



化学工艺学

崔恩选 顾登平 潘鸿章 编



高等教育出版社

化学工艺学

崔恩选 顾登平 潘鸿章 编

TQ02

高等教育出版社

(京) 112号

内 容 简 介

本书是为中学教师进修高等师范专科化学教育专业编写的教材。全书突出中学教师培训教材以自学为主的特点,内容精炼,结构合理,通俗易懂,便于教学。

本书共分十一章。内容包括绪论、流体的流动与输送、传热过程、吸收、蒸馏、化学反应器简介、硫酸、氨的合成与氨加工简介、氯碱工业、石油化工简介以及玻璃和水泥等。

本书可作为中学化学教师进修学习的教材,亦可供其他科技人员参考。

化学工艺学

崔恩选 顾登平 潘鸿章 编

*

高等教育出版社出版

新华书店总店科技发行所发行

中国科学院印刷厂印装

*

开本787×1092 1/16 印张12.5 字数310 000

1994年10月第1版 1994年10月第1次印刷

印数 0001—6 708

ISBN7-04-004597-4/O·1299

定价 5.95 元

前 言

1989年9月,根据国家教委在四川成都召开的卫星电视教材工作会议的要求,我们编写出版了适用于中学教师化学专业用的《工业化学》培训教材。1992年国家教委又重新制定了中学教师进修高等师范专科化学教育专业用的《化学工艺学教学大纲》,本书则是根据该大纲的精神和要求编写而成的。

在编写本书的过程中,考虑到广大中学教师的实际需要,我们在内容上力求精炼,按专科的要求进行取舍;这是一本以自学为主的教材,编者力争使其文字通顺、易懂;对学科发展的新领域,本书也略加介绍,以反映生产中的某些新成就,并指出今后的发展趋势。本书每章后均配有一定数量的复习思考题,便于学生自学。

本书由河北师范大学崔恩选主编,第一、二、三、四、五、六、七、十一章由崔恩选编写;第八、九章由河北师范大学顾登平编写;第十章由河北师范学院潘鸿章编写。

本书由福建师范大学蒋家俊教授主审。蒋家俊教授认真细致地审阅了全稿,并提出许多宝贵意见,对本书质量的提高帮助甚大,编者对此表示衷心的感谢。

限于编者的水平,无论在选材和叙述等方面,难免存在缺点和问题,希望使用本书的广大读者批评指正。

编者

1993年10月

目 录

第一章 绪论..... 1

- § 1-1 化学工艺学课程的内容 1
- § 1-2 化学工业的分类 1
- § 1-3 化学工艺和工程中的一些基本概念 ... 2
 - 1-3-1 物料衡算 3
 - 1-3-2 能量衡算 3
 - 1-3-3 平衡关系 4
 - 1-3-4 过程速率 4
 - 1-3-5 技术经济评价..... 4
- § 1-4 单位制与单位换算 5
 - 1-4-1 国际单位制 5
 - 1-4-2 其它单位制单位与SI单位的换算..... 8

第二章 流体的流动与输送..... 9

- § 2-1 流体稳定流动时的衡算 9
 - 2-1-1 流体流动的一些物理量和单位换算 9
 - 2-1-2 稳定流动和不稳定流动 11
 - 2-1-3 流体稳定流动时的物料衡算 12
 - 2-1-4 流体稳定流动时的能量衡算..... 12
 - 2-1-5 柏努利方程的应用举例 15
- § 2-2 流体流动时的阻力 18
 - 2-2-1 产生流体阻力的原因 18
 - 2-2-2 粘度 19
 - 2-2-3 流体的流动形态 20
 - 2-2-4 流体在管路中流动时的阻力计算 22
- § 2-3 流体流量的测定 25
 - 2-3-1 孔板流量计 25
 - 2-3-2 转子流量计 26
- § 2-4 流体输送机械简介 27
 - 2-4-1 离心泵 27
 - 2-4-2 气体的压缩与输送 29
- 复习题 31

第三章 传热过程..... 32

- § 3-1 概述 32
 - 3-1-1 化工生产中的传热 32
 - 3-1-2 传热的基本方式 32

3-1-3 工业上的换热方法 32

- § 3-2 传导传热 33
 - 3-2-1 热传导基本方法 33
 - 3-2-2 传导传热计算 33
- § 3-3 对流传热 36
 - 3-3-1 对流传热机理..... 36
 - 3-3-2 对流传热基本方程 36
 - 3-3-3 给热系数及其影响因素 37
- § 3-4 热交换的计算 38
 - 3-4-1 热交换器的热负荷 38
 - 3-4-2 传热方程和传热系数 39
 - 3-4-3 稳定传热的平均温度差 40
- § 3-5 强化传热的途径 42
 - 3-5-1 提高传热系数..... 42
 - 3-5-2 增大传热温度差 43
 - 3-5-3 增大传热面积..... 43
- § 3-6 热交换器 43
 - 3-6-1 主要热交换器的类型 43
 - 3-6-2 列管式热交换器 43
- § 3-7 加热剂与冷却剂 47
 - 3-7-1 冷却剂 47
 - 3-7-2 加热剂 47
- 复习题 48

