

全国高等医药院校药类规划教材

QUANGUO GAODENG YIYAO YUANXIAO

YAOXUELEI GUIHUA JIAOCAI

化工原理

(第二版)

HUAGONG
YUANLI

主编 何志成
主审 梁忠英

 中国医药科技出版社

全国高等医药院校药学类规划教材

化 工 原 理

(第二版)

主 编 何志成
主 审 梁忠英
副主编 王存文 邵 伟
编 委

(以姓氏笔画为序)

王存文 (武汉工程大学)

王 萍 (泰山医学院)

礼 彤 (沈阳药科大学)

杜 薇 (贵阳中医学院)

何志成 (沈阳药科大学)

邵 伟 (山东大学)

焦淑清 (佳木斯大学)

 中国医药科技出版社

内 容 提 要

本书是全国高等医药院校药学类规划教材之一。本书为医药工艺类高等院校《化工原理》课程适用教材,针对工艺类专业工程课时数较少的教学特点而编写。本书坚持理论联系实际,力求使学生通过课程学习对化工生产常见单元操作有一个整体概念,并能掌握其基本原理、熟悉典型设备的构造及工艺参数确定(或选型)。培养学生从工程的观点出发提出、分析和解决各种相关问题能力。本书还可供科研、设计及生产单位的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理/何志成主编. —2版. —北京:中国医药科技出版社, 2009.8

全国高等医药院校药学类规划教材

ISBN 978-7-5067-4257-3

I. 化… II. 何… 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(2009)第110171号

美术编辑 陈君杞

版式设计 郭小平

出版 中国医药科技出版社

地址 北京市海淀区文慧园北路甲22号

邮编 100082

电话 发行:010-62227427 邮购:010-62236938

网址 www.cspyp.cn

规格 787×1092mm $\frac{1}{16}$

印张 29 $\frac{1}{4}$

字数 586千字

初版 2002年8月第1版

版次 2009年8月第2版

印次 2009年8月第2版第4次印刷

印刷 北京季蜂印刷有限公司

经销 全国各地新华书店

书号 ISBN 978-7-5067-4257-3

定价 53.00元

本社图书如存在印装质量问题请与本社联系调换

全国高等医药院校药学类规划教材常务编委会

名誉主任委员 吴阶平 蒋正华 卢嘉锡

名誉副主任委员 邵明立 林蕙青

主任委员 吴晓明 (中国药科大学)

副主任委员 吴春福 (沈阳药科大学)

姚文兵 (中国药科大学)

吴少楨 (中国医药科技出版社)

刘俊义 (北京大学药学院)

朱依谆 (复旦大学药学院)

张志荣 (四川大学华西药学院)

朱家勇 (广东药学院)

委员 (按姓氏笔画排列)

王应泉 (中国医药科技出版社)

叶德泳 (复旦大学药学院)

刘红宁 (江西中医学院)

毕开顺 (沈阳药科大学)

吴 勇 (四川大学华西药学院)

李元建 (中南大学药学院)

李 高 (华中科技大学同济药学院)

杨世民 (西安交通大学药学院)

陈思东 (广东药学院)

姜远英 (第二军医大学药学院)

娄红祥 (山东大学药学院)

曾 苏 (浙江大学药学院)

程牛亮 (山西医科大学)

秘书 罗向红 (沈阳药科大学)

徐晓媛 (中国药科大学)

浩云涛 (中国医药科技出版社)

高鹏来 (中国医药科技出版社)

出版说明

全国高等医药院校药学类专业规划教材是目前国内体系最完整、专业覆盖最全面、作者队伍最权威的药学类教材。随着我国药学教育事业的快速发展,药学及相关专业办学规模 and 水平的不断扩大和提高,课程设置的不断更新,对药学类教材的质量提出了更高的要求。

