

第四章 气体和蒸汽的热力过程

4-1 有 2.3kg 的 CO，初态 $T_1 = 477\text{K}$ ， $p_1 = 0.32\text{MPa}$ ，经可逆定容加热，达终温 $T_2 = 600\text{K}$ ，设 CO 为理想气体，求 ΔU 、 ΔH 、 ΔS ，过程功及过程热量。(1) 比热容为定值；(2) 比热容为变值，按气体性质表计算。

提示和答案：无论比热容是否定值，理想气体热力学能和焓只是温度的函数，定容过程功为零。定值比热容： $\Delta U = 209.94\text{kJ}$ 、 $\Delta H = 293.92\text{kJ}$ 、 $\Delta S = 0.3916\text{kJ/K}$ 、 $W = 0$ 、 $Q = \Delta U = 209.94\text{kJ}$ ；变比热容： $\Delta U = 219.10 \times 10^3\text{J}$ 、 $\Delta H = 303.08 \times 10^3\text{J}$ 、 $W = 0$ 、 $\Delta S = 0.4186\text{kJ/K}$ 、 $Q = \Delta U = 219.10\text{kJ}$ 。

4-2 甲烷 CH_4 的初始状态 $p_1 = 0.47\text{MPa}$ ， $T_1 = 393\text{K}$ ，经可逆定压冷却对外放出热量 4 110.76 J/mol，试确定其终温及 1mol CH_4 的热力学能变化量 ΔU_m 、焓变化量 ΔH_m 。设甲烷的比热容近似为定值， $c_p = 2.329\text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ 。

提示和答案：压力不高，甲烷处于理想气体状态，热力学能和焓只是温度的函数。 $T_2 = 283\text{K}$ 、 $\Delta U_m = -3196.11\text{J/mol}$ 、 $\Delta H_m = -4110.76\text{J/mol}$ 。

4-3 氧气由 $t_1 = 40^\circ\text{C}$ ， $p_1 = 0.1\text{MPa}$ 被压缩到 $p_2 = 0.4\text{MPa}$ ，试计算压缩 1kg 氧气消耗的技术功。(1) 按定温压缩计算；(2) 按绝热压缩计算，设比热容为定值；(3) 将它们表示 $p-v$ 图和 $T-s$ 图上，试比较两种情况技术功大小。

提示和答案：理想气体定温压缩技术功等于膨胀功，绝热压缩技术功等于焓差 $w_{t,r} = -112.82\text{J/kg}$ 、 $w_{t,s} = -138.34\text{kJ/kg}$ ；在

$p-v$ 图上定温压缩和绝热压缩技术功分别以图 4-1 面积 $1-2_T-m-n-1$ 和 $1-2_s-m-n-1$ 表

示， $w_{t,r} < w_{t,s}$ ，在 $T-s$ 图上，定温过程

$w_{t,r} = q_r$ ，用面积 $1-2_T-m-n-1$ 表示，绝热

过程 $w_{t,s} = h_1 - h_2 = h_{2r} - h_{2s}$ ，用面积 $1-2_s-2_T-m-n-1$ 表示，显见 $w_{t,r} < w_{t,s}$ 。

4-4 同上题，若比热容为变值，试按气体热力性质表计算绝热压缩 1 kg 氧气消耗的技术功。

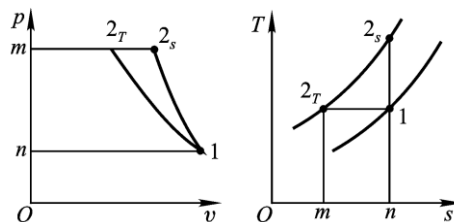


图 4-1

提示和答案： 由附表 8 插值求出 $T_1 = 313\text{K}$ 时， $H_{m,1}$ 和 $S_{m,1}^0$ 。因定熵过程

$$\Delta S = S_{m,2}^0 - S_{m,1}^0 - R \ln \frac{p_2}{p_1} = 0, \text{ 所以 } S_{m,2}^0 = S_{m,1}^0 + R \ln \frac{p_2}{p_1} = 217.97\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})。 \text{ 由同表据}$$

$$S_{m,2}^0 \text{ 得 } T_2 = 460.08\text{K}, H_{m,2} = 13546.39\text{J}/\text{mol}, w_{t,s} = \frac{1}{M}(H_{m,1} - H_{m,2}) = -138.21 \times 10^3 \text{J}/\text{kg}。$$

