

普通高等教育“十三五”规划教材

“双一流”本科教育教学用书

# 化工原理(少学时)(第三版)

## PRINCIPLES OF CHEMICAL ENGINEERING (THIRD EDITION)

陈敏恒 潘鹤林 齐鸣斋 主编



华东理工大学出版社  
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

普通高等教育“十三五”规划教材  
“双一流”本科教育教学用书  
本教材第二版 2015 年获上海普通高校优秀教材奖

# 化工原理(少学时)

(第三版)

陈敏恒 潘鹤林 齐鸣斋 主编



华东理工大学出版社  
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

· 上海 ·

## 图书在版编目(CIP)数据

化工原理: 少学时/陈敏恒,潘鹤林,齐鸣斋主编.

—3 版. —上海: 华东理工大学出版社, 2019. 3

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5628-5778-5

I. ①化… II. ①陈… ②潘… ③齐… 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(2019)第 037503 号

## 内 容 提 要

本教材介绍了各主要化工单元操作的基本原理、典型设备及相关计算方法,涉及学科内动量传递、热量传递和质量传递的基本内容。全书分为七章,内容包括流体流动与输送机械、传热、非均相机械分离过程、吸收、精馏、其他传质分离方法、固体干燥等,每章选编适量的例题、习题和思考题,并且每章的习题均附有答案。

本教材注重基本概念和基本原理的阐述,结合工程实践,用工程观点分析问题,并适当兼顾某些新的化工单元操作过程,力求由浅入深、主次分明、重点突出,可作为高等院校少学时化工原理课程教材,也可作为高职高专化工及相关专业的教材。

项目统筹 / 牛 东

责任编辑 / 赵子艳

出版发行 / 华东理工大学出版社有限公司

地址: 上海市梅陇路 130 号, 200237

电话: 021-64250306

网址: [www.ecustpress.cn](http://www.ecustpress.cn)

邮箱: [zongbianban@ecustpress.cn](mailto:zongbianban@ecustpress.cn)

印 刷 / 上海展强印刷有限公司

开 本 / 787 mm × 1092 mm 1/16

印 张 / 21.25

字 数 / 565 千字

版 次 / 2008 年 8 月第 1 版

2019 年 3 月第 3 版

印 次 / 2019 年 3 月第 1 次

定 价 / 48.00 元

版权所有 侵权必究

## 第三版前言

《化工原理(少学时)》是根据高等院校少学时“化工原理”课程教学需要编写的,自2008年第一版出版后,2013年再版至今,已有10余年,教材应用中得到各高等院校同行的大力支持,并且一些院校教师提出了许多建设性建议。本教材第二版2015年获得上海普通高校优秀教材奖。

本教材经过各高校的教学实践,教材章节体系和内容能够满足少学时教学需要。这次修订基本保持第二版的原有框架,对部分内容做了删除、修改或增补。修订的原则是化繁为简、精益求精,文字叙述与公式推导力求简洁,体现“少而精,学到手”的指导思想,注重基础概念与理论的科学性、系统性、实用性。

为适应现代教育技术的发展,并满足课堂教学的需要,本版首次尝试电子教学课件,供读者使用。十分感谢参与视频拍摄的黄婕老师、叶启亮老师、曹正芳老师、丛梅老师和宗原老师。

本教材第三版编者为陈敏恒、潘鹤林和齐鸣斋,十分感谢华东理工大学化工原理教研组的同事给予的支持和帮助。

编者

2019年1月

## 第二版前言

本教材第一版出版后,一些院校教师在使用过程中提出了许多建设性的宝贵意见。鉴于单元操作的不断发展与教学改革深入,不同院校不同专业对本课程的要求各异,为适应少学时化工原理课程的教学需要,有必要对本教材加以修订。本教材第二版内容仍以单元操作基础知识和基本设备原理为主,力求少而精和简明扼要。在上述前提下,第二版删除了一些不适合少学时教学需要的内容,增补了必要的新内容。

本教材第二版章节安排仍沿用第一版,但对某些章节做了删改和增补。如流体流动章节增加了质量流速的概念;传热章节删除了传热基本方程的推导过程;吸收章节则删除了气液两相在填料层内的流动和填料塔的传质部分内容;精馏章节删除了恒沸精馏和萃取精馏法的简介,增补了汽相回流比的概念。这些删改和增补体现了少学时教材内容少而精、简明扼要的要求。

