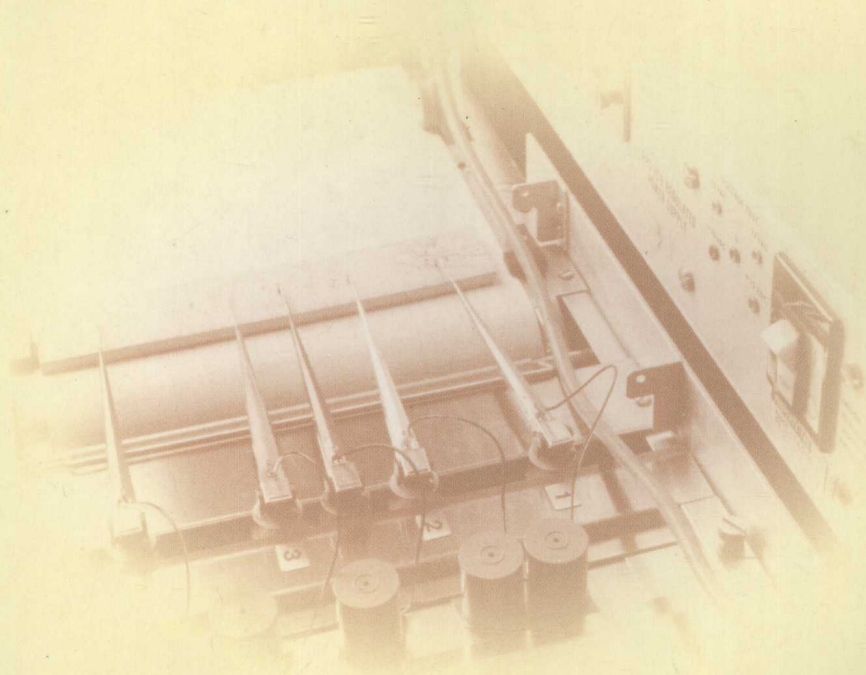





新世纪高职高专教改项目成果教材
Xinshiji Gaozhi Gaozhuang Jiaogai Xiangmu Chengguo Jiaocai

食品工程原理

徐文通 主 编
孙元宾 魏贞伟 副主编



D00337237

 高等教育出版社

新世纪高职高专教改项目成果教材

Xinshiji Gaozhi Gaozhuan Jiaogai Xiangmu Chengguo Jiaocai

食品工程原理

徐文通 主 编

孙元宾 魏贞伟 副主编

高等教育出版社

内容提要

本书是新世纪高职高专教学改革项目的研究成果教材。

本书从高职高专毕业生就业岗位的实际需要出发,力求简明实用,放弃了繁难的数学推导,淡化了设计计算程序的介绍。编写了不少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,以使学生加深对单元操作的基本概念、基本理论和基本规律的理解。

全书的基本内容为食品、生物技术等生产行业常见的各种单元操作。包括:流体流动、流体输送机械、粉碎、筛分、沉降、过滤、传热、蒸发、膜分离、搅拌、均质、乳化、蒸馏、制冷、干燥。

本书可作为高职高专院校食品工程专业学生教材、成人教育教材,也可供相关专业生产、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, 2005.4

ISBN 7-04-016473-6

I. 食... II. 徐... 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(2005)第 021425 号

策划编辑 张庆波 责任编辑 周传红 封面设计 刘晓翔 责任绘图 尹莉
版式设计 张岚 责任校对 俞声佳 责任印制 宋克学

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 100011
总 机 010-58581000

经 销 北京蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京地质印刷厂

开 本 787×1092 1/16
印 张 18.75
字 数 460 000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
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>

版 次 2005 年 4 月第 1 版
印 次 2005 年 4 月第 1 次印刷
定 价 23.60 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

