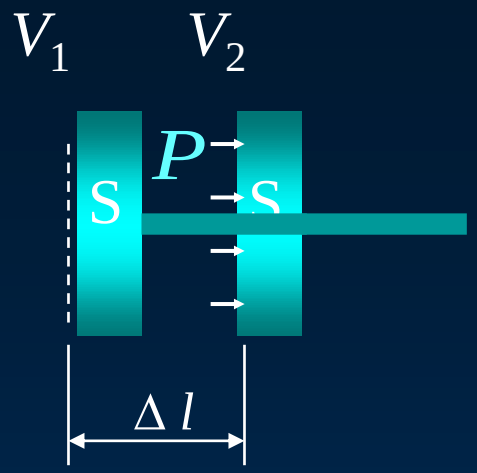
三、等温过程

特征： $T = const \quad dT = 0$

等温过程 = 等内能过程 $dE = 0$

恒温热源



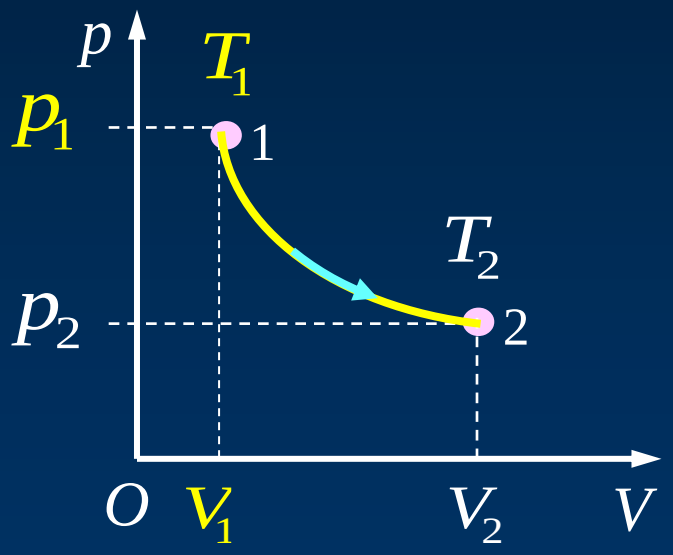
$$A = \int_{V_1}^{V_2} P\mathrm{d}V = \int_{V_1}^{V_2} \frac{\nu RT}{V}\mathrm{d}V$$

$$= \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \nu RT \ln \frac{p_1}{p_2}$$

吸收的热量：

$$Q = \Delta E + A$$

$$= 0 + \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \nu RT \ln \frac{p_1}{p_2}$$



等温膨胀过程中，理想气体吸收的热量全部用来对外作功，等温压缩中，外界对系统所作的功，都转化为气体向外界放出的热量。

四、绝热过程

系统在变化过程中始终不与外界交换热量 —— 理想过程

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

特征： $dQ = 0 \longrightarrow dE = -dA$　　P, V, T **如何变化?**

1. **过程方程**

对无限小的准静态绝热过程，有

$$\mathrm{d}A + \mathrm{d}E = 0 \rightarrow P\mathrm{d}V = -\nu C_V \mathrm{d}T$$

$$PV = \nu RT \rightarrow P\mathrm{d}V + V\mathrm{d}P = \nu R\mathrm{d}T$$

消去 $\mathrm{d}T$

迈耶公式

$$C_P P\mathrm{d}V + C_V V\mathrm{d}P = 0 \longleftarrow C_V(PdV + VdP) = -RPdV$$

$$\frac{\mathrm{d}P}{P} + \gamma\frac{\mathrm{d}V}{V} = 0 \rightarrow \ln P + \gamma \ln V = C' \rightarrow PV^{\gamma} = C_1$$

$$PV^{\gamma}=C_1 \qquad TV^{\gamma-1}=C_2 \qquad P^{\gamma-1}T^{-\gamma}=C_3$$

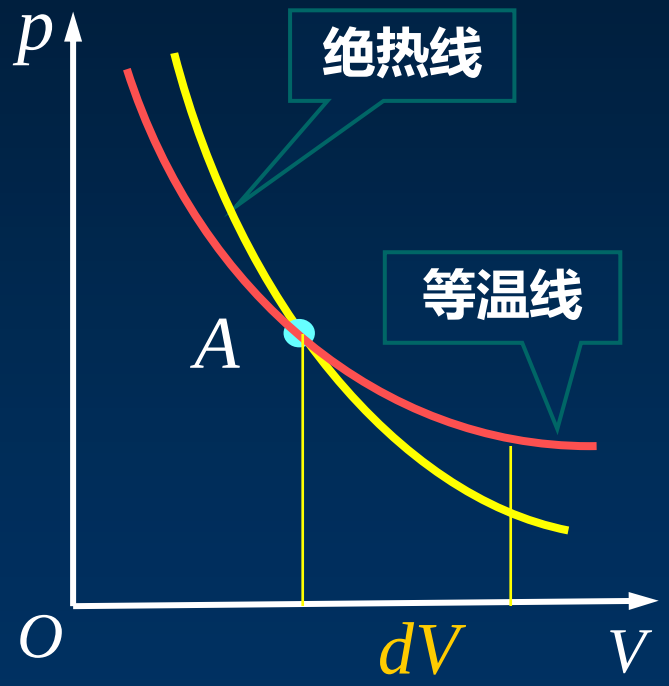
理想气体绝热过程的过程方程 —— 泊松方程

2. 过程曲线

从数学角度分析：

$$pV^{\gamma}=C_1 \xrightarrow{\text{微分}} \frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}V}=-\gamma\frac{p}{V}$$

$$pV=C_2 \xrightarrow{\text{微分}} \frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}V}=-\frac{p}{V}$$



由于 $\gamma>1$，故绝热线比等温线陡

从状态变化上分析：

等温过程 $V\uparrow \longrightarrow p\downarrow$

绝热过程 $V\uparrow + T\downarrow \longrightarrow p\downarrow$

故绝热线比等温线陡！

3. 能量转换

绝热过程中，理想气体不吸收热量，系统减少的内能，等于其对外作功：

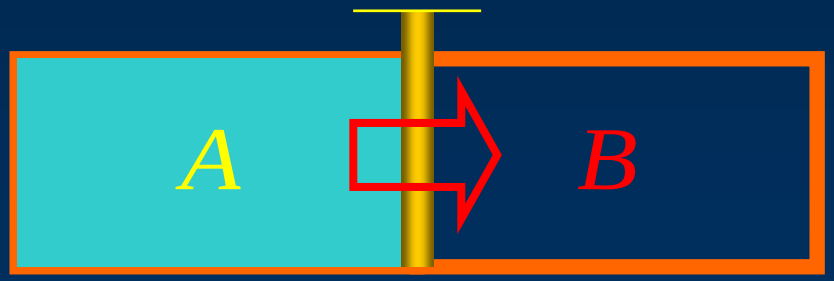
$$A=\int_{V_1}^{V_2} p\mathrm{d}V=\int_{V_1}^{V_2} p_1V_1^{\gamma}\frac{\mathrm{d}V}{V^{\gamma}}=-\Delta E$$

热力学第一定律结果

$$=\frac{1}{\gamma-1}(p_1V_1-p_2V_2)=\frac{1}{\gamma-1}\frac{m}{M}R(T_1-T_2)=C_V\frac{m}{M}(T_1-T_2)$$

利用 $pV=\frac{m}{M}RT$，$C_V=\frac{R}{\gamma-1}$

4. 绝热自由膨胀过程分析



绝热壁

非准静态过程 P_1 $V_2=2V_1$ 求 P_2

答案1 $P_1V_1^{\gamma}=P_2V_2^{\gamma}$

$P_2=(1/2)^{\gamma}P_1$

答案2 $A=0$ $E_2=E_1=E(T)$

$P_1V_1=P_2V_2$ $P_2=(1/2)P_1$

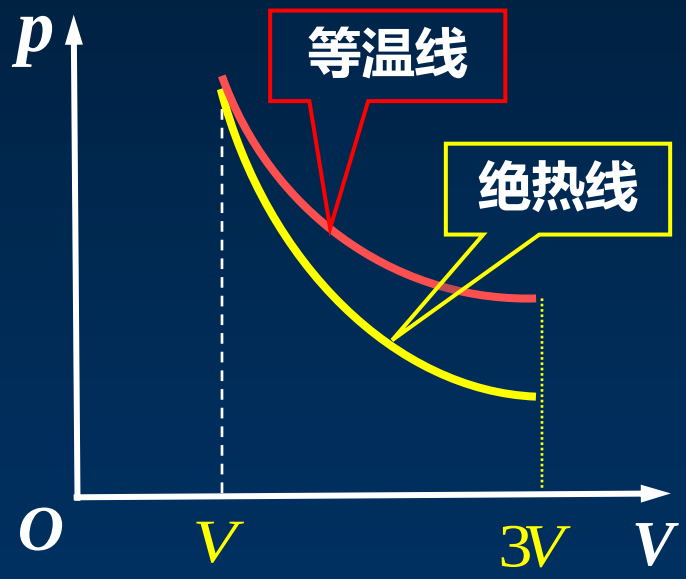
例1： 温度为25℃，压强为1atm 的1mol 刚性双原子分子理想气体经等温过程体积膨胀至原来的3倍。

求： 1）该过程中气体对外所作的功；2）若气体经绝热过程体积膨胀至原来的3 倍，气体对外所作的功。

解： 1）由等温过程可得

$$A=\int_{V_1}^{V_2} p\mathrm{d}V=\int_{V_1}^{V_2}\nu RT\frac{\mathrm{d}V}{V}$$

$$=\nu RT\ln\frac{V_2}{V_1}=2.72\times10^3\ \mathrm{J}$$



2）根据绝热过程方程，有

$$T_2=T_1\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}=192\ \mathrm{K}$$

$$\Delta E=\nu C_V(T_2-T_1)=-2.2\times10^3\ \mathrm{J}$$

$$A=-\Delta E=2.2\times10^3\ \mathrm{J}$$

绝热过程的功小于等温过程的功

例2： 一容器被一可移动、无摩擦且绝热的活塞分割成两部分。左端封闭且导热，其他部分绝热。开始时在I, II中各有温度为0℃，压强$1.013\times10^5\,\mathrm{P_a}$的刚性双原子分子的理想气体。两部分的容积均为36升。现从容器左端缓慢地对I中气体加热，使活塞缓慢地向右移动，直到II中气体的体积变为18升为止。



