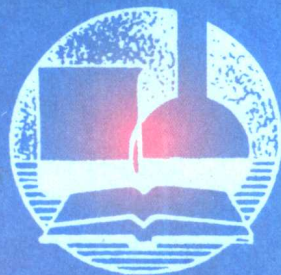


中等专业学校教材



化工过程及设备

湖南省化工学校 汤金石
北京市化工学校 赵锦全

化学工业出版社

中等专业学校教材

化工过程及设备

湖南省化工学校 汤金石

北京市化工学校 赵锦全

化学工业出版社

·北京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

化工过程及设备/汤金石, 赵锦全编. -北京: 化学工业出版社, 1996. 11
中等专业学校教材
ISBN 7-5025-1683-2

I. 化… II. ①汤… ②赵… III. ①化工过程-专业学校-教材②化工设备-专业学校-教材 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 18990 号

出版发行: 化学工业出版社 (北京市朝阳区惠新里 3 号)

社长: 棒培宗 总编辑: 蔡剑秋

发 行: 新华书店北京发行所
印 刷: 北京市通县京华印刷厂
装 订: 北京市通县京华印刷厂
版 次: 1996 年 11 月第 1 版
印 次: 1996 年 11 月第 1 次印刷
开 本: 787×1092 1/16
印 张: 32 $\frac{1}{4}$
字 数: 807 千字
印 数: 1—5000
定 价: 24.50 元



前 言

1990年7月于厦门召开的全国化工中专“化工原理类教材编审委员会”(以下简称编委会)的工作会议上,确定组织编写第三轮化工原理教材,并明确新教材应遵循的基本原则是:适应我国化学工业的现状及不断发展的需要;适应化工原理课程教学改革的需要;符合中专培养目标,具有鲜明的中专特色。编者接受任务后,在认真学习和领会中央关于教育改革一系列文件精神的基础上,广泛征求兄弟学校同行意见、深入工厂企业调查研究,拟定了“编写大纲”(征求意见稿)并在自己的教学过程中试行。随后写出“编写《化工原理》教材的基本思路”一文,于同年12月召开的“全国工科中专《化工原理》教改座谈会”上宣读,再次听取了同行们的意见。此后,本教材的组织工作一度停顿,直至1993年9月在北京召开“化工原理教材编写大纲审定会”对编者提出的“编写大纲(送审稿)”进行了逐章逐节的深入讨论、修改、补充后,本教材的编审工作才全面启动。经过近一年的修改、补充,编者将自己多年上课的讲稿整理成册,并由主审人进行初审,于1994年9月交化工出版社印成“化工过程及设备讲义”,分送各兄弟学校征求意见。1995年4月在全国化工中专教学指导委员会的组织与指导下,化工原理第三轮教材“化工过程及设备”的审稿会在上海召开。会后,编者又根据审稿会上同行们的意见,对“讲义”进行了认真的修改、补充,于1995年10月交化工出版社。至此,前后历经近六年的化工原理第三轮教材终于与大家见面了。可以说,此教材的问世是全国同行们的共同心愿,也是大家集体智慧的结晶,编者只是具体执笔人而已。如果说教材比较成功,应归功于全国的同行,教材的不足则是编者的水平不高所致。

从总的培养目标出发,根据知识结构整体优化的原则改革教学内容,是确定本教材体系和内容取舍的基本着眼点。新教材自始至终围绕培养现场技术人员的总体目标确定其主要教学内容为:化工过程的基本特征与规律;化工单元操作的工程体现;处理化工单元操作过程中各种技术问题的常规、有效方法。

工科中专学校教育的重点是如何将学生培养成为能胜任现场技术工作的“工作者”。通过在校学习,学生应掌握一定的基础理论知识,但不要求达到理论研究的深度。因此,本教材在介绍过程和设备的理论知识和常规的工程计算方法时,注意不把理论体系的完整性作为目标;而对现场技术人员所必须具备的工程观念、工程常识、工程分析方法等则结合各个单元操作进行了比较系统、全面的介绍,并给学生反复练习、实践的机会。

本教材阐述每一个单元操作的基本思路为:从工业生产实际问题引入,强调物理概念的准确性,避开繁杂的数学推导,用较多的生活、生产实例介绍公式的应用;着重描述过程的规律,全面分析影响过程的因素,以培养学生分析问题和解决问题的能力;选用例题和习题时,增加了查图、查表、合理选用经验公式的内容,使学生反复接受查阅工程手册和技术资料的训练。内容的取舍则注意了与实验教材、课程设计教材的衔接与分工;文字上力求简练、通顺、便于自学。

《化工原理》是一门成熟的、经典的课程,而科学技术的发展日新月异,新型、高效的

化工设备不断被开发、应用。为此，本教材根据“继承发扬、推陈出新”的基本原则，从设备如何保证过程实现的角度介绍典型的常用设备和比较成熟的新型设备，寻找对设备进行挖潜改造的潜力和途径，并将书名更改为《化工过程与设备》。

为拓宽学生的知识面，增强对未来工作的适应性，本教材适当增加了一些单元操作的内容，各校可根据专业性质及地区的特点灵活选用。

本教材绪论、第一至第五章由赵锦全执笔，第六至第十章由汤金石执笔，全书由汤金石统稿，上海化工学校瞿琳昌主审。参加审稿的还有广东化校梁正熙、侯丽新，南京化校归宗燕、王纬武、南宁化校陈克俊、泸州化校刘盛宾、辽宁石油化校刘元清、河北化校金德仁、江西化校王小宝、杭州化校屠金炎、安徽化校王根来、徐州化校周立雪、湖北化校芦莲英、吉林化校吕继奎、兰州化校陆小荣、天津化校徐善述、太原化校程葵阳等十五所学校的十七位老师。

化学工业出版社对本教材的出版给予了特殊的关怀、指导，并为此做了大量的组织、协调工作，付出了辛勤的劳动。编者所在学校的领导也从多方面给予支持、帮助。借此机会特向他们表示衷心感谢。

限于编者水平，书中错误及不妥之处定将不少，敬希读者批评指正。

编者 95.10

内 容 提 要

本书是全国化工中专教学指导委员会组织编审的化工原理课程教材。教材根据中等专业学校培养目标,充分吸收近十几年来中专化工原理教学改革成果,强调基础理论知识、基本概念和基本方法,注重工程观念的培养,相对减少了“原理”部分的理论推导,加强了对过程和设备知识的介绍,故书名改为《化工过程及设备》。

除绪论外,全书分十章介绍常见化工单元操作的原理、过程及设备:流体的流动与输送、流体与粒子间的相对运动、传热、蒸发、结晶、气体的吸收、液体的蒸馏、液-液萃取、固体的干燥、冷冻。每章均配适当的复习思考题与习题,书后附有二十八个有关数据图表,供学生练习查取数据之用。

目 录

绪 论	1
一、化工单元操作与化工过程	1
二、工程学与工程观念	3
三、学习本课程应注意的几个问题	5
复习思考题	6
习 题	6
第一章 流体的流动与输送	7
§ 1.1 一般概念	7
1.1.1 化工生产中的流体流动问题	7
1.1.2 流体的有关物理参数	8
1.1.3 稳定流动与连续流动	12
1.1.4 流体的流动形态	14
§ 1.2 连续、稳定流动系统的能量衡算	17
1.2.1 流动系统的能量分析	17
1.2.2 流动系统的机械能量衡算	18
1.2.3 柏努利方程的工程应用	20
§ 1.3 化工管路的基本知识	29
1.3.1 管子的类型	29
1.3.2 管件、阀以及管路的联接方式	31
1.3.3 能量损失的计算	35
1.3.4 管路计算的基本方法	43
1.3.5 管路布置及安装注意事项	49
§ 1.4 液体输送机械	51
1.4.1 离心泵	52
1.4.2 其他类型泵	64
1.4.3 各类化工用泵的比较	69
§ 1.5 气体输送机械	70
1.5.1 压缩机	70
1.5.2 鼓风机	80
1.5.3 通风机	81
1.5.4 真空泵	83
§ 1.6 液体搅拌	85
1.6.1 搅拌器的常用类型	86
1.6.2 强化搅拌作用的措施	88

