



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

食品工程原理

徐文通 主编



高等教育出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

内容提要

食品工程原理

徐文通 主编



高等教育出版社

开 本 787mm×1092mm (1/16)

印 张 32

字 数 240 000

定 价 28.20 元

印 次 2010 年 1 月第 1 次印刷

版 次 2010 年 1 月第 1 次印刷

版 权 所 有 登 录 必 究
邮 政 发 行 局 代 理 各 地 分 销 处 均 有 代 售
邮 政 发 行 局 代 理 各 地 分 销 处 均 有 代 售

内容提要

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书内容为食品、生物技术等行业常见的各种单元操作。包括流体流动、流体输送、粉碎、筛分、沉降、过滤、传热、蒸发、结晶、搅拌、均质、乳化、蒸馏、制冷、干燥、液体吸附、离子交换、浸出、超临界萃取、膜分离等。

本书舍弃了繁难的数学推导和理论偏深的内容,淡化了对单元操作设计程序的介绍,注重对问题的分析,便于教与学。每章均扩编了对正文理解或实际应用有益的思考题,计算题附有参考答案。

本书可以作为高职高专院校、应用型本科院校、成人教育、五年制高职食品类专业与生物技术类专业教材,也可供相关行业生产、技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

食品工程原理/徐文通主编. —北京:高等教育出版社,
2010. 1

ISBN 978 - 7 - 04 - 028175 - 0

I. 食… II. 徐… 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(2009)第 196352 号

策划编辑 张庆波 责任编辑 田 军 封面设计 刘晓翔 责任绘图 尹 莉
版式设计 张 岚 责任校对 王 超 责任印制 毛斯璐

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
总 机 010 - 58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 国防工业出版社印刷厂

开 本 787 × 1092 1/16
印 张 22
字 数 540 000

购书热线 010 - 58581118
咨询电话 400 - 810 - 0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2010 年 1 月第 1 版
印 次 2010 年 1 月第 1 次印刷
定 价 28.20 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

物料号 28175 - 00

前 言

本书的前身新世纪高职高专教改项目成果教材《食品工程原理》自 2005 年出版以来,很多兄弟院校同行和相关企业读者给予了支持和鼓励,同时也提出一些有益的建议。2008 年 7 月,部分学校和高等教育出版社在长春召开了高职高专教育食品类专业“十一五”国家级规划教材及教学资源建设会议,对本教材的建设进行了详细的研讨。根据读者意见和会议精神,结合自身的教学实践,编者对原教材的错误和不足做了修订,部分章节重新编写。

高职高专教育主要为区域经济建设培养人才,各地的食品类专业发展专业方向不尽相同,所需专业技能不完全一致。基于这一现实情况,新版教材扩编了部分单元操作内容,具体包括结晶、液体吸附、离子交换、浸出及超临界萃取(以上内容均在编者所在学校试讲过)。各校可根据自身专业方向的需要,选用相应章节。

高职高专教材编写既要体现职业教育的特色,又要实现“高技能”人才培养目标。本教材主要特点为:(1)理论知识以实用、适用和先进为原则,尽量降低理论深度。(2)注重培养学生分析、计算和解决工程实际问题的能力。(3)力求做到层次分明、概念与原理准确,同时注重知识的连贯性和整体性。(4)融“教、学、做”为一体,编写了许多与工程实际有联系的例题和思考题,例题注重对问题的分析与小结;为了方便学生自学,在每章开始的“学习目标”里以三个层次(即重点掌握、理解和了解)来说明主要的学习内容,各章末均有适量的思考题、习题及参考答案。(5)尽力做到对物理量和单位的表述符合国家标准。考虑到各校一般安排“课程设计”作为实训环节,因此淡化了设计计算程序的介绍。

本书由吉林工商学院(原吉林粮食高等专科学校)徐文通主编,孙元宾、李凤祥为副主编。参加修订和编写工作的有:吉林工商学院魏贞伟(第一章、第二章及第五章);徐文通(概论、第九章、第十一章及附录);孙元宾(第四章);李凤祥(第六章、第八章及全书插图);郑荣食品有限公司袁玉超(第三章);郑州牧业工程高等专科学校王斌(第七章及第十章);沧州职业技术学院刘英梅(第六章第二节、第十一章第一节及第二节,初稿);广西工业职业技术学院陈延(第十一章第二节及第四节,初稿);吉林工商学院焦子惠参加了部分文字和图片的排版工作。

全书由徐文通统改定稿,吉林化工学院王广铨教授和华东理工大学赵延斌副教授主审。

吉林工商学院王成刚教授对本书的整体结构等,提出了许多建设性意见;生物工程教研室的同仁给予了大量支持。吉林省植物油集团教授级高工高凤海参加了提纲的拟定。在此深致谢意。

