



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



面向21世纪课程教材

Textbook Series for 21st Century

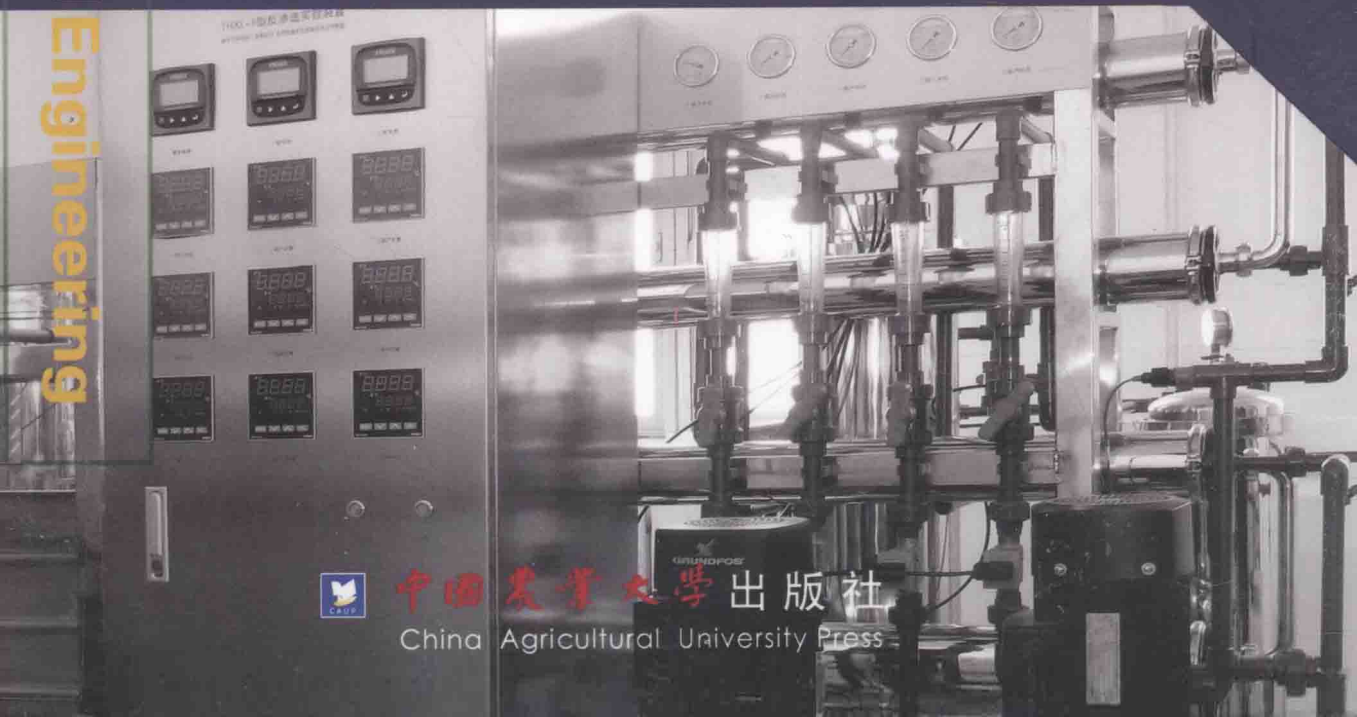
The Principle of Food

Engineering

食品工程原理

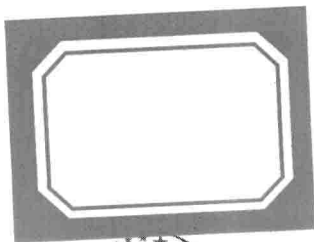
第3版

李云飞 葛克山◎主编



中国农业大学出版社

China Agricultural University Press



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



面向 21 世纪课程教材

Textbook Series for 21st Century

食品工程原理

第 3 版

李云飞 葛克山 主编

中国农业大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

根据食品加工中的操作单元和所涉及的基础理论,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上,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。书中设置了大量的例题、思考题和习题等环节,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。

