



普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
(高职高专教材)

# 化工单元操作及设备

● 冷士良 陆清 宋志轩 主编  
● 王德堂 主审



化学工业出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
(高职高专教材)

# 化工单元操作及设备

冷士良 陆清 宋志轩 主编  
王德堂 主审



化学工业出版社

·北京·

本教材为普通高等“十一五”国家级规划教材。为了适应培养化工高技术及高技能人才的需要，教材贯彻以全面素质为基础，以能力为主线，以培养创新意识和实践能力为重点的当代职教理念。在选择内容时，坚持面向岗位需要，从实际中来，到实际中去，兼顾未来发展的原则。全书分上下两篇，上篇包括流体输送、传热和冷冻，下篇包括非均相物系的分离、传热、蒸馏、吸收、干燥、蒸发、结晶、萃取和新型单元操作等分离操作，可供学习者根据实际选学选用。教材每章开始为学习目标，能够使学习者明确学习目的；章后配有一定的思考题，以引发学习者思考和提高学习兴趣；章后还配有习题，方便学习者学以致用，复习提高。

本教材可以作为高职高专化工技术类专业及相关专业的教材及化工职业资格培训教材，也可以作为各类化工应用性人才及教师的参考书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

化工单元操作及设备/冷士良，陆清，宋志轩主编。  
北京：化学工业出版社，2007.7  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
(高职高专教材)  
ISBN 978-7-122-00639-4

I. 化… II. ①冷…②陆…③宋… III. 化工单元操作-高等学校：技术学院-教材 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 087727 号

---

责任编辑：于 卉

文字编辑：冯国庆

责任校对：宋 玮

装帧设计：于 兵

---

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）

印 装：化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张 24 $\frac{1}{2}$  字数 677 千字 2007 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

---

定 价：38.00 元

版权所有 违者必究

# 前 言

本教材是在全国化工高职教学指导委员会化工原理课程组指导下，根据教育部有关高职高专教材编写的文件精神，以高职高专化工技术专业高技术、高技能型人才培养目标为依据编写的，是根据 2005 年化工原理课程教学改革会议的精神，对化工原理课程进行改革的产物。

教材尊重学科，但不恪守学科，从职业岗位需要出发，以能力培养主线组织内容，自始至终贯彻了“了解概念、理论够用、强化应用”的职业教学理念。即了解与岗位相关的工程概念，从技术应用角度去介绍必要的理论，重点在于运用概念和理论解决工程实际问题。

在教材编写过程中，征求了企业专家的意见。各章中的流程及操作举例均由企业提供，再把概念、理论与之结合起来进行编写。因此教材实际、实用，既符合岗位工作需要，又符合认知规律。高职教育与生产实际相结合的特色在教材中得到了充分的展示。

教材每章开始为学习目标，能够使学习者明确学习目的；章后配有一定的思考题，以引发学习者思考和提高学习兴趣；章后还配有习题，方便学习者学以致用，复习提高。

教材淡化了没有实用价值的推导及计算，以物料平衡及能量的平衡为重点，致力于解决工程实际问题。把工程技术观点的培养作为重点，努力把培养用工程技术观点观察、分析和解决单元操作中的操作问题的能力落到实处。

教材中的物理量，统一采用法定计量单位，符号采用国家标准 GB 3100~3102—1993。

教材根据当前高职生源的实际状况，力求深浅适中，简单明了，层次分明，难点生动化，重点实例化，方便学习者自主学习。

教材分上篇和下篇，上篇主要介绍流体输送、传热和冷冻，它们是下篇的基础；下篇主要是化工分离操作，内容既涉及了化工生产中的常见分离操作，也涉及了应用不十分广泛的单元操作，还涉及了新型单元操作，以便各校根据各地区经济及专业实际选择教学内容。

教材共分十二章，冷士良、陆清、宋志轩担任主编。绪论、附录、第 4、5、9、12 章及篇前过渡由冷士良编写；第 7、8 章由陆清编写；第 1 章由宋志轩编写；第 2、3、11 章由何灏彦编写；第 6、10 章由郑幼松编写；张文革在编写过程中给予了支持。全书由冷士良统稿；王德堂审阅了书稿。

在本教材编写过程中，得到企业专家和同行的无私支持，在此一并提出感谢。

由于编者水平所限，时间仓促，不完善之处在所难免，敬请读者和同仁们指正，以便今后修订。

编者  
2007.5

# 目 录

绪论	1	0.4.2 能量衡算	5
0.1 化工生产过程	1	0.4.3 平衡关系	5
0.2 单元操作	2	0.4.4 过程速率	6
0.3 本门课程的性质、内容和任务	3	0.5 单位的正确使用	6
0.4 本课程解决问题的主要方法	4	思考题	7
0.4.1 物料衡算	4		

## 上 篇

第1章 流体输送	11	思考题	67
学习目标	11	习题	68
1.1 概 述	11	本章主要符号说明	73
1.1.1 流体输送在化工生产中的应用	12	第2章 传热	74
1.1.2 常见流体输送方式	12	学习目标	74
1.1.3 流体的物理性质及测定	13	2.1 概述	74
1.2 输送任务的表达	18	2.1.1 传热在化工生产中的应用	74
1.2.1 流量与流速	18	2.1.2 传热过程的类型	75
1.2.2 流量方程式	19	2.1.3 载热体及其选择	75
1.2.3 连续性方程	19	2.1.4 工业换热方法	75
1.3 化工管路	21	2.2 传热的基本方式	76
1.3.1 化工管路的构成与标准化	21	2.2.1 传导传热	76
1.3.2 化工管路的布置与安装	24	2.2.2 对流传热	77
1.4 伯努利方程及其应用	26	2.2.3 辐射传热	77
1.4.1 伯努利方程	26	2.3 间壁传热	77
1.4.2 伯努利方程的应用	29	2.3.1 总传热速率方程及其应用	77
1.5 流体输送时的流动阻力	34	2.3.2 传热速率	81
1.5.1 流体阻力产生的原因	34	2.3.3 传热推动力的计算	81
1.5.2 流体阻力计算	34	2.3.4 传热系数的获取方法	84
1.5.3 管路设计时减少流体阻力的措施	43	2.3.5 强化与削弱传热	96
1.6 流量测量	43	2.3.6 传热计算举例	98
1.6.1 孔板流量计	43	2.4 换热器	101
1.6.2 文丘里流量计	45	2.4.1 换热器的分类	101
1.6.3 转子流量计	45	2.4.2 间壁式换热器简介	101
1.7 流体输送设备	46	2.4.3 列管换热器的型号与系列标准	107
1.7.1 离心泵	46	2.4.4 列管式换热器的选用与设计原则	108
1.7.2 其他类型泵	58	2.4.5 换热器的使用与维护	110
1.7.3 往复式压缩机	61	思考题	113
1.7.4 离心式压缩机	63	习题	114
1.7.5 其他气体压送机械	65	本章主要符号说明	115

<b>第3章 冷冻</b> .....	116
学习目标 .....	116
3.1 概述 .....	116
3.1.1 工业生产中的冷冻操作 .....	116
3.1.2 人工制冷方法 .....	116
3.2 压缩制冷基本原理 .....	117
3.2.1 单级压缩蒸发制冷的工作过程 .....	117
3.2.2 操作温度的选择 .....	118
3.2.3 多级压缩制冷 .....	119
3.3 冷冻能力 .....	120
3.3.1 冷冻能力的表示 .....	120

3.3.2 标准冷冻能力 .....	121
3.4 冷冻剂与载冷体 .....	122
3.4.1 冷冻剂 .....	122
3.4.2 载冷体 .....	123
3.5 压缩制冷装置 .....	124
3.5.1 压缩机 .....	124
3.5.2 冷凝器 .....	124
3.5.3 蒸发器 .....	125
3.5.4 节流膨胀阀 .....	126
思考题 .....	126
本章符号说明 .....	126

## 下 篇

<b>第4章 非均相物系分离</b> .....	129
学习目标 .....	129
4.1 概述 .....	129
4.1.1 非均相物系分离在化工生产中的应用 .....	129
4.1.2 常见非均相物系分离的方法 .....	130
4.2 沉降 .....	130
4.2.1 重力沉降 .....	131
4.2.2 离心沉降 .....	135
4.3 过滤 .....	139
4.3.1 过滤的基本知识 .....	139
4.3.2 过滤设备 .....	142
4.4 气体的其他净制方法 .....	145
4.4.1 惯性除尘器 .....	145
4.4.2 静电除尘器 .....	145
4.4.3 文丘里除尘器 .....	145
4.4.4 泡沫除尘器 .....	146
4.4.5 袋滤器 .....	146
4.5 非均相物系分离方法的选择 .....	146
4.5.1 气体非均相物系 .....	146
4.5.2 液体非均相物系 .....	146
思考题 .....	147
习题 .....	147
本章主要符号 .....	147

5.2.4 加料板物料衡算 .....	156
5.3 塔板数的确定 .....	158
5.3.1 实际板数与板效率 .....	158
5.3.2 理论板数的确定方法 .....	158
5.4 连续精馏的操作分析 .....	162
5.4.1 进料状况对精馏的影响 .....	163
5.4.2 回流比的影响 .....	164
5.4.3 操作温度及压力的影响 .....	166
5.5 精馏过程的热量平衡与节能 .....	167
5.5.1 热量衡算 .....	167
5.5.2 节能措施 .....	168
5.6 其他蒸馏方式 .....	170
5.6.1 简单蒸馏 .....	170
5.6.2 闪蒸 .....	170
5.6.3 间歇精馏 .....	171
5.6.4 多组分精馏 .....	171
5.6.5 特殊精馏 .....	172
5.7 精馏设备 .....	173
5.7.1 板式塔 .....	174
5.7.2 辅助设备 .....	176
5.8 精馏塔的操作 .....	177
5.8.1 操作步骤 .....	177
5.8.2 不正常现象及处理 .....	177
思考题 .....	178
习题 .....	179
本章主要符号 .....	180

<b>第5章 蒸馏</b> .....	148
学习目标 .....	148
5.1 概述 .....	148
5.1.1 蒸馏在化工生产中的应用 .....	148
5.1.2 气液相平衡 .....	149
5.1.3 精馏原理和流程 .....	153
5.2 精馏的物料衡算 .....	154
5.2.1 全塔物料衡算 .....	154
5.2.2 精馏段物料衡算 .....	155
5.2.3 提馏段物料衡算 .....	155

<b>第6章 气体吸收</b> .....	181
学习目标 .....	181
6.1 概述 .....	181
6.1.1 气体吸收在化工生产中的应用 .....	181
6.1.2 气体吸收的分类 .....	183
6.1.3 吸收剂的选择 .....	183
6.2 从溶解相平衡看吸收操作 .....	184
6.2.1 气液相平衡关系 .....	184
6.2.2 吸收条件 .....	190

6.2.3 气液相平衡关系对吸收操作的意义	191	7.3.2 $H-I$ 图的应用	248
6.3 吸收速率	192	7.4 湿物料中水分的性质	250
6.3.1 传质基本方式	192	7.4.1 湿物料含水量的表示方法	250
6.3.2 双膜理论	193	7.4.2 平衡水分与自由水分	250
6.3.3 吸收速率	195	7.4.3 结合水分与非结合水分	251
6.3.4 影响吸收速率的因素	197	7.5 干燥过程的物料衡算	252
6.4 吸收的物料衡算	199	7.5.1 干燥产品流量 $G_2$	252
6.4.1 全塔物料衡算	200	7.5.2 水分蒸发量 $W$	252
6.4.2 吸收操作线	201	7.5.3 空气消耗量 $L$	252
6.4.3 吸收剂用量	203	7.6 干燥速率	253
6.5 塔径的计算	206	7.6.1 干燥速率	253
6.6 填料层高度的确定	206	7.6.2 影响干燥速率的因素	255
6.6.1 填料层高度的确定方法	207	7.7 干燥设备	255
6.6.2 填料层高度的计算	209	7.7.1 对干燥设备的基本要求	255
6.7 吸收操作分析	214	7.7.2 干燥器的选择	256
6.7.1 影响吸收操作的因素	214	7.7.3 常用的工业干燥器	258
6.7.2 吸收塔的操作	218	7.8 干燥器的操作	261
6.8 其他吸收与解吸	219	7.8.1 干燥过程控制的参数	261
6.8.1 化学吸收	219	7.8.2 典型干燥器的操作	262
6.8.2 高浓度吸收	220	思考题	263
6.8.3 多组分吸收	220	习题	264
6.8.4 解吸	221	本章主要符号说明	264
6.9 吸收设备	224	<b>第8章 蒸发</b>	266
6.9.1 填料塔	224	学习目标	266
6.9.2 填料	224	8.1 概述	266
6.9.3 辅助设备	231	8.1.1 蒸发在工业生产中的应用	266
6.9.4 填料塔的流体力学性能	233	8.1.2 蒸发的类型与特点	266
思考题	235	8.2 单效蒸发	267
习题	236	8.2.1 单效蒸发流程	267
本章主要符号	237	8.2.2 单效蒸发计算	268
<b>第7章 干燥</b>	239	8.3 多效蒸发	271
学习目标	239	8.3.1 多效蒸发对节能的意义	271
7.1 概述	239	8.3.2 多效蒸发流程	272
7.1.1 干燥在工业生产中的应用及干燥方法	239	8.4 蒸发设备	273
7.1.2 对流干燥的条件和流程	241	8.4.1 自然循环型蒸发器	274
7.2 湿空气的性质	242	8.4.2 强制循环蒸发器	275
7.2.1 湿度	242	8.4.3 膜式蒸发器	276
7.2.2 相对湿度	242	8.4.4 浸没燃烧蒸发器	277
7.2.3 比体积	243	8.5 蒸发器的操作	278
7.2.4 比热容	244	8.5.1 蒸发操作的几个问题	278
7.2.5 比焓	244	8.5.2 典型蒸发器的操作	279
7.2.6 干球温度	244	思考题	281
7.2.7 露点	244	习题	281
7.2.8 湿球温度	245	本章主要符号说明	282
7.2.9 绝热饱和温度	245	<b>第9章 结晶</b>	283
7.3 湿空气的湿度图	246	学习目标	283
7.3.1 $H-I$ 图的构成	246	9.1 概述	283
		9.1.1 结晶及其工业应用	283
		9.1.2 固液体系相平衡	284

9.1.3 晶核的形成 .....	286	11.2.3 吸附工艺简介 .....	335
9.1.4 晶体的成长 .....	287	11.3 色谱分离技术 .....	337
9.2 结晶方法 .....	288	11.3.1 概述 .....	337
9.2.1 冷却结晶 .....	288	11.3.2 色谱分配系数 .....	339
9.2.2 蒸发结晶 .....	288	11.3.3 柱色谱的分离过程及应用 .....	339
9.2.3 真空冷却结晶 .....	288	思考题 .....	340
9.2.4 盐析结晶 .....	289	<b>第12章 分离方法的选择</b> .....	342
9.2.5 反应沉淀结晶 .....	289	学习目标 .....	342
9.2.6 升华结晶 .....	289	12.1 分离方法的比较 .....	342
9.2.7 熔融结晶 .....	289	12.2 分离方法的选择 .....	342
9.3 结晶设备与操作 .....	289	12.2.1 经济合理性 .....	342
9.3.1 常见结晶设备 .....	289	12.2.2 技术可行性 .....	343
9.3.2 结晶操作要求 .....	293	12.2.3 系统适应性 .....	343
思考题 .....	294	12.2.4 方法可靠性 .....	344
习题 .....	294	12.2.5 公共安全性 .....	344
<b>第10章 萃取</b> .....	295	附录 .....	345
学习目标 .....	295	一、中华人民共和国法定计量单位	
10.1 概述 .....	295	(摘录) .....	345
10.1.1 萃取在化工生产中的应用 .....	295	二、某些气体的重要物理性质 .....	346
10.1.2 萃取剂的选择 .....	296	三、某些液体的重要物理性质 .....	347
10.1.3 萃取操作流程 .....	297	四、干空气的物理性质 (101.33kPa) .....	348
10.2 部分互溶物系的相平衡 .....	299	五、水的物理性质 .....	349
10.2.1 部分互溶物系的相平衡 .....	300	六、常用固体材料的密度和比热容 .....	350
10.2.2 单级萃取在相平衡图上的		七、饱和水蒸气 (以温度为基准) .....	351
表示 .....	306	八、饱和水蒸气 (以压力为基准) .....	352
10.3 萃取设备 .....	311	九、某些液体的热导率 .....	354
10.3.1 塔式萃取设备 .....	312	十、某些气体和蒸气的热导率 .....	355
10.3.2 萃取塔的操作 .....	316	十一、某些固体材料的热导率 .....	356
10.4 超临界流体萃取技术 .....	318	十二、液体的黏度共线图 .....	357
10.4.1 超临界流体萃取技术的发展与		十三、101.33kPa 压力下气体的黏度共	
特点 .....	318	线图 .....	359
10.4.2 超临界流体萃取原理 .....	319	十四、液体的比热容共线图 .....	361
10.4.3 超临界流体萃取过程简介 .....	320	十五、气体的比热容共线图	
10.4.4 超临界流体萃取的工业应用 .....	322	(101.33kPa) .....	363
思考题 .....	323	十六、蒸发潜热 (汽化热) 共线图 .....	365
习题 .....	323	十七、某些有机液体的相对密度共线图 .....	367
本章主要符号 .....	324	十八、壁面污垢热阻 (污垢系数) .....	368
<b>第11章 新型单元操作简介</b> .....	325	十九、离子泵的规格 (摘录) .....	369
学习目标 .....	325	二十、管壳式换热器系列标准 (摘录) .....	374
11.1 膜分离 .....	325	二十一、某些二元物系在 101.3kPa (绝压)	
11.1.1 概述 .....	325	下的气液平衡组成 .....	377
11.1.2 膜分离装置与工艺 .....	327	二十二、热轧无缝钢管规格与质量	
11.1.3 典型膜分离过程及应用 .....	330	(摘自 GB 8163—87) .....	378
11.2 吸附 .....	333	二十三、冷拔无缝钢管规格与质量	
11.2.1 概述 .....	333	(摘自 GB 8163—87) .....	382
11.2.2 吸附速率 .....	334	参考文献 .....	384



# 绪 论

## 0.1 化工生产过程

化工生产过程是指化学工业的一个个具体的生产过程，简单地说，就是化工产品的加工过程。化学工业是指以工业规模（而不是实验室规模）对原料进行加工处理，使其发生物理和化学变化而成为生产资料或生活资料的加工业。显然，化学变化是化工生产过程的最显著特征，也是过程的核心。但是，为了使化学反应过程得以经济、有效、安全的进行，必须创造并维持适宜的反应条件，如一定的温度、压力、流速、物料的组成等。因此，原料必须经过适当的预处理（前处理），以除去其中对反应有害的成分、达到必要的纯度、营造适宜的温度和压力条件；而反应混合物必须经过分离（后处理），以获得合乎质量标准的产品；在提倡物尽其用节约资源的今天，未反应完的原料还必须循环利用，以提高资源利用率，减少排放。以上这些前、后处理及循环操作主要是物理过程（少数也涉及化学反应），发生的是物理变化。可见，化工生产过程是由若干个物理过程与若干个化学反应过程的串联组合。对化工生产来说，研究物理变化规律同研究化学变化规律同样重要，甚至更加重要。

化学工业品种多，工艺更多，但基本上可用图 0-1 的框图模式来表示。

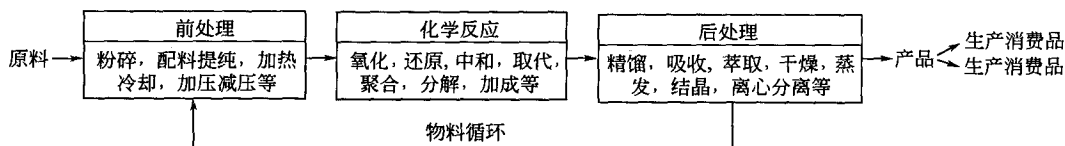


图 0-1 化工生产基本模式

化工生产与国民经济各部门、国防建设及人民生活有着十分密切的关系，化学工业已成为国民经济重要支柱产业。化工产品与技术推动了世界经济的发展和人类社会的进步，提高了人民的生活质量与健康水平。我国化学工业已形成盐化工、煤化工、石油化工、精细化工、酸碱、林产化工等 20 多个行业，4 万多个品种和规格的化工产品，主要化工产品产量已跃居世界前列；电石、染料、合成氨居世界第一位；化肥、农药、纯碱居世界第二位；硫酸、烧碱居世界第三位；乙烯、轮胎涂料、合成材料等也名列前茅。其前进的脚步越来越引起世界瞩目。

化工生产的原料来源丰富，最原始原料为煤、石油、天然气、化学矿、空气和水等天然资源及农、林业副产品等。由于化石能源的不可再生性，提高资源利用率及开发生物资源等新型化工原料都将是实现化工可持续发展的重要途径。

化工生产的生产路线多，控制参数多，技术含量高，新技术的应用研究尤其重要。大型生产装置或关键设备常常采用过程控制系统完成生产工艺参数的检测、显示、记录、调节、控制、报警等功能，它对提高化工生产线的作业率，改善产品质量及缩短新产品、新工艺的开发周期起着极其重要的作用。可以既安全可靠又经济高效地完成生产任务。目前，国内先进的大中型过程控制基本上以采用 PLC 和 DCS 为主，但是，由 DCS 与 PLC 发展而来的 FCS 将广泛地应用在化工生产中。

化工生产经常涉及有毒、有害、腐蚀性、易燃、易爆等物料，经常需要在高温、高压、低温、低压等条件下进行。因此，化学工业也带来了生态、环境及社会安全等问题。在 21 世纪，化工生产必须不断采用新的工艺、新的技术，提高对原料的利用率，消除或减少对环境的污染，维护人们的健康与安全，实现可持续发展。因此，保持化工持续、安全、健康、环保并快速增长的课题是值得研究的。在化工企业推行 QSHE 管理体系，使员工按规范化的工作程序开展各项工作，已经是化工生产企业管理的必然趋势。

