

# 食品工程导论

葛克山 崔建云 主编



化学工业出版社

·北京·

## 图书在版编目 (CIP) 数据

食品工程导论/葛克山, 崔建云主编. —北京:  
化学工业出版社, 2006.10  
ISBN 978-7-5025-9417-6

I. 食… II. ①葛…②崔… III. 食品工程学  
IV. TS201.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 120214 号

---

### 食品工程导论

葛克山 崔建云 主编  
责任编辑: 孟 嘉  
文字编辑: 温建斌  
责任校对: 洪雅姝  
封面设计: 关 飞

\*

化学工业出版社出版发行

(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

购书咨询: (010)64518888

购书传真: (010)64519686

售后服务: (010)64518899

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

\*

新华书店北京发行所经销

北京市振南印刷有限责任公司印刷

三河市前程装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 19 $\frac{3}{4}$  字数 491 千字

2007 年 1 月第 1 版 2007 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-5025-9417-6

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

# 前 言

我国食品企业众多，但在许多企业中，企业的管理者或技术人员对食品加工的原理、应用并不甚了解，因此，很难对企业进行技术革新、挖潜改造以提高产品的竞争力；另外，我国的一些大、中专学校的食品科学与工艺方向也缺乏这方面的专业教材。编写此书的目的就是为解决上述问题。本书较系统地介绍了食品工程领域中的一些典型加工操作，着重解决“为什么和如何用”等问题，使食品相关方面的人员有兴趣去读。本书有以下特点：

- ① 内容较全面，既有“三传”（热量传递、质量传递、动量传递）的基本理论、传统的单元操作（如吸收、蒸馏等），又有较新的单元操作（如膜分离过程、吸附、离子交换等）；
- ② 通俗易懂，使广大读者读得进去，便于自学；
- ③ 重点介绍基本原理和应用，减少公式推导与定量计算这些繁琐的环节。

本书由中国农业大学食品科学与营养工程学院的葛克山、崔建云担任主编。全书除前言和附录外，共分11章。具体编写分工如下：葛克山（前言，第1章，第5章，第6章和第10章）；崔建云（第2章和附录）；汪政富（第3章和第4章）；汪立君（第7章和第11章）；伍军（第8章和第9章）。

中国农业大学食品科学与营养工程学院的任发政教授在本书的成书和编写过程中，提出了许多指导性和有益的建议，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

# 目 录

<b>第 1 章 工程原理与单位制介绍</b> .....	1	2.2.5 流动类型与雷诺准数 .....	19
1.1 单元操作与传递过程、基本单位制 .....	1	2.2.6 流体在管内的流动阻力 .....	20
1.1.1 单元操作 .....	1	2.3 流体流动的基本方程 .....	24
1.1.2 基本传递过程 .....	2	2.3.1 管中稳定流动连续性方程 .....	24
1.1.3 基本单位制与其他单位制 .....	2	2.3.2 柏努利方程(能量衡算方程) .....	24
1.1.4 量纲一致性方程和单位的一致性 .....	2	2.3.3 柏努利方程的应用 .....	25
1.2 温度和组成的表示法 .....	3	2.4 流速和流量的测量 .....	28
1.2.1 温度 .....	3	2.4.1 毕托管 .....	28
1.2.2 物质的量和质量 .....	3	2.4.2 孔板流量计 .....	28
1.2.3 液体的浓度表示法 .....	4	2.4.3 文丘里流量计 .....	29
1.3 气体定律与蒸气压 .....	4	2.4.4 转子流量计 .....	29
1.3.1 压强 .....	4	2.5 液体输送机械 .....	29
1.3.2 理想气体定律 .....	5	2.5.1 泵的类型 .....	30
1.3.3 理想气体混合物 .....	5	2.5.2 泵的主要性能与特性 .....	30
1.3.4 液体的蒸气压与沸点 .....	6	2.5.3 泵的允许安装高度 .....	33
1.4 质量守恒与物料衡算 .....	6	2.5.4 泵的工作点与流量调节 .....	34
1.4.1 质量守恒 .....	6	2.5.5 离心泵的选择与使用 .....	36
1.4.2 简单的物料衡算 .....	6	2.6 气体输送机械 .....	37
1.5 能量守恒与能量衡算 .....	7	2.6.1 离心式通风机和鼓风机 .....	37
1.5.1 能量守恒 .....	7	2.6.2 往复式压缩机 .....	39
1.5.2 热量衡算 .....	7	2.6.3 真空泵 .....	39
1.6 数学解法与图解法 .....	8	2.7 液体搅拌与混合 .....	40
1.6.1 图解积分 .....	8	2.7.1 搅拌器的分类 .....	41
1.6.2 线性图 .....	9	2.7.2 搅拌设备的其他结构问题 .....	42
1.6.3 单对数坐标图(单 lg 坐标图) .....	9	2.7.3 常用的机械搅拌装置 .....	42
1.6.4 双对数坐标图(lg-lg 坐标图) .....	10	2.7.4 搅拌器的选型 .....	42
实践练习 .....	10	2.7.5 搅拌器的放大 .....	43
参考文献 .....	11	2.7.6 搅拌器的功率 .....	44
<b>第 2 章 动量传递原理</b> .....	12	实践练习 .....	47
2.1 流体静力学 .....	13	参考文献 .....	49
2.1.1 流体的作用力 .....	13	<b>第 3 章 传热原理</b> .....	50
2.1.2 流体静力学基本方程 .....	13	3.1 传热机理 .....	50
2.1.3 流体静力学基本方程的应用 .....	13	3.1.1 热传导机理 .....	50
2.2 流体流动现象与流动阻力 .....	16	3.1.2 对流传热机理 .....	52
2.2.1 牛顿内摩擦定律与黏度 .....	16	3.1.3 辐射传热机理 .....	53
2.2.2 理想流体 .....	17	3.2 导热 .....	53
2.2.3 非牛顿流体 .....	17	3.2.1 一维稳态热传导 .....	53
2.2.4 流量与流速 .....	17	3.2.2 非稳态热传导 .....	57

