



普通高等教育“十二五”规划教材

食品工程原理

(第二版)

主 编 赵思明
副主编 熊善柏 刘 茹 林向东 李冬生



科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

食品工程原理

(第二版)

主 编 赵思明

副主编 熊善柏 刘 茹

林向素 李冬生



科学出版社

北 京

内 容 简 介

食品工程原理是研究食品加工中工程技术的基本理论、实践方法的一门学科,是食品专业学生的必修课程。

全书共十三章,主要介绍动量、热量、质量传递的基本理论及食品工程主要单元操作、典型设备和计算方法。主要的单元操作包括:流体输送与机械、制冷技术、物质分离、固体流态化、气力输送、传热、蒸发、气体吸收、蒸馏和物料干燥等。结合食品加工生产,介绍过程的物料衡算、能量衡算和设备选型配套设计计算的方法。

本书可作为高等学校食品专业本科生的教材,也可供食品、生物、环境工程、化学工程与工艺等专业的教师、研究生、科研人员、企业工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

食品工程原理/赵思明主编. —2版. —北京:科学出版社,2016.11

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-03-050669-6

I. ①食… II. ①赵… III. ①食品工程学-高等学校-教材 IV. TS201.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 272972 号

责任编辑:赵晓霞 丁 里/责任校对:郭瑞芝

责任印制:赵 博/封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

大厂书文印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009年2月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016年11月第 二 版 印张:26 3/4

2016年11月第八次印刷 字数:666 000

定价:69.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

第二版前言

食品工程原理是研究食品加工中工程技术的基本理论、实践方法的一门学科，为农业资源转化和食品生产提供理论和技术基础，是食品工程技术的重要组成部分，也是食品专业学生的必修课程。本书是在总结华中农业大学和其他兄弟院校食品工程原理教学以及精品课程建设的基础上编写的，凝聚了作者多年的食品工程教学和科研经验。

食品工程原理是食品科学与工程、食品安全等专业的一门重要专业基础课程，该课程的先修课程有高等数学、物理化学、工程制图等。通过本课程的学习，学生可掌握传递过程及单元操作的基本原理，运用其基本理论解决食品生产中的一些工程问题，也为学习本专业的食品工艺学、食品机械、食品工艺与设备、食品工厂设计等后续课程打好工程技术基础。

根据食品专业的特点，本书介绍了三传理论的基本原理，并运用这些理论研究食品加工过程中各种单元操作的内在规律和基本原理、主要设备构造和设计计算。主要的单元操作包括：流体输送与机械、制冷技术、物质分离、固体流态化、气力输送、传热、蒸发、气体吸收、蒸馏和物料干燥等。结合食品加工生产，介绍过程的物料衡算、能量衡算和设备选型配套设计计算的方法。

食品工程原理是在化学工程原理的基础上发展和逐步深化，并在多年的实践中逐步形成了具有食品领域特色的工程技术课程。尽管化学工程中的许多单元操作都可以用到食品工程中，但食品工业还有其自身的特点。例如，食物讲究营养、色、香、味、质地、安全与卫生，因此许多食品加工都要采用低温、低氧、无菌等操作，制冷、真空技术、现代分离技术等食品工业中具有重要地位。

食品工程原理的学习对许多学生而言具有较大的难度，特别是农业院校的学生，通常要投入大量的时间进行课后复习和作业练习，本书每一章节后的习题或思考题可以帮助学生进一步理解相关知识，并且灵活应用。习题采用了高校课程考试普遍采用的形式，包括名词解释、填空、选择、简答、计算题等多种题型，便于学生复习及考前准备。

另外，为了进一步阐述食品工程原理在食品工程中的应用，本书增加了“食品工程原理的应用”一章，试图通过食品加工工艺过程强化食品加工与设备、单元操作、三传理论等的关系，使学生利用本课程学到的知识，解决食品领域中的工程和科学研究问题，对该课程的知识有一个比较连贯的、全面的、透彻的理解。

本书的编写得到了许多食品工程专家的支持。参加本书编写的人员有：华中农业大学熊善柏教授（绪论、第四章、第五章、第十二章）、华中农业大学刘茹副教授（第一章、第六章、第十章）、华中农业大学赵思明教授（第二章、第三章、第八章、第十一章、第十三章）、海南大学林向东教授（第七章）、湖北工业大学李冬生教授（第九章），华中农业大学尤娟、胡杨、牛猛、尹清和张宾佳博士参加了习题编写，熊青参加了图形的绘制。全书由赵思明教授统稿。

