

21世纪高等院校教材

# 食品工程原理

赵思明 主编

熊善柏 林向东 李冬生 副主编



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

21 世纪高等院校教材

# 食品工程原理

赵思明 主编

熊善柏 林向东 李冬生 副主编

科学出版社

(总定价) 元 100.50; 付本

( ISBN 7-03-014000-0 ) 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。

全书共分十四章,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。本书配有光盘,包含与该课程学习的相关资料,可供学生使用。

本书可作为高等院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. —北京:科学出版社,2009

21世纪高等院校教材

ISBN 978-7-03-22468-2

I. 食… II. 赵… III. 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(2008)第101632号

责任编辑:丁里 王志欣 沈晓晶/责任校对:朱光光

责任印制:张克忠/封面设计:陈敬

**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>

**明辉印刷有限公司**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:B5(720×1000)

2009年2月第一次印刷 印张:37

印数:1—3 500 字数:728 000

**定价:62.00元(含光盘)**

(如有印装质量问题,我社负责调换〈明辉〉)

## 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等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。

食品工程原理在化学工程原理的基础上发展并逐步深化,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,因此食品加工应采用低温、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）、华中农业大学邱承光副教授（第一章、第十三章）、华中农业大学赵思明教授（第二章、第三章、第八章、第十一章、第十四章）、武汉工业学院肖安红教授（第五章）、海南大学张德拉副教授（第六章）、海南大学林向东教授（第六章、第七章）、湖北工业大学李冬生教授（第九章）、东莞理工学院邵友元教授（第十章）。华中农业大学曾令彬、张正茂、姚森、张习军、丁玉琴、周继成、范露、王彩霞参加了编写，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

2008年10月

2008年10月

2008年10月

2008年10月

2008年10月

2008年10月

2008年10月

2008年10月

2008年10月

2008年10月

2008年10月

2008年10月

2008年10月

2008年10月

2008年10月

2008年10月

2008年10月

2008年10月

2008年10月

2008年10月

2008年10月

2008年10月

2008年10月

2008年10月

14	.....	.....	二
24	.....	.....	三
17	.....	.....	四
20	.....	.....	六
12	.....	.....	一
12	.....	.....	二
12	.....	.....	三
12	.....	.....	四
12	.....	.....	五
12	.....	.....	六
12	.....	.....	七
12	.....	.....	八
12	.....	.....	九
12	.....	.....	十
12	.....	.....	十一
12	.....	.....	十二
12	.....	.....	十三
12	.....	.....	十四
12	.....	.....	十五
12	.....	.....	十六
12	.....	.....	十七
12	.....	.....	十八
12	.....	.....	十九
12	.....	.....	二十
12	.....	.....	二十一
12	.....	.....	二十二
12	.....	.....	二十三
12	.....	.....	二十四
12	.....	.....	二十五
12	.....	.....	二十六
12	.....	.....	二十七
12	.....	.....	二十八
12	.....	.....	二十九
12	.....	.....	三十
12	.....	.....	三十一
12	.....	.....	三十二
12	.....	.....	三十三
12	.....	.....	三十四
12	.....	.....	三十五
12	.....	.....	三十六
12	.....	.....	三十七
12	.....	.....	三十八
12	.....	.....	三十九
12	.....	.....	四十
12	.....	.....	四十一
12	.....	.....	四十二
12	.....	.....	四十三
12	.....	.....	四十四
12	.....	.....	四十五
12	.....	.....	四十六
12	.....	.....	四十七
12	.....	.....	四十八
12	.....	.....	四十九
12	.....	.....	五十

二、流体在直管中的流动阻力损失 .....	41
三、管路中的局部阻力损失 .....	49
四、管内流动的总能量损失 .....	51
第六节 管路计算 .....	53
一、简单管路的计算 .....	53
二、复杂管路的计算 .....	57
第七节 流速与流量的测定 .....	62
一、测速管 .....	62
二、孔板流量计 .....	63
三、文丘里流量计 .....	65
四、转子流量计 .....	66
第二章 流体输送机械 .....	69
第一节 概述 .....	69
第二节 离心泵 .....	69
一、离心泵的工作原理及结构 .....	69
二、离心泵的主要性能参数 .....	71
三、离心泵的特性曲线 .....	74
四、离心泵的气蚀现象和安装高度 .....	76
五、离心泵的工作点 .....	79
六、流量调节 .....	80
七、离心泵的并联与串联操作 .....	81
八、离心泵的选择 .....	82
第三节 其他类型泵 .....	83
一、往复泵 .....	83
二、漩涡泵 .....	85
三、旋转泵 .....	86
第四节 气体输送机械 .....	87
一、离心式通风机 .....	87
二、罗茨风机 .....	89
三、压缩机 .....	89
四、真空泵 .....	94
第三章 非均相物系的分离 .....	96
第一节 概述 .....	96
一、非均相混合物 .....	96
二、非均相物系分离的意义 .....	96

