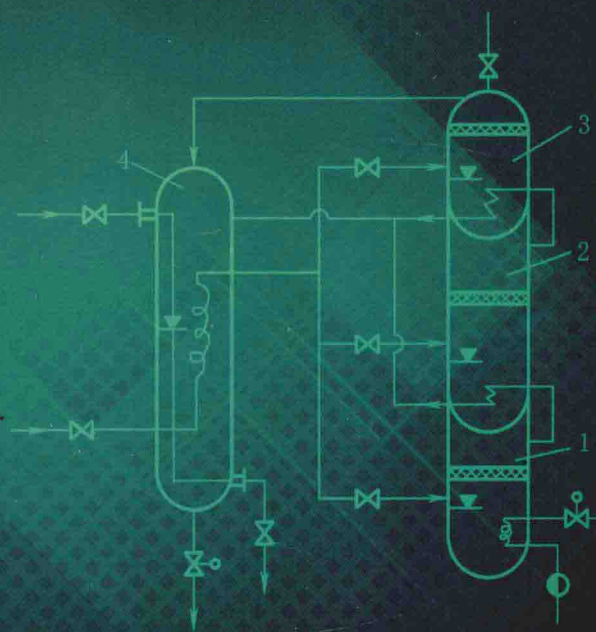
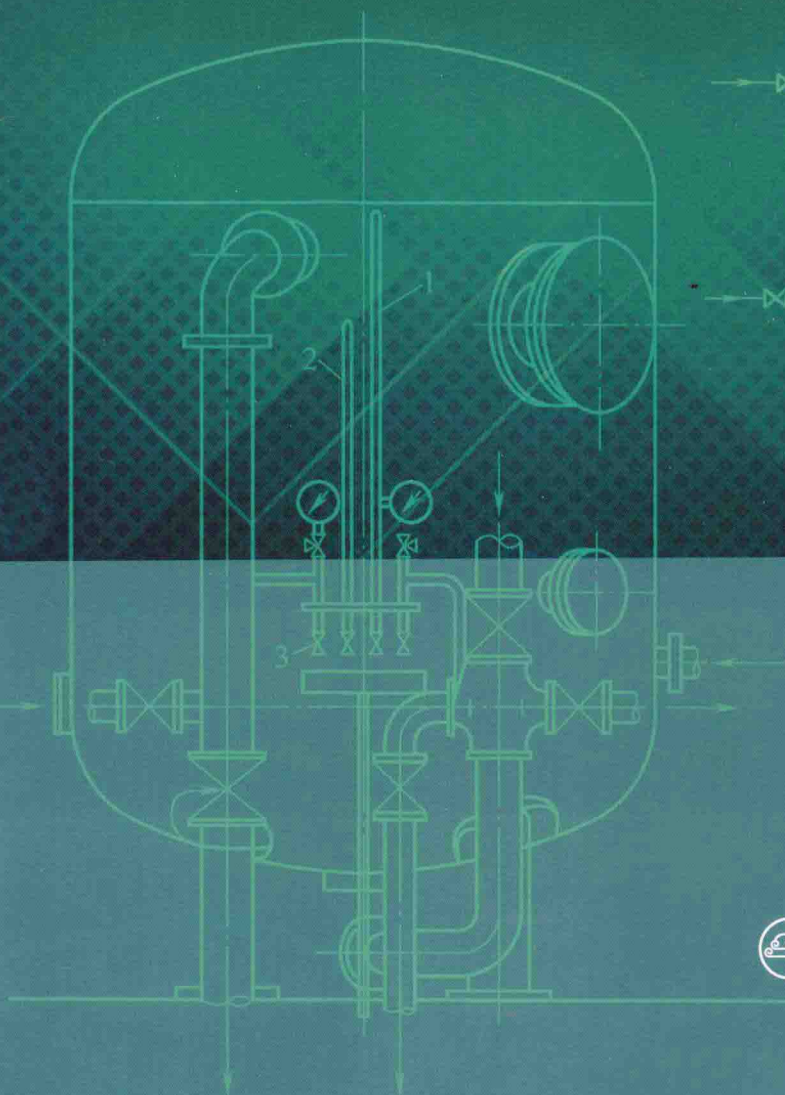


