

化工原理

下册

蒋维钧 雷良恒 刘茂林 编

清华大学出版社



370536

化 工 原 理

下 册

蒋维钧 雷良恒 刘茂林 编



清华大学出版社

100267

内 容 摘 要

本书为清华大学一类课“化工原理”的教材，在清华大学化工系和环境系等使用多年。

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、干燥和吸附分离等7章。

本教材与“化工原理”课的实验教材《化工原理实验》一起出版，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，以及上述专业从事设计、开发和运行的科技人员。

(京) 新登字 158 号



清华大学出版社出版
北京 清华园
北京密云红光照排厂排版
北京密云胶印厂印装
新华书店总店科技发行所发行

☆

开本：850×1168 1/32 印张：18 $\frac{3}{4}$ 字数：475千字
1993年10月第1版 1993年10月第1次印刷
印数：0001---5000

ISBN7-302-01252-0/O · 137

定价：10.40元

目 录

第七章 传质分离过程概论	(1)
第一节 传质分离过程	(1)
第二节 混合物组成的表示方法	(3)
7-2-1 质量浓度与摩尔浓度	(3)
7-2-2 质量分数与摩尔分数	(3)
7-2-3 质量比与摩尔比	(4)
7-2-4 气体的总压与组分的分压	(5)
第三节 传质分离过程的热力学基础——组分在两相间的平衡 ..	(6)
第四节 传质分离过程的两种基本类型	(9)
第五节 传质分离过程的基本操作方法	(10)
7-5-1 单级接触操作和理论级的概念	(10)
7-5-2 并流接触操作	(12)
7-5-3 逆流接触操作	(13)
7-5-4 错流接触操作	(16)
第六节 分析、处理传质分离过程的两种方法和两类设备	(17)
7-6-1 分级接触式设备	(18)
7-6-2 微分接触式设备	(19)
第七节 传质分离过程的动力学	(19)
7-7-1 单相中物质的扩散	(20)
7-7-2 双相间的传质	(42)
习题	(44)
第七章符号说明	(45)
参考文献	(48)
第八章 吸收	(49)
第一节 概述	(49)

第二节	吸收过程的气液平衡关系	(51)
8-2-1	气液平衡关系	(51)
8-2-2	亨利定律	(52)
8-2-3	用气液平衡关系分析吸收过程	(55)
8-2-4	吸收剂的选择	(59)
第三节	吸收过程机理和吸收速率方程	(60)
8-3-1	双膜理论	(60)
8-3-2	吸收速率方程	(63)
8-3-3	其它传质理论简介	(71)
第四节	吸收塔的设计及计算	(74)
8-4-1	吸收塔的物料衡算与操作线方程	(76)
8-4-2	吸收剂用量的确定	(78)
8-4-3	塔径的确定	(83)
8-4-4	填料层高度的计算	(84)
8-4-5	理论级数与塔高的计算	(100)
8-4-6	吸收的操作型计算	(107)
第五节	吸收系数和传质单元高度	(109)
8-5-1	吸收系数与传质单元高度的实验测定	(110)
8-5-2	经验公式	(111)
8-5-3	准数关联式	(113)
第六节	其它类型的吸收	(117)
8-6-1	高浓度气体吸收	(117)
8-6-2	化学吸收	(133)
习题		(135)
第八章符号说明		(144)
参考文献		(147)
第九章	蒸馏	(148)
第一节	概述	(148)
第二节	溶液的汽液平衡	(151)
9-2-1	混合物汽、液两相平衡的条件和诸参数的关系	(151)
9-2-2	汽、液两相平衡关系的确定	(154)

