



普通高等教育“十五”国家级规划教材

SHIPIN GONGCHENG YUANLI

PUTONG GAODENG JIAOYU SHIWU
GUOJIANJI GUIHUA JIAOCAI

食品工程原理

冯 磊 主编

夏素兰 卢晓黎 林庆生 周亚军 徐涵庆 参编



中国轻工业出版社

普通高等教育“十五”国家级规划教材

食品工程原理

冯 翥 主编

夏素兰 卢晓黎 林庆生 周亚军 徐涵庆 参编

 中国轻工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

食品工程原理/冯焱主编.

—北京:中国轻工业出版社,2006.8

普通高等教育“十五”国家级规划教材

ISBN 7-5019-4545-4

I. 食… II. 冯… III. 食品工程学

IV. TS201.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 089173 号

责任编辑:白洁 姚怀芝 责任终审:滕炎福 封面设计:过红雷
版式设计:丁夕 责任校对:燕杰 责任监印:胡兵

*

出版发行:中国轻工业出版社(北京东长安街6号,邮编:100740)

印刷:北京市卫顺印刷厂

经销:各地新华书店

版次:2006年8月第1版第2次印刷

开本:787×1092 1/16 印张:41.5

字数:996千字

书号:ISBN 7-5019-4545-4/TS·2676

定价:60.00元

读者服务部邮购热线电话:010-65241695 85111729 传真:85111730

发行电话:010-85119817 65128898 传真:85113293

网址: <http://www.chlip.com.cn>

Email: club@chlip.com.cn

·如发现图书残缺请直接与我社读者服务部联系调换·

60678J4C102ZBW

目 录

绪论	(1)
第一章 流体流动和输送	(6)
第一节 流体的物理性质	(6)
第二节 流体静力学	(10)
第三节 流体流动的基本概念	(14)
第四节 流体流动的质量衡算和能量衡算	(19)
第五节 流体流动的阻力	(25)
第六节 流体输送管路的计算	(36)
第七节 流速和流量的测定	(44)
第八节 非牛顿流体的流动	(50)
第九节 液体输送机械	(53)
第十节 气体输送机械	(67)
本章主要符号	(76)
本章习题	(77)
第二章 衡算方程	(83)
第一节 简单流动系统的衡算	(83)
第二节 通用的总衡算方程	(90)
第三节 微分衡算方程	(92)
本章主要符号	(109)
本章习题	(109)
第三章 机械分离	(112)
第一节 流体与粒子的相对运动	(112)
第二节 沉降	(122)
第三节 过滤	(133)
第四节 离心分离	(145)
本章主要符号	(152)
本章习题	(152)
第四章 以动量传递为特征的混合单元操作	(155)
第一节 搅拌	(155)
第二节 流态化和气力输送	(174)
第三节 均质和乳化	(189)
本章主要符号	(200)
本章习题	(200)
第五章 传热	(202)
第一节 热传递的基本传递方式	(202)

第二节	热传导	(204)
第三节	对流传热	(212)
第四节	辐射传热	(227)
第五节	稳定传热过程的计算	(232)
第六节	不稳定传热过程	(242)
第七节	换热器	(249)
	本章主要符号	(260)
	本章习题	(261)
第六章	以热量传递为特征的单元操作	(264)
第一节	蒸发	(264)
第二节	结晶	(283)
第三节	热杀菌	(298)
	本章主要符号	(304)
	本章习题	(305)
第七章	传质原理	(307)
第一节	传质基础	(307)
第二节	传质原理	(313)
第三节	流动中的传递与相似类比	(337)
	本章主要符号	(343)
	本章习题	(344)
第八章	微分传质单元操作	(345)
第一节	吸收	(345)
第二节	填料塔	(359)
第三节	吸附	(366)
第四节	离子交换	(378)
	本章主要符号	(393)
	本章习题	(394)
第九章	多级分离操作	(397)
第一节	蒸馏	(397)
第二节	板式塔	(416)
第三节	液-液萃取	(423)
第四节	浸取	(439)
第五节	超临界萃取	(457)
	本章主要符号	(464)
	本章习题	(465)
第十章	膜分离过程	(470)
第一节	膜分离过程概论	(470)
第二节	超滤与微滤	(478)
第三节	反渗透	(490)
第四节	电渗析	(497)

第五节 渗透汽化·····	(507)
本章主要符号·····	(515)
本章习题·····	(516)
第十一章 干燥与空气调节·····	(517)
第一节 湿空气的性质·····	(518)
第二节 干燥过程的衡算·····	(529)
第三节 干燥动力学·····	(535)
第四节 干燥设备·····	(544)
第五节 喷雾干燥·····	(558)
第六节 空气调节·····	(572)
本章主要符号·····	(578)
本章习题·····	(579)
第十二章 冷冻过程·····	(583)
第一节 冷冻的原理·····	(583)
第二节 食品的冷冻·····	(588)
第三节 冷冻浓缩·····	(603)
第四节 冷冻干燥·····	(611)
本章主要符号·····	(620)
本章习题·····	(621)
附录·····	(622)
参考文献·····	(657)

