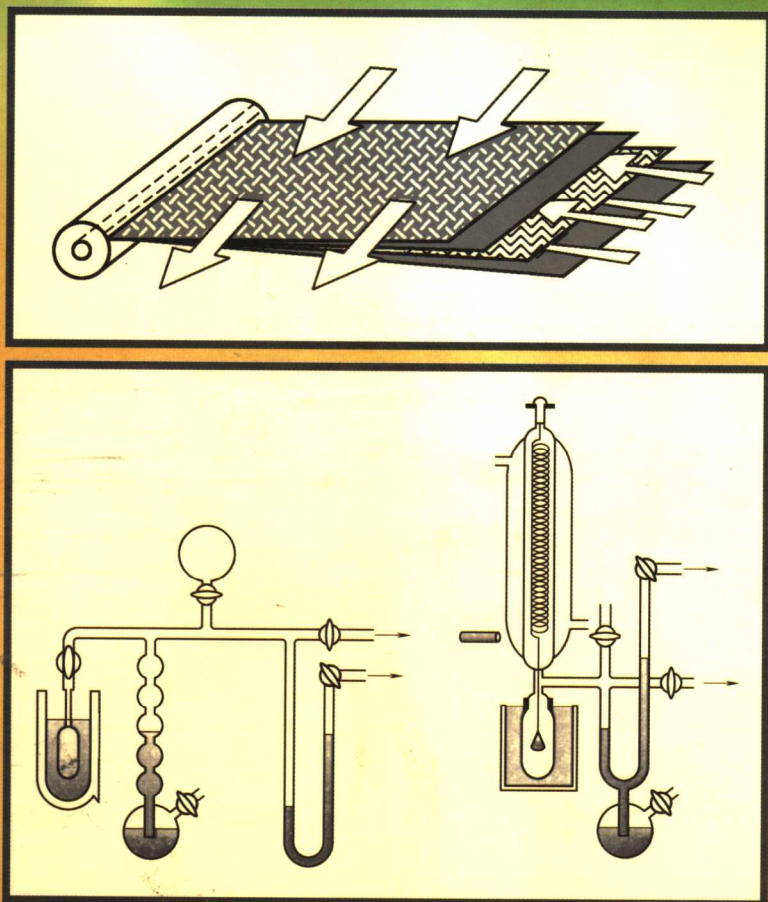


—— 高等学校教材 ——

化学分离原理与技术

胡小玲 管萍 主编



化学工业出版社
教材出版中心

高等学校教材

化学分离原理与技术

胡小玲 管 萍 主编



化学工业出版社
教材出版中心

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

化学分离原理与技术/胡小玲, 管萍主编. —北京:
化学工业出版社, 2006. 6

高等学校教材

ISBN 7-5025-8754-3

I. 化… II. ①胡…②管… III. 分离-化工过程-
高等学校-教材 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 068608 号

高等学校教材

化学分离原理与技术

胡小玲 管萍 主编

责任编辑: 宋林青 唐旭华

文字编辑: 孙凤英

责任校对: 郑捷

封面设计: 胡艳玮

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(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

三河市前程装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 19 字数 469 千字

2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8754-3

定 价: 36.00 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

在化学化工、材料科学、生命科学、环境科学、金属冶金学等领域的科研与教学中,有关物质的分离提纯占有极其重要的地位,大量的研究工作都与分离过程密切相关,已成为这些领域的中心问题。

长期以来,国内有关化学分离理论与分离技术方面的教材和专业书一直很少,而且内容陈旧,缺乏系统性和相应的分离理论,因此迫切需要内容新颖、理论性和应用性并重,并能反映现代化学分离技术前沿的专业教材,使广大科研技术人员能够全面系统地了解化学分离理论、方法以及分离技术的现状与发展趋势,给从事现代分离科学理论研究、分离方法研究或工业生产的工程技术人员以必备的理论基础,这点非常重要。这正是作者编写此书的目的。

本书是作者多年科研和教学工作的成果和经验总结,全面系统地介绍了现代化学分离的研究方法、分离原理和技术应用,并将有关领域中最新的分离方法和技术以及最新进展写入书中,是一本非常有参考和实用价值的专业书籍。

