



普通高等教育食品类专业“十二五”规划教材
高等学校食品类国家特色专业建设教材

食品工程原理

SHIPIN GONGCHENG YUANLI



岳田利 魏安池 主编

郑州大学出版社



普通高等教育食品类专业“十二五”规划教材
高等学校食品类国家特色专业建设教材

食品工程原理

SHIPIN GONGCHENG YUANLI

□□□□□□□□□□□□□□□□
□□□□□□□□□□□□□□□□
□□□□□

岳田利 魏安池◎主编



郑州大学出版社
郑 州

内容提要

食品加工具有原料来源广泛、加工工艺与实现途径多种多样的特点。为此,本书重点把理论的系统性和解决实际问题的实用性相结合,突出工程观念,力求内容简练。全书共分14章,可作为高等院校食品、生物工程类及相关专业教材,也可供上述专业及相关部门技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

食品工程原理/岳田利,魏安池主编. —郑州:郑州大学出版社,2014.9

普通高等教育食品类专业“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5645-1705-2

I. ①食… II. ①岳… ②魏… III. ①食品工程
学-高等学校-教材 IV. ①TS201.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第150176号



郑州大学出版社出版发行

郑州市大学路40号

出版人:王 锋

全国新华书店经销

郑州市诚丰印刷有限公司印制

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:39.25

字数:929千字

版次:2014年9月第1版

邮政编码:450052

发行部电话:0371-66966070

印次:2014年9月第1次印刷

书号:ISBN 978-7-5645-1705-2

定价:60.00元

本书如有印装质量问题,由本社负责调换



编写指导委员会

(按姓氏笔画排序)

- | | |
|-----|------------------------|
| 王茂增 | 河北工程大学农学院副教授 |
| 艾志录 | 河南农业大学食品科学技术学院教授 |
| 权伍荣 | 延边大学农学院食品科学系教授 |
| 刘延奇 | 郑州轻工业学院食品与生物工程学院教授 |
| 刘全德 | 徐州工程学院食品生物工程学院副教授 |
| 孙俊良 | 河南科技学院食品学院教授 |
| 朱 珠 | 吉林工商学院食品工程分院教授 |
| 肖安红 | 武汉工业学院食品科学与工程学院教授 |
| 李新华 | 沈阳农业大学食品学院教授 博导 |
| 汪东风 | 中国海洋大学食品科学与工程学院教授 博导 |
| 张凤宽 | 吉林农业大学发展学院生物食品学院教授 |
| 张进忠 | 安阳工学院生物与食品工程学院教授 |
| 陆启玉 | 河南工业大学粮油食品学院教授 博导 |
| 陈从贵 | 合肥工业大学生物与食品工程学院教授 |
| 邵秀芝 | 山东轻工业学院食品与生物工程学院教授 |
| 岳田利 | 西北农林科技大学食品科学与工程学院教授 博导 |
| 胡耀辉 | 吉林农业大学食品科学与工程学院教授 博导 |
| 侯玉泽 | 河南科技大学食品与生物工程学院教授 |
| 章超桦 | 广东海洋大学食品科技学院教授 博导 |
| 蔺毅峰 | 运城学院生命科学系教授 |
| 阚建全 | 西南大学食品科学学院教授 博导 |



Food

本书作者

主 编 岳田利 魏安池

主 审 黄泽元

副 主 编 胡仲秋 高振鹏 宋 慧
王成忠 任来成 李忠宏

编写人员 (按姓氏笔画排序)

马国刚	王成忠	朱俊友
任来成	李忠宏	宋 慧
陈春刚	岳田利	胡仲秋
高振鹏	唐仕荣	彭 丹
魏安池		



近年来,我国高等教育事业快速发展,取得了举世瞩目的成就,为我国经济社会的快速、健康和可持续发展以及高等教育自身的改革发展作出了巨大贡献,但是,还不能完全适应经济社会发展的需要,迫切需要进一步深化高等学校教育教学改革,提高人才培养的能力和水平,更好地满足经济社会发展对高素质创新性人才的需要。为此,国家实施了高等学校本科教学质量与教学改革工程,进一步确立了人才培养是高等学校的根本任务,质量是高等学校的生命线,教学工作是高等学校各项工作的中心的指导思想,把深化教育教学改革、全面提高高等教育教学质量放在了更加突出的位置。