绪 论

一、食品工程的发展

现代食品工业的发展史,是从个体小工业向现代工业发展的历史。

“民以食为天”,食品对人类的生存和繁衍具有第一重要性。在人类的历史上,食品加工的出现远早于化学工业。但长期以来,人们以家庭和手工的方式加工食品,加工的规模远未达到工业化的程度。食品工业处于“必然王国”的时期是漫长的,由于社会经济的发展还没有产生改变小生产方式的迫切需要,由于科学技术的发展还没有解决食品工业生产中的某些关键问题,食品的小生产方式延续了数个世纪。实际上,直至今日,仍有一些食品的生产与其说是科学,不如说是艺术。真正意义上的食品工业只是在 100 多年前才出现,其标志是尼古拉·阿佩尔发明的罐藏法,它使食品能够长时间贮藏和长距离运输。此后,路易·巴斯德阐明了食品腐败的原理,为解决食品的贮藏和输送问题提供了科学依据。由于社会的发展,人们需要大量地贮藏和运输食品,各项食品加工技术便应运而生,食品工业才作为一种产业而受到社会的重视。发展至今,食品工业已能大规模地、重复性地生产许多人们常用的食品,如快餐食品和方便食品等,并能使大部分食品的生产实现了工业化,使人们在家庭食品加工上耗用的时间大大减少,适应了现代社会发展的需要。

二、食品工业与化学工程学的联系

食品工业的发展是与化学工程学的发展紧密相关的。食品工业与化学工业有许多相似的地方。从本质上说,它们都是通过某些加工工序,将自然资源加工成各种材料或制成品,以满足人类的需要,因此都可以称为加工工业(Industry of Transformation)。

化学工业的发展经历了与食品工业相似的过程,但其发展速度却远快于食品工业,以至于食品工业的许多理论和实践是直接 from 化学工业引入的,其中最重要的原因是化学工业较早地实现了大规模工业化生产。

化学工业的发展与石油的开发密切相关。石油既是重要的能源,又是重要的化工原料,石油的开发提出了许多课题,化学工程学就是在此基础上发展起来的。它以蒸馏、吸收、加热、过滤等石油工业所必需的技术设计理论为主体,其最初的定义是“研究原料加工的方法和技术的科学”。1923 年首部论述单元操作的著作《化学工程原理》在 MIT 出版,标志着化学工程学的诞生。而化学工程学的发展,又大大地推动了化学工业。

三、化学工程学与过程工程学

随着化学工业的发展,化学工程学的定义扩大为“研究原料的组成、能量或物态发生变化的过程和方法,以及所得到的产品及其用途的工程学”,通俗的表达,就是要在工业规模以连续方式实现那些在实验室内以间歇方式实现的过程。从诞生以来,化学工程学的内涵一直在不断扩展,但是单元操作仍是其中最主要和最基础的部分。

单元操作是人们在长期的生产实践中,通过归纳、抽象和总结,把不同化工生产过程分解

为若干基本操作过程而得出的概念。一个具体的化工生产过程可以分解为一系列单元操作的组合。单元操作的概念提出是一大突破,它使人们可以统一通常被认为是不同的化工生产技术,抛弃各项技术的个性,系统而深入地研究其内在规律,从而更有效地推进化工生产技术的发展。而所有单元操作的综合,就构成了化学工程的基础——化工原理。

进一步的研究指出,单元操作中所发生过程的本质是传递。从20世纪60年代起提出了“三传一反”的概念,将化工单元操作按其传递原理分为遵循动量传递规律、热量传递规律和质量传递规律的操作三大类,作为化工原理课程的基础;加上反应工程,就构成了化学工程学的的主要框架。例如,属于动量传递单元操作的有:流体输送、沉降、过滤、混合等,属于热量传递单元操作的有加热、冷却、蒸发、冷凝等,属于质量传递单元操作的有蒸馏、吸收、萃取、吸附、膜分离等。因此,对单元操作的学习和研究,实际上也是为进一步研究传递的机理和规律打下了基础。

实际上,还有许多两种或三种传递兼而有之的操作如干燥、结晶等,以及热力过程、粒子过程等。因此,以传递特性分类也有其不完善之处,而较新的分类方法则将单元操作分为以下三大类:

- ① 流体力学和传热过程;
- ② 涉及分散粒子的过程;
- ③ 混合物的分离过程。

不难看出,新的分类包含的范围更广,而这一点对食品加工尤其重要。

今天,化学工程学的原理已经扩展到其他的工业领域,特别是食品和其他加工工业领域。而这些工业中对单元操作和传递过程的研究,又反过来丰富了化学工程学。因此,为更准确地表示这些原理的普遍适用性,将化学工程学扩展为“过程工程学”(Process Engineering)已成为共识。

四、食品工程的特点

尽管食品工业出现较早,但食品科学和食品工程的引入则较晚。就科学意义上说,化学工业的进展是遥遥领先的。食品加工科学化一个重要方面是单元操作的概念被引入食品加工领域。食品工程与化学工程有许多相似之处:食品加工过程同样可以分解为一系列单元操作的组合,这些单元操作的机理同样是动量、热量和质量传递,单元操作计算的主要内容同样是物料衡算、能量衡算、平衡关系和过程速率,化学工程中常用的理论和方法同样适用于食品工程。从这一意义上说,化学工程学的大部分内容可以应用于食品工业中。

