



普通高等教育“十五”国家级规划教材  
国家级精品课程配套教材

食品科学与工程专业主干课程

# 食品 工程原理

(第三版)

主编 冯 翥 涂国云



PRINCIPLES  
OF FOOD  
ENGINEERING  
(THIRD EDITION)



中国轻工业出版社

全国百佳图书出版单位

普通高等教育“十五”国家级规划教材

# 食品工程原理

(第三版)

冯 磊 涂国云 主编

 中国轻工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

食品工程原理/冯磊, 涂国云主编. —3版. —北京: 中国轻工业出版社, 2019. 8

普通高等教育“十五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5184-2459-7

I. ①食… II. ①冯… ②涂… III. ①食品工程学—高等学校—教材  
IV. ①TS201.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 079430 号

责任编辑: 张 靓      责任终审: 劳国强      整体设计: 锋尚设计  
版式设计: 锋尚设计      责任校对: 吴大鹏      责任监印: 张 可

出版发行: 中国轻工业出版社 (北京东长安街 6 号, 邮编: 100740)

印 刷: 三河市国英印务有限公司

经 销: 各地新华书店

版 次: 2019 年 8 月第 3 版第 1 次印刷

开 本: 787×1092 1/16 印张: 34

字 数: 780 千字

书 号: ISBN 978-7-5184-2459-7 定价: 78.00 元

邮购电话: 010-65241695

发行电话: 010-85119835 传真: 85113293

网 址: <http://www.chlip.com.cn>

Email: [club@chlip.com.cn](mailto:club@chlip.com.cn)

如发现图书残缺请与我社邮购联系调换

181043J1X301ZBW

食品工程包含的单元操作诸多,不可能也无必要逐一讨论。《食品工程原理》作为一门基础技术课程,与《化工原理》有许多相似之处。然而,作为面向食品工业的课程,它也有自身的特点。近年来国内外此方面的教材和参考书较多,各有其特色,它们的共同点是强调原理部分,除传递是各单元操作的主线外,对处理工程问题的各种数学方法的介绍和讨论也是重点。

本书试图以传递的原理来研究食品工业常见的单元操作,在保持和强调基本原理的同时兼顾食品工业的特点,适当吸收近年来发展迅速的新单元操作,以体现新世纪食品工程发展的风貌。同时注意介绍处理工程问题的方法,如数学模型法、因次分析法、经验和半经验模型法等。为此,对一些原理上尚不成熟,工业生产中主要以经验做处理的操作予以简化或舍去,对一些主要为技术性介绍的内容也作简化。

《食品工程原理》第三版是在第二版的基础上作的全面修订。修订的指导思想主要是两点:一是保持原书的特色,在注重强调基本原理的同时兼顾食品工业的特点;二是吸取教学实践中的经验,使本书尽量满足教师 and 学生的需求。

与第二版相比,对全书的框架作了小的调整。本着按传递性质为主线叙事的原则,将“冷冻过程”这一章拆分,其中的“冷冻”和“冷冻浓缩”两节归入“以热量传递为特征的单元操作”,“冷冻干燥”一节归入“干燥与空气调节”。删去了“膜分离过程”这一章,因为膜分离过程包含许多单元操作,尽管近年来发展迅速,但成熟而得到公认的理论仍比较缺乏。删去了“气力输送”一节,因为它的原理已经在其它操作中介绍,实践中一般凭经验进行设计和计算。还删去了“超临界萃取”一节,因为它也缺乏成熟的理论和计算方法。以上这些单元操作,以及其它单元操作,在掌握基本原理以后均可通过自学学习,也可作为本课程的后继课程,在实践应用中则应参考专业资料。经此调整后,全书篇幅明显减少。

这次修订的另一项重要内容是根据使用者的意见和建议对若干重要章节如流体流动、传热、吸收、蒸馏、干燥等增加了例题,以便于学生的学习。

此外,为适应现代教学方法的发展,第三版配套了数字化资源,读者可登录中国轻工业出版社数字教学服务平台食课堂([www.qingongchuban.com](http://www.qingongchuban.com))获取。

