

Food

A Series of Food Science
& Technology Textbooks

食品科技
系列

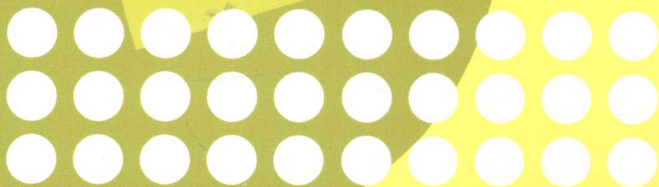
普通高等教育“十二五”规划教材

食品科学与工程 食品质量与安全 专业核心课程推荐教材



食品工程原理

姜绍通 周先汉 主编



化学工业出版社

Food

A Series of Food Science
& Technology Textbooks
食品科技
系列

普通高等教育“十二五”规划教材

食品科学与工程 食品质量与安全 专业核心课程推荐教材

★★★★★

食品工程原理

姜绍通 周先汉 主 编

刘伟民 缪冶炼 副主编



化学工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

食品工程原理/姜绍通, 周先汉主编. —北京: 化学工业出版社, 2010.5

普通高等教育“十二五”规划教材. 食品科学与工程
食品质量与安全 专业核心课程推荐教材

ISBN 978-7-122-08016-5

I. 食… II. ①姜…②周… 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 (2010) 第 048692 号

责任编辑: 赵玉清

文字编辑: 咎景岩

责任校对: 洪雅姝

装帧设计: 尹琳琳

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市前程装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 23½ 字数 631 千字 2010 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888(传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 40.00 元

版权所有 违者必究

目 录

绪论	1	0.2.2 课程学习要求	4
0.1 本课程的内容、性质及任务	1	0.3 物理量的量纲与单位换算	5
0.1.1 单元操作	1	0.3.1 物理量的量纲	5
0.1.2 三种传递过程及其物理量的守恒	2	0.3.2 单位制及物理量的换算	5
0.1.3 本课程与《化工原理》的联系	3	习题	7
0.2 本课程的研究方法	4		
0.2.1 课程的两条主线	4		
第1章 流体流动	8		
1.1 流体静力学	8	1.4.2 局部阻力	31
1.1.1 流体的物理性质	9	1.5 管路计算	35
1.1.2 流体静力学方程及其应用	10	1.5.1 简单管路	35
1.2 流体流动的守恒原理	13	1.5.2 复杂管路	36
1.2.1 流体流动的基本概念	13	1.6 流量测量	38
1.2.2 质量守恒——连续性方程式	14	1.6.1 测速管	38
1.2.3 机械能守恒——柏努利方程式	15	1.6.2 孔板流量计	39
1.2.4 动量守恒	21	1.6.3 转子流量计	41
1.3 流体流动的内部结构	22	1.7 非牛顿流体流动	42
1.3.1 雷诺实验与流体流动类型	22	1.7.1 非牛顿流体的分类	42
1.3.2 直圆管内流体的流速分布	23	1.7.2 非牛顿流体的流动计算	43
1.3.3 流动边界层	24	思考题	44
1.4 流体在管内的流动阻力	26	习题	45
1.4.1 沿程阻力	26	本章符号说明	47
第2章 流体输送	49		
2.1 液体输送机械	49	2.3.1 流体输送主要知识点概要	67
2.1.1 离心泵	49	2.3.2 流体输送设备的种类特点及 选型	67
2.1.2 其它类型泵	60	2.3.3 计算实例	69
2.2 气体输送机械	63	思考题	71
2.2.1 离心式风机	64	习题	71
2.2.2 鼓风机和压缩机	65	本章符号说明	72
2.2.3 真空泵及真空管路	65		
2.3 流体流动与输送综合算例	67		
第3章 非均相物系分离	73		
3.1 颗粒及颗粒群的几何特性	73	3.3.2 过滤基本方程式	81
3.1.1 单颗粒的几何特性	73	3.3.3 过滤过程方程	82
3.1.2 颗粒群的几何特性	75	3.3.4 过滤常数的测定	83
3.2 流体通过固定床层的压降	79	3.3.5 过滤设备	83
3.2.1 颗粒床层的简化物理模型	79	3.3.6 滤饼的洗涤	85
3.2.2 流体通过颗粒床层的数学模型	79	3.3.7 过滤机的生产能力	86
3.3 过滤	80	3.4 颗粒的沉降分离	88
3.3.1 过滤操作的基本概念	80	3.4.1 重力沉降	88

