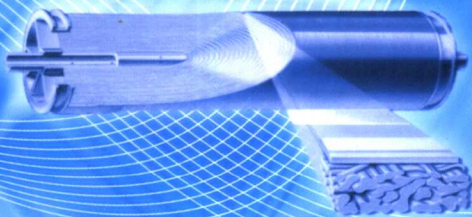


膜分离技术与应用丛书

反渗透和纳滤技术与应用

王晓琳 丁宁 编著



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

膜分离技术与应用丛书

反渗透和纳滤技术与应用

王晓琳 丁 宁 编著



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

反渗透和纳滤技术与应用/王晓琳, 丁宁编著. —北京:
化学工业出版社, 2005.5
(膜分离技术与应用丛书)
ISBN 7-5025-6977-4

I. 反… II. ①王…②丁… III. 反渗透膜-分离-化工
过程 IV. TQ028.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 037064 号

膜分离技术与应用丛书
反渗透和纳滤技术与应用
王晓琳 丁宁 编著
责任编辑: 戴燕红
文字编辑: 丁建华
责任校对: 李林
封面设计: 潘峰

*
化学工业出版社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心
(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
北京永鑫印刷有限责任公司印刷
三河市东柳装订厂装订
开本 850mm×1168mm 1/32 印张 13 字数 348 千字
2005 年 6 月第 1 版 2005 年 6 月北京第 1 次印刷
ISBN 7-5025-6977-4
定 价: 28.00 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

序

《膜分离技术与应用丛书》与广大读者见面了，的确是一件可贺的事。

膜对于每一个人都不陌生，它广泛地存在于自然界，与生命起源和生命活动紧密相关，在许多自然现象中发挥重大作用，在现代化的经济发展和人民日常生活中也扮演重要角色。

膜技术是当代新型高效分离技术，是多学科交叉的产物，与传统的分离技术比较，它具有高效、节能、过程易控制、操作方便、环境友好、便于放大、易与其他技术集成等优点。膜技术已广泛而有效地应用于能源、电子、石油化工、医药卫生、生化、环境、冶金、轻工、食品、重工和人民生活等领域，形成了新兴的高技术产业。在当今世界上能源短缺、水资源匮乏和环境污染日益严重的情况下，膜技术更得到了世界各国的高度重视，已成为推动国家支柱产业发展和改善人类生存环境、提高人们生活质量的共性技术。超纯水、纯净水、海水淡化和人工肾透析……都是大家所熟悉的与膜有关的产品或工艺过程。

该系列丛书以每种膜技术为单分册发行，包括无机膜、微滤、超滤、反渗透和纳滤、电渗析、气体分离膜、渗透蒸发和蒸气渗透、无机膜分离技术等，除对相关的膜的介绍外，重点放在这些膜各自的应用方面；这一以各种膜为基础的丛书可与其他膜的相关书籍互相借鉴和参考。

可以相信，该系列丛书对促进膜技术的进步及其在国民经济和社会的各个领域中的应用将会发挥积极作用。

高从堦

2003年3月15日

前 言

1960年 Sidney Loeb 和 Srinivasa Sourirajan 根据优先毛细吸附模型，发明了用于海水脱盐的醋酸纤维素膜，开创了膜科学与技术研究发展的新纪元。在过去的 50 多年里，膜科学与技术得到了蓬勃发展，而且毫无收敛之势，与其相关的学术论文也不断地出现在期刊上，如：1959 年才出版的《应用高分子科学期刊》，然后是 1965 年出版的《脱盐》，还有 1976 年出版的《膜科学期刊》，我国《膜科学与技术》创刊于 1981 年。现代膜科学与技术已经成为当代最有发展前景的高新科技之一，并期待着开发出新的膜及膜集成技术。像 1960 年 Loeb 和 Sourirajan 发明醋酸纤维素非对称膜成功地用于海水脱盐那样，期待在解决水资源不足和水环境污染的膜法水净化与处理方面再创辉煌，出现又一次历史性飞跃。

