



普通高等教育“十二五”部委级规划教材（本科）

膜法水处理实验

张宏伟 王捷 编著 ©

 中国纺织出版社



普通高等教育“十二五”部委级规划教材(本科)

膜法水处理实验

张宏伟 王捷 编著



中国纺织出版社

内 容 提 要

膜技术是 21 世纪最具有发展潜力的高新技术之一,膜法水处理技术则是关键技术,具有极高的实用价值。本教材对膜法水处理技术实验进行了系统的归纳整理及提炼,旨在规范环境专业本科生实验教学,加深学生对膜法水处理技术的理解,提高其应用能力。

本书内容包括:膜法水处理技术简介、水处理实验基本知识及数据处理方法及膜法水处理。精选了 10 个膜法水处理工艺实验,14 个膜法水处理性能参数测试实验和 4 个膜制备实验。最后还列出了实验常用数据,便于实验时查阅。

本书可作为高等院校理工科和师范院校本科环境专业以及相关专业的基础实验教材,也可供相关科研和技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

膜法水处理实验/张宏伟,王捷编著. —北京:中国纺织出版社,2015.3

普通高等教育“十二五”部委级规划教材. 本科

ISBN 978-7-5180-0835-3

I. ①膜… II. ①张…②王… III. ①膜法—水处理—实验—高等学校—教材 IV. ①TU991.2-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 172872 号

策划编辑:范雨昕 秦丹红 责任编辑:范雨昕 责任校对:余静雯
责任设计:何 建 责任印制:何 建

中国纺织出版社出版发行

地址:北京市朝阳区百子湾东里 A407 号楼 邮政编码:100124

销售电话:010—67004422 传真:010—87155801

<http://www.c-textilep.com>

E-mail: faxing@c-textilep.com

中国纺织出版社天猫旗舰店

官方微博 <http://weibo.com/2119887771>

北京彩蝶印刷有限公司印刷 各地新华书店经销

2015 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

开本:787×1092 1/16 印张:8.25

字数:154 千字 定价:38.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社图书营销中心调换

《国家中长期教育改革和发展规划纲要》中提出“全面提高高等教育质量”,“提高人才培养质量”。教育部教高[2007]1号文件“关于实施高等学校本科教学质量与教学改革工程的意见”中,明确了“继续推进国家精品课程建设”,“积极推进网络教育资源开发和共享平台建设,建设面向全国高校的精品课程和立体化教材的数字化资源中心”,对高等教育教材的质量和立体化模式都提出了更高、更具体的要求。

“着力培养信念执着、品德优良、知识丰富、本领过硬的高素质专门人才和拔尖创新人才”,已成为当今本科教育的主题。教材建设作为教学的重要组成部分,如何适应新形势下我国教学改革要求,配合教育部“卓越工程师教育培养计划”的实施,满足应用型人才培养的需要,在人才培养中发挥作用,成为院校和出版人共同努力的目标。中国纺织服装教育学会协同中国纺织出版社,认真组织制订“十二五”部委级教材规划,组织专家对各院校上报的“十二五”规划教材选题进行认真评选,力求使教材出版与教学改革和课程建设发展相适应,充分体现教材的适用性、科学性、系统性和新颖性,使教材内容具有以下三个特点:

(1)围绕一个核心——育人目标。根据教育规律和课程设置特点,从提高学生分析问题、解决问题的能力入手,教材附有课程设置指导,并于章首介绍本章知识点、重点、难点及专业技能,增加相关学科的最新研究理论、研究热点或历史背景,章后附形式多样的思考题等,提高教材的可读性,增加学生学习兴趣和自学能力,提升学生科技素养和人文素养。

(2)突出一个环节——实践环节。教材出版突出应用性学科的特点,注重理论与生产实践的结合,有针对性地设置教材内容,增加实践、实验内容,并通过多媒体等形式,直观反映生产实践的最新成果。

(3)实现一个立体——开发立体化教材体系。充分利用现代教育技术手段,构建数字教育资源平台,开发教学课件、音像制品、素材库、试题库等多种立体化的配套教材,以直观的形式和丰富的表达充分展现教学内容。

教材出版是教育发展中的重要组成部分,为出版高质量的教材,出版社严格甄选作者,组织专家评审,并对出版全过程进行跟踪,及时了解教材编写进度、编写质量,力求做到作者权威、编辑专业、审读严格、精品出版。我们愿与院校一起,共同探讨、完善教材出版,不断推出精品教材,以适应我国高等教育的发展要求。

前言

膜分离技术是利用特殊的有机高分子或无机材料制成的膜将溶液隔开,使溶液中的某些溶质或水渗透出来,从而达到分离目的的技术。该技术是近40年来迅速发展为产业化的高新技术,具有分离效果好,一般没有相的变化,操作方便,设备紧凑,工作环境安全,节约能耗和化学试剂等优点,目前正受到广泛的应用。

1748年法国学者Abble Nallet发现了膜分离现象。20世纪50年代,Juda试制成功了高选择透过性的阴阳离子交换膜使电渗析投入使用。自此,膜技术应用得到飞速发展。微滤和电渗析于20世纪50年代率先进入工业应用,60年代反渗透投入使用,70年代是超滤,80年代是气体分离,90年代是渗透蒸发。随着技术的改进,在不断扩展应用领域的同时,工业应用的膜分离过程也不断发展和完善。