国家卫生和计划生育委员会“十二五”规划教材  
全国高等医药教材建设研究会“十二五”规划教材  
全国高等学校制药工程、药物制剂专业规划教材  
供制药工程、药物制剂专业用

# 化工原理

主 编 王志祥  
副主编 周丽莉 潘晓梅



人民卫生出版社  
PEOPLE'S MEDICAL PUBLISHING HOUSE

国家卫生和计划生育委员会“十二五”规划教材  
全国高等医药教材建设研究会“十二五”规划教材  
全国高等学校制药工程、药物制剂专业规划教材  
供制药工程、药物制剂专业用

# 化工原理

主 编 王志祥

副主编 周丽莉 潘晓梅

编 者 (以姓氏笔画为序)

于智莘 (长春中医药大学)

王志祥 (中国药科大学)

周丽莉 (沈阳药科大学)

孟繁钦 (牡丹江医学院)

高文义 (浙江国邦药业有限公司)

黄宏妙 (广西中医药大学)

黄德春 (中国药科大学)

雷雪霏 (辽宁中医药大学)

潘永兰 (南京中医药大学)

潘晓梅 (东南大学)



人民卫生出版社  
PEOPLE'S MEDICAL PUBLISHING HOUSE



## 图书在版编目 ( CIP ) 数据

化工原理 / 王志祥主编. —北京: 人民卫生出版社,  
2014.6

ISBN 978-7-117-18804-3

I. ①化… II. ①王… 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 (2014) 第 071117 号

人卫社官网	<a href="http://www.pmph.com">www.pmph.com</a>	出版物查询, 在线购书
人卫医学网	<a href="http://www.ipmph.com">www.ipmph.com</a>	医学考试辅导, 医学数 据库服务, 医学教育资 源, 大众健康资讯

版权所有, 侵权必究!

## 化 工 原 理

主 编: 王志祥

出版发行: 人民卫生出版社 ( 中继线 010-59780011 )

地 址: 北京市朝阳区潘家园南里 19 号

邮 编: 100021

E - mail: [pmph@pmph.com](mailto:pmph@pmph.com)

购书热线: 010-59787592 010-59787584 010-65264830

印 刷: 三河市博文印刷有限公司

经 销: 新华书店

开 本: 787 × 1092 1/16 印张: 23

字 数: 574 千字

版 次: 2014 年 6 月第 1 版 2014 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

标准书号: ISBN 978-7-117-18804-3/R · 18805

定 价: 39.00 元

打击盗版举报电话: 010-59787491 E-mail: [WQ@pmph.com](mailto:WQ@pmph.com)

( 凡属印装质量问题请与本社市场营销中心联系退换 )

# 国家卫生和计划生育委员会“十二五”规划教材 全国高等学校制药工程、药物制剂专业规划教材

## 出版说明

《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010-2020年)》和《国家中长期人才发展规划纲要(2010-2020年)》中强调要培养造就一大批创新能力强、适应经济社会发展需要的高质量各类型工程技术人才,为国家走新型工业化发展道路、建设创新型国家和人才强国战略服务。制药工程、药物制剂专业正是以培养高级工程化和复合型人才为目标,分别于1998年、1987年列入《普通高等学校本科专业目录》,但一直以来都没有专门针对这两个专业本科层次的全国规划性教材。为顺应我国高等教育教学改革与发展的趋势,紧紧围绕专业教学和人才培养目标的要求,做好教材建设工作,更好地满足教学的需要,我社于2011年即开始对这两个专业本科层次的办学情况进行了全面系统的调研工作。在广泛调研和充分论证的基础上,全国高等医药教材建设研究会、人民卫生出版社于2013年1月正式启动了全国高等学校制药工程、药物制剂专业国家卫生和计划生育委员会“十二五”规划教材的组织编写与出版工作。

本套教材主要涵盖了制药工程、药物制剂专业所需的基础课程和专业课程,特别是与药专业教学要求差别较大的核心课程,共计17种(详见附录)。

作为全国首套制药工程、药物制剂专业本科层次的全国规划性教材,具有如下特点:

### 一、立足培养目标,体现鲜明专业特色

本套教材定位于普通高等学校制药工程专业、药物制剂专业,既确保学生掌握基本理论、基本知识和基本技能,满足本科教学的基本要求,同时又突出专业特色,区别于本科药专业教材,紧紧围绕专业培养目标,以制药技术和工程应用为背景,通过理论与实践相结合,创建具有鲜明专业特色的本科教材,满足高级科学技术人才和高级工程技术人才培养的需求。

### 二、对接课程体系,构建合理教材体系

本套教材秉承“精化基础理论、优化专业知识、强化实践能力、深化素质教育、突出专业特色”的原则,构建合理的教材体系。对于制药工程专业,注重体现具有药物特色的工程技术性要求,将药物和工程两方面有机结合、相互渗透、交叉融合;对于药物制剂专业,则强调不单纯以学科型为主,兼顾能力的培养和社会的需要。

### 三、顺应岗位需求,精心设计教材内容

本套教材的主体框架的制定以技术应用为主线,以“应用”为主旨甄选教材内容,注重学生实践技能的培养,不过分追求知识的“新”与“深”。同时,对于适用于不同专业的同一

课程的教材,既突出专业共性,又根据具体专业的教学目标确定内容深浅度和侧重点;对于适用于同一专业的相关教材,既避免重要知识点的遗漏,又去掉了不必要的交叉重复。

#### 四、注重案例引入,理论密切联系实践

本套教材特别强调对于实际案例的运用,通过从药品科研、生产、流通、应用等各环节引入的实际案例,活化基础理论,使教材编写更贴近现实,将理论知识与岗位实践有机结合。既有用实际案例引出相关知识点的介绍,把解决实际问题的过程凝练至理性的维度,使学生对于理论知识的掌握从感性到理性;也有在介绍理论知识后用典型案例进行实证,使学生对于理论内容的理解不再停留在凭空想象,而源于实践。

#### 五、优化编写团队,确保内容贴近岗位

为避免当前教材编写存在学术化倾向严重、实践环节相对薄弱、与岗位需求存在一定程度脱节的弊端,本套教材的编写团队不但有来自全国各高等学校具有丰富教学和科研经验的一线优秀教师作为编写的骨干力量,同时还吸纳了一批来自医药行业企业的具有丰富实践经验的专家参与教材的编写和审定,保障了一线工作岗位上先进技术、技能和实际案例作为教材的内容,确保教材内容贴近岗位实际。

本套教材的编写,得到了全国高等学校制药工程、药物制剂专业教材评审委员会的专家和全国各有关院校和企事业单位的骨干教师和一线专家的支持和参与,在此对有关单位和个人表示衷心的感谢!更期待通过各校的教学使用获得更多的宝贵意见,以便及时更正和修订完善。

全国高等医药教材建设研究会

人民卫生出版社

2014年2月

## 附：国家卫生和计划生育委员会“十二五”规划教材 全国高等学校制药工程、药物制剂专业规划教材目录

序号	教材名称	主编	适用专业
1	药物化学*	孙铁民	制药工程、药物制剂
2	药剂学	杨 丽	制药工程
3	药物分析	孙立新	制药工程、药物制剂
4	制药工程导论	宋 航	制药工程
5	化工制图	韩 静	制药工程、药物制剂
5-1	化工制图习题集	韩 静	制药工程、药物制剂
6	化工原理	王志祥	制药工程、药物制剂
7	制药工艺学	赵临襄 赵广荣	制药工程、药物制剂
8	制药设备与车间设计	王 沛	制药工程、药物制剂
9	制药分离工程	郭立玮	制药工程、药物制剂
10	药品生产质量管理	谢 明 杨 悦	制药工程、药物制剂
11	药物合成反应	郭 春	制药工程
12	药物制剂工程	柯 学	制药工程、药物制剂
13	药物剂型与递药系统	方 亮 龙晓英	药物制剂
14	制药辅料与药品包装	程 怡 傅超美	制药工程、药物制剂、药学
15	工业药剂学	周建平 唐 星	药物制剂
16	中药炮制工程学*	蔡宝昌 张振凌	制药工程、药物制剂
17	中药提取工艺学	李小芳	制药工程、药物制剂