虽然我们尽了很大努力,力求修订完美,但难免存在不妥之处,望读者继续提出意见。

编 者

2009 年 9 月

目 录

概论	(1)	本章主要符号说明	(123)
第一章 流体流动	(7)	第五章 传热	(124)
第一节 概述	(7)	第一节 概述	(124)
第二节 流体的物理性质	(8)	第二节 热传导	(127)
第三节 流体静力学	(11)	第三节 对流传热	(133)
第四节 流体动力学	(18)	第四节 热辐射	(143)
第五节 流体流动阻力	(27)	第五节 传热过程计算	(149)
第六节 管路计算	(40)	第六节 换热器	(157)
第七节 流量的测量	(43)	思考题	(163)
第八节 非牛顿流体的流动	(48)	习题	(163)
思考题	(50)	本章主要符号说明	(165)
习题	(51)	第六章 蒸发与结晶	(166)
本章主要符号说明	(52)	第一节 蒸发	(166)
第二章 流体输送机械	(54)	第二节 结晶	(178)
第一节 离心泵	(54)	思考题	(187)
第二节 其他类型的泵	(66)	习题	(188)
第三节 气体输送机械	(70)	本章主要符号说明	(188)
思考题	(77)	第七章 搅拌、均质与乳化	(190)
习题	(78)	第一节 概述	(190)
本章主要符号说明	(79)	第二节 液体的搅拌	(190)
第三章 粉碎与筛分	(80)	第三节 均质	(198)
第一节 粉碎	(80)	第四节 乳化	(201)
第二节 筛分	(89)	思考题	(204)
思考题	(94)	习题	(205)
习题	(94)	本章主要符号说明	(205)
本章主要符号说明	(95)	第八章 蒸馏	(206)
第四章 沉降与过滤	(96)	第一节 概述	(206)
第一节 概述	(96)	第二节 双组分溶液的气液 相平衡	(206)
第二节 沉降	(96)	第三节 简单蒸馏与精馏	(212)
第三节 过滤	(108)	第四节 双组分连续精馏的 计算	(216)
第四节 离心机	(118)	第五节 板式塔	(231)
思考题	(121)		
习题	(122)		

思考题	(238)
习题	(238)
本章主要符号说明	(240)
第九章 制冷	(241)
第一节 概述	(241)
第二节 制冷的基本理论	(241)
第三节 实际压缩制冷循环	(246)
第四节 制冷剂和载冷剂	(253)
第五节 蒸气压压缩制冷装置	(254)
第六节 其他制冷方法简介	(256)
思考题	(258)
习题	(258)
本章主要符号说明	(259)
第十章 干燥	(260)
第一节 概述	(260)
第二节 湿空气的性质与 湿度图	(261)
第三节 干燥静力学	(269)

第四节 干燥动力学	(275)
第五节 干燥设备	(280)
第六节 冷冻干燥	(283)
思考题	(285)
习题	(286)
本章主要符号说明	(287)
第十一章 其他传质分离过程	(288)
第一节 液体吸附	(288)
第二节 离子交换	(294)
第三节 浸出	(298)
第四节 超临界萃取简介	(306)
第五节 膜分离	(307)
思考题	(326)
习题	(327)
本章主要符号说明	(327)
附录	(328)
参考文献	(344)

概 论

学习目标

1. 重点掌握的内容

单元操作的概念及其作用,单位换算。

2. 理解的内容

本课程的性质、内容和目的,单元操作解决实际问题的基本依据。

3. 了解的内容

物料衡算的步骤,定常与非定常操作,单位制。



现代食品工业是在化学工程的基础上发展起来的。虽然食品加工远早于化学加工,但长期以来,食品加工是以家庭作坊式的传统方法结合经验来组织生产的。食品加工科学化的重要标志之一是化工单元操作的引入和应用。从此,才促使食品工业迅速向规模化、连续化和自动化方向发展。

由于食品加工原料的特殊性(如色、香、味和营养成分的变化等),使得某些化工单元操作在与食品加工结合后,其发展速度反而超过了化学工业(如浓缩、干燥、冷冻)。科学技术的不同领域就是这样互相渗透,互相促进,共同提高与发展的。

一、本课程的性质、内容和目的

(一) 课程的性质

现行的数学、物理和化学等课程属于了解自然界普遍规律的基础科学,而食品工程原理属于探索单元操作共同规律的工程技术科学的范畴。在教学计划中,食品工程原理是食品加工技术专业(包括生物技术及应用等相近专业)的一门重要的技术基础课。它在基础课和专业课之间,起着承前启后、由“理”及“工”的桥梁作用。在培养学生专业素质的过程中有其独特的重要地位。

