第五章 热力学第二定律

5−1 利用逆向卡诺机作为热泵向房间供热，设室外温度为 $-5^\circ\mathrm{C}$，室内温度为保持 $20^\circ\mathrm{C}$。要求每小时向室内供热 $2.5\times10^4\ \mathrm{kJ}$，试问：（1）热泵每小时从室外吸多少热量？（2）此循环的供暖系数多大？（3）热泵由电机驱动，设电机效率为 95 %，求电机功率多大？（4）如果直接用电炉取暖，问每小时耗电几度（$\mathrm{kW\cdot h}$）？

提示和答案： 用电炉取暖，则热能全部由电能供给。每小时从室外吸热 $q_{Q_2}=2.287\times10^4\mathrm{kJ/h}$，循环供暖系数 $\varepsilon'=11.72$，电机功率 $P=0.623\mathrm{kW}$，直接用电炉取暖每小时耗电 6.94 度。

5−2 一种固体蓄热器利用太阳能加热岩石块蓄热，岩石块的温度可达 $400\ \mathrm{K}$。现有体积为 $2\ \mathrm{m^3}$ 的岩石床，其中的岩石密度为 $\rho=2\ 750\ \mathrm{kg/m^3}$，比热容 $c=0.89\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$，求岩石块降温到环境温度 $290\ \mathrm{K}$ 时其释放的热量转换成功的最大值。

提示和答案： 岩石块从 290K 被加热到 400K 蓄积的热量的可用能与岩石块平均温度 T_m 有关，$T_\mathrm{m}=\dfrac{Q}{\Delta S}=\dfrac{mc(T_2-T_1)}{mc\ln\dfrac{T_2}{T_1}}=342.1\mathrm{K}$，在 T_m 和 T_0 之间运行的热机最高热效率 $\eta_{\mathrm{t,max}}=1-T_0/T_\mathrm{m}=0.152$，可以求得最大功 $W_{\max}=81946.0\mathrm{kJ}$。

5−3 设有一由两个定温过程和两个定压过程组成的热力循环，如图 5−1 所示。工质加热前的状态为 $p_1=0.1\ \mathrm{MPa}$，$T_1=300\ \mathrm{K}$，定压加热到 $T_2=1\ 000\ \mathrm{K}$，再在定温下吸热 400 kJ/kg。试分别计算不采用回热和采用极限回热循环的热效率，并比较它们的大小。设工质比热容为定值，$c_p=1.004\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$。

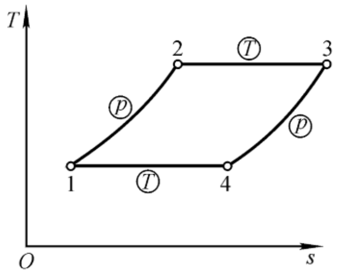


图 5−1

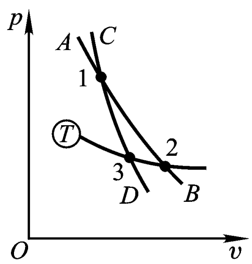


图 5-2

提示和答案： （1）不回热时 $q_1 = q_{1-2} + q_{2-3}$、$q_2 = q_{3-4} + q_{4-1}$，$\eta_t = 0.254$；（2）采用极限回热时，1-2 过程所需热量由 3-4 过程供给，$q_1 = q_{2-3}$、$q_2 = q_{4-1}$，$\eta_t = \eta_c = 0.70$。

5−4 试证明：同一种工质在参数坐标图上（例如 $p-v$ 图上）的两条绝热线不可能相交。

提示： 假设 AB 和 CD 两条可逆绝热线可能相交（图 5−2），设另一条等温线分别与二条绝热线相交构成热力循环，此循环自单一热源吸热，全部转化为机械能而不引起任何其他变化，违反热学第二定律。

5−5 设有 1kmol 某种理想气体进行图 5−3 所示循环 $1-2-3-1$。且已知：$T_1 = 1\,500\ \text{K}$、$T_2 = 300\ \text{K}$、$p_2 = 0.1\ \text{MPa}$。设比热容为定值，取绝热指数 $\kappa = 1.4$。（1）求初态压力；（2）在 $T-s$ 图上画出该循环；（3）求循环热效率；（4）该循环的放热很理想，T_1 也较高，但热效率不很高，问原因何在？

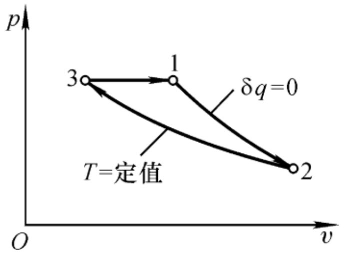


图 5−3

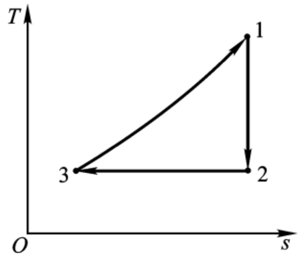


图 5−4

提示和答案： 循环吸热过程为定压过程，吸热量 $Q_1 = C_{p,\mathrm{m}}(T_1 - T_3)$，放热过程为等温过程，放热量 $Q_2 = Q_{2-3} = RT_3 \ln \dfrac{p_3}{p_2}$，计算平均吸热温度，观察与放热温度的差距。① $p_1 = 27.951\text{MPa}$；②见图 5−4；③ $\eta_t = 0.598$；④虽然循环 $\overline{T}_2$ 与卡诺循环相同，但平均吸热温度 $\overline{T}_1 = \dfrac{Q_1}{\Delta S_{3-1}} = \dfrac{C_{p,\mathrm{m}}(T_1 - T_3)}{C_{p,\mathrm{m}} \ln \dfrac{T_1}{T_3}} = 745.6\text{K}$，比卡诺循环的吸热温度 T_1（1500K）低得多，即 $\overline{T}_1 \ll T_1$，$\eta_t = 1 - T_2 / \overline{T}_1$，故该循环热效不高。

5−6 如图 5−5 所示，在恒温热源 T_1 和 T_0 之间工作的热机作出的循环净功 W_{net} 正好带动工作于 T_{H} 和 T_0 之间的热泵，热泵的供热量 Q_{H} 用于谷物烘干。已知 $T_1 = 1\,000\ \text{K}$、

$T_H = 360\ \mathrm{K}$、$T_0 = 290\ \mathrm{K}$、$Q_1 = 100\ \mathrm{kJ}$，（1）若热机效率 $\eta_t = 40\%$，热泵供暖系数 $\varepsilon' = 3.5$，求 Q_H；（2）设 E 和 P 都以可逆机代替，求此时的 Q_H；（3）计算结果 $Q_H > Q_1$，表示冷源中有部分热量传入温度为 T_H 的热源，此复合系统并未消耗机械功，将热量由 T_0 传给了 T_H，是否违背了第二定律？为什么？