注：\*教材有配套光盘。

# 全国高等学校制药工程、药物制剂专业 教材评审委员会名单

## 主任委员

尤启冬 中国药科大学

## 副主任委员

赵临襄 沈阳药科大学

蔡宝昌 南京中医药大学

## 委 员 (以姓氏笔画为序)

于奕峰 河北科技大学化学与制药工程学院

元英进 天津大学化工学院

方 浩 山东大学药学院

张 珩 武汉工程大学化工与制药学院

李永吉 黑龙江中医药大学

杨 帆 广东药学院

林桂涛 山东中医药大学

章亚东 郑州大学化工与能源学院

程 怡 广州中医药大学

虞心红 华东理工大学药学院

## 前 言

我国的制药工程教育始于 1998 年,虽然起步较晚,但发展速度极快,目前国内已有 200 余所高校相继设立了制药工程本科专业。根据原教育部制药工程专业教学指导分委员会起草制订的《高等学校制药工程专业指导性专业规范》中对于本专业课程体系的要求,化工原理是制药工程专业的核心课程。

目前国内已有多种版本的化工原理教材,并且各具特色,但仍缺乏反映制药工业特点和制药工程专业特色的《化工原理》教材。为此,全国高等医药教材建设研究会、人民卫生出版社启动了全国高等学校制药工程、药物制剂专业国家卫生和计划生育委员会“十二五”规划教材的论证、编写与出版工作,并将《化工原理》教材列入首批规划教材,目的是为制药工程及相关专业提供适宜的《化工原理》教材。

制药化工单元操作的种类很多,每种单元操作均有十分丰富的内容。根据制药工业的特点和化工原理课程的教学要求,本书精选了若干个典型的制药化工单元操作进行介绍,力求全面系统地阐明制药化工过程的基本原理和工程方法。全书共分为十章,包括流体流动、流体输送设备、沉降与过滤、传热、蒸发、结晶、蒸馏、吸收、萃取和固体干燥等。在内容选择和深度上,力求能反映制药工业的特点和教学改革的需要,强调“三基”(基本理论、基本知识和基本技能)和“五性”(思想性、科学性、先进性、启发性和适用性),注重理论与实践以及药学与工程学的结合。

本书由中国药科大学王志祥教授主编并统稿。沈阳药科大学周丽莉教授和东南大学潘晓梅副教授任副主编。参加本书编写工作的人员还有于智莘、孟繁钦、高文义、黄宏妙、黄德春、雷雪霏、潘永兰。在编写过程中还得到中国药科大学史益强、李想、杨照、崔志芹、武法文、戴琳等诸多同志的大力支持,在此一并表示感谢。

作者在编写和修改过程中已作了很大努力,但由于水平所限,错误和不当之处在所难免,恳请广大读者批评指正,以利于该书的进一步修订和完善。

王志祥  
2014 年 1 月





# 目 录

绪论	1
一、制药工业与单元操作	1
二、课程性质和任务	1
三、物理量的单位及单位换算	1
<b>第一章 流体流动</b>	<b>4</b>
第一节 流体静力学	4
一、流体的密度	4
二、流体的压强	7
三、流体静力学基本方程式	8
四、流体静力学基本方程式的应用	9
第二节 流体在管内流动的基本方程式	15
一、流量与流速	15
二、稳态流动与非稳态流动	17
三、连续性方程式	17
四、伯努利方程式	18
第三节 流体在管内的流动现象	25
一、牛顿黏性定律与流体的黏度	25
二、流动类型与雷诺准数	27
三、流体在圆管内的速度分布	29
四、层流内层	29
第四节 流体在管内的流动阻力	30
一、直管阻力	30
二、局部阻力	35
三、管路系统的总能量损失	37
四、降低管路系统流动阻力的途径	39
第五节 管路计算	39

