



中等职业教育国家规划教材  
全国中等职业教育教材审定委员会审定

# 化工单元过程及操作

◎ 冷士良 主编



化学工业出版社  
教材出版中心

中等职业教育国家规划教材  
全国中等职业教育教材审定委员会审定

# 化工单元过程及操作

主 编 冷士良  
责任主审 戴猷元  
审 稿 余立新 戴猷元

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**

化工单元过程及操作/冷士良主编. —北京:化学工业出版社, 2002.6  
中等职业教育国家规划教材  
ISBN 7-5025-3896-8

I. 化… II. 冷… III. 化工单元操作-专业学校-教材 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 039127 号

---

中等职业教育国家规划教材  
全国中等职业教育教材审定委员会审定

**化工单元过程及操作**

主 编 冷士良  
责任主审 戴猷元  
审 稿 余立新 戴猷元  
责任编辑: 何 丽 奚志刚  
责任校对: 郑 捷  
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)

购书咨询: (010) 64982530

(010) 64918013

购书传真: (010) 64982630

<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销  
北京密云红光印刷厂印刷  
三河市海波装订厂装订

开本 787mm × 1092mm 1/16 印张 21 字数 512 千字

2002 年 7 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 7 次印刷

ISBN 7-5025-3896-8/G·1050

定 价: 28.00 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

## 中等职业教育国家规划教材出版说明

为了贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》精神，落实《面向21世纪教育振兴行动计划》中提出的职业教育课程改革和教材建设规划，根据教育部关于《中等职业教育国家规划教材申报、立项及管理意见》(教职成[2001]1号)的精神，我们组织力量对实现中等职业教育培养目标和保证基本教学规格起保障作用的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和80个重点建设专业主干课程的教材进行了规划和编写，从2001年秋季开学起，国家规划教材将陆续提供给各类中等职业学校选用。

国家规划教材是根据教育部最新颁布的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和80个重点建设专业主干课程的教学大纲(课程教学基本要求)编写，并经全国中等职业教育教材审定委员会审定。新教材全面贯彻素质教育思想，从社会发展对高素质劳动者和中初级专门人才需要的实际出发，注重对学生的创新精神和实践能力的培养。新教材在理论体系、组织结构和阐述方法等方面均作了一些新的尝试。新教材实行一纲多本，努力为教材选用提供比较和选择，满足不同学制、不同专业和不同办学条件的教学需要。

希望各地、各部门积极推广和选用国家规划教材，并在使用过程中，注意总结经验，及时提出修改意见和建议，使之不断完善和提高。

教育部职业教育与成人教育司

2001年10月

## 前 言

为了适应培养跨世纪高素质化工劳动者的需要,我们以“关于全面推进素质教育深化职业教育教学改革的意见”和“关于制定中等职业学校教学计划的原则意见”为指导思想,以教育部颁发的中等职业教育“化工工艺专业(初中3年制)”教学计划为规范,以培养德智体美等全面发展,从事化工职业岗位群生产操作的高素质劳动者和化工生产、服务和技术管理的初中级专门人才为目标,以全国石油和化工教学指导委员会对《化工原理》课程改革的意见为原则,精心组织了本教材。

新教材是利用现代职业教育思想对原《化工原理》课程改革的产物,尊重学科,但不恪守学科。全书贯彻以素质教育为基础,以能力训练为主线,以培养创新意识和实践能力为重点的当代教育理念,以应用能力为主线构建课程体系。在选择内容时,既坚持必要而够用的工程基础,又重点面向工程实际,还考虑学生未来的发展和单元操作技术的进展。为了使学习者明确学习目的,在每章开始首先是学习目标,而在每章的结束提出本章注意点,用来强调本章的难点与重点,章后并配有一定的思考题与习题,使学生学以致用,复习提高。思考题以引导思考的类型为主,适当配一些直问直答的题。书中淡化了没有实用价值的推导及计算,计算以物料平衡及能量的平衡为重点,例题贴近生产实际,具有实用价值。全书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。

