

分离过程

第二版

〔美〕C·贾德森·金 编著

**FENLI
GUOCHENG**

化学工业出版社 ●

分 离 过 程

第 二 版

〔美〕 C · 贾德森 · 金 编著

化工原理教研室
大连工学院 译
化学工程研究室

化 学 工 业 出 版 社

全书共十四章，第一章为分离过程的用途和特性，第二、三章为简单平衡过程及影响产品纯度的附加因素，第四、五、六章阐述多级分离过程，第七、八章讲述变化的型式及群法，第九章为极限流量和所需级数及其经验关联，第十章为计算多组分多级分离的精确方法，第十一章讲述传质速率，第十二章为接触装置的处理能力和级效率，第十三、十四章为分离过程的能耗及分离过程的选择，附录部分主要介绍计算机在复杂分离计算中的新成就。

本书有关分离过程内容全面，是一本有实用价值的教材及参考书。

本书可供化工、石油化工、石油等有关大专院校的教学参考书，也可供有关科研、设计人员及工厂技术人员使用。

参加本书的译者有：丁惠华 王保璋，卢瑱，冯骅，冯朴荪，向惟浚，沙庆云，陈毓琛，李景鹤，郑锡胤，郑轩荣，徐维勤，姚平经 郭宜祐，魏德孚。

参加审校者有：沈自求，袁一，郭宜祐，魏德孚。

(以上皆按姓名笔划为序)

C. Judson King
Separation Processes
Second Edition
McGraw-Hill Book Company 1980

分 离 过 程
第 二 版
化工原理教研室
大连工学院 化学工程研究室 译

责任编辑：苗延秀
施承薇

封面设计：任 辉

化学工业出版社出版发行
(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所经销

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ 印张 $38^{1/2}$ 字数986千字印数1—1,970

1987年12月北京第1版1987年12月北京第1次印刷

统一书号15063·3952定价8.10元

再 版 序

再版的目的在于增加经实践证明有用的新材料以及更新出现新概念和新资料的领域，同时多方使介绍紧凑，但仍然保留并进一步充实与初版相近的过程思路。

有关扩散、传质和连续逆流接触式设备的论述已有所扩充，并单独列为一章。尽管它在书中出现较晚，但由于有其本身的独立性，故可任意调动它在课程中的位置，或可完全不要。由于在单级分离计算的初步讨论中引入了计算机技术，同时对多组分多级过程计算步骤的内容作了全面的修订，从而介绍了计算机方法在复杂分离计算中的大致发展过程。在附录E中讨论了分块三对角型矩阵，它为复杂逆流过程的（无论是分级的还是连续接触的）现代计算方法打下了基础。其内容包括求解这种矩阵和求解精馏问题的程序。分离过程的能量消耗和守恒、色层分离和类似的新分离技术以及精馏塔板上的混合问题都是正在迅速发展的领域，这方面的讨论都作了相当多的增新。

同时，我尽量删去过分繁琐的和多余的例题。广义的流量基准和组成参数（ B_+ ， C_- 等）对很多学生来说确实是太复杂了，因而也删去了。问题分类的叙述规则仍有用，但放在次要地位。固定床过程的分析和分离过程的控制（在初版中曾作简明介绍），在别处有更充分的论述，故这些章节已大多删节。

在美国，正开始由英制改行SI制（Système International，即国际单位制）。虽然学生和在职工程师必须熟悉并使用SI制，但他们仍须继续掌握几种单位制，因为改为SI制不是短期能完成的，而且现有的文献也不能改变。故在再版中，按照政策大多数单位采用了SI制，但仍有意识地保留了许多英制和少量cgs制。对于不熟悉SI制的读者将会发现，在分析分离过程时引起的障碍并不大，主要要知道1标准大气压(atm)为101.3千帕(kPa)，1Btu为1055焦耳(J)或1卡(cal)为4.187焦耳，1磅(lb)为0.454千克(kg)，此外就是早已熟悉的关于摄氏、华氏和开尔文(Kelvins)度数之间的换算。

