



面向 21 世纪 课程 教材
Textbook Series for 21st Century

食品工程原理

杨同舟 主编

食品科学与工程专业用

中国农业出版社

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

食品工程原理

杨同舟 主编

食品科学与工程专业用

中国农业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

食品工程原理/杨同舟主编 .—北京: 中国农业出版社, 2001.7

面向 21 世纪课程教材

ISBN 7-109-06976-1

I. 食... II. 杨... 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 (2001) 第 036741 号

中国农业出版社出版
(北京市朝阳区农展馆北路 2 号)
(邮政编码 100026)

出版人: 沈镇昭
责任编辑 何致莹

中国农业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行
2001 年 9 月第 1 版 2001 年 9 月北京第 1 次印刷

开本: 850mm × 1168mm 1/16 印张: 28.5

字数: 687 千字

定价: 44.60 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

前 言

《食品工程原理》一书是经教育部高教司批准的全国高等教育“面向 21 世纪课程教材”，是食品科学与工程本科专业的主干课程教材。在低年级学过高等数学、物理学、物理化学、工程制图和机械设计基础等基础课之后，通过本课程系统学习食品加工过程的工程概念和各种单元操作原理，为高年级学习食品机械设备、食品厂设计及各种食品工艺学等课程奠定理论基础。在本专业所有专业基础课和专业课中，食品工程原理是学时最多，而且在教和学两方面都有较大难度的课程，因此，教材问题显得格外重要，急需一部适用教材问世。

十几年前国内出现首本《食品工程原理》教材，对各院校食品相关专业的教学改革起过良好的推动作用。但可能是篇幅的原因，一些院校还是选择非化工专业用的《化工原理》作为食品工程原理课的代用教材。然而化工所侧重的单元操作显然与食品工业不同，因此，许多院校尤其是在食品科技和工程人才的培养方面已占较大比重的全国各农业院校，殷切期望一部适用的有关食品工程原理的教材出版。有鉴于此，中华农业科教基金会把新编《食品工程原理》作为首批高校教材建设项目予以基金资助，经招标确定由我们承担这项编写任务。

我们尽力将此书编出自己的特色。首先是精于选材。为适应大多数院校为本课程规定的 80~100 学时的教学要求，在有限的篇幅内提供足够的教学信息量并具有一定深度，叙述简明，深入浅出。多着墨于基本概念和基本原理，少描微枝末节。具有食品

工程的应用特点，强调制冷、真空技术、物料干燥及均相和非均相物系的分离。新编入了食品冷冻和超临界流体萃取等内容。其次，注意将动量传递、热量传递和质量传递三大传递过程原理与各单元操作相结合，强化了对传质部分的系统描述。再次，编写中重视量和单位的名称、符号的规范化，符合国家法定计量单位的要求。

本书初稿参编人员编写分工为：张家年教授（第一、二、八章），李元瑞教授（第五、六、七章），范贵生副教授（第三、四章），杨同舟教授（引论，第九、十、十一、十二章及附录）。全书由杨同舟教授统稿。本书主审为哈尔滨工业大学蔡伟民教授。书中部分插图的绘制和改绘由刘毅副教授及刘海波完成，谨向他们表示感谢。

尽管在统稿时下了较大功夫，但限于水平，缺点错误在所难免，诚恳欢迎广大读者批评指正。

编 者

2001年3月

目 录

引 论

0-1 食品工程原理的研究内容.....	1
0-2 物料衡算和能量衡算.....	3
习题.....	7

第一章 流体流动

第一节 流体静力学原理.....	8
1-1 流体密度和压力.....	8
1-2 流体静力学基本方程式.....	10
第二节 管内流体流动的基本规律.....	14
1-3 管内流动的连续性方程.....	15
1-4 柏努利方程.....	17
第三节 流体流动现象.....	20
1-5 流体的黏度.....	20
1-6 流体流动型态.....	23
1-7 流体在圆管内的速度分布.....	26
第四节 流体流动的阻力.....	29
1-8 管内流体流动的直管阻力.....	29
1-9 管内流体流动的局部阻力.....	35
第五节 管路计算.....	38
1-10 简单管路.....	38
1-11 复杂管路.....	40
第六节 流量测定.....	42

