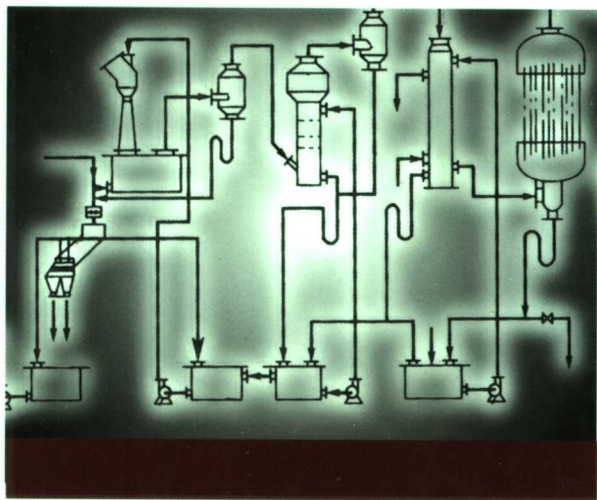


化工工人岗位培训教材

# 化工单元操作过程

刘佩田 闫 晔 主编



Chemical Industry Press



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

化工工人岗位培训教材

# 化工单元操作过程

刘佩田 闫 晔 主编



化学工业出版社  
工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

# (京)新登字 039 号

## 图书在版编目 (CIP) 数据

化工单元操作过程/刘佩田, 闫晔主编. —北京: 化学工业出版社, 2004. 7  
化工工人岗位培训教材  
ISBN 7-5025-5862-4

I. 化… II. ①刘…②闫… III. 化工单元操作-技术培训-教材 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 077303 号

---

化工工人岗位培训教材

化工单元操作过程

刘佩田 闫 晔 主编

责任编辑: 周国庆 刘 哲 卢小林

责任校对: 洪雅姝

封面设计: 于 兵

化学工业出版社 出版发行

工业装备与信息工程出版中心  
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64782530

http://www.cip.com.cn

\*

新华书店北京发行所经销

化学工业出版社印刷厂印装

开本 850mm×1168mm 1/32 印张 14½ 字数 387 千字

2004 年 9 月第 1 版 2004 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5862-4/G·1584

定 价: 29.00 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

为适应市场经济发展和行业发展对职工教育培训的需要，积极配合化工企业技术工人进行职业技能鉴定及培训，提高工人理论知识和操作技能，根据国家有关部门职业技能鉴定标准，结合化工企业技术工人的现状，化学工业出版社组织了一套《化工工人岗位培训教材》，包括《化学基础》、《化工工艺基础》、《机械基础》、《化工安全技术基础》、《化工单元操作过程》、《化工电气》、《化工仪表》和《化工分析》。

本书为《化工单元操作过程》。全书针对化工各个单元的操作，分别介绍了其基本原理、典型设备和计算方法。在编写过程中，我们多次学习讨论了《化工特有工种职业技能鉴定规范》（讨论稿）和最新化工特有职业技能鉴定的有关精神，对其内容范围和深浅程度有了充分的理解，在写作上兼顾高级技术工人在操作技能上的差别及其在基本技术理论知识上的共性，并考虑成人学习的特点，注重理论联系实际，紧紧围绕化工生产的实际和检修维护的特点，由浅入深、由易到难地提出问题、分析问题、解决问题，列举了生产和计算实例。

本书在文字表述方面注意做到用语通俗易懂、图表清晰、术语、名词及符号符合新规定。在内容方面删减了部分目前化工企业生产中已淘汰的工艺、设备等方面的内容，增加了近年来在化工企业生产中采用的新标准、新技术、新工艺、新设备等方面的内容。