本书的份量对某些学生来说确实会望而生畏。初版曾用作分离过程的（或单元操作，或传质操作）基础大学课程和研究生课程的教科书，同时还用作在职工程师的参考书。要使整个教科书在所有情况下都适用是不可能的，也是不合适的，但在本书写作中，大多数章节具有自身的独立性。为了帮助导师为各种类型的课程选择合适的章节和内容，在本书第16、17页列出了大学三、四年级用的分离过程和传质课程的教学大纲，以及一年级研究生用的分离过程课程的教学大纲。最近，加利福尼亚大学伯克利分校是按此大纲讲授的。

本书另一重要的增添是在大多数章末至少有两个新题，作为初版保留题的补充。由于删去了初版中的一些习题，故总题数未变。备有题解手册可直接写信给我索取，凡大学教师可免费供给。

我衷心感谢很多人所给予的有益建议和其它帮助。特别要感谢南加利福尼亚大学的Frank Lockhart、普渡大学的Philip Wankat以及苏黎世联邦工大(ETH Zürich)的John Bourné，他们详细评论了初版本，这对于再版工作有莫大的价值。犹他(Utah)大学的J. D. Seader以及加利福尼亚大学伯克利分校的Donald Hanson和其他几位同事曾经提供了大量有益的讨论。Hanson教授还欣然亲自校订了大部分定稿。南华尔士大学的Christopher J.

D. Fell审阅了第十二章，并且提出了一些有益的建议。联合碳化物公司的George Keller以及墨西哥国立大学的Francisco Barnés交流了一些重要的新观点。这几年本人的一些顾问性工作为本书的内容提供了广度及真实性。很多学生提出了有益的建议，并发现了某些含糊不清之处。最后，我要感谢加利福尼亚大学给我假期，大部分修订工作是在这期间完成的；还要感谢犹他大学在这期间给我极大的便利条件和良好的环境，感谢我的家庭以及若干地方如Escalante Canyon及Sierra Nevada在我工作期间提供了临时的非常宝贵的给蓄电池再充电的机会。

C. Judson King

初 版 序

本书准备用作化学工程课程的一本大学教材,适用于各种课程设置,例如分离过程、传质操作、单元操作、蒸馏等课程。编写本书的基本目的是与传递现象的教材互为补充,以便一并更好地满足化学工程课的核心部分——动量、热量和质量传递或单元操作方面的需要。

使用本书时可按不同程度讲授,包括大学生和研究生。已初步使用过本书的类型有:在加利福尼亚大学伯克利分校用于三、四年级课程和研究生课程,在普林斯顿用于二年级课程,在罗彻斯特用于四年级课程,在麻省理工学院用于研究生课程。通常大学课程着重于第一章至第七章,以及第八章至第十一章中的某些章或全部。在研究生课程中,第一章至第六章不是重点,而着重于第七章至第十四章。用本书作教材时,不一定要规定先修课程,但至少同时要同时开设以热力学为重点的物理化学课程。本书关于相平衡热力学和传质基本理论的内容很少,学生应加选这方面的课程。

在职工程师关心的是选择和评价各种分离过程或计算方法的发展,他们会发现本书也是有用的;然而,本书并不打算成为一本详细设计分离装置具体结构的综合性指南。

本书着重于概念的基本理解,为分离过程的选择、性能和计算打下基础。因而有些章的叙述几乎完全是定性的。对于不同的分离过程,如蒸馏、吸收、萃取、离子交换等,传统上是依次分别叙述的。与此方法不同,本书把分离过程作为一个普遍性问题来考虑,并着重阐述各种分离过程在性能和分析上的许多共同点。设想这种综合性的论述将更有成效,将使学生的理解能力更为开阔。

在工程教育中,工程科学方面的发展使得过程工程学和过程设计在化学工程课中的需求更加突出。关于过程的思想应当贯串在全部课程中而不仅是保留在最终的一门设计课中。这本教科书的重要目的在于保持这样一个特点,即论述实际过程以及过程的综合与选择,此外还提供有关的计算方法。

