



面向 21 世纪 课程 教材

Textbook Series for 21st Century

食品工程原理

李云飞 葛克山 主编



中国农业大学出版社

面向 21 世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

食品工程原理

李云飞 葛克山 主 编

中国农业大学出版社

·北 京·

图书在版编目 (CIP) 数据

食品工程原理/李云飞, 葛克山主编. —北京: 中国农业大学出版社, 2002.8
ISBN 7-81066-445-X/TS·8
面向 21 世纪课程教材

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 042215 号

出版 中国农业大学出版社
发行 新华书店
经销 新华书店
印刷 涿州市星河印刷厂
版次 2002 年 8 月第 1 版
印次 2002 年 8 月第 1 次印刷
开本 16 印张 55.75 千字 1 025
规格 787×980
印数 1~4 050
定价 60.00 元

图书如有质量问题本社负责调换

社址 北京市海淀区圆明园西路 2 号 邮政编码 100094
电话 010-62892633 网址 www.cau.edu.cn

全国高等农业院校食品
专业“面向 21 世纪课程”系列教材
编审指导委员会委员

- 罗云波 中国农业大学教授博士生导师 (生物技术)
孙远明 华南农业大学教授博士生导师 (食品营养)
陈宗道 西南农业大学教授博士生导师 (食品化学)
李里特 中国农业大学教授博士生导师 (食品工程)
李新华 沈阳农业大学教授博士生导师 (粮油加工)
李士靖 中国食品科学技术学会副秘书长教授
李云飞 上海交通大学教授博士生导师 (食品工程)
何国庆 浙江大学教授博士生导师 (食品微生物)
杨公明 西北农林科技大学教授博士生导师 (食品工程)
周光宏 南京农业大学教授博士生导师 (畜产品加工)
林家栋 中国农业大学教授全国高等学校教学研究中心特聘专家
南庆贤 中国农业大学教授博士生导师 (畜产品加工)
谢笔钧 华中农业大学教授博士生导师 (食品化学)

出版说明并代序

我国农业结构的调整，解决农村、农业、农民的发展出路，已将农产品的贮藏加工及食品科学推到了举足轻重的位置，成为拉动农业产业化、提高农产品附加值以及实现国家现代化的牵引力。而大专院校食品科学各专业的教学工作为这种牵引力提供了人才保障。

全国高等农业院校的食品学科大多建立于 20 世纪 80 年代改革开放的初期，经过近 20 年的发展，现已成为我国食品科学人才培养的最为重要的人才基地。农业院校的食品学科之所以能快速发展，后来居上，成为我国食品科学的主要力量，其主要原因是：食品科学与生物学科广泛地联系在一起。农业院校的食品学科得益于它植根于生物科学学科群之中，借助于生物科学飞速发展的翅膀而不断地深化自己的研究内容，提高自己的学科水平。

在学科发展的起步阶段，教学工作一直沿用过去轻工院校所编写的食品工程专业教材。然而，经过 20 年的发展，这些教材已经远远不能适应今天的教学需要。虽然各院校针对这种情况也曾先后编写过一些教材，但终因不成体系，很难系统地将食品学科内容广泛的课程体系和教学内容很好地衔接起来。要培养面向 21 世纪的高素质食品科学人才，迫切地需要将现代生物学理论与食品科学紧密地结合在一起，编写一套理论性和实践性俱强的完整教材。

这套教材正是在这样的背景和需要的前提下，在教育部、农业部有关领导部门的指导下，通过全国 40 多所院校在第一线的教师的共同努力下，由中国农业大学出版社组织编写而成的。教材力求反映最新的食品科学的理论与实践，同时针对食品科学是多学科集成的优点，特别注重了教材的系统性，避免课程教学内容的重复；针对食品科学实践性强的特点，教材中使用了较多的案例分析。在写作方式上，力求教材能启发学生的主动思考能力，培养学生的创新思维能力。

这套教材还得到了食品学界一批有声望的老专家、老教授的关怀和指导。由于时间紧、任务重，加之该教材体系初次建立，使用效果怎样，还要在实践中去检验。随着学科不断发展，其内容也需要不断地修改补充，编者真诚地期待着使用这套教材的教师和同学们能够提出宝贵意见，以使这套教材充实和得以完善。

