



"十二五"普通高等教育本科国家级规划教材

化工原理课程系列教材

# 化工原理

(第三版)上册

■ 天津大学化工学院 柴诚敬 贾绍义 主编  
张国亮 夏清 张凤宝 刘明言 等编

高等教育出版社



"十二五"普通高等教育本科国家级规划教材

程系列教材

# 化工原理

(第三版)上册

■ 天津大学化工学院 柴诚敬 贾绍义 主编  
张国立 夏清 张凤宝 刘明言 等编



高等教育出版社·北京

## 内容提要

本书是“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。全书以传递过程的理论和处理工程问题的方法论为两条主线,重点介绍化工单元操作的基本原理、过程计算、典型设备及其强化。全书共十二章,分上、下两册出版。上册包括流体流动、流体输送机械、非均相混合物分离及固体流态化、液体搅拌、传热及蒸发;下册包括传质与分离过程概论、气体吸收、蒸馏、液-液萃取和液-固浸取、固体物料的干燥及其他分离方法(结晶、膜分离及吸附等)。每章均有学习指导、例题、习题与思考题。

本书采用双色印刷、双栏排版,与本书配套的数字课程网站可为使用者提供课程演示文稿、知识动画等多种形式的教学素材。

本书专业适用面宽,可供高等院校化工、石油、生物、制药、食品、环境、材料等专业使用,也可供有关部门从事科研、设计、管理及生产等工作的科研人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

化工原理. 上册 / 柴诚敬, 贾绍义主编. -- 3 版.  
-- 北京: 高等教育出版社, 2016. 12(2017. 3 重印)  
ISBN 978-7-04-046495-5

I. ①化… II. ①柴… ②贾… 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(2016)第 226373 号

## Huagong Yuanli

策划编辑 翟怡  
插图绘制 杜晓丹

责任编辑 翟怡  
责任校对 刘春萍

封面设计 张申申  
责任印制 刘思涵

版式设计 马云

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街 4 号  
邮政编码 100120  
印 刷 肥城新华印刷有限公司  
开 本 787mm×1092mm 1/16  
印 张 23.5  
字 数 560 千字  
购书热线 010-58581118  
咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>  
<http://www.hepmall.com>  
<http://www.hepmall.cn>  
版 次 2005 年 6 月第 1 版  
2016 年 12 月第 3 版  
印 次 2017 年 3 月第 2 次印刷  
定 价 33.90 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物 料 号 46495-00

# 与本书配套的数字课程资源使用说明

## 一、注册/登录

访问 <http://abook.hep.com.cn/>, 点击“注册”, 在注册页面输入用户名、密码及常用的邮箱进行注册。已注册的用户直接输入用户名和密码登录即可进入“我的课程”页面。

## 二、课程绑定

点击“我的课程”页面右上方“绑定课程”, 正确输入教材封底防伪标签上的密码, 点击“确定”完成课程绑定。

## 三、访问课程

在“正在学习”列表中选择已绑定的课程, 点击“进入课程”即可浏览与本书配套的课程资源。刚绑定的课程请在“申请学习”列表中选择相应课程并点击“进入课程”。

## 四、资源使用

与本书配套的数字课程资源的类型及图标如下:



——演示文稿



——动画



——练习文稿

如有账号问题, 请发邮件至: [ecourse@hep.com.cn](mailto:ecourse@hep.com.cn)。

## 第三版前言

本书是“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材，第一版和第二版分别为普通高等教育“十五”和“十一五”国家级规划教材。本书自问世以来，受到业界和读者的热情支持、鼓励和认可，总体反映良好。根据十多年来教学实践的检验，并考虑到学科的最新进展和课程教学的资源化需求，此次修订在保持原总体结构和特色风格的前提下，对部分内容进行删减、调整、更新和充实。

第三版教材主要修订内容如下：

(1) 对有关单元过程进一步加强了研究重点、发展前沿、强化途径、节能措施等内容的介绍，以启迪读者的创新思维；

(2) 对某些例题做适当的调整，结合工程实际，加强案例分析，突出应用型人才与创新能力的培养；

(3) 对某些章节的内容顺序做了局部调整，同时对工程上已少用的内容做了删除或精简；

(4) 附录中更新了部分内容；

(5) 在出版纸质教材的同时，建立数字课程网站，纸质教材与数字课程网站的教学资源相链接。

本次修订工作由各章的原执笔者承担，他们是柴诚敬（绪论、流体输送机械、液体搅拌、蒸发、蒸馏、下册附录）、张国亮（流体流动、其他分离过程）、夏清（非均相混合物分离及固体流态化、固体物料的干燥）、张凤宝（传热、液-液萃取和液-固萃取）、刘明言（传热）、贾绍义（上册附录、传质与分离过程概论、气体吸收），柴诚敬、贾绍义担任主编。

