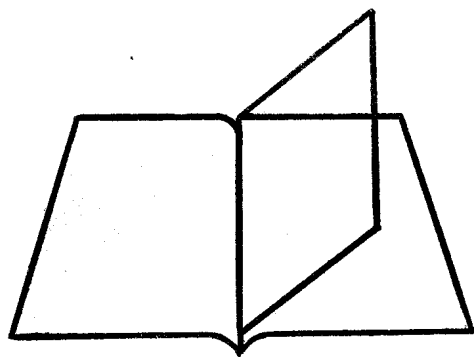


职工高等工业专科学校试用教材



化 工 原 理

上 册

陈 敏 吴惠芳 蔡伯钦 陈玉英 编

化 学 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书以化工各主要单元操作为基本内容,着重叙述单元操作的基本原理及其典型设备的性能和基本计算方法,叙述力求深入浅出、通俗易懂。并适当注重应用。全书分上、下两册,上册包括绪论、流体流动,流体输送机械、过滤、沉降、流态化、传热、蒸发及附录,下册包括气体吸收、液体蒸馏、板式塔、液-液萃取、干燥、吸附和离子交换等,每册书末附有习题参考答案。

本书适合成人高等工业专科学校化工工艺、化学工程、化工机械、化工自动化、石油化工、轻化工等专业作为教材使用,并适于在职青年自学之用,亦可供化工技术人员参考。

职工高等工业专科学校试用教材

化 工 原 理 上 册

陈 敏 吴惠芳 编
蔡伯钦 陈玉英

责任编辑:陈丽

封面设计:任辉

化学工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ 印张 $20^{1/4}$ 字数481千字印数1—10,000

1988年3月北京第1版1988年3月北京第1次印刷

ISBN 7-5025-0201-7/TQ·163定价4.20元

序

本书系根据一九八三年十一月原教育部在无锡召开的“全国成人高等工业专科学校教学大纲审定会”会上审定通过的“职工高等工业专科学校（化工工艺类专业）化工原理教学大纲（试行草案）”规定的教学内容和要求编写的，另外还增编了一章“吸附和离子交换”。

为适应职工大专学校的教学特点和便于在职青年的自学，编写本书时，在保证达到大专水平的前提下，以单元操作作为基本内容，精选化工过程的基本理论和基本知识，努力反映了本学科的新成就。在叙述上力求深入浅出、通俗易懂，适当注重应用。

本书内容较宽，根据化工工艺专业学习要求，书中不打“*”号的章节为必学内容，打“*”号的章节为选学内容。其他专业使用本教材时，则可根据本专业需要确定教学内容。

本书由化工部上海化学工业研究院职工大学陈敏主编，绪论、第一、二、八、十一章由陈敏编写，第三、六章由苏州市化工局职工大学吴惠芳编写，第五、九章由广州业余大学蔡伯钦编写，第四章由吴惠芳、蔡伯钦合编，第七、十章由大连化学工业公司职工大学陈玉英编写。

本书由华东化工学院陈敏恒教授主审，由华东化工学院方图南、南京化工学院赵汝溥、上海第一纺织印染公司职工大学陈荣圻等三位老师审阅，最后还聘请了华东化工学院丛德滋、吴俊生两位老师一起参加了本书的评审和修改。

在编写本书过程中，我们得到了评审组老师的热情指导和帮助，并根据他们审阅后提出的宝贵意见作了认真修改。对此，我们深致谢意。

在编写组开展工作时，除得到了化学工业部教育司和化学工业出版社的领导和支持外，编者所属各校亦给予各种方便和大力协助。各兄弟职工高等工业专科学校有关同志很关心本书的编写，热情提供意见，积极介绍资料。此外，近年来出版的（包括内部使用的）高校“化工原理”教材，为我们编写本教材提供了主要参考依据。对以上这些赞助，编者一并深表感谢。

由于编者水平有限，书中一定存在许多不妥和错误之处，诚望读者和使用单位批评指正。

编 者

1986年6月

目 录

绪论	1
第一章 流体流动	9
1-1 概述	9
第一节 流体的性质	9
1-2 密度	9
1-3 粘度	11
第二节 流体的静力学基本方程式	13
1-4 流体的压强	13
1-5 流体静力学基本方程式	14
1-6 压强的测定	17
第三节 流体在管内流动的基本规律	22
1-7 流体的流量和流速	22
1-8 流体的定常流动与非定常流动	24
1-9 定常流动时的物料衡算——连续性方程	25
1-10 定常流动时的能量衡算——柏努利方程	26
第四节 流体在管内流动的阻力	35
1-11 流体流动类型	36
1-12 流体在圆管内的速度分布	38
1-13 流动边界层基本概念	42
1-14 流体流动的阻力	44
第五节 管路计算	59
1-15 简单管路计算	60
1-16 复杂管路计算*	65
1-17 可压缩流体在管内的流动*	71
第六节 流量测定	72
1-18 流量测定	72
思考题	80
习题	82
本章符号说明	87
第二章 流体输送机械	89
第一节 概述	89
2-1 概述	89
第二节 离心泵	89
2-2 离心泵的工作原理与基本结构	89

2-3	离心泵的基本方程式*	92
2-4	离心泵的主要性能参数	96
2-5	离心泵的特性曲线	99
2-6	离心泵特性曲线的换算	100
2-7	离心泵的工作点与流量调节	104
2-8	离心泵的并联操作与串联操作	106
2-9	离心泵的汽蚀现象与安装高度	108
2-10	离心泵的类型与选用	112
第三节	其他类型泵*	117
2-11	旋涡泵	117
2-12	往复泵	118
2-13	齿轮泵和螺杆泵	120
2-14	各种化工用泵比较	121
第四节	气体输送机械	122
2-15	通风机	122
2-16	鼓风机	126
2-17	压缩机*	127
2-18	真空泵	130
思考题		132
习题		133
本章符号说明		134
第三章	过滤、沉降和流态化*	135
第一节	过滤	135
3-1	概述	135
3-2	过滤计算	141
3-3	离心过滤设备和操作	154
第二节	沉降	156
3-4	重力沉降	157
3-5	离心沉降	163
第三节	固体流态化	171
3-6	固体流态化	171
思考题		174
习题		175
本章符号说明		176
第四章	传热	178
第一节	概述	178
4-1	概述	178
第二节	导热	180
4-2	傅立叶定律	180

4-3	平壁的定态导热	183
4-4	圆筒壁的定态导热	185
第三节	对流给热	188
4-5	牛顿冷却定律	188
4-6	流体无相变化时的给热系数	190
4-7	蒸汽冷凝给热系数	197
4-8	液体沸腾给热系数	200
第四节	辐射传热	202
4-9	基本概念	202
4-10	热辐射基本定律	203
4-11	两固体间的辐射传热	204
4-12	设备热损失的计算	206
第五节	传热过程的计算	208
4-13	热量衡算	208
4-14	传热温度差	209
4-15	传热系数 K	212
4-16	壁温计算	217
4-17	换热器工况改变时的传热计算	217
第六节	列管式换热器的结构 and 设计计算	220
4-18	列管式换热器的结构和型式	220
4-19	列管换热器设计中应考虑的问题	221
4-20	列管换热器的选用和设计步骤	225
第七节	其他间壁式换热器	230
4-21	其他间壁式换热器	230
4-22	强化传热过程的途径	234
思考题		235
习题		235
本章符号说明		237
第五章 蒸发*		239
第一节	概述	239
5-1	概述	239
第二节	单效蒸发计算	241
5-2	物料衡算	241
5-3	热量衡算	241
5-4	传热面积的计算	243
第三节	多效蒸发	248
5-5	多效蒸发操作流程	249
5-6	多效蒸发计算	250
第四节	蒸发操作的经济性	259

5-7 蒸发器的生产强度	259
5-8 蒸发操作的经济性	260
第五节 蒸发设备	261
5-9 蒸发器的结构与特点	261
5-10 蒸发装置的辅助设备	266
5-11 蒸发器的选型	268
习题	269
本章符号说明	269
附录	271
一、单位因次及其换算	271
二、干空气的物理性质 (760 mmHg)	275
三、水与蒸汽的物理性质	276
四、某些固体材料的密度、导热系数和比热	282
五、某些液体的导热系数	283
六、某些气体和蒸汽的导热系数	284
七、液体比热共线图	286
八、气体比热共线图(常压下用)	288
九、液体汽化潜热共线图	290
十、液体的粘度和密度	292
十一、某些有机液体比重共线图	294
十二、气体粘度共线图	296
十三、某些液体的表面张力及常压下的沸点	298
十四、某些水溶液的表面张力	299
十五、无机盐溶液在大气压下的沸点	300
十六、1atm下溶液的沸点升高与浓度关系	301
十七、壁面污垢的热阻系数(污垢系数), $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$	301
十八、列管换热器的传热系数 K 的参考值	302
十九、管子规格	304
二十、泵规格(摘录)	306
二十一、4-72-11型离心通风机规格(摘录)	309
二十二、列管式换热器规格	309
二十三、旋风分离器规格(摘录)	312
上册习题参考答案	314

绪 论

十九世纪末，化学工业已发展成为一个重要的工业分支。但是，开始对于化工生产的研究都是局限于各自行业中独有的生产工艺，随着生产和科研的深入发展，才认识到各种不同的生产行业中均存在着一些共同的过程，如流体输送、沉降、过滤、加热、冷却、蒸发、吸收、蒸馏、萃取和干燥等，称为单元操作。这些单元操作不管出现在哪类生产工艺中，其操作原理和设备是类同的。因而于本世纪二十年代开始形成了专门研究化工各单元操作的学科，称为“化工原理”。我国解放后，该学科名称虽几经变革，曾称为“化工过程及设备”、“化学工程”等，但其基本内容与体系仍保持了相对稳定。目前国内出版的有关这门学科的书籍，大多称为“化工原理”。

一、“化工原理”研究内容

“化工原理”是研究化学工业中共有的单元操作原理，设备性能和基本计算方法。由于化工单元操作种类很多，本书限于篇幅只能讨论其中比较重要和常见的几种，按其基本理论基础可分为以下三类：

1. 以流体力学为基础的单元操作：流体输送、过滤、沉降和固体流态化。
 2. 以热量传递理论为基础的单元操作：传热和蒸发。
 3. 以质量传递理论为基础的单元操作：吸收、蒸馏、萃取、干燥、吸附和离子交换。
- 各单元操作进行的方式又有间歇式与连续式之分。

间歇式过程是分批进行操作的过程，每次操作开始时，在设备内加入原料，处理结束后，排出设备内的产品或残留物，然后再重新投料周而复始地进行操作。在间歇操作设备内的同一位置上，不同时刻进行着不同的操作步骤，因而设备内任一位置的温度、压强、流速、浓度等参数是随时间而变化。在工程上，将设备内任一点上表示物料性质和状态的参数不随时间而变的过程称为定态过程，否则称为非定态过程。所以，间歇式过程是属于非定态过程。

连续式过程是连续进行操作的过程，原料不断地加入设备，产品亦不断地从设备中排出。连续操作除停车阶段是属于非定态过程外，一般在正常操作阶段，设备内任一位置的温度、压强、流速、浓度等参数均不随时间而变化。所以，正常操作时的连续式过程是属于定态过程。

与间歇操作相比，连续操作具有以下一些优点：便于机械化、自动化，减少劳动强度；产品质量均匀，容易保证产品质量等。因此，在化工生产中，一般采用连续操作。

二、本课程的性质和特点

本课程是以数学、物理、化学、制图、物理化学等课程为基础，以化工生产中的物理变化过程为研究对象的一门技术基础课。通过对各主要单元操作的学习，了解（1）如何根据各单元操作的特点和物系的性质，进行过程与设备的选择，以经济有效地满足生产工艺要求；（2）如何进行化工过程和设备的设计计算，及在缺乏数据的情况下，又如何组织实验以取得设计数据；（3）如何进行操作和调节，以适应不同生产的要求，并在遇到故障

时,能初步通过分析寻找故障的原因。因此,“化工原理”不仅在基础课与专业课之间起到了桥梁作用,而且本身亦是一门应用性学科。

学习本课程还要注意其以下一些特点:

1. “化工原理”要求综合应用基础知识解决化工生产实际问题。为学好本课程,非但应有必备的基础知识,还应对化工生产有一些初步的认识和了解。为此,在学习各主要单元操作时,应注意与其基础知识的联系,并重视实验和工厂实习等实践环节。

2. 本书以单元操作作为学习的主要内容,而单元操作又包括过程与设备两个方面。我们应重点掌握过程的原理,熟悉典型设备的构造和操作性能。各单元操作的计算,一般是衡算方程(包括物料衡算、机械能衡算和热量衡算等)与过程特征方程(如阻力计算式、速率方程等)的联合运用。要熟练掌握基本的计算方法,并要培养运用上述基本关系分析和解决一般设计及操作问题的能力。在分析影响过程的因素时,一般均可从物性、设备结构和操作状况三方面来考虑。

3. 本课程所要解决的问题不单是过程的基本规律,还面临着真实的、复杂的生产实际问题。实际问题的复杂性不完全在于过程的本身,而首先在于化工设备几何形状的复杂性和千变万化的物性。根据实际问题的复杂性和人们已有的认识,“化工原理”采用了不同的研究方法,主要有实验研究法、半经验半理论的数学模型法和数学解析法等三种。在学习本课程内容时,我们要注意这些方法的应用,了解怎样组织实验简便可靠地测取设计数据。

