

普通高等教育“十三五”规划教材

# 化工原理

HUAGONG YUANLI

张秀玲 刘爱珍 刘葵 主编



化学工业出版社

普通高等教育“十三五”规划教材

# 化工原理

张秀玲 刘爱珍 刘葵 主编



化学工业出版社

·北京·

本书是在“化工原理”课程一线教师多年教学实践的基础上,根据地方本科院校创新型、应用型人才培养新模式的特点编写而成。本书内容突出工程特色,注重工程实践能力培养。本书各章介绍了单元操作的原理、计算方法及相应设备;单元操作按过程原理分类,以过程带操作;各个章节中强调经常使用的内容,淡化公式的推导,而注重公式的应用,为学生熟练掌握公式、应用公式奠定基础。每章后配有适量习题,方便读者复习提高。

本书可作为少学时的化工原理课程教材,特别适用于应用型本科院校学生及非化工专业的学生学习使用。

化工原理

张秀玲 刘爱珍 刘葵 主编

### 图书在版编目(CIP)数据

化工原理/张秀玲,刘爱珍,刘葵主编. —北京:化学工业出版社,2015.10

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-122-24715-5

I. ①化… II. ①张…②刘…③刘… 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(2015)第171003号

---

责任编辑:赵玉清

文字编辑:向东

责任校对:王素芹

装帧设计:韩飞

---

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)

印装:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张17¼ 字数451千字 2016年1月北京第1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: 45.00 元

版权所有 违者必究

## 本书编写人员名单

主    编：张秀玲  刘爱珍  刘  葵  
编写人员：张秀玲  刘爱珍  刘  葵  邱玉娥  
            王丽梅  宋玉兰  商书波  王福明



## 前言

本书是遵循化学工程与工艺专业教学指导分委员会普通高等学校“化学工程与工艺专业规范”要求，结合地方本科院校“创新性、应用型”人才培养新模式的特点，深入地研究和比较了国内外优秀化工原理教材及相关参考书，充分吸收了众多教材的精华编写而成的。

本书不求知识的全面性，重在突出基本观点和工程处理方法，培养学生的工程实践能力。在教学内容上贯彻“少而精”的理念，精选各相关单元操作的主要内容。各单元操作按传递过程的共性归类，重点介绍了化工单元操作的基本原理、计算方法及相应设备；淡化公式的推导，而注重公式的应用，着重培养学生以工程观念观察、分析和解决实际工程技术问题的能力。本书力求知识结构合理、内容精炼、层次分明，便于学生学习。

本书是德州学院“化工原理”课程一线教师在多年教学实践的基础上，针对化工类及相关专业的需求，进行规划和编写的。其中，绪论由邱玉娥编写；第1章及第7章的萃取和膜分离部分由宋玉兰编写；第2章、第6章及附录部分由刘爱珍编写；第3章及第7章的蒸发部分由王丽梅编写；第4章由张秀玲、王福明编写；第5章由商书波编写；全书的插图由商书波绘制完成。张秀玲、刘爱珍及广西师范大学的刘葵教授担任本书的主编并负责最后的统编定稿。本书的编写还得到了德州学院领导的支持和关心，在此一并表示诚挚的谢意。

本书是“山东省本科高校化工特色专业建设”及山东省“卓越工程师教育培养计划”的成果之一，是编写者在总结近几年来主持研究山东省教育厅教改课题(2012477)、山东省教育科学研究重点课题 [(2010GZ081) 及 (2008GG112)] 研究成果的基础上，针对地方本科院校的教学特点编写而成。

由于编者水平有限，书中不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者

2015年4月



# 目 录

## 第 0 章 绪论 1

- 0.1 化工原理课程的性质、内容与任务 ..... 1
- 0.2 化工过程与单元操作 ..... 1
  - 0.2.1 化工过程与单元操作 ..... 1
  - 0.2.2 单元操作的分类及特点 ..... 2
- 0.3 单元操作中的物料衡算与能量衡算 ..... 2
  - 0.3.1 物料衡算 ..... 3
  - 0.3.2 能量衡算 ..... 3
- 0.4 单位制与单位换算 ..... 4
  - 0.4.1 单位制 ..... 4
  - 0.4.2 单位换算 ..... 5

