



郭 慧 生 编

西南師範大學出版社

化 工 原 理

郭慧生 编

西南师范大学出版社出版

(重庆·北碚)

新华书店重庆发行所发行

达县新华印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/32 印张: 15 字数: 325 千

1988年9月第一版

1988年9月第一次印刷

印数: 1—3,500

*

ISBN 7-5621-0101-9/O·7

定价: 2.95元

前 言

《化工原理》是工科专业基础课，也是理科必修基础课程之一，是一门解决化工生产中有关单元操作的原理、设备以及设计计算，理论密切联系化工生产实际的应用性学科。由于本课程实践性强，重点在于应用。为帮助读者及时巩固教学内容，故在编写中既注意引导读者掌握学习方法，还力求通过例题计算突出重点、难点。

每章的“学习提示”中简要说明该章学习的目的要求、重点、难点和学习方法；“内容要点”概括该章主要的概念、定律及计算公式，简明扼要地归纳出该章教材的主要内容；“计算举例”则通过典型实例的计算来加深对基本概念与定律、公式的理解；每章还备有“习题”以作自学练习之用，书后并附有习题解答。

限于编者水平，书中缺点错误难免，敬请读者批评指正。

在本书编写过程中，得到付玲同志的不少帮助，在此表示感谢。

编 者

1988年7月

目 录

绪 论

学习提示.....	(1)
内容要点.....	(2)
一、《化工原理》课程的性质、任务与内容.....	(2)
二、物料衡算及能量衡算.....	(3)
三、单位制与单位换算.....	(4)
四、基本物性数据的计算.....	(9)
五、化工计算中常用的数学方法.....	(15)
计算举例.....	(26)
习题.....	(46)

第一章 流体流动

学习提示.....	(48)
内容要点.....	(49)
一、流体静力学基本方程式.....	(49)
二、流体在管内的流动.....	(50)
三、柏努利方程式——流体稳定流动时的 能量衡算.....	(51)
四、流体在管内的流动阻力.....	(56)

五、管路计算与流量测量.....	(63)
计算举例.....	(64)
习题.....	(87)

第二章 流体输送设备

学习提示.....	(90)
内容要点.....	(90)
一、离心泵.....	(90)
二、往复泵的流量计算.....	(102)
计算举例.....	(107)
习题.....	(122)

第三章 非均相物系的分离

学习提示.....	(126)
内容要点.....	(126)
一、沉降.....	(126)
二、过滤.....	(136)
计算举例.....	(141)
习题.....	(156)

第四章 传热与蒸发

学习提示.....	(159)
内容要点.....	(160)
一、传热中的一些基本概念.....	(160)
二、热传导.....	(161)
三、对流传热.....	(163)
四、间壁式换热器的传热.....	(171)

五、蒸发.....	(173)
计算举例.....	(179)
习题.....	(201)

第五章 蒸 馏

学习提示.....	(206)
内容要点.....	(206)
一、双组分理想溶液的气液平衡.....	(206)
二、双组分连续精馏计算.....	(211)
三、多组分精馏.....	(220)
计算举例.....	(226)
习题.....	(250)

第六章 吸 收

学习提示.....	(254)
内容要点.....	(254)
一、基本概念与基本定律.....	(255)
二、吸收速率方程式.....	(260)
三、填料吸收塔的计算.....	(266)
计算举例.....	(271)
习题.....	(286)

第七章 干 燥

学习提示.....	(289)
内容要点.....	(289)
一、湿空气的性质和湿度图.....	(289)
二、干燥过程的物料衡算和热量衡算.....	(293)

三、干燥速率U	(297)
计算举例	(300)
习题	(313)
习题解答	(315)
附录	(421)

绪 论

学 习 提 示

《化工原理》的学习，首先应明确课程的性质、任务与内容。物料衡算与能量衡算，是化工计算中最基本与最重要的内容，也是进行化工过程设计、过程经济估价、过程控制及过程最优化的基础。掌握不同单位制之间的换算是学好本课程的先决条件，熟悉本课程常用的数学方法，是学好本课程的基础，因此，绪论讨论的主要内容是：

- 一 《化工原理》课程的性质、任务与内容；
- 二 物料衡算及能量衡算；
- 三 单位制与单位换算；
- 四 基本物性数据的计算；
- 五 化工计算中常用的数学方法。

内 容 要 点

一 《化工原理》课程的性质、任务与内容

《化工原理》是研究和探讨化工生产中大规模地改变物料物理性质的工程技术学科。虽然化工生产原料来源广泛，产品种类繁多，生产过程复杂多样。但在各加工过程中总可以分解并归纳成在原理上相同或相似的一些基本单元而从属于一定的变化规律。因此在化工生产过程中，除化学反应外，其余步骤均可归纳为由若干单元操作所组成，而单元操作又可按其具有的共同的理论与变化规律，概括为三个主要的传递过程，如表 0—1。

