

化学工程手册

4

《化学工程手册》编辑委员会

化学工业出版社

内 容 提 要

《化学工程手册》共26篇，分6卷合订出版。

本卷包括增湿与减湿、干燥、吸附及离子交换、薄膜过程。主要介绍有关气体增湿减湿的理论、计算方法、设备结构；有关干燥的基础理论和数据、干燥器的构造以及计算方法；还介绍化工生产中吸附及离子交换的工艺流程和工艺设备，从应用的角度出发，叙述了过程的应用范围、常用分离剂的性质、基本机理和设备的操作条件；介绍了各种主要膜分离过程的基本理论、分离机理、传递模型、设备设计计算和应用等。

本书供化工、石油及有关工业部门的设计、研究人员，工厂技术人员及有关院校师生参考。

化学工程手册

4

《化学工程手册》编辑委员会

*

化学工业出版社出版发行

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

化学工业出版社印刷厂装订

新华书店北京发行所经销

*

开本787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张59 $\frac{1}{4}$ 插页1 字数1,481千字

1989年10月第1版 1989年10月北京第1次印刷

印数1—8,000

ISBN 7-5025-0595-4/TQ·352

定 价27.85元

《化学工程手册》编辑委员会

主任	冯伯华			
副主任	陈自新	李步年	苏元复	
	汪家鼎	蔡剑秋		
委员	(以姓氏笔划为序)			
	卢焕章	区灿棋	邓颂九	朱亚杰
	朱自强	余国琮	时 钧	沈 复
	吴锡军	林纪方	杨友麒	张洪沅
	张剑秋	郑 焯	郭慕孙	傅举孚
	萧成基			

《化学工程手册》编辑人员

郭长生

谢丰毅

施承薇

张红兵

陈逢阳

苗延秀

苗润生

陈志良

陈丽

郭乃铎

刘小蕪

李洪勋

序

化学工程是以物理、化学、数学的原理为基础，研究化学工业和其他化学类型工业生产中物质的转化、改变物质的组成、性质和状态的一门工程学科。它出现于19世纪下半叶，至本世纪二十年代，从理论上分析和归纳了化学类型（化工、冶金、轻工、医药、核能……）工业生产的物理和化学变化过程，把复杂的工业生产过程归纳成为数不多的若干个单元操作，从而奠定了其科学基础。在以后的发展历程中，进而相继出现了化工热力学、化学反应工程、传递过程、化工系统工程、化工过程动态学和过程控制等新的分支，使化学工程这门工程学科具备更完整的系统性、统一性，成为化学类型工业生产发展的理论基础，是本世纪化学类型工业持续进展的重要因素。

工业的发展，只有建立在技术进步的基础上，才能有速度、质量和水平。四十年代初，流态化技术应用于石油催化裂化过程，促使石油工业的面貌发生了划时代的变化。用气体扩散法提取铀²³⁵，从核燃料中提取钚，用精密蒸馏方法从普通水中提取重水，用发酵罐深层培养法大规模生产青霉素；建立在现代化工技术基础上的石油化学工业的兴起等等，——这些使人类生活面貌发生了重大变化。六十年代以来，化工系统工程的形成，系统优化数学模型的建立和电子计算机的应用，为化工装置实现大型化和高度自动化，最合理地利用原料和能源创造了条件，使化学工业的科研、设计、设备制造、生产发展踏上了一个技术上的新台阶。化学工程在发展过程中，既不断丰富本学科的内容，又开发了相关的交叉学科。近年来，生物化学工程分支的发展，为重要的高科技部门生物工程的兴起创造了必要的条件。可见，化学工程学科对于化学类型工业和应用化工技术的部门的技术进步与发展，有着至为重要的作用。

由于化学工程学科对于化工类型生产、科研、设计和教育的普遍重要性，在案头备有一部这一领域得心应手的工具书，是广大化工技术人员众望所趋。1901年，世界上第一部《化学工程手册》在英国问世，引起了人们普遍关注。1934年，美国出版了《化学工程师手册》，此后屡次修订，至1984年已出版第六版，这是一部化学工程学科最有代表性的手册。我国从事化学工程的科技、教育专家们，在五十年代，就曾共商组织编纂我国化学工程手册大计，但由于种种原因，迁延至七十年代末中国化工学会重新恢复活动后方始着手。值得庆幸的是，荟集我国化学工程界专家共同编纂的这部重要巨著终于问世了。手册共分26篇，先分篇陆续印行，为方便读者使用，现合订成六卷出版。这部手册总结了我国化学工程学科在科研、设计和生产领域的成果，向读者提供理论知识、实用方法和数据，也介绍了国外先进技术和发展趋势。希望这部手册对广大化学工程界科技人员的工作和学习有所裨益，能成为读者的良师益友。我相信，该书在配合当前化学工业尽快克服工艺和工程放大设计方面的薄弱环节，尽快消化引进的先进技术，缩短科研成果转化为生产力的时间等方面将会起积极作用，促进化工的发展。

