**2.1 介绍** 2021年5月17日10点48分

系统的任何特征都称为**属性**.一些熟悉的属性是压力P,温度T,体积V和质量m.该列表可以扩展为包括不太熟悉的参数,例如粘度,导热系数,弹性模量,热膨胀系数,电阻率,甚至速度和高度.

属性被认为是强度的或广度.**强度量[intensive properties]**是与系统质量无关的性质,例如温度,压力和密度.**广度量[extensive properties]**是指其值取决于系统大小或范围的属性.总质量,总体积V和总动量是广度量的一些示例.确定属性是强度还是广度的一种简单方法是将系统分为两个相等的部分,并使用一个假想的分区,如图2–1所示.每个部分将具有与原始系统相同的强度属性值,但具有广泛属性值的一半.

通常,大写字母用于表示广泛的属性(质量m为主要例外),小写字母用于强化属性(压力P和温度T为明显例外).

每单位质量的广度量称为**特定性质**.特定性质的一些例子是比容()和比总能量().

系统的状态由其属性描述.但是从经验中我们知道,不需要为了固定状态而指定所有属性.一旦指定了足够数量的属性值,其余的属性将采用某些值.也就是说,指定一定数量的属性足以修复状态.固定系统状态所需的属性数量由状态假设给出:简单可压缩系统的状态完全由两个独立的强度量指定.

如果一个属性可以更改,而另一个保持不变,则两个属性是独立的.并非所有属性都是独立的,并且某些属性是根据其他属性定义的,如第2–2节所述.

**连续体**

流体由可能广泛分布的分子组成,尤其是在气相中.然而,忽略流体的原子性质并将其视为没有孔的连续,均匀的物质(即连续体)是很方便的.连续性理想化使我们可以将特性视为点函数,并假定特性在空间中连续变化且没有跳跃间断.只要我们处理的系统的大小相对于分子之间的空间大(图2-2),这种理想化就有效.除了一些专门的问题,几乎所有问题都是这种情况.我们所做的许多陈述都暗含了连续性理想化的含义,例如“玻璃杯中水的密度在任何时候都是相同的”.

要了解分子水平上涉及的距离,请考虑一个在大气条件下充满氧气的容器.氧分子的直径约为,质量为.同样,在1个大气压下和20°C时,氧气的平均自由程为.也就是说,一个氧分子在与另一个分子碰撞之前平均行进 (直径的200倍).

另外,在1个大气压和20°C的温度下,的微小体积中存在约个氧分子(图2-3).只要系统的特征长度(例如其直径)远大于分子的平均自由程,就可以使用连续模型.在非常低的压力下,例如在非常高的海拔,平均自由程可能会变大(例如,海拔100 km的大气约为0.1m).在这种情况下,应使用稀有气体流动理论,并应考虑单个分子的影响.在本文中,我们将考虑范围限于可以建模为连续体的物质.定量地定义了一个无量纲数,称为Knudsen数,其中是流体分子的平均自由程,是流体流动的某些特征长度尺度.如果非常小(通常小于0.01),则可以将流体介质近似为连续介质.

**2.2 密度和比重** 2021年5月17日11点10分

**密度**定义为每单位体积的质量(图2-4).即,

密度的倒数是比体积(或比容),其定义为每单位质量的体积.即,.对于质量和体积的差分体积元素,密度可以表示为.

物质的密度通常取决于温度和压力.大多数气体的密度与压力成正比,与温度成反比.另一方面,液体和固体基本上是不可压缩的物质,其密度随压力的变化通常可以忽略不计.例如,在20°C下,水的密度从1个大气压下的变为100个大气压下的,变化仅为0.5％.液体和固体的密度与温度的关系比压力的影响更大.例如,在1个大气压下,水的密度从20°C时的变为75°C时的，变化为2.3％,在许多工程分析中仍然可以忽略不计.

有时,物质的密度是相对于众所周知的物质的密度给出的.然后称为**比重**或**相对密度**,定义为在特定温度下(通常为4°C的水,)物质的密度与某些标准物质的密度之比.即,

注意,物质的比重是无量纲的量.但是,以SI单位表示的物质的比重数值恰好等于其在单位为或的密度(或密度的0.001倍,单位为),因为水的密度在4°C是.例如,在20℃下,汞的比重为13.6.因此,其在20℃下的密度为.表2-1给出了某些物质在20°C时的比重.请注意,比重小于1的物质比水轻,因此它们会漂浮在水上(如果不混溶).

物质单位体积的重量称为**比重[specific weight]**或**重量密度[weight density]**,表示为

其中是重力加速度.

回顾第一章,液体的密度基本上是恒定的,因此在大多数过程中,它们通常可以近似地视为不可压缩的物质,而又不会牺牲太多的精度.

**理想气体的密度**

属性表提供了有关属性的非常准确和精确的信息,但是有时在属性之间具有足够一般且合理准确的一些简单关系很方便.任何与物质的压力,温度和密度(或比体积)相关的方程式都称为**状态方程**.气相中物质的最简单和最著名的状态方程是理想气体状态方程,表示为

其中P是绝对压力,是比体积,是热力学(绝对)温度,𝜌是密度,R是气体常数.不同气体的气体常数R不同,由决定,其中是**通用气体常数**,其值为,是 气体的摩尔质量(也称为分子量).表A-1列出了几种物质的和值.

SI中的热力学温度标度是**开尔文标度**,该标度上的温度单位是**开尔文**,用K表示.在英语系统中,它是**兰金标度**,而该标度上的温度单位是**兰金**R .各种温度标度通过以下方式相互关联

通常将常数273.15和459.67分别舍入为273和460，但是我们不鼓励这样做.

方程2-4,即理想气体状态方程,也简称为**理想气体关系**,遵守该关系的气体称为理想气体.对于体积,质量和摩尔数的理想气体,理想气体状态方程也可以写成或.对于固定质量，两次写入理想气体关系并进行简化,理想状态下处于两种不同状态的气体的特性彼此之间的关系为.

理想气体是遵循关系的假设物质.实验上已经观察到,理想气体关系在低密度下非常接近真实气体的行为.在低压和高温下,气体的密度降低,并且气体的行为类似于理想气体(图2–5).在实际应用范围内,许多熟悉的气体(例如空气,氮气,氧气,氢气,氦气,氩气,氖气和二氧化碳),甚至重气体(例如k气)都可以被视为理想气体,其误差可以忽略不计(通常小于1 百分).但是,不应将诸如蒸汽发电厂中的水蒸气以及冰箱,空调和热泵中的制冷剂蒸气之类的稠密气体视为理想气体,因为它们通常以接近饱和的状态存在.

**2.3 蒸气压和空化** 2021年5月17日12点01分

众所周知,温度和压力是相变过程中纯物质的相关属性,并且温度和压力之间存在一一对应的关系.在给定压力下,纯物质发生相变的温度称为**饱和温度**.同样,在给定温度下,纯物质发生相变的压力称为**饱和压力**.例如,在1个标准大气压(1个大气压或101.325 kPa)的绝对压力下,水的饱和温度为100°C.相反,在100℃的温度下,水的饱和压力为.

纯物质的**蒸气压[vapor pressure]**定义为在给定温度下其蒸气与液体处于相平衡状态时所施加的压力(图2-7).是纯物质的属性,结果与液体的饱和压力相同().我们必须注意不要将蒸气压与分压混淆.**分压[partial pressure]**定义为与其他气体混合的气体或蒸汽的压力.例如,大气是干燥空气和水蒸气的混合物,并且大气压力是干燥空气的分压和水蒸气的分压之和.水蒸气的分压仅占大气压力的一小部分(通常低于3％),因为空气主要是氮气和氧气.如果没有液体,蒸气的分压必须小于或等于蒸气压.但是,当同时存在蒸气和液体并且系统处于相平衡状态时,蒸气的分压必须等于蒸气压,并且系统被称为已饱和.来自开放水体(例如湖泊)的蒸发速率由蒸气压和分压之间的差控制.例如,水在20℃下的蒸气压为2.34kPa.因此,留在房间中的20°C的水桶在1 atm的干燥空气下将继续蒸发,直到发生以下两种情况之一:水蒸发掉(房间中没有足够的水建立相平衡),或者当室内水蒸气的分压升至2.34 kPa时,蒸发停止,此时建立了相平衡.

对于纯物质的液相和气相之间的相变过程,由于蒸气是纯净的,因此饱和压力和蒸气压是相等的.请注意,无论是在气相还是液相中测量,压力值都将相同(前提是应在靠近液-气界面的位置进行测量,以避免产生静水效应).蒸气压随温度升高而增加.因此,高压下的物质在高温下沸腾.例如,在压力为3 atm的绝对压力锅中,水在134°C时沸腾,而在2000 m海拔的大气压锅中,水在93°C时沸腾,此时大气压为0.8 atm.附录1和2中列出了各种物质的饱和(或蒸气)压力.为了便于参考,表2-2中提供了节水表.

我们对蒸气压感兴趣的原因是,液体流动系统中的液体可能会在某些位置下降到低于蒸气压的状态,并导致计划外的蒸发.例如,温度在10摄氏度以下的水可能会蒸发并在压力降到1.23 kPa以下的位置(例如叶轮的尖端区域或泵的吸入侧)形成气泡.蒸气气泡(由于它们在液体中形成“腔”,因此称为空化气泡)在从低压区域扫除时会崩溃,从而产生破坏力极高的波动波.这种现象是导致性能下降甚至损坏叶轮叶片的常见原因,这种现象称为气蚀现象,它是水轮机和泵设计中的重要考虑因素.

在大多数流量系统中,必须避免(或至少最小化)气穴现象,因为它会降低性能,产生烦人的振动和噪音并损坏设备.我们注意到,某些流动系统利用空化来发挥其优势,例如,高速“超空化”鱼雷.由于大量气泡长时间在固体表面附近坍塌而导致的压力峰值可能导致腐蚀,表面点蚀,疲劳破坏以及最终损坏组件或机械(图2-8).流动系统中空化的存在可以通过其特有的翻滚声来感知.

**2.4 能源和特殊热量** 2021年5月17日12点03分

能量可以以多种形式存在,例如热,机械,动力学,势,电,磁,化学和核能(图2–9),它们的和构成系统的**总能量**E(或以单位质量为基础的e).与系统的分子结构和分子活性程度有关的能量形式称为微观能量.所有微观形式的能量之和称为系统的**内部能量**,用（或以单位质量为单位的）表示.

系统的宏观能量与运动以及某些外部效应(例如重力,磁力,电和表面张力)的影响有关.系统因其运动而拥有的能量称为**动能**.当系统的所有部分以相同的速度运动时,单位质量的动能表示为,其中表示系统相对于某个固定参考系的速度.系统在重力场中的高度所拥有的能量称为**势能**,以单位质量表示为,其中是重力加速度,是重心的高度系统相对于一些任意选择的参考平面的高度.

在日常生活中,我们经常将内在能量的敏感形式和潜能形式称为**热**,并且我们谈论身体的热量.然而,在工程中,这些能量形式通常称为**热能[thermal energy]**,以防止与热传递的任何混淆.

能量的国际单位是焦耳（J）或千焦耳（1 kJ = 1000 J）。焦耳为1 N乘以1 m。在英语系统中，能量单位是英制热量单位（Btu），它定义为将68 F的1 lbm水的温度提高1°F所需的能量。 kJ和Btu的大小几乎相同（1 Btu = 1.0551 kJ）。另一个众所周知的能量单位是卡路里（1 cal = 4.1868 J），它定义为将1 g的水的温度在14.5°C升高1°C所需的能量。

在涉及流体流动的系统分析中,我们经常遇到特性和的组合.为方便起见,此组合称为**焓[enthalpy]**.那是,

其中是流动能,也称为流动功,是移动流体并保持流动所需的每单位质量的能量.在流动流体的能量分析中,将流动能量视为流体能量的一部分,并用焓h表示流体流的微观能量非常方便(图2-10).注意,焓是每单位质量的数量,因此它是一种特殊的性质.

在没有诸如磁,电和表面张力之类的影响的情况下,系统称为简单可压缩系统.一个简单的可压缩系统的总能量由三部分组成:内部,动能和势能.在单位质量的基础上,它表示为.进入或离开控制体积的流体具有另一种形式的能量-流动能.然后,以单位质量为基础的**流动流体**的总能量变为

的单位是,其中是焓,是速度的大小,是系统相对于某个外部参考点的标高.

通过使用焓代替内部能量来表示流动流体的能量,我们无需关心流动功.与推动流体有关的能量将由焓自动处理.实际上,这是定义属性焓的主要原因.

理想气体的内部能量和焓的微分和有限变化可以用比热表示为

其中和是理想气体的恒定体积和恒定压力的比热.使用平均温度下的比热值,内部能量和焓的有限变化可以近似表示为

对于不可压缩的物质,恒定体积和恒定压力的比热是相同的.因此,液体的和液体的内能变化可以表示为.

注意到𝜌=不可压缩物质恒定,焓的微分给出.积分,焓变变为

因此,对于恒定压力过程,,对于液体中的恒定温度过程,.

2.5 可压缩性和音速 2021年5月17日12点08分

压缩系数

从经验中我们知道，流体的体积（或密度）随温度或压力的变化而变化。 流体通常在加热或减压时会膨胀，而在冷却或加压时会收缩。 但是对于不同的流体，体积变化的量是不同的，我们需要定义将体积变化与压力和温度的变化相关联的属性。 两个这样的特性是体积弹性模量κ和体积膨胀系数𝛽。 通常观察到，当施加更大的压力时，流体会收缩，而作用于其上的压力会降低，流体会膨胀（图2-11）。 也就是说，流体在压力方面的作用类似于弹性固体。 因此，以类似于固体的杨氏弹性模量的方式，将流体的压缩系数κ（也称为体积可压缩模量或体积弹性模量）定义为

也可以用有限变化近似表示为

注意Δv/ v或Δ𝜌 / 𝜌是无量纲的，因此κ必须具有压力的大小（Pa或psi）。 另外，可压缩系数表示在温度保持恒定的同时，压力的变化，该压力的变化对应于流体的体积或密度的分数变化。 然后得出结论，真正不可压缩的物质（v =常数）的可压缩系数是无穷大。 较大的κ值表示需要大的压力变化以引起较小的体积分数变化，因此具有大κ的流体基本上不可压缩。 这对于液体来说很典型，并解释了为什么通常认为液体是不可压缩的。 例如，在正常大气条件下，水的压力必须升高到210 atm，才能将其压缩1％，这对应于κ= 21,000 atm的可压缩系数值。

液体中密度的微小变化仍会在管道系统（例如水锤）中引起有趣的现象，其特征类似于类似于“锤打”管道时产生的声音。当管道网络中的液体遇到突然的流量限制（例如关闭阀）并被局部压缩时，会发生这种情况。沿管道传播和反射时，产生的声波会​​撞击管道表面，弯曲和阀门，从而导致管道振动并产生熟悉的声音。除了刺激性的声音外，水锤还会造成很大的破坏，导致泄漏甚至结构损坏。水锤避雷器（图2–12）可以抑制这种影响，该避雷器是一个装有波纹管或活塞以吸收冲击的容积腔。对于运送液体的大型管道（例如水力压力管道），通常使用称为调压塔的垂直管道。调压塔的顶部有自由空气表面，并且几乎不需要维护。对于其他管道，使用封闭的液压蓄能器箱，其中在蓄能器箱中压缩诸如空气或氮气之类的气体以减轻冲击。请注意，体积和压力成反比（体积随着压力的增加而减小，因此∂P/∂v为负数），定义中的负号（方程2–12）确保κ为正数。同样，微分1 = 1 / v得到d𝜌 = -dv / v 2，可以重新排列为

即，比体积的分数变化和流体的密度在大小上相等但在符号上相反。 对于理想气体，P = 𝜌RT和（∂P/ ∂𝜌）T = RT = P / 𝜌，因此

因此，理想气体的可压缩系数等于其绝对压力，并且气体的可压缩系数随着压力的增加而增加。 将κ= P代入可压缩系数的定义并重新排列，得出

因此，等温压缩期间理想气体的密度增加百分比等于压力增加百分比。 对于压力为1 atm的空气，κ= P = 1 atm，体积减少1％（ΔV/ V = -0.01）对应于压力为ΔP= 0.01 atm。 但是对于1000 atm的空气，κ= 1000 atm，体积减少1％对应于压力增加ΔP= 10 atm。 因此，在非常高的压力下，气体体积的小部分变化会导致压力的大变化。 可压缩系数的倒数称为等温压缩率α，表示为

流体的等温可压缩性代表与压力单位变化相对应的体积或密度的分数变化。

体积膨胀系数

通常，流体的密度比温度对压力的依赖性更大，并且密度随温度的变化是造成许多自然现象的原因，例如风，洋流，烟囱中烟羽的上升， 热气球，通过自然对流进行的热传递，甚至是热空气的上升，因此短语“热量上升”（图2-13）。 为了量化这些影响，我们需要一个属性，该属性表示流体在恒定压力下密度随温度的变化。 提供信息的属性是体积膨胀系数（或体积膨胀系数）𝛽，定义为（图2-14）

也可以用有限变化近似表示为

流体的𝛽值越大，密度随温度的变化就越大，乘积ΔT表示流体的体积变化率，其对应于恒定压力下的ΔT温度变化。 可以看出，理想气体在温度T下的体积膨胀系数（P = 𝜌RT）等于温度的倒数：

其中T是绝对温度。

在自然对流研究中，围绕有限的热区或冷区的主流体状态用下标“无穷大”表示，以提醒人们，这是存在热的一定距离处的值 或感觉不到寒冷的地区。 在这种情况下，体积膨胀系数可以表示为

其中𝜌∞是密度，T∞是远离受限的热流体腔或冷流体腔的静态流体的温度。我们将在第3章中看到，自然对流是由浮力产生的，该浮力与密度差成正比，而密度差又与恒压下的温度差成正比。因此，热流体袋或冷流体袋与周围的主流体体之间的温度差越大，浮力越大，因此自然对流越强。当飞机以声速飞行时，有时会发生相关现象。温度的突然下降使水蒸气凝结在可见的蒸气云上（图2-15）。压力和温度变化对流体体积变化的综合影响可以通过将比体积作为T和P的函数来确定。微分v = v（T，P）并使用压缩和膨胀的定义系数α和𝛽给出

然后，由于压力和温度的变化而引起的体积（或密度）的分数变化可以近似表示为

声速和马赫数

在研究可压缩流时，一个重要的参数是声速（或声速），它是指无限小的压力波在介质中传播的速度。压力波可能是由较小的扰动引起的，该扰动会引起局部压力的轻微变化。要获得与介质中声速的关系，请考虑一个充满静止流体的管道，如图2-17所示。现在，安装在管道中的活塞以恒定的增量速度dV向右移动，从而产生声波。波前以声音的速度c穿过流体向右移动，并将与活塞相邻的运动流体与静止的流体分开。波前左侧的流体的热力学性质会发生增量变化，而波前右侧的流体则保持其原始的热力学性质，如图2-17所示。为了简化分析，请考虑一个控制体积，该体积包围波前并随其移动，如图2-18所示。对于沿波前行进的观察者，向右的流体似乎以c的速度向波前移动，向左的流体似乎以c-dV的速度向波前移动。当然，观察者会看到包围波前（和她或他自己）的控制体积是静止的，并且观察者正在目睹稳定的流动过程。此单流稳定流过程的质量平衡表示为

通过消除横截面积（或流动面积）A并忽略高阶项，该等式简化为

在此稳定流过程中，没有热量或功穿过控制体积的边界，并且可以忽略势能变化。 然后，稳定流能量平衡ein = eout变为

在这里我们忽略了二阶项（dV）2。 普通声波的振幅很小，不会引起流体压力和温度的任何明显变化。 因此，声波的传播不仅绝热，而且几乎是等熵的。 然后热力学关系式T ds = dh-dP / 𝜌（见Çengel和Boles，2015）简化为

结合以上等式，可以得出所需的声音速度表达式，如下所示：

留给读者练习是通过使用热力学性质关系来表明，方程2–24也可以写为

其中k = c p / cv是流体的比热比。 请注意，流体中的声速是该流体的热力学性质的函数（图2–19）。 当流体是理想气体（P = 𝜌RT）时，可以通过公式2–25的微分求出

注意到气体常数R对于特定的理想气体具有固定值，并且理想气体的比热比k最多是温度的函数，我们看到特定的理想气体中的声速是函数 单独的温度（图2–20）。 可压缩流体流动分析中的第二个重要参数是马赫数Ma，以奥地利物理学家恩斯特·马赫（1838–1916）的名字命名。 它是流体（或静止流体中的物体）的实际速度与相同状态下相同流体中的声速之比：

马赫数也可以定义为惯性力与弹力之比。 如果Ma小于约1/3，则流动可近似为不可压缩的，因为仅当马赫数超过该值时，可压缩性的影响才变得显着。 请注意，马赫数取决于声音的速度，而声音的速度取决于流体的状态。 因此，在静止空气中以恒定速度巡航的飞机的马赫数在不同位置可能会有所不同（图2-21）。 流体流动状态通常以流动马赫数来描述。 当Ma = 1时，该流称为声波；当Ma <1时，该流称为亚声速；当Ma> 1时，该流称为超音速；当Ma >> 1时，该流称为超音速；当Ma≅1时，该流称为跨音速。

2.6 黏度 2021年5月17日14点04分

当两个接触的固体彼此相对运动时，摩擦力在接触面上沿与运动相反的方向发展。例如，要在地板上移动桌子，我们必须在水平方向上向桌子施加足够大的力以克服摩擦力。移动桌子所需的力的大小取决于桌子腿和地板之间的摩擦系数。当一种流体相对于固体运动或两种流体相对于彼此运动时，情况类似。我们在空气中相对容易移动，但在水中则相对不那么容易。如从滴入装有油的管中的玻璃球的缓慢下降运动所观察到的那样，在油中移动将更加困难。似乎存在代表流体对运动的内部阻力或“流动性”的特性，并且该特性是粘度。流动的流体在流动方向上施加在人体上的力称为阻力，该力的大小部分取决于粘度（图2-23）。为了获得粘度关系，请考虑两个非常大的平行板（或等效地，两个平行板浸入大量流体中）之间的流体层，它们之间的距离为𝓁（图2-24）。现在将恒定的平行力F施加到上板，同时保持下板固定。在初始瞬变之后，可以观察到上板在此力的作用下以恒定速度V连续移动。与上板接触的流体粘附到板表面并以相同的速度移动，并且作用在该流体层上的切应力𝜏为

其中A是板和流体之间的接触面积。 注意，在剪切应力的作用下，流体层连续变形。 与下板接触的流体采用该板的速度，该速度为零（由于不打滑，请参见第1-2节）。 在稳定的层流中，板之间的流体速度在0和V之间线性变化，因此速度分布和速度梯度为

其中y是距下板的垂直距离.

在微分时间间隔dt内，沿垂直线MN的流体颗粒的侧面旋转微分角d 1，而上板移动微分距离da = V dt。 角位移或变形（或剪切应变）可以表示为

重新排列，在剪切应力stress的影响下的变形率变为

因此，我们得出结论，流体元件的变形率等于速度梯度du / dy。 此外，可以通过实验验证，对于大多数流体，变形率（因此速度梯度）与剪切应力directly成正比,

在1687年艾萨克·牛顿爵士（Isaac Newton）首次提出之后，其变形速率与剪切应力成线性比例的流体被称为牛顿流体。水，空气，汽油和机油等最常见的流体是牛顿流体。 血液和液体塑料是非牛顿流体的例子。 在牛顿流体的一维剪切流中，剪切应力可以用线性关系表示

其中比例常数𝜇被称为流体的粘度系数或流体的动态（或绝对）粘度，单位为kg / m·s，或等效地为N·s / m2（或Pa·s，其中Pa是 压力单位帕斯卡）。 常见的粘度单位是泊，等于0.1 Pa·s（或厘泊，是泊的百分之一）。 水在20℃下的粘度为1.002厘泊，因此单位厘泊可用作有用的参考。 牛顿流体的剪应力与变形率（速度梯度）的关系图是一条直线，其斜率是流体的粘度，如图2-25所示。 注意，粘度与牛顿流体的变形速率无关。 由于变形率与应变率成正比，因此图2–25显示粘度实际上是应力-应变关系的一个系数.

作用在牛顿流体层上的剪切力（或根据牛顿第三定律，作用在板上的力）为

其中，A再次是板与流体之间的接触面积。 然后，当下板保持静止时，以恒定速度V移动图2-24中的上板所需的力F为

当测量到力F时，该关系可以替代地用于计算。因此，刚刚描述的实验设置可用于测量流体的粘度。注意，在相同的条件下，对于不同的流体，力F将会有很大的不同。对于非牛顿流体，剪切应力与变形率之间的关系不是线性的，如图2–26所示。 𝜏相对于du / dy图的曲线斜率称为流体的表观粘度。表观粘度随变形速率增加的流体（例如具有悬浮淀粉或沙子的溶液）被称为膨胀或剪切增稠流体，而表现出相反行为的流体（随着剪切强度的增加，粘性降低） （例如某些油漆，聚合物溶液和带有悬浮颗粒的流体）称为假塑性或剪切稀化流体。某些材料（例如牙膏）可以抵抗有限的剪切应力，因此表现为固体，但是当剪切应力超过屈服应力时会连续变形并表现为流体。此类材料在Eugene C. Bingham（1878-1945）之后被称为Bingham塑料，他在20世纪初期为美国国家标准局做了流体粘度方面的开拓性工作。在流体力学和热传递中，动态粘度与密度之比经常出现。为方便起见，该比值称为运动粘度ν，并表示为ν= 𝜇 / 𝜌。运动粘度的两个常见单位是m2 / s和冲程（1冲程= 1 cm2 / s = 0.0001 m2 / s）。通常，流体的粘度取决于温度和压力，尽管对压力的依赖性很弱。对于液体，动态粘度和运动粘度实际上都与压力无关，并且除了极高的压力外，通常不考虑压力的任何细微变化。对于气体，动态粘度（在中低压力下）也是如此，但对于运动粘度，情况并非如此，因为气体的密度与压力成正比（图2–27）。流体的粘度是其抵抗变形速率的量度。粘度是由于在流体的不同层之间被迫相对移动时在流体的不同层之间产生的内部摩擦力所致。

流体的粘度直接关系到在管道中输送流体或使物体（例如空气中的汽车或海洋中的潜水艇）通过流体移动所需的泵浦功率。粘度是由液体中的分子之间的内聚力和气体中的分子碰撞引起的，并且随温度变化很大。液体的粘度随温度降低而降低，而气体的粘度随温度升高而提高（图2–28）。这是因为分子在液体中在较高温度下拥有更多的能量，并且它们可以更强大地抵抗较大的内聚分子间力。结果，通电的液体分子可以更自由地移动。另一方面，在气体中，分子间的力可忽略不计，并且高温下的气体分子以较高的速度随机运动。这导致每单位时间每单位体积更多的分子碰撞，因此导致更大的流动阻力。气体动力学理论预测气体的粘度与温度的平方根成正比。也就是说，𝜇gas∝√T。实际观察证实了这一预测，但是需要通过结合一些校正因子来考虑不同气体的偏差。气体的粘度通过Sutherland相关性（来自美国标准大气）表示为温度的函数，表示为

其中T是绝对温度，a和b是实验确定的常数。注意，在两个不同温度下测量粘度足以确定这些常数。对于大气条件下的空气，这些常数的值为a = 1.458×10-6 kg /（m⋅s⋅K1/ 2），b = 110.4K。气体的粘度与中低压力下的压力无关（ （从1个大气压的百分之几到几个大气压）。但是由于密度增加，在高压下粘度增加。对于液体，粘度近似为

其中T再次是绝对温度，而a，b和c是实验确定的常数。对于水，使用值a = 2.414×10-5 N·s / m2，b = 247.8 K，c = 140 K，在0°C至370°C的温度范围内，粘度误差小于2.5％ （Touloukian等，1975）。表2–3列出了室温下某些液体的粘度。它们相对于温度绘制在图2–29中。注意，不同流体的粘度相差几个数量级。还应注意，在高粘度流体（例如机油）中移动物体比在低粘度流体（例如水）中移动物体更困难。通常，液体比气体粘稠得多。考虑两个同心圆柱体之间的小间隙内厚度为thickness的流体层，例如轴颈轴承中的薄油层。圆柱体之间的间隙可以建模为被流体分隔开的两个平行平板。注意到扭矩为T = FR（力乘以力矩臂，在这种情况下为内圆柱体的半径R），切向速度为V = 𝜔R（角速度乘以半径），并取湿润面积为忽略作用在内筒两端的剪应力，将内筒设为A =2πRL，扭矩可以表示为

其中L是圆柱体的长度，而n是。 是每单位时间的转数，通常以rpm（每分钟转数）表示。 请注意，旋转一圈所经过的角距离为2πrad，因此角速度rad / min与rpm之间的关系为𝜔 =2πn。公式2–38可用于通过测量来计算流体的粘度 在指定角速度下的最大扭矩。 因此，可以使用两个同心圆柱体作为粘度计的粘度计。

2.7 表面张力和毛细效应 2021年5月17日14点21分

经常观察到，一滴血在水平玻璃杯上形成驼峰。一滴水银会形成一个近乎完美的球体，可以像钢球一样在光滑的表面上滚动；雨水或露水产生的水滴挂在树枝或树叶上；注入发动机的液体燃料形成球形液滴的薄雾；从漏水的龙头滴下的水几乎落成球形水滴；释放到空气中的肥皂泡几乎形成球形。和水珠在花瓣上滴成小滴（图2–31a）。在这些和其他观察中，液滴的行为就像充满液体的小气球，而液体的表面在张力下的作用就像拉伸的弹性膜。引起该张力的拉力平行于表面起作用，并且是由于液体分子之间的吸引力所致。每单位长度的该力的大小称为表面张力或表面张力系数𝜎s，通常以N / m单位（或英制lbf / ft）表示。该效应也称为表面能（每单位面积），用N·m / m2或J / m2的等效单位表示。在这种情况下，𝜎s表示为使液体的表面积增加单位量而需要进行的拉伸功。为了可视化如何产生表面张力，我们在图2–32中给出了微观视图，其中考虑了两个液体分子，一个在表面，一个在液体体内深处。由于对称性，周围分子施加在内部分子上的吸引力相互平衡。但是作用在表面分子上的吸引力不是对称的，上方气体分子施加的吸引力通常很小。因此，存在作用在液体表面上的分子上的净吸引力，其倾向于将表面上的分子拉向液体内部。该力由试图压缩的表面以下分子的排斥力平衡。结果是液体最小化其表面积。这是液滴趋于形成球形的原因，其对于给定的体积具有最小的表面积。

您可能还发现，有些昆虫会很有趣地发现它们会落在水上甚至在水上行走（图2–31b），并且细小的钢针会漂浮在水上。通过平衡这些物体重量的表面张力使这些现象成为可能。为了更好地了解表面张力效果，请考虑将液体薄膜（例如肥皂泡薄膜）悬挂在带有可移动侧的U形线架上（图2–33）。通常，液膜倾向于将可动线向内拉，以使其表面积最小。需要以相反的方向在可动线材上施加力F，以平衡这种拉力效果。薄膜的两面都是暴露于空气的表面，因此在这种情况下作用于表面张力的长度为2b。然后，可移动线上的力平衡为F = 2b𝜎s，因此表面张力可以表示为

注意，对于b = 0.5 m，测得的力F（单位为N）仅是表面张力，单位为N / m。这种具有足够精度的设备可以用于测量各种液体的表面张力。在U形线框装置中，可动线被拉动以拉伸膜并增加其表面积。当将可移动线拉出距离Δx时，表面积增加ΔA= 2bΔx，并且在此拉伸过程中完成的功W为

我们假设力在短距离内保持恒定。该结果也可以解释为在拉伸过程中薄膜的表面能增加了𝜎sΔA，这与𝜎s作为单位面积的表面能的另一种解释是一致的。这类似于在进一步拉伸后具有更多势能（弹性）的橡皮筋。在液膜的情况下，该工件用于抵抗其他分子的吸引力将液体分子从内部移动到表面。因此，表面张力也可以定义为液体表面积每增加一单位所完成的功。对于每种物质，表面张力随物质的不同而有很大差异，对于给定物质，其温度如表2-4所示。例如，在20°C下，被空气包围的水的表面张力为0.073 N / m，汞的表面张力为0.440 N / m。汞的表面张力足够大，以至于汞滴形成几乎球形的球，可以像实心球一样在光滑的表面上滚动。通常，液体的表面张力会随温度降低而在临界点处变为零（因此，在临界点以上的温度下没有明显的液体-蒸汽界面）。压力对表面张力的影响通常可以忽略不计。

物质的表面张力会因杂质而发生很大变化。因此，可以将某些化学物质（称为表面活性剂）添加到液体中以降低其表面张力。例如，肥皂和洗涤剂会降低水的表面张力，并使水能够渗透到纤维之间的小孔中，从而更有效地进行洗涤。但是，这也意味着，由于工艺差而导致杂质的存在，会破坏其运行取决于表面张力的设备（例如热管）。我们说的是液体仅在液-液或液-气界面处的表面张力。因此，当指定表面张力时，必须指定相邻的液体或气体。表面张力决定了形成的液滴的大小，因此当表面张力不再将其保持在一起时，通过添加更多质量而保持增长的液滴会分解。这就像一个气球，当内部压力超过气球材料的强度时，它会在膨胀时破裂。弯曲的界面表示跨界面的压差（或“压力跃变”），其中凹面一侧的压力较高。考虑例如空气中的液滴，水中的气泡（或其他气体）或空气中的肥皂泡。高于大气压的过压ΔP可以通过考虑一半液滴或气泡的自由图来确定（图2–34）。注意表面张力沿圆周作用，压力作用于区域，液滴或气泡的水平力平衡，而肥皂泡产生

其中Pi和Po分别是液滴或气泡内部和外部的压力。 当液滴或气泡在大气中时，Po只是大气压。 肥皂泡的力平衡中的额外因子2是由于存在具有两个表面（内表面和外表面）的肥皂膜，因此在横截面上有两个圆周。 气体中液滴（或液体中气泡）中的过大压力也可以通过考虑由于增加了不同质量量而引起的液滴半径差异的增加并解释表面来确定。 张力随着单位面积表面能的增加而增加。 然后，在此微分膨胀过程中，液滴的表面能增加

在此微分过程中完成的膨胀功是通过将力乘以距离来确定的

公式化以上两个表达式可得出ΔPdroplet= 2𝜎s / R，这与在公式2–40中之前获得的和给出的关系相同。 注意，液滴或气泡中的过大压力与半径成反比。

毛细作用

表面张力的另一个有趣的结果是毛细作用，这是插入小直径管中的液体的上升或下降。这种狭窄的管子或狭窄的流动通道称为毛细管。由于这种作用，煤油通过插入到煤油灯储槽中的棉芯而上升。毛细作用还部分导致水上升到高大的树木顶部。毛细管中液体的弯曲自由表面称为弯液面。通常观察到，玻璃容器中的水在其接触玻璃表面的边缘略微向上弯曲。但是汞则相反：它在边缘处向下弯曲（图2–35）。这种效果通常表示为水润湿玻璃（通过粘附在玻璃上）而汞却不润湿。毛细作用的强度通过接触角（或润湿角）来量化，接触角定义为在接触点处与液体表面的切线与固体表面所成的角度。表面张力沿着该切线朝向固体表面作用。当ϕ <90°时，称液体润湿表面，而当ϕ> 90°时，则不润湿表面。在大气中，水（和大多数其他有机液体）与玻璃的接触角几乎为零，ϕ≈0°（图2–36）。因此，表面张力沿圆周向上作用在玻璃管中的水上，趋向于将水向上拉。结果，水在管中上升，直到管中的液体重量超过储液器液位为止，才使表面张力平衡。汞玻璃在空气中的接触角为130°，煤油玻璃在空气中的接触角为26°。请注意，通常，接触角在不同的环境中会有所不同（例如，用另一种气体或液体代替空气）。毛细管效应的现象可以通过考虑内聚力（类似分子之间的力，例如水和水）和粘着力（不同分子之间的力，例如水和玻璃）来微观地解释。固液界面处的液体分子既受到其他液体分子的内聚力，又受到固体分子的粘附力。这些力的相对大小确定液体是否润湿固体表面。显然，与其他水分子相比，水分子对玻璃分子的吸引力更大，因此水倾向于沿着玻璃表面上升。汞则相反，这会导致玻璃壁附近的液体表面受到抑制（图2–37）。

圆形管中毛细管上升的幅度可以根据管中高度为h的圆柱状液柱上的力平衡来确定（图2–38）。 液柱的底部与储存器的自由表面处于同一高度，因此压力必须为大气压。 这平衡了作用在液柱顶面上的大气压，因此这两种作用相互抵消。 液柱的重量约为

将表面张力的垂直分量等于重量

求解h使毛细管上升为

该关系也适用于不润湿的液体（例如玻璃中的汞）并产生毛细滴。在这种情况下，ϕ> 90°，因此cos ϕ <0，这使h变为负数。因此，毛细血管上升的负值对应于毛细血管下降（图2–37）。注意，毛细管上升与管的半径成反比。因此，管越细，管中液体的上升（或下降）越大。实际上，在直径大于1 cm的管中，水的毛细作用通常可以忽略不计。使用压力计和气压计进行压力测量时，重要的是要使用足够大的试管，以最大程度地减少毛细管效应。如所预期的，毛细管上升也与液体的密度成反比。因此，一般而言，较轻的液体会出现更大的毛细管上升。最后，应记住，方程2-42是针对恒定直径的管得出的，不应用于变截面的管。