



普通物理I PHYS1181.03

彭鹏

Office: 物质学院8号楼301室
Email: pengpeng@shanghaitech.edu.cn

研究方向: 超快光谱、X射线阿秒脉冲产生、阿秒瞬态吸收光谱、
强场激光物理、飞秒激光成丝。

<https://spst.shanghaitech.edu.cn/2021/0115/c2349a59066/page.htm>



例如图所示，1mol氮气处于a态时的温度为300K，体积为 $2.0 \times 10^{-3} \text{m}^3$ 。

求 氮气在下列过程中作的功：

- (1) 从a态绝热膨胀到b态($V_b = 20.0 \times 10^{-3} \text{m}^3$)；
- (2) 从a态等温膨胀到c态，再由c态等体冷却到b态。

解

$$T_a = 300\text{K}$$

$$V_a = 2 \times 10^{-3} \text{m}^3$$

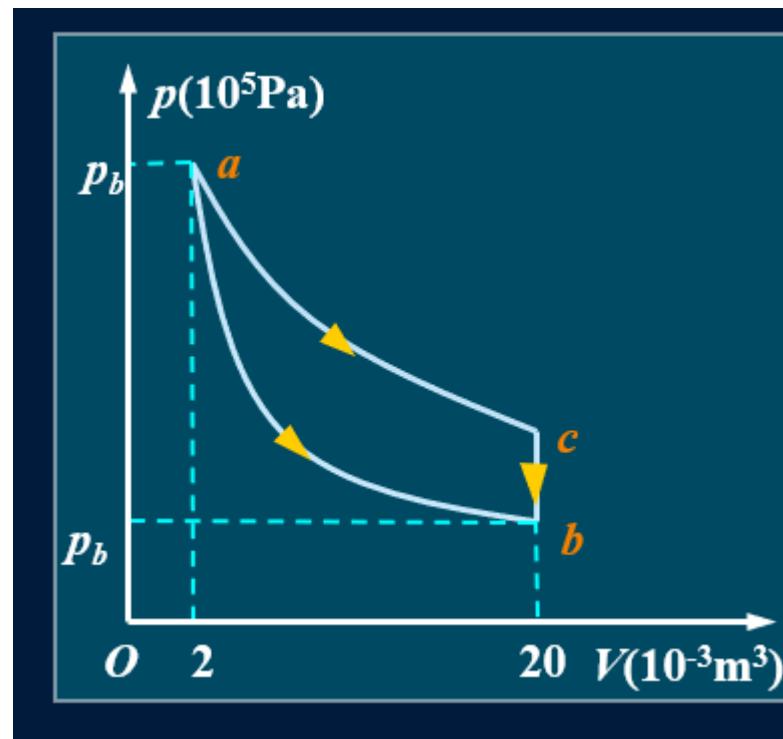
$$V_b = 20 \times 10^{-3} \text{m}^3$$

(1) ab过程中作的功

氮气为双原子分子，

自由度数*i* = 5

$$C_{V,\text{m}} = \frac{5}{2}R = 20.8 \text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$



$$\gamma = \frac{C_{p,m}}{C_{V,m}} = \frac{\frac{5}{2}R + R}{\frac{5}{2}R} = 1.4$$

ab过程为绝热过程，根据绝热过程方程

$$T_a V_a^{\gamma-1} = T_b V_b^{\gamma-1}$$

$$T_b = T_a \left(\frac{V_a}{V_b} \right)^{\gamma-1} = 300 \times \left(\frac{2.0 \times 10^{-3}}{20.0 \times 19^{-3}} \right)^{1.4-1} \text{K} = 119.4 \text{K}$$

氮气在***ab***绝热过程中所作的功为

$$A_Q = -(E_b - E_a) = -\frac{m}{M_{\text{mol}}} C_{V,m} (T_b - T_a) = 3.76 \times 10^3 \text{ J}$$

$$\begin{cases} V^{\gamma-1}T = C_2 \\ p^{\gamma-1}T^{-\gamma} = C_3 \\ pV^\gamma = C_1 \end{cases}$$



(2) *ac*过程为等温过程，氮气在*ac*过程中所作的功为

$$\begin{aligned} A_{ac} &= \frac{m}{M_{\text{mol}}} RT \ln \frac{V_c}{V_a} \\ &= 8.31 \times 300 \ln \frac{20.0 \times 10^{-3}}{2.0 \times 10^{-3}} \text{ J} \\ &= 5.74 \times 10^3 \text{ J} \end{aligned}$$

