

高等学校试用教材

# 化工原理

王志魁 主编  
莫锡荣 审定

化学工业出版社



高等学校试用教材

# 化工原理

王志魁 主编  
莫锡荣 审定

化学工业出版社

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

化工原理/王志魁主编. —北京: 化学工业出版社,  
1987.6 (1998.4 重印)

高等学校教材

ISBN 7-5025-0413-3

I. 化… II. 王… 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 (95) 第 03063 号

---

高等学校试用教材

化 工 原 理

王志魁 主编

莫锡荣 审定

责任编辑: 孙世斌

封面设计: 任 辉

\*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

新华书店北京发行所经销

北京通县京华印刷厂印刷

北京通县京华印刷厂装订

\*

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 26 字数 616 千字

1987 年 6 月第 1 版 1998 年 4 月北京第 8 次印刷

印 数: 138491—146490

ISBN 7-5025-0413-3/G·69

定 价: 20.30 元

---

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换

## 内 容 提 要

本书介绍了主要化工单元操作的基本原理、典型设备及计算方法。全书分七章，内容包括绪论、流体流动、流体输送机械、沉降与过滤、传热、吸收、蒸馏、干燥等章。每章都编入适量的例题和习题。

本书重视基本概念和基础理论的阐述，注意理论联系实际，用工程观点分析问题，并适当介绍本学科领域的新进展；力求由浅入深，突出重点，主次分明，便于自学。供作高等院校少学时《化工原理》课程的教材，亦可为科研、设计和生产单位的技术人员参考用书。

本书由北京化工学院王志魁主编 并编写绪论和第三章，林义英编写第一章与第二章，李云倩编写第四章与第七章，崔应宁编写第五章与第六章。全书由莫锡荣审定。

## 序 言

本教材是根据化学工业部教育司，关于增编高等院校少学时《化工原理》教材的要求而编写的。

1982年以来，北京化工学院根据本院某些专业的特点，以精选内容、突出重点、理论联系实际、便于教学为原则，自编了一套教学学时少（简称少学时）的《化工原理》教材，在本院已使用几届，并曾为十余所兄弟院校有关专业选用。本教材即在此基础上并按化工部教育司的要求作了适当修改而成。

1984年11月化学工业部教育司为本教材（少学时《化工原理》）召开了评审会，参加会议的有北京工业学院、吉林化工学院、沈阳化工学院、大连工学院、天津大学、河北化工学院、青岛化工学院、华东化工学院、武汉化工学院、四川轻化工学院、广西工学院、北京化工学院等十二所院校的代表；浙江大学、南京化工学院和华南工学院提出了书面意见。会议认为教材的编写目的明确，并具有一定的教学实践基础，适用于少学时《化工原理》课程的教学需要，有一定的适应面和实际意义；考虑到教材的适用范围，并提出增加沉降与过滤的内容。会后根据所确定的编写原则和代表们提出的具体意见作了适当修改和增删。

本教材可供大学本科80~120学时《化工原理》课程的教学选用，如：“高分子材料”、“橡胶工程与塑料工程”、“高分子材料加工机械”、“腐蚀与防护”、“化工生产过程自动化”、“化学工业管理工程”、“化工工业分析”等专业。本教材包括流体流动、流体输送机械、传热、吸收、蒸馏、干燥、沉降与过滤等章，删除了一般“化工原理”教材中的蒸发、萃取和流态化等内容。编写时注意了加强基础、理论联系实际和以工程观点和经济观点分析问题；力求保持其系统性和完整性。

编写过程中，许多兄弟院校从事《化工原理》课程教学的同志，提供意见、介绍资料；北京化工学院各级领导和传递工程教研室的同志们，在工作上给予各种协助和支持，在此一并表示感谢。由于水平有限，经验不足，缺点错误在所难免，欢迎批评指正。

