

化工原理. 下册

蒋维钧 编著

清华大学出版社
北京

内 容 摘 要

本书为清华大学一类课“化工原理”的教材,在清华大学多个系所使用多年。全书分上、下两册。上册包括流体流动、流体输送机械、流体流过颗粒和颗粒层的流动、非均相混合物的分离、传热和蒸发等6章,书末有26个附录;下册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、吸附分离、膜分离过程和其他分离过程等9章。

本教材与“化工原理”课的实验教材《化工原理实验》,可以配套使用,也可以单独选用。

读者对象:高等院校化工、生物化工、环境、食品、轻工、制药和材料等专业的师生,以及从事上述专业的设计、开发和运行的科技人员。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理 . 下册/ 蒋维钧等编著 . —2 版 . —北京:清华大学出版社,2002
ISBN 7-302-06102-5

. 化... . 蒋... . 化工原理 - 高等学校 - 教材 . TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 092840 号

出 版 者: 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

[http:// www .tup .tsinghua .edu .cn](http://www.tup.tsinghua.edu.cn)

责任编辑: 刘明华

印 刷 者: 北京牛山世兴印刷厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 787 × 960 1/ 16 印张: 30 25 字数: 554 千字

版 次: 2003 年 3 月第 2 版 2003 年 3 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-06102-5/ TQ · 11

印 数: 0001 ~ 5000

定 价: 41 .00 元

第 2 版前言

1992年由清华大学出版社出版的《化工原理》已由清华大学多个系所及十余所兄弟院校使用多年,反映良好。1997年评为全国优秀教材二等奖(原化工部推荐)。由于化学工程与工艺学科的发展,部分内容需要更新及修订。

作为“清华大学一类课”,近十年来《化工原理》的教学按照“掌握基本原理、突出过程强化、体现前沿进展”的三层次教学指导思想,讲授基本理论与激发创新意识并重,引导学生从掌握基本原理出发,注重培养创新能力。第2版仍将化工单元操作按过程共性归类,以动量传递为基础,阐述了流体流动、流体输送机械、流体流过颗粒和颗粒层的流动、非均相混合物的分离;以热量传递为基础,阐述了传热及蒸发操作;以质量传递为基础,阐述了吸收、精馏、萃取、干燥、吸附分离和膜分离等单元操作。

本教材不仅可读性强、易于自学,同时强调流动、传热、传质等概论方面的描述,注意在内容中引入过程强化部分和新型分离技术的前沿领域研究状况,并通过思考题或讨论题,培养学生综合能力和解决问题能力。

本教材第1版各章分别由蒋维钧(绪论,第三、四、六、七、九章)、戴猷元(第一、二章)、顾惠君(第五章)、雷良恒(第十、十一章)和刘茂林(第八、十二、十三章)编写,最后由蒋维钧修改,统一定稿。

第2版对全书进行了修订,并新增了膜分离与其他分离过程两章,更新了部分附录。修订工作由戴猷元和余立新负责完成。膜分离由戴猷元和余立新编写,其他分离过程由余立新编写。全书由蒋维钧审阅定稿。

编者感谢清华大学化工原理教研组的同事在修订工作中给予的大力协助。

编 者

目 录

7	传质分离过程概论.....	1
7.1	传质分离过程.....	1
7.2	混合物组成的表示方法.....	2
7.2.1	质量浓度与摩尔浓度.....	2
7.2.2	质量分数与摩尔分数.....	3
7.2.3	质量比与摩尔比.....	3
7.2.4	气体的总压与组分的分压.....	4
7.3	传质分离过程的热力学基础——组分在两相间的平衡.....	5
7.4	传质分离过程的两种基本类型.....	7
7.5	传质分离过程的基本操作方法.....	7
7.5.1	单级接触操作和理论级的概念.....	7
7.5.2	并流接触操作.....	9
7.5.3	逆流接触操作.....	9
7.5.4	错流接触操作.....	12
7.6	分析、处理传质分离过程的两种方法和两类设备.....	12
7.6.1	分级接触式设备.....	13
7.6.2	微分接触式设备.....	13
7.7	传质分离过程的动力学.....	14
7.7.1	单相中物质的扩散.....	14
7.7.2	两相间的传质.....	30
	习题.....	32
	符号说明.....	33
	参考文献.....	35
8	吸收.....	36
8.1	吸收过程的气液平衡关系.....	37
8.1.1	气液平衡关系.....	37
8.1.2	亨利定律.....	38
8.1.3	用气液平衡关系分析吸收过程.....	41
8.1.4	吸收剂的选择.....	44
8.2	吸收过程机理和吸收速率方程.....	44
8.2.1	双膜理论.....	44