三、四个基本概念

在研究化工单元操作时,经常用到“物料衡算”、“能量衡算”、“平衡关系”和“过程速率”这四个概念来描述过程的变化规律和特征,下面对这四个基本概念作简单介绍。

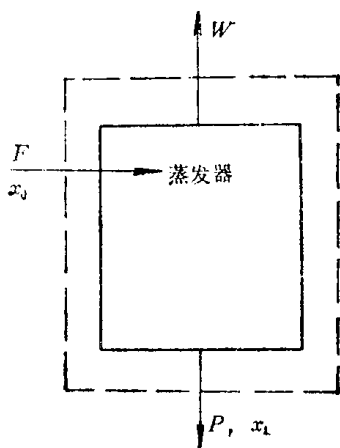
(一) 物料衡算 根据质量守恒定律,在化工操作过程中,单位时间输入一设备的物料量必等于离开这一设备的物料量与设备内积存物料增量之和,即

$$\text{输入量} = \text{输出量} + \text{积存增量}$$

对于多数连续的定态过程,设备中物料积存增量为零,因此物料衡算关系可简化为:

$$\text{输入量} = \text{输出量}$$

在物料衡算时,首先要确定衡算范围:可以在整个过程的系统范围内,亦可以在一个



例 0-1 附图

或几个设备的范围内。其次要确定衡算的对象:可以是全部物料,亦可以是某一组分(或元素)。另外还要确定衡算的基准:间歇过程常以一次操作为基准,即用每次操作的输入量、输出量和积存量进行衡算;连续的定态过程常以单位时间为基准,即以单位时间内的输入量与输出量进行衡算。

〔例0-1〕 利用一蒸发器,将NaOH稀溶液蒸发除去一部分水分后,加工成较浓的NaOH溶液产品。已知NaOH溶液的初始浓度为 $x_0=10\%$,浓缩后的浓度为 $x_1=20\%$,加入蒸发器的NaOH原料液量为 $F=10000$

kg/h, 试求蒸发器的产品量 P 和蒸发水量 W 。

解: 先绘出设备简图如本例附图所示。

衡算范围: 以图中虚线框表示, 即为蒸发器设备。

衡算基准: 1h

衡算对象:

对全部物料衡算时

$$\begin{aligned} F &= W + P \\ \text{即 } 10000 &= W + P \end{aligned} \quad (1)$$

对NaOH溶质衡算时

$$\begin{aligned} Fx_0 &= Px_1 \\ \text{即 } 10000 \times 0.10 &= 0.2P \end{aligned} \quad (2)$$

由式(2):

$$P = 5000 \text{ kg/h}$$

将 P 之值代入式(1):

$$W = 5000 \text{ kg/h}$$

(二) 能量衡算 能量有机械能、电能、热量等多种形式, 在操作中有几种形式能量之间相互转化时, 应采用能量衡算确定它们之间的关系。但在化工生产中, 有时参与过程各股物料之间交换的能量形式只涉及到热量一种, 这时可简化为热量衡算。

在定态操作过程中, 当参与过程各流股既未对外界做功, 又未接受外界对它做功时, 输入设备的热量等于从这设备输出的热量, 即

$$\text{输入热量} = \text{输出热量}$$

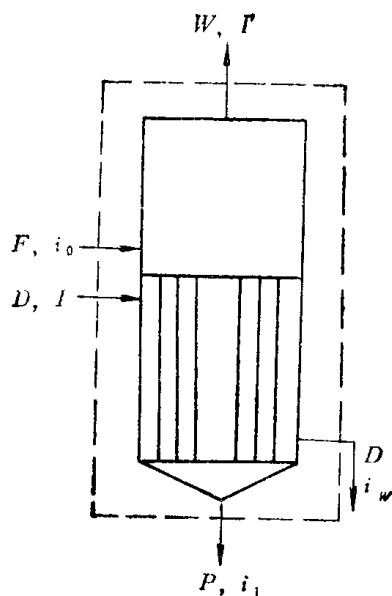
这里的输入、输出热量包括进出设备(或系统)的各股物料带进与带出的热量(包括显热与潜热, 统称为焓), 及外界加给设备(或系统)的热量或设备(或系统)向外界散失的热量。热量衡算的依据是能量守恒定律。

在作热量衡算时, 与物料衡算一样要确定衡算的范围和衡算基准。同时在确定物料焓值时, 一般以273K为基准温度, 即温度为273K的物料焓值为零。当有相变时, 以273K液态物料为基准。例如, 273K的液态水焓值为零, 398K饱和水蒸汽焓值为2716.5kJ/kg, 它包括从273K水加热至398K水所增加的显热525kJ/kg和从398K水加热变成398K饱和蒸汽所增加的潜热2191.5kJ/kg。以后凡以273K为基准温度计算焓值时, 均不予指出, 否则必须加以指明。

〔例 0-2〕 如本例附图所示, 加入蒸发器的原料液量为10000kg/h, 其焓值为 $i_0 = 305$ kJ/kg。从蒸发器底排出的浓缩液量为 $P = 6667$ kg/h, 其焓为 $i = 570$ kJ/kg。蒸发器顶排出的蒸汽量为 $W = 3333$ kg/h, 其焓为 $I' = 2608$ kJ/kg。送入蒸发器加热管内的加热蒸汽为420K的饱和水蒸汽, 焓为 $I = 2745$ kJ/kg, 加热蒸汽在加热管内冷凝后的冷凝水在饱和温度下排出, 水的比热近似为 $C = 4.2$ kJ/kg·K。试求加热蒸汽用量 D 。

