

现代膜技术 及其应用指南

XIANDAI MO JISHU
JIQI YINGYONG
ZHINAN

王学松 编著



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

TQ028.8-62
W406



-93

现代膜技术及其应用指南

王学松 编著

TQ028.8-62
W406



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

· 北京 ·

Qaz100/08

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

现代膜技术及其应用指南/王学松编著. —北京: 化学工业出版社, 2005. 4
ISBN 7-5025-6867-0

I. 现… II. 王… III. 膜-技术-指南 IV. TQ028.8-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 027677 号

现代膜技术及其应用指南

王学松 编著

责任编辑: 陈志良

文字编辑: 贾 婷

责任校对: 洪雅姝

封面设计: 于 兵

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)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 48 字数 1346 千字

2005 年 7 月第 1 版 2005 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6867-0/TQ·2189

定 价: 98.00 元

版权所有 违者必究

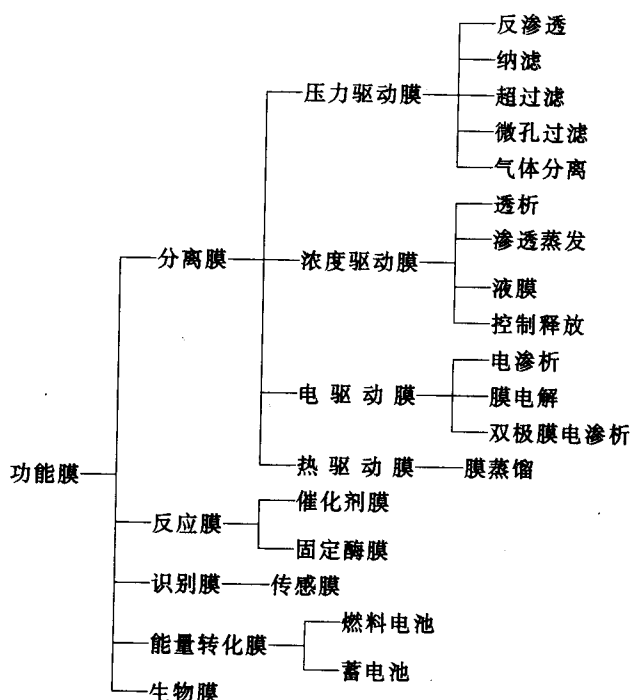
该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换
京化广临字 2005-03 号

前言

众所周知，材料、能源和信息被誉为当代工业的三大支柱，其中材料又是工业的基础，因此，某些具有特殊功能的新材料，不仅能满足新技术革命的需要，而且是工业生产的重要保证。

在名目繁多的功能新材料中，功能膜是近年来最为人们关注者之一。特别是进入 21 世纪后，它日益在现代经济发展和人民日常生活中扮演着重要角色。目前，功能膜不仅充当分离介质，而且在化学反应、识别传感、能量转换及仿生模拟等方面大显身手，已博得业界普遍好评并取得了可观的经济效益与社会效益。

目前已活跃在各科技领域中的功能膜，概括起来大体可分为人工（合成）膜和生物（天然）膜两大类，其中前者又可分为分离膜、识别传感膜及能量转换膜等（见下表）。



本书的编写目录主要是依据上表为纲，以分离膜为主，兼论其他各种功能膜，主要目的是使广大读者扩大视野，对功能膜有一个更全面的认识和更深入的了解，以使现代膜技术更好地应用和推动未来的科技天地。

为了满足高新技术开发的需要，编者在总结个人多年从事膜科研工作的基

基础上,广泛收集有关文献资料,编写了此书,书中全面介绍了有关各种功能膜的基本原理、膜的制备方法及其特性测试、膜装置的结构与工艺设计及其在不同领域中的大量应用实例等。

本书在组织选材方面,注意将基础知识与应用实例结合起来,力求每章内容独立、完整而又相互衔接。在写作方面尽量做到通俗易懂、由浅入深,以使尚不熟悉现代膜技术的读者在阅读后有一个清晰的概念,对于已具备膜科学基础知识的读者,也能从中得到新的启发。这是编者的愿望和宗旨。

概括起来,本书的特点有以下三方面。

① 内容广泛 与国内迄今已出版的同类书籍相比,其内容不再局限于分离膜,而是在主讲分离膜的基础上,用相当篇幅兼论了反应膜、识别传感膜、能量转换膜及生物膜等各种功能膜及其开发方向。

② 取材新颖 在组织选材方面列举国内外最新成果和文献,不少资料都取自2002年以后的报道,最新的采集时间截至2004年下半年。

③ 实用性强 为使读者在阅读后融会贯通,本书对各种膜过程除阐明其机理外,力求理论联系实际,以应用为主,列举了大量详细的设计方法和具体演算实例。

总之,本书的涵盖面较宽,涉及领域较广,是一本非常实用的专业参考书。希望本书的出版发行能对我国膜分离技术的发展起到积极的推动作用。

在本书的编写和出版过程中,荣幸地获得了大连市学术专著出版评审委员会的资助和中国科学院大连化学物理研究所及化学工业出版社的积极支持。在部分初稿形成后,承蒙中国科学院大连化学物理所研究员、博士生导师曹义鸣教授及徐仁贤教授和董子丰教授的热情推荐和评审。稿中的一些问题曾请教了膜界元老中国科学院大连化学物理所郑领英教授,另外在资料查阅和版面的编排方面幸得中国科学院大连化学物理研究所王从厚教授和孙胜梅工程师的协助,在此一并表示诚挚的谢意。

由于编者水平所限,调查研究不够,书中不当之处在所难免,敬请业界同仁和广大读者不吝批评指正。

中国科学院大连化学物理研究所 研究员 王学松

2005年1月

内 容 提 要

现代膜技术是一项涉及多种学科的高新技术,由于它具有能耗低、单级分离效率高、过程简单和不污染环境等优点,近年来颇受科技界及产业部门的关注,应用领域日趋广泛。本书较全面和系统地介绍了当代各种功能膜技术的基本原理、制膜方法、膜的特性测试、应用实例及其最新发展。

