

# 化工原理

◀上册▶

天津大学化工原理教研室 编

天津科学技术出版社

81.103  
131  
1:3

# 化工原理

上册

天津大学化工原理教研室 编

362K/01

天津科学技术出版社

## 内 容 提 要

本书系根据天津大学化工原理教研室多年的教学经验及积累的资料，并参考国内出版的化工原理教材和国外新出版的几本化工单元操作书籍编写的。书中重点介绍各个化工单元操作的基本原理、典型设备及计算方法。全书分上、下两册出版。本册（上册）除绪论外，还包括流体流动、流体输送设备、非均相物系的分离、传热及蒸发等五章。每章都编入较多的例题，各章末均附有典型的习题和思考题。书末有做化工原理习题时常用到的物性参数图表及管子、泵、通风机、换热器的部分规格等方面资料。

本书可供高等院校化工类专业作教材使用，也可供化工方面的科研、设计及生产单位的技术人员参考。

## 化 工 原 理

上 册

天津大学化工原理教研室 编

\*

天津科学技术出版社出版

天津市赤峰道124号

天津新华印刷二厂印刷

天津市新华书店发行

\*

开本 787×1092毫米 1/16 印张 25 字数 612,000

一九八三年三月第一版

一九八三年三月第一次印刷

印数：1—25,500

书号：15212·77 定价：2.60元

# 目 录

绪论	1
<b>第一章 流体流动</b>	<b>10</b>
本章符号说明	10
第一节 流体静力学基本方程式	12
1-1-1 流体的密度	12
1-1-2 流体的静压强	14
1-1-3 流体静力学基本方程式	15
1-1-4 流体静力学基本方程式的应用	16
第二节 流体在管内的流动	22
1-2-1 流量与流速	22
1-2-2 稳定流动与不稳定流动	24
1-2-3 连续性方程式	24
1-2-4 柏努利方程式	25
1-2-5 柏努利方程式的应用	30
第三节 流体在管内的流动阻力	36
1-3-1 牛顿粘性定律与流体的粘度	36
1-3-2 流动类型与雷诺准数	39
1-3-3 滞流与湍流	41
1-3-4 边界层的概念	44
1-3-5 流动阻力	47
1-3-6 流体在直管中的流动阻力	48
1-3-7 管路中的局部阻力	59
1-3-8 管路总能量损失的计算	60
第四节 管路计算与流量测量	65
1-4-1 管路计算	65
1-4-2 流量测量	72
柏努利方程式的另一种推导方法	81
习题	87
思考题	92
<b>第二章 流体输送设备</b>	<b>94</b>
本章符号说明	94
第一节 液体输送设备	96
2-1-1 离心泵	96

2-1-2 其它类型泵 .....	125
第二节 气体输送和压缩设备 .....	130
2-2-1 离心通风机、鼓风机与压缩机 .....	130
2-2-2 旋转鼓风机、压缩机与真空泵 .....	134
2-2-3 往复压缩机 .....	136
习题 .....	146
思考题 .....	147

### 第三章 非均相物系的分离.....148

本章符号说明 .....	148
第一节 重力沉降 .....	151
3-1-1 沉降速度 .....	151
3-1-2 降尘室 .....	152
3-1-3 悬浮液的沉聚过程 .....	160
3-1-4 沉降槽的构造与操作 .....	161
3-1-5 连续沉降槽的计算 .....	162
第二节 离心沉降 .....	165
3-2-1 惯性离心力作用下的沉降速度 .....	165
3-2-2 旋风分离器的操作原理 .....	167
3-2-3 旋风分离器的性能 .....	168
3-2-4 旋风分离器的结构型式与选用 .....	176
3-2-5 旋液分离器 .....	179
第三节 过滤 .....	180
3-3-1 过滤操作的基本概念 .....	180
3-3-2 过滤基本方程式 .....	182
3-3-3 恒压过滤 .....	186
3-3-4 恒速过滤与先恒速后恒压的过滤 .....	189
3-3-5 过滤常数的测定 .....	190
3-3-6 过滤设备 .....	194
3-3-7 滤饼的洗涤 .....	198
3-3-8 过滤机的生产能力 .....	199
第四节 离心机 .....	203
3-4-1 一般概念 .....	203
3-4-2 离心机的结构与操作 .....	204
第五节 气体的其它净制方法 .....	206
3-5-1 惯性分离器 .....	206
3-5-2 袋滤器 .....	207
3-5-3 静电除尘器 .....	208
3-5-4 文丘里除尘器 .....	208
习题 .....	209
思考题 .....	211

