



面向 21 世纪 课程教材

新型分离技术

陈欢林 主编



化学工业出版社
教材出版中心

面向 21 世纪课程教材

新型分离技术

陈欢林 主编



化学工业出版社
教材出版中心

· 北京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

新型分离技术/陈欢林主编. —北京: 化学工业出版社, 2005. 4

面向 21 世纪课程教材

ISBN 7-5025-6853-0

I. 新… II. 陈… III. 分离-化工过程-高等学校-教材 IV. TQ028

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 027643 号

面向 21 世纪课程教材

新型分离技术

陈欢林 主编

责任编辑: 何 丽 骆文敏

文字编辑: 林 媛

责任校对: 陈 静 宋 玮

封面设计: 郑小红

*

化学工业出版社
教材出版中心

(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
北京市昌平振南印刷厂印刷
三河市东柳装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 24¼ 字数 594 千字

2005 年 7 月第 1 版 2005 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6853-0/G · 1751

定 价: 38.00 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

五年前,在教育部《化工类专业人才培养方案及教学内容体系改革研究与实践》项目组成都会议临近期间,我的老师黄仲九、王尚弟先生热心、真诚地鼓励我编写一本新型分离技术。在他们的再三催促下,我们较为仓促地在原第二版教材(浙江大学出版)基础上,整理了本书的编写提纲与教材大纲(初稿),由二位先生带去成都会议讨论。由于编写提纲不细,又未提交样章等原因,经再次修改后,在次年的大连会议上,我们的教材正式列入了项目的编写计划。

刘莱娥教授和我早在20年前就为化学工程、生物化工、环境化工、高分子化工等工科类本科生开出新型分离技术的课程,并于1992年正式在浙江大学出版社出版了《新型分离技术基础》教材,1999年再版。对于编写教材的辛酸苦辣早已有深切的体会,对于正在发展中的新型分离技术的教材编写,尤为与基础课教材不同,必须完善相对已成熟的、并不断充实新发展的技术,工作量极大。在校、院教学部门领导的支持下,通过近六年来的教学积累和编写,今天终于成稿,如释重负,顿觉一身轻松。

基于前两版教材基础,新版充分考虑到与过程工程原理(原称化工原理)课程教学内容的联系与衔接,合理调整了原版不适应教学规律的框架与结构,适当增添了正在发展并已取得共识的新概念、新技术,适量补充了日趋成熟且实用的新工艺。例如将各类膜接触器分别列入与其密切相关的精馏、吸收、萃取与吸附等章节中;在平衡级分离、传质分离的基础上,又在某些章节中增添了有关反应分离的概念;并在最后补充了分离-分离、反应-分离耦合与集成技术,其目的在于使系统在最佳条件下运行,进一步提高工艺过程的合理性、有效性与经济性。

本书分别由陈欢林(第1章、第2章第1~4节、第3章、第5章)、刘莱娥(第6章第4、5节,第9章,第10章第1、2节)、李昌圣(第2章第5节)、孙海翔(第10章第3节)、张林(第4章、第11章)编写;其余各章节的编写者为陈欢林、刘莱娥(第6章第1~3节),陈欢林、姚善泾(第7章),孙海翔、任其龙(第8章);全书由陈欢林统稿并作部分修改。在编写过程中,孙海翔在各章文字输入与图表处理方面付出大量的辛劳,李昌圣对有关章节的文字和语句方面进行了润色工作;熊大和所长审阅了第10章第2节的初稿,并提出了中恳的意见和建议,在此表示感谢。

在本书即将完稿之际,我们要感谢潘祖仁、陈维祖二位先生对本书的极力推荐;感谢近20年来选修本课程的化学、化工、生物、环境、高分子材料等专业的本科生和研究生对前两版教材的使用,为我们的教材建设与教学水平的提高提供了一个良好的平台。

