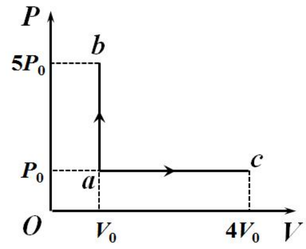
大学物理（王少杰教材）第 1 套阶段训练题答案
热学（9-10 章）

一、填空题（共 30 分）

1.（本题 3 分）如题 1 图所示，一定量的理想气体从同一初态 $a(P_0, V_0)$开始，分别经历定体过程 $a\to b$ 和定压过程 $a\to c$，b 点的压强为 $5P_0$，c 点的体积为 $4V_0$，若两个过程中系统吸收热量相同，则摩尔热容比γ等于________。



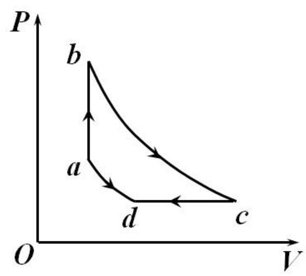
题 1 图

参考答案：4/3

2.（本题 3 分）0.1 kg 氯气（可视为理想气体）在等压膨胀情况下，系统对外做功与从外界吸收热量的比值为____________。

参考答案：2/7

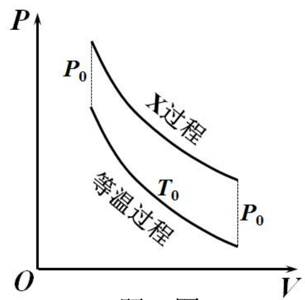
3.（本题 3 分）理想气体经历如题 3 图所示的循环过程，$a\to b$ 为等体过程，$b\to c$ 和 $d\to a$ 为绝热过程，$c\to d$ 为等压过程，已知各点的温度为 T_a、T_b、T_c、T_d，摩尔热容比为γ，则此循环的效率η为__________。



题 3 图

参考答案：$1-\gamma\dfrac{T_c-T_d}{T_b-T_a}$

4.（本题 3 分）如题 4 图所示，物质的量为ν的理想气体进行了一次 X 过程，在 P-V 图上将 X 过程向下平移 P_0 后，恰好与温度为 T_0 的等温曲线重合，则 X 过程中 V 与 T 的关系为__________。



题 4 图

参考答案：$V=\dfrac{\nu R}{P_0}\left(T-T_0\right)$

5.（本题 6 分）分子有效直径为 0.23 nm 的某种气体，在温度为 25 ℃、压强为 1.013×10^5 Pa 时，其分子热运动的平均自由程为______________，一个分子在 3.5 m 的路程上与其它分子碰撞次数为____________。

参考答案：173 nm；2×10^7

6.（本题 3 分）一容器内储有三种理想气体，处于平衡态，a 种气体的分子数密度为 n_1，产生的压强为 P_0，b 种和 c 种气体的分子数密度分别为 $3n_1$ 和 $5n_1$，则混合气体的压强为____________。

参考答案：$9P_0$

7.（本题 3 分）有一刚性绝热容器被隔板分为两部分，其中 1/4 充有 1 mol 理想气体，另外的 3/4 为真空。现将隔板抽去，使气体自由膨胀到整个容器中，则该气体的熵变为___________。

参考答案：$R\ln 4$

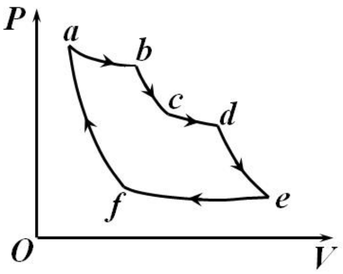
8.（本题 6 分）质量均为 m、比热均为 c 的 7 个物体，其中 A 的温度为 T_0，其余物体的温度均为 $2T_0$。通过物体与物体相互接触中发生的热传导使物体 A 温度升高，假设接触过程与外界绝热，则物体 A 可达到的最高温度为____________，它的熵增量为___________。