衷心地感谢天津大学化学工程学院的同事在本书修订工作中给予的热情支持和帮助。

编者

2016年4月

## 第二版前言

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,第一版为普通高等教育“十五”国家级规划教材。本书第一版自问世以来,受到同行的热情支持、鼓励和认可,总体反映良好。根据几年来教学实践的检验,并考虑到学科的最新进展,此次修订中,在保持原总体结构和特色风格的前提下,对部分内容进行了删减、调整、更新和充实。

第二版教材主要修订内容如下:

(1) 对有关单元过程进一步加强了研究重点、发展前沿、强化途径、节能措施等内容的介绍,以启迪读者的创新思维;

(2) 在相关单元过程中补充了具有工程背景、体现工程应用、有利于加深对基础理论理解的例题,以期读者在获取知识的同时提高工程能力;

(3) 增加了部分内容,某些章节的内容顺序做了局部调整,同时对工程上已少用的内容做了删除或精简;

(4) 附录中增加和更新了部分内容。

本次修订工作由各章的原执笔者承担,他们是柴诚敬(绪论、流体输送机械、液体搅拌、蒸发、蒸馏、下册附录)、张国亮(流体流动、其他分离过程)、夏清(非均相混合物分离及固体流态化、固体物料的干燥)、张凤宝(传热、液-液萃取和液-固萃取)、刘明言(传热)、贾绍义(上册附录、传质与分离过程概论、气体吸收)。

感谢天津大学化学工程学院的同事在本书修订工作中给予的热情支持和帮助。

编者

2009年12月

# 第一版前言

根据现代科学技术飞速发展对高等化工专门人才“知识、能力和综合素质”的要求,新编教材以“加强基础,拓宽知识面,培养学生的创新能力”为宗旨,坚持“面向 21 世纪的教学内容和课程体系改革”的主导思想,力求在内容和体系上有新意。

考虑到生物工程、制药工程、环境工程、食品工程等不同类型专业的需要,新编教材不仅拓展了内容,增加了新的知识点(如非牛顿流体的流动和传热、生物溶液的浓缩、冷冻干燥及固体浸取等),而且注意吸收本学科领域最新科技成果,及时反映学科发展的前沿,力求达到博而精,实现科学性、先进性和适用性的有机统一。

本教材以化工传递过程的基本理论和工程方法论为两条主线,突出工程学科的特点,系统而简明地阐述了化工单元操作的基本原理、过程计算、典型设备的结构特点及性能、过程或设备的强化途径等。全书分上、下两册出版。上册除绪论和附录外,包括流体流动、流体输送机械、非均相混合物分离及固体流态化、液体搅拌、传热和蒸发;下册包括传质与分离过程概论、气体吸收、蒸馏、萃取、干燥及其他分离过程(结晶、膜分离及吸附等)。

本教材在编写过程中,注意吸收我校在长期教材建设方面的经验和成果,按照学科的发展和认识规律,由浅入深、循序渐进、层次清晰、难点分散、理论联系实际,力求概念准确、论述严谨、可读性强。每章开篇有学习指导,且编入适量具有工程背景的实例、习题和思考题,有利于启迪思维,增强工程观念和创新意识,便于教与学。

本书可作为高等学校化工类及相关专业(化工、石油化工、生物、制药、环境、食品、材料、冶金等)的教材,也可供有关部门从事科研、设计、生产及管理工作的科技人员参考。

本书主编柴诚敬。参加各章编写工作的有:柴诚敬(绪论、流体输送机械、液体搅拌、蒸发、蒸馏)、张国亮(流体流动、其他分离过程)、夏清(非均相混合物分离及固体流态化、干燥)、张凤宝(传热、液-液萃取和液-固萃取)、刘明言(传热)、贾绍义(附录、传质与分离过程概论、气体吸收)。王军、马红钦、吴松海、张裕卿、杨晓霞、张缨、姜峰等教师参加部分文字加工、素材搜集与制作等工作。在本书编写过程中,化工系的有关教师给予热情关心和支持,姚玉英、陈常贵等老师给予了具体的帮助,在此表示衷心的感谢。