谁最先提出了反渗透 (reverse osmosis, RO) 这一术语？有两种说法，一种是由加利福尼亚州立大学洛杉矶分校 (UCLA) Gerald Hassler 研究小组提出，并最早出现在 1956 年 8 月的 UCLA 工程报告中；另一种说法是由佛罗里达大学 Charles Reid 研究小组提出，并出现在 1957 年 4 月的苦咸水研究院的研究开发进度报告中。因为上述两个小组所开展的研究工作是完全独立的，所以无法界定反渗透这个术语到底是谁最先提出。不过“反渗透”对该过程可逆性的准确定义，应该归因于 Hassler 和 Reid 都是著名的物理化学家，擅长化学工程热力学。

谁最先提出了纳滤 (nanofiltration, NF) 这一术语？根据 Robert J. Petersen 教授所述，“纳滤”这一术语最早诞生于 1984 年底 FilmTec 公司广告经理的办公室会议。FilmTec 公司采用纳滤这一术语，至少有一些逻辑基础。首先，Sourirajan 和 Takeshi Matsuura 提出了反渗透膜表面力毛细管流动模型，并推算出醋酸纤维

素膜的理想毛细管孔径约为 0.9nm,“疏松型反渗透膜”应具有稍大些的毛细管孔径,大概在 1.0~1.2nm;其次,早期反渗透膜研究中出现超过滤(hyperfiltration)被认为是反渗透的同义词,因此为何不简单地“纳”和“滤”直接连在一起呢?再者,“纳米级”溶剂已经得到广泛应用,带有“纳”字的术语意味着优良、纯洁和品位,因此纳滤可能给产品带来正面的广告效应,因此 FilmTec 公司立即将“FT”膜改称为“NF”膜。

21 世纪是水的世纪,正是膜科学技术大显身手的时代,反渗透和纳滤作为其中的两个重要分支,在各行各业的水净化与处理、产品的精制与分离中发挥愈来愈重要的作用。本书作为“膜分离技术与应用丛书”中的一个分册,共分 6 章。第 1 章介绍了反渗透技术早期发展史、现状与展望,纳滤膜的问世及其研究进展;第 2 章介绍了反渗透和纳滤过程分离特性、分离模型和评价方法,重点介绍了非平衡热力学模型、固定电荷模型、静电位阻模型和浓差极化现象,并论述了膜的分离特性、特征参数和结构参数之间的关系;第 3 章关于反渗透和纳滤膜材料、形态及组件,介绍了各种组件的优缺点及使用状况;第 4 章分为两个部分,第一部分介绍膜工艺及其操作模式,讲述膜分离中浓缩和渗滤两种操作模式及其组合优化,第二部分介绍了膜污染的防治,包括膜污染的定义和分类,膜污染对膜性能的影响,膜污染的控制方法及膜清洗技术;第 5 章为工艺设计、系统操作和维护管理,首先介绍了膜系统工艺设计,包括原水水质评价和系统性能预测等,其次介绍了系统操作和维护管理,包括日常启动、操作参数调整和系统性能标准化等,最后介绍了系统故障分析和排除;第 6 章介绍了几个应用实例,包括法国 Méry-sur-Oise 纳滤饮用水净化系统、新加坡 SUT SERAYA 公司抗污染反渗透膜法废水回用、中国太钢集团反渗透膜法废水回用、西班牙 Lanzarote 四期海水淡化系统、日本冲绳海水淡化系统、中国山东荣成海水淡化系统以及纳滤膜分离技术在其他领域的应用。

