



全国高等院校化工类专业规划教材

# 化工分离工程

(第二版)

邓修 吴俊生 等 编著



科学出版社

全国高等院校化工类专业规划教材

# 化工分离工程

(第二版)

邓修 吴俊生 等 编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

化工分离工程是我国高等院校化学工程与工艺专业的一门重要课程。本书在内容上以传质分离过程开发为主线,论述有关的工程问题,如分离方法的选择、分离流程的择优和节能、分离操作和设备的设计计算、分离设备的传质特性和强化以及分离操作的实验研究方法、中试组织、工程放大、简要的化工过程模拟等。本书阐明原理时简明扼要、深入浅出,论述的内容和选例密切结合工程实际,具有较强的实用性。本次修订增选了几个近年来极具发展潜力的分离过程,在每章末选编了若干思考题和计算题,并完善了教学课件供教师选用。

本书可适应大学本科和硕士研究生两个层次的教学,编者分别建议了教学内容和学时数,各学校可结合实际情况选用。本书也可作为从事化学、化工、环境等专业及工程设计人员阅读和提高了的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

化工分离工程/邓修等编著. —2版. —北京:科学出版社,2013. 1  
全国高等院校化工类专业规划教材

ISBN 978-7-03-036515-6

I. ①化… II. ①邓… III. ①化工过程-分离-高等学校-教材  
IV. TQ028

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 012695 号

责任编辑:陈雅娴 刘俊来 / 责任校对:邹慧卿  
责任印制:阎 磊 / 封面设计:迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

骏杰印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2000 年 1 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2013 年 1 月第 二 版 印张:29

2013 年 1 月第十二次印刷 字数:740 000

定价:58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 第二版前言

光阴荏苒，一十二载。自 2000 年以来，蒙读者抬爱、多校选用、出版社敬业，拙著连续印刷十二次，还忝为华东理工大学“上海市精品课程”的指定教材，编者感到十分欣慰。出版社再三委托，希望《化工分离工程》再版，盛情难却下，余等浸淫分离工程学科的建设与教学数十年，认识到近年来该学科老的过程不断推陈出新、计算方法臻于完善，新的过程持续发展、渐趋成熟；认识到分离工程教学越贴近生产实践，越有更高的需求。思之再三，编者进行了修订，以期满足广大读者的要求与出版社的期待。

本次修订内容包括：

- (1) 绪论，进一步阐明了分离工程的基本点——“场”的概念及其引申(邓修)。
- (2) 精馏，配合教学中用的“Process”等软件系统，增补了新的精馏严格计算方法，并对全章进行了修订(吴俊生)。
- (3) 基于稀土和中医药的现代化生产工艺，新设“固液浸取”章(周永传)。
- (4) 对“传质分离过程的节能”章进行若干修订(吴俊生)。
- (5) 新增“固膜分离技术”的内容，并独立成章(邓修)。
- (6) 基于食品与医药领域的最新发展，新添“微波辅助提取技术”(邓修)。
- (7) 新增“色谱分离方法”的内容，并独立成章(吴艳阳、朱家文)。
- (8) 为使内容更集中，删除原书第 8 章。
- (9) 配合教学的需要，每章后附若干思考题和计算题(唐小琪)。考虑到工程界和各类书籍至今 SI 制与非 SI 制杂存，计算题中选收了少量非 SI 制，望学生在单位换算方面得到锻炼。
- (10) 为方便教学，本次修订配套制作了数学课件，需者可联系编者朱家文、唐小琪、杨金根和吴艳阳(联系人)。

本书的内容仍旧适合大学本科和硕士研究生两个层次的教学，可根据新添章节，结合总学时数自行增删。诚然，再版过程依然蒙同行、同仁以及出版社编辑的鼎力相助，在这里编者继续表达深深的敬意和谢意。

由于编者自身的知识水平和认识水平有限，再版内容中错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正，以便改正。

编者

2012 年 6 月

## 第一版前言

世界万物都是由有序自动地走向无序,所有纯物质都逐渐变为混合物。好在有了人类,能够有目的地能动地做功,使上述混合过程逆转为分离过程,以求得人类社会需要的纯物质。

大多数化学过程和物理过程所得到的产品都是混合物。分离工程就是使混合物得以分离成为二种或二种以上的较纯物质的一门工程技术。它是化学工程学科的一个重要分支。自从1901年戴维斯(Davis)所著的《化学工程师手册》问世至今,化学工程学有了很大的发展,分离工程始终扮演着化工生产过程中的关键角色。近年来,它的发展更为迅速,研究与应用的分离方法种类繁多。本书试图以传质分离过程开发为主线,论述有关的工程问题,如分离方法的选择、分离流程的择优和节能、分离操作和设备的设计计算、分离设备的传质特性和强化以及分离操作的实验研究方法、中试组织、简要的化工过程模拟等。力求阐明原理时简明扼要、深入浅出,论述的内容和选例密切结合工程实际,具有较强的实用性。