第四章 吸收..... 49

- § 4-1 概述 49
 - 4-1-1 吸收及其在化工生产中的应用..... 49
 - 4-1-2 吸收的类型..... 49
 - 4-1-3 吸收方法和流程简述 50
- § 4-2 吸收的平衡 51
 - 4-2-1 亨利定律 51
 - 4-2-2 用比摩尔分率表示的相平衡 53
- § 4-3 吸收速率 54
 - 4-3-1 吸收过程的机理 54
 - 4-3-2 吸收速率方程式 55
- § 4-4 强化吸收的途径 57
- § 4-6 吸收过程的物料衡算 59

4-5-1 物料衡算与操作线方程	59	§ 6-4 典型反应器的计算	86
4-5-2 吸收剂的用量	59	6-4-1 间歇操作反应槽的计算	86
§ 4-6 吸收设备	60	6-4-2 管式反应器的计算	89
4-6-1 吸收设备的主要类型及特点	60	6-4-3 连续操作反应槽	90
4-6-2 填料吸收塔	62	6-4-4 多级串联反应槽	90
复习题	65	§ 6-5 反应器性能的比较与选择	91
第五章 蒸馏	66	6-5-1 间歇操作反应槽的特点	91
§ 5-1 概述	66	6-5-2 管式反应器的特点	92
§ 5-2 气液相平衡	67	6-5-3 连续操作单级反应槽的特点	92
5-2-1 理想溶液的气液相平衡	67	6-5-4 多级串联反应槽	92
5-2-2 相对挥发度	67	§ 6-6 气-固相催化反应设备	93
5-2-3 t - x - y 相图和 y - x 相图	68	6-6-1 气-固相催化反应过程	93
§ 5-3 蒸馏操作流程及原理	70	6-6-2 固定床催化反应器	95
5-3-1 简单蒸馏	70	6-6-3 流化床催化反应器	97
5-3-2 间歇精馏及其原理	70	复习题	99
5-3-3 连续精馏设备流程	71	第七章 硫酸	100
§ 5-4 精馏过程的物料衡算	72	§ 7-1 概述	100
5-4-1 全塔物料衡算	72	7-1-1 硫酸在国民经济中的作用	100
5-4-2 精馏段的物料衡算	72	7-1-2 硫酸的组成和物性	101
5-4-3 提馏段的物料衡算	73	7-1-3 制造硫酸的含硫原料	101
§ 5-5 塔板数的确定	74	7-1-4 生产硫酸的原则流程	102
5-5-1 求理论塔板数的途径	74	§ 7-2 以硫铁矿为原料制取二氧化硫硫炉	
5-5-2 图解法求理论塔板数	74	气及炉气的净制	104
5-5-3 回流比与理论塔板数的关系	75	7-2-1 硫铁矿的焙烧原理	104
5-5-4 实际塔板数的计算	76	7-2-2 硫铁矿的沸腾焙烧	105
§ 5-6 精馏塔	76	7-2-3 炉气的净制	107
5-6-1 泡罩塔	77	§ 7-3 二氧化硫的催化氧化	111
5-6-2 筛板塔	78	7-3-1 化学平衡和平衡转化率	111
5-6-3 浮阀塔	79	7-3-2 二氧化硫氧化的催化剂与反应速率	113
5-6-4 并流喷射塔	79	7-3-3 二氧化硫氧化的工艺流程	114
5-6-5 填料塔	80	§ 7-4 三氧化硫的吸收	117
复习题	80	7-4-1 三氧化硫的吸收原理和操作条件	117
第六章 化学反应器简介	82	7-4-2 三氧化硫吸收的工艺流程及设备	118
§ 6-1 反应器与化学反应工程学	82	§ 7-5 接触法生产硫酸的全流程	118
§ 6-2 反应器的类型及结构	82	§ 7-6 硫酸生产中的“三废”治理和环	
6-2-1 按反应器的结构形式分类	82	境保护	120
6-2-2 按反应器内物料相态分类	83	复习题	121
6-2-3 按操作方式分类	84	第八章 氨的合成与氨加工简介	122
§ 6-3 流体在反应器内的流动	85	§ 8-1 概述	122
6-3-1 连续操作的两种理想流动状态	85	8-1-1 合成氨生产的重要性	122
6-3-2 流体在反应器内的停留时间	86	8-1-2 各种原料(煤和天然气)生产合成氨简介	122