9-2-3	汽液平衡关系的表示方法	(161)
第三节	平衡蒸馏与简单精馏	(164)
9-3-1	平衡蒸馏	(164)
9-3-2	简单蒸馏	(168)
第四节	精馏	(172)
9-4-1	精馏过程原理	(172)
9-4-2	两组分体系连续精馏的计算	(178)
9-4-3	加料状态的影响与加料位置	(188)
9-4-4	回流比的影响和选择	(194)
9-4-5	简捷法求理论板数	(201)
9-4-6	连续逆流精馏塔的计算	(203)
9-4-7	两组分精馏的操作型计算与操作	(205)
9-4-8	两组分精馏过程的几种特殊情况	(211)
9-4-9	精馏塔、冷凝器和再沸器的工艺设计	(214)
9-4-10	间歇精馏	(221)
第五节	多组分精馏	(230)
9-5-1	多组分物系的汽液平衡	(230)
9-5-2	多组分精馏的工艺流程	(235)
9-5-3	多组分精馏的计算	(237)
第六节	特殊蒸馏	(244)
9-6-1	恒沸精馏	(244)
9-6-2	萃取精馏	(246)
9-6-3	加盐精馏和加盐萃取精馏	(248)
9-6-4	水蒸汽蒸馏	(250)
习题	.....	(251)
思考题	.....	(259)
第九章符号说明	.....	(260)
参考文献	.....	(263)
第十章	气液传质设备	(264)
第一节	板式塔	(264)
10-1-1	概述	(264)

10-1-2	塔板上的流体力学现象分析	(266)
10-1-3	气体通过塔板的流体力学计算	(270)
10-1-4	塔板结构及对塔板的要求	(286)
10-1-5	筛板塔的设计	(294)
10-1-6	板式塔的传质与塔板效率	(304)
10-1-7	各种塔板简介与比较	(312)
第二节 填料塔		(318)
10-2-1	填料塔与填料	(318)
10-2-2	填料塔的流体力学特性	(323)
10-2-3	填料塔的传质与塔高的计算	(330)
10-2-4	填料塔的主要附件	(333)
10-2-5	板式塔与填料塔的比较	(338)
习题		(340)
第十章符号说明		(342)
参考文献		(344)
第十一章 液液萃取		(346)
第一节 概述		(346)
11-1-1	液液萃取简介	(346)
11-1-2	液液萃取在工业上的应用	(348)
11-1-3	液液萃取的基本流程	(349)
第二节 液液相平衡		(350)
11-2-1	三角形相图	(351)
11-2-2	液液平衡关系在三角形相图上的表示法	(354)
11-2-3	液液相平衡在直角坐标上的表示法——分配曲线	(359)
11-2-4	萃取过程在三角形相图上的表示法	(360)
第三节 萃取的分离效果与萃取剂		(361)
11-3-1	萃取的分离效果	(361)
11-3-2	萃取剂的选择	(361)
第四节 萃取过程的流程和计算		(365)
11-4-1	单级萃取的流程与计算	(366)

11-4-2	多级错流萃取的流程与计算	(370)
11-4-3	多级逆流萃取的流程与计算	(378)
11-4-4	多级逆流萃取的最小溶剂用量	(386)
11-4-5	连续逆流萃取的流程与计算	(390)
11-4-6	回流萃取——两组分的萃取分离	(393)
第五节 液液萃取设备		(395)
11-5-1	液液萃取设备的基本条件与分类	(395)
11-5-2	混合澄清器	(397)
11-5-3	塔式萃取设备	(400)
11-5-4	离心式萃取设备	(406)
第六节 萃取设备的流动和传质特性与设计		(408)
11-6-1	萃取塔的液泛与泛点速度的计算	(409)
11-6-2	液滴的形成与聚结及其传质特性	(412)
11-6-3	萃取塔内液相的轴向混合	(413)
11-6-4	萃取塔高的确定	(414)
11-6-5	萃取设备的选择	(415)
习题		(416)
第十一章符号说明		(420)
参考文献		(422)
第十二章 干燥		(423)
第一节 概述		(423)
12-1-1	干燥在化工生产中的应用	(423)
12-1-2	去湿方法	(423)
12-1-3	干燥方法	(424)
12-1-4	对流干燥的特点	(426)
第二节 湿空气的性质及湿焐图		(427)
12-2-1	湿空气的性质及其状态参数	(427)
12-2-2	湿含量的测定和表示方法	(430)
12-2-3	湿空气的湿度图 ($T-H$ 图)	(435)
12-2-4	湿空气的湿焐图 ($H-I$ 图)	(438)
12-2-5	$H-I$ 图的应用	(441)

