## 1、热力学第一定律（first law of thermodynamics）

$$Q = A + \triangle E$$

**Q**——外界向系统传递的热量

（吸热**Q＞0**，放热**Q＜0**）

**A**——系统对外作的功

（对外作功 **A＞0**，外界对系统作功**A＜0**）

**△E**——系统的内能的增量 $\triangle E = E_{末} - E_{初}$

$$Q = \nu C_{mol}(T_2 - T_1) \qquad C_v = \frac{i}{2}R \qquad dQ = \nu C dT$$

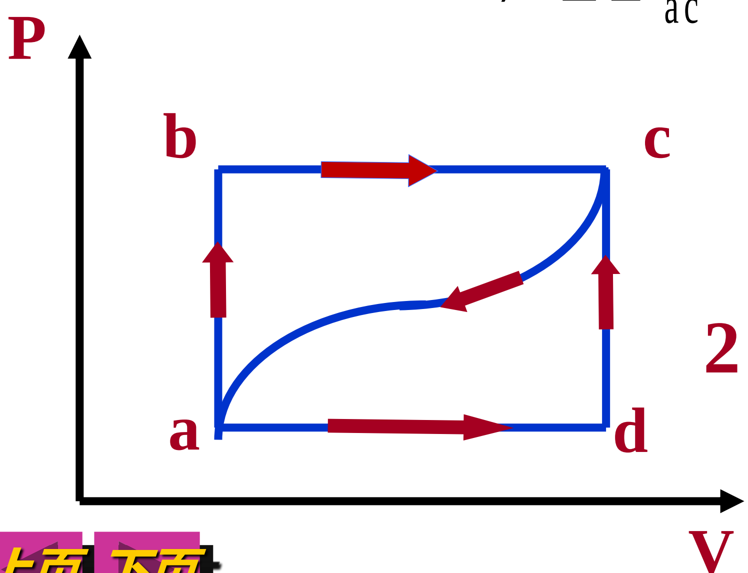
$$A = \int_{V_1}^{V_2} PdV \qquad C_p = C_V + R \qquad dA = PdV$$

$$\Delta E = E_2 - E_1 = \frac{m}{M}\frac{i}{2}R(T_2 - T_1) \qquad dE = \nu\frac{i}{2}RdT$$

例1 （p249 7-1）一系统如图所示，由a沿abc到达c有350J的热量传入系统，系统对外作功126J。
1)若沿adc时,系统作功42J，系统吸收多少热量？
2)当系统由c沿曲线ca返回a时,外界对系统作功84J,系统是吸热还是放热？热量传递多少？

解：1） $$Q_{abc}=A_{abc}+\Delta E_{ac}$$

$$\Rightarrow \Delta E_{ac}=Q_{abc}-A_{abc}=350-126=224J$$




$$Q_{adc}=A_{adc}+\Delta E_{ac}$$

$$=42+224=266J$$

2） $$\mathbf{Q}_{ca}=\mathbf{A}_{ca}+\Delta E_{ca}$$

$$=-84-224=-308J<0$$

系统放热

上页 下页

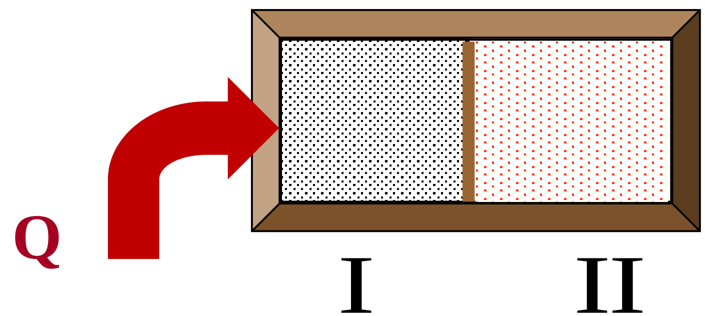
例2、 如图，一容器被一可移动，无摩擦且绝热的活塞分割成I、II两部分. 活塞不漏气、容器左端封闭且导热，其他部分绝热。开始时在I、II中各有温度为$0^{0}C$，压强为1atm的刚性双原子分子的理想气体。I、II两部分的容积均为36*l*，现从容器左端缓慢地对I中气体加热，使活塞缓慢地向右移动，直到II中气体的体积变为18*l*为止。求：

（1）I中气体末态的压强和温度。

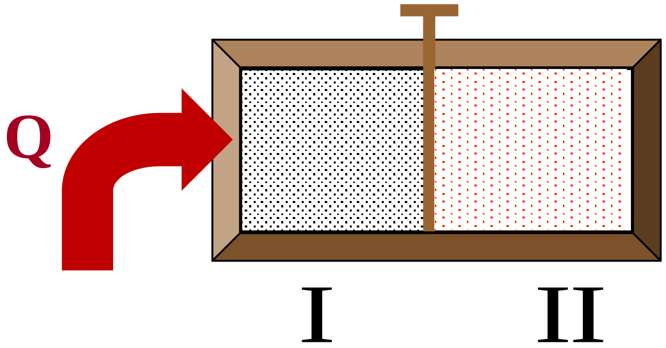
（2）外界传给I中气体的热量。

分析：$P_I=P_{II}$;

II中进行的是绝热压缩




已知 $P_{I0}=P_{II0}$、$T_{I0}=T_{II0}$、$V_{I0}=V_{II0}$, $V_I=V_{II}$




解：

$$P_{II0}V_{II0}^{\gamma} = P_{II}V_{II}^{\gamma}$$

$$\gamma = \frac{C_P}{C_v} = \frac{i+2}{i} = \frac{7}{5}$$

$$\Rightarrow P_{II} = \left(\frac{V_{II0}}{V_{II}}\right)^{\gamma} P_{II0} = 2.64\text{atm} = 2.67\times10^{5}\,\text{Pa}$$

$$(1\text{atm} = 1.013\times10^{5}\,\text{Pa})$$

$$P_I = P_{II} = 2.67\times10^{5}\,Pa$$

$$\frac{P_{I0}V_{I0}}{T_{I0}} = \frac{P_I V_I}{T_I} \Rightarrow T_I = 1.018\times10^{3}\,\text{K}$$

（2） $Q_{I} = \Delta E_{I} + A_{I} = \Delta E_{I} - A_{II} = \Delta E_{I} + \Delta E_{II}$

$$\boxed{(0 = \Delta E_{II} + A_{II})}$$

$$Q_{I} = \frac{m_{I}}{M} C_{V}(T_{I} - T_{I0}) + \frac{m_{II}}{M} C_{V}(T_{II} - T_{II0})$$