本书承蒙清华大学蒋维钧教授主审,对书稿提出许多宝贵意见,在此致以诚挚的感谢。由于编者水平所限,书中不妥之处甚至错误在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2005 年 1 月

# 目 录

绪论 .....	1	1.5.2 湍流特性与涡流动量传递 .....	39
0.1 化工原理课程的内容和特点 .....	1	1.5.3 边界层与边界层分离现象 .....	44
0.2 单位制度及单位换算 .....	4	1.6 流体在管内流动的阻力 .....	47
习题 .....	7	1.6.1 管内流动阻力的分类 .....	47
思考题 .....	7	1.6.2 流体在直管中的摩擦阻力 .....	48
第一章 流体流动 .....	8	1.6.3 管路上的局部阻力 .....	56
1.1 流体的重要性质 .....	9	1.6.4 管路系统的总能量损失 .....	58
1.1.1 连续介质假定 .....	9	1.7 管路的计算 .....	60
1.1.2 流体的密度与比体积 .....	9	1.7.1 简单管路 .....	61
1.1.3 流体的黏性 .....	11	1.7.2 复杂管路 .....	63
1.2 流体静力学 .....	13	1.7.3 可压缩流体管路的计算 .....	67
1.2.1 作用在流体上的力 .....	13	1.8 流速和流量的测量 .....	69
1.2.2 静止流体的压力特性 .....	14	1.8.1 测速管 .....	69
1.2.3 流体静力学方程 .....	15	1.8.2 孔板流量计 .....	71
1.2.4 流体静力学方程的应用 .....	17	1.8.3 文丘里流量计 .....	73
1.3 流体流动概述 .....	21	1.8.4 转子流量计 .....	75
1.3.1 流动体系的分类 .....	21	1.9 非牛顿流体的流动 .....	76
1.3.2 流量与平均流速 .....	22	1.9.1 非牛顿流体的流动特性 .....	76
1.3.3 流体流动的类型 .....	24	1.9.2 幂律流体在管内流动的阻力 .....	77
1.4 流体流动的基本方程 .....	26	习题 .....	80
1.4.1 连续性方程 .....	26	思考题 .....	83
1.4.2 机械能衡算方程 .....	28	本章主要符号说明 .....	84
1.4.3 机械能衡算方程的应用 .....	33	第二章 流体输送机械 .....	86
1.5 流体的动量传递现象 .....	36	2.1 流体输送机械概述 .....	86
1.5.1 层流与分子动量传递 .....	37	2.1.1 流体输送机械的作用 .....	86
		2.1.2 流体输送机械的分类 .....	88
		2.2 离心泵 .....	89



2.2.1 离心泵的工作原理和基本结构 .....	89	3.2.5 恒速过滤与先恒速后恒压的过滤 .....	167
2.2.2 离心泵的基本方程——能量方程 .....	91	3.2.6 过滤常数的测定 .....	169
2.2.3 离心泵的性能参数与特性曲线 .....	95	3.2.7 过滤设备 .....	170
2.2.4 离心泵在管路中的运行 .....	101	3.2.8 滤饼的洗涤 .....	174
2.2.5 离心泵的类型与选择 .....	107	3.2.9 过滤机的生产能力 .....	175
2.3 其他类型化工用泵 .....	112	3.3 离心机 .....	178
2.3.1 往复泵 .....	112	3.3.1 一般概念 .....	178
2.3.2 回转式泵 .....	116	3.3.2 离心机的结构与操作简介 .....	179
2.3.3 旋涡泵 .....	117	3.4 固体流态化 .....	181
2.3.4 常用液体输送机械性能比较 .....	117	3.4.1 流态化的基本概念 .....	181
2.3.5 液体输送机械的发展趋势 .....	118	3.4.2 流化床的流体力学特性 .....	184
2.4 气体输送和压缩机械 .....	118	3.4.3 流化床的浓相区高度与分离高度 .....	188
2.4.1 气体输送机械的分类 .....	119	3.4.4 流化质量及提高流化质量的措施 .....	189
2.4.2 离心通风机、离心鼓风机和离心压缩机 .....	119	3.4.5 气力输送简介 .....	191
2.4.3 往复压缩机 .....	121	习题 .....	194
2.4.4 回转鼓风机、压缩机 .....	127	思考题 .....	195
2.4.5 真空泵 .....	128	本章主要符号说明 .....	196
2.4.6 常用气体输送机械的性能比较 .....	129	第四章 液体搅拌 .....	198
习题 .....	131	4.1 搅拌器的性能和混合机理 .....	199
思考题 .....	132	4.1.1 搅拌设备 .....	199
本章主要符号说明 .....	133	4.1.2 搅拌作用下流体的流动 .....	202
第三章 非均相混合物分离及固体流态化 .....	135	4.1.3 混合机理 .....	205
3.1 沉降分离原理及设备 .....	136	4.1.4 搅拌器的选型和发展趋势 .....	206
3.1.1 颗粒相对于流体的运动 .....	136	4.2 搅拌功率 .....	208
3.1.2 重力沉降 .....	141	4.2.1 搅拌功率的量纲为 1 数群关联式 .....	208
3.1.3 离心沉降 .....	147	4.2.2 均相物系搅拌功率的计算 .....	209
3.2 过滤分离原理及设备 .....	156	4.2.3 非均相物系搅拌功率的计算 .....	212
3.2.1 流体通过固体颗粒床层的流动 .....	156	4.2.4 非牛顿流体的搅拌功率 .....	213
3.2.2 过滤操作的原理 .....	160	4.3 搅拌设备的放大 .....	214
3.2.3 过滤基本方程 .....	162	习题 .....	216
3.2.4 恒压过滤 .....	166	思考题 .....	216
		本章主要符号说明 .....	217