求： (1) I中气体末态的压强和温度。

(2) 外界传给I中气体的热量。

解： (1) II中气体经历绝热过程，则

$$p_0V_0^{\gamma}=p_2V_2^{\gamma}$$ 刚性双原子分子 $\gamma=7/5$

$$p_2=p_0\left(\frac{V_0}{V_2}\right)^{\gamma}=2.674\times10^5\,\mathrm{Pa}$$ $$p_1=p_2=2.674\times10^5\,\mathrm{Pa}$$

由物态方程得 $$T_1=\frac{p_1V_1}{p_0V_0}T_0=1.081\times10^3\,\mathrm{K}$$

(2)I中气体内能的增量为

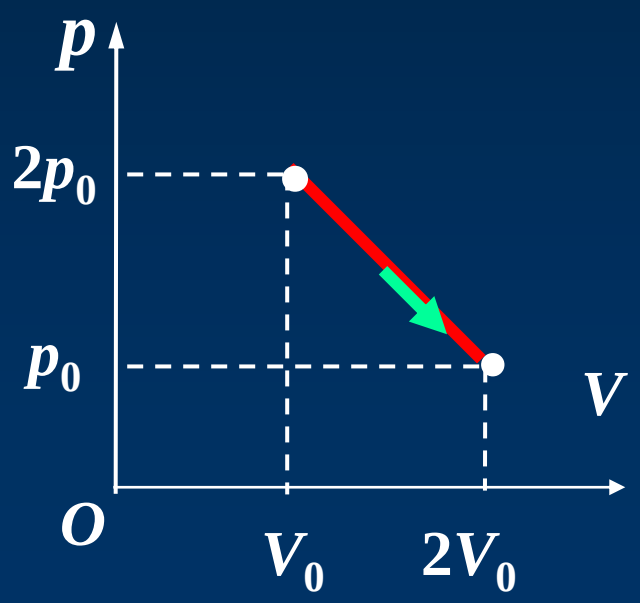
$$\Delta E_1 = \nu C_V (T_1 - T_0) = \nu \frac{5}{2} R(T_1 - T_0)$$

$$= \frac{5}{2}(p_1 V_1 - p_0 V_0) = 2.69 \times 10^4 \text{ J}$$

根据热力学第一定律，$Q_1 = \Delta E_1 + A_1 = 2.99 \times 10^4 \text{ J}$

I中气体对外作的功为 $A_1 = \Delta E_2 = 2.92 \times 10^3 \text{ J}$

例3： ν 摩尔的单原子分子理想气体，经历如图的热力学过程，求在该过程中放热和吸热的区域和经历的最高温度。

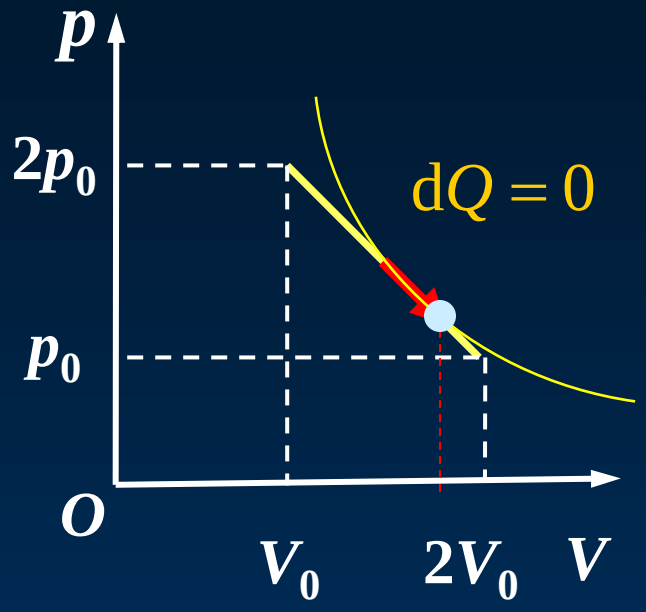


解： 从图中可求得过程曲线方程为

$$p = -\frac{p_0}{V_0} V + 3p_0$$

将物态方程代入上式，并消去 p，有

$$T=\frac{p_0V_0}{\nu R}\left[-\left(\frac{V}{V_0}\right)^2+3\left(\frac{V}{V_0}\right)\right]$$



对该过程中任一无限小过程，有

$$\mathrm{d}T=\frac{p_0}{\nu R}\left[-2\left(\frac{V}{V_0}\right)+3\right]\mathrm{d}V$$

由热力学第一定律，有

$$\mathrm{d}Q=\nu C_V\mathrm{d}T+p\mathrm{d}V=\left(-4\frac{Vp_0}{V_0}+\frac{15}{2}p_0\right)\mathrm{d}V$$

由上式可知，吸热和放热的区域为

$$\begin{cases} V_0\le V<\dfrac{15}{8}V_0 & \mathrm{d}Q>0 & \text{吸热} \\ \dfrac{15}{8}V_0<V\le 2V_0 & \mathrm{d}Q<0 & \text{放热} \end{cases} \quad V=\frac{15}{8}V_0$$

吸热区域和放热区域的转折点

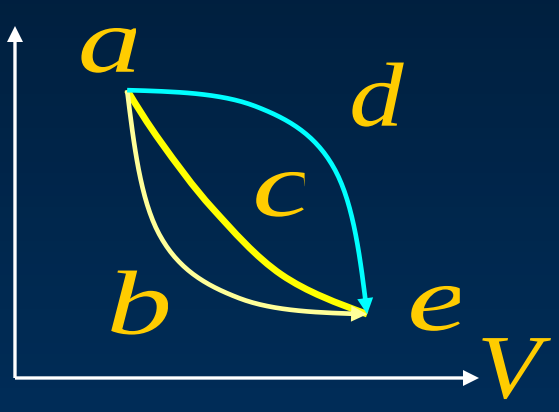
小结

$$Q = \Delta E + A = E_2 - E_1 + A$$

要求始末状态都是平衡态
也适用于非准静态过程

典型过程： 等体过程，等压过程，等温过程，绝热过程

➡ 求解：功，热量，内能变化?



思考题：热容量的分析

$C_{max} = ?$　$C = dQ / dT$　$C_{max} = C_{abe}$

五、多方过程

- 多方过程方程　$pV^n = C$　（n 多方指数，$-\infty < n < \infty$）

  满足这一关系的过程称为多方过程

- 多方过程曲线　根据多方过程方程，有

$$p\mathrm{d}(V^n) + V^n \mathrm{d}p = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}V} = -n\frac{p}{V}$$

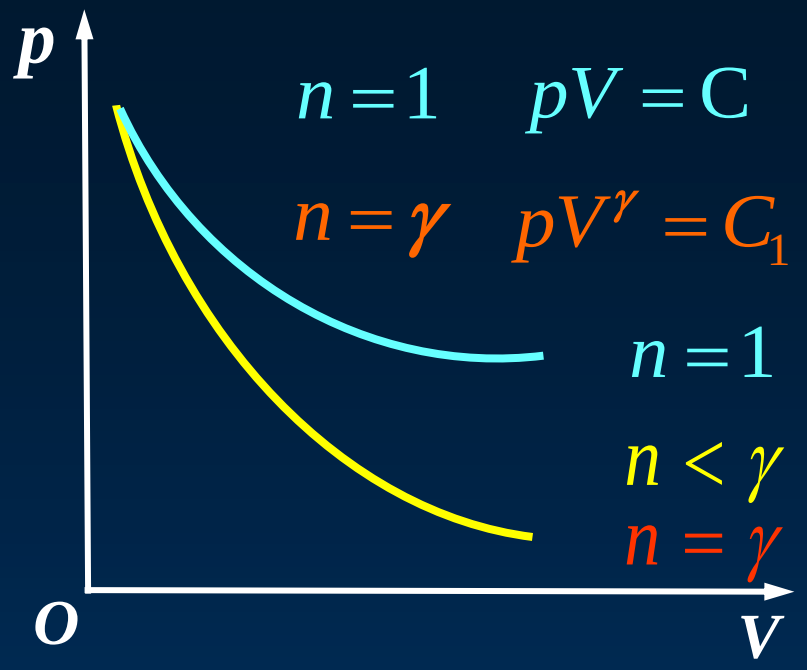
可见：n 越大，曲线越陡。

多方过程中功的计算

$$A=\int_{V_1}^{V_2} p\mathrm{d}V=\int_{V_1}^{V_2} p_1V_1^n\frac{\mathrm{d}V}{V^n}$$

$$=\frac{1}{n-1}(p_1V_1-p_2V_2)$$

$$=-\frac{\nu R}{n-1}(T_2-T_1)$$



- **多方过程中：** 内能增量 $\Delta E=\nu C_V(T_2-T_1)$

热量 $Q_n=\nu C_n(T_2-T_1)=\Delta E+A$

摩尔热容 $C_n=\dfrac{Q_n}{\Delta T}=\dfrac{C_V(T_2-T_1)}{T_2-T_1}+\dfrac{R}{1-n}=C_V+\dfrac{R}{1-n}=\dfrac{n-\gamma}{n-1}C_V$

$1<n<\gamma \longrightarrow C_n<0$

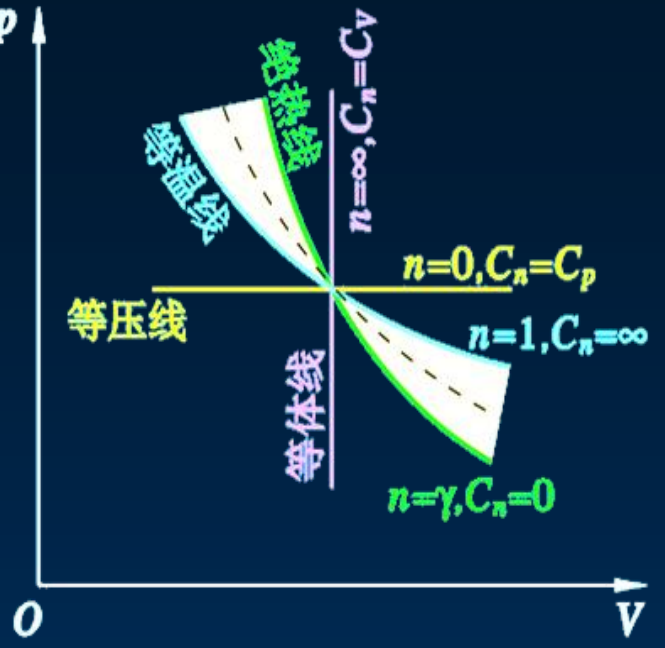
系统放热时，温度升高，而系统吸热时温度降低

一般多方指数通常取 $1<n<\gamma$

• 多方过程包括前面讨论的四种典型过程。

$n=1$ 等温过程　$n=\gamma$ 绝热过程

$n=0$ 等压过程　$n=\infty$ 等体过程



例： 一台空气压缩机，压缩前的温度为 27^0C，压强 P 为 0.1×10^6Pa ，气缸容积为 $0.005m^3$ ，压缩后温度为 $213\ ^0C$，已知压缩过程中消耗的功为 $1.166KJ$ ，过程是多方的。求，压缩过程的多方指数?

