# 大学物理 B(1)

# § 9.12 输运过程

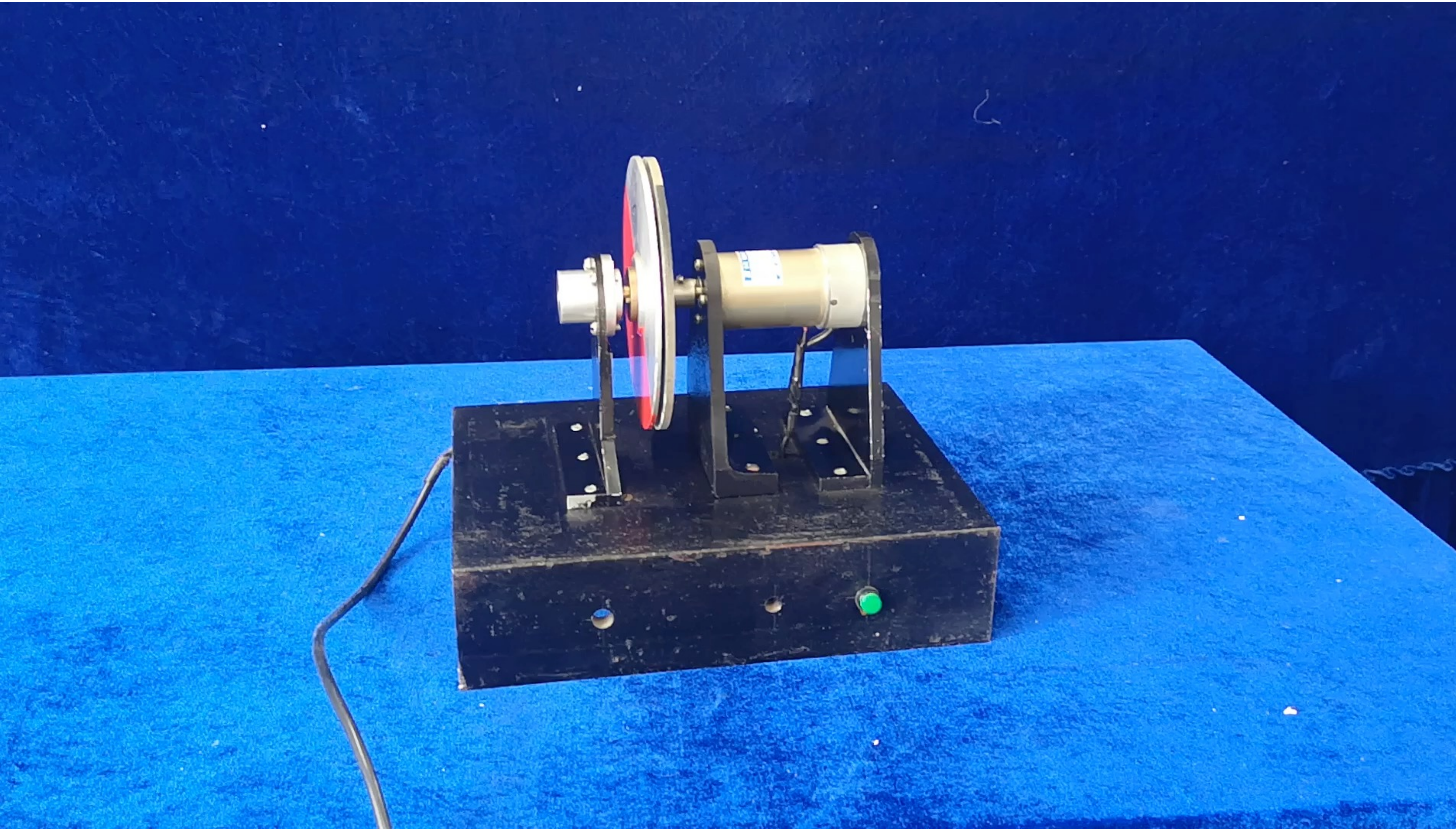
系统各部分的物理性质，如流速、温度或密度不均匀时，系统处于非平衡态。

非平衡态问题是至今没有完全解决的问题，理论只能处理一部分，另一部分问题还在研究中。

最简单的非平衡态问题：不受外界干扰时，系统自发地从非平衡态向物理性质均匀的平衡态过渡过程 --- 输运过程。

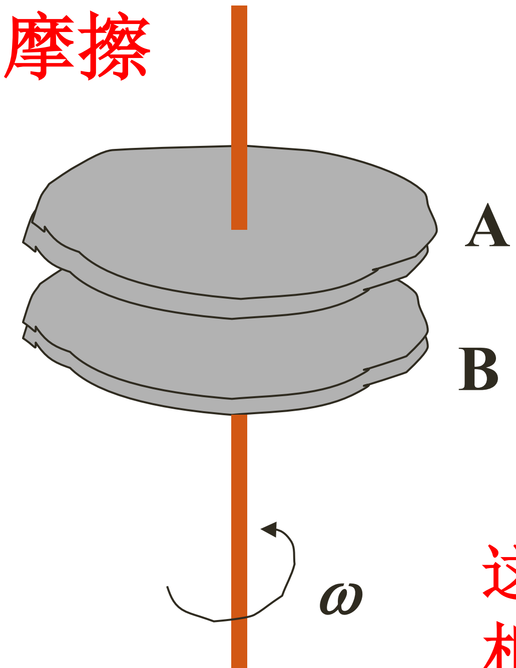
介绍三种输运过程的基本规律：

内摩擦　　热传导　　扩散



# 1. 粘滞现象

•内摩擦




现象：A盘自由，B盘由电机带动而转动，慢慢A盘也跟着转动起来。

解释：B盘转动因摩擦作用力带动了周围的空气层，这层又带动邻近层，直到带动A盘。

电风扇

这种相邻的流体之间因速度不同，引起的相互作用力称为内摩擦力，或粘滞力。

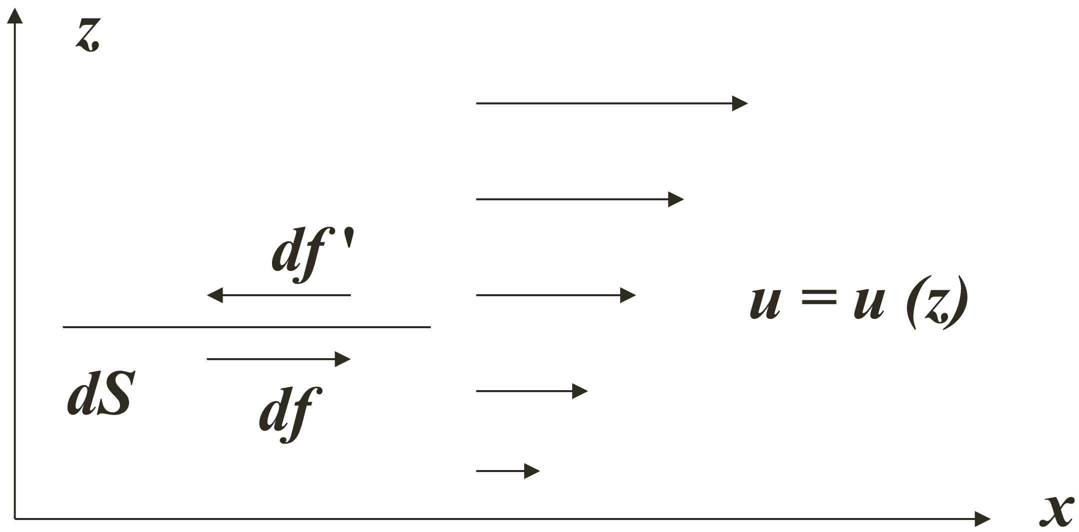
层流: 平缓流动时, 流体做分层平行流动, 流体质点轨迹是光滑曲线

湍流: 在大雷诺数下发生的紊乱流动

减少湍流使阻力显著减小

鲨鱼皮泳衣

## 稳恒层流



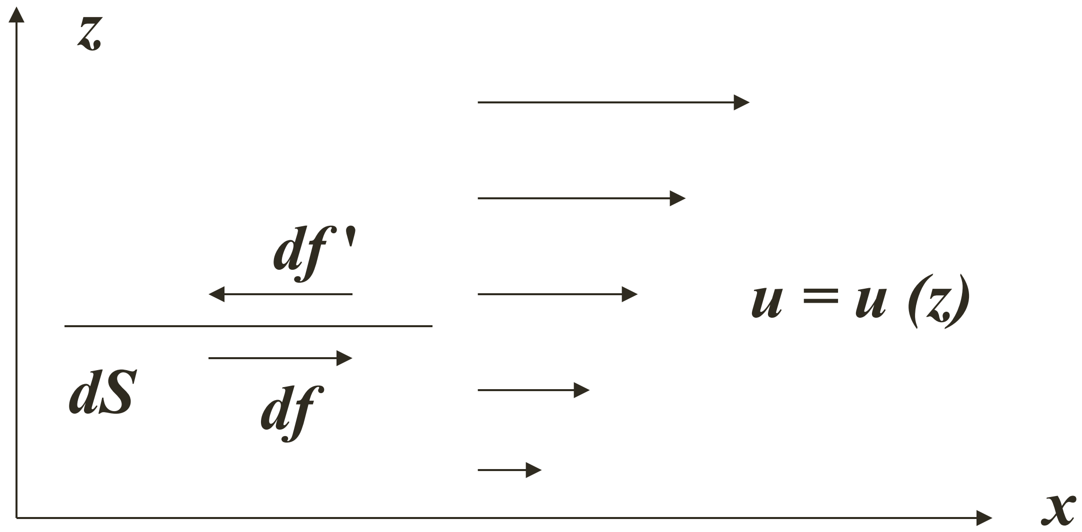

流速不均匀，沿 $z$ 变化（或有梯度）

不同流层之间有粘滞力

流速大的流层带动流速小的流层，
流速小的流层后拖流速大的流层。