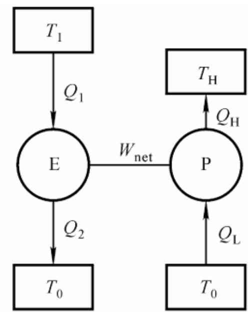


图 5-5

提示和答案： ①热泵向热源 T_H 输送热量 $Q_H = \varepsilon' W_{net} = 140\mathrm{kJ}$；②若是可逆机，$Q_{H,rev} = \varepsilon'_{p,rev} W_{net,rev} = 364.94\mathrm{kJ}$；③ 上述两种情况 Q_H 均大于 Q，但这并不违背热力学第二定律，以（1）为例，包括温度为 T_1、T_H、T_0 的诸热源和冷源，以及热机 E，热泵 P 在内的一个大热力系统并不消耗外功，但是 $Q_2 = Q_R - W_{net} = 60\mathrm{kJ}$，$Q_1 = Q_H - W_{net} = 100\mathrm{kJ}$，即经过每一循环，冷源 T_0 净传出热量 40kJ 给 T_H 的热源，但同时有 100kJ 热量自更高温的热源 T_1 传给较低温 T_H 的热源，所以 40kJ 热量自低温传给高温热源的代价是 100kJ 热量自高温传给了低温热源，所以不违力学第二定律。

5−7 某热机工作于 $T_1 = 2\ 000\ \mathrm{K}$、$T_2 = 300\ \mathrm{K}$ 的两个恒温热源之间，试问下列几种情况能否实现？是否是可逆循环？（1）$Q_1 = 1\ \mathrm{kJ}$，$W_{net} = 0.9\ \mathrm{kJ}$；（2）$Q_1 = 2\ \mathrm{kJ}$，$Q_2 = 0.3\ \mathrm{kJ}$；（3）$Q_2 = 0.5\ \mathrm{kJ}$，$W_{net} = 1.5\ \mathrm{kJ}$。

提示和答案： 方法一，在 T_1、T_2 间工作的可逆循环热效率最高，等于卡诺循环热效率，比较 $\eta_t = 1 - \dfrac{Q_2}{Q_1}$ 与 $\eta_c = 1 - \dfrac{T_2}{T_1}$ 的关系，①$\eta_t > \eta_c$，不可能实现；②$\eta_t = \eta_c$ 是可逆循环；③$\eta_t < \eta_c$ 是不可逆循环。方法二，利用克劳修斯积分，注意热量的符号依工质吸热为正、放热为负确定。

5−8 有人设计了一台热机，工质分别从温度为 $T_1 = 800\ \mathrm{K}$、$T_2 = 500\ \mathrm{K}$ 的两个高温热源吸热 $Q_1 = 1\ 500\ \mathrm{kJ}$ 和 $Q_2 = 500\ \mathrm{kJ}$，以 $T_0 = 300\ \mathrm{K}$ 的环境为冷源，放热 Q_3，问：（1）要求热机作出循环净功 $W_{net} = 1\ 000\ \mathrm{kJ}$，该循环能否实现？（2）最大循环净功 $W_{net,max}$ 为多

少？

提示和答案：（1）先据能量守恒求得循环放热量，再利用克劳修斯积分，得 $\oint \frac{\delta Q}{T_{\mathrm{r}}} < 0$，所以可以实现；（2）最大循环净功只有在可逆循环时才能获得，即 $\oint \frac{\delta Q}{T_{\mathrm{r}}} = 0$ 求得放热量，据循环能量守恒得 $W_{\mathrm{net,max}} = 1137.5\mathrm{kJ}$。

5−9 试判别下列几种情况的熵变是：（a）正；（b）负；（c）可正可负；（d） 零。

（1）闭口系中理想气体经历一可逆过程，系统与外界交换功量 $20\ \mathrm{kJ}$，热量 $20\ \mathrm{kJ}$；

（2）闭口系经历一不可逆过程，系统与外界交换功量 $20\ \mathrm{kJ}$，热量 $-20\ \mathrm{kJ}$；

（3）工质稳定流经开口系，经历一可逆过程，开口系作功 $20\ \mathrm{kJ}$，换热 $-5\ \mathrm{kJ}$，工质流在系统进出口的熵变；

（4）工质稳定流经开口系，按不可逆绝热变化，系统对外作功 $10\ \mathrm{kJ}$，系统的熵变。

提示和答案： 据闭口系及稳定流动开口系的熵方程，注意熵流的符号及不可逆熵产为正。考虑第 4 小题时注意与第 3 小题的差别及稳定流动的特征。（1）正；（2）可正，可负，可为零；（3）负；（4）零。

5−10 燃气经过燃气轮机，由 $0.8\ \mathrm{MPa}$、$420\ ^{\circ}\mathrm{C}$ 绝热膨胀到 $0.1\ \mathrm{MPa}$，$130\ ^{\circ}\mathrm{C}$。设比热容 $c_p = 1.01\mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$，$c_V = 0.732\mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$，问：（1）该过程能否实现？过程是否可逆？（2）若能实现，计算 1 kg 燃气作出的技术功 w_{t}，设进、出口的动能差、位能差忽略不计。

提示和答案： 据绝热过程的比熵变大于、等于及小于零确定（或比较可逆绝热膨胀温度 $T_{2\mathrm{s}}$ 与终态温度 T_2），$\Delta s = c_p \ln\frac{T_2}{T_1} - R_{\mathrm{g}} \ln\frac{p_2}{p_1} = 0.03057\mathrm{kJ/(kg \cdot K)} > 0$，该过程是不可逆绝热过程；不计动能差，位能差，$q = 0$，则 $w_{\mathrm{t}} = w_{\mathrm{i}} = h_1 - h_2 = c_p(T_1 - T_2) = 292.9\mathrm{kJ/kg}$。

5−11 $0.25\ \mathrm{kg}$ 的 CO 在闭口系中由 $p_1 = 0.25\ \mathrm{MPa}$、$t_1 = 120\ ^{\circ}\mathrm{C}$ 膨胀到 $t_2 = 25^{\circ}\mathrm{C}$、$p_2 = 0.125\ \mathrm{MPa}$，作出膨胀功 $W = 8.0\ \mathrm{kJ}$。试计算过程热量，并判断该过程是否可逆。已知环境温度 $t_0 = 25\ ^{\circ}\mathrm{C}$，CO 的 $R_{\mathrm{g}} = 0.297\ \mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$，$c_V = 0.747\ \mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$。

提示和答案： 由闭口系能量方程确定换热量 $Q = mc_V(T_2 - T_1) + W = -9.74\text{kJ}$，因 $\Delta S = m(c_p \ln\dfrac{T_2}{T_1} - R_{\text{g}} \ln\dfrac{p_2}{p_1}) = -0.00021\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，$\Delta S_{\text{surr}} = \dfrac{Q_{\text{surr}}}{T_0} = 0.03268\text{kJ/K}$，孤立系熵变 $\Delta S_{\text{iso}} = \Delta S + \Delta S_{\text{surr}} = 0.03247\text{kJ/K} > 0$，据孤立系统熵原理该过程为不可逆膨胀过程。

5-12 某太阳能供暖的房屋用 $5\text{m}\times 8\text{m}\times 0.3\ \text{m}$ 的大块混凝土板作为蓄热材料，该混凝土的密度为 $2\ 300\ \text{kg/m}^3$，比热容 $0.65\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$。若混凝土板在晚上从 23℃冷却到 18℃，求此过程的熵产（设 t_0 =18℃）。

提示和答案： 求得混凝土板质量 $m = \rho V = 27600\text{kg}$ 和释热量 $Q = mc\Delta T = 89700\text{kJ}$ 后，计算混凝土板的熵变 $\Delta S_1 = mc\ln\dfrac{T_2}{T_1} = -305.63\text{kJ/K}$ 和环境介质的熵变 $\Delta S_2 = \dfrac{Q}{T_0} = 308.25\text{kJ/K}$，按混凝土板和环境介质组成的孤立系统熵增即为熵产（或利用混凝土板的熵方程，由混凝土板的熵变和熵流计算熵产，注意在熵方程中热量的符号及温度）$S_{\text{g}} = \Delta S_{\text{iso}} = \Delta S_1 + \Delta S_2 = 2.62\text{kJ/K}$。