罗云波

2002 年 7 月

于马连洼

内容提要

根据食品加工中的操作单元和所涉及到的基础理论，本教材共分12章。其中前半部分重点论述了流体力学、传热学和热力学等基础理论，介绍了与之相关的食品加工工程原理；后半部分在论述传质学理论基础，重点介绍了食品加工中的吸收、分离等与质量传递有关的工程原理。全书通过大量的例题、思考题和习题等内容的学习，有利于读者对各单元操作原理的理解和掌握。

本书除可作为食品科学与工程专业的教学教材或参考书外，也适于相关企业的工程技术人员阅读。

为进一步具体落实教育部的教改精神，全面、系统地更新食品专业的教材内容，2001年2月，在中国农业大学出版社的组织下，“全国高等农业院校食品专业系列教材研讨会”在北京召开。全国近30所农业院校的近100名教师参加了此次研讨会，并确定了16种涵盖食品科学与工程专业的教材编写任务。《食品工程原理》即是其中一种。本书是高等教育面向21世纪教学内容和课程体系改革项目（04-18）研究成果。

本教材共12章，由李云飞、葛克山任主编，张青、伍军和黄阿根任副主编，上海水产大学徐文达教授担任主审。编写分工如下：

- | | | | |
|------|--------------|-----|----------|
| 第1章 | 流体力学基础、绪论和附录 | 李云飞 | 上海交通大学 |
| 第2章 | 传热 | 葛克山 | 中国农业大学 |
| 第3章 | 食品冷冻技术 | 宋立华 | 上海交通大学 |
| 第4章 | 颗粒与流体之间的相对流动 | 李雁 | 华南农业大学 |
| 第5章 | 液体搅拌与气液混合 | 张佰清 | 沈阳农业大学 |
| 第6章 | 粉碎与筛分 | 李喜载 | 福建农林科技大学 |
| 第7章 | 吸收与蒸馏 | 黄阿根 | 扬州大学 |
| 第8章 | 液体吸附与离子交换 | 蒋玉梅 | 甘肃农业大学 |
| 第9章 | 浸出和萃取 | 周颖越 | 上海水产大学 |
| 第10章 | 膜分离 | 伍军 | 北京农学院 |
| 第11章 | 溶液浓缩 | 胡萍 | 天津商学院 |
| 第12章 | 食品干燥原理 | 张青 | 上海交通大学 |

在编写过程中，我们侧重论述食品工程中的基础理论和基本原理，尽可能编入近年来在食品工程中应用的新技术。希望学生通过大量的例题、思考题和习题等内容的学习，能加深对教材内容的理解和便于课后自学。

由于本教材涉及的领域很广，编者水平有限，书中难免有许多不足之处，望读者提出宝贵意见，以便再版时补充修正。

编者
2002年4月

1 本课程的目的和特点

食品工程原理是一门以力学、动力学、热力学、传热学和传质学为理论基础的学科基础课程,该课程主要回答食品原料在加工过程中,进出各加工单元的相互关系,如质量平衡关系和能量平衡关系,以及影响它们相互关系的因素。它是食品机械设计制造、选型配套以及维修操作的基础,也是保证食品工艺准确实施的必备知识,是食品科学与工程专业的骨干课程之一。

食品工程原理在国外的名称并不统一,根据所论述的内容可知,下列教材或参考书均属于食品工程原理内容,如 *Unit Operations in Food Processing*, *Food Process Engineering*, *Food Engineering Operations*, *Elements of Food Engineering*, *Principles of Food Engineering* 等。

食品工程是在化学工程基础上发展起来的一个新领域,因此,两者有相同的理论基础和相似的单元操作,如搅拌、过滤、蒸发、吸收、精馏、萃取、干燥等主要单元操作完全一致。但由于食品原料和化学原料不同,有些单元操作在食品工程中应用较少,而有些单元操作在化学工程中很少或没有。如制冷低温原理、真空技术原理、均质乳化、粉碎筛分等在食品加工中应用较多。因此,在教学中如开设的是化学工程原理,应该根据实际情况作适当的增补和调整。

从以往教学中体会到,学生感到此门课程较难。主要原因是涉及的领域太宽,而且章与章之间内容的系统连贯性较小,在单元操作上几乎各成体系,在基础理论上又是多学科的综合,如蒸发单元,既有热力学