解: 以蒸发器为衡算范围(如图中虚线框所示), 衡算基准为1小时, 则输入热量有:

$$\begin{aligned} \text{原料带入热量} &= Fi_0 = 10000 \times 305 \\ &= 3.05 \times 10^6 \text{ kJ/h} \end{aligned}$$



例 0-2 附图

加热蒸汽带入热量 $= DI$

$$= 2745D \text{ kJ/h}$$

输出热量有:

$$\text{浓缩液带出热量} = Pi_1 = 6667 \times 570$$

$$= 3.8 \times 10^6 \text{ kJ/h}$$

$$\text{二次蒸汽带出热量} = WI' = 3333 \times$$

$$2608 = 8.69 \times 10^6 \text{ kJ/h}$$

$$\text{冷凝水带出热量} = Di_w = DC(420 - 273)$$

$$= D \cdot 4.2(420 - 273)$$

$$= 617.4D \text{ kJ/h}$$

根据

输入热量 = 输出热量

$$\text{得: } Fi_0 + DI = Pi_1 + WI' + Di_w$$

$$\text{即 } 3.05 \times 10^6 + 2745D = 3.8 \times 10^6 + 8.69 \times 10^6 + 617.4D$$

$$D = 4437 \text{ kg/h}$$

(三) 平衡关系 任一过程中, 物系的变化必趋于一定方向, 如任其发展, 结果一定会达到平衡。例如, 在一定温度下, 将食盐渐渐加入水中, 开始时盐水浓度随着食盐加入量的增加而上升, 但当食盐加到一定量(盐水达到饱和)时, 盐水浓度不再变化, 而是保持一个定值。此时, 在该温度下, 食盐与盐水已达到平衡。只有当温度改变时, 盐水浓度才会变化, 并达到新的平衡。

必须指出, 由于物质的运动是绝对的, 静止是相对的, 所以物系的平衡总是动平衡, 即物系平衡时各相之间交换的量相等。例如, 食盐与盐水平衡时, 食盐溶解到盐水中的量等于盐水中析出的食盐量。

平衡关系表示物系变化的极限, 这一极限随外界条件(如上述例子中的温度)的变化而变化。平衡关系在工程上有其实际意义, 即可根据它推知过程能否进行及可能进行到何种程度。

(四) 过程速率 物系在单位时间和单位传递面积内, 由不平衡向平衡变化的快慢程度称为过程的速率。影响过程速率的因素很多, 但可以近似地简化为:

$$\text{过程速率} = \frac{\text{推动力}}{\text{阻力}}$$

这里的推动力与阻力不同于它们在力学中的含义。推动力的意义是指直接导致过程进行的动力, 按不同过程可具体理解为压强差、温度差、浓度差。阻力的含义比较复杂, 它包括了推动力以外的各种因素的总概括, 不同过程, 属于阻力的因素亦各不相同。

四、单位制与单位换算

我们任意选定几个彼此独立的物理量(个数是一定的, 例如在力学领域内为三个), 并规定它们各自的单位。这几个选定的、彼此独立的物理量称为基本量、它们的单位称为基本单位, 如长度 m 、时间 s 等。其他物理量则可根据它们与基本量之间的内在联系导出它们的单位, 这些物理量称为导出量, 它们的单位称为导出单位。如速度为导出量, 速度

的单位 m/s 为导出单位。

在不同的单位制中，所选定的基本量和基本单位有所不同，因此其导出单位亦不相同。经常使用的有绝对单位制（包括CGS制和MKS制）与工程单位制。这些单位制在科学和技术领域中都得到一定的应用。工程上常同时并用几种单位制，使同一物理量在不同单位制中具有不同的单位和数值，给运算带来麻烦，且易产生差错。为改变这一局面，一九六〇年十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，用符号“SI”表示。

国际单位制具有通用性和一贯性两大优点。其通用性表现在它能应用于自然科学、工程技术及国民经济各个部门中。其一贯性在于：用它的基本单位相乘或相除导出任何一个导出单位时，均不需引入比例系数；且任何一个物理量均只有一个单位。例如热量与功是本质相同的物理量，它们在国际单位制中均以 J（焦耳）表示。而在 MKS 制中，热量单位是 cal（卡），功的单位是 J，运算时必须通过所谓“热功当量”（ $1\text{cal}=4.18\text{J}$ ）这一比例系数来换算。

我国亦已开始推广采用 SI 制，故本书采用国际单位制。

由于要用 SI 全部取代其他单位制需要较长一段过渡时间，所以我们除了要掌握国际单位制外，对过去常用的单位制应有所了解，并能对不同单位制单位进行相互换算。

（一）国际单位制（SI）在 SI 中选定了七个基本量：长度、时间、质量、温度、电流强度、光强度和物质的量。其基本单位是：长度单位——m（米），时间单位——s（秒），质量单位——kg（千克），温度单位——K（开尔文），电流强度单位——A（安培），光强度单位——cd（坎德拉），物质质量单位——mol（摩尔）。在本课程中常采用的基本量有：长度、时间和质量，它们的因次符号分别用 $[L]$ 、 $[\tau]$ 和 $[M]$ 。