3.3 对流传热 .....	60	<b>第 5 章 非均相物系的分离与混合</b> .....	94
3.3.1 对流传热基础 .....	60	5.1 沉降分离 .....	94
3.3.2 管内强制对流传热 .....	62	5.1.1 重力沉降 .....	94
3.3.3 自然对流传热 .....	64	5.1.2 离心沉降 .....	98
3.4 冷凝与沸腾 .....	66	5.2 悬浮液的过滤 .....	101
3.4.1 凝结传热现象 .....	66	5.2.1 过滤操作的基本概念 .....	101
3.4.2 沸腾传热 .....	66	5.2.2 过滤设备及其选择 .....	103
3.5 辐射传热 .....	68	5.2.3 过滤的计算 .....	106
3.5.1 物体的辐射特性 .....	68	5.3 气溶胶的分离简介 .....	110
3.5.2 辐射传热的计算 .....	69	5.3.1 过滤净制 .....	111
3.6 换热器 .....	70	5.3.2 重力沉降与离心沉降 .....	112
3.6.1 热交换器类型 .....	70	5.3.3 湿法净制 .....	112
3.6.2 换热器设计计算中的几个参数 .....	72	5.3.4 电净制 .....	113
实践练习 .....	77	5.4 乳化与均质 .....	114
参考文献 .....	78	5.4.1 乳化机理 .....	115
<b>第 4 章 质量传递原理</b> .....	79	5.4.2 乳化液的稳定性及影响其稳定性 的主要因素 .....	115
4.1 质量传递与扩散过程 .....	79	5.4.3 乳化剂及其作用 .....	116
4.1.1 分子传质 .....	79	5.4.4 乳化液形成的方法 .....	116
4.1.2 对流传质 .....	80	5.4.5 乳化设备简介 .....	117
4.1.3 扩散通量与主体流动通量 .....	80	5.5 固体流态化与气力输送简介 .....	118
4.2 气体中的分子扩散 .....	80	5.5.1 固体流态化 .....	118
4.2.1 停滞介质中稳态分子扩散速率方程 的通用积分形式 .....	80	5.5.2 气力输送 .....	127
4.2.2 组分 A 通过停滞组分 B 的稳态 扩散 .....	81	实践练习 .....	130
4.2.3 组分 A 通过停滞组分 B 的拟稳态 扩散 .....	81	参考文献 .....	131
4.2.4 等分子反方向稳态扩散 .....	82	<b>第 6 章 吸收与蒸馏</b> .....	132
4.2.5 气体扩散系数 .....	83	6.1 吸收 .....	132
4.3 液体中的分子扩散 .....	84	6.1.1 气液相平衡 .....	133
4.3.1 液体中的稳态分子扩散速率 方程 .....	84	6.1.2 总传质速率方程 .....	137
4.3.2 组分 A 通过停滞组分 B 的稳态 扩散 .....	85	6.1.3 吸收设备与计算 .....	138
4.3.3 等分子反方向稳态扩散 .....	85	6.2 蒸馏 .....	144
4.3.4 液体中的扩散系数 .....	86	6.2.1 双组分溶液的气液相平衡 .....	145
4.4 固体中的分子扩散 .....	86	6.2.2 蒸馏与精馏原理 .....	149
4.4.1 与固体结构无关的稳态扩散 .....	87	6.2.3 双组分连续精馏塔的计算 .....	152
4.4.2 多孔固体中的稳态扩散 .....	88	6.3 其他蒸馏简介 .....	162
4.5 对流传质 .....	90	6.3.1 恒沸精馏与萃取精馏 .....	162
4.5.1 对流传质速率与对流传质系数 .....	90	6.3.2 分子蒸馏 .....	163
4.5.2 对流传质系数关联式 .....	91	实践练习 .....	164
实践练习 .....	92	参考文献 .....	166
参考文献 .....	93	<b>第 7 章 吸附与离子交换</b> .....	167
		7.1 吸附的基本概念与吸附剂 .....	167
		7.1.1 吸附的基本概念 .....	167
		7.1.2 吸附剂 .....	168
		7.2 吸附理论 .....	169

