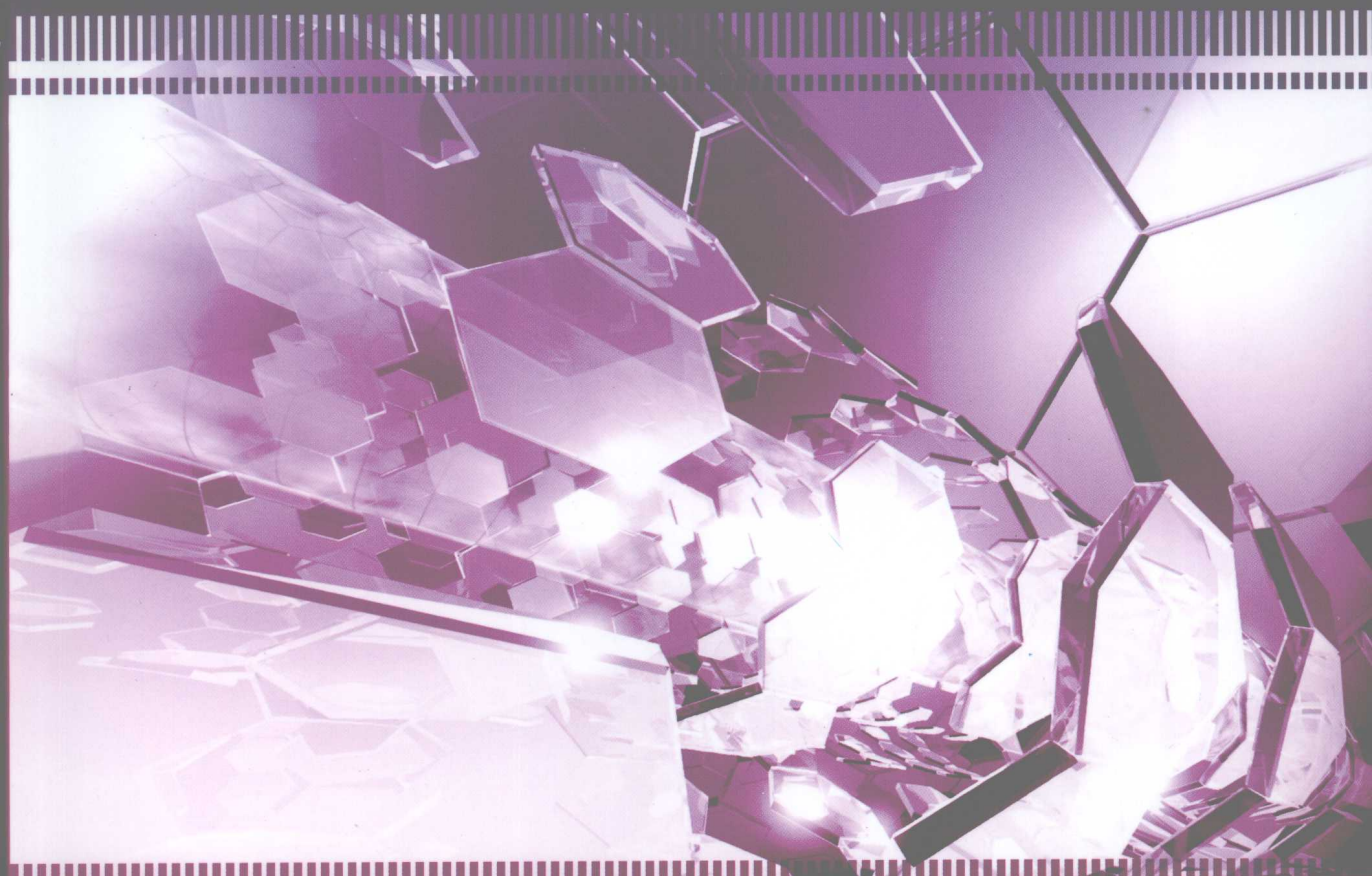


高 等 学 校 教 材

分离过程与设备

袁惠新 主编



化学工业出版社

高等学校教材

分离过程与设备

袁惠新 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本教材全面介绍了各种分离技术及设备,包括机械分离过程、离心分离、旋流分离、浮选、过滤及电分离)和扩散分离过程(蒸发、蒸馏、干燥、吸收、萃取和膜分离),还介绍了分离过程的基本概念、一般原理、评价方法、分离对象——混合物及其特性,以及两相流颗粒动力学等。

本教材主要供过程装备与控制工程专业学生使用,也可作为化工工艺人员、化工设备设计、制造、操作和管理的技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

分离过程与设备/袁惠新主编. —北京:化学工业出版社, 2008.1
高等学校教材
ISBN 978-7-122-01752-9

I. 分… II. 袁… III. ①分离-化工过程-高等学校-教材②分离-化工设备-高等学校-教材 IV. TQ028

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 203173 号

责任编辑:程树珍 金玉连
责任校对:宋 玮

装帧设计:史利平

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印 刷:北京市振南印刷有限责任公司
装 订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张21 字数562千字 2008年3月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:39.80元

版权所有 违者必究

序

泛化学工业指炼油、化工、冶金、建材、制药、材料等过程制造业，它既是不断提高人民衣、食、住、行、安全、健康等生活品质的保障，也是持续为新科学技术发展提供新机遇的物质基础，从炼铜、炼铁、炼油直至高分子材料、硅材料、纳米材料……无不是各自时代科技进步的前驱，泛化学工业是涉及物质传递与转化、能量传递与转化和信息集成与优化的巨大系统工程，近年来各国在大学教育体系中倾向于把原有的“化工原理”课程中，侧重于基础原理部分和侧重于工程技术应用部分进行拆分，无疑会使两者教学都得到加强。符合培养近代工程科技人才的需求，本书的出版是对国内这一进程的有力促进。

