

本书第三版获第八届中国石油和化学工业优秀教材一等奖

高等教育规划教材

# 化工原理

第四版

王志魁 刘丽英 刘伟 ● 编

HUAGONG YUANLI



化学工业出版社

本书提供教学课件和习题解答，可免费下載

下載地址：[www.cipedu.com.cn](http://www.cipedu.com.cn)

本书第三版获第八届中国石油和化学  
工业优秀教材一等奖

高等教育规划教材

# 化 工 原 理

第四版

王志魁 刘丽英 刘 伟 编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书以物料衡算、能量衡算、物系平衡关系、传递速率及经济核算观点 5 个基本概念为基础,介绍了主要化工单元操作的基本原理、计算方法及典型设备。全书除绪论外共分 7 章,分别为流体流动、流体输送机械、沉降与过滤、传热、吸收、蒸馏、干燥。每章都编入适量的例题、习题及思考题。本次修订基本保持了第三版的框架,对部分内容作了删改,增补了习题;对基本概念、基本理论精益求精,文字叙述、公式推导简洁易懂,突出重点,主次分明,便于自学。本书为便于教学配备了电子教学课件和习题解。

本书可作为高等学校少学时(70~100 学时)化工原理课程的教材,也可供相关专业的高等职业学校以及科研、设计和生产部门的科技人员作为参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

化工原理/王志魁,刘丽英,刘伟编.—4 版.—北京:  
化学工业出版社,2010.5  
高等教育规划教材  
ISBN 978-7-122-08095-0

I. 化… II. ①王…②刘…③刘… 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(2010)第 053951 号

---

责任编辑:何 丽  
责任校对:顾淑云

装帧设计:关 飞

---

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)  
印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司  
装 订:三河市前程装订厂  
787mm×1092mm 1/16 印张 23 字数 598 千字 2010 年 6 月北京第 4 版第 1 次印刷

---

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

---

定 价:36.00 元

版权所有 违者必究

# 前 言

本教材是根据各类高等院校少学时《化工原理》课程教学需要而编写的。自1985年问世，经1998年再版与2005年第三版至今，已有二十余年。受到了各高等院校广泛采用及广大读者的欢迎。本教材第二版获化学工业出版社第一届（1993~1998年度）优秀畅销书奖，第三版获第八届中国石油和化学工业优秀教材一等奖。

本教材经众多院校的教学实践表明，教材的章节体系与内容尚能满足教学需要。本次修订基本上保持第三版的原有框架，对部分内容做了删除、修改或增补。修订的基本原则是精益求精，对于基本概念与基础理论的阐述，注重其科学性、严谨性、系统性、先进性及实用性。在文字叙述及公式推导方面，力求简洁易懂。

为了满足课堂教学需要，第四版教材配有电子教学课件与习题解答，供任课教师使用。

参加第四版教材编写者有王志魁、刘丽英、刘伟。编者学识有限，难免存在不妥，恳请读者批评指正。

编 者

2010年2月

# 第三版前言

本教材是根据各类高等学校少学时《化工原理》课程的教学需要而编写的，自1987年问世，经1998年再版至今。教学实践证明，教材的章节体系，内容的深浅程度等，尚能满足教学需要。由于科学技术的发展，部分内容需要更新，决定再次修订。

本教材以少学时化工原理课程教学需要为准，以动量传递、热量传递及质量传递为理论基础，介绍流体在管内的流动、流体输送机械、沉降、过滤、传热、吸收、蒸馏及干燥等单元操作。

本次修订，对部分章节作了较大修改。蒸馏全章重新改编，以主要影响因素为中心，更新了内容，加强了系统性。传热中的热辐射一节全节改编，增强了基础理论与应用。流体流动中的管路计算，采用了新的计算方法。加强了吸收、蒸馏过程中的影响因素分析及操作型计算。

本次修订，力求基本概念与理论叙述的表达更为严谨，易读易懂。对物理量（术语）、物理量符号及计量单位进行了必要的规范。为了提高应用理论解决工程实际问题的能力，更换并增补了若干例题与习题。为了便于自学，各章增加了思考题。为方便教学，与本书配套有习题解答，授课教师有兴趣，可向化学工业出版社发行部索取。