2005年出版的第一版是集体智慧的结晶,参加编写的人员均来自教学科研的第一线,其中江南大学冯焜编写绪论和第四章、第六章第二节、第八章第三和第四节、第九章第三、第四和第五节、第十章、第十二章、附录以及全书的统稿;徐涵庆编写第七章、第八章第一和第二节、第九章第一和第二节;四川大学卢晓黎编写第三章;四川大学夏素兰编写第一章;华南理工大学林庆生编写第五章和第六章第一、第三节;吉林大学周亚军编写第一章和第二章。第三

版的修订工作由江南大学冯焜和涂国云承担。在此对所有参编人员的付出表示衷心的感谢。

教材需要在长期的教学实践中不断修改完善,方能成为经典。因此,凡读者提出的意见,均将是编者今后进一步修订的参考,编者在此表达由衷的谢意。

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

编者

2019年元月于无锡

<b>绪 论</b> .....	1
<b>第一章 流体流动和输送</b> .....	5
<b>第一节 流体的物理性质</b> .....	5
一、连续介质假定 .....	5
二、流体的密度 .....	6
三、流体的可压缩性和温度膨胀性 .....	7
四、流体的黏性 .....	7
<b>第二节 流体静力学</b> .....	8
一、流体的受力 .....	8
二、流体压强的度量 .....	9
三、流体静力学基本方程 .....	9
四、压强的静力学测量 .....	10
<b>第三节 流体流动的质量衡算和能量衡算</b> .....	14
一、流体流动的基本概念 .....	14
二、质量衡算与连续性方程 .....	19
三、能量衡算与柏努利方程 .....	20
<b>第四节 流体流动的阻力</b> .....	24
一、直管阻力损失的计算 .....	25
二、局部阻力损失的计算 .....	32
<b>第五节 流体输送管路的计算</b> .....	37
一、管径的确定 .....	37
二、管路计算 .....	38
三、管路特性曲线 .....	41
四、可压缩流体的管路计算 .....	43
<b>第六节 流速和流量的测定</b> .....	44
一、测 速 管 .....	44
二、孔板流量计与文丘里流量计 .....	46
三、转子流量计 .....	49
<b>第七节 非牛顿流体的流动</b> .....	50
一、非牛顿流体的主要类型 .....	50

二、幂律流体在圆管内的流动 .....	51
第八节 液体输送机械 .....	52
一、离心泵 .....	52
二、往复泵 .....	61
三、其它类型泵 .....	63
第九节 气体输送机械 .....	65
一、通风机 .....	66
二、鼓风机 .....	68
三、压缩机 .....	69
四、真空泵 .....	71
本章习题 .....	74

## 第二章 非均相混合物的分离 .....

第一节 流体与粒子的相对运动 .....	80
一、颗粒在流体中的运动 .....	80
二、流体通过固定床的流动 .....	84
第二节 沉降 .....	88
一、重力沉降 .....	88
二、离心沉降 .....	92
第三节 过滤 .....	96
一、过滤操作的基本概念 .....	96
二、过滤设备 .....	98
三、过滤计算 .....	101
第四节 离心分离 .....	109
一、概论 .....	109
二、沉降式离心机 .....	110
三、过滤式离心机 .....	112
本章习题 .....	115

## 第三章 以动量传递为特征的混合单元操作 .....

第一节 搅拌 .....	118
一、混合的理论 .....	118
二、搅拌系统及其流动特性 .....	120
三、搅拌器的功率消耗 .....	124
四、相似理论和搅拌系统的放大 .....	127
五、几种特殊情况下的混合和搅拌 .....	130
第二节 流态化 .....	134
一、流态化现象 .....	135
二、流化床的流体力学特性 .....	138

三、流化床的结构和计算 .....	140
第三节 均质和乳化 .....	142
一、概述 .....	142
二、乳化液的类型和稳定性 .....	142
三、均质机理 .....	144
四、均质和乳化设备 .....	146
本章习题 .....	150
<b>第四章 传热</b> .....	152
第一节 传热的基本方程 .....	152
一、传热的方式 .....	152
二、能量方程 .....	154
第二节 热传导 .....	156
一、温度场和傅立叶定律 .....	156
二、热导率 .....	157
三、平壁的稳态热传导 .....	159
四、圆筒壁的稳态热传导 .....	161
第三节 对流传热 .....	164
一、对流传热与对流传热系数 .....	164
二、流体无相变时的对流传热过程的量纲分析 .....	166
三、流体无相变对流传热系数的关联式 .....	167
四、流体有相变时的对流传热系数 .....	172
五、流化床中的对流传热 .....	176
第四节 辐射传热 .....	178
一、基本概念 .....	178
二、斯忒藩-玻耳兹曼定律与物体的辐射能力 .....	179
三、克希霍夫 (Kirchoff) 定律 .....	180
四、两固体间的相互传热 .....	181
五、高温设备的热损失 .....	183
第五节 稳态传热过程的计算 .....	184
一、稳态传热过程的计算方法 .....	184
二、稳态传热过程的操作型计算 .....	193
第六节 非稳态传热过程 .....	195
一、内热阻可以忽略的非稳态热传导 .....	195
二、内部和表面的热阻均不能忽略的一维非稳态热传导 .....	196
三、内部和表面的热阻均不能忽略的多维非稳态热传导 .....	199
四、流体的间歇式换热 .....	201
第七节 换热器 .....	201
一、换热器的种类 .....	201

二、间壁式换热器 .....	202
三、传热过程的强化 .....	208
本章习题 .....	211

## 第五章 以热量传递为特征的单元操作 .....

第一节 蒸发 .....	215
一、概述 .....	216
二、蒸发设备 .....	218
三、蒸发器的传热温差和温差损失 .....	223
四、单效蒸发计算 .....	226
五、多效蒸发计算 .....	228
六、蒸发系统的经济性 .....	234
第二节 结晶 .....	235
一、结晶的原理 .....	235
二、结晶方法与设备 .....	239
第三节 热杀菌 .....	244
一、微生物的耐热性 .....	245
二、罐装食品的传热 .....	247
三、热杀菌时间的计算 .....	248
第四节 冷冻 .....	250
一、制冷基本原理和常用制冷方法 .....	250
二、食品的冷冻 .....	255
三、食品冷冻的方法和装置 .....	265
第五节 冷冻浓缩 .....	269
一、冷冻浓缩的原理 .....	269
二、冷冻浓缩装置 .....	273
本章习题 .....	278

## 第六章 微传质单元操作：吸收、吸附、离子交换 .....

第一节 传质基础 .....	281
一、基本概念 .....	281
二、传质微分方程 .....	285
三、分子扩散 .....	286
四、对流传质 (扩散) .....	296
五、流动中的传递与相似类比 .....	301
第二节 吸收 .....	304
一、概述 .....	304
二、气体吸收的平衡关系 .....	305
三、吸收速率方程 .....	307

四、低浓度气体吸收的计算 .....	309
五、吸收系数 .....	318
第三节 填料塔 .....	320
一、填料塔的结构与填料 .....	320
二、填料塔的流体力学性能 .....	324
第四节 吸附 .....	326
一、吸附的基本概念 .....	327
二、吸附分离理论 .....	329
三、吸附计算 .....	332
四、吸附设备 .....	335
第五节 离子交换 .....	338
一、离子交换的基本概念 .....	338
二、离子交换理论 .....	341
三、离子交换操作与设备 .....	346
本章习题 .....	350

## **第七章 传质单元操作：蒸馏、萃取、浸取** .....

第一节 蒸馏 .....	354
一、两组分系统的气液平衡 .....	355
二、平衡蒸馏与简单蒸馏 .....	359
三、两组分连续精馏原理 .....	362
四、两组分连续精馏塔的计算 .....	364
第二节 板式塔 .....	379
一、板式塔的结构 .....	379
二、板效率 .....	382
三、塔径和塔高计算 .....	383
四、板式塔的流体力学性能和操作特性 .....	384
第三节 液-液萃取 .....	386
一、液-液萃取相平衡过程与三元相图 .....	387
二、液-液萃取过程的计算 .....	390
三、液-液萃取设备 .....	398
第四节 浸取 .....	401
一、浸取平衡的表示 .....	402
二、浸取操作的计算 .....	403
三、浸取传质机理与速率 .....	408
四、浸取设备 .....	412
本章习题 .....	417

