



面向二十一世纪课程教材
普通高等教育“九五”国家级重点教材



化工原理

陈敏恒 丛德滋 方图南 齐鸣斋 编

上册

(第二版)

面向 21 世纪课程教材
普通高等教育“九五”国家级重点教材

化 工 原 理

上 册

(第 二 版)

陈敏恒 丛德滋 方图南 齐鸣斋 编

化 学 工 业 出 版 社

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

化工原理. 上/陈敏恒等编. —2版. —北京:化学工业出版社, 1999
高等学校教材
ISBN 7-5025-2494-0

I. 化… II. 陈… III. 化工原理-高等学校-教材
IV. TQ02

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第14141号

面向 21 世纪课程教材
普通高等教育“九五”国家级重点教材

化 工 原 理

上 册

(第 二 版)

陈敏恒 丛德滋 方图南 齐鸣斋 编

责任编辑: 骆文敏 何 丽

责任校对: 凌亚男

封面设计: 田彦文

*

化学工业出版社出版发行
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)
<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

三河市东柳装订厂装订

开本 787×960 毫米 1/16 印张 26 $\frac{1}{4}$ 字数 445 千字

1999 年 6 月第 2 版 2000 年 9 月北京第 2 次印刷

印 数: 5001—9000

ISBN 7-5025-2494-0/G · 661

定 价: 35.00 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

本书将化工单元操作按过程共性归类，即以动量传递为基础，叙述了流体输送、搅拌、流体通过颗粒层的流动、绕流及其相关的单元操作；以热量传递为基础，阐述了换热及蒸发操作；以质量传递的原理说明了吸收、精馏、萃取、吸附、结晶、膜分离等传质单元操作，最后阐述了热量、质量同时传递过程的特点及增减湿和干燥操作。

现代化工技术包含了数学模型、参数归并和过程分解等重要的工程问题处理方法，本书结合典型单元操作的定量分析和数学描述对这些方法作了较详细的说明。

单元操作的发展在过程和设备方面积累了丰富的材料，本书将以工程观点来取舍和组织这些材料。例如，以建立循环流动说明蒸发设备的沿革，以机械能平衡和动量平衡的观点观察管内流动和均布现象，结合吸收和传质设备分析引入返混的观点等，以期读者在获取知识的同时对重要的工程观点有较深的印象，便于日后更敏捷地分析较复杂的工程问题。

在过程定量分析之后，本书从设计和操作两方面将数学描述的结果付诸应用，便于读者联系实际思考问题。

自本书一版问世以来，受到了许多读者和同行的支持和鼓励。由于近十多年来化工技术的发展，此次再版时删去了工程上已少用的内容和计算方法，上册中补充了非牛顿流体基础，加快过滤速率的方法，用两相流解释蒸发管内的给热系数等；下册中补充了多元精馏、吸附、结晶和膜分离等单元操作的基本知识，各章都补充了思考题和习题以便于自学。

作者十分感谢袁渭康院士和谭天恩教授为本书再版审稿并提出了许多宝贵意见，感谢华东理工大学化工原理教研组的同事在修订工作中所给予的帮助。

作 者

1998年8月

内 容 提 要

本书以过程原理的共性和处理工程问题的方法论作为贯穿化工单元操作的两条主线，注意从典型实例的剖析中提炼若干重要的工程观点，以期提高读者处理实际工程问题的能力。全书分上、下两册出版。上册包括绪论、流体流动、流体输送机械、液体的搅拌、流体通过颗粒层的流动、颗粒的沉降和流态化、传热、蒸发等七章。每章均有例题和习题。概念论述清楚，可作为大专院校有关专业的教材使用，也可供化工部门从事科研、设计和生产的技术人员参考。



C616648

目 录

绪论	1
1. 流体流动	5
1.1 概述	5
1.1.1 流体流动的考察方法	5
1.1.2 流体流动中的作用力	7
1.1.3 流体流动中的机械能	10
1.2 流体静力学	10
1.2.1 静压强在空间的分布	10
1.2.2 压强能与位能	12
1.2.3 压强的表示方法	13
1.2.4 压强的静力学测量方法	13
1.3 流体流动中的守恒原理	16
1.3.1 质量守恒	16
1.3.2 机械能守恒	18
1.3.3 动量守恒	25
1.4 流体流动的内部结构	27
1.4.1 流动的类型	27
1.4.2 湍流的基本特征	29
1.4.3 边界层及边界层脱体	31
1.4.4 圆管内流体运动的数学描述	33
1.5 阻力损失	36
1.5.1 两种阻力损失	36
1.5.2 湍流时直管阻力损失的实验研究方法	37
1.5.3 直管阻力损失的计算式	39
1.5.4 局部阻力损失	41
1.6 流体输送管路的计算	46
1.6.1 阻力对管内流动的影响	47
1.6.2 管路计算	48
1.6.3 可压缩流体的管路计算	58
1.7 流速和流量的测定	61
1.7.1 毕托管	61
1.7.2 孔板流量计	63

1.7.3 转子流量计	67
1.8 非牛顿流体的流动	70
1.8.1 非牛顿流体的基本特性	70
1.8.2 非牛顿流体的层流流动	72
1.8.3 非牛顿流体的湍流流动与减阻现象	74
习题	75
思考题	86
本章符号说明	89
参考文献	90
2. 流体输送机械	92
2.1 概述	92
2.1.1 概述	92
2.2 离心泵	94
2.2.1 离心泵的工作原理	94
2.2.2 离心泵的特性曲线	98
2.2.3 离心泵的流量调节和组合操作	101
2.2.4 离心泵的安装高度	104
2.2.5 离心泵的类型与选用	106
2.3 往复泵	109
2.3.1 往复泵的作用原理和类型	109
2.3.2 往复泵的流量调节	111
2.4 其他化工用泵	113
2.4.1 非正位移泵	113
2.4.2 正位移泵	115
2.4.3 各类化工用泵的比较	116
2.5 气体输送机械	117
2.5.1 通风机	118
2.5.2 鼓风机	121
2.5.3 压缩机	121
2.5.4 真空泵	125
习题	129
思考题	131
本章符号说明	132
参考文献	133
3. 液体的搅拌	134

3.1 概述	134
3.1.1 搅拌器的类型	134
3.1.2 混合效果的度量	137
3.2 混合机理	138
3.2.1 搅拌器的两个功能	138
3.2.2 均相液体的混合机理	139
3.2.3 非均相物系的混合机理	140
3.3 搅拌器的性能	141
3.3.1 几种常用搅拌器的性能	141
3.3.2 强化湍动的措施	142
3.4 搅拌功率	144
3.4.1 搅拌器的混合效果与功率消耗	144
3.4.2 功率曲线	144
3.4.3 搅拌功率的分配	148
3.5 搅拌器的放大	148
3.5.1 搅拌器的放大	148
3.6 其他混合设备	151
3.6.1 其他混合设备	151
习题	152
思考题	153
本章符号说明	153
参考文献	154
4. 流体通过颗粒层的流动	155
4.1 概述	155
4.1.1 概述	155
4.2 颗粒床层的特性	155
4.2.1 单颗粒的特性	155
4.2.2 颗粒群的特性	157
4.2.3 床层特性	161
4.3 流体通过固定床的压降	162
4.3.1 颗粒床层的简化模型	162
4.4 过滤原理及设备	167
4.4.1 过滤原理	167
4.4.2 过滤设备	170
4.5 过滤过程计算	176

4.5.1	过滤过程的数学描述	176
4.5.2	间歇过滤的滤液量与过滤时间的关系	179
4.5.3	洗涤速率与洗涤时间	182
4.5.4	过滤过程的计算	183
4.6	加快过滤速率的途径	186
4.6.1	加快过滤速率的三种途径	186
	习题	188
	思考题	190
	本章符号说明	190
	参考文献	191
5.	颗粒的沉降和流态化	192
5.1	概述	192
5.1.1	概述	192
5.2	颗粒的沉降运动	192
5.2.1	流体对固体颗粒的绕流	192
5.2.2	静止流体中颗粒的自由沉降	195
5.3	沉降分离设备	199
5.3.1	重力沉降设备	199
5.3.2	离心沉降设备	203
5.4	固体流态化技术	210
5.4.1	流化床的基本概念	210
5.4.2	实际的流化现象	212
5.4.3	流化床的主要特性	212
5.4.4	流化床的操作范围	215
5.4.5	流化质量	218
5.5	气力输送	220
5.5.1	概述	220
5.5.2	气力输送装置	221
5.5.3	稀相输送的流动特性	223
	习题	225
	思考题	227
	本章符号说明	227
	参考文献	228
6.	传热	229
6.1	概述	229

6.1.1	概述	229
6.1.2	传热过程	231
6.2	热传导	233
6.2.1	傅立叶定律和导热系数	233
6.2.2	通过平壁的定态导热过程	235
6.2.3	通过圆筒壁的定态导热过程	236
6.2.4	通过多层壁的定态导热过程	238
6.3	对流给热	241
6.3.1	对流给热过程分析	241
6.3.2	对流给热过程的数学描述	243
6.3.3	无相变的对流给热系数的经验关联式	246
6.4	沸腾给热与冷凝给热	253
6.4.1	沸腾给热	253
6.4.2	沸腾给热过程的强化	256
6.4.3	蒸汽冷凝给热	257
6.4.4	冷凝给热系数	257
6.4.5	影响冷凝给热的因素及强化措施	262
6.5	热辐射	263
6.5.1	固体辐射	264
6.5.2	气体辐射	275
6.6	传热过程的计算	278
6.6.1	传热过程的数学描述	278
6.6.2	传热过程基本方程式	283
6.6.3	换热器的设计型计算	287
6.6.4	换热器的操作型计算	289
6.6.5	传热单元法	293
6.6.6	非定态传热过程的拟定态处理	296
6.6.7	变系数的传热过程计算	298
6.7	换热器	298
6.7.1	间壁式换热器的类型	298
6.7.2	管壳式换热器的设计和选用	302
6.7.3	换热器的强化和其他类型	313
习题		321
思考题		327
本章符号说明		328

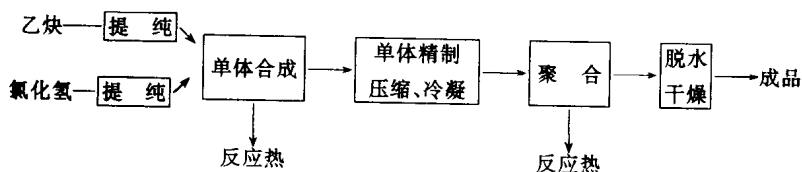
参考文献	329
7. 蒸发	330
7.1 概述	330
7.1.1 概述	330
7.2 蒸发设备	331
7.2.1 蒸发器	331
7.2.2 蒸发器的传热系数	334
7.2.3 蒸发辅助设备	336
7.3 蒸发操作的经济性和操作方式	338
7.3.1 加热蒸汽的利用率	338
7.3.2 蒸发设备的生产强度	341
7.3.3 蒸发操作的最优化	342
7.4 单效蒸发计算	343
7.4.1 单效蒸发过程的数学描述	343
7.5 多效蒸发计算	348
7.5.1 多效蒸发的过程分析	348
7.5.2 多效蒸发过程的数学描述	349
7.5.3 多效蒸发的计算方法	351
习题	357
思考题	358
本章符号说明	358
参考文献	359
附录	360
一、部分物理量的单位和因次	360
二、水与蒸汽的物理性质	360
三、干空气的物理性质	367
四、液体及水溶液的物理性质	368
五、气体的重要物理性质	382
六、固体性质	388
七、管子规格	390
八、泵与风机	392
九、换热器	397
十、标准筛目	403
十一、气体常数 R	404
十二、因次分析方法和 π 定理	404

绪 论

化工生产过程

化学工业是对原料进行化学加工以获得有用产品的工业。显然，其核心是化学反应过程及其设备——反应器。但是，为使化学反应过程得以经济有效地进行，反应器内必须保持某些优惠条件，如适宜的压力、温度和物料的组成等。因此，原料必须经过一系列的预处理以除去杂质，达到必要的纯度、温度和压力，这些过程统称为前处理。反应产物同样需要经过各种后处理过程加以精制，以获得最终产品（或中间产品）。

例如，乙炔法制取聚氯乙烯塑料的生产是以乙炔和氯化氢为原料进行加成反应以制取氯乙烯单体，然后在 0.8MPa、55°C 左右进行聚合反应获得聚氯乙烯。在进行加成反应前，必须将乙炔和氯化氢中所含各种有害物质除去，以免反应器中的催化剂中毒失效。反应生成物（氯乙烯单体）中含有未反应掉的氯化氢及其他副反应产物。未反应的氯化氢必须首先除去以免除其对设备、管道的腐蚀，然后将反应后的气体压缩、冷凝并除去其他杂质，达到聚合反应所需的纯度和聚集状态。聚合所得的塑料颗粒和水的悬浮液须经脱水、干燥而后成为产品。生产过程可简要图示如下。



此生产过程除单体合成、聚合属化学反应过程外，原料和反应物的提纯、精制等工序均属前、后处理过程。前、后处理工序多数是纯物理过程，但却是化工生产所不可缺少的。

实际上，在一个现代化的、设备林立的大型工厂中，反应器为数并不多，绝大多数的设备中都是进行着各种前、后处理操作。也就是说，现代化学工业中的前、后处理工序占有着企业的大部分设备投资和操作费用。因此，目前已不是单纯由反应过程的优惠条件来决定必要的前、后处理过程，而必须总体地确定全系统的优惠条件。由此足以见得，前后处理过程在化工生产中的重要地位。

单元操作

为数众多的前、后处理过程可从不同的角度加以分类。按操作的目的将

其分为

- (1) 物料的增压、减压和输送；
- (2) 物料的混合或分散；
- (3) 物料的加热或冷却；
- (4) 非均相混合物的分离；
- (5) 均相混合物的分离。

由于被加工物料相态的不同，上述各项也可作进一步细分。例如，气体的输送和液体输送；液-固混合物的分离与气-固混合物分离；气体均相混合物的分离与液体均相混合物的分离等等。

为了达到同样的目的，可以依据不同的原理、采用不同的方法。例如，液-固非均相混合物可依据其密度的不同采用沉降的方法实现分离的目的，也可利用其尺度的不同而采用过滤的方法加以分离。又如液态均相混合物可依据组分间挥发度的不同用精馏的方法分离，也可利用各组分在溶剂中的溶解度不同，采用溶剂萃取法进行分离。

在化学工业的历史发展中，起初是按物理过程的目的，同时也兼顾过程的原理、相态，将各种前、后处理归纳成一系列的单元操作，如表 1 所示。

表 1 化工常用单元操作

单元操作	目的	物 态	原 理	传递过程
流体输送	输送	液或气	输入机械能	动量传递
搅拌	混合或分散	气-液；液-液； 固-液；	输入机械能	动量传递
过滤	非均相混合物分离	液-固；气-固；	尺度不同的截留	动量传递
沉降	非均相混合物分离	液-固；气-固；	密度差引起的沉降运动	动量传递
加热、冷却	升温、降温，改变相态	气或液	利用温度差而传入或移出热量	热量传递
蒸发	溶剂与不挥发性溶质的分离	液	供热以汽化溶剂	热量传递
气体吸收	均相混合物分离	气	各组分在溶剂中溶解度的不同	物质传递
液体精馏	均相混合物分离	液	各组分挥发度的不同	物质传递
萃取	均相混合物分离	液	各组分在溶剂中溶解度的不同	物质传递
干燥	去湿	固体	供热汽化	热、质同时传递
吸附	均相混合物分离	液或气	各组分在吸附剂中的吸附能力不同	物质传递

表中只列出常用的单元操作，此外尚有一些不常用的单元操作。而且，随着生产发展对前、后处理过程所提出的一些特殊要求，又不断地发展出若干新的单元操作。

就其内容而言，各单元操作包括两个方面：过程和设备。各单元操作中

所发生的过程都有其内在的规律。例如，液-固非均相混合物的沉降分离中所进行的过程实质是细颗粒在液体中的自由沉降；过滤的过程实质是液体通过滤饼（颗粒层）的流动。又如气体的吸收分离中所发生的过程是某个组分由气相主体传递至气液界面，继而溶解，然后由界面传递到液相主体中去，其过程实质是传质-溶解。研究各单元操作就是为了掌握过程的规律，并设计设备的结构和大小，以使过程在有利的条件下进行。

“化工原理”课程的两条主线

对化学工业各个行业中的单元操作加以研究，这是生产发展的需要。各单元操作依据不同的原理，适应于不同的物态，达到各自的目的。然而又何以统一于同一个学科之中呢？任何一个学科（或学科分支）之所以能成为一门学科，必须有统一的研究对象、统一的研究方法。

首先，各单元操作中所发生的过程虽然多种多样，但从物理本质上说只是下列三种：

- (1) 动量传递过程（单相或多相流动）；
- (2) 热量传递过程——传热；
- (3) 物质传递过程——传质。

表1所列各单元操作皆归属传递过程。于是，传递过程成为统一的研究对象，也是联系各单元操作的一条主线。

另一方面，各单元操作有着共同的研究方法。化工原理是一门工程学科，它要解决的不单是过程的基本规律，而且面临着真实的、复杂的生产问题——特定的物料在特定的设备中进行特定的过程。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的复杂的几何形状和千变万化的物性。例如，过滤中发生的过程是流体的流动，其本身并不复杂，但滤饼提供的是形状不规则的网状结构通道。对这样的流动边界作出如实的、逼真的数学描述几乎是不可能的。采用直接的数学描述和方程求解的方法将是十分困难的。因此，探求合理的研究方法是发展这门工程学科的重要方面。

在这门学科的历史发展中已形成了两种基本的研究方法。一种是实验研究方法，即经验的方法；另一种是数学模型方法，即半理论半经验的方法。实验研究方法避免了方程的建立，直接用实验测取各变量之间的联系。但是，如果实验工作必须遍历各种规格的设备和各种不同物料，那么，这样的实验将不胜其烦，而且失去了指导意义。因此必须建立实验研究的方法论，以使实验结果在几何尺寸上能“由小见大”，在物料品种方面能“由此及彼”。至今，本门学科已在相当程度上解决了这一问题。数学模型方法立足于对复杂的实际问题作出合理简化，从而使方程得以建立。例如，将滤饼中的不规则网状通道简化成若干个平行的圆形细管，由此引入的一些修正系数则由实验测定，

因而这种方法是半经验、半理论的。由于数学模型方法抓住了影响过程的主要因素，大体上反映了过程的真实面貌，现正日益广泛地被采用。

由此可知，研究工程问题的方法论是联系各单元操作的另一条主线。

这样，以单元操作为内容，以传递过程和研究方法论为主线组成了“化工原理”这一门课。

“化工原理”课程所回答的问题

化工原理是一门应用性课程，它应通过各有关过程的研究回答工业应用中提出的问题。

1. 如何根据各单元操作在技术上和经济上的特点，进行“过程和设备”的选择，以适应指定物系的特征，经济而有效地满足工艺要求。

2. 如何进行过程的计算和设备的设计。在缺乏数据的情况下，如何组织实验以取得必要的设计数据。

3. 如何进行操作和调节以适应生产的不同要求。在操作发生故障时如何寻找故障的缘由。

当然，当生产提出新的要求而需要工程技术人员发展新的单元操作时，已有的单元操作发展的历史将对如何根据一个物理或物理化学的原理发展一个有效的过程，如何调动有利的并克服不利的工程因素发展一种新设备，提供有用的借鉴。