本教材的绪论、第1章、第7章、第8章由北京市化工学校刘佩田编写；第2章、第3章、第4章由北京市化工学校吕春莲编

写；第5章、第6章、第9章、第10章、第11章、第12章由北京市化工学校闫晔编写。

由于编者水平有限，书中难免有不足之处，恳请读者提出宝贵意见。

编者

2004年5月

# 目 录

绪论 .....	1
1. 化工单元操作及研究对象 .....	1
2. 化工单元操作过程中的基本规律 .....	2
3. 单位制及单位换算 .....	4
<b>第 1 章 流体流动</b> .....	<b>5</b>
1.1 流体静力学 .....	5
1.1.1 流体的密度 .....	5
1.1.2 流体压强 (压力) .....	8
1.1.3 流体平衡时的规律——流体静力学基本方程式 .....	10
1.2 流体流动 .....	16
1.2.1 流量和流速 .....	16
1.2.2 流体连续稳定流动时物料衡算——连续性方程 .....	19
1.2.3 流体稳定流动时的能量衡算——柏努利方程式 .....	21
1.3 流体流动的阻力 .....	31
1.3.1 产生流体阻力的原因 .....	32
1.3.2 流体黏度 .....	32
1.3.3 流体的流动类型及其判断 .....	33
1.3.4 流体流动阻力的计算 .....	37
1.4 化工管路 .....	44
1.4.1 管子的种类 .....	44
1.4.2 管路布置和安装原则 .....	46
1.4.3 管路常见故障及处理 .....	47
<b>第 2 章 液体输送机械</b> .....	<b>49</b>
2.1 离心泵 .....	49
2.1.1 离心泵的工作原理及主要构件 .....	49
2.1.2 离心泵性能参数和离心泵的特性曲线 .....	53

2.1.3	离心泵的调节	58
2.1.4	离心泵的安装高度	59
2.1.5	离心泵的型号	62
2.1.6	离心泵的选用	65
2.1.7	离心泵的运行与维护	66
2.1.8	离心泵常见设备故障及处理	68
2.1.9	离心泵常见操作事故与防止	69
2.2	往复泵	69
2.2.1	往复泵的工作原理	69
2.2.2	往复泵的分类和结构特点	70
2.2.3	往复泵的主要性能	71
2.2.4	往复泵的运转和调节	72
2.3	其他类型泵	74
2.3.1	旋涡泵	74
2.3.2	螺杆泵	76
2.3.3	齿轮泵	78
2.3.4	屏蔽泵	79
<b>第3章</b>	<b>气体压缩和输送机械</b>	<b>82</b>
3.1	离心通风机	83
3.1.1	通风机的类型	83
3.1.2	离心通风机的构造和工作原理	83
3.1.3	离心通风机的性能、型号和选型	84
3.2	鼓风机	87
3.2.1	离心鼓风机的工作原理、主要构造和型号	87
3.2.2	罗茨鼓风机	88
3.3	压缩机	88
3.3.1	离心压缩机	88
3.3.2	往复压缩机	91
3.3.3	旋转压缩机	101
3.4	真空泵	102
3.4.1	往复真空泵	102
3.4.2	液环式真空泵	103
3.4.3	旋片真空泵	103

3.4.4	喷射真空泵	104
<b>第4章</b>	<b>流体与粒子间相对运动的过程</b>	<b>106</b>
4.1	沉降	106
4.1.1	重力沉降	107
4.1.2	离心沉降	113
4.2	过滤	118
4.2.1	过滤操作的基本概念	118
4.2.2	过滤基本方程式	122
4.2.3	过滤机的构造和操作	124
4.2.4	离心过滤	133
4.3	气体的其他净制设备	138
4.3.1	袋滤器	138
4.3.2	湿式除尘器	139
4.3.3	静电除尘器	141
<b>第5章</b>	<b>传热原理及传热设备</b>	<b>142</b>
5.1	概述	142
5.1.1	传热在化工生产中的应用	142
5.1.2	传热的基本方式	142
5.1.3	稳定传热和非稳定传热	143
5.1.4	载热体及其选择	144
5.2	热传导	144
5.2.1	热传导基本规律	145
5.2.2	热导率	145
5.2.3	多层平壁的热传导	148
5.2.4	圆筒壁的热传导	150
5.3	对流传热	153
5.3.1	对流传热过程分析	153
5.3.2	对流传热速率方程	154
5.3.3	对流传热膜系数的经验公式	155
5.4	传热基本方程式和传热过程的计算	162
5.4.1	传热基本方程式(总传热速率方程式)	162
5.4.2	传热过程的热量衡算	163
5.4.3	平均温度差的计算	165