871	三、非均相物系分离的种类及原理	97
881	第二节 过滤	98
881	一、过滤的基本概念和理论	98
881	二、颗粒床层的特性	100
881	三、流体通过固定床的阻力	101
881	四、过滤基本方程的推导	103
881	五、过滤过程的计算	105
881	六、过滤机的生产能力	109
881	七、过滤设备	111
881	第三节 压榨	114
881	一、压榨的基本理论	114
881	二、压榨设备	115
881	第四节 沉降	116
881	一、颗粒在流体中的流动	116
881	二、颗粒在流体中的自由沉降	119
881	三、沉降的计算	119
881	四、重力沉降设备	122
881	第五节 离心分离	124
881	一、离心分离理论	124
881	二、离心分离设备的结构、选型及计算	127
881	第六节 离心过滤	133
881	一、离心过滤基本理论	133
881	二、离心过滤设备	133
881	第四章 粉碎 筛分 混合 乳化	136
881	第一节 粉碎	136
881	一、粉碎理论	136
881	二、磨介式粉碎	143
881	三、冲击式粉碎	146
881	四、转辊式粉碎	149
881	五、切割碎解	151
881	第二节 筛分	152
881	一、筛分的基本原理与基本概念	152
881	二、筛孔的种类与排列	154
881	三、筛面运动方式	156
881	第三节 混合	157



300	一、混合的基本理论	157
300	二、液体介质中的搅拌混合	159
300	三、高黏度流体的搅拌	166
300	四、高黏度浆体和塑性固体的混合	167
300	五、固体的混合	169
300	<b>第四节 乳化</b>	171
300	一、乳化的基本理论	172
300	二、乳化设备	173
	<b>第五章 流态化与气力输送</b>	175
311	<b>第一节 固体流态化</b>	175
311	一、固体流态化的原理和基本概念	175
311	二、流化床的流体力学	179
311	三、流态化技术的应用及常见流化床	185
311	<b>第二节 气力输送</b>	190
311	一、气力输送的基本概念	191
311	二、气力输送系统的组成	194
311	三、气力输送系统的设计	201
311	四、压力损失的计算	203
	<b>第六章 传热学</b>	210
321	<b>第一节 概述</b>	210
321	一、传热在食品工业中的应用	210
321	二、传热的三种基本方式	211
321	<b>第二节 热传导</b>	213
321	一、热传导的基本概念和傅里叶定律	213
321	二、平壁的热传导	217
321	三、圆筒壁的热传导	221
321	<b>第三节 对流传热</b>	226
321	一、对流传热的基本概念	227
321	二、对流传热机制	229
321	三、对流传热系数 $\alpha$ 关联式的确定	231
321	四、无相变时的对流传热系数	233
321	五、有相变时的对流传热系数	241
321	<b>第四节 稳定传热的计算</b>	247
321	一、能量衡算	248
321	二、总传热速率微分方程和总传热系数	249

三、平均温差的计算	254
四、传热的强化	267
第五节 热辐射	268
一、基本概念和定律	268
二、两固体间的辐射传热	274
三、对流和辐射的联合传热	280
四、辐射加热方法	282
第六节 换热器	285
一、换热器的类型	286
二、间壁式换热器	287
三、各种间壁式换热器的比较和传热强化措施	296
四、其他类型的换热器	298
第七章 制冷与食品冷冻	306
第一节 制冷的基本原理与方法	306
一、制冷技术的热力学基础	306
二、制冷过程	307
三、制冷方法	313
四、蒸气压缩式制冷的热力计算	317
第二节 食品的冷冻	319
一、食品的冻结过程	319
二、食品冻结的速度与时间	326
三、食品冻结的方法与装置	333
第八章 蒸发	344
第一节 概述	344
一、蒸发的概念及其作用	344
二、蒸发操作的分类	344
三、蒸发系统的基本组成	345
四、蒸发对食品物料的影响	346
第二节 溶液的沸点与温度差损失	348
一、溶液的沸点	348
二、温度差损失	348
第三节 单效蒸发的计算	350
一、蒸发量	351
二、加热蒸气消耗量	351
三、传热面积 $S_0$	353

