



面向21世纪课程教材

化工传质 与分离过程

贾绍义 柴诚敬 主编

化学工业出版社
教材出版中心



面向 21 世纪课程教材

化工传质与分离过程

贾绍义 柴诚敬 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

化工传质与分离过程/贾绍义,柴诚敬主编. —北京:
化学工业出版社,2001.1
面向 21 世纪课程教材
ISBN 7-5025-3042-8

I. 化… I. ①贾…②柴… III. ①传质-化工过
程-高等学校-教材②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(2000)第 78516 号

面向 21 世纪课程教材
化工传质与分离过程
贾绍义 柴诚敬 主编
责任编辑:骆文敏 何丽
责任校对:马燕珠
封面设计:田彦文

*

化学工业出版社出版发行
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)
发行电话:(010)64982511
<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
化学工业出版社印刷厂印刷
三河市东柳装订厂装订
开本 787×960 毫米 1/16 印张 31 字数 558 千字
2001 年 1 月第 1 版 2001 年 1 月北京第 1 次印刷
印 数: 1—4000
ISBN 7-5025-3042-8/G·765
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

序

《化工类专业人才培养方案及教学内容体系改革的研究与实践》为教育部(原国家教委)《高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划》的 03-31 项目,于 1996 年 6 月立项进行。本项目牵头单位为天津大学,主持单位为华东理工大学、浙江大学、北京化工大学,参加单位为大连理工大学、四川大学、华南理工大学。

项目组以邓小平同志提出的“教育要面向现代化,面向世界,面向未来”为指针,认真学习国家关于教育工作的各项方针、政策,在广泛调查研究的基础上,分析了国内外化工高等教育的现状、存在问题和未来发展。四年多来项目组共召开了由 7 校化工学院、系领导亲自参加的 10 次全体会议进行交流,形成了一个化工专业教育改革的总体方案,主要包括:

——制定《高等教育面向 21 世纪“化学工程与工艺”专业人才培养方案》;

——组织编写高等教育面向 21 世纪化工专业课与选修课系列教材;

——建设化工专业实验、设计、实习样板基地;

——开发与使用现代化教学手段。

《高等教育面向 21 世纪“化学工程与工艺”专业人才培养方案》从转变传统教育思想出发,拓宽专业范围,包括了过去的各类化工专业,以培养学生的素质、知识与能力为目标,重组课程体系,在加强基础理论与实践环节的同时,增加人文社科课和选修课的比例,适当削减专业课份量,并强调采取启发性教学与使用现代化教学手段,因而可以较大幅度地减少授课时数,以增加学生自学与自由探讨的时间,这就有利于逐步树立学生勇于思考与走向创新的精神。项目组所在各校对培养方案进行了初步试行与教学试点,结果表明是可行的,并收到了良好效果。

化学工程与工艺专业教育改革总体方案的另一主要内容是组织编写高等教育面向 21 世纪课程教材。高质量的教材是培养高素质人才的重要基础。项目组要求教材作者以教改精神为指导,力求新教材从认识规律出发,阐述本门课程的基本理论与应用及其现代进展,并采用现代化教学手段,做到新体系、厚基础、重实践、易自学、引思考。每门教材采取自由申请及择优选定的原则。项目组拟定了比较严格的项目申请书,包括对本门课程目前国内外教材的评述、拟编写教材的特点、配套的现代化教学手段(例如提供教师在

课堂上使用的多媒体教学软件,附于教材的辅助学生自学用的光盘等)、教材编写大纲以及交稿日期。申请书在项目组各校评审,经项目组会议择优选取立项,并适时对样章在各校同行中进行评议。全书编写完成后,经专家审定是否符合高等教育面向 21 世纪课程教材的要求。项目组、教学指导委员会、出版社签署意见后,报教育部审批批准方可正式出版。

