



液压传动及控制I

— 概述、介质与流体力学

浙江大学
流体动力与机电系统国家重点实验室
2022. 11



- 液体静力学
- 液体动力学
- 管道中液体流动特性
- 孔口与缝隙液体流动特性
- 气穴现象
- 液压冲击



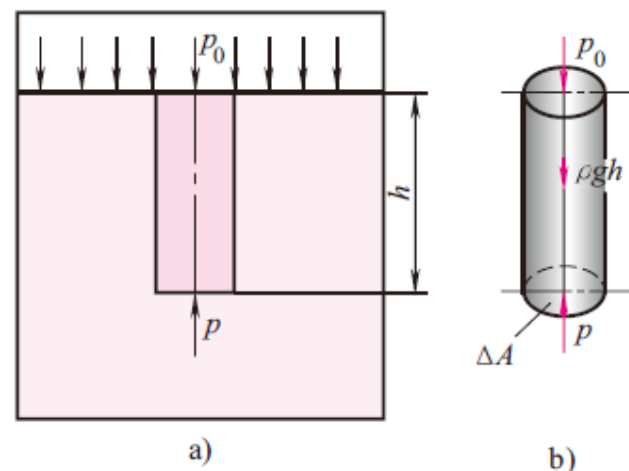
➤ 液体静压力基本方程

$$p = p_0 + \rho gh$$

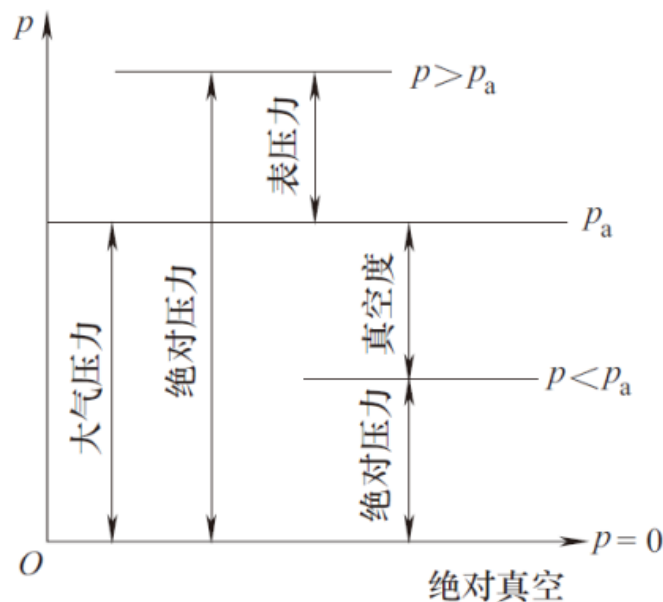
以绝对零压力作为基准所表示的压力，称为**绝对压力**；以当地大气压力为基准所表示的压力，称为**相对压力**。

真空度 = 大气压力 - 绝对压力

液压传动中所提到的压力一般为**相对压力**。

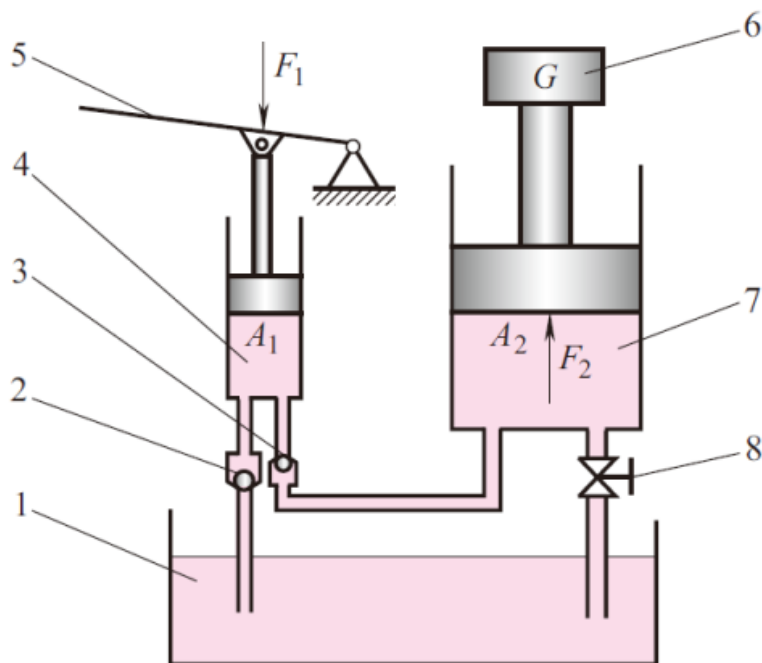


重力作用下的静止液体



绝对压力与相对压力的关系

- 在**密闭容器**内，施加于静止液体上的压力将以等值传递到液体中所有各点。



液压千斤顶示意图

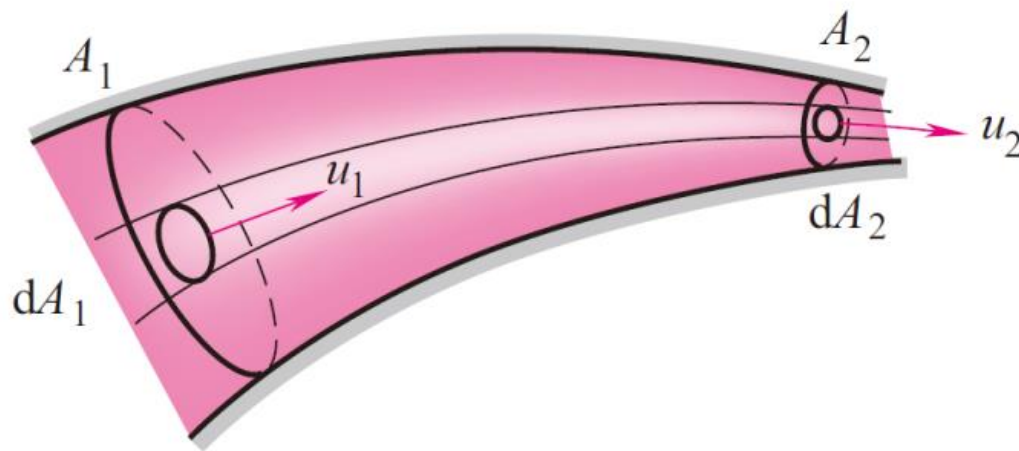
$$p = \frac{G}{A_2} = \frac{F_2}{A_2} = \frac{F_1}{A_1}$$

- 帕斯卡原理，又称**静压传递**原理，是液压传动的一个基本原理。

- 通过流管各截面的不可压缩液体的流量是相等的

$$q = v_1 A_1 = v_2 A_2 = \text{常数}$$

- 流管中液体的流速与通流面积成反比。

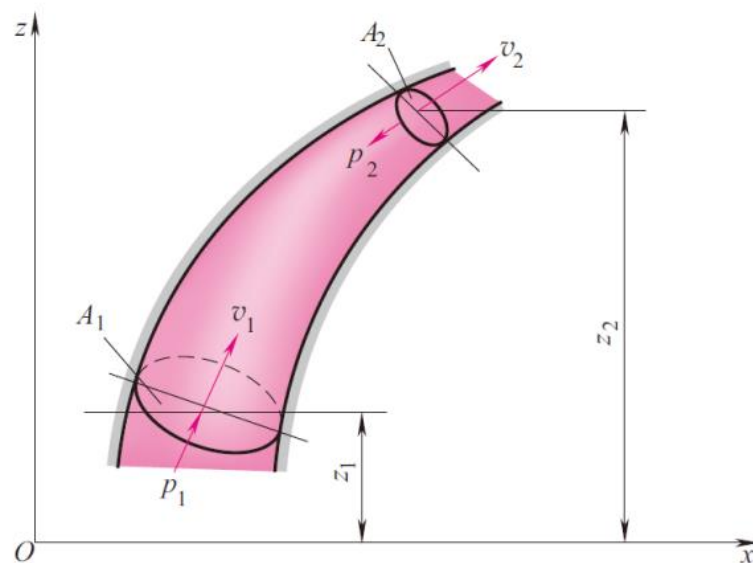


连续方程推导简图



- 伯努利方程的本质是能量守恒方程
- 同一流管每一截面上液体的总能量都是相等的。(理想液体无黏性，不可压缩)
- 液体总能量=压能+位能+动能

$$\frac{p_1}{\rho_1} + z_1 g + \frac{v_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho_2} + z_2 g + \frac{v_2^2}{2}$$

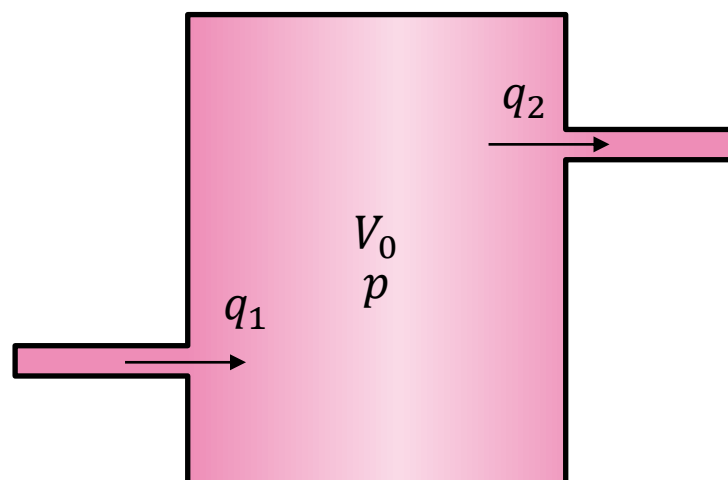


流管内液流能量方程推导简图

- 伯努利方程又称理想液体能量方程

- 液体在容腔中的压力变化（假设容腔不形变）
- 通过油液流量可以计算油液的压力飞升速度

$$q_1 - q_2 = \frac{V_0}{K} \frac{dp}{dt}$$



容腔中的压力变化

工作介质	体积模量 K/MPa	工作介质	体积模量 K/MPa
石油基液压油	$(1.4 \sim 2) \times 10^3$	水-乙二醇液压液	3.45×10^3
水包油乳化液	1.95×10^3	磷酸酯液压液	2.65×10^3
油包水乳化液	2.3×10^3	水	2.4×10^3

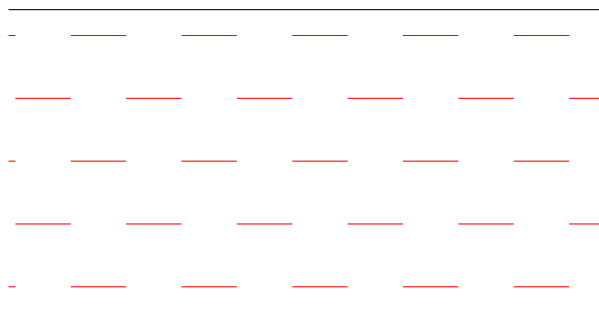
□ 介质的流态

- 层流：液体中质点沿管道作直线运动而没有横向运动，液体作分层流动，各层间的流体互不混杂。
- 紊流：液体中质点除沿管道轴线运动外，还有横向运动，呈现紊乱混杂状态。