膜分离技术自问世以来得到了广泛的应用,但最初的研究和应用都是在水处理领域。在给水方面,膜分离技术脱离了传统的化学处理范畴,转入物理固液处理领域。这应该可以看作是由19世纪应用快滤方法,作为现代化水处理标志以来,100年后的又一次重大技术突破。与常规饮用水处理工艺相比,膜技术具有少投甚至不投加化学药剂、占地面积小、便于实现自动化等优点,并已大量应用于城镇自来水的深度处理上。正是由于膜技术的迅速发展,使得该技术被称为“21世纪的水处理技术”,在水处理中具有广阔的应用前景。

目前,有关介绍各种膜分离技术在水处理实验技术方面的专著在我国尚不多见,这对于推广膜法水处理技术是十分不利的。为了弥补这一不足,编者在近几年的教学、科研过程中,结合课程的教学实践,并在参考许多教材和资料、教学笔记的基础上编成本书,目的是想在规范我国化工、材料、环境等专业本科生膜技术领域的实验教学方面起到微薄作用。

本书共包括三章,由张宏伟负责本书结构框架的整体设计,理论、方法和技术研究的全面指导,王捷负责统稿,崔钊、王雨霏和张阳在本书的组稿过程中也做了大量的工作。

在本书的写作过程中,我们参考了前人的研究成果,在此,对所引用成果的作者表示感谢!

在本书正式出版之际,我们向支持和帮助本书编撰出版的中国纺织出版社表示感谢。

我们希望此教材能成为我国高等院校膜法水处理技术实验的方法指南,也希望它是一本膜分离技术应用于水处理的工具书,更希望通过本书的抛砖引玉,得到规范膜技术领域本科实验教学势在必行的共鸣。

受水平和时间所限,书中难免存在粗浅、纰漏和不足之处,欢迎广大读者批评指正。

编著者

2015年1月

目录

第一章 膜法水处理技术简介	001
第一节 膜的定义	001
第二节 水处理中的膜过程	003
一、膜材料及膜组件	004
二、渗透与反渗透	006
三、超滤与微滤	007
四、纳滤	008
五、电渗析	009
六、正向渗透	010
第三节 膜污染与浓差极化	011
第四节 常用的膜法水处理工艺	013
一、膜生物反应器	013
二、连续膜过滤工艺	014
三、浸没式连续膜过滤技术	015
第二章 水处理实验基本知识与数据处理	017
第一节 实验室规则及安全常识	017
一、实验室规则	017
二、实验室安全知识	018
三、意外事故的一般处理	018
第二节 化学试剂常识	018
一、化学试剂的分类	019
二、化学试剂的使用	019
第三节 实验仪器常识	021
一、玻璃仪器的洗涤和干燥	021
二、实验仪器的操作要求	022
第四节 正交实验设计	023
一、全面试验法	024

二、简单对比法	024
第五节 实验误差与实验数据的处理	025
一、误差的基本概念和性质	026
二、有效数字及其运算规则	037
三、实验数据的表达与整理	038
第六节 实验报告的书写	039
一、性质实验报告示例	039
二、合成实验报告示例	039
三、定量分析实验报告示例	040
第三章 膜法水处理实验	041
第一节 膜制备实验	041
一、平板膜制备实验	041
二、中空纤维膜的制备实验(溶液纺丝法)	043
三、反渗透复合膜制备实验	045
四、正渗透膜制备实验	047
第二节 膜法水处理性能参数测试实验	048
一、纳滤与反渗透截留性能比较	048
二、淤泥密度指数(SDI)测定	051
三、超滤膜截留相对分子质量测定	053
四、超滤膜通量测量	057
五、超滤膜临界通量的测定	061
六、微滤膜孔性能的测定(泡点法)	064
七、中空纤维膜过滤不均匀特性实验	066
八、中空纤维膜拉伸性能实验	069
九、膜材料化学稳定性实验	071
十、扫描电子纤维镜观测膜污染实验	073
十一、膜接触角测试	077
十二、红外法观测膜污染实验	080
十三、激光共聚焦显微镜观测与分析膜污染实验	082
十四、中空纤维超滤膜的内外压操作与死端过滤、错流过滤现象	083
第三节 膜法水处理工艺实验	085
一、微滤膜污染过程实验	085
二、超滤膜清洗实验	087
三、膜生物反应器工艺运行实验	089
四、连续膜过滤工艺实验	091

五、反渗透工艺运行实验	096
六、无机陶瓷膜分离技术试验	098
七、双膜工艺处理印染废水的实验	101
八、纳滤膜分离糖和盐的实验	103
九、电渗析除盐实验	105
十、膜蒸馏实验	110
参考文献	112
附录	119
一、基本单位	119
二、膜法水处理技术应用过程中常用的量和法定计量单位	119
三、有机溶剂的物性常数	121
四、红外光谱的常用图表	122
五、分离膜产品的特性	123