新型分离技术所涉及的面极广,且在进一步的拓展之中,为一门始终处于发展之中的学科。要使新型分离技术的教材深受学生的喜爱并获得好评是不容易的,它与编著者的学术水平和长期的教学经验积累密切相关。由于我们对专业知识的理解与领悟有着一定的局限性,学术水平有限,实践经验不足,书中难免有不少纰漏甚至错误,我

们真诚希望相关专家、学者和同行能给予指教，提出意见与建议，以便进一步修订和完善。

陈欢林

2005年2月

于浙江大学求是园

内 容 提 要

本书在介绍分离过程的分类、技术进展、基础理论的基础上，分章详细介绍了几类新型分离技术，包括反渗透、纳滤、超滤与微滤，气体渗透、渗透汽化与膜基吸收，透析、电渗析与膜电解，特种精馏，新型萃取分离技术，吸附、离子交换与色谱分离，液膜分离及促进传递，其他分离技术（泡沫分离技术，高梯度磁分离技术，分子识别与印迹分离），耦合与集成技术。

本书内容新颖、全面，可作为高等院校化学工程专业本科生和研究生的教材或教学参考书，也可供从事化工过程设计和开发人员参考。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 分离技术及其在过程工程中的意义	1
1.1.1 分离技术的地位与作用	1
1.1.2 新型分离技术开拓与发展的必要性	2
1.2 分离过程的分类	3
1.2.1 机械分离	4
1.2.2 传质分离	4
1.2.3 反应分离	5
1.3 新型分离技术的进展	5
1.3.1 膜分离技术	6
1.3.2 基于传统分离方法的新型分离技术	9
1.3.3 耦合与集成技术	10
1.4 选择分离技术的一般规则	11
1.4.1 选择的基本依据	11
1.4.2 工艺可行性与设备可靠性	13
1.4.3 过程的经济性	13
1.4.4 组合工艺排列次序的经验规则	14
参考文献	15
习题	15
第 2 章 分离过程的基础理论	16
2.1 分离过程的热力学基础	16
2.1.1 热力学基本定义与函数	16
2.1.2 偏摩尔量和化学位	17
2.1.3 克拉贝龙方程和克-克方程	18
2.1.4 相律	19
2.1.5 渗透压与唐南平衡理论	20
2.1.6 非平衡热力学基本定律	22
2.2 分离过程的动力学基础	25
2.2.1 分子传质及其速率与通量	25
2.2.2 质量传递微分方程	27
2.2.3 质量传递微分方程特定式	28
2.3 分离过程中的物理力	28
2.3.1 分子间和原子间的作用力	28
2.3.2 溶解度参数	31

2.3.3 渗透系数	33
2.4 分离因子	34
2.4.1 平衡分离过程的固有分离因子	35
2.4.2 速率控制过程的固有分离因子	36
2.4.3 分离因子与过程能耗的定性关系	36
2.5 分离过程的能耗分析	37
2.5.1 有效能的基本概念	37
2.5.2 分离过程的焓分析	41
参考文献	43
习题	43
第3章 反渗透、纳滤、超滤与微滤	46
3.1 反渗透	46
3.1.1 溶液渗透压	46
3.1.2 反渗透基本机理及模型	49
3.1.3 反渗透操作特性参数计算	50
3.1.4 反渗透工艺流程	52
3.2 纳滤	55
3.2.1 纳滤脱盐率	55
3.2.2 纳滤恒容脱盐	56
3.3 超滤	57
3.3.1 超滤的基本原理	57
3.3.2 超滤传质模型	57
3.3.3 超滤过程工艺流程	61
3.4 微滤	66
3.4.1 微孔过滤模式	66
3.4.2 滤饼过滤式通量方程	68
3.4.3 通量衰减模型	69
3.5 膜组件	72
3.5.1 膜组件种类	72
3.5.2 各种膜组件比较	76
参考文献	77
习题	78
第4章 气体渗透、渗透汽化与膜基吸收	80
4.1 气体分离	80
4.1.1 气体在膜内的传递机理	80
4.1.2 影响气体渗透性能的因素	84
4.1.3 气体分离的计算	89
4.1.4 级联操作的形式和级数计算	92
4.1.5 气体膜分离的经济性比较	94
4.2 渗透汽化与蒸汽渗透	95