7.2.1 吸附平衡 .....	169	问题 .....	209
7.2.2 吸附速率 .....	171	9.1.3 膜分离过程的类型 .....	210
7.3 吸附计算 .....	171	9.1.4 膜的种类 .....	211
7.3.1 分级接触式吸附 .....	171	9.1.5 膜组件 .....	212
7.3.2 连续逆流吸附 .....	173	9.1.6 膜性能 .....	214
7.4 吸附设备与操作 .....	174	9.2 反渗透 .....	215
7.4.1 吸附操作方式 .....	174	9.2.1 反渗透的基本原理 .....	215
7.4.2 接触过滤吸附设备 .....	175	9.2.2 反渗透膜传递机理 .....	216
7.4.3 固定床吸附设备 .....	175	9.2.3 浓差极化现象和膜污染 .....	218
7.4.4 移动床吸附设备 .....	176	9.2.4 反渗透的渗透通量 .....	219
7.5 离子交换概念与离子交换剂 .....	176	9.2.5 反渗透的工艺流程 .....	219
7.5.1 离子交换的基本概念 .....	176	9.3 超滤 .....	221
7.5.2 离子交换树脂 .....	176	9.3.1 超滤原理 .....	221
7.6 离子交换理论 .....	180	9.3.2 超滤过程的传质模型 .....	222
7.6.1 离子交换平衡 .....	180	9.3.3 超滤的浓差极化现象 .....	222
7.6.2 离子交换过程机理 .....	181	9.3.4 减轻浓差极化的方法 .....	222
7.7 离子交换操作与设备 .....	181	9.3.5 超滤的渗透通量 .....	224
7.7.1 交换柱内的操作循环 .....	181	9.3.6 膜的清洗 .....	224
7.7.2 固定床离子交换装置 .....	183	9.3.7 超滤的流程 .....	225
7.7.3 半连续移动床离子交换装置 .....	183	9.4 电渗析 .....	226
7.7.4 流动床离子交换装置 .....	184	9.4.1 基本原理 .....	226
实践练习 .....	185	9.4.2 电渗析中的传递过程与伴随 过程 .....	226
参考文献 .....	185	9.4.3 离子交换膜的选择透过性 .....	227
<b>第8章 浸取与萃取</b> .....	186	9.4.4 浓差极化 .....	228
8.1 浸取 .....	186	9.4.5 电渗析装置 .....	229
8.1.1 浸取的基本原理 .....	186	9.5 膜分离技术在食品工业中的应用 .....	231
8.1.2 浸取流程与设备 .....	188	实践练习 .....	231
8.1.3 浸取操作的计算 .....	191	参考文献 .....	231
8.2 液液萃取 .....	193	<b>第10章 溶液浓缩</b> .....	232
8.2.1 概述 .....	193	10.1 蒸发 .....	232
8.2.2 相平衡 .....	194	10.1.1 蒸发操作及其特点 .....	232
8.2.3 萃取操作设备 .....	197	10.1.2 蒸发设备及选用 .....	233
8.2.4 萃取过程的计算 .....	199	10.1.3 单效蒸发 .....	238
8.3 超临界流体萃取 .....	203	10.1.4 多效蒸发 .....	242
8.3.1 超临界流体的基本性质及 特征 .....	203	10.1.5 多效蒸发与单效蒸发的比较 .....	244
8.3.2 超临界流体萃取的流程与 应用 .....	206	10.1.6 蒸汽再压缩蒸发 .....	245
实践练习 .....	207	10.2 结晶 .....	249
参考文献 .....	208	10.2.1 结晶原理 .....	249
<b>第9章 膜分离技术</b> .....	209	10.2.2 结晶方法与设备 .....	254
9.1 概述 .....	209	10.2.3 结晶操作的基本计算 .....	257
9.1.1 膜分离技术的发展历史 .....	209	10.3 冷冻浓缩 .....	258
9.1.2 膜分离技术的优势及存在的 问题 .....	209	10.3.1 冷冻浓缩操作原理 .....	258
		10.3.2 冷冻浓缩装置 .....	261

实践练习 .....	265	11.6 干燥机的分类和选择 .....	281
参考文献 .....	266	11.6.1 干燥机的分类 .....	281
<b>第 11 章 物料干燥</b> .....	<b>267</b>	11.6.2 干燥机的选择 .....	283
11.1 概述 .....	267	11.7 干燥方法和干燥器 .....	285
11.2 湿空气的基本性质 .....	268	11.7.1 隧道干燥器和厢式干燥器 .....	285
11.2.1 干球温度 .....	268	11.7.2 转筒干燥器 .....	285
11.2.2 绝对湿度 $y$ .....	268	11.7.3 转鼓干燥器 .....	287
11.2.3 相对湿度 $\varphi$ .....	268	11.7.4 带式干燥机 .....	288
11.2.4 湿气体的比容 (湿容积) $v_H$ .....	268	11.7.5 盘式连续干燥器 .....	288
11.2.5 湿空气的密度 $\rho_H$ .....	269	11.7.6 卧式桨叶式干燥器 .....	289
11.2.6 湿空气的比热容 $c_H$ .....	269	11.7.7 流化床干燥 .....	290
11.2.7 湿焓 $I$ .....	269	11.7.8 振动流化床干燥机 .....	291
11.2.8 露点 $t_d$ .....	269	11.7.9 喷雾干燥 .....	292
11.2.9 湿球温度 $t_w$ .....	269	11.7.10 气流干燥 .....	295
11.2.10 绝热饱和温度 $t_{as}$ .....	270	11.7.11 真空冷冻干燥 .....	297
11.3 湿空气的湿-焓图及使用方法 .....	270	11.7.12 超临界流体干燥 .....	298
11.3.1 湿空气的湿-焓图 .....	270	实践练习 .....	298
11.3.2 湿-焓图的使用方法 .....	272	参考文献 .....	299
11.4 湿物料的性质 .....	273	<b>附录</b> .....	<b>300</b>
11.4.1 物料的湿含量 .....	274	1. 常用单位的换算 .....	300
11.4.2 湿物料的分类 .....	274	2. 干空气的物理性质 (101.33kPa) .....	302
11.4.3 干燥的平衡 .....	274	3. 水的物理性质 .....	303
11.4.4 物料和水分的结合形式 .....	275	4. 水在不同温度下的黏度 .....	304
11.5 基本干燥过程的计算 .....	276	5. 饱和水蒸气表 (以温度为准) .....	305
11.5.1 干燥的基本流程 .....	276	6. 饱和水蒸气表 (以用 kPa 为单位的压强 为准) .....	306
11.5.2 总体热、质衡算 .....	276		

# 第 1 章 工程原理与单位制介绍

## 1.1 单元操作与传递过程、基本单位制

在化学、生物及食品等工业中，由最初的原料加工成最终的产品，有许多类似的过程。把这些表面上好像不同的物理、化学或生物加工过程，分解成若干个不同的工序，这些工序称为单元操作。

例如，在酿酒工业中，利用“蒸馏”这个单元操作来提纯或分离乙醇，而在石油工业中则用来提纯或分离烃类。谷物及其他食品的干燥与木材、过滤后得到的沉淀物的干燥类似。在发酵与污水处理过程中从空气中吸收氧气，在液体石油的加氢过程中吸收氢气，都应用“吸收”这个单元操作。化学工业中盐溶液的蒸发与食品工业中糖溶液的蒸发相似。废水处理与采矿工业中悬浮物的沉降相似。炼油厂中的液体物料与牛奶加工厂中的牛奶都是以相同的方式在管道中流动。

