

SEPARATION PROCESS
PRINCIPLES (2e)

分离过程原理

原 著

J. D. Seader [美]

Ernest J. Henley [美]

朱开宏 吴俊生 译

分离过程原理

Separation Process Principles (2e)

原著: J. D. Seader [美]

Ernest J. Henley [美]

朱开宏 吴俊生 译



华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

本书为 John Wiley & Sons, Inc. 授权出版的独家简体中文译本,
翻印必究。

图书在版编目(CIP)数据

分离过程原理/(美)西德尔(Seader, J. D.), (美)亨利(Henley, E. J.)著;朱开宏, 吴俊生
译. —上海:华东理工大学出版社, 2007, 11

书名原文: Separation Process Principles, 2e

ISBN 978-7-5628-2030-7

I. 分... II. ①西...②亨...③朱...④吴... III. 分离—化工过程 IV. TQ028

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 014651 号

著作权合同登记号:“图字:09-2006-219 号”

All Rights Reserved. Authorized translation from the English language edition
published by John Wiley & Sons, Inc.

分离过程原理

Separation Process Principles (2e)

原著 J. D. Seader [美] Ernest J. Henley [美]

译者 / 朱开宏 吴俊生

责任编辑 / 钱四海

责任校对 / 张波 金慧娟 李晔

出版发行 / 华东理工大学出版社

地址: 上海市梅陇路 130 号, 200237

电话: (021)64250306(营销部)

(021)64252718(编辑室)

传真: (021)64252707

网址: www.hdlgpress.com.cn

印刷 / 上海长阳印刷厂

开本 / 787mm×1092mm 1/16

印张 / 75

字数 / 1908 千字

版次 / 2007 年 11 月第 1 版

印次 / 2007 年 11 月第 1 次

印数 / 1—4000 册

书号 / ISBN 978-7-5628-2030-7/TQ·115

定价 / 180.00 元

(本书如有印装质量问题, 请到出版社营销部调换。)

内 容 提 要

本书在介绍与分离过程相关的热力学和传递过程知识的基础上,采用理论与实践密切结合的方式,详细阐述了各类分离过程(精馏、吸收、解吸、萃取、膜分离、吸附、浸取、结晶和干燥等)的物理化学原理、工业应用、主要设备、数学模型、设计计算方法和计算机应用软件。本书反映了分离过程学科的发展历史和最新进展。可作为化学工程与工艺及相关专业本科生、研究生的教材或教学参考书,也可供从事化工过程研究、开发、设计及生产管理的工程技术人员参考。

译者的话

本书原著第一版于 1999 年出版,当时化学工业出版社曾把该书作为国外名校名著的一种出版了影印本。时隔七年,作者在经过重大修改和补充后,于 2006 年又出版了第二版。与第一版相比,第二版最大的变化是增加了第四篇“涉及固相的分离”中的 3 章:浸取和洗涤;结晶、凝华和蒸发;固体干燥。此外,对间歇精馏、膜分离、吸附等章也有所更新和补充。

译完此书,有一种强烈的感觉:这是一本具有百科全书特征的教科书。此话包含两层含义:

第一,本书涵盖的内容极广。本书包括各种工业上常用的分离过程,如精馏、吸收、解吸、萃取、膜分离、吸附、浸取、结晶和干燥等。对每种分离过程,又包含其各子类。如精馏中除常规精馏外,还阐述了各种特殊精馏:萃取精馏、加盐精馏、均相恒沸精馏、非均相恒沸精馏、变压精馏、反应精馏;除连续精馏外,还讲述间歇精馏。对每种分离过程,均详细阐述其物理化学原理、工业应用、主要设备、数学模型、设计计算方法,直至计算机应用软件。

第二,本书所具的历史纵深感。许多分离过程的雏形可追溯到几千年前,现代分离过程的发展也已有一个多世纪的历史。本书在阐述各类分离过程及其设计计算方法的最新进展的同时,对在分离过程发展过程中曾起过作用,但现在已被新的、更有效的方法取代的方法也作了回顾。例如,在阐述精馏过程的严格计算方法时,除重点讲述目前广泛应用的 Newton-Raphson 法和内外层法外,也回顾了 19 世纪末最早出现的平衡级模型、20 世纪 30 年代的 Lewis-Matheson 法和 Thiele-Geddes 法及 60 年代的 θ 法和 Wang-Henke 法,使读者能清楚了解基于平衡级模型的精馏算法发展的历史脉络。

基于上述特征,我们相信不论是初学者,还是多年从事分离过程教学、研究和设计的人士都能从本书中发现对他们有用的内容。

也正是由于本书的上述特征,故即便对于曾多年从事分离过程教学和研究的我们,仍不敢说对本书的所有内容都有透彻的理解。因此在翻译过程中虽经多方检索、相互探讨,但翻译得不太恰当甚至错误之处恐仍难完全避免,恳请同行不吝指正。

