



第一章 绪论

一、流体的定义及连续介质模型

二、流体的主要性质



粘性
可压缩性

三、作用在流体上的力



1.2 流体质点与连续介质概念

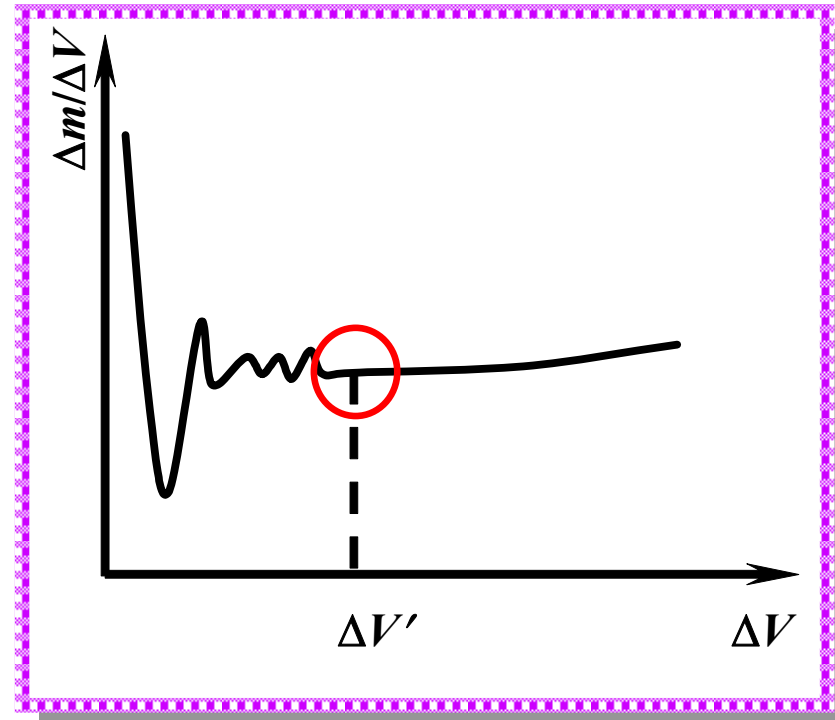
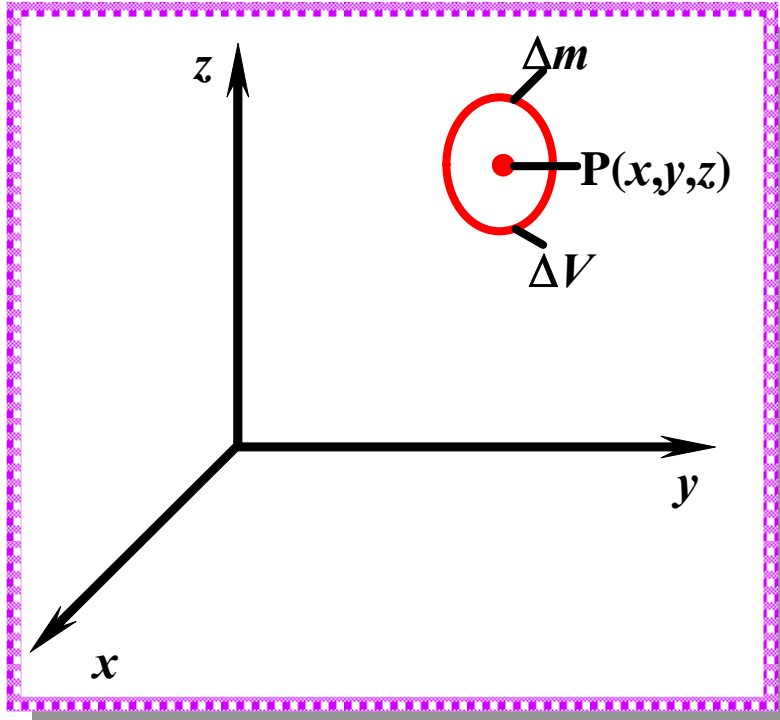
流体的定义

	形状	体积	压力	拉力	剪切力
固体	✓	✓	✓	✓	✓
液体	×	✓	✓	-	×
气体	×	×	✓	×	×

任意微小剪切力持续作用下发生连续变形的物质称为流体



流体质点1



$\Delta V'$



特征体积



流体质点2

特征体积

① 宏观上充分小 

特征体尺度 \ll 流动问题特征长度

☞ 在数学上可近似地看成一个几何上没有维度的点

② 微观上充分大 

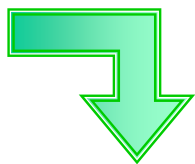
分子平均自由程 \ll 特征体尺度

☞ 包含大量的分子，对分子团进行统计平均后可以得到稳定数值，少数分子的进出不影响稳定的平均值



流体质点3

流体质点



微小特征体，包含大量分子，具有特定的宏观统计特性

⑩ 分子平均自由程 \ll 流体质点尺度
 \ll 流动问题的特征长度



连续介质模型4

连续介质模型

- 组成流体的最小物质实体是流体质点
- 流体由无限多的流体质点连绵不断地组成，质点之间无间隙

适用条件 

分子平均自由程 \ll 流动问题特征尺寸

不适用  稀薄气体，激波层内等



1.3 流体的密度、比容和相对密度

密度



$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV}$$

$$\text{kg/m}^3$$
$$\Delta V \rightarrow \Delta V'$$

任意时刻流体质量在空间的分布状态

比容



$$v = \frac{1}{\rho}$$

$$\text{m}^3/\text{kg}$$

重度



$$\gamma = \rho g$$

$$\text{N/m}^3$$



相对密度

相对密度



$$d = \frac{m}{m_w} = \frac{\rho}{\rho_w} = \frac{v_w}{v}$$

- ④ 物体质量与同样体积 4°C 蒸馏水质量之比
- ④ 4°C 蒸馏水的密度 $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$



