



"十二五"普通高等教育本科国家级规划教材

化工原理课程系列教材

化工原理

(第三版) 下册

■ 天津大学化工学院 柴诚敬 贾绍义 主编
张凤宝 夏 清 张国亮 等编

高等教育出版社

化工原理课程系列教材

化工原理

(第三版) 下册

■ 天津大学化工学院 柴诚敬 贾绍义 主编
张凤宝 夏 清 张国亮 等编

内容提要

本书是“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。全书以传递过程的理论和处理工程问题的方法论为两条主线,重点介绍化工单元操作的基本原理、过程计算、典型设备及其强化。全书共十二章,分上、下两册出版。上册包括流体流动、流体输送机械、非均相混合物分离及固体流态化、液体搅拌、传热及蒸发;下册包括传质与分离过程概论、气体吸收、蒸馏、液-液萃取和液-固浸取、固体物料的干燥及其他分离方法(结晶、膜分离及吸附等)。每章均有学习指导、例题、习题与思考题。

本书采用双色印刷、双栏排版,与本书配套的数字课程网站可为使用者提供课程演示文稿、知识点动画等多种形式的教学素材。

本书专业适用面宽,可供高等学校化工、石油、生物、制药、食品、环境、材料、冶金等专业使用,也可供有关部门从事科研、设计、管理及生产等工作的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理. 下册 / 柴诚敬, 贾绍义主编; 张凤宝等编. -- 3 版. -- 北京: 高等教育出版社, 2017. 4
ISBN 978-7-04-047248-6

I. ①化… II. ①柴… ②贾… ③张… III. ①化工原理-高等学校-教材 IV. ①TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 022941 号

Huagong Yuanli

策划编辑 翟 怡
插图绘制 杜晓丹

责任编辑 翟 怡
责任校对 杨凤玲

封面设计 张申申
责任印制 刘思涵

版式设计 马 云

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 肥城新华印刷有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 21
字 数 490 千字
购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>
<http://www.hepmall.com>
<http://www.hepmall.cn>
版 次 2006 年 1 月第 1 版
2017 年 4 月第 3 版
印 次 2017 年 4 月第 1 次印刷
定 价 33.80 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物 料 号 47248-00

与本书配套的数字课程资源使用说明

一、注册/登录

访问 <http://abook.hep.com.cn/>, 点击“注册”, 在注册页面输入用户名、密码及常用的邮箱进行注册。已注册的用户直接输入用户名和密码登录即可进入“我的课程”页面。

二、课程绑定

点击“我的课程”页面右上方“绑定课程”, 正确输入教材封底防伪标签上的密码, 点击“确定”完成课程绑定。

三、访问课程

在“正在学习”列表中选择已绑定的课程, 点击“进入课程”即可浏览与本书配套的课程资源。刚绑定的课程请在“申请学习”列表中选择相应课程并点击“进入课程”。

四、资源使用

与本书配套的数字课程资源的类型及图标如下:



——演示文稿



——动画



——练习文稿

如有账号问题, 请发邮件至: ecourse@hep.com.cn。

第三版前言

本书是“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材,第一版和第二版分别为普通高等教育“十五”和“十一五”国家级规划教材。本书自问世以来,受到业界和读者的热情支持、鼓励和认可,总体反映良好。根据十多年来教学实践的检验,并考虑到学科的最新进展和使用者的课程教学资源的需求,此次修订在保持原总体结构和特色风格的前提下,对部分内容进行删减、调整、更新和充实。

第三版教材主要修订内容如下:

(1) 对有关单元过程进一步加强了研究重点、发展前沿、强化途径、节能措施等内容的介绍,以启迪读者的创新思维;

(2) 对某些例题做适当的调整,结合工程实际,加强案例分析,突出应用型人才与创新能力的培养;

(3) 对某些章节的内容顺序做了局部调整,同时对工程上已少用的内容做了删除或精简;

(4) 附录中更新了部分内容;

(5) 在出版纸质教材的同时,建立数字课程网站,纸质教材与数字课程网站的教学资源相链接。

本次修订工作由各章的原执笔者承担,他们是柴诚敬(绪论、流体输送机械、液体搅拌、蒸发、蒸馏、下册附录)、张国亮(流体流动、其他分离方法)、夏清(非均相混合物分离及固体流态化、固体物料的干燥)、张凤宝(传热、液-液萃取和液-固浸取)、刘明言(传热)、贾绍义(上册附录、传质与分离过程概论、气体吸收),柴诚敬、贾绍义担任主编。