编者 1985年7月

# 目 录

序言	
绪论	1
一、化工过程与单元操作	1
二、《化工原理》课程的内容、性质及任务	1
三、单位与单位换算	2
四、单元操作中常用的基本概念	4
第一章 流体流动	6
第一节 概述	6
第二节 流体静力学基本方程式	6
1-1 密度	6
1-2 压力	8
1-3 流体静力学基本方程式	9
1-4 流体静力学基本方程式的应用	11
第三节 管内流体流动的基本方程式	15
1-5 流量与流速	15
1-6 稳定流动与不稳定流动	17
1-7 连续性方程式	17
1-8 柏努利方程式	18
1-9 实际流体机械能衡算式	20
第四节 管内流体流动现象	23
1-10 粘度	23
1-11 流体流动类型与雷诺准数	26
1-12 流体在圆管内的速度分布	28
第五节 流体流动的阻力	32
1-13 管、管件及阀门	32
1-14 流体在直管中的流动阻力	34
1-15 层流的摩擦阻力	34
1-16 湍流的摩擦阻力	35
1-17 非圆形管内的流动阻力	39
1-18 局部阻力	40
第六节 管路计算	45
1-19 简单管路	45
1-20 复杂管路	50
第七节 流量的测定	52

1-21	测速管	52
1-22	孔板流量计	54
1-23	转子流量计	58
1-24	湿式气体流量计	59
	习题	60
	重要符号说明	65
<b>第二章</b>	<b>流体输送机械</b>	<b>67</b>
第一节	概述	67
第二节	离心泵	67
2-1	离心泵的工作原理	67
2-2	离心泵的主要部件	68
2-3	离心泵的主要性能参数	69
2-4	离心泵的特性曲线	71
2-5	离心泵的安装高度和汽蚀现象	73
2-6	离心泵工作点	76
2-7	流量调节	77
2-8	并联与串联操作	79
2-9	离心泵的类型与选用	80
第三节	往复泵	81
2-10	往复泵的构造和操作原理	81
2-11	往复泵的流量与压头	82
2-12	往复泵的流量调节	83
第四节	其他类型的化工用泵	83
2-13	计量泵	83
2-14	旋转泵	84
2-15	旋涡泵	85
第五节	通风机、鼓风机、压缩机、真空泵	85
2-16	通风机	86
2-17	鼓风机	88
2-18	压缩机	89
2-19	真空泵	93
	习题	94
	重要符号说明	95
<b>第三章</b>	<b>沉降与过滤</b>	<b>97</b>
第一节	概述	97
3-1	非均相物系的分离	97
3-2	颗粒与流体相对运动时所受的阻力	97
第二节	重力沉降	98
3-3	沉降速度	99

3-4	降尘室 .....	100
3-5	悬浮液的沉聚 .....	102
第三节	离心沉降 .....	103
3-6	离心分离因数 .....	104
3-7	离心沉降速度 .....	104
3-8	旋风分离器 .....	105
3-9	旋液分离器 .....	107
3-10	沉降式离心机 .....	108
第四节	过滤 .....	111
3-11	悬浮液的过滤 .....	111
3-12	过滤速率基本方程式 .....	113
3-13	恒压过滤 .....	115
3-14	过滤设备 .....	117
	习题 .....	122
	重要符号说明 .....	122
<b>第四章</b>	<b>传热</b> .....	<b>124</b>
第一节	概述 .....	124
4-1	传热过程在化工生产中的应用 .....	124
4-2	传热的基本方式 .....	124
4-3	间壁式换热器中的传热过程 .....	125
4-4	换热器的热负荷计算 .....	126
第二节	热传导 .....	128
4-5	傅立叶定律 .....	128
4-6	导热系数 .....	129
4-7	平壁的稳定热传导 .....	132
4-8	圆筒壁的稳定热传导 .....	135
第三节	对流传热 .....	138
4-9	对流传热的基本概念 .....	138
4-10	影响对流传热系数的主要因素 .....	139
4-11	对流传热中的因次分析 .....	139
4-12	流体无相变时对流传热系数的经验关联式 .....	141
4-13	流体有相变时的对流传热系数 .....	150
4-14	对流传热系数小结 .....	155
第四节	传热计算 .....	156
4-15	传热平均温度差的计算 .....	156
4-16	流体流动方向的选择 .....	161
4-17	总传热系数 .....	162
4-18	污垢热阻 .....	165
4-19	壁温的计算 .....	167