全国高等医药院校药学类规划教材编写委员会在调查和总结上轮药学类规划教材质量和使用情况的基础上,经过审议和规划,组织中国药科大学、沈阳药科大学、广东药学院、北京大学药学院、复旦大学药学院、四川大学华西药学院、北京中医药大学、西安交通大学药学院、山东大学药学院、山西医科大学药学院、第二军医大学药学院、山东中医药大学、上海中医药大学和江西中医学院等数十所院校的教师共同进行药学类第三轮规划教材的编写修订工作。

药学类第三轮规划教材的编写修订,坚持紧扣药学类专业本科教育培养目标,参考执业药师资格准入标准,强调药学特色鲜明,体现现代医药科技水平,进一步提高教材水平和质量。同时,针对学生自学、复习、考试等需要,紧扣主干教材内容,新编了相应的学习指导与习题集等配套教材。

本套教材由中国医药科技出版社出版,供全国高等医药院校药学类及相关专业使用。其中包括理论课教材 82 种,实验课教材 38 种,配套教材 10 种,其中有 45 种入选普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

全国高等医药院校药学类规划教材

编写委员会

2009 年 8 月 1 日

第二版前言

化工原理在医药工艺类高等院校中属工程类专业基础课。

本教材针对工艺类专业工程课时数较少的教学特点而编写，在努力强化“三基五性”、确保课程理论系统和完整性的同时，尽量精练语言、结合专业、突出重点。

为培养学生从工程观点出发提出、分析并解决问题的能力，全书无论从理论阐述，还是在例题、习题的选取上，始终贯穿并强调了理论联系实际；为方便自学，各章之后均附有适量习题及答案。

参编作者均为从教多年并有一定工程实践经验的教师，编写过程中参考了国内外的相关教材和专著，收集了大量的工程常用数据、图表和典型应用实例，本书除用于教学外，对从事科研、设计的一线工程技术人员也具有参考价值。

作为再版教材，本书一方面传承了梁忠英教授主编的第一版的精华，另一方面在兼顾现行教学大纲要求的同时，适当引入了时下化工、制药生产中的最新技术，进一步强化了教材的适用性和新颖性。

本书共分九章，参加编写工作的有：泰山医学院王萍（第二章、第三章）、武汉工程大学王存文（第四章）、贵阳中医学院杜薇（第五章）、山东大学药学院邵伟（第六章）、佳木斯大学化学与药学院焦淑清（第七章）、沈阳药科大学礼彤（第八章）、沈阳药科大学何志成（绪论、第一章、第九章）。

沈阳药科大学梁忠英教授担任本教材主审，并参与了部分章节的编写工作。

成书过程中，得到了中国医药科技出版社、沈阳药科大学及各编委所属院校领导全方位的支持，得到了原教材编写成员的大力支持，为此次编写工作提供了极大的便利，在此深表感谢。

由于编者学识有限，书中不当之处在所难免，诚盼读者赐教，以利教材不断完善。

编 者

2009年4月

目录

CONTENTS

绪论	(1)
一、本课程的内容、性质和任务	(1)
二、本课程的学习方法	(2)
三、单位制和单位换算	(3)
第一章 流体力学基础	(7)
第一节 流体静力学基本方程	(7)
一、密度、比容和相对密度	(7)
二、流体的压强	(9)
三、流体静力学基本方程	(10)
四、流体静力学方程在实际生产中的应用	(11)
第二节 流体动力学的基本方程	(14)
一、流量与流速	(14)
二、稳定流动与不稳定流动	(15)
三、流体稳定流动时的物料衡算——连续性方程	(15)
四、流体稳定流动时的机械能衡算——柏努利方程	(17)
第三节 流体在管内的流动阻力	(24)
一、流体阻力的表现形式——压降	(24)
二、流体的黏度	(24)
三、流体的流动形态	(26)
四、流体流动时的阻力计算	(30)
五、管路计算	(42)
第四节 流速与流量的测量	(45)
一、测速管（毕托管）	(45)
二、孔板流量计	(46)
三、转子流量计	(48)