本教材第二版承方图南先生百忙之中审阅,并提出了许多宝贵的修正意见,特此致谢。限于编者水平,不足之处在所难免,敬请教师和读者予以指正。

编者  
2013年3月

# 第一版前言

本书是为适应高等院校少学时化工原理课程教学的要求,以少学时相关专业、高职高专化工技术类专业高技能、应用型人才培养目标为依据编写而成的。

本书尊重学科,但不恪守学科,从应用需要出发,以应用能力培养为主线组织教学内容,贯彻“少而精,学到手”的教学理念,了解与各专业相关的工程概念,从技术应用角度去介绍必要的原理、概念,侧重运用概念和理论解决工程实际问题。

本书每章从基本概念开始,介绍各单元操作的原理、计算方法及相应设备;每章后配有适量的思考题,以期读者思考并提高学习兴趣;同时配有习题,方便读者学以致用,复习提高。

本书淡化了过程的推导,以物料平衡、能量守恒为侧重点,致力于解决实际工程问题。将工程观点的培养作为重点,努力将培养读者的以工程观念观察、分析和解决实际工程技术问题的能力落到实处。

本书根据当前教学与学生就业的实际情况,力求深浅适中,简单明了,层次分明,便于读者学习。

本书主要介绍了各主要化工单元操作的基本原理、典型设备及相关计算方法,内容依次包括绪论、流体流动与输送机械、传热、非均相机械分离过程、吸收、精馏、其他传质分离方法、干燥等。流体流动是传热的基础,流体流动和传热是各分离过程的基础,分离过程涉及化工生产过程常见的分离操作,也涉及新型单元操作。各院校可根据各专业实际选择教学内容。

全书由华东理工大学陈敏恒、潘鹤林、齐鸣斋编写。陈敏恒审定全书。本书的编写还得到了华东理工大学领导的支持关心,校内外化工原理全体同仁的无私支持帮助,在此一并表示诚挚的谢意。同时,十分感谢方图南教授为本书的出版审稿并提出了许多宝贵意见。

限于教学时数,时间仓促,欠妥及未完善之处在所难免,敬请同仁和读者指正。

编者

2008.4

# 目 录

绪论 .....	1
<b>第 1 章 流体流动与输送机械 .....</b>	<b>7</b>
1.1 概述 .....	7
1.1.1 流体流动的实例 .....	7
1.1.2 流体流动的基础概念 .....	7
1.1.3 牛顿黏性定律 .....	9
1.1.4 流体流动中的机械能 .....	11
1.2 流体静力学 .....	11
1.2.1 静力学方程 .....	11
1.2.2 压强能和位能 .....	12
1.2.3 压强的静力学测量方法 .....	12
1.3 流体流动中的守恒原理 .....	14
1.3.1 管流质量守恒 .....	14
1.3.2 机械能守恒 .....	14
1.4 流体流动阻力 .....	17
1.4.1 流动的类型与雷诺数、边界层 .....	17
1.4.2 流动阻力损失 .....	19
1.5 流体输送管路的计算 .....	24
1.5.1 阻力对管内流动的影响 .....	24
1.5.2 管路计算 .....	25
1.6 流速和流量的测量 .....	29
1.6.1 皮托管 .....	29
1.6.2 孔板流量计 .....	30
1.6.3 转子流量计 .....	31
1.7 液体输送机械 .....	33
1.7.1 管路特性曲线 .....	34
1.7.2 离心泵构造及原理 .....	35
1.7.3 离心泵参数及特性曲线 .....	36
1.7.4 离心泵的安装高度 .....	37
1.7.5 离心泵的选用 .....	39
1.8 * 往复泵 .....	40
1.8.1 往复泵的作用原理和类型 .....	40
1.8.2 往复泵的流量调节 .....	40
1.8.3 其他化工用泵及性能比较 .....	41
1.9 * 气体输送机械 .....	44
1.9.1 离心式通风机 .....	44