图书在版编目(CIP)数据

食品工程原理/李云飞,葛克山主编. —3 版. —北京:中国农业大学出版社,2014. 6
ISBN 978-7-5655-0928-5

I. ①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(2014)第 059321 号

书 名 食品工程原理(第 3 版)

作 者 李云飞 葛克山 主编

策划编辑 宋俊果 刘 军

封面设计 郑 川

出版发行 中国农业大学出版社

社 址 北京市海淀区圆明园西路 2 号

电 话 发行部 010-62731190,2620

编辑部 010-62732617,2618

网 址 <http://www.cau.edu.cn/caup>

经 销 新华书店

印 刷 北京时代华都印刷有限公司

版 次 2014 年 8 月第 3 版 2014 年 8 月第 1 次印刷

规 格 787×1 092 16 开本 26 印张 642 千字

定 价 42.00 元

责任编辑 刘耀华 王笃利

责任校对 王晓凤 陈 莹

邮政编码 100193

读者服务部 010-62732336

出版部 010-62733440

E-mail cbsszs@cau.edu.cn

图书如有质量问题本社发行部负责调换

第3版编审人员

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)

参编者 (按姓氏拼音排序)

蒋玉梅(甘肃农业大学)

李 雁(华南农业大学)

齐治国(甘肃农业大学)

宋立华(上海交通大学)

于殿宇(东北农业大学)

张佰清(沈阳农业大学)

周颖越(上海海洋大学)

主 审 徐文达(上海海洋大学)

第2版编审人员

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)

参编者 (按姓氏拼音排序)

蒋玉梅(甘肃农业大学)

李 雁(华南农业大学)

齐治国(甘肃农业大学)

宋立华(上海交通大学)

于殿宇(东北农业大学)

张佰清(沈阳农业大学)

周颖越(上海海洋大学)

主 审 徐文达(上海海洋大学)

第1版编审人员

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

参编者 (按姓氏拼音排序)

胡 萍 天津商学院

蒋玉梅 甘肃农业大学

李喜载 福建农林大学

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

全国高等学校食品类专业系列教材 编审指导委员会委员

(按姓氏拼音排序)

- | | | | |
|-----|-------------|------|-------------|
| 曹小红 | 天津科技大学 | 教授 | 博士生导师 |
| 陈绍军 | 福建农林大学 | 教授 | 博士生导师 |
| 陈宗道 | 西南大学 | 教授 | 博士生导师 |
| 董海洲 | 山东农业大学 | 教授 | 博士生导师 |
| 郝利平 | 山西农业大学 | 教授 | 博士生导师 |
| 何国庆 | 浙江大学 | 教授 | 博士生导师 |
| 贾英民 | 河北科技大学 | 教授 | 博士生导师 |
| 江连洲 | 东北农业大学 | 教授 | 博士生导师 |
| 李洪军 | 西南大学 | 教授 | 博士生导师 |
| 李里特 | 中国农业大学 | 教授 | 博士生导师 |
| 李士靖 | 中国食品科学技术学会 | 副秘书长 | 教授 |
| 李新华 | 沈阳农业大学 | 教授 | 博士生导师 |
| 李云飞 | 上海交通大学 | 教授 | 博士生导师 |
| 林家栋 | 中国农业大学 | 教授 | 中国农业大学出版社顾问 |
| 罗云波 | 中国农业大学 | 教授 | 博士生导师 |
| 南庆贤 | 中国农业大学 | 教授 | 博士生导师 |
| 钱建亚 | 扬州大学 | 教授 | 博士生导师 |
| 石阶平 | 国家食品药品监督管理局 | 教授 | 博士生导师 |
| 史贤明 | 上海交通大学 | 教授 | 博士生导师 |
| 孙远明 | 华南农业大学 | 教授 | 博士生导师 |
| 夏延斌 | 湖南农业大学 | 教授 | 博士生导师 |
| 谢笔钧 | 华中农业大学 | 教授 | 博士生导师 |
| 谢明勇 | 南昌大学 | 教授 | 博士生导师 |
| 杨公明 | 华南农业大学 | 教授 | 博士生导师 |
| 岳田利 | 西北农林科技大学 | 教授 | 博士生导师 |
| 赵丽芹 | 内蒙古农业大学 | 教授 | 博士生导师 |
| 周光宏 | 南京农业大学 | 教授 | 博士生导师 |