解： 气缸内空气的摩尔数为

$$\nu=\frac{PV}{RT}=0.20$$

根据多方过程公式

$$A=-\frac{\nu R}{n-1}(T_2-T_1)$$

得：$$n=1+\frac{\nu R}{A}(T_1-T_2)=1.27$$

总结

(1) 理想气体的内能是温度的单值函数，任何过程只要始末状态确定，内能变化相同，与过程无关。

$$\Delta E = \nu C_V \Delta T$$

(2) 功和热量是过程量，讲某一状态的功、热量没有意义。

计算功时，由 $A = \int_{V_1}^{V_2} p\mathrm{d}V$ 出发，根据过程特点找到 p -V 关系积分求解。

计算热量时，*由* $Q = \nu C_{\mathrm{m}} \Delta T$ *出发，摩尔热容* C_m *是过程量，等体过程* $C_m = C_{V,m}$；等压过程 $C_{\mathrm{m}} = C_{p,\mathrm{m}}$；绝热过程 $C = 0$；等温过程的热量按照 $Q = A$ 计算。

解题思路与方法：

应用热力学第一定律处理实际问题时，注意以下几点：

(1) 明确准静态过程的始末状态，根据题设条件及过程方程或状态方程，求出始末状态的状态参量 p、V、T。

(2) 应用热量、功、内能的定义式和热力学第一定律，求解待求量。特别注意，**功与热量**与过程有关，**内能**与过程无关。

(3) 理想气体在等值过程及绝热过程中的有关公式经常用到，熟悉这些公式会给计算带来许多方便。

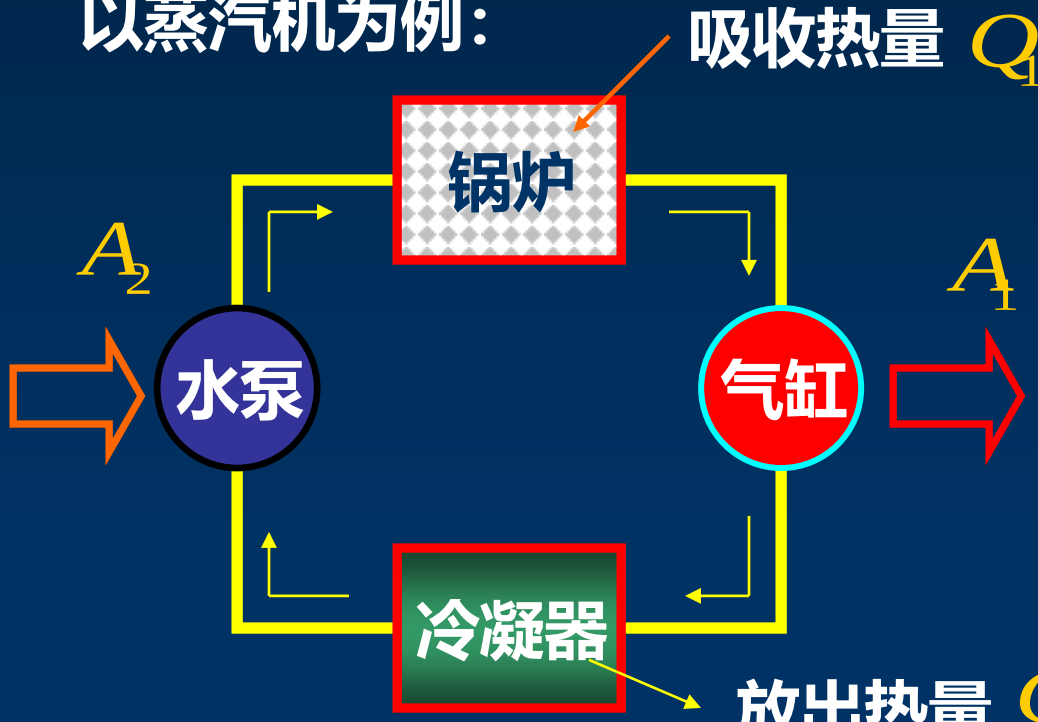
11-6 热力学循环

历史上，热力学理论 ⟺ 研究热机 （蒸汽机、内燃机）

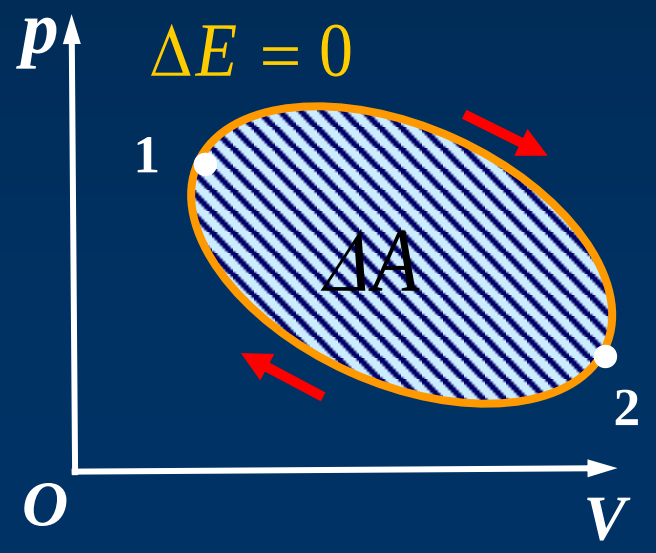
一、循环过程

如果物质系统（热力学系统）的状态经历一系列的变化后，又回到了原状态，就称系统经历了一个循环过程。

以蒸汽机为例：



如果循环是准静态过程



系统（工质）对外所作的功：

净功 $A=\oint \mathrm{d}A=$ 闭合曲线包围的面积 $=\oint dQ$ —— 净热

二、正循环过程（热机循环）

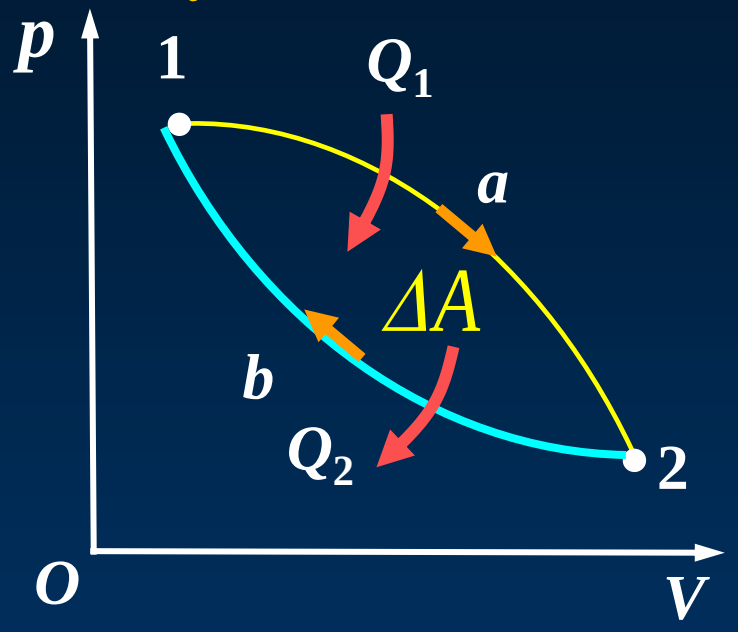
循环沿顺时针方向进行

$1\Rightarrow 2 \qquad Q_1=E_2-E_1+A_1$

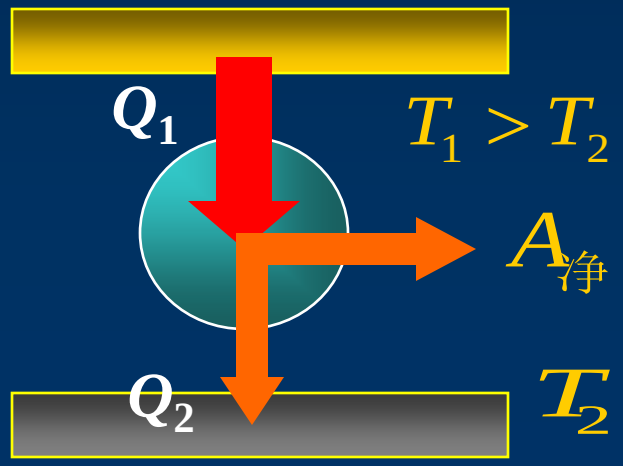
$2\Rightarrow 1 \qquad -Q_2=E_1-E_2-A_2$