第一章 膜法水处理技术简介

第一节 膜的定义

从 1778 年 Nollet 首次发表关于膜透析现象的文献至今,膜科学与技术已经历了 250 多年的发展。随着人们对膜现象、机理、过程认识的不断深入,形形色色的膜材料已经广泛应用在人类生产和生活中。根据膜具有的奇特分离性能,Maxwell 曾将膜形容为“分类精灵”。现如今,人们正在充分开发和应用这个“精灵”在水处理中的“魔力”,以期得到我们需要的“水”。

膜分离(Membrane Separation)是以选择性透过膜为分离介质,在膜两侧一定推动力的作用下,使原料中的某组分选择性地透过膜,从而使混合物得以分离,以达到提纯、浓缩等目的的分 离过程。许多膜过程是基于不同的分离原理或机理,分离的物质可以从颗粒到分子。尽管存在这样大的差异,所有膜过程都有一个共同点,即使用膜。膜是每一膜过程的核心部件,它可以看成是两相之间一个具有透过选择性的屏障;或看作两相之间的界面。膜分离过程如图 1-1 所示,相 1 为原料或上游侧,相 2 为渗透物或下游侧。原料混合物中某一组分可以比其他组分更快地通过膜而传递到下游侧,从而实现分离。分离的机理有许多种,将在以后讨论。

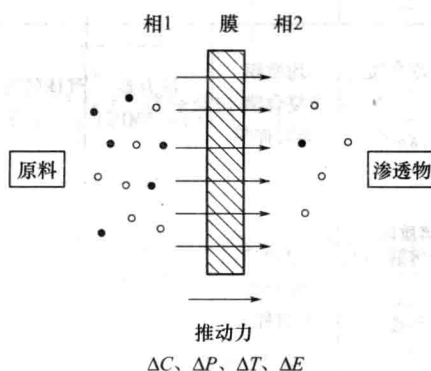


图 1-1 被膜分开的两相系统示意图

膜分离所用的膜可以是固相、液相,也可以是气相,而大规模工业应用中多数为固体膜,本书中的内容主要以固体膜的分离过程展开。目前根据固态物质选择透过膜的分离能力可分为

两类:借助外界能量,物质发生由低位到高位流动;借助本身的化学位差,物质发生由高位到低位的流动。操作的推动力可以是膜两侧的压力差、浓度差、电位差、温度差等。依据推动力不同,膜分离又分为多种过程,表 1-1 列出了几种主要膜分离过程的基本特性,图 1-2 给出了各种膜过程的分离范围。

表 1-1 膜分离过程

过程	示意图	膜类型	推动力	传递机理	透过物	截留物
微滤 (MF)		多孔膜	压力差 (0~0.1MPa)	筛分	水、溶剂、溶解物	悬浮物各种微粒
超滤 (UF)		非对称膜	压力差 (0.1~1MPa)	筛分	溶剂、离子、小分子	胶体及各类大分子
反渗透 (RO)		非对称膜复合膜	压力差 (2~10MPa)	溶剂的溶解—扩散	水、溶剂	悬浮物、溶解物、胶体
电渗析 (ED)		离子交换膜	电位差	离子在电场中的传递	离子	非解离和大分子颗粒
气体分离 (GS)		均质膜复合膜非对称膜	压力差 (1~15MPa)	气体的溶解—扩散	易渗透气体	难渗透气体
渗透汽化 (PVAP)		均质膜复合膜非对称膜	浓度差分压差	溶解—扩散	易溶解或易挥发组分	不易溶解或难挥发组分
膜蒸馏 (MD)		微孔膜	由于温度差而产生的蒸气压差	通过膜的扩散	高蒸汽压的挥发组分	非挥发的小分子和溶剂