衷心地感谢天津大学化学工程学院的同事在本书修订工作中给予的热情支持和帮助。

编者

2016年4月

第二版前言

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,第一版为普通高等教育“十五”国家级规划教材。本书第一版自问世以来,受到同行的热情支持、鼓励和认可,总体反映良好。根据几年来教学实践的检验,并考虑到学科的最新进展,此次修订中,在保持原总体结构和特色风格的前提下,对部分内容进行了删减、调整、更新和充实。

第二版教材主要修订内容如下:

(1) 对有关单元过程进一步加强了研究重点、发展前沿、强化途径、节能措施等内容的介绍,以启迪读者的创新思维;

(2) 在相关单元过程中补充了具有工程背景、体现工程应用、有利于加深对基础理论理解的例题,以期读者在获取知识的同时提高工程能力;

(3) 增加了部分内容,某些章节的内容顺序做了局部调整,同时对工程上已少用的内容做了删除或精简;

(4) 附录中增加和更新了部分内容。

本次修订工作由各章的原执笔者承担,他们是柴诚敬(绪论、流体输送机械、液体搅拌、蒸发、蒸馏、下册附录)、张国亮(流体流动、其他分离方法)、夏清(非均相混合物分离及固体流态化、固体物料的干燥)、张凤宝(传热、液-液萃取和液-固浸取)、刘明言(传热)、贾绍义(上册附录、传质与分离过程概论、气体吸收)。

感谢天津大学化学工程学院的同事在本书修订工作中给予的热情支持和帮助。

编 者

2009年12月

第一版前言

根据现代科学技术飞速发展对高等化工专门人才“知识、能力和综合素质”的要求,新编教材以“加强基础,拓宽知识面,培养学生的创新能力”为宗旨,坚持“面向 21 世纪的教学内容和课程体系改革”的主导思想,力求在内容和体系上有新意。

考虑到生物工程、制药工程、环境工程、食品工程等不同类型专业的需要,新编教材不仅拓展了内容,增加了新的知识点(如非牛顿流体的流动和传热、生物溶液的浓缩、冷冻干燥及固体浸取等),而且注意吸收本学科领域最新科技成果,及时反映学科发展的前沿,力求达到博而精,实现科学性、先进性和适用性的有机统一。

本教材以化工传递过程的基本理论和工程方法论为两条主线,突出工程学科的特点,系统而简明地阐述了化工单元操作的基本原理、过程计算、典型设备的结构特点及性能、过程或设备的强化途径等。全书分上、下两册出版。上册除绪论和附录外,包括流体流动、流体输送机械、非均相混合物分离及固体流态化、液体搅拌、传热和蒸发;下册包括传质与分离过程概论、气体吸收、蒸馏、液-液萃取和液-固浸取、固体物料的干燥及其他分离方法(结晶、膜分离及吸附等)。

本教材在编写过程中,注意吸收我校在长期教材建设方面的经验和成果,按照学科的发展和认识规律,由浅入深、循序渐进、层次清晰、难点分散、理论联系实际,力求概念准确、论述严谨、可读性强。每章开篇有学习指导,且编入适量具有工程背景的实例、习题和思考题,有利于启迪思维,增强工程观念和创新意识,便于教与学。

本书可作为高等学校化工类及相关专业(化工、石油化工、生物、制药、环境、食品、材料、冶金等)的教材,也可供有关部门从事科研、设计、生产及管理工作的科技人员参考。

本书主编柴诚敬。参加各章编写工作的有:柴诚敬(绪论、流体输送机械、液体搅拌、蒸发、蒸馏)、张国亮(流体流动、其他分离方法)、夏清(非均相混合物分离及固体流态化、固体物料的干燥)、张凤宝(传热、液-液萃取和液-固浸取)、刘明言(传热)、贾绍义(附录、传质与分离过程概论、气体吸收)。王军、马红钦、吴松海、张裕卿、杨晓霞、张缨、姜峰等教师参加部分文字加工、素材搜集与制作等工作。在本书编写过程中,化工系的有关教师给予了热情关心和支持,姚玉英、陈常贵等老师给予了具体的帮助,在此表示衷心的感谢。

