

中等职业学校教材

化工原理

第二版

上册

► 王振中 张利锋 编



化学工业出版社
教材出版中心

中等职业学校教材

化工原理

第二版

上册

王振中 张利锋 编



化学工业出版社
教材出版中心

· 北京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

化工原理·上册/王振中, 张利锋编. —2 版. —北京:
化学工业出版社, 2005. 5
中等职业学校教材
ISBN 7-5025-7043-8

I. 化… II. ①王…②张… III. 化工原理-专业学
校-教材 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 046398 号

中等职业学校教材

化 工 原 理

第二版

上 册

王振中 张利锋 编

责任编辑: 于 卉

责任校对: 顾淑云 于志岩

封面设计: 于 兵

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话 (010)64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

化学工业出版社印刷厂印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 17¼ 字数 422 千字

2005 年 7 月第 2 版 2005 年 7 月北京第 19 次印刷

ISBN 7-5025-7043-8

定 价: 26.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

再 版 前 言

本书是 1986 年由化学工业出版社出版的王振中编《化工原理》(上、下册)的修订版。为适应中等职业教育蓬勃发展的新形势,修订版更注重提高学生理论联系实际的能力,培养学生工程技术观点和分析问题的能力。

本书重点讲述化工常用单元操作的基本原理、典型设备操作和化工基本计算。在修订版中:①删除了设计计算和偏深的内容;②更新了部分章节的内容与顺序;③新增加了结晶内容;④删去了原书中第十章冷冻;⑤精选了各章习题;⑥更新了附录中部分内容。

本书由河北化工医药职业技术学院王振中、张利锋合编。结晶一章由张利锋执笔;其余各章由王振中修订。张利锋修订了全书各章习题。全书由河北化工医药职业技术学院谭弘校阅,并提出了许多宝贵的修改意见。

全书按上、下两册出版。上册除绪论、附录外,包括流体流动、流体输送、非均相物系的分离、传热、蒸发共五章内容。下册除附录外有蒸馏、吸收、液-液萃取、干燥、结晶共五章内容。每章章末附有习题,书末配有各章习题的参考答案。

在本书编写过程中,得到河北化工医药职业技术学院和同事们的的大力支持,在此表示感谢。由于编者水平有限,恳切希望读者给予批评指正。

编 者

2005 年 2 月

目 录

绪论	1
一、化工原理的研究对象	1
二、本课程的内容、性质与任务	2
三、基本概念	2
四、工程观点	3
五、单位及单位换算	4
习题	7
第一章 流体流动	8
第一节 流体静力学基本方程	8
一、流体的密度	8
二、作用在流体上的力	9
三、流体静压强	10
四、流体静力学基本方程	11
五、流体静力学基本方程的应用举例	13
第二节 流体在管内的流动	18
一、流量与流速	18
二、稳定流动和不稳定流动	18
三、流体稳定流动时的物料衡算——连续性方程	19
四、流体稳定流动时的能量衡算——伯努利方程	20
五、伯努利方程的应用	25
第三节 流体在管内的流动阻力	29
一、流体的黏性和牛顿黏性定律	29
二、流体的流动形态	32
三、流体在圆管内流动时的速度分布	34
四、湍流时滞流内层和缓冲层	35
五、流动阻力的计算	35
六、流体在直管中的流动阻力	35
七、管路上的局部阻力	42
八、管路总能量损失的计算	46
第四节 流体输送管路的计算	50
一、简单管路的计算	50
二、复杂管路计算的原则	52
三、管道直径的选择和计算	54
第五节 流速和流量的测定	55
一、测速管	55

二、孔板流量计	56
三、文丘里流量计	60
四、转子流量计	61
本章主要符号说明	63
习题	64
第二章 流体输送	69
第一节 化工管路	69
一、管子、管件与阀门	69
二、管路的连接	74
三、管路的热补偿	76
四、管路布置的基本原则	76
第二节 液体输送机械	77
一、离心泵	77
二、其他类型泵	94
第三节 气体输送与压缩机械	98
一、离心通风机、鼓风机与压缩机	99
二、往复压缩机	102
三、回转式鼓风机与压缩机	108
四、真空泵	109
本章主要符号说明	111
习题	112
第三章 非均相物系的分离	115
第一节 沉降	116
一、重力沉降	116
二、离心沉降	123
第二节 过滤	128
一、过滤操作的原理	128
二、过滤基本方程式	130
三、恒压过滤方程式	132
四、滤饼的洗涤	133
五、过滤设备	135
第三节 离心分离	140
一、影响离心分离的主要因素	140
二、离心机	141
第四节 气体的其他净制设备	143
一、袋滤器	144
二、文丘里除尘器	144
三、泡沫除尘器	144
四、电除尘器	145
本章主要符号说明	146