3.4.2 离心沉降	92	(阅读材料)	99
3.5 固体流态化和气力输送简介	96	3.5.5 气力输送简介	101
3.5.1 流态化的基本概念与特征	96	思考题	102
3.5.2 流化床的操作范围	98	习题	102
3.5.3 流化质量及提高措施	99	本章符号说明	104
3.5.4 流化床的改进形式			
第4章 搅拌与混合	106		
4.1 混合的基本理论	106	4.3 均质	113
4.1.1 混合物的混合程度	106	4.3.1 均质机理	114
4.1.2 混合机理	108	4.3.2 均质设备	115
4.1.3 混合速率与混合时间	108	4.3.3 均质效应与均质操作方式	116
4.2 液体搅拌	109	习题	117
4.2.1 搅拌器的分类及选型	109	本章符号说明	118
4.2.2 搅拌器的功率	111		
第5章 传热	119		
5.1 传热的基本概念	119	5.4.2 传热平均温差	138
5.2 热传导	120	5.4.3 总传热系数	142
5.2.1 傅里叶定律和热导率	120	5.4.4 非稳态传热 (阅读材料)	146
5.2.2 平壁的稳态导热	122	5.5 热辐射	150
5.2.3 圆管壁的稳态导热	123	5.5.1 辐射的基本概念和定律	150
5.3 对流传热	126	5.5.2 固体壁面间的辐射传热	153
5.3.1 对流传热过程的数学描述	126	5.6 间壁式换热器	155
5.3.2 影响对流传热系数的因素	127	5.6.1 管式换热器	155
5.3.3 对流传热过程的量纲分析	128	5.6.2 板式换热器	157
5.3.4 无相变流体的对流传热	129	5.6.3 板式换热器	159
5.3.5 有相变的对流传热	133	思考题	161
5.4 传热过程计算	138	习题	161
5.4.1 传热速率方程	138	本章符号说明	163
第6章 蒸发与结晶	164		
6.1 蒸发的基本概念	164	6.3.4 提高生蒸汽经济性的其它措施	175
6.1.1 蒸发过程的基本概念	164	6.4 蒸发设备	175
6.1.2 食品物料蒸发的特点	164	6.4.1 蒸发器	175
6.1.3 温差损失	165	6.4.2 蒸发装置的附属设备和机械	178
6.2 单效蒸发	167	6.5 结晶	179
6.2.1 单效蒸发的计算	167	6.5.1 结晶原理	179
6.2.2 蒸发器的生产强度	169	6.5.2 食品工业常用结晶方法与设备	181
6.3 多效蒸发	169	6.5.3 结晶操作的基本计算	183
6.3.1 多效蒸发的操作流程	170	思考题	184
6.3.2 多效蒸发的计算	171	习题	184
6.3.3 多效蒸发和单效蒸发的比较	174	本章符号说明	184
第7章 吸收	186		
7.1 气液平衡关系	186	7.2 传质基础	190
7.1.1 亨利定律	187	7.2.1 分子扩散	190
7.1.2 吸收剂的选择	190	7.2.2 对流传质	194

7.2.3 传质系数与速率方程	197	7.4.2 吸收剂的用量	203
7.3 传质设备简介	198	7.4.3 填料层高度计算	204
7.3.1 板式塔	198	思考题	210
7.3.2 填料塔	200	习题	211
7.4 吸收塔的计算	201	本章符号说明	212
7.4.1 物料衡算与操作线方程	201		
第8章 蒸馏	214		
8.1 双组分溶液的气液相平衡	214	8.4.2 进料热状态对精馏过程的影响	229
8.1.1 理想物系的气液相平衡	215	8.4.3 回流比的影响及其选择	229
8.1.2 挥发度与相对挥发度	216	8.4.4 实际板数与板效率	232
8.1.3 非理想物系的气液相平衡	218	8.4.5 常规流程理论塔板数的简捷求解	233
8.2 蒸馏与精馏原理	219	8.4.6 非常规流程分析(阅读材料)	234
8.2.1 平衡蒸馏与简单蒸馏	219	8.5 反应精馏与分子蒸馏	237
8.2.2 精馏原理与流程	221	8.5.1 反应精馏	237
8.3 双组分连续精馏常规流程的数学描述	223	8.5.2 分子蒸馏	240
8.3.1 全塔物料衡算	223	8.6 蒸馏操作综合算例	242
8.3.2 理论板与恒摩尔流假定	223	8.6.1 蒸馏操作知识概要	242
8.3.3 精馏段操作线方程	224	8.6.2 综合计算实例	242
8.3.4 提馏段操作线方程	224	思考题	244
8.3.5 进料热状况的影响	225	习题	245
8.4 双组分连续精馏的计算	226	本章符号说明	246
8.4.1 常规流程的理论塔板数	226		
第9章 萃取与浸提	248		
9.1 液-液萃取的传质基础	248	特性	257
9.1.1 三角形相图	248	9.3.3 萃取设备的选型	257
9.1.2 杠杆规则	250	9.4 浸提	258
9.1.3 萃取剂的选择	251	9.4.1 浸提的传质机理	258
9.2 萃取流程及其计算	251	9.4.2 浸提操作的计算	258
9.2.1 单级萃取	251	9.4.3 浸提设备	262
9.2.2 多级错流接触	252	9.5 超临界流体萃取技术简介	262
9.2.3 多级逆流萃取	252	9.5.1 超临界流体的性质	263
9.2.4 有回流的逆流萃取	253	9.5.2 超临界流体萃取的基本原理	263
9.2.5 微分接触逆流萃取	254	9.5.3 超临界流体萃取在食品工程中的应用	263
9.2.6 萃取操作综合算例	254	思考题	264
9.3 液-液萃取设备	255	习题	264
9.3.1 液-液传质萃取设备	255	本章符号说明	265
9.3.2 液-液传质设备中流体流动与传质			
第10章 食品冷冻技术	266		
10.1 物料冷冻的技术原理	266	10.2.1 食品物料的流态化速冻原理	272
10.1.1 制冷基本概念	266	10.2.2 流态化速冻过程中的传热	273
10.1.2 制冷循环及其计算	267	10.2.3 流态化速冻流程和装置	274
10.1.3 食品的冻结过程	268	10.3 冷冻浓缩	276
10.1.4 食品冷冻与冷藏	270	10.3.1 冷冻浓缩的相平衡	276
10.2 流化床速冻	271	10.3.2 冰晶-浓缩液的分离	277