本书前言和第 1 章由王晓琳撰写,第 2~6 章提纲由王晓琳确定,具体内容由丁宁编写,最后由祝振鑫教授审核和校对了全文。

虽然本书的编写经历了两年多时间，由于编者自身缘故，缺点和错误在所难免，恳请读者予以批评指正。

在本书的编写过程中，深感自己在纳滤和反渗透技术与应用的相关知识方面的不足，尽可能引用这一领域最新的研究开发成果和技术应用实例，始终得到了高从堦院士、谭永文教授、徐平先生、张建飞先生、郭有智先生、曹新民先生、中尾真一教授、山村弘之先生、川崎睦男先生、前田恭志先生等的热心指导和大力支持，王大新、姚红娟、汪伟宁等研究生也为本书相关文献及资料的收集与整理付出了辛勤的劳动，在此表示由衷的感谢！

王晓琳

2005年春于清华园

目 录

第 1 章 反渗透和纳滤技术简介	1
1.1 反渗透技术早期发展史	1
1.2 反渗透技术现状与展望	6
1.3 纳滤膜的问世及其研究进展	14
1.3.1 中性溶质体系	17
1.3.2 电解质体系	19
1.3.3 中性溶质和电解质混合体系	21
1.3.4 两性溶质体系	23
第 2 章 膜过程分离特性、分离模型和评价方法	26
2.1 反渗透和纳滤分离特性	26
2.1.1 反渗透	26
2.1.2 纳滤	28
2.2 非平衡热力学模型	30
2.3 分离模型	36
2.3.1 优先吸附-毛细管流动模型	36
2.3.2 溶解-扩散模型	38
2.3.3 摩擦模型	40
2.3.4 细孔模型	43
2.3.5 空间电荷模型	45
2.3.6 固定电荷模型	46
2.3.7 静电位阻模型	51
2.4 浓差极化现象	57
2.4.1 浓差极化的概念	58
2.4.2 浓差极化的计算	58
2.4.3 浓差极化下的传质方程	60
2.4.4 传质系数 k 值的估算	62
2.5 评价方法	65

2.5.1	透过实验	65
2.5.2	其他评价方法	70
第3章	膜材料、形态及组件	77
3.1	膜材料	77
3.1.1	醋酸纤维素和三醋酸纤维素	77
3.1.2	芳香族聚酰胺	80
3.1.3	聚苯并咪唑	81
3.1.4	聚苯醚	82
3.1.5	聚乙烯醇缩丁醛	82
3.1.6	聚砜类	83
3.1.7	聚芳酯	85
3.1.8	聚哌嗪酰胺	85
3.1.9	无机纳滤膜材料	85
3.2	膜形态	86
3.2.1	对称膜	86
3.2.2	非对称膜	86
3.2.3	复合膜	87
3.3	膜组件	91
3.3.1	卷式膜组件	92
3.3.2	中空纤维式膜组件	95
3.3.3	毛细管式和管式膜组件	100
3.3.4	板框式膜组件	103
3.3.5	几种膜组件的比较	106
第4章	操作模式与膜污染的防治	107
4.1	膜工艺及其操作模式	107
4.1.1	压力驱动膜过程的操作模式	107
4.1.2	操作模式的优化	135
4.2	膜污染的防治	139
4.2.1	膜的污染和劣化的定义	139
4.2.2	膜劣化和污染对膜性能的影响	141
4.2.3	控制膜过程污染的有效方法	143
4.2.4	膜清洗技术	148
4.2.5	反渗透膜的污染与防治	163

第 5 章 工艺设计、系统操作和维护管理	191
5.1 膜系统工艺设计	191
5.1.1 设计原则	192
5.1.2 原水水质评价	199
5.1.3 预处理系统	208
5.1.4 膜组件的选择	211
5.1.5 减少浓差极化的影响	215
5.1.6 相关设备及零部件	221
5.1.7 系统性能预测	235
5.1.8 经济性分析	243
5.1.9 设计文件的编制	247
5.2 系统操作和维护管理	254
5.2.1 首次启动	254
5.2.2 日常启动	260
5.2.3 运行记录	260
5.2.4 调整操作参数	264
5.2.5 系统停机	266
5.2.6 系统保存	267
5.2.7 微生物活动监控	268
5.2.8 系统性能标准化	269
5.3 系统故障分析和排除	273
5.3.1 整个系统调查	273
5.3.2 膜本体评估	275
5.3.3 膜组件评估	278
5.3.4 故障起因、症状和纠正措施	281
5.3.5 故障排除指南	290
第 6 章 应用实例	298
6.1 地表水净化	298
6.1.1 地表水净化中纳滤膜的使用	300
6.1.2 法国 Méry-sur-Oise 纳滤饮用水净化系统	309
6.1.3 应用前景	336
6.2 废水回用	337
6.2.1 新加坡 SUT SERAYA 公司抗污染反渗透膜法废水回用	338