等温过程

系统对外界作功

$$\begin{aligned} A &= \int_{V_1}^{V_2} \frac{m}{M_{\text{mol}}} \frac{RT}{V} dV \\ &= \frac{m}{M_{\text{mol}}} RT \ln \frac{V_2}{V_1} \\ &= \frac{m}{M_{\text{mol}}} RT \ln \frac{p_1}{p_2} \end{aligned}$$

*cb*过程为等体过程，氮气对外界不做功

$$A_{cb} = 0$$

气体在*acb*过程中作的总功为

$$\begin{aligned} A_{acb} &= A_{ac} + A_{cb} \\ &= 5.74 \times 10^3 \text{ J} + 0 \text{ J} = 5.74 \times 10^3 \text{ J} \end{aligned}$$



例如图所示的 p - V 图，表示某一理想气体由初态 a 经准静态过程 ab 直线变到状态 b ，已知该理想气体的定体摩尔热容 $C_{V,m} = 3R$

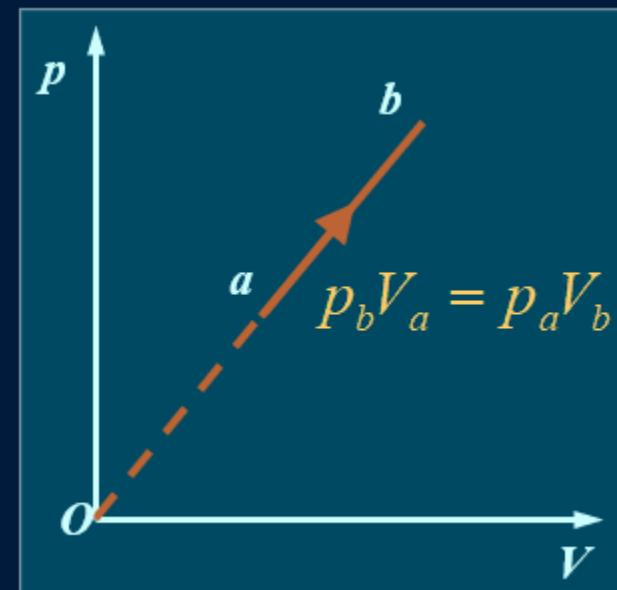
求 该理想气体在 ab 过程中的摩尔热容量 C_{ab} 。

解 先求出该过程中理想气体吸收的热量 Q_{ab}

再从 热量的基本定义 $Q_{ab} = \frac{m}{M_{\text{mol}}} C_{ab} (T_b - T_a)$ ，算出 C_{ab}

在 ab 过程中系统对外作的功

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{2}(p_a + p_b)(V_b - V_a) \\ &= \frac{1}{2}(p_a V_b + p_b V_b - p_a V_a - p_b V_a) \\ &= \frac{1}{2}(p_b V_b - p_a V_a) = \frac{1}{2} \frac{m}{M_{\text{mol}}} R(T_b - T_a) \end{aligned}$$





在 ab 过程中，系统内能增量

$$\Delta E = \frac{m}{M_{\text{mol}}} C_{V,\text{m}} (T_b - T_a) = \frac{m}{M_{\text{mol}}} 3R(T_b - T_a)$$

则 ab 过程系统吸收热量

$$Q = \Delta E + A = \left(3 + \frac{1}{2}\right) \frac{m}{M_{\text{mol}}} R (T_b - T_a)$$

所以， ab 直线过程的摩尔热容

$$C_{ab} = \frac{Q}{\frac{m}{M_{\text{mol}}} (T_b - T_a)} = \left(3 + \frac{1}{2}\right) R = \frac{7}{2} R$$

讨论

- 该直线过程的摩尔热容 C_{ab} 介于定体摩尔热容与定压摩尔热容之间 $C_{V,\text{m}} < C_{ab} < C_{p,\text{m}}$
- 摩尔热容与具体过程有关，非等体、等压过程，要以基本定义为依据计算摩尔热容。