泛化学工业究其本源是由物质在分子水平上的重组和分离纯化两方面组成，分离过程是原料进行化学转化前和化学反应后获得高附加值产品所必须，更宽泛地讲，分离工程是把物质消费使用的“增熵过程”与再生资源重复和循环利用的“减熵过程”相互衔接，实现社会经济可持续发展的技术基础之一。

《分离过程与设备》一书正是为了培养泛化学工业科技人才所必修的教材，它包含了基于机械的、物理的、物化的多种分离过程与设备，选材繁简适度，叙述脉络清晰、逻辑严谨，也易于自学，是本领域中一本优良的教材。

清华大学化工系



2007. 12

前 言

分离过程存在于各种工业领域，特别在石油、化学、选矿、冶炼、核工业、造纸、食品、环保等流程工业中是主要的过程。炼油、冶炼、三废处理等过程几乎都是由各种分离过程组成的。近年来，随着能源、环保、新材料、生物制药等过程及高纯物质提取等的发展，分离过程与设备越来越受到人们的重视。

过程装备与控制工程专业是一个化工与机械的交叉学科，以往偏重于化工容器和机械的强度设计，而过程装备本身的原创即研究开发相对缺少。过程工业的发展首先是基于过程装备的研究、开发与创新。这些都离不开流体力学、传热传质过程和分离过程等专业基础知识。传统上，这三部分内容是通过“化工原理”课程的教学来使学生掌握的。从内容上来看，《化工原理》中流体力学方面只介绍流体流动，传递过程方面只简单地介绍传热，分离过程与设备方面诸多机械分离过程设备没有介绍，而且原理与设备脱节、原理与工程实际脱节。

为了适应分离工程面临的机遇与挑战，出现了相应的教学改革，即将本专业沿用了几十年的“化工原理”课程分设为“流体力学”、“传热传质”和“分离过程与设备”三门课程，分别强化，夯实本专业学生的专业基础。

从多年《分离过程与设备》讲义的使用情况来看，学生反映本课程脉络清晰，主线明确，条理性强，易学好懂。

本教材除了全面介绍了各种主要的分离技术及设备，包括机械分离过程（离心分离、旋流分离、浮选、过滤及电分离）和扩散分离过程（蒸发、蒸馏、干燥、吸收、萃取和膜分离），还介绍了分离过程的基本概念、一般原理、评价方法、分离对象——混合物及其特性，以及两相流颗粒动力学等，充分体现了内容的全面性和系统性，克服了传统编写内容杂乱、不全面带来的缺憾。因为混合物的高效分离往往要用到多种分离技术，缺乏对各种分离技术的全面了解，往往不能设计出高效的分离过程。本书结合应用实例来叙述或介绍各种分离技术，且反映了当今国际上分离技术发展的最新成果，如电分离技术、旋流分离技术、膜技术、超临界萃取技术等。

除特殊说明处（如有些经验公式）外，本教材均采用国际单位制（SI制）。

本教材由袁惠新教授主编。参加编写的有江苏工业学院袁惠新教授（第1章～第7章）、冷一欣（第11章～第12章）、钟璟教授（第16章）、杨利民副教授（第14章）、陆怡副教授（第10章）、李中（第15章），江南大学王跃进副教授（第9章）、苗青副教授（第13章）和蒋建忠副教授（第8章）。

在本教材内容的编著过程中，曾得到余国琮院士、高金吉院士、金涌院士、卓震教授等的指导，在此，谨向他们表示衷心的感谢。

分离过程种类繁多，而且新的分离过程不断出现，限于编者水平，教材中恐有不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者
2007. 12

目 录

第 1 章 导论	1	第 4 章 颗粒动力学	43
1.1 分离过程的概念	1	4.1 流体绕球体的流动	43
1.1.1 分离过程的组成	1	4.2 颗粒的扩散运动	44
1.1.2 分离剂	1	4.3 颗粒的布朗运动	45
1.2 分离过程的分类	2	4.4 颗粒的沉降运动	47
1.3 分离过程的功能及用途	7	4.4.1 球形颗粒在重力场中的自由沉降	48
1.3.1 分离过程的功能	7	4.4.2 球形颗粒在离心力场中的自由沉降	49
1.3.2 分离过程的用途	7	4.4.3 沉降分离的极限	50
1.4 分离过程的一般特性及经济意义	8	4.4.4 影响颗粒沉降的基本因素	50
1.4.1 分离过程的一般特性	8	4.4.5 影响颗粒沉降的其他因素	51
1.4.2 分离过程的经济意义	8	习题	53
1.5 分离过程实例——蔗糖生产	9		
习题	11	第 5 章 离心分离	54
参考文献	11	5.1 离心机的概念及分离因素	54
		5.2 流体及颗粒在离心力场中的运动	54
第 2 章 混合物的种类及特性分析	12	5.2.1 转鼓内液体的自由表面	54
2.1 混合物的来源、分类及一般性质	12	5.2.2 转鼓内液体的压力	55
2.2 混合物的一般性质	12	5.2.3 颗粒在离心力场中的运动——离心机分离性能预测	56
2.3 非均相混合物的种类	13	5.3 离心机的结构及类型	59
2.4 非均相混合物的特性	14	5.3.1 过滤式离心机	61
2.4.1 颗粒的形状	14	5.3.2 沉降式离心机	65
2.4.2 颗粒粒度	16	5.4 离心机选型	74
2.4.3 密度	23	5.5 离心机主轴所需功率	76
2.4.4 颗粒的浓度	24	5.5.1 启动转动件及物料所需的功率	76
2.4.5 混合物的黏度	25	5.5.2 摩擦损耗	77
2.4.6 颗粒的表面特性	28	5.5.3 卸料所需的功率 N_5	77
2.4.7 颗粒床层特性	31	5.5.4 总功率计算	78
2.4.8 乳浊液的特性	33	习题	79
2.4.9 取样方法	35		
习题	35	第 6 章 旋流分离	80
参考文献	36	6.1 引言	80
		6.2 旋流器的基本构造、工作原理及操作特点	81
第 3 章 分离效率的评价	37	6.3 旋流器的功能及分类	82
3.1 分离过程的质量衡算	37	6.3.1 旋流器的功能	82
3.2 总效率	38	6.3.2 旋流器的分类	83
3.2.1 一般总效率	38	6.4 旋流器内的流场	83
3.2.2 修正总效率	38	6.4.1 旋流器内流体的速度分布	83
3.3 粒级效率	40	6.4.2 旋流器内的流型	85
3.3.1 粒级效率曲线	40		
3.3.2 分割粒度	41		
3.3.3 分级锐度	42		
习题	42		

