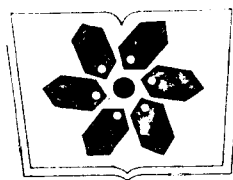


膜分离技术及其应用

王学松 编著

科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版

膜分离技术及其应用

王学松 编著

科学出版社

1994

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

膜分离是一项涉及多种学科的新型化工分离技术,近年来颇受科技界的关注,应用领域日趋广泛.本书较全面地介绍当代主要膜分离技术的基本概念,制膜方法,膜的特性测量,应用实例及最新发展.

全书共十四章.主要包括:总论,反渗透,超过滤,微孔过滤,气体分离,透析,电渗析,渗透蒸发,液膜,膜传感器,反应膜,膜蒸馏,控制释放膜及膜分离技术的发展展望等.

本书取材广泛,内容丰富,在写作上注意理论与实践并重.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人员有较大的参考价值.本书可作大专院校有关专业师生的教学参考书,也可作初学者的入门用书.

膜 分 离 技 术 及 其 应 用

王学松 编著

责任编辑 唐正必

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

北京市怀柔黄坎印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1994年4月第 一 版 开本:787×1092 1/16

1994年4月第一次印刷 印张:16

印数:1—2 000 字数:362 000

ISBN 7-03-003913-0/TQ·17

定价:17.80 元

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,有机高分子分离膜是近年来最为人们关注的一种。以它为分离介质的膜分离技术自 60 年代以来取得了令人鼓舞的重大发展。目前,膜分离技术已作为一项新兴技术跨入了各生产领域与科技领域,并取得了很好的经济效益和社会效益。

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础上,广泛收集有关文献资料,编写了此书。书中全面介绍有关膜分离技术的基本原理,膜的特性与制备方法,膜分离装置的结构及应用实例等。

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,以使尚不熟悉膜分离技术的读者阅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。

在本书的编写和出版过程中,得到了章元琦和李荣森二位教授的赞许和推荐,陈燕淑同志为本书部分章节的内容提供了一些资料,孙胜梅同志为全书的插图绘制做了大量工作。另外,中国科学院大连化学物理所、湖州水处理设备厂、无锡市超滤设备厂和浙江海宁医药器材厂等对本书的出版也给予了大力帮助,在此一并表示真挚的谢意。

目 录

前言

第一章 总论	(1)
1-1 奇特的功能材料——膜	(1)
1-2 膜的定义	(1)
1-3 膜分离技术的发展简史	(2)
1-4 功能高分子膜的分类	(3)
参考文献	(6)
第二章 反渗透	(7)
2-1 引言	(7)
2-2 渗透、渗透压及反渗透	(8)
2-3 反渗透膜的分离机理	(9)
2-3-1 非荷电膜	(9)
2-3-2 荷电膜	(11)
2-4 反渗透膜的主要特性参数	(11)
2-4-1 透水率	(11)
2-4-2 透盐率	(12)
2-4-3 压密系数	(12)
2-5 反渗透膜及其制备	(13)
2-5-1 乙酸纤维膜	(13)
2-5-2 芳香聚酰胺膜	(15)
2-5-3 复合膜	(16)
2-6 反渗透装置及其流程	(17)
2-6-1 板框式反渗透膜组件	(18)
2-6-2 管式组件	(19)
2-6-3 螺旋卷式膜组件	(20)
2-6-4 中空纤维式	(21)
2-6-5 反渗透法的基本流程	(24)
2-7 反渗透法的经济效益	(24)
2-8 我国反渗透技术的发展概况	(27)
2-9 反渗透法的应用	(28)
2-9-1 海水和苦咸水的淡化	(28)
2-9-2 甘蔗糖汁及甜菜糖汁的浓缩	(30)
2-9-3 电子工业用水的高度提纯	(30)
2-9-4 由电镀废液中回收重金属	(30)
参考文献	(32)

