

食品工程原理及应用

王海 主编

机械工业出版社

食品工程原理及应用

主 编 王 海
副主编 乔效中
王献梅

机械工业出版社

(京)新登字 054 号

内 容 提 要

本书共七章,包括流体流动、流体输送、真空技术、筛分、过滤、沉降、分离、传热、制冷、蒸发、结晶、干燥及流态化技术等内容,结合食品生产各单元操作,从理论和生产两方面论述了基本原理和应用实践,可针对性地解决食品工程中设计、计算、设备选型、提高效率、降低能耗、防止污染等各类问题。

本书适合高等院校食品加工专业用作教材,也是从事食品加工、食品机械的工程技术人员适用的参考书。

食品工程原理及应用

主编 王 海

*

责任编辑:王 琳 版式设计:李松山

封面设计:姚 毅 责任校对:陈立耘

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码:100037

(北京市书刊出版业营业许可证出了第117号)

三河市安远印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16·印张 19.5·字数 480 千字

1995 年 4 月北京第 1 版·1995 年 4 月北京第 1 次印刷

印数 00 001—35000 定价:20.00 元

*

ISBN7-111-04636-6/TS·24 (G)

前 言

近年来,我国各农业院校相继设立了农畜产品加工专业,但至今还没有适用的《食品工程原理》教材。编写本书的目的就是满足农业院校食品加工和食品机械专业教学的需要。

食品工程学是一门综合性的技术学科。本书将化工原理和食品工业生产相结合,比较完整、系统地论述了食品工业生产中单元操作的原理及其应用,并根据食品原料的特点和加工要求作了详细的分析和论证,为食品生产企业在保证产品质量的前提下,就节约能源、降低成本等方面提供了解决的办法或途径。在论述各单元操作的典型设备的结构、造型、设计计算方法的同时,介绍了常用设备的型号、规格,为食品生产企业合理选择设备,提高设备生产效率,降低设备投资以及防止污染等提供了依据。所以,理论和应用的结合是本书的特点。

本书在编写中注意了计量单位的统一,并按照国务院发布的《中华人民共和国法定计量单位》执行。但鉴于目前企业中使用的设备,其说明书等还沿用着一些非法定计量单位,在全国范围内统一实行法定计量单位还要有一段过渡过程,故本书例题中还保留了一些工程制单位,并在附录中列出了各种单位间的换算关系。

本书由张家口高等农业专科学校王海主编,参加编写的还有乔效中、王献海、白殿海、郭建成、许秀珍、严佩峰。本书由孟寿萱主审。

在编写过程中参考了国内外有关书籍和资料,主要参考书目列于书末,谨向其作者表示感谢。

由于编者水平所限,书中缺点错误在所难免,竭诚欢迎读者批评指正。

编者

1994年10月

目 录

前言		第七节 换热器	146
绪论	1	第八节 加热剂、冷却剂及加热方法	150
第一章 流体流动	5	第九节 制冷技术	155
第一节 流体静力学基本方程	5	第十节 不稳定热传导	167
第二节 流体流动的基本方程	12	第五章 流态化技术及气力输送	173
第三节 流体在管内的流动阻力	20	第一节 固体流态化	173
第四节 管路计算和流量测量	31	第二节 气力输送	186
第五节 非牛顿流体的流动	35	第六章 蒸发、结晶、冷冻浓缩	196
第二章 流体输送	38	第一节 蒸发	196
第一节 液体输送设备	38	第二节 结晶	214
第二节 气体输送、压缩设备和真空技术	53	第三节 冷冻浓缩	220
第三章 非均相物系的分离	74	第七章 空气调节、物料干燥	225
第一节 筛分	74	第一节 湿空气的热力学基础	225
第二节 沉降	79	第二节 空气调节	234
第三节 过滤	88	第三节 干燥机理	238
第四节 离心机分离	100	第四节 喷雾干燥	254
第四章 传热及制冷技术	107	第五节 冷冻干燥	267
第一节 传热学基础	107	附录	272
第二节 热传导	109	一 单位换算	272
第三节 对流传热	115	二 物理常数	275
第四节 传热计算	116	三 物理性质数据	276
第五节 对流换热系数关联式	124	四 型号、规格、规范	287
第六节 辐射换热	139	习题	296
		参考文献	304

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,原料来源广泛,品种种类繁多,加工过程复杂多样,常需要流体的输送和压缩,沉降、过滤、传热、蒸发、结晶、干燥、冷冻等一些基本的物理过程,这些过程称为单元操作。

不同工艺过程的同一单元操作,具有共同的基本原理和通用的典型设备。

最早把某些最基本的单元操作,通过实践加以理论总结和提高,再应用到生产实践中去,作为一门学科,称为化工原理。化工原理是70年前石油工业开发中,面临着各种问题需要解决,才发展起来的一门科学。

食品工业发展历史悠久,但长期以来是以前加工经验和传统方法为其生产方式的基础。随着人们的生活水平不断提高,食品加工迫切需要科学化,使食品工业向大规模、连续化、自动化生产发展,从而由化工原理中提出一些基本单元操作并加以发展,成为食品工程原理。