4.2.1	渗透汽化及蒸汽渗透原理	95
4.2.2	渗透通量和分离因子	96
4.2.3	渗透汽化膜过程的设计计算	99
4.2.4	影响工艺设计的主要因素	100
4.2.5	渗透汽化级联计算	102
4.2.6	渗透汽化与蒸汽渗透的经济分析	103
4.3	膜基吸收	104
4.3.1	膜基吸收及其气液传质形式	104
4.3.2	膜基吸收的传质	105
4.3.3	膜基吸收的设计参数的确定	107
4.3.4	膜基吸收过程的应用	108
	参考文献	108
	习题	109
第5章	透析、电渗析与膜电解	111
5.1	透析与渗析	111
5.1.1	透析过程机理	111
5.1.2	透析过程的通量模型	112
5.1.3	透析液的种类及其组成	113
5.1.4	透析过程的种类及其清除率	114
5.2	电渗析	116
5.2.1	电渗析过程原理	116
5.2.2	电渗析的基本理论	117
5.2.3	电渗析过程中的传递现象	119
5.2.4	电渗析器工艺参数计算	120
5.2.5	电渗析器及其脱盐流程设计	123
5.2.6	电渗析中的浓差极化现象	127
5.2.7	倒极电渗析的设计	128
5.2.8	离子交换树脂填充式电渗析	130
5.3	双极膜水解离	131
5.3.1	双极膜的特性	132
5.3.2	双极膜的水解离理论电位和能耗	132
5.3.3	双极膜电渗析的水解离原理	133
5.3.4	双极膜过程设计参数	134
5.3.5	双极膜的组装工艺及应用	135
5.4	膜电解	137
5.4.1	膜电解基本原理	137
5.4.2	离子电解膜	137
5.4.3	膜电解槽中的电化学反应及物料平衡	139
5.4.4	膜电解槽中的物料衡算	140
5.4.5	电解定律	140

5.4.6 膜电解槽阳极电流效率	141
5.4.7 膜电解的槽电压	141
5.5 电渗析的经济性比较	145
参考文献	145
习题	146
第6章 特种精馏技术	147
6.1 混合物组分的相图	147
6.1.1 三组分相图与蒸馏边界	147
6.1.2 剩余曲线图	148
6.1.3 蒸馏曲线图	150
6.1.4 在全回流下的产物组成区	152
6.2 萃取与恒沸精馏	153
6.2.1 萃取与恒沸精馏特征及其差异	153
6.2.2 溶剂选择原则	154
6.2.3 萃取精馏的分离因子	156
6.2.4 萃取精馏理论板数计算	157
6.2.5 恒沸精馏理论板数计算	160
6.3 反应精馏	162
6.3.1 反应精馏的基本特点	162
6.3.2 反应精馏的相平衡与化学平衡	163
6.3.3 反应蒸馏的动力学	164
6.3.4 反应蒸馏塔的设计计算	165
6.3.5 反应蒸馏塔形式的选用	168
6.3.6 催化蒸馏塔催化剂的装填	168
6.3.7 反应精馏的应用	170
6.4 分子蒸馏	175
6.4.1 分子蒸馏的原理	176
6.4.2 分子蒸馏的传热与传质	178
6.4.3 分子蒸馏装置及设计	180
6.4.4 分子蒸馏的应用	183
6.5 膜蒸馏及渗透蒸馏	183
6.5.1 膜蒸馏及渗透蒸馏的基本原理	183
6.5.2 膜蒸馏中的传热和传质	184
6.5.3 膜蒸馏用膜及装置	187
6.5.4 膜蒸馏的应用	188
参考文献	189
习题	190
第7章 新型萃取分离技术	191
7.1 超临界流体萃取	191
7.1.1 超临界流体及其性质	192