记得有把编书者喻作裁缝一说,窃以为再恰当不过了。裁缝并不会织布,但他刻意追求的是布料的质地、色彩的选择、线条的飘逸流畅。在量体裁衣中使个体的表达和群体的风格趋于尽善尽美。正像编书者在编写过程中并不看重把自己的科研成果编入,而是希望博采众长,个性孕于共性之中,把最好的成果和见解呈现在读者面前。这两者又是何其相似乃尔。

近年来,我国高等院校化学工程与工艺专业都将“分离工程”作为一门重要的课程来开设。本书能够写到现在这个样子和出版,当然得益于编者长期从事于分离工程的教学与实践;得益于华东理工大学《分离工程》和《分离工程选论》两本教材和讲义的多年使用;得益于校教务处和上海市研究生教材委员会的支持和资助;得益于我校从事这方面工作的教师的宝贵经验和无私地提供素材。在这里,让我们对于在各种情况下以各种形式帮助过本书出版的单位和个人表达深深的敬意和谢意。

全书共分八章,具体分工为:第一、三、六章(邓修),第二、五、八章(吴俊生),第四章(郁威、蔡建国[超临界]、陆强[反胶束、双水相]),第七章(邓修、韩伟[液膜分离]、陈鸿雁[吸附与层析])。韩伟还参与了全书的校勘和汇总。

本书的内容可适应大学本科和硕士研究生两个层次的教学。它既可作为大学本科的专业课“分离工程”的教材,又可作为硕士研究生的必修课“分离工程选论”的教材。各学校可结合实际情况选用,具体内容划分上可参考如下:

大学本科专业的学习内容为:概述(第一章),多组分精馏及计算(第二章和第八章),化学吸收与过程开发(第三章),萃取和新分离方法(第四章和第七章),建议学时 36~40;

硕士研究生必修课的学习内容为:概述(第一章),吸收过程开发(第三章),分离过程节能(第五章),界面特性及调控(第六章),新分离方法(第七章),建议学时 36~40。

在本书付印之际,欣闻教育部门已在着手 21 世纪课程教材的编写。愿本书作为世纪之交的一本教材贡献于读者,能起到承上启下的作用。

由于我们自身的知识水平和认识水平所限,错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评、指正,以便再版时改正。

作者

1999年7月



# 目 录

第二版前言

第一版前言

第 1 章 绪论	(1)
1.1 概述	(1)
1.1.1 分离过程的发展与分类	(1)
1.1.2 分离过程的地位	(3)
1.2 分离因子	(4)
1.3 过程开发及方法	(5)
1.4 分离方法的选择	(7)
思考题	(11)
参考文献	(11)
第 2 章 精馏	(12)
2.1 概述	(12)
2.1.1 理论板、板效率和填料的理论板当量高度	(13)
2.1.2 精馏操作开发的内容和步骤	(14)
2.2 汽液相平衡	(15)
2.2.1 相平衡关系的表示方法	(15)
2.2.2 求取相平衡常数的两条途径	(15)
2.2.3 汽液相平衡系统的分类	(16)
2.2.4 逸度、逸度系数和焓的基本方程	(17)
2.2.5 实际气体理想溶液的逸度 $\hat{f}_i^V$	(18)
2.2.6 烃类系统相平衡常数的近似估计—— $p$ - $T$ - $K$ 列线图	(18)
2.2.7 从维里状态方程计算逸度和逸度系数	(22)
2.2.8 应用 SRK 状态方程计算逸度、逸度系数和焓	(23)
2.2.9 纯液体逸度的计算	(24)
2.2.10 活度系数与过剩自由焓的关系	(25)
2.2.11 沃尔型方程	(26)
2.2.12 以局部组成概念为基础的活度系数方程——威尔逊、NRTL 和 UNIQUAC 方程	(27)
2.2.13 从实测的汽液平衡数据求取活度系数方程中的参数	(29)
2.2.14 相平衡常数计算方法的选择	(29)
2.2.15 多组分系统的泡点计算	(30)
2.2.16 多组分系统的露点计算	(34)
2.2.17 等温闪蒸计算	(35)
2.3 精馏计算	(38)
2.3.1 精馏的定态数学模型	(38)
2.3.2 精馏的定态模拟计算算法概述	(39)

