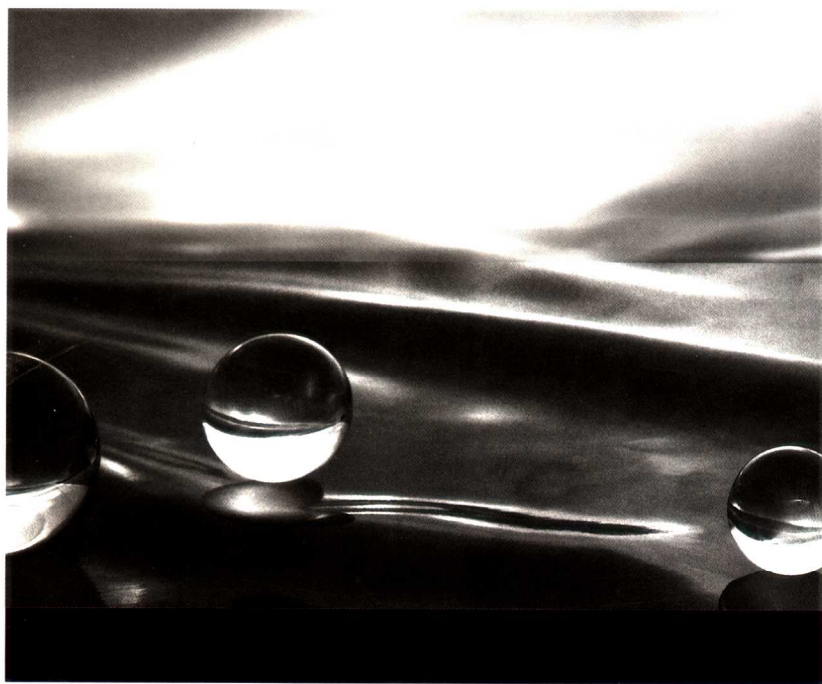


周正立 编著

反渗透水处理应用技术 及膜水处理剂



Chemical Industry Press

 化学工业出版社
环境·能源出版中心

反渗透水处理应用技术 及膜水处理剂

周正立 编著



化学工业出版社
环境·能源出版中心

·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

反渗透水处理应用技术及膜水处理剂/周正立编著.
北京: 化学工业出版社, 2005. 4
ISBN 7-5025-6897-2

I. 反… II. 周… III. ①反渗透膜-水处理-技
术②水处理料剂 IV. TU991. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 032418 号

反渗透水处理应用技术及膜水处理剂

周正立 编著

责任编辑: 管德存 徐 娟

责任校对: 李 林

封面设计: 于 兵

*

化学工业出版社
环境·能源出版中心 出版发行

(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

北京市彩桥印刷厂印刷

三河市前程装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 29 $\frac{3}{4}$ 字数 738 千字

2005 年 6 月第 1 版 2005 年 6 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6897-2

定 价: 68.00 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

前 言

据中国工程院 2000 年 7 月提出的“21 世纪中国可持续发展水资源战略研究报告”预测：到 2010 年，我国需水量 7300 亿立方米，可供水量为 6200 亿~6300 亿立方米，缺水 1000 亿立方米。解决人类用水紧缺问题，关键是增加淡水资源的总量。利用反渗透膜进行海水淡化是我国水资源开发和利用的一个重要措施。

反渗透水处理技术目前被认为是最有效的水脱盐技术之一，是 21 世纪水处理的关键技术之一，是最有发展潜力的高新技术之一。

随着膜技术的引进和国家各部委科研攻关研究的深入，膜技术已在海水、苦咸水淡化及工业水处理、环境污染治理等领域获得成功，显示出膜技术具有极高的实用价值。反渗透水处理技术在许多大中型工业水处理系统中，特别是电力工业给水处理中，应用最为广泛。膜技术在我国已经走过了推广应用阶段，现在正向更深入的理论研究和深入使用阶段发展。

本书阐述了反渗透水处理应用技术及膜用水处理剂的基础理论；提供了有代表性和真实可靠的应用技术数据，以及生产、使用方法。书中突出了如何设计、安装、调试反渗透水处理系统；如何在实际生产中控制与处理反渗透膜结垢物质的污染；如何实际运行反渗透装置系统；如何全过程（从设计到应用）地进行反渗透海水淡化；列举了反渗透膜分离技术的应用实例。书中还提供了反渗透阻垢分散剂的种类及产品特性；介绍了一些国外和国内的膜用阻垢分散剂；介绍了如何使用膜阻垢分散剂对污染膜进行清洗以及膜元件的再生，突出了阻垢剂的生产方法；为了便于应用，还列举了反渗透水处理剂的分析方法，反渗透水处理系统水质分析和监测；为方便读者实际操作，还收集了国家标准分析方法。

