

§8 热力学第一定律

对理想气体在典型准静态过程中的应用

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

热力学第一定律

表明：系统从外界吸收的热量 Q ，一部分使系统的内能增加 ΔE ，而另一部分用于系统对外界做功 A

Q ：系统从外界吸收热量为正，放热为负

ΔE ：系统内能增加为正，内能减少为负

A ：系统对外界做功为正，外界对系统做功为负

一. 等温过程 $T = \text{常量}, dT = 0$

波意耳-马略特定律 (1676)

过程方程: $pV = C \quad (C = \nu RT)$

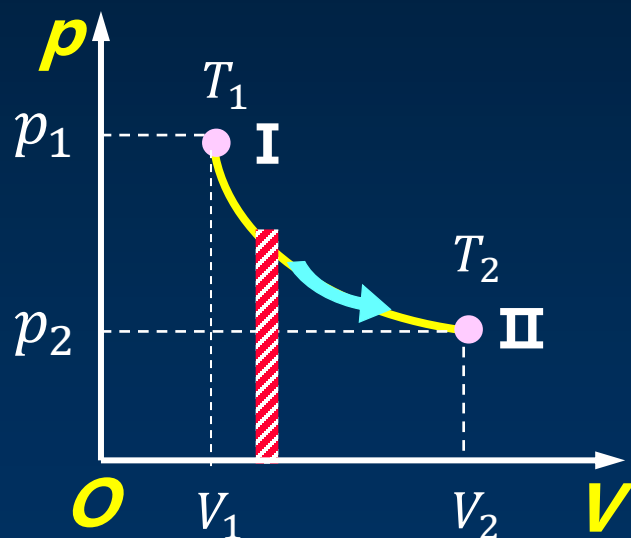
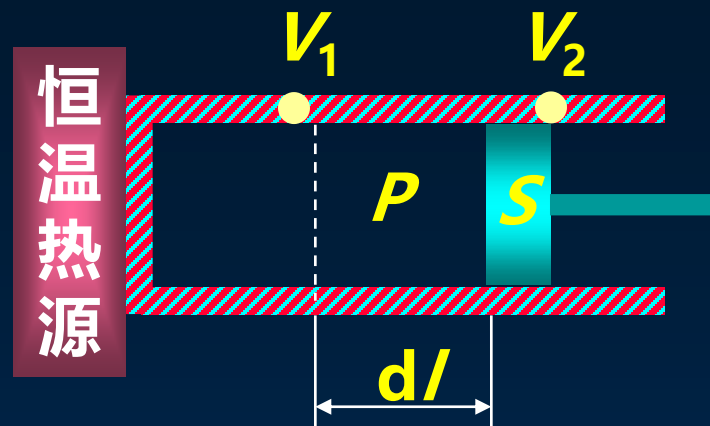
● 内能的增量 $\Delta E = 0$

● 系统对外界做功

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{\nu RT}{V} dV$$
$$= \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \nu RT \ln \frac{p_1}{p_2}$$

● 系统从外界吸收的热量

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



结论: 在等温膨胀过程中, 理想气体吸收的热量全部用来对外做功, 在等温压缩中, 外界对气体所做的功, 都转化为气体向外界放出的热量。

二. 等体过程 ($V = \text{常量}$ or $dV = 0$)

过程方程: $\frac{p}{T} = C$ ($C = \frac{\nu R}{V}$)

● 系统对外做功 $A = \int p dV = 0$

● 系统内能的增量

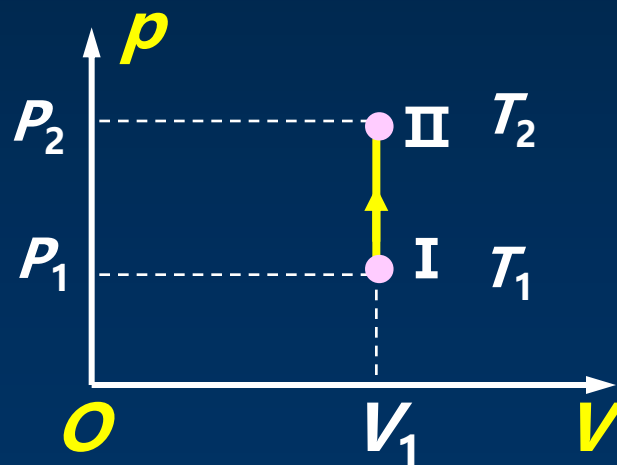
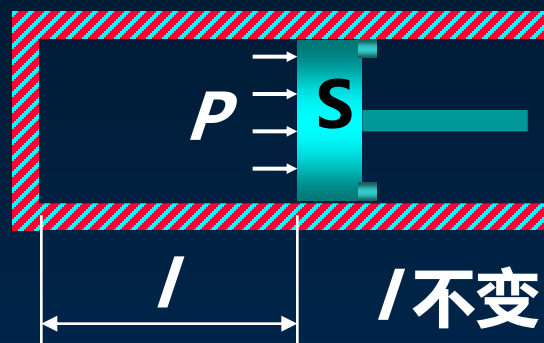
$$\Delta E = \nu \int_{T_1}^{T_2} C_V dT = \nu C_V (T_2 - T_1)$$

● 系统从外界吸收的热量

$$Q = \Delta E = \nu \int_{T_1}^{T_2} C_V dT = \nu C_V (T_2 - T_1)$$

结论: 等体过程中气体吸收的热量, 全部用来增加系统的内能, 使系统温度上升

查理定律 (1787)



三. 等压过程 ($P = \text{常量}$ or $dp = 0$) 盖·吕萨克定律 (1802)

过程方程: $\frac{V}{T} = C \quad (C = \frac{\nu R}{p})$

● 系统对外做功

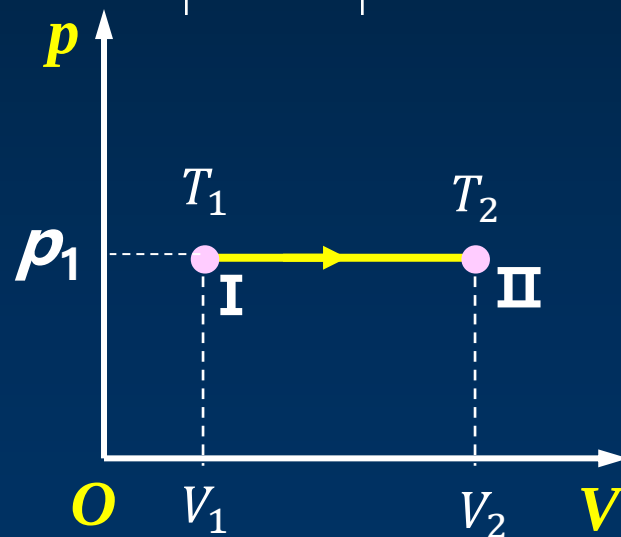
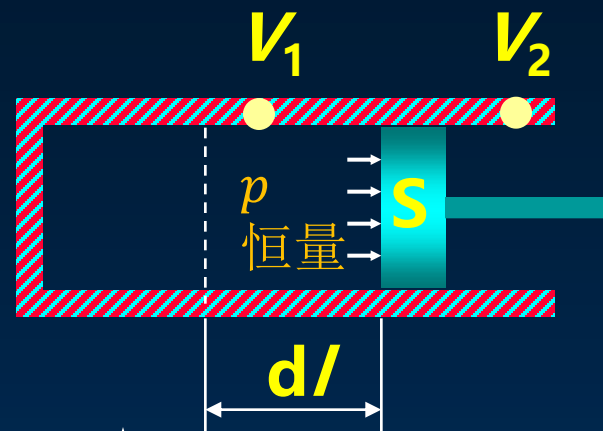
$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV = p(V_2 - V_1) = \nu R(T_2 - T_1)$$

● 系统内能的增量

$$\Delta E = \int_{T_1}^{T_2} \nu C_V dT = \nu C_V(T_2 - T_1)$$

● 系统从外界吸收的热量

$$Q = \nu \int_{T_1}^{T_2} C_p dT = \nu C_p(T_2 - T_1)$$



结论：等压过程中系统吸收的热量，一部分用来对外做功，其余部分则用来增加其内能

对于理想气体系统来说，在下列过程中，哪个过程系统所吸收的热量、内能的增量和对外作的功三者均为负值？

A

等体降压过程

B

等温膨胀过程

C

绝热膨胀过程

D

等压压缩过程

注意：

特殊过程特点，即内能增量、热量、做功三个量表现出的特点

四. 绝热过程

系统在绝热过程中始终不与外界交换热量

- 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

1. 准静态绝热过程方程

对无限小的准静态绝热过程 有

$$dA + dE = 0 \quad \rightarrow \quad pdV = -\nu C_V dT$$

$$pV = \nu RT \quad \rightarrow \quad pdV + Vdp = \nu R dT$$

$$(C_V + R)pdV + C_V Vdp = 0$$



$$\frac{dp}{p} + \gamma \frac{dV}{V} = 0$$

$$pV^\gamma = C_1$$

$$p^{\gamma-1}T^{-\gamma} = C_3$$

上式和状态方程可得

$$TV^{\gamma-1} = C_2$$

2. 准静态绝热过程曲线

问题：哪条是等温线？哪条是绝热线？

$$pV^\gamma = C_1$$

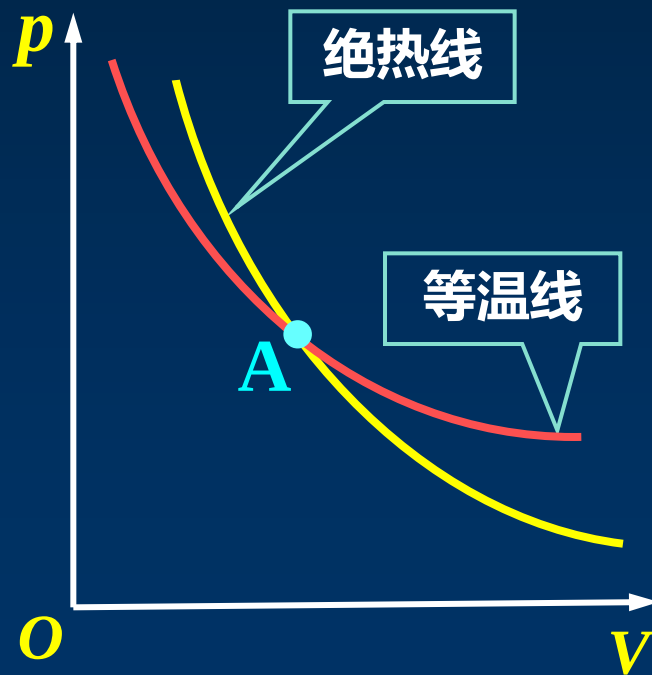
$$\frac{dp}{dV} = -\gamma \frac{p}{V}$$

求导

$$pV = C_2$$

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

由于 $\gamma > 1$ ，所以绝热线要比等温线陡一些。



3. 绝热过程中功、内能增量的计算

在绝热过程中 $Q = 0$

系统对外作功

$$A = -(E_2 - E_1) = -\nu C_V(T_2 - T_1)$$

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV = \int_{V_1}^{V_2} p_1 V_1^\gamma \frac{dV}{V^\gamma} = \frac{1}{\gamma - 1} (p_1 V_1 - p_2 V_2)$$

结论：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

理想气体的热力学过程有关公式对照表

过程	特征	过程方程	能量转换方式	内能增量 ΔE	对外做功 A	吸收热量 Q	摩尔热容
等体	$V = \text{常量}$	$\frac{p}{T} = \text{常量}$	$Q = \Delta E$	$\frac{m}{M} \frac{i}{2} R(T_2 - T_1)$	0	$\frac{m}{M} C_{V,m}(T_2 - T_1)$	$C_{V,m} = \frac{i}{2} R$
等压	$p = \text{常量}$	$\frac{V}{T} = \text{常量}$	$Q = \Delta E + A$	$\frac{m}{M} \frac{i}{2} R(T_2 - T_1)$	$p(V_2 - V_1)$ $\frac{m}{M} R(T_2 - T_1)$	$\frac{m}{M} C_{p,m}(T_2 - T_1)$	$C_{p,m} = C_{V,m} + R$
等温	$T = \text{常量}$	$pV = \text{常量}$	$Q = A$	0	$\frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$ $\frac{m}{M} RT \ln \frac{p_2}{p_1}$	$\frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$ $\frac{m}{M} RT \ln \frac{p_2}{p_1}$	∞
绝热	$dQ = 0$	$pV^\gamma = C_1$ $V_{\gamma-1} T = C_2$ $p^{\gamma-1} T^{-\gamma} = C_3$	$A = -\Delta E$	$\frac{m}{M} \frac{i}{2} R(T_2 - T_1)$	$-\frac{m}{M} \frac{i}{2} C_{V,m}(T_2 - T_1)$	0	0

多方过程 (Polytropic Process)

- 多方过程方程 $pV^n = C$ (n 多方指数, $1 < n < \gamma$)

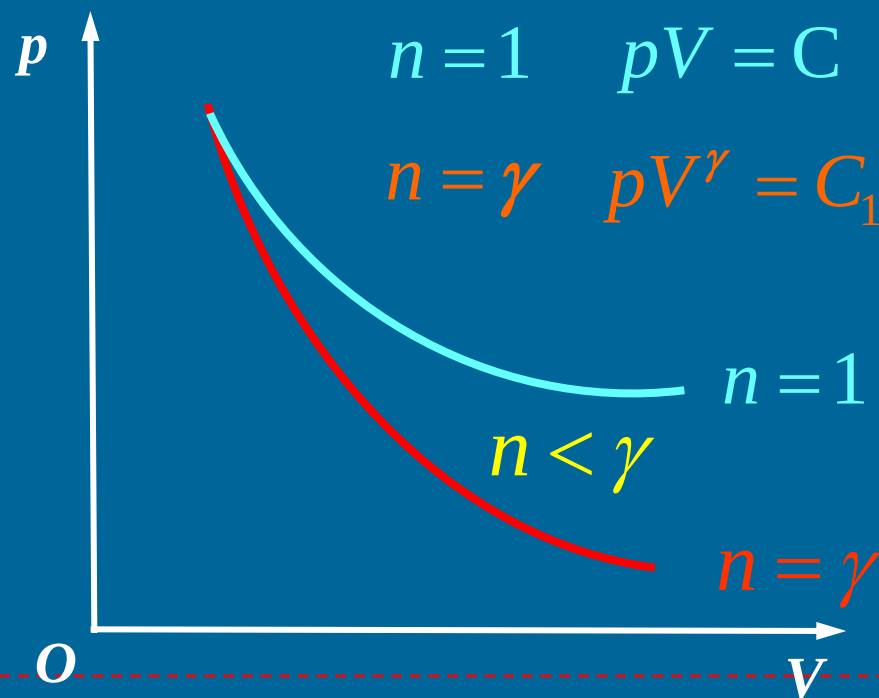
满足这一关系的过程称为多方过程

- 多方过程曲线 根据多方过程方程, 有

$$pd(V^n) + V^n dp = 0 \quad \longrightarrow \quad \frac{dP}{dV} = -n \frac{p}{V} \quad \text{指数 } n \text{ 越大} \\ \text{曲线越陡}$$

多方过程中功的计算

$$\begin{aligned} A &= \int_{V_1}^{V_2} p dV = \int_{V_1}^{V_2} p_1 V_1^n \frac{dV}{V^n} \\ &= \frac{1}{n-1} (p_1 V_1 - p_2 V_2) \\ &= -\frac{\nu R}{n-1} (T_2 - T_1) \end{aligned}$$



多方过程的摩尔热容量:

$$C_n = C_V + \frac{R}{1-n} = \frac{n-\gamma}{n-1} C_V$$

多方过程的其它状态参量之间的关系:

$$TV^{n-1} = C \quad \frac{p^{n-1}}{T^n} = C' \quad pV^n = C$$

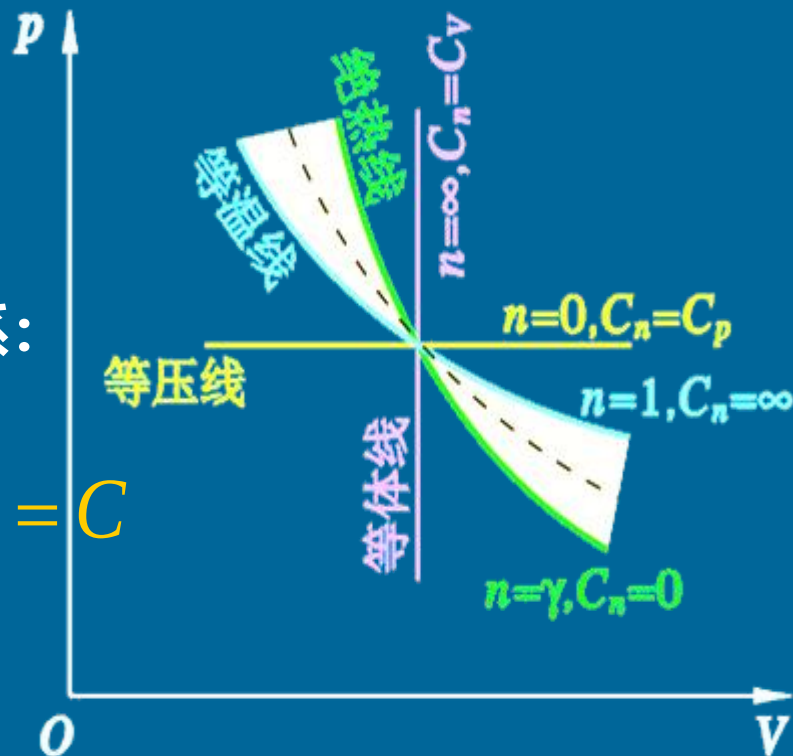
小结: 四个典型的热力学过程:

$n=1$ $pV = C$ 等温过程

$n=\gamma$ $pV^\gamma = C$ 绝热过程

$n=0$ $p = C$ 等压过程

$n=\infty$ $V = C$ 等体过程



可见, 多方过程是相当大一类过程的概括, 比其它三个过程更接近于实际过程

例 一定量氮气，其初始温度为 300 K，压强为 1atm。将其绝热压缩，使其体积变为初始体积的 1/5。

求 压缩后的压强和温度？

解 氮气是双原子分子

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{(7/2)}{(5/2)} = \frac{7}{5}$$

根据绝热过程方程的 p 、 V 关系，有

$$p_2 = p_1(V_1/V_2)^\gamma = 1 \times 5^{\frac{7}{5}} = 9.52 \text{ atm}$$

根据绝热过程方程的 T 、 V 关系，有

$$T_2 = T_1(V_1/V_2)^{\gamma-1} = 300 \times 5^{\frac{7}{5}-1} = 571 \text{ K}$$

1 用公式 $\Delta E = \nu C_v \Delta T$ (式中 C_v 为定体摩尔热容量, 视为常量, ν 为气体摩尔数) 计算理想气体内能增量时, 此式

- A 只适用于准静态的等体过程
- B 只适用于一切等体过程
- C 只适用于一切准静态过程
- D 适用于一切始末态为平衡态的过程

提交

讨论: (1) 内能、功、热量, 状态量? 过程量

例 已知 2 mol 氦气 $t_1 = 27^\circ\text{C}$, $V_1 = 20\text{L}$ 先等压膨胀体积倍增, 后绝热膨胀至原温度.

求 (1) 画 $p-V$ 图; (2) 在这过程中氦气吸热.

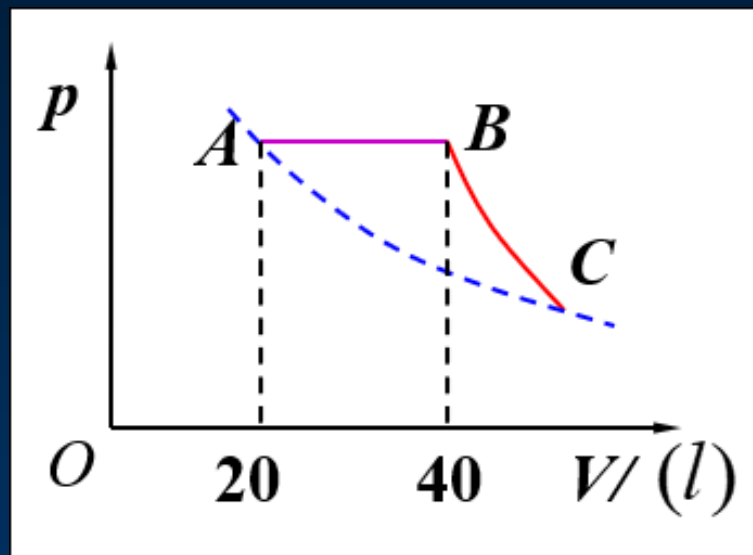
$$Q_{\text{吸}} = Q_{AB} = 2C_p (T_2 - T_1)$$

$$T_1 = (273 + 27) \text{ K}$$

$$C_p = \frac{5}{2}R = 20.79 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\therefore \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad \therefore T_2 = 600\text{K}$$

$$Q_{AB} = 1.25 \times 10^4 \text{ J}$$



(3) $A-B-C$ 过程氦气的内能变化 $\because \Delta T = 0, \therefore \Delta E = 0$

(4) $A-B-C$ 过程气体作的总功

$$Q = \Delta E + W = W = 1.25 \times 10^4 \text{ J}$$

对一定量的理想气体，下述那几个过程不可能发生

A

系统从外界吸热但温度降低；

B

从外界吸热同时对外做功

C

吸收热量同时体积被压缩

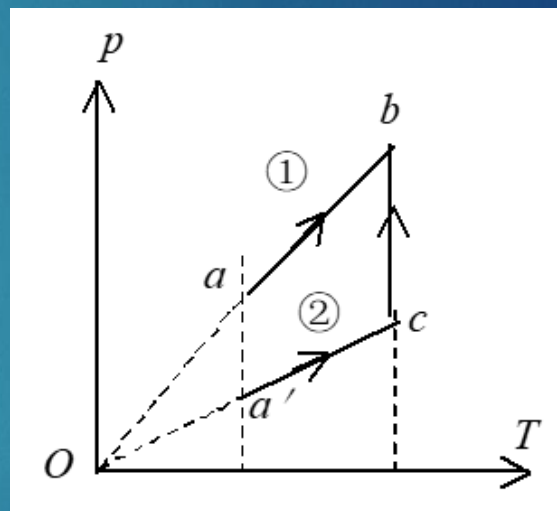
D

等温下的绝热膨胀

5

一定量的理想气体分别由初态 a 经①过程 ab 和由初态 a' 经②过程 $a'cb$ 到达相同的终态 b ，如 $p-T$ 图所示，则两个过程中气体从外界吸收的热量 Q_1 ， Q_2 的关系为

- A $Q_1 < 0$, $Q_1 > Q_2$
- B $Q_1 > 0$, $Q_1 > Q_2$
- C $Q_1 < 0$, $Q_1 < Q_2$
- D $Q_1 > 0$, $Q_1 < Q_2$



提交

例 如图，对于同一气体，**1** 为绝热过程，那么从各个过程的整体来看，**2** 和 **3** 是吸热还是放热？

解 对 **1** 过程：

$$Q_1 = 0, \quad \Delta E = -A_1$$

对 **2** 过程：

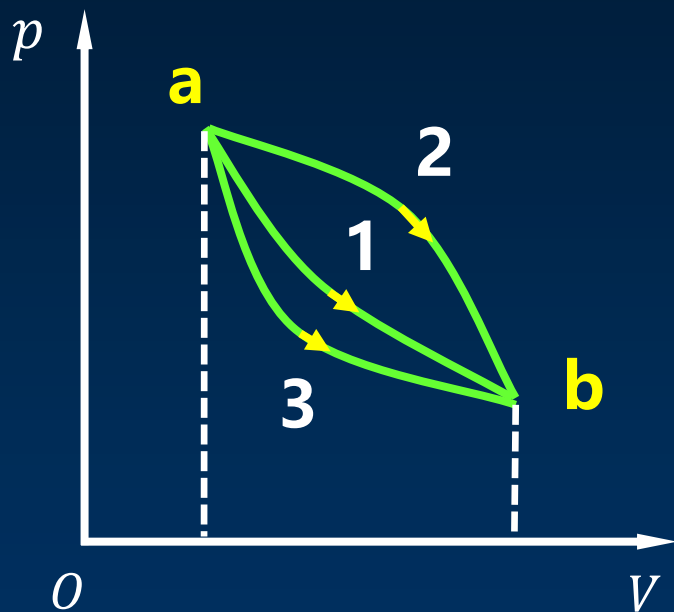
$$\begin{aligned} Q_2 &= \Delta E + A_2 \\ &= -A_1 + A_2 > 0 \end{aligned}$$

吸热

对 **3** 过程：

$$Q_3 = \Delta E + A_3 = -A_1 + A_3 < 0$$

放热



3

一物质系统从外界吸收一定的热量，则系统的内能

- ☐ A 一定增加
- ☐ B 一定减少
- ☐ C 一定保持不变
- ☐ D 可能增加，也可能减少或保持不变

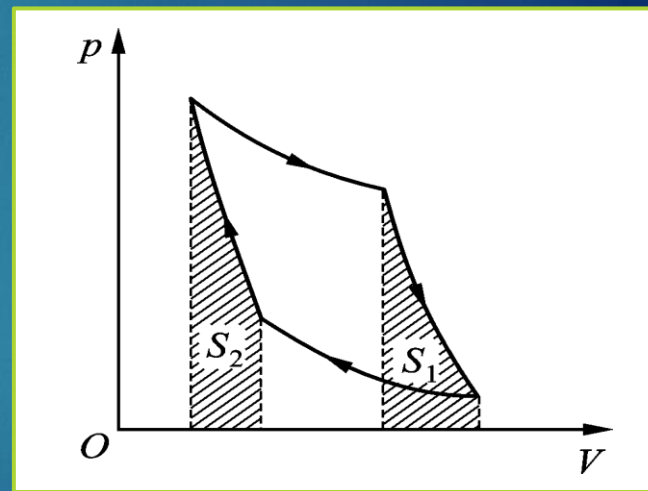
提交

讨论：(1)为什么？ (2)摩尔热容何时 >0 ? <0 ?

7

理想气体经历等温、绝热、等温、绝热过程，两条绝热线下的面积大小(图中阴影部分)分别为 S_1 和 S_2 ，则二者的大小关系为

- A $S_1 = S_2$
- B $S_1 > S_2$
- C $S_1 < S_2$
- D 无法确定



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) 理想气体在几个等值过程及绝热过程中的有关公式经常用到, 熟练掌握这些公式会给计算带来许多方便

➤ 小结

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

$$\Delta E = \nu C_V \Delta T = \nu C_V (T_2 - T_1)$$

- (2) **功和热量是过程量**，讲某一状态的功、热量没有意义

功的计算：由 $A = \int_{V_1}^{V_2} p dV$ 出发，根据过程特点找到 $p-V$ 关系，代入积分求解。P-V 图中的规则图形可以直接计算面积

热量的计算：由 $Q = \nu C_x (T_2 - T_1)$ 出发，摩尔热容 C_x 是过程量，等体过程 $C_x = C_V$ ；等压过程 $C_x = C_p$ ；绝热过程 $C_x = 0$ ；等温过程（ $C_x = \infty$ ）的热量按照 $Q = A$ 计算

例： 1 mol 氦气由状态 $M(p_1, V_1)$ 沿图中的直线到 $N(p_2, V_2)$ 。

求： (1) 过程方程； (2) $\Delta E=?$, $A=?$, $Q=?$
(3) 求此过程的摩尔热容。

解 (1) $p = CV$ $pV^{-1} = C$

$$C = \frac{p_2 - p_1}{V_2 - V_1} = \frac{p_2}{V_2} = \frac{p_1}{V_1}$$

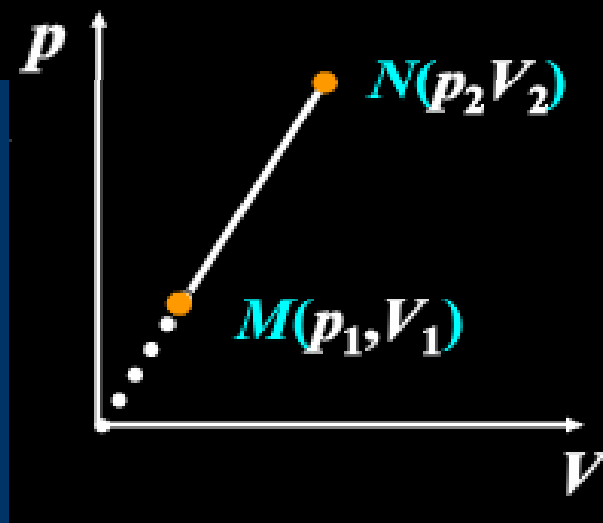
(2) $\Delta E = C_V(T_2 - T_1)$

$$= \frac{3}{2}R(T_2 - T_1) = \frac{3}{2}(p_2V_2 - p_1V_1)$$

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV = \int_{V_1}^{V_2} CV dV = \frac{1}{2}C(V_2^2 - V_1^2) = \frac{1}{2}(p_2V_2 - p_1V_1)$$

$$Q = A + \Delta E = 2(p_2V_2 - p_1V_1) = 2R(T_2 - T_1) = C(T_2 - T_1)$$

(3) 求此过程的摩尔热容： $C = 2R$



§9 循环过程

一. 循环过程

1. 循环过程 系统从某一状态出发经历一系列变化后又回到了原态的整个变化过程。

循环过程
内能变化

$$\Delta E = 0$$

循环曲线包围面积
代表系统作的净功

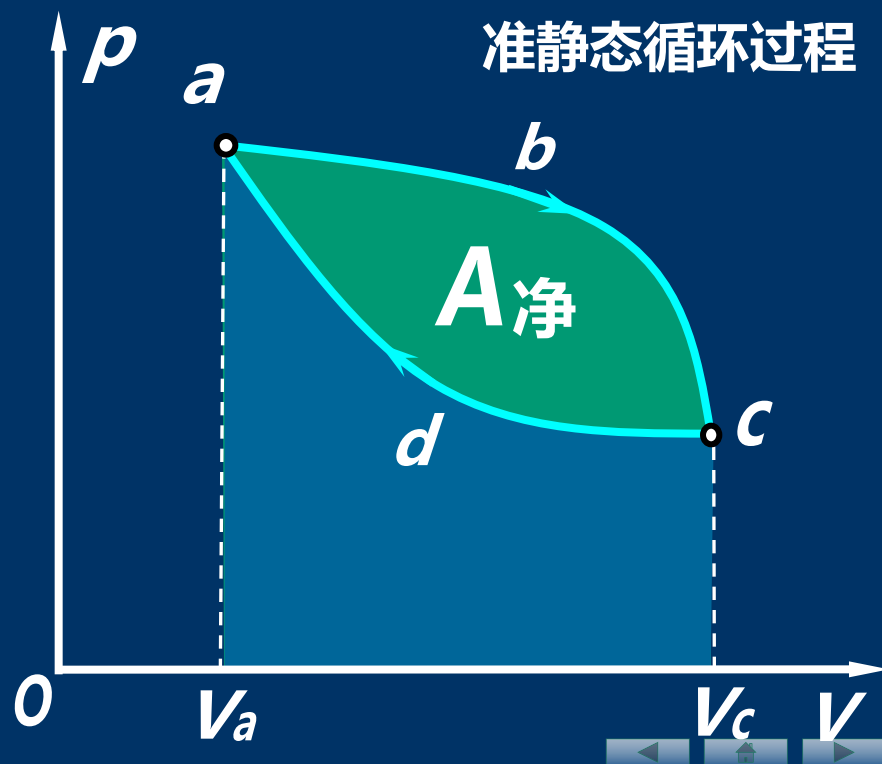
$A_{\text{净}}$

顺时针 正循环 热机

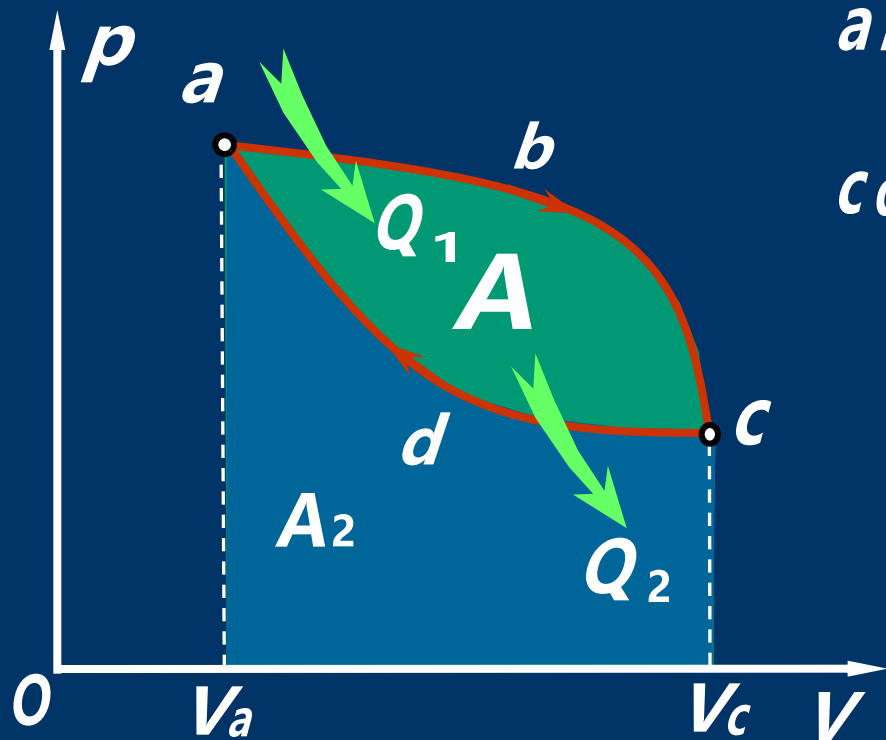
$A_{\text{净}} > 0$ 系统对外作正功

逆时针 逆循环 致冷机

$A_{\text{净}} < 0$ 外界对系统做功



2. 循环过程的热功转换



abc 吸热膨胀

cda 放热压缩

吸收热量 Q_1

对外做功 A_1

放出热量 Q_2

外界做功 A_2

绝对值

吸收的净热量 $Q = Q_1 - Q_2$

对外作的净功 $A = A_1 - A_2$

热力学第一定律

$$Q = \Delta E + A$$

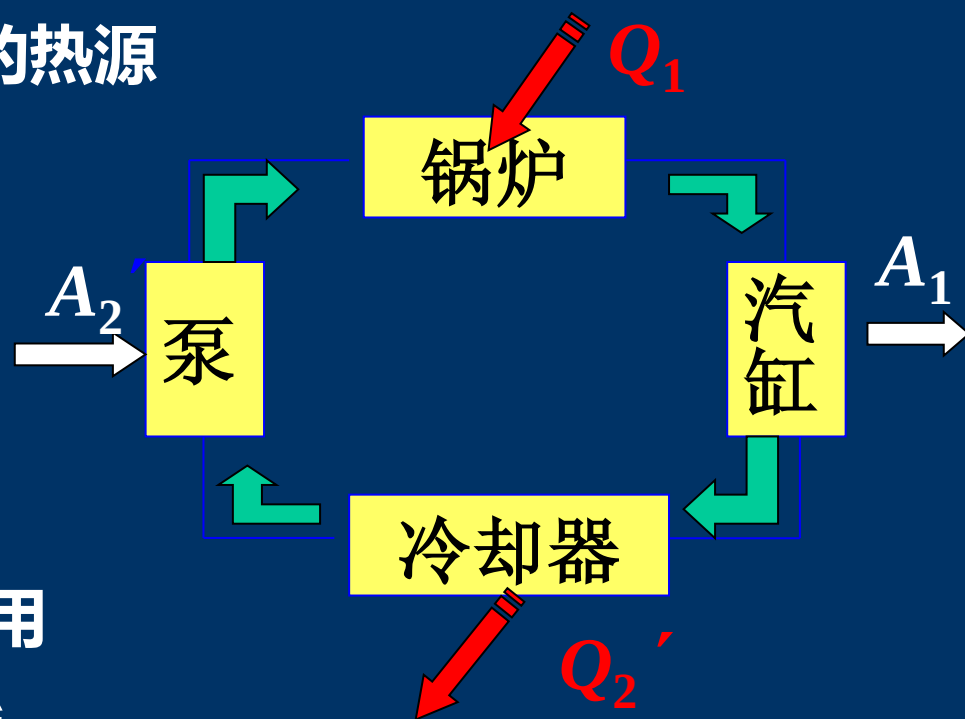
循环过程 $\Delta E = 0$ 则 $A_{\text{净}} =$

$$A = Q_1 - Q_2$$

热机：持续地将热量转变为功的机器。

热机的三个要素：

- 1) 工作物质
- 2) 两个或两个以上温度不同的热源
- 3) 对外作功的机械装置

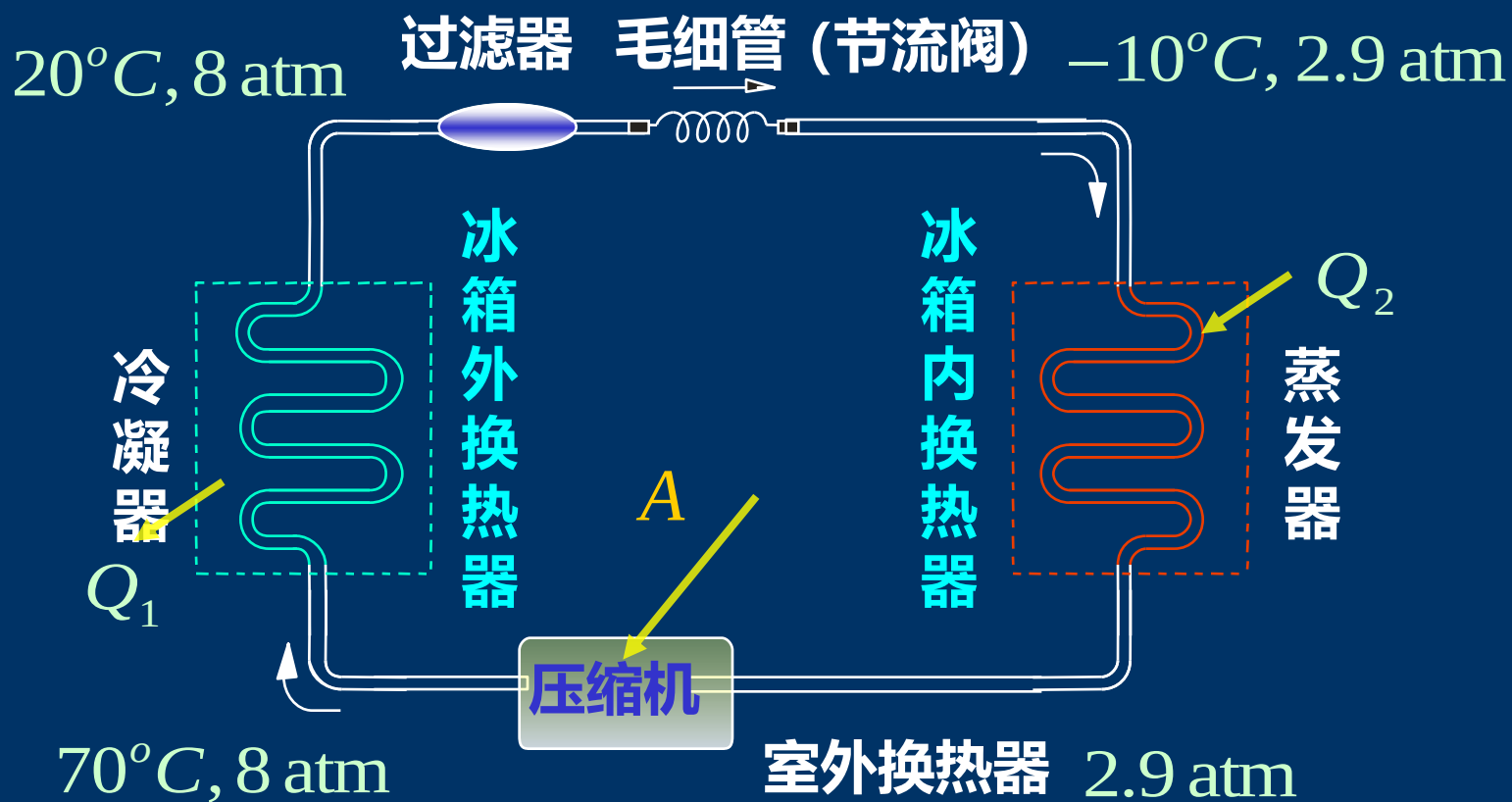


工作物质(工质)：热机中被利用来吸收热量并对外做功的物质。

蒸汽机：工质水

例，制冷循环——电冰箱

工作物质：氨或氟利昂



电冰箱的工作原理图

总结：工作物质、循环、外界作正功、……

接下来研究什么？

能转化多少？ 或者说

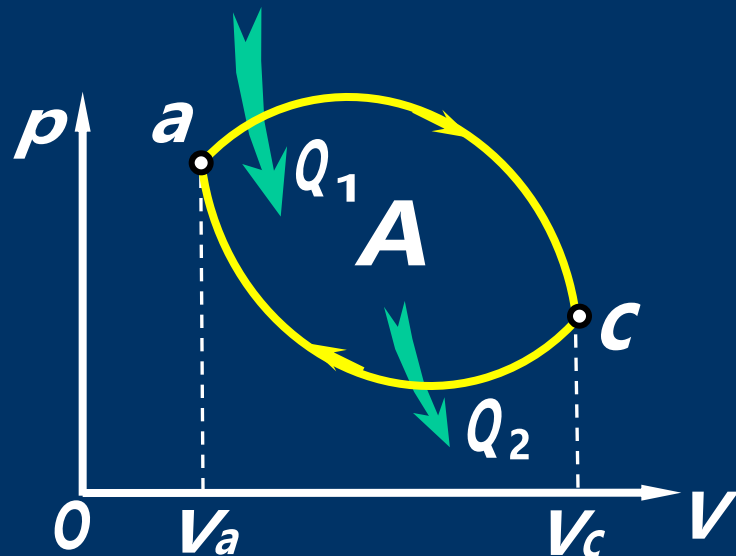
效率

二. 循环效率

● 热机的循环效率

$$\eta = \frac{A}{Q_1} \quad \begin{array}{l} \text{工质对外作的净功} \\ \text{工质从高温热源吸收的热量} \end{array}$$

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



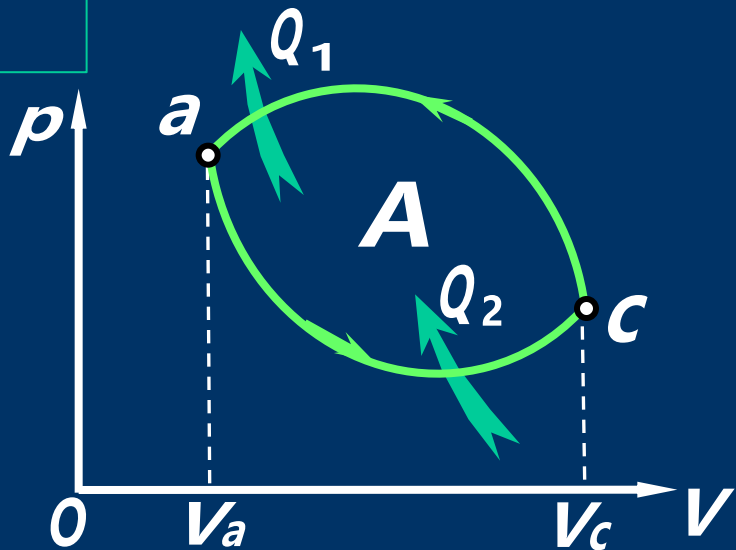
热机效率：标志循环过程中吸收的热量有多少转化为对外做功

Q_1 一定时, A 越大, 热机效率越高。

● 致冷机的致冷系数

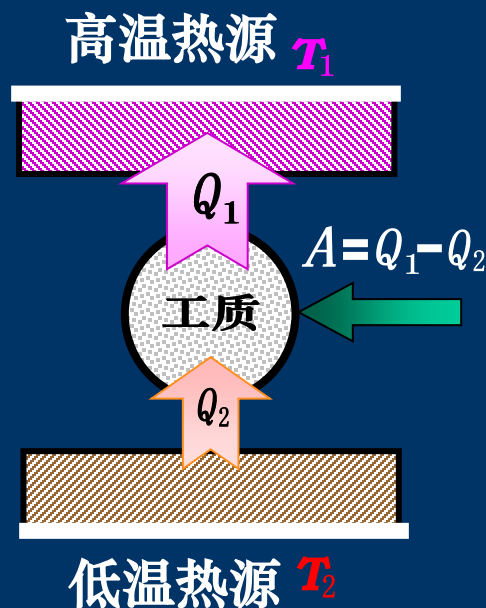
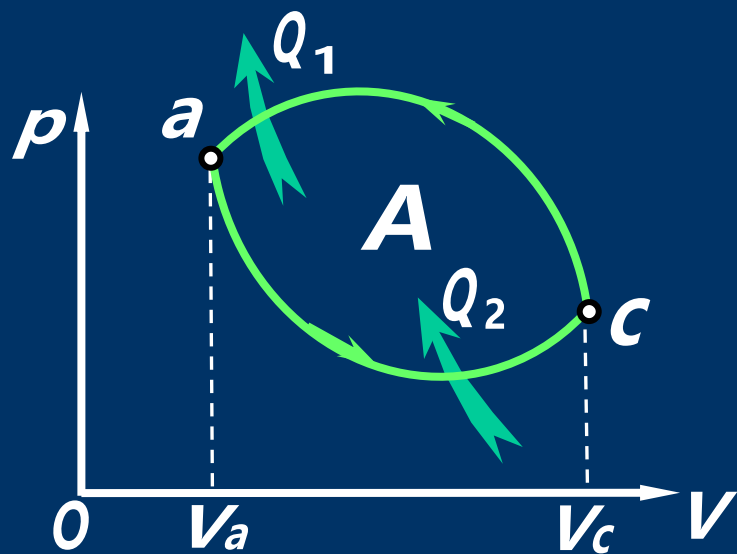
$$W = \frac{Q_2}{A} \quad \begin{array}{l} \text{工质从低温热源吸收的热量} \\ \text{外界对工质作的净功} \end{array}$$

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



外界对系统做功 A 相同时, 吸收的热量 Q_2 越多, 制冷系数越大

逆循环：从低温热源吸热加上外界对系统做功向高温热源放热



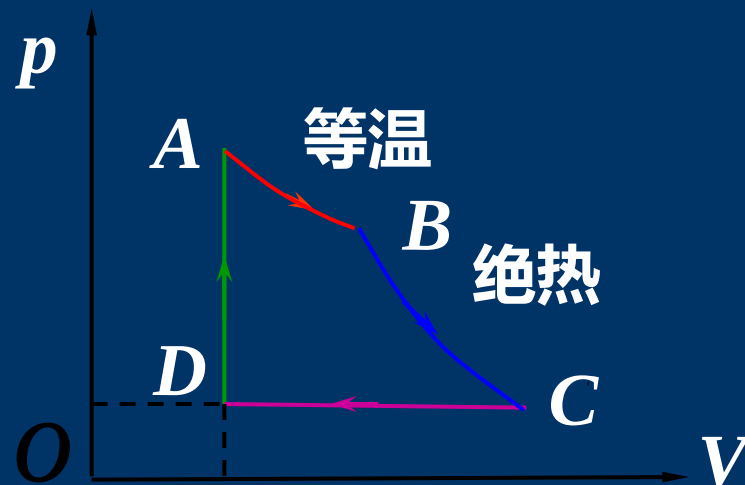
1) 制冷机：空调

$$w_c = \frac{Q_2}{A} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

2) 制热机：热泵

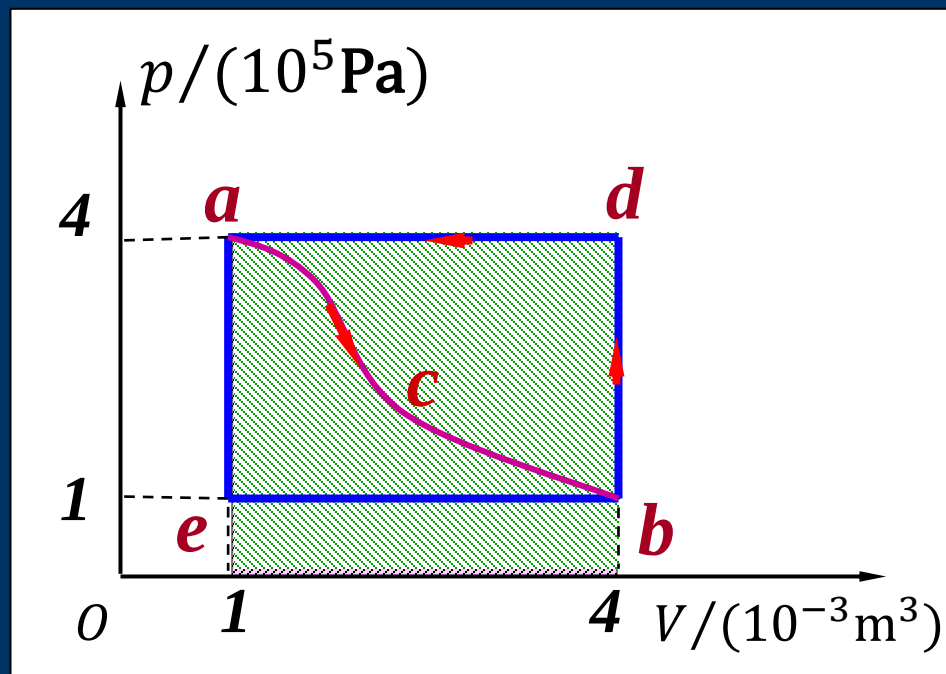
$$w_h = \frac{Q_1}{A} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

例 一定量理想气体的循环过程如 $P - V$ 图所示, 请填写表格中的空格.