2.3.3	三对角线矩阵算法	(40)
2.3.4	全变量迭代法	(43)
2.3.5	内外层法	(47)
2.3.6	精馏的简捷计算	(51)
2.3.7	多组分精馏塔内的浓度、温度和流率分布	(59)
2.3.8	精馏操作压力的选择	(61)
2.4	特殊精馏	(62)
2.4.1	萃取精馏	(63)
2.4.2	恒沸精馏	(71)
2.4.3	恒沸精馏与萃取精馏的比较	(78)
2.5	板效率	(78)
2.5.1	效率的四种表示方法	(78)
2.5.2	点效率与传质间的关系	(79)
2.5.3	塔板上液体混合情况对板效率的影响	(80)
2.5.4	液体在塔板上的非均匀流动	(81)
2.5.5	气体在板间的不完全混合和通过塔板的不均匀分布	(82)
2.5.6	雾沫夹带的影响	(82)
2.5.7	塔效率和板效率间的关系	(83)
2.5.8	系统物性对板效率的影响	(85)
2.5.9	相平衡数据误差对塔效率的影响	(86)
2.5.10	获取效率的途径	(86)
2.5.11	多组分系统的效率	(88)
2.5.12	板效率的其他表示法	(88)
2.5.13	填料精馏塔的理论板当量高度	(89)
	思考题	(92)
	计算题	(93)
	参考文献	(96)
<b>第3章</b>	<b>吸收</b>	(98)
3.1	吸收过程在化学工业中的应用	(99)
3.1.1	吸收装置的工业流程	(99)
3.1.2	吸收过程的应用	(102)
3.2	吸收过程的设计变量和对工艺生产的适应性	(103)
3.2.1	设计关键参数分析	(104)
3.2.2	吸收过程对工艺生产的适应性	(105)
3.3	气液相平衡	(105)
3.3.1	物理溶解时的相平衡	(106)
3.3.2	伴有化学反应的吸收相平衡	(110)
3.3.3	相平衡曲线及其比较	(112)
3.3.4	工业应用实例	(113)
3.4	传质理论	(116)
3.4.1	双膜论	(116)

3.4.2	渗透论	(117)
3.4.3	表面更新论	(118)
3.5	传质速率与传质系数	(119)
3.5.1	物理吸收传质速率	(119)
3.5.2	化学吸收传质速率与增强因子	(121)
3.5.3	传质系数的关联式	(125)
3.6	化学吸收与增强因子	(126)
3.6.1	化学吸收的分类及其判别	(126)
3.6.2	以不同传质理论处理化学一级不可逆反应	(130)
3.6.3	不可逆瞬时化学反应	(138)
3.6.4	不可逆二级反应	(141)
3.6.5	可逆反应	(142)
3.7	设计择要	(145)
3.7.1	吸收率	(146)
3.7.2	传质设备的流向	(146)
3.7.3	最小液体流率	(150)
3.7.4	最小蒸汽速率	(153)
3.8	中间试验	(157)
3.8.1	中试流程	(158)
3.8.2	中试组织	(158)
3.9	塔径	(160)
3.10	塔高	(164)
3.10.1	低浓度气体吸收时的填料高度	(164)
3.10.2	高浓度气体吸收时的填料高度	(165)
3.10.3	多组分逆流吸收塔的填料高度——吸收因子法	(168)
3.10.4	伴有化学反应时的吸收塔的填料高度	(176)
	思考题	(179)
	计算题	(179)
	参考文献	(182)
<b>第4章</b>	<b>液液萃取</b>	(184)
4.1	液液萃取过程	(184)
4.1.1	液液萃取过程的特点和主要研究内容	(184)
4.1.2	萃取剂的选择和常用萃取剂	(185)
4.1.3	液液萃取过程中的一些常用名词	(187)
4.2	液液相平衡	(188)
4.2.1	三元体系相图表示法	(188)
4.2.2	互溶度测定方法	(189)
4.2.3	测定相平衡的实验方法	(190)
4.2.4	结线关联	(191)
4.2.5	液液相平衡数据的预测和常用关联方法	(192)
4.2.6	相平衡数据的检索	(193)