全书共6篇。第1篇为膜过程,其中以综论分离膜为主,兼论其他功能膜,如反应膜、识别传感膜、能量转换膜及生物膜等;第2篇介绍各种有机、无机膜的制备工艺和性能测试;第3篇为各种膜设备和膜组件等的构造和组装方法;第4篇为膜技术的运行流程与工艺设计;第5篇为膜分离装置操作中的工艺问题,具体探讨了浓差极化、膜污染的成因和防治及原水的前处理方法;第6篇为膜技术的开发展望,重点报道了诸多新开发的膜材料与先进的成膜工艺。

本书内容丰富,取材新颖,实例广泛,图文并茂,在写作上注意理论与实践并重,综合阐述了现代膜技术的最新进展及其应用方向。可进一步使读者对膜的功能有更加全面的认识和了解,扩大视野,活跃思路,从中得以启迪创新。

本书对从事水处理、食品加工、电子工业、石油化工、制药、印染、气体分离、生物工程及分析监测等工作的科研人员和工程技术界同仁有较大的参考价值。

本书可供与膜技术相关的企业专家、从业人员以及各级管理干部和大专院校师生参考,也可作为对膜技术感兴趣的初学者的入门读物。

目 录

第 1 篇 膜 过 程

第 1 章 总论	1	性能	53
1.1 奇特的功能材料——膜	1	2.1.2.3 纳滤膜的材质	54
1.2 膜的定义	1	2.1.2.4 纳滤膜的制备方法	55
1.3 膜分离技术的发展简史	2	2.1.2.5 纳滤膜的特点	57
1.4 功能高分子膜的分类	3	2.1.2.6 纳滤膜的构型、组件及 装置	57
1.4.1 按分离原理进行分类	3	2.1.2.7 纳滤过程中的污染及其 对策	58
1.4.1.1 具有所需孔径的膜	3	2.1.2.8 纳滤膜分离过程最新进展 ..	60
1.4.1.2 无孔膜	3	2.1.2.9 我国纳滤膜技术的研究 进展	62
1.4.1.3 具有反应性官能团作用 的膜	4	2.1.2.10 纳滤技术的工业应用	64
1.4.2 按分离的推动力进行分类	4	2.1.2.11 有关膜厂商及其膜产品 性能介绍	76
1.4.3 按分离物质大小（膜孔径）进 行分类	4	2.1.3 超过滤	78
1.4.4 按膜的结构形态进行分类	4	2.1.3.1 引言	78
1.5 膜过程中的主要传递机制	5	2.1.3.2 超过滤法的基本原理	78
1.5.1 溶解-扩散模型	6	2.1.3.3 超过滤膜	79
1.5.2 液体的水力学透过	6	2.1.3.4 超过滤装置	85
1.5.3 孔传递模型	7	2.1.3.5 超过滤法的经济效益	88
1.5.4 孔隙开闭学说	8	2.1.3.6 我国超过滤技术发展概况 ..	89
1.5.5 筛分理论	9	2.1.3.7 超过滤技术的工业应用	92
1.5.6 优先吸附-毛细管流动机制	10	2.1.3.8 有关膜厂商及其膜产品 性能介绍	111
参考文献	11	2.1.4 微孔过滤	118
第 2 章 分离膜	12	2.1.4.1 引言	118
2.1 压力驱动膜过程	12	2.1.4.2 微孔滤膜	118
2.1.1 反渗透	12	2.1.4.3 微孔过滤装置	132
2.1.1.1 引言	12	2.1.4.4 膜微滤强化技术国内研究 进展	133
2.1.1.2 渗透、渗透压及反渗透	13	2.1.4.5 微孔滤膜在使用中应注意 的若干问题	137
2.1.1.3 反渗透膜的分离机理	14	2.1.4.6 我国微孔滤膜的研究 开发	138
2.1.1.4 反渗透膜的主要特性参数 ..	17	2.1.4.7 微孔滤膜的应用	140
2.1.1.5 反渗透膜	18	2.1.4.8 有关膜厂商及其膜产品 性能介绍	148
2.1.1.6 反渗透组件与装置	25	2.1.5 气体分离	151
2.1.1.7 延长反渗透膜使用寿命的 方法	25	2.1.5.1 引言	151
2.1.1.8 反渗透法的经济效益	27	2.1.5.2 气体分离膜	151
2.1.1.9 我国反渗透技术的发展 概况	28	2.1.5.3 气体的膜分离机制	155
2.1.1.10 反渗透法的应用	29	2.1.5.4 气体分离膜的主要特性	
2.1.1.11 有关膜厂商及其膜产品 性能介绍	47		
2.1.2 纳滤	52		
2.1.2.1 “纳滤”术语的由来	52		
2.1.2.2 纳滤膜的分离机理、模型与			