## 第 1 章 流体流动及输送机械 7

- 1.1 流体静力学 ..... 7
  - 1.1.1 密度和压力 ..... 7
  - 1.1.2 流体静力学方程 ..... 9
  - 1.1.3 流体静力学方程的应用 ..... 9
- 1.2 流体动力学 ..... 11
  - 1.2.1 流量和流速 ..... 11
  - 1.2.2 稳定流动与非稳定流动 ..... 11
  - 1.2.3 流动系统中的物料衡算 ..... 11
  - 1.2.4 流动系统中的能量衡算 ..... 12
- 1.3 流体流动的阻力损失 ..... 17
  - 1.3.1 牛顿黏性定律与流体的黏度 ..... 17
  - 1.3.2 流动类型与雷诺数 ..... 18
  - 1.3.3 流体阻力计算 ..... 19
- 1.4 管路计算 ..... 24

- 1.4.1 简单管路的计算 ..... 25
- 1.4.2 复杂管路的计算 ..... 28
- 1.5 流量测量 ..... 29
  - 1.5.1 测速管 ..... 29
  - 1.5.2 孔板流量计 ..... 31
  - 1.5.3 转子流量计 ..... 32
- 1.6 流体输送机械 ..... 33
  - 1.6.1 离心泵 ..... 33
  - 1.6.2 其他类型泵 ..... 41
  - 1.6.3 离心式通风机 ..... 43
- 习题 ..... 45
- 本章主要符号说明 ..... 49

## 第 2 章 传热 50

- 2.1 概述 ..... 50
  - 2.1.1 传热的基本方式 ..... 50
  - 2.1.2 载热体及其选择 ..... 51
  - 2.1.3 传热速率与热通量 ..... 51
  - 2.1.4 定态与非定态传热 ..... 52
- 2.2 热传导 ..... 52
  - 2.2.1 傅里叶定律 ..... 52
  - 2.2.2 热导率 ..... 53
  - 2.2.3 平壁的定态热传导 ..... 53
  - 2.2.4 圆筒壁的定态热传导 ..... 56
- 2.3 对流传热 ..... 57
  - 2.3.1 对流传热速率方程 ..... 58
  - 2.3.2 对流传热系数 ..... 59
  - 2.3.3 流体无相变时的对流传热系数 ..... 60
  - 2.3.4 流体有相变时的对流传热系数 ..... 65
- 2.4 传热过程的计算 ..... 69
  - 2.4.1 总传热速率方程 ..... 69
  - 2.4.2 总传热系数 ..... 70
  - 2.4.3 热负荷的确定 ..... 73

2.4.4	平均温度差的计算	74
2.4.5	传热过程的计算	78
2.4.6	壁温的计算	79
2.5	辐射传热	80
2.5.1	基本概念	80
2.5.2	物体的辐射能力	81
2.5.3	两固体间的辐射传热	82
2.5.4	对流与辐射的联合 传热	83
2.6	换热器	84
2.6.1	换热器的类型	84
2.6.2	间壁式换热器的类型	85
2.6.3	列管式换热器的设计和 选型	91
2.6.4	传热过程的强化	98
	习题	99
	本章主要符号说明	101

### 第3章 吸收

103

3.1	概述	103
3.1.1	吸收的分类	103
3.1.2	吸收剂的选择	104
3.1.3	吸收的流程	104
3.2	吸收的气液相平衡	105
3.2.1	相组成的表示方法	105
3.2.2	亨利定律	107
3.2.3	相平衡关系在吸收过程中 的应用	109
3.3	吸收传质机理与吸收速率 方程	110
3.3.1	单相内传质	110
3.3.2	双膜模型吸收过程的总 传质速率方程	115
3.4	吸收塔的计算	119
3.4.1	物料衡算与操作线 方程	119
3.4.2	填料层高度的计算	121
3.4.3	塔径的计算	127
3.4.4	解吸	127
3.5	填料塔	128
3.5.1	填料的主要类型及	