设，$dS$ 的上层面上流体对下层面上流体的粘滞力为 $df$，反作用为 $df'$，这一对力满足牛顿第三定律。

实验测得




$$\boxed{df' = -\eta \left(\frac{du}{dz}\right) dS}$$

牛顿粘性定律

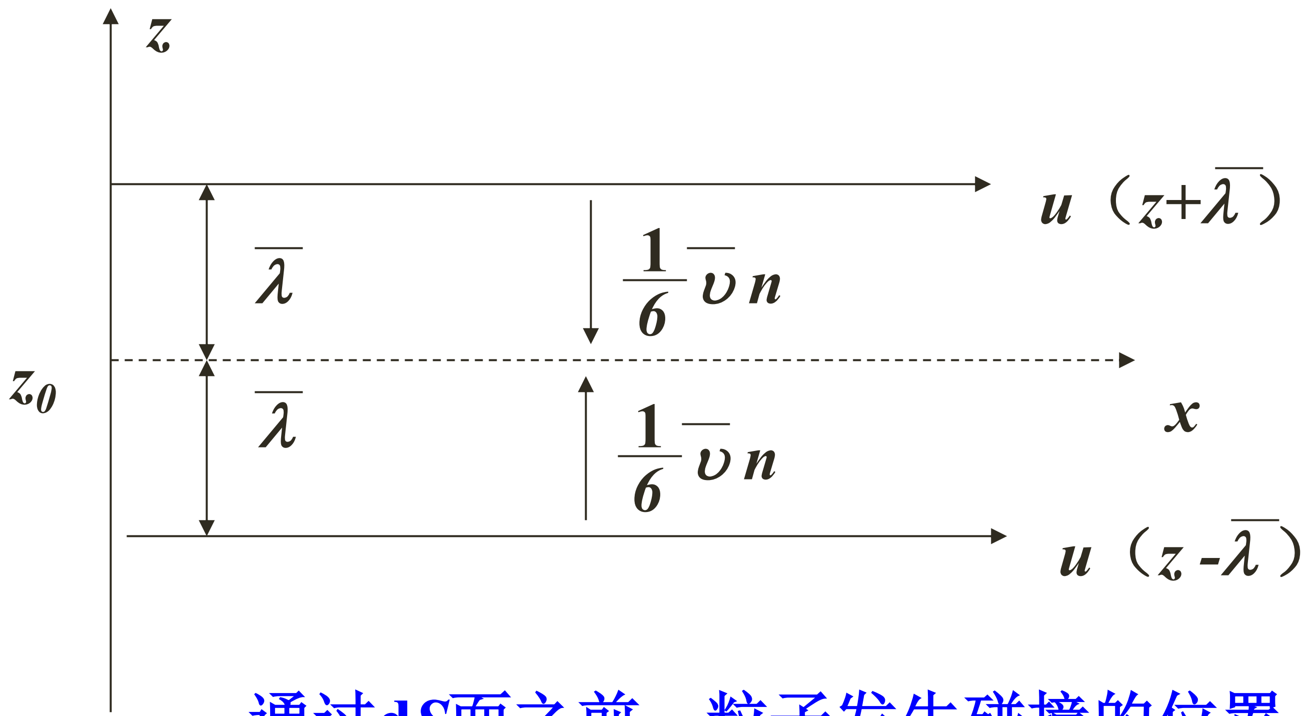
$\eta$ 称为粘滞系数

$$df = -df'$$

20 $^{o}$C 时，水为 1.005 $\times 10^{-3}$ Pa s
空气为 1.71 $\times 10^{-5}$ Pa s

用分子运动论应该可以从微观推导出上面公式。

微观上，这种粘滞力是动量传递的结果




通过d*S*面之前，粒子发生碰撞的位置距d*S*面的平均距离为平均自由程 $\overline{\lambda}$

下层区域，单位时间通过 d*S* 面积，向上层输运动量的平均 *x* 分量

$$\frac{1}{6}\overline{\upsilon}\,n\,m\,u_x(z_0-\overline{\lambda})dS$$

上层区域，单位时间通过$dS$ 面积，向下层输运动量的平均 $x$ 分量

$$\frac{1}{6}\bar{\upsilon}\, n\, m\, u(z_0+\bar{\lambda})\, dS$$

$$df = \frac{1}{6}\bar{\upsilon}\, n\, m\, [\, u(z_0+\bar{\lambda}) - u\,(z_0-\bar{\lambda})]dS$$

$$\approx \frac{1}{3}\bar{\upsilon}\, n\, m\, \bar{\lambda}\left(\frac{du}{dz}\right)_{z=z_0} dS$$

$$\boxed{df\,' = -\eta\left(\frac{du}{dz}\right) dS}$$

比较实验定律

$$\bar{\lambda} = \frac{\bar{\upsilon}}{\bar{Z}} = \frac{1}{\sqrt{2}\,\pi d^2 n}$$

$$\eta = \frac{1}{3}\bar{\upsilon}\, n\, m\, \bar{\lambda}$$

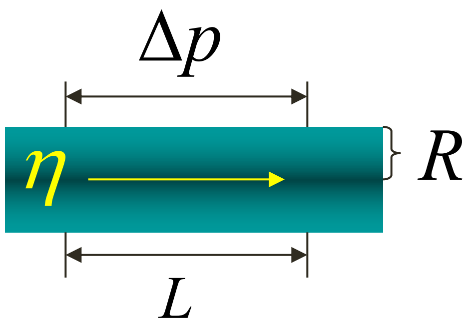
推导过程看系数不准确

带入 $\bar{\lambda}$ ，气体$\eta$与压强或密度无关，只与温度有关 。

实验结果支持了分子运动论

泊肃叶定律*

粘滞液体的流动规律, 如血管中血液流动

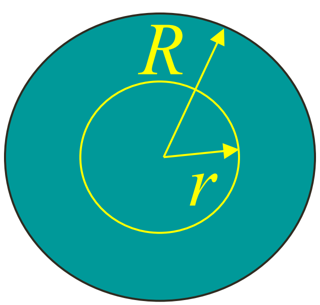



假设是层流, 而且是稳流

$$\upsilon_{r=R} = 0 \qquad \upsilon = \upsilon(r)$$

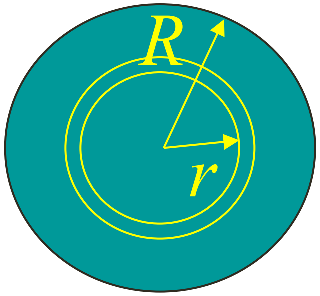
$$df' = -\eta \left(\frac{du}{dz}\right) dS$$

$$\pi r^2 \Delta p = -\eta \frac{d\upsilon}{dr} 2\pi r L$$



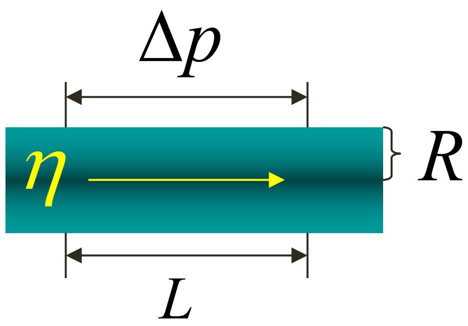

$$\frac{d\upsilon}{dr} = -\frac{\Delta p}{2\eta L} r$$

$$\upsilon = \frac{\Delta p}{4\eta L}(R^2 - r^2)$$

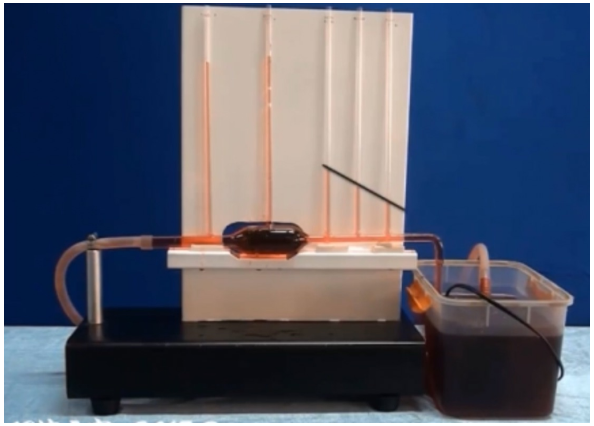



流量

$$\frac{dV}{dt}=\int_0^R \upsilon 2\pi r dr=\frac{\pi}{8}\frac{R^4\Delta p}{\eta L}$$




管粗细不变 $\Delta p \propto L$



$$\Delta p=\left(8\pi\eta\frac{L}{\pi R^2}\right)\cdot\left(\frac{1}{\pi R^2}\frac{dV}{dt}\right)$$

$$血压=(流阻)\cdot(流量)$$

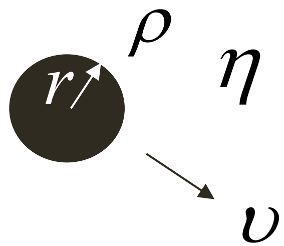
$$V=RI$$

不同的物理规律有相同的数学表示

[redacted]

# 斯托克斯定律*

阻力 $f$ ?




## 量纲分析方法

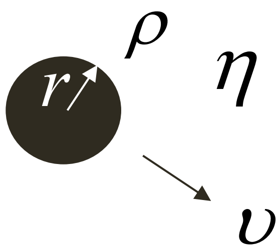
$$f \propto \rho^{\alpha} \upsilon^{\beta} r^{\gamma} \eta^{\delta}$$

$$MLT^{-2} = \left(ML^{-3}\right)^{\alpha} \left(LT^{-1}\right)^{\beta} L^{\gamma} \left(ML^{-1}T^{-1}\right)^{\delta}$$

$$MLT^{-2} = M^{\alpha+\delta} L^{-3\alpha+\beta+\gamma-\delta} T^{-\beta-\delta}$$

$$\beta = \gamma = 1 + \alpha \qquad \delta = 1 - \alpha$$

$$f = \kappa \eta r \upsilon \left( \frac{\rho \upsilon r}{\eta} \right)^{\alpha} = \kappa \eta r \upsilon \left(\mathrm{Re}\right)^{\alpha}$$




实验给出

$$\boxed{\mathrm{Re} = \frac{\rho \upsilon r}{\eta}}$$

雷诺数

小雷诺数

$$\alpha = 0, \quad \kappa = 6\pi$$

$$f = 6\pi\eta r\upsilon$$

大雷诺数

$$\alpha = 1, \quad \kappa = \frac{\pi}{5}$$

$$f = \frac{\pi}{5}\eta r\upsilon\,\mathrm{Re} = \frac{\pi}{5}\rho r^2 \upsilon^2$$

层流

$$\mathrm{Re} < 2000$$

过渡不稳定

湍流

$$\mathrm{Re} > 4000$$

高尔夫球 **~130m/s**

空气 $\rho \sim 1.3kg/m^3$

乒乓球 **~30m/s**

$$\mathrm{Re} > 4000$$

## 终极速度

$$\boxed{\mathrm{Re} = \frac{\rho \upsilon r}{\eta}}$$

小水滴(云雾)

$$r \sim 10^{-5} m \qquad \mathrm{Re} << 1$$

$$f = 6\pi\eta r \upsilon_{\max} = mg = \frac{4\pi}{3} r^3 \rho g$$

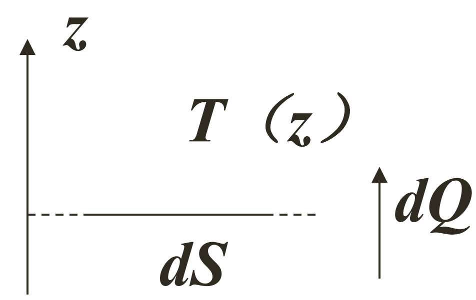
$$\upsilon_{\max} = \frac{2\rho g r^2}{9\eta} \sim 10^{-2} m/s$$

雨滴

$$r \sim 10^{-3} m \qquad \mathrm{Re} >> 1 \qquad f = \frac{\pi}{5} \rho r^2 \upsilon^2$$

$$\upsilon_{\max} = \sqrt{\frac{20 r \rho_{water} g}{3 \rho_{air}}} \sim 10 m/s$$

## 2. 热传导现象




温度不均匀就有热传导

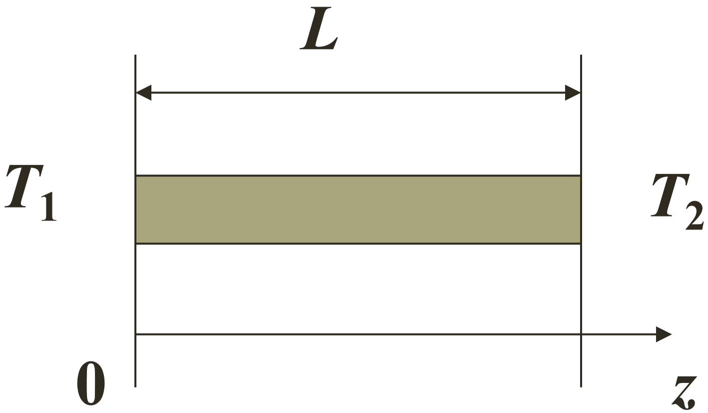
设，沿 $z$ 方向有温度梯度，实验指出，
$dt$ 时间内，通过 $dS$传递的热量为：

$$dQ = -\kappa \left( \frac{dT}{dz} \right) dt dS$$

傅立叶定律

负号表示热从温度高处向温度低处传递， $\kappa$ 为导热系数

例




$$dQ = -\kappa \left( \frac{dT}{dz} \right) dt dS$$

温度分布稳定以后

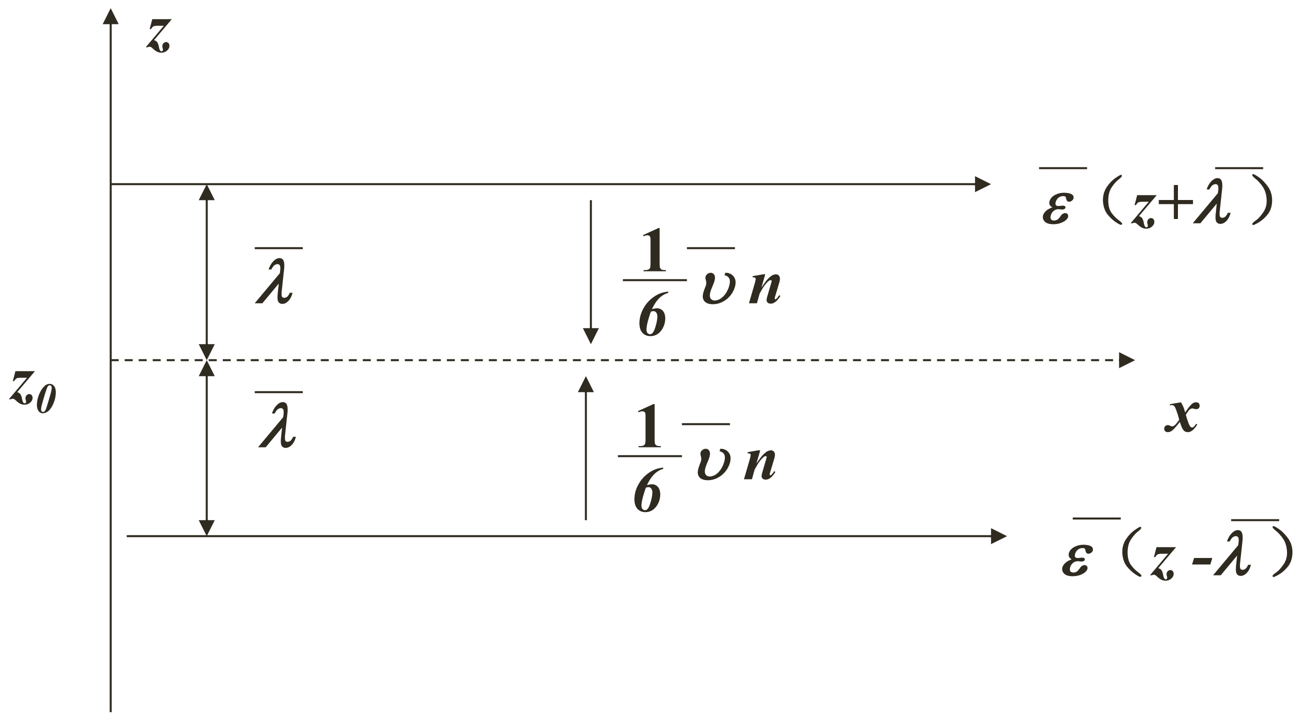
$$-\kappa \frac{dT}{dz} = c$$

$$T = cz + c'$$

$$T = \frac{T_2 - T_1}{L} z + T_1$$

$$\frac{dQ}{dt} = -\kappa \frac{T_2 - T_1}{L} \Delta S$$

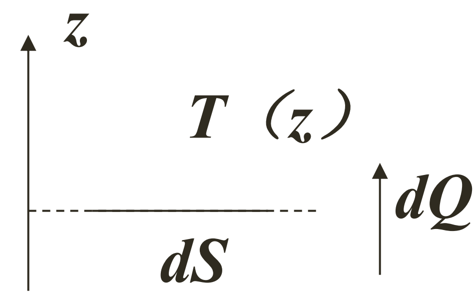
# 微观上，热是平均动能传递的结果




通过d$S$面之前，粒子发生碰撞的位置距d$S$面的平均距离为平均自由程 $\overline{\lambda}$

热是粒子无规运动平均动能

导热系数微观推导与粘滞力情况相似，只是动量换成平均动能




$$dQ = \frac{1}{6}\bar{\upsilon}\, n\, [\,\bar{\varepsilon}(z_0 - \bar{\lambda}) - \bar{\varepsilon}(z_0 + \bar{\lambda})\,]\, dt\, dS$$

$$-2\bar{\lambda}\left.\frac{d\bar{\varepsilon}}{dz}\right|_{z=z_0} = -2\bar{\lambda}\,\frac{d\bar{\varepsilon}}{dT}\left(\frac{dT}{dz}\right)_{z=z_0}$$

$$dQ = -\kappa\left(\frac{dT}{dz}\right)_{z=z_0} dt\, dS$$

$= m\, c_v$

定容比热

导热系数 $\kappa = \frac{1}{3}\bar{\upsilon}\, n\, m\, \bar{\lambda}\, c_v$ 只与温度有关

[例] 已知保温瓶胆夹层厚 $l = 5\text{mm}$， 问要抽空到多大压强以下，才能有效地保温？

分析:

$$dQ = -\kappa\left(\frac{dT}{dz}\right)dtdS \qquad \kappa = \frac{1}{3}\bar{\upsilon}\, n\, m\, \bar{\lambda}_t\, c_v$$

$$\frac{dQ}{dtdS} = -\frac{1}{3}\sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}nm\frac{\bar{\lambda} l}{\bar{\lambda}+l}c_v\frac{T_{外}-T_{内}}{l} \qquad \bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2}\,\pi d^2 n}$$