5.4.4	总传热系数 $K$ .....	172
5.4.5	强化传热的措施 .....	178
5.5	换热器 .....	179
5.5.1	工业换热方式 .....	179
5.5.2	间壁式换热器 .....	181
5.5.3	标准列管换热器型号及表示法 .....	189
5.5.4	换热器的基本操作 .....	190
5.5.5	常用换热器常见故障与处理方法 .....	193
<b>第6章</b>	<b>蒸发</b> .....	<b>195</b>
6.1	概述 .....	195
6.1.1	蒸发及蒸发流程 .....	195
6.1.2	蒸发操作的分类 .....	196
6.1.3	蒸发操作的特点 .....	196
6.2	单效蒸发及其计算 .....	197
6.2.1	溶液的温度差损失 .....	197
6.2.2	单效蒸发的物料衡算和热量衡算 .....	200
6.3	蒸发设备 .....	205
6.3.1	蒸发器的结构及特点 .....	206
6.3.2	蒸发设备的选用 .....	213
6.3.3	蒸发装置辅助设备 .....	213
6.4	蒸发设备的运行与操作 .....	216
6.4.1	影响蒸发器生产强度的因素 .....	216
6.4.2	蒸发操作的经济性 .....	217
6.4.3	蒸发系统日常运行操作与维护 .....	222
6.4.4	蒸发系统常见操作事故与防止 .....	224
<b>第7章</b>	<b>蒸馏</b> .....	<b>227</b>
7.1	气、液平衡关系 .....	229
7.1.1	双组分理想溶液和非理想溶液的气、液相平衡关系 .....	229
7.1.2	挥发度和相对挥发度 .....	235
7.2	简单蒸馏和精馏的原理及流程 .....	237
7.2.1	简单蒸馏的原理和流程 .....	237
7.2.2	精馏原理及精馏流程 .....	238
7.3	双组分连续精馏过程的计算 .....	242

7.3.1	物料衡算及操作线方程 .....	243
7.3.2	进料状况对操作线的影响——操作线交点的轨迹方程 .....	247
7.3.3	精馏塔塔板数的计算 .....	250
7.3.4	回流比的影响和选择 .....	256
7.3.5	连续精馏装置的热量衡算 .....	261
7.4	特殊蒸馏 .....	263
7.4.1	水蒸气蒸馏 .....	263
7.4.2	恒沸蒸馏 .....	264
7.4.3	萃取蒸馏 .....	266
7.5	精馏设备 .....	268
7.5.1	精馏塔 .....	268
7.5.2	再沸器 .....	273
7.5.3	回流冷凝器 .....	274
7.6	精馏塔的操作 .....	274
7.6.1	气、液相负荷对精馏操作的影响 .....	274
7.6.2	精馏塔的操作控制 .....	276
7.6.3	精馏系统常见的设备故障及处理 .....	279
7.6.4	精馏塔常见操作故障与处理 .....	279
<b>第8章</b>	<b>吸收 .....</b>	<b>282</b>
8.1	概述 .....	282
8.1.1	吸收操作的目的 .....	282
8.1.2	对吸收剂的基本要求 .....	283
8.1.3	吸收操作的特点 .....	283
8.1.4	吸收操作的分类 .....	284
8.1.5	吸收的基本流程 .....	285
8.2	吸收过程的相平衡关系 .....	288
8.2.1	气相和液相组成的表示法 .....	288
8.2.2	气体在液体中的溶解度 .....	290
8.2.3	亨利定律 .....	291
8.2.4	相平衡关系在吸收操作中的应用 .....	295
8.2.5	传质的基本方式 .....	295
8.2.6	吸收机理——双膜理论 .....	296
8.3	吸收速率方程 .....	298