物料号 16473-00

出版说明

为认真贯彻《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》和《面向 21 世纪教育振兴行动计划》，研究高职高专教育跨世纪发展战略和改革措施，整体推进高职高专教学改革，教育部决定组织实施《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》(教高[2000]3号,以下简称《计划》)。《计划》的目标是：“经过五年的努力，初步形成适应社会主义现代化建设需要的具有中国特色的高职高专教育人才培养模式和教学内容体系。”《计划》的研究项目涉及高职高专教育的地位、作用、性质、培养目标、培养模式、教学内容与课程体系、教学方法与手段、教学管理等诸多方面，重点是人才培养模式的改革和教学内容体系的改革，先导是教育思想的改革和教育观念的转变。与此同时，为了贯彻落实《教育部关于加强高职高专教育人才培养工作的意见》(教高[2000]2号)的精神，教育部高等教育司决定从 2000 年起，在全国各省市的高等职业学校、高等专科学校、成人高等学校以及本科院校的职业技术学院(以下简称高职高专院校)中广泛开展专业教学改革试点工作，目标是：在全国高职高专院校中，遴选若干专业点，进行以提高人才培养质量为目的、人才培养模式改革与创新为主题的专业教学改革试点，经过几年的努力，力争在全国建成一批特色鲜明、在国内同类教育中具有带头作用的示范专业，推动高职高专教育的改革与发展。

教育部《计划》和专业试点等新世纪高职高专教改项目工作开展以来，各有关高职高专院校投入了大量的人力、物力和财力，在高职高专教育人才培养目标、人才培养模式以及专业设置、课程改革等方面做了大量的研究、探索和实践，取得了不少成果。为使这些教改项目成果能够得以固化并更好地推广，从而总体上提高高职高专教育人才培养的质量，我们组织了有关高职高专院校进行了多次研讨，并从中遴选出了一批较为成熟的成果，组织编写了一批“新世纪高职高专教改项目成果”教材。这些教材结合教改项目成果，反映了最新的教学改革方向，很值得广大高职高专院校借鉴。

新世纪高职高专教改项目成果教材适用于高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院、继续教育学院和民办高校使用。

高等教育出版社

2002 年 11 月 30 日

前 言

高职高专教育是我国高等教育的重要组成部分。经济发展、科技进步、教育国际化趋势对高职高专教育提出了更新、更高的要求。根据教育部《关于加强高职高专教育教材建设的若干意见》的有关精神,吸收《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》的成果,围绕培养技能型、应用型专门人才这一宗旨,我们编写了《食品工程原理》这本高职高专教材。

食品工程原理是学生初次接触的一门工程性很强的课程,学生从这门课开始转入食品工程专业的学习。因此,编写的主要原则是着眼于增强学生解决工程问题的能力和掌握解决工程实际问题的基本方法;教导学生掌握食品工程常见的单元操作的基本概念和单元操作所遵循的基本理论与基本规律;为学生日后的专业学习和工作中分析、计算和解决工程实际问题奠定基础。

为了方便学习,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,并通过例题、思考题和习题的反复训练来达到良好的学习效果。

在本书的编写过程中,重视贯彻 GB3100~3102-93《量和单位》的有关规定,力求使物理量和单位的表述符合国家标准。

本书由吉林粮食高等专科学校徐文通主编,孙元宾、魏贞伟副主编。参加编写工作的还有郑州牧业工程高等专科学校王斌、黑龙江大学赵辉、吉林粮食高等专科学校李凤祥。其中概论、第一章、第六章、附录由徐文通编写,第二章、第五章由魏贞伟编写,第四章由孙元宾、李凤祥编写,第八章由李凤祥编写,第三章、第九章由赵辉编写,第七章、第十章由王斌编写,北京市营养源研究所的黄威参加了部分文字的整理工作。

全书由徐文通统稿和修订,由孙元宾、魏贞伟协助。由吉林化工学院王广铨教授主审。

本书在编写过程中,得到了高等教育出版社高职高专分社梁琦副社长、赵洁老师、张庆波老师的大力支持和帮助。另外,本书得到了吉林粮食高等专科学校生物工程教研室和食品工程教研室石彦忠、王维坚、朱珠三位副教授的热情帮助;刘天明、崔景军两位老师做了部分稿件的打字工作;在编写过程中参考了许多相关的文献资料,在此对其有关作者和上述人员一并表示诚挚的谢意。

由于编写水平所限,用力虽勤,但错误与不当之处在所难免,敬请读者指正。

徐文通

2005年1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》，其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。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。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。

