

SPT 高等院校选用教材

工科类

分离过程及系统模拟

刘芙蓉 金鑫丽 王 黎 等 编著

科学出版社

内 容 简 介

本书主要以多级、多组分分离过程为主要对象,重点讨论多级、多组分分离的热力学基础和工程上常见的多组分分离过程原理及设计计算。根据当今世界分离科学发展的现状,特别介绍了多种新型分离方法、反应-分离一体化,以及分离过程系统模拟、优化的基础等。并结合工程应用实际,给出分离过程及系统模拟的例题及实例。最后还详细分析了分离过程的能耗,指出了分离过程的节能措施。

本书可作为高校化工专业本、专科生的教材,亦可供相关专业研究生和化学工业工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

分离过程及系统模拟/刘芙蓉等编著,-北京:科学出版社,2001
(高等院校选用教材)

ISBN 7-03-009124-8

I.分… II.刘… III.分离-化工过程-高等学校-教材 IV.TQ028

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第02197号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16

邮政编码 100 17

http www.sciencep.com

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001年7月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2001年7月第一次印刷 印张:25

印数:1—3 500 字数:462 000

定价:35.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

序 言

化学工业生产过程是将原料经过化学变化和分离过程加工成有用的产品,所以化工生产过程按其基本原理,大体上可分为化学反应过程和分离过程两大类。原料在进行化学反应前,往往需要通过分离,将其提纯。而反应后的产物,也需要通过分离制成产品,所以化学反应与分离过程是紧密联系的。特别是近年来开发的反应分离一体化过程,更使反应和分离过程结合在一起进行。还有一些化工生产过程没有化学反应发生,分离是惟一主要的过程,如从植物中萃取有效成分等。可见分离过程在化工生产中的重要地位。

分离的目的是改变混合物中各个组分的浓度。分离的方法视物系的性质和要求而定。对于某些非均相混合物,可利用密度和粒度的不同,采用机械方法分离。但是对于化工生产中常遇到的均相混合物,则要利用蒸气压和溶解度的不同,使物质由一相向另一相转移,从而达到分离的目的。这样的过程称为物质传递过程或传质过程。本书主要介绍基于物质传递的分离过程,书中除了介绍分离过程的基本原理和计算方法外,还特别介绍了新型分离方法和反应分离一体化过程,这对读者在今后的工作中开发和应用新型分离技术具有重要意义。

过程模拟已被确认为一种用于过程设计和优化的非常有效的工具。模拟方法的广泛应用,使得从科学通向工程的道路变得更加宽阔。模拟是过程放大的一种合理方法。近年来,随着大型、高速计算机的开发,模拟的应用得到迅速发展,在化工生产过程中,大型的、实际的非线性问题,通过模拟已能常规地得以解决。本书介绍了系统模拟的基本内容,为分离过程的设计和优化提供了有效手段。对分离过程的工业应用具有重要意义。

本书对分离过程的基本原理、计算方法和计算机模拟都作了详尽的叙述,每章还附有例题和习题,可作为高等院校大学生和研究生的教学用书。同时对工程技术人员也可作为设计和操作分离过程的参考用书。本书对促进分离过程的教学和工业应用将起重要作用。

石炎福

2000年8月10日

前 言

本教材是 1998 年 10 月全国工科高等院校化学工程与工艺专业面向 21 世纪教学体制、教学内容与方法改革会议上确定的重点教材,其主要内容包括多组分分离的基本概念及设备;多组分相平衡的基本理论与计算;除对化学工业中最常见的传质分离过程——多组分精馏与吸收、恒沸精馏与萃取精馏、吸附分离等过程进行讨论外,还对新型传质与分离方法、反应分离一体化、分离过程系统模拟及合成等进行了介绍,最后还讨论了分离过程的能耗及节能措施等。本书偏重于用计算机进行计算,多数章节都配有例题或习题,便于学生学习。