单元操作主要涉及能量和质量的传递与变化，它们主要应用物理的方法和物理化学的方法。

下面介绍本书所包含的一些重要单元操作，这些重要的单元操作可以按照不同的顺序组合成一个加工工艺。

### 1.1.1 单元操作

(1) 流体流动 主要讨论流体由一处流动或输送到另一处的规律。

(2) 传热 主要研究热量和能量的积累以及它们从一处传递到另一处的规律。

(3) 蒸发 它是热量传递的一种特殊情况，涉及从含不挥发溶质（如盐或其他物质）的溶液中蒸发出易挥发的溶剂（如水）。

(4) 干燥 研究从固体或液体物质中通过加热的方法除掉其中的液体以获得固体产品（通常是水）。

(5) 蒸馏 利用混合物中各组分蒸气压的不同，通过加热沸腾使液体混合物中的各个组分分离的一种方法。

(6) 吸收 利用气体混合物中各组分溶解性的不同，通过使其与液体接触去除混合物中的某个组分的一种分离方法。

(7) 液-液萃取 使液体混合物与另一种几乎不相溶的液体相接触，以分离出某一物质的一种方法。

(8) 液-固浸出 用液体处理固体物料，把其中的溶质溶解并从固体中分离出来的一种方法。

(9) 结晶 这是一种使溶液中的溶质沉淀，从而将溶质分离出来的单元操作。

(10) 吸附 利用吸附力的不同，用吸附剂来分离液体（或气体）混合物的一种方法。

(11) 离子交换 利用交换能力的不同，用离子交换剂从溶液中分离出某种离子的一种方法。

(12) 膜分离 用固体或液体膜分离气体或液体混合物的一种方法。

(13) 机械-物理分离 这里指的是用机械的方法,例如沉降、过滤等来分离固体、液体或气体。

上述的许多单元操作,都有某些共同的基本原理。例如在吸收、蒸馏、吸附、离子交换和结晶等单元操作中,都涉及扩散或传质的机理。在干燥、蒸馏和蒸发等单元操作中,都涉及传热。因此,常常根据基本原理将它们分成下列的传递过程。

### 1.1.2 基本传递过程

(1) 动量传递 这一传递过程是研究在运动的介质中所发生的动量传递。例如在流体流动、沉降和混合等单元操作中的动量传递。

(2) 热量传递 这一传递过程是研究热量从一处到另一处的传递。在传热、干燥、蒸馏和蒸发等单元操作中都存在着这种传递现象。

(3) 质量传递 这一传递过程是研究物质从一处到另一处的传递。不论在气相、液相还是固相中,其传递机理都是相同的。在吸收、蒸馏、吸附、离子交换和结晶等单元操作中都存在着这种传递现象。

### 1.1.3 基本单位制与其他单位制

由于历史、地区及各个学科的不同,因而产生了多种单位制度。早期的单位制度有: MKS制; CGS制; 西方国家常用的 FPS制。

目前,已正式规定在世界各国采用一种新的单位制,称为国际单位制,其代号为 SI,而废除早期的单位制度。国际单位制由七个基本单位和两个辅助单位组成,如表 1-1 所示。

表 1-1 国际单位制的基本单位和辅助单位

类别	物理量	单位名称	单位代号
基本单位	长度	米(meter)	m
	质量	千克(公斤)(kilogram)	kg
	时间	秒(second)	s
	物质的量	摩尔(mole)	mol
	热力学温度	开尔文(Kelven)	K
	电流强度	安培(Ampere)	A
	发光强度	坎德拉(candela)	cd
辅助单位	平面角	弧度(radian)	rad
	立体角	球面度(steradian)	sr

SI 的其他标准单位可由这些基本单位导出。

为了表示量的倍数,可在其前面添加的一些词冠如下:

G(吉) $=10^9$ ; M(兆) $=10^6$ ; k(千) $=10^3$ ; c(厘) $=10^{-2}$ ; m(毫) $=10^{-3}$ ;  $\mu$ (微) $=10^{-6}$ ; n(纳) $=10^{-9}$ 。

在我国,除了使用国际单位制,还可使用《中华人民共和国法定计量单位》(简称法定计量单位)。我国的法定计量单位除 SI 的基本单位、辅助单位和导出单位外,又规定了一些我国选定的非国际单位制单位。例如,时间还可以用分(min)、小时(h)、日(天)(d);质量可用吨(t);长度可用海里(n mile)等单位计量。

### 1.1.4 量纲一致性方程和单位的一致性

量纲一致性方程是指方程中所有各项具有相同单位的方程。这些单位可以是基本单位或导出单位。这种方程可以使用任何一种单位制,但在整个方程中必须使用该单位制的基本单位与导出单位,满足这样的条件,称为单位的一致性。当使用的单位一致时,则不需要单位

换算因子。

在使用任何一个方程时，必须仔细地检验其量纲的一致性。为此，应首先选择单位制，然后把单位代入该方程的每一项，并消去相同的单位。

## 1.2 温度和组成的表示法

### 1.2.1 温度

在化学、生物及食品工业中，通常使用摄氏温度（ $^{\circ}\text{C}$ ）作为温标。此外，还有其他多种温标，如华氏温度（ $^{\circ}\text{F}$ ）、郎肯温度（ $^{\circ}\text{R}$ ）和热力学温度（ $\text{K}$ ）。摄氏温度是用 101325Pa（1atm）下水的冰点和沸点作基点。在热力计算中，常常需将温度表示为热力学温度（ $\text{K}$ ）（SI 的标准单位）。

若以  $t$ 、 $T$ 、 $R$  和  $F$  分别表示摄氏温度、热力学温度、郎肯温度和华氏温度，则这些常用温标的换算如下：

$$F = 1.8t + 32 \quad (1-1)$$

$$R = F + 460 \quad (1-2)$$

$$T = t + 273.15 \quad (1-3)$$

所使用的温标不同，则温度差的大小也不同。各种温标的温度差换算如下：

$$1^{\circ}\text{C} = 1.8^{\circ}\text{F} = 1.8^{\circ}\text{R} \quad (1-4)$$

$$1^{\circ}\text{C} = 1\text{K} \quad (1-5)$$

从式(1-5)可以得出， $1\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}) = 1\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ （此为比热容的单位）。