本书的指导思想是突出实用性。反渗透脱盐的理论部分尽量精练，实用部分尽量典型、实用、可操作性强，力求突破一些使用瓶颈，打破一些技术封锁，让更多的人掌握此项技术。本书适合有关工程设计人员、膜组件和水处理剂使用单位的技术人员、膜组件和水处理剂产品经销商及高校有关专业师生参考。

本书在编写过程中得到了梁颀、张悦、周宇辉、周君玉、石英达、翟金鹏、梁永霞、刘华、周玉玺、刘翠青等人的帮助，在此谨向他们表示衷心感谢。

由于本人水平有限，书中难免有不足、不妥、缺点和疏漏之处，恳请读者批评和指正。

编著者
2005 年 1 月

目 录

第一篇 反渗透水处理应用技术

第一章 反渗透膜分离技术	1
第一节 反渗透膜分离技术的基本原理	1
一、理想半透膜.....	1
二、渗透与渗透平衡.....	1
三、渗透压与反渗透.....	1
四、反渗透膜分离技术的特点.....	2
五、采用反渗透-化学除盐系统方法的优点	2
第二节 反渗透膜污染及浓差极化	3
一、反渗透膜污染.....	3
二、膜的浓差极化.....	3
三、浓差极化对反渗透的影响和降低浓差极化的途径.....	3
第三节 反渗透膜种类和膜组件性能	4
一、按膜材料化学组成分类.....	4
二、按膜材料的物理结构分类.....	4
三、膜元件和膜组件	4
四、膜组件性能测试方法.....	8
第四节 反渗透膜的制备	9
一、膜材料.....	9
二、CA膜的制备	9
三、聚酰胺膜的制备	12
四、复合膜	13
五、动力形成膜的制备	15
第二章 反渗透水处理系统设计	18
第一节 基本设计内容	18
一、设计依据的资料	18
二、基本流程	18
三、反渗透进水的预处理方案	19
第二节 反渗透装置设计	19
一、反渗透系统常用术语	19
二、反渗透装置的设计程序	19
三、膜组件的性能参数	20
四、膜组件的选用	23
五、膜组件的排列组合	24

六、反渗透装置的配套件	27
七、反渗透装置的辅助设备	29
八、反渗透脱盐系统检测和控制功能	30
九、反渗透脱盐处理系统图	31
第三节 反渗透系统设计软件的使用	34
一、反渗透系统设计导则的内容	34
二、反渗透系统设计软件使用导则	35
三、使用反渗透膜系统设计软件应用实例	36
四、部分设备简图	45
第三章 反渗透预处理	52
第一节 反渗透进水预处理的目的	52
一、影响反渗透的因素	52
二、预处理的目的	52
三、预处理的目标	52
四、反渗透进水水源和水质要求	52
第二节 预处理的方法	54
一、污泥密度指数	54
二、水的混凝与沉淀处理	54
三、水的过滤处理	56
四、离子交换软化法	58
五、化学软化法	59
六、杀菌处理	59
七、金属氧化物的处理	60
八、有机物的去除方法	60
第三节 反渗透结垢物质的控制与处理	60
一、反渗透结垢物质的控制	60
二、反渗透膜防结垢的处理	62
三、防硅垢处理	74
第四节 预处理系统	75
一、确定预处理方案的因素	75
二、预处理的一般原则	75
三、常见预处理系统	75
四、预处理的工艺流程	76
第四章 反渗透装置的安装与运行	77
第一节 反渗透膜元件的安装	77
一、安全注意事项	77
二、反渗透膜元件的装人和取出	78
第二节 反渗透装置的运行	80
一、反渗透装置的调试	80
二、反渗透装置的运行	81

