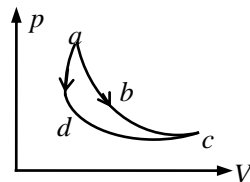


第七章 热力学第一定律

一 选择题

1. 图为质量一定的某理想气体由初态 a 经两过程到达末状态 c , 其中 abc 为等温过程, 则 ()

- A. adc 也是一个等温过程
- B. adc 和 abc 过程吸收的热量相等
- C. adc 过程和 abc 过程做功相同
- D. abc 过程和 adc 过程气体内能变化相同



选择题 1 图

解: 热量和功均是过程量, 内能是状态量。

故答案选 D。

2. 有两个相同的容器, 容积不变, 一个盛有氦气, 另一个盛有氢气, (看成刚性分子), 它们的压强和温度都相等, 现将 5J 的热量传给氢气, 使氢气的温度升高, 如果使氦气也升高同样的温度, 则应向氦气传递热量是 ()

- A. 6J
- B. 5J
- C. 3J
- D. 2J

解: 氦气是单原子分子, 自由度为 3, 氢气是双原子分子, 自由度为 5。根据理想气体的状态方程, 两种气体的摩尔数相同。容器容积不变, 气体吸收的热量全部转化为内能。再根据理想气体的内能公式, 使氦气也升高同样的温度, 应向氦气传递热量是 3J。

答案选 C。

3. 1mol 的单原子分子理想气体从状态 A 变为状态 B, 如果不知是什么气体, 变化过程也不知道, 但 A、B 两态的压强、体积和温度都知道, 则可求出 ()

- A. 气体所作的功
- B. 气体内能的变化
- C. 气体传给外界的热量
- D. 气体的质量

解 答案: B

4. 已知系统从状态 A 经某一过程到达状态 B, 过程吸热 10J, 系统内能增量为 5J。现系统沿原过程从状态 B 返回状态 A, 则系统对外作功是 ()

- A. -15J
- B. -5J
- C. 5J
- D. 15J

解 热力学第一定律的表达式 $Q = \Delta U + W$, 系统从 A 态经某一过程到达 B 态时系统做的功为 $W = Q - \Delta U = 10 - 5 = 5 \text{ J}$ 。因此当系统沿原过程从 B 态返回 A 态时, 系统对外做功为 -5J。

因此答案选 B。

5. 用公式 $\Delta U = \nu C_{V,m} \Delta T$ 计算理想气体内能增量时(式中 $C_{V,m}$ 视为常量), 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

解 答案选 D

6. 对于室温下的双原子分子理想气体, 在等压膨胀的情况下, 系统对外所作的功与从外界吸收的热量之比 W/Q 等于 ()

A. $2/3$

B. $1/2$

C. $2/5$

D. $2/7$

解 答案选 D

7. 理想气体初态的体积为 V_1 , 经等压过程使体积膨胀到 V_2 , 则在此过程中, 气体对外界作 ()

A. 正功, 气体的内能增加

B. 正功, 气体的内能减少

C. 负功, 气体的内能增加

D. 负功, 气体的内能减少

解 等压膨胀过程系统对外作正功, 由于压强不变体积增加, 所以温度升高, 因此气体的内能增加。

因此答案选 A。

8. 理想气体内能不变的过程是 ()

A. 绝热过程和等温过程

B. 循环过程和等体过程

C. 等温过程和循环过程

D. 等体过程和绝热过程

解 对于一定的理想气体, 其内能仅取决于状态的温度, 如果一个热力学过程的初末态温度没有变化, 则内能也不变化。

因此答案选 C。

9. 一定量的某种理想气体起始温度为 T , 体积为 V , 该气体在下面循环过程中经过下列三个平衡过程: (1) 绝热膨胀到体积为 $2V$; (2) 等体变化使温度恢复为 T ; (3) 等温压缩到原来体积 V , 则此整个循环过程中, 气体 ()