<b>第四章 传 热</b> .....	213
本章符号说明.....	213
第一节 概 述 .....	215
4-1-1 传热的基本方式 .....	215
4-1-2 典型的传热设备 .....	216
4-1-3 稳定传热和不稳定传热 .....	218
第二节 热传导 .....	218
4-2-1 热传导的基本概念和傅立叶定律 .....	218
4-2-2 导热系数 .....	219
4-2-3 平壁的热传导 .....	220
4-2-4 圆筒壁的热传导 .....	225
第三节 对流传热 .....	227
4-3-1 对流传热的分析 .....	227
4-3-2 壁面和流体间的对流传热速率 .....	228
4-3-3 热边界层 .....	230
第四节 传热计算 .....	230
4-4-1 能量衡算 .....	231
4-4-2 总传热速率方程 .....	232
4-4-3 平均温度差 .....	232
4-4-4 总传热系数 .....	239
4-4-5 传热效率和传热单元数 .....	244
第五节 对流传热系数关联式 .....	249
4-5-1 对流传热系数的影响因素 .....	249
4-5-2 流体无相变时的对流传热系数 .....	251
4-5-3 流体有相变时的传热系数 .....	260
4-5-4 壁温的估算 .....	267
第六节 辐射传热 .....	268
4-6-1 基本概念和定律 .....	268
4-6-2 两固体间的辐射传热 .....	272
4-6-3 对流和辐射的联合传热 .....	275
第七节 换热器 .....	276
4-7-1 换热器的类型 .....	276
4-7-2 列管式换热器的基本型式和设计计算 .....	280
4-7-3 新型的换热器 .....	291
4-7-4 各种间壁式换热器的比较和传热的强化途径 .....	295
习题 .....	296
思考题 .....	299
<b>第五章 蒸 发</b> .....	300
本章符号说明 .....	300

第一节 蒸发器的型式 .....	303
5-1-1 蒸发器的结构和特点 .....	303
5-1-2 蒸发器的选型 .....	309
第二节 单效蒸发 .....	310
5-2-1 溶液的沸点和温度差损失 .....	310
5-2-2 单效蒸发的计算 .....	315
5-2-3 蒸发器的生产能力和生产强度 .....	322
第三节 多效蒸发 .....	323
5-3-1 多效蒸发的操作流程 .....	323
5-3-2 多效蒸发的计算 .....	325
5-3-3 多效蒸发和单效蒸发的比较 .....	336
5-3-4 多效蒸发中效数的限制及最佳效数 .....	337
第四节 蒸发器的设计 .....	337
5-4-1 蒸发器的设计举例 .....	337
5-4-2 蒸发器的辅助装置 .....	341
习题 .....	342
思考题 .....	343

附录 .....	344
一、《化工原理》中常用的、有专门名称的、国际单位制的导出单位 .....	344
二、常用单位的换算 .....	344
三、干空气的物理性质(760mmHg) .....	347
四、水的物理性质 .....	348
五、水在不同温度下的粘度 .....	349
六、水的饱和蒸气压(-20°C至100°C) .....	350
七、饱和水蒸气表(以温度为准) .....	352
八、饱和水蒸气表(以用kgf/cm <sup>2</sup> 为单位的压强为准) .....	354
九、饱和水蒸气表(以用kN/m <sup>2</sup> 为单位的压强为准) .....	356
十、某些液体的导热系数 .....	358
十一、某些气体和蒸气的导热系数 .....	360
十二、某些固体材料的导热系数 .....	361
十三、常用固体材料的密度和比热 .....	363
十四、某些液体的表面张力及常压下的沸点 .....	364
十五、某些气体在常压下的沸点及临界参数 .....	365
十六、某些水溶液的表面张力, N/m .....	365
十七、液体的粘度和密度 .....	366
十八、气体的粘度 .....	369
十九、液体的比热 .....	371
二十、101.3kN/m <sup>2</sup> 压强下气体的比热 .....	374
二十一、蒸发潜热(气化热) .....	376

二十二、某些有机液体的相对密度(液体密度与277K水的密度之比) .....	378
二十三、壁面污垢的热阻(污垢系数) $m^2 \cdot K/W$ .....	380
二十四、无机盐溶液在大气压下的沸点 .....	381
二十五、1atm下溶液的沸点升高与浓度的关系 .....	382
二十六、管子规格(摘录) .....	382
二十七、泵规格(摘录) .....	385
二十八、4-72-11型离心通风机规格(摘录) .....	389
二十九、管壳式热交换器系列标准(摘录) .....	390
<b>主要参考资料</b> .....	<b>392</b>



