

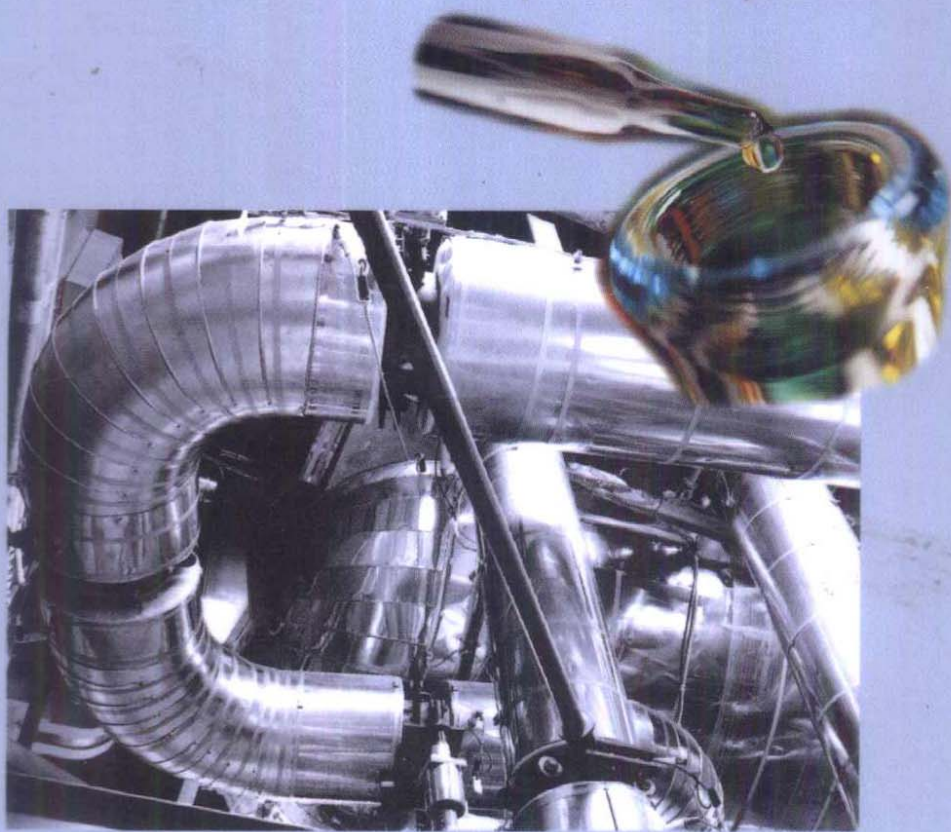
GAODENG ZHIYE JIAOYU JIAOCAI

· 高等职业教育教材 ·

# 食品工程原理

SHIPIN GONGCHENG YUANLI

· 周巍 主编 马兴胜 主审 ·



-43



中国轻工业出版社

ZHONGGUO QINGGONGYE CHUBANSHE

826

高等职业教育教材

# 食品工程原理

周 巍 主 编

马兴胜 主 审

高爱武 杨方美 副主编

 中国轻工业出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

食品工程原理/周巍主编. —北京: 中国轻工业出版社, 2002. 9

ISBN 7-5019-3718-4

I. 食… II. 周… III. 食品工程学-高等学校: 技术学校-教材 IV. TS201.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 032057 号

责任编辑: 沈力匀

策划编辑: 沈力匀 责任终审: 滕炎福 封面设计: 杨焱龙

版式设计: 王欣 责任校对: 李靖 责任监印: 吴京一

\*

出版发行: 中国轻工业出版社(北京东长安街6号, 邮编: 100740)

网 址: <http://www.chlip.com.cn>

联系电话: 010—65241695

印 刷: 北京公大印刷厂

经 销: 各地新华书店

版 次: 2002年9月第1版 2002年9月第1次印刷

开 本: 850×1168 1/32 印张: 15.75

字 数: 428千字 插页: 2 印数: 1—4000

书 号: ISBN 7-5019-3718-4/TS·2211

定 价: 30.00元

·如发现图书残缺请直接与我社发行部联系调换·

# 全国高等职业教育食品生物工程 专业系列教材编委会

主任：赵丽芹

副主任：薛文通 夏延斌 高愿军 江汉湖 张子德  
张意静

编委：(按姓氏笔画)

