

中等职业教育国家规划教材  
全国中等职业教育教材审定委员会审定

# 食品工程原理

(食品生物工艺专业)

主    编    黄亚东  
责任主审    杨铭铎  
审    稿    李元瑞    姜道年

高等教育出版社

## 内容提要

本书是根据教育部 2001 年颁布的“中等职业学校食品生物工艺专业课程设置”中“主干课程”食品工程原理教学基本要求”,并参照有关行业的职业技能鉴定规范及中级技术工人等级考核标准编写的中等职业教育国家规划教材。

本书共十一章,内容有:流体的流动与输送、传热、过滤、压榨、沉降、离心分离、粉碎、筛分、混合、乳化、流态化技术、气力输送、蒸发、结晶、冷冻浓缩、蒸馏、吸收、萃取、吸附、浸出、离子交换、膜分离、干燥、制冷。

本书可作为中等职业学校食品生物工艺专业教材,也可作为相关行业岗位培训教材或自学用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

食品工程原理/黄亚东主编. —北京:高等教育出版

社, 2002. 12

中等职业教育国家规划教材

ISBN 7-04-011719-3

I. 食... II. 黄... III. 食品工程学—专业学校—教材 IV. TS201.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 099197 号

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号  
邮政编码 100009  
传 真 010-64014048

购书热线 010-64054588  
免费咨询 800-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所  
排 版 高等教育出版社照排中心  
印 刷

开 本 787×1092 1/16  
印 张 22.75  
字 数 560 000

版 次 2002 年 12 月第 1 版  
印 次 年 月第 次印刷  
定 价 27.60 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

# 中等职业教育国家规划教材 出版说明

为了贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》精神,落实《面向 21 世纪教育振兴行动计划》中提出的职业教育课程改革和教材建设规划,根据教育部关于《中等职业教育国家规划教材申报、立项及管理意见》(教职成〔2001〕1 号)的精神,我们组织力量对实现中等职业教育培养目标和保证基本教学规格起保障作用的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教材进行了规划和编写,从 2001 年秋季开学起,国家规划教材将陆续提供给各类中等职业学校选用。

国家规划教材是根据教育部最新颁布的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教学大纲(课程教学基本要求)编写,并经全国中等职业教育教材审定委员会审定。新教材全面贯彻素质教育思想,从社会发展对高素质劳动者和中初级专门人才需要的实际出发,注重对学生的创新精神和实践能力的培养。新教材在理论体系、组织结构和阐述方法等方面均作了一些新的尝试。新教材实行一纲多本,努力为教材选用提供比较和选择,满足不同学制、不同专业和不同办学条件的教学需要。

希望各地、各部门积极推广和选用国家规划教材,并在使用过程中,注意总结经验,及时提出修改意见和建议,使之不断完善和提高。

教育部职业教育与成人教育司

二〇〇一年十月

# 郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》。行为人将承担相应的民事责任和行政责任,构成犯罪的,将被依法追究刑事责任。社会各界人士如发现上述侵权行为,希望及时举报,本社将奖励举报有功人员。

现公布举报电话及通讯地址:

电 话 (010)84043279 13801081108

传 真 (010)64033424

E-mail: dd@hep.com.cn

地 址 北京市东城区沙滩后街 55 号

邮 编 100009

责任编辑	杨树东			
封面设计	刘晓翔			
责任绘图	吴文信	郝	林	尹 莉
版式设计	胡志萍			
责任校对	朱惠芳			
责任印制				

# 前 言

本书是根据教育部 2001 年颁布的“中等职业学校食品生物工艺专业课程设置”中主干课程“食品工程原理教学基本要求”,并参照有关行业的职业技能鉴定规范及中级技术工人等级考核标准编写的中等职业教育国家规划教材。本书的特点是“宽”、“浅”、“用”、“新”。主要体现在以下几个方面:

1. 知识面宽。本教材内容涉及面广,既可作为中等职业学校食品生物工艺专业教材,亦可供大专院校师生及从事食品、发酵、粮食加工、油脂、制糖及其他农产品加工业的生产、科研、设计人员业务学习参考。在教学过程中,可根据专业特点,按“主修模块”、“选修模块”,合理选择教学内容。

2. 深入浅出。为了便于教学,在选择教学内容及表达方式时,力求做到通俗易懂、言简意赅、深入浅出,设法使复杂问题简单化,抽象问题具体化。

3. 注重应用。在编写过程中,能根据“应用型”人才培养的需要,密切联系我国食品生产实际,广泛征求食品生产企业富有实践经验的工程技术人员的意见,力求使专业教学与生产实际相结合,以增强职业教育的针对性和有效性。