6.2.2	中国太钢集团反渗透膜法废水回用	349
6.3	海水淡化	359
6.3.1	西班牙 Lanzarote 四期海水淡化系统	360
6.3.2	日本冲绳海水淡化系统	366
6.3.3	中国山东荣成海水淡化系统	372
6.4	纳滤膜分离技术在其他领域的应用	384
6.4.1	低聚糖的分离和精制	384
6.4.2	果汁的高浓度浓缩	385
6.4.3	肽和氨基酸的分离	386
6.4.4	抗生素的浓缩与纯化	386
6.4.5	牛奶及乳清蛋白的浓缩	387
6.4.6	农产品的综合利用	387
6.4.7	膜生化反应器的开发	387
参考文献	389

第 1 章 反渗透和纳滤技术简介

1960 年 Loeb 和 Sourirajan 发明了用于海水脱盐的醋酸纤维素非对称膜，开创了膜科学与技术研究发展的新纪元。在过去 50 多年里，膜科学与技术得到了蓬勃发展，而且毫无颓废之势，与其相关的学术论文也出现在较新的期刊上，如创刊于 1959 年的《应用高分子科学期刊》，然后是 1965 年创刊的《脱盐》，还有更新的 1976 年创刊的《膜科学期刊》，我国《膜科学与技术》创刊于 1981 年。当你以‘膜’作为关键词，对过去 10 年的文献进行检索时，《化学文摘》中将得到超过 100000 个检索结果，“Web of Science”收录的每 50 篇 SCI 论文中有 1 篇 SCI 论文涉及膜科学技术的研究工作。

21 世纪是水的世纪，正是膜科学技术再显身手的时代了，期待着开发出新的膜及膜集成技术，像 1960 年 Loeb 和 Sourirajan 发明醋酸纤维素非对称膜成功用于海水脱盐那样，在解决水资源不足和水环境污染的膜法水净化与处理方面出现又一次历史性飞跃。

1.1 反渗透技术早期发展史

早在 1748 年法国人 Abbe Nollet 就发现了渗透现象，在接下来的一个世纪里，渗透作用引起了生物与制药工程界的极大兴趣，最初实验用膜都是动物或植物膜，直到 1867 年 Traube 成功制备了第 1 张无机膜，这种由亚铁氰酸铜支撑在黏土上制成的凝胶膜对稀电解质溶液表现出显著的选择透过性，尤其渗透压现象引起了物理学家们的特别关注，被列入当时处于热点的依数性研究中。这种现象的高度敏感性及其与气体行为的相似性为无数研究者提供了灵感，发明了一系列渗透压测量技术，基于这种现象的独特性质，Van't Hoff 于 1887 年建立了完整的稀溶液理论。

反渗透和纳滤等膜技术是以压力差作为推动力的膜分离过程。早在 1855 年 Fick 用火棉胶制成的人工膜进行溶液的透析实验，Graham 采用该技术分离“由晶粒构成的胶体”，并最早提出“透析”这个术语来描述半透膜的选择性扩散过程。而论述压力差驱动下的膜过滤的最早、最详细的文献是由 Bechold 在 1907 年发表的，Bechold 将乙酸火棉胶注入滤纸中，成功制备了多孔膜，最早提出了“超滤”这一术语，并设计出第一台过滤器。

