

## 第五章 热力学第二定律

## 习 题

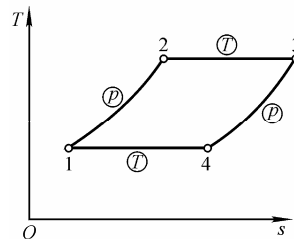
**5-1** 利用逆向卡诺机作为热泵向房间供热，设室外温度为  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，室内温度为保持  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。要求每小时向室内供热  $2.5 \times 10^4\text{ kJ}$ ，试问：（1）每小时从室外吸多少热量？（2）此循环的供暖系数多大？（3）热泵由电机驱动，设电机效率为 95%，求电机功率多大？（4）如果直接用电炉取暖，问每小时耗电几度（ $\text{kW} \cdot \text{h}$ ）？

**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  $q_{Q_2} = 2.287 \times 10^4\text{ kJ/h}$ ，循环供暖系数  $\varepsilon' = 11.72$ ，电机功率  $P = 0.623\text{ kW}$ ，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  $400\text{ K}$ 。现有体积为  $2\text{ m}^3$  的岩石床，其中的岩石密度为  $\rho = 2\text{ }750\text{ kg/m}^3$ ，比热容  $c = 0.89\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，求岩石块降温到环境温度  $290\text{ K}$  时其释放的热量转换成功的最大值。

**提示和答案：** 岩石块从  $290\text{ K}$  被加热到  $400\text{ K}$  蓄积的热量的可用能与岩石块平均温度  $T_m$  有关，且在  $T_m$  和  $T_0$  之间运行的热机最高热效率  $\eta_{t,\max} = 1 - T_0/T_m$ ，可以求得最大功  $W_{\max} = 81946.0\text{ kJ}$ 。

**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 5-35 所示。工质加热前的状态为  $p_1 = 0.1\text{ MPa}$ ， $T_1 = 300\text{ K}$ ，定压加热到  $T_2 = 1\text{ }000\text{ K}$ ，再在定温下每千克工质吸热  $400\text{ kJ}$ 。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， $c_p = 1.004\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。



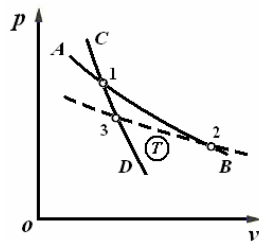
题 5-3 附图

**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：若相交的话，将违反热力学第二定律）。

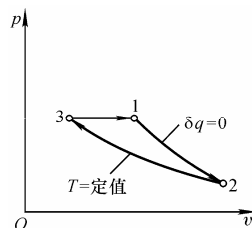
**提示：** 假设 AB 和 CD 两条可逆绝热线可能相交，设另一条等温线分别与二条绝热线相交构成热力循环，此循环自单一热源吸热，全部转化为机械能而不引起任何其他变化，违反热学第二定律。



题 5-4  $p-v$  图

**5-5** 设有  $1\text{ kmol}$  某种理想气体进行图 5-36 所示循环  $1-2-3-1$ 。且已知： $T_1 = 1500\text{ K}$ 、 $T_2 = 300\text{ K}$ 、 $p_2 = 0.1\text{ MPa}$ 。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？（提示：算出平均温度）

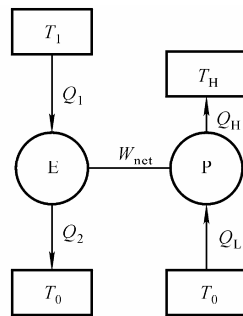


题 5-5 附图

**提示和答案：** 循环吸热过程为定压过程，吸热量  $Q_1 = C_{p,m}(T_1 - T_3)$ ，放热过程为等温过程，放热量  $Q_2 = Q_{2-3} = RT_3 \ln \frac{p_3}{p_2}$ ，计算平均吸热温度，观察与放热温度的差距。①

$$p_1 = 27.951\text{ MPa}; \text{②略}; \text{③} \eta_t = 0.598; \text{④} \bar{T}_1 \square T_1, \eta_t = 1 - T_2 / \bar{T}_1。$$

**5-6** 如图 5-37 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  $W_{\text{net}}$  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  $T_1 = 1000\text{ K}$ 、 $T_H = 360\text{ K}$ 、 $T_0 = 290\text{ K}$ 、 $Q_1 = 100\text{ kJ}$ ，(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？



题 5-6 附图

**提示和答案：** ①热泵向热源  $T_H$  输送热量  $Q_H = \varepsilon' W_{\text{net}} = 3.5 \times 40\text{ kJ} = 140\text{ kJ}$ ；②若是可逆机， $Q_{H,\text{rev}} = \varepsilon'_{p,\text{rev}} W_{\text{net,rev}} = 5.14 \times 71\text{ kJ} = 364.94\text{ kJ}$ ；③ 上述两种情况  $Q_H$  均大于  $Q_1$ ，