2

二、傅立叶定律	(108)
三、导热系数	(108)
四、平壁的稳态热传导	(111)
五、圆筒壁的稳态热传导	(113)
第三节 对流传热	(116)
一、传热系数	(118)
二、热量衡算式与传热速率方程间的关系	(122)
三、传热平均温度差	(123)
四、壁温的计算	(128)
第四节 对流传热系数的计算	(131)
一、影响对流传热系数的因素	(131)
二、对流传热中的量纲分析	(131)
三、流体无相变时对流传热系数的关联式	(132)
四、流体有相变时的对流传热系数	(140)
五、选用对流传热系数关联式的注意事项	(145)
第五节 热辐射	(146)
一、基本概念	(146)
二、物体的辐射能力与斯蒂芬-波尔兹曼定律	(146)
三、克希霍夫定律	(148)
四、两固体间的相互辐射	(149)
五、设备热损失的计算	(152)
第六节 换热器	(153)
一、换热器的分类	(153)
二、间壁式换热器	(153)
三、列管式换热器选用计算中有关问题	(159)
四、系列标准换热器的选用步骤	(162)
五、加热介质与冷却介质	(165)
六、传热过程的强化	(166)
第五章 蒸发与结晶	(172)
第一节 蒸发	(172)
一、蒸发过程的基本概念	(172)
二、单效蒸发计算	(175)
三、多效蒸发简介	(179)
四、蒸发设备	(181)
第二节 结晶	(188)
一、结晶原理	(188)
二、结晶的工业方法及设备	(191)

第六章 气体吸收	(196)
第一节 概述	(196)
一、吸收操作的基本概念	(196)
二、吸收操作中的主要问题	(197)
三、吸收操作在工业生产中的应用	(197)
第二节 吸收的基本原理	(198)
一、气体在液体中的溶解度	(198)
二、亨利定律	(199)
三、吸收速率	(201)
四、双膜理论	(205)
五、吸收速率方程式	(206)
第三节 填料吸收塔及吸收工艺计算	(214)
一、填料吸收塔	(214)
二、吸收剂的用量计算	(218)
三、塔径及填料层压强降	(222)
四、填料层高度	(227)
五、填料塔的附属设备	(242)
第四节 其他吸收设备	(246)
一、工业用吸收罐	(246)
二、喷洒式吸收器	(246)
三、湍球塔	(247)
第七章 蒸馏	(252)
第一节 概述	(252)
第二节 基本概念	(253)
一、完全互溶液体混合物的相平衡	(253)
二、相对挥发度	(256)
第三节 精馏过程	(258)
一、精馏原理	(258)
二、精馏塔和精馏操作流程	(260)
第四节 双组分溶液连续精馏的计算	(261)
一、全塔物料衡算	(262)
二、操作线方程	(263)
三、进料热状态的影响和 q 线方程	(265)
四、理论板数的求法	(268)
五、回流比的影响及其选择	(273)
六、简捷法求理论板数	(277)

七、实际板数与塔效率	(279)
八、塔径与塔高的计算	(281)
第五节 间歇蒸馏	(284)
一、简单蒸馏的原理及计算	(284)
二、间歇精馏	(285)
第六节 特殊蒸馏	(288)
一、恒沸蒸馏	(289)
二、萃取蒸馏	(291)
三、水蒸气蒸馏	(292)
四、分子蒸馏	(294)
第七节 塔设备	(299)
一、精馏操作对塔设备的要求	(299)
二、塔板结构	(299)
三、塔板的流体力学状况	(300)
四、塔板负荷性能图	(303)
五、常用塔板类型	(305)
第八章 萃取	(310)
第一节 概述	(310)
一、萃取过程	(310)
二、萃取在工业生产中的应用	(311)
三、液-液萃取中常见的物系和萃取流程	(312)
第二节 液-液萃取的相平衡及萃取速度	(315)
一、液-液萃取的相平衡	(315)
二、液-液萃取过程的速度	(321)
三、萃取剂的选择原则	(323)
第三节 萃取过程的工艺计算	(326)
一、萃取剂与原溶剂部分互溶物系的萃取工艺计算	(326)
二、萃取剂与原溶剂不互溶物系的萃取工艺计算	(336)
第四节 液-液萃取设备	(342)
一、液-液萃取设备概述	(342)
二、萃取设备的主要类型	(343)
三、萃取设备的选择	(348)
第五节 固-液萃取	(349)
一、固-液萃取概述	(349)
二、影响固-液萃取的因素	(350)
三、固-液萃取的方法及设备	(351)
四、超声波与微波强化浸取	(356)