本教材内容既涉及了化工生产中的常见单元操作,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,并注重各单元操作的新进展。教学中各校可以根据各地区经济及学生实际选择教学内容,以体现灵活性。书中打\*的部分大纲未作要求。

本教材中,物理量的单位统一采用法定计量单位,符号采用国家标准 GB 310~3102—93。但由于本课程的符号很多,故蒸馏与吸收两章中的部分符号沿用了老教材中的符号,以便于教师教学。

本教材考虑到当前中职生源的实际状况,力求深浅适中,简单明了,层次分明,难点生动化,重点实例化,从而便于自主学习。

教材注意与本专业其他课程的分工与衔接,特别是与《单元操作实训》课程的分工,教学中,可以两门课程配合使用。

教材共分十一章,由徐州化工学校冷士良主编。绪论及第一章由冷士良编写;第二章、第三章和第六章由湖南化工学校易卫国编写;第五章、第八章、第十章和第十一章由湖北化工学校卢莲英编写;第四章、第七章和第九章由扬州化工学校夏德阳编写。全书由冷士良统稿。上海金山石油化工学校的陆小荣审阅书稿。

本书编写过程中,得到上述四所学校及领导和同行的支持,特别是徐州化工学校周立雪校长的支持,在此一并表示感谢。

由于编者水平所限,不完善甚至缺点错误之处在所难免,敬请读者和同仁指正。

编 者  
2002年2月

# 目 录

绪论 .....	1
0.1 化工生产过程 .....	1
0.2 化工单元操作 .....	1
0.3 本课程的研究对象、性质、任务与内容 .....	2
0.4 单位的正确使用 .....	2
0.5 学习建议 .....	3
思考题 .....	3
1. 流体输送 .....	4
学习目标 .....	4
1.1 概述 .....	4
1.1.1 流体输送在化工生产中的应用 .....	4
1.1.2 常见流体输送方式 .....	4
1.2 流体的物理性质 .....	6
1.2.1 密度与相对密度 .....	6
1.2.2 压力 .....	8
1.2.3 粘度 .....	10
1.3 流体流动基本知识 .....	10
1.3.1 流量方程式 .....	10
1.3.2 稳定流动与不稳定流动 .....	11
1.3.3 稳定流动系统的物料衡算——连续性方程 .....	12
1.3.4 稳定流动系统的能量衡算——柏努利方程 .....	13
1.3.5 流体阻力 .....	19
1.4 化工管路 .....	22
1.4.1 化工管路的构成与标准化 .....	22
1.4.2 化工管路的布置与安装 .....	31
1.5 流体输送设备 .....	32
1.5.1 离心泵 .....	33
1.5.2 其他类型泵 .....	42
1.5.3 往复式压缩机 .....	45
1.6 流量测量 .....	48
1.6.1 孔板流量计 .....	48
1.6.2 文丘里流量计 .....	49
1.6.3 转子流量计 .....	49
本章小结 .....	49
本章主要符号说明 .....	50