10.3.3 冷冻浓缩装置	277	习题	280
思考题	280	本章符号说明	281
第 11 章 干燥	282		
11.1 湿空气的性质	282	11.3.4 干燥时间的计算	299
11.1.1 湿空气的状态参数	282	11.4 干燥设备	300
11.1.2 湿空气的焓湿图及初步应用	287	11.4.1 对流干燥器	301
11.2 干燥过程的衡算	289	11.4.2 非对流干燥器	302
11.2.1 湿物料的性质	289	11.4.3 干燥器的选择	303
11.2.2 物料衡算	290	11.5 喷雾干燥	305
11.2.3 热量衡算	291	11.5.1 喷雾干燥流程	305
11.2.4 空气通过干燥器的焓变	293	11.5.2 喷雾干燥系统的工作过程	305
11.3 干燥速率与干燥时间	294	11.5.3 喷雾干燥器的基本设计计算	308
11.3.1 物料中的水分	294	思考题	310
11.3.2 干燥过程的传质机理	295	习题	310
11.3.3 干燥速率曲线	296	本章符号说明	311
第 12 章 膜分离	313		
12.1 概述	313	12.3.1 反渗透原理	320
12.1.1 分离膜及膜组件	313	12.3.2 反渗过程的数学模型	320
12.1.2 膜分离过程主要类型	315	12.3.3 反渗透设备	321
12.1.3 膜分离技术在食品工业中的 应用	316	12.4 电渗析	321
12.2 微滤与超滤	316	12.4.1 电渗析原理及装置	321
12.2.1 过程特征和膜	316	12.4.2 电渗析过程的传递理论	322
12.2.2 过程的数学模型	317	12.4.3 电渗析操作计算	323
12.2.3 微滤与超滤操作流程	318	思考题	325
12.3 反渗透	320	习题	325
		本章符号说明	326
第 13 章 吸附与离子交换	327		
13.1 吸附	327	13.2.2 离子交换过程的传质机理	334
13.1.1 吸附作用与吸附剂	327	13.2.3 离子交换设备	335
13.1.2 吸附过程的传质机理	328	13.2.4 离子交换操作计算	336
13.1.3 吸附过程的计算	330	思考题	339
13.1.4 吸附设备	332	习题	339
13.2 离子交换	333	本章符号说明	340
13.2.1 离子交换树脂	333		
附录	341		
参考文献	366		

绪论

0.1 本课程的内容、性质及任务

应用现代工程技术改造与创新传统食品的生产与制造,形成了现代食品工业。食品工业现在已成为世界上许多国家最重要的支柱产业。随着现代科学技术的突飞猛进,食品现代加工技术也获得蓬勃发展。食品工程原理是一门主要研究食品加工过程的技术原理与工程实现的应用基础课程,与机械工程、化学工程等学科的有关课程密切相关,其基础涉及数学、物理、力学、热力学、传热学和传质学等。本课程以单元操作为主线,研究食品加工过程的有关理论与工程方法,为食品科学与工程及相近专业的学生和工程技术人员学习研究提供参考。

0.1.1 单元操作

由于食品原料主要来自农林牧副渔等成千上万种生物物质,加工出的产品又必须满足不同民族、不同地域和不同人群的消费习惯与需求,这就要求现代食品工业为广大消费者提供花色品种极为丰富的食品品种。所以食品加工工艺的多样性、复杂性和独特性是可想而知的。虽然食品加工工艺千变万化,但是通过宏观分析可以发现,这些工艺一般都是由一系列的基基本工序组装集成产生的。包含在不同食品加工工艺中的同一类基本工序称为单元操作(unit operation),同一单元操作一般具有相同的理论基础和遵循的规律,可以用一类加工目的相同的工程装备实现。例如,浓缩苹果汁与普通苹果汁相比,具有体积小,可溶性固形物含量高,节约包装及运输费用,产品保藏期较长等特点。浓缩苹果汁的工艺一般由原料输送、选果、洗涤、破碎、榨汁、澄清、杀菌、浓缩、计量灌装、包装等基本操作构成。再比如普通的乳粉加工,其工艺主要是合格原料乳经标准化预处理后,由配料混合、均质、杀菌、浓缩、喷雾干燥、冷却、计量包装等基本操作构成。显然浓缩苹果汁和普通的乳粉的总体加工工艺不同,但是二者在浓缩的基本操作方面是类似的。浓缩操作目的是部分脱除水分,提高溶液的固形物含量,其基本操作是通过传热升温结合真空技术,实现水分蒸发。浓缩基本操作在浓缩苹果汁和普通的乳粉加工中遵循的规律是相同的,其工程设备的加工目的相同,所以可以把它称为蒸发(浓缩)单元操作。

单元操作的概念源自于化工原理。人们经过长期的生产实践总结,根据所用设备相似、原理相近、基本过程相同的原则,提出了“单元操作”的概念。各种食品、化工、生物工程产品的生产过程,可由若干单元操作或与化学反应、生物转化过程作适当的串联组合而构成。

作为单元操作,一般具有下列特点:①这些操作只改变物料的状态或其物理性质,并不改变物料的化学性质,所以它们都是物理性操作;②单元操作都是工业生产过程中的共有操作,例如前文介绍的苹果汁和牛奶的浓缩、油厂浸出车间混合油的浓缩等都是通过蒸发这一单元操作而实现的;酒精工业中酒精的提纯、浸出毛油脱臭(分离溶剂油)都是通过蒸馏操作而实现的。

单元操作统一了通常被认为各不相同的独立的工业生产技术,使人们可以系统而深入地研究每一单元操作的内在规律、基本原理和工程实现方法。

由于食品加工原料的复杂性和产品的多样性，食品加工过程涉及的单元操作非常多，按其功能可以分为：物料的增压、减压和输送；物料的混合和分散；物料的加热和冷却；均相混合物的分离（蒸发、蒸馏、结晶等等）；多相混合物的分离（沉降、过滤、干燥等等）。其中每一类还可以细分，例如按相态的不同把多相混合物的分离再分为气-液分离、气-固分离、固-液分离、液-液分离（分层）、固-固分离（筛分）等。这样，具有实际意义的单元操作不下数十种。