§ 8-2 固体燃料气化制取合成氨原料气	123	§ 10-3 催化裂化与裂解简介	168
8-2-1 原料气的制取	124	10-3-1 催化裂化的原理	168
8-2-2 原料气的脱硫, 变换和精制	125	10-3-2 催化裂化的反应器及工艺流程	169
§ 8-3 氨的合成	132	10-3-3 裂解	171
8-3-1 氨合成反应的反应速率和催化剂	132	§ 10-4 重整简介	172
8-3-2 最佳工艺条件的选择	133	10-4-1 重整的基本反应类型	172
8-3-3 工艺流程	134	10-4-2 重整的工艺条件	173
8-3-4 合成塔	136	10-4-3 重整和萃取分离	173
§ 8-4 氨加工	137	§ 10-5 石油化工生产简介	175
8-4-1 尿素生产简介	137	10-5-1 石油化工的主要产品	175
8-4-2 硝酸的生产	139	10-5-2 氯乙烯生产简介	176
复习题	141	10-5-3 石油化工的发展动态	177
第九章 氯碱工业	143	第十一章 玻璃和水泥	179
§ 9-1 概述	143	第一部分 玻璃工业	179
§ 9-2 电解的基本原理	144	§ 11-1 玻璃的组成和分类	179
9-2-1 电解过程的主反应和副反应	144	11-1-1 玻璃的化学组成	179
9-2-2 离子的放电顺序	145	11-1-2 玻璃的分类	179
9-2-3 理论分解电压和槽电压	146	§ 11-2 玻璃原料	180
9-2-4 电解过程所需要的理论电量		11-2-1 主要原料	180
——法拉第定律	147	11-2-2 辅助原料	180
9-2-5 电流效率	148	§ 11-3 玻璃熔窑	181
9-2-6 电能效率	149	11-3-1 坩埚窑	181
9-2-7 电能消耗的计算	150	11-3-2 池窑	181
§ 9-3 隔膜法电解食盐水溶液制备烧碱和氯气	151	§ 11-4 玻璃制品的生产	182
9-3-1 饱和食盐水溶液的制备和精制	151	11-4-1 原料的粉碎与配合	182
9-3-2 隔膜电解法工艺流程及电解槽结构	153	11-4-2 玻璃液的熔制	182
9-3-3 离子交换膜制烧碱简介	155	11-4-3 玻璃制品的成型	183
§ 9-4 电解产物的处理	156	11-4-4 退火	184
9-4-1 电解碱液的蒸发和固碱生产	156	第二部分 水泥工业	184
9-4-2 氢气和氯气的加工——合成盐酸	160	§ 11-5 水泥工业概述	184
9-4-3 液氯	162	11-5-1 水泥工业的发展	184
复习题	163	11-5-2 水泥的品种	185
第十章 石油化工简介	164	§ 11-6 硅酸盐水泥熟料的组成	186
§ 10-1 概述	164	11-6-1 硅酸盐水泥熟料的化学成分及矿物组	186
10-1-1 我国的石油工业及石油化工	164	11-6-2 熟料在形成过程中的变化	186
10-1-2 石油的组成及分类	164	11-6-3 熟料中各种氧化物的作用及其比例关系	187
10-1-3 石油的加工方案	165	§ 11-7 硅酸盐水泥的生产流程	187
§ 10-2 石油的常减压蒸馏	166	11-7-1 生料的制备	187
10-2-1 常减压蒸馏的流程	166	11-7-2 水泥熟料的烧成	188
10-2-2 石油蒸馏的产物及其用途	167		

11-7-3 熟料的磨细	189	11-8-2 水泥的凝结与硬化	189
§ 11-8 水泥的水化反应及凝结硬化	189	§ 11-9 水泥生产的技术改进	190
11-8-1 水泥的水化反应	189	复习题	190

第一章 绪 论

§ 1-1 化学工艺学课程的内容

化学工业是利用化学反应改变物质的组成及结构以获得化工原料和化学产品的生产部门。研究化工生产的工程技术学科有化学工艺学和化学工程学。化学工艺学是按化学工业的不同产品种类,分别研究生产过程中的原料特点、生产原理、工艺流程、最适宜生产条件、产品质量以及所用的设备类型及其结构材料等。根据所研究的对象,化学工艺学又可分为无机化学工艺学、有机化学工艺学等分支学科。

化学工业产品的种类繁多,生产方法更是千差万别。但是,统观这些化工生产过程可以看出,它们都是由诸如破碎、混合、加热、冷却、蒸发、干燥、蒸馏等单元操作以及各种化学反应过程以不同形式适当地配列,并根据过程特点改进组合而成的。将不同化工生产部门所共有的单元操作和有共性的化学反应过程集中起来进行研究,便形成了化学工程学学科。化学工程学是研究化工生产过程的单元操作的基本原理,寻找其内在规律,解决生产中所需设备及机械的结构设计和操作条件的优化等工程问题的技术科学。在化学工程学中所讨论的具有共性的主要单元操作及过程有:

流体流动过程——流体流动及输送、悬浮液的沉降和过滤、液相物料的搅拌等;

