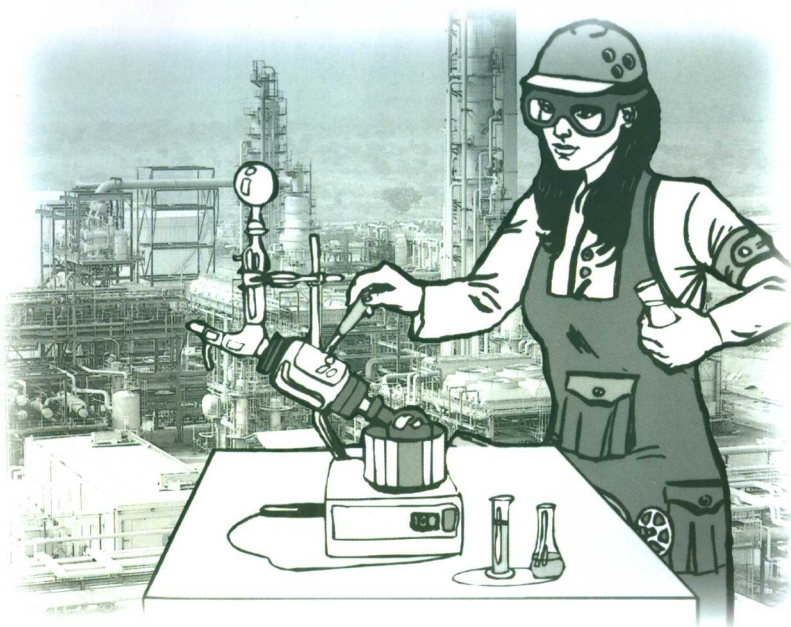


化工操作工实训丛书

传质与分离操作实训

潘文群 主编

薛叙明 主审



Chemical Industry Press



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

化工操作工实训丛书

传质与分离操作实训

潘文群 主编

薛叙明 主审



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

传质与分离操作实训/潘文群主编. —北京: 化学工业出版社, 2006. 3

(化工操作工实训丛书)

ISBN 7-5025-8441-2

I. 传… II. 潘… III. ①传质-化工过程②分离-化工过程 IV. ①TQ021.4②TQ028

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 025109 号

化工操作工实训丛书

传质与分离操作实训

潘文群 主编

薛叙明 主审

责任编辑: 辛 田 李玉晖

文字编辑: 贾 婷

责任校对: 洪雅姝

封面设计: 尹琳琳

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 14½ 字数 288 千字

2006 年 5 月第 1 版 2006 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8441-2

定 价: 27.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

随着我国社会经济的迅猛发展和职业资格准入制度的不断推进,对从事石油与化工行业的生产操作人员进行职业技能培训与鉴定显得尤为重要。为尽快适应经济与行业发展需求,本着提升石油与化工行业生产操作人员的理论知识水平与实际操作技能的目的,依据《中华人民共和国工人技术等级标准》(以下简称《等级标准》)和《中华人民共和国职业技能鉴定规范(化工行业特有工种考核大纲)》(以下简称《考核大纲》)的要求,化学工业出版社组织编写了此套化工操作工实训丛书。它包括《流体输送与过滤操作实训》、《传热、蒸发与冷冻操作实训》、《传质与分离操作实训》、《化学反应器操作实训》和《化工仿真操作实训》五分册。

本套培训教材的编写遵循了“坚持标准、结合实际,立足现状、着眼发展,突出技能、体现特色,内容精练、深浅适度”的指导思想,以《考核大纲》为准绳,参考《等级标准》,从有利于教师教学和方便工人学习出发,力求做到教材内容能适应当前化工技术的发展及现代化生产工人的技能培训要求。

本套培训教材具有如下基本特点。

(1) 作为工人技能培训用书,本套培训教材以化工单元操作和岗位操作技术为主线,着重介绍岗位操作必须掌握的基本知识、基本理论、操作规范和设备维护等知识;强调实践操作,力求做到理论联系实际,注重理论性与实用性的统一。