专业建设、课程建设和教材建设是高等教育“质量工程”的重要组成部分,是提高教学质量的关键。“质量工程”实施以来,在专业建设、课程建设方面取得了明显的成果,而教材是这些成果的直接体现,同时也是深化教学内容和教学方法改革的重要载体。为此,教育部要求加强立体化教材建设,提倡和鼓励学术水平高、教学经验丰富的教师,根据教学需要编写适应不同层次、不同类型院校,具有不同风格和特点的高质量教材。郑州大学出版社按照这样的要求和精神,在教育部食品科学与工程专业教学指导委员会的指导下,在全国范围内,对食品类专业的培养目标、规格标准、培养模式、课程体系、教学内容等,进行了广泛而深入的调研,在此基础上,组织全国二十余所学校召开了食品类专业教育教学研讨会、教材编写论证会,组织学术水平高、教学经验丰富的一线教师,编写了本套系列教材。

教育教学改革是一个不断深化的过程,教材建设是一个不断推陈出新、反复锤炼的过程,希望这套教材的出版对食品类专业教育教学改革和提高教育教学质量起到积极的推动作用,也希望使用教材的师生多提意见和建议,以便及时修订、不断完善。

编写指导委员会

2010年11月



Food

前言

食品科学随着经济的发展和社會技术的进步在飞速发展,《食品工程原理》作为食品科学各专业最基础的专业课之一也应与时俱进。本教材在编写时参照教育部食品专业教学指导委员会制定的培养方案和基本要求,结合应用型本科教育教学情况和实际,以培养食品科学与工程领域应用型人才为目标,以工科素质教育和能力培养为根本,以经典的单元操作为基础,融入当今食品科学与工程发展的新原理、新技术。所以这本教材适用于各院校食品工程专业、食品安全专业、农产品加工与储藏专业、蛋白质工程和粮油工程专业的本科教学。各专业可根据其自身特点必修或选修全部或部分内容。

本书的具体编写分工如下:岳田利(西北农林科技大学)编写第1章,彭丹(河南工业大学)编写第2章,宋慧(徐州工程学院)编写第3章,魏安池(河南工业大学)编写第4章,王成忠(山东轻工业学院)编写第5章和附录,唐仕荣(徐州工程学院)编写第6章,任来成(吉林农业大学)编写第7章,胡仲秋(西北农林科技大学)编写第8章,马国刚(运城学院)编写第9章,胡仲秋、朱俊友(西北农林科技大学)编写第10章,陈春刚(河南科技学院)编写第11章,高振鹏(西北农林科技大学)编写第12章,李忠宏(西北农林科技大学)编写第13章,朱俊友(安阳工学院)编写第14章。

本书涉及面广,学科交叉多,虽编者著书态度认真,限于目前学术资料和个人能力的局限,加之时间仓促,难免有遗漏和错误,恳请广大读者批评指正。

编者

2014年8月1日



Food

目录

第1章 绪论	1
1.1 食品工程原理的研究内容	3
1.2 单位和量纲	4
1.3 物料衡算和能量衡算	6
第2章 流体流动	9
2.1 概述	10
2.2 流体静力学原理和应用	10
2.3 流体在管内流动的基本方程	19
2.4 流体流动现象	28
2.5 流体在管内的流动阻力损失	40
2.6 管路计算	52
2.7 流速和流量的测量	58
第3章 流体输送机械	68
3.1 离心泵	69
3.2 其他类型泵	89
3.3 气体输送机械	93
3.4 真空泵	101
第4章 传热	105
4.1 概述	106
4.2 热传导	109
4.3 对流传热	117
4.4 辐射传热	133
4.5 稳定传热过程计算	142
4.6 换热器	156
第5章 蒸发与结晶	172
5.1 蒸发	173
5.2 结晶	192
第6章 蒸馏	203
6.1 双组分溶液的气液相平衡	204

6.2	蒸馏与蒸馏原理	213
6.3	双组分连续精馏的计算	218
6.4	精馏装置	245
6.5	其他蒸馏方法	254
第7章	干燥	268
7.1	干燥的目的和方法	269
7.2	湿物料中的水分	271
7.3	湿空气的性质	281
7.4	湿空气的焓-湿图及其应用	289
7.5	干燥静力学	295
7.6	干燥动力学及干燥时间	308
7.7	干燥器	315
7.8	其他干燥设备	324
第8章	制冷	334
8.1	制冷技术的基本原理	335
8.2	制冷剂和载冷剂	337
8.3	蒸汽压缩式制冷	338
8.4	食品冷冻	345
8.5	食品冷藏库	355
第9章	萃取	361
9.1	液-液萃取	362
9.2	固-液萃取	393
9.3	超临界流体萃取	406
9.4	双水相萃取	411
9.5	其他萃取技术	413
第10章	非均相混合物的分离	417
10.1	沉降	418
10.2	过滤	440
第11章	膜分离	454
11.1	膜及膜分离器	455
11.2	反渗透	463
11.3	超滤	470
11.4	电渗析	476
第12章	液体吸附与离子交换	482
12.1	液体吸附	483
12.2	离子交换	493