过程	内能增量 $\Delta E/\text{J}$	做功 W/J	吸热 Q/J
$A \rightarrow B$	0	50	50
$B \rightarrow C$	-50	50	0
$C \rightarrow D$	-100	-50	-150
$D \rightarrow A$	150	0	150
$ABCD A$	循环效率 $\eta = 50/200 = 25\%$		

例：一定量的理想气体经历 acb 过程时吸热 500 J，
则经历 acbda 过程时，吸热多少？



解： $Q_{acb} = 500 \text{ J}$

$$W_{acb} = Q_{acb} - \Delta E_{ba}$$

$$\because p_a V_a = p_b V_b \therefore T_a = T_b$$

$$W_{acb} = Q_{acb} = 500 \text{ J}$$

$$Q_{acbda} = W_{acbda} = W_{acb} + W_{da}$$

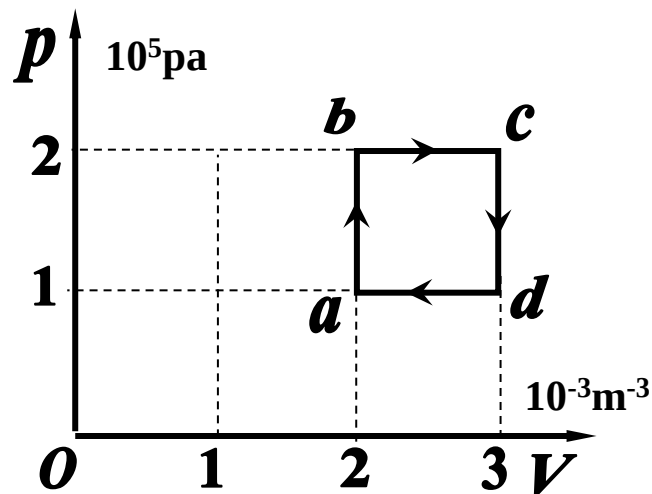
$$W_{da} = -1200 \text{ J}$$

$$Q_{acbda} = -700 \text{ J}$$

已知

1mol

单原子理想气体循环如图



求 循环一次的

● Q_1 ● A

● 证明 $T_a T_c = T_b T_d$

● ab 、 bc 为吸热过程

$$Q_1 = Q_{ab} + Q_{bc}$$

$$= c_V (T_b - T_a) + c_p (T_c - T_b)$$

$$= \frac{3}{2}R \left(\frac{P_b V_b - P_a V_a}{R} \right)$$

$$+ \left(\frac{3}{2}R + R \right) \left(\frac{P_c V_c - P_b V_b}{R} \right) = 800 \text{ (J)}$$

● $A = \text{面积 } S_{abcd}$

$$= (P_b - P_a)(V_d - V_a)$$
$$= 100 \text{ (J)}$$

● $T_a T_c = \frac{P_a V_a}{R} \frac{P_c V_c}{R}, T_b T_d = \frac{P_b V_b}{R} \frac{P_d V_d}{R}$

因 $\frac{P_a}{V_a} = \frac{P_d}{V_d}, \frac{P_c}{V_c} = \frac{P_b}{V_b}$

故 $T_a T_c = \frac{P_c V_a}{R} \frac{P_a V_c}{R} = T_b T_d$

例 1 mol 单原子分子的理想气体，循环过程如图

求 (1) 画出 $p-V$ 图 (2) 三个过程的吸放热 (3) 此循环效率?

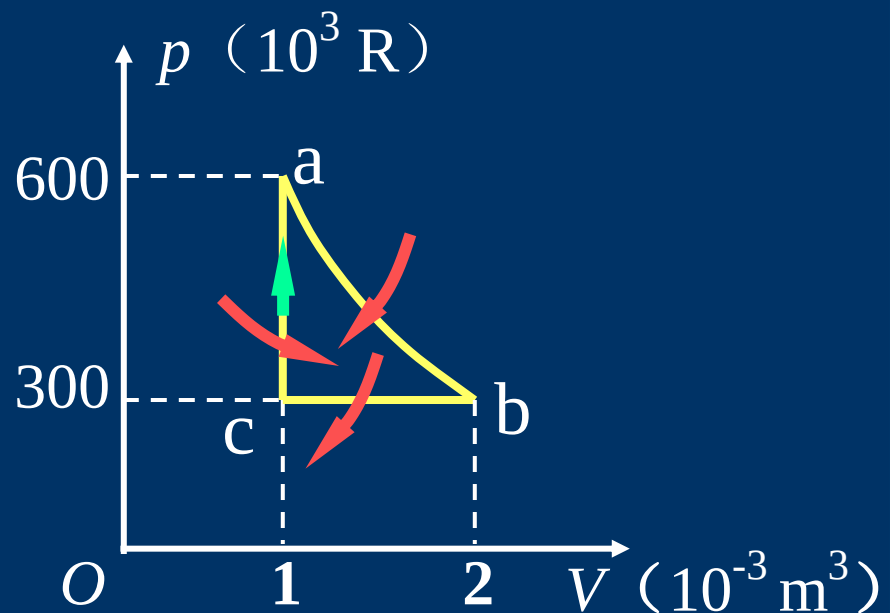
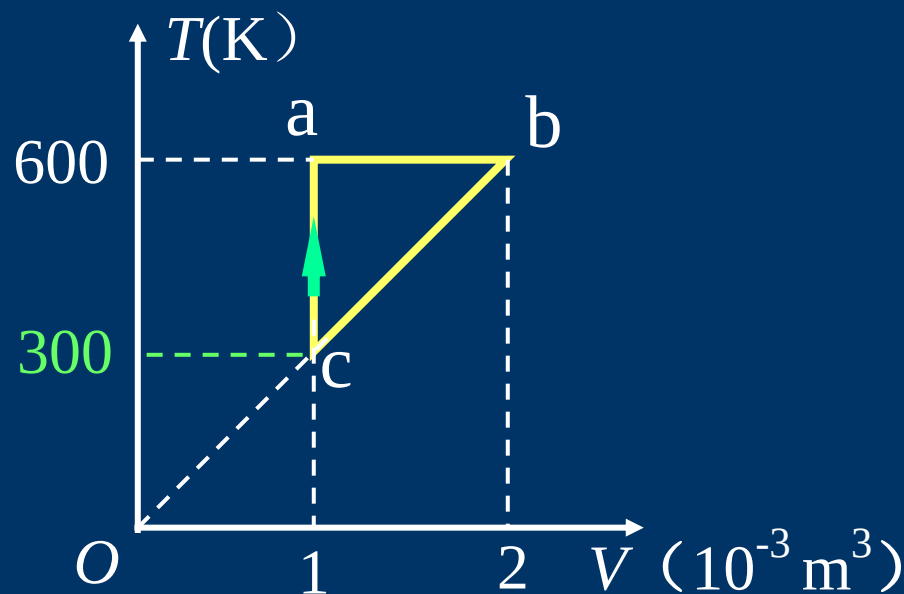
解 (1) $p-V$ 图

(2) ab 是等温膨胀过程

$$\begin{aligned} Q_{ab} &= A = \nu RT \ln \frac{V_b}{V_a} \\ &= 600R \ln 2 \end{aligned}$$

bc 是等压压缩过程

$$Q_{cb} = \nu C_p (T_c - T_b) = -750R$$



例 1 mol 单原子分子的理想气体，循环过程如图

求 (1) 画出 $p-V$ 图 (2) 三个过程的吸放热 (3) 此循环效率?

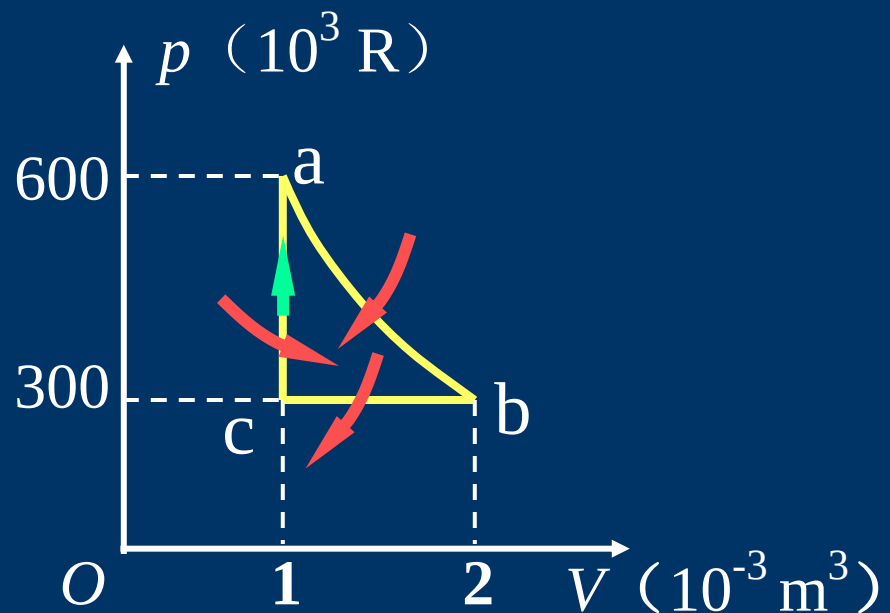
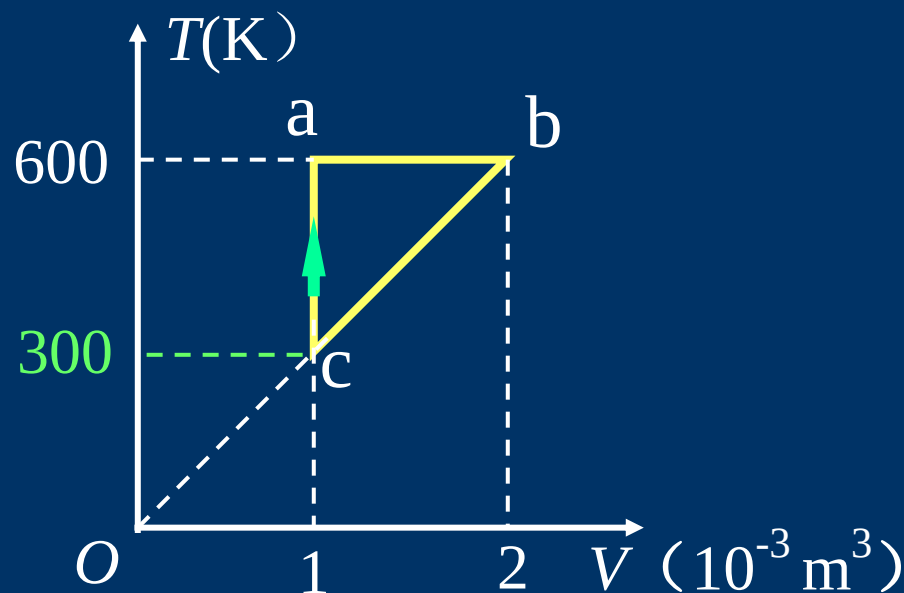
解 (1) $p-V$ 图

(2) ab 是等温膨胀过程

$$\begin{aligned} Q_{ab} &= A = \nu RT \ln \frac{V_b}{V_a} \\ &= 600R \ln 2 \end{aligned}$$

ca 是等体升压过程

$$\begin{aligned} Q_{ca} &= \Delta E = \nu C_V (T_a - T_c) \\ &= 450R \end{aligned}$$



循环过程中系统吸热

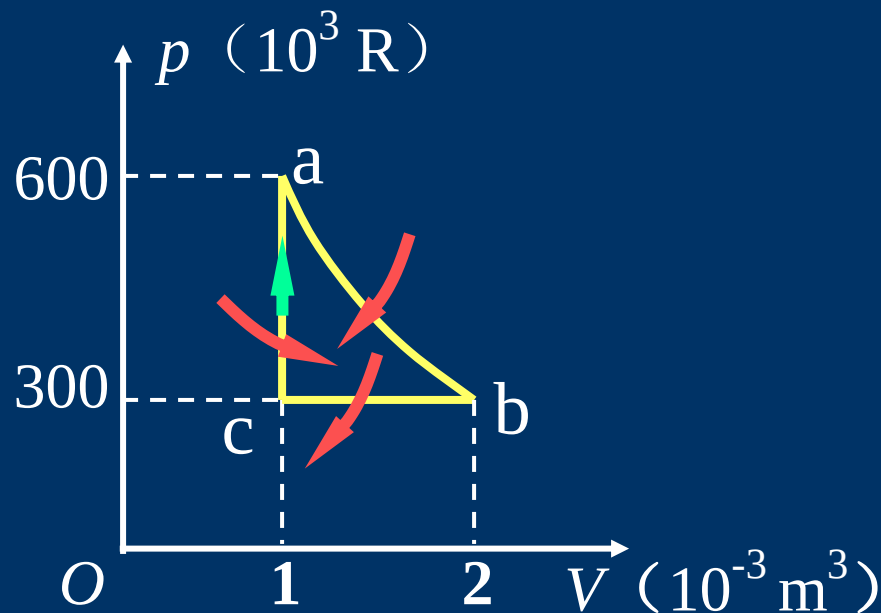
$$Q_1 = Q_{ab} + Q_{ca} = 600R \ln 2 + 450R = 866R$$

循环过程中系统放热

$$Q_2 = |Q_{bc}| = 750R$$

(3) 此循环效率

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{750R}{866R} = 13.4\%$$



例 一定量的理想气体经历如图所示的循环过程， $A \rightarrow B$ 和 $C \rightarrow D$ 是等压过程， $B \rightarrow C$ 和 $D \rightarrow A$ 是绝热过程。

已知： $T_C = 300K$ ， $T_B = 400K$

求 此循环的效率？

分析 $Q_{AB} = \nu C_p \Delta T = \nu C_p (T_B - T_A) = Q_1$

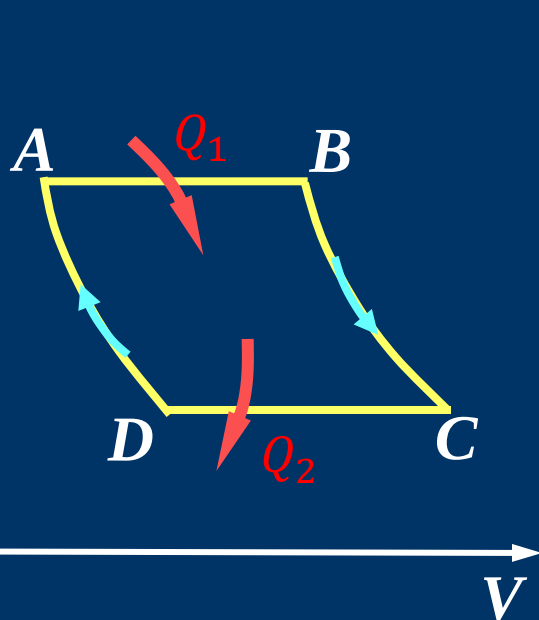
$$Q_{CD} = \nu C_p \Delta T = \nu C_p (T_D - T_C) = Q_2$$

$$\eta = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{T_C - T_D}{T_B - T_A}$$

绝热过程方程 $p^{\gamma-1} T^{-\gamma} = C_3$

BC 绝热过程 $p_B^{\gamma-1} T_B^{-\gamma} = p_C^{\gamma-1} T_C^{-\gamma}$

AD 绝热过程 $p_A^{\gamma-1} T_A^{-\gamma} = p_D^{\gamma-1} T_D^{-\gamma}$



$$\left. \begin{array}{l} p_B^{\gamma-1} T_B^{-\gamma} = p_C^{\gamma-1} T_C^{-\gamma} \\ p_A^{\gamma-1} T_A^{-\gamma} = p_D^{\gamma-1} T_D^{-\gamma} \end{array} \right\} \longrightarrow \frac{T_B}{T_A} = \frac{T_C}{T_D}$$

$$\frac{T_B}{T_A} = \frac{T_C}{T_D} \longrightarrow \frac{T_B}{T_A - T_B} = \frac{T_C}{T_D - T_C}$$

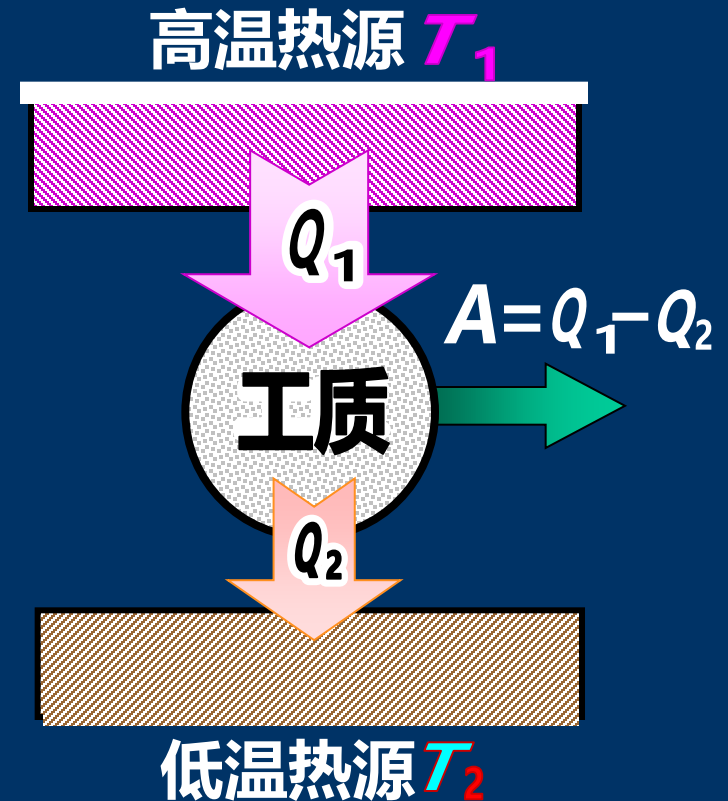
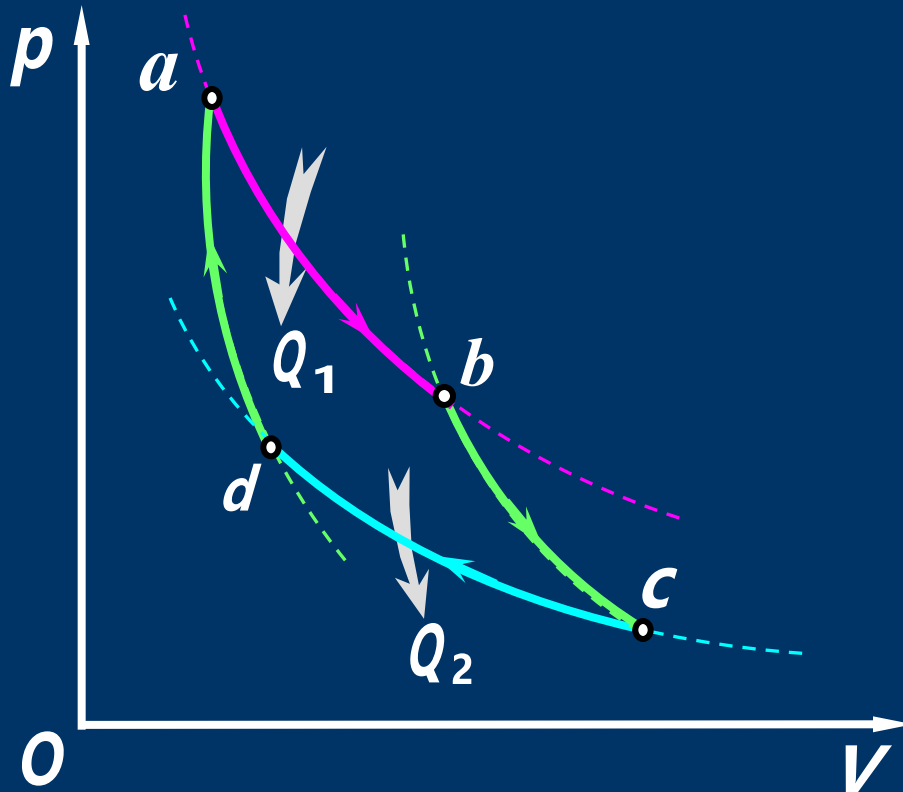
$$\eta = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{T_C - T_D}{T_B - T_A} \longleftarrow \frac{T_C - T_D}{T_B - T_A} = \frac{T_C}{T_B}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_C}{T_B}$$

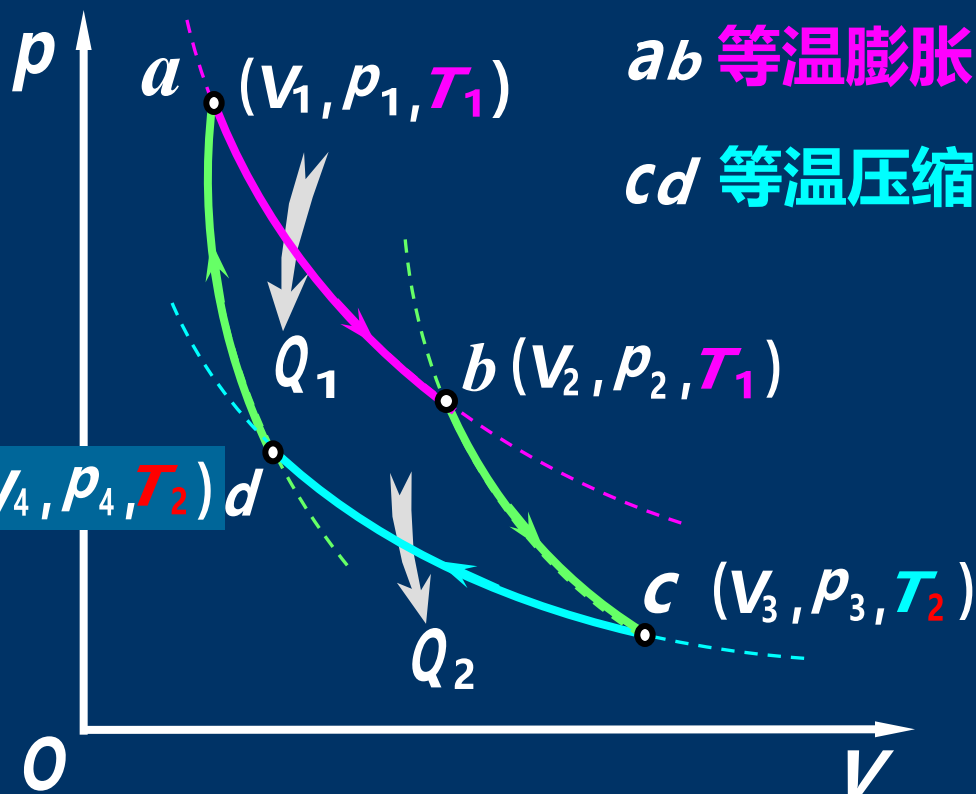
$$\eta = 1 - \frac{T_C}{T_B} = 1 - \frac{300}{400} = 25\%$$

三. 卡诺循环

两个等温
两个绝热过程构成的一种理想循环



两个等温 两个绝热过程构成的一种理想循环

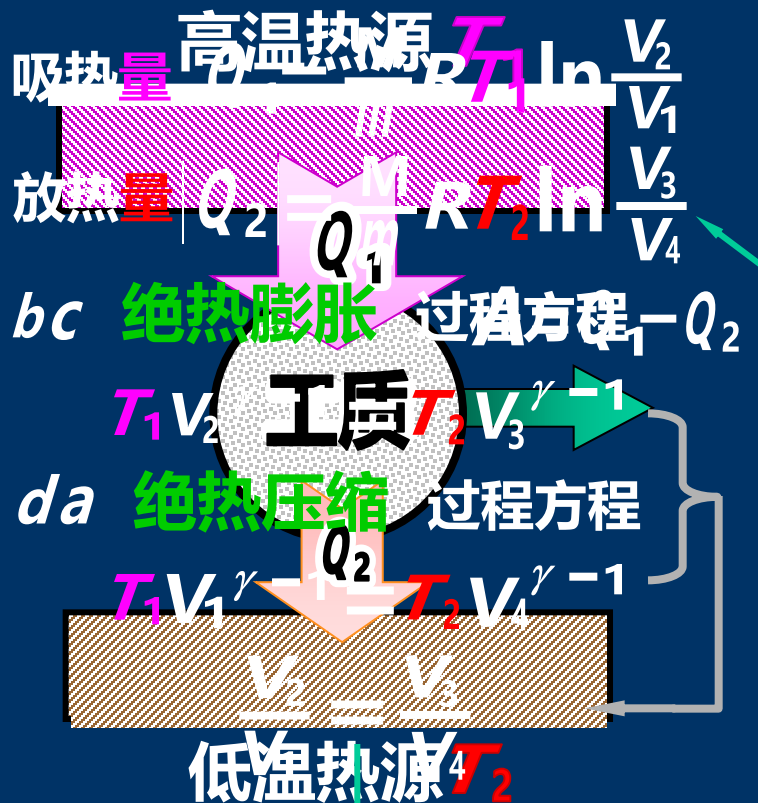


两式对比

$$\frac{Q_2 = \frac{M}{m} R T_2 \ln \frac{v_2}{v_1}}{Q_1 = \frac{M}{m} R T_1 \ln \frac{v_2}{v_1}}$$