定体摩尔热容：

$$C_{V,\text{m}} = \frac{i}{2} R$$

定压摩尔热容 $C_{p,\text{m}} = \frac{i+2}{2} R$

定体摩尔热容 $C_{p,\text{m}} = C_{V,\text{m}} + R$

比热容比 $\gamma = \frac{C_{p,\text{m}}}{C_{V,\text{m}}} = \frac{i+2}{i}$





多方过程

理想气体多方过程

$$pV^n = \text{常量}$$

多方过程摩尔热容

$$C_{n,m} = C_{V,m} - \frac{R}{n-1}$$

其中 n 为常数，称为多方指数。

当 $n = 0$ 时， $C_{n,m} = C_{p,m}$ ，过程方程为 $VT^{-1} = \text{常量}$ ，等压过程。

当 $n = 1$ 时， $C_{n,m} = \infty$ ，过程方程为 $pV = \text{常量}$ ，等温过程。

当 $n = \gamma$ 时， $C_{n,m} = 0$ ，过程方程为 $pV^\gamma = \text{常量}$ ，绝热过程。

当 $n = \infty$ 时， $C_{n,m} = C_{V,m}$ ，过程方程为 $pT^{-1} = \text{常量}$ ，等体过程。



理想气体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	对外作功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	$dQ = 0$	$\begin{cases} V^{\gamma-1}T = C_2 \\ p^{\gamma-1}T^{-\gamma} = C_3 \\ pV^\gamma = C_1 \end{cases}$	$A = -\Delta E$	$\frac{m}{M} \frac{i}{2} R(T_2 - T_1)$	$-\frac{m}{M} \frac{i}{2} C_{V,m} (T_2 - T_1)$	0	0



➤ 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。

$$\Delta E = \frac{m}{M_{\text{mol}}} \frac{i}{2} R \Delta T$$

(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 $A = \int_{V_1}^{V_2} p dV$ 出发，根据过程特点找到 p - V 关系积分求解。

计算热量时，由 $Q = \frac{m}{M_{\text{mol}}} C_m \Delta T$ 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 $C_m = C_{p,m}$ ；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.





