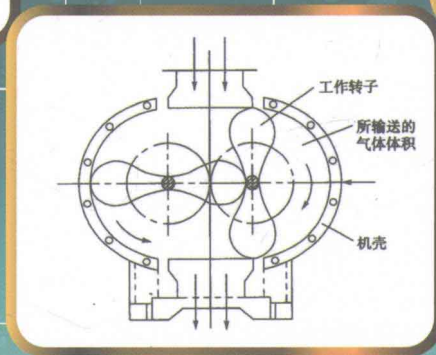
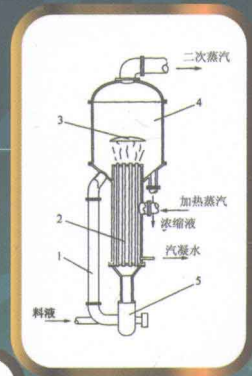
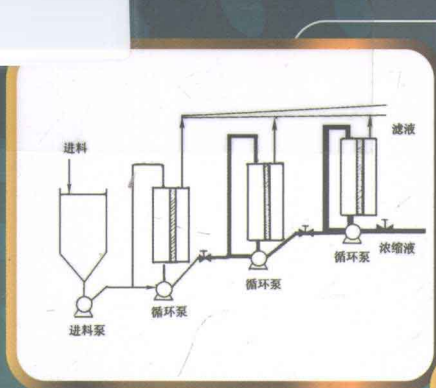




“食品工程原理” 国家级精品课程配套教材

食品工程单元操作

SHIPIN GONGCHENG DANYUAN CAOZUO

冯 翥 涂国云 主编



化学工业出版社

本书结合传递原理阐述了食品工业中常见单元操作的基本原理和主要应用,注重学生工程设计和实际操作能力培养,详细介绍了处理食品工程问题的常用方法,并配备了大量的例题和习题。考虑到教学中的实际需要,本书尽量以简洁的语言进行叙述,突出应用,简化理论推导。

本书可作为高等院校食品科学与工程专业的教材或参考书,也可供从事食品、发酵、粮食加工、油脂、制糖及其他农产品加工工业的生产、设计、科研人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

食品工程单元操作/冯磊,涂国云主编. —北京:
化学工业出版社, 2012. 6
ISBN 978-7-122-13988-7

I. 食… II. ①冯…②涂… III. 食品工程学
IV. TS201.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 068678 号

责任编辑: 杜进祥 徐雅妮
责任校对: 吴 静

文字编辑: 孙凤英
装帧设计: 韩 飞

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 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司
装 订: 三河市万龙印装有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张 27 $\frac{3}{4}$ 字数 743 千字 2012 年 9 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: 58.00 元

版权所有 违者必究

前言

食品、发酵、医药等工业与化学工业有许多相似的地方。从本质上说，它们都是从自然资源出发，经过某些加工工序，成为各种材料或制品，最终满足人们的需要，因此都可以称为加工工业。许多加工工业的发展都与化学工程密切相关，许多理论和实践是直接由化学工业引入的，因为化学工业较早地实现了大规模工业化生产。

回顾化学工程学科的发展历史，“三传一反”的基础理论是里程碑式的贡献，在相当长的时间里主导着化学工程的发展。相应地，在其他相关专业，包括食品专业的教学中，也将“化工原理”作为一门主要的专业基础课。然而食品工业毕竟有其自身的特点，因此，“食品工程原理”课程的教学在借鉴“化工原理”课程的同时，出于食品工程的特殊性而对各单元操作有不同的侧重。

随着科学技术的发展，化学工程的内涵也在不断地演变和拓展，传统的化学工程正在向过程工程演化。反映在教学中，一方面诞生了“过程工程”课程，其内容更多地注重过程的系统性、实用性和效率优化；另一方面传统的“化工原理”课程也在经历改革，在保持原有基本框架的同时，引入新观点和新方法，使课程的内容更加丰富，现代教学手段的使用使课程教学的效率显著提高，使授课学时减少成为可能。

在“食品工程原理”课程教学中，除了食品工业常用的单元操作不同于化学工业以外，该课程在人才培养中的定位乃至学时数也与化工专业不同。有鉴于此，本书在编写时突出了食品工业的特点，删去了一些理论尚不成熟、实践中多依赖经验的内容；同时顾及当前国内高校的实际情况，减少总篇幅，努力以简洁的语言叙述单元操作的原理和应用，从而启发和培养学生举一反三的能力，以适应教育教学改革的要求。其中，书中带——部分为自学内容。

