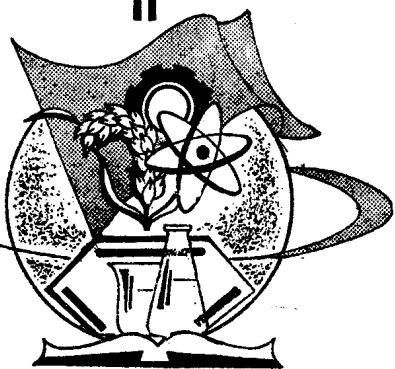


中等专业学校试用教材



化 工 原 理

上 册

王振中 编

化 学 工 业 出 版 社

本书为中等专业学校或同类学校化工工艺各专业、化工机械专业的化工原理课程教材。分上、下两册出版。主要讲述化学工程中单元操作的基础理论。上册包括：绪论、流体流动、流体输送、非均相物系的分离、传热、蒸发。全书按 180 学时编写。石家庄河北化工学校王振中编，化工原理审稿组审，兰州化工学校张弓主审。

中等专业学校试用教材

化 工 原 理

上 册

王振中 编

责任编辑：李洪勋

封面设计：季玉芳

*

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字数476千字印数1—31,670

1986年6月北京第1版1986年6月北京第1次印刷

统一书号15063·3845(K-304)定价2.30元

序

本书系根据1982年化工部教育司审定的中等专业学校基本有机化工专业、无机化工专业和化工机械专业的教学计划（指导性试行稿）要求，参照1982年11月全国化工中等专业学校化工原理编审委员会拟定的化工中等专业学校（四年制工艺专业和化工机械专业用）化工原理教学大纲（征求意见稿）编写而成。

本书在体系和内容方面，主要讲述“化学工程学”中基础组成部分化工常用单元操作。内容以基础理论、典型设备的操作原理和化工基本计算为主，设备构造、设计计算等从简。

在编写过程中，力求主次分明、由浅入深地把基本的概念及理论讲透，同时，培养学生基本的工程技术观点。

本书由河北化工学校王振中编写，陕西化工学校陈守约协编各章习题，兰州化工学校张弓主审。

在本书编写过程中，化工部教育司组织的中专化工原理编审委员会对全书初稿进行了审查。审稿过程中，福建化工学校叶永昌、淮南化工设备安装学校管尧彩、陕西化工学校陈守约、吉林化工学校李国洁等单位同志，对初稿提出了许多宝贵的建设性意见，对本书的修改定稿起了积极的作用。对此，编者谨表示衷心的感谢。由于编者水平有限，书中难免存在不少欠妥或谬误之处，恳切希望读者给予批评指正。

王振中 1985年5月

上册 目 录

序

绪论	1
一、化工原理的研究对象	1
二、本课程的任务、性质与内容	2
三、化学工程发展简史和展望	2
四、基本概念	3
五、单位及单位换算	4
习题	9

第一章 流体流动

第一节 流体静力学基本方程	10
1-1 流体的密度	10
1-2 作用在流体上的力	12
1-3 流体静压力及其特性	12
1-4 流体静力学基本方程	15
1-5 流体静力学基本方程的应用举例	16
第二节 流体在管内的流动	22
1-6 流量与流速	22
1-7 稳定流动和不稳定流动	23
1-8 流体稳定流动时的物料衡算——连续性方程	24
1-9 流体稳定流动时的能量衡算——柏努利方程	25
1-10 柏努利方程的应用	30
第三节 流体在管内的流动阻力	36
1-11 流体的粘性和牛顿粘性定律	36
1-12 流体的流动型态	39
1-13 流体在圆管内流动时的速度分布	41
1-14 湍流时滞流内层和缓冲层	42
1-15 流动阻力的计算	42
1-16 流体在直管中的流动阻力	43
1-17 管路上局部阻力	52
1-18 管路总能量损失的计算	56
第四节 流体输送管路的计算	62
1-19 简单管路的计算	62
1-20 复杂管路计算的原则	65
1-21 管道直径的选择和计算	67
第五节 流速和流量的测定	68