6.5 旋流器的能量(压力降)需要	85	8.4 过滤过程计算的理论基础	126
6.6 旋流器的分流比	88	8.4.1 恒压过滤	127
6.6.1 分流比对旋流器分离性能的影响	88	8.4.2 恒速过滤	128
6.6.2 所需分流比	88	8.4.3 先恒速后恒压过滤	129
6.6.3 影响分流比的因素	88	8.4.4 过滤常数的测定	131
6.7 旋流器的分离性能及其影响因素	89	8.5 过滤设备	133
6.7.1 影响旋流器分离性能的因素	89	8.5.1 重力过滤机	133
6.7.2 旋流分离理论	92	8.5.2 加压过滤机	133
6.7.3 旋流器的粒级效率曲线	94	8.5.3 带式压榨机	135
6.8 旋流器的设计	94	8.5.4 真空过滤机	136
6.8.1 已知 x_{50} 和处理量 Q 下的设计	95	8.6 过滤计算	137
6.8.2 在给定 x_{50} 、处理量 Q 和压力降范围条件下的设计	96	8.6.1 滤饼洗涤计算	137
6.9 旋风分离器	97	8.6.2 过滤生产能力的计算	138
6.9.1 旋风分离器的结构及原理	97	习题	141
6.9.2 旋风分离器的性能	98	参考文献	142
6.9.3 旋风分离器的选择与计算	100	第9章 电分离	143
6.10 旋流器的结构、材料及成形	101	9.1 静电除尘	143
习题	102	9.1.1 静电除尘的工作原理	143
第7章 浮选	104	9.1.2 静电除尘器的类别	145
7.1 引言	104	9.1.3 静电除尘器的除尘效率	146
7.2 疏水性与浮选	104	9.1.4 影响静电除尘效率的主要因素	147
7.3 浮选过程中气泡的产生	105	9.2 静电分选	148
7.4 固体颗粒尺寸与浮选能力	106	9.2.1 静电分选技术的基本原理	149
7.5 气泡与颗粒的聚集	106	9.2.2 静电分选的作用	151
7.6 浮选的宏观动力学模型	107	9.3 静电在固液分离与液液分离中的应用	154
7.7 浮选设备及其设计	108	习题	159
7.7.1 电浮选	108	参考文献	159
7.7.2 分散气浮选	109	第10章 蒸发	160
7.7.3 溶气气浮	111	10.1 概述	160
习题	115	10.1.1 蒸发的基本概念	160
第8章 过滤	116	10.1.2 蒸发的操作条件	161
8.1 颗粒床层的几何特性	116	10.1.3 蒸发的基本流程	161
8.2 过滤的基本概念	118	10.1.4 蒸发的操作方法	162
8.2.1 过滤过程	118	10.2 蒸发器类型及其选择	163
8.2.2 过滤介质	118	10.2.1 循环型蒸发器	163
8.2.3 过滤的分类	119	10.2.2 非循环型(单程型)蒸发器	165
8.2.4 助滤剂	120	10.2.3 各类蒸发器的性能比较	167
8.3 过滤的基本方程	120	10.2.4 蒸发的辅助设备	167
8.3.1 过滤过程的主要操作与设备参数	120	10.3 单效蒸发的计算	168
8.3.2 过滤的基本理论	121	10.3.1 物料衡算	169
8.3.3 滤饼的可压缩性	123	10.3.2 热量衡算	169
8.3.4 过滤的基本方程式	124	10.3.3 传热面计算	171
		10.3.4 单效蒸发计算小结	174
		10.4 多效蒸发器及其计算	175

10.4.1 多效蒸发的温度差损失和有效温度差	176	12.3.1 填料	230
10.4.2 多效蒸发最佳效数的确定	177	12.3.2 填料塔的流体力学特性	233
10.4.3 多效蒸发的计算	178	12.3.3 填料塔内件	236
10.5 蒸发的应用	182	习题	237
10.5.1 热敏性物料的蒸发	182	第13章 干燥	238
10.5.2 工业废水的蒸发处理	182	13.1 湿空气的性质及湿焓图	238
10.6 蒸发过程的设计	183	13.1.1 湿空气的性质	238
10.6.1 蒸发过程的设计内容	183	13.1.2 湿焓图($H-I$ 图)	241
10.6.2 蒸发器的工艺设计	183	13.1.3 湿焓图($H-I$ 图)的应用	243
习题	185	13.2 干燥器的物料衡算和热量衡算	243
参考文献	186	13.2.1 物料衡算	243
第11章 蒸馏	187	13.2.2 热量衡算	245
11.1 双组分溶液的汽液相平衡	187	13.2.3 干燥介质在干燥系统内的状态变化	246
11.1.1 汽、液两相平衡共存时的自由度	187	13.3 干燥速率和干燥时间	249
11.1.2 理想溶液	187	13.3.1 湿物料中水分的存在形式	249
11.1.3 非理想溶液	189	13.3.2 干燥曲线和干燥速率	250
11.1.4 汽液平衡关系的表示方法	190	13.3.3 干燥时间	253
11.2 平衡蒸馏与简单蒸馏	192	13.4 干燥设备	254
11.2.1 平衡蒸馏(闪蒸)	192	13.4.1 常压干燥	254
11.2.2 简单蒸馏	193	13.4.2 真空干燥	262
11.3 精馏	194	13.4.3 干燥器的选择	263
11.3.1 精馏原理	194	习题	263
11.3.2 两组分物系连续精馏的计算	196	参考文献	264
11.3.3 加料状态的影响与加料位置	203	第14章 吸收	265
11.3.4 回流比的影响和选择	204	14.1 吸收过程概述	265
11.3.5 简捷法求理论板数	207	14.2 吸收设备	266
11.3.6 两组分精馏的操作型计算与操作	208	14.2.1 级式接触吸收设备	266
11.3.7 精馏塔、冷凝器和再沸器的工艺设计	210	14.2.2 微分接触吸收设备	266
习题	213	14.3 吸收过程工艺计算	277
参考文献	214	14.3.1 物理吸收	277
第12章 塔设备	215	14.3.2 化学吸收	285
12.1 板式塔	215	习题	285
12.1.1 限制板式塔生产能力的因素	215	参考文献	286
12.1.2 气液两相在塔板上的流动状况	216	第15章 萃取	287
12.1.3 各种塔板简介	217	15.1 基本概念和理论	287
12.2 筛板塔的设计	221	15.1.1 概述	287
12.2.1 筛孔塔板的板面布置	221	15.1.2 三角形相图	288
12.2.2 筛孔塔板的设计参数	222	15.2 萃取过程的计算	291
12.2.3 筛孔塔板的设计程序	223	15.2.1 单级萃取	291
12.3 填料塔	230	15.2.2 多级错流萃取	292
		15.2.3 多级逆流萃取	293
		15.2.4 微分逆流萃取	295
		15.2.5 回流萃取	296