习题	146
第四章 传热	148
第一节 概述	148
一、传热的基本方式	148
二、工业换热方式	149
三、载热体及其选用	150
四、稳定传热和不稳定传热	151
第二节 热传导	151
一、傅里叶定律和热导率	151
二、平壁的稳定热传导	153
三、圆筒壁的稳定热传导	155
第三节 对流传热	158
一、对流传热分析	159
二、壁面和流体间的对流传热速率	159
三、影响对流传热系数的因素及其一般关联式	160
四、对流传热系数的经验关联式	163
第四节 传热过程计算	169
一、传热基本方程	169
二、热负荷的计算	170
三、传热温度差的计算	173
四、传热系数的计算和测定	180
五、传热计算举例	184
六、壁温的估算	186
第五节 管路和设备的热损失与热绝缘	187
一、管路和设备的热损失	187
二、热绝缘	187
第六节 换热器	189
一、间壁式换热器	189
二、间壁式换热器的比较	196
三、换热器传热过程的强化	197
本章主要符号说明	198
习题	198
第五章 蒸发	202
第一节 蒸发设备	203
一、蒸发器	203
二、蒸发器的性能比较	207
三、蒸发器的辅助装置	208
第二节 单效蒸发	208
一、单效蒸发的计算	208
二、蒸发器中传热温度差的计算	213

三、蒸发器的生产能力和生产强度	218
第三节 多效蒸发	219
一、多效蒸发装置的流程	220
二、多效蒸发中效数的限制	221
本章主要符号说明	221
习题	222
习题参考答案	223
附录	226
一、常用单位的换算	226
二、某些气体的重要物理性质	229
三、某些液体的重要物理性质	229
四、某些固体的重要物理性质	231
五、干空气的物理性质 (101.33kPa)	231
六、水的物理性质	232
七、水在不同温度下的饱和蒸汽压与黏度 ($-20\sim 100^{\circ}\text{C}$)	233
八、饱和水蒸气表 (按温度顺序排)	234
九、饱和水蒸气表 (按压强顺序排)	236
十、某些液体的热导率	237
十一、某些气体和蒸气的热导率	239
十二、某些固体材料的热导率	240
十三、液体的黏度和密度	241
十四、101.33kPa 压强下气体的黏度	244
十五、液体的比热容	246
十六、101.33kPa 压强下气体的比热容	248
十七、汽化热 (蒸发潜热)	250
十八、液体的表面张力	252
十九、壁面污垢热阻 (污垢系数) ($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$)	254
二十、无机盐水溶液的沸点	255
二十一、管子规格 (摘录)	256
二十二、离心泵规格 (摘录)	257
二十三、离心通风机规格	262
参考文献	264

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,形成了数以万计的化学生产工艺。目前,全世界化工产品已超过5万多种,中国生产的各种规格的化工产品已达到了3.7万余种。综观各种化工产品的生产过程,不论其生产规模大小,都是由化学反应及其设备——反应器,和若干物理操作有机组合而成。其中反应器是化工生产的核心,但为了使化学反应过程得以有效地进行,反应器内必须保持适宜的工艺条件,如适宜的温度、压强和物料的组成等。为此,原料必须经过一系列预处理以提纯原料的组成,并达到必要的温度和压强等,这类过程称为前处理。反应后的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。上述反应前、后处理中所进行的各个过程是物理过程,但却是化工生产中不可缺少的步骤,这一类化工生产中具有共同物理变化特点和相同目的的基本操作过程称为化工单元操作,简称单元操作。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,单元操作占有着企业的大部分设备和操作费用。由此可见,单元操作在化学工业生产过程中的重要地位。

按照物理过程的目的,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。此外尚有固体流态化、搅拌、结晶、膜分离等。