1-12 测速管和流量计	42
习题	46
第二章 流体输送	
第一节 离心泵	48
2-1 离心泵的结构原理	48
2-2 离心泵的性能	50
2-3 离心泵的安装高度和工作点	53
2-4 离心泵的类型和选用	57
第二节 其他类型的泵	59
2-5 往复泵	59
2-6 旋转泵	62
第三节 风机	63
2-7 通风机和鼓风机	63
第四节 气体压缩	65
2-8 往复压缩机的工作原理	66
2-9 往复压缩机的性能和分类	69
第五节 真空技术	71
2-10 真空技术的物理基础	71
2-11 真空泵	75
习题	78
第三章 粉碎与混合	
第一节 粉碎	80
3-1 粉碎的基本概念和原理	80
3-2 粉碎设备	83
第二节 筛分	88
3-3 筛分和筛析	88
3-4 筛分设备	92
第三节 混合	95
3-5 混合的基本理论	95
3-6 液体的搅拌混合	98
3-7 乳化	102
3-8 浆体的混合及塑性固体的捏和	106
3-9 固体的混合	107
习题	109

第四章 沉降与过滤

第一节 重力沉降	110
4-1 颗粒在流体中的运动	111
4-2 悬浮液的重力沉降	116
4-3 气溶胶的重力沉降	119
第二节 过滤	121
4-4 过滤的基本概念	121
4-5 过滤的基本理论	123
4-6 过滤设备	127
第三节 离心分离	133
4-7 离心分离原理	133
4-8 过滤式离心机	137
4-9 沉降式离心机	140
4-10 分离式离心机	142
4-11 旋风分离器	144
习题	147

第五章 传热

第一节 概述	149
5-1 传热的基本概念	149
第二节 热传导	151
5-2 傅立叶定律	152
5-3 通过平壁的稳态导热	153
5-4 通过圆筒壁的稳态导热	155
第三节 对流传热	157
5-5 对流传热的基本原理	157
5-6 无相变的对流传热	160
5-7 有相变的对流传热	165
5-8 流化床中的传热	166
第四节 热交换	170
5-9 换热器	170
5-10 稳态换热计算	176
5-11 非稳态换热	181
第五节 辐射传热	186
5-12 辐射的基本概念和定律	186

5-13 两固体间的辐射换热	189
5-14 微波加热	192
习题	195
第六章 蒸发	
第一节 蒸发概述	198
6-1 食品物料的蒸发	198
6-2 蒸发的操作方法	199
第二节 蒸发器	202
6-3 蒸发器	202
6-4 蒸发的辅助设备	206
第三节 单效蒸发	209
6-5 蒸发器的换热温差	209
6-6 单效蒸发的计算	211
第四节 多效蒸发	214
6-7 多效蒸发流程和温差分配	214
6-8 多效蒸发的计算	216
习题	219
第七章 制冷	
第一节 制冷技术的理论基础	221
7-1 制冷的基本概念	221
7-2 一般制冷方法	225
第二节 蒸汽压缩式制冷	227
7-3 蒸汽压缩式制冷循环	227
7-4 蒸汽压缩式制冷的计算	230
7-5 蒸汽压缩式制冷设备和系统	232
第三节 食品冷冻	237
7-6 食品冷冻的理论基础	237
7-7 食品冷冻设备	240
第四节 湿空气热力学	242
7-8 湿空气的性质	243
7-9 湿空气的基本热力学过程	248
第五节 空气调节	251
7-10 直流式空气调节	251
7-11 回风式空气调节	253

习题	255
第八章 干燥	
第一节 干燥的基本原理	257
8-1 干燥的目的和方法	257
8-2 湿物料中的水分	259
8-3 干燥静力学	263
8-4 干燥动力学	269
第二节 干燥设备	274
8-5 对流干燥设备	274
8-6 其他干燥设备	277
第三节 喷雾干燥	279
8-7 喷雾干燥原理及应用	279
8-8 喷雾干燥设备	282
第四节 冷冻干燥	286
8-9 冷冻干燥原理	286
8-10 冷冻干燥装置	289
习题	291
第九章 传质	
第一节 质量传递原理	294
9-1 传质概述	294
9-2 分子扩散	296
9-3 对流传质	299
9-4 相间传质	304
第二节 吸收	308
9-5 吸收平衡和吸收速率	308
9-6 吸收塔的计算	311
9-7 填料塔的结构和性能	316
第三节 吸附	322
9-8 吸附的基本原理	322
9-9 吸附分离过程与设备	325
第四节 离子交换	333
9-10 离子交换的基本原理	333
9-11 离子交换过程与设备	339
习题	344