本书是“食品工程原理”国家级精品课程配套教材，编写组由江南大学化工与材料工程学院化工原理教研室教师组成，由冯聃、涂国云、许林妹、陈美玲执笔，冯聃、涂国云主编。

限于编写人员的水平，缺陷和疏漏在所难免，恳切希望广大读者向我们提出宝贵意见。

编者
2012年元月于无锡

目 录

0

绪论	1
0.1 食品工程与单元操作	1
0.2 单位、量纲和换算	2
0.2.1 物理单位的换算	2
0.2.2 经验公式的换算	3

1

流体流动和输送	4
1.1 流体的物理性质	4
1.1.1 连续介质假定	4
1.1.2 流体的密度	4
1.1.3 流体的可压缩性和温度膨胀性	5
1.1.4 流体的黏性	5
1.2 流体静力学	7
1.2.1 流体的受力与静压强	7
1.2.2 流体静力学基本方程	7
1.2.3 静力学基本方程的应用	8
1.3 流体流动的质量衡算和能量衡算	10
1.3.1 流动与流场	10
1.3.2 质量衡算与连续性方程	11
1.3.3 能量衡算与柏努利方程	12
1.4 流体流动的阻力	16
1.4.1 流动的类型与雷诺数	16
1.4.2 边界层和边界层的分离	18
1.4.3 计算直管阻力损失的通式	20
1.4.4 直管内的速度分布	21
1.4.5 直管阻力损失的计算	22
1.4.6 局部阻力损失的计算	26
1.5 流体输送管路的计算	31
1.5.1 管径的选择	31
1.5.2 管路计算	32
1.5.3 管路特性曲线	35
1.5.4 可压缩流体的管路计算	36
1.6 流速和流量的测定	38

1.6.1	测速管	38
1.6.2	孔板流量计与文丘里流量计	40
1.6.3	转子流量计	42
1.7	非牛顿流体的流动	43
1.7.1	幂律流体在管内层流时的速度分布和流量	44
1.7.2	幂律流体管内流动时的阻力损失	44
1.8	液体输送机械	45
1.8.1	离心泵	45
1.8.2	往复泵	54
1.8.3	其他类型泵	56
1.9	气体输送机械	57
1.9.1	通风机	57
1.9.2	鼓风机	59
1.9.3	压缩机	60
1.9.4	真空泵	62
	本章主要符号	64
	本章习题	64

2

非均相混合物的分离		71
2.1	流体与粒子的相对运动	71
2.1.1	颗粒在流体中的运动	71
2.1.2	流体通过固定床的流动	74
2.2	沉降	77
2.2.1	重力沉降	77
2.2.2	离心沉降	80
2.3	过滤	85
2.3.1	过滤的基本概念	85
2.3.2	过滤设备	86
2.3.3	过滤计算	89
2.4	离心机	96
2.4.1	概论	96
2.4.2	沉降式离心机	97
2.4.3	过滤式离心机	99
	本章主要符号	100
	本章习题	101

3

以动量传递为特征的混合单元操作		104
3.1	搅拌	104
3.1.1	混合的理论和搅拌器的流动特性	104
3.1.2	搅拌器的功率消耗	108
3.1.3	相似理论和搅拌系统的放大	110

3.1.4	几种特殊情况下的混合和搅拌	113
3.2	流态化和气力输送	117
3.2.1	流化床的流体力学特性	117
3.2.2	流化床的结构和计算	122
3.2.3	气力输送	123
3.3	乳化和均质	127
3.3.1	乳化	128
3.3.2	均质	129
3.3.3	乳化和均质设备	131
	本章主要符号	133
	本章习题	134

传热

135

4.1	传热基本方程	135
4.1.1	热传递的基本方式	135
4.1.2	能量方程	136
4.1.3	实际的传热过程	139
4.2	热传导	139
4.2.1	温度场和傅里叶 (Fourier) 定律	139
4.2.2	热导率	140
4.2.3	平壁的稳态热传导	141
4.2.4	圆筒壁的稳态热传导	142
4.3	对流传热	145
4.3.1	对流传热与对流传热系数及其主要的影响因素	145
4.3.2	流体无相变时的对流传热过程的量纲分析	147
4.3.3	流体无相变对流传热系数的经验关联式	149
4.3.4	流体有相变时的对流传热系数	153
4.3.5	流化床中的对流传热	157
4.4	辐射传热	158
4.4.1	辐射的基本定律	158
4.4.2	两固体间的相互传热	161
4.4.3	对流-辐射联合传热	163
4.5	稳态传热过程的计算	164
4.5.1	稳态传热过程的计算方法	164
4.5.2	稳态传热过程的操作型计算	171
4.6	非稳态传热过程	173
4.6.1	内热阻可以忽略的非稳态热传导	173
4.6.2	内部和表面热阻均不能忽略的非稳态热传导	174
4.6.3	流体的间歇式换热	178
4.7	换热器	179
4.7.1	管式换热器	179