5−13 将 $m = 0.36\text{kg}$，初始温度 $T_{\text{m},1} = 1\ 060\text{K}$ 的金属棒投入绝热容器内 $m_{\text{w}} = 9\text{kg}$，温度 $T_{\text{w}} = 295\text{K}$ 的水中，金属棒和水的比热容分别为 $c_{\text{m}} = 0.42\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ 和 $c_{\text{w}} = 4.187\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，求：终温 T_{f} 和金属棒、水以及它们组成的孤立系的熵变。

提示和答案： 取容器内水和金属棒为热力系，由闭口系能量方程 $\Delta U = Q - W$，系统绝热，不作外功，则 $\Delta U_{\text{w}} + \Delta U_{\text{m}} = 0$， 故 $m_{\text{w}}c_{\text{w}}(T_{\text{f}} - T_{\text{w}}) + m_{\text{m}}c_{\text{m}}(T_{\text{f}} - T_{\text{m}}) = 0$，计算得金属棒温度 $T_{\text{f}} = 298.1$。过程中组成孤立系的金属棒和水的熵变分别为：$\Delta S_{\text{m}} = m_{\text{m}}c_{\text{m}}\ln\dfrac{T_{\text{f}}}{T_{\text{w}}} = -0.1918$，$\Delta S_{\text{w}} = m_{\text{w}}c_{\text{w}}\ln\dfrac{T_{\text{f}}}{T_{\text{w}}} = 0.3939\text{kJ/K}$，相加即得 $\Delta S_{\text{iso}} = \Delta S_{\text{m}} + \Delta S_{\text{w}} = 0.202$。

5−14 刚性密闭容器中有 1 kg 压力 $p_1 = 0.101\ 3\ \text{MPa}$ 的空气，可以通过叶轮搅拌，或由 $t_{\text{r}} = 283\ ^\circ\text{C}$ 的热源加热及搅拌联合作用，而使空气温度由 $t_1 = 7\ ^\circ\text{C}$ 上升到 $t_2 = 317\ ^\circ\text{C}$。

求：（1）联合作用下系统的熵产 s_g；（2）系统的最小熵产 $s_{g,\min}$；（3）系统的最大熵产 $s_{g,\max}$。

提示和答案： 容器中空气进行的是定容过程。（1）由 T_1、T_2 查气体热力性质表，得 h_1、s_1^0、h_2、s_2^0。过程中气体热力学能差 $\Delta u = \Delta h - \Delta(pv) = \Delta h - R_g \Delta T = 227.33\text{kJ/kg}$，据闭口系量方程 $q = \Delta u + w$

$$q = 227.33 + w \tag{a}$$

由闭口系熵方程、

$$s_2 - s_1 = s_f + s_g \tag{b}$$

$$s_2 - s_1 = s_2^0 - s_1^0 - R_g \ln \frac{p_2}{p_1} = 0.5445\text{kJ/(kg} \cdot \text{K)}$$

$$s_f = \frac{q}{T_r} = \frac{227.33 + w}{556} \tag{c}$$

将上述结果代入式(b)，则 $s_g = 0.5445 - \dfrac{227.33 + w}{556}$。

注意：式中 w 为负值，可见系统熵产与搅拌功的大小有关，搅拌功越大，则 s_g 越大。

（2）为使系统的熵产最小，应尽可能多利用加热，减小搅拌功。据题意，热源加热至多可加热到 $T_a = T_r = 556\text{K}$，$T_a \to T_2$ 这一段温升只是由于叶轮搅拌而产生。故将过程分成两个阶段：由 T_1 到 T_2 靠热源加热，由 T_a 到 T_2 靠搅拌。由附表查得 h_a、s_a^0，算得 $\Delta u_{1a} = 201.57\text{kJ/kg}$，而 $q_{1-a} = \Delta u_{1a}$、$w_{\min} = -\Delta u_{a2}$，考虑到空气初终态不变，所以 $s_2 - s_1$ 与（1）的相同，于是可得 $s_{g,\min} = s_2 - s_1 - s_f = 0.18196\text{kJ/(kg} \cdot \text{K)}$。

(3) 全部由搅拌而升温熵产最大，$S_f = 0$，$s_{g,\max} = s_2 - s_1 = 0.5445\text{kJ/(kg} \cdot \text{K)}$。

5−15 要求将绝热容器内管道中流动的空气由 $t_1 = 17\ ^\circ\text{C}$ 定压加热到 $t_2 = 57\ ^\circ\text{C}$。有两种方案。方案 A：叶轮搅拌容器内的黏性液体，通过黏性液体加热空气；方案 B：

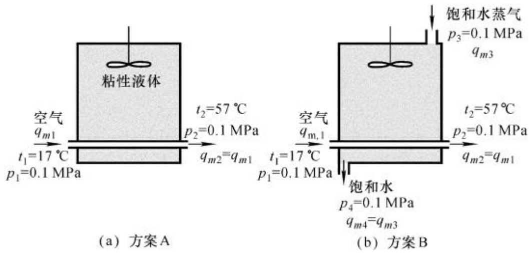


图 5−6

容器中通入 $p_3 = 0.1$ MPa 的饱和水蒸气，加热空气后冷却为饱和水，如图 5−6 所示。设系统稳态工作，且不计动能、位能影响。试分别计算两种方案流过 1kg 空气时系统的熵产并从热力学角度分析哪一种方案更合理。

提示和答案： 低压下空气作为理想气体。方案 I：稳定流动系空气的熵方程为 $s_2 - s_1 = s_f + s_g$，控制体积绝热，故

$$s_g = s_2 - s_1 = s_2^0 - s_1^0 - R_g \ln\frac{p_2}{p_1} = s_2^0 - s_1^0$$

根据 T_1、T_2 由附表中查得 s_1^0、s_2^0，$s_g = s_2 - s_1 = s_2^0 - s_1^0 = 0.1297\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$

方案Ⅱ：空气和水蒸汽均为稳定流动，根据稳定流动热力系的熵方程

$$q_{m1}(s_2 - s_1) + q_{m3}(s_4 - s_3) = \dot{S}_f + \dot{S}_g$$

绝热
$$s_g = \frac{\dot{S}_g}{q_{m1}} = (s_2 - s_1) + \frac{q_{m3}}{q_{m1}}(s_4 - s_3) \tag{a}$$

式中 $\frac{q_{m3}}{q_{m1}}$ 可由稳定流动能量方程确定，不计动能，位能差时 $\frac{q_{m3}}{q_{m1}} = \frac{h_2 - h_1}{h_3 - h_4}$。由附表，根据 T_1、T_2 查得 h_1、h_2 和 s_1、s_2，得 $s_g = 0.022\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$。

计算结果表明，系统 2 的熵产远小于系统 1 的，从热力学角度分析方案Ⅱ更合理。

5−16 某小型运动气手枪射击前枪管内空气压力 250kPa、温度 27°C、体积 1cm^3，被扳机锁住的子弹像活塞，封住压缩空气。扣动扳机，子弹被释放。若子弹离开枪管时枪管内空气压力为 100kPa、温度为 235K，求此时空气的体积、过程中空气作的功及单位质量空气熵产。

提示和答案： 射击前枪管内空气和子弹离开枪管时枪管内空气质量不变，且都满足状态方程；射击过程近似绝热，管内空气熵变即过程熵产。$V_2 = V_1\frac{p_1}{p_2}\frac{T_2}{T_1} = 1.96\text{cm}^3$、

$W = U_1 - U_2 = \frac{mR_g}{\kappa - 1}(T_1 - T_2) = 0.135\text{J}$、$\Delta s_{12} = s_g = c_p \ln\frac{T_2}{T_1} - R_g \ln\frac{T_2}{T_1} = 17.7\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$。

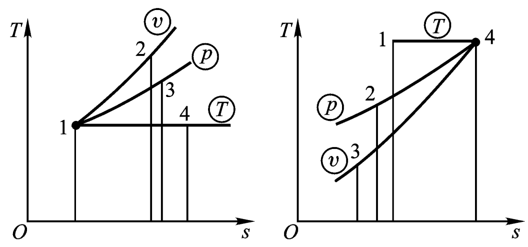
5−17 $m = 1\times 10^6\text{kg}$，温度 $t = 45^\circ\text{C}$ 的水向环境放热，温度降低到环境温度 $t_0 = 10^\circ\text{C}$，

试确定其热量 $E_{x,Q}$ 和热量 $A_{n,Q}$。已知水的比热容 $c_w = 4.187\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$。

提示和答案： 温度为 318K 的水放热，温度降低到 283K 过程的平均温度为 $\overline{T} = \dfrac{Q}{\Delta s} = \dfrac{c_w(T_1 - T_0)}{c_w \ln\dfrac{T_1}{T_0}} = 300.16\text{K}$，热量 $E_{x,Q} = \left(1 - \dfrac{T_0}{\overline{T}}\right)Q = 8.38\times10^6\text{kJ}$；热量

$A_{n,Q} = Q - E_{x,Q} = \dfrac{T_0}{\overline{T}}Q = 138.16\times10^6\text{kJ}$。

5−18 根据熵增与热量 的关系来讨论对气体：（1）定容加热；（2）定压加热；（3）定温加热，哪一种加热方式较为有利？比较的基础分两种情况：（1）从相同的初温出发；（2）达到相同的终温。



（a） （b）

图 5−7

提示和答案： ①加热量 Q_1 相同，即三条过程线下面积相等，此时 $\Delta s_{1-2} < \Delta s_{1-3} < \Delta s_{1-4}$，而熵增与热量 成正比，故定容过程中 Δs_{1-2} 最小，最有利；定压次之；定温最不利。②到达相同的终温，加热量 Q_1 相同，三条线下面积相等，此时，$\Delta s_{3-4} > \Delta s_{2-4} > \Delta s_{1-4}$，定容最不利，定压次之，定温最有利。

5−19 设工质在 1 000 K 的恒温热源和 300 K 的恒温冷源间按循环 $a-b-c-d-a$ 工作（图 5−8），工质从热源吸热和向冷源放热都存在 50 K 的温差。（1）计算循环的热效率；（2）设体系的最低温度即环境温度，$T_0 = 300\ \text{K}$，求热源每供给 1 000 kJ 热量时，两处不可逆传热引起的 损失 I_1 和 I_2，及总 损失。

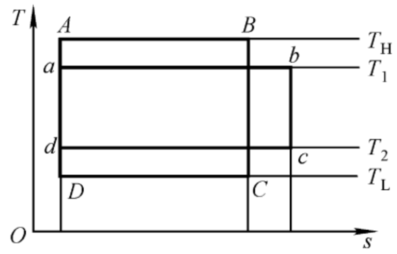


图 5−8

提示和答案： (1) 循环 $a-b-c-d-a$ 是在中间热源 T_1、T_2 之间工作的内可逆循环，

$\eta_t = 1 - \dfrac{T_2}{T_1} = 0.632$；（2）循环 $a-b-c-d-a$ $Q_1 = 1000\text{kJ}$，故放热 $Q_2 = \dfrac{T_2}{T_1}Q_1 = 368\text{kJ}$。

工质吸热过程，高温热源（$T_H = 1000\text{K}$）放出热量 1000kJ，工质吸热 1000kJ，过程熵方

程$S_{g,1}=\Delta S_{a-b}-S_{f,1}$，$S_{g,1}=\dfrac{Q_1}{T}-\dfrac{Q_1}{T_H}=\dfrac{1000\text{kJ}}{950\text{K}}-\dfrac{1000\text{kJ}}{1000\text{K}}=0.0526\text{kJ/K}$。不等温传热引起的损失$I_1=T_0\Delta S_{iso,1}=T_0S_{g,1}=15.78\text{kJ}$。类似，350K 的工质放热 368KJ，被 300K 的冷源吸收，过程熵产$S_{g,2}=\Delta S_{c-d}-S_f=\dfrac{Q_2}{T_2}-\dfrac{Q_2}{T_L}=0.1752\text{kJ/K}$，不等温传热的 损失，$I_2=52.56\text{kJ}$。总的 损失$I=I_1+I_2=68.34\text{kJ}$。

5−20 将$100\ \text{kg}$温度为$20\ ^\circ\text{C}$的水与$200\ \text{kg}$温度为$80\ ^\circ\text{C}$的水在绝热容器中混合，求混合前后水的熵变及 损失。设水的比热容为定值，$c_w=4.187\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，环境温度$t_0=20\ ^\circ\text{C}$。

提示和答案：取所有的水为闭口系，设混合后水温为t，据闭口系能量方程求得混合后水温为$t=\dfrac{m_2t_2+m_1t_1}{m_2+m_1}=60^\circ\text{C}$，系统熵变$\Delta S=m_1c_w\ln\dfrac{T}{T_1}+m_2c_w\ln\dfrac{T}{T_2}=4.7392\text{kJ/K}$，绝热过程熵变等于熵产$S_g=\Delta S$， 损失$I=T_0S_g=1388.6\text{kJ}$。

5−21 100kg 温度为 0℃的冰，在大气环境中融化为 0℃的水，已知冰的溶解热为 335 kJ/kg，设环境温度$T_0=293\text{K}$，求冰化为水的熵变，过程中的熵流和熵产，及 损失。

提示和答案： 100kg 冰融解所需热量$Q=3.35\times10^4\text{kJ}$。设想在冰与环境间有一中间热源，中间热源与冰接触侧的温度$T=T_{ice}=273\text{K}$，它们之间是无温差传热，取冰为热力系，进行的是内可逆过程，因而冰的熵变$\Delta S_{12}=\dfrac{Q}{T}=\dfrac{Q}{T_{ice}}=122.71\text{kJ/K}$，熵流$S_f=\dfrac{Q}{T_r}=\dfrac{Q}{T_0}=114.33\text{kJ/K}$，熵产$S_g=\Delta S-S_f=8.38\text{kJ/K}$， 损失$I=T_0S_g=2455.34\text{kJ}$。

5−22 若上题中冰在 20℃的环境中融化为水后升温至 20℃。求：（1）冰融化为水并升温到 20℃的熵变量；（2）包括相关环境在内的孤立系统熵变；（3） 损失，并将其示于$T-s$图。