第二版发行以来，许多读者提出了宝贵意见，在此表示感谢。

由于编者学识水平有限，虽经努力，仍不免有不妥之处，恳请批评指正。

编者

2004年7月

## 第二版前言

本书依据各类高等院校少学时《化工原理》课程的教学需要而编写，自1987年问世至今已十年有余。众多院校教学实践证明，教材章节体系、内容多少、深浅程度等尚能满足教学需要。但由于科学技术的发展，单位制的改革，对教材质量的更高要求等原因，原版的某些内容已不能适应当前教学要求，决定再版修订。

修订的原则仍以少学时《化工原理》课程教学需要为准，保留原有章节体系；全面采用法定计量单位，物性数据图表的单位也相应改动；某些物理量名称改用新名称；离心泵、换热器等设备规格采用新标准。为使基本概念与理论的表达更为严密、易懂，某些章节重新进行改写；为了理论联系工程实际，提高应用理论解决工程实际问题的能力，某些章节增补了适量例题、习题。

本书第一版由王志魁主编，参加编写人员有林义英、李云倩和崔应宁，主审莫锡荣。

本版参加修订人员有北京化工大学王志魁、李云倩和崔应宁，并由莫锡荣进行了审阅。

本书自第一版发行以来，许多读者提出了不少有益意见，在此表示感谢。

由于编者学识水平所限，虽经努力，仍不免有错误和不足之处，恳请读者批评指正。

编者

1998年2月

# 第一版前言

本教材是根据化学工业部教育司关于增编高等院校少学时《化工原理》教材的要求而编写的。

1982年以来，北京化工学院根据本院某些专业的特点，以精选内容、突出重点、理论联系实际、便于教学为原则，自编了一套教学学时少（简称少学时）的《化工原理》教材，在本院已使用几届，并曾为十余所兄弟院校有关专业选用。本教材即在此基础上并按化工部教育司的要求作了适当修改而成。

1984年11月化学工业部教育司为本教材（少学时《化工原理》）召开了评审会，参加会议的有北京工业学院、吉林化工学院、沈阳化工学院、大连工学院、天津大学、河北化工学院、青岛化工学院、华东化工学院、武汉化工学院、四川轻化工学院、广西工学院、北京化工学院十二所院校的代表；浙江大学、南京化工学院和华南工学院提出了书面意见。会议认为教材的编写目的明确，并具有一定的教学实践基础，适用于少学时《化工原理》课程的教学需要，有一定的适应面和实际意义；考虑到教材的适用范围，并提出增加沉降与过滤的内容。会后根据所确定的编写原则和代表们提出的具体意见作了适当修改和增删。

本教材可供大学本科80~120学时《化工原理》课程的教学选用，如：“高分子材料”、“橡胶工程与塑料工程”、“高分子材料加工机械”、“腐蚀与防护”、“化工生产过程自动化”、“化学工业管理工程”、“化工工业分析”等专业。本教材包括流体流动、流体输送机械、传热、吸收、蒸馏、干燥、沉降与过滤等章，删除了一般“化工原理”教材中的蒸发、萃取和流态化等内容。编写时注意了加强基础、理论联系实际和以工程观点和经济观点分析问题；力求保持其系统性和完整性。

编写过程中，许多兄弟院校从事《化工原理》课程教学的同志，提供意见、介绍资料；北京化工学院各级领导和传递工程教研室的同志们，在工作上给予各种协助和支持，在此一并表示感谢。由于水平有限，经验不足，缺点错误在所难免，欢迎批评指正。