第五节	热辐射	171
4-20	基本概念	171
4-21	物体的辐射能力与斯蒂芬-波尔兹曼定律	172
4-22	克希霍夫定律	174
4-23	两固体间的相互辐射	175
4-24	设备热损失的计算	178
第六节	换热器	179
4-25	换热器的分类	179
4-26	间壁式换热器	180
4-27	列管式换热器的选用	188
4-28	列管式换热器选用计算中的有关问题	188
4-29	传热过程的强化	195
第七节	加热、冷却和冷凝	197
4-30	加热	197
4-31	冷却	199
4-32	冷凝	200
	习题	200
	重要符号说明	203
<b>第五章</b>	<b>吸收</b>	<b>205</b>
第一节	概述	205
第二节	气液相平衡	207
5-1	气体在液体中的溶解度	207
5-2	亨利定律	209
5-3	相平衡与吸收过程的关系	212
第三节	吸收过程的速率	213
5-4	分子扩散与费克定律	213
5-5	气相中的稳定分子扩散	214
5-6	液相中的稳定分子扩散	218
5-7	湍流流体中的对流传质	219
5-8	单相传质速率方程及传质系数	220
5-9	两相间的传质	221
5-10	总吸收速率方程式	221
第四节	吸收塔的计算	227
5-11	物料衡算与操作线方程	227
5-12	吸收剂的用量与最小液气比	229
5-13	填料层高度的计算	232
5-14	吸收塔操作计算	241
5-15	解吸塔的计算	243
第五节	填料塔	245

5-16	填料塔的结构及填料特性	245
5-17	填料塔内的流体力学状况	247
5-18	塔径的计算	250
5-19	填料塔的附件	252
	习题	256
	重要符号说明	258
<b>第六章</b>	<b>蒸馏</b>	<b>261</b>
第一节	概述	261
第二节	双组分溶液的汽液相平衡	261
6-1	溶液的蒸汽压及拉乌尔定律	261
6-2	温度组成图 ( $t$ - $y$ - $x$ 图)	262
6-3	汽-液相平衡图 ( $y$ - $x$ 图)	264
6-4	双组分非理想溶液	265
6-5	挥发度及相对挥发度	266
第三节	蒸馏与精馏原理	268
6-6	简单蒸馏与平衡蒸馏	268
6-7	精馏原理	269
第四节	双组分连续精馏塔的计算	273
6-8	全塔物料衡算	273
6-9	理论板的概念与恒摩尔流的假定	275
6-10	操作线方程式	276
6-11	理论板数的确定	278
6-12	进料状况的影响	281
6-13	回流比的影响与选择	291
6-14	理论板数的简捷计算	297
6-15	双组分精馏的操作计算	299
第五节	间歇蒸馏	300
6-16	馏出液浓度维持恒定的操作	301
6-17	回流比维持恒定的操作	302
第六节	恒沸精馏与萃取精馏	303
6-18	恒沸精馏	303
6-19	萃取精馏	304
第七节	板式塔	305
6-20	塔板结构	305
6-21	塔板的流体力学状况	306
6-22	塔板效率	309
6-23	塔高的确定	310
6-24	塔径的计算	311
6-25	塔板负荷性能图	313

