

"十一五"国家重点图书



高等学校化工类专业规划教材

膜科学技术 过程与原理

杨座国 / 编著

Processes and Principles of Membrane Science and Technology



华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

3

"十一五"国家重点图书



高等学校化工类专业规划教材

膜科学技术 过程与原理

杨座国 / 编著

Processes and Principles of Membrane Science and Technology



华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

膜科学技术过程与原理/杨座国编著. —上海: 华东理工大学出版社, 2009. 8

高等学校化工类专业规划教材

ISBN 978-7-5628-2486-2

I. 膜… II. 杨… III. 膜—技术—高等学校—教材
IV. TQ028.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 096965 号

“十一五”国家重点图书

高等学校化工类专业规划教材

膜科学技术过程与原理

编 著 / 杨座国

责任编辑 / 陈新征

责任校对 / 李 晔

出版发行 / 华东理工大学出版社

地址: 上海市梅陇路 130 号, 200237

电话: (021)64250306(营销部) 64252253(编辑部)

传真: (021)64252707

网址: www.hdlgpress.com.cn

印 刷 / 常熟华顺印刷有限公司

开 本 / 787 mm × 1092 mm 1/16

印 张 / 20.25

字 数 / 536 千字

版 次 / 2009 年 8 月第 1 版

印 次 / 2009 年 8 月第 1 次

印 数 / 1-3 000 册

书 号 / ISBN 978-7-5628-2486-2/TQ · 145

定 价 / 38.00 元

(本书如有印装质量问题, 请到出版社营销部调换。)

前 言

膜分离技术集成了高分子材料科学、物理化学、有机合成、分离工程、机械设备等多学科内容。膜技术的发展得到了世界各国政府和科学家的高度重视。美国官方文件在提到膜分离技术的重要性时说,“18 世纪电器改变了整个工业过程,而 21 世纪膜技术改变了整个世界”。国际学术界一致认为:“谁掌握了膜技术,谁就掌握了化工的未来”。有关机构也指出:膜技术与光纤、超导等技术将成为主导未来工业的六大高新技术之一,也将是 21 世纪十大高科技产业之一。可见,发展膜分离技术对于经济发展和学科建设具有重要而深远的意义。

膜分离技术具有操作方便、设备紧凑、工作环境安全、节能等优点,和其他传统分离技术相比,膜分离技术作为分离、浓缩、提纯及净化技术,具有无可比拟的优势,特别是它在节能、环境保护以及水资源的再生利用方面的突出表现,使人们对膜分离技术的发展前景刮目相看。膜分离技术已在海水淡化、污水处理、石油化工、节能技术、清洁技术、生化、医药、轻工、食品、医疗卫生、环保、电子、纺织、冶金、能源、航天、重工等行业领域得到了广泛应用。

据 Mcilvaine 公司最新出版的《世界反渗透、超滤和微滤市场》研究,全球错流膜设备和膜的销售额从 2004 年的 63 亿美元增长至 2007 年的 84 亿美元,而全世界膜组件成套设备和膜工程的市场则已达到数百亿美元,而且每年还以 13% 的幅度递增,其中仅用于海水淡化的增长就占总额的三分之一。膜技术不仅自身形成了每年约百亿美元的产值,而且有力地促进了社会、经济及科技的发展。就膜市场的构成而言,欧、美、日等发达国家和地区在膜分离领域占有领先地位。

我国从事膜材料、膜组件、膜与水处理工程的企业大约有 600 多家,其中生产型企业 10 家左右,具有一定规模的工程公司 20 多家,以民营企业和股份制企业居多。与国外膜工业相比,我国膜工业呈现出技术水平低、膜品种少、产业规模小、应用领域窄、行业管理薄弱等缺点。目前,国内膜市场主要被美国陶氏化学、科氏、海得能、日东电工、日本旭化成以及日本东丽等国外公司产品所瓜分。2005 年国内膜市场高达 100 亿元,但国内企业仅占到市场份额的 2% 左右,估计 2009 年这一市场可以达到 140 亿元。反渗透和纳滤占膜市场的半壁江山,其次是超滤和微滤膜。目前,国内市场超滤膜、微滤膜已经可以逐渐替代进口,主要用于三大领域:海水淡化、污水再生利用以及净化水。