我作为这部手册编纂工作的主要支持者和组织者，谨向《手册》编委会的编委、承担编

写、审校任务的专家、化学工程设计技术中心站、出版社工作人员以及对《手册》编审、出版工作做出贡献的所有同志，致以衷心的感谢，并欢迎广大读者对《手册》的内容和编排提出意见和建议，供将来再版时参考。

冯仲

1989年5月

... (Faint, mostly illegible text, likely bleed-through from the reverse side of the page) ...

前 言

化学工程是研究化工类型生产过程共性规律的一门技术科学，是化工类型生产重要的技术和理论基础。化学工程学科的内容主要包括：传递过程原理及化工单元操作；化学反应工程；化工热力学及化工基础数据；化工系统工程学等。研究和掌握化学工程，对于提高化工生产效率和经济效益，加速新技术的开发，提高科研、设计和生产技术水平，有着十分重要的作用。因此，对化学工业来说，化学工程是涉及提高技术水平的主要环节之一。

建国以来，我国的化学工程技术工作逐步发展，已经初步具有一定的基础，并取得了一定的成果。但是，目前国内还缺少一套较为完整实用的化学工程参考资料。编辑出版一套适合国内需要的，具有一定水平的《化学工程手册》，是化工技术工作者多年来的宿愿。早在五十年代和六十年代，国内的化学工程专家就曾酝酿和筹备组织编写《化学工程手册》，一九七五年化学工程设计技术中心站又曾组织讨论过编写计划。今天，在党中央提出加快实现四个现代化宏伟目标的鼓舞下，在化学工业部和中国化工学会的领导下，于一九七八年正式组成《化学工程手册》编委会，经过化工界许多同志的共同努力，《化学工程手册》终于与广大读者见面了。

希望这部手册的出版，将有助于国内的化工技术人员在工作中掌握和运用化学工程的科学技术原理，更好地处理和解决设计、科研和生产中遇到的化工技术问题。

本手册是一本通用性的工作手册。内容以实用为主，兼顾理论；读者对象为具有一定化工专业基础知识的工程技术人员和教学人员；内容取材注意了结合国内的情况和需要，并反映国内工作已取得的成果；对于国外有关的技术及数据，也尽量予以吸收。

根据当前国内的实际情况，计量单位一律采用“米-公斤(力)-秒”工程制(MKfS制)。但是考虑到我国将逐步过渡到采用国际单位制(SI)，除了在第一篇中列出详细的单位换算表外，并在每篇之末加列简明的MKfS制-SI换算表。

参加本手册编写工作的，有全国各有关的设计、科研和高等院校等共二十多个单位，近二百人。此外，还有其它许多单位和人员提供资料或间接参与手册的有关工作。《化学工程手册》编辑委员会负责指导手册工作的开展，研究和确定编审工作中一些原则问题，并负责书稿的最后审定工作。手册编写的日常组织工作，由化工部化学工程设计技术中心站负责。

本手册系按篇分册陆续出版，今后还将定期修订再版并出版合订本。希望广大读者对本手册提出宝贵意见，以便再版时改进。

《化学工程手册》编辑委员会

1979年7月

编辑说明

- 一、《化学工程手册》共26篇，原按篇分册印行，现分为六卷合订出版。
- 二、《化学工程手册》分篇单行本的编写工作始于1978年，1980年后陆续出版发行，1989年出齐。这次分卷合订本是利用原有纸型进行印刷的，对出版较早的篇章只能进行一定程度的修订，限于增补最必要的新内容，对近期出版的单行本只进行一些涉及技术内容的订正和印刷错误的勘正工作。
- 三、由于本手册着手编纂和出版时间较早，全书应用的是工程单位制，利用原纸型再印不能作全面修改，特在每卷附我国法定单位换算表，供读者查用。本手册修订再版时将采用法定计量单位。
- 四、本手册是中国化工学会、化学工业部化学工程设计技术中心和化学工业出版社共同组织的。参加手册编写和审稿工作的，有全国各有关的设计、科研和高等院校等二十多个单位，近二百位专家。此外还有其它许多单位和人员提供资料和间接参与手册的工作。
- 五、囿于条件，本手册中所采用的名词术语和符号可能有不尽统一之处，内容上也可能有重复、遗漏、甚至错误的地方，印刷、装帧等方面也不尽如人意，欢迎读者提出改进意见，在修订时一一予以考虑，以使本手册更臻完善。