A. 向外界放热

B. 对外界作正功

C. 内能增加

D. 内能减少

解: 画出 p - V 图, 这个循环是逆循环。在逆循环过程中, 内能不变, 外界对系统做功, 因此系统向外界放热。

故答案选 A。

10. 用下列两种方法: (1) 使高温热源的温度 T_1 升高 ΔT ; (2) 使低温热源的温度 T_2 降低同样的 ΔT 值, 分别可使卡诺循环的效率升高 $\Delta\eta_1$ 和 $\Delta\eta_2$ 。两者相比 ()

A. $\Delta\eta_1 > \Delta\eta_2$

B. $\Delta\eta_2 > \Delta\eta_1$

C. $\Delta\eta_1 = \Delta\eta_2$

D. 无法确定哪个大

解: $\Delta\eta_2 - \Delta\eta_1 = \left[\left(1 - \frac{T_2 - \Delta T}{T_1} \right) - \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) \right] - \left[\left(1 - \frac{T_2}{T_1 + \Delta T} \right) - \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) \right]$

$$\approx \frac{(T_1 - T_2)\Delta T}{T_1(T_1 + \Delta T)} > 0$$

故答案选 B。

11. 在绝热良好的房间内有一台工作着的电冰箱。若冰箱门一直敞开着, 待一定时间后, 房间的温度将 ()

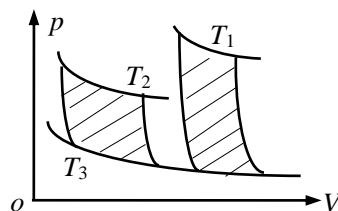
- A. 降低 B. 升高 C. 不变 D. 无法确定

解：电冰箱工作时是逆循环，它向环境放出的热量大于从冰箱中吸收的热量。

故答案选 B。

12. 两个卡诺热机的循环曲线如图所示，一个工作在温度为 T_1 与 T_3 的两个热源之间，另一个工作在温度为 T_2 与 T_3 的两个热源之间，已知这两个循环曲线所包围的面积相等，由此可知：（ ）

- A. 两个热机的效率一定相等
B. 两个热机从高温热源所吸收的热量一定相等
C. 两个热机向低温热源所放出的热量一定相等
D. 两个热机吸收的热量与放出的热量的差值一定相等



选择题 12 图

解：循环曲线所包围的面积表示工作物质在整个循环过程中对外做的净功，而循环过程的内能不变，因此工作物质吸收的净热量相等。

故答案选 D。

二 填空题

1. 从任何一个中间状态是否可近似看成平衡态，可将热力学过程分为_____过程和_____过程，只有_____过程才可以用 pV 图上的一条曲线表示。

解：准静态，非准静态；准静态

2. 在热力学中，系统做功是通过_____来完成的；系统与外界之间传递热量是通过_____来完成的。

解：物体的宏观位移；分子之间的相互碰撞

3. 一气缸内贮有 10 mol 的单原子分子理想气体，在压缩过程中外界做功 209 J ，气体升温 1 K ，此过程中气体内能增量为 _____，外界传给气体的热量为_____。

解： 124.7 J ， -84.3 J

4. 理想气体状态变化满足 $p dV = \nu R dT$ 为_____过程，满足 $V dp = \nu R dT$ 为_____过程；满足 $p dV + V dp = 0$ 为_____过程。

解：等压；等体；等温。

5. 一定量的某种理想气体在等压过程中对外做功 200 J 。若此种气体为单原子分子气体，则该过程中需吸热_____J；若为双原子分子气体，则需吸热 _____J。

解：单原子分子气体

$$Q_p = \nu C_{p,m} \Delta T = \nu \frac{5R}{2} \Delta T = \frac{5}{2} \nu R \Delta T = \frac{5}{2} p \Delta V = \frac{5}{2} \times 200 = 500 \text{ J}$$