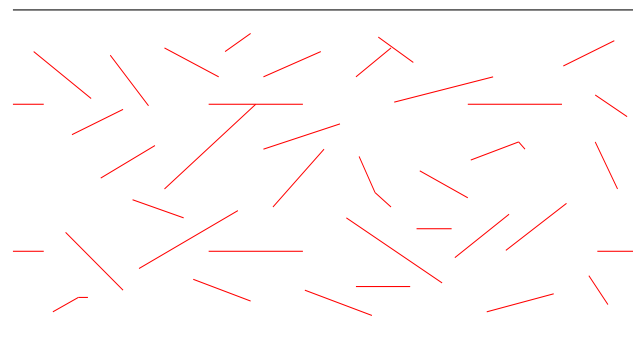
□ 雷诺数

$$R_e = \frac{v \cdot d_H}{\nu}$$

v 平均流速 d_H 管径 ν 运动粘度



层流示意图



紊流示意图

□ 介质的流态：雷诺数是判断流态的依据

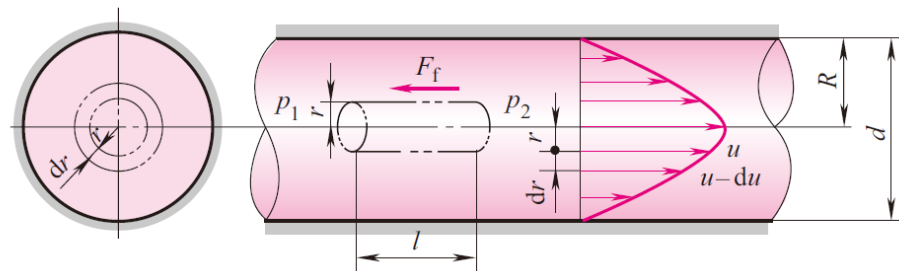
管道形状	临界雷诺数
光滑金属圆形管道	2320
橡胶软管	1600 - 2000
光滑的同心环状缝隙	1100
光滑的偏心环状缝隙	1000
有环槽的同心环状缝隙	700
有环槽的偏心环状缝隙	400
圆柱形滑阀开口	260
锥阀阀口	20 - 100

□ 管道压力损失：沿程压力损失和局部压力损失

□ 沿程压力损失

➤ 油液在直管中流动的沿程压力损失可表示为：

$$\Delta p_{\lambda} = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho v^2}{2}$$



沿程压力损失示意图

λ ——沿程阻力系数

- 沿程压力损失 ΔP 与管道长度及流速 v 的平方成正比，而与管子的内径成反比；
- 沿程阻力系数与油液的粘度，管壁粗糙度和流动状态等有关；
- 湍流流动时，其沿程压力损失的计算公式与层流时相同。

□ 管路压力损失：层流时沿程压力损失系数 λ

■ 求沿程阻力系数 λ

➤ 层流时沿程阻力系数 λ 的理论值为： $\lambda = \frac{64}{R_e}$

➤ 水的实际阻力系数和理论值很接近。液压油在金属管中流动时，常取： $\lambda = \frac{75}{R_e}$

➤ 在橡皮管中流动时，取 $\lambda = \frac{80}{R_e}$

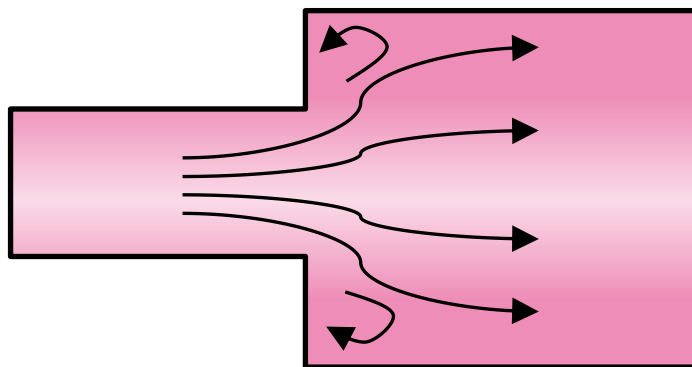


□ 管路压力损失：局部压力损失

- 局部压力损失是液流流经管道截面突然变化的弯管、管接头以及控制阀阀口等局部障碍处时的压力损失。计算式为：

$$\Delta p_{\zeta} = \zeta \frac{\rho v^2}{2}$$

ζ - 局部阻力系数，由试验求得； V - 液流流速。



局部压力损失示意图



□ 管路压力损失：沿程压力损失+局部压力损失

- 液压系统中管路通常由若干段管道串联而成。其中每一段又串联一些诸如弯头、控制阀、管接头等形成局部阻力的装置，因此管路系统总的压力损失等于所有直管中的沿程压力损失 ΔP_λ 及所有局部压力损失 $\Sigma \Delta P_\xi$ 之和。即：

$$\begin{aligned}\Delta P &= \Sigma \Delta P_\lambda + \Sigma \Delta P_\xi \\ &= \Sigma \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho v^2}{2} + \Sigma \xi \cdot \frac{\rho v^2}{2}\end{aligned}$$



□ 孔口、阀口与缝隙节流特性

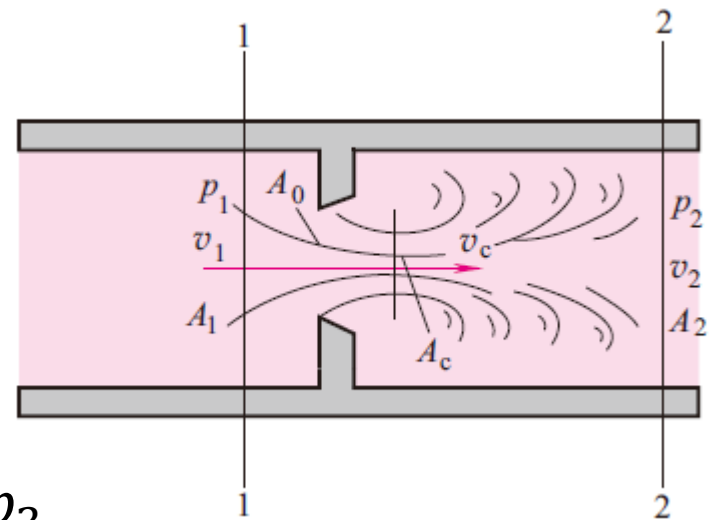
- 液流流经小孔是节流调速和液压伺服系统工作原理的基础；
- **流经薄壁小孔的流量**：当小孔的通流长度 L 与孔径 d 之比 L/d 小于等于0.5时称为**薄壁小孔**。根据截面1-1和2-2的能量方程，推导出通过薄壁小孔的流量：

$$q = C_d \cdot A_0 \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

C_d - 流量系数；

A_0 - 小孔的截面面积；

Δp - 小孔前后的压差， $\Delta p = p_1 - p_2$



通过薄壁小孔的流体

□ 流经细长孔的流量

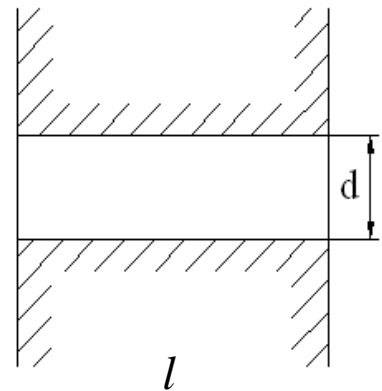
- 细长小孔指长径比 $l/d > 4$ 的小孔。油液流经细长小孔时的流动状态一般为层流，因此可用圆管的流量公式：

$$q = \frac{\pi d^4}{128 \mu l} \cdot \Delta p$$

d - 小孔直径；

l - 小孔长度；

Δp - 小孔前后的压差， $\Delta p = p_1 - p_2$

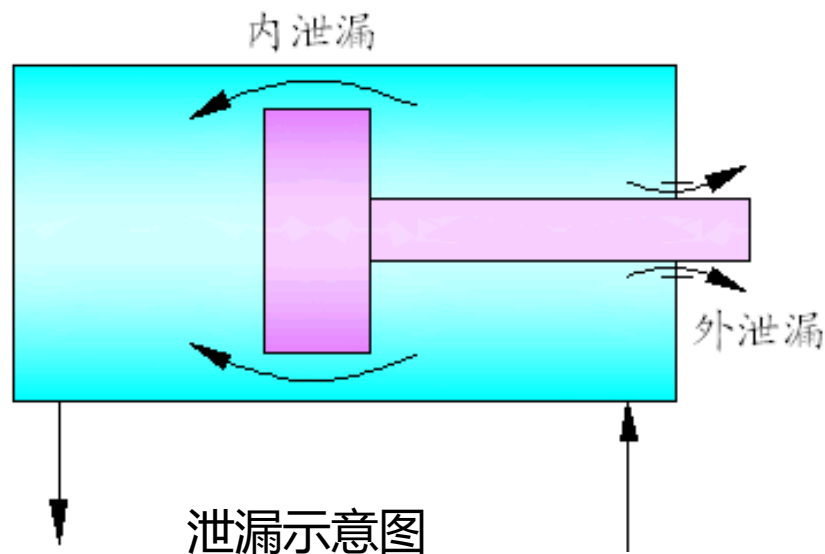


细长小孔

- 从上式可看出，细长小孔流量和前后压差、动力粘度等有关，因此受油温影响较大，这是和薄壁小孔不同的。

□ 流经缝隙的流量

- 液压元件各零件间相对运动时存在一定的配合间隙。液压油会从高压处经过间隙流到低压处，产生泄漏。
- 泄漏的存在将使系统效率降低，泄漏量与压力差的乘积便是功率损失。功率损失将转化为热量，使系统温度升高，影响系统性能。



□ 流经缝隙的流量：平行平板缝隙

- 若平行平板缝隙两端存在**压差**，或平板间存在**相对运动**，缝隙内的液体就会产生流动。由微元体的受力平衡方程可推得平行平板隙缝的流量公式：

$$q = \underbrace{\frac{bh^3}{12\mu l} \Delta p}_{\text{压差流动}} + \underbrace{\frac{bh}{2} u_0}_{\text{剪切流动}}$$

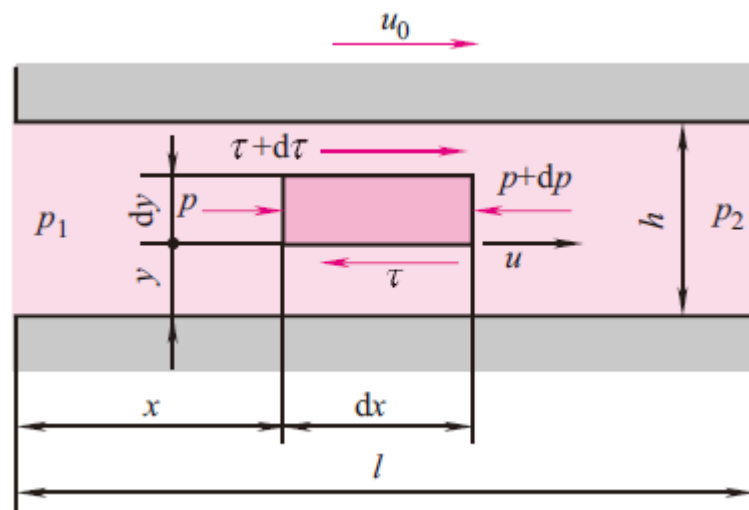
b - 缝隙宽度；

h - 缝隙高度；

l - 缝隙长度；

Δp - 缝隙两端压差， $\Delta p = p_1 - p_2$ ；

u_0 - 平板间相对运动速度。



平行平板缝隙间的液流

□ 流经缝隙的流量：同心环形间隙

- 当缝隙 h 较小时，可将环形缝隙沿圆周方向展开，把它近似地看作是平行平板缝隙间的流动，将 $b=\pi d$ 代入前述公式，就可得同心环形缝隙的流量公式：

$$q_0 = \underbrace{\frac{\pi d h^3}{12 \mu l} \Delta p}_{\text{压差流动}} + \underbrace{\frac{\pi d h}{2} u_0}_{\text{剪切流动}}$$

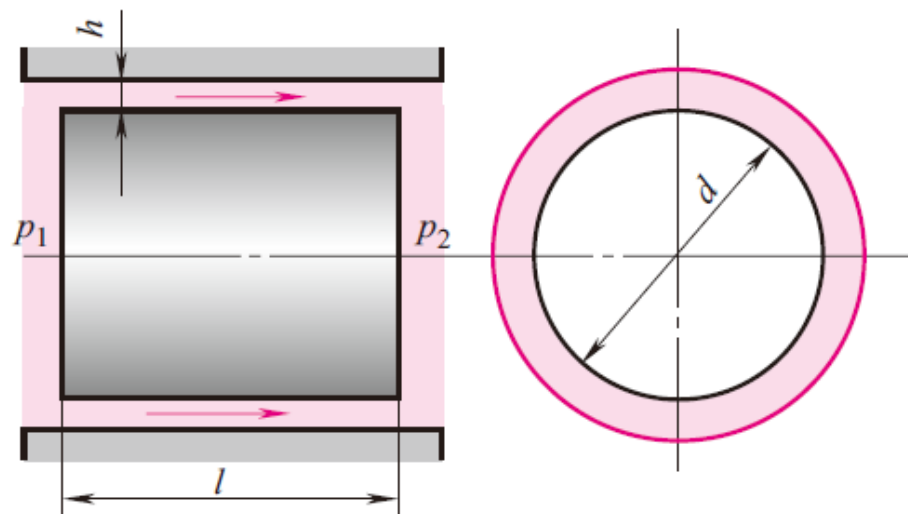
d - 圆柱体直径；

h - 缝隙高度；

l - 缝隙长度；

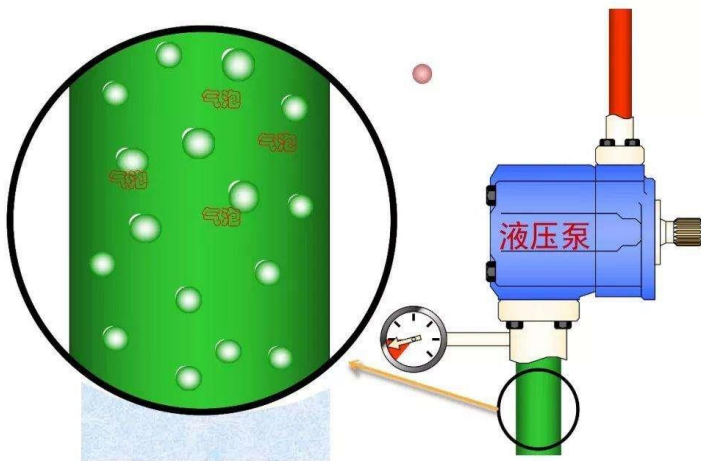
Δp - 缝隙两端压差， $\Delta p = p_1 - p_2$ ；

u_0 - 平板间相对运动速度。



同心圆柱环形间隙

- 在液压系统中，当流动液体某处的压力低于空气分离压时，原先溶解在液体中的空气就会游离出来，使液体中产生大量气泡，这种现象称为气穴现象。
- 气穴会对金属表面产生腐蚀，大大缩短其使用寿命，这种现象成为气蚀。

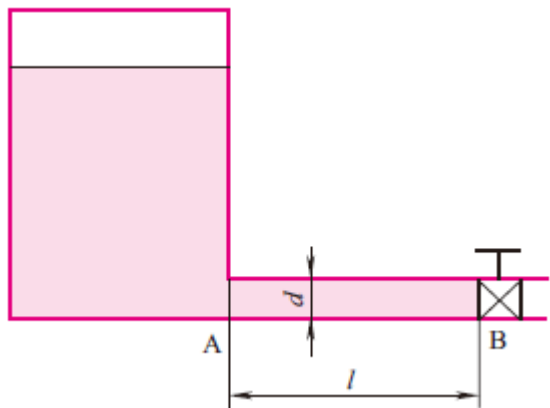


气穴现象

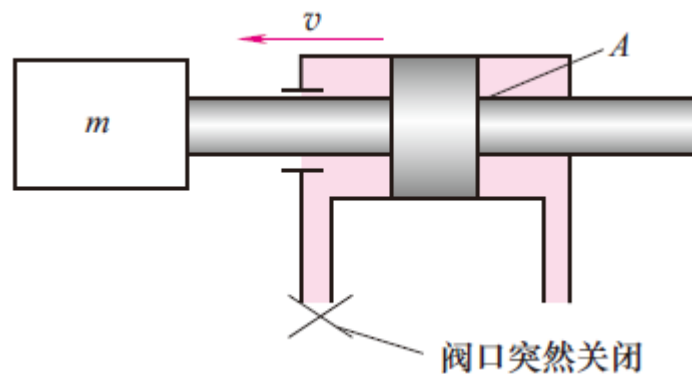


气蚀危害

- 在液压系统中，突然关闭或开启液流通道时，液体压力在一瞬间会突然升高，这种现象称为**液压冲击**。
- 液压冲击的危害：液压冲击产生的压力峰值往往比正常工作压力高好几倍，且常伴有**噪声和振动**，损坏液压元件、密封装置、管件等。



液流速度突变引起的液压冲击



运动部件制动引起的液压冲击

□ 课后作业：1-1; 1-2; 2-3; 2-5; 3-8; 3-20