8.3.1	吸收速率方程 .....	298
8.3.2	气体溶解度对吸收系数的影响 .....	299
8.4	吸收塔的计算 .....	300
8.4.1	吸收塔的物料衡算与操作线方程 .....	300
8.4.2	吸收剂用量的确定 .....	303
8.4.3	填料吸收塔填料层高度 .....	306
8.4.4	板式吸收塔塔板数的计算 .....	310
8.5	解吸 .....	311
8.6	填料塔 .....	312
8.6.1	填料塔的基本结构 .....	312
8.6.2	主要塔内件介绍 .....	313
8.6.3	吸收塔操作的主要控制因素 .....	319
8.6.4	吸收系统常见设备故障与处理 .....	321
8.6.5	吸收系统常见操作事故与防止 .....	323
<b>第9章</b>	<b>干燥 .....</b>	<b>326</b>
9.1	概述 .....	326
9.1.1	干燥过程的分类 .....	327
9.1.2	对流干燥过程 .....	328
9.2	湿空气的性质和湿物料的性质 .....	329
9.2.1	湿空气的状态参数 .....	330
9.2.2	湿空气的 $H-I$ 图及其应用 .....	338
9.2.3	湿物料的性质 .....	342
9.3	干燥速率与干燥过程计算 .....	345
9.3.1	干燥速率及其影响因素 .....	346
9.3.2	干燥过程的有关计算 .....	351
9.4	干燥的操作方式 .....	359
9.4.1	干燥的操作方式介绍 .....	359
9.4.2	流态化干燥技术 .....	362
9.4.3	流化床结构 .....	362
9.4.4	流态化干燥的应用 .....	364
9.5	干燥设备及其操作 .....	364
9.5.1	常用对流式干燥器 .....	365
9.5.2	非对流式干燥器 .....	370

9.5.3	干燥器的比较和选择 .....	373
9.5.4	常用干燥器的使用与维护 .....	375
9.5.5	干燥过程的节能 .....	376
9.5.6	干燥技术的发展趋势 .....	378
<b>第10章</b>	<b>液-液萃取</b> .....	<b>380</b>
10.1	液-液萃取基本原理 .....	380
10.1.1	液-液相平衡 .....	381
10.1.2	萃取剂的选择 .....	383
10.2	萃取的流程和计算 .....	385
10.2.1	单级萃取流程和计算 .....	385
10.2.2	多级萃取流程 .....	388
10.3	萃取设备 .....	389
10.3.1	萃取设备分类 .....	389
10.3.2	常用萃取设备 .....	390
10.3.3	萃取设备的选用 .....	396
10.3.4	影响萃取操作的主要因素 .....	397
<b>第11章</b>	<b>结晶</b> .....	<b>401</b>
11.1	结晶过程的基本原理 .....	402
11.1.1	溶解与结晶 .....	402
11.1.2	结晶过程的基本原理 .....	402
11.1.3	结晶生成过程 .....	405
11.2	结晶操作的影响因素 .....	406
11.2.1	过饱和度的影响 .....	406
11.2.2	温度的影响 .....	406
11.2.3	搅拌的影响 .....	407
11.2.4	冷却(蒸发)速度的影响 .....	407
11.2.5	杂质的影响 .....	407
11.2.6	晶种的影响 .....	407
11.3	结晶过程的基本计算 .....	408
11.3.1	物料衡算 .....	408
11.3.2	热量衡算 .....	409
11.4	结晶装置及操作 .....	412
11.4.1	工业上采用的结晶方法 .....	412

11.4.2	常用结晶设备 .....	413
11.4.3	结晶过程的操作与控制 .....	418
<b>第 12 章</b>	<b>新型分离技术 .....</b>	<b>420</b>
12.1	超临界萃取 .....	420
12.1.1	超临界萃取的基本原理 .....	420
12.1.2	超临界萃取的典型流程 .....	422
12.1.3	超临界萃取的特点 .....	423
12.2	膜分离技术 .....	424
12.2.1	膜分离原理 .....	425
12.2.2	分离用膜和膜分离过程 .....	426
12.2.3	膜分离组件 .....	431
12.2.4	膜分离过程的应用 .....	433
12.2.5	膜污染的防治 .....	441
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>445</b>

