



高等学校教材

# 化工原理

第二版

管国锋 赵汝溥 主编

化学工业出版社  
教材出版中心

高等学校教材

# 化 工 原 理

(第 二 版)

管国锋 赵汝溥 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/管国锋, 赵汝溥主编. —2 版. —北京:  
化学工业出版社, 2003.7  
高等学校教材  
ISBN 7-5025-4532-8

I. 化… II. ①管…②赵… 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 (2003) 第 041583 号

---

高等学校教材

化 工 原 理

(第 二 版)

管国锋 赵汝溥 主编

责任编辑: 何 丽 徐世峰

文字编辑: 刘志茹

责任校对: 凌亚男

封面设计: 于 兵

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

北京管庄永胜印刷厂印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 31 $\frac{3}{4}$  字数 789 千字

2003 年 8 月第 2 版 2003 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4532-8/G·1207

定 价: 45.00 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

## 内 容 提 要

本书介绍化工及其相近工业生产中常见“单元操作”的原理、设备和工艺计算方法，并介绍必需的流体流动、传热和传质学基础知识。全书取材范围以全国高校化工原理课程教学指导委员会制订，化工部教育司批准执行的“化工原理课程教学基本要求”为依据，编有绪论、流体流动、流体输送机械、颗粒流体力学与机械分离、传热与换热器、蒸发、气体吸收、液体蒸馏、液液萃取、塔设备及固体干燥等章，此外，根据科技应用情况，还编入吸附与膜分离两章。本书重物理概念，强调方法论，注重教学法，注意对学生工程观点和分析、解决问题能力的培养。

本书可作为高校化工类及相关专业的本科、高职教育及培训教材；也可供相关部门的生产、设计、研究人员参考。

## 再 版 前 言

自本书一版问世以来，受到了许多兄弟院校同行、读者的支持和鼓励。这次再版重新编写了第1章、第2章、第3章的内容，改写了部分章节，增加了各章的习题答案，为了拓宽教材的应用领域，补充了蒸发、萃取单元操作的基本知识。此次再版既增加了教材的可读性，又补充了最新科技成果。

本书具有篇幅小、语言简练、内容少而精的特点，并且注重物理概念，注重方法论，强调在工程计算中给学生以引导。本教材应用面较广，不仅可作为化工类及相关专业（化工、石油、制药、生物工程、材料、环保、食品、机械等）的教材，而且也可供有关部门的科研、设计、过程开发及生产单位科技人员参考。

本书由（南京工业大学）管国锋、赵汝溥主编。参加编写工作的有赵汝溥（绪论、流体流动、流体输送机械、颗粒流体力学基础与机械分离、塔设备）、管国锋（传热及换热器、固体干燥、吸附、附录）、李新（南京林业大学）（蒸发）、居沈贵（南京工业大学）（气体吸收）、武文良（南京工业大学）（液体蒸馏）、顾正桂、林军（南京师范大学）（液-液萃取）、徐南平、邢卫红（南京工业大学）（膜分离技术）。

本书的编写得到了中科院资深院士时钧教授的亲切关怀和大力支持，编者在此对时先生表示深切的谢意。同时感谢南京工业大学化工原理教研室的同事在本书修订再版工作中给予的帮助。

由于水平有限，加以时间仓促，书中遗漏之处难免，还请读者不吝赐教，以使教材日臻完善。

编 者  
2003年3月

## 前 言

《化工原理》是以单元操作为背景的一门课程，是化工及其相近专业的一门主课。学习此课程对单元操作设备设计、设备运转情况分析、工艺评价乃至新工艺、新设备的开发都有重要作用。

单元操作种类很多，每种单元操作都有十分丰富的内容。要在此课程的有限学时内介绍单元操作，只能是少而精，加强理论基础并重视方法论，即通过对若干典型单元操作的介绍，阐明针对不同性质的问题如何选用有效地分析问题的方法。此外，根据此课程特点，还应重视设备与运行以及工程运算能力的训练。

当时国内已有多种版本的《化工原理》教材，而且各具特色。本书力求在汲取各家之长的基础上，融入自己的教学心得，写出自己的风格。但是，不仅由于编者学识水平限制，而且也因付稿仓促，书中肯定有错误疏漏之处。编者恳请专家、读者予以赐正，以便再版时订正。