第三节	固体物料干燥的平衡关系	(443)
12-3-1	物料含水量的表示方法	(443)
12-3-2	干燥平衡及干燥平衡曲线	(444)
12-3-3	影响平衡水分的因素	(447)
12-3-4	平衡曲线的应用	(448)
第四节	干燥曲线和干燥速度	(450)
12-4-1	影响干燥速率的因素	(450)
12-4-2	干燥实验和干燥曲线以及干燥速度曲线	(451)
12-4-3	干燥过程分析及干燥速度关系式	(453)
第五节	干燥设备的设计计算	(459)
12-5-1	干燥过程的物料衡算	(462)
12-5-2	干燥过程热量恒算及干燥器的热效率	(464)
12-5-3	干燥时间计算	(470)
12-5-4	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	(477)
第六节	干燥器	(490)
12-6-1	工业上常用的干燥器	(490)
12-6-2	干燥器的选择	(501)
第七节	连续干燥器的设计计算	(503)
12-7-1	气流干燥器的设计	(504)
12-7-2	卧式多室流化床干燥器的设计	(511)
习题	.....	(518)
第十二章符号说明	.....	(523)
参考文献	.....	(525)
第十三章	吸附分离	(526)
第一节	概述	(526)
第二节	吸附剂及其特性	(528)
13-2-1	吸附剂的种类及用途	(528)
13-2-2	吸附剂的选择	(531)
第三节	吸附平衡	(532)
13-3-1	吸附等温线的类型	(532)

13-3-2	等温吸附公式	(534)
第四节	吸附动力学	(541)
13-4-1	外扩散	(542)
13-4-2	内扩散	(542)
13-4-3	总传质速率方程	(544)
第五节	吸附操作及设备计算	(544)
13-5-1	液体接触过滤操作及计算	(545)
13-5-2	固定床吸附器	(552)
习题	.....	(570)
第十三章	符号说明	(573)
参考文献	.....	(575)

第七章 传质分离过程概论

第一节 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，已在第四章中进行了讨论。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，所以本课程中只讨论平衡分离过程。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四种情况：

(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、氮和各种稀有气体；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。

(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分组成的表示方法。

第二节 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 的分子量。

7-2-2 质量分数与摩尔分数

混合物中某组分 A 的质量 G_A 占混合物总量 G 的分数称为该

组分 A 的质量分数 a_A 。

$$a_A = \frac{G_A}{G} \quad (7-4)$$

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 的分数称为该组分 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：

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

或

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

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, …的分子量；

\bar{M} ——混合物的平均分子量。

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：

$$X_A = \frac{G_A}{G - G_A} \quad (7-10)$$

式中： X_A ——组分 A 的质量比；

$(G-G_A)$ ——混合物中除组分 A 以外的惰性物质的量。
质量比与质量分数的关系为：

$$\bar{X}_A = \frac{a_A}{1 - a_A} \quad (7-11)$$

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、组分分压与组分的摩尔比和摩尔分数的关系为：

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

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

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 ，求氨在溶液中的质量分数、质量比、摩尔分数和摩尔比。已知此溶液的密度为 910 kg/m^3 。

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 \bar{X}_{NH_3} ：

$$\bar{X}_{\text{NH}_3} = \frac{240}{910 - 240} = \frac{240}{670} = 0.358;$$

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} ：

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

第三节 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，通过人为的加入另一个相，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浓集，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 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

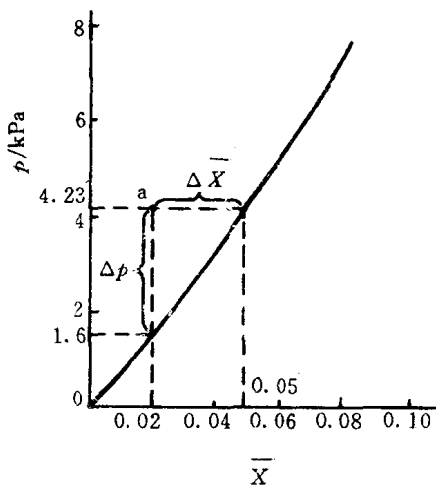


图 7-1 NH_3 在空气与水两相间的平衡关系

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。

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，水中氨的组成比与分压为 4.23 kPa 的含氨空气的平衡组成 0.05（质量比）