

化工原理

化工分离过程

蒋维钧 余立新 编著

清华大学出版社

化工原理

化工分离过程

蒋维钧 余立新 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书以蒋维钧、戴猷元和雷良恒等编著的“北京市高等教育精品教材”《化工原理》(第2版)为基础精简改编而成。本书包括传质分离过程概论、吸收、蒸馏、气液传质设备、液液萃取、干燥、蒸发、非均相混合物的分离、膜分离过程和其他分离方法等10章。

本书可用作高等学校普通化工、石油化工、精细化工、生物化工、制药化工、轻化工以及环境过程工程等专业的化工原理课程教材,也可以作为化工流体流动、化工传热和化工分离过程等课程的教材,并可供从事上述专业的工程技术人员参考。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

化工原理:化工分离过程/蒋维钧,余立新编著. —北京:清华大学出版社,2005.10
ISBN 7-302-11140-5

I. 化… II. ①蒋… ②余… III. 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(2005)第056111号

出版者:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

社总机:010-62770175 客户服务:010-62776969

责任编辑:柳 萍

印刷者:北京市清华园胶印厂

装订者:三河市化甲屯小学装订二厂

发行者:新华书店总店北京发行所

开 本:170×230 印张:29.75 字数:565千字

版 次:2005年10月第1版 2005年10月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-11140-5/TQ·23

印 数:1~3000

定 价:39.80元

前 言

本书以蒋维钧、戴猷元和雷良恒等编著的“北京市高等教育精品教材”《化工原理》(第2版)(以下简称原教材)为基础精简改编而成。改编中力求保持原教材的特色,而对部分内容作适当的精简与删减,并对课程体系进行了改变,对化工分离过程作了一些补充。

根据一般过程工业,包括普通化工、石油化工、精细化工、生物化工、制药化工、轻化工以及环境过程工程等专业学生培养的要求和减少学时的需要,编者对原教材中理论上较深的和涉及面过广的内容(如理想流体运动微分方程和导热微分方程的推导与应用、非牛顿型流体的流动和传热、高浓度气体吸收的计算、多组分精馏计算、多效蒸发计算等)作了删减,对某些章节(如萃取、干燥和吸附)在内容和文字上作了精简,使内容更加精炼,全书篇幅显著减小,便于各院校有关专业选用。

考虑到有关专业课程设置改革发展的趋势,本书将原化工原理课程包含的内容分为化工流体流动、化工传热和化工分离过程三部分。前两个部分构成《化工原理(上)——流体流动与传热》,后一部分构成《化工原理(下)——化工分离过程》。按照过程的工艺作用,将原教材上册中的非均相混合物的分离和蒸发两章归入化工分离过程,因此《化工原理(下)——化工分离过程》实质上可以单独作为一本完整的化工分离过程的基础教材。

本书对化工分离过程做了较全面的介绍,特别是对一些新的有发展前景的和对开发新分离方法有启发性的分离方法作了简要的介绍,以利于扩展学生的视野和思路,提高学生选择与开发分离方法的能力。

编者感谢原教材编者为本书提供了改写的基础。

目 录

1 化工分离过程概论.....	1
1-1 分离过程在化工类生产中的地位.....	1
1-2 混合物的类型与分离目的.....	1
1-3 混合物的分离方法.....	2
1-4 混合物组成的表示方法.....	4
1-4-1 质量浓度与物质的量浓度.....	4
1-4-2 质量分数与摩尔分数.....	4
1-4-3 质量比与摩尔比.....	5
1-4-4 气体的总压与组分的分压.....	6
1-5 传质分离过程的热力学基础——组分在两相间的平衡.....	7
1-6 传质分离过程的两种基本类型.....	8
1-7 传质分离过程的基本操作方法.....	9
1-7-1 单级接触操作和理论级的概念.....	9
1-7-2 并流接触操作.....	11
1-7-3 逆流接触操作.....	11
1-7-4 错流接触操作.....	14
1-8 分析、处理传质分离过程的两种方法和两类设备.....	14
1-8-1 分级接触式设备.....	15
1-8-2 微分接触式设备.....	15
1-9 传质分离过程的动力学.....	16
1-9-1 单相中物质的扩散.....	16
1-9-2 两相间的传质.....	32
习题.....	34
思考题.....	34
符号说明.....	35
参考文献.....	37
2 吸收.....	38
2-1 概述.....	38