本书第 1 章至第 5 章、第 14 章、第 15 章及作者简介、前言、量纲和单位由吴俊生翻译,其余部分均由朱开宏翻译。

原著中涉及至今仍在国外沿用的许多非 SI 单位,可能与目前国内相关专著中所用的不尽一致,考虑到转换的复杂性和忠于原著的原则,译著中仍保留了原著所采用的单位。

译者

作者简介

J. D. Seader 是美国犹太大学化学工程荣誉退休教授。他从加利福尼亚大学伯克莱分校获得学士学位和硕士学位,从威斯康辛大学获得哲学博士学位。从 1952 到 1959 年,Seader 为加利福尼亚州利兹曼(Richmond)市的 Chevron 研究所设计了工艺过程;从 1959 到 1965 年他为位于加利福尼亚州卡诺伽园(Canoga Park)的 Rocketdyne 公司主持了火箭引擎的研究。他在犹太大学执教共有 37 年;在到犹太大学任教前,他曾在爱达荷大学担任过教授。他共发表(包括与别人合作)过 110 篇科技论文,出版过 8 部著作并拥有 4 项发明专利,并且还是 *Perry's Chemical Engineers' Handbook* 第六版和第七版中蒸馏篇的参编者。Seader 曾担任美国化工计算机辅助教学协会(CACHE)理事 33 年,从 1980 到 1984 年担任常务主管。在 20 年中他主持了将孟山都公司的 FLOWTRAN 过程模拟计算机程序系统在各大学中的应用和推广工作。从 1983 到 1985 年 Seader 还担任了美国化学工程师学会(AIChE)的理事。1983 年他在美国化学工程师学会第 35 届年会上作了报告。1988 年他获得美国化学工程师学会计算机辅助和系统技术(CAST)分会的化工计算奖;2004 年美国工程教育协会(ASEE)授予他化工计算机辅助奖,表彰他在化学工程教育方面的卓越贡献;在 2004 年他还是美国化学工程师学会化工教育 Warren K. Lewis 奖的获奖者之一。他曾担任 *Industrial and Engineering Chemistry Research* 杂志的副主编共 12 年。

Ernest J. Henley 是休斯顿大学的化学工程教授。他从特拉华大学获得学士学位,从哥伦比亚大学获得工程科学博士学位,并从 1953 到 1959 年在哥伦比亚大学担任教授。Henley 还在 Stevens 工学院、Brazil 大学、斯坦福大学、剑桥大学和纽约城市大学拥有教授职位。他共发表(包括与别人合作)过科技论文 72 篇,出版过 12 本著作,最新的一本是 *Probabilistic Risk Management for Scientists and Engineers*。他曾担任化工计算机辅助教学协会理事 17 年,在 1975 到 1976 年间担任该协会会长,并指导了七卷本 *Computer Programs for Chemical Engineering Education* 和五卷本 *AIChE Modular Instruction* 的编撰工作。他是一位活跃的顾问,拥有 9 项发明专利,并在 Maxxim 医药公司、Procedyne 公司、Lasermedics 公司和 Nano-dyne 公司的董事会担任董事。1998 年获得 McGraw-Hill 公司的化学工程个人杰出成就奖,2002 年美国工程教育协会(ASEE)授予他化工计算机辅助奖,褒奖其在化工教育中计算机应用方面的贡献。他是 Henley 基金会的会长。

第二版前言

本版新增内容

“岁月不等人”，对于工程技术教科书同样如此。*Separation Process Principles* 第一版出版以来的七年间，已经见证了这样的事实：(1)在质量、热量和动量传递的基本原理方面，以及在借助计算机编程使得复杂的传递问题的数学模型得以广泛应用方面，取得了各种进展；(2)在化工设计实践方面的变化；(3)化工教学计划的结构调整。鉴于我们已注意到的问题并根据各类出版物征求的一些有影响力的评论中指出的意见，我们在第二版中作了如下修订和增补：

- 新增了量纲和单位部分，以方便在分离过程应用中无所不在的 SI 制、AE 制和 CGS 制的使用。
- 每章增加了教学目的一览。
- 进一步强调化学混合物组成的多种表示方法。
- 新增了有关难处理混合物的热力学的内容，包括电解质、聚合物溶液、轻质气体混合物和极性有机化合物。
- 有代表性的扩散系数数据表。
- 无量纲数群的公式和意义的表格。
- 有关 Churchill 和 Zajic 的最新类似理论的一小节内容。
- 新增的关于混合系统和膜级联的段落。
- 第四代乱堆填料和高容量塔板的论述。
- 对于基于速率的多单元模型的简要讨论。
- 新增有关作为间歇蒸馏第三操作模式的最佳控制部分。
- 对浓差极化和积垢问题作了新的阐述。
- 新增超滤和微过滤的内容。
- 新增连续、逆流吸附系统一小节。
- 对用吸附进行主体分离的 McCabe-Thiele 方法一小节作了修改。
- 新增了关于模拟的(以及真实的)吸附移动床的一小节内容。