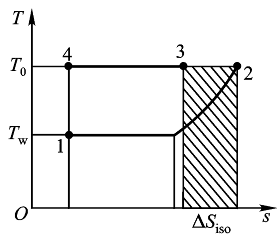


图 5−9

提示和答案：过程由冰融化和升温组成，所需热量是两者之和$Q=Q_1+Q_2=4.1874\times10^4\text{kJ}$。水的熵变可分两段求出，

$\Delta S_{12}=\dfrac{Q_1}{T_{\text{ice}}}+mc_{\text{w}}\ln\dfrac{T_0}{T_{\text{ice}}}=152.313\text{kJ/K}$。环境的熵变$\Delta S_{34}=\dfrac{-Q}{T_0}=-142.915\text{kJ/K}$。由冰和水与环境组成孤立系，$\Delta S_{\text{iso}}=\Delta S_{12}+\Delta S_{34}=9.398\text{kJ/K}$， 损失$I=T_0\Delta S_{\text{iso}}=2753.71\text{kJ}$。$I$在$T$–$s$图（图5–9）中以阴影面积表示。

5–23 两物体A和B质量及比热容相同，即$m_1=m_2=m$、$c_{p1}=c_{p2}=c_p$，温度各为T_1和T_2，且$T_1>T_2$，设环境温度为T_0。按一系列微元卡诺循环工作的可逆机，以A为热源，B为冷源，循环运行，使A物体温度逐渐降低，B物体温度逐渐升高，直至两物体温度相等为T_{f}为止，试证明：（1）$T_{\text{f}}=\sqrt{T_1T_2}$，以及最大循环净功 $W_{\max}=mc_p(T_1+T_2-2T_{\text{f}})$；（2）若A和B直接传热，热平衡时温度为$T_m$，求$T_m$及不等温传热引起的 损失。

提示：（1）根据题意，在变温热源A、B间工作的最大循环净功，一定是可逆循环。设过程中，A、B温度分别为T_{1x}、T_{2x}时的微元卡诺循环，自A热源吸热$\delta Q_{1,x}$，向B冷源放热$\delta Q_{2,x}$，循环净功为δW_{net}，则热源 A 的熵变$\text{d}s_1=\dfrac{\delta Q_{1,x}}{T_{1,x}}=\dfrac{mc_p\text{d}T_{1,x}}{T_{1,x}}$、冷源 B 的熵变$\text{d}s_2=\dfrac{\delta Q_{2,x}}{T_{2,x}}=\dfrac{mc_p\text{d}T_{2,x}}{T_{2,x}}$。经过一系列微元卡诺循环，热源A温度由$T_1$变化到$T_{\text{f}}$，冷源B的温度由$T_2$变化到$T_{\text{f}}$。A 的总熵变$\Delta S_1=\int_{T_1}^{T_{\text{f}}}mc_p\dfrac{\text{d}T_{1,x}}{T_{1,x}}=mc_p\ln\dfrac{T_{\text{f}}}{T_1}$、B 的总熵变$\Delta S_2=mc_p\ln\dfrac{T_{\text{f}}}{T_2}$。由热源、冷源、工质组成闭口绝热系，系统中进行可逆循环，故 $\Delta S_{\text{iso}}=0$，于是，$mc_p\ln\dfrac{T_{\text{f}}}{T_1}+mc_p\ln\dfrac{T_{\text{f}}}{T_2}=0$，即可解得得 $T_{\text{f}}=\sqrt{T_1\cdot T_2}$。微元循环的循环净功$\delta w_{\max}=|\delta Q_{1,x}|-|\delta Q_{2,x}|$，全部微元循环累加得 $W_{\max}=mc_p(T_1+T_2-2T_f)$。(2)两物体A 和 B 直接触，则热物体放出的热量等于冷物体吸入的热$|\delta Q_{1x}|=|\delta Q_{2x}|$，可得$T_{\text{m}}=\dfrac{1}{2}(T_1+T_2)$。 损失的计算有二种方法。一是利用$I=T_0\Delta S_{\text{iso}}=2mc_pT_0\ln\dfrac{T_{\text{m}}}{T_{\text{f}}}$；二是分别求出 A 物体放出热量中的热量 ，$E_{\text{x},Q_A}=Q_A-A_{\text{n},Q_A}=mc_p\left(T_1-T_m-T_0\ln\dfrac{T_1}{T_{\text{m}}}\right)$和 B

物体吸收 A 物体放出热量的热量 $E_{\mathrm{x},Q_B} = mc_p\left(T_{\mathrm{m}} - T_2 - T_0 \ln\dfrac{T_{\mathrm{m}}}{T_2}\right)$，两者的差即为 损失

$I = E_{\mathrm{x},Q_A} - E_{\mathrm{x},Q_B} = 2T_0 mc_p \ln\dfrac{T_{\mathrm{m}}}{T_{\mathrm{f}}}$ 。

5−24 稳定工作的齿轮箱，由高速轴输入功率 $300\ \mathrm{kW}$，由于磨擦损耗和其它不可逆损失，从低速驱动轴输出功率 $292\ \mathrm{kW}$，如图 5−10 所示。齿轮箱的外表面被环境空气冷却，散热量 $q_Q = -hA(T_{\mathrm{b}} - T_0)$ 。式中表面传热系数 $h = 0.17\ \mathrm{kW/(m^2 \cdot K)}$，齿轮箱外表面积 $A = 1.2\ \mathrm{m}^2$ 。T_{b} 为外壁面平均温度。已知环境温度 $T_0 = 293\ \mathrm{K}$ 。试求：（1）齿轮系统的熵产和 损失；（2）齿轮箱及相关环境组成的孤立系熵增（$\mathrm{kW/K}$）和 损失（kW）。

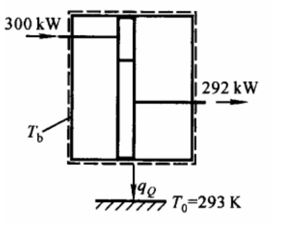


图 5−10

提示和答案：齿轮箱在稳定情况下工作，齿轮箱内部存在磨擦不可逆因素；齿轮箱壁面（温度 T_{b} ）和环境（温度 T_0 ）间存在有限温差传热引起的不可逆损失。假设齿轮箱外表面温度均匀。

（1）取齿轮箱为热力系，列闭口系能量守恒，由稳定 $q_Q = \Delta P = -8\mathrm{kW}$，负号表示放热。由 $q_Q = -hA(T_{\mathrm{b}} - T_0)$ 确定 $T_{\mathrm{b}} = \dfrac{-q_Q}{hA} + T_0 = 332.2\mathrm{K}$ 。闭口系的熵方程 $\mathrm{d}S = \delta S_{\mathrm{f}} + \delta S_{\mathrm{g}}$ 。由于稳定 $\dfrac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}\tau} = 0$ $\dot{S}_{\mathrm{g1}} = -\dot{S}_{\mathrm{f1}} = 0.0241\mathrm{kW/K}$ 。 损失 $\dot{I}_1 = T_0\dot{S}_{\mathrm{g1}} = 7.056\mathrm{kW}$ 。（2）包括齿轮箱和环境在内的复合系统，是闭口绝热系，$\Delta S_{\mathrm{iso}} = S_{\mathrm{g}}$ 。对齿轮箱写出熵方程，同样由于稳定得 $\dot{S}_{\mathrm{g}} = -\dot{S}_{\mathrm{f}} = 0.0273\mathrm{kW/K}$， 损失 $\dot{I} = T_0\dot{S}_{\mathrm{g}} = 8\mathrm{kW}$ 。$\dot{S}_{\mathrm{g}}$ 和 $\dot{I}$ 分别为总熵产和总 损失。由于齿轮箱外壳与环境间不等温传起的熵产和 损失为 $S_{\mathrm{g,2}} = S_{\mathrm{g}} - S_{\mathrm{g,1}} = 0.0032\mathrm{kW/K}$，$\dot{I}_2 = \dot{I} - \dot{I}_1 = 0.944\mathrm{kW}$ 。

5−25 有一热交换器用干饱和蒸汽加热空气，已知蒸汽压力为 $0.1\mathrm{MPa}$，空气出入口温度分别为 $66^{\circ}\mathrm{C}$ 和 $21^{\circ}\mathrm{C}$，环境温度为 $t_0 = 21^{\circ}\mathrm{C}$ 。假设热交换器与外界绝热，求稳流状态下 $1\ \mathrm{kg}$ 蒸汽凝结为饱和液时空气质流量和整个系统不可逆作功能力损失。

提示和答案： 稳定状态下蒸汽凝结放出能量为空气吸收的能量，由换热器能量守恒

$m_a(h_{a2}-h_{a1})=m_v\gamma$，得 $m_a=49.92\text{kg}$ ；取换热器为控制容积，列熵方程，考虑到 $Q=0$ ，故 $S_f=0$，，即可计算 $S_g=1.0857\text{kJ/K}$， $I=T_0S_g=318.3\text{kJ}$ 。

5−26 垂直放置的气缸活塞系统内含有 100 kg 水，初温为 27 °C，外界通过搅拌叶向系统输入功 $W_s=1\ 000\ \text{kJ}$，同时温度为 373 K 的热源向系统内水传热 100 kJ，如图 5−11 所示。若加热过程中水维持定压，且水的比热容取定值，$c_w=4.187\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，环境参数为 $T_0=300\text{K}$、 $p_0=0.1\text{MPa}$ 。求：（1）过程中水的熵变及热源熵变；（2）过程中作功能力损失。

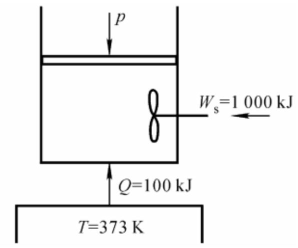


图 5−11

提示和答案： 先以水为系统，忽略其体积变化，据能量守恒，则 $\Delta t_w=\dfrac{(W_s+Q)}{(c_wm_w)}$，确定水的终温 $t_2=29.63\ ^\circ\text{C}$ ，进而求得水和热源各自的熵变：$\Delta S_w=\int_1^2\dfrac{\delta Q}{T}=m_wc_w\ln\dfrac{T_{w,2}}{T_{w,1}}=3.652\ 8\ \text{kJ/K}$、 $\Delta S_r=\int_1^2\dfrac{\delta Q}{T_r}=-0.268\ 1\ \text{kJ/K}$ 。取水和热源为闭口绝热系，列熵方程，计算得熵产 $S_g=\Delta S_w+\Delta S_r=3.3847\text{kJ/k}$ 及作功能力损失 $I=T_0S_g=1015.9\text{kJ}$ 。

5−27 在一台蒸汽锅炉中，烟气定压放热，温度从 1 500 ℃降低到 250 ℃，所放出的热量用以生产水蒸气。压力为 9.0MPa、温度为 30 ℃的锅炉给水被加热、汽化、过热成 $p_1=9.0\ \text{MPa}$、 $t_1=450\ ^\circ\text{C}$ 的过热蒸汽。将烟气近似为空气，取比热容为定值、且 $c_p=1.079\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ 。每生产 1 kg 过热蒸汽，试求：（1）所需烟气质量；（2）烟气及过热蒸汽熵的变化量；（3）过程的熵产；（4）作功能力的损失（环境温度为 15℃）。

提示和答案： 由热平衡方程：$m_gc_p(t_{g,1}-t_{g,2})=m(h_2-h_1)$ 求得烟气量 $m_{gas}=\dfrac{m(h_2-h_1)}{c_p(t_{g,1}-t_{g,2})}=2.315\text{kg}$。并计算得烟气熵变 $\Delta S_{gas}=m_{gas}c_p\ln\dfrac{T_{g,2}}{T_{g,1}}=-3.0488\text{kJ/K}$，和水的熵变 $\Delta S_{H_2O}=m(s_2-s_1)=6.0497\text{kJ/K}$，水的平均温度 $\bar{T}=\dfrac{q}{\Delta s}=\dfrac{h_2-h_1}{s_2-s_1}=516.1\text{K}$ 。以

烟气为系统，$\Delta S_{\mathrm{gas}} = S_{\mathrm{f}} + S_{\mathrm{g}}$，则过程熵产 $S_{\mathrm{g}} = \Delta S_{\mathrm{gas}} - S_{\mathrm{f}} = \Delta S_{\mathrm{gas}} \frac{-Q}{\overline{T}} = 3.0009\mathrm{kJ/K}$，$I = T_0 \Delta S_{\mathrm{iso}} = T_0 S_{\mathrm{g}} = 879.7\mathrm{kJ}$ 。

5−28 上题中加热、汽化和过热过程若在电热锅炉内完成，同样生产 1 kg 过热蒸汽，试求：（1）耗电量；（2）整个系统作功能力损失；（3）蒸汽获得的可用能。

提示和答案：（1）耗电量即 H_2O 获得的能量 $Q_{\mathrm{E}} = m(h_2 - h_1) = 3122.14\mathrm{kJ}$；(2) 电热锅炉散热不计，熵流为零，据熵方程熵产即为水的熵变 $S_{\mathrm{g}} = \Delta S_{\mathrm{H_2O}} = 6.0497\mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$，可得 $I = T_0 S_{\mathrm{g}} = 1773.5\,\mathrm{kJ/kg}$；（3）蒸汽获得的可用能是其焓 值增量或电能全部是 ，减去损失即为蒸汽获得的可用能 $\Delta e_{\mathrm{x},H} = (h_2 - h_1) - T_0(s_2 - s_1) = 1348.67\mathrm{kJ/kg}$ 。

5−29 分别求取例 4−9 两种情况的 损失。

提示和答案： 例 4−9 已求得气缸内 80%的水蒸发需输入能量 $1\,761.4\ \mathrm{kJ}$ 。（1）取缸内水为闭口绝热系，$S_{\mathrm{f}} = 0$，据熵方程 $S_{\mathrm{g}} = \Delta S = m(s'' - s') = 4.477\,5\ \mathrm{kJ/K}$ 、$I = T_0 S_{\mathrm{g}} = 1\,311.9\ \mathrm{kJ}$ 。（2）直接加热，因系统初、终态系统不变，故熵变与 (1) 相同，所以 $S_{\mathrm{g}} = \Delta S - S_{\mathrm{f}} = \Delta S - \frac{Q}{T_{\mathrm{r}}} = 0.563\,3\ \mathrm{kJ/K}$ 、$I = T_0 S_{\mathrm{g}} = 165.0\ \mathrm{kJ}$ 。

5−30 体积 $V = 0.1\mathrm{m}^3$ 的刚性真空容器，打开阀门，$p_0 = 10^5\mathrm{Pa}$ 、$T_0 = 303\mathrm{K}$ 的环境大气充入，充气终了 $p_2 = 10^5\mathrm{Pa}$ 。分别按绝热充气和等温充气两种情况，求：（1）终温 T_2 和充气量 m_{i}；（2）充气过程的熵产 S_{g}；（3）充气过程 损失 I 。已知空气的 $R_{\mathrm{g}} = 0.287\mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$，$c_p = 1.004\mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$，$\kappa = 1.4$ 。

提示和答案：取容器为控制体积，列能量方程 $\delta Q = \mathrm{d}U_{\mathrm{CV}} + h_{\mathrm{e}}\delta m_{\mathrm{e}} - h_{\mathrm{i}}\delta m_{\mathrm{i}} + \delta W_{\mathrm{i}}$，和熵方程 $\mathrm{d}S_{\mathrm{CV}} = \frac{\delta Q}{T_{\mathrm{r}}} + s_{\mathrm{i}}\delta m_{\mathrm{i}} - s_{\mathrm{e}}\delta m_{\mathrm{e}} + \delta S_{\mathrm{g}}$。（1）据已知能量方程简化为 $\delta Q = \mathrm{d}U_{\mathrm{CV}} - h_0 \mathrm{d}m$，积分得 $u_2 m_2 - u_1 m_1 - h_0(m_2 - m_1) = 0$，因初态真空，$m_1 = 0$，$m_2 = m_{\mathrm{i}}$，因而 $u_2 = h_0$，即 $c_V T_2 = c_p T_0$，可求出终态温度 $T_2 = \kappa T_0 = 424.2\mathrm{K}$，$m_{\mathrm{i}} = m_2 = \frac{p_2 V}{R_{\mathrm{g}} T_2} = 0.8214\mathrm{kg}$ 。进而求得

过程熵产 $S_g = m_2(s_2 - s_0) = m_2 c_p \ln\dfrac{T_2}{T_0} = 0.2775\text{kJ/K}$、 损失 $I = T_0 S_g = 84.08\text{kJ}$；（2）等温充气 $T_2 = 303\text{K}$、$m_i = m_2 = \dfrac{p_2 V}{R_g T_2} = 1.1499\text{kg}$。能量方程的简化式 $Q = U_2 - U_1 - h_0(m_2 - m_1)$，因 $U_1 = 0$，$u_2 = u_0$、$h_0 - u_0 = p_0 v_0$，代入后有 $Q = (u_0 - h_0)m_2 = -p_0 v_0 m_2 = -p_0 V$，熵方程简化为 $S_2 - S_1 = \dfrac{Q}{T_0} + s_0(m_2 - m_1) + S_g$，因 $S_2 = m_2 s_2 = m_2 s_0$、$S_1 = 0$、$m_1 = 0$ 故 $S_g = -\dfrac{Q}{T_0} = \dfrac{p_0 V}{T_0} = 0.0330\text{kJ/K}$、$I = T_0 S_g = 10\text{kJ}$。

5-31 一刚性密封容器体积为 V，其中装有压力为 p 温度为 T_0 的空气，环境状态为 p_0，T_0。若不计系统的动能和位能，试证明其热力学能 为：$E_{x,U} = p_0 V\left(1 - \dfrac{p}{p_0} + \dfrac{p}{p_0}\ln\dfrac{p}{p_0}\right)$。

提示： 空气作理想气体处理，$S - S_0 = m\left[c_p \ln\dfrac{T}{T_0} - R_g \ln\dfrac{p}{p_0}\right] = -mR_g \ln\dfrac{p}{p_0}$，$U - U_0 = mc_V(T - T_0)$，代入热力学能 的定义式，考虑到 $\dfrac{p_0 V_0}{T_0} = \dfrac{pV}{T}$ 及 $T = T_0$，所以，$\dfrac{V_0}{V} = \dfrac{p}{p_0}$，并 $U - U_0 = 0$，即可证。

5-32 活塞—气缸系统的容积 $V = 2.45\times10^{-3}\ \text{m}^3$，内有 $p_1 = 0.7\text{MPa}$、$t_1 = 867°\text{C}$ 的燃气，已知燃气的 $R_g = 0.296\ \text{kJ/(kg K)}$，$c_p = 1.04\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，环境温度、压力分别为 $t_0 = 27°\text{C}$、$p_0 = 0.101\,3\text{MPa}$。求：（1）燃气的热力学能 ；（2）除环境外无其它热源的情况下，燃气膨胀到 $p_2 = 0.3\ \text{MPa}$、$t_2 = 637\ °\text{C}$ 时的最大有用功 $W_{u,max}$。

提示和答案： 据理想气体的性质可求得燃气的 c_V、m、V_0、V_2 等参数进而算热力学能 $E_{x,U_1} = 1.7277\text{kJ}$；除环境外无其它热源的情况下，燃气膨胀的最大有用功 $W_{u,max}$ 即为两状态之间热力学能 的差 $W_{1-2,max} = 0.6803\text{kJ}$。

5−33 试证明理想气体状态下比热容为定值的稳定流动气流的无量纲焓 的表达式为：$\dfrac{e_{\mathrm{x,H}}}{c_pT_0}=\dfrac{T}{T_0}-1-\ln\dfrac{T}{T_0}+\ln\left(\dfrac{p}{p_0}\right)^{\kappa-1/\kappa}$，式中：$c_p$ 为气体的比定压热容；T_0 为环境温度，K；p_0 为环境压力，MPa；p 为气体压力，MPa；T 为温度，K。

提示：将理想气体定值热容的焓变 $h-h_0=c_p(T-T_0)$ 及熵变 $s-s_0=c_p\ln\dfrac{T}{T_0}-R_{\mathrm{g}}\ln\dfrac{p}{p_0}$ 代入稳流的焓 式 $e_{\mathrm{x},H}=h-h_0-T_0(s-s_0)$，考虑到 $c_p=\dfrac{\kappa}{\kappa-1}R_{\mathrm{g}}$ 即可证明。

5−34 空气稳定流经绝热气轮机，由 $p_1=0.4\mathrm{MPa}$、$T_1=450\ \mathrm{K}$、$c_{\mathrm{f1}}=30\ \mathrm{m/s}$、膨胀到 $p_2=0.1\ \mathrm{MPa}$、$T_2=330\mathrm{K}$、$c_{\mathrm{f2}}=130\ \mathrm{m/s}$。若环境参数 $p_0=0.1\ \mathrm{MPa}$、$T_0=293\ \mathrm{K}$，设空气的 $R_{\mathrm{g}}=0.287\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$、$c_p=1.004\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$。不计位能变化，求：（1）工质稳定流经气轮机时进、出口处的比焓 $e_{\mathrm{x,H_1}}$、$e_{\mathrm{x,H_2}}$，以及比物流 e_{x_1}、e_{x_2}；（2）每千克空气从状态变 1 化到状态 2 的最大有用功 $w_{\mathrm{u,max}}$；（3）实际有用功。

提示和答案： 气体工质比焓 $e_{\mathrm{x},H_1}=c_p(T_1-T_0)-T_0\left(c_p\ln\dfrac{T_1}{T_0}-R_{\mathrm{g}}\ln\dfrac{p_1}{p_0}\right)$ 和比物流相差宏观动能项，进出口处工质的比焓 和比物流 分别为 $e_{\mathrm{x},H_1}=148.48\mathrm{kJ/kg}$，$e_{\mathrm{x},H_2}=2.165\mathrm{kJ/kg}$；$e_{\mathrm{x1}}=e_{\mathrm{x},H_1}+\dfrac{1}{2}c_{\mathrm{f1}}{}^2=148.93\mathrm{kJ/kg}$，$e_{\mathrm{x2}}=10.62\mathrm{kJ/kg}$。除环境外无其他热源时的最大有用功等于比物流 的变化量 $w_{1-2,\max}=138.31\mathrm{kJ/kg}$。稳流过程的实际有用功和轴功相同，$w_{\mathrm{u}}=w_{\mathrm{s}}=112.48\ \mathrm{kJ/kg}$，因不可逆而小于 $w_{1-2,\max}$。

5−35 表面式换热器中用热水加热空气。空气进、出口参数为 $p_1=0.13\ \mathrm{MPa}$、$t_1=20\ ℃$ 和 $p_2=0.12\ \mathrm{MPa}$、$t_2=60\ ℃$，空气流量 $q_m=1\ \mathrm{kg/s}$，热水进口温度 $t_{\mathrm{w1}}=80\ ℃$，流量 $q_{m,\mathrm{w}}=0.8\ \mathrm{kg/s}$，压力几乎不变。水和空气的动能差、位能差也可不计。如图 5−12 所示，已知环境温度 $t_0=10℃$、压力 $p_0=0.1\mathrm{MPa}$，空气和水的比热容为 $c_p=1.004\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$ 和 $c_w=4.187\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$，空气的气体常

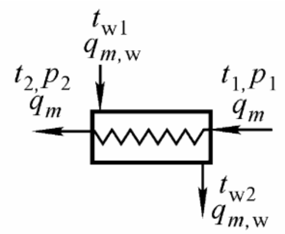


图 5−12

数 $R_g=0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，换热器散热损失可忽略不计，试采用 平衡方程确定 损失。

提示和答案：首先据第一定律，热水放出热量等于空气吸入热量，确定出口水的温度，$t_{w2}=68^\circ\text{C}$。然后计算空气和水的进、出口的比焓 ，$e_{x,H_1}=21.48\text{kJ/kg}$、$e_{x,H_2}=18.78\text{kJ/kg}$，$e_{x,H_w1}=31.20\text{kJ/kg}$、$e_{x,H_w2}=21.93\text{kJ/kg}$。再据稳定流动系的 平衡方程，考虑到该换热器无散热损失，不作功，$E_{x,Q}=0$、$W_i=0$，可算得 $I=10.12\text{kW}$。

5-36 空气稳定地流经绝热气轮机，由 $p_1=0.75\ \text{MPa}$、$t_1=750\ ^\circ\text{C}$ 膨胀到 $p_2=0.1\ \text{MPa}$、$t_2=320\ ^\circ\text{C}$。若不计动能，位能变化，环境参数 $p_0=0.1\ \text{MPa}$、$T_0=298\ \text{K}$，空气 $R_g=0.287\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，$c_p=1.004\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$。针对流入 1 kg 空气，计算：（1）实际过程输出的轴功 w_s，过程是否可逆？（2）1 到 2 的最大有用功 $w_{u,\max}$；（3） 损失 I；（4）可逆绝热膨胀到 $p_2=0.1\text{MPa}$ 时的理论轴功 $w_{s,\text{rev}}$，并讨论 I 与（$w_{s,\text{rev}}-w_s$）为何不相同？

提示和答案： （1）由稳定流动能量方程，不计动、位能差，过程绝热，简化后算得 $w_i=431.72\text{kJ/kg}$、据熵变 $\Delta S_{12}=c_p\ln\dfrac{T_2}{T_1}-R_g\ln\dfrac{p_2}{p_1}=0.031\text{kJ/kg}>0$，判定过程不可逆；（2）$w_{u,\max}=e_{x,H_1}-e_{x,H_2}=440.897\text{kJ/kg}$；（3） 损失 $I=w_{u,\max}-w_s'=9.177\text{kJ/kg}$；（4）$w_{i,\text{rev}}=449.54\text{kJ/kg}$。$w_{i,s}-w_i\neq I$，是因两者终态不同，实际终态 2 工质的焓 $e_{x,H_2}=262.63\text{kJ/kg}$，比 2_s 的 $e_{x,H_{2s}}=253.90\text{kJ/kg}$ 大，且 $w_s-w_s=I+e_{x,H_1}-e_{x,H_{2s}}$。

5-37 容器 A 的体积为 3m^3，内装.08MPa、27℃的空气，容器 B 中空气的质量和温度与 A 中相同，但压力为 0.64MPa，用空气缩压机将容器 A 中空气全部抽空送到容器 B，如图 5-13 所示。设抽气过程中 A 和 B 的温度保持不变。已知环境温度为 27℃，求：（1）空气压缩机消耗的最小有用功；（2）容器 A 抽空后，打开旁通阀门，使两容器内空气压力平衡，空气温度仍保持 27℃，求该不可逆过程中气体的 损失。

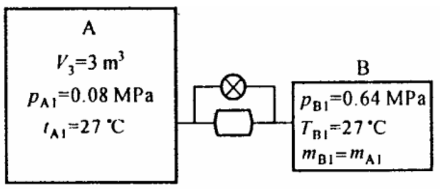


图 5-13

提示和答案： （1）取容器 A 和容器 B 以及压缩机共同组成闭口热力系，除环境外无其它热源，若过程可逆，则压缩消耗最小有用功，这时，$E_{x,Q}=0$，$I=0$，闭口系 平衡

方程可写作：

$$W_{1-2,\min} = E_{x,U_2} - E_{x,U_1} = U_2 - U_1 - T_0(S_2 - S_1) + p_0(V_2 - V_1)$$
$$= (m_{A1} + m_{B1})c_V T_{B2} - (m_{A1}c_V T_{A1} + m_{B1}c_V T_{B1}) + p_0(V_2 - V_1)$$
$$- T_0\left[m_{A1}\left(c_p \ln\frac{T_{B2}}{T_{A1}} - R_g \ln\frac{p_{B2}}{p_{A1}} \right) + m_{B1}\left(c_p \ln\frac{T_{B2}}{T_{B1}} - R_g \ln\frac{p_{B2}}{p_{B1}} \right) \right]$$

$T_{A1} = T_{B1} = T_{B2}$，终态 A 真空 $V_2 = V_B$，$V_1 = V_A + V_B$，$p_{B2} = \dfrac{(m_{A1} + m_{B1})}{V_B} R_g T_{B2} = 1.28 \times 10^6\,\text{Pa}$，

$W_{1-2,\min} = T_0 m_{A1} R_g \ln\dfrac{p_{B2}^2}{p_{A1} p_{B1}} - p_0 V_A = 531.79\,\text{kJ}$；（2）打开旁通阀，关闭压缩机后，取 A、B 和旁通阀构成热力系。因 $T_{A3} = T_{A1}$，故压力为 $p_3 = \dfrac{2m_{A1} R_g T_{A3}}{V_A + V_B} = 0.142 \times 10^6\,\text{Pa}$。对 2-3 写出　平衡方程 $I = E_{x,Q} + E_{x,U_2} - E_{x,U_3} - E_{x,W} + E_{x,A}$。除环境外无热源换热，故 $E_{x,Q} = 0$；不作功 $E_{x,W} = 0$，真空具有　值 $E_{x,A} = p_0 V_A$，所以 $I = E_{x,U_2} - E_{x,U_3} + E_{x,A}$。考虑到 $T_{A3} = T_{B3} = T_{B2}$，$U_2 - U_3 = 0$，且 $V_2 = V_B$，$V_3 = V_A + V_B$，$p_{A3} = p_{B3}$，$m_{A3} = \dfrac{p_{A3} V_A}{R_g T_{A3}} = 4.954\,\text{kg}$、$m_{B3} = 2m_{A1} - m_{A3} = 0.621\,\text{kg}$，得 $I = 1054.8\,\text{kJ}$。