但是,食品工程也有自身的一些特点。从单元操作的角度看,化学工程涉及最多的是气-液系统的操作,如蒸馏、吸收等。对这些单元操作的研究构成了化工原理的最精华部分,其理论和方法已经推广到其他许多单元操作。而食品工业所涉及的单元操作比化学工业广泛,其中的相当一部分,如粉碎、结晶、离心分离等,还缺乏成熟的理论,而蒸馏和吸收这些化学工程研究较为深入、理论较为成熟的单元操作反而在食品工业应用不多,这就大大增加了应用数学模型方法处理食品工业操作的困难。

食品工业中引入和运用化工单元操作的研究之所以如此迟缓,主要的原因还在于食品工业具有如下一些特点:

- ① 食品工业的原料大多是农、林、牧、副、渔业的动植物产品,这些原料的结构和成分非常复杂。大部分原料是活的生物体,其成分不仅随土壤、气候等条件而变化,而且在成熟、输送和

贮藏过程中也在不断变化。某些成分如蛋白质、酶之类是生物活性物质,在加工条件下会引起变性、钝化甚至破坏。某些成分如色素、脂肪等,在有氧气存在的条件下,会发生变色或哈败。某些芳香类物质又会因加工条件不当而损失。这些变化一方面给加工带来许多不方便,另一方面还影响产品的色、香、味和营养,即影响产品的内在品质。这也就是长期以来许多食品加工过程固守传统方法的原因。

② 热敏性和易氧化变质是动、植物原料的共有特点。为避免食品加工的高温破坏和氧化变质,不得不采用低温、低压的加工条件。生产实践中更多地采用真空操作和冷冻操作,而这两类操作的计算在很大程度上还只是半经验甚至经验的。

易腐性是食品原料和制品的又一特点。食品加工的目的,就在于如何抑制微生物和酶的活动,以便于提高制品的保藏性。浓缩食品、干制食品、冷冻和速冻食品已成为目前食品工业的重要产品。而作为这些食品加工基础的浓缩、干燥和冷冻等单元操作,就必然在食品加工工程中占有特别重要的地位。就浓缩、干燥、冷冻这三者来说,其进展反而较化学工业迅速。

③ 食品工业涉及的固体和液体多,气体少,使得化学工业中研究最多的气-液操作及其理论难有用武之地。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,而且由于食品加工的特殊需要,近年来已开发了膜分离、凝胶过滤、酶萃取等新型的提取、分离和提纯操作。与气-液系统相比,固体和液体形成的体系在相间传递和分离两方面都要复杂和困难得多。

④ 食品加工过程中的液体,特别是大分子溶液,常为非牛顿流体。

五、《食品工程原理》的特点

食品工程包含的单元操作诸多,不可能也无必要逐一讨论。《食品工程原理》作为一门基础技术课程,与《化工原理》有许多相似之处。然而,作为面向食品工业的课程,它也有自身的特点。近年来国内外此方面的教材和参考书较多,各有其特色,它们的共同点是强调原理部分,除传递是各单元操作的主线外,对处理工程问题的各种数学方法的介绍和讨论也是重点。

本书同样试图以传递的原理来研究食品工业常见的单元操作,在保持和强调基本原理的同时兼顾食品工业的特点,适当吸收近年来发展迅速的新单元操作,以体现新世纪食品工程发展的风貌。同时注意介绍处理工程问题的方法,如数学模型法、因次分析法、经验和半经验模型法等。为此,对一些原理上尚不成熟,工业生产中主要以经验做处理的操作予以简化或舍去,对一些主要为技术性介绍的内容也作了简化。参加本书编写的人员均来自教学科研的第一线,其中江南大学冯焜编写绪论和第四章、第六章第二节、第八章第三和第四节、第九章第三、第四和第五节、第十章、第十二章、附录以及全书的统稿;徐涵庆编写第七章、第八章第一和第二节、第九章第一和第二节;四川大学卢晓黎编写第三章;四川大学夏素兰编写第一章;华南理工大学林庆生编写第五章和第六章第一、第三节;吉林大学周亚军编写第二章和第十一章。

六、单位、因次和换算

物质、物体、现象或过程可以定量出的属性称为物理量。除了基本量以外的任何物理量都是可以定义的,这一定义与计量单位无关。因此,物理量都是用数字和单位的组合表示,两者缺一不可。由于历史、地区和学科发展的不同,出现了多种单位制。在每一种单位制中,选择几个独立的物理量,规定其单位,称为基本量。其余物理量即为基本量的组合,称为导出量。导出量中各基本量的次方即称为因次或量纲(dimension)。因次式揭示了物理单位的特性,物

理方程两边的因次必须一致,即所谓因次一致性原则,是整理实验数据常用方法——因次分析法的依据。

在科学研究中曾广泛使用物理单位制,而在工程领域则较多地使用工程单位制,美国至今仍在使用英美单位制,这些单位制各有其优缺点。在实际应用中,各种单位制并存,很不方便。1960年10月第十一届国际计量大会通过了一种新的单位制,称为国际单位制,代号为SI制,是最完整、最合理、通用性最强的单位制,在国际上迅速得到推广。