8.2.2	吸收速率方程	46
8.2.3	其他传质理论简介	52
8.3	吸收塔的设计与计算	54
8.3.1	吸收塔的物料衡算与操作线方程	55
8.3.2	吸收剂用量的确定	57
8.3.3	塔径的确定	61
8.3.4	填料层高度的计算	61
8.3.5	理论级数与塔高的计算	73
8.3.6	吸收的操作型计算	79
8.4	吸收系数和传质单元高度	80
8.4.1	吸收系数与传质单元高度的实验测定	81
8.4.2	经验公式	82
8.4.3	特征数关联式	83
8.5	其他类型的吸收	87
8.5.1	高浓度气体吸收	87
8.5.2	化学吸收	98
	习题	99
	符号说明	106
	参考文献	108
9	蒸馏	109
9.1	溶液的气液平衡	111
9.1.1	混合物气、液两相平衡的条件和诸参数的关系	111
9.1.2	气、液两相平衡关系的确定	113
9.1.3	气液平衡关系的表示方法	119
9.2	平衡蒸馏与简单精馏	121
9.2.1	平衡蒸馏	121
9.2.2	简单蒸馏	124
9.3	精馏	127
9.3.1	精馏过程原理	127
9.3.2	两组分体系连续精馏的计算	131
9.3.3	加料状态的影响与加料位置	139
9.3.4	回流比的影响和选择	143
9.3.5	简捷法求理论板数	148
9.3.6	连续逆流精馏塔的计算	150
9.3.7	两组分精馏的操作型计算与操作	152
9.3.8	两组分精馏过程的几种特殊情况	156

9 3 9	精馏塔、冷凝器和再沸器的工艺设计	159
9 3 .10	间歇精馏	164
9 4	多组分精馏	170
9 4 .1	多组分物系的气液平衡	171
9 4 .2	多组分精馏的工艺流程	174
9 4 .3	多组分精馏的计算	176
9 5	特殊蒸馏	181
9 5 .1	恒沸精馏	181
9 5 .2	萃取精馏	183
9 5 .3	加盐精馏和加盐萃取精馏	185
9 5 .4	水蒸气蒸馏	185
	习题	186
	思考题	192
	符号说明	193
	参考文献	195
10	气液传质设备	196
10 .1	板式塔	196
10 .1 .1	概述	196
10 .1 .2	塔板上的流体力学现象分析	198
10 .1 .3	气体通过塔板的流体力学计算	201
10 .1 .4	塔板结构及对塔板的要求	212
10 .1 .5	筛板塔的设计	218
10 .1 .6	板式塔的传质与塔板效率	226
10 .1 .7	各种塔板简介与比较	232
10 .2	填料塔	236
10 .2 .1	填料塔与填料	236
10 .2 .2	填料塔的流体力学特性	239
10 .2 .3	填料塔的传质与塔高的计算	245
10 .2 .4	填料塔的主要附件	247
10 .2 .5	板式塔与填料塔的比较	251
	习题	252
	符号说明	253
	参考文献	256
11	液液萃取	257
11 .1	液液相平衡	259