$(PV = \frac{m}{M} RT \qquad C_{v} = \frac{i}{2} R)$

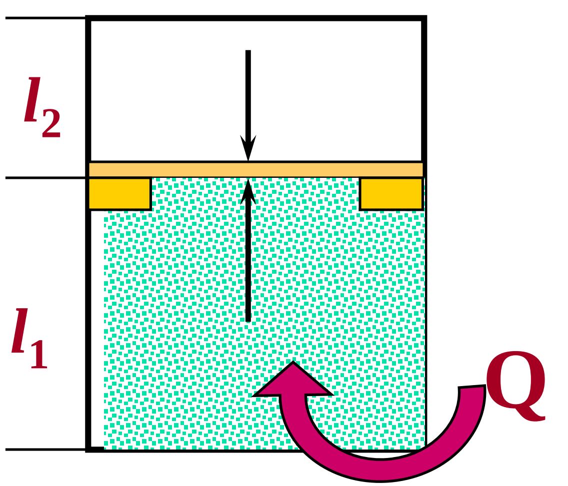
$$= \frac{5}{2}(P_{I}V_{I} - P_{I0}V_{I0}) + \frac{5}{2}(P_{II}V_{II} - P_{II0}V_{II0}) = 2.98 \times 10^{4} (J)$$

例3、侧面绝热的气缸盛有1mol的单原子理想气体，气体的温度 $T_1$=273K，活塞外气压强$P_0=1.01\times10^5$ Pa，活塞面积S=0.02$m^2$、**m**=102kg（活塞绝热、不漏气且与气缸壁的磨擦可忽略），由于气缸内小突起物的阻碍，活塞起初停在距气缸底部为$l_1$=1m处。今从底部极缓慢地加热气缸中的气体，使活塞上升了$l_2$=0.5m的一段距离如图所示。试问：

（1）气缸中的气体经历了哪几个过程？

（2）整个过程吸取的热量为多少？

不是绝热过程




判别系统内外压强大小

若系统压强 > 外界⇒直接膨胀

若系统的压强 < 外界 则

（1）等体升温（2）等压膨胀

解：初始态的压强$P_1$

$$P_1=\frac{RT_1}{V_1}=\frac{RT_1}{Sl_1}=1.13\times10^5\,Pa$$

气缸中气体施于活塞向上的作用力

$$f_1=P_1S=2.26\times10^3\,N$$

活塞受到向下的作用力

$$f_0+mg=P_0S+mg\;=3.02\times10^3\,N>f_1$$

加热后等体升温

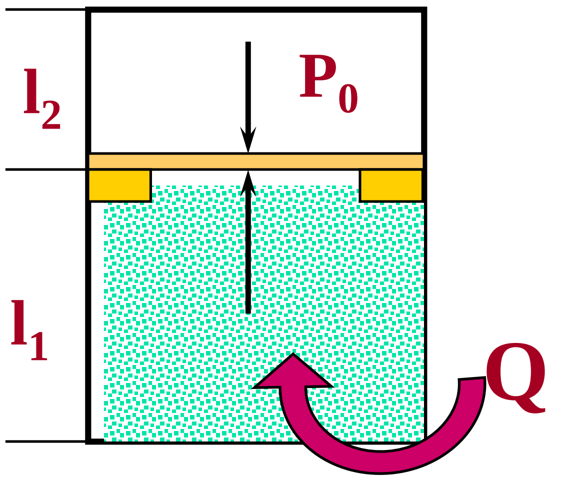
$$P_2=\frac{P_0S+mg}{S}=1.51\times10^5\,Pa$$

$$\frac{P_1}{T_1}=\frac{P_2}{T_2}\Rightarrow T_2$$

系统两个过程：

等体升温

等压膨胀



加热后等容升温

$$P_2=\frac{P_0S+mg}{S}=1.51\times10^5\,Pa \qquad \frac{P_1}{T_1}=\frac{P_2}{T_2}\Rightarrow T_2$$

当气体压强为$P_2$时，等压膨胀

$$P_2V_2=RT_3\Rightarrow T_3=\frac{P_2(l_1+l_2)S}{R}=545K$$

法一、 $$Q=Q_V+Q_P=\frac{3}{2}R(T_2-T_1)+\frac{5}{2}R(T_3-T_2)$$

法二、二个过程合并考虑

$$\Delta E=C_v(T_2-T_1)=\frac{3}{2}R(545-273)$$

$$A=P_2(V_2-V_1)=P_2l_2S$$

$$\therefore\quad Q=A+\Delta E=4.90\times10^3\,J$$

# 常见过程

等容过程 dV=0　　等压过程 dP=0

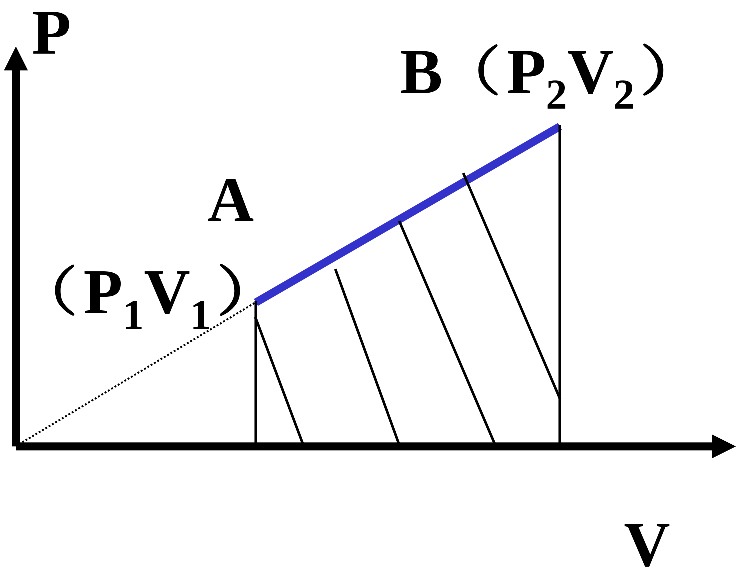
等温过程 dT=0　　绝热过程 dQ=0

| | | |
|---|---|---|
| 等温过程 | $PV = C$ | $n = 1$ |
| 绝热过程 | $PV^{\gamma} = C$ | $n = \gamma$ |
| 等压过程 | $P = C = PV^{0}$ | $n = 0$ |
| 等容过程 | $V = C \Rightarrow P^{\frac{1}{\infty}} V$ | $n = \infty$ |

多方过程　$PV^{n} = C$　（n为多方指数）

一般情况的多方指数$1 < n < \gamma$，　多方过程近似代表气体内进行的实际过程 。

例4：P288　7–5




解：P=kV　　$\Rightarrow$ n= –1

$$\Delta E=\frac{3}{2}R\left(T_2-T_1\right)$$

$$\left(PV=RT\right)\quad=\frac{3}{2}\left(P_2V_2-P_1V_1\right)$$

$$A=\int_{V_1}^{V_2}PdV=\int_{V_1}^{V_2}kVdV=\frac{1}{2}\left(P_2V_2-P_1V_1\right)$$

$$\text{or}\quad A=\frac{1}{2}\left(P_2+P_1\right)\left(V_2-V_1\right)$$

$$C_{mol}=\frac{dQ}{dT}$$

$$Q=A+\Delta E=2\left(P_2V_2-P_1V_1\right)$$

$$dQ = dA + dE = PdV + \frac{3}{2}RdT$$

$$PV = RT \Rightarrow PdV + VdP = RdT$$

$$\because \quad P = kV \Rightarrow \quad dP = kdV$$

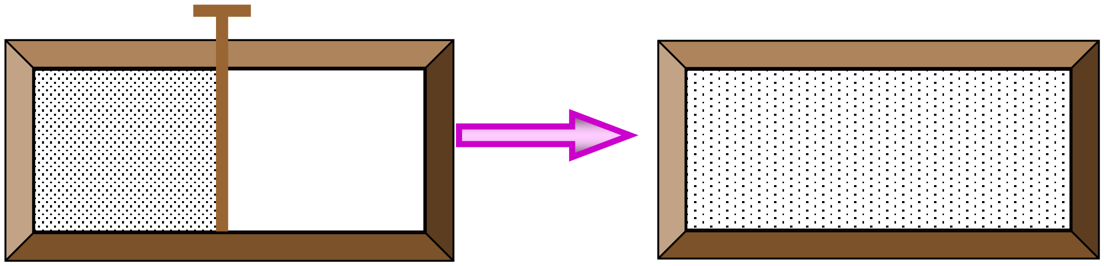
$$\therefore \quad PdV + \underbrace{\boxed{kV}}_{P}dV = 2PdV = RdT$$

$$\Rightarrow PdV = \frac{1}{2}RdT$$

$$dQ = dA + dE = 2RdT$$

$$\therefore \quad C_{mol} = \frac{dQ}{dT} = 2R$$

# 理想气体绝热自由膨胀过程（非准静态过程）



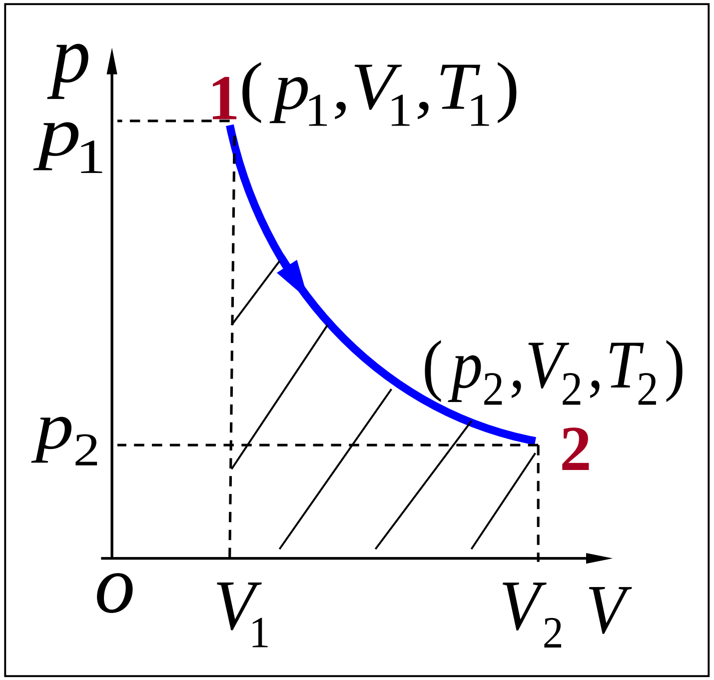
$(P_1, V_1, T_1)$ $(P_2, V_2, T_2)$

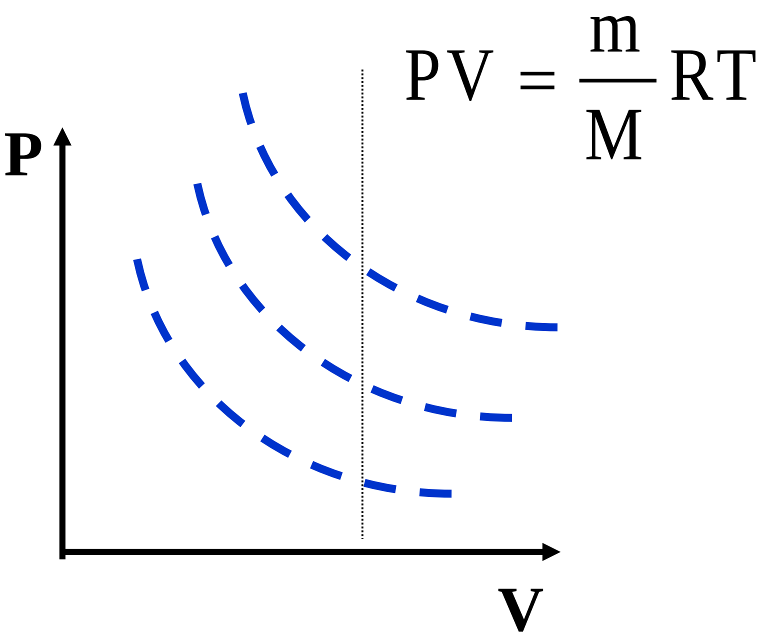
$$dQ = 0;\ A = 0 \ \Rightarrow \Delta E = 0 \quad (Q = A + \Delta E)$$

$$E_1 = E_2 \quad \Rightarrow T_1 = T_2$$

$$PV = \frac{m}{M} RT \Rightarrow P_1 V_1 = P_2 2V_1 \Rightarrow P_2 = \frac{1}{2} P_1$$

# 准静态过程 *f* (P,V)=0 ⇒P–V图：

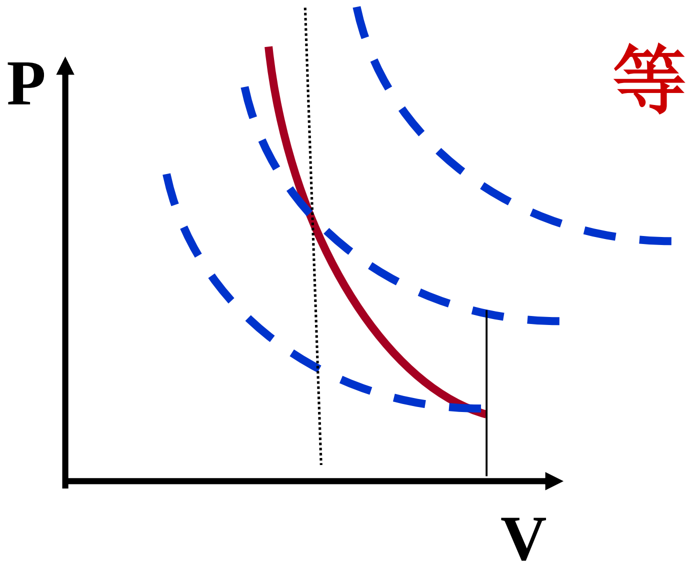



$$S = A\begin{cases} \Delta V > 0 & A > 0 \\ \Delta V < 0 & A < 0 \end{cases}$$

$$\Delta T = \begin{cases} > 0 & \Delta E > 0 \\ < 0 & \Delta E < 0 \end{cases}$$

$$Q = A + \Delta E$$




等温： $PV = C$

$$VdP + PdV = 0$$

$$\frac{dP}{dV} = -\frac{P}{V}$$

等温 $A = Q$

绝热： $PV^{\gamma} = C$

$$V^{\gamma}dP + \gamma PV^{\gamma-1}dV = 0$$

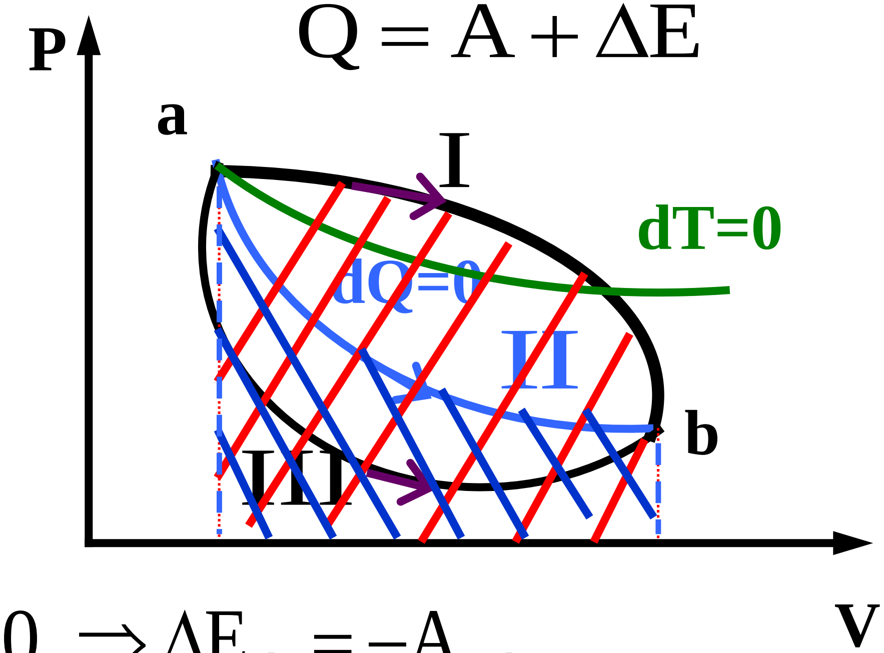
$$\frac{dP}{dV} = -\gamma\frac{P}{V} \qquad (\gamma = \frac{C_P}{C_V})$$

绝热： $A + \Delta E = 0$

$$\Rightarrow A = -\Delta E$$

$$P_T > P_Q$$

p 285 思考题 7-7




$$Q = A + \Delta E$$

**aIb:** $\Delta T < 0$

$\Rightarrow \Delta E < 0$

$A > 0$

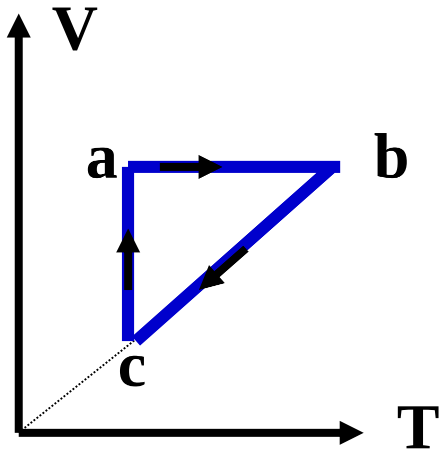
$$Q_{aIIb} = A_{aIIb} + \Delta E_{ab} = 0 \Rightarrow \Delta E_{ab} = -A_{aIIb}$$

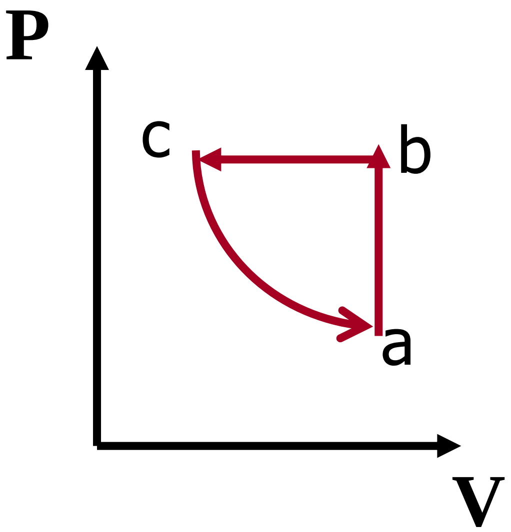
$$Q_{aIb} = A + \Delta E > 0$$

**aIIIb:** $\Delta T < 0 \Rightarrow \Delta E < 0$

$A > 0 \quad A < |\Delta E|$

$$Q_{aIIIb} = A + \Delta E < 0$$




**ab :** 等体升温

**bc:** 等压压缩

$$V = kT \Rightarrow \text{等压过程}$$

$$PV = \frac{m}{M}RT$$

**ca :** 等温膨胀

## 三、热力学循环（thermodynamic cycle）

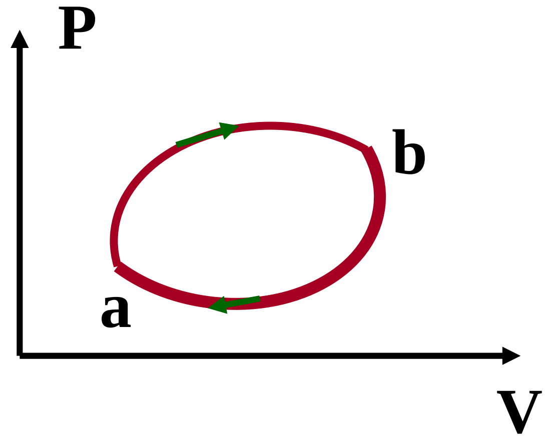
1、循环过程—热力学系统的状态经过一系列不同的过程又回到初始状态。

热机——持续不断地将热转换为功的装置。

工质——在热机中参与热功转换的媒介物质。

特点：

$\Delta E=0$；　$Q_{吸}-|Q_{放}|=Q_{净}=A_{净}$




2、两种循环：

正循环：顺时针方向变化

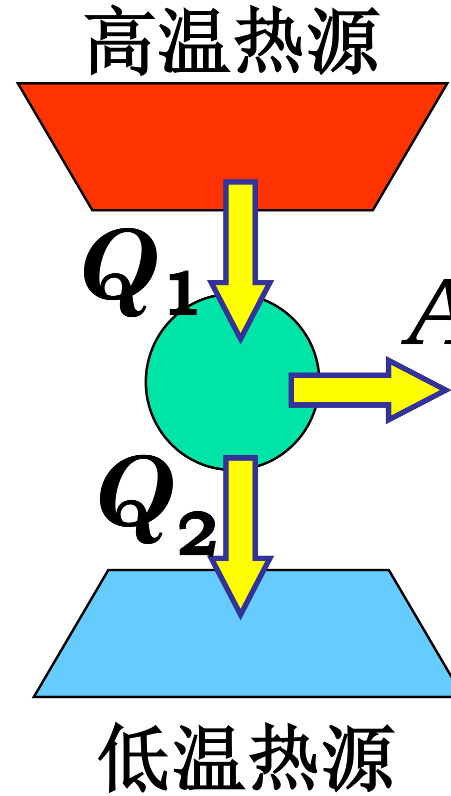
$A_{净}>0$　（蒸汽机、内燃机）

逆循环：反时针方向变化

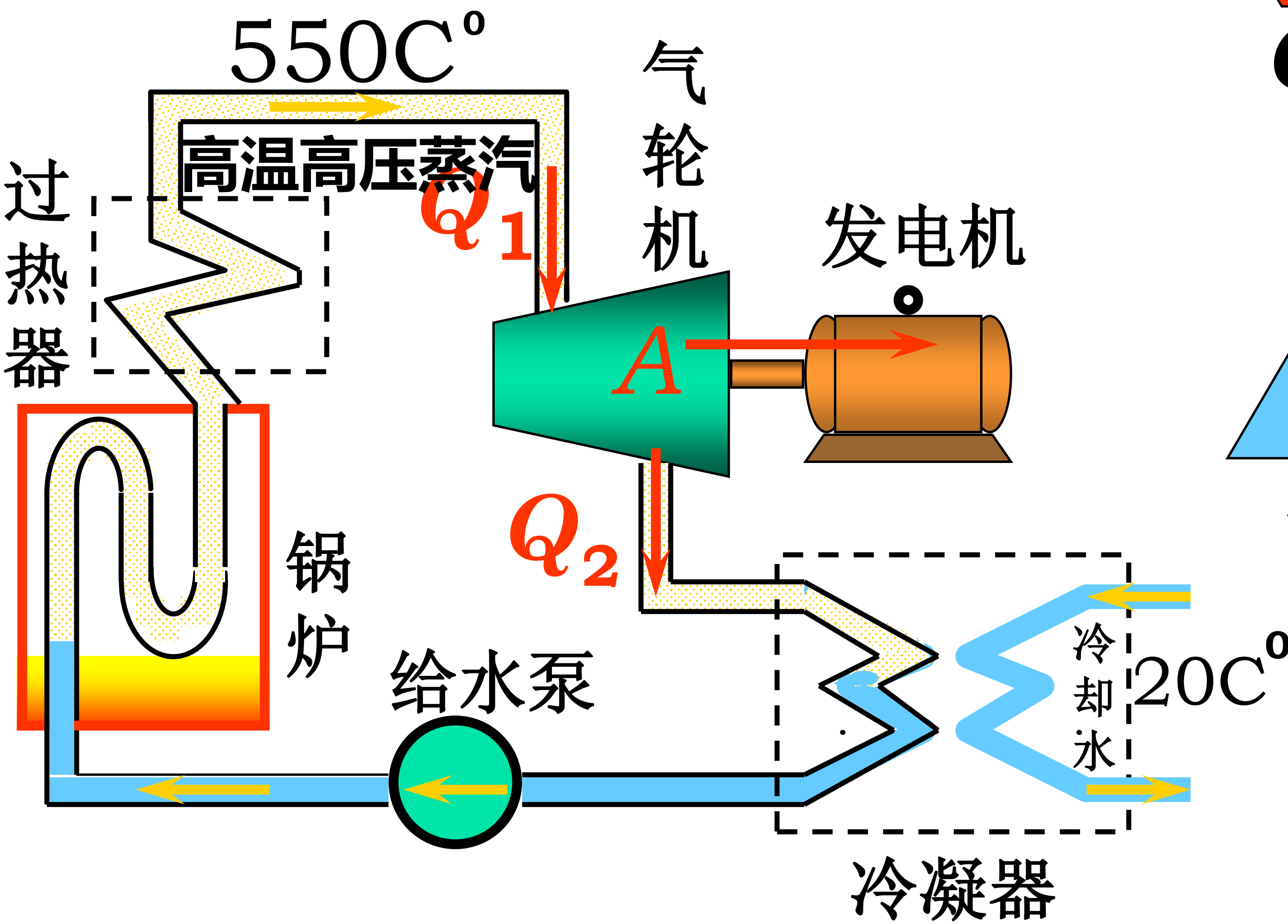
$A_{净}=Q_{吸}-|Q_{放}|<0$

（家用冰箱、致冷装置）

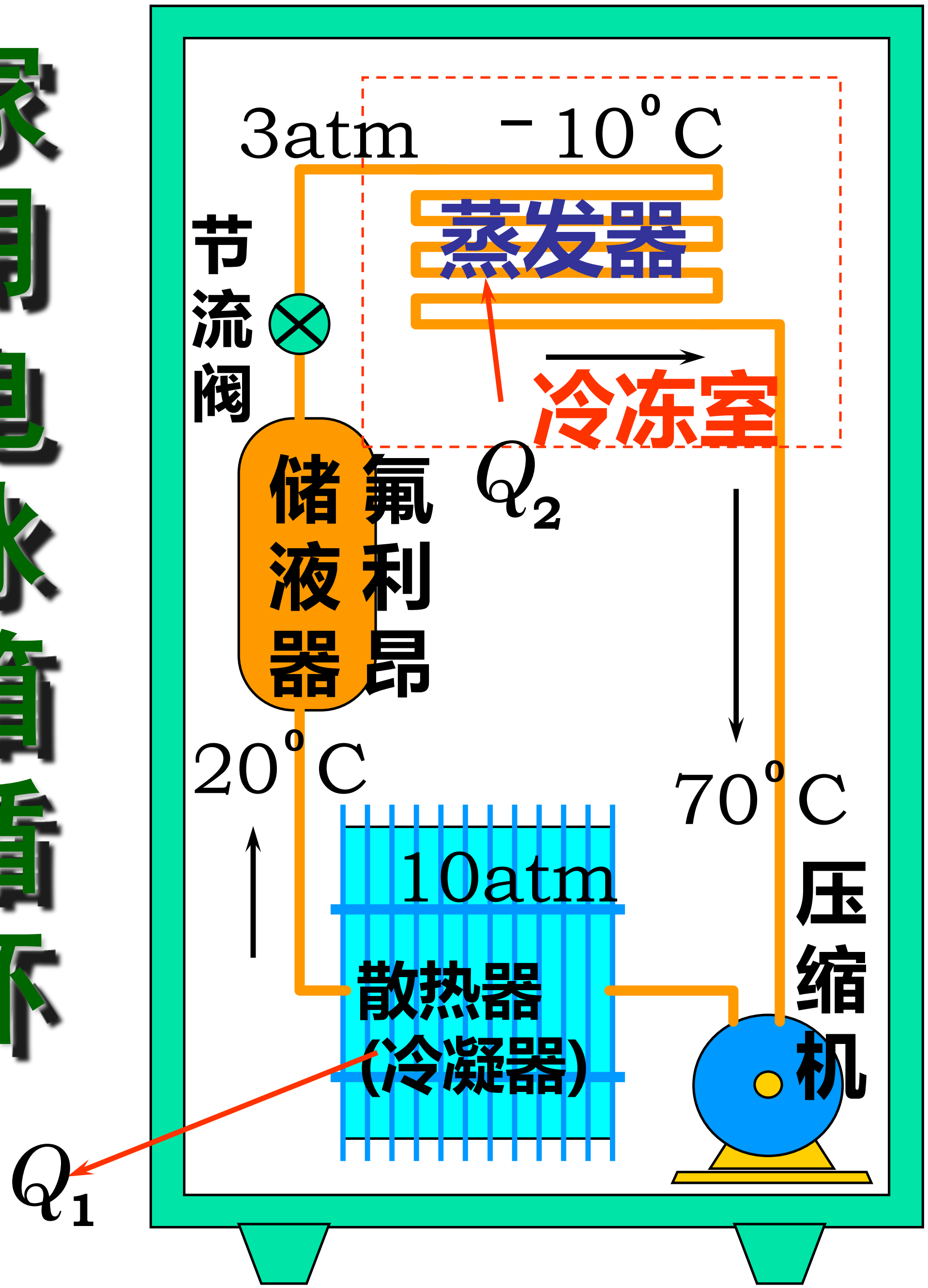
热机工作示意图

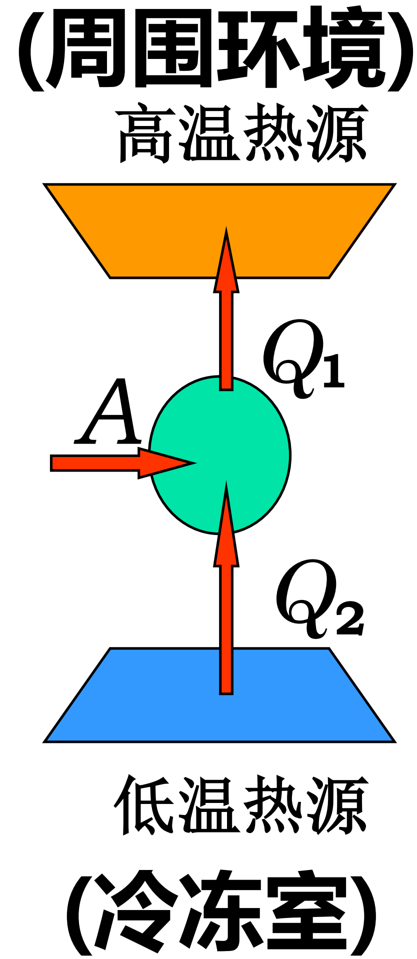



发电厂蒸汽动力循环示意图



# 家用电冰箱循环


3atm
-10°C
蒸发器
节流阀
冷冻室
储液器
氟利昂
Q2
20°C
70°C
10atm
散热器
(冷凝器)
压缩机
Q1


(周围环境)
高温热源
Q1
A
Q2
低温热源
(冷冻室)

## 3、性能指标

**热机效率**

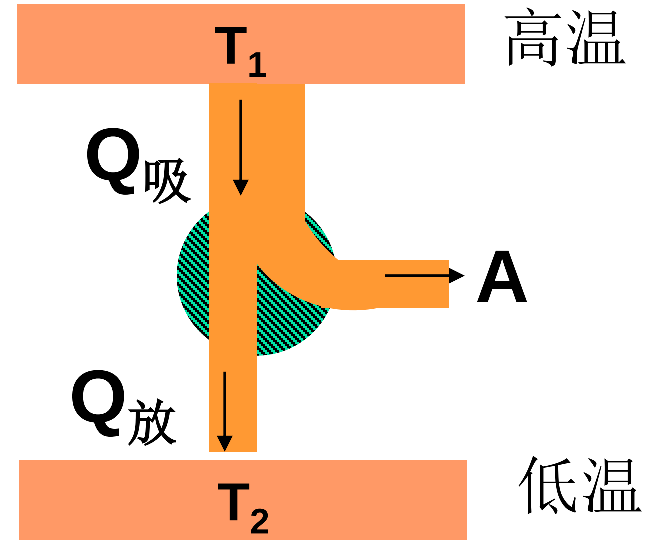
$$\eta = \frac{A}{Q_{吸}} = 1 - \frac{|Q_{放}|}{Q_{吸}}$$

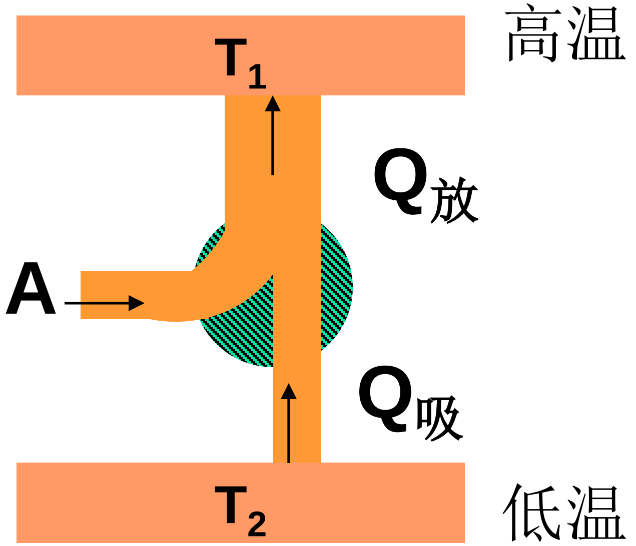
$$Q_{吸} = A + Q_{放}$$

**致冷系数**

$$\omega = \frac{Q_{吸}}{A} = \frac{Q_{吸}}{|Q_{放}| - Q_{吸}}$$

$$A + Q_{吸} = Q_{放}$$



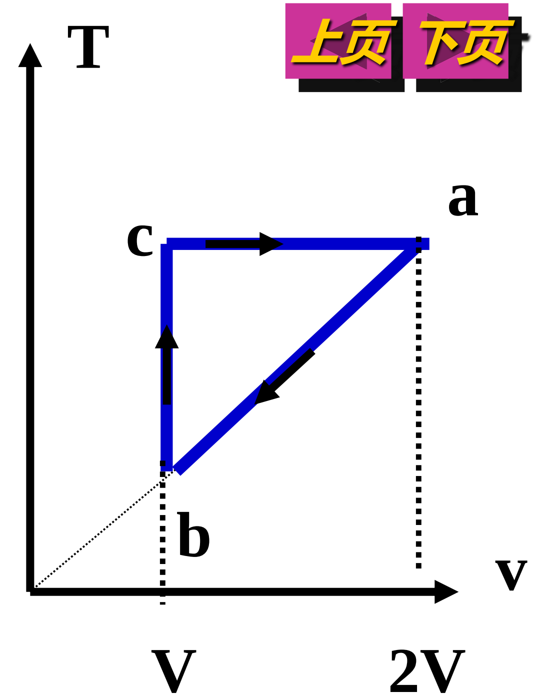



例1、1mol单原子理想气体的循环过程如T-V图所示，其中C点的温度为$T_c$=600K。试求：

（1）ab、bc、ca各个过程系统吸收的热量；

（2）经一循环系统所作的净功；

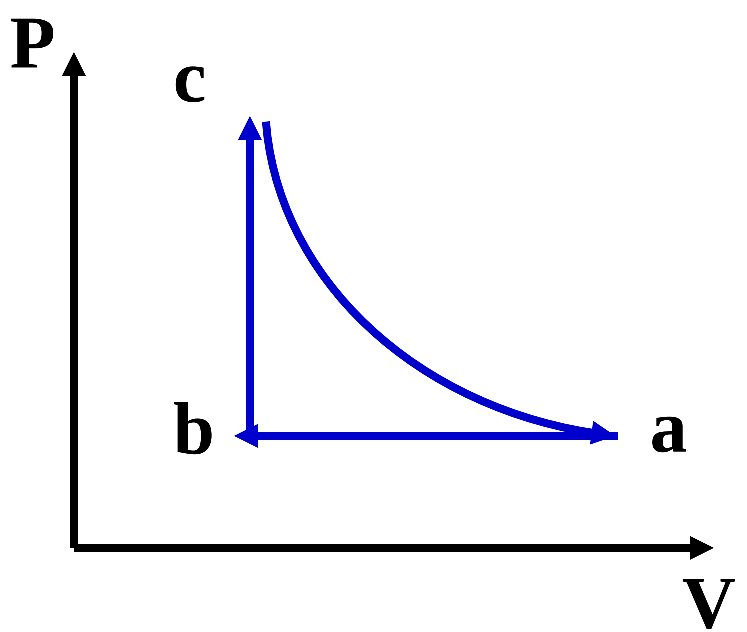
（3）循环的效率。（Ln2=0.693）




解：

$$\frac{T}{V}=k\left(PV=\frac{m}{M}RT\right)$$

$$\frac{V_a}{T_a}=\frac{V_b}{T_b}\Rightarrow T_b=300K$$

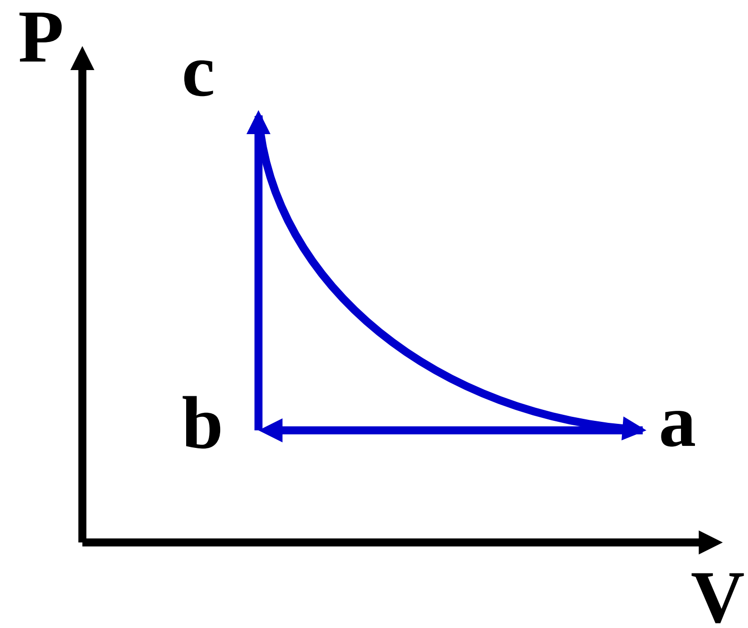



$$Q_{ab}=C_p(T_b-T_a)=\frac{i+2}{2}R(T_b-T_a)$$

$$=-6232.5J$$ <0 放热

$$Q_{bc} = C_v(T_c - T_b) = \frac{i}{2}R(T_c - T_b)$$

$$= 3739.5J$$ >0 吸热



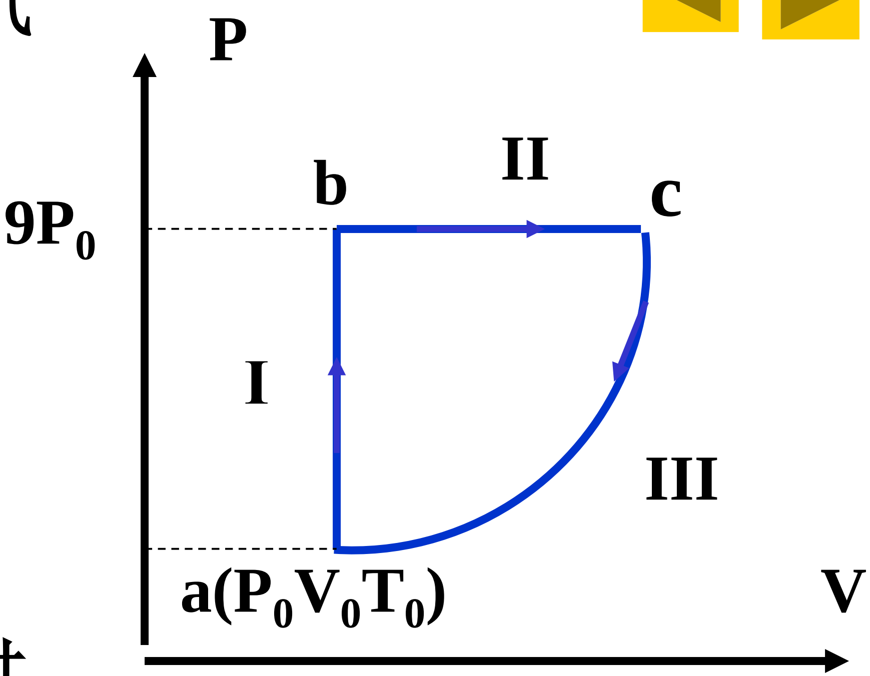

$$Q_{ca} = RT_C \ln\frac{V_a}{V_c} = 3456J$$ >0 吸热

$$A = (Q_{ba} + Q_{ca}) - |Q_{ab}| = 963J$$

$$\eta = \frac{A}{Q_{ba} + Q_{ca}} = 13.4\%$$

上页 下页

例2、1mol单原子分子的理想气体，经历如图所示的可逆循环，联结ac两点的曲线III的方程为 $P=\frac{P_0}{V_0^2}V^2$ ，a点的温度为$T_0$。




