



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

化工原理

第二版

何潮洪 冯 霄 主编

(上 册)



科学出版社

www.sciencep.com

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

化 工 原 理

第二版

(上 册)

何潮洪 冯 霄 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6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》(科学出版社,2001年)使用多年的教学实践的基础上修订再版的。本书重视基本概念,阐述力求严谨,且注重对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,并简明扼要地介绍了相关的传递过程基础。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、热量传递基础、传热过程计算与换热器、蒸发等7部分;下册包括质量传递基础、气体吸收、蒸馏、气-液传质设备、液-液萃取和固-液萃取、干燥、其他分离过程等7部分。

本书可作为高等院校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(上册)/何潮洪,冯霄主编. —2版. —北京:科学出版社,2007
(普通高等教育“十一五”国家级规划教材)
ISBN 978-7-03-019150-2

I. 化… II. ①何… ②冯… III. 化工原理-高等学校-教材 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 127907 号

责任编辑:杨向萍 丁 里 / 责任校对:张 琪
责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

新 蕾 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:B5(720×1000)

2007年8月第 二 版 印张:22 1/2

2007年8月第六次印刷 字数:424 000

印数:14 501—18 500

定价:28.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈路通〉)

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

第二版前言

第一版前言

绪论	1
参考文献	5
第1章 流体力学基础	6
1.1 概述	6
1.2 流体静力学及其应用	7
1.2.1 静止流体所受的力	7
1.2.2 流体静力学基本方程	8
1.2.3 静力学原理在压力和压力差测量上的应用	10
1.3 流体流动的基本方程	13
1.3.1 基本概念	13
1.3.2 质量衡算方程——连续性方程	21
1.3.3 运动方程	24
1.3.4 总能量衡算和机械能衡算方程	33
1.4 管路计算	53
1.4.1 简单管路	53
1.4.2 复杂管路	58
1.4.3 管网简介	64
1.4.4 可压缩流体的管路计算	64
1.5 边界层及边界层方程	68
1.5.1 普兰特边界层理论	68
1.5.2 边界层方程及其应用简介	70
1.5.3 边界层分离	73
1.6 湍流	74
1.6.1 湍流特点及其研究方法	74
1.6.2 湍流应力	75

1.7 流速、流量测量	76
1.7.1 变压头流量计	76
1.7.2 变截面流量计	81
主要符号说明	84
参考文献	85
习题	85
第2章 流体输送机械	92
2.1 概述	92
2.2 速度式流体输送机械	92
2.2.1 离心式流体输送机械的基本方程	92
2.2.2 离心泵与离心通风机的结构、工作原理与分类	94
2.2.3 离心泵与离心通风机的性能	96
2.2.4 离心泵与离心通风机的特性曲线	98
2.2.5 离心泵与离心通风机的工况点和流量调节	100
2.2.6 离心泵与离心通风机的安装和选用	103
2.2.7 离心鼓风机与离心压缩机	108
2.2.8 轴流泵和轴流通风机	109
2.2.9 旋涡泵	109
2.3 容积式流体输送机械	110
2.3.1 往复式流体输送机械工作原理	110
2.3.2 往复泵	111
2.3.3 往复压缩机	113
2.3.4 回转式流体输送机械	117
2.4 真空泵	119
2.4.1 真空泵的典型结构和分类	120
2.4.2 真空泵性能及选用	121
2.5 流体输送机械的特点	121
主要符号说明	123
参考文献	124
习题	124
第3章 机械分离与固体流态化	126

3.1 过滤	126
3.1.1 概述	126
3.1.2 过滤基本方程	128
3.1.3 过滤常数的测定	132
3.1.4 滤饼洗涤	133
3.1.5 过滤设备及过滤计算	134
3.2 沉降	142
3.2.1 重力沉降原理	143
3.2.2 重力沉降设备	146
3.2.3 离心沉降原理	149
3.2.4 离心沉降设备	150
3.2.5 离心机	153
3.3 固体流态化	155
3.3.1 基本概念	156
3.3.2 流化床的主要特性	157
3.3.3 流化床的操作气速范围	159
主要符号说明	159
参考文献	160
习题	160
第4章 热量传递基础	162
4.1 概述	162
4.1.1 基本概念	162
4.1.2 热量传递的三种基本方式	163
4.2 热传导	165
4.2.1 热传导的基本定律——傅里叶定律	165
4.2.2 导热系数	165
4.2.3 热传导微分方程及其定解条件	167
4.2.4 稳态热传导	170
4.2.5 非稳态热传导	176
4.2.6 热传导问题的数值解法	180
4.3 对流传热	184