一、《食品工程原理及应用》的性质、任务与内容

《食品工程原理及应用》是在高等数学、物理学、普通化学及物理化学等课程的基础上开设的一门基础技术课。其任务是研究食品工业单元操作的基本原理,典型设备的结构及工艺尺寸的造型(或计算)。《食品工程原理及应用》内容主要是关于动量传递、热量传递及质量传递的理论,即三传原理贯穿在各单元操作中。

二、食品原料的特点

食品原料是农、林、牧、副、渔业的动植物产品。原料的结构和成分复杂。原料的成分随品种、成熟度及贮藏条件而变化,如蛋白质、酶之类成分是生物活性的物质,在加工时易变性、钝化或破坏,有些如色素、脂肪等成分易氧化。总之,作为人类食用的食品在加工中对色、香、味、营养成分以及卫生等问题都应考虑。

热敏性和氧化变质是动植物原料普遍的特点,因此,食品加工常在低温、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、真空干燥、真空蒸馏、真空包装等。

易腐性是食品加工原料及制品的又一特点。食品加工的目的就是抑制微生物和酶的活动以提高制品的保藏性。

三、食品工程原理计算的基础

1. 物料衡算

质量守恒定律:向设备输入的材料质量减去从设备中输出的材料质量,必等于积累在设备中的质量,即:

$$\Sigma F - \Sigma D = A \quad (0-1)$$

式中 ΣF ——输入物料量的总和;

ΣD ——输出物料量的总和;

A ——积累物料量。

式(0-1)是物料衡算的通式,适用于任何指定的空间范围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;有化学变化时,其中各元素仍然符合这个通式。

式(0-1)既适应于间歇过程,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 $A=0$,式(0-1)可简化为:

$$\Sigma F = \Sigma D \quad (0-2)$$

进行物料衡算时,首先要画出衡算的范围(或称系统),并确定衡算对象及衡算基准,然后把穿越系统边界的物料流股逐项列出。对于间歇过程,常以一次(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。

〔例 0-1〕 浓度为 20% (质量百分数) 的 KNO_3 水溶液以 1000kg/h 的流量送入蒸发器。在 422K 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 311K 后,析出含有 4% 结晶水的 KNO_3 晶体,并不断取走,浓度为 37.5% 的 KNO_3 饱和母液则返回蒸发器循环处理。试求结晶产品量 P 、水分蒸发量 W 、循环母液量 R 及浓缩溶液量 S 。

解:

(1) 计算结晶产品量 P 及水分蒸发量 W 首先根据题意画出示意图,如图 0-1。

以 1h 为基准,在图中虚线方框 I 所示的范围内作物料衡算。因过程中无化学反应,且为连续稳定过程,故可依式(0-2)写出总物料衡算式及 KNO_3 的衡算式,即

$$1000 = W + P$$

及 $1000(0.20)$

$$= W(0) + P(1 - 0.04)$$

解得

$$P = 208.3\text{kg/h}$$

$$W = 791.7\text{kg/h}$$

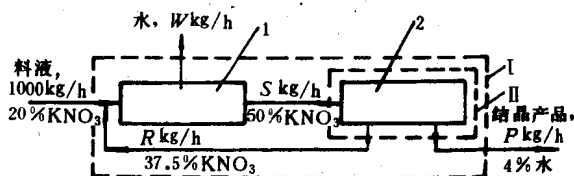


图 0-1 例 0-1 附图

1—蒸发器 2—结晶器

(2) 计算循环母液量 R 及浓缩溶液量 S 仍以 1h 为基准,在图中虚线方框 II 所示的范围内作总物料衡算及 KNO_3 衡算:

$$S = R + 208.3$$

及

$$S(0.50) = R(0.375) + 208.3(1 - 0.04)$$

解得

$$R = 766.6\text{kg/h}$$

$$S = 974.9\text{kg/h}$$

〔例 0-2〕 桶内存有 2000kg 浓度为 10% (质量百分数) 的盐水。现以 100kg/min 的恒定流量向桶内注入浓度为 0.2% 的稀盐水。同时用泵以相同的流量从桶底抽出盐水。若操作过程中桶内液体能达到完全混合,即桶内的盐水浓度均匀,因而任何时刻抽出的盐水与当时存在桶内的盐水浓度相等,试求桶内盐水浓度降至 1% 所需的时间。