1.4 流体的可压缩性

可压缩性的定义



压强变化引起流体体积或密度变化的属性





体积压缩系数

体积压缩系数
(压缩率)



$$\kappa_T = -\frac{dV/V}{dp}$$

① 增加单位压强引起的体积的相对改变量

② 体积压缩系数



流体可压缩性





体积弹性模量1

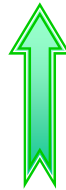
体积弹性模量



$$E_V = -\frac{dp}{dV/V} = \frac{1}{\kappa_T}$$

Pa

① 体积弹性模量



流体可压缩性



② 体积弹性模量的另一种表达形式



$$E_V = \frac{dp}{d\rho/\rho}$$



体积弹性模量2 - 液体

液体



$$E_V = f(p, T)$$

压强与密度无简单表达式，液体的体积弹性模量很大，压缩性很小

标压下水的体积弹性模量与温度的关系

温度(°C)	0	10	20	50	100
E_V (Pa)	2.02×10^9	2.1×10^9	2.18×10^9	2.29×10^9	2.07×10^9



体积弹性模量3 - 气体

气体



根据过程方程、状态方程求解

④ 等温过程

$$\frac{p}{\rho} = C$$



$$E_v = p$$

④ 等熵过程

$$\frac{p}{\rho^\kappa} = C$$



$$E_v = \kappa p$$

	水	空气 (等温/标压)
E_v	2.1×10^9	1.013×10^5



可压缩和不可压缩流体1

不可压缩流体

④ 均质不可压缩流体 \Rightarrow $\rho = \text{const}$



$$E_V \rightarrow \infty$$

④ 流体都具有可压缩性，不可压缩流体是一种假想的模型



可压缩和不可压缩流体2

液体



不可压缩

④ 水击、水下爆炸等必须考虑可压缩性

气体




可压缩

④ 低速流动且温差不大的气体可认为是不可压缩的




流体的可压缩性 - 例题1

例：把 20°C 水在 1atm 下压缩 1% 所需的压强变化

解： $E_V = -\frac{dp}{dV/V}$  $E_V = -\frac{\Delta p}{\Delta V/V}$

查表1-5 $E_V = 2.18 \times 10^9 \text{ Pa}$

 $\Delta p = 2.18 \times 10^9 \times 0.01 = \underline{\underline{2.18 \times 10^7}} \text{ (Pa)}$



流体的可压缩性 - 例题2

例：求空气在标准大气压下等熵压缩 50% 时压强需增加到多少？

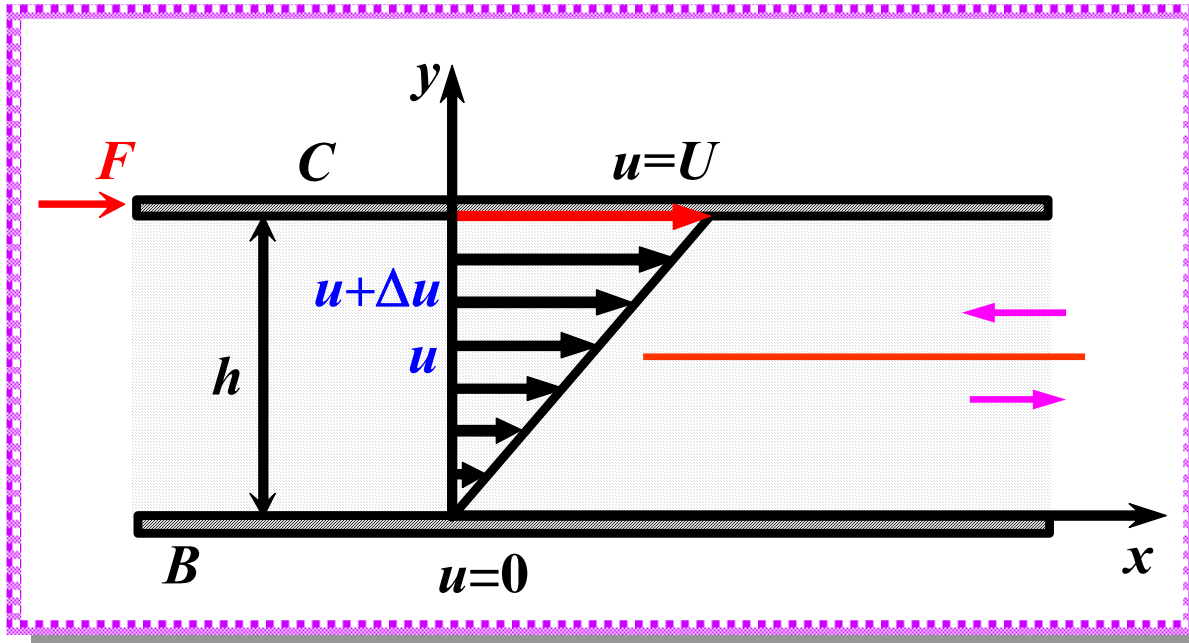
解： $E_V = -\frac{dp}{dV/V} \implies dV/V = -\frac{dp}{\kappa p}$

$\implies \ln \frac{V_2}{V_1} = -\frac{1}{\kappa} \ln \frac{p_2}{p_1}$

$\implies p_2 = p_1 \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{-\kappa} = 2.67 \times 10^5 \text{ Pa}$

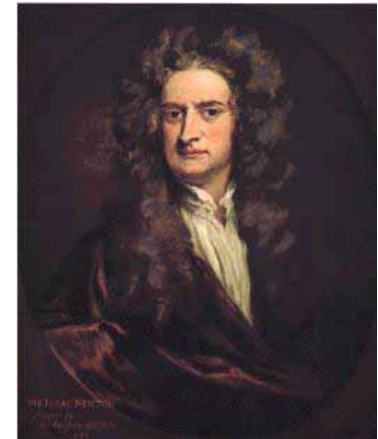


1.5 流体的粘性

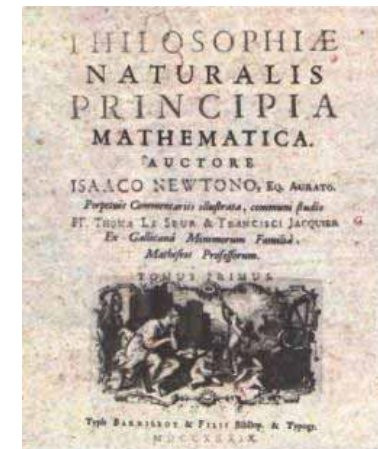


流体抵抗剪切变形（相对运动）
的一种属性

④ 流体层间无相对运动时不表现粘性



Isaac Newton
1642 - 1727



自然哲学的
数学原理



粘性产生的机理1

液体



分子间内聚力

流体团剪切变形



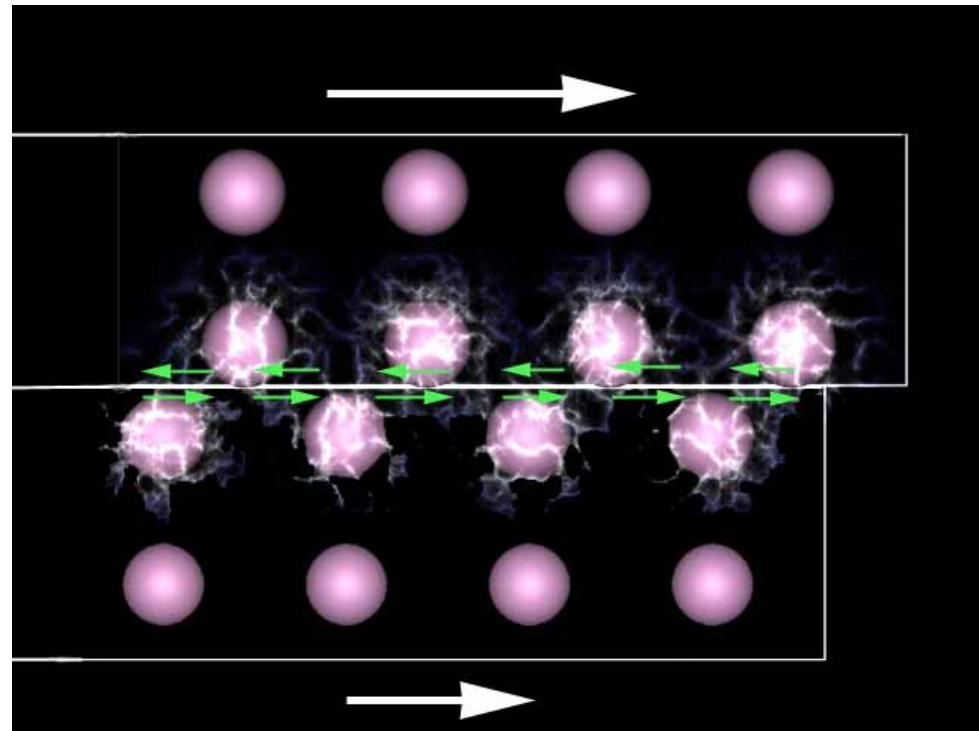
改变分子间距离



分子间引力阻止距离改变



内摩擦抵抗变形





粘性产生的机理2

气体

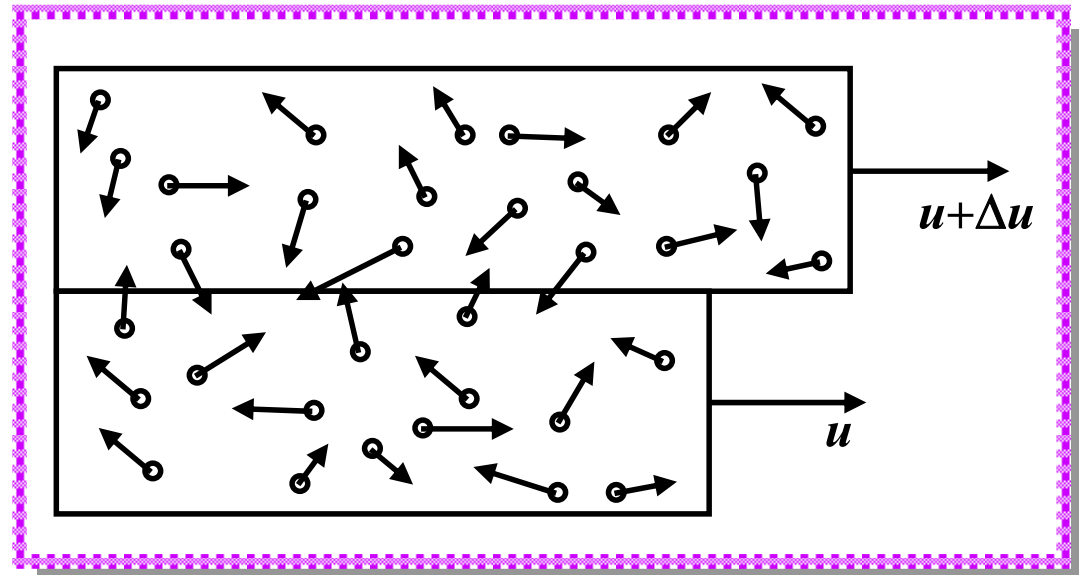


分子热运动

流体层间相对运动



分子热运动产生流
体层与层之间的动
量交换



内摩擦抵抗相对运动



粘性应力（内摩擦应力）1

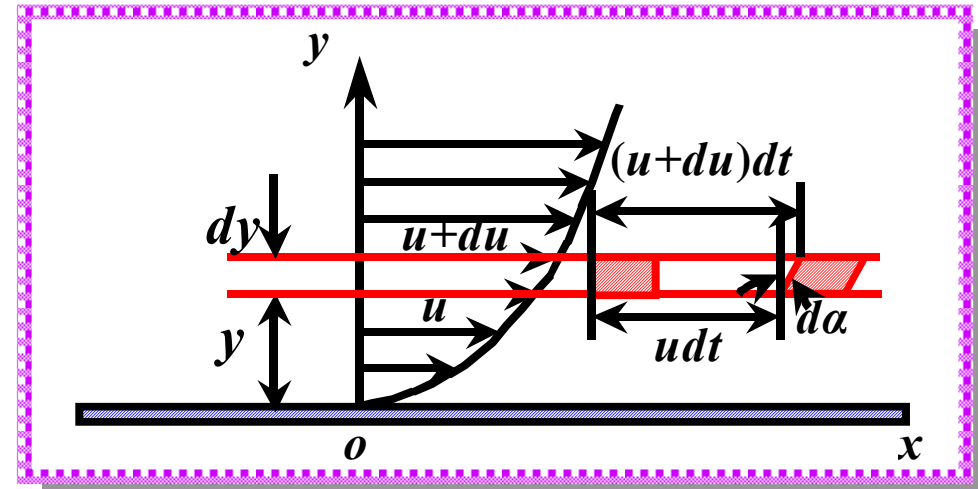
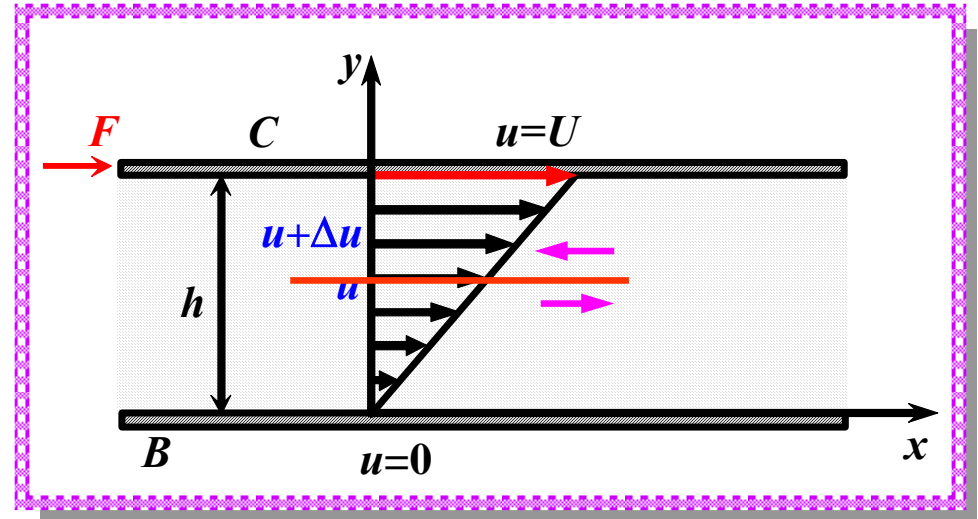
切应力

$$\tau = \frac{F}{A} \propto \frac{U}{h} = \mu \frac{U}{h}$$

牛顿内摩擦定律

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

y 方向速度梯度



粘性切应力与层间速度梯度成正比，而不由速度决定



粘性应力（内摩擦应力）2

牛顿内摩擦定律



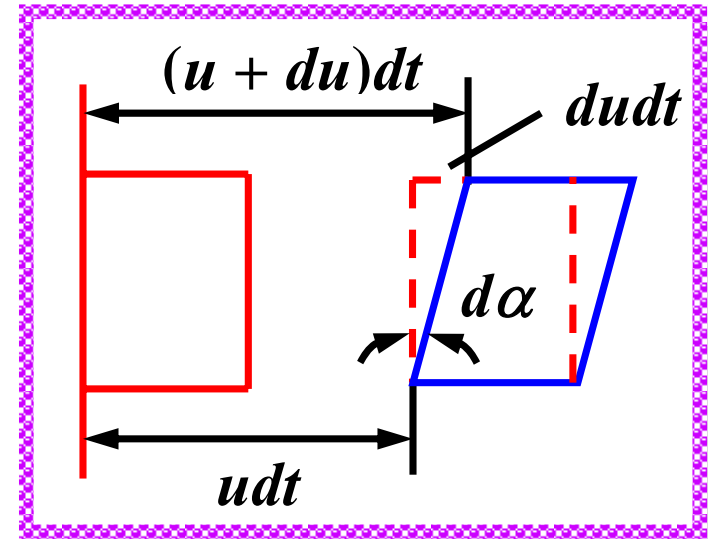
$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

① 从相对运动的角度反应内摩擦力



$$\tau = \mu \frac{d\alpha}{dt}$$

角变形率



① 粘性切应力与角变形率成正比，而不由变形量决定

② 从剪切变形的角度反应内摩擦力



动力粘性系数 μ

动力粘性系数



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

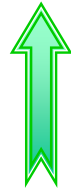
Pa·s

① μ 反应流体真实粘性的大小

② μ 与温度的关系

液体

T

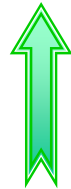


μ

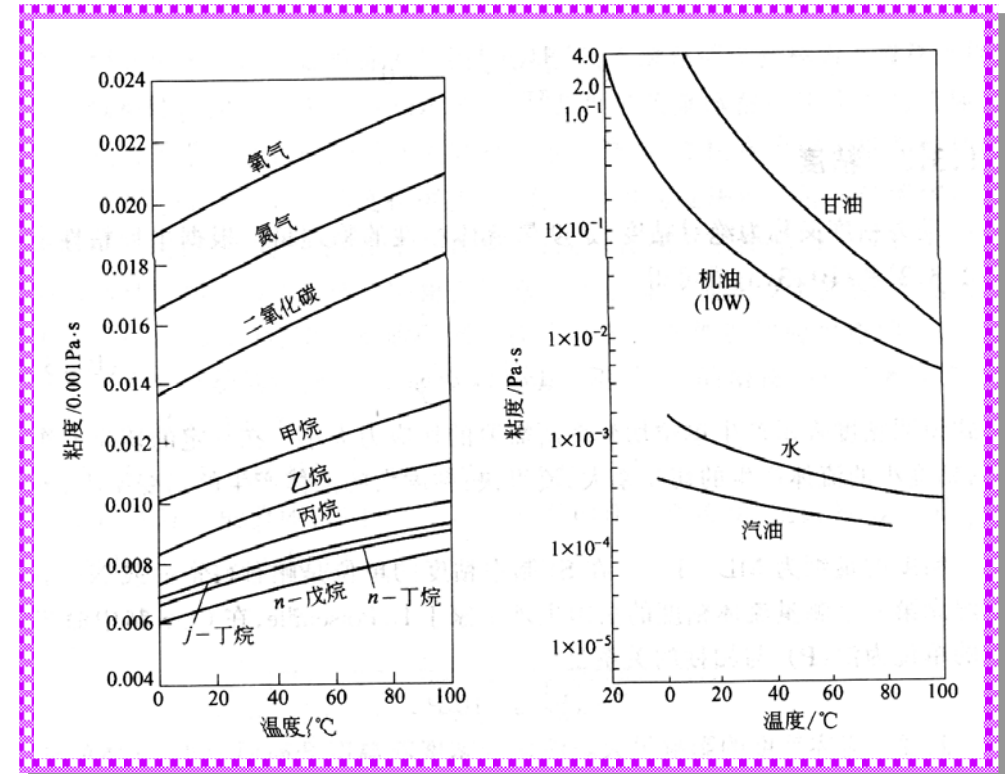
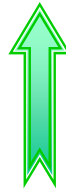


气体

T



μ





运动粘性系数 ν

运动粘性系数



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

m^2/s

⊙ ν 不能真实反应流体粘性的大小

表 1-6 P.28

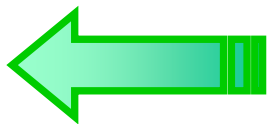
20°C

	动力粘性系数 μ	运动粘性系数 ν
水	1.005×10^{-3}	1.007×10^{-6}
空气	1.83×10^{-5}	1.57×10^{-5}



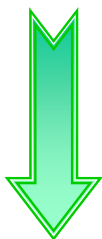
几个概念1

牛顿流体与
非牛顿流体



是否符合牛顿内摩擦定律

符合

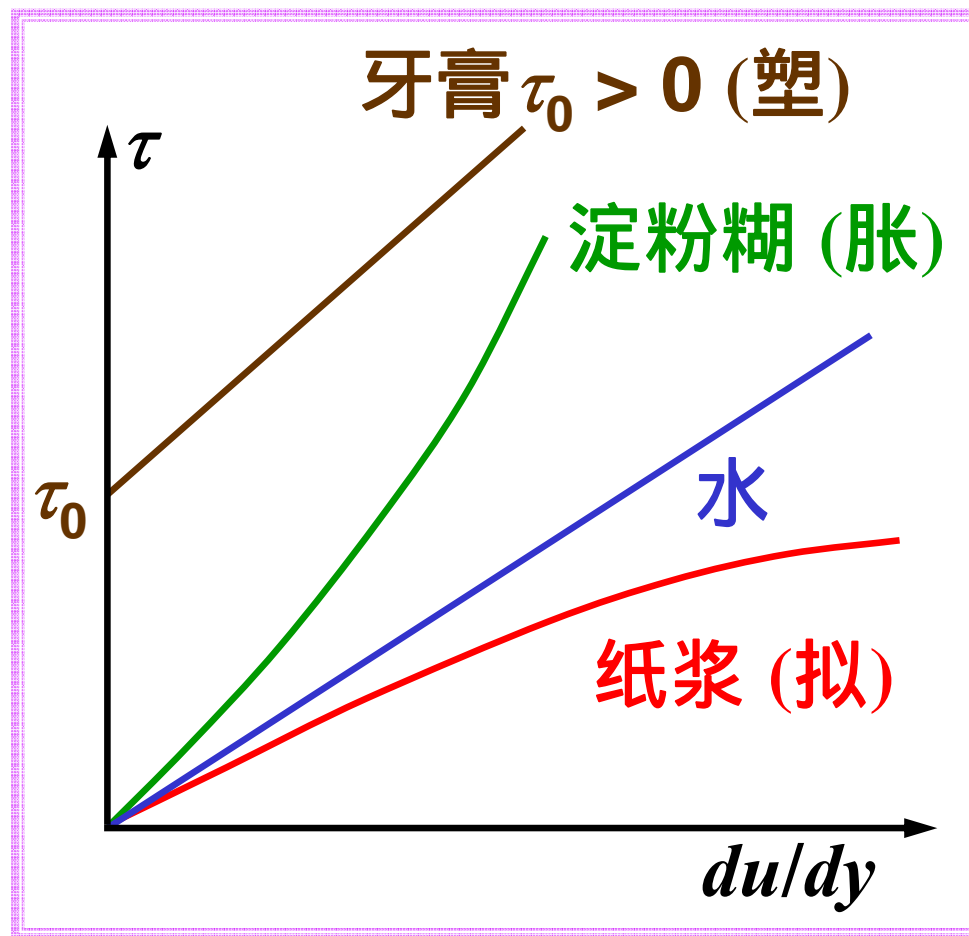


牛顿流体

不符合



非牛顿流体





几个概念2

理想流体



粘性系数为零的流体

$$\mu = 0$$

④ 实际流体都具有粘性，粘性是流体的基本属性

☞ 理想流体理论在描述平面和空间无旋流动、液面波浪运动，物体升力（19世纪）等方面取得很大成功，但却解释不了绕流物体阻力和河道水头损失等问题



粘性 - 例题1 - 1

几个概念：

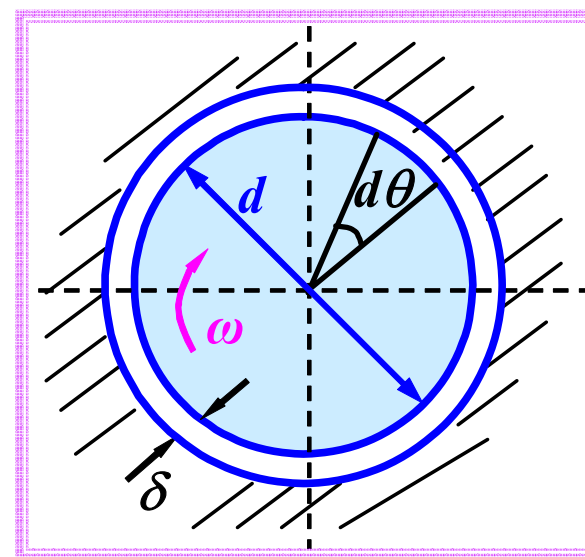
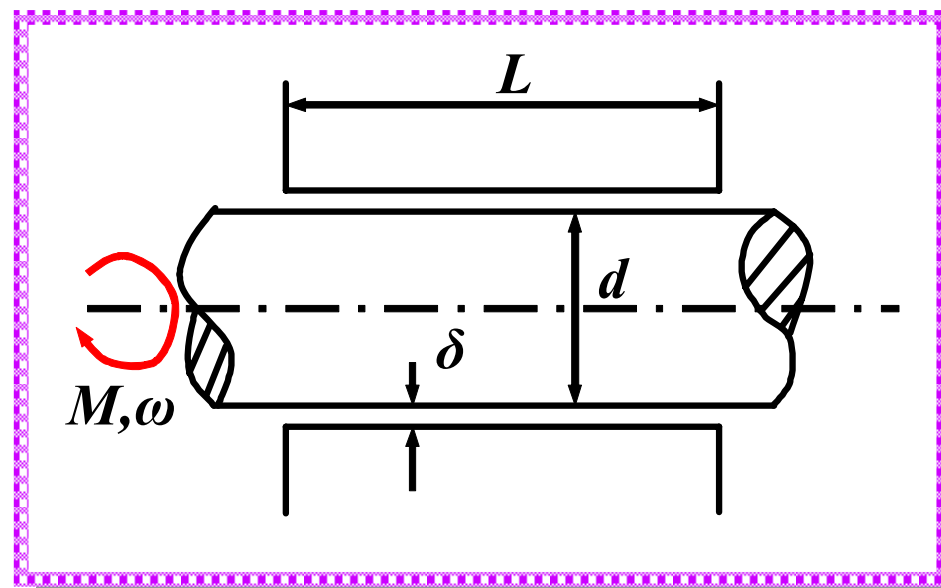
转速 n (r/min)

角速度 ω (rad/s) = $2\pi n / 60$

线速度 u (m/s) = $r\omega = d\omega / 2$

功率 N (w) = $F \cdot u = F \cdot r\omega = M\omega$

转矩 M (N.m) = $F \cdot r = F \cdot d / 2$

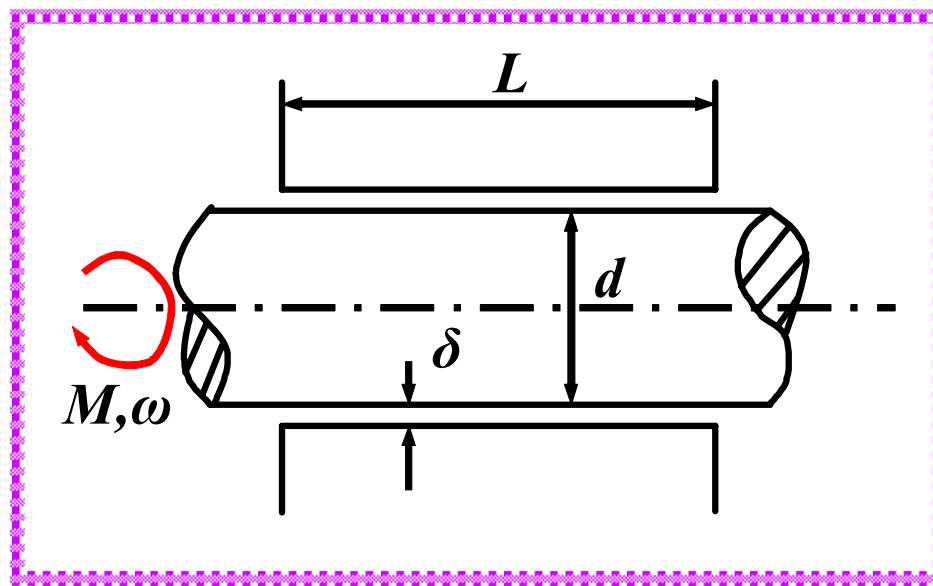
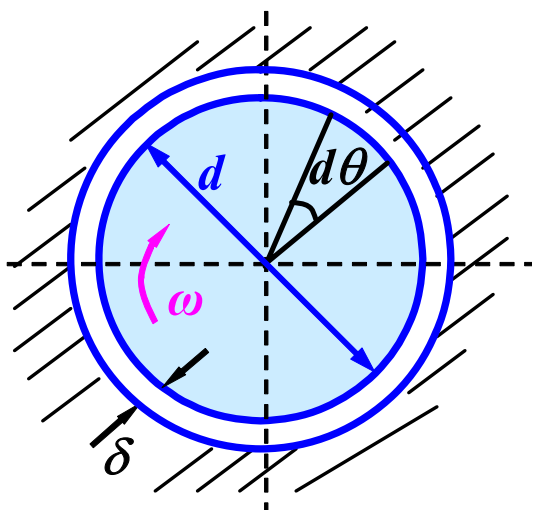




粘性 - 例题1 - 2

例：已知轴承长 $L = 0.5\text{m}$ ，轴径 $d = 150\text{mm}$ ，转速 $n = 400\text{r/min}$ ，轴与轴承间隙 $\delta = 0.25\text{mm}$ ，作用在转轴上的摩擦力矩 $M = 10.89\text{ N}\cdot\text{m}$ ，求 μ

解：1、切应力



$$dM = \frac{d}{2} dF = \frac{d}{2} \cdot \frac{d}{2} d\theta \cdot L \cdot \tau \quad \longrightarrow \quad M = \int dM$$

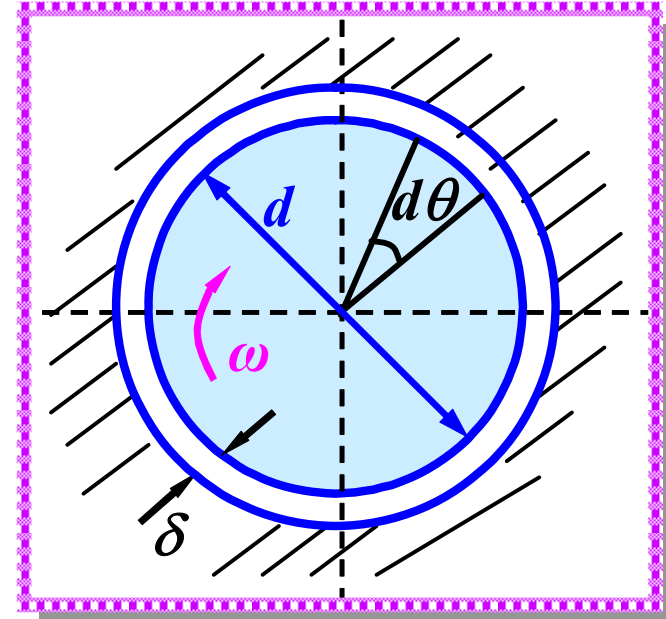


粘性 - 例题1 - 3

➡
$$M = \int_0^{2\pi} \left(\frac{d}{2}\right)^2 \tau L d\theta$$

2、速度梯度 - 速度线性分布

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{\pi d n}{60 \delta}$$



➡
$$M = \frac{d}{2} dL \pi \mu \frac{\pi d n}{60} \quad \Rightarrow \quad \mu = \frac{120 M \delta}{d^3 \pi^2 n L}$$



粘性 - 例题2 - 1

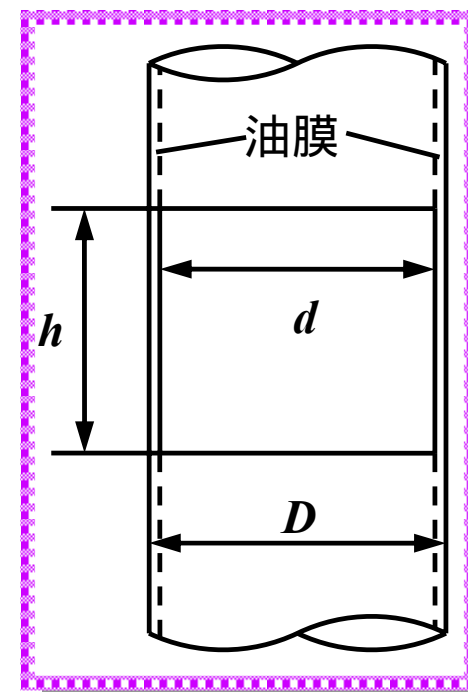
例：如图所示一重9N的圆柱体在同心圆管中以46mm/s的速度匀速下落，柱体直径 $d = 149.5\text{mm}$ ，高度 $h = 150\text{mm}$ ，圆管直径 $D = 150\text{mm}$ ，柱体与圆管间存在油膜，求油的动力粘性系数 μ

解：圆柱匀速下落，受力平衡

柱体与圆管间隙很小，可认为速度线性分布，则柱体所受切应力为



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





粘性 - 例题2 - 2

柱体所受阻力与重力平衡

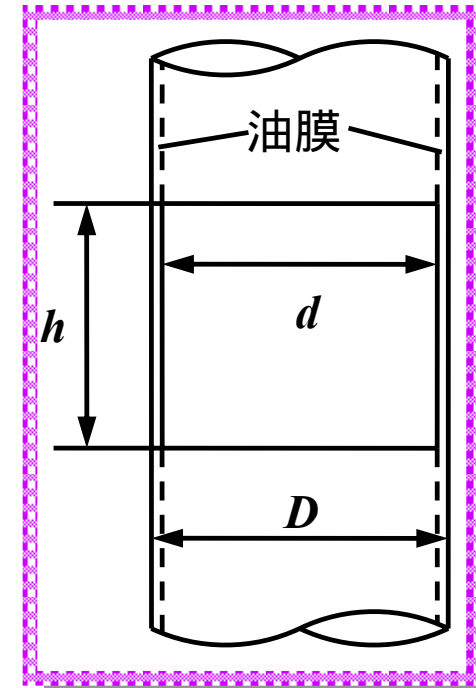


$$G = \tau A = \mu \frac{V}{\delta} A$$



$$\mu = \frac{G}{\pi d h \left(V / \frac{D-d}{2} \right)}$$

$$= 0.694(\text{Pa} \cdot \text{s})$$





作业

作业：P.41 ~ 46

- ① 1-2, 1-15, 1-18
- ② 有一边长为200mm的方金属块，重为1KN，在一倾斜角为 $\alpha = 20^\circ$ 的平板上下滑，金属块与平板之间有0.005mm的油层，油的动力粘性系数为 $7 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。问金属块下滑可达到的不变速度为多少？



小结1

流体的定义



不能承受剪切力

连续介质模型



流体质点

连续介质模型

流体的粘性



牛顿内摩擦定律

粘性产生的机理

两种粘性系数



小结2

流体的可压缩性



可压缩性定义
体积弹性模量

作用在流体上的力



质量力
表面力

几个概念

理想流体、牛顿流体、不可压缩流体



小结3

公式

牛顿内摩擦定律



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

$$\tau = \mu \frac{d\alpha}{dt}$$

运动粘性系数



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

体积弹性模量



$$E_V = \frac{dp}{d\rho/\rho}$$

$$E_V = -\frac{dp}{dV/V} = \frac{1}{\kappa_T}$$



小结4

公式

体积弹性模量 - 等温



$$E_v = p$$

体积弹性模量 - 等熵



$$E_v = \kappa p$$



连续介质模型思考题

下列有关流体质点的描述，错误的是

- A、流体质点的尺寸远小于流动问题特征尺寸
- B、流体质点的宏观物理量具有确定性
- C、流体质点是由大量流体分子组成的流体团它的大小不超过0.1cm
- D、从微观上看，流体质点的尺寸远大于分子平均自由程



流体的粘性思考题1

静止流体是否具有粘性？是否表现粘性？

理想流体是否具有粘性？

流体粘性与温度有什么样的关系？为什么？

两种粘性系数有什么区别？



流体的粘性思考题2

与牛顿内摩擦定律有关的因素是

- A、流体的压强、速度、粘性系数
- B、流体的切应力，粘性系数，角变形率
- C、流体的法向应力、温度、粘性系数
- D、流体的压强、粘性系数、线变形率



流体的可压缩性思考题

下列情况中哪些不符合不可压缩流体模型

- A、原油在输油管道中的流动
- B、空气的低速流动，温度变化不大
- C、锅炉里的水蒸汽流动