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  $Q_2 = Q_R - W_{net} = 100\text{kJ} - 40\text{kJ} = 60\text{kJ}$ ， $Q_1 = Q_H - W_{net} = 140\text{kJ} - 40\text{kJ} = 100\text{kJ}$ ，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 热量自高温热源  $T_1$  传给低温  $T_H$  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  $T_1 = 2\,000\text{ K}$ 、 $T_2 = 300\text{ K}$  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） $Q_1 = 1\text{ kJ}$ ， $W_{net} = 0.9\text{ kJ}$ ；（2） $Q_1 = 2\text{ kJ}$ ， $Q_2 = 0.3\text{ kJ}$ ；（3） $Q_2 = 0.5\text{ kJ}$ ， $W_{net} = 1.5\text{ kJ}$ 。

**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  $\eta_t = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$  与  $\eta_c = 1 - \frac{T_2}{T_1}$  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。

**5-8** 有人设计了一台热机，工质分别从温度为  $T_1 = 800\text{ K}$ 、 $T_2 = 500\text{ K}$  的两个高温热源吸热  $Q_1 = 1\,500\text{ kJ}$  和  $Q_2 = 500\text{ kJ}$ ，以  $T_0 = 300\text{ K}$  的环境为冷源，放热  $Q_3$ ，问：（1）要求热机作出循环净功  $W_{net} = 1\,000\text{ kJ}$ ，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  $\oint \frac{\delta Q}{T_r} < 0$ ，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  $\oint \frac{\delta Q}{T_r} = 0$  求得放热量，据循环能量守恒得  $W_{net,max} = 1137.5\text{ kJ}$

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

- （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 kJ，热量 20 kJ；
- （2）闭口系经历一不可逆过程，系统与外界交换功量 20 kJ，热量 -20 kJ；
- （3）工质稳定流经开口系，经历一可逆过程，开口系作功 20 kJ，换热 -5 kJ，工

质流在进出口的熵变；

(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 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 MPa、420 °C 绝热膨胀到 0.1 MPa，130 °C。

设比热容  $c_p = 1.01 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ， $c_v = 0.732 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，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、等于及小于零或比较可逆绝热膨胀温度  $T_{2s}$  与终态温度  $T_2$  确定，该绝热过程是不可逆绝热过程； $w_t = 292.9 \text{ kJ/kg}$ 。

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

**提示和答案：** 由闭口系能量方程确定换热量  $Q = -9.74 \text{ kJ}$ ，再据孤立系统熵原理判明该过程为不可逆膨胀过程。

**5-12** 某太阳能供暖的房屋用  $5 \times 8 \times 0.3 \text{ m}$  的大块混凝土板作为蓄热材料，该混凝土的密度为  $2300 \text{ kg/m}^3$ ，比热容  $0.65 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。若在  $18 \text{ °C}$  的房子内的混凝土板在晚上从  $23 \text{ °C}$  冷却到  $18 \text{ °C}$ ，求此过程的熵产。

**提示和答案：** 求得混凝土板的质量和释热量后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。 $S_g = 2.62 \text{ kJ/K}$ 。

**5-13** 将一根  $m = 0.36 \text{ kg}$  的金属棒投入  $m_w = 9 \text{ kg}$  的水中，初始时金属棒的温度  $T_{m,1} = 1060 \text{ K}$ ，水的温度  $T_w = 295 \text{ K}$ 。比热容分别为  $c_m = 0.42 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，和  $c_w = 4.187 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，求：终温  $T_f$  和金属棒、水以及它们组成的孤立系的熵变。设容器

为绝热。

**提示和答案：** 由闭口系能量方程  $\Delta U = Q - W$ ，求得  $T_f = 298.1\text{K}$ ；再求由金属棒和水组成的孤立系的熵变  $\Delta S_{\text{iso}} = 0.2021\text{kJ/K}$ 。

**5-14** 刚性密闭容器中有  $1\text{ kg}$  压力  $p_1 = 0.1013\text{ MPa}$  的空气，可以通过叶轮搅拌，或由  $t_r = 283^\circ\text{C}$  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  $T_1$ 、 $T_2$  查气体的热力性质表，得  $h_1$ 、 $s_1^0$ 、 $h_2$ 、 $s_2^0$ 。过程中气体的热力学能差  $\Delta u = \Delta h - \Delta(pv) = \Delta h - R_g \Delta T = 227.33\text{kJ/kg}$ ，据闭口系量方程  $q = \Delta u + w$

$$\{q\}_{\text{kJ/kg}} = 227.33 + \{w\}_{\text{kJ/kg}}$$

(a)

由闭口系熵方程

$$s_2 - s_1 = s_f + s_g$$

(b)

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

$$\{s_f\}_{\text{kJ/(kg} \cdot \text{K)}} = \frac{q}{T_r} = \frac{227.33 + \{w\}_{\text{kJ/kg}}}{556}$$