解: 首先根据题意画出过程示意图,如图 0-2。

以盐水桶为衡算范围,如图中虚线方框所示。在本题情况下,因向桶内输入盐水的速率与由桶内抽出盐水的速率相同,故桶内盐水积累量为零,桶内盐水总质量 m 应维持不变,即:

$$m = 2000\text{kg}$$

但就桶内盐水浓度随时间而改变的情况来讲,应属于连续而不稳定的过程。

设任一时刻桶内的盐水浓度为 x ，则在 $d\theta$ 时间内各流股中盐分的数量为：

$$\text{输入的盐量} = 100(0.002)d\theta$$

$$\text{输出的盐量} = 100xd\theta$$

$$\text{积累的盐量} = d(mx) = m dx + x dm$$

$$= m dx = 2000 dx$$

依式 (0-1) 写出微分时间内的盐量衡算式：

$$100(0.002)d\theta - 100xd\theta = 2000dx$$

$$d\theta = \frac{2000dx}{0.2 - 100x}$$

按照如下边界条件，积分上式，即：

$$\text{开始时刻} \quad \theta = 0 \quad x = 0.1$$

$$\text{终了时刻} \quad \theta = \theta \quad x = 0.01$$

$$\begin{aligned} \int_0^\theta d\theta &= \int_{0.1}^{0.01} \frac{2000dx}{0.2 - 100x} \\ &= -20 \int_{0.1}^{0.01} \frac{dx}{x - 0.002} \end{aligned}$$

解得

$$\theta = -20 \ln \frac{0.01 - 0.002}{0.1 - 0.002} = 50 \text{min}$$

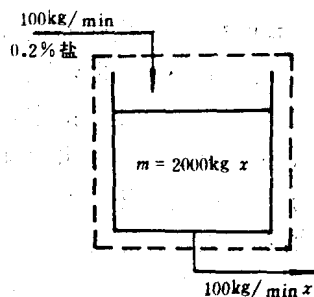


图 0-2 例 0-2 附图

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变，但是，在许多食品设备（如换热器、蒸馏塔等）中，往往没有或者不考虑这种能量转变，唯一需要考虑的能量形式就是热。因此，加工过程中的能量衡算均简化为热量衡算，而热量衡算的依据就是能量守恒定律。

进行热量衡算的基本方法与物料衡算的方法相同，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，为要确定物料的焓值，必须首先规定基准温度；当有相变化发生时，还须规定基准状态。通常以 273K、液态为基准。本书附录三表 5、6、7 中所列水蒸气的焓值。便是以 273K 的液体为基准求得的。譬如，从表 6 中查得 398K 饱和水蒸气的焓值为 2716.5 kJ/kg，是因将 1kg 273K 的液体水加热至 398K（吸热 523.4 kJ），再令其汽化成为饱和蒸汽（又吸热 2193.1 kJ）所吸收的总热量为 2716.5 kJ。

(2) 热量不仅可以随同物料进、出系统，而且可以透过设备、管道的壁面而由外界传入系统，或由系统逸散到环境里去。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：

$$\Sigma H_F + q = \Sigma H_P \quad (0-3)$$

式中 ΣH_F ——单位时间内进入系统的各股物料的总焓值；

ΣH_P ——单位时间内离开系统的各股物料的总焓值；

q ——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 0-3〕 在换热器里每小时将 1000kg 平均比热容为 $3.65\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 的某种溶液自 298K 加热到 353K。加热介质为 393K 的饱和水蒸气,每小时消耗量为 95kg。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。

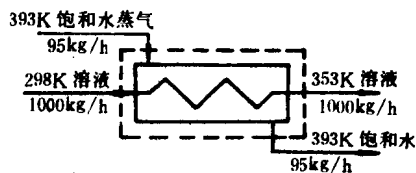


图 0-3 例 0-3 附图

解: 首先根据题意画出过程示意图,如图 0-3。

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

$$\begin{aligned} \text{输入系统的溶液的焓} &= 1000 \times 3.56(298 - 273) \\ &= 89000\text{kJ/h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{系统输出的溶液的焓} &= 1000 \times 3.56(353 - 273) \\ &= 284800\text{kJ/h} \end{aligned}$$

又从附录三表 6 查出 393K 饱和水蒸气的焓值为 2708.9kJ/kg 、393K 饱和水的焓值为 503.67kJ/kg 。

则:

$$\text{输入系统的饱和水蒸气的焓} = 95 \times 2709 = 257400\text{kJ/h}$$

$$\text{系统输出的饱和水的焓} = 95 \times 503.7 = 47900\text{kJ/h}$$

依式 (0-3) 列出热量衡算式,即:

$$89000 + 257400 + q = 284800 + 47900$$

解得

$$q = -13700\text{kJ/h}$$

$$\text{热损失速率 } qL = -q = 13700\text{kJ/h}$$

$$\text{热损失百分数} = \frac{13700}{257400 - 47900} \times 100\% = 6.5\%$$

第一章 流体流动

在食品生产过程中,许多原料、半成品、成品或辅助材料是以流体的状态存在的。流体是液体和气体的统称。它具有流动性的特征,即抗剪和抗张的能力小,无固定形状,随容器的形状而变化。流体受剪便连续不断地变形,即产生流动。流动时,流体作为整体流动,并且还在内部发生相对运动。

在食品生产中经常应用的流体流动基本原理及流动规律有以下主要方面:

(1) 流体输送 欲把流体从一地方输送到所需的另一地方时,通常遇到流体通过管路系统的压力变化,输送所需功率,流量的测量,管路的直径和输送设备的选择等,可以应用流体流动规律和静止规律来确定。

(2) 为设备提供适宜的流动条件 在食品工程中传热和传质等过程都是在流体内部进行的。这些设备的操作效率都与流体流动状况密切相关。

本章着重讨论流体流动规律和基本原理,并分析和计算流体输送问题。

在讨论流体流动时,常从流体质点来着手。所谓流体质点指的是大量流体分子构成的集团,质点大小与容器或管路尺寸相比是微不足道的。流体就是由无数个质点组成的连续工质,质点间没有空隙,这样就不必考虑复杂的分子运动而从宏观上来研究流体流动所遵循的规律,这在工程上是许可的。

第一节 流体静力学基本方程

流体静力学是研究流体在外力作用下达到静止平衡的规律,也就是指流体在重力作用下内部压力变化的规律。在实际工作中,这些规律可用于流体在设备或管道内压强变化的测量、液体在贮罐中液位的测量及设备液封的设计等。

一、流体的物理性质

流体的物理性质主要指密度、粘度、压缩性、比热容等。

1. 密度、重度、相对密度及比容

单位体积流体所具有的质量称为流体的密度,其表达式为:

$$\rho = \frac{dm}{dV} \quad (1-1)$$

式中 ρ ——流体的密度, kg/m^3 ;

m ——流体的质量, kg ;

V ——流体的体积, m^3 。

流体的密度一般可在物理化学手册或有关资料中查得,一些流动食品的密度见表 1-1。

流体包括液体和气体。液体是不可压缩流体,液体密度基本上不随压力而变,但随温度稍有改变。气体是可压缩的流体,其密度随压力和温度而变化,因此必须标明气体的状态。从手册中查取的密度是在某一条件下的数值,并且,不同单位制的单位和数值不同,这就要掌

握单位换算,把查取的密度换算到操作条下的密度。如水在温度不变的情况下,每增加1个大气压,体积减少0.005%左右,空气在压力不变时,温度升高100℃,体积就增加约27%,纯水在4℃时的密度为1000kg/m³;空气在标准状态下的密度为1.293kg/m³。因此,液体密度的变化很小,可以忽略,而对于气体,密度就必须进行换算。一般当压强不太高,温度不太低时,可按理想气体来处理。

对于一定质量的理想气体,其体积、压强和温度之间的关系为:

$$\frac{PV}{T} = \frac{P'V'}{T'} \quad (1-2)$$

由于气体是均匀物质,式(1-1)可写为 $\rho = \frac{m}{V}$,把式(1-2)代入此式并整理得:

$$\rho = \rho' \frac{T'P}{TP'} \quad (1-3)$$

式中 P ——气体的绝对压强, kPa;

V ——气体的体积, m³;

T ——气体的绝对温度, K。

(上标“'”表示手册所指定的条件)。

$$PV = \frac{m}{M}RT$$

实际中,某状态理想气体的密度计算式为:

$$\rho = \frac{PM}{RT} \quad PM = PR\bar{T} \quad (1-3a)$$

或

$$\rho = \frac{MT_0P}{22.4TP_0} \quad (1-3b)$$

式中 M ——气体的分子量, kg/kmol;

R ——气体常数, 其值为8.315kJ/(kmol·K);

(下标“0”表示标准状态)。

在食品中常遇到几个组分的混和物,而手册中所给的是纯物质密度。故混合物的平均密度按下面的通式计算。

对于气体混合物,各组分的浓度常用体积分率来表示,若以1m³混合物为基准,各组分在混合前后质量不变,则1m³混合气体的质量等于各组分的质量之和,即:

$$\rho_m = \rho_A X_{VA} + \rho_B X_{VB} + \dots + \rho_n X_{Vn} \quad (1-4)$$

式中 $\rho_A, \rho_B \dots \rho_n$ ——气体混和物中各纯组分的密度, kg/m³;

$X_{VA}, X_{VB} \dots X_{Vn}$ ——气体混合物中体积分率。

对于液体混和物,各组分的浓度常用质量分率来表示,若以1kg混合物为基准。各组分在混合前后体积不变,则1kg混合物的体积等于各组分单独存在时体积之和,即:

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{X_{WA}}{\rho_A} + \frac{X_{WB}}{\rho_B} + \dots + \frac{X_{Wn}}{\rho_n} \quad (1-5)$$

式中 $X_{WA}, X_{WB} \dots X_{Wn}$ ——液体混合物中各组分的质量分率。

相对密度(d)是物质的密度与在4℃下水的密度之比,即:

$$d = \frac{\rho}{\rho_{H_2O}^{4^\circ C}} \quad (1-6)$$

重度(ν)是单位体积流体所具有的重力。密度与重度的关系为:

$$\nu = \rho g \quad (1-7)$$

单位：若 ρ 为 $\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ ，则 ν 为 kgf/m^3 。

比容 (ν) 是流体密度的倒数。也就是单位质量所具有的体积，即

$$\nu = \frac{dV}{dm}$$

表 1-1 某些流动食品的密度、比容和相对密度 (15℃)

品 名	密 度 (kg/m^3)	比 容 (m^3/kg)	相对密度
10%食盐水	1070	9.37×10^{-4}	1.07
20%食盐水	1150	8.71×10^{-4}	1.15
20%糖液	1080	9.27×10^{-4}	1.08
40%糖液	1180	8.50×10^{-4}	1.18
牛奶	1030~1040	$9.27 \times 10^{-4} \sim 9.63 \times 10^{-4}$	1.03~1.04
芝麻油	910~930	$1.1 \times 10^{-3} \sim 1.07 \times 10^{-3}$	0.91~0.93
猪油	910~920	$1.1 \times 10^{-3} \sim 1.09 \times 10^{-3}$	0.91~0.92
椰子油	910~940	$1.1 \times 10^{-3} \sim 1.06 \times 10^{-3}$	0.91~0.94

2. 压强

流体的压强是流体垂直作用在单位面积上的力。习惯上称为压力，表达式为：

$$p = \frac{dF}{dA} \quad (1-8)$$

式中 p ——流体的压强， N/m^2 ；

F ——垂直作用流体表面上的力， N ；

A ——作用面的面积， m^2 。

为了计算和测压方便，常把压力表示为绝对压强、表压和真空度。绝对压强是以绝对零压作起点，是流体的真实压强。表压是测压时压力表所显示的读数，是表内压强比表外大气压高出的值；真空度是测压时表内压强比表外大气压低的数值。关系为：

表压 = 绝对压强 - 大气压

真空度 = 大气压 - 绝对压强

真空度又是表压的负值，如真空度为 500mmHg，则表压是 -500mmHg，绝对压强、表压和真空度之间的关系，如图 1-1 所示。

当压强用表压和真空度表示时，必须注明，以免混淆，如：200kN/m² (表压)，500mmHg (真空度)。

3. 粘度

流体具有流动性，当流体受外力作用，其质点内部产生相对运动时，本身内部产生阻力的性质，称为粘性。流体在圆管内流动时，管内任一截面上各点的速度不同，中心处的速度最大，愈靠近管壁速度愈小，在管壁处流体质点粘附于管壁上，其速度为零。因此，流体在圆管中流动时，可视为被分割成无数极薄的圆筒层，一层套着一层，称为流体层，各层以不同的速度向前运动，如图

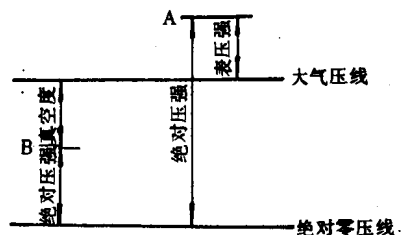


图 1-1 绝对压强、表压和真空度的关系

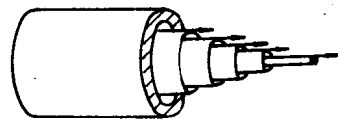


图 1-2 流体在圆管内分层流动示意图

1-2 所示。由于各层速度不同,层与层之间发生了相对运动,速度较大的流体层对与之相邻的速度较慢的流体层起着带动作用,而后者又对前者起着拖曳作用。流体层间这种相互作用阻止了流体向前运动。这种相互作用称为流体的内摩擦,是粘性的表现,又称粘性摩擦。粘性摩擦是流体流动时产生流动阻力的依据,因此维持流体流动就必须消耗能量来克服流动阻力。

衡量流体粘性大小的物理量称为粘度,粘度是流体的物理性质。流体流动时内摩擦大小与哪些因素有关?下面加以说明。

如图 1-3 所示,设想有两块面积很大而且相距很近的平行平板,其间充满了液体。若将下板固定,而以一推力向右推动上板,上板就以一定速度 v 沿 x 方向运动,这样粘附在上板底面一薄层液体也以速度 v 随上板运动,其下各层流体的速度依次降低,直至附在下层板表面的一薄层液体速度为零。

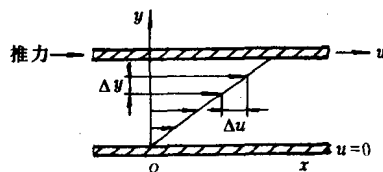


图 1-3 平板间液体速度变化

图 1-3 中设流体层的接触面积为 S , 作平板法线 y , 则垂直于流体层、两相邻流体层的距离为 dy , 若下层流速为 u , 则上层流速为 $u+du$ 。 du 为法向距离 dy 内的速度增量。当 $dy \rightarrow 0$ 称 du/dy 为该处的速度梯度, 如图 1-4 所示。经过无数次实验, 牛顿进行了归纳, 提出了以下定律: 两流体层间的摩擦力 (即剪力) 与垂直于流动方向的速度梯度成正比, 也与两层接触面积成正比, 即:

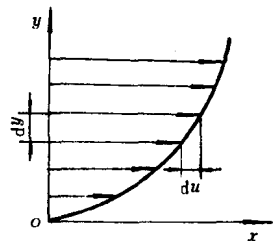


图 1-4 一般速度分布图

$$F = \mu S \frac{du}{dy} \quad \text{或} \quad \tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-9)$$

式中 F ——摩擦力, 即剪力, N;

τ ——剪应力, 即单位面积上的摩擦力, N/m^2 ;

μ ——流体粘度。

该定律通常被称为牛顿摩擦定律。凡是剪应力与速度梯度一次方成正比的流体, 即符合牛顿定律的流体, 称为牛顿型流体, 所有气体和大多数流体都属于这一类。不符合牛顿定律的流体, 称为非牛顿型流体, 大多数高分子溶液、胶体溶液都属于这一类。

流体粘度的大小, 是受温度影响的, 液体的粘度随温度升高而减小, 而气体的粘度随温度升高而增大。压强变化时, 液体的粘度基本不变, 气体的粘度在通常情况下变化不大, 一般可忽略, 但在高压下要考虑变化。图 1-5 表示几种液体食品粘度与温度的关系。

粘度的意义就是流体的速度梯度为 1 单位时所产生的剪应力, 则粘度单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

在 SI 制中:

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{du}{dy}} = \frac{\frac{\text{N}}{\text{m}^2}}{\frac{\text{m/s}}{\text{m}}} = \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = \text{Pa} \cdot \text{s}$$

在物理单位中:

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{du}{dy}} = \frac{\frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2}}{\frac{\text{cm/s}}{\text{cm}}} = \frac{\text{dyn} \cdot \text{s}}{\text{cm}^2} = \frac{\text{g}}{\text{cm} \cdot \text{s}}$$

$$= \text{P}(\text{泊})$$

以上两种粘度单位都是食品工程上常见的, 其换算关系为:

$$1\text{Pa} \cdot \text{s} = 10\text{P} = 1000\text{cp}(\text{厘泊})$$

在食品工程中,为了解决问题方便,常引入理想流体的概念。理想流体在流动时没有摩擦损失,即摩擦力为零,也就是理想流体的粘度为零,但这仅为一种假设,在流体粘性极小,可以忽略不计时才能成立。

4. 比热容及焓

流体的比热容是单位质量流体在没有发生化学反应和相变化时,温度每升高 1K 所需要的热量,以 c 表示,单位为 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,一般说,流体比热容是温度的函数:

$$c = \frac{dQ}{mdT}$$

几种常见液体食品的比热容见表 1-2。

表 1-2 常见液体食品的比热容 (0~100℃ 间的平均值)

名 称	含水量 (%)	比热容 $[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$
牛奶	87.5	3.85
脱脂奶	91	3.98~4.02
奶油	14~15.5	2.05~2.14
人造奶油	9~15	1.76~2.09
植物油	—	1.46~1.88
可可饮料	—	1.84

常用的气体比热容有定压比热容 c_p 、定容比热容 c_v 、摩尔比热容 c_M 等,单位为 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 或 $\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

气体比热容与气体加热过程有关,故常用定压比热容,它是气体在加热过程中压力保持不变的比热容。对于定压下的加热(或冷却),气体吸收(或放出)的热量为:

$$\Delta Q_p = mc_p \Delta T \quad (1-10)$$

焓是流体的内能及内界对其所作的功,是流体状态发生变化的一种特性,可以表示为:

$$H = E + pV$$

式中 H ——焓, kJ ;

E ——内能, kJ 。

定压过程中,焓的增量等于流体所吸收的热量。

二、流体静力学基本方程

(一) 流体所受到的力

作用在流体上的力有表面力和质量力两种。

1. 表面力

作用于流体表面上的力称为表面力,它与表面积成正比。若在流体中任取一块流体 dV ,则 dV 四周的流体对 dV 的表面有作用力,这就是表面力。表面力常表示为剪应力和正应力。剪应力是作用在单位面积上沿表面的切线方向上的力。正应力是作用在单位面积上沿表面的法线方向的力,一般正应力不是拉而是压,故也称压力。当流体处于静止时,所受的力处于平衡,其内部不存在剪应力,而只存在压力。

2. 质量力

质量力也称体积力,作用在流体内部每一质点上并与质量成正比的力称为质量力。质量

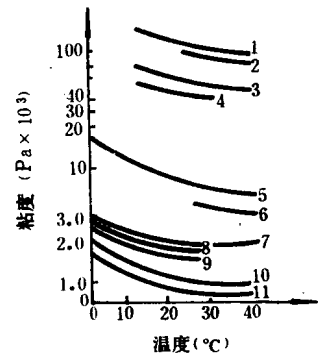


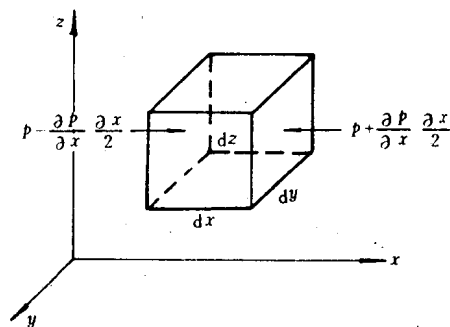
图 1-5 液体食品的粘度与温度的关系

1—菜籽油 2—猪油 3—椰子油 4—沙丁鱼油、鲸油 5—40%砂糖溶液 6—50%葡萄糖溶液 7—20%砂糖溶液 8—20%葡萄糖溶液 9—牛奶 10—10%盐水 11—水