传热过程——加热、冷却、蒸发、冷凝、热交换等;

传质过程——溶解、结晶、萃取、蒸馏、吸收、吸附等;

化学反应过程——各种类型的化学变化过程。

以上这些过程的基本理论和应用,可以概括为“三传一反”,即动量传递、热量传递、质量传递和化学反应工程。

本书拟首先按化学工程的体系,对主要单元过程的基本原理和典型化工设备作简单介绍;然后在此基础上,选择典型的和在国民经济中具有重要意义的化工产品,按照化学工艺学的体系,着重讲授其生产原理、工艺流程、最适宜操作条件及其主要设备机械等。

通过本课程的学习,要求学生在化工生产的理论与实践方面获得较为完整而清晰的概念;了解化学工业主要部门在国民经济中的重要地位、以及目前化学工业的生产情况和发展趋势;熟悉物理学、无机化学、有机化学、物理化学的某些基本理论和知识在化工生产中的应用;初步学会运用化学工程的基本理论和知识分析和解决化工生产中的实际问题,为今后在教学工作中更有效地联系化工生产实际,完成中学化学教学任务打好基础。

§ 1-2 化学工业的分类

化学工业行业复杂,分类方法也很繁多。有的按原料或产品的特征来分类;有的按反应过程及操作过程来分类等。但不论用哪一种单一的分类方法,都很难将所有的化学工业部门全都包括进来,因此一般常采用综合分类方法。按综合分类法,主要化工类型的生产部门大致可以

分为:

无机化学工业

- (1) 基本无机化学工业* (无机酸、碱、盐及化学肥料的生产);
- (2) 精细无机化学工业 (稀有元素、无机试剂、药物、催化剂、电子材料等的生产);
- (3) 电化学工业 (食盐水溶液的电解——烧碱、氯、氢的生产, 熔融盐的电解——金属钠、镁、铝的生产, 电热工业等);
- (4) 冶金工业 (钢铁、有色金属、稀有金属等的冶炼);
- (5) 硅酸盐工业 (玻璃、水泥、陶瓷、耐火材料的生产);
- (6) 矿物性颜料工业。

有机化学工业

- (1) 石油炼制及石油裂解工业;
- (2) 煤的焦化及煤焦油工业;
- (3) 基本有机合成工业 (以一氧化碳、甲烷、乙炔、乙烯、丙烯、丁二烯以及芳烃等为基础原料, 合成醇、醛、酸、酮、酯等);
- (4) 精细有机合成工业 (染料、医药、有机农药、香料、试剂、合成洗涤剂、塑料、橡胶的填充剂、纺织印染助剂、食品和饲料添加剂等的生产);
- (5) 高分子化学工业 (塑料、合成纤维、合成橡胶等高分子材料的合成工业);
- (6) 食品化学工业 (糖、淀粉、油脂、蛋白质、酒类、饮料等食品的生产);
- (7) 纤维素化学工业 (以天然纤维素为原料的造纸、人造纤维、胶片等的生产)。

自本世纪50年代以来, 在有机化学工业中, 以石油为原料的工业得到了迅速的发展, 生产能力和生产规模日趋扩大, 很多原来以电石、焦化产品以及农副产品等为原料的生产, 也多转向以石油为原料。至今在有机合成工业中, 以石油炼厂气、天然气以及石油馏分为原料经过裂解生产乙烯、丙烯、丁二烯、乙炔和芳烃等的石油化工基础原料, 以及由这些基础原料合成的中间产品和最终产品占极大的比重。通常, 广义地把由石油制取基本有机化工原料的工业和由这些原料合成化学中间产品的基本有机合成工业以及加工成最终产品——塑料、合成纤维、合成橡胶的高分子化学工业均包括在石油化学工业的范围之内。

应该注意的是, 在上述化学工业的分类中, 有些工业如冶金工业, 因其本身在国民经济中的重要性和生产上的特殊性, 习惯上已从化学工业中分离出来, 成为一个独立生产部门; 有些工业根据国家在经济管理方面的需要, 将其分属于各有关部门管理。例如, 水泥分属于建筑材料工业部门。合成纤维和人造纤维分属于纺织工业部门。而造纸、塑料工业则分属于轻工业部门。因此, 从经济管理的角度来看, 化学工业和化工产品的范围比前述的分类内容要狭窄得多。

§ 1-3 化学工艺和工程中的一些基本概念

在进行工艺过程的开发、设备的设计和操作管理时, 经常运用到物料衡算、能量衡算、平衡关系、过程速率和技术经济评价等基本概念和有关理论。这些基本概念在化学工程和工艺的