复习思考题	89
习 题	91
本章符号说明	95
第二章 流体与粒子间的相对运动	97
§ 2.1 沉降	98
2.1.1 基本概念	98
2.1.2 影响沉降操作的因素	100
2.1.3 沉降设备	103
§ 2.2 过滤	109
2.2.1 过滤操作概述	109
2.2.2 过滤速率基本方程式	110
2.2.3 影响过滤操作的因素	114
2.2.4 过滤设备	114
§ 2.3 固体流态化	121
2.3.1 一般概念	121
2.3.2 流化床中的流体力学特性	124
2.3.3 流化床操作中的几个问题	125
§ 2.4 气力输送	129
2.4.1 一般概念	129
2.4.2 气力输送装置与流程	131
复习思考题	133
习 题	134
本章符号说明	135
第三章 传 热	136
§ 3.1 基本概念	136
3.1.1 化工生产中的传热问题	136
3.1.2 传热的基本方式	137
3.1.3 稳定传热与不稳定传热	138
3.1.4 传热介质的热力学参数	139
§ 3.2 热量传递的基本规律	140
3.2.1 导热过程	140
3.2.2 给热过程	146
3.2.3 给热—导热—给热过程	153
3.2.4 辐射传热过程	163
§ 3.3 换热器	167
3.3.1 换热器的分类	167
3.3.2 管式换热器	170
3.3.3 板式换热器	172
§ 3.4 列管换热器的工艺计算	175

3.4.1	换热器的能量衡算	175
3.4.2	主要结构尺寸的确定	179
3.4.3	设计计算中的其他问题	183
3.4.4	列管换热器设计计算的一般程序	186
§ 3.5	化工生产中的节能(热)	189
3.5.1	化工生产中节约热能的途径	190
3.5.2	节热与保温计算	193
3.5.3	节水	199
	复习思考题	200
	习 题	201
	本章符号说明	204
第四章	蒸 发	206
§ 4.1	基本概念	206
4.1.1	化工生产中的蒸发操作	206
4.1.2	蒸发操作的特点	206
4.1.3	蒸发操作的分类	207
§ 4.2	单效蒸发的计算	207
4.2.1	计算的主要内容	208
4.2.2	蒸发器中传热温度差的确定方法	210
§ 4.3	蒸发操作的几个问题	213
4.3.1	操作条件的选择	213
4.3.2	强化传热速率的措施	214
§ 4.4	多效蒸发	215
4.4.1	多效蒸发的概念	215
4.4.2	多效蒸发的常用流程	216
§ 4.5	蒸发设备	217
4.5.1	自然循环型蒸发器	217
4.5.2	强制循环蒸发器	219
4.5.3	膜式蒸发器	220
4.5.4	蒸发器的辅助装置	222
	复习思考题	224
	习 题	224
	本章符号说明	224
第五章	结 晶	226
§ 5.1	基本概念	226
5.1.1	化工生产中的结晶操作	226
5.1.2	结晶的理论基础	226
5.1.3	结晶的生长过程	229
§ 5.2	影响结晶操作的因素	230

5.2.1 过饱和度的影响	231
5.2.2 冷却(蒸发)速度的影响	231
5.2.3 晶种的影响	231
5.2.4 搅拌的影响	232
§ 5.3 结晶过程的基本计算	232
5.3.1 物料衡算	232
5.3.2 热量衡算	233
§ 5.4 结晶装置	235
5.4.1 工业上采用的结晶方法	235
5.4.2 结晶器	236
复习思考题	240
习 题	241
本章符号说明	241
第六章 气体的吸收	243
§ 6.1 基本概念	243
6.1.1 工业生产中的吸收操作	243
6.1.2 相组成的表示方法	245
§ 6.2 吸收操作的机理和规律	249
6.2.1 吸收操作中的相平衡	249
6.2.2 吸收过程机理	255
6.2.3 吸收过程规律	256
§ 6.3 吸收装置	262
6.3.1 塔器简介	262
6.3.2 填料塔	263
6.3.3 填料塔的液体力学特性	271
6.3.4 其他类型吸收装置	276
§ 6.4 填料塔内低浓度气体吸收的工艺计算	277
6.4.1 物料衡算	278
6.4.2 塔径的确定	280
6.4.3 填料层高度的计算	283
§ 6.5 填料吸收塔的操作分析	290
6.5.1 实际生产中的吸收操作流程	290
6.5.2 吸收操作温度	292
6.5.3 液气比	294
6.5.4 处理气量变化对吸收操作的影响	297
6.5.5 吸收-解吸相互制约	298
§ 6.6 其他条件下的吸收操作	301
6.6.1 非等温吸收	301
6.6.2 化学吸收	302

6.6.3 多组分吸收	303
6.6.4 高浓度气体吸收	303
复习思考题	304
习 题	304
本章符号说明	306
第七章 液体的蒸馏	308
§ 7.1 基本概念	308
7.1.1 工业生产中的蒸馏操作	308
7.1.2 理想二元溶液的汽液平衡	309
7.1.3 非理想二元溶液的汽-液平衡关系	316
§ 7.2 蒸馏过程的工程体现	317
7.2.1 平衡蒸馏与简单蒸馏	317
7.2.2 精馏	318
7.2.3 板式塔	319
7.2.4 精馏流程	324
§ 7.3 连续精馏过程的计算	325
7.3.1 计算的前题条件	325
7.3.2 物料衡算	326
7.3.3 理论塔板数的求取	333
7.3.4 实际塔板数的确定	338
7.3.5 连续精馏装置的热量衡算	341
§ 7.4 连续精馏操作分析	343
7.4.1 回流比	343
7.4.2 进料状况对精馏操作的影响	349
7.4.3 汽、液负荷的影响	353
7.4.4 精馏操作技术要点	355
§ 7.5 特殊精馏与多元精馏	359
7.5.1 恒沸精馏	359
7.5.2 萃取精馏	360
7.5.3 水蒸汽精馏	362
7.5.4 多元精馏	362
复习思考题	366
习 题	366
本章符号说明	368
第八章 液-液萃取	370
§ 8.1 一般概念	370
8.1.1 工业生产中的萃取过程	370
8.1.2 萃取原理	371
8.1.3 萃取剂的选择	371

§ 8.2 部分互溶物系的相平衡	372
8.2.1 三角形相图	373
8.2.2 溶解度曲线与联结线	373
8.2.3 辅助曲线与杠杆规则	376
8.2.4 萃取过程在三元相图上的表示	378
§ 8.3 液-液萃取操作	380
8.3.1 萃取操作流程	380
8.3.2 萃取过程计算	382
8.3.3 萃取操作分析	386
§ 8.4 萃取设备	390
8.4.1 混合-澄清萃取器	390
8.4.2 萃取塔	391
8.4.3 离心萃取机	395
8.4.4 萃取设备的选用	395
复习思考题	397
习 题	397
本章符号说明	398
第九章 固体的干燥	399
§ 9.1 一般概念	399
9.1.1 工业生产中的干燥操作	399
9.1.2 对流干燥过程分析	400
§ 9.2 对流干燥设备	401
9.2.1 对干燥器的基本要求	401
9.2.2 厢式干燥器	401
9.2.3 转筒干燥器	402
9.2.4 气流干燥器	403
9.2.5 沸腾床干燥器	404
9.2.6 喷雾干燥器	405
9.2.7 干燥设备的选用	406
§ 9.3 热空气流干燥含水固体湿物料	407
9.3.1 湿空气的性质	407
9.3.2 湿度图及其应用	416
9.3.3 对流干燥过程的物料衡算和热量衡算	420
9.3.4 对流干燥过程的实验测定	427
9.3.5 对流干燥操作	430
§ 9.4 特殊干燥方法	434
9.4.1 红外线干燥 (辐射干燥)	434
9.4.2 高频电流干燥	435
9.4.3 升华干燥 (冷冻干燥)	435

复习思考题·····	436
习 题·····	436
本章符号说明·····	437
第十章 冷冻 ·····	439
§ 10.1 一般概念·····	439
10.1.1 工业生产中的冷冻操作·····	439
10.1.2 人工制冷途径·····	440
§ 10.2 压缩制冷·····	440
10.2.1 单级压缩蒸发制冷的工作过程·····	440
10.2.2 多级压缩制冷·····	444
10.2.3 冷冻能力、冷冻剂与载冷体·····	446
10.2.4 压缩制冷装置·····	453
§ 10.3 其他人工制冷方法·····	455
10.3.1 吸收制冷装置·····	455
10.3.2 蒸汽喷射制冷装置·····	456
§ 10.4 深度冷冻·····	457
复习思考题·····	458
习 题·····	458
本章符号说明·····	459
附录 ·····	460
一、不同单位制的换算·····	460
二、水的物理性质·····	462
三、某些气体的主要物理性质·····	463
四、某些液体的主要物理性质·····	464
五、液体在常压下的粘度列线图·····	466
六、气体在常压下的粘度列线图·····	467
七、干空气的物理性质·····	468
八、常用钢管的规格·····	469
九、流体的常用流速范围·····	470
十、饱和蒸汽在钢管中的流速与压强降·····	472
十一、常用离心泵的规格·····	474
十二、4-72-11 型离心式通风机的规格·····	479
十三、常用物质的导热系数·····	479
十四、比热列线图·····	480
十五、液体汽化潜热列线图·····	482
十六、饱和水蒸汽表·····	483
十七、热交换器系列标准·····	486
十八、无机溶液在大气压下的沸点·····	493
十九、若干气体水溶液的亨利系数·····	494

二十、部分双组分混合液在 101.3kPa 下的汽液平衡数据	494
二十一、常压下被水汽饱和的湿空气的温湿特性	496
二十二、氨的热力学性质	497
二十三、几种冷冻剂的沸点和饱和蒸汽压的关系	498
二十四、氟利昂-12 的物理性质	499
二十五、氯化钠溶液的物理性质	499
二十六、氯化钙溶液的物理性质	500
二十七、氯化钠溶液和氯化钙溶液的比热容	501
二十八、氨压-焓图 (见插页)	

绪 论

《化工过程及设备》(又称《化工原理》)是从事化学工业的工程技术人员都应当了解、熟悉或牢固掌握的一门学科。为了使读者更好地学习这一课程,有必要把这一学科的研究对象、学习方法、以及学习中要涉及到的某些普遍问题作一个大致的介绍。

一、化工单元操作与化工过程

化学工业、石油化学工业、医药工业、以及轻工、食品、冶金、原子能等工业部门,尽管它们所生产的产品性质、加工方法、工艺流程、以及设备型式等并不完全相同,甚至差异很大,但是,它们的某些生产过程却具有一些共同的特点:这就是从原料转变为产品,不仅其物理性质发生了变化,而且其化学性质也发生了变化。此外,生产过程中还包含有一些共同的物理操作,如流体的流动与输送、沉降、过滤、热量交换(传热)……等等。

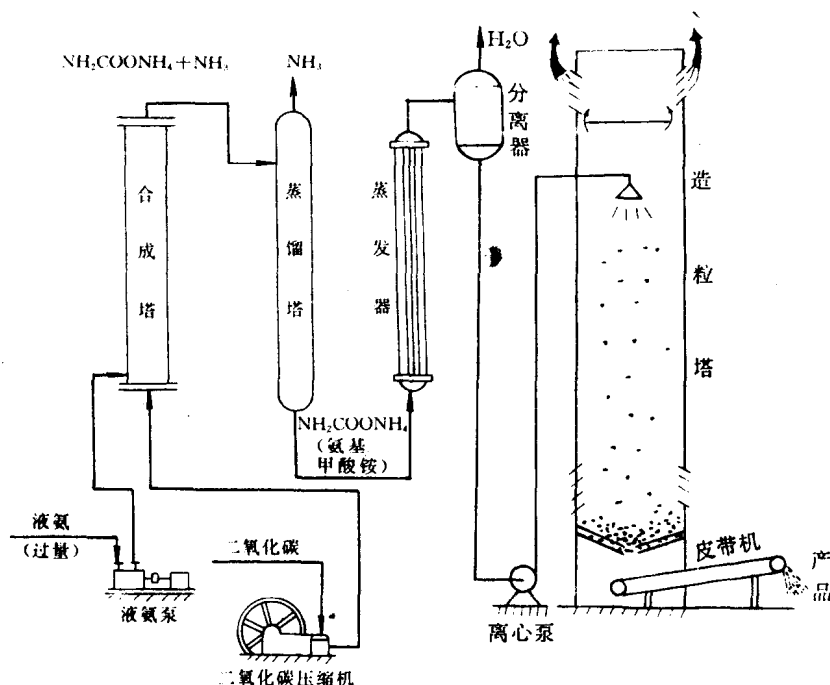


图 0-1 尿素的生产流程示意图

图 0-1 表示的是生产尿素的流程图。自合成车间来的液氨(过量)和二氧化碳气,分别由液氨泵和压缩机输送至合成塔内,生成氨基甲酸铵($\text{NH}_2\text{COONH}_4$),其中的 70% 左右经过脱水而成为尿素($\text{NH}_2\text{COONH}_4 = (\text{NH}_2)_2\text{CO} + \text{H}_2\text{O}$)。经蒸馏塔蒸出过剩的氨以及部

分氨基甲酸铵分解成的氨和 CO_2 ，在压差作用下被送到真空蒸发器内，被蒸发出的水汽和被高度浓缩的溶液在旋风分离器内被分离开（该操作称为沉降），水蒸汽从器顶部逸出，溶液从器底流出，并经离心泵输送到一般高达五六十米的造粒塔内。造粒塔的关键部件是喷嘴，它把溶液分散成一定尺寸的液滴，这些液滴在向下散落的过程中与逆流而上的冷空气相接触，在冷却过程中形成晶粒。最后经皮带运输机送至包装车间，从而得到合格的产品。