(2) 以目前在化学工业中广泛使用的成熟技术及工艺作为重点,同时对近年来在化工企业生产中采用的新标准、新技术、新工艺和新设备也有所涉及,力求体现本行业的技术发展趋势。

(3) 考虑到目前本行业工人的实际情况,由浅入深、由易到难地提出问题、分析问题和解决问题。此外,在每章节后编入适量的习题,以帮助读者巩固所学知识,检验学习效果。

本套培训教材的编写出版得到了常州工程职业技术学院有关领导和老师以及相关化工企业工程技术人员的大力支持,常州工程职业技术学院化学工程系系主任薛叙明老师对本套培训教材的出版做了大量工作,他组织了本套

教材的编写班子并参与提纲的制定与审定，担任了本套培训教材的主审。在此，对上述人员的辛勤劳动表示衷心的感谢。

本套培训教材适用于石油与化工行业的生产操作人员技能培训，也可作为自学教材使用。

本书为《传质与分离操作实训》分册。主要包括蒸馏、吸收、干燥、结晶共四个单元操作。本书在编写过程中，参照了化工操作工相关工种的标准和规范，比较全面地介绍了蒸馏、吸收、干燥和结晶的基础理论知识、操作知识、相关的节能及安全知识。同时本书比较注重理论联系实际，理论知识以“够用”为原则，注重由易到难、深入浅出地分析问题和解决问题，以提高操作工的实际操作技能。

本书的第一章由潘文群编写，第二章由蒋晓帆编写，第三章、第四章由刘长春编写，全书由潘文群定稿。南京金陵石化公司的彭作飞高级工程师对本书的编写提出了宝贵意见，在此表示感谢。

由于编者水平有限，书中不妥之处在所难免，望读者批评指正。

编 者

2005 年 12 月

目 录

第一章 蒸馏操作	1
第一节 概述	1
一、化工生产中的蒸馏操作	1
二、蒸馏的分类	1
第二节 汽液平衡	2
一、气、液相组成表示	2
二、汽液平衡关系	2
三、相对挥发度	5
第三节 蒸馏原理	7
一、简单蒸馏和平衡蒸馏	7
二、精馏	8
三、精馏流程	10
第四节 精馏过程的计算	11
一、基本假设	11
二、物料衡算	12
三、操作线方程在相图上的表示	15
四、理论塔板数的求取	16
五、适宜的加料位置	17
六、板效率与实际塔板数	18
第五节 回流比	19
一、回流比对理论塔板数的影响	19
二、全回流和最少理论塔板数	20
三、最小回流比	21
四、适宜回流比的选择	21
五、回流方式	22
第六节 特殊蒸馏	23
一、水蒸气蒸馏	23
二、恒沸蒸馏	23
三、萃取蒸馏	24

第七节 精馏设备	25
一、再沸器	25
二、精馏塔	27
三、冷凝器	32
四、其他相关设备	34
第八节 精馏塔的操作	35
一、精馏塔的开工准备	35
二、精馏塔的开停车	39
三、精馏塔的操作调节	40
四、精馏塔的节能	44
五、精馏塔的故障及处理	45
六、精馏塔的日常维护和停车检修	48
七、精馏塔的安全技术	48
思考题	50
习题	51

第二章 吸收操作 53

第一节 吸收的基本概念	53
一、相组成表示	54
二、溶解度	56
三、吸收剂	58
四、吸收流程	59
第二节 吸收机理与吸收速率	61
一、亨利定律	61
二、双膜理论	65
三、吸收速率及吸收速率方程式	66
四、吸收系数	69
第三节 吸收计算	71
一、吸收操作线方程	71
二、吸收剂用量	73
三、适宜操作气速	75
第四节 吸收设备	76
一、填料	76
二、填料塔的结构	77
第五节 吸收操作	82
一、吸收操作的开停车	82
二、吸收操作的调节	85