本书共分成 10 章,每章包括一个基本主题。

第 1 章论述了分离科学中的概念、分离特征及现代分离科学的发展趋势。

第 2 章是分离过程的热力学及其有关过程的平衡理论,介绍了平衡过程中的热力学及溶液行为模型,描述了液-液萃取平衡过程。利用相平衡原理描述了单组分、双组分及三组分相图、双水相平衡相图及如何将其应用于简单组分的分离。介绍了分离过程中的计量置换关系,这对于将计量置换用于组分分离的宏观和微观变化研究,了解分离机理和提高分离效果是十分重要的。

第 3 章论述了溶质的迁移与扩散理论。讨论了分离过程中动力学方面的问题。在不同介质和不同分离体系中组分迁移和扩散的基本性质和运动规律,特别对与分离体系密切相关的定量关系加以介绍,以便对选择分离体系的最优条件有所帮助。

第 4 章介绍了试样的溶解及浸取,这是物质在分离提纯过程中首先要解决的问题。

第 5 章详细介绍了萃取分离技术,其中着重介绍溶剂萃取、超临界流体萃取、双水相萃取、膜萃取和液膜萃取的萃取理论、萃取特征和应用。

第 6 章论述了膜分离技术,介绍了主要膜的结构组成、膜传递过程、膜分离理论、分离机理和膜分离技术的研究进展。

第 7、8 章介绍了在石油化工、冶金、食品和医药工业中广泛应用的离子交换分离和吸附分离的平衡理论及吸附机理,阐述了离子交换动力学和吸附动力学理论。

第 9 章对于性质相近的物质,在介绍色谱法原理的基础上,介绍典型的色谱分离方法即萃取色谱法、吸附色谱法、凝胶色谱法、亲和色谱法和电泳的分离原理及理论分析。

第 10 章介绍了分离方法的选择。

本书的特点是内容丰富新颖、全面系统、适用范围广。

本书不仅可以作为化学化工、生物医药、湿法冶金、材料科学和环境工程等领域的广大科技人员的专业指导书,也可以作为有关专业的研究生及本科生的专业教材。

本书由胡小玲、管萍主编。其中第 1~5 章，第 7、8 章由胡小玲编写，第 6 章，第 9、10 章由管萍编写。

由于现代分离科学是一门新兴的边缘学科，限于作者水平，书中的疏漏及不妥之处，请读者批评指正。

编者
2006 年 5 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 分离科学及其研究对象	1
1.1.1 分离科学与现代分离科学	1
1.1.2 现代分离科学的重要性	1
1.1.3 现代分离科学研究的对象	2
1.1.4 现代分离科学的发展趋势	2
1.2 分离过程的分类和特征	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 分离科学中的基本概念	6
1.3.1 不同浓度组分的分离	6
1.3.2 回收因子、分离因子和纯度	6
1.4 分离效率的评价	7
1.5 选择分离技术的一般规则	8
1.5.1 选择依据	8
1.5.2 分离过程的经济性	9
第 2 章 分离过程的平衡理论	11
2.1 化学平衡.....	11
2.1.1 化学平衡的特点.....	11
2.1.2 密闭体系中的化学平衡.....	11
2.1.3 开放体系的平衡.....	12
2.1.4 活度系数与标准态.....	14
2.1.5 外加场作用下的平衡.....	16
2.2 多相平衡.....	17
2.2.1 单组分体系.....	18
2.2.2 双组分体系.....	19
2.2.3 三组分体系.....	20
2.2.4 双水相相图.....	21
2.3 相平衡理论.....	21
2.3.1 气-液平衡体系热力学	21
2.3.2 单分子层吸附理论.....	23
2.3.3 多分子层吸附理论.....	26
2.3.4 固体对非电解质溶液的吸附.....	29
2.3.5 固体对电解质溶液的吸附.....	34