第六节 超临界流体萃取	(359)
一、超临界流体萃取的基本原理	(359)
二、影响超临界 CO_2 流体萃取的主要因素	(360)
三、超临界流体萃取的典型流程	(361)
四、超临界流体萃取的特点	(362)
第九章 固体干燥	(366)
第一节 概述	(366)
第二节 湿空气的性质	(367)
一、水蒸气分压	(368)
二、湿度 (湿含量)	(368)
三、相对湿度	(368)
四、湿空气的比容	(369)
五、湿空气的比热	(370)
六、湿空气的焓	(370)
七、干球温度与湿球温度	(371)
八、绝热饱和温度	(373)
九、露点	(374)
第三节 湿空气的焓湿图	(375)
一、焓湿图的绘制原理	(375)
二、焓湿图的使用	(378)
第四节 干燥计算	(379)
一、物料衡算	(380)
二、热量衡算	(382)
三、干燥器的热效率	(386)
四、干燥时间的计算	(387)
第五节 干燥器	(395)
一、厢式干燥器	(395)
二、气流干燥器	(397)
三、流化床干燥器	(399)
四、转筒干燥器	(401)
五、喷雾干燥器	(403)
六、滚筒干燥器	(404)
七、真空耙式干燥器	(405)
八、冷冻干燥器	(406)
九、干燥器的选型	(407)
第六节 干燥器设计举例	(407)
一、干燥操作条件的确定	(407)

二、气流干燥器的设计..... (410)

附录 (418)

 附录一 各种重要数据..... (418)

 附录二 管内各种流体常用流速..... (442)

 附录三 管子规格（摘录）..... (442)

 附录四 壁面污垢的热阻（污垢系数）..... (445)

 附录五 标准筛目..... (446)

 附录六 泵规格（摘录）..... (447)

 附录七 型离心通风机规格（摘录）..... (450)

 附录八 列管式热交换器系列标准（摘录）..... (451)

参考文献..... (453)

一、本课程的内容、性质和任务

化工原理是一门专门研究化工单元操作科学规律、指导化工生产实践的工程学科。

所谓单元操作是指化工生产过程中除化学反应外的基本物理过程（诸如流体输送、传热、蒸发、吸收、蒸馏、萃取、干燥等），是组成生产工艺的基本单位。

单元操作在化工生产及作为其分支的制药生产实际中占有重要地位。不同工艺中的相同单元操作、基本原理和典型设备都是一样的。例如，制碱工业中苛性钠溶液的浓缩与制药工业中葡萄糖溶液的浓缩，都是通过蒸发这一单元操作来实现的，它们共同遵循热交换原理并且都采用蒸发器。

化工单元操作所遵循的规律可归纳成以下几个基本过程。

1. 动量传递过程

研究流体流动的基本规律以及相关的单元操作，如流体的输送与压缩、沉降、过滤等。

2. 热量传递过程

研究传热过程的基本规律及相关的单元操作，如传热、蒸发、结晶等。热量传递过程又被称为传热过程。

3. 质量传递过程

研究物质通过相界面之迁移过程的基本规律及受这些规律支配的一些单元操作，如吸收、蒸馏、萃取、干燥等。质量传递过程又被称为传质过程。

4. 热力学过程

研究热力学的基本规律及遵循这些规律的单元操作，如冷冻及深度冷冻等（由于篇幅所限，本书不介绍冷冻单元操作）。

对制药工艺类院校的学生来说，《化工原理》是一门基于高等数学、物理及物理化学等基础课程上开设的工程类专业基础课。

其任务如下：使学生通过课程学习掌握常见化工单元操作的基本原理，熟悉典型设备的构造及工艺参数确定（或选型）。培养学生从工程的观点出发提出、分析和解决各

种相关问题能力，为学生缩短日后步入制药生产一线所必需经历的思维磨合期，早日成为被社会认可的人才。

二、本课程的学习方法

“理论推导加经验数据”是工程类课程从过程到结果的一般研习规律，本课程也不例外。在研究各种单元操作时，通常把物料衡算及能量衡算作为研究手段，并依此确定实际生产过程中各物料之间的数量及组成关系、吸收或释放的能量、实现过程所需的设备选型等，最终从工程的观点出发判断该过程的技术可行性和经济合理性。

本课程所涉及的基本原理如下。

1. 质量守恒

质量守恒是宇宙间一切物质发生变化时恪守的必然规律。在化工及制药生产中，尽管物质状态随着过程的进行不断变化，但对某个指定系统或设备而言，始终符合

$$\sum G_{\text{入}} = \sum G_{\text{出}} + \sum G_{\text{损}} \quad (0-1)$$

式中

$\sum G_{\text{入}}$ —— 所有输入物料量；

$\sum G_{\text{出}}$ —— 所有输出物料量；

$\sum G_{\text{损}}$ —— 所有物料损失量。

按照这一规律对物质质量进行的计算，称为物料衡算。

书中许多计算公式都是以这种方式导出的。掌握质量守恒原理，对于本课程的学习十分重要。

2. 能量守恒

能量守恒也是宇宙间的各种能量发生转换时遵守的根本规律。在化工、制药生产过程中，无论是流体的运送、还是物料的加热冷却，都伴随着能量的转换。但对某个指定的系统来说，始终符合

$$\sum Q_{\text{入}} = \sum Q_{\text{出}} + \sum Q_{\text{损}} \quad (0-2)$$

式中

$\sum Q_{\text{入}}$ —— 全部输入的能量；

$\sum Q_{\text{出}}$ —— 全部输出的能量；

$\sum Q_{\text{损}}$ —— 全部能量损失。

按照这一规律对能量进行的计算，称为能量衡算。能量衡算可以在实际生产中帮助我们评估能量的消耗程度，确定能量综合利用的途径，以及制定合理的能耗方案等，有助于我们选出最佳的生产条件。

3. 平衡关系

化工、制药生产过程中的任何过程，都是由不平衡到平衡的变化过程（或者相反）。而平衡状态则是过程变化的极限。

在一定的温度的溶剂中投入食盐，并使其溶解，直至溶液达到饱和。从整体上看，溶解过程已经终止。但如果我们分别从溶解和结晶的角度看，过程并没有停止，只是因食盐溶解的速率等同其结晶速率，正处于动态的平衡状态。传热过程也有类似的情况，当冷热流体因发生传热而最终达到温度相等时，之间的传热过程也就不再进行。

可见，一个过程能否进行以及能进行到什么程度（过程的方向和极限），其条件及规律只有通过平衡关系研究来确定。

4. 过程速率

通常把某种过程进行中的单位时间变化量称为过程的速率，用以表述过程进行的快慢。在实际生产中，过程的速率越高，设备生产能力也就越大（或在同样产能下，设备的尺寸越小）。过程的速率可用式（0-3）表示

$$u = \frac{\Delta}{R} \quad (0-3)$$

式中

u ——过程的速率；

Δ ——过程的推动力；

R ——过程的阻力。

从式（0-3）可以看出，提高过程速率的途径在于加大过程的推动力和减少过程的阻力，在学习本课程时，务必重视这一概念。

三、单位制和单位换算

1. 基本量和导出量

影响化工过程的因素基本可概括为两个方面：一是物料的物理性质，如密度、黏度、比热、导热系数等；二是过程的参变量，如温度、压强、速度等。人们把这些物理性质和参变量统称为物理量。几乎在所有的化工、制药生产过程中均需对它们实施严格的计量和控制。

