

第一章 绪论

一、概述

近 10 年来，随着我国经济状况的明显好转，特别是食品工业的迅速发展，使食品的种类和数量有了较大的增长，现代食品工业与工程学之间的关系也愈来愈密切了。人们更重视食品加工、贮藏与食品品质之间的关系问题。

食品工程原理是由化学工程学中分离出来的。作为一门学科来说主要是 20 世纪的产物。食品加工的出现远较化学加工为早，但食品工业仍然处于“传统加工”阶段。长期以来食品工业是以前加工经验和传统方法为其生产方式的基础。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。这一事实有力地说明，虽然食品工业的出现较化学工业为早，但食品科学的出现则较化学工业为晚。就科学意义上说，化学工业的发展是遥遥领先的。只是从较晚的时期起，科学才开始进入食品加工领域，产生了年轻的食物科学。

食品加工科学化的一个重要表现就是化工单元操作的引入和运用。这使食品工业迅速向着大规模、连续化、自动化的生产发展。例如，以豆类为原料制造蛋白质制品和饲料的现代化工程就是具体运用这些化工单元操作的典型成果。前者是由粉碎、离心分离、沉降、浓缩、喷雾干燥、真空包装，后者是由粉碎、配料、混合、造粒等单元操作科学而巧妙地组合而成的食品工程。

食品工业的发展较化学工业发展迟缓的主要原因在于，原料和产品在性质上存有极其显著的差别。

食品加工的原料是农、畜、水产品。这些原料的结构和成分非常复杂。原料的成分随品种、成熟度及贮藏条件而变化。某些成分如蛋白质、酶类都是生物学活性物质，在加工条件下会引起变性、钝化或破坏。某些成分如色素、脂肪和维生素等，在有氧条件下，会发生变色或氧化分解，产生有害物质。而某些芳香物质（如挥发性脂肪酸）则又会因加工条件不当而损失。总之，作为人类食用的食品，不得不考虑在加工时色、香、味、形以及营养成分的变化问题。这就是长期以来食品加工固守传统方法的原因所在。同时也说明，食品加工原料和加工条件要有特殊性。

热敏性和氧化变质是动植物原料显而易见的共同特点。为避免食品加工的高温破坏和氧化变质，加工条件就不得不采用低温、低压，特别是低压。因此单元操作的理论研究和运用就更多地集中于诸如真空输送、真空过滤、真空脱气、真空冷却、真空蒸发、真空结晶、真空造粒、真空干燥、真空蒸馏、真空成型、真空包装、冷冻浓缩、冷冻干燥等方面。

易腐性是食品加工原料和制品共有的又一特点。食品原料和制品含有人类所需的多种营养物质，因而也是微生物活动的良好场所。食物正是由于这些微生物及其本身含有的酶的作用发生腐败变质的。食品加工主要的目的，就在于怎样抑制这些微生物和酶的活力以便提高

制品的安全性和延长保藏期。因而，浓缩食品、干制食品、冷冻和速冻食品已成为目前食品工业上的重要产品。而作为这些食品加工基础的浓缩、冷冻和干燥等单元操作，就势必在食品加工工程中占有特殊重要的地位。而且，由于上述食品加工对低温和真空的要求，一般的传统加工方法已不能满足要求。这样近年来又逐渐开发出新型的冷冻浓缩、半透膜浓缩、辐射干燥、冷冻干燥、低温冷冻、速冻等食品加工操作。由此可见，化工单元操作一经与食品加工相结合、就会使食品工业迅速发展。

食品加工的原料，其相态几乎全部为固态或液态。要使这些原料成为美味可口、营养丰富的食品，首先必须提取其精华、去弃其糟粕，分离出不同成分并组合制成不同种类的制品。这就使有关提取、分离、净制，以及混合、乳化、粉碎等单元操作占有相当重要的地位。近年来又开发出半透膜分离技术、电渗析技术、反渗透、超微滤、酶萃取等先进技术，应用于食品加工之中。

另外，食品加工过程中的液体原料、液体半成品和液体成品多半是非牛顿液体，具有流变学特性，因而，在其输送、加热和冷却以及搅拌混合方面都具有其独特的特点，有别于化学工业。

由此可见，食品工程学与化工原理彼此相联系又各有其特殊性。食品工程是食品科学的一个重要分支，是食品工艺学的基础。

二、食品工程常用的单位及换算

食品工程中所使用的单位，通常采用国际单位制（SI制），它是国际度量衡会议于60年代初期提出的一种新的单位制度。这种单位制目前在国际上已普遍使用于整个科学和工程的领域。SI制总共采用七个基本量和基本单位。它们分别是，力学中采用的长度单位“米”（m），质量单位“千克”（kg），时间单位“秒”（s）；光学中采用的表示发光强度的单位“坎德拉”，简称坎、代号为Cd；电学中采用电流的单位“安培”，简称安，代号为A；在化学和分子物理学中采用表示物质的量的单位“摩尔”，简称摩，代号mol/L；在热力学中采用热力学温度“开尔文”，简称开，代号为K。

在本学科范围内，主要涉及力学、热学、化学和分子物理学领域，故常用的单位是m、kg、S、K和mol。

在SI制中，规定了如表1中所列具有专门名称的导出单位和表2中所列用专门名称导出单位导出的SI单位。

表 1-1 具有专门名称的 SI 制导出单位

物理量	中文名称	国际代号	用其他导出单位表示	用基本单位表示
频率	赫兹	Hz		s^{-1}
力	牛顿	N		$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
压力、应力	帕斯卡	Pa	N/m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
能、功、热	焦耳	J	$N \cdot m$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
功率	瓦特	W	J/S	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$

表 1-2

用专门名称导出单位的 SI 制导出单位

物理量	代 号		用基本单位表示
	中文	国际	
(动力) 粘度	帕·秒	Pa·s	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
表面张力	牛/米	N/m	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
热流密度、辐射照度	瓦/米 ²	W/m ²	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
比热、比焓	焦/千克·开	J/kg·K	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
导热系数	瓦/米·开	W/m·K	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
传热系数	瓦/米 ² ·开	W/m ² ·K	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$

此外, SI 制还规定了一套词冠来表示单位的倍数或分数。常用的有: M 表示兆 (10^6), k 表示千 (10^3), h 表示百 (10^2), da 表示拾 (10^1), d 表示分 (10^{-1}), c 表示厘 (10^{-2}), m 表示毫 (10^{-3}), μ 表示微 (10^{-6})。在使用词冠时, 代号应用正体, 词冠代号和单位代号之间不留间隙, 如 Mm(兆米), mm(毫米)等。而且, 不允许使用两个以上词冠并列而成的组合词冠。