2.4	分配平衡	35
2.4.1	分配等温线	36
2.4.2	第二类化学平衡	41
2.5	溶液行为模型	42
2.5.1	理想溶液	42
2.5.2	稀溶液	43
2.5.3	超额函数	44
2.6	分离因子	44
2.6.1	平衡分离过程的固有分离因子	44
2.6.2	速率控制过程的固有分离因子	45
2.6.3	分离因子与过程能耗的定性关系	46
	参考文献	47
第3章	迁移与扩散理论	48
3.1	迁移过程与不可逆过程热力学	48
3.1.1	不可逆过程热力学	48
3.1.2	机械运动与分子迁移	49
3.1.3	分子迁移——费克 (Fick) 第一扩散定律	50
3.2	溶质在介质中的迁移与扩散	53
3.2.1	流体的迁移与扩散	53
3.2.2	在毛细管中的迁移与扩散	55
3.2.3	超临界流体中的迁移与扩散	56
3.2.4	在电解质溶液中的迁移与扩散	56
3.3	气体扩散系数	57
3.3.1	气体扩散系数的 Chapman-Enskog 理论	59
3.3.2	动力学理论的特性	60
3.3.3	气体扩散系数的经验式	62
3.3.4	高压下的气体扩散	62
3.4	液体中的扩散系数	64
3.4.1	由 Stokes-Einstein 方程给出的液相扩散系数	65
3.4.2	Stokes-Einstein 方程的推导	66
3.4.3	浓溶液中的扩散	66
3.5	固体中的扩散	68
3.5.1	依据晶格理论的金属中扩散系数	68
3.5.2	较复杂的固体中扩散	69
3.6	聚合物中的扩散	70
3.6.1	稀溶液中的聚合物溶质	70
3.6.2	聚合物溶剂中的低分子溶质	71
3.6.3	聚合物溶剂中的聚合物溶质	72
	参考文献	72

第4章 浸取与溶解	74
4.1 浸取过程的热力学	74
4.1.1 浸取过程的热力学分析	74
4.1.2 离子熵的对应原理	76
4.1.3 电位-pH图	78
4.2 常用的浸取过程	84
4.2.1 无机物质的浸取	84
4.2.2 有机物质的浸取	89
4.3 浸取过程的动力学	91
4.3.1 动力学方程式	92
4.3.2 影响浸出速率的各种因素	96
4.4 溶解和分解	99
4.4.1 溶解法	99
4.4.2 熔融法	101
4.4.3 烧结法	101
4.4.4 有机试样的分解	102
4.4.5 有机试样的溶解	103
参考文献	103
第5章 萃取分离	105
5.1 溶剂萃取原理	105
5.1.1 萃取过程的分配平衡	105
5.1.2 萃取相平衡原理	109
5.1.3 伴有化学反应萃取的相平衡	112
5.2 混合溶剂萃取与协同萃取	114
5.2.1 混合溶剂萃取	114
5.2.2 协同萃取	115
5.3 萃取体系的分类与萃取剂	117
5.3.1 萃取体系分类	117
5.3.2 萃取剂的选择标准	121
5.3.3 萃取剂的种类	122
5.4 超临界流体萃取	128
5.4.1 超临界流体及其性质	128
5.4.2 超临界流体和溶质所组成体系的热力学相平衡模型	134
5.4.3 超临界流体萃取中相际平衡的状态方程方法	141
5.4.4 超临界流体萃取过程	148
5.4.5 超临界流体萃取过程的质量传递	154
5.4.6 超临界萃取分离方法和操作条件	155
5.5 双水相萃取	158
5.5.1 双水相体系	158
5.5.2 双水相分配原理	159