三、计算机监控的应用	83
第三节 反渗透系统的故障分析及排除	83
一、反渗透系统的故障分析	83
二、反渗透系统故障排除的主要措施	85
第四节 反渗透膜的清洗和维护	86
一、反渗透膜的清洗	86
二、推荐膜清洗技术	91
三、反渗透膜的再生系统	98
四、反渗透膜元件的一般保存方法	100
第五章 反渗透与其他脱盐设备的综合系统	102
第一节 反渗透与离子交换脱盐系统	102
一、反渗透与离子交换脱盐系统的特点	104
二、反渗透与离子交换脱盐系统的组合形式	104
三、反渗透与离子交换脱盐系统的工艺流程举例	104
第二节 反渗透与电去离子脱盐系统	105
一、电去离子脱盐	105
二、反渗透与电去离子脱盐系统的组合形式	106
三、反渗透-电去离子脱盐系统的特点	106
四、反渗透-电去离子脱盐系统的工艺流程举例	106
第六章 反渗透海水淡化	109
第一节 海水淡化的发展趋势	109
一、国外海水淡化现状	109
二、国内海水淡化现状	109
第二节 海水的物理化学性质	109
一、典型海水组成	110
二、海水中物质的分类	110
三、海水的特性	110
第三节 反渗透海水淡化工艺流程	111
一、一级除盐法	111
二、二级除盐法	111
三、反渗透海水淡化系统选择	112
四、典型工艺流程介绍	112
第四节 海水取水	113
一、海水取水的难度	113
二、典型海水取水方法	113
三、海水取水系统投资、运行和维护费用	113
第五节 海水预处理及化学药品调节	115
一、海水预处理	115
二、化学药品及化学调节	115
第六节 反渗透高压给水系统	116

一、高压泵	116
二、能量回收装置	117
三、压力提升泵	117
第七节 反渗透海水淡化系统	118
一、海水淡化系统进水水质	118
二、海水淡化膜元件	118
三、化学清洗系统	119
第八节 产品水后处理	120
一、完全除盐	120
二、饮用水	120
三、产品水用作其他用途	120
第九节 系统控制	120
一、集中监视操作	120
二、高压泵后分别设置高、低压开关	120
三、自动联锁装置	120
四、打印系统	120
第十节 海水淡化系统设备、材料的选择	120
一、过滤设备	120
二、膜组件	121
三、泵和能量回收装置	121
四、管道件及阀门	121
第七章 反渗透膜分离技术的应用实例	122
第一节 苦咸水淡化工程实例	122
一、沧州电厂锅炉补给水系统应用实例	122
二、饮用水处理中的应用实例	123
三、工业循环冷却水系统排污水处理中的应用实例	127
第二节 海水淡化工程实例	128
一、崂山 500m ³ /d 反渗透海水淡化示范工程实例	128
二、大连长海县大长山岛 1000m ³ /d 反渗透海水淡化工程实例	131
三、美国军用 2.27m ³ /h (600gph) 标准反渗透净化装置	133
四、我国海军舰艇用反渗透海水淡化装置	135
五、特立尼达和多巴哥 136000m ³ /d 的海水淡化工厂	137
第三节 高纯水生产的应用实例	139
一、清华大学微电子所高纯水处理工程实例	139
二、反渗透(频繁倒极电渗析)-电去离子工程实例	141
三、利用三膜体系制备医用高纯水工程实例	143
第四节 城镇自来水及优质饮用水净化工程实例	144
一、我国纯净水生产实例	144
二、大庆油田分质供水工程实例	149
三、饮用电解还原水——优质饮用水的实例	152

第五节 城市污水处理及废水回收利用工程实例	155
一、美国 21 世纪水厂	156
二、科威特 $31 \times 10^4 \text{t/d}$ 市政污水回用系统	161
第八章 其他膜分离技术	163
第一节 纳滤	163
一、纳滤的特点	163
二、纳滤膜组件及其分离系统的设计	163
三、纳滤膜分离系统的操作与维护	166
四、纳滤膜分离技术的其他用途	169
第二节 超滤	169
一、超滤的分离原理	169
二、超滤的特性	170
三、超滤膜分离系统	171
四、超滤膜组件的运行方法	172
五、超滤膜分离技术的主要用途	174
第三节 微滤	175
一、微滤膜的特点和用途	175
二、微滤的原理和微滤膜的截留机理	176
三、微滤膜分离系统及工艺流程	176
四、微滤膜的污染与防治	179
五、微滤的应用	181

第二篇 反渗透水处理剂

第九章 反渗透膜的污染与防治	183
第一节 浓差极化	183
一、浓差极化	183
二、克服浓差极化的方法	183
第二节 膜污染及去除	184
一、常见污堵征兆	184
二、膜污染物的形态	184
三、膜污染物的去除	185
第十章 反渗透阻垢分散剂	198
第一节 反渗透阻垢分散剂的种类与标准	198
一、聚磷酸盐	198
二、有机磷酸盐	198
三、聚羧酸	203
四、有机磷酸酯	211
第二节 反渗透阻垢分散剂的功能及阻垢机理	212
一、阻垢分散剂的功能	212