<b>第八章 干燥与空气调节</b> .....	422
<b>第一节 湿空气的性质</b> .....	423
一、湿空气的状态参数 .....	423
二、湿空气性质图 .....	428
三、湿空气的基本状态变化过程 .....	431
<b>第二节 干燥过程的衡算</b> .....	434
一、湿物料的形态和含水量表示 .....	434
二、干燥系统的物料衡算 .....	435
三、干燥系统的能量衡算 .....	436
四、空气通过干燥器的状态变化 .....	438
<b>第三节 干燥动力学</b> .....	441
一、物料中的水分 .....	441
二、干燥机理 .....	443
三、干燥速率 .....	445
四、恒定干燥时间计算 .....	448
<b>第四节 干燥设备</b> .....	450
一、干燥器的分类 .....	450
二、对流干燥器 .....	451
三、传导干燥器和辐射干燥器 .....	456
四、干燥器的选择 .....	460
<b>第五节 喷雾干燥</b> .....	461
一、喷雾干燥原理 .....	462
二、喷雾干燥装置系统 .....	465
三、喷雾器 .....	468
<b>第六节 冷冻干燥</b> .....	470
一、冷冻干燥原理 .....	470
二、冷冻干燥装置 .....	475
<b>第七节 空气调节</b> .....	479
一、空气调节系统基本原理及类型 .....	479
二、直流式空气调节 .....	480
三、回风式空气调节 .....	482
<b>本章习题</b> .....	485
<b>附录</b> .....	488
<b>参考文献</b> .....	532

# 绪论

## 一、食品工程学的发展与特点

### （一）食品工程学与化学工程学

现代食品工业的发展史，是从个体小工业向现代工业发展的历史。

从本质上说，食品工业与化学工业和其他一些工业相似，都是将自然资源经过某些加工工序，加工成为各种材料或制成品，以满足人类的需要，因此都可以称为加工工业。而由于食品对人类的生存和繁衍具有第一重要性，因此在人类的历史上，食品加工的出现远早于化学工业。但由于社会经济的发展还没有产生改变小生产方式的迫切需要，由于科学技术的发展还没有解决食品工业生产中的某些关键问题，使得人类长期以来一直以家庭和手工的方式加工食品，加工的规模远未达到工业化的程度，食品的小生产方式延续了数个世纪。直至今日，仍有一些食品的生产与其说是科学，不如说是艺术。真正意义上的食品工业只是在一百多年前才出现，其标志是尼古拉·阿佩尔发明的罐藏法，它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。由于社会的发展，人们需要大量地贮藏和运输食品，各项食品加工技术便应运而生，食品工业才作为一种产业而受到社会的重视。发展至今，食品工业已能大规模地、重复性地生产许多人们常用的食品，如快餐食品和方便食品等，并能使大部分食品的生产实现工业化，使人们在家庭食品加工上耗用的时间大大减少，适应了现代社会发展的需要。

另一方面，化学工业的发展速度却远快于食品工业，以至于食品工业的许多理论和实践是直接来自化学工业引入的，其中最重要的原因是化学工业较早地实现了大规模工业化生产。化学工业的发展与石油的开发密切相关。石油既是重要的能源，又是重要的化工原料，石油的开发提出了许多课题，化学工程学就是在此基础上发展起来的。它以蒸馏、吸收、加热、过滤等石油工业所必需的技术设计理论为主体，其最初的定义是“研究原料加工的方法和技术的科学”。1923年首部论述单元操作的著作《化学工程原理》在MIT出版，标志着化学工程学的诞生。而化学工程学的发展，又大大地推动了化学工业。

### （二）从化学工程学到过程工程学

随着化学工业的发展，化学工程学的定义扩大为“研究使原料的组成、能量或物态发生变化的过程和方法，以及所得到的产品及其用途的工程学”，通俗的表达，就是要在工业规模以

连续方式实现那些在实验室内以间歇方式实现的过程。从其诞生至今, 化学工程学的内涵一直在不断扩展, 但是单元操作仍是其中最主要和最基础的部分。

单元操作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。一个具体的化工生产过程可以分解为一系列单元操作的组合。单元操作概念提出是一大突破, 它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。而所有单元操作的综合, 就构成了化学工程的基础——化工原理。