5.5.3	影响双水相分配的主要因素	163
5.5.4	双水相系统的选择	166
5.5.5	双水相萃取技术的研究和应用	166
	参考文献	169
第6章	膜分离技术	172
6.1	膜分离技术概况及发展趋势	172
6.1.1	各种膜技术的发展趋势	174
6.1.2	膜材料的开发趋势	176
6.1.3	仿生膜的基础研究	176
6.2	膜材料和膜制备	176
6.2.1	膜材料	176
6.2.2	膜材料的改性	180
6.2.3	膜的制备	180
6.3	分离膜的表征	186
6.3.1	多孔膜的表征	186
6.3.2	离子膜的表征	191
6.3.3	无孔膜的表征	192
6.4	反渗透和纳滤分离过程	193
6.4.1	分离机理	194
6.4.2	其他分离机理模型	200
6.5	超滤和微滤分离过程	203
6.5.1	摩擦模型	204
6.5.2	筛分模型	206
6.6	电渗析分离过程	207
6.6.1	电渗析过程	207
6.6.2	电渗析分离的传递现象	207
6.6.3	电渗析分离的基本理论	208
6.7	浓差极化现象与膜污染	209
6.7.1	浓差极化现象	209
6.7.2	压力驱动膜过程中的浓差极化	210
6.7.3	浓差极化现象的描述	212
6.7.4	膜污染	214
6.8	膜器件类型与设计	217
6.8.1	膜材料与膜组件	217
6.8.2	板框式膜组件	217
6.8.3	卷式膜组件	217
6.8.4	管式膜组件	218
6.8.5	中空纤维膜器	219
	参考文献	219
第7章	离子交换分离	222
7.1	离子交换的基本原理	222

7.1.1	离子交换平衡	222
7.1.2	离子交换选择性	225
7.1.3	离子交换反应	228
7.2	离子交换动力学	228
7.2.1	离子交换速率理论	228
7.2.2	离子交换容量与离子交换动力学	230
7.2.3	离子交换树脂的溶胀行为对离子交换性能的影响	231
7.3	离子交换分离过程	231
7.3.1	树脂的选择	231
7.3.2	柱上操作	232
7.3.3	穿透曲线	234
7.3.4	分步淋洗和梯度淋洗	235
7.4	离子交换的应用	236
7.4.1	离子交换树脂法提取分离稀有金属和稀土金属	236
7.4.2	离子交换树脂法提取分离氨基酸	238
7.4.3	离子交换树脂法提取纯化抗生素	239
7.4.4	离子交换树脂法提取分离生物碱	240
7.4.5	离子交换树脂法脱盐、脱色	241
7.4.6	离子交换树脂法脱水	242
	参考文献	242
第8章	吸附分离	244
8.1	固体表面上的吸附作用	244
8.1.1	吸附与吸附量	244
8.1.2	吸附量随温度、压力和体相浓度的变化	245
8.1.3	脱附迟滞现象	247
8.1.4	物理吸附与化学吸附	248
8.1.5	变温吸附和变压吸附	248
8.2	固体吸附的实验、半经验和理论方法	249
8.2.1	实验方法	249
8.2.2	半经验模型	249
8.2.3	理论方法	253
8.3	吸附分离材料	254
8.3.1	吸附分离材料的分类	254
8.3.2	吸附分离材料的发展前景	256
8.4	吸附分离特性参数	257
8.4.1	穿透曲线	257
8.4.2	优惠与非优惠吸附线	257
8.4.3	传质区理论长度	259
8.4.4	残余吸附量 q_R	260
8.4.5	床层高度与直径	261

8.5 液-固界面上的溶质计量置换吸附模型	261
8.6 各种液-固吸附等温线的比较	266
参考文献	271
第9章 色谱分离技术	272
9.1 色谱分离法的分类	272
9.2 色谱法的基本原理	272
9.2.1 分配系数	273
9.2.2 阻滞因数 R_f	273
9.2.3 洗脱体积 V_e	274
9.2.4 塔板理论	274
9.2.5 色谱分离回收率和纯度	275
9.3 萃取色谱法	276
9.3.1 萃取色谱法的原理和特点	276
9.3.2 萃取色谱分离	277
9.3.3 萃取色谱分离的应用	278
9.4 凝胶色谱法	279
9.4.1 原理和分类	279
9.4.2 凝胶色谱分离	280
9.4.3 应用	280
9.5 亲和色谱法	280
9.5.1 原理与操作	280
9.5.2 亲和吸附介质	281
9.5.3 亲和色谱分离过程及其理论分析	284
9.6 电泳分离技术	287
9.6.1 基本原理	287
9.6.2 纸电泳	288
9.6.3 薄层电泳	288
9.6.4 凝胶电泳	289
9.6.5 等电聚焦电泳	289
参考文献	290
第10章 分离方法的选择	291
10.1 分离方法选择标准	291
10.2 选择分离方法的要素	292
10.2.1 分离对象的性质	292
10.2.2 分析的要求	292
10.3 分析方法的确定	293
参考文献	293