由于编者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请读者批评指正。

编 者

2016年10月

目 录

第二版前言

绪论	1
一、食品工业与食品工程原理	1
二、食品工程原理的主要研究内容	1
三、食品工程原理的特点及与其他课程的关系	3
四、食品工程原理的学习方法、基本概念	3
思考题与计算题	8
第一章 流体流动	9
第一节 概述	9
第二节 静止流体的基本规律	9
一、与流动相关的流体物理性质	9
二、流体静力学基本方程	11
第三节 流体在管道内的流动	14
一、流量与流速	14
二、稳定流动与非稳定流动	16
三、连续性方程	17
四、流体流动过程的能量方程	18
五、伯努利方程的讨论	19
六、实际流体流动的能量衡算式	20
七、用伯努利方程解题的注意事项	20
八、实际流体能量衡算式的应用	22
第四节 流体的流动现象	23
一、牛顿黏性定律	23
二、流体的黏度	24
三、流体的动量传递	24
四、牛顿流体与非牛顿流体	24
五、流体流动类型与雷诺准数	26
六、流体在圆管内的速度分布	27
七、流体边界层	30
第五节 流体在管内的流动阻力	31
一、管路系统	32
二、流体在直管中的流动阻力损失	33
三、管路上的局部阻力损失	37
四、管内流动的总能量损失	39
第六节 管路计算	40

一、简单管路的计算	41
二、复杂管路的计算	44
第七节 流速与流量的测定	45
一、测速管	45
二、孔板流量计	46
三、文丘里流量计	47
四、转子流量计	48
思考题与计算题	48
第二章 流体输送机械	50
第一节 概述	50
第二节 离心泵	50
一、离心泵的工作原理及结构	50
二、离心泵的主要性能参数	52
三、离心泵的特性曲线	54
四、离心泵的气蚀现象和安装高度	56
五、离心泵的工作点	58
六、流量调节	59
七、离心泵的并联与串联操作	60
八、离心泵的选择	61
第三节 其他类型泵	62
一、往复泵	62
二、漩涡泵	64
三、旋转泵	65
第四节 气体输送机械	65
一、离心式通风机	66
二、罗茨风机	67
三、压缩机	67
四、真空泵	71
思考题与计算题	72
第三章 非均相物系的分离	74
第一节 概述	74
一、非均相混合物	74
二、非均相物系分离的意义	74
三、非均相物系分离的种类及原理	74
第二节 过滤	75
一、过滤的基本概念	75
二、颗粒床层的特性	77
三、流体通过固定床的阻力	78
四、过滤基本方程的推导	79
五、过滤过程的计算	81

六、过滤机的生产能力	84
七、过滤设备	86
第三节 沉降	88
一、颗粒在流体中的流动	88
二、颗粒在流体中的自由沉降	90
三、沉降的计算	91
四、重力沉降设备	93
第四节 离心分离	94
一、离心分离原理	95
二、离心分离设备的结构、选型及计算	97
第五节 离心过滤	101
一、离心过滤基本原理	101
二、离心过滤设备	101
思考题与计算题	102
第四章 粉碎 筛分 混合 乳化	104
第一节 粉碎	104
一、粉碎理论	104
二、磨介式粉碎	109
三、冲击式粉碎	111
四、对辊式粉碎	113
五、切割碎解	115
第二节 筛分	115
一、筛分的基本原理与基本概念	115
二、筛孔的形状与排列	117
三、筛面运动方式	118
第三节 混合	119
一、混合的基本理论	119
二、液体介质的搅拌混合	121
三、高黏度流体的搅拌	126
四、高黏度浆体和塑性固体的混合	127
五、固体的混合	129
第四节 乳化	130
一、乳化的基本理论	131
二、乳化设备	131
思考题与计算题	133
第五章 流态化与气力输送	134
第一节 固体流态化	134
一、固体流态化的原理和基本概念	134
二、流化床的流体力学	137
三、流态化技术的应用及常见流化床	142