出版说明并代序

承蒙广大读者厚爱，食品科学与工程系列教材出版6年来，业已成为目前全国高等学校本科食品类专业教育使用最为广泛的主要教科书。出版之初，这套教材便被整体列为教育部“面向21世纪课程教材”，至今已累计发行33万册，其中《食品生物技术导论》、《食品营养学》、《食品工程原理》、《粮油加工学》、《食品试验设计与统计分析》等书已成为“十五”、“十一五”国家级规划教材。实践证明，这套教材的设计、编写是成功的，它满足了这一时期我国食品生产发展和学科建设的需要，为我国食品专业人才培养做出了积极的贡献。

教材建设是学科建设的重要内容，是人才培养的重要支柱，也是社会和经济发展的反映。近年来，随着我国加入世界贸易组织，食品工业在机遇和挑战并存的形势下得以持续快速的发展，食品工业进入到了一个产业升级、调整提高的关键时期。食品产业出现了许多新情况和新问题，原有的教材无论在内容广度上，还是在深度上，都已经难以满足时代的需要。教材建设无疑应该顺应时代发展，与时俱进，及时反映本学科科学技术发展的最新内容以及产业和社会经济发展的最新需求。正是在这样的思想指导下，我们重新修订和补充了这套教材。

在中国农业大学出版社的支持下，我们组织了全国40多所大专院校、科研院所的300多位一线专家教授，参与教材的编写工作，专家涉及生物、工程、医学、农学等领域。在认真总结原有教材编写经验的基础上，综合一线任课教师和学生的使用意见，对新增教材进行了科学论证和整体策划，以保证本套教材的系统性、完整性和实用性。新版系列教材在原有15本的基础上新增了20本，主要涉及食品营养、食品质量与安全、市场与企业管理等相关内容，几乎覆盖所有食品学科专业的骨干课程和主要选修课程。教材既考虑到对食品科学与工程最新理论发展的介绍，又强调了食品科学的具体实践。该系列教材力求做到每本既相对独立又相互衔接，互为补充，成为一个完整的课程体系。本套教材除可作为大专院校的教科书外，也可作为食品企业技术人员的参考材料和技术手册。

感谢参与策划、编写这套教材的所有专家学者，他们为这套教材贡献了经验、智慧、心血和时间，同时还要感谢各参与院校和单位所给予的支持。

由于本系列教材的编写工程浩大，加之时间紧、任务重，不足之处在所难免，希望广大读者、专家在使用过程中提出宝贵意见，以使这套教材得以不断完善和提高。

罗云波
2008年8月16日
于马连洼

第3版前言

本教材《食品工程原理》从第1版(2002年)出版至今已面向读者10余年,在这个过程中编写组得到了广大使用单位的教师和学生的反馈意见,也得到了中国农业大学出版社的大力支持,在此编写组向广大读者和出版社表示诚挚的谢意。根据国家高等教育发展方向和人才培养模式的调整,编写组在第2版(2009年)基础上,重点细化了各章节内容的表述,使全书内容在文字、图表、公式符号等方面更趋完善,单元结构更趋合理。

本教材共12章,由李云飞、葛克山主编,负责组织与全书修正工作。张青、伍军和黄阿根为副主编,协助修正工作。上海海洋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、绪论和附录等	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	制冷与食品冷冻	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	张佰清	沈阳农业大学
第6章	粉碎与筛分	齐治国	甘肃农林大学
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	浸出与萃取	周颖越	上海海洋大学
第10章	膜分离	伍军	北京农学院
第11章	溶液浓缩	于殿宇	东北农业大学
第12章	食品干燥	张青	上海交通大学