第六节 流速与流量的测量 .....	41
一、测速管 .....	41
二、孔板流量计 .....	42
三、文丘里流量计 .....	44
四、转子流量计 .....	44
<b>第二章 流体输送设备 .....</b>	<b>50</b>
第一节 液体输送设备 .....	50
一、离心泵 .....	50
二、其他类型泵 .....	63
第二节 气体输送设备 .....	67
一、离心式通风机 .....	67
二、鼓风机 .....	69
三、压缩机 .....	70
四、真空泵 .....	71
<b>第三章 沉降与过滤 .....</b>	<b>75</b>
第一节 重力沉降 .....	75
一、重力沉降速度 .....	75
二、沉降槽 .....	78
三、降尘室 .....	78
第二节 离心沉降 .....	82
一、惯性离心力作用下的离心沉降 .....	82
二、离心分离设备 .....	83
第三节 过滤 .....	86
一、基本概念 .....	86
二、恒压过滤 .....	89
三、过滤设备 .....	91
四、滤饼的洗涤 .....	93
五、板框压滤机的生产能力 .....	94
第四节 膜过滤 .....	95
一、膜过滤原理与膜组件 .....	95
二、微滤 .....	97
三、超滤 .....	98
四、纳滤 .....	98
五、反渗透 .....	98
六、电渗析 .....	99
第五节 气体净化 .....	100
一、机械除尘 .....	100
二、过滤除尘 .....	101

三、洗涤除尘 .....	101
四、洁净空气净化流程及专用过滤器 .....	102
<b>第四章 传热</b> .....	106
<b>第一节 概述</b> .....	106
一、传热的基本方式 .....	106
二、典型的传热设备 .....	107
三、换热器的主要性能指标 .....	108
四、稳态传热和非稳态传热 .....	109
<b>第二节 热传导</b> .....	109
一、温度场和温度梯度 .....	109
二、傅立叶定律和导热系数 .....	110
三、平壁的热传导 .....	111
四、圆筒壁的热传导 .....	113
<b>第三节 对流传热</b> .....	116
一、对流传热分析 .....	116
二、对流传热速率方程 .....	116
三、对流传热系数 .....	117
<b>第四节 传热计算</b> .....	128
一、能量衡算 .....	128
二、总传热速率方程 .....	129
三、总传热系数 .....	130
四、平均温度差 .....	132
五、壁温的估算 .....	135
六、设备热损失的计算 .....	136
<b>第五节 换热器</b> .....	137
一、间壁式换热器 .....	137
二、传热过程的强化 .....	143
<b>第五章 蒸发</b> .....	147
<b>第一节 概述</b> .....	147
一、蒸发过程的特点 .....	147
二、蒸发的分类 .....	148
<b>第二节 单效蒸发</b> .....	149
一、单效蒸发流程 .....	149
二、单效蒸发的计算 .....	149
<b>第三节 多效蒸发</b> .....	155
一、多效蒸发原理 .....	155
二、多效蒸发流程 .....	155
三、蒸发过程的节能措施 .....	157

第四节 蒸发器的生产能力、生产强度及效数的限制 .....	159
一、生产能力 .....	159
二、生产强度 .....	159
三、多效蒸发效数的限制 .....	160
第五节 蒸发设备 .....	160
一、蒸发设备的结构 .....	160
二、蒸发器的选型 .....	166
<b>第六章 结晶</b> .....	169
第一节 基本概念 .....	169
一、溶解度 .....	169
二、过饱和度 .....	171
第二节 结晶动力学与操作控制 .....	172
一、结晶动力学 .....	172
二、结晶操作的主要性能指标 .....	174
三、结晶操作方式 .....	175
四、结晶操作控制 .....	175
第三节 结晶计算 .....	176
一、物料衡算 .....	176
二、热量衡算 .....	178
第四节 结晶设备 .....	179
一、冷却式结晶器 .....	179
二、蒸发式结晶器 .....	180
三、真空式结晶器 .....	181
<b>第七章 蒸馏</b> .....	183
第一节 概述 .....	183
一、蒸馏过程的分离机制 .....	183
二、蒸馏过程的分类 .....	183
第二节 双组分溶液的气液平衡 .....	183
一、溶液的蒸气压及拉乌尔定律 .....	184
二、温度组成图( $t$ - $y$ - $x$ 图) .....	185
三、挥发度及相对挥发度 .....	185
四、气液平衡图( $y$ - $x$ 图) .....	187
五、双组分非理想溶液 .....	189
第三节 蒸馏与精馏原理 .....	190
一、平衡蒸馏与简单蒸馏 .....	190
二、精馏原理 .....	191
第四节 双组分连续精馏塔的计算 .....	193
一、理论板及恒摩尔流假设 .....	193