11.1.1	三角形相图	260
11.1.2	液液平衡关系在三角形相图上的表示法	263
11.1.3	液液相平衡在直角坐标上的表示法——分配曲线	266
11.1.4	萃取过程在三角形相图上的表示法	266
11.2	萃取的分离效果与萃取剂	268
11.2.1	萃取的分离效果	268
11.2.2	萃取剂的选择	268
11.3	萃取过程的流程和计算	271
11.3.1	单级萃取的流程与计算	271
11.3.2	多级错流萃取的流程与计算	275
11.3.3	多级逆流萃取的流程与计算	281
11.3.4	多级逆流萃取的最小萃取剂用量	286
11.3.5	连续逆流萃取的流程与计算	290
11.3.6	回流萃取——两组分的萃取分离	292
11.4	液液萃取设备	293
11.4.1	液液萃取设备的基本条件与分类	293
11.4.2	混合澄清器	294
11.4.3	塔式萃取设备	297
11.4.4	离心式萃取设备	301
11.5	萃取设备的流动和传质特性与设计	303
11.5.1	萃取塔的液泛与泛点速度的计算	303
11.5.2	液滴的形成与聚结及其传质特性	305
11.5.3	萃取塔内液相的轴向混合	306
11.5.4	萃取塔高的确定	307
11.5.5	萃取设备的选择	308
11.6	液膜分离和膜萃取	308
11.6.1	液膜分离	308
11.6.2	膜萃取	312
	习题	313
	符号说明	317
	参考文献	319
12	干燥	320
12.1	湿空气的性质及湿焓图	322
12.1.1	湿空气的性质及其状态参数	322
12.1.2	湿含量的测定方法	325
12.1.3	湿空气的湿度图($T-H$ 图)	329

12.1.4	湿空气的湿焓图($H-I$ 图)	331
12.1.5	$H-I$ 图的应用	333
12.2	干燥平衡关系	334
12.2.1	物料含水量的表示方法	335
12.2.2	干燥平衡及干燥平衡曲线	335
12.2.3	影响平衡水分的因素	337
12.2.4	平衡曲线的应用	338
12.3	干燥曲线和干燥速度	340
12.3.1	影响干燥速度的因素	340
12.3.2	干燥实验和干燥曲线以及干燥速度曲线	340
12.3.3	干燥过程分析及干燥速度关系式	341
12.4	干燥设备的设计计算	346
12.4.1	干燥流程设计	346
12.4.2	干燥过程的物料衡算	347
12.4.3	干燥过程热量衡算及干燥器的热效率	349
12.4.4	干燥时间计算	353
12.4.5	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	357
12.5	干燥器	365
12.5.1	工业上常用的干燥器	365
12.5.2	干燥器的选择	374
12.6	干燥器的设计计算	378
12.6.1	气流干燥器的设计	378
12.6.2	卧式多室流化床干燥器的设计	384
	习题	389
	符号说明	393
	参考文献	394
13	吸附分离	396
13.1	吸附剂及其特性	397
13.1.1	吸附剂的种类及用途	397
13.1.2	吸附剂的选择	399
13.2	吸附平衡	400
13.2.1	吸附等温线的类型	400
13.2.2	等温吸附公式	401
13.3	吸附动力学	406
13.3.1	外扩散	407

13.3.2	内扩散	407
13.3.3	总传质速率方程	408
13.4	吸附操作及设备计算	409
13.4.1	液体接触过滤操作及计算	409
13.4.2	固定床吸附器	414
	习题	427
	符号说明	430
	参考文献	431
14	膜分离过程	432
14.1	微滤	433
14.2	超滤	434
14.3	纳滤和反渗透	435
14.4	气体分离	436
14.5	渗透汽化	438
14.6	电渗析	440
14.7	膜器	441
	习题	443
	符号说明	443
	参考文献	444
15	其他分离方法	445
15.1	其他分离方法介绍	445
15.1.1	溶液结晶	446
15.1.2	熔液结晶	449
15.1.3	浸取	452
15.1.4	气体扩散分离	454
15.1.5	色谱分离	457
15.1.6	利用生物反应的分离	458
15.1.7	反应精馏	459
15.1.8	离子交换	461
15.1.9	气体离心分离	463
15.2	分离方法的选择	465
15.2.1	总的选择原则	465
15.2.2	分离方法选择时需要考虑的因素	466
	习题	469
	符号说明	470
	参考文献	471