常见的单元操作种类如表 0-1 所示。

表 0-1 常见单元操作种类

单元操作名称	操作目的	处理物态	原 理
流体输送	输送	液或气	向流体输入机械能
沉降	非均相混合物的分离	液-固/气-固	利用两相密度差异引起沉降运动
过滤	非均相混合物的分离	液-固/气-固	利用过滤介质使固体颗粒与流体分离
加热、冷却	升温、降温、改变相态	气或液	利用温度差引入或导出热量
蒸发与结晶	溶剂与非挥发性溶质的分离	液体	供热以气化溶剂
吸收	均相混合物的分离	气体	利用各组分在溶剂中溶解度不同分离
蒸馏	均相混合物的分离	液体	利用各组分的相对挥发度不同分离
干燥	去湿	固体	供热气化湿物料中的湿分
固-液萃取	固体混合物中组分的分离	固体	利用各组分在溶剂中溶解度不同分离

食品单元操作的分类还可以按其加工目的或工程实现方法来分类。如前述的浓缩苹果汁加工中的破碎、榨汁、澄清、杀菌、浓缩等单元操作就是按加工目的进行分类的；再比如按工程实现方法可以把浓缩分为膜浓缩、冷冻浓缩、真空蒸发浓缩等。

把单元操作按其理论基础来划分，将更便于学习和研究。食品、生物工程产品和化工生产中，主要的单元操作可以归纳为以下几类过程。

流体流动过程：以动量传递过程原理作为主要理论基础的过程，包括流体的输送、悬浮物的沉降和过滤、颗粒状物料的流态化等。

热量传递过程：以热量传递过程原理作为主要理论基础的过程，包括加热、冷却、蒸气的冷凝、溶液的蒸发等。

质量传递过程：以质量传递过程原理作为主要理论基础的过程，包括液体溶液的蒸馏、气体混合物的吸收、固体物料的干燥等。

热力过程：以热力学为主要理论基础的过程，如压缩、冷冻等。

机械过程：以机械力学为主要理论基础的过程，如农产品物料的粉碎、分级等。

有些单元操作可能同时包含几种过程原理，如干燥、结晶操作就同时进行热量传递与质量传递。

0.1.2 三种传递过程及其物理量的守恒

食品工程中的主要单元操作大多是以动量传递、热量传递和质量传递三大传递过程原理作为理论基础的。

运动的流体发生的动量由一处向另一处传递的过程称为动量传递。从微观角度看，由于流体内部质点（或分子）的速度不同，它们的动量就不同，在流体质点随机运动和相互碰撞过程中，动量从速度大处向速度小处传递，从宏观现象上则观察到的是流体流动。在流体动量传递过程中，若系统不受外力或所受外力的矢量和在某力学过程中始终为零，则系统的总动量是守恒的。系统的动量恒算遵循动量守恒定律。

热量传递过程中，因温度差的存在而使能量由高温区处传到低温区。该过程遵循能量守

恒定律, 对于稳态过程, 有: Σ 能量输入 = Σ 能量输出。

质量传递过程是因物质在流体内存在的浓度差而产生的扩散作用, 物质从高浓度处向低浓度处传递。在质量传递过程中, 物料的衡算遵循质量守恒定律, 即 Σ 质量输入 = Σ 质量输出 + 积存。对于无物料积存的稳态过程, 物料衡算关系便简化为: Σ 质量输入 = Σ 质量输出。

质量恒算、能量恒算和动量恒算是食品工程原理课程中分析问题的重要基本方法之一。三种恒算的方法与应用将在后面的有关章节中介绍。

0.1.3 本课程与《化工原理》的联系

一门工程技术学科的诞生往往与其对应的工业发展需求密切相关。化学工业的快速发展催生了化学工程学科。化工原理是化学工程学科中形成最早、基础性最强、应用面最广的学科分支。与化学工业相比, 食品工业的发展要迟缓得多, 食品工程学科的建立也相对滞后。

化工原理是化工及其它化学加工过程类专业的一门重要的技术基础课程。它围绕化学反应前原料的处理、反应后产物的提纯、精制过程, 讲述化工“单元操作”的基本原理、典型设备的结构原理、操作性能和设计计算。化工“单元操作”的条件比较激烈, 许多是在高温、高压下进行的。

食品工程原理是把化工原理应用到食品工程领域发展起来的一门课程, 在单元操作原理及过程实现方面与化工原理课程有许多相同或相似之处。但由于食品加工过程以农产品生物物质的物理加工或生物转化加工为主体, 其单元操作的条件比较温和, 有许多单元操作是化学工程没有的, 有些设备的实现原理、结构与化学加工的单元操作有很大差别。所以食品工程原理不是化工原理的简单重复, 它结合食品工程学科的特点, 形成了许多特有的内涵与特色。

首先, 食品多为热敏性物料, 要求其单元操作在温和的条件下进行, 于是食品工程加速了低温、真空技术的发展。食品加工原料中的主要成分中蛋白质遇热容易变性, 其中的各种酶遇热容易失去活性; 脂肪成分和其它一些生物活性物质在较高温度下容易氧化变质; 食品中风味性的芳香物质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。为了在较低温度下仍能完成高效优质加工, 所以食品工程非常注重真空技术的应用。对真空蒸发、真空过滤、真空干燥、冷冻升华干燥等的理论研究和应用在食品工程领域发展很快。

其次, 食品制品的安全性对加工过程的减菌保鲜单元操作提出了很高的要求。食品原料与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酶的作用下, 食品很容易发生腐败变质。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。因此在食品工程中, 浓缩、干燥和冷冻、非热力杀菌等操作地位特别重要, 这些单元操作的研究应用在食品行业中比在化学工业中发展迅速, 有些是化学工程中所没有的。