本书由赵汝溥主编。书中第四、八、九章由管国锋执笔，第十章由徐南平执笔，第五章由赵汝溥、管国锋共同完成，其余均由赵汝溥执笔。

编者对本书编写过程中给予热情帮助的南京化工大学姚虎卿、徐南平、董谊英、刘天琳、杨培怡、朱辉、武文良、夏毅和许诚洁等同志表示衷心感谢。化学工业出版社张红兵、徐世峰、徐力生同志对本书出版给予了大力协助，在此一并致以深切的谢意。

编者识 1995.6

# 目 录

绪论 .....	1
第 1 章 流体流动 .....	7
1.1 概述 .....	7
1.1.1 流体及其特征 .....	7
1.1.2 连续介质模型 .....	7
1.1.3 流体力学与“流体流动” .....	7
1.2 流体静力学 .....	8
1.2.1 流体静压强 .....	8
1.2.2 流体密度 .....	9
1.2.3 流体静力学基本方程 .....	9
1.2.4 U 形压差计 .....	12
1.3 流体流动的基本概念 .....	13
1.3.1 流体在流道中的流量与流速 .....	13
1.3.2 定态与非定态流动 .....	14
1.3.3 流线 .....	14
1.3.4 流体黏度 .....	15
1.3.5 流动型态 .....	17
1.3.6 流体在圆直管内流动的流速侧形与流动阻力 .....	18
1.4 流体流动过程的物料衡算与机械能衡算 .....	20
1.4.1 连续性方程 .....	20
1.4.2 理想流体流动的机械能守恒 .....	20
1.4.3 真实流体流动的机械能守恒 .....	24
1.5 圆直管内流体层流时的流速分布与阻力计算 .....	26
1.6 圆直管内湍流的流速分布与阻力计算 .....	28
1.6.1 涡流黏度与圆直管内湍流的流速分布 .....	28
1.6.2 流体沿壁流动的速度边界层 .....	29
1.6.3 量纲分析方法 .....	30
1.6.4 摩擦系数图 .....	33
1.6.5 流体沿程阻力计算 .....	35
1.6.6 局部阻力计算 .....	35
1.6.7 流体流过非圆形截面管道的阻力计算 .....	37
1.7 管路计算 .....	38
1.7.1 管路的分类和管路计算图表 .....	38
1.7.2 简单管路计算 .....	39

1.7.3	并联管路计算	44
1.7.4	分支管路计算	45
1.7.5	变密度流体的简单管路计算	46
1.8	流速与流量测定	48
1.8.1	毕托管	48
1.8.2	文丘里流量计	48
1.8.3	孔板流量计	50
1.8.4	转子流量计	50
	本章主要符号说明	52
	习题	53
<b>第2章</b>	<b>流体输送机械</b>	<b>59</b>
2.1	概述	59
2.1.1	流体输送机械的作用	59
2.1.2	离心泵与离心式风机简介	59
2.1.3	离心力场中流体修正压强的分布规律	60
2.2	离心泵操作性能的基本方程	62
2.2.1	速度三角形	62
2.2.2	欧拉方程	63
2.3	实际离心泵的性能曲线	65
2.3.1	离心泵操作性能参量	65
2.3.2	离心泵的各项效率分析	65
2.3.3	各种叶片类型离心泵的操作性能比较	66
2.3.4	实测的离心泵性能曲线	67
2.3.5	转速改变或叶轮切削对离心泵性能曲线的影响	68
2.3.6	液体性质对离心泵特性的影响	69
2.4	离心泵的操作	69
2.4.1	灌泵及对吸入管路的要求	69
2.4.2	离心泵的工作点	70
2.4.3	离心泵的串联操作	71
2.4.4	离心泵的并联操作	72
2.5	离心泵的安装高度限制	73
2.5.1	离心泵的安装高度问题	73
2.5.2	气蚀现象	74
2.5.3	离心泵正常操作必须满足的条件	74
2.5.4	离心泵最大安装高度计算	74
2.6	离心泵的类型与选型	76
2.6.1	离心泵的类型	76
2.6.2	离心泵的选型	77
2.7	离心式风机	78
2.7.1	使用风机的目的及离心式风机的分类	78