4. 突出实践。为了增强学生的职业适应性,培养学生的实践技能,在教学过程中,可有计划地安排认识实习、生产实习、设备拆装、综合实训、大型工艺实验等实践性教学环节。

5. 强化训练。每一单元均安排一定数量的具有代表性的例题、复习思考题及练习题,做到教、学、练相统一。

6. 注意创新。体系新:打破传统的学科体系,淡化课程体系的完整性。对每一单元操作的基础知识、基本理论的阐述本着“少而精”的原则,以“必要”、“够用”为度;“多结论,少演绎”;“多结果,少推导”,着重加强基本操作技能的训练;结构新:一般包括基本概念和理论、基本工艺计算、设备安装、操作要点及有关注意事项、思考题、练习、实训等几个部分;内容新:按照“四新”要求,及时补充食品生产中的新知识、新技术、新工艺、新设备、新方法、新材料。教学方法新:在教学过程中,可利用幻灯片、录像带、光盘及计算机仿真模拟软件等电化教学手段进行辅助教学,以增加学生的感性认识和职业适应能力;考核办法新:本课程除进行常规的理论考核外,应针对性地对实验、实训等实践性教学环节进行单独考核。同时,可根据专业特点,安排学生参加劳动部门组织的相关工种的技能等级考核。

本书共 112 学时,具体安排见下表(供参考):

序号	教 学 内 容	学 时 数		
		授课	实验	合计
1	绪 论	2		2
2	流体的流动与输送	10	2	12
3	传 热	10	2	12
4	过滤、压榨、沉降、离心分离	12	2	14
5	粉碎、筛分、混合、乳化	8	2	10
6	气力输送	4		4
7	蒸发、结晶	8		8
8	蒸馏、吸收、萃取	10		10
9	吸附、浸出、离子交换	6		6
10	膜分离	4		4
11	干 燥	8	2	10
12	制 冷	6	2	8
机 动		12		12
总 计		100	12	112

本书由江苏食品职业技术学院黄亚东主编,四川工商职业技术学院李肇全为副主编。参加编写的人员还有山西省轻工业学校任石苟,四川工商职业技术学院蒋国海,江苏食品职业技术学院史经略,内蒙古轻工业学校孙霖。全书由黄亚东统稿和定稿。本书由全国中等职业教育教材审定委员会审定,由哈尔滨商业大学杨铭铎教授担任责任主审,西北农林科技大学李元瑞教授和姜道年副教授审阅了此稿,本书的编写还得到了高等教育出版社、江苏食品职业技术学院、四川工商职业技术学院等单位领导的大力支持和帮助,在此一并表示感谢。

由于编写时间仓促,在教材中难免有不足之处,恳请广大读者提出宝贵的意见,以便我们在重印和修订时及时改正。

编者

2002年3月

# 目 录

绪论 .....	1	一、气体输送机械的种类及作用 .....	40
一、食品工程原理课程的性质、内容及任务 .....	1	二、常用气体输送设备 .....	41
二、食品原料的特点 .....	1	实训 :离心泵的启动及停车技能训练 .....	44
三、食品生产过程与化工过程的联系 .....	2	思考题 .....	45
四、单元操作的计算基础 .....	2	练习题 .....	45
五、单位制与单位换算 .....	5	第二章 传热 .....	47
六、物理量的量纲 .....	8	第一节 传热的基本概念和理论 .....	47
思考题 .....	9	一、传热的基本方式 .....	47
练习题 .....	9	二、工业上的换热方式 .....	48
第一章 流体的流动与输送 .....	10	三、稳定传热和不稳定传热 .....	48
第一节 流体力学基础 .....	10	第二节 热传导 .....	48
一、流体的物理性质与作用力 .....	10	一、热传导的基本定律——傅里叶定律 .....	48
二、静止流体的基本规律 .....	12	二、导热系数 .....	49
三、流体流动的基本规律 .....	15	三、多层平壁的导热 .....	49
第二节 管内流体流动时的阻力 .....	22	四、圆筒壁的热传导 .....	50
一、流体阻力产生的原因及影响因素 .....	22	第三节 对流传热 .....	52
二、管内流体流动时的速度分布 .....	24	一、对流传热速率方程 .....	52
三、流体流动时的阻力计算 .....	25	二、对流传热系数 .....	53
第三节 流量测定 .....	28	三、流体自然对流时的给热 .....	55
一、毕托管 .....	28	四、流体无相变时的强制性对流给热 .....	57
二、孔板、喷嘴和文丘里流量计 .....	28	五、流体有相变时的强制对流传热系数 .....	60
三、转子流量计 .....	30	第四节 稳定传热的基本计算 .....	63
第四节 管路、管件及阀门 .....	30	一、传热的基本方程 .....	63
一、管道的种类、规格 .....	31	二、热负荷的计算 .....	64
二、管件及管道的连接方式 .....	32	三、传热温度差的计算 .....	65
三、常用阀门简介 .....	34	四、传热系数 $K$ 值的计算和测定 .....	70
第五节 液体输送机械 .....	35	五、强化传热过程的途径 .....	72
一、泵的种类及作用 .....	35	第五节 换热器 .....	72
二、常用的液体输送机械 .....	36	一、夹套式换热器 .....	73
三、离心泵的选用 .....	39	二、蛇管式换热器 .....	73
第六节 气体输送机械 .....	40	三、套管式换热器 .....	74
		四、列管式换热器 .....	74