表 0—1 各传递过程中重要的单元操作

过 程	单元操作	过 程	单元操作
流体动力过程	流体的输送 压缩与减压 流速和流量测定 沉 降 过 滤 离心分离 流 态 化	热量传递过程	传 热 蒸发、冷冻
		质量传递过程	蒸 馏 吸 收 结 晶 干 燥 萃 取 离子交换

流体动力过程、热量传递过程、质量传递过程的理论，即所谓三传理论统称为“化工传递过程”，其内容不属于本课程范围。本课程的主要任务是研究流体流动、流体输送设备、非均相物系分离、传热与蒸发、蒸馏、吸收、干燥等单元操作的基本原理、典型设备的结构及其工艺尺寸计算（或选型）。学员通过本课程的学习，应该掌握主要化工单元操作的基本原理和典型设备的工艺计算，培养分析和解决化工单元操作中各种问题的能力，为今后科研和设计等工作打下良好基础。

二 物料衡算及能量衡算

物料衡算及能量衡算，是化工计算中最基本与最重要的内容；是进行化工过程设计、过程经济估价、过程控制以及过程最优化的基础，物料衡算所遵循的是质量守恒定律，能量衡算所遵循的是能量守恒定律。

（一）物料衡算

在化工生产过程中，进入过程或设备的物料量必等于离开过程或设备的物料量，如果其中有累积量还应加上累积量。

$$\Sigma \text{输入的物料量} = \Sigma \text{输出的物料量} + \text{累积量} \quad (0-1)$$

在计算时，首先要确定衡算范围。在化工生产中，往往既可以将一个生产过程作为衡算的范围，也可以把一个或几个设备作为衡算范围。其次则要确定好衡算基准。例如在间歇操作中，可以选取一个操作周期为基准；在连续操作中，可选时间为基准。物料的数量可以用质量或物质量表示，对于液体还可以用体积表示；如果为理想气体，当系统的温度、压强恒定时，也可以用体积表示气体的数量；溶液或固体混合物中各组分的浓度，常用质量分率表示；理想混合气体的浓度常用摩尔分率或体积分率表示。

(二) 能量衡算

进入过程或设备的能量，必须等于离开过程或设备的能量，如果其中有累积，则必须加上累积的能量。

$$\Sigma \text{输入的能量} = \Sigma \text{输出的能量} + \text{累积的能量} \quad (0-2)$$

能量应该包括各种形式的能量，如热能、机械能(位能、动能和静压能等)、电能、磁能等，但在化工生产过程中，由于常常遇到的是向系统输入或取出热量的问题，因此在能量衡算中最突出的就是热量衡算。

三 单位制与单位换算

任何一个物理量的大小都是用数字与单位的乘积表示的，因此，应把物理量的单位与数字并在一起，纳入运算。例如3米(m)与4米(m)相加或相乘，则：

$$3\text{ m} + 4\text{ m} = (3 + 4)\text{ m} = 7\text{ m}$$

$$3\text{ m} \times 4\text{ m} = (3 \times 4)\text{ m} \times \text{m} = 12\text{ m}^2$$

物理量的单位可以任意选择。根据不同的选择基准，可以将物理量分为两类：一类是将少数独立的物理量定为基本量(如质量、长度、时间等)；另一类则是用这些基本量来表示的物理量即导出量(如速度、加速度、压强等)。基本量的单位称为基本单位，导出量的单位称为导出单位。基本单位与导出单位的总和则称为单位制度，简称单位制。

由于种种历史原因，世界各国对基本单位有不同的选择，因而产生了不同的单位制。这些单位制的并行使用，给科学计算和国际交往带来很大的不便。我国为贯彻对外实行开放政策，对内搞活经济的方针，适应我国国民经济、文化教育事业的发展，以及推进科学技术进步和扩大国际经济、文化交流的需要，国务院于一九八四年二月二十七日颁布了在我国

统一实行法定计量单位的命令。多年以来，推广很快，并已逐渐被各行各业所接受。我国的法定计量单位是以现行国际单位制（SI）为基础，另外考虑到我国实情，适当增选了少量非国际单位制单位，如时间可以用分（min）、小时（h）、天（d）表示，质量也可以用吨（t）表示，体积以用升（l）表示等等，构成了我国现行的法定单位。表 0—2 为常见的几种单位制度的基本单位，表 0—3 为常用的一些物理量的国际单位制与其他单位制表示方法。