以下三章在本书第一版中未编入，但曾作为补充章节编入了供教师使用的硬拷贝中。现在这几章已正式编入本书第二版：

第 16 章 浸取和洗涤，并添加了蒸馏咖啡机一小节。

第 17 章 结晶、凝华和蒸发。

第 18 章 固体干燥，包括湿度测定法。

在第一版中，对每 1 个论题至少用 1 道详细的例题来说明，并至少配有 3 道课外习题。这一点在新增的论题和章节中继续保留。现在本书中有 214 道例题和 649 道课外习题，并

引用了 839 条参考文献。

论题的编排

同第一版一样,本书第二版也阐述了基于平衡和基于速率的各种模型。本书内容经组织后分成四个篇:第一篇有五章,论述各种基本概念。第 1 章介绍用于分离化学混合物的各种方法,特别是用于工业中的方法。第 2 章是有关应用于分离问题中的溶液热力学的综述。第 3 章阐述扩散和传质的基本原理,这些原理应用于基于速率的模型。单个平衡级模型中相平衡方程和物料平衡方程的应用在第 4 章中阐述,在第 5 章论述平衡级的级联和复合分离系统。

本书的其余三个篇是按分离方法来组织的。第二篇从第 6 章到第 13 章,阐述靠加入或产生新相而实现的分离方法。第 6 章到第 8 章阐述稀溶液吸收和解吸、二元蒸馏及三元液-液萃取,重点在图解法。第 9 章到第 11 章阐述基于平衡的多元气(汽)-液和液-液分离模型的计算机计算方法,它们被广泛用于过程模拟程序系统,如 ASPAN PLUS, HYSYS, PRO-II, CHEMCAD, BATCH PLUS 和 SUPERPRO DESIGNER。第 12 章论述多元基于速率的模型,而第 13 章则着重论述二元和多元间歇蒸馏。

第三篇包含第 14 和 15 章,论述利用阻挡层(膜)或固体介质的分离方法,它们在工业和实验室操作中的应用日渐增多。第 14 章阐述基于速率的膜分离模型,而第 15 章则论述吸附、离子交换和色谱的基于平衡和基于速率的模型,这些分离方法中均用到了固体或类固体的吸附剂。

涉及一个固相的化学成分发生变化的固体分离方法在第四篇中进行论述,该篇中包含了本书的最后三章。第 16 章阐述了物料从固相进入液相溶剂的选择性浸取。液体的结晶和蒸气的凝华将于第 17 章中讨论,该章中还包括了蒸发操作。第 18 章论述有关固体干燥的内容,还包括湿度测定的一节。

第 6、7、8、14、15、16、17 和 18 章的开头部分,均有对于被论述的分离过程的工业应用的详细描述,以帮助学生熟悉工业上用的实际设备。在这些内容中,必要时将理论的阐发与适当的历史回顾相结合。

网址

在本书中会偶尔提到那些能提供有用的补充资料的网站的网址,学生和教师要善于利用像 Google 那样的搜索引擎去查取有关老的和新的进展方面的补充资料。例如下面两个例子:(1)80 年前首次提出的 McCabe-Thiele 图解法;(2)有关塔填料的新进展。前者能搜索到 700 多个网站,它们以访问的次数为序列出;有关后者的资料也有几个参考的网址。

下面一些网站已被证明对于休斯顿大学的学生是有帮助的:

- (1) www.chemspy.com——查取术语、定义、同义词、首字母缩写词和缩写词;提供与化工和化学有关的自学资料及新闻的链接,还能帮助查取安全信息、科学出版物和世界范围的专利信息。
- (2) webbook.nist.gov——拥有 7000 多种化合物的热化学数据和 34 种流体的热物理数据。
- (3) www.chemist.about.com/od/chemicalengineerin1/index.htm——拥有论文资料 and

与化学工程课题有关的网站链接,这些课题包括建立模型、传质、膜分离和热力学。

(4) www.matche.com——提供许多种化学工艺过程装置的投资费用资料。

教师用的资料资源

一些教师用的资料能从网站www.wiley.com/college/seader上找到,包括:

(1) 教师题解手册给出全部课外习题的详细题解。

(2) 本书各个印次的勘误表。

(3) 一份由本书作者之一成功地应用多年的预备(摸底)考试试卷,用以确定和确保选读分离过程、平衡级操作或/和传质课程的学生已具有的预备知识。这项 50 分钟的闭卷考试,于开课的第二天举行,内容覆盖学生已在前面学过的有关化学工程和传热基本原理的课程,共有 10 个简单试题:温度换算,压力换算,质量-摩尔间的换算,围绕一个普通分离器的物料衡算,流量换算,在容器中的平均停留时间,理想气体定律,换热器的热负荷,热传导,对流换热。学生必须重新考试,直至所有 10 道试题都答对。

这些网站资源用密码(Password)保护,仅供他们的课程采用本教材的老师使用,为访问本书网站的教师资源页面,需要注册来获取密码。

学生用的资料资源

学生用的资料也在网站www.wiley.com/college/seader上提供,内容有:

(1) 为了鼓励学生阅读教科书,帮助他们恰当理解书本上叙述的材料,对于本书的每一章都开列了大量的问答题。

(2) 经过挑选的奇数编号的课外习题的答案。

(3) 解题技巧的讨论。

(4) 对完成课外习题的建议。

(5) 勘误表。

建议的课程教学大纲

在本科生的化学工程教学计划中,于化学工程基本原理、化学和工程热力学、流体力学和传热课程后,安排有分离过程方面的课程,包含分离过程的课程的名称是:分离,平衡级操作,基于传质和基于速率的操作或单元操作。按照下列建议的、不同的学分课时数的课程大纲,本书所包含的材料足以满足这四门课程中的任意一门课程的需要。

分离或单元操作

3 学分课时:第 1,3,4,5,6,7,8,(14,15 或 17)章。

4 学分课时:第 1,3,4,5,6,7,8,9,14,15,17 章。

5 学分课时:第 1,3,4,5,6,7,8,9,10,13,14,15,16,17,18 章。

平衡级操作

3 学分课时:第 1,4,5,6,7,8,9,10 章。

4 学分课时:第 1,4,5,6,7,8,9,10,11,13 章

基于传质和基于速率的操作

3 学分课时:第 1,3,6,7,8,12,14,15 章。

4 学分课时:第 1,3,6,7,8,12,14,15,16,17,18 章

致谢

在本书第一版和第二版的编写过程中,许多教师提出了各种宝贵的意见和建议。在此我们谨向下列各位致谢:堪萨斯州立大学的 Richard G. Akins 教授,田纳西大学的 Paul Bienkowski 教授,位于 Huntsville 的亚拉巴马大学的 C. P. Chen 教授,弗吉尼亚理工学院和州立大学的 William L. Conger 教授, Rice 大学的 Kenneth Cox 教授,位于奥斯汀的得克萨斯大学的 R. Bruce Eldridge 教授,Institut for Kemiteknik 的 Rafiqul Gani 教授,Auburn 大学的 Ram B. Gupta 教授,北卡罗来纳 A&T 州立大学的 Shamsuddin Ilias 教授,Kingsville 的得克萨斯 A&M 大学的 William A. Heenan 教授,衣阿华州立理工大学的 Kenneth R. Jolls 教授,亚拉巴马大学的 Alan M. Lane 教授,新墨西哥州立大学的 Richard L. Long 教授,Tufts 大学的 Jerry Meldon 教授,Brigham Young 大学的 John Oscarson 教授,Tufts 大学的 Timothy D. Placek 教授,基督教兄弟大学的 Randel M. Price 教授,俄亥俄大学的 Michael E. Prudich 教授,耶鲁大学的 Daniel E. Rosner 教授,Stevens 工学院的 Ralph Schefflan 教授,Clarkson 大学的 Ross Taylor 教授,南卡罗来纳大学的 Vincent Van Brunt 教授。

J. D. Seader

Ernest J. Henley

符号表

大写和小写拉丁字母

A	状态方程中的常数; Margules 方程中的常数; 传质面积; 传热面积; 面积; Freundlich 方程中的常数; 吸收因子 $=L/KV$; 塔板总面积; 频率因子
A_a	筛板的有效面积
A_b	塔板的有效鼓泡面积
A_d	塔板的降液管横截面积
A_{da}	降液管下方液体流动面积
A_h	筛板的开孔面积
A_{ij}	van Laar 方程中的二元交互作用常数
$\bar{A}_{ij}$	Margules 二常数方程中的二元交互作用常数
A_j, B_j, C_j, D_j	式(10-7)到式(10-11)定义的物料衡算参数
A_M	膜表面积
A_p	指前(频率)因子
A_w	颗粒的比表面积
a	活度; 理想气体热容方程中的常数; 单位体积的界面积; 表面积; 固体颗粒的特征尺寸; 离子交换中的交换当量; 每级的界面积
$\bar{a}$	塔板上单位体积当量清液的界面积
a_h	填料的比水力面积
a_{mk}	UNIFAC 法中的基团交互作用参数
a_v	单位体积的表面积
B	状态方程中的常数; 塔底产物流量; 二元恒沸物数
B^0	单位体积溶液的成核速率
b	摩尔有效能函数 $=h-T^0s$; 状态方程中的常数; 塔底产物中组分流量; 表