2.7.2	离心式风机主要性能参量与性能曲线	78
2.7.3	离心式风机选型计算	80
2.8	其他类型的泵与风机	82
2.8.1	往复泵	82
2.8.2	隔膜泵	84
2.8.3	齿轮泵	84
2.8.4	旋涡泵	84
2.8.5	罗茨鼓风机	85
2.8.6	纳氏泵	85
2.8.7	水环真空泵	85
2.8.8	喷射泵	86
	本章主要符号说明	86
	习题	87
<b>第3章</b>	<b>颗粒流体力学基础与机械分离</b>	<b>91</b>
3.1	固体颗粒的几何特性与筛分分析	91
3.1.1	单颗粒的几何特性	91
3.1.2	筛分分析与颗粒群的几何特性	93
3.2	流体通过固定床层的流动	96
3.3	悬浮液滤饼过滤	98
3.3.1	悬浮液滤饼过滤的操作特点	98
3.3.2	悬浮液滤饼过滤的物料衡算	98
3.3.3	过滤速率基本方程式	99
3.3.4	间歇式过滤设备	101
3.3.5	叶滤机的过滤、洗涤过程计算和最大产率问题	103
3.3.6	板框式压滤机的过滤、洗涤过程计算和最大产率问题	105
3.3.7	过滤常量的测定	106
3.3.8	先恒速后恒压过滤	109
3.3.9	连续式过滤设备	109
3.3.10	过滤操作的改进	111
3.4	颗粒沉降与沉降分离设备	112
3.4.1	重力沉降速度	112
3.4.2	重力沉降室	117
3.4.3	离心沉降速度	118
3.4.4	旋风分离器	118
3.5	固体流态化	124
3.5.1	固体流态化现象	124
3.5.2	固体流态化的流体力学特性	126
	本章主要符号说明	129
	习题	131
<b>第4章</b>	<b>传热及换热器</b>	<b>134</b>

4.1	概述	134
4.1.1	传热在化工生产中的应用	134
4.1.2	加热介质与冷却介质	134
4.1.3	传热的基本方式	134
4.1.4	冷、热流体热交换形式	135
4.1.5	传热速率与热通量	136
4.1.6	定态传热与非定态传热	136
4.2	热传导	137
4.2.1	热传导的基本概念	137
4.2.2	傅里叶定律	137
4.2.3	热导率	138
4.2.4	平壁的热传导	139
4.2.5	圆筒壁的热传导	141
4.3	对流传热概述	142
4.3.1	给热和给热的类型	142
4.3.2	给热速率与给热系数	144
4.4	无相变流体的给热	144
4.4.1	影响给热的因素	144
4.4.2	温度边界层	145
4.4.3	与给热有关的特征数及特征数关联式的确定方法	145
4.4.4	流体在管内强制对流给热	148
4.4.5	流体在管外强制对流给热	151
4.4.6	大空间自然对流给热	153
4.5	有相变流体的给热	155
4.5.1	蒸汽冷凝给热	155
4.5.2	液体沸腾给热	159
4.6	辐射传热	161
4.6.1	辐射传热的基本概念与定律	161
4.6.2	固体壁面间的辐射传热	164
4.6.3	对流与辐射并联传热	167
4.7	串联传热过程计算	168
4.7.1	传热速率方程	168
4.7.2	热量衡算	168
4.7.3	传热系数	169
4.7.4	换热器的平均温度差	172
4.7.5	传热效率法	176
4.8	换热器	181
4.8.1	间壁式换热器	181
4.8.2	换热器传热过程的强化	187
4.8.3	列管式换热器设计与选型原则	188