### 1.2.2 物质的量和质量

表示气体、液体和固体组成的方法很多，其中最常用的是物质的量，因为化学反应和气体定律用物质的量时比较简单。物质的量的单位是摩尔（ $\text{mol}$ ）， $1\text{kmol}$  纯物质的质量（以  $\text{kg}$  计）在数值上等于它的相对分子质量。例如， $1\text{kmol}$   $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$  含有  $46.0\text{kg}$   $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ 。

某一物质的摩尔分数是该物质的物质的量与混合物的总物质的量之比值。同理，质量分数是该物质的质量与混合物的总质量之比值。

对混合物中 A 组分，可以表示为：

$$x_A (\text{A 的摩尔分数}) = \frac{\text{A 的物质的量}}{\text{混合物的总物质的量}} \quad (1-6)$$

$$w_A (\text{A 的质量分数}) = \frac{\text{A 的质量}}{\text{混合物的总质量}} \quad (1-7)$$

而混合物中各组分的摩尔分数（或质量分数）之和等于 1。

**【例 1-1】** 某水溶液由  $50\text{kg}$  水（B）和  $50\text{kg}$   $\text{NaOH}$ （A）组成，计算  $\text{NaOH}$  的摩尔分数和质量分数。

**解：**取  $50 + 50 = 100\text{kg}$  溶液作计算基准。

$\text{NaOH}$ （A）的相对分子质量  $M_A = 40.0$

水（B）的相对分子质量  $M_B = 18.0$

$50\text{kg}$   $\text{NaOH}$  的物质的量  $= 50/40 = 1.25$ （ $\text{kmol}$ ）

$50\text{kg}$  水的物质的量  $= 50/18 = 2.78$ （ $\text{kmol}$ ）

由式(1-6), 得:

$$x_A = \frac{\text{A 的物质的量}}{\text{混合物的总物质的量}} = \frac{1.25}{1.25 + 2.78} = 0.310$$

由式(1-7), 得:

$$w_A = \frac{\text{A 的质量}}{\text{混合物的总质量}} = \frac{50}{50 + 50} = 0.500 = 50.0\%$$

### 1.2.3 液体的浓度表示法

当一种液体与另一种互溶的液体混合时, 体积通常不能加和。因此, 液体的组成一般不用体积分数表示, 而用质量分数或摩尔分数表示。溶液中组分浓度的另一种表示法是物质的量浓度。它定义为单位体积溶液中组分的物质的量 ( $\text{kmol}/\text{m}^3$ )。浓度的其他表示方法是质量浓度, 它定义为单位体积溶液中组分的质量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。溶液的浓度与温度有关, 因此, 必须指明温度。

表示总质量浓度最常用的方法是密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。例如水在 277.2K ( $4^\circ\text{C}$ ) 时的密度是  $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 。有时也用相对密度, 它定义为该溶液在某一温度下的密度与  $4^\circ\text{C}$  水的密度之比值。

**【例 1-2】** 2.0% (质量分数) 的牛血清蛋白 (A) 溶液, 在 298K ( $25^\circ\text{C}$ ) 的温度下, 其密度为  $1002.8\text{kg}/\text{m}^3$ , 白蛋白的相对分子质量是 67000。试计算:

- (1) 溶液的相对密度;
- (2) 白蛋白 (A) 在溶液中的摩尔分数;
- (3) 白蛋白 (A) 在溶液中的物质的量浓度。

**解:** (1)  $4^\circ\text{C}$  时水的密度为  $1000\text{kg}/\text{m}^3$ , 故

$$\text{溶液的相对密度} = \frac{1002.8\text{kg}/\text{m}^3}{1000\text{kg}/\text{m}^3} = 1.0028$$

(2) 取 100kg 溶液作计算的基准

$$\text{A 的质量} = 2.0\% \times 100 = 2.00 \text{ (kg)}$$

$$\text{B (水) 的质量} = 100 - 2.00 = 98.0 \text{ (kg)}$$

$$\text{A 的物质的量} = 2.00/67000 = 2.99 \times 10^{-5} \text{ (kmol)}$$

$$\text{B 的物质的量} = 98.0/18.0 = 5.44 \text{ (kmol)}$$

$$\text{总物质的量} = 2.99 \times 10^{-5} + 5.44 = 5.44 \text{ (kmol)}$$

$$x_A = \frac{2.99 \times 10^{-5}}{5.44} = 5.50 \times 10^{-6}$$

(3) 取  $1\text{m}^3$  溶液作计算的基准

$$\text{A 的质量} = 2.0\% \times 1002.8 = 20.056 \text{ (kg)}$$

$$\text{B (水) 的质量} = 1002.8 - 20.056 = 982.7 \text{ (kg)}$$

$$\text{A 的物质的量} = 20.056/67000 = 2.993 \times 10^{-4} \text{ (kmol)}$$

$$\text{A 的物质的量浓度 } \rho_A = \frac{2.993 \times 10^{-4}}{1} = 2.993 \times 10^{-4} \text{ (kmol}/\text{m}^3)$$

## 1.3 气体定律与蒸气压

### 1.3.1 压强

压强, 工程上也称作压力。压强的表示方法有多种。1 个标准大气压 ( $1.00\text{atm}$ ) 的绝

对压强等于 0℃ 时 760mmHg，或 4℃ 时 10.33mH<sub>2</sub>O 或 101.33kPa。表压强是指比（当地）大气压强高出的部分。而真空度是指比（当地）大气压强低出的部分。也就是说，表压强或真空度是以大气压为计算的基准。因此，表压强为 120kPa 时（设当地大气压为标准大气压），其绝对压强是 101.33+120=221.33kPa。

### 1.3.2 理想气体定律

理想气体定义为分子本身没有体积、相互间无作用力的刚性小球。没有一种实际气体能完全符合这些要求，但在常温、不高于几个大气压的压强下，用理想气体定律计算的结果与实际结果相比，误差在百分之几或更小的范围内。因此在这种情况下，对工程计算而言，理想气体定律就已足够准确。