7 传质分离过程概论

7.1 传质分离过程

混合物分离是化工类生产中的重要过程。混合物可分为均相混合物和非均相混合物两类。非均相混合物的分离主要依靠力学的,即质点运动与流体力学的原理进行分离,已在第4章中进行了讨论。本章以及以后的几章讨论的主要是均相混合物的分离,这些分离过程的特点是依靠物质的传递(分子传递和涡流传递)来实现混合物中各组分的分离,因此统称为传质分离过程。某些非均相混合物也是依靠物质传递达到分离的目的,例如湿固体物料中的水分依靠使水分传递到气相来实现物料的干燥,这些非均相混合物的分离方法(如干燥,浸取)也列入传质分离过程。

传质分离过程可分为两大类:

(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:根据混合物中各组分在某种力场的作用下扩散速度不同的性质来实现它们的分离,这类分离方法称为速率分离过程,例如气体扩散、电泳、喷嘴扩散等。

在一般化工生产中主要应用平衡分离过程,所以本课程中也主要讨论平衡分离过程。后面讲到的传质分离过程均指平衡分离过程。

化工生产中遇到的混合物是多种多样的。它们可以是气体、液体或固体;它们可以是均相的,也可以是非均相的(例如某些固体混合物);其中各组分的物理化学性质可以相差很大,也可以十分相似;各组分的含量可以相差很大,也可以处于同样数量级。另一方面分离混合物的目的也各不相同,一般说可以分为以下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。例如将空气分离而得氧、氮和多种稀有气体;将原油分离成汽油、煤油、柴油等若干产物。

(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。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：将含组分很少的稀溶液浓缩。

因此，为了有效地进行混合物的分离，必须根据不同的具体情况，采用不同的方法。

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。

本章讨论平衡分离过程的共同的基本原理，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。

7 2 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四种。

7 2 1 质量浓度与摩尔浓度

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

$$G_A = \frac{m_A}{V} \text{ kg/m}^3 \quad (7-1)$$

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摩尔数称为该组分的摩尔浓度，其定义式为

$$c_A = \frac{n_A}{V} \quad (7-2)$$

式中： c_A ——组分 A 的摩尔浓度， kmol/m^3 ；

n_A ——混合物中组分 A 的摩尔数， kmol 。

组分 A 的质量浓度与摩尔浓度的关系为

$$c_A = \frac{G_A}{M_A} \quad (7-3)$$

式中: M_A —— 组分 A 的相对分子质量。

7 2 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 的质量分数 a_A :

$$a_A = \frac{m_A}{m} \quad (7-4)$$

显然, 混合物中所有组分 (A, B, ...) 的质量分数之和等于 1, 即

$$a_A + a_B + \dots = 1 \quad (7-5)$$

混合物中某组分 A 的摩尔数 n_A 占混合物总摩尔数 n 的比例称为该组分 A 的摩尔分数 x_A :

$$x_A = \frac{n_A}{n} \quad (7-6)$$

同上, 混合物中所有组分的摩尔分数之和等于 1, 即

$$x_A + x_B + \dots = 1 \quad (7-7)$$

一般用 x, y 分别表示两不同相中组分的摩尔分数, 对于气-液相体系, y 表示气相中的摩尔分数, x 表示液相中的摩尔分数。

组分 A 的质量分数与摩尔分数的关系为

$$x_A = \frac{a_A}{M_A} \bigg/ \frac{a_A}{M_A} + \frac{a_B}{M_B} + \dots \quad (7-8)$$

或

$$x_A = \frac{a_A}{M_A} \bigg/ \frac{1}{\bar{M}} \quad (7-9)$$

式中: a_A, a_B, \dots —— 分别为组分 A, B, ... 的质量分数;

M_A, M_B, \dots —— 分别为组分 A, B, ... 的相对分子质量;