项目组按此程序组织编写了一套化学工程与工艺专业高等教育面向 21 世纪课程教材,共计 25 种,将陆续推荐出版,其中包括专业课教材、选修课教材、实验课教材、设计课教材以及计算机仿真实验与仿真学习教材等。本教材是其中的一种。

按教育部要求,本套教材在内容和体系上体现创新精神、注重拓宽基础、强调能力的培养,力求适应高等教育面向 21 世纪人才培养的需要,但由于受到我们目前对教学改革的研究深度和认识水平所限,仍然会有不妥之处,尚请广大读者予以指正。

化学工程与工艺专业的教学改革是一项长期的任务,本项目的全部工作仅仅是一个开端。作为项目组的总负责人,我衷心地对多年来给予本项目大力支持的各校和为本项目贡献力量的人们表示最诚挚的敬意!

中国科学院院士、天津大学教授

余国琮

2000 年 4 月于天津

前 言

本书是与《化工流体流动与传热》配套的教材。本教材将各种传质分离过程中的传质原理汇集于一章,加强了传质理论的阐述,从而使气体吸收、蒸馏、液-液萃取、固体物料的干燥、结晶、吸收与离子交换等分离过程具有较雄厚的传质基础。

教材中除传统的传质单元操作外,增加了结晶、吸附与离子交换等操作,同时简要叙述了蒸馏中的节能途径、盐效应精馏、超临界流体萃取及化学萃取、膜分离等内容,反映了化工分离过程近代发展的新成果和新技术。

本教材保持了天津大学原《化工原理》和《化工传递过程基础》两教材的优点,力求论述严谨、重点突出、实例丰富、层次清晰、启迪思维、便于自学。

本书中划★的节段各校可根据专业需要选择讲授。

本教材可作为化工类及相关专业(包括化工、石油、生物工程、制药、材料、冶金、环保、食品等)的教材,也可供有关部门的科研、设计、过程开发及生产单位科技人员参考。

本书主编贾绍义、柴诚敬。参加编写工作的有柴诚敬(绪论、蒸馏)、贾绍义(传质过程基础、气液传质设备)、马红钦(气体吸收)、张凤宝(液-液萃取)、夏清(固体物料的干燥)、张国亮(其它传质与分离过程)。本书编写过程中,化工系的有关老师给予了热情的关心、支持和帮助,在此表示感谢。

本书承蒙方图南、杨祖荣两位教授主审,他们提出了许多宝贵的意见,对此致以诚挚的谢意。

由于水平有限,书中不完善之处敬请同仁和读者指正,以使本教材日臻完善。

编 者

2000年7月

目 录

绪 论	1
第一章 传质过程基础	5
第一节 传质概论与传质微分方程	5
1.1.1 传质过程概论	5
1.1.2 传质微分方程	14
第二节 分子传质(扩散)	18
1.2.1 气体中的稳态扩散	18
1.2.2 液体中的稳态扩散	23
★1.2.3 固体中的稳态扩散	26
★1.2.4 扩散系数	32
第三节 对流传质	42
1.3.1 对流传质的类型与机理	42
1.3.2 浓度边界层与对流传质系数	43
1.3.3 相际间的对流传质模型	45
1.3.4 对流传质问题的分析求解	52
1.3.5 动量、热量与质量传递之间的类比	61
1.3.6 对流传质系数经验公式	67
本章符号说明	69
习题	71
思考题	73
主要参考文献	74
第二章 气体吸收	75
第一节 概述	75
2.1.1 气体吸收过程	75
2.1.2 气体吸收的分类	76
2.1.3 气体吸收的工业应用	77
2.1.4 吸收剂的选择	77
第二节 气体吸收的平衡关系	78
2.2.1 气体在液体中的溶解度	78
2.2.2 亨利定律	80