1-22 测速管	68
1-23 孔板流量计	70
1-24 文丘里流量计	74
1-25 转子流量计	75
习题	77
本章符号说明	82
第二章 流体输送	
第一节 化工管路	84
2-1 公称直径和公称压力	84
2-2 管子、管件与阀门	86
2-3 管路的连接	91
2-4 管路热补偿	92
2-5 管路布置的基本原则	93
第二节 液体输送机械	93
2-6 离心泵	93
2-7 其它类型泵	118
第三节 气体输送与压缩机械	123
2-8 离心通风机、鼓风机与压缩机	124
2-9 往复压缩机与真空泵	128
2-10 旋转鼓风机、压缩机与真空泵	135
2-11 喷射式真空泵	137
习题	138
本章符号说明	141
第三章 非均相物系的分离	
第一节 沉降	143
3-1 重力沉降速度	143
3-2 降尘室	147
3-3 沉降器	149
3-4 离心沉降速度	151
3-5 旋风分离器	152
3-6 旋液分离器	154
第二节 过滤	154
3-7 概述	155
3-8 过滤的基本理论	156
3-9 滤饼的洗涤	160
3-10 过滤设备	162
第三节 离心分离	167
3-11 影响离心分离的主要因素	167
3-12 离心机	167

第四节 气体的其它净制设备	170
3-13 袋滤器	171
3-14 文丘里除尘器	171
3-15 泡沫除尘器	172
习题	172
本章符号说明	173
第四章 传 热	
第一节 概述	175
4-1 传热的基本方式	175
4-2 工业换热方式	176
4-3 稳定传热和不稳定传热	178
第二节 热传导	178
4-4 傅立叶定律和导热系数	178
4-5 平壁的稳态热传导	180
4-6 圆筒壁的稳态热传导	183
第三节 对流传热	187
4-7 对流传热的分析	187
4-8 壁面和流体间的对流传热速率	187
4-9 影响对流传热系数的因素及其一般关联式	189
4-10 对流传热系数的经验关联式	192
第四节 间壁两侧流体间的传热	203
4-11 传热基本方程	203
4-12 热负荷的计算	204
4-13 传热温度差的计算	207
4-14 变温传热时流体流动流向的选择	215
4-15 传热系数值的计算和测定	216
4-16 传热计算的举例	221
4-17 壁温的估算	226
第五节 管路和设备的热损失与热绝缘	227
4-18 管路和设备的热损失	227
4-19 热绝缘	227
第六节 换热器	229
4-20 间壁式换热器	229
4-21 列管式换热器的设计和选用	234
4-22 其它类型换热器	245
4-23 间壁式换热器的比较	248
4-24 换热器的强化途径	249
习题	250
本章符号说明	252

第五章 蒸发

第一节 单效蒸发	255
5-1 单效蒸发的计算	255
5-2 蒸发器中传热温度差的计算	259
第二节 多效蒸发	263
5-3 多效蒸发装置的流程	263
5-4 多效蒸发中效数的限制	265
第三节 蒸发设备	265
5-5 蒸发器	266
5-6 蒸发器的辅助装置	271
第四节 蒸发器的生产能力和生产强度	272
5-7 蒸发器的生产能力	272
5-8 蒸发器的生产强度	272
习题	273
本章符号说明	274
习题参考答案	275
附 录	278
1. 单位换算表	278
2. 某些气体的重要物理性质	282
3. 某些液体的重要物理性质	283
4. 某些固体材料的重要物理性质	284
5. 空气的重要物理性质 ($P=101.3\text{kN/m}^2$)	285
6. 水的重要物理性质	286
7. 水的饱和蒸汽压 (-20 至 100°C)	287
8. 饱和水蒸汽表 (按温度排列)	287
9. 饱和水蒸汽表 (按压力排列)	288
10. 水的粘度 (0 至 100°C)	291
11. 液体粘度共线图和密度	292
12. 气体的粘度共线图	293
13. 气体的比热 ($P=101.3\text{kN/m}^2$)	295
14. 液体的比热	297
15. 液体气化潜热共线图	299
16. 某些气体的导热系数图	301
17. 某些液体的导热系数图	302
18. 某些固体材料的导热系数	302
19. 无机盐水溶液在大气压下的沸点	304
20. 管子规格	305
21. 离心泵规格	306
22. 4-72-11型离心通风机规格 (摘录)	310
23. 列管式热交换器规格 (摘录)	311

绪 论

一、化工原理的研究对象

《化工原理》是学习化学工业生产过程中单元操作的一门化学工程技术课程。它是当代《化学工程》学科的一个基础组成部分。

《化学工程》是以化学工业的生产过程为研究对象。化学工业是将原料大规模进行加工处理,使其不仅在物理性质上发生变化,而且在化学性质上也发生变化生成新物质,而成为所需要产品的工业。这种以化学变化为主要特点的化学工业,其原料广泛,产品种类繁多,生产过程复杂多样且差别很大。但是,各种化工产品的生产过程,不论其生产规模大小,其核心皆为化学反应过程及其设备——反应器。为了使化学反应过程得以有效地进行,反应器内必须保持某些优惠条件,如适宜的温度、压力和物料的组成等。为此,原料必须经过一系列预处理以提纯并达到必要的温度和压力等。这类过程称为前处理。反应产物也同样需要经过各种处理过程来分离精制等,以获得最终成品或中间产品。上述化学反应前、后处理中所进行的各个过程,多数是纯物理过程,但却是化工生产中所不可缺少的步骤。这一类过程称为单元操作。实际上,在一个现代化的、设备林立的大型化工厂中,反应器为数并不多,绝大多数的设备中都是进行着单元操作。也就是说,在现代化学工业生产过程中的单元操作占有着企业的大部设备和操作费用。由此可见,单元操作在化学工业生产过程中的重要地位。

按各物理过程的目的,同时兼顾过程的原理、相态,可将各种前、后处理过程归纳成各类单元操作。常用的单元操作如表0-1中所列出的几种。此外尚有搅拌、结晶、萃取、冷冻等。

单元操作具有下列特点:(1)它们都是物理性操作,这些操作只改变物料的状态或其

表 0-1 化工常用单元操作

单元操作	目 的	物 态	原 理
流体输送	输 送	液 或 气	输入机械能
沉 降	非均相混合物的分离	液-固 气-固	密度引起的沉降运动
过 滤	非均相混合物的分离	液-固 气-固	利用过滤介质使固体颗粒与液体分离
加热、冷却	升温、降温,改变相态	气或液	利用温度差引入或导出热量
蒸 发	溶剂与不挥发性溶质的分离	液 体	供热以汽化溶剂
气体的吸收	均相混合物的分离	气 体	各组分在溶剂中溶解度不同
液体的蒸馏	均相混合物的分离	液 体	各组分间的相对挥发的不同
干 燥	去湿	固 体	供热气化

物理性质，并不改变物料的化学性质。（2）它们都是化学工业生产过程中共有的操作。例如，制糖工业中稀糖液的浓缩与制碱工业中苛性钠稀溶液的浓缩，都是通过蒸发这一单元操作而实现的；酒精工业中酒精的提纯与石油化工中烃类的分离，都是要进行蒸馏操作等。所以，各种化工产品的生产过程，可由若干单元操作与化学反应过程作适当的串联组合而构成。（3）某单元操作用于不同的化工产品生产过程时，其基本原理并无不同，而且进行该操作的设备往往也是通用的。如蒸发操作中使用的蒸发器；蒸馏操作中使用的蒸馏塔。当然，在具体运用时尚要结合各化工产品生产过程的特点来考虑，如原料与产品的物理、化学性质，生产规模的大小等。

本课程——化工原理的研究对象，就是研究化学工业生产过程中，所使用的各个单元操作的基本原理及设备。

二、本课程的任务、性质与内容

在教学计划中，本课程属于技术基础课。在中等专业中只讨论一些应用较为广泛的单元操作。具体内容可分为以下三个部分：

（1）讨论流体流动及流体和与其相接触的固相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单元操作，如流体输送、沉降、过滤、离心分离。

（2）讨论传热的基本规律，以及受这些基本规律支配的单元操作，如加热、冷却、蒸发。

（3）讨论物质透过相界面迁移过程的基本规律，以及受这些基本规律支配的单元操作，如液体的蒸馏、气体的吸收、液-液萃取、固体的干燥。

此外，还对遵循热力学定律的冷冻操作，作简要的说明。

本课程是既不同于自然科学中的基础学科，又区别于具体的化工产品生产工艺学。它是将基础学科中的一些基本原理用来研究化学工业生产过程中内在本质规律问题的一门综合性的工程技术课程。它不仅是一门为化学工业生产服务的，内容十分广泛的工程技术学科，同时也是一切涉及物质变化的工业部门，如冶金工业、轻工业、原子能工业以及环境保护等所必需的。因此，它具有十分广泛的实用性。

