



环境工程实例丛书

HUANJIING GONGCHENG SHILI CONGSHU

膜法水处理技术 及工程实例

邵刚 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

膜法水处理技术及工程实例

邵 刚 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

膜法水处理技术及工程实例/邵刚编著. —北京:
化学工业出版社, 2002.3
(环境工程实例丛书)
ISBN 7-5025-3675-2

I. 膜… II. 邵… III. 膜法-水处理 IV.
TU991.2②X703.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 002285 号

环境工程实例丛书
膜法水处理技术及工程实例

邵刚 编著
责任编辑: 管德存 陈丽
责任校对: 顾淑云
封面设计: 郑小红

*

化学工业出版社 出版发行
环境科学与工程出版中心
(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
北京市昌平振南印刷厂印刷
三河市延风装订厂装订
开本 787×1092 毫米 1/16 印张 23¼ 字数 576 千字
2002 年 3 月第 1 版 2002 年 3 月北京第 1 次印刷
ISBN 7-5025-3675-2/X·131
定 价: 48.00 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

作者简介

邵 刚 (邵高升), 男, 1934 年 11 月出生, 山西省运城市人。冶金工业部建筑研究总院教授级高工。1959 年哈尔滨工业大学土木系毕业, 留校任教。1961 年吉林大学放射化学专业进修两年。1964 年为加强国防工业力量, 被国家选调入核工业部第二研究设计院任职 17 年。1980 年调入冶金工业部建筑研究总院。主要从事放射化工及水处理技术的研究开发和工程设计工作, 在放射性废水处理及膜法水处理技术等方面有较深的研究。中国机械工程学会环保分会理事, 中国膜工业协会及北京膜学会理事。

四十年来, 完成了大量的科研和工程设计项目, 其中: “填充床电渗析处理低放废水” 获 1980 年上海市科技二等奖, “华北地区城市与工业用水节水的研究” 获 1987 年建设部科技二等奖, 此外还获冶金部及本院科技奖多项。发表论文 80 余篇, 其中“液膜法处理含锌废水中试报告” 获 1984 年中国海水淡化及水再利用学会优秀论文, “冶金工业节水措施与对策” 获 1991 年中国金属学会优秀论文, 发表译文 20 余篇。代表性著作有《膜法水处理技术》(专著)(1992 年出第 1 版, 28.9 万字; 2000 年出第 2 版, 41.5 万字)、《原子能工业》(合著)、《核工业污染及其防治》(合著)、《机械工程手册—专用机械(四)第 17 卷》(第 2 版)(合编)、《环境工程手册—水污染防治卷》(合编)、《实用环境工程手册——水处理材料与药剂》(主编)、《新技术在环境保护中的应用》(合编)、《环境问题与科学技术》(二)(合编)、《膜法水处理技术及工程实例》(专著)(50 余万字)等。主要译著有《放射性废物处理丛书: (1) 放射性废液的离子交换处理, (2) 放射性废液蒸发器的设计与运行, (3) 放射性废液的化学处理, (4) 放射性废物的沥青固化》一套四本、《放射性废物处理》(译文选编)(合译)、《核电站放射性废物处理技术》(合译)、《核动力的环境问题》(合译)、《大气污染控制技术手册》(译校)等共 18 部约 400 余万字。此外宁夏科技著作出版基金资助下将出版《邵刚论文选集》

内 容 提 要

本书为环境工程实例丛书的一个分册。共 10 章。第 1 章概要介绍了膜技术的特点及发展概况,第 2 章介绍电渗析、反渗透等 8 种分离膜过程的基本原理、技术特点及发展概况,第 3 章介绍膜法水处理系统整体概念,对膜污染及防治作了简要介绍,第 4 章介绍了集成膜技术及工程设计,第 5~10 章系统介绍了海水和苦咸水淡化、工业纯水和高纯水生产、城镇自来水及优质饮用水净化、城市污水处理与回用、工业废水处理与回用等方面工程实例 100 个。本书可供环境工程、水处理专业及有关行业的科研、设计、及工程技术人员,膜技术研究及工程技术人员以及高等院校的有关专业师生阅读和参考。

前 言

21 世纪全世界面临的重大问题之一是水危机。水处理将成为人们关注的热门话题，它的主要任务是开发新水源、治理水污染。膜技术是 21 世纪最有发展潜力的高新技术之一。膜法水处理技术将会扮演着战略的角色，是 21 世纪水处理的关键技术。

本书以膜法水处理技术应用为重点，通过国内外大量膜法水处理技术工程实例，向读者介绍这一新颖的具有极高实用价值的技术。借鉴他们的经验，促使膜技术在我国得到迅速、全面的推广应用。