# 绪 论

化工生产是以化学变化或化学处理为主要特征的工业生产过程，其原料来源广泛，产品种类繁多，加工过程复杂多样。但是，在各种加工过程中，除化学反应外，其余步骤皆可归纳为若干种基本的物理过程，如流体的输送与压缩、沉降、过滤、传热、蒸发、结晶、干燥、蒸馏、吸收、萃取、冷冻等等。这些基本的物理过程称为单元操作。若干单元操作串联组合则可构成一个工艺制造过程。

单元操作不仅在化工中占据重要地位，也广泛应用于石油、冶金、轻工、制药、原子能等工业中。

不同工艺过程中的同一种单元操作，具有共同的基本原理和通用的典型设备。譬如，制糖工业中糖水的浓缩与制碱工业中苛性钠溶液的浓缩，都是通过蒸发这一单元操作而实现的，它们共同遵循热交换原理并且都采用蒸发器。又如酿造工业中酒精的提纯与石油工业中烃类的分离都是通过蒸馏这一单元操作而实现的，它们共同遵循物质传递原理并且都采用精馏塔。但是，不同工艺过程各有其独特的条件与要求，制糖工业中蒸发操作的条件以及对蒸发器的要求就有别于制碱工业的，酿造工业中与石油工业中的蒸馏操作也是如此。

自本世纪初逐渐形成化学工程学科以后，于二十年代明确提出了单元操作的概念，并在高等院校化工系中就这一领域开设了相应的课程，称之为《化工原理》。我国解放以来，这一课程的教材名称虽曾几经变革，如称为《化工过程及设备》、《化学工程》等等，但其基本内容与体系，仍保持了相对的稳定。

## 一、《化工原理》课程的性质、任务与内容

《化工原理》是在高等数学、物理学及物理化学等课程的基础上开设的一门基础技术课程，其主要任务是研究化工单元操作的基本原理，典型设备的构造及工艺尺寸的计算（或选型）。通过学习本课程，可培养学生分析和解决有关单元操作各种问题的能力，以便在化工生产、科研和设计工作中达到强化生产过程，提高设备能力及效率，降低设备投资及产品成本，节约能耗，防止污染以及加速新技术开发与提高科研、设计水平等方面的目的。因此，《化工原理》亦可称为《单元操作》，它是作为一门综合性技术学科的化学工程学的一个基础组成部分。

限于教材篇幅，不能把所有常用的单元操作逐一列述。本书主要讨论以下几方面的问题：

### 1. 流体动力过程

研究流体的流动及流体和与之接触的固体间发生相对运动时的基本规律，以及主要受这些基本规律支配的若干单元操作，如流体的输送、沉降、过滤等。

### 2. 热过程

研究传热的基本规律，以及主要受这些基本规律支配的若干单元操作，如热交换、蒸发等。

### 3. 传质过程

研究物质通过相界面的迁移过程的基本规律，以及主要受这些基本规律支配的若干单元

操作，如液体的蒸馏、气体的吸收、固体的干燥等。

随着对各种单元操作的不断研究与发展，人们逐渐认识到它们的共同规律及其内在联系，从而进一步形成了关于动量传递、热量传递及质量传递三种传递过程的理论，即所谓三传理论。有关三传理论的介绍不属于本课程的范围。

在研究各种单元操作时，为了搞清过程始末和过程之中各股物料的数量、组成之间的关系及搞清过程中吸收或释放的能量，必需作出物料衡算及能量衡算。物料衡算及能量衡算是本课程中常用的手段。此外，为了计算所需设备的工艺尺寸，必须依赖平衡关系，了解过程进行的方向与极限，依赖速率关系分析过程进行的快慢。平衡关系和速率关系是研究各种单元操作过程原理的基本内容。物料衡算及能量衡算的应用在0-2节中作扼要介绍，而平衡关系及速率问题的讨论将在以后有关的章节中陆续进行。

单元操作过程进行的方式有间歇与连续之分。

间歇过程即分批进行的过程。每次操作之初向设备投入一批原料，经过一番处理之后，排出全部产物，再重新投料。小规模生产多采用间歇操作。间歇操作的设备里，同一位置上在不同时刻进行着不同的操作步骤，因而，同一位置上物料的组成、温度、压强、流速等参数都随时间而改变，属于不稳定操作状态。