* 基本无机(有机)化学工业是指生产基本化工原料的化学工业, 也称为重化学工业。

应用中起着极重要的作用。

1-3-1 物料衡算

物料衡算的基础是物质守恒定律。物料衡算的基本内容是：引入某一设备或系统以进行处理的原料、辅助原料等的总量 ($m_{t_1} + m_{t_2} + m_{t_3} + \dots$) 恒等于经过处理所得产品、副产品、废物等的总量 ($m_{p_1} + m_{p_2} + m_{p_3} + \dots$)。据此可以列出物料衡算方程式：

$$\sum m_{t_i} = \sum m_{p_j}$$

对于间歇操作，物料衡算可按每一批处理物料的总量列式；而对于连续稳定的操作，则可按单位时间输入的物质量和输出的物质量（包括设备内积蓄的量）列式。物料衡算的范围可以是设备的一部分、一个设备或一组设备。衡算的对象可以是所处理的物料的总量，或者是物料中某一组分的量。当对组分作衡算时，设输入物料与输出物料中某组分的分率分别为 x_{t_i} 与 x_{p_j} ，则对某一组分的物料衡算方程式为：

$$\sum m_{t_i} x_{t_i} = \sum m_{p_j} x_{p_j}$$

化工生产中，物料衡算有广泛的作用，如根据进料求算产品量；计算过程中物料的转化率；求算消耗定额；确定过程的操作情况或有无泄漏损失；计算产品或副产物量，以确定加工方案及综合利用途径等。

例 1 由电解食盐水得1000kg的稀碱液，其组成为：NaOH10%，NaCl10%，H₂O80%。在蒸发器内蒸发浓缩得到浓碱液，并有大部分食盐自溶液结晶析出。测得浓碱液的组成为：NaOH50%，NaCl2%，H₂O48%，求蒸发的水量 $m_{\text{水}}$ 、析出的食盐量 $m_{\text{盐}}$ 及浓碱液量。

解：总物料的衡算式为：

$$m_{\text{稀碱}} = m_{\text{浓碱}} + m_{\text{水}} + m_{\text{盐}}$$

对NaOH的衡算式为：

$$m_{\text{稀碱}} \times 10\% = m_{\text{浓碱}} \times 50\%$$

由此得

$$m_{\text{浓碱}} = 1000 \times 10 \div 50 = 200 \text{ kg}$$

对NaCl的衡算式为：

$$m_{\text{稀碱}} \times 10\% = m_{\text{浓碱}} \times 2\% + m_{\text{盐}} \times 100\%$$

由此得

$$m_{\text{盐}} = 1000 \times 10\% - 200 \times 2\% = 96 \text{ kg}$$

对水的衡算式为：

$$m_{\text{稀碱}} \times 80\% = m_{\text{浓碱}} \times 48\% + m_{\text{水}} \times 100\%$$

由此得

$$m_{\text{水}} = 1000 \times 80\% - 200 \times 48\% = 704 \text{ kg}$$

通过物料衡算，不仅可以使我们正确选择工艺流程和设备尺寸，而且可以确定原料、产品、副产品中某些未知的物料量，掌握物料的消耗情况，从而找出减少副产品和废料，提高原料利用率的途径。

1-3-2 能量衡算

能量衡算是基于能量守恒定律。根据此定律，引入某系统或操作过程的能量恒等于某系统或操作过程所获得的能量。

能量可以同进入设备的物料一起输入和随物料一起输出，或者是分别输入或输出。

同物料一起输入或输出的能量包括这些物料的内能（内部分子运动所具有的能量）、位能和动能；而不随物料输入或输出的能量，则有通过器壁加热而输入的热量，以及设备损失于周围的热量等。

过程能量衡算可以求得在流体输送和压缩时所需要的动力。在加热和冷却时所需要供给和导出的热量，在绝热情况下进行混合或反应时物系的温度变化等。在工艺过程的开发和设备的设计中，通过能量衡算可以确定生产的工艺条件和设备尺寸；在生产操作中，通过能量衡算可以得到能量损耗情况，寻求节能的有效途径。

1-3-3 平衡关系

不论是传热、传质还是化学反应过程，在经过足够长的时间后，最终均能达到平衡状态。例如，热量从热的物体传向冷的物体，一直进行到两物体的温度相等为止。又如，盐在水中溶解，一直进行到溶液达到饱和为止，此时，液相与固相处于平衡状态。在吸收、蒸馏、萃取、结晶等过程中也都存在着相平衡关系。在化学反应中，当正逆两反应速率相等时，反应达到平衡。

平衡是在一定条件下物系变化可能到达的极限。除非影响平衡的条件发生变化，否则物系变化的极限不会改变。通过平衡关系可以判断物系变化能否发生。以及能进行到何种程度。因此，平衡关系对于化工过程具有重要的意义。

1-3-4 过程速率

任何物系如果不是处于平衡状态，则必然会发生使该物系趋向于平衡的变化。此时，通常是偏离平衡状态愈远，则变化过程的速率愈大。物系状态与平衡之间的差距是过程速率的推动力，此推动力愈大，则过程速率也就愈大；而物系愈接近于平衡状态，则推动力和过程速率也就愈小；当到达平衡状态时，过程速率变为零。