本书分上下篇，上篇为膜法水处理技术篇。其中包括：第 1 章概论，概要介绍了膜技术的特点及其发展概况；第 2 章现已应用的膜过程及发展概况，重点介绍了电渗析、反渗透等 8 种分离膜过程的基本原理、技术特点及发展概况；第 3 章膜法水处理系统及膜污染防治，着重介绍膜法水处理系统整体概念，对膜法的核心部件膜的污染及防治作了简要介绍；第 4 章集成膜技术及工程设计，集成膜技术是工程应用中必须重视的问题，工程设计更是膜法应用的关键环节。下篇为工程实例篇。其中包括：第 5 章海水和苦咸水淡化；第 6 章工业纯水及高纯水生产；第 7 章城镇自来水及优质饮用水净化；第 8 章城市污水处理及回收利用；第 9 章工业废水处理及回收利用；第 10 章膜法的特殊应用。共列举工程实例 100 个。

在编写工程实例中，作者主要从国内外近年来发表的论文和报道整理而成，100 个工程实例中国内占 52 例，国外占 48 例（其中美国 19 例，日本 15 例，其他国家 14 例）。在编写过程中引用了刘茉娥教授等人的专著及其他 40 多位作者的文章，这里就不一一列举（见参考文献），本书编写过程中还得到李尚志、武江津、聂小苇等同志热情帮助，邵康杰为全书的插图制作做了大量的工作，在此仅向他们表示衷心的感谢。

膜法水处理技术在我国的应用时间较晚，经验尚不多，发表的材料也较少，且不全面，这些都给本书的编写带来一定的困难。加之作者水平所限，时间仓促，书中一定有许多遗漏、不妥、缺点和错误，恳请读者批评指正。

编著者

2001 年 10 月 1 日

目 录

上篇 膜法水处理技术篇

第 1 章 概论	1	2.6.4 MF 的操作及应用	64
1.1 膜分离工程发展概况	1	2.7 渗透汽化	65
1.2 膜分离概念及其分类	2	2.7.1 渗透汽化原理及传递模型	65
1.2.1 膜分离概念	2	2.7.2 PV 的特点及其影响因素	67
1.2.2 膜分离法分类	2	2.7.3 PV 膜及其应用	68
1.3 膜分离技术特点	3	2.8 液膜	69
1.4 膜法水处理应用前景	4	2.8.1 液膜及其分类	69
第 2 章 现已应用的膜过程及发展		2.8.2 液膜分离机理	71
概况	6	2.8.3 液膜的制备及分离操作程序	74
2.1 渗析	6	2.8.4 液膜法的应用	83
2.1.1 渗析法原理	6	第 3 章 膜法水处理系统及膜污染	
2.1.2 渗析器及应用	7	防治	85
2.2 电渗析	8	3.1 膜法水处理系统的构成	85
2.2.1 电渗析技术的特点	8	3.2 预处理系统	86
2.2.2 电渗析基本原理及过程	9	3.2.1 电渗析预处理系统	86
2.2.3 离子交换膜	12	3.2.2 反渗透预处理系统	87
2.2.4 电渗析装置	18	3.2.3 UF 和 MF 过程的预处理	91
2.2.5 频繁倒极电渗析	23	3.3 后处理系统	92
2.2.6 填充床电渗析	25	3.4 集中控制问题	93
2.2.7 高温电渗析	28	3.5 膜污染及防治	93
2.2.8 离子隔膜电解	29	3.5.1 电渗析过程膜污染及防治	93
2.2.9 双极性膜电渗析	30	3.5.2 反渗透 (RO) 及纳滤 (NF) 膜	
2.3 反渗透	31	污染防治	97
2.3.1 渗透和反渗透	31	3.5.3 反渗透膜/超滤膜清洗剂实例	102
2.3.2 反渗透膜的制备及性能	35	第 4 章 集成膜技术及工程设计	104
2.3.3 反渗透装置的几种形式	44	4.1 概述	104
2.4 纳滤	50	4.2 集成膜技术	104
2.4.1 纳滤	50	4.2.1 什么是集成膜技术	104
2.4.2 纳滤膜及其应用领域	51	4.2.2 集成膜技术的发展	104
2.5 超滤	53	4.3 工程设计基础	107
2.5.1 超滤的基本理论	53	4.3.1 设计的重要性	107
2.5.2 超滤膜的特性及制备方法	57	4.3.2 工程设计的基本程序	107
2.6 微滤	61	4.3.3 处理系统的灵活性	113
2.6.1 概述	61	4.3.4 提高工程的自动化水平	114
2.6.2 微孔过滤	62	4.4 电渗析水处理工艺及设计计算	114
2.6.3 微孔滤膜	62	4.4.1 电渗析水处理工艺	114

4.4.2 电渗析 (ED) 除盐的设计计算	116	4.6 超滤工艺流程及设计计算	143
4.4.3 ED 设计计算举例	122	4.6.1 超滤的基本工艺流程	143
4.4.4 EDR 流程设计	123	4.6.2 超滤的设计计算	144
4.5 反渗透水处理工艺及设计计算	126	4.6.3 超滤设计计算示例	146
4.5.1 反渗透水处理工艺	126	4.7 水处理站房设计原则	147
4.5.2 反渗透除盐设计计算	128	4.7.1 水处理站房在厂区总平面布置中 的设计原则	147
4.5.3 反渗透海水淡化 (SWRO) (二次 浓缩) 设计计算示例	136	4.7.2 水处理站房设备布置原则	147
4.5.4 某电厂引进的反渗透装置计算 示例	139	4.7.3 水处理站房管道布置原则	148
		4.8 膜法经济性评价	148

下篇 工程实例篇

第 5 章 海水和苦咸水淡化	150	5.3.3 沧化公司 18000m ³ /d BWRO 淡化 工程 (工程实例 14)	181
5.1 海水淡化的发展趋势	150	5.3.4 日本鹿岛钢铁厂 BWRO 淡化 工程 (工程实例 15)	183
5.2 RO 和 ED 法海水淡化技术	150	5.3.5 日本鹿岛南共同火力电厂 BWED 淡化工程 (工程实例 16)	186
5.2.1 我国西沙 200m ³ /d SWED 淡化 工程 (工程实例 1)	152	5.3.6 巴林的 RAJJ BWRO 脱盐工程 (工程实例 17)	188
5.2.2 我国嵊山 500m ³ /d SWRO 示范 工程 (工程实例 2)	154	5.3.7 美国加州阿灵顿 15000m ³ /d BWRO 淡化工程 (工程实例 18)	192
5.2.3 大连长海县 1000m ³ /d SWRO 淡化工程 (工程实例 3)	158	第 6 章 工业纯水及高纯水的生产	194
5.2.4 浙江马迹山 350m ³ /d SWRO 淡化 工程 (工程实例 4)	159	6.1 工业纯水的生产	194
5.2.5 沙特阿拉伯捷达 (Jeddah) SWRO 淡化工程 (工程实例 5)	160	6.2 电渗析的应用	196
5.2.6 巴林的 Addur SWRO 淡化工程 (工程实例 6)	163	6.2.1 松木坪电厂中压锅炉补给水 ED 处理 (工程实例 19)	196
5.2.7 美国 Diablo Canyon 核电站的 SWRO 淡化工程 (工程实例 7)	164	6.2.2 石景山发电厂 2400m ³ /d EDR 淡化工程 (工程实例 20)	198
5.2.8 日本造水促进中心 SWRO 示范 工程 (工程实例 8)	166	6.2.3 凌钢动力厂 150m ³ /h (3600m ³ /d) EDR 除盐车站 (工程实例 21)	201
5.2.9 美军 150000gpd ROWPU (567.8m ³ /d) (工程实例 9)	168	6.2.4 电渗析在铁路系统的应用 (工程实例 22)	204
5.2.10 美国军用标准反渗透净化装置 600gph ROWPU (2.27m ³ /h) (工程实例 10)	170	6.2.5 上海石化总厂大型 ED 装置的 运行经验 (工程实例 23)	207
5.2.11 我国海军舰艇用 SWRO 淡化装置 (工程实例 11)	172	6.3 反渗透的应用	208
5.3 苦咸水淡化	174	6.3.1 河北沧州发电厂 360m ³ /d BWRO 工程 (工程实例 24)	208
5.3.1 山东长岛梁南长山岛 BWRO 淡化工程 (工程实例 12)	175	6.3.2 沧州炼油厂热电厂 RO 工程 (工程实例 25)	210
5.3.2 新疆石西油田 BWRO 饮水工程 (工程实例 13)	180	6.3.3 山东聊城发电厂化学水处理系统	

的改进 (工程实例 26)	212
6.3.4 宝钢电厂 2440m ³ /d BWRO 工程 (工程实例 27)	213
6.3.5 上海杨树浦发电厂超高压锅炉 补给水 RO 工程 (工程实例 28)	214
6.3.6 美国中西部某电厂锅炉补给水 系统 (工程实例 29)	215
6.3.7 澳大利亚 Bayswater/Liddell 火电 厂的锅炉冷却水零排放系统 (工程实例 30)	217
6.4 高纯水的生产	218
6.4.1 佛山彩色显像管厂 80m ³ /h 纯水站 (工程实例 31)	219
6.4.2 最新高纯水制备系统 RO (或 EDR) ——EDI (工程实例 32)	221
6.4.3 清华 VLSI 高纯水站设计 (工程实例 33)	223
6.4.4 德国电子工业集成电路高 纯水制备 (工程实例 34)	225
6.4.5 利用三膜体系制备医用高 纯水 (工程实例 35)	228
6.4.6 哈尔滨制药六厂用 RO 制备纯净水 和制药用水 (工程实例 36)	230
6.4.7 我国制剂用无菌无热原纯水系统 (工程实例 37)	231
6.4.8 用 RO-GAC-IX-UF 组合技术 制备注射医用水 (工程实例 38)	232

第 7 章 城镇自来水及优质饮用水 净化

7.1 纳滤膜软化	234
7.1.1 山东长岛南隍城纳滤 (NF) 工程 (工程实例 39)	234
7.1.2 美国佛罗里达州路丝市 3800m ³ /d 纳滤软化试验厂 (工程实例 40)	236
7.2 饮水水质改善工程	237
7.2.1 咸阳机场 RO 法生产饮用水 (工程实例 41)	238
7.2.2 顺德五沙水厂的 MF 工艺 (工程实例 42)	239
7.2.3 法国巴黎的 Aurse-Sur-Oise 水厂	