性能	129	
3.5.2	填料塔的流体力学 性能	131
3.5.3	填料塔的附件	132
	习题	133
	本章主要符号说明	136

### 第4章 蒸馏

137

4.1	概述	137
4.2	双组分溶液的气液相平衡	137
4.2.1	双组分理想物系的 液相平衡	138
4.2.2	双组分非理想物系的 气液相平衡	141
4.3	蒸馏方式	143
4.3.1	简单蒸馏	143
4.3.2	平衡蒸馏	143
4.3.3	精馏	143
4.4	双组分连续精馏塔的计算	145
4.4.1	全塔物料衡算	145
4.4.2	理论板与恒摩尔流 假设	146
4.4.3	操作线方程	147
4.4.4	进料热状况的影响与 $q$ 线 方程	149
4.4.5	理论塔板数的确定	152
4.4.6	回流比的影响及选择	155
4.4.7	理论塔板数的捷算法	158
4.4.8	实际塔板数与塔板 效率	160
4.4.9	精馏装置的热量衡算	162
4.5	板式塔	163
4.5.1	塔板类型	163
4.5.2	板式塔的工艺设计	165
4.5.3	板式塔的流体力学 性能	171
4.5.4	塔板负荷性能图	173
	习题	174
	本章主要符号说明	176

### 第5章 非均相混合物的分离

178

5.1	沉降	178
-----	----	-----

5.1.1 重力沉降	178
5.1.2 离心沉降	182
5.2 过滤	185
5.2.1 概述	185
5.2.2 过滤基本理论	186
5.2.3 过滤设备	190
5.2.4 滤饼的洗涤	192
5.2.5 过滤机的生产能力	193
习题	195
本章主要符号说明	196

## 第6章 干燥

198

6.1 概述	198
6.1.1 固体物料的去湿	198
6.1.2 干燥过程的分类	198
6.1.3 对流干燥过程	198
6.2 湿空气的性质与湿度图	199
6.2.1 湿空气的性质	199
6.2.2 湿空气的湿度图及其应用	205
6.3 干燥过程的物料衡算与热量衡算	207
6.3.1 干燥过程的物料衡算	207
6.3.2 干燥过程的热量衡算	210
6.3.3 干燥系统的热效率	211
6.3.4 干燥器出口空气状态的确定	212
6.4 干燥速率与干燥时间	214
6.4.1 物料中所含水分的性质	215
6.4.2 恒定干燥条件下的干燥速率	216
6.4.3 恒定干燥条件下干燥时间的计算	218
6.5 干燥器	220
6.5.1 工业上常用的干燥器	221
6.5.2 干燥器的选型	224
习题	225
本章主要符号说明	226

## 第7章 其他单元过程简介

227

7.1 蒸发	227
--------	-----

7.1.1 单效蒸发	227
7.1.2 多效蒸发	230
7.1.3 蒸发器	231
7.2 萃取	234
7.2.1 萃取流程	236
7.2.2 萃取设备	237
7.3 膜分离	240
7.3.1 典型膜过程简介	240
7.3.2 膜组件	242
习题	243
本章主要符号说明	243

## 附录

245

1. 单位换算表	245
2. 某些气体的重要物理性质	248
3. 某些液体的重要物理性质	249
4. 常用固体材料的密度和比热容	250
5. 常用固体材料的热导率	250
6. 某些固体材料的黑度	251
7. 某些液体的热导率	251
8. 壁面污垢热阻(污垢系数)	252
9. 干空气的重要物理性质(101.3kPa)	252
10. 水的重要物理性质	253
11. 水在不同温度下的黏度	254
12. 饱和水蒸气表(按温度排列)	255
13. 饱和水蒸气表(按压强排列)	256
14. 液体黏度共线图	257
15. 气体黏度共线图(常压)	258
16. 液体比热容共线图	260
17. 气体比热容共线图(常压)	261
18. 液体汽化潜热共线图	262
19. 无机物水溶液在101.3kPa(绝)下的沸点	264
20. 某些气体在水中的亨利系数	265