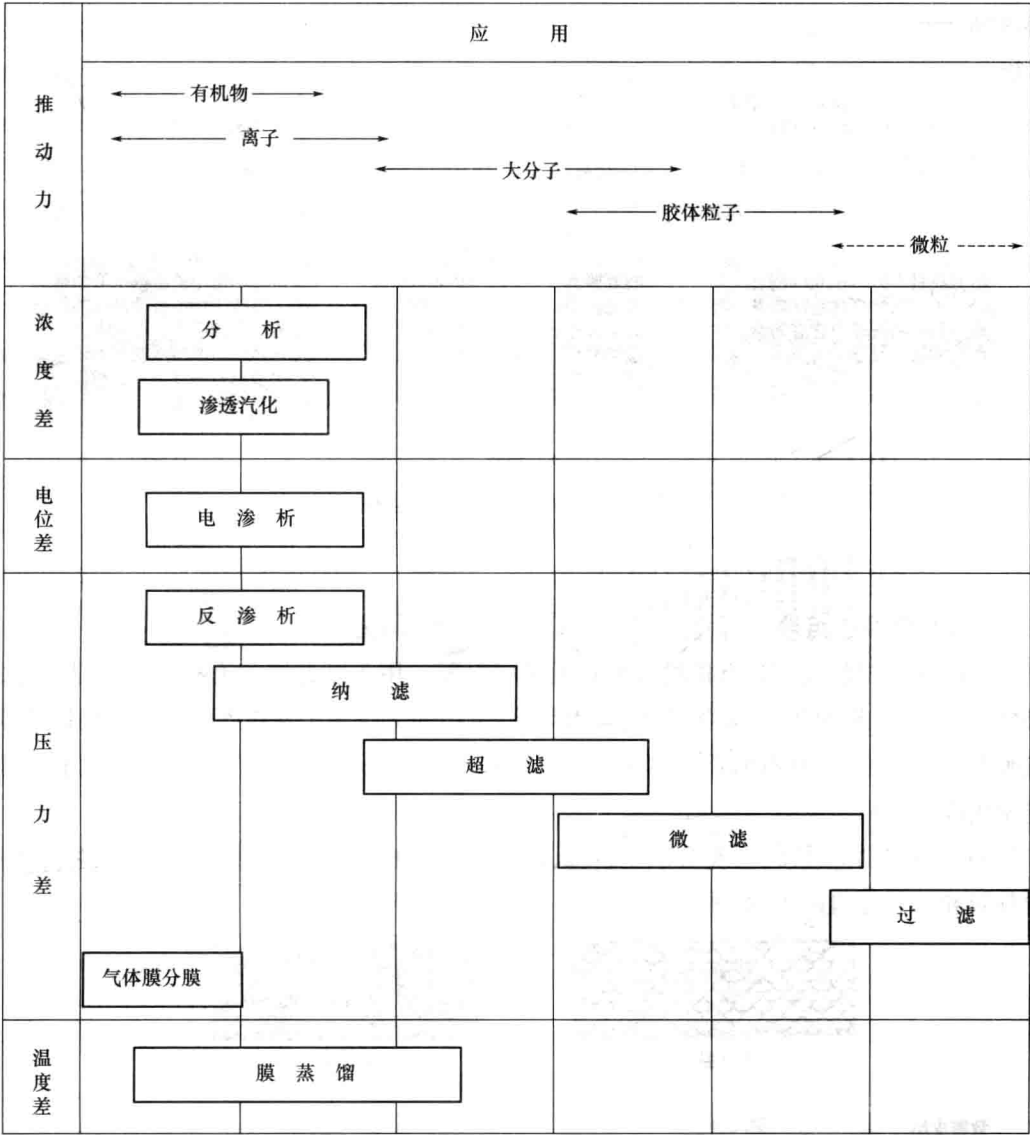


图 1-2 膜分离过程的分离范围

第二节 水处理中的膜过程

相对于传统分离过程,膜分离过程是一个全新的分离方法,在 30 年以前膜过滤还没有被视为一种技术上很重要的分离过程。膜分离技术作为“21 世纪的水处理技术”,其对于颗粒物、细菌和微生物的有效截留已经在水处理领域中得到了普遍的认可,其操作压力低,出水水质稳定,在给水处理中的应用不断发展,已具有取代传统饮用水处理的潜力。

目前膜过程已广泛应用于水处理领域并不断扩展。从在水处理中应用膜的种类和范围来

看,微滤(MF)、纳滤(NF)、超滤(UF)、反渗透(RO)、电渗析(ED)等膜工艺应用得最为广泛,如图 1-3 所示。

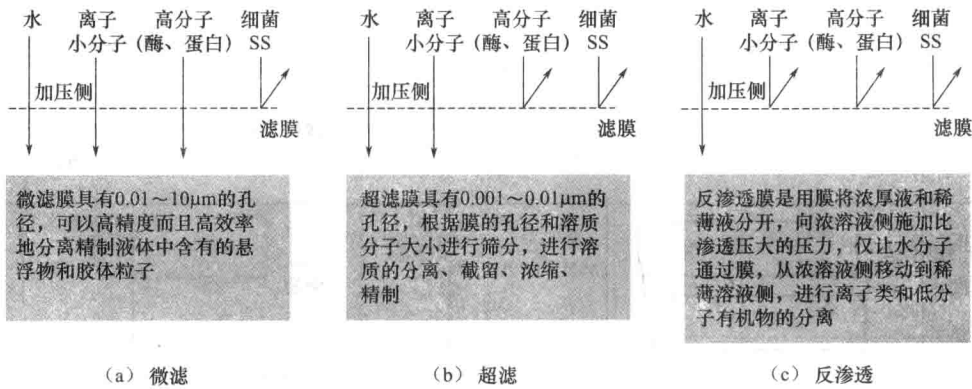


图 1-3 膜的种类及作用机理

一、膜材料及膜组件

按膜的制造材料类型分有机材料膜和无机材料膜。用于制造膜的有机材料包括醋酸纤维素、聚砜、聚醚砜、聚丙烯腈、聚氯乙烯、聚丙烯等;常用的无机膜主要有陶瓷膜、玻璃膜、碳膜等。无机膜与有机膜相比,具有耐化学腐蚀、无老化问题,使用寿命长等特点,但无机膜具有易破碎、投资费用高的特点。

