

中等职业教育教材

2000年版

化工原理

上册

张弓 主编

化学工业出版社
教材出版中心



(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

化工原理. 上、下册 / 张弓主编. — 北京: 化学工业出版社, 2000.6

中等职业教育教材

ISBN 7-5025-2663-3

I. 化… II. 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 (2000) 第 07164 号

中等职业教育教材

化 工 原 理

上、下册

张 弓 主 编

责任编辑: 何 丽

责任校对: 蒋 宇 马燕珠

封面设计: 田彦文

化学工业出版社
教材出版中心 出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010) 64982330 (010) 64918013

购书传真: (010) 64982630

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

*

新华书店北京发行所经销

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市海波装订厂装订

开本 850mm × 1168mm 1/32 印张 21 1/4 插页 1 字数 574 千字

2000 年 6 月第 1 版 2005 年 8 月北京第 8 次印刷

ISBN 7-5025-2663-3 / G · 694

定 价: 32.00 元 (上、下册)

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

前 言

本书系根据 1978 年 6 月在兰州召开的全国中等专业学校有机化工专业教材会议所通过的编写大纲和会议精神编写的。

本书在体系上以化工单元操作为基础,着重讲清楚成熟的基础理论,努力反映本学科的现代特点。书中对传统的内容进行了精选,以流体力学、传热基本原理、蒸馏和吸收作为重点。

为了适应四个现代化的需要,本书采用了国际单位制(SI)。由于传统的化工数据和机械性能都不是国际制的,书中引用的技术资料不可避免地会出现工程制单位或习用单位。又由于我国各部门广泛采用工程制或其他单位制,为了联系我国实际,学习国际单位制时,应了解 SI 与其他单位制的关系。为此,本书附录中除选编 SI 数据外,并列出 SI 与其他单位制的换算关系。

本书全部内容讲课时数约为 180 学时。各专业可按需要选讲其中内容。

本书的绪论、第一章、第二章和第三章由兰州化学工业公司化工学校张弓编写;第四章、第十章和第十一章由北京化工学校程祖球编写;第五章和第六章由石家庄化工学校金德仁编写;第七章、第八章和第九章由兰州化学工业公司化工学校顾辉编写;全书由张弓主编。

由于时间仓促及编者水平有限,书中必有不少不妥或错误之处,希望读者予以批评指出。对本书的意见请寄兰州化学工业公司化工学校。

编 者

1979 年 5 月

2000 年版前言

本书是在 1980 年出版的《化工原理》的基础上, 根据 1996 年全国化工中等专业教学指导委员会颁发的教学大纲和 1999 年 4 月化工原理课程组工作会议精神进行修订。

本书保持原教材内容精炼、深浅适中的特点, 着重修订以下内容: (1) 新增第十二章, 包括液-液萃取、结晶、膜分离等内容。萃取和结晶两个单元操作符合新大纲的要求, 膜分离技术为新发展的操作, 这次引进可作为选修内容; (2) 计量单位按 GB 3100 ~ 3102—93 的规定修订; (3) 删除超出大纲要求的内容及繁琐的公式推导, 更新了教材涉及的机泵、设备型号等。此外, 按新大纲要求改写了绪论。

本次修订中绪论及第十二章的编写由兰州石油化工学校张弓执笔, 其他各章的修订由兰州石油化工学校陆小荣执笔。

这次修订得到化工出版社教材部及全国化工中等专业教学指导委员会化工原理课程组的支持及老师们的热心指导, 编者在此致以深切的谢意。

编 者

1999 年 9 月

上册目录

绪论	1
第一章 流体力学	8
第一节 流体静力学	8
一、流体的主要物理量	8
二、流体静力学基本方程式	14
第二节 流体动力学	21
一、流量和流速	21
二、稳定流动和不稳定流动	24
三、稳定流动的连续性——连续性方程式	25
四、柏努利方程式	26
第三节 流体阻力	34
一、流体的粘度	34
二、流体流动的类型	39
三、滞流与湍流的比较	42
四、流动阻力	44
第四节 简单管路的计算和管路布置	52
一、简单管路的计算	52
二、管路布置和安装的一般原则	54
第五节 流量的测量	56
一、孔板流量计	56
二、文氏管流量计	59
三、转子流量计	60
习题	61
第二章 液体输送机械	65
第一节 离心泵	65
一、离心泵的工作原理和结构	65
二、离心泵的性能	70