由于编者水平有限,书中仍难免有许多不足之处,望读者提出宝贵意见和建议,以便编写组及时补充与修正。

编者
2014年6月

第2版前言

为进一步适应各高校“食品工程原理”课程的开课情况,根据原教材(中国农业大学出版社,2002年版)使用单位教师和学生的反馈意见,《食品工程原理》教材编写组在保留原框架基础上进行了较大的改动。其中重点压缩或者删减了部分公式推导和单元操作装置等内容,突出基本原理和新型技术原理。

本教材共12章,由李云飞、葛克山主编,负责组织编写与全书统稿工作。张青、伍军和黄阿根为副主编,协助统稿工作。上海海洋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	制冷与食品冷冻	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	张佰清	沈阳农业大学
第6章	粉碎与筛分	齐治国	甘肃农业大学
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	浸出与萃取	周颖越	上海海洋大学
第10章	膜分离	伍军	北京农学院
第11章	溶液浓缩	于殿宇	东北农业大学
第12章	食品干燥	张青	上海交通大学

由于主讲课程变动等原因,福建农林大学李喜载老师和天津商学院胡萍老师未能继续参加本次编写。他们在原教材(中国农业大学出版社,2002年版)编写中做了大量的工作,对本次编写有很大的帮助,对此,编写组深表谢意。

由于编者水平有限,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

2009年1月

第 1 版前言

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

绪 论

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主干课程之一。

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,二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,本课程可以概况为三部分。

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,但它们之间并不是绝对没有联系的。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、传热学、传质学和热力学等问题都关系到下一环节的状态,毫无疑问,也关系到产品的质量和成本。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来学习和研究。

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、自动化或半自动化。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原理中将不断出现,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。以往由于技术和经济水平的限制,有些技术在食品工程中还没有得到较大的应用,如超高压(200~700 MPa)加工技术、工业化微波杀菌技术、欧姆电加工技术和超微结构重组技术等,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

2014年6月

目 录

绪论	I
第 1 章 流体力学基础	1
1.1 牛顿流体及其黏度	2
1.1.1 牛顿内摩擦定律	2
1.1.2 流体黏度的定义及单位	3
1.1.3 理想流体	3
1.2 流体流动能量平衡	4
1.2.1 稳定流动热力体系的概念	4
1.2.2 稳定流动体系的能量平衡	4
1.2.3 不可压缩理想流体的稳定流动与柏努利(Bernoulli)方程	7
1.2.4 不可压缩实际流体的稳定流动	8
1.3 管中流动	8
1.3.1 管中稳定流动连续性方程	9
1.3.2 雷诺实验与雷诺数	9
1.3.3 水力直径	10
1.3.4 圆管中的滞流	10
1.3.5 圆管中的湍流	13
1.3.6 管路中的沿程阻力	16
1.3.7 管路中的局部阻力	18
1.4 液体输送设备	22
1.4.1 泵的类型	22
1.4.2 叶片泵的主要性能和特性	22
1.4.3 泵的安装高度	27
1.4.4 管路特性	28
1.4.5 泵的工作点	29
1.5 简单管路计算	30
习题	34
思考题	35
第 2 章 传热	36
2.1 热传导	37
2.1.1 傅立叶导热定律与热导率	37
2.1.2 通过单层壁的稳定热传导	38

2.1.3	通过多层壁的稳定热传导	39
2.2	对流传热	41
2.2.1	牛顿冷却定律与对流传热系数	41
2.2.2	对流传热系数关联式的建立方法	42
2.2.3	流体在管内作强制对流	43
2.2.4	流体外绕壁面强制对流	45
2.2.5	流体在搅拌槽内强制对流	47
2.2.6	大空间自然对流传热	47
2.2.7	蒸气冷凝放热	48
2.2.8	沸腾传热	50
2.3	辐射传热	52
2.3.1	基本概念	52
2.3.2	物体的辐射能力	53
2.3.3	两固体表面间的辐射传热	54
2.3.4	对流与辐射的综合传热	57
2.4	稳定传热过程计算	58
2.4.1	热量衡算	59
2.4.2	总传热速率方程	59
2.4.3	总传热系数	60
2.4.4	传热的平均温度差	62
2.4.5	传热面积的计算	67
2.4.6	传热过程的强化	67
2.5	不稳定传热	70
2.5.1	集总参数分析法	70
2.5.2	不稳定导热的图解法	71
2.6	换热器简介	77
2.6.1	管式换热器	77
2.6.2	其他形式的换热器	80
	习题	80
	思考题	82
第3章	制冷与食品冷冻	83
3.1	制冷技术原理	84
3.1.1	制冷基本概念、原理与方法	84
3.1.2	一般制冷方法	86
3.1.3	低温制冷方法	88
3.1.4	食品冷冻常用的蒸气压缩式制冷循环	90
3.2	制冷剂和载冷剂	97
3.2.1	对制冷剂的要求和选用制冷剂的原则	98
3.2.2	常用的制冷剂	98

