



全国高等院校化工类专业规划教材
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

化工原理

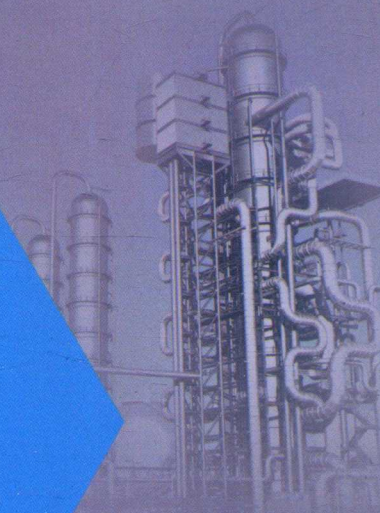
(下册) 第三版

何潮洪 伍 钦 魏凤玉 姚克俭 / 主编

非外借



科学出版社



全国高等院校化工类专业规划教材
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

化 工 原 理

(下册) 第三版

何潮洪 伍 钦 魏凤玉 姚克俭 主编

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书由浙江大学、西安交通大学等 8 所院校的有关教师共同编写,作为浙江大学等院校的专业基础课教材。本书是在《化工原理》(上、下册)第二版(何潮洪等,科学出版社,2007 年)使用多年的教学实践基础上修订再版的。本书分上、下两册出版,上册包括绪论、流体力学基础、流体输送机械、机械分离与固体流态化、搅拌、热量传递基础、传热过程计算与换热器、蒸发 8 章;下册包括质量传递基础、气体吸收、蒸馏、气-液传质设备、萃取、干燥、吸附与膜分离 7 章。本书重视基本概念,阐述力求严谨,且选配了一些典型的工程案例,以强化相关的实际应用与工程观念的培养。在内容上重点论述化学工程中单元操作的基本原理,并简明扼要地介绍相关的传递过程基础。

本书可作为高等院校化工类相关专业化工原理课程的教材,也可供化工部门从事研究、设计与生产的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理.下册/何潮洪等主编. —3 版. —北京:科学出版社,2017
全国高等院校化工类专业规划教材 普通高等教育“十一五”国家
级规划教材

ISBN 978-7-03-053703-4

I. ①化… II. ①何… 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 137617 号

责任编辑:陈雅娴 丁里 / 责任校对:张小霞

责任印制:赵博 / 封面设计:黄华斌

特邀编辑:俞菁

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

安泰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001 年 9 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2007 年 8 月第 二 版 印张:18

2017 年 8 月第 三 版 字数:461 000

2017 年 8 月第十八次印刷

定价:49.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《全国高等院校化工类专业规划教材》 编写委员会

顾问 金涌 戴千策

主编 王静康

副主编 冯亚青 于建国 李伯耿 曲景平

陈建峰 梁斌 山红红 胡华强

编委 (按姓名汉语拼音排序)

鲍晓军 陈砾 陈建峰 陈卫航 崔鹏

冯亚青 管国锋 何潮洪 胡华强 黄玉东

计伟荣 纪红兵 乐清华 李伯耿 李文秀

李小年 梁斌 刘永忠 刘有智 骆广生

马连湘 马晓迅 曲景平 山红红 孙克宁

汤吉彦 王静康 王延吉 谢在库 于建国

张凤宝 钟宏 钟秦 周小华 朱家骅

《化工原理》(下册) 第三版 编写委员会

主编 何潮洪 伍钦 魏凤玉 姚克俭

副主编 黄国林 王成习 诸爱士 刘永忠

窦梅 冯霄

编委 (按姓名汉语拼音排序)

戴荧 邓慧宇 窦梅 冯霄 何潮洪

黄国林 刘永忠 沈绍传 王成习 魏凤玉

伍钦 姚克俭 诸爱士



总 序

近十几年是国内外工程教育研究与实践的一个快速发展期，尤其是国内工程教育改革，从教育部立项重大专项对工程教育进行专门研究与探索，到开展工程教育认证，再到 2016 年 6 月我国成为《华盛顿协议》正式成员，我国的工程教育正向国际化、多元化、产学研一体化推进。在工程教育改革的浪潮中，我国的化工高等教育取得了一系列显著的成果，从各级教学成果奖中化工类专业的获奖项目占比可见一斑。尽管如此，在当前国家推动创新驱动发展等一系列重大战略背景下，工程学科及相应行业对人才培养又提出更高要求，新一轮的“新工科”研究与实践活动已经启动，在此深化工程教育改革的良好契机下，每位化工人都应积极思考，我们的高等化工工程教育如何顺势推进专业改革，进一步提升人才培养质量。