在 SI 中，导出单位均可用以上七个基本单位来表示。如力的单位可根据牛顿定律 $F=ma$ 导出，即

$$[F]^{\Delta} = [ma] = \text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2 = \text{N} \text{（牛顿）}$$

力的因次为 $[F] = [M \cdot L \cdot \tau^{-2}]$ 。其他导出单位如：功和热的单位均为 $\text{J} = \text{N} \cdot \text{m} = \text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$ ，因次为 $[M \cdot L^2 \cdot \tau^{-2}]$ ；密度单位为 kg/m^3 ，因次为 $[ML^{-3}]$ ；压强单位为 Pa （帕斯卡） $= \text{N}/\text{m}^2 = \text{kg}/\text{s}^2 \cdot \text{m}$ ，因次为 $[M \cdot L^{-1} \tau^{-2}]$ 。

（二）绝对单位制 在绝对单位制中，所选定的基本量为长度、时间和质量，按其采用的基本单位不同又可分为厘米·克·秒制（简称CGS制）和米·公斤·秒制（简称MKS制）两种。

在 CGS 制中，基本单位为：长度单位——cm（厘米），质量单位——g（克），时间单位——s（秒）。导出单位如：力的单位是 dyn（达因），密度单位是 g/cm^3 等。

在 MKS 制中，基本单位为：长度单位——m（米）、质量单位——kg（千克）、时间单位——s（秒）。导出单位如：力的单位是 N（牛顿） $= \text{kgm}/\text{s}^2$ ，功的单位是 J（焦耳） $= \text{N} \cdot \text{m} = \text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$ ，密度单位是 kg/m^3 等。

（三）工程单位制 工程单位制中选定长度、时间和重量三个量为基本量，因此又称重力单位制。其基本单位是：长度单位——m（米）、时间单位——s（秒），重力单位

△ 本书于物理量符号外加一方括号“[]”即表示该物理量的因次。 $[F]$ 即表示力 F 的单位或因次。

——kgf (公斤)。导出单位如：质量单位亦可根据牛顿定律导出，即

$$[m] = \frac{[F]}{[a]} = \frac{\text{kgf}}{\text{m/s}^2} = \frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$$

功的单位为kgf·m等。

(四) 单位换算 工程上常遇到的公式有理论公式与经验公式两类。理论公式是根据物理定律建立起来的方程，称为物理方程，如牛顿第二定律公式 $F = ma$ 。在应用公式时，如已知数据单位不属于同一单位制，应换算成同一单位制单位后方可代入计算。经验公式是根据实验数据整理出来的方程，它的每个符号的单位常常是指定的。应用经验公式时，必须将已知数据的单位换算成公式指定的单位后才能代入计算。

1. 物理量单位换算 物理量由一个单位换算成另一个单位后，其前后保持等量关系。例如，力1kgf换算成9.81N后，有等量关系，

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

由上式可得

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

即

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

其中 $9.81 \frac{\text{N}}{\text{kgf}}$ 称为力的单位由kgf换算成N的换算因数。将力的单位由kgf换算成N时，只须乘以它们的换算因数就可得到，即

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

任何换算因数都是相等的两个物理量之比，其本质是纯数1。因此，任何物理量由一种单位换算成另一种单位时，均只须乘以它们的换算因数即可。

常用单位的换算因数可从本书附录及有关手册中查得。

〔例0-3〕 已知 20.2°C 水的粘度为 $1\text{cP} = 0.01 \frac{\text{dyn} \cdot \text{s}}{\text{cm}^2}$ ，试求其在SI中相当于多少 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ ，在工程单位制中相当于多少 $\text{kgf} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 。

解：(1) 由附录一： $1\text{dyn} = 10^{-5}\text{N}$ ， $1\text{cm} = 10^{-2}\text{m}$

$$\text{所以 } 1\text{cP} = 0.01 \frac{\text{dyn} \cdot \text{s}}{\text{cm}^2} = 0.01 \frac{\text{dyn} \cdot (10^{-5}\text{N}/\text{dyn}) \cdot \text{s}}{(\text{cm} \cdot 10^{-2}\text{m}/\text{cm})^2} = 10^{-3}\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$$

$$(2) \quad 1\text{kgf} = 9.81\text{N}$$

$$\text{所以 } 1\text{cP} = 10^{-3}\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2 = 10^{-3} \frac{\text{N} \cdot \left(\frac{1}{9.81} \text{kgf}/\text{N} \right) \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = \frac{1}{9810} \text{kgf} \cdot \text{s}/\text{m}^2$$

