



普通高等教育“十五”国家级规划教材



北京市高等教育精品教材立项项目

化工原理

杨祖荣 主 编

刘丽英 刘 伟 副主编



化学工业出版社
教材出版中心

普通高等教育“十五”国家级规划教材
北京市高等教育精品教材立项项目

化 工 原 理

杨祖荣 主 编
刘丽英 刘 伟 副主编



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/杨祖荣主编. —北京: 化学工业出版社,
2004.7

普通高等教育“十五”国家级规划教材. 北京市高
等教育精品教材立项项目

ISBN 7-5025-5758-X

I. 化… II. 杨… 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 (2004) 第 068206 号

普通高等教育“十五”国家级规划教材
北京市高等教育精品教材立项项目

化 工 原 理

杨祖荣 主编

刘丽英 刘 伟 副主编

责任编辑: 何 丽

文字编辑: 周 寒

责任校对: 李 林

封面设计: 蒋艳君

*

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

北京市彩桥印刷厂印刷

三河市前程装订厂装订

开本 787mm×960mm 1/16 印张 31 字数 711 千字

2004 年 9 月第 1 版 2004 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5758-X/G · 1528

定 价: 48.00 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

前 言

本书是教育部为普通高等院校组织编写的“十五”国家级规划教材及北京市高等教育精品教材立项项目。

本书重点介绍化工单元操作的基本原理、计算方法和典型设备。在编写过程中，力争系统完整，并做到深入浅出，注重理论联系实际，突出工程观点和研究方法，同时反映出新技术的发展。各章中设有“过程强化与展望”一节，介绍过程的强化措施及该过程的发展方向。为便于学习，各章首有“本章学习要求”，明确本章应掌握、熟悉与了解的内容；各章末附有思考题和习题。本书可作为化工类及相关专业（包括化工、石油、生物化工、食品、制药、材料、轻纺、冶金、环境工程等）的化工原理教材，也可供有关部门的技术人员参考。

为了配合教与学，我们还出版了与本书配套的《化工原理学习辅导》和《化工原理电子教案》。前者主要介绍各章节重点，难点解析，部分习题解答及工程案例，自测练习及部分研究生入学试卷等；后者为全部章节电子教案（powerpoint及部分多媒体素材）及习题详解。以供学生和教师使用。

本书主编杨祖荣，副主编刘丽英、刘伟。参加编写工作的有北京化工大学杨祖荣（绪论、蒸发、结晶），刘丽英（流体流动与输送机械、固体干燥、膜分离），刘伟（气体吸收、吸附）、苏海佳（传热、蒸馏）及开封大学陶颖（非均相物系分离）。

本书承蒙清华大学蒋维钧教授审阅，并提出了许多宝贵意见。本书在编写过程中，编者的同事们给予了热情的关心、支持和帮助，在此向他们表示深切的谢意。

鉴于编者水平有限，书中不妥之处恳请读者批评指正。

编者
2004年5月

内 容 提 要

本书重点介绍化工单元操作的基本原理、计算方法和典型设备。全书共8章，包括绪论、流体流动与输送机械、非均相物系分离、传热、蒸发、气体吸收、蒸馏、固体干燥及其他分离技术。每章均编有适量的例题，章首有“本章学习要求”，章末附有思考题和习题。

本书理论联系实际，强调工程观点，在阐明基本原理的基础上介绍计算方法和典型设备，同时适当介绍本学科的新进展。内容简练，深入浅出，突出重点，便于自学，引导创新。

本书可作为高等院校化工及相关专业的教材，也可供化工及相关部门技术人员参考。

目 录

绪论	1
第 1 章 流体流动与输送机械	6
1.1 流体基本性质	6
1.1.1 连续介质的假定	6
1.1.2 流体的压缩性	7
1.1.3 作用在流体上的力	7
1.1.4 质量力与密度	7
1.1.5 压力	8
1.1.6 剪切力与黏度	9
1.2 流体静力学	11
1.2.1 静压力特性	11
1.2.2 流体静力学基本方程	11
1.3 流体动力学	16
1.3.1 流体的流量与流速	17
1.3.2 定态流动与非定态流动	17
1.3.3 定态流动系统的质量衡算	18
1.3.4 定态流动系统的机械能衡算	19
1.4 流体流动的内部结构	26
1.4.1 流体的流动型态	26
1.4.2 流体在圆管内的速度分布	28
1.5 流体流动阻力	32
1.5.1 直管阻力	33
1.5.2 局部阻力	41
1.5.3 流体在管路中的总阻力	45
1.6 管路计算	46
1.6.1 简单管路	46
1.6.2 复杂管路	50
1.7 流速与流量的测量	52
1.7.1 测速管	52
1.7.2 孔板流量计	53

1.7.3 文丘里流量计	56
1.7.4 转子流量计	57
1.8 流体输送机械	59
1.8.1 离心泵	60
1.8.2 其他类型化工用泵	75
1.8.3 气体输送机械	80
思考题	85
习题	86
本章符号说明	94
主要参考文献	95
第2章 非均相物系分离	96
2.1 概述	96
2.1.1 非均相物系分离在工业中的应用	96
2.1.2 颗粒与颗粒群的特性	97
2.2 颗粒沉降	99
2.2.1 颗粒在流体中的沉降过程	99
2.2.2 重力沉降及设备	100
2.2.3 离心沉降及设备	106
2.3 过滤	111
2.3.1 概述	111
2.3.2 过滤基本方程式	113
2.3.3 过滤设备	116
2.4 非均相物系分离过程强化与展望	122
2.4.1 沉降过程的强化	122
2.4.2 过滤过程的强化	122
2.4.3 过滤技术展望	123
思考题	124
习题	125
本章符号说明	126
主要参考文献	127
阅读参考文献	127
第3章 传热	128
3.1 概述	128
3.1.1 传热过程在化工生产中的应用	128
3.1.2 热量传递的基本方式	129
3.1.3 间壁式换热器中的传热过程	129

3.1.4	定态与非定态传热	130
3.1.5	传热速率方程式	130
3.2	热传导	131
3.2.1	傅立叶定律	131
3.2.2	热导率	132
3.2.3	平壁的定态热传导	134
3.2.4	圆筒壁的定态热传导	137
3.3	对流传热	140
3.3.1	对流传热过程分析	140
3.3.2	对流传热速率方程	140
3.3.3	影响对流传热系数的因素	141
3.3.4	量纲分析在对流传热中的应用	141
3.3.5	无相变时对流传热系数的经验关联式	143
3.3.6	流体有相变时的对流传热系数	151
3.3.7	对流传热小结	157
3.4	传热过程的计算	158
3.4.1	热量衡算	158
3.4.2	平均温度差的计算	159
3.4.3	流体流动方向的选择	165
3.4.4	总传热系数	166
3.4.5	壁温的计算	170
3.4.6	传热面积的计算	171
3.4.7	传热计算示例	172
3.5	热辐射	177
3.5.1	热辐射的基本概念	177
3.5.2	物体的辐射能力与斯蒂芬-波尔茨曼定律	178
3.5.3	克希霍夫定律	179
3.5.4	两固体间的相互辐射	180
3.5.5	辐射、对流联合传热	182
3.6	换热器	183
3.6.1	换热器的分类	183
3.6.2	间壁式换热器	184
3.6.3	新型高效换热器	188
3.6.4	列管式换热器的设计和选用计算中的有关问题	193
3.6.5	列管式换热器的选用步骤	195
3.6.6	加热介质与冷却介质	199

3.7 传热过程的强化与展望	200
思考题	202
习题	203
本章符号说明	208
主要参考文献	208
阅读参考文献	209
第4章 蒸发	210
4.1 概述	210
4.2 单效蒸发与真空蒸发	212
4.2.1 单效蒸发流程	212
4.2.2 单效蒸发设计计算	212
4.2.3 蒸发器的生产能力与生产强度	217
4.3 多效蒸发	218
4.3.1 加热蒸汽的经济性	218
4.3.2 多效蒸发	219
4.3.3 多效蒸发效数的限制	226
4.4 蒸发设备	227
4.4.1 蒸发器	227
4.4.2 蒸发器的选型	231
4.4.3 蒸发装置的附属设备和机械	231
4.5 蒸发过程和设备的强化与展望	232
思考题	233
习题	233
本章符号说明	234
主要参考文献	234
阅读参考文献	234
第5章 气体吸收	236
5.1 概述	236
5.1.1 化工生产中的传质过程	236
5.1.2 相组成表示法	237
5.1.3 气体吸收过程	240
5.1.4 气体吸收过程的应用	241
5.1.5 吸收剂的选用	241
5.1.6 吸收操作的分类	242
5.2 吸收过程的汽-液平衡关系	243
5.2.1 气体在液体中的溶解度	243

5.2.2	相平衡关系在吸收过程中的应用	248
5.3	单相内传质	251
5.3.1	单相内物质的分子扩散	251
5.3.2	分子扩散系数	256
5.3.3	单相对流传质机理	260
5.3.4	单相内对流传质速率方程	261
5.4	相际对流传质及总传质速率方程	263
5.4.1	双膜理论	263
5.4.2	吸收过程的总传质速率方程	264
5.5	吸收塔的计算	269
5.5.1	物料衡算和操作线方程	269
5.5.2	吸收剂用量与最小液-气比	271
5.5.3	吸收塔填料层高度的计算	273
5.5.4	吸收塔塔径的计算	281
5.5.5	吸收塔的操作型计算	281
5.5.6	解吸及其计算	283
5.6	填料塔	287
5.6.1	填料	288
5.6.2	填料塔的流体力学性能	290
5.6.3	填料塔的附件	294
5.6.4	强化吸收过程的措施	296
5.6.5	填料塔分离技术新进展	297
	思考题	299
	习题	299
	本章符号说明	302
	主要参考文献	303
	阅读参考文献	303
第 6 章	蒸馏	304
6.1	概述	304
6.2	双组分溶液的汽-液平衡	305
6.2.1	理想溶液的汽-液平衡	305
6.2.2	温度组成图 ($t-x-y$ 图)	306
6.2.3	气液平衡图 ($x-y$ 图)	307
6.2.4	挥发度与相对挥发度	308
6.2.5	非理想溶液的汽-液平衡	310
6.3	简单蒸馏和平衡蒸馏	312

6.3.1	简单蒸馏	312
6.3.2	平衡蒸馏	313
6.4	精馏原理	313
6.4.1	多次部分汽化、部分冷凝	313
6.4.2	连续精馏装置流程	314
6.4.3	塔板的作用	316
6.4.4	精馏过程的回流	316
6.5	双组分连续精馏塔的计算	317
6.5.1	理论板的概念与恒摩尔流的假设	317
6.5.2	全塔物料衡算	319
6.5.3	操作线方程	320
6.5.4	进料热状况的影响及 q 线方程	322
6.5.5	理论塔板数的确定	326
6.5.6	回流比的影响与选择	335
6.5.7	理论板数的简捷计算	343
6.5.8	精馏装置的热量衡算	344
6.5.9	双组分精馏的操作型计算	347
6.6	间歇精馏	348
6.6.1	维持馏出液浓度恒定的操作	349
6.6.2	维持回流比恒定的操作	350
6.7	恒沸精馏与萃取精馏	351
6.7.1	恒沸精馏	351
6.7.2	萃取精馏	352
6.8	板式塔	352
6.8.1	板式塔的结构特点和流体力学特性	353
6.8.2	塔板的流体力学状况	354
6.8.3	塔板效率	357
6.8.4	塔高和塔径的计算	359
6.8.5	塔板负荷性能图	362
6.8.6	板式塔的类型	363
6.9	蒸馏过程的强化与展望	366
	思考题	368
	习题	369
	本章主要符号说明	374
	主要参考文献	375
	阅读参考文献	375

第7章 固体干燥	376
7.1 概述	376
7.1.1 物料的去湿方法	376
7.1.2 物料的干燥方法	376
7.1.3 对流干燥特点	377
7.2 湿空气的性质与湿度图	377
7.2.1 湿空气的性质	377
7.2.2 湿空气的湿度图及其应用	384
7.3 固体物料的干燥平衡	387
7.3.1 物料中水分含量的表示方法	387
7.3.2 水分在气-固两相间的平衡	388
7.4 干燥过程的计算	389
7.4.1 干燥过程的物料衡算	390
7.4.2 干燥过程的热量衡算	392
7.4.3 干燥系统的热效率	393
7.4.4 干燥器空气出口状态的确定	395
7.5 干燥速率与干燥时间	397
7.5.1 干燥速率	397
7.5.2 恒定干燥条件下干燥时间的计算	400
7.6 干燥器	403
7.6.1 干燥器的基本要求与分类	403
7.6.2 工业上常用的干燥器	404
7.6.3 干燥器的选型	409
7.7 固体干燥过程的强化与展望	409
7.7.1 干燥过程强化	409
7.7.2 干燥设备改进	410
7.7.3 干燥技术展望	412
思考题	413
习题	413
本章符号说明	416
主要参考文献	416
阅读参考文献	416
第8章 其他分离技术	417
8.1 结晶	417
8.1.1 概述	417
8.1.2 结晶原理	417

8.1.3	结晶器简介	420
8.1.4	结晶过程的强化与展望	421
8.2	吸附分离	421
8.2.1	概述	421
8.2.2	吸附剂及其特性	422
8.2.3	吸附平衡	424
8.2.4	吸附速率	427
8.2.5	吸附操作与装置	428
8.2.6	吸附过程的强化与展望	431
8.3	膜分离	433
8.3.1	概述	433
8.3.2	膜与膜组件	435
8.3.3	反渗透	438
8.3.4	超滤与微滤	439
8.3.5	气体分离	441
8.3.6	膜接触器	442
	思考题	444
	主要符号说明	445
	阅读参考文献	445
附录	447
一、	常用物理量的单位与量纲	447
二、	某些气体的重要物理性质	447
三、	某些液体的重要物理性质	448
四、	干空气的物理性质 (101.3kPa)	450
五、	水及蒸汽的物理性质	451
1.	水的物理性质	451
2.	水在不同温度下的黏度	452
3.	饱和水蒸气表 (按温度排列)	453
4.	饱和水蒸气表 (按压力排列)	454
六、	黏度	456
1.	液体黏度共线图	456
2.	气体黏度共线图	458
七、	热导率	459
1.	固体热导率	459
2.	某些液体的热导率	460
3.	气体热导率共线图 (101.3 kPa)	462

八、比热容	464
1. 液体比热容共线图	464
2. 气体比热容共线图 (101.3 kPa)	466
九、液体汽化热共线图	468
十、无机物水溶液的沸点 (101.3 kPa)	470
十一、管路规格	471
十二、离心泵规格 (摘录)	472
1. IS型单级单吸离心泵规格	472
2. Y型离心油泵规格	476
十三、换热器系列 (摘录)	477

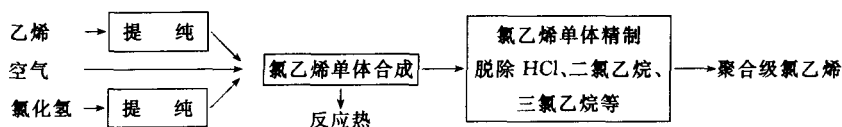
绪 论

0.1 化工生产过程与单元操作

0.1.1 化工生产过程

化学工业是将原料进行化学和物理方法加工而获得产品的工业。化工产品不仅是工业、农业和国防的重要生产资料，同时也是人们日常生活中的重要生活资料。近年来，传统化学工业向石油化工、精细化工、生物化工、环境、医药、食品、冶金等工业领域延伸与结合，并出现“化工及其相近过程工业”的提法，更显现其在国民经济中的重要地位。

化工产品种类繁多，生产过程十分复杂，每种产品的生产过程也各不相同，但加以归纳，均可视为由原料预处理过程、化学反应过程和反应产物后处理 3 个基本环节组成。例如，乙烯法制取氯乙烯的生产过程是以乙烯、氯化氢和空气为原料，在压力为 0.5 MPa、温度为 220 ℃、 CuCl_2 为催化剂等条件下反应，制取氯乙烯。在反应前，乙烯和氯化氢需经预处理除去有害物质，避免催化剂中毒。反应后产物中，除反应主产物氯乙烯外，还含有未反应的氯化氢、乙烯及副产物，如二氯乙烷、三氯乙烷等，需经后处理过程，如氯化氢的吸收过程，二氯乙烷、三氯乙烷与氯乙烯的分离过程等，最终获得聚合级精制氯乙烯。其生产过程简图如下。



上述生产过程除单体合成属化学反应过程外，原料和反应产物预、后处理环节中的提纯、精制分离，包括为反应过程维持一定的温度、压力需进行的加热、冷却、压缩等均为物理加工过程。据资料报道，化学与石油化学、制药等工业中，物理加工过程的设备投资约占全厂设备投资的 90% 左右，由此可见它们在化工生产过程中的重要地位。

0.1.2 单元操作

通常，一种产品的生产过程往往需要几个或数十个物理加工过程。但研究化工生产诸多物理过程后发现，根据这些物理过程的操作原理和特点，可归纳为若干基本的操作过程，如流体流动及输送、沉降、过滤、加热或冷却、蒸发、蒸馏、吸收、干燥、结晶及吸附等，并列于表 0-1。工程上将这些具有共性的基本操作称为单元操作 (Unit operation)。由于各单元操作均遵循自身的规律和原理，并在相应的设备中进行，因此，单元操作包括过程原理和设备两部分内容。

表 0-1 化工常用单元操作

单元操作名称	过程原理与目的	基本过程(理论基础)
流体输送 沉降 过滤 搅拌 流态化	输入机械能将一定量流体由一处送到另一处 利用密度差,从气体或液体中分离悬浮的固体颗粒、液滴或气泡 根据尺寸不同的截留,从气体或液体中分离悬浮的固体颗粒 输入机械能使流体间或与其他物质均匀混合 输入机械能使固体颗粒悬浮,得到具有流体状态的特性,用于燃烧、反应、干燥等过程	流体动力过程 (动量传递)
换热 蒸发	利用温差输入或移出热量,使物料升温、降温或改变相态 加热以气化物料,使之浓缩	传热过程 (热量传递)
蒸馏 吸收 萃取 吸附 膜分离	利用各组分间挥发度不同,使液体混合物分离 利用各组分在溶剂中的溶解度不同,分离气体混合物 利用各组分在萃取剂中的溶解度不同分离液体混合物 利用各组分在吸附剂中的吸附能力不同分离气、液混合物 利用各组分对膜渗透能力的差异,分离气体或液体混合物	传质过程 (质量传递)
干燥 增减湿 结晶	加热湿固体物料,使之干燥 利用加热或冷却来调节或控制空气或其他气体中的水汽含量 利用不同温度下溶质溶解度不同,使溶液中溶质变成晶体析出	热、质同时传递过程
压缩 冷冻	利用外力做功,提高气体压力 加入功,使热量从低温物体向高温物体转移	热力过程
粉碎 颗粒分级	用外力使固体物体破碎 将固体颗粒分成大小不同的部分	机械过程

在对上述单元操作进行基础研究归纳后还发现,它们遵循若干类似的基本规律并具有相应的理论基础。从表 0-1 可以看出,除压缩、冷冻、粉碎、颗粒分级分属热力过程和机械过程外,其余单元操作分属于以下几类。

流体动力过程 (fluid flow process) (动量传递)——遵循流体力学基本规律,以动量传递 (momentum transfer) 为理论基础的单元操作;

传热过程 (heat transfer process) (热量传递)——遵循传热基本规律,以热量传递 (heat transfer) 为理论基础的单元操作;

传质过程 (mass transfer process) (质量传递)——遵循传质基本规律,以质量传递 (mass transfer) 为理论基础的单元操作;

热、质同时传递的过程——遵循热质同时传递规律的单元操作。

1923 年,美国麻省理工学院教授 W. H. 华克尔等出版了第一部关于单元操作的著作《化工原理》(Principles of Chemical Engineering)。解放后,我国也相继出版了以单元操作为主线的《化工原理》、《化工过程与设备》等教材,至今仍沿用《化工原理》这一名称。

0.2 《化工原理》课程的性质、内容及任务

本课程的性质:本课程是继数学、物理、化学、物理化学、计算机基础之后开设的一门技

术基础课，它也是一门实践性很强的课程，所讨论的每一单元操作均与生产实践紧密相连。

本课程的内容：主要研究化工生产中各单元操作的基本原理、典型设备及其设计计算方法，主要内容如下所述（见表 0-1）。

- ① 流体动力过程 包括流体流动与输送、非均相物系分离等单元操作；
- ② 传热过程 包括传热、蒸发等单元操作；
- ③ 传质过程 包括蒸馏、吸收、吸附、膜分离等单元操作；
- ④ 热质过程 包括干燥、结晶等单元操作。

本课程的任务：培养学生运用本学科基础理论及技能（如电算技能等）分析和解决化工生产中有关实际问题的能力，特别是要注意培养学生的工程观点、定量计算、设计开发能力和创新理念。具体要求有以下几点。

- ① 选型 根据生产工艺要求、物料特性和技术、经济特点，会合理地选择单元操作及设备；
- ② 设计计算 根据选定的单元操作进行工艺计算和设备设计，当缺乏数据时会设法获取，如通过实验测取必要数据；
- ③ 操作 熟悉操作原理、操作方法和调节参数。具备分析和解决操作中产生故障的基本能力；
- ④ 开发创新 具备探索强化或优化过程与设备的基本能力。

特别应该指出的是，近年来，随着高新技术产业的发展（例如新材料、生物化工、制药、环境工程等领域的发展和崛起）出现了一系列新兴的单元操作和过程技术，如膜分离技术、超临界流体技术、超重力场分离、反应精馏技术、电磁分离技术等。它们是各单元操作之间、各专业学科之间互相渗透、耦合的结果。因此，注意培养学生灵活运用本学科以及各学科间知识与技术的耦合以开发新型单元操作与设备的基本能力十分重要。

0.3 单元操作中常用的基本概念和观点

在计算和分析单元操作的问题时，经常会用到下列 4 个基本概念和一个观点，即物料衡算、能量衡算、过程平衡和速率这 4 个基本概念和建立一个经济核算的观点，它们贯穿了本课程始终，应熟练掌握并灵活运用。这里仅作简单的介绍。

(1) 物料衡算 根据质量守恒定律，进入与离开某一过程或设备的物料的质量之差应等于积累在该过程或设备中的物料质量，即

$$\sum G_{\text{入}} - \sum G_{\text{出}} = G \quad (0-1)$$

式中 $\sum G_{\text{入}}$ ——输入物料量的总和；

$\sum G_{\text{出}}$ ——输出物料量的总和；

G ——积累物料量。

在进行物料衡算（mass balance）时，应注意下列几点。

- ① 确定衡算系统 式（0-1）既适合于一个生产过程，也适合于一个设备，甚至适合于设