目 录

15. 增湿与减湿

- 15.1 绪论 15-1
 - (1) 循环水的冷却 15-1
 - (2) 气体的降温与除尘 15-1
 - (3) 可凝蒸汽冷凝潜热的回收和利用 15-1
 - (4) 溶剂回收 15-2
 - (5) 空气调湿 15-2
- 15.2 湿气体的性质及湿度图表 15-4
 - 15.2.1 湿气体的性质 15-4
 - (1) 湿度 15-4
 - (2) 相对湿度与饱和度 15-4
 - (3) 湿气体的比容和重度 15-5
 - (4) 湿气体的比热和焓 15-5
 - (5) 露点 15-6
 - (6) 绝热饱和温度 15-10
 - (7) 湿球温度 15-11
 - (8) 湿度的测定 15-16
 - 15.2.2 湿气体的湿度图及其应用 15-16
 - (1) 湿空气的 $t-H$ 图 15-16
 - (2) 高温下湿气体的 $t-H$ 图 15-20
 - (3) 湿空气的焓-湿图 ($I-H$ 图) 15-22
 - (4) 总压对湿气体性质的影响 15-22
 - 参考文献 15-25
- 15.3 增湿与减湿过程的计算基础 15-26
 - 15.3.1 气体与液体间的传热与传质关系 15-26
 - (1) 增湿塔内的传热与传质关系 15-26
 - (2) 减湿塔内的传热与传质关系 15-27
 - 15.3.2 增湿与减湿塔的气液平衡线与操作线 15-28
 - 15.3.3 传热与传质速率方程 15-30
 - 15.3.4 气液相界面状态及气体的温度和湿度 15-31
 - (1) 气液相界面状态 15-31
 - (2) 气体的温度与湿度 15-31
 - (3) 气液相界面状态和气体状态在塔内的分布 15-32
 - (4) 气液相界面状态和气温的图解法 15-33
 - 15.3.5 塔高的计算 15-35
 - 15.3.6 横流式增湿与减湿过程 15-38
 - 15.3.7 增湿与减湿过程的设计 15-43
 - (1) 工艺参数的选择 15-43
 - (2) 塔设备的设计 15-44
 - (3) 辅助设备的设计与选型 15-44
 - 参考文献 15-44
- 15.4 循环水冷却塔的设计 15-45
 - 15.4.1 概述 15-45
 - 15.4.2 塔型和塔结构的选择 15-46
 - 15.4.3 气象参数 15-48
 - 15.4.4 冷却塔的热力计算 15-49
 - (1) 焓差法 15-50
 - (2) 用辛普生公式计算冷却数 15-53
 - (3) 温度差法 15-54
 - (4) 平均压差法 15-54
 - (5) 横流式冷却塔的热力计算 15-56
 - (6) 冷却塔的热力特性 15-61
 - (7) 冷却塔热力与动力的综合计算方法 15-65
 - 15.4.5 冷却塔的通风阻力 15-67
 - (1) 填料层的通风阻力 15-68
 - (2) 冷却塔的局部通风阻力 15-71
 - 15.4.6 补充水量的计算 15-78
 - (1) 蒸发损失的水量 15-78
 - (2) 通风损失的水量 15-79
 - (3) 渗漏损失的水量 15-79
 - (4) 排污损失的水量 15-79

15.4.7 辅助设备的选择	15-80
(1) 通风设备	15-80
(2) 配水系统	15-82
参考文献	15-83
15.5 传热与传质速率数据	15-84
15.5.1 填料塔传热与传质系数的实验	

关联式和实测数据	15-84
15.5.2 喷雾塔传热与传质系数的实验	
关联式和实测数据	15-92
15.5.3 传热与传质系数的测定	15-96
参考文献	15-98
符号表	15-100

16. 干燥

重要物理量符号说明

16.1 概论	16-1
16.1.1 去湿方法和干燥过程	16-1
16.1.2 干燥过程的特点	16-1
16.1.3 干燥操作的目的	16-2
16.1.4 分散悬浮态干燥在化学工业以及 其他工业上的应用	16-2
16.1.5 干燥技术的进展概况	16-4
参考文献	16-8
16.2 基础理论	16-9
16.2.1 固体物料中湿分的种类	16-9
16.2.2 干燥时湿分运动的机理	16-12
16.2.3 颗粒与液滴的运动	16-19
(1) 颗粒液滴一维运动的系统	16-19
(2) 颗粒液滴在重力场中一维运动 的统一基本方程	16-23
(3) 一维不等速运动所需的时间	16-25
(4) 一维不等速运动的高度	16-26
(5) $Re_0 < Re_r$ 加速沉降的计算 及举例	16-31
(6) 颗粒、液滴在重力场中的二维 运动	16-35
16.2.4 干燥过程中气固相间的给热与 传质	16-50
(1) 对平板状物料的给热	16-50
(2) 板状物料真空干燥的传质	15-51
(3) 气流通过固定床的给热	16-51
(4) 稀相条件下静止气流中对颗 粒或液滴的给热与传质	16-51
(5) 单颗粒或液滴在流动流体中的 传热与传质	16-52
(6) 颗粒在气流式干燥器中的 给热	16-53
(7) 气流干燥中物料温度的升高	16-57