编者

1985年7月

# 目 录

绪论 .....	1
一、化工过程与单元操作 .....	1
二、《化工原理》课程的性质与任务 .....	2
三、物理量的单位与量纲 .....	3
四、混合物含量的表示方法 .....	5
五、单元操作中常用的基本概念 .....	8
习题 .....	10
本章符号说明 .....	10
第一章 流体流动 .....	11
第一节 流体静力学 .....	11
一、流体的压力 .....	11
二、流体的密度与比体积 .....	12
三、流体静力学基本方程式 .....	13
四、流体静力学基本方程式的应用 .....	14
第二节 管内流体流动的基本方程式 .....	18
一、流量与流速 .....	18
二、稳态流动与非稳态流动 .....	19
三、连续性方程式 .....	20
四、伯努利方程式 .....	21
五、实际流体机械能衡算式 .....	22
第三节 管内流体流动现象 .....	24
一、黏度 .....	25
二、流体流动类型与雷诺数 .....	27
三、流体在圆管内的速度分布 .....	29
第四节 管内流体流动的摩擦阻力损失 .....	32
一、直管中流体摩擦阻力损失的测定 .....	32
二、层流的摩擦阻力损失计算 .....	33
三、湍流的摩擦阻力损失 .....	33
四、非圆形管的当量直径 .....	38
五、局部摩擦阻力损失 .....	39
六、管内流体流动的总摩擦阻力损失计算 .....	40
第五节 管路计算 .....	42
一、简单管路 .....	42
二、复杂管路 .....	46
第六节 流量的测定 .....	47



一、测速管 .....	48
二、孔板流量计 .....	49
三、转子流量计 .....	53
四、湿式气体流量计 .....	54
思考题 .....	54
习题 .....	55
本章符号说明 .....	61
<b>第二章 流体输送机械</b> .....	<b>62</b>
<b>第一节 离心泵</b> .....	<b>62</b>
一、离心泵的工作原理 .....	62
二、离心泵的主要部件 .....	63
三、离心泵的主要性能参数 .....	64
四、离心泵的特性曲线 .....	65
五、离心泵的工作点与流量调节 .....	67
六、离心泵的汽蚀现象与安装高度 .....	71
七、离心泵的类型与选用 .....	75
<b>第二节 其他类型化工用泵</b> .....	<b>77</b>
一、往复泵 .....	77
二、齿轮泵 .....	79
三、旋涡泵 .....	79
<b>第三节 气体输送机械</b> .....	<b>80</b>
一、离心式通风机 .....	80
二、鼓风机和压缩机 .....	83
三、真空泵 .....	87
思考题 .....	88
习题 .....	88
本章符号说明 .....	90
<b>第三章 沉降与过滤</b> .....	<b>91</b>
<b>第一节 概述</b> .....	<b>91</b>
一、非均相物系的分离 .....	91
二、颗粒与流体相对运动时所受的阻力 .....	91
<b>第二节 重力沉降</b> .....	<b>92</b>
一、沉降速度 .....	92
二、降尘室 .....	94
三、悬浮液的沉聚 .....	97
<b>第三节 离心沉降</b> .....	<b>98</b>
一、离心分离因数 .....	98
二、离心沉降速度 .....	98
三、旋风分离器 .....	99
四、旋液分离器 .....	101
五、沉降式离心机 .....	102
<b>第四节 过滤</b> .....	<b>103</b>

一、悬浮液的过滤	103
二、过滤速率基本方程式	106
三、恒压过滤	108
四、过滤设备	111
思考题	115
习题	115
本章符号说明	116
<b>第四章 传热</b>	<b>118</b>
<b>第一节 概述</b>	<b>118</b>
一、传热过程的应用	118
二、热量传递的基本方式	118
三、两流体通过间壁换热与传热速率方程式	119
<b>第二节 热传导</b>	<b>120</b>
一、傅里叶定律	120
二、热导率	121
三、平壁的稳态热传导	124
四、圆筒壁的稳态热传导	126
<b>第三节 对流传热</b>	<b>128</b>
一、对流传热方程与对流传热系数	128
二、影响对流传热系数的因素	130
三、对流传热的特征数关系式	130
四、流体无相变时对流传热系数的经验关联式	131
五、流体有相变时的对流传热	136
六、选用对流传热系数关联式的注意事项	141
<b>第四节 两流体间传热过程的计算</b>	<b>141</b>
一、热量衡算	142
二、传热平均温度差	142
三、总传热系数	146
四、壁温计算	152
五、传热计算示例	153
<b>第五节 热辐射</b>	<b>158</b>
一、热辐射的基本概念	158
二、物体的辐射能力与斯蒂芬-波尔兹曼定律	159
三、克希霍夫定律	162
四、两固体间的辐射传热	162
五、辐射与对流的联合传热	166
<b>第六节 换热器</b>	<b>167</b>
一、换热器的分类	167
二、间壁式换热器	167
三、列管式换热器选用计算中有关问题	173
四、系列标准换热器的选用步骤	176
五、加热介质与冷却介质	178