二、全塔物料衡算 .....	194
三、精馏段操作线方程 .....	195
四、提馏段操作线方程 .....	196
五、进料热状况与进料方程 .....	197
六、理论塔板数的确定 .....	202
七、回流比的影响与选择 .....	205
<b>第五节 间歇精馏</b> .....	209
一、间歇精馏的特点 .....	209
二、间歇精馏的操作方式 .....	210
<b>第六节 特殊蒸馏</b> .....	211
一、恒沸精馏 .....	211
二、萃取精馏 .....	212
三、水蒸气蒸馏 .....	213
四、分子蒸馏 .....	214
<b>第七节 精馏塔</b> .....	217
一、板式塔 .....	218
二、填料塔 .....	219
<b>第八章 吸收</b> .....	225
<b>第一节 概述</b> .....	225
一、吸收过程的基本概念 .....	225
二、吸收的工业应用 .....	225
三、吸收的分类 .....	225
四、吸收和解吸 .....	226
五、吸收剂的选择 .....	226
<b>第二节 气液相平衡</b> .....	227
一、溶解度曲线 .....	227
二、亨利定律 .....	228
<b>第三节 基于理论板假设的吸收塔的计算</b> .....	231
一、全塔物料衡算 .....	231
二、吸收操作线方程 .....	232
三、吸收剂最小用量和适宜用量 .....	233
四、理论塔板数的计算 .....	234
<b>第四节 基于传质速率的吸收塔的计算</b> .....	236
一、传质机制 .....	236
二、吸收速率 .....	238
三、填料层高度的计算 .....	242
四、吸收塔的操作型计算 .....	247
五、体积吸收系数的测定 .....	248
<b>第五节 解吸及其他类型吸收</b> .....	249

一、解吸操作及计算 .....	249
二、化学吸收 .....	249
<b>第九章 萃取 .....</b>	<b>252</b>
<b>第一节 液液萃取 .....</b>	<b>252</b>
一、液液萃取流程 .....	252
二、部分互溶三元物系的液液萃取 .....	254
三、萃取剂的选择 .....	257
四、萃取过程的计算 .....	258
五、液液萃取设备 .....	263
<b>第二节 固液萃取 .....</b>	<b>266</b>
一、中药材中的成分 .....	266
二、中药提取的类型 .....	266
三、药材有效成分的提取过程及机制 .....	267
四、常用提取剂和提取辅助剂 .....	268
五、提取方法 .....	269
六、提取设备 .....	272
<b>第三节 超临界流体萃取 .....</b>	<b>275</b>
一、超临界流体 .....	275
二、超临界流体萃取的基本原理 .....	276
三、超临界萃取剂 .....	276
四、超临界流体萃取药物成分的特点 .....	277
五、超临界 CO <sub>2</sub> 萃取装置 .....	278
<b>第十章 固体干燥 .....</b>	<b>281</b>
<b>第一节 概述 .....</b>	<b>281</b>
一、去湿方法 .....	281
二、干燥操作的分类 .....	281
三、对流干燥过程分析 .....	282
<b>第二节 湿空气的性质与焓湿图 .....</b>	<b>282</b>
一、湿空气的性质 .....	282
二、湿空气的焓湿图及其应用 .....	288
<b>第三节 干燥过程的相平衡 .....</b>	<b>291</b>
一、湿物料含水量的表示方法 .....	291
二、水分在气、固两相之间的平衡及干燥平衡曲线 .....	292
<b>第四节 干燥过程速率 .....</b>	<b>294</b>
一、干燥速率 .....	294
二、干燥曲线与干燥速率曲线 .....	294
<b>第五节 干燥过程的工艺计算 .....</b>	<b>298</b>
一、物料衡算 .....	298