2.* 经验公式单位变换 由于经验公式中某一符号 A 的单位是指定的，它只代表某一物理量的数值大小，因此这一符号 A 乘以它所指定的单位才代表某一物理量。当将该物理量的单位换算成另一单位时，该物理量的数值大小将变为 A' ，这 A' 与新的指定单位的乘积仍代表该物理量。故有

$$A \times \text{原单位} = A' \times \text{新单位}$$

则

$$A = A' \times \frac{\text{新单位}}{\text{原单位}} = A' \times \frac{\text{新单位} \times \text{新单位换算成原单位的换算因数}}{\text{原单位}}$$

将上式代入原经验公式即可变换成新的指定单位下的经验公式。

〔例0-4〕 盘式分布器从盘底筛孔中流下的液流量经验计算式为 $L = 0.0052\sqrt{H}$ ，式中： L ——液流量， m^3/s ； H ——盘内液层高度， m 。试将该经验公式变换成流量单位为 m^3/h 、液层高度单位为 mm 的公式。

解：设变换后的液流量符号为 L' 、液层高度符号为 H' ，则

$$L \times \text{m}^3/\text{s} = L' \times \text{m}^3/\text{h}$$

$$H \times \text{m} = H' \times \text{mm}$$

所以

$$L = L' \times \frac{\text{m}^3/\text{h}}{\text{m}^3/\text{s}} = L' \times \frac{\frac{\text{m}^3}{\text{h} \cdot 3600\text{s/h}}}{\text{m}^3/\text{s}} = L'/3600$$

$$H = H' \times \frac{\text{mm}}{\text{m}} = H' \times \frac{\text{mm} \times \frac{1}{1000} \frac{\text{m}}{\text{mm}}}{\text{m}} = \frac{H'}{1000}$$

代入原公式得

$$\frac{L'}{3600} = 0.0052\sqrt{\frac{H'}{1000}}$$

即

$$L' = 0.592\sqrt{H'}$$

因此变换后的经验公式为 $L = 0.592\sqrt{H}$ 。

习 题

1. 有一套NaOH水溶液蒸发设备。已知每小时将浓度为10%（重量%）的NaOH水溶液 50000 kg 加入第一蒸发器，蒸发出部分水分后得到浓度为18%的NaOH溶液，再送至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分量及第二蒸发器的进料量与产品量。

2. 每小时将1500 kg、353 K的硝基苯通过一换热器用水冷却至313 K。冷却水初温为303 K，出口温度为308 K。若忽略热损失，试求冷却水用量。（硝基苯的比热为1.64 J/kg·K，水的比热为4.2 J/kg·K。）

3. 填空

质量 $1.5 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m} = () \text{ kg}$;

压强 $0.2 \text{ kgf}/\text{cm}^2 = () \text{ Pa}$;

功 $4 \text{ kgf} \cdot \text{m} = () \text{ J}$;

热量 $900 \text{ cal} = () \text{ J}$;

温度 $15^\circ\text{C} = () \text{ K}$;

粘度 $0.1 \text{ dyn} \cdot \text{s}/\text{cm}^2 = () \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$

比热 $1 \text{ J}/\text{kg} \cdot \text{K} = () \text{ kcal}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$;

传热系数 $1 \text{ kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C} = () \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ 。

4. 已知通用气体常数 $R = 82.06 \text{ atm} \cdot \text{cm}^3/\text{mol} \cdot \text{K}$ ， $1 \text{ atm} = 1.0336 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ 。试分别导出以工程单位

制单位“ $\text{kgf} \cdot \text{m} / \text{kmol} \cdot ^\circ\text{C}$ ”和SI单位“ $\text{kJ} / \text{kmol} \cdot \text{K}$ ”表示 R 的数值。

5. 计算板式精馏塔总板效率的经验公式为 $E_T = 0.49(\alpha\mu_L)^{-0.245}$, 式中, E_T ——总板效率, α ——溶液中易挥发组分对难挥发组分的相对挥发度, μ_L ——液相平均粘度, cP。试将该式变换成粘度单位为 $\text{N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$ 的经验公式。

第一章 流体流动

1-1 概 述

气体和液体统称为流体。流体流动的规律是本课程的重要基础，这是因为：1) 化工生产过程中所处理的物料（包括原料、半成品和产品等）大多是流体，流体在管道内的输送问题与流体流动规律有关；2) 有些化工单元操作直接与流体流动有关，如过滤、沉降、流态化等；3) 化工中进行传热与传质操作的物料大多是在流体的状态下进行的，流体流动状况影响这些过程的速率。因此，研究流体流动规律是研究传热与传质的基础。