根据膜分离过程推动力的不同,可将膜分离过程分为:压力差驱动膜过程、浓度差驱动膜过程、电场驱动膜过程以及特殊膜过程。本书就是根据推动力的不同,对主要膜过程及其原理进行阐述,主要为:微滤(MF)、超滤(UF)、纳滤(NF)、反渗透(RO)、离子交换膜过程、电渗析(ED)、渗析(D)、液膜分离、气体膜分离(GS)、渗透汽化(PV)、膜反应器、亲和膜分离、智能膜、膜萃取、膜蒸馏和膜吸收等。

由于编者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正(cbsch@ecust.edu.cn)。

编 者
2009 年 3 月

目 录

第1章 绪论	1
本章要求	1
1.1 引言	1
1.2 膜的定义、膜分离的概念	3
1.3 膜的分类	6
1.4 膜分离技术的发展历史	9
习题	12
参考文献	12
第2章 膜制备技术	13
本章要求	13
2.1 引言	13
2.2 膜材料	13
2.3 膜的制备方法	20
2.4 高分子膜的制备	21
2.5 无机膜的制备	36
2.6 膜性能指标	38
2.7 膜组件	42
2.8 膜污染	46
习题	47
参考文献	48
第3章 微滤	49
本章要求	49
3.1 概述	49
3.2 微滤分离机理	50
3.3 微滤过程的特点	50
3.4 微滤膜的形态结构	50
3.5 微滤膜材料	51
3.6 高分子微滤膜的制备	52
3.7 无机微滤膜的制备	54
3.8 微滤过程传质模型	55
3.9 微滤过程设计	57
3.10 微滤膜性能指标	61
3.11 微滤膜污染	62
3.12 微滤技术的用途	62
习题	67

参考文献	67
第4章 超滤	68
本章要求	68
4.1 概述	68
4.2 超滤分离机理	69
4.3 超滤过程的特点	69
4.4 超滤膜的形态结构	69
4.5 超滤膜材料	70
4.6 超滤膜的制备	70
4.7 超滤过程传质模型	71
4.8 超滤过程设计	74
4.9 超滤膜性能指标	82
4.10 超滤膜污染	84
4.11 超滤技术的用途	85
习题	89
参考文献	90
第5章 纳滤	91
本章要求	91
5.1 概述	91
5.2 纳滤过程的特点	91
5.3 纳滤过程的分离特性	92
5.4 纳滤膜的分类	94
5.5 纳滤分离机理	95
5.6 纳滤膜的形态结构	97
5.7 纳滤膜材料	98
5.8 纳滤膜的制备	99
5.9 纳滤过程设计	102
5.10 纳滤膜性能指标	103
5.11 纳滤膜污染及其防治	105
5.12 纳滤技术的用途	105
习题	110
参考文献	110
第6章 反渗透	112
本章要求	112
6.1 概述	112
6.2 反渗透过程的基本原理	113
6.3 反渗透过程的特点	114
6.4 反渗透过程的分离特性	115
6.5 反渗透过程数学模型	115
6.6 反渗透膜的分类	121
6.7 反渗透膜材料	122

6.8 反渗透膜的制备	124
6.9 反渗透膜性能指标	125
6.10 反渗透过程设计	126
6.11 反渗透膜污染及其防治	129
6.12 反渗透技术的用途	132
习题	137
参考文献	137
第7章 离子交换膜	138
本章要求	138
7.1 离子交换膜的发展历史	138
7.2 离子交换膜	138
7.3 离子交换膜的作用机理	139
7.4 离子交换膜的分类	140
7.5 离子交换膜的分离特点	141
7.6 离子交换膜的选择性透过理论	142
7.7 离子交换膜材料	142
7.8 离子交换膜的制备	143
7.9 离子交换膜的主要性能指标	147
7.10 离子交换膜的污染及防治	149
7.11 离子交换膜的应用	151
习题	160
参考文献	161
第8章 电渗析	162
本章要求	162
8.1 绪论	162
8.2 电渗析的基本原理	163
8.3 电渗析器	164
8.4 电渗析器的组装方式	165
8.5 电渗析器的操作方式	165
8.6 电渗析的种类	166
8.7 电渗析过程的传质	168
8.8 电渗析过程的极化现象	169
8.9 电渗析器工艺参数	170
8.10 电渗析的应用	172
习题	173
参考文献	174
第9章 渗析	175
本章要求	175
9.1 绪论	175
9.2 渗析的基本原理	176
9.3 渗析过程的分类	176