再次, 食品加工的原料几乎都是凝聚态的, 其加工过程以物理变化为主。所以食品工业中, 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。而化工生产多以气体、液体为原料, 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。

综上所述, 食品工程原理与化学工程原理在许多单元操作的理论基础和处理方法方面既有共同点, 又因学科、行业存在差异; 联系密切, 又各具特色。

0.2 本课程的研究方法

0.2.1 课程的两条主线

食品工程的课程体系设计是按照单元操作展开的。各单元操作的研究对象、需要解决的工程问题是不一样的,它们各自依据不同的原理、适应于不同物态,最终解决各自的工程问题。但是,作为一门学科分支,它们又有统一的研究对象和研究方法,把分散的单元操作有机地联系起来。

分析食品工程单元操作的理论基础,可以发现它们基本上可以归属于动量传递过程、热量传递过程、质量传递过程,所以过程研究成为联系各单元操作的一条主线。

另一条主线就是研究方法。本课程是一门实践性很强的工程学科,在食品工程中除了极少数简单的问题可以用理论分析的方法解决以外,许多工程应用问题都需要靠试验研究解决。所以食品工程的各单元操作在宏观研究方法方面形成了试验研究方法和数学模型方法。

(1) 试验研究方法(经验法) 食品加工过程复杂,涉及的影响因素很多,尤其是食品工程原理是在化工原理基础之上发展而成的,其物性参数和单元操作工艺设计参数十分缺乏,所以试验研究占有十分重要的位置。为了有效地进行试验研究和整理试验数据,一般应用量纲分析和相似原理为指导,依靠试验来确定过程变量之间的关系,通过量纲为1的数群构成的关系式来表达,这是一种工程上通用的基本方法。

对于较复杂的食品加工过程,一般不能直接采用设计方法解决放大问题,只能采用逐级放大的方法逐步扩大实验规模,最后进行大装置的设计。逐级放大的级数和每级的倍数可依据理论分析和经验确定。

(2) 数学模型法(半经验半理论法) 该方法是首先要对实际过程的机理进行深入的分析,在抓住过程本质的前提下,对过程机理进行某种合理的简化,建立基本能反映过程机理的物理模型,然后进行数学描述,得出数学模型,并通过实验确定模型参数。这种方法是理论与实验密切结合的半理论半经验的方法。随着计算科学与技术的发展,复杂的数学模型求解成为可能,所以该方法的应用发展较快。

0.2.2 课程学习要求

食品工程原理是食品科学与工程及其相近专业的一门十分重要的专业基础课程,在创新人才培养中具有举足轻重的地位。由于课程涉及的知识面宽,对理论分析、设计计算、实验探索、工程经验的贯通融合和创新应用方面要求很高。学习过程中要逐步树立工程观念,从先进实用、安全可靠、经济方便、节能减排等方面认真掌握单元操作和工程系统集成方面的知识。学习过程中应注意以下几个方面能力的培养:

(1) 工程设计与应用的能力 食品加工工艺千变万化,其实现的途径又可以多种多样,所以要牢固树立工程观念,能够根据生产工艺要求和物料特性,合理地选择单元操作及相应的设备,完成过程分析、设计计算,努力使系统集成达到最优化。

(2) 数据获取能力 食品工程原理学科研究的历史短,基础数据十分缺乏。如何通过网络或资料查取有参考价值的数据,或者通过实验测取、生产现场查定相关数据,是进行良好的食品工程设计的重要前提。

(3) 实验能力 学习试验设计、单元操作实验、数据处理、误差分析方法,提高动手能力和实验技能。

0.3 物理量的量纲与单位换算

0.3.1 物理量的量纲

将一个物理量表达为若干个基本物理量的幂积形式,称为该物理量的量纲式,简称量纲(dimension)或因次。它是在选定了单位制之后,由基本物理量单位表达的式子。在国际单位制中,规定了七个基本物理量:长度(L),质量(M),时间(T),电流(I),温度(Θ),物质的量(N),发光强度(J)。于是,任何一个量的量纲均可表示为:

$$\dim Q = L^{\alpha} M^{\beta} T^{\gamma} I^{\delta} \Theta^{\epsilon} N^{\zeta} J^{\eta}$$

式中, $\dim$ 为量纲符号;指数 $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ 称为量纲指数。

对于基本物理量,其量纲就是其本身,如长度量纲 $\dim L = L$,即在量纲表达式中, $\alpha = 1$,其余的指数均为 0。对于导出量,其量纲则可由量纲表达式导出,如速度的量纲为 $\dim u = LT^{-1}$,加速度的量纲为 $\dim a = LT^{-2}$ 。此外,在量纲表达式中,若所有基本量量纲的指数均为零时,称该物理量为量纲为 1 的量,习惯上称为无量纲量。例如摩擦因数、折射率、质量分数等都是无量纲量。

任何一个理论上合理的物理量方程,其等号两边各项的量纲必定相等,该原理称为量纲一致性原理。该原理是量纲分析法(整理实验数据常用方法)的重要依据。

0.3.2 单位制及物理量的换算

0.3.2.1 国际单位制与法定计量单位

在科学和工程中,曾经使用过的单位制有 CGS 制、MKS 制、工程单位制、国际单位制(SI)等。SI 制是国际度量衡会议于 20 世纪 60 年代初期提出的一种新的单位制度,由基本单位和包括辅助单位在内的具有专门名称的导出单位所构成。SI 制体系完整,包括了所有领域中的计量单位,是科学技术、工农业生产、经济贸易甚至日常生活中通用的一种单位制度。目前,SI 制已逐渐取代其它单位制,被各个领域广泛采用。另外,在 SI 制中,同一种物理量只有一个单位,如能量、热、功的单位都采用焦耳(J),从而避免了不同单位制中热功之间换算因子的引入。