第三章 超过滤	(33)
3-1 引言	(33)
3-2 超过滤法的基本原理	(33)
3-3 超过滤膜	(34)
3-3-1 超过滤膜的结构	(34)
3-3-2 超过滤膜的制备	(35)
3-4 超过滤装置	(36)
3-4-1 薄层流道超滤组件	(36)
3-4-2 中空丝型超滤组件	(37)
3-5 超过滤法经济效益	(37)
3-6 我国超过滤技术发展概况	(38)
3-7 超过滤技术的应用	(41)
3-7-1 在超纯水制备中的应用	(41)
3-7-2 在电泳涂漆中的应用	(43)
3-7-3 在回收废显影液中的应用	(45)
3-7-4 在人血清白蛋白浓缩中的应用	(46)
参考文献	(48)
第四章 微孔过滤	(49)
4-1 引言	(49)
4-2 微孔滤膜	(49)
4-2-1 微孔滤膜的主要特征	(49)
4-2-2 微孔滤膜的性能测定	(51)
4-2-3 微孔滤膜的形态结构	(55)
4-2-4 微孔滤膜的截留机理	(57)
4-2-5 微孔滤膜的制备方法	(58)
4-2-6 微孔滤膜的主要品种	(59)
4-3 微孔过滤装置	(60)
4-3-1 小型吸滤器	(60)
4-3-2 错流过滤	(60)
4-3-3 板框式过滤装置	(61)
4-3-4 褶皱筒式过滤组件	(62)
4-3-5 针头过滤器	(62)
4-4 我国微滤技术的发展概况	(63)
4-5 微孔滤膜的应用	(63)
4-5-1 实验室中的应用	(63)
4-5-2 工业上的应用	(63)
参考文献	(65)
第五章 气体分离	(67)
5-1 引言	(67)
5-2 气体分离膜	(67)
5-2-1 膜材料及其分类	(67)

5-2-2 选择性高分子膜	(68)
5-2-3 一些主要高分子膜的分离特性	(68)
5-3 气体的膜分离机制	(70)
5-3-1 多孔膜	(71)
5-3-2 非多孔膜 (均质膜)	(72)
5-3-3 非对称膜	(74)
5-4 气体分离膜的主要特性参数	(75)
5-4-1 渗透系数	(75)
5-4-2 扩散系数	(76)
5-4-3 分离系数	(76)
5-4-4 溶解度系数	(77)
5-5 气体分离膜的制备工艺	(78)
5-5-1 永上展开制膜法	(78)
5-5-2 干湿制膜法	(79)
5-5-3 包覆法	(79)
5-5-4 飞溅涂膜法	(84)
5-6 气体分离膜的开发近况	(84)
5-6-1 H_2 , He 气体的回收浓缩	(84)
5-6-2 O_2 , N_2 的分离富集膜	(88)
5-6-3 CO_2 , SO_2 , H_2O 的回收和脱除	(91)
5-7 气体膜分离技术的开发动向与展望	(94)
5-7-1 促进输送膜分离	(94)
5-7-2 提高多孔膜的选择性	(95)
5-7-3 分离促进反应	(95)
5-7-4 开发耐热高分子膜	(96)
5-7-5 连续膜塔	(96)
5-8 气体膜分离技术的应用	(97)
5-8-1 由合成氨弛放气中回收氢气	(97)
5-8-2 制取富氧空气	(98)
5-8-3 由天然气中回收浓缩氮气	(99)
5-8-4 以金属钯膜制取超纯氢	(99)
5-8-5 水果保鲜系统	(100)
5-8-6 医用富氧器	(100)
参考文献	(101)
第六章 透析	(103)
6-1 引言	(103)
6-2 透析的原理	(103)
6-3 生物肾与人工肾	(104)
6-4 透析膜的材料	(106)
6-4-1 纤维素酯类	(107)
6-4-2 纤维素	(107)
6-4-3 玻璃	(107)