三、离心泵的型号和选用	79
四、离心泵的操作与调节	82
第二节 往复泵	87
一、往复泵的工作原理	87
二、往复泵的分类和构造特点	87
三、往复泵的主要性能	89
四、往复泵的运转和调节	91
第三节 其他类型泵	92
一、旋涡泵	92
二、齿轮泵	93
三、螺杆泵	94
四、流体作用泵	94
五、其他化工用泵	95
第四节 各类泵的比较	95
习题	98
第三章 气体压缩和输送机械	100
第一节 往复压缩机	100
一、往复压缩机的主要构造和工作原理	100
二、往复压缩机的生产能力	104
三、多级压缩	106
四、往复压缩机的分类及型号	108
五、往复压缩机的安装与运转	109
第二节 离心鼓风机和离心压缩机	110
一、离心鼓风机和离心压缩机的工作原理、主要构造和型号	110
二、离心压缩机的性能曲线与调节	111
第三节 通风机	113
一、通风机的类型	113
二、离心通风机的性能、型号和选型	113
第四节 旋转鼓风机和旋转压缩机	116
一、罗茨鼓风机	116
二、液环压缩机	117
第五节 真空泵	117
一、往复式真空泵	118

二、液环式真空泵	118
三、喷射式真空泵	118
习题	119
第四章 流体与粒子间相对运动的过程	121
第一节 重力沉降	122
一、重力作用下的沉降速度	122
二、沉降器的构造和计算	127
第二节 过滤	130
一、基本概念	130
二、过滤操作中液体通过颗粒层的流动	134
三、过滤基本方程式	135
四、过滤机的构造和操作	138
第三节 离心机	144
一、离心力作用下的沉降速度	144
二、离心机的构造和操作	146
第四节 气体净制设备	153
一、旋风分离器	154
二、其他气体净制设备	164
第五节 固体流态化	167
一、基本概念	167
二、流化床的流体力学	169
第六节 气力输送	174
习题	178
第五章 传热基本原理和换热器	180
第一节 基本概念	181
一、传热的基本方式	181
二、工业生产的换热方法	181
第二节 传热计算	183
一、传热方程式	183
二、传热过程的热量衡算	184
三、平均温度差的计算	187
四、流体流动方向的选择	193
五、传热系数 K 的测定和估算	195

第三节 热传导	198
一、导热基本定律	198
二、多层平壁的热传导	202
三、圆筒壁的热传导	204
第四节 对流传热	207
一、对流传热方程式	208
二、对流传热膜系数的经验公式	208
第五节 总传热系数	217
一、总传热系数与垢层热阻	217
二、强化传热过程的途径	223
第六节 换热器	224
一、列管式换热器	224
二、其他换热器	227
三、各种换热器的比较	234
第七节 列管换热器的工艺设计	235
一、工艺设计中应考虑的问题	236
二、列管换热器的选用和设计计算步骤	245
习题	249
第六章 蒸发	253
第一节 蒸发器	254
一、蒸发器的结构	254
二、除沫器、冷凝器	263
第二节 单效蒸发	265
一、单效蒸发的计算	265
二、温度差损失	270
第三节 多效蒸发简介	273
一、多效蒸发流程	273
二、多效蒸发的效数	275
第四节 影响蒸发器生产强度的因素	277
习题	278
附录	280
一、计量单位换算	280
二、管子规格	282

三、水的粘度 (273 ~ 373K)	284
四、液体粘度和在 293K 时的密度	285
五、气体在常压下的粘度	287
六、常用离心泵的规格 (摘录)	288
七、8-18、9-27 型离心通风机综合特性曲线图	293
八、水的物理性质	294
九、比热容列线图	295
十、液体汽化潜热列线图	299
十一、饱和水蒸气表 (按温度排列)	300
十二、饱和水蒸气表 (按压力排列)	302
十三、某些固体的导热系数	304
十四、某些液体的导热系数	305
十五、某些气体和蒸气的导热系数	306
十六、壁面污垢的热阻系数	309
十七、列管换热器的传热系数 K 的参考值	309
十八、热交换器系列标准 (摘录)	311
十九、某些水溶液的沸点 (101.3kPa)	319

绪 论

一、本课程的性质、内容和任务

化学工业是一个多行业、多品种的生产工业。很久以前，各种化工产品的生产技术，被看作很少有相同之处。那时，只从一种产品到另一种产品，逐个地去认识化工生产过程的规律；反映化工生产技术的学科，是每一种化工产品的工艺学，如硫酸工艺学、纯碱工艺学、制糖工艺学等等。

实践是认识发展的基本来源，经过长期的生产实践和科学实验，至 19 世纪 20 年代初期，提出了化工单元操作的概念。后来，又提出了化工单元过程的概念。单元过程是指化工生产中各类化学反应操作，如氧化、硝化、裂解、聚合等等。单元操作是指各种化工生产过程中普遍采用的、遵循共同的物理定律、所用设备相似、具有相同作用的那些基本物理操作。在单元操作中，参与操作的物料不发生化学性质的变化。例如，液体输送，在化肥生产中需要，在石油化工厂中和其他化工产品的生产中也需，而在输送各种液体的操作中，都遵循流体力学的规律，其目的都是把液体从一个地方送到另一个地方，这是使液体发生位置变化的力学过程。液体输送就是应用最广泛的单元操作之一。

化工产品有成千上万种，但化工单元过程和单元操作只有为数不多的几十种。单元过程和单元操作好像拼音字母的作用那样，几十个字母可以组合成无数的字、词和文章。几十种单元过程和单元操作适当的结合，构成了整个多行业、多品种的化学工业。化工原理是讲述化工生产过程的单元操作及所用设备的基本理论知识的课程。因此，它是化学工艺类和化工机械专业的一门主干课程，是必修的技术基础课。

本课程既不同于自然科学的基础学科，也不同于具体的化工产品

的生产工艺学。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，也是一切涉及物质化学变化的工业部门，如冶金工业、轻工业、原子能工业以及环境保护等所必须的。因此，它具有十分广泛的实用性。

学习本课程的主要任务：掌握各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，以便对现行的化工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。

二、基本概念

各单元操作的操作原理及设备的计算都是以物料衡算、能量衡算、平衡关系和过程速率四种概念为依据。下面扼要介绍这几个基本概念。此外，还介绍经济效益这个概念，它也是从事生产过程工作者应当了解的。

1. 物料衡算

物料衡算为质量守恒定律在化工计算中一种表现形式。根据质量守恒定律，则在任何一个化工过程中，凡向该过程输入的物料量必等于从该过程中输出的物料量与积累于该过程中的物料量之和，即

$$\sum G_1 = \sum G_2 + G_A \quad (0-1)$$

式中 $\sum G_1$ ——输入物料量的总和，kg/h；

$\sum G_2$ ——输出物料量的总和，kg/h；

G_A ——积累在过程中的物料量，kg/h。

式(0-1)是总物料衡算式，既适用于连续操作，也适用于间歇操作。当过程没有化学反应时，它也适用于物料中的任一组分的衡算；当有化学反应时，它只适用于任一元素的衡算。对连续操作，操作稳定后， $G_A = 0$ （即无新的积累）。式(0-1)简化为

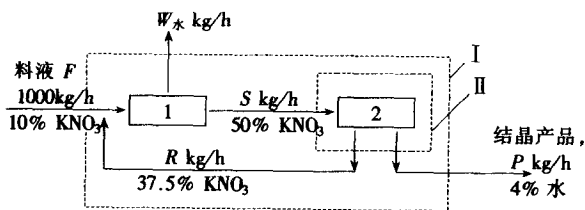
$$\sum G_1 = \sum G_2 \quad (0-2)$$

进行物料衡算时，首先画出过程示意图，在图上用箭头标出物料股股的流向，并用数字及符号说明物料的量及组成，然后用虚线圈出

衡算范围，并确定衡算对象及衡算基准，把穿过衡算范围的物料流股逐项列出建立衡算式。对于间歇操作，常以一次操作为基准；对于连续操作，则常以单位时间为基准。

例 0-1 质量分数为 0.2 的 KNO_3 水溶液，以 1000kg/h 的流量送入蒸发器。在 422K 温度下蒸发出一部分水而得到质量分数为 0.5 的水溶液；浓溶液送入结晶器，冷却至 311K 后，析出结晶水的质量分数为 0.04 的 KNO_3 晶体，并不断取出：质量分数为 0.375 的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 。首先画出过程示意图如图 0-1 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。因过程无化学反应，且为连续稳定过程，故可按式 (0-2) 写出物料衡算式：