15.3 不同的萃取体系及方法	298	16.1.3 微滤和超滤设备	306
15.3.1 液液萃取	298	16.1.4 工业应用	308
15.3.2 液固萃取或浸取	299	16.2 反渗透	310
15.3.3 超临界萃取	299	16.2.1 反渗透的原理	310
15.4 萃取设备	300	16.2.2 反渗透工艺	312
15.4.1 混合澄清槽	300	16.2.3 反渗透的应用	312
15.4.2 填料塔	300	16.3 电渗析	313
15.4.3 筛板塔	301	16.3.1 电渗析过程	313
15.4.4 转盘萃取塔	301	16.3.2 电渗析中的传递	315
15.4.5 离心萃取器	302	16.3.3 电渗析装置	316
15.4.6 其他新型萃取设备	302	16.3.4 电渗析的应用	320
习题	302	16.4 渗透汽化	321
参考文献	302	16.4.1 渗透汽化过程	321
第 16 章 膜分离	303	16.4.2 渗透汽化中的传质	321
16.1 微滤和超滤	303	16.4.3 渗透汽化模型和计算	324
16.1.1 过程特征和膜	303	16.4.4 渗透汽化的应用	326
16.1.2 浓差极化和膜污染	305	习题	326
		参考文献	326

第 1 章 导 论

1.1 分离过程的概念

1.1.1 分离过程的组成

混合是一个自发的过程。因此，来自于自然界的原料绝大部分是混合物。这些混合物有的可以直接利用，但大部分往往先要加入能量或物质，经过分离提纯才能被人们所利用。

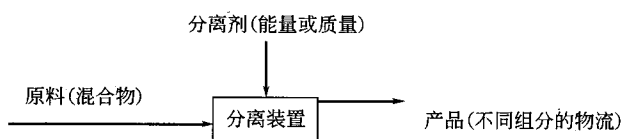


图 1-1 所示为一个基本的分离过程，其中，进料为混合物，产品为不同组分或相的物流。分离剂为能量或另一股物流（质量）。广义地讲，质量也是能量的一种形式。分离装置的主要部分是分离场或分离介质。混合物的分离是在其内因和外因的作用下发生的。内因就是混合物分离的内在推动力，即混合物内组分或相之间在物理、化学、生物等方面的性质差异；外因就是相应形式（物理、化学、生物）分离剂的加入。混合物的分离过程就是在混合物内、外因的作用下，在分离场或分离介质内发生组分物质选择性的反应、相变、传递、迁移或截留而相互分开，得到组成互不相同的两种或几种产品的操作，以达到产品的提取、提纯、净化、浓缩、干燥或三废（废水、废气或废渣）处理等的要求。

1.1.2 分离剂

分离剂是分离过程的辅助物质或推动力。分离剂包括能量分离剂和质量分离剂。常见的分离剂如表 1-1 所示。

表 1-1 常见的分离剂

能量分离剂	机械能(重力、离心力、压力等)、光能、电能、磁能、热量、冷量等
质量分离剂	溶剂、吸收液、吸附剂、交换树脂、表面活性剂、酸、碱、化学反应物、过滤介质、助滤剂、膜、微生物等

无论是用哪种形式的分离剂，广义地说都是利用某种形式的能量，都会增加过程的费用，即操作费用。

能量分离剂，无论是机械能、热能还是冷能，大都是电能、光能或燃料能量的转化形式。这些能量真正被用于分离过程的往往只有其中的一部分，即有效利用部分。如蒸发过程中使溶剂吸热汽化所需的能量，沉降过程中加速颗粒或使颗粒具有一定的初始位能所需的能量。这部分能量与总能耗之比为能量的有效利用率，反映了过程或设备的性能之一。其余的能量被耗在热、冷泄漏、加热设备、摩擦损失（包括机械摩擦和流体摩擦损失）、加速辅助材料的运动（如离心机）等方面，有的甚至浪费在破坏作用上，如磨损等。但有些能量可以考虑回收，如溶剂蒸气的热能（可用来预热物料或采用多效蒸发）、流体流动的能量（如旋

流器出口流的能量)、物料的余热等。有些能量有时是难于回收的,如机械运动件的动能,有时反而还需能量停止机件的运动。

质量分离剂,有时其使用可减少能量分离剂的用量,如助滤剂。但质量分离剂的使用除消耗材料(物质、能量)外,还可能产生污染。这个污染包括对产品的污染和对环境的污染两个方面。