6-26 塔板型式 .....	314
第八节 精馏装置的热量衡算与节能 .....	316
6-27 精馏装置的热量衡算 .....	316
6-28 精馏装置的节能 .....	318
习题 .....	321
重要符号说明 .....	325
<b>第七章 干燥</b> .....	<b>327</b>
第一节 概述 .....	327
7-1 去湿方法 .....	327
7-2 干燥过程的分类 .....	327
7-3 干燥过程进行的条件 .....	328
第二节 湿空气的性质及湿度图 .....	329
7-4 湿空气的性质 .....	329
7-5 湿空气的湿度图及其应用 .....	335
第三节 干燥过程的物料衡算和热量衡算 .....	339
7-6 干燥过程的物料衡算 .....	340
7-7 干燥过程的热量衡算 .....	342
第四节 干燥速率和干燥时间 .....	345
7-8 物料中所含水分的性质 .....	345
7-9 固体物料的干燥机理 .....	346
7-10 恒定干燥条件下的干燥速率 .....	347
7-11 恒定干燥条件下干燥时间的计算 .....	349
第五节 干燥设备 .....	351
7-12 工业上常用的干燥器 .....	351
7-13 干燥器的选择 .....	356
习题 .....	357
重要符号说明 .....	358
参考文献 .....	360
<b>附录</b> .....	<b>361</b>
1. 单位换算表 .....	361
2. 某些气体的重要物理性质 .....	365
3. 某些液体的重要物理性质 .....	366
4. 某些固体材料的重要物理性质 .....	368
5. 水的重要物理性质 .....	369
6. 空气的重要物理性质 (760mmHg压力下) .....	370
7. 水的饱和蒸汽压 (-20℃至100℃) .....	371
8. 饱和水蒸汽表(按温度排列) .....	372
9. 饱和水蒸汽表(按压力排列) .....	373
10. 水的粘度 (0℃至100℃) .....	377

11. 液体粘度共线图.....	378
12. 气体粘度共线图(常压下用).....	380
13. 液体比热共线图.....	382
14. 气体比热共线图(常压下用).....	384
15. 液体汽化潜热共线图.....	386
16. 对数平均温度差校正系数 $e_{\Delta}$ 值.....	388
17. 管子规格.....	390
18. 离心泵规格.....	391
19. 离心通风机规格.....	395
20. 列管式换热器规格.....	396
21. 几种气体的平衡溶解度.....	400
22. 一些气体在不同温度时的亨利系数值.....	402
23. 气体在空气中的扩散系数.....	403
24. 气体在水中的扩散系数.....	403
25. 几种常用填料的特性数据.....	404

# 绪 论

## 一、化工过程与单元操作

化学工业是将自然界的各种物质，经过化学和物理方法处理，制造成生产资料和生活资料的工业。一种产品的生产过程中，从原料到成品，往往需要几个或几十个加工过程。其中除了化学反应过程外，还有大量的物理加工过程。

化学工业产品种类繁多。各种产品的生产过程中，使用着各种各样的物理加工过程。根据它们的操作原理，可以归纳为应用较广的数个基本操作过程，如流体输送、搅拌、沉降、过滤、热交换、蒸发、结晶、吸收、蒸馏、萃取、吸附以及干燥等。例如，乙醇、乙烯及石油等生产过程中，都采用蒸馏操作分离液体混合物，所以蒸馏为一基本操作过程。又如合成氨、硝酸及硫酸等生产过程中，都采用吸收操作分离气体混合物，所以吸收也是一个基本操作过程。又如尿素、聚氯乙烯及染料等生产过程中，都采用干燥操作以除去固体中的水分，所以干燥也是一个基本操作过程。这些基本操作过程称为单元操作 (*unit operation*)。任何一种化工产品的生产过程，都是由若干单元操作及化学反应过程组合而成的。每个单元操作，都是在一定的设备中进行的。例如，吸收操作是在吸收塔内进行的；干燥操作是在干燥器内进行的。单元操作不仅在化工生产中占有重要地位，而且在石油、轻工、制药及原子能等工业中也广泛应用。

## 二、《化工原理》课程的内容、性质及任务

为学习化工单元操作而编写的教材，在我国习惯上称之为《化工原理》(*Principles of Chemical Engineering*)。单元操作按其理论基础可分为下列三类：

- (1) 流体流动过程 (*fluid flow process*) 包括流体输送、搅拌、沉降、过滤等。
- (2) 传热过程 (*heat transfer process*) 包括热交换、蒸发等。
- (3) 传质过程 (*mass transfer process*) 包括吸收、蒸馏、萃取、吸附、干燥等。

流体流动时，其内部发生动量传递 (*momentum transfer*)，故流体流动过程也称为动量传递过程。流体流动的基本原理，不仅是流体输送、搅拌、沉降及过滤的理论基础，也是传热与传质过程中各单元操作的理论基础，因为这些单元操作中的流体都处于流动状态。传热的基本原理，不仅是热交换和蒸发的理论基础，也是传质过程中某些单元操作 (例如干燥) 的理论基础。因为干燥操作中，不仅有质量传递而且有热量传递。因此，流体力学、传热及传质的基本原理是各单元操作的理论基础。