7.1.2	超临界流体萃取中的相平衡	196
7.1.3	超临界流体的传递性质	199
7.1.4	超临界流体萃取工艺及设备计算	203
7.1.5	超临界流体萃取分离方法及典型流程	207
7.1.6	超临界萃取操作条件选择	208
7.1.7	超临界流体萃取过程的能耗	209
7.2	双水相萃取	209
7.2.1	双水相分配原理	209
7.2.2	双水相系统中的作用力	211
7.2.3	影响双水相分配的主要因素	213
7.2.4	双水相系统的选择	216
7.2.5	双水相萃取工艺设计	217
7.2.6	双水相分配技术的应用	218
7.3	凝胶萃取	219
7.3.1	凝胶的种类及其特性	219
7.3.2	凝胶的相变温度	220
7.3.3	凝胶的溶胀与收缩机理	221
7.3.4	凝胶的筛分作用	222
7.3.5	凝胶萃取设计参数	222
7.3.6	典型的凝胶萃取工艺	223
7.3.7	凝胶萃取的应用	226
7.4	膜基溶剂萃取	227
7.4.1	膜基萃取基本原理	227
7.4.2	膜基传质方程式	228
7.4.3	影响膜基萃取传质的因素	230
7.4.4	膜与膜组件的选择原则	231
	参考文献	232
	习题	234
第8章	吸附、离子交换与色谱分离	236
8.1	吸附剂及其结构性能	236
8.1.1	常用吸附剂	236
8.1.2	离子交换树脂	237
8.1.3	特种色谱用固定相与流动相	239
8.1.4	吸附剂的选择原则	241
8.2	吸附分离	241
8.2.1	吸附平衡及等温吸附方程	241
8.2.2	吸附扩散传质机理	244
8.2.3	吸附分离特性参数	246
8.2.4	吸附分离工艺	249
8.3	离子交换	256

8.3.1	离子交换平衡与动力学关系	256
8.3.2	离子交换过程设计	260
8.3.3	离子交换器及其设计要求	263
8.4	色谱分离	264
8.4.1	色谱的分类和特点	264
8.4.2	色谱分离平衡关系及操作方法	267
8.4.3	色谱分离的基本参数	268
8.4.4	色谱分离的放大设计与优化	272
8.4.5	几种新型色谱	274
	参考文献	275
	习题	276
第9章	液膜分离及促进传递	277
9.1	引言	277
9.2	液膜的形状和分类	277
9.2.1	液膜的形状	278
9.2.2	液膜的分类	278
9.3	促进传递及载体	278
9.3.1	促进传递原理	278
9.3.2	载体的选择	279
9.4	液膜分离机理及传质方程	280
9.4.1	无载体液膜	280
9.4.2	有载体液膜	281
9.5	液膜制备及其分离操作过程	284
9.5.1	液膜的组成	284
9.5.2	液膜制备方法及其使用	286
9.5.3	液膜的稳定性	288
9.6	液膜分离技术的应用	289
9.6.1	乳化液膜处理含酚废水	289
9.6.2	重金属废水中铜的回收	290
9.6.3	气体分离	291
	参考文献	292
	习题	293
第10章	其他分离技术	295
10.1	泡沫分离技术	295
10.1.1	基本原理	296
10.1.2	泡沫分离的设备及流程	300
10.1.3	影响泡沫分离的因素	302
10.1.4	泡沫分离过程的设计计算和理想泡沫模型	304
10.1.5	泡沫分离过程的应用及研究情况	310
10.2	高梯度磁分离技术	313