本章主要符号说明	195
习题	197
<b>第 5 章 蒸发</b>	<b>201</b>
5.1 蒸发设备	202
5.1.1 蒸发器	202
5.1.2 蒸发辅助设备	206
5.2 单效蒸发	207
5.2.1 溶液沸点和温度差损失	207
5.2.2 单效蒸发的计算	209
5.3 多效蒸发	212
5.3.1 多效蒸发操作流程	212
5.3.2 多效蒸发的计算	213
5.3.3 多效蒸发效数的限制	223
5.4 蒸发器生产能力和生产强度	223
5.4.1 生产能力	223
5.4.2 生产强度	224
5.4.3 提高生产强度的途径	224
5.5 蒸发操作的其他节能措施	225
5.5.1 额外蒸汽引出	225
5.5.2 二次蒸汽的再压缩	225
5.5.3 冷凝水热量的利用	226
本章主要符号说明	226
习题	227
<b>第 6 章 气体吸收</b>	<b>228</b>
6.1 概述	228
6.1.1 吸收与传质	228
6.1.2 物理吸收与化学吸收	228
6.1.3 吸收与解吸	229
6.1.4 溶剂的选择	229
6.2 气液相平衡	229
6.2.1 平衡溶解度图	229
6.2.2 过程方向判断与过程推动力	232
6.3 分子扩散	233
6.3.1 分子扩散速率——费克定律	233
6.3.2 分子扩散传质速率	234
6.3.3 组分在气相中的分子扩散系数	237
6.3.4 组分在液相中的分子扩散系数	239
6.4 对流传质	240
6.4.1 吸收过程中溶质气体由气相转移至液相的过程	240
6.4.2 吸收机理模型	240

6.4.3	对流传质速率 .....	242
6.4.4	总传质系数 .....	243
6.5	在填料塔中低浓度气体吸收过程的计算 .....	245
6.5.1	填料塔简介 .....	245
6.5.2	低浓度气体吸收的特点 .....	245
6.5.3	物料衡算——操作线方程 .....	245
6.5.4	填料层高度的计算式 .....	246
6.5.5	传质单元高度的计算 .....	247
6.5.6	传质单元数的计算 .....	248
6.5.7	填料吸收塔的设计型计算 .....	251
6.5.8	填料吸收塔的操作型计算 .....	255
6.5.9	其他吸收流程 .....	257
6.6	气体解吸 .....	259
6.6.1	气体解吸的特点与常用的解吸方法 .....	259
6.6.2	逆流气体解吸塔的计算 .....	259
6.7	高浓度气体吸收 .....	259
6.7.1	高浓度气体吸收的特点 .....	259
6.7.2	高浓度气体吸收过程计算 .....	260
	本章主要符号说明 .....	262
	习题 .....	263
<b>第7章</b>	<b>液体蒸馏</b> .....	267
7.1	概述 .....	267
7.1.1	蒸馏原理与蒸馏操作 .....	267
7.1.2	闪蒸 .....	268
7.2	双组份物系的汽液相平衡 .....	269
7.2.1	理想物系的汽液相平衡 .....	269
7.2.2	非理想物系的汽液相平衡 .....	273
7.3	双组份简单蒸馏 .....	276
7.4	双组份液体连续精馏 .....	277
7.4.1	精馏原理与过程分析 .....	277
7.4.2	基本型连续精馏塔的设计型计算 .....	284
7.4.3	基本型连续精馏塔的操作型计算 .....	291
7.4.4	其他类型的连续精馏 .....	293
7.5	双组份间歇精馏 .....	299
7.5.1	间歇精馏过程特点 .....	299
7.5.2	$x_D$ 恒定的间歇精馏 .....	299
7.5.3	$R$ 恒定的间歇精馏 .....	300
7.6	特殊精馏 .....	301
7.6.1	萃取精馏 .....	302
7.6.2	恒沸精馏 .....	303

7.6.3	反应精馏 .....	304
7.6.4	分子蒸馏 .....	306
	本章主要符号说明 .....	308
	习题 .....	309
<b>第 8 章</b>	<b>塔设备</b> .....	<b>313</b>
8.1	填料塔 .....	313
8.1.1	填料塔简介 .....	313
8.1.2	填料的种类与特性 .....	314
8.1.3	填料层内气液逆流的流体力学特性 .....	317
8.1.4	填料层内的气液传质 .....	321
8.1.5	填料塔的附属设备 .....	326
8.2	板式塔综述 .....	328
8.2.1	板式塔的气液流动类型 .....	328
8.2.2	几种主要板式塔型简介 .....	328
8.3	筛板塔 .....	330
8.3.1	筛板塔的结构 .....	330
8.3.2	筛板塔正常操作的气液流量范围 .....	333
8.3.3	筛板塔的设计 .....	340
8.4	浮阀塔 .....	342
8.4.1	浮阀塔的结构 .....	342
8.4.2	浮阀塔正常操作的气液流量范围 .....	343
8.5	塔板效率 .....	345
8.5.1	塔板效率的不同表示方法及其应用 .....	345
8.5.2	提高塔器操作传质效果须注意的问题 .....	346
8.5.3	总板效率的经验图线 .....	347
	本章主要符号说明 .....	348
	习题 .....	349
<b>第 9 章</b>	<b>液液萃取</b> .....	<b>351</b>
9.1	概述 .....	351
9.1.1	液液萃取原理 .....	351
9.1.2	工业萃取过程 .....	351
9.1.3	萃取过程的经济性 .....	352
9.2	液液相平衡原理 .....	352
9.2.1	三角形相图 .....	352
9.2.2	三角形相图在单级萃取中的应用 .....	356
9.3	萃取过程计算 .....	358
9.3.1	萃取级内过程的数学描述 .....	358
9.3.2	多级错流萃取 .....	359
9.3.3	多级逆流萃取 .....	361
9.3.4	连续接触逆流萃取 .....	364