# 绪 论

## 1. 化工单元操作及研究对象

用化工方法对原料进行加工处理成为产品的过程称为化工过程。化工过程可以分为两类：一类是以化学反应为核心的化学反应过程，通常在化学反应器中进行；另一类是不进行化学反应的过程，不改变物料的化学性质，只改变其物理性质，这一类物理过程称为化工单元操作。化工单元操作具有如下特点：①它们都是物理过程，这些操作过程只改变物质的物料的状态或其物理性质，并不改变其化学性质；②它们是化工生产中共有的操作，化工过程虽然差别很大，但它们都是由若干单元操作有机地组合而成的；③某一单元操作用于不同的化工生产过程，其原理是相同的，进行该单元操作的设备往往是通用的。

化工单元操作的研究对象就是化工生产中共同的部分，即化工单元操作的基本规律、基本计算、操作原理、典型设备的构造和操作等，本书的内容是讨论常用的一些单元操作。单元操作按其所遵循的规律分为如下四类：

(1) 流体动力传递过程 包括遵循流体流动规律的单元操作，如流体的输送、沉降、过滤、离心分离、固体流态化等。也称为动量传递过程。

(2) 热量传递过程 研究传热的基本规律及遵循传热基本规律的单元操作，如加热、冷却、蒸发等，也简称传热。

(3) 质量传递过程 研究质量传递过程的基本规律及遵循质量传递基本规律的单元操作。如蒸馏、吸收、萃取、膜分离等，也简称

传质。

(4) 热力过程 遵循热力学定律的单元操作，如冷冻等。

化工单元操作的分类并不是绝对的，有些单元操作如干燥、结晶等同时遵循传热和传质的基本规律。

## 2. 化工单元操作过程中的基本规律

单元操作的操作过程尽管比较复杂，但过程中遵循的是物料衡算、能量衡算、平衡关系和过程速率四个规律。下面扼要介绍这几个规律。

(1) 物料衡算 物料衡算的依据是质量守恒定律。化工过程中，向过程输入物料质量必等于从该过程输出的物料的质量和积累于该过程中物料质量之和

$$\text{输入物质质量} = \text{输出物质质量} + \text{累积物质质量}$$

对于连续操作过程，各物料质量不随时间变化，即处于稳定操作状态时，过程中无物料累积，此时物料衡算关系为

$$\text{输入物质质量} = \text{输出物质质量}$$

物料衡算可以由过程的已知量求出未知量。进行物料衡算的步骤如下：①根据过程要求画出示意图，用箭头在图上标出物料的流向，将已知和所求标注在箭头旁边；②划定衡算范围，其边界要与待求的物流相交，这样所列的衡算式才包括所求的未知量；③确定衡算基准，一般以时间、单位进料量或排除量及设备的单位体积等为基准；④列出衡算式并求解。

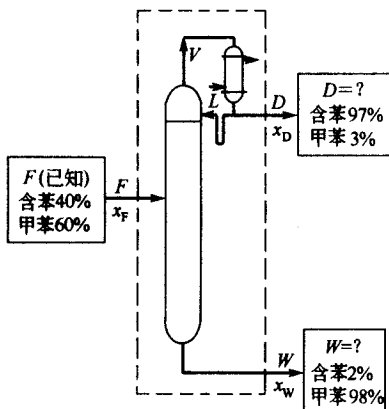


图 0-1 例 0-1 附图

【例 0-1】 如图 0-1 所示，连续操作的精馏塔将 15000kg/h 含苯 40% 和甲苯 60% 的混合液分离成为含苯 97% 的馏出液和含甲苯 98% 的残液（以上均为质量分

数)。求馏出液和残液的流量。

解 如图虚线范围为精馏塔物料衡算范围，因连续操作，以每小时为衡算基准，列出衡算式求解。

$$\text{全塔总物料衡算式} \quad 15000 = D + W \quad (1)$$

$$\text{苯组分物料衡算式} \quad 15000 \times 40\% = D \times 97\% + W \times 2\% \quad (2)$$

$$\text{联立方程 (1)、(2) 求解得馏出液} \quad D = 6000 \text{ kg/h}$$

$$\text{残液} \quad W = 9000 \text{ kg/h}$$

(2) 能量衡算 能量衡算的依据是能量守恒定律。在化工过程中，向过程输入的能量必等于从该过程中输出的能量。多数情况下化工过程涉及的能量为热量，能量衡算常为热量衡算。即

$$\text{输入该过程总热量} = \text{输出该过程总热量}$$

应用热量衡算，可以了解生产过程中热量利用和损失情况，为生产和设计提供依据。进行热量衡算时，除要画出流程示意图、划定衡算范围、确定衡算基准外，还要确定出基准温度。一般选用  $0^\circ\text{C}$  为基准温度。