5

4.7.2 板式换热器	182
4.7.3 传热过程的强化	184
本章主要符号	186
本章习题	186

蒸发、结晶、热杀菌与冷冻

189

5.1 蒸发	189
5.1.1 蒸发的原理与设备	189
5.1.2 蒸发过程的温差损失	195
5.1.3 单效蒸发	197
5.1.4 多效蒸发	198
5.2 结晶	204
5.2.1 结晶的原理	205
5.2.2 结晶方法与设备	207
5.3 热杀菌	210
5.3.1 微生物的耐热性	210
5.3.2 罐装食品的传热	211
5.3.3 热杀菌时间的计算	212
5.4 食品的冷冻	213
5.4.1 制冷基本原理和常用制冷方法	213
5.4.2 食品的冷冻过程	216
5.4.3 食品冷冻的方法和装置	220
本章主要符号	223
本章习题	223

6

传质原理

226

6.1 传质基础	226
6.1.1 混合物组成的表示方法	226
6.1.2 相平衡与传质推动力	228
6.1.3 传质速度与传质通量	229
6.2 传质原理	229
6.2.1 传质微分方程	229
6.2.2 分子传质	231
6.2.3 对流传质(扩散)	236
6.3 流动中的传递与相似类比	241
6.3.1 动量、热量与质量传递之间的相似性	241
6.3.2 三传类比表达式(类似律)	242
本章主要符号	243
本章习题	244

7

吸收、吸附与离子交换

245

7.1	吸收	245
7.1.1	气体吸收的平衡关系	246
7.1.2	吸收速率方程	248
7.1.3	低浓度气体吸收的计算	249
7.1.4	吸收系数	257
7.2	填料塔	259
7.2.1	填料塔的结构与填料	259
7.2.2	填料塔的流体力学性能	263
7.3	吸附	265
7.3.1	吸附分离的基本理论	265
7.3.2	吸附计算	269
7.3.3	吸附设备	272
7.4	离子交换	275
7.4.1	离子交换的基本理论	275
7.4.2	离子交换操作与设备	279
	本章主要符号	281
	本章习题	282

8

蒸馏、萃取与浸取

285

8.1	蒸馏	285
8.1.1	两组分系统的汽液平衡	285
8.1.2	平衡蒸馏与简单蒸馏	289
8.1.3	两组分连续精馏原理	292
8.1.4	两组分连续精馏塔的计算	294
8.1.5	精馏特例	304
8.2	板式塔	307
8.2.1	板式塔的结构	307
8.2.2	板效率	310
8.2.3	塔径和塔高计算	311
8.2.4	板式塔的流体力学性能和操作特性	311
8.3	液-液萃取	313
8.3.1	液-液萃取相平衡过程与三元相图	313
8.3.2	液-液萃取过程的计算	316
8.3.3	液-液萃取设备	322
8.4	浸取	325
8.4.1	浸取平衡的表达	325
8.4.2	浸取操作的计算	327
8.4.3	浸取设备	330

8.5 超临界萃取	332
8.5.1 超临界萃取的原理	332
8.5.2 超临界萃取的流程	334
本章主要符号	335
本章习题	336

9

干燥与空气调节 340

9.1 湿空气的性质	340
9.1.1 湿空气的状态参数	341
9.1.2 湿空气性质图	345
9.1.3 湿空气的基本状态变化过程	348
9.2 干燥过程的衡算	350
9.2.1 湿物料的形态和含水量表示	350
9.2.2 干燥系统的衡算	350
9.2.3 空气通过干燥器的状态变化	352
9.3 干燥动力学	355
9.3.1 物料中的水分	355
9.3.2 干燥机理	357
9.3.3 干燥速率	358
9.3.4 恒定干燥时间计算	361
9.4 干燥设备	363
9.4.1 干燥器的分类	363
9.4.2 对流干燥器	363
9.4.3 传导干燥器和辐射干燥器	368
9.4.4 干燥器的选择	370
9.5 喷雾干燥	371
9.5.1 喷雾干燥原理	371
9.5.2 喷雾器	373
9.6 冷冻干燥	375
9.6.1 冷冻干燥原理	375
9.6.2 冷冻干燥装置	379
9.7 空气调节	381
9.7.1 直流式空气调节	381
9.7.2 回风式空气调节	383
本章主要符号	384
本章习题	385