### 0.2 单元操作

如前所述，一个化工产品的生产是通过若干个物理操作与若干个化学反应实现的。长期的实践与研究发现，尽管化工产品千差万别，生产工艺多种多样，但这些产品的生产过程所包含的物理过程并不是很多的，而且是相似的。比如，流体输送不论用来输送何种物料，其目的都是将流体从一个设备输送至另一个设备；加热与冷却的目的都是得到需要的操作温度；分离提纯的目的都是得到指定浓度的混合物等。把这些包含在不同化工产品生产过程中，发生同样的物理变化，遵循共同的物理学规律，使用相似设备，具有相同功能的基本物理操作，称为单元操作。

已经为人们所熟知的单元操作有流体流动与输送、传热、蒸馏、吸收、蒸发、结晶、萃取、干燥、沉降、过滤、离心分离、静电除尘、湿法除尘等；近年来，随着新技术的应用，像膜分离、吸附、超临界萃取、反应与分离偶合等新的单元操作，也得到了越来越广泛的应用。

从前面的分析可以看出，一个化工产品的生产过程是若干个单元操作与若干个单元反应的串联组合，在不同的化工产品生产过程中，可以包括同一种单元操作，如硫酸生产及合成氨生产中都包括流体输送、换热、吸收等单元操作。显然，对单元操作的研究，得到具有共性的结果，可以用来指导多种相关产品的生产和化工设备的设计，对于化工生产的进步是重要、必要和有效的。

根据操作方式的不同，单元操作可以分为连续操作和间歇操作两种方式。

在连续操作过程中，物质（物料）与能量持续不断地流入或流出设备，过程的不同环节在不同的空间位置上同时进行，即原料进入、加工、合格产品采出等是同时进行的。其特点是，同一空间位置上所进行的操作与时间无关，同一时刻在不同空间进行不同的操作。操作稳定、物料损失少，劳动投入少，便于自动控制。大型化工生产多数为连续操作。

在间歇操作过程中，物质（物料）与能量流入或流出设备不是同时进行的，过程的不同环节按时间顺序进行，即原料进入、加工、合格产品采出等在时间上是有先后的。其特点是，过程的各个环节是按一定的程序顺次进行的，表现出一定的周期性。以间歇反应釜生产为例，反应物进入反应釜并达到一定的液位后，停止进料，然后创造反应需要的条件进行化学反应，反应一定时间后达到规定要求，停止反应，再排出反应混合物料，最后清理恢复到原始状态，重复进行上述过程。间歇操作设备投入少，操作简单，灵活性大。适应于小批量、多品种的生产过程。

化工生产中，有时为了方便操作，还采用半间歇式操作，其特点介于连续操作与间歇操作之间。

根据操作过程参数的变化规律，单元操作可以分为定态操作（稳定操作）和非定态操作（不稳定操作）两种形式。

定态操作指操作参数只与位置有关而时间无关的操作，如定态流动和定态传热等。连续化工生产通常属于定态操作。定态操作的特点是过程进行的速率是稳定的，系统内没有物质或能

量的积累。

非定态操作指操作参数既与位置有关又与时间有关，如非定态流动和非定态传热等。间歇生产通常属于非定态操作。非定态操作的特点是过程进行的速率是随时间变化的，系统内存在物质或能量的积累。

长期以来，人们把研究单元操作的学科叫《化工原理》，对化学工程师来说，无论从事化工过程开发、设计还是生产工作，《化工原理》都是重要的和不可取代的。鉴于化工高等职业技术教育的培养目标是生产一线的技术性技能型操作人才，在学习和研究单元操作时更加注重过程的操作控制，其重点不在于研究单元操作的原理及其设备设计，而在于如何运用单元操作的规律实现其设备的有效操作与控制等原因，因此把《化工原理》更名为《化工单元操作及设备》。

### 0.3 本门课程的性质、内容和任务

《化工单元操作及设备》是化工技术类专业核心课程，带有很强的技术性、工程性及实用性，是构造化工高等技术应用性专门人才知识结构、素质结构与能力结构的必修课，是培养学生工程技术观点与化工核心实践技能的重要课程。它以化工生产过程作为自己的研究对象，主要研究化工单元操作过程规律在化工生产中的应用，使学生熟练掌握常见的化工单元操作的基本知识与基本技能，初步形成用工程观点观察问题、分析问题、处理操作中遇到的问题的能力，树立良好的职业意识和职业道德观念，为学生学习后续专门课程和将来从事化工生产、建设、管理和服务工作作准备，为提高职业能力打下基础。

《化工单元操作及设备》课程的任务是使学生获得常见化工单元操作过程及设备的基础知识，并能够运用这些知识进行物料平衡、能量平衡及设备操作维护，以适应不同的生产要求；使学生得到用工程技术观点观察问题、分析问题和解决常见操作问题的训练，在操作发生故障时能够寻找故障的缘由；使学生初步树立创新意识、安全生产意识、质量意识和环境保护意识；使学生了解新型单元操作在化工生产中的应用。

《化工单元操作及设备》的主要内容是化学工程学科“三传一反”（质量传递、热量传递、动量传递及化学反应）中的三传部分，具体包括流体流动与输送、传热、非均相物系分离、蒸馏、吸收、干燥等传统化工单元操作，随着化学工程从“三传一反”的知识结构向“三传一反+X”的扩展，也包括一些新产生的单元操作。本教材内容分为两篇，上篇主要介绍流体输送技术、传热技术和制冷技术；下篇主要介绍分离技术，见表0-1。