SI制总共采用7个基本量,它们是:长度(m)、质量(kg)、时间(s)、热力学温度(K)、物质的量(mol)、发光强度(cd)、电流强度(A)。根据物理量的大小,可以在基本单位前加上表示十进制倍数或分数的词冠。我国于1984年颁布国家标准GB3100~3102-93以SI制为基础,除SI制中的基本单位、导出单位和辅助单位外,增加了少数非SI制单位如分、小时、日、海里等。经过多年的努力,这一标准已在全国推开。

对于单位符号的使用和书写,有以下规则:

- ① 单位符号的字母一律用正体,不附省略号,无复数形式,不附加任何其他标记或符号;
- ② 单位符号一般为小写字母,单位名称来源于人名时第一个字母用大写,但升的符号可用小写也可用大写;
- ③ 表示十进制倍数或分数的词冠写在单位符号前,与单位符号之间不留间隙,且不允许使用两个以上词冠并列而成的组合词冠;
- ④ 用斜线表示相除时,若分母中包含两个以上的单位符号,整个分母应加括号,如: $W/(m \cdot K)$;
- ⑤ 分子无量纲而分母有量纲组合单位的符号,一般不用分式而用负数幂形式,如:波数单位用 m^{-1} 而不用 $1/m$ 。

当前,多数国家已经采用SI制,但还有一些国家采用别的单位制,在过去的文献资料中又是多种单位制并存。因此,需要掌握单位制的换算方法。在物理量的换算中常见的有两种情况:物理单位的换算和经验公式的换算。

(a) 物理单位的换算

同一物理量用不同单位制表示时,其数值是不同的。例如,直径为1m的容器,用英制单位表示即为3.2808in。常用物理量之间的换算关系可参考有关的教材或手册。若查不到一个导出物理量的换算关系,则可以从构成该单位的基本单位入手,将单位之间的换算系数相乘或相除,得到新的换算系数。

[例0-1] 将传热系数 $860 \text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 换算成SI制,即 $W/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

解: 从附录查得: $1 \text{kcal} = 4.186 \text{kJ}$ 又 $1 \text{h} = 3600 \text{s}$

故: $860 \text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}) = 860 \text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}) \times (4.187 \times 10^3 \text{J}/\text{kcal}) \times (3600 \text{s}/\text{h}) = 1000 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

由此得: $1 \text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}) = 1.163 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

(b) 经验公式的换算

经验公式是根据实验数据整理而成的公式,式中各物理量只代表指定单位制的数字部分。进行换算时有两种方法:一是先将各物理量换算成经验公式指定的单位,再代入公式计算;二是将公式中的常数进行变换,得到用新单位制表示的经验公式。

[例0-2] 以英制表示的计算式:

$$G = 2.45u^{0.8}\Delta p$$

式中 G ——单位为 $\text{lb}(\text{质})/(\text{ft}^2 \cdot \text{h})$;

u ——单位为 ft/s;

Δp ——单位为 atm。试换算成以 SI 制表示的公式。

解: SI 制中 G' 的单位为 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, u' 的单位为 m/s , $\Delta p'$ 的单位为 Pa, 故:

$$G = \frac{0.4536}{0.3084^2 \times 3600} = 0.001356 G'$$

$$u = 0.3048 u' \quad \Delta p = 1.013 \times 10^5 \Delta p'$$

从而: $0.001356 G' = 2.45 \times (0.3048 u')^{0.8} \times (1.013 \times 10^5 \Delta p')$

即: $G' = 7.075 \times 10^7 u'^{0.8} \Delta p'$

应指出的是,经验公式中物理量的指数只表示物理量对过程的影响程度,与单位制的选取无关。因此,在单位换算过程中,物理量的指数保持不变。

在《量和单位》一书中,除对物理量的定义和使用作了严格的规定外,还对用于表示物理量的符号作了规定,以便统一各学科的符号。在本书的编写中,全部使用 SI 制,同时对某些常用的非 SI 制单位,介绍了换算关系。对于物理量的符号,也尽量使用《量和单位》中所规定的符号。可是由于本课程涉及多门学科,各学科的符号间存在一定的矛盾,不可能完全照搬标准中规定的符号。实际上,标准也不可能考虑到所有的物理量。因此,对一些在使用标准规定的符号时可能产生矛盾的量,仍使用工业生产中约定俗成的符号,特此说明。

第一章 流体流动和输送

化工、石油、制药、生物、食品、环境等许多生产领域中的处理对象多为流体,从原料输入到成品输出的许多工序通常都在一定的流动状态下进行,如传热、传质、过滤、沉降、搅拌等。设备中发生的传热、传质和化学反应与流体流动状态密切相关,流动参数的改变将迅速波及整个系统,直接影响所有设备的操作状态。因此,掌握流体流动的规律是解决流体输送以及研究传热、传质过程及设备的重要基础。

流体输送是过程工程中最为普遍的单元操作之一。食品生产系统中流体输送的主要任务是满足对工艺流体的流量和压强的要求。流体输送系统包括:输送管路、输送机械和流动参数测控装置。本章将重点讨论流体流动的基本原理,并运用基本原理分析和解决流体输送过程的基本计算问题。