4.3.1 概述	184
4.3.2 层流流动对流传热的近似分析解法	187
4.3.3 因次分析法在对流传热中的应用	191
4.3.4 管内强制对流传热	193
4.3.5 管外强制对流传热	199
4.3.6 自然对流传热	203
4.4 冷凝与沸腾传热	205
4.4.1 冷凝传热	205
4.4.2 影响冷凝传热的因素和冷凝传热的强化	210
4.4.3 沸腾传热过程	211
4.4.4 影响沸腾传热的因素及强化途径	215
4.5 辐射传热	216
4.5.1 热辐射的基本概念	216
4.5.2 辐射基本定律	218
4.5.3 固体间的辐射传热	221
4.5.4 气体的热辐射	229
4.5.5 对流与辐射的复合传热	232
主要符号说明	233
参考文献	235
习题	235
第5章 传热过程计算与换热器	238
5.1 换热器的分类与型式	238
5.1.1 换热器的分类	238
5.1.2 间壁式换热器	239
5.2 间壁式换热器中的传热过程分析	247
5.3 传热过程的基本方程	247
5.3.1 热量衡算方程	247
5.3.2 传热速率方程	249
5.3.3 总传热系数与壁温计算	249
5.4 传热过程的平均温差计算	253
5.4.1 恒温差传热	253

5.4.2 变温差传热	253
5.5 传热效率和传热单元数	260
5.5.1 传热效率	260
5.5.2 传热单元数	261
5.5.3 传热效率和传热单元数的关系	262
5.6 换热器计算的设计型和操作型问题	265
5.6.1 设计型计算	265
5.6.2 操作型计算	266
5.7 传热系数变化的传热过程计算	269
5.8 列管式换热器的选用与设计原则	270
5.8.1 流体通道的选择	271
5.8.2 流体流速的选择	271
5.8.3 流体两端温度的确定	271
5.8.4 管径、管子排列方式和壳体直径的确定	272
5.8.5 管程和壳程数的确定	272
5.8.6 折流板	273
5.8.7 换热器中传热与流体流动阻力计算	273
5.8.8 列管式换热器的选用和设计的一般步骤	273
5.9 换热器的传热强化途径	274
5.9.1 扩展传热面积	274
5.9.2 增大传热平均温差	275
5.9.3 提高传热系数	275
主要符号说明	276
参考文献	277
习题	277
第6章 蒸发	280
6.1 概述	280
6.2 蒸发器及辅助设备	281
6.2.1 蒸发器的结构及特点	282
6.2.2 除沫器、冷凝器和真空装置	287
6.3 蒸发计算基础	288

6.3.1 蒸发中的温度差损失	288
6.3.2 蒸发过程的传热系数	291
6.3.3 溶液的浓缩热及焓浓图	292
6.4 单效蒸发的计算	293
6.4.1 蒸发器的物料衡算	293
6.4.2 蒸发器的热量衡算	294
6.4.3 蒸发器的传热面积	295
6.5 多效蒸发	295
6.5.1 多效蒸发的流程	296
6.5.2 多效蒸发的优缺点	298
6.5.3 多效蒸发计算	300
6.6 提高蒸发经济性的其他措施	303
6.6.1 额外蒸气的引出	303
6.6.2 热泵蒸发器	304
主要符号说明	304
参考文献	305
习题	306
附录	307
一、单位换算表	307
二、空气的重要物性	310
三、水的重要物性	311
四、饱和水蒸气的物性	315
五、某些气体的重要物性	318
六、某些液体及溶液的物性	324
七、某些固体的性质	334
八、管子规格	335
九、离心泵和风机的规格	337
十、列管式换热器规格	342
十一、壁面污垢热阻	346

绪 论^[1~6]