参数	162	2.2.2.4	影响渗透蒸发过程的 因素	251
2.1.5.5	气体分离膜的制备工艺	167	2.2.2.5	渗透蒸发膜及膜材质的 选择
2.1.5.6	气体膜分离器	172	2.2.2.6	渗透蒸发膜的制备
2.1.5.7	气体膜分离器的级联	172	2.2.2.7	渗透蒸发膜的性能测试
2.1.5.8	气体分离膜的开发近况	174	2.2.2.8	填充型渗透蒸发膜
2.1.5.9	国内外气体膜分离技术的 研究生产现状	185	2.2.2.9	渗透蒸发膜的改性技术
2.1.5.10	气体膜分离技术的开发 动向与展望	188	2.2.2.10	渗透蒸发法的经济效益与 流程
2.1.5.11	气体膜分离技术的应用	191	2.2.2.11	我国渗透蒸发的应用 发展
2.1.5.12	有关膜厂商及其膜产品 性能介绍	211	2.2.2.12	渗透蒸发的应用
2.1.6	亲和膜	213	2.2.3	液膜
2.1.6.1	引言	213	2.2.3.1	引言
2.1.6.2	基本原理	213	2.2.3.2	液膜的分类
2.1.6.3	基本理论	214	2.2.3.3	液膜的透过机制
2.1.6.4	亲和膜的制备	215	2.2.3.4	液膜分离中迁移率的 计算
2.1.6.5	亲和膜的形状	217	2.2.3.5	乳状液膜的静电破乳及其 机理
2.1.6.6	亲和膜分离的操作方式	217	2.2.3.6	液膜过程的特点
2.1.6.7	国内亲和膜应用的研究 进展	218	2.2.3.7	液膜技术的进展
2.1.6.8	亲和膜的应用	220	2.2.3.8	液膜分离技术的应用
2.1.7	膜萃取	222	2.2.4	控制释放膜
2.1.7.1	引言	222	2.2.4.1	引言
2.1.7.2	膜萃取过程的特点	222	2.2.4.2	控制释放的主要机制
2.1.7.3	数学模型	222	2.2.4.3	控制释放材料
2.1.7.4	膜萃取过程的影响因素	224	2.2.4.4	膜式控释制剂的制法
2.1.7.5	各分传质系数关联式的 建立	224	2.2.4.5	控制释放膜的性能评价
2.1.7.6	膜萃取器和过程设计	225	2.2.4.6	包膜型缓释/控释肥料
2.1.7.7	膜萃取的应用	227	2.2.4.7	控制释放膜的应用
2.1.8	动态膜	229	2.2.5	保鲜膜
2.1.8.1	引言	229	2.2.5.1	引言
2.1.8.2	动态膜的特点	230	2.2.5.2	涂膜保鲜的原理
2.1.8.3	动态膜过程的基本理论	230	2.2.5.3	涂膜剂及其使用方法
2.1.8.4	动态膜载体的组件与膜 材料	231	2.2.5.4	保鲜膜的应用
2.1.8.5	动态膜的制备方法	231	2.2.6	膜吸收法
2.1.8.6	动态膜的应用	231	2.2.6.1	膜吸收法的原理
2.2	浓差驱动膜过程	232	2.2.6.2	膜吸收法的应用
2.2.1	透析	232	2.2.7	促进传递
2.2.1.1	引言	232	2.2.7.1	引言
2.2.1.2	透析的原理	232	2.2.7.2	促进传递与促进因子
2.2.1.3	医疗用透析	233	2.2.7.3	促进传递机理与模型
2.2.1.4	工业用透析	238	2.2.7.4	活性载体的选择与活性膜 的制备
2.2.1.5	透析的应用	243	2.2.7.5	促进传递的应用
2.2.2	渗透蒸发	250	2.3	电驱动膜过程
2.2.2.1	引言	250	2.3.1	电渗析
2.2.2.2	渗透蒸发的基本原理	250	2.3.1.1	引言
2.2.2.3	渗透蒸发的特点	251		

2.3.1.2	电渗析的基本原理	318	2.4.1.10	膜蒸馏法的应用	375
2.3.1.3	离子交换膜	319	2.4.2	渗透蒸馏	380
2.3.1.4	电渗析器	320	2.4.2.1	引言	380
2.3.1.5	电渗析给水处理的主要特点	321	2.4.2.2	渗透蒸馏过程	380
2.3.1.6	电渗析中膜垢膜污染的形成、防止与去除	322	2.4.2.3	渗透蒸馏过程热力学	380
2.3.1.7	电渗析技术的新进展	325	2.4.2.4	渗透蒸馏过程动力学	381
2.3.1.8	我国电渗析技术的发展	328	2.4.2.5	渗透蒸馏膜	381
2.3.1.9	电渗析技术的工业应用	329	2.4.2.6	渗透蒸馏膜组件	382
2.3.2	膜电解	336	2.4.2.7	渗透蒸馏的特点	383
2.3.2.1	引言	336	2.4.2.8	渗透蒸馏的应用	383
2.3.2.2	膜电解法的原理	336	2.4.3	膜结晶	384
2.3.2.3	离子交换膜的极限电流密度	337	2.4.3.1	引言	384
2.3.2.4	膜电解用离子交换膜	338	2.4.3.2	膜结晶的原理	384
2.3.2.5	离子交换膜的最佳设计	338	2.4.3.3	膜结晶过程及其优点	385
2.3.2.6	离子交换膜易出现的损伤分析	340	2.4.3.4	膜结晶器	385
2.3.2.7	离子交换膜损伤的预防措施	341	2.4.3.5	膜结晶的发展前景	386
2.3.2.8	膜电解用电解槽	341	2.4.3.6	膜结晶的应用	386
2.3.2.9	膜电解的流程	342	参考文献	388	
2.3.2.10	膜电解法的应用	343	第3章	反应膜	398
2.3.3	双极膜电渗析	347	3.1	引言	398
2.3.3.1	双极膜的结构、运行机理及其特点	347	3.2	膜反应器的特点	398
2.3.3.2	双极膜的理论模型	348	3.2.1	反应转化率不受化学平衡转化率的限制	398
2.3.3.3	膜材料种类、合成方法及单张阴、阳膜的制备	350	3.2.2	能提高复杂反应的选择性	398
2.3.3.4	双极膜的制备方法	351	3.2.3	经济高效	399
2.3.3.5	双极膜电渗析水解分离器	352	3.3	膜反应器的分类	399
2.3.3.6	双极膜电渗析器的组装方式及其功用	353	3.3.1	从同膜相关的特性参数出发	399
2.3.3.7	双极膜电渗析的应用	358	3.3.2	从同催化剂相关的特性参数出发	399
2.4	热驱动膜过程	366	3.4	惰性膜反应器	400
2.4.1	膜蒸馏	366	3.5	催化膜反应器	400
2.4.1.1	引言	366	3.5.1	无机催化膜反应器	400
2.4.1.2	膜蒸馏法的原理	367	3.5.1.1	钯膜反应器	400
2.4.1.3	膜蒸馏过程的特征	367	3.5.2	有机催化膜反应器	402
2.4.1.4	膜蒸馏用膜材料	368	3.5.2.1	酶膜生物反应器	402
2.4.1.5	膜蒸馏过程中的膜污染问题	370	3.5.2.2	膜生物反应器	409
2.4.1.6	膜蒸馏用膜的特性参数	370	3.6	膜反应器的应用	415
2.4.1.7	膜蒸馏组件的性能测试与影响因素	371	3.6.1	钯膜反应器的应用	415
2.4.1.8	在膜蒸馏过程中的热回收问题	374	3.6.1.1	造氢反应	415
2.4.1.9	膜蒸馏存在问题及发展方向	374	3.6.1.2	环己烷的脱氢	416
			3.6.1.3	低级石蜡族烷烃的芳构化	417
			3.6.2	酶膜反应器的应用	417
			3.6.2.1	微生物固定化膜反应器	417
			3.6.2.2	蔗糖的加水分解	418
			3.6.2.3	酶膜生物反应器	418
			3.6.2.4	微胶囊化酶膜反应器	418
			3.6.2.5	生物大分子的水解	419
			3.6.2.6	辅酶或辅助因子的再生	419
			3.6.2.7	脂肪酶催化水解及合成	420