2-2	吸收过程的气液平衡关系	39
2-2-1	气液平衡关系	39
2-2-2	亨利定律	40
2-2-3	用气液平衡关系分析吸收过程	43
2-2-4	吸收剂的选择	45
2-3	吸收过程机理和吸收速率方程	46
2-3-1	双膜理论	46
2-3-2	吸收速率方程	48
2-3-3	其他传质理论简介	54
2-4	吸收塔的设计与计算	56
2-4-1	吸收塔的物料衡算与操作线方程	57
2-4-2	吸收剂用量的确定	58
2-4-3	塔径的确定	62
2-4-4	填料层高度的计算	63
2-4-5	理论级数与塔高的计算	74
2-4-6	吸收的操作型计算	78
2-5	吸收系数和传质单元高度	80
2-5-1	吸收系数与传质单元高度的实验测定	80
2-5-2	经验公式	82
2-5-3	特征数关联式	83
2-6	其他类型的吸收	87
2-6-1	高浓度气体吸收	87
2-6-2	化学吸收	90
	习题	91
	思考题	95
	符号说明	96
	参考文献	98
3	蒸馏	99
3-1	概述	99
3-2	溶液的气液平衡	100
3-2-1	混合物气液两相平衡的条件和诸参数的关系	100
3-2-2	气液两相平衡关系的确定	103

3-2-3	气液平衡关系的表示方法	107
3-3	平衡蒸馏与简单蒸馏	109
3-3-1	平衡蒸馏	109
3-3-2	简单蒸馏	112
3-4	精馏	114
3-4-1	精馏过程原理	114
3-4-2	两组分体系连续精馏的计算	119
3-4-3	加料状态的影响与加料位置	126
3-4-4	回流比的影响和选择	130
3-4-5	简捷法求理论板数	135
3-4-6	两组分精馏的操作型计算与操作	137
3-4-7	两组分精馏过程的几种特殊情况	140
3-4-8	精馏塔、冷凝器和再沸器的工艺设计	143
3-4-9	间歇精馏	148
3-5	多组分精馏	154
3-5-1	多组分精馏的工艺流程	155
3-5-2	多组分精馏的计算	157
3-6	特殊蒸馏	157
3-6-1	恒沸精馏	158
3-6-2	萃取精馏	159
3-6-3	加盐精馏和加盐萃取精馏	161
3-6-4	水蒸气蒸馏	162
	习题	162
	思考题	167
	符号说明	168
	参考文献	170
4	气液传质设备	171
4-1	板式塔	171
4-1-1	概述	171
4-1-2	塔板上的流体力学现象分析	172
4-1-3	气体通过塔板的流体力学计算	175
4-1-4	塔板结构及对塔板的要求	183

4-1-5	筛板塔的设计	188
4-1-6	板式塔的传质与塔板效率	193
4-1-7	各种塔板简介与比较	199
4-2	填料塔	202
4-2-1	填料塔与填料	202
4-2-2	填料塔的流体力学特性	207
4-2-3	填料塔的传质与塔高的计算	210
4-2-4	填料塔的主要附件	212
4-3	板式塔与填料塔的比较	216
	习题	217
	思考题	218
	符号说明	219
	参考文献	221
5	液液萃取	222
5-1	概述	222
5-1-1	液液萃取简介	222
5-1-2	液液萃取在工业上的应用	223
5-1-3	液液萃取的基本流程	223
5-2	液液相平衡	224
5-2-1	分配系数与选择性系数	224
5-2-2	三角形相图	225
5-2-3	分配曲线——液液相平衡在直角坐标上的表示法	227
5-2-4	萃取过程在三角形相图上的表示法	228
5-3	萃取的分离效果与萃取剂	229
5-3-1	萃取的分离效果	229
5-3-2	萃取剂的选择	229
5-4	萃取过程的流程和计算	230
5-4-1	单级萃取的流程与计算	230
5-4-2	多级错流萃取的流程与计算	233
5-4-3	多级逆流萃取的流程与计算	238
5-4-4	多级逆流萃取的最小萃取剂用量	244
5-4-5	连续逆流萃取的流程与计算	246