2.2.3	相平衡关系在吸收过程中的应用	85
第三节	气体吸收速率方程式	87
2.3.1	膜吸收速率方程式	87
2.3.2	总吸收速率方程式	89
2.3.3	吸收速率方程式及吸收系数小结	94
第四节	低组成气体吸收的计算	96
2.4.1	物料衡算与操作线方程	97
2.4.2	吸收剂用量的确定	98
2.4.3	塔径的计算	102
2.4.4	填料层高度的计算	102
★第五节	吸收系数	120
2.5.1	吸收系数的测定	120
2.5.2	吸收系数的经验公式	121
2.5.3	吸收系数的准数关联式	122
★第六节	其它吸收与解吸	128
2.6.1	高组成气体吸收	128
2.6.2	非等温吸收	131
2.6.3	多组分吸收	133
2.6.4	化学吸收	135
2.6.5	解吸	135
	本章符号说明	139
	习题	140
	思考题	142
	主要参考文献	143
第三章	蒸馏	144
第一节	两组分溶液的汽液平衡	145
3.1.1	两组分理想物系的汽液平衡	145
3.1.2	两组分非理想物系的汽液平衡	152
第二节	平衡蒸馏与简单蒸馏	154
3.2.1	平衡蒸馏	154
3.2.2	简单蒸馏	156
第三节	精馏原理和流程	158
3.3.1	精馏原理	158
3.3.2	精馏操作流程	159
第四节	两组分连续精馏的计算	160

3.4.1	理论板的概念及恒摩尔流假定	160
3.4.2	物料衡算和操作线方程	161
3.4.3	进料热状况的影响	164
3.4.4	理论板层数的计算	168
3.4.5	回流比的影响及其选择	174
3.4.6	简捷法求理论板层数	179
3.4.7	其它类型双组分精馏过程理论板层数的求法	181
3.4.8	塔高和塔径的计算	188
3.4.9	连续精馏装置的热量衡算	192
3.4.10	精馏过程的操作型计算和调节	195
第五节	间歇精馏	199
3.5.1	回流比恒定时的间歇精馏	199
3.5.2	馏出液组成恒定时的间歇精馏	202
★第六节	特殊精馏	206
3.6.1	恒沸精馏	206
3.6.2	萃取精馏	208
3.6.3	盐效应精馏	209
3.6.4	几种特殊精馏方法的比较	210
★第七节	多组分精馏	211
3.7.1	流程方案的选择	211
3.7.2	多组分物系的汽液平衡	212
3.7.3	关键组分的概念及各组分在塔顶和塔底产品中的预分配	217
3.7.4	简捷法确定理论板层数	221
本章符号说明	.....	224
习题	.....	225
思考题	.....	229
主要参考文献	.....	230
第四章 气液传质设备	.....	231
第一节 板式塔	.....	231
4.1.1	板式塔的结构	231
4.1.2	塔板的类型及性能评价	232
4.1.3	板式塔的流体力学性能与操作特性	238
★4.1.4	板式塔的设计	242
第二节 填料塔	.....	262
4.2.1	填料塔的结构与特点	262

4.2.2	填料的类型及性能评价	264
4.2.3	填料塔的流体力学性能	269
4.2.4	填料塔的内件	272
★4.2.5	填料塔的设计	276
本章	符号说明	286
	习题	287
	思考题	288
	主要参考文献	288
第五章	液-液萃取	290
第一节	概述	290
第二节	液-液萃取相平衡	291
5.2.1	三角形坐标图及杠杆规则	292
5.2.2	三角形相图	294
5.2.3	萃取剂的选择	299
第三节	液-液萃取过程的计算	302
5.3.1	单级萃取的计算	302
5.3.2	多级错流萃取的计算	307
5.3.3	多级逆流萃取的计算	313
5.3.4	微分接触逆流萃取的计算	323
5.3.5	回流萃取	326
★第四节	新型萃取技术	327
5.4.1	超临界流体萃取	327
5.4.2	化学萃取	332
★第五节	液-液萃取设备	338
5.5.1	萃取设备的基本要求与分类	338
5.5.2	萃取设备的主要类型	339
5.5.3	萃取塔的流动和传质特性	346
5.5.4	萃取设备的选择	350
本章	符号说明	351
	习题	352
	思考题	355
	主要参考文献	356
第六章	固体物料的干燥	357
第一节	湿空气的性质及湿度图	358
6.1.1	湿空气的性质	358