得

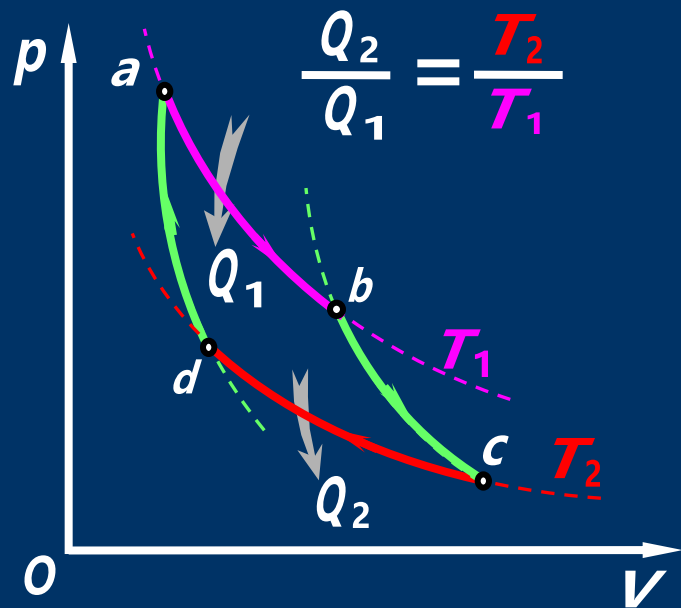
$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$$



回顾循环效率和热机效率的普遍定义

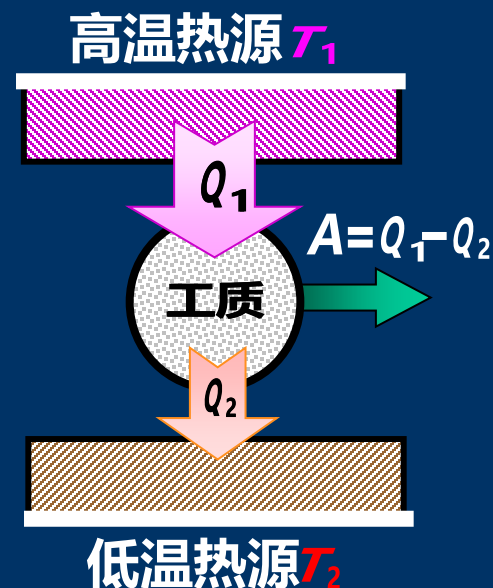
$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

卡诺循环的效率

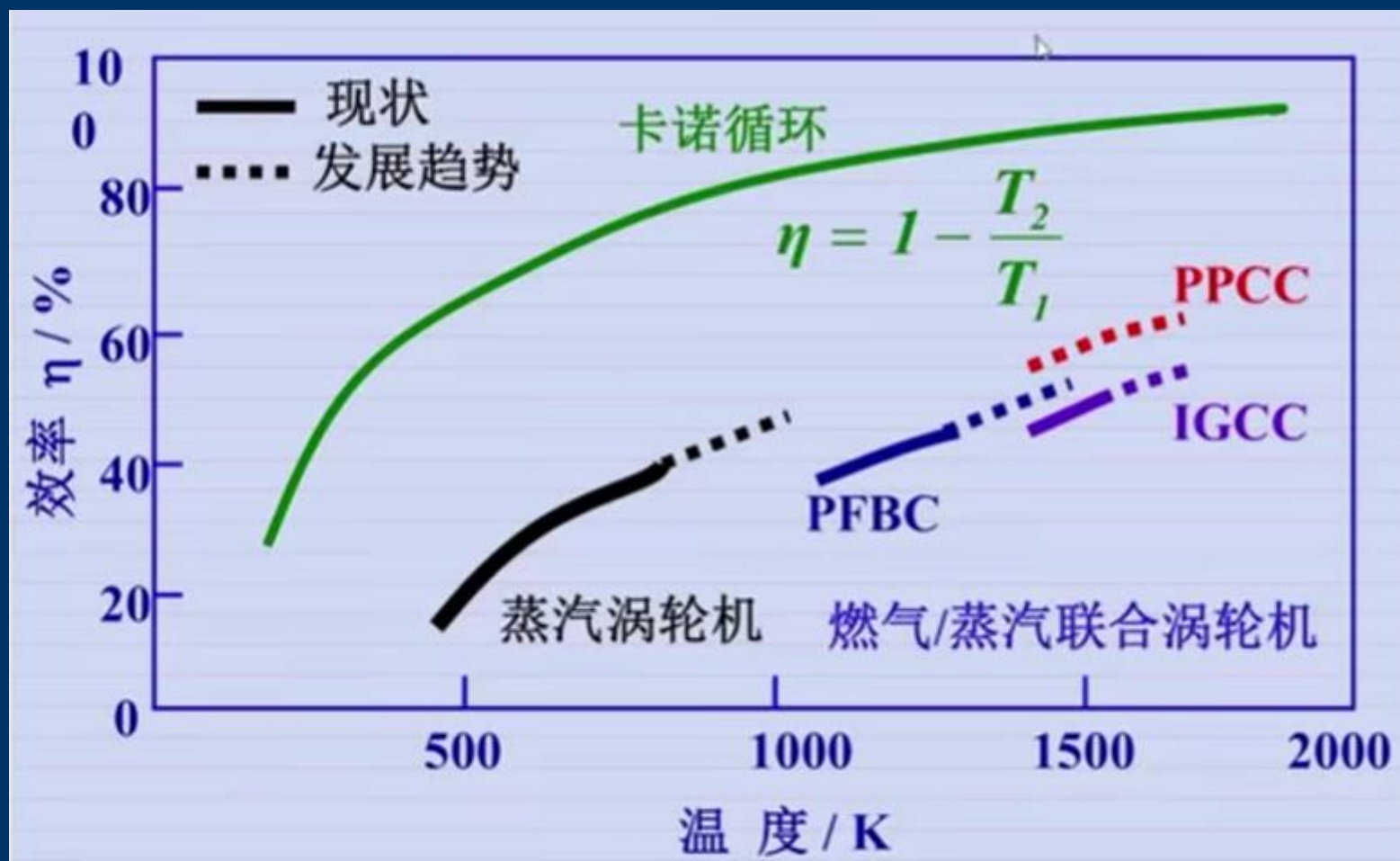


$$\eta_{\text{卡}} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

高温热源温度 T_1 越高,
低温热源温度 T_2 越低,
卡诺循环效率就越大。

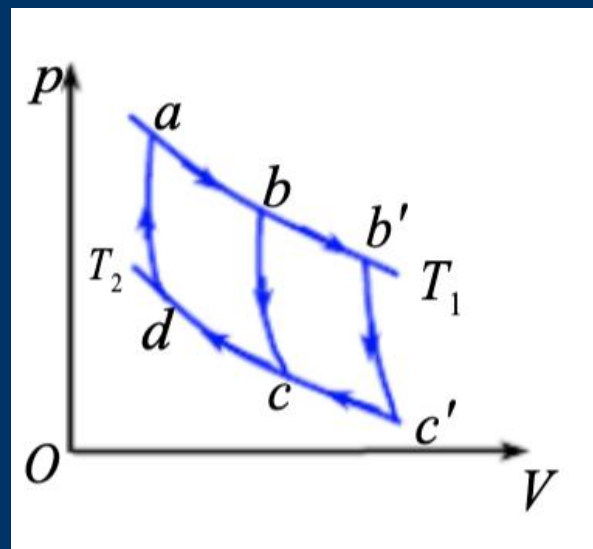


燃煤电厂发电效率的现状和发展趋势



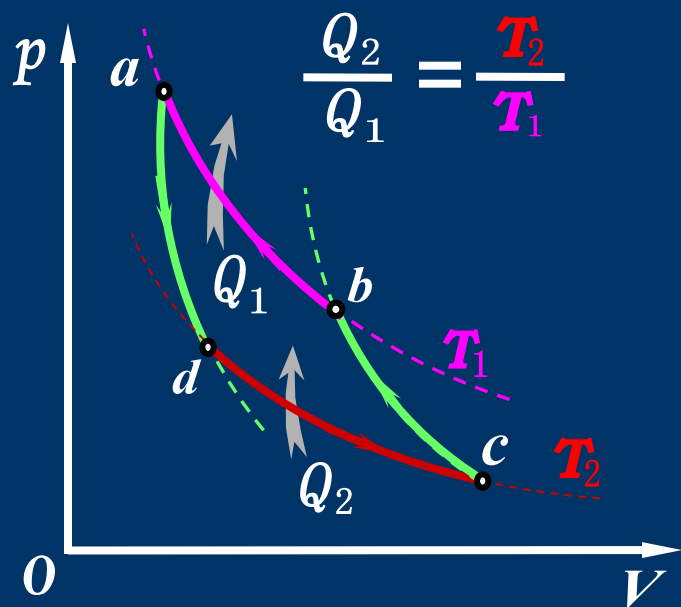
如果卡诺热机的循环曲线所包围的面积从图中的 $abcda$ 增大为 $ab'c'da$ ，那么循环 $abcda$ 与 $ab'c'da$ 所作的功和热机效率变化情况是

- A 净功增大，效率提高。
- B 净功增大，效率降低。
- C 净功和效率都不变。
- D 净功增大，效率不变。



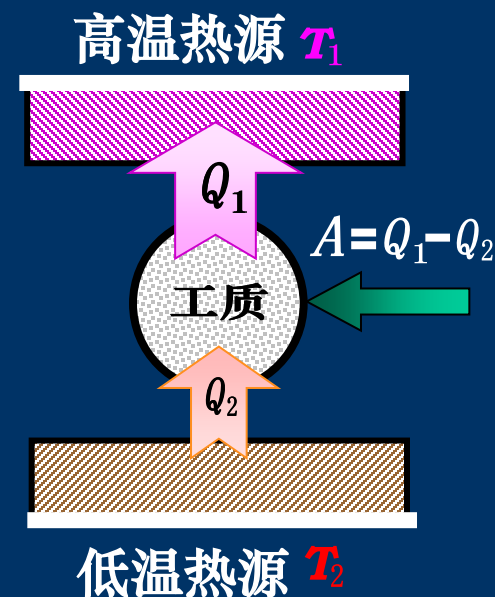
回顾逆循环效率和致冷机致冷系数的普遍定义 $w = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$

卡诺逆循环的制冷系数

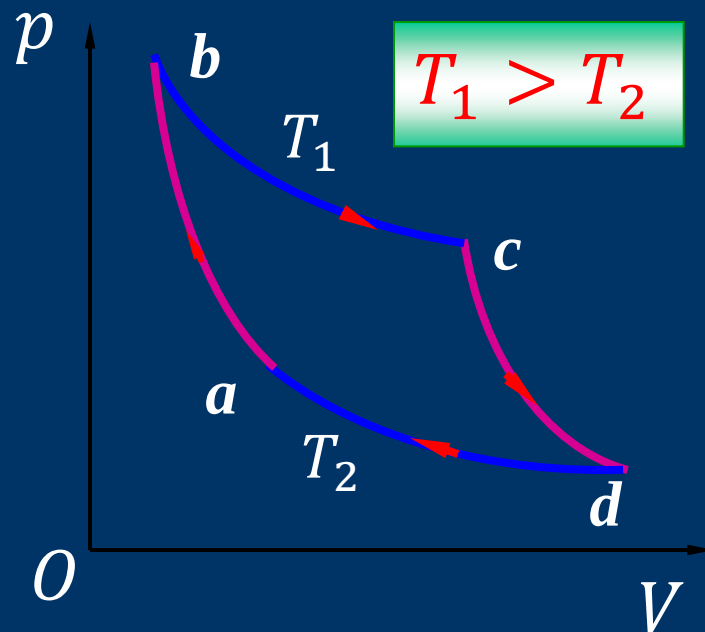
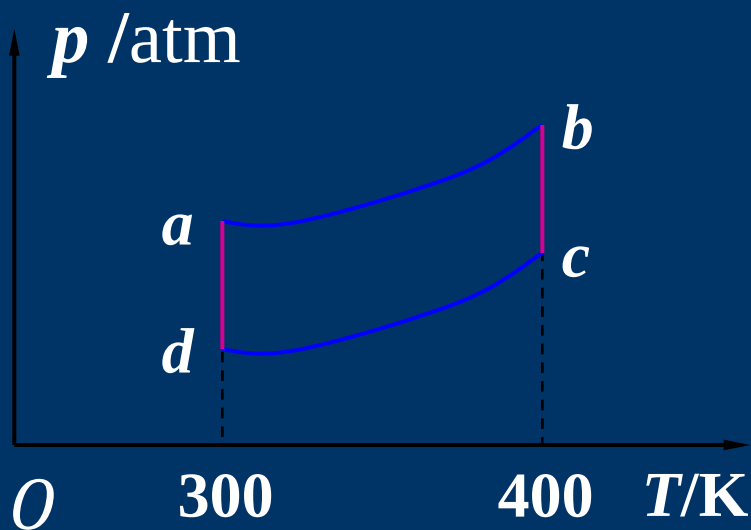