思考题 .....	50
习题 .....	51
<b>2. 非均相物系的分离</b> .....	<b>54</b>
学习目标 .....	54
2.1 概述 .....	54
2.1.1 非均相物系分离在化工生产中的应用 .....	54
2.1.2 常见非均相物系的分离方法 .....	55
2.2 沉降 .....	55
2.2.1 重力沉降 .....	55
2.2.2 离心沉降 .....	60
2.3 过滤 .....	63
2.3.1 过滤的基本知识 .....	63
2.3.2 过滤设备 .....	66
2.4 气体的其他净制方法与非均相物系分离方法的选择 .....	70
2.4.1 气体的其他分离方法与设备 .....	70
2.4.2 非均相物系分离方案的选择 .....	71
本章小结 .....	72
本章主要符号说明 .....	72
思考题 .....	72
习题 .....	73
<b>3. 传热</b> .....	<b>74</b>
学习目标 .....	74
3.1 概述 .....	74
3.1.1 传热在化工生产中的应用 .....	74
3.1.2 强化传热与削弱传热 .....	75
3.1.3 稳态传热与非稳态传热 .....	75
3.1.4 工业换热方法 .....	75
3.1.5 典型间壁式换热器 .....	76
3.2 传热的基本方式 .....	77
3.2.1 传导传热 .....	77
3.2.2 对流传热 .....	82
*3.2.3 辐射传热 .....	86
3.3 间壁传热 .....	88
3.3.1 总传热速率方程及其应用 .....	89
3.3.2 热量衡算 .....	89
*3.3.3 传热推动力的计算 .....	92
*3.3.4 传热系数的获取方法 .....	98
3.3.5 强化传热与削弱传热 .....	99
3.3.6 工业加热与冷却方法 .....	103
3.4 换热器 .....	105

3.4.1	换热器的分类 .....	105
3.4.2	换热器结构与性能特点 .....	106
*3.4.3	列管换热器的选型原则 .....	113
3.4.4	换热器的操作与保养 .....	116
	本章小结 .....	120
	本章主要符号说明 .....	120
	思考题 .....	121
	习题 .....	121
<b>4.</b>	<b>液体蒸馏 .....</b>	<b>123</b>
	学习目标 .....	123
4.1	概述 .....	123
4.1.1	蒸馏在化工生产中的应用 .....	123
4.1.2	精馏原理和流程 .....	123
4.2	精馏的物料衡算 .....	125
4.2.1	全塔物料衡算 .....	125
4.2.2	精馏段物料衡算 .....	127
4.2.3	提馏段物料衡算 .....	128
4.3	塔板数的确定 .....	129
4.3.1	实际塔板数与板效率 .....	129
4.3.2	理论塔板数的确定原则 .....	130
*4.3.3	理论塔板数的确定方法 .....	131
4.4	连续精馏的操作分析 .....	134
4.4.1	进料状况对精馏操作的影响 .....	135
4.4.2	回流比的影响 .....	138
4.4.3	操作温度和操作压力的影响 .....	139
*4.5	精馏过程的热量平衡与节能 .....	140
*4.6	其他蒸馏方式 .....	143
4.6.1	简单蒸馏 .....	144
4.6.2	闪蒸 .....	144
4.6.3	特殊精馏 .....	144
4.6.4	精馏操作的进展 .....	146
4.7	精馏设备 .....	146
4.7.1	板式塔 .....	146
4.7.2	辅助设备 .....	149
4.8	精馏塔的操作 .....	149
	本章小结 .....	150
	本章主要符号说明 .....	150
	思考题 .....	151
	习题 .....	151
<b>5.</b>	<b>气体吸收 .....</b>	<b>153</b>



学习目标	153
5.1 概述	153
5.1.1 气体吸收在化工生产中的应用	153
5.1.2 气体吸收的分类	154
5.1.3 吸收剂的选择	154
5.2 从溶解相平衡看吸收操作	155
5.2.1 气液相平衡关系	155
5.2.2 气液相平衡关系对吸收操作的意义	157
5.3 吸收速率	158
5.3.1 传质基本方式	159
5.3.2 双膜理论	159
5.3.3 吸收速率	159
5.3.4 影响吸收速率的因素	160
5.4 吸收的物料衡算	162
5.4.1 全塔物料衡算	162
5.4.2 吸收操作线	163
5.4.3 吸收剂用量	164
5.5 填料层高度的确定	165
5.5.1 填料层高度的确定原则	165
*5.5.2 填料层高度的确定方法	166
*5.5.3 填料层高度的计算	167
5.6 吸收操作分析	169
5.6.1 影响吸收操作的因素	169
5.6.2 吸收操作的特点	169
5.6.3 吸收塔的操作和调节	171
5.7 其他吸收与解吸	172
5.7.1 化学吸收	172
5.7.2 高含量气体吸收	173
5.7.3 多组分吸收	173
5.7.4 解吸	174
5.8 吸收设备	175
5.8.1 吸收塔	175
5.8.2 填料	176
5.8.3 辅助设备	179
本章小结	182
本章主要符号说明	182
思考题	183
习题	183
6. 固体干燥	185
学习目标	185