\bar{M} —— 混合物的平均相对分子质量。

7 2 3 质量比与摩尔比

混合物中单位质量惰性物质 (指传质分离过程中不在相间传递的物质) 所含某组分的质量称为该组分的质量比, 其定义式为

$$\bar{w}_A = \frac{m_A}{m - m_A} \quad (7-10)$$

式中: \bar{w}_A —— 组分 A 的质量比;

$(m - m_A)$ ——混合物中除组分 A 以外的惰性物质的质量。

质量比与质量分数的关系为

$$\text{羸}_A = \frac{a_A}{1 - a_A} \quad (7-11)$$

混合物中每摩尔惰性物质所含某组分的摩尔数称为该组分的摩尔比。在传质分离过程中用 X 和 Y 分别表示两相中的摩尔比,对于气、液两相体系,通常用 X 表示液相中的摩尔比,用 Y 表示气相中的摩尔比。摩尔比的定义式为

$$X_A = \frac{n_A}{n - n_A} \quad (7-12)$$

式中: X_A ——组分 A 的摩尔比;

$(n - n_A)$ ——混合物中除组分 A 以外的惰性物质的摩尔数。

摩尔比与摩尔分数的关系为

$$X_A = \frac{x_A}{1 - x_A} \quad (7-13)$$

7.2.4 气体的总压与组分的分压

对于气体混合物,其组成还常常用总压和分压表示。总压、组分的分压与组分的摩尔分数和摩尔比的关系为

$$x_A = \frac{p_A}{p} \quad (7-14)$$

$$X_A = \frac{p_A}{p - p_A} \quad (7-15)$$

式中: p ——气体的总压, Pa;

p_A ——组分 A 的分压, Pa。

实际上应用哪种方法表示混合物的组成,需根据过程计算时使用上的方便而定。因此需要掌握各种组成表示方法之间的换算。进行各种组成表示方法相互换算的要点是取一定量的混合物作为基准,然后根据组成定义再作换算。

例 7-1 已知氨水的浓度为 240 kg/m^3 ,此溶液的密度为 910 kg/m^3 。求氨在溶液中的质量分数、质量比、摩尔分数和摩尔比。

解: 取 1 m^3 溶液作为基准,

氨水的质量分数 a_{NH_3} :

$$a_{\text{NH}_3} = \frac{240}{910} = 0.264$$

氨水的质量比 羸_{NH_3} :

$$\text{羸}_{\text{NH}_3} = \frac{240}{910 - 240} = \frac{240}{670} = 0.358$$

氨水的摩尔分数 x_{NH_3} :

$$x_{\text{NH}_3} = \frac{\frac{240}{17}}{\frac{240}{17} + \frac{670}{18}} = \frac{14.1}{14.1 + 37.2} = 0.275$$

氨水的摩尔比 X_{NH_3} :

$$X_{\text{NH}_3} = \frac{\frac{240}{17}}{\frac{670}{18}} = \frac{14.1}{37.2} = 0.379$$

7.3 传质分离过程的热力学基础 ——组分在两相间的平衡

平衡分离过程分离混合物的基本方法是根据混合物中诸组分在两相间平衡时分配不同的性质,通过人为地加入另一个相,或者变更条件产生一个新相从而形成一个两相体系,利用欲分离的组分在此两相间的分配不同,某些组分在某一相中富集,从而实现其分离。所以组分在两相间的平衡是传质分离过程的热力学基础。

任何一个混合物与另一相接触时,其中的组分就会在两相间传递,最后达到平衡,此时两相中各组分的组成不再发生变化。平衡时组分在两相中的组成关系称为组分在两相间的平衡关系,利用各组分在两相间平衡关系的不同,可以实现混合物的分离。例如在 20℃ 下含氨(NH_3)空气与水接触时, NH_3 在水、气两相间的平衡关系如图 7-1 中的曲线所示,此曲线叫做平衡线。当气相中 NH_3 的含量(以其分压表示)一定时,平衡时水中含 NH_3 量亦为一定值,例如当气相中 NH_3 的分压为 4.23 kPa 时,水中 NH_3 的平衡组成为 0.05(质量比)。当气、液两相中 NH_3 的组成为此值时, NH_3 在两相间达平衡, NH_3 在两相间不会再发生净的传递。空气中的 O_2 和 N_2 在水中的溶解度很小,可以看成它们在水中的浓度为零。