第二节 气力输送	147
一、气力输送的基本概念	147
二、气力输送系统的组成	148
三、气力输送系统的计算	149
四、压力损失的计算	151
思考题与计算题	156
第六章 传热学	157
第一节 概述	157
一、传热在食品工业中的应用	157
二、传热的三种基本方式	157
第二节 热传导	159
一、热传导的基本概念和傅里叶定律	159
二、平壁的热传导	161
三、圆筒壁的热传导	164
第三节 对流传热	167
一、对流传热的基本概念	168
二、对流传热机制	169
三、对流传热系数 α 关联式的确定	171
四、无相变时的对流传热系数	173
五、有相变时的对流传热系数	178
第四节 稳定传热的计算	183
一、能量衡算	183
二、总传热速率微分方程和总传热系数	184
三、平均温差的计算	188
四、传热的强化	198
第五节 热辐射	199
一、基本概念和定律	199
二、两固体间的辐射传热	203
三、对流和辐射的联合传热	206
四、辐射加热方法	207
第六节 换热器	210
一、换热器的类型	211
二、间壁式换热器	212
思考题与计算题	218
第七章 制冷与食品冷冻	220
第一节 制冷的基本原理与方法	220
一、制冷技术的热力学基础	220
二、制冷过程	221
三、制冷的热力计算	223
第二节 食品的冷冻	224

一、食品的冻结过程	225
二、食品冻结的速度与时间	230
三、食品冻结的方法与装置	236
思考题与计算题	243
第八章 蒸发	244
第一节 概述	244
一、蒸发的概念及其作用	244
二、蒸发操作的分类	244
三、蒸发系统的基本组成	245
四、蒸发对食品物料的影响	246
第二节 溶液的沸点与温度差损失	247
一、溶液的沸点	247
二、温度差损失	247
第三节 单效蒸发的计算	249
一、蒸发量	249
二、加热蒸气消耗量	250
三、传热面积 A_0	252
四、蒸发器的生产能力和生产强度	254
第四节 多效蒸发	254
一、多效蒸发原理及特点	254
二、多效蒸发的流程	256
三、多效蒸发的温差分配	257
第五节 蒸发设备	258
一、蒸发设备的分类	258
二、非膜式蒸发设备	258
三、膜式蒸发设备	260
思考题与计算题	264
第九章 传质原理与吸收	265
第一节 质量传递原理	265
一、单相传质	265
二、相际间的传质	273
第二节 气体吸收	279
一、气体吸收的基本概念及原理	279
二、低浓度气体吸收过程的计算	291
思考题与计算题	302
第十章 蒸馏	304
第一节 概述	304
第二节 蒸馏原理	304
一、简单蒸馏和平衡蒸馏	304
二、精馏原理及塔内气-液传质过程	305

第三节 双组分连续精馏	306
一、双组分理想溶液的气-液相平衡	306
二、非理想双组分理想溶液简介	309
三、精馏设备	310
第四节 板式塔中双组分连续精馏的计算	313
一、工艺计算内容	313
二、理论板的概念及恒摩尔流假定	314
三、连续精馏的物料衡算和操作线方程	315
四、进料状况和加料方程	319
五、精馏操作塔板数的求法	322
六、塔板效率及实际塔板数的确定	326
七、回流比的选择	327
思考题与计算题	331
第十一章 干燥	332
第一节 湿空气性质	333
一、湿度	333
二、相对湿度	333
三、比体积	334
四、比热容	334
五、焓	334
六、露点	335
七、干球温度和湿球温度	335
八、绝热饱和温度	336
九、 $H-I$ 图及说明	337
第二节 热风干燥过程的物料衡算和热量衡算	340
一、湿物料中水分的表示方法	340
二、物料衡算	341
三、热量衡算	342
第三节 湿物料的性质及干燥机制	344
一、湿物料的性质	344
二、干燥机制	345
第四节 干燥动力学	346
一、干燥曲线和干燥速率曲线	346
二、恒速干燥阶段干燥速率的计算	348
三、恒定干燥条件下干燥时间的计算	349
第五节 干燥设备	352
一、箱式干燥器	352
二、气流干燥器	353
三、沸腾床干燥器	353
四、喷动床干燥器	354