1.9.2 鼓风机 .....	46
1.9.3 真空泵 .....	46
习题 .....	47
思考题 .....	52
本章主要符号说明 .....	53
参考文献 .....	54
<b>第2章 传热</b> .....	<b>56</b>
2.1 概述 .....	56
2.1.1 热量传递方式 .....	56
2.1.2 传热基本概念 .....	56
2.1.3 传热应解决的问题 .....	57
2.2 热传导 .....	57
2.2.1 傅里叶定律 .....	57
2.2.2 单层平壁定态热传导过程 .....	58
2.2.3 多层平壁热传导 .....	58
2.2.4 单层圆筒壁的定态热传导过程 .....	59
2.2.5 多层圆筒壁的定态热传导过程 .....	60
2.3 对流给热 .....	61
2.3.1 对流给热系数的影响因素分析 .....	62
2.3.2 管内无相变对流给热系数的经验关联式 .....	63
2.3.3 有相变时的对流给热 .....	65
2.4 间壁式传热过程 .....	69
2.4.1 热量衡算和传热系数 .....	69
2.4.2 传热基本方程 .....	74
2.5 传热过程计算 .....	76
2.5.1 换热器的传热面积的计算 .....	76
2.5.2 换热器的操作核算与调节 .....	78
2.6 换热设备 .....	82
2.6.1 间壁式换热器的类型 .....	82
2.6.2 管壳式换热器的设计和选用 .....	85
2.6.3 换热器的强化和其他类型 .....	89
2.6.4 各类换热器的性能比较及其日常维护 .....	93
习题 .....	94
思考题 .....	98
本章主要符号说明 .....	98
参考文献 .....	99
<b>第3章 *非均相机械分离过程</b> .....	<b>100</b>
3.1 概述 .....	100
3.2 沉降分离 .....	102
3.2.1 沉降概述 .....	102
3.2.2 沉降过程 .....	102



3.2.3	自由沉降 .....	102
3.2.4	干扰沉降 .....	106
3.2.5	重力沉降设备 .....	106
3.2.6	沉降过程的强化 .....	109
3.2.7	离心沉降设备 .....	109
3.3	过滤 .....	111
3.3.1	过滤概述 .....	111
3.3.2	过滤过程计算 .....	113
3.3.3	间歇过滤的滤液量与过滤时间的关系 .....	115
3.3.4	过滤设备 .....	116
3.3.5	洗涤速率与洗涤时间 .....	121
3.3.6	过滤设备生产能力 .....	123
	习题 .....	124
	思考题 .....	125
	本章主要符号说明 .....	126
	参考文献 .....	127
<b>第4章</b>	<b>吸收 .....</b>	<b>128</b>
4.1	概述 .....	128
4.2	吸收和气液相平衡关系 .....	131
4.2.1	平衡溶解度 .....	131
4.2.2	相平衡与吸收过程的关系 .....	134
4.3	吸收速率 .....	135
4.3.1	两种物质传递的方式 .....	135
4.3.2	对流传质速率 .....	136
4.3.3	* 对流传质理论 .....	137
4.4	相际传质 .....	137
4.4.1	相际传质速率 .....	137
4.4.2	传质阻力的控制步骤 .....	139
4.5	低含量气体吸收 .....	141
4.5.1	低含量气体吸收的特点 .....	141
4.5.2	低含量气体吸收过程的数学描述和操作线 .....	141
4.5.3	传质单元数的简便计算方法 .....	144
4.5.4	吸收塔塔高的计算 .....	145
4.5.5	吸收塔的核算过程 .....	148
4.6	填料塔 .....	152
4.6.1	填料塔的结构、填料的作用和特性 .....	152
4.6.2	填料塔的附属结构 .....	155
	习题 .....	157
	思考题 .....	158
	本章主要符号说明 .....	158
	参考文献 .....	159

<b>第 5 章 精馏</b> .....	160
5.1 概述 .....	160
5.2 双组分溶液的气液相平衡 .....	161
5.3 精馏 .....	166
5.3.1 精馏过程 .....	166
5.3.2 精馏过程的数学描述及工程简化处理方法 .....	167
5.3.3 精馏塔操作方程 .....	172
5.4 双组分精馏理论塔板数的计算 .....	173
5.4.1 理论板数的计算 .....	173
5.4.2 回流比的选择 .....	176
5.4.3 加料热状态的选择 .....	179
5.5 双组分精馏的核算 .....	180
5.5.1 精馏过程的核算 .....	180
5.5.2 精馏塔的温度分布和灵敏板 .....	182
5.6 * 板式塔 .....	184
5.6.1 板式塔简介 .....	184
5.6.2 筛板上的气液接触状态 .....	185
5.6.3 气体通过筛板的阻力损失 .....	186
5.6.4 筛板塔内气液两相的非理想流动 .....	186
5.6.5 板式塔的不正常操作现象 .....	187
5.6.6 全塔效率 .....	188
5.6.7 提高塔板效率的措施 .....	189
5.6.8 塔板型式 .....	191
5.6.9 填料塔与板式塔的比较 .....	196
5.6.10 精馏塔的辅助设备 .....	196
习题 .....	196
思考题 .....	198
本章主要符号说明 .....	198
参考文献 .....	199
<b>第 6 章 * 其他传质分离方法</b> .....	200
6.1 液液萃取 .....	200
6.1.1 液液萃取过程 .....	200
6.1.2 两相的接触方式 .....	202
6.1.3 液液相平衡 .....	202
6.1.4 萃取过程的计算 .....	207
6.1.5 萃取设备 .....	210
6.2 结晶 .....	215
6.2.1 结晶概述 .....	215
6.2.2 溶解度及溶液的过饱和 .....	216
6.2.3 结晶机理与动力学 .....	217
6.2.4 结晶过程的物料和热量衡算 .....	219
6.2.5 结晶设备 .....	220