物理量的种类很多，其中的一些可以用独立的单位表示，称为基本量。例如长度，单位为“米”；质量，单位为“千克”；时间，单位为“秒”等。而另一些则可用这些基本量来导出，如速度为路程与时间之比，由长度和时间导出，单位为“米/秒”。由基本量导出的量被称为导出量。

基本量所用的单位称为基本单位，由基本单位导出的单位称为导出单位。

2. 单位制

因为前人曾用不同的单位来表示过相同的基本量，所以产生了不同的单位制度。目前常用的单位制有以下 3 种。

（1）绝对单位制 以长度（单位为厘米，符号为 cm）、质量（单位为克，符号为 g）、时间（单位为秒，符号为 s）为基本量，亦称 CGS 制。实际使用中，厘米和克的量有时太小，故改以米（m）、千克（kg）、秒（s）为基本单位，并将此称为绝对单位制或 MKS 制。

绝对单位制在早期的自然科学领域，尤其是一些物化手册中广泛采用，因而又被称

之为物理单位制。

(2) 工程单位制 以长度(单位为米)、力[单位为千克(力)]、时间(单位为秒)为基本量,工程单位制把力作为基本量,质量作为导出量。根据力=质量×重力加速度,导出其单位为[千克(力)·秒²/米]。为简化起见,通常用千克(质)来表示工程单位制中的质量。

(3) 国际单位制 于1948年提出,1960年第11届国际计量大会正式通过的新单位制。代号为SI(源于法文 le système international d'unités 的缩写;英文为: International System of Unit),是现行应用最为广泛的单位制。

本教材中的物理量亦采用 SI。

SI是由MKS制发展起来的,以7个基本量的单位为基本单位,其名称、符号见表0-1。

表 0-1 国际单位制的 7 个基本量

基本量	单 位 名 称	单 位 符 号	
		中 文	国 际
长度	米	米	m
质量	千克(公斤)	千克(公斤)	kg
时间	秒	秒	s
电流	安培	安	A
热力学温度	开尔文	开	K*
物质的量	摩尔	摩	mol
光强度	坎德拉	坎	cd

注: * 也可使用摄氏温度,符号℃,用 t 表示, $t = T - 273.15\text{K}$, 其中 T 为热力学温度。

一些化工、制药工业常用物理量的 SI 单位列于表 0-2。

表 0-2 工程常用物理量的 SI 单位

物 理 量	国 际 单 位 制 (SI)			
	单位名称	单位符号		用基本单位表示的关系式
		中文	国际	
力	牛顿	牛	N	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
压力(压强)	帕斯卡	帕	Pa	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
能、功	焦耳	焦	J	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
热量	焦耳	焦	J	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
功率	瓦特	瓦	W	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
密度	千克每立方米	千克/米 ³	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\text{m}^{-3} \cdot \text{kg}$
黏度	帕斯卡秒	帕·秒	$\text{Pa} \cdot \text{s}$	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
力矩	牛顿米	牛·米	$\text{N} \cdot \text{m}$	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
表面张力	牛顿每米	牛/米	$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
热容、熵	焦耳每开尔文	焦/开	$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
比热容、比熵	焦耳每千克开尔文	焦/(千克·开)	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
扩散系数	平方米每秒	米 ² /秒	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
导热系数	瓦特每米开尔文	瓦/(米·开)	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
传热系数	瓦特每平方米开尔文	瓦/(米 ² ·开)	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$