21. 某些二元物系的气液平衡组成 ..... 265

22. 管子规格 ..... 266

23. 离心泵规格 (摘录) ..... 267

24. 4-72 型离心通风机规格 (摘录) ..... 271

25. 管壳式热交换器系列标准 (摘自 JB/T 4714、4715-92) ..... 271

**参考文献**

**275**

# 第 0 章 绪 论

## 0.1 化工原理课程的性质、内容与任务

化工原理是综合运用数学、物理、化学和算法语言等基础知识,将自然科学中的基本原理(质量守恒、能量守恒及平衡关系等)用来研究化工生产中内在的共同规律,讨论化工生产过程中各个单元操作的基本原理、典型设备结构、工艺尺寸设计和设备的选型以及计算方法的一门工程学科。它是化学工程与工艺类及相近专业的专业基础理论主干课程,在基础课与专业课之间起着承上启下、从“化学”到“化工”、由“理”及“工”的桥梁作用,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。

化工原理课程的主要内容是以化工生产中的物理加工过程为背景,按其操作原理的共性归纳为若干“化工单元操作”(流体流动、传热、吸收、蒸馏、干燥、机械分离、蒸发、结晶、吸附、膜分离等),研究各化工单元操作的基本原理,单元操作中典型设备的构造、设备的操作特性与过程和设备的设计与计算、设备的选择与改造等。化工原理属于工程科学,是用自然科学的原理考察、解释和处理工程实际问题的科学。本课程的研究方法主要是在理论指导下的实验研究法(经验法)和数学模型法(半经验半理论方法)。

化工原理课程的主要任务是培养学生综合利用本学科的基础理论及专业基础理论知识,分析解决化工生产实际问题的能力,具体包括以下几种基本能力:

- ① 选择单元操作和设备的能力 根据具体生产工艺要求、物料特性,用工程观点(安全适用、经济合理)合理选择单元操作及设备;
- ② 进行设计计算的能力 根据选定的单元操作进行工艺计算和设备设计;
- ③ 进行单元操作的能力 熟悉典型单元操作过程的操作原理、操作方法,初步具备分析、解决操作故障的能力;
- ④ 开发创新能力 具有选择适宜操作条件,探索强化过程途径和提高设备效能的初步能力。

除了以上几种基本能力的培养外还应该特别指出的是,近年来,随着高新技术的发展(例如新材料、生物化工、制药、环境工程等领域的发展和崛起)出现了一系列的新型单元操作和过程技术,如膜分离技术、反应精馏技术、超临界流体技术、超重力场分离、电磁分离技术等。它们是各单元操作之间、各专业学科之间相互渗透、耦合的结果。因此,注意培养学生灵活运用本学科以及各学科间知识与技术的耦合来开发新型单元操作与设备的基本能力十分重要。

## 0.2 化工过程与单元操作

### 0.2.1 化工过程与单元操作

化工过程是指化学工业的生产过程。它的特点之一是操作步骤多,因为原料在各步骤中

需要依次通过若干个或若干组设备,经过各种方式的处理后才能成为产品;同时由于化学工业使用的原料与所得的产品种类繁多,不同化工过程的差别很大。但分析各种化工过程可发现,它们一般都可概括为原料预处理、化学反应和产品的分离与精制三大步骤,其简图如图 0-1 所示。

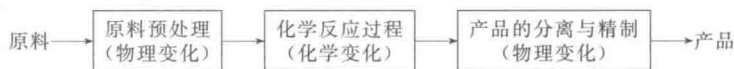


图 0-1 化工过程三大步骤

由图 0-1 可以看出,一个化工过程的操作步骤可以归纳为两大类:一类以化学反应为主,通常是在反应器中进行;另一类则主要是物理加工过程,包括原料预处理和产品的分离与精制两大部分。从生产化工产品的角度讲,化学反应是核心步骤,但在化工厂的设备投资和操作费用中通常并不占据主要比例。实际上,涉及原料预处理和产品的分离及精制的物理加工过程,在整个化工生产中发挥着极其重要的作用,并在很大程度上决定着整个生产的经济效益。化学工业中将具有共同的物理变化,遵循共同的物理学规律,以及具有共同作用的基本操作称之为单元操作。

## 0.2.2 单元操作的分类及特点

各种单元操作根据不同的物理原理,采用相应的设备,达到各自的工艺目的。对于目前工业上经常使用的单元操作,可从不同角度加以分类。

按各单元操作所遵循的基本原理分为:

- ① 遵循流体动力规律的单元操作 包括流体输送、沉降、过滤搅拌等。
- ② 遵循热量传递基本规律的单元操作 包括加热、冷却、冷凝、蒸发等。
- ③ 遵循传质基本规律的单元操作 包括蒸馏、吸收、萃取等。

因为遵循传质基本规律的单元操作其最终目的是将混合物中的组分分开,故又称分离操作单元。

- ④ 同时遵循热质传递规律的单元操作 包括气体的增湿与减湿、结晶、干燥等。

另外,还有热力过程(制冷)、粉体工程(粉碎、颗粒分级、流态化)等单元操作。同时,随着新产品、新工艺的开发或为实现绿色化工生产,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,如膜分离、参数泵分离、电磁分离、超临界技术等。此外,以节约能耗,提高效率或洁净无污染生产为目标的集成化工艺(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。

单元操作具有下列特点:①所有的单元操作都是物理性操作,即只改变物料的状态或其物理性质,并不改变其化学性质;②单元操作是化工生产过程中共有的操作,只是不同的化工生产中所包含的单元操作数目、名称与排列顺序不同;③单元操作用于不同的化工过程时,基本原理相同,所用的设备也是通用的。

## 0.3 单元操作中的物料衡算与能量衡算

在研究各类单元操作时,为了搞清过程始末和过程之中各段物料的数量、组成之间的关系以及过程中各股物料带进、带出的能量及与环境交换的能量,必须进行物料衡算和能量衡算。物料衡算及能量衡算也是本课程解决问题时的常用手段之一。

### 0.3.1 物料衡算

物料衡算是化工计算中最基本、也是最重要的内容之一，它是能量衡算的基础。一般在物料衡算之后，才能计算所需要提供或移走的能量。通常，物料衡算有两种情况，一种是对已有的生产设备或装置，利用实际测定的数据，算出另一些不能直接测定的物料量，用此计算结果，对生产情况进行分析、作出判断、提出改进措施。另一种是设计一种新的设备或装置，根据设计任务，先作物料衡算，求出进、出各设备的物料量，然后再作能量衡算，求出设备或过程的热负荷，从而确定设备尺寸及整个工艺流程。

#### 0.3.1.1 物料衡算式

物料衡算是以质量守恒定律为基础对物料平衡进行计算的。物料平衡是指“在单位时间内进入系统（体系）的全部物料质量必定等于离开该系统的全部物料质量与积累在该系统内的物料质量之和”，用公式表示即为：

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

式中  $\sum G_{\text{入}}$ ——输入物料量的总和，kg；

$\sum G_{\text{出}}$ ——输出物料量的总和，kg；

$G$ ——积累物料量，kg。

#### 0.3.1.2 物料衡算的方法和步骤

进行物料衡算时，为了能顺利地计算，避免错误，必须掌握计算技巧，按正确的计算方法和步骤进行。尤其是对复杂的物料衡算过程，更应如此，这样才能获得准确的计算结果。一般情况物料衡算的基本步骤如下：

- ① 根据题意画出简单的流程示意图；
- ② 列出由物料平衡所需求解的问题；
- ③ 决定系统的边界，即根据物料平衡所需求解的问题，确定计算范围；
- ④ 选择计算基准；
- ⑤ 用数学方法进行物料平衡计算；
- ⑥ 列出物料平衡表，并进行校核。

### 0.3.2 能量衡算

能量衡算的基础是物料衡算，只有在进行完备的物料衡算后才能作出能量衡算。在化工生产中，能量的消耗是一项重要的技术经济指标，它是衡量工艺过程、设备设计、操作制度是否先进合理的主要指标之一。

能量衡算的依据是能量守恒定律。根据能量守恒定律，在任何一个化工生产过程中，凡向该过程输入的能量必等于该过程输出的能量。在许多化工生产中所涉及的能量仅为热能，所以本教材只对热量衡算作简单介绍。

#### 0.3.2.1 热量衡算式

热量衡算有两种情况，一种是在设计时，根据给定的进出物料量及已知温度求另一股物料的未知物料量或温度，常用于计算换热设备的蒸汽用量或冷却水用量；另一种是在原有的装置上，对某个设备，利用实际测定（有时也要作一些相应的计算）的数据，计算出另一些不能或很难直接测定的热量或能量，由此对设备作出能量上的分析。