膜的种类与功能较多,分类方法也较多,但普遍采用的是按膜的形态结构分类,将分离膜分为对称膜和非对称膜两类,如图 1-4 所示。

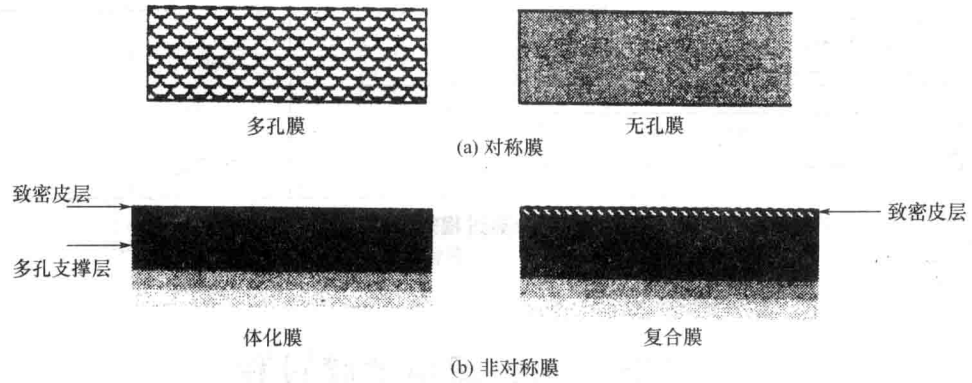


图 1-4 不同类型膜横断面示意图

对称膜又称为均质膜,是一种均匀的薄膜,膜两侧截面的结构及形态完全相同,包括致密的无孔膜和对称的多孔膜两种,如图 1-4(a) 所示。一般对称膜的厚度在 10~200μm 之间,传质阻力由膜的总厚度决定,降低膜的厚度可以提高透过速率。

非对称膜的横断面具有不对称结构,如图 4-1(b) 所示。一体化非对称膜是用同种材料制

备、由厚度为 $0.1\sim0.5\mu\text{m}$ 的致密皮层和 $50\sim150\mu\text{m}$ 的多孔支撑层构成,其支撑层结构具有一定的强度,在较高的压力下也不会引起很大的形变。此外,也可在多孔支撑层上覆盖一层不同材料的致密皮层构成复合膜。显然,复合膜也是一种非对称膜。对于复合膜,可优选不同的膜材料制备致密皮层与多孔支撑层,使每一层独立的发挥最大作用。非对称膜的分离主要或完全由很薄的皮层决定,传质阻力小,其透过速率较对称膜高得多,因此非对称膜在工业上应用十分广泛。

膜组件是将一定膜面积的膜以某种形式组装在一起的器件,在其中实现混合物的分离。应用在水处理中的膜组件主要有中空纤维式、卷式、板框式和管式四种类型,如图 1-5 所示。中空纤维式和卷式组件膜填充密度高、造价低、组件内流体力学条件好,但组件对制造技术要求高、密封困难、使用中抗污染能力差、对原水预处理要求高。板框式和管式组件膜填充密度低、造价高,但组件清洗方便、耐污染。不同形式膜组件的性能如图 1-2 所示。

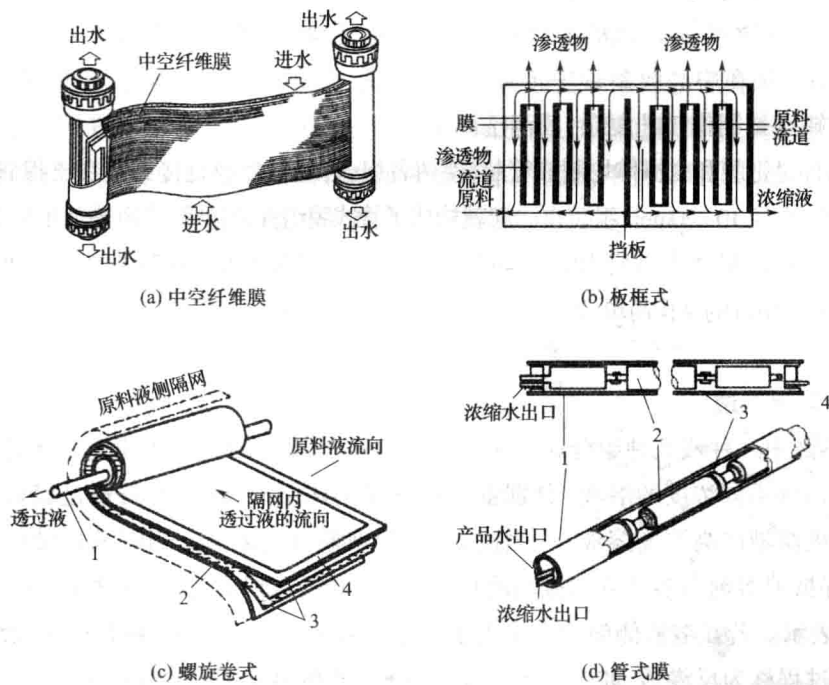


图 1-5 应用在水处理中的膜组件

表 1-2 不同形式膜组件的性能比较

膜组件形式	膜填充面积 (m^2/m^3)	投资费用	操作费用	稳定运行	膜的清洗
管式	20~50	高	高	好	容易
板框式	400~600	高	低	较好	难
卷式	800~1000	很低	低	不好	难
中空纤维式	8000~15000	低	低	不好	难