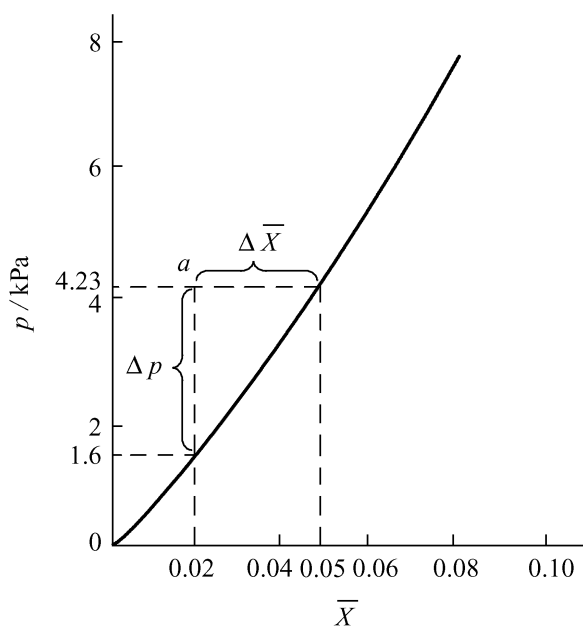


图 7-1 NH_3 在空气与水两相间的平衡关系

设想使 NH_3 分压为 4.23 kPa 的含 NH_3 空气与氨组成为 0.02 (质量比) 的氨水接触, NH_3 在两相间不呈平衡。水中氨的组成低于分压为 4.23 kPa 的含氨空气的平衡组成 0.05 (质量比), 因此氨就向水中传递 (被水吸收), 使它在水中的含量提高。因为空气几乎不溶于水, 也就是说它与 NH_3 在水、气两相间的分配不同, 所以加水可以使 NH_3 与空气分离, 这个过程称为吸收过程。过程的推动力为实际体系离开平衡状态的距离, 可以用含氨空气与氨水组成的两相体系的状态点 a 与平衡线的水平距离表示:

$$\Delta = 0.05 - 0.02 \quad (7-16)$$

也可以用 a 点与平衡线的垂直距离表示:

$$p = 4.23 - 1.6 \quad (7-17)$$

式中 1.6 为与组成为 0.02 的氨水呈平衡的气体中氨的分压。

再如, 苯与甲苯的混合物在 101.3 kPa 的压力下气、液两相平衡时的组成关系 (平衡线) 如图 7-2 所示。图中横坐标表示液相中苯的摩尔分数 x , 纵坐标表示气相中苯的摩尔分数 y 。由图可知, 当液相中苯的组成为 0.5 时, 气相中苯的