马兴胜	万萍	王如福	孔书敬	李丽萍
辛秀兰	沈建福	张培正	张和平	张惟广
苏平	孟宪军	杨公明	周巍	贾英民
徐明生	章建浩	陆宁	卢益中	李晓华

## 序

党的十一届三中全会以来,食品工业受到党和国家的高度重视。1984年召开了全国食品工业工作会议,颁布了《1981~2000年食品工业发展纲要》,食品工业第一次作为整体行业进行规划、部署和发展。从此,中国的食品工业步入了持续、健康和快速发展的轨道,创造出了前所未有的业绩。改革开放20年以来,我国的食品工业一直以年均10%~12%的速度递增,1995年以来,食品工业总产值在全国工业部门总产值中所占比重始终保持第一位;1996年食品工业年实现利税总额突破1000亿大关;到1998年末,全国食品工业固定资产已达4507亿元。总之,食品工业在国民经济建设中发挥着越来越重要的作用。

随着食品工业的快速发展,我国食品专业已有的高校本科及中专毕业生远不能满足和适应形势发展的需要,尤其是全国食品行业大量乡镇及私营企业的蓬勃发展,形成了食品专业的人才短缺,导致了全国各高等院校兴办食品专业的热潮。其中,各种名目的成人教育(继续教育)、职业技术教育及函授教育等大专学历的、快速培养高层次实用人才的办学方式是近年来高校掀起的又一股办学热潮,其在校人数几乎与本科生接近。然而,目前国内仍没有一套适合于食品专业大学专科生使用的教材,其教学效果受到了直接的影响。喜闻全国高等职业教育食品生物工程专业系列教材编委会组织编写了这套教材,实为他们填补这类教材的空白感到高兴。为了这套教材的编写,他们付出了许多的辛苦,而且参编人员都是各院校的业务尖子,相信这套书会成为这类学生的最佳使用教材。

中国农业大学  
李里特

## 前 言

食品工业作为一个直接关系国计民生的支柱产业,近二三十年来发生了革命性的变化,先进的工业技术层出不穷。

在食品加工中,存在着若干个基本的物理加工过程,如流体输送、传热、冷冻、干燥等。这些基本过程称为单元操作(Unit operation)。若干个单元操作的组合,就构成一种食品的生产工艺流程。作为食品工程技术人员,了解和掌握现代生产过程的设计、控制和操作是一项必备的技能。

食品工程原理是食品工程专业的一门重要技术基础课。它讲述的内容包括食品工程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。贯穿和联系本课程各章节间的基本理论是三传理论,即动量传递、能量传递和质量传递。通过课程的学习,可以训练和培养运用各种技术手段、分析解决工程设计和生产操作中的各类实际工作问题的能力。

本书介绍了与食品工程原理相关的内容,包括流体流动、流体输送、非均相混合物的分离、混合、乳化、传热、制冷、物料浓缩、物料干燥等。

本书中,绪论、前言、第一、二章、附录、实验一、二由哈尔滨商业大学周巍编写,第四、八章、实验七由内蒙古农业大学高爱武编写,第五章由南京农业大学杨方美编写,第三章、实验三、四由浙江农业大学陈纯编写,第六章、实验五、六由河南职业技术师范学院余小领编写,第七章由山西农业大学孟雪雁编写。在编写过程中得到了中国轻工业出版社、哈尔滨商业大学食品工程系等单位的领导和同行及内蒙古农业大学食品科学系范贵生、赵丽芹的真诚帮助,并引用了大量公开出版、发表的文献资料,在此一并向这些作者和所有提供过帮助的人们致以诚挚的谢意。

由于作者水平所限,书中错误在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

# 目 录

绪论 .....	1
一、课程性质 .....	1
二、基本概念和方法 .....	1
三、单位制与单位换算 .....	2
练习题 .....	3
第一章 流体流动 .....	4
第一节 流体流动中的作用力 .....	4
一、流体的物理性质与内摩擦力 .....	4
二、压力和静压强 .....	9
第二节 流体力学的基本方程 .....	11
一、流体静力学基本方程 .....	11
二、流体动力学基本方程 .....	13
第三节 流体流动现象 .....	19
一、流体流动类型与雷诺数 .....	19
二、流体在圆管内的速度分布 .....	21
第四节 管内流动的阻力损失 .....	23
一、流体在直管内的沿程阻力损失 .....	23
二、局部阻力损失 .....	29
三、流体流动的总阻力 .....	31
第五节 管路设计和流量测量 .....	33
一、管路设计 .....	33
二、流量测量 .....	36
第六节 非牛顿流体的流动 .....	40
一、非牛顿流体的分类 .....	41
二、非牛顿流体管内流动的阻力损失 .....	42
练习题 .....	43