第 1 章 绪 论

1.1 分离科学及其研究对象

分离科学是研究分离、浓集和纯化物质的一门科学。近年来,由于精细化工、生命科学和材料科学等新兴学科的发展,使现代分离手段得到广泛应用,促使分离科学的基础理论日臻完善,技术水平不断提高,使其逐渐发展成为一门相对独立的学科。

1.1.1 分离科学与现代分离科学

分离科学是一门与人类生活、社会发展、科学技术进步及工农业生产联系十分密切的学科。分离技术的应用已有长久的历史,我国几千年前就出现了炼铜、冶铁技术(将在矿石中以化合物形式存在的铜和铁经冶炼变成了单体的铜和铁,铜和铁与矿石中的其他组分及其伴生矿物的分离实质上就是分离科学中的第二类化学平衡与相分离的结合),明朝宋应星所著的《天工开物》中早已记载了我国古代在酿酒和制糖中采用蒸馏、结晶等分离技术。几百年来,分离技术经历了手工作坊和单元操作两个阶段。在有机合成、石油炼制、化工、冶金、食品及制药工业中逐渐形成了蒸馏、吸收、萃取、吸附等传统的分离单元操作。

随着现代工业的发展和科学技术的不断进步,人们对分离技术提出了越来越高的要求,促进了分离理论及新技术的研究,逐步掌握了分离理论及技术的规律,建立了接近于实际情况的数学模型,使各种新的现代分离技术不断涌现,形成了崭新的现代分离科学。

“现代”意味着:①分离过程使用最新的技术,例如激光、计算机、微生物及电子技术等;②分离的对象为生物工程及现代化工业产品,如生命科学中蛋白质、核酸、酶及多糖等的分离和纯化,原子能科学中同位素的分离,材料科学中新材料的制备等;③提出新的分离原理,发展新的分离方法和技术;④对分离技术观念上的更新。经典评价分离方法的优劣时,仅从宏观效果,如对有关物质的回收率、分离度等指标进行评估。而现代分离科学对某些体系,如蛋白质药物的分离,除上述指标外,还要对其分离过程中微观变化——分子构象进行评估,分子构象将直接影响蛋白质的生物活性,有时为了满足这个指标,不得不放弃高的质量回收率和高分离度。另外,对传统分离科学而言,提高或降低 1% 的回收率往往是不予考虑的,然而现代分离的对象有些是十分昂贵的,若回收率降低 1%,损失就十分惊人,如对某些总量 1g 的稀贵蛋白质而言,若回收率降低 1%,损失可达几十万元。

1.1.2 现代分离科学的重要性

发展现代分离科学是以高效、节能为核心,对传统分离操作进行技术改造。能源开发、石油产品的深度加工、煤化工的重新振兴、精细化工的持续发展都带来了多样化产品分离和高纯物质的再提纯任务。蒸馏、吸收、萃取、吸附等传统的分离单元操作都是不可缺少的。即便在 21 世纪初,以上传统的分离单元操作仍占据重要的地位。因此,采用现代分离技术、提高分离效率、降低能耗、降低成本、提高质量是促使传统分离技术不断进步的重要任务。

现代科学的发展对分离科学提出了更高的要求。现代工业的发展和科学技术的进步对产品分离纯度的要求很高，难度也在不断加大。如生命科学的基础研究——蛋白质的分离和纯化以及在基因工程产品的纯化过程中，有时就会出现回收率低的现象，其主要原因或是分离过程中发生了部分生物大分子失活难以得到一定量的目标产品，或是从大肠杆菌提取液中分离及蛋白复性过程中形成沉淀致使大部分蛋白损失。有些产品往往是很昂贵的，因此，发展现代分离科学也是形成新兴的高利润、高技术产业的需要。当前，某些重要的生物制品，如某些标准蛋白或激素由于提取困难，价格竟高达每毫克数万美元。一些发达国家正在或已放弃了一些劳动力密集型企业，转向技术密集型的高利润产业。许多国家都把 21 世纪的科学目标定为人类科学，而分离科学的现代化便是实现这一目标的重要手段。