《化工原理》是化工各专业学生必修的一门基础技术课程，其主要任务是介绍流体流动、传热、传质的基本原理及主要单元操作的典型设备构造、操作原理、计算、选型及实验研究方法；培养学生运用基础理论分析和解决化工单元操作中各种工程实际问题的能力。

### 三、单位与单位换算

#### 1. 单位制

由于科学技术的迅速发展和国际学术交流的日益频繁，以及理科与工科的关系进一步密切，国际计量会议制定了一种国际上统一的国际单位制，其国际代号为SI(法文*Système International d'Unités*的缩写)。国际单位制中的单位是由基本单位、辅助单位和具有专门名称的导出单位构成的，分别列于表1、表2及表3中，国际单位制中用于构成十进倍数和分数单位的词头，列于表4中。

表1 国际单位制的基本单位

量的名称	单位名称	单位符号
长度	米	m
质量	千克(公斤)	kg
时间	秒	s
电流	安培	A
热力学温度	开尔文	K
物质的量	摩尔	mol
发光强度	坎德拉	cd

表2 国际单位制的辅助单位

量的名称	单位名称	单位符号
平面角	弧度	rad
立体角	球面度	sr

表3 国际单位制中具有专门名称的导出单位(只列出本书常用的单位)

量的名称	单位名称	单位符号	其它表示式例
频率	赫兹	Hz	$s^{-1}$
力; 重力	牛顿	N	$kg \cdot m/s^2$
压力(压强), 应力	帕斯卡	Pa	$N/m^2$
能量, 功, 热	焦耳	J	$N \cdot m$
功率, 辐射通量	瓦特	W	J/s
摄氏温度	摄氏度	°C	*

\* 摄氏温度是按式 $t = (T - 273.15)$ 定义的, 式中 $t$ 为摄氏温度,  $T$ 为热力学温度。

表4 用于构成十进倍数和分数单位的词头(只列出本书常用的词头)

所表示的因数	词头名称	词头符号	所表示的因数	词头名称	词头符号
$10^6$	兆	M	$10^{-1}$	分	d
$10^3$	千	k	$10^{-2}$	厘	c
$10^2$	百	h	$10^{-3}$	毫	m
$10^1$	十	da	$10^{-6}$	微	$\mu$

我国已开始实行法定计量单位。法定计量单位是以国际单位制的单位为基础，根据我国的情况，适当增加了一些其他单位构成的。国家选定的非国际单位制单位，列于表5中。本书采用法定计量单位，但因目前常用的物理、化学数据和工程用数、表、列线图仍有许多是用物理制（CGS制）单位和工程单位，尚未换算过来，故本书兼用这些单位制中的个别单位（如例题、习题中），望注意这些单位，并要掌握单位的换算方法。CGS与工程单位制中的基本单位如表6所示。工程单位制中以“力”为基本量，用符号kgf表示。

表5 国家选定的非国际单位制单位(只列出本书常用的单位)

量的名称	单位名称	单位符号	换算关系和说明
时间	分	min	1min=60s
	〔小〕时	h	1h=60min=3600s
	天(日)	d	1d=24h=86400s
平面角	秒	( <sup>o</sup> )	1 <sup>o</sup> =( $\pi/648000$ )rad ( $\pi$ 为圆周率)
	分	( <sup>'</sup> )	1 <sup>'</sup> =60 <sup>o</sup> =( $\pi/10800$ )rad
	度	( <sup>o</sup> )	1 <sup>o</sup> =60 <sup>'</sup> =( $\pi/180$ )rad
旋转角度	转每分	r/min	1r/min=(1/60)s <sup>-1</sup>
质量	吨	t	1t=10 <sup>3</sup> kg
	原子质量单位	u	1u $\approx$ 1.6605655 $\times$ 10 <sup>-27</sup> kg
体积	升	L, (l)	1L=1dm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>