(1) 对产品的污染

i. 对产品污染,但不影响产品的质量,如洗矿等。

ii. 质量分离剂经过分离过程后,与产品不在同一物流内,如生物制品生产过程中通过助滤剂提取滤液。

iii. 质量分离剂与产品在同一物流内,经过进一步分离可以将分离剂与产品分离,如萃取过程中蒸发回收溶剂。

iv. 有时由于污染性,不能用质量分离剂,如产品是过滤上游物,如麸酸颗粒的过滤、纳米材料的过滤脱水等。

(2) 对环境的污染

有些质量分离剂不构成对产品的污染,但其排放会对环境产生污染,如吸附剂、表面活性剂、过滤啤酒用的助滤剂、电场、磁场、微波等。

1.2 分离过程的分类

分离过程的分类方法有多种,主要有以下几种。

i. 扩散式分离与非扩散式分离过程,或传质分离与机械分离;

ii. 平衡分离过程与速率控制分离过程;

iii. 能量分离剂过程与质量分离剂过程;

iv. 相平衡分离、速度差分离与反应分离过程;

v. 相变分离与非相变分离过程;

vi. 按分离过程的功能要求分,有提取、净化(澄清、提纯或精制)、浓缩、干燥、洗涤、分级等;

vii. 按分离过程的程度或精度分,有粗分离(如压榨、筛分、旋流分离等)、细分离(如重力沉降、细过滤)和精分离(如精过滤、离心分离、蒸发、蒸馏、膜分离等)三个级别。

对于非均相混合物的分离,除了根据分离的程度或精度外,这种分类法还包含有颗粒大小的区别在内。颗粒越小,分离的级别越细。

当然,这只是一个粗略的指导性分类,因为同一种分离技术不同的型号、不同的应用场合往往有不同的分离精度。但一般情况下,如蒸发、蒸馏等要比重力沉降、过滤等分离精度高;膜分离一般要比过滤的精度高。这里只是提出一种概念,以利于为具体的分离任务选择技术上和经济上都可行的分离方法。

将分离过程分为扩散式分离和非扩散式分离过程或传质分离过程(表 1-2)和机械分离过程(表 1-3)两大类,是目前最为普遍的分类方法。但这种分法有个问题,有时机械分离过程中含有传质分离,而传质分离如膜分离可看作是过滤(一种机械分离)的延伸。因此,这种分类法是根据分离过程中物质扩散过程的强弱来分的。传质分离是以物质的扩散传递为主的分离过程,而机械分离是不以扩散传递为主的分离过程。传质分离涉及物质从进料流向产品流的扩散传递,而机械分离则主要是完成相的分离。

一般认为,传质分离过程处理的是均相混合物,机械分离过程处理的是非均相混合物。但是,有时非均相混合物要用传质分离过程来处理,如固体物料的干燥。

表 1-2 传质分离过程的种类

过程	名称	进 料	分离剂	产 品	分离原理	实 例
应用能量分离剂的普通平衡过程	蒸发	液体	热量	液体, 蒸气	挥发度(蒸气压)	果汁浓缩 ^[2,3]
	闪急膨胀	液体	减压(能量)	液体, 蒸气	挥发度(蒸气压)	闪蒸法淡化海水 ^[4]
	精馏	液体和或气体	热量	液体, 蒸气	挥发度(蒸气压)	
	结晶	液体	冷却或加热 蒸发	液体, 固体	凝固点或溶解度	见图 1-5、图 1-6
	固体干燥	湿固体	热量	干固体, 湿气体	挥发度	食品脱水 ^[5]
	冷冻干燥	冷 冻 的 含 水 固体	热量	干固体, 水蒸气	升华点	食品脱水 ^[5]
	凝华	蒸气	冷量	固体, 蒸气	凝华点	苯二酸酐的精制 ^[2]
	双温度交换 反应	流体	热量和冷量	两种流体	在两个不同温度下的 反应平衡常数	氢和氖的分离 ^[6]
	区域熔融	固体	热量	组 成 不 同 的 固体	凝固点或溶解度	金属的超提纯 ^[7]
应用质量分离剂的普通平衡过程	气提	液体	不凝性气体	液体, 蒸气	挥发度	从原油馏分中除去 轻烃 ^[1,2]
	吸收	气体	不挥发性液体	液体, 蒸气	溶解度	用乙醇胺类吸收以 除去天然气中的 CO ₂ 和 H ₂ S ^[1,2,8]
	萃取	液体	不互溶液体	两种液体	溶解度	
	沥取或洗涤	固体	溶剂	液体, 固体	溶解度	从烧结矿石中沥 取 CuSO ₄ ^[2]
	沉淀	液体	化学反应物	液体, 固体	生成不溶性沉淀	石 灰-苏 打 水 的 处理 ^[9]
	吸附	气体或液体	固体吸附剂	液体, 固体	吸附势	用固体干燥剂干燥 气体 ^[2]
	离子交换	液体	固体树脂	液体, 固体树脂	质量作用定律用于 适当的阴离子或阳 离子	水的软化 ^[2]
	离子排斥	液体	吸附性固体离 子交换树脂	液体, 固体树脂	阻止与树脂电荷相 同的物质吸附	核酸的分离 ^[10]
	纸上色层分 离	液体	毛细作用; 纸或 凝胶相	湿 纸 的 若 干 区域	选择性溶解度和两 相中的吸附势	蛋白质的分离 ^[11]
	配位比率色 层分离	液体	固 定 的 配 位 基体	液体, 配位支承 固体	与配位基体的可逆 化学反应	酶的分离 ^[12,13]
	气泡分馏, 泡 沫分馏	液体	空气泡(有时还 加表面活性剂)	两种液体	在气液界面上积聚 的趋势	清除洗衣废水中的 洗 涤 剂; 矿 石 浮选 ^[14,15]
	等电位聚焦	液体	电场; pH 值	几种液体	等电点(pH 值)	蛋 白 质 的 分离 ^[16,17]
	等容超速离 心分离	液体	离 心 力; 密 度 梯度	几种液体	压力扩散	生 物 物 质 的 分离 ^[18]
使用几种分离剂的平衡过程	萃取蒸馏和 恒沸蒸馏	液体和气体	液体和热量	液体, 蒸气	挥发度	回收丁二烯 ^[2]
	包合	液体	包 合 分 子 和 冷量	液体, 固体	选择性的进入晶体 结构中	用于海水淡化的水 合过程
	加合结晶	液体	加合物和冷量	液体, 固体	选择性的进入晶体 结构中	二甲苯异构体的 分离 ^[19]