6-4-4	聚丙烯腈	(107)
6-4-5	聚酰胺	(108)
6-4-6	聚碳酸酯嵌段共聚物	(108)
6-4-7	聚电解质	(108)
6-4-8	聚乙烯-聚乙烯基共聚物	(108)
6-4-9	聚甲基丙烯酸甲酯	(108)
6-4-10	聚砜	(108)
6-5	透析膜的表征	(109)
6-5-1	溶质透过系数	(109)
6-5-2	过滤系数	(110)
6-5-3	含水率	(110)
6-6	人工肾的构成及性能评价	(111)
6-6-1	清除率	(111)
6-6-2	透析率	(112)
6-7	透析的应用	(113)
6-7-1	人工肾	(113)
6-7-2	从人造丝浆压榨液中回收碱	(114)
	参考文献	(115)
第七章	电渗析	(116)
7-1	引言	(116)
7-2	电渗析的基本原理	(116)
7-3	离子交换膜	(118)
7-3-1	离子交换膜的性能要求	(118)
7-3-2	离子交换膜的分类和制备方法	(118)
7-4	电渗析器	(120)
7-5	电渗析给水处理的主要特点	(121)
7-6	我国电渗析技术的发展	(122)
7-6-1	电渗析装置	(122)
7-6-2	电渗析工艺	(123)
7-6-3	预处理	(123)
7-7	电渗析技术在我国的应用	(123)
7-7-1	海水、苦咸水的淡化	(123)
7-7-2	电厂和其他工业锅炉用水的制备	(124)
7-7-3	生产工艺用水的除盐、初级纯水的制备	(124)
7-7-4	纯水、超纯水的制备	(124)
7-7-5	废水处理、有用物质的回收和再生水的回用	(125)
	参考文献	(125)
第八章	渗透蒸发	(126)
8-1	引言	(126)
8-2	渗透蒸发的基本原理	(126)
8-3	渗透蒸发的特点	(127)

8-4	影响渗透蒸发过程的因素	(127)
8-5	渗透蒸发膜及膜材质的选择	(128)
8-6	渗透蒸发膜的制备与性能测试	(131)
8-7	渗透蒸发法的经济效益与流程	(135)
8-8	渗透蒸发的应用	(137)
8-8-1	二元恒沸有机溶剂的分离	(137)
8-8-2	异丙醇的脱水浓缩	(137)
8-8-3	无水乙醇的生产	(138)
	参考文献	(139)
第九章	液膜	(141)
9-1	引言	(141)
9-2	液膜的分类	(141)
9-2-1	乳化液膜	(142)
9-2-2	支撑液膜	(144)
9-2-3	乳化液膜与支撑液膜的比较	(146)
9-3	液膜的透过机制	(147)
9-3-1	乳化液膜	(147)
9-3-2	支撑液膜	(147)
9-4	液膜分离技术的应用	(148)
9-4-1	金属的分离	(148)
9-4-2	氨基酸的生成和分离	(149)
9-4-3	铀的分离回收	(150)
9-4-4	以支撑液膜分离气体	(151)
9-4-5	废水的处理与回收	(152)
	参考文献	(153)
第十章	膜传感器	(155)
10-1	引言	(155)
10-2	膜传感器的分类	(156)
10-3	膜传感器的原理与结构	(156)
10-4	酶膜传感器	(159)
10-5	微生物膜传感器	(160)
10-6	免疫响应膜传感器	(162)
10-7	微型酶薄膜传感器	(163)
	参考文献	(164)
第十一章	反应膜	(165)
11-1	引言	(165)
11-2	酶膜生物反应器	(166)
11-2-1	酶膜生物反应器的基本原理及结构形式	(166)
11-2-2	酶固定化膜的制法	(168)
11-2-3	酶膜生物反应器的应用	(169)
11-3	钯膜反应器	(172)

11-3-1	钯膜及其用于反应分离的原理	(172)
11-3-2	支撑钯膜的制备	(172)
11-3-3	钯膜反应器的特点	(173)
11-3-4	钯膜反应器的应用	(174)
参考文献		(176)
第十二章 膜蒸馏		(177)
12-1	引言	(177)
12-2	膜蒸馏法的原理与特征	(177)
12-3	膜蒸馏用膜及其性能参数	(179)
12-4	膜蒸馏组件的性能测试与影响因素	(180)
12-4-1	装置	(181)
12-4-2	膜组件	(182)
12-4-3	膜	(182)
12-4-4	各种因素对蒸馏通量的影响	(182)
12-5	在膜蒸馏过程中的热回收问题	(184)
12-6	膜蒸馏法的应用	(184)
12-6-1	盐水的淡化	(184)
12-6-2	强酸、强碱中水的分离	(185)
12-6-3	甘蔗榨汁液的浓缩	(185)
12-6-4	人参露和洗参水的分离浓缩	(186)
12-6-5	分离提纯天然盐水中的食盐和芒硝	(187)
参考文献		(188)
第十三章 控制释放膜		(190)
13-1	引言	(190)
13-2	控制释放的主要机制	(191)
13-2-1	扩散控制体系	(191)
13-2-2	溶剂活化体系	(193)
13-3	膜式控释制剂的制法	(194)
13-3-1	口服微型胶囊	(194)
13-3-2	外用透皮膜剂	(195)
13-4	控制释放膜的性能评价	(196)
13-4-1	控释特性的评价	(196)
13-4-2	高分子膜生体适应性的评价	(196)
13-5	控制释放膜的应用	(197)
参考文献		(197)
第十四章 膜分离技术的开发展望		(198)
14-1	引言	(198)
14-2	新型膜材料的开发	(199)
14-2-1	开发功能高分子膜材料	(199)
14-2-2	开发无机膜材料	(201)
14-3	新的膜分离技术	(202)