前三章论述简单分离过程的某些共同原理。接着探讨分级的理由和双组分精馏的麦凯布-西尔 (McCabe-Thiele) 图解法。这种作图法在讨论其它双组分分离和多组分分离时会一再提到,这是一种为人们所熟悉的直观表示方法,通过它可以更容易地理解各种复杂的影响。此外,相当详细地论述了单级和多级分离的近代计算方法,重点是理解那些适用于不同计算方法的不同条件。为了更充分地领会各种多级分离过程的共同特性,在讨论多组分分离过程的计算方法之前,论述了流量、组成和温度分布图线的形状,这是第七章所叙述的内容。其它独立性的章节有:第十三章论及分离过程所需能量的控制因素,第十四章为给定的分离任务考虑选择一个合适的分离过程。

在各章之末附有习题。这些题目是作者多年来在加利福尼亚大学和麻省理工学院讲授分离过程、传质操作以及早期的、偏重于定性的过程选择和设计等课程时所拟定和收集的。其中许多题目是属于定性讨论一类的,藉以加强学生对于基本概念的理解,并提高他们说明和分析新情况的能力。用于计算的时间以及照套公式的题目均减少到最低限度。大多数题目是根据具体的实际过程或实际工艺状况确定的。

Donald N. Hanson主动地参与了本书早期的计划阶段,并推动作者进行这项计划。第

五、七、八、九各章的主要部分取材于Hanson教授在加利福尼亚大学多年作为大学课程所用的讲稿。第十一章的内容曾与Edward A. Grens I 进行过多次讨论而受到很大教益。近几年来, 几位助教和许多学生, 特别是Romesk Kumar、Roger Thompson、Francisco Barnés和Raul Acosta的反应、建议和其它贡献是非常宝贵的。Roger Thompson还大力协助编制了本书的索引。William Schowalter、J. Edward Vivian 和 Charles Byers在基于他那里的课堂应用, 提供了一些值得深思并非常有用的复习题。

对Edith P. Taylor表示另一方面的谢意, 她熟练地、积极地打出了最终的原稿, 并感谢她和其他几位打字员参加了早期的草稿工作。

最后, 我有三点要特别感谢的是: Charles V. Tompkins启发了我对科学和工程的兴趣; Thomas K. Sherwood教导我领会到在教育工作中过程设计和综合的重要意义; 加利福尼亚大学伯克利分校和在该校的许多同事给我以鼓励并尽可能提供最好的环境。

J. Judson King

教学参考大纲

大学三、四年级课程：分离过程和传质

继“基本传递现象（包括扩散）、流体流动和传热”这门课程之后，学习四个单元，10周（季度制），每周两次80分钟讲课，另有一次50分钟的讨论课，用于讨论问题、答疑等。

讲课次序	课 题	章 次
1	课程的组织；分离过程的一般特征	1
讨论课1	复习相平衡；泡点和露点	1,2
2	简单平衡	2
3	分级的原理	4
4	双组分精馏	5
5	双组分精馏	5
6	半小时测验；双组分精馏中效率的应用	5,附录D
7	麦凯布-西尔图在其它过程中的应用	6
8	稀释系统；吸收及气提；KSB方程	8
9	期中考试	
10	KSB方程(续)；多组分多级分离概述	7
11	全回流，最小回流；近似精馏算法	9
12	多组分分离：复习简单平衡和单级分离；多级分离计算概述	2,10
13	多级分离计算各种方法的综述	10
14	半小时测验；传质系数	11
15	传质系数；相际传质	11
16	传质；同时传热和传质（只是概述）	11
17	传递单元；连续式逆流接触设备	11
18	控制设备处理能力的因素	12
19	级效率	12
20	专题讨论；复习	12
	期终考试	

补充或备用课题：

影响平衡过程中产品组成的诸因素的综述	3
精馏过程的Ponchon-Savarit图	6
萃取过程用的三角形相图	6
多效蒸发	附录B
瑞利(Rayleigh)方程式	3
收敛方法	附录A