4-5 3 kg 空气从 $p_1 = 1\text{MPa}$ 、 $T_1 = 900\text{K}$ ，绝热膨胀到 $p_2 = 0.1\text{MPa}$ 。设比热容为定值，绝热指数 $\kappa = 1.4$ ，求：(1) 终态参数 T_2 和 V_2 ；(2) 过程功和技术功；(3) ΔU 和 ΔH 。

提示和答案： 绝热过程过程功和技术功分别等于热力学能减少量和焓减少量。

$$T_2 = 466.17\text{K}、v_2 = 1.3379\text{m}^3/\text{kg}、W = 934.47\text{kJ}、W_t = 1308.26\text{kJ}、\Delta U = -934.47\text{kJ}、\Delta H = -1308.26\text{kJ}。$$

4-6 同上题，比热容为变值，按空气热力性质表重新进行计算。

提示和答案： 利用 $p_{r2} = \frac{p_2}{p_1} p_{r1}$ 查附表 7 得 T_2 ，进而查得 h_2 ，不论比热容是否取定值，

绝热过程过程功和技术功分别等于热力学能减少量和焓减少量。 $W = 983.22\text{kJ}$ 、 $W_t = 1336.82\text{kJ}$ 。

4-7 1kg 空气初态为 $p_1 = 0.5\text{MPa}$ ， $T_1 = 1000\text{K}$ ，按定熵过程：(1) 变化到 $T_2 = 500\text{K}$ ，试确定 p_2 ；(2) 变化到 $p_2 = 0.1\text{MPa}$ 确定 T_2 。空气的 c_p 可由空气真实热容公式确定：

$$\frac{C_{p,m}}{R} = 3.653 - 1.337 \times 10^{-3} \{T\}_K + 3.294 \times 10^{-6} \{T\}_K^2 - 1.913 \times 10^{-9} \{T\}_K^3 + 0.2763 \times 10^{-12} \{T\}_K^4$$

将计算结果与利用气体性质表求出的值进行比较。

提示和答案： (1) 将 $C_{p,m}$ 代入 $\Delta S = \int C_{p,m} \frac{dT}{T} - R \ln \frac{p_2}{p_1} = 0$ ，解得 $p_2 = 0.037\text{MPa}$ ；

(2) 同理有 $\int_{1000\text{K}}^{T_2} C_{p,m} \frac{dT}{T} - R \ln \frac{p_2}{p_1} = 0$ ，用迭代法得出 $T_2 = 657.4\text{K}$ 。(a) 根据 T_1 、 T_2 ，

查得 $p_{r1} = 115.97$ ， $p_{r2} = 8.5558$ ，所以 $p_2 = \frac{p_{r2}}{p_{r1}} p_1 = 0.03689\text{MPa}$ ；(b) 已知 p_1 ， T_1 ， p_2 得

$p_{r2} = 23.194$ 根据 p_{r2} ，查得 $T_2 = 657.419\text{K}$ ，表明用真实比热容式积分所得的结果与气体性质表得出的结果是一致的，但后一方法更方便。

4-8 某气缸中空气初始参数 $p_1 = 8\text{MPa}$, $t_1 = 1300^\circ\text{C}$, 进行了一个可逆多变过程后, 终态 $p_2 = 0.4\text{MPa}$, $t_2 = 400^\circ\text{C}$, 空气的气体常数 $R_g = 0.287\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, 试按下列两种方法计算空气该过程是放热还是吸热? (1) 按定值比热容, $c_v = 0.718\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; (2) 比热容是温度的线性函数 $\{c_v\}_{\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})} = 0.7088 + 0.000186\{t\}_c$ 。

提示和答案: 由 $p_1, T_1; p_2, T_2$ 确定多变指数 $n = 1.3955$ 。(1) $\Delta u = c_v(T_2 - T_1) = -646.2\text{kJ}/\text{kg}$, $w = \frac{1}{n-1}R_g(T_1 - T_2) = 653.1\text{kJ}/\text{kg}$, $q = \Delta u + w = 6.9\text{kJ}/\text{kg}$ 所以是吸热过程。(2) $\Delta u = \int_1^2 c_v dt = -780.2\text{kJ}/\text{kg}$, $w = \frac{1}{n-1}R_g(T_1 - T_2) = 653.1\text{kJ}/\text{kg}$, $q = \Delta u + w = -127.1\text{kJ}/\text{kg}$, 放热过程。可见温度变化范围很大时按定值比热容计算误差太大。