4.3 萃取过程计算 .....	(193)
4.3.1 萃取过程分析 .....	(193)
4.3.2 逐级萃取过程 .....	(193)
4.3.3 微分逆流萃取过程 .....	(198)
4.4 萃取设备 .....	(204)
4.4.1 萃取设备的分类 .....	(204)
4.4.2 萃取设备的选择 .....	(206)
4.4.3 萃取设备中两相的流动特性 .....	(206)
4.4.4 萃取设备中的传质特性 .....	(209)
4.4.5 萃取设备的设计 .....	(211)
4.5 萃取过程的新进展 .....	(217)
4.5.1 超临界流体萃取 .....	(217)
4.5.2 反胶束萃取 .....	(233)
4.5.3 双水相萃取 .....	(240)
思考题 .....	(246)
计算题 .....	(246)
参考文献 .....	(248)
<b>第5章 固液浸取 .....</b>	<b>(251)</b>
5.1 概述 .....	(251)
5.2 固体中的分子扩散 .....	(252)
5.2.1 遵从菲克定律的固体内的扩散 .....	(252)
5.2.2 与固体结构有关的多孔固体中的扩散 .....	(253)
5.3 浸取过程的相平衡 .....	(254)
5.3.1 三角坐标 .....	(254)
5.3.2 相平衡 .....	(254)
5.4 浸取过程的计算 .....	(255)
5.4.1 浸取的平衡及理论级 .....	(255)
5.4.2 物料衡算及操作线方程 .....	(256)
5.4.3 代数法 .....	(256)
5.4.4 图解法 .....	(257)
5.4.5 解析法 .....	(259)
5.5 浸取过程的工艺条件选择 .....	(262)
5.5.1 固体物料的预处理 .....	(262)
5.5.2 浸取溶剂的选择 .....	(263)
5.5.3 浸取温度的选择 .....	(263)
5.5.4 浸取时间 .....	(263)
5.6 浸取过程设备 .....	(263)
5.6.1 渗滤浸取设备 .....	(264)
5.6.2 分散固体浸取设备 .....	(266)
5.6.3 螺旋输送浸取器 .....	(268)

5.7 应用举例 .....	(269)
5.7.1 矿物加工 .....	(269)
5.7.2 中药材浸取 .....	(270)
5.7.3 食品加工 .....	(271)
思考题 .....	(271)
计算题 .....	(271)
参考文献 .....	(272)
<b>第6章 传质分离过程的节能</b> .....	(273)
6.1 分离过程节能的基本概念 .....	(273)
6.1.1 有效能(焓)衡算 .....	(273)
6.1.2 分离最小功 .....	(274)
6.1.3 热力学效率 .....	(275)
6.1.4 分离过程中有效能损失的主要形式 .....	(275)
6.2 精馏节能技术 .....	(277)
6.2.1 最适宜回流比 .....	(277)
6.2.2 最佳进料热状态 .....	(277)
6.2.3 中间冷凝器和中间再沸器 .....	(279)
6.2.4 多效精馏 .....	(279)
6.2.5 热泵精馏 .....	(280)
6.2.6 SRV 精馏 .....	(281)
6.3 多组分物料分离流程的安排 .....	(281)
6.3.1 分离流程方案数 .....	(282)
6.3.2 试探法 .....	(283)
6.3.3 调优法 .....	(288)
6.3.4 数学规划法 .....	(290)
计算题 .....	(295)
参考文献 .....	(296)
<b>第7章 界面现象及其调控</b> .....	(298)
7.1 概述 .....	(298)
7.2 界面张力 .....	(298)
7.2.1 界面与界面现象 .....	(298)
7.2.2 表(界)面张力 .....	(299)
7.2.3 溶液的表面张力——组成的影响 .....	(304)
7.2.4 动态表面张力 .....	(304)
7.3 四个基本定律 .....	(306)
7.3.1 拉普拉斯公式——弯曲液面下的附加压力 .....	(306)
7.3.2 开尔文公式——液体表面曲率与蒸汽压 .....	(307)
7.3.3 吉布斯公式——溶液的表面吸附 .....	(308)
7.3.4 杨公式——固体表面的润湿 .....	(313)
7.4 表面活性物质 .....	(314)
7.4.1 表面活性剂及其特征 .....	(314)