10

膜分离过程 388

10.1 膜分离过程概论	388
10.1.1 膜分离过程的特点	388
10.1.2 常用的膜和膜分离设备	389

10.2	超滤与微滤	393
10.2.1	超滤与微滤的过程特征和数学模型	393
10.2.2	微滤和超滤的操作	397
10.3	反渗透与纳滤	398
10.3.1	反渗透原理	398
10.3.2	描述反渗透的数学模型	400
10.4	电渗析	401
10.4.1	电渗析过程原理	401
10.4.2	电渗析装置	405
10.5	渗透汽化	407
10.5.1	渗透汽化原理	407
10.5.2	渗透汽化中的传递	408
	本章主要符号	410
	本章习题	411

附录

412

一、单位换算	412
二、物性数据	413
1. 干空气的物理性质 ($p=101.3\text{kPa}$)	413
2. 水的物理性质	414
3. 饱和水蒸气表 (以压强为准)	414
4. 饱和水蒸气表 (以温度为准)	416
5. 101.3kPa 下气体黏度	417
6. 101.3kPa 下气体比热容	418
7. 液体黏度	419
8. 液体的比热容	420
9. 常用液体的热导率	421
10. 有机液体的相对密度	422
11. 液体汽化潜热	423
12. 常用固体材料的重要性质	424
13. 一些食品的热导率	425
14. 一些食品的定压比热容	425
三、常用材料和设备的型号、规格、规范	426
1. 流体输送用无缝钢管规格 (摘自 GB/T 8163—2008)	426
2. IS 型单级单吸离心泵 (部分)	426
3. 4-72-11 型离心通风机性能表 (部分)	428
4. 空气压缩机规格	429
5. CLT/A 型旋风分离器的生产能力 (m^3/h)	429
6. 固定管板式热交换器 (摘自 JB/T 4714—92、JB/T 4715—92)	430

参考文献

432

0 | 绪 论

0.1 食品工程与单元操作

食品对人类的生存和繁衍具有第一重要性，人类历史上很早就出现了食品加工，但长期以来，食品加工一直停留在家庭和手工方式阶段，小生产的加工方式延续了数个世纪。究其原因，一方面是由于社会经济的发展还没有产生改变这种小生产方式的迫切需要，另一方面也由于食品加工的特殊性，某些关键问题难以解决。

首先，食品加工中的原料结构和成分非常复杂，大部分原料是活的生物体，其成分不仅随土壤、气候等条件而变化，而且在成熟、输送和贮藏过程中也在不断变化，食品原料还具有热敏性、易氧化、易腐蚀等特点。原料的多样性，使得食品加工过程难以提炼出共性。

其次，食品加工中常遇到固态物料，其输送和处理均比流体困难。而且，食品加工中的液态原料、半成品、产品多为非牛顿液体，又增加了处理的难度。

再者，在食品加工过程中往往会添加各种酶或菌等辅助原料，这些辅助原料又往往对温度、酸碱条件有比较特殊的、甚至苛刻的要求。这些特点使得食品加工过程的大部分单元操作都有特殊的要求，也决定了某些单元操作如真空操作、冷冻操作、干燥、液体吸附、离子交换、浸取、过滤等在食品加工过程中被更多地选用，而其中的一些单元操作，理论研究的进展相对迟缓，实践中更多地依靠经验解决应用问题。

一百多年前，尼古拉·阿佩尔发明了罐藏法，使食品能够长时间贮藏和长距离运输。此后，路易·巴斯德阐明了食品腐败的原理，为解决食品的贮藏和输送问题提供了科学依据。从那以后，食品工业才作为一种产业而受到社会的重视，人类才能够大规模地、重复性地生产许多常用的食品，适应了现代社会发展的需要。

从其诞生之日起，食品工业的发展就与化学工业的发展紧密相关。从本质上说，它们都是从自然资源出发，经过某些加工工序，成为各种材料或制成品，最终满足人类的需要，因此都可以称为加工工业（industry of transformation）。由于化学工业的发展速度远快于食品工业，较早地实现了大规模工业化生产，对常用的单元操作研究也比较深入，因此食品工业的许多理论和实践是直接从化学工业引入的。

单元操作是化学工程中的最主要和最基础的概念，是人们在长期的生产实践中，通过归纳、抽象和总结，把不同化工生产过程分解为若干基本操作过程而得出的概念。单元操作概念的提出使人们可以统一通常被认为是不同的化工生产技术，抛弃各项技术的个性，系统而深入地研究其内在规律，从而更有效地推进化工生产技术的发展。

进一步的研究指出，单元操作中所发生过程的本质是传递。从 20 世纪 60 年代起提出了“三传一反”的概念，将化工单元操作分为遵循动量传递规律、热量传递规律和质量传递规律的操作三大类。但仅以传递特性分类也有其不完善之处。实际上，有些单元操作是两种或三种



传递兼而有之的,如干燥、结晶,以及热力过程、粒子过程等。因此,较新的分类方法则将单元操作分为以下三大类:流体力学和传热过程;涉及分散粒子的过程;混合物的分离过程。