本书承蒙清华大学蒋维钧教授主审,对书稿提出许多宝贵意见,在此致以诚挚的感谢。

由于编者水平所限,书中不妥之处甚至错误在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2005 年 1 月

目 录

第七章 传质与分离过程概论..... 1

7.1 传质与分离过程概述..... 1

7.1.1 传质与分离方法 2

7.1.2 相组成的表示方法 4

7.2 质量传递的方式与描述 6

7.2.1 分子传质(分子扩散) 7

7.2.2 对流传质 15

7.2.3 相际间的传质 17

7.3 传质设备简介 20

7.3.1 传质设备的分类与性能要求 ... 20

7.3.2 典型的传质设备 21

7.4 分离过程的研究重点 22

习题..... 23

思考题 23

本章主要符号说明 24

第八章 气体吸收..... 25

8.1 气体吸收过程概述 25

8.1.1 气体吸收过程与流程 25

8.1.2 气体吸收的分类 27

8.1.3 吸收剂的选择 28

8.2 吸收过程的相平衡关系 28

8.2.1 气体在液体中的溶解度 28

8.2.2 亨利定律 29

8.2.3 相平衡关系在吸收过程中的

应用 32

8.3 吸收过程的速率关系 34

8.3.1 膜吸收速率方程 34

8.3.2 总吸收速率方程 36

8.3.3 吸收速率方程小结 39

8.4 低组成气体吸收的计算 41

8.4.1 物料衡算与操作线方程 41

8.4.2 吸收剂用量的确定 43

8.4.3 塔径的计算 45

8.4.4 吸收塔有效高度的计算 45

8.5 吸收系数 58

8.5.1 吸收系数的测定 58

8.5.2 吸收系数的经验公式 59

8.5.3 吸收系数的量纲为 1 数群关 联式 60

8.6 其他吸收与解吸 64

8.6.1 高组成气体吸收 64

8.6.2 化学吸收 66

8.6.3 解吸 67

8.7 填料塔 70

8.7.1 塔填料 70

8.7.2 填料塔的流体力学性能与操作 特性 75

8.7.3 填料塔的内件 82

习题..... 84

思考题 86

本章主要符号说明 86

第九章 蒸馏 88

9.1 蒸馏过程概述 88

9.2 两组分溶液的气液平衡	90	本章主要符号说明	153
9.2.1 两组分理想物系的气液平衡 ...	90		
9.2.2 两组分非理想物系的气液平衡	94	第十章 液-液萃取和液-固浸取 ...	155
9.2.3 气液平衡的应用	96	10.1 液-液萃取概述	156
9.3 单级蒸馏过程	96	10.2 液-液相平衡	157
9.3.1 平衡蒸馏	96	10.2.1 三角形坐标图及杠杆规则 ...	157
9.3.2 简单蒸馏	97	10.2.2 三角形相图	159
9.4 精馏——多级蒸馏过程	99	10.2.3 萃取剂的选择	162
9.4.1 精馏原理	99	10.3 液-液萃取过程的计算	164
9.4.2 精馏操作流程	100	10.3.1 单级萃取的计算	164
9.5 两组分连续精馏的计算	101	10.3.2 多级错流萃取的计算	168
9.5.1 理论板的概念和恒摩尔流假定	101	10.3.3 多级逆流萃取的计算	172
9.5.2 物料衡算与操作线方程	102	10.3.4 微分接触逆流萃取的计算 ...	181
9.5.3 理论板层数的计算	107	10.4 液-液萃取设备	184
9.5.4 回流比的影响及选择	111	10.4.1 萃取设备的传质特性	184
9.5.5 简捷法求理论板层数	116	10.4.2 萃取设备的基本要求与分类 ...	186
9.5.6 几种特殊情况理论板层数的计算	117	10.4.3 萃取设备的主要类型	186
9.5.7 连续精馏装置的热量衡算与精馏过程的节能	121	10.4.4 萃取设备的选择	192
9.5.8 精馏过程的操作型计算和调节	124	10.5 其他萃取技术简介	193
9.6 间歇精馏	126	10.5.1 超临界流体萃取	193
9.6.1 回流比恒定时的间歇精馏 ...	126	10.5.2 液膜萃取	197
9.6.2 馏出液组成恒定时的间歇精馏	128	10.5.3 回流萃取	198
9.7 特殊精馏	131	10.5.4 化学萃取	199
9.7.1 共沸精馏	131	10.6 液-固浸取	202
9.7.2 萃取精馏	132	10.6.1 液-固浸取概述	202
9.7.3 盐效应精馏	133	10.6.2 浸取过程中的平衡关系	203
9.8 板式塔	134	10.6.3 单级浸取	203
9.8.1 塔板的类型及性能评价	134	10.6.4 多级逆流浸取	204
9.8.2 塔高和塔径的计算	138	10.6.5 浸取设备	207
9.8.3 塔板的结构	144	习题	209
9.8.4 板式塔的流体力学性能和操作特性	147	思考题	211
习题	150	本章主要符号说明	212
思考题	153	第十一章 固体物料的干燥	214
		11.1 湿空气的性质及湿度图	215
		11.1.1 湿空气的性质	215
		11.1.2 湿空气的 $H-I$ 图	221
		11.2 干燥过程的物料衡算与热量	