连续过程恰似流水作业。原料不断地从设备一端送入，产品不断地从另一端排出。在连续操作的设备里，各个位置上物料的组成、温度、压强、流速等参数可互不相同，但在任一固定位置上，这些参数一般不随时间而变，属于稳定操作状态。多数化工生产过程是连续的，在正常情况下的操作状态都是稳定的，但在开车、停车、发生波动与故障以及调节过程中属于暂时的不稳定操作状态。

## 二、物料衡算及能量衡算

### 1. 物料衡算

根据质量守恒定律，向设备输入的物质质量减去从设备输出的物质质量必等于积累在设备里的物质质量，即：

$$\Sigma F - \Sigma D = A \quad (0-1)$$

式中  $\Sigma F$ ——输入物料量的总和；

$\Sigma D$ ——输出物料量的总和；

$A$ ——积累物料量。

式0-1是物料衡算的通式，适用于任何指定的空间范围及参加生产过程的全部物料。当没有化学变化时，混合物的任一组分都符合这个通式；有化学变化时，其中各元素仍然符合这个通式。

式0-1既适用于间歇过程，也适用于连续过程。连续稳定过程中，设备内不应有任何物料积累，即 $A=0$ ，式0-1可简化为：

$$\Sigma F = \Sigma D \quad (0-2)$$

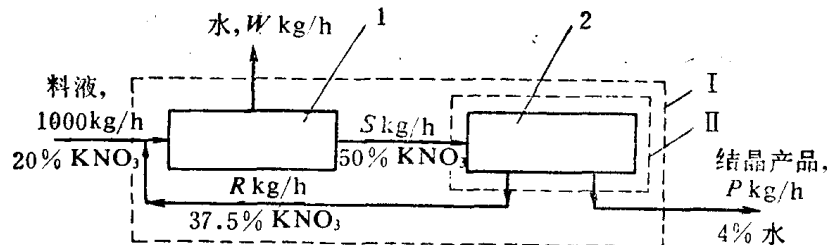
进行物料衡算时，首先要圈出衡算的范围（或称系统），并确定衡算对象及衡算基准，然后把穿越系统边界的物流股逐项列出。对于间歇过程，常以一次（一批）操作为基准，即式0-1中各项分别代表每次操作输入、输出及积累物料的质量；对于连续过程，则常以单位时间为基准，即式0-1中各项分别代表单位时间内输入、输出及积累物料的质量。

**【例0-1】**浓度为20%（质量百分数）的 $\text{KNO}_3$ 水溶液以1000kg/h的流量送入蒸发器。

在422K温度下蒸出一部分水而得到浓度为50%的水溶液，再送入结晶器，冷却至311K后，析出含有4%结晶水的KNO<sub>3</sub>晶体，并不断取走，浓度为37.5%的KNO<sub>3</sub>饱和母液则返回蒸发器循环处理。试求结晶产品量 $P$ 、水分蒸发量 $W$ 、循环母液量 $R$ 及浓缩溶液量 $S$ 。

解：

(1) 结晶产品量 $P$ 及水分蒸发量 $W$  首先根据题意画出过程示意图（见本例附图）。



例0-1附图

1—蒸发器 2—结晶器

以1h为基准，在图中虚线方框 I 所示的范围内作物料衡算。因过程中无化学反应，且为连续稳定过程，故可依式 0-2 写出总物料衡算式及KNO<sub>3</sub>的衡算式，即：

$$1000 = W + P$$

及  
解得

$$1000(0.20) = W(0) + P(1 - 0.04)$$

$$P = 208.3 \text{ kg/h}$$

$$W = 791.7 \text{ kg/h}$$

(2) 循环母液量 $R$ 及浓缩溶液量 $S$  仍以1h为基准，在图中虚线方框 II 所示的范围内作总物料衡算及KNO<sub>3</sub>衡算：

$$S = R + 208.3$$

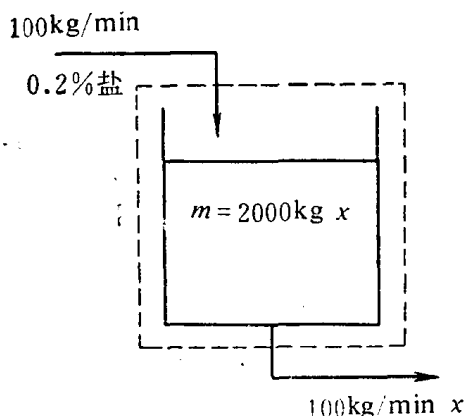
及

$$S(0.50) = R(0.375) + 208.3(1 - 0.04)$$

解得

$$R = 766.6 \text{ kg/h}$$

$$S = 947.9 \text{ kg/h}$$



例0-2附图

【例0-2】桶内存有2000kg浓度为10%（质量）的盐水。现以100kg/min的恒定流量向桶内注入浓度为0.2%的稀盐水，同时用泵以相同的流量从桶底抽出盐水。若操作过程中桶内液体能达到完全混合，即桶内的盐水浓度均匀，因而任何时刻抽出的盐水与当时存在桶内的盐水浓度相等，试求桶内盐水浓度降至1%所需的时间。