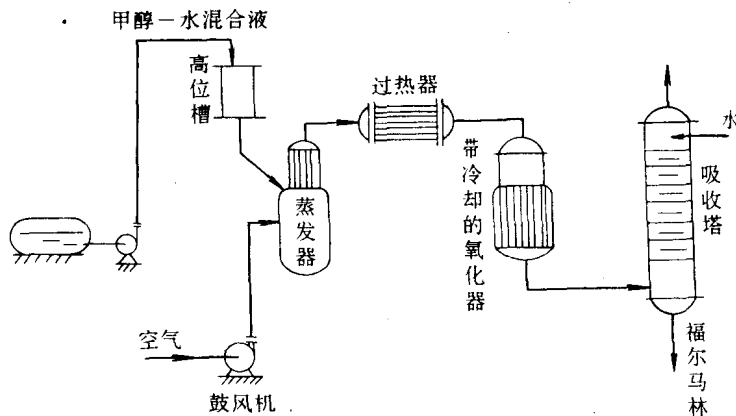


图 0-2 福尔马林的生产流程示意图

图 0-2 表示的是用甲醇氧化法生产福尔马林（含甲醇的甲醛水溶液）的流程图。甲醇和水的混合液由泵送到高位槽内，然后进入蒸发器内蒸发成汽态，与此同时，鼓风机把氧化剂（空气）送入，这两种气态原料经加热器加热至 923K (650°C) 左右，在氧化器内进行化学反应，生成了甲醛 ($\text{CH}_3\text{OH} + \frac{1}{2}\text{O}_2 = \text{HCHO} + \text{H}_2\text{O}$)；然后，使其迅速通过氧化器下部的冷却器降温至 $353\sim 393\text{K}$ ($80\sim 120^\circ\text{C}$)，最后在吸收塔内被水吸收后而成为产品。

工程上还经常将上述流程图用如下的方框图表示：

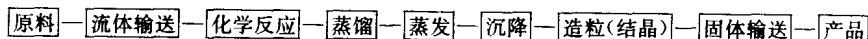


图 0-3 尿素生产方框图

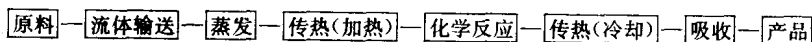


图 0-4 福尔马林生产的方框图

从这两个产品的生产过程中可以看出，尽管它们的性质和用途差别很大，但是，任何一个化工生产过程——统称为化工过程，都是由一系列化学反应操作（如氧化、还原、硝化、磺化、……等等）和上述一系列物理操作所构成。习惯上把上述化学反应操作称为化工单元过程（Unit Processes），将上述物理操作^①称为化工单元操作（Unit Operations）。应当指出，

① 凡参与操作的物料不会出现化学性质变化的操作，均属物理操作。

世界上所有化工性质的工业生产过程，全都是由上述化工单元过程和化工单元操作，按照不同方式串联组合而成。有人把这些单元过程和操作比作英文中的 26 个字母，虽然为数不多，却可以组成世界上普遍采用的一种文字。

A·T·卡萨特金教授曾经把化工生产过程中所采用的各种单元操作按照其遵循的规律划分为表 0-1 所示的五大过程：

表 0-1 常见化工单元操作的分类

过程名称	单元操作名称	遵循的规律	过程名称	单元操作名称	遵循的规律
动量传递过程	流体的流动与输送 沉降 过滤 气力输送等	流体动力学规律	热力过程	冷冻 深度冷冻	热力学规律
热量传递过程	传热（加热或冷却） 蒸发 结晶等	热交换规律	机械过程	固体的粉碎 粒子的筛分 固体输送及包装等	固体力学规律
质量传递过程	蒸馏与精馏 吸收 萃取 干燥等	分子扩散规律			

一般说来，在某一产品的加工过程中，化学反应是具有决定意义的一步，因此，人们常把化学反应称为化工生产过程的核心。而上述的物理单元操作，在多数情况下是为化学反应这一核心服务的，只有少数的单元操作（如吸收，精馏等）有时候也用来直接制造产品。所有的化工单元过程及化工单元操作，都是在特定的机器或设备内进行的，而且，设备在技术上的先进程度，对这些单元操作能否有效进行的影响极大。研究上述各种化工单元操作的基本原理和规律，熟悉实现这些操作的设备结构、工作原理、主要性能和有关技术问题，并掌握一定的运算能力，以便于读者在工程实践中能运用这些知识去分析和解决实际问题，使各项操作在最优化条件下进行，并创造较好的经济效益，就是我们学习本课程的目的。

二、工程学与工程观念

学习本课程的另一项主要任务是：帮助学生初步树立工程观念，初步养成良好的工程工作习惯，以便将来能够更好地去分析和处理化工生产中的技术问题。

凡研究如何有效地将原料变为工业产品的学科，统称为工程学。本学科就是研究在化工生产中如何有效地进行上述单元操作的学科，因此，有人把本学科称为《化学工程》。

对待任何工程问题，都必须具有如下四种观念，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