3.2.3	制冷剂的发展趋势	100
3.2.4	载冷剂	100
3.3	食品的冻结	101
3.3.1	水的冻结曲线	101
3.3.2	食品的冻结曲线	102
3.3.3	水分结冰率与最大冰晶生成区	103
3.3.4	冻结对食品的影响	103
3.3.5	食品冻结的速度与时间	106
	习题	111
	思考题	111
第4章	颗粒与流体之间的相对流动	112
4.1	流体绕过颗粒及颗粒床层的流动	113
4.1.1	颗粒床层的特性	113
4.1.2	流体绕球形颗粒的流动阻力(曳力)	115
4.1.3	流体通过颗粒床层的压降	116
4.2	颗粒在流体中的运动	117
4.2.1	固体颗粒沉降过程的作用力	117
4.2.2	固体颗粒的沉降速度	118
4.3	固体流态化与气力输送简介	121
4.3.1	固体流态化	121
4.3.2	气力输送	128
4.4	非均相混合物的分离	130
4.4.1	沉降	131
4.4.2	过滤	138
	习题	149
	思考题	151
第5章	液体搅拌	153
5.1	液体搅拌混合的基本理论	154
5.1.1	混合物的混合程度	154
5.1.2	过程对混合程度的要求	157
5.1.3	混合的原理	158
5.1.4	混合物的稳定性	159
5.1.5	混合速率	159
5.2	搅拌器的性能	160
5.2.1	常用的机械搅拌装置	160
5.2.2	搅拌器的分类	160
5.2.3	搅拌设备的其他结构问题	162
5.2.4	搅拌器的液体循环量与压头	162
5.2.5	搅拌器的选型	163

5.2.6	搅拌器的放大	164
5.3	搅拌器的功率	166
5.3.1	搅拌时机械能的输入	166
5.3.2	功率关联式	166
5.3.3	功率曲线	168
5.3.4	非牛顿液体的搅拌功率	169
5.4	乳化	170
5.4.1	乳化机理	171
5.4.2	乳化液的稳定性及影响其稳定性的主要因素	171
5.4.3	乳化剂及其作用	172
5.4.4	乳化液形成的方法	172
5.4.5	乳化设备简介	173
	习题	174
	思考题	174
第6章	粉碎与筛分	175
6.1	粉碎	176
6.1.1	粉碎的基本概念	176
6.1.2	粒度分布	178
6.1.3	粒度分布的测定	180
6.2	粉碎分类	180
6.2.1	按被粉碎粒度分类	180
6.2.2	按物料中含水量分类	181
6.2.3	按粉碎比分类	181
6.2.4	按粉碎力分类	181
6.2.5	按粉碎工艺类型分类	182
6.3	物料的性质	183
6.3.1	物料的力学性质	183
6.3.2	物料的腐蚀性	183
6.4	粉碎能耗假说	183
6.4.1	表面积假说	184
6.4.2	体积假说	185
6.4.3	裂缝假说	185
6.4.4	粉碎能耗的统一公式	185
6.5	筛分	186
	习题	192
	思考题	193
第7章	吸收与蒸馏	194
7.1	传质学基础	195
7.1.1	扩散现象与分子扩散速率计算	195