1937 年 Carothers 最先合成出聚酰胺（俗名尼龙），对现代高分子科学的发展具有里程碑作用。在此之前，高分子材料鲜为人知，除了 1906 年发明的酚醛塑料外，所有的塑料和薄膜材料都来自于天然产品，如赛璐珞、火棉胶、玻璃纸等，由硝酸纤维素、醋酸纤维素或再生纤维素制得。现在商业化的高质量反渗透膜和纳滤膜的膜材料基本上是聚酰胺，还有一些是醋酸纤维素。

随着二次世界大战的结束，美国加利福尼亚州的经济和人口增长非常快速，使得这个半干旱地区面临了前所未有的淡水供应不足的危机，因此美国内政部于 1952 年建立苦咸水事务部，开展一个全面的海水脱盐淡化技术与开发计划。

下面介绍有关反渗透膜技术的早期研究与开发概况，这里首先要提到的是美国加利福尼亚州立大学洛杉矶分校（UCLA）的 Gerald Hassler 教授，他是一位勇于异想天开的科学家。Gerald Hassler 在 1949 年所作的题目是“将海水作为饮用水的水源”的报告标志着膜技术研究在 UCLA 的开始（由此可见，UCLA 的海水脱盐研究超前于上述联邦项目就已经起动了）。在这个报告中，Hassler 提到了水蒸气迁移通过玻璃纸层的可能性。在另一篇写于 1950 年但未公开发表的报告中，Hassler 描述了“阻挡盐分渗透的膜”和“选择性渗透膜层”，最早提出了膜法脱盐的概念，其构思是从细胞生理学和物理化学中得到的。Hassler 设想了一张人工合成的多层膜，能够实现细胞膜中水的传递，并从热力学上论证该过程优于常规精馏。尽管这种膜层至今也没有被成功地制备出来，基于该设想制成的玻璃纸膜用来覆盖待汽化或浓缩的溶液表面，与玻

璃纸膜相接的溶液表面存在一层非常薄的“完美”的半透膜层，渗透以蒸发方式发生，以蒸汽状态传递到膜的另一侧，整个装置被放置在一个压力容器中，其中有一个灯芯-虹吸管装置来提供苦咸水流过玻璃纸膜汽化表面。该设备可以得到少量淡水，产水通量与膜层厚度成反比，膜层厚度为 $10 \sim 25 \mu\text{m}$ ，当海水压力为 1000psi (6.89476MPa) 时，通量为 $0.34 \text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (0.2gfd)。因为不能获得较高的产水量，该技术研究于 1960 年前后被中止。尽管有着令人失望的结果，其研究成果为后来反渗透研究工作奠定了基础。今天看来 Hassler 教授应该是对反渗透膜法脱盐技术早期研究与开发做过重大贡献而没有被赞颂过的英雄之一。

其次要提到的是美国佛罗里达大学 Charles Reid 教授，他获得苦咸水事务部提供的经费资助，大约从 1955 年开始进行“渗透膜在苦咸水脱盐中的应用”研究。与 Hassler 的狭窄气孔概念不同，这项研究所采用的装置和当时的超滤装置较为相似。采用压缩空气提供压力推动盐水溶液渗透通过一系列高分子材料制成的薄膜，其中最具有前途的是醋酸纤维素制成的薄膜，它实现了很高的脱盐率，但是产水量却比较低。当时已经开发出从醋酸纤维素丙酮溶液制备超薄膜的技术，厚度小于 $10 \mu\text{m}$ ，对 0.10mol/L 氯化钠溶液的脱盐率基本上可以达到 98% ，产水量和膜厚度呈反比关系，产水通量非常低，仅以 $\mu\text{L}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ 来计量。Reid 提出了一种有趣的膜传递机理，假定水分子与醋酸纤维素的羰基氧间存在氢键，使得醋酸纤维素膜孔隙中充满了被氢键束缚的水并形成水的通道，而离子和中性分子与醋酸纤维素的羰基氧间没有氢键，只能以“孔道扩散”方式通过薄膜，水通道对离子传递有一定的阻力。为了验证和支持这些假设，对醋酸纤维素薄膜样本进行了一系列包括电阻和介电常数等的物理测量，该模型很有创新性，是最早的选择渗透性模型理论之一。Reid 教授研究小组对反渗透膜法海水脱盐技术的研究与开发取得了实验和理论上的重大突破，是物理化学成功应用于聚合物材料和渗透现象的极好范例。