系统对外作净功 $A=A_1-A_2$

系统吸收的净热 $Q=Q_1-Q_2$

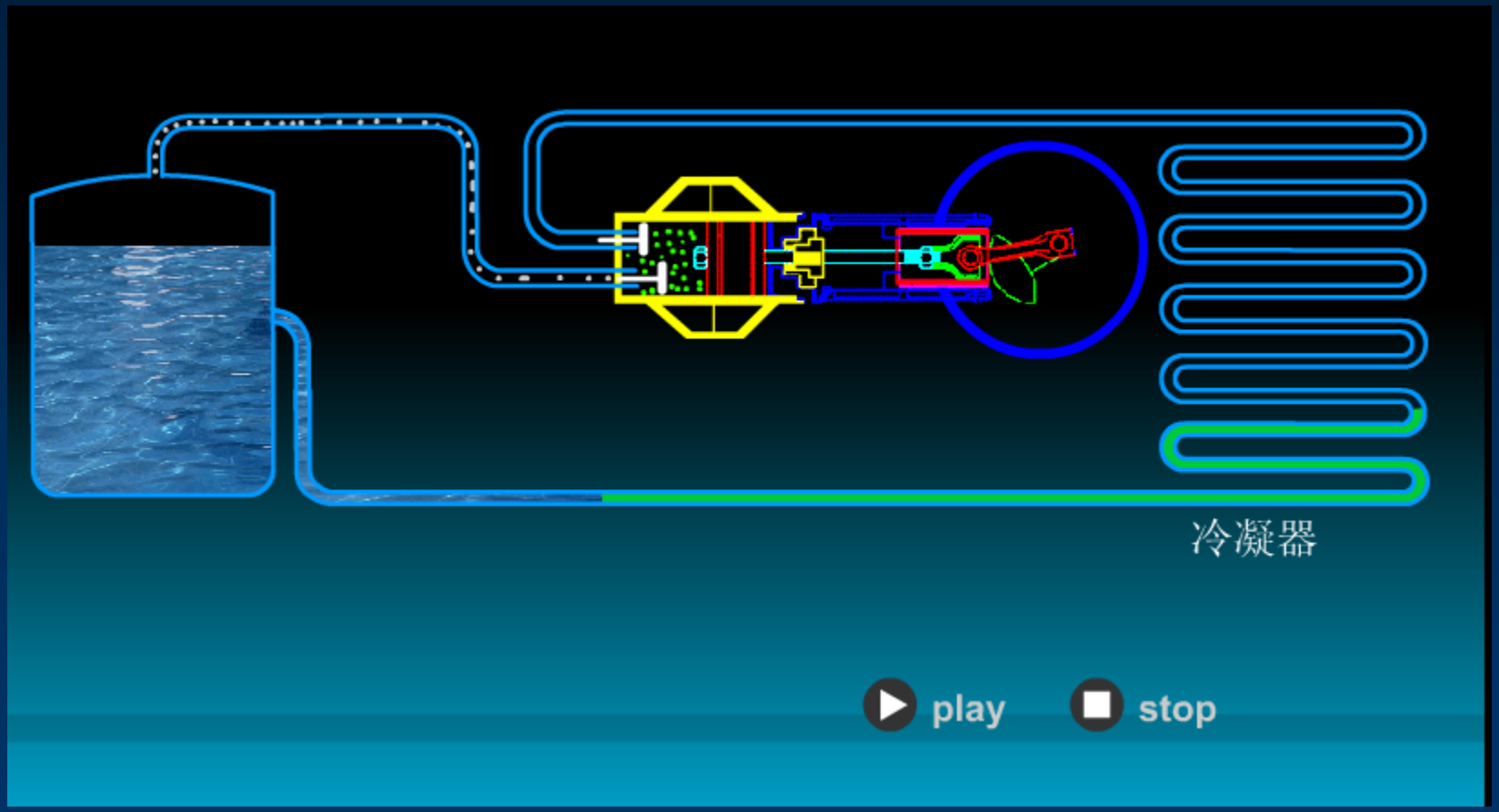


$\Rightarrow \quad \Delta A_{净}=\Delta Q_{净}$



在每一正循环中，系统自高温热源吸收热量，不能全部转化为系统对外做功，一部分传递到低温热源而废弃。

热机循环示意图



三、逆循环过程（致冷循环）

循环沿逆时针方向进行

$1 \Rightarrow 2 \qquad Q_2 = E_2 - E_1 + A_2$

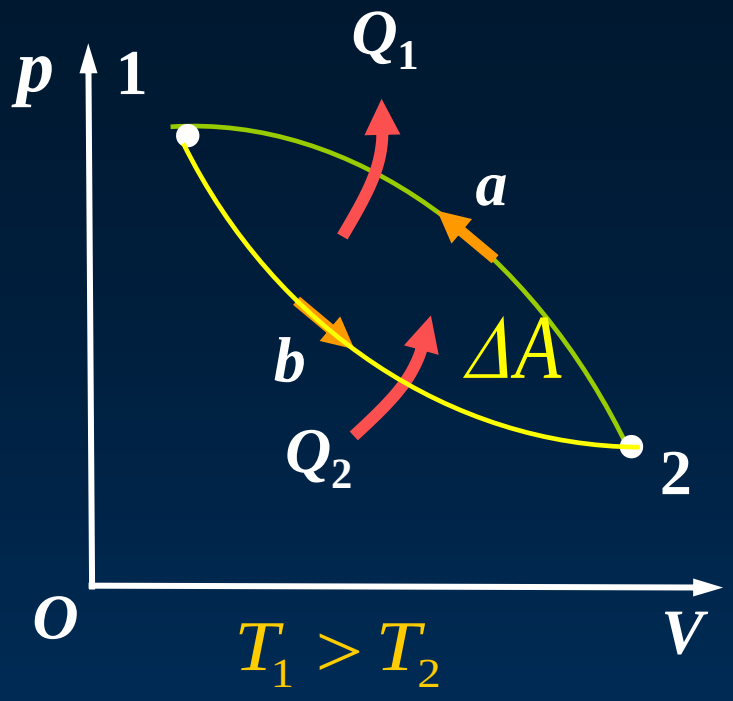
$2 \Rightarrow 1 \qquad -Q_1 = E_1 - E_2 - A_1$

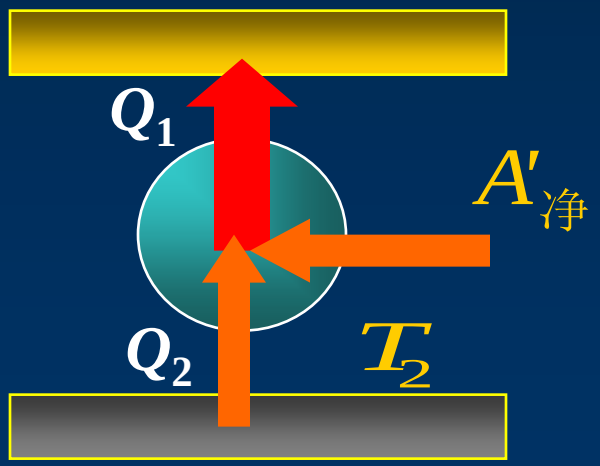
$-(Q_1 - Q_2) = -(A_1 - A_2)$

外界对系统作正功　系统对外作负功

$\Delta Q'_{净} = \Delta A'_{净}$

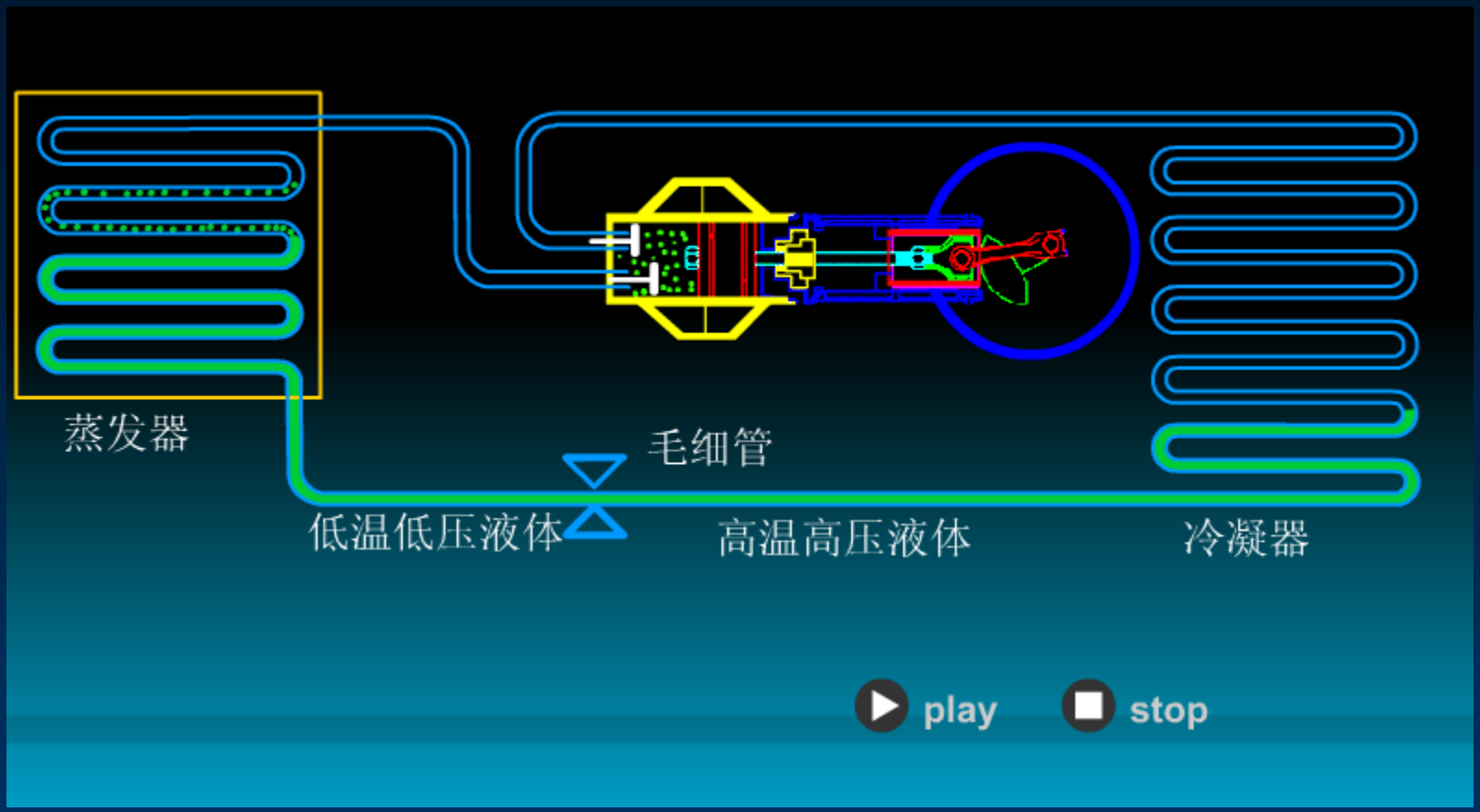
在每一逆循环中，系统在外界做功的条件下，把低温热源的热量转移到高温热源去，使低温热源温度降低。





致冷机工作原理

冰箱循环示意图



压缩机工作后，将低温、低压的制冷剂压缩成为高温高压的过热蒸汽排出至冷凝器。经冷凝器散热逐渐被冷却为高压饱和液体。流入毛细管节流降压，变为常温低压液体。随后在蒸发器内开始吸收热量进行汽化，降低蒸发器及其周围的温度。重复以上过程，将冰箱内的热量转移到箱外空气中，实现了制冷目的