第 13 章	气体吸收	511
13.1	气体吸收概述	512
13.2	吸收的基本理论	514
13.3	低组成气体吸收的计算	523
13.4	填料塔	535
第 14 章	混合	542
14.1	粉碎理论	543
14.2	粒度测定	548
14.3	粉碎方法	551
14.4	筛分	565
14.5	混合的基本原理	569
14.6	液体的搅拌混合	572
14.7	乳化	580
14.8	浆体的混合及塑性固体的捏合	585
14.9	固体的混合	591
附录		596
参考文献		614

绪论

第1章

食品加工是以农、林、牧、副、渔业的动植物产品为原料的,这些原料的结构和成分非常复杂。原料的成分随品种、成熟度及储藏条件而变化。某些成分如蛋白质、酶等都是生物学活性物质,在加工条件下会引起变性、钝化或破坏。某些成分如色素、脂肪等,在有氧气存在的条件下,也会发生变色或腌败。而某些芳香类物质则又会因加工条件不当而损失。总之,作为人类食用的食品,应考虑在加工时色、香、味、营养成分的变化问题。这也是长期以来食品加工难于突破传统方法的原因所在。

历史上,食品加工的出现远远早于化学加工。人类以家庭烹调和手工方式加工食品延续很久,但食品工业的出现则仅有 100 多年的历史。长期以来,食品工业是以其加工经验和传统方法作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。即使今天,仍有一些传统食品的生产缺少食品科学的支撑。食品加工的这一事实有力地说明,虽然食品工业的出现较化学工业为早,但食品科学的出现则远远落后于化学工业。

食品工业在第二次世界大战期间及战后得到飞速发展。原因在于人们发现食品工业中许多基本操作单元在原理上与化学工业是相似的,将化工原理中的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,食品工程原理的基本内容来源于化工原理,二者对单元操作的研究思路和方法是相通的,但面对的原料、基质、体系又不尽相同。

食品加工科学化一个重要方面是化工单元操作的引入和运用。虽然化工单元操作被引入食品加工领域较晚,但一旦引入和运用,就更促进食品工业迅速向着大规模、连续化、自动化的生产发展。例如,以豆类为原料制造豆粉的现代化工程就是具体运用这些化工单元操作的典型成果。前者是由粉碎、离心分离、沉降、浓缩、喷雾干燥,后者是由粉碎、配料、混合、造粒等单元操作科学而巧妙地组合而成的食品工程。

单元操作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食物生产技术,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,促进了食品生产技术的发展。对所有这些单元操作研究成果进行总结,就构成了食品工程的基础学科——食品工程原理。但是,食品工业中引入和运用单元操作的研究比较缓慢,主要原因是在食品原料性质上存在着极为显著的差别。

(1) 动、植物原料具有热敏性和氧化变质的特点 动、植物原料的主要成分中,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下易氧化变质。食品中风味性的芳香成分遇热易挥发损失。为避免食品加工的高温破坏和氧化变质,加工条件就不得不采用低温、低压。在一定条件下,低温与低压紧密相关,所以单元操作的理论研究和运用就更多地集中于诸如真空输送、真空过滤、真空脱气、真空冷却、真空蒸发、真空结晶、真空造粒、真空干燥、真空蒸馏、真空成型、真空包装、冷冻浓缩、冷冻升华干燥等方面。

(2) 食品加工原料和制品具有腐败变质的特点 食品加工原料和制品含有多种营养物质,因而也是微生物活动的良好场所,腐败变质是这些原料的特点。食品正是在这些微生物及其本身所含的酶的作用下发生腐败变质的。食品加工的目的,就是如何抑制这些微生物和酶的活动,以便于提高制品的保藏性。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。

(3) 食品加工原料几乎都是凝聚态的 食品加工原料几乎都是凝聚态的,在食品工

业方面,要使固体或液体原料成为多种美味可口、营养丰富的食品,首先必须分离出不同成分并组合制成不同种类的制品。同时为了做到有益无毒,风味别致,又必须反复提纯和精制。所以在食品工业中,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。在食品工业中,不仅一般的液体吸附、离子交换、固体浸出、过滤分离成为重要的单元操作,而且,近年来已开发了半透膜分离技术、电渗析技术、凝胶过滤、酶萃取等新型的提取、分离和提纯操作。

由此可见,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,食品工程单元操作与化工单元操作两者既彼此联系又各有特性。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,使食品工程原理成为内容丰富、独具特色的学科。