五、转筒干燥器	354
六、网带式干燥器	354
七、喷雾干燥器	355
八、红外光干燥器	355
九、微波干燥器	355
十、滚筒干燥器	356
第六节 冷冻干燥	356
一、水的相图	356
二、冻结对冷冻干燥的影响	357
思考题与计算题	357
第十二章 萃取	359
第一节 液-液萃取	359
一、液-液萃取相平衡关系与三角形相图	359
二、萃取系统的杠杆规则	360
三、液-液平衡在三角形相图上的表示法	361
四、液-液萃取过程的流程和计算	364
五、萃取分离设备	372
第二节 浸取	374
一、浸取平衡	375
二、浸取流程	376
三、浸取设备	380
第三节 超临界流体萃取	382
一、超临界流体萃取的基本原理	382
二、超临界流体萃取的方法	383
思考题与计算题	384
第十三章 膜分离	385
第一节 概述	385
一、膜分离过程	385
二、分离膜	385
三、膜分离器	389
第二节 反渗透	390
一、反渗透的基本理论	390
二、反渗透膜材料与结构	392
三、膜污染与浓差极化	392
四、反渗透分离工艺	393
第三节 超滤	395
一、超滤分离的基本原理	395
二、超滤膜	396
第四节 电渗析	397
一、电渗析的基本原理	397

二、电渗析用离子交换膜	398
三、膜的极化与膜污染	400
四、电渗析器	400
五、电渗析操作流程	401
思考题与计算题	402
参考文献	403
附录	404
附录一 常用单位的换算	404
附录二 某些固体材料的重要物理性质	405
附录三 干空气的物理性质 (101.33kPa)	406
附录四 水的物理性质	407
附录五 饱和水蒸气表 (以温度为准)	408
附录六 饱和水蒸气表 (以用 kPa 为单位的压强为准)	410
附录七 某些食品材料热导率的实验数据	412
附录八 某些食品组分的热物理性质	413
附录九 某些食品材料的含水量、冻前比热容、冻后比热容和熔化热数据	413

绪 论

一、食品工业与食品工程原理

食品工业是利用物理、化学或生物方法将自然界的某些物质加工成可食用的生活资料的工业。食品工业的蓬勃发展为人们的健康生活提供了条件。然而，食品工业从以传统经验、手工作坊的加工方式发展到现代化生产方式，经历了漫长的过程，直到第二次世界大战，食品工业才得到迅速发展，粮油加工、果蔬加工、肉制品加工、乳制品加工、蛋制品加工等都进入了工业化生产的阶段。目前，食品工业已逐渐成为世界各国的支柱产业。

食品工程原理是研究食品加工中一切工程技术的基本理论和实践方法的一门学科，主要解决三传理论和单元操作的基本问题。三传理论是食品工程技术的理论基础，而单元操作是食品加工的基本过程，三传理论和单元操作始终贯穿于食品加工的各个环节。研究好食品加工过程的三传理论和单元操作，是食品加工实现工业化生产的前提。

食品的工业化生产方案是在实验室工艺研究的基础上确定的，其加工原理与实验室研究是一样的。但从实验室的工艺研究到工业化生产，还涉及放大、设备配套、生产线、控制等方面的问题，在实验室中几个试管、烧瓶就能完成的过程，在工业化生产中可能需要十几个甚至几十个设备和工序才能实现。食品工程就是解决食品的工业化生产问题的一门学科。

二、食品工程原理的主要研究内容

食品工程原理主要研究三传理论与单元操作。

尽管不同食品的加工方法不尽相同，同一食品的产品形式也千差万别，但其加工的基本操作原理却有许多共同之处。例如，奶粉的加工从原料乳的验收开始，需要经过预热杀菌、调配、真空浓缩、过滤、喷雾干燥等过程；又如，酱油的加工包含大豆的浸泡、加热、杀菌、过滤等工序，这两种产品的原料、产品形式、加工工艺都有较大的不同，但却包含了流体的输送、物质的分离、加热等相同的物理过程。在食品工程原理中，将这些食品生产工艺过程所共有的基本物理操作称为单元操作（unit operation）。

任何一个食品的加工过程都是由若干个单元操作串联起来形成的。例如，奶粉的加工（图 0-1）主要有流体的输送、传热、均质、蒸发、非均相物系的分离、干燥等单元操作。又如，甜菜制糖要经过 30 多个步骤，其中主要涉及浸取、蒸发浓缩、结晶、离心分离、干燥等单元操作。每个单元操作都在一定的设备中进行。例如，过滤操作是在过滤设备中进行的；干燥操作是在干燥器内进行的。所有这些单元操作都属于物理操作，只改变物料的状态或其物理性质，不改变其化学性质。

同一食品生产过程中可能包含多个相同的单元操作，但是每次操作的目的可能不同。例如，小麦经过多次研磨和筛理，逐步制成面粉并提出麸皮。皮磨是将麦粒剥开，从麦片上刮下麦渣、麦心和粗粉，并保持麸皮不过分破碎，以便最大限度地分离麦乳和麦皮。渣磨是处理皮磨及其他系统分出的带有表皮的粉粒，使麦皮与胚乳分离，从中提取品质好的麦心和粗粉，送入心磨系统磨制成粉。

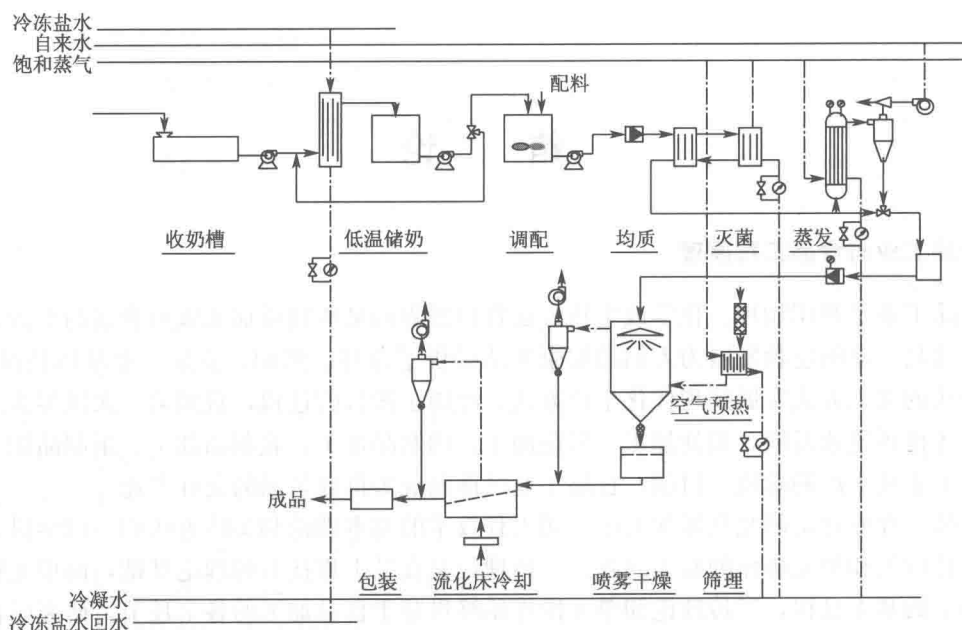


图 0-1 奶粉加工工艺流程图

单元操作用于不同的生产过程其基本原理相同。例如，果蔬冷却和肉的冷冻过程操作条件有所不同，但是都属于制冷操作，遵循热量传递的基本规律。根据单元操作所遵循的基本规律，可以将单元操作划分为以下三大类：

- 1) 遵循流体流动基本规律的单元操作，包括流体输送、搅拌、沉降、过滤等。
- 2) 遵循热量传递基本规律的单元操作，包括加热、冷却、冷凝、蒸发等。
- 3) 遵循质量传递基本规律的单元操作，包括吸收、蒸馏、萃取、结晶、干燥、膜分离等。

上述三类单元操作所涉及的三种理论称为三传理论：

- 1) 动量传递理论。随着对单元操作研究的不断深入，人们认识到流体流动是一种动量传递现象，即流体在流动过程中，其内部发生了动量传递。凡是遵循流体流动基本规律的单元操作都可以用动量传递理论研究。
- 2) 热量传递理论。物体在加热或者冷却的过程中都伴随着热量的传递。凡是遵循传热基本规律的单元操作都可以用热量传递的理论研究。
- 3) 质量传递理论。两相间物质的传递过程即为质量传递。凡是遵循传质基本规律的单元操作都可以用质量传递的理论研究。

三种传递现象之间存在着类似的规律和内在的联系，并且可以用类似的数学公式表达。因此，在学习和研究过程中要特别注意“三传类似”。

三传理论和单元操作是食品工程技术的理论和实践基础。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。所以，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，三传理论是单

元操作在理论上的发展与深化,而单元操作是三传理论的具体应用,许多单元操作都包含两种以上的传递现象。例如,物料的热风干燥、精馏等单元操作中既包含传热和传质现象,也有流体流动现象。