衡算	225	12.1.2 结晶过程的相平衡	276
11.2.1 湿物料的性质	225	12.1.3 结晶动力学简介	278
11.2.2 干燥过程的物料衡算与热量 衡算	226	12.1.4 溶液结晶方法与设备	279
11.2.3 空气通过干燥器时的状态 变化	229	12.1.5 溶液结晶过程的计算	282
11.2.4 干燥系统的热效率	232	12.1.6 其他结晶方法	284
11.3 干燥速率与干燥时间	235	12.2 膜分离	285
11.3.1 物料中水分的性质	236	12.2.1 概述	285
11.3.2 恒定干燥条件下干燥时间的 计算	237	12.2.2 膜材料及膜性能	286
11.3.3 变动条件下的干燥过程	245	12.2.3 典型膜过程简介	288
11.4 真空冷冻干燥	245	12.2.4 膜分离设备(膜组件)	297
11.4.1 真空冷冻干燥原理	245	12.3 吸附	299
11.4.2 冷冻干燥过程	246	12.3.1 吸附现象与吸附剂	299
11.4.3 冻干程序与冻干曲线	249	12.3.2 吸附平衡与吸附速率	301
11.5 干燥器	249	12.3.3 工业吸附方法与设备	305
11.5.1 干燥器的主要型式	250	12.4 离子交换	309
11.5.2 干燥器的设计	260	12.4.1 离子交换原理与离子交换剂	309
11.6 增湿与减湿	266	12.4.2 离子交换平衡与传质速率	311
11.6.1 增湿与减湿过程的传热、传质 关系	266	12.4.3 工艺方法与设备	312
11.6.2 空气调湿器与水冷却塔	269	习题	313
习题	270	思考题	314
思考题	272	本章主要符号说明	314
本章主要符号说明	272	附录	315
第十二章 其他分离方法	274	一、扩散系数	315
12.1 结晶	274	二、常用填料的特性参数	317
12.1.1 基本概念	275	三、塔板结构参数系列化标准(单溢流型)	318
		参考书目	320

第七章 传质与分离过程概论

学习指导

一、学习目的

通过本章的学习,掌握传质与分离过程的基本概念和传质过程的基本计算方法,为以后各章传质单元操作过程的学习奠定基础。

二、学习要点

1. 应重点掌握的内容

传质与分离方法的类型与选择;相组成的表示方法;传质的方式与描述;相际间的对流传质模型——双膜模型;传质设备的基本类型和性能要求。

2. 应掌握的内容

相际间的对流传质模型——溶质渗透模型和表面更新模型。

3. 应注意的问题

分子传质与导热、对流传质与对流传热具有类似性,在学习时应注意把握它们之间的类似性,以便于理解和记忆。学习分子传质问题的求解时,不要机械地记忆各过程的求解结果,应注意把握求解的思路和应用背景。

7.1 传质与分离过程概述

质量传递(简称传质)是自然界和工程技术领域普遍存在的现象,它与动量传递、热量传递一起构成了化工过程中最基本的三种传递过程,简称为“三传”。质量传递可以在一相内进行,也可在相际间进行。质量传递的起因是系统内存在化学势的差异,这种化学势的差异可由浓度、温度、压力或外加电磁场等引起。在化工、石油、生物、制药、食品等工业过程中,质量传递是均相混合物分离的物理基础,同时,也是反应过程中几种反应物互相接触及反应产物分离的基本依据。

在近代工业的发展中,传质与分离过程起到了特别重要的作用。从航天飞机到核潜艇的制造,从绿色食品到珍贵药品的生产,从生物化工到环境保护,从燃料油、润滑油到各种石油化工原料的提取,都离不开对均相混合物的分离。



演示文稿

7-1

7.1.1 传质与分离方法

依据分离原理的不同,传质与分离过程可分为平衡分离和速率分离两大类。

一、平衡分离过程

平衡分离过程系借助分离媒介(如热能、溶剂、吸附剂等)使均相混合物体系变为两相体系,再以混合物中各组分在处于平衡的两相中分配关系的差异为依据而实现分离。因此,平衡分离属于相际传质过程。图 7-1 所示为几种相际传质过程的示意图,主要分为如下几种类型。

1. 气液传质过程

气液传质过程是指物质在气、液两相间的转移,它主要包括气体的吸收(或脱吸)、气体的增湿(或减湿)、液体的蒸馏(或精馏)等单元操作过程,如图 7-1 中(a)、(b)、(c)所示。其中,蒸馏操作的气相是由液相经过汽化而得。

2. 液液传质过程

液液传质过程是指物质在两个不互溶(或有限互溶)的液相间的转移,它主要包括液体的萃取等单元操作过程,如图 7-1 中(d)所示。

3. 液固传质过程

液固传质过程是指物质在液、固两相间的转移,它主要包括结晶(或溶解)、液体吸附(或脱附)、浸取等单元操作过程,如图 7-1 中(e)、(f)、(g)所示。

4. 气固传质过程

气固传质过程是指物质在气、固两相间的转移,它主要包括气体吸附(或脱附)、固体干燥等单元操作过程,如图 7-1 中(f)、(h)所示。

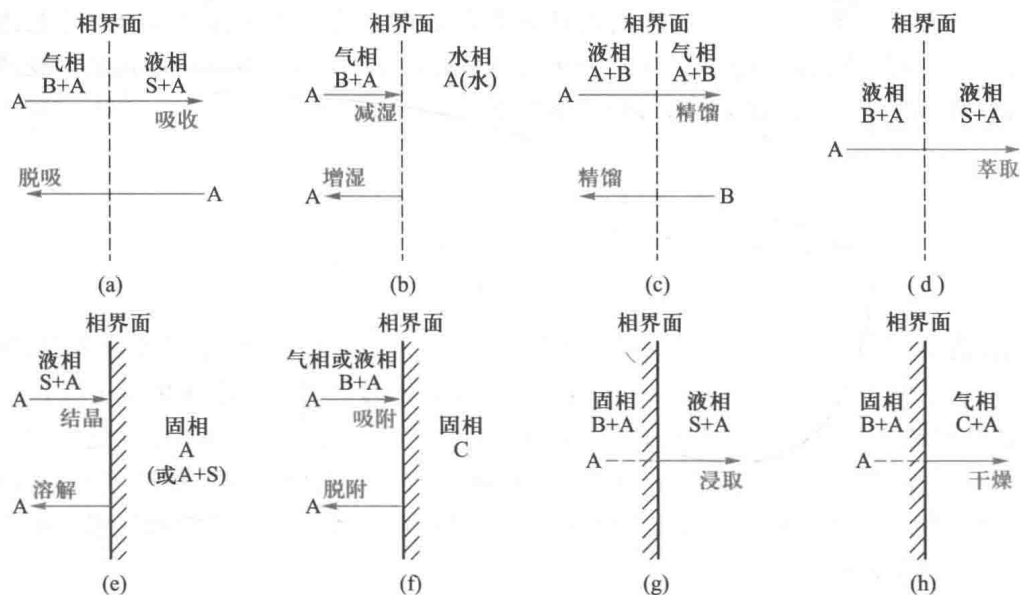


图 7-1 几种相际传质过程的示意图

应予指出,上述的固体干燥、气体的增湿或减湿、结晶等单元操作过程同时遵循热量传

递和质量传递的规律,一般将其列入传质单元操作。

在上述的平衡分离过程中, i 组分在互成平衡的两相中的组成关系常用相平衡常数(又称分配系数) K_i 来表示,即

$$K_i = y_i / x_i \quad (7-1)$$

式中, y_i 、 x_i 分别表示 i 组分在两相中的组成。 K_i 值的大小通常取决于物系特性及操作条件(如温度、压力等)。 i 和 j 两个组分的相平衡常数 K_i 和 K_j 之比称为分离因子 α_{ij} ,即