$$\text{总物料衡算} \quad 1000 = W_{\text{水}} + P$$

$$\text{纯 } \text{KNO}_3 \text{ 衡算} \quad 1000 \times 0.2 = W + P(1 - 0.04)$$

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

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

(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 所示的范围内作物料衡算：

$$\text{总物料衡算：} \quad S = R + 208.3$$

$$\text{纯 } \text{KNO}_3 \text{ 衡算} \quad S(0.5) = R(0.375) + 208.3(1 - 0.04)$$

解得

$$R = 766.8 \text{ kg/h}$$

$$S = 975.1 \text{ kg/h}$$

由上例可知，通过物料衡算可确定过程中某些未知的物料量，为正确选择设备的尺寸提供重要的依据，也为能量衡算提供数据。如果实际操作中物料量与理论计算不相符合，应探求其原因，找出改进生产操作以及提高原料利用率的措施。

2. 能量衡算

能量衡算为能量守恒定律在化工计算中的一种表现形式。根据能量守恒定律，则在任何一个化工过程中，凡向过程输入的能量必等于从该过程输出的能量。

热量是能量的一种形式，在多数情况下化工过程涉及的能量是热量。在本课程中，能量衡算常为热量衡算。热量衡算式可表示为

$$\sum Q_1 = \sum Q_2 + q \quad (0-3)$$

式中 $\sum Q_1$ ——输入该过程的物料带入的总热量，kJ 或 kW；

$\sum Q_2$ ——从该过程输出的物料带出的总热量，kJ 或 kW；

q ——该过程与环境交换的总热量，当过程向环境散热时，此值为正，称为输出热量或热损失，当系统外向过程加入热量时，其值为负。

通过热量衡算，可以了解在生产操作中热量利用和损失情况，而在生产过程与设备的设计时，运用热量衡算可以确定需从外界引入多少热量或向外界输出多少热量（或热损失）的问题。

进行热量衡算时，除要画流程示意图、圈出衡算范围、确定出衡算基准外，还要确定出基准温度（简称基温）。习惯上选 0°C 为基温，并规定 0°C 时液体的焓为零。

3. 平衡关系

物理和化学变化过程，都有一定的方向和极限。在一定条件下，过程的变化达到了极限，即达到平衡状态。例如：热量从高温物体传到低温物体至两物体的温度相等为止；盐在一定温度下溶解于水中至盐水达到饱和状态为止等。

任何一种平衡状态的建立都是有条件的。当条件改变时，原有平

衡状态被破坏并发生移动,直至在新的条件下建立新的平衡。在生产中常用改变平衡条件的方法使平衡向有利于生产的方向移动。为了能有有效的控制生产,对许多化工生产过程,应了解过程的平衡状态和平衡条件的相互关系。可以从生产过程的物系平衡关系来推知过程能否进行以及能进行到何种程度。平衡关系也为设备的设计提供理论依据。

4. 过程速率

单位时间内过程的变化率称为过程速率。平衡关系只表明过程变化的极限,而过程速率表明过程进行的快慢。在生产中,过程速率比平衡关系更为重要。如果一个过程可以进行,但速率十分缓慢,则该过程在生产中无实用价值。

任何一个物系,如果不是处于平衡状态,必然会发生使物系趋向平衡的过程;但过程以何等速率趋向平衡,这不取决于平衡关系,而是被多方面的因素所影响。理论和科学实验证明,过程速率是过程推动力与过程阻力的函数,过程推动力越大,过程阻力越小,则过程速率越大。在某些过程中,过程速率与过程推动力成正比,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。

由于过程不同,推动力与阻力的内容也各不相同。通常,过程偏离平衡状态越远,则推动力越大;达到平衡时,推动力为零。例如,引起热物体与冷物体间热量流动的推动力是两物体间的温度差,温度差越大,则传热速率越大,温度差等于零时,两物体处于热平衡状态,彼此间不会有热的流动。过程阻力较为复杂,将在有关章节中分别介绍。