4-9 一体积为 0.15m^3 的气罐, 内装有 $p_1 = 0.55\text{MPa}$, $t_1 = 38^\circ\text{C}$ 的氧气, 今对氧气加热, 其温度、压力都将升高, 罐上装有压力控制阀, 当压力超过 0.7MPa 时阀门自动打开, 放走部分氧气, 使罐中维持最大压力 0.7MPa 。问当罐中氧气温度为 285°C 时, 共加入多少热量? 设氧气的比热容为定值, $c_v = 0.667\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, $c_p = 0.917\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

提示和答案: 初、终态氧气质量 $m_1 = \frac{p_1 V}{R_g T_1} = 1.02\text{kg}$, $m_3 = \frac{p_3 V}{R_g T_3} = 0.72\text{kg}$ 。据题意 1-2 是定容加热过程, $T_2 = \frac{p_2}{p_1} T_1 = 395.8\text{K}$, $Q_v = m_1 c_v (T_2 - T_1) = 56.83\text{kJ}$ 。2-3 是边加热, 边放气的过程, 过程中氧气压力不变, 恒为 0.7MPa 。罐中气体由 $m_2 (= m_1)$ 减少到 m_3 , 温度由 T_2 升高到 T_3 , 任何中间状态都满足 $p_3 V = m R_g T$ 。 $Q_p = \int_{T_2}^{T_3} m c_p dT = c_p \int \frac{p_3 V}{R_g T} dT = 127.19\text{kJ}$, $Q = Q_v + Q_p = 184.02\text{kJ}$ 。

4-10 某理想气体在 $T-s$ 图上的四种过程如图 4-2a 所示, 试在 $p-v$ 图上画出相应的四个过程, 并对每个过程说明 n 的范围, 是吸热还是放热, 是膨胀还是压缩过程?

提示和答案: 各过程如图 4-2。(1)

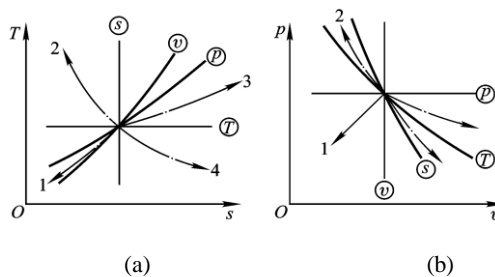


图 4-2

- $-\infty < n_1 < 0$, 压缩、放热; (2) $1 < n_2 < \kappa$, 压缩、放热; (3) $0 < n_3 < 1$, 膨胀、吸热;
 (4) $1 < n_4 < \kappa$, 膨胀、吸热。

4-11 试将满足以下要求的多变过程表示在 $p-v$ 和 $T-s$ 图上(先标出四个基本热力过程): (1) 工质膨胀、吸热且降温; (2) 工质压缩、放热且升温; (3) 工质压缩, 吸热, 且升温; (4) 工质压缩、降温且降压; (5) 工质放热、降温且升压; (6) 工质膨胀, 且升压。

提示和答案: 据顺时针移动 n 增大及 $p-v$ 图上温度和熵变化方向和 $T-s$ 图上压力和比体积变化的方向确定, 见图 4-3。

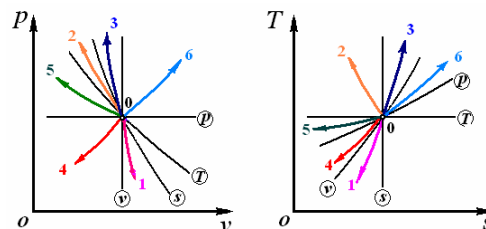


图 4-3

4-12 有 1kg 空气, 初始状态为 $p_1 = 0.5\text{MPa}$, $t_1 = 500^\circ\text{C}$, (1) 绝热膨胀到 $p_2 = 0.1\text{MPa}$; (2) 定温膨胀到 $p_2 = 0.1\text{MPa}$; (3) 多变膨胀到 $p_2 = 0.1\text{MPa}$, 多变指数 $n = 1.2$ 。试将各过程画在 $p-v$ 图和 $T-s$ 图上, 并计算 Δs_{12} 。设过程可逆, 且比热容 $c_v = 718\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

提示和答案: 在 $p-v$ 图和 $T-s$ 图上, 随顺时针移动, n 增大 (图 4-4)。可逆绝热膨胀 $\Delta s_{1-2s} = 0$, 定温膨胀 $\Delta s = 0.462\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 多变膨胀 $\Delta s = 0.1923\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