现代分离科学对于治理现代化工业带来的“三废”、防止环境污染也是有效的。治理“三废”、变废为利是与现代化建设同步发展的事业。近年来利用现代科学分离手段治理“三废”已取得长足进展。泡沫吸附分离技术、微生物技术，如降解塑料消除白色污染等已经用于多种工业废水及垃圾的处理中并取得良好效果就是很好的事例。

现代分离科学还是发现和研究新物质及探索宇宙奥秘的重要手段。众所周知，元素周期表中每种元素的发现，都经历了制取纯净物质、确定其结构、测定其所具有的性质才能得以承认的过程。要确定月球或火星上是否有过生命，必不可少的工作就是对所采集的样品进行分离，测定其中是否含有生命的遗迹——氨基酸和水。因此，分离科学又是一门基础学科，是人类在生产活动、科学研究中必不可少的重要手段。

1.1.3 现代分离科学研究的对象

分离科学是研究被分离组分在空间移动和再分布的宏观和微观变化规律的一门学科。分离过程中伴随着分离与混合（或定向迁移与扩散）、浓集与稀释。从热力学观点出发，以上这两种过程的后者都为自发过程。分离科学实质上是研究如何将热力学第二定律所说的自发过程以相反方向进行到最大限度的科学，即如何给体系增加能量和降低体系的熵值以便增强分离效果。从这种意义上讲，说“分离科学是一门不断地与热力学第二定律所描述过程做斗争的科学”是有一定道理的。现代分离科学所研究的内容有：①各种表面上看来毫无联系的各分离方法之间的共同规律，例如组分在相及界面迁移过程中发生了什么变化，对分离产生了什么样的影响，如何强化对分离有利的因素和抑制那些不利的因素；②如何将现代科技中最先进的技术和材料应用于分离技术中；③选择现代科学技术中对分离和纯化要求最迫切的对象进行研究，以提高经济效益，解决生产中的关键问题；④将各种分离方法联用，研究最优化的分离条件；⑤分离出迄今尚未发现的新物质；⑥寻求新的分离原理及方法等。

1.1.4 现代分离科学的发展趋势

工业技术发达的国家已开始把大量资金投放在高新技术工业上，材料科学、生命科学和生物技术是高新技术工业的重要组成部分。以生命科学和生物技术为例，近几年来，美国、俄罗斯、日本以及其他许多工业化程度较高的国家都相继建立了各种专门的研究机构和开发公司。例如，新成立的仅以“分离科学”和分离技术命名的公司就有上百家。自 20 世纪 80 年代开始，美国化学会每年都对在分离科学研究中做出贡献的科学家进行奖励，1986 年奖励了犹他大学的吉丁斯（Giddings）教授，表彰他创立的场级分馏法；1989 年奖励了美国

普渡大学的瑞格涅尔 (Regnier) 教授在用高效液相色谱分离生物大分子, 特别是在“蛋白质计量置换保留机理方面”的贡献。20 世纪 90 年代又相继奖励了英国爱丁堡大学前教授纳克斯 (Knox) 对柱色谱速率理论及电驱动毛细管分离体系的贡献, 毛细管电泳的奠基人美国北卡罗纳大学的教授乔根森 (Jorgenson), 在研究分离体系中分子间相互作用力很有成效的美国明尼苏达大学教授卡尔 (Carr), 美国橡树林国家实验室及田纳西大学的教授给松 (Guoichon) 对非线性色谱理论研究中的贡献, 美国普渡大学教授汪凯特 (Wankat) 在工业色谱分离方面的贡献等; 还对美国在分离工程及分离技术方面做出贡献的一些成就, 如哥伦比亚大学 (密苏里) 前教授盖克 (Gehrke) 对月球及火星岩石样品的分析及有无生命遗迹存在的确认, 在喷干技术中做出贡献的美国加利福尼亚大学伯克利分校的教授肯 (King) 的贡献等。

美国硅谷所在地的加利福尼亚州在美国率先成立了分离科学学会, 仅 3 年时间其年会就从州的规模扩大为在国际上颇有影响的国际学术报告会。另外, 从 20 世纪 80 年代初开始, 在国外愈来愈多的大学里设立了“现代分离科学”课程, 课程内容不断更新, 国际上每年多次召开以分离科学为内容的学术会议, 仅以“高效液相色谱”及“毛细管电泳”命名的国际会议每年就有十几次。