(3) 平衡关系 自然界中的过程，总是一个由不平衡到平衡的过程。平衡关系可以用来判断过程能否进行以及进行的程度。平衡关系是设备设计的理论依据。平衡状态的建立都是在一定的条件下完成的，如：在一定的温度和压力下二氧化碳溶解于水中直至达到饱和状态为止。当条件改变时，平衡溶解度发生变化，原有的平衡状态被破坏，平衡发生移动，直到在新条件下建立新的平衡。在生产过程中可以设置合理的操作条件，使平衡向有利于生产的方向移动。

(4) 过程速率 平衡关系只表明过程能否进行及过程进行的程度，而过程速率可以表明过程进行的快慢。一个过程由不平衡到平衡速度相差很大，有的很快，有的很慢。因此，在生产过程中过程速率非常重要，如果一个过程可以进行，但速率很慢，该过程在生产中无实用价值。过程速率可以近似表示如下：

$$\text{过程速率} = \text{过程推动力} / \text{过程阻力}$$

对不同的过程，推动力和阻力的内容各不相同，其中过程的阻力较为复杂，将在有关章节中分别介绍。



### 3. 单位制及单位换算

在化工过程中，有较多的化工计算，涉及到许多物理量，要说明一个物理量的大小仅有数字是不够的，还必须与单位结合起来。我国实行的法定计量单位是以国际单位制（SI制单位）为基础的，国际单位制的基本单位如下表：

量名称	长度	质量	时间	热力学温度	物质的量	电流	光亮度
单位名称	米	千克	秒	开尔文	摩尔	安培	坎德拉
单位符号	m	kg	s	K	mol	A	cd

SI制单位具有通用性强、使用方便的特点，在我国已得到广泛的应用。同一物理量用不同的单位表示时，其数值也相应改变。由于在我国CGS制与工程单位制等也还有应用，因此，必须掌握物理量的单位换算方法。在此以例题的形式说明单位换算方法。

**【例 0-2】** 将密度中英制单位  $\text{lb}/\text{ft}^3$  换成 SI 制单位  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

**解** 由相关手册中查得

$$1\text{ft}=0.3048\text{m} \quad 1\text{lb}=4.44822\text{N}=0.4536\text{kg}$$

因此

$$\rho = \frac{1\text{lb}}{\text{ft}^3} = \frac{0.4536\text{kg}}{(0.3048\text{m})^3} = 16.02\text{kg}/\text{m}^3$$

**【例 0-3】** 将普适气体常数  $R=82.06\text{atm} \cdot \text{cm}^3/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ，换算成：①工程单位制  $\text{kgf} \cdot \text{m}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ ；②SI单位制  $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

**解** ①由相关手册中查到  $1\text{atm}=1.033 \times 10^4 \text{kgf}/\text{m}^2$

$$R = 82.06 \times \frac{(1.033 \times 10^4 \text{kgf}/\text{m}^2) \times (10^{-2})^3 \text{m}^3}{10^{-3} \text{kmol} \cdot \text{K}}$$
$$\approx 848 \text{kgf} \cdot \text{m}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$$

②由相关手册中查到  $1\text{atm}=1.013 \times 10^5 \text{Pa}=1.013 \times 10^5 \text{N}/\text{m}^2$

$$R = 82.06 \times \frac{(1.013 \times 10^5 \text{N}/\text{m}^2) \times (10^{-2})^3 \text{m}^3}{1 \text{mol} \cdot \text{K}} \approx 8.313 \text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$$

$$R = 8.314 \text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$$