(二) 课程的内容

食品工程原理的学习内容就是各种单元操作。什么是单元操作呢?首先,一种单元操作是一种物理加工过程,即操作中只改变物料的物理状态或物理性质,而不改变其化学性质;其次,单元操作具有超越行业界限的功能,是过程工业(所有涉及物质转化过程的工业部门)共有的操作。例如:食品工业中的原料乳和氯碱工业中的烧碱稀溶液的浓缩,都需除去其中的水分,而采用的设备都是蒸发器,两者均可称为蒸发这类单元操作。又如,制取淀粉和制药属于不同的行业,但其产品都离不开干燥这一单元操作。同一单元操作应用于不同的生产过程有共性也有各

自的特性。例如前述的原料乳和烧碱稀溶液的浓缩,都采用蒸发这一单元操作,它们共同遵循传热的基本规律,都采用蒸发器,这也是蒸发操作在两个不同行业生产中的共性。但由于原料性质的不同,两者的操作条件和所选用设备的结构也各异,这就是特殊性。

食品加工的工艺流程是由若干个单元操作的技术,来处理原料和半成品过程的组合。单元操作如同英文字母的作用,二十几个字母可以构成大量的单词和词组,而二三十种单元操作(往往需结合生物技术)的不同组合,形成了整个多行业、多品种的食品工业。

按食品工业过程所要达到的目的来看,目前使用的单元操作有三十余种。但按照各单元操作的物理本质和内在联系,可以将各种单元操作归纳为以下六类:

1. 有关流体流动的操作,如流体输送和过滤;
2. 有关传热过程的操作,如热交换、蒸发、冷凝;
3. 有关传质过程的操作,如膜分离、蒸馏;
4. 有关热、质同时传递的操作,如干燥、结晶;
5. 有关热力过程的操作,如制冷;
6. 有关机械过程的操作,如固体输送和粉碎。

读者在学习单元操作的知识时,应时刻注意把握不同单元操作所遵循的共同规律,只有如此,才能做到事半功倍。

(三) 课程的目的

对于高职高专的学生而言,学习食品工程原理的目的是:

1. 掌握单元操作的基本概念和所遵循的基本理论与基本规律;
2. 掌握单元操作的基本计算;
3. 寻求单元操作的最佳操作条件,并能根据过程的原理来探索强化过程的途径,使生产向有利的方向进行;
4. 学生学习单元操作后,应能运用所学知识来指导生产操作和调节,当操作发生故障时,应能正确分析、判断故障的缘由,进而采取适当措施排除故障;
5. 学生学习单元操作后,应能站在经济的角度来考虑技术问题。

二、单元操作服从自然界的普遍规律

各单元操作解决实际问题的依据服从自然界的普遍规律。首先,质量守恒、能量守恒、平衡关系和过程速率在单元操作中应用得最多;其次,像牛顿第二定律、理想气体的状态方程等一些与具体过程和物料有关的物理或物理化学规律也常常遇到。例如,食品工程计算中的物料衡算和热量衡算就服从质量守恒和能量守恒定律;而像传热、干燥的计算既涉及平衡关系又与过程的速率有密切联系。上述的普遍规律也是定量解决单元操作问题的依据。掌握了这一点,会给本课程学习带来很大的帮助。概论中简要介绍前两项,余下的在有关章节陆续介绍。

(一) 物料衡算

在一个食品生产中根据质量守恒定律,输入的物料量必等于排出的物料量和过程积累的物料量之和。即

$$\text{输入量} = \text{输出量} + \text{积累量}$$

由此,对总物料量或其中某一组分列出方程求解,这种运算称为物料衡算。如果过程中积累

量等于零,称为定常操作;反之,是非定常操作。定常与非定常操作通常体现在生产过程是否连续,一般连续操作为定常操作,间歇操作则为非定常操作。食品工厂中多半是连续不断的流水作业,故本教材只讨论定常操作时的情况。

例 0-1 每小时将 15 000 kg 含乙醇 0.4(质量分数,下同)的水溶液在精馏塔中进行分离,要求从塔底获得含乙醇 0.02 的乙醇水溶液,从塔顶获得含乙醇 0.90 的乙醇水溶液,试求塔顶和塔底产品的质量流量。

解 进行物料衡算时按以下步骤进行:

(1) 由题意画出如图 0-1 所示的流程示意图 在图上用箭头标出物料的流向,并用数字及符号说明物料的量及组成。

(2) 确定衡算范围 如图 0-1 中封闭的虚线所示。在物料衡算中,根据具体情况,可以在一组设备或其中的一部分进行,也可以包括几组设备或全部流程作为衡算范围。凡是穿越虚线范围的物料流,其箭头向内表示输入,反之表示输出。