6.2.6 其他结晶方法 .....	222
6.3 吸附分离 .....	223
6.3.1 吸附概述 .....	223
6.3.2 吸附平衡 .....	225
6.3.3 吸附传质及吸附速率 .....	228
6.3.4 固定床吸附过程分析 .....	229
6.3.5 吸附分离工艺及设备 .....	230
6.4 膜分离 .....	232
6.4.1 膜分离概述 .....	232
6.4.2 反渗透 .....	233
6.4.3 超滤 .....	235
6.4.4 电渗析 .....	237
6.4.5 气体混合物的分离 .....	238
6.4.6 膜分离设备 .....	239
6.5 分离方法的选择 .....	240
习题 .....	243
思考题 .....	244
本章主要符号说明 .....	245
参考文献 .....	248
<b>第7章 固体干燥</b> .....	<b>249</b>
7.1 固体干燥过程概述 .....	249
7.2 湿空气的性质及湿度图 .....	250
7.2.1 湿空气的状态参数 .....	250
7.2.2 湿度图 .....	252
7.2.3 湿度图的应用 .....	253
7.3 湿物料中水分的性质 .....	256
7.4 干燥过程物料衡算 .....	258
7.5 干燥速率 .....	258
7.5.1 间歇干燥过程的计算 .....	261
7.5.2 连续干燥过程一般特性 .....	263
7.5.3 干燥过程的热量衡算 .....	264
7.6 干燥设备(干燥器) .....	266
7.6.1 干燥器的基本要求 .....	266
7.6.2 常用对流式干燥器 .....	267
7.6.3 非对流式干燥器 .....	271
习题 .....	272
思考题 .....	274
本章主要符号说明 .....	274
参考文献 .....	275
<b>附录</b> .....	<b>276</b>

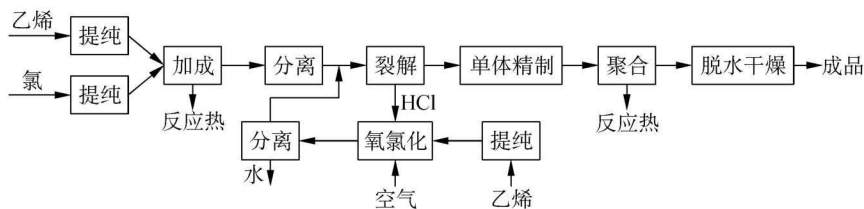
# 绪 论

## 1. 化工原理课程性质

“化工原理”是一门技术基础课程。它以物理、数学、化学及物理化学的理论为基础,系统介绍化工、轻工、石油、冶金等诸多工业中具有共同特点的各单元操作。每一单元操作基于一定理论基础,其过程都具有定量的数学描述,并配以典型设备来完成单元操作过程。它着重探讨各类操作过程的普遍机理,为学生学习各专业课程做理论和能力的准备。这样一门课程的形成与发展,都是以工业的发展为基础的,人们在长期不断的探索研究中,提出问题,做出假设,并予以不断的实践检验,得到符合客观规律的理论结果。