172	四、蒸发器的生产能力和生产强度	356
148	第四节 多效蒸发	357
148	一、多效蒸发原理及特点	357
149	二、多效蒸发的流程	358
152	三、多效蒸发的温差分配	360
182	四、多效蒸发的计算	361
183	第五节 蒸发设备	365
183	一、蒸发设备的分类	365
183	二、非膜式蒸发设备	365
185	三、膜式蒸发设备	368
103	第九章 传质原理与吸收	374
103	第一节 质量传递原理	374
108	一、单相传质	374
109	二、相间间的传质	385
108	第二节 气体吸收	392
106	一、气体吸收的基本概念及原理	392
110	二、低浓度气体吸收过程的计算(逆流操作的物料衡算及操作线方程)	407
103	第十章 蒸馏	424
116	第一节 概述	424
117	第二节 蒸馏原理	424
121	一、简单蒸馏和平衡蒸馏	424
122	二、精馏原理及塔内气-液传质过程	426
118	第三节 双组分连续精馏	427
118	一、双组分理想溶液的气-液相平衡	427
119	二、非理想双组分理想溶液简介	431
119	三、精馏设备	433
122	第四节 板式塔中双组分连续精馏的计算	440
122	一、工艺计算内容	440
127	二、理论板的概念及恒摩尔流假定	441
128	三、连续精馏的物料衡算和操作线方程	442
130	四、进料状况和加料方程	447
133	五、精馏操作塔板数的求法	451
136	六、塔板效率及实际塔板数的确定	456
138	七、回流比的选择	457
138	第五节 蒸馏装置的选型配套	462

201	一、选型配套基本原则	462
205	二、选型配套的主要内容	463
<b>第十一章 干燥</b>		467
<b>第一节 湿空气性质</b>		468
100	一、湿度	468
100	二、相对湿度	469
103	三、比体积	469
202	四、比热容	470
202	五、焓值	470
206	六、露点	470
103	七、干球温度和湿球温度	471
202	八、绝热饱和温度	472
052	九、 $H-I$ 图及说明	473
110	十、湿空气的基本状态变化过程	475
132	<b>第二节 热风干燥过程的物料衡算和热量衡算</b>	477
127	一、湿物料中水分的表示方法	477
222	二、物料衡算	478
227	三、热量衡算	479
122	四、干燥系统的热效率	481
122	<b>第三节 湿物料的性质及干燥机制</b>	484
222	一、湿物料的性质	484
110	二、干燥机制	486
122	<b>第四节 干燥动力学</b>	486
122	一、干燥曲线和干燥速率曲线	487
120	二、恒速干燥阶段干燥速率的计算	489
103	三、恒定干燥条件下干燥时间的计算	490
122	<b>第五节 干燥设备</b>	493
122	一、箱式干燥器	494
211	二、气流干燥器	494
212	三、沸腾床干燥器	495
212	四、喷动床干燥器	496
212	五、转筒干燥器	496
212	六、网带式干燥器	497
212	七、喷雾干燥器	497
212	八、红外光干燥器	498

307	九、微波干燥器	498
308	十、滚筒干燥器	498
310	第六节 冷冻干燥	499
311	一、水的相图	499
312	二、冻结对冷冻干燥的影响	500
313	三、冷冻干燥中的传热和传质	501
315	第七节 干燥设备的选择	501
317	第十二章 萃取	502
317	第一节 液-液萃取	502
318	一、液-液萃取相平衡关系与三角形相图	502
319	二、萃取系统的杠杆规则	503
320	三、液-液平衡在三角形相图上的表示法	505
321	四、液-液萃取过程的流程和计算	509
324	五、萃取分离设备	517
325	第二节 浸取	521
326	一、浸取平衡	521
327	二、浸取流程	522
328	三、浸取设备	528
329	第三节 超临界流体萃取	530
330	一、超临界流体萃取的基本原理	530
331	二、超临界流体萃取的方法	532
333	第十三章 膜分离	534
333	第一节 概述	534
334	一、膜分离过程	534
335	二、分离膜	534
336	三、膜分离器	539
337	第二节 反渗透	539
338	一、反渗透的基本理论	539
339	二、反渗透膜材料与结构	542
340	三、膜污染与浓差极化	542
341	四、反渗透分离工艺	543
342	第三节 超滤	546
343	一、超滤分离的基本原理	546
344	二、超滤膜	547
345	第四节 电渗析	548

