

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·

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)

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。

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 and 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

2	搅拌器的性能	377
2.1	搅拌器的分类	377
2.2	搅拌设备的其他结构问题	379
2.3	常用的机械搅拌装置	380
2.4	搅拌器的液体循环量与压头	380
2.5	搅拌器的选型	381
2.6	搅拌器的放大	383
3	搅拌器的功率	386
3.1	搅拌时机械能的输入	386
3.2	功率关联式	387
3.3	功率曲线	389
3.4	非牛顿液体的搅拌功率	391
4	乳化	393
4.1	乳化机理	393
4.2	乳化液的稳定性及影响其稳定性的主要因素	394
4.3	乳化剂及其作用	395
4.4	乳化液形成的方法	395
4.5	乳化设备简介	396
5	气液混合原理	399
5.1	气液混合搅拌器的通气速度和搅拌器转速	399
5.2	容器通气搅拌功率的计算	400
6	气液混合方法和设备	402
6.1	碳酸化方法和设备	402
6.2	气液混合搅拌器	404
	习题	407
	思考题	407
	本章重点符号说明	408
	参考文献	409
第6章	粉碎与筛分	410
1	粉碎理论	411
1.1	有关粉碎的基本概念	411
1.2	粉碎理论	413
2	粒度分布与测定	420

2.1	颗粒群的粒度分布	420
2.2	粒度测定方法	422
3	粉碎方法	424
3.1	高速机械冲击微粉碎	425
3.2	研磨介质粉碎	429
3.3	超微气流粉碎	442
3.4	辊压式微粉碎或超微粉碎	448
3.5	盘式粉碎	453
3.6	超细粉末制备技术研究方向	454
4	筛分与筛析的基本概念	457
4.1	筛分与筛析	457
4.2	标准筛	457
4.3	筛分机理	458
4.4	筛分方法	461
	习题	463
	思考题	463
	本章重点符号说明	464
	参考文献	464
第7章	吸收与蒸馏	466
1	传质学基础	467
1.1	混合物组成的表示方法	467
1.2	扩散现象与分子扩散速率计算	469
1.3	对流传质与相间传质	476
1.4	传质设备简介	481
2	吸收与解吸	482
2.1	概述	482
2.2	气液相平衡	484
2.3	总传质速率方程	491
3	吸收塔的计算	497
3.1	物料衡算与操作线方程	498
3.2	吸收剂的用量与最小液气比	500
3.3	塔径的确定	502
3.4	填料层高度的计算	502

3.5 吸收塔的操作型计算	510
4 蒸馏	512
4.1 双组分溶液的汽液相平衡	513
4.2 蒸馏与精馏原理	519
5 双组分连续精馏塔的计算	526
5.1 理论板的概念及恒摩尔流假定	527
5.2 物料衡算与热量衡算	528
5.3 操作线方程	531
5.4 理论板的确定与实际板的讨论	536
5.5 回流比的影响与选择	540
5.6 双组分精馏的操作计算	545
5.7 精馏装置的热量衡算	549
5.8 其他有关实例的讨论	550
6 其他蒸馏简介	553
6.1 恒沸精馏与萃取精馏	553
6.2 分子蒸馏	555
习题	559
思考题	565
本章重点符号说明	566
参考文献	569
第 8 章 液体吸附与离子交换	570
1 液体吸附	571
1.1 吸附作用和吸附剂	571
1.2 吸附理论	574
1.3 吸附操作	578
1.4 吸附计算	580
2 离子交换	587
2.1 离子交换概念和离子交换树脂	587
2.2 离子交换机理	592
2.3 离子交换速率	597
2.4 离子交换操作及设备	599
2.5 离子交换操作计算	605
习题	610