二、热量衡算 .....	300
三、干燥系统的热效率 .....	304
四、干燥时间的计算 .....	305
第六节 干燥器 .....	307
一、常用干燥器 .....	307
二、干燥器的选型 .....	313
主要参考文献 .....	316
附录 .....	317
附录 1 单位换算因数 .....	317
附录 2 饱和水的物理性质 .....	318
附录 3 部分有机液体的相对密度共线图 .....	319
附录 4 部分液体的物理性质 .....	321
附录 5 饱和水蒸气表(按温度排列) .....	323
附录 6 饱和水蒸气表(按压力排列) .....	324
附录 7 干空气的热物理性质( $1.013 \times 10^5$ Pa) .....	326
附录 8 液体的黏度共线图 .....	327
附录 9 气体的黏度共线图(101.3kPa) .....	330
附录 10 固体材料的导热系数 .....	331
附录 11 液体的导热系数 .....	332
附录 12 气体的导热系数共线图(101.3kPa) .....	334
附录 13 液体的比热共线图 .....	336
附录 14 气体的比热共线图(101.3kPa) .....	338
附录 15 液体的汽化潜热(蒸发潜热)共线图 .....	340
附录 16 管子规格 .....	341
附录 17 常用流速范围 .....	343
附录 18 IS 型单级单吸离心泵规格(摘录) .....	345
附录 19 错流和折流时的对数平均温度差校正系数 .....	347
附录 20 换热器系列标准 .....	348
附录 21 壁面污垢热阻 .....	350

---

# 绪 论

---

## 一、制药工业与单元操作

制药工业是根据中医和西医相结合的临床实践,生产医疗上所需的药品。药品的种类很多,每一种药品都有其独特的生产过程,但归纳起来,各种不同的生产过程都是由若干个反应(包括化学反应和生物转化反应等)和若干个基本的物理操作串联而成,每一个基本的物理操作过程都称为一个单元操作。例如,利用混合物中各组分的挥发度差异来分离液体混合物的操作过程称为精馏单元操作;利用各组分在液体溶剂中的溶解度差异来分离气体混合物的操作过程称为吸收单元操作;利用各组分在液体萃取剂中的溶解度不同来分离液体或固体混合物的操作过程称为萃取单元操作;通过对湿物料加热,使其中的部分水分汽化而得到干固体的操作过程称为干燥单元操作;通过冷却或使溶剂汽化的方法,使溶液达到过饱和而析出晶体的操作过程称为结晶单元操作,等等。因此,在研究药品生产过程时不需要将每一个药品生产过程都视为一种特殊的或独有的知识加以研究,而只需研究组成药品生产过程的每一个单元操作即可。研究药品生产过程中典型制药单元操作的基本原理及设备,并探讨这些单元操作过程的强化途径,是本课程的主要内容。

## 二、课程性质和任务

本课程是制药工程、药物制剂等制药类专业学生必修的一门技术基础课程,是利用《高等数学》、《物理学》和《物理化学》等先修课程的知识来解决制药生产中的实际问题,并为《制药工程学》等后续工程类专业课程的学习打下基础。因此,本课程是自然科学领域的基础课向工程学科的专业课过渡的入门课程,在整个教学计划中起着承上启下的作用。

本课程的任务是研究制药化工生产中典型单元操作的基本原理、设备及过程的强化途径,是一门理论与实践密切结合的工程类课程,也是一门需要学以致用用的课程。在教学和学习过程中,要善于理论联系实际,树立工程观点,从工程和经济的角度去考虑技术问题。通过本课程的课堂教学和实验训练,使学生掌握典型制药单元操作的基本原理及设备应用,并具备初步的工程实验研究能力和实际操作技术。对学生而言,努力学好本课程,将来无论是在科研院所,还是在工厂企业工作,都是大有裨益的。

## 三、物理量的单位及单位换算

任何物理量都是用数字和单位联合表达的。一般先选几个独立的物理量,如长度、时间等作为基本量,并规定出它们的单位,这些单位称为基本单位。而其他物理量,如速度、加速度等的单位则根据其自身的物理意义,由相应的基本单位组合而成,这些单位称为导出单位。