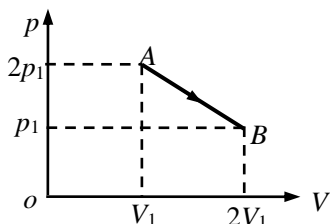
双原子分子气体

$$Q_p = \nu C_{p,m} \Delta T = \nu \frac{7R}{2} \Delta T = \frac{7}{2} \nu R \Delta T = \frac{7}{2} p \Delta V = \frac{7}{2} \times 200 = 700 \text{ J}$$

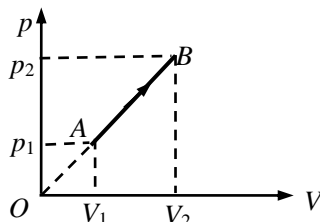
6. 如图所示，一定量理想气体从 A 状态 ($2p_1$ 、 V_1) 经历如题图所示的直线过程变到 B 状态 (p_1 、 $2V_2$)，则 AB 过程中系统做功 $W =$ _____；内能增加 $\Delta U =$ _____。

解: AB 过程中系统做功等于 AB 下的面积, 即 $W = \frac{3}{2} p_1 V_1$ 。

从理想气体状态方程可知, B 状态的温度和 A 状态的温度相同, 故内能不变, 即 $\Delta U = 0$ 。



填空题 6 图



填空题 7 图

7. 如图所示, 1 mol 的单原子理想气体, 从状态 $A(p_1, V_1)$ 变化至状态 $B(p_2, V_2)$, 如图所示, 则此过程气体对外作的功为_____, 吸收的热量为_____。

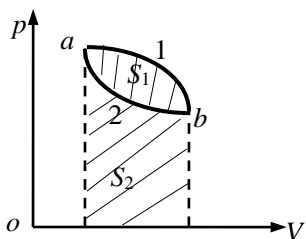
解: $W = \frac{1}{2}(p_1 + p_2)(V_2 - V_1)$, $Q = \frac{1}{2}(p_1 + p_2)(V_2 - V_1) + \frac{3}{2}(p_2 V_2 - p_1 V_1)$

8. 如图所示, 已知图中两部分的面积分别为 S_1 和 S_2 , 那么

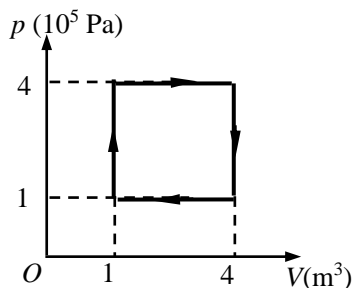
(1) 如果气体膨胀过程为 $a \rightarrow 1 \rightarrow b$, 则气体对外做功 $W =$ _____;

(2) 如果气体进行 $a \rightarrow 2 \rightarrow b \rightarrow 1 \rightarrow a$ 的循环过程, 则它对外作 $W =$ _____。

解: $S_1 + S_2$; $-S_1$ 。



填空题 8 图



填空题 9 图

9. 气体经历如图所示的一个循环过程, 在这个循环中, 外界传给气体的净热量是_____(J)。

解 循环过程热力学能不变, 外界传给气体的净热量就是循环过程对外做的功。本题中这个功等于循环曲线 (正方形) 包围的面积, 不难计算得到

$$W = (4 - 1) \times 10^5 \times (4 - 1) = 9 \times 10^5 \text{ J}$$

10. 有一卡诺热机, 用 29kg 空气为工作物质, 工作在 27°C 的高温热源与 -73°C 的低温热源之间, 此热机的效率 $\eta =$ _____。若在等温膨胀的过程中气体体积增大 2.71 倍, 则此热机每一次循环所做的功为_____。(设空气的摩尔质量为 $29 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$)

解：热机效率

$$\eta = (T_1 - T_2) / T_1 = 33.3\%$$

每一次循环所做的功

$$W = Q_1 - Q_2 = \nu RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} - \nu RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}$$