9.4 萃取设备 .....	365
9.4.1 常用萃取设备 .....	366
9.4.2 萃取设备的选择 .....	371
9.5 萃取过程的新进展 .....	372
9.5.1 超临界流体萃取 .....	372
9.5.2 反胶束萃取 .....	374
9.5.3 双水相萃取 .....	374
本章主要符号说明 .....	375
习题 .....	376
<b>第 10 章 固体干燥</b> .....	<b>379</b>
10.1 湿空气的性质和湿度图 .....	380
10.1.1 湿空气的性质 .....	380
10.1.2 湿空气的“ <i>I-H</i> ”图及其应用 .....	384
10.2 干燥过程的物料衡算和热量衡算 .....	387
10.2.1 物料衡算 .....	387
10.2.2 热量衡算 .....	389
10.2.3 干燥器出口空气状态的确定 .....	390
10.2.4 干燥器的热效率和干燥效率 .....	391
10.3 干燥速率和干燥时间 .....	393
10.3.1 物料中所含水分的性质 .....	394
10.3.2 干燥速率及其影响因素 .....	395
10.3.3 恒定干燥条件下干燥时间的计算 .....	399
10.4 干燥器 .....	401
10.4.1 干燥器的主要型式 .....	401
10.4.2 干燥器设计原则与举例 .....	405
本章主要符号说明 .....	411
习题 .....	413
<b>第 11 章 吸附</b> .....	<b>416</b>
11.1 概述 .....	416
11.1.1 吸附现象及其工业应用 .....	416
11.1.2 常用吸附剂 .....	417
11.2 吸附平衡 .....	418
11.2.1 吸附等温线 .....	418
11.2.2 单一气体（或蒸汽）的吸附平衡 .....	421
11.2.3 液相吸附平衡 .....	421
11.3 吸附机理和吸附速率 .....	422
11.3.1 吸附机理 .....	422
11.3.2 吸附速率 .....	422
11.3.3 吸附的传质速率方程 .....	423
11.4 吸附设备与吸附过程计算 .....	424

11.4.1	固定床吸附器与固定床吸附过程计算	424
11.4.2	移动床吸附器与移动床吸附过程计算	429
	本章主要符号说明	431
<b>第 12 章</b>	<b>膜分离技术</b>	<b>433</b>
12.1	概述	433
12.1.1	膜的概念	433
12.1.2	膜分离技术发展简史	433
12.1.3	各种膜分离过程简介	434
12.1.4	膜分离设备	435
12.2	反渗透	437
12.2.1	反渗透过程	437
12.2.2	反渗透过程的操作	441
12.2.3	反渗透的应用	443
12.3	超滤和微滤	444
12.3.1	过程原理	444
12.3.2	过程与操作	445
12.3.3	应用	446
12.4	电渗析	447
12.4.1	电渗析原理	447
12.4.2	离子交换膜及其性质	449
12.4.3	电渗析设备与操作	450
12.4.4	电渗析的应用	452
12.5	其他膜过程	454
12.5.1	气体膜分离	454
12.5.2	渗透汽化	455
12.5.3	液膜分离技术	456
	本章主要符号说明	458
<b>附录</b>		<b>460</b>
1.	单位换算	460
2.	水的物理性质	464
3.	水在不同温度下的黏度	464
4.	干空气的物理性质 ( $p = 101.3\text{kPa}$ )	465
5.	饱和水蒸气表 (以温度为准)	466
6.	饱和水蒸气表 (以压强为准)	467
7.	某些无机物水溶液的表面张力 $\sigma \times 10^3 / (\text{N/m})$ (达因/厘米)	468
8.	某些有机液体的相对密度 (液体密度与 $4^\circ\text{C}$ 水的密度之比)	469
9.	有机液体的表面张力共线图	470
10.	液体黏度共线图	472
11.	液体的比热容	474
12.	蒸发潜热 (汽化热)	476