表6 CGS制与工程制的基本单位

量的名称 单位符号	CGS制				工程制			
	长度 cm	质量 g	时间 s	温度 ℃	长度 m	力 kgf	时间 s	温度 ℃

## 2. 因次

法定计量单位中，基本量的长度、质量、时间、温度可分别用符号  $L$ 、 $M$ 、 $T$ 、 $\theta$  表示，则导出量可由这些基本量的符号组合而成。例如，速度可用  $[LT^{-1}]$ 、加速度用  $[LT^{-2}]$ 、力用  $[MLT^{-2}]$  表示。若某物理量以  $[M^a L^b T^c]$  表示，则称它为该物理量的因次或量纲 (*dimension*) (严格地说，指数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  称为因次， $[M^a L^b T^c]$  称为该物理量的因次式或量纲式)。它表示该物理量的单位与基本量的单位之间的关系。当  $a = b = c = 0$  时，时  $[M^0 L^0 T^0] = [1]$ ，称为无因次 (*dimensionless*)。例如，液体的相对密度为该液体的密度与4℃时纯水的密度之比值，其因次为  $[ML^{-3}/ML^{-3}] = [M^0 L^0] = [1]$ ，为无因次。

## 3. 单位换算

同一物理量若用不同单位度量时，其数值需相应地改变。这种换算称为单位换算。法定计量单位刚实行不久，由过去的CGS和工程单位制过渡到全部使用法定单位，还需要一段时间。因此，必须掌握这些单位间的换算关系。单位换算时，需要换算因数。化工中常用单位的换算因数，可从本教材附录中查得。要特别注意工程单位制中的“力”的单位kgf与国际单位制中“力”的单位N之间的换算关系，在这里对这两个单位的换算关系

作简要说明。

若物体受地心引力作用产生  $a=9.80665\text{m/s}^2$  的重力加速度 (国际标准重力加速度, 即在北纬  $45^\circ$  海面上的重力加速度), 则作用于质量为  $m=1\text{kg}$  的物体上的重力为

$$F=ma=1 \times 9.80665=9.80665\text{N}$$

物体在重力场中所受的重力, 就是该物体的重量。因此, 工程单位制中是把 SI 中的  $9.80665\text{N}$  重量, 作为其  $1\text{kgf}$  重量, 故有

$$1\text{kgf}=9.80665\text{N}$$

由于质量为  $1\text{kg}$  物体的重量为  $1\text{kgf}$ , 所以工程单位制中的重量与 SI 中的质量数值相等。

例 1 通用气体常数  $R=0.08206\text{L}\cdot\text{atm}/\text{mol}\cdot^\circ\text{K}$ , 试用法定单位  $\text{J}/\text{mol}\cdot\text{K}$  表示。

解 从单位换算表查得  $1\text{L}=10^{-3}\text{m}^3$ ,  $1\text{atm}=1.013 \times 10^5\text{Pa}$

因此, 得  $R=0.08206 \times 10^{-3} \times 1.013 \times 10^5=8.313\text{m}^3\cdot\text{Pa}/\text{mol}\cdot\text{K}$

从单位换算表查得  $1\text{Pa}=1\text{N}/\text{m}^2=1\text{N}\cdot\text{m}/\text{m}^3=1\text{J}/\text{m}^3$

因此, 得  $R=8.313\text{J}/\text{mol}\cdot\text{K}$

#### 四、单元操作中常用的基本概念

在研究化工单元操作时, 经常用到下列五个基本概念, 即物料衡算, 能量衡算, 物系的平衡关系, 传递速率及经济核算等。这五个基本概念贯串于本课程的始终, 在这里仅作简要说明, 详细内容见各章。

##### 1. 物料衡算

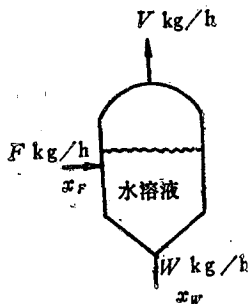
依据质量守恒定律, 进入与离开某一化工过程的物料质量之差, 等于该过程中累积的物料质量, 即

$$\text{输入量} - \text{输出量} = \text{累积量}$$

对于连续操作的过程, 若各物理量不随时间改变, 即处于稳定操作状态时, 过程中不应有物料的积累。则物料衡算 (material balance) 关系为

$$\text{输入量} = \text{输出量}$$

用物料衡算式可由过程的已知量求出未知量。物料衡算可按下列步骤进行: (1) 首先根据题意画出各物流的流程示意图, 物料的流向用箭头表示, 并标上已知数据与待求量。