6.1 概述 .....	185
6.1.1 干燥在工业生产中的应用及干燥方法 .....	185
6.1.2 对流干燥进行的条件和流程 .....	186
6.2 湿空气的性质 .....	187
6.2.1 湿度 .....	187
6.2.2 相对湿度 .....	187
6.2.3 湿空气的比体积 .....	188
6.2.4 湿空气的比热容 .....	189
6.2.5 湿空气的焓 .....	189
6.2.6 干球温度 .....	189
6.2.7 露点 .....	190
6.2.8 湿球温度 .....	190
6.2.9 绝热饱和温度 .....	191
6.3 湿物料中水分的性质 .....	191
6.3.1 物料中含水量的表示方式 .....	192
6.3.2 平衡水分与自由水分 .....	192
6.3.3 结合水分与非结合水分 .....	193
6.4 干燥过程的物料衡算 .....	193
6.4.1 水分蒸发量 .....	194
6.4.2 空气消耗量 .....	194
6.5 干燥速率 .....	195
6.5.1 干燥速率 .....	195
6.5.2 影响干燥速率的因素 .....	197
6.6 干燥设备 .....	197
6.6.1 对干燥器的基本要求 .....	197
6.6.2 工业上常用的干燥器 .....	198
6.6.3 干燥器的选择 .....	200
6.6.4 干燥过程的操作分析 .....	201
本章小结 .....	203
本章主要符号说明 .....	203
思考题 .....	203
习题 .....	203
*7. 蒸发 .....	205
学习目标 .....	205
7.1 概述 .....	205
7.1.1 蒸发在工业生产中的应用 .....	205
7.1.2 单效蒸发的流程与计算 .....	206
7.2 多效蒸发 .....	209
7.2.1 多效蒸发对节能的意义 .....	209
7.2.2 多效蒸发的流程 .....	210

7.3 蒸发设备 .....	211
7.3.1 常见蒸发设备 .....	211
7.3.2 蒸发操作的要点 .....	215
本章小结 .....	216
本章主要符号说明 .....	216
思考题 .....	216
习题 .....	217
<b>* 8. 结晶 .....</b>	<b>218</b>
学习目标 .....	218
8.1 概述 .....	218
8.1.1 结晶及其工业应用 .....	218
8.1.2 固液体系相平衡 .....	219
8.1.3 晶核的形成 .....	220
8.1.4 晶体的成长 .....	222
8.2 结晶方法 .....	223
8.2.1 冷却结晶 .....	223
8.2.2 蒸发结晶 .....	223
8.2.3 真空冷却结晶 .....	223
8.2.4 盐析结晶 .....	224
8.2.5 反应沉淀结晶 .....	224
8.2.6 升华结晶 .....	224
8.2.7 熔融结晶 .....	224
8.3 结晶设备与操作 .....	224
8.3.1 常见结晶设备 .....	224
8.3.2 间歇结晶操作 .....	228
本章小结 .....	229
思考题 .....	229
<b>* 9. 液-液萃取 .....</b>	<b>230</b>
学习目标 .....	230
9.1 概述 .....	230
9.1.1 萃取在工业生产中的应用 .....	230
9.1.2 萃取剂的选择 .....	231
9.1.3 萃取操作流程 .....	231
9.2 部分互溶物系的相平衡 .....	233
9.2.1 部分互溶物系的相平衡 .....	233
9.2.2 单级萃取在相平衡图上的表示 .....	238
9.3 萃取设备 .....	240
9.3.1 塔式萃取设备 .....	240
9.3.2 萃取塔的操作 .....	244
本章小结 .....	246

