

● 高职高专教材 ●

化工原理

主 编 宋建国
副主编 郝国栋 李春彦

HUAGONG YUANLI

东北林业大学出版社

高 职 高 专 教 材

化 工 原 理

主 编 宋建国

副主编 郝国栋 李春彦

東北林業大學 出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

化工原理/宋建国主编. —哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2007.7

ISBN 978-7-81131-057-3

I. 化… II. 宋… III. 化工原理 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 115594 号

责任编辑: 张红梅

封面设计: 彭 宇



NEFUP

化工原理

Huagong Yuanli

主 编 宋建国

副主编 郝国栋 李春彦

东北林业大学出版社出版发行

(哈尔滨市和兴路 26 号)

哈尔滨市工大节能印刷厂印装

开本 787 × 1092 1/16 印张 14 字数 340 千字

2007 年 7 月第 1 版 2007 年 7 月第 1 次印刷

印数 1—1 000 册

ISBN 978-7-81131-057-3

TQ·10 定价: 32.00 元

前 言

高职高专教育是我国高等教育的重要组成部分,随着经济和科学技术的不断发展,对高职高专教育也提出了更高的要求。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,围绕基本知识够用为度,以提高学生实践动手能力为主、培养技能型、应用型专门人才这一宗旨,我们编写了《化工原理》这本高职高专食品专业用教材。

《化工原理》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、设备及其应用,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。通过对若干典型单元操作的介绍,阐明针对不同性质的问题如何选用有效的分析解决问题的方法。此外,根据此课程特点,还应重视设备与运行以及工程运算能力的训练。

本书由牡丹江大学宋建国主编,牡丹江师范学院郝国栋、牡丹江医学院李春彦副主编。参加编写工作的还有齐齐哈尔大学王平等。其中绪论、第一章、第四章由宋建国、王平共同编写,第三章、第六章由郝国栋编写,第二章、第七章由李春彦编写,其他章节由宋建国编写。

全书由宋建国统稿和修订,由王平协助。本书在编写过程中,得到了东北林业大学出版社的大力支持和帮助。另外,本书在编写过程中参考了许多相关的文献资料,在此对有关作者及给予帮助的人员表示诚挚的谢意。

由于编者水平所限,难免有疏漏不当之处,敬请读者指正。

宋建国
2007年3月10日

内 容 提 要

本书重点介绍食品工程单元操作的基本原理、基本计算以及典型设备的构造原理。全书共七章,内容包括流体流动、流体输送机械、非均相混合物的分离、混合乳化、传热、蒸发与膜分离物料干燥内容。每章均编有适量的例题,章首有本章学习要求,章末附有习题。

本书在选材上注重从食品生产实际出发,加强运用理论知识解决生产实际问题能力的培养。注重基本概念、基本理论的广泛性与实用性,内容由浅入深,力求严谨,通俗易懂,可作为高职高专院校食品专业用的教材,也可供从事食品科研、生产、管理人员参考。

目 录

绪论	1
第一章 流体流动	3
第一节 流体的物理性质及流动状态参数	3
第二节 流体力学的基本方程	8
第三节 流体流动阻力	14
第四节 管路设计和流量测量	23
练习题	28
第二章 流体输送机械	30
第一节 离心泵	30
第二节 其他类型泵	40
练习题	45
第三章 非均相混合物的分离	47
第一节 沉 降	47
第二节 过 滤	64
第三节 离心分离	80
练习题	87
第四章 混合、乳化	89
第一节 搅 拌	89
第二节 乳 化	93
练习题	97
第五章 传热	98
第一节 概述	98
第二节 热传导	99
第三节 对流传热概述	105
第四节 辐射传热	115

第五节 传热过程计算.....	122
第六节 换热器.....	133
练习题.....	140
第六章 蒸发与膜分离	143
第一节 蒸 发.....	143
第二节 膜分离.....	161
练习题.....	171
第七章 物料干燥	173
第一节 概 述.....	173
第二节 湿空气的性质及湿度图.....	174
第三节 干燥过程的物料衡算与能量衡算.....	181
第四节 干燥速率和干燥时间.....	184
第五节 干燥设备.....	188
练习题.....	191
附录	194
参考文献	217