例如，决定物质传递速率的推动力是浓度差或分压差，决定热量传递速率的推动力是温度差。设在时间 τ 内传递的物质质量或热量为 Q ，则传递速率 $dQ/d\tau$ 与垂直于传递方向的面积 A 及推动力 ΔF 成正比：

$$dQ/d\tau = K \cdot A \cdot \Delta F = \frac{\Delta F}{1/(K \cdot A)}$$

式中 K 为传递速率系数。此式表示传递速率与 ΔF 成正比，而与 $1/K \cdot A$ 成反比，这与电学中的欧姆定律 $I[A] = \frac{V[V]}{R[\Omega]}$ 具有相同的形式。因此 $1/K \cdot A$ 可以视为过程的阻力，而过程的速率可以表示为：

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

变化过程的速率是确定化工设备尺寸的主要因素，因为过程速率大，则设备尺寸可以减小，从而能降低设备的投资。

1-3-5 技术经济评价

在设计具有相同生产能力的设备时，选用不同的材料、型式以及操作条件，可以提出多种不同的设计方案。但是最终应该从技术经济的观点出发进行比较，即从设备的造价、操作的难

易、人力、水、电和燃料的消耗、耐用年限等方面进行综合评价，从中选择经济上最有利的方案。

在进行经济评价时，设备造价和耐用年限折算成设备费（摊派到单位产品上的设备折旧费）。而消耗的人力、水电、燃料的费用则总括为操作费。例如，在确定输送流体的管道时，若选用小的管径，虽可降低设备费用，但由于管径小，阻力大，要消耗较多的动力，因而使操作费用增加。又如，在某一类型的冷却器内进行流体的冷却时，若增大冷却器的冷却面积，则设备费用增大，而可减少冷却水的用量，使操作费降低。为此需要通过经济核算来确定最适宜的设备尺寸。

§ 1-4 单位制与单位换算

化工生产中，各种物料的物理性质和数量以及过程进行的条件和强度等，都需要用各种物理量来表示，如长度、体积、密度、粘度、温度、压强等。物理量的种类虽多，但都可以通过几个彼此独立的基本量来表示。常用的基本量有长度 L 、质量 M 、时间 T 、温度 θ 等。基本量以外的其他物理量则可以通过既定的物理关系由基本量导出，所以这些物理量又称为导出量。应用一些基本量以表示物理量特性的式子称为量纲式（旧称因次式）。例如：

体积的量纲式为 $[V] = L^3$

加速度的量纲式为 $[a] = L/T^2$

力的量纲式为 $[F] = M \cdot L/T^2$

在量纲式中各基本量的指数称为该导出量对于所取基本量的量纲。量纲式明确地表示出基本量与导出量的关系，它对于单位换算和校验计算结果的正确性具有实际意义。

用以表示物理量大小的单位，有各种不同的单位制，如米制（过去称公制）、市制、英制、国际单位制等。

解放前的旧中国，市制、米制、英制单位混合使用，很不统一。解放后在全国推行了米制，但在商业上以及日常生活中还保留着市制，在某些生产部门还沿用一些英制单位。尽管在各类科技文献，教材中米制单位已占主要地位，但是由米制派生出来的物理学中常用的厘米-克-秒制（CGS制），工程技术界常用的米-千克-秒制（MKS制，即实用单位制）和米-千克力-秒制（重力单位制或工程单位制），电磁学中常用的米-千克-秒-安培制（MKSA制）等都共存并用，使用时，它们之间仍需要换算，存在着很多不便。

国际上为了统一各国使用的各种单位，1960年举行的第11届国际计量大会通过了一种单位制，称为国际单位制（SI）*。以后又经过补充和改进。目前世界上已有很多国家宣布采用国际单位制，英国和绝大部分传统采用英制的国家也决定放弃英制，改用国际单位制。

我国国务院于1984年2月27日颁布了《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》。命令中指出：“国务院决定在采用先进的国际单位制的基础上，进一步统一我国的计量单位”。本书以国际单位制为主，同时根据实际需要，适当介绍并部分地采用现存的其他单位制。

1-4-1 国际单位制

国际单位制采用七个基本单位，二个辅助单位，十九个具有专门名称的导出单位和其他导

* SI是法文“Le Systeme International d'unit'es”的缩写。

出单位，另外还有十六个词冠用以构成SI的倍数单位或分数单位。

国际单位制的基本单位和辅助单位如表1-1所示，在化工中常用的一些主要导出单位如表1-2所示。

表 1-1 国际单位制的基本单位和辅助单位

	量的名称	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
	发光强度	坎[德拉]	cd
	物质的量	摩[尔]	mol
辅助单位	平面角	弧度	rad
	立体角	球面度	sr