正因为如此, 目前形成了在研究分离过程和技术进展方面空前未有的踊跃局面。例如: 解决生物酶、蛋白质的分离和纯化的高效液相色谱技术, 双水相萃取分离技术, 电动毛细管色谱技术, 毛细管电泳技术及超临界分离技术等。这些新颖分离技术的出现大大丰富了现代分离科学的内容, 解决了现代分离科学中的许多难题。

1.2 分离过程的分类和特征

分离之所以能够进行, 是由于混合物中待分离的组分之间在物理、化学、生物学等方面的性质至少有一个存在着差异, 把这些差异按物理、化学以及生物学性质进行分类, 如表 1-1 所示。

表 1-1 可用于分离的性质

物理方面的性质	
力学性质	密度, 摩擦系数, 表面张力, 尺寸, 质量
热力学性质	熔点, 沸点, 临界点, 转变点, 蒸气压, 溶解度, 分配系数, 吸附平衡
电、磁性质	电导率, 介电常数, 迁移率, 电荷, 淌度, 磁化率
输送性质	扩散系数, 分子飞行速率
化学方面的性质	
热力学性质	反应平衡常数, 化学吸附平衡常数, 离解常数, 电极电位
反应速率性质	反应速率常数
生物学方面的性质	生物学亲和力, 生物学吸附平衡, 生物学反应速率常数

在表 1-1 所列的物理以及化学性质当中, 属于混合物平衡状态的参数有: 溶解度, 分配系数, 平衡常数等; 属于各个组分自身所具有的性质有: 密度, 迁移率, 电极电位等; 而属于生物学方面的性质有: 由生物高分子这样的极大分子复合后的相互作用, 立体构造, 有机体的复杂反应以及三者综合作用产生的特殊性质等。

这些性质上的差异与能量的组合可以有各种形式。对发生作用的方式还可以进行很多推敲与改进, 所以到目前为止, 人们设计了许多分离方法, 并完善以至实用化。

各类分离方法大致可分为三类：①输入能量使原混合物质形成新的相界面的方法——平衡分离过程；②输入能量强化特殊梯度场的方法——速率差分离过程；③输入能量促进反应的方法——反应分离过程。

按分离原理，分离过程可分为机械分离、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，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 1-2 列出了几种典型的机械分离过程。

表 1-2 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分离两类。

(1) 平衡分离过程 平衡分离过程是依据被分离混合物中各组分在不互溶的两相平衡配组成不等的原理进行分离的过程。

分离媒介可以是能量媒介如热和功或物质媒介如溶剂和吸附剂，有时也可两种同时应用。表 1-3 列出了常用的基于平衡分离的分离过程。

表 1-3 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+气	物质沸点	稀溶液浓缩
闪蒸	液	热-减压	液+气	相对挥发度	海水脱盐
蒸馏	液或气	热	液+气	相对挥发度	酒精增浓
热泵	气或液	热或压力	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	气+液	挥发度、溶解度	恒沸物分离
结晶	液	热	液+固	溶解平衡	糖液脱水

(2) 速率分离过程 速率分离是依据被分离组分在均相中的传递速率差异而实现组分的分离，这类过程所处理的原料和产品通常属于同一相态，仅有组成上的差别。例如利用溶液中分子、离子等粒子的迁移速率和扩散速率等的不同来进行分离。

表 1-4 中所示为典型的速率分离过程，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。

表 1-4 几种典型的速率分离过程

名 称	原 料 相 态	分 离 方 式	产 物	分 离 原 理	应 用 实 例
气体渗透	气	压力、膜	气	浓度差、压差	富氧、富氮
反渗透	液	膜、压力	液	克服渗透压	海水淡化
渗析	液	多孔膜	液	浓度差	血液透析
渗透汽化	液	致密膜、负压	液	溶解、扩散	醇类脱水
泡沫分离	液	表面能	液	界面浓度差	矿物浮选
色谱分离	气或液	固相载体	气或液	吸附浓度差	难分体系分离
区域熔融	固	温度	固	温度差	金属锗提纯
热扩散	气或液	温度	气或液	温度差引起浓度差	气态同位素分离
电渗析	液	电场、膜	液或气	电位差	氨基酸脱盐
膜电解	液	(膜)电场	液	电位差	液碱生产