主要内容：

1. 循环过程
2. 正循环和循环效率
3. 逆循环与致冷系数
4. 卡诺循环

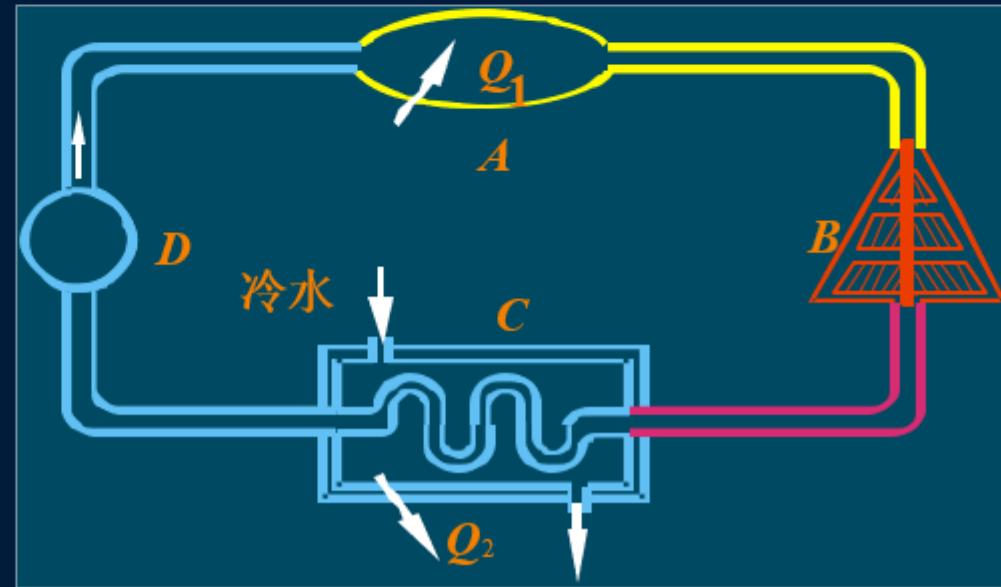


热机：利用热来作功的机器，以蒸汽轮机为例

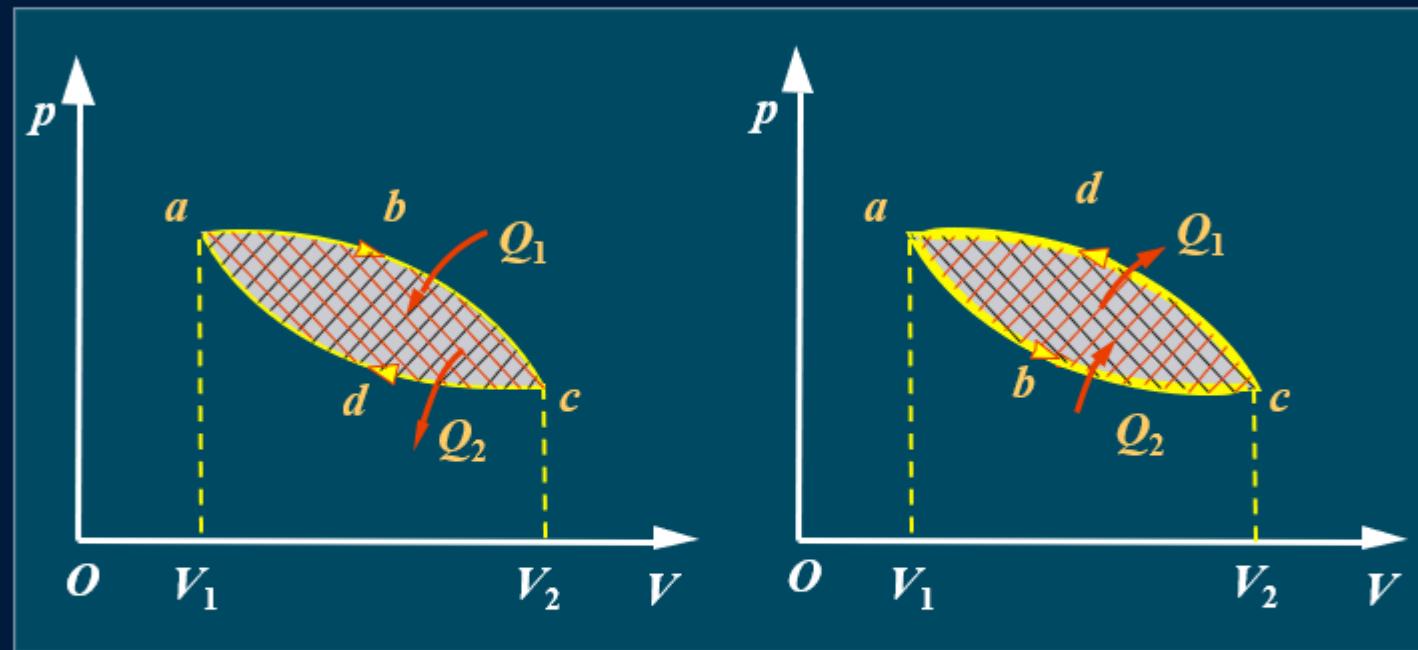


热机工作特征

- (1) 有工作物质
如水(蒸汽机)
- (2) 循环过程



循环过程: 工作物质经历一系列变化过程又回到初始状态的整个过程.



循环过程特征: $\Delta E = 0$

循环的分类: 正循环(顺时针) -- 热机

逆循环(逆时针) -- 致冷机

正循环和循环效率

设工质从高温热源吸热 Q_1 , 向低温热源放热 Q_2 , 对外作功 A .

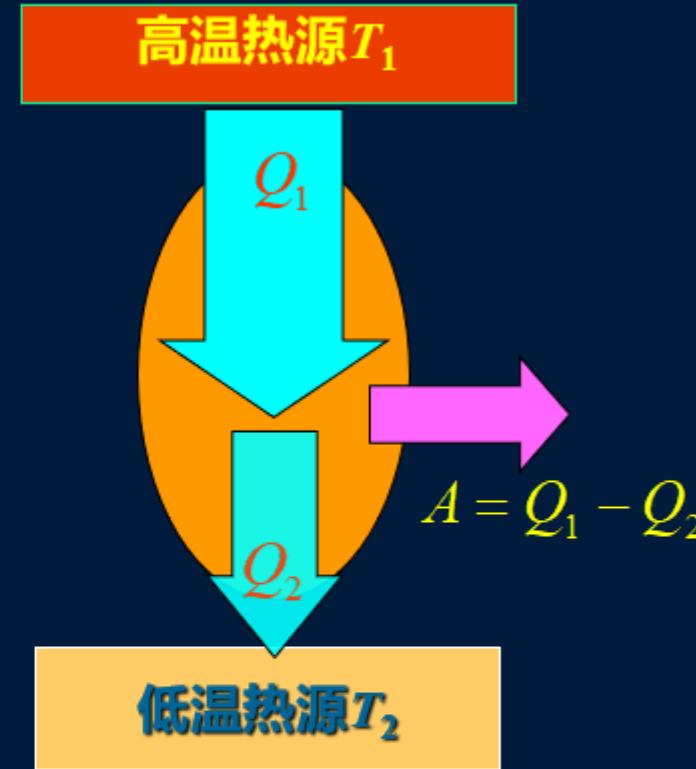
能量转换关系

净吸热: $Q_1 - |Q_2|$

对外作功: A

内能增加: $\Delta E = 0$

(净功 A 为循环过程曲线所包围的面积)



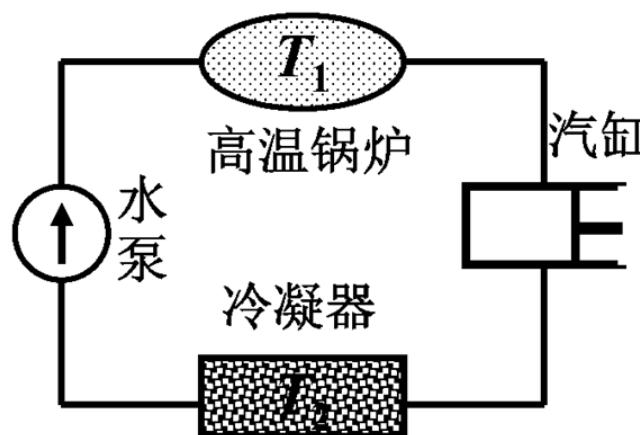
热机效率: 一次循环过程中, 工质对外作的净功 A 与它从高温热源吸收的热量 Q_1 的比值.

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

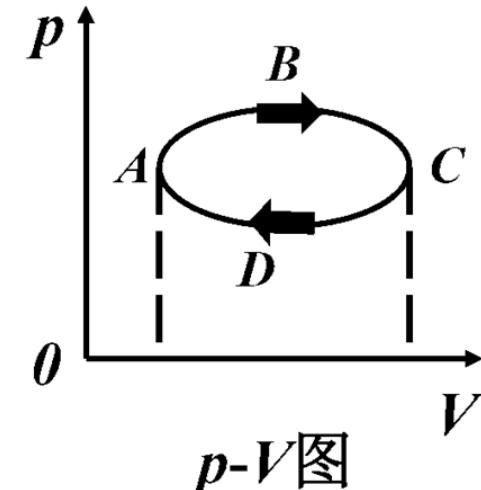


➤ 说明

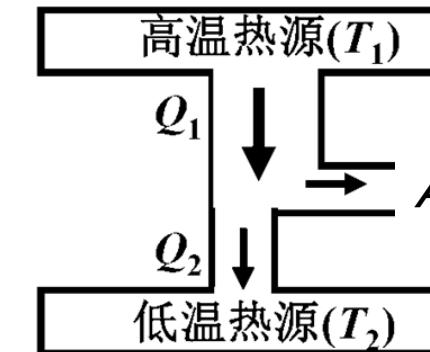
1. 正循环的膨胀过程中，系统从外界吸热， Q_1 包括整个循环过程中吸收的热量($Q_1>0$).
2. 正循环的压缩过程中，系统向外界放热， Q_2 包括整个循环过程中放出的热量($Q_2<0$ 注意取绝对值).



简单蒸汽机示意图



p - V 图



能流图

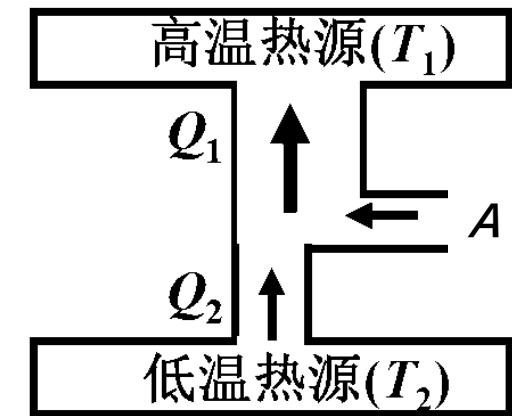
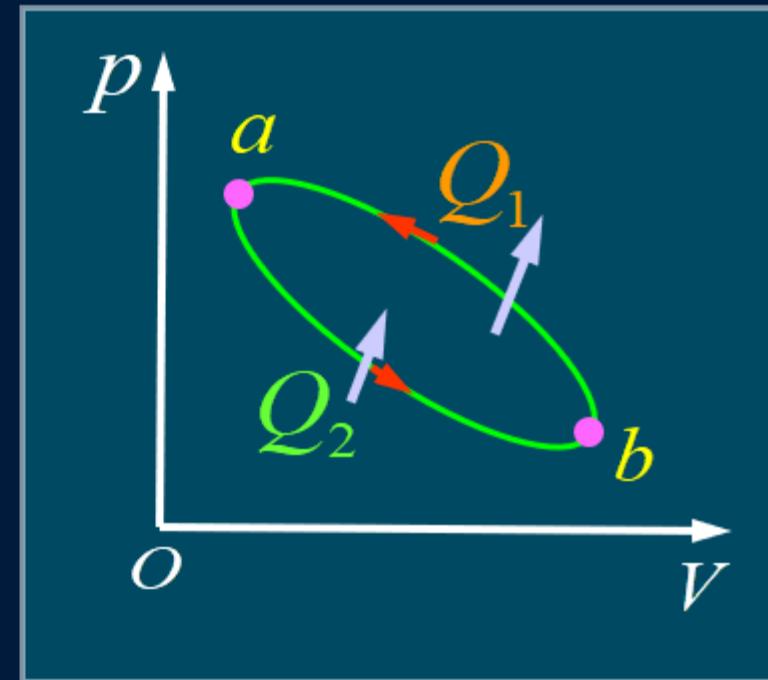
逆循环与致冷系数

逆循环过程中，工质从低温热源吸收热量 Q_2 ($Q_2 > 0$)，循环过程中 $Q_2 - |Q_1| = -|A|$ ，并向高温热源放出热量 Q_1 ($Q_1 < 0$)，外界必须对工质作功.

致冷系数：

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

从低温热源吸收的热量 Q_2 与外界作的功 A 之比.



能流图

例 1mol氧气作如图循环, *ab*为等温过程, *bc*为等压过程,
*ca*为等体过程。试计算循环效率。

解 *ab*过程等温膨胀, 吸热 Q_{ab} ;

*bc*过程等压压缩, 放热 $|Q_{bc}|$;

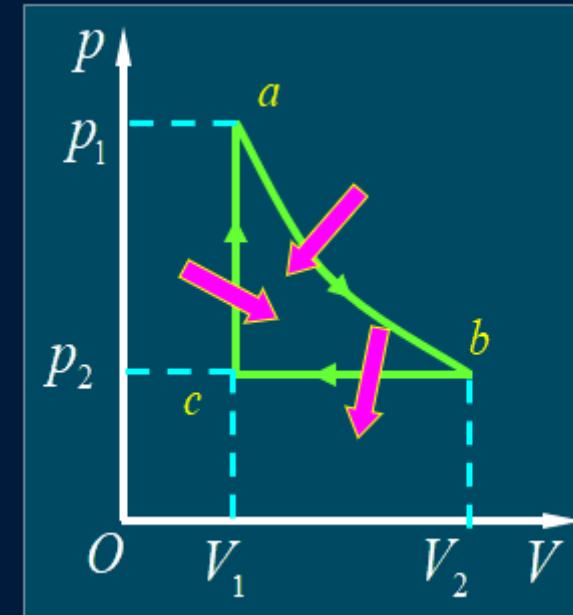
*ca*过程等体升温, 吸热 Q_{ca} ;

一次循环吸收的总热量

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

$$= \frac{m}{M_{\text{mol}}} RT_A \ln \frac{V_2}{V_1} + \frac{m}{M_{\text{mol}}} C_{V,\text{m}} (T_A - T_C)$$

$$= p_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} + \frac{5}{2} (p_1 V_1 - p_2 V_1)$$



等温过程

系统对外界作功

$$\begin{aligned} A &= \int_{V_1}^{V_2} \frac{m}{M_{\text{mol}}} \frac{RT}{V} dV \\ &= \frac{m}{M_{\text{mol}}} RT \ln \frac{V_2}{V_1} \\ &= \frac{m}{M_{\text{mol}}} RT \ln \frac{p_1}{p_2} \end{aligned}$$