1.1 食品工程原理的研究内容

食品工程原理研究食品工程中各种单元操作的基本原理和方法、典型设备和相关计算。

1.1.1 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 食品工程中运动的流体发生的动量由一处向另一处传递的过程,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 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 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。

1.1.2 单元操作

食品工程原理在流体流动、传热和传质等三大传递原理的基础上,讨论相关的单元操作。

食品加工过程中采用的一种单元操作往往涉及不止一种传递过程,例如蒸馏操作既包括质量传递,也包括热量传递。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。

食品工程原理课程主要讲授食品加工过程的各种工程概念和单元操作。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单元操作构成

的。例如,由甜菜制糖包括 30 多个单元操作,其中浸取、蒸发浓缩、结晶、离心分离、干燥等都是主要的操作单元。主要工艺过程为: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,再送入结晶罐结晶。将结晶混合物用离心机分离出糖结晶,经干燥即可得糖制品,再包装入库。再例如用大豆以萃取法制油,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、离心脱胶等步骤,得豆油产品。通过以上两个例子可知,虽然甜菜制糖和大豆制油的生产工艺是不同的,但是,两者的某些单元操作是类似的。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。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,有相同的工程计算方法。食品工程原理课讨论与食品相关的单元操作技术。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。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 and 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。

1.2 单位和量纲

食品工程原理中含有不同的单位和量纲。凡参与生产过程的物料,既具有各种各样的物理性质(如密度、黏度、导热系数等),又具有表示过程特征的参变数(如温度、压力、速度等)。此等物理量虽然种类很多,但均可通过几个彼此独立的基本量来表示其性质和特征。代表这些基本量的符号称为量纲或因次。常用的量纲有长度(L)、质量(m)、力(F)、时间(t)和温度(θ)等。其他物理量均可通过固有的物理关系与基本量联系起来,称为导出量。所以其他导出量都可按如下形式表示出来:

$$[Q] = L^{\alpha} m^{\beta} t^{\gamma} \dots \quad (1-1)$$

此式称为物理量 Q 的量纲式,而 $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ 则可以是任意的有理数。

量纲式明显地表示出导出量与基本量之间的关系,揭示了物理量的特性。它对于单位换算、验算结果的准确性,具有实用的意义。

单位制是基本单位与导出单位的总和。基本量的单位称为基本单位,通过基本单位而导出的单位称为导出单位。基本量和基本单位的选择,各种单位制均不相同,但通常均取长度和时间作为基本量。

在工程单位制中,力的单位“kg”的规定相当于在真空中以 MKS (meter-kilogram-

second,米-千克-秒)制量度的1 kg 质量的物体,在重力加速度为 $9.806\ 65\ \text{m/s}^2$ 处所受的重力。根据牛顿第二定律 $F=ma$,各种力的单位之间有如下的关系:

$$1\ \text{kg}=1\ \text{kg}\times 9.81\ \text{m/s}^2=9.81\ \text{kg}\cdot\text{m/s}^2=9.81\ \text{N}=1\ 000\ \text{g}\times 981\ \text{cm/s}^2=981\ 000\ \text{g}\cdot\text{cm/s}^2=981\ 000\ \text{dyn}$$

国际单位制(SI制)是国际度量衡会议上提出的一种新的单位制度,它是米制发展的现代形式。这种单位制目前在国际上已普遍使用于整个科学和工程的领域。1997年我国国家标准计量局确定,我国将逐步采用国际单位制。本书所采用的主要就是这种单位制,但考虑到过去自然科学和工程技术领域所使用的其他单位制,所以必要时也兼用其他单位制。

在力学范围内,SI制的基本量和基本单位完全与MKS制相同,即长度的单位为米(m),质量的单位为千克(kg),时间的单位为秒(s)。常见的几种单位制所用的力学基本量和基本单位如表1-1所示。

表1-1 常见单位制的力学基本量和基本单位

单位制	长度		质量		力		时间	
	中文名	代号	中文名	代号	中文名	代号	中文名	代号
SI制	米	m	千克	kg	—	—	秒	s
MKS制	米	m	千克	kg	—	—	秒	s
cgs制	厘米	cm	克	g	—	—	秒	s
工程单位制	米	m	—	—	公斤	kgf	秒	s

SI制总共采用七个基本量和基本单位。除上述力学中采用的m、kg、s这三个之外,在热学中采用热力学温度“开尔文”,简称开,代号为K;在光学中采用发光强度的单位“坎德拉”,简称坎,代号为cd;在电学中采用电流的单位“安培”,简称安,代号为A;在化学和分子物理学中采用物质的量的单位“摩尔”,简称摩,代号为mol。在本学科范围内,主要涉及力学、热学、化学和分子物理学领域,故常用的单位是m、kg、s、K和mol这五个。