第十章 蒸馏

第一节 蒸馏的基本原理	347
10-1 双组分体系汽液相平衡	347
10-2 蒸馏方法	350
第二节 双组分精馏的计算	354
10-3 精馏塔的物料衡算	354
10-4 进料状态对精馏的影响	357
10-5 平衡级数的确定	360
10-6 回流比的影响和选择	361
第三节 精馏装置及节能	364
10-7 板式塔的结构和性能	364
10-8 精馏装置的节能	370
习题	372

第十一章 萃取

第一节 液—液萃取	375
11-1 液—液萃取的基本原理	375
11-2 液—液萃取过程	379
第二节 浸取	385
11-3 浸取的基本原理	385
11-4 浸取流程和设备	388
11-5 多级逆流浸取级数的计算	391
第三节 超临界流体萃取	396
11-6 超临界流体萃取的基本原理	396
11-7 超临界流体萃取在食品工业中的应用	400
习题	404

第十二章 膜分离

第一节 膜及膜分离器	406
12-1 分离膜	406
12-2 膜分离器	409
第二节 反渗透和超滤	412
12-3 反渗透的基本原理	412
12-4 反渗透的实际过程	416
12-5 超滤和微孔过滤	419

目 录

12-6 超滤和反渗透在食品工业中的应用.....	421
第三节 电渗析	425
12-7 电渗析的基本原理和概念	425
12-8 电渗析装置系统	429
习题	431
附 录	433
主要参考文献	442

0-1 食品工程原理的研究内容

食品工程原理课程讲授食品加工过程的各种工程概念和单元操作。什么是单元操作？

0.1A 单元操作

各种现代食品的工业生产，都有其独特的加工工艺。每种工艺都是由一系列基本步骤构成的。例如，由甜菜制糖要经过三十多个步骤。其中主要步骤为：甜菜经过清洗，用切丝机切丝。以一定温度的水进行浸取，使糖溶解。再经一系列步骤将杂质分离出去。糖溶液打入蒸发罐蒸发浓缩，再入结晶罐结晶。将晶糊用离心机分离出糖结晶，经干燥即可得糖制品包装入库。其中浸取、蒸发浓缩、结晶、离心分离、干燥等都是主要的基本操作步骤。再如由大豆以萃取法制油，先经过大豆筛选、粉碎、去皮、压片，然后以正己烷浸取，浸取液经过滤、蒸发脱溶剂、离心脱膜等步骤，得豆油产品。可见，虽然甜菜制糖和大豆制油的生产工艺是不同的，但是，两者的有些操作步骤是类似的。例如，以水浸甜菜丝和以正己烷浸豆片，都是用溶剂把固体中的一些成分萃取出来，二者遵循相同的传质规律。我们将这种基本生产步骤称作浸取。浸取就是一些食品加工工艺共有的一种基本步骤，称作一种单元操作（unit operation）。再如，制糖中结晶前的糖液浓缩和制油中油浸取液脱除正己烷，都采用蒸发单元操作，通过间壁加热使溶液中易挥发的溶剂汽化分出，二者遵循相同的传热规律。

同一种单元操作，具有共同的理论基础，它遵循相同的平衡和动力学等规律，产生一些典型设备予以实现，有相同的工程计算方法。食品工程原理课讨论近二十种单元操作。将这些单元操作的基本原理、典型设备和工程计算方法搞清，对数以千计的具体食品加工工艺就不难掌握。有人把单元操作比喻成语言中的字母，二十几个字母可组合成各种词汇和优美的文句。掌握了单元操作，各种食品生产过程不过是单元操作的连接和组合，只是不同食品工艺，这些单元操作的具体条件有异而已，单元操作的规律性是共同的。对这些单元操作本身进行深入的理论探讨，透彻了解其一般性和本质性规律，对了解和设计各种食品加工工艺是很有意义的。例如，分析由牛奶制造奶粉的工艺流程，可知它主要由流体输送—离心沉降（净乳）—混合（成分标准化）—热交