第五章 传热 .....	218	6.2 蒸发设备 .....	297
5.1 传热过程概述 .....	219	6.2.1 循环型蒸发器 .....	297
5.1.1 传热的基本方式 .....	219	6.2.2 单程型蒸发器 .....	301
5.1.2 传热过程中冷、热流体的 (接触)热交换方式及其 对应的换热器 .....	222	6.2.3 蒸发设备和蒸发技术的进展 .....	304
5.1.3 载热体及其选择 .....	224	6.2.4 蒸发器的选型 .....	305
5.2 热传导 .....	225	6.2.5 蒸发器的辅助设备 .....	306
5.2.1 平壁的一维稳态热传导 .....	225	6.3 单效蒸发的计算 .....	307
5.2.2 圆筒壁的一维稳态热传导 .....	229	6.3.1 物料衡算与热量衡算 .....	307
5.3 对流传热 .....	231	6.3.2 蒸发器的传热面积 .....	310
5.3.1 对流传热机理和对流传热 系数 .....	231	6.3.3 蒸发器的生产强度 .....	313
5.3.2 对流传热的量纲分析 .....	234	6.3.4 加热蒸汽的经济性和蒸发 过程的节能措施 .....	315
5.3.3 流体无相变时的对流传热 系数 .....	237	6.4 多效蒸发 .....	317
5.3.4 流体有相变时的对流传热 系数 .....	243	6.4.1 多效蒸发的流程 .....	317
5.4 辐射传热 .....	250	6.4.2 多效蒸发的计算 .....	318
5.4.1 辐射传热的基本概念和定律 .....	250	6.4.3 多效蒸发与单效蒸发的比较 .....	320
5.4.2 两固体间的辐射传热 .....	254	6.4.4 多效蒸发的适宜效数 .....	321
5.4.3 对流和辐射联合传热 .....	256	6.5 生物溶液的增浓 .....	322
5.5 换热器的传热计算 .....	258	6.5.1 生物溶液的蒸发 .....	322
5.5.1 热平衡方程 .....	258	6.5.2 冷冻浓缩 .....	322
5.5.2 总传热速率微分方程和 总传热系数 .....	259	习题 .....	325
5.5.3 传热计算方法 .....	263	思考题 .....	326
5.6 换热器 .....	272	本章主要符号说明 .....	326
5.6.1 间壁式换热器的结构型式 .....	272	附录 .....	328
5.6.2 换热器传热过程的强化 .....	280	一、中华人民共和国法定计量单位 .....	328
5.6.3 管壳式换热器的设计和选型 .....	282	二、常用单位的换算 .....	329
习题 .....	290	三、某些气体的重要物理性质 .....	332
思考题 .....	292	四、某些液体的重要物理性质 .....	333
本章主要符号说明 .....	292	五、干空气的物理性质(101.3 kPa) .....	335
第六章 蒸发 .....	295	六、水的物理性质 .....	336
6.1 蒸发过程概述 .....	295	七、水的饱和蒸气压(-20~100 °C) .....	337
		八、饱和水蒸气表(以压力为准, 单位 kPa) .....	338
		九、某些液体的导热系数 .....	340
		十、某些气体和蒸气的导热系数 .....	342
		十一、某些固体材料的导热系数 .....	343
		十二、常用固体材料的密度和比热容 .....	344
		十三、壁面污垢热阻(污垢系数) .....	345

十四、无机盐水溶液的沸点(101.3 kPa) ...	346	十八、管壳式换热器系列标准(摘录) ...	353
十五、IS 型单级单吸离心泵性能表 (摘录) .....	347	十九、管壳式换热器总传热系数 $K$ 的 推荐值 .....	357
十六、4-72 型离心通风机规格 (摘录) .....	350	参考书目 .....	359
十七、管子规格 .....	351		

# 绪 论

## 0.1 化工原理课程的内容和特点

化工原理课程是化工类各专业(包括化工、石油、生物、制药、轻工食品、环境、材料等)重要的技术基础课。它是综合运用数学、物理、化学等基础知识,分析和解决化学加工类生产中各种物理过程问题的工程学科,它承担着工程科学与工程技术的双重教育任务。

### 一、化工原理课程内容

对原料进行化学加工获得有用产品的过程称为化工生产过程。例如,用乙烯生产高压聚乙烯需经过气体压缩、热量交换、化学反应、分离、造粒等一系列过程;抗生素(又称抗菌素)的整个生产工艺过程可分为上游(包括菌种保存、选育、纯化、孢子制备、种子培育和发酵)、下游(包括发酵液的过滤、预处理、抗生素的提取和纯化)和成品(主要指制剂和包装)等阶段。由于产品、原料的多样性及生产过程的复杂性,形成了数以万计的化工生产工艺过程。综观纷杂众多的化工生产过程,都是由化学反应和物理操作有机组合而成。其中,化学反应及其设备是化工生产的核心,该部分内容由“反应工程”课程来研究。物理操作则起到为化学反应准备必要条件及将反应物分离提纯而获得有用产品的作用。这些物理步骤在整个化工生产中发挥着极其重要的作用,在很大程度上决定了生产过程的经济性和生产技术的先进性。这些物理操作统称为化工单元操作,简称单元操作。“化工原理”是研究单元操作共性的课程。

需要强调指出,随着生产发展和技术进步,许多单元操作中利用到化学反应,如化学吸收、反应精馏、反应萃取等,从而使得过程速率提高,设备台数减少,缩短了生产工艺流程。

“化工原理”是沿用1923年世界上第一部系统阐述单元操作物理化学原理及定量计算方法著作“Principles of Chemical Engineering”的名称。从以产品来划分的化工生产工艺中抽象出单元操作,是认识上的一个飞跃,从而奠定了化学工程作为一门独立工程学科的基础。化学工程是研究化学工业和其他过程工业中所进行的化学过程和物理过程共同规律的一门工程学科。20世纪初,对于化学工程的认识仅限于单元操作。

我国于20世纪20年代开办了化学工程系,也开出了化工原理课程。中华人民共和国成立以后,我国先后出版了以单元操作为主线的《化工原理》《化工过程及设备》《化工操作过程原理与设备》等教科书。至今仍沿用“化工原理”这个名称。



20世纪60年代“三传一反”概念的提出,开辟了化学工程发展过程的第二个历程。计算机应用技术的快速发展,使化学工程成为更完整的体系,并推向了“过程优化集成”“分子模拟”的新阶段。随着科学技术的高速发展,化学工程与相邻学科相融合,逐渐形成了若干新的分支与生长点,诸如:生物化学工程、分子化学工程、环境化学工程、能源化学工程、计算化学工程、软化学工程、微电子化学工程等。上述新兴产业与学科的发展,推动了特殊领域化学工程的进步,同时,也拓宽了化工原理课程的研究内容。

## 二、单元操作的分类和特点

### 1. 单元操作的分类

各种单元操作根据不同的物理化学原理,采用相应的设备,达到各自的工艺目的。对于单元操作,可从不同角度加以分类。根据各单元操作所遵循的规律和工程目的,将其划分为表0-1所列的主要类型。除表中所列之外,还有热力过程(制冷)、粉体或机械过程(粉碎、分级)等单元操作。