(c)

将上述结果代入式(b)，则  $\{s_g\}_{\text{kJ/(kg} \cdot \text{K)}} = 0.5445 - \frac{227.33 + \{w\}_{\text{kJ/kg}}}{556}$

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。

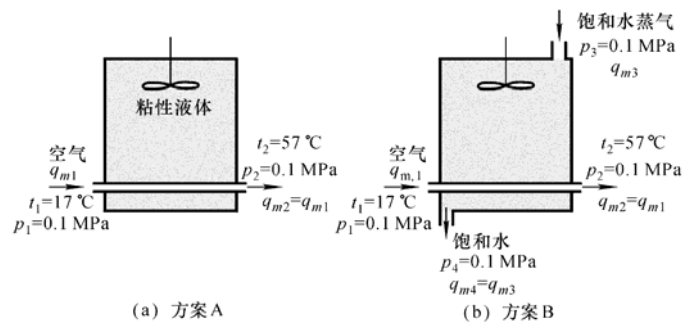
（2）为使系统的熵产最小，应尽可能多利用加热，减小搅拌功。据题意，热源加热至多可加热到  $T_a = T_r = 556\text{K}$ ， $T_a \rightarrow T_2$  这一段温升只是由于叶轮搅拌而产生。故将过程分成两个阶段：由  $T_1$  到  $T_2$  靠热源加热，由  $T_a$  到  $T_2$  靠搅拌。由附表查得  $h_a$ 、 $s_a^0$ ，算得

$\Delta u_{1a} = 201.57 \text{ kJ/kg}$ ，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) 最大熵产发生在全部由搅拌而升温， $S_f = 0$ ，

$$s_{g,\max} = s_2 - s_1 = 0.5445 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}。$$

**5-15** 要求将绝热容器内管道中流动着的空气由  $t_1 = 17^\circ \text{C}$  在定压 ( $p_1 = p_2 = 0.1 \text{ MPa}$ ) 下加热到  $t_2 = 57^\circ \text{C}$ 。有两种方案。方案 A：叶轮搅拌容器内的粘性液体，通过粘性液体加热空气；方案 B 容器中通入  $p_3 = 0.1 \text{ MPa}$  的饱和水蒸气，加热空气后冷却为饱和水，见图 5-38。设两系统均为稳态工作，且不计动能、位能影响。试分别计算两种方案流过  $1 \text{ kg}$  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。已知水蒸气进、出口的焓值及熵值分别为  $s_3 = 7.3589 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ 、 $s_4 = 1.3028 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$  和  $h_3 = 2673.14 \text{ kJ/kg}$ 、 $h_4 = 417.52 \text{ kJ/kg}$ 。



题 5-15 附图

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

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  $s_g = 0.022 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

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, 容积 1cm<sup>3</sup>, 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的熵产。

**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, 熵变即熵产。  $V_2 = 1.96 \text{ cm}^3$ 、 $W = 0.135 \text{ J}$ 、 $s_g = 17.7 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

**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  $c_w = 4.187 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

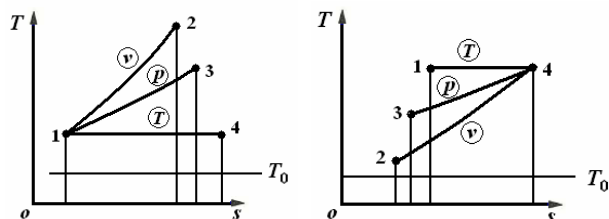
**提示和答案:** 温度为 318K 的水放热, 温度降低到 283K 过程的平均温度为

$$\bar{T} = \frac{Q}{\Delta s} = \frac{c_w(T_1 - T_0)}{c_w \ln \frac{T_1}{T_0}} = 300.16 \text{ K}, \text{ 热量 } E_{x,Q} = \left(1 - \frac{T_0}{\bar{T}}\right) Q = 8.38 \times 10^6 \text{ kJ}; \text{ 热量}$$

$$A_{n,Q} = Q - E_{x,Q} = \frac{T_0}{\bar{T}} Q = 138.16 \times 10^6 \text{ kJ}。$$

**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 (提示: 比较时取同样的热量  $Q_1$ )



**提示和答案:** ①加热量  $Q_1$  相同,

题 5-18 附图

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  $\Delta s_{1-2}$  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。

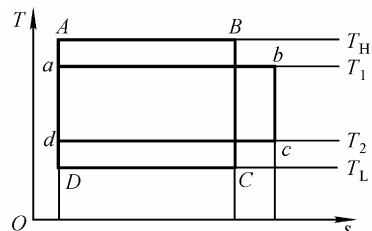
**5-19** 设工质在 1 000 K 的恒温热源和 300 K 的恒温冷源间按循环  $a-b-c-d-a$

工作 (见图 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,  $T_0 = 300$  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。