六、传热过程的强化	178
思考题	180
习题	181
本章符号说明	184
<b>第五章 吸收</b>	185
第一节 概述	185
一、吸收操作的应用	185
二、吸收设备	185
三、吸收操作的分类	185
四、吸收剂的选择	186
第二节 气液相平衡	187
一、平衡溶解度	187
二、亨利定律	188
三、气液相平衡在吸收中的应用	191
第三节 吸收过程的传质速率	193
一、分子扩散与费克定律	193
二、等摩尔逆向扩散	194
三、组分 A 通过静止组分 B 的扩散	195
四、分子扩散系数	197
五、单相内的对流传质	199
六、两相间传质的双膜理论	201
七、总传质速率方程	203
八、传质速率方程式的各种表示形式	205
第四节 吸收塔的计算	207
一、物料衡算与操作线方程	207
二、吸收剂的用量与最小液-气比	208
三、填料层高度的计算	211
四、吸收塔的操作计算	218
五、解吸塔的计算	220
第五节 填料塔	223
一、填料塔的结构及填料性能	223
二、气液两相在填料层内的流动	225
三、塔径的计算	226
四、填料塔的附件	229
思考题	230
习题	231
本章符号说明	233
<b>第六章 蒸馏</b>	235
第一节 双组分溶液的汽液相平衡	235
一、溶液的蒸气压与拉乌尔定律	235
二、理想溶液汽液相平衡	236
三、非理想溶液汽液相平衡	242

第二节 蒸馏与精馏原理.....	244
一、简单蒸馏与平衡蒸馏.....	244
二、精馏原理.....	245
第三节 双组分连续精馏的计算与分析.....	247
一、全塔物料衡算.....	247
二、恒摩尔流量的假设.....	248
三、进料热状态参数 $q$ .....	249
四、操作线方程与 $q$ 线方程.....	252
五、理论板数计算.....	256
六、回流比与进料热状态对精馏过程的影响.....	260
七、塔顶液相回流比的选择.....	263
八、理论板数的简捷计算法.....	268
九、精馏塔的操作计算.....	269
十、直接蒸汽加热及两股进料的精馏塔.....	273
第四节 间歇精馏.....	276
一、回流比恒定的操作.....	277
二、馏出液组成恒定的操作.....	277
第五节 恒沸精馏与萃取精馏.....	278
一、恒沸精馏.....	278
二、萃取精馏.....	279
第六节 板式塔.....	280
一、塔板结构.....	280
二、塔板上汽液两相的流动现象.....	282
三、塔板效率.....	284
四、塔高的确定.....	286
五、塔径的计算.....	286
六、塔板类型.....	288
思考题.....	290
习题.....	292
本章符号说明.....	296
<b>第七章 干燥</b> .....	<b>297</b>
第一节 概述.....	297
一、固体物料的去湿方法.....	297
二、湿物料的干燥方法.....	297
三、对流干燥过程的传热与传质.....	298
第二节 湿空气的性质及湿度图.....	298
一、湿空气的性质.....	298
二、湿空气的湿度图及其应用.....	304
第三节 干燥过程的物料衡算和热量衡算.....	307
一、干燥过程的物料衡算.....	307
二、干燥过程的热量衡算.....	309
第四节 物料的平衡含水量与干燥速率.....	313