3.6.2.8	低聚肽合成	420	测量	441
3.6.2.9	反胶团催化	420	4.7.4	SnO ₂ 气敏传感器
3.6.2.10	提高反应生产能力	420	4.7.4.1	薄膜型 SnO ₂ 气敏传感器
3.6.2.11	手性化合物的生产研究	420	4.7.4.2	SnO ₂ 薄膜的制备方法
3.6.2.12	辅酶的再生	421	4.7.5	LB 膜传感器
3.6.2.13	在淀粉糖化中的应用	421	4.7.5.1	离子敏传感器
3.6.2.14	其他应用	421	4.7.5.2	味敏传感器
3.6.3	膜生物反应器的应用	422	4.7.5.3	气敏传感器
3.6.3.1	国外应用情况	422	4.7.5.4	图像传感器
3.6.3.2	国内应用情况	425	4.7.5.5	红外传感器
参考文献		425	4.7.5.6	湿度传感器
第4章	传感膜	427	4.7.6	自组膜传感器
4.1	引言	427	参考文献	445
4.2	膜传感器	427	第5章	能量转化膜
4.3	膜传感器的分类	428	5.1	燃料电池
4.4	敏感膜	428	5.1.1	引言
4.4.1	膜基体材料	428	5.1.2	离子交换膜燃料电池
4.4.2	敏感膜材	429	5.1.2.1	用作燃料电池电解质的离子 交换膜
4.4.2.1	温度敏感膜材	429	5.1.2.2	构成材料
4.4.2.2	pH 敏感膜材	429	5.1.2.3	离子交换膜燃料电池的 特点
4.4.2.3	电场敏感膜材	429	5.1.2.4	离子交换膜燃料电池的 实例
4.4.2.4	光敏感膜材	430	5.1.3	质子交换膜燃料电池
4.5	膜传感器的原理与结构	430	5.1.3.1	引言
4.6	各种膜传感器	432	5.1.3.2	PEM 电池与质子交换膜
4.6.1	化学传感器	432	5.1.4	燃料电池用质子交换膜的开发 近况
4.6.2	生物传感器	433	5.1.4.1	引言
4.6.2.1	酶膜传感器	433	5.1.4.2	全氟磺酸型质子交换膜
4.6.2.2	微生物膜传感器	434	5.1.4.3	增强型复合质子交换膜
4.6.2.3	免疫响应膜传感器	435	5.1.4.4	高温型复合质子交换膜
4.6.2.4	微型酶薄膜传感器	436	5.1.4.5	非全氟化质子交换膜
4.7	膜传感器的开发应用	437	5.1.4.6	新型无氟化质子交换膜
4.7.1	膜式氢浓度传感器	437	5.1.5	聚合物膜燃料电池的主要技术 问题与对策
4.7.1.1	引言	437	5.2	蓄电池
4.7.1.2	基本原理	437	5.2.1	引言
4.7.1.3	传感器的膜与电极的制备 方法	438	5.2.2	隔膜
4.7.1.4	传感器结构	438	5.2.2.1	隔膜的特性
4.7.1.5	传感器输出信号的测定	438	5.2.2.2	铅蓄电池用隔膜
4.7.2	高分子膜光纤气体传感器	439	5.2.2.3	碱蓄电池用隔膜
4.7.2.1	引言	439	5.2.3	蓄电池的电解质
4.7.2.2	原理	439	5.2.4	绿色能源——双极膜蓄电池
4.7.2.3	高分子敏感膜的制备方法 及其特点	439	参考文献	466
4.7.2.4	高分子敏感膜在光纤气体 传感器中的应用	439	第6章	生物膜
4.7.3	V ₂ O ₅ 薄膜用作 SO ₂ 气敏传 感器	440	6.1	引言
4.7.3.1	V ₂ O ₅ 薄膜对 SO ₂ 气体的 敏感机理	440	6.2	生物膜的结构
4.7.3.2	V ₂ O ₅ 薄膜的制法与性能		6.2.1	生物膜的构成