一、电渗析的基本原理	548
二、电渗析用离子交换膜	550
三、膜的极化与膜污染	551
四、电渗析器	552
五、电渗析操作流程	553
<b>第十四章 食品工程原理的应用</b>	<b>555</b>
一、火腿肠的生产工艺	555
二、工程配套和工业化生产	555
三、主要单元操作分析	557
四、传递过程分析	558
五、食品工程中五个基本概念的应用	563
<b>参考文献</b>	<b>565</b>
<b>附录</b>	<b>566</b>
附录一 常用单位的换算	566
一、质量	566
二、长度	566
三、力	566
四、压强	566
五、功/能和热	567
附录二 某些固体材料的重要物理性质	567
附录三 干空气的物理性质 (101.33kPa)	568
附录四 水的物理性质	569
附录五 饱和水蒸气表 (以温度为准)	570
附录六 饱和水蒸气表 (以用 kPa 为单位的压强为准)	572
附录七 某些食品材料热导率的实验数据	574
附录八 某些食品组分的热物理性质	575
附录九 某些食品材料的含水量、冻前比热容、冻后比热容和 融化热数据	575

## 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。

良好的食品工程技术是实现食品工业化生产的关键，任何一个科研成果只有通过工程技术才能投入大规模生产，食品工程原理就是研究食品加工实现工业化大生产的基本理论与操作，对食品工业的发展起着举足轻重的作用。

### 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。

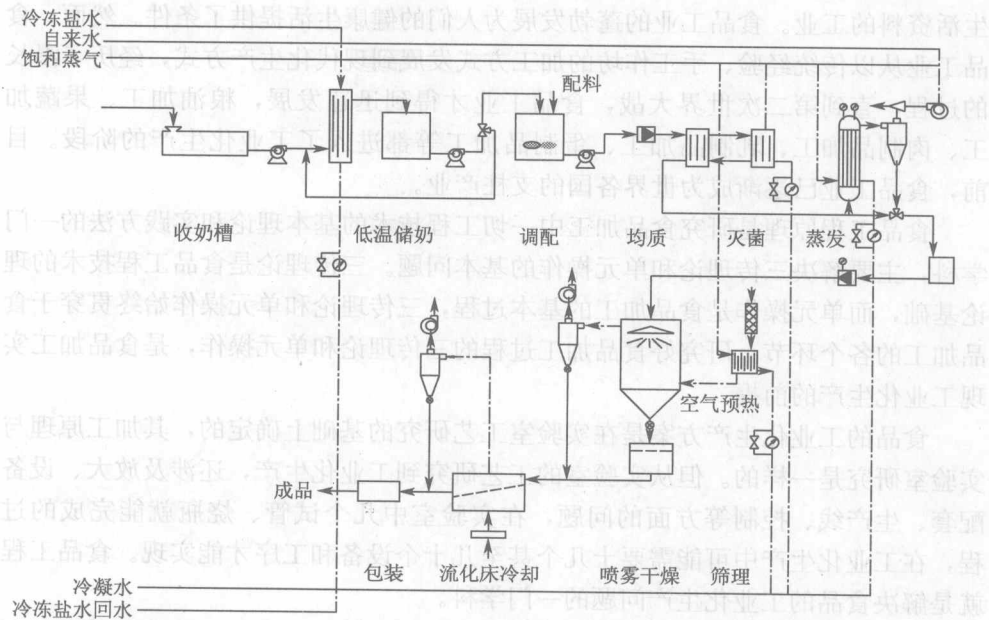


图 0-1 奶粉加工工艺流程图

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，并保持麸片不过分破碎，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。

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