第一节 流体的物理性质

一、连续介质假定

人们熟知物质的三种常规聚集状态是气、液、固三态。气态和液态物质统称为流体。大量的作无序随机运动的分子构成的流体,分子之间有一定的间隙,如常温常压下的气体,分子间的距离约为 $3.3 \times 10^{-9} \text{m}$ 。因此若以单个分子而论,流体是不连续的。但如果以其尺度远小于流体的宏观尺度,而又远大于分子平均自由程的流体微团作为考察对象,则可认为流体是由大量的彼此间无间隙的流体质点组成,流体质点连续布满整个流体空间,从而流体的物理性质和运动参数在空间上也是连续分布的,这就是连续介质假定。实践证明,连续介质假定对绝大多数流体都适用,但是当流动体系的特征尺寸与分子平均自由程相当时,例如微孔中高真空稀薄气体的流动,连续介质假定即受到限制而不能应用。

作为连续介质,流体的密度、压强、温度等各种物理量和运动参数均是空间位置 (x, y, z) 和时间 θ 的连续函数。数学上将某物理量随空间和时间的连续分布函数称为该物理量的场,如:

$$\rho = \rho(x, y, z, \theta) \quad (1-1-1)$$

$$u = u(x, y, z, \theta) \quad (1-1-2)$$

$$t = t(x, y, z, \theta) \quad (1-1-3)$$

式(1-1-1)~(1-1-3)分别表示流体的密度场、速度场和温度场。

二、流体的密度

流体的密度是流体在空间某点上单位体积流体所具有的质量,以 ρ 表示,即:

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-1-4)$$

式中 ΔV ——流体质点或微团体积。

在SI单位制中, ρ 的单位为 kg/m^3 。密度的倒数称为比体积,单位为 m^3/kg 。表1-1-1所列几种常见流体食品的密度和比体积。

表 1-1-1

几种常见流体食品的密度和比体积(15°C)

品名	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	比体积 $v/(\text{m}^3/\text{kg})$	品名	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	比体积 $v/(\text{m}^3/\text{kg})$
10%食盐水	1 070	9.37×10^{-4}	牛奶	1 030~1 040	$(9.27 \sim 9.63) \times 10^{-4}$
20%食盐水	1 150	8.71×10^{-4}	芝麻油	910~930	$(1.07 \sim 1.1) \times 10^{-3}$
20%蔗糖液	1 080	9.27×10^{-4}	猪油	910~920	$(1.09 \sim 1.1) \times 10^{-3}$
40%蔗糖液	1 180	8.50×10^{-4}	椰子油	910~940	$(1.06 \sim 1.1) \times 10^{-3}$

流体的密度是压强和温度的函数。但压强对液体的密度影响很小,通常可忽略不计,因此液体的密度可仅视为温度的函数。气体的密度随压强和温度而改变,其值可用气体状态方程进行计算。在气体的温度不太低而压强也不太高的情况下,可用理想气体状态方程计算:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{\rho M}{RT} \quad (1-1-5)$$

式中 m ——质量, kg;

V ——体积, m^3 ;

p ——压强, Pa;

M ——摩尔质量, kg/mol;

T ——热力学温度, K;

R ——气体常数, 其值为 $8.314\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

液体混合物的密度可按加成法则计算,即混合前后各组分的体积保持不变:

$$v_m = \frac{1}{\rho_m} = \frac{\sum w_i}{\rho_i} \quad (1-1-6)$$

式中 w_i ——组分 i 的质量分数。

气体混合物也可按加成法则,根据各组分的体积分数 φ_i 计算:

$$\rho_m = \sum \rho_i \varphi_i \quad (1-1-7)$$

若混合气体可按理想气体处理,则可用式(1-1-5)计算其密度,但式中的 M 值应该用平均摩尔质量 M_m 代替:

$$M_m = \sum M_{yi} \quad (1-1-8)$$

式中 y_i ——组分 i 的摩尔分数。

三、流体的可压缩性和温度膨胀性

流体最显著的宏观特征是无定形,易于流动。改变压强和温度时,流体的体积还会随之发生变化。温度一定时,由压强变化引起体积发生相对变化的性质称为流体的可压缩性;而压强一定时,由温度变化引起体积发生相对变化的性质称为流体的温度膨胀性。通常,用等温压缩率 $\kappa_T(\text{m}^2/\text{N})$ 表征流体的可压缩性;用体积膨胀系数 $\alpha_V(1/\text{K})$ 表征流体的温度膨胀性,其定义式分别为:

$$\kappa_T = -\frac{1}{V} \left(\frac{\alpha_V}{\alpha p} \right)_T \quad (1-1-9)$$

$$\alpha_V = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \quad (1-1-10)$$