研究生课程：分离过程

学习三个单元，10周(季度制)，每周两次80分钟讲课，主要课时用于问题讨论，有一门关于传质的后继课程。

讲课次序	课 题	章 次
1	课程的组织；分离过程的共同特征和分类	1
2	影响分离过程中的平衡和选择性的因素；流动型式的影响；瑞利方程式	3
3	固定床；色层分离	3,4

续表

讲课次序	课 题	章 次
4	分级; 逆流分级式分离过程的图解分析法	5(简单复习), 6
5	逆流分级式分离过程的一般性图解分析法	6
6	逆流分离过程中的变型; 萃取蒸馏和恒沸蒸馏	7
7	第一次期中考试	
8	KSB方程式	8
9	群法计算: Underwood方程式	8
10	群法; 限制条件	9
11	限制条件; 经验方法	9
12	多组分多级分离过程的计算机求解方法	10
13	多组分多级分离过程的计算机求解方法	10, 附录E
14	第二次期中测验	
15	级效率	12
16	级效率	12
17	分离过程的能量消耗	13
18	节约能量的方法	13
19	分离过程的选择	14
20	分离过程的选择; 复习期终考试	14
补充或备用课题:		
	多组分单级分离的计算	2
	再论色层分离和分类过程	4
	控制设备处理能力的因素	12
	精馏过程的最佳化分析	附录 D
	多效蒸发	附录 B

目 录

再版序

初版序

教学参考大纲

第一章 分离过程的用途和特征	1
第一节 分离过程一例：蔗糖精制.....	1
第二节 分离过程的另一例：制造对-二甲苯	5
第三节 分离过程的重要性和多样性.....	7
第四节 分离过程的经济意义.....	8
第五节 分离过程的特征.....	9
1. 分离剂	9
2. 分离过程的分类	9
3. 分离因子	17
第六节 平衡过程的固有分离因子.....	17
1. 汽-液系统.....	18
2. 双组分系统	19
3. 液-液系统.....	20
4. 液-固系统.....	23
5. 分离因子为无穷大的系统	26
6. 平衡数据的来源	26
第七节 速率控制过程的固有分离因子.....	27
1. 气体扩散	27
2. 反渗透	28
参考文献.....	30
习题.....	33
第二章 简单平衡过程	39
第一节 平衡关系的计算.....	39
1. 双组分汽-液系统.....	39
2. 三组分液体系统	39
3. 多组分系统	39
第二节 核定混合物的相状态.....	45
第三节 简单平衡分离过程的分析.....	46
1. 过程变量的规定：叙述规则	46
2. 代数法	48
3. 图解法	62
参考文献.....	67

习题	67
第三章 影响产品纯度的附加因素	72
第一节 产品相的机械分离不完全	72
1. 夹带	72
2. 洗涤	74
3. 泄漏	76
第二节 流型和混合效应	76
1. 相内的混合	77
2. 流动型式	78
第三节 间歇操作	80
1. 两相均为间歇加料	80
2. 瑞利Rayleigh方程式	81
3. 连续操作和间歇操作产率的比较	85
4. 多组分间歇蒸馏	86
5. 简单的固定床过程	87
第四节 再生的方法	91
第五节 传质和传热速率的限制	91
1. 平衡分离过程	91
2. 速率控制的分离过程	91
第六节 级效率	92
参考文献	94
习题	94
第四章 多级分离过程	98
第一节 提高产品纯度	98
1. 多级蒸馏	98
2. 板式塔	101
3. 逆流流动	105
第二节 降低分离剂的消耗量	108
多效蒸发	108
第三节 并流、错流和逆流流动	110
第四节 其他分离过程	112
1. 液-液萃取	112
2. 回流的产生	114
3. 鼓泡和泡沫分馏	114
4. 速率控制的分离过程	115
5. 分级的其他理由	117
第五节 固定床(固定相)过程	120
逆流的实现	120
第六节 色谱	122
1. 实现有差别的迁移方法	125

