



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



# 化工原理

第五版

王志魁 · 主编

向阳 王宇 · 执行主编

刘伟 刘丽英 · 主审

HUAGONG YUANLI



化学工业出版社



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

# 化工原理

第五版

王志魁 · 主编

向阳 王宇 · 执行主编

刘伟 刘丽英 · 主审



化学工业出版社

· 北京 ·

《化工原理》(第五版)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四版的框架,对部分内容作了删改,增补了例题与习题;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。《化工原理》(第五版)采用双色印刷,重点内容更加醒目;主要设备及原理配有动画与视频演示,可通过扫描二维码观看。为便于教学,本书还配备了电子教学课件和习题解答。

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,也可作为相关专业高等职业学校以及科研、设计和生产部门科技人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

化工原理/王志魁主编. —5版. —北京:化学工业出版社, 2017.10

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

ISBN 978-7-122-30427-8

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(2017)第194824号

---

责任编辑:徐雅妮

装帧设计:关飞

责任校对:王素芹

---

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:大厂聚鑫印刷有限责任公司

装订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张24 $\frac{3}{4}$  字数631千字 2018年1月北京第5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:49.00元

版权所有 违者必究

# 前言

本书由北京化工大学化工原理教学团队精心组织编写，目的是为了满足不同高等院校少学时化工原理课程教学的需要，面向非化学工程类专业学生。本书第一版自1987年问世至今已有三十年，被众多高等院校采用并受到广大读者好评。本书第二版获化学工业出版社第一届优秀畅销书奖，第三版获第八届中国石油和化学工业优秀教材一等奖，第四版被评为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。

多年的教学实践表明，本书原有的章节体系已能很好地满足教学需求，但为了在内容上与时俱进，反映化学工程的最新进展，并考虑读者的不同侧重，本次修订对部分内容做了删减、修改和增补。本次再版的一个重要特色是增配了过程原理、重点单元设备原理及结构的动画或视频二维码，读者可扫码观看；对部分例题和习题进行了更新，增加了部分综合性工程案例题；对书中插图进行了重新制作，并采用双色印刷，使重点内容更加醒目。此外，本次再版对原配套的教学课件与习题解答也进行了修订，方便任课教师使用。

本书主编王志魁先生已于2012年以87岁高龄仙逝。王先生多年来致力于化学工程专业的教学工作，对化工原理课程教学的发展做出了卓越贡献。特别是在传质与分离的单元操作方面形成了独特的教学观点，如将传递理论和工程实际紧密地结合，帮助学生培养以工程观点为主的思维方法；注重典型单元操作的设计型和操作型问题，加强理论和实际的联系，使学生能正确地分析复杂的工程问题，提高解决实际问题的能力。王先生将宝贵的教学经验凝结在教材中，并为本书的修订与完善孜孜不倦工作多年。在本书第五版出版之际，谨向王志魁先生为教书育人所做出的贡献表示敬意！

本次再版的修订工作由北京化工大学向阳、王宇完成，刘丽英、刘伟审阅。书中二维码链接的主要设备及原理素材资源由北京东方仿真软件技术有限公司提供技术支持。

由于编者学识有限，虽经努力，难免有不足之处，恳请读者批评指正。

编者  
2017年8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

# 第四版前言

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

# 目 录

## 绪论

一、化工过程与单元操作 .....	1	五、单元操作中常用的基本概念 .....	9
二、“化工原理”课程的性质与任务 .....	2	习题 .....	10
三、物理量的单位与量纲 .....	3	本章符号说明 .....	10
四、混合物含量的表示方法 .....	5		

