

第4节 循环过程 卡诺循环

热力学理论是在研究热机工作过程的基础上发展起来的。

在热机中被用来吸收热量并对外作功的物质叫工质。工质经历着循环过程。

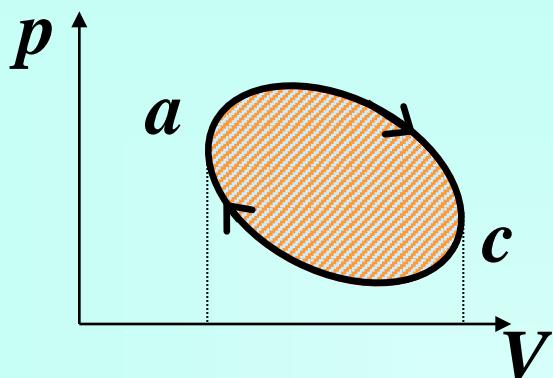
循环过程特征：

内能经过整个循环变化后回到原态： $\Delta E = 0$

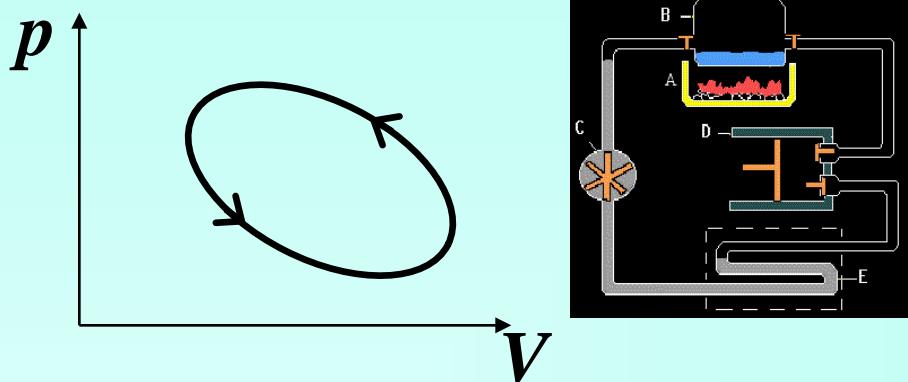
若循环的每一阶段都是准静态过程，则此循环可用 $p-V$ 图上的一条闭合曲线表示。

$p-V$ 图上一条闭合曲线表示一个准静态循环过程。

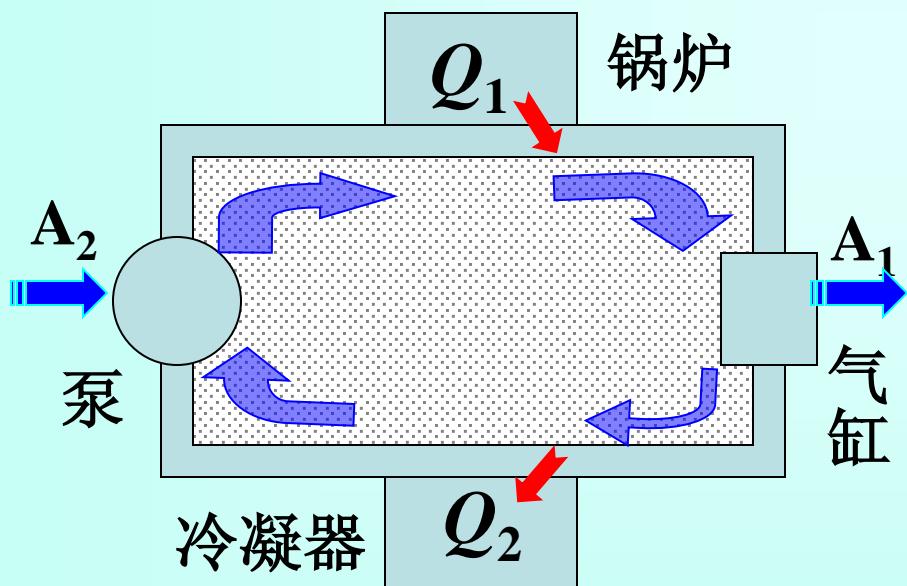
按循环过程进行的方向，循环可分为：



沿顺时针方向进行的循环称为**正循环**或**热循环**。



沿反时针方向进行的循环称为**逆循环**或**致冷循环**。



蒸汽机循环过程

一、正循环

在正循环中，热机中的工质在整个循环过程中对外作的净功：
等于循环闭合曲线所包围的面积。





正循环的特征：

一定质量的工质在一次循环过程中要从高温热源吸热 Q_1 ，对外作净功 $A = A_1 - A_2$ ，又向低温热源放出热量 Q_2 。而工质回到初态，内能不变。

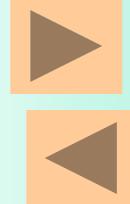
Q_1 、 Q_2 、 A 均表示**数值大小**。由热一律得：

工质经一次循环： $A = Q_1 - Q_2$

用**热机效率**表示热机的工作能力。

即在一次循环中工质从高温热源吸收的热量转换为功的能力：

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



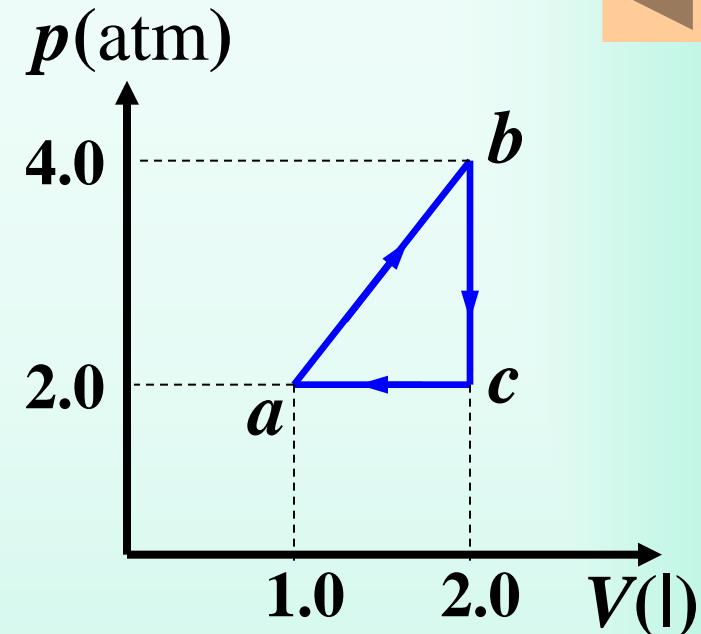
例5. (刚性) 双原子分子理想气体经历如图所示的循环, 求该循环的效率。

解:

$$\begin{aligned} A = S_{abc} &= \frac{1}{2}(p_b - p_a)(V_c - V_a) \\ &= 1 \text{ (atm} \cdot \text{l)} \end{aligned}$$

$a-b$ 过程: $\frac{5}{2}R$

$$\begin{aligned} \Delta E_{ab} &= \nu C_{V,m} (T_b - T_a) \\ &= \nu \frac{5}{2} R \left(\frac{p_b V_b}{\nu R} - \frac{p_a V_a}{\nu R} \right) \\ &= 15 \text{ (atm} \cdot \text{l)} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} A_{ab} &= \frac{1}{2}(p_a + p_b)(V_b - V_a) \\ &= 3 \text{ (atm} \cdot \text{l)} \end{aligned}$$

$$Q_{ab} = \Delta E_{ab} + A_{ab} \\ = 18 \text{ (atm} \cdot \text{l)} \quad \text{吸热}$$

$b - c$ 过程:

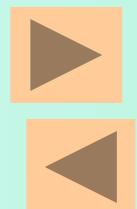
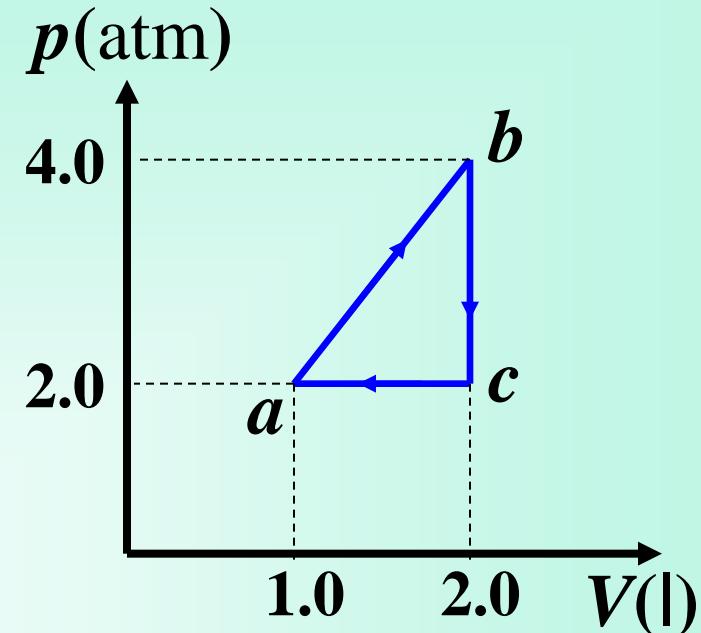
$$Q_{bc} = \nu C_{V,m} (T_c - T_b) < 0 \quad \text{放热}$$

$c - a$ 过程:

$$Q_{ca} = \nu C_{p,m} (T_a - T_c) < 0 \quad \text{放热}$$

$$Q_1 = Q_{ab} = 18 \text{ (atm} \cdot \text{l)}$$

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{1}{18} = 5.6\%$$



例6. 1 mol刚性双原子理想气体经历如图所示循环，其中1—2为过O点的直线，2—3为绝热线，3—1为等温线。已知 $T_2=2 T_1$, $V_3=8 V_1$ 。求：