以 SI 制为基础,我国于 1984 年颁布了《中华人民共和国法定计量单位》,简称法定计量单位。我国的法定计量单位除 SI 制的基本单位、辅助单位和导出单位外,还规定了一些我国选定的非国际单位制单位。例如,时间还可以用分(min)、小时(h)、日(天)(d);质量可用吨(t);长度可用海里(n mile)等单位计量。

除本章介绍单位换算内容之外,本书其他章节如无特殊说明,一律采用 SI 制。

0.3.2.2 单位换算

虽然目前整个科学和技术领域已普遍采用国际单位制,但由于历史原因,科技界过去曾经采用过英制、工程单位制、CGS 制等其它多种单位制,特别在以前出版的科技书籍、期刊与手册中大都使用这些老的单位制,因此我们在进行工程计算时,不可避免地会遇到需将某物理量由其它单位换算成 SI 单位的情况。

(1) 物理量的单位换算 物理量由一种单位换成另一种单位时,要乘以两单位间的换算因数。所谓换算因数,就是同一物理量用不同单位制的单位度量时的数值比。例如 1m 长的管子用英尺度量时为 3.2808ft,所以米与英尺的换算因数为 3.2808。各种单位制的单位间的换算因数参见本书附录 1。

【例 0-1】 已知 $1\text{atm}=1.033\text{kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$, 试求其在 SI 制中为多少 $\text{Pa}(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$ 。

解: 先列出有关物理量不同单位制之间的关系:

$$1\text{kgf}=9.81\text{N} \quad 1\text{cm}=10^{-2}\text{m}$$

$$\begin{aligned} \text{因此 } 1\text{atm} &= 1.033\text{kgf}\cdot\text{cm}^{-2} = 1.033 \times \text{kgf} \times \frac{9.81\text{N}}{\text{kgf}} \times \text{cm}^{-2} \times \frac{(10^{-2}\text{m})^{-2}}{\text{cm}^{-2}} \\ &= 1.033 \times 9.81 \times 10^4 \text{N}\cdot\text{m}^{-2} = 1.0133 \times 10^5 \text{N}\cdot\text{m}^{-2} (\text{Pa}) \end{aligned}$$

(2) 经验公式(数字公式)换算 工程计算中所用到的经验公式是单纯根据实验数据整理或者半实验、半理论的方法得来的。它只反映各有关物理量的数字之间的关系, 所以又叫数字公式。经验公式中每个符号并不代表完整的物理量, 只代表物理量中的数字部分, 而这些数字都是与特定的单位相对应的。因此在使用经验公式时, 各物理量必须采用指定的单位。

当已知数据的单位与经验公式所规定的单位不同时, 可把整个公式加以变换, 使其中各符号都采用计算者所希望的单位。这就是经验公式的单位变换。换算的原则是: 原来给出的公式是成立的, 故应将新单位下的物理量(加“'”表示)还原到公式所要求的单位后, 将还原后的物理量代入原公式, 再变化。此为“还原”法则。

【例 0-2】 水蒸气在空气中的扩散系数可用如下经验公式计算:

$$D = \frac{1.46 \times 10^{-4}}{p} \times \frac{T^{5/2}}{T+441}$$

式中, D 为扩散系数, $\text{ft}^2\cdot\text{h}^{-1}$; p 为压强, atm ; T 为绝对温度, $^{\circ}\text{R}$ 。

试将上式加以变换, 使式中各符号的单位: D 为 $\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$; p 为 $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$; T 为 K 。

解: 先列出有关各量不同单位间的关系:

$$1\text{ft}=0.3048\text{m} \quad 1\text{atm}=1.0133 \times 10^5 \text{N}\cdot\text{m}^{-2} \quad 1^{\circ}\text{R}=\frac{1}{1.8}\text{K}$$

以 D' 、 p' 、 T' 分别代表扩散系数、压强、温度等三个物理量, 则原式可写成:

$$\frac{D'}{[\text{ft}^2\cdot\text{h}^{-1}]} = \frac{1.46 \times 10^{-4}}{\frac{p'}{[\text{atm}]}} \times \frac{\left(\frac{T'}{[^{\circ}\text{R}]}\right)^{5/2}}{\frac{T'}{[^{\circ}\text{R}]} + 441}$$

引入各换算因数进行单位变换:

$$\frac{D'}{[\text{ft}^2\cdot\text{h}^{-1}] \times \left(\frac{0.3048\text{m}}{\text{ft}}\right)^2} = \frac{1.46 \times 10^{-4}}{\frac{p'}{[\text{atm}] \times \frac{1.0133 \times 10^5 \text{N}\cdot\text{m}^{-2}}{\text{atm}}}} \times \frac{\left(\frac{T'}{[^{\circ}\text{R}] \times \frac{1\text{K}}{1.8^{\circ}\text{R}}}\right)^{5/2}}{\frac{T'}{[^{\circ}\text{R}] \times \frac{1\text{K}}{1.8^{\circ}\text{R}}} + 441}$$

$$\text{整理后得: } \frac{D'}{[\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}]} = \frac{5.974}{\frac{p'}{[\text{N}\cdot\text{m}^{-2}]}} \times \frac{\left(\frac{T'}{[\text{K}]}\right)^{5/2}}{1.8 \frac{T'}{[\text{K}]} + 441} = \frac{3.319}{\frac{p'}{[\text{N}\cdot\text{m}^{-2}]}} \times \frac{\left(\frac{T'}{[\text{K}]}\right)^{5/2}}{\frac{T'}{[\text{K}]} + 245}$$

$$\text{故单位变换后的经验公式应为: } D = \frac{3.319}{p} \times \frac{T^{5/2}}{T+245}$$

习 题

0-1 将下列各物理量换算成以 SI 单位制表示:

(1) 密度 $90 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-4}$; ($882.60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

(2) 黏度 $0.032 \text{ dyn} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$; ($0.0032 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

(3) 压强 $2.56 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^{-2}$; ($2.510 \times 10^5 \text{ Pa}$)

(4) 传热系数 $780 \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 。($907.14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)

0-2 试将气体常数 $R=82.06 \text{ atm} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 换算成 SI 单位制。($8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

0-3 现有公式 $G=2.45u^{0.8}\Delta p$, 式中 G 的单位为磅(质)·英尺⁻²·小时⁻¹, u 的单位为英尺·秒⁻¹, Δp 的单位为大气压。试将该公式以 SI 单位来表示。($G=8.483 \times 10^{-8} u^{0.8} \Delta p$)

第1章 流体流动

【本章学习要求】

以流体静力学、动力学两条宏观主线贯穿始终,全面了解食品工业生产中流体的基本物性特征,正确区别压力、压强,流速、流量,定态流动、非定态流动,牛顿型流体、非牛顿型流体,层流、湍流,边界层及因次分析等基本概念;掌握流体质量守恒、机械能守恒、动量守恒三大守恒定律,学会利用静力学基本方程、柏努利方程、流体流动阻力计算公式解决流体流动中的压强测定、流速及流量计算、输送位置关系确定、动力消耗、阻力损失、管径选择等基本问题;学会利用所学知识完成食品工厂中水、气以及原料溶液等流体输送过程的选择、操作和相关设计。

【引言】

食品生产中,许多原料、半成品、成品或辅助材料以流体的状态存在。如常见的液体有:水、牛奶、饮料、酒、酱油、醋、植物油、糖浆、果酱、蜂蜜等等;常见的气体有:水蒸气、氧气、氮气、二氧化碳、无菌空气等等。食品原料、产品成分体系复杂,种类繁多,与传统化工原料产品不同,这些流体多为非牛顿型流体,且物性数据缺乏,如:黏稠的糖浆、果酱、蜂蜜等流体的密度、黏度是多少,如何获得这些数据?在食品实际生产中,流体从一个工序到另一个工序,流体的输送遵循什么样的规律?流体物性对输送产生什么样的影响,又会对输送提出哪些具体要求?此外,压强、流速、流量的测量原理是什么,又如何利用设备进行测定?围绕上述问题,本章着重讨论流体静力学及流体动力学中的基本原理和规律,并运用这些原理与规律去分析和计算食品生产实践中流体的输送问题。

1.1 流体静力学

液体和气体都具有流动性,通常总称为流体。液体分子间距较气体分子间距小,在压力作用下体积改变很小,工程上一般可忽略不计,称之为不可压缩流体。气体分子间距较大,在压力作用下体积改变较大,一般不能忽略,称之为可压缩流体。

从微观角度看,流体是由无数分子组成的,分子间有空隙,而且分子在不断地运动。但流体力学并不研究微观的分子运动,而是从宏观角度研究流体的机械运动。从宏观角度看,可以把流体看成由无数质点组成的且完全占满空间的连续介质,质点间没有空隙。流体质点不同于流体分子,它由大量分子集合而成,但又远远小于设备尺寸。

流动中的流体受到的力分为体积力和表面力两种。所谓体积力是作用于流体每个质点上的力,它与流体质量成正比。流体在重力场内所受的重力和离心力场内所受的离心力都是典型的体积力。所谓表面力则是作用于流体质点表面的力,它的大小与表面积成正比。对于任意一个流体微元表面,表面力一般分为垂直作用于表面的力和平行作用于表面的力。垂直作用于表面的力称为压力,平行作用于表面的力称为剪力。

流体静力学是研究流体在外力作用下达到平衡的规律。在工程实际中,流体的平衡规律应用很广,如流体在设备或管道内压强的变化与测量、液体在贮罐内液位的测量、设备的液封等均以此一规律为依据。

1.1.1 流体的物理性质

1.1.1.1 密度和比容

密度 单位体积流体所具有的质量，称为流体的密度。液体的密度基本上不随压力而改变（除极高的压力以外），但随温度稍有改变。因此，在查取液体密度时，要注意所指的温度。液体混合物的平均密度可按照质量加和的方法，由体积分数及各纯物质的密度计算得到。或近似按照体积加和的方法，由质量分数及各纯物质的密度计算得到。

气体的密度随压力、温度而改变。当压力不高时气体的密度（除极低压力以外）可按理想气体状态方程计算：

$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (1-1)$$

式中， p 为气体的绝对压强，Pa 或 N/m^2 ； M 为气体的摩尔质量（不是分子量）， kg/mol ； T 为气体的热力学温度，K； R 为气体常数， $8.314\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ 。

近似理想气体的混合物的平均密度 ρ_m 可通过气体分子平均摩尔质量计算求得。

比容 单位质量流体具有的体积，是密度的倒数，单位为 m^3/kg 。

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (1-2)$$

1.1.1.2 黏度

黏度（viscosity）的物理意义是促使流体流动产生单位速度梯度时剪应力的大小。黏度总是与速度梯度相联系，只有在运动时才显现出来。其表达式可写为：

$$\mu = \pm \frac{\tau}{du/dy} \quad (1-3)$$

式中， μ 为流体的黏度， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ； τ 为两相邻流体层之间单位面积上的内摩擦力， N/m^2 ； du/dy 为两相邻流体层间的速度梯度， $1/\text{s}$ ，指速度沿方向的最大变化率，即最大的方向导数。数学已证明：沿 u 的等值面上研究点的法线方向变化率最大。故速度梯度的方向总是指 u 的等值面指定点的法线方向，大小为 u 对法线的导数，是个向量。