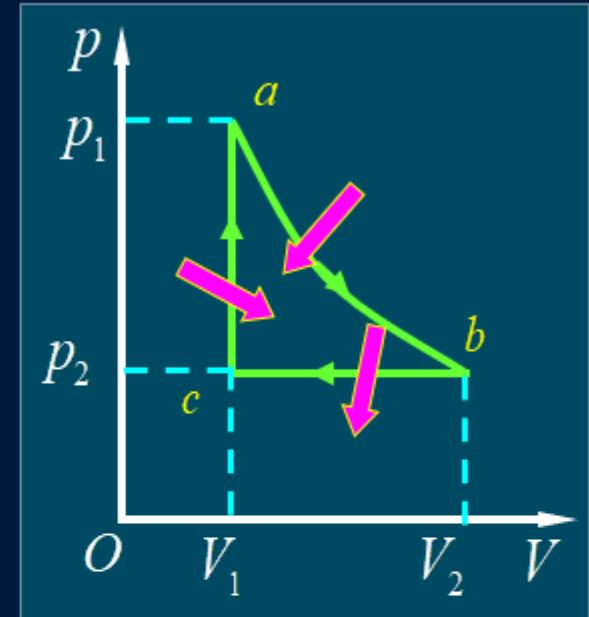
系统从外界吸收的热量

$$Q = A$$

一次循环放出的总热量

$$Q_2 = Q_{bc} = \left| \frac{m}{M_{\text{mol}}} C_{p,\text{m}} (T_C - T_B) \right|$$

$$= \frac{7}{2} (p_2 V_2 - p_2 V_1)$$



热机的循环效率

$$\eta = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{\frac{7}{2}(p_2 V_2 - p_2 V_1)}{p_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} + \frac{5}{2} V_1 (p_1 - p_2)}$$





例 广东大亚湾核电站总装机容量为 $180 \times 10^7 \text{ W}$, 效率为30%.

求 当发电机组全部投入运行时, 每秒钟热机从核锅炉中吸取的热量; 若用 10°C 的海水冷却冷凝器, 而排水温度为 20°C , 问每秒钟需要多少吨海水?

已知海水的比热为 $c = 4.18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

解 每秒钟热机从核锅炉中吸取的热量为

$$Q_1 = \frac{A}{\eta} = \frac{180 \times 10^4 \times 10^3}{0.30} \text{ J} = 6.00 \times 10^9 \text{ J}$$

热机效率: 一次循环过程中, 工质对外作的净功 A 与它从高温热源吸收的热量 Q_1 的比值.

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

工质向冷凝器每秒钟放出热量

$$Q_2 = Q_1 - A = 6.00 \times 10^9 \text{ J} - 1.8 \times 10^9 \text{ J} = 4.2 \times 10^9 \text{ J}$$

每秒钟所需的海水质量

$$m = \frac{Q_2}{c\Delta T} = \frac{4.2 \times 10^9}{4.18 \times 10^3 \times (20 - 10)} \text{ kg} = 1.00 \times 10^5 \text{ kg} = 100 \text{ t}$$

卡诺循环

卡诺热机: 理想热机, 循环过程为卡诺循环.

卡诺循环: 由两个等温过程和两个绝热过程组成.

等温膨胀过程:

$$a(p_1, V_1, T_1) \rightarrow b(p_2, V_2, T_1)$$

绝热膨胀过程:

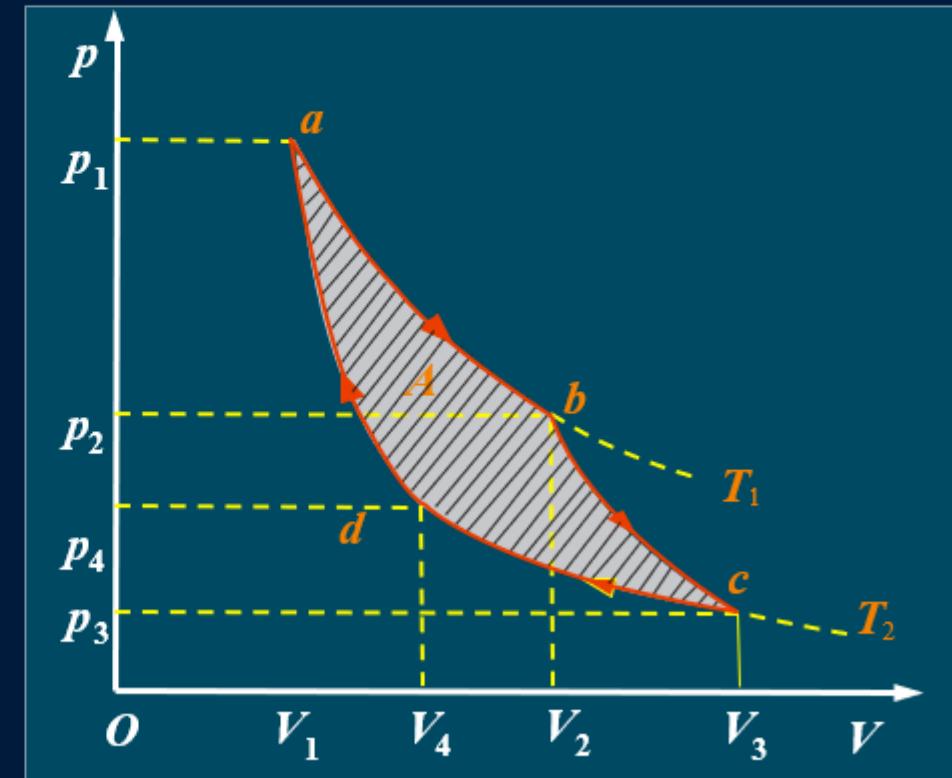
$$b(p_2, V_2, T_1) \rightarrow c(p_3, V_3, T_2)$$