波义尔（Boyle）理想气体定律指出：气体的体积与热力学温度成正比，而与绝对压强成反比。其关系式为：

$$pV = nRT \quad (1-8)$$

式中  $p$ ——气体的绝对压强，kPa；

$V$ ——气体的体积，m<sup>3</sup>；

$n$ ——气体的物质的量，kmol；

$T$ ——热力学温度，K；

$R$ ——通用气体常数， $R = 8.314 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

当一定量的理想气体从状态 1 ( $p_1, V_1, T_1$ ) 变化到状态 2 ( $p_2, V_2, T_2$ ) 时，有如下关系式：

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad (1-9)$$

为便于比较各种气体的量，把 101.33kPa 和 273.15K (0℃) 规定为标准压强与标准温度，以 STP 或 SC 表示。在此标准状况下，气体的体积为：

$$1 \text{ kmol 气体体积(SC)} = 22.414 \text{ m}^3$$

### 1.3.3 理想气体混合物

对于理想气体混合物，道尔顿（Dalton）定律指出：气体混合物的总压等于其中各组分的分压之和，即：

$$P = p_A + p_B + p_C + \dots \quad (1-10)$$

式中  $P$ ——混合气体的总压强，kPa；

$p_A, p_B, p_C, \dots$ ——分别为混合物中组分 A, B, C, ……的分压，kPa。

由于某一组分的摩尔分数与其分压成正比，故 A 组分的摩尔分数为：

$$x_A = \frac{p_A}{P} = \frac{p_A}{p_A + p_B + p_C + \dots} \quad (1-11)$$

体积分数等于摩尔分数。气体混合物几乎总是用摩尔分数表示，而不用质量分数。对于工程应用，在总压只有几个大气压或更低压强的情况下，道尔顿定律用于实际气体混合物已足够精确。

**【例 1-3】** 有一气体混合物，其组分与分压如下：CO<sub>2</sub> 10.0kPa，CO 6.67kPa，N<sub>2</sub> 79.3kPa，O<sub>2</sub> 3.47kPa。试计算混合物的总压及各组分的摩尔分数。

解：分别以 A, B, C, D 代表  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2$  和  $\text{O}_2$ , 将已知值代入式(1-10), 得:

$$P = p_A + p_B + p_C + p_D = 10.0 + 6.67 + 79.3 + 3.47 = 99.4 (\text{kPa})$$

应用式(1-11) 计算各组分的摩尔分数

$$x_A = \frac{p_A}{P} = \frac{10.0}{99.4} = 0.101$$

同理计算可得  $\text{CO}$ 、 $\text{N}_2$  和  $\text{O}_2$  的摩尔分数分别为 0.067、0.797 和 0.035。

### 1.3.4 液体的蒸气压与沸点

在一定温度下, 某种液体与其上方的蒸气达到平衡时 (即液体的蒸发速度等于蒸气的凝结速度), 蒸气的压强称为 (饱和) 蒸气压。

在蒸气中存在惰性气体 (例如空气) 时, 对蒸气压的影响很小。通常, 在总压强等于或小于几个大气压的情况下, 总压对蒸气压的影响可以忽略不计。

液体的蒸气压随温度的升高而显著增加。例如,  $50^\circ\text{C}$  时水的蒸气压是 12.33kPa, 而在  $100^\circ\text{C}$  时增加到 101.33kPa。

液体的蒸气压等于总压时的温度定义为液体的沸点。因此, 在 101.33kPa (1atm) 下, 水将在  $100^\circ\text{C}$  时沸腾。在高山顶上, 总压显然低于 101.33kPa, 因此, 水会在低于  $100^\circ\text{C}$  的温度下沸腾。

水的蒸气压数据列于附录 5 和附录 6 中, 以备查用。

## 1.4 质量守恒与物料衡算

### 1.4.1 质量守恒

物理学中的一个基本定律是质量守恒定律。可简述如下: 质量既不能创生, 也不能消失 (不包括核反应)。因此, 进入一个过程的所有物质的总质量必须等于离开这一过程的所有物质的总质量与过程中物质的积累之和, 即:

$$\text{进入量} = \text{输出量} + \text{积累量} \quad (1-12)$$

在很多情况下, 过程中没有物质的积累。这时, 进入量等于输出量。这种进入量等于输出量的过程称为稳态过程, 即:

$$\text{进入量} = \text{输出量} \quad (1-12a)$$

### 1.4.2 简单的物料衡算

本节仅讨论无化学反应、稳态过程的简单物料衡算。为了求解一个物料衡算问题, 需要按以下步骤进行。

(1) 按题意绘出一个简单的流程图 它可以是一个简单的方框图, 图中用一个向内的箭头表示每一股进料, 用一个向外的箭头表示每一股出料, 在每个箭头上, 注明物料流的组成、流量、温度等。所有有关的数据都应标在该流程图上。

(2) 选择计算基准 一般而言, 对稳态过程选择单位时间 (1h 或 1s) 为计算基准, 对间歇式过程选择一批的处理时间为基准。

(3) 建立物料衡算关系式 向内的箭头都是进入项, 而向外的箭头都是输出项。物料衡算关系式可以按方程 (1-12a) 作总的物料衡算, 也可以进行每一组分的衡算。