例 1 附图

(2) 在写衡算式之前, 要选定计算基准, 一般选用单位进料量或排料量、时间及设备的单位体积等作为计算的基准。在较复杂的流程示意图上应圈出衡算的范围, 列出衡算式, 求解未知量。

例 1 用连续操作的蒸发器把含盐浓度为  $x_F$  (质量分率) 的稀盐水溶液蒸发到浓度为  $x_w$  (质量分率) 的浓盐水溶液, 每小时稀盐水溶液的进料量为  $F\text{kg}$ 。试求每小时所得浓盐水溶液量  $W$  及水分蒸发量  $V$  各为多少  $\text{kg}$ 。

解 各股物系的流程图如附图所示, 计算基准取  $1\text{h}$ , 由于是连续稳定操作, 总物料衡算式为

$$F = V + W$$



溶质衡算式为

$$F x_F = W x_W$$

由此两式解得

$$W = (x_F/x_W)F, \quad V = (1 - x_F/x_W)F$$

## 2. 能量衡算

本教材中所用到的能量主要有机械能和热能。能量衡算 (*energy balance*) 的依据是能量守恒定律。机械能衡算将在第一章流体流动中说明；热量衡算也将在传热、蒸馏、干燥等章中结合具体单元操作有详细说明。热量衡算的步骤与物料衡算的基本相同。

## 3. 物系的平衡关系

平衡状态是自然界中广泛存在的现象。例如，在一定温度下，不饱和的食盐溶液与固体食盐接触时，食盐向溶液中溶解，直到溶液为食盐所饱和，食盐就停止溶解，此时固体食盐表面已与溶液成动平衡状态。反之，若溶液中食盐浓度大于饱和浓度，则溶液中的食盐会析出，使溶液中的固体食盐结晶长大，最终达到平衡状态。一定温度下食盐的饱和浓度，就是这个物系的平衡浓度。当溶液中食盐的浓度低于饱和浓度，则固体食盐将向溶液中溶解。当溶液中食盐的浓度大于饱和浓度，则溶液中溶解的食盐会析出，最终都会达到平衡状态。从这个例子可以看出，平衡关系 (*equilibrium relation*) 可以用来判断过程能否进行，以及进行的方向和能达到的限度。

## 4. 传递速率

仍以食盐溶解为例说明。食盐溶液中食盐浓度低时，溶解速率（单位时间内溶解的食盐质量）大，食盐浓度高时，溶解速率小。当溶液达到饱和浓度（即平衡状态）时，不再溶解，即溶解速率为零。由此可知，溶液浓度越是远离平衡浓度，其溶解速率就越大，溶液浓度越是接近平衡浓度，其溶解速率就越小。溶液浓度与平衡浓度之差值，可以看作是溶解过程的推动力 (*driving force*)。另外，由实验得知，把一个大食盐块破碎成许多小块，溶液由不搅拌改为搅拌，都能使溶解速率加快。这是因为由大块改为许多小块，能使固体食盐与溶液的接触面积增大；由不搅拌改为搅拌，能使溶液质点对流。其结果能减小溶解过程的阻力 (*resistance*)。因此，过程的传递速率 (*rate of transfer process*) 与推动力成正比，与阻力成反比，即

$$\text{传递速率} = \frac{\text{推动力}}{\text{阻力}}$$

这个关系类似于电学中的欧姆定律。过程的传递速率是决定化工设备的重要因素，传递速率大时，设备尺寸可以小。

## 5. 经济核算

为生产定量的某种产品所需要的设备，根据设备的型式和材料的不同，可以有若干设计方案。对同一台设备，所选用的操作参数不同，会影响到设备费与操作费。因此，要用经济核算确定最经济的设计方案。