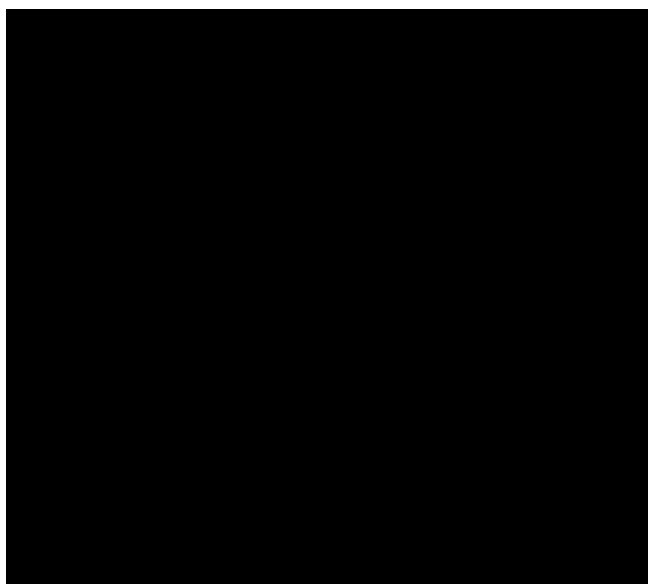


图 7-2 苯-甲苯的气、液相平衡关系

平衡组成为 0.7。设想使苯的摩尔分数为 0.5 的苯-甲苯混合液与苯的摩尔分数为 0.5 的苯-甲苯混合气接触, 苯与甲苯在两相间呈不平衡, 与含苯 0.5 的苯-甲苯混合液呈平衡的气相中苯的摩尔分数应为 0.7, 比实际混合气中苯的摩尔分数高, 所以苯要从液相向气相传递。相反地, 甲苯要从气相向液相传递。因此, 加入苯-甲苯混合气可使液相中甲苯的组成提高, 气相中苯的组成提高, 苯与甲苯部分地得

到分离。上述过程是苯-甲苯精馏过程中发生的传递过程, 这个过程的推动力也是实际体系与平衡状态间的距离, 可以用相互接触的气、液两相状态点 a 与平衡线之间的垂直距离表示:

$$y = 0.7 - 0.5 \quad (7-18)$$

或者用 a 点与平衡线之间的水平距离表示:

$$x = 0.5 - 0.29 \quad (7-19)$$

由上面两个例子可知, 混合物中诸组分在两相间平衡时的分配不同为它们的分离提供了可能性, 下面讨论如何利用这种可能性来实现混合物的分离。

7.4 传质分离过程的两种基本类型

混合物中诸组分在两相间的分配,根据其相对量的不同可以分为两种情况,与此相对应的分离方法也可以分为两类。

1. 混合物中诸组分在两相间的分配相差很大

例如氨和空气的混合气在气相与水相间的分配。此体系两相平衡时,水相中溶解的空气相对于 NH_3 来说很少,实际上可以认为只有氨溶入水相,空气几乎不溶于水相。这就是说当水相与气相接触时只有一种组分(氨)进入水相,从而使氨与空气得到分离。

吸收、简单萃取、浸取、干燥以及简单吸附等分离过程属于这种类型。这种分离方法的特点是只需引入一股物流,形成两相接触体系即可实现组分的分离。

2. 混合物中诸组分在两相间的分配相差不大

苯-甲苯混合物的气、液两相平衡属于这类情况。平衡时,气相中苯的相对含量较液相中高(或者说液相中甲苯的相对含量较气相中高),但是高得不多。例如与含苯 0.5 摩尔分数(含甲苯也是 0.5)的液体呈平衡的气相中苯的含量为 0.7 摩尔分数(含甲苯为 0.3)。对于这类情况只引入一股物流已不可能实现苯与甲苯的完全分离。为了使这两个组分完全分离,必须再加入另一股物流,譬如,对于精馏是回流与上升气流。

精馏、回流萃取、分馏吸附、同位素化学交换等分离过程属于这种类型。这类分离方法的特点是需要引入两股物流,分段形成两相接触体系,整个过程可以同时分段进行(如精馏、回流萃取),也可以周期性地轮换进行(如色层分离等)。

7.5 传质分离过程的基本操作方法

引入另一相与混合物接触进行传质分离过程时,根据体系平衡情况和分离要求的不同,可以采用几种不同的操作方法。

7.5.1 单级接触操作和理论级的概念

以液液萃取过程为例来说明。摩尔比为 X_{A_i} 的组分 A 的水溶液,用有机溶剂来提取其中组分 A,有机溶剂中组分 A 的原始摩尔比为 Y_{A_i} 。组分 A 在两液相中的平衡关系如图 7-3 所示。将此两液相放在一个槽中,搅拌均匀,水溶液中的组分 A 向有机相转移,经过一定时间澄清,两相分开,这种操作称为单级接触操作。现分析此操作过程中组分 A 的转移和两相组成的变化情况。开始时两