三、解吸塔操作	87
四、吸收系统常见故障与处理	87
五、吸收塔的安全技术	91
思考题	91
习题	92

第三章 干燥操作..... 93

第一节 干燥的基本概念	93
一、干燥过程的原理	93
二、物料的含水量	98
三、湿空气的湿度图	100
四、干燥速率及干燥速率曲线	103
第二节 干燥过程的计算	106
一、干燥速率的计算	106
二、干燥过程的物料衡算	107
第三节 干燥设备	110
一、物料静止型或物料输送型干燥器	110
二、搅拌型干燥器	119
三、热风输送型干燥器	140
四、接触加热型滚筒干燥器	147
五、冷冻干燥器	150
六、其他类型的干燥器	151
七、附属设备	158
八、干燥器的选择	174
第四节 干燥操作	179
一、化工系统干燥的操作与检测	179
二、干燥设备的使用与维护	183
三、干燥操作的安全技术	190
思考题	190

第四章 结晶操作..... 192

第一节 结晶的基本概念	192
一、基本概念	192
二、结晶过程的分类	193
三、溶解度和溶解度曲线	195
四、饱和溶液与过饱和溶液	196
第二节 结晶过程的计算	197

一、结晶过程的物料衡算·····	197
二、物料衡算式的应用·····	198
第三节 结晶设备·····	199
一、冷却结晶设备·····	199
二、蒸发结晶设备·····	203
三、直接冷却结晶设备·····	210
四、结晶设备的选择·····	212
第四节 结晶操作·····	216
一、间歇结晶的操作·····	216
二、连续结晶的操作·····	218
三、连续结晶系统的控制与监测·····	219
思考题·····	221

参考文献·····	222
-----------	-----

第一章 蒸馏操作

第一节 概 述

一、化工生产中的蒸馏操作

在石油、化工、轻工等生产过程中，许多原料、中间产物、粗产品等几乎都是由若干组分组成的混合物，而且大多是均相混合物。例如，石油是由许多碳氢化合物组成的液体混合物。生产上为了满足贮存、运输、加工和使用的要求，需将这些混合物分离成较纯净或几乎纯态的物质。

互溶液体混合物中，饱和蒸气压较大的组分的沸点较低，沸点较低的组分容易汽化，称为“易挥发组分”或“轻组分”。饱和蒸气压较小的组分的沸点较高，沸点较高的组分不容易汽化，称为“难挥发组分”或“重组分”。

蒸馏是分离液体均相混合物或液态均相气体混合物的操作。蒸馏操作是基于组成混合物的各组分具有不同的挥发度，即在相同温度下各自的饱和蒸气压不同以实现分离的一种单元操作。该分离操作是通过加入热量或移出热量的方法，使混合物形成气液两相，气液两相在互相接触中进行热量、质量传递，使易挥发组分在气相中增浓，难挥发组分在液相中增浓，从而实现互溶混合物的分离。其中应用最广泛的是精馏操作。

二、蒸馏的分类

工业蒸馏过程有多种分类方法。

（一）按照操作流程分类

按照操作方式是否连续可分为间歇蒸馏和连续蒸馏，生产中以后者为主。间歇蒸馏主要应用于小规模、多品种或某些具有特殊要求的场合。

（二）按照蒸馏操作方式分类

按照蒸馏操作方式可分为简单蒸馏、平衡蒸馏（闪蒸）、精馏和特殊蒸馏。对于易分离的物系或对分离要求不高的物系，采用简单蒸馏或闪蒸；对于较难分离的物系或对分离要求较高的物系可采用精馏；很难分离或采用普通方法不能分离的物系采用特殊蒸馏。特殊蒸馏包括水蒸气蒸馏、恒沸蒸馏、萃取蒸馏等。