6.2.2 生物膜的化学组成	468	7.5.4 接触透镜的制法	485
6.2.3 生物膜分子结构的模型	469	7.5.5 对接触透镜的特性要求	485
6.2.3.1 脂双层模型	469	7.6 人工皮肤	486
6.2.3.2 Danielli 与 Davson 三夹 模型	469	7.6.1 引言	486
6.2.3.3 Robertson “单位膜” 模型	469	7.6.2 人工皮肤的品种和特性	487
6.2.3.4 “流动镶嵌”模型	470	7.6.3 人工皮肤的分类和制法	487
6.2.3.5 “板块镶嵌”模型	470	7.6.3.1 非生长型人工皮肤	487
6.3 生物膜的功能	470	7.6.3.2 生长型人工皮肤	488
6.3.1 能量转换	470	7.6.4 人工真皮替代物的结构模型	489
6.3.2 物质运送	470	7.6.5 人工皮肤的应用	489
6.3.3 信息传递	470	7.7 人工肝	489
参考文献	471	7.7.1 引言	489
第7章 医疗用膜	472	7.7.2 人工肝的开发经过	490
7.1 引言	472	7.7.3 膜型人工肝的原理与构造	490
7.2 对医用高分子膜材料的基本要求	473	7.7.4 生物人工肝	491
7.3 人工肾	474	参考文献	491
7.3.1 人工肾的构成	474	第8章 其他膜	493
7.3.2 人工肾的性能评价	475	8.1 自组装膜	493
7.3.2.1 清除率	475	8.1.1 引言	493
7.3.2.2 透析率	475	8.1.2 分子自组装的原理及特点	493
7.3.3 血液净化用高分子膜的开发 现状	476	8.1.3 自组装膜的分类	494
7.4 人工肺	477	8.1.4 自组装膜的制备方法	494
7.4.1 引言	477	8.1.5 自组装膜技术的应用	494
7.4.2 人工肺的分类	477	8.1.5.1 在基础学科研究中的 应用	495
7.4.3 人工肺用膜	479	8.1.5.2 在各种新型器件制造中的 应用	495
7.4.3.1 膜材质	479	8.1.5.3 在金属等表面改性中的 应用	495
7.4.3.2 膜形态	480	8.1.5.4 在纳米加工中的应用	497
7.4.4 人工肺的运作原理	480	8.1.5.5 在含能材料中的应用	497
7.4.5 人工肺系统	481	8.2 回归式反光膜	498
7.4.6 人工肺的开发展望	482	8.2.1 引言	498
7.5 接触透镜（隐形眼镜）	482	8.2.2 基本原理	498
7.5.1 引言	482	8.2.3 回归式反光膜的制备方法	498
7.5.2 接触透镜的作用	483	8.2.4 回归反光性能的测试	499
7.5.3 接触透镜的种类和材质	483	参考文献	499

第2篇 制膜工艺

第1章 引言	501	2.2.1 溶液浇铸法	506
1.1 分离膜应具备的基本特性	501	2.2.2 熔融拉伸成膜法	506
1.2 膜材料与制膜工艺兼顾	501	2.2.3 膜形成与聚合过程同时进 行法	507
1.3 制膜工艺的分类	502	2.3 溶剂蒸发法	507
第2章 有机膜的制备方法	503	2.4 浸沉凝胶相转化法	508
2.1 膜材料	503	2.4.1 引言	508
2.1.1 普通高聚物膜材料	503	2.4.2 制膜工艺	508
2.1.2 高分子合金膜材料	505	2.4.3 实例——醋酸纤维素膜的 制备	509
2.1.2.1 高分子合金膜材料	505	2.4.3.1 制膜程序	509
2.1.2.2 高分子合金膜结构	505		
2.2 致密膜的制备	506		

2.4.3.2	制膜液组成	509	2.10.2	微胶囊的基本特征	528
2.4.3.3	制膜条件对膜性能的影响	511	2.10.2.1	微胶囊的大小	528
2.4.3.4	醋酸纤维素膜的成膜机理	515	2.10.2.2	微胶囊的形状	528
2.5	浸入沉淀相转化法制膜	516	2.10.2.3	微胶囊的功能	529
2.5.1	引言	516	2.10.3	微胶囊壁材的选择	529
2.5.2	成膜机理	516	2.10.4	微胶囊芯材的释放	529
2.5.3	膜结构形态	517	2.10.5	微胶囊的制法原理	530
2.5.3.1	胞腔状结构	517	2.10.5.1	化学法	530
2.5.3.2	粒状结构	517	2.10.5.2	物理法	530
2.5.3.3	双连续结构	517	2.10.5.3	物理化学法	530
2.5.3.4	胶乳结构	517	2.10.6	常用的微胶囊制备技术	531
2.5.3.5	大孔结构	517	2.10.6.1	界面聚合法	531
2.6	热致相分离法制备高聚物微孔膜	518	2.10.6.2	原位聚合法	531
2.6.1	引言	518	2.10.6.3	锐孔法	531
2.6.2	热致相分离法的制膜过程	518	2.10.6.4	喷雾干燥法与包络结合物法相结合	531
2.6.3	热致相分离法制微孔材料	519	2.10.6.5	溶剂蒸发法	531
2.6.4	热致相分离法制备微孔膜的 优点	519	2.10.6.6	复凝聚法	531
2.6.5	热致相分离法制备微孔膜的 最新进展	519	2.10.6.7	油相分离法	531
2.6.5.1	国外的最新进展	520	2.10.6.8	干燥浴法(复相乳 液法)	531
2.6.5.2	国内的最新进展	520	2.11	烧结法制微孔滤膜	532
2.7	复合膜的制法	521	2.11.1	原理	532
2.7.1	引言	521	2.11.2	膜材料	532
2.7.2	复合膜的制作	521	2.11.3	多孔氧化铝基质膜的制备	533
2.7.3	复合膜的结构形态	523	2.12	LB膜的制法	534
2.8	低温等离子体制膜法	524	2.12.1	引言	534
2.8.1	引言	524	2.12.2	LB膜及其材料	534
2.8.2	等离子体聚合成膜条件	524	2.12.3	LB膜的制备技术	535
2.8.2.1	化学反应动力学	524	2.12.3.1	LB技术	535
2.8.2.2	等离子体聚合的机理	525	2.12.3.2	特殊材料的成膜技术	536
2.8.3	等离子体聚合制备高分子膜的 装置	525	2.12.4	LB膜的制备装置	536
2.8.4	利用低温等离子体制备高分 子膜	526	2.12.5	LB膜的物性表征及试验研究 技术	537
2.8.4.1	等离子体聚合制备反渗透 膜	526	2.13	核微孔滤膜的制法	538
2.8.4.2	等离子体技术在分离膜 改性方面的应用	526	2.13.1	引言	538
2.9	荷电膜的制法	527	2.13.2	核微孔滤膜的制备	538
2.9.1	荷电膜的分类	527	2.13.2.1	基本原理	538
2.9.2	荷电膜的制备方法	527	2.13.2.2	重离子辐照	538
2.9.2.1	表层处理法	527	2.13.2.3	敏化和化学蚀刻	538
2.9.2.2	含浸法	528	2.13.3	核微孔滤膜的特性	539
2.9.2.3	相转化法	528	2.13.4	核微孔滤膜的主要性能测定	539
2.9.2.4	聚合法	528	2.13.5	光接枝改性核微孔滤膜	539
2.10	微胶囊的制法	528	2.13.5.1	光接枝的原理	539
2.10.1	引言	528	2.13.5.2	光接枝核微孔滤膜的 制备	541
			2.13.5.3	接枝膜的表征	541
			2.13.5.4	光接枝改性的效果	541
			2.14	拉伸法制微孔膜	542
			参考文献		544