$$\alpha_{ij} = K_i / K_j \quad (7-2)$$

通常将 K 值大的当作分子,故 α_{ij} 一般大于1。当 α_{ij} 偏离1时,便可采用平衡分离过程使均相混合物得以分离, α_{ij} 越大越容易分离。在某些传质单元操作中,分离因子又有专用名称,如蒸馏中称为相对挥发度,萃取中称为选择性系数等。

应予指出,相际传质过程的进行是以其达到相平衡为极限的,而两相平衡的建立往往需要经过相当长的接触时间。在实际操作中,相际的接触时间一般是有限的,某组分由一相迁移到另一相的量则由传质速率所决定。因此,在研究传质过程时,一般都要涉及两个主要问题,其一是相平衡,决定物质传递过程进行的极限,并为选择合适的分离方法提供依据;其二是传递速率,决定在一定接触时间内传递物质的量,并为传质设备的设计提供依据。只有将相际平衡与传递速率二者统一考虑,才能获得最佳工程效益。

二、速率分离过程

速率分离过程是指借助某种推动力(如压力差、温度差、电位差等)的作用,利用各组分扩散速率的差异而实现混合物分离的单元操作过程。这类过程的特点是所处理的物料和产品通常属于同一相态,仅有组成的差别。速率分离过程主要分为以下两类。

1. 膜分离

膜分离是指在选择性透过膜中,利用各组分扩散速率的差异而实现混合物分离的单元操作过程,它主要包括超滤、反渗透、渗析和电渗析等。

2. 场分离

场分离是指在外场(如电场、磁场等)作用下,利用各组分扩散速率的差异而实现混合物分离的单元操作过程,它主要包括电泳、热扩散、高梯度磁场分离等。

应予指出,传质与分离过程的能量消耗通常是构成单位产品成本的主要因素之一,因此降低传质与分离过程的能耗,受到全球性普遍重视。膜分离和场分离是一类新型的分离操作,由于其具有节约能耗,不破坏物料,不污染产品和环境等突出优点,在稀溶液、生化产品及其他热敏性物料分离方面,有着广阔的应用前景。

三、分离方法的选择

对于一种均相混合物,有时可采用不同的方法进行分离,选择分离方法时应考虑以下主要因素:

(1) 被分离物系的相态 通常,不同的分离方法适用于不同相态(气态、液态和固态)混合物的分离。例如,吸收方法用于气体混合物的分离,萃取方法用于液体混合物的分离等,故选择分离方法时应考虑被分离物系的相态。

(2) 被分离物系的特性 被分离物系的特性通常是指热敏性、流动性、可燃性、挥发性及毒性等,这些特性对分离方法的选择往往具有决定性的作用。例如,对热敏性(物料受热易分解、聚合或氧化等)物系的分离,不宜采用蒸馏方法等。

(3) 产品的质量要求 大多数化工产品都是经过分离过程获得的,产品的质量(包括纯度、外观等)通常与采用的分离方法密切相关。例如,对某些沸点差较小而熔点差较大的物系,若采用精馏方法分离,一般很难获得高纯度的产品,而采用结晶方法分离,则可获得高纯度的产品。

(4) 经济程度 分离过程的经济程度主要取决于设备投资及操作费用等,选择分离方法时应予以充分考虑。例如,对某些液体混合物的分离,采用精馏方法通常能耗高,操作费用较高。

应予指出,选择分离方法除考虑上述的主要因素外,还应考虑场地和环境条件、环境保护的要求、可变因素(如原料组成、温度等)的影响。应根据具体条件,选择技术上先进,经济上合理,有利于可持续发展的最佳方案,以便充分调动有利因素,因地制宜,取得最大的经济效益和社会效益。