题 5-19 附图

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

$\eta_i = 0.632$ ; (2) 分别取高温热源与工质级低温热源与工质组成孤立系, 其熵增即为熵产,

求得由于不等温传热引起的损失  $I_1 = 15.78 \text{ kJ}$ 、 $I_2 = 52.56 \text{ kJ}$  和总损失  $I = 68.34 \text{ kJ}$ 。

**5-20** 将 100 kg 温度为 20 °C 的水与 200 kg 温度为 80 °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,  $c_w = 4.187 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ , 环境

温度  $t_0 = 20$  °C。

**提示和答案:** 据闭口系能量方程求得混合后水温为  $t = 60$  °C, 水的熵变

$$\Delta S_{1-2} = \Delta S_1 + \Delta S_2 = m_1 c_w \ln \frac{T}{T_1} + m_2 c_w \ln \frac{T}{T_2} = 4.7392 \text{ kJ/K}$$

绝热过程熵变等于熵产  $\Delta S_{1-2} = S_g$ , 损失  $I = T_0 S_g = 1388.6 \text{ kJ}$ 。

**5-21** 100 kg 温度为 0 °C 的冰, 在大气环境中融化为 0 °C 的水, 已知冰的溶解热

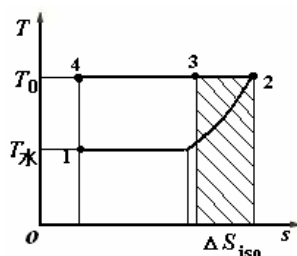
为 335 kJ/kg, 设环境温度  $T_0 = 293$  K, 求冰化为水的熵变, 过程中的熵流和熵产, 及

损失。

**提示和答案:** 参见上题, 注意冰融解过程温度不变, 热源温度即为环境温度。

$\Delta S_{1-2} = 122.71 \text{ kJ/K}$ ,  $S_f = 114.33 \text{ kJ/K}$ ,  $S_g = 8.38 \text{ kJ/K}$ ,  $I = 2455.34 \text{ kJ}$ 。

**5-22** 100 kg 温度为 0 °C 的冰, 在 20 °C 的环境中融化





为水后升温至  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。已知冰的溶解热为  $335\text{ kJ/kg}$ ，水的比热容为  $c_w = 4.187\text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ ，求：(1) 冰融化为水，并升温到  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  的熵变量；(2) 包括相关环境在内的孤立系统的熵变；(3) 损失，并将其示于  $T-s$  图上。

**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，水的熵变可分两段求出，由冰和水与环境组成的孤立系，并据之可求得 损失。 $\Delta S_{1-2} = 152.313\text{ kJ/K}$ 、 $\Delta S_{\text{iso}} = 9.398\text{ kJ/K}$ 、 $I = 2753.71\text{ kJ}$ ， $I$  在  $T-s$  图中以阴影面积表示。习题 5-22  $T-s$  图

**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，以 B 为冷源，循环运行后，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)  $T_f = \sqrt{T_1 T_2}$ ，以及最大循环净功  $W_{\text{max}} = mc_p(T_1 + T_2 - 2T_f)$ ；(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  $T_{1,x}$ 、 $T_{2,x}$  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  $\delta W_{\text{net}}$ ，则热源 A 的熵变  $ds_1 = \frac{\delta Q_{1,x}}{T_{1,x}} = \frac{mc_p dT_{1,x}}{T_{1,x}}$ 、冷源 B 的熵变

$ds_2 = \frac{\delta Q_{2,x}}{T_{2,x}} = \frac{mc_p dT_{2,x}}{T_{2,x}}$ 。经过一系列微元卡诺循环，热源 A 温度由  $T_1$  变化到  $T_f$ ，冷源 B

的温度由  $T_2$  变化到  $T_f$ 。A 的总熵变  $\Delta S_1 = \int_{T_1}^{T_f} mc_p \frac{dT_{1,x}}{T_{1,x}} = mc_p \ln \frac{T_f}{T_1}$ 、B 的总熵变

$\Delta S_2 = \int_{T_2}^{T_f} mc_p \frac{dT_{2,x}}{T_{2,x}} = mc_p \ln \frac{T_f}{T_2}$ 。由热源、冷源、工质组成孤立系，孤立系中进行的可逆

循环，故  $\Delta S_{\text{iso}} = 0$ ，所以， $mc_p \ln \frac{T_f}{T_1} + mc_p \ln \frac{T_f}{T_2} = 0$  即可得  $T_f = \sqrt{T_1 \cdot T_2}$ 。微元循环的