(1) 各过程的功、内能的增量和传递的热量；

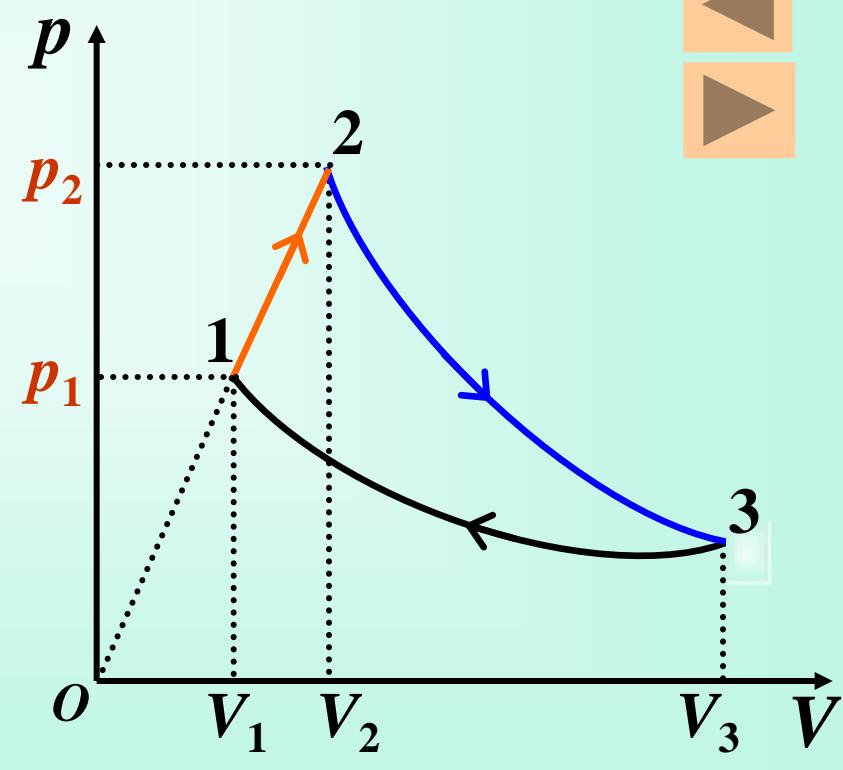
解： 1—2过程：

$$A_{12} = \frac{1}{2} p_2 V_2 - \frac{1}{2} p_1 V_1$$

由状态方程、已知条件

$$\begin{aligned} A_{12} &= \frac{1}{2} (RT_2 - RT_1) \\ &= 0.5 RT_1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta E_{12} &= \nu C_{V,m} (T_2 - T_1) \\ &= 2.5 RT_1 \end{aligned}$$



$$Q_{12} = \Delta E_{12} + A_{12} = 2.5 RT_1 + 0.5RT_1 = 3RT_1 \quad \text{吸热}$$

2-3过程，为绝热膨胀过程: $Q_{23} = 0$

$$\Delta E_{23} = \nu C_{V,m} (T_3 - T_2)$$

$$= \nu C_{V,m} (T_1 - T_2)$$

$$= -2.5 RT_1$$

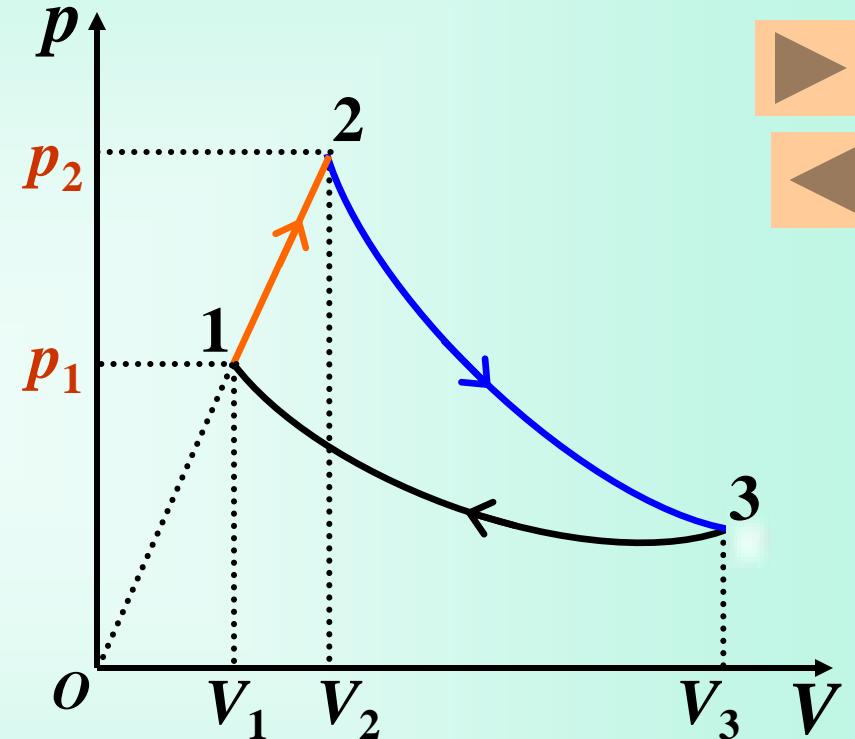
$$A_{23} = Q_{23} - \Delta E_{23}$$

$$= 2.5 RT_1$$

3-1过程，为等温压缩过程:

$$\Delta E_{31} = 0$$

$$A_{31} = \nu RT_1 \ln \frac{V_1}{V_3} = -2.08RT_1$$



$$Q_{31} = \Delta E_{31} + A_{31}$$

$$= -2.08RT_1 \quad \text{放热}$$

(2) 该循环的效率。

$$\eta = \frac{A}{Q_1}$$

$$Q_{12} = 3RT_1 \quad \text{吸热}$$

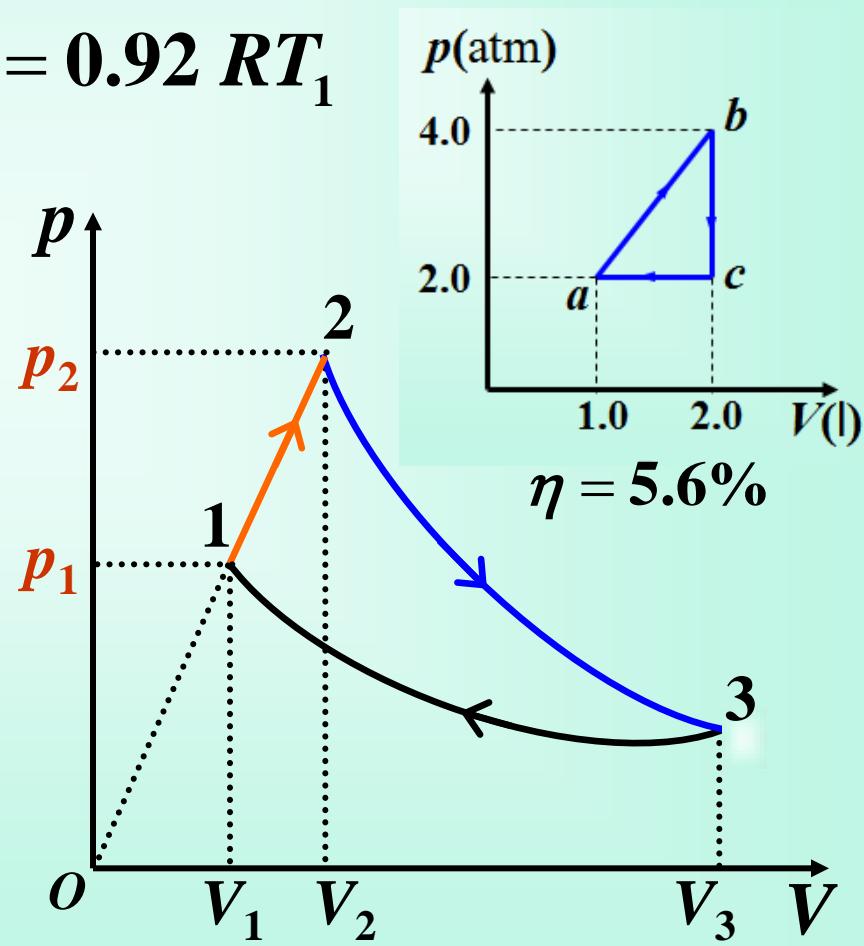
$$Q_{31} = -2.08RT_1 \quad \text{放热}$$

净功: $A = A_{12} + A_{23} + A_{31} = 0.92 RT_1$

只有1-2过程吸热:

$$Q_1 = Q_{12} = 3RT_1$$

$$\eta = \frac{0.92RT_1}{3RT_1} = 30.7\%$$



二、卡诺循环

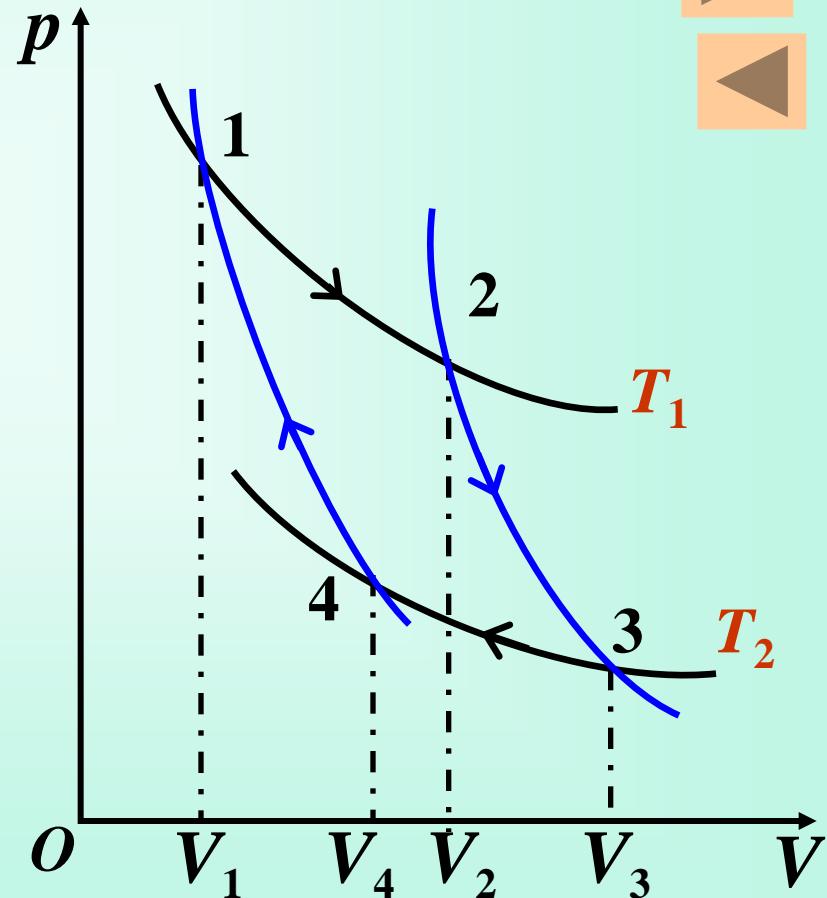
卡诺循环由4个准静态过程（两个等温、两个绝热）组成。按卡诺循环工作的热机称为卡诺热机。

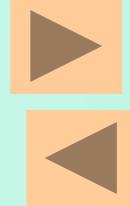
讨论以理想气体为工质的卡诺循环。

1→2：与温度为 T_1 的高温热源接触， T_1 不变，体积由 V_1 膨胀到 V_2 ，从热源吸收热量为：

$$Q_1 = \nu R T_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

2→3：绝热膨胀，体积由 V_2 变到 V_3 ，吸热为零。

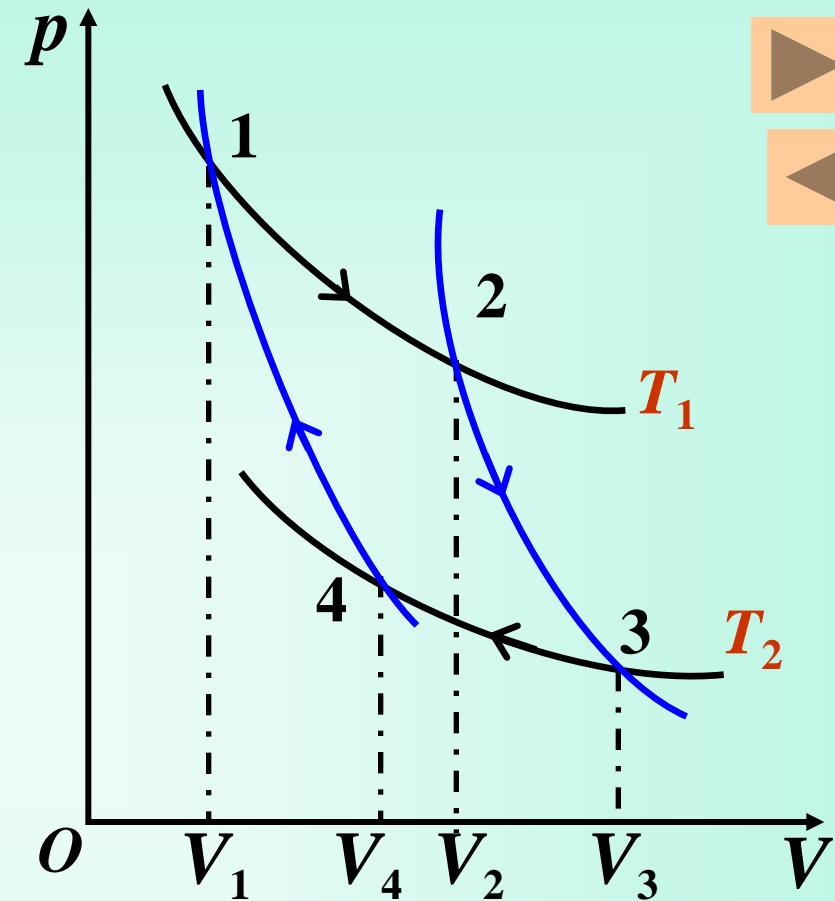
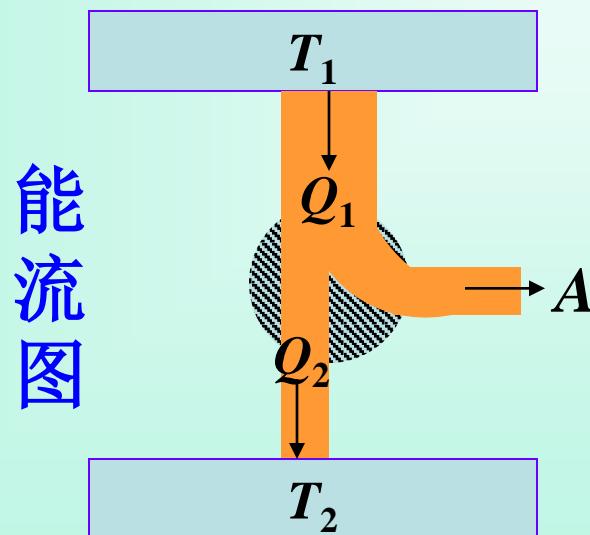




3→4: 与温度为 T_2 的低温热源接触, T_2 不变, 体积由 V_3 压缩到 V_4 , 向热源放热为:

$$Q_2 = \nu R T_2 \ln \frac{V_3}{V_4}$$

4→1: 绝热压缩, 体积由 V_4 变到 V_1 , 吸热为零。



在一次循环中, 气体对外作净功为:

$$A = Q_1 - Q_2$$

效率为：

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

$$Q_1 = \nu R T_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$
$$Q_2 = \nu R T_2 \ln \frac{V_3}{V_4}$$

由例5.结果知 $\frac{V_3}{V_4} = \frac{V_2}{V_1}$ 即 $\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$

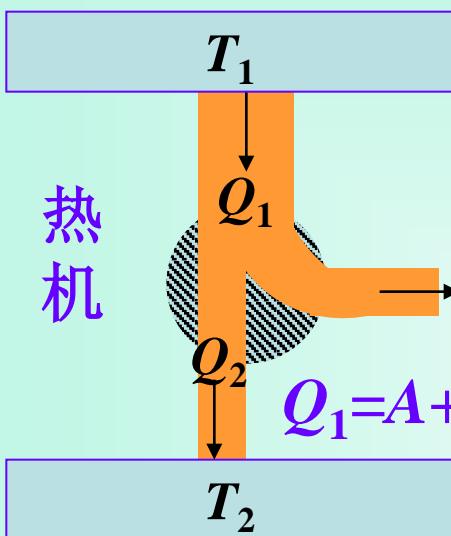
所以 $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$ ○ ○

理想气体卡诺循环
的效率只与两热
源的温度有关

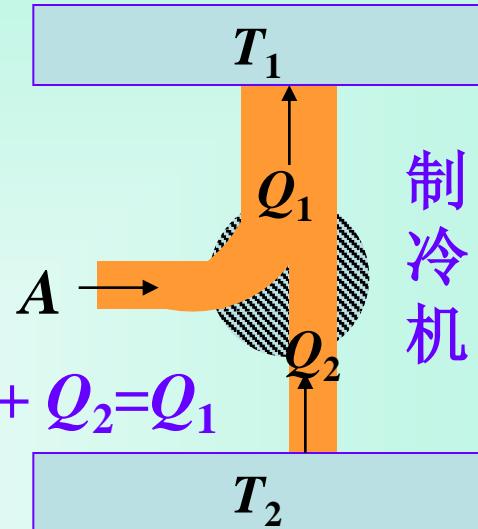
可以证明，在同样两个温度 T_1 和 T_2 之间工作的各种工质的卡诺循环的效率都由上式给定，而且是实际热机可能效率的最大值。