续表

过程	名称	进 料	分离剂	产 品	分离原理	实 例
速率控制过程	气体扩散	气体	压力梯度	几种气体	Knudsen 速率或通过多孔隔离层的扩散速率	从天然 UF ₆ 中浓缩 U ²³⁵ F ₆
	分离扩散	气体	可凝蒸气	几种气体	对于错流蒸气吹扫运动的扩散系数	同位素的分离; 从甲烷中分离氮气等
	热扩散	气体或液体	温度梯度	几种气体或液体	热扩散速率	同位素分离 ^[20]
	质谱分离	气体	磁场	几种气体	单位质量的电荷量	同位素分离 ^[21,22]
	渗析	液体	选择性膜; 溶剂	几种液体	通过膜时的扩散传递速率	制造人造丝时回收 NaOH; 人工肾
	电渗析	液体	阴离子和阳离子膜; 电场	几种液体	阴离子膜只通过阴离子的趋势	微咸水淡化 ^[2]
	气体渗透	气体	选择性膜; 压力梯度	几种气体	溶解度和通过膜的传递速率	利用钯隔离层精制氢气 ^[23]
	电泳	含胶体的液体	电场	几种液体	胶体粒子的迁移率	蛋白质分离 ^[24]
	电解加反应	液体	电能	几种液体	离子在电极处的放电速率	浓缩水中的 HDO
	沉降式超速离心机	液体	离心力	两种液体	压力扩散	按分子量分离大聚合分子 ^[25]
	反渗透	液体溶液	压力梯度+膜	两种液体溶液	物质在膜中的溶解度和扩散速率	海水淡化
	超滤	含大分子或胶体的液体溶液	压力梯度+膜	几种液体	通过膜(孔为分子大小)的渗透速率	废水处理; 蛋白质浓缩; 人工肾
	分子蒸馏	液体混合物	热量+真空	液体加蒸气	动力学理论上的最大汽化速率	维生素 A 的酯类和中间体的分离 ^[2]
	凝胶过滤	液体	固体凝胶(例如交键合成血液)	凝胶相+液体	分子大小和透入膨胀凝胶的能力	药物精制; 蛋白质分离 ^[26]
	液膜	液体	溶剂液体薄膜	几种液体	透过液体薄膜的渗透速率	废水处理 ^[27,28]
	喷嘴扩散	气体	压力梯度	几种气体	从喷嘴发出的射流中向外的传递速率	铀同位素的分离

表 1-3 机械分离过程的种类

名称	进 料	分离剂	产 品	分离原理	实 例
沉降	固-液	重力; 离心力	固, 液	密度差	悬浮液的澄清
	液-液		液, 液		油水分离
	气-液		气, 液		原油脱气
	固-气		固, 气		除尘, 催化剂细粉的回收 ^[2,29]
	液-气		液, 气		捕沫
	固-固		固, 固	密度差; 粒度差; 形状差	小麦与麸皮的分离; 灰粒的等密度面分离 ^[31]
	固-固		固, 固		
过滤	固-气	过滤介质+正压, 真空或离心力	固, 气	固体颗粒粒度差引起的截留性差异	袋式除尘
	液-气		液, 气		捕沫
	固-液		固, 液		泥浆状催化剂回收 ^[2]
	液-液	由亲油或亲水材料制成的过滤介质+正压或真空	液, 液	吸附性引起的截留性差异	含水油脱水
静电沉积	气体+固体尘粒	电场	气体, 固体尘粒	带电性	烟道气除尘 ^[2]
磁力分离	固体粉末混合物	磁场	两种固体	磁性	铁矿石的富集 ^[2,32]

实践中常使用不互溶的两个相的界面上的平衡关系来对气体或者液体的均相混合物进行分离。例如蒸馏过程就是利用加热所产生的蒸气与冷凝器冷凝所形成的液相两者之间的汽液平衡关系，使易挥发组分集于气相，难挥发组分集于液相，从而使均相混合物作为塔顶的馏出组分和塔底的釜残组分而分离。像这种通过输入能量，使原混合物体系形成新的相并利用相间平衡关系进行分离的过程称为平衡分离过程。表 1-4 所列是具有代表性的平衡分离操作。

表 1-4 以从第一相移向第二相为主的平衡分离操作示例

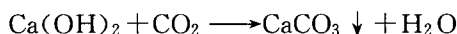
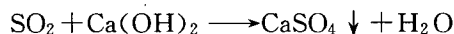
第二相 \ 第一相	气 相	SCF 相	液 相	固 相
气 相	×	×	气 提 蒸 发 蒸 馏	脱 吸 升 华 (冷冻干燥)
SCF 相	×	×	SCF 萃取	SCF 萃取
液 相	吸 收 蒸 馏	SCF 吸收	萃 取	固体萃取 带域熔融
固 相	吸 附 凝 华	SCF 吸附	结 晶 吸 附	×

注：SCF——超临界流体。

另一方面，有些分离过程通过某种介质，在压力、温度、浓度、电势等梯度所造成的驱动力下，依靠传递速率的差别进行分离，这种分离过程称为速率控制过程。

分离过程也可根据是否有相变发生而分为相变分离和非相变分离两大类。这样对分离过程进行分析、综合会对产生新分离方法提供思路或启发。这里主要介绍相变分离。

相变分离的原理是根据混合物内组分的相变特性，通过加入分离剂，使混合物中的某一组分变为与原来不同的相态，使之转变为非均相混合物后再分离。分离剂的作用可以是物理的也可以是化学的。这里所讲的相变是广义的，既包括同一物质在不同相态之间的变化，也包括某一组分被质量分离剂溶解或吸收（前者由固态变为液态，后者由气态变为液态），或与质量分离剂发生化学反应，如：