非常有趣的是，直到 1958 年 11 月 Reid 教授被邀请在美国国

家科学研究院发起的苦咸水讨论会上作报告，而来自 UCLA 的 Hassler 教授也参加了这次会议，同在美国内政部苦咸水事务部资助下同时进行反渗透膜脱盐研究的两个小组才察觉到对方的研究成就。已经过去近 60 年了，谁最先提出了反渗透 (reverse osmosis, RO) 这一术语？有两种说法，一种是由 Hassler 提出，并最早出现在 1956 年 8 月的 UCLA 工程报告中；另一种说法是由 Reid 提出，并出现在 1957 年 4 月的苦咸水研究院的研究开发进度报告中。因为上述两个小组所开展的研究工作是完全独立的，所以无法界定反渗透这个术语到底是谁最先提出。不过“反渗透”对海水淡化过程可逆性的准确定义，应该归因于 Hassler 教授和 Reid 教授都是著名的物理化学家，擅长化学工程热力学。

现在再来回顾在 1960 年前后 Sidney Loeb 和 Srinivasa Sourirajan 所作出的杰出成就。当年在 UCLA 有两个研究小组同时进行海水脱盐技术研究。一个是上述 Hassler 教授领导的研究小组，另一个是 Samuel Yuster 教授领导的研究小组，根据 Gibbs-Duhem 表面吸附理论，探讨如何采用毛细管或通过鼓泡，撇去苦咸水溶液与空气界面处形成的水分子层从而获得淡水的实际可行性。1958 年夏天 Loeb 加入 Yuster 教授研究小组和已经投身到这项研究工作中的 Sourirajan 一起工作。值得注意的是，当时他们都没有注意到 Reid 和 Breton 所发表的论文。Loeb 和 Sourirajan 尝试一种新的方法即采用一个片状高分子超滤膜，直接给溶液增压产生淡水。他们积极地想要发明一种既能满足实际需要的产水量又能保持高脱盐率的膜，开始是对 Schleicher 和 Schuell 公司的商用醋酸纤维素超滤膜进行改性修饰，发现只有与盐水接触的一侧存在一个活性层的超滤膜才表现出较高的脱盐率和产水量，不过结果仍不理想，后来他们决定从 Eastman 化学公司得到的醋酸纤维素聚合物直接制膜，经过数月的辛苦努力后，Loeb 和 Sourirajan 在 1960 年终于造就了第一张可用于海水脱盐的醋酸纤维素非对称型反渗透膜。

Loeb-Sourirajan 醋酸纤维素非对称型反渗透膜的问世开创了膜科学技术研究发展的新纪元。1980 年美国化学学会为纪念这

个伟大发明 20 周年而举办了一个专题讨论会中, Loeb 和 Sourirajan 被授予很高的荣誉。由于其在历史上的重要性, 下面列出第一张反渗透膜的制备过程: 配制具有如下组成的聚合物溶液 (质量分数) 醋酸纤维素 (E-398-3, 乙酰含量 39.8%) 22.2, 丙酮 66.7, 水 10.0, 高氯酸镁 1.1; 用刀片将上述溶液均匀地铺展在玻璃板上, 得到厚度约为 0.25mm 的液体层; 放入一定温度和湿度的空气浴中, 停留数分钟使丙酮蒸发; 将膜与玻璃板一起浸入冰水中, 膜可以自然地与玻璃盘分开。