## 第一章 流体流动

第一节 流体静力学 .....	11	二、层流的摩擦阻力损失计算 .....	35
一、流体的压力 .....	12	三、湍流的摩擦阻力损失 .....	37
二、流体的密度与比体积 .....	12	四、非圆形管的当量直径 .....	41
三、流体静力学基本方程式 .....	14	五、局部摩擦阻力损失 .....	43
四、流体静力学基本方程式的应用 .....	15	六、管内流体流动的总摩擦阻力损失计算 .....	44
第二节 管内流体流动的基本方程式 .....	19	第五节 管路计算 .....	46
一、流量与流速 .....	19	一、简单管路 .....	46
二、稳态流动与非稳态流动 .....	21	二、复杂管路 .....	51
三、连续性方程式 .....	21	第六节 流量的测定 .....	53
四、伯努利方程式 .....	22	一、测速管 .....	53
五、实际流体机械能衡算式 .....	24	二、孔板流量计 .....	55
第三节 管内流体流动现象 .....	26	三、转子流量计 .....	58
一、黏度 .....	26	四、湿式气体流量计 .....	60
二、流体流动类型与雷诺数 .....	29	思考题 .....	60
三、流体在圆管内的速度分布 .....	31	习题 .....	61
第四节 管内流体流动的摩擦阻力损失 .....	34	本章符号说明 .....	67
一、直管中流体摩擦阻力损失的测定 .....	35		

## 第二章 流体输送机械

第一节 离心泵 .....	68	一、往复泵 .....	84
一、离心泵的工作原理 .....	69	二、齿轮泵 .....	87
二、离心泵的主要部件 .....	69	三、旋涡泵 .....	87
三、离心泵的主要性能参数 .....	71	第三节 气体输送机械 .....	88
四、离心泵的特性曲线 .....	72	一、离心式通风机 .....	88
五、离心泵的工作点与流量调节 .....	74	二、鼓风机和压缩机 .....	91
六、离心泵的汽蚀现象与安装高度 .....	79	三、真空泵 .....	95
七、离心泵的类型与选用 .....	82	思考题 .....	96
第二节 其他类型化工用泵 .....	84		

### 第三章 沉降与过滤

第一节 概述 .....	99	四、旋液分离器 .....	110
一、非均相物系的分离 .....	99	五、沉降式离心机 .....	110
二、颗粒与流体相对运动时所受的阻力 .....	100	第四节 过滤 .....	112
第二节 重力沉降 .....	101	一、悬浮液的过滤 .....	112
一、沉降速度 .....	101	二、过滤速率基本方程式 .....	115
二、降尘室 .....	103	三、恒压过滤 .....	117
三、悬浮液的沉聚 .....	105	四、过滤设备 .....	120
第三节 离心沉降 .....	106	思考题 .....	124
一、离心分离因数 .....	106	习题 .....	125
二、离心沉降速度 .....	107	本章符号说明 .....	126
三、旋风分离器 .....	107		

### 第四章 传 热

第一节 概述 .....	127	三、总传热系数 .....	159
一、传热过程的应用 .....	127	四、壁温计算 .....	164
二、热量传递的基本方式 .....	128	五、传热计算示例 .....	166
三、两流体通过间壁换热与传热速率方程式 .....	129	第五节 热辐射 .....	171
第二节 热传导 .....	130	一、热辐射的基本概念 .....	171
一、傅里叶定律 .....	130	二、物体的辐射能力与斯蒂芬-波尔兹曼定律 .....	173
二、热导率 .....	131	三、克希霍夫定律 .....	175
三、平壁的稳态热传导 .....	133	四、两固体间的辐射传热 .....	176
四、圆筒壁的稳态热传导 .....	136	五、辐射与对流的联合传热 .....	180
第三节 对流传热 .....	139	第六节 换热器 .....	180
一、对流传热方程与对流传热系数 .....	139	一、换热器的分类 .....	181
二、影响对流传热系数的因素 .....	140	二、间壁式换热器 .....	181
三、对流传热的特征数关系式 .....	141	三、列管式换热器选用计算中有关问题 .....	187
四、流体无相变时对流传热系数的经验关联式 .....	142	四、系列标准换热器的选用步骤 .....	190
五、流体有相变时的对流传热 .....	147	五、加热介质与冷却介质 .....	193
六、选用对流传热系数关联式的注意事项 .....	152	六、传热过程的强化 .....	194
第四节 两流体间传热过程的计算 .....	153	思考题 .....	195
一、热量衡算 .....	153	习题 .....	196
二、传热平均温度差 .....	154	本章符号说明 .....	199

