第一章 流体的基本性质

1.1 流体的定义

流体的定义：在任何微小的剪切力的作用下都能够发生连续变形的物质称为流体。通俗的说法就是，能够流动的物质叫流体。

A *fluid* is a substance which *deforms* continuously under the application of a *shear stress.*

1.2 流体的特性

- 流体的易流动性 (fluidity)
- 流体的易变形形 (deformability)
- 流体的粘性 (viscosity)
- 流体的可压缩性 (compressibility)

1.2.1 流体的易流动性

流体的易流动性：流体间的分子作用力较小，很难象固体那样保持一定的固定形状，只要有外界的作用力或能量(势能)不平衡，就会发生流动。

固体：分子间作用力大，分子只能在平衡位置作微小振动，有固定形状，能承受压力，拉力，剪切力。

气体：分子间作用力很小，分子接近自由运动，没有固体形状和体积，不能承受拉力，剪切力。

液体：分子间作用力介于固体和气体之间，没有固体形状，但有一定的体积，不能承受拉力，剪切力。

1.2.2 流体的易变形性

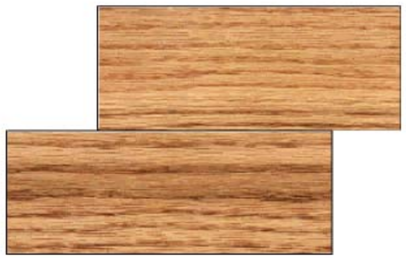
流体的易变形性：在受到剪切力持续作用时，固体的变形一般是微小的(如金属)或有限的(如塑料)，但流体却能产生很大的甚至无限大(只作用时间无限长)的变形。

- 当剪切力停止作用后，固体变形能恢复或部分恢复，流体则不作任何恢复。
- 在弹性范围内，固体变形与作用力成正比，遵守Hooke定律，固体内的切应力由剪切变形量(位移)决定；而流体内的切应力与变形量无关，由变形速度(切变率)决定，遵守Newton内摩擦定律。

1.2.3 流体的粘性

流体的粘性： 当相邻两层流体之间发生相对运动时，在两层流体的接触面会产生对于变形的抗力，与固体不同的是，这种抗力不是与流体的变形大小有关，而是与流体的变形速度成比例，流体这种抵抗变形的特性就称为粘性。

固体： 固体表面之间的摩擦是滑动摩擦，即摩擦力，摩擦力与固体表面状况有关。

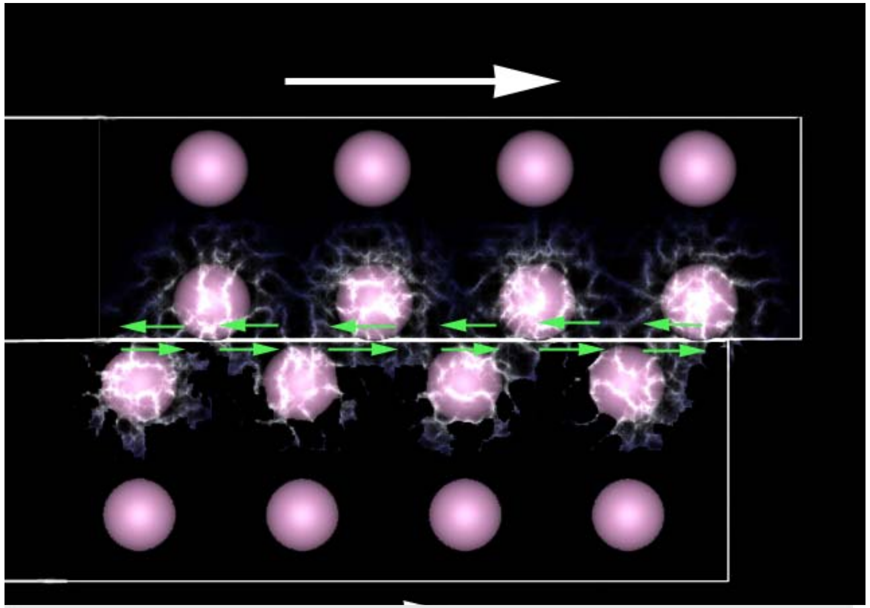


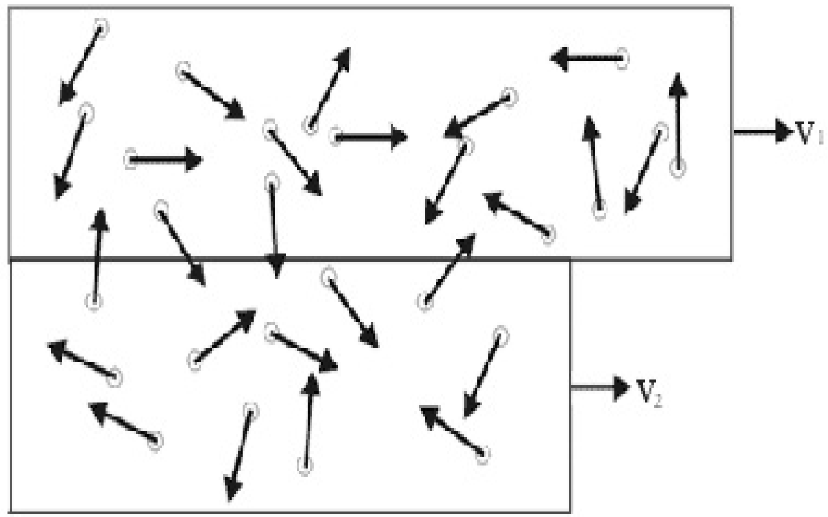
1.2.3 流体的粘性

液体： 当两层液体作相对运动时，两层液体分子的平均距离加大，吸引力随之增大，这就是**分子内聚力**。

气体： 气体分子的随机运动范围大，流层之间的分子交换频繁。两层之间的分子动量交换表现为力的作用，称为**表观切应力**。

流体的粘性就是由**内摩擦**产生，是两层流体间分子内聚力和分子动量交换的宏观表现。**液体粘性**主要取决于分子间的引力，**气体粘性**主要取决于分子的热运动。



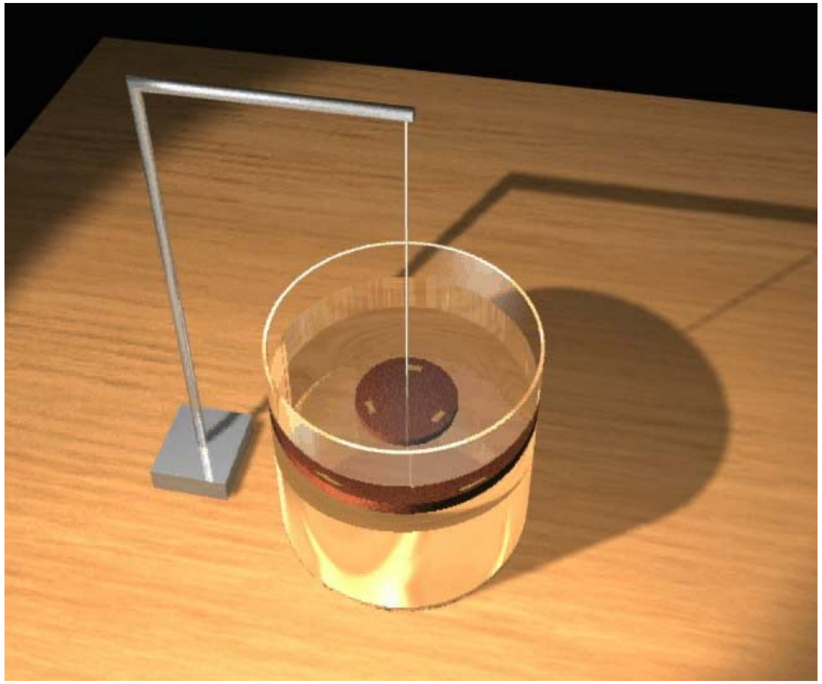


1.2.3 流体的粘性

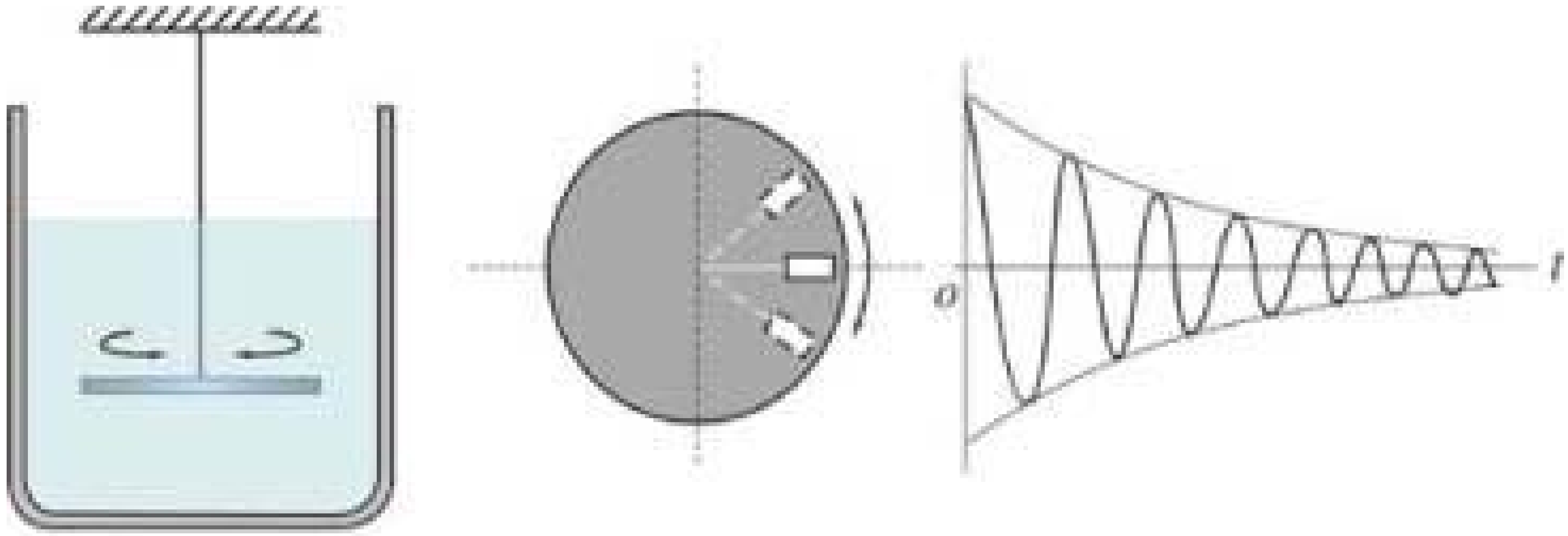
流体的粘性：流体流动时产生内摩擦力的性质称为流体的粘性。

流体内摩擦的概念最早由牛顿(I. Newton, 1687)提出。由库仑(C.A. Coulomb, 1784)用实验得到证实。

库仑把一块薄圆板用细金属丝平吊在液体中，将圆板绕中心转过一角度后放开，靠金属丝的扭转作用，圆板开始往返摆动，由于液体的粘性作用，圆板摆动幅度逐渐衰减，直至静止。库仑分别测量了普通板、涂腊板和细沙板，三种圆板的衰减时间。



1.2.3 流体的粘性



三种圆板的衰减时间均相等。

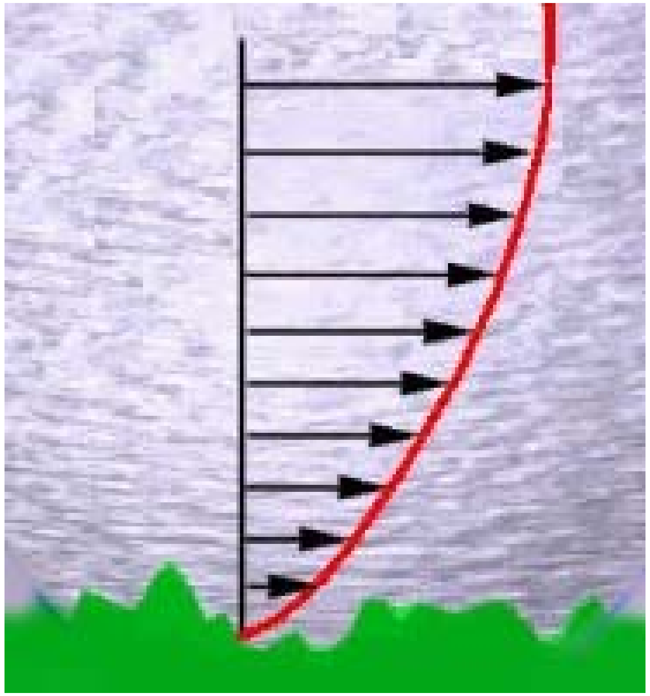
库仑得出结论：衰减的原因，不是圆板与液体之间的相互摩擦 ，而是液体内部的摩擦 。

1.2.3 流体的粘性

壁面无滑移条件(no-slip condition)

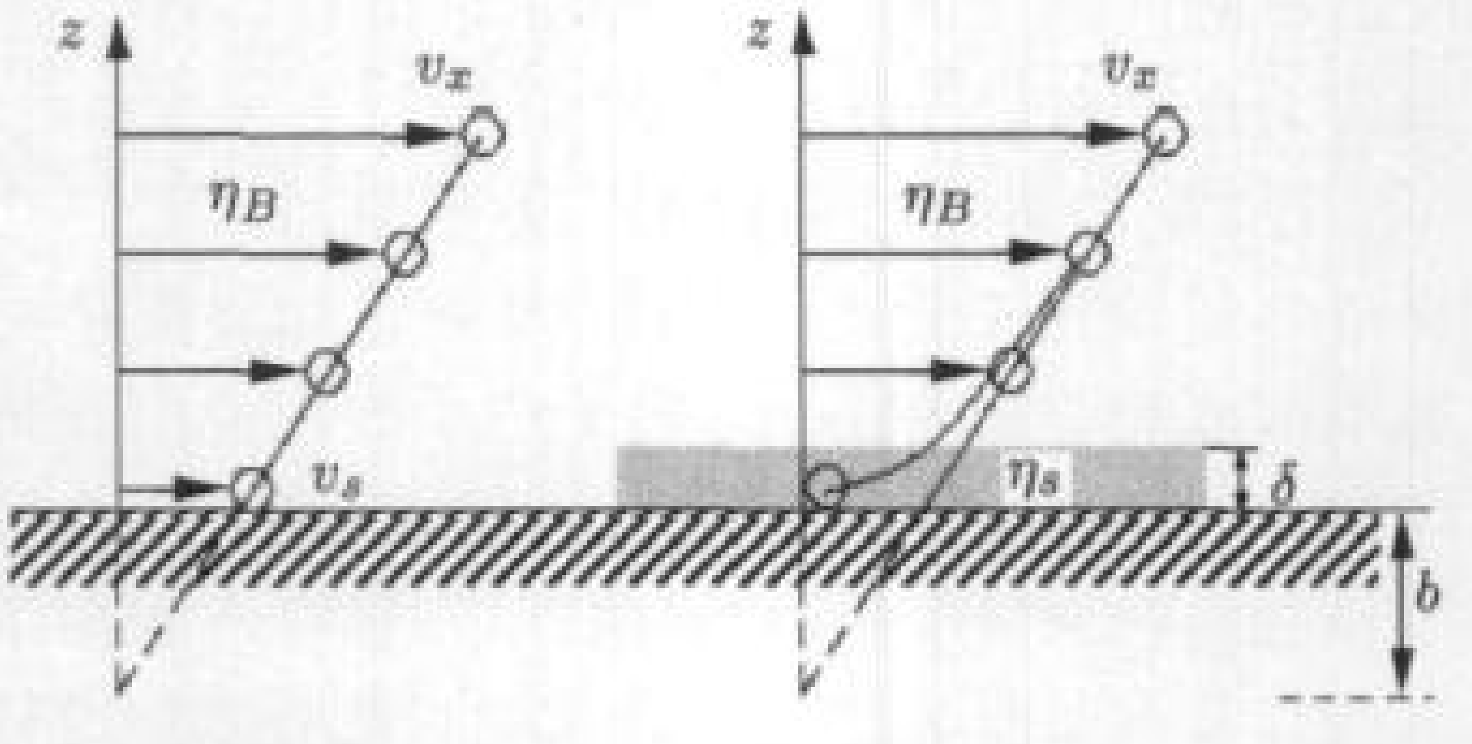
壁面不滑移假设

由于流体的易变形性，流体与固壁可实现分子量级的粘附作用。通过分子内聚力使粘附在固壁上的流体质点与固壁一起运动。即：流体与固体表面可实现分子量级的接触，达到表面不滑移。