根据能量守恒定律，在任何一个化工生产过程中，一定时间内凡向系统（体系）输入的

热量，必等于从该系统输出的热量与积累在该系统内的热量之和。对于连续定态过程，积累的热量为零，则热量衡算的基本关系式可表示为：

$$\sum Q_F = \sum Q_D + q \quad (0-2)$$

式中  $\sum Q_F$ ——输入系统的各物料带入的总热量，kJ；

$\sum Q_D$ ——输出系统的各物料带出的总热量，kJ；

$q$ ——系统与环境交换的总热量，当系统向环境散热时，此值为正，称为热损失，kJ。

### 0.3.2.2 热量衡算的方法与步骤

热量衡算的方法与步骤和物料衡算大致相同，一般包括以下几个基本步骤：

① 绘制以单位时间为基准的物料流程图，确定热量衡算范围。

② 在物料流程图上标明温度、压力、相态等已知条件。

③ 选定计算基准温度。在进行热量计算时，基准温度选择不恰当，会给计算带来许多不便。因此，在同一个计算中，要选择同一个计算基准温度，而且要使计算尽量地简单、方便。由于手册、文献上查到的热力学数据大多数是 273K 或 298K 的数据，故选此温度为基准温度计算比较方便。计算时相态的确定也是很重要的。

④ 列出热量衡算式，然后用数学方法求解未知值。

⑤ 整理并校核计算结果，列出热量平衡表。

进行热量衡算时应注意以下几点：

① 热量衡算时要先根据物料的变化和走向，认真分析热量间的关系，然后根据热量守恒定律列出热量关系式；

② 要弄清楚过程中出现的热量形式，以便搜集有关的物性数据；

③ 计算结果是否正确适用，关键在于数据的正确性和可靠性；

④ 间歇操作设备，传热量  $Q$  随时间而变化，因此要用不平衡系数将设备的热负荷由“kJ/台”换算为“kJ/h”；

⑤ 选定设备的换热面积要大于理论计算面积。

## 0.4 单位制与单位换算

化学工程和化学工艺中涉及多种物理量。任何一个物理量的大小都是用数字和单位联合来表达的，二者缺一不可。运算时，数字与单位一并纳入运算。

### 0.4.1 单位制

一般，物理量的单位是可任选的，但由于各个物理量之间存在着客观联系，因此不必对每种物理量的单位都单独进行任意选择，而可通过某些物理量的单位来度量另一些物理量。因此，单位就会有基本单位和导出单位两种。在描述单元操作的众多物理量中，独立的物理量叫基本量，其单位叫作基本单位，如时间、长度、质量等；由基本量导出的物理量，叫作导出物理量（简称导出量），其单位叫作导出单位，如速度、加速度、密度等。

基本单位和导出单位构成一个完整的体系，称为单位制。

由于历史和地区的原因，也由于学科领域的不同，出现了对基本量及其单位的不同选择，因而产生了不同的单位制度。常用的单位制有以下几种。

### 0.4.1.1 绝对单位制

常用的绝对单位制有两种。

① 厘米·克·秒制（简称 CGS 制），又称物理单位制。其基本量为长度、质量和时间，它们的单位为基本单位。其中长度单位是厘米，质量单位是克，时间单位是秒。力是导出量，力的单位由牛顿第二定律  $F=ma$  导出，其单位为  $\text{g} \cdot \text{cm}/\text{s}^2$ ，称为达因。在过去的科学实验和物理化学数据手册中常用这种单位制。

② 米·千克·秒制（简称 MKS 制），又称绝对实用单位制。其基本量与 CGS 制相同，但基本单位不同。其长度单位是米，质量单位是千克，时间单位是秒。导出量——力的单位是  $\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$ ，称为牛顿。

### 0.4.1.2 工程单位制（重力单位制）

工程单位制选用长度、力和时间为基本量，其基本单位分别为米、千克力和秒。质量是导出量。工程单位制中力的单位千克力是这样规定的：它相当于真空中以 MKS 制量度的 1kg 质量的物体，在重力加速度为  $9.807\text{m}/\text{s}^2$  下所受的重力。质量的单位相应为  $\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$ ，并无专门名称。