表0-1 化工中常用单元操作

类别	单元操作	目的	原理	传递过程
流体动力过程	流体输送	液体、气体的输送	输入机械能	动量传递
	沉降	非均相混合物分离	密度差引起的相对运动	
	过滤	非均相混合物分离	介质对不同尺寸颗粒的截留	
	搅拌	混合或分散	输入机械能	
传热过程	换热	加热、冷却或变相态	利用温度差交换热量	热量传递
	蒸发	溶剂与不挥发溶质分离	供热汽化溶剂,并将其及时移除	
传质过程	蒸(精)馏	液体均相混合物分离	各组分挥发度的差异	质量传递
	气体吸收	气体均相混合物分离	各组分在溶剂中溶解度不同	
	萃取	液态均相混合物分离	各组分在萃取剂中溶解度不同	
	浸取	用溶剂从固体中提取物料	固体中组分在溶剂中溶解度不同	
	吸附	流体均相混合物分离	固体吸附剂对组分吸附力不同	
	离子交换膜分离	从液体中提取某些离子	离子交换剂的交换离子	
热质传递过程	干燥	固体物料去湿	供热汽化液体,并将其及时移除	热质同时传递
	增、减湿	调节控制气体中水汽含量	气体与不同温度的水接触	
	结晶	从溶液中析出溶质晶体	利用物质溶解度的差异	

随着新产品、新工艺的开发或为实现绿色生产工艺,对物理过程提出了一些特殊要求,又不断地发展出新的单元操作或化工技术,如参数泵分离、电磁分离、超临界技术和纳米技术等。同时,以节约能耗,提高效率或洁净无污染及安全生产为特点的集成化工艺(如反应精馏、反应膜分离、萃取精馏、多塔精馏系统的优化热集成等)将是未来的发展趋势。

### 2. 单元操作的特点

单元操作是组成各种化工生产过程,完成一定加工目的的过程。同一单元操作在不同

的生产过程中遵循相同的过程规律,但在操作条件及设备类型(或结构)方面会有很大差别。另一方面,对于同样的工程目的,可采用不同的单元操作来实现。例如,一种均相液态混合物中组分的分离,既可用精馏方法,也可用萃取方法,还可用结晶或膜分离方法。究竟采用什么方法,要根据物料特性、工艺要求和综合技术经济分析作出抉择。

随着人们对单元操作研究的不断深入,逐渐发现若干个单元操作之间存在着共性。从本质上讲,所有的单元操作都可分解为动量传递、热量传递、质量传递这三种传递过程和它们的结合。三种传递过程中存在着类似的规律和内在的联系。“三传理论”的建立,是单元操作在理论上的进一步发展和深化。传递过程是单元操作的基础,从理论上揭示单元操作的原理,并为所研究的过程提供数学模型。传递过程是联系各单元操作的一条主线。

单元操作的研究内容包括“过程”和“设备”两个方面,故单元操作又称为“化工过程和装备”。“化工原理”是研究各单元操作的基本原理,所运用的典型设备结构和工艺尺寸设计,过程强化和设备选型的共性问题。

### 三、化工原理课程的研究方法

本课程是一门实践性很强的工程学科,在长期的发展过程中,形成了两种基本的研究方法。

#### 1. 试验研究方法(经验法)

该方法一般用量纲分析和相似论为指导,依靠试验来确定过程变量之间的关系,通过量纲为1数群(或称准数)构成的关系式来表达。它是一种工程上通用的基本方法。

#### 2. 数学模型法(半经验半理论方法)

该方法是在对实际过程的机理进行深入分析的基础上,在掌握过程本质的前提下,作出某种合理简化,建立物理模型,进行数学描述,得出数学模型,并通过实验确定模型参数。

如果一个物理过程的影响因素较少,各参数之间的关系比较简单,能够建立数学方程并能直接求解,则称为解析法。

需要强调指出,在计算机数学模拟技术快速发展的今天,试验研究方法仍不失其重要性,因为即使采用数学模型方法,模型参数的确定还是需通过实验来完成。

研究工程问题的方法是联系各单元操作的另一条主线。

### 四、化工过程计算的理论基础

化工过程计算可分为设计型计算和操作型计算两类。不同类型计算的处理方法各有特点,但是不管何种计算都是以质量守恒、能量守恒、平衡关系和速率关系为基础的。上述四种基本关系将在有关章节陆续介绍。

### 五、化工原理课程的学习要求

本课程在化工类各专业(包括化工、石油、生物、制药、轻工食品、环境、材料等)专门创新人才培养中具有举足轻重的地位。在教学的全过程中,本课程强调对学生工程观点、安全理

念、定量运算、实验技能及设计能力的培养,强调理论联系实际,增强创新意识。

具体地说,学生在学习本课程时,应注意以下几个方面能力的培养:

(1) 单元操作和设备选择的能力 根据生产工艺要求和物料特性,合理地选择单元操作及相应的设备。

(2) 工程设计的能力 学习工艺过程计算和设备设计。当缺乏现成数据时,能够从网络或资料中查取,实验测取或到生产现场查定。

(3) 操作和调节生产过程的能力 学习如何操作和调节生产过程,使之达到整体优化。

(4) 过程开发或科学研究的能力 学习运用物理或物理化学原理去选择或开发单元操作,进而组织一个生产工艺过程。

(5) 实验能力 学习试验设计、单元操作实验、数据处理、误差分析方法,提高动手能力和实验技能。

将可能变现实,实现工程目的,这是综合创造能力的体现。

学完每一章(或单元操作)后,希望能从如下三个方面进行总结,即基础理论(原理及规律)、实验技术(理论及技能)及工程应用(工程方法及应用实例),以达到巩固知识、提高能力的效果。

## 0.2 单位制度及单位换算

任何物理量的大小都是由数字和单位联合来表达的,二者缺一不可。例如,钢管长度为2 m,“2”和“m”二者缺一均不能构成长度这个物理量。

### 一、单位和单位制度

在工程和科学中,由于历史、地区及学科的不同,单位制度有不同的分类方法。

#### 1. 基本单位和导出单位

一般选择几个独立的物理量(如质量、长度、时间、温度等),根据使用方便的原则规定出它们的单位,这些选择的物理量称为基本物理量,其单位称为基本单位。其他的物理量(如速度、加速度、密度等)的单位则根据其本身的物理意义,由有关基本单位组合而成,这种组合单位称为导出单位。

#### 2. 绝对单位制和重力单位(工程单位)制

绝对单位制以长度、质量、时间为基本物理量,力是导出物理量,其单位为导出单位;重力单位制以长度、时间和力为基本物理量,质量是导出物理量,其单位为导出单位。力和质量的关系用牛顿第二定律相关联,即

$$F = ma \quad (0-1)$$

式中  $F$ ——作用在物体上的力;

$m$ ——物体的质量;

$a$ ——物体在作用力方向上的加速度。

上述两种单位制中又有米制单位与英制单位之分。

#### 3. 国际单位制(SI)



1960年10月第十一届国际计量大会通过了一种新的单位制度,称为国际单位制,其代号为SI,它是米千克秒制(MKS制)的引申。由于SI单位具有“通用性”和“一贯性”的优点,在国际上迅速得到推广。

#### 4. 中华人民共和国法定计量单位(简称法定单位制)

我国的法定计量单位除SI的基本单位、辅助单位及导出单位,又规定了一些我国选定的单位(详见附录一)。例如,时间可以用分(min)、小时(h)、日(d);质量还可以用吨(t);长度可以用海里(n mile)等。

本套教材中采用法定单位制。在少数例题与习题中有意识地编入一些非法定单位,目的是让读者练习单位之间的换算。

## 二、单位换算

### 1. 物理量的单位换算

同一物理量,若采用不同的单位则数值就不相同。例如,最简单的一个物理量,圆形反应器的直径为1 m,在物理单位制中,单位为cm,其值为100;而在英制中,其单位为ft,其值为3.2808。它们之间的换算关系为

$$\text{反应器的直径} \quad D = 1 \text{ m} = 100 \text{ cm} = 3.2808 \text{ ft}$$

同理,重力加速度  $g$  不同单位制之间的换算关系为

$$\text{重力加速度} \quad g = 9.81 \text{ m/s}^2 = 981 \text{ cm/s}^2 = 32.18 \text{ ft/s}^2$$

彼此相等而单位不同的两个同名物理量(包括单位在内)的比值称为换算因子。如1 m和100 cm的换算因子为100 cm/m。常用物理量的单位换算关系可查附录二。

若查不到一个导出物理量的单位换算关系,则从该导出单位的基本单位换算入手,采用单位之间的换算因子与基本单位相乘或相除的方法,以消去原单位而引入新单位。具体换算过程见例0-1。

**【例0-1】** 某物质的比定压热容  $c_p = 1.00 \text{ BTU}/(\text{lb} \cdot ^\circ\text{F})$ , 试从基本单位换算入手,将其换算为SI单位,即  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

解: 从本教材附录中查出基本物理量的换算关系为

$$1 \text{ BTU} = 1.055 \text{ kJ}$$

$$1 \text{ lb} = 0.4536 \text{ kg}$$

$$1 \text{ } ^\circ\text{F} = 5/9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{则 } c_p = 1.00 \left( \frac{\text{BTU}}{\text{lb} \cdot ^\circ\text{F}} \right) \left( \frac{1 \text{ lb}}{0.4536 \text{ kg}} \right) \left( \frac{1.055 \text{ kJ}}{1 \text{ BTU}} \right) \left( \frac{1 \text{ } ^\circ\text{F}}{5/9 \text{ } ^\circ\text{C}} \right) = 4.187 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$$