<b>第二章 流体输送</b>	46
<b>第一节 离心泵</b>	46
一、离心泵的工作原理及主要构件	46
二、离心泵的主要性能参数	49
三、离心泵的特性曲线	51
四、影响离心泵性能改变的因素	52
五、离心泵的安装高度	53
六、离心泵的工作点及工作点的调节	57
七、离心泵的类型和选用	59
<b>第二节 正位移泵</b>	61
一、往复式泵	62
二、旋转式泵	64
三、正位移泵的特性	65
<b>第三节 气体输送与压缩设备</b>	67
一、离心式通风机	67
二、鼓风机	70
三、压缩机	71
四、真空泵	75
<b>练习题</b>	78
<b>第三章 非均相混合物的分离</b>	81
<b>第一节 筛分</b>	83
一、固体颗粒表示法	83
二、筛分	90
三、筛分设备	93
<b>第二节 沉降</b>	95
一、重力沉降	95
二、离心沉降	104
三、沉降设备	107
<b>第三节 过滤</b>	120
一、概述	120
二、过滤的基本理论	123
三、过滤设备	133



四、过滤计算 .....	139
<b>第四节 离心分离 .....</b>	<b>143</b>
一、概述 .....	143
二、离心分离原理 .....	144
三、离心机 .....	150
<b>第五节 压榨 .....</b>	<b>154</b>
一、压榨的影响因素 .....	155
二、压榨理论 .....	156
三、压榨设备 .....	159
练习题.....	162
<b>第四章 混合、乳化 .....</b>	<b>166</b>
<b>第一节 混合 .....</b>	<b>167</b>
一、混合的基本理论 .....	167
二、液液系统的搅拌 .....	169
三、固液系统的搅拌 .....	172
四、捏合 .....	173
五、固体混合 .....	176
<b>第二节 乳化 .....</b>	<b>179</b>
一、乳化操作的基本理论 .....	180
二、食品工业中的乳化剂 .....	182
三、乳化方法及设备 .....	183
练习题.....	188
<b>第五章 传热 .....</b>	<b>190</b>
<b>第一节 概述 .....</b>	<b>190</b>
一、传热在食品工业中的应用 .....	190
二、传热的基本方式 .....	190
三、传热过程 .....	191
<b>第二节 热传导 .....</b>	<b>192</b>
一、傅立叶定律 .....	192
二、热导率 .....	193
三、通过平壁的稳态导热过程 .....	196
四、通过圆筒壁的稳态导热过程 .....	199

<b>第三节 对流传热</b> .....	202
一、基本概念及牛顿冷却定律 .....	202
二、影响对流传热系数的因素及准数关系式 .....	204
三、无相变的对流传热系数的经验关联式 .....	206
四、冷凝传热与沸腾传热 .....	211
<b>第四节 辐射传热</b> .....	217
一、基本概念 .....	217
二、斯蒂芬-波尔茨曼定律 .....	218
三、克希霍夫定律 .....	219
四、两固体间的相互辐射 .....	220
五、辐射加热方法 .....	224
六、设备热损失计算 .....	226
<b>第五节 传热过程计算</b> .....	227
一、热量衡算 .....	227
二、传热速率方程 .....	228
三、传热过程计算实例 .....	239
四、传热的强化 .....	243
<b>第六节 换热器</b> .....	245
一、管式换热器 .....	246
二、板式换热器 .....	252
三、夹套式换热器 .....	257
四、混合式换热器 .....	257
<b>练习题</b> .....	260
<b>第六章 制冷</b> .....	265
<b>第一节 制冷的理论基础</b> .....	266
一、温熵图与压焓图 .....	266
二、理想压缩制冷循环 .....	269
<b>第二节 实际压缩制冷循环</b> .....	271
一、单级压缩制冷循环 .....	271
二、单级压缩制冷循环常见基本概念及计算 .....	276
三、多级压缩制冷循环 .....	287
四、逐级制冷循环 .....	290

第三节 制冷剂与载冷剂 .....	292
一、制冷剂 .....	292
二、载冷剂 .....	295
第四节 其他制冷方法简介 .....	296
一、吸收式制冷 .....	296
二、蒸汽喷射式制冷 .....	297
三、热电式制冷 .....	299
第五节 制冷机械与设备 .....	300
一、压缩机 .....	301
二、冷凝器 .....	301
三、蒸发器 .....	302
四、膨胀阀 .....	303
练习题 .....	303
<b>第七章 物料浓缩 .....</b>	<b>306</b>
第一节 蒸发浓缩 .....	306
一、蒸发的基本概念 .....	307
二、单效真空蒸发 .....	316
三、多效蒸发 .....	321
四、蒸发设备 .....	330
五、蒸发浓缩在食品工业中的应用 .....	338
第二节 冷冻浓缩 .....	339
一、冷冻浓缩的理论和方法 .....	340
二、冷冻浓缩的装置系统 .....	347
三、冷冻浓缩的应用 .....	353
第三节 膜分离 .....	356
一、膜分离的分类与特点 .....	356
二、微滤和超滤 .....	358
三、反渗透 .....	368
四、电渗析 .....	373
五、膜分离在食品工业上的应用 .....	379
练习题 .....	381
<b>第八章 物料干燥 .....</b>	<b>383</b>