参考答案：$\dfrac{127}{64}T_0 = 1.98T_0;\ln\left(\dfrac{127}{64}\right)mc = 0.685mc$

二、推导证明题（共 8 分）

9.（本题 8 分）题 9 图显示了克劳修斯循环过程，其中 $a\to b$、$c\to d$ 和 $e\to f$ 是等温过程，温度分别为 T_1、T_2 和 T_3，$b\to c$、$d\to e$ 和 $f\to a$ 是绝热过程。设系统是一定量的理想气体，在 $c\to d$ 过程吸收的热量和 $e\to f$ 过程中放出的热量相等，证明此循环的效率为

$$\eta = 1 - \frac{T_2T_3}{T_2T_3 + T_1\left(T_2 - T_3\right)}$$



题 9 图

证明：ab 为等温吸热膨胀过程，有

$$Q_{ab} = \nu RT_1 \ln\frac{V_b}{V_a} \qquad \text{（1 分）}$$

cd 为等温吸热膨胀过程，有

$$Q_{cd} = \nu RT_2 \ln\frac{V_d}{V_c} \qquad \text{（1 分）}$$

ef 为等温放热压缩过程，有

$$\left|Q_{ef}\right| = \nu RT_3 \ln\frac{V_e}{V_f} \qquad \text{（1 分）}$$

由绝热过程方程，有

$$T_1V_b^{\gamma-1} = T_2V_c^{\gamma-1}，\ T_2V_d^{\gamma-1} = T_3V_e^{\gamma-1}，\ T_3V_f^{\gamma-1} = T_1V_a^{\gamma-1}，$$

可得 $\dfrac{V_b}{V_a} = \dfrac{V_eV_c}{V_fV_d}$，（2 分）

由于 $Q_{cd} = \left|Q_{ef}\right|$，得到 $\dfrac{\ln\left(V_d/V_c\right)}{\ln\left(V_e/V_f\right)} = \dfrac{T_3}{T_2}$，（1 分）

循环的效率

$$\eta = 1 - \frac{|Q_{ef}|}{Q_{ab}+Q_{cd}} = 1 - \frac{\nu RT_3 \ln(V_e/V_f)}{\nu RT_1 \ln(V_b/V_a) + \nu RT_2 \ln(V_d/V_c)}$$

$$= 1 - \frac{T_3 \ln(V_e/V_f)}{T_1\left[\ln(V_e/V_f) - \ln(V_d/V_c)\right] + T_2 \ln(V_d/V_c)}$$

$$= 1 - \frac{T_3(T_2/T_3)}{T_1(T_2/T_3 - 1) + T_2} = 1 - \frac{T_2T_3}{T_2T_3 + T_1(T_2 - T_3)} \qquad \text{（2 分）}$$

三、计算题（共 56 分）

10.（本题 6 分）某容器内有 3 L 的氮气（可视为理想气体），其内能为 978 J。(1) 求气体的压强；(2) 设分子总数为 4.6×10^{22}，求分子的平均平动动能及气体的温度。

解：(1) 设分子数为 N，由 $E = N\cdot\frac{5}{2}kT$ 和 $P = \frac{N}{V}kT$ 得

$$P = \frac{2E}{5V} = \frac{2\times978}{5\times3\times10^{-3}} = 1.304\times10^{5}(\text{Pa}) \qquad \text{（2 分）}$$

(2) 由 $\frac{\bar{\varepsilon}_k}{E} = \frac{\frac{3}{2}kT}{N\cdot\frac{5}{2}kT}$ 得分子的平均平动动能：

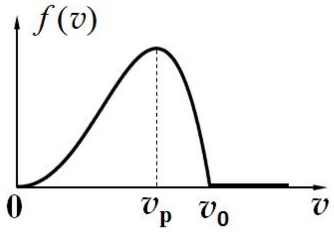
$$\bar{\varepsilon}_k = \frac{3E}{5N} = \frac{3\times978}{5\times4.6\times10^{22}} = 1.276\times10^{-20}(\text{J}) \qquad \text{（2 分）}$$

由 $E = N\cdot\frac{5}{2}kT$ 得气体的温度：

$$T = \frac{2E}{5Nk} = \frac{2\times978}{5\times4.6\times10^{22}\times1.38\times10^{-23}} = 616.3(\text{K}) \qquad \text{（2 分）}$$