5-4-6	回流萃取——两组分的萃取分离	248
5-5	液液萃取设备	249
5-5-1	液液萃取设备的基本条件与分类	249
5-5-2	分级接触萃取器	251
5-5-3	连续逆流接触设备——塔式萃取设备	253
5-6	萃取设备的流动和传质特性与设计	256
5-6-1	萃取塔的液泛与泛点速度的计算	256
5-6-2	液滴的形成与聚结及其传质特性	258
5-6-3	萃取塔内液相的轴向混合	259
5-6-4	萃取塔高的确定	260
5-6-5	萃取设备的选择	261
5-7	新型萃取技术	261
5-7-1	超临界流体萃取	261
5-7-2	液膜分离	263
5-7-3	膜萃取	264
	习题	264
	思考题	266
	符号说明	266
	参考文献	268
6	干燥	269
6-1	概述	269
6-1-1	湿物料的干燥方法	269
6-1-2	对流干燥过程	269
6-2	湿空气的性质及湿焓图	270
6-2-1	湿空气的性质及其状态参数	270
6-2-2	湿含量的确定方法	272
6-2-3	湿空气的湿焓图($H-I$ 图)	274
6-2-4	$H-I$ 图的应用	277
6-3	干燥平衡关系	278
6-3-1	物料含水量的表示方法	278
6-3-2	干燥平衡及干燥平衡曲线	278
6-4	干燥动力学——干燥速度	281

6-4-1	干燥实验、干燥曲线和干燥速度曲线	281
6-4-2	干燥过程分析	282
6-5	干燥过程的设计计算	284
6-5-1	干燥流程设计	284
6-5-2	干燥过程的物料衡算	285
6-5-3	干燥过程热量衡算及干燥器的热效率	286
6-5-4	干燥时间计算	289
6-5-5	干燥介质和物料在干燥系统内状态变化的分析及 干燥操作参数的确定	291
6-6	干燥器	298
6-6-1	工业上常用的干燥器	298
6-6-2	干燥器的选择	305
6-7	干燥器的设计计算	306
	习题	312
	思考题	314
	符号说明	315
	参考文献	317
7	蒸发	318
7-1	概述	318
7-1-1	蒸发过程	318
7-1-2	蒸发的基本流程	318
7-1-3	蒸发的操作方法	319
7-2	蒸发设备	323
7-2-1	循环型蒸发器	323
7-2-2	非循环型(单程型)蒸发器	325
7-2-3	各类蒸发器的性能比较	327
7-2-4	蒸发的辅助设备	328
7-3	单效蒸发的计算	329
7-3-1	物料衡算	330
7-3-2	热量衡算	330
7-3-3	传热面计算	335
7-3-4	单效蒸发计算小结	341

7-4 多效蒸发	341
7-4-1 多效蒸发流程与各效温度压力分布	341
7-4-2 多效蒸发最佳效数的确定	342
7-4-3 多效蒸发的计算	344
7-5 蒸发过程的设计	344
习题	345
思考题	346
符号说明	346
参考文献	348
8 非均相混合物的分离	349
8-1 沉降	350
8-1-1 沉降分离的一般原理	350
8-1-2 重力沉降分离	350
8-1-3 离心沉降分离	356
8-1-4 电沉降——电除尘器	368
8-2 过滤	368
8-2-1 概述	368
8-2-2 过滤设备	371
8-2-3 过滤过程计算的理论基础	380
8-2-4 过滤机生产能力的计算	392
8-3 其他分离方法与分离方法的新进展	397
8-3-1 惯性分离器	297
8-3-2 湿法除尘器	398
8-3-3 非均相混合物分离方法的新进展	399
8-3-4 分离方法的选择	401
习题	402
思考题	405
符号说明	406
参考文献	408
9 膜分离过程	409
9-1 概述	409

9-2	微滤	410
9-3	超滤	411
9-4	纳滤和反渗透	412
9-5	气体分离	413
9-6	渗透汽化	415
9-7	电渗析	417
9-8	膜器	418
	习题	420
	思考题	421
	符号说明	421
	参考文献	421
10	其他分离方法	422
10-1	吸附分离	422
10-1-1	概述	422
10-1-2	吸附剂	422
10-1-3	吸附平衡	423
10-1-4	吸附速率	424
10-1-5	吸附分离的工艺流程与设备	424
10-1-6	吸附分离的应用	427
10-2	离子交换	428
10-2-1	概述	428
10-2-2	离子交换树脂	428
10-2-3	离子交换平衡	429
10-2-4	离子交换的工艺流程	429
10-2-5	离子交换的应用	431
10-3	色谱分离	431
10-4	浸取	434
10-4-1	概述	434
10-4-2	浸取设备与流程	435
10-5	溶液结晶	437
10-6	熔液结晶	440
10-7	鼓泡与泡沫分离	443