9.4 渗析过程的特点	179
9.5 渗析膜	179
9.6 渗析器	180
9.7 渗析的操作方式	181
9.8 渗析膜的性能指标	181
9.9 渗析过程的应用	183
习题	185
参考文献	185
第 10 章 液膜分离	187
本章要求	187
10.1 概述	187
10.2 液膜分离	187
10.3 液膜分离的特点	188
10.4 液膜的组成	189
10.5 液膜分离的分类	190
10.6 液膜分离机理	191
10.7 液膜的制备	194
10.8 液膜分离的工艺过程	194
10.9 液膜分离的影响因素	196
10.10 液膜分离的应用	198
习题	202
参考文献	202
第 11 章 气体分离膜	203
本章要求	203
11.1 概述	203
11.2 气体膜分离	203
11.3 气体膜分离的基本原理	204
11.4 气体分离膜的分类	209
11.5 气体分离膜材料	210
11.6 气体分离膜的制备	211
11.7 气体分离膜性能评价指标	213
11.8 气体分离膜组件	215
11.9 气体膜分离过程工艺	215
11.10 气体膜分离过程的应用	217
习题	222
参考文献	222
第 12 章 渗透汽化	223
本章要求	223
12.1 概述	223
12.2 渗透汽化过程	224
12.3 渗透汽化过程的特点	224

12.4	渗透汽化过程的操作方式	224
12.5	渗透汽化装置	225
12.6	渗透汽化的传质机理	227
12.7	影响渗透汽化过程的因素	229
12.8	温差极化	230
12.9	渗透汽化膜	230
12.10	渗透汽化膜组件	232
12.11	渗透汽化膜的性能指标	233
12.12	渗透汽化的应用	233
	习题	238
	参考文献	239
第 13 章	膜反应器	240
	本章要求	240
13.1	膜反应器	240
13.2	膜反应器的分类	240
13.3	膜反应器的特点	242
13.4	膜反应器中膜的功能	242
13.5	膜催化反应器	245
13.6	膜化学反应器	248
13.7	酶膜反应器	249
13.8	无机膜反应器	252
13.9	膜生物反应器	256
	习题	262
	参考文献	263
第 14 章	亲和膜分离	264
	本章要求	264
14.1	概述	264
14.2	亲和膜分离过程	264
14.3	亲和膜分离过程的特点	266
14.4	亲和膜分离机理	267
14.5	亲和膜的制备	268
14.6	亲和膜分离装置及组件	271
14.7	亲和膜分离的应用	272
	习题	273
	参考文献	273
第 15 章	智能膜	274
	本章要求	274
15.1	概述	274
15.2	智能膜	275
15.3	智能膜的分类	275
15.4	温敏膜	276

15.5	pH 响应型智能膜	278
15.6	光敏膜	280
15.7	电场敏感膜	281
15.8	气敏膜	284
15.9	湿敏膜	285
15.10	物质敏感型分离膜	286
15.11	智能膜的表征	287
15.12	膜传感器	287
15.13	膜控制释放	292
	习题	296
	参考文献	296
第 16 章	膜耦合技术	298
	本章要求	298
16.1	概述	298
16.2	膜接触器	298
16.3	膜萃取	300
16.4	膜蒸馏	304
16.5	膜吸收	308
16.6	膜结晶	311
16.7	渗透汽化-反应耦合膜过程	311
	习题	312
	参考文献	312

第 1 章 绪 论



本章要求

1. 了解并理解膜分离技术的特点。
2. 掌握膜、膜分离的定义。
3. 掌握膜的分离机理。
4. 了解膜内的传质形式。
5. 掌握膜及膜分离过程分类方法。
6. 了解膜分离技术的发展历史。

1.1 引 言

1.1.1 膜分离技术的重要性

膜分离技术是一门系统科学,它集成了高分子材料科学、物理化学、有机合成、化工分离、生物化工、化工机械等多个学科的科学知识,是一门多学科交叉的科学。

膜分离技术作为分离、浓缩、提纯及净化技术,具有分离效率高、操作方便、设备紧凑、工作环境安全、节能等优点,和其他传统分离技术相比,具有无可比拟的优势。特别是它在节能、环境保护以及水资源的再生利用方面的突出表现,使人们对膜技术的发展前景刮目相看。