换(杀菌等)—蒸发(浓缩)—喷雾干燥等单元操作构成。其中的蒸发操作,在操作温度、压力等条件上可能与制糖、制油等工艺中的蒸发不同,但其操作原理和规律性却是共通的。

食品工程原理研究食品工程中应用的各单元操作的基本原理和方法、典型设备和相关计算,构成食品工程学的理论基础。

0.1B 三大传递过程

食品工程原理是以三大传递过程原理作为理论基础的,三大传递过程为:动量传递、热量传递、质量传递。

1. 动量传递 (momentum transfer) 食品工程中常见到运动的流体发生的动量由一处向另一处传递的过程,这就是工程流体力学研究的内容。影响流体流动最重要的一种流体性质是它的黏度。从微观角度看,流体分子由于热运动不断进行动量传递和交换,是产生黏度的主要原因。主要以流体动量传递原理作理论基础的单元操作有:流体输送,混合,沉降,过滤,离心分离,气力输送等。

2. 热量传递 (heat transfer) 因温度差的存在而使能量由一处传到另一处的过程即为热量传递。包含热量传递原理的单元操作主要有:热交换(加热或冷却),蒸发,物料干燥,蒸馏等。

3. 质量传递 (mass transfer) 因浓度差而产生的扩散作用形成相内和相间的物质传递过程,称为质量传递。主要遵循质量传递原理的单元操作有:吸附,吸收,浸取,液—液萃取,蒸馏,结晶,膜分离等。

一种单元操作往往涉及不止一种传递过程,例如蒸馏操作既涉及质量传递,也离不开热量传递。

本书依次介绍流体流动、传热和传质等三大传递的基本原理,在此基础上讨论相关的单元操作。从理论上分析和阐明各种单元操作原理,首先必须学好三大传递的知识。在以后的学习中会发现,三种传递过程尽管不同,但有许多概念和规律却有相似之处。

现代食品工业常常涉及复杂的分离过程,以制造高价值的食品配料,去除天然食品原料中无益或有害的成分,或者回收食品加工副产物中有用的成分。前面列出的各单元操作,大部分是物质分离过程。因此,要掌握现代食品工程技术,必须学好作为各种单元操作理论基础的三大传递过程原理。

0.1C 食品工程原理与化工原理的密切关系

在历史上,食品加工的出现远远早于化学加工。但许多世纪以来,食品加工长期停留在家庭烹调 and 手工作坊操作水平上,靠代代相传的加工经验和传统方法为其生产方式的基础,迟迟没有形成食品科学或食品工程学科。

化学工业的产生是近代的事情。化学工业虽然产生较晚,但因为其起点的科学知识水平较高,因而发展较快。尤其在20世纪20年代,由于汽车工业和航空工业等对优质燃料和材料的迫切需求,促使石油化学工业突飞猛进发展。生产的飞速发展迫切要求对生产过程规律性的研究和理论上的总结提高,使化学工程学科得到飞快发展。人们从长期化工实践中,把不同化学生产工艺过程所共有的基本操作步骤抽提出来,研究其各自的内在规律性,在理论上加以总结,再到生产实践中应用和验证,不断提高,就产生了单元操作的概念。

单元操作概念的抽提是了不起的事情。这些概念不仅使人们认识了这些操作的共性,统一了

原来认为各不相干的化工生产技术，而且随着对每种单元操作内在规律和基本原理系统而深入的研究，更强有力地促进化工生产技术的发展。所有这些单元操作研究成果的综合，就构成了化学工程的基础学科——化学工程原理。

食品工业在第二次世界大战期间及战后得到飞速发展。人们发现食品工业中许多基本操作步骤在原理上与化工是相似的，将化工原理中的现成的单元操作研究成果应用于食品工程，就产生了食品工程的基础理论——食品工程原理。可见，食工原理的基本内容来源于化工原理，二者对单元操作的研究是相通的。各种化工原理的书籍自然就是本课程的参考书。