10.2.1	高梯度磁分离技术的原理	314
10.2.2	高梯度磁分离设备	316
10.2.3	高梯度磁分离技术的应用	319
10.3	分子识别与印迹分离	323
10.3.1	分子识别特征	323
10.3.2	分子识别体系	324
10.3.3	分子识别机理以及印迹分离模型	329
10.3.4	分子印迹技术的应用	334
	参考文献	339
	习题	340
第 11 章	耦合与集成技术	341
11.1	反应-分离的耦合与集成过程	341
11.1.1	催化膜反应器	341
11.1.2	渗透汽化膜反应器	343
11.1.3	膜生物反应器	346
11.2	分离-分离的集成过程	348
11.2.1	膜与吸收-汽提的集成	349
11.2.2	精馏-渗透汽化集成	350
11.3	耦合与集成过程的建模	353
11.3.1	平推流集成过程建模	353
11.3.2	全混流集成过程建模	355
11.3.3	间歇式集成过程建模	356
11.4	集成过程的设计优化	357
11.4.1	Aspen Plus 软件模拟设计	358
11.4.2	McCabe-Thiele 图解法设计	358
	参考文献	362
	习题	364
附录		365
附录 A	电解质水溶液的渗透压系数	365
附录 B	聚合物膜材料的溶解度参数	366
附录 C	常用溶剂的溶解度参数	367
附录 D	无机离子和离子对的自由能参数 (25℃)	368
附录 E	碱金属阳离子和卤族阴离子的自由能参数 (25℃)	368
附录 F	有机离子的自由能参数 (25℃)	368
附录 G	结构基团对 $E_{\text{coh},i}$ 和 V_i 的贡献	369
附录 H	结构基团对溶解度参数的贡献	370

第1章 绪论

1.1 分离技术及其在过程工程中的意义

两种或多种物质的混合是一个自发过程，而要将混合物分开或将其变成产物，必须采用适当的分离手段（技术）并耗费一定的能量或分离剂。分离技术系指利用物理、化学或物理化学等基本原理与方法将某种混合物分成两个或多个组成彼此不同的产物的一种手段。待分离的混合物可以是原料、中间产物或废弃物料，制得产物的组成依需求而定，仍然可以是混合物，也可以为纯度极高的单体。在工业规模上，通过适当的技术与装备，耗费一定的能量或分离剂来实现混合物分离的过程称为分离工程。分离工程通常贯穿在整个生产工艺过程中，是获得最终产品必不可少的一个重要环节。

1.1.1 分离技术的地位与作用

（1）分离技术在化工过程工业中的地位与角色 分离技术广泛应用于石油、化工、医药、食品、冶金、原子能等许多工业领域中，其所需的装备和能量消耗在整个过程工程中占有主要地位。在化工生产过程中，分离方面的基建投资通常占 50%~90%，所消耗的能量也往往占绝大部分。例如，在聚乙烯生产过程中，精制所消耗的能量占总能量的 94%；而在醋酸生产中，精制所消耗的能量为总能耗的 98%。

在化工过程工业中，反应常常是过程的中心，但如果没有有效纯化产物和去除废物的过程相配合，工厂就不可能生存。如图 1-1 所示，分离技术用于去除原料中不纯物、回收和纯化初级产物、清除排放水或空气流中的杂质与毒物。