一、物料的干燥实验曲线	313
二、物料的平衡含水量曲线	314
三、恒定干燥条件下的干燥速率与干燥时间	315
第五节 干燥设备	319
一、常用对流干燥器简介	319
二、干燥器的选用	322
思考题	324
习题	324
本章符号说明	326
<b>附录</b>	327
一、单位换算	327
二、基本物理常数	327
三、饱和水的物理性质	328
四、某些液体的物理性质	329
五、某些有机液体的相对密度 (液体密度与 4℃ 水的密度之比)	330
六、饱和水蒸气表 (按温度排列)	331
七、饱和水蒸气表 (按压力排列)	332
八、干空气的热物理性质 ( $p=1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$ )	334
九、某些气体的重要物理性质	334
十、液体饱和蒸气压 $p^\circ$ 的 Antoine (安托因) 常数	335
十一、水在不同温度下的黏度	336
十二、液体黏度共线图	337
十三、气体黏度共线图 (101.325kPa)	339
十四、固体材料的热导率	340
十五、某些液体的热导率 ( $\lambda$ )/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	341
十六、气体热导率共线图	341
十七、液体比热容共线图	343
十八、气体比热容共线图 (101.325kPa)	345
十九、液体比汽化热共线图	347
二十、液体表面张力共线图	348
二十一、管子规格	350
二十二、IS 型单级单吸离心泵规格 (摘录)	351
二十三、热交换器系列标准 (摘录)	353
二十四、双组分溶液的汽液相平衡数据	355
二十五、常用化学元素的相对原子质量	355
<b>参考文献</b>	356

# 绪 论

## 一、化工过程与单元操作

化学工业是将自然界的各种物质经过化学反应和物理方法处理，制造成生产资料和生活资料的工业。一种产品的生产过程中，从原料到成品往往需要几个或几十个加工过程。其中除了化学反应过程外，还有大量的物理加工过程，统称为化工过程。

化学工业产品种类繁多。各种产品的生产过程中，使用着各种各样的物理加工过程。根据它们的操作原理，可以归纳为应用较广的数个基本操作过程，如流体输送、搅拌、沉降、过滤、热交换、蒸发、结晶、吸收、蒸馏、萃取、吸附以及干燥等。例如，乙醇、乙烯及石油等生产过程中都采用蒸馏操作分离液体混合物，所以蒸馏为一个基本操作过程。又如合成氨、硝酸及硫酸等生产过程中，都采用吸收操作分离气体混合物，所以吸收也是一个基本操作过程。又如尿素、聚氯乙烯及染料等生产过程中，都采用干燥操作以除去固体中的水分，所以干燥也是一个基本操作过程。此外，流体输送和热交换也为基本操作过程，应用更为广泛。这些基本操作过程称为单元操作 (unit operation)。任何一种化工产品的生产过程都是由若干单元操作及化学反应过程组合而成的。化学反应在反应器内进行；各个单元操作，也都在相应的设备 (apparatus) 中进行。例如，蒸馏操作是在蒸馏塔内进行的，吸收操作在吸收塔内进行，干燥操作在干燥器内进行，如图 0-1 所示。不同的单元操作设备其结构有很大不同，为相应的单元操作过程提供必要的条件，使过程能有效地进行。在过程进行中，需要进行操作控制，根据规定的操作指标调节物料的进、出口流量以及内部的温度、压力、浓度及流动状态等，使过程能以适当的速率进行，得到所规定流量的合格产品或中间产品。单元操作不仅用在化工生产中，而且在石油、冶金、轻工、制药及原子能等工业及生物工程、环境保护工程中也广泛应用。