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, 至今这一概念仍是化工原理课程的基础。例如, 属于动量传递单元操作的有: 流体输送、沉降、过滤、混合等, 属于热量传递单元操作的有加热、冷却、蒸发、冷凝等, 属于质量传递单元操作的有蒸馏、吸收、萃取、吸附、膜分离等。因此, 对单元操作的学习和研究, 实际上也是为进一步研究传递的机理和规律打下了基础。

实际上, 还有许多两种或三种传递兼而有之的操作如干燥、结晶等, 以及热力过程、粒子过程等。因此, 以传递特性分类也有其不完善之处, 而较新的分类方法则将单元操作分为以下三大类。

- (1) 流体力学和传热过程;
- (2) 涉及分散粒子的过程;
- (3) 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。

今天, 化学工程学的原理已经扩展到其它的工业领域, 特别是食品和其它加工工业领域。而这些工业中对单元操作和传递过程的研究, 又反过来丰富了化学工程学。因此, 为更准确地表示这些原理的普遍适用性, 将化学工程学扩展为“过程工程学”(Process Engineering) 已成为共识。

### (三) 食品工程的特点

食品加工科学化的一个重要方面是单元操作的概念被引入食品加工领域。食品加工过程同样可以分解为一系列单元操作的组合, 这些单元操作的机理同样是动量、热量和质量传递, 单元操作计算的主要内容同样是物料衡算、能量衡算、平衡关系和过程速率, 化学工程中常用的理论和方法同样适用于食品工程。从这一意义上说, 化学工程学的大部分内容可以容易地应用于食品工业中。

但是, 食品工程也有自身的一些特点。从单元操作的角度看, 化学工程涉及最多的是气-液系统的操作, 如蒸馏、吸收等。对这些单元操作的研究构成了化工原理的最精华部分, 其理论和方法已经推广到其它许多单元操作。而食品工业所涉及的单元操作比化学工业广泛, 其中的相当一部分, 如粉碎、结晶、离心分离等, 还缺乏成熟的理论, 而蒸馏和吸收这些化学工程研究较为深入、理论较为成熟的单元操作反而在食品工业应用不多, 这就大大增加了用数学模型方法处理食品工业操作的困难。

食品工业中引入和运用化工单元操作的研究之所以迟缓, 原因还在于食品工业具有如下一些特点。

- (1) 食品工业的原料大多是农、林、牧、副、渔业的动植物产品, 这些原料的结构和成分

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。这些变化一方面给加工带来许多不方便，另一方面还影响产品的色、香、味和营养，即影响产品的内在品质。

(2) 热敏性、易氧化和易腐性变质是动、植物原料显而易见的共有特点。为避免食品加工的高温破坏和氧化变质，不得不采用低温、低压的加工条件。生产时间中更多地采用真空操作和冷冻操作，而这两类操作的计算在很大程度上还只是半经验甚至经验的。

(3) 食品工业涉及的固体和液体多，气体少，使得化学工业中研究最多的气-液操作及其理论难有用武之地。与气-液系统相比，固体和液体形成的体系在相间传递和分离两方面都要复杂和困难得多。

(4) 食品加工过程中的液体，特别是大分子溶液，常为非牛顿液体。

## 二、单位、因次和换算

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的，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，即所谓量纲一致性原则，是整理实验数据常用方法——量纲分析法的依据。

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，美国至今仍在使用英美单位制，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。国家标准GB 3100~3102—1993，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，不附加任何其它标记或符号。

(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) 分子量纲为1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别的单位制,在过去的文献资料中又是多种单位制并存。因此,需要掌握单位制的换算方法。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。

(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 3.2808in。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] 将传热系数  $860\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$  换算成 SI 制,即  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

解:从附录查得:  $1\text{kcal}=4.186\text{kJ}$  又  $1\text{h}=3600\text{s}$

故:  $860\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}) = 860\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}) \times (4.187 \times 10^3 \text{J}/\text{kcal}) / (3600\text{s}/\text{h}) = 1000\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

由此得:  $1\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}) = 1.163\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

(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。

[例 0-2] 以英制表示的计算式:

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

式中  $G$ ——单位为  $\text{lb}(\text{质})/(\text{ft}^2 \cdot \text{h})$ ;

$u$ ——单位为  $\text{ft}/\text{s}$ ;

$\Delta p$ ——单位为  $\text{atm}$ 。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  $\text{m}/\text{s}$ ,  $\Delta p'$  的单位为  $\text{Pa}$ , 故:

$$G = 0.4536 / (0.30482 \times 3600) = 0.001356G'$$

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

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

即  $G' = 7.075 \times 10^7 u'^{0.8} \Delta p'$

应指出的是,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。

在《量和单位》一书中,除对物理量的定义和使用作了严格的规定外,还对用于表示物理量的符号作了规定,以便统一各学科的符号。在本书的编写中,全部使用 SI 制,同时对某些常用的非 SI 制单位,介绍了换算关系。对于物理量的符号,也尽量使用《量和单位》中所规定的符号。可是由于本课程涉及多门学科,各学科的符号间存在一定的矛盾,不可能完全照搬标准中规定的符号。实际上,标准也不可能考虑到所有的物理量。因此,对一些在使用标准规定的符号时可能产生矛盾的量,仍使用工业生产中约定俗成的符号,特此说明。

# 流体流动和输送

食品生产中的处理对象有许多是流体，许多操作都在流动状态下进行。设备中发生的传热、传质和化学反应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普遍的单元操作之一，其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。本章将重点讨论流体流动的基本原理，并运用基本原理分析和解决流体输送过程的基本计算问题，恰当地选择和使用流体输送机械。

## 第一节 流体的物理性质

### 一、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。气态和液态物质统称为流体。大量的作无序随机运动的分子构成的流体，分子之间有一定的间隙，如常温常压下的气体，分子间的距离约为  $3.3 \times 10^{-9} \text{ m}$ 。若以单个分子而论，流体是不连续的。但如果以其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流体微团作为考察对象，则可认为流体是由大量的彼此间无间隙的流体质点组成，流体质点连续布满整个流体空间，从而流体的物理性质和运动参数在空间上也是连续分布的，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，但是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，则连续介质假定不能应用。

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  $\theta$  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，式 (1-1) 和式 (1-2) 分别表示流体的密度场和速度场：

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

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

## 二、流体的密度

流体的密度是流体在空间某点上单位体积流体所具有的质量, 以  $\rho$  表示, 即:

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

式中  $\Delta V$ ——流体质点或微团体积。

工程上常用质量与体积之比作为密度, 实际上是平均密度。在 SI 单位制中,  $\rho$  的单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ , 其倒数  $v$  称为比体积。表 1-1 所示为几种常见流体食品的密度和比体积。

表 1-1 几种常见流体食品的密度和比体积 (15°C)

食品	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	比体积 $v/(\text{m}^3/\text{kg})$
10%食盐水	1070	$9.37 \times 10^{-4}$
20%食盐水	1150	$8.71 \times 10^{-4}$
20%糖液	1080	$9.27 \times 10^{-4}$
40%糖液	1180	$8.50 \times 10^{-4}$
牛乳	1030~1040	$9.27 \times 10^{-4} \sim 9.63 \times 10^{-4}$
芝麻油	910~930	$1.07 \times 10^{-3} \sim 1.1 \times 10^{-3}$
猪油	910~920	$1.09 \times 10^{-3} \sim 1.1 \times 10^{-3}$
椰子油	910~940	$1.06 \times 10^{-3} \sim 1.1 \times 10^{-3}$

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计算:

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

式中  $m$ ——质量, kg;

$V$ ——体积,  $\text{m}^3$ ;

$p$ ——压强, Pa;

$M$ ——摩尔质量, kg/mol;

$T$ ——热力学温度, K;

$R$ ——气体常数, 其值为  $8.314\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

气体混合物可按加成法则, 根据各组分的体积分数  $\varphi_i$  计算:

$$\rho_m = \sum \varphi_i \rho_i \quad (1-5)$$

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:

$$M_m = \sum M_i y_i \quad (1-6)$$

式中  $y_i$ ——组分  $i$  的摩尔分数。

液体混合物的密度也可按加成法则计算, 即混合前后各组分的体积保持不变:

$$v_m = \frac{1}{\rho_m} = \sum \frac{w_i}{\rho_i} \quad (1-7)$$

式中  $w_i$ ——组分  $i$  的质量分数。