三、(逆)致冷循环



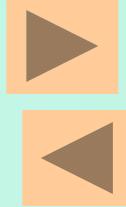
逆向循环反映了制冷机的工作原理，其能流图如右图：



工质借助于外界做的功，把从低温热源吸收的热量和外界对它所作的功以热量的形式传给高温热源，其结果可使低温热源的温度更低，达到制冷的目的。

制冷系数 ω : 吸热越多，外界作功越少，表明制冷机效能越好。

$$\omega = \frac{Q_2}{A}$$



$$\omega = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$

以理想气体为工质的卡诺制冷循环的制冷系数为

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

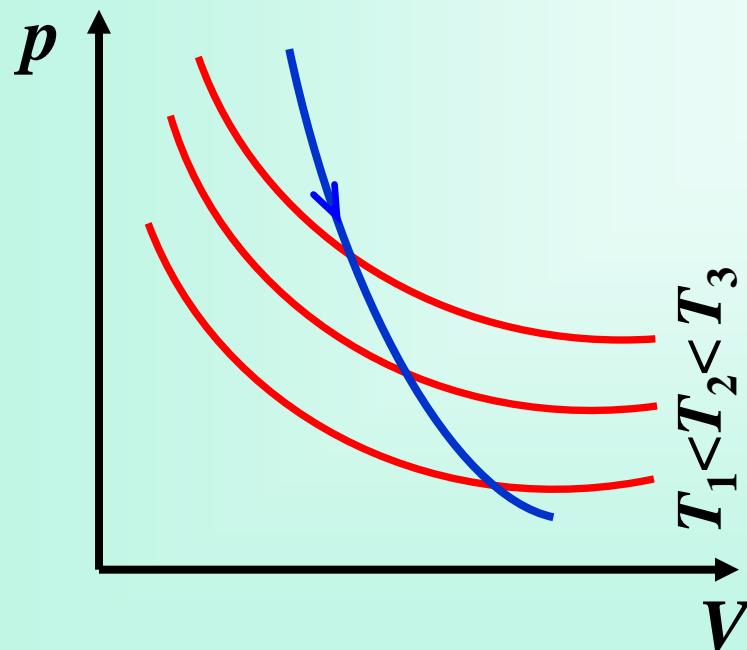
这是在 T_1 和 T_2 两温度间工作的各种制冷机的制冷系数的最大值。

可以看出，当 T_1 一定时，要从温度越低的热源中吸收热量，必须消耗越多的外界功。

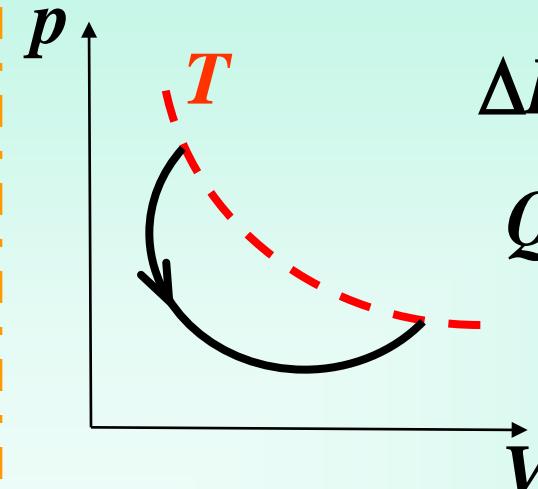


讨论: $p-V$ 图中准静态过程的温度和热量

1、用等温线簇判断过程温度的变化。



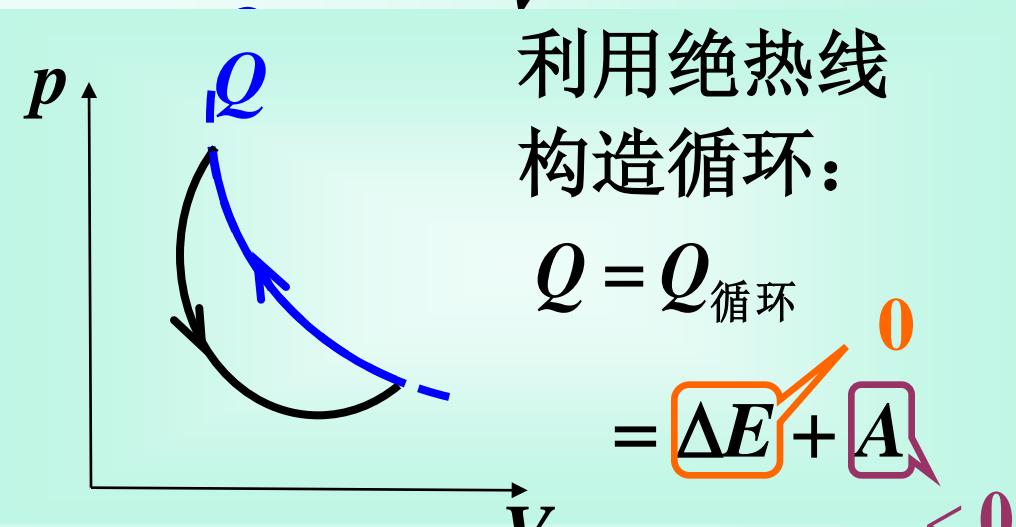
热量?



$$\Delta E = 0 \quad A > 0$$

$$Q = \Delta E + A > 0$$

吸热



利用绝热线
构造循环:

$$Q = Q_{\text{循环}} = \boxed{\Delta E} + \boxed{A} < 0$$

$Q < 0$ 放热

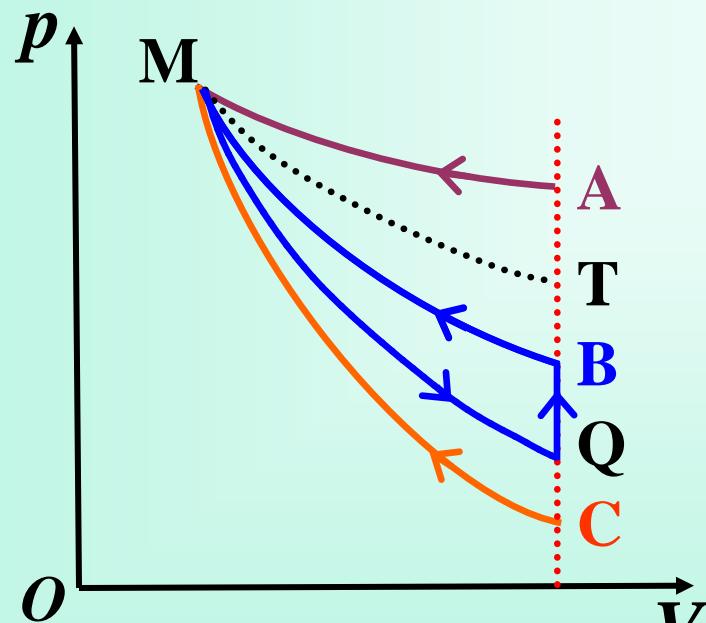
2、借助**循环**判断过程的**热量**



方法：沿原过程方向结合某些特殊过程
(等值过程、绝热过程) 构造循环。

例7. 图中各过程温度的变化? 热量的变化?