不难看出,新的分类包含的范围更广,而这一点对食品加工尤其重要。但是,对单元操作的研究为进一步研究传递的机理和规律提供了基础,仍是食品工程不可或缺的基础。

0.2 单位、量纲和换算

物质、物体、现象或过程的可以定量给出的属性称为物理量。除了基本量以外的任何物理量都是可以定义的,这一定义与计量单位无关。因此,物理量都是用数字和单位的组合表示,两者缺一不可。由于历史、地区和学科发展的不同,出现了多种单位制。在每一种单位制中,选择几个独立的物理量,规定其单位,称为基本量。其余物理量即为基本量的组合,称为导出量。导出量中各基本量的次方即称为量纲(dimension)或因次。量纲式揭示了物理单位的特性,物理方程两边的量纲必须一致,即量纲一致性原则,是整理实验数据时常用的量纲分析法(或称因次分析法)的依据。

在科学研究中曾广泛使用物理单位制,而在工程领域则较多地使用工程单位制,至今美国仍在用英美单位制,这些单位制各有其优缺点。在实际应用中,各种单位制并存,很不方便。1960年10月第十一届国际计量大会通过了一种新的单位制,称为国际单位制,代号为SI制,是最完整、最合理、通用性最强的单位制,在国际上迅速得到推广。

SI制总共采用7个基本量,它们是:长度(m)、质量(kg)、时间(s)、热力学温度(K)、物质的量(mol)、发光强度(cd)、电流强度(A)。根据物理量的大小,可以在基本单位前加上表示十进制倍数或分数的词冠。我国于1984年颁布国家标准GB 3100~3102-93(见《量和单位》一书),以SI制为基础,除SI制中的基本单位、导出单位和辅助单位外,增加了少数非SI制单位,如分、小时、日、海里等。经过多年的努力,这一标准已在全国推开。

对于单位符号的使用和书写,有以下规则:

(1) 单位符号的字母一律用正体,不附省略号,无复数形式,不附加任何其他标记或符号;

(2) 单位符号一般为小写字母,单位名称来源于人名时第一个字母用大写,但升的符号可用小写也可用大写;

(3) 表示十进制倍数或分数的词冠写在单位符号前,与单位符号之间不留间隙,且不允许使用两个以上词冠并列而成的组合词冠;

(4) 用斜线表示相除时,若分母中包含两个以上的单位符号,整个分母应加括号,如 $W/(m \cdot K)$;

(5) 分子无量纲而分母有量纲的组合单位的符号,一般不用分式而用负数幂形式,如波数单位用 m^{-1} 而不用 $1/m$ 。

当前,多数国家已经采用SI制,但还有一些国家采用其他单位制,实践中也还有一些习惯难以完全扭转,而在过去的文献资料中又是多种单位制并存。因此,工程与科技人员应该了解各种单位制,并掌握物理单位的换算方法。

在物理量的换算中常见的有两种情况:物理单位的换算和经验公式的换算。

0.2.1 物理单位的换算

同一物理量用不同单位制表示时,其数值是不同的。例如,直径为1m的容器,用英制单位表示即为39.37in。常用物理量之间的换算关系可参考有关的教材或手册。若查不到一个导出物理量的换算关系,则可以从构成该单位的基本单位入手,将单位之间的换算系数相乘或相



除, 得到新的换算系数。

[例 0-1] 将通用气体常数 $R=82.07 \text{ atm} \cdot \text{cm}^3/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 换算成 SI 制。

解: $1 \text{ atm}=1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, $1 \text{ cm}=0.01 \text{ m}$

$$\text{故 } R=82.07 \frac{\text{atm} \cdot \text{cm}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}} \times \left(\frac{1.013 \times 10^5 \text{ N}}{\text{atm} \cdot \text{m}^2} \right) \times \left(\frac{10^{-6} \text{ m}^3}{\text{cm}^3} \right) = 8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

0.2.2 经验公式的换算

经验公式是根据实验数据整理而成的公式, 式中各物理量只代表指定单位制的数字部分。进行换算时有两种方法: 一是先将各物理量换算成经验公式指定的单位, 再代入公式计算; 二是将公式中的常数进行变换, 得到用新单位制表示的经验公式。由于经验公式中物理量的指数只表示物理量对过程的影响程度, 与单位制的选取无关。因此, 在单位换算过程中, 物理量的指数保持不变。