(工程实例 43)	240
7.2.4 我国饮用纯净水生产实例 (工程实例 44)	242
7.2.5 天津某直饮水工程 RO 系统 (工程实例 45)	247
7.2.6 日本 21 世纪水计划 (新 MAC21) 膜法饮水净化 (工程实例 46)	249
7.2.7 大庆油田分质供水工程 (工程实例 47)	251
7.2.8 天津饮料用水的电渗析处理 (工程实例 48)	253

第 8 章 城市污水处理及废水回收 利用

8.1 膜生物反应器	256
8.2 膜法城市污水处理的工程应用	258
8.2.1 日本姬路白鹭高尔夫俱乐部 MBR 污水处理工程 (工程实例 49)	258
8.2.2 日本膜生物反应器在中水道的 应用 (工程实例 50)	259
8.3 用 RO 进行城市污水深度处理 及回收利用	260
8.3.1 美国 21 世纪水厂 (工程实例 51)	261
8.3.2 美国科罗拉多州丹佛市废水 回用工程 (工程实例 52)	266
8.3.3 日本废水再利用处理工程实例 (工程实例 53)	267
8.3.4 日本用 RO 法将城市污水再生 作锅炉给水 (工程实例 54)	269
8.3.5 日本新小仓电站废水再利用 工程 (工程实例 55)	272
8.3.6 澳大利亚 Eraring 发电厂用 RO 法从废水制备锅炉补给水 (工程实例 56)	274
8.3.7 日本下水的高级处理 (工程实例 57)	276
8.4 填埋场垃圾渗滤液的处理	277
8.4.1 德国 Ihlenberg 的沉积池污水 RO 处理 (工程实例 58)	277
8.4.2 德国 Schonberg 填埋场渗滤液 RO 处理厂 (工程实例 59)	280

第 9 章 工业废水处理及回收利用

9.1 电镀废水处理及利用	283	9.6.4 德国大众汽车公司卡塞尔厂处理 乳化液和洗涤水的 UF 装置 (工程实例 78)	316
9.1.1 北京广播器材厂 RO 法处理镀 镍和镀铬废水 (工程实例 60)	284	9.6.5 Adolph Coors UF 法处理含油 清洗废水 (工程实例 79)	317
9.1.2 日本电渗析法处理电镀含镍 废水 (工程实例 61)	285	9.7 化工废水处理	319
9.1.3 宝钢冷轧厂电镀含锌废水 MF 处理 (工程实例 62)	286	9.7.1 RO 法回收 ϵ -己内酰胺 (工程实例 80)	319
9.1.4 浙江邮电印刷厂用 ED-IX 法 处理含铜废水 (工程实例 63)	288	9.7.2 日本用 RO 法处理化工综合废 水试验厂 (工程实例 81)	321
9.1.5 上海仪表电镀厂镀铬废水的 RO 处理 (工程实例 64)	290	9.8 皮革废水处理	322
9.2 上海汽车制造厂 UF 法处理电泳 涂漆废水工程 (工程实例 65)	291	9.8.1 美国皮革废水处理——硫化物的 回收 (工程实例 82)	322
9.3 纤维工业废水处理	295	9.8.2 美国皮革废水处理——植鞣的回收 (工程实例 83)	324
9.3.1 UF 法从羊毛精制废水中回收 羊毛脂 (工程实例 66)	295	9.9 食品工业废水处理	325
9.3.2 美国 UF 法从退浆废水中回收 PVA (工程实例 67)	297	9.9.1 食品工业废水处理——淀粉加 工厂废水处理 (工程实例 84)	326
9.3.3 上海石化总厂涤纶厂油剂废水 的 UF 处理 (工程实例 68)	299	9.9.2 美国大豆加工废液 UF 和 RO 处理 (工程实例 85)	327
9.4 造纸工业废水处理	301	9.9.3 我国集成膜工艺从海带浸泡水中提 取甘露醇 (工程实例 86)	328
9.4.1 美国纸浆和造纸漂白废水的 MF-RO 处理 (工程实例 69) ...	301	9.9.4 无锡酶制剂厂 UF 法浓缩 糖化酶 (工程实例 87)	330
9.4.2 日本 UF 法处理硫酸盐纸浆 漂白废水 (工程实例 70)	302	9.10 酸、碱废液处理	332
9.4.3 我国电渗析法处理草浆黑液 (工程实例 71)	304	9.10.1 上海矽钢片厂扩散渗析-隔 膜电解法处理废酸液 (工程实例 88)	332
9.4.4 我国 UF 法处理亚硫酸纸浆 废液 (工程实例 72)	305	9.10.2 某钢厂酸洗废液治理新工艺—— NF 法 (工程实例 89)	334
9.5 印染废水处理	307	9.10.3 美国利用双极性膜电渗析回 收不锈钢酸洗废液中的 HF 和 HNO_3 (工程实例 90)	336
9.5.1 北京光华染料厂用 UF 法回收 染料 (工程实例 73)	308	9.10.4 日本从人造丝浆压榨液中回收碱 (工程实例 91)	337
9.5.2 PW 膜技术处理印染废水 (工程实例 74)	310	第 10 章 膜法特殊应用	339
9.6 含油废水处理	311	10.1 放射性废水处理	339
9.6.1 胜利油田回注水中 UF 的应用 (工程实例 75)	311	10.1.1 我国 ED 和 ED-ED I 在放射性 废水处理中的应用 (工程实例 92)	340
9.6.2 大庆油田含油污水 MF 处理 (工程实例 76)	313	10.1.2 日本核电站含铬废水的膜法处理 (工程实例 93)	342
9.6.3 宝钢冷轧厂乳化油废水 UF 处理 (工程实例 77)	315	10.1.3 日本敦贺核电站放射性废水	