本书可作为工科高等院校化学工程与工艺及相关专业本科生和研究生的教材,亦可供从事化学工程、石油加工及气体分离工程等方面的工程技术人员参考。

本书第 4 章、第 5 章由金鑫丽编写,第 7 章由杨玲编写,第 8 章由王黎编写,第 9 章与第 10 章由张文玲编写,其余各章由刘芙蓉编写。

本书由陈澄华教授和夏光榕教授审稿,石炎福教授在百忙中为本书撰写序言,在此一并表示诚挚的谢意。

由于编写人员水平有限,错误和缺点在所难免,深切希望广大读者和有关专家学者予以批评指正。

作 者

2000 年 10 月

通用符号表

符号	物理意义	单位	符号	物理意义	单位
A	1. 渗透常数 2. 吸收因数 3. 面积	m^2	ΔH	2. 亨利系数 3. 气相焓 气化潜热, 溶解热	J/mol
A_e	有效吸收因数		J	1. 渗透通量	$kg/(m^2 \cdot s)$
B	1. 有效吸收因数 2. 维里系数 3. Antoine 常数		K	2. 雅可比矩阵 1. 平衡常数 2. 总传质系数 3. 分配系数	
C	1. 恒沸物组成比值 2. 组分数 3. 维里系数 4. Antoine 常数 5. 分离易度系数		R	1. 吸附分离系数 2. 回流比 3. 气体常数	$kJ/(kg \cdot K)$
D	1. 气体在固相中的 扩散系数 2. 液相扩散系数 3. 馏出液流率 4. 维里系数 5. Antoine 常数	m^2/s $kmol/h$	S	1. 溶剂流率 2. 蒸出因数 3. 解吸因子	$kmol/h$
E	酶		S_c	1. 斯克特准数 2. 有效蒸出因数 3. 分离序数	
E	存量	$kmol/h$	T	热力学温度	K
F	1. 扩散传质面积 2. 进料流率	m^2 $kmol/h$	U	惟一分割数	
G	1. 气相流率 2. 子群数 3. 气体的质量流率	$kmol/s$ $kg/(kmol \cdot h)$	V	1. 体积 2. 气相流率 3. 摩尔体积 4. 吸附量	m^3 $kmol/h$ kg/kg
H	1. 气体在固相中的 溶解度系数	$Pa \cdot m^3/kmol$	W	1. 塔釜产物及釜液 流率 2. 单位功	$kmol/h$ kJ
			X	比摩尔浓度	

符号	物理意义	单位	符号	物理意义	单位
Y	比摩尔浓度		Ω	无因次常数	
a	1. 活度 2. 有效传质系数 3. 颗粒的外表面积	m^2	α	1. 相对挥发度 2. 分离因子	
b	吸附常数		β	1. 化学吸收增强 2. 无因次浓度	
c	1. 比热容 2. 体积摩尔浓度	$\text{kJ}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$ kmol/m^3	γ	活度系数	
d	颗粒直径	m	δ	1. 厚度 2. 推动力的增量	m
f	1. 进料组分流率 2. 逸度	kmol/h kPa	ε	1. 无限小数 2. 空隙率	
g	气相流率	kmol/h	η	1. 吸收率 2. 分离热力学效率	
h	总传热系数	$\text{kJ}/(m^2\cdot\text{K})$	θ	1. 对比湿度 2. 表面覆盖分数	
k	1. 传质分系数 2. 盐析常数 3. 吸附分系数	$\text{kmol}/s\cdot m^2$	μ	1. 化学位 2. 无因次底物模数	
k_B	玻耳兹曼常量		Π	渗透压	kPa
k^*	化学反应速率常数	kmol/s	ρ	1. 密度 2. 堆密度	kg/m^3 kg/m^3
l	液相流率	kmol/h	τ	时间	s 或 h
m	质量摩尔浓度	kmol/kg	ϕ	1. 逸度系数 2. Thiele 模数	
p	分压	Pa	Ψ	气化分率	
q	1. 气体透过量 2. 化学计量系数 3. 进料的液相分率		ω	偏心因子	
r	化学反应速率			上角标	
t	摄氏温度	$^{\circ}\text{C}$	B	塔底	
u	流速	m/s	D	塔顶	
x	1. 液相摩尔分数 2. 平衡吸附剂的吸附量	kg/kg	F	原料	
y	气相摩尔分数		L	液相	
ν	运动黏度	m^2/s	OL	纯液相	
Φ	回收率		OV	纯气相	
			V	气相	

符号	物理意义	符号	物理意义
cp	平均值	c	1. 组分
k	迭代次数		2. 临界
o	饱和状态	d	露点
∞	无限稀释	d	1. 馏出液
*	平衡		2. 尾气
	下角标		3. 扩散
B	塔底	f	进料
D	塔顶	g	气相
F	进料	h	重组分
G	气相	i	第 i 个组分
HK	重关键组分	j	塔板序号
HNK	重非关键组分	k	本征反应动力学常数
L	液相	l	1. 轻组分
LK	轻关键组分		2. 液相
LNK	轻非关键组分	m	混合物
M	1. 混合物	q	进料状态
	2. 米氏	r	溶解热
OL	液相总	s	溶剂
R	再沸器	t	总
T	热力学温度	v	气相
T	总数	w	釜液
V	体积		
b	泡点		