## 2. 化学工业的发展提出了各工艺过程的共性问题

最早的化工生产可以追溯到古代,火药、造纸、炼金术等都是古老而简单的化工生产。随着工业革命的兴起,化学工业也逐步发展起来。最初,面对种类繁多的化工产品以及各种各样的化工工艺,人们感到这些过程难以统一起来,因此最早出现的是“化工工艺学”。它是依据各种化工产品的生产工艺过程分类的,例如“硫酸工艺学”“制碱工艺学”等。随着化工产品种类逐渐多样化,“化工工艺学”的体系日渐庞大,几乎每一种产品都可以形成一门“工艺学”。最终人们还是发现,化学工业中任何产品的制造程序无论工艺如何错综复杂,都可以归纳为若干个基本过程,同时这些基本过程与生产的具体要求结合以后,还可以加以串联组合,构成一个新的产品制造工艺。在此基础上,人们提出研究各工艺过程共性的问题。例如乙烯氧氯化法制取聚氯乙烯塑料的生产,它以乙烯和氯为原料进行加成反应,经分离获得二氯乙烷;二氯乙烷再经 $550^{\circ}\text{C}$ 、 $3\text{ MPa}$ 的高温裂解生成氯乙烯;裂解所得氯化氢与空气、乙烯在 $200^{\circ}\text{C}$ 、 $0.5\text{ MPa}$ 下进行氧氯化反应,生成二氯乙烷和水,经分离后二氯乙烷再进行裂解;精制后的氯乙烯单体在 $55^{\circ}\text{C}$ 、 $0.8\text{ MPa}$ 左右进行聚合反应获得聚氯乙烯。在进行加成反应前,必须将乙烯和氯中所含各种杂质除去,以免反应器中的催化剂中毒失效。反应产物又需进行分离,除去副产物四氯化碳、苯、三氯乙烷以及未反应的原料等。分离精制后的氯乙烯单体须经压缩、换热,达到聚合反应所需的纯度和聚集状态。聚合所得的塑料颗粒和水的悬浮液须经脱水、干燥成为产品。生产过程可简要地图示如下。



上述生产过程除加成、裂解、氧氯化和聚合属化学反应外,原料和反应物的提纯、精制、分离等工序均属前、后处理过程。前、后处理工序所进行的过程多数是物理过程,但却是化工生产所不可缺少的。

由上述例子及大量的化工工艺过程可以看出,尽管各种产品生产工艺各不相同,但都经过“原料→前处理(预处理)→化学反应→后处理→产品”这一过程。

化学工业发展史上,根据物理过程的目的,同时兼顾过程的原理、物质的相态等,将各种前、后处理过程归纳为一系列的单元操作,如表 0-1 所示。



(扫描二维码  
观看单元操作  
及其发展历程  
视频)

表 0-1 化工常用单元操作

单元操作	目的	物 态	原 理	传递过程
流体输送	输送	气、液	输入机械能	动量传递
搅拌	混合或分散	气、液、固	输入机械能	动量传递
过滤	非均相混合物分离	气、液、固	不同尺度的截留	动量传递
沉降	非均相混合物分离	气、液、固	密度差引起的沉降	动量传递
加热、冷却	升、降温,改变相态	气、液	利用温度差传入或移出热量	热量传递
蒸发	溶剂与非挥发性物质的分离	液	供热以汽化溶剂	热量传递
吸收	均相混合物的分离	气	各组分在溶剂中溶解度的差异	物质传递
精馏	均相混合物的分离	液	各组分挥发度的差异	物质传递
萃取	均相混合物的分离	液	组分在溶剂中溶解度的差异	物质传递
干燥	去湿	固	供热汽化	热、质同时传递
吸附	均相混合物的分离	气、液	各组分在吸附剂中吸附能力不同	物质传递

单元操作形成于化学工业的发展过程之中,这一发展创造性地把不同体系存在的相似或相同的内容加以归类,并进一步探索其共同的原理,而这些原理正是基于物理、数学、化学及物理化学等基础学科。用这些理论解决实际工程问题,既能使各单元操作具有理论基础,又能使其具有可操作性。在配备各单元操作相应的典型设备后,形成相对完整的独立体系。因此,各单元操作包括两个方面:过程和设备。

就各单元操作的本质而言,不外乎三种,即动量传递、热量传递和质量传递,这样就将各单元操作归纳为三传过程,这种归纳既揭示了单元操作的过程本质,又反映了各种现象,从而使传递过程成为统一的研究对象,这是联系各单元操作的一条主线。同时,各单元操作有着共同的研究方法,这是因为各单元操作既依据不同的原理和操作目的加以分类,又要用一定的设备去实现具体操作目的。各单元操作面对的是真实而复杂的实际工程问题,如实逼真的数学描述几乎是不可能的,必须寻求合理、实用的研究方法。经验法(即实验研究法)和数学模型法(即半经验半理论法)就这样形成了。