思考题	612
本章重点符号说明	612
参考文献	613
第 9 章 浸出和萃取	614
1 浸出	615
1.1 浸出理论	616
1.2 浸出速率与溶剂的条件	619
1.3 浸出操作的流程	622
1.4 浸出操作计算	623
1.5 浸出装置	631
2 萃取	635
2.1 液-液相平衡关系	636
2.2 萃取过程的计算	641
2.3 萃取操作的设备	647
3 超临界流体萃取	649
3.1 超临界流体萃取的原理和特性	649
3.2 超临界流体萃取的流程和应用	652
3.3 超临界流体萃取技术的应用前景	655
习题	656
思考题	659
本章重点符号说明	659
参考文献	660
第 10 章 膜分离	662
1 概述	663
1.1 膜分离技术发展的历史	663
1.2 膜分离过程	663
1.3 膜的分类及性质	666
1.4 膜性能	667
2 反渗透	668
2.1 反渗透的基本原理	668
2.2 反渗透膜传递机理	670
2.3 反渗透的浓差极化现象	674
2.4 反渗透的渗透通量	675

3	超滤	675
3.1	超滤原理	676
3.2	超滤过程的传质模型	676
3.3	超滤的浓差极化现象	678
3.4	影响超滤渗透通量的因素	680
3.5	渗透通量的衰减及解决方法	681
3.6	反渗透和超滤的流程及装置	683
4	电渗析	692
4.1	基本原理	692
4.2	电渗析中的传递过程与伴随过程	693
4.3	离子交换膜的选择透过性	694
4.4	电渗析中的电化学过程	695
4.5	浓差极化	697
4.6	电渗析装置	699
4.7	电渗析的计算	701
4.8	电渗析在食品工业的应用	703
5	液膜分离技术	704
5.1	液膜的分类	704
5.2	液膜的组成	705
5.3	液膜分离机理	706
5.4	液膜分离技术的特点	708
5.5	液膜分离操作过程	708
	习题	709
	思考题	709
	本章重点符号说明	709
	参考文献	711
第 11 章	溶液浓缩	712
1	蒸发	713
1.1	蒸发操作及其特点	713
1.2	单效蒸发	715
1.3	多效蒸发	726
1.4	多效蒸发与单效蒸发的比较	735
1.5	蒸发设备	737

2	结晶	744
2.1	结晶原理	745
2.2	结晶方法与设备	754
2.3	结晶操作的基本计算	760
3	冷冻浓缩	766
3.1	冷冻浓缩操作原理	766
3.2	冷冻浓缩装置	771
	习题	777
	思考题	779
	本章重点符号说明	779
	参考文献	781
第 12 章	食品干燥原理	782
1	湿空气的热力学性质	784
1.1	绝对湿度和相对湿度	784
1.2	湿含量 d	785
1.3	湿空气的比热容和比体积	785
1.4	湿空气的热含量	786
1.5	干球温度和湿球温度	786
1.6	露点温度	788
2	湿空气的焓湿图及使用方法	788
2.1	湿空气的焓湿图 ($h-d$ 图)	788
2.2	焓湿图的使用方法	792
3	湿物料的基本性质	793
3.1	湿物料的形态和物理性质	793
3.2	湿物料中水分存在形式和表示法	794
3.3	湿物料中水分的活度	795
4	湿物料常压热风干燥过程	797
4.1	热风干燥过程计算	798
4.2	干燥器的热效率、干燥效率和蒸发效率	799
4.3	应用举例	800
5	对流干燥理论	803
5.1	物料干燥机理	803
5.2	干燥速率和干燥特性曲线	804

5.3	等速干燥	806
5.4	降速干燥	807
5.5	由模型拟合确定干燥时间	812
6	食品冷冻干燥	813
6.1	冷冻干燥原理	813
6.2	冷冻干燥中的传热与传质	814
7	干燥设备	821
7.1	喷雾干燥	821
7.2	冷冻干燥设备	827
	习题	835
	思考题	837
	本章重点符号说明	837
	参考文献	838
附录一	常用材料物理性质	839
附录二	常用产品规格与性能	851

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