五、翅片管式换热器.....	76	一、粉碎的基本概念 .....	111
六、片式换热器.....	76	二、粉碎的方法 .....	111
七、螺旋板式换热器.....	76	三、常用的粉碎设备 .....	113
实训一 传热系数的比较 .....	77	第二节 筛分 .....	115
实训二 列管式换热器的压力及 气密性试验 .....	78	一、筛分的基本概念和理论 .....	115
实训三 传热装置系统的开、停车 操作及事故处理方法的训练 .....	79	二、筛分操作在食品工业中的应用 .....	115
思考题 .....	81	三、常用的筛分设备 .....	116
练习题 .....	81	第三节 混合 .....	118
第三章 过滤 压榨 沉降 离心分离 .....	83	一、混合的基本概念和理论 .....	118
第一节 过滤.....	83	二、常用的混合设备 .....	119
一、过滤的基本概念和理论.....	83	第四节 乳化 .....	124
二、常用的过滤设备.....	85	一、乳化的基本概念和理论 .....	124
三、过滤操作的基本工艺计算.....	91	二、乳化设备 .....	126
第二节 压榨.....	93	实训 锤式粉碎机的安装及操作 技能训练 .....	131
一、压榨的基本概念和理论.....	93	思考题.....	131
二、典型的压榨设备.....	94	练习题.....	132
第三节 沉降.....	96	第五章 流态化技术 气力输送 .....	133
一、沉降的基本概念和理论.....	96	第一节 固体流态化的基本原理 .....	133
二、典型的沉降设备.....	97	一、固体流态化基本概念 .....	133
第四节 离心分离 .....	98	二、流化床的结构及操作要点 .....	134
一、离心分离的基本概念和理论.....	98	第二节 气力输送 .....	135
二、离心分离设备.....	99	一、气力输送的原理及特点 .....	135
实训一 恒压过滤操作技能训练 .....	105	二、典型的气力输送设备流程 .....	136
实训二 板框式硅藻土过滤机的安装 及操作技能训练 .....	106	三、气力输送设备的主要部件 .....	138
实训三 螺旋榨汁机的操作技能训练 .....	107	四、气力输送系统的主要工艺参数 .....	141
实训四 间歇沉降实验 .....	108	实训一 流化床操作技能训练 .....	143
实训五 上悬式离心机的安装操作 技能训练 .....	109	实训二 气力输送系统的安装及 操作技能训练 .....	144
思考题.....	110	思考题.....	144
练习题.....	110	练习题.....	144
第四章 粉碎 筛分 混合 乳化 .....	111	第六章 蒸发 结晶 冷冻浓缩 .....	146
第一节 粉碎 .....	111	第一节 蒸发 .....	146
		一、蒸发的基本概念和理论 .....	146
		二、蒸发装置及其选型 .....	146
		三、单效蒸发 .....	151
		四、多效蒸发 .....	154
		五、影响蒸发器生产强度的因素 .....	157