6.1.2	湿空气的 $H-I$ 图	366
第二节	干燥过程的物料衡算与热量衡算	370
6.2.1	湿物料含水量的表示方法	370
6.2.2	干燥系统的物料衡算	371
6.2.3	干燥系统的热量衡算	372
6.2.4	空气通过干燥器时的状态变化	376
第三节	固体物料在干燥过程中的平衡关系与速率关系	381
6.3.1	物料中的水分	381
6.3.2	干燥时间的计算	383
第四节	干燥器	395
6.4.1	干燥器的主要型式	396
★6.4.2	干燥器的设计	409
★第五节	增湿与减湿	417
6.5.1	空气与水之间的传热、传质关系	417
6.5.2	调温设备与水冷却塔	420
	本章符号说明	423
	习题	424
	思考题	426
	主要参考文献	427
第七章	其它传质与分离过程	428
★第一节	膜分离	428
7.1.1	概述	428
7.1.2	膜材料与分离膜	429
7.1.3	膜组件	431
7.1.4	膜传递现象	433
7.1.5	各种膜过程简介	439
★第二节	结晶	443
7.2.1	结晶的基本原理	443
7.2.2	工业结晶方法与设备	448
7.2.3	结晶过程的产量计算	451
7.2.4	其它结晶方法简介	453
★第三节	吸附与离子交换	455
7.3.1	吸附	455
7.3.2	离子交换	466
	主要参考文献	471

附录.....	473
一、扩散系数.....	473
二、分子扩散的碰撞积分 Ω_D 与 kT/ϵ 的关系	475
三、纯物质的 σ 和 ϵ/k 值	475
四、部分物质的 D° 和 n 值	477
五、塔板结构参数系列化标准 (单溢流型)	478
六、常用散装填料的特性参数.....	479
七、常用规整填料性能参数.....	480

绪 论

质量传递是自然界和工程技术领域普遍存在的现象，它与动量传递、热量传递并列为“三传过程”。敞口水杯中水向静止空气中蒸发；糖块在水中溶解；用吸收方法脱除烟气中的二氧化硫；从植物中提取药物；从矿石中提炼金属；催化反应中反应物向催化剂迁移等都是常见的质量传递过程。由于物质的传递过程系借扩散作用（分子扩散和涡流扩散），故质量传递过程又称扩散过程。质量传递可以在一相内进行，也可在相际进行。质量传递的起因是系统内存在化学势的差异。化学势的差异可由浓度、温度、压力或外加电磁场所引起。在化工、石油等工业中，质量传递是均相混合物分离的物理基础，同时也是反应过程中几种反应物互相接触及反应产物分离的基本依据。

在近代化学工业的发展中，传质分离过程起到了特别重要的作用。可以毫不夸张地说，几乎没有一个化工生产过程中，不包括对原料或反应产物的分离提纯操作。现代生活中，从航天飞机到核潜艇，从绿色食品到珍贵药品的生产，从生物化工到环境保护，从原油中分离出各种燃料油、润滑油和石油化工原料，都离不开对均相混合物的分离。

一、传质分离方法的分类

依据物理化学原理的不同，传质分离过程可分为平衡分离和速率分离两大类。

（一）平衡分离过程

平衡分离过程系借助分离媒介（如热能、溶剂、吸附剂等）使均相混合物系统变为两相体系，再以混合物中各组分在处于平衡的两相中分配关系的差异为依据而实现分离。根据两相状态的不同，平衡分离过程可分为如下几类。