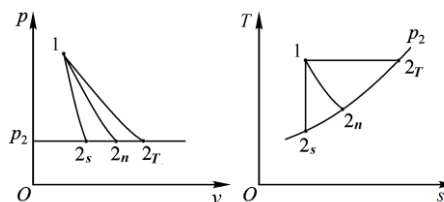


图 4-4

4-13 试证明理想气体在 $T-s$ 图 (图 4-5) 上的任意两条定压线 (或定容线) 之间的水平距离相等, 即求证:

$$\overline{14} = \overline{23}$$

提示和答案: 线段 $\overline{14} = s_4 - s_1 = R_g \ln \frac{p_1}{p_4}$, 线段

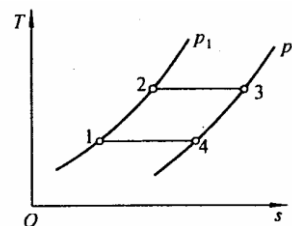


图 4-5

$$\overline{23} = s_3 - s_2 = R_g \ln \frac{p_2}{p_3}。 p_1 = p_2, p_3 = p_4, \text{ 所以 } \overline{14} = \overline{23}。$$

4-14 1 mol 理想气体, 从状态 1 经定压过程达状态 2, 再经定容过程达状态 3, 另一途径为经 1-3 直接到达 3 (见图 4-6)。已知 $p_1 = 0.1\text{MPa}$, $T_1 = 300\text{K}$, $v_2 = 3v_1$, $p_3 = 2p_2$,

试证明：(1) $Q_{12} + Q_{23} \neq Q_{13}$ ；(2) $\Delta S_{12} + \Delta S_{23} = \Delta S_{13}$ 。

提示和答案： (1) 分别列出两条途径的热力学第一定律表达式，由于热力学能只是温度的函数，故证明他们的功不等（如从过程线与 v 轴包围的面积）即可；(2) 求出定压过程和定容过程熵变相加与 ΔS_{1-3} 比较。

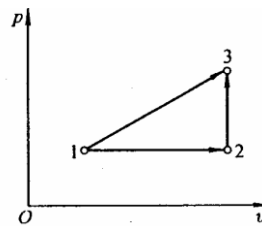


图 4-6

4-15 试导出理想气体定值比热容时多变过程熵差的计算式为

$$s_2 - s_1 = \frac{n - \kappa}{n(\kappa - 1)} R_g \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (\text{a})$$

或

$$s_2 - s_1 = \frac{(n - \kappa) R_g}{(n - 1)(\kappa - 1)} \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (n \neq 1) \quad (\text{b})$$

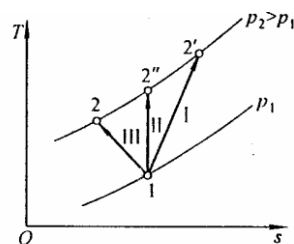


图 4-7

并根据式 (a) 对图 4-7 中示出的三种压缩过程进行分析，它们的 n 是大于、等于 κ ，还是小于 κ ？它们各是吸热、绝热、还是放热过程？

提示和答案： 将多变过程比热容 $c_n = \frac{n - \kappa}{n - 1} c_v (n \neq 1)$ 代入 $\Delta s = \int \frac{\delta q}{T} = \int \frac{cdT}{T}$ ，并注意到 $c_v = \frac{1}{\kappa - 1} R_g$ 和 $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}$ 即证。过程线与 s 轴所夹的面积代表热量，由图分析熵变，过程 I 是吸热过程， $n > \kappa$ 或 $n < 0$ ；过程 II 与 s 轴垂直，是可逆绝热过程， $n = \kappa$ ；过程 III 是放热过程，多变指数应满足 $0 < n < \kappa$ 。

4-16 气缸活塞系统的缸壁和活塞均为刚性绝热材料制成，如图 4-8。A 侧为 N_2 ，B 侧为 O_2 ，两侧温度、压力、体积均相同： $T_{A1} = T_{B1} = 300K$ ，