14-3-1 膜萃取	(202)
14-3-2 膜式化学-物理转变的工艺	(202)
14-3-3 膜亲和分滤技术	(202)
14-4 集成膜分离技术	(203)
14-4-1 膜分离与化学反应相结合	(203)
14-4-2 膜分离与蒸发单元操作相结合	(204)
14-4-3 膜分离与吸附单元操作相结合	(204)
14-4-4 膜分离与冷冻单元操作相结合	(204)
14-4-5 膜分离与催化单元操作相结合	(204)
14-4-6 膜分离与离子交换树脂单元操作相结合	(204)
14-5 膜市场及其预测	(204)
14-5-1 膜产品的销售状况	(205)
14-5-2 膜市场的分布	(206)
14-5-3 膜产品和膜分离法的价格结构	(207)
14-5-4 膜工业及其构成	(208)
14-6 结束语	(208)
参考文献	(209)
附录	(210)
附表 1 常用单位换算	(210)
附表 2 各种浊度单位的对照表	(211)
附表 3 透水率单位换算表	(212)
附表 4 气体渗透系数的单位换算表	(213)
附表 5 [NaCl-H ₂ O] 系在 25℃ 下的特性参数	(213)
附表 6 NaCl 水溶液在不同温度下的渗透压和摩尔密度	(214)
附表 7 [蔗糖-H ₂ O]系在 25℃ 下的特性参数	(215)
附表 8 国外主要微孔滤膜产品的规格和性能	(215)
附表 9 国外主要商品超滤膜的特性	(216)
附表 10 国外主要膜及膜装置的厂商一览表	(220)
附表 11 国内主要膜及膜装置的厂商一览表	(240)
参考文献	(244)

第一章 总 论

1-1 奇特的功能材料——膜

随着科学技术的发展,“膜”这个新名词已越来越多地在科研、生产和科技文献中出现。尽管想像起来,膜不过是一层极微的薄片,但是它的威力却惊人之大,神通无比,因此其应用领域日趋广泛。

众所周知,构成生命活动的许多基本问题,如能量转换、细胞识别、免疫激素、药物的作用和物质的传输等都与生物膜的功能有关。而所有这些活动过程都是在生物膜的界面上发生的。因此,研究膜及其界面的科学具有重要的意义。实际上,许多工业部门都在有意无意地应用着膜科学的基本原理。例如,物质在水和空气界面上形成的单分子膜之所以受到人们的特别关注,原因就是这种单分子膜的结构、性质与生物膜有某些相似之处。事实上,细胞膜的类脂双层镶嵌模型就是在广泛研究单分子膜的基础上提出和发展起来的。单分子膜在乳状液、泡沫、矿物浮选和洗涤去污等方面都具有重要的作用。在这些体系中,界面膜提供了强度合适的界壁,并能有选择性地允许某些物质透过。界面膜的这种特性在工业生产、环境保护和医药卫生等方面有着广阔的应用前景。

1-2 膜 的 定 义

膜究竟是什么样的物质?它的定义是什么?大家知道,自然界中经常存在着这样的物质体系,即在一种流体相(fluid phase)内或两种流体相之间,有一薄层凝聚相(condensed phase)物质把流体相分隔成两部分。这一薄层物质就是所谓的“薄膜”[或简称膜(membrane)]。显然,这里作为凝聚相的膜可以是固态的或液态的,而被膜分隔开的流体相物质可以是液态的或气态的。膜本身可以是均匀的一相,也可以是由两相以上的凝聚态物质所构成的复合体。然而,不论膜本身薄到何等程度,它都必定有两个界面,并由这两个界面分别与被其分隔于两侧的流体相物质相接触。