7.1.2 相组成的表示方法

对于各种传质与分离过程,为了分析问题与设计计算的方便,通常采用不同的组成表示方法,常用的有以下几种。

一、质量浓度与物质的量浓度

1. 质量浓度

单位体积混合物中某组分的质量称为该组分的质量浓度,以符号 ρ 表示,其定义式为

$$\rho_A = \frac{m_A}{V} \quad (7-3)$$

式中 ρ_A ——组分 A 的质量浓度(或密度), kg/m^3 ;

m_A ——混合物中组分 A 的质量, kg ;

V ——混合物的体积, m^3 。

若混合物由 N 个组分组成,则混合物的总质量浓度为

$$\rho_{\text{总}} = \sum_{i=1}^N \rho_i \quad (7-4)$$

2. 物质的量浓度

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,以符号 c 表示,其定义式为

$$c_A = \frac{n_A}{V} \quad (7-5)$$

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 。

若混合物由 N 个组分组成,则混合物的总物质的量浓度为

$$c_{\text{总}} = \sum_{i=1}^N c_i \quad (7-6)$$

组分 A 的质量浓度与物质的量浓度的关系为

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

式中 M_A ——组分 A 的摩尔质量, kg/kmol。

二、质量分数与摩尔分数

1. 质量分数

混合物中某组分的质量占混合物的总质量的分数称为该组分的质量分数, 以符号 w 表示, 其定义式为

$$w_A = \frac{m_A}{m} \quad (7-8)$$

式中 w_A ——组分 A 的质量分数;

m ——混合物的总质量, kg。

若混合物由 N 个组分组成, 则有

$$\sum_{i=1}^N w_i = 1 \quad (7-9)$$

2. 摩尔分数

混合物中某组分的物质的量占混合物总物质的量的分数称为该组分的摩尔分数, 以符号 x 表示, 其定义式为

$$x_A = \frac{n_A}{n} \quad (7-10)$$

式中 x_A ——组分 A 的摩尔分数;

n ——混合物总物质的量, kmol。

若混合物由 N 个组分组成, 则有

$$\sum_{i=1}^N x_i = 1 \quad (7-11)$$

应予指出, 当混合物为气液两相体系时, 常以 x 表示液相中的摩尔分数, y 表示气相中的摩尔分数。

组分 A 的质量分数与摩尔分数的互换关系为

$$x_A = \frac{w_A / M_A}{\sum_{i=1}^N (w_i / M_i)} \quad (7-12)$$

及

$$w_A = \frac{x_A M_A}{\sum_{i=1}^N (x_i M_i)} \quad (7-13)$$

三、质量比与摩尔比

在某些传质单元操作过程(如吸收、萃取等)中, 混合物的总质量(或总物质的量)是变化的。此时, 若用质量分数(或摩尔分数)表示气液相组成, 计算很不方便。为此引入以惰性组分为基准的质量比(或摩尔比)来表示气液相的组成。

1. 质量比

混合物中某组分质量与惰性组分质量的比值称为该组分的质量比, 以符号 $\bar{X}$ 表示。若混合物中除组分 A 外, 其余为惰性组分, 则组分 A 的质量比定义式为

$$\bar{X}_A = \frac{m_A}{m - m_A} \quad (7-14)$$

式中 $\bar{X}_A$ ——组分 A 的质量比；

$m - m_A$ ——混合物中惰性组分的质量, kg。

质量比与质量分数的关系为

$$\bar{X}_A = \frac{w_A}{1 - w_A} \quad (7-15)$$

或

$$w_A = \frac{\bar{X}_A}{1 + \bar{X}_A} \quad (7-15a)$$

2. 摩尔比

混合物中某组分物质的量与惰性组分物质的量的比值称为该组分的摩尔比, 以符号 X 表示。若混合物中除组分 A 外, 其余为惰性组分, 则组分 A 的摩尔比定义式为

$$X_A = \frac{n_A}{n - n_A} \quad (7-16)$$

式中 X_A ——组分 A 的摩尔比；

$n - n_A$ ——混合物中惰性组分的物质的量, kmol。

摩尔比与摩尔分数的关系为

$$X_A = \frac{x_A}{1 - x_A} \quad (7-17)$$

或

$$x_A = \frac{X_A}{1 + X_A} \quad (7-17a)$$

同样, 当混合物为气液两相体系时, 常以 X 表示液相的摩尔比, Y 表示气相的摩尔比。

【例 7-1】含乙醇(A)12%(质量分数)的水溶液, 其密度为 980 kg/m^3 , 试计算乙醇的摩尔分数、摩尔比及物质的量浓度。

解: 乙醇的摩尔分数为

$$x_A = \frac{w_A / M_A}{\sum_{i=1}^N (w_i / M_i)} = \frac{0.12/46}{0.12/46 + 0.88/18} = 0.0507$$