物质有 3 种基本存在形态：气态、液态和固态。如图 1-2 所示，根据相变特性，有如下分离方法。

① 汽化分离 可用的分离方法有汽化、气化和升华等，如 L-L 和 S-L 系统的蒸发，L-L 系统的蒸馏，L-S 系统汽化干燥，S-S 系统的升华干燥，S-S 系统的汽化分离（如硅藻土的焚烧回收，计化学气化分离）等。

② 液化分离 可用的分离方法有凝结、溶化和溶解等，例如，用溶剂选择性地溶解固体混合物中某一组分，使固-固分离变为较易进行的固-液分离过程——沥取，或称浸取、固-液萃取、浸出等。又如用不挥发性液体选择性地溶解气体。

混合物中的某一气体组分，就将气体混合物的分离变为汽液混合物的分离，这就是吸收，常用于燃气脱硫等。

③ 固化分离 可用的分离方法有凝固、凝华、结晶和沉淀

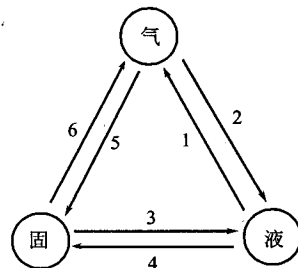


图 1-2 物质的相变示意图
1—汽化，气化；2—凝结，液化；
3—融熔，溶解；4—凝固，结晶，
沉淀析出；5—凝华；6—升华

析出等。结晶是一种常用的分离方法，广泛用于蔗糖生产中。沉淀析出实际上是利用分离剂有选择性的化学反应作用生成固体沉淀物，将均相混合物变为非均相混合物。凝固、凝华用于分离过程不多见。

当原料为非均相混合物时，就可以利用机械能量如重力、离心力或压力来对它们进行机械分离。例如，在固液或者固气系统中，当固体颗粒粒度较大，处于重力场中短时间内就可以沉下去或浮上来而实现分离。然而当固体颗粒较小，两相密度差又较小时，粒子下沉或上浮的速度会很小，这时就可利用离心力场或者过滤材料等来形成移动速度差，才能实现分离。当颗粒粒度小到与分子相当时，还要用到压力梯度、浓度梯度、电位梯度等驱动力来强化移动速度的差别而进行分离。像这些通过输入能量，使混合物中的组分产生移动速度差进行分离的过程称为速度差分离过程。例如，将电解质溶液置于直流电场中，并把阳离子交换膜作为分离介质，在电位梯度的作用下，溶液中的荷电离子就会移动。这时具有选择性的阳离子交换膜只允许阳离子通过，于是就实现了对阳离子的分离。当然，为了保持电中性，还需要使用一枚阴离子交换膜。成对地使用阴阳离子交换膜，就可对电解质物质进行分离浓缩或是除去。这就是电渗析法。

各种速度差分离操作可按所利用的能量及其与场的组合整理分类，列于表 1-5 中。能够产生速度差的场，又可以分为均匀场空间（如气体或液体）和非均匀场。所谓非均匀场就是分离介质，如多孔体，其孔径大至毫米，小至分子尺寸，范围很宽，如膜（有机膜、无机膜）、硅藻土、分子筛等。在客观上可视作连续的凝胶相（如图 1-3 所示）也是由线状高分子和球状粒子所构成的具有网状结构的非均匀空间。如果网孔被堵住，就变成了固体。这种非均匀空间和一般认为应该存在细孔的固体，在狭义上可看作多孔体。尽管这个界限并不清晰，但若能让胶体通过的，就可以认为它是狭义多孔体。

表 1-5 速度差分离操作

场		能量类型	热 能	化学能 (浓度差)	机 械 能			电 能
					压力梯度	重力梯度	离心力梯度	
均匀空间		真空	分子蒸馏					
		气相	热 扩 散	分离扩散		沉降	旋风分离	质 谱 电集尘 磁力分离
		液相				沉降 浮选	旋液分离 离心分离	电 泳 磁力分离
非均匀空间	多孔材料	气相			气体扩散 过滤集尘			
		液体			过滤(包括 超滤、微滤)	重力过滤	离心过滤	
	膜	凝胶相			气体透过			电 泳
		固相	渗透气化	渗析	反渗透			电渗析

所谓反应分离过程就是通过输入能量，促进反应达到物质转化（如发生相变）而被分离的过程。利用反应进行分离操作的方法很多。例如，通过调整 pH 值，把溶解于水中的重金属变成氢氧化物的不溶性结晶而沉淀分离，利用离子交换树脂的交换平衡反应的离子交换，以及通过微生物进行生物反应，将溶解于水中的有机物质（BOD）分离等，都可以看作是反应分离操作。表 1-6 把反应分离过程按反应种类做了分类，大体可以分为利用反应体的分离和不利用反应体的分离。反应体又可以分为再生型反应体、一次性反应体和生物体型反应体。再生型的反应体在可逆或平衡交换反应中利用反应体进行分离反应，当其分离作用逐渐消失时需要进行适当的再生反应，使其活化作用得到再生。而一次性反应体在与被分离物质

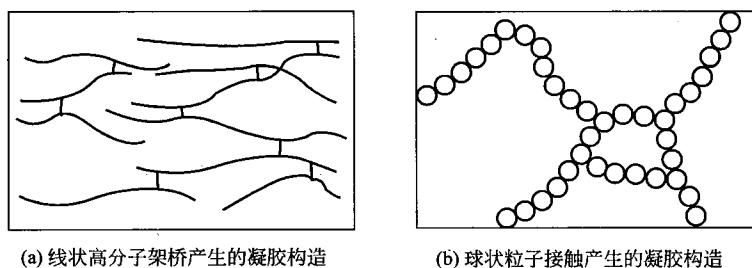


图 1-3 凝胶相的模型图

发生反应后，它的化学构造也会发生不可逆的改变。例如，烟气脱硫时，气体中的 SO_2 变为石膏 (CaSO_4) 被分离掉。在利用微生物进行污水处理时，溶解于水中的有机物最后会被分解为二氧化碳和水而被分离。