解：首先根据题意画出过程示意图（见本例附图）。

以盐水桶为衡算范围，如图中虚线方框所示。在本题情况下，因向桶内输入盐水的速率与由桶内抽出盐水的速率相同，故桶内盐水积累量为零。桶内盐水总质量 $m$ 应维持不变，即：

$$m = 2000\text{kg}$$

但就桶内盐水浓度随时间而改变的情况来讲，应属于连续而不稳定的过程。

设任一时刻桶内的盐水浓度为 $x$ ，则在 $d\theta$ 时间内各流股中盐分的数量为：

$$\text{输入的盐量} = 100(0.002)d\theta$$

$$\text{输出的盐量} = 100xd\theta$$

$$\begin{aligned} \text{积累的盐量} &= d(mx) = m dx + x dm \\ &= m dx = 2000 dx \end{aligned}$$

依式0-1写出微分时间内的盐量衡算式：

$$100(0.002)d\theta - 100xd\theta = 2000dx$$

$$d\theta = \frac{2000dx}{0.2 - 100x}$$

按照如下边界条件，积分上式，即：

$$\text{开始时刻} \quad \theta = 0 \quad x = 0.1$$

$$\text{終了时刻} \quad \theta = \theta \quad x = 0.01$$

$$\int_0^\theta d\theta = \int_{0.1}^{0.01} \frac{2000dx}{0.2 - 100x}$$

$$= -20 \int_{0.1}^{0.01} \frac{dx}{x - 0.002}$$

$$\text{解得} \quad \theta = -20 \ln \frac{0.01 - 0.002}{0.1 - 0.002} = 50 \text{ min}$$

## 2. 能量衡算

各种形式的能量（如机械能、化学能、电能等）与热之间虽可相互转变，但是，在许多化工设备（如换热器、蒸馏塔等）中，基本上都没有这种能量转变，唯一需要考虑的能量形式就是热。因此，本教材的能量衡算常简化为热量衡算，而热量衡算的依据就是能量守恒定律。

进行热量衡算的基本方法与物料衡算的方法相同，也必须首先明确衡算范围与衡算基准，但对热量衡算还有两个值得注意的问题：

(1) 进、出系统的各股物料所携带的热量，包括物料的显热与潜热两部分称为物料的焓。物料的焓值与其状态有关，而且是相对值。所以，在进行热量衡算时，为要确定物料的焓值，必须首先规定基准温度；当有相变化发生时，还须规定基准状态。通常以273K、液态为基准。本教材附录七、八、九的饱和水蒸气性质表中所列水蒸气的焓值，便是以273K的液体水为基准求得的。譬如，从附录七中查得398K饱和水蒸气的焓值为2716.5kJ/kg，是因将1kg273K的液体水加热至398K（吸热523.4kJ），再令其汽化成为饱和蒸汽（又吸热2193.1kJ）所吸收的总热量为2716.5kJ。

(2) 热量不仅可以随同物料进、出系统，而且可以透过设备、管道的壁面而由外界传入系统，或由系统逸散到环境里去。因此，只要系统温度与环境温度有差别，就会有这种热量

的输入或散失，应把这部分热量列入衡算式中。

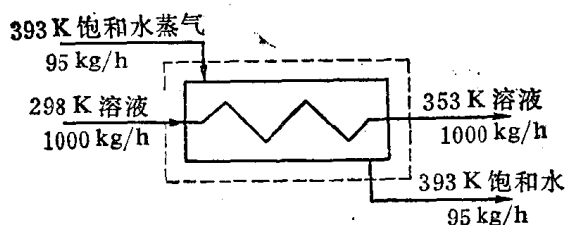
于是，可写出连续稳定过程热量衡算的基本关系式，即：

$$\Sigma H_F + q = \Sigma H_P \quad (0-3)$$

式中  $\Sigma H_F$ ——单位时间内进入系统的各股物料的总焓值；

$\Sigma H_P$ ——单位时间内离开系统的各股物料的总焓值；

$q$ ——单位时间内系统与环境交换的总热量。当系统向环境散热时，此值为负，并称之为“热损失”。



例 0-3 附图

【例0-3】在换热器里每小时将1000 kg平均比热为3.56kJ/(kg·K)的某种溶液自298K加热到353K。加热介质为393K的饱和水蒸气，每小时消耗量为95kg。蒸汽冷凝成同温度的饱和水后排出。试计算此换热器的热损失占水蒸气所提供热量的百分数。