- 库仑实验间接地验证了壁面不滑移假设；
- 壁面不滑移假设已获得大量实验证实，被称为壁面不滑移条件（no-slip condition）。

边界不可滑移条件



(a) 真实滑移　　(b) 表观滑移

1.2.3 流体的粘性

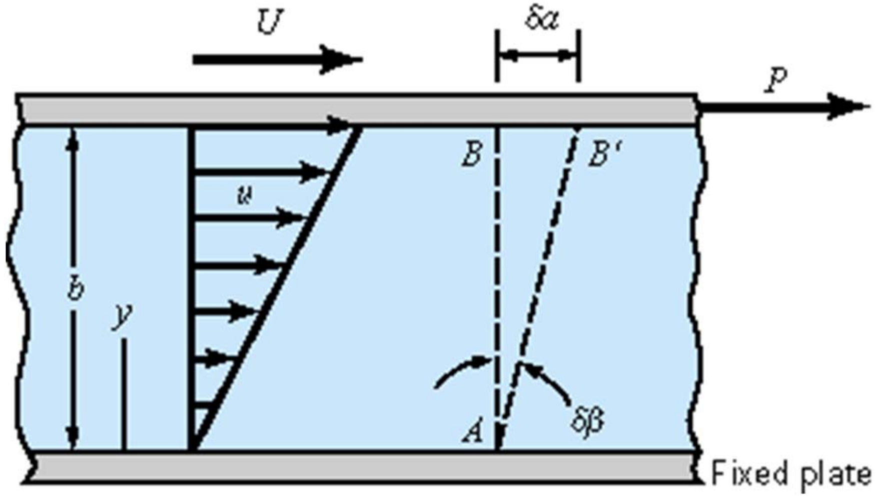
牛顿内摩擦定律

两板之间速度存在线性分布：

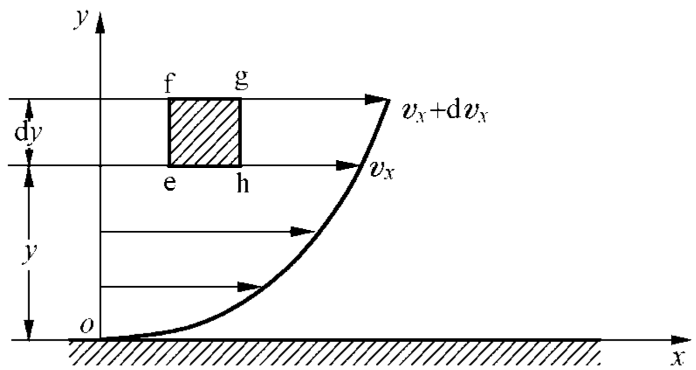
$$u(y) = Uy / b$$

剪应力与流体变形率成正比：

$$\frac{F}{A} = \tau \propto U / b$$



牛顿粘性(内摩擦)定律：粘性切应力与速度梯度成正比，比例系数称粘性系数(coefficient of viscosity)，也称为动力粘度。



$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

#与固体的虎克定律作对比：

$$f = kx$$

1.2.3 流体的粘性

粘 度

μ的全称为动力粘度(dynamic viscosity),根据牛顿粘性定律可得:

$$\mu = \frac{\tau}{du/dy}$$

单位: $\mu = \text{牛顿} \bullet \text{秒}/\text{米}^2 = N \bullet s/m^2 = kg/(s \bullet m) = \text{帕} \bullet \text{秒} = Pa \bullet s$

工程中常常用到运动粘度(kinematic viscosity)用下式表示:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

单位: $\nu = \text{米}^2/\text{秒} = m^2/s$

这里, ρ是流体密度, 单位: $\rho = \text{千克}/\text{米}^3 = kg/m^3$

1.2.3 流体的粘性

- 常温常压下水的动力粘度是空气的55.4倍

水 $$\mu = 1\times10^{-3}\,\mathrm{Pa\cdot s} = 0.01\mathrm{P}$$

空气 $$\mu = 1.8\times10^{-5}\,\mathrm{Pa\cdot s} = 0.00018\mathrm{P}$$

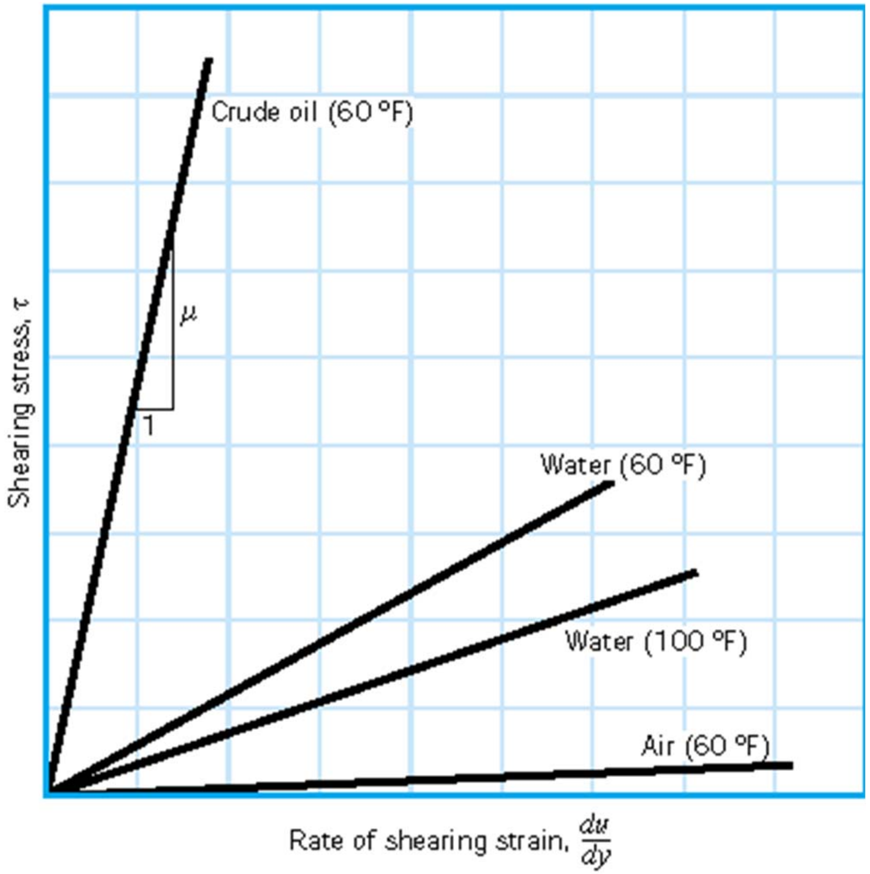
- 常温常压下空气的运动粘度是水的15倍

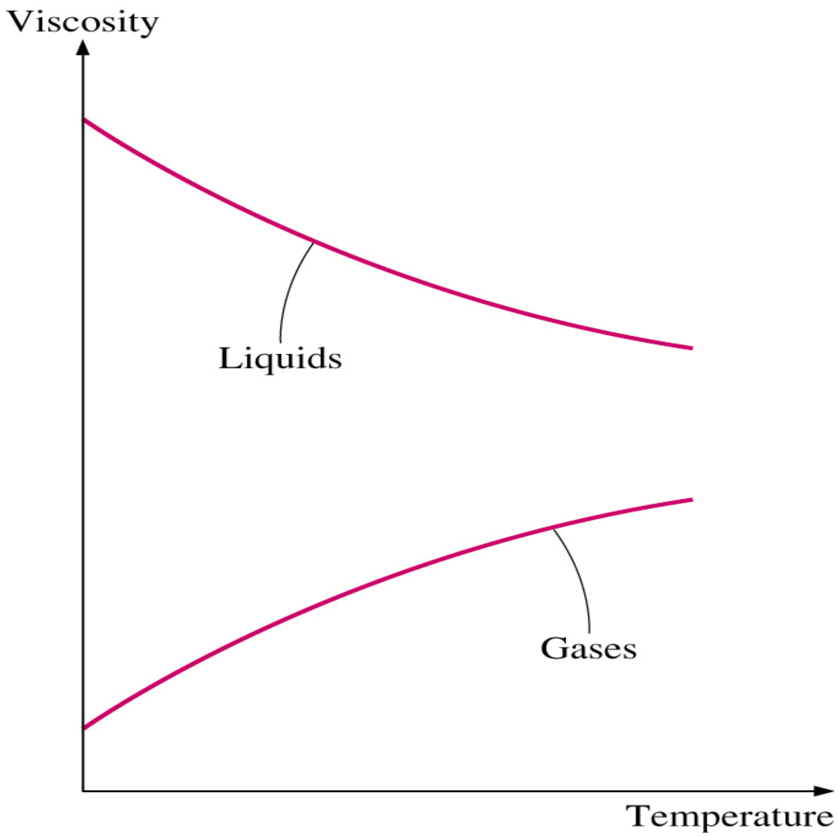
水 $$\nu = 1\times10^{-6}\,\mathrm{m^2/s} = 0.01\mathrm{cm^2/s}$$

空气 $$\nu = 15\times10^{-5}\,\mathrm{m^2/s} = 0.15\mathrm{cm^2/s}$$

1.2.3 流体的粘性

粘度一般仅随温度变化，液体温度升高粘度减小，气体温度升高粘度增大。

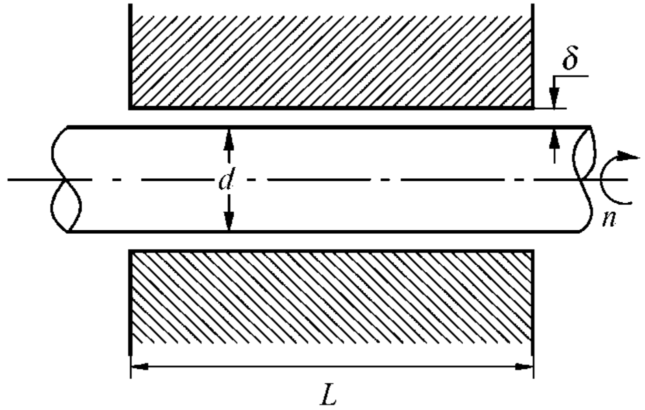


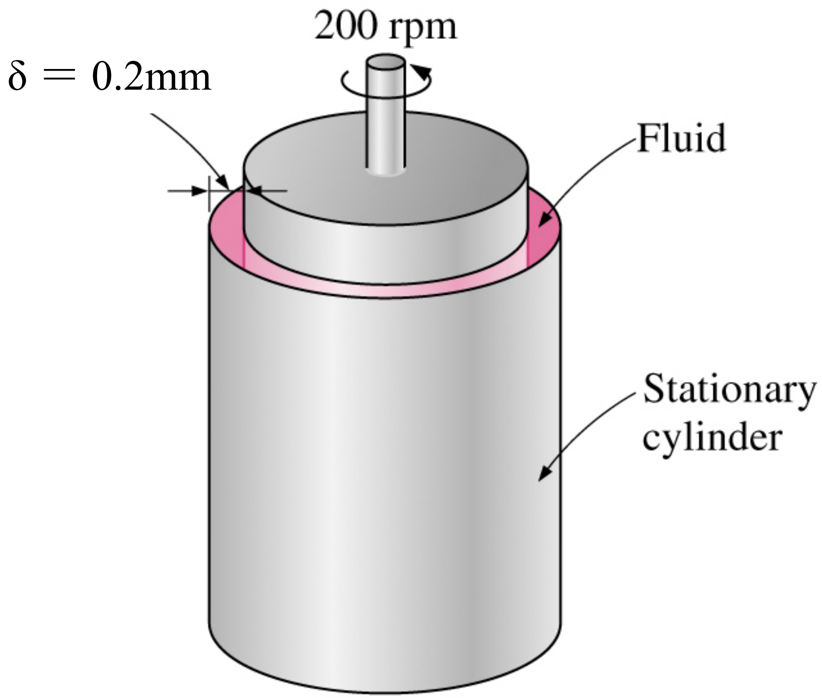


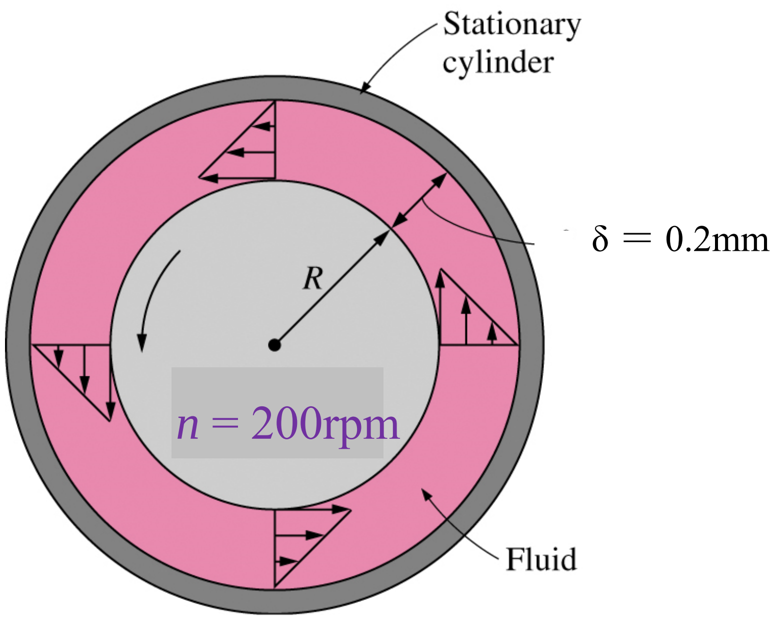
牛顿内摩擦定律

例 子 1

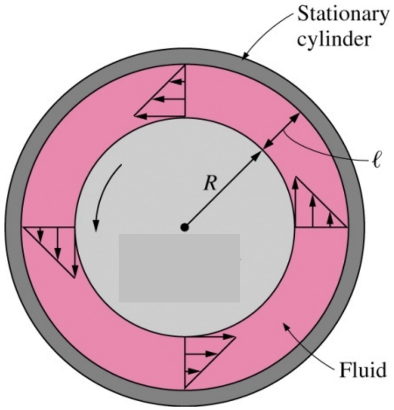
如图所示，转轴直径 $d = 0.36$m，轴承长度$L = 1$m，轴与轴承之间的缝隙 $\delta = 0.2$mm，其中充满动力粘度 $\mu = 0.72$ Pa.s的油，如果轴的转速 $n = 200$rpm，求克服油的粘性阻力所消耗的功率。

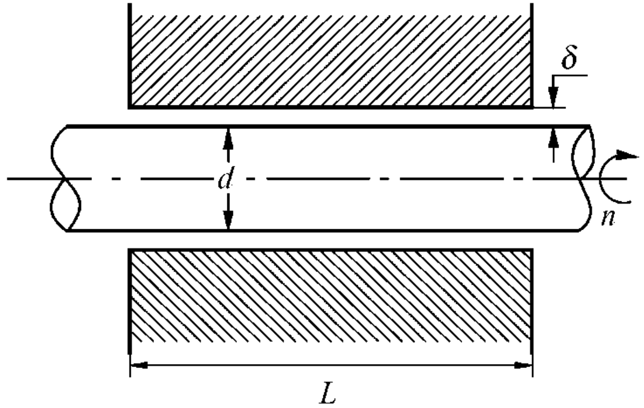






牛顿内摩擦定律





解：油层与轴承接触面上的速度为零，与轴接触面上的速度等于轴面上的线速度：

$$U=\omega r=2\pi\frac{n}{60}\frac{d}{2}=\frac{n\pi d}{60}=\frac{\pi\times200\times0.36}{60}=3.77m/s$$

油层的缝隙很小，在油层缝隙内的速度分布可近似认为线性分布，即则轴表面上总的切向力 为：

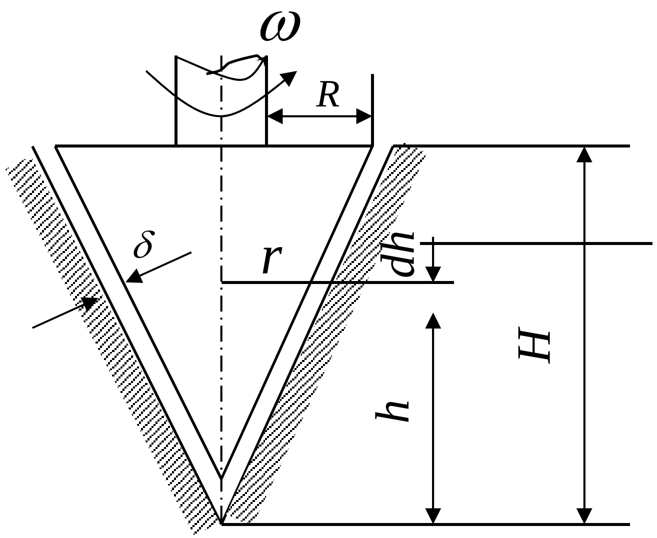
$$T=\tau A=\mu\frac{U}{\delta}(\pi d L)=\frac{0.72\times3.77\times\pi\times0.36\times1}{2\times10^{-4}}=1.535\times10^{4}(N)$$

克服摩擦所消耗的功率为：

$$N=TU=1.535\times10^{4}\times3.77=5.79\times10^{4}(Nm/s)=57.9(kW)$$

牛顿内摩擦定律

例 子 2



一圆锥体绕竖直中心轴等速旋转，锥体与固定的外锥体之间的隙缝 δ = 1 mm，其中充满 μ = 0.1 Pa·s的润滑油。已知锥体顶面半径 *R* = 0.3 m，锥体高度*H* = 0.5 m，当旋转角速度ω = 16 1/s时，求所需要的旋转力矩。

解： 如图所示，旋转力矩的微元表达式

$$dM = \tau \cdot dA \cdot r = \mu \frac{du}{dy} dA \cdot r$$

(1) 锥体半径*r*的变化规律 $r = h \cdot \tan\theta$

(2) 对应 *dh* 的 *dA* 表达式

$$dA = 2\pi r \cdot \frac{dh}{\cos\theta} = 2\pi h \tan\theta \frac{dh}{\cos\theta}$$

牛顿内摩擦定律

（3）因为δ很小，可认为速度分布为线性分布

$$\frac{du}{dy}=\frac{u}{\delta}=\frac{\omega r}{\delta}=\frac{\omega}{\delta}h\tan\theta$$

将上三式代入dM表达式中，整理得

$$dM=\mu\cdot\frac{\omega}{\delta}=2\pi\tan^{3}\theta\frac{1}{\cos\theta}h^{3}dh$$

（4）求总力矩

$$M=\int dM=2\pi\mu\frac{\omega}{\delta}\frac{\tan^{3}\theta}{\cos\theta}\int_{0}^{H}h^{3}dh=\frac{\pi\mu\omega}{2\delta}\frac{\tan^{3}\theta}{\cos\theta}H^{4}$$

代入已知数据，解得

$$M=39.6\ (\mathrm{N\cdot m})$$

(其中 $\tan\theta=\frac{R}{H}=\frac{0.3}{0.5}=0.6$，求得 $\theta=31^{o}$，$\cos\theta=0.857$)

1.2.3 流体的粘性

粘性流体和理想流体

- 实际流体（粘性流体，viscous fluid）

实际中的流体都具有粘性，因为都是由分子组成，都存在分子间的引力和分子的热运动，故都具有粘性，所以，粘性流体也称实际流体。

- 理想流体 (ideal fluid)： 假想没有粘性的流体。

具有实际意义：

在有些问题中，流体的粘性显示不出来，如均匀流动、流体静止状态，这时实际流体可以看成理想流体。所以建立理想流体模型具有非常重要的实际意义。

一些情况下基本上符合粘性不大的实际流体的运动规律，可用来描述实际流体的运动规律，如空气绕流圆柱体时，边界层以外的势流就可以用理想流体的理论进行描述。

由于实际流体存在粘性使问题的研究和分析非常复杂，甚至难以进行，为简化起见，引入理想流体的概念。一些粘性流体力学的问题往往是根据理想流体力学的理论进行分析和研究的。

1.2.3 流体的粘性

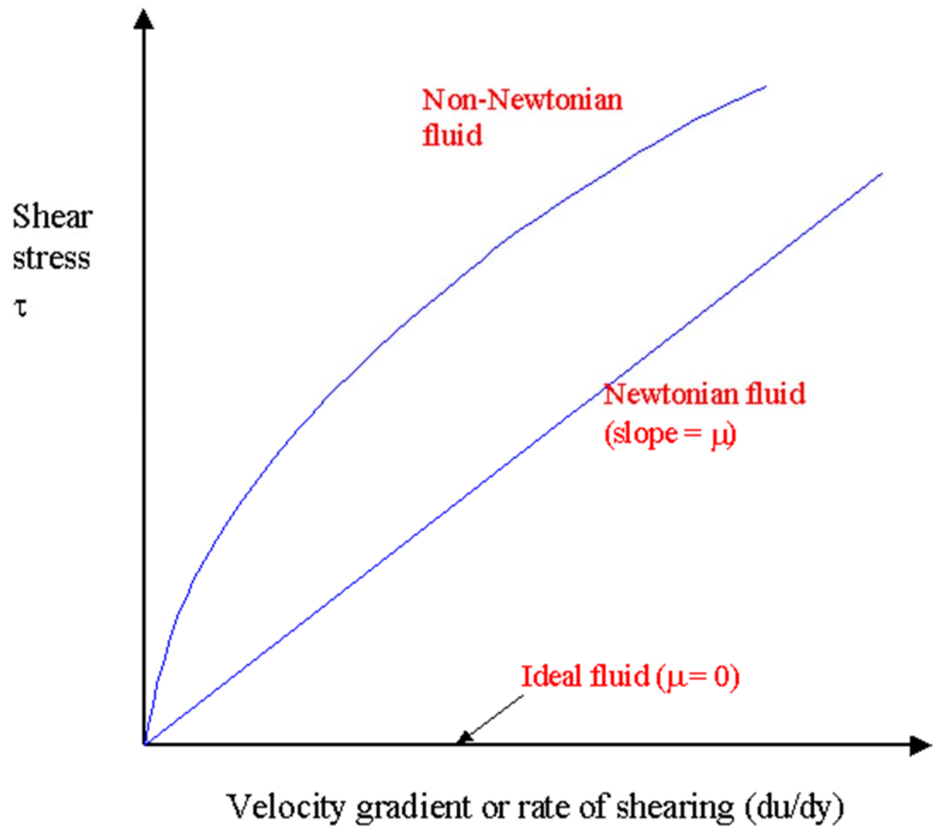
生顿流体和非生顿流体

生顿流体：（Newtonian fluids）
剪应力和变形速率满足线性关系。

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

非生顿流体：（non-Newtonian fluids）剪切应力和变形速率之间不满足线性关系的流体。

$$\tau = \mu(T, p)\left(\frac{du}{dy}\right)^2$$



1.2.4 流体的压缩性

流体的压缩性

在一定的温度下，单位压强增量引起的体积变化率定义为流体的压缩性系数(coefficients of compressibility)，其值越大，流体越容易压缩，反之，不容易压缩。

定义式：

$$k=-\frac{dV/V}{dp}=-\frac{dV}{Vdp}$$

单位：k＝米^2/牛顿$=m^2/N$

这里，V是单位质量流体的体积，p是压力。

体积弹性模量(bulk modulus)：

$$K=\frac{1}{k}=-\frac{Vdp}{dV}$$

其值越大，流体越不容易压缩，反之，就容易压缩。

1.2.4 流体的压缩性

流体的密度

单位体积内流体所具有的质量，表征流体在空间的密集程度。

密度 $$\rho = \lim_{\Delta V \to 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \qquad (kg/m^3)$$

均质流体 $$\rho = \frac{m}{V}$$

比容： 密度的倒数 $$V = \frac{1}{\rho}$$

相对密度 $$d = \rho_f / \rho_w$$

式中ρ_f —— 流体的密度；

ρ_w —— 4℃时水的密度。

1.2.4 流体的压缩性

由比容和密度关系： $V = \dfrac{1}{\rho}$

得 $V\rho = 1$， 微分后得： $\rho\, dV + V\, d\rho = 0$

这样，流体的压缩性系数可以写成：

$$k = -\frac{dV/V}{dp} = -\frac{dV}{Vdp} = \frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dp}$$

体积弹性模量可以写成：

$$K = \frac{1}{k} = -\frac{Vdp}{dV} = \rho\frac{dp}{d\rho}$$

1.2.4 流体的压缩性

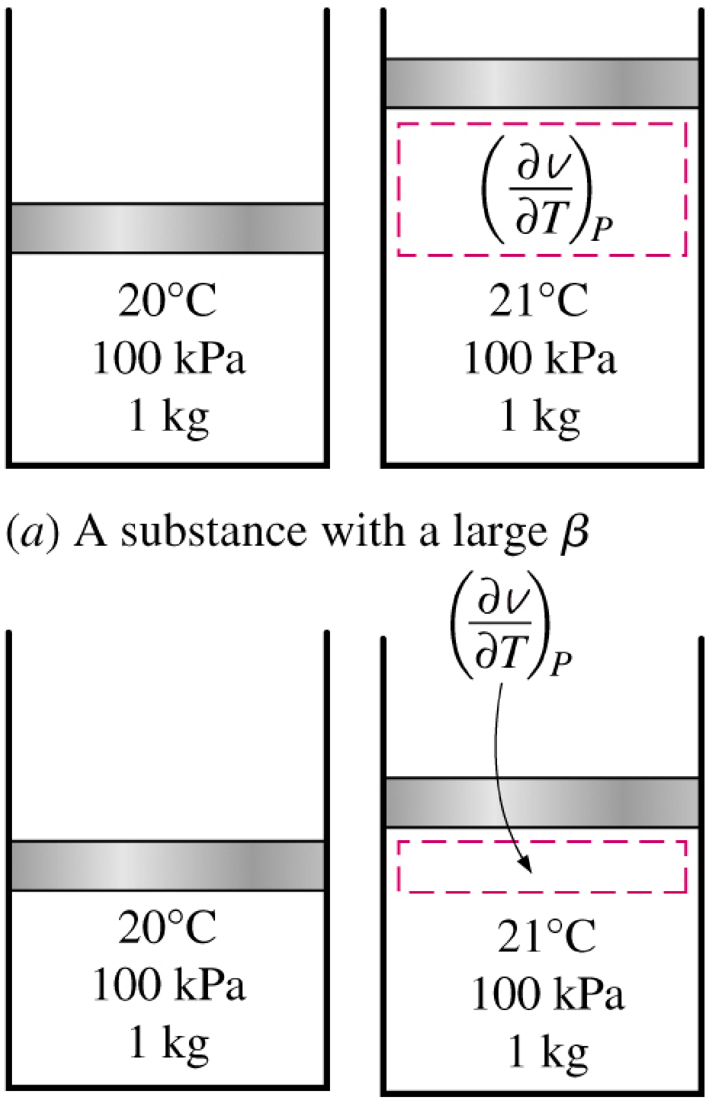
流体的膨胀性(dilatability)

当压强一定时，流体温度变化体积改变的性质称为流体的膨胀性，膨胀性的大小用温度膨胀系数来表示。

膨胀性系数 $$\beta = \frac{dV/V}{dT} = \frac{1}{V}\frac{dV}{dT} = -\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dT}$$

式中 dT 为温度增量；dV/V 为相应的体积变化率。由于温度升高体积膨胀，故二者同号。膨胀性系数的单位为1/K或1/℃。

1.2.4 流体的压缩性



(a) A substance with a large β

(b) A substance with a small β

1.2.4 流体的压缩性

可压缩流体和不可压缩流体

压缩性系数和膨胀系数为0的流体称为不可压缩流体(incompressible fluid)，也就是密度不随压力和温度改变而改变，否则就称为可压缩流体(compressible fluid)。

气体和液体都是可压缩的，但通常将气体视为可压缩流体，把液体视为不可压缩流体。

例外：水下爆炸，水要视为可压缩流体；当气体流速比较低时，可以视为不可压缩流体。

1.3 流体连续介质模型

连续介质模型

将流体作为由无穷多稠密、没有间隙的流体质点构成的连续介质，这就是1755年欧拉提出的“连续介质模型”。

在连续性假设之下，表征流体状态的宏观物理量如速度、压强、密度、温度等在空间和时间上都是连续分布的，都可以作为空间和时间的连续函数。

流体质点：包含有足够多流体分子的微团，在宏观上流体 微团的尺度和流动所涉及的物体的特征长度相比充分的小，小到在数学上可以作为一个点来处理。而在微观上，微团的尺度和分子的平均自由行程相比又要足够大。