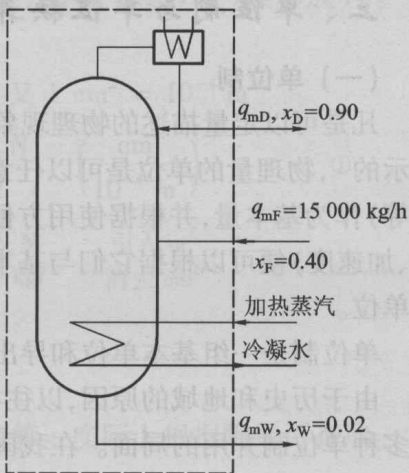


图 0-1 流程示意图

图中, q_{mF} ——原料液流量, kg/h;

x_F ——乙醇在原料中的质量分数;

x_D, x_W ——分别为乙醇在塔顶及塔底产品中的质量分数;

q_{mD}, q_{mW} ——分别为塔顶及塔底产品的流量, kg/h。

图中塔的下部有加热蒸汽加入,它在塔内放出热量后以冷凝水的状态排出虚线范围外,该股物料在虚线范围内进、出一次,故不参与衡算。

(3) 规定衡算基准 基准是解决某一问题所选择的起始条件。如果基准选得合适,往往使计算得到简化。对于连续操作,常常选单位时间作基准;对间歇操作,则以一批物料(即一个循环)作基准为宜。

对本例题选 1 h 为基准,在虚线范围作总物料衡算和乙醇的衡算,有

$$\text{总物料} \quad q_{mF} = q_{mD} + q_{mW}$$

$$\text{乙醇} \quad q_{mF}x_F = q_{mD}x_D + q_{mW}x_W$$

将已知数据代入以上二式,得

$$15\,000 = q_{mD} + q_{mW}$$

$$15\,000 \times 0.4 = 0.90q_{mD} + 0.02q_{mW}$$

联立求解,得

$$q_{mD} = 6\,477 \text{ kg/h}; \quad q_{mW} = 8\,523 \text{ kg/h}$$

(二) 能量衡算

能量的种类很多,食品工厂中最常见的能量往往是热量,故本教材以热量衡算为重点内容进行讨论。

热量衡算是以物料衡算为基础。将输入设备内物料带入的热量、从外界所获得的热量、过程

积累的热量、流出设备的物料带走的热量和经过设备器壁散失的热量——考虑在内来计算。总之要遵从下面的守恒关系式：

$$\text{输入量} = \text{输出量} + \text{积累量}$$

如果过程积累的热量等于零，它是定常操作，否则为非定常操作。在热衡算中，基准温度的选择尤为重要，有关这类问题，待传热章再做介绍。

三、单位制与单位换算

(一) 单位制

凡是可以用定量描述的物理现象都是物理量。任何物理量的大小都是用数字与单位的乘积来表示的^①，物理量的单位是可以任意选择的。通常先任意选定若干个独立的物理量（如长度、时间等）作为基本量，并根据使用方便的原则规定这些量的单位，称为基本单位。其他各量（如速度、加速度）便可以根据它们与基本量之间的关系来确定，称这些物理量为导出量，其单位为导出单位。

单位制是一组基本单位和导出单位的总和。

由于历史和地域的原因，以往在整个科学技术领域，出现了对基本量及单位的不同选择造成了多种单位制并用的局面。在我国经常见到的单位制中的基本单位如表 0-1 所示。

表 0-1 不同单位制的基本单位

单位制度		基本量	长度	时间	质量	力(或重力)
绝对单位制	CGS 制 (厘米克秒制)		cm	s	g	—
	MKS 制 (米千克秒制)		m	s	kg	—
工程单位制 (重力单位制)			m	s	—	kgf

目前，几乎所有国家都已采用或决定采用国际单位制，其国际符号为“SI”。我国采用中华人民共和国法定计量单位（简称法定单位），它是在国际单位制的基础上，结合我国的实际情况，又选定了 16 个非国际单位制单位，作为我国的法定计量单位。具体内容见本教材附录一。

(二) 单位换算

由于旧有文献资料中的数据是以多种单位制并存的，因此使用时需要换算成法定计量单位，这就要求读者应掌握同一物理量在不同单位制间的换算。

^① 为了区别量本身和用特定单位表示的量的数值，特别是在图、表中用特定单位表示量的数值，应用量与单位的比值 $A/[A] = \{A\}$ 表示。例如热力学温度 $T/K = 273.15$ 。