二、阻垢分散剂的作用机理	212
三、阻垢机理比较	213
第三节 水处理剂产品的分类、代号和命名	213
一、水处理剂产品的分类和类别代号	214
二、水处理剂产品的系列代号	214
三、水处理剂产品的命名和产品代号	216
第四节 反渗透阻垢分散剂性能评定方法	216
一、碳酸钙沉积法	216
二、极限碳酸盐硬度法	222
三、水质稳定剂缓蚀性能的测定	224
第五节 反渗透阻垢分散剂产品特性	225
一、国外反渗透阻垢分散剂产品特性	225
二、反渗透阻垢分散剂的技术要求和性能	230
三、膜清洗剂及缓蚀剂的技术标准	234
四、反渗透常用混凝剂、助凝剂及其行业标准	239
五、膜用杀生剂技术标准	243
六、杀生剂及其他水处理剂的试验数据	245
第六节 反渗透阻垢剂的生产方法	256
一、聚丙烯酸(钠)	256
二、丙烯酸(酯类)共聚物	257
三、水解马来酸酐	259
四、聚马来酸(HPMA)	260
五、马来酸酐共聚物	260
六、羟基亚乙基二磷酸(HEDP)	261
七、氨基三亚甲基磷酸(ATMP)	262
八、乙二胺四亚甲基磷酸(EDTMP)	262
九、聚天门冬氨酸	263
十、水解聚马来酸酐绿色合成工艺	266
十一、异噻唑啉酮	268
第十一章 反渗透水处理剂的分析	270
第一节 反渗透水处理剂分析的基本内容	270
一、反渗透水处理剂的鉴别	270
二、有效成分含量的化验	270
三、杂质的检查	270
第二节 无机水处理剂的分析	271
一、聚偏磷酸钠(SHMP)的分析	271
二、硫酸亚铁的分析	276
三、聚合硫酸铁的分析	278
四、硫酸铝的分析	282
五、聚合氯化铝的分析	284

第三节 有机磷酸盐及酯阻垢分散剂的分析.....	287
一、氨基三亚甲基膦酸(ATMP)的分析.....	287
二、羟基亚乙基二膦酸(HEDPA)的分析.....	292
三、乙二胺四亚甲基膦酸钠(EDTMPs)的分析.....	296
四、多元醇磷酸酯的分析.....	297
五、2-磷酸基-1,2,4-三羟基丁烷(PBTC)的分析.....	301
第四节 聚羧酸类阻垢分散剂的分析.....	306
一、聚丙烯酸及聚丙烯酸钠的分析.....	306
二、丙烯酸-丙烯酸酯类共聚物的分析.....	309
三、水解聚马来酸酐(HPMA)的分析.....	312
四、丙烯酸/2-甲基-2-丙烯酰胺基丙磺酸类共聚物的分析.....	316
第五节 杀生剂的分析.....	319
一、十二烷基二甲基苄基氯化铵(洁尔灭)的分析.....	319
二、异噻唑啉酮衍生物的分析.....	321
三、稳定性二氧化氯溶液的分析.....	324
四、次氯酸钠溶液的分析.....	326
五、三氯异氰尿酸的分析.....	327

第三篇 反渗透水处理系统水质分析与监测

第十二章 水质分析基本知识.....	331
一、水样的采集.....	331
二、水样的容器.....	332
三、水样的存放与运送.....	334
四、水质分析中所用浓度表示方法.....	336
五、标准溶液的配制和标定.....	338
第十三章 反渗透水处理系统中微生物的测定方法.....	341
一、活菌平皿计数法.....	341
二、最大可能法.....	341
三、平皿计数法测定黏液形成菌.....	341
四、平皿计数法测定黏泥真菌.....	345
五、MPN法测定硫酸盐还原菌.....	347
六、铁细菌的测定.....	349
第十四章 反渗透水处理系统中水的物理性质的测定.....	354
一、淤泥密度指数的测定.....	354
二、总溶解固体的测定.....	355
三、电导率的测定.....	355
四、浊度的测定.....	357
五、悬浮固形物的测定.....	359
六、pH值的测定.....	360