三、食品工程原理的特点及与其他课程的关系

食品工程原理的研究内容具有较大的通用性和专业性。三传理论可用于化学工程、生物工程、环境工程等领域的研究;流体的输送、非均相物系的分离、蒸发、干燥等单元操作也是许多行业共有的操作过程。因此,三传理论和单元操作具有较大的应用范围,具有通用性。

由于食品具有热敏性,且营养成分复杂,在加工过程中常伴随某些生化反应,造成风味物质的散失和营养成分的损失,同时,食品加工还须注重卫生 and 安全性,因此在研究食品工程原理时还要注意食品的特性。只有这样,才能学好食品工程,可见食品工程原理具有本行业的专业性。

食品工程原理的学习需要用到高等数学、物理化学、工程制图等方面的知识;同时,食品工程原理又是设备选型配套、食品机械设计、食品工厂设计等课程的先修课。食品工程原理以食品加工过程的物理变化为基础,但食品加工过程中不可避免地要发生一些生物化学变化,因此,了解食品原料学、食品物性学、食品工艺学、食品化学、食品微生物学、食品机械等知识对掌握食品工程原理有极大的帮助。

化学工程的发展具有悠久的历史,化学工程原理的研究比较成熟,已成为化学工业发展的重要基础。食品工程在许多方面与化学工程具有相似之处,食品工程原理就是在化工原理的基础上发展起来的。因此,借鉴化工原理的研究方法处理食品工程的问题,通常可以获得较理想的效果。

四、食品工程原理的学习方法、基本概念

(一) 课程性质、内容及学习方法

食品工程原理是介绍三传理论和单元操作的一门技术基础课,它适用于食品工程等工科专业的学生、老师以及从事食品工程的科研技术人员学习和使用。要掌握现代食品加工技术,必须学好各种单元操作和与之相对应的基本理论。

通过本课程的学习,要求学生掌握各单元操作的基本原理、所有典型设备的结构、设备工艺尺寸的计算和设备选型,培养学生分析和解决单元操作中各种问题的能力,即在科学研究和生产实践中对设备进行操作管理、设计、强化与过程开发的本领。

如何才能学好食品工程原理呢?

首先要注意食品原料的特性。食品加工的原料多来自农副产品,具有生物特性,而且组成成分十分复杂。大多数的食品原料都是凝聚态的,这就使得普通的蒸馏、吸收操作难以达到理想的分离效果,因而浸取、过滤、离心分离以及混合、乳化、粉碎等单元操作在食品工业中格外重要。许多食品原料具有热敏性、易腐败等性质,在加工过程中往往发生多种生物化学变化。食品加工的动植物原料中的蛋白质成分遇热容易变性,其中的各种酶在加热条件下容易失去活性;脂肪成分在高温下易氧化变质;食品中的风味成分,尤其是芳香成分遇热

易挥发损失。食品原料和制品中含有各种人类需要的营养成分,因而也是微生物生长繁殖的好场所,正是在这些微生物及其所含的酶的作用下,食品才会腐败变质。因此,低温加工技术、真空加工技术、各种杀菌技术等都在食品工程中占有重要的地位。

其次要注意化学工程和生物工程中的某些单元操作。这些操作在食品工程中可能很少涉及,但是一些基本的单元操作是相同的。将化学工程和生物工程的一些理论和技术成果应用到食品工程中,对食品工程原理的学习、研究与发展都是有益的。

另外还要学会利用各种工业手册和阅览各种相关的期刊。工业手册的大量数据资料为设备工艺尺寸的计算和设备选型提供方便,而且从中还能查阅到许多关于食品原料性质的数据。这些资料由于出版国家及年限等原因,可能使用了不同的单位制,因此学习过程中还需注意单位换算。本书均使用国际单位制,并且在附录中列出了一些常用的数据资料。阅览各种相关的期刊可以了解食品工程发展的新动向,更新课本上的信息,学到更多、更新的单元操作及其加工设备。

(二) 食品工程原理的几个基本概念

单元操作中常用的基本概念有物料衡算、能量衡算、物系的平衡关系、传递速率和经济核算。本课程中,各单元操作的计算、设备的选型等工作都将围绕上述五个方面进行,并以最优经济效益作为最终的设计方案。

1. 物料衡算

物料衡算可以弄清生产过程中原料、成品以及损失的物料数量。从物料衡算上求出原料的利用率和流失率。

物料衡算遵循质量守恒定律,即对于一个生产加工过程,输入物料总量必定等于输出物料的总质量与积累物料的质量之和。例如,要将原料乳制成脱脂乳和奶油,根据质量守恒定律,每分钟进入离心机的原料乳的质量应该等于每分钟从离心机中离开的脱脂乳和奶油的质量之和(忽略物料损失)。