11.（本题 10 分）如题 11 图所示，设某种气体分子的速率分布函数为：

$$f(v) = \begin{cases} a\left(-2v^4 + v_0v^3 + v_0^2v^2\right) & (0 \le v \le v_0) \\ 0 & (v > v_0) \end{cases}$$



题 11 图

求：(1) 常量 a 与 v_0 的关系；(2) 分子的最概然速率 v_p；(3) $0\sim v_0$ 区间内分子的平均速率；(4) $0\sim v_p$ 区间内分子的平均速率；(5) $0\sim v_p$ 区间内的分子占总分子数的百分比。

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

$$\int_0^\infty f(v)\mathrm{d}v = \int_0^{v_0} a\left(-2v^4 + v_0 v^3 + v_0^2 v^2\right)\mathrm{d}v = \frac{11}{60}av_0^5 = 1,$$

所以$a = \dfrac{60}{11v_0^5}$ （2 分）

(2) 由$\dfrac{\mathrm{d}f(v)}{\mathrm{d}v} = a\left(-8v^3 + 3v_0 v^2 + 2v_0^2 v\right) = av\left(-8v^2 + 3v_0 v + 2v_0^2\right) = 0$，

得到当$f(v)$取极大值时，对应分子的最概然速率

$$v_{\mathrm{p}} = \frac{3+\sqrt{73}}{16}v_0 = 0.72v_0$$ （2 分）

(3) 0~ v_0 区间内分子的平均速率

$$\overline{v} = \frac{\int_0^{v_0} vNf(v)\mathrm{d}v}{\int_0^{v_0} Nf(v)\mathrm{d}v} = \int_0^{v_0} vf(v)\mathrm{d}v$$

$$= \int_0^{v_0} va\left(-2v^4 + v_0 v^3 + v_0^2 v^2\right)\mathrm{d}v = a\frac{7}{60}v_0^6 = 0.64v_0$$ （2 分）

(4) 0~ v_{p} 区间内分子的平均速率

$$\overline{v}' = \frac{\int_0^{v_{\mathrm{p}}} Nvf(v)\mathrm{d}v}{\int_0^{v_{\mathrm{p}}} Nf(v)\mathrm{d}v} = \frac{\int_0^{v_{\mathrm{p}}} vf(v)\mathrm{d}v}{\int_0^{v_{\mathrm{p}}} f(v)\mathrm{d}v}$$

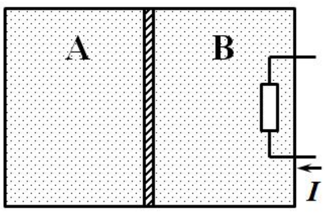
$$= \frac{\int_0^{v_{\mathrm{p}}} v\left(-2v^4 + v_0 v^3 + v_0^2 v^2\right)\mathrm{d}v}{\int_0^{v_{\mathrm{p}}} \left(-2v^4 + v_0 v^3 + v_0^2 v^2\right)\mathrm{d}v} = \frac{0.0594v_0^6}{0.114v_0^5} = 0.52v_0$$ （2 分）

(5) 0~v_{p} 区间内的分子占总分子数的百分比

$$\frac{\Delta N}{N} = \int_0^{v_{\mathrm{p}}} f(v)\mathrm{d}v = \int_0^{v_{\mathrm{p}}} a\left(-2v^4 + v_0 v^3 + v_0^2 v^2\right)\mathrm{d}v$$

$$= \frac{60}{11v_0^5} \times 0.114v_0^5 = 62.2\%$$ （2 分）

12.（本题 10 分） 如题 12 图所示，容积为 100 L 的绝热容器，中间用一绝热板隔开。绝热板可无摩擦自由滑动，A、B 两部分各装有 1 mol 氦气（可视为理想气体）。最初压强是 2×10^4 Pa，隔板停在中间，现通过 B 中电阻对其缓慢加热，直到 A 部分气体体积缩小到原来的一半为止。求：(1) B 中气体的过程方程；(2) 两部分气体的各自最后温度；(3) B 中气体吸收的热量。