表 0—2 常见的几种单位制度的基本单位

基本量 单位制度		长 度		质 量		时 间		力	
		中文名称	代号	中文名称	代号	中文名称	代号	中文名称	代号
绝对单位	CGS制	厘米	cm	克	g	秒	s	—	—
	MKS制	米	m	千克 (公斤)	kg	秒	s	—	—
	SI	米	m	千克 (公斤)	kg	秒	s	—	—
工程单位制 (重力单位制)		米	m	—	—	秒	s	公斤力	kgf

在向SI过渡的阶段不仅要正确地应用SI，而且还要正确地掌握单位间换算的方法。由表 0—2 可知，绝对单位制与工程单位制两者在长度与时间的基本单位上是一致的，所不同的地方是绝对单位制以质量作为基本单位，而工程单位制是以力（或重量）为基本单位，质量的单位则为导出单位。

质量和力的关系遵循牛顿力学第二定律，即：

$$f = ma$$
(0—3)

表0—3 常用的一些物理量的国际单位制与其他单位制单位的表示方法

物理量	国际单位制 (SI)			物理单位制 (CGS制)	工程单位制 (m·kgf·s制)	
	名称	代号				
		中文	国际			
力	牛	牛	N	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$	$\text{g} \cdot \text{cm} / \text{s}^2 = \text{dyn}$ (达因)	kgf
压力(压强)	帕斯卡	帕	Pa	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$	$\text{dyn} / \text{cm}^2 = 10^{-6} \text{bar}$ (巴)	kgf/m ²
能, 功	焦耳	焦	J	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$	$\text{dyn} \cdot \text{cm} = \text{erg}$ (尔格)	kgf·m
热量	焦耳	焦	J	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$	Cal	kcal
功率	瓦特	瓦	W	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$	erg/s	kgf·m/s
密度	千克每立方米	千克/米 ³	kg/m ³	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	g/cm ³	kgf·s ² /m ⁴
粘度	帕斯卡秒	帕·秒	Pa·s	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{dyn} \cdot \text{s} / \text{cm}^2 = \text{p}$ (泊)	kgf·s/m ²
力矩	牛·米	牛·米	N·m	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$	dyh·cm	kgf·m
表面张力	牛/米	牛/米	N/m	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$	dyn/cm	kgf/m
热容、熵	焦耳每开尔文	焦/开	J/K	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	cal/°C	kcal/°C
比热容、比熵	焦耳每千克开尔文	焦/(千克·开)	J/(kg·K)	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	cal/(g·°C)	kcal/(tgf·°C)
扩散系数	平方米每秒	米 ² /秒	m ² /s	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	cm ² /s	m ² /s
导热系数	瓦特每米开尔文	瓦/(米·开)	W/(m·K)	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$	cal/(cm·s·°C)	kcal/(m·s·°C)
传热系数	瓦特每平方米开尔文	瓦/(米 ² ·开)	W/m ² ·K	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$	cal/(cm ² ·s·°C)	kcal/(m ² ·s·°C)

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。

在任何方程式的计算中，各物理量必须采用同一种单位制下的单位来表示，使物理量方程具有单位一致性。从式 0—3 可以得出不同单位制下质量或力的导出单位，见表 0—3。在工程制单位中，经国际度量衡委员会规定：

$$\begin{aligned} 1 \text{ [公斤 (力)]} &= 9.80665 \text{ [牛顿]} \\ &= 9.80665 \text{ [公斤 (质)]} \cdot \text{米/秒}^2 \\ &= 9.80665 \text{ [克 (质)]} \cdot \text{厘米/秒}^2 \\ &\approx 9.81000 \text{ [克 (质)]} \cdot \text{厘米/秒}^2 \end{aligned}$$

据此，根据上述这些关系，不难将工程单位制中的基本量力换算成SI中的力（导出单位）。

在国际单位制中，质量单位kg是基本度量单位之一。力 f 的单位是导出单位。

$$f = m[\text{kg}] \cdot a[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] = ma \quad \text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \text{ 或 } [\text{N}]$$

对重力而言

$$f = m[\text{kg}] \cdot g[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] = mg \quad \text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \text{ 或 } [\text{N}]$$

在工程制单位中，以力的单位作为基本单位，而质量和密度的单位为导出单位，在工程制中，常以重度 γ 表示物性：

$$\gamma = \rho (\text{密度}) \cdot g (\text{重力加速度})$$

求得重度的单位为〔公斤(力)/米³〕；密度〔质量/容积〕的单位为〔公斤(力)·秒²/米³〕。由此可知物理量由一种单位换算成另一种单位时，其数值要跟着改变。换算时需用换算因数。所谓换算因数，就是彼此相等而各不同单位的两个物理量的比值。化工中常用的单位换算因数可以从附表一中查到。对无表可查的比较复杂的单位换算因数，可以把复杂