膜分离技术的发展得到了世界各国政府和科学家的高度重视。1987 年在日本东京召开的国际膜与膜过程会议上,科学家曾将“21 世纪的多数工业中膜过程所扮演的战略角色”列为专题进行深入讨论,认为膜技术将是 20 世纪末到 21 世纪中期最有发展前途的高新技术之一。有关机构指出:膜技术与光纤、超导等技术将成为主导未来工业的六大高新技术之一。美国官方文件在提到膜分离技术的重要性时说,“18 世纪电器改变了整个工业过程,而 20 世纪膜技术改变了整个世界。”著名的美籍华裔科学家黎念之也曾提出:“谁掌握了膜技术,谁就掌握了化学工业的未来”。

膜分离技术已经在海水淡化、污水处理、石油化工、节能技术、清洁技术、生化、医药、食品、医疗卫生、环保、电子、纺织、冶金、能源、航天等行业领域得到了广泛的应用。市政和工业用膜生物反应器也呈现出快速增长的态势,平均每年增长 15% 以上。

世界膜市场的快速发展,不仅自身形成了每年约百亿美元的产值,而且有力地促进了社会、经济及科技的发展。可见,发展膜分离技术对于社会、经济、科学发展都具有重要而深远的意义。

1.1.2 膜分离技术与传统分离技术的区别

物质的分离不是自发进行,必须添加一定的分离剂,依靠特定的分离设备才能进行。一般单个分离过程可用图 1-1 表示。分离剂可分为两类:一类为能量添加剂,如热、压力、电、磁、离心、辐射等;另一类为物质添加剂,包括过滤介质、吸收剂、吸附剂、表面活性剂、离子交换树脂、液膜及固膜材料等。

工业常用的分离过程(图 1-2)可以分为机械分离过程和传质分离过程两大类。传质分离过程又可分为平衡分离过程和速率控制分离过程两类,平衡分离过程包



图 1-1 分离系统示意图

括能量(E)分离过程、物质(M)分离过程、能量物质(E+M)分离过程。

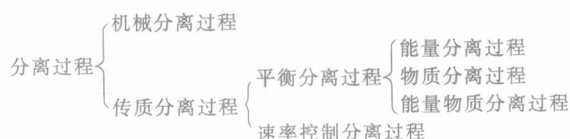


图 1-2 分离过程的分类

各种分离过程的基本原理如下所述。

- (1) 机械分离过程 根据物体颗粒大小不同而实现分离,如筛分和过滤等其他分离过程。
- (2) 重力和离心分离 根据物体密度不同而实现分离,如重力沉降、旋风分离。
- (3) 速率控制分离过程 根据物质分子在外力作用下迁移速率不同而实现分离,如膜分离、电泳。

(4) 平衡分离过程 体系处于平衡状态时不同相态(气液、气固、液固等)中浓度不同而实现分离,如蒸馏、吸收、萃取、吸附、结晶等。

分离过程具体分类如表 1-1 所示。

表 1-1 分离过程分类

过 程	原 料	分 离 剂	产 品	分 离 原 理
机械分离过程	过滤	过滤介质	固+液	固体颗粒大小
	沉降	重力	固+液	密度差
	离心分离	离心力	固+液	密度差
	旋风分离	惯性力	气+固或液	密度差
	静电除尘	电场	气+固	使细颗粒带电
平衡分离过程	蒸发	热	液+蒸气	蒸气压不同
	蒸馏	热	液+蒸气	蒸气压不同
	吸收	不挥发性液体	液+气	溶解度不同
	萃取	不互溶液体	液+液	溶解度不同
	结晶	冷或热	液+固	利用过饱和度
	离子交换	固体树脂	液+固	质量作用定律
	吸附	固体吸附剂	固+液或气	吸附差异
	干燥	热	固+蒸气	湿分蒸发
	浸取	溶剂	固+液	溶解度
	泡沫分离	表面活性剂	液+液	表面吸附
速率控制分离过程	热扩散	温度梯度	气+液	热扩散速率不同
	电泳	电场	液	胶体的迁移速率不同
	微滤	压差+膜	悬浮物、细菌等+液	筛分作用
	超滤	压差+膜	蛋白质、胶体等+液	筛分作用
	纳滤	压差+膜	二价盐、糖等+液	筛分+溶解扩散机理
	反渗透	压差+膜	小分子、盐+溶液	溶解扩散机理
	气体分离	压力差	气体	溶解扩散机理
	电渗析	离子交换膜	盐+液体	离子交换膜选择渗透
	渗析	浓度差	含盐或溶质的液体	扩散速度不同
	渗透汽化	分压差	气体或液体	溶解扩散机理
	膜蒸馏	温度差	气体	气液平衡
	液膜分离	电解质溶液	液体	促进反应+浓差扩散
	膜接触器	浓度差	液体或扩散	分配系数

膜分离过程是一种速率控制分离过程,主要依据物质分子在推动力的作用下,不同组分在膜中迁移速度的不同而实现分离,不同于传统的平衡分离过程。膜分离技术与传统平衡分离技术的对比如表 1-2 所示。

表 1-2 膜分离技术与传统平衡分离技术的对比

分离过程	原料	分离原理	分离器件	分离介质
传统平衡分离过程 (如精馏、吸收、萃取等)	混合物	依据处于热力学平衡时两相组成不相等的原理,在处理分离过程时,常简化成多个平衡理论级来处理——平衡级理论	塔器等	能量、溶剂或吸附剂等添加剂
膜分离过程 (如微滤、超滤、反渗透等)	混合物	利用原料侧各组分透过膜的扩散速率的差异进行混合物的分离;分离效果由各组分通过膜的速率快慢来决定——速率控制理论	具有选择性透过的膜	借助推动力(如压差、温差、浓度差、电位差)

1.2 膜的定義、膜分离的概念

1.2.1 膜的定義

膜是指两相之间具有选择性透过能力的隔层,它可与一种或两种相邻流体的相之间构成不连续区并影响流体中各组分的透过速度。因此,膜可以看作是一种具有分离功能的介质。膜的形态可以是均相的或非均相的、对称的或非对称的、固体的或液体的,膜也可以是荷电的。膜的厚度往往从几微米到几毫米。

1.2.2 膜分离的定义

借助膜的选择性透过性能,在推动力(压力差 Δp 、浓度差 Δc 、温度差 ΔT 、电位差 $\Delta \varphi$ 等)的作用下,使混合物中的一种或多种组分透过膜,达到对混合物的分离并实现产物的提取、纯化、浓缩、分级或富集等目的的一种新型分离过程,称为膜分离。不同于传统的精馏、蒸发、结晶等平衡分离过程,膜分离过程是一种速率控制分离过程。膜分离过程的示意图如图 1-3 所示。

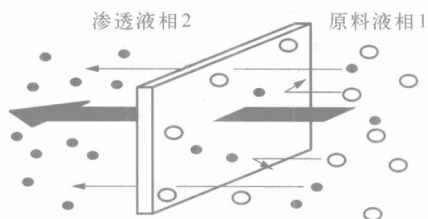


图 1-3 膜分离过程示意图

膜分离过程主要有:微滤、超滤、纳滤、反渗透、离子交换膜、电渗析、渗析、气体分离、液膜分离、渗透汽化、膜电解、双极膜、亲和膜分离、智能膜、膜控制释放、光电转化膜、氢燃料电池用化学交换膜、储氢膜、分子印迹膜、膜反应器等。

1.2.3 膜分离过程

微滤、超滤、纳滤和反渗透都是以压力差作为推动力的膜分离过程,在膜两侧施加一定的压力差作为推动力时,可使一部分溶剂及小于膜孔径的组分透过膜,而大于膜孔径的微粒、大分子、盐等被膜截留下来,从而达到分离的目的。一般微滤膜的孔径范围为 $0.02 \sim 10 \mu\text{m}$,所施加的压力差为 $0.01 \sim 0.2 \text{ MPa}$;超滤膜膜孔径为 $1 \sim 20 \text{ nm}$,所施加的压力差为 $0.1 \sim 1.0 \text{ MPa}$;纳滤孔径范围介于反渗透和超滤之间,孔径为 $0.5 \sim 1.0 \text{ nm}$,操作压力为 $0.5 \sim 1.5 \text{ MPa}$;反渗透常被用于截留溶液中的盐分及小分子物质,孔径在 0.3 nm 左右,所施加的压力差为 $1.0 \sim 10 \text{ MPa}$ 。