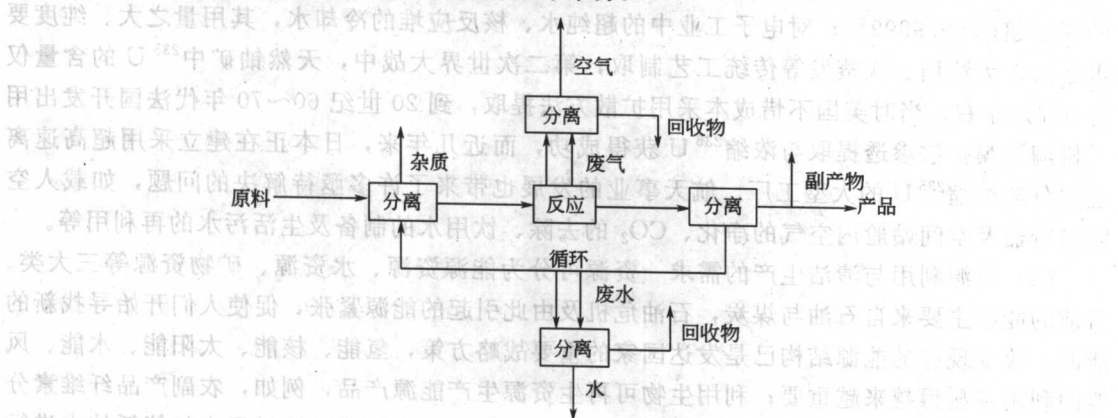


图 1-1 分离过程在化工过程工业中扮演的重要角色

(2) 分离技术在日常生活中的作用 人们的日常生活离不开分离技术, 每天用于洗脸、刷牙的自来水, 饮用的纯净水大多通过对来自江河湖海的水处理后获得的; 每天食用的果汁、生啤、白糖、食盐等分别通过蒸发、膜滤、结晶、电渗析等方法制得; 每天开车所用的汽油、煤油等都是通过对原油加氢反应除去硫磺并经分馏制得。

(3) 分离技术在环境保护中的作用 普通居民家庭生活污水所含成分十分复杂, 直接排入江河湖泊, 将会严重污染环境, 目前大部分城市已开展生活污水集中统一的生化处理, 有效地将污染物质分离出来或转化为无毒物质; 然而对于广大农村的生活污水, 如何利用湿地或氧化塘等生物处理方法, 及时将有毒、有害污染物通过富集、吸收、降解或转化等手段去除已十分迫切。

加油站在汽车加油过程中释放的汽油, 有机溶剂在储运过程中的挥发, 由汽车排放的尾气、旅游大巴放出的黑烟、氮氧化合物、喷气机喷出的白雾等, 造成了严重的空气污染。及时去除空气中气溶胶 (PM_{2.5} 颗粒物)、易挥发有机物 (VOCs), 降低 NO_x、SO₂、CO 和 CO₂ 等均需要快速有效的新型分离技术。

(4) 分离技术在人类健康与保健中的作用 分离技术在医疗上做出的贡献是有目共睹的, 人工肾、人工肺、人工肝分别具有与人体肾、肺、肝等脏器功能的血液透析、血液氧合、脱毒作用。利用膜的筛分作用通过透析、滤过方法净化血液、供氧和去除 CO₂ 使血液氧合, 或通过置换及吸附方法使血液脱毒等, 达到调节人体平衡、维持生活、延长寿命的目的。

(5) 分离技术在能源再生与利用方面的作用 化石燃料难以持久, 按当前年消耗量相比, 除煤可维持二百年外, 包括核能铀在内的其他能源, 只有 60 年左右的用量, 迫使人们不断开发新能源与提高利用率。如贫矿铀的富集新技术、氢能源开发、燃料电池的应用、风能与水能的利用等均需要高效而经济的分离技术。

1.1.2 新型分离技术开拓与发展的必要性

(1) 科技发展与探索的需求 随着现代生产和科学技术的飞速发展, 人民生活水平的逐步提高, 对分离技术提出了越来越高的要求。

首先, 对产品的质量及物质纯度的要求提高了, 有时甚至很苛刻。例如, 在原子能和半导体工业中所需的高纯度气体氦、氖及半导体材料硅和锗等, 其纯度都要求在 99.99%, 有的甚至超过 99.9999%; 对电子工业中的超纯水、核反应堆的冷却水, 其用量之大、纯度要求之高, 无法用二次蒸发等传统工艺制取; 第二次世界大战中, 天然铀矿中²³⁵U 的含量仅为 0.7% 左右, 当时美国不惜成本采用扩散方法提取, 到 20 世纪 60~70 年代法国开发出用无机陶瓷膜扩散渗透提取与浓缩²³⁵U 获得成功, 而近几年来, 日本正在建立采用超高速离心法分离浓缩²³⁵U 的大型工厂。航天事业的发展也带来了许多亟待解决的问题, 如载人空间飞行器及空间站舱内空气的净化、CO₂ 的去除、饮用水的制备及生活污水的再利用等。