处理 (工程实例 94)	343	10.4 法国用渗透汽化 (PV) 法生产无	
10.1.4 莫斯科放射性废物处理站 ED-		水乙醇 (工程实例 98)	351
EDI 放射性废水处理工程		10.5 离子交换膜在制碱工业中的	
(工程实例 95)	345	应用 (工程实例 99)	353
10.2 电渗析法海水浓缩制盐		10.6 华北药厂链霉素浓缩工艺	
(工程实例 96)	346	(工程实例 100)	356
10.3 奥地利利用液膜法处理含锌废水			
工程 (工程实例 97)	348	参考文献	359

上篇 膜法水处理技术篇

第 1 章 概 论

1.1 膜分离工程发展概况

膜分离现象广泛存在于自然界中，特别是生物体内，但人类对它的认识和研究却经过了漫长而曲折的道路。

膜分离技术的工程应用是从 20 世纪 60 年代海水淡化开始的。1960 年洛布 (Loeb) 和索里拉金 (Sourirajan) 教授制成了第一张高通量和高脱盐率的醋酸纤纸素膜，这种膜具有非对称结构，从此使反渗透从实验室走向工业应用。其后各种新型膜陆续问世，1967 年美国杜邦 (Du Pont) 公司首先研制出以尼龙-66 为膜材料的中空纤维膜组件；1970 年又研制出以芳香聚酰胺为膜材料的“Permasep B-9”中空纤维膜组件，并获得 1971 年美国柯克帕特里克 (Kirkpatrick) 化学工程最高奖。从此反渗透技术在美国得到迅猛的发展，随后在世界各地相继应用。其间微滤和超滤技术也得到相应的发展。电渗析技术从 20 世纪 50 年代就已开始进入工业应用，60 年代在日本大规模用于海水浓缩制盐。目前膜法除大规模用于海水淡化、苦咸水淡化、纯水及高纯水生产、城市生活饮水净化外，在城市污水处理与利用及各种工业废水处理与回收利用方面也逐步得到推广和应用。此外还在食品工业、医药工业、生物工程、石油、化学工业、核工业等领域得到应用，随着膜技术的发展，其应用领域还在不断地扩大。据报道，世界膜产品市场销售额已超过 100 亿美元，且以 14% ~ 30% 的年增长速度在发展，膜产业将是 21 世纪新型十大高科技产业之一。

近半个世纪以来，膜分离工程得到了迅猛的发展，至今方兴未艾。表 1-1 列出了主要膜分离过程的发展进程。

表 1-1 主要膜分离过程工业发展进程

膜 过 程	年代	生 产 厂
微滤 (microfiltration, MF)	1925	Sartorius ^① , Millipore Corp, Pall Corp, Asahi Chemical
电渗析 (electro-dialysis, ED)	1950	Ionics Inc ^① , Asahi Glass Tokuyama Soda
反渗透 (reverse osmosis, RO)	1965	Hexens Industry General Atomics ^① Film Tech/Dow, Torray Hydro-nautics/Nitto, Du Pont
渗析 (dialysis, D)	1965	Enka (AKZO) ^① , GAmbrö Asahi Chemical
超滤 (ultrafiltration, UF)	1970	Amicon Corp ^① , Koch Eng. Inc Nitto Denko
控制释放 (control release)	1975	Alza Corp ^① Ciba, Sa
气体分离 (gas separation, GP)	1980	Permea (DOW) Permea/Air Prod, Ube Ind. Heechst
渗透汽化 (pervaporation, PV)	1990	GFT GmbH

① 开发商。

1.2 膜分离概念及其分类

1.2.1 膜分离概念

可以将分离膜看作是把两相分开的一薄层物质，称其为“薄膜”，简称“膜”。膜可以是固态的，也可以是液态的或气态的。被膜所隔开的流体相物质则是液态的或气态的。膜可以是均相的或非均相的，对称的或非对称的；可以是带电的或不带电的（中性的）；而带电膜又可以是带正电荷或带负电荷的，或二者兼而有之。膜可以是具有渗透性的，也可以是具有半渗透性的，但不能是完全不渗透性的。膜可以存在于两流体之间，也可以附着于支撑体或载体的微孔隙上，膜厚度应比表面积小得多。