表 0-1 化工常用单元操作

单元操作名称	目 的
流体输送	以一定流量将流体从一处送到另一处
沉降	从气体或液体中分离悬浮的固体颗粒、液滴或气泡
过滤	从气体或液体中分离悬浮的固体颗粒
加热、冷却	使物料升温、降温或改变相态
蒸发	使溶液中溶剂受热汽化从而与不挥发的溶质分离,达到溶液浓缩的目的
气体的吸收	用液体吸收剂分离气体混合物
液体的蒸馏	利用均相液体混合物中各组分挥发度不同,使液体混合物分离
萃 取	用液体萃取剂分离均相液体混合物
干 燥	加热固体使其所含液体汽化而除去

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，但不同的化工生产过程中所包含的单元操作数目、名称与顺序各异；③某单元操作用于不同的化工产品生产过程时，其基本原理相同，而且进行该操作的设备往往也是通用的。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。

二、本课程的内容、性质与任务

在教学计划中，本课程属于技术基础课。在中等职业教育中，只讨论一些应用较为广泛的单元操作，具体内容如下。

① 讨论流体流动及流体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、非均相物系的分离。

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，如传热、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。

④ 讨论同时遵循传热、传质规律的单元操作，如干燥、结晶。

本课程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，内容十分广泛的工程技术学科，同时也是涉及物质变化的工业部门，如冶金工业、轻工业、制药工业、原子能工业、能源、环境等工业及技术部门所必需的。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做各种改进，以提高其效率，从而使生产获得最大限度的经济效益。

三、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，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

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

式中 $\sum F$ ——输入物质质量的总和，kg；

$\sum D$ ——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分列出物料衡算式，进行求解。对于操作参数不随时间变化的连续稳定过程，积累的物质质量为零，式(0-1)可以简化为

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

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与积累于该过程中的能量之和。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。对于连续稳定过程，积累的热量为零，热量衡算基本关系式可表示为

$$\sum Q_F = \sum Q_D + q \quad (0-3)$$

式中 $\sum Q_F$ ——输入该过程的各物料带入的总热量，kJ；

$\sum Q_D$ ——输出该过程的各物料带出的总热量，kJ；

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，kJ。

3. 平衡关系

物系在自然发生变化时，其变化必趋向于一定的方向，如任其发展，结果必达到平衡状态为止。例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，将一直进行到饱和为止等。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，如亨利定律、拉乌尔定律等。

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，而是由多方面因素所决定。由于对影响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来表示，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。过程的阻力是各种因素对过程速率影响的总的体现，较为复杂，具体情况要做具体分析。

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

四、工程观点

通过《化工原理》课程的学习，要初步掌握化工过程的开发、设计与操作的有关方法。这里的开发，是指从已研究出的某些化工过程所包括的步骤为基础，把这些步骤连接起来使得生产进行时，在经济上合理有利。其主要工作就是探索最佳的流程与设备，定出最佳的操作条件。设计通常是规定出设备应具有的性能，选出合适的形式并确定其主要尺寸。操作则除了对生产过程进行管理并使设备正常运转以外，更重要的是对现有的生产过程与设备做各种改进以提高其效率。对中等职业学生学习本课程，在上述化工过程开发、设计与操作方面，要求较少。这里需要引起充分重视的是：上述问题都具有强烈的工程性，具体表现在以下几方面。

1. 过程影响因素多

对于每一种单元操作，其影响因素通常包括物性因素（如密度、黏度）、操作因素（如温度、压强、流量）和结构因素（如设备形状、尺寸）三类。

2. 过程制约条件多

在工业上要实现一个具体的生产过程，客观上存在许多制约条件，如原料来源、冷却水

来源、可供应的设备及其结构材料的质量和规格、当地的气温和气压变化范围等。此外，还受安全防火、环保、设备加工、安装以及维修等条件的制约。

3. 经验公式与经验数据多

由于工业过程的复杂性，许多情况下，单纯依靠理论分析还解决不了问题，往往还需要结合实验（包括工业试验），因此产生出许多经验公式与经验数据。它们都是在长期的生产实践中总结出来的，熟练地运用这些经验公式与经验数据，做到心中有“数”、有“式”，是十分重要的。