第二节 结晶 .....	158	二、常用浸出装置及操作 .....	218
一、结晶的基本概念和理论 .....	158	第三节 离子交换 .....	222
二、结晶设备(结晶罐) .....	163	一、离子交换的基本概念和理论 .....	222
第三节 冷冻浓缩 .....	164	二、离子交换剂 .....	223
一、冷冻浓缩与冷却结晶(冷冻浓缩的 理论和方法) .....	164	三、离子交换装置及操作要点 .....	225
二、冷冻浓缩的结晶过程 .....	164	思考题 .....	228
三、冷冻浓缩的应用 .....	165	练习题 .....	228
思考题 .....	167	第九章 膜分离 .....	229
练习题 .....	167	第一节 超滤 .....	229
第七章 蒸馏 吸收 萃取 .....	168	一、超滤的基本概念和理论 .....	229
第一节 蒸馏 .....	168	二、超滤装置及操作要点 .....	230
一、蒸馏的基本概念和理论 .....	168	第二节 反渗透 .....	233
二、精馏操作的基本工艺计算 .....	172	一、反渗透的基本概念和理论 .....	233
三、常用的精馏设备及流程 .....	176	二、反渗透装置及操作要点 .....	234
实训 精馏塔的安装和操作 .....	181	第三节 电渗析 .....	235
第二节 吸收 .....	183	一、离子交换膜 .....	235
一、气体吸收的基本概念 .....	184	二、电渗析的基本原理 .....	236
二、吸收原理 .....	187	实训 电渗析装置及操作要点 .....	237
三、常用的吸收设备、流程及操作 .....	188	思考题 .....	238
第三节 萃取 .....	193	练习题 .....	239
一、萃取的基本概念和理论 .....	194	第十章 干燥 .....	240
二、常用的萃取设备流程 .....	198	概述 .....	240
三、萃取操作 .....	201	第一节 湿空气的热力学基础 .....	240
四、超临界流体萃取 .....	202	一、湿空气的性质 .....	241
实训一 板式塔精馏操作技能训练 .....	205	二、湿空气的温度-湿度图 .....	245
实训二 吸收(解吸)操作技能训练 .....	206	三、湿空气的增湿和减湿 .....	249
实训三 液-液萃取操作技能训练 .....	207	第二节 干燥器的物料衡算和热量 衡算 .....	250
思考题 .....	207	一、湿物料中含水量的表示方法 .....	250
练习题 .....	208	二、物料衡算 .....	251
第八章 吸附 浸出 离子交换 .....	209	三、热量衡算 .....	252
第一节 液体吸附 .....	209	四、空气通过干燥器时的状态变化 .....	253
一、液体吸附的基本概念 .....	209	五、干燥器的热效率和干燥效率 .....	254
二、吸附剂 .....	210	第三节 干燥过程的机理 .....	255
三、液体吸附的方法 .....	212	一、平衡水分和物料中水分的分类 .....	255
四、常用吸附装置及操作 .....	212	二、固体物料的干燥机理 .....	256
第二节 浸出 .....	214	三、干燥速率及其影响因素 .....	257
一、浸出的基本概念和计算 .....	215	四、干燥曲线和干燥速率曲线 .....	258

第四节 典型干燥设备及选用 .....	260	第五节 典型制冷系统简介 .....	292
一、几种常见的干燥器 .....	261	一、单级制冷系统的比较 .....	292
二、干燥器的选用 .....	264	二、制冷系统的供液方式 .....	292
第五节 冷冻干燥 .....	265	三、单级间接制冷系统 .....	294
一、冷冻干燥的理论基础 .....	265	第六节 制冷机械与设备 .....	296
二、冷冻干燥的装置系统 .....	269	一、压缩机 .....	296
实训 沸腾干燥操作技能训练 .....	270	二、冷凝器 .....	298
思考题 .....	271	三、膨胀阀 .....	300
练习题 .....	271	四、蒸发器 .....	300
第十一章 制冷 .....	272	五、贮液桶 .....	302
第一节 制冷的意义 .....	272	六、气液分离器 .....	303
第二节 制冷的基本概念和理论 .....	272	七、空气分离器 .....	304
一、逆卡诺循环 .....	272	八、油氨分离器 .....	305
二、制冷量 .....	274	第七节 绝热材料及结构 .....	305
三、制冷系数 .....	275	一、绝热材料 .....	305
四、制冷剂 .....	275	二、防潮隔汽层 .....	308
五、载冷剂 .....	278	三、绝热结构 .....	309
第三节 常用的制冷方法 .....	280	实训 制冷系统的调试和维护 .....	311
一、一般制冷方法 .....	280	思考题 .....	318
二、低温制冷方法 .....	283	练习题 .....	319
第四节 单级蒸气压缩式制冷循环的 计算 .....	285	附录 .....	320
一、实际的蒸气压缩式制冷机循环 .....	285	附录一 单位换算和物理常数 .....	320
二、蒸气压缩式制冷循环的计算 .....	286	附录二 物理性质数据 .....	323
		附录三 型号、规格、规范 .....	344

# 绪 论

食品工业生产是以化学变化或微生物变化为主要特征的工业生产过程。其原料来源广泛,产品种类繁多,加工过程复杂多样,常需使用流体的输送和压缩、沉降、过滤、离心分离、混合、乳化和、传热、蒸发、结晶、干燥、冷冻等操作过程。通常将这些相对独立的操作过程称为单元操作。

不同生产工艺过程的同一单元操作,往往具有共同的基本原理和通用的典型设备。我们把食品生产中常用的单元操作理论,在实践的基础上加以概括、总结和提高,进而应用到生产实践中去,并将其作为一门课程,称为食品工程原理。

我国的食品工业历史悠久,但长期以来一直以其加工经验和传统方法为其生产方式的基础。近年来,随着食品工业产业结构、产品结构的变化及人们生活水平的不断提高,尤其是随着我国加入WTO,食品生产迫切需要通过实现从经验型向科学型的转变,使食品生产向大规模、工业化、连续化和自动化方向发展。