### 0.4.1.3 国际单位制（简称 SI 制）

国际单位制规定了七个基本量及对应的基本单位，即长度——米、质量——千克、时间——秒、电流强度——安培、热力学温度——开尔文、发光强度——坎德拉及物质的量——摩尔（在化工原理中，一般只使用米、千克、秒、开尔文和摩尔），还有两个辅助单位和大量的导出单位。SI 制还规定了一套词冠（单位词头）来表示十进倍数或分数。

自然科学与工程技术领域里的一切单位都可以由 SI 制的七个基本单位导出，所以 SI 制通用于所有科学部门，这就是其通用性；在 SI 制中任何一个导出单位由基本单位相乘或相除而导出时，都不引入比例常数，或者说其比例常数都等于 1，从而使运算简便，不易发生错漏，这就是其一贯性。SI 制的“通用性”和“一贯性”的优点，使它在国际上迅速得到推广。

### 0.4.1.4 中华人民共和国法定计量单位（简称法定单位制）

《中华人民共和国法定计量单位》是以国际单位制（SI）单位为基础，并根据我国实际情况，适当选用一些非国际单位制单位。我国的法定计量单位包括：①国际单位制的基本单位；②国际单位制的辅助单位；③国际单位制中具有专门名称的导出单位；④国家选定的非国际单位制单位；⑤由以上单位构成的组合形式的单位；⑥由词头和以上单位所构成的十进倍数和分数单位。本教材采用法定单位制。

## 0.4.2 单位换算

在我国，以国际单位制（SI）单位为基础的法定计量单位虽已公布推行，但工程制单位在生产、设计使用中仍较普遍，而且化学工程中常用的物理、化学数据有些仍以物理制（CGS）单位表示。因此，有必要对单位换算知识简单进行介绍。

### 0.4.2.1 物理量的单位换算

同一物理量，若采用不同的单位制则数值就不相同。例如：重力加速度在法定单位制中的单位是  $\text{m}/\text{s}^2$ ，数值为 9.81；在 CGS 制中单位是  $\text{cm}/\text{s}^2$ ，数值为 981。二者包括单位在内的数值比称为单位换算因子。如重力加速度在法定单位制与 CGS 制中的单位换算因子为：

$$\frac{9.81\text{m/s}^2}{981\text{cm/s}^2} = \frac{1}{100}\text{m/cm}$$

任何单位换算因子都是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。单位换算时，需要换算因子。化工中常用单位的换算因子可从教材附录中查得。

#### 0.4.2.2 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，如牛顿定律中力、质量和加速度的关系， $F=ma$ 。物理方程遵循单位或量纲一致的原则。同一物理方程中绝不允许采用两种单位制度。

用一定单位制度的基本物理量来表示某一物理量，称为该物理量的量纲。在 MKS 单位制度中，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  $MLT^{-2}$ ；在工程单位制度中，力为基本量，其量纲用 F 表示，质量的量纲则变为  $FT^2L^{-1}$ 。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成的公式，式中各物理量的符号只代表指定单位制度的数据部分，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度不相同，则需要进行单位换算。可采取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计算；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度。

物质的常规聚集状态分为气体、液体和固体，气体和液体合称为流体。在化工生产过程中所处理的物料多为流体，通常需要将流体从一个装置输送到另一个装置，使之进行后续的加工处理。但是，无论是管道输送、流量测定，还是输送流体所需的功率的计算和输送设备的选择及操作，都与流体流动的基本原理和规律密切相关。不仅如此，许多单元操作都与流体流动密切相关，例如沉降、过滤、传热与传质等过程。本章主要讨论流体的特性、流体在管路流动过程的基本原理及流体输送机械。

## 1.1 流体静力学

流体静力学主要是研究平衡状态下流体性质在受力作用下变化规律的科学，是流体力学的一个分支。本节仅讨论流体在重力场中流体的静力平衡规律。

静止流体中没有剪应力，只有来自于压力的法向力，而法向力的产生具有重要的作用，如大型水电站和防护堤坝的建立，都必须考虑水压力的作用。因此流体的静力平衡规律在工程技术领域应用很多，如流体贮存容器和输送管道的受力计算、液压传动装置的设计、液位的测量和液封技术等。