（1）气液传质过程 如吸收、气体的增湿和减湿。

（2）汽液传质过程 如液体的蒸馏和精馏。

（3）液液传质过程 如萃取。

（4）液固传质过程 如结晶、浸取、吸附、离子交换、色层分离、参数泵分离等。

（5）气固传质过程 如固体干燥、吸附等。

上述的固体干燥、气体的增湿与减湿、结晶等操作同时遵循热量传递和质量传递的规律，一般将其列入传质单元操作。

从工程目的来看，上述过程都可达到混合物分离的目的，故又称为分离操作。

在平衡分离过程中， i 组分在两相中的组成关系常用分配系数（又称相平衡比） K_i 来表示，即

$$K_i = y_i / x_i \quad (0-1)$$

式中 y_i 、 x_i 分别表示 i 组分在两相中的组成。习惯上 y_i 表示蒸馏、吸收中汽（气）相组成和萃取中萃取相的组成。 K_i 值的大小取决于物系特性及操作条件（如温度和压力等）。 i 和 j 两个组分的相平衡比 K_i 和 K_j 之比称为分离因子 α_{ij} ，即

$$\alpha_{ij} = K_i / K_j \quad (0-2)$$

通常将 K 值大的当作分子，故 α_{ij} 一般大于 1。当 α_{ij} 偏离 1 时，便可采用平衡分离过程使均相混合物得以分离， α_{ij} 越大越容易分离。在某些传质单元操作中，分离因子又有专用名称，如蒸馏中称作相对挥发度，萃取中称作选择性系数。

相际传质过程的进行，都以其达到相平衡为极限，而两相的平衡需要经过相当长的接触时间后才能建立。在实际的操作中，相际的接触时间一般是有限的，由一相迁移到另一相物质的量，乃决定传质过程的速率。因此，在研究传质过程时，一般都要涉及到两个主要问题，其一是相平衡，决定物质传递过程进行的极限，并为选择合适的分离方法提供依据。其二，传递速率，决定在一定接触时间内传递物质的量。传递速率又由扩散体系偏离平衡的程度，处理剂、传递组分和载体的性质，两相的接触方式（即传质设备的结构）等诸多因素而决定。只有将相际平衡与传递速率二者统一考虑，才能获得最佳工程效益。

（二）速率分离过程

速率分离过程是指借助某种推动力，如浓度差、压力差、温度差、电位差等的作用，某些情况下在选择性透过膜的配合下，利用各组分扩散速度的差异而实现混合物的分离操作。这类过程的特点是所处理的物料和产品通常属于同一相态，仅有组成的差别。

速率分离过程可分为两大类

（1）膜分离 利用选择性透过膜分割组成不同的两股流体，如超滤、反渗透、渗析和电渗析等。

（2）场分离 如电泳、热扩散、高梯度磁力分离等。

传质分离过程的能量消耗，常构成单位产品成本的主要因素之一，因此降低传质分离过程的能耗，受到全球性普遍重视。膜分离和场分离是一类新型的分离操作，由于其具有节约能耗，不破坏物料，不污染产品 and 环境等突

出优点，在稀溶液、生化产品及其它热敏性物料分离方面，有着广阔的应用前景。研究和开发新的分离方法和传质设备，优化传统传质分离设备的设计和操作，不同分离方法的集成化，化学反应和分离过程的有机偶合，都是值得重视的发展方向。

（三）分离方法的选择

面对一种均相混合物，往往有多种分离方法可供选择。如何根据具体条件，选择技术上先进、经济上合理、有利于可持续发展的最佳方案，是工程科技人员的根本任务。在进行分离方法选择时，应认真考虑被分离物系的相态（气态、液态和固态）和特性（热敏性、可燃性、毒性等），对分离产品的质量要求（纯度、外观等），经济程度（设备投资、操作费用、动力消耗等），当地环境条件及环境保护等因素，尤其要注意一些可变因素（如原料组成、温度、甚至物态和设备等）的影响，以便充分调动有利因素、因地制宜，取得最大的经济和社会效益。