解：首先根据题意画出过程示意图（见本例附图）。

在图中虚线方框所示的范围内作热量衡算。以1h为基准，则进、出系统的各项热量分别为：

$$\text{输入系统的溶液的焓} = 1000 \times 3.56(298 - 273) = 89000 \text{ kJ/h}$$

$$\text{系统输出的溶液的焓} = 1000 \times 3.56(353 - 273) = 284800 \text{ kJ/h}$$

又从附录七查出393K饱和水蒸气的焓值为2709kJ/kg、393K饱和水的焓值为503.7kJ/kg。则：

$$\text{输入系统的饱和水蒸气的焓} = 95 \times 2709 = 257400 \text{ kJ/h}$$

$$\text{系统输出的饱和水的焓} = 95 \times 503.7 = 47900 \text{ kJ/h}$$

依式0-3列出热量衡算式，即：

$$89000 + 257400 + q = 284800 + 47900$$

解得

$$q = -13700 \text{ kJ/h}$$

$$\text{热损失速率 } q_L = -q = 13700 \text{ kJ/h}$$

$$\text{热损失百分数} = \frac{13700}{257400 - 47900} \times 100\% = 6.5\%$$

### 三、单位制与单位换算

#### 1. 单位与单位制

任何物理量的大小都是用数字与单位的乘积表示的，因此，物理量的单位与数字应一并纳入运算。例如：

$$5\text{m} + 8\text{m} = (5 + 8)\text{m} = 13\text{m}$$

$$5\text{m} \times 8\text{m} = (5 \times 8)(\text{m} \times \text{m}) = 40\text{m}^2$$

一般说来，物理量的单位可以任意选择。但是，由于各种物理量间存在着客观的联系，

因此不必对每种物理量的单位都单独进行任意的选择，而可通过某些物理量的单位来量度另一些物理量。通常先任意选定几个独立的物理量（如长度、时间等），称为基本量，并根据使用方便的原则制定出这些量的单位，称为基本单位。然后，其它诸量（如速度、加速度等）的单位便可根据它们与基本量之间的关系来确定，这些物理量称为导出量，其单位称为导出单位。

基本单位与导出单位的总和称为单位制。

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。常见的几种单位制所用的基本量与基本单位列于表0-1中。

表0-1 绝对单位制与重力单位制

	长 度	时 间	质 量	力
绝对单位制				
CGS制（物理单位制）	cm	s	g	
MKS制	m	s	kg	
重力单位制（工程单位制）	m	s		kgf

绝对单位制以长度、时间、质量为基本量，其中质量单位为kg。重力单位制以长度、时间、力为基本量，其中力的单位为kgf。1kgf等于质量为1kg的物体在重力加速度为 $9.807\text{m/s}^2$ 的海平面上所受到的重力。

长期以来，整个科学技术领域存在着多制并用的局面，同一个物理量在不同的单位制中具有不同的单位与数值，这就给计算和交流带来了麻烦，并且容易引起错误。为改变这种局面以统一计量单位制，1960年10月第十一届国际计量大会通过了一种新的单位制，称为国际单位制，其国际符号为SI。

SI是在MKS制基础上建立起来的，共规定了七个基本单位，除MKS制中原有的长度单位m（米）、时间单位s（秒）和质量单位kg（千克）外，还加上热力学温度单位K（开尔文）、电流单位A（安培）、光强度单位cd（坎德拉）和物质量单位mol（摩尔）。这些基本单位都有严格的科学定义。国际单位制有两大优点：一是它的通用性。在自然科学、工程技术乃至国民经济各部门中，所有物理量的单位都可由上述七个基本单位导出，也就是说，SI是所有科学、技术、经济部门都可采用的一套相当完整的单位制。二是它的一贯性。任何一个导出单位在由上述七个基本单位相乘或相除而导出时，都不需引入比例系数。SI中每种物理量只有一个单位。譬如，热和功是本质相同的物理量（能量），但在重力单位制中，热的单位是kcal，功的单位是kgf·m，在运算中必须通过所谓“热功当量”（ $1\text{kcal} = 427\text{kgf}\cdot\text{m}$ ）这样一个比例系数来换算。而在SI中，热、功、能三者的单位都采用J（焦耳），转换时无需换算因数。