10-7-1	概述	443
10-7-2	工艺方法	444
10-7-3	应用	445
10-8	电泳分离	445
10-8-1	概述	445
10-8-2	连续流动膜电泳	446
10-8-3	等电聚焦	447
10-9	气体扩散分离	448
10-10	气体离心分离	450
10-11	分离过程与化学反应的结合	452
10-11-1	利用生物反应的分离	452
10-11-2	反应精馏	453
10-12	分离方法的选择	455
10-12-1	总的选择原则	455
10-12-2	分离方法选择时需要考虑的因素	455
	习题	459
	思考题	459
	符号说明	460
	参考文献	460

1 化工分离过程概论

1-1 分离过程在化工类生产中的地位

混合物分离是化工类生产中不可缺少的重要过程。

化工类生产的目的是制取人们生活上和生产建设中所需要的各种物料,如食品、燃料、药物、化工原材料、建筑材料,以及制造各种日用品、机械、仪器、交通工具所需的种种原材料。

制取各种物料有两个途径。一是自然界中存在的物质,通常只需要从自然界存在的混合物中用一定的分离方法将它从混合物中分离出来制得所需纯度的成品,例如从海水中提取食盐,从原油中提取各种燃料油,从植物种子中提取食用油等。二是在自然界中没有的,或存量少不能满足人们需求的,或难以从自然资源中分离出来的物料,这类物料需要通过化学反应人为制造。在这类物料的生产过程中,化学反应所需的原料需要通过分离过程达到一定纯度,而反应产物往往是包含反应产物、未反应完的原料和反应副产物的混合物,它需要通过分离过程除掉副产物,制得纯产品和回收未反应完的原料,重新使用。

在上述两类生产过程中,还不可避免地会产生各种废料。它们通常是由多种组分组成的混合物,有气体的、液体的和固体的。它们往往含有污染环境、危害生态的有害物质和有利用价值的物质,也需要用各种分离方法来除去有害物质,保护环境,回收有用物质,有效利用各种资源。

由此可见,分离过程在化工类生产过程中具有重要地位,它们在化工生产过程中占有很大比例,例如在大型石油工业和以化学反应为中心的石油化工生产过程中,分离装置的费用常占总投资的50%~90%。有些物料生产之所以不能实现或产品价格昂贵,并不因为其合成反应不能实现,而在于反应产物不能经济有效地实现分离。因此,掌握分离过程,学会正确选择与设计分离方法和过程,对于从事化工生产与开发研究的技术人员具有重要作用。

1-2 混合物的类型与分离目的

化工生产中遇到的混合物多种多样,有气态、液态还有固态的;其中包含的组分数有多有少;各组分的物理化学性质可能相差很大,也可能十分相近;各组

分的含量可能相差很大,也可能处于同样数量级。概括说,它们可以分为均相与非均相混合物两类。

(1) 均相混合物

混合物中各组分以分子状态互相均匀混合的称为均相混合物,有气态均相混合物,如空气、天然气等;固态均相混合物,如各种固溶体、合金等;液态均相混合物,如各种液体溶液。液体溶液又可分为两类,一类是各组分在常温下是液体,这类混合物中各组分均有挥发性;另一类是溶剂为挥发性液体,溶质在常温下是固体,无挥发性。

(2) 非均相混合物

这类混合物中各组分不是以分子状态互相均匀混合,而是有些组分以粒状分散地混在一起,彼此有明显的界面。它也有气、液、固 3 类。

气相非均相混合物:气体中含有固体微粒或液滴,如含尘气体。

液相非均相混合物:液体中含有固体微粒、气泡或另一种与其不互溶的液滴,如各种悬浮液、泡沫液和乳浊液。

固相非均相混合物:如各种矿物、植物种子、湿晶体等。

进行混合物分离的目的不同,但一般可以分为下面 4 种情况:

(1) 分离

将混合物中各组分完全分开,得到各个纯组分或若干种产品。例如将空气分离得氧、氮和各种稀有气体;将原油分离成汽油、煤油、柴油、润滑油等若干种产品。

(2) 提取和回收

从混合物中提取出某种或某几种有用的组分。例如从矿石中提取某种有用的金属,从工厂排放的废料中回收有价值的物质或除去污染环境的有害物质。

(3) 纯化

除去混合物中所含的少量杂质,纯化的对象可以是单质,也可以是混合物,例如合成氨生产中除去原料气中的 CO_2 和 CO 等有害气体,以制取纯净的 N_2 , H_2 混合气体。