反盗版举报电话：(010) 58581897/58581896/58581879

传 真：(010) 82086060

E - mail：dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮 编：100011

购书请拨打电话：(010)58581118

目 录

概论	1	思考题	116
习题	5	习题	117
第一章 流体流动	6	本章主要符号说明	117
第一节 概述	6	第五章 传热	119
第二节 流体的物理性质及流动 状态参数	7	第一节 概述	119
第三节 流体静力学	13	第二节 热传导	122
第四节 流体动力学	19	第三节 对流传热	127
第五节 流体流动阻力	25	第四节 热辐射	136
第六节 管路计算	37	第五节 传热过程计算	142
第七节 流速和流量的测量	40	第六节 换热器	149
第八节 非牛顿流体的流动	45	思考题	154
思考题	46	习题	155
习题	47	本章主要符号说明	156
本章主要符号说明	49	第六章 蒸发与膜分离	157
第二章 流体输送机械	50	第一节 蒸发	157
第一节 离心泵	50	第二节 膜分离	169
第二节 其他类型的泵	60	思考题	187
第三节 气体输送机械	64	习题	187
思考题	71	本章主要符号说明	188
习题	72	第七章 搅拌、均质与乳化	189
本章主要符号说明	73	第一节 概述	189
第三章 粉碎与筛分	74	第二节 液体的搅拌	189
第一节 粉碎	74	第三节 均质	196
第二节 筛分	85	第四节 乳化	199
思考题	90	思考题	202
习题	90	习题	202
本章主要符号说明	91	本章主要符号说明	202
第四章 沉降与过滤	92	第八章 蒸馏	203
第一节 概述	92	第一节 概述	203
第二节 沉降	92	第二节 双组分溶液的气液相平衡	203
第三节 过滤	104	第三节 蒸馏方式	209
第四节 离心机	114	第四节 双组分连续精馏的计算	212
		第五节 板式塔	227

思考题	232	第十章 干燥	253
习题	232	第一节 概述	253
本章主要符号说明	234	第二节 湿空气的性质与湿度图	254
第九章 制冷	235	第三节 干燥静力学	261
第一节 概述	235	第四节 干燥动力学	267
第二节 制冷的基本理论	235	第五节 干燥设备	272
第三节 实际压缩制冷循环	240	第六节 冷冻干燥	274
第四节 制冷剂和载冷剂	246	思考题	276
第五节 蒸气压缩制冷装置	248	习题	277
第六节 其他制冷方法简介	250	本章主要符号说明	278
思考题	251	附录	279
习题	252	参考文献	293
本章主要符号说明	252		

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、共同发展的。

一、本课程的性质、内容和目的

(一) 课程的性质

食品工程原理是食品工程专业(包括食品生物技术等相近专业)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”的作用。

(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，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特点。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类单元操作。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，因此两者的操作条件和所选用的蒸发设备也各异，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，20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(有时需结合生物技术)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30余种。但按照单元操作的内在联系和其所遵循的基本规律，可以将各种单元操作归纳为以下五类：

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. 有关热力过程的操作，如制冷；
5. 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；
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共同规律

各单元操作解决实际问题的依据服从自然界的共同规律。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，牛顿第二定律、理想气体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会用到。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关系。概论中简要介绍物料衡算和能量衡算，余下的内容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离出方程求解，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 如图 0-1 所示，每小时将 15 000 kg 含乙醇 0.40 (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。

图中 q_{mF} ——原料液质量流量，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质量流量，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，能够使计算得到简化。对于连续操作，常常选单位时间作基准；对于间歇操作，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

总物料

$$q_{mF} = q_{mD} + q_{mW}$$

乙醇

$$q_{mF}x_F = q_{mD}x_D + q_{mW}x_W$$

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

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

(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——考虑在内来计算的。要遵从：

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

这一守恒关系式。

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，在第五章再做介绍。

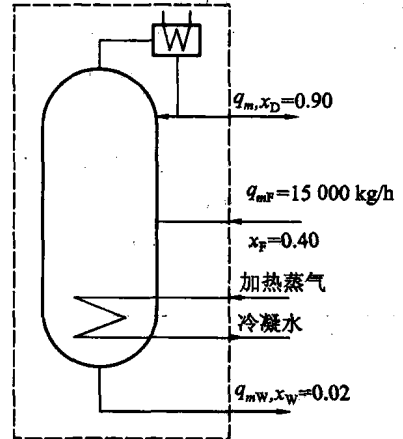


图 0-1 流程示意图

三、单位制与单位换算

(一) 单位制

凡是可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,即为基本单位。其他各量(如速度、加速度)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。