2. 逆流分配	125
3. 气相色谱和液相色谱	128
4. 保留体积	129
5. 纸色谱和薄层色谱	129
6. 可变的操作条件	130
7. 场-流动分馏(极化色谱)	130
8. 用途	131
9. 连续色谱	131
10. 放大问题	133
11. 最近的发展	133
第七节 固定床的循环操作	133
1. 参数泵法	133
2. 循环区域分离	134
第八节 二维级联	136
参考文献	137
习题	138
第五章 双组分多级分离: 蒸馏	145
第一节 双组分系统	145
第二节 平衡级	146
第三节 麦凯布-西尔图解	146
1. 平衡曲线	146
2. 质量衡算	148
3. 问题的规定	149
4. 塔内蒸气和液体流量	150
5. 过冷液体回流	151
6. 操作线	151
7. 操作线的交点	153
8. 多股进料和侧线	154
第四节 设计问题	156
1. 规定的变量	156
2. 逐级图解计算	157
3. 进料级	159
4. 容许的和最佳的操作条件	161
5. 极限条件	162
6. 级效率	163
第五节 其他问题	165
第六节 多级间歇蒸馏	167
1. 间歇蒸馏与连续蒸馏的比较	170
2. 塔板上持液量的影响	170
第七节 塔压的选择	171

水蒸汽蒸馏.....	171
第八节 恒沸物.....	172
参考文献.....	172
习题.....	173
第六章 双组分多级分离过程的通用图解法	178
第一节 直线操作线.....	179
1. 恒定的总流量	179
2. 恒定的惰性物流量	182
3. 计及精馏中的不等潜热的MLHV法(修正气化潜热法)	186
第二节 曲线操作线.....	189
1. 热焓衡算: 精馏	189
2. 互溶度关系: 萃取	197
3. 独立的技术条件: 在各级中加入分离剂	203
第三节 不分级的过程.....	205
第四节 yx 图的普遍性质	205
参考文献.....	206
习题.....	207
第七章 变化的型式	215
第一节 双组分多级分离.....	215
1. 单向传质	216
2. 恒相对挥发度	217
3. 热焓衡算限制	219
4. 相际互溶度限制: 萃取	221
第二节 多组分多级分离过程.....	223
1. 吸收	223
2. 精馏	225
3. 萃取	234
4. 萃取蒸馏和恒沸蒸馏	238
参考文献.....	242
习题.....	242
第八章 群 法	249
第一节 线性级出口组成关系和恒流量.....	249
1. 逆流分离	249
2. 色层分离	260
第二节 非线性级出口组成关系和变流量.....	269
双组分逆流分离: 离散的级.....	269
第三节 恒分离因子和恒流量.....	274
1. 双组分逆流分离: 离散的级	274
2. 多组分逆流分离: 离散的级	278
参考文献.....	285

习 题	286
第九章 极限流量和所需级数及其经验关联	291
第一节 最小流量	291
1. 所有组分都分布	291
2. 一般情况	293
第二节 所需最少级数	298
1. 能量分离剂和质量分离剂	298
2. 双组分分离	298
3. 多组分分离	300
第三节 实际的设计和操作条件的经验关联	301
1. 级数对回流的关联	301
2. 非关键组分的分布	304
3. 具有许多组分的混合物的蒸馏	307
参考文献	310
习 题	310
第十章 计算多组分多级分离的精确方法	314
第一节 基本方程式	314
第二节 总方案 and 问题的分类	315
第三节 逐级计算法	316
1. 多组分蒸馏	316
2. 萃取蒸馏和共沸蒸馏	320
3. 吸收和气提	320
第四节 三对角线矩阵	330
第五节 具有恒摩尔溢流的蒸馏过程; 操作型问题	334
1. 过高或过低的温度分布的持续性问题	335
2. 加速泡点计算的措施	335
3. 考虑相邻级上有变化时的影响	336
第六节 更通用的逐次逼近法	340
1. 非理想溶液: 同时收敛法	340
2. 理想或中等非理想溶液; $2N$ 牛顿法	341
第七节 松弛法	346
第八节 收敛特性的比较; 几种方法的结合	347
第九节 设计型问题	348
最适宜的进料级位置	349
第十节 初值	351
第十一节 在特定分离过程中的应用	352
1. 蒸馏	352
2. 吸收和气提	353
3. 萃取	353
第十二节 过程动态; 间歇蒸馏	354