面周长

C	通用组成变量, 如浓度、质量分数、摩尔分数或体积分数; 组分数; 常数; 式(6-40)中的处理量参数; 式(6-50)给出的塔板持液量表示式中的常数; 晶体产量
C_1	式(6-126)中的常数
C_2	式(6-127)中的常数
C_D	曳力系数
C_F	图 6.24 和式(6-42)中的夹带液泛因子
C_L	式(6-132)和表 6.8 中的常数
C_V	式(6-133)和表 6.8 中的常数
C_h	表 6.8 中的填料常数
C_o	孔板系数
c_p, C_P	恒压比热容; 表 6.8 中的填料常数
c_{pV}^0	恒压理想气体热容
c	摩尔浓度; BET 方程中的常数; 光速
c^*	与主体分压下的气体成平衡的液体浓度
c'	临近膜表面的液体浓度
c_m	晶体的亚稳极限溶解度
c_s	湿比热容; 晶体的正常溶解度
c_t	总摩尔浓度
ΔC_{limit}	极限过饱和
$D, \mathcal{D}$	扩散系数; 馏出液流量; 馏出液量; 解吸(排放)气流量; 第 10 章内外层法中的偏差函数
D_B	气泡直径
D_E	式(6-36)中的涡流扩散系数
D_e, D_{eff}	有效扩散系数[见式(3-49)]
D_H	筛板的筛孔直径

D_i	叶轮直径		料流量;力;式(6-67)定义的 F 因子
D_{ij}	i 在 j 中的相互扩散系数	F_b	浮力
D_K	Knudsen 扩散系数	F_d	曳力
D_L	纵向涡流扩散系数	F_F	式(6-42)中的发泡因子
$\bar{D}_N$	算术平均直径	F_g	重力
D_o	式(3-51)中的扩散常数	F_{HA}	式(6-42)中的孔面积因子
D_p, D_p	有效填料直径;颗粒直径	F_{LV}, F_{LG}	图 6.24 中定义的动能比
$\bar{D}_P$	两相邻筛网筛孔孔径的平均值	F_P	表 6.8 中的填料因子
D_s	表面扩散系数	F_{ST}	式(6-42)中的表面张力因子
$\bar{D}_S$	表面(Sauter)平均直径	F_V	单位时间内经单位横截面积以体积表示的固体体积速率
D_T	塔或容器直径	$F\{t\}$	接触时间小于 t 的漩涡分数
$\bar{D}_V$	体积平均直径		自由度
$\bar{D}_W$	质量平均直径	f	纯组分逸度;Fanning 摩擦因子;函数;进料中的组分流量;残差
d	馏出液中的组分流率	f_t	液泛速度的分数
d_e	当量液滴直径;孔径	f_i	混合物中组分 i 的逸度
d_H	水力直径 $= 4r_H$	f_v	体积形状因子
d_m	分子直径		分逸度
d_p	液滴或颗粒直径;孔径	f_w	SRK 方程和 PR 方程中的偏心因子
d_{vs}	式(8-35)定义的 Sauter 平均直径		函数
E	活化能;式(3-80)中定义的无量纲浓度变化;式(4-24)中定义的萃取因子;萃取液的数量或流量;湍流扩散系数;伏特;波动能量;蒸发速率	G	Gibbs 自由能;质量速度;塔板上的体积持液量;晶体尺寸生长速率
E^0	标准电位	G_{ij}	NRTL 方程中的二元交互作用参数
E_b	黑体发射的辐射能	g	摩尔 Gibbs 自由能;重力加速度
E_D	聚合物中的扩散活化能	g_c	通用的
$E_{i,j}$	平衡方程式(10-2)的残差	g_{ij}	NRTL 方程中的交互作用能
E_{MD}	分数表示的 Murphree 分散相效率	H	表 2.3 中定义的亨利定律系数;式(3-50)中定义的亨利定律常数;容器的高度或长度;摩尔焓
E_{MV}	分数表示的 Murphree 气相效率		偏摩尔焓
E_{OV}	分数表示的 Murphree 气相点效率	H	式(6-121)定义的亨利定律系数
E_O	分数表示的总级(板)效率	H_j	能量衡算方程式(10-5)的残差
E_p	活化能		吸附热
	黑体发射的给定波长的辐射能		冷凝热
$E\{t\}dt$	出口物流中停留时间在 t 到 $t+dt$ 间的分数		结晶热
	Gibbs 相律的独立方程数		稀释热
ΔE^{vap}	摩尔汽化内能		饱和积分溶解热
e	夹带量;通过相边界的传热速率		无限稀释溶解热
F	法拉第常数 $= 96490$ 库仑/克当量;进		