然而，由于食品加工物料的特殊性，使食工原理不是仅仅重复化工原理的东西，它在发展中形成了自己的许多特色。

首先，食品物料都是热敏性的。食品加工的原料都是动植物生产产品。其主要成分中，蛋白质遇热容易变性，其中的各种酶遇热会失去活性；脂肪成分在较高温度易氧化变质。食品中风味性的芳香成分遇热易挥发损失。为避免热敏性成分被破坏，食品加工就不得不采用较低温度。在许多情况下，低温与低压是密切相关的。所以在食品工程中，非常注重真空技术的应用。对真空蒸发、真空过滤、真空干燥、真空蒸馏、冷冻升华干燥等的理论研究和技术应用更为重视。

其次，食品原料与制品具有易腐性。食品原料和制品含有各种人类需要的营养成分，因而也是微生物活动繁衍的好场所。正是在这些微生物及其所含的酶的作用下，食品才发生腐败变质的。食品加工的主要目的之一就是抑制微生物的活动和酶的作用而提高食品的保藏性。因此在食品加工工程中，浓缩、干燥和冷冻等操作地位特别重要。在食品加工中，不断开发出新的浓缩、干燥和冷冻技术，这三种单元操作的研究应用在食品工业中已比在化学工业中发展迅速。

再次，食品加工的原料几乎都是凝聚态的。而化工生产许多是以甲烷、乙烷、乙烯、乙炔等气体为原料的。这就使二者对各种单元操作有不同的侧重。在化学工业中，吸收、蒸馏操作占有突出地位。而在食品工业中，浸取、过滤、离心分离以及混合、乳化、粉碎等单元操作就格外受到重视。新的提取和分离技术，如膜分离、凝胶过滤、酶萃取等在食品研究和应用领域发展很快。

由上可见，食品工程原理在创立过程中，从化工原理引进和借鉴了许多概念和观念，得益多多。在以后的发展中，由于学科的综合、分化和相互渗透，更由于食品工业已发展成为许多国家的支柱产业，生产实践为学科提供了丰硕素材，使食品工程原理现在成为内容丰富、独具特色的学科，成为40年前开始形成的食品科学学科体系的重要组成部分。可以说，现在食品工程原理和化工原理是联系密切、各具特色、并行发展的学科。

0-2 物料衡算和能量衡算

食品工程原理中讨论每种单元操作的基本原理时，都包括过程的平衡关系和过程的速率两个方面。

过程的速率正比于过程的推动力，反比于过程的阻力：

$$\text{过程速率} = \frac{\text{过程推动力}}{\text{过程阻力}}$$

在不同的单元操作过程中，推动力和阻力的涵意会不同，在后面的章节中会逐一见到。

在过程的平衡关系研究中，经常需要作物料衡算（material balance）和能量衡算（energy balance）。

0.2A 物料衡算

物理学的基本定律之一是质量守恒定律。它说明质量不能创造，也不会毁灭。因而，对于一个过程，输入的物料总质量必定等于输出物料总质量与累积物料质量之和：

$$\text{输入质量} = \text{输出质量} + \text{累积质量}$$

如果过程中累积质量为零，此过程即为一稳态过程，此时，

$$\text{输入质量} = \text{输出质量}$$

设： $(\sum_{i=1}^m m_i)_1$ 为输入物料量的总和，kg 或 kg/s， $(\sum_{j=1}^n m_j)_2$ 为输出物料量的总和，kg 或 kg/s，则总的物料衡算式为