电渗析是在电场力的推动下,水溶液中的离子定向迁移并通过离子交换膜达到去除水中荷电离子的一种膜过程,在苦咸水脱盐、海水淡化等方面已得到大规模应用,其中双极膜在有机酸的分离与纯化中已经得到应用。膜电解的基本原理与电渗析基本相同,但是有电极反应发生,目前的主要应用是全氟磺酸离子膜用于食盐水的电解生产氢氧化钠及氯气等。

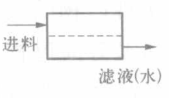
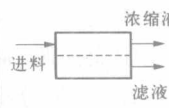
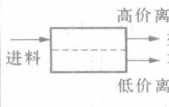
气体分离膜是根据混合气体中各组分在压差推动力下透过膜的渗透速率不同实现混合气体分离的一种膜过程。目前也已大规模用于空气中氧、氮的分离,合成氨厂弛放气中氮、氢的分离以及天然气中二氧化碳、甲烷的分离等。

渗透汽化是利用选择性渗透膜,优先渗透待分离混合物中某组分并在膜下游汽化去除,从而达到混合物的分离与纯化的一种新型膜分离技术。渗透汽化为液态进料,过程中有相变发生。渗透汽化主要用于有机物脱水、水中少量有机物的脱除以及有机混合物的分离等,其中恒沸物的分离被认为是最有希望取代传统精馏技术的膜过程,目前有机溶剂脱水及水中有有机物脱除的渗透汽化过程已实现工业化。

膜蒸馏是膜技术与蒸发过程相结合的膜分离过程。膜蒸馏是1980年代发展起来的一种新型膜分离技术,以其能常压低温操作、可利用废热、适合于小规模淡化和浓缩等一系列优点,被用于海水淡化、超纯水的制备、非挥发性物质水溶液的浓缩和结晶、挥发性物质水溶液的浓缩和分离等方面,有望成为一种廉价高效的分离手段。其所用的膜为不被待处理的溶液润湿的疏水性微孔膜。

除了上述工业化的膜分离过程以外,还有多种正在开发的新型膜分离过程,如亲和膜分离、智能膜、膜控制释放、光电转化膜、氢燃料电池用化学交换膜、储氢膜、分子印迹膜以及以膜为关键技术的集成分离过程,包括膜与吸收、膜与萃取、膜与蒸馏、膜与反应等耦合的集成分离过程。表1-3为一些主要的膜分离过程及其分离原理。

表 1-3 膜分离过程及其分离原理

过 程	膜的 功能	透过组分	截留组分	透过组分 在料液中 含量	推动力	分离原理	膜类型	进料和 透过物 物态	简 图
微滤 (MF)	溶液或 气体除 菌、脱微 粒	溶液或 气体	0.02~ 10 μm 细 菌或微粒	大量溶 剂、少量 小分子溶 质和大分 子溶质	压力差 0.1 MPa	筛分	多孔膜	液体或 气体	
超滤 (UF)	溶液脱 大分子蛋 白质等、大 分子溶液 脱小分子、 大分子分 级	小分子 溶液	1~ 20 nm 大 分子溶 质,如蛋 白质等	大量溶 剂、一定 量小分子 溶质	压力差 0.1~1 MPa	筛分	非对称 膜	液体	
纳滤 (NF)	溶液脱 高价盐离 子,相对 分子质量 200以上 分子浓缩	溶剂, 一价盐离 子、相对 分子质量 200以下 溶质	1 nm 以 上溶质, 如糖类	大量溶 剂,一价 盐离子, 相对分子 质量200 以下分子	压力差 0.3~1.5 MPa	筛分或 Donnan 效 应	复合膜 或荷电膜	液体	