在SI制中,按上述基本量的基本单位来量度,就可以确定有关物理方程中的比例因数,或者适当选取比例因数,推出导出量的导出单位。主要物理方程是:

在SI制中,功和能的单位均以牛顿·米来量度,称为焦耳,简称焦,代号为J,即

$$1\ \text{J}=1\ \text{N}\cdot\text{m}=1\ \text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$$

在SI制中,热与功一样,都是以焦耳为其单位。

在SI制中,规定了如表1-2中所列具有专用名称的导出单位,可以用它们和基本单位一起表示其他导出单位。

另外,还规定了如下的单位与SI制的单位并用:如时间采用日(d)、小时(h)、分(min);质量采用吨(t);容积采用升(L);平面角采用度(°)、分(')、秒(")。

物理量的大小由一种单位换算成另一种单位时,其数值亦随之而变,要将原单位表示的数值乘以换算因数方得到新单位表示的数值。所谓换算因数就是原单位与新单位

大小的比值。

表 1-2 具有专用名称的 SI 制导出单位(热力学范围)

物理量	单位中文名称	国际单位符号	用其他导出单位表示
频率	赫兹	Hz	—
力	牛顿	N	—
压力、应力	帕斯卡	Pa	N/m ²
能、功、热	焦耳	J	N·m
功率	瓦特	W	J/s

1.3 物料衡算和能量衡算

食品工程原理中每种单元操作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:

$$Q = F_1/F_2 \tag{1-2}$$

式中 Q ——过程速率;
 F_1 ——过程推动力,N;
 F_2 ——过程阻力,N。

在不同的单元操作过程中,推动力和阻力的含义不同。在过程的平衡关系研究中,经常需要作物料衡算和能量衡算。

1.3.1 物料衡算

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

$$W = W_1 + W_2 \tag{1-3}$$

式中 W ——输入质量,kg;
 W_1 ——输出质量,kg;
 W_2 ——累积质量,kg。

如果过程中累积质量为零,此过程即为一稳态过程,此时:

$$W = W_1 \tag{1-4}$$

式中 W ——输入质量,kg;
 W_1 ——输出质量,kg。

解物料衡算问题,可采取下列步骤:

(1)画出过程框图,进入箭头为输入量,引出箭头为输出量。在每个箭头上标出物料的名称及数据。

(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。

(3) 作物料衡算。衡算可以是对总量的,也可以是对某种成分的。

例 1-1 苹果汁的浓缩

将固形物含量为 7.08% 的苹果原汁引入真空蒸发器进行浓缩,得固形物含量为 58% 的浓缩汁。若苹果原汁进料流量为 1 000 kg/h,计算生产浓缩苹果汁和蒸发水的量。

解:(1) 先按题意画出框图(图 1-1)



图 1-1 例 1-1 框图

图 1-1 中 W ——未知的蒸出水量, kg/h;

C ——未知的浓缩苹果汁量, kg/h。

(2) 取苹果原汁进料 1 000 kg/h 作计算基准。

(3) 总物料衡算: $1\ 000 = W + C$ (1)

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

解(2)式,得 $C = 122$ kg/h。

代入(1)式,解得 $W = 878$ kg/h。

1.3.2 能量衡算

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。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。

例 1-2 食物的直接蒸汽加热

将 100 kg 温度为 5 °C 的食品物料引入加热锅中,通入温度为 120.2 °C 的水蒸气直接加热,最后终温为 81.2 °C,若食品物料的比热容 $c_p = 3\ 559$ J/(kg · K),求蒸汽的消耗量。

解:水蒸气冷凝放出凝结热又降温至 81.2 °C 放热,两步放热之和可由始、终态的焓差直接求得。120.2 °C 水蒸气的比焓为 2 709.2 kJ/kg,而 81.2 °C 液体水的比焓为 339.8 kJ/kg。设蒸汽耗量为 x ,则蒸汽共放热:

$$Q_1 = x(2\ 709.2 - 339.8) = 2\ 369.4x \text{ (kJ)}$$

而食品物料吸热:

$$Q_2 = 100 \times 3\ 559 \times (81.2 - 5) = 2.712 \times 10^7 \text{ (J)}$$

因 $Q_1 = Q_2$,则蒸汽耗量:

$$x = \frac{2.712 \times 10^7}{2\ 369.4 \times 1\ 000} = 11.45 \text{ (kg)}$$