作图时，如果是用具体数据作量 A 与 B 的 $A-B$ 图，纵、横坐标应分别为 $A/[A]$ 和 $B/[B]$ 。但若只是示意表示 $A-B$ 的函数关系，为了方便起见，本书中对纵、横坐标只标注 A 和 B 。

物理量由一种单位换算成另一种单位时,物理量本身并无变化,但数值要改变。换算要乘以两单位间的转换因子。所谓转换因子,就是彼此相等而各有不同单位的两个同名物理量之比。例如 $1 \text{ in} = 25.4 \text{ mm}$, 则 $(\text{in}/25.4 \text{ mm})$ 及 $(25.4 \text{ mm}/\text{in})$ 均为转换因子,当欲知 160 mm 等于多少 in , 可依据转换因子计算得 $160 \text{ mm}(\text{in}/25.4 \text{ mm}) = 6.30 \text{ in}$; 反过来 6.30 in 用 mm 表示时,有 $6.30 \text{ in}(25.4 \text{ mm}/\text{in}) = 160 \text{ mm}$ 。计算时转换因子的写法要能消去原单位同时取得新单位。

食品工程计算中常用单位换算的转换因子可由本教材附录二查取。

例 0-2 试将 2 个标准大气压(atm)通过工程单位制的压力单位(kgf/cm^2)换算成 Pa。

解 查附录二,得

$$1 \text{ atm} = 1.033 \text{ kgf}/\text{cm}^2, \quad 1 \text{ kgf} = 9.81 \text{ N}, \quad \text{又} \quad 1 \text{ cm}^2 = 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\text{因此} \quad 2 \text{ atm} = (2 \text{ atm}) \cdot \left(\frac{1.033}{\text{atm}} \times \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right) \cdot \left(\frac{9.81 \text{ N}}{\text{kgf}} \right) \cdot \left(\frac{\text{cm}^2}{10^{-4} \text{ m}^2} \right)$$

原有的数	引入 kgf/cm^2	引入 N	引入 m^2
值与单位	消去 atm	消去 kgf	消去 cm^2

$$= 2.066 \times 9.81 \times 10^4 \text{ N}/\text{m}^2$$

$$= 202.7 \text{ kPa}$$

为了使读者练习单位换算方法,本题采用上述方法进行换算。实际上根据附录可查取

$$1 \text{ atm} = 101\,325 \text{ Pa}$$

$$\text{所以} \quad 2 \text{ atm} \left(\frac{101\,325 \text{ Pa}}{\text{atm}} \right) = 202.7 \text{ kPa}$$

熟练单位换算方法后,不必在式子中间写出单位。

四、怎样学习“食品工程原理”

在以往的教学,许多同学都反映本课程既难又不好学。仔细分析造成“难学”的局面,无外乎来自以下三个方面:首先,工程思维方式尚未形成。“食品工程原理”是学生初次接触的一门工程性很强的课程。与前面所学的数、理、化等基础学科比较而言,其思维方式有比较明显的区别。由于工程问题的复杂性,目前还不能像基础学科完全靠理论分析来解决问题,在很大程度上需要通过实验,并利用实验数据整理成经验方程来解决实际问题。此外,还有许多工程问题的解决,采用了当量、平均、分解与综合、简化与系数修正等近似的处理方法。这就给已习惯于用理论思维方式来思考和解决问题的同学们造成一种困惑,认为该课程“不讲道理,缺少理论”。作为教师来说,在教学活动中,应该有意识地引导学生从理论思维向工程思维方面转化;而作为学生来说,应该配合教师从感情上完成好这种转化,这也是学好本课程乃至后续专业课程的先决条件。

其次,学习内容“多而杂”。“食品工程原理”的学习内容是各种常见的单元操作。各单元操作由于根据不同的过程原理,采用了不同的设备,以达到各自的工艺目的。学生会产生该课程缺少“系统性和逻辑性”等错觉,如前所述,按照各单元操作的物理本质和内在联系,可将各单元操作归纳为六类。而这六类操作,在定量解决工程问题时的基本依据,又是大家早已熟知的自然界的普遍规律。同学们经过学习,一旦领悟到这些规律性的知识,那么举一反三、触类旁通的能力

便会得到提高,其一时的错觉也随之消失。

第三,涉及其他课程的门类多。由于高职高专人才培养目标和学制的限制,不可能也没有必要像本科生那样设置宽厚的基础课程群。因此额外给学生的学习带来了一定的难度。尽管在教材的编写中尽量做到利用学生已有的基础知识来组织编写学习内容,但在少数章节仍然存在缺少必备的基础知识,造成学习上的困难。作为教师应根据本校开课的实际情况,适度补充必要的相关知识;而作为学生要认真听课,记好笔记以利于课后复习,及时消化吸收。实践证明,在教与学的活动中只要做到师生互动,这一难点是完全可以解决的。