(4) 浓缩

将含有用组分很少的稀溶液浓缩,提高产品中有效成分的含量。

由于混合物的多样性和分离目的不同,为了有效地进行混合物的分离,必须根据具体情况,采用不同的方法。

1-3 混合物的分离方法

1. 分离的基本依据

分离混合物的基本依据是各组分物理化学性质的差异,原则上,只要组分间

在某种物化性质上有差别,即可利用它来分离这些组分。已被用于分离的性能差别及相应的分离方法有:

挥发性:如蒸馏、气提、蒸发、干燥、升华与凝华;

溶解度:如吸收、萃取、浸取、结晶;

吸附性:如吸附;

表面性质:如泡沫分离、浮选;

密度与粒度:如沉降、分级、过滤;

电磁性能:如磁选、电渗析、电泳;

化学性能(如酸碱性、分子基团性质):如化学吸收、萃取、浸取;

分子扩散性能:如扩散、渗析、气体膜分离、渗透汽化、反渗透;

分子质量:如质谱分离、高速离心分离。

2. 分离的基本方法

根据分离方法的动力学机理,现有分离方法可以分为两大类:

1) 机械分离过程

以各种力(如重力、离心力、压差、电磁力)的作用引起的颗粒或流体整体移动为基础的分方法属机械分离过程,其分离对象主要是非均相混合物。

2) 传质分离过程

它是依靠物质的分子移动(包括分子的分子传递与涡流传递)来实现混合物中各组分的分离,因此称为传质分离过程,几乎所有均相混合物的分离都属于这一类。某些非均相混合物也是依靠这种物质传递来实现分离的,例如湿固体物料中的水分(或其他溶剂)依靠使水分(溶剂)汽化传递到气相来实现物料的干燥,矿物用溶剂浸取使其中有用的组分溶入溶剂以从矿石中分离出来也属于传质分离过程。

传质分离过程根据其分离机理又可分为两类:

(1) 平衡分离过程

根据混合物中诸组分在两相间的平衡分配不同来实现混合物的分离,这类分离方法称为平衡分离过程,如蒸馏、吸收、萃取、吸附和干燥等。

(2) 速率分离过程

根据混合物中诸组分在某种力场作用下扩散速度不同的性质来实现分离,这类方法称为速率分离过程。例如反渗透、渗透汽化、气体膜分离、电渗析和电泳等。

在一般化工生产中应用最多的是平衡分离过程,所以本课程主要讨论平衡分离过程。

应用平衡分离原理实现混合物分离的方法很多,每种方法均有其本身的特

点。但是分析各种常用的分离方法可以发现,尽管各种分离方法的具体情况各不相同,它们的基本原理、所用的分析与处理问题的方法和使用的设备,很多是相同的或相似的。掌握这些平衡分离过程的基本原理和方法,对于更好地理解与掌握各种具体的分离方法无疑是有益的。

本章后面将讨论平衡分离过程的一些共同的基本原理、分离的基本方法以及分离设备的基本类型和设计方法。

平衡分离过程的共同基础是混合物中各组分在两相间平衡时的分配(即相对组成)不同,所以作为讨论问题的基础,首先要说明混合物中组成的表示方法。

1-4 混合物组成的表示方法

对于各种传质分离过程,为了分析问题与设计计算的方便,常常采用不同的组成表示方法,化工计算中常用的组成表示方法有以下 4 种。

1-4-1 质量浓度与物质的量浓度

单位体积混合物中某物质(组分)的质量称为该物质(组分)的质量浓度,其定义式为

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

式中: G_A ——组分 A 的质量浓度, kg/m^3 ;

V ——混合物的体积, m^3 ;

m_A ——混合物中组分 A 的质量, kg 。

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,其定义式为

$$c_A = \frac{n_A}{V} \quad (1-2)$$

式中: c_A ——组分 A 的物质的量浓度, kmol/m^3 ;

n_A ——混合物中组分 A 的物质的量, kmol 。

组分 A 的质量浓度与物质的量浓度的关系为

$$c_A = \frac{G_A}{M_A} \quad (1-3)$$

式中: M_A ——组分 A 的相对分子质量。

1-4-2 质量分数与摩尔分数

混合物中某组分 A 的质量 m_A 占混合物总质量 m 的比例称为该组分 A 的