第3章 无机膜的制备方法	545
3.1 沸石分子筛膜的制法	545
3.1.1 引言	545
3.1.2 沸石分子筛膜的合成技术	546
3.1.2.1 沸石嵌入合成膜	546
3.1.2.2 直接原位晶化合成膜	546
3.1.2.3 化学蒸气相法	546
3.1.2.4 晶种负载晶化合成	546
3.1.3 沸石膜合成的最新方法	546
3.1.3.1 二次生长法	547
3.1.3.2 微波合成法	547
3.1.3.3 其他合成方法	548
3.1.4 沸石分子筛膜的缺陷和修饰	548
3.1.4.1 沸石分子筛膜的缺陷	548
3.1.4.2 沸石分子筛膜的修饰	548
3.1.5 沸石膜合成中的注意点	548
3.1.5.1 二次合成法	548
3.1.5.2 基底表面处理	548
3.1.5.3 合成条件控制	548
3.1.6 沸石膜的表征	548
3.2 碳分子筛膜的制法	549
3.2.1 引言	549
3.2.2 制膜原料	549
3.2.2.1 聚酰亚胺	549
3.2.2.2 酚醛树脂	549
3.2.2.3 聚糠醇	549
3.2.2.4 其他原料	550
3.2.3 碳膜的制备	550
3.2.3.1 非支撑碳膜的制备	550
3.2.3.2 支撑碳膜的制备	550
3.2.4 碳膜的修饰	551
3.2.4.1 化学气相沉积法	551
3.2.4.2 氧化法	551
3.2.4.3 沸石生长调孔法	551
3.2.4.4 其他	551
3.3 钯及其合金膜的制法	552
3.3.1 引言	552
3.3.2 钯膜的制备方法	552
3.3.2.1 钯膜的制法	552
3.3.2.2 钯膜制法的改进	552
3.3.3 钯合金膜的制备方法	553
3.3.3.1 高温熔炼-机械轧制技术	553
3.3.3.2 物理气相沉积	553
3.3.3.3 化学气相沉积	554
3.3.3.4 电镀	554
3.3.3.5 化学镀	554
3.3.3.6 喷雾-热分解技术	554
3.4 化学气相沉积制膜法	554
3.4.1 引言	554
3.4.2 化学气相沉积过程	555
3.4.3 化学气相沉积制膜	555
3.4.4 化学气相沉积法用于制备无机 分离膜	555
3.5 陶瓷膜的制法	557
3.5.1 引言	557
3.5.2 陶瓷膜的构型及其特性	557
3.5.3 陶瓷膜的制备	558
3.5.3.1 阳极氧化法	558
3.5.3.2 薄膜沉积法	558
3.5.3.3 辐射-腐蚀法	558
3.5.3.4 浸浆成膜法	558
3.5.4 复合陶瓷膜的制备	558
3.5.5 无机膜陶瓷支撑体的制备 方法	559
3.5.5.1 陶瓷支撑体的制备方法	559
3.5.5.2 制备过程的主要影响 因素	560
3.6 溶胶-凝胶法成膜技术	561
3.6.1 引言	561
3.6.2 原理	561
3.6.3 工艺	561
3.6.4 原料	562
3.6.5 成膜实例	563
3.6.6 功能膜成膜技术动向	563
3.7 无机介孔膜的制备	564
3.7.1 模板合成法	564
3.7.2 溶胶-凝胶法	565
3.7.2.1 旋转涂覆法	565
3.7.2.2 浸渍提拉法	565
3.7.2.3 脉冲激光沉积法	565
3.7.3 表面活性剂	565
参考文献	565
第4章 各种构型膜的制备工艺	567
4.1 平板膜	567
4.1.1 流延制膜法	567
4.1.2 水上展开法	568
4.1.3 平板刮膜机	568
4.1.3.1 科研用刮膜机	568
4.1.3.2 以非织布作支撑的平板膜 刮膜机	570
4.1.3.3 复合膜刮膜机	570
4.2 管式膜	571
4.3 卷式膜	572
4.4 中空纤维膜	573
4.4.1 熔融拉丝法	573
4.4.2 溶液拉丝法	573
4.4.3 中空纤维膜组件的制法	575
4.4.3.1 中空纤维膜的集束排列	575
4.4.3.2 浇铸封装	576
4.4.3.3 切割	577
参考文献	579