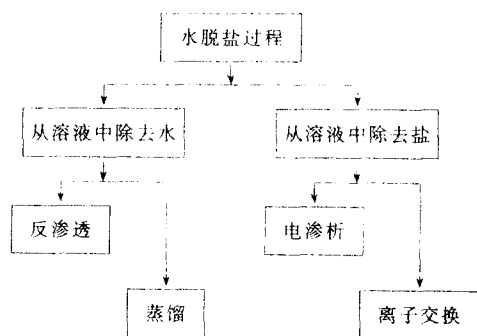


图 1-1 水的脱盐过程

膜分离是用天然或人工合成膜，以外界能量或化学位差作推动力，对双组分或多组分溶质和溶剂进行分离、分级、提纯和富集的方法。膜分离法可以用于液相和气相，对液相分离，可以用于水溶液体系、非水溶液体系以及水溶胶体系。

海水和苦咸水淡化，或其他含盐水除盐制取淡水，通常采用两种方法：一种是从盐水中除去水，如反渗透和蒸馏；另一种是从盐水中除去盐，如电渗析和离子交换。其过程如图 1-1 所示。

1.2.2 膜分离法分类

膜分离法的分类方法一般有以下几种。

- ① 按分离机理分 主要有反应膜、离子交换膜、渗透膜等。
- ② 按膜的性质分 主要有天然膜（生物膜）和合成膜（有机膜和无机膜）。
- ③ 按膜的结构型式分 主要有平板型、管型、螺旋型（卷式）及中空纤维型等。

目前常见的几种膜分离法是：微滤（MF）、超滤（UF）、反渗透（RO）、纳滤（NF）、渗析（D）、电渗析（ED）、气体分离（GS）、渗透蒸发（PV）及液膜（LM）等，现将这几种主要膜分离法的特点归纳于表 1-2 中，它们的适用范围如图 1-2 所示。

表 1-2 几种主要的膜分离特点

过 程	简 图	推动力	传递机理	透过物	截留物	膜类型
微孔过滤 (MF)		压力差约 100 kPa	颗粒大小、形状	水、溶剂、溶解物	悬浮物颗粒、纤维	多孔膜
超 滤 (UF)		压力差 0.1 - 1.0 MPa	分子特性、大小、形状	水、溶剂	胶体大分子 (不同分子量)	非对称性膜
反渗透 (RO) 纳滤 (NF)		压力差 (0.5 - 1 MPa)	溶剂的扩散传递	水溶剂	溶 质、盐 (悬浮物、大分子、离子、二价和多价阳离子盐)	非对称性膜 或复合膜

续表

过 程	简 图	推动力	传递机理	透过物	截留物	膜类型
渗 析 (D)		浓度差	溶质的扩散传递	低分子量物质、离子	溶剂分子量 > 1 000	非对称性膜、离子交换膜
电渗析 (ED)		电位差	电解质离子的选择性传递	电解质离子	非电解质大分子物质	离子交换膜
气体分离 (GS)		压力差 1 ~ 10MPa 浓度差 (分压差)	气体和蒸汽的扩散渗透	渗透性的气体和蒸汽	难渗透性气体或蒸汽	均匀膜、复合膜、非对称性膜
渗透蒸发 (PV)		分压差 浓度差	选择传递 (物性差异)	溶质或溶剂 (易渗组分的蒸汽)	溶剂或溶质 (难渗组分的蒸汽)	均匀膜、复合膜、非对称性膜
液 膜 (LM)		化学反应和浓度差	反应促进和扩散传递	杂质 (电解质离子)	溶剂 (非电解质)	液膜