### 第五章 吸 收



<b>第一节 概述</b> .....	201
一、吸收操作的应用 .....	202
二、吸收设备 .....	202
三、吸收操作的分类 .....	202
四、吸收剂的选择 .....	203
<b>第二节 气液相平衡</b> .....	204
一、平衡溶解度 .....	204
二、亨利定律 .....	205
三、气液相平衡在吸收中的应用 .....	208
<b>第三节 吸收过程的传质速率</b> .....	210
一、分子扩散与费克定律 .....	211
二、等摩尔逆向扩散 .....	211
三、组分 A 通过静止组分 B 的扩散 .....	213
四、分子扩散系数 .....	215
五、单相内的对流传质 .....	217
六、两相间传质的双膜理论 .....	219

七、总传质速率方程 .....	221
八、传质速率方程式的各种表示形式 .....	223
<b>第四节 吸收塔的计算</b> .....	225
一、物料衡算与操作线方程 .....	225
二、吸收剂的用量与最小液-气比 .....	226
三、填料层高度的计算 .....	229
四、吸收塔的操作计算 .....	237
五、解吸塔的计算 .....	240
<b>第五节 填料塔</b> .....	244
一、填料塔的结构及填料性能 .....	244
二、气液两相在填料层内的流动 .....	247
三、塔径的计算 .....	249
四、填料塔的附件 .....	250
<b>思考题</b> .....	252
<b>习题</b> .....	253
<b>本章符号说明</b> .....	255

## 第六章 蒸 馏

<b>第一节 双组分溶液的汽液相平衡</b> .....	258
一、溶液的蒸气压与拉乌尔定律 .....	258
二、理想溶液汽液相平衡 .....	259
三、非理想溶液汽液相平衡 .....	265
<b>第二节 蒸馏与精馏原理</b> .....	266
一、简单蒸馏与平衡蒸馏 .....	266
二、精馏原理 .....	267
<b>第三节 双组分连续精馏的计算与分析</b> .....	269
一、全塔物料衡算 .....	270
二、恒摩尔流量的假设 .....	271
三、进料热状态参数 $q$ .....	272
四、操作线方程与 $q$ 线方程 .....	275
五、理论板数计算 .....	280
六、回流比与进料热状态对精馏过程的影响 .....	283
七、塔顶液相回流比的选择 .....	286
八、理论板数的简捷算法 .....	291
九、精馏塔的操作计算 .....	292

十、直接蒸汽加热及两股进料的精馏塔 .....	297
<b>第四节 间歇精馏</b> .....	300
一、回流比恒定的操作 .....	301
二、馏出液组成恒定的操作 .....	301
<b>第五节 恒沸精馏与萃取精馏</b> .....	302
一、恒沸精馏 .....	302
二、萃取精馏 .....	303
<b>第六节 板式塔</b> .....	304
一、塔板结构 .....	305
二、塔板上汽液两相的流动现象 .....	306
三、塔板效率 .....	309
四、塔高的确定 .....	311
五、塔径的计算 .....	311
六、塔板类型 .....	313
<b>思考题</b> .....	315
<b>习题</b> .....	317
<b>本章符号说明</b> .....	320

## 第七章 干 燥

<b>第一节 概述</b> .....	322
一、固体物料的去湿方法 .....	322
二、湿物料的干燥方法 .....	323

三、对流干燥过程的传热与传质 .....	324
<b>第二节 湿空气的性质及湿度图</b> .....	324
一、湿空气的性质 .....	324

二、湿空气的湿度图及其应用 .....	330	三、恒定干燥条件下的干燥速率与干燥时间 .....	342
<b>第三节 干燥过程的物料衡算和热量衡算</b> .....	333	<b>第五节 干燥设备</b> .....	347
一、干燥过程的物料衡算 .....	333	一、常用对流干燥器简介 .....	347
二、干燥过程的热量衡算 .....	335	二、干燥器的选用 .....	351
<b>第四节 物料的平衡含水量与干燥速率</b> .....	339	思考题 .....	352
一、物料的干燥实验曲线 .....	339	习题 .....	353
二、物料的平衡含水量曲线 .....	341	本章符号说明 .....	355