由于国际单位制有其优越性，近年来它在世界上推广很快。国务院于1977年5月规定我国要逐步采用国际单位制；1981年8月又批准颁发了以国际单位制为基础的《中华人民共和国计量单位名称与符号方案（试行）》。这样势必加速我国推行国际单位制。

本教材主要采用国际单位制。

## 2. 单位换算

要使SI为人们所熟悉并取代其它单位制，毕竟尚需很长时间。因此还有必要了解其它常用的单位制，学会正确地运用单位，并掌握单位间的换算方法。

公式是计算的依据，因为它是对物质运动过程各有关因素间数量关系的客观描述。化工计算中所用到的公式可分两类。一类是根据物理规律建立的理论公式，反映各有关物理量之间的关系，又叫物理量方程。例如牛顿第二运动定律，即：

$$F = ma$$

式中  $F$ ——作用在物体上的力；

$m$ ——物体的质量；

$a$ ——物体运动的加速度。

物理量方程具有单位一致性（或称因次一致性），对于其中各个符号的单位无须多加限制，只要采用同一单位制便可。

另一类是单纯根据实验数据整理得来的经验公式。由于影响过程的因素颇多，彼此间关系又很复杂，致使许多化工问题未能依靠理论取得完满的解决，而必须借助实验或者半实验、半理论的方法来处理。由此得到的公式称为经验公式，它只反映各有关物理量的数字之间的关系，所以又叫数字公式。经验公式中每个符号并不代表完整的物理量，只代表物理量中的数字部分，而这些数字都是与特定的单位相对应的。因此在使用经验公式时，各物理量必须采用指定的单位。

所谓正确地运用单位，就是要注意到这两类公式对单位的不同要求，并在将各物理量代入公式进行运算之前，预先给它们换上适合公式要求的单位。

(1) 物理量的单位换算 物理量由一种单位换成另一单位时，量本身并无变化，但数值要改变。换算时要乘以两单位间的换算因数。所谓换算因数，就是彼此相等而各有不同单位的两个物理量之比。譬如，1 atm的压强和760mmHg的压强是两个相等的物理量，但其所用单位不同，即：

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg}$$

那么，atm和mmHg两种单位间的换算因数便是：

$$\frac{760 \text{ mmHg}}{1 \text{ atm}} = 760 \text{ mmHg/atm}$$

因为任何换算因数都是两个相等的量之比，所以任何换算因数（包括其单位部分在内）在本质上都是纯数1。

化工中常用单位间的换算因数可由本教材附录二查得。

【例0-4】已知 $1 \text{ atm} = 1.033 \text{ kgf/cm}^2$ ，试求此压强在SI中为若干 $\text{N/m}^2$ 。

解：先列出有关各量不同单位间的关系：

$$1 \text{ kgf} = 9.81 \text{ N}$$

$$1 \text{ cm}^2 = 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\text{因此 } 1 \text{ atm} = 1.033 \text{ kgf/cm}^2 = 1.033 \frac{\text{kgf} \times 9.81 \text{ N/kgf}}{\text{cm}^2 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{cm}^2} = 1.033 \times 9.81 \times 10^4 \text{ N/m}^2$$

$$= 1.0133 \times 10^5 \text{ N/m}^2 \quad (= 101.33 \text{ kN/m}^2)$$

(2) 经验公式的单位变换 经验公式中各符号都要用规定单位的数字代入, 不容随意变更。当已知数据的单位与公式所规定的单位不同而这公式又要经常使用时, 可把整个公式加以变换, 使其中各符号都采用计算者所希望的单位。这就是经验公式的单位变换。

前已指明, 经验公式中各符号只代表物理量中的数字部分, 并非完整的物理量。根据物理量与其单位及数字三者间的关系, 即:

$$\text{物理量} = \text{数字} \times \text{单位}$$

可写出 
$$\text{数字} = \frac{\text{物理量}}{\text{单位}}$$

若把经验公式中每个符号都写成物理量与规定单位之比的形式, 便可利用单位间的换算因数, 把原来规定的单位换成计算者所希望的单位。其具体步骤以例 0-5 说明。

【例 0-5】水蒸气在空气中的扩散系数可用如下经验公式计算:

$$D = \frac{1.46 \times 10^{-4}}{p} \times \frac{T^{\frac{5}{2}}}{T + 441}$$

式中  $D$ ——扩散系数, [英尺<sup>2</sup>/h];