专业教育改革成果很重要的一部分是要落实到课程教学中，而教材是课程教学的重要载体，因此，建设适应新形势的优秀教材也是教学改革的重要组成部分。为此，科学出版社联合教育部高等学校化工类专业教学指导委员会以及国内部分院校，组建了《全国高等院校化工类专业规划教材》编写委员会(以下简称“编委会”)，共同研讨新形势下专业教材建设改革。编委会成员均参与了所在院校近年来化工类专业的教学改革，对改革动向及发展趋势有很好的把握，同时经过多次编委会会议讨论，大家集各院校改革成果之所长，对建设突出工程案例特色的系列教材达成了共识。在教材中引入工程案例，目的是阐述学科的方法论，训练工程思维，搭建连接理论与实践的桥梁，这与工程教育改革要培养工程师的思想是一致的。

工程素养的培养是一项系统工程，需要学科内外基础知识和专业知识的系统搭建。为此，编委会对国内外高等学校化工类专业的教学体系进行了细致研究，确定了系列教材建设计划，统筹考虑化工类专业基础课程和核心专业课程的覆盖度。对专业基础课教材的确定，基本参照国内多数院校的课程设置，符合当前的教学实际，同时对各教材之间内容衔接的科学性、合理性和可行性进行了整体设计。对核心专业课教材的确定，在立足当前各院校教学实际的基础上，充分考虑了学科发展和国家战略及产业发展对专业人才培养的新需求，以发挥教材内容更新对新时期人才培养质量提升的支撑作用。

将工程案例引入课程和教材，是本系列教材的创新探索。这也是一项系统工程，因为实际工程复杂多变，而教学需要从复杂问题中抽离出其规律及本质，做到举一反三。如何让改编的案例既体现工程复杂性和系统性，又符合认知和教学规律，需要编写者解放思想、改变观念，既要突破已有教材设计思路和模式的束缚，又能谨慎下笔。对此，系列教材的编写者进行了有益的尝试。在不同分册中，读者将看到不同的案例编写模式。学科不断发展，工程案例也不断推陈出新。本系列教材在给任课教师提供课程教学素材的同时，更希望能给任课教师以启发，希望任课教师在组织课程教学过程中，积极尝试新的教学模式，不断积累案例教学经验，把提高化工类专业学生工程素养作为一项长期的使命。

教学改革需要一代代教师坚持不懈地努力,需要不断探索、总结和反思,希望本系列教材能够给各院校教师以借鉴和启迪,切实推动化工高等教育质量不断迈上新台阶。在针对化工类专业构建一套体系、内容和形式较为新颖的教材目标指引下,我们组建了一支强大的编委会队伍,为推进这项工作,大家群策群力,积极分享教育教学改革成功经验和前瞻性思考,在此我代表编委会对各位委员及参与各分册编写的所有教师致以衷心的感谢。同时,也希望以本系列教材建设为契机,以编委会为平台,加强化工类高等学校本科人才培养、师资培训、课程建设、教材及教学资源建设等交流与合作,携手共创化工的美好明天。

王静康

中国工程院院士

2017年7月

第三版前言

《化工原理》(上、下册)第二版在 2007 年出版后经过十年的使用,广大读者在给予肯定的同时,也提出了一些意见和建议,主要是部分例题偏理想化,与实际工程问题有一定的距离,希望再版时能有合适的工程案例,以更有利于学生工程观念的培养。为此,结合科学出版社“全国高等院校化工类专业规划教材”的建设,编者对第二版进行了修订。

为体现案例特色,第三版中在每章的开头以“引例”的方式简介了该章相关的典型工程案例,并在后续内容中编写了与该案例相关的重要例题,进而对其进行了求解、讨论,以突出理论知识和工程实际的联系,更好地培养学生学以致用能力。此外,第三版中还新增了一章“搅拌”(第 4 章)。同时,为了更好地适应不同院校的教学要求,仍将部分难度较大、要求较高的内容作为选学内容(用小号字体编排)。