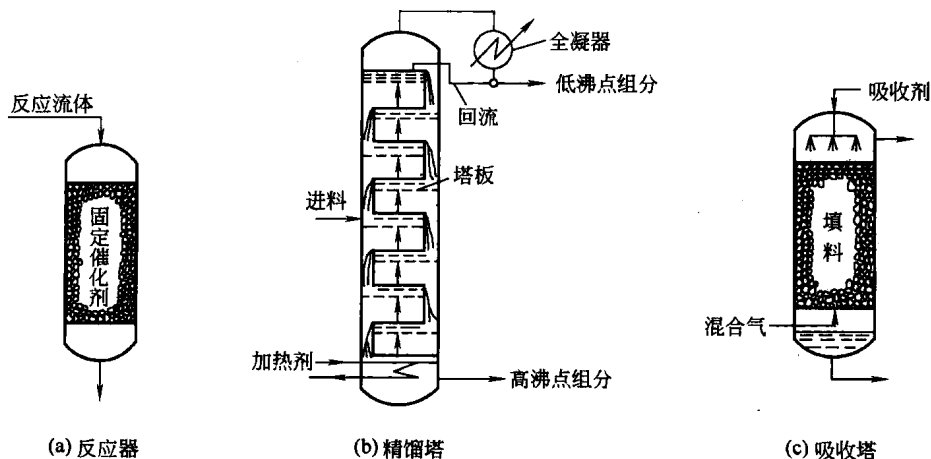


图 0-1 反应器与单元操作设备举例

单元操作按其理论基础可分为下列3类。

(1) 流体流动过程 (fluid flow process) 包括流体输送、搅拌、沉降、过滤等。

(2) 传热过程 (热量传递过程) (heat transfer process) 包括热交换、蒸发等。

(3) 传质过程 (质量传递过程) (mass transfer process) 包括吸收、蒸馏、萃取、吸附、干燥、结晶、膜分离等。

流体流动时, 流体内部由于流体质点 (或分子) 的速度不同, 它们的动量也就不同, 在流体质点随机运动和相互碰撞过程中, 动量从速度大处向速度小处传递, 这称为动量传递。所以流体流动过程也称为动量传递过程 (momentum transfer process)。

动量传递与热量传递和质量传递类似, 热量传递是流体内部因温度不同, 有热量从高温处向低温处传递, 质量传递是因物质在流体内部存在浓度差, 物质将从浓度高处向浓度低处传递。在流体中的这3种传递现象 (transport phenomena), 都是由于流体质点 (或分子) 的随机运动所产生的。若流体内部有温度差存在, 当有动量传递的同时必有热量传递; 同理, 若流体内部有浓度差存在时, 也会同时有质量传递。若没有动量传递, 则热量传递和质量传递主要是因分子的随机运动产生的现象, 其传递速率较缓慢。要想增大传递速率, 需要对流体施加外功, 使它流动起来。

由上述可知流体流动的基本原理不仅是流体输送、搅拌、沉降及过滤的理论基础, 也是传热与传质过程中各单元操作的理论基础, 因为这些单元操作中的流体都处于流动状态。传热的基本原理不仅是热交换和蒸发的理论基础, 也是传质过程中某些单元操作 (例如干燥) 的理论基础。因为干燥操作中不仅有质量传递, 而且有热量传递。因此, 流体力学、传热及传质的基本原理是各单元操作的理论基础。

人们会注意到上述的单元操作, 有许多是用来分离混合物的。沉降与过滤用于非均相物系的分离, 包括含尘或含雾的气体、含固体颗粒的悬浮液、由两种不互溶液体组成的乳浊液等。蒸发用于分离由挥发性溶剂和不挥发的溶质组成的溶液; 吸收是利用各组分在液体溶剂中的溶解度不同分离气体混合物; 蒸馏是利用各组分的挥发度不同来分离均相液体混合物; 萃取是利用各组分在液体萃取剂中的溶解度不同来分离液体混合物或固体混合物; 吸附是利用气体或液体中各组分对固体吸附剂表面分子结合力的不同, 使其中一种或几种组分进行吸附分离; 干燥是对湿固体物料加热, 使其所含水分汽化而得到干固体产品的操作; 结晶是利用冷却或溶剂汽化的方法, 使溶液达到过饱和而析出晶体的操作。膜分离是利用固体薄膜 (有机高分子膜或无机膜) 或液体薄膜, 对液体或气体混合物的选择性透过分离。