## 一、食品工程原理课程的性质、内容和任务

食品工程原理是以高等数学、物理学、普通化学及物理化学等课程为基础的一门技术基础课。其内容是关于动量传递、热量传递及质量传递的理论,即“三传”原理在有关单元操作中的应用。本课程的主要任务是通过理论教学和技能训练,使学生了解食品生产过程中有关单元操作的基本概念,理解常用单元操作的基本原理,熟悉各单元操作的基本规律,掌握典型设备的组成、结构、工作原理、性能特点、操作要点及有关注意事项,并能灵活运用所学知识和技能分析、解决食品生产中的一般性技术问题,进而使生产过程得到不断改进。

## 二、食品原料的特点

食品原料是农、林、牧、副、渔等行业的动植物产品。原料的结构和成分复杂,其成分随品种、成熟度、加工及贮藏条件而变化。例如,蛋白质、酶等生物活性物质,在加工时易变性、钝化或破坏,色素、脂肪等成分易氧化。总之,作为人类食用的产品,在加工过程中,应根据食品原料的特点,综合考虑色、香、味、营养成分及安全性等各方面问题。

### 1. 热敏性

食品加工原料普遍具有受热易发生营养成分破坏、风味改变、理化性质改变等现象,即热敏性。它能严重影响食品的利用价值、加工性能和产品的质量等。因此,有的食品加工过程常在低温、低压下进行,故真空技术在食品工业中应用很广,如真空输送、真空过滤等。

### 2. 易氧化性

食品加工原料普遍具有易氧化而发生变质或变色等特点。因此,在某些食品的加工过程中应设法避免氧化。

### 3. 易腐性

食品物料营养丰富,成分复杂,很容易受微生物污染而发生腐败变质,或因金属、酸、酶等物质的存在而发生腐败变质。某些食品加工的目的就是抑制微生物或酶的活性以提高制品的保藏性。

### 三、食品生产过程与化工过程的联系

随着现代食品工业的发展,食品工程与化学工程之间的关系愈来愈密切,化工生产中的有些单元操作在食品加工中的应用也日益广泛。这些单元操作的引入和应用,使食品加工技术进入了一个新的领域。例如,以豆类为原料制造蛋白质制品就是运用粉碎、离心分离、沉降、浓缩和喷雾干燥等化工单元操作科学而巧妙地组合而成的食品工程。

然而,由于食品原料的结构和成分的复杂性以及加工要求的特殊性,在化工单元操作与食品加工过程相结合时,会产生研究方向的不同,因而其经验积累也不相同。如对热敏性和易氧化变质的原料,在食品加工中,一般要求采用低温低压(特别是低压)操作。故单元操作的理论研究和技术应用就更多地集中于如真空输送、真空过滤、真空蒸发、真空结晶、真空造粒、真空干燥、真空包装等方面。此外,对具有易腐性的食品加工原料和制品,为了延长其保藏性能,主要采用冷冻浓缩、半透膜浓缩、辐射干燥、冷冻升华干燥、低温冷冻、速冻等单元操作。

食品生产过程虽与化工过程有紧密的联系,但又各有其特殊性。用于食品加工的动植物性原料,其相态几乎全部为固态和液态;食品生产中的固体物料往往比化工生产中的原料具有硬度低、韧性强等特点;食品生产中的液体原料、液体半成品及液体成品多为非牛顿型液体,而化工生产中的液体多为牛顿型液体,在输送、加热或冷却以及搅拌混合等方面各有其特性;在食品工业上,要使固体或液体原料成为多种美味可口、营养丰富,且无毒、风味别致的食品,则提取、分离、净制、混合、乳化、粉碎、筛析以及液体吸附、离子交换、固体浸出、过滤分离等成为重要的单元操作。同时,根据食品加工的特殊需要,近年来又开发了如半透膜分离、电渗析、凝胶过滤、酶萃取等新型的提取、分离和提纯操作。

### 四、单元操作的计算基础

#### 1. 物料衡算

物料衡算的理论依据是质量守恒定律。通过物料衡算,可确定进、出单元设备(或过程)的物料量和组成间的相互数量关系,了解过程中物料的分布及损耗情况,同时还可为单元设备的其他计算提供依据。所谓质量守恒定律,也就是向设备输入的物料质量减去从设备中输出的物料质量,必等于积累在设备中的物料的质量,即

$$\sum m_F - \sum m_D = m_A \quad (0-1)$$

式中:  $\sum m_F$ ——输入物料量的总和;

$\sum m_D$ ——输出物料量的总和;

$m_A$ ——积累物料量。

式(0-1)是物料衡算的通式,适用于任何指定的系统及参加生产过程的全部物料。当没有化学变化时,混合物的任一组分都符合这个通式;当有化学变化时,其中各元素仍然符合这个通式。