第十三节 总的回顾	356
参考文献	356
习 题	358
第十一章 传质速率	360
第一节 传质机理	360
第二节 分子扩散	360
扩散系数的估算	362
第三节 扩散方程式的解	365
第四节 传质系数	367
1. 稀溶液	367
2. 界面面积	374
3. 高通量和高溶质浓度的影响	375
第五节 相际传质	381
1. 瞬间扩散	383
2. 界面面积和传质系数的合并	385
第六节 同时传热和传质	388
1. 孤立液体块的蒸发	388
2. 干燥	391
第七节 连续逆流接触器的设计	396
1. 两流体均为活塞流的情况	397
2. 轴向分散的考虑	406
第八节 连续并流接触器的设计	414
第九节 连续错流接触器的设计	416
第十节 固定床过程	416
第十一节 数据来源	416
参考文献	416
习 题	418
第十二章 接触装置的处理能力和级效率	423
第一节 限制处理能力的因素	423
1. 液泛	423
2. 液沫夹带	426
3. 压强降	428
4. 获得良好效率的停留时间	429
5. 筛板塔板中的流动状态	429
6. 适宜操作区域	430
7. 性能比较	432
第二节 影响效率的因素	436
1. 经验关联	436
2. 机理模型	437
3. 传质速率	437

4. 点效率 E_{OG}	439
5. 流动方式和混合效应	439
6. 液沫夹带	445
7. 预计塔板效率AICHE方法的概要	445
8. 化学反应	449
9. 表面张力梯度: 相界面积	450
10. 密度梯度和表面张力梯度: 传质系数	452
11. 表面活性剂	454
12. 传热	455
13. 多组分系统	456
第三节 级效率的各种定义	457
1. 准则	457
2. 液相Murphree效率	457
3. 总效率	458
4. 气化效率	458
5. Hausen效率	459
第四节 效率与处理能力之间的协调	459
1. 周期性操作的分离过程	460
2. 逆流和并流操作的比较	460
3. 历史实例	461
参考文献	461
习 题	464
第十三章 分离过程的能耗	469
第一节 分离的最小功	469
1. 等温分离	469
2. 非等温分离和可用能	471
3. W_{min} 的意义	472
第二节 净功耗	472
第三节 热力学效率	473
第四节 单级分离过程	473
第五节 多级分离过程	483
1. 可能可逆过程: 近沸点混合物的精馏	484
2. 部分可逆过程: 分步吸收	486
3. 不可逆过程: 膜分离	488
第六节 降低能耗的途径	489
1. 能量费用和设备费用的关系	489
2. 基本的经验法则	489
3. 精馏	492
4. 降低其他分离过程的能耗的途径	511
参考文献	511

习 题	513
第十四章 分离过程的选择	517
第一节 影响选择分离过程的因素	517
1. 可行性	517
2. 产品价值和生产规模	518
3. 对产品的损害	519
4. 分离过程的类型	519
5. 分离因子和分子性质	520
6. 化学络合	522
7. 经验	523
第二节 新过程的产生	523
第三节 示例	523
1. 二甲苯异构体的分离	523
2. 果汁的浓缩和脱水	529
第四节 溶剂萃取	535
1. 溶剂选择	535
2. 过程的构型	539
3. 设备选择	541
第五节 控制方案的选择	545
参考文献	546
习 题	548
附录A 收敛方法及计算方法的选择	551
1. 期望的特性	551
2. 直接迭代	551
3. 一阶方法	552
4. 二阶和高阶方法	552
5. 初值估计和允许误差	553
6. 多变量收敛	553
7. $f(x)$ 的选取	555
参考文献	556
附录B 多效蒸发的分析和优化	557
1. 简化分析	557
2. 最优效数	559
3. 更复杂的分析	560
参考文献	561
附录C 精馏的问题规定	562
1. 叙述规则	562
2. 全凝器和分凝器的比较	565
3. 变量置换和变量范围的限制	566
4. 其它方法和其它分离过程	567