表 1-2 化工中常用的一些国际单位制的导出单位

量的名称	SI单位名称	单位符号	用SI基本单位表示
面积	平方米	m ²	m ²
体积	立方米	m ³	m ³
密度	千克每立方米	kg/m ³	kg·m ⁻³
浓度	摩尔每立方米	mol/m ³	mol·m ⁻³
速度	米每秒	m/s	m·s ⁻¹
加速度	米每二次方秒	m/s ²	m·s ⁻²
力	牛顿(Newton)	N	m·kg·s ⁻²
压强、应力	帕斯卡(Pascal)	Pa	m ⁻¹ ·kg·s ⁻² (=N·m ⁻²)
能、功、热量	焦耳(Joule)	J	m ² ·kg·s ⁻² (=N·m)
功率	瓦特(Watt)	W	m ² ·kg·s ⁻³ (=J·s ⁻¹)
表面张力	牛顿每米	N/m	kg·s ⁻²
粘度	帕斯卡秒	Pa·s	kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹ (=N·s·m ⁻²)
扩散系数	平方米每秒	m ² /s	m ² ·s ⁻¹
热容、熵	焦耳每开尔文	J/K	m ² ·kg·s ⁻² ·K ⁻¹
比热容	焦耳每千克开尔文	J/(kg·K)	m ² ·s ⁻² ·K ⁻¹
摩尔热容	焦耳每摩尔开尔文	J/(mol·K)	m ² ·kg·s ⁻² ·K ⁻¹ ·mol ⁻¹
导热系数	瓦特每米开尔文	W/(m·K)	m·kg·s ⁻³ ·K ⁻¹
传热系数	瓦特每平方米开尔文	W/(m ² ·K)	kg·s ⁻³ ·K ⁻¹

在上述单位所表示的量值过大或过小时，可以在单位符号前加上“词冠”，以构成SI单位的十进倍数与分数单位，国际单位制词冠如表1-3所示。

国际单位制是在米制的基础上发展起来的。为了适应现代科学技术对计量精度的要求，在确定某些单位的基准上作了重要的规定。例如在米制中，长度单位“米”是以米的国际原器为基准；时间单位“秒”是以平太阳日为基准*，而在SI中都分别改用以某种原子的某些能级之

* 取地球自转的平太阳日的1/86400的时间间隔定为时间单位“秒”。

表 1-3 国际单位制词冠

分 数	词冠名称	词冠符号	倍 数	词冠名称	词冠符号
10^{-1}	分	d	10	十	da
10^{-2}	厘	c	10^2	百	h
10^{-3}	毫	m	10^3	千	k
10^{-6}	微	μ	10^6	兆	M
10^{-9}	纳[诺]	n	10^9	吉[咖]	G
10^{-12}	皮[可]	p	10^{12}	太[拉]	T
10^{-15}	飞[因托]	f	10^{15}	拍[它]	P
10^{-18}	阿[托]	a	10^{18}	艾[可萨]	E

间跃迁所对应的辐射波长或周期为基准。

热力学温度是以水的三相点为定点，并定义其温度为273.16 K，除了以 K 为单位表示的热力学温度（符号 T ）外，也使用下式所定义的摄氏温度（符号 t ）。

表 1-4 一些米制系统非国际单位制单位与国际单位制单位间的换算

物 理 量	非SI单位名称	符 号	换 算
长度	埃	$\text{\AA}$	$1 \text{\AA} = 10^{-10} \text{m}$
体积	升*	L (l)	$1 \text{l} = 1 \text{dm}^3 = 10^{-3} \text{m}^3$
质量	吨*	t	$1 \text{t} = 10^3 \text{kg}$
力	达因 千克(力)	dyn kg(f)	$1 \text{dyn} = 1 \text{g} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^{-2} = 10^{-5} \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} = 10^{-5} \text{N}$ $1 \text{kg(f)} = 1 \times 9.807 \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} = 9.807 \text{N}$
压强	巴 毫米汞柱 米水柱 标准大气压 工程大气压	bar mmHg mH ₂ O atm kg(f)/cm ² Torr	$1 \text{bar} = 10^6 \text{dyn} \cdot \text{cm}^{-2} = 10^5 \text{Pa}$ $1 \text{mmHg} = 13.6 \times 9.8 \text{N} \cdot \text{m}^{-2} = 1333.3 \text{Pa}$ $1 \text{mH}_2\text{O} = 1000 \times 9.8 \text{N} \cdot \text{m}^{-2} = 9.8 \times 10^3 \text{Pa}$ $1 \text{atm} = 760 \text{mmHg} = 1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ $1 \text{kg(f)/cm}^2 = 9.807 \times 10^4 \text{Pa}$ $1 \text{Torr} = 1 \text{mmHg} = 133.3 \text{Pa}$
粘度	泊 千克(力)秒/米 ²	P kg(f)·s/m ²	$1 \text{P} = 1 \text{dyn} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2} = 1 \text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} = 0.1 \text{Pa} \cdot \text{s}$ $1 \text{kg(f)} \cdot \text{s} / \text{m}^2 = 9.807 \text{Pa} \cdot \text{s}$
功能 热量	尔格 千克(力)·米 千瓦·时 千卡	erg kg(f)·m kW·h kcal	$1 \text{erg} = 1 \text{dyn} \cdot \text{cm} = 10^{-7} \text{N} \cdot \text{m} = 10^{-7} \text{J}$ $1 \text{kg(f)} \cdot \text{m} = 9.807 \text{N} \cdot \text{m} = 9.807 \text{J}$ $1 \text{kWh} = 3.6 \times 10^6 \text{J}$ $1 \text{kcal}_{15^\circ\text{C}} = 4185.5 \text{J}^{**}$
功率	尔格/秒 千克(力)·米/秒	erg/s kg(f)·m/s	$1 \text{erg/s} = 10^{-7} \text{J} \cdot \text{s}^{-1} = 10^{-7} \text{W}$ $1 \text{kg(f)} \cdot \text{m} / \text{s} = 9.807 \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} = 9.807 \text{W}$
比热容	卡/克·度	cal/(g·°C)	$1 \text{cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C}) = 1 \text{kcal}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}) = 4.187 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
导热系数	千卡/米·时·度	kcal/(m·h·°C)	$1 \text{kcal}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}) = 1.163 \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
传热系数	千卡/米 ² ·时·度	kcal/(m ² ·h·°C)	$1 \text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}) = 1.163 \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