目 录

序言

前言

通用符号

第 1 章 分离过程及系统模拟概论	(1)
1.1 分离过程及特征	(3)
1.1.1 分离过程的定义	(3)
1.1.2 分离过程的特征	(3)
1.1.3 分离过程的分类	(5)
1.2 分离过程在工业中的应用	(8)
1.3 分离过程的研究特点	(9)
1.3.1 多组分混合物的热物性数据	(9)
1.3.2 实际体系的相平衡常数	(9)
1.3.3 集态的变化	(9)
1.3.4 需用电子计算机作为运算工具	(9)
参考文献	(10)
习题	(10)
第 2 章 多组分分离基础	(11)
2.1 气液相平衡基本关系及计算	(11)
2.1.1 气液相平衡基本关系	(11)
2.1.2 气液相平衡常数的计算	(12)
2.1.3 气液相平衡的分类	(14)
2.1.4 逸度系数的计算	(19)
2.1.5 泡点和露点温度的计算	(26)
2.1.6 混合物相状态的核定	(32)
2.1.7 焓值的计算	(33)
2.2 多组分单级平衡分离过程的计算	(35)
2.2.1 等温闪蒸计算	(36)
2.2.2 部分气化与部分冷凝计算	(38)
2.2.3 等焓节流过程与计算	(41)

参考文献	(44)
习题	(45)
第3章 多组分精馏	(46)
3.1 多组分简单精馏塔的计算	(46)
3.1.1 基本概念	(46)
3.1.2 设计变量的确定	(50)
3.1.3 普通精馏塔的简捷算法	(52)
3.1.4 简单精馏塔的迭代法	(62)
3.2 多组分复杂精馏塔的计算	(73)
3.2.1 通用模型塔的建立	(73)
3.2.2 通用数学模型的建立	(73)
3.2.3 MESH 方程组的解法	(75)
3.2.4 泡点(BP)法	(77)
3.2.5 流量总和(SR)法	(79)
3.2.6 2N-牛顿-拉夫森法(简称 N-R 法)	(83)
3.2.7 松弛法	(89)
3.2.8 小结	(90)
参考文献	(91)
习题	(92)
第4章 特殊精馏	(95)
4.1 恒沸精馏	(95)
4.1.1 恒沸物的形成与特性	(95)
4.1.2 非理想溶液的相平衡关系与活度系数的计算	(100)
4.1.3 恒沸剂的选择和恒沸精馏流程	(107)
4.1.4 恒沸精馏过程的计算	(112)
4.2 萃取精馏	(127)
4.2.1 萃取精馏基本原理	(128)
4.2.2 萃取剂的选择	(130)
4.2.3 萃取精馏流程	(133)
4.2.4 萃取精馏的计算	(135)
4.2.5 萃取精馏与恒沸精馏的比较	(142)
参考文献	(143)
习题	(144)

第 5 章 多组分吸收、解吸及吸收蒸出塔	(148)
5.1 吸收分离概述	(148)
5.1.1 吸收过程的分类与特点	(148)
5.1.2 吸收过程的基本原理	(150)
5.1.3 吸收过程的工艺流程	(154)
5.2 多组分吸收过程的计算	(157)
5.2.1 吸收因子法	(157)
5.2.2 精确算法	(171)
5.3 吸收操作条件的选择	(180)
5.3.1 吸收过程的必要条件和限度	(180)
5.3.2 吸收操作因素分析	(181)
5.3.3 吸收剂的选择	(183)
5.4 吸收塔的热量平衡	(183)
5.4.1 吸收过程的热效应	(183)
5.4.2 吸收塔的热平衡方法及其应用	(184)
5.5 多组分解吸方法及解吸计算	(187)
5.5.1 常用的解吸方法	(188)
5.5.2 解吸过程计算	(190)
5.6 吸收蒸出塔	(191)
5.6.1 吸收蒸出塔的物质平衡	(192)
5.6.2 吸收蒸出塔的工艺计算	(193)
参考文献	(197)
习题	(198)
第 6 章 吸附分离过程	(201)
6.1 吸附分离基本概念	(201)
6.1.1 吸附现象	(201)
6.1.2 物理吸附与化学吸附	(201)
6.1.3 脱附过程	(202)
6.1.4 吸附剂	(202)
6.1.5 吸附设备	(204)
6.2 吸附分离的理论基础	(206)
6.2.1 吸附平衡	(206)
6.2.2 吸附速率	(212)
6.3 固定床吸附过程的计算	(213)