7.4.2	表面活性剂的亲水、亲油性和 HLB 值	(319)
7.5	界面阻力与表面湍动	(320)
7.5.1	界面阻力	(320)
7.5.2	表面湍动	(322)
7.6	固体表面的吸附	(325)
7.6.1	物理吸附与化学吸附	(325)
7.6.2	吸附的基本理论	(326)
7.7	界面调控	(330)
7.7.1	表面张力效应	(331)
7.7.2	表面润湿	(331)
7.7.3	表面吸附	(332)
7.7.4	液体界面调控	(333)
	思考题	(335)
	计算题	(335)
	参考文献	(336)
<b>第 8 章</b>	<b>新分离方法</b>	<b>(337)</b>
8.1	泡沫吸附分离技术	(337)
8.1.1	泡沫吸附分离技术的分类	(337)
8.1.2	泡沫分离流程设置及操作	(339)
8.1.3	泡沫分离的基本原理	(340)
8.1.4	特点与应用	(347)
8.2	液膜分离技术	(348)
8.2.1	液膜的结构及分类	(348)
8.2.2	液膜分离的机理	(349)
8.2.3	液膜分离的操作过程	(351)
8.2.4	液膜传质的影响因素	(352)
8.2.5	液膜分离的数学模型	(354)
8.2.6	液膜分离技术的应用	(357)
8.3	微波辅助提取技术	(360)
8.3.1	概述	(360)
8.3.2	微波萃取的基本原理	(360)
8.3.3	微波辅助提取传质过程模型	(363)
8.3.4	微波萃取的特点	(366)
8.3.5	微波辅助提取过程	(366)
8.3.6	微波萃取技术的应用	(370)
8.4	吸附技术	(371)
8.4.1	概述	(371)
8.4.2	吸附剂	(372)
8.4.3	吸附过程与吸附剂的实验研究	(373)
8.4.4	吸附分离的工艺设计	(376)
8.4.5	吸附剂的再生	(379)

8.4.6 新型吸附分离过程	(380)
8.5 热扩散简介	(384)
8.5.1 基本原理及其机理	(384)
8.5.2 热扩散的应用实例	(385)
8.6 耦合技术	(387)
8.6.1 耦合蒸馏	(388)
8.6.2 发酵与分离耦合过程	(389)
8.6.3 其他分离耦合技术	(390)
思考题	(392)
计算题	(392)
参考文献	(392)
<b>第9章 固膜分离技术</b>	(396)
9.1 概述	(397)
9.1.1 反渗透、纳滤、超过滤、微粒过滤	(397)
9.1.2 与过滤的区别	(398)
9.2 基本工作原理	(399)
9.2.1 反渗透	(399)
9.2.2 微粒过滤	(401)
9.3 固膜	(403)
9.3.1 固膜的分离机理	(403)
9.3.2 膜组件和膜分离系统	(403)
9.4 膜技术实施中遇到的若干问题	(408)
9.4.1 操作模式	(408)
9.4.2 膜的截留率	(411)
9.4.3 浓差极化与流率	(412)
9.4.4 膜降解	(414)
9.4.5 膜污染	(415)
9.5 应用实例	(416)
9.5.1 反渗透淡化技术	(416)
9.5.2 医药用水的制造	(418)
9.5.3 药物纯化与浓缩	(420)
9.5.4 超过滤回收电镀涂料	(421)
9.6 电渗析简介	(421)
9.6.1 海水脱盐	(423)
9.6.2 牛奶的组成的调整	(424)
9.6.3 果汁的调味	(425)
思考题	(426)
计算题	(426)
参考文献	(427)
<b>第10章 色谱分离方法</b>	(428)
10.1 概述	(428)

10.1.1	色谱法及其分类	(428)
10.1.2	色谱介质	(429)
10.2	液-固吸附平衡	(429)
10.2.1	液-固吸附等温线的分类	(429)
10.2.2	液-固吸附等温式	(430)
10.3	色谱分离的基本参数	(430)
10.3.1	色谱图	(430)
10.3.2	保留因子	(431)
10.3.3	分离因子	(431)
10.3.4	分离度	(432)
10.4	色谱基础理论	(432)
10.4.1	塔板理论模型	(432)
10.4.2	速率理论模型	(435)
10.5	色谱分离过程	(438)
10.5.1	进样量	(438)
10.5.2	洗脱方式	(438)
10.5.3	色谱柱的放大与计算	(440)
10.5.4	柱层析与大型工业色谱	(441)
10.6	不同分离机制的色谱分离法	(442)
10.6.1	离子交换色谱	(442)
10.6.2	疏水作用色谱	(443)
10.6.3	亲和色谱	(443)
10.6.4	凝胶过滤色谱	(444)
10.7	新型吸附和制备色谱分离技术	(445)
10.7.1	灌注色谱	(445)
10.7.2	扩张床吸附技术	(447)
	思考题	(448)
	计算题	(448)
	参考文献	(449)
附录	由英制单位和 CGS 制单位转换成 SI 制单位的转换因子	(450)

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 概 述

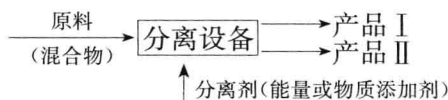
世界万物,无论是无机物,还是有机物,多以混合物状态存在。诸如天然燃料中煤、石油和天然气乃至日常生活中必不可少的空气、水和食物等,都是混合物。除了它们自身的使用价值外,往往需要将它们加以分离或提纯,才能为人们充分和合理地使用。