研究对象和研究方法的确立,加上具体单元操作的实质内容,形成“化工原理”课程。

### 3. 化工原理课程的实践检验与发展

如前所述,化工原理课程所包含的各单元操作具有相对独立性与相容性。每一单元操作都基于一定原理,在应用于实际工程问题的分析时,必须确定定量的数学描述,配备适宜的设备来完成。如精馏单元操作,其理论基础是物理化学中的相平衡理论。应用相平衡理论来分析具有不同挥发性的液体物质,给予一定热量和冷量,使各组分在不断达到相平衡的过程中趋向于纯物质。该过程在热量衡算假设的基础上,用气-液两相之间的相平衡与物料衡算来进行数学描述。而为了实现该过程,设计了各种型式的精馏塔,并探索出塔顶液相回流、塔釜气相回流的特殊操作方法。该种设备及其操作完成了液体混合物分离成纯物质这一完整过程。

化工原理课程之所以稳固成为化工类学科的专业基础课程,是因为它以基础理论课为前续课程,并应用了其中的许多原理,使学生懂得了前续课程的用途。除了自然科学严格的理论分析方法(解析法)外,配以解决实际工程问题所用的实验研究法和数学模型法,引导学生解决复杂的实际工程问题,并在课程结束之后安排典型设备的设计,更增添课程的实践性。激发学生从单纯的理论学习模式中跳出来,开始接触实际工程问题,逐渐熟悉分析、解决实际工程问题的渐进方法,这种方法为后继的专业课程打下基础。这恰恰反映了该课程作为专业基础课程的必要性。

化工原理课程是工业发展与科学理论相结合的产物,具有广阔的实践基础和坚实的理论基础,其还将向广度和深度发展。

#### 4. 化工原理重要基本概念

在化工原理的学习中必须掌握以下基本概念,它们是从事化工生产的操作者和管理者所要掌握的重要基本概念。

##### 1) 物料衡算

在单元操作中,对于任一系统,凡是向该系统输入的物料量必定等于从该系统输出的物料量与在该系统累积的物料量之和,即

$$\text{输入系统的物料量} = \text{输出系统的物料量} + \text{系统累积物料量}$$

这是物料衡算的通式,它是根据质量守恒定律建立的。因为化工生产贯穿着物料的转化,所以在化工操作中应该进行物料衡算,它是企业进行生产核算的重要内容。据此可以判断操作的优劣、分析经济效益、提供工艺数据等,为严密控制生产的正常运行、减少物料损失打下基础。上述物料衡算的方法既适用于连续操作系统,也适用于间歇操作系统,还适用于对系统任一组分的物料衡算。对于含化学反应的系统,它适用于任一元素的衡算。

物料衡算的步骤可概括为划定物料衡算的范围、确定物料衡算的基准、列出物料衡算的方程和求解方程四个步骤。

① 划定范围 确定物料衡算所包括或涉及的范围,一般可用封闭虚线框(即控制体)将需要衡算的设备的局部,或一个车间、一个工段、一个塔段等划定出来,控制体就是要进行物料衡算的对象。进出控制体的物料均用带箭头的物流线标明,物流线一定与范围线相交(若不相交表示该物流没有进入或者离开体系)。

② 确定基准 对于间歇操作,可以规定以一批物料为基准;对于连续操作,一般以 1 h 作为基准,必要时也可以用 1 天、1 月、1 年作为基准。

③ 列出方程 可以列出整个物料衡算的方程,也可以列出某组分的衡算方程。所列方程应包含已知条件和所求的量,对于有几个未知量的衡算问题,需要列出几个互相独立的衡算方程。

④ 求解方程 从联立方程组解出未知量。列出物料衡算表,并用衡算表验算。

应当注意:物料衡算时,应严格按以上步骤进行;计算时使用的单位要统一;物料衡算实际上是质量守恒,计算时常用质量单位。

##### 2) 能量衡算

在化工生产操作中,始终贯穿着能量的使用是否完善的问题。提高输入体系能量的有效利用率和尽量减少能量的损失,在很大程度上关系着产品成本和生产的经济效益。能量衡算是定量计算能量有效利用率和能量损失的一种形式,它是基于能量守恒定律的。在任何一个化工过程中,凡向体系输入的能量必等于从该体系输出的能量和能量损失之和,即

$$\text{输入能量} = \text{输出能量} + \text{能量损失}$$

式中,能量损失是指输入体系能量中未被有效利用的部分。

按照这一规律进行计算,称为能量衡算,其计算步骤除按物料衡算外,还应确定基准温度。习惯上选 0℃ 为基准温度,并规定 0℃ 的液体焓为零。

##### 3) 平衡关系

化工过程中的每一单元操作或化学反应可称为过程,研究过程的规律,目的是使过程向有利于生产的方向进行。平衡关系,就是研究过程进行的方向和过程进行的极限(过程进行的最大程度)。