描述静态平衡下流体性质的物理量有很多，常用的有密度、压力、温度、体积等。因此在研究流体的静力平衡规律之前，先对与此相关的物理量予以说明。

### 1.1.1 密度和压力

#### 1.1.1.1 密度

单位体积流体所具有的质量称为流体的密度，用符号  $\rho$  表示，单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。流体的密度可用下式表示：

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-1)$$

式中  $m$ ——流体的质量， $\text{kg}$ ；

$V$ ——流体的体积， $\text{m}^3$ 。

式中， $\Delta V \rightarrow 0$  时， $\frac{\Delta m}{\Delta V}$  的极限值即流体在某点的密度。

任何一种流体的密度都是压力和温度的函数。

对于液体，压力的变化对密度的影响很小，可以忽略不计，故通常视液体为不可压缩流体。但温度的变化则有一定的影响。因此，查阅和使用液体的密度数据，一定要注意其所指的温度。

气体是可压缩流体，它的密度随着温度和压力的不同而有较大的差别。低压气体的密度（极低压力除外）可按照理想气体状态方程计算，即



$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT} \quad (1-2)$$

式中  $p$ ——气体的绝对压力, kPa;

$M$ ——气体的摩尔质量, kg/kmol;

$R$ ——气体常数, 其值为 8.314kJ/(kmol·K);

$T$ ——热力学温度, K。

化工生产中经常遇到各种混合物, 在无直接的实测数据时, 混合物的密度可以用一些近似公式进行估算。通常, 按理想溶液各组分混合前后体积不变, 即混合物体积等于各组分单独存在时体积的加和原则进行计算。

对于液体, 混合物组成常用组分的质量分数表示, 因此液体混合物密度  $\rho_m$  的计算公式为:

$$\frac{1}{\rho_m} = \sum_{i=1}^n \frac{x_{wi}}{\rho_i} \quad (1-3)$$

式中  $\rho_i$ ——液体混合物中  $i$  组分的密度, kg/m<sup>3</sup>;

$x_{wi}$ ——液体混合物中  $i$  组分的质量分数。

对于气体, 混合物组成常用体积分数 (或摩尔分数) 表示, 因此气体混合物密度  $\rho_m$  的计算公式为:

$$\rho_m = \sum_{i=1}^n \rho_i y_i \quad (1-4)$$

式中  $\rho_i$ ——气体混合物中  $i$  组分的密度, kg/m<sup>3</sup>;

$y_i$ ——气体混合物中  $i$  组分的摩尔分数。

对于理想气体混合物, 其密度的计算只需要将公式(1-2)中的摩尔质量  $M$  用混合物的平均相对分子质量  $\bar{M}$  代替即可。其计算公式如下:

$$\bar{M} = \sum_{i=1}^n y_i M_i \quad (1-5)$$

式中  $M_i$ ——混合气体中  $i$  组分的分子量。

### 1.1.1.2 压力

通常, 流体单位面积上所受的力称为流体的静压力, 简称压力, 即

$$p = \frac{F}{A} \quad (1-6)$$

式中  $p$ ——流体的静压力, N/m<sup>2</sup> 或者 Pa;

$F$ ——垂直作用于流体表面的总压力 (法向力), N;

$A$ ——作用面的表面积, m<sup>2</sup>。

在国际单位制中, 压力的单位为 Pa, 即帕斯卡; 工程单位为 kgf/m<sup>2</sup>。压力单位之间的换算关系如下:

$$1 \text{ atm} = 101300 \text{ Pa} = 101.3 \text{ kPa} = 10330 \text{ kgf/m}^2 = 10.33 \text{ mH}_2\text{O} = 760 \text{ mmHg}$$

工程中, 称流体体系的真实压力为绝对压力。工业上一般采用的测压仪表 (压力表) 的读数常常是被测流体的绝对压力与当地大气压力的差值, 称为表压力, 即

$$\text{表压力} = \text{绝对压力} - \text{大气压力}$$

当被测流体体系的压力小于外界大气压力时, 使用真空表进行测量。真空表的读数称为真空度, 它表示被测流体的绝对压力低于当地大气压力的数值, 即