### 1.1.1 分离过程的发展与分类

从古到今,分离过程一直很受重视。早在古代,我国古书《物原》上就有“轩辕臣夙沙作盐”的记载;《世本》也说“黄帝时,诸侯有夙沙氏,始以海水煮乳煎成盐”。这里已孕育着现代工业中“蒸发”和“结晶”两个分离技术。其后,“煮酒”、“糖霜”(冰糖)的制作都在明代宋应星所著的《天工开物》和清代所出版的《图书集成》中有所反映。但是这时的分离过程往往只在某一物品的生产中零星提到。

随着世界工业的技术革命与发展,特别是化学工业的发展,人们发现尽管化工产品种类繁多,但生产过程的设备往往都可以认为是由反应器、分离设备和通用的机、泵、换热器等构成。其中离不开两类关键操作:一是反应器,产生新物质的化学反应过程,其为化工生产的核心;一是分离设备,用于原料、中间产物、产品等混合物的分离、提纯过程,它是获得合格产品的关键。于是研究化学工业中具有共同性的过程和设备的规律,并将之运用于生产的“化学工程”这一学科应运而生。20 世纪初,从美国李特尔首先提出“化工单元操作”的概念,麻省理工学院率先开“化工原理”这门课程开始,到现代“化学工程”已发展成为世界公认的一门系统性的工程学科。

分离工程是化学工程领域中发展较早的学科分支之一。它所研究的任一单个分离过程,一般都可表示为



众所周知,糖粒会很快地溶解于水,这说明物质的混合是个自发完成的过程。反之,要把糖水分为纯净的糖和水就必须采用容器(设备)加热使水分蒸发,水蒸气冷凝为纯水,糖在变浓的溶液中结晶成纯糖。这样才完成了熵值减少的分离过程,即外界必须对系统做功。做功的分离剂分为两大类:一类为能量添加剂,诸如热、压力、电、磁、离心、辐射等能量;另一类为物质添加剂,如过滤介质、吸收剂、表面活性剂、吸附剂、离子交换树脂、液膜及固膜材料等。

但是,分离过程的发生还必须有一个前提,即过程必须在“场”的存在下才得以进行。在一个均匀的“场”中,例如浓度为 0.1mol/L 的盐(NaCl)溶液内,浓度处处是均一的,当然就不会有传质现象发生,所以不存在分离。然而,当溶剂(如水或乙醇)接触到溶质(以中药材为例)时,药材中能溶于溶剂的溶质(如多糖或生物碱等组分)开始从药材的边缘向溶剂溶解,并在液固界面区形成较高浓度的溶液,而此时大部分溶剂还是纯态。于是,在这一系统内部就形成了从固体(药材)中心到固体表面、再由经固液界面到液相边界层,主体(溶剂)中的溶质由浓至稀



(零)的浓度场。在这个浓度场中,溶质不断溶解到溶液中,并扩散至整个溶液内直至平衡,构成了一个完整的传质分离过程。通过上述例子,说明传质过程必须在“场”的存在下才得以进行。构成“场”的元素包括浓度、温度、压力、电位、磁力、离心力以及重力等诸多因素,并由此引发多种形式的分离过程与技术可供工程选用。

分离过程可分为机械分离和传质分离两大类。机械分离过程的对象都是两相或两相以上的非均相混合物,只要用简单的机械方法就可将两相分离,而两相间并无物质传递现象发生。传质分离过程的特点是相间传质,可以在均相中进行,也可以在非均相中进行。传统的单元操作中,蒸发、蒸馏、吸收、吸附、萃取、浸取、干燥、结晶等单元操作大多在两相中进行。依据处于热力学平衡的两相组成不相等的原理,以每一级都处于平衡态为手段,把其他影响参数均归纳于效率之中,使其更符合实际。它的另一种工程处理方法则是把现状和达到平衡之间的浓度梯度或压力梯度作为过程的推动力,而把其他影响参数都归纳于阻力之中,传递速率就成为推动力与阻力的商了。上述两种工程处理方法所描述的过程,都称作平衡级分离过程。分离行为在单级中进行时,往往着眼于气相或液相中粒子、离子、分子以及分子微团等在场的作用下迁移速度不同所造成的分离。热扩散、反渗透、超过滤、电渗析及电泳等分离过程都属此类,称速率控制分离过程,都是很有发展潜力的新分离方法。综上所述,分离过程得以进行的基础是在“场”的存在下,利用分离组分间物理或化学性质的差异,并采用工程手段使之达到分离。显然,构思新颖、结构简单、运行可靠、高效节能的分离设备将是分离过程得以实施乃至完成的保证。它们的简要情况列于表 1-1(King, 1980)。