第十五章 反渗透系统水中阳离子的测定方法	363
一、总硬度的测定.....	363
二、指示剂法测定钙离子和镁离子.....	364
三、原子吸收分光光度法测定钙离子.....	365
四、火焰原子吸收光谱法测定镁离子.....	367
五、分光光度法测定铁离子.....	369
六、铝离子的测定.....	373
七、锌离子的测定.....	375
八、钾离子的测定.....	378
九、火焰原子吸收光谱法测定钠离子.....	381
十、铜离子的测定.....	383
十一、铵离子的测定.....	387
十二、离子色谱法测定钠离子、铵离子、钾离子、镁离子和钙离子.....	392
第十六章 反渗透系统水中阴离子的测定	396
一、碱度的测定.....	396
二、氟离子的测定.....	398
三、二氧化硅含量的化验.....	401
四、重量法测定硫酸根.....	402
五、各种磷酸盐和总磷酸盐的测定.....	403
六、紫外分子吸收光谱法测定硝酸根离子.....	407
七、 α -萘胺盐酸盐分光光度法测定亚硝酸根离子.....	409
八、氟离子、氯离子、硫酸根、硝酸根、亚硝酸根、磷酸根的同时测定.....	410
第十七章 反渗透系统水中其他物质的测定	414
一、溶解氧的测定.....	414
二、游离氯和总氯的测定.....	418
三、化学需氧量的测定.....	423
四、水中油含量的测定.....	424
五、微量聚丙烯酸和聚马来酸的测定.....	426
第十八章 反渗透膜脱盐系统沉积物的分析	428
一、试样的采集、调查和制备.....	428
二、沉积物的定性分析和结构形态鉴定.....	429
三、水分的测定.....	433
四、硫化亚铁含量的测定.....	434
五、灼烧损失的测定.....	436
六、二氧化碳含量的测定.....	437
七、硫酸盐含量的测定.....	439
八、酸不溶物和磷、硅、铁、铝、钙、镁、锌、铜含量的系统分析.....	440
附录	453
参考文献	460

第一篇 反渗透水处理应用技术

第一章 反渗透膜分离技术

第一节 反渗透膜分离技术的基本原理

一、理想半透膜

只能允许溶剂分子通过，而不允许溶质的分子通过的膜称为理想半透膜。

二、渗透与渗透平衡

在相同的外压下，当溶液与纯溶剂为半透膜隔开时，纯溶剂会通过半透膜使溶液变稀的现象称为渗透，其原理如图 1-1 (a) 所示。这时溶剂分子在单位时间内进入溶液内的数目要比溶液内的分子在同一时间内通过半透膜进入纯溶剂内的数目多。表面上看，溶剂通过半透膜渗透到溶液中，使得溶液体积增大，浓度变稀，当单位时间内溶剂分子从两个相反的方向穿过半透膜的数目彼此相等，即达到渗透平衡，其原理如图 1-1 (b) 所示。

三、渗透压与反渗透

当半透膜隔开溶液与纯溶剂时，加在原溶液上使其恰好能阻止纯溶剂进入溶液的额外压力称为渗透压，通常溶液愈浓，溶液的渗透压愈大。如果加在溶液上的压力超过了渗透压，则反而使溶液中的溶剂向纯溶剂方向流动，这个过程叫做反渗透，其原理如图 1-1 (c) 所示。

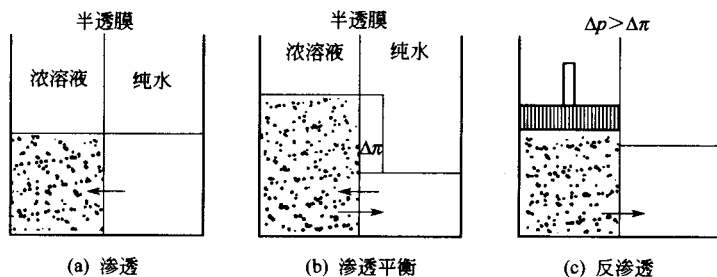


图 1-1 示意

渗透压是溶液的一种特性，它的大小取决于溶液的种类、浓度和温度。一些常见溶液的渗透压力见表 1-1。

表 1-1 一些常见溶液的渗透压力 (25℃)

化合物名称	浓度/(mg/L)	渗透压力/MPa	化合物名称	浓度/(mg/L)	渗透压力/MPa
氯化钠(NaCl)	1000	约 0.77	氯化镁(MgCl ₂)	1000	约 0.700
	35000	约 2.834	氯化钙(CaCl ₂)	1000	约 0.056
碳酸氢钠(NaHCO ₃)	1000	约 0.091	蔗糖	1000	约 0.0074
硫酸镁(MgSO ₄)	1000	约 0.028		5000	约 0.0365
硫酸钠(Na ₂ SO ₄)	1000	约 0.042		35000	约 0.257

根据渗透平衡时膜两侧水的化学位相等的条件，可推导出渗透压的计算公式。对于水的稀溶液，渗透压的计算式可近似为 Van't Hoff 方程。

$$\Pi = RT \sum C_i$$

式中 Π ——渗透压，MPa；

R ——气体常数， $0.008039 \text{MPa} \cdot \text{L}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ；

T ——水的热力学温度，K；

C_i ——水中各种溶质（包括阳离子、阴离子和未电离的分子）的浓度之和，mol/L。

渗透压是选择操作压力和设计反渗透的重要依据。由上式可计算出， 25°C 时， 3.5% NaCl 的海水渗透压为 2.8MPa ， 0.1% NaCl 苦咸水的渗透压为 0.08MPa ，可见海水的渗透压比苦咸水的渗透压高很多。因此，反渗透用于海水淡化时需要较高的操作压力。