式(0-1)既适用于间歇过程,也适用于连续过程。连续稳定过程中,设备内不应有任何物料

积累,即  $m_A = 0$ , 式(0-1)可简化为

$$\sum m_F = \sum m_D \quad (0-2)$$

**例 0-1** 浓度为 20% (质量分数) 的  $\text{KNO}_3$  水溶液以 1 000 kg/h 的流量送入蒸发器。在 422 K 温度下蒸发出一部分水而得到浓度为 50% 的水溶液,再送入结晶器,冷却至 311 K 后,析出含有 4% 结晶水的  $\text{KNO}_3$  晶体,并不断取走,浓度为 37.5% 的  $\text{KNO}_3$  饱和母液则返回蒸发器循环处理。试求结晶产品量  $q_{m,P}$ 、水分蒸发量  $q_{m,W}$ 、循环母液量  $q_{m,R}$  及浓缩液量  $q_{m,S}$ 。

解: (1) 计算结晶产品量  $q_{m,P}$  及水分蒸发量  $q_{m,W}$

首先根据题意画出示意图,如图 0-1 所示。

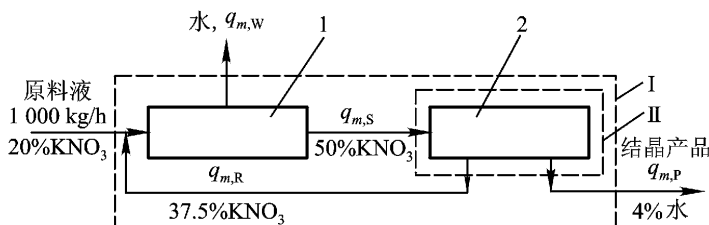


图 0-1 例 0-1 附图

1—蒸发器; 2—结晶器

以 1 h 为基准,在图中虚线方框 I 所示的范围内作物料衡算。因操作过程中未发生化学反应,且为连续稳定过程,故可依式(0-2)写出总物料衡算式及  $\text{KNO}_3$  的衡算式,即

$$1\ 000 = q_{m,W} + q_{m,P}$$

及  $1\ 000 \times 20\% = q_{m,W} \times 0 + q_{m,P} \times (1 - 4\%)$

解得:

$$q_{m,P} = 208.3\ \text{kg/h}$$

$$q_{m,W} = 791.7\ \text{kg/h}$$

(2) 计算循环母液量  $q_{m,R}$  及浓缩液量  $q_{m,S}$

仍以 1 h 为基准,在图中虚线方框 II 所示的范围内作总物料衡算及  $\text{KNO}_3$  衡算

$$q_{m,S} = q_{m,R} + 208.3$$

及  $q_{m,S} \times 50\% = q_{m,R} \times 37.5\% + 208.3 \times (1 - 4\%)$

解得

$$q_{m,R} = 766.6\ \text{kg/h}$$

$$q_{m,S} = 974.9\ \text{kg/h}$$

物料衡算的基本步骤为:

(1) 根据题意确定衡算范围(或衡算系统)。衡算系统可以是一个单元设备,也可以是设备的某一部分。

(2) 根据问题的类型和性质,确定需要补充哪些数据,并设法通过各种途径获得这些数据。

(3) 用流程示意图表示衡算对象。即将问题的文字描述转化为图形描述。用闭合线框出衡算系统,注明进、出系统各物流及其组分的名称或代号、相状态、流量和组成(包括已知量和未知量,必要时将它们换算为统一单位)。

(4) 确定衡算基准。对于间歇过程,常以一次(或一批)操作为基准,即式(0-1)中各项分别代表每次操作输入、输出及积累物料的质量;对于连续过程,则常以单位时间为基准,即式(0-1)

中各项分别代表单位时间内输入、输出及积累物料的质量。

(5) 按框出的衡算范围 根据质量守恒定律列出独立的物料衡算式。

(6) 检验计算结果是否正确。

## 2. 能量衡算

各种形式的能量(如机械能、化学能、电能等)与热之间虽可相互转化,但是,在许多食品设备(如换热器、蒸馏塔等)中,一般不考虑这种能量转变,惟一需要考虑的能量形式就是热能。因此,食品加工过程中的能量衡算可简化为热量衡算,热量衡算的依据是能量守恒定律。

热量衡算的方法与物料衡算的方法基本相同,也必须首先明确衡算范围与衡算基准,但对热量衡算还有两个值得注意的问题:

(1) 进、出系统的各股物料所携带的热量,包括物料的显热与潜热两部分,称为物料的焓。物料的焓值与其状态有关,而且是相对值。所以,在进行热量衡算时,为确定物料的焓值,必须首先规定基准温度。当有相变发生时,还必须规定基准状态,通常以 273 K、液态为基准,本书附录中所列水蒸气的焓值是以 273 K 液体为基准求得的。例如,从附表中查得 398 K 饱和水蒸气的焓值为 2 716.5 kJ/kg,是因将 1 kg 273 K 的液态水加热至 398 K(吸收 523.4 kJ 显热),再令其汽化为饱和蒸汽(吸收 2 193.1 kJ 潜热),所吸收的总热量为 2 716.5 kJ。