κ_T 定义式(1-1-9)中的负号表示压强增加时,体积缩小。对理想气体, $\kappa_T = 1/p$, $\alpha_V = 1/T$ 。

流体的上述宏观性质是由流体内部微观结构和分子间力所决定的。流体分子处于永不停息的随机热运动和相互碰撞之中,这给分子以动能,使之趋于离散,而分子与分子间存在的相

互作用力又给予分子势能,使之趋于团聚。气体的分子平均动能远远大于分子间相互作用势能,分子近似作自由的无规则运动,因此表现出易流动、可压缩和易膨胀的宏观性质,为可压缩流体。液体的分子热运动动能与分子间相互作用势能基本相同。液体分子间距离仅比固体稍大,其分子排列类似于固体中的非晶体,但分子热振荡的振幅比固体大且平衡位置频繁改变,宏观上即表现为液体易流动但压强和温度对其体积影响小的性质。测试表明,一般情况下液体的等温压缩率很小,如水的等温压缩率约为 $4.85 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{N}$,故一般可忽略液体的压缩性,而将液体称为不可压缩流体。

四、流体的黏性

(一) 牛顿黏性定律

当静止的流体受到一持续施加的切向力时,即发生大的变形,亦即流动。流动时速度不同的相邻流体层间存在着相互作用力,该力称为流体的剪切力,又称为流体的内摩擦力或黏性力,流体所具有的这一特性称为流体的黏性。

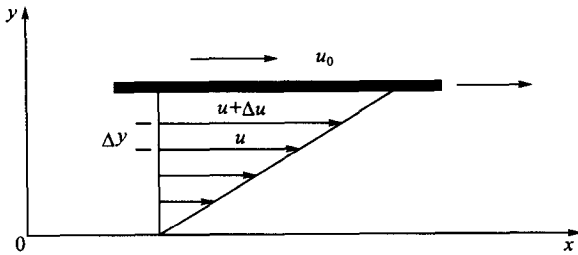


图 1-1-1 流体的黏性

考察如图 1-1-1 所示的间距很小的两平行平板间的流体层。若将下板固定,对上板施加一恒定的平行于平板的剪切力 F ,使上板以速度 u_0 沿 x 方向作匀速运动。由于流体的黏性作用,紧贴于板的流体层附着于板面上以速度 u_0 随板一起运动,而紧贴固定板的流体层附着于板面上静止不动。两板间其他各层流体的速度则介于这两者之间,且从上到下逐渐减小形成沿垂直于流体流动方向(y 方向)的速度分布。紧邻流体层间存在着速度差,即存在着相对运动,从而存在着相互作用力。速度高的流体层施加一切向力于速度低的流体层,拖着向其运动方向流动;而速度低的流体层则以大小相等方向相反的力反作用于速度高的流体层,阻碍其运动。这个相互作用力即为流体的内摩擦力,亦为流体流动的阻力,若要保持流体以一定的速度流动,则必须对其做功,克服此阻力。

实验证明,对大多数流体,任意两紧邻流体层之间作用的剪切力 F 与法向速度梯度以及作用面积成正比,即:

$$F = -\mu A \frac{du}{dy} \quad (1-1-11)$$

或:

$$\tau = \frac{F}{A} = -\mu \frac{du}{dy} \quad (1-1-12)$$

式中 du/dy ——法向速度梯度, $1/\text{s}$;

A ——剪切力的作用面积, m^2 ;

μ ——比例系数,称为流体的动力黏度或简称黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$;

τ ——剪应力, Pa 。

式(1-1-11)称为牛顿黏性定律,式中负号可理解为流体所受的剪切力与其流速方向相反。服从牛顿黏性定律的流体称为牛顿型流体,所有的气体和大多数低分子量的液体为牛顿型流体,如空气、水、食用油等。而剪应力与法向速度梯度的关系不服从牛顿黏性定律的流体则统称为非牛顿型流体,如分子量很大的高分子溶液,以及蛋白质或多糖类的溶液或悬浮液

等,都是非牛顿流体。

实际流体,无论气体或液体,均具有黏性。而在流体力学的研究中,为简化理论分析,引入了理想流体的概念,所谓理想流体是指无黏性($\mu = 0$)的流体,即流体流动时不存在黏性力。对实际流体,只有当其黏性力的影响很小近而可忽略不计时,才可视为理想流体。

(二) 流体的黏度

黏度是影响流体流动的重要物理性质之一,不同流体的黏度相差可能很大,一般通过实验测定并由式(1-1-9)关联而得。本书附录给出了一些常见气体和液体的黏度。

在SI单位制中,黏度的单位为 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。较早的手册或文献中更常用泊(P, $\text{dyn}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$)或厘泊(cP)表示黏度。其换算关系为:

$$1\text{cP} = 0.01\text{P} = 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$$

流体的黏性还可用黏度与密度的比值来表示,即:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-1-13)$$

式中 ν ——运动黏度,在SI单位制中单位为 m^2/s 。

气体的黏度随温度升高而增加,液体的黏度随温度升高而降低。理想气体的黏度与压强无关,实际气体和液体的黏度一般是随压强升高而增加的,但在4.0MPa以下,液体黏度随压强变化不大。一般在工程计算中均忽略压强对黏度的影响。图1-1-2给出了一些常见液体食品的黏度随温度的变化曲线。实际上,一般液体食品多为复杂的多组分物系,因此除温度以外,其黏度还受其他因素的影响,特别是浓度的影响。图1-1-3所示为组分含量和悬浮粒子大小对食品黏度的影响。图1-1-3所示为组分含量和悬浮粒子大小对食品黏度的影响。