这样制成的膜具有非对称结构, 后来被电子显微镜所证实, 其致密活性层形成于暴露在空气的一侧, 下面是多孔支撑层。从制膜液组成来看, 丙酮是用来溶解醋酸纤维素的溶剂, 含水高氯酸镁的加入, 被认为是作为溶胀剂或成孔剂, 后来被甲酰胺及一系列其他的有机组分代替, 在商业膜工厂中多采用完全由有机物组成的制膜溶液制备上述非对称膜。

膜科学技术在 UCLA 的发展并没有因为第一张实用反渗透膜的发明而停止, 随后就是膜器件的改革和试验工厂的设计。早期最具有历史意义的实用化成果是在加利福尼亚州的一个名叫 Coalinga 的山村建成了第一个膜法脱盐装置, 每天提供 5000gal (1gal = 3.78541dm³) 的饮用水给这个小山村以克服日益减少的水供应。

1961 年 Loeb-Sourirajan 膜通过专利、出版物和技术报告进入了应用阶段, 引起了南加利福尼亚数家公司的注意。Havens 公司是第一家应用这项新技术的公司, 发明了在中空玻璃纤维内侧制膜的方法, 这种新奇的膜结构提供了 Coalinga 脱盐装置的设计概念。另一家从事膜法脱盐技术开发的是 Aerojet-General 公司, 发明了可安装平板 Loeb-Sourirajan 膜的多级盘式结构, 然而由于经济因素, 海水脱盐计划最终被放弃。膜工业最重大的发展发生在圣地亚哥, 当时的 General Atomics 公司 (现在改名为 Fluid Systems) 积极从事膜实用化制造的技术创新。可能商业化的膜法脱盐技术激发了几个年轻学者的兴趣, Merten, Riley, Lonsdale 和 Bray 等在理论和实践上作出了重要贡献, 值得一提的是, Bray 发明了卷式膜

组件结构。

20世纪60年代中期，两大化学品公司：Dow Chemical公司和Dupont公司认识到大型膜法脱盐装置的市场潜力，开始从事反渗透膜的研究与开发工作，Dow Chemical公司仍采用醋酸纤维素，Dupont则把注意力投向了聚酰胺，分别开发了醋酸纤维素和芳香族聚酰胺中空纤维膜及其组件。Dupont开发的高脱盐率“Permassep”中空纤维膜适合于一次通过式海水脱盐过程。

1.2 反渗透技术现状与展望

世界卫生组织（WHO）报道，2025年世界人口将达80亿，经济增长促进人们生活水平的提高，同时带来水资源不足和水环境污染问题的日益严重，以海水、地下水甚至排水作为水源，解决水问题已经受到愈来愈广泛的重视。2001年，世界上海水淡化装置的产水量超过 $2.0 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{d}$ ，达到相当于4000万~8000万人生活用水的规模。其中蒸馏法产水量为 $1.5 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{d}$ ，占77%，反渗透膜法产水量为 $4.5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$ ，占22%，蒸馏法依然占据主导地位，但从节能和缩短建设期来看，近年来反渗透法逐步成为主流的时期已经来临。

目前国际上主要反渗透膜生产商有，美国的Dow Chem公司、Hydranautics公司、Koch公司，日本的Nitto Denko公司、Toray公司、Toyobo公司，韩国的Saehan公司等，国内有数家反渗透膜生产商，汇通源泉公司是目前国内规模最大、系列较多的复合反渗透膜生产商。表1-1所列几种常用的海水淡化反渗透膜。

近年来世界上已建成和拟建中的产水量 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 以上大型反渗透膜法海水淡化装置见表1-2，在装置规模上与蒸馏法相比毫不逊色的反渗透法海水淡化技术正在被广泛地采用。

20世纪80年代后期反渗透膜法海水淡化技术首先在中东地区得到实用推广，反渗透膜法海水淡化装置淡水回收率、最高操作压力、淡水水质及能耗随年度的推移见表1-3。随着反渗透膜自身性能的提高，淡化回收率从1980年的25%，1990年的40%~45%