1. 流体流动

化工生产涉及的物料大部分是流体，涉及的过程绝大部分是在流动条件下进行的。流体流动的规律是本门课程的重要基础。涉及流体流动规律的主要有以下几方面。

(1) 流动阻力及流量计量 各种流体的输送，需要进行管路的设计、输送机械的选择以及所需功率的计算。化工管道中流量的常用计量方法也都涉及流体力学的基本原理。

(2) 流动对传热、传质及化学反应的影响 化工设备中的传热、传质以及反应过程在很大程度上受流体在设备内流动状况的影响。例如，各种换热器、塔、流化床和反应器都十分关注流体沿流动截面速度分布的均匀性，流动的不均匀性会严重地影响反应器的转化率、塔和流化床的操作性能，最终影响产品的品质和产量。各种化工设备中还常伴有颗粒、液滴、气泡和液膜、气膜的运动，掌握粒、泡、滴、膜的运动状况，对理解化工设备中发生的过程非常重要。

(3) 流体的混合 流体与流体、流体与固体颗粒在各类化工设备中的混合效果都受流体流动的基本规律的支配。

1.1 概 述

1.1.1 流体流动的考察方法

连续性假定 流体包括液体和气体。流体是由大量的彼此之间有一定间隙的单个分子所组成，而且各单个分子作着随机的、混乱的运动。如果以单个分子作为考察对象，那么，流体将是一种不连续的介质，所需处理的运动是一种随机的运动，问题将是非常复杂的。

但是，在流动规律的研究中，人们感兴趣的不是单个分子的微观运动，而是流体宏观的机械运动。因此，可以取流体质点（或微团）而不是单个分子作为最小的考察对象。所谓质点指的是一个含有大量分子的流体微团，其尺寸远小于设备尺寸，但比起分子自由程却要大得多。这样，可以假定流体是由大量质点组成的、彼此间没有间隙、完全充满所占空间的连续介质。流体的物理性质及运动参数在空间作连续分布，从而可以使用连续函数的数学工具加以描述。

实践证明，这样的连续性假定在绝大多数情况下是适合的，然而，在高

真空稀薄气体的情况下，这样的假定将不复成立。

流体在运动时，各质点间可改变其相对位置，这是它与固体运动的重要区别。由此造成对流体运动规律的描述上的种种不同。

运动的描述方法——拉格朗日法和欧拉法 对于流体的流动，通常有两种不同的考察方法。一种方法是：选定一个流体质点，对其跟踪观察，描述其运动参数（如位移、速度等）与时间的关系。这种考察方法称为拉格朗日法。

另一种方法称为欧拉法。此法并不跟踪流体质点进行观察，而是在固定空间位置上观察流体质点的运动情况，如空间各点的速度、压强、密度等，即欧拉法系直接描述各有关运动参数在空间各点的分布情况和随时间的变化。例如，对于速度，可作如下描述：

$$\begin{aligned} u_x &= f_x(x, y, z, t) \\ u_y &= f_y(x, y, z, t) \\ u_z &= f_z(x, y, z, t) \end{aligned} \quad (1-1)$$

式中 x, y, z 为位置坐标； t 为时间； u_x, u_y, u_z 为指定点速度在三个垂直坐标轴上的投影。

简言之，拉格朗日法描述的是同一质点在不同时刻的状态；欧拉法描述的则是空间各点的状态及其与时间的关系。必须指出，由于上述的连续性假定，此处所谓的点不是真正几何意义上的点，而是具有质点尺寸的点。以下均同。

定态流动 如果运动空间各点的状态不随时间而变化，则该流动称为定态流动。显然，对定态流动，指定点的速度 u_x, u_y, u_z 以及压强 p 等均为与时间无关的常数。

流线 with 轨线 为了进一步说明两种考察方法的不同，有必要区别轨线与流线。

轨线是某一流体质点的运动轨迹。显然，轨线是采用拉格朗日法考察流体运动所得的结果。

流线则不同，它是采用欧拉法考察的结果。流线上各点的切线表示同一时刻各点的速度方向。

显而易见，轨线与流线是完全不同的。轨线描述的是同一质点在不同时间的位置，而流线表示的则是同一瞬间不同质点的速度方向。在定态流动时，流线 with 轨线重合。

图 1-1 所示的曲线为一流线。图中四个箭头分别表示在同一时刻 a、b、c 和 d 四点的速度方向。

由于同一点在指定某一时刻只有一个速度，所以各流线不会相交。