6.3.1	固定床吸附器的传质规律	(213)
6.3.2	吸附等温线对传质区的影响	(214)
6.3.3	吸附转效曲线	(215)
6.3.4	固定床吸附器的计算	(217)
6.3.5	固定床吸附器的再生(又称脱附)	(222)
6.4	变压吸附	(224)
6.4.1	变压吸附简介	(224)
6.4.2	PSA 操作原理及典型流程	(224)
6.4.3	变压吸附塔的计算	(226)
	参考文献	(227)
	习题	(227)
第 7 章	新型分离方法	(228)
7.1	溶盐精馏和加盐萃取精馏	(228)
7.1.1	盐效应及其对气液平衡的影响	(228)
7.1.2	溶盐精馏	(230)
7.1.3	加盐萃取精馏	(231)
7.2	特殊萃取	(232)
7.2.1	超临界流体萃取	(232)
7.2.2	凝胶萃取	(234)
7.2.3	双水相萃取	(235)
7.3	新型吸附分离技术	(237)
7.3.1	变压吸附	(237)
7.3.2	热参数系吸附分离	(237)
7.3.3	泡沫吸附	(239)
7.4	离子交换与色谱	(242)
7.4.1	离子交换	(242)
7.4.2	色谱分离	(248)
7.5	膜分离	(252)
7.5.1	概述	(252)
7.5.2	电渗析	(255)
7.5.3	超滤、微滤及反渗透	(257)
7.5.4	渗透气化	(261)
7.5.5	气体膜分离	(262)
7.5.6	液膜分离	(263)

7.5.7 气膜分离	(266)
第8章 反应分离一体化	(268)
8.1 化学吸收	(268)
8.1.1 概述	(268)
8.1.2 化学吸收的分类	(269)
8.1.3 化学吸收的气液平衡	(270)
8.1.4 化学吸收的传质速率	(273)
8.1.5 化学吸收的计算	(282)
8.2 反应精馏	(286)
8.2.1 概述	(286)
8.2.2 反应精馏中的反应类型	(288)
8.2.3 反应精馏的典型流程	(290)
8.2.4 反应精馏的基础理论	(292)
8.2.5 影响反应精馏的条件	(296)
8.2.6 反应精馏的发展方向	(297)
8.3 催化膜分离	(297)
8.3.1 概述	(297)
8.3.2 酶催化特性	(298)
8.3.3 米-曼方程	(299)
8.3.4 酶催化膜分离中的传质	(303)
8.3.5 影响酶催化膜分离的因素	(308)
8.3.6 酶催化膜生化反应器	(311)
参考文献	(314)
第9章 分离过程系统模拟基础	(315)
9.1 分离过程系统模拟的基本方法	(316)
9.2 序贯模块法	(317)
9.2.1 模拟的基本要素	(317)
9.2.2 再循环流的断裂	(319)
9.2.3 系统的分割与排序	(323)
9.2.4 断裂流股变量的收敛	(327)
9.3 联立方程法	(328)
9.3.1 流程方程组的建立	(329)
9.3.2 流程方程组的分割与排序	(329)
9.3.3 流程方程组的求解	(332)

9.4 联立模块法	(333)
9.5 模拟方法比较	(337)
9.6 分离过程模拟	(338)
9.6.1 流程模拟系统构成	(338)
9.6.2 通用分离流程模拟系统	(339)
9.7 油田气分离装置的模拟计算	(340)
参考文献	(344)
习题	(344)
第 10 章 分离过程系统合成	(345)
10.1 分离系统的组织	(345)
10.1.1 分离过程的合成	(345)
10.1.2 分离器数和分离序列数	(346)
10.1.3 子群数	(347)
10.1.4 分离问题数	(347)
10.1.5 分离序列合成的主要方法	(348)
10.2 试探合成	(349)
10.2.1 试探规则	(349)
10.2.2 有序试探法	(351)
10.3 调优法合成	(353)
10.3.1 初始分离序列的建立	(353)
10.3.2 确定调优规则	(353)
10.3.3 制定调优策略	(354)
10.4 最优化合成	(356)
参考文献	(359)
习题	(359)
第 11 章 分离过程的能耗及节能措施	(360)
11.1 分离过程所需理论最小功	(360)
11.1.1 等温分离最小功	(360)
11.1.2 非等温分离最小功	(363)
11.1.3 净功耗	(363)
11.1.4 热力学效率	(364)
11.2 分离过程的节能措施	(365)
11.2.1 影响分离过程热力学效率因素的分析	(365)
11.2.2 分离过程主要操作条件对能耗的影响	(365)