循环净功  $\delta w_{\text{max}} = |\delta Q_{1,x}| - |\delta Q_{2,x}|$ ，全部微元循环累加得

$W_{\text{max}} = mc_p(T_1 + T_2 - 2T_f)$ 。

(2) 两物体 A 和 B 直接接触，则热物体放出的热量等于冷物体吸入的热  $|\delta Q_{1,x}| = |\delta Q_{2,x}|$ ，可得

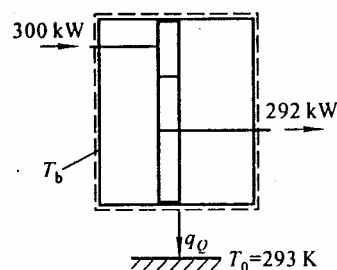
$T_m = \frac{1}{2}(T_1 + T_2)$ 。 损失的计算有二种方法。一是利用  $I = T_0 \Delta S_{\text{iso}} = 2mc_p T_0 \ln \frac{T_m}{T_f}$ ；二

是分别求出 A 物体放出热量中的热量  $E_{x,Q_A} = Q_A - A_{n,Q_A} = mc_p \left( T_1 - T_m - T_0 \ln \frac{T_1}{T_m} \right)$  和

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

损失  $I = E_{x,Q_A} - E_{x,Q_B} = 2T_0 mc_p \ln \frac{T_m}{T_f}$ 。

**5-24** 稳定工作的齿轮箱，由高速轴输入功率 300 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 kW，齿轮箱的外表面被环境空气冷却，冷却量  $q_Q = -hA(T_b - T_0)$ 。式中表面传热系数  $h = 0.17 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，齿轮箱外表面积  $A = 1.2 \text{ m}^2$ 。 $T_b$  为外壁面平均温度。已知环境温度  $T_0 = 293 \text{ K}$ 。试求：（1）齿轮箱系统的熵产和 损失；（2）齿轮箱及相关环境组成的孤立系熵增（kW/K）和 损失（kW）。



习题 5-24 示意图

**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； $T_b$  温度的齿轮箱和  $T_0$  环境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，由于稳定得  $q_Q = \Delta P = -8 \text{ kW}$ ，负号表示放

热。由  $q_Q = -hA(T_b - T_0)$  确定  $T_b = \frac{-q_Q}{hA} + T_0 = 332.2 \text{ K}$ 。闭口系的熵方程

$dS = \delta S_f + \delta S_g$ 。由于稳定  $\frac{dS}{d\tau} = 0$   $\dot{S}_{g1} = -\dot{S}_{f1} = 0.0241 \text{ kW/K}$ 。故 损失

$\dot{I}_1 = T_0 \dot{S}_{g1} = 7.056 \text{ kW}$ 。（2）包括齿轮箱和环境在内的复合系统，是孤立系， $\Delta S_{\text{iso}} = S_g$ 。

对齿轮箱写出熵方程，同样由于稳定得  $\dot{S}_g = -\dot{S}_f = 0.0273 \text{ kW/K}$ ，故 损失

$\dot{I} = T_0 \dot{S}_g = 8 \text{ kW}$ 。 $\dot{S}_g$  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

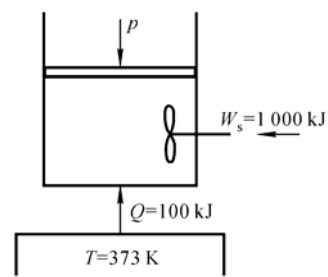
起的熵产和 损失为  $S_{g,2} = S_g - S_{g,1} = 0.0032 \text{ kW/K}$ ， $\dot{I}_2 = \dot{I} - \dot{I}_1 = 0.944 \text{ kW}$ 。

**5-25** 有一热交换器用于饱和蒸汽加热空气，已知蒸汽压力为 0.1 MPa，空气出入口温

度分别为  $66\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，环境温度为  $t_0 = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。若热交换器与外界完全绝热，求稳流状态下  $1\text{ kg}$  蒸汽凝结时，(1) 空气的质流量；(2) 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，由能量守恒得  $m_a = 49.92\text{ kg}$ ；取换热器为控制容积，列熵方程考虑到  $S_f = 0$ ，即可计算  $S_g$ ，由此  $I = 318.3\text{ kJ}$ 。

**5-26** 垂直放置的气缸活塞系统内含有  $100\text{ kg}$  水，初温为  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，外界通过螺旋桨向系统输入功  $W_s = 1\,000\text{ kJ}$ ，同时温度为  $373\text{ K}$  的热源向系统内水传热  $100\text{ kJ}$ ，如图 5-39 所示。若加热过程中水维持定压，且水的比热容取定值， $c_w = 4.187\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ，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。



习题 5-26 附图

**提示和答案：** 据能量守恒，因温升较小，忽略其体积变化，则  $\Delta t_w = (W_s + Q)/(c_w m_w)$  确定水的终温，进而求得熵变  $\Delta S_w = 3.6528\text{ kJ/K}$ 、 $\Delta S_r = -0.2681\text{ kJ/K}$ 。取水和热源为系统，为闭口绝热系，列熵方程，计算熵产及作功能力损失  $I = 1015.9\text{ kJ}$ 。