$p_{A1} = p_{B1} = 0.1MPa$ ， $V_{A1} = V_{B1} = 0.5m^3$ 。活塞可在气缸中无磨

擦地自由移动。A 侧的电加热器通电后缓缓对 N_2 加热，直到

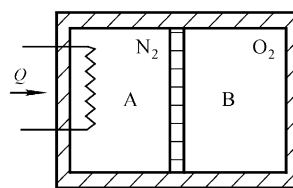


图 4-8

$p_{A2} = 0.22MPa$ ，设 O_2 和 N_2 均为理想气体，试按定值比热容计算：(1) T_{B2} 和 V_{B2} ；(2) V_{A2} 和 T_{A2} ；(3) Q 和 W_A （A 侧 N_2 对 B 侧 O_2 作出的功）；(4) ΔS_{O_2} 和 ΔS_{N_2} ；(5) 在 $p-v$ 图及 $T-s$ 图上定性表示 A、B 两侧气体所进行的过程；(6) A 侧进行的是否是多变过程，为什么？

提示和答案：(1) 活塞是自由的，故 $p_{B2} = p_{A2}$ 。B 内可逆绝热过程， $T_{B,2} = 375.8\text{K}$ 、 $V_{B,2} = 0.2847\text{m}^3$ ；(2) 总体积不变， $V_{A,2} = 0.7153\text{m}^3$ 、 $T_{A,2} = 944.15\text{K}$ ；(3) 取 A+B 为热力系，系统不作功 $Q = 299.99\text{kJ}$ ，取 B 为热力系，绝热， $W_B = -\Delta U_B = -31.58\text{kJ}$ 且 $W_A = -W_B = 31.58\text{kJ}$ ；(4) $\Delta S_{O_2} = 0$ 、 $\Delta S_{N_2} = 74\text{kJ/K}$ ；(5)，(6)略。

4-17 空气装在如图 4-9 所示的绝热刚性气缸活塞装置内，气缸中间有一块带有小孔的导热隔板，两活塞联动，故活塞移动时装置内总体积不变。设活塞移动时外界机器以对系统作功 40 kJ，活塞与隔板静止后，系统恢复平衡。已知初始状态， $p_1 = 2.0\text{ MPa}$ ， $T_1 = 400\text{ K}$ ，

空气总质量 $m = 2\text{ kg}$ 。设比热容为定值， $c_v = 0.718\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。求：(1) 终态空气的温度 T_2 和压力 p_2 ；(2) 系统的熵变 ΔS_{12} ，是定熵过程吗？(3) 在 $T-s$

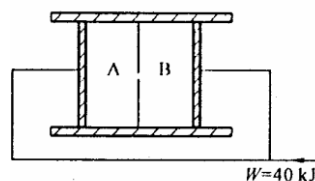


图 4-9

图上示意性地画出该过程。

提示和答案：(1) $V_{A1} = V_{B1} = 0.0574\text{m}^3$ 。取 A+B 为系统， $W = -(\Delta U_A + \Delta U_B) = 2c_v(T_1 - T_2)$ ，

$$T_2 = T_1 + \frac{W}{mc_v} = 427.9\text{K} \quad , \quad p_2 = \frac{mR_g T_2}{2V_A} = 2.139\text{MPa} \quad . \quad (2) \quad \text{过程中系统}$$

$$\Delta S = m \left(c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R_g \ln \frac{V_2}{V_1} \right) = mc_v \ln \frac{T_2}{T_1} = 0.0968\text{kJ/K} > 0 \quad , \quad \text{所以不是定熵过程。} (3) \text{略。}$$

4-18 一孤立系统由带有活塞的气缸组成，活塞将气缸分成两部分，一侧装有理想气体氦，气体常数 $R_g = 2.077\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ，比热容 $c_v = 3.116\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ，另一侧完全真空，内装有一弹簧，弹性系数 $k = 900\text{N/m}$ ，弹簧的自由长度为 0.3 m，弹性力 $F = kx$ ， x 表示伸长或压缩的长度，初始位置如图 4-10 所示。初态为 $t_1 = 40^\circ\text{C}$ ， $V_1 = 10^{-4}\text{m}^3$ ， $p_1 = 0.14\text{MPa}$ ，

弹簧长度为 0.25 m。开始时活塞由销子固定，现拔去销子，则气体和弹簧达到新的力平衡。假定不计活塞质量，且活塞是绝热的，面积 $A = 0.001\text{ m}^2$ 。不计移动磨擦阻力，求：力平衡时气体的压力和温度，状态变化前后气体的熵变，是否是定熵过程？试在 $T-s$ 图上示意性地画出该过程。

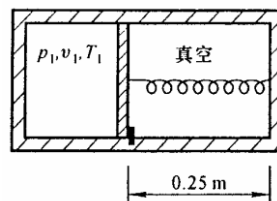


图 4-10

提示和答案：取弹簧自由伸长位置为坐标原点， $x_1 = 0.3\text{m} - 0.