本章主要符号说明	246
习题	247
<b>10. 制冷</b>	<b>248</b>
学习目标	248
10.1 概述	248
10.1.1 制冷方法	248
10.1.2 制冷的分类	250
10.2 制冷基本原理	250
10.2.1 压缩蒸气制冷循环	250
10.2.2 制冷系数	252
10.2.3 操作温度的选择	252
10.2.4 制冷剂的过冷	253
10.3 制冷能力	253
10.3.1 制冷能力的表示	253
10.3.2 标准制冷能力	254
10.4 制冷剂与载冷体	254
10.4.1 制冷剂	254
10.4.2 载冷体	255
10.5 压缩蒸气制冷设备	256
10.5.1 压缩机	256
10.5.2 冷凝器	256
10.5.3 节流阀	257
本章小结	257
本章主要符号说明	258
思考题	258
<b>* 11. 新型单元操作简介</b>	<b>259</b>
学习目标	259
11.1 吸附	259
11.1.1 吸附原理与吸附剂	259
11.1.2 吸附速率	261
11.1.3 吸附工艺简介	261
11.2 膜分离	264
11.2.1 膜分离技术的基本原理	264
11.2.2 分离膜应具备的条件及类型	268
11.2.3 几种主要的膜分离过程	270
11.3 超临界流体萃取技术进展	277
11.3.1 超临界流体萃取技术的发展与特点	277
11.3.2 超临界流体萃取原理	277
11.3.3 超临界流体萃取过程简介	279
11.3.4 超临界流体萃取的工业应用	279

本章小结	280
思考题	281
<b>附录</b>	<b>282</b>
一、中华人民共和国法定计量单位（摘录）	282
二、某些气体的重要物理性质	282
三、某些液体的重要物理性质	283
四、干空气的物理性质（101.33kPa）	284
五、水的物理性质	285
六、常用固体材料的密度和比热容	286
七、饱和水蒸气（以温度为基准）	286
八、饱和水蒸气（以压力为基准）	287
九、某些液体的热导率	290
十、某些气体和蒸气的热导率	291
十一、某些固体材料的热导率	292
十二、液体的粘度共线图	293
十三、101.33kPa 压力下气体的粘度共线图	295
十四、液体的比热容共线图	296
十五、气体的比热容共线图（101.33kPa）	298
十六、蒸发潜热（汽化热）共线图	299
十七、某些有机液体的相对密度共线图	301
十八、壁面污垢热阻（污垢系数）	302
十九、离心泵的规格（摘录）	303
二十、管壳式换热器系列标准（摘录）	308
二十一、某些二元物系在 101.33kPa（绝压）下的气液平衡组成	311
二十二、热轧无缝钢管规格与质量	312
二十三、冷拔无缝钢管规格与质量	316
<b>主要参考资料</b>	<b>319</b>

# 绪 论

## 0.1 化工生产过程

化学工业是指以工业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。化工生产过程是指化学工业的一个个具体的生产过程，或者简单地说，就是一个产品的加工过程。显然，化工生产过程的最明显特征或核心就是化学变化。为了使化学反应过程得以经济有效的进行，必须创造并维持适宜的条件，如一定的温度、压力、物料的组成等等。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；反应混合物必须经过后处理分离提纯，获得合乎质量标准的产品；在必要的情况下，未反应完的原料还必须循环利用。这些前、后处理主要是物理操作，发生的是物理变化。因此，化工生产过程是若干个物理过程与若干个化学反应过程的组合。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。在必要的时候，后处理分离出的未反应的原料应该循环利用。