**5-27** 在一台蒸汽锅炉中，烟气定压放热，温度从  $1\,500\text{ }^{\circ}\text{C}$  降低到  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。所放出的热量用以生产水蒸气。压力为  $9.0\text{ MPa}$ 、温度为  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  的锅炉给水被加热、汽化、过热成  $p_1 = 9.0\text{ MPa}$ 、 $t_1 = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$  的过热蒸汽。将烟气近似为空气，取比热容为定值、且  $c_p = 1.079\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。试求：(1) 产生  $1\text{ kg}$  过热蒸汽的烟气 ( $\text{kg}$ )；(2) 生产  $1\text{ kg}$  过热蒸汽时，烟气熵的减小以及过热蒸汽熵的增大；(3) 将烟气和水蒸气作为孤立系时生产  $1\text{ kg}$  过热蒸汽孤立系熵的增大为多少；(4) 环境温度为  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  时作功能力的损失。

**提示和答案：** 由热平衡方程： $m_g c_p (t_{g,1} - t_{g,2}) = m(h_2 - h_1)$  求得烟气流  $m_g = 2.315\text{ kg}$ 。并计算得  $\Delta S_g = -3.0488\text{ kJ/K}$ ， $\Delta S_{\text{H}_2\text{O}} = 6.0497\text{ kJ/K}$ ， $\Delta S_{\text{iso}} = 3.0009\text{ kJ/K}$  及  $I = 879.7\text{ kJ}$ 。

**5-28** 上题中加热，汽化，过热过程若在电热锅炉内完成，试求生产  $1\text{ kg}$  过热蒸汽的

(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 $\text{H}_2\text{O}$ 获得的能量  $Q_E = 3122.14\text{kJ}$ ; (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可得  $I = 1773.5\text{kJ/kg}$ ; (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  $\Delta e_{x,H} = 1348.67\text{kJ/kg}$ 。

**5-29** 分别求例 4-10 两种情况的作功能力损失。

**提示和答案:** 例 4-10 已求得气缸内 80%的水蒸发需输入能量  $1761.4\text{kJ}$ 。(1) 取缸内水为系统, 是闭口绝热系,  $S_f = 0$ , 据闭口系熵方程  $S_g = \Delta S = m(s'' - s') = 4.4775\text{kJ/K}$ 、 $I = T_0 S_g = 1311.9\text{kJ}$ 。(2) 直接加热, 系统熵变与 (1) 相同, 所以  $S_g = \Delta S - S_f = 0.5633\text{kJ/K}$ 、 $I = T_0 S_g = 165.0\text{kJ}$ 。

**5-30** 体积  $V = 0.1\text{m}^3$  的刚性真空容器, 打开阀门,  $p_0 = 10^5\text{Pa}$ 、 $T_0 = 303\text{K}$  的大气环境空气充入, 充气终了  $p_2 = 10^5\text{Pa}$ 。分别按绝热充气 and 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 损失  $I$ 。已知空气的  $R_g = 0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ ,  $c_p = 1.004\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ ,  $\kappa = 1.4$ 。

**提示和答案:** 取容器内空间为控制体积, 其能量方程为  $\delta Q = dU_{CV} + h_e \delta m_e - h_i \delta m_i + \delta W_i$ , 熵方程为  $dS_{CV} = \frac{\delta Q}{T_r} + s_i \delta m_i - s_e \delta m_e + \delta S_g$ 。据已知条件能量方程简化为  $\delta Q = dU_{CV} - h_0 dm$ , 几分渴求出终态温度, 进而求解。(1)  $T_2 = 424.2\text{K}$ 、 $m_i = 0.8214\text{kg}$ 、 $S_g = 0.2775\text{kJ/K}$ 、 $I = 84.08\text{kJ}$ ; (2)  $T_2 = 303\text{K}$ 、 $m_i = 1.1499\text{kg}$ 、 $S_g = 0.0330\text{kJ/K}$ 、 $I = 10\text{kJ}$ 。

**5-31** 一刚性密封容器体积为  $V$ , 其中装有状态  $(p_0, T_0)$  的空气, 这时环境大气的状态为  $(p_0, T_0)$ , 不计系统的动能和位能, 试证明其热力学能 为:

$$E_{x,U} = p_0 V \left( 1 - \frac{p}{p_0} + \frac{p}{p_0} \ln \frac{p}{p_0} \right)。$$