四、反渗透膜分离技术的特点

利用反渗透原理进行分离的方法，就是反渗透膜分离技术，其特点如下。

① 在常温不发生相变化的条件下，可以对溶质和水进行分离，适用于对热敏感物质的分离、浓缩，并且与有相变化的分离方法相比，能耗较低。

② 杂质去除范围广，不仅可以去除溶解的无机盐类，而且还可以去除各类有机物杂质。

③ 较高的除盐率和水的回用率，可截留粒径几纳米以上的溶质。

④ 由于只是利用压力作为膜分离的推动力，因此分离装置简单，容易操作、自控和维修。

⑤ 由于反渗透装置要在高压下运转，因此必须配备高压泵和耐高压的管路。

⑥ 反渗透装置要求进水要达到一定的指标才能正常运行，因此原水在进入反渗透装置之前要采用一定的预处理措施。为了延长膜的使用寿命，还要定期对膜进行清洗，以清除污垢。

五、采用反渗透-化学除盐系统方法的优点

随着工业的发展，用水耗量日益增多，水资源日渐贫乏，很多电厂不得不取用含盐量高的原水。由于进水总含盐量增加，致使离子交换树脂发生污染或降解，使除盐设备出力降低一半左右，降低了交换容量，总的酸、碱耗量增加，水处理费用随之升高。水处理的价格和水质有关，化学除盐能适用的最高进水含盐量一般为 500mg/L 。如果超过此极限，单纯用化学除盐处理就比较困难。解决上述问题最适宜的办法，在目前来说，通常采用反渗透-化学除盐联合系统。采用这种系统具有以下优点。

① 离子交换设备的再生剂用量可以减少 $90\% \sim 95\%$ 。

② 由于反渗透装置可将原水含盐量降低到原来的 $1/20$ 以上，因此对后续除盐设备的运行周期可以延长。

③ 除盐系统可以简化，有的水源甚至在反渗透后只用混床处理就可以满足锅炉用水要求。

④ 用一般处理方法，不易除去原水中的物质如胶体、有机物、铁离子、二氧化硅等，但反渗透法可以去除这些杂质。

⑤ 延长了离子交换树脂的使用寿命。

⑥ 通常混床出水导电率为 $0.1 \mu\text{S}/\text{cm}$ ，反渗透-化学除盐联合系统出水导电率为 $0.07 \mu\text{S}/\text{cm}$ 。

⑦ 提高了对原水水质变化的适应性和出水质量的可靠性。

- ⑧ 由于除盐设备排放的废液量减少了，有利于环境保护。
- ⑨ 制水总价格较无反渗透的化学除盐系统便宜。

第二节 反渗透膜污染及浓差极化

一、反渗透膜污染

自然界中的水并不是静止不动的，而是不断地发生相态转换以及周而复始的运动，即水的自然循环。同时，人类为满足生活和生产的需求，不断地取用天然水体中的水，产生大量的生活污水和生产废水，排放后重新进入天然水体。自然界中的水中含有各类杂质，按其在水中的存在状态可分为三类：悬浮物质、溶解物质和胶体物质。天然水源中的杂质种类和数量各不相同，即使同一水源中的水，其杂质成分与含量也随着时间、地点和气候而变化。当用反渗透膜对水和溶质进行分离时，尽管对原水进行了适当的预处理，但水中的杂质仍会聚集在膜的表面使膜污染，结果使膜的分离率或透水速度下降，或兼而有之。膜的污染类型通常有：水中难溶盐在膜表面结垢，金属氧化物及胶体、微生物形成污垢。

膜污染是膜使用中必然产生的现象。

二、膜的浓差极化

在反渗过程中，由于膜的选择渗透性，溶剂（通常为水）从高压侧透过膜，而溶质被膜截留，其浓度在膜表面处升高；同时发生从膜表面向本体的回扩散，当这两种传质过程达到动态平衡时，膜表面处的浓度 c_2 高于主体溶液浓度 c_1 ，这种现象称为浓差极化。上述两种浓度的比率 c_2/c_1 称为浓差极化度。根据薄膜理论模型描述浓差极化现象，见图 1-2。

界面上比主体溶液高的区域称为浓差极化层。膜的浓差极化在实际的膜分离过程中是不可避免的，也是不容忽视的。由于浓差极化层溶质浓度的增加，溶质会以固体形式析出。

需要指出的是，若使用条件（压力、温度、进水 pH 值、游离氯等）控制不当，可能会导致膜本身性能的恶化，引起膜的损害。

三、浓差极化对反渗透的影响和降低浓差极化的途径

1. 浓差极化对反渗透的影响

这种影响包括：降低水通量；降低脱盐率；导致膜上沉淀污染和增加流道阻力。

2. 降低浓差极化的途径

反渗过程中浓差极化不能消除只能降低，其途径如下。

- ① 合理设计和精心制作反渗透基本单元——膜元件，使之流体分布均匀，促进湍流等。
- ② 适当控制操作流速，改善流动状态，使膜-溶液相界面层的厚度减至适当的程度，以降低浓差极化度。通常浓差极化度有一个合理的值，约为 1.2。
- ③ 适当提高温度，以降低流体黏度和提高溶质的扩散系数。

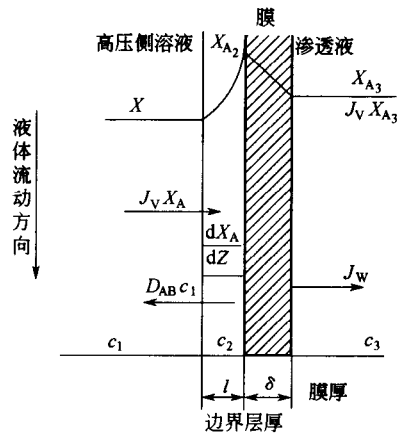


图 1-2 浓差极化理论模型

第三节 反渗透膜种类和膜组件性能

反渗透膜是反渗透分离技术的核心，高性能的膜取决于制膜材料及成膜工艺，对膜性能的要求因使用目的而异。除了应有高通量、高截留率外，还应有耐酸碱、抗氧化、耐热、耐污染、耐细菌、抗压实及耐溶剂侵蚀的功能。

反渗透膜的分类，按驱动压力可分为高压膜、低压膜和超低压膜；按膜的形状分为平板膜、中空纤维膜和管式膜；根据制膜方法可分为相转化膜和复合膜。另外，还可根据制膜材料及膜应用对象等进行分类。

一、按膜材料化学组成分类

用于水脱盐的反渗透膜按材质主要分为两大类：一类是醋酸纤维素膜，另一类是芳香族聚酰胺膜。

1. 醋酸纤维素膜 (CA 膜)

这是第一个被推出的商品反渗透膜 (Loeb-Sourirajan, 1960)，CA 膜以二醋酸纤维素和三醋酸纤维素及二者混合物为原料，经调制铸膜液、铸膜液刮平 (doctor blade)、溶剂 (乙醇或乙醚) 挥发、凝胶固化、热处理等多道工序制成，制得的成品膜厚约 $100\mu\text{m}$ ，包括致密表层 (约 $0.2\mu\text{m}$) 及多孔支撑层。CA 膜的化学稳定性较差，易水解，膜性能衰减较快，操作压力较高；但 CA 膜有一定的抗氧化性，膜表面光洁，不易发生结垢和污染。

2. 芳香族聚酰胺类薄膜复合膜 (TFC 膜)

最常用的有芳香族聚酰胺复合膜和芳香族聚酰胺中空纤维膜。薄膜复合膜是将完全不同的材料浇铸在一多孔聚砜支撑层上 (见图 1-3)，由于这两层材料不同，所以复合膜不易被压密。TFC 膜具有化学稳定性较好、耐生物降解、操作压力低、高脱盐率、高通量等优点；但其不耐氯及其他氧化剂，抗污染和抗结垢的性能较差。

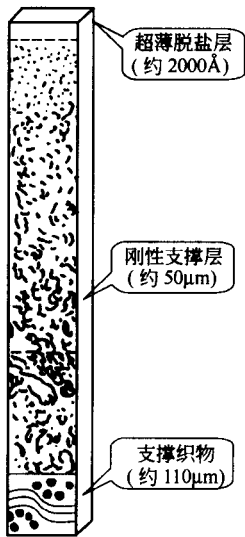


图 1-3 卷式反渗透复合膜的段面示意
注： $1\text{Å}=10^{-10}\text{m}$

二、按膜材料的物理结构分类

反渗透膜按膜材料的物理结构大致可分为均态膜和非对称膜。

1. 均态膜

这种膜厚度均一，致密层厚，透水量小。

2. 非对称膜

这种膜厚度不均一，致密层薄，透水量大，强度高。

三、膜元件和膜组件

反渗透膜组件是由膜、支撑物和容器按一定的技术要求制成的组合构件，它是能将膜付诸于实际应用的最小单元。

成品膜的外形有片状、管状和中空纤维状，相应可制成卷式、板式、管式、中空纤维式的反渗透膜组件 (元件)。卷式、中空纤维式膜组件 (元件) 由于膜的充填密度大、单位体积膜组件的处理量大，常用于大水量的脱盐处理；而对含悬浮物、黏度较高的溶液，则主要采用管式及板式膜组件。工业上应用最多的是卷式和中空纤维式膜组件，它们占据了绝大多数天然水的脱盐和海水淡化市场。其中卷式膜组件是在天然水脱盐中使用最广泛的反渗透膜组件。图 1-3 是卷式反渗透复合膜的段面示意。