### 2. 经验公式(或数字公式)的单位换算

化工计算中常遇到的公式有两类:

一类为物理方程,它是根据物理规律建立起来的,如前述式(0-1)。物理方程遵循单位或量纲一致的原则。同一物理方程中绝对不允许采用两种单位制。

用一定单位制的基本物理量来表示某一物理量,称为该物理量的量纲。量纲是用来表示物理量类别的。在MKS单位制中,基本物理量质量、长度、时间、热力学温度的量纲分别用M、L、T与 $\Theta$ 表示,力的量纲为 $\text{MLT}^{-2}$ 。量纲与单位不同,例如,长度的单位可以是m、



cm 或 mm,但其量纲总是 L。量纲一致的原则是量纲分析方法的基础。

另一类为经验方程,它是根据实验数据整理而成的公式,式中各物理量的符号只代表指定单位制的数据部分,因而经验公式又称数字公式。当所给物理量的单位与经验公式指定的单位制不相同,则需要进行单位换算。可采用两种方式进行单位换算:将诸物理量的数据换算成经验公式中指定的单位后,再分别代入经验公式进行运算;若经验公式需经常使用,对大量的数据进行单位换算很繁琐,则可将公式加以变换,使式中各符号都采用所希望的单位制。换算方法见例 0-2。

【例 0-2】 清水在圆管内对管壁的强制湍流对流传热系数可用下面经验公式表示,即

$$\alpha = 180(1 + 2.93 \times 10^{-3} T) u^{0.8} d^{-0.2}$$

式中  $\alpha$ ——对流传热系数, BTU/(ft<sup>2</sup>·h·°F);

$T$ ——热力学温度, K;

$u$ ——水的流速, ft/s;

$d$ ——圆管内径, in。

试将式中各物理量的单位换算为 SI 单位,即  $\alpha$  为 W/(m<sup>2</sup>·K),  $T$  为 K,  $u$  为 m/s,  $d$  为 m。

解: 本题为经验公式的单位换算。经验公式单位换算的基本要点是:找出式中每个物理量新旧单位的换算关系,导出物理量“数字”表达式,然后代入经验公式并整理,便将式中各物理量都变为所希望的单位。本例的具体计算过程如下。

(1) 从附录中查出经验公式有关物理量新旧单位之间的换算关系为

$$1 \text{ BTU}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F}) = 5.678 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$1 \text{ ft} = 0.3048 \text{ m}$$

$$1 \text{ in} = 2.54 \times 10^{-2} \text{ m}$$

热力学温度  $T$  及时间  $\theta$  不必换算。

(2) 将原物理量的符号加上“'”以代表新单位的符号,导出原符号的“数字”表达式。

$$\alpha \frac{\text{BTU}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F}} = \alpha' \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$\text{因而} \quad \alpha = \alpha' \left[ \frac{\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}}{\frac{\text{BTU}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F}}} \right] \left[ \frac{1 \frac{\text{BTU}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F}}}{5.678 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}} \right] = \frac{\alpha'}{5.678}$$

$$\text{同理} \quad u = u' \left[ \frac{\text{m/s}}{\text{ft/s}} \right] \left[ \frac{3.2808 \text{ ft/s}}{1 \text{ m/s}} \right] = 3.2808 u'$$

$$d = d' \left[ \frac{\text{m}}{\text{in}} \right] \left[ \frac{1 \text{ in}}{2.54 \times 10^{-2} \text{ m}} \right] = 39.37 d'$$

(3) 将以上关系式代入原经验公式,得

$$\frac{\alpha'}{5.678} = 180(1 + 2.93 \times 10^{-3} T)(3.2808 u')^{0.8} (39.37 d')^{-0.2}$$

经整理得

$$\alpha' = 1268.3(1 + 2.93 \times 10^{-3} T)(u')^{0.8} (d')^{-0.2}$$

去掉符号上标“'”,得

$$\alpha = 1268.3(1 + 2.93 \times 10^{-3} T)u^{0.8}d^{-0.2}$$

应予指出,经验公式中物理量的指数是表明该物理量对过程的影响程度,与单位制无关,因而经过单位换算后,经验公式中各物理量的指数均不发生变化。