本章学习内容有关流体的压强及其测定、流体在流动过程中的物料衡算与能量衡算、流体在管路内流动的阻力计算、管路计算及其流量测定等。重点讨论流体流动过程的基本原理与流体在管内的流动规律，并运用这些基本原理和规律去分析、计算流体输送问题。

在工程上对流体的运动，通常只需考虑其宏观的机械运动规律，而不考察单个分子的微观运动。为了避开复杂的分子微观运动，可取流体的质点作为考察流体的最小单元。所谓质点，就是指一个含有大量分子的流体微团，其尺寸与设备相比还是微不足道。这样，可以假设流体是由大量质点组成，彼此间没有空隙、完全充满所占空间的连续介质。实践证明，这样的连续性假设，除高度真空的稀薄气体外，在绝大多数情况下是合适的。

第一节 流体的性质

1-2 密 度

单位体积流体的质量，称为流体的密度，常用 ρ 表示，单位为 kg/m^3 ，即

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

式中： ρ ——流体的密度， kg/m^3 ；

m ——流体的质量， kg ；

V ——流体的体积， m^3 。

流体的密度一般可在物理化学手册或有关资料中查得。

液体的密度基本上不随压力变化，故常称为不可压缩流体。而温度对液体密度稍有影响，在查取液体密度数据时，要注意所指明的温度。

气体密度随压力、温度有显著变化，所以常称为可压缩流体。因此，气体的密度必须标明其状态（压强与温度）。从手册中查得的气体密度往往是某一状态下的数值，这就必须换算到操作条件下的密度。一般当压强不太高、温度不太低时，可按理想气体处理。

一定质量（设为 m ）理想气体的体积、压强、温度变化关系为

$$\frac{pV}{T} = \frac{p'V'}{T'}$$

因为

$$V = \frac{m}{\rho} \quad V' = \frac{m}{\rho'}$$

所以

$$\frac{p \cdot \frac{m}{\rho}}{T} = \frac{p' \cdot \frac{m}{\rho'}}{T'}$$

即

$$\rho = \rho' \frac{pT'}{p'T} \quad (1-2)$$

式中: V 、 V' ——分别为操作条件和数据指定条件下的气体体积, m^3 ;

ρ ——操作条件下的气体密度, kg/m^3 ;

ρ' ——查得的气体密度, kg/m^3 ;

p 、 p' ——分别为操作压力和数据指定压力, N/m^2 ;

T 、 T' ——分别为操作温度和数据指定温度, K 。

当查不到气体密度数据时,一般可近似按理想气体计算,标准状态下的气体密度为

$$\rho_0 = \frac{M}{22.4}$$

则某一状态(压力为 p 、温度为 T)下的气体密度为

$$\rho = \rho_0 \frac{pT_0}{p_0T} = \frac{M}{22.4} \frac{pT_0}{p_0T} \quad (1-3)$$

式中: ρ 、 ρ_0 ——分别为操作状态和标准状态下的气体密度, kg/m^3 ;

M ——气体的分子量, kg/kmol ;

22.4——1kmol气体在标准状态下的体积, m^3/kmol ;

p 、 p_0 ——分别为操作压力和标准状态下的压力, N/m^2 ($p_0 = 1.0133 \times 10^5 \text{N}/\text{m}^2$);

T 、 T_0 ——分别为操作温度和标准状态下的温度, K ($T_0 = 273\text{K}$)。

通常手册中所列的流体密度为纯物质的密度,而化工生产中所遇到的流体一般为含有若干组分的混合物。流体混合物的密度可按下列方法算得。

对于液体混合物,各组分的浓度通常以质量分率(某一组分的质量与混合物质量之比) a 表示。以1kg混合液体为基准,并设各组分混合时具有体积加和性,即1kg混合液体体积等于各组分单独存在时的体积之和,因此有:

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{a_1}{\rho_1} + \frac{a_2}{\rho_2} + \frac{a_3}{\rho_3} + \dots + \frac{a_n}{\rho_n} \quad (1-4)$$

式中:

ρ_m ——混合液体的密度, kg/m^3 ;

a_1 、 a_2 、 a_3 、 $\dots$ 、 a_n ——分别为各组分的质量分率;

ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 、 $\dots$ 、 ρ_n ——分别为各组分的密度, kg/m^3 。

对于混合气体,各组分的浓度通常用体积分率(在同一温度、压力下某一组分单独存在时的体积与混合气体体积之比) y 表示,以1 m^3 混合气体为基准,因各组分混合前后其质量不变,因此1 m^3 的混合气体的质量等于各组分质量之和,即

$$\rho_m = \rho_1 y_1 + \rho_2 y_2 + \dots + \rho_n y_n \quad (1-5)$$

式中:

ρ_m ——混合气体的密度, kg/m^3 ;

ρ_1 、 ρ_2 、 $\dots$ 、 ρ_n ——分别为各组分气体的密度, kg/m^3 ;