力分两种,一种是外界物质对流体的吸引力;另一种是流体作加速运动时产生的惯性力。

(二) 静止微小流体的受力分析

如图 1-6 所示,在流体中取一微元体,其体积 $dV = dx dy dz$, 设点 A 为微元体的中心点,且压强变化为线性变化,则微元体在 x 轴方向,在左面受到的力为 $(P - \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \frac{dx}{2}) dy dz$, 在右面受到的力为 $(P + \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \frac{dx}{2}) dy dz$ 及质量力 $X \rho dx dy dz$, 其中 X 为单位质量力。因流体是静止的,则流体的微元体受力平衡。那么微元体在 x 轴方向上所受的力两边平衡。



即:

图 1-6 理想流体运动微分方程式的推导

$$\left(p - \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \frac{dx}{2}\right) dy dz - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \frac{dx}{2}\right) dy dz + X \rho dx dy dz = 0$$

化简此式得:

$$-\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + X = 0 \quad (1-11a)$$

同理, y 轴方向和 z 轴方向所受的力亦平衡, 即

$$-\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + Y = 0 \quad (1-11b)$$

$$-\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + Z = 0 \quad (1-11c)$$

这三个公式就是欧拉方程。把三个式合并起来, 则为

$$dp = \rho(Xdx + Ydy + Zdz) \quad (1-12)$$

若流体只受重力场的作用, 即 $X=Y=0$, $Z=-g$, 代入式 (1-12) 并微分得:

$$p + \rho gz = C$$

若取 z 轴为高度 h 则:

$$\frac{p - p_0}{\rho g} = h \quad (1-13)$$

式 (1-13) 就是静力学基本方程。

(三) 静力学基本方程的应用

在食品工程中, 静力学基本方程应用很广, 下面介绍几个例子。

1. 压强及压差的测量

液柱压差计就是以流体静力学基本方程式为依据的。

(1) U 形管压差计 U 形管压差计的结构如图 1-7 所示。U 形管中装有液体作为指示液。指示液要与所测流体不互溶、不起化学反应, 且其密度要大于被测流体的密度。

将 U 形管两端与所要测的两点接触, 若作用于 U 形管两端的压力不等 (图中 $p_1 > p_2$), 则在 U 形管的两侧便出现了指示液面的高度差 R , R 称为压差计的读数。压差 ($p_1 - p_2$) 与 R 的关系式, 可根据静力学基本方程进行推导。

设指示液的密度为 ρ_A , 被测流体的密度为 ρ_B , 则图 1-7 中, a 、 a' 两点的静压是相等的, 因为这两点都在相联通的同一流体中, 且在同一水平面上。1、2 两点虽然也在同一水平面上, 但不在连通的同一种静止的流体中, 故两点的压力不相等。然而 $p_a = p_{a'}$, 根据静力学方程知, U

形管左侧的液柱, a' 处的压力为

$$p_a = p_1 + \rho_B g(R + h)$$

同样, 右侧 a' 点的压力为

$$p_{a'} = p_2 + \rho_B g h + \rho_A g R$$

于是

$$p_2 + \rho_B g(R + h) = p_2 + \rho_B g h + \rho_A g R$$

简化后即得 $(p_1 - p_2)$ 与 R 的关系式:

$$p_1 - p_2 = (\rho_A - \rho_B) g R \quad (1-14)$$

若被测流体是气体, 则因气体的密度要比液体的密度小得多, 即 $\rho_A - \rho_B \approx \rho_A$, 此式可简化为:

$$p_1 - p_2 = \rho_A g R \quad (1-14a)$$

若 U 形管的一端与被测流体连接, 另一端与大气相通, 则读数 R 所反映的是被测流体的表压。

(2) 微差压差计 若所测压差很小, 用 U 形管压差计很难测量, 即数值 R 难以准确读出。为了放大读数 R , 除可选用其他指示液外, 还可用微差压差计。如图 1-8 所示, 微差压差计中装有两种密度相近且不互溶的指示液 A 和 C, 而指示液 C 与被测流体不互溶。并在 U 形管两侧上增设两个小室, 小室的内径与 U 形管的内径之比应大于 10, 这样 U 形管内指示液 A 的液面差 R 很大, 但小室的指示液 C 的液面变化甚微。则

$$p_1 - p_2 = (\rho_A - \rho_C) g R' \quad (1-15)$$

〔例 1-1〕 用普通 U 形管压差计测量气体管路上两点的压力差, 指示液用水, 读数 R 为 12mm, 为了放大读数, 改用微差压差计, 指示液 A 是酒精水溶液, 密度为 920 kg/m^3 ; 指示液 C 为煤油, 密度为 850 kg/m^3 。问读数可以放大到多少毫米? 放大了多少倍?