(8) 笼式粉碎机的体积给热系数	16-57
(9) 聚式流态化干燥中气固相间给热 系数简介与分析	16-59
(10) 热质同时传递的关联	16-64
参考文献	16-65
16.3 湿介质的性质与湿度图	16-67
16.3.1 湿介质的性质	16-67
16.3.2 干湿球温度计的讨论与热质传递 关联方程的应用	16-72
16.3.3 低温范围内的湿度图	16-75
16.3.4 高温范围内的湿度图	16-78
16.3.5 总压改变对湿度图的影响	16-80
16.3.6 有机溶剂蒸汽的湿度图	16-82
16.3.7 各类湿度图的应用	16-83
参考文献	16-85
16.4 干燥速率	16-86
16.4.1 恒定干燥条件下的干燥曲线	16-86
(1) 物料湿含量(w)及物料温度(t_m) 与干燥时间(τ)曲线	16-86
(2) 物料的干燥速率曲线	16-87
(3) 干燥速率曲线的分析	16-87
16.4.2 恒速干燥速率	16-88
16.4.3 降速干燥速率	16-93
16.4.4 临界湿含量	16-99
参考文献	16-102
16.5 干燥基础数据及其测试方法	16-103
16.5.1 概述	16-103
16.5.2 颗粒粒径、形状系数与比 表面积	16-103
16.5.3 颗粒粒径的测定	16-106
16.5.4 气体湿度的测定方法	16-135
16.5.5 物料湿含量的测试方法	16-141

- 16.5.6 湿物料临界湿含量测定.....16-147
参考文献.....16-150
- 16.6 干燥器的特性与计算**.....16-152
- 16.6.1 干燥器的分类.....16-152
- 16.6.2 间歇箱式干燥器.....16-152
- (1) 概述.....16-152
- (2) 适用范围.....16-153
- (3) 设计用有关参数.....16-153
- (4) 各种箱式干燥器的运转操作数据.....16-154
- 16.6.3 连续式热风干燥器总论.....16-155
- (1) 概述.....16-155
- (2) 连续式干燥器主体容积的计算
(物料在恒定干燥条件下降速干燥速率线为一直线).....16-156
- (3) 低物料临界湿含量条件下连续式干燥器主体容积计算.....16-161
- (4) 连续式干燥器主体容积计算
(物料在恒定干燥条件下降速干燥线为曲线).....16-161
- 16.6.4 物料移动型干燥器.....16-167
- (1) 隧道式干燥器.....16-167
- (2) 穿流带式干燥器.....16-168
- (3) 喷流式干燥器.....16-174
- (4) 立式移动床干燥器.....16-178
- 16.6.5 物料搅拌型干燥器.....16-179
- 16.6.6 回转干燥器.....16-185
- 16.6.7 膏糊状物料干燥器.....16-193
- 16.6.8 红外及远红外干燥器.....16-198
- 16.6.9 冷冻干燥器.....16-201
- 16.6.10 微波干燥器.....16-205
- 16.6.11 有机过热蒸汽干燥器.....16-208
参考文献.....16-211
- 16.7 气流式干燥器**.....16-213
- 16.7.1 气流干燥器的特征.....16-213
- 16.7.2 气流干燥器的适用范围.....16-214
- 16.7.3 气流干燥器的类型.....16-215
- 16.7.4 气流干燥器的设计计算.....16-228
- (1) 基本数据.....16-228
- (2) 进行干燥管的物料衡算和热量衡算,以确定干燥除水量及干燥用热空气用量 $G(\text{kg/h})$16-228
- (3) 加速运动段气固相间给热系数关联式的确定.....16-228
- (4) 干燥管直径 D 的计算.....16-229
- (5) 气流干燥管高度计算.....16-229
- (6) 气流式干燥器设计计算示例.....16-230
- (7) 脉冲式气流干燥器的计算.....16-244
参考文献.....16-250
- 16.8 流化床及喷动床干燥器**.....16-251
- 16.8.1 概述及其特征.....16-251
- 16.8.2 流化床干燥器的型式与分类.....16-252
- 16.8.3 流化床干燥器的设计.....16-261
- (1) 间歇式.....16-261
- (2) 单室连续式或多室连续式.....16-261
- (3) 其他.....16-262
- (4) 卧式多室流化床干燥器床层截面积的计算.....16-262
- (5) 多层流化床干燥器所需层数的计算.....16-265
- (6) 设计计算举例.....16-267
- 16.8.4 喷动床干燥器.....16-275
参考文献.....16-279
- 16.9 喷雾干燥**.....16-280
- 16.9.1 喷雾干燥原理及其特点.....16-280
- 16.9.2 喷雾干燥器的工艺布置.....16-283
- 16.9.3 喷雾干燥的优缺点.....16-288
- 16.9.4 雾化器的结构和计算.....16-289
- (1) 雾化机理.....16-289
- (2) 雾滴(或颗粒)平均直径和尺寸分布的表示方法.....16-291
- (3) 压力式雾化器.....16-293
- (4) 旋转式(也称转盘式)雾化器.....16-301
- (5) 气流式雾化器.....16-306
- (6) 超声波雾化器.....16-308
- 16.9.5 雾滴的传热和干燥.....16-309
- (1) 含有可溶性固体的液滴蒸发.....16-309
- (2) 物料干燥前后的粒度比.....16-311
- (3) 含有不溶性固体的液滴蒸发.....16-312
- (4) 喷雾干燥产品的物理性质及其影响因素.....16-314

16.9.6 喷雾干燥塔的直径和高度的 计算.....	16-315	参考文献.....	16-354
16.9.7 喷雾干燥过程中的物料 粘壁问题.....	16-316	16.11 干燥器的选型	16-356
16.9.8 干燥产品的分离和排出 装置.....	16-318	16.11.1 选型前需要确定的条件	16-356
16.9.9 喷雾干燥的节能.....	16-319	(1) 物料性能及干燥特性.....	16-356
16.9.10 喷雾干燥的安全措施.....	16-321	(2) 对于干燥产品的要求.....	16-356
16.9.11 喷雾干燥的控制系统.....	16-323	(3) 湿物料水含量的波动情况及 干燥前的脱水.....	16-356
16.9.12 国内外喷雾干燥器应用 实例.....	16-324	16.11.2 环境湿度改变对干燥器 选型的影响.....	16-357
参考文献.....	16-326	16.11.3 干燥器的选型步骤及选 型表	16-357
16.10 干燥系统的组成	16-327	16.11.4 干燥器容积的估算	16-361
16.10.1 热风动力系统.....	16-327	参考文献.....	16-363
16.10.2 热源及其装置	16-332	16.12 干燥器的热效率与最佳化	16-364
(1) 干燥过程中热源的选择.....	16-332	16.12.1 热平衡在干燥过程中的 应用	16-364
(2) 气体燃料的燃烧.....	16-333	16.12.2 热风干燥器的热效率及 其分析.....	16-365
(3) 液体燃料的燃烧.....	16-338	16.12.3 典型干燥器热效率数据范围	16-369
(4) 空气预热器.....	16-340	16.12.4 提高干燥器热效率的途径	16-369
16.10.3 干燥过程中的进出料	16-343	16.12.5 干燥装置的最优化设计	16-370
(1) 供料器的作用.....	16-343	参考文献.....	16-381
(2) 选择注意事项.....	16-343	附图1~5.....	16-382
(3) 供料器的种类.....	16-344		
(4) 供料器的选择.....	16-349		
(5) 螺旋输送机的选型计算.....	16-349		
(6) 旋转式供料器的选型计算.....	16-352		

17. 吸附及离子交换

第一部分 吸附分离

符号说明、主要参考书.....	17-1	曲线.....	17-15
17.1 绪论.....	17-4	(2) 液相吸附平衡和吸附等温 曲线.....	17-23
17.1.1 吸附分离过程的应用及其循环 操作.....	17-4	(3) 吸附热	17-27
(1) 吸附分离过程的应用.....	17-4	17.2.2 吸附速率及物质传递	17-29
(2) 吸附分离过程的循环操作.....	17-5	(1) 吸附速率	17-29
17.1.2 吸附剂的种类和性能.....	17-8	(2) 传质系数	17-31
(1) 吸附剂的种类.....	17-8	参考文献	17-37
(2) 吸附剂的性能	17-10	17.3 设计原理.....	17-39
参考文献	17-13	17.3.1 多釜(段)连续式吸附分离	17-39
17.2 吸附分离理论.....	17-14	(1) 接触方式和计算.....	17-39
17.2.1 吸附平衡和吸附热.....	17-14	(2) 连续釜式吸附分离	17-40
(1) 气相吸附平衡和吸附等温			