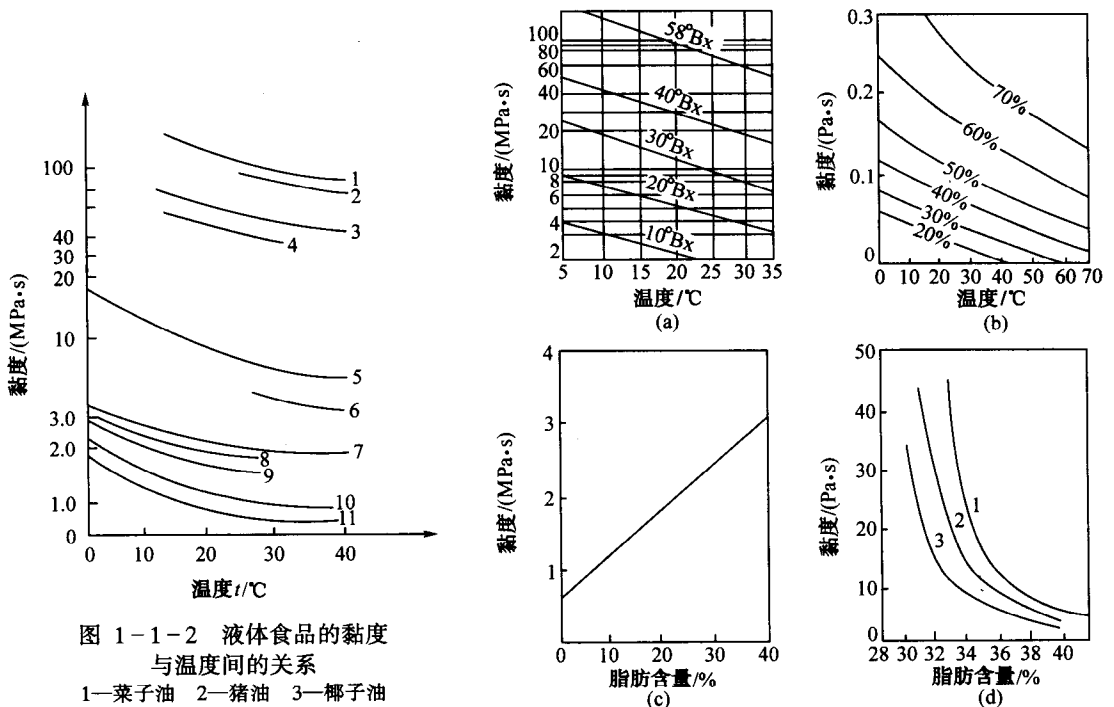


图 1-1-2 液体食品的黏度与温度间的关系

- 1—菜子油 2—猪油 3—椰子油
4—沙丁鱼油、鲸油 5—40%蔗糖溶液
6—50%葡萄糖溶液 7—20%蔗糖溶液
8—20%葡萄糖溶液 9—牛奶
10—10%盐酸 11—水

图 1-1-3 组分含量和悬浮粒子大小对食品黏度的影响
(a) 橘子汁 (b) 蔗糖溶液 (c) 牛奶 (d) 巧克力
1—细粒 2—中粒 3—粗粒

第二节 流体静力学

一、流体的受力

既然流体可作为连续介质处理,其受力必然服从于牛顿力学定律。外界作用在流体上的力可分为体积力与表面力。

(一) 体积力

体积力即场力,是一种非接触力。例如,地球引力、流体加速运动时所受的惯性力以及带电流体所受的静电力等。重力场中任何物质都受重力的作用,重力的大小与物质的质量成正比,因此体积力也称为质量力。对质量为 m , 密度为 ρ 的流体,场力的一般表达式为:

$$F = ma = \rho Va \quad (1-2-1)$$

式中,加速度 a 由力场特性决定,重力场的加速度值是重力加速度 g , 离心力场的加速度值是离心加速度 $r\omega^2$ 。

(二) 表面力

表面力是由与流体表面相接触的物质(包括相邻流体)施加给该流体的作用力,其大小与作用面积成正比。作用于流体上的表面力可分为垂直于表面的力和平行于表面的力。压力是垂直作用于表面的力,作用在流体单位面积上的压力称为压强。剪切力是平行作用于表面的力,作用在流体单位面积上的剪切力称为剪应力。压强和剪应力的单位均为 N/m^2 或 Pa 。

在液体与不同流体的相邻界面上还存在着一种特殊的作用力,称为表面张力,其方向指向作用面的外法向,使液体表面具有收缩的趋势。表面张力的大小用表面张力系数 σ 来表示,其单位为 N/m 。表面张力系数与相邻流体的种类及液面温度有关,例如 20°C 时,水-空气界面的 σ 为 $72.7 \times 10^{-3} \text{N/m}$ 、肥皂水-空气则为 $40.0 \times 10^{-3} \text{N/m}$ 。表面张力的大小对于流体的分散和多相流动与传热传质有重要影响。