表 0-1 本书主要内容一览表

篇名	章名	操作目标
上篇	流体输送	将流体从一个设备输送到另一设备
	传热	创造并维持一定的温度条件
	冷冻	创造并维持低于环境温度的条件
下篇	非均相物系分离	使非均相混合物中各组分相互分离
	蒸馏	依据各组分挥发能力不同分离均相液体混合物
	气体吸收	依据各组分溶解能力不同分离气体混合物
	干燥	用热能让固体湿物料中的部分湿分气化除去
	蒸发	用热能让不挥发物料中的部分溶剂气化除去
	结晶	让溶液中的某组分变成晶体而析出
	萃取	依据各组分溶解能力不同分离液体混合物
	新型单元操作简介	利用新技术实现混合物分离
分离方法的选择	正确、合理选用分离方法	

## 0.4 本课程解决问题的主要方法

《化工单元操作及设备》所要解决的问题均具有明显的工程性，主要原因是：①影响因素多（物性因素、操作因素及结构因素等）；②制约因素多（原辅材料来源、设备性能、自然条件等）；③评价指标多（经济、健康、安全、环保等评价指标）；④经验与理论并重。因此，解决单元操作问题仅仅通过解析的方法是难以实现的，常常需要理论与实践相结合。历史上，使用过工业放大法、因次分析法、模型法等。化工高职人才主要在化工生产一线从事生产操作控制工作，在解决相关单元操作问题时，主要运用物料衡算、能量衡算方法及平衡关系和过程速率。这些内容在各章节（具体某种单元操作）中均有介绍，亦可参阅有关文献资料。

### 0.4.1 物料衡算

将质量守恒定律应用到化工生产过程，以确定过程中物料量及组成的分布情况，称为物料衡算。其通式为

$$\text{输入系统的物料量} - \text{输出系统的物料量} = \text{系统中物料的积累量}$$

衡算时，方程两边计量单位应保持一致。在物料衡算时，首先要选择控制体（衡算范围，可以用框图框出）和衡算基准（时间基准和物质基准），然后再列方程计算。

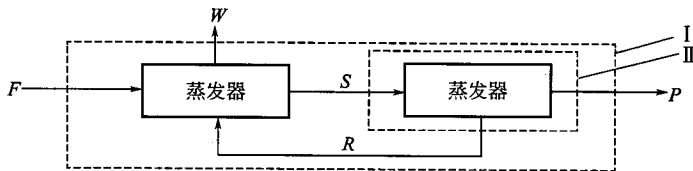
在过程没有化学变化时，全部物质的总量是平衡的，其中任何一个组分（物质）也是平衡的；在过程有化学变化时，全部物质的总量是平衡的，其中任何一种元素也是平衡的。

对于定态连续操作，过程中没有物质的积累（读者想一想，为什么？），输入系统的物料量等于输出系统的物料量，在物料衡算时，物质的量通常以单位时间为计算基准；对于间歇操作，操作是周期性的，物料衡算时，常以一批投料作为计算基准。

在化工生产中，物料衡算是一切计算的基础，是保持系统物质平衡的关键，能够确定原料、中间产物、产品、副产品、废弃物中的未知量，分析原料的利用及产品的产出情况，寻求减少副产物、废弃物的途径，提高原料的利用率。

**【例 0-1】** 用蒸发器连续将质量分数为 0.20（下同）的  $\text{KNO}_3$  水溶液蒸发浓缩到 0.50，处理能力为 1000kg/h，再送入结晶器冷却结晶，得到的  $\text{KNO}_3$  结晶产品中含水 0.04，含  $\text{KNO}_3$  0.375 的母液循环至蒸发器。试计算结晶产品的流量、水的蒸发量及循环母液量。

解：根据题意，画出流程示意图如下。



【例 0-1】附图

(1) 求结晶产品量  $P$  以图中框 I 作为物料衡算的范围，以  $\text{KNO}_3$  为物质对象，以 1h 为衡算基准，则有物料衡算式

$$Fx_{w_F} = Px_{w_P}$$

式中， $F=1000\text{kg/h}$ ； $x_{w_F}=0.20$ ； $x_{w_P}=1-0.04=0.96$ 。

代入得

$$P = \frac{1000 \times 0.20}{0.96} = 208.3\text{kg/h}$$

(2) 求水分蒸发量  $W$  以图中框 I 作为物料衡算的范围, 以水为物质对象, 以 1h 为衡算基准, 则有物料衡算式

$$F = W + P$$

因此,  $W = F - P = 1000 - 208.3 = 791.7 \text{ kg/h}$

(3) 求循环母液量  $R$  以图中框 II 作为物料衡算的范围, 并设进入结晶器的物料量为  $S$ , 单位为  $\text{kg/h}$ 。分别以总物料和  $\text{KNO}_3$  为物质对象, 以 1h 为衡算基准, 则有物料衡算式

$$S = R + P$$

$$Sx_{w_s} = Rx_{w_r} + Px_{w_p}$$

式中,  $x_{w_s} = 0.50$ ;  $x_{w_r} = 0.375$ ; 其他同前。

两式联合解得

$$R = 766.6 \text{ kg/h}$$

#### 0.4.2 能量衡算

将能量守恒定律应用到化工生产过程, 以确定过程中能量的分配情况, 称为能量衡算。其通式为

输入系统的能量 - 输出系统的能量 = 系统中物料的积累量

衡算时, 方程两边计量单位应保持一致。与物料衡算相似, 能量衡算时, 也要先确定控制体和衡算基准, 不过能量衡算时还必须要有能量的计算基准。

能量包括物料自身的能量 (内能、动能、位能等)、系统与环境交换的能量 (功、热等) 等, 因此能量的形式是多种多样的。同物料衡算相比, 能量衡算要复杂, 有时还复杂得多。但是, 在化工生产中, 特别是单元操作过程中, 其他形式的能量在过程前后常常是不发生变化的, 发生变化的多是热量, 此时, 能量衡算可以简化为热量衡算, 热量衡算的通式为