1. 卷式膜元件和膜组件的结构及功能

(1) 卷式膜元件和膜组件的结构

图 1-4 是卷式膜元件 (spiral wound element) 的结构示意。在卷式膜元件中,膜袋 (一个或多个) 与网状分隔层一起围着轴心及透过液收集管卷绕。膜袋由两张膜以及两张膜之间的多孔网状支撑层 (输送透过液) 构成,膜袋的三条边经黏合密封,第四条边粘接到组件中央透过液收集管的狭缝通道上。原料溶液 (或原水) 从一端进入,在压力的推动下,沿轴向流过膜袋之间的网状分隔层 (简称隔网) 从另一端流出;而透过液在膜袋内多孔网状支撑层沿径向垂直方向螺旋式流进中央透过液收集管。需要说明的是,膜袋之间的网状分隔层不仅起保证原料液流过通道间隔的作用,而且还可以改善膜面流动状况,控制膜面浓差极化。

卷式膜组件是由膜元件及装载膜元件的承压壳体 (简称压力容器) 构成。在卷式膜组件中,原水由膜组件的端部进入,在膜元件的隔网中沿中心管平行方向流动,淡水从两侧的膜透过,沿卷膜的方向旋转流进中心集水管,然后引出;浓缩水流入下一个膜元件作为进水,并依次流过组件内的每个膜元件进行脱盐,直至排出。膜组件中每个膜元件的进水端外侧用密封圈隔开,每个膜元件的中心集水管采用连接件连通。膜组件的装配如图 1-5 所示。

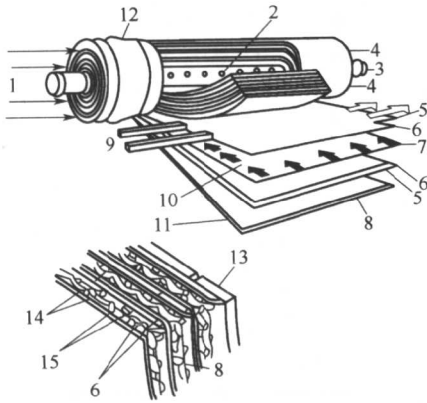


图 1-4 卷式膜元件的结构示意

- 1—进水；2—透过水集水孔；3—透过水；4—浓缩水；
- 5—进水隔网；6—膜；7—产品水隔网；8—黏结剂；
- 9—进水流动方向；10—透过液流过方向；11—外套；
- 12—元件外套；13—中心透过水集水管；
- 14—膜间支撑材料；15—多孔支撑材料

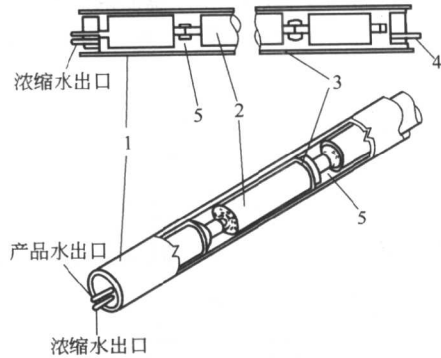


图 1-5 卷式膜组件的装配

- 1—压力容器；2—膜元件；3—密封圈；
- 4—进水（料液）口；5—膜元件连接件

装载膜元件的压力容器一般由玻璃钢 (FRP) 或不锈钢 (SS) 材料制成。有可装单个膜元件至 7 个膜元件的不同规格供不同需要时选用,在工业水处理中,以可装 6 个 8"膜元件的压力容器使用最多。图 1-6 是美国 Advanced Structures 公司生产的 Codline 系列 8"卷式反渗透膜元件用压力容器结构示意图。

(2) 卷式膜元件的性能及使用条件

卷式膜元件有 2.5"、4"及 8"等规格,一般以 4"及 8"膜元件常用,在工业水处理中以 8"膜元件使用最多。图 1-7 列出了这几种规格膜元件的外形尺寸 (不同膜厂家的产品外形尺寸可能稍有差别)。

① 1"(in) = 25.4mm, 下同。