$p$ ——压强, atm;

$T$ ——绝对温度, °R。

试将上式加以变换, 使式中各符号的单位为:

$D$ ——m<sup>2</sup>/h;

$p$ ——kN/m<sup>2</sup>;

$T$ ——K。

解: 先列出有关各量不同单位间的关系:

$$1 \text{ [英尺]} = 0.3048 \text{ m} \quad 1 \text{ atm} = 101.33 \text{ kN/m}^2 \quad 1 \text{ }^\circ\text{R} = \frac{1}{1.8} \text{ K}$$

以  $D'$ 、 $p'$ 、 $T'$  分别代表扩散系数、压强、温度等三个物理量, 则原式可写成:

$$\frac{D'}{\text{[英尺}^2\text{/h]}} = \frac{1.46 \times 10^{-4}}{\frac{p'}{\text{[atm]}}} \times \frac{\left(\frac{T'}{\text{[}^\circ\text{R]}}\right)^{\frac{5}{2}}}{\frac{T'}{\text{[}^\circ\text{R]}} + 441}$$

引入各换算因数进行单位变换:

$$\begin{aligned} & \frac{D'}{\text{[英尺}^2\text{/h]} \times (0.3048 \text{ m/英尺})^2} \\ &= \frac{1.46 \times 10^{-4}}{\frac{p'}{\text{[atm]} \times (101.33 \text{ kN/m}^2 \cdot \text{atm})}} \times \frac{\left\{ \frac{T'}{\text{[}^\circ\text{R]} \times \left(\frac{1}{1.8} \text{ K/}^\circ\text{R}\right)} \right\}^{\frac{5}{2}}}{\frac{T'}{\text{[}^\circ\text{R]} \times \left(\frac{1}{1.8} \text{ K/}^\circ\text{R}\right)} + 441} \end{aligned}$$



$$\frac{D'}{0.0929[\text{m}^2/\text{h}]} = \frac{1.46 \times 10^{-4}}{\frac{p'}{101.33[\text{kN}/\text{m}^2]}} \times \frac{\left(1.8 \frac{T'}{[\text{K}]}\right)^{\frac{5}{2}}}{1.8 \frac{T'}{[\text{K}]} + 441}$$

整理得：

$$\frac{D'}{[\text{m}^2/\text{h}]} = \frac{5.973 \times 10^{-3}}{\frac{p'}{[\text{kN}/\text{m}^2]}} \times \frac{\left(\frac{T'}{[\text{K}]}\right)^{\frac{5}{2}}}{1.8 \frac{T'}{[\text{K}]} + 441}$$

故单位变换后的经验公式应为：

$$D = \frac{5.973 \times 10^{-3}}{p} \times \frac{T^{\frac{5}{2}}}{1.8T + 441} = \frac{3.318 \times 10^{-3}}{p} \times \frac{T^{\frac{5}{2}}}{T + 245}$$

### 习 题

1. 有一套苛性钠水溶液蒸发设备。浓度为10%的NaOH水溶液以每小时4000kg的流量送入第一蒸发器，蒸出部分水分而得浓度为18%的溶液，再送入第二蒸发器进一步蒸发，得到浓度为50%的产品。试计算每台蒸发器每小时蒸出的水量、第二蒸发器的进料量及产品量。

2. 在一传热设备内，以某种高温气体加热170°C的饱和水而产生同温度的饱和水蒸气，水蒸气发生量为500kg/h。气体进口温度为530°C，质量流量为3330kg/h。又知该气体由273K至任一温度T的平均比热  $c_{pm} = 0.94 + 1.83 \times 10^{-4}T$  kJ/(kg·K)，式中T为热力学温度，K。若设备的热损失可以忽略，求气体的出口温度。

3. 试将通用气体常数  $R = 82.06 \text{atm} \cdot \text{cm}^3 / (\text{mol} \cdot \text{K})$  换成SI单位。

4. 三氯乙烯的饱和蒸气压与温度的关系符合下面经验公式：

$$\lg p = -\frac{1773}{T} + 7.8238$$

式中  $p$ ——饱和蒸气压，mmHg；

$T$ ——热力学温度，K。

若需将式中  $p$  的单位改为  $\text{N}/\text{m}^2$ ，试对该式加以变换。