（三）按照操作压力分类

按照操作压力可分为常压、加压和减压操作。工业生产上一般都采用常压操

作。在常压下为气态混合物，则采用加压蒸馏；在常压下沸点较高或在高温下易发生分解、聚合等易变质的物系，则采用减压蒸馏。

(四) 按照混合物中组分的数目分类

按照混合物中组分的数目可分为两组分精馏和多组分精馏。工业生产上一般都采用多组分精馏，但两组分精馏的原理及计算原则同样适用于多组分精馏，只是处理多组分精馏过程时更为复杂，因此常以两组分精馏为基础。

第二节 汽液平衡

一、气、液相组成表示

在相与相之间发生质量传递，随之组分在各相中的含量也会发生变化。组分在各相中的含量表示方法常用以下几种。需要说明的是在传质计算中，通常以 x 表示液相组成，以 y 表示气相组成。

(一) 质量分数

混合物中某组分的质量与混合物的质量之比称为该组分的质量分数。若混合物的质量为 m ，而其中所含组分 A、B、C…的质量分别为 m_A 、 m_B 、 m_C …则各组分的质量分数为

$$w_A = \frac{m_A}{m}; w_B = \frac{m_B}{m}; w_C = \frac{m_C}{m} \quad (1-1)$$

式中 w_A 、 w_B 、 w_C …——分别表示组分 A、B、C…的质量分数。

(二) 摩尔分数

混合物中某组分的摩尔质量与混合物的摩尔质量之比称为该组分的摩尔分数。若混合物的摩尔质量为 n ，其中所含组分 A、B、C…的摩尔质量分别为 n_A 、 n_B 、 n_C …则各组分的摩尔分数为

$$x_A = \frac{n_A}{n}; x_B = \frac{n_B}{n}; x_C = \frac{n_C}{n} \quad (1-2)$$

式中 x_A 、 x_B 、 x_C …——分别表示组分 A、B、C…的摩尔分数。

注意：蒸馏操作中为方便起见，在表示其组成时，都用易挥发组分的组成来表示，不再加下标。例如， x 、 y 分别表示易挥发组分 A 在液相中和气相中的摩尔分数。

二、汽液平衡关系

(一) 汽液平衡的概念

体系内部物理性质和化学性质完全均匀一致的部分称为“相”。相与相之间有明显的分界面，例如水和水蒸气混合在一起，水及其上方的水蒸气是具有不同物理性质有明显界面的两相，水为液相，水蒸气为气相。蒸馏过程的混合物虽然是多组分的，但不同组分的液体没有分界面，是一个液相；混合液体上方的蒸气

虽然也是多组分的，但没有分界面，是一个气相，但与液体有明显的分界面。以水和水蒸气为例，将水放在一个没有其他气体的密闭容器中，在加热的条件下，水分子会从水中汽化成水蒸气，水蒸气分子也会返回到水中。开始时，从水中跑到水蒸气中的分子数多于从水蒸气中返回到水中的分子数，这时水不断地汽化，水蒸气的压力逐渐增加，控制在某一温度下，会出现这样一种情况，即单位时间内从水中汽化到水蒸气中的分子数与水蒸气返回到水中的分子数相等。这时水和水蒸气就达到了动平衡状态，这种动平衡状态就称作水和水蒸气的汽液平衡状态。把这种气、液两相在平衡状态下的浓度关系、称为汽液平衡关系。相平衡时，混合物液面上的蒸气压是各组分蒸气压的加和。

(二) 理想溶液的汽-液平衡关系

在溶液中，有组分部分互溶的溶液及组分完全互溶的溶液，而后者在蒸馏操作中最为常见。本章只讨论两组分完全互溶的汽液平衡关系。

1. 压力-组成图 ($P-x$) 对于理想溶液

$$P_A = P_A^0 x_A; P_B = P_B^0 x_B$$

为直线方程 (见图 1-1)。其中， P_A^0 、 P_B^0 为在一定温度下纯组分 A 和纯组分 B 的饱和蒸气压， N/m^2 ，为常数。

$$P = P_A + P_B = P_A^0 x_A + P_B^0 (1 - x_A)$$

$$P = P_B^0 + (P_A^0 - P_B^0) x_A \quad (1-3)$$

该式表示，在一定温度下，液面上方气相总压 P 与溶液的组成 x_A 仍为一直线方程，称为“液相等温线方程”。显然，温度不同，这组线的位置也不同，温度上升，组线上移；温度下降，组线下移。

2. 沸点与组成图 ($t-x-y$) 蒸馏操作通常在一定外压下进行，操作过程中溶液的沸点随组成而变化。故一定总压下的沸点与组成图 ($t-x-y$) 是分析蒸馏过程的基础。图 1-2 所示为总压 $P = 1 \text{ atm}$ 下苯-甲苯溶液的沸点与组成图。

图中以温度 t 为纵坐标，以液相组成 x 及气相组成 y 为横坐标。图中有两条曲线，上方曲线为 $t-y$ 线，表示平衡时气相组成与温度的关系，该曲线称为气相线或饱和蒸气线或露点线。下方曲线为 $t-x$ 线，表示平衡时液相组成与温度的关系，该曲线称为液相线或饱和液体线或泡点线。两条曲线将 $t-x-y$ 图分成三个区域。液相线以下的称为液相区；气相线以上的称为过热蒸气区；液相线和气相线之间的称为气液共存区，在该区内，气液两相互成平衡，其平衡组成由等温线与气相线和液相线的交点来决定，两相之间量的关系则遵守杠杆规则。

如图 1-2 所示，易挥发组分在气相组成中所占的分数大于它在液相组成中所占的分数，故气相线位于液相线之上。在平衡时，气液两相具有同样的温度，故汽液平衡状态点 $2'$ 和 $2''$ 在同一水平线上。纯组分 A 的沸点为 t_A^0 ，纯组分 B 的沸

● $1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，全书同。

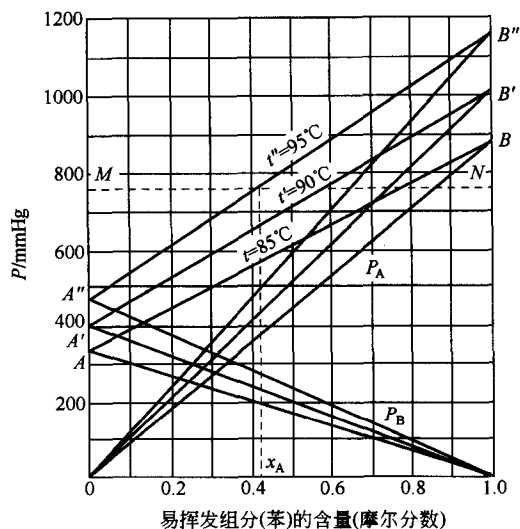


图 1-1 理想溶液（苯-甲苯）的 $P-x$ 图
($1\text{mmHg}=133.322\text{Pa}$)