黏度是流体物理性质之一，其单位常用泊（poise）、厘泊（centi-poise）来表示。液体的黏度随温度升高而减小，气体的黏度则随温度升高而增大。压力对液体黏度的影响很小，可忽略不计。气体的黏度，除非在极高或极低的压力下，可以认为与压力无关。有时，为工程计算带来方便，假设流体的黏度为零，此种流体称为理想流体。

黏度 μ 与密度 ρ 的比值常用来表示流体的运动黏度，以 ν 表示，即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-4)$$

运动黏度（kinematic viscosity）在法定单位制中的单位为 m^2/s ；在物理制中的单位为 cm^2/s ，称为斯托克斯（Stokes），简称为沱，以 St 表示， $1\text{St} = 100\text{cSt}$ （厘沱）= $10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$ 。

混合气体黏度按 $\mu_m = \frac{\sum y_i M_i^{1/2} \mu_i}{\sum y_i M_i^{1/2}}$ 计算， y 为摩尔分数， M 为分子摩尔质量。非缔合混

合液体黏度按 $\lg \mu_m = \sum (x_i \lg \mu_i)$ 计算， x 为摩尔分数。

一般液体食品是复杂的多成分体系。除温度外，尚有其它因素影响食品的黏度，例如组分的浓度和悬浮颗粒的大小等。对混合物的黏度，如缺乏实验数据时，可参阅有关资料，选用适当的经验公式进行估算，或在实验室里利用黏度计直接测定。

1.1.2 流体静力学方程及其应用

1.1.2.1 静压强

单位流体面积上所受的垂直压力，称为流体的静压强（pressure），简称压强。在 SI 制中，压强的单位是 Pa，称为帕斯卡（Pascal）。atm（标准大气压）、某流体柱高度、bar（巴）或 kgf/cm^2 等也常作为压强的单位，不同单位之间的换算关系为：

$$1\text{atm}=1.0332\text{kgf}/\text{cm}^2=760\text{mmHg}=10.332\text{mH}_2\text{O}=1.0133\text{bar}=1.0133\times 10^5\text{Pa}$$

工程上为了使用和换算方便，常将 $1\text{kgf}/\text{cm}^2$ 近似地作为 1 个大气压，称为 1 工程大气压。

$$1\text{kgf}/\text{cm}^2=735.6\text{mmHg}=10\text{mH}_2\text{O}=0.9807\text{bar}=9.807\times 10^4\text{Pa}$$

流体的压强除用不同的单位来计量外，还可以用不同的方法来表示。

以绝对零压为起点计算的压强，称为绝对压强，是流体的真实压强。

流体的压强可用测压仪表来测量。当被测流体的绝对压强大于外界大气压强时，所用的测压仪表称为压强表。压强表上的读数表示被测流体的绝对压强比大气压强高出的数值，称为表压强（简称表压），即

$$\text{表压强}=\text{绝对压强}-\text{大气压强}$$

当被测流体的绝对压强小于外界大气压强时，用真空表进行测量。真空表的读数为负值，绝对值表示被测流体的绝对压强低于当地大气压强的数值，称为真空度，即

$$\text{真空度}=\text{大气压强}-\text{绝对压强}$$

1.1.2.2 流体静力学基本方程式

流体静力学基本方程是用于描述静止流体内部，流体在重力和压力作用下的平衡规律，这一规律的数学表达式称为流体静力学基本方程。

在密度为 ρ 的静止流体中，取边长分别为 δx 、 δy 、 δz 的微元立方体，如图 1-1 所示。由于流体处于静止状态，因此所有作用于该立方体上的力在坐标轴上的投影之代数和应等于零。

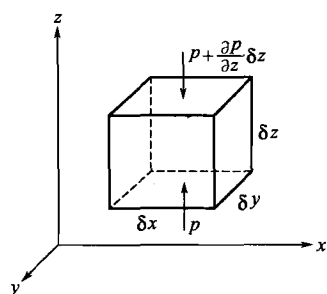


图 1-1 微元流体的静力平衡

对于 z 轴，作用于该立方体上的力有：①作用于下底面的法向力为 $p\delta x\delta y$ 。②作用于上底面的法向力为 $-[p+(\partial p/\partial z)\delta z]\delta x\delta y$ 。③作用于微元立方体的重力为 $-\rho g\delta x\delta y\delta z$ 。

z 轴方向力的平衡式可写成：

$$p\delta x\delta y-[p+(\partial p/\partial z)\delta z]\delta x\delta y-\rho g\delta x\delta y\delta z=0$$
$$-(\partial p/\partial z)\delta z\delta x\delta y-\rho g\delta z\delta x\delta y=0$$

上式各项除以 $\delta x\delta y\delta z$ ，则 z 轴方向力的平衡式可简化为：

$$\partial p/\partial z=-\rho g=\rho(-g)$$

对于 x 、 y 轴，作用于该立方体的力仅有压力，亦可写出其相应的力的平衡式，简化后， x 、 y 轴向有：

$$\partial p/\partial x=0, \quad \partial p/\partial y=0$$

将各向平衡式分别乘以 dz 、 dx 、 dy ，并相加后得 $\frac{\partial p}{\partial x}dx+\frac{\partial p}{\partial y}dy+\frac{\partial p}{\partial z}dz=-\rho g dz$ ，等号的左侧即为压强的全微分 dp ，于是有： $dp+\rho g dz=0$ 。对于不可压缩流体或 ρ 近似可看为常数的同一种流体，积分后得：

$$p^+=p+\rho gz=\text{常数} \quad (1-5)$$

p^+ 定义为和压强，单位与压强单位相同，其大小与密度 ρ 有关。