17.3.2 恒温下固定床吸附分离	17-41
(1) 固定床吸附柱动力学	17-41
(2) 线性平衡下的浓度分布	17-48
(3) 吸附等温线对透过曲线的影响	17-51
17.3.3 不等温下固定床吸附分离	17-55
(1) 固定床不等温吸附	17-55
(2) 不等温固定床吸附计算	17-57
参考文献	17-60
17.4 过程设备和计算	17-61
17.4.1 固定床	17-61
(1) 脱湿干燥	17-61
(2) 溶剂回收	17-67
(3) 污水处理	17-67
(4) 流动相的流向	17-71
17.4.2 移动床和多柱串联吸附柱	17-75

(1) 移动床	17-75
(2) 多床层(塔节)串联吸附柱	17-82
17.4.3 变压吸附	17-86
(1) 操作原理	17-86
(2) 工艺流程	17-89
(3) 变压吸附分离塔的计算	17-92
17.4.4 流化床	17-93
(1) 工艺流程	17-93
(2) 过程计算	17-94
17.4.5 其它吸附分离方法	17-98
(1) 色谱分离	17-98
(2) 循环区吸附	17-100
(3) 参数泵吸附	17-100
参考文献	17-101

第二部分 离子交换

符号说明	17-102
名词浅释	17-103
主要参考书	17-103
17.5 概述	17-104
17.5.1 离子交换的基本原理	17-104
17.5.2 离子交换树脂的结构特征	17-104
17.5.3 离子交换树脂的基本性能	17-105
(1) 含水量和密度	17-105
(2) 粒度	17-106
(3) 交联度	17-106
(4) 溶胀变化	17-106
(5) 交换容量	17-106
(6) 选择性	17-107
17.5.4 离子交换剂的种类、牌号和特性	17-108
(1) 离子交换树脂分类	17-108
(2) 各种离子交换剂	17-108
17.5.5 离子交换的应用	17-116
(1) 离子的转换	17-116
(2) 杂质的去除	17-117
(3) 离子物质的浓缩	17-117
(4) 电解质与非电解质的分离——离子排斥法	17-117
(5) 性质相似物质的分级分离——离子交换层析法	17-118

(6) 催化作用	17-118
17.5.6 离子交换在水处理中的应用	17-119
(1) 水的硬度	17-120
(2) 部分脱盐	17-120
(3) 用离子交换脱盐制备纯水	17-121
参考文献	17-121
17.6 离子交换平衡	17-123
17.6.1 离子交换等温线	17-123
17.6.2 离子交换的选择性及影响选择性的因素	17-123
(1) 选择性系数	17-123
(2) 影响选择性的因素	17-127
17.6.3 分配比和分离因数	17-128
(1) 分配比或分配系数	17-128
(2) 分离因数	17-129
17.6.4 离子交换平衡的实验通式	17-129
17.6.5 离子交换的多组份平衡	17-130
参考文献	17-131
17.7 离子交换动力学	17-132
17.7.1 Helfferich判别式	17-132
17.7.2 在同位素交换中颗粒扩散控制的交换速率	17-134
(1) 颗粒扩散速率公式	17-134
(2) 交换度和相对交换速率	17-134

- 17.7.3 在同位素交换中液膜扩散控制的交换速率.....17-137
- (1) 无限浴条件.....17-137
- (2) 有限浴条件.....17-137
- 17.7.4 在离子交换中颗粒扩散控制的交换速率.....17-138
- (1) Nernst-Planck公式..... 17-138
- (2) 交换速率公式.....17-138
- 17.7.5 在离子交换中液膜扩散控制的交换速率.....17-139
- 17.7.6 离子交换速率通则和实验式.....17-140
- 参考文献.....17-141
- 17.8 离子交换设计原理**..... 17-142
- 17.8.1 设计前所需基本数据.....17-142
- 17.8.2 间歇式离子交换.....17-143
- 17.8.3 固定床离子交换.....17-143
- (1) 透过曲线.....17-143
- (2) 工作交换容量的确定.....17-144
- (3) 透过比, T17-146
- (4) 柱的理论塔板有效高度和有效塔板数.....17-146
- (5) 单一组份取代过程柱的利用率.....17-147
- (6) 设计计算实例.....17-147
- (7) 再生过程和条件的选择.....17-149
- (8) 树脂床的水头损失 ΔP 的计算.....17-151
- (9) 每次循环周期所需时间.....17-152
- (10) 固定床离子交换设计的基本数据.....17-153
- 17.8.4 连续式移动床的计算.....17-153
- (1) Avco系统的过程性能分析.....17-153
- (2) 反应区的离子交换速率.....17-153
- (3) 操作图和操作参数.....17-154
- (4) 设计上的考虑.....17-155
- 17.8.5 离子交换色层分离.....17-156
- (1) 透过曲线方程式.....17-156
- (2) 洗提曲线方程式.....17-157
- (3) 交换柱的分离效能——分离产物的纯度.....17-158
- (4) 色层分离中最优化操作条件的选择.....17-159
- 17.8.6 混合床制备去离子水的设计计算.....17-161
- (1) 混合床的交换平衡.....17-161
- (2) 混合床去离子过程的速率公式.....17-162
- (3) 出水质量与树脂利用率.....17-162
- (4) 混合床去离子的性能.....17-163
- 17.9 离子交换的过程和装置**.....17-165
- 17.9.1 间歇式离子交换过程和装置.....17-165
- 17.9.2 柱式固定床离子交换单元装置.....17-166
- (1) 惯用的交换与再生顺流过程.....17-166
- (2) 逆流再生过程.....17-166
- 17.9.3 连续式的离子交换过程和装置.....17-168
- (1) 移动床离子交换过程——Higgins系统..... 17-168
- (2) Asahi连续式离子交换过程.....17-169
- (3) 国产双柱式流动床离子交换水处理装置的流程.....17-169
- (4) Avco连续移动床离子交换系统.....17-170
- 17.9.4 混合床的离子交换过程.....17-172
- 17.9.5 一个制备纯水的流程.....17-173
- 17.9.6 一个回收铀的流程.....17-173
- 17.9.7 电镀厂废水回收镉的流程.....17-174
- 17.9.8 离子交换系统的测量和控制.....17-175
- 17.9.9 离子交换树脂的污损和处理.....17-175
- 17.9.10 离子交换单元的经济评价.....17-175
- 附录 离子交换的计算转换表.....17-176
- 参考文献.....17-176

18. 薄膜过程

- 18.1 引言..... 18-1
- 18.1.1 膜的定义.....18-1
- 18.1.2 膜的分类.....18-1
- (1) 按膜的性质分类.....18-1
- (2) 按膜的结构分类.....18-2
- (3) 按膜的用途分类.....18-2
- (4) 按膜的作用机理分类.....18-2
- 18.1.3 膜的分离作用.....18-3
- 参考文献.....18-4
- 18.2 膜分离过程综述..... 18-5
- 18.2.1 膜分离过程的发展和现状.....18-5
- (1) 膜分离过程的历史.....18-5
- (2) 膜分离的主要应用.....18-7
- 18.2.2 各种膜分离过程的概述.....18-8
- (1) 气体的渗透分离.....18-8
- (2) 反渗透.....18-9
- (3) 超滤..... 18-10
- (4) 渗析..... 18-10
- (5) 电渗析.....18-11
- (6) 其他膜分离过程.....18-11
- 18.2.3 膜分离过程的机理和传递模型..... 18-12
- (1) 以传递机理为基础..... 18-12
- (2) 以不可逆热力学为基础.....18-17
- 18.2.4 合成膜的制备、性质和应用..... 18-22
- (1) 综述.....18-22
- (2) 合成膜的形成.....18-26
- (3) 中空纤维素膜.....18-28
- 符号表.....18-30
- 参考文献.....18-31
- 18.3 气体的膜分离过程..... 18-34
- 18.3.1 基础理论和主要参数..... 18-34
- (1) 分离机理..... 18-34
- (2) 扩散系数、渗透率、溶解度的测定和计算..... 18-36
- 18.3.2 影响气体渗透性的因素.....18-41
- (1) 微孔膜.....18-41
- (2) 非多孔膜.....18-43
- 18.3.3 气体分离膜.....18-55
- (1) 气体分离膜需符合的主要要求..... 18-55
- (2) 几种高分子聚合膜.....18-57
- (3) 聚合物膜的改性.....18-58
- (4) 非对称膜和复合膜.....18-59
- (5) 多孔膜和液体载体形成的促进分离膜.....18-62
- 18.3.4 气体膜分离工程设备.....18-63
- (1) 设备结构.....18-63
- (2) 操作流程和工艺计算.....18-66
- 18.3.5 气体膜分离的应用.....18-78
- (1) 工业气体中氢的回收.....18-78
- (2) 空气中氧气的富集.....18-80
- (3) 天然气中氮的提取.....18-81
- (4) 二氧化碳的分离.....18-82
- 符号表.....18-84
- 参考文献.....18-84
- 附录 美国Westing house氮回收装置的假设性设计要点.....18-86
- 18.4 反渗透..... 18-90
- 18.4.1 基本理论和传递方程.....18-90
- (1) 反渗透的基本原理.....18-90
- (2) 渗透压.....18-91
- (3) 浓差极化.....18-93
- (4) 反渗透速率方程.....18-94
- (5) A 、 $\frac{D_{AM}}{K\delta}$ 、 k 的测定和推算..... 18-95
- 18.4.2 反渗透膜的制备和性质.....18-98
- (1) 纤维素膜.....18-98
- (2) 聚酰胺膜.....18-102
- (3) 复合膜.....18-106
- (4) 其它反渗透膜.....18-107
- 18.4.3 浓差极化和反渗透操作.....18-107
- (1) 浓差极化的危害和控制.....18-107
- (2) 膜污染、老化的防治.....18-108
- 18.4.4 反渗透膜组件.....18-109
- (1) 板框式.....18-109
- (2) 管式.....18-110
- (3) 螺旋卷式.....18-111
- (4) 毛细管式.....18-111
- (5) 中空纤维式.....18-111

- (6) 槽式.....18-112
- 18.4.5 反渗透设备的设计.....18-113
- (1) 基本方程.....18-113
- (2) 流动体系的基本方程.....18-114
- (3) 径向流动体系的基本方程.....18-116
- 18.4.6 反渗透的应用.....18-119
- (1) 苦咸水和海水淡化.....18-119
- (2) 纯水生产.....18-121
- (3) 低分子量水溶性组分的浓缩回收.....18-122
- 符号表.....18-125
- 参考文献.....18-125
- 18.5 电渗析.....18-127
- 18.5.1 电渗析的基本理论.....18-127
- (1) 电渗析的基本原理.....18-127
- (2) 离子交换膜的选择透过机理.....18-128
- (3) 电渗析中的传递过程.....18-129
- (4) 基本传质方程.....18-130
- (5) 电极反应及电极电位.....18-131
- 18.5.2 离子交换膜.....18-132
- (1) 离子交换膜的种类.....18-132
- (2) 离子交换膜的性能.....18-133
- (3) 离子交换膜的制备.....18-142
- 18.5.3 浓差极化及其控制.....18-143
- (1) 浓差极化和极限电流密度.....18-143
- (2) Willson 浓差极化公式.....18-144
- (3) 极限电流密度的测定.....18-144
- (4) 浓差极化的危害和控制.....18-144
- (5) 膜的污染和中毒.....18-145
- 18.5.4 电渗析器.....18-146
- (1) 电渗析器的主要部件.....18-146
- (2) 电渗析器的组装.....18-148
- (3) 电渗析脱盐的流程.....18-149
- (4) 电渗析器的能耗.....18-149
- 18.5.5 电渗析系统设计.....18-151
- (1) 操作参数的确定.....18-151
- (2) 膜面积的计算.....18-154
- (3) 设计过程.....18-154
- 18.5.6 电渗析的应用.....18-157
- (1) 苦咸水和海水淡化.....18-157
- (2) 纯水制备.....18-158
- (3) 海水浓缩制造食盐.....18-159
- (4) 废水处理.....18-159
- (5) 在化工、食品、制药生产中的应用.....18-160
- 符号表.....18-161
- 参考文献.....18-161
- 18.6 超滤.....18-163
- 18.6.1 基本理论.....18-163
- (1) 超滤的基本原理.....18-163
- (2) 超滤过程的基本特性.....18-163
- (3) 传质系数.....18-164
- (4) 透过速率方程.....18-164
- 18.6.2 超滤、微孔过滤和反渗透的比较.....18-166
- 18.6.3 超滤膜的性质和制备.....18-168
- (1) 超滤膜的性质.....18-170
- (2) 超滤膜的制备.....18-171
- 18.6.4 影响超滤效果的因素.....18-172
- (1) 超滤(透过)速率.....18-172
- (2) 膜的寿命.....18-173
- (3) 膜的清洗和消毒.....18-174
- 18.6.5 超滤设备和流程.....18-174
- (1) 设备.....18-174
- (2) 流程.....18-174
- (3) 超滤的费用估算.....18-175
- 18.6.6 设计计算.....18-176
- (1) 计算方法.....18-176
- (2) 基础数据.....18-177
- 18.6.7 超滤的应用.....18-179
- (1) 食品、制药工业中的应用.....18-179
- (2) 废水处理.....18-181
- 符号表.....18-183
- 参考文献.....18-184
- 18.7 液体的渗透汽化.....18-186
- 18.7.1 基本原理和传递模型.....18-186
- (1) 纯液体的渗透汽化.....18-186
- (2) 液体混合物的渗透汽化.....18-187
- (3) 以化学位梯度为传质推动力,且膜中扩散系数不随浓度而变化的简化情况.....18-188
- (4) 膜内扩散系数与浓度有关,且考虑过程中的伴生现象.....18-189
- 18.7.2 渗透汽化过程的特点.....18-190
- 18.7.3 分离过程的影响因素.....18-191
- (1) 温度的影响.....18-191
- (2) 膜下游侧压力的影响.....18-191