$$w_{\text{卡}} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

致冷系数随着被致冷物体的温度变化而变化。被致冷物体的温度 T_2 越低，则卡诺逆循环的致冷系数越小。

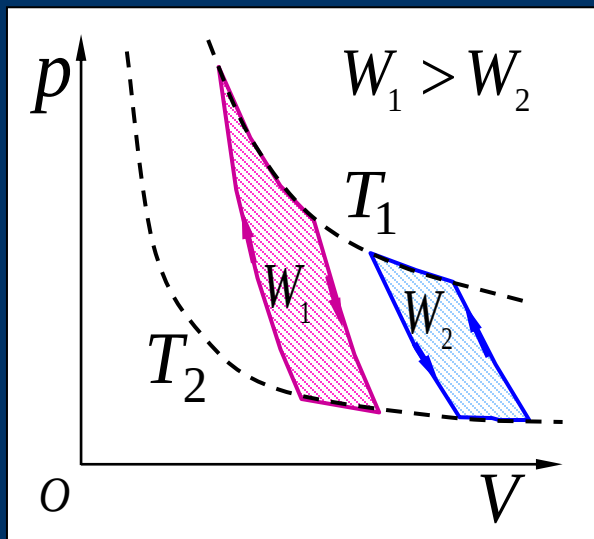


例 一定量的理想气体，在 $p - T$ 图上经历如图所示的循环过程 $abcd$ ，其中 ab 、 cd 为两个绝热过程，**求**：该循环过程的效率。

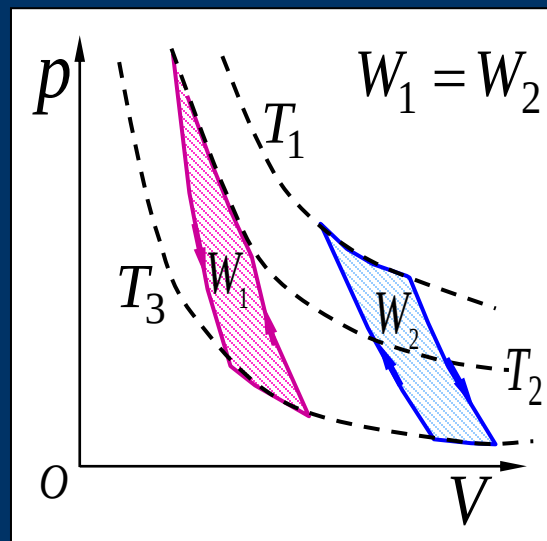


$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{300}{400} = 25\%$$

分析图中两个卡诺循环 η_1 和 η_2 关系



$$\eta_1 = \eta_2$$



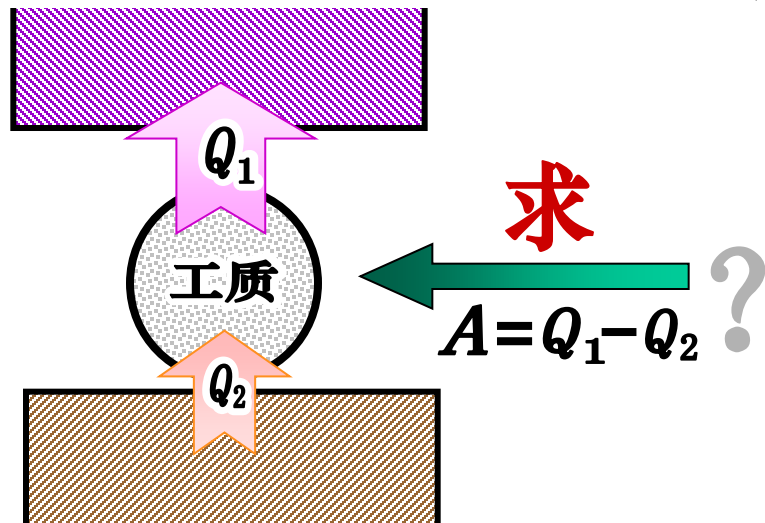
$$\eta_1 < \eta_2$$

卡诺致冷机使1kg 0℃的水变成0℃的冰，需作多少功？

已知

环境温度 27℃

高温热源 $T_1 = 27 + 273 = 300(\text{K})$



被致冷的 0℃水变 0℃的冰

低温热源 $T_2 = 0 + 273 = 273(\text{K})$

冰的溶解热为 $3.35 \times 10^5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$

$$w_{\text{卡}} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} = 10.1$$

1kg 0℃的水变0℃的冰
需取出热量

$$Q_2 = 1 \times 3.35 \times 10^5 \\ = 3.35 \times 10^5 (\text{J})$$

外界需向致冷机做功

$$A = Q_2 / w_{\text{卡}} \\ = 3.32 \times 10^4 (\text{J})$$

例 地球上的人要在月球上居住，首要问题就是保持他们的起居室处于一个舒适的温度，现考虑用卡诺循环机来作温度调节，设月球白昼温度为 100°C ，而夜间温度为 -100°C ，起居室温度要保持在 20°C ，通过起居室墙壁导热的速率为每度温差 0.5kW ，

求 白昼和夜间给卡诺机所供的功率

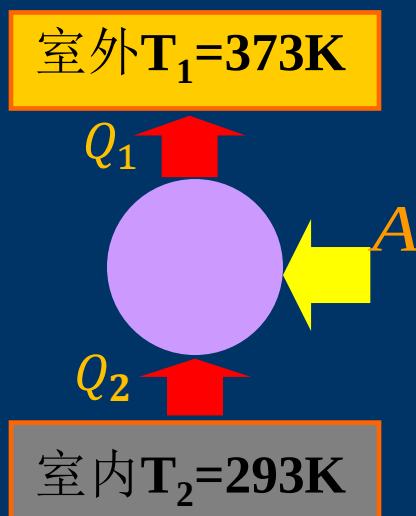
解 在白昼欲保持室内温度低，卡诺机工作于致冷机状态，从室内吸取热量 Q_2 ，放入室外热量 Q_1

则
$$w = \frac{Q_2}{A} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \quad A = \frac{Q_2}{w} = Q_2 \frac{T_1 - T_2}{T_2}$$

每秒钟从室内取走的热量为通过起居室墙壁导进的热量，即

$$Q_2 = C(T_2 - T_1)t$$

$$A = \frac{Q_2}{w} = Q_2 \frac{T_1 - T_2}{T_2} = C \frac{(T_1 - T_2)^2}{T_2} = 10.9 \times 10^3 \text{J}$$

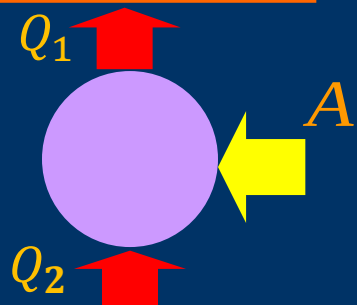


在黑夜欲保持室内温度高，卡诺机工作于致冷机状态，从室外吸取热量 Q_2 ，放入室内热量 Q_1

$$w = \frac{Q_1}{A} = \frac{T'_1}{T'_1 - T'_2} \rightarrow Q_1 = A \frac{T'_1}{T'_1 - T'_2}$$

每秒钟放入室内的热量为通过起居室墙壁导进的热量，即

室内 $T'_1=293\text{K}$



室外 $T'_2=173\text{K}$

$$Q_1 = C(T'_1 - T'_2)t$$

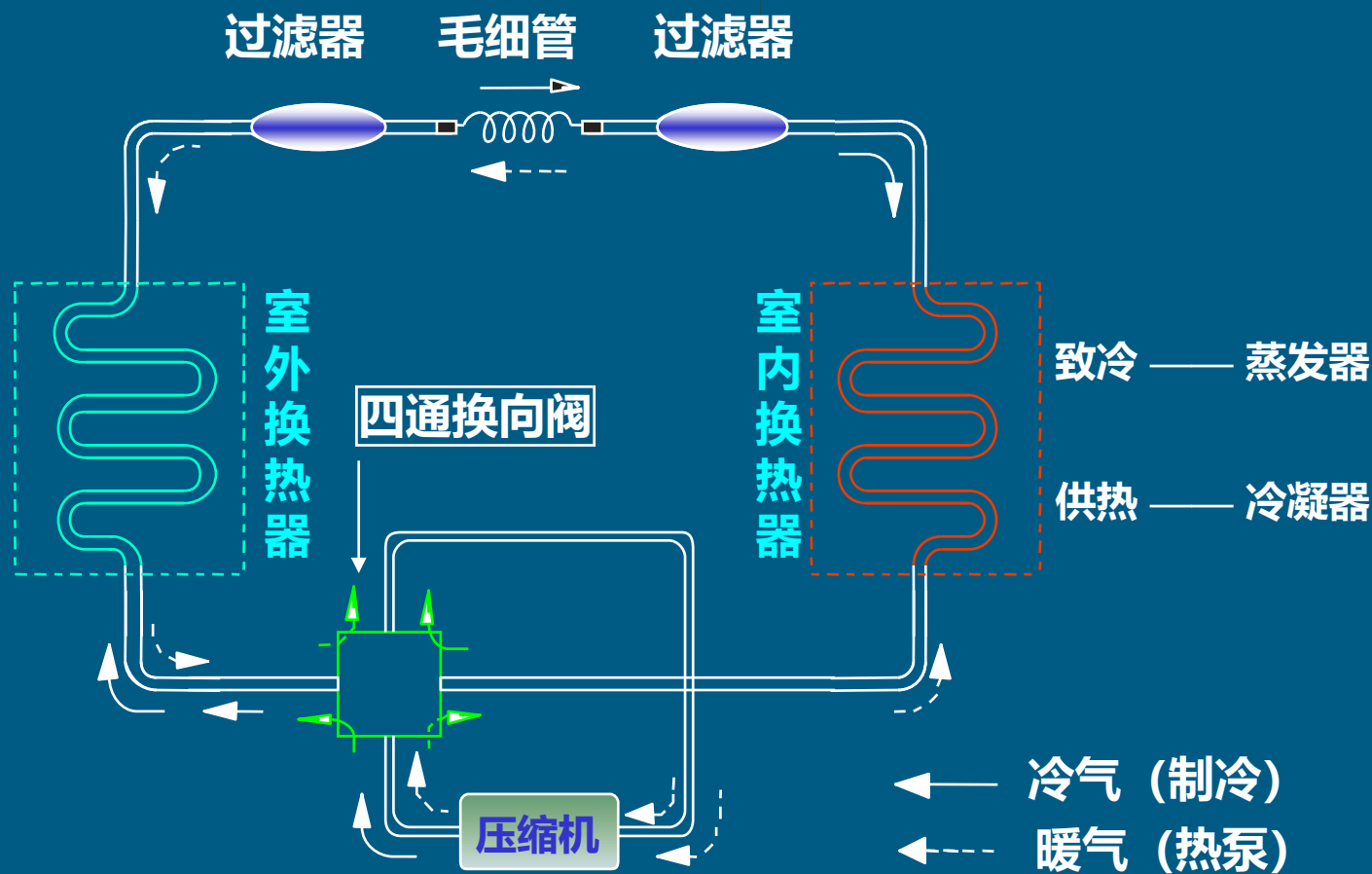
解得 $A = \frac{C(T'_1 - T'_2)^2}{T'_1} = 24.6 \times 10^3 \text{ J}$



说明

此种用可逆循环原理制作的空调装置既可加热，又可降温，这即是所谓的冷暖双制空调。

冷热双制空调工作原理简图



□ 说明

- 1) 卡诺循环热效率的大小只取决于冷热源温度 (T_2 、 T_1) ;
- 2) 卡诺循环热效率总是小于1。只有当 $T_1 = \infty$ 或 $T_2 = 0$ 时, 热效率才等于1, 但是这都是不可能实现的;
- 3) 卡诺循环的热效率与工质无关;
- 4) 逆卡诺循环的性能系数只决定于热源温度 T_1 及冷源温度 T_2 , 制冷系数随热源温度 T_1 的降低及冷源温度 T_2 的提高而增大;
- 5) 逆卡诺循环的制冷系数可以大于1, 等于1, 或小于1, 一般情况下 $T_2 > T_1 - T_2$, 所以制冷系数通常大于1;
- 6) 逆卡诺循环可以用来制冷, 也可以用来供热。

问：一条等温线与一条绝热线能否有两个交点？

答：不可能。

因为，若一条等温线与一条绝热线有两个交点，则两条曲线构成了一个循环过程，它仅从单一的热源吸热，且全部转换为功，热机效率达100%，违背了热力学第二定律的开尔文表述，所以不成立。