符号表

	摩尔汽化焓		平衡分配系数;总传质系数;吸附平衡常数
H_G	气相传质单元高度	K	UM 扩散的总传质系数
H_i	叶轮离釜底的距离	K_a	基于活度的化学平衡常数
H_L	液相传质单元高度	K_c	溶度积;用于结晶的总传质系数
H_{OG}	基于气相的总传质单元高度	K_D	用于液-液平衡的平衡常数
H_{OL}	基于液相的总传质单元高度		以摩尔或质量比表示的用于液-液平衡的平衡常数
	湿度	K_G	用分压为推动力的气相总传质系数
	摩尔湿度	K_{ij}	离子交换中的选择性系数
	百分比湿度	K_L	用浓度为推动力的液相总传质系数
	相对湿度	K_s	式(6-53)定义的处理量参数
	饱和湿度	K_w	式(6-111)给出的壁因子
	温度 T_w 下的饱和湿度	K_X	用摩尔比为推动力的液相总传质系数
HETP	理论板当量高度		数
HETS	理论级当量高度(与 HETP 相同)	K_x	用摩尔分数为推动力的液相总传质系数
HTU	传质单元高度	K_Y	用摩尔比为推动力的气相总传质系数
h	摩尔焓;传热系数;比焓;液体摩尔焓;通道高度;Planck 常数	K_y	用摩尔分数为推动力的气相总传质系数
h_d	用液柱表示的干板压降	K_r	孔内扩散的限制因子
h_{da}	降液管下液体流动的压头损失	k	导热系数;无主体流动影响的传质系数
h_{dc}	降液管中的清液柱高度	k	如式(3-229)和式(3-330)中考虑的主体流动影响的传质系数
h_{df}	降液管中的泡沫层高度	k_c	用浓度 c 为推动力的传质系数;晶体层的导热系数
h_l	塔板上的泡沫层高度	k_{ij}	二元交互作用参数
h_i	塔板上的清液当量压头	k_i	结合进入晶格的传质系数
h_L	填料塔内的比持液量	k_N	常数
h_t	用液柱表示的塔板总压降	k_p	用分压 p 为推动力的气相传质系数
h_w	堰高	k_x	用摩尔分数为推动力的液相传质系数
	用液柱表示的由表面张力引起的压降	k_y	用摩尔分数为推动力的气相传质系数
I	电流		提馏段的液体摩尔流量
i	电流密度	L	液体;长度;高度;液体流量;底流流量;晶体大小
J_i	相对于混合物摩尔平均速度的由正常分子扩散导致的 i 的摩尔通量		
J_D	Chilton-Colburn 传质 j 因子		
J_H	Chilton-Colburn 传热 j 因子		
J_M	Chilton-Colburn 动量传递 j 因子		
j_i	相对于化合物摩尔平均速度的由正常分子扩散导致的 i 的质量通量		
K	气-液平衡的平衡常数;式(3-53)中及用于某组分在液体和膜间分配的		

L	不含溶质的液体摩尔流量; 塔的中间段的液体摩尔流量		传质 Biot 数
L_B	吸附床层长度	N_D	自由度
L_e	进口长度	N_E	独立方程数
L_{pd}	占主导地位的晶体大小	N_{Eo}	式(8-49)定义的 Eotvos 数
L_S	侧线的液体摩尔流量	N_{Fo}	传热的 Fourier 数 $= at/a^2 =$ 无因次时间
LES	吸附床层的平衡(失效)段长度		传质的 Fourier 数 $= Dt/a^2 =$ 无因次时间
LUB	吸附床层的未使用段长度		
L_w	堰长	N_{Fr}	Froude 数 $=$ 惯性力/重力
l	UNIQUAC 和 UNIFAC 方程中的常数; 液体中的组分流量; 长度	N_G	表 6.7 中定义的气相传质单元数
l_{ij}	二元交互作用参数	N_L	表 6.7 中定义的液相传质单元数
l_M	膜厚度	N_{Le}	Lewis 数 $= N_S / N_{Pr}$
l_T	填料高度	N_{Lu}	Luikov 数 $= 1/N_{Le}$
M	相对分子质量; 混合点的量或流量, 摩尔持液量	N_{min}	规定分离所需的最小级数
M_i	间歇蒸馏釜中组分 i 的摩尔数	N_{Nu}	Nusselt 数 $= dh/k =$ 壁面或界面处的温度梯度/通过流体的温度梯度($d =$ 特性长度)
$M_{i,j}$	组分物料衡算方程式(10-1)的残差	N_{OG}	表 6.7 中定义的总气相传质单元数
M_T	单位体积稠液中的晶体质量	N_{OL}	表 6.7 中定义的总液相传质单元数
M_t	总质量	N_{Pe}	传热的 Peclet 数 $= N_{Re} / N_{Pr} =$ 对流传递与分子传递之比
m	平衡曲线的斜率; 质量流量; 质量		传质的 Peclet 数 $=$ 对流传递与分子传递之比
m_i	单位体积母液中的晶体质量	N_{Po}	式(8-21)定义的功率数
	溶液中组分 i 的质量摩尔浓度	N_{Pr}	Prandtl 数 $=$ 动量扩散系数/热扩散系数
m_p	吸附剂或颗粒质量	N_R	冗余方程数
m_s	干基固体质量; 固体流量	N_{Re}	雷诺数 $=$ 惯性力/黏性力($d =$ 特性长度)
m_v	汽化质量; 汽化速率	N_{RX}	反应数
m_x	图 3.22 中液膜摩尔分率区的气-液平衡曲线的切线斜率	N_S	Schmidt 数 $=$ 动量扩散系数/质量扩散系数
m_y	图 3.22 中气膜摩尔分率区的气-液平衡曲线的切线斜率	N_{Sh}	Sherwood 数 $=$ 壁面或界面处的浓度梯度/通过流体的浓度梯度($d =$ 特性长度)
MTZ	吸附床层的传质区长度	N_S	传热的 Stanton 数 $= h/GC_p$
N	相数; 摩尔数; 摩尔通量 $= n/A$; 平衡(理论、理想)级数; 转速; 尺寸为 L 及以下的晶体的累计数; 稳定节点数; 摩尔流量		传质的 Stanton 数
N_A	附加变量数; Avogadro 常数, 分子数/摩尔	NTU	传质单元数
N_a	实际板数	N_T	单位体积母液的总晶体数; 传热单元
N_{Bi}	传热 Biot 数		