* 与SI单位并用的单位（国家计量局规定的法定计算单位）；

** $1 \text{kcal}_{15^\circ\text{C}} = 1 \text{kg}$ 的水温度由 14.5°C 上升到 15.5°C 所需热量。

$$t = T - T_0$$

式中 $T_0 = 273.16\text{K}$ 是水的冰点温度。摄氏温度仍以 $^{\circ}\text{C}$ 为单位来表示。

1-4-2 其它单位制单位与SI单位的换算

有些单位虽然不属于国际单位制，但是有重要的作用，并已广泛流传使用。为此我国的法定计量单位制中选定了某些非国际单位制单位与国际单位并用。例如：时间的单位分（min）、时（h）、日（d）；体积的单位升（L）；质量的单位吨（t）等，但只有在一些特定情况下，才与SI单位构成组合单位。

鉴于当前国内外很多参考书、科技资料以及工业生产中仍然使用着各种非SI单位，因此有必要弄清它们与SI单位的换算关系。现将化工中常用的非SI单位的米制单位与SI单位的换算列于表1-4。

第二章 流体的流动与输送

流体是指液体和气体，它们与固体物料间的区别是具有流动性。几乎可以任意地分割或改变其形状。在化工生产过程中所处理的物料，包括原料、中间体及产品等，大多数都是流体。流体能够流动，不仅便于它在工业生产中的输送和处理，并且还使过程中的化学反应趋于均匀一致，也使生产易于实现连续操作、机械化和自动控制。现代化的生产中，在处理固态物料时，也常采用“固体流态化”的新技术，即固体物料以细粒或粉末的形式用气体或蒸汽来进行压送、反应、沸腾焙烧或流化床催化，以实现操作的连续化。

处理流体的主要操作是流体的输送，它是流体本身流动的过程。此外，过滤、沉降分离、气体降尘、离心分离和搅拌等操作，实质上也是固体或液体质点在流体介质中的运动，或是流体在特殊条件下运动的过程。因此，研究流体静止和运动的规律的流体力学，是化工生产中处理流体操作的理论基础。此外，热传递和扩散传质的操作也与流体在当时条件下的流动形态有着密切的关系。流体力学的理论对这些操作也起着很大的指导作用。

§ 2-1 流体稳定流动时的衡算

2-1-1 流体流动的一些物理量和单位换算

在化工生产中，流体一般是在管路中流动的，管径的大小与流体的输送量密切相关。而计算输送量又要对流体的有关物性和参数有所了解，如对密度、压强、流量和流速有明确的认识。

(一) 密度

单位体积流体的质量，称为流体的密度，如果设 m 为流体的质量， V 为流体的体积， ρ 为流体的密度，则

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

式中 ρ 的单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

(二) 压强

流体垂直作用于单位面积上的压力称为压力强度，简称压强。如果流体垂直作用于面积 A 上的压力为 F ，则压强 p 为：

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

在SI单位中， F 的单位是牛顿(N)， A 的单位是米²(m²)，所以压强 p 的单位是 $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ，专用名为帕斯卡，简称为帕(Pa)。

在化工生产中，压强曾采用过多种方式和多种单位表示。包括有：

用液柱高度，如毫米汞柱、米水柱表示压强，是指流体的压强等于该高度的液柱作用于单位底面积上的重力。设液柱的高度为 h ，液柱的底面积为 A ，液体的密度为 ρ ，则液柱的重力