本次修订,上册由何潮洪、刘永忠、窦梅、冯霄担任主编,姚克俭、郑育英、刘桂莲、伍钦、魏凤玉、南碎飞担任副主编;下册由何潮洪、伍钦、魏凤玉、姚克俭担任主编,黄国林、王成习、诸爱士、刘永忠、窦梅、冯霄担任副主编,并由浙江大学、西安交通大学、华南理工大学、合肥工业大学、浙江工业大学、浙江科技学院、东华理工大学和广东工业大学 8 所院校的有关教师共同努力完成。具体修订分工如下:绪论(浙江大学何潮洪),第 1 章(浙江大学窦梅、南碎飞),第 2 章(浙江大学窦梅、南碎飞),第 3 章(广东工业大学郑育英、方岩雄),第 4 章(浙江工业大学负军贤、姚克俭),第 5 章(西安交通大学刘永忠),第 6 章(西安交通大学闫孝红、刘永忠),第 7 章(西安交通大学刘桂莲),附录(浙江大学窦梅、南碎飞),第 8 章(华南理工大学伍钦),第 9 章(合肥工业大学魏凤玉),第 10 章(浙江大学王成习),第 11 章(浙江工业大学姚克俭、沈绍传),第 12 章(浙江科技学院诸爱士),第 13 章(华南理工大学伍钦),第 14 章(东华理工大学戴荧、邓慧宇、黄国林)。

编者虽尽了很大的努力,书中仍难免有不妥之处,恳请广大读者批评指正。对过去指出教材不足的读者,在此表示深切的谢意!

编者

2017 年 4 月



第二版前言

本书第一版于 2001 年出版后, 经过几年的使用, 广大读者给予了肯定的评价, 同时也提出了不少的意见和建议, 主要是部分章节数学推导过多、难度偏大、内容不够精练, 并存在一些印刷错误等。加之近几年的教学情况也有所变化, 因此编者对第一版教材进行了修订。修订版被列入“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”建设。

此次修订对第一版发现的错误作了更正, 不够确切或严密的提法作了修改, 对某些内容尤其是第一、三、五、十三章作了较大的调整。为了更好地适应不同院校的教学要求, 将部分难度较大、要求较高的内容调整为选学内容(用小号字体进行编排), 同时将原教材分成上、下两册出版。修订时, 上册由何潮洪、冯霄主编, 下册由冯霄、何潮洪主编, 并由浙江大学、西安交通大学、浙江工业大学、西南石油大学、浙江科技学院和东华理工大学等 6 所院校的有关教师共同努力完成。具体修订分工如下: 绪论(浙江大学何潮洪), 第 1 章(浙江大学窦梅、南碎飞), 第 2 章(西安交通大学李云), 第 3 章(浙江大学窦梅、南碎飞), 第 4 章(西安交通大学刘永忠), 第 5 章(西安交通大学冯霄), 第 6 章(西安交通大学王黎), 附录(浙江大学窦梅、南碎飞), 第 7 章(浙江大学何潮洪), 第 8 章(西南石油大学王兵), 第 9 章(浙江大学何潮洪、钱栋英), 第 10 章(填料塔: 西南石油大学诸林; 板式塔、塔设备的比较和选型: 浙江工业大学姚克俭、俞晓梅), 第 11 章(浙江科技学院朱以勤、诸爱士), 第 12 章(浙江大学窦梅、南碎飞), 第 13 章(吸附: 东华理工大学刘峙嵘、黄国林、邹丽霞; 膜分离: 浙江大学陈欢林)。

由于编者学识有限, 书中难免有错误不妥之处, 恳请广大读者批评指正。并在此对指出第一版教材不足的读者表示深切的谢意!

编者

2007 年 5 月

第一版前言

本书是根据原化学工业部人事教育司面向 21 世纪化工原理教材的要求而编写的。

本书重点论述化学工程中单元操作的基本原理，并简明扼要地介绍了相关的动量、热量、质量传递过程基础。之所以这样安排，是考虑到单元操作和传递过程之间的紧密依赖关系，希望以传递机理来深化单元操作，也能使传递理论更好地联系实际。编写过程中，力求阐述清楚基本概念、基本理论和方法，同时注意引导学生从工程角度考虑问题。

本书由浙江大学何潮洪、西安交通大学冯霄主编，由浙江大学、西安交通大学、浙江工业大学、西南石油大学、杭州应用工程技术学院和华东地质学院等 6 所院校的有关教师共同编写而成。执笔分工如下：绪论(浙江大学何潮洪)，第一章(浙江大学南碎飞、窦梅)，第二章(西安交通大学李云)，第三章(浙江大学南碎飞、窦梅)，第四、五章(西安交通大学刘永忠)，第六章(西安交通大学王黎)，第七章(浙江大学何潮洪、吕秀阳)，第八章(西南石油学院王兵)，第九章(浙江大学钱栋英、施耀)，第十章(填料塔：西南石油学院诸林；板式塔、塔设备的比较和选型：浙江工业大学姚克俭、俞晓梅)，第十一章(浙江科技学院朱以勤、诸爱士)，第十二章(浙江大学南碎飞、窦梅；浙江工业大学田军、姚克俭)，第十三章(吸附：华东地质学院邹丽霞、黄国林；膜分离：浙江大学陈欢林)，附录(浙江大学南碎飞、窦梅)。

本书第一~六章及附录由冯霄、何潮洪统稿，第七~十三章由何潮洪、冯霄统稿。

由于编者学识有限，书中难免有错误和不妥之处，恳请读者批评指正，尽量指出其不足，以助日后之修订。

编者

2001 年 5 月

目 录

总序	
第三版前言	
第二版前言	
第一版前言	
第 8 章 质量传递基础1	
8.1 相组成的表示法.....2	
8.2 扩散理论.....4	
8.2.1 菲克定律.....4	
8.2.2 一维稳定分子扩散.....6	
8.3 扩散系数.....10	
8.3.1 气体的扩散系数.....10	
8.3.2 液体的扩散系数.....13	
8.4 对流传质及传质理论简介.....14	
8.4.1 膜模型.....15	
8.4.2 溶质渗透模型和表面更新模型.....16	
8.5 传质设备简介.....18	
8.5.1 填料塔.....19	
8.5.2 板式塔.....20	
本章主要符号说明.....21	
参考文献.....22	
习题.....22	
第 9 章 气体吸收23	
9.1 概述.....24	
9.1.1 气体吸收在工业生产中的应用.....24	
9.1.2 吸收的流程和吸收剂.....25	
9.1.3 吸收的分类.....25	
9.2 吸收相平衡.....26	
9.2.1 气-液相平衡关系.....26	
9.2.2 亨利定律.....27	
9.3 传质速率方程.....28	
9.3.1 双膜模型.....28	
9.3.2 相际传质速率方程.....29	
9.4 吸收(或解吸)塔计算.....33	
9.4.1 物料衡算和操作线方程.....33	
9.4.2 吸收剂用量的确定.....35	
9.4.3 低浓度气体吸收时的填料层高度.....36	
9.4.4 填料塔的设计型计算和操作型分析.....42	
9.4.5 高浓度气体吸收时填料层高度的计算.....47	
9.4.6 塔板数.....50	
9.4.7 解吸.....53	
9.5 其他类型吸收.....55	
9.5.1 多组分吸收.....55	
9.5.2 化学吸收.....56	
9.5.3 非等温吸收.....56	
本章主要符号说明.....57	
参考文献.....59	
习题.....59	
第 10 章 蒸馏63	
10.1 概述.....64	
10.2 蒸馏过程的热力学基础.....65	
10.2.1 理想物系的气-液平衡.....65	
10.2.2 蒸气压和挥发度.....66	
10.2.3 非理想物系的气-液平衡及恒沸现象.....68	
10.3 蒸馏方式.....70	

10.3.1	简单蒸馏	70	11.2.7	筛板塔上流体力学计算	153
10.3.2	平衡蒸馏	71	11.2.8	浮阀塔的设计	156
10.3.3	精馏	72	11.2.9	新型塔设备简介	163
10.4	二元连续精馏的分析和计算	74	11.3	塔设备的比较和选用	165
10.4.1	精馏过程的简化	74	11.3.1	板式塔的比较	165
10.4.2	全塔物料衡算及操作线方程	75	11.3.2	填料塔和板式塔的对比与 选用	165
10.4.3	进料状态及进料线方程	78	本章主要符号说明	166	
10.4.4	精馏塔的设计型计算	81	参考文献	168	
10.4.5	精馏塔的热量衡算及节能	92	习题	168	
10.4.6	二元连续精馏的其他流程	94	第 12 章 萃取	169	
10.5	精馏过程的操作及控制	99	12.1	萃取概述	170
10.5.1	精馏过程的操作型分析	99	12.2	液-液相平衡	172
10.5.2	精馏塔的灵敏板	102	12.3	选择性系数及萃取剂的选择	175
10.5.3	精馏过程的控制	103	12.4	液-液萃取计算	176
10.6	多组分精馏	104	12.4.1	单级萃取	176
10.6.1	多组分精馏的特点	104	12.4.2	多级错流萃取	179
10.6.2	多组合物系的气-液平衡	106	12.4.3	多级逆流萃取	183
10.6.3	多组分精馏的简捷计算	106	12.4.4	连续接触逆流萃取	187
10.6.4	多组分精馏的严格计算模型	112	12.5	液-液萃取设备	190
10.7	其他蒸馏方式	113	12.5.1	混合-澄清器	190
10.7.1	水蒸气蒸馏	113	12.5.2	塔式萃取设备	191
10.7.2	间歇精馏	114	12.5.3	离心式萃取设备	192
10.7.3	恒沸精馏和萃取精馏	118	12.6	其他萃取简介	193
10.7.4	反应精馏	121	本章主要符号说明	195	
本章主要符号说明		122	参考文献	195	
参考文献		125	习题	196	
习题		125	第 13 章 干燥	198	
第 11 章 气-液传质设备		129	13.1	概述	199
11.1	填料塔	131	13.2	湿空气的性质及温-湿图	200
11.1.1	填料塔与填料	131	13.2.1	湿空气的性质	200
11.1.2	填料塔的流体力学性能与传 质性能	136	13.2.2	湿空气的温-湿图及应用	208
11.1.3	填料塔的附属结构	141	13.3	湿物料的性质	211
11.2	板式塔	144	13.3.1	湿物料含水量的表示方法	212
11.2.1	板式塔的塔型简介	144	13.3.2	湿物料的分类	212
11.2.2	板式塔的操作原理	146	13.3.3	物料与水分的结合状态	213
11.2.3	板式塔塔径的估算	146	13.4	干燥动力学及干燥时间	214
11.2.4	塔板溢流型式	148	13.4.1	干燥动力学实验	215
11.2.5	塔板的共同结构	149	13.4.2	恒定干燥条件下的干燥时间 计算	217
11.2.6	筛板塔的结构设计	152			

13.5 连续干燥过程的物料衡算和 热量衡算.....	221
13.5.1 物料衡算.....	221
13.5.2 热量衡算.....	222
13.5.3 空气在干燥过程中的状态 变化.....	225
13.5.4 干燥系统的热效率和节能.....	228
13.6 干燥介质状态变化时的干燥 时间计算.....	230
13.7 干燥器简介.....	233
13.7.1 干燥器的分类和选择.....	233
13.7.2 常用的干燥器.....	234
本章主要符号说明.....	241
参考文献.....	242
习题.....	242
第 14 章 吸附与膜分离.....	246
14.1 吸附.....	246
14.1.1 概述.....	247
14.1.2 吸附平衡.....	247
14.1.3 吸附设备及计算.....	249
14.2 膜分离.....	257
14.2.1 微滤与超滤.....	259
14.2.2 反渗透与纳滤.....	260
14.2.3 渗透气化.....	263
14.2.4 气体分离.....	264
14.2.5 膜组件特性及膜污染防治.....	265
本章主要符号说明.....	267
参考文献.....	268
习题.....	268
索引.....	270

第 8 章 质量传递基础

引 例

盐酸是氯碱化工的主要产品之一，电解产物 Cl_2 与 H_2 反应生成 HCl 气体，再用水吸收即可得到 32% 的盐酸产品。气体中的可溶组分溶解于溶剂的过程称为吸收，详见第 9 章。