符号表

数		q_L	通过塔板的液体流量
N_t	平衡(理论)级数	R	通用气体常数 1.987cal/(mol·K)或 Btu/(lbmol·R) 8315J/(kmol·K)或 Pa·m ³ /(kmol·K) 82.06atm·cm ³ /(mol·K) 0.7032atm·ft ³ /(lbmol·R) 10.73psia·ft ³ /(lbmol·R)
N_V	变量数		分子半径;萃余液数量或流量;溶剂与不溶性固体之比;回流比;干燥速率通量;式(12-31)和式(12-32)定义的倒数二元传质系数
N_{We}	式(8-37)定义的 Weber 数	R	单位质量骨架干固体的干燥速率
	摩尔数	R_c	恒速阶段的干燥速率通量
n	摩尔流量;摩尔;Freundlich 方程中的常数;单位膜横截面积的孔数;单位尺寸单位体积的晶体数	R_t	降速阶段的干燥速率通量
n_c	单位体积母液的晶体数	R_k	UNIFAC 法中基团 k 的体积参数
n^0	单位尺寸单位体积的初始晶体数	R_L	式(10-80)中的液相抽出因子
n_+, n_-	分别为阳离子和阴离子的价数	R_{min}	规定分离的最小回流比
P	压力;功率;电功率	R_p	颗粒半径
P, P	差值点	R_V	式(10-81)中的气相抽出因子
	等张比容;Gibbs 相律中的相数	r	UNIQUAC 和 UNIFAC 方程中每个分子的相对片段数;半径;膜的渗透压与进料压力之比;扩散方向上的距离;作为侧线离开某级的物流分率;单位体积填料层的摩尔传质速率
P_c	临界压力	r_c	反应界面处的半径
P_M	渗透率	r_H	水力半径=流动横截面积/浸润周边
	渗透系数	r_p	孔半径
p_r	对比压力, p/p_c	r_s	颗粒表面处的半径
	蒸气压	r_w	壁面处的半径
	孔内蒸气压	S	固体;熵变速率;总熵;溶解度,等于式(3-50)中的 H ;流动横截面积;吸附剂质量;汽提因子 = KV/L ;表面积;惰性固体流量;晶体流量;过饱和;弯曲速率;鞍点数
p_0	试验条件下的吸附质蒸气压	S_{ij}	离子交换中的分离因子
p	分压	S_g	单位体积多孔颗粒的表面积
p	与液相主体浓度平衡的分压	S_x	液相摩尔分数加和方程式(10-3)的
p_j, q_j	用于第 10 章 Thomas 算法的物料衡算参数		
Q	传热速率;液体体积;体积流量		
Q_C	冷凝器的传热速率		
Q_L	液体体积流量		
Q_{ML}	母液体积流量		
Q_R	再沸器的传热速率		
Q_k	UNIFAC 法中基团 k 的面积参数		
q	UNIQUAC 和 UNIFAC 方程中分子的相对表面积;热通量;吸附剂上吸附的吸附质量或浓度;精馏中的进料状态,定义为通过进料级的液体摩尔流量增加值与摩尔进料流量之比 对球形颗粒由式(15-103)定义的体积平均比吸附质量		
q^e	液体吸附中的表面过量		