等温压缩过程:

$$c(p_3, V_3, T_2) \rightarrow d(p_4, V_4, T_2)$$

绝热压缩过程:

$$d(p_4, V_4, T_2) \rightarrow a(p_1, V_1, T_1)$$



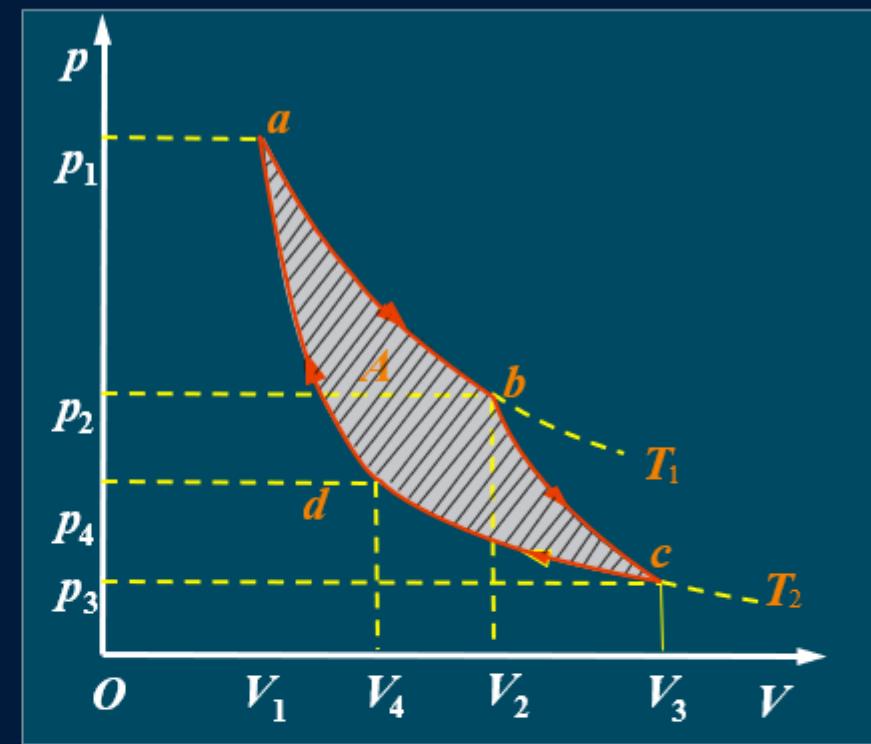
卡诺循环的热机效率

$$Q_1 = Q_{ab} = \frac{m}{M_{\text{mol}}} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$|Q_2| = |Q_{cd}| = \frac{m}{M_{\text{mol}}} RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}$$

由绝热过程方程有

$$\left. \begin{aligned} V_2^{\gamma-1} T_1 &= V_3^{\gamma-1} T_2 \\ V_1^{\gamma-1} T_1 &= V_4^{\gamma-1} T_2 \end{aligned} \right\} \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$$



$$\eta = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{\frac{m}{M} RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}{\frac{m}{M} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}} = 1 - \frac{T_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}{T_1 \ln \frac{V_2}{V_1}} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

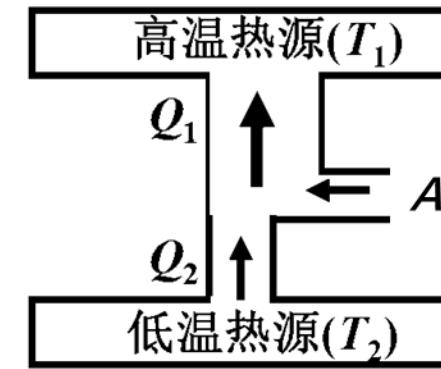
卡诺热机的效率仅与高低温热源温度比值有关.



逆循环（制冷循环）与制冷系数

制冷机的工作效率用制冷系数表示：

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



能流图

可逆卡诺制冷机的制冷系数

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