平衡关系就是指在一定条件下,过程的变化达到了极限,即达到平衡状态。例如,高温物体自动地向低温物体传热,直至两个物体的温度相等。宏观上热量不再进行传递,即达到了传热的平衡状态。

当条件改变时,原有的平衡状态被破坏并发生转移,直至在新的条件下重新建立平衡。在化工生产中经常采用改变平衡条件的方法,使平衡向有利于生产的方向移动。为有效地控制生产,应掌握生产过程的平衡状态和平衡条件的相互关系,进而判断过程进行的程度,做到心中有数地驾驭生产、完善操作。

#### 4) 过程速率

过程速率是指在单位时间内过程的变化,即表明过程进行的快慢。在化工生产中,过程进行的快慢远比过程的平衡更重要。若一个过程可以进行,而速率非常慢,那么这个过程就失去了工业规模生产的意义。

对于一个处于不平衡状态的体系,必然会产生使体系趋于平衡的过程;但过程以怎样的速率趋向平衡,这不仅与平衡关系有关,也与影响过程的诸多因素有关。由理论研究和科学实验证明,过程速率是过程推动力与过程阻力的函数,过程推动力越大,过程阻力越小,则过程速率越大;否则反之,即

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

式中,过程推动力指的是直接导致过程进行的动力,如水从高处自动流向低处的推动力是位能差。过程阻力因素较多,与体系物性、过程性质、设备结构类型、操作条件都有关系。对过程速率问题的讨论,将在各章中进行介绍。在化工单元操作中,应努力寻求提高过程速率的途径。怎样加大过程推动力和减少过程阻力,是提高设备生产能力的重要问题。

#### 5) 经济效益

经济效益也称为经济效果,一般指经济活动中,所取得的成果与劳动消耗之比,即

$$\text{经济效益} = \frac{\text{劳动成果}}{\text{劳动消耗}}$$

式中,劳动成果是指最终的合格产品的价值;劳动消耗包含操作费用(消耗的人力、原材料、水电、维修等)、设备折旧费用(设备的造价和使用年限折算)以及占用的固定资产和流动资金。

可见,在一定的劳动消耗条件下,适合市场需求的合格产品越多,经济效益越好。为了提高经济效益,必须从提高生产操作者的技术素质、提高劳动成果和降低消耗三个方面去开展技术革新,加强生产管理和经济核算,降低操作费用,提高设备的生产能力,以达到优质、高产、低消耗、高效益的目的。

## 5. 化工常用量和单位

### 1) 化工常用量

量是指物理量,任何物理量都是用数字和单位联合表达的。每种物理量都有规定的符号,这些符号都是国际上认定和国家标准规定的。目前,国际上逐渐统一采用国际单位制单位(SI单位);我国采用中华人民共和国法定计量单位。

物理量分为基本量和导出量。一般先选几个独立的物理量,如 SI 单位中,长度、时间、质量、热力学温度、物质的量、电流强度、发光强度确定为基本量。化工单元操作中,用前 5 个基本量就足够了。由基本量导出的量都是导出量,如体积、重力加速度等。

### 2) 单位

用来度量同类量大小的标准量称为计量单位。基本量的主单位称作基本单位。在确定了基本单位后,按照物理量之间的关系,用相乘、相除的形式构成的单位称为导出单位。

我国在 1984 年公布实施的法定计量单位主要以 SI 单位制为基础,它具有统一性、科学性、简明性、实用性、合理性等优点。我国根据实际情况选用了一些非国际单位构成了法定

计量单位,如吨(t)、升(L)等。

### 3) 化工常用的 5 个 SI 基本量及单位

长度:基本单位是米(m),其倍数单位有千米(km)、毫米(mm)、微米( $\mu\text{m}$ )等。

时间:基本单位是秒(s),国家选定的 SI 制外的时间单位有分(min)、小时(h)、天(d)、年(a)。

质量:千克(kg)、克(g)及其部分倍数单位,如毫克(mg)、吨(t)等。

热力学温度:基本单位是开尔文(K),等于水的三相点热力学温度的  $1/273.16$ 。

物质的量:基本单位是摩尔(mol),其倍数单位有 kmol, mmol 等。

### 4) 化工常用的 4 个 SI 导出单位

力、重力:牛顿(N)及倍数单位,如 MN, kN, mN 等。

压力、压强:帕斯卡(Pa)及其倍数单位,如 kPa, MPa, mPa 等。

能量、功、热量:焦耳(J)及其倍数单位,如 kJ, MJ 以及瓦特秒( $\text{W} \cdot \text{s}$ ),千瓦时( $\text{kW} \cdot \text{h}$ )等。