[例 0-2] 以英制表示的计算式:

$$G=2.45u^{0.8}\Delta p$$

其中 G 的单位为磅(质)/(英尺²·小时), u 的单位为英尺/秒, Δp 的单位为大气压。试换算成以 SI 制表示的公式。

解: SI 制中 G' 的单位为 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, u' 的单位为 m/s , $\Delta p'$ 的单位为 Pa , 故

$$G' = \frac{0.4536G}{0.3048^2 \times 3600} = 0.001356G$$

$$u' = 0.3048u \quad p' = 1.013 \times 10^5 p$$

从而

$$\frac{G'}{0.001356} = 2.45 \times \left(\frac{u'}{0.3048} \right)^{0.8} \times \frac{\Delta p'}{1.013 \times 10^5}$$

即

$$G' = 8.484 \times 10^{-8} u'^{0.8} \Delta p'$$

1

流体流动和输送

食品生产中经常处理流体物料，许多操作在一定的流动状态下进行，如传热、传质、过滤、沉降、搅拌等。设备中发生的传热、传质和化学反应也与流体流动状态密切相关，流动参数的改变将迅速波及整个系统，直接影响所有设备的操作状态。因此，掌握流体流动的规律是解决流体输送以及研究传热、传质过程及设备的重要基础。

流体输送是过程工程中最为普遍的单元操作之一，流体输送的主要任务是满足对工艺流体的流量和压强的要求。流体输送系统包括输送管路、输送机械和流动参数测控装置，其核心是输送机械。本章将讨论流体流动的基本原理，并运用这些基本原理分析和解决流体输送过程的基本计算问题，从而选择和使用流体输送机械。

1.1 流体的物理性质

1.1.1 连续介质假定

人们熟知物质的三种常规聚集状态是气、液、固三态，其中气态和液态物质称为流体。流体是由大量做随机运动的分子构成的，分子之间有较大的间隙，若以单个分子而论，流体是不连续的。但是如果将流体看作是由大量尺度远小于流体的宏观尺度，而又远大于分子平均自由程的微团或质点组成，则可认为流体质点连续地布满整个空间，从而流体的物理性质和运动参数在空间上是连续分布的，这就是连续介质假定。实践证明，连续介质假定对绝大多数流体都适用，只有当流动体系的特征尺寸与分子平均自由程相当时，例如微孔中高真空稀薄气体的流动，连续介质假定才受到限制而不能应用。

作为连续介质，流体的密度、压强、温度等各种物理量和运动参数均是空间位置 (x, y, z) 和时间 θ 的连续函数。数学上将某物理量随空间和时间的连续分布函数称为该物理量的场，如：

$$\rho = \rho(x, y, z, \theta) \quad (1-1)$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}(x, y, z, \theta) \quad (1-2)$$

式(1-1)和式(1-2)分别表示流体的密度场和速度场，前者是数量场，后者是矢量场。

1.1.2 流体的密度

流体的密度定义为流体在空间某点上单位体积流体所具有的质量，以 ρ 表示，即：

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-3)$$

在 SI 单位制中， ρ 的单位为 kg/m^3 。密度的倒数称为比体积或比容，单位为 m^3/kg 。

流体的密度是压强和温度的函数。但压强对液体的密度影响很小，通常可忽略不计，因此液体的密度可仅视为温度的函数。气体的密度随压强和温度而改变，其值可用气体状态方程进行计算。在气体的温度不太低而压强也不太高的情况下，可用理想气体状态方程：



$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT} \quad (1-4)$$

式中, m 为质量, kg; V 为体积, m^3 ; p 为压强, Pa; M 为摩尔质量, kg/kmol; T 为热力学温度, K; R 为通用气体常数, 其值为 $8.314 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

对液体混合物, 若各组分混合前后的体积保持不变, 则其密度可按加成法则计算:

$$v_m = \frac{1}{\rho_m} = \sum \frac{w_i}{\rho_i} \quad (1-5)$$

式中, w_i 为组分 i 的质量分数。

对气体混合物, 若各组分在混合前后质量不变, 则可根据各组分的体积分数 φ_i 按加成法则计算:

$$\rho_m = \sum \varphi_i \rho_i \quad (1-6)$$

若混合气体可按理想气体处理, 则可用式(1-4) 计算其密度, 但式中的 M 值应该用平均摩尔质量 M_m 代替:

$$M_m = \sum M_i y_i \quad (1-7)$$

式中, y_i 为组分 i 的摩尔分数。

1.1.3 流体的可压缩性和温度膨胀性

流体最显著的宏观特征是无定形, 易于流动。改变压强和温度时, 流体的体积还会随之发生变化。将温度一定时, 由压强变化引起体积发生相对变化的性质称为流体的可压缩性; 而压强一定时, 由温度变化引起体积发生相对变化的性质称为流体的温度膨胀性。通常, 用等温压缩率 κ_T 表征流体的可压缩性, 用体膨胀系数 α_V 表征流体的温度膨胀性, 其定义式分别为:

$$\kappa_T = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T \quad (1-8)$$

$$\alpha_V = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \quad (1-9)$$

式(1-8) 中的负号表示压强增加时, 体积缩小。对理想气体, $\kappa_T = 1/p$, $\alpha_V = 1/T$ 。

流体的上述宏观性质是由流体内部微观结构和分子间力所决定的。流体分子因处于随机的热运动和相互碰撞之中而具有动能, 使之趋于离散, 而分子间存在的相互作用力又给予分子势能, 使之趋于团聚。气体的分子平均动能远远大于分子间相互作用势能, 因此表现出易流动、可压缩和易膨胀的宏观性质, 为可压缩流体。液体的分子热运动动能与分子间相互作用势能基本势均力敌。液体分子间距离仅比固体稍大, 其分子排列类似于固体中的非晶体, 但分子热振荡的振幅比固体大且平衡位置频繁改变, 宏观上即表现为液体易流动但压强和温度对其体积影响小的性质。一般可忽略液体的压缩性, 而将液体称为不可压缩流体。

1.1.4 流体的黏性

1.1.4.1 牛顿黏性定律

静止的流体受到持续施加的切向力时, 即产生流动。流动时速度不同的相邻流体层间存在着相互作用力, 称为流体的剪切力, 又称为流体的内摩擦力或黏性力, 流体所具有的这一特性称为流体的黏性。

如图 1-1 所示, 在间距很小的两平行平板间存在流体层。若将下板固定, 使上板以速度 u_0 沿 x 方向做匀速运动。由于流体的黏性作用, 紧贴上线的流体层附着于板面上以速度 u_0 随板运动, 而紧贴固定板的流体层附着于板面上静止不动。两板间各层流体的速度则介于这两者之间, 且从上到下逐渐减小, 形成沿垂直于流体流动方向 (y 方向) 的速度分布。相邻流体层间存在速度差, 即存在相对运动, 从而存在相互作用力。速度高的流体层施加一剪切力于速度低

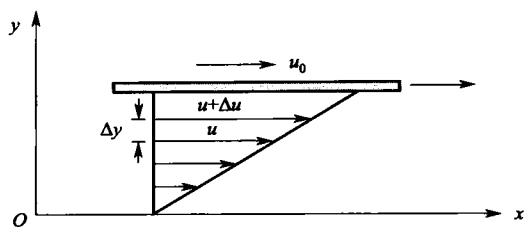


图 1-1 流体的黏性

的流体层，拖着向其运动方向流动；而速度低的流体层则以大小相等方向相反的力反作用于速度高的流体层，阻碍其运动。这个相互作用力即为流体的内摩擦力，亦为流体流动的阻力，若要保持流体以一定的速度流动，则必须对其做功，克服此阻力。

实验证明，对大多数流体，剪切力 F 与法向速度梯度（即在与流动方向相垂直的方向上流体速度的变化率）以及作用面积成正比，其关系

可以用牛顿黏性定律表示：

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-10)$$

式中， du/dy 为法向速度梯度， $1/s$ ； A 为剪切力的作用面积， m^2 ； μ 为比例系数，称为流体的动力黏度或简称黏度， $Pa \cdot s$ ； τ 为剪应力， Pa 。

服从牛顿黏性定律的流体称为牛顿型流体，所有的气体和大多数低分子量的液体均为牛顿型流体；而不服从牛顿黏性定律的流体则称为非牛顿型流体。

自然界中存在的实际流体均具有黏性。在流体力学的研究中，为简化理论分析，引入了理想流体的概念。所谓理想流体是指无黏性（ $\mu=0$ ）的流体，即流体流动时不存在黏性力。对实际流体，只有当其黏性力的影响很小时，才可视作理想流体。

1.1.4.2 流体的黏度

黏度是影响流体流动的重要物理性质之一，一般通过实验测定。在 SI 单位制中，黏度的单位为 $Pa \cdot s$ 。较早的手册或文献中常用泊（P，达因·秒/厘米²）或厘泊（cP）表示黏度。其换算关系为：

$$1 \text{ 厘泊 (cP)} = 0.01 \text{ 泊 (P)} = 10^{-3} Pa \cdot s$$

流体的黏性还可用黏度与密度的比值来表示，即：

$$\nu = \mu / \rho \quad (1-11)$$

ν 称为运动黏度（又称为动量扩散系数），在 SI 单位制中单位为 m^2/s 。

气体的黏度随温度升高而增加，液体的黏度随温度升高而降低。理想气体的黏度与压强无关，实际流体的黏度一般是随压强升高而增加的，但在 4.0MPa 以下，液体黏度随压强变化不大，在 1.0MPa 以下，气体黏度随压强变化可忽略，所以一般在工程计算中均忽略压强对黏度的影响。一般液体食品多为复杂的多组分物系，除温度以外，其黏度还受其他因素特别是浓度的影响。