$$(\sum_{i=1}^m m_i)_1 = (\sum_{j=1}^n m_j)_2 \quad (0-1)$$

如果过程未发生化学变化，则对物料中某成分 A 的物料衡算式为

$$(\sum_{i=1}^m m_i w_{Ai})_1 = (\sum_{j=1}^n m_j w_{Aj})_2 \quad (0-2)$$

式中 w_i ， w_{Aj} ——第 i 种和第 j 种物料中组分 A 的质量分数。

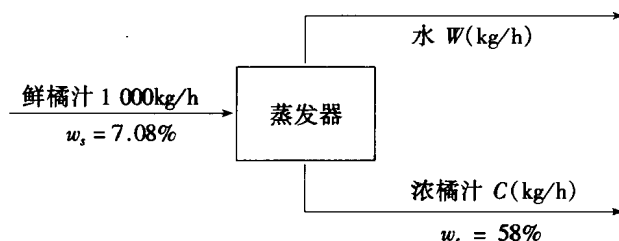
解质量衡算问题，可采取下列步骤：

1. 画出过程框图，用进入箭头表示输入的物料，用引出的箭头表示输出的物料。在每个箭头上标出物料的名称，物料量，成分含量，温度，密度等。所有数据都标在图上。
2. 选择计算基准。大多数情况下，题中给出一种物料的量，它就可作为计算基准。否则，可指定一种物料量为 100kg 作基准。
3. 作物料衡算。进入箭头为输入量，引出箭头为输出量。衡算可以是对总量的，也可是对某种成分的。

例 0-1 橘汁的浓缩

将固形物含量为 7.08% 的鲜橘汁引入真空蒸发器进行浓缩，得固形物含量为 58% 的浓橘汁。若鲜橘汁进料流量为 1 000kg/h，计算生产浓橘汁和蒸出水的量。

解：1. 先按题意画出框图



图中 W ——未知的蒸出水量，kg/h；

C ——未知的浓橘汁量，kg/h。

2. 取鲜橘汁进料 1 000kg/h 作计算基准。

3. 总物料衡算: $1\ 000 = W + C$ (1)

固体物质质量衡算: $1\ 000 \times 7.08\% = W \times 0 + C \times 58\%$ (2)

解 (2) 式, 得 $C = 122\text{kg/h}$ 。

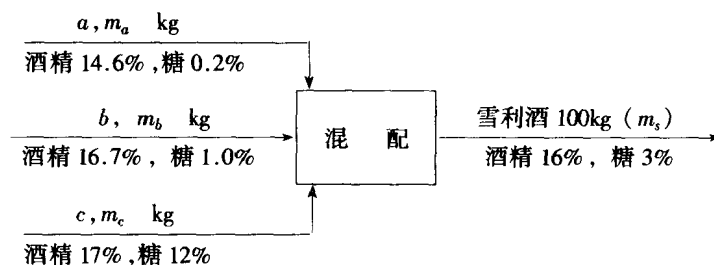
代入 (1) 式, 解得 $W = 878\text{kg/h}$ 。

例 0-2 雪利酒的配制

以下列 a 、 b 、 c 三种原料酒配制含酒精 16.0%、糖 3.0% 的雪利酒 (Sherry)。

	a	b	c
含酒精 (%)	14.6	16.7	17.0
含糖 (%)	0.2	1.0	12.0

解:



以产品雪利酒的量 $m_s = 100\text{kg}$ 作计算基准。

总物料衡算: $m_a + m_b + m_c = m_s = 100\text{kg}$ (1)

对酒精的物料衡算: $0.146m_a + 0.167m_b + 0.170m_c = 0.16 \times 100$ (2)

对糖的物料衡算: $0.002m_a + 0.01m_b + 0.12m_c = 0.03 \times 100$ (3)

将式 (1)、(2)、(3) 联立可解得:

$m_a = 36.8\text{kg}$; $m_b = 42.4\text{kg}$; $m_c = 20.8\text{kg}$ 。

0.2B 能量衡算

物料衡算的依据是质量守恒定律, 与此相似, 能量衡算的依据是能量守恒定律。根据能量守恒定律, 进入过程的能量等于离开的能量和累积能量之和。本节只简单介绍能量衡算的原则, 而各单元操作具体的能量衡算在讲述各单元操作时再具体讨论。

能量可以以各种形式出现。如焓、化学能、电能、动能、势能、功和热等。在食品工程中遇到的许多过程, 往往没有电能、势能、动能和功, 或者它们可忽略不计。这时, 衡算的能量往往只有焓、反应热以及加入或移走的热量, 通常把这时的能量衡算叫作热量衡算。

物料被加热或冷却, 其焓的变化可由下式计算:

$$\Delta H = m \int_{T_1}^{T_2} c_p dT \quad (0-3)$$

式中 m ——物料的质量, kg;

c_p ——物料的等压比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{s})$, 它是温度的函数。如温度变化较小, 可将 c_p 视为常量, 于是有: