

学习热力学的意义

1.掌握自然界的基本规律

热一： 能量守恒

热二： 自然过程的方向

2.学习唯象的研究方法

以实验为基础的逻辑推理的研究方法

3.熵 (S) 的概念与“信息技术”密切相关

4.热能是重要的能源，也是维持生命的主要来源

第五章 热力学第一定律

(First law of thermodynamics)

§ 5.1 热力学过程



§ 5.2 功



§ 5.3 热量、热力学第一定律



§ 5.4 热容



§ 5.5 绝热过程



§ 5.6 循环过程



§ 5.7 卡诺循环



§ 5.8 致冷循环



§ 1 准静态过程

(quasi-static process)

热力学系统从一个状态变化到另一个状态，称为**热力学过程**（简称“过程”）。

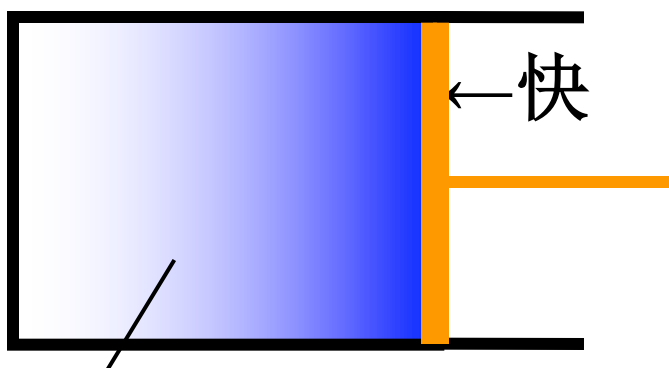
过程进行的任一时刻系统的状态并非平衡态。



热力学中，为能利用平衡态的性质，引入**准静态过程**的概念。

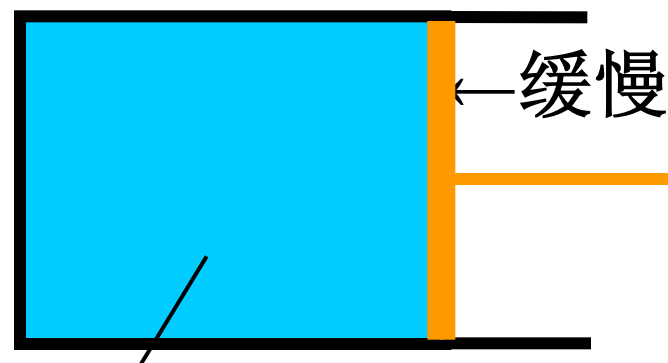
准静态过程：系统的每一状态都**无限接近于平衡态**的过程。即准静态过程是由一系列平衡态组成的过程。

准静态过程是一个**理想化**的过程，是实际过程的近似。



非平衡态

非准静态过程



接近平衡态

准静态过程

平衡即不变
过程即变化 } 矛盾 \Rightarrow 统一于 “无限缓慢”

只有过程进行得无限缓慢，每个中间态才可看作是平衡态。

如何判断 “无限缓慢” ？

引入弛豫时间（relaxation time） τ ：

平衡破坏 $\xrightarrow{\tau}$ 恢复平衡

$\Delta t_{\text{过程}} > \tau$ ：过程就可视为准静态过程

所以无限缓慢只是个相对的概念。

例如分析内燃机气缸内的气体经历的过程：

气体压强的弛豫时间：

$$\tau_p = \frac{L}{\bar{v}}$$

—— 容器的线度
—— 分子热运动平均速率

气缸线度： $L \sim 10^{-1} \text{ m}$

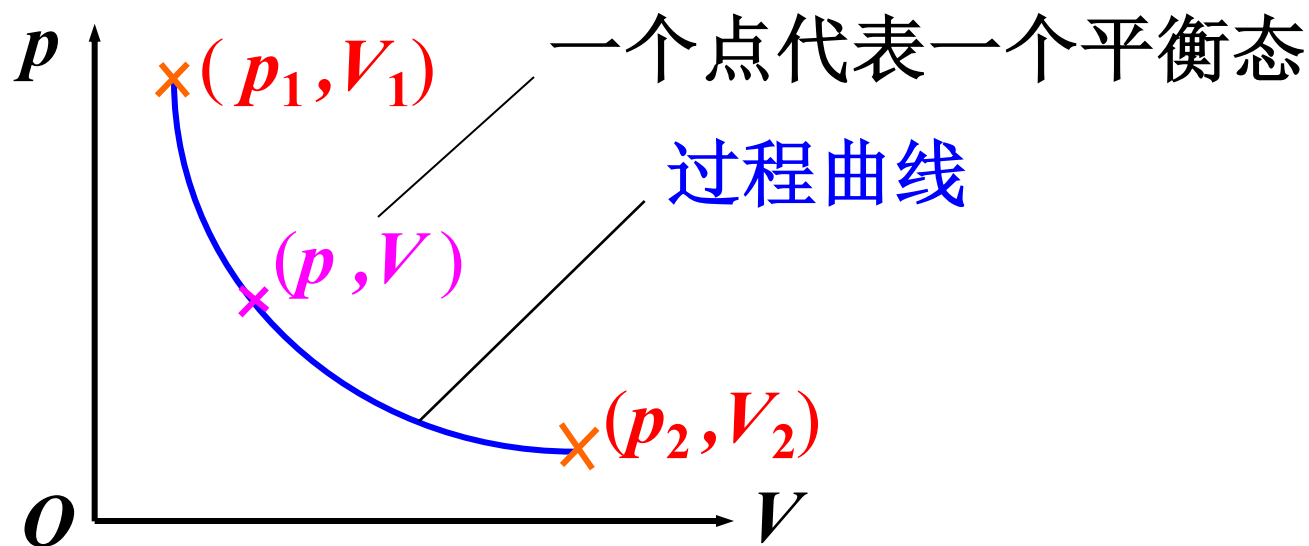
分子平均速率： $\bar{v} \sim 10^2 \text{ m/s}$

} $\tau_p \sim 10^{-3} \text{ s}$

内燃机活塞运动周期 $\Delta t \sim 10^{-2} \text{ s} > \tau_p$

所以汽缸的压缩过程可认为是准静态过程。

准静态过程可以用过程曲线来表示：



改变系统状态的方法：1. 做功
2. 传热



§ 2功 (work)

一.功 (work) 通过做功可以改变系统的状态

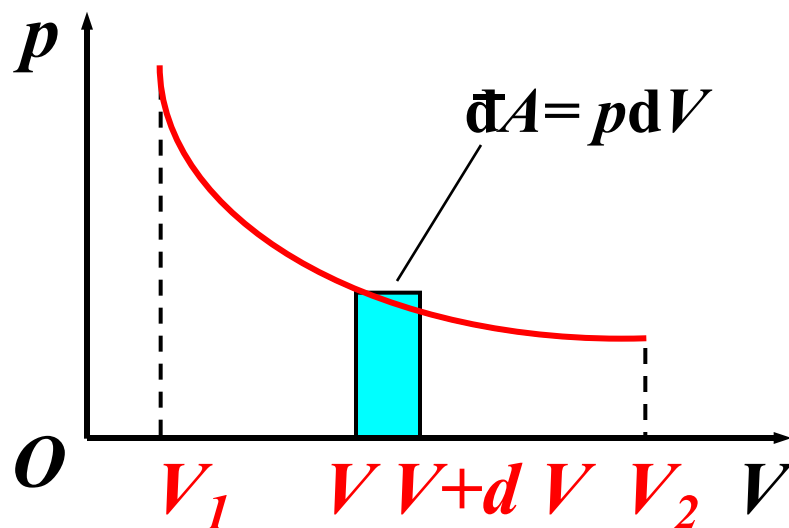
体积功 $\delta A = p dV$

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV$$

—过程量

摩擦功 $\delta A = f_r dl$

电流的功 $\delta A = U dq = UI dt$



通过做功改变
系统的热力学状
态的微观实质:

分子规则运动的能量 $\xrightarrow{\text{碰撞}}$
分子无规则运动的能量



[例] ν mol 理想气体, T 不变, $V_1 \rightarrow V_2$

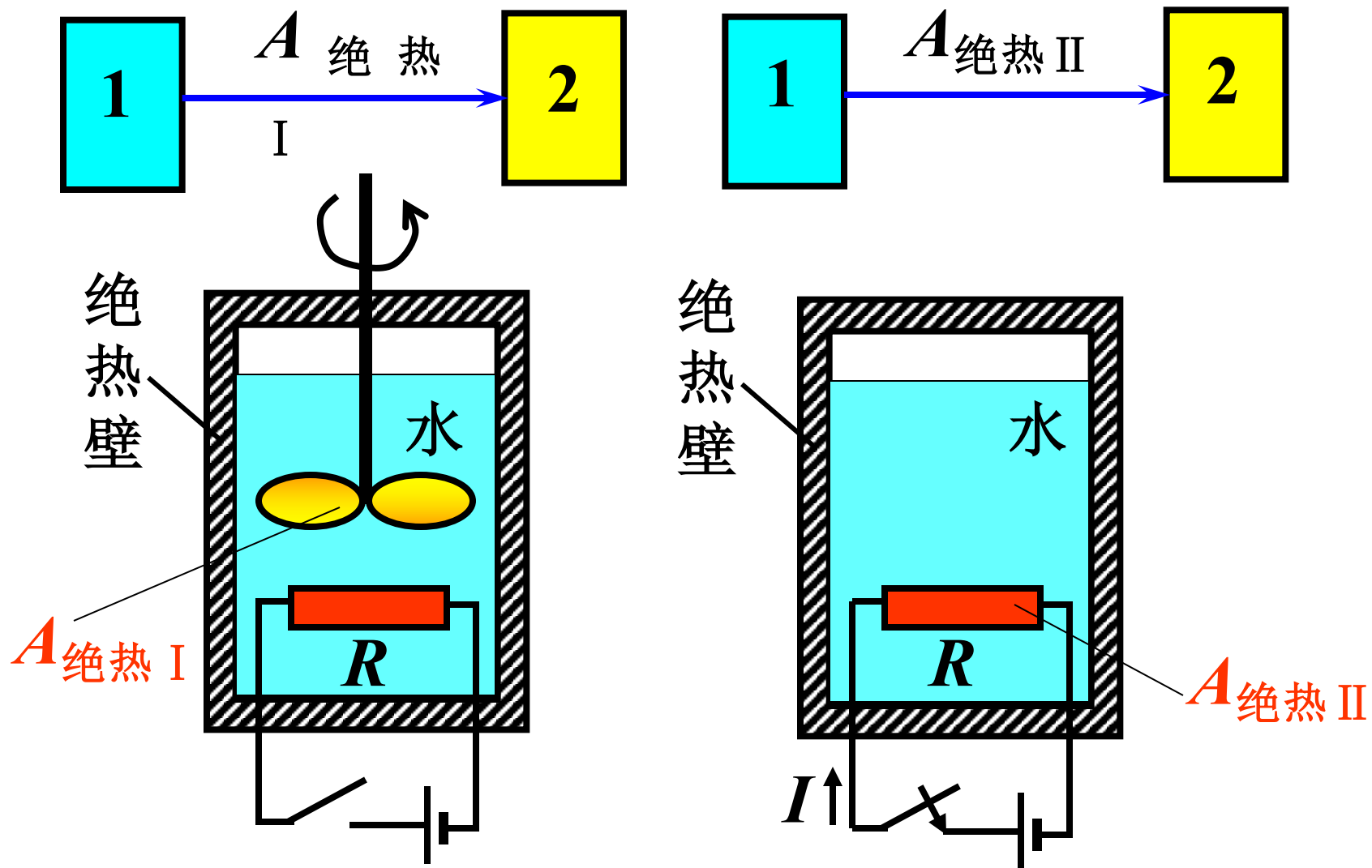
求: 等温过程中系统对外做功?

解: 由理想气体状态方程

$$pV = \nu RT$$

$$\begin{aligned} A &= \int_{V_1}^{V_2} p dV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{\nu RT}{V} dV \\ &= \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1} \end{aligned}$$

二.内能 (internal energy)



实验表明：只要1和2状态确定，则

$$A_{\text{绝热I}} = A_{\text{绝热II}} \quad \text{—与过程无关}$$

由此可定义系统内能 U ，令 U 的增量满足关系：

$$U_2 - U_1 = A_{\text{绝热}1 \rightarrow 2}$$

U — 状态量， $U = U(T, V)$

实验和理论都表明： $U_{\text{Ideal Gas}} = U(T)$

从微观上看，系统的内能包括：

- (1) 分子热运动的能量；
- (2) 分子间势能和分子内的势能；
- (3) 分子内部、原子内部运动的能量；
- (4) 电场能、磁场能等。

T 不太大时，系统状态的变化主要是热运动的能量变化和分子间的势能变化
其它形式的运动能量不改变。

气体动理论：
$$U_{\text{Ideal Gas}} = \nu \cdot \frac{i}{2} RT \quad (\text{刚性})$$

§ 3 热量，热力学第一定律

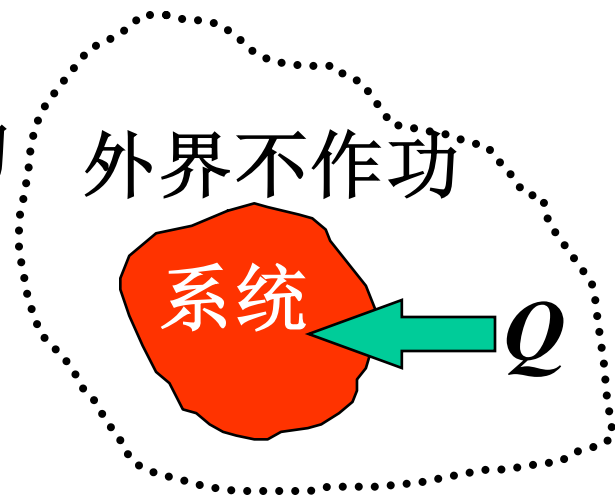
一. 热量 (**heat**) : 通过温度差传递的能量 (定性)
由内能可进一步给出热量的**定量的**定义。

考虑一个传热不作功的过程:  $U_1 \xrightarrow{Q} U_2$

定义: $Q = (U_2 - U_1)$ 不作功

$Q > 0$ 系统吸热

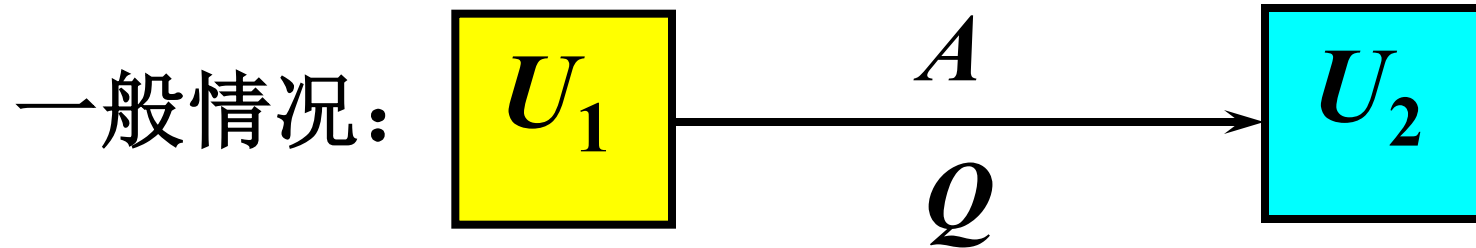
$Q < 0$ 系统放热



传热的微观本质是:

分子无规则运动的能量  碰撞
从高温物体向低温物体的传递

二.热力学第一定律 (first law of thermodynamics)



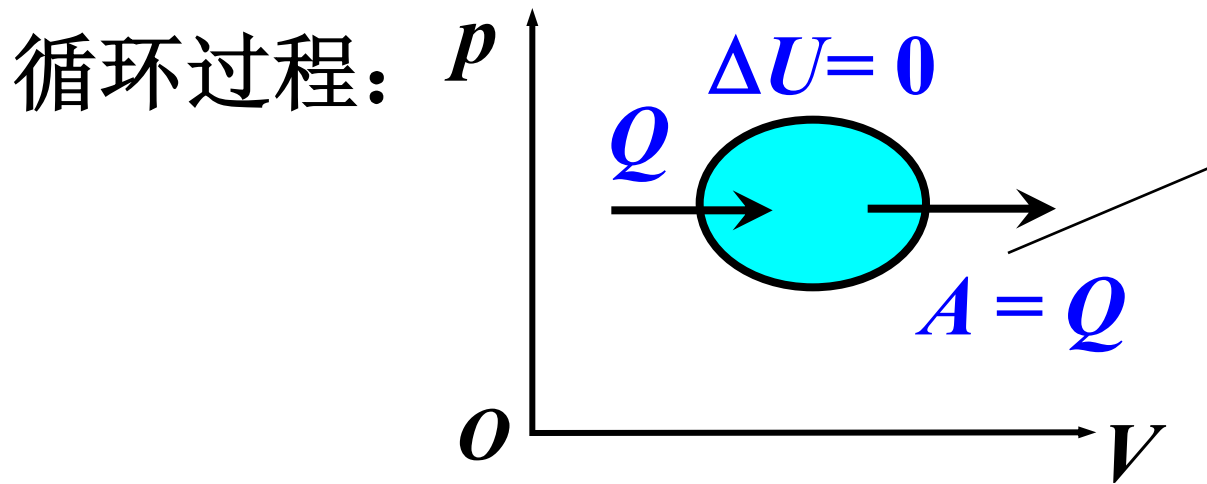
实验表明: $Q = (U_2 - U_1) + A$ (热一律)

系统从外界吸收的热量等于系统内能的增量和系统对外界做功之和。

$A > 0$ 系统对外界做功

$Q > 0$ 系统从外界吸热 Q — 过程量

对任意元过程: $\mathrm{d}Q = \mathrm{d}U + \mathrm{d}A$



“第一类永动机”不存在。

热力学第一定律是热现象中的能量转化与守恒的定律。

热力学第一定律适用于任何系统的任何过程（非准静态过程亦成立）。

§ 4 热容、焓

一. 摩尔热容（量）

定义系统温度升高1度所吸收的热量系统的
热容量，即：

$$C = \frac{\delta Q}{dT}$$

定体热容量

$$C_V = \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_V$$

（体积不变）

定压热容量

$$C_p = \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_p$$

（压强不变）

一摩尔物质温度升高1度所吸收的热量叫
摩尔热容量，即：

$$C_m = \frac{1}{\nu} \left(\frac{\delta Q}{dT} \right) \quad \nu \text{ —— 摩尔数}$$

定体摩尔热容量

$$C_{V, m} = \frac{1}{\nu} \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_V$$

定压摩尔热容量

$$C_{p, m} = \frac{1}{\nu} \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_p$$

二. 定体热容与内能

定体过程: $\Rightarrow \quad \delta Q = dU \quad \Rightarrow \quad C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V$

$\delta A = 0$

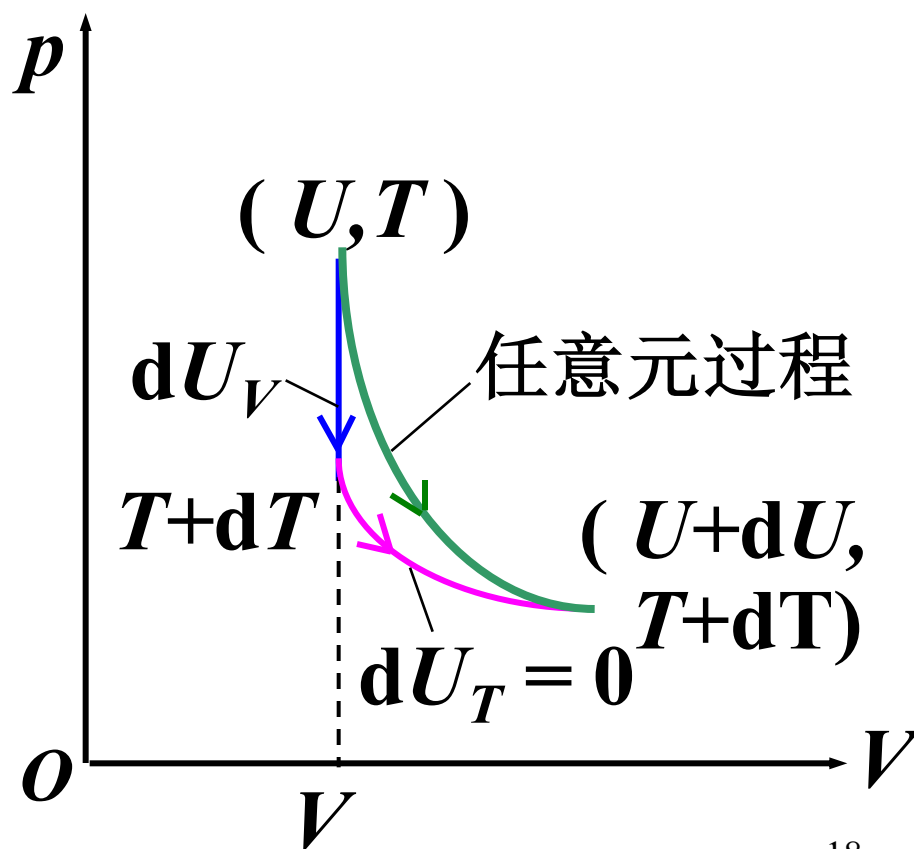
理气, 任意元过程:

$$dU = dU_V + dU_T$$
$$= C_V dT = \nu C_{V,m} dT$$

若 $C_{V,m} = \text{const.}$, 则

$$\Delta U = \nu C_{V,m} \Delta T$$

—理想气体内能公式



三. 定压热容与焓

定压过程:

$$\delta A = p dV$$



$$\delta Q = d(U + pV)$$

$$H \equiv U + pV$$



$$C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p$$

焓是状态函数。对于理想气体，内能和焓只与温度有关： $U = U(T)$

$$\begin{aligned} H(T, p) &= U(T) + pV \\ &= U(T) + \nu RT = H(T) \end{aligned}$$

四. 迈耶公式 (Mayer formula)

对理想气体, 考虑一个等压过程:

$$\delta Q_p = dU + \delta A_p \quad (\text{热一})$$

$$\delta Q_p = \nu C_{p,m} dT$$

$$dU = \nu C_{V,m} dT$$

$$\delta A_p = p dV = d(pV) = \nu R dT$$

$$C_{p,m} - C_{V,m} = R$$

—迈耶公式

定义 比热容比
(比热比)

$$\gamma = \frac{C_{p,m}}{C_{V,m}}$$

由气体分子动理论，对刚性分子理想气体：

$$\left. \begin{aligned} dU &= \nu \frac{i}{2} R dT \\ dU &= \nu C_{V,m} dT \end{aligned} \right\} \boxed{C_{V,m} = \frac{i}{2} R}$$

$$\gamma = \frac{C_{p,m}}{C_{V,m}} = \frac{\frac{i}{2} R + R}{\frac{i}{2} R} = \frac{i+2}{i} = \begin{cases} \frac{5}{3} = 1.67 & \text{(单)} \\ \frac{7}{5} = 1.40 & \text{(双)} \\ \frac{8}{6} = 1.33 & \text{(多)} \end{cases}$$

热容量是可以实验测量的。

γ 的理论值可以与 γ 的实验值比较。

- 常温下：

对单原子分子气体理论值与实验值符合得相当好；

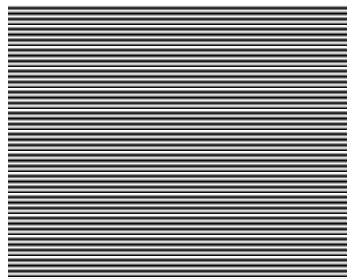
对双、多原子分子气体符合稍差；

- 在大的温度范围上看热容与温度有关。

即 $C_{V,m}$ ， $C_{p,m}$ 和 γ 都并非常量。

这是经典理论无法解释的。

分子能量是量子化的：



平动

ε_t 连续



转动

$$\varepsilon_r = l(l+1) \frac{h^2}{8\pi^2 I}$$

振动

$$\varepsilon_v = (n + \frac{1}{2}) h \nu$$

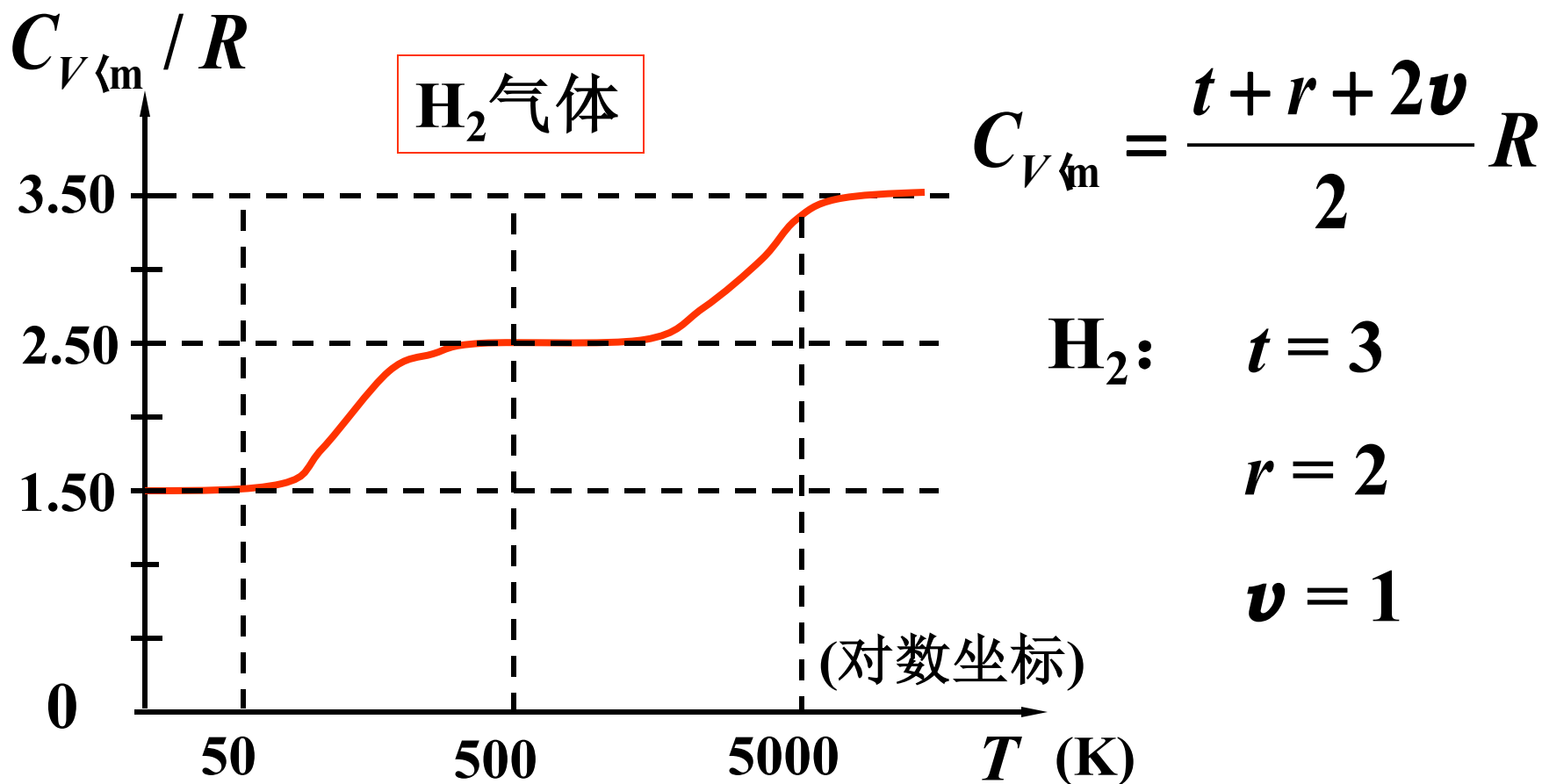
$kT > \Delta\varepsilon_r$ 时转动能级才能激发（转动起作用）

$kT > \Delta\varepsilon_v$ 时振动能级才能激发（振动起作用）

特征温度： $T_r^* = \frac{\Delta\varepsilon_r}{k}$ （几—几十 K）

$$T_v^* = \frac{\Delta\varepsilon_v}{k} \quad (\text{数千 K})$$

对H₂分子: $T_r^* = 85 \text{ K} \ll T_v^* = 6.1 \times 10^3 \text{ K}$



常温下，不易发生振动能级的跃迁，分子可视为刚性（振动自由度被“冻结”）。



§ 5 绝热过程 (adiabatic process)

绝热过程：系统和外界没有热量交换的过程。

例如：

- 良好绝热材料包围的系统发生的过程；
- 进行得较快而来不及和外界交换热量的过程。

特点： $\delta Q = 0$

$$\text{由 } \delta Q = dU + \delta A \rightarrow \delta A = -dU$$

一. 理想气体的准静态绝热过程

过程时间 \ll 传热时间

$$\text{热一: } \underbrace{0}_{\delta Q} = \underbrace{pdV}_{\delta A} + \underbrace{\nu C_{V,m}dT}_{dU} \quad \textcircled{1}$$

$$pV = \nu RT \rightarrow p dV + V dp = \nu R dT \quad \textcircled{2}$$

$$R = C_{p,m} - C_{V,m} \quad \textcircled{3}$$

$$\textcircled{1} \textcircled{2} \textcircled{3}: \quad \frac{dp}{p} = -\frac{C_{p,m}}{C_{V,m}} \frac{dV}{V} = -\gamma \frac{dV}{V}$$

常温下 $\gamma = \text{const.}$

$$\int \frac{d p}{p} = \int -\gamma \frac{d V}{V} \rightarrow \ln p = -\gamma \ln V + C'$$

$$\ln(p V^{\gamma}) = C' \xrightarrow{\text{令}} \ln C$$

\therefore

$$p V^{\gamma} = C$$

—— 绝热过程方程

或

$$p_1 V_1^{\gamma} = p_2 V_2^{\gamma}$$

$$T V^{\gamma-1} = \text{const.}$$

$$p^{\gamma-1} T^{-\gamma} = \text{const.}$$

} 自己推导

绝热线比等温线陡，因为：

$$p = nkT$$

等温膨胀 (U 不变)

$$V \uparrow \rightarrow n \downarrow \rightarrow p \downarrow$$

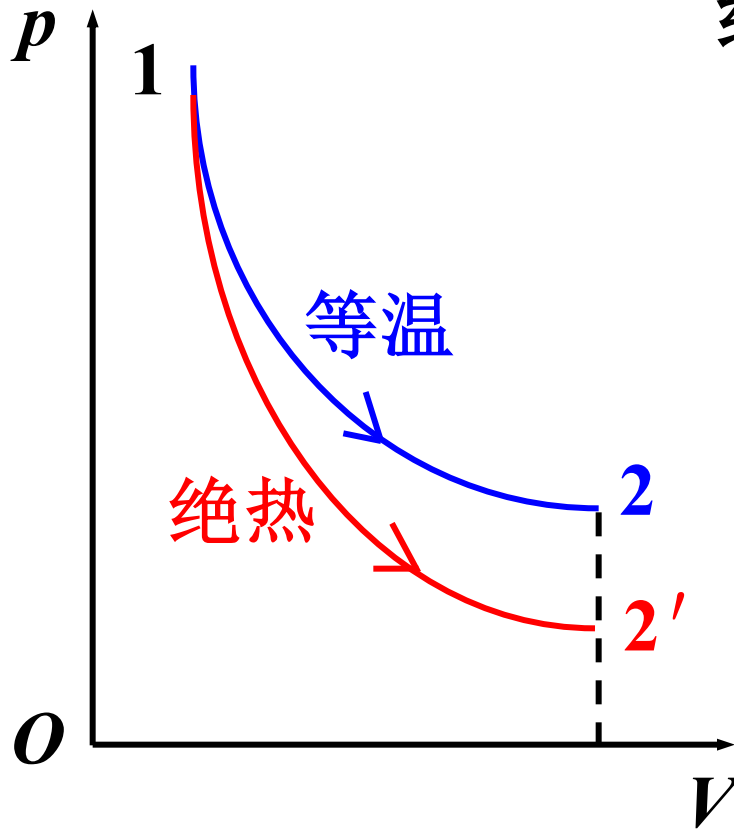
绝热膨胀

$$V \uparrow \rightarrow n \downarrow$$

$$U \downarrow \rightarrow T \downarrow$$

$$\left. \begin{array}{l} V \uparrow \rightarrow n \downarrow \rightarrow p \downarrow \\ U \downarrow \rightarrow T \downarrow \end{array} \right\} \rightarrow p \downarrow \downarrow$$

$$p_2 > p_{2'}$$



绝热功：

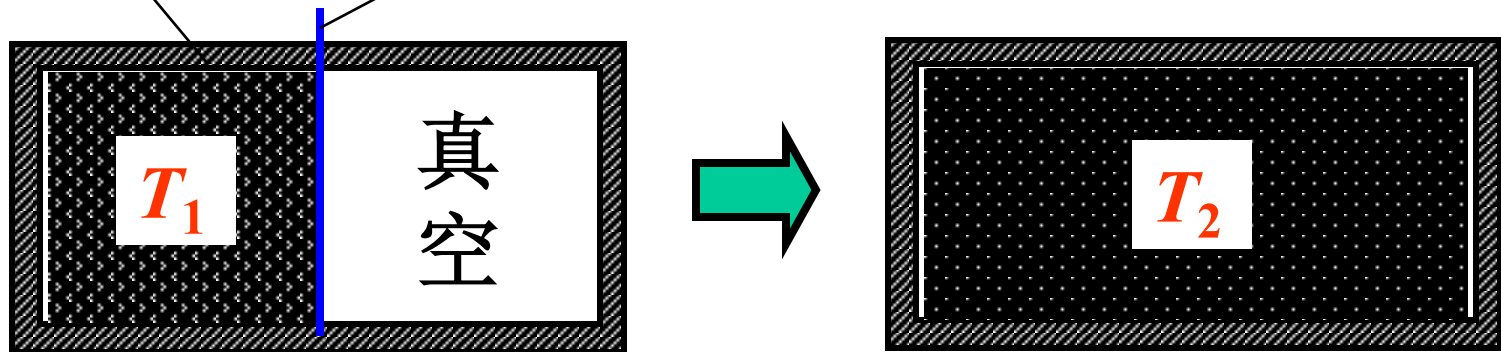
$$A = \int_{V_1}^{V_2} p \, dV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{p_1 V_1^\gamma}{V^\gamma} \, dV$$

$$= \frac{1}{\gamma - 1} [p_1 V_1 - p_2 V_2]$$

二. 绝热自由膨胀 (非准静态绝热过程)

绝热刚性壁

隔板

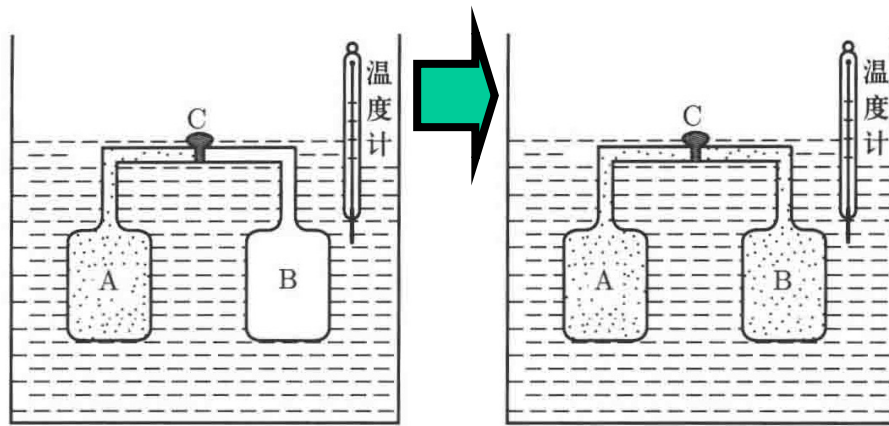


$$\left. \begin{array}{l} \text{器壁绝热: } Q = 0 \\ \text{向真空膨胀: } A = 0 \end{array} \right\} \xrightarrow{\text{热一律}} U_1 = U_2$$

对理想气体: $T_1 = T_2$ (是否等温过程?)

对真实气体: 分子力以引力为主时 $T_2 < T_1$

分子力以斥力为主时 $T_2 > T_1$



热力学第一定律:

$$\Delta U = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V \Delta T + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T \Delta V = 0$$

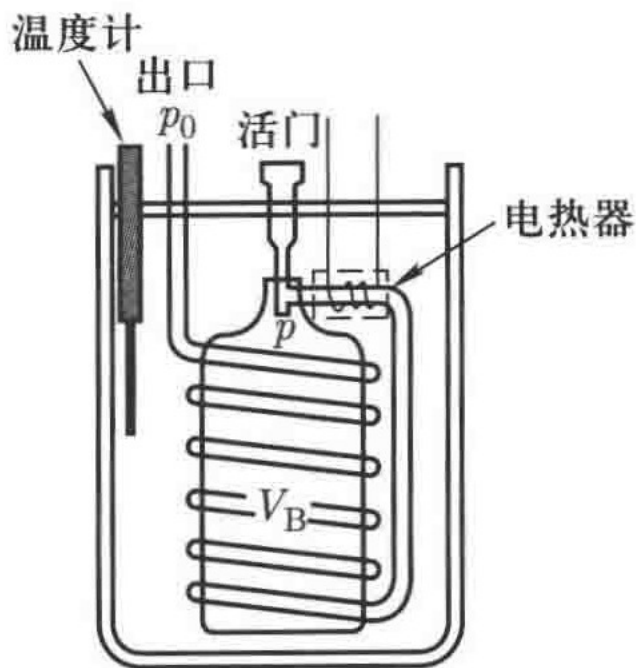
对稀薄气体实验测得: $\Delta V \neq 0$ 时 $\Delta T = 0$

$$\rightarrow \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T = 0$$

三. Rossini & Frandsen 实验

气体绝热自由膨胀的实验很难得到精确结果。

Rossini and Frandsen 实验 (1932)



- 储气瓶体积 V_B , 初始压强 p , 质量 ν , 大气压 p_0 时摩尔体积 $V_{m,0}$
- 电热器和温度计保证过程等温 T

— 内外平衡后, 气体体积改变

$$\Delta V = \nu V_{m,0} - V_B$$

气体对外做功 $A = p_0 \Delta V$

— 电热器传递给气体的热量为 Q (可测量)

$$\Delta U = U(p, T) - U(p_0, T) = -A + Q$$

$$\Delta U = U(p, T) - U(p_0, T) = -A + Q$$

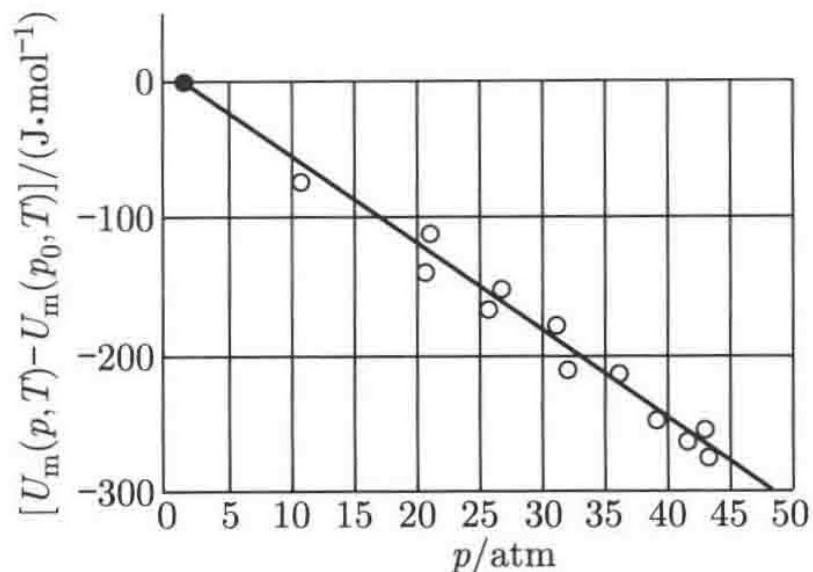
$$= -p_0(\nu V_{m,0} - V_B) + Q$$

– 在同样温度、不同初始压强下实验结果

$$\Delta U_m(p, T) = -f(T) (p - p_0)$$

$$f(T) \sim 6 \frac{\text{J}}{\text{atm} \cdot \text{mol}}$$

$$\sim 6 \times 10^{-5} \frac{\text{J}}{\text{Pa} \cdot \text{mol}}$$



28°C空气的实验结果

表明高压时对理想气体有所偏离。

- **Rossini & Frandsen** 实验是在等温条件下进行的。压强变化（等效为体积变化）造成内能改变（1mol气体）

$$\Delta U_T = -f(T)\Delta p$$

- 如果是等容过程，压强也改变相同值，温度改变引起内能变化

$$\Delta T = \frac{V_m}{R} \Delta p \rightarrow \Delta U_V = c_{V,m} \frac{V_m}{R} \Delta p$$

对1mol空气：

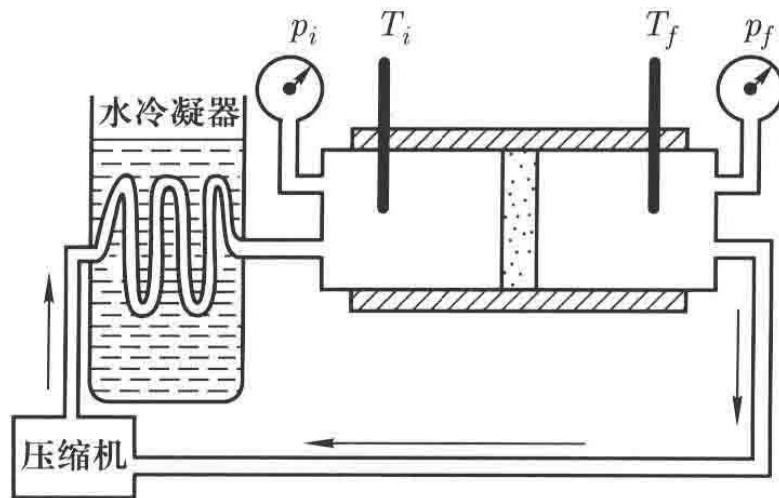
$$\frac{|\Delta U_T|}{\Delta U_V} = \frac{f(T)}{c_{V,m} \frac{V_m}{R}} = \frac{f(T)p}{\frac{c_{V,m}}{R} RT} \sim 10^{-3}$$

说明内能随体积的变化远小于随温度的变化。

四.焦耳 — 汤普孙效应

节流过程： 高压气体经过多孔塞流到低压一侧的稳定流动称为节流过程。

常温常压下节流后，一般气体温度下降 $T_f < T_i$ ，氢、氦等气体温度上升 $T_f > T_i$ 。



这种气体节流膨胀后温度发生变化的现象称为节流效应，也称**焦耳—汤姆逊效应**，且 $T_f < T_i$ 的称为正效应， $T_f > T_i$ 的称为负效应。

- 过程中系统对外做功

$$A = p_f V_f - p_i V_i$$

- 热力学第一定律（绝热过程）

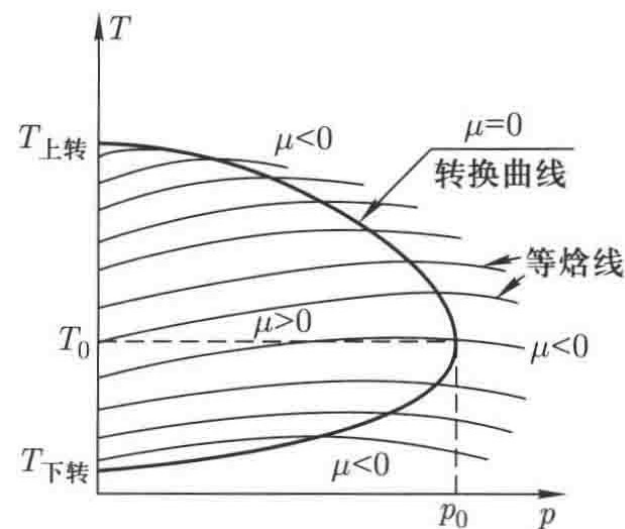
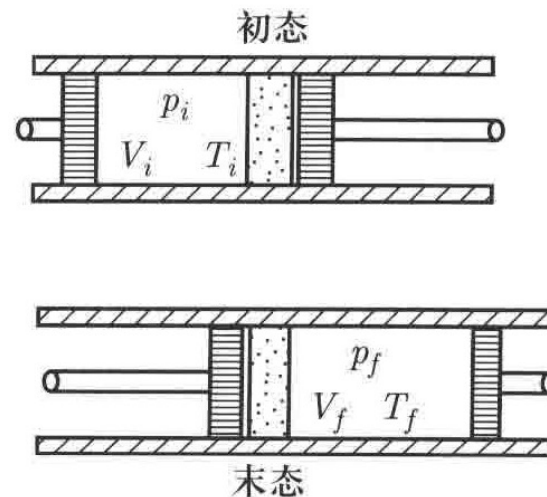
$$0 = Q = U_f - U_i + A$$

$$\rightarrow U_f + p_f V_f = U_i + p_i V_i$$

节流过程前后气体的焓不变。

- 焦耳 — 汤姆孙系数

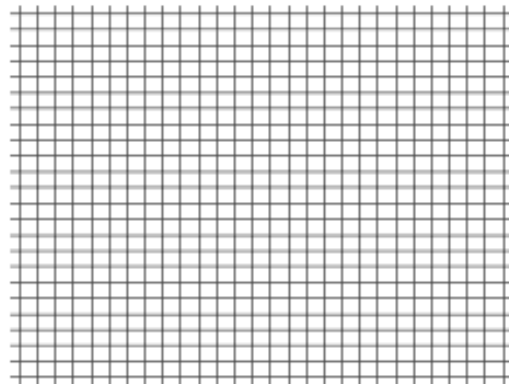
$$\mu = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_H$$



【例】 空气中的声速

声速公式： 声波是介质局部周期性压缩和膨胀在空间形成的疏密相间的**纵波**。

$$c_s = \sqrt{\frac{\partial p}{\partial \rho}} \quad (\text{声速公式})$$



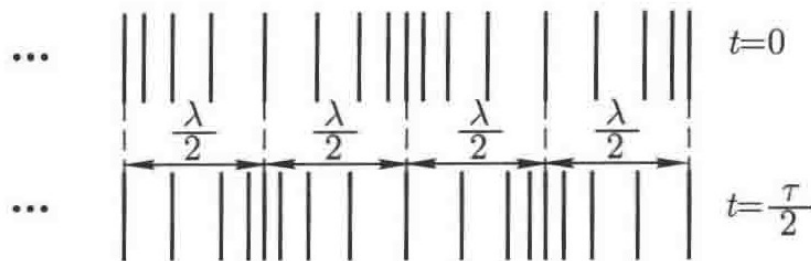
标准状况（0°C, 1atm）干燥空气中测得 $c_s^{ex} = 331.5 \text{ m/s}$

空气看成理想气体。牛顿按等温过程推算

$$\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_T = \left(\frac{\partial(\rho RT/\mu)}{\partial \rho}\right) = \frac{RT}{\mu} = \frac{p}{\rho}$$

$$T = 273.15 \text{ K}, \mu = 0.029 \text{ Kg/mol} \rightarrow c_s = 280 \text{ m/s}$$

与实验不符



声波是疏密波，压缩中心 $n \uparrow, T \uparrow$; 膨胀中心 $n \downarrow, T \downarrow$

- 两中心距离半个波长 $\lambda/2$, 转换时间 $\tau = \lambda/(2C_s)$, 温度差 $\Delta\theta$

- 经热传导通过界面（面积 A ）的热量

$$Q \sim \kappa \frac{\partial T}{\partial z} A \tau \sim \kappa \frac{\Delta\theta}{\frac{\lambda}{2}} A \frac{\lambda}{2C_s} = \kappa A \frac{\Delta\theta}{C_s}$$

- 两个中心变温所需输入热量

$$q \sim \rho c_V V \Delta\theta \sim \rho A \frac{\lambda}{2} c_V \Delta\theta$$

等温条件: $Q \gg q \rightarrow \lambda \ll \frac{2\kappa}{C_s c_V \rho}$; 绝热条件: $Q \ll q \rightarrow \lambda \gg \frac{2\kappa}{C_s c_V \rho}$

等温条件: $Q \gg q \rightarrow \lambda \ll \frac{2\kappa}{c_s c_V \rho}$; 绝热条件: $Q \ll q \rightarrow \lambda \gg \frac{2\kappa}{c_s c_V \rho}$

空气: $\kappa = 0.0237 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

$$C_s = 331 \text{ m/s} \quad c_V = 0.716 \text{ KJ}/(\text{Kg}\cdot\text{K})$$

$$\rho = 1.29 \text{ Kg/m}^3$$

$$\frac{2\kappa}{c_s c_V \rho} = 1.55 \text{ nm} \ll \lambda \approx 0.1 \text{ m}$$

拉普拉斯修正 按绝热过程推算

$$pV^\gamma = \text{const} \rightarrow p = \text{const} \cdot \rho^\gamma \quad \frac{\partial p}{\partial \rho} = \text{const} \cdot \gamma \rho^{\gamma-1} = \gamma \frac{p}{\rho}$$

$$C_s = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}} = 331 \text{ m/s} \quad (\gamma \approx 1.4)$$

$$C_s^{ex} = 331.5 \text{ m/s}$$

【例】绝热指数的测量（Rüchhardt's Method）

气体置于大瓶中，截面积为 S 的玻璃管
竖直插入，管中放置一质量为 m 光滑小球
形成活塞。小球处平衡位置时气体体积 V 。
此时瓶内压强为（设大气压为 p_0 ）

$$p = p_0 + mg/S$$

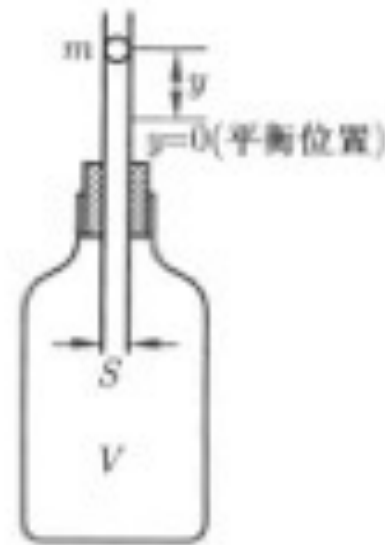
给小球一个扰动后，小球在管内上下振动。

$$pV^\gamma = \text{const.} \rightarrow V^\gamma dp + \gamma p V^{\gamma-1} dV = 0$$

$$dp = -\gamma p \frac{dV}{V}$$

小球离开平衡位置 dy 处受力

$$dF = Sdp = -\frac{\gamma p S^2}{V} dy$$



$$dF = -\frac{\gamma p S^2}{V} dy$$

小球受到一个**弹性恢复力**，弹性系数

$$k = \frac{\gamma p S^2}{V} = \frac{\gamma \left(p_0 + \frac{mg}{S} \right) S^2}{V}$$

小球作简谐振动的圆频率

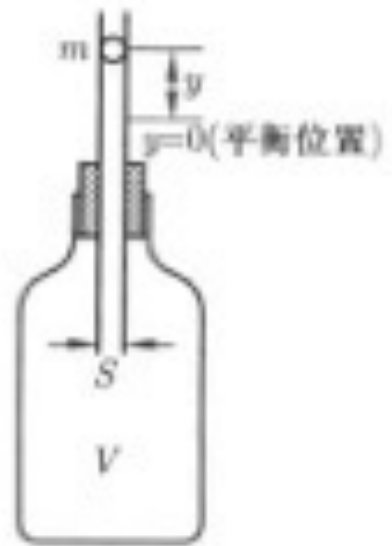
$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{\gamma \left(p_0 + \frac{mg}{S} \right) S^2}{Vm}}$$

实验测定小球振动的圆频率就可得到气体绝热系数。

【问题】 是绝热过程吗？**是准静态过程吗？**

空气导热性很差。

振动产生的波以声速传播

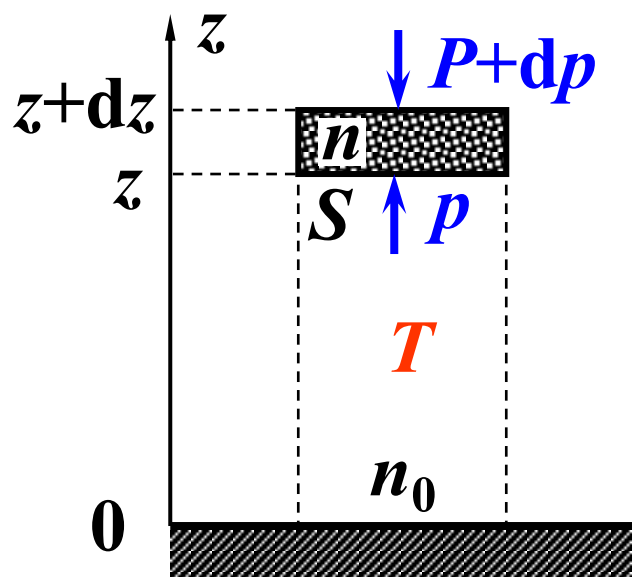


五. 绝热大气模型

干绝热递减率 (Dry Adiabatic Lapse Rate, DALR)

薄层气体：底面积 S ，厚 dz ，

分子质量为 m ，平衡时：



$$(p + dp)S + mgnSdz = pS$$

$$\longrightarrow \boxed{dp = -mgndz}$$

$$p^{\gamma-1}T^{-\gamma} = C \rightarrow \frac{dp}{dT} = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p}{T}$$

$$\frac{dT}{dz} = \frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{T}{p} \frac{dp}{dz} = -\frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{M_{\text{mol}}g}{R}$$

$$\approx -10 \text{ K/km}$$

二. 饱和绝热递减率

(Saturated Adiabatic Lapse Rate, SALR)

大气中水蒸气的含量 $\sim 3-4\%$ ，其影响：

- ① 低空时温度高，未饱和水蒸汽，无特别影响
- ② 高空时温度低，饱和水蒸汽，蒸发/凝结

水蒸气摩尔汽化热： Λ_0

大气中水蒸汽的摩尔数：

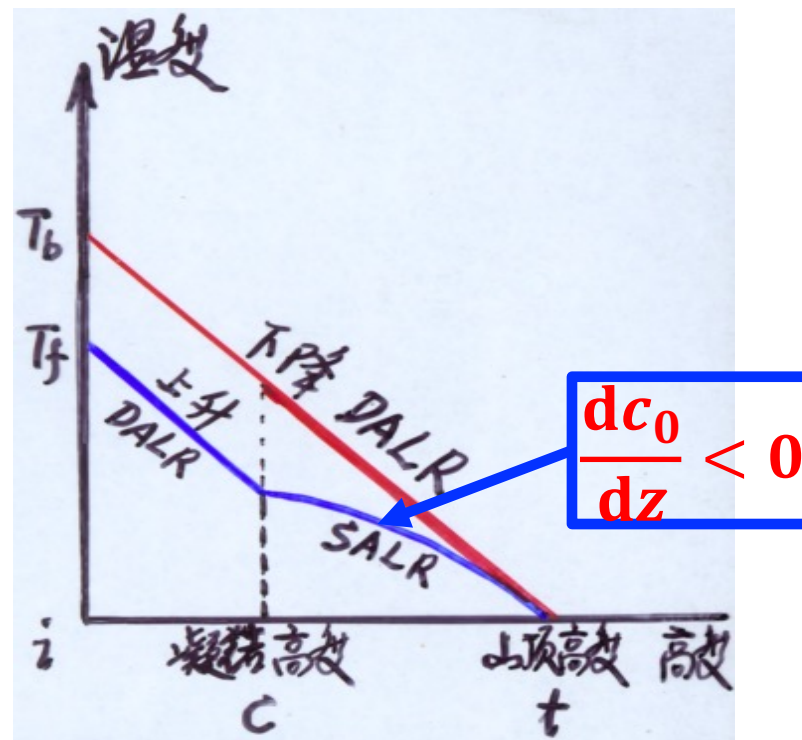
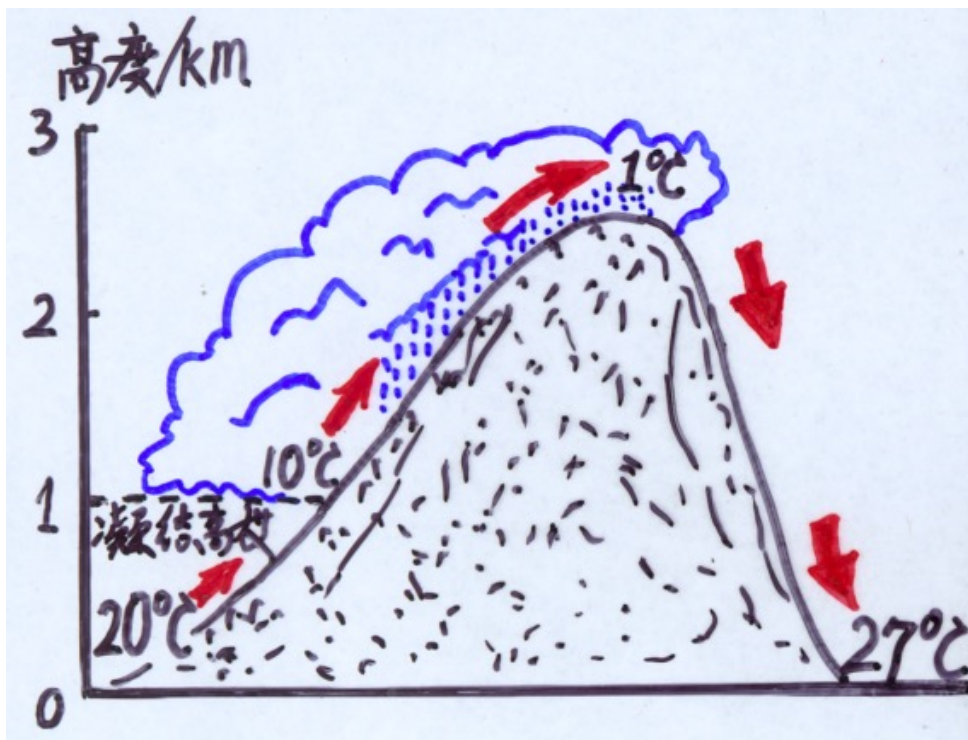
大气中水蒸汽的摩尔数比例： $c_0 = v_0/v$

$$\left. \begin{array}{l} -\Lambda_0 dv_0 = p dV + C_V dT \\ p dV + V dp = v R dT \\ dp = -m g n dz \end{array} \right\} \frac{dT}{dz} = -\frac{1}{R + C_{V,m}} \left(\frac{M_{\text{mol}} g}{R} + \frac{\Lambda_0}{R} \frac{dc_0}{dz} \right)$$

由此得到饱和绝热递减率（SALR）：

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{\gamma - 1}{\gamma} \left(\frac{M_{\text{mol}} g}{R} + \frac{\Lambda_0}{R} \frac{dc_0}{dz} \right)$$

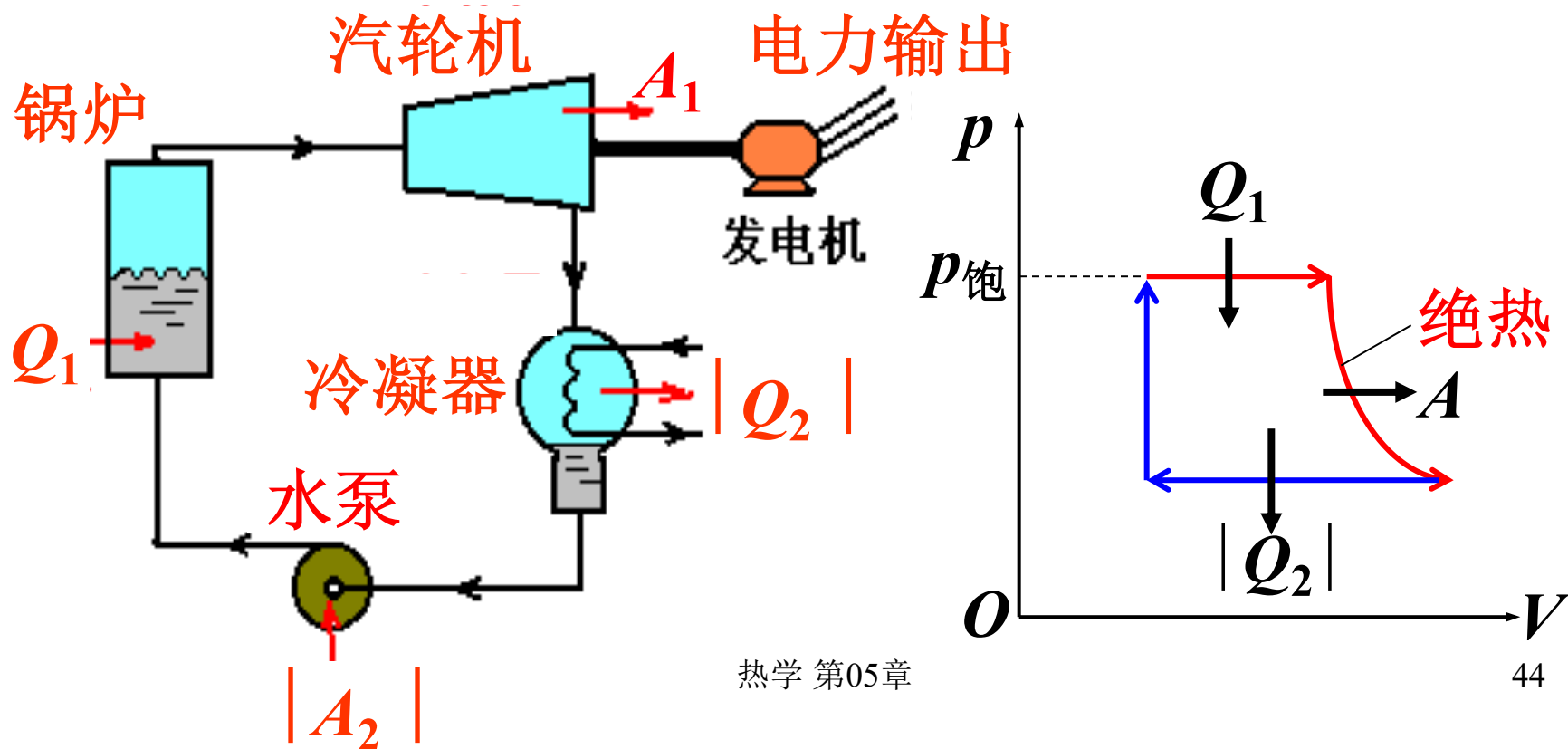
焚风效应



§ 6 循环过程 (cycle process)

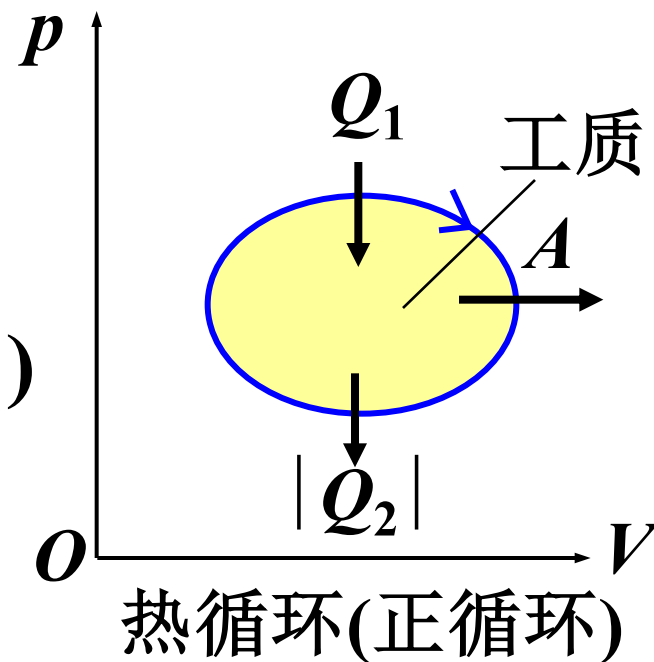
热机循环过程:系统(如热机中的工质)经一系列变化后又回到初态的整个过程叫循环过程。

实例：火力发电厂的热力循环



如果循环的各阶段均为准静态过程，则循环过程可用状态图(如 P - V 图)上的闭合曲线表示。

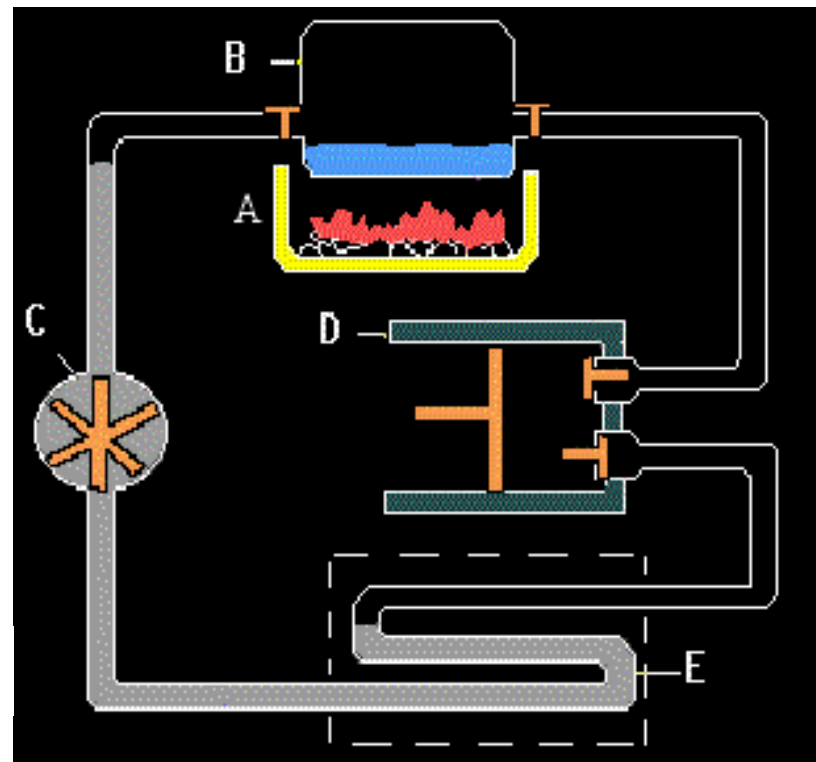
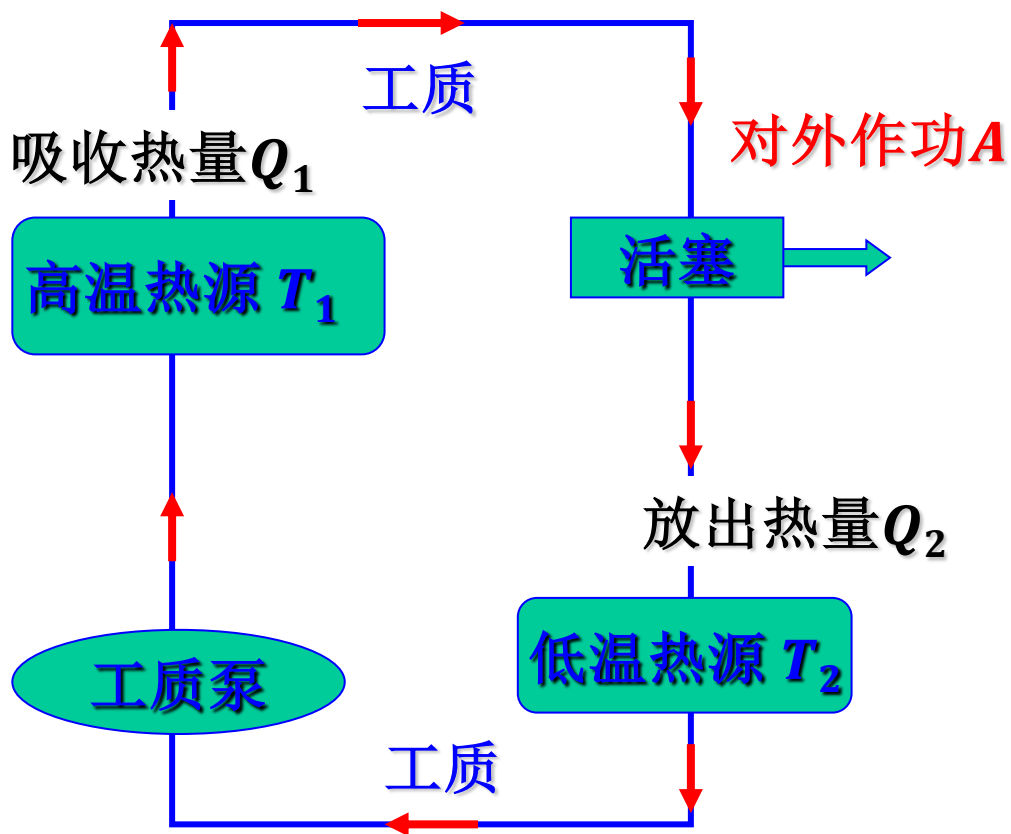
定义热循环效率



$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}$$

$$\eta_{\text{蒸汽机}} \sim \text{十几} \% , \quad \eta_{\text{内燃机}} \sim 20 - 30 \%$$

正循环过程示意图

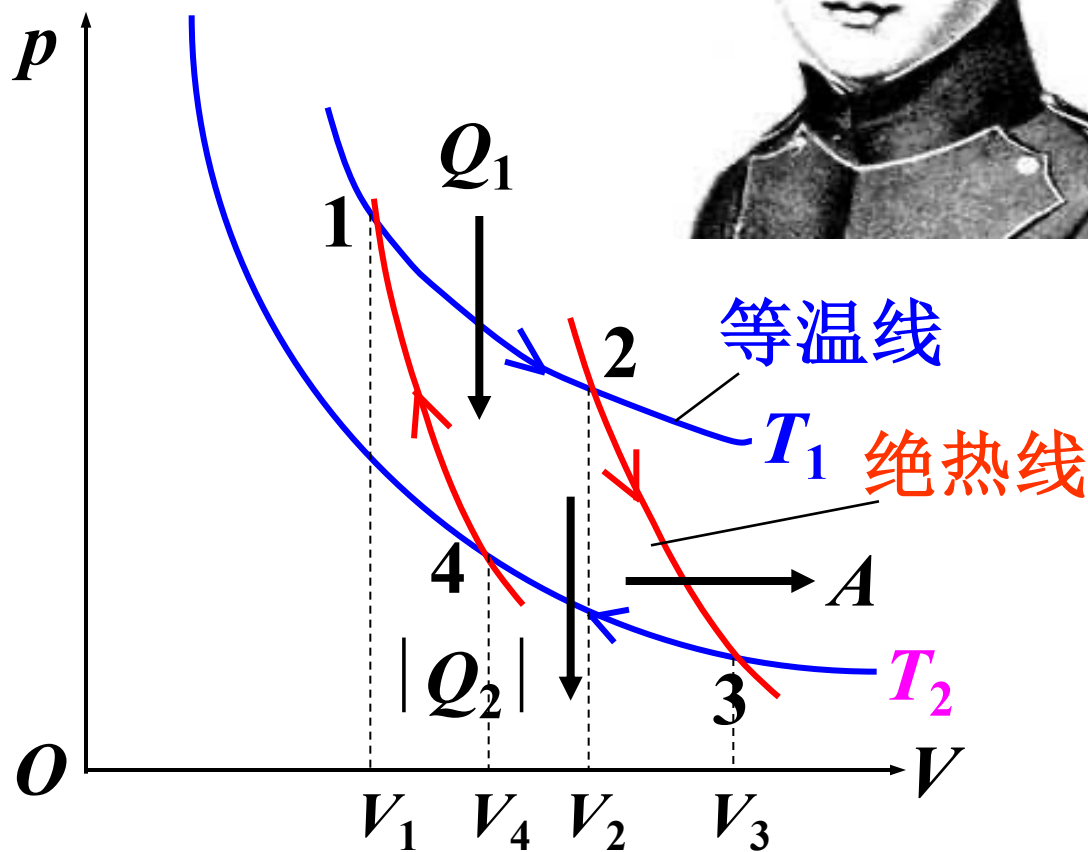
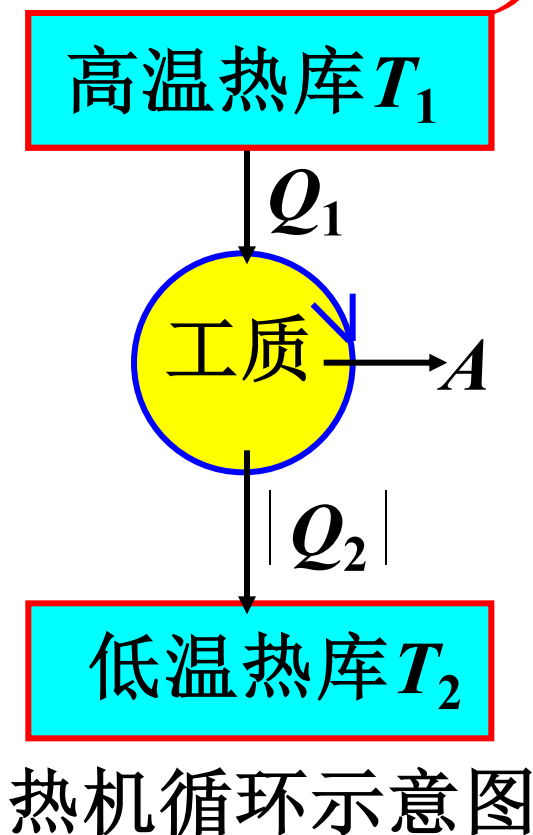


A:高温热源, B:锅炉, C: 泵
D-- 气缸, E-- 低温热源

§ 7 卡诺循环 (Carnot cycle)

卡诺 (Carnot, 法国人, 1796-1832)

卡诺循环：工质只和两个恒温热库交换热量的准静态、无摩擦的循环。



对理想气体工质：

等温
过程

$$1 \rightarrow 2: Q_1 = A_1 = \nu R T_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$3 \rightarrow 4: |Q_2| = |A_2| = \nu R T_2 \ln \frac{V_3}{V_4}$$

$$\eta_c = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{T_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}{T_1 \ln \frac{V_2}{V_1}}$$

绝热
过程

$$\left. \begin{array}{l} 2 \rightarrow 3: T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1} \\ 4 \rightarrow 1: T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_4^{\gamma-1} \end{array} \right\} \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$$

(闭合条件)

卡诺热机循环的效率

$$\eta_c = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

说明：① η_c 与理气种类、 M 、 p 、 V 的变化无关，
只与 T_1 、 T_2 有关。

② $T_1 \uparrow$ ， $T_2 \downarrow \rightarrow \eta_c \uparrow$ ，实用上是 $\uparrow T_1$ 。

现代热电厂： $T_1 \sim 600^\circ\text{C} \text{ (900K)}$ $\text{ } T_2 \sim 30^\circ\text{C} \text{ (300K)}$

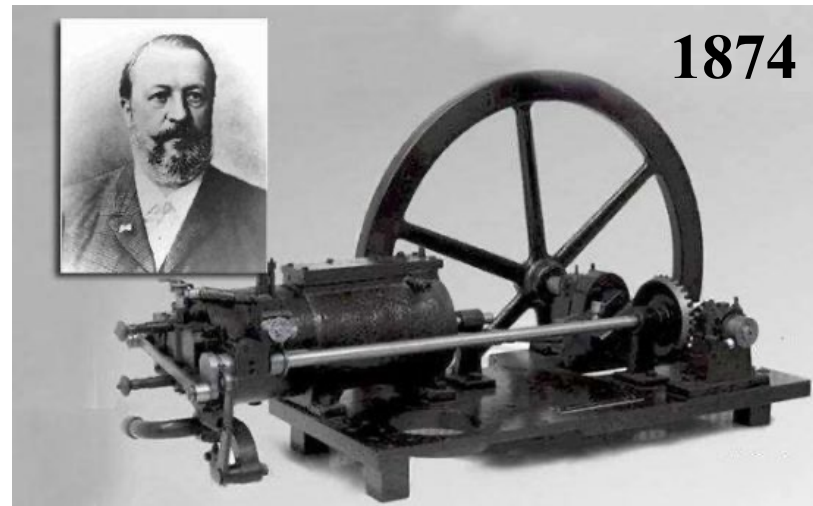
理论上： $\eta_c \sim 65\%$ ， 实际： $\eta < 40\%$ ，

原因： 非卡诺，非准静态，有摩擦。



奥托循环

蒸汽机：外加热
内燃机：内加热

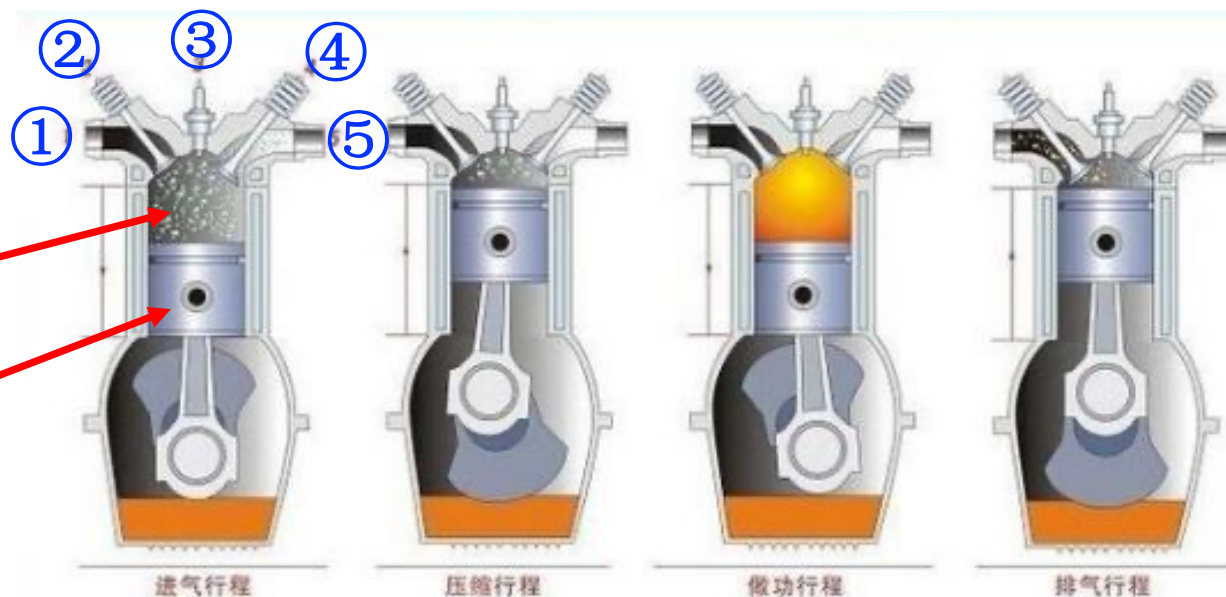


1874

- ① 排气道
- ② 排气气门
- ③ 火花塞
- ④ 进气气门
- ⑤ 进气道

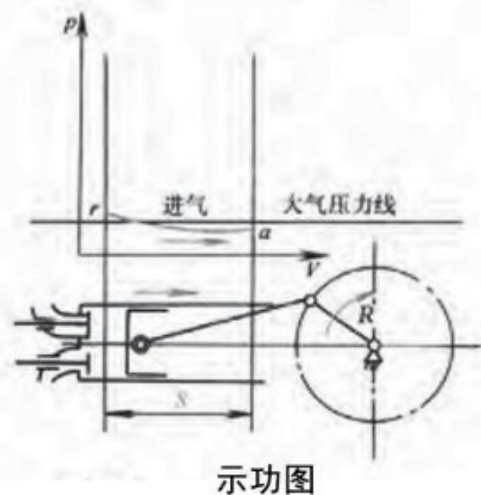
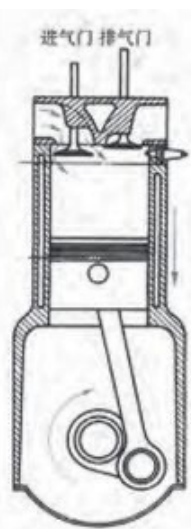
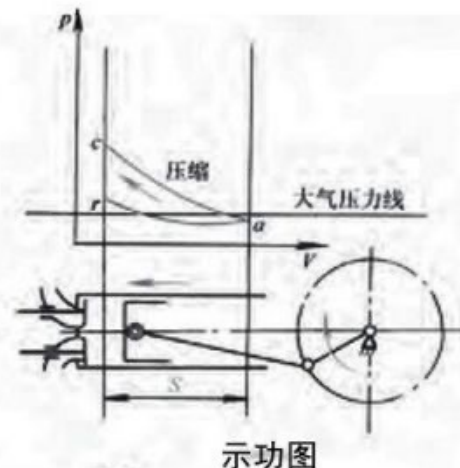
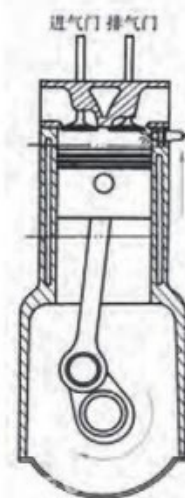
可燃混合气

活塞



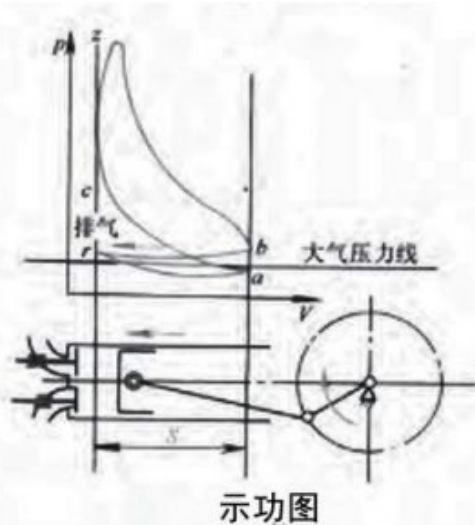
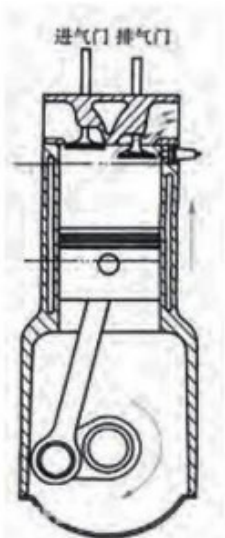
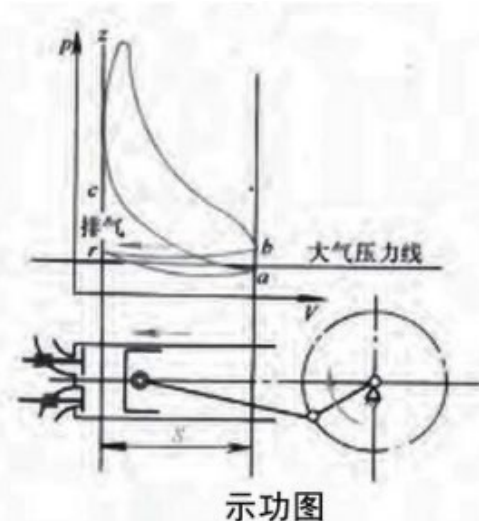
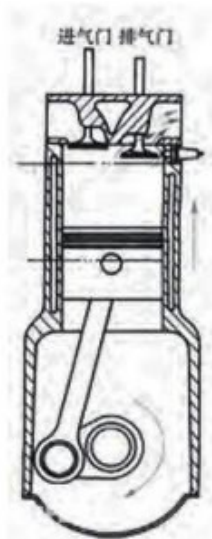
https://www.sohu.com/a/227035149_499173

进气行程 进气门开启，排气门关闭。活塞从上止点往下止点运动，上部的容积逐渐增大，气缸内部的压力随之减小。可燃混合气就从进气门中直接吸入了气缸。缸内压力为 $0.075-0.09\text{MPa}$ ，温度 $100-130^{\circ}\text{C}$ 。



压缩行程 进排气门均关闭，活塞从下止点往上止点运动的过程中，上部的容积逐渐减小，混合气被压缩，缸内压力逐渐升高，最后达到了 $0.6-1.2\text{MPa}$ ，温度升高至 $300-400^{\circ}\text{C}$ 。

做功行程 进排气门处于关闭状态，活塞接近上止点时，火花塞点燃压缩混合气。压力达到3-5MPa，温度1900-2500℃。活塞从上止点向下止点运动，缸内容积增加，气压和温度随之下降，最终到达做功终点，此时缸内的压力为0.3-0.5MPa，温度为1000-1300℃。



排气行程 进气门关闭，排气门开启。活塞由下止点往上止点运动，气缸内的废气排到气缸之外。当活塞接近上止点时，排气门关闭。此时大气压约为0.105-0.115MPa（略高于标准大气压），温度为600-900℃。

奥托循环的效率

绝热
过程

$$T_A V_1^{\gamma-1} = T_B V_2^{\gamma-1}$$

$$T_C V_2^{\gamma-1} = T_D V_1^{\gamma-1}$$

等容
过程

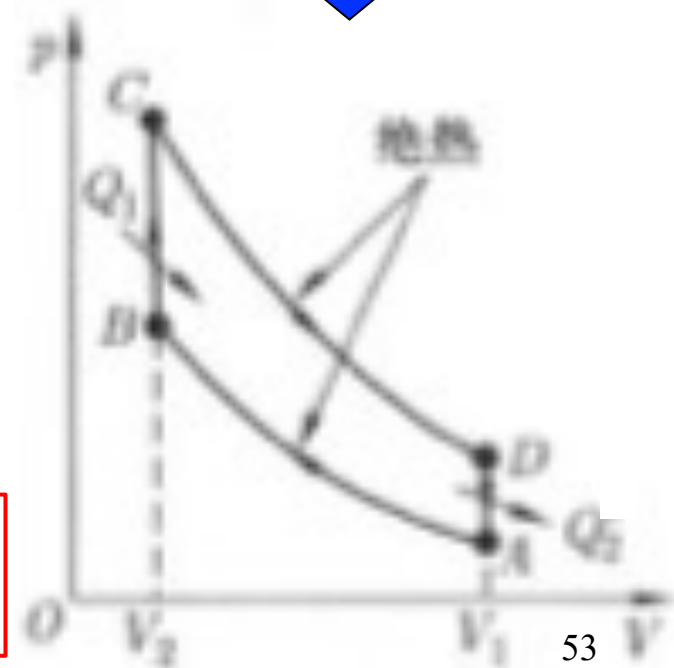
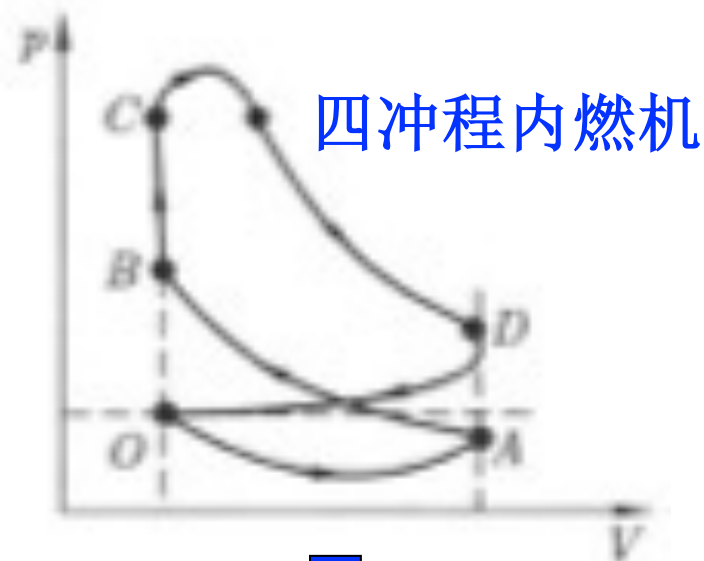
$$Q_1 = C_V(T_C - T_B)$$

$$Q_2 = C_V(T_A - T_D)$$

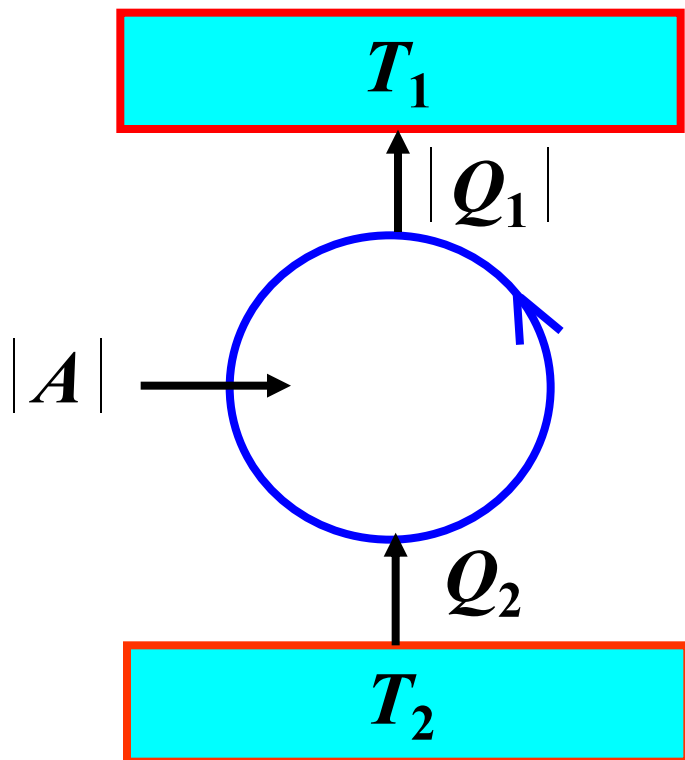
$$\eta = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{T_A - T_D}{T_C - T_B}$$
$$= 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \quad r = \frac{V_1}{V_2} \text{ (压缩比)}$$

2024春季学期

热学 第05章



§ 8 致冷循环



致冷系数

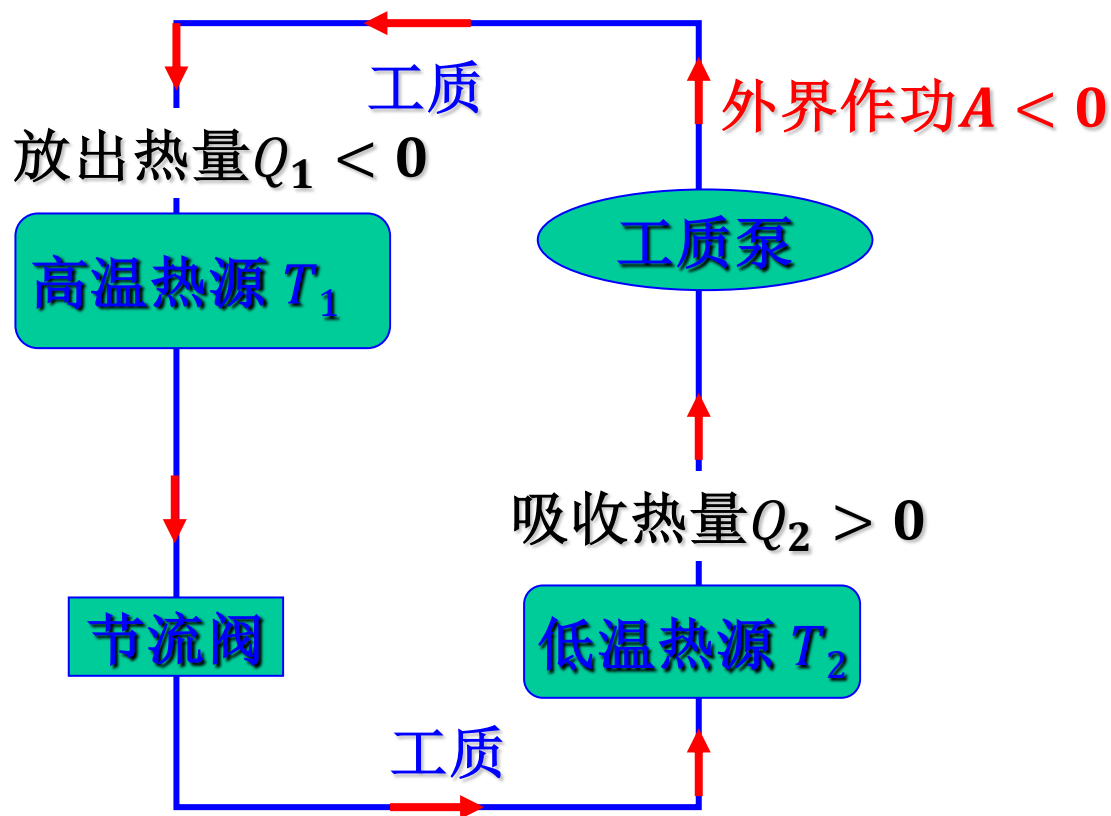
$$w = \frac{Q_2}{|A|}$$

卡诺致冷机

$$w_c = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$



逆循环过程——制冷系数



制冷系数: 制冷机在一个循环过程中的制冷量与外界做功之比, 即

$$w = \frac{Q_2}{|A|}$$