判断热量: AM: $Q_{AM} < 0$ 放热



BM? 构造循环: BMQB

逆循环: $A < 0$

$$\Delta E = 0 \quad Q = \Delta E + A < 0$$

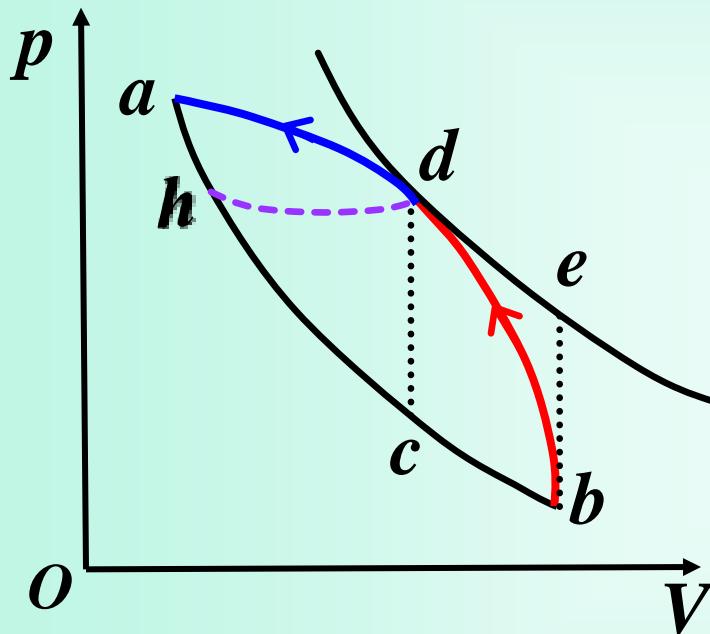
$$Q = Q_{BM} + Q_{MQ} + Q_{QB} < 0$$

$$Q_{MQ} = 0 \quad Q_{QB} = \Delta E_{QB} + A_{QB} > 0$$

$Q_{BM} < 0$ 放热

例8. 试分析带箭头的 ba 过程的吸放热情况，其中 a 、 b 处在一条绝热线上。

对带箭头 ba 过程： $Q_{ba} < 0$ 放热



对 bd 过程： 构造循环： $bdeb$

$Q_{bd} + Q_{eb} > 0$ $Q_{bd} > 0$ 吸热

对 da 过程： 构造循环： $dacd$

$Q_{da} + Q_{cd} < 0$ $Q_{da} < 0$ 放热

$$|Q_{da}| > |Q_{bd}|$$

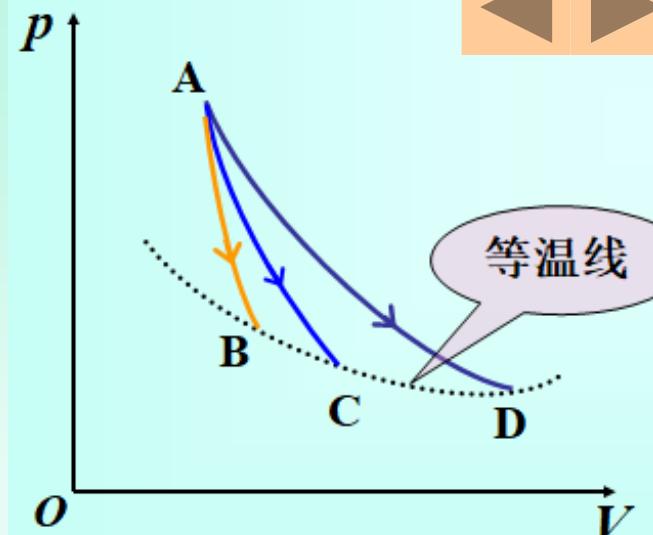
利用过程末态绝热线及等容
线或等温构造循环





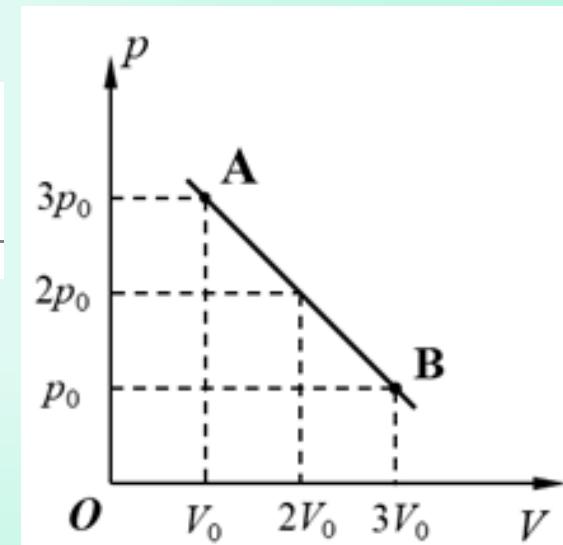
思考题1. 一定量的理想气体，从同一初态A开始，分别经历不同的过程过渡到不同的末态，末态的温度相同，AC是绝热过程，试判定AB过程和AD过程气体分别是吸热还是放热。

答案： AB放热， AD吸热



1. 如图所示， 1 mol 单原子理想气体经过的过程为 p - V 图上的一条直线（A、B点的位置已标注），试求：

- (1) T_A 和 T_B 的关系，以及 AB 的过程方程；
- (2) 该过程中最高温度的位置，以及最高温度 T_{max} 与 T_A 的关系；
- (3) 讨论整个过程中的吸热、放热情况。



$$dQ = 2p_0 \left(5 - \frac{2V}{V_0} \right) dV$$