上述分离单元操作中, 通常把沉降与过滤归属为机械分离操作, 而其余归属为传质分离操作。

## 二、《化工原理》课程的性质与任务

为学习化工单元操作而编写的教材, 在我国习惯上称之为《化工原理》(Principles of Chemical Engineering)。

《化工原理》是化工及其相关专业学生必修的一门基础技术课程, 它在《数学》、《物理》、《化学》、《物理化学》等基础课与专业课之间起着承先启后的作用, 是自然科学领域的基础课向工程科学的专业课过渡的入门课程。其主要任务是介绍流体流动、传热和传质的基本原理及主要单元操作的典型设备构造、操作原理、过程计算、设备选型及实验研究方法等。这些都密切联系生产实际, 以培养学生运用基础理论分析和解决化工单元操作中各种工程实际问题的能力, 为专业课学习和今后的工作打下较坚实的基础。

从上面介绍可知, 单元操作种类很多, 每种都有十分丰富的内容, 在有限学时内,

只有以3种传递现象的基本原理为主线,选择几种典型的单元操作学习,以物料衡算、能量衡算、平衡关系、传递速率、经济核算等5种基本概念(在绪论第五节介绍)为理论依据,掌握单元操作通用的学习方法和分析问题的思路,培养理论联系实际的观点方法,提高单元操作设备的设计计算、操作、选型、实验研究方法与技术,增加解决工程实际问题的能力。

### 三、物理量的单位与量纲

#### 1. 国际单位制与法定计量单位

由于科学技术的迅速发展和国际学术交流的日益频繁以及理科与工科关系的进一步密切,国际计量会议制定了一种国际上统一的国际单位制,其国际代号为SI(System International d'Unites,的缩写)。国际单位制的单位是由基本单位和包括辅助单位在内的具有专门名称的导出单位构成的,分别列于表0-1和表0-2。国际单位制中用于构成十进倍数和分数单位的词头列于表0-3。

表 0-1 SI 基本单位

量的名称	单位名称	单位符号	量的名称	单位名称	单位符号
长度	米	m	热力学温度	开[尔文]	K
质量	千克(公斤)	kg	物质的量	摩[尔]	mol
时间	秒	s	发光强度	坎[德拉]	cd
电流	安[培]	A			

表 0-2 包括 SI 辅助单位在内的具有专门名称的 SI 导出单位 (只列出本书常用的单位)

量的名称	单位名称	单位符号	用 SI 基本单位和 SI 导出单位表示
[平面]角	弧度	rad	rad=m/m=1
立体角	球面度	sr	sr=m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> =1
频率	赫[兹]	Hz	Hz=s <sup>-1</sup>
力	牛[顿]	N	N=kg·m/s <sup>2</sup>
压力,压强,应力	帕[斯卡]	Pa	Pa=N/m <sup>2</sup> =kg/(m·s <sup>2</sup> )
能[量],功,热	焦[耳]	J	J=N·m=kg·m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
功率,辐[射能]通量	瓦[特]	W	W=J/s=kg·m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup>
摄氏温度 <sup>①</sup>	摄氏度	℃	

① 摄氏温度是按式  $t=(T-273.15)$  定义的,式中  $t$  为摄氏温度,  $T$  为热力学温度。摄氏温度间隔  $t_1-t_2$  或温度差  $\Delta t$  以及热力学温度间隔  $T_1-T_2$  或温度差  $\Delta T$ , 单位既可用 K 也可用℃。

表 0-3 用于构成十进倍数和分数单位的词头 (只列出本书常用的词头)

所表示的因数	词头名称		词头符号	所表示的因数	词头名称		词头符号
	法文	中文			法文	中文	
10 <sup>9</sup>	giga	吉[咖]	G	10 <sup>-1</sup>	deci	分	d
10 <sup>6</sup>	mega	兆	M	10 <sup>-2</sup>	centi	厘	c
10 <sup>3</sup>	kilo	千	k	10 <sup>-3</sup>	mili	毫	m
10 <sup>2</sup>	hecto	百	h	10 <sup>-6</sup>	micro	微	μ
10 <sup>1</sup>	deca	十	da	10 <sup>-9</sup>	nano	纳[诺]	n