影响分离的主要因素

各种分离方法的适用范围

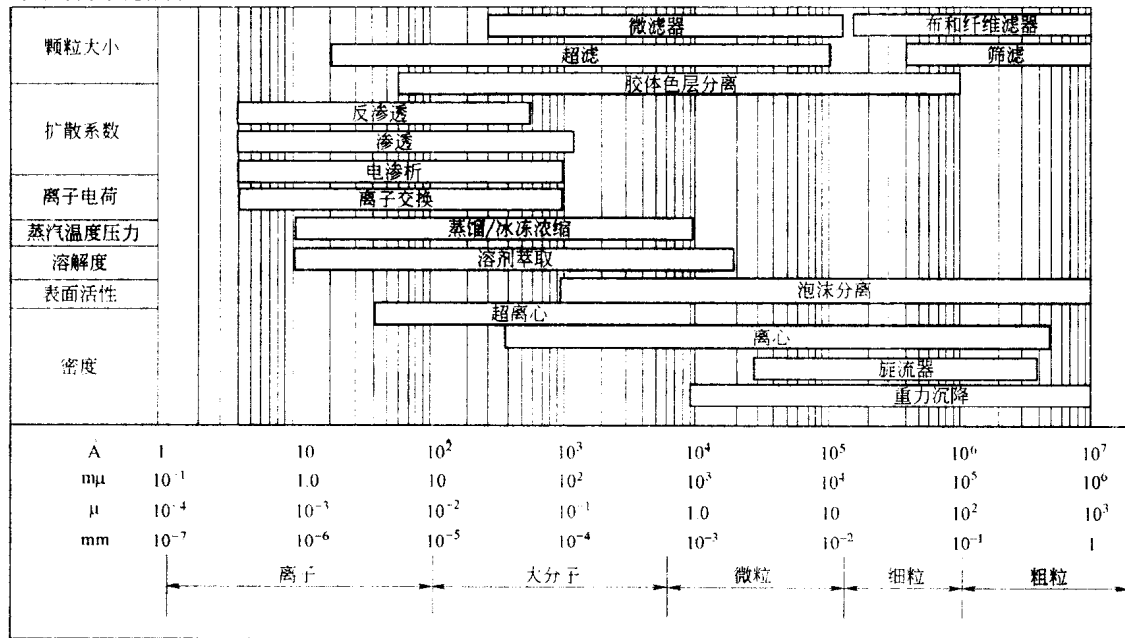


图 1-2 各种分离方法的适用范围

1.3 膜分离技术特点

与传统的分离技术相比，膜分离技术具有以下特点。

① 膜分离过程不发生相变和其他方法相比能耗较低，因此又称节能技术。以海水淡化

为例，各种淡化方法所需的能量比较如表 1-3 所示。由表中数据看出，反渗透法耗能最低。

② 膜分离过程是在常温下进行的，因而特别适于对热敏感物质的处理。膜分离在食品工业、医药工业、生物技术等领域有其独特的适应性。例如抗生素的生产，果汁、酶等的分离、分级与富集过程。很多食品加工后仍基本保持原有的营养和风味。表 1-4 中比较了用反渗透与蒸发两种方法对西莲果汁浓缩成分的影响。

表 1-3 几种海水淡化方法耗能比较

分离方法	消耗的动力 $W/(kW \cdot h/m^3)$	消耗的热量 $Q/(kJ/m^3)$	分离方法	消耗的动力 $W/(kW \cdot h/m^3)$	消耗的热量 $Q/(kJ/m^3)$
理论功值	0.72	2577	溶剂萃取法	25.6	92048
反渗透法(回收率 40%)	3.5	12935	电渗析法	32.2	115863
反渗透法(回收率 30%)	4.7	16911	多级闪蒸法	62.8	225936
冷冻法	9.3	33472			

表 1-4 两种浓缩方法使西莲果汁成分损失的量 $w_B/\%$

浓缩方法	甲酸乙酯	乙酸乙酯	丁酸乙酯	己酸乙酯	V_c
蒸发	20.6	94.5	99.4	100	100
反渗透	0	0	13.8	31.3	9.9

③ 膜分离技术不仅适用于有机物和无机物的分离，生物学病毒、细菌到微粒的分离，而且还适用于许多特殊溶液体系的分离，如溶液中大分子与无机盐的分离、一些共沸物或近沸物系的分离等，而后者用常规的蒸馏方法常常是无能为力的。

④ 膜分离法分离装置简单，操作容易且易控制，工作温度又在室温附近，便于维修管理，分离效率高，可靠性高。作为一种新型的水处理方法，与常规水处理方法相比，具有设备紧凑小巧、处理效率高、容易实现自动化操作、占地面积小、可以频繁启动或停止工作的特点，十分灵活。

⑤ 液膜与固膜相比，具有传质速度快、选择性高、分离效率高、浓缩倍数高、操作简单等特点。固膜厚度一般为 0.5~1.0 mm，而液膜厚度仅为 1~10 μm ，1m³ 乳液形成的液膜表面积达 $2 \times 10^6 m^2$ ，而 1m³ 固膜的表面积只能达到 $10^2 \sim 10^4 m^2$ ，因此液膜有其更广阔的发展前景。

1.4 膜法水处理应用前景

膜分离技术应用范围是极其广泛的，但首先开发研究和应用的都是水处理领域，其应用涉及面广而且量大，所以膜法水处理在水工业中受到特别青睐，膜法水处理工程在世界各地陆续问世，今后将会以更快的速度开拓水工业市场，膜法水处理技术必将成为 21 世纪水处理的关键技术。

据日本工业用水杂志 2000 年报道，1995 年全球海水淡水产水量为 20 918 km³/d，其中蒸馏法生产 11 556 km³/d，占 55%；膜法生产 8 848 km³/d，占 42.3%（其中 RO 7 683 km³/d，占 36.7%，ED 1 165 km³/d，占 5.6%）。从地区分布来看，中东居首位，11 179 km³/d，占 53.4%；其次为美国，3 200 km³/d，占 15.3%；欧洲第三，2 076 km³/d，占 9.9%。

世界工业膜分离装置年销售额在迅速增长，1950 年为 500 万美元，1980 年增至 5 亿美元，1990 年增至 39.9 亿美元，2000 年已经超过 100 亿美元。