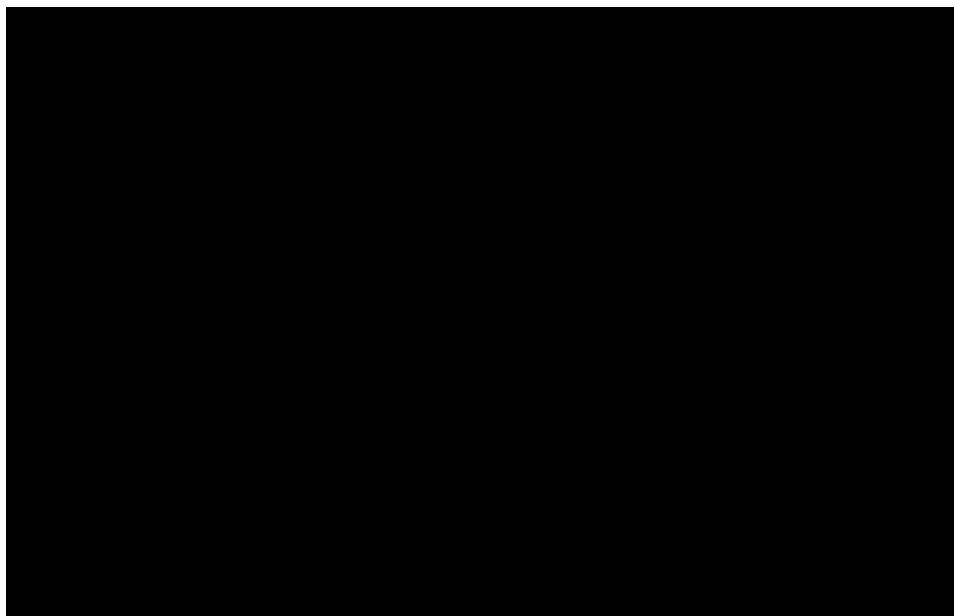


图 7-3 单级接触操作

相的状态点为 a 点, 组分 A 在水相中的摩尔比为 X_{Ai} , 与其呈平衡的有机相的组成应为 Y_{Ai}^* 。实际有机相中的组成为 Y_{Ai} , 低于平衡值, 所以组分 A 要向有机相中转移, 使其在有机相中的组成提高, 也就是说向平衡的状态转移, 此时过程的推动力为

$$Y_{Ai} = Y_{Ai}^* - Y_{Ai} \quad (7-20)$$

同理, 也可以用

$$X_{Ai} = X_{Ai} - X_{Ai}^* \quad (7-20a)$$

来表示过程的推动力。由于组分 A 从水相传递到有机相, 水相中组分 A 的组成下降, 有机相中组分 A 的组成增高。在任何时刻组分 A 在两相中的组成关系可以用物料衡算确定。根据组分 A 的衡算, 从水相中传出的组分 A 的量等于进入有机相的组分 A 的量:

$$L(X_{Ai} - X_A) = S(Y_A - Y_{Ai}) \quad (7-21)$$

式中: L ——水相中水的摩尔数, 即除组分 A 以外的惰性物质的摩尔数;

S ——有机相中溶剂的摩尔数, 即除组分 A 以外的惰性物质的摩尔数;

X_A, Y_A ——分别为在任意时刻水相与有机相中组分 A 的摩尔比。

在图 7-3 中, 式(7-21)为经过 (X_{Ai}, Y_{Ai}) 点, 斜率为 $-L/S$ 的直线 ae , 此线称为过程的操作线。由图可知随着组分 A 从水相向有机相传递过程的进行, 两相的状态点沿 ae 线按 $a \rightarrow e$ 方向移动。任意时刻, 例如状态点 M , 两相传质的推动力为 Y 或 X , 可见随着过程的进行, 传质推动力逐渐减小。这个过程的终点是两相达到平衡, 此时两相的状态点为操作线与平衡线的交点(e 点)。这一两相接触进行物质传递最后达到平衡的一级设备称为一个理论级, 这个过程的结果, 部