不过,需要指出的是,我们在这里向大家介绍的不是普通的塑料膜或皂泡膜,而是那些具有一定特殊性能(例如,半透、电学、光学、识别及反应等特性)的膜。比如,对于分离膜来说,可将它看作是两相之间的一个半渗透的隔层,该隔层按一定的方式截留分子。因此,两相间的膜必须起到隔层的作用,以阻止两相的直接接触。该隔层可以是固体、液体,甚至是气体的,半渗透性质主要是为了保证分离效果。如果所有物质不按比例均可通过,那就失去了分离的意义了。膜截留分子的方式有多种,例如,按分子孔径大小截留,按不同渗透系数截留,按电荷截留,按不同的溶解度截留,等等。

1-3 膜分离技术的发展简史

一般说来,膜在大自然中,特别是在生物体内是广泛而永恒存在的。可是人类对它的认识、利用、模拟,以至人工合成它的历史过程却是极其漫长而曲折的。人们对膜进行科学的研究则是近几十年来的事。

人类发现渗透现象,首先是由诺来特(Nollet)在1748年注意到的。他看到水会自发地扩散穿过猪膀胱而进入到酒精中。但是,直到1854年格雷厄姆(Graham)发现了透析现象(dialysis),人们才开始重视对膜的研究。最初许多生理学家所使用的主要是动物膜,一直到1864年,特劳贝(Traube)才成功地制成人类历史上第一片人造膜——亚铁氰化铜膜。后来普莱菲(preffer)用这种膜以蔗糖和其他溶液进行了细致的实验,他把渗透压同温度和溶质浓度联系起来。其后,范托夫(Vant'Hoff)以普莱菲的结论为出发点,建立了稀溶液的完整理论。在热力学上,主要由吉布斯(Gibbs)提供了认识渗透压现象和它与其他热力学性能关系的理论。这些工作在1920年就完成了。后来,由于没有可靠的膜可供采用,研究工作一度被迫停顿,直到证明了反渗透是咸水淡化的可行方法之后,才又掀起了研究高潮。

1953年初,里德在美国佛罗里达大学首先发现了醋酸纤维素具有良好的半透性,令人遗憾的是其透水率却非常小[在100大气压下为 $3 \times 10^{-5} \text{cm}^3 / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$],不能满足要求。与此同时,加利福尼亚大学的尤斯特(Yuster),洛布(Loeb)和索利拉金(Sourirajan)等对膜材料进行了广泛的筛选工作,结果也发现了醋酸纤维素具有特殊的半透性质。为改进醋酸纤维素的透水性能,他们采用过氯酸镁水溶液为添加剂,经过反复研究和试验,结果终于在1960年首次制成了世界上具有历史意义的高性能非对称的醋酸纤维素反渗透膜。其后又进一步取得了更多的可喜成果。其中重要的有索利拉金和古英丹(Gouindan)改进的醋酸纤维膜、洛布和曼吉钦(Manjikian)改进的醋酸纤维膜,曼吉钦等制备的乙酸-丁酸纤维膜,霍斯切米尔(Hoernschemyer)和索顿斯托尔(Saltonstall)等制备的醋酸纤维-三醋酸纤维混合膜,以及杜邦(Dupont)公司雷齐尔(Richer)等制备的改性尼龙和芳香聚酰胺膜等。随后,制膜技术不断机械化、自动化。膜的形式也从平板膜发展到管式膜及中空丝膜等。

如此,微滤、反渗透、超滤、透析及气体分离等膜分离技术都是在60—80年代相继得到迅速发展的。至于对液膜及渗透蒸发等膜分离技术的研究,则是十年前才开始的。

综上所述,膜分离技术的发展大致可分为三个阶段。

50年代为奠定基础的阶段,主要是进行膜分离科学的基础理论研究和膜分离技术的初期工业开发。

60年代和70年代为发展阶段,许多膜分离技术实现了工业化生产,并得到广泛应用。

80年代为发展深化阶段,主要是不断提高已实现工业化的膜分离技术水平,扩大应用范围。一些难度较大的膜分离技术的开发此时也取得了重大进展,并开拓出了新的膜分离技术。

1-4 功能高分子膜的分类

随着人类对膜及其性能的认识的逐步深化，我们现已知道的膜有各式各样的类型，其中的功能膜材料已日益引起人们的关注。

所谓功能膜是指膜本身具有一定的特异性能（例如具有分离、识别、反应、能量转换、导电、发光等性能），因而使它有可能被开发成具有独特用途的膜。近二三十年来，已被优选的具有代表性的功能膜，按其功能进行分类大体如表 1-1 所示。表中括弧内表

