热 学 复 习

基本概念

理想气体、热力学系统、微观状态、宏观状态、
平衡态 、准静态过程、可逆过程

物理量

压强、体积、温度、分子数密度、
内能、功（体积功）、热量、
热容量（定压、定容摩尔热容量，比热容比）、比热
热机效率
熵（玻耳兹曼熵、克劳修斯熵变公式）、热力学概率

分子质量、分子运动速度、方均根速率、平均速率、
自由度、速率分布函数、最概然速率、平均自由程

普适气体常数、玻耳兹曼常数

定理和定律

热力学第一定律　热力学第二定律（熵增加原理）

能量均分定理、麦克斯韦速率分布律

过 程

等容过程、等压过程、等温过程、

绝热过程（准静态绝热过程、绝热自由膨胀）

循环过程（热机循环、制冷循环）、卡诺循环

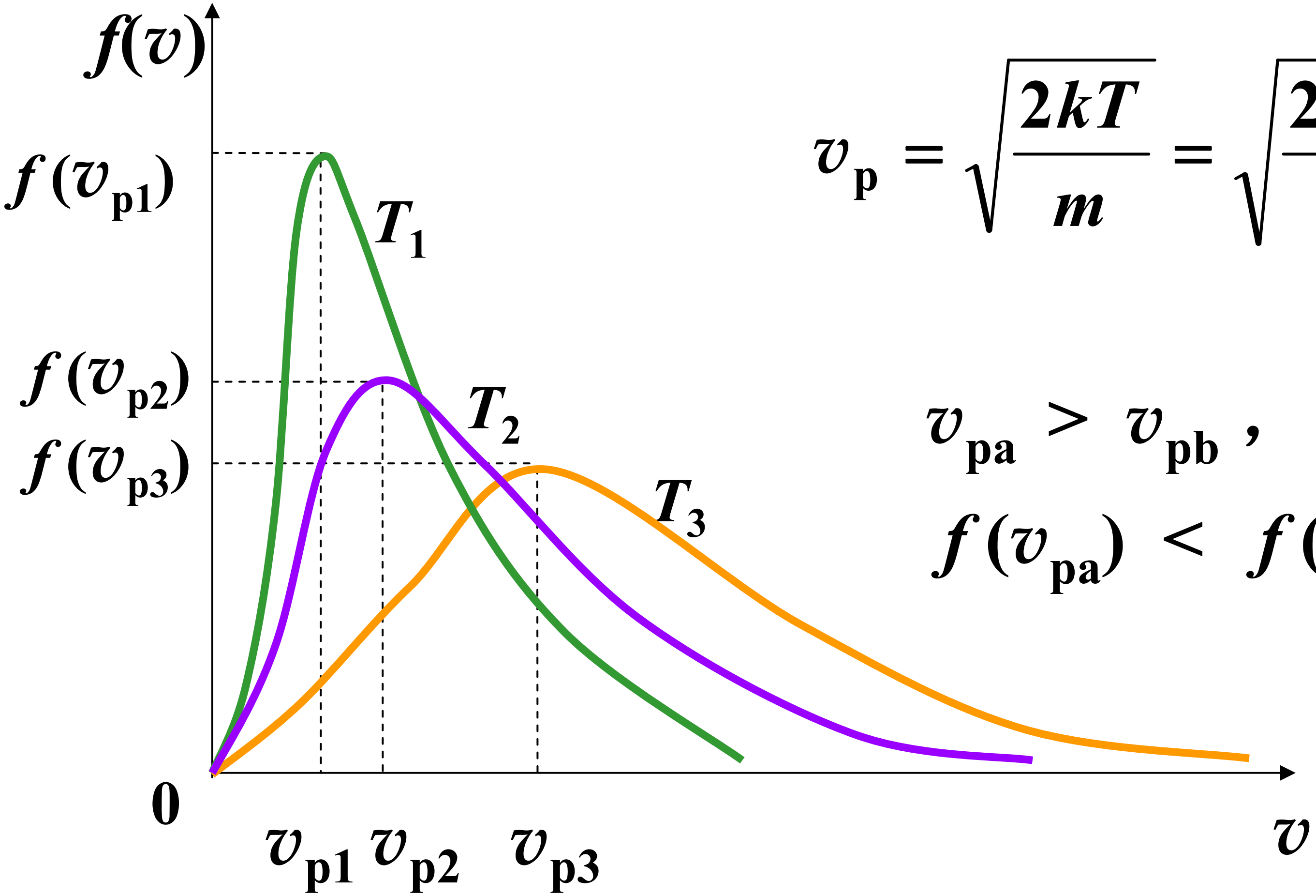
模 型

理想气体（方程）

热 学 测 验 题

一、填空题

1. 一定量的理想气体在温度为 T_a、T_b 时分子的最可几速率分别为 v_{pa} 及 v_{pb}。设 $T_a > T_b$，则 v_{pa} ______ v_{pb}，$f(v_{pa})$ ______ $f(v_{pb})$。（填 < 或 > 或 =）

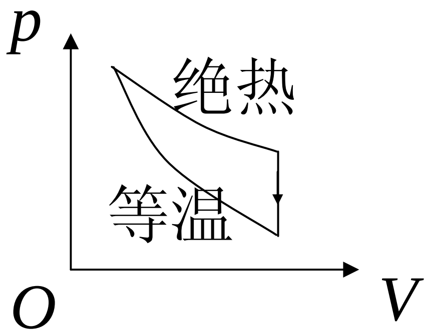


$$v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}}$$

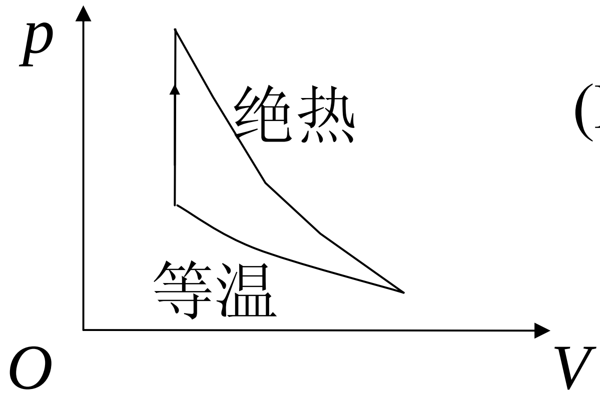
$v_{pa} > v_{pb}$，

$f(v_{pa}) < f(v_{pb})$

2. 下列循环中， _____图是可能的循环。

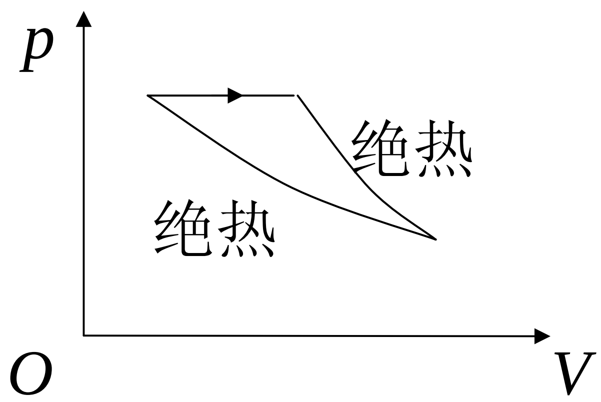


(A)

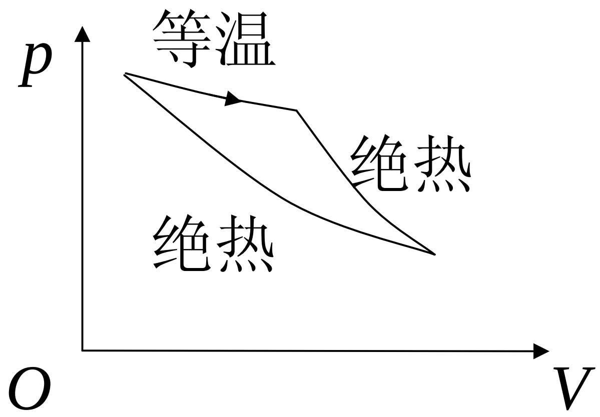


（B）

(B) 是可能的。

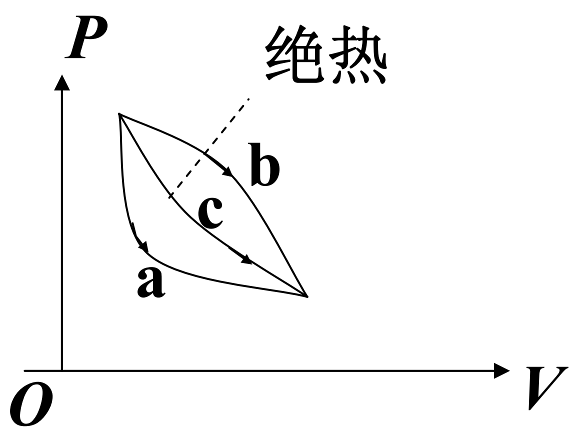


(C)



(D)

4. 判断下列过程中ΔE、ΔT、W、Q的正负。



解： 考虑 c 过程，绝热。$Q_c = 0$ $\quad W_c > 0$

由热一律 $\quad \Delta E_c + W_c = 0$

$\Delta E_c < 0, \qquad \Delta T < 0.$

考虑a 过程，

$W_a > 0 \qquad \Delta E_a = \Delta E_c < 0, \qquad \Delta T < 0.$

由热一律 $\quad Q_a = \Delta E_a + W_a = \Delta E_c + W_a = -W_c + W_a < 0.$

a 过程，放热

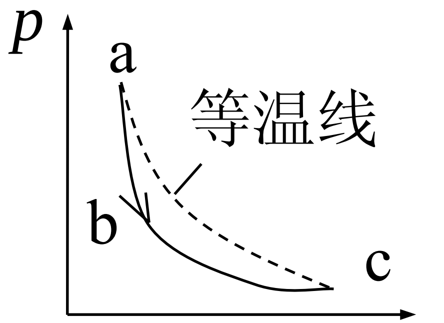
考虑 b 过程，

$W_b > 0 \qquad \Delta E_b = \Delta E_c < 0, \qquad \Delta T < 0.$

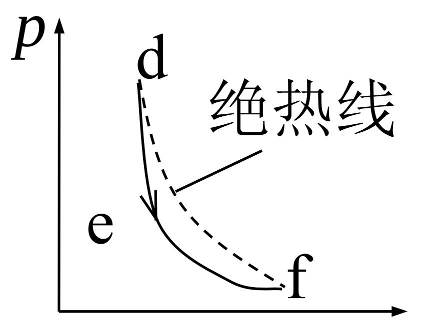
由热一律 $\quad Q_b = \Delta E_b + W_b = \Delta E_c + W_b = -W_c + W_b > 0.$

b 过程，吸热

5. 一定量的理想气体分别经历如图（1）所示的abc过程和图（2）所示的def过程,则这两种过程的净吸热和净放热的情况是： abc过程净___热，def过程净___热。



图（1） V



图（2） V

解: (1) 对于a、c 两点 $\Delta E = 0$ 对于abc过程， $W > 0$

由热一律 $Q_{abc} = \Delta E + W > 0$ abc过程中净吸热。

（2）与4题 a 过程一样，净放热。

6. 图示为一理想气体几种状态变化过程的 ***P* — *V*** 图，其中***MT***为等温线，***MQ***为绝热线，在***AM***、***BM***、***CM*** 三种准静态过程中：

(1) 温度降低的是___________过程；

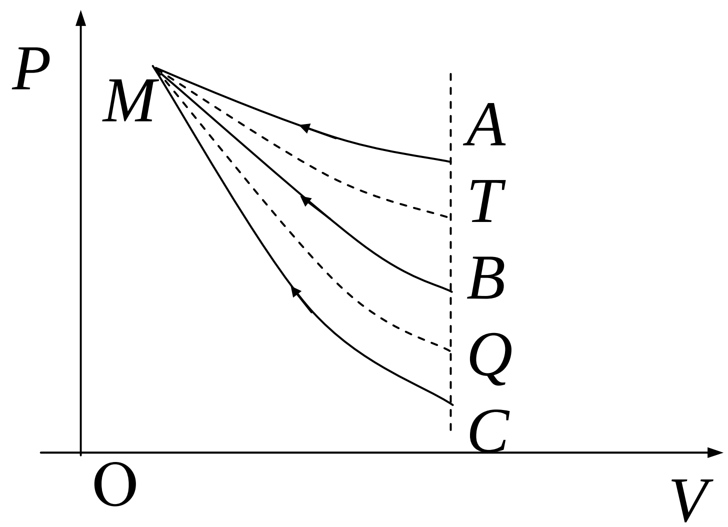
(2)气体吸热的是______过程.

解：（**1**） **A**点的温度高于***T***点的温度，

AM过程温度降低。

（**2**）**CM** 过程。

将**CMQC** 视为一个循环， **MQ**为绝热线，而**QC**放热，故**CM**为吸热过程。



8. 理想气体的压强为P、 密度为 ρ，则 v_{rms}=______ 。

解：$$v_{\mathrm{rms}} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}$$

$$PV = \frac{M}{\mu}RT \qquad \frac{RT}{\mu} = \frac{PV}{M} = \frac{P}{M/V} = \frac{P}{\rho}$$

$$v_{\mathrm{rms}} = \sqrt{\frac{3P}{\rho}}$$

10. 大气中一绝热气缸内装有一定量的气体。用电炉徐徐加热，活塞无摩擦地缓缓上升。此过程中，以下物理量如何变化？

(1) 气体压强__________;

(2)气体分子平均动能 ________;

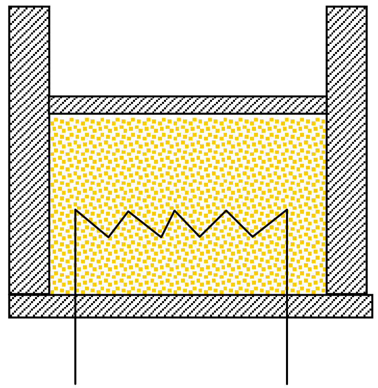
(3)气体的内能 ____________。

答:

(1) 气体压强_不变_.

(2) 气体分子平均动能 _增大_.

(3) 气体的内能_增大_.



11. 将2kg，100℃的铅块投入10 ℃ 的湖水中，铅与湖水组成的系统的熵变为 ________。（已知铅的比热为0.128×10³J/kg·K）

解：
$$\Delta S_{\mathrm{Pb}}=\int_{(R)1}^{2}\frac{đQ}{T}=\int_{T_1}^{T_2}\frac{cm\,\mathrm{d}T}{T}=cm_{\mathrm{Pb}}\ln\frac{T_2}{T_1}$$

$$=2\times0.128\times10^3\times\ln\frac{10+273}{100+273}=-70.7\ \mathrm{J/K}$$

铅放出的热量为

$$Q=cm\Delta T=2\times0.128\times(100-10)\times103=23\times\times103\ \mathrm{J}$$

$$\Delta S_{\mathrm{W}}=\frac{Q}{T_{\mathrm{W}}}=\frac{23\times10^3}{273+10}=81.4\ \mathrm{J/K}$$

$$\Delta s_{\mathrm{u}}=\Delta s_{\mathrm{W}}+\Delta s_{\mathrm{Pb}}=81.4-70.7=10.7\ \mathrm{J/K}$$

二、 计 算 题

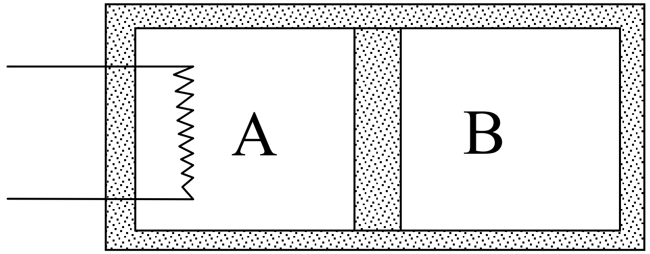
1. 绝热容器中间有一无摩擦、绝热的可移动的活塞。活塞的两侧各有 ν **mol**的理想气体，γ=1.5。初态状态参量为 P_0, V_0, T_0，现将一线圈通入左侧气体，对气体缓缓加热。左侧气体右移，使右侧压强增加为 $27P_0/8$，求：

(1)左侧气体作了多少功？

(2)右侧气体的终温是多少？

(3)左侧气体的终温是多少？

(4)左侧气体吸收了多少热量？



解:（1）右侧为绝热过程

$$W_{右} = \frac{P_0V_0 - P_1V_1}{\gamma - 1} = \frac{P_0V_0}{\gamma - 1}\left(1 - \frac{P_1V_1}{P_0V_0}\right) \qquad P_1=27P_0/8$$

对于绝热过程 $\quad P_1V_1^{\gamma} = P_0V_0^{\gamma} \qquad V_1 = \left(\frac{P_0}{P_1}\right)^{\frac{1}{\gamma}} V_0 = \frac{4}{9}V_0$

经过计算得到 $\quad W_{右} = -P_0V_0$

左侧气体的功 $\quad W_{左} = P_0V_0$

（2）右侧气体的终温是多少？

$$\frac{P_1V_1}{T_1}=\frac{P_0V_0}{T_0} \qquad T_1=\frac{3}{2}T_0$$

（3）左侧气体的终温是多少？

$$\frac{P_A(2V_0-V_B)}{T_A}=\frac{P_0V_0}{T_0} \qquad P_A=P_B=P_1$$

$$T_A=\frac{P_A(2V_0-V_1)}{P_0V_0}T_0=\frac{21}{4}T_0$$

（4）左侧气体吸收的热量是多少？ $Q=\Delta E+W$ $\qquad W_{左}=P_0V_0$

$$C_{V,m}=\frac{R}{\gamma-1}=\frac{R}{1.5-1}=2R$$

$$\Delta E=\nu C_{V,m}\Delta T=\nu\cdot 2R\cdot(\frac{21}{4}T_0-T_0)=\frac{17}{2}\nu RT_0$$

$$Q=\Delta E+W=\frac{17}{2}\nu RT_0+P_0V_0$$

2. 一绝热容器，体积为10^{-3}m^3, 以100 m/s 的速度做匀速直线运动，容器中装有 100g的氢气。当容器突然停止运动时，氢气的温度、压强各增加多大?

解： 容器停止运动，机械能转化为气体无规则运动的动能。

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{i}{2}k\Delta T \qquad k = \frac{R}{N_A}$$

$$\Delta T = \frac{mv^2}{ik} = \frac{\mu v^2}{iR} = \frac{2\times10^{-3}\times100^2}{5\times8.31} = 0.481\text{K}$$

由状态方程 $PV = \nu RT$ $\qquad \Delta PV = \nu R\Delta T$

$$\Delta P = \frac{\nu R\Delta T}{V} = \frac{M}{\mu}\frac{R\Delta T}{V} = \frac{100\times10^{-3}\times8.31\times0.481}{2\times10^{-3}\times10^{-3}}$$

$$\Delta P = 2\times10^4\,\mathrm{P_a}$$

3. 1mol 氦气的循环过程如图。ab,cd为绝热过程, bc,da 过程为等容过程。求（1）a,b,c,d 各态的温度；（2）循环效率。

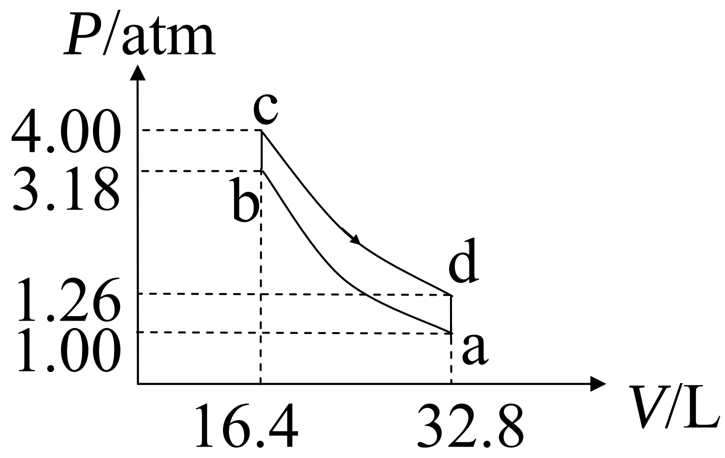
解：（1） $PV = \nu RT$

$$T_a = \frac{P_a V_a}{R} = \frac{1\times1.013\times10^5\times32.8\times10^{-3}}{8.31} = 400\text{K}$$

$$T_b = \frac{P_b V_b}{R} = \frac{3.18\times1.013\times10^5\times16.4\times10^{-3}}{8.31} = 636\text{K}$$

$T_c = 800\text{K}$ $\quad$ $T_d = 504\text{K}$

（2）循环效率



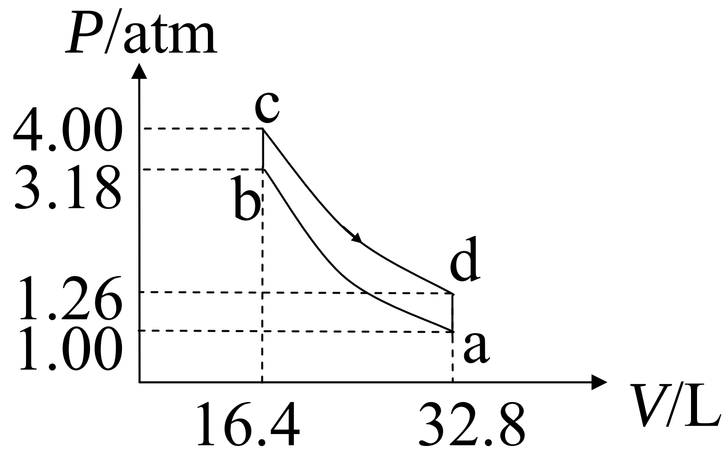
b→c 吸热， **d→a** 放热

$$Q_{吸} = \nu C_{V,m}(T_c - T_b)$$

$$|Q_{放}| = \nu C_{V,m}(T_d - T_a)$$

$$Q_{吸} = \nu C_{V,m}(T_c - T_b)$$

$$|Q_{放}| = \nu C_{V,m}(T_d - T_a)$$



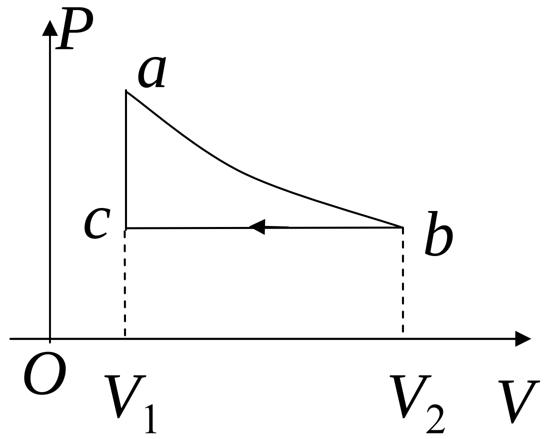
$$\eta = 1 - \frac{|Q_{放}|}{Q_{吸}} = 1 - \frac{T_d - T_a}{T_c - T_b}$$

$$T_c V_c^{\gamma-1} = T_d V_d^{\gamma-1} \qquad T_b V_b^{\gamma-1} = T_a V_a^{\gamma-1}$$

$$(T_c - T_b) V_c^{\gamma-1} = (T_d - T_a) V_d^{\gamma-1} \qquad \gamma = 5/3$$

$$\eta = 1 - \left(\frac{V_c}{V_d}\right)^{\gamma-1} = 37.1\%$$

4. 如图所示为 **1mol** 单原子理想气体经历的循环过程，**ab**为等温线，V_1 , V_2已知。求循环效率。



解：分析吸、放热。

a→b 等温过程，$T_a = T_b$

$Q = W > 0$ ，吸热Q_1

c→a 等容过程，

压强增大，温度升高，吸热Q_2

b→c 等压过程，

体积减小，温度降低，放热Q_3

$$Q_1 = W = \int P\mathrm{d}V = \int_{V_1}^{V_2} \frac{RT}{V}\mathrm{d}V = RT_a \ln\frac{V_2}{V_1} = RT_b \ln\frac{V_2}{V_1}$$

$$Q_2 = \nu C_{\mathrm{V,m}} \Delta T = C_{\mathrm{V,m}} (T_\mathrm{a} - T_\mathrm{c}) = C_{\mathrm{V,m}} T_a (1 - \frac{T_c}{T_a})$$

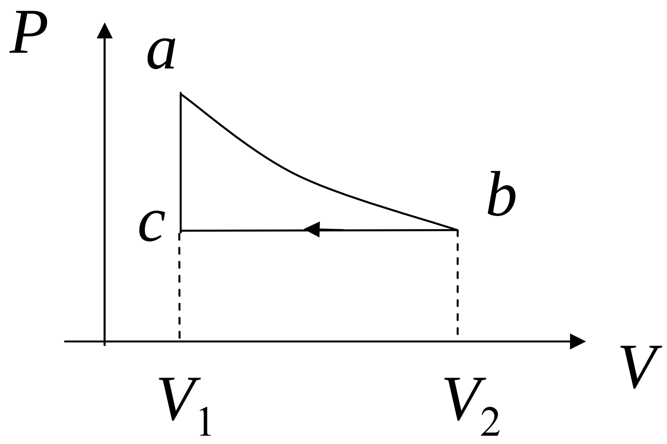
$$Q_2 = C_{\mathrm{V,m}} T_b (1 - \frac{T_c}{T_b}) = C_{\mathrm{V,m}} T_b (1 - \frac{V_1}{V_2})$$

$$|Q_3| = \nu C_{P,m} \Delta T = C_{P,m}\ (T_b - T_c) = C_{P,m} T_b (1 - \frac{T_c}{T_b})$$

$$|Q_3| = C_{P,m} T_b (1 - \frac{V_1}{V_2})$$

$$\eta = 1 - \frac{|Q_3|}{Q_1 + Q_2} = 1 - \frac{C_{P,m} T_b (1 - \frac{V_1}{V_2})}{R T_b \ln \frac{V_2}{V_1} + C_{V,m} T_b (1 - \frac{V_1}{V_2})}$$

$$= 1 - \frac{\frac{5R}{2}(1 - \frac{V_1}{V_2})}{R \ln \frac{V_2}{V_1} + \frac{3R}{2}(1 - \frac{V_1}{V_2})}$$



$$\eta = 1 - \frac{5(1 - \frac{V_1}{V_2})}{2 \ln \frac{V_2}{V_1} + 3(1 - \frac{V_1}{V_2})}$$

其它典型题

1. 2g氢气与2g氦气分别装在两个容积相同的封闭容器内，温度也相同。(氢气视为刚性双原子分子)。

求：(1)氢分子与氦分子的平均平动动能之比；(2)氢气与氦气压强之比；(3)氢气与氦气内能之比。

解：(1) $\bar{\varepsilon}_t = \frac{3}{2}kT \qquad \bar{\varepsilon}_{t\mathrm{H_2}} / \bar{\varepsilon}_{t\mathrm{He}} = 1$

(2) $p = \frac{2}{3} n \bar{\varepsilon}_t \qquad \nu_{\mathrm{H_2}} / \nu_{\mathrm{He}} = \frac{2\mathrm{g}}{2\mathrm{g/mol}} : \frac{2\mathrm{g}}{4\mathrm{g/mol}} = 2$

$$n_{\mathrm{H_2}} / n_{\mathrm{He}} = \frac{\nu_{\mathrm{H_2}}}{V} : \frac{\nu_{\mathrm{He}}}{V} = 2 \qquad p_{\mathrm{H_2}} / p_{\mathrm{He}} = 2$$

(3) $E = \frac{i}{2}\nu RT \qquad E_{\mathrm{H_2}} / E_{\mathrm{He}} = \frac{i_{\mathrm{H_2}}\nu_{\mathrm{H_2}}}{i_{\mathrm{He}}\nu_{\mathrm{He}}} = \frac{5}{3} \times 2 = \frac{10}{3}$

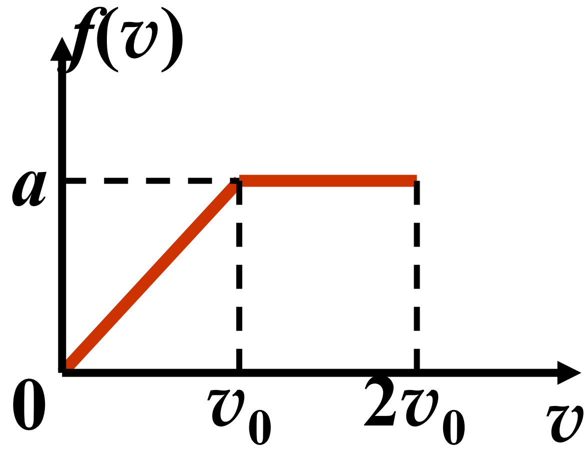
2. N个粒子，其速率分布函数为
$$\begin{cases} f(v)=\dfrac{a}{v_0}v & (0\le v<v_0) \\ f(v)=a & (v_0\le v\le 2v_0) \\ f(v)=0 & (2v_0<v<\infty) \end{cases}$$

(1)作速率分布曲线并求常数a；

(2)分别求速率大于v_0和小于v_0的粒子数；

(3)求粒子的平均速率。

解：(1) 速率分布曲线如右图所示：



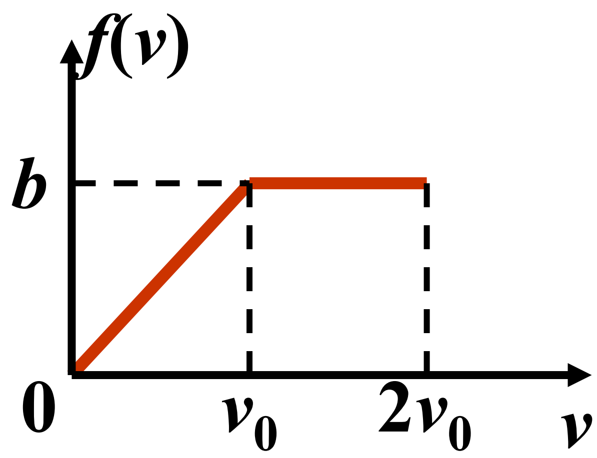
由归一化条件：
$$\int_0^\infty f(v)\cdot \mathrm{d}v=1$$

$$\int_0^{v_0} f(v)\cdot \mathrm{d}v+\int_{v_0}^{2v_0} f(v)\cdot \mathrm{d}v+\int_{2v_0}^{\infty} f(v)\cdot \mathrm{d}v=1$$

$$\int_0^{v_0}\frac{a}{v_0}v\cdot \mathrm{d}v+\int_{v_0}^{2v_0}a\cdot \mathrm{d}v+0=1 \qquad \frac{a}{v_0}\frac{v_0^2}{2}+a(2v_0-v_0)=1 \qquad a=\frac{2}{3v_0}$$

另法：由图可有面积 S $\quad S=\dfrac{1}{2}av_0+av_0=\dfrac{100}{100} \qquad a=\dfrac{2}{3v_0}$

(2) 大于 v_0 的粒子数：



$$N_1 = N\cdot\int_{v_0}^{2v_0} f(v)\cdot \mathrm{d}v = N\cdot\int_{v_0}^{2v_0} a\,\mathrm{d}v$$

$$= Nav_0 = N\cdot\frac{2}{3}\cdot\frac{v_0}{v_0} = \frac{2}{3}N$$

小于 v_0 的粒子数： $N - \frac{2}{3}N = \frac{1}{3}N$

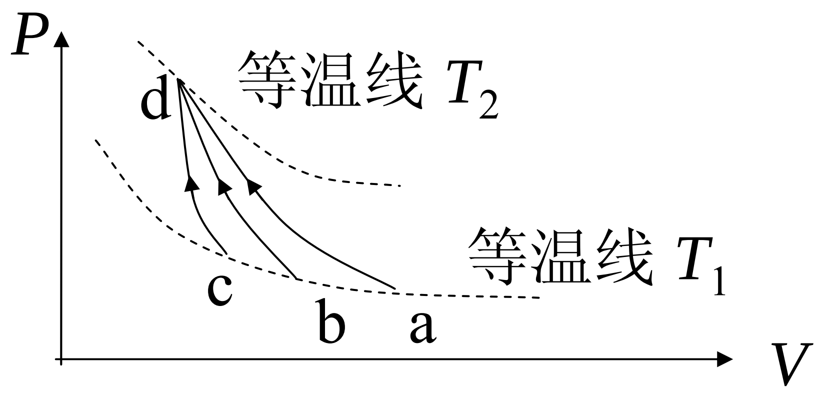
(3) 平均速率：$\overline{v} = \int_0^{\infty} v\cdot f(v)\cdot \mathrm{d}v$

$$\overline{v} = \int_0^{v_0} v\cdot f(v)\cdot \mathrm{d}v + \int_{v_0}^{2v_0} v\cdot f(v)\cdot \mathrm{d}v + 0$$

$$= \int_0^{v_0} v\frac{av}{v_0}\cdot \mathrm{d}v + \int_{v_0}^{2v_0} v\cdot a\cdot \mathrm{d}v = \frac{11}{9}v_0$$

3.理想气体经历如图所示过程，其中**bd**为绝热过程，分析各个过程热容量的符号。

解： $T_2 > T_1$



bd过程：绝热压缩

由热一律 $\Delta E_{bd} + W_{bd} = 0$

$\Delta E_{bd} = -W_{bd}$

$C_{bd} = 0$

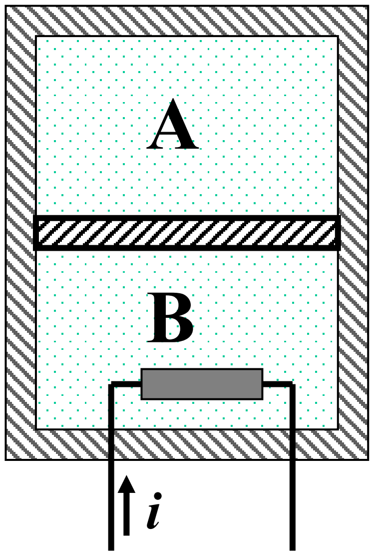
ad过程由热一律 $Q_{ad} = \Delta E_{ad} + W_{ad} = \Delta E_{bd} + W_{ad} = -W_{bd} + W_{ad}$

W_{bd}和 W_{ad}均为负值。$|W_{bd}| < |W_{ad}|$。

$Q_{ad} < 0 \qquad \Delta T > 0 \qquad C_{ad} < 0$

同理： $C_{cd} > 0$

4.如图，总体积为40L的绝热容器，中间用一隔热板隔开，隔板重量忽略，可以无摩擦的自由升降。A、B两部分各装有1mol的氮气，它们最初的压强是1.013×10^{3}Pa，隔板停在中间，现在使微小电流通过B中的电阻而缓缓加热，直到A部分气体体积缩小到一半为止，求在这一过程中：(1)B中气体的过程方程，以其体积和温度的关系表示；(2)两部分气体各自的最后温度；(3)B中气体吸收的热量？



解：（1）$p_A V_A^{\gamma} = \mathrm{C} = p_{A1} V_{A1}^{\gamma} = 1.013\times10^{5}\times0.02^{1.4} = 4.2\times10^{2}$

活塞上升过程中， $p_A = p_B$， $\mathrm{V_A = V - V_B = 0.04 - V_B}$

B 中气体的过程方程为：$p_B(0.04-V_B)^{\gamma} = 4.2\times10^{2}$

$$p_B = \frac{RT_B}{V_B} \qquad T_B(0.04-V_B)^{\gamma} = 51V_B$$

（2） $$T_{A2}=T_{A1}\left(\frac{V_{A1}}{V_{A2}}\right)^{\gamma-1}=\frac{p_{A1}V_{A1}}{R}\left(\frac{V_{A1}}{V_{A2}}\right)^{\gamma-1}=322\mathrm{K}$$

$$T_{B2}=\frac{51V_{B2}}{(0.04-V_{B2})^{\gamma}}=965\mathrm{K}$$

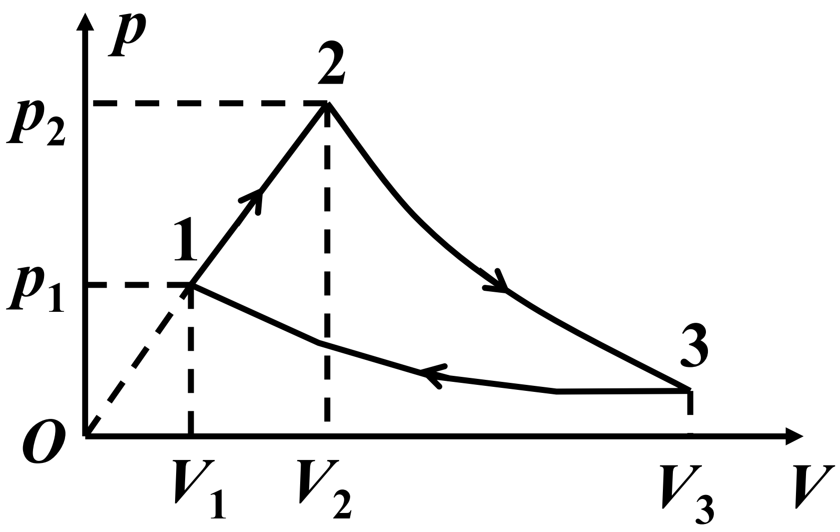
（3） $$Q_B=\Delta E_B+A_B=\frac{i}{2}R\left(T_{B2}-T_{B1}\right)+\int_{V_{B1}}^{V_{B2}}p_B dV_B$$

$$=\frac{i}{2}R\left(T_{B2}-\frac{p_{B1}V_{B1}}{R}\right)+\int_{V_{B1}}^{V_{B2}}\frac{4.2\times10^{2}}{(0.04-V_{B2})^{\gamma}}\mathrm{d}V_B$$

$$=1.66\times10^{4}\mathrm{J}$$

5. 1mol双原子分子理想气体作如图的可逆循环过程，其中1—2为直线，2—3为绝热线，3—1为等温线。已知 $T_2 = 2T_1$, $V_3 = 8V_1$。试求：(1)各过程的功，内能增量和传递的热量(用 T_1和已知常数表示)；(2)此循环的效率 η。

解：(1) 1—2任意过程



$$\Delta E_1 = C_V(T_2 - T_1)$$

$$= C_V(2T_1 - T_1) = \frac{5}{2}RT_1$$

$$A_1 = \frac{1}{2}(p_2V_2 - p_1V_1)$$

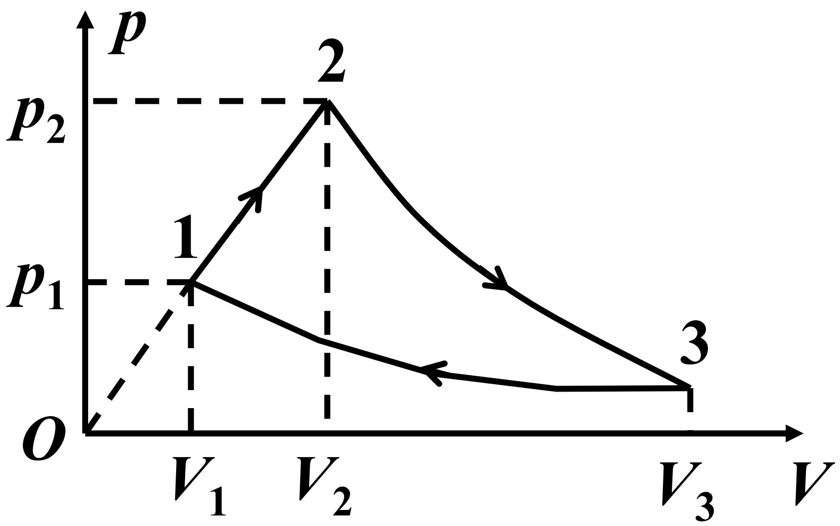
$$= \frac{1}{2}RT_2 - \frac{1}{2}RT_1 = \frac{1}{2}RT_1$$

$$Q_1 = \Delta E_1 + A_1 = \frac{5}{2}RT_1 + \frac{1}{2}RT_1 = 3RT_1$$

2—3绝热膨胀过程

$$\Delta E_2 = C_V(T_3 - T_2)$$

$$= C_V(T_1 - T_2) = -\frac{5}{2}RT_1$$



$$A_2 = -\Delta E_2 = \frac{5}{2}RT_1$$

$$Q_2 = 0$$

3—1等温压缩过程 $\Delta E_3 = 0$

$$A_3 = -RT_1\ln(V_3/V_1) = -RT_1\ln(8V_1/V_1) = -2.08RT_1$$

$$Q_3 = A_3 = -2.08RT_1$$

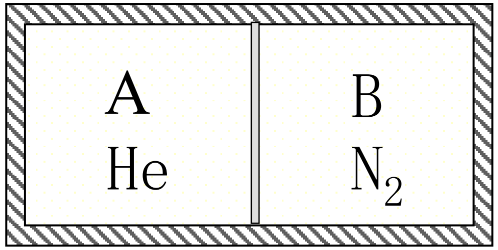
(2) $\eta = 1 - |Q_3|/Q_1 = 1 - 2.08RT_1/(3RT_1) = 30.7\%$

6.如图所示，在绝热刚性容器中有一可无摩擦移动且不漏气的极薄导热隔板，将容器分为A、B两部分。A、B中分别有1mol的氦气和1 mol的氮气，它们可被视为刚性分子理想气体。已知初态氦气和氮气的温度分别为T_A=300K、T_B=400K，压强均为1atm。忽略导热板的质量并不计其体积的变化，求：

(1)整个系统达到平衡时两种气体的温度。

(2)整个系统达到平衡时两种气体的压强。

(3)氮气末态与初态的熵差。



解：(1) 将氦气和氮气作为一个系统，

因为容器是绝热刚性的，所以系统进行的过程与外界没有热交换，系统对外不作功。由热力学第一定律可知，系统的总内能始终不变，即

$$C_{V,mA}\left(T-T_A\right)+C_{V,mB}\left(T-T_B\right)=0$$

$$C_{V,mA}\left(T-T_A\right)+C_{V,mB}\left(T-T_B\right)=0$$

$$T=\frac{C_{V,mA}T_A+C_{V,mB}T_B}{C_{V,mA}+C_{V,mB}}=\frac{\frac{3}{2}RT_A+\frac{5}{2}RT_B}{\frac{3}{2}R+\frac{5}{2}R}=362.5\ K$$

（2）设A、B两部分初态的体积为V_A、 V_B，末态的体积为V'_A、 V'_B，则有

$$V_A+V_B=V_A'+V_B'$$

$$\frac{RT_A}{p_A}+\frac{RT_B}{p_B}=2\frac{RT}{p}$$

$$p=\frac{2T}{T_A+T_B}p_A=1.04\,\mathrm{atm}$$

(3) 由理想气体的克劳修斯熵变公式

$$\Delta S=C_{pB}\ln\frac{T}{T_B}+R\ln\frac{p_B}{p}=\frac{7}{2}\times 8.31\times\ln\frac{362.5}{400}+8.31\times\ln\frac{1}{1.04}=-3.19\,\mathrm{J/K}$$

7. 1 kg 0 ºC 的冰与恒温热库（$t = 20$ ºC ）接触， 求冰全部溶化成水的熵变？(熔解热λ=334J/g)

思路：

- 为不等温热传导过程，不可逆。
- 设想冰与 0°C 恒温热源接触可逆地吸热

解：冰等温融化成水的熵变：

$$\Delta S_{溶化} = \int \frac{đQ}{T} = \frac{Q}{T} = \frac{m\lambda}{273.15+t} = \frac{10^3 \times 334}{273.15} = 1.22\times10^3 \mathrm{J/K}$$

另求：此不等温热传导过程的总熵变

$t = 20$ ºC 的恒温热库发生的熵变：

$$\Delta S_{热库} = \int \frac{đQ}{T} = \frac{Q}{T} = \frac{-m\lambda}{273.15+t} = \frac{-10^3 \times 334}{293.15} = -1.14\times10^3 J/K$$

总熵变 $\Delta S_{总} = \Delta S_{溶化} + \Delta S_{热库} = 80 J/K$ 符合热二律。