二、流体压强的度量

压强为外部作用力(包括流体柱自身的重力)在流体中的传播,其方向始终与作用面相垂直且指向作用面的法向。无论流体运动与否,压强始终存在,静止流体中的压强称为静压强。可以证明,在静止流体中作用于某一点不同方向上的压强在数值上是相等的。

压强的单位除用 N/m^2 即 Pa 外,其他常用的计量单位有: atm (标准大气压)、 at (工程大气压)、流体柱高度、 kgf/cm^2 等。一些常用压强单位之间的换算关系如下:

$$1 \text{atm} = 101300 \text{N/m}^2 = 1.033 \text{kgf/cm}^2 = 10.33 \text{mH}_2\text{O} = 760 \text{mmHg}$$

$$1 \text{at} = 98070 \text{N/m}^2 = 1 \text{kgf/cm}^2 = 10 \text{mH}_2\text{O} = 735.6 \text{mmHg}$$

可直接用压力计测量流体在某点或某截面的压强,但压力计的测量元件通常处于大气压作用下,因此按测量原理,其测量值往往是流体真实压强(也称绝对压强)与被测点处的外界大气压之差。当被测流体的绝对压强大于外界大气压时,压力计所测得的压强值称为表压,即:

$$\text{绝对压强} = \text{大气压强} + \text{表压}$$

当被测流体的绝对压强小于外界大气压时,压力计所测得的压强值称为真空度,即:

$$\text{绝对压强} = \text{大气压强} - \text{真空度}$$

[例 1-2-1] 某果汁蒸发浓缩釜顶部装有一与釜内气相空间相通的真空表,其读数为 400mmHg 。问釜内果汁蒸发的绝对压强为多少? 若通入夹套内的加热饱和水蒸气的压强为

0.2MPa(表压),问该加热饱和水蒸气的绝对压强及温度为多少?

解: (1) 因真空表上的读数即为真空度,故釜内果汁蒸发的绝对压强 p 为:

$$p = \text{大气压强} - \text{真空度} = 0.1013 - (400/760) \times 0.1013 = 0.0480\text{MPa}$$

(2) 表压为 0.2MPa 的饱和水蒸气的绝对压强 p 为:

$$p = \text{大气压强} + \text{表压} = 0.1013 + 0.2 = 0.3013\text{MPa}$$

查饱和水蒸气表,绝对压强为 0.3013MPa 的饱和水蒸气所对应的饱和温度为 133.3°C。

三、流体静力学基本方程

考察图 1-2-1 所示直角坐标系中静止流体空间任意位置 (x, y, z) 处的微元体 $dx dy dz$ 的受力情况。微元体的面 $dx dy$ 、 $dy dz$ 、 $dz dx$ 分别与所对应的坐标轴正交。对静止的流体,作用其上的表面力仅有静压力。若设流体处于重力场中,则作用在此微元体上的体积力仅为重力,其方向在坐标 z 的负方向。

根据力的平衡,在 z 方向上:

$$\left[p_z - \left(p_z + \frac{\partial p}{\partial z} dz \right) \right] dx dy - \rho g dx dy dz = 0 \quad (1-2-2)$$

展开并用 $dx dy dz$ 除以上式得:

$$\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g = 0 \quad (1-2-3)$$

在 x 及 y 方向上,仅有静压力存在,仿照上述推导可得:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (1-2-4)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (1-2-5)$$

式(1-2-3)~(1-2-5)表明,在重力场中静压强仅与垂直位置有关,而与水平位置无关。

设流体不可压缩,即流体的密度 ρ 为常数,积分式(1-2-3)得:

$$\frac{p}{\rho} + gz = \text{常数} \quad (1-2-6)$$

式中,各项的单位均为 J/kJ, p/ρ 称为流体的压强能, gz 称为流体的位能,均为流体的机械能。上式表明单位质量静止流体的压强能与位能的总和(称为总势能)保持不变。

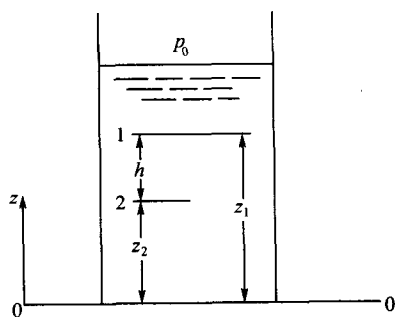


图 1-2-2 静止流体内的压强分布

在如图 1-2-2 所示的静止液体中,任取两水平截面 z_1 和 z_2 ,两截面处对应的压强分别为 p_1 和 p_2 ,则有:

$$\frac{p_1}{\rho} + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + gz_2 \quad (1-2-7)$$

或:
$$p_2 = p_1 + \rho gh \quad (1-2-8)$$

式中 $h = z_1 - z_2$ ——两截面间的距离。

若用 h 代表距液面的位置,而液面上的压强为 p_0 ,则 h 截面处流体的压强:

$$p = p_0 + \rho gh \quad (1-2-9)$$

式(1-2-6)~(1-2-9)均称为流体静力学基本方程式,表达了如下的流体静力学原理:

① 重力场中静止流体总势能不变,静压强仅随垂直位置而变,与水平位置无关,压强相等