## 附录

一、单位换算 .....	356	十四、固体材料的热导率 .....	369
二、基本物理常数 .....	356	十五、某些液体的热导率 .....	370
三、饱和水的物理性质 .....	357	十六、气体热导率共线图 .....	370
四、某些液体的物理性质 .....	358	十七、液体比热容共线图 .....	372
五、某些有机液体的相对密度（液体密度与4℃水的密度之比） .....	359	十八、气体比热容共线图（101.325kPa） .....	374
六、饱和水蒸气表（按温度排列） .....	360	十九、液体比汽化热共线图 .....	376
七、饱和水蒸气表（按压力排列） .....	361	二十、液体表面张力共线图 .....	377
八、干空气的热物理性质（ $p=1.01325 \times 10^5$ Pa） .....	363	二十一、管子规格 .....	379
九、某些气体的重要物理性质 .....	363	二十二、IS型单级单吸离心泵规格（摘录） .....	380
十、液体饱和蒸气压 $p^\circ$ 的安托因（Antoine）常数 .....	364	二十三、热交换器系列标准（摘录） .....	382
十一、水在不同温度下的黏度 .....	365	二十四、双组分溶液的汽液相平衡数据 .....	384
十二、液体黏度共线图 .....	366	二十五、常用化学元素的相对原子质量 .....	384
十三、气体黏度共线图（101.325kPa） .....	368		

## 参考文献

### 主要设备及原理素材资源

（建议在 wifi 环境下扫码观看）

伯努利方程的物理意义 .....	23	罗茨鼓风机工作原理 .....	93
边界层分离演示 .....	34	往复式压缩机工作原理 .....	94
流体流过弯头 .....	43	水环真空泵 .....	95
突然扩大和缩小 .....	44	降尘室的工作原理 .....	103
孔板流量计流动状态 .....	55	旋风分离器 .....	108
文丘里流量计流动状态 .....	58	板框压滤机 .....	120
离心泵 .....	69	转筒真空过滤机 .....	122
离心泵的气缚 .....	69	流体流过圆管和管束 .....	145
离心泵的汽蚀 .....	79	套管式换热器工作状态 .....	182
齿轮泵 .....	87	螺旋板式换热器工作状态 .....	183

板式换热器工作状态 .....	183	严重漏液 .....	308
固定管板式换热器 .....	186	液泛 .....	308
浮头式换热器工作状态 .....	187	塔板类型 .....	313
U形管式换热器工作状态 .....	187	厢式干燥器工作状态 .....	347
等摩尔逆向扩散演示 .....	212	转筒干燥器工作状态 .....	348
填料塔简介 .....	244	沸腾床干燥器工作状态 .....	349
流体力学特征 .....	248	气流干燥器工作状态 .....	350
板式塔简介 .....	305	喷雾干燥器工作状态 .....	350
泡沫接触状态 .....	306		