物料衡算是质量守恒定律的一种表现方式,用数学表达式可以表示为

$$\sum M_i = \sum M_o + \sum M_s \quad (0-1)$$

式中: $\sum M_i$ —— 输入物料的总和;

$\sum M_o$ —— 输出物料的总和;

$\sum M_s$ —— 累积物料量。

式(0-1)为总物料衡算式,如果过程中累积的物料量为零,则式(0-1)可以简化为

$$\sum M_i = \sum M_o \quad (0-2)$$

式(0-2)所描述的是稳态操作过程,稳态过程的特点是在设备的各个不同位置上,物料的流速、浓度、温度、压强等参数不随时间而变化。一般连续操作为稳态过程,而间歇操作则为非稳态过程。非稳态过程在设备的同一位置上各个参数随时间而变化。

如果生产过程中没有发生化学变化,可以对物料中的某一组分 A 进行物料衡算,其表达式为

$$\sum M_i w_1 = \sum M_o w_2 \quad (0-3)$$

式中: w_1 ——输入物料中 A 的质量分数;

w_2 ——输出物料中 A 的质量分数。

在食品加工过程中经常涉及物料衡算的问题。物料衡算既可以基于进入系统的总物料,也可以基于物料中的固形物或者某一特殊组分,如蛋白质、脂肪等。例如,在脱水蔬菜的制作过程中,碳水化合物、矿物质、蛋白质等统称为固形物,在干燥过程中需要对固形物和水进行物料衡算。

例 0-1 用热风干燥的方法将土豆脱水。原料土豆的固形物含量为 14% (质量分数,下同),要求干燥产品的固形物含量达到 93%。求每 1000kg 原料土豆的产品产量。假定原料土豆在去皮处理时有 8% 的质量损失。

解 以 1000kg 原料土豆为衡算基准。输入物料的固形物含量为

$$1000 \times 14\% = 140(\text{kg})$$

设干燥产品的质量为 $x\text{kg}$, 则输出物料的固形物含量为 93% $x\text{kg}$, 原料损失的固形物含量为

$$1000 \times 14\% \times 8\% = 11.2(\text{kg})$$

对整个系统的固形物进行衡算可得

$$140 = 93\%x + 11.2$$

$$x = 138.5(\text{kg})$$

例 0-2 从全乳中除去脂肪成分可以得到脱脂乳。已经测得某脱脂乳中含有 90.5% (质量分数,下同) 的水分, 3.5% 的蛋白质, 5.1% 的碳水化合物, 0.1% 的脂肪和 0.8% 的灰分。如果原料乳中含有 4.5% 的脂肪, 试计算原料乳中各成分的含量。假定只有脂肪从原料乳中除去, 且加工过程中没有物料损失。

解 以 100kg 脱脂乳为基准, 则其中含有 0.1kg 脂肪。

设原料乳中被除去的脂肪为 $x\text{kg}$, 则原料乳中的脂肪含量为 $(0.1+x)\text{kg}$, 原料乳的总质量为 $(100+x)\text{kg}$ 。已知原料乳中的脂肪含量为 4.5%, 可得

$$\frac{x+0.1}{100+x} = 4.5\%$$

解得

$$x = 4.6(\text{kg})$$

所以, 原料乳中各成分的含量为

$$w_{\text{脂肪}} = 4.5\% \quad w_{\text{水}} = \frac{90.5}{104.6} \times 100\% = 86.5\%$$

$$w_{\text{蛋白质}} = \frac{3.5}{104.6} \times 100\% = 3.3\% \quad w_{\text{碳水化合物}} = \frac{5.1}{104.6} \times 100\% = 4.9\% \quad w_{\text{灰分}} = 0.8\%$$

在食品工程中经常使用不同的表示方法来表示物质的浓度, 在例 0-1 中就用到了质量分数 (m/m), 即某组分的质量占总质量的分数。通常还会用到体积分数 (V/V), 即某组分的体积占总体积的分数; 摩尔浓度 (M), 即单位体积的溶液中含有溶质的物质的量; 摩尔分数, 即溶质的物质的量占溶液总物质的量的分数。在常规的计算中, 最经常使用的是质量分数 (m/m)。