盐酸工段是氯气平衡的工段之一，图 8-1 是产量为 12 万 t/a 电解烧碱工艺中产 3.5 万 t/a 氯气的配套工艺流程，图 8-2 为盐酸的生产装置。

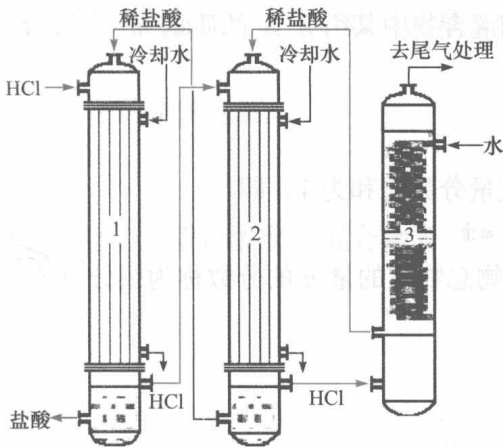


图 8-1 盐酸生产工艺

1. 第一级降膜式吸收塔；
2. 第二级降膜式吸收塔；
3. 填料塔

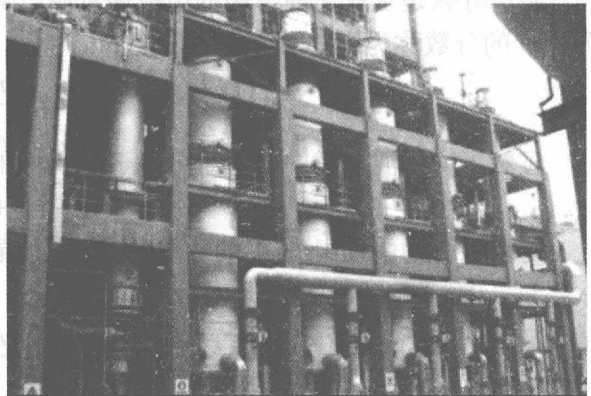


图 8-2 盐酸的生产装置

氯气和氢气在合成炉中反应生成的氯化氢气体，经合成炉上部用冷却水冷却到 40°C 后进入三级串联吸收塔吸收。水吸收 HCl 气体为放热过程，且吸收产物——盐酸有腐蚀性。所以，一、二级吸收塔均采用降膜式石墨吸收塔。降膜式吸收塔与降膜式蒸发器类似，蒸发器是使溶液中挥发性物质在沸点下沿下降的液膜不断汽化，而吸收塔则是在操作温度下使气相中可溶物质沿下降的液膜不断被吸收进入液膜。对最后一级吸收，因为 HCl 气体的浓度很低，故第三级吸收单元采用填料塔(详见 8.5 节)。

为了能及时移走气体 HCl 吸收过程中产生的溶解热，一、二级吸收须用冷却水间壁冷却，使吸收操作温度保持在 40°C 以下。通过前两级吸收后 HCl 气体浓度已经很低，吸收过程溶解热很小，所以第三级吸收采用填料塔用水直接吸收，无需施以换热装置。

进入第一级吸收塔的吸收剂是来自第二级吸收塔的稀盐酸，稀盐酸浓度为 12.8%(质量分数)，温度为 40°C ，进入降膜式吸收塔后沿管壁垂直下流，在管壁上形成液膜，与从合成炉冷却器出来的 HCl 气体并流向下并完成吸收操作，吸收后出塔盐酸浓度为 32%；未被吸收的 HCl

气体由第一级吸收塔塔底引出并从第二级降膜式吸收塔的顶部进入,与来自填料塔浓度为 2.2% 的稀盐酸并流吸收;经二级降膜吸收塔吸收后剩余 HCl 气体由塔底引出,并从填料塔底部进入后逆流而上与自上而下的液体在填料表面上进行吸收,进入填料塔的液相是纯水。吸收后的尾气送去尾气处理单元。

用水吸收 HCl 气体生成盐酸的过程是在浓度梯度作用下使 HCl 气体扩散到两相界面,溶解后再由界面扩散到液体主体的质量传递过程。本章主要讨论物质的扩散过程和质量传递基础,传质过程的单元操作及其计算在以后各章中详细讨论。

8.1 相组成的表示法

在传质过程中涉及的物系较复杂,为了分析与计算的方便,物质的组成需采用不同的表示方法,常用的有下列几种。

1. 质量分数和摩尔分数

质量分数是工业上最常用的组成表示法。均相混合物中某组分 A 的质量 m_A 占混合物总质量 m 的分数称为组分 A 的质量分数 w_A :

$$w_A = \frac{m_A}{m}$$

显然,均相混合物中所有组分(A、B、…)的质量分数之和为 1,即

$$w_A + w_B + \dots = 1$$

均相混合物中某组分 A 的物质的量 n_A 占混合物总物质的量 n 的分数称为组分 A 的摩尔分数 x_A :

$$x_A = \frac{n_A}{n}$$

同理,均相混合物中所有组分(A、B、…)的摩尔分数之和也为 1,即

$$x_A + x_B + \dots = 1$$

习惯上,液相中的摩尔分数用 x 表示,而气相中的摩尔分数则用 y 表示。

质量分数和摩尔分数可相互换算。若以 1kg 混合物为基准,如组分 A、B、…的质量分别为 w_A 、 w_B 、…,则相应的物质的量分别为 w_A/M_A 、 w_B/M_B 、…,从而