问题,又有传热学和流体力学等问题。学生通过一门课程很难掌握这么多内容,尤其是农业院校食品专业的学生,在教学计划中工程课程相对薄弱,学好这门课程更困难一些。在此编者建议:①加强本教材基础理论方面的内容,使学生能够掌握流体力学、传热学、热力学、传质学等基础理论,为学好各单元操作原理和自学相关内容奠定基础;②尽量采用多媒体或结合生产实况讲解单元操作原理;③各院校根据实际情况,可侧重某些单元,其余单元可留给学生自学。

2 本课程的主要框架

根据教材内容,本课程可以概况为3个部分。

第一部分:基础理论,主要包括流体力学、传热学、热力学和传质学;

第二部分:混合操作,主要包括搅拌、均质、乳化;

第三部分:分离操作,主要包括沉降、过滤、压榨、粉碎与筛分、蒸发、结晶、蒸馏、吸收、吸附、萃取、浸出、膜分离、干燥等。

3 本课程各单元操作间的关系

如前所述,本课程内容虽然面广、零散,但它们之间并不是没有联系。其中,联系的纽带之一是产品的工艺要求。不同的产品和不同的工艺要求将涉及不同的单元操作。例如,果蔬饮料产品,从原料到销售将经过原料的清洗、挑选→榨汁和浸提→澄清和过滤→均质和脱气→浓缩→杀菌和灌装等。这里每一道加工环节几乎都是食品工程原理中的一个单元操作,由这些单元操作组成了饮料工业生产流水线。环节与环节之间用泵输送着清洗和杀菌所用的水或蒸气或成品或半成品饮料,这是食品工程原理中的流体力学问题;浓缩、杀菌主要是传热学问题;均质是以流体力学为基础的混合问题;澄清和过滤是颗粒与流体相对运动问题。原料和加工介质进出每一环节的动力学问题、传热传质学问题和热力学等问题都关系到下一环节的状态,毫无疑问,也关系到产品质量和成本。因此,本课程单元操作虽是相对独立的,但应该作为一个整体学习和研究。

4 食品工程发展现状与趋势

食品工程是在机械工程、动力工程和化学工程基础上发展起来的新兴学科。将先进的工业技术应用于食品加工工业,使食品工业从以手工操作为主发展到以机械操作为主,各道工艺从零散发展到连续化、自动或半自动化。随着生物技术与电子信息技术的发展,一些生物技术和光电技术在食品工程中的原理将不断出现,如目前的酶萃取、电渗析等分离提纯技术,食品感官质量计算机图像识别技

术等。以往由于技术经济水平限制，有些技术在食品工程中还没有得到较大的应用，如超临界萃取技术；超低温冷冻技术；超微粉碎技术等，但随着高新技术的不断成熟，今后这些技术的原理将不断更新和补充本教材内容。

编 者
2002 年 4 月

主 编	李云飞	上海交通大学
	葛克山	中国农业大学
副主编	张 青	上海交通大学
	伍 军	北京农学院
	黄阿根	扬州大学
编 者	(按拼音顺序排列)	
	胡 萍	天津商学院
	蒋玉梅	甘肃农业大学
	李喜载	福建农林科技大学
	李 雁	华南农业大学
	宋立华	上海交通大学
	张佰清	沈阳农业大学
	周颖越	上海水产大学
主 审	徐文达	

绪论	I
第1章 流体力学基础.....	1
1 基础知识与概念	2
1.1 单位制.....	2
1.2 量纲分析.....	3
1.3 流体的压缩性与膨胀性.....	7
2 牛顿流体及其粘度	9
2.1 牛顿内摩擦定律.....	9
2.2 流体粘度的定义及单位	10
2.3 理想流体	11
3 流体流动能量平衡.....	11
3.1 稳定流动热力体系的概念	11
3.2 稳定流动体系的能量平衡	11
3.3 不可压缩理想流体的稳定流动与柏努利 (Bernoulli) 方程	15
3.4 不可压缩实际流体的稳定流动	16
4 管中流动.....	17
4.1 管中稳定流动连续性方程	17
4.2 雷诺实验与雷诺数	18
4.3 水力直径	19
4.4 圆管中的层流	20

4.5	圆管中的紊流	24
4.6	管路中的沿程阻力	27
4.7	管路中的局部阻力	32
5	管路计算与流量测量	35
5.1	管路计算	35
5.2	流量测量	43
6	液体输送设备	48
6.1	泵的类型	48
6.2	叶片泵的主要性能和特性	50
6.3	泵的安装高度	54
6.4	管路特性	57
6.5	泵的工作点	57
7	非牛顿流体	59
7.1	塑性流体	60
7.2	假塑性流体	61
7.3	胀塑性流体	61
7.4	时变性流体	62
8	气体输送原理与设备	64
8.1	离心式通风机和鼓风机	64
8.2	往复式压缩机	68
8.3	真空泵	74
	习题	78
	思考题	80
	本章重点符号说明	80
	参考文献	81
第 2 章	传热	82
1	传热的基本概念	83
1.1	传热的基本方式	83
1.2	温度场与温度梯度	84
1.3	传热速率与热通量	85
1.4	载热体	86
1.5	换热器	87

2	热传导	88
2.1	傅立叶导热定律与热导率	88
2.2	通过单层壁的稳定热传导	90
2.3	通过多层壁的稳定热传导	92
3	对流传热	95
3.1	牛顿冷却定律与对流传热系数	95
3.2	对流传热系数关联式的建立方法	96
3.3	流体在管内作强制对流	98
3.4	流体外绕壁面强制对流	101
3.5	流体在搅拌槽内强制对流	104
3.6	非牛顿型流体的传热	105
3.7	大空间自然对流传热	107
3.8	蒸汽冷凝放热	108
3.9	沸腾传热	112
4	辐射传热	114
4.1	基本概念	114
4.2	物体的辐射能力	115
4.3	两固体表面间的辐射传热	117
4.4	对流与辐射的综合传热	121
5	稳定传热过程计算	123
5.1	热量衡算	123
5.2	总传热速率方程	124
5.3	总传热系数	126
5.4	传热的平均温度差	130
5.5	传热面积的计算	136
5.6	传热过程的强化	137
6	不稳定传热	141
6.1	流体的间歇式换热	141
6.2	导热微分方程	144
6.3	集总参数分析法	146
6.4	不稳定导热的图解法	147
7	换热器	156
7.1	间壁式换热器的类型	157

7.2 列管式换热器的设计和选用	167
习题	178
思考题	184
本章重点符号说明	184
参考文献	187
第3章 食品冷冻技术	188
1 制冷技术基本原理	189
1.1 制冷技术在食品工业中的应用	189
1.2 制冷基本概念、原理与方法	190
2 制冷剂和载冷剂	208
2.1 对制冷剂的要求和选用制冷剂的原则	208
2.2 常用的制冷剂	210
2.3 制冷剂的发展趋势	212
2.4 载冷剂	213
3 食品的冻结	214
3.1 水的冻结曲线	214
3.2 食品的冻结曲线	215
3.3 水分结冰率与最大冰晶生成区	216
3.4 冻结对食品的影响	217
3.5 食品冻结的速度与时间	220
4 食品速冻方法和速冻装置	227
4.1 空气冻结法	228
4.2 间接接触冻结法	232
4.3 直接接触冻结法	236
5 冷藏库	238
5.1 冷藏库的类型	239
5.2 冷藏库的组成与布置	240
5.3 冷藏库的隔热与防潮	242
5.4 冷藏库容量的计算	243
5.5 冷藏库冷负荷的计算	245
5.6 装配式冷藏库	248
6 食品冷藏链	250
6.1 食品冷藏链的组成与结构	250

6.2 冷藏运输	251
6.3 冷冻销售	259
习题	262
思考题	262
本章重点符号说明	263
参考文献	266
第4章 颗粒与流体之间的相对流动	267
1 流体绕过颗粒及颗粒床层的流动	268
1.1 颗粒床层的特性	268
1.2 流体绕球形颗粒的流动	275
1.3 流体通过颗粒床层的流动	278
2 颗粒在流体中的流动	281
2.1 固体颗粒沉降过程的作用力	282
2.2 固体颗粒的沉降形态	283
2.3 固体颗粒的沉降速度	284
3 固体流态化与气力输送	289
3.1 固体流态化	290
3.2 气力输送	308
4 非均相混合物的分离	313
4.1 沉降	314
4.2 过滤	334
习题	357
思考题	360
本章重点符号说明	362
参考文献	366
第5章 液体搅拌与气液混合	367
1 液体搅拌混合的基本理论	368
1.1 混合物的混合程度	369
1.2 过程对混合程度的要求	372
1.3 搅拌釜内液体的流动	373
1.4 混合的原理	375
1.5 混合物的稳定性	375
1.6 混合速率	376