不存在化学反应的典型单元操作有蒸馏、吸附、膜分离、浸出、干燥等。通过建立含有未知量的方程, 再求解未知量来解决这些过程的计算问题。

**【例 1-4】** 在橘汁的浓缩加工中，榨出的新橘汁固形物含量为 7.08%（质量分数）。将其送入蒸发器除去部分水分，使其中的固形物含量增加到 58%（质量分数），若进料量为 1000kg/h，试计算蒸发器出口浓橘汁和水的流量。

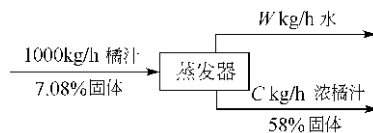


图 1-1 橘汁浓缩加工物料衡算

**解：**按照上述三个步骤，绘出该过程的流程图（第一步），如图 1-1 所示。以  $W$  表示水的未知量， $C$  表示浓橘汁的未知量。计算基准取为 1h（第二步）。进行物料衡算，应用方程（1-12a）建立物料衡算关系式：

$$1000 = W + C \quad (1)$$

在此方程中，有两个未知量。因此，再作固形物的单组分衡算：

$$1000 \times 0.0708 = W \times 0 + C \times 0.58 \quad (2)$$

联立（1）、（2）两式，可解得：

$$C = 122.1 \text{ kg/h}, W = 877.9 \text{ kg/h}$$

通常，一个工艺流程包含有多个过程，这时可以选择其中的某一个过程或整个工艺来建立物料衡算关系式。

## 1.5 能量守恒与能量衡算

### 1.5.1 能量守恒

能量守恒定律也是物理学中的一个基本定律。该定律指出：进入过程的能量等于离开过程的能量与积累在过程中的能量之和。

能量可以多种形式出现。一些普通的形式是焓、电能、化学能、动能、位（势）能、功和热能。

在恒压下发生的许多过程中，既没有化学反应，又没有电能、动能、势能和功，或者这些能量可以忽略不计。因此在能量衡算中，只有物质的焓与加入或移走的热量需要考虑。通常，这种情况下的能量衡算称为热量衡算。

### 1.5.2 热量衡算

稳态情况下进行热量衡算时，可以使用类似物料衡算的方法，即进入过程的物料所带入的能量或热量与加到过程的净能量之和等于离开的物料所带出的能量，数学表达式为：

$$\sum m_i H_i + Q = \sum m_o H_o \quad (1-13)$$

式中  $Q$ ——加到过程中的净能量或热量，如果热量离开（如热损失），这一项为负值；

$\sum m_i H_i$ ——进入过程的所有物料的焓的总和；

$\sum m_o H_o$ ——离开过程的所有物料的焓的总和；

$m_i, m_o$ ——进、出过程的物料质量或质量流量，kg 或 kg/h。

注意：工程上为计算方便，规定  $0^\circ\text{C}$  的液体或气体的焓值为零。当溶液无稀释热时，其焓值可用比热容来计算，即：

$$H = c_p t \quad (1-14)$$

式中  $H$ ——单位质量物料的焓值，kJ/kg；

$c_p$ ——物料的比热容,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ;

$t$ ——物料的温度,  $^\circ\text{C}$ 。

**【例 1-5】** 用泵将某发酵液送入间壁式加热器加热, 温度从  $30^\circ\text{C}$  加热到  $70^\circ\text{C}$ , 流量为  $2000\text{kg}/\text{h}$ 。用来加热发酵液的废热水于  $95^\circ\text{C}$  进入加热器, 在  $85^\circ\text{C}$  下流出。发酵液的平均比热容为  $4.06\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ , 热水的平均比热容为  $4.21\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ , 假定没有热损失。试建立整个体系的热量衡算, 并计算热水的流量及加给发酵液的热量。该过程的流程图见图 1-2。

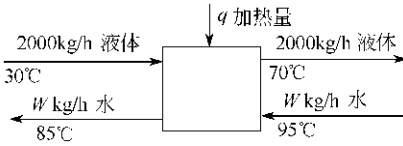


图 1-2 流程图

**解:** 取 1h 为计算基准。

输入项, 按式(1-14) 计算焓:

$$H_{1i}(\text{发酵液}) = 2000 \times 4.06 \times 30 = 2.436 \times 10^5 \text{ (kJ/h)}$$

$$H_{2i}(\text{水}) = W \times 4.21 \times 95 = 400W \text{ (kJ/h)}$$

$$Q = 0 \text{ (没有热损失, 也没有加热)}$$

输出项, 按式(1-14) 计算焓:

$$H_{1o}(\text{发酵液}) = 2000 \times 4.06 \times 70 = 5.684 \times 10^5 \text{ (kJ/h)}$$

$$H_{2o}(\text{水}) = W \times 4.21 \times 85 = 357.9W \text{ (kJ/h)}$$

代入式(1-13), 可解出  $W$ :

$$2.436 \times 10^5 + 400W + 0 = 5.684 \times 10^5 + 357.9W$$

$$W = 7715 \text{ (kg/h)}$$

加给发酵液的热量为其流出和流入的焓差:

$$\Delta H = H_{1o} - H_{1i} = 5.684 \times 10^5 - 2.436 \times 10^5 = 3.248 \times 10^5 \text{ (kJ/h)}$$

注意: 本例中若比热容为常数, 热量衡算方程就更为简单, 其形式如下:

热水失去的热量 = 发酵液得到的热量

$$W \times 4.21 \times (95 - 85) = 2000 \times 4.06 \times (70 - 30)$$

$\therefore$

$$W = 7715 \text{ (kg/h)}$$

## 1.6 数学解法与图解法

### 1.6.1 图解积分

当一个数学函数  $f(x)$  很复杂时, 可能就不能用解析法进行积分; 在某些情况下, 函数关系是由实验数据以表格的形式给出的, 没有适于表示这些数据的数学方程, 因而也不能进行解析积分。对于这些情况, 可以使用图解积分法。定积分的意义就是函数曲线与坐标轴再加上积分限所围成的面积的代数和。

**【例 1-6】** 有一污水处理厂, 在不同时间  $t$  测定了污水的体积流量  $R$ , 数据如表 1-2, 试计算在 60min 内流出的污水总体积。

表 1-2 不同时间污水的体积流量

$t/\text{min}$	$R/(\text{m}^3/\text{min})$	$t/\text{min}$	$R/(\text{m}^3/\text{min})$
0	79	40	51.5
10	72	50	55
20	62	60	61
30	54		

解：首先将数据  $R$  对  $t$  作图，如图 1-3 所示，其中， $R$  就是  $f(x)$ ，然后绘出如图所示的一系列长方形。

长方形的高度可以根据长方形在曲线上的阴影面积等于曲线下方的阴影面积的原则来确定。

污水总流出体积 ( $V$ ) 就等于从 A 到 F 的所有长方形的面积之和，故

$$V = 75.8 \times 10 + 67.5 \times 10 + 57.7 \times 10 + 52.4 \times 10 + 53.0 \times 10 + 57.8 \times 10 = 3642 \text{ (m}^3\text{)}$$