$$x_A = \frac{w_A / M_A}{w_A / M_A + w_B / M_B + \dots} \quad (8-1)$$

式中, M_A 、 M_B 、…分别为 A、B、…的相对分子质量。

类似地,若以 1mol 混合物为基准,可得

$$w_A = \frac{x_A M_A}{x_A M_A + x_B M_B + \dots} \quad (8-2)$$

2. 质量比和摩尔比

单元操作(如吸收、解吸和干燥过程)计算中,有时用参照组分的质量比或摩尔比代表组成使得计算更方便。对于双组分物系,若以 B 为参照组分,则

质量比

$$\bar{w} = \frac{m_A}{m_B} = \frac{w_A}{w_B}$$

摩尔比

$$X_A = \frac{n_A}{n_B}$$

若为双组分物系，通常以目标产品表示浓度，并删去下标，故有

$$\bar{w} = \frac{w_A}{w_B} = \frac{w}{1-w} \quad (8-3)$$

$$X = \frac{x}{1-x} \quad (8-4)$$

为计算方便，一般将参照组分取为惰性物质，即在传质过程中量保持不变的物质。

3. 质量浓度和物质的量浓度

浓度的定义是单位体积中的物质量。物质量可用质量或物质的量(单位为 mol 或 kmol)来表示，相应地就有质量浓度或物质的量浓度(摩尔浓度)。记 V 为均相混合物的体积，单位为 m^3 ，则

组分 A 的质量浓度 ρ_A

$$\rho_A = \frac{m_A}{V} \quad \text{kg/m}^3$$

混合物的总质量浓度 ρ (混合物的密度)

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{kg/m}^3$$

显然

$$\rho_A = w_A \rho \quad (8-5)$$

同理，组分 A 的物质的量浓度 c_A

$$c_A = \frac{n_A}{V} \quad \text{kmol/m}^3$$

混合物的总物质的量浓度(总摩尔浓度) C

$$C = \frac{n}{V} \quad \text{kmol/m}^3$$

且

$$c_A = Cx_A \quad (8-6)$$

质量浓度与物质的量浓度的关系为

$$c_A = \frac{\rho_A}{M_A} \quad (8-7)$$

如果混合物为理想气体，会给计算带来极大方便。设混合物的总压为 P ，组分 A 的分压为 p_A 。根据理想气体状态方程，组分 A 的物质的量浓度为

$$c_A = \frac{p_A}{RT} \quad (8-8)$$

式中， p_A 为分压，kPa； T 为热力学温度，K； R 为摩尔气体常量，8.314kJ/(kmol·K)。

气体混合物的总物质的量浓度为

$$C = \frac{P}{RT} \quad (8-8a)$$

因此, 组分 A 的摩尔分数 y_A 为

$$y_A = \frac{n_A}{n} = \frac{p_A}{P} \quad (8-9)$$

气体组分 A 的质量浓度为

$$\rho_A = \frac{m_A}{V} = \frac{M_A n_A}{V} = \frac{M_A p_A}{RT} \quad (8-10)$$

例 8-1 实验测得在总压 $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 及温度 20°C 下, 1 kg 水中含氨 0.01 kg , 此时液面上氨的平衡分压为 800 Pa 。求氨在气、液相中的摩尔分数和物质的量浓度。

解 以下标 A、B 分别表示组分氨及水。

氨在气相中的摩尔分数 y_A 为

$$y_A = \frac{800}{1.013 \times 10^5} = 0.0079$$

氨在气相中的物质的量浓度 c_{AG} 为

$$c_{AG} = \frac{p_A}{RT} = \frac{800}{8314 \times 293} = 0.00328 \text{ (kmol/m}^3\text{)}$$

为求氨在液相中的组成, 以 100 kg 水为计算基准。摩尔分数 x_A 为

$$x_A = \frac{m_A / M_A}{m_A / M_A + m_B / M_B} = \frac{1/17}{1/17 + 100/18} = 0.01048$$