11.2.3 分离过程节能途径.....	(368)
参考文献.....	(375)
习题.....	(376)

第 1 章 分离过程及系统模拟概论

分离工程或分离过程(separation processes),主要是对化学工业、石油化学工业、煤化工生产及相关工业生产中的分离过程进行研究。

尽管化工生产中产品种类繁多,生产方法各异,但共同的特点是都包括有原料的净化、预处理及产物的分离与提纯。如由石油系原料(包括油田气、凝析油、石脑油、煤油、柴油和原油等)生产乙烯、丙烯等基本有机化工产品的乙烯装置,首先需将原料经过一定的预加工,经短时间的高温裂解化学反应和急冷得到裂解气,再经一系列的分离过程最后得到乙烯、丙烯等产品。裂解气的成分如表 1-1 所示。它是一个复杂的混合气体,含有氢及各种烃类物质,并含有少量的 CO , CO_2 , C_2H_2 , H_2S 及水蒸气等杂质。为了从这样一个复杂的混合气体中分离出乙烯、丙烯等产品,就需要对裂解气进行一系列的净化、预处理、分离及提纯。图 1-1 给出由裂解气生产乙烯、丙烯的生产过程示意图。由图 1-1 可见,在整个流程中,分离设备的数量最多,因此用于分离过程消耗的能量及设备费所占的比重也最大。在化工、气体净化与分离、低温技术、食品加工、农业、医药等诸多工业中,分离过程都是极重要的操作。

表 1-1 裂解气组成(%)举例*

组	原料来源	乙烷裂解	丙烷裂解	石脑油	粗柴油
	H_2	35.2	12.7	14.6	15.6
	CH_4	3.6	32.4	29.5	29.6
	C_2H_2	0.2	0.1	0.6	0.2
	C_2H_4	33.1	25.7	32.4	32.4
	C_3H_6	26.7	7.9	5.7	2.9
	C_3H_8	} 0.6	8.7	10.5	11.3
	C_3H_8		9.7	0.7	0.6
	C_4H_6	} 0.3	} 0.9	2.5	3.8
	C_4H_8			4.3	3.4
	C_4H_{10}			0.2	0.2
	C_5^+	0.3	1.9	—	—
	Σ	100	100	100	100

* 未计入少量 CO , CO_2 , C_2H_2 , H_2S , H_2O 等杂质。

1.1 分离过程及特征

1.1.1 分离过程的定义

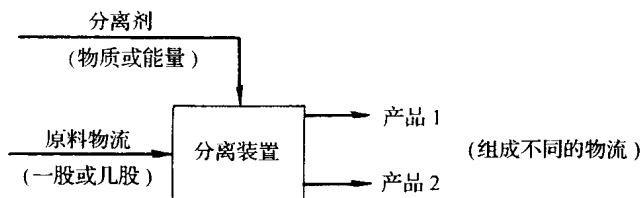
由热力学第二定律可知,几种物质可以自发而均匀地混合在一起,如将盐置于水中,盐便溶解在水中形成完全均匀的溶液,但是欲将混合物分离成不同组成的产品则并不容易,它是非自发过程,必须通过建立装置、系统或过程,对混合物加入能量,才能实现分离。如要分离盐和水的溶液,需(1)供给热量,使水沸腾、气化,然后在较低温度下使其冷凝;(2)供给冷量,使纯水凝固出来,然后在较高温度下使其融化;(3)将盐水加压,通过特殊的固体膜将水与盐分离。

总之,混合是自发过程,分离则是非自发过程。分离过程的定义是:将一混合物转变为组成互不相同的两种或两种以上产物的操作。

1.1.2 分离过程的特征

1. 分离剂

图 1-2 是一般分离过程的示意图。



一股或几股物流的原料进入分离装置,加入分离剂后引起分离作用,最后得到至少是两股不同组成的产品。通常分离所需输入的能量由分离剂供给,分离剂又常常引起第二相物质的生成。如蒸发过程中,分离剂是提供蒸发器的热量,它使水分蒸发出来成为第二相(蒸汽);又如用醇胺法吸收除去裂解气或天然气中的 CO_2 , H_2S , 分离剂是不挥发性醇胺类液体。分离剂可以是能量(热量、冷量或功等),叫能量分离剂;也可以是物质(或另一种原料),叫质量分离剂;还可以是某种强制力(如压力梯度、温度梯度、电、磁场力)及特殊膜等,分离过程的特征往往由加入分离剂的性质所决定。