(2) 热量不仅可以随同物料进、出系统,还可以透过设备、管道的壁面而由外界传入系统,或由系统逸散到周围环境中去。因此,只要系统温度与环境温度有差别,就会有这种热量的输入或散失,应把这部分热量列入衡算式中。

于是,可写出连续稳定过程热量衡算的基本关系式,即

$$\sum H_F + \Phi = \sum H_P \quad (0-3)$$

式中  $\sum H_F$ ——单位时间内进入系统的各股物料的总焓值;

$\sum H_P$ ——单位时间内离开系统的各股物料的总焓值;

$\Phi$ ——单位时间内系统与环境交换的总热量。当系统向环境散热时,此值为负,并称之为“热损失”。

**例 0-2** 在换热器里每小时将 1 000 kg 平均比热容为 3.65 kJ/(kg·K)的某种溶液自 298 K 加热到 353 K。加热介质为 393 K 的饱和水蒸气,每小时消耗量为 95 kg。蒸汽冷凝成同温度的饱和水后排出。试计算此换热器的热损失占水蒸气所提供热量的百分数。

解: 首先根据题意画出过程示意图,如图 0-2 所示。

在图中虚线方框所示范围内作热量衡算。以 1 h 为基准,则进、出系统的各项热量分别为:

输入系统的溶液的焓 = 1 000 kg/h × 3.56 kJ/(kg·K) × (298 - 273) K = 89 000 kJ/h

系统输出的溶液的焓 = 1 000 kg/h × 3.56 kJ/(kg·K) × (353 - 273) K = 284 800 kJ/h

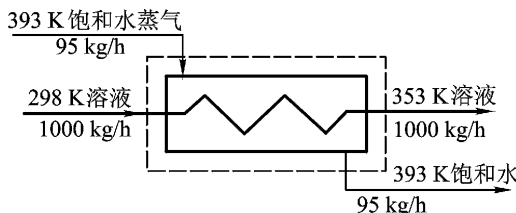


图 0-2 例 0-2 附图

由附录查出 393 K 饱和水蒸气的焓值为 2 708.9 kJ/kg、393 K 饱和水的焓值为 503.67 kJ/kg。则

$$\text{输入系统的饱和水蒸气的焓} = 95 \times 2\,709 = 257\,400 \text{ kJ/h}$$

$$\text{系统输出的饱和水的焓} = 95 \times 503.7 = 47\,900 \text{ kJ/h}$$

依式(0-3)列出热量衡算式,即

$$89\,000 + 257\,400 + \Phi = 284\,800 + 47\,900$$

解得:

$$\Phi = -13\,700 \text{ kJ/h}$$

$$\text{热损失速率 } \Phi' = -\Phi = 13\,700 \text{ kJ/h}$$

$$\text{热损失百分数} = \frac{13\,700}{257\,400 - 47\,900} \times 100\% = 6.5\%$$

热量衡算的基本步骤为:

(1) 根据题意画出衡算示意图,注明各物流的数量、组成、温度、相状态及焓值。一般热量衡算均在物料衡算基础上进行。

(2) 确定衡算基准,计算各物流的焓值。这里,除确定物料衡算的基准(时间或物流量)外,还要选择各物流组分焓的基准态。物流焓的基准态包括物流的基准压力  $p_0$ 、基准温度  $t_0$  和基准相状态。

(3) 列出热量衡算式,求解未知量。一个衡算系统只能列出一个热量衡算式,对于某些复杂过程,热量衡算常需与物料衡算方程联立求解。

### 3. 传递过程速率的计算

传递过程速率的大小决定过程进行的快慢,其通用表示式如下:

$$\text{传递过程速率} = \frac{\text{传递过程的推动力}}{\text{传递过程的阻力}}$$

在各种单元操作中,传递过程的速率对于设备的工艺尺寸以及设备的操作性能有决定性的影响。

## 五、单位制及单位换算

表示一个物理量大小,不能只列出数字,还要列出所使用的计量单位。生产中所遇到的单位可分为基本单位和导出单位两大类。基本单位是指基本量的单位。国际单位制(SI制)共采用七个基本单位,即长度单位为米(m)、质量单位为千克(kg)、时间单位为秒(s)、温度单位为开尔文(K)、发光强度单位为坎德拉(cd)、电流单位为安培(A)、物质的量的单位为摩尔(mol)。在本课程中,一般只用 m、kg、s、K 和 mol 五个。导出单位是指由基本单位导出的单位。单位制是基本单位与导出单位的总和。常见的几种单位制度所用的力学基本量和基本单位如表 0-1 所示。

由表 0-1 可以看出,绝对单位制以长度、质量和时间为基本量,它们的单位为基本单位,力是导出量,其单位是导出单位;工程单位制是以长度、力和时间的单位为基本单位,质量的单位则属于导出单位;MKS 制和 SI 制虽都是以长度、质量和时间为基本量,其单位为基本单位,但长度和质量的基本单位与 cgs 制中的基本单位是不同的。本书采用的单位制主要为 SI 制。