题 12 图

解：(1) A 部分气体经历绝热过程，则

$$P_{\mathrm{A}}V_{\mathrm{A}}^{\gamma}=P_{\mathrm{A0}}V_{\mathrm{A0}}^{\gamma}=2\times10^{4}\times0.05^{5/3}=135.7$$

活塞滑动过程中，

$$P_{\mathrm{A}}=P_{\mathrm{B}};V_{\mathrm{A}}=V_{总}-V_{\mathrm{B}}=0.1-V_{\mathrm{B}}$$

代入上式，得 B 中气体的过程方程

$$P_{\mathrm{B}}\left(0.1-V_{\mathrm{B}}\right)^{5/3}=135.7$$ （2 分）

(2) A 中气体的最后温度：

$$T_{\mathrm{A}}=T_{\mathrm{A0}}\left(\frac{V_{\mathrm{A0}}}{V_{\mathrm{A}}}\right)^{\gamma-1}=\frac{P_{\mathrm{A0}}V_{\mathrm{A0}}}{R}\left(\frac{V_{\mathrm{A0}}}{V_{\mathrm{A}}}\right)^{2/3}=\frac{2\times10^{4}\times0.05}{8.31}\times\left(\frac{0.05}{0.025}\right)^{2/3}=191(\mathrm{K})$$ （2 分）

B 中气体的最后压强：

$$P_{\mathrm{B}}=\frac{135.7}{\left(0.1-V_{\mathrm{B}}\right)^{5/3}}=\frac{135.7}{\left(0.1-0.075\right)^{5/3}}=6.349\times10^{4}(\mathrm{Pa})$$ （1 分）

B 中气体的最后温度：

$$T_{\mathrm{B}}=\frac{P_{\mathrm{B}}V_{\mathrm{B}}}{R}=\frac{6.349\times10^{4}\times0.075}{8.31}=573(\mathrm{K})$$ （2 分）

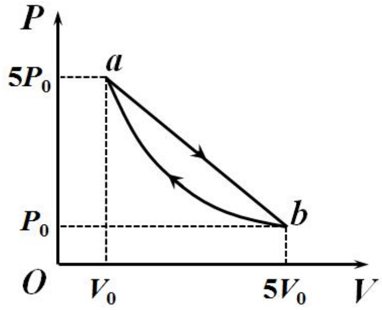
(3) B 中气体吸收的热量：

$$Q_{\mathrm{B}}=\Delta E_{\mathrm{B}}+A_{\mathrm{B}}=\frac{3}{2}R\left(T_{\mathrm{B}}-T_{\mathrm{B0}}\right)+\int_{V_{\mathrm{B0}}}^{V_{\mathrm{B}}}P_{\mathrm{B}}\mathrm{d}V_{\mathrm{B}}$$

$$=\frac{3}{2}R\left(T_{\mathrm{B}}-\frac{P_{\mathrm{B0}}V_{\mathrm{B0}}}{R}\right)+\int_{V_{\mathrm{B0}}}^{V_{\mathrm{B}}}\frac{135.7}{\left(0.1-V_{\mathrm{B}}\right)^{5/3}}\mathrm{d}V_{\mathrm{B}}$$

$$=\frac{3}{2}\times8.31\times\left(573-\frac{2\times10^{4}\times0.05}{8.31}\right)+\left.\frac{135.7}{\frac{2}{3}\left(0.1-V_{\mathrm{B}}\right)^{2/3}}\right|_{V_{\mathrm{B0}}}^{V_{\mathrm{B}}}=6.523\times10^{3}(\mathrm{J})$$ （3 分）

13.（本题 12 分）1 mol 氧气（可视为理想气体）经历如题 13 图所示的循环 $a\to b\to a$，气体在 a 点的压强和体积分别为 $5P_0$ 和 V_0，经直线过程 $a\to b$ 到达 b 点，其压强和体积分别为 P_0 和 $5V_0$，再由 b 点经等温过程 $b\to a$ 回到 a 点。求：(1) $a\to b$ 中绝热点（$\delta Q=0$）的位置；(2) 将此 P-V 图画成 T-V 图；(3) 此循环的效率。



题 13 图

解：(1) 设 $a\to b$ 过程的状态方程为 $P=\alpha V+\beta$，把 a 和 b 处的坐标带入方程，得

$5P_0 = \alpha V_0 + \beta$

$P_0 = \alpha \cdot 5V_0 + \beta$

解方程组，得到 $\alpha = -\dfrac{P_0}{V_0}$；$\beta = 6P_0$

$a \to b$ 过程方程为 $P = -\dfrac{P_0}{V_0}V + 6P_0$　（1 分）

绝热点 $\delta Q = \mathrm{d}E + P\mathrm{d}V = 0$，所以

$$P\mathrm{d}V = -\mathrm{d}E = -\frac{5}{2}R\mathrm{d}T,$$

由 $PV = RT$，得

$$P\mathrm{d}V + V\mathrm{d}P = R\mathrm{d}T = -\frac{2}{5}P\mathrm{d}V,$$

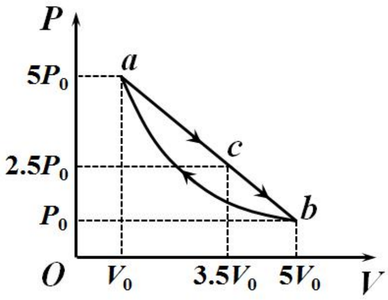
$$\frac{7}{5}P\mathrm{d}V + V\mathrm{d}P = 0,$$　（2 分）

代入过程方程 $P = -\dfrac{P_0}{V_0}V + 6P_0$ 和 $\mathrm{d}P = -\dfrac{P_0}{V_0}\mathrm{d}V$，

$$\left[\frac{7}{5}\left(-\frac{P_0}{V_0}V + 6P_0\right) - \frac{P_0}{V_0}V\right]\mathrm{d}V = 0,$$

所以 $V_c = 3.5V_0$；$P_c = 2.5P_0$，此为绝热点，位于下图中 c 点，　（2 分）

$a \to c$，吸热；$c \to b$，放热。



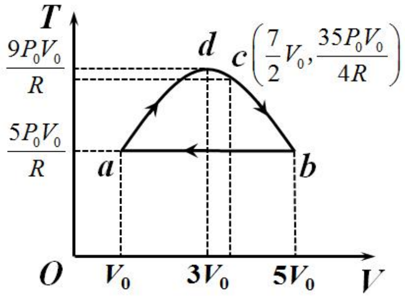
(2) 温度 $T = \dfrac{PV}{R} = -\dfrac{P_0}{RV_0}V^2 + \dfrac{6P_0}{R}V$　（1 分）

由 $\dfrac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}V} = -\dfrac{2P_0}{RV_0}V + \dfrac{6P_0}{R} = 0$，得到 T 最大时，

$V = 3V_0$；$P = 3P_0$，

最大温度 $T_{\max} = \dfrac{PV}{R} = \dfrac{9P_0V_0}{R}$，

得到 T-V 图如下图所示，$T_{\max}$ 位于图中 d 点。　（2 分）



(3) a 和 b 处的温度为 $T_a = T_b = \dfrac{5P_0V_0}{R}$，$c$ 处的温度 $T_c = \dfrac{35P_0V_0}{4R}$，

循环过程吸热

$$Q_{ac} = \Delta E_{ac} + A_{ac} = \frac{5}{2}R\left(T_c - T_a\right) + \frac{1}{2}\left(P_a + P_c\right)\left(V_c + P_a\right) = \frac{75}{4}P_0V_0 \qquad \text{（1 分）}$$

循环过程放热

$$Q_{cb} = \Delta E_{cb} + A_{cb} = \frac{5}{2}R\left(T_b - T_c\right) + \frac{1}{2}\left(P_b + P_c\right)\left(V_b - V_c\right) = -\frac{27}{4}P_0V_0 \qquad \text{（1 分）}$$

$$Q_{ba} = A_{ba} = RT_b \ln\frac{V_a}{V_b} = R \cdot \frac{5P_0V_0}{R} \cdot \ln\frac{V_0}{5V_0} = -5\ln 5P_0V_0 \qquad \text{（1 分）}$$