学习本课程的主要任务是掌握各个单元操作的基本规律，熟悉其操作原理及有关典型设备的构造、性能和基本计算方法等，并能用以分析和解决工程技术中的一般问题。以便对现行的化学工业生产过程进行管理，使设备能正常运转、进而对现行的生产过程及设备作各种改进以提高其效率，从而使生产获得最大限度的经济效益。

三、化学工程发展简史和展望

化学工程是随着化学工业的发展而逐渐形成和发展的。化学工程的发展经历了萌芽时期，以单元操作作为标志的奠基时期，化学工程学时期以及近期四个阶段。

化学工业具有悠久的历史，而现代化学工业是开始于十八世纪产业革命以后的欧洲。当时，纯碱、硫酸等无机化学工业成为现代化学工业的开端。十九世纪以煤为基础原料的有机化学工业在欧洲也发展起来。那时的煤化学工业按其规模尚不十分巨大，主要着眼于苯、甲苯、酚等各种化学产品的开发。值得提出的是，在上述化学工业生产过程中应用了吸收、蒸馏、过滤、干燥等操作。所以在十九世纪末，在欧洲已有化学工程的萌芽。

十九世纪末，二十世纪初大规模的石油炼制业是产生化学工程的基础。到本世纪二十年代，化学工程即作为一门专门的新兴的工程技术而被确立。三十年代在美国出版了第一

部《化学工程原理》一书，这就是早期以“单元操作”为中心的初期化学工程，从而奠定了化学工程的基础。

四十年代后期化学工程进入第三个发展阶段——化学工程学时期。五十年代中期提出传递过程原理，把单元操作进一步解析成三种基本传递过程，即动量传递、热量传递和质量传递以及三者之间的联系。同时，在反应过程中将化学反应与动量、热量和质量传递一并研究而形成了化学反应工程学。伴随着大规模的化学工业发展和传递过程原理以及化学反应工程学的开拓，又由于同期电子计算技术的跃进促进了化学工程学另一个分支“化工系统工程学”的兴起。

进入七十年代以后，化学工程向着更加高级化、应用更加广泛方面发展。与此同时，化学工程与其它科学技术相互交叉渗透产生一些更新的边缘技术科学，如生物化学工程、医学化学工程、地热化学工程、环境化学工程等等。展望2000年，化学工程将面临一系列新的挑战，其中最主要的是来自能源、原料和环境保护三大方面。此外，化学工程还将对农业、食品和食品加工，城市交通及建设以及保健等方面作出贡献。

我国是世界文明古国之一，古代劳动人民在长期的生产实践中，在科学技术和化学工艺方面有不少的发明创造，对于我国社会的发展和世界文明，曾作出卓越的贡献。如陶瓷、冶金、火药、燃料、酿酒、染色、造纸和无机盐等的生产技术，一直到西方出现资本主义以前，都走在世界前列。现代许多化工生产是在古代化学工艺的基础上发展起来的。

在化学工程形成和发展过程中，早在本世纪的三、四十年代起，我国的专家学者们就对化学工程学作出了有价值的贡献，如在流体力学、传热、传质理论、蒸馏、结晶、萃取、干燥等方面的工作，对于早期化学工程学的发展，都是有贡献的。但化学工程学在我国的发展，主要是在新中国成立以后，在中国共产党和人民政府的正确领导下，根据国家经济建设与国防建设的需要，按照学科规划的安排发展起来的。三十多年来，在单元过程及设备的强化和提高效率、化工热力学与化工基础数据、基础研究工作、系统研究和过程模拟、化工新技术开发这五个主要方面，作了大量的工作，取得了一批成果，并为国家的经济建设作出了贡献。在今后我国实现四个现代化的进程中，化学工程学科将得到更大的发展。

四、基本概念

在讨论各个单元操作时，常引用下列四个基本概念。

1. 物料衡算

根据质量守恒定律，则在任何一个化工生产过程中，凡向该过程输入的物质质量必等于从该过程输出的物质质量与积累于该过程中的物质质量之和，即

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

式中 ΣF ——输入物质质量的总和，kg；

ΣD ——输出物质质量的总和，kg；

A ——积累在该过程中的物质质量，kg。

式 0-1 是物料衡算的通式。以此式可对总物料或其中某一组成列出物料衡算式，进行求解。

物料衡算是化工计算中重要内容之一，它对于设备尺寸的设计和生产过程的进行，具有重要的意义。

2. 能量衡算

根据能量守恒定律,则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从该过程输出的能量。能量衡算应包括与该过程操作有关的各种形式的能,如热能、机械能、电能、化学能等。但是在许多化工生产过程中所涉及的能量仅为热能,所以能量衡算在本课程中,常简化为热量衡算。热量衡算基本关系式可表示为

$$\Sigma Q_D = \Sigma Q_B + q \quad (0-2)$$

式中 ΣQ_D ——输入该过程的各物料带入的总热量, J;

ΣQ_B ——输出该过程的各物料带出的总热量, J;

q ——该过程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, J。

通过热量衡算,可以了解在生产操作中热量的利用和损失情况;而在生产过程与设备设计时,运用热量衡算可以确定是需要从外界引入热量或向外界输出热量的问题。

3. 平衡关系

物系在自然发生变化时,其变化必趋于一定方向,如任其发展,结果必达到平衡关系为止。例如液体从水位较高的容器流到水位较低的容器时,将一直进行到两个容器中水位相等为止;又如热量从较热的物体传向较冷的物体时,将一直进行到两个物体的温度相等为止;再如盐在水中溶解时,将一直进行到达于饱和时为止等。平衡状态表示的就是各种自然发生的过程可能达到的极限程度,除非影响物系的情况有变化,否则其变化的极限是不会改变的。而平衡关系则为各种定律所表明,如热力学第二定律、拉乌尔定律等。

对于许多化学工业生产过程,可以从物系平衡关系来推知其能否进行以及能进行到何种程度。平衡关系也为设备尺寸的设计提供了理论依据。

4. 过程速率

任何一个物系,如果不是处于平衡状态,就必然发生使物系趋向平衡的过程,但过程以如何的速率趋向平衡,这不决定于平衡关系,而是被多方面的因素所影响,由于对支配各种物系变化速率的因素,有些还不清楚,所以目前过程速率是近似的采用推动力除以阻力表示,即

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

这里的过程推动力,可依具体过程而有不同的理解,但必要的条件是物系在平衡状态时它必须等于零。例如,引起冷物体与热物体间热流动的推动力是冷、热两物体间的温度差,若温度差等于零,则此两物体间就互成热平衡,彼此间就不会有热的流动。至于过程的阻力则较为复杂,具体情况要作具体分析。

过程速率与推动力成正比,而与过程阻力成反比,这三者的相互关系,类似于电学中的欧姆定律。

上述四个基本概念,在讨论单元操作时,常被引用来反应过程中物料的变化规律。此外在具体解决化学工业建设和生产问题时,它们也是制定技术经济比较方案的重要依据。

五、单位及单位换算

在本课程的有关计算中,将涉及到物质的各种物理量,如密度、压力等。所有这些物理量的大小,是用数字和计量单位来表示的。由于长期以来,整个科学技术领域存在着多

种单位制单位并用的局面，故物理量的大小常用不同单位制单位来表示。1984年2月国务院发布了关于在我国统一实行法定计量单位的命令，现在我国正逐步推行法定计量单位。在推行法定计量单位的过程中，熟悉常遇到的各种不同单位制单位以及掌握不同单位的换算方法是非常必要的。

1. 法定计量单位

我国颁布的法定计量单位是以国际单位制单位为基础的。现对国际单位制单位和法定计量单位，分别介绍于下：

(1) 国际单位制单位 国际单位制（英文缩写SI）是1960年第十一届国际计量大会通过的一种新的单位制度。在这种单位制中规定了七个基本单位和两个辅助单位，见表0-2。由这七个基本单位和两个辅助单位构成不同科学技术领域中所需要的全部单位。其用于构成十进倍数和分数单位的词头列于表0-3中。SI制还规定了具有专门名称的导出单位，可以用它们和基本单位一起表示其它的导出单位，现将化工常用国际单位制中具有专门名称的导出单位列于表0-4中。

(2) 法定计量单位

在我国发布的统一实行法定计量单位的命令中，规定了我国法定计量单位（简称法定

表 0-2 国际单位制的基本单位和辅助单位

类 别	物 理 量	单 位 名 称	单位符号
基本单位	长度	米	m
	质量	千克（公斤）	kg
	时间	秒	s
	电流	安[培]	A
	热力学温度	开[尔文]	K
	物质的量	摩[尔]	mol
	发光强度	坎[德拉]	cd
辅助单位	平面角	弧度	rad
	立体角	球面度	sr

注：1. ()内的字为前者同义语。

2. []内的字，是在不致混淆的情况下，可以省略的字。

表 0-3 国际单位制用于构成十进倍数和分数单位的词头

所表示的因数	词头名称	符 号	所表示的因数	词头名称	符 号
10^{18}	艾[可萨]	E	10^{-1}	分	d
10^{15}	珀[它]	P	10^{-2}	厘	c
10^{12}	太[拉]	T	10^{-3}	毫	m
10^9	吉[加]	G	10^{-6}	微	μ
10^6	兆	M	10^{-9}	纳[诺]	n
10^3	千	k	10^{-12}	皮[可]	p
10^2	百	h	10^{-15}	飞[母托]	f
10^1	十	da	10^{-18}	阿[托]	a

注：[]内的字，可在不致混淆的情况下省略。

表 0-4 化工常用国际单位制中具有专门名称的导出单位

物 理 量	单位名称	单位符号	用其它导出 单位表示	用基本量 表 示
频率	赫[兹]	Hz		s^{-1}
力; 重力	牛[顿]	N		$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
压力, 压强; 应力	帕[斯卡]	Pa	N/m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
能量; 功; 热	焦[耳]	J	$N \cdot m$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
功率	瓦[特]	W	J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
摄氏温度	摄氏度	$^{\circ}C$		

注: [] 内的字, 在不混淆的情况下, 可以省略。

单位) 是以国际单位制单位为基础, 保留少数国内外习惯或通用的非国际单位制单位。我国法定计量单位包括: (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) 由以上这些单位构成的组合形式的单位; (6) 由词头和以上这些单位所构成的十进倍数和分数单位。现将国家选定的部分非国际单位制单位列于表0-5中。

表 0-5 国家选定的部分非国际单位制单位

物 理 量	单位名称	单位符号	换算关系和说明
时 间	分	min	$1 \text{ min} = 60 \text{ s}$
	[小]时	h	$1 \text{ h} = 60 \text{ min} = 3600 \text{ s}$
	天(日)	d	$1 \text{ d} = 24 \text{ h} = 86400 \text{ s}$
平 面 角	[角]秒	($''$)	$1'' = (\pi/648000) \text{ rad}$ (π 为圆周率)
	[角]分	($'$)	$1' = 60'' = \pi/10800 \text{ rad}$
	度	($^{\circ}$)	$1^{\circ} = 60' = (\pi/180) \text{ rad}$
旋转速度	转每分	r/min	$1 \text{ r/min} = (1/60) \text{ s}^{-1}$
质量	吨	t	$1 \text{ t} = 10^3 \text{ kg}$
体积	升	L(l)	$1 \text{ L} = 1 \text{ dm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$

注: 1. [] 内的字, 在不致混淆的情况下, 可以省略。

2. () 内的字为前者的同义语。

3. 角度单位度、分、秒的符号不处于数字后时, 要用括弧。

4. r 为“转”的符号。

5. 升的符号中, 小写字母 l 为备用符号。

2. 过去曾用过的几种计量单位

(1) 厘米·克·秒制单位 厘米·克·秒制 (简称 CGS 制) 又称物理单位制。其基本单位是厘米、克和秒。其它物理量的单位可以通过物理和力学的定律导出, 如力的单位可由牛顿第二定律 (力 = 质量 × 加速度) 导出, 其单位为克·厘米/秒²。在以往的科学研究和物化数据手册中, 常以此单位制单位作为计量单位。

(2) 米·千克 (公斤)·秒制单位 米·千克 (公斤)·秒制 (简称 MKS 制) 又称实用单位制。其基本单位是米·千克 (公斤) 和秒。同理, 其它物理量的单位, 亦均由其基本单位导出, 如力的单位是千克·米/秒², 称为牛顿。

(3) 米·公斤 (力)·秒制单位 米·公斤 (力)·秒制 (简称 MKfS 制) 又称工程单位

制。其基本单位是米、公斤（力）和秒。1公斤（力）等于在真空中以MKS制量度的1千克（公斤）物体在重力加速度为 9.807米/秒^2 的地球表面附近所受到的重力。其它物理量的单位，亦均由其基本单位导出，如质量的单位是公斤（力）·秒²/米。本课程在以往二十余年中，多采用此单位制单位作为计量单位。

本书采用我国法定计量单位。

3. 单位换算

在我国虽已推行法定计量单位，但工程单位制在现行生产和设计中使用仍很普遍，而且许多物理、化学数据有许多还是以物理单位制单位表示。因此，从各种来源得到的数据，其单位不一定符合法定计量单位的要求。在使用这些数据时，则必须将其换算成法定计量单位。现介绍单位间的换算方法。

物理量由一种单位制的单位转换成另一种单位制的单位时，量本身并无变化，只是在数字上要改变。在进行单位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1m的长度和100cm的长度是两个相等的物理量，但其所用的单位不同，即

$$1\text{m}=100\text{cm}$$

那么，m和cm两种单位间的换算因数便是

$$\frac{100\text{cm}}{1\text{m}}=100\frac{\text{cm}}{\text{m}}$$

又如 1m^3 体积等于 10^6cm^3 的体积，则将 m^3 换算成 cm^3 的换算因数就是 10^6 。

化工中常用单位间的换算因数可从本书附录中查得。

单位换算的规则为：（1）一种物理量的大小，由一种单位制的单位换算成另一种单位制的单位时，其数字也跟着改变，即要将原单位的数字乘以换算因数，才可以得到新单位的数字。（2）在一个组合形式的单位（简称组合单位）中，任何一个单独的单位要换算成其它单位时，要连同换算因数一起换算。

例0-1 求把能量中 $\text{kgf}\cdot\text{m}$ 单位换算成 $\text{N}\cdot\text{m}$ 单位时的换算因数。

解：由附录查知

$$1\text{kgf}=9.807\text{N}$$

因此所求换算因数 $=9.807\times 1=9.807$ 。

例0-2 求把密度中 g/cm^3 单位换算成 kg/m^3 单位时的换算因数。

解：由附录查知

$$1\text{g}=\frac{1}{1000}\text{kg}, \quad 1\text{cm}=\frac{1}{100}\text{m}$$

因此所求换算因数 $=\frac{10^{-3}}{(10^{-2})^3}=10^3$

例0-3 一标准大气压的压力等于 $1.033\text{kgf}/\text{cm}^2$ ，将其换算成SI单位。

解：要求SI单位表示标准大气压，则工程单位 kgf/cm^2 中的 kgf 须转换为N， cm^2 须转换为 m^2 。由附录查知 kgf 与N，及 cm 与m的换算关系为：

$$1\text{kgf}=9.807\text{N}, \quad 1\text{cm}=\frac{1}{100}\text{m}$$

$$\begin{aligned}
 \text{因此 一标准大气压} &= 1.033 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \left(\frac{9.807 \text{ N}}{1 \text{ kgf}} \right) \left(\frac{1}{\left(\frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} \right)^2} \right) \\
 &= (1.033 \times 9.807 \times 100^2) \left(\frac{\text{kgf} \times \text{N} \times \text{cm}^2}{\text{cm}^2 \times \text{kgf} \times \text{m}^2} \right) \\
 &= 1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2 \\
 &= 101.3 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

例0-4 通用气体常数 $R = 82.06 \text{ atm} \cdot \text{cm}^3 / \text{mol} \cdot \text{K}$ ，将其换算成以下列单位表示：

(a) 工程单位：千克(力)·米/千克分子·K；(b) 国际单位：kJ/kmol·K。

解：(a)

$$\begin{aligned}
 R &= 82.06 \frac{\text{atm} \cdot \text{cm}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}} = 82.06 \left(\frac{10330 \text{ kgf}}{\text{m}^2} \right) (0.01 \text{ m})^3 \left(\frac{1}{0.001 \text{ kmol}} \right) \left(\frac{1}{\text{K}} \right) \\
 &= 848 \text{ kgf} \cdot \text{m} / \text{kmol} \cdot \text{K}
 \end{aligned}$$

(b) 国际单位

$$\begin{aligned}
 R &= 82.06 \frac{\text{atm} \cdot \text{cm}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}} = 82.06 \left(\frac{1.013 \times 10^5 \text{ N}}{\text{m}^2} \right) (0.01 \text{ m})^3 \\
 &\quad \left(\frac{1}{0.001 \text{ kmol}} \right) \left(\frac{1}{\text{K}} \right) \\
 &= 8313 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{kmol} \cdot \text{K} = 8.313 \text{ kJ} / \text{kmol} \cdot \text{K}
 \end{aligned}$$

4. 单位的正确运用

化工计算中所用的公式可分为两类。

一类公式是根据物理规律建立的，称为理论公式。式中的符号各代表一个物理量，因此又称为物理量方程，如质量和力的关系可以用牛顿第二定律表示，即

$$F = ma$$

式中， F 是作用于物体上的力， m 是物体的质量， a 是物体在力所作用方向上的加速度。这一类理论公式，在单位上总是一致的，即任何同属一个单位制的单位都可以用，但中途不能改变。若将某一单位制的数据代入这类理论公式中，解出的结果总是属于同一单位制的。

另一类公式是根据实验整理出来的经验公式。这一类公式中的每一个符号都要用指定的单位数值代入，所得结果属于什么单位也是指定的。对于此类公式，代入以前要逐一核实数据的单位是否符合经验公式中的规定，这时只须将数字代入，则算出的结果就符合公式所规定的单位。例如，水蒸汽在空气中的扩散系数计算的经验公式为

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

式中 D ——扩散系数， ft^2/h ；

p ——压力， atm ；

T ——绝对温度， $^{\circ}\text{R}$ ； $\left(1^{\circ}\text{R} = \frac{1}{1.8} \text{ K} \right)$ 。

在使用上式时，都必须采用指定的单位。

所谓正确地运用单位，就是要注意到上述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。

习 题

- [0-1] 求把压力单位 kgf/cm^2 换算成 N/m^2 和 kgf/m^2 的换算因数。
- [0-2] $7\text{kgf}/\text{m}^2$ 等于多少 N/m^2 ? 多少 Pa ?
- [0-3] $5\text{kgf}\cdot\text{m}/\text{s}$ 等于多少 $\text{N}\cdot\text{m}/\text{s}$? 多少 J/s ? 多少 kW ?
- [0-4] 将 $1\text{kcal}/\text{h}$ 换算为功率 W 。
- [0-5] $4\text{L}/\text{s}$ 等于多少 L/min ? 多少 m^3/s ? 多少 m^3/h ?

第一章 流体流动

流体是指具有流动性的物体，包括液体和气体。在化学工业生产过程中所处理的物料，包括原料、半成品和成品等，大多都是流体。按照生产工艺的要求，制造产品时往往把它们依次输送到各设备内，进行化学反应或物理变化；制成的产品又常需要输送到贮罐内贮存。上述过程进行的好坏、操作费用及设备的投资都与流体的流动状态有密切的关系。因此，流体流动在化学工业生产上占有重要的地位。此外，它也是学习本课程的基础。

在研究流体流动时，我们总是把由不断运动着的大量分子所构成的流体看成是由无数分子集团所组成的连续介质，而不再将流体看成是由分子组成的了。把每个分子集团称为质点或称为流体微团，其大小与容器和管路相比是微不足道的。质点在流体内部一个紧挨一个，它们之间没有任何空隙，即可认为流体充满其占据的空间。这样就撇开了流体内部复杂的分子运动，而把注意力集中在研究流体在外力作用下的宏观的机械运动。当然上述流体连续性的假设不能任意推广，如在高度真空下的气体，由于气体分子稀薄，就不能再视为连续介质了。

第一节 流体静力学基本方程

现在研究流体平衡时内部压力变化的规律，及其在化工生产中的应用。流体平衡是指流体所受力的平衡，是流体流动的一个特殊形式。根据课程的性质，这里只讨论流体在重力和压力作用下的平衡规律。下面先对流体的密度，流体静压力和作用在流体上的力加以说明。

1-1 流体的密度

在均质流体中，流体所具有的质量与其所占有体积之比称为密度，以 ρ 表示。若以 m 代表体积为 V 的流体的质量，则

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

国际单位制中密度的单位是： kg/m^3 。

单位质量流体的体积，称为流体的比容，以 v 表示之。显然，它与密度互为倒数，即

$$v = \frac{1}{\rho} \text{ m}^3/\text{kg} \quad (1-2)$$

某液体的密度 ρ 与标准大气压下 4°C (277 K) 的纯水的密度 $\rho_{\text{水}}$ 的比值称为相对密度。习惯上称为液体的比重，以 s 表示之，即

$$s = \frac{\rho}{\rho_{\text{水}}} \quad (1-3)$$

因为水在标准大气压下 4°C 时的密度为 $1000\text{ kg}/\text{m}^3$ ，所以由式 (1-3) 知 $\rho = 1000 s$ ，即将比重乘以 1000 即得该液体的密度 ρ ，单位是 kg/m^3 。