表 0-1 常见单位制度的基本单位

基本量	长度		质量		力		时间	
	中文代号	代号	中文代号	代号	中文代号	代号	中文代号	代号
绝对单位制(cgs制)	厘米	cm	克	g	—		秒	s
MKS制	米	m	千克	kg	—		秒	s
SI制	米	m	千克	kg	—		秒	s
工程单位制 (重力单位制)	米	m	—		公斤力	kgf	秒	s

SI制还规定了一套词头来表示倍数或分数。如 $10^6$ 称为兆,代号为M; $10^3$ 称为千,代号为k; $10^{-3}$ 称为毫,代号为m; $10^{-2}$ 称为厘,代号为c。

使用国际单位制词冠时,应遵守下列规则:

(1)词头代号用正体,词头代号和单位代号之间不留间隔,如1 km、1 Mm、1 mm等。

(2)如带词头的单位代号上有指数,则表明倍数单位或分数单位的系数值可由词头自乘而得,例如:

$$1 \text{ cm}^3 = 1 \text{ c}^3 \text{ m}^3 = 1 \times (10^{-2})^3 \text{ m}^3 = 10^{-6} \text{ m}^3; 1 \text{ cm}^{-1} = 1 \text{ c}^{-1} \text{ m}^{-1} = 1 \times (10^{-2})^{-1} \text{ m}^{-1} = 10^2 \text{ m}^{-1}.$$

(3)不允许用二个以上国际制词头并列而成的组合词头,如 $10^6 \text{ g}$ ,可用1 Mg,不许用1 k kg。

(4)选用国际制词头时,一般应使单位前系数值在0.1~1 000之间,如12 000 m可写成12 km,0.004 m可写成4 mm。

SI制还规定具有专门名称的导出单位的代号,可用它们的基本单位一起表示其他导出单位的常见的物理量。如表0-2和表0-3所示。

表 0-2 具有专门名称的SI制导出单位(热力学范围)

物理量	中文名称	国际代号	用其他导出单位表示	用基本单位表示
频率	赫兹	Hz		$\text{s}^{-1}$
力	牛顿	N		$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
压力、应力	帕斯卡	Pa	$\text{N}/\text{m}^2$	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
能、功、热量	焦耳	J	$\text{N} \cdot \text{m}$	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
功率	瓦特	W	$\text{J}/\text{s}$	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$

表 0-3 用专门的导出单位的 SI 制导出单位

量的名称	代 号		基本单位表示
	中文	国际	
(动力)粘度	帕·秒	Pa·s	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
表面张力	牛/米 <sup>2</sup>	N/m <sup>2</sup>	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
热流密度、辐射强度	瓦/米 <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
热容、熵	焦/开	J/K	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
比热容、比熵	焦/(千克·开)	J/(kg·K)	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
比能	焦/千克	J/kg	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
能密度	焦/米 <sup>3</sup>	J/m <sup>3</sup>	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
导热系数	瓦/(米·开)	W/(m·K)	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
传热系数	瓦/(米 <sup>2</sup> ·开)	W/(m <sup>2</sup> ·K)	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$

除上述外,SI制还规定了平面角和立体角两个辅助单位。平面角的单位称弧度,代号为 rad;立体角的单位称球面度,代号为 sr。表 0-4 表示这些辅助单位以及用它们来表示的国际制导出单位的例子。

表 0-4 SI 制辅助单位及辅助单位表示的导出单位例

量的名称	名称	符号
平面角	弧度	rad
立体角	球面度	sr
角速度	弧度/秒	rad/s
角加速度	弧度/秒 <sup>2</sup>	rad/s <sup>2</sup>
辐射强度	瓦/球面度	W/sr
辐射宽度	瓦/米 <sup>2</sup> 球面度	W/m <sup>2</sup> sr

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('')。

当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。此时,只要将原单位表示的数值乘以换算因数便得到新的单位所表示的数值。所谓换算因数就是原单位与新单位大小的比值,如 1 m<sup>3</sup> 等于 10<sup>6</sup> cm<sup>3</sup>,把 m<sup>3</sup> 换算成 cm<sup>3</sup> 的换算因数就是 10<sup>6</sup>。至于 SI 制与其他公制及英制之间的单位换算关系可查阅本书的附录中的单位换算表。例如:各种单位制中的力的单位之间有如下的关系:

$$\begin{aligned}
 1 \text{ kgf} &= 1 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 = 9.81 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 9.81 \text{ N} \\
 &= 1\,000 \text{ g} \times 981 \text{ cm/s}^2 = 981\,000 \text{ g} \cdot \text{cm/s}^2 = 981\,000 \text{ dyne} = 2.205 \text{ lbf}
 \end{aligned}$$