由上述可知,改变过程推动力或过程阻力即可改变过程速率。在学习各单元操作时,要注意分析影响推动和阻力的各种因素,探求改进生产的措施。

5. 经济效益

经济效益是各种生产方式都普遍存在的客观经济范畴,一般是指经济活动中,所取得的成果与消耗的劳动之比,即

$$\text{经济效益} = \frac{\text{劳动成果}}{\text{劳动消耗}}$$

式中：劳动成果常指最终的合格产品；劳动消耗包括操作费（消耗的人力、原材料、水电、维修等）和设备折旧费（由设备的造价和使用年限折算）及占用固定资产和流动资金。

显然，在一定的劳动消耗条件下，合格产品越多，经济效益就越好。为了提高效益，必须从提高成果、降低消耗两方面去改进生产。要提高劳动者的素质，开展技术革新，加强生产管理和经济核算，降低操作费用，提高设备的生产能力，以达到产品适销对路、高产、优质、低消耗、高效益的目的。

三、学习本课程的主要方法

本课程是实践性较强的课程，强调理论联系实际。通过课堂教学、讨论、做练习题、形象教学等方式，掌握基本理论；通过实验教学，巩固和加深对理论的理解，并得到化工操作的基本训练；通过课程设计，综合应用本课程及有关必修课程的知识，初步掌握化工设计的基本程序和方法。学习中，必须按各教学环节的要求圆满完成学习任务。此外，还须注意下列几点。

1. 树立工程观念

处理工程技术问题要用工程观念去分析它的可能性，所谓工程观念，就是必须同时具备四种观念，即

理论上的正确性 技术上的可行性

操作上的安全性 经济上的合理性

在这四个观念中，经济性是核心，并且是相互联系、相互促进形成一个有机的统一体，确定工程问题，必须全面考虑。

2. 理解和掌握基本理论

首先要理解各章的基本概念、基本原理、基本公式，这是学好本课程的基础。在这些基础上联系实际，逐步深入，才能灵活应用，并有意识的培养工程观念。

例如，管路直径的确定，在基本计算式中，管径与流体的体积流量和流速有关。生产中体积流量一定时，选择较大流速（阻力大，操作费用增加），则管径变小（投资费用降低）；按公式计算的管径应作调整，一是需要按流体的性质、操作温度和压力选择材质与壁厚，二

是要按国家技术标准确定实际管子规格尺寸。这就不是一个简单的数学计算问题，必须用工程观念去探讨。在本课程中，常提出“适宜”的概念或适宜范围，如适宜流速（经济流速）等，这种适宜条件就是适应工程技术的要求和生产方法各异的特点而产生的。

3. 熟悉工程计算方法，培养基本计算能力

在化工计算中涉及的物理量很多，某些数据（流体的性质、有关的常数等）计算起来比较繁杂，常常利用图表或手册查取。正确应用和熟练掌握这些图表手册的使用方法，是学习本课程的基本技能之一。

本书采用我国法定单位制和国际单位制。由于历史的原因，有些图表、手册还载有其它单位制的数据，应注意这些单位制与国际单位制的换算。

要重视本课程中各物理量的意义、单位和量纲，以及计算公式或方程的应用范围和条件。本课程中涉及的物理量、计算公式或方程式较多，如果对公式或方程的应用范围和条件以及物理量缺乏理解，就容易引起混淆，导致计算错误。

第一章 流体力学

气体和液体都具有流动性，通常总称为流体。化工生产中所处理的物料，包括原料、半成品及产品等，大多数是流体。为了把流体原料制成半成品、产品，常需把流体从一个设备送到另一个设备，或从一个车间送到另一车间。因此，流体输送操作是化工生产中经常遇到的操作。

另外，在现代化工生产的各项操作过程中，无论是传热、传质或化学反应，大多是在流体流动的情况下进行的，流体流动状态对这些过程有很大的影响。因此，流体输送是化工生产中的一个基本操作，也是其他化工过程的基础。

流体力学基本知识，是解决流体输送问题的理论根据，也是学习其他化工过程必要的基础知识。

本章主要讲述：流体静力学，即流体在静止时的平衡规律；流体动力学，即流体流动时的基本规律；流体阻力的理论和计算；以及用这些基本知识解决流体流动中的基本问题，即管路的计算和流量测量。

第一节 流体静力学

流体的静止是流体运动的一种特殊形式。研究流体流动问题，一般先从静止流体这个特殊事物开始。流体静力学的任务是研究静止流体的内部压力变化的规律。

下面，首先介绍在流体静力学中涉及的流体的主要物理量。

一、流体的主要物理量

(一) 密度

单位体积流体的质量称为密度。如以 m 表示流体的质量， V 表示流体的体积， ρ 表示流体的密度，单位为 kg/m^3 。则