续 表

过 程	膜的 功能	透过 组分	截留组分	透过组分 在料液中 含量	推动力	分离 原理	膜类型	进料和 透过物 物态	简 图
反渗透 (RO)	溶剂脱 溶质, 含 小分子溶 质溶液的 浓缩	溶剂	0.1 ~ 1 nm 以上 溶质, 如 盐类	大量溶 剂	压力差 1~10 MPa	优 先 吸附, 毛 细孔流, 溶解-扩 散	非 对 称 膜 或 复合膜	液体	
电渗析 (ED)	溶液脱 离子, 小 离子溶液 的浓缩, 离子的分 级	小离 子组分	同名离 子, 大离 子和水	少量离 子组分少 量水	电化学 势, 电渗 透	反 离 子 经 离 子 交 换 膜 的 迁 移	离 子 交换膜	液体	
渗析 (D)	大分子 溶质溶液 脱小分子, 小分子溶 质溶液脱 大分子	小分 子溶质或 较小的溶 质	大 于 0.02 μm 溶质的截 留, 血透 中大于 0.005 μm 溶质的截 留	较小组 分或溶质	浓度差	筛分, 微孔膜 内的受 阻扩散	非 对 称 膜 或 离子交 换膜	液体	
气体分离 (GS)	气体混 合物分 离、富集 或特殊组 分的脱除	气 体, 较 小组分 或膜中 易溶组 分	较大组 分(除非 膜中的溶 解度大)	两者都 有	压力差 1~10 MPa 浓度差 (分压差)	溶解- 扩散	均 质 膜、复 合膜、 非对 称膜 多孔 膜	气体	
渗透汽化 (PVAP)	挥发性 液体混合 物分离	膜内 易溶解 组分或 易挥发 组分	不易溶 解组分 或较大 难挥发 组分	少量组 分	分压差 浓度差	溶解- 扩散	均 质 膜、复 合膜、 非对 称膜	料 液 为液体, 透 过 物 为气态	
乳液液膜 (ELM) 促进传递 (ET)	液体混 合物或气 体混合物 分离、富 集或特殊 组分的脱 除	在液 膜相中 溶解度 高的组 分或能 反应的 组分	在液膜 相中难 溶解的 组分	少量组 分的有机 混合物分 离中, 也 可以是 大量的组 分	浓度差 pH 差	促 进 传递 溶解- 扩散	液膜	通 常 为液体, 也 可 以 为气体	

1.2.4 膜的分离机理

1) 筛分机理

截留比膜孔径大或与膜孔径相当的微粒。这一作用机理主要针对具有孔的膜的分离。

2) 荷电机理

主要指孔径以外的影响因素, 包括吸附与电性能等。这一作用机理主要针对膜中存在固定电荷的荷电型膜的分离。

3) 溶解-扩散机理

膜的选择性吸附和选择性扩散共同作用机理。这一作用机理主要针对致密膜的分离。

1.2.5 膜内的传质方式

膜内有三种基本的传质方式。

1) 被动传递

膜内的传质必须有化学势梯度作为推动力。这种推动力可以是膜两侧的压力差、浓度差、温度差或电化学势差。如反渗透、纳滤、超滤、微滤、气体分离等膜分离过程都属于被动传质。

2) 促进传递(facilitated transportation)

通过膜相的组分仍以化学势梯度作为推动力,但是各组分是由特定的载体带入膜中,由于载体的介入,促进了组分传递速率和分离度,因此促进传递是一种高选择性的被动传递。如液膜中的传质方式主要是促进传递方式。

3) 主动传递

与前两者不同,主动传递过程中各组分可以逆化学势梯度而传递,其推动力由膜内某种化学反应提供。这类现象主要存在于生命膜中,也可以模仿主动传递将其用于实际分离过程中,如逆向耦合液膜传递。

1.3 膜的分类

由于膜材料种类非常丰富,制备方法多种多样,用途十分广泛,因此膜的分类方法也有多种。常用的分类方法主要有:按膜凝聚态分类、按膜结构分类、按膜材料分类、按膜的作用机理分类、按膜的用途分类、按膜的功能分类及按膜分离过程的推动力分类等。





(1) 固膜 以固态物质为分离介质制成的膜,也叫作固态膜或固体膜。固膜是最常见的一类膜,目前实用的膜分离过程主要采用的就是固膜。

(2) 气膜 以气态物质为分离介质制成的膜,也叫作气相膜。它通常以充斥于疏水多孔聚合物膜孔隙中的气体为分离介质构成,当用这种载有气体的膜将两种水溶液隔开时,气膜可使一种液体中含有的挥发性溶质迅速扩散通过膜,然后用另一种溶液进行富集或分离。