解: 由于是测量气体, 故用 U 形管的计算式 (1-14a) 和微差压差计计算式 (1-15) 得:

$$\begin{aligned} \rho_A g R &= (\rho_A - \rho_C) g R' \\ R' &= \frac{\rho_A R}{\rho_A - \rho_C} = \frac{1000 \times 12}{920 - 850} = 171 (\text{mm}) \\ \frac{R'}{R} &= \frac{171}{12} = 14.3 \text{ 倍} \end{aligned}$$

2. 液位的测量

食品厂经常要了解容器里液体的贮存量, 或要控制容器里液面的高度, 故要进行液位的测量。

如图 1-9 压差法测量液位的原理是, 将一个带有平衡室的 U 形管与被测容器连接, U 形管底将有指示液, 平衡室装有与容器中相同的液体, 由压差计读数 R 便可求出容器中液面的高度。

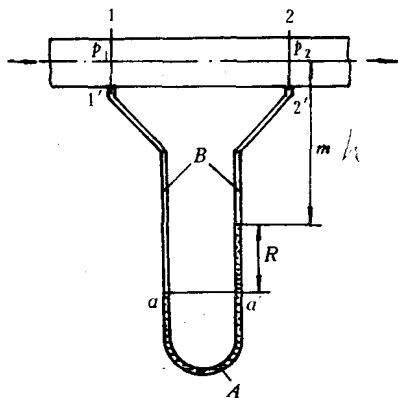


图 1-7 U 形管压差计

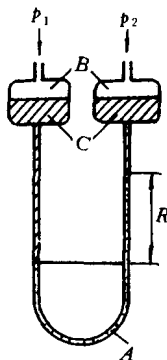


图 1-8 微差压差计

3. 液封

在食品生产中常遇到液封,液封的目的主要是维持设备中的压力稳定和保障人身安全。液封设计实际上就是计算液柱的高度。

〔例 1-2〕 罐头厂为了使高压杀菌连续化,采用如图 1-10 所示的静水压密封连续杀菌装置,杀菌室内通入高压蒸汽。若蒸汽的压力为 2kgf/cm^2 (绝对),试求水封室的高度。

解:如图设杀菌室内液面为 1,其离基准面的高度为 Z_1 ,液面的静压力为 p_1 ,水封室的液面为 2,其离基准面的高度为 Z_2 ,液面的压力为 p_2 ,则液面 1、2 为同一流体连通,由静力学方程得:

$$gZ_1 + \frac{p_1}{\rho} = gZ_2 + \frac{p_2}{\rho}$$

$$H = Z_2 - Z_1 = \frac{p_1 - p_2}{g\rho} = \frac{2 \times 98100 - 101000}{9.81 \times 1000}$$

$$= 9.70\text{m}$$

在生产上,还要考虑操作上的弹性等因素,一般采用 $15 \sim 16\text{m}$ 。

第二节 流体流动的基本方程

前一节讨论了静止流体内部压强的变化规律。对于流动着的流体内部压强的规律;液体从低位流向高位或从低压流到高压,需要输送设备对液体提供能量等问题,都是流体输送过程中常见的,因此,必须找出流体在管内的流量规律。这就是流体流动连续方程和柏努利方程。

一、流量与流速

单位时间内流过管道任一截面的流体量,称为流量。若以体积来计量,称为体积流量,以 V_s 表示,单位为 m^3/s 。若以质量来计量,称为质量流量,以 W_s 表示,单位为 kg/s 。体积流量与质量流量的关系为:

$$W_s = V_s \rho \quad (1-16)$$

单位时间内流体在流动方向上所流过的距离,称为流速,以 u 表示,单位为 m/s 。由于流体在管道任一截面上各质点的流速沿管径而变化,速度分布规律复杂,所以工程上为了计算方便,流体流速常指整个截面上的平均速度,即:

$$u = \frac{V_s}{A} \quad (1-17)$$

式中 A ——与流体流动方向垂直的管道截面积, m^2 。

由式 (1-16) 与 (1-17) 得流量与流速关系:

$$W_s = V_s \rho = u A \rho \quad (1-18)$$

一般流体输送的管道截面均为圆形,若以 d 表示管道的内径,则:

$$d = \sqrt{\frac{4V_s}{\pi u}} \quad (1-19)$$

因此,流体输送管路的直径是根据流量与流速计算的,流量取决于生产任务,合理的流

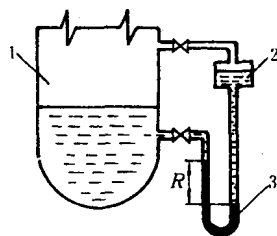


图 1-9 压差法测量液位
1—容器 2—平衡器的小室
3—U形管压差计

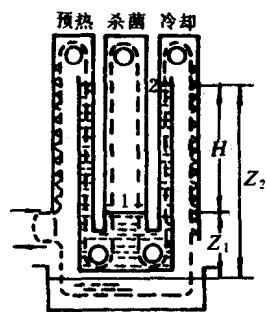


图 1-10 罐头杀菌示意图