在缺乏实验数据时，混合物的黏度可以用经验公式计算。例如混合气体的黏度可以用下式计算：

$$\mu_m = \frac{\sum y_i \mu_i \sqrt{M_i}}{\sum y_i \sqrt{M_i}} \quad (1-12)$$

式中， y_i 为组分 i 的摩尔分数； μ_i 为组分 i 的黏度， $Pa \cdot s$ ； M_i 为组分 i 的摩尔质量， $kg/kmol$ 。

非缔合混合液体的黏度则可用下式计算：

$$\lg \mu_m = \sum x_i \lg \mu_i \quad (1-13)$$

式中， x_i 为组分 i 的摩尔分数。



1.2 流体静力学

1.2.1 流体的受力与静压强

外界作用在流体上的力可分为体积力与表面力两类。

体积力即场力，是一种非接触力。例如，地球引力、流体加速运动时所受的惯性力以及带电流体所受的静电力等。重力场中任何物质都受重力的作用，重力的大小与物质的质量成正比，因此体积力也称为质量力。对质量为 m 、密度为 ρ 的流体，场力的一般表达形式为：

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} = \rho V\mathbf{a} \quad (1-14)$$

式中， $\mathbf{a}$ 表示加速度。重力场的加速度是重力加速度，离心力场的加速度则是离心加速度。

表面力是由与流体表面相接触的物质（包括相邻流体）施加给该流体的作用力，其大小与作用面积成正比。作用于流体上的表面力可分为垂直于表面的力和平行于表面的力。压力是垂直作用于表面的力，作用在流体单位面积上的压力称为压强，一般也简称为压力。剪切力是平行作用于表面的力，作用在流体单位面积上的剪切力称为剪应力。压强和剪应力的单位均为 N/m^2 或 Pa 。

压强为外部作用力（包括流体柱自身的重力）在流体中的传播，其方向始终与作用面相垂直且指向作用面。无论流体运动与否，压强始终存在，静止流体中的压强称为静压强。可以证明，在静止流体中作用于某一点不同方向上的压强在数值上是相等的。

在 SI 制中压强的单位为 Pa ，其他常用的计量单位有： atm （标准大气压）、 at （工程大气压）、流体柱高度、 kgf/cm^2 等。一些常用压强单位之间的换算关系如下：

$$1\text{atm} = 101300\text{N/m}^2 = 1.033\text{kgf/cm}^2 = 10.33\text{mH}_2\text{O} = 760\text{mmHg}$$

$$1\text{at} = 98070\text{N/m}^2 = 1\text{kgf/cm}^2 = 10\text{mH}_2\text{O} = 735.6\text{mmHg}$$

地球周围的空气受到地球引力的作用而产生压强，即大气压。用压力计测量流体的压强时，测量元件通常处于大气压作用下，其测量值往往是流体真实压强（也称绝对压强）与被测点处的大气压之差。若被测流体的绝对压强大于外界大气压时，压力计所测得的压强值称为表压，即：

$$\text{绝对压强} = \text{大气压} + \text{表压}$$

若被测流体的绝对压强小于大气压时，压力计所测得的压强值称为真空度，即：

$$\text{绝对压强} = \text{大气压} - \text{真空度}$$

工业上也将真空度称为负压。

【例 1-1】 某果汁浓缩釜顶部装有一与釜内气相空间相通的真空表，其读数为 600mmHg 。问釜内果汁蒸发的绝对压强为多少？若通入夹套内的加热饱和水蒸气的压强为 0.2MPa （表压），问该饱和水蒸气的绝对压强及温度为多少？设当地的大气压强为 101.3kPa 。

解：（1）因真空表上的读数即为真空度，故釜内果汁蒸发的绝对压强 p 为

$$p = \text{大气压强} - \text{真空度} = 0.1013 - (600/760) \times 0.1013 = 0.0213\text{MPa}$$

（2）表压为 0.2MPa 的饱和水蒸气的绝对压强 p 为

$$p = \text{大气压强} + \text{表压} = 0.1013 + 0.2 = 0.3013\text{MPa}$$

查饱和水蒸气表，绝对压强为 0.3013MPa 的饱和水蒸气所对应的饱和温度为 133.3°C 。

1.2.2 流体静力学基本方程

在如图 1-2 所示的连续静止流体内部取一底面积为 A 、高为 dz 的垂直接流体柱微元，其下底面和上底面的坐标分别为 z 和 $z+dz$ 。对静止的流体，作用其上的力仅有静压力和重力。作