进入系统物料的焓 - 离开系统物料的焓 + 系统与环境交换的热量 = 系统内物料焓的积累量

上式中, 当系统获得热量时, 系统与环境交换的热量取正值, 否则取负值。

对于定态连续操作, 过程中没有焓的积累 (读者想一想, 为什么?), 输入系统的物料的焓与输出系统的物料的焓之差等于系统与环境交换的热量, 通常以单位时间为计算基准; 对于间歇操作, 操作是周期性的, 热量衡算时, 常以一批投料作为计算基准。

选取焓的计算基准通常以简单方便为准, 通常包括基准温度、压力和相态。比如, 物料都是气态时, 基准态应该选气态, 都是液态时应该选择液态。基准温度常选  $0^\circ\text{C}$ , 基准压力常选  $100\text{kPa}$ 。还要考虑数据来源, 应尽量使基准与数据来源一致。

在化工生产中, 热量衡算主要用于保持系统能量的平衡, 能够确定热量变化、温度变化、热量分配、热量损失、加热或冷却剂用量等, 寻求控制热量传递的办法, 减少热量损失, 提高热量利用率。热量衡算的基础是物料衡算, 其衡算过程与方法均与物料衡算相似, 此不举例, 见传热及蒸发等单元操作的例题。

#### 0.4.3 平衡关系

一个过程所能够达到的极限状态, 称为平衡态。比如相平衡状态、传质平衡、传热平衡、化学反应平衡等。平衡状态下, 各参数是不随时间变化而变化的, 并保持特定的关系。平衡时各参数之间的关系称为平衡关系。平衡是动态的, 当条件发生变化时, 旧的平衡将被打破, 新的平衡将建立, 但平衡关系不发生变化。比如, 当水的液位不同时, 连通就会发生流动现象, 当液位相同时达到流动平衡, 平衡关系就是液位 1 等于液位 2, 不论流动平衡时, 液位多高, 平衡关系都是一样, 即两液位相等。再如, 当温度不同时, 会发生热量传递, 当温度相同时, 达到传热平衡, 平衡关系就是温度 1 等于温度 2, 不论传热平衡时温度是多少, 平衡关系都是一样, 即两温度相等。

在化工生产中, 平衡关系用于判定过程能否进行以及进行的方向和限度。操作条件确定后, 可以通过平衡关系分析过程的进行情况, 以确定过程方案、适宜设备等, 明确过程限度和

努力方向。

比如，当确定用某种液体吸收某混合气体中的溶质时，如果操作条件定了，就可以根据溶解相平衡关系分析吸收所能达到的极限，反过来，也能根据所要得到的吸收液浓度或尾气浓度分析需要的吸收条件。

#### 0.4.4 过程速率

物系处在平衡时，称之为平衡状态，当实际状态偏离平衡状态时，就会发生从实际状态向平衡状态转化的过程，过程进行的快慢，称为过程速率。影响过程的因素很多，不同过程影响因素也不一样，因此，没有统一的解析方法计算过程速率。工程上，按照相似理论，仿照电学中的欧姆定律，认为过程速率正比于过程推动力，反比于过程阻力，即

$$\text{过程速率} \propto \frac{\text{过程推动力}}{\text{过程阻力}}$$

过程推动力是实际状态偏离平衡状态的程度，对于传热来说，就是温度差，对传质来说，就是浓度差等。显然，在其他条件相同的情况下，推动力越大，过程速率越大。

过程阻力是阻碍过程进行的一切因素的总和，与过程机理有关。阻力越大，速率越小。

在化工生产中，过程速率用于确定过程需要的时间或需要的设备大小，也用于确定控制过程速率办法。比如，通过研究影响过程速率的因素，可以确定改变哪些条件，以控制过程速率的大小，达到预期目的。这一点，对于一线操作人员来说非常重要。

## 0.5 单位的正确使用

《化工单元操作及设备》涉及大量物理量，物理量的正确表达是单位与数字统一的结果，比如，管径是300mm，管长是6m等。因此，正确使用单位是正确表达物理量的前提。正确使用单位对于日常生活及国内外贸易也非常重要。

由于国际单位制（SI制）具有一贯性与通用性两大优点，世界各国都在积极推广SI制，我国也于1984年颁发了以SI制为基础的法定计量单位，读者应该自觉使用法定计量单位。

但是，由于数据来源不同，常常会出现单位不统一或不一定符合公式需要的情况，必须进行单位换算。本课程涉及的公式有两种，一种是物理量方程，另一种是经验公式。前者是有严格的理论基础的，要么是某一理论或规律的数学表达式，要么是某物理量的定义式，比如， $p=F/A$ ，这类公式中各物理量的单位只要统一采用同一单位制下的单位就可以了；而后者则是由特定条件下的实验数据整理得到的，经验公式中，物理量的单位均为指定单位，使用时必须采用指定单位，否则公式就不成立了。如果想把经验公式计算出的结果换算成SI制单位，最好的办法就是先按经验公式的指定单位计算，最后再把结果转换成SI制单位，不要在公式中换算。

单位换算是通过换算因子来实现的，换算因子就是两个相等量的比值。比如， $1\text{m}=100\text{cm}$ ，当需要把m换算成cm时，换算因子为 $100\text{cm}/1\text{m}$ ；当需要把cm换算成m时，换算因子为 $1\text{m}/100\text{cm}$ 。在换算时只要用原来的量乘上换算因子，就可以得到期望的单位了。

**【例 0-2】** 一个标准大气压（1atm）等于 $1.033\text{kgf}/\text{cm}^2$ ，等于多少Pa？

$$\text{解：} 1\text{atm} = 10.33 \text{ kgf}/\text{cm}^2 = 10.33 \times \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \times \frac{98.1\text{N}}{1\text{kgf}} \times \left(\frac{100\text{cm}}{1\text{m}}\right)^2 = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