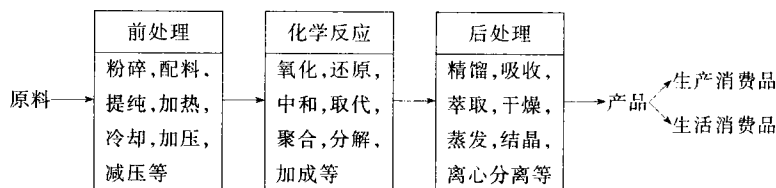


图 0-1 化工生产基本模式

化工生产的最原始原料为煤、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。化学工业的产品则涉及国民经济的各个部门，它的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。化工生产的主要特点是原料来源丰富，生产路线多，技术含量高，经常涉及有毒、有害、易燃、易爆等物料，需要高温、高压、低温、低压等条件。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，实现可持续发展。

## 0.2 化工单元操作

如前所述，一个化工产品的生产需经过若干个物理过程与若干个化学反应过程。经过长期的实践与研究，人们发现，尽管化工产品千差万别，生产工艺多种多样，但生产这些产品的过程所包含的物理过程并不是很多的，而且是相似的。例如，流体输送不论用来输送何种物料，其目的都是输送流体；加热与冷却都是为了得到需要的温度；分离提纯都是为了得到指定浓度的混合物等等。人们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，遵循共同的规律，使用相似设备，具有相同作用的基本物理操作，称为单元操作。人们所熟知的单元操作有流体流动与输送、传热、蒸发、结晶、蒸馏、吸收、萃取、干燥、沉降、过滤、离心分离、静电除尘、湿法除尘等。近年来一些新的单元操作，像吸附、膜分

离、超临界萃取、反应与分离偶合等，也得到了越来越广泛的应用。

根据前面的分析，不难看出，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组合，但在不同的化工产品生产过程中，单元操作有其独特的条件与要求。显然，研究单元操作对于化工生产的进步是重要与必要的。

### 0.3 本课程的研究对象、性质、任务与内容

《化工单元过程及操作》是一门技术性、工程性及应用性都很强的专业课程，是构造从事化工职业岗位群生产操作的高素质劳动者和化工生产及技术管理的初、中级专门人才知识结构、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基本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、技术、管理和服务工作作准备，为提高职业能力打下基础。

《化工单元过程及操作》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、初步计算能力和基本操作技能，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，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，并了解新型单元操作在化工生产中的应用。

《化工单元过程及操作》的主要内容是流体流动与输送、传热、非均相物系分离、蒸馏、吸收等常见化工单元操作，也涉及一些应用相对较少的单元操作及新型单元操作。

### 0.4 单位的正确使用

描述化工生产过程需使用大量物理量，物理量的正确表达应该是单位与数字统一的结果。例如，管径是 25mm、管长是 6m 等。因此，正确使用单位是正确表达物理量的前提。

由于国际单位制（SI 制）单位的一贯性与通用性，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，这就必须进行单位换算。本课程涉及的公式有两种：一种是物理量方程，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，例如  $p = \frac{F}{A}$  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。例如， $1\text{m} = 100\text{cm}$ ，当需要把 m 换算成 cm 时，换算因子为  $\frac{100\text{cm}}{1\text{m}}$ ，当需要把 cm 换算成 m 时，换算因子为  $\frac{1\text{m}}{100\text{cm}}$ 。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。

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

解： $1\text{atm} = 10.33\text{kgf}/\text{cm}^2 = 10.33 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \left( \frac{9.81\text{N}}{1\text{kgf}} \right) \left( \frac{100\text{cm}}{1\text{m}} \right)^2 = 1.013 \times 10^5 \text{Pa}$

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 0-2】** 三氯乙烷的饱和蒸气压可用经验公式  $\lg p^\circ = \frac{-1773}{T} + 7.8238$  计算，试求 300K 时三氯乙烷的饱和蒸气压为多少 Pa。