第3篇 膜设备

第1章 引言	581	cartridge unit)	600
第2章 膜设备的分类与要求	582	3.4.3 散装式中空纤维膜	600
第3章 膜组件的主要形式	583	3.4.3.1 散装式中空纤维膜的 特点	601
3.1 板框式	583	3.4.3.2 散装式中空纤维膜的应 用领域	601
3.1.1 板框式膜组件的特点	583	3.4.4 中空纤维膜组件的应用	601
3.1.2 系紧螺栓式	583	第4章 各种形式膜组件的特性对比	603
3.1.3 耐压容器式	584	第5章 膜组件的开发与改进	604
3.1.4 DDS型	584	第6章 膜分离用泵及其选定	605
3.1.4.1 20型和40型	584	6.1 引言	605
3.1.4.2 30型	585	6.1.1 泵的分类	605
3.1.4.3 35型	585	6.1.2 泵的特性	605
3.1.5 R-P公司的平板型膜组件	587	6.1.2.1 作用原理	605
3.1.6 板框式膜组件的应用	588	6.1.2.2 特性曲线	606
3.2 圆管式	589	6.2 叶轮式泵	607
3.2.1 圆管式膜组件的特点	589	6.2.1 离心泵	607
3.2.2 内压型管式	590	6.2.2 黏液泵(摩擦泵)	607
3.2.2.1 内压型单管式	590	6.2.3 螺旋桨泵	607
3.2.2.2 内压型管束式	590	6.3 容积式泵	607
3.2.3 外压型圆管式	591	6.3.1 往复泵	607
3.2.4 圆管式膜组件的应用	594	6.3.1.1 柱塞泵	607
3.3 螺旋卷式	595	6.3.1.2 隔膜泵	607
3.3.1 螺旋卷式膜组件的特点	595	6.3.2 旋转泵	608
3.3.2 螺旋卷式膜组件的结构	595	6.3.2.1 齿轮泵	608
3.3.3 膜组件的部件和材料	596	6.3.2.2 偏心泵	608
3.3.4 黏结密封问题	596	6.3.2.3 螺杆泵	608
3.3.5 使用中的注意事项	596	6.4 膜分离用泵的选定要点	608
3.3.6 螺旋卷式膜组件的应用	597	6.4.1 泵的选型	608
3.4 中空纤维式	598	6.4.2 材质的选定	609
3.4.1 中空纤维膜组件的特点	598	6.4.3 经济性	609
3.4.2 中空纤维膜组件的结构	598	6.4.4 可靠性	610
3.4.2.1 轴向流动型(axial flow unit)	599	6.4.5 维修与更新	610
3.4.2.2 径向流动型(radial flow unit)	600	参考文献	610
3.4.2.3 纤维卷筒型(bobbin			

第4篇 膜技术的运行流程与设计

第1章 膜分离装置的基本流程	611	2.1.2.3 浓缩倍数和回收率的简易 计算法	618
第2章 膜过程的系统设计	615	2.1.3 实际装置上的检测结果举例	619
2.1 反渗透系统	615	2.1.4 反渗透系统设计中应注意的 事项	620
2.1.1 反渗透单元工艺及装备设计	615	2.1.4.1 预处理阶段	620
2.1.1.1 原始资料	615	2.1.4.2 反渗透阶段	621
2.1.1.2 反渗透器的选型设计	615	2.1.4.3 工艺水泵	622
2.1.2 反渗透系统设计中处理容量、 浓缩率及回收率的确定	617	2.1.4.4 对一些操作因素的掌握	623
2.1.2.1 处理容量的确定	617	2.1.4.5 反渗透系统设计软件	624
2.1.2.2 浓缩率与回收率的确定	617		

2.2 电渗析过程	624	2.2.2.1 处理条件	626
2.2.1 电渗析过程计算的基础	624	2.2.2.2 电渗析槽	626
2.2.1.1 极限电流密度与负荷电流 密度	624	2.2.2.3 电流密度的计算	626
2.2.1.2 电渗析槽的脱盐率	625	2.2.2.4 设备的计算	627
2.2.1.3 所需膜面积	625	2.2.2.5 浓缩液量	628
2.2.2 设计的顺序	626	2.2.3 过程设计的计算实例	628
		参考文献	629

第5篇 膜分离装置操作中的工艺问题

第1章 膜分离过程中的浓差极化	631	2.6.3 膜结构的选择	652
1.1 浓差极化形成的基本原因	631	2.6.4 组件结构的选择	652
1.2 浓差极化的数学模型	631	2.6.5 溶液 pH 值的控制	653
1.3 浓差极化的危害	634	2.6.6 溶液中盐浓度的影响	653
1.4 浓差极化的测定	635	2.6.7 溶液温度的影响	653
1.5 改善浓差极化的对策	639	2.6.8 溶质浓度、料液流速与压力 的控制	653
1.5.1 增大流速	639	第3章 分离膜的清洗与再生	654
1.5.2 填料法	640	3.1 引言	654
1.5.3 装设湍流促进器	641	3.2 物理清洗法	655
1.5.4 脉冲法	641	3.2.1 高速水冲洗法	655
1.5.5 搅拌法	642	3.2.1.1 正洗法	655
1.5.6 提高扩散系数	642	3.2.1.2 循环法	655
1.5.7 错流过滤	642	3.2.1.3 逆洗法	656
1.5.8 流化床法	643	3.2.2 海绵球管式膜清洗法	656
1.5.9 旋转强化	644	3.3 化学清洗法	657
1.5.9.1 旋转盘式膜器	644	3.3.1 清洗液的选择	658
1.5.9.2 旋转膜管式膜器	644	3.3.2 专用清洗液的成分及其功用 介绍	659
1.5.9.3 旋转流管式膜器	645	第4章 原料水的前处理	660
第2章 膜污染	646	4.1 反渗透的原水系统	660
2.1 膜污染的定义	646	4.1.1 堵塞指数 P 的测定方法	660
2.2 膜污染的起因	646	4.1.2 污染密度指数 SDI 的测定 方法	661
2.2.1 粒子或溶质尺寸	646	4.2 电渗析的原水系统	662
2.2.2 膜结构	646	第5章 膜分离过程中的能量消耗及 其回收装置	663
2.2.3 膜、溶质和溶剂之间的相互 作用	647	5.1 能量消耗	663
2.2.3.1 静电作用力	647	5.2 能量回收装置	663
2.2.3.2 范德瓦耳斯力	647	5.2.1 水力回收透平	663
2.2.3.3 溶剂化作用	647	5.2.1.1 逆转泵型水轮机	664
2.2.3.4 空间立体作用	647	5.2.1.2 佩尔顿水轮机	664
2.2.4 膜表面粗糙度、孔隙率等膜的 物理特性	647	5.2.1.3 水轮内装型泵	665
2.3 污染指数的测定方法	647	5.2.2 近年来公布的液压往复（正位 移）能量回收系统	665
2.3.1 引言	647	5.2.3 新型水力透平	666
2.3.2 测定方法概要	648	5.2.4 直接接触正位移压力交换器	666
2.3.3 测定装置与操作程序	648	5.3 部分能量回收装置的性能比较	667
2.3.4 自动测定装置	648	5.4 能量回收装置在反渗透海水和苦咸 水脱盐中的应用	667
2.4 膜法水处理中常见的污染物	650	参考文献	669
2.5 反渗透膜元件污染的判断处理	650		
2.6 膜污染的控制方法	652		
2.6.1 膜材料的选择	652		
2.6.2 膜孔径或截留分子量的选择	652		