**提示:** 空气可作为理想气体, 有  $U - U_0 = mc_V(T - T_0)$  代入热力学能 的定义式,

考虑到  $U - U_0 = 0$  ,  $V_0/V = p/p_0$  ,  $S - S_0 = -mR_g \ln(p/p_0)$  , 即可证。

**5-32** 活塞—气缸系统的容积  $V = 2.45 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  , 内有  $p_1 = 0.7 \text{ MPa}$ 、 $t_1 = 867 \text{ °C}$  的燃气, 已知环境温度、压力分别为  $t_0 = 27 \text{ °C}$ 、 $p_0 = 0.1013 \text{ MPa}$  , 燃气的  $R_g = 0.296 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$  ,  $c_p = 1.04 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$  , 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  $c_v$ 、 $m$ 、 $V_0$  等参数而计算其热力学能  $E_{x,U_1} = 1.7277 \text{ kJ}$  ; 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体流的无量纲焓的表达式为:  $\frac{e_{x,H}}{c_p T_0} = \frac{T}{T_0} - 1 - \ln \frac{T}{T_0} + \ln \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$  , 式中  $c_p$  为气体的比定压热容,  $T_0$  和  $p_0$  分别为环境的温度和压力, 单位分别为 K 和 MPa;  $p$  为气体的压力, MPa,  $T$  为温度 K。

**提示:** 将理想气体定值热容的焓变及熵变代入稳流的焓式  $e_{x,H} = h - h_0 - T_0(s - s_0)$  , 考虑到  $c_p = \frac{\kappa}{\kappa-1} R_g$  即可证明。

**5-34** 空气稳定流经绝热气轮机, 由  $p_1 = 0.4 \text{ MPa}$ 、 $T_1 = 450 \text{ K}$ 、 $c_{f1} = 30 \text{ m/s}$ 、膨胀到  $p_2 = 0.1 \text{ MPa}$ 、 $T_2 = 330 \text{ K}$ 、 $c_{f2} = 130 \text{ m/s}$  , 这时环境参数  $p_0 = 0.1 \text{ MPa}$ 、 $T_0 = 293 \text{ K}$  , 设空气的  $R_g = 0.287 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$  ,  $c_p = 1.004 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$  , 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  $e_{x,H_1}$ 、 $e_{x,H_2}$  , 以及比物流  $e_{x_1}$ 、 $e_{x_2}$  ; (2) 每千克空气从状态 1 化到状态 2 的最大有用功  $W_{u,\max}$  ; (3) 实际有用功。

**提示和答案:** 气体工质比焓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  $e_{x,H_1} = 148.48 \text{ kJ/kg}$  ,  $e_{x,H_2} = 2.165 \text{ kJ/kg}$  ;  $e_{x_1} = 148.93 \text{ kJ/kg}$  ,  $e_{x_2} = 10.62 \text{ kJ/kg}$  。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

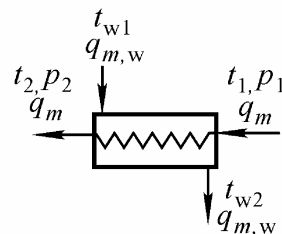
$w_{1-2,\max} = 138.31 \text{ kJ/kg}$ 。稳流过程的实际有用功  $w_u$  和轴功  $w_s$  相同，

$w_u = w_s = 112.48 \text{ kJ/kg}$ ，因不可逆而小于  $w_{1-2,\max}$ 。

**5-35** 刚性绝热器内装有  $0.5 \text{ kg}$ ， $t_1 = 20^\circ\text{C}$ 、 $p_1 = 200 \text{ kPa}$  的空气，由于叶轮搅拌使空气压力升高到  $p_2 = 220 \text{ kPa}$ ，空气的比定容热容  $c_v = 0.717 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ ，设环境参数为  $p_0 = 98 \text{ kPa}$ 、 $t_0 = 20^\circ\text{C}$ 。求：（1）实际过程的过程功（即消耗的搅拌功）；（2）状态 1 变化到状态 2 的最大可用功  $W_{u,\max}$ ；（3）过程损失。

**提示和答案：**根据闭口绝热系能量方程  $W = U_1 - U_2$  及理想气体性质  $U_1 - U_2 = mc_v(T_1 - T_2)$ ，求得终态温度即可求得过程功  $W = -10.504 \text{ kJ}$ ；状态 1 和状态 2 间最大可用功即为热力学能的  $W_{u,\max} = -0.493 \text{ kJ}$ ；损失  $I = T_0 \Delta S_{\text{iso}}$ ，由于是绝热系， $\Delta S_{\text{iso}} = \Delta S_{1-2}$ ，得  $I = 10.011 \text{ kJ}$ 。或根据闭口系平衡方程，除环境外无其他的热源时， $I = W_{1-2,\max} - W_u = 10.011 \text{ kJ}$ 。

**5-36** 表面式换热器中用热水加热空气。空气进、出口参数为  $p_1 = 0.13 \text{ MPa}$ 、 $t_1 = 20^\circ\text{C}$ ， $p_2 = 0.12 \text{ MPa}$ 、 $t_2 = 60^\circ\text{C}$ ，空气流量  $q_m = 1 \text{ kg/s}$ ，热水进口温度  $t_{w1} = 80^\circ\text{C}$ ，流量  $q_{m,w} = 0.8 \text{ kg/s}$ ，压力几乎不变。水和空气的动能差、位能差也可不计。见附图，已知环境温度  $t_0 = 10^\circ\text{C}$ 、压力  $p_0 = 0.1 \text{ MPa}$ ，空气和水的比