第一节 概述 .....	383
一、去湿方法和干燥过程 .....	383
二、干燥过程的特点 .....	385
第二节 湿空气的性质及湿度图 .....	385
一、湿空气的性质 .....	385
二、空气的湿度图 .....	393
三、湿度图的应用 .....	395
第三节 干燥过程计算 .....	397
一、干燥器操作的基本原理 .....	397
二、干燥过程的物料衡算 .....	397
三、干燥过程的热量衡算 .....	400
四、理想干燥过程的计算 .....	402
第四节 干燥速率和干燥时间 .....	403
一、物料中所含水分的性质 .....	404
二、恒定干燥条件下的干燥速率 .....	405
三、恒定干燥条件下干燥时间的计算 .....	408
第五节 干燥设备 .....	410
一、常用的对流干燥器 .....	410
二、干燥器的选型 .....	414
第六节 冷冻干燥 .....	416
一、冷冻干燥理论 .....	416
二、冷冻干燥设备 .....	419
练习题 .....	421
<b>实验</b> .....	426
实验一 圆管沿程阻力的测定 .....	426
实验二 离心泵特性曲线的测定 .....	429
实验三 板框式压滤机过滤常数的测定 .....	432
实验四 液体黏度的测定(滚动落球黏度计) .....	434
实验五 冷库制冷系统制冷系数测定 .....	436
实验六 制冷设备的调试 .....	439
实验七 干燥速率曲线和传质系数的测定 .....	446

<b>附录</b> .....	452
<b>附录一 常用法定计量单位</b> .....	452
<b>附录二 常用单位的换算</b> .....	453
<b>附录三 物理性质数据</b> .....	457
<b>附录四 管子规格</b> .....	469
<b>附录五 设备规格和性能</b> .....	472
<b>本书符号说明</b> .....	484
<b>主要参考文献</b> .....	490

# 绪 论

## 一、课程性质

食品工业作为一个直接关系到国计民生的支柱产业,近几十年来发展很快。我国传统的一直以家庭作坊式的食品加工生产,正逐渐被规模化、自动化、连续化生产线所替代。进入 21 世纪后,这种在食品工业上的革命将会继续进行下去。作为工程技术人员,了解和掌握现代化生产过程的设计、控制和操作是一项必备的技能。本课程就是培训学生运用各种技术手段,分析解决工程设计和生产操作中的各类实际工作问题的能力。

食品工程原理是食品工程专业的一门重要的技术基础课。它讲述的内容包括食品工程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。贯穿和联系本课程各章节间的基本理论是三传理论,即动量传递、热量传递和质量传递。

在食品加工生产中,存在着多种多样的物理加工过程,但就其操作原理而言,无论其原料和产品如何,可以归纳为若干基本的物理过程,如流体输送、传热、冷冻、干燥等。这些基本过程称为单元操作。若干个单元操作的组合,就构成一种食品的生产工艺过程。

## 二、基本概念和方法

本课程学习中除要了解掌握各单元操作的原理、设备和流程外,主要的学习方式是通过完成大量的工程计算来培养学生的分析问题和解决问题的能力。每章最后所精选的计算题,作为局部计算,可为将来的整体设计计算打下基础。在计算中,除需运用题给数据外,往往需要借助各类工程设计手册中的图表来获得相关数据。在查取数据、进行运算过程中应逐渐建立和养成严谨细致的工作作风。为计

算方便,本书附录中给出部分常用图表以备查取。

本教材中,对于各单元操作的工程计算,主要是为了解决两类基本问题:

(1) 物料衡算: 即对进出系统的水、气、汽等工质及原料和产品的平衡计算。在计算中,依据质量守恒定律,进入一过程的所有总质量(或质量)必须等于离开过程所有总质量(或质量)加上过程中物质的积累(或消耗)的总质量。对多数的稳定操作的连续过程,则无过程的积累或消耗,进入量就等于输出量。