循环的效率

$$\eta = 1 - \frac{\left|Q_{cb}\right| + \left|Q_{ba}\right|}{Q_{ac}} = 1 - \frac{27P_0V_0/4 + 5\ln 5P_0V_0}{75P_0V_0/4} = \frac{4\times\left(12 - 5\times\ln 5\right)}{75} = 21.1\% \qquad \text{（1 分）}$$

14.（本题 8 分）一封闭绝热筒，被一个与绝热筒密接而无摩擦的导热活塞分为两部分，体积均为 $V_0 = 2$ L。将活塞固定在正中间，一边充以 $T_0 = 400$ K、$P_0 = 10^5$ Pa 的空气，另一边充以 400 K、3×10^5 Pa 的空气。然后活塞被释放，并在新的位置达到平衡，求平衡后气体的温度、压强以及熵的增加值。

解：(1) 外界无传热，无做功，整个绝热筒两部分空气内能无变化，所以温度不变，末状态温度仍为 $T_0 = 400(\text{K})$。（1分）

(2) 设两部分气体末压强为 P_1，左侧体积为 V_1，右侧则为 $(2V_0 - V_1)$，由两部分各自的状态方程得

$$P_0V_0 = P_1V_1$$
$$3P_0V_0 = P_1(2V_0 - V_1) \qquad \text{（1分）}$$

$$V_1 = \frac{1}{2}V_0$$

$$P_1 = 2P_0 = 2\times10^5(\text{Pa}) \qquad \text{（1分）}$$

(3) 设气体经过无摩擦的准静态过程，即经过一个可逆过程由初态到末态，则总的熵增加为

$$\Delta S=\Delta S_{左}+\Delta S_{右}=\int\frac{\delta Q_{左}}{T_{左}}+\int\frac{\delta Q_{右}}{T_{右}}=\int_{V_0}^{V_0/2}\frac{P\mathrm{d}V}{T_0}+\int_{V_0}^{3V_0/2}\frac{P'\mathrm{d}V'}{T_0} \qquad（2分）$$

由过程方程 $P_0V_0=PV$， $3P_0V_0=P'V'$ 得

左侧压强 $P=\dfrac{P_0V_0}{V}$，

右侧压强 $P'=\dfrac{3P_0V_0}{V'}$， （1分）

$$\Delta S=\frac{P_0V_0}{T_0}\int_{V_0}^{V_0/2}\frac{\mathrm{d}V}{V}+\frac{3P_0V_0}{T_0}\int_{V_0}^{3V_0/2}\frac{\mathrm{d}V'}{V'}$$

$$=\frac{P_0V_0}{T_0}\ln\frac{1}{2}+\frac{3P_0V_0}{T_0}\ln\frac{3}{2}=\frac{P_0V_0}{T_0}\left(\ln\frac{1}{2}+3\ln\frac{3}{2}\right)=0.262(\mathrm{J/K}) \qquad（2 分）$$

15.（本题 10 分）质量为 2 kg、温度为-15 ℃的冰，在压强为 1.013×10^5 Pa、温度为 25 ℃下熔解变成水，整个过程分为：(a) -15 ℃的固态冰在定压条件下从周围环境吸热，成为 0 ℃的固态冰；(b) 0 ℃的固态冰等温地吸热熔解为 0 ℃的液态水；(c) 0 ℃的水定压吸热，成为 25 ℃的水。求：(1) 此过程中的熵变（整个过程中周围环境温度不变）；(2) 在 0 ℃时冰变成 0 ℃的水时，水的微观状态数与冰的微观状态数之比。已知：水的定压比热容 $c_{pw}=4.22\times10^3$ J/(kg·K)，冰的定压比热容 $c_{pi}=2.09\times10^3$ J/(kg·K)，冰的熔解热 $L=3.34\times10^5$ J/kg。

解：(1) (a)过程的熵变

$$\Delta S_{\mathrm{a}}=\int\frac{\delta Q}{T}=\int_{T_1}^{T_2}\frac{mc_{pi}\mathrm{d}T}{T}=mc_{pi}\ln\frac{T_2}{T_1}$$

$$=2\times2.09\times10^3\times\ln\frac{273}{258}=236.2(\mathrm{J/K}) \qquad（1 分）$$

(b)过程的熵变

$$\Delta S_{\mathrm{b}}=\frac{\Delta Q_{\mathrm{b}}}{T_2}=\frac{mL}{T_2}=\frac{2\times3.34\times10^5}{273}=2446.9(\mathrm{J/K}) \qquad（1 分）$$

(c)过程的熵变

$$\Delta S_{\mathrm{c}}=\int\frac{\delta Q}{T}=\int_{T_2}^{T_3}\frac{mc_{pw}\mathrm{d}T}{T}=mc_{pw}\ln\frac{T_3}{T_2}$$

$$=2\times4.22\times10^3\times\ln\frac{298.15}{273.15}=739.5(\mathrm{J/K}) \qquad（1 分）$$

在(a), (b), (c)过程中，环境放热

$$\Delta Q_{\mathrm{d}}=-\left[mc_{pi}\left(T_2-T_1\right)+mL+mc_{pw}\left(T_3-T_2\right)\right]$$

$$=-\begin{pmatrix}2\times2.09\times10^3\times15+2\times3.34\times10^5\\+2\times4.22\times10^3\times25\end{pmatrix}=-9.417\times10^5(\mathrm{J}) \qquad（2 分）$$

环境的熵变

$$\Delta S_{\mathrm{d}}=\frac{\Delta Q_{\mathrm{d}}}{T_3}=\frac{-9.417\times10^5}{298}=-3160.1(\mathrm{J/K}) \qquad （1 分）$$

过程的总熵变

$$\Delta S=\Delta S_{\mathrm{a}}+\Delta S_{\mathrm{b}}+\Delta S_{\mathrm{c}}+\Delta S_{\mathrm{d}}=262.5(\mathrm{J/K}) \qquad （1 分）$$

(2) 按玻尔兹曼关系，(b)过程的熵变可以表示为

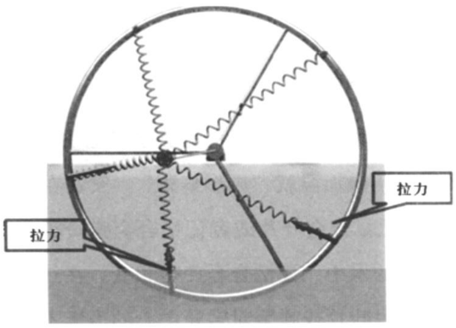
$$\Delta S_{\mathrm{b}}=S_{\mathrm{w}}-S_{\mathrm{i}}=k\ln W_{\mathrm{w}}-k\ln W_{\mathrm{i}}=k\ln\frac{W_{\mathrm{w}}}{W_{\mathrm{i}}} \qquad （1 分）$$

水的微观状态数与冰的微观状态数之比

$$\frac{W_{\mathrm{w}}}{W_{\mathrm{i}}}=\exp\left(\frac{\Delta S_{\mathrm{b}}}{k}\right)=\exp\left(\frac{2446.9}{1.38\times10^{-23}}\right)=\exp\left(1.77\times10^{26}\right)\to\infty \qquad （2 分）$$

四、设计应用题（共 6 分）

16.（本题 6 分）如题 16 图所示，安装在转轮上的记忆合金弹簧在高于其“转变温度”的水中缩短，在空气中伸长。这就使得弹簧组对转轮中心的力矩不为零，在此力矩的作用下，转轮便转动起来了。若在下面放上热水，转轮能否不停地转动而形成“第二类永动机”（忽略空气和水的阻力）？并解释原因。



题 16 图

参考答案：不能。记忆合金虽然只从热水中吸收热量，但是它同时必须不停地向空气中散热冷却，依靠记忆合金的依次收缩和恢复使转轮运动。所以，该装置并不是只从单一热源吸收热量，空气是它的低温热源，或者说转轮的运动也把部分热量散发到空气中去了。随着热水中的热量经记忆合金不断散入空气中，热水温度逐渐降低，当它与空气温度平衡时，转轮就停止运动了。