表 1-6 反应分离操作

反应体	再生型	反应体可逆的或平衡交换反应分离	离子交换、螯合交换反应，反应萃取，反应吸收
	一次性	不可逆反应分离	反应吸收，反映晶析，中和沉淀，氧化，还原(化学解吸)
	生物体型		活性污泥
无反应体		电化学反应	湿式精炼

在对再生型反应体进行再生操作时，要用到再生剂。这时，再生剂在制造时所吸纳的能量就有一部分转移到了反应体上。分离反应时，就会利用到这部分能量。也有用加热的方法来再生反应体的，在这种场合，可以认为反应体再生所吸纳的热能变成了分离所需的能量。

不可逆反应过程中所需要的能量，有来自于一次性反应体在制造时所吸纳的能量，还有采用其他手段从外部向反应场补充的能量。在生物学反应中，是使用光能或者是原料中所含有机物来推进反应的。不需要反应体而进行反应分离的例子是电化学反应，使用电能作为反应所需的能量。

1.3 分离过程的功能及用途

1.3.1 分离过程的功能

分离过程的功能主要有如下几个方面。

- i. 提取。
- ii. 澄清，是对连续相为液体的混合物分离而言的。
- iii. 增浓，是对分散相而言的，分散相可以是固体也可以是液体。
- iv. 脱水或脱液，可以是固液混合物，也可以是液液混合物的分离。
- v. 干燥，固液混合物或液液混合物的进一步分离。
- vi. 洗涤，是对固体分散相而言的。
- vii. 净化或精制，是将气体、液体或固体中残存的杂质降到允许的程度。
- viii. 分级，是对固体物料按粒度分离而言的。

增浓、脱水和干燥是根据残留液量的多少来分的。这些过程中产品的残留液量依次减少。

1.3.2 分离过程的用途

分离过程的用途主要有如下几个方面。

- i. 产品的提取、浓缩，如生物制品（酒精、柠檬酸、黄原胶、药物等）、淀粉、蔗糖

等的生产，从牛奶制取奶油和脱脂奶，选矿，冶炼，海水淡化，从植物中提取营养成分、芳香物质、色素或其他有用成分等。

ii. 提高产品纯度，如从食物中除去有毒或有害成分、牛奶净化（除去固体杂质等）、蔗糖精制、淀粉洗涤精制等。

iii. 回收有用物质，如从反应混合物中回收未转化的反应物、催化剂等以便循环使用，降低成本；从含有微粒固体的气溶胶中回收奶粉；从淀粉废水或淀粉气溶胶中回收淀粉等。

iv. 延长产品保藏寿命，如食品的脱水干燥。

v. 减少产品重量或体积，便于贮运，如增浓、脱水等。

vi. 三废（废气、废液、废渣）处理。

vii. 提高机器或设备的性能，如燃气轮机入口海盐气溶胶脱水、脱盐；压缩机进气脱水、除尘；气流磨进气脱油等。

1.4 分离过程的一般特性及经济意义

1.4.1 分离过程的一般特性

① 多样性 由于混合物的种类繁多，特性各异，因此，分离方法也多种多样。各种分离方法各有优缺点或适应场合。如三废的组成、形态、特性多种多样，相应地有许多不同的处理方法，即有许多分离过程。

② 普遍性 分离过程存在于绝大部分的生产过程或处理过程中，如食品加工过程中从原料的洗涤（清洗）、提取、净化、浓缩、干燥、生物制品的提取、选矿、冶炼、采油、炼油、化工、三废处理等。

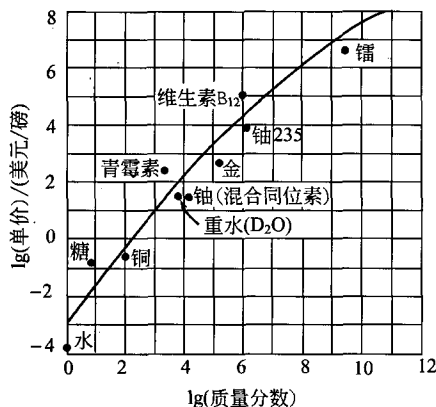


图 1-4 商品的市场价格与商品在原料（混合物）中浓度的关系^[1]

③ 重要性 分离过程对于产品生产或处理过程，不但影响到其质量，而且影响到其成本。分离过程是生产过程中的主要耗能过程。例如在聚乙烯生产过程中，分离精制所消耗的能量要占到整个生产能耗的 94% 左右，而在醋酸生产过程中，精制所消耗的能量约占整个生产过程消耗能量的 98%。分离过程又是一个高投资费用过程。对于一般的生产过程，分离过程所占的投资费用要占 50%~90%。就生产总成本而言，分离成本也是主要部分。例如微生物制品的生产，花在分离过程上的费用（包括设备投资、运行和维护费用）往往要占到产品总成本的 75% 以上。由此可见分离过程在工业上的重要地位。

1.4.2 分离过程的经济意义

一种纯物质的生产成本，其很大部分用于分离过程。Sherwood 等通过研究发现，商品的市场价格与商品在原料（混合物）中的浓度大致成反比（图 1-4）。

这一关系反映出：当需要的物质只能在低浓度下取得时，势必要处理大量额外的物料，需要大的能量。这也有热力学根据，因为分离提取某一纯物质所需的最小等温功与 $(-lga_i)$ 成正比。 a_i 为物质在进料混合物中的活度，而活度大致与浓度成正比。例如，铀 235 (U^{235}) 要比金还贵，因为它在天然铀矿中的含量只有 0.7% 左右，若想获得一定量的可产生裂变的 U^{235} ，就必须对大量的铀矿石进行分离浓缩。