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。

食品工业发展历史悠久,但长期以来是以其加工经验和传统方法为其生产方式的基础。即使时至今日,仍有许多食品的生产,与其说是科学,不如说是艺术。因此,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。

一、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、成熟度及储藏条件而变化,如蛋白质、酶之类成分是生物活性的量,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操高制品的保藏性。

二、化工原理计算的基础

虽然各个单元操作所遵循的基本原理不同,但它们同时又遵循着某些共同的规律,这些规律是本课程的计算和分析问题的基础,包括物料衡算、能量衡算、平衡关系及过程速率。

(一) 物料衡算

在对进出系统的水、气、汽等工质及原料和产品的平衡计算中,依据质量守恒定律,进入一过程的所有总质量(或质量)必须等于离开过程所有总质量(或质量)加上过程中物质的积累(或消耗)的总质量,即

$$\text{输入量} = \text{输出量} + \text{积累量(消耗量)} \quad (0-1)$$

称式(0-1)为物料衡算式。对多数的稳定操作的连续过程,则无过程的积累或消耗,单位时间内进入量就等于输出量,即

$$\sum M_{\text{入}} = \sum M_{\text{出}} \quad (0-2)$$

(二) 能量衡算

能量衡算主要指机械能衡算和热量衡算,机械能衡算是指操作中能量的相互转化而建

立的平衡关系;而热量衡算是食品工程中最常见的能量衡算的形式。根据能量守恒定律,对于连续稳定系统,进入系统的总能量,必等于系统输出的总能量。当不计热损失时,热量衡算式为进入设备的总热量等于输出设备的总热量,即

$$\sum Q_{\text{入}} = \sum Q_{\text{出}} \quad (0-3)$$

(三)平衡关系

传质过程中,在温度和压力一定的条件下,若物系存在两个或两个以上的相,物料在各相中相对的量,即物料中各组分在各相中的组成不随时间变化是,我们称该物系处于平衡状态。这种平衡是动态平衡,即平衡时物料仍在进出各相,只是各相的量及组分在各相中的组成恒定而已。例如,在一定温度下,不饱和的糖溶液与固体糖接触,糖向溶液中溶解,直至糖溶液饱和,此时,固体糖表面已与溶液成动平衡状态。若溶液中糖的浓度大于饱和浓度,则溶液中的糖就会析出,使固体糖长大,达到新的平衡状态。

传热过程中,当两种流体的温度不相等时,热量自高温流体传给低温液体,直至两种流体的温度相等,即达到平衡。

可见,任何过程在一定条件下都由不平衡到平衡,而平衡关系则可用来判断一个过程在一定条件下能否进行、进行的方向及过程进行的极限。

(四)过程速率

单位时间内,过程的变化量称为过程速率。它是用来表示过程进行的快慢的物理量。如单位时间内传递的热量,称为传热速率;单位时间内传递的物质的量,称为传质速率。过程的速率越大,设备的生产能力越大,或在完成同样产量的情况下,设备的尺寸就越小。

$$\text{过程的速率} = \frac{\text{过程的推动力}}{\text{过程的阻力}} \quad (0-4)$$

过程的推动力是指:某一瞬间过程的实际状态与平衡状态间的差距。如传质过程的推动力,通常用某一瞬间过程的实际组成与平衡组成之差来表示;传热过程的推动力为进行传热的两方的温度差。构成过程阻力的因素很多,其值因过程的性质不同而异。

三、课程性质、内容、学习方法

化工原理是食品工程专业的一门重要的技术基础课。它讲述的内容包括化工单元操作的基本原理、典型设备的结构原理、操作性能和设计计算。贯穿和联系本课程各章节间的基本理论是三传理论,即动量传递、热量传递和质量传递。本课程学习中除要了解掌握各单元操作的原理、设备和流程外,主要的学习方式是通过完成大量的工程计算来培养学生的分析问题和解决问题的能力。每章最后所精选的计算题,作为局部计算,可为将来的整体设计计算打下基础。

第一章 流体流动

基本技能和要求

1. 重点掌握流速、流量、牛顿流体、非牛顿流体、雷诺数、沿程阻力、局部阻力等基本概念。
2. 熟练地掌握流体流动中其物理性质的变化规律以及能量、质量平衡计算的方法。
3. 能设计一般的管路输送系统。

在食品工业生产中,流体(液体、气体)的流动是各种单元操作中普遍涉及的现象。工业生产过程中,常需按照工艺要求,将某种液体或气体依次输送到某些设备或使用地。一般情况下,这类输送需借助于管路系统和输送设备(如泵或风机等)才能完成。

本章主要是讨论流体流动过程的基本原理和流体在管内流动的规律,从而解决流体输送和管路及输件的设计选择问题。

第一节 流体的物理性质及流动状态参数

一、流体的物理性质与内摩擦力

对于某种特定流体,衡量其在某状况下具有的特征的状态参数,称做这种流体的物理性质。如水和空气的物理性质可参见本书附录。从表中可以看出,影响流体物理性质变化的主要因素,一是温度,二是压力。一般认为,气体的分子间密度很稀,在外力作用下,体积很容易被压缩,故称做可压缩流体;而液体内部分子间间距较小,外力作用下,体积改变很少,故称做不可压缩流体。所以查取流体的物理性质参数时,气体要注意受压力和温度的共同影响。而液体压力作用较弱,主要考虑温度影响。

(一) 密度

单位体积流体的质量以下图,称做流体的密度 ρ ,其表达式为:

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

式中: m ——流体的质量,kg;

V ——流体的体积, m^3 。

密度的法定计量单位为 kg/m^3 ,有关资料查阅到的流体密度数据常用 g/cm^3 表示。有时资料中会出现相对密度概念,它是指某种流体的密度与纯水在 $4^\circ C$ 时密度的比值。纯水在 $4^\circ C$ 时的密度值为 $1000kg/m^3$ (常压)。相对密度在数值上和物理学中的相对密度相同,同时它们都是量纲为 1 的纯数。

另外,有时会遇到比体积的概念,比体积即密度的倒数,其表达式为:

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

v 单位为 m^3/kg , 即单位质量流体所具有的体积。

在生产过程中,经常遇到各种混合物,在无直接实测数据时,混合物的密度可以用以下近似公式进行计算。

对于液体,混合物组成常用组分的质量分数表示。故液体混合物密度 ρ_m 的计算式为:

$$\rho_m = \sum_{i=1}^n \omega_i \rho_i \quad (1-3)$$

式中: ρ_i ——液体混合物中 i 组分的密度, kg/m^3 ;

ω_i ——液体混合物中 i 组分的质量分数。

对于气体,混合物组成常用体积分数(或摩尔分数)表示,故其密度 ρ_m 的计算式为:

$$\rho_m = \sum_{i=1}^n \rho_i \varphi_i \quad (1-4)$$

式中: φ_i ——气体混合物中 i 组分的体积分数。

(二) 体膨胀系数

流体的体积在外界温度和压力发生改变时,会发生一定变化。如前所述,一般温度影响较压力影响导致体积变化更常见(尤以气体为基)。故附表中列出的体膨胀系数 α_v 值均指温度变化引起体积的相对变化,即:

$$\alpha_v = \frac{\partial V}{\partial T} / V \quad (1-5)$$

式中: α_v ——体膨胀系数又称热或温度膨胀系数, $1/\text{K}$ 。

(三) 比热容和焓

1. 比热容

比热容指单位流体,在无化学反应和相变时,温度升高 1K 时所需要的热量。一般过程常在定压下进行,故用定压比热容 c_p 表示。由于衡量单位基准不同,工程上有:

质量比热容,单位: $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ (用得最多);

体积比热容,单位: $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$;

摩尔比热容,单位: $\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

在定压下进行的加热或冷却过程,流体吸收或放出的热量等于其比热容、质量和温升(或温降)的乘积,即:

$$\Delta Q_p = mc_p \Delta T \quad (1-6)$$

注意式(1-6)应用在无相变的场合。

2. 焓

焓又称热含量,其值反映流体在某状态下所包含的热量。由附表中查得的是单位流体具有的焓,又称做比焓,单位: kJ/kg 。利用焓差可直接计算流体热量的变化。

(四) 内摩擦力与黏度

日常生活中我们会直观地感到某种流体黏与不黏,这实际反映出流体流动性的好坏,又

称做流体的黏性。而黏度是对流体黏性的度量参数。

黏性的大小是流体流动时内部存在的内摩擦力起作用。内摩擦力是存在于流体内部层与层之间及质点与质点间的一种黏性阻力,它对流体流动起阻滞作用。如图 1-1 所示,设有两块平行平板,其间距甚小且充满流体。下板固定,上板施加一平行于平板的外力,使此平板以速度 v 做匀速运动。十分明显,紧贴在运动板上的一层流体应以同一速度流动。而紧贴在固定板上的一层流体则仍处于静止状态。两块平行板间各层流体的速度不同,可以将其看成由下板至上板速度不同的流体层组合而成,其速度分布如图 1-1 所示。

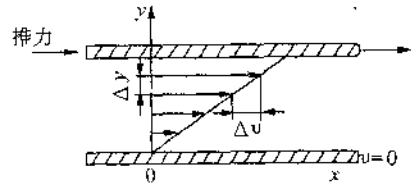


图 1-1 平板间液体速度变图

这样,各流体层之间存在速度差,亦即存在相对运动。流体层间,运动较快的拖动运动较慢的向前运动,运动较慢的则曳制运动较快的流动。这种运动着的流体内部相邻两流体层间的相互作用力就称做流体的内摩擦力或黏滞力。单位面积上的内摩擦力就是剪应力。

实验证明,对于大多数流体,剪应力 τ 服从下述牛顿摩擦定律:

$$\tau = \frac{F}{S} = \mu \cdot \frac{dv}{dy} \quad (1-7)$$

式中: τ ——剪应力, N/m^2 ;

$\frac{dv}{dy}$ ——法向速度梯度, L/s ;

μ ——比例系数,称为黏性系数或动力黏度, $N \cdot s/m^2$ 。

凡是剪应力与速度梯度的一次方成正比的流体,即服从牛顿摩擦定律的流体,称做牛顿流体。凡是反映的特性与牛顿摩擦定律不相符合的流体,统称为非牛顿流体。式(1-7)可以导出黏度 μ 的法定计量单位为 $N \cdot s/m^2$, 即 $Pa \cdot s$ 。一般查得黏度数据常为 CGS 制单位:泊(P), 即 $dyn \cdot s/cm^2$, 换算关系:

$$1 \text{ 厘泊(cP)} = 10^{-2} \text{ 泊(P)} = 10^{-3} \text{ 帕} \cdot \text{秒}(Pa \cdot s)$$

流体的黏度可由黏度计或流变仪测定可以从本书附录中另外,工程上有时以运动黏度表示流体黏性大小。运动黏度是动力黏度与密度之比,用符号 ν 表示,即:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-8)$$

运动黏度的法定计量单位为 m^2/s , CGS 制单位为 St, 简称斯。

$$1 \text{ St} = 10^{-4} m^2/s$$

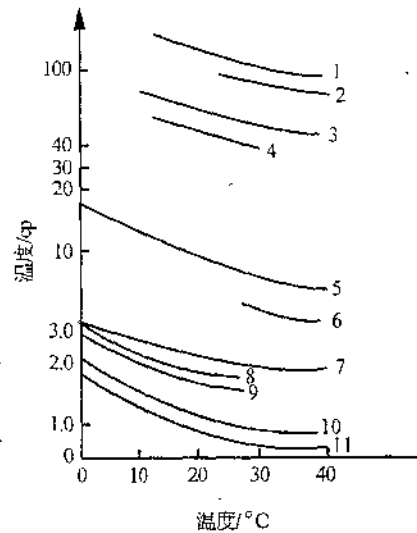


图 1-2 液体食品的黏度与温度的关系

- 1 - 栗子油; 2 - 猪油; 3 - 椰子油;
4 - 沙丁鱼油、鲱鱼油; 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% 盐水; 11 - 水 (1 cP = 10⁻³ Pa · s)

或有关手册中查取。图 1-2 给出几种液体食品的黏度与温度的关系。图 1-3 表示某些食品的黏度受组分含量和悬浮粒子大小影响的关系。

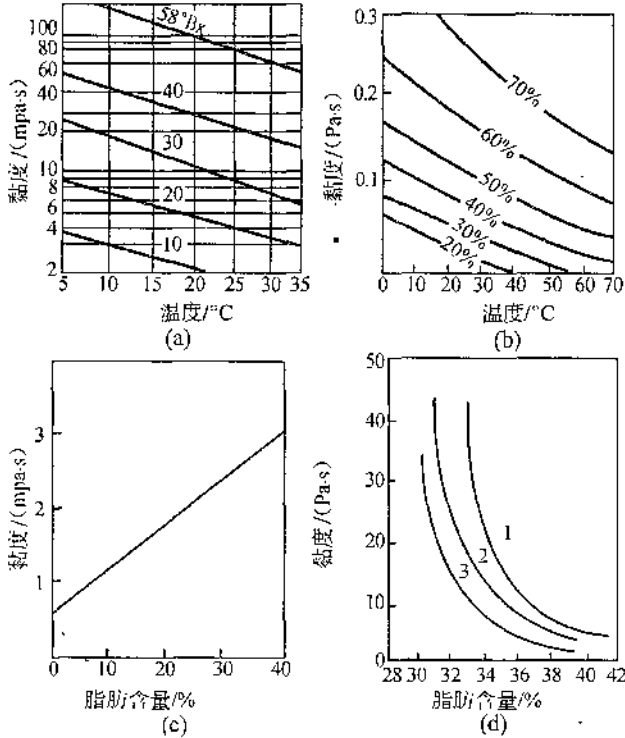


图 1-3 组分含量和悬浮粒子大小对食品黏度的影响
 (a) 椰子; (b) 蔗糖溶液; (c) 牛奶; (d) 巧克力
 1 - 细粒; 2 - 中粒; 3 - 粗粒

例 1-1 当速度梯度为 100 s^{-1} 时, 求牛奶在室温下的剪应力。假设 20°C 时牛奶的黏度 $\mu = 2 \text{ cP}$ 。

解:

$$\mu = 2 \text{ cP} = 2 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} = 2 \times 10^{-3} \times 100 = 0.2 (\text{Pa})$$

所以当速度梯度为 100 s^{-1} 时, 牛奶在室温下的剪应力为 0.2 Pa 。

二、压力和静压强

垂直作用于任意流体微元表面的力称做压力。对静止的流体, 其单位面积上所受的力称做静压强用 p 表示, 即:

$$p = \frac{F}{S} \quad (1-9)$$

式中: p ——流体的静压强, N/m^2 或 Pa ;

F ——垂直作用于流体表面的力, N ;

S ——作用面的表面积, m^2 。

压强的法定计量单位是 N/m^2 , 即 Pa , 叫做帕。由于过去用的压强单位很多, 如标准大气压 (atm)、工程大气压 (at)、毫米汞柱 (mmHg)、米水柱 (mH_2O)、巴 (bar) 等, 因此正确掌握它们之间的换算关系十分重要:

$$1 \text{ atm} = 1.033 \text{ kgf/cm}^2 = 760 \text{ mmHg} = 10.33 \text{ mH}_2\text{O} = 1.013 \text{ bar} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ at} = 1 \text{ kgf/cm}^2 = 735.6 \text{ mmHg} = 10 \text{ mH}_2\text{O} = 0.987 \text{ bar} = 9.807 \times 10^4 \text{ Pa}$$

更详细的换算请参见附录。

按度量压强的基准 (即零点) 的不同, 压强有 3 种不同的名称, 即绝对压强、表压强和真空度。

绝对压强是以绝对真空为基准, 在工程计算中常用此压强。

表压强是以大气压为基准, 即绝对压强高于大气压的数值, 一般压强表所测得压强值都是表压强。表压强 p_g 、绝对压强 p_{ab} 和大气压 p_a 三者有下列关系:

$$p_g = p_{ab} - p_a \quad (1-10)$$

当被测流体体系的压强小于外界大气压时, 使用真空度进行测量。真空表的读数称做真空度, 设真空度为 p_{vm} , 则有:

$$p_{vm} = p_a - p_{ab} \quad (1-11)$$

即真空度表示被测流体的绝对压强低于当地大气压的数值。不难看出真空度实际上是流体表压强的负值。例如体系的真空度为 $5.0 \times 10^3 \text{ Pa}$, 则其表压强为 $-5.0 \times 10^3 \text{ Pa}$ 。

为了避免差错, 在用表压或真空度表示流体的压强时, 必须在压强单位后面加括号注明, 如 $p = 2.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ (表压), $p = 66.7 \text{ kPa}$ (真空度) 等。如果不注明, 即为绝对压强 (见图 1-4)。

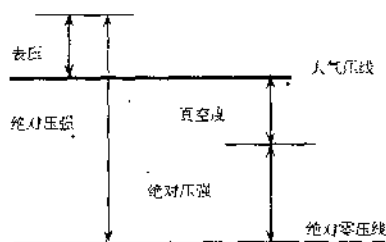


图 1-4 绝对压强、表压与真空度的关系

例 1-2 压缩机进口处真空表的读数是 66.7 kPa (真空度), 出口处压强表的读数是 196 kPa , 求气体在压缩机进、出口处的压强差。设当地大气压为 $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

解: 气体在压缩机进口处的绝对压强:

$$p_1 = 1.013 \times 10^5 - 6.67 \times 10^4 = 3.46 \times 10^4 \text{ Pa}$$

气体在压缩机出口处的绝对压强:

$$p_2 = 1.013 \times 10^5 + 1.96 \times 10^5 = 2.973 \times 10^5 \text{ Pa}$$

故气体在压缩机进、出口处的压强差:

$$p_2 - p_1 = 2.973 \times 10^5 - 3.46 \times 10^4 = 2.63 \times 10^5 \text{ Pa}$$

又解:

$$p_2 - p_1 = (1.013 \times 10^5 + 1.96 \times 10^5) - (1.013 \times 10^5 - 6.67 \times 10^4)$$

$$=1.96 \times 10^5 + 6.67 \times 10^4 = 2.63 \times 10^5 \text{ Pa}$$

由上例可看出,当已知一处的表压和另一处的真空度时,两处的压强差就等于其表压和真空度之和,不必先通过当地大气压换算成绝对压强。但计算时需注意单位必须统一。

第二节 流体力学的基本方程

一、流体静力学基本方程

描述静止流体内部压力变化规律的数学表达式,称做流体静力学基本方程。如图 1-5 所示,容器内盛有密度为 ρ 的静止液体,从中任意取一段上、下底面积为 S 的垂直液柱,任意选定一水平基准面,如容器的底部做水平基准平面。液柱上、下两面与基准面的垂直距离分别为 Z_1 和 Z_2 ,作用在上、下底面的压强分别为 p_1 和 p_2 。现分析液柱的受力情况:

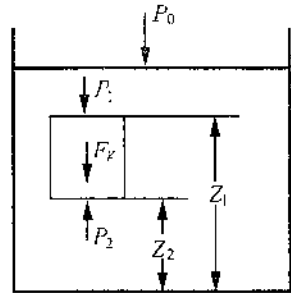


图 1-5 静力学基本方程式的推倒

作用于液柱上面的压力 $= p_1 S$; 液柱自身的重力 $F_g = \rho g S (Z_1 - Z_2)$; 作用于液柱底面的压力 $= p_2 S$; 液柱处于平衡状态,上述三力之合力应等于零,即:

$$p_1 S + \rho g S (Z_1 - Z_2) - p_2 S = 0$$

以 ρS 除上式各项,并移项得:

$$g Z_1 - \frac{p_1}{\rho} = g Z_2 + \frac{p_2}{\rho} \quad (1-12a)$$

此方程式称为流体静力学基本方程式,也可写成以下形式:

$$p_2 = p_1 + \rho g (Z_1 - Z_2) \quad (1-12b)$$

如果将液柱的上底面放在液面上,设液面上方的压强为 p_0 ,液柱高 $Z_1 - Z_2 = h$,则式(1-12c)改写为:

$$p_2 = p_0 + \rho g h \quad (1-12c)$$

由上式可看出:

- (1) 在静止液体内任一点压强的大小,与液体的密度及该点的深度有关。
- (2) 在静止液体内同一水平面上的各点,则因其深度相同,其压强亦相等。此压力相等的水平面,称做等压面。

(3) 当液体上方的压强发生变化时,必将引起液体内部各点发生同样大小的变化。

流体静力学方程在生产上有广泛的用途:

(1) 压力或压力差的测量:以静力学原理为依据的测量压力的仪器称为液柱压差计或液柱压力计。这类压差计可测量流体某点的压力,也可测量两点之间的压力差,常见的液柱压差计有,U形管压差计、双液柱 U 形管压差计(做差压差计)、倒 U 形压差计、倾斜液柱压差计(斜管压差计)等。

(2) 测量容器中的液位:要了解容器中的贮存量,或需要控制设各里液体的液面,就要对液位进行测定。很多液位测定方法,都是以静力学基本原理为依据的。

(3)确定液封高度:生产中常遇到设备的液封问题。液封的目的主要是防止系统中的气体外溢或需要维持系统的安全。

例 1-3 罐头厂为使高压杀菌连续化,采用如图 1-5 所示的静水压密封连续杀菌装置。杀菌室内通入高压蒸汽。若蒸汽的压强为 $2 \times 10^5 \text{ Pa}$ (绝对),试求水封室的高度。

解:如图 1-6,设杀菌室内液面为其基准面的高度为 Z_1 ,液面的静压强(即杀菌室内压强)为 p_1 ;水封室的液面为 2,基准面高度为 Z_2 ;液面的压强(即大气压强)为 p_2 。由于从液面 1 至液面 2 为同一流体所连通,引用流体静力学基本方程即有:

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

故水封室的最小高度应为:

$$H = Z_2 - Z_1 = \frac{p_1 - p_2}{\rho g}$$

已知:水的密度 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$,液面 1 的压强 $p_1 = 2 \times 10^5 \text{ Pa}$,液面 2 的压强 $p_2 = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$,代入上式即得:

$$H = \frac{2 \times 10^5 - 1.013 \times 10^5}{1000 \times 9.81} \approx 10 \text{ m}$$

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

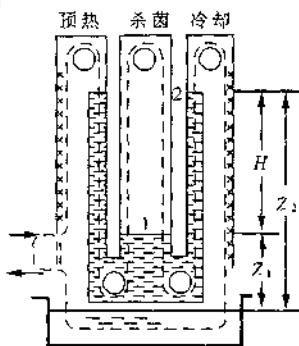


图 1-6 例 1-3 附图

二、流体动力学基本方程

(一)稳定流动的连续性方程

1. 稳定流动和不稳定流动

稳定流动指在一个流动系统中任一位置上的流体的状态参数,如流速、压力、密度等只是位置的函数,而不随时间变化。

不稳定流动是指上述物理量不仅随位置变化,而且随时间变化的流动。

在工业生产中,多数过程常采用连续稳定操作,即流体流动属稳定流动。只有间歇操作过程或过程的开工阶段和停工阶段为不稳定过程。故本章讨论的重点为稳定流动。

2. 流量和流速

单位时间内流过管路任一截面的流体体积,称做体积流量,单位 m^3/s 。若某一流体在时间 t 内流过任一截面 S 的体积为 V ,则有:

$$q_v = \frac{V}{t} \quad (1-13)$$

单位时间内流过管路任一截面的质量,称做质量流量,以 q_m 表示,单位 kg/s 。若流体的密度为 ρ ,则:

$$q_m = q_v \cdot \rho \quad (1-14)$$

单位时间内流体在流动方向上流过的距离称为流速,以 v 表示,其单位为 m/s 。实验证明,流体在管道内流动时管道任一截面上各点的流速各不相等,在管壁处为零,越接近管中心速度越大,在管中心达到最大值。为了工程上计算方便,一般选用平均流速,即管截面上

速度的平均值,平均速度 v 的定义如下:

$$v = \frac{q_v}{S} \quad (1-15)$$

由式(1-14)和式(1-15),可以得出:

$$q_m = q_v \rho = v S \rho \quad (1-16)$$

工业生产中,经常使用圆形管道,若以 d 表示管道内径,则式(1-15)化为:

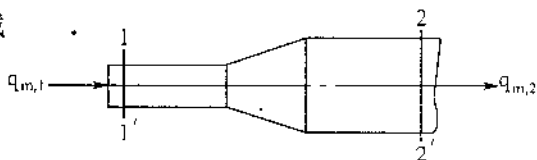
$$v = \frac{q_v}{\frac{\pi d^2}{4}} \quad (1-17)$$

3. 连续性方程

流体稳定流动的连续性方程,实质上是流体流动体系的物料衡算关系式,即流入体系的质量流量和流出体系的质量流量应相等。

在如图 1-7 的稳定流动的管路系统中,流体从截面 1-1' 流入的质量流量 $q_{m,1}$ 应等于截面 2-2' 流出的质量流量 $q_{m,2}$,即:

$$q_{m,1} = q_{m,2} \text{ 或 } v_1 S_1 \rho_1 = v_2 S_2 \rho_2 \quad (1-18)$$



可以把此关系式推广到管路系统的任意截面,则有:

图 1-7 连续性方程式的推倒

$$q_m = v_1 S_1 \rho_1 = v_2 S_2 \rho_2 = \dots = v S \rho = \text{常数} \quad (1-19)$$

式(1-19)即为稳定流动的连续性方程。

对于圆形管道,不可压缩流体,则 ρ 为常数,其连续性方程可以写成:

$$v_1 = \frac{\pi}{4} d_1^2 = v_2 \frac{\pi}{4} d_2^2$$

即

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 \quad (1-20)$$

这一关系式十分有用,它说明在体积流量一定时,管内流体的流速与管道直径平方成反比。

例 1-4 全脂牛奶连续地从 $\phi 57\text{mm} \times 3.5\text{mm}$ 的管子流入 $\phi 25\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ 的管子,在粗管中的流速为 0.8m/s ,求全脂牛奶在细管中的流速及牛奶的质量流量。(全脂牛奶的密度为 1035kg/m^3)

解:由连续性方程式(1-20),牛奶在细管中的流速为:

$$v_2 = v_1 \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 = 0.8 \times \left(\frac{57 - 2 \times 3.5}{25 - 2 \times 2.5} \right)^2 = 2\text{m/s}$$

依式(1-19)得全脂牛奶的质量流量为:

$$q_m = v S \rho = \frac{\pi}{4} \rho v d^2 = 0.785 \times 1035 \times 2 \times \left(\frac{25 - 2 \times 2.5}{100} \right)^2 = 0.65 \text{ kg/s} = 2340 \text{ kg/h}$$