13. 气体黏度共线图 (常压下用) .....	477
14. 101.3kPa 压强下气体的比热容 .....	478
15. 某些液体的热导率 .....	479
16. 某些固体物质的黑度 .....	480
17. 某些固体材料的热导率 .....	481
18. 常用固体材料的密度和比热容 .....	482
19. 某些气体溶于水的亨利系数 .....	483
20. 某些二元物系的汽液平衡组成 .....	483
21. 管子规格 .....	484
22. SI 型离心泵性能表 .....	486
23. 管壳式热交换器系列标准 (摘录) .....	490
24. 标准筛目 .....	491
<b>参考文献</b> .....	<b>493</b>



## 绪 论

### 《化工原理》课程

《化工原理》这一课程名称是从美国麻省理工学院的 3 位教授 W.H.Walker, W.K.Lewis 和 W.H.McAdams 于 1913 年合著的“Principles of Chemical Engineering”的书名直译过来的, 该书就是世界上第 1 本化工原理教材。

麻省理工学院开设这门课程的原意是让化学系学生在学完化学课程后能在校学习到一些化工生产实际知识, 以便就业后能较快地胜任工作。实践证明, 设置这课程的效果是良好的, 课程讨论的内容是符合客观需要的。以后, 不仅在美国而且在世界各地的许多大学都相继开出了这一课程。

中国约在 1940 年也引入了这课程, 至今, 我国自编的化工原理教材已不下二三十种。这门课不仅是当前我国化工类各专业的主干课程, 也是与化工相关的许多专业的必修课程。

此课程究竟阐述的是哪些内容呢? 在回答这问题之前, 不妨先了解如下 3 个化工术语的涵义。

#### 1. 化工生产过程

广义地说, 凡工业生产的关键环节是改变物质的组成, 或者说是化学反应, 这类生产便归属化工生产范畴。属于化工范畴的行业是很多的, 这些行业通常被划分成多种组合。有按原料路线或产品用途的不同划分的, 亦有按加工性质的差异划分的。各化工行业大体被分为以“三酸两碱”为代表的基础化工、石油化工、煤化工、生物化工、制药工业、硅酸盐工业、林业化工、涂料化工、肥料化工、精细化工及塑料工业等。虽然为便于管理及相近行业的技术交流, 很多行业已从化工中划分出去, 但它们仍属“化工大家族”中的一员, 而且彼此间在许多技术问题上仍是密切关联的。

#### 2. 化工生产工艺学

凡研究某一特定化工产品生产全过程的学科称为该产品的生产工艺学。例如, 研究合成氨生产过程的学科称为合成氨生产工艺学, 研究硫酸生产的就叫硫酸生产工艺学等。

#### 3. 单元操作与化学工程

对于任何一个化工生产过程, 不难发现, 虽然化学反应是核心, 反应器是“心脏”, 然而这部分只是生产全过程中的一个环节, 在生产线的其余许多环节却往往都是物理加工过程。这些物理加工过程主要用于反应前对物料的前处理或反应后对物料的后处理。像这样的物理过程很多, 如流体的输送、物料的加热或冷却、过滤、沉降、蒸发、结晶、气体的吸收、液体的蒸馏、萃取、干燥和吸附等。

早年人们对不同的化工产品的生产技术是分别研究的, 没有考虑到其间相互的联系。到 19 世纪 80 年代, Davis 开始注意到了不同的化工产品生产过程中用到的物理过程之间是有联系的。到 1888 年, Norton 讲授机械工程与工业化学相互渗透的课程, 在工业化学部分谈到物理过程时已带有超越行业、阐明共性的观念。到 20 世纪初, 一个称为“单元操作”的概念已逐渐酝酿成熟。一方面, 一种单元操作指的是一种物理加工过程; 另一方面, 单元操作含有超越行业界限, 把各行业生产中同类的物理过程集中起来研究, 找出共性规律, 改进