膜工业至今还集中在少数国家，根据 1990 年的统计：美国居首位占 55%，其次为西欧占 23%，日本居第三占 18%。

我国膜技术从开始建立至今也有 40 多年的历史，1958 年开始离子交换膜的研究，1967 年异相离子交换膜实现工业化生产，电渗析进入实用化阶段。反渗透从 1965 年开始研究，1968 年 CA 不对称膜研制成功，20 世纪 70 年代后开始开发各种类型膜组件，并得到应用。20 世纪 80 年代是 ED、RO、UF 和 MF 跨入推广应用阶段。1985 年 PS 中空纤维膜试制成功，气体分离膜也开始进入应用。20 世纪 90 年代试制了反渗透-纳滤复合膜，NF 开始应用。据 1993 年统计，我国膜和膜装置的年产值大约是 2 亿多元人民币，其中离子交换膜和电渗析器约 1 亿元，反渗透和超滤膜装置约为 6 000 万元，微孔滤膜约为 3 000 万元，气体分离膜约为 1 000 万元。很显然我国膜和膜装置的生产能力是很低的，其产值仅为世界市场的 1/500，日本的 1/100，我们和世界发达国家相比差距还是很大的。因此我们必须急起直追，迎头赶上，加速发展我国膜工业。可以预料，在 21 世纪，我国膜工业和膜法水处理技术将会出现突飞猛进的发展，而应用将会进入新高潮。特别是在提高饮用水水质、海水及苦咸水淡化、工业纯水及高纯水制备、水污染控制、废水的回收再利用等方面将会得到更迅速更全面的发展。相信在不久的将来，一种崭新的水处理技术——膜法水处理技术，将会受到水处理技术领域的专家学者欢迎和重视，膜法水处理技术在水工业中定会开花结果。膜法水处理工程会如雨后春笋般在祖国大地生长，其前景是十分广阔的。

第2章 现已应用的膜过程及发展概况

2.1 渗析

在膜分离技术中，渗析（D）是最早被发现和研究的膜分离过程。渗析法是利用半透膜或离子交换膜两侧溶液间溶质浓度梯度所产生的浓差扩散原理而进行分离的。因受体系本身条件的限制，所以扩散过程进行缓慢，效率较低；另一方面渗析过程选择性不高，化学性质相近似的或分子大小类似的溶质体系很难用渗析法分离，因此渗析法的发展受到了一定的限制。生物体内的膜分离过程是在等温等压下进行的，只有浓度梯度是膜传递的惟一推动力，因此生物体内的膜过程大多为渗析过程，如肾、肺、血管的机理都相当于膜渗析过程。

渗析在生命科学中具有重要的意义，目前渗析法应用的最大市场是血液渗析。据1989年报道，全世界用于渗析器的总膜面积为 $35 \times 10^7 \text{ m}^2/\text{a}$ ，通过它净化的患者血液每年约35亿升。在工业废液处理中，从酸性或碱性废液中回收酸或碱也是渗析技术应用的一个重要领域。由于它不需外来的压力或电能，不需要高温条件，因而是一种节能技术。渗析膜在世界膜市场上年销售额占38%，居首位。

2.1.1 渗析法原理

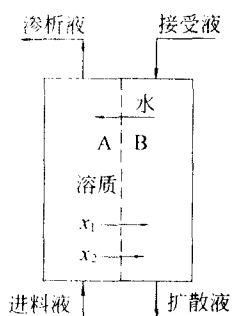


图 2-1 渗析法原理示意图

渗析法原理如图 2-1 所示，在容器中间用 1 张渗析膜（虚线）隔开，膜两侧分别为 A 侧和 B 侧，A 侧通过原进料液，B 侧通过接受液。由于两侧溶液的浓度不同，溶质由 A 侧根据扩散原理到 B 侧、溶剂（水）由 B 侧根据渗透原理到 A 侧相互进行迁移，一般低分子比高分子扩散得快。渗析的目的就是借助扩散速度差，使 A 侧二组分以上溶质（如 B_1 和 B_2 ）得以分离，而浓度差（化学位）是这种分离过程的惟一推动力。在渗析过程中原料液和接受液（渗透物）是逆向流动的。

渗析有非选择性膜渗析和有选择性的离子交换膜渗析，前者和超滤相似，后者可由扩散渗析和 Donnan 渗析两种过程来描述。

阴、阳离子交换膜的扩散渗析和 Donnan 渗析原理如图 2-2 所示。

扩散渗析为一扩散过程，在此过程中，离子在浓差作用下通过膜。该过程可用与渗析过程类似的方式进行描述。无浓差极化条件下离子 i 通过膜的通量为：

$$J_i = \frac{p_i}{l} \Delta c_i \quad (2-1)$$

式中 p_i ——某一离子（ i ）通过膜的渗透系数， m^2/s ；

Δc_i ——原料液和渗透物之间的浓度差， mol/m^3 ；

l ——膜厚度， m ；

J_i ——溶质 i 的渗透通量， $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

在碱性条件下（ $\text{pH} > 7$ ），可使用阳离子交换膜，此时除 OH^- 以外的所有其他阴离子均会被截留，运用该过程可从盐溶液中回收烧碱（图 2-2（a）左）。利用类似原理也可从盐中回收酸，此时使用带正电的阴离子交换膜，这种膜可以截留除氢离子以外的其他所有阳离