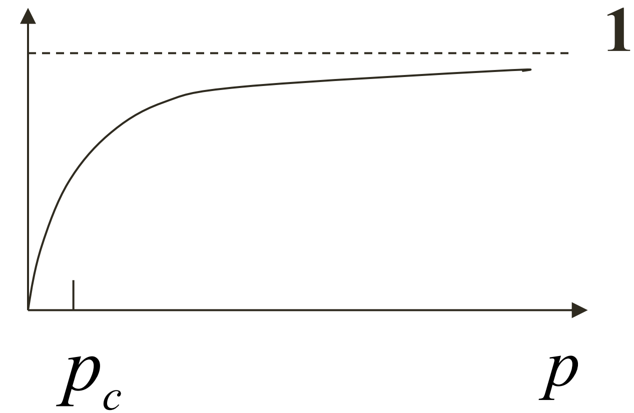
刚性双原子分子 $\qquad mc_v = \frac{5}{2}k$

$$\frac{dQ}{dtdS} = -\frac{5k}{3\pi d^2}\sqrt{\frac{kT}{\pi m}}\frac{1}{1+\frac{\bar{\lambda}}{l}}\frac{T_{外}-T_{内}}{l} \propto \frac{1}{1+\frac{\bar{\lambda}}{l}}$$

令 $$p_c = \frac{kT}{\sqrt{2}\,\pi l d^2} \quad \rightarrow \quad \bar{\lambda} = \frac{p_c}{p} l$$

$$\frac{dQ}{dtdS} \propto \frac{1}{1+\frac{\bar{\lambda}}{l}} = \frac{1}{1+\frac{p_c}{p}}$$

$$\frac{1}{1+\frac{p_c}{p}}$$



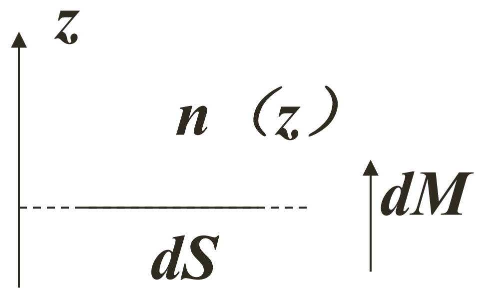

**解:**

**当 $p < p_c$ 时，才能随 $p$ 的下降，使 热流 也显著下降**

**空气分子 $d \approx 3.5\times10^{-10}$m， 取 $T = 330$K，**

$$p_c = \frac{kT}{\sqrt{2}\,\pi d^2 l} \approx 2\times10^{-5}\,atm$$

## 3. 扩散现象



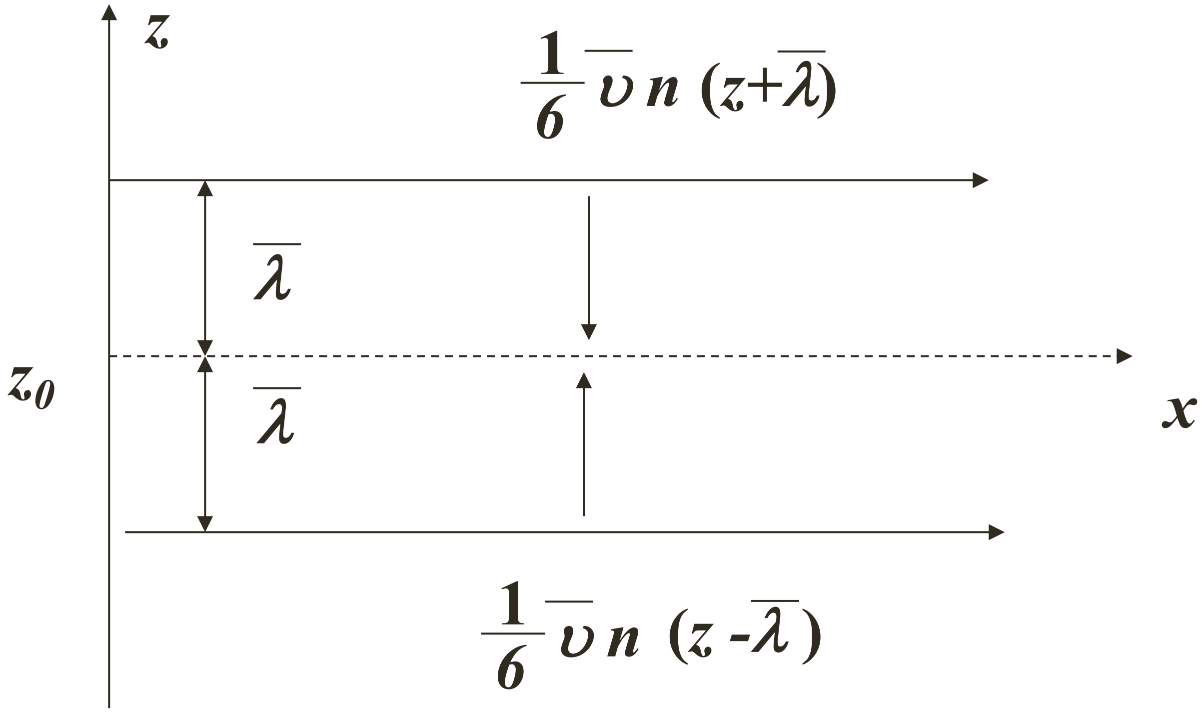

密度不均匀就有扩散

设，沿 $z$ 方向有密度梯度，实验指出，
$dt$ 时间内，通过 $dS$ 传递的质量为：

$$dM = -D\left(\frac{d\rho}{dz}\right) dt\,dS$$

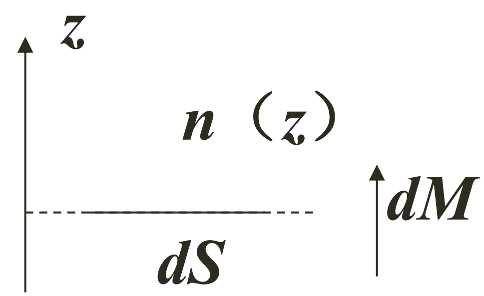
菲克定律

负号表示质量从密度高处向密度低处传递，**$D$ 为自扩散系数**




通过d*S*面之前，粒子发生碰撞的位置距d*S*面的平均距离为平均自由程 $\bar{\lambda}$

扩散系数的微观推导与粘滞力情况相似，只是密度不同




$$dM = \frac{1}{6}\overline{\upsilon} m \,[\underbrace{n(z_0 - \overline{\lambda}) - n(z_0 + \overline{\lambda})}_{-2\overline{\lambda}\left(\frac{dn}{dz}\right)_{z=z_0}}]\, dtdS$$

$$D = \frac{1}{3}\overline{\upsilon}\,\overline{\lambda}$$

$$dM = -D\left(\frac{d\rho}{dz}\right)_{z=z_0} dtdS$$

讨论类似

实验验证

相互作用（非钢球分子） $\eta \propto T^{0.7}$

系数 $\frac{1}{3} \to \frac{1}{2}$

$$\frac{\eta}{D\rho} = 1$$

实际0.6到0.8之间

$$\frac{\kappa c_v}{\eta} = 1 \quad \to \frac{1}{4}(9\gamma - 5)$$

双原子分子气体~1.8-1.9

# 第十章  热力学第一定律

# § 10.1 准静态过程 Quasi-static process

- 过程中的每一状态都是平衡态 (Equilibrium state )

系统状态的变化就是过程。

矛盾？

不受外界影响时，系统的宏观性质不随时间改变。

举例1：外界对系统做功

过程无限缓慢

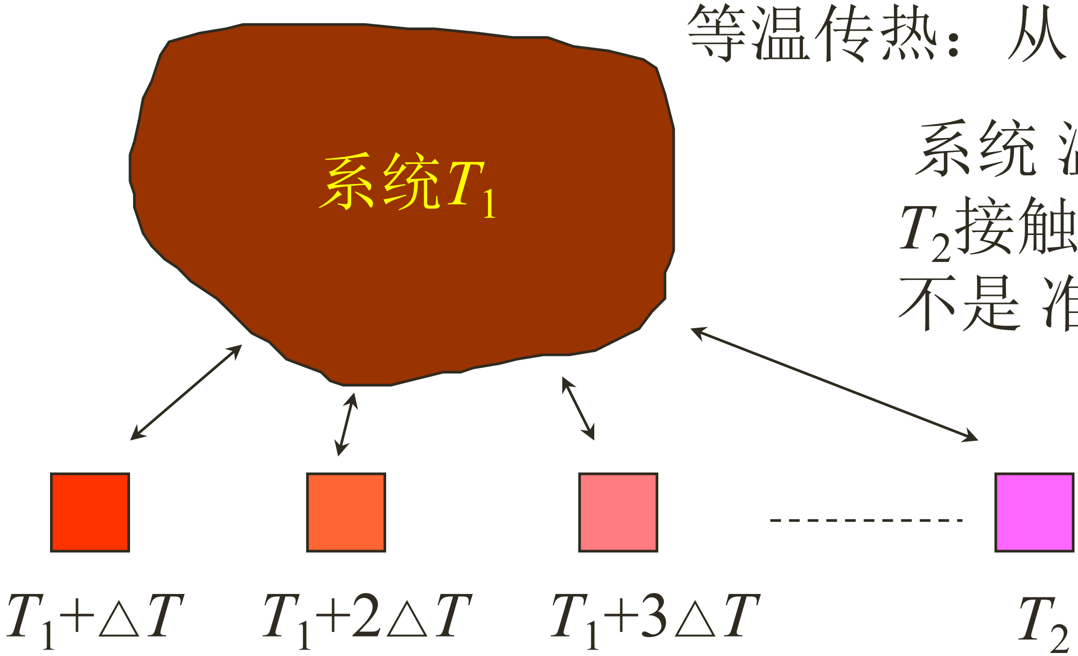
外界压强总比系统压强大一小量 $\Delta P$， 就可以 缓慢压缩。


非平衡态到平衡态的过渡时间，即弛豫时间，约 $10^{-3}$ 秒， 如果实际压缩一次所用时间为 1 秒，就可以说 是准静态过程。

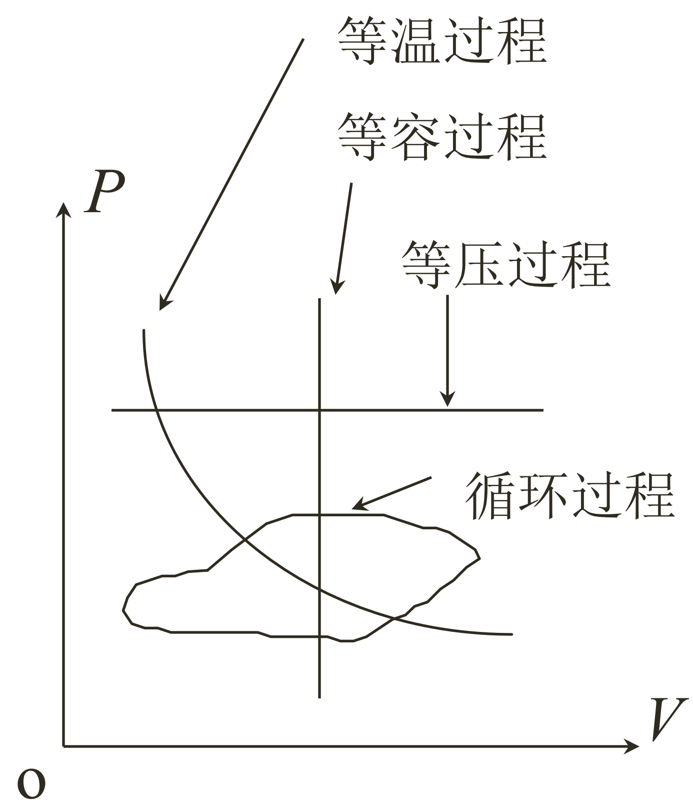
## 举例2：系统（初始温度 $T_1$）从 外界吸热

等温传热：从 $T_1 \longrightarrow T_2$ 是准静态过程

系统 温度 $T_1$ 直接与热源 $T_2$接触，最终达到热平衡，不是 准静态过程。




- 因为状态图中任何一点都表示系统的一个平衡态，故准静态过程可以用系统的状态图，如 $P$-$V$图（或$P$-$T$图，$V$-$T$图）中一条曲线表示，反之亦如此。



# § 10.2 功、热、内能
## (Work, Heat, Internal energy)

做功使动能增加（动能定理）

钻木取火

无规运动动能增加

物体内能变化

内能是状态量

演示实验：
做功导致内能增加

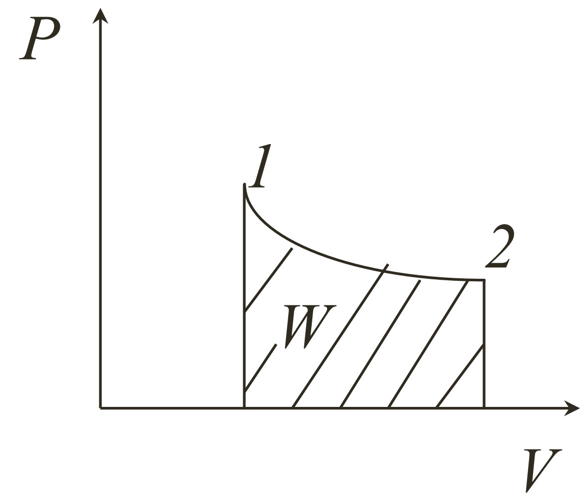
- 做功可以改变系统的状态
  - 摩擦升温（机械功）、电加热（电功）
  - 内能改变量与做功多少有关，但功不是内能

- **功是过程量**(与系统的状态变化过程相关）

摩擦功：$dw = f_r dl$

电功：$dw = IUdt = Udq$

通常：　微量功＝广义力× 广义位移




准静态过程气体对外界做功：

$$\text{đ}w = PdV$$

（通过活塞做功过程可以简单推导）

系统对外做功为正

总功：

$$w = \int \text{đ}w = \int_{V_1}^{V_2} PdV$$

- 系统和外界温度不同，就会传热，或称能量交换

  传递的是内能

  热量传递可以改变系统的状态。

- 热量是过程量

  微小热量：

  $$đQ \begin{cases} > 0 & \text{表示系统从外界吸热；} \\ < 0 & \text{表示系统向外界放热。} \end{cases}$$

  总热量：$$Q = \int_1^2 đQ$$ 积分与过程有关。

## ◆ 系统的内能是状态量

❖ 如同 *P*、*V*、*T*等量

理想气体只有分子动能： $E=\frac{i}{2}\nu RT$

范德瓦尔斯气体
分子动能和相互作用势能： $E=\frac{i}{2}\nu RT-\frac{\nu^2 a}{V}$

$t+r+2\upsilon$

内能的变化：

$$\Delta E_{12}=\int_1^2 dE=E_2-E_1$$

只与初、末态有关，
与过程无关。

多选题 1分

设置

下列说法中错误的是

A 物体的温度越高，则热量越多

B 物体的温度越高，则内能越大

C 高热量食物不是因为温度高，而是因为热量多

D 内能仅与温度有关

提交

# §10.3 热力学第一定律 (The first law of thermodynamics)

- **功能原理:**

外力做功+非保守内力做功 = 系统机械能增量

$$W_{外} + W_{非保内} = E_2 - E_1$$

考虑热产生或传入效果，扩大机械能到一般能量

- 某一过程，系统从外界吸热 $Q$，外界对系统做功W，系统内能从初始态 $E_1$增长为 $E_2$，则由能量守恒：

$$W + Q = E_2 - E_1$$

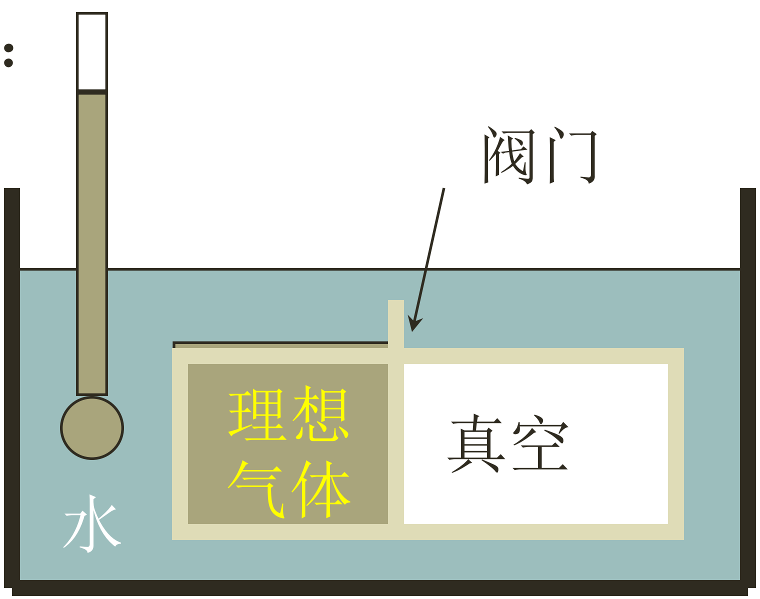
本书定义系统对外界做功为正

- 某一过程，系统从外界吸热 $Q$，用于对外界做功 $W$，并让系统内能从初始态 $E_1$变为 $E_2$，则由能量守恒：

$$Q = E_2 - E_1 + W$$

◆ 对无限小过程： $$đQ = dE + đW$$

例：




保持水温不变，打开阀门，问：

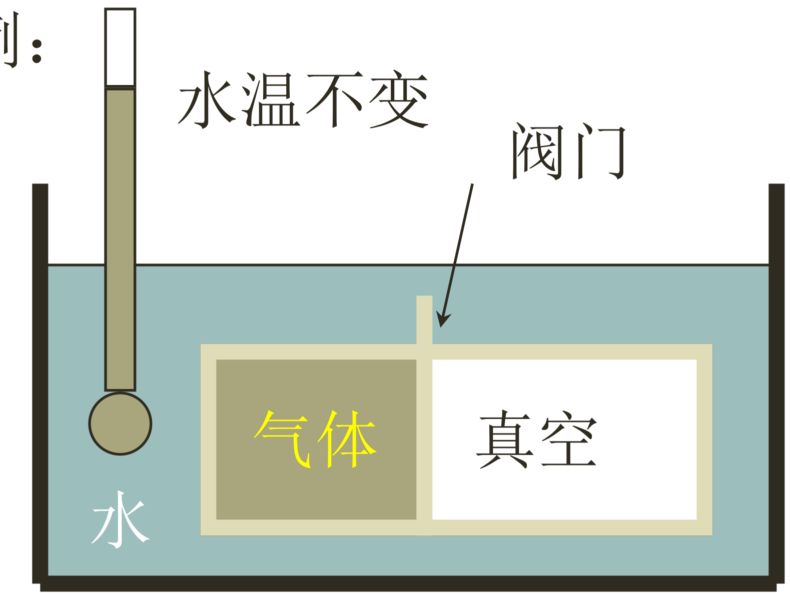
1）气体吸热？
2）气体温度？
3）气体内能？
4）气体做功？

单选题 1分

设置

对于理想气体和范德瓦尔斯气体，当阀门打开后，两种气体是否吸热，是否对外做功？

例：




A 都不吸热，都不做功

B 都吸热，都对外做正功

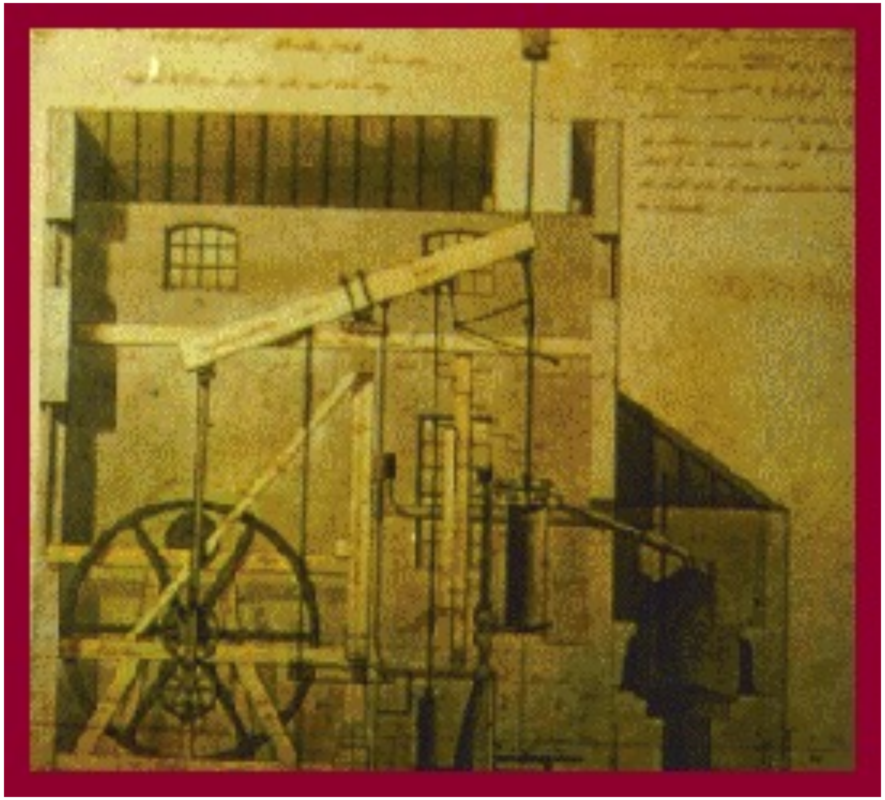
C 不吸热，不做功；吸热，不做功

D 不吸热，不做功；放热，不做功

提交

系统是蒸汽

$$Q = E_2 - E_1 + W$$



瓦特早期蒸气机

# § 10.4 热容量(Heat capacity)

$$C' = \frac{đQ}{dT}$$

- 摩尔热容量 *c*， 单位：J/mol· K
- 比热容 *c*， 单位：J/kg· K

$đQ$ 为过程量

定压热容量：

$$C'_P = \left(\frac{đQ}{dT}\right)_P$$

定容热容量：

$$C'_V = \left(\frac{đQ}{dT}\right)_V$$

也可以是其它过程

理想气体准静态等容过程：

$$đQ = dE + PdV = dE$$

$$C_V' = \left(\frac{đQ}{dT}\right)_V = \frac{dE}{dT} \qquad C_V' = \nu C_V \qquad \text{广延量}$$

$$\boxed{dE = \nu C_V dT}$$

理想气体准静态定压过程：

$$PV = \nu RT$$

$$C_P' = \frac{dE}{dT} + P\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = \nu C_P \qquad \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = \nu \frac{R}{P}$$

迈耶公式 $\boxed{C_P = C_V + R}$

比热容比 $\gamma$ $$\gamma=\frac{C_P}{C_V}=1+\frac{R}{C_V}$$

$$t+r+2\upsilon$$

$$dE=\frac{i}{2}\nu RdT=\nu C_V dT$$

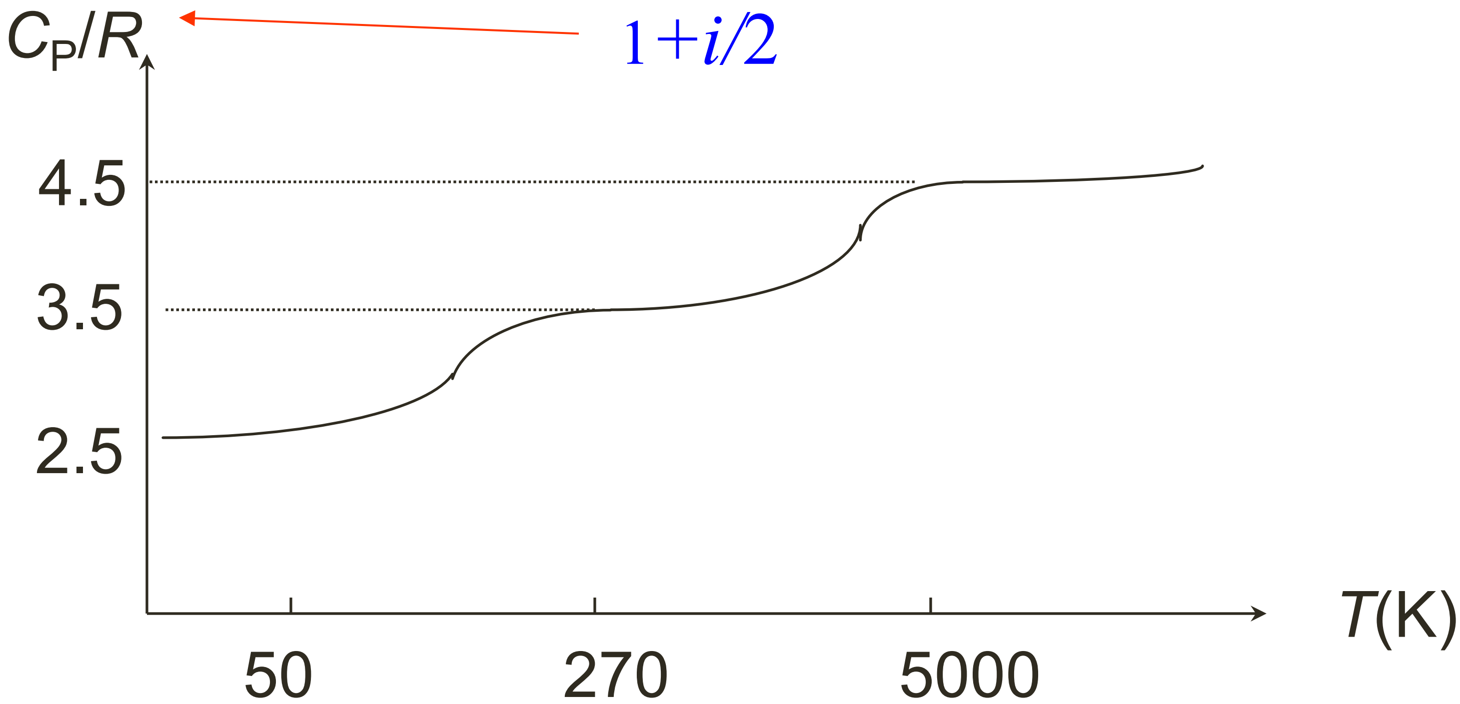
$$C_V=\frac{i}{2}R \qquad C_P=(1+\frac{i}{2})R \qquad \gamma=\frac{2+i}{i}$$

$C<0$ ? 恒星；对外做功比吸热多的过程

用 $\gamma$ 值和实验比较，常温下符合很好，
多原子分子气体则较差，见教材

# 量子效应

氢气




经典理论有缺陷，需量子理论。

低温时，只有平动，$i=3$；

常温时，转动被激发， $i=3+2=5$；

高温时，振动也被激发， $i=3+2+2=7$。