单位分解成若干简单的单位，逐个进行换算。

例如，压强的单位换算因数：

$$1 \text{ 绝对大气压}[\text{atm}] = 760\text{mmHg} = 101325\text{Pa} \\ = 101.3\text{kPa} = 10.33[\text{m水柱}] = 1.033\text{kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$$

$$1 \text{ 工程大气压}[\text{at}] = 735.6\text{mmHg} = 98070\text{Pa} \\ = 98.1\text{kPa} = 10[\text{m水柱}] = 1\text{kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$$

工程上，常取 $1\text{kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$ 为 1 工程大气压。

流体的压强，是指流体垂直作用于单位面积上的压力，又称为流体的静压强。

$$p = \frac{P}{A}$$

p ——流体的静压强， $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ ；

P ——流体垂直作用于单位面积上的压力 N ；

A ——作用面的面积 m^2 。

以绝对零压作起点计算的压强，称为绝对压强，是流体的真实压强。测量流体压强的仪表称为压强表，但压强表上读数并非设备内真正的压强数，而是设备内流体的压力与设备外大气压强之差值，称为表压强，即：

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

当被测流体的绝对压强小于外界大气压强时，所用测压仪表称为真空表。真空表上的读数，表示被测流体的绝对压强低于大气压强的数值，称为真空度，即：

$$\text{真空度} = \text{大气压强} - \text{绝对压强}$$

显然，设备内的真空度愈高，其绝对压强愈低。真空度又是表压强的负值，例如，真空度为 730mmHg ，表压强则为 -730mmHg 。

四 基本物性数据的计算

物性数据是化工生产中评定产品质量和控制生产的重要指标，也是化工设计和计算的必要数据。物性数据可以由实验直接测试而得；也可查阅有关数据书或手册等，不过一般查阅所得的数据，大都属于纯物质的物性数据，而生产中遇到的常常是混合物，所以还需通过公式进行计算，这里主要介绍一般常用的物性数据——密度、比容、重度、比热、粘度、焓、潜热等的概念及其查阅计算方法。

(一) 密度 (ρ)

单位体积内所具有物质的质量称为该物质的密度。

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (0-4)$$

式中 ρ ——物质的密度， $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ；

m ——物质的质量， kg ；

V ——体积， m^3 。

式 0—4 无论对气体，液体或固体均适用，如为流体，则指的是单位体积的流体所具有的质量。

不同的单位制，密度的单位也不一样，在工程单位制中 ρ 的单位为 $\text{kgf} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-4}$ ，(其中 kgf 为力的单位)。

密度在化工计算中是一个十分重要的物理量，在质量换算成体积或体积换算成质量的过程中，密度是换算的桥梁。

1 理想气体或一般气体温度不太低、压力不太高时，其密度可由理想气体方程式导出：

$$PV = nRT = \frac{m}{M}RT$$

$$PM = \frac{m}{V}RT = \rho RT$$

$$\therefore \rho = \frac{PM}{RT} \quad (0-5)$$

$$\text{或 } \rho = \frac{M}{22.4} \frac{T_0 P}{TP_0} = \rho_0 \frac{T_0 P}{TP_0} \quad (0-6)$$

式中 ρ ——气体的压强 $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$;

T ——气体的绝对温度 K ;

M ——气体的分子量 $\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$;

R ——气体常数, 其值为 $8.315 \text{ kJ} \cdot \text{kmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$;

$\rho_0 T_0 P_0$ ——分别为已知状态下气体的密度、绝对温度和压强。

在标准状态下气体的密度则可简化为下式:

$$\rho_0 = \frac{M}{22.4} \quad (0-7)$$

2 混合气体的平均密度 混合气体密度的求法, 也可以用上述方法, 只是应以气体混合物的平均分子量 M_m 代替气体分子量。

$$M_m = M_A y_A + M_B y_B + \cdots + M_n y_n \quad (0-8)$$

式中 $M_A, M_B \cdots M_n$ 为气体混合物中各组分的分子量 $\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$; $y_A, y_B \cdots y_n$ 为气体混合物中各组分的摩尔分率。

除此之外, 对于气体混合物, 各组分的浓度也常用体积分率表示。如以 1 m^3 的混合气体为基准, 各组分在混合前后其质量不变, 则 1 m^3 混合气体的质量等于各组分的质量之和, 即

$$\rho_m = \rho_A x_{VA} + \rho_B x_{VB} + \cdots + \rho_n x_{Vn} \quad (0-9)$$

式中 $x_{VA}, x_{VB} \cdots x_{Vn}$ 表示气体混合物各组分的体积分率。

3 混合液体的平均密度 对于液体混合物, 各组分的浓度常用质量分率表示。现以 1 kg 混合液体为基准, 若各组分在混合前后其体积不变, 则 1 kg 混合物的体积等于各组分单独存在时的体积之和, 即: