



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>

在系统状态变化过程中，热量、功和内能之间的关系满足

$$Q = E_2 - E_1 + A = \Delta E + A \quad (\text{热力学第一定律})$$

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 、 A 、 $E_2 - E_1$ 都是代数量，其正负号意义如下

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。

对微小的状态变化过程

$$dQ = dE + dA$$





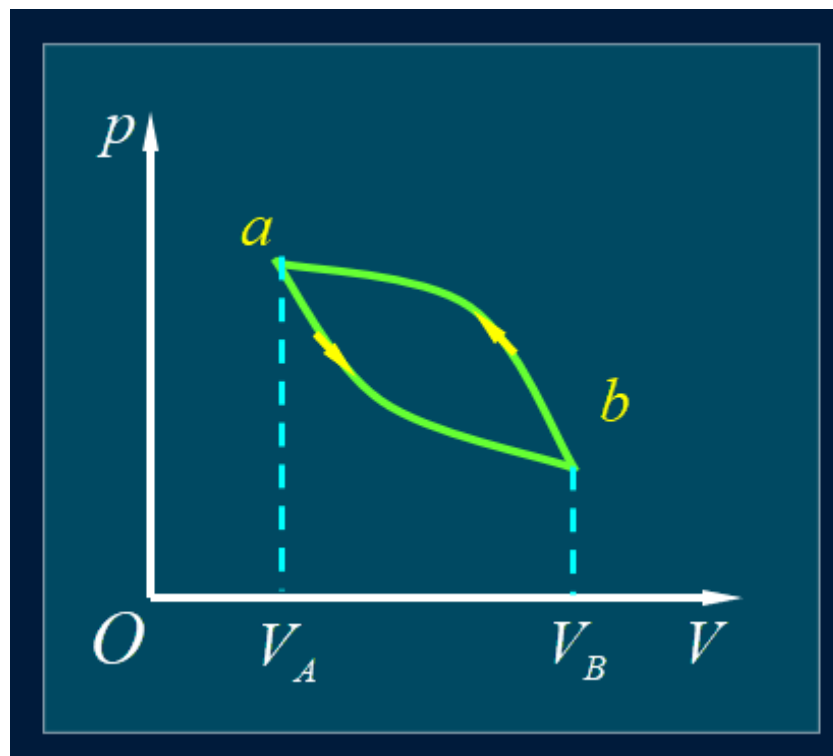
➤ 说明

- 内能是状态的单值函数，功和热量都是过程量.
- 热力学第一定律的实质是包含热现象在内的能量守恒和转换定律，是普遍的能量守恒与转化定律在一切涉及热现象的宏观过程中的具体表现.
- 热力学第一定律的适用范围：任何热力学系统的任何热力学过程.





例 系统从 $a \rightarrow b \rightarrow a$ 经历一个循环, 且 $E_b > E_a$. (1) 试确定 $a \rightarrow b$, 以及 $b \rightarrow a$ 的功 A 的符号及含义; (2) Q 的符号如何确定; (3) 循环总功和热量的正负.



热力学第一定律对理想气体准静态过程的应用

1. 等体过程

过程特点

$$V = \text{常量}, \quad dV = 0$$

过程方程

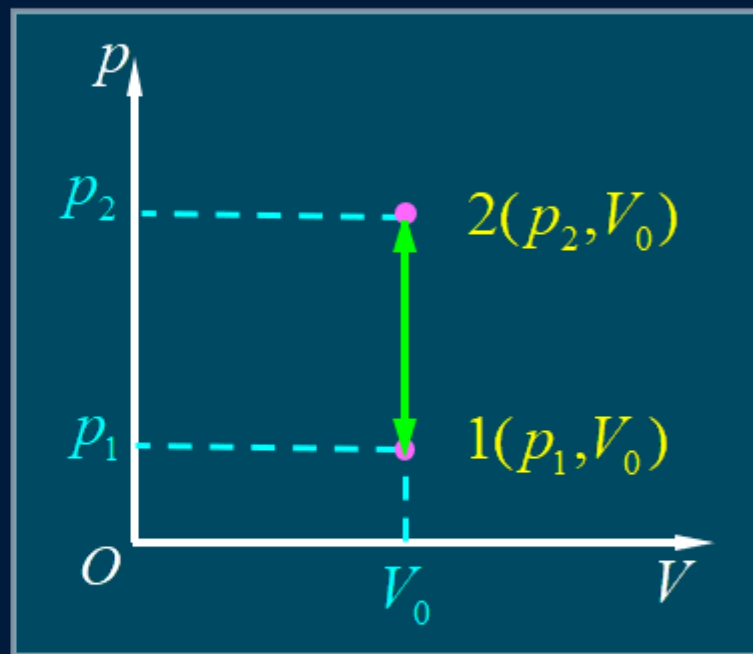
$$pT^{-1} = \text{常量}$$

系统对外做功

$$A = \int p dV = 0$$

系统吸收热量

$$Q = \frac{m}{M_{\text{mol}}} C_{V,m} (T_2 - T_1)$$



若摩尔热容 C_m 与温度无关, 则

$$Q = \frac{m}{M_{\text{mol}}} C_m (T_2 - T_1)$$

内能的增量:

$$E_2 - E_1 = \frac{m}{M_{\text{mol}}} \frac{i}{2} R(T_2 - T_1)$$

根据热力学第一定律, 等体过程中

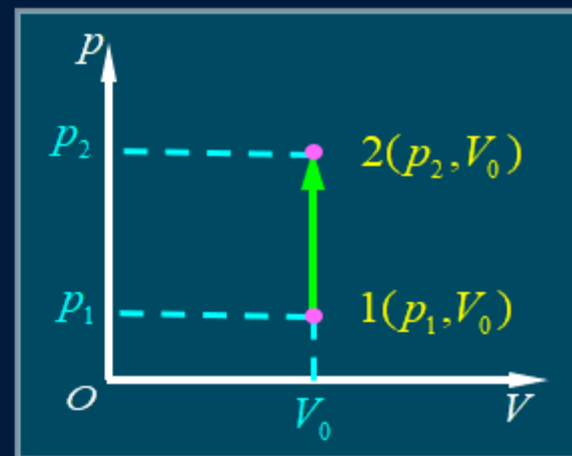
$$Q = E_2 - E_1$$

$$\frac{m}{M_{\text{mol}}} C_{V,m} \Delta T = \frac{m}{M_{\text{mol}}} \frac{i}{2} R \Delta T$$

定体摩尔热容:

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

理想气体定体摩尔热容仅与气体分子的自由度 i 有关.



2. 等压过程

过程特点

$$p = \text{常量}, \quad dp = 0$$

过程方程

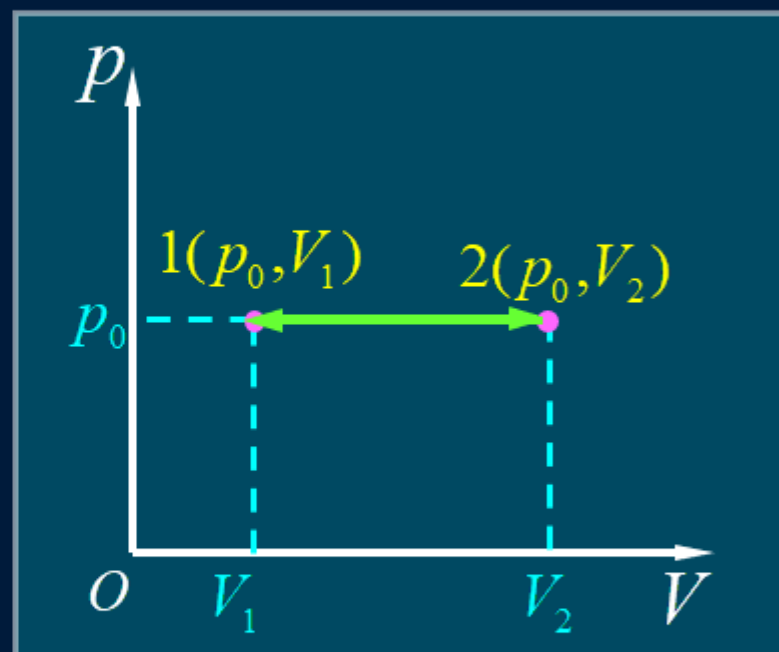
$$VT^{-1} = \text{常量}$$

系统对外界所作的功

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV = p(V_2 - V_1)$$

内能的增量

$$E_2 - E_1 = \frac{m}{M_{\text{mol}}} \frac{i}{2} R(T_2 - T_1)$$





系统从外界吸收的热量

$$\begin{aligned} Q &= \frac{m}{M_{\text{mol}}} C_{p,\text{m}} (T_2 - T_1) \\ &= \frac{m}{M_{\text{mol}}} \frac{i}{2} R \Delta T + \frac{m}{M_{\text{mol}}} R \Delta T \\ &= \frac{m}{M_{\text{mol}}} C_{V,\text{m}} \Delta T + \frac{m}{M_{\text{mol}}} R \Delta T \end{aligned}$$

定压摩尔热容

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

定体摩尔热容

$$C_{V,\text{m}} = C_{p,\text{m}} - R$$

比热容比

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

若摩尔热容 C_m 与温度无关, 则

$$Q = \frac{m}{M_{\text{mol}}} C_m (T_2 - T_1)$$

等压过程

系统对外界所作的功

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV = p(V_2 - V_1)$$

内能的增量

$$E_2 - E_1 = \frac{m}{M_{\text{mol}}} \frac{i}{2} R (T_2 - T_1)$$

3. 等温过程

过程特点: $T = \text{常量}$, $dT = 0$

过程方程: $pV = \text{常量}$

等温过程系统的内能不变

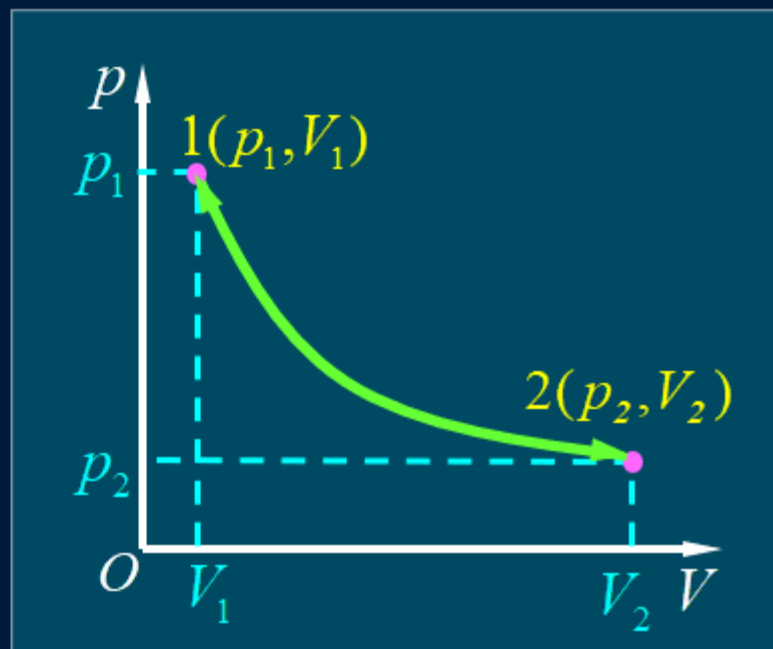
$$\Delta E = 0$$

系统对外界做功

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

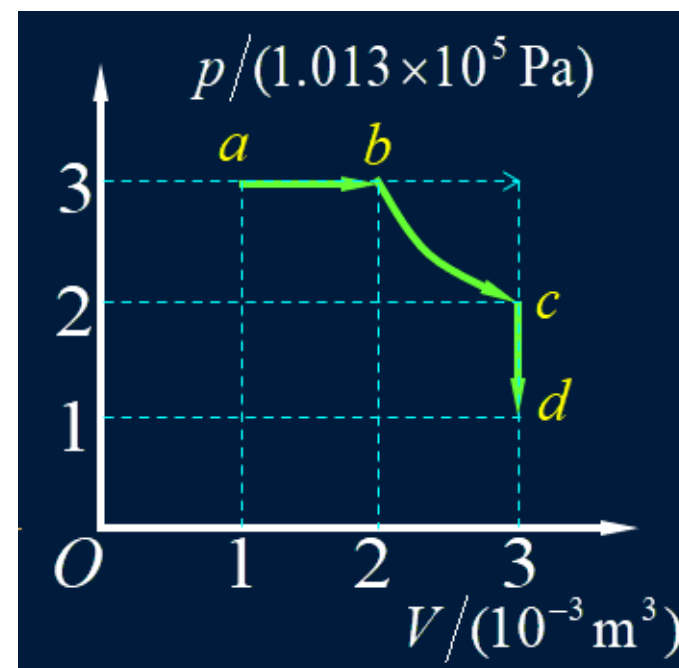
系统从外界吸收的热量

$$Q = A$$





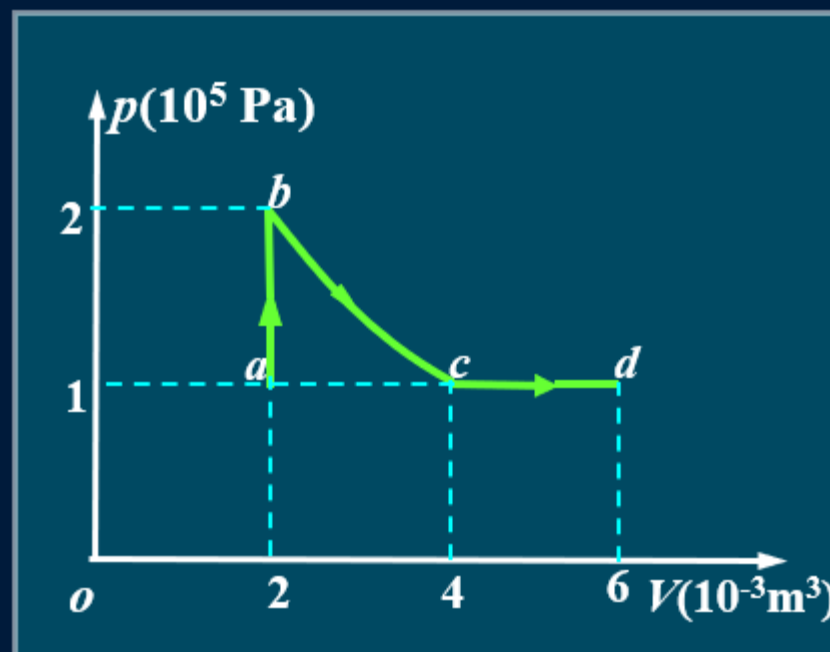
例 质量一定的单原子理想气体开始时压力为 $3.039 \times 10^5 \text{Pa}$ ，体积 10^{-3}m^3 ，先等压膨胀至体积为 $2 \times 10^{-3} \text{m}^3$ ，再等温膨胀至体积为 $3 \times 10^{-3} \text{m}^3$ ，最后被等体冷却到压力为 $1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ 。
求 气体在全过程中内能的变化，所作的功和吸收的热量。





例 压强为 $1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，体积为 $2.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 的氩气，先等体升压至 $2.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，后等温膨胀至体积为 $4.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ，最后再等压膨胀至体积为 $6.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 。

求 氩气在上述各过程中做的功，吸收的热量及内能的变化。



绝热过程

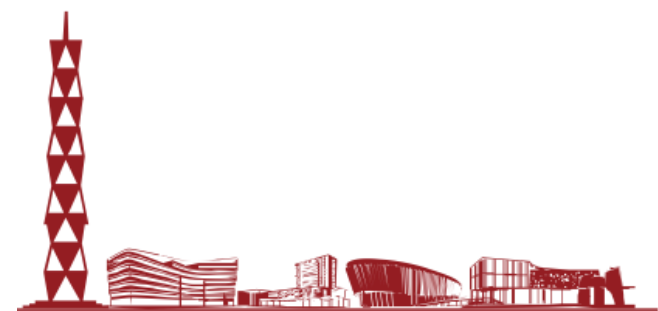
绝热过程: 如果系统在整个过程中始终与外界没有热量交换.

1. 绝热过程方程

过程特点: $dQ = 0$, p 、 V 、 T 三个状态参量都在变化.

$$dQ = dE + pdV \quad \longrightarrow \quad \frac{m}{M_{\text{mol}}} C_{V,m} dT + pdV = 0$$

$$\text{又 } pV = \frac{m}{M_{\text{mol}}} RT \quad \longrightarrow \quad pdV + Vdp = \frac{m}{M_{\text{mol}}} R dT$$



消去 dT

$$pdV + Vdp = -\frac{R}{C_{V,m}} pdV$$

即

$$(C_{V,m} + R)pdV = -C_{V,m} Vdp \quad \leftarrow \begin{cases} C_{V,m} + R = C_{p,m} \\ \frac{C_{p,m}}{C_{V,m}} = \gamma \end{cases}$$

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

积分有

$$pV^\gamma = C_1$$

利用理想气体的状态方程 $pV = \frac{m}{M_{\text{mol}}} RT$, 消去 p 或 V ,得准静态绝热过程
过程方程的
三种形式

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

 $(C_1, C_2, C_3 \text{ 均为常量, 但彼此不相等})$

2. 绝热线与等温线的比较

- **数学方法：** 比较两曲线交点处的斜率.

等温过程方程

$$pV = C$$

$$pdV + Vdp = 0$$

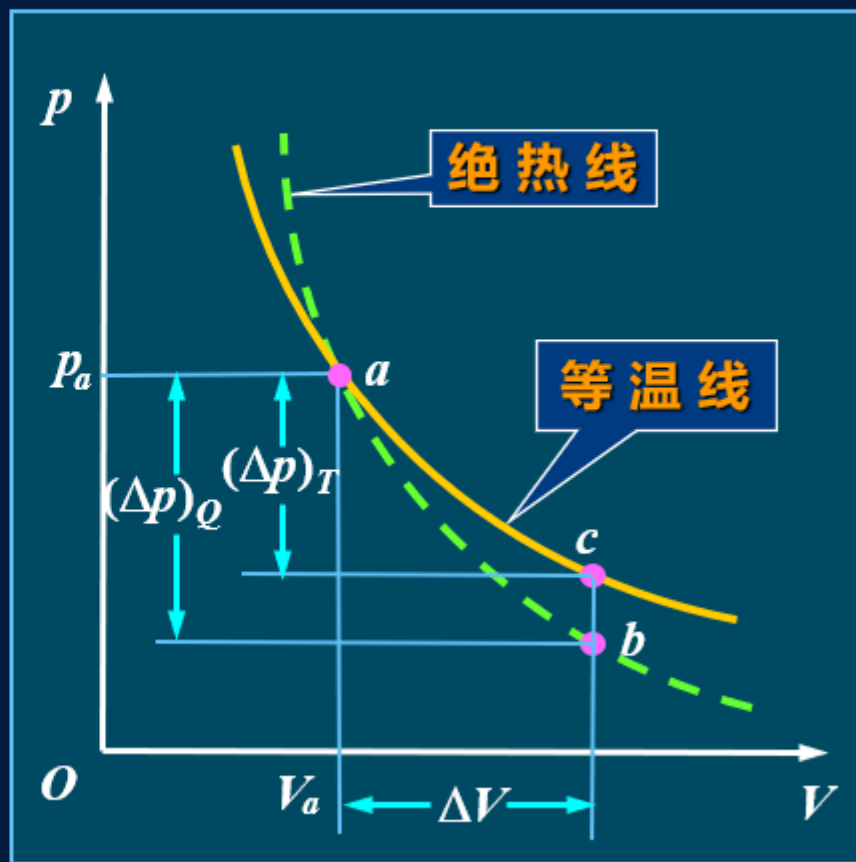
即 $\left(\frac{dp}{dV}\right)_T = -\frac{p_a}{V_a}$

绝热过程方程

$$pV^\gamma = C$$

$$V^\gamma dp + \gamma pV^{\gamma-1}dV = 0$$

即 $\left(\frac{dp}{dV}\right)_Q = -\gamma \frac{p_a}{V_a} \quad (\gamma > 1)$



3. 绝热过程的功

在绝热过程中 $Q = 0$

系统对外作功

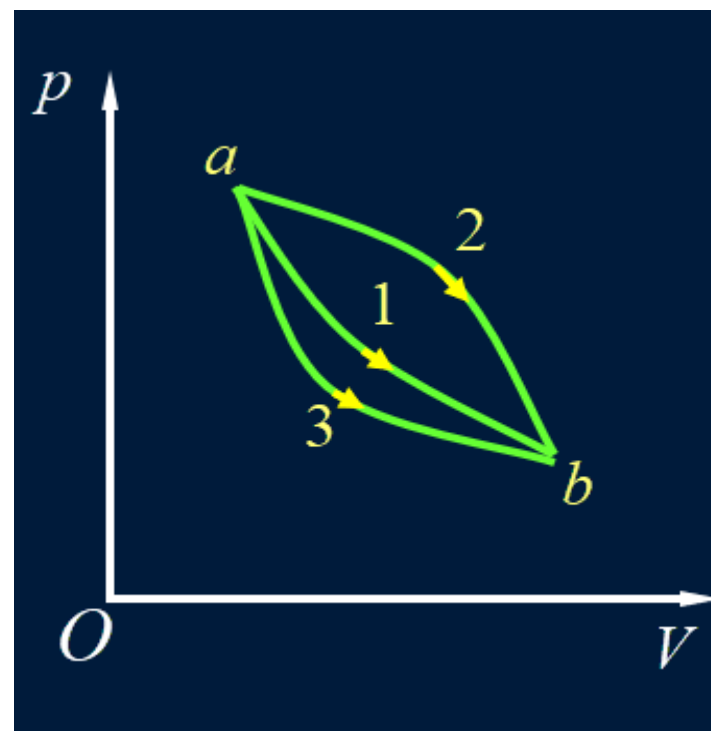
$$A = -\Delta E = -\frac{m}{M_{\text{mol}}} C_{V,\text{m}} (T_2 - T_1)$$

$$\text{又 } \gamma = \frac{C_{p,\text{m}}}{C_{V,\text{m}}} = \frac{C_{V,\text{m}} + R}{C_{V,\text{m}}} \quad \longrightarrow \quad C_{V,\text{m}} = \frac{R}{\gamma - 1}$$

代入前式, 并利用状态方程可有

$$A = -\frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{\gamma - 1} \quad (\text{也可以利用功的定义计算})$$

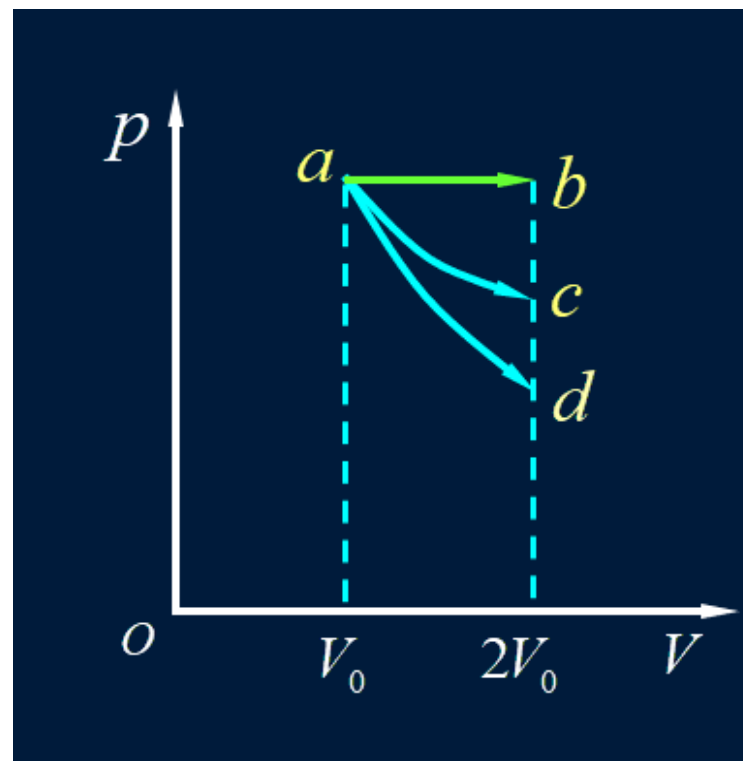
例如图，对同一气体，**1**为绝热过程，那么**2**和**3**过程是吸热还是放热？





例 同一气体经过等压过程 ab , 等温过程 ac , 绝热过程 ad .

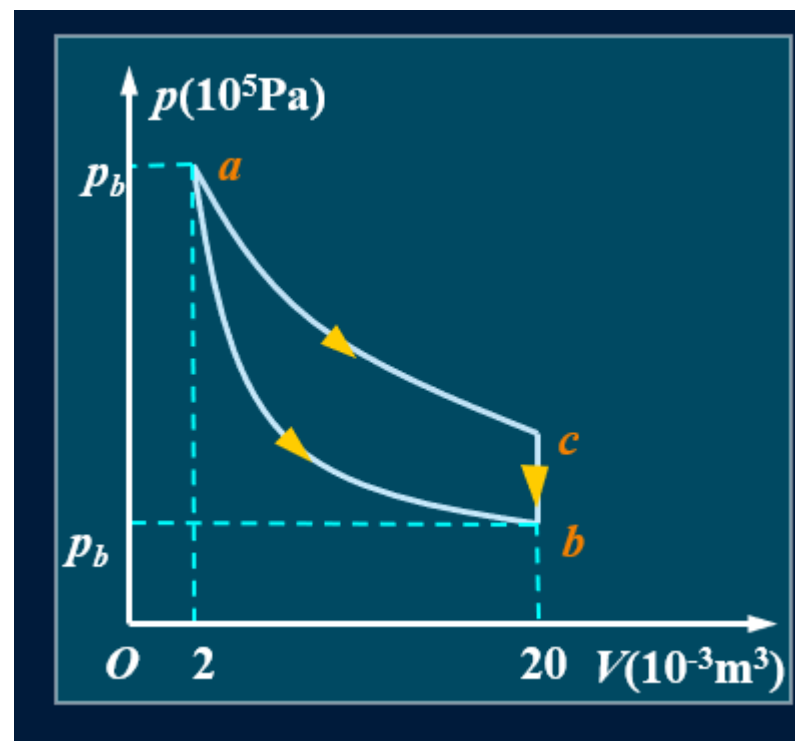
问 (1)哪个过程做功最多?
(2)哪个过程吸热最多?
(3)哪个过程内能变化最大?



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

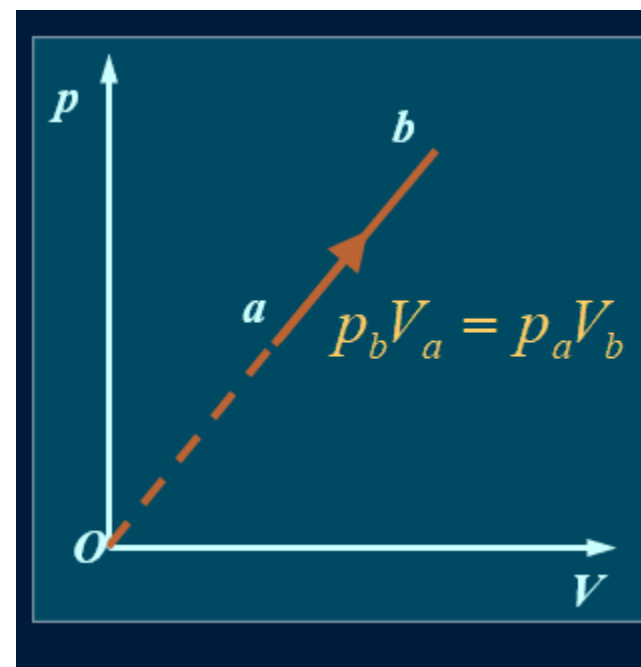
求 氮气在下列过程中作的功:

- (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.





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} .





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

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



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