1）试以$T_0$、R表示I、II、III过程中气体吸收的热量;

2）求此循环的效率;

3) 净功.

分析：$Q_{I}=C_{V}\left(T_{b}-T_{a}\right)$

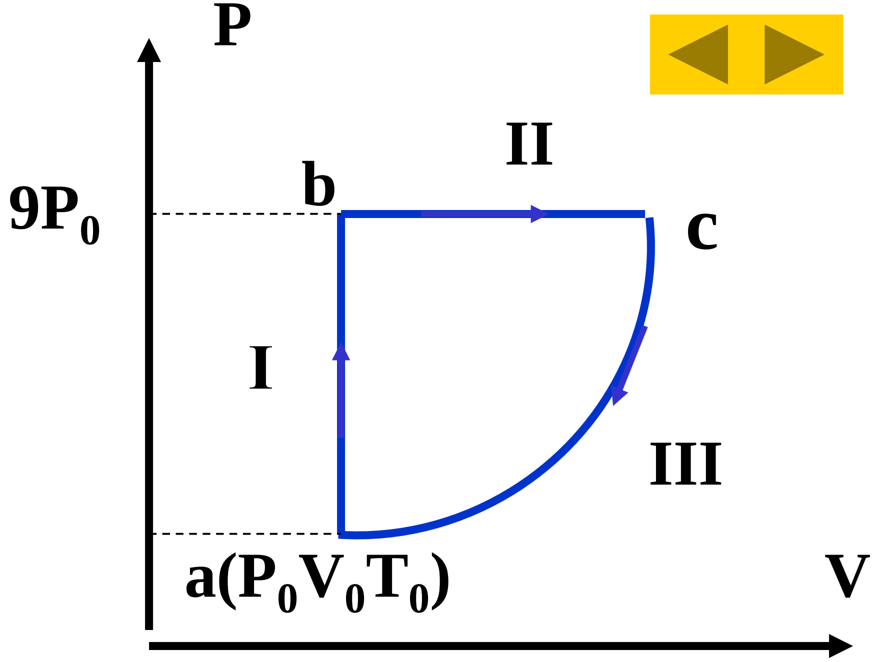
$$Q_{II}=C_{P}\left(T_{c}-T_{b}\right)$$

$$Q_{III}=A+C_{V}\left(T_{a}-T_{c}\right)$$

**解:** $\dfrac{P_0}{T_0}=\dfrac{9P_0}{T_b}\Rightarrow T_b=9T_0$

$\dfrac{P_0}{V_0^2}=\dfrac{9P_0}{V_c^2}\Rightarrow V_c=3V_0$

$\dfrac{P_0V_0}{T_0}=\dfrac{9P_0 3V_0}{T_c}\Rightarrow T_c=27T_0$




$$Q_{I}=C_v\left(T_b-T_a\right)=\frac{3}{2}R\left(9T_0-T_0\right)=12RT_0$$

$$PV=\frac{m}{M}RT$$

$$Q_{II}=C_p\left(T_c-T_b\right)=\frac{5}{2}R\left(27T_0-9T_0\right)=45RT_0$$

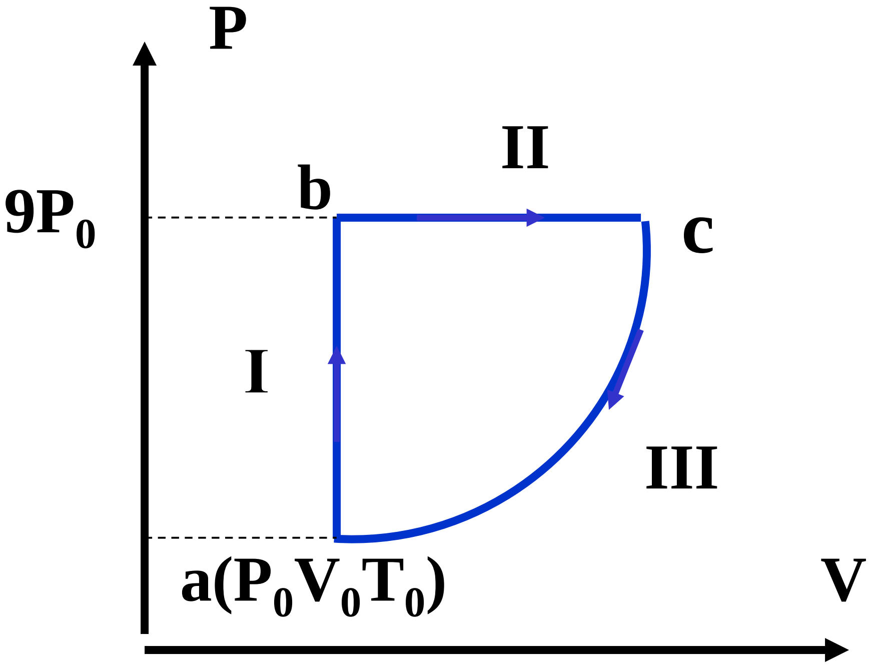
$$\Rightarrow \frac{PV}{T}=\frac{m}{M}R$$

$$\mathbf{Q}_{III}=A+\Delta E=\int_{V_c}^{V_a}PdV+C_v\left(T_a-T_c\right)$$

$$=\int_{3V_0}^{V_0}\frac{P_0}{V_0^2}V^2dV+\frac{3}{2}R\left(T_0-27T_0\right)=-47.7RT_0$$

（2） $$\eta = 1 - \frac{|Q_{III}|}{Q_I + Q_{II}}$$

$$= 16.3\%$$




（3） $$A_{净} = Q_{净}$$

$$= Q_I + Q_{II} + Q_{III}$$

$$= 12RT_0 + 45RT_0 - 47.7RT_0 = 9.3RT_0$$