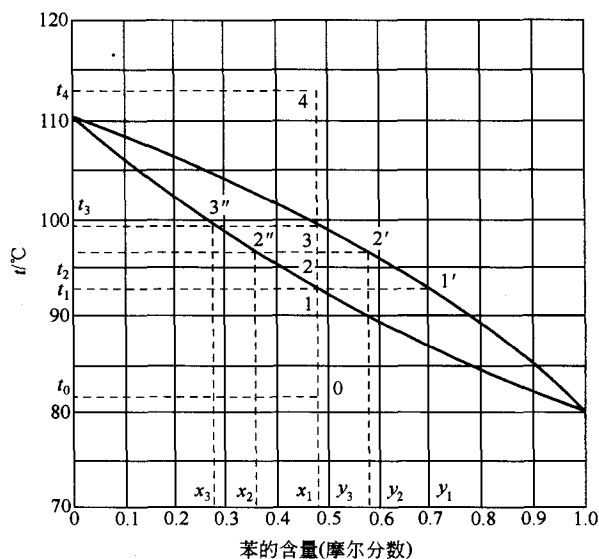


图 1-2 理想溶液（苯-甲苯）的 $t-x-y$ 图

点为 t_0' ，由它们组成的溶液其沸点介于二者之间。图中 0 点所示为加热混合物，当温度到达 t_1 时，溶液开始沸腾，此时产生气泡，相应的温度称为泡点温度，因此饱和液体线又称泡点线。同样将温度为 t_4 （点 4）的过热蒸气冷却，当温度降至 t_3 时，混合物开始冷凝有液滴出现，相应的温度称为露点温度，因此饱和

蒸气线又称露点线。这通常是由实验测得的。以苯-甲苯溶液为例,利用实验测得的数据即可绘出苯-甲苯溶液的 t - x - y 图。

【例 1-1】 苯-甲苯的饱和蒸气压和温度的关系数据见表 1-1。根据表中数据作 $P=1\text{atm}$ 时苯-甲苯混合物的 t - x - y 图。

解 因溶液服从拉乌尔定律,所以

$$P_A = P_A^0 x_A; P_B = P_B^0 x_B; P = P_B^0 + (P_A^0 - P_B^0) x_A$$

解得

$$x_A = \frac{P - P_B^0}{P_A^0 - P_B^0} \quad (1-4)$$

由分压定律得

$$P_A = P y_A$$

所以

$$y_A = \frac{P_A^0 x_A}{P} \quad (1-5)$$

由此可以计算出任一温度下的气、液相组成(见表 1-2),以 $t=105^\circ\text{C}$ 为例,计算如下。

$$x_A = \frac{101.3 - 86.0}{204.2 - 86.0} = 0.130; y_A = \frac{204.2 \times 0.130}{101.3} = 0.262$$

表 1-1 苯-甲苯在某些温度下的蒸气压

温度/ $^\circ\text{C}$	80.1	85	90	95	100	105	110.6
$P_A^0/(\text{kN/m}^2)$	101.3	116.9	135.5	155.7	179.2	204.2	240.0
$P_B^0/(\text{kN/m}^2)$	40	46	54.0	63.3	74.3	86.0	101.3

表 1-2 苯-甲苯在总压 1atm 下的 t - x - y 关系

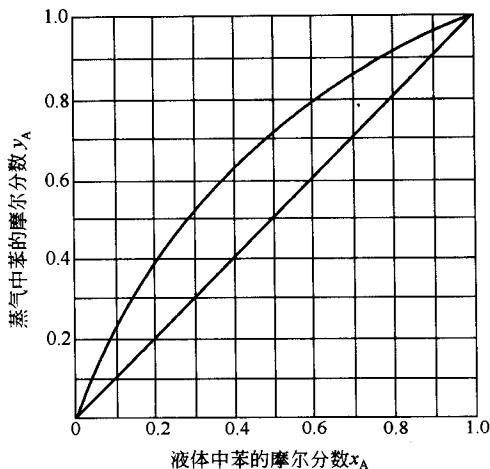
温度/ $^\circ\text{C}$	80.1	85	90	95	100	105	110.6
x	1.000	0.780	0.581	0.411	0.258	0.130	0
y	1.000	0.900	0.777	0.632	0.456	0.262	0

3. 汽-液平衡图 在上述的 t - x - y 图中,找出气、液两相在不同温度时,相应的平衡组成 x 、 y 标绘在 x 、 y 坐标图上,并连成光滑的曲线,就得到了 y - x 图。它表示在一定的总压下,气相组成 y 和与之平衡的液相组成 x 之间的关系(见图 1-3)。

应当指出,总压对平衡曲线的影响不大,若总压变化范围为 20%~30%, y - x 平衡线的变动不超过 2%。因此在总压变化不大时外压影响可以忽略。故蒸馏操作使用 y - x 图更为方便。

三、相对挥发度

溶液的汽-液平衡关系除了用相图表示以外,还可以用相对挥发度来表示。

图 1-3 苯-甲苯溶液的 y - x 图

(一) 挥发度

挥发度是表示某种液体易挥发的程度。对于纯组分通常用它的饱和蒸气压来表示。而溶液中各组分的蒸气压因组分间的相互影响要比纯态时为低。故溶液中各组分的挥发度则用它在一定温度下蒸气中的分压和与之平衡的液相中该组分的摩尔分数之比来表示。

$$\text{组分 A 的挥发度} \quad \nu_A = \frac{P_A}{x_A} \quad (1-6)$$

$$\text{组分 B 的挥发度} \quad \nu_B = \frac{P_B}{x_B} \quad (1-7)$$

式中 ν_A, ν_B ——组分 A、B 的挥发度。

组分挥发度的大小，需通过实验测定。对于理想溶液，符合拉乌尔定律，则

$$\nu_A = \frac{P_A}{x_A} = \frac{P_A^0 x_A}{x_A} = P_A^0; \quad \nu_B = \frac{P_B}{x_B} = P_B^0$$

(二) 相对挥发度

溶液中两组分的挥发度之比称为相对挥发度，用 α 表示，通常为易挥发组分的挥发度与难挥发组分的挥发度之比。

$$\alpha = \frac{\nu_A}{\nu_B} = \frac{P_A x_B}{P_B x_A} \quad (1-8)$$

对于两组分的理想溶液，则

$$\alpha = \frac{P_A^0}{P_B^0}$$

整理得

$$y = \frac{\alpha x}{1 + (\alpha - 1)x} \quad (1-9)$$

式 (1-9) 为用相对挥发度来表示的汽-液平衡关系式。

第三节 蒸馏原理

一、简单蒸馏和平衡蒸馏

(一) 简单蒸馏

简单蒸馏 (微分蒸馏) 是使混合物在蒸馏釜中逐次地部分汽化, 并不断地将生成的蒸气移至冷凝器中冷凝, 可使组分部分地分离, 这种方法称为简单蒸馏, 又称微分蒸馏。其装置如图 1-4 所示。操作时, 将原料液送入一密闭的蒸馏釜 1 中加热, 使溶液沸腾, 将产生的蒸气通过颈管及蒸气引导管引入冷凝器 2, 冷凝后的馏出液送入贮槽 3 内。这种蒸馏方法由于不断地将蒸气移走, 蒸馏釜中的液相易挥发组分的浓度逐渐降低, 馏出液的浓度也逐渐降低, 故需分别贮存不同组成范围的馏出液。当蒸馏釜中的液体浓度下降到规定要求时, 便停止蒸馏, 将残液排出。

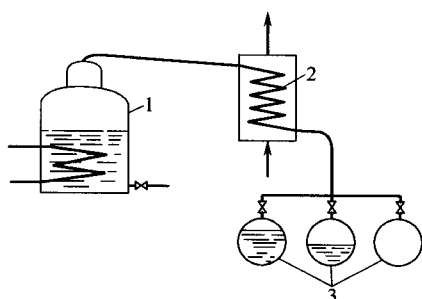


图 1-4 简单蒸馏装置

1—蒸馏釜；2—冷凝器；3—贮槽

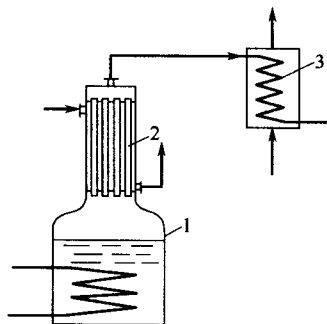


图 1-5 具有分凝器的简单蒸馏装置

1—蒸馏釜；2—分凝器；3—冷凝器

为了使简单蒸馏达到更好的分离效果, 可在蒸馏釜上方安装一个分凝器, 如图 1-5 所示。当蒸馏进行时, 蒸馏釜 1 中的混合液经部分汽化产生的蒸气再送至分凝器 2 中进行部分冷凝, 由于增加了一次部分冷凝使从分凝器中出来的蒸气中易挥发组分的含量得到进一步提高。所获得的馏出液中易挥发组分的含量较高。

简单蒸馏是间歇操作, 适用于相对挥发度较大、对分离程度要求不高的互溶混合物的粗略分离。例如, 石油的粗馏。

(二) 平衡蒸馏

平衡蒸馏又称闪蒸。料液连续地加入加热器中加热至一定的温度后, 经减压阀减压至预定压强送入闪蒸罐, 由于压强降低使过热液体在减压情况下大量自蒸发, 这时部分液体汽化, 气相中含较多的易挥发组分, 气相上升至塔顶冷凝器全部冷凝成塔顶产品。未汽化的液相中难挥发组分浓度增大, 此液相下降至塔底引出, 成为塔底产品。

这种蒸馏方法可以连续进料,连续移出蒸气和液相,是一个连续的稳定过程。因此可以得到稳定浓度的气相和液相,但分离程度仍然不高。所形成的气液两相可认为达到平衡,所以称作平衡蒸馏。常见的平衡蒸馏装置如图 1-6 所示。

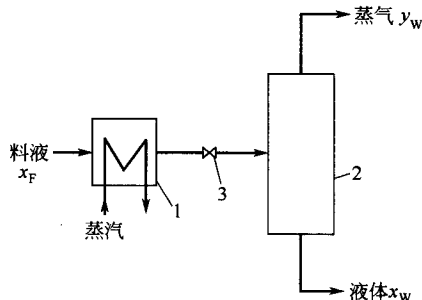


图 1-6 闪蒸装置

1—加热器；2—闪蒸罐；3—减压阀

二、精馏

(一) 多次部分汽化和部分冷凝

如图 1-7 和图 1-8 所示,将组成为 x_F 、温度为 t_F 的混合物加热至 t_1 ,使其部分汽化,气相和液相分离,所得的气相组成为 y_1 、液相组成为 x_1 。由 t - x - y 图(见图 1-8)可以看出, $y_1 > x_F > x_1$ 。

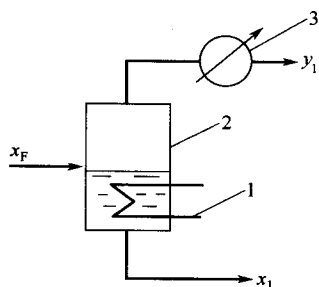
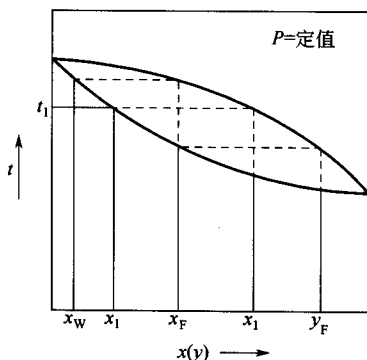


图 1-7 一次部分汽化示意图

1—加热器；2—分离器；3—冷凝器

图 1-8 一次部分汽化的 t - x - y 示意图

由此可见,将液体混合物进行一次部分汽化的过程,只能起到部分分离的作用。显然,要使混合物得到完全分离,必须进行多次部分汽化和部分冷凝的过程。图 1-9 所示为多级分离过程,若将第一级溶液部分汽化所得到的气相产品在冷凝器中加以冷凝,然后再将冷凝液在第二级中部分汽化,此时所得到的气相组成为 y_2 ,且 $y_2 > y_1$ 。这样部分汽化的次数越多,所得到的蒸气浓度也越高,最