此外,下面的一些共性问题,在学习中也给予足够的重视。

(一) 为了帮助同学们学习,在每一章的“学习目标”里,对主要学习内容均有说明。这些问题在开始学习时,可能还不能窥其全貌。但在每章学完之后,通过及时复习,则应对上述问题有明确的认识。

(二) 要养成课前预习的好习惯。通过预习,一方面可以提高自学能力;另一方面可以做到带着问题听课,有助于提高课堂记笔记的效率和听课的主动性。

(三) 在消化吸收课堂学习内容的基础上,要认真做好书中的习题和思考题。每道习题和思考题都涉及相关的物理方程(定义)或概念,所以阅题之后,要问问自己,这些方程(定义)或概念是什么,而且一定要做到真正理解。做题也是培养独立思考和解决问题不可缺少的实践环节。

(四) “食品工程原理”实验属于工程实践的范畴。通过“食品工程原理”实验,可以使学生熟悉单元操作所用设备,对于检验单元操作的理论和规律,测取某些设备的性能参数,培养学生的实际操作能力,有着其他教学环节无法替代的重要作用。因此要求学生做实验时,决不能满足于按现成的实验步骤“照方抓药”,而应开动脑筋,运用所学理论知识指导实验,努力去发现新的现象和规律。“食品工程原理”实验也为学生日后走向工作岗位,对生产过程及设备进行工艺查定打下基础。

为了学好“食品工程原理”,每位初学者都应该根据自己的经验,摸索出一套适合本身特点的学习方法。事实证明,学好本课程对于将来从事的专业技术工作和继续学习提高都有莫大的帮助。

习 题

1. 摩尔气体常数 $R=0.08206 \text{ L} \cdot \text{atm}/(\text{mol} \cdot \text{K})$, 试用法定单位 $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 表示。 [$R=8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$]
2. 导热系数 $\lambda=175 \text{ kcal}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$, 试用法定单位 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 表示。 [$204 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]

第一章 流体流动

学习目标

1. 重点掌握的内容

流体的物理性质,流体静力学基本方程、连续性方程、伯努利方程及其应用,流体在管内流动阻力的计算。

2. 理解的内容

流体的两种流动类型及其比较,流动边界层、流动阻力产生的原因,局部阻力的概念,当量直径和当量长度的工程意义,流量的测量。

3. 了解的内容

流体在管内的速度分布,边界层分离,非牛顿型流体的特性。



第一节 概 述

液体和气体统称为流体。食品生产过程中所处理的原料、辅助原料、半成品以及产品有很多都是以流体的形式存在的,如最常见的水、空气、水蒸气,此外还有牛奶、果汁、蜂蜜、植物油、动物油等。生产过程是一个动态过程,经常需要将流体物料由一个设备送到另一个设备,或由一道工序转到下一工序,逐步完成全部工艺过程。通常,要把流体从一个设备送到另一个设备中去,还需借助管路和输送设备方能完成。为了有效地控制流体流动过程使之满足生产实际需要,我们必须掌握流体流动的基本原理以及相关的实际知识。此外,多数单元操作都与流体流动密切相关,因此流体流动的学习内容是本课程的重要基础。

本章主要讨论流体静力学,即流体在静止时的平衡规律;流体动力学,即流体流动时的基本规律。并运用这些理论分析解决流体流动过程中的实际问题,如流体流动中流动阻力的计算,流体输送所需功率的确定,管路计算、管路系统的压力变化和流量的测量等。

在研究流体流动时,常将流体看作由无数分子微团所组成的连续介质。每个分子微团称为质点,其大小与容器或管路相比是微不足道的,但比分子平均自由程要大得多。因此流体质点在流体内部一个紧挨一个,它们之间没有任何间隙,即可认为流体充满其所占据的空间,为连续介质。把流体看作连续介质,目的是为了摆脱复杂的分子运动,从宏观的角度来研究流体的流动规律。但是,并不是任何情况下都可以把流体看作连续介质,如高度真空下的气体就不能再看作连续介质了。

第二节 流体的物理性质

与流体流动直接有关的物理性质有压缩性、膨胀性、密度、相对密度和黏度等。

一、流体的压缩性和膨胀性

在一定温度下,压力的变化引起流体体积相对变化的性质叫做流体的压缩性,液体的体积随压力变化很小,所以常把液体当做不可压缩流体,而气体的可压缩性要比液体大很多,工程上一般称气体为可压缩流体。