1984年,我国开始颁布实行法定计量单位。法定计量单位是以国际单位制的单位为基础,根据我国情况,适当增加了一些其他单位构成的,可与国际单位并用的我国法定计量单位列于表0-4。本书全面采用法定计量单位,但读者在查阅物理、化学基础数据以及化学工程参考书时,可能遇到非法定计量单位,需要进行换算,在附录一中列出了化学、化工常见的非法定计量单位与法定计量单位的换算系数。



表 0-4 可与国际单位制的单位并用的我国法定计量单位 (只列出本书常用的单位)

量的名称	单位名称	单位符号	换算关系和说明
时间	分	min	1min=60s
	[小]时	h	1h=60min=3600s
	日,(天)	d	1d=24h=86400s
[平面]角	度	°	1°=(π/180)rad
	[角]分	'	1'=(1/60)°=(π/10800)rad
	[角]秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000)rad
体积	升	L;l	1L=1dm³=10⁻³m³
旋转速度	转每分	r/min	1r/min=(1/60)s⁻¹
质量	吨	t	1t=10³kg
	原子质量单位	u	1u≈1.660540×10⁻²⁷kg

## 2. 量纲

物理量的基本量的量纲 (dimension) 为其本身。SI 量制中, 长度、质量、时间、电流、热力学温度、物质的量、发光强度 7 个基本量的量纲符号分别为 L、M、T、I、Θ、N、J。

导出量 Q 的量纲, 其一般表达式为

$$\dim Q = L^{\alpha} M^{\beta} T^{\gamma} I^{\delta} \Theta^{\epsilon} N^{\zeta} J^{\eta} \quad (0-1)$$

式中 dim 为量纲符号, 指数  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、... 称为量纲指数。

例如, 密度  $\rho$  的量纲写为  $\dim \rho = ML^{-3}$ 。

量纲表达式中所有量纲指数均为零的量, 称为量纲为 1 的量, 表示为

$$\dim Q = L^0 M^0 T^0 \dots = 1$$

量纲为 1 的量, 其单位名称是一, 符号为 1。

例如, 液体的相对密度  $d$  为该液体的密度  $\rho$  与 4 °C 时纯水的密度  $\rho_w$  之比值, 其量纲为

$$\dim d = ML^{-3} / ML^{-3} = M^0 L^0 = 1$$

过去把量纲指数均为零的量称为无量纲量。

## 3. 量纲一致性方程

物理量方程是与某一客观现象有关的各物理量之间关系的表达式。任何一个物理量方程, 只要理论上合理, 则该方程等号两边各项的量纲必定相等, 称为量纲一致性方程 (dimensionally homogeneous equation)。

例如, 理想气体状态方程式

$$pV = nRT \quad (0-2)$$

理想气体是指分子本身没有体积, 分子间没有作用力的气体, 它在任何温度和压力下均能服从气体状态方程式。低压下的实际气体的行为接近于理想气体, 因此常用理想气体状态方程式对低压气体进行计算。

气体压力  $p$   $\dim p = ML^{-1}T^{-2}$ ; 气体体积  $V$   $\dim V = L^3$

因此, 式(0-2) 等号左边的量纲为  $ML^2T^{-2}$ 。

气体的物质的量  $n$   $\dim n = N$ ; 热力学温度  $T$   $\dim T = \Theta$ , 为了保证方程的量纲一致性, 摩尔气体常数  $R$  的量纲应为  $\dim R = ML^2T^{-2}N^{-1}\Theta^{-1}$ 。

化学工程中的流体流动、传热和传质等过程中, 由于影响因素较多, 在不能推导出理论关联式时, 通常用量纲分析法通过工程实验建立经验关联式。物理方程的量纲一致性是量纲分析法的基础, 具体内容将在第一章流体流动和第四章传热中介绍。

## 4. 物理方程的单位一致性