表 1-1 分离过程分类举例

过程名称	原料	分离剂	产品	分离原理
<b>一、机械分离</b>				
(1) 过滤	液体+固体	过滤介质	固体+液体	固体颗粒大于过滤介质 细孔
(2) 沉降	液体+固体	重力	固体+液体	密度差
(3) 离心分离	液体+固体	离心力	固体+液体	密度差
(4) 旋风分离	气体+固体或液体	惯性力	气体+固体或液体	密度差
(5) 静电除尘	气体+细颗粒固体	电场	气体+固体	细颗粒带电
<b>二、传质分离</b>				
<b>1. 平衡分离过程</b>				
(6) 蒸发	液体	热	液体+蒸汽	蒸汽压不同
(7) 蒸馏	液体	热	液体+蒸汽	蒸汽压不同
(8) 吸收	气体	不挥发性液体	液体+气体	溶解度不同
(9) 萃取	液体	不互溶液体	两种液体	溶解度不同
(10) 结晶	液体	冷或热	液体+固体	利用过饱和度
(11) 离子交换	液体	固体树脂	液体+固体	质量作用定律
(12) 吸附	气体或液体	固体吸收剂	固体+液体或气体	吸附差别
(13) 干燥	湿物料	热	固体+蒸汽	湿分蒸发
(14) 浸取	固体	溶剂	固体+液体	溶解度
(15) 泡沫吸附	液体	表面活性剂与鼓泡	两种液体	表面吸附

过程名称	原料	分离剂	产品	分离原理
2. 速率控制分离过程				
(16) 气体扩散	气体	压力梯度(压缩机)	气体	穿过多孔膜的扩散速率的差异
(17) 热扩散	气体或液体	温度梯度	气体或液体	不同的热扩散速率
(18) 电渗析	液体	电场、阴离子或阳离子膜	液体	膜对不同电荷离子的选择性渗透
(19) 电泳	液体(含胶体)	电场	液体	胶质在电场下的迁移速率不同
(20) 反渗透	溶液	压力梯度(泵)和膜	两种液体	溶质的溶解度与溶剂在膜中的扩散速率
(21) 超过滤	溶液(含高分子物质或胶体)	压力梯度(泵)和膜	两种液体	分子大小不同所引起的膜透过率不同

### 1.1.2 分离过程的地位

化学、石油、冶金、食品、轻工、医药、生化和原子能等工业都广泛应用分离过程。古代煤用于直接燃烧,为饮食和取暖。炼焦工业的兴起使得煤经干馏获得焦炭和煤气,煤得到了初步的合理使用,但其副产物煤焦油长期被看作无用而有毒的废物。直到近代,发现煤焦油是含有多种芳香族化合物的复杂混合物(达几百种物质),用分馏的方法可以使苯、酚、萘和更复杂的芳香族化合物分开,才使煤的综合利用臻于完善。同样,从原油的直接燃烧到把它分馏为溶剂油、汽油、煤油、柴油和重油(沥青)等各种组分并加以利用和再加工,直到形成现代庞大的石油炼制和石油化工体系。以上都是分离过程成功应用于化工生产的典型例子。干燥过程的应用遍及各行各业。例如,谷物的含水量从收获时的30%~35%干燥到13%就可延长储存期一年;食品含水量低于5%,微生物难以生存,酶难以作用,可长期保持其香味和营养;聚氯乙烯颗粒含水量低于2%,可保证聚合加工成型时不出现气泡和提高塑料制品的强度。此外,建材、木材、布匹、纸张、皮革、药物、油漆等无不涉及干燥。据统计,仅化工产品就有20万种以上需要干燥作业。化工生产中原料的净制、中间产物和主副产品之间的分离、同位素的分离和重水制备,生化领域中抗生素的净制、病毒的分离、生物制品的下游技术,冶金工业中矿物的精选等,都离不开分离技术。

随着工业的现代化,科学研究和生产技术向着高质量、高纯度、精密加工、微型化和高技术密集型发展,而这些都必须有分离过程的密切配合。以半导体与电子技术为例,高质量、高纯度的材料如超纯水、半导体锗和硅,以及载气氮、氦等,其纯度都要在99.99%以上,有的甚至达到99.9999%。这类产品的微型化使集成电路的线距仅 $1\mu\text{m}$ 。彩色显像管装配封口后,管内不得含有微粒,否则在屏幕上会因折射而出现闪烁亮点而导致报废,于是,无论载气和装配车间的空气都必须经洁净处理到每升气体中所含大于 $0.5\mu\text{m}$ 的尘粒少于3.5个。仅以洁净空气和纯水为例,就包括了沉降、湿法洗净、过滤、电除尘、絮凝、泡沫分离、电渗析、超滤、反渗透以及离子交换等如此多的分离单元操作,更何况其他。