1. 本课程的性质、地位和内容

化工原理是化工类及其相近专业的一门重要的技术基础课,在培养“化学工程与工艺”专业学生综合素质的过程中更有其特殊的地位和作用。

1) 在教学计划中,这门课程是承前启后、由理及工的桥梁

先行的数学、物理、化学等课程主要是了解自然界的普遍规律,属于自然科学的范畴,而化工原理课程则属于工程技术科学的范畴,是化工专业课程的基础。

2) 化工原理课程具有显著的工程性

它要解决的问题是多因素、多变量的综合性的工业实际问题,因此分析和处理问题的方法也就与理科课程有较大的不同,这可能会导致部分学生在学习初期有些不适应。

3) 化工原理的内容主要涉及化工单元操作的基本原理及其相关基础

它来自化工实践,又面向化工实践,是化工技术工作者的看家本领所在,可以说“化工原理”四个字恰如其分地表达了这门课程的性质与重要性。

2. 化工过程、单元操作与传递基础

化工过程是指化学工业的生产过程,它的特点之一是操作步骤多,原料在各步骤中依次通过若干个或若干组设备,经历各种方式的处理之后才能成为产品。由于化学工业中不同行业所用的原料与所得的产品不同,所以各种化工过程的差别很大。

一个化工过程所包含的操作步骤可分为两大类:一类以进行化学反应为主,通常是在反应器中进行;另一类则为不进行化学反应的物理过程,包括原料预处理过程和反应产物后处理过程。尽管从生产某种产品的意义上讲,反应过程是生产过程的核心,但它在工厂的设备投资和操作费用中通常并不占据主要比例,实际上起决定作用的往往是众多的物理过程,它们决定了整个生产的经济效益,这一类重要的物理过程就是单元操作。

单元操作有下列特点:①它们都是物理性操作,即只改变物料的状态或其物理性质,而不改变其化学性质;②它们都是化工过程中共有的操作,但不同的化工过程中所包含的单元操作数目、名称与排列顺序各异;③某单元操作用于不同的化工过程,其基本原理并无不同,进行该操作的设备往往也是通用的。当然,具体运用

时也要结合各化工过程的特点来考虑,如原料与产品的物理、化学性质,生产规模的大小等。

随着化学工业的发展,单元操作也不断发展。目前化工生产中常用的单元操作如表 0-1 所示。

表 0-1 常用单元操作

传递基础	单元操作名称	目 的
流体流动 (动量传递)	流体输送 沉降 过滤 搅拌 流态化	以一定流量将流体从一处送到另一处 从气体或液体中分离悬浮的固体颗粒、液滴或气泡 从气体或液体中分离悬浮的固体颗粒 使物料混和均匀或使过程加速 用流体使固体颗粒悬浮并使其具有流体状态的特性
热量传递	换热 蒸发	使物料升温、降温或改变相态 使溶液中的溶剂受热气化而与不挥发的溶质分离,从而达到溶液浓缩的目的
质量传递	吸收 蒸馏 萃取 浸取 吸附 离子交换 膜分离	用液体吸收剂分离气体混合物 利用均相液体混合物中各组分挥发度不同而使液体混合物分离 用液体萃取剂分离均相液体混合物 用液体浸渍固体物料,将其中的可溶组分分离出来 用固体吸附剂分离气体或液体混合物 用离子交换剂从溶液中提取或除去某些离子 用固体膜或液体膜分离气体、液体混合物
热、质传递	干燥 增(减)湿 结晶	加热固体使其所含液体汽化而除去 调节气体中的水汽含量 使溶液中的溶质变成晶体析出

把各种不同的化工过程总结成为由数量不多的单元操作所组成的观点,是人们对化工过程认识的进步,它使人们看到了化工生产中的共性。把这种共性的东西抽象出来进行研究,可以对过程的本质了解得更为透彻。一旦人们对各个单元操作有了较深刻的理解,就会对由这些单元操作所组成的具体的化工过程有更好的掌握,这种认识的循环前进,推动了学科的发展。

经过对单元操作的深入研究,人们发现所有单元操作都属于速率过程,而且在大部分情况下,是动量、热量和质量的传递速率控制着过程的进行。换句话说在大部分单元操作中,最基本的过程是动量、热量和质量的传递(简称三传)。三个传递过程有时单独起作用,有时则两个或三个同时起作用,如表 0-1 所示。

因此,本书力求按照单元操作和传递过程之间的内在紧密联系,把两者有机地结合在一起进行编写,使学生在重点掌握好单元操作原理和过程特性的同时,对过程的机理有较深的了解,从而对化工过程有一个较完整的把握。