### 1.6.2 线性图

实验数据常以图表而不是数学表达式的形式表示。在许多情况下，需要得到适合该实验数据的数学方程。为此，一个重要方法是将数据点描绘在坐标图上，然后通过这些点画出一条光滑的曲线或直线。在某些情况下，如果坐标图纸选择合适，数据点会近似落在一条直线上。由实验数据得到的方程称为经验方程。

最简单的坐标图纸是线性图纸，即算术图纸。如果包含变量  $x$  和  $y$  的实验数据满足下述方程：

$$y = mx + a \quad (1-15)$$

式中  $m$ ——直线的斜率；

$a$ —— $y$  轴的截距。

那么，在线性图纸上，这些数据将落在一条直线上。

**【例 1-7】** 干燥一片压缩纸浆得到如下实验数据 (表 1-3)，试用图解法确定适合这些数据的经验方程。

表 1-3 干燥实验数据

自由水含量 $W/\text{kgH}_2\text{O}$	干燥速率 $R/[\text{kgH}_2\text{O}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)]$	自由水含量 $W/\text{kgH}_2\text{O}$	干燥速率 $R/[\text{kgH}_2\text{O}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)]$
1.51	0.287	0.91	0.192
1.47	0.279	0.67	0.150
1.30	0.248	0.55	0.138
1.12	0.224	0.40	0.105

解：将这些数据描绘在线性图纸上，如图 1-4 所示。其直线方程为：

$$R = mW + a$$

斜率是距离 A 与距离 B 的比值，即：

$$m = 0.272 / 1.72 = 0.158$$

截距  $a$  是 0.048。由此得经验方程为：

$$R = 0.158W + 0.048$$

### 1.6.3 单对数坐标图 (单 lg 坐标图)

在加工工程中，有许多方程具有如下形式：

$$y = a \times 10^{bx} \quad (1-16)$$

式中， $a$  和  $b$  为常数。如果对等式两边取对数，则有：

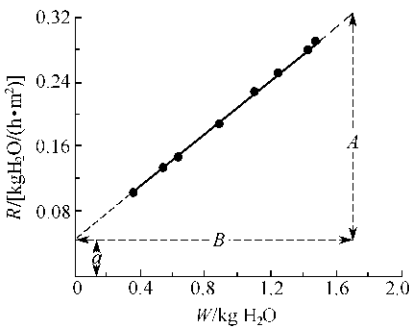


图 1-4 干燥实验数据曲线

$$\lg y = bx + \lg a \quad (1-16a)$$

因此，如果在线性图纸上用  $\lg y$  对  $x$  作图，则得到一条直线，其斜率为  $b$ ，在  $y$  轴上的截距为  $\lg a$ 。这时，更方便的方法是使用单对数坐标图纸。这种图纸的一个坐标是线性的，另一个坐标是  $\lg$  坐标。将  $y$  放在  $\lg$  坐标上， $x$  放在线性坐标上直接描点，即可得一条直线。

#### 1.6.4 双对数坐标图 (lg-lg 坐标图)

如果某方程有如下形式：

$$y = ax^b \quad (1-17)$$

式中， $a$  和  $b$  为常数。对等式两边取对数，则有：

$$\lg y = b \lg x + \lg a \quad (1-17a)$$

因此，如果使用  $\lg$ - $\lg$  坐标图，用  $y$  对  $x$  作图则得到一条直线，其斜率为  $b$ ， $a$  是  $x=1$  时  $y$  的值。另一个求解  $a$ 、 $b$  的方法是在所绘的直线上找出两点，将其值代入式(1-17a)，解出  $a$ 、 $b$ ，即为所求。

### 实 践 练 习

1. 一气体混合物含有 20g  $N_2$ ，83g  $O_2$  和 45g  $CO_2$ 。计算各组分的摩尔分数和混合物的平均相对分子质量。

[答： $x_{N_2} = 0.165$ ； $x_{O_2} = 0.599$ ； $x_{CO_2} = 0.236$ ； $\bar{M} = 34.2$ ]

2. 一溶液中含有 1.15% (质量分数) 的蛋白质，0.27% (质量分数) 的 KCl，其余是水。已知蛋白质的平均相对分子质量是 525000。计算溶液中各组分的摩尔分数。

[答： $x_{\text{蛋白质}} = 4.00 \times 10^{-7}$ ； $x_{KCl} = 6.60 \times 10^{-4}$ ； $x_{H_2O} = 0.9993$ ]

3. 一气体混合物，含有  $NH_3$  为 0.13kmol、 $N_2$  为 1.27kmol 和水蒸气 0.025kmol，其总压为 110.7kPa，温度为 323K。计算：

- (1) 各组分的摩尔分数；
- (2) 各组分的分压；
- (3) 混合物的总体积。

[答：(1)  $x_{NH_3} = 0.0912$ ， $x_{N_2} = 0.8913$ ， $x_V = 0.0175$ ；(2)  $p_{NH_3} = 10.1kPa$ ， $p_{N_2} = 98.7kPa$ ， $p_V = 1.94kPa$ ；(3)  $34.6m^3$ ]

4. 某热敏性物质的水溶液蒸发压强是 1.60kPa，求蒸发温度是多少 (K)？假定少量固体物对水的蒸气压没有影响，蒸气压可按下式计算：

$$\lg p_A = -2250 \left( \frac{1}{T} \right) + 8.175$$

式中， $p_A$  的单位是 kPa， $T$  的单位是 K。

[答：282.3K]

5. 用一蒸发器浓缩蔗糖溶液。进料量为 10000kg/d，料液含糖 38% (质量分数)，浓缩液含糖 74% (质量分数)。计算浓缩液的流量和去除的水分量。

[答：5135kg/h；4865kg/h]

6. 某工艺要将含水 66% (质量分数) 的木薯干燥至含水 5% (质量分数)。如果要得到 5000kg/h 的产品，问需要多少原料木薯？每小时除去多少水？

[答：13970kg/h；8970kg/h]

7. 454kg 温度为 10℃ 的苹果酱在一加热器中加热，加入的热量为 121300kJ。计算苹果