(2) 资源利用与清洁生产的需求 资源可分为能源资源、水资源、矿物资源等三大类。目前的能源主要来自石油与煤炭, 石油危机及由此引起的能源紧张, 促使人们开始寻找新的能源。改变现有的能源结构已是发达国家的重要战略方策, 氢能、核能、太阳能、水能、风能的利用将显得越来越重要; 利用生物可再生资源生产能源产品, 例如, 农副产品纤维素分解发酵生产酒精、玉米芯生产木糖醇等; 能源的危机促使人们对工业过程中的能耗技术进行改造等。

我国是水资源缺少的国家，人均年占有径流量仅为 2260m^3 ，人均年降水量为 5157m^3 ，比世界平均值的 $1/4$ 还低。约相当于美国人均占有量的 $1/6$ ，原苏联的 $1/8$ ，加拿大的 $1/58$ 。据报道，2000 年我国的工业用水、火电用水、生活用水的需水量分别为 700 亿吨、360 亿吨。在 2030 年前，若农业用水量上限控制在 5000 亿吨，则全国年缺水量仍将高达 600 亿吨。估算每年影响工业产值约 127 亿元；我国有 300 多个城市生活用水处于缺水状态，日缺水量达 1600 万吨以上，严重缺水的城市有 150 余个，日供水能力仅能保证高峰期日用水量的 $60\%\sim 70\%$ 。

水资源匮乏已成为我国经济与社会发展的制约因素之一。在沿海城市，利用充足的海水资源，进行苦咸水脱盐、海水淡化将是缓解沿海城市缺水的主要途径之一。

(3) 生态环境保护的需求 随着现代工业的飞速发展，产生的废气、废水、废渣对环境的污染和生态平衡的矛盾也越来越突出。

近几年来我国的废水、污水排放总量约占世界 10% 以上，而国民生产总值约占世界的 3% ；目前城市污水处理率只有 36% ，致使 82% 的江河湖泊、 64% 的城市的浅层地下水遭受不同程度的污染。长江水系约有 30000 多个污染源，排放江中的废水已达 128 亿吨，污染物多达 40 余种；淮河的污染最为严重，不但造成沿淮河城市的饮用水供应困难，而且严重污染沿河两岸附近耕地和浅层地下水水质。我国海岸和近海海域水质劣于国家一类海水水质标准的面积已占总面积的 $1/3$ ，其中劣于四类水质标准的严重污染区面积约 2.9 万平方公里。

目前已知由厂矿生产、交通运输等排入大气的毒害物质种类高达 1500 种以上，其中排放量大。对人类和环境影响较大的约有 100 多种。特别是空气中易吸入颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$)、二氧化硫、VOCs、温室气体等的大幅度或成倍超标，对大气造成了极为严重的污染。

近几年来，开展废水中的有用物质的回收，既可降低污水处理负荷，又能取得较大的经济效益，已受到环保部门及工矿企业的重视；室内居住环境的污染也已受到充分的关注，采用某些新型分离技术将房间内空气中的尘埃、VOCs 等清除已成为可能。

上述种种需求，不但促使一些常规分离技术，如蒸馏、吸收、萃取、吸附、结晶等不断改进和发展，更使一些特色明显的新型分离技术，如膜分离、泡沫分离、超临界流体萃取、印迹分离，以及集成技术等得到重视和开发。这些新型的分离技术有些已得到一定规模的应用，有些还处于实验研究或工厂中试规模的开发阶段，但可以预料，不久的将来这些技术将逐步得到发展和应用。