根据 $\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4} = 2.71$ ，故

$$|W| = \nu R(T_1 - T_2) \ln 2.71 = \frac{29}{29 \times 10^{-3}} \times 8.31 \times 100 \times \ln 2.71 = 8.31 \times 10^5 \text{ J}$$

11. 有一卡诺致冷机，其低温热源温度为 $T_2=200\text{K}$ ，高温热源温度为 $T_1=350\text{K}$ ，每一循环，从低温热源吸热 $Q_2=400\text{J}$ ，则该致冷机的致冷系数 $\omega=$ _____。每一循环中外界必须做功 $W=$ _____。

解： $\omega = T_2 / (T_1 - T_2) = 4/3$ ； $W = \frac{Q_2}{\omega} = \frac{400}{4/3} = 300\text{J}$

三 计算题

1. 设有 1mol 的氧气，体积 $V_1=4.92 \times 10^{-3}\text{m}^3$ ，压强 $p_1=2.026 \times 10^5\text{Pa}$ ，今使它等温膨胀，使压强降低到 $p_2=1.013 \times 10^5\text{Pa}$ ，试求此过程中氧气所作的功，吸收的热量以及内能的变化。（ $\ln 2=0.693$ ）。

解 等温过程氧气所做的功 $W_T = \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \nu RT \ln \frac{p_1}{p_2}$ ，再利用物态方程 $p_1 V_1 = \nu RT$ ，得到

$$W_T = \nu RT \ln \frac{p_1}{p_2} = p_1 V_1 \ln \frac{p_1}{p_2} = 2.026 \times 10^5 \times 4.92 \times 10^{-3} \times \ln 2 = 690.8 \text{ J}$$

等温过程系统的内能不发生变化，即 $\Delta U=0$ 。

根据热力学第一定律，等温过程中系统吸收的热量等于系统对外作的功，即

$$Q_T = 690.8 \text{ J}$$

2. 已知某单原子分子理想气体作等压加热，体积膨胀为原来的两倍，试证明气体对外所作的功为其吸收热量的 40%。

解：设该理想气体体积为 V ，摩尔数为 ν ，由物态方程 $pV = \nu RT$ ，得

$$\nu \Delta T = \frac{p \times 2V - pV}{R} = \frac{pV}{R}$$

对外做功为： $W = \int_V^{2V} p dV = pV$

吸收热量： $Q_p = \nu C_{p,m} \Delta T = C_{p,m} \frac{(p \cdot 2V - pV)}{R} = C_{p,m} \cdot \frac{pV}{R}$

$$\frac{W}{Q_p} = \frac{pV \cdot R}{C_{p,m} pV} = \frac{R}{C_{p,m}} = \frac{R}{\frac{5}{2}R} = \frac{2}{5} = 40\%$$

3. 压强为 1atm, 体积为 100cm³ 的氮气压缩到 20cm³ 时, 气体内能的增量、吸收的热量和所做的功各是多少? 假定经历的是下列两种过程: (1) 等温压缩; (2) 先等压压缩, 然后再等体升压到同样状态。(1atm=1.01325×10⁵Pa)

解: 两种过程如下图所示。

(1) 视气体为理想气体, 当气体由初态 I 等温压缩到终态 III 时, 据热力学第一定律, 其内能不变。即

$$U_3 - U_1 = 0$$

故系统吸收的热量和系统对外界所做的功相等, 为

$$\begin{aligned} Q = W &= \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1} = p_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} \\ &= 1.013 \times 10^5 \times 100 \times 10^{-6} \ln(20 \times 10^{-6} / 100 \times 10^{-6}) = -16.3 \text{ J} \end{aligned}$$

负号表明外界向气体做正功而系统向外界放热。

(2) 对于过程 I → II → III, 由于 I、III 的温度相同, 故 I、III 两态内能相等, 即 $U_3 - U_1 = 0$ 。同样地, 系统吸收的热量和系统对外界所做的功相等。