# 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、

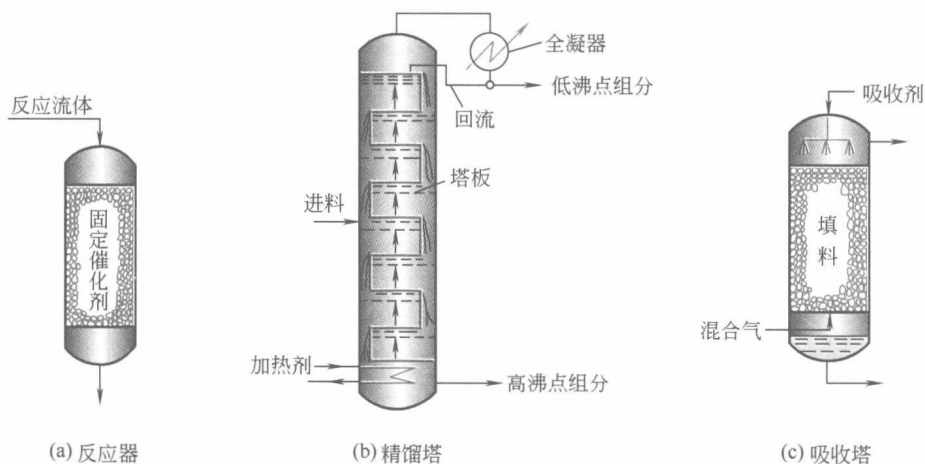


图 0-1 反应器与单元操作设备举例

环境保护工程中也广泛应用。

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, 使其流动起来。

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。

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“高等数学”、“大学物理”、“大学化学”、“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,以物料衡算、能量衡算、平衡关系、传递速率、经济核算这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、实验研究方法与技能,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(Système International d'Unités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	长度	质量	时间	电流	热力学温度	物质的量	发光强度
单位名称	米	千克(公斤)	秒	安(培)	开[尔文]	摩(尔)	坎[德拉]
单位符号	m	kg	s	A	K	mol	cd

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	°C	

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 °C。

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

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

式中, dim为量纲符号;指数α、β、γ…称为量纲指数。

例如,密度ρ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ρ与4℃时纯水的密度ρ<sub>水</sub>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  $\dim R = ML^2 T^{-2} N^{-1} \Theta^{-1}$ 。

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

任何物理量的大小都要用数值和单位表示。例如, 同一压力, 其单位不同, 则数值也不同。1kPa=10<sup>3</sup>Pa, 即压力的单位用 Pa 和 kPa, 其数值相差 10<sup>3</sup> 倍。

因此, 在用物理方程式进行计算时, 必须注意式中各项单位的一致性。例如, 理想气体状态方程式  $pV=nRT$ , 若将式中气体压力  $p$  或气体的物质的量  $n$  的单位改变, 则摩尔气体常数  $R$  的数值和单位也应作相应改变, 以保持方程式各项单位的一致性, 如下所示。

序号	$p$	$V$	$n$	$T$	$R$
1	Pa	m <sup>3</sup>	mol	K	8.314 Pa·m <sup>3</sup> /(mol·K)=J/(mol·K)
2	kPa	m <sup>3</sup>	kmol	K	8.314 kPa·m <sup>3</sup> /(kmol·K)=kJ/(kmol·K)
3	kPa	m <sup>3</sup>	mol	K	8.314×10 <sup>-3</sup> kPa·m <sup>3</sup> /(mol·K)=kJ/(mol·K)
4	Pa	m <sup>3</sup>	kmol	K	8314 Pa·m <sup>3</sup> /(kmol·K)=J/(kmol·K)

本书采用第 2 项列出的单位。

#### 5. 实验方程式的单位换算

实验方程式等号两边各项的单位往往不一致。目前有些实验方程式中的物理量单位不是法定计量单位, 其换算方法举例说明如下。

例如, 液体蒸气压的 Antoine 方程为

$$\lg p_s = A' - \frac{B}{t+C} \quad (a)$$

式中,  $A'$ 、 $B$ 、 $C$  为 Antoine 常数, 与物质种类有关, 可由手册中查得;  $t$  为温度, °C;  $p_s$  为液体的蒸气压, mmHg。

试将蒸气压  $p_s$  的单位由 mmHg 改为 kPa, 单位换算为 kPa 后的蒸气压符号用  $p^\circ$  表示。已知 1kPa=7.50061mmHg, 则有  $7.50061p^\circ=p_s$ , 代入式(a), 得

$$\lg(7.50061p^\circ) = A' - \frac{B}{t+C}$$

$$\lg p^\circ = A' - 0.875097 - \frac{B}{t+C}$$

$$\text{令} \quad A = A' - 0.875097 \quad (b)$$

$$\text{得} \quad \lg p^\circ = A - \frac{B}{t+C} \quad (c)$$

由上述单位换算可知, 只要把计算  $p_s$  (mmHg) 用的常数  $A'$  值, 按式(b) 换算为常数  $A$  值, 代入式(c), 即可求出  $p^\circ$  (kPa)。附录十列出了某些液体计算  $p^\circ$  的 Antoine 常数  $A$ 、 $B$  及  $C$  的值。