在一定压力下,温度的变化引起流体体积相对变化的性质叫做流体的热膨胀性,一般气体的热膨胀性要大于液体的热膨胀性。

二、密度、相对密度

(一) 密度

密度是质量密度的简称,又称作体积质量——质量除以体积。用符号 ρ 表示,单位为 kg/m^3 。

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

式中, m ——物质的质量, kg ;

V ——质量为 m 的该物质所占有的体积, m^3 。

一般流体的密度都是随温度、压力的变化而变化的。作为流体的物理性质,流体的密度可以在物理化学手册或有关资料中查到,本书附录中也列有常见液体和气体的密度数值。

1. 液体的密度 液体的密度随压力的变化很小,因此压力对液体密度的影响可以忽略,但温度的影响不能忽略。所以可只根据温度条件,查取液体的密度。

2. 气体的密度 气体的密度随温度、压力的改变有较大的变化。一般在温度不太低、压力不太高时,可按理想气体处理,即

$$pV = nRT = \frac{m}{M}RT$$

于是

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

式中, p ——气体的绝对压力, kPa ;

T ——气体的热力学温度, K ;

M ——气体的千摩尔质量(数值上等于气体的相对分子质量), kg/kmol ;

R ——摩尔气体常数, $8.314 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

另外,已知某一状态(p_0 、 T_0)下气体的密度数值 ρ_0 ,可以计算出操作条件(p 、 T)下气体的密度值 ρ ,即

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0}{T} \cdot \frac{p}{p_0} \quad (1-3)$$

(二) 流体混合物的密度

生产过程中经常遇到各种流体混合物,在没有直接数据使用时,可通过下面的公式计算。

1. 液体混合物的密度 取 1 kg 混合液体为基准,若混合液体各组分在混合前后其体积不变,则

$$\frac{1}{\rho_{ml}} = \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\rho_i} \quad (1-4)$$

式中, ρ_{ml} ——混合液体的密度, kg/m^3 ;

ρ_i ——液体混合物中 i 组分单独存在时的密度, kg/m^3 ;

w_i ——液体混合物中 i 组分的质量分数。

2. 气体混合物的密度 取 1 m^3 混合气体为基准,若混合气体各组分在混合前后其质量不变,则

$$\rho_{mg} = \sum_{i=1}^n \rho_i \varphi_i \quad (1-5)$$

式中, ρ_{mg} ——混合气体的密度, kg/m^3 ;

ρ_i ——气体混合物中 i 组分单独存在时的密度, kg/m^3 ;

φ_i ——气体混合物中 i 组分的体积分数,对于理想气体等于该组分的摩尔分数 y_i 。

气体混合物的密度也可按式(1-2)计算,但需用气体混合物的平均千摩尔质量 M_m 代入式中计算,即

$$M_m = \sum_{i=1}^n (M_i y_i) \quad (1-6)$$

式中, M_i ——气体混合物中 i 组分的千摩尔质量, kg/kmol ;

y_i ——气体混合物中 i 组分的摩尔分数, $\sum_{i=1}^n y_i = 1$ 。

(三) 相对密度

相对密度是相对质量密度的简称,也称作相对体积质量。用符号 d 表示,定义为:物质的密度与参考物质的密度在对两种物质所规定条件下之比,即

$$d = \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad (1-7)$$

式中, ρ_1 ——待测物质的密度;

ρ_2 ——参考物质的密度。

工程技术中经常使用常压下 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 纯水作为参考物质,此时相对密度记作 $d_{4 \text{ }^\circ\text{C}, \text{H}_2\text{O}}^t$ 。

例 1-1 求干空气在常压($p = 101.3 \text{ kPa}$)下 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 的密度。

解 (1) 由附录直接查得常压下 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 空气的密度

$$\rho = 1.128 \text{ kg/m}^3$$

(2) 已知空气的平均千摩尔质量为 28.9 kg/kmol, 由式(1-2)有

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT} = \frac{101.3 \times 28.9}{8.314 \times (273 + 40)} = 1.125 \text{ kg/m}^3$$

例 1-2 已知某酸液室温下的密度为 1 830 kg/m³, 此温度下水的密度为 998 kg/m³。求酸液的质量分数为 0.40 时水溶液的密度。

解 由式(1-4)有

$$\frac{1}{\rho_{\text{ml}}} = \frac{w_1}{\rho_1} + \frac{w_2}{\rho_2} = \frac{0.4}{1830} + \frac{1-0.4}{998} = 8.198 \times 10^{-4}$$

$$\rho_{\text{ml}} = 1220 \text{ kg/m}^3$$

三、流体的黏性与牛顿黏性定律

流体流过固体壁面时, 由于流体对壁面有附着力的作用, 因此在壁面形成一层静止流体层。同时, 由于分子间的引力作用, 使得壁面上的静止流体层对相邻流体层有约束作用, 使该层流体流速减慢, 离开壁面越远其约束作用越弱, 这种流速的差异造成了流体内部各层之间的相对运动。例如, 在河道中的水流, 其中心处水流速度最快, 越靠近河岸水流速度越慢, 而紧贴在岸边的水流速度为零。