氨在液相中的物质的量浓度 c_{AL} 则计算如下: 由于氨水很稀, 可设其密度与水相同, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, 其体积为 $(100+1)/1000 = 0.101 \text{ (m}^3\text{)}$, 而氨的物质的量为 $1/17 \text{ kmol}$, 故

$$c_{AL} = \frac{1/17}{0.101} = 0.582 \text{ (kmol/m}^3\text{)}$$

8.2 扩散理论

流体内部摩擦、导热及扩散现象可以用分子运动论来解释, 并找出定量关系。例如, 对于热传导过程, 将热流量与温度梯度关联起来, 就是傅里叶定律, 而牛顿黏性定律则是将剪切力与速度梯度相关联。大多数扩散源于扩散组分在浓度场中存在浓度差。例如, 发生煤气泄漏时, 可以在一定距离内闻到气味, 这是泄漏源与该空间位置之间存在煤气浓度差, 导致煤气扩散传递。传质过程的操作就是利用这种特性。例如, 在吸收塔中, 用水来吸收气体混合物中的 HCl 生产盐酸, 就是因为气体混合物中的 HCl 浓度高于气相与液相交界面上 HCl 的浓度, 在浓度差的作用下气相中的 HCl 扩散到相界面, 再由相界面扩散到液体。通常, 传质过程是分子扩散和对流扩散共同贡献的结果。

8.2.1 菲克定律

物质分子的传递过程也可以用类似于热传导和动量传递的方式将质量通量与浓度梯度进行关联。对于由 A 和 B 组成的双组分混合物, 在浓度差的推动下, 组分 A 在 z 方向上单位时间内垂直穿过单位面积的物质的量正比于它的浓度梯度, 称为扩散通量, 表示为

$$J_A = -D_{AB} \frac{dc_A}{dz} \quad (8-11)$$

式中, J_A 为扩散通量, $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; D_{AB} 为组分 A 在组分 B 中的扩散系数, m^2/s ; c_A 为物质 A 的物质的量浓度, mol/m^3 ; z 为扩散距离, m 。

式(8-11)称为菲克定律, 适用于物质 A 的一维分子扩散。B 组分的分子扩散通量 J_B 也可以写成与式(8-11)相同形式的表达式

$$J_B = -D_{BA} \frac{dc_B}{dz} \quad (8-12)$$

式中, D_{BA} 为组分 B 在组分 A 中的扩散系数, m^2/s 。

尽管多数情况下扩散是由浓度梯度所致, 然而, 压强梯度和温度梯度同样能引起扩散, 由温度差引起的扩散称为热扩散; 此外, 对混合体系施以外力(如离心力)也能引起扩散, 施以外力产生的扩散称为强制扩散。

就传递过程而言, 最关心的是扩散通量或者传质通量的大小, 传质通量除了与浓度梯度有关外, 还与分子运动速度和选择的参考面有关。

1. 速度

单独分子的运动速度和分子集合的总体速度不同, 单独分子的速度是分子热运动的随机速度; 而总体速度指的是所有分子的随机速度在垂直于界面方向上速度分量的集合速度, 表示为 u_d 。对于由 A、B 两种物质组成的混合物, 物质 A 和 B 的分子扩散速度分别为 u_{Ad} 、 u_{Bd} 。在质量传递过程的研究和应用中, 只有与所选定参考面的相对速度才有意义, 而以地球为参考的绝对速度是没有意义的。

2. 传质通量

当物质分子穿过参考面(通常是相界面)传递物质时, 参考面可以是移动的也可以是静止的。设参考面以速度 u_m 移动, 则用速度表示的传质通量(传质速率)如下:

当参考面静止时, $u_m=0$, 此时无宏观运动对传质通量的影响, 所以垂直通过参考面的传质通量 N_A 等于分子扩散速度与物质的量浓度的乘积

$$N_A = c_A u_{Ad} \quad (8-13)$$

式中, N_A 为传质通量, $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

当参考面以速度 u_m 移动时, 界面的宏观运动与分子扩散同时影响传质通量, 所以

$$N_A = c_A u_{Ad} + c_A u_m = c_A (u_{Ad} + u_m) \quad (8-14)$$

式(8-14)的第一项为分子扩散对传质通量的贡献, 第二项为参考面运动对传质通量的贡献。把表示分子扩散的菲克定律代入式(8-14)得

$$N_A = c_A u_m - D_{AB} \frac{dc_A}{dz} \quad (8-15)$$

计算时, 使用摩尔分数 y_A 表示浓度更为方便。若体系的总浓度和总传质通量分别用 C 和 N 表示, 则它们之间的关系如下

$$y_A = \frac{c_A}{C}$$