乙醇的摩尔比为

$$X_A = \frac{x_A}{1 - x_A} = \frac{0.0507}{1 - 0.0507} = 0.0534$$

溶液的平均摩尔质量为

$$\bar{M} = (0.0507 \times 46 + 0.9493 \times 18) \text{ kg/kmol} = 19.42 \text{ kg/kmol}$$

乙醇的物质的量浓度为

$$c_A = c_{\text{总}} x_A = \frac{\rho_{\text{总}}}{\bar{M}} x_A = \left(\frac{980}{19.42} \times 0.0507 \right) \text{ kmol/m}^3 = 2.558 \text{ kmol/m}^3$$

7.2 质量传递的方式与描述

与热量传递中的导热和对流传热类似, 质量传递的方式有分子传质(分子扩散)和对流传质(对流扩散)两类。



7.2.1 分子传质(分子扩散)

一、分子扩散现象与费克定律

1. 分子扩散现象

分子传质又称为分子扩散,简称为扩散,它是由于分子的无规则热运动而形成的物质传递现象。因此,分子传质是微观分子热运动的宏观结果。分子传质在固体、液体和气体中均能发生。

如图 7-2 所示,用一块隔板将容器分为左、右两室,两室中分别充入温度及压力相同而浓度不同的 A、B 两种气体。设在左室中,组分 A 的浓度高于右室,而组分 B 的浓度低于右室。当隔板抽出后,由于气体分子的无规则热运动,左室中的 A、B 分子会窜入右室,同时,右室中的 A、B 分子也会窜入左室。左、右两室交换的分子数虽相等,但因左室 A 的浓度高于右室,故在同一时间内 A 分子进入右室较多而返回左室较少。同理, B 分子进入左室较多而返回右室较少,其净结果必然是物质 A 自左向右传递,而物质 B 自右向左传递,即两种物质各自沿其浓度降低的方向传递。

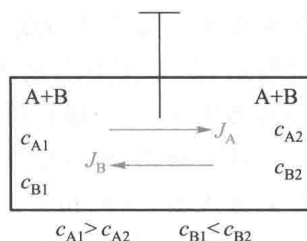


图 7-2 分子扩散现象

上述扩散过程将一直进行到整个容器中 A、B 两种物质的浓度完全均匀为止,此时,系统处于扩散的动态平衡中,在任一截面,物质 A、B 的净的扩散通量为零,即

$$J = J_A + J_B = 0 \quad (7-18)$$

式中 J ——混合物总的扩散通量, $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;

J_A ——组分 A 的扩散通量, $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;

J_B ——组分 B 的扩散通量, $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

2. 费克(Fick)定律

实验表明,在二元混合物的分子扩散中,某组分的扩散通量与其浓度梯度成正比,该关系称为费克定律,其数学表达式为

$$J_A = -D_{AB} \frac{dc_A}{dz} \quad (7-19)$$

及

$$J_B = -D_{BA} \frac{dc_B}{dz} \quad (7-20)$$

式中 $\frac{dc_A}{dz}$ 、 $\frac{dc_B}{dz}$ ——组分 A、B 在扩散方向的浓度梯度, $(\text{kmol} \cdot \text{m}^{-3})/\text{m}$;

D_{AB} ——组分 A 在组分 B 中的扩散系数, m^2/s ;

D_{BA} ——组分 B 在组分 A 中的扩散系数, m^2/s 。

对于两组分扩散系统,在恒温下,总物质的量浓度为常数,即

$$c_{\text{总}} = c_A + c_B = \text{常数} \quad (7-21)$$

对式(7-21)微分,可得

$$\frac{dc_A}{dz} = -\frac{dc_B}{dz}$$



动画 31
分子扩散现象