将膜材料制成外径为 $80\sim400\mu\text{m}$ 、内径为 $40\sim100\mu\text{m}$ 的空心管,即为中空纤维膜。将大量

的中空纤维一端封死,另一端用环氧树脂浇注成管板,装在圆筒形压力容器中,就构成了中空纤维膜组件,也形如列管式换热器,如图 1-5(a) 所示。大多数膜组件采用外压式,即高压原料在中空纤维膜外侧流过,透过物则进入中空纤维膜内侧。中空纤维膜组件装填密度极大($10000\sim 30000\text{m}^2/\text{m}^3$),且无须外加支撑材料;但膜易堵塞,不易清洗。

板框式膜组件采用平板膜,其结构与板框过滤机类似,用板框式膜组件进行海水淡化的装置如图 1-5(b) 所示。在多孔支撑板两侧覆以平板膜,采用密封环和两个端板密封、压紧。海水从上部进入组件后,沿膜表面逐层流动,其中纯水透过膜到达膜的另一侧,经支撑板上的小孔汇集在边缘的导流管后排出,而未透过的浓缩咸水从下部排出。

螺旋卷式膜组件也是采用平板膜,其结构与板框式换热器类似,如图 1-5(c) 所示。它是由中间为多孔支撑板、两侧是膜的“膜袋”装配而成,膜袋的三个边粘封,另一边与一根多孔中心管连接。组装时在膜袋上铺一层网状材料(隔网),绕中心管卷成柱状再放入压力容器内。原料进入组件后,在隔网中的流道沿平行于中心管方向流动,而透过物进入膜袋后旋转着沿螺旋方向流动,最后汇集在中心收集管中再排出。螺旋卷式膜组件结构紧凑,装填密度可达 $830\sim 1660\text{m}^2/\text{m}^3$ 。缺点是制作工艺复杂,膜清洗困难。

管式膜组件是把膜和支撑体均制成管状,使两者组合,或者将膜直接刮制在支撑管的内侧或外侧,将数根膜管(直径 $10\sim 20\text{mm}$) 组装在一起就构成了管式膜组件,与列管式换热器相类似。若膜刮在支撑管内侧,则为内压型,原料在管内流动,如图 1-5(d) 所示;若膜刮在支撑管外侧,则为外压型,原料在管外流动。管式膜组件的结构简单,安装、操作方便,流动状态好,但装填密度较小,为 $33\sim 330\text{m}^2/\text{m}^3$ 。

二、渗透与反渗透

能够让溶液中一种或几种组分通过而其他组分不能通过的选择性膜称为半透膜。当把溶剂和溶液(或两种不同浓度的溶液)分别置于半透膜的两侧时,纯溶剂将透过膜而自发地向溶液(或从低浓度溶液向高浓度溶液)一侧流动,这种现象称为渗透。当溶液的液位升高到所产生的压差恰好抵消溶剂向溶液方向流动的趋势,渗透过程达到平衡,此压力差称为该溶液的渗透压,以 $\Delta\pi$ 表示。若在溶液侧施加一个大于渗透压的压差 Δp 时,则溶剂将从溶液侧向溶剂侧反向流动,此过程称为反渗透,如图 1-6 所示。这样,可利用反渗透过程从溶液中获得纯溶剂。

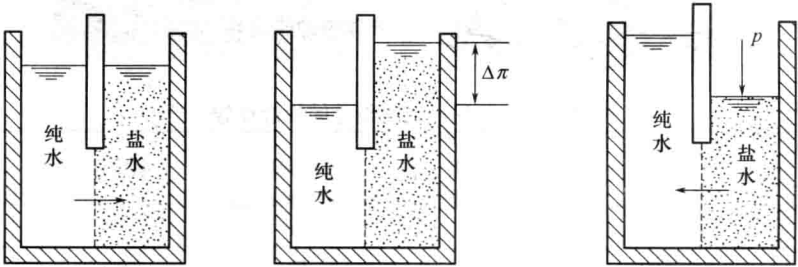


图 1-6 渗透和反渗透机理

反渗透膜多为不对称膜或复合膜,如图 1-7 所示的是一种典型的反渗透复合膜的结构图。反渗透膜的致密皮层几乎无孔,因此可以截留大多数溶质(包括离子)而使溶剂通过。反渗透

操作压力较高,一般为 2~10MPa。大规模应用时,多采用卷式膜组件和中空纤维膜组件。

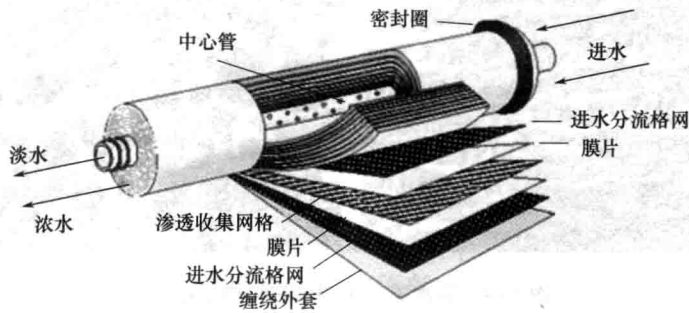


图 1-7 反渗透膜结构

评价反渗透膜性能的主要参数为透过速率(透水率)与截留率(脱盐率)。此外,在高压下操作对膜产生压实作用,造成透水率下降,因此抗压实性也是反渗透膜性能的一个重要指标。

反渗透是一种节能技术,过程中无相变,一般无须加热,工艺过程简单,能耗低,操作和控制容易,应用范围广泛。其主要应用领域有海水和苦咸水的淡化,纯水和超纯水制备,工业用水处理,饮用水净化,医药、化工和食品等工业料液处理和浓缩以及废水处理等。

三、超滤与微滤

超滤与微滤是在压力差作用下根据膜孔径的大小进行筛分的分离过程,其基本原理如图 1-8 所示。

在一定压力差作用下,当含有高分子溶质 A 和低分子 B 的混合溶液流过膜表面时,溶剂和小于膜孔的低分子溶质(如无机盐类)透过膜,作为透过液被收集起来,而大于膜孔的高分子溶质(如有机胶体等)则被截留,作为浓缩液被回收,从而达到溶液的净化、分离和浓缩的目的。通常,能截留相对分子质量 500 以上、 10^6 以下分子的膜分离过程称为超滤;截留更大分子(通常称为分散粒子)的膜分离过程称为微滤。

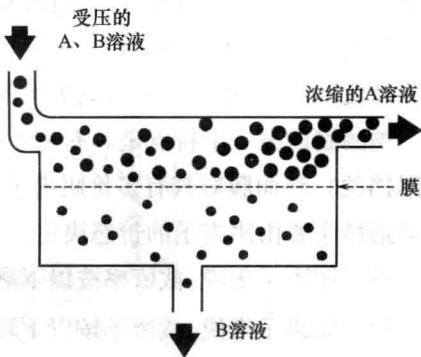


图 1-8 超滤与微滤原理示

实际上,反渗透操作也是基于同样的原理,只不过截留的是分子更小的无机盐类,由于溶质的相对分子质量小,渗透压较高,因此必须施加高压才能使溶剂通过,如前所述,反渗透操作压差为 2~10MPa。而对于高分子溶液而言,即使溶液的浓度较高,但渗透压较低,操作也可在较低的压力下进行。通常,超滤操作的压差为 0.3~1.0MPa,微滤操作的压差为 0.1~0.3MPa。

微滤和超滤中使用的膜都是多孔膜。超滤膜多数为非对称结构,膜孔径范围为 1~50nm,是由一极薄具有一定孔径的表皮层和一层较厚具有海绵状和指孔状结构的多孔层组成,前者起分离作用,后者起支撑作用。微滤膜有对称和非对称两种结构,孔径范围为 0.05~10 μ m。图 1-9 所示的是超滤膜与微滤膜的扫描电镜图片。

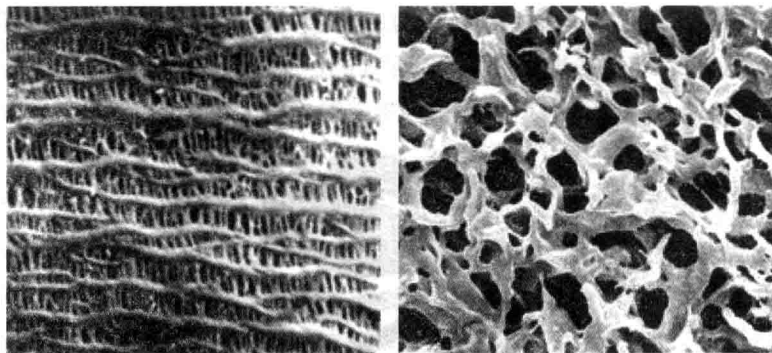


图 1-9 超滤膜与微滤膜扫描电镜图片

表征超滤膜性能的主要参数有透过速率和截留相对分子质量及截留率,而更多的是用截留相对分子质量表征其分离能力。表征微滤膜性能的参数主要是透过速率、膜孔径和空隙率,其中膜孔径反映微滤膜的截留能力,可通过电子显微镜扫描法或泡压法、压汞法等方法测定。孔隙率是指单位膜面积上孔面积所占的比例。

四、纳滤

纳滤膜是指具有“纳米级孔”的膜,它的孔径介于超滤和反渗透之间,对无机盐有一定的截留率。对一价离子具有选择透过性,对二价以上离子有一定的截留能力,对有机物截留相对分子质量为 200~1000。纳滤膜对不同价态离子的选择透过性可以实现对水的软化,纳滤软化在去除硬度的同时,还可以去除其中的浊度、色度、有机物与合成有机物。

纳滤膜的另一个特点是具有离子选择性,具有一价阴离子的盐可以大量地通过膜(但并非无阻挡的),然而膜对其有多价阴离子的盐(例如硫酸盐和碳酸盐)的截留率则高得多。因此盐的渗透性主要由阴离子的价态决定。

对于阴离子来说,截留率按以下顺序上升: NO_3^- 、 Cl^- 、 OH^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 。

对于阳离子来说,截留率按以下顺序上升: H^+ 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cu^{2+} 。

纳滤膜技术是介于传统分离范围的超滤和反渗透之间的一种新型膜分离技术,截留相对分子质量一般在 200~1000 之间,能截留有机小分子而使大部分无机盐通过,能分离不同价态的离子,并实现高分子量和低分子量的有机物的分离,主要应用在苦咸水淡化、膜法软化水、溶液的分级和浓缩等方面。

纳滤膜又称为超低压反渗透膜或疏松型反渗透膜,其操作压力通常在 1.0MPa 以下。它对单价离子和相对分子质量小于 300 的小分子的截留率较低,对于二价离子和相对分子质量大于 300 的有机小分子的截留率较高。目前商品纳滤膜多为薄层复合膜和不对称合金膜。

纳滤的选择透过性如图 1-10 所示,如果利用纳滤膜来对含有一价和多价阴离子的溶液进行脱盐处理,则会出现一种有趣的效应。通过试验发现,一价氯阴离子的截留率随着二价硫酸根阴离子浓度的增加而下降,甚至出现负值。负的截留率意味着,氯离子逆其浓度梯度而渗透,在渗透物中氯的浓度高于进料中的浓度。

在加入硫酸钠的情况下,为了达到新的平衡,氯离子由相 1 逆其浓度梯度转入相 2,这种过程称

为泵效应或者道南效应。归根结底,产生这种泵效应的推动力是由于加入硫酸钠而导致增大了膜上的钠离子浓度差。由于钠离子的浓度差增大了,于是就增强了钠离子的渗透,而为了保持电中性,所以氯离子也跟着渗透。

纳滤膜对 Na^+ 和 Cl^- 等单价离子的截留率较低,但对 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 等二价离子及除草剂、农药、色素、染料、抗生素、多肽和氨基酸等相对分子质量(200~1000)较小的物质的截留率很高,而且水在膜中的渗透速率远大于在反渗透膜中,所以当需要对低浓度的二价离子和相对分子质量在 500 至数千的溶质进行截留时,选择纳滤工艺比使用反渗透工艺经济。

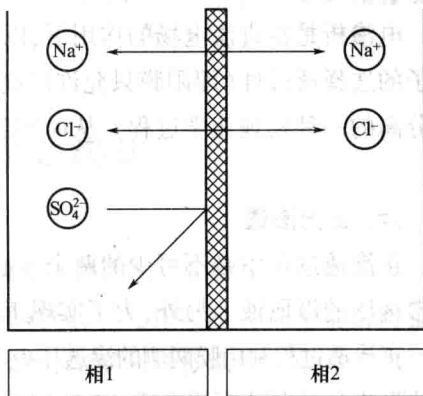


图 1-10 纳滤的选择透过性

五、电渗析

利用半透膜的选择透过性来分离不同的溶质粒子(如离子)的方法称为渗析。在电场作用下进行渗析时,溶液中的带电的溶质粒子(如离子)通过膜而迁移的现象称为电渗析。利用电渗析进行提纯和分离物质的技术称为电渗析法。电渗析原理图见图 1-11。

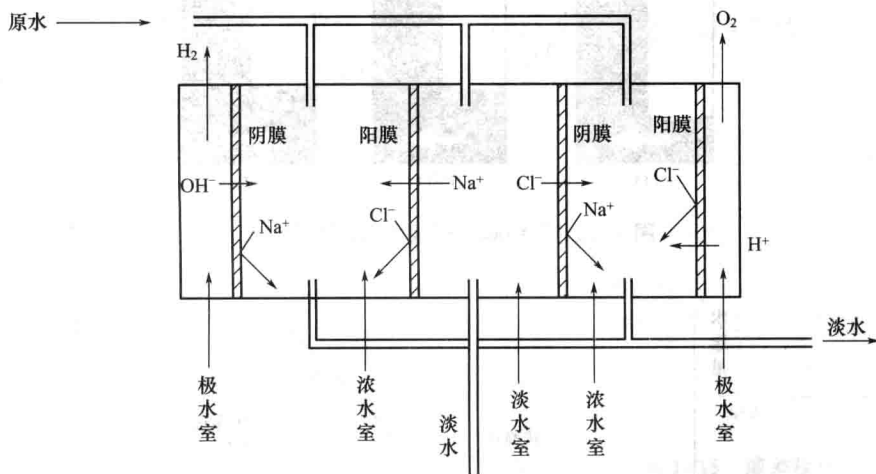


图 1-11 电渗析原理图

电渗析是 20 世纪 50 年代发展起来的一种新技术,最初用于海水淡化,现在广泛用于化工、轻工、冶金、造纸、医药工业,尤以制备纯水和在环境保护中处理三废最受重视,例如用于酸碱回收、电镀废液处理以及从工业废水中回收有用物质等。

优点:能量消耗低;药剂耗量少;对原水的含盐量变化适应强;操作简单,易于实现机械化、自动化;设备紧凑耐用,预处理简单;水的利用率高。

缺点:其只能去除水中的盐分,而对水中的有机物不能去除;电渗析在运行的过程中容易发