1.2 分离过程的分类

分离过程的概念可用图 1-2 简单示意，其通常由原料、产物、分离剂及分离装置组成。原料是待分离的混合物，可以是单相或多相体系，但至少含有两个组分；产物为分离所得的产品，通常为两股，也可以有多股，其组分彼此不同；分离剂为加到分离装置中使过程得以实现的能量或物质，或两者并用，如蒸馏过程中的热量、萃取过程中的溶剂、吸附过程中的吸附剂、膜分离中的膜材料等。

分离装置是分离过程得以实施的必要物质设备，它可以是某个特定的装置，也可指从原料到产品之间的整个流程。分离过程指的是一股或多股物流作为原料进入分离装置，利用混

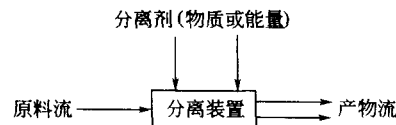


图 1-2 分离过程示意

合物各组分的某种物性差异，在分离装置中对其施加能量或者特定分离剂，使混合物分离过程得以进行，并产生两个或两个以上产物的过程。

在工业上常用的分离方法不下三四十种，装置的结构和形式五花八门，但若按分离过程原理来分，可以分为机械分离、传质分离和反应分离三大类。

1.2.1 机械分离

分离装置中，利用机械力简单地将两相混合物相互分离的过程称为机械分离过程，它的分离对象大多是两相混合物，分离时，相间无物质传递发生。表 1-1 列出了几种典型的机械分离过程。

表 1-1 几种典型的机械分离过程

名 称	原料相态	分离剂	产物相态	分 离 原 理	应 用 实 例
过滤	液-固	压力	液+固	粒径>过滤介质孔径	浆状颗粒回收
沉降	液-固	重力	液+固	密度差	浑浊液澄清
离心分离	液-固	离心力	液+固	固-液相颗粒尺寸	结晶物分离
旋风分离	气-固(液)	惯性力	气+固(液)	密度差	催化剂微粒收集
电除尘	气-固	电场力	气+固	微粒的带电性	合成氨原料气除尘

1.2.2 传质分离

传质分离可以在均相或非均相混合物中进行。传质分离又可以分为平衡分离和速率控制分离两大类。

(1) 平衡分离 平衡分离是依据被分离混合物各组分在不互溶的两相平衡分配组成不等的原理进行分离的过程，常采用平衡级概念作为设计基础，如表 1-2 的精馏、吸收、萃取、吸附、结晶等几种典型平衡分离过程。

表 1-2 几种典型的平衡分离过程

名 称	原料相态	分离剂	产物相态	分离原理	应 用 实 例
蒸发	液	热	液+汽	物质沸点	稀溶液浓缩
闪蒸	液	热-减压	液+汽	相对挥发度	海水脱盐
蒸馏	液或汽	热	液+汽	相对挥发度	酒精增浓
热泵	气或液	热或压力	二气或二液	吸附平衡	CO ₂ /He 分离
吸收	气	液体吸收剂	液+气	溶解度	碱吸收 CO ₂
萃取	液	不互溶萃取剂	二液相	溶解度	芳烃抽提
吸附	气或液	固体吸附剂	液或气	吸附平衡	活性炭吸附苯
离子交换	液	树脂吸附剂	液	吸附平衡	水软化
萃取蒸馏	液	热+萃取剂	汽+液	挥发度、溶解度	恒沸物分离
结晶	液	热	液+固		糖液脱水

(2) 速率控制分离 速率控制分离是依据被分离组分在均相中的传递速率差异而进行分离的，例如利用溶液中分子、离子等粒子的迁移速率、扩散速率等的不同来进行分离。

表 1-3 中所示为典型速率控制分离过程，其分离剂大多为压力或温度。在固-液或者固-气系统中，当固体颗粒较小，两相密度接近时，颗粒上浮或下沉速率会很低，需借助离心力，甚至超高速离心力来分离，或通过渗透膜强化其速率差来实现分离；当粒子尺寸小到与分子的大小相当时，还必须采用其他特定推动力。