因 II → III 是等体过程, 系统不做功, 因此第二个过程中外界对系统所做的功即为 I → II 等压过程中系统对外界所做的功

$$W = p(V_2 - V_1) = 1.013 \times 10^5 \times (20 \times 10^{-6} - 100 \times 10^{-6}) = -8.1 \text{ J}$$

第二个过程中系统吸收的热量

$$Q = W = -8.1 \text{ J}$$

4. 将 1 mol 的刚性分子理想气体等压加热, 使其温度升高 72K, 气体吸收的热量等于 1.60×10³ J。求: (1) 气体所作的功; (2) 该气体的比热容比。

解 (1) 利用理想气体的物态方程, 等压过程气体所作的功

$$W_p = p\Delta V = \nu R\Delta T = R\Delta T = 8.31 \times 72 = 598.3 \text{ J}$$

(2) 由题意, 可知摩尔定压热容为

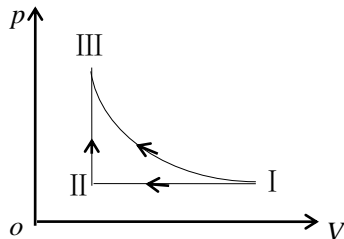
$$C_{p,m} = \frac{Q_p}{\Delta T} = \frac{1.60 \times 10^3}{72} = 22.22 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$$

根据迈耶公式 $C_{p,m} - C_{v,m} = R$, 得到气体的摩尔定容热容为

$$C_{v,m} = C_{p,m} - R = 22.22 - 8.31 = 13.91 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$$

因此该气体的比热容比为

$$\gamma = \frac{C_{p,m}}{C_{v,m}} = \frac{22.22}{13.91} = 1.60$$



5. 把氮气放在一个绝热的汽缸中进行液化。开始时，氮气的压强为 50 个标准大气压、温度为 300K；经急速膨胀后，其压强降至 1 个标准大气压，从而使氮气液化。试问此时氮的温度为多少？

解 氮气可视为理想气体，其液化过程为绝热过程。 $p_1 = 50 \times 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ ， $T_1 = 300 \text{ K}$ ， $p_2 = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。氮气为双原子气体， $\gamma = 7/5 = 1.4$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} = 98.0 \text{ K}$$

6. 5mol 的氦气（视为理想气体），温度由 290K 升为 300K。若在升温过程中不与外界交换热量，试分别求出气体内能的改变、吸收的热量和气体所作的功。

解 气体内能的改变仅与始末态的温度有关而与过程无关，氦气是单原子分子， $C_{V,m} = \frac{3}{2}R$ ，因此

$$\Delta U = \nu C_{V,m} (T_2 - T_1) = 5 \times \frac{3}{2} \times 8.31 \times (300 - 290) = 623.25 \text{ J}$$

气体不与外界交换热量，因此是绝热过程，因此吸收的热量

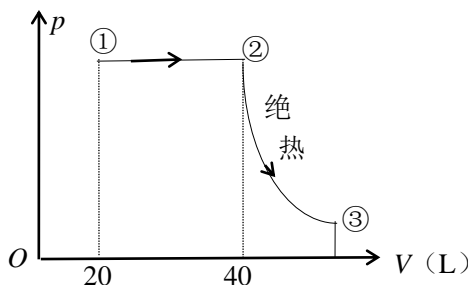
$$Q = 0$$

根据热力学第一定律，绝热过程中气体所作的功

$$W = -\Delta U = -623.25 \text{ J}$$

负号表示外界对气体作了正功。

7. 已知 2.0 mol 的氦，起始的温度是 27℃，体积是 20 L。此氦先等压膨胀至体积为原体积的 2 倍，然后作绝热膨胀使其温度仍恢复到起始温度。(1) 在 p - V 图上画出过程的曲线；(2) 在这过程中共吸热多少？(3) 氦的内能总改变多少？(4) 氦所作的总功为多少？(5) 最后的体积为多少？（氦可看作为理想气体）。



解：(1) 曲线如下图所示。

(2) 系统吸热为两个过程中吸热之和，而绝热过程无热量交换，故总热量即为等压膨胀过程中吸收的热量：

$$\begin{aligned} Q &= \nu C_{p,m} (T_2 - T_1) = \nu C_{p,m} \left(\frac{V_2}{V_1} T_1 - T_2 \right) \\ &= 2.0 \times \frac{5}{2} \times 8.31 \times \left(\frac{40}{20} - 1 \right) (273 + 27) = 12465 \text{ 焦耳} \end{aligned}$$

(3) 氦的最后温度与起始温度相同，作为理想气体，内能不变。

(4) 因内能不变，系统吸收的热量全部用来对外作功。氦所作的总功 $W = Q - \Delta U = Q = 12465 \text{ 焦耳}$

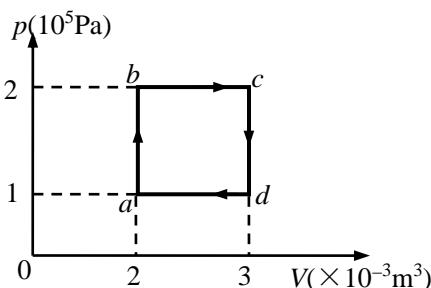
(5) 最后体积为 V_3 ，根据绝热过程方程

$$V_3 = V_2 \left(\frac{T_2}{T_3} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} = 40 \left(\frac{\frac{40}{20} \times 300}{300} \right)^{\frac{1}{\frac{5}{2}-1}} = 40 \times 2^{3/2} = 1.1 \times 10^2 \text{ L}$$

8. 如图所示, $abcda$ 为 1 mol 单原子分子理想气体的循环过程, 求: (1) 气体循环一次, 在吸热过程中从外界共吸收的热量; (2) 气体循环一次对外作的净功; (3) 证明 $T_a T_c = T_b T_d$ 。

解: (1) 过程 ab 与 bc 为吸热过程, 吸热总和为

$$\begin{aligned} Q_1 &= C_{V,m}(T_b - T_a) + C_{p,m}(T_c - T_b) \\ &= \frac{3}{2}(p_b V_b - p_a V_a) + \frac{5}{2}(p_c V_c - p_b V_b) = 800 \text{ J} \end{aligned}$$



计算题 8 图

(2) 循环过程对外所做总功为图中矩形面积

$$W = p_b(V_c - V_b) - p_d(V_d - V_a) = 100 \text{ J}$$

(3) $T_a = p_a V_a / R$, $T_b = p_b V_b / R$, $T_c = p_c V_c / R$, $T_d = p_d V_d / R$

$$T_a T_c = p_a V_a p_c V_c / R^2 = 12 \times 10^4 / R^2$$

$$T_b T_d = p_b V_b p_d V_d / R^2 = 12 \times 10^4 / R^2$$

所以有

$$T_a T_c = T_b T_d$$

9. 1 mol 理想气体在 $T_1=400\text{K}$ 的高温热源与 $T_2=300\text{K}$ 的低温热源之间作卡诺循环。在 400K 的等温线上起始体积为 $V_1=0.001\text{m}^3$, 终止体积为 $V_2=0.005\text{m}^3$, 试求此气体在每一循环中: (1) 从高温热源吸收的热量 Q_1 ; (2) 气体所做的净功 W ; (3) 气体传给低温热源的热量 Q_2 。

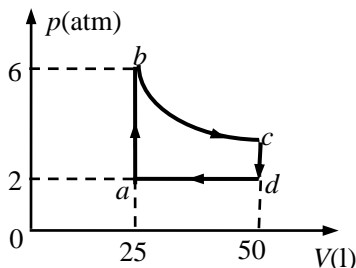
解: (1) $Q_1 = RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = 5.35 \times 10^3 \text{ J}$

(2) $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 0.25$

$$W = \eta Q_1 = 1.34 \times 10^3 \text{ J}$$

(3) $Q_2 = Q_1 - W = 4.01 \times 10^3 \text{ J}$

10. 气缸贮有 36g 水蒸汽 (视为理想气体), 经 $abcda$ 循环过程如图所示, 其中 $a \rightarrow b$, $c \rightarrow d$ 为等体过



计算题 10 图

程, $b \rightarrow c$ 为等温过程, $d \rightarrow a$ 为等压过程, 试求: (1) W_{da} ; (2) ΔU_{ab} ; (3) 循环过程水蒸汽所作的净功 W ; (4) 循环效率 η 。

解: 水的质量 $m=36 \times 10^{-3} \text{ kg}$, 水的摩尔质量 $M=18 \times 10^{-3} \text{ kg}$, 故摩尔数 $\nu=m/M=2 \text{ mol}$ 。水是刚性多原子分子, 自由度 $i=6$ 。

$$(1) \quad W_{da} = p_a (V_a - V_d) = -0.0507 \times 10^5 \text{ J}$$

$$(2) \quad \Delta U_{ab} = \nu (i/2) R (T_b - T_a) = (i/2) V_a (p_b - p_a) = 3.039 \times 10^4 \text{ J}$$

$$(3) \quad T_b = p_b V_a / (\nu R) = 914.3 \text{ K}$$

$$W_{bc} = \nu R T_b \ln (V_c / V_b) = 1.053 \times 10^4 \text{ J}$$

$$\text{净功} \quad W = W_{bc} + W_{da} = 5.47 \times 10^3 \text{ J}$$

$$(4) \text{ 循环过程吸收的热 } Q_1 = Q_{ab} + Q_{bc} = \Delta U_{ab} + W_{bc} = 4.09 \times 10^4 \text{ J}, \text{ 循环效率}$$

$$\eta = W/Q_1 = 13.4\%$$

11. 1 mol 单原子分子理想气体的循环过程如 T - V 图所示, 其中 c 点的温度为 $T_c=600 \text{ K}$ 。试求: (1) ab 、 bc 、 ca 各个过程系统吸收的热量; (2) 经一循环系统所作的净功; (3) 循环的效率。

解 (1) 单原子分子的自由度 $i=3$

由图可知, ab 是等压过程, 因此

$$V_a/T_a = V_b/T_b, T_a = T_c = 600 \text{ K}$$

$$\text{可求得 } T_b = (V_b/V_a) T_a = 300 \text{ K}$$

$$Q_{ab} = C_{p,m} (T_b - T_a) = \frac{i+2}{2} R (T_b - T_a) = -6232.5 \text{ J}$$

bc 是等体过程, 因此

$$Q_{bc} = C_{v,m} (T_c - T_b) = \frac{i}{2} R (T_c - T_b) = 3739.5 \text{ J}$$

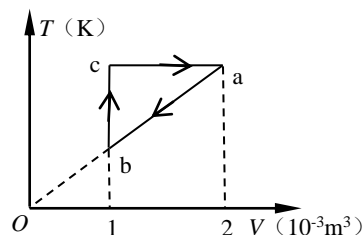
ca 是等温过程, 因此

$$Q_{ca} = RT_c \ln (V_a/V_c) = 3456 \text{ J}$$

$$(2) \quad W = Q_{ab} + Q_{bc} + Q_{ca} = -6231.5 + 3739.5 + 3456 = 963 \text{ J}$$

(3) 根据循环效率的公式

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{W}{Q_{bc} + Q_{ca}} = \frac{963}{3739.5 + 3456} = 13.4\%$$



计算题 11 图