	残差	u_c	吸附中浓度波的速度
S_y	气相摩尔分数加和方程式(10-3)的残差	u_{ij}	UNIQUAC 方程中的交互作用能量
s	摩尔熵;表面更新的分率;相对过饱和度	u_L	表观液体速度
s_p	颗粒外表面积	u_{mf}	最小流化速度
SF	式(1-2)定义的分割分率	u_o	筛板的孔速;填料塔的表现气速
SP	式(1-4)定义的分离能力或相对分割比率;式(14-70)定义的盐通过率	u_s	表观速度
SR	式(1-3)定义的分离比	u_v	气体速度
T	温度	u_0	液滴的特征上升速度
T_c	临界温度	V	气相;体积;蒸气流量;溢流流量
T_g	聚合物的玻璃化温度		塔的中间段的气体摩尔流量;不含溶质的气体流量
T_{ij}	UNIQUAC 和 UNIFAC 方程中的二元交互作用参数	V_B	蒸出比
T_m	聚合物的熔点温度	V_H	作为干燥器体积分数的物料持有量
T_0	计算熵的基准温度;参考温度;无限源或汇温度	V_{LH}	体积持液量
T_r	对比温度 $= T/T_c$	V_{ML}	稠液中的母液体积
T_s	热源或热汇温度	V_p	单位质量颗粒的孔体积
T_v	水分汽化温度	V_v	容器体积
t	时间;停留时间		提馏段的气体摩尔流量
	平均停留时间		Gibbs 相律中的变量数
t_b	吸附中的穿透时间	v	摩尔体积;速度;气相的组分流量;吸附气体的体积
t_c	渗透理论中的接触时间		平均分子速度
t_E	色谱中的洗脱时间	v_i	相对于静止坐标的组分速度
t_F	色谱中的进料脉冲时间		相对于混合物摩尔平均速度的组分扩散速度
t_L	渗透理论中的液体接触时间;晶体达到尺寸 L 的停留时间	v_c	临界摩尔体积
t_{res}	停留时间	v_H	湿体积
U	表观速度;总传热系数;液体侧线摩尔流量;萃取因子的倒数	v_M	混合物的摩尔平均速度
U_a	以塔板有效鼓泡面积为基准的表现速度	v_p	颗粒体积
U_f	液泛速度	v_r	对比摩尔体积
u	速度;空隙速度	v_s	晶体的摩尔体积
	主体平均速度;流动平均速度;相对或滑动速度	v_0	表观速度
u_{all}	允许速度		式(3-36)中的原子和结构扩散体积之和
		W	功;膜宽度;底部流量;吸附质数量;浸取中的洗涤因子 $= S/RF_A$;挡板宽度;间歇蒸馏釜中的液体摩尔数;湿基湿含量;气相侧线摩尔流量;堰长
		W_{min}	分离最小功

符号表

WES	吸附床层的平衡(失效)段重量	α^*	膜的理想分离因子
WUS	未使用吸附床层的重量	α_{ij}	气-液平衡中组分 i 对组分 j 的相对挥发度;NRTL 方程中的参数
W_s	轴功	$\alpha_j, \beta_j, \gamma_j$	式(10-23)到式(10-26)中的能量衡算参数
w	质量分数;通道宽度;式(10-90)中的加权函数	β_{ij}	液-液平衡中组分 i 对组分 j 的相对选择性
X	摩尔或质量比;底流中可溶物料与溶剂的质量比;干基湿含量;通用变量;式(9-34)中的参数	Γ	液膜流量/单位液膜宽度;式(12-37)定义的热力学函数
X	干基平衡湿含量	Γ_k	UNIFAC 方程中基团 k 的剩余活度系数
X_B	干基结合湿含量	γ	比热容比;活度系数
X_c	临界自由结合湿含量	Δ	变化(最终-最初)
X_T	总干基湿含量	δ	溶解度参数;膜厚度;速度边界层厚度;Prandtl 类似律中层流底层的厚度
X_i	单位体积固体的溶质质量	δ_c	浓度边界层厚度
X_m	UNIFAC 法中基团 m 的摩尔分率	δ_{ij}	Kronecker 三角形
x	液相摩尔分数;任何相的摩尔分数;距离;萃余液的质量分数;底流的质量分数;颗粒的质量分数	ϵ	式(3-40)中的指数参数;空隙率;允许误差;式(10-31)中的允差
x	归一化的摩尔分数=1	ϵ_b	床层空隙率(外部空隙率)
x	液相摩尔分数向量	ϵ_D	用于扩散的涡流扩散系数(传质)
x_n	尺寸小于 L 的晶体的分数	ϵ_H	用于传热的涡流扩散系数
Y	摩尔或质量比;溢流中可溶物料与溶剂的质量比;式(6-102)定义的填料塔的压降因子;溶液中溶质的浓度;式(9-34)中的参数	ϵ_M	用于动量传递的涡流扩散系数
y	气相摩尔分数;距离;萃取液的质量分数;溢流的质量分数	ϵ_p	颗粒空隙率(内部空隙率)
y	气相摩尔分数向量	η	式(10-73)中的 Murphree 气相板效率
Z	压缩因子= pV/RT ;总质量;高度	θ	UNIQUAC 和 UNIFAC 方程中的面积分数;式(3-80)中定义的无量纲浓度变化;Edmister 集合算法中的校正因子;分离膜的渗透物流率与原料流率比的分割比;接触角;Langmuir 方程中的覆盖分数;干燥器中的固体停留时间;Underwood 方程式(9-28)的根
Z_i	塔板上的泡沫层高度	θ_L	塔板上液体平均停留时间
Z_L	通过塔板的液体流道长度	κ	二元混合物中的 Maxwell-Stefan 传
z	任何相的摩尔分数;组合相的总摩尔分数;距离;进料的总摩尔分数;无量纲晶体尺寸;通过塔板的液体流道长度		
z	整个混合物的摩尔分数向量		
希腊字母 ^①			
α	导热系数;相对挥发度;每个吸附分子的表面积		

① 原著中这部分符号均缺希腊字母,为译者所补。