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物理量之比。例如 $1 \text{ in} = 25.4 \text{ mm}$, 则 $(1 \text{ in}/25.4 \text{ mm})$ 及 $(25.4 \text{ mm}/1 \text{ in})$ 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 $160 \text{ mm} (1 \text{ in}/25.4 \text{ mm}) = 6.30 \text{ in}$; 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在能消去原单位的同时取得新单位。

^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。

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 atm (大气压)通过工程单位制的压力单位(kgf/cm²)换算成以 Pa 为单位。

解 查附录二, 得

$$1 \text{ atm} = 1.033 2 \text{ kgf/cm}^2, 1 \text{ kgf} = 9.807 \text{ N}, 1 \text{ cm}^2 = 10^{-4} \text{ m}^2。$$

因此

$$2 \text{ atm} = (2 \text{ atm}) \cdot \left(\frac{1.033 2}{\text{atm}} \times \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right) \cdot \left(\frac{9.807 \text{ N}}{\text{kgf}} \right) \cdot \left(\frac{\text{cm}^2}{10^{-4} \text{ m}^2} \right)$$

原有的数 引入 kgf/cm² 引入 N 引入 m²
值与单位 消去 atm 消去 kgf 消去 cm²

$$= 2.066 4 \times 9.807 \times 10^4 \text{ N/m}^2$$
$$= 202.7 \text{ kPa}$$

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 atm = 101 325 Pa。

所以

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

熟练单位换算方法后, 不必在式子中间写出单位。



1. 通用气体常数 $R = 0.082 06 \text{ L} \cdot \text{atm}/(\text{mol} \cdot \text{K})$, 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(流速)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。这就必然涉及到流体的输送、流体流动状态参数的测定和流体输送所需功率的计算等。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。

本章主要讨论流体流动的基本原理，流体在管内流动的基本规律，并运用这些知识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和压力、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。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 流体的物理性质及流动状态参数

一、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，所以常把液体当作不可压缩流体，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

1. 密度 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，常用单位为 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 ——通用气体常数， $8.314 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

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

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

2. 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 以 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 以 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, 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

$$\text{中计算, 即} \quad M_m = \sum_{i=1}^n (M_i y_i) \quad (1-6)$$

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, $\sum_{i=1}^n y_i = 1$ 。

3. 相对密度 相对质量密度的简称, 也称作相对体积质量。用符号 d 表示。它的定义为: 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°C 纯水作为参考物质, 此时相对密度记作 $d_{4^\circ\text{C}, \text{H}_2\text{O}}^t$ 。

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

解 (1) 由附录直接查得常压下 40°C 空气的密度

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

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

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

例 1-2 已知某酸液室温下的密度为 $1830 \text{ kg}/\text{m}^3$, 此温度下水的密度为 $998 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。求酸液的质量分数为 0.40 时水溶液的密度。

解 由式(1-4)有

$$\frac{1}{\rho_{ml}} = \frac{w_1}{\rho_1} + \frac{w_2}{\rho_2} = \frac{0.4}{1830} + \frac{1-0.4}{998} = 8.198 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\rho_{ml} = 1\,220 \text{ kg/m}^3$$

(三) 流体的黏度与牛顿黏性定律

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，而紧贴在水流速度接近于零。

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，而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。流体的黏性是流体内在的、抗拒向前运动的特性。

1. 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，紧贴在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：

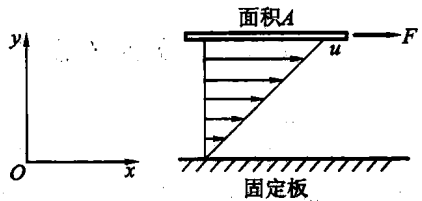


图 1-1 剪应力与速度梯度

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

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流体，如气体、水以及纯液体和大多数溶液是牛顿流体。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，称为非牛顿流体。

2. 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。在极高或极低压力情况下，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。