(2) 能量衡算: 本课程涉及的能量衡算主要包括机械能衡算和热能衡算。能量衡算的基础是能量守恒和转换定律。机械能衡算是指操作中几种能量的相互转化而建立的平衡关系;而热能衡算是食品工程中最常见的能量衡算的形式。同物料衡算相似,对于稳态操作的热量衡算,同样也满足进入量等于输出量这个关系,一般对过程产生的散热量,可并入输出量考虑。

具体的物料衡算和能量衡算过程及计算方法,在本书各章中分析和讨论,各章的运算参数和过程一般相互独立(本书各章都可作为独立学科来讨论研究),但也有一定渗透,在学习上要适当注意。

### 三、单位制与单位换算

由于各国使用的单位制不同,给国际间的科技交流与贸易往来带来不便。1960年10月第十一届国际计量大会制定了一种新的单位制,称为国际单位制,符号SI。

国际单位制目前正被世界各国广泛采用。以国际单位制为基础,国务院制定了中华人民共和国法定计量单位现已正式实施。所以本课程采用的是法定计量单位。法定计量单位分基本单位和导出单位,具体情况可见本书的附录一。

由于历史原因和各国国情所限,目前在工程技术领域和市场流通上仍大量存在和使用如工程单位制、厘米克秒单位制(CGS制)、英制和市制等单位。因此,了解并掌握这些单位制间的换算,以及与法定计量单位间的换算关系,是工程计算上常遇到的问题。尤其在

本课程学习初期,发生的错误经常是在单位换算中产生的。故本教材在附录二中给出了常用单位的换算,已备查取。需强调的是,在完成本课程规定的计算中,除特殊说明,一定要将其他单位制先换算成法定计量单位再进行运算。

最后需提及的是,对运算中各步骤以及最后计算结果所获得的数据,除系数、指数和无因次准数外,都应注明数据后面的单位。计算数据的处理一般采用四舍五入的原则。无特指,数据精确至小数点后两位,并最好以指数形式表示。

## 练 习 题

1. 通用气体常数  $R = 82.06(\text{atm} \cdot \text{cm}^3)/(\text{mol} \cdot \text{K})$ , 将其换算成国际单位  $\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

2. 试将下列物理量换算成指定的单位

密度:  $13.6\text{g}/\text{cm}^3 = \underline{\hspace{2cm}} \text{kg}/\text{m}^3$ ;

压强:  $35\text{kgf}/\text{cm}^2 = \underline{\hspace{2cm}} \text{Pa}$ ;

$4.7\text{atm} = \underline{\hspace{2cm}} \text{Pa}$ ;

$670\text{mmHg} = \underline{\hspace{2cm}} \text{Pa}$ ;

功率:  $10 \text{ 马力} = \underline{\hspace{2cm}} \text{kW}$ ;

比热容:  $2\text{Btu}/(\text{lb} \cdot ^\circ\text{F}) = \underline{\hspace{2cm}} \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;

$3\text{kcal}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}) = \underline{\hspace{2cm}} \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;

流量:  $2.5\text{L}/\text{s} = \underline{\hspace{2cm}} \text{m}^3/\text{h}$ ;

温度:  $25^\circ\text{C} = \underline{\hspace{2cm}} ^\circ\text{F}$ ;

$100^\circ\text{F} = \underline{\hspace{2cm}} ^\circ\text{C}$ 。



# 第一章 流体流动

## 基础理论和知识

流速、流量、牛顿流体、非牛顿流体、雷诺数、沿程阻力、局部阻力等的概念。

## 基本技能和要求

1. 熟练地掌握流体流动中其物理性质的变化规律以及能量、质量平衡计算的方法。
2. 能设计一般的管路输送系统。

在食品工业生产中,流体(液体、气体)的流动是各种单元操作中普遍涉及的现象。工业生产过程中,常需按照工艺要求,将某种液体或气体依次输送到某些设备或使用地。一般情况下,这类输送需借助于管路系统和输送设备(如泵或风机等)才能完成。

本章主要是讨论流体流动过程的基本原理和流体在管内流动的规律,从而解决流体输送和管路及辅件的设计选择问题。

## 第一节 流体流动中的作用力

### 一、流体的物理性质与内摩擦力

对于某种特定流体,衡量其在某状况下具有的特征的状态参数,称做这种流体的物理性质。如水和干空气的物理性质可参见本书附录三。从表中可以看出,影响流体物理性质变化的主要因素,一是温度,二是压力。一般认为,气体的分子间密度很稀,在外力作用下,体积很容易被压缩,故称做可压缩流体;而液体内部分子间间距较小,外力作用下,体积改变很少,故称做不可压缩流体。所以查取流体的物理性质参数时,气体要注意受压力和温度的共同影响。而液体压力作用较弱,主要考虑温度影响。