<b>膜生物反应器处理工业废水的特性</b>	<b>201</b>
5.1	膜生物反应器处理焦化废水	202
5.1.1	焦化废水的特性	202
5.1.2	A <sub>1</sub> /A <sub>2</sub> /O-MBR 处理焦化废水的性能评价	202
5.1.3	总 HRT 对污染物去除效果的影响	204
5.1.4	回流比对污染物去除效果的影响	207
5.1.5	与 A <sub>1</sub> /A <sub>2</sub> /O-CAS 长期对比研究	209
5.2	基因工程菌生物强化膜生物反应器处理含阿特拉津废水	216
5.2.1	基因工程菌生物强化 MBR 系统	216
5.2.2	基因工程菌生物强化 MBR 对阿特拉津的去除	218
5.2.3	基因工程菌生物强化 MBR 长期运行中阿特拉津的去除效果	222
5.2.4	基因工程菌生物强化 MBR 长期运行中 COD 和氨氮的去除情况	227
5.2.5	阿特拉津生物强化处理对污泥活性的影响	227
5.2.6	MBR 和 CAS 生物强化去除阿特拉津的比较	227
5.2.7	基因工程菌在 MBR 中的生态行为	228
5.3	膜生物反应器处理印染废水	240
5.3.1	废水概况与现有处理工艺	241
5.3.2	中试工艺与运行条件	242
5.3.3	系统运行情况	243
<b>第 6 章</b>	<b>膜生物反应器处理受污染水源水的特性</b>	<b>247</b>
6.1	几种膜生物反应器处理微污染水源水的效果	247
6.1.1	工艺系统与原水水质	247
6.1.2	悬浮生长型 MBR 的工艺特性	249
6.1.3	附着生长型 MBR 的效果	252
6.2	几种膜生物反应器中微生物的特征	257
6.2.1	悬浮生长型 MBR 微生物相	257
6.2.2	块状填料-MBR 微生物相	257
6.2.3	PAC-MBR 微生物相	259
6.3	BAF-UF 组合工艺去除致嗅物质的特性	260
6.3.1	BAF-UF 组合工艺特征	260
6.3.2	BAF-UF 组合工艺运行条件优化	261

6.3.3	BAF 中生物量与细菌群落结构分析 .....	269
6.3.4	水质的三维荧光分析 .....	272
6.3.5	BAF-UF 组合工艺运行效果的综合比较 .....	274
<b>第 7 章</b>	<b>厌氧膜生物反应器处理高浓度污水污泥的特性</b> .....	<b>276</b>
7.1	厌氧膜生物反应器的特点 .....	276
7.1.1	厌氧膜生物反应器的结构特点 .....	276
7.1.2	厌氧膜生物反应器的运行特点 .....	278
7.1.3	厌氧膜生物反应器的应用前景 .....	278
7.2	工艺系统与研究方案 .....	279
7.2.1	试验装置 .....	279
7.2.2	处理污泥来源与特点 .....	280
7.2.3	接种污泥 .....	281
7.2.4	装置启动及运行 .....	282
7.3	不同负荷下 US-AnMBR 系统和 AnMBR 系统的污泥消化特性 ..	283
7.3.1	工况 1 .....	283
7.3.2	工况 2 .....	287
7.3.3	工况 3 .....	287
7.3.4	工况 4 .....	288
7.3.5	工况 5 .....	288
7.3.6	工况 6 .....	289
7.4	污泥消化性能的整体分析 .....	289
7.4.1	VS 降解率和比产气率 .....	289
7.4.2	消化污泥的稳定性 .....	290
7.4.3	消化液水质指标的比较 .....	291
7.5	US-AnMBR 系统中污泥消化效果的影响因素 .....	291
7.6	超声对 US-AnMBR 系统污泥消化性能的影响机理 .....	292
7.6.1	超声对污泥物化性质的影响 .....	292
7.6.2	超声对污泥中微生物性质的影响 .....	302
<b>第 8 章</b>	<b>膜生物反应器的工程应用</b> .....	<b>306</b>
8.1	处理医院污水的 MBR 工程 .....	306
8.1.1	海淀乡卫生院污水处理工程 .....	306
8.1.2	四〇二医院污水处理工程 .....	313
8.2	处理洗浴污水的 MBR 工程 .....	317
8.2.1	工程背景 .....	318
8.2.2	工程概况 .....	318

8.2.3	工程运行效果 .....	319
8.2.4	小结 .....	324
8.3	小区污水处理-海淀温泉 MBR 污水再生工程 .....	324
8.3.1	工程背景 .....	324
8.3.2	工程概况 .....	324
8.3.3	工程运行效果 .....	326
8.3.4	小结 .....	329
8.4	大规模城市污水处理厂——密云县污水处理厂 MBR 污水再生工程 .....	330
8.4.1	工程背景 .....	330
8.4.2	工程概况 .....	330
8.4.3	工程运行效果 .....	333
8.4.4	小结 .....	334
8.5	与生物脱氮除磷工艺耦合的 MBR 工程——硕放 MBR 工程 .....	335
8.5.1	工程背景 .....	335
8.5.2	工程概况 .....	335
8.5.3	工程运行效果 .....	337
8.5.4	小结 .....	348
8.6	工业废水处理——徐州卷烟厂 MBR 工程 .....	349
8.6.1	工程背景 .....	349
8.6.2	工程概况 .....	349
8.6.3	工程运行效果 .....	351
8.6.4	小结 .....	353
8.7	污染河水净化——温榆河水资源利用 MBR 工程 .....	353
8.7.1	工程背景 .....	353
8.7.2	工程概况 .....	353
8.7.3	工程运行效果 .....	355
8.7.4	小结 .....	356
8.8	国内 MBR 工程应用情况 .....	356
<b>参考文献</b> .....		359



# 第1章 基础知识

## 1.1 膜分离概述

### 1.1.1 膜与膜分离过程

#### 1.1.1.1 膜

广义的“膜”是指分隔两相界面的一个具有选择透过性的屏障,称其为“薄膜”,简称为“膜”。它以特定的形式限制和传递各种化学物质,其形态千差万别,有固态和液态、均相和非均相、对称和非对称、带电和不带电等之分。一般膜很薄,其厚度可以从几微米(甚至到 $0.1\mu\text{m}$ )到几毫米。尽管如此,不同形式的膜均具有一个特点,即渗透性或半渗透性。

膜是膜分离过程的核心。根据膜的性质、来源、相态、材料、用途、形状、分离机理、结构、制备方法等的不同,膜有不同的分类方法:

- (1) 按分离机理,主要有反应膜、离子交换膜、渗透膜等;
- (2) 按膜的性质,主要有天然膜(生物膜)和合成膜(有机膜和无机膜);
- (3) 按膜的结构,有对称膜、非对称膜和复合膜;
- (4) 按膜的形状,有平板膜、管式膜和中空纤维膜。

#### 1.1.1.2 膜分离过程

膜分离是指以具有选择透过功能的薄膜为分离介质,通过在膜两侧施加一种或多种推动力,使原料中的某些组分选择性地优先透过膜,从而达到混合物分离和产物提取、纯化、浓缩等的目的。它与传统过滤的不同在于,膜可以在分子范围内进行分离,并且这一过程是一种物理过程,不需发生相的变化和添加助剂。原料中的溶质透过膜的现象一般叫做渗析;溶剂透过膜的现象叫做渗透。

膜分离过程有多种,不同的分离过程所采用的膜及施加的推动力也不同。表1.1列出了几种工业应用膜分离过程的基本特性及适用范围。

微滤、超滤、纳滤与反渗透都是以压力差为推动力的膜分离过程。当在膜两侧施加一定的压差时,混合液中的一部分溶剂及小于膜孔径的组分透过膜,而微粒、大分子、盐等被截留下来,从而达到分离的目的。这四种膜分离过程的主要区别在于被分离物质的大小和所采用膜的结构和性能不同。微滤的分离范围为 $0.05\sim$

10 $\mu\text{m}$ ,压力差为0.015~0.2MPa;超滤的分离范围为0.001~0.05 $\mu\text{m}$ ,压力差为0.1~1MPa;反渗透常用于截留溶液中的盐或其他小分子物质,压力差与溶液中的溶质浓度有关,一般在2~10MPa;纳滤介于反渗透和超滤之间,脱盐率及操作压力通常比反渗透低,一般用于分离溶液中相对分子质量为几百至几千的物质。

表 1.1 几种工业化膜分离工程的基本特性及适用范围(邵刚,2002)

过程	简图	膜类型	推动力	传递机理	透过物	截留物
微滤 (0.05~10 $\mu\text{m}$ )		均相膜、非对称膜	压力差 0.015~0.2MPa	筛分	水、溶剂、溶解物	悬浮物微粒、细菌
超滤 (0.001~0.05 $\mu\text{m}$ )		非对称膜、复合膜	压力差 0.1~1MPa	微孔筛分	溶剂、离子及小分子	生物大分子
反渗透 (0.0001~0.001 $\mu\text{m}$ )		非对称膜、复合膜	压力差 2~10MPa	优先吸附、毛细孔流动	水	溶剂、溶质大分子、离子
渗析		非对称膜、离子交换膜	浓度差	扩散	低相对分子质量溶质、离子	溶剂相对分子质量 >1000
电渗析		离子交换膜	电位差	反离子迁移	离子	同名离子、水分子
膜电解		离子交换膜	电位差 电化学反应	电解质离子选择传递、电极反应	电解质离子	非电解质离子
渗透气化		均相膜、复合膜、非对称膜	压力差	溶解扩散	蒸气	难渗液体

电渗析是指在电场力作用下,溶液中的反离子发生定向迁移并通过膜,以去除溶液中离子的一种膜分离过程。所采用的膜为荷电的离子交换膜。目前电渗析已大规模用于苦咸水脱盐、纯净水制备等,也可以用于有机酸的分离与纯化。膜电解与电渗析的传递机理相同,但膜电解存在电极反应,主要用于食盐电解生产氢氧化

钠及氯气等。

渗透气化与蒸气渗透的基本原理是利用被分离混合物中某些组分有优先选择性透过膜的特点,使进料侧的优先组分透过膜,并在膜下游侧气化去除。渗透气化和蒸气渗透过程的区别仅在于进料的相态不同,前者为液相进料,后者为气相进料。这两种膜分离技术还处在开发之中。

### 1.1.2 膜分离特点

与传统分离技术相比,膜分离技术具有以下特点:

- (1) 在膜分离过程中,不发生相变,能量转化效率高;
- (2) 一般不需要投加其他物质,不带入二次污染物质,不改变分离物质的性质,并节省原材料和化学药品;
- (3) 膜分离过程中,分离和浓缩同时进行,可回收有价值的物质;
- (4) 可在一般温度下操作,不会破坏对热敏感和对热不稳定的物质,并且不消耗热能;
- (5) 膜分离法适应性强,操作及维护方便,易于实现自动化控制,运行稳定。

因此,膜分离技术除大规模用于海水淡化、苦咸水淡化、纯水生产外,在城市生活饮用水净化、城市污水处理与利用以及各种工业废水处理与回收利用等领域也逐步得到推广和应用。

### 1.1.3 膜工艺过程的基本参数与运行模式

#### 1.1.3.1 基本参数

##### 1. 膜通量

膜通量(membrane flux)是指物料(如水)在单位时间通过单位膜面积的量,通常用 $J$ 表示。国际标准单位为 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 或简化为 $\text{m}/\text{s}$ ,有时也称为渗透速率或过滤速率。其他非国际标准单位包括 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (或LMH)和 $\text{m}/\text{d}$ 。膜通量由膜过程的驱动力和过滤总阻力决定。对于固液分离膜生物反应器(membrane bioreactor, MBR),驱动力即为跨膜压差(transmembrane pressure, TMP)。一般情况下,MBR的运行通量在 $10 \sim 100\text{LMH}$ 。

由于温度会影响滤过液的黏度,从而会影响膜过滤性。因此,不同温度下测定的膜通量,可以用式(1.1)校正到同一温度下的通量:

$$J = J_{20} \times 1.025^{(T-20)} \quad (1.1)$$

式中, $J$ 和 $J_{20}$ 分别代表温度为 $T(^{\circ}\text{C})$ 和 $20^{\circ}\text{C}$ 时的通量。

##### 2. 过滤阻力

过滤阻力 $R(\text{m}^{-1})$ 的定义为