4. 效益是评价工程合理性的最终判据

自然科学研究的目的是希望发现规律，而工业过程的目的则是为了最大限度地取得经济效益和社会效益，这是工业过程的出发点，也是评价其是否成功的标志。

因此，在分析有关过程时，要从工程实际出发，学会从多种角度，尤其是经济角度去考虑技术问题，这是学习《化工原理》课程需时时注意的关键所在。

五、单位及单位换算

任何物理量的大小都是由数字和单位联合来表达的。由于过去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。中国于1984年颁布《中华人民共和国法定计量单位》，并从1990年开始采用《中华人民共和国法定单位制度》（简称法定单位制度），它是在国际单位制的基础上，加上若干个由中国指定的国际单位制以外的单位组成的。现对国际单位制单位、法定计量单位和过去曾用过的几种单位制单位，分别介绍如下。

1. 国际单位制单位

国际单位制（英文缩写SI）是1960年10月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他的导出单位，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。

表 0-2 国际单位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	球面角	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}	拍[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	用其他导出单位表示	用基本单位表示
频率	赫[兹]	Hz		s^{-1}
力;重力	牛[顿]	N		$m \cdot kg/s^2$
压力;压强;应力	帕[斯卡]	Pa	N/m^2	$kg/(m \cdot s^2)$
能量;功;热	焦[耳]	J	$N \cdot m$	$m^2 \cdot kg/s^2$
功率	瓦[特]	W	J/s	$m^2 \cdot kg/s^3$
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。

2. 法定计量单位

中国法定计量单位制（简称法定单位）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。中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构成的十进倍数和分数单位。现将国家选定的部分非国际制单位列于表 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	1min=60s
	[小]时	h	1h=60min=3600s
	天(日)	d	1d=24h =86400s
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。

3. 过去曾用过的计量单位制的单位

(1) 绝对单位制的单位

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。其他物理量的单位可以通过物理定义和定律导出, 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·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, 其他物理量的单位, 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。

(2) 重力单位制的单位 米·公斤(力)·秒制单位制 (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。其他物理量的单位, 亦均由其基本单位导出, 如质量的单位是公斤(力)·秒²/米。

本书采用中国法定计量单位。

4. 单位换算

目前国际上虽基本采用国际单位制单位, 但旧有的文献资料中的数据是多种单位制单位并存, 在使用这些数据时需将它们换算到所需要的单位制单位, 所以应掌握物理量的单位换算方法。

(1) 物理量的单位换算 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, 化工中常用的换算因数列于附录中。

例 1 标准大气压等于 1.033 kgf/cm², 将其换算成 SI 单位。

解: 要求用 SI 单位制单位, 则需将工程单位制中单位 kgf/cm² 中 kgf 转换成 N, cm² 转换为 m²。查附录知 kgf 与 N, cm 与 m 的换算关系为:

$$1\text{kgf}=9.087\text{N}, \quad 1\text{cm}=10^{-2}\text{m}$$

$$\begin{aligned} \text{因此, } 1 \text{ 标准大气压} &= 1.033 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \left(\frac{9.087}{1\text{kgf}} \right) \frac{1}{\left(\frac{1\text{m}}{100\text{cm}} \right)^2} \\ &= 1.033 \times 9.087 \times 100^2 \left(\frac{\text{kgf} \cdot \text{N} \cdot \text{cm}^2}{\text{cm}^2 \cdot \text{kgf} \cdot \text{m}^2} \right) \\ &= 1.013 \times 10^5 \text{N/m}^2 = 101.3 \text{kN/m}^2 = 101.3 \text{kPa} \end{aligned}$$

(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。一类公式是根据物理规律建立的, 称为理论公式。式中各符号代表一个物理量, 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, 即任何同属于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。另一类公式是根据大量实验数据整理出来的经验公式, 它只反映各有关物理量数字之间关系, 所以又称为数字公式。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，这时只需将数字代入，算出的结果就符合经验公式所规定的单位。例如，水蒸气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 ——压强， atm ；

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

使用上式时，必须采用指定的单位。

习 题

- 0-1 $7\text{kgf}/\text{m}^2$ 等于多少 N/m^2 ？多少 Pa ？
- 0-2 $5\text{kgf} \cdot \text{m}/\text{s}$ 等于多少 $\text{N} \cdot \text{m}/\text{s}$ ？多少 J/s ？多少 kW ？
- 0-3 将 $1\text{kcal}/\text{h}$ 换算为功率 W 。
- 0-4 $4\text{L}/\text{s}$ 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。