SI 制还规定了平面角和立体角两个辅助单位。平面角的单位称弧度, 代号为 rad; 立体角的单位称球面度, 代号为 Sr。

另外, 还规定了如下的单位与 SI 制的单位并用: 如时间采用日 (d)、小时 (h)、分 (min); 质量采用吨 (t); 容积采用升 (L); 平面角采用度 (°)、分 (′)、秒 (″)。

除了国际单位制, 工程上目前还大量应用以重力为基础的工程单位制 (M、kg、s 制) 即米、千克 (力)、秒制; 有时也用物理单位制 (Cgs 制) 即厘米、克、秒制。

在工程单位中, 力的单位“千克”的规定相当于在真空中以 MkgS 制量度的 1kg 质量的物体, 在重力加速度为 9.80665m/s^2 处所受的重力。根据牛顿第二定律 $F = ma$, 各种力的单位之间有如下的关系:

$$\begin{aligned} 1\text{kg} &= 1\text{kg} \times 9.81\text{m/s}^2 = 9.81\text{kg} \cdot \text{m/s}^2 = 9.81\text{N} \\ &= 9.81 \times 10^5\text{g} \cdot \text{cm/s}^2 = 9.81 \times 10^5\text{dyn} \end{aligned}$$

物理量的大小由一种单位换算成另一种单位, 其数值也随之改变, 要将原单位表示的数值乘以换算因数才得到新单位的数值。所谓换算因数就是原单位和新单位大小的比值。如 1m^3 等 10^6cm^3 , 把 m^3 换算成 cm^3 的换算因数就是 10^6 。

单位换算在食品工程计算上十分重要, 虽然我国已公布使用 SI 制单位, 但由于历史上的原因, 许多物理量数据的单位到目前仍然未采用 SI 制。因此, 在计算之前, 如遇到其它的单位制的单位时, 应把它们换算成 SI 制单位, 然后再进行计算。

例 1-1 $1\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 等于多少 Pa? 1atm 等于多少 Pa?

$$\begin{aligned} \text{解: } 1\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2} &= \frac{9.81\text{N}}{\left(\frac{1}{100}\right)^2\text{m}^2} = 9.81 \times 10^4\text{N} \cdot \text{m}^{-2} \\ &= 9.81 \times 10^4\text{Pa} \end{aligned}$$

$$1\text{atm} = 1.033\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2} = \frac{9.81 \times 1.033\text{N}}{\left(\frac{1}{100}\right)^2\text{m}^2}$$

$$= 1.013 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

例 1-2 1kcal·h⁻¹等于多少 W? 1kw 等于多少 kcal·h⁻¹?

$$\text{解: } 1\text{kcal} \cdot \text{h}^{-1} = \frac{4.187 \times 10^3 \text{ J}}{3600\text{s}} = 1.163 \text{ J} \cdot \text{s}^{-1} = 1.163 \text{ W}$$

$$1\text{kw} = 1\text{kJ} \cdot \text{S}^{-1} = \frac{1/4.187}{1/3600} = 860\text{kcal} \cdot \text{h}^{-1}$$

三、 四个基本概念

在分析食品工程单元操作或工艺过程时，我们经常要用到物料衡算、热量衡算、平衡关系和过程速率这四个基本概念，它们是分析任何一个食品工程的出发点和着眼点。因此，在这里简单加以叙述，为以后学习做准备。

(一) 物料衡算物料衡算的理论依据是质量守恒定律。它说明在一个食品生产过程中，进入的物料量必等于排出的物料量和过程中的积累量（或减少量）。用数学式子表示为：

$$\text{进入的物料量} (\Sigma G_{\text{入}}) = \text{输出的物料量} (\Sigma G_{\text{出}}) + \text{系统内的积累量或减少量} (G)$$

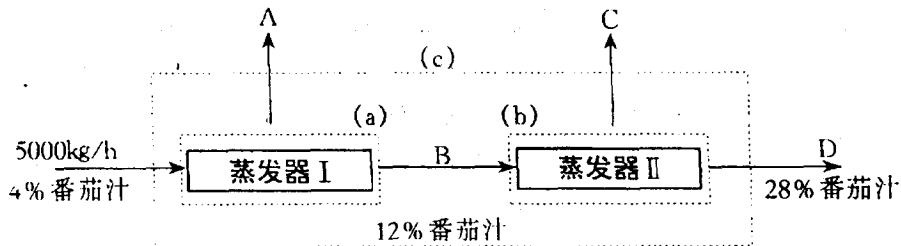
进行物料衡算时，必须注意以下几点。首先是要规定出衡算的系统，即计算对象所包括的范围。一般以一个生产过程或一个工艺、一个设备为系统，也有以设备的一部分作为一个系统的。规定出的系统应绘出流程方框图（或）简图，并用箭头标出各物料的进出方向、数量以及温度、压力和组成等条件。

其次，要规定一个衡算的基准。一般来说是取过程中不起变化的一个量作为计算基准。在连续操作中，则以单位时间为基准较为方便，也可用已知组成的进料开始计算。如果进料组成只知它的主要成分，而主产物的产量是确定的，就用产物的单位质量作基准，反算得到进料量。

最后，计算时物料的量可以用重量或摩尔数表示，但一般不宜用体积表示。同时应采用统一的单位制。

例 1-3 番茄汁在两个连续操作的串联蒸发器中从固形物含量 4% 浓缩至成品浓度 28%，在第一蒸发器内液缩到 12% 后输送到第二个蒸发器，以上均为质量百分数。原料液处理量为每小时 5 吨，试分别求出两个蒸发器每小时蒸发的水量及从第二个蒸发器送出的成品量。

解：绘出设备简图如下所示。



先求第一个蒸发器的蒸发量。第一步划定衡算的系统范围，用一圈封闭的虚线 (a) 表示。衡算范围一经划定，便可设想圈内部分与其四邻分开，以虚线为界。又以箭头表示物流

方向，凡是穿越边界指向内的，都属于输入项，凡是穿越边界指向外的都属于输出项。

对于第一个蒸发器，有两个未知数待确定，即蒸发出的水量 A 与送出的 12% 溶液量 B 。现在考虑 1 小时内所涉及的物料量，可以写出：

基准——1 小时（进料 5000kg）

总物料衡算： $5000 = A + B$

番茄衡算： $5000 (0.04) = A (0) + B (0.12)$

解出： $A = 1666.7\text{kg/h}$ ； $B = 3333.3\text{kg/h}$ 。

既然进入第二个蒸发器的 12% 番茄汁量 B 已经算出，用与前面一样的方法在虚线 (b) 所圈定的范围内列出物料衡算式，便可解出第二个蒸发器的蒸发量 C 与送出的 28% 番茄汁量 D 。

总物料衡算： $3333.3 = C + D$

番茄衡算： $3333.3 (0.12) = C (0) + D (0.28)$

解出： $C = 2619\text{kg/h}$ ； $D = 714.3\text{kg/h}$ 。

若按整套设备进行衡算，即取虚线 (C) 所圈定的范围作衡算范围，也可求得相同，基准同前。

总物料衡算： $5000 = 1666.7 + C + D$

番茄衡算： $5000 (0.04) = D (0.28)$

结果同上。

例 1-4 某厂用煤含水 2.3%、挥发物 24.8%、固定物 60.3%、灰分 11.6%，燃烧后渣用水浸润，渣中含水 34.5%、挥发物 4.7%、固定物 18.2%，余渣为灰分，若灰分全进入渣中，求出煤中燃烧物有多少损失？

解：取 100kg 为基准，并设炉渣重 $X\text{kg}$ ，

灰分： $100 \times 11.6\% = 11.6\text{kg}$

炉渣中灰分所占比例： $1 - (34.5\% + 4.7\% + 18.2\%) = 42.6\%$ 。

灰分衡算： $11.6\% \times 100 = 42.6\% \times X$

炉渣重为： $X = \frac{11.6 \times 100}{42.6} = 27.2\text{kg}$

原可燃物量： $100 \times (24.8 + 60.3)\% = 85.1\text{kg}$

损失的燃烧物： $27.2 \times (4.7 + 18.2)\% = 6.24\text{kg}$

损失率： $\frac{6.24}{85.1} \times 100\% = 7.32\%$

以上所举的两例，只是最简单的物料衡算，它表明了在进行物料衡算时首先应当注意：基准的选择；联系的物质的选择；单位的选择。

(二) 热量衡算 热量衡算的理论基础是能量守恒定律。稳定过程中，根据此定律可以列出热量衡算的数学表达式：

输入系统的热量 ($\sum Q_{\lambda}$) = 输出系统的热量 ($\sum Q_{\text{出}}$) + 系统内积累或减少的热量 (Q)。

其中 $\sum Q_{\lambda}$ 包括：从外界加入的热量、反应物带入的热量和放热反应所放出的热量；($\sum Q_{\text{出}}$) 包括：反应产物带走的热量（包括汽化热等）、吸热反应吸收的热量、辐射的热损失等。

在热量衡算中基准温度的选定是最重要的，这个基准温度应当与参考资料上所常用的基

准温度相一致。

例 1-5 设在一管壳加热器中，用压力为 136kN/m^2 的饱和蒸气加热空气。蒸气流量是 0.01kg/s ，空气流量是 1kg/s ，入口温度 297K ，冷凝液在饱和温度 (361K) 下排出。若在这温度范围内，空气的平均比热是 $1.005\text{kJ/kg}\cdot\text{k}$ ，试求空气的出口温度 (忽略热损失)。

解：取 1 秒为计算基准。

由蒸气表查出： 136kN/m^2 的饱和蒸气的焓是 368kJ/kg 。

设空气的出口温度为 T ，可列出热量衡算，取基准温度为 297K ，于是进口空气的焓为零。

出口空气的焓 = $1.005(T - 297)\text{kJ/kg}$

空气获得的热 = $1 \times 1.005(T - 297)\text{kJ/s}$

$$= (1.005T - 298.5)\text{kw}$$

热量衡算 蒸气放出的热 = 空气获得的热 + 热损失。即 $23.2 = 1.005T - 298.5$

解出： $T = 320\text{K}$

(三) 平衡关系 自然现象总是向使它的体系所具有的力学或者化学的能量趋向最稳定状态的方向变化的，变化的极限就是过程的平衡状态。例如盐类的溶解度极限是当时条件下，盐类在溶液中的饱和溶解度；可逆反应的极限是当时条件下的平衡转化率等。除非影响物系变化或反应条件的情况发生变化，否则平衡关系是不会改变的。

对于许多食品加工过程，物系的平衡关系具有实际意义，因为过程能否进行，以及能进行到何种程度，均可由平衡关系推知。例如：在干燥某物质时，在一定湿度的空气条件下，物料所含的平衡水分就为定值，这对物料的干燥、贮存具有实际意义。

(四) 过程速率 过程的速率决定设备的生产能力。显然，过程的速率越高，设备生产能力越大，这样就提高了设备的生产强度而使设备紧凑。

物系变化的快慢不取决于平衡关系，而为多种因素所影响。很难将过程的速率用一个普遍应用的数学公式来代表。因此，为了帮助分析生产过程，可将物系变化的过程速率近似地用推动力除以阻力表示。即：

$$\text{过程速度} = (\text{推动力}) / (\text{阻力})$$

例如冷物体和热物体接触时，由于物体的温度不同，热由热物体传向冷物体，此传热过程的速率的快慢就取决于温度差和热阻力的大小而定。直到这两个物体温度相等时，以温差为零，传热表面上停止，这时就达到热平衡。

过程的推动力是影响过程的某条件在瞬间距平衡时的差额，它可以是压强差，或浓度差等。实际生产中可以用增大过程的推动力来提高过程的速率。例如，液体在管道中流动过程中加大压强差，热交换时提高温度差，传质时提高浓度差等。过程的速率也可以通过减少阻力的方法来提高。例如流体输送时加大管径，对流传热时附加搅拌，传质时提高流体湍动程度，反应时用催化剂降低活化能等。

采用各种措施来提高过程速率时，要考虑到所选用的措施不应降低物料和能量的利用率，或引起副反应或副作用的发生，也不宜增添过多设备而使投资过分提高。总之，由于加工过程多样和复杂，要针对具体过程的特点采用合适的手段和措施，提高过程速率。

第二章 流体流动和输送

在食品生产中，许多原料、半成品、成品或辅助材料是以流体的状态存在。水和水蒸气就是常见的典型流体。食品加工所遇到的液体有稀薄的，也有稠厚的。稀薄的有如牛奶、果汁、盐水等，稠厚的有如糖浆、蜂蜜、脂肪、果酱等。就气体而言，除经常需用的空气和水蒸气外，氮气、二氧化碳、乙烯等气体也用于加工过程。

食品工业上处理的物料，除单纯的液体外，多半是具有多种成分的复杂混合物，其流动现象与一般液体有区别，称非牛顿流体，其流动规律属流变学范畴，亦为食品工程上急待研究的重要问题。

为了完成食品加工生产过程，特别是连续生产的过程，必须保证将流体原材料送入加工系统，将流体半成品从一工序输送到另一工序，同时还要将流体成品从系统引出。因此流体的流动和输送是食品生产上的一项重要单元操作。

所有上述问题均与研究流体宏观运动和平衡规律的工程流体力学有关。所以必须从学习流体力学基础入手，才能较深刻地掌握流体平衡和运动的基本规律，以解决食品生产实践中的实际问题。

流体输送的手段不外乎管路、泵和风机。管路是工序间流体流动的纽带，犹如人体血管，故管内流动的理论 and 实践是一重要环节。故应着重研究管内流动问题。

第一节 工程流体力学基础

一、流体的物理性质与作用力

液体和气体都具有流动性，通常总称为流体。液体分子间距较气体小，在压力作用下体积改变很小，一般可忽略不计，工程上称不可压缩流体。气体分子间距较大，在压力作用下体积改变较大，一般不能忽略，称为可压缩流体。

从微观角度看，流体是由无数分子组成，分子间有空隙，而且分子在不断地运动。但流体力学并不研究微观的分子运动，而是从宏观角度研究流体的机械运动。从宏观角度看，可把流体看成由质点组成的连续介质，质点之间没有空隙。流体质点不同于流体分子，而是由大量分子集合而成。这些假设在工程上是相对可行的。

在通常的情况下，流体在流动过程中，不仅其内部的各种能量要发生互相转换，而且还要与外界发生功的交换和热的交换。这些转换和交换都要与流体的物理性质发生密切关系。

(一) 流体的主要物理性质 与流体流动直接有关的主要物理性质有密度、粘度、压缩性、温度膨胀性和比热等。在这里简单介绍如下：

1. 密度和比体积 任何流体都有质量，并占有一定的体积。对于均匀的流体，单位体

积所具有的质量称为密度。对于一般非均匀流体，密度 ρ 为空间点函数，并可表示为

$$\rho = \frac{dm}{dv} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (2-1)$$

式中， m 为质量， kg ； V 为流体体积， m^3 。

流体密度的例数称为流体的比体积，或者说比体积是单位质量流体所具有的体积。显然，比体积可用下式来定义：

$$V = \frac{dv}{dm} \quad (\text{m}^3/\text{kg}) \quad (2-2)$$

一般来说，流体的密度和比体积是随压力和温度的变化而变化。例如，水在温度不变的情况下，每增加一个大气压，体积就减少 0.005% 左右。对于空气，压力不变时，温度升高 100℃，体积就增加约 27%。所以，密度和比体积要发生相应的变化。例如：纯水在 4 时的密度为 1000kg/m^3 ；空气在标准状态（即 0 ， 760mmHg）下的密度为 1.293kg/m^3 。

相对密度为流体的密度与纯水在 4 时密度之比值。相对密度和物理学上的比重在数值上是相同的，同时它们都是无因次的纯数。

几种流动食品的密度、比体积和相对密度列于表 2-1。

表 2-1 某些流动食品的密度和比体积 (15℃)

品名	密度 (kg/m^3)	比体积 (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	$1.07 \times 10^{-3} \sim 1.1 \times 10^{-3}$	0.91×0.93
猪油	910~920	$1.09 \times 10^{-3} \sim 1.1 \times 10^{-3}$	0.91×0.92
椰子油	910~940	$1.06 \times 10^{-3} \sim 1.1 \times 10^{-3}$	0.91×0.94

2. 压缩性和温度膨胀性：在这两种物理性质上，液体和气体有很大的不同，这也是区别液体和气体的主要依据。

一般地说，流体的体积随压力和温度而变化。在一定的温度下，压力变化引起体积相对变化的性质叫压缩性；在一定的压力下，温度变化引起体积相对变化的性质叫做温度膨胀性。通常，压缩性是以体积压缩系数 β_P 表示，温度膨胀性是以温度膨胀系数 β_T 表示。 β_P 和 β_T 的定义如下：

$$\beta_P = -\frac{\partial V}{\partial P} / V (\text{m}^2/\text{N}), \beta_T = -\frac{\partial V}{\partial T} / V (\text{V/K}) \quad (2-3)$$

流体的体积压缩系数一般都很小，如水的体积压缩系数约为 $4.85 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{N}$ ，因此一般工程中都将其忽略不计。液体的温度膨胀系数也很小；一般可以忽略不计，但在某些场合下例如包装杀菌设计中，还要考虑这种温度膨胀系数的影响。

因液体的体积压缩系数和温度膨胀系数都很小，故认为是不可压缩的，称为不可压缩流

体。否则，则称为可压缩流体。

3. 粘性 当流体受力且其质点间作相对运动时产生阻力的性质，称为粘性。以流体平行流过固体平板壁面为例，紧贴板壁的流体质点因其与板壁的附着力大于分子的内聚力，故其速度为零，并在贴近板壁处形成一静止液层。由于流体内部粘性的存在，以静止液层对相邻外层流体的流动，有着约束的作用，这外层流体对更外一层流体的流动也有着约束的作用。如此一层一层继续下去，就在流体内部形成速度梯度，层与层间就存在粘性阻力，如图 2-1 所示。

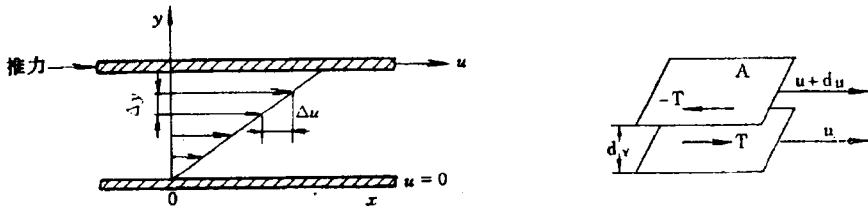


图 2-1 流体流过固体壁的速度分布及粘性力

从微观角度解释产生粘性的原因是十分清楚的。由于流体有分子运动，两层流体在相对运动过程中就有分子的相互掺混。慢层中分子进入快层中后，其向前的动量要发生变化，反之快层中分子进入慢层中，其向前的动量也要发生变化。这种分子动量变化的效果就表现为阻止两流体层作相对滑动的阻力。此外，两层流体间的分子引力也阻止其作相对的滑动。因此，流体受力流动时，流体内部分子运动和分子引力是两层流体间产生剪力的根源。这种力称为内摩擦力，或称为粘性力。粘性即是流体运动时产生的阻力，因此维持流体运动必须消耗能量来克服此粘性阻力。

流体的粘性是流体的重要物理性质，流体粘性的大小是用粘度来度量的。

如图 2-1 所示，由运动的流体中取出平行于壁面的相邻的两层流体。设此流体层间的接触面积为 A 。另由平板壁面向外作法线 Y ，则 Y 垂直于所有流体层。设上述两层的法向间距为 dy 。若下层的流速为 u ，上层的流速为 $u + du$ 。 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。根据牛顿对这类现象所进行的归纳，得出牛顿粘性定律。该定律表示：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：

$$T = \mu A \frac{du}{dy} (\text{N}) \quad \text{或} \quad \tau = \mu \frac{du}{dy} (\text{N/m}^2) \quad (2-4)$$

式中， T 为摩擦力即剪力； τ 为单位面积上的摩擦力即剪应力； μ 为反映流体粘性的一个物理量，称为流体的粘度，或称动力粘度。

凡是单位面积上摩擦力（粘性力）与速度梯度的一次方成正比的流体，即服从牛顿定律的流体，称为牛顿流体。凡是反映的特性与牛顿定律不相符合的流体，统称为非牛顿流体。

流体的粘度决定于流体的性质，其值等于流体在速度梯度为 1 单位时所产生的剪应力。

由式 2-4 知粘度的单位为：

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

在 CgS 制中，粘度的单位用 $\text{dyn}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ 来表示，称为泊（Poise），代号为 P。由于泊的单位太大，使用不便，故通常用厘泊（cP）来表示。 $1\text{cP} = 0.01\text{P}$ 。帕·秒与泊及厘泊有如下关系：

$$\begin{aligned} 1\text{Pa}\cdot\text{s} &= 1\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2 = \frac{100000}{10000} \frac{\text{dyn}\cdot\text{s}}{\text{cm}^2} \\ &= 10\text{P} = 1000\text{cP} \end{aligned}$$

此外，工程上有时以运动粘度来表示流体粘性的大小。运动粘度是动力粘度与密度之比，用符号 ν 表示，即：

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (2-5)$$

在 CgS 制中，运动粘度的单位为斯托克斯（StokeS），代号为 St

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

严格地说，流体的动力粘度和运动粘度都是压力和温度的函数。但一般情况下，压力的影响很小，可忽略不计，通常只考虑温度对粘性的影响。

就温度对粘度的影响而言，液体和气体的规律并不相同。液体的粘性随温度升高而减小，而气体的粘性则随温度升高而增大。液体和气体的粘性如此不同，主要因其分子运动和分子引力的特点不同所致。

图 2-2 表示几种液体食品的粘度。从图上可以看出，所有这些食品的粘度均随温度升高而降低。

应当指出，流体内摩擦定律只适用于流体仅有分子运动而无质点掺混的层流运动中。另外，在处理某些问题时，往往需要引入所谓理想流体的概念。理想流体是一种假定没有粘性的流体，亦即在这种流体中不发生内摩擦力。事实上所有的实际流体都是有粘性的，只不过当其粘性力很小而完全可以忽略时，也就非常接近于理想流体。

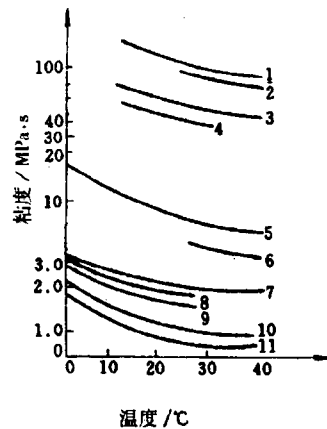


图 2-2 液体食品的粘度与温度的关系

4. 比热和焓 流体的比热是单位质量流体，在没有化学反应和相应变化时，温度升高 1K 所需要的热量，以符号 C 表示之，其单位为 $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$ 。一般而言，流体的比热是流体温度的函数，故比热可用下式定义：

$$C = \frac{dQ}{mdT} \quad (\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{s}) \quad (2-6)$$

某些液体食品的比热列表 2-2。比热随温度而变化的关系示于图 2-3。

度量气体比热有许多方法，所取单位也不尽相同。工程上常用的有：

(1) 质量比热 即上述以 1kg 质量为基准的比热，单位为 $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$ 。

(2) 容积比热 以标准米³为基准的比热,称为容积比热(C'),单位为 kJ/标准 m³·K。

(3) 摩尔比热 以 1kmol 为基准的比热,称为摩尔比热(C_M),单位为 kJ/kmol·K。

表 2-2 若干液体食品的比热 (0~100 间的平均值)

名称	含水量 (%)	比热 (kJ/kg·K)
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
牛奶	87.5	3.85
脱脂奶	91	3.98~4.02

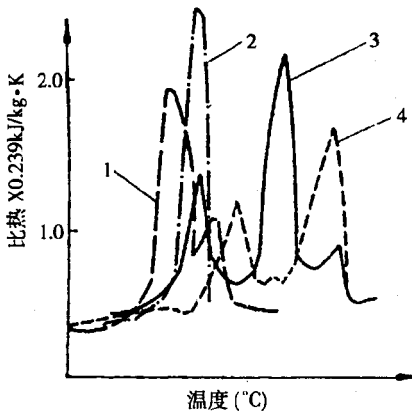


图 2-3 若干食品比热与温度关系

三种比热之间有如下换算关系：

$$C = \frac{C_M}{M} = C'V_0 \quad (2-7)$$

式中 V_0 为气体标准状况下的比体积。

气体比热与气体的加热过程的特性有关。常用的有定容比热和定压比热。定容比热是指气体在加热过程中容积保持不变的比热。定压比热是指气体在加热过程中压力保持不变的比热。在定容过程中, 气体不膨胀作功, 所加之热量全用于增加气体的内能 (主要是分子功能)。在定压过程中, 气体膨胀作功, 所加之热量除用以增加气体内能外, 还要克服外力而作功。因此对同一气体来说, 定压比热要大于定容比热。以单位质量为基准的定压比热和定容比热分别用 C_p 、 C_v 来表示。

工业上定压过程较为常见。对于定压下的加热或冷却, 气体吸收 (或放出) 的热量等于其比热、质量和温升 (或温度降低) 的乘积, 即：

$$\Delta Q_p = mC_p\Delta T \quad (2-8)$$

气体吸收此热量后, 其热力状态即发生变化。

流体的焓是流体的一项状态性质。流体状态发生变化时, 焓值也发生变化。定压过程中, 焓的增量等于流体所吸收的热量。如以 H 表示流体的焓, 则有：

$$\Delta H_p = H_2 - H_1 = \Delta Q_p = mC_p\Delta T \quad (2-9)$$

若以 h 表示以单位质量为基准的焓值, 则有：

$$\Delta h_p = h_2 - h_1 = \Delta q_p = C_p\Delta T \quad (2-9a)$$

在物理化学中已学过, 焓的一般定义是 $H = E + PV$, 或以单位质量计, $h = e + pv$ 。 h 称为比焓, 而 E 、 e 分别称为内能和比内能。

图 2-4 表示若干流动食品的焓值。

(二 作用在流体上的力 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，它与表面积的大小成正比。设在流动的流体中任取一块流体 V ，则 V 四周的流体对 V 的表面有作用力，这就是表面力。若在 V 的表面上取一微小面积 dA ，其上所受的表面力 dF 与此表面的法线成 α 角。将 dF 分解为切线力 dT 及法向力 dP ，见图 2-5 (1)。

表面力通常用单位面积上所受的力来计算。单位面积上所受的切向力称为切应力或剪应力。如前述，剪应力的产生是由于流体的粘性。单位面积上所受的力向力称为正应力。剪应力 τ 和正应力 σ 可分别用下面两式定义：

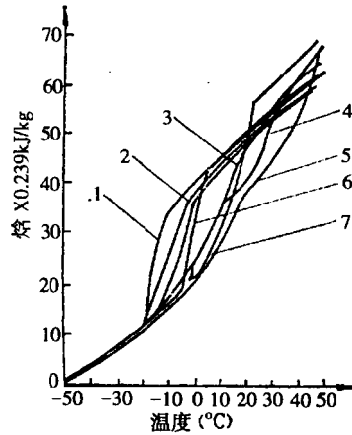


图 2-4 若干食品的焓

1. 大豆油 2. 花生油 3. 奶油 4. 猪脂肪
5. 牛脂肪 6. 菜子油 7. 椰子油

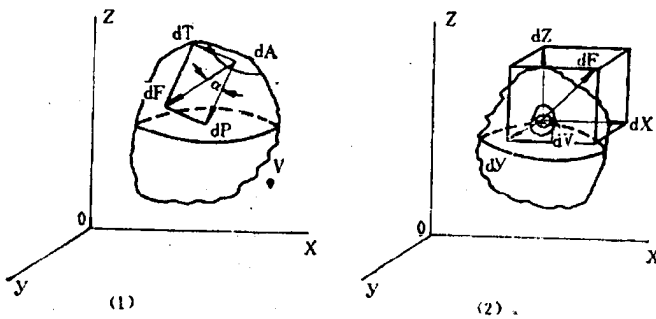


图 2-5 表面力和质量力的作用图

(1) 表面力 (2) 质量力

$$\tau = \lim_{dA \rightarrow 0} \frac{dT}{dA} \quad (\text{N/m}^2) \quad (2-10)$$

$$\sigma = \lim_{dA \rightarrow 0} \frac{dP}{dA} \quad (\text{N/m}^2) \quad (2-11)$$

由于流体是连续介质，因此流体中的剪应力和正应力都是坐标的连续函数。

在流体处于静止或平衡（即质点相互间及质点与固体接触面间无相对运动）时，流体内部就不存在剪应力，只存在正应力。而且，由于流体不能承受任何微小拉力的作用，故上述正应力不能是拉应力，而只能是压应力，称为流体静压力，简称压力，一般用 P 表示。

在流体处于运动状态时，必然会因粘性而产生摩擦力，因而运动流体中的表面力除正应力外尚有剪应力的作用。运动流体中的正应力称为“流体动压力”，也简称为压力。

度量压力的单位，除了国际单位制用 N/m^2 表示外，工程上还常用其他多种表示法。

按度量压力的基准（即零点）的不同，压力有三种不同的名称，即绝对压力、表压力和真空度。

绝对压力是以绝对真空为基准，在工程计算中，常用此种压力。

表压力是以大气压为基准，即绝对压力高于大气压的数值。一般压力表所测得的压力值

都是表压力。表压力 P_g ，绝对压力 P_{ab} 和大气压 P_a 三者有如下关系：

$$P_g = P_{ab} - P_a \quad (2-12)$$

真空度是当绝对压力小于大气压时，其小于大气压的数值。设真空度为 P_{vm} ，则有：

$$P_{vm} = P_a - P_{ab} \quad (2-13)$$

2. 质量力 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。

质量力主要有两种：一种是外界物质对流体的吸引力，如地心引力；另一种是流体作加速运动时产生的，即达朗贝尔力（D'Alembert's force），如直线惯性力和离心惯性力等。

质量力通常用单位质量上所受的力来计算，称为单位质量力。见图 2-5 (2)，显然可知， $dF/dm = a$ ，故单位质量力即为加速度。

二、稳定流动热力体系的总能量方程式

(一) 稳定流动热力体系的概念 热力体系是指某一由周围边界所限定的空间内的所有物质，而边界可以是真实的边界（如设备和管道的壁面），也可以是虚拟的边界（如人为选取的截面，称为控制面）。边界将体系与其外部的一切事物分开，体系的外部称为外界。例如，牛奶从加热设备的进口管路流入设备，又从设备的出口管路流出，如果在进、出口管路上各取一截面（控制面），则其所限定的空间内的物质即构成一体系，其以外的部分则称为外界。

体系与其外界有各种形式的交换，物质交换、热交换和功交换。当体系与外界并无物质交换时，这种体系称为封闭体系或定质体系。另外，当体系与外界有物质交换时，则称为开口体系或流动体系。此时物质将经过控制面而流动。

当流体流过如图 2-6 所示的设备中，如果体系内部任意一点上，表示流体性质和流动参数的物理量如密度、流速、压力和温度均不随时间而改变，则称这种流动体系为稳定流动体系，否则称为不稳定流动体系。

稳定流动热力体系必须具备下述的条件：

1. 在进口截面和出口截面上。流体须保持组成、状态、流速等各方面的稳定，不随时间而变；

2. 进入体系流体的质量流量恒等于离开体系的质量流量。

3. 经过边界与外界在单位时间内的功交换和热交换均须保持定值。

流体连续流过离心泵、离心式压缩机、冷凝器、加热器等，当工作情况达到正常稳定状态时，均可视为稳定流动。又如各种往复式设备如往复式压缩机等，虽然流体流过设备，将受到间歇性的循环变化，如果单位时间循环次数很高，过程近似于连续时，仍可视为稳定的流动。

(二) 稳定流动体系的能量平衡 对于稳定流动热力体系（图 2-6 所示），设在一定时间

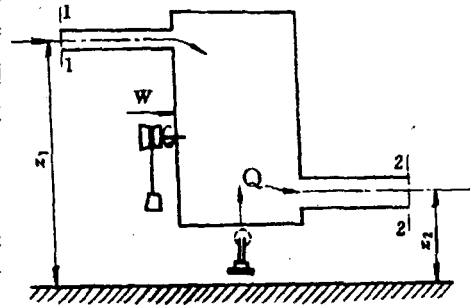


图 2-6 稳定流动的分析

内进出体系的流体质量为 G (kg)，若忽略电能和化学能等不计，则输入和输出体系的能量计有：

(1) 位能 是流体由于在地球引力场中的位置而产生的能量。若任选一基准水平面作为位能的零点，则离基准面垂直距离为 Z 的流体所具有的位能为 GgZ (J)。

(2) 动能 是流体由于运动而产生的能量。若流体以均匀速度 u 流动，则其动能等于 $Gu^2/2$ (J)。若流动截面上流速分布不均，如按平均流速计算，必须乘以动能校正系数，在特定的条件下，也可近似按平均流速计，而不加校正。

(3) 内能 内能 E 是储藏在流体分子内部的能量。对于不可压缩流体，主要是流体的分子动能；对可压缩流体，除分子动能外，尚有分子位能。如果单位质量流体所含的内能表示为 e ，则 $E = Ge$ (J)。

(4) 流动功 也有称为压力能，是流动系统中在不改变流体体积情况下，引导流体经控制面进入或流出所必须作的功，其值等于 $G \cdot P \cdot V$ 或 $G \cdot P / \rho$ (J)。式中 V 为流体的比体积， ρ 为密度。

(5) 外功 如果设备中尚包括压缩机或泵等机械，则外界通过这类机械将对体系做功，是为功的输入。相反也有体系对外做功的情形，是为功的输出。可以人为约定外界对体系做功为正，体系对外界做功为负。设对应于单位质量的功量为 w (J/kg)，则对质量 G (kg) 的功 $W = Gw$ (J)。

(6) 热量 系统通过换热器对外界进行热交换。同样可约定，对系统加热为正，系统对外界加热为负。且 $Q = Gq$ (J)。

将热力学第一定律应用于此稳定流动体系，得：

$$E_1 + GP_1V_1 + GgZ_1 + G\frac{u_1^2}{2} + Q + W = E_2 + GP_2V_2 + GgZ_2 + G\frac{u_2^2}{2} \quad (\text{J}) \quad (2-14)$$

或：

$$e_1 + P_1V_1 + gZ_1 + \frac{u_1^2}{2} + q + w = e_2 + P_2V_2 + gZ_2 + \frac{u_2^2}{2} \quad (\text{J/kg}) \quad (2-14a)$$

$$h_1 + gZ_1 + \frac{u_1^2}{2} + q + w = h_2 + gZ_2 + \frac{u_2^2}{2} \quad (\text{J/kg}) \quad (2-14b)$$

$$q + W = \Delta h + g\Delta Z + \Delta\frac{u^2}{2} \quad (\text{J/kg}) \quad (2-14c)$$

上列各式称为稳定流动总能量方程式。式中的角码 1 表示的项为体系出口截面上的对应项，以 2 表示的项为体系进口截面上的对应项。

稳定流动总能量方程说明，外界加给体系的能量和功量，全部用增加流体的焓、位能和动能。

现就常见的热交器、喷嘴、节流阀和压缩机的流体流动说明稳定流动总能量方程的应用。参阅图 2-7。

(1) 通过热交换器的流动 此时，外界对体系的机械功 $w = 0$ ，设流体从进口至出口的位能和动能变化可以忽略，即 $g\Delta Z = 0$ ， $\Delta\frac{u^2}{2} = 0$ ，故方程简化为：

$$q = \Delta h = h_2 - h_1 \quad (\text{J/kg}) \quad (2-15)$$

此式表示：流体流过换热器时，加热量等于流体焓值的增加，冷却放热量等于焓值的减少。

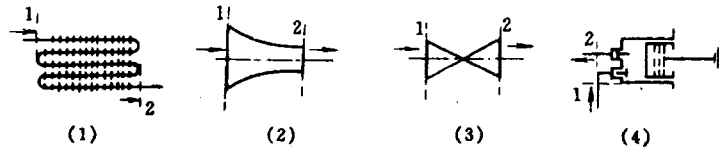


图 2-7 几种常见的流体流动

(1) 经换热器 (2) 经喷嘴 (3) 经节流阀 (4) 经压缩机

(2) 通过喷嘴的流动 由于时间短，可视为对外无热交换，即 $q = 0$ 。同时也无功交换，故 $w = 0$ 。若忽略位能变化不计，则方程式可简化为：

$$\Delta h + \Delta \frac{u^2}{2} = 0 \text{ 或 } h_1 - h_2 = \frac{u_2^2 - u_1^2}{2}$$

由于是收缩喷嘴， $u_1 \leq u_2$ ，若略去 u_1 不计，则近似可得：

$$u_2 \approx \sqrt{2(h_1 - h_2)} \quad (\text{m/s}) \quad (2-15a)$$

表明：流体流过收缩喷嘴后获得的动能等于流体焓值的减少。

(3) 通过节流阀的流动 对外的功交换和热交换均为零，即 $q = 0$ ， $w = 0$ 。设管道上下游的截面积相等，故流体流速近似相等，即 $\Delta \frac{u^2}{2} = 0$ 。因此，方程简化为：

$$\Delta h = 0 \text{ 或 } h_1 = h_2 \quad (\text{J/kg}) \quad (2-15b)$$

可见，通过节流阀前后，流体焓值没有变化。

(4) 流过压缩机 设此时对外无热交换， $q = 0$ ，且位能和动能的变化可以忽略，则方程式简化为：

$$w = \Delta h = h_2 - h_1 \quad (\text{J/kg}) \quad (2-15c)$$

这就是理论上压缩机所耗之功，它等于压缩前后气体焓值的增量。

例 2-1 某小型奶粉喷雾干燥设备，每小时需要的空气量为 2000kg ，空气流过加热器大致可以认为是在空压下从初温 25°C 加热至 200°C ，试计算所需要之热量。

解：根据公式 2-15 来求解。空气的定压比热近似等于 1，故出口和进口的空气焓为。

$$h_2 = 1 \times 200 = 200 \quad (\text{J/kg})$$

$$h_1 = 1 \times 25 = 25 \quad (\text{J/kg})$$

所需之热量为：

$$Q = Gq = G \times (h_2 - h_1) = 2000 \times (200 - 25) = 350 \quad (\text{kJ/h})$$

三、不可压缩理想流体的稳定流动

(一) 伯努利 (Bernoulli) 方程 稳定流动总能量方程式是一较普遍的方程式, 它适用于可压缩实际流体的流动, 且在流动过程中体系还有对外的热交换和功交换。因此, 这一方程可被用于解决工程上范围相当广泛的问题。但是, 对于单纯的流体输送问题, 虽然其中气体为可压缩流体, 但一般都是在压力变化范围不大的情况下进行。因此, 在特定场合下, 处理气体也可同液体一样, 视为不可压缩流体。

在另一方面, 虽然在输送中的流体都是粘性流体, 即实际流体, 但如果从它的抽象模型——理想流体入手, 就会使分析问题得以简化。

对于单纯的流动问题, 体系对外无功交换和热交换, 即 $w=0$, $q=0$ 。且由于不可压缩 ($V_1=V_2=V$, $\rho_1=\rho_2=\rho$) 和理想流体的假定, 则流体的分子位能和分子动能都不发生变化。换言之, 流体的内能保持不变, $e_1=e_2$ 。由此, 稳定流动总能量方程式将简化为如下的特殊形式:

$$gZ_1 + P_1 V + \frac{u_1^2}{2} = gZ_2 + P_2 V + \frac{u_2^2}{2} \quad (\text{J/kg}) \quad (2-16)$$

$$\text{或} \quad gZ_1 + \frac{P_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} = gZ_2 + \frac{P_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} \quad (\text{J/kg}) \quad (2-16a)$$

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} \quad (\text{m}) \quad (2-16b)$$

$$\rho g Z_1 + P_1 + \frac{\rho u_1^2}{2} = \rho g Z_2 + P_2 + \frac{\rho u_2^2}{2} \quad (\text{N/m}^2) \quad (2-16c)$$

上三式即为不可压缩理想流体稳定流动的能量方程式, 称为伯努利方程式 (Bernoulli equation)。三式中的各项均代表单位流体所具有的各种形式的能量, 即位能、压力能和动能三种。位能、压力能和动能都是机械能的能量形式, 所以伯努利方程是一种流体机械能的恒算式。

上列各式, 其单位均不相同。式 *a* 以每 1kg 质量流体所含能量来表示, 式 *b* 以每 1N 重量流体所含能量来表示, 而式 *c* 则以每 1m³ 体积流体所含能量来表示。

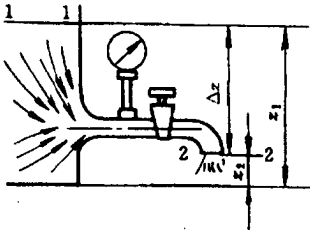
以单位重量流体所含能量来表示的 *b* 式各单位均为 *m*, 在实用上有方便之处, 称为压头。式中各项分别称为位压头, 静压头和动压头。

由此可见, 伯努利方程的物理意义是不可压缩理想流体稳定流中, 在质量力只有重力情况下, 能量守恒必然表现为机械能的守恒。所以, 伯努利方程是能量守恒定律在流动中的具体体现。

虽然伯努利方程说明了理想流体在流动过程中总机械能保持不变, 但各项能量之间仍可互相转化。

例 2-2 如附图所示的开口水箱, 其下部侧方装有进水龙头。设水箱上方有维持水位恒定的装置, 液面与泄水出口的高差 $\Delta Z = 10\text{m}$ 。试求龙头开启后, 水流达稳定时, 水的流量。已知管内径为 12mm。

解: 引用伯努利方程近似计算。取水箱液面为第一截面, 龙头出口为第二截面。由于第一截面面积相对于出口面积甚大, 故其速度 u_1 相对甚小可以忽略不计, 故有:



例 2-2 附图

$$\frac{u_2^2}{2g} = \Delta Z + \frac{P_1 + P_2}{\rho g}$$

又因两截面均与大气接触，故截面上流体压力相等，均等于大气压，从而上式简化为：

$$u_2 = \sqrt{2g\Delta Z} = \sqrt{2 \times 9.81 \times 10} = 14 \quad (\text{m/s})$$

故水的流量为：

$$\begin{aligned} Q &= \frac{\pi}{4} d^2 u_2 = (0.785)(0.012)^2 (14) \\ &= 0.00158 \quad (\text{m}^3/\text{s}) \end{aligned}$$

(二) 流体静力学基本方程式 当流体静止时，体系内任一点的流体流速均等于零。由于流体质点之间没有相对运动，因而也无粘性表现，此时的实际流体也无异于理想流体。在这种情况下，若引用伯努利方程于体系中任两点，并令式中 $u_1 = u_2 = 0$ ，即得：

$$gZ_1 + \frac{P_1}{\rho} = gZ_2 + \frac{P_2}{\rho} \quad (\text{J/kg}) \quad (2-17)$$

$$\text{或} \quad gZ + \frac{P}{\rho} = \text{常数} \quad (\text{J/kg}) \quad (2-17a)$$

此式称为流体静力学基本方程式。它说明静止流体内部各点的位能和压力能之和为常数。

设液体自由表面上方的外压为 P_0 ，液面离基准水平面的高度差为 Z_0 ，如将上式应用于液面上一点与液面内部任一点之间，则可得：

$$gZ_0 + \frac{P_0}{\rho} = gZ + \frac{P}{\rho} \quad (\text{J/kg})$$

$$\text{或} \quad P = P_0 + \rho g(Z_0 - Z) = P_0 + \rho gh \quad (\text{N/m}^2) \quad (2-17b)$$

此式为静力学基本方程式的另一形式。式中 h 为液体内部任一点离液面的深度。

例 2-3 罐头厂为使高压杀菌连续化，采用如附图所示的静水压密封连续杀菌装置。杀菌室内通入高压蒸气。若蒸气压力为 2kg/cm^2 (绝对)，试求水封室的高度。

解：如附图，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（即杀菌室内压力）为 P_1 ；水封室的液面为 2，其离基准面高度为 Z_2 ；液面的压力（即大气压力）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得：

$$gZ_1 + \frac{P_1}{\rho} = gZ_2 + \frac{P_2}{\rho}$$

故水封室最小高度应为：

$$H = Z_2 - Z_1 = \frac{P_1 - P_2}{g\rho}$$

已知：水的密度 $\rho = 1000\text{kg/m}^3$ ，液面 1 的压力 $P_1 = 2\text{kg/cm}^2 = 2 \times 98\,100\text{N/m}^2$ ，液面 2 的压力 $P_2 = 1\text{atm} = 101\,000\text{N/m}^2$ 代入上式即得：