随着现代工业大型化生产的趋向,三废(水、气、渣)更趋向低浓、量大、排放集中。处理三废不仅涉及物料的综合利用,而且关系到毒物污染环境和破坏生态平衡,实施过程中分离过程起着重要作用。例如,脱除废水中的微量同位素物质,废气中所含二氧化硫、氧化氮、硫化氢、

制碱废渣等,都必须采用有效的分离过程化废为宝,变害为利。

然而,分离过程往往是一个十分耗能的过程。事实上分离过程在化工生产的投资和操作费用中所占比例极高。以分离任务较重的炼油厂为例,与分离有关的成本常占产品总成本的90%左右。即使一般的化工厂,分离设备在数量上往往超过作为核心设备的反应器,在投资上也不亚于反应器。因此选择高效、低耗的分离技术还与降低成本、减少能耗以及提高产品质量密切相关。科学的发展、学科的交叉提供了这种可能。在使常规分离过程如蒸发、结晶、蒸馏、吸收、萃取、干燥等得到不断完善和发展的同时,又衍生、开发出众多新的分离方法,如泡沫分离、超临界萃取、固膜与液膜分离等,展示了巨大的应用潜势。

总而言之,广泛的应用、科技的发展、环境的需要都说明分离过程在国计民生中所占的地位和作用,并展示了分离过程的广阔前景:现代社会离不开分离技术,分离技术发展于现代社会。

## 1.2 分离因子

分离过程的应用几乎涉及每一个工业部门乃至日常生活用品。但追其共性,它不外以气、液、固三态物料为对象,是一个不改变物性的物理加工过程。它使得被处理后的物料(组分)变得更纯净,却不产生任何新的物质。所以,任何一个特定的分离过程所得到的分离程度都可用产品组成之间的关系来表示,定义为通用分离因子:

$$\alpha_{ij}^s = \frac{x_{i1}/x_{j1}}{x_{i2}/x_{j2}} \quad (1-1)$$

组分  $i$  和  $j$  的通用分离因子  $\alpha_{ij}^s$  为二组分在产品 1 中的摩尔分率的比值除以在产品 2 中的比值。显然,  $x$  的单位可以用组分的质量分率、摩尔流量或质量流量,其所得的分离因子值不变。

由式(1-1),若  $\alpha_{ij}^s = 1$ ,则说明组分  $i$  和  $j$  在产品中的含量相等,意味着系统无法分离。若  $\alpha_{ij}^s > 1$ ,则组分  $i$  在产品 1 中浓缩的程度比组分  $j$  大,而组分  $j$  在产品 2 中得到浓缩,此时意味着系统得到有效的分离,且  $\alpha_{ij}^s$  值越大越好。若  $\alpha_{ij}^s < 1$ ,则反之,同样得到有效的分离, $\alpha_{ij}^s$  值越小越好。既然分离的程度可由  $\alpha_{ij}^s$  偏离 1 的程度来判断, $i, j$  可任意指定,习惯上常使  $\alpha_{ij}^s \geq 1$ 。

上述定义式没有任何限制条件,基于产品的实际组成而获得分离因子值。系统的平衡组成、传质速率、设备结构、分离流程都将影响  $\alpha_{ij}^s$  的大小。为方便计,将分离过程理想化,平衡分离过程仅讨论其两组组成的平衡浓度,速率控制过程只讨论在场的作用下的物理传递机理,把那些较复杂的、不易定量的因素归之于效率,来说明实际过程与理想过程的偏差。于是得到了无上标的分离因子  $\alpha_{ij}$ 。

我们十分熟悉的用于判断双组分蒸馏的难易程度的相对挥发度  $\alpha$ ,就是理想的分离因子在精馏这个特定过程的表达式。以  $v_1, v_2$  表示溶液中各组分的挥发度,气相服从道尔顿(Dalton)定律,有下列表达式:

$$v_A = \frac{p_A}{x_A} = \frac{p y_A}{x_A}, \quad v_B = \frac{p_B}{x_B} = \frac{p y_B}{x_B}$$
$$\alpha_{AB} = \frac{v_A}{v_B} = \frac{y_A/y_B}{x_A/x_B} \quad (1-2)$$

同样,液液萃取有选择性系数  $\beta$ ,是分配系数  $k_A$  和  $k_B$  之比,即