表 1-1 功能高分子膜的功能

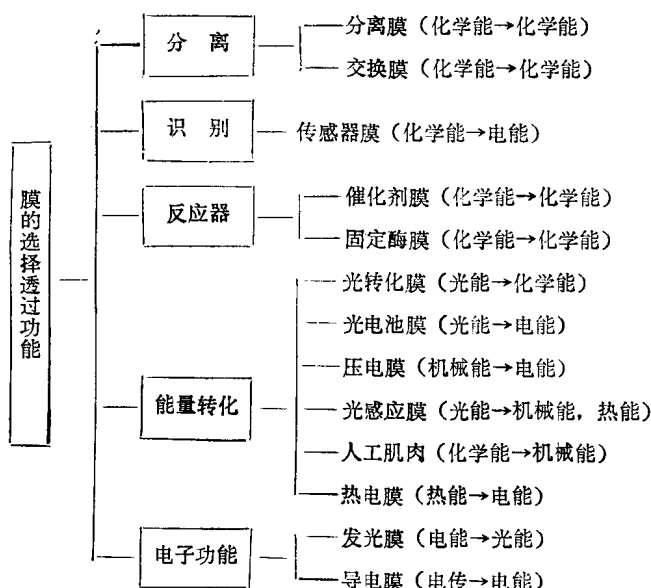


表 1-2 按推动力功能高分子膜的分类

推动力	膜系统	膜过程	功能膜	膜形态		
				均质	非对称	复合
压力差		反渗透	反渗透膜		○	○
		超过滤	超过滤膜		○	○
		微滤	微孔滤膜	○	○	
		气体分离	气体分离膜	○	○	○
电位差		电渗析	离子交换膜	○		
浓度差		渗析	非对称或离子交换膜		○	
浓度差		控制释放	微多孔膜	○		
浓度差 (分压差)		渗透蒸发	渗透蒸发膜	○	○	○
浓度差+化学反应		液膜	乳化或支撑液膜	○		
浓度差+化学反应		膜传感器	微孔或酶等固定化膜	○		
化学反应		反应膜	催化剂等固定化膜	○		
温度差		膜蒸馏	微多孔膜	○		

示能量转换。

由表 1-1 可见，由不同高分子材料所制成的膜，其功能特征千差万别。无数实验结果表明，功能高分子膜的各种奇异功能同各类高分子的结构因子（如化学结构因子、物理结构因子及微相分离结构因子等）有着密切的内在联系。因此，研究高分子膜的结构与各种功能的关系，可为高分子膜材料的分子设计与合成研究提供理论依据。

功能膜的分类方法一般有以下儿种：

(1) 按分离机理进行分类。

1) 具有所需孔径的膜。膜的孔径大小虽有差别，但分离原理与筛网、滤纸的分离相同。

2) 无孔膜。分离原理类似于萃取。由于被分离物与高分子膜的亲合性强，进入膜分子间隙的粒子经溶解—扩散后，可从膜的另一侧被分离出来。

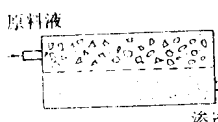
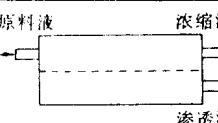
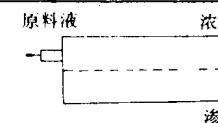
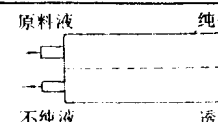
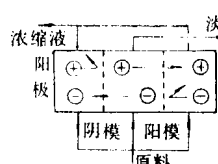
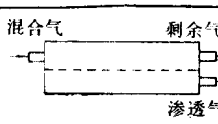
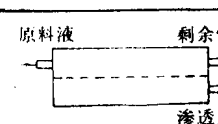
表 1-3 分离膜根据不同孔径进行分类