膜分离技术是近十几年来研究较多、发展较快的一种速率控制分离过程。此外，还有用场作为分离剂的速率控制过程，例如超速离心分离、电沉降、高梯度磁分离、色谱分离等。

1.2.3 反应分离

化学反应通常能将反应物转化为目的产物，如果这类可转化为目的产物的反应物存在于混合物中，则人们可借助于化学反应将其从混合物中分离出来或直接把它去除。化学反应的种类很多，可分为可逆与不可逆反应、均相与非均相反应、热化学反应、电化学反应、催化反应等。

不是所有的化学反应都可用于分离为目的的过程，一般情况下可逆反应、不可逆反应、分解反应三大类可以考虑选用，但也要根据具体的混合物分离的要求来筛选，如表 1-5 所示，借助于分解反应的分离技术还可分为生物分解反应、电化学分解反应、光分解反应等类。

表 1-5 几种典型的反应分离技术

分 离 种 类		原 料 相	分 离 剂	代 表 性 技 术	应 用 实 例
可逆反应		可再生物	再生剂	离子交换、反应萃取	水软化
不可逆反应		一次性转化物	催化剂	反应吸收、反应结晶	烟道气中 SO ₂ 吸收
分解反应	生物分解反应	生物体	微生物	生物降解	废水厌氧生物处理
	电化学分解反应	电反应物	电、膜	双极膜水解反应	湿法精炼
	光分解反应	光反应物	光		烟道气 CO ₂ 生物转化

利用反应进行分离操作的方法很多。例如，通过调整 pH，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的方法；利用离子交换树脂的交换平衡反应的离子交换分离法；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）分离除去的方法等，都可以看作是反应分离操作。表 1-6 把反应分离操作按反应种类做了分类。

反应分离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。

表 1-6 反应分离操作

反应体	再生型	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、反应晶析、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

而一次性反应体在与被分离物质发生反应后，它的化学构造也会发生不可逆的改变。例如，排烟脱硫时，气体中的 SO_2 变为石膏被分离掉。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 CO_2 和水，并被分离。

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时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的资质来推进反应的。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 分离科学中的基本概念

1.3.1 不同浓度组分的分离

分离的目的除了获得纯的欲分离组分外，还要求提高欲分离组分的浓度，依据欲分离组分在原始溶液中浓度的不同，罗尼 (Rony) 提出了下述三个概念以示区分。

- (1) 富集 对摩尔分数小于 0.1 组分的分离。
- (2) 浓缩 对摩尔分数处于 0.1~0.9 范围内组分的分离。
- (3) 纯化 对摩尔分数大于 0.9 组分的分离。

虽然罗尼的区分法完全是人为的，但已被许多人所接受。

1.3.2 回收因子、分离因子和纯度

- (1) 回收因子 R_i R_i 为欲回收量 Q 占样品总量 Q_0 的比例。它的数学表达式为：

$$R_i = Q/Q_0 \quad (1-1)$$

在任何一个分离过程中，欲回收组分的回收因子都是愈高愈好。

- (2) 分离因子 $S_{B/A}$ 对于 A、B 两种组分而言，A 为欲分离的组分，B 为伴随组分，B 对 A 的分离因子 $S_{B/A}$ 定义为：

$$S_{B/A} = \frac{Q_B/Q_A}{Q_{0,B}/Q_{0,A}} = \frac{R_B}{R_A} \quad (1-2)$$

$$\text{或} \quad \frac{Q_B}{Q_A} = S_{B/A} \frac{Q_{0,B}}{Q_{0,A}} \quad (1-3)$$

因在一般定量分离中， $R_A \approx 1$ ，所以：

$$S_{B/A} \approx \frac{Q_B}{Q_{0,B}} \approx R_B \quad (1-4)$$

由此可见，在分离过程中，要求分离因子愈小愈好，即 R_B 值愈小愈好。

分离因子取决于两个因素：