## 四、混合物含量的表示方法

化工生产中所处理的物料, 常常不是单一组分, 而是由若干组分所构成的混合物。混合



物中, 各组分的含量 (或组成) 有多种表示方法, 下面介绍常用的几种。

### 1. 物质的量浓度与物质的量分数

(1) 物质的量浓度 物质的量浓度 (amount concentration), 其定义是组分  $i$  的物质的量  $n_i$  除以混合物的体积  $V$ , 以符号  $c_i$  表示, 即

$$c_i = n_i / V \quad (0-3)$$

物质的量浓度又简称为物质的浓度 (过去称为摩尔浓度), 单位为  $\text{kmol}/\text{m}^3$ 。

(2) 物质的量分数 (摩尔分数) 物质的量分数 (amount fraction) 又称为摩尔分数 (mole fraction), 其定义是组分  $i$  的物质的量  $n_i$  与混合物的物质的量  $n$  之比值, 用于表示混合物中各组分的组成。对于液体混合物, 以  $x_i$  表示, 即

$$x_i = n_i / n \quad (0-4)$$

式中,  $n$  为混合物中各组分物质的量之总和, 即

$$n = n_1 + n_2 + \dots = \sum n_i \quad (0-5)$$

显然, 混合物中各组分的摩尔分数之和等于 1, 即

$$x_1 + x_2 + \dots = \sum x_i = 1 \quad (0-6)$$

### 2. 质量浓度与质量分数

(1) 质量浓度 质量浓度 (mass concentration) 又称质量密度 (mass density), 其定义是组分  $i$  的质量  $m_i$  除以混合物的体积  $V$ , 以符号  $\rho_i$  表示, 即

$$\rho_i = m_i / V \quad (0-7)$$

式中,  $\rho_i$  的单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

(2) 质量分数 质量分数 (mass fraction), 其定义是组分  $i$  的质量  $m_i$  与混合物的总质量  $m$  之比值, 用于表示混合物中各组分的组成, 以符号  $w_i$  表示, 即

$$w_i = m_i / m \quad (0-8)$$

显然, 混合物中各组分的质质量分数之和等于 1, 即

$$\sum w_i = 1 \quad (0-9)$$

上述各组成 (浓度) 之间的换算关系列于表 0-5。

表 0-5 各组成 (浓度) 之间的换算关系

项 目	浓度 ( $c_A$ ) / $\text{kmol} \cdot \text{m}^{-3}$	摩尔分数 ( $x_A$ 或 $y_A$ )	质量浓度 ( $\rho_A$ ) / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	质量分数 ( $w_A$ )
组分 A 的浓度及组成 (双组分物系)	浓度 ( $c_A$ ) / $\text{kmol} \cdot \text{m}^{-3}$	$c x_A$	$\frac{\rho_A}{M_A}$	$\frac{\rho w_A}{M_A}$
摩尔分数 ( $x_A$ 或 $y_A$ )	$\frac{c_A}{c}$		$\frac{\rho_A / M_A}{\rho_A / M_A + \rho_B / M_B}$	$\frac{w_A / M_A}{w_A / M_A + w_B / M_B}$
质量浓度 ( $\rho_A$ ) / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_A M_A$	$\frac{\rho x_A M_A}{x_A M_A + x_B M_B}$		$\rho w_A$
质量分数 ( $w_A$ )	$\frac{c_A M_A}{\rho}$	$\frac{x_A M_A}{x_A M_A + x_B M_B}$	$\frac{\rho_A}{\rho}$	

注: 混合物的浓度  $c = c_A + c_B$ , 混合物的质量浓度  $\rho = \rho_A + \rho_B$ , 混合物平均摩尔质量  $M_m = M_A x_A + M_B x_B$ ; 其中  $1 = x_A + x_B$ ,  $1 = w_A + w_B$ , A 为溶质, B 为溶剂。

表 0-5 中的  $c$  及  $\rho$  说明如下。