为学习单元操作而开设的课程,在我国习惯上称为化工原理。

3. 基本研究方法

在单元操作的发展过程中形成了两种基本研究方法,即实验研究法和数学模型法。

1) 实验研究法

化工过程往往十分复杂,涉及的影响因素很多,各种因素的影响有时不能用迄今已掌握的物理、化学和数学等基本原理定量地分析和预测,而必须通过实验来解决,即所谓的实验研究法。它一般以因次分析法为指导,依靠实验建立过程参数之间的相互关系,而且通常是把各种参数的影响表示成为由若干个有关参数组成的、具有一定物理意义的无因次数群(也称准数)的影响。在本课程的学习过程中,将经常见到以无因次数群表示的关系式。

2) 数学模型法

数学模型法首先要对化工实际问题的机理作深入分析,并在抓住过程本质的前提下作出某些合理的简化,得出能基本反映过程机理的物理模型,然后结合传过程、物理化学的基本原理,得到描述此过程的数学模型,再用适当的数学方法求解。通常,数学模型法所得结果包括反映过程特性的模型参数,它必须通过实验才能确定,因而它是一种半经验、半理论的方法。

随着计算机及计算技术的飞速发展,复杂数学模型的求解已成为可能,所以数学模型方法将逐步成为单元操作中的主要研究方法。

在学习本课程时,学生应仔细体会不同单元操作中为什么有些采用实验法,有些采用数学模型法,有些则同时采用实验研究法和数学模型法。掌握这些方法论,将有助于增强分析问题与解决问题的能力。

4. 过程的衡算、平衡与速率

1) 过程衡算

质量衡算、能量衡算是化工原理课程中分析问题的基本手段。质量衡算的依据是质量守恒定律,能量衡算的依据是能量守恒和热力学第一定律。

用衡算的方法来分析时,首先要划定衡算的范围(即控制体)。根据范围的大小,衡算分为微分衡算与总衡算两种。微分衡算取设备或管道中的一个微元体为衡算范围,如直角坐标中的 $dx dy dz$;总衡算的范围不是微元体,而是设备的一个大的部分或整个设备,也可以是包括几个设备的一段生产流程或整个车间,甚至整个工厂。

对于给定的控制体,质量衡算、能量衡算的方程为

进控制体的量 - 出控制体的量 = 控制体内的积累量

若过程为稳态(稳定),则控制体内的有关变量均不随时间而变,其积累量为零,所

以结果简化为

$$\text{进控制体的量} = \text{出控制体的量}$$

2) 过程的平衡与速率

平衡与速率是分析单元操作过程的两个基本方面。

过程的平衡问题说明过程进行的方向和所能达到的极限。化工过程的平衡是化工热力学研究的问题,所以化工热力学是化工原理的一个重要基础。过程的速率是指过程进行的快慢。当过程不是处于平衡态时,则此过程必将以一定的速率进行。例如传热过程,当两物体温度不同时,即温度不平衡,就会有净热量从高温物体向低温物体传递,直到两物体的温度相等为止,此时过程达到平衡,两物体间也就没有净的热量传递。

过程的速率和“过程所处的状态与平衡状态的距离”及其他很多因素有关。过程所处的状态与平衡状态之间的距离通常称为过程的推动力。例如两物体间的传热过程,其过程的推动力就是两物体的温度差。

通常存在以下关系式:

$$\text{过程速率} = \text{过程推动力} / \text{过程阻力}$$

即过程的速率与推动力成正比,与阻力成反比。显然过程的阻力是各种因素对过程速率影响的总的体现。

物料衡算、能量衡算、平衡关系和过程速率,将反复出现在本书中,它们所形成的各单元操作的相应计算式,就是各单元操作的主要计算依据。抓住这条主线,会给学习本课程带来很大的帮助。

5. 工程观点

通过本课程的学习,学生要初步掌握化工过程开发、设计与操作的有关方法。这里的开发是指,以已研究出的某化工过程所包括的步骤为基础,把这些步骤连接起来使得生产进行时经济上合理有利,其主要工作是探索最佳的流程与设备,定出最佳的操作条件。设计通常是规定出设备应具有的性能,选出合适的型式并确定其主要尺寸。操作则除了对生产过程(包括正常工况与非正常工况)进行管理并使设备能正常运转以外,更重要的是对现有的生产过程与设备作各种改进以提高其效率。

需要引起充分重视的是,上述问题都具有强烈的工程性,具体表现如下:

1) 过程影响因素多

对于每一种单元操作,其影响因素通常包括物性因素(如密度、黏度)、操作因素(如温度、压力、流量)和结构因素(如设备形状、尺寸)三类。

2) 过程制约条件多

在工业上要实现一个具体的生产过程,客观上存在许多制约条件,如原料来