二、传质设备

应用于平衡分离过程的设备，其功能是提供两相密切接触的条件，进行相际传质，从而达到组分分离的目的。性能优良的传质设备，一般应满足以下要求：

- （1）单位体积中，两相的接触面积应尽可能大，两相分布均匀，避免或抑制短路及返混；
- （2）流体的通量大，单位设备体积的处理量大；
- （3）流动阻力小，运转时动力消耗低；
- （4）操作弹性大，对物料的适应性强；
- （5）结构简单，造价低廉，操作调节方便，运行可靠安全。

传质设备种类繁多，而且不断有新型设备问世，可按照不同方法进行分类：

按照所处理物系的相态可分为气（汽）液传质设备（用于蒸馏及吸收等），液液传质设备（用于萃取等），气固传质设备（用于干燥、吸附）、液固传质设备（用于吸附、浸取、离子交换等）。

按照两相的接触方式可分为分级接触设备（如各种板式塔，多级混合-澄清槽、多层流化床吸附等）和微分接触设备（如填料塔、膜式塔、喷淋塔、移动床吸附柱等）。在级式接触设备中，两相组成呈阶梯式变化，而在微分接触设备中，两相组成沿设备高度连续变化。

按促使两相混合和实现两相密切接触的动力可分为两类。一类是依靠一种流体自身所具有的能量分散到另一相中去的设备，如大多数的板式塔、填料塔、流化床、移动床等；另一类是依靠外加能量促使两相密切接触的设备，

如搅拌式混合-澄清槽，转盘塔，脉冲填料塔、往复式筛板塔等。

此外，对于气固和液固传质设备，还可按固体的运动状态分为固定床、移动床、流化床和搅拌槽等。其中流化床传质设备采用流态化技术，将固体颗粒悬浮在流体中，使两相均匀接触，以实现强化传热、传质和化学反应的目的。

传质设备在化工、石油、轻工、冶金、食品、医药、环保等工业部门的整个生产设备中占很大比例，因此，合理选择设备，完善设备设计，优化设备操作，对于节省投资，减少能耗，降低成本，提高经济效益，有着十分重要的意义。

第一章 传质过程基础

在传质分离过程中,所涉及的物系均是由两个或两个以上组分构成的。当物系中的某组分存在浓度梯度时,将发生该组分由高浓度区向低浓度区的迁移过程,该过程即为质量传递。质量传递是自然界和工程领域中普遍存在的传递现象,它与动量传递、热量传递一起,构成化工上最基本的三种传递过程,简称为“三传”。

本章将对传质过程的基础理论进行论述,为传质单元操作过程的学习奠定基础。

第一节 传质概论与传质微分方程

传质微分方程是描述传质过程的最基本的数学模型。本节首先讨论传质的一些基本概念,然后在此基础上,重点讨论传质微分方程的建立过程。

1.1.1 传质过程概论

一、混合物组成的表示方法

在多组分系统中,各组分的组成有不同的表示方法,化工计算中常用的有以下几种。

1. 质量浓度与物质的量浓度

(1) 质量浓度 单位体积混合物中某组分的质量称为该组分的质量浓度,以符号 ρ 表示。组分 A 的质量浓度定义式为

$$\rho_A = \frac{m_A}{V} \quad (1-1)$$

式中 ρ_A ——组分 A 的质量浓度, kg/m^3 ;

m_A ——混合物中组分 A 的质量, kg ;

V ——混合物的体积, m^3 。

设混合物由 N 个组分组成,则混合物的总质量浓度为

$$\rho = \sum_{i=1}^N \rho_i \quad (1-2)$$

(2) 物质的量浓度 单位体积混合物中某组分的物质的量称为该组分的物质的量浓度,简称浓度,以符号 c 表示。组分 A 的物质的量浓度定义式为

$$c_A = \frac{n_A}{V} \quad (1-3)$$