在研究流体流动时，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。

一、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，称为流体的比体积，用 v 表示，单位是 m^3/kg 。显然，它与密度互为倒数，即

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (1-2)$$

某液体的密度 ρ 与标准大气压下， 4°C (277K) 的纯水的密度 $\rho_{\text{水}}$ 的比值称为该液体的相对密度。以 s 表示，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 1000kg/m^3 ，所以由式 (1-3) 知 $\rho = 1000s$ ，即将相对密度乘以 1000 即得该液体的密度 ρ ，单位是 kg/m^3 。

气体的相对密度，是指气体的密度与特定的温度和压强下某种气体（氢或者空气）密度的比值，它没有统一的规定，必须看给定的条件而定。在从手册中选用气体相对密度数据时，要注意测定该数据时的特定条件。

流体的密度一般可在有关手册中查得。

任何流体的密度，都随它的温度和压强而变化。但压强对液体的密度影响很小，可忽略

不计,故常称液体为不可压缩的流体。温度对液体的密度有一定的影响,如纯水的密度在4℃时为1000kg/m³,而在20℃时则为998.2kg/m³。因此,在选用液体密度数据时,要注意测定该数值的温度。

气体具有可压缩性及热膨胀性,其密度随压强和温度的不同有较大的变化,因此气体的密度必须标明其状态。当查不到某一定温度和压强条件下的气体密度数值时,在一般的温度和压强下,气体密度可近似用理想气体状态方程式计算,即

$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (1-4)$$

或
$$\rho = \frac{M}{22.4} \times \frac{T_0 p}{T p_0} \quad (1-5)$$

式中 p ——气体的压强, kPa;

T ——气体的温度, K;

M ——气体的摩尔质量, kg/kmol;

R ——气体常数, 8.314kJ/(kmol·K)。

下标“0”表示标准状态。

手册中列出的通常为纯物质的密度。而在化工生产中所遇到的流体,往往是含有几个组分的混合物,流体混合物的平均密度 ρ_m 可近似按下述公式计算。

对于液体混合物,组分的浓度常用质量分数 w 表示。现以1kg混合液体为基准,设各组分在混合前后其体积不变,则1kg混合液体的体积应等于各组分单独存在时的体积之和,即

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{w_1}{\rho_1} + \frac{w_2}{\rho_2} + \cdots + \frac{w_n}{\rho_n} \quad (1-6)$$

式中 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ ——液体混合物中各纯组分流体的密度, kg/m³;

$w_1, w_2, \dots, w_n$ ——液体混合物中各组分液体的质量分数。

对于气体混合物,组分的浓度常用体积分数 φ 来表示。现以1m³混合气体为基准,若各组分在混合前后的质量不变,则1m³混合气体的质量等于各组分的质量之和,即

$$\rho_m = \rho_1 \varphi_1 + \rho_2 \varphi_2 + \cdots + \rho_n \varphi_n \quad (1-7)$$

式中 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ ——气体混合物中各纯组分气体的密度, kg/m³;

$\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ ——气体混合物中各组分气体的体积分数。

气体混合物的平均密度 ρ_m 也可按式(1-4)计算,此时应以气体混合物的平均摩尔质量 M_m 代替式中气体摩尔质量 M 。气体混合物的平均摩尔质量 M_m 可按下式求算,即

$$M_m = M_1 y_1 + M_2 y_2 + \cdots + M_n y_n \quad (1-8)$$

式中 $M_1, M_2, \dots, M_n$ ——气体混合物中各纯组分的摩尔质量, kg/kmol;

$y_1, y_2, \dots, y_n$ ——气体混合物中各组分的摩尔分数。

二、作用在流体上的力

流体中任一流体团所受到外界施加于其上的力有两种:体积力与表面力。

体积力亦称质量力,是作用在流体团中每一个质点上,并与流体的质量成正比,对于均质流体也与流体的体积成正比。它本质上是一种非接触力。例如,流体在重力场中受到的重力,在离心力场中受到的离心力都是典型的体积力。

表面力又称机械力,是流体团与其周围环境流体,在界面上产生相互作用的力,表面力