第6篇 新的膜技术发展展望

第1章 引言	671	4.3.5.2 与反应过程相结合	686
第2章 新型膜材料的开发	672	4.3.5.3 与吸附过程的集成	687
2.1 开发功能高分子膜材料	673	4.3.6 超临界流体与膜过程的耦合	687
2.2 开发无机膜材料	675	4.3.6.1 超临界流体萃取与纳滤过程 相耦合	687
第3章 新的膜过程	676	4.3.6.2 超临界流体强化超滤 过程	688
3.1 膜式化学-物理转变的工艺	676	4.3.7 络合-超滤-电解集成技术处理 重金属废水	689
3.2 导电聚合物复合透膜	676	4.3.8 膜生物反应器+反渗透	689
3.2.1 引言	676	第5章 国内外现代膜技术与膜工业的 发展概况	691
3.2.2 导电透膜的结构和分离机理	676	5.1 国外膜工业的发展概况	691
3.2.3 导电透膜的合成与制备方法	677	5.1.1 美国	691
3.2.4 本征导电聚合物材料的选择	677	5.1.2 日本	691
3.2.5 导电透膜的应用	677	5.1.3 欧洲	692
3.2.5.1 导电透膜用于液相分离	677	5.1.4 中东国家和地区的膜技术发展 概况	693
3.2.5.2 导电透膜用于气相分离	678	5.1.5 国外主要膜及膜组件的发展 概况	693
3.3 连续去离子化	678	5.1.5.1 微滤、超滤和纳滤膜组 件的发展概况	693
3.4 膜接触器	679	5.1.5.2 反渗透膜组件的发展 概况	694
第4章 集成膜分离技术	680	5.1.5.3 气体膜分离组件的发展 概况	695
4.1 引言	680	5.1.5.4 渗透气化膜组件的发展 概况	695
4.2 几种典型的集成膜分离过程 模式	680	5.1.5.5 无机膜及组件的发展 概况	696
4.2.1 膜分离与化学反应相结合	680	5.1.6 膜工业及其构成	696
4.2.2 膜分离与蒸发单元操作相 结合	680	5.2 中国膜工业和技术的发展	697
4.2.3 膜分离与吸附单元操作相 结合	680	5.2.1 液体分离膜的发展	697
4.2.4 膜分离与冷冻单元操作相 结合	681	5.2.2 膜法气体分离的发展	698
4.2.5 膜分离与催化单元操作相 结合	681	5.2.3 其他	698
4.2.6 膜分离与离子交换树脂单元 操作相结合	681	5.2.4 发展现状	699
4.3 集成膜分离操作的应用实例	681	5.2.4.1 研究与开发	699
4.3.1 膜集成技术提取甘露醇	681	5.2.4.2 生产与应用	699
4.3.1.1 引言	681	5.2.4.3 学术交流	700
4.3.1.2 膜集成工艺	681	5.2.5 中国膜工业存在的主要问题	701
4.3.1.3 经济效益估算	683	5.2.6 中国膜工业的发展对策和 措施	702
4.3.2 集成化膜法水处理工艺	683	5.2.6.1 加强技术创新, 全力推动 膜科技进步	702
4.3.2.1 预处理部分	683	5.2.6.2 调整产业布局, 优化产业 结构, 提升产业水平	703
4.3.2.2 主机与系统配置	684	5.2.6.3 加强行业管理, 建立规范 有序的市场体系	703
4.3.2.3 结果	684		
4.3.3 集成膜分离技术在茶饮料行业 中的应用	684		
4.3.4 渗透蒸馏与其他过程的集成	685		
4.3.4.1 与其他膜分离过程的 集成	685		
4.3.4.2 与精馏过程的集成	685		
4.3.5 渗透蒸发与其他过程的集成	686		
4.3.5.1 与精馏过程的集成	686		

第 6 章 新世纪膜分离技术市场展望	704
6.1 引言	704
6.2 全球液体膜过滤市场展望	705
6.2.1 概况	705
6.2.2 饮用水方面	705
6.2.3 废水处理方面	706
6.2.4 水处理市场面临的新课题	707
6.3 全球气体膜分离市场展望	708
6.3.1 概述	708

6.3.2 膜法制氮方面	708
6.3.3 膜法富氧方面	709
6.3.4 膜法提氢	709
6.3.5 天然气净化	709
6.3.6 蒸气/气体分离	710
6.3.7 蒸气/蒸气分离	710
6.4 结语	710
参考文献	711

附

附表 1 常用单位换算	713
附表 2 我国生活饮用水卫生标准 (GB 5749—85)	714
附表 3 我国地面水的分类及水质标准	715
附表 4 我国海水水质标准 (GB 3097—82)	716
附表 5 我国电子级水的技术指标 (GB 11446-1—89)	717
附表 6 我国电子工业部高纯水水质试行 标准	718
附表 7 我国低压锅炉的水质标准 (GB 1576—79)	718
附表 8 我国污水综合排放标准 (GB 8978—88)	719

录

附表 9 浓度表示法	720
附表 10 硬度单位的换算	720
附表 11 碱度单位的换算	721
附表 12 浊度单位的对照表	721
附表 13 透水率单位的换算	721
附表 14 气体渗透系数的单位换算	722
附表 15 [NaCl-H ₂ O] 体系在 25℃ 下的 特性参数	722
附表 16 NaCl 水溶液在不同温度下的 渗透压和摩尔密度	723
附表 17 国内膜及膜设备厂商一览表	724
附表 18 国外膜及膜设备厂商一览表	737
参考文献	749