功率:瓦特(W)及其倍数单位,如 kW, MW 等。

### 5) 法定计量单位的使用、写法及读的规则

① 使用规则 词头代号用正体,词头代号和单位代号之间不留间隙,如 1 km, 1 Mm, 1 mm 等;如带词头的单位代号上有指数,则表明倍数单位的系数值可由词头自乘而得,如  $1 \text{ cm}^3 = 1 \times (10^{-2})^3 \text{ m}^3 = 10^{-6} \text{ m}^3$ ,  $1 \text{ cm}^{-1} = 1 \times (10^{-2})^{-1} \text{ m}^{-1} = 10^2 \text{ m}^{-1}$ ;不允许两个以上国际单位制词头并列而成的组合词头,如  $10^6 \text{ g}$ ,可用 1 Mg,不许用 1 kkg;选用国际单位制词头时,一般应使单位前系数值在 0.1~1 000,如 12 000 m 可写成 12 km, 0.003 94 m 可写成 3.94 mm。

② 写法规则 量的符号用斜体字母,单位的符号用正体字母,单位符号一般为小写,不能写成大写,如 m 不能写成 M;两个以上单位的乘积应最好用圆点作为乘号,当不致与其他单位代号混淆时,圆点可省略,如  $\text{N} \cdot \text{m}$  可以写成 Nm,但不应写成 mN,因为后者会误认为是毫牛;但导出单位系由一个单位除以另外一个单位构成时,可以用斜线形式书写,分子、分母应同在一水平线上,如  $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$ ,不能写成  $\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$ ;当词头符号表示的因数小于  $10^6$  时小写,大于  $10^6$  时大写,如兆写为 M, 1 MPa 不能写成 1 mPa;千写为 k, 1 kg 不能写成 1 Kg。

③ 读的规则 可按单位或词头的名称读音读,如“km”读“千米”,“mm”读“毫米”,“ $^{\circ}\text{C}$ ”读“摄氏度”。读的顺序与序号顺序一致,乘号按顺序读,如“ $\text{N} \cdot \text{m}$ ”读“牛顿米”。除号的对应名称是“每”,如速度“ $\text{m}/\text{s}$ ”读“米每秒”,不能读“秒分之米”;传热系数“ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ”读“瓦特每平方米开尔文”。

SI 还规定一些辅助单位和基本单位并用,如时间采用日(d)、小时(h)、分(min),质量采用吨(t),容积采用升(L)等,以上括号中为单位代号。除此之外,在本书中还遇到一些不属于任何单位制的单位,因为它们是由于习惯而保留下来的,故称为惯用单位。

应当提出,在使用物理量方程进行计算时,一开始应选定一种单位制度,并贯彻到底,中途不应改变,本书中未特别提出处均采用 SI 单位制。在计算之前,如遇到其他单位制的单位,应把它们换算成 SI 单位。单位换算在书中各章节的计算例题中进行应用训练。化工常用法定计量单位及单位换算见附录一。

## 6. 学习本课程的主要方法

本课程是理论与实践紧密联系的一门工程课程,学习时既要注意理论的系统性,又要充分重视课程的实践性。由课堂教学讲授基本理论,再通过实验、实习,巩固和加深对基本理论的理解,用掌握了的基本理论去指导单元操作训练,在实践中验证理论的正确性。此外,



还需注意下列几点。

1) 理解和掌握基本理论

重视基础理论、基本概念、基本公式的学习,尤其要抓住各单元过程的平衡、速率关系问题,因为这是学好本课程的基础。在此基础上联系实际、逐步深入,才能将理论灵活应用于生产操作中。

2) 树立工程观念

学习本课程还需让学生初步树立工程观念,学会从工程角度去分析和处理生产中的技术问题。也就是说必须同时具备四种观念,即理论上的正确性、技术上的可行性、操作上的安全性、经济上的合理性,其中经济是核心。这四种观念是相互联系、相互促进的统一体。所谓工程观念,就是要从这四个方面的要求出发,全面地考虑和决定工程问题的观点。

3) 熟悉工程计算,培养基本计算能力

在单元操作计算中,涉及的物理量很多,有些数据计算时较烦琐,常需利用有关图表或手册查取。正确应用和熟练掌握有关图表和手册的使用方法,并将其用于单元操作过程计算也是本课程学习的基本技能之一。