由于流体层与层之间相对运动, 使得流体内部相邻两层之间必然存在相互作用的内摩擦力或黏滞力, 结果使流得快的流体层对相邻流得慢的流体层产生一种牵引作用, 流得慢的流体层对流得快的流体层产生一种阻碍作用。

流体流动时产生内摩擦力的性质, 称为流体的黏性。流体的黏性是阻碍流体流动的性质, 是流体内在的、抗拒向前运动的特性。

(一) 牛顿黏性定律

如图 1-1 所示, 有两块面积为 A 的很大的平行平板, 与板面积相比其间距 y 很小, 两板间充满某种黏性流体。将下板固定, 对上板施加一平行于平板的切向力 F , 使平板以一个恒定的速度 u 沿水平方向做匀速运动。该力通过平板成为界面处作用于流体流动的内摩擦力。结果两板间的液体分成无数薄层而运动, 紧贴上板面的流体与上板一起以速度 u 平行流动, 离运动平板越远的流体薄层速度越小, 直到固定平板处速度降至零。实验表明, 单位面积的内摩擦力 (F/A) 即流体的剪应力 τ 满足:

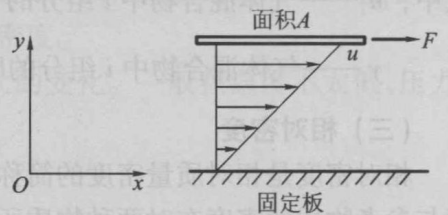


图 1-1 剪应力与速度梯度

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-8)$$

式中, τ ——剪应力, Pa;

μ ——与流体性质有关的比例系数, Pa·s;

du/dy ——法向速度梯度, 1/s。

式(1-8)为牛顿黏性定律的表达式。牛顿黏性定律说明流体在流动过程中, 流体层间所产

生的剪应力与法向速度梯度成正比,与法向力无关。这与固体表面摩擦力遵循的规律截然不同。服从牛顿黏性定律的流体称为牛顿型流体,如气体、水以及纯液体和大多数溶液是牛顿型流体。对于多数高分子溶液、固体含量高的悬浮液不服从牛顿黏性定律,称为非牛顿型流体。

(二) 流体的黏度

黏度是描述流体黏性大小的物理量,用 μ 表示,又称为动力黏度。通常,当流体种类和温度一定时,黏度也一定。根据牛顿黏性定律,黏度等于流动截面上的任一点剪应力与该点的速度梯度之比。即

$$\mu = \tau / \frac{du}{dy} \quad (1-8a)$$

上式表明,速度梯度增加,剪应力也增大(反之亦然),但两者的比值为一定值,其数值由实验确定。液体的黏度随温度升高而降低,气体的黏度随温度的升高而增大。在极高和极低压力情况下,要考虑压力对气体黏度的影响,除此以外压力对流体黏度的影响可以忽略。应该注意:黏度总是与速度梯度相联系,流体的黏性只有在它流动时才表现出来。因此当流体保持静止时就不涉及流体黏度这一物理性质。

黏度的单位可以根据其定义式导出:

在法定单位中黏度的单位为

$$[\mu] = \left[\tau / \frac{du}{dy} \right] = \frac{N/m^2}{\frac{m/s}{m}} = \frac{N \cdot s}{m^2} = Pa \cdot s$$

在物理单位制中黏度的单位为

$$[\mu] = \left[\tau / \frac{du}{dy} \right] = \frac{dyn/cm^2}{\frac{cm/s}{cm}} = \frac{dyn \cdot s}{cm^2} = P(\text{泊})$$

由于泊的单位太大,在实际使用中不便,以往通常用厘泊表示黏度,符号为cP,1 P = 100 cP。两种黏度单位换算关系为:1 cP = 10⁻² P = 10⁻³ Pa · s。常用流体的黏度可以在有关手册中查取。

流体的黏度 μ 与密度 ρ 之比,称为运动黏度,用 ν 表示:

$$\nu = \mu / \rho \quad (1-9)$$

运动黏度的法定单位为m²/s;物理单位制中的单位为cm²/s,称为湍,用St表示。厘湍为百分之一湍,用cSt表示。

第三节 流体静力学

一、流体的压力

(一) 压力的定义

垂直作用于流体单位表面积上的力称为压强,用 p 表示。压强是流体力学中重要而又常用