解：将流体的温度  $T = 300\text{K}$  代入公式得

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

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

请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。

### 0.5 学习建议

在学习本课程之前，建议组织一次单元操作认识实习，使学生形成对化工生产的整体认识，了解化工生产在国民经济中的地位，初步认识化工生产中的单元操作，认识到单元操作在化工生产中的地位与作用，从而激发学生学习本课程的兴趣，为学好本课程奠定基础。

实习可以采用多种多样的办法：①到工厂去，在生产现场边参观边听技术人员的介绍，此法真实感强，有利于学生获得真实可信的现场感受，但生产现场声音嘈杂，时间短，不一定能面向全体学生，如果人数少，指导人员多，则能达到更好的效果；②在校内实训基地实习，有条件的学校可以在单元操作训练室或实训工厂内实习，虽然与工厂的生产实际有一定的差距，但只要安排合理，指导到位，也可以达到实习目的；③通过多媒体工具实现，比如可以观看化工生产的录像，或多媒体软件，或化工仿真等。三种方法各有优劣，也可以同时采用，以提高实习效果，真正达到认识单元操作的目的。

### 思考题

1. 试分析学习单元操作对化工生产有何意义，举例说明。
2. 对经验公式来说，指定单位意味着什么？



# 1. 流体输送



## 学习目标

●了解：流体的主要特征，气体与液体异同点；静压强在化工生产中的作用；粘性与粘度的概念；稳定流动与不稳定流动；流量方程式的应用；内能、静压能、动能、位能及压头的概念；柏努利方程的内容及其在流体输送中的应用；流体阻力及其产生的根本原因；层流和湍流的特点；流量测量对化工生产的意义；化工生产中流体输送的方法；流体输送机械的作用、类型与特点；离心泵的主要性能、性能曲线及密度、粘度、转速等对其性能的影响；气缚、气蚀现象产生的原因；往复式压缩机的构造、工作过程与特点；化工管路的构成、材质、保温、涂色、布置、补偿、安装的原则。

●理解：温度、压力对密度与相对密度、粘度的影响；流量、流速、流通面积之相互关系；连续性方程；静止流体中压力的变化规律；转子、孔板、文丘里等流量计的工作原理；流体物性、流动条件、流速等变化对阻力的影响。

●掌握：转子、孔板、文丘里等流量计的使用要点；密度、压力、粘度、流量的获得方法；压力的正确表示与单位换算；液位测量、液封高度确定、分层器控制等方法；流动型态的判定方法；化工管路拆装方法；避免气缚、气蚀现象发生的方法；离心泵的使用与维护要点；往复式压缩机的操作规程与维护要点。

## 1.1 概 述

### 1.1.1 流体输送在化工生产中的应用

流体即可以流动的物体，包括可压缩的气体和难以压缩的液体。其共同特点是在外力作用下易于变形、具有流动性、没有固定形状，同时，当流体与界面物之间或自身各部分之间存在相对运动的趋势或发生相对运动时，会产生与之对抗的摩擦力。不同之处在于两者的可压缩性不同及因此而带来的其他不同，但研究表明，在声速以下，气体表现出与液体相同的规律，因此可以一起讨论。

化工生产中所涉及的物料有很多都是流体，一方面，由于生产工艺的要求，常常需要将这些物料从一个设备输送到另一个设备，从一个车间输送到另一个车间；另一方面，化工生产中的传热、传质及化学反应过程多数都是在流体流动条件下进行的，流体的流动状况对这些过程的动力消耗、设备投资有着巨大的影响、直接关系到化工产品的成本与经济效益。因此，流体输送对于保证工艺任务的完成及提高化工过程的速率和效率都是十分重要的。

### 1.1.2 常见流体输送方式

为了完成生产工艺要求的流体输送任务，并做到科学合理有效，流体输送可以从生产实际出发，采取不同的输送方式。

#### 1.1.2.1 高位槽送料

化工生产中，各容器、设备之间常常会存在一定的位差，当工艺要求将处在高位设备内