习题 5-36 附图

热容为  $c_p = 1.004 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ ， $c_w = 4.187 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ ，空气的气体常数  $R_g = 0.287 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ ，换热器的散热损失可忽略不计，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， $t_{w2} = 68^\circ\text{C}$  然后可计算空气和水的进、出口的比焓，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  $I = 10.12 \text{ kW}$ 。

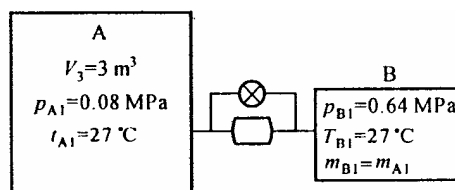
**5-37** 空气稳定地流经气轮机，由  $p_1 = 0.75 \text{ MPa}$ 、 $t_1 = 750^\circ\text{C}$ ，绝热膨胀到  $p_2 = 0.1 \text{ MPa}$ 、 $t_2 = 320^\circ\text{C}$ ，不计动能，位能变化。若环境参数

$p_0 = 0.1 \text{ MPa}$ 、 $T_0 = 298 \text{ K}$ ，已知空气  $R_g = 0.287 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ ， $c_p = 1.004 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ 。

针对流入  $1 \text{ kg}$  空气，计算：（1）实际过程输出的内部功  $w_i$ ，过程是否可逆？（2）1 到 2 的最大有用功  $w_{u,\max}$ ；（3）损失  $I$ ；（4）若不可逆，试计算经可逆绝热过程膨胀到  $p_2 = 0.1 \text{ MPa}$  时的理论内部功  $w_{i,\text{rev}}$ ，并讨论  $I$  与  $(w_{i,\text{rev}} - w_i)$  为何不相同？

**提示和答案：**（1）由稳定流动能量方程，据条件简化后算得  $w_i = 431.72 \text{ kJ/kg}$ 、据熵变  $\Delta S_{12} = 0.031 \text{ kJ/kg} > 0$  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  $I = 9.177 \text{ kJ/kg}$ ；（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。

**5-38** 容器 A 的体积为  $3 \text{ m}^3$ ，内装  $0.08 \text{ MPa}$ 、 $27^\circ \text{C}$  的空气，容器 B 中空气的质量和温度与 A 中相同，但压力为  $0.64 \text{ MPa}$ ，用空气压缩机将容器 A 中空气全部抽空送到容器 B，见图 5-41。设抽气过程 A 和 B 的温度保持不变。已知环境温度为  $27^\circ \text{C}$ ，压力为  $0.1 \text{ MPa}$ ，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  $27^\circ \text{C}$ ，求该不可逆过程造成的损失。



习题 5-38 附图

器内空气压力平衡，空气温度仍保持  $27^\circ \text{C}$ ，求该不可逆过程造成的损失。

**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：

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

$$T_{A1} = T_{B1} = T_{B2} \quad , \quad \text{终态 A 真空} \quad , \quad V_2 = V_B \quad , \quad V_1 = V_A + V_B \quad ,$$

$$p_{B2} = \frac{(m_{A1} + m_{B1})}{V_B} R_g T_{B2} = 1.28 \times 10^6 \text{ Pa} \quad ,$$

$$W_{1-2,\min} = T_0 m_{A1} R_g \ln \frac{p_{B2}^2}{p_{A1} p_{B1}} - p_0 V_A = 531.79 \text{ kJ}; \quad (2) \text{ 打开旁通阀, 关闭压缩机后, 取 A、}$$

$$\text{B 和旁通阀构成热力系。因 } T_{A3} = T_{A1}, \text{ 故压力为 } p_3 = \frac{2m_{A1} R_g T_{A3}}{V_A + V_B} = 0.142 \times 10^6 \text{ Pa}。 \text{ 对 2-3}$$

写出 平衡方程  $I = E_{x,Q} + E_{x,U_2} - E_{x,U_3} - E_{x,w}$ 。除环境外无热源换热, 故  $E_{x,Q} = 0$ ; 不作

功  $E_{x,w} = 0$ , 所以  $I = E_{x,U_2} - E_{x,U_3}$ 。考虑到  $T_{A3} = T_{B3} = T_{B2}$ ,  $U_2 - U_3 = 0$ , 且  $V_2 = V_B$ ,

$$V_3 = V_A + V_B, \quad p_{A3} = p_{B3}, \text{ 且 } m_{A3} = \frac{p_{A3} V_A}{R_g T_{A3}} = 4.954 \text{ kg}, \quad m_{B3} = 2m_{A1} - m_{A3} = 0.621 \text{ kg},$$

得  $I = 754.76 \text{ kJ}$ 。