可见，当多个单位需要换算时，只要将各换算因子相乘即可。

**【例 0-3】** 三氯乙烷的饱和蒸气压可用如下经验公式计算，即

$$\lg p^0 = \frac{-1773}{T} + 7.8238$$

式中  $p^0$ ——三氯乙烷的饱和蒸气压, mmHg;

$T$ ——三氯乙烷的温度, K。

试求 300K 时, 三氯乙烷的饱和蒸气压 (Pa)。

解: 将温度  $T=300\text{K}$  代入得

$$\lg p^0 = \frac{-1773}{T} + 7.8238 = \frac{-1773}{300} + 7.8238 = 1.9138$$

因此  $p^0 = 81.9974\text{mmHg}$  (注意, 只能是 mmHg, 而不能是 Pa)  
 $= 81.9974 \times 133.3\text{Pa} = 10.93\text{kPa}$

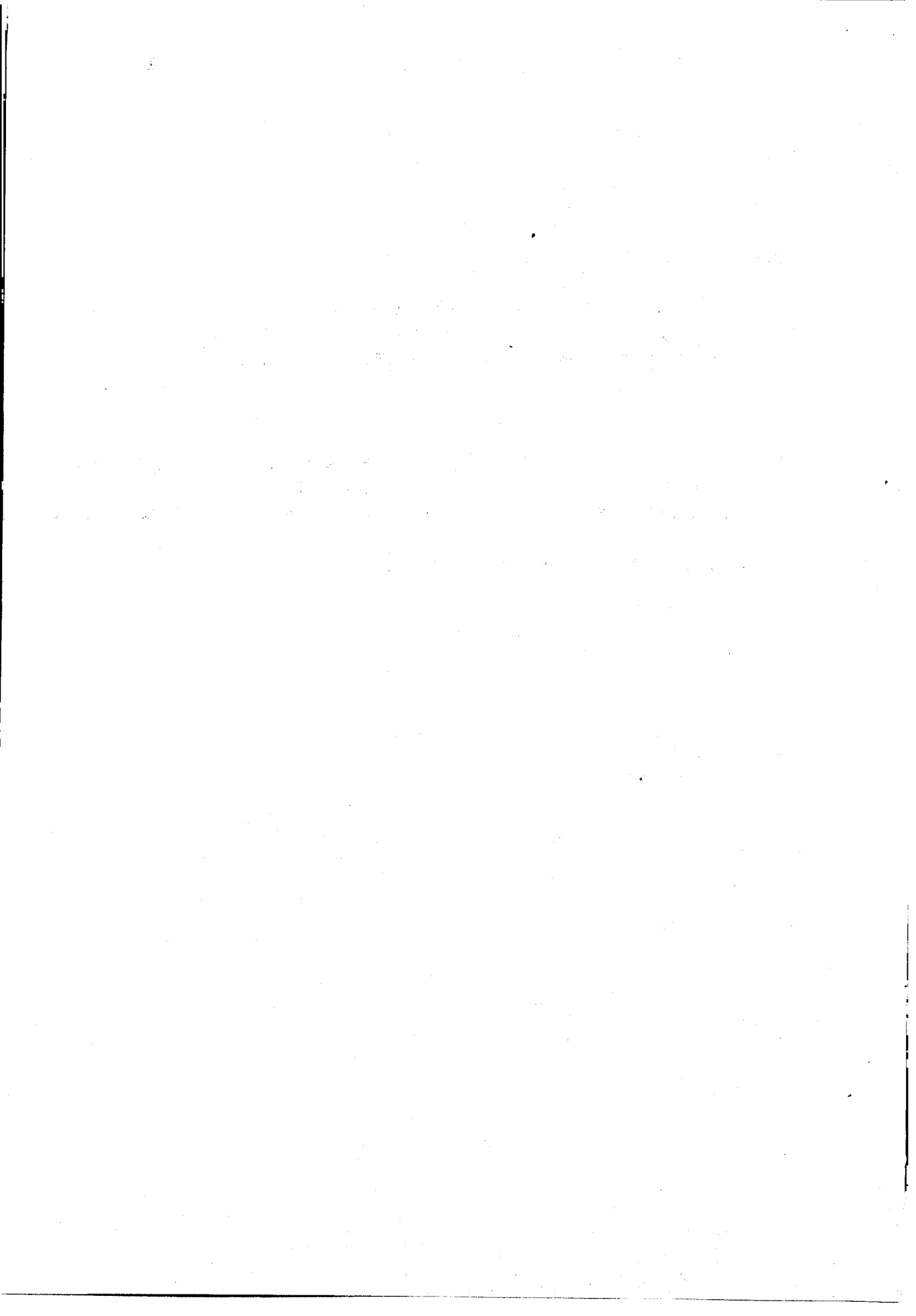
建议读者用两种方法计算, 当三氯乙烷的饱和蒸气压为 10.93kPa 时, 三氯乙烷的温度是多少? 第一种方法是将 10.93kPa 直接代入上面的公式, 第二种方法是将 10.93kPa 换算成 mmHg 后代入上面的公式。比较两种方法的结果, 判断哪一种算法正确。

### 思考题

1. 通过检索资料, 进一步了解化工生产在国民经济的地位与作用, 了解化学工业的发展现状及趋势, 并对国内外化工发展的情况进行比较, 提出对我国发展化学工业的建议。

2. 什么是单元操作? 它与化工生产的关系如何? 通过检索资料, 了解单元操作的类型、发展及应用。

3. 举例说明, 理论公式与经验公式在使用中有何不同。





# 上 篇