10 ⁻⁸ cm		10 ⁻⁷ cm		10 ⁻⁶ cm		10 ⁻⁵ cm		10 ⁻⁴ cm		10 ⁻³ cm		孔径			
0.1	0.2	0.5	1nm	2	5	10	20	50	100	200	500	1μm	2	5	10 μm
H ₂ (2.3Å) O ₂ (2.9Å) CO(3.1Å) H ₂ O(3.4Å)		Cl ⁻ OH ⁻ H ⁺ Na ⁺ Ca ²⁺	蔗糖	卵清蛋白	血红蛋白	各种病毒			胶体二氧化硅	油乳液体	乳液		大肠菌	葡萄状球菌	分离对象
气体分离 液体分离		反渗透			超滤				微滤				膜分离法		
(渗透蒸发)		透析膜												分离膜的种 类	
				超滤膜		精 滤 膜									
气体分离膜		反渗透膜								预涂过滤器					
		离子交换膜										一般过滤			
用电子显微镜可观察到的范围															
用超倍显微镜可观察的范围															
用光学显微镜可观察的范围															

3) 具有反应性官能团作用的膜。例如离子交换膜，当电荷相同时就互相排斥。

(2) 按分离的推动力进行分类。表 1-2, 1-3 为按照不同的推动力、孔径对功能高分子膜所进行的分类。

表 1-4 各种膜分离过程一览表

过程	概念示意	膜类型	推动力	透过物质	被截留物质
微过滤		多孔膜 非对称膜	压力差 (0.1—2 kg/cm ²)	水, 溶剂 溶解成分, 胶体	悬浮物质(胶体, 细菌)各种微粒
超过滤		非对称膜	压力差 (1—10 kg/cm ²)	溶剂和离子及 小分子(分子量 <1 000)	生物制品、胶体及 各类大分子(分子量 1 000—300 000)
反渗透		非对称膜 复合膜 动力膜	压力差 (10—70 kg/cm ²)	水	全部悬浮物、溶 解物和胶体
透析		非对称膜 离子 交换膜	浓度差	离子、低分子量 有机质、酸、碱	分子量大于 1 000 的溶解物和悬浮物
电渗析		离子交 换 膜	电位差	离子	所有非解离和大分 子颗粒
气体分离		均质膜 复合膜	压力差 (1—150 atm)	气体	不易和不可渗透气 体
渗透气化		均质膜 复合膜	浓度差	蒸气	液体

(3) 按膜的结构形态进行分类。可分成一种为普通形状的平面膜，也可捲成螺旋型的袋状体；另一种是空心丝膜。空心丝膜可以得到更大的表面积。

对于膜，不仅要求其能达到分离目的，还要求其能通过大量溶液。因此，除了符合设计要求的孔径尺寸或分离性能外，还必须尽量减小膜的厚度。膜厚度减小后需要有载体支撑。形成膜的高聚物与多孔质载体可以是同一种高聚物，也可以是不同的高聚物（即复合体）。这种有载体支撑的高分子膜称为皮层膜。皮层膜可分为孔径随膜厚度变化的和均一（不变化）的两种，前者称为非对称膜，后者称为对称膜。

综上所述，我们将各种膜分离过程的基本概念及特征列于表 1-4。

鉴于功能高分子膜在分离工程中应用最广，影响最大，为此，这方面内容将作为本书论述的重点。

参 考 文 献

- [1] 郑载兴, 1981, 大力开展膜分离科学技术的理论研究和推广应用——代发刊词, 膜分离科学与技术, (1), 1—5.
- [2] 王学松, 1988, 反渗透膜技术及其在化工和环保中的应用, 化学工业出版社.
- [3] 许嘉敏, 1988, 功能性高分子膜材料, 高分子材料科学与工程, (4), 7—14.
- [4] 里查德·诺贝尔著, 宋荣华译, 1988, 膜分离综述, 净水技术, (1), 40—45.
- [5] 钱锦棠, 1989, 膜分离工程发展及建议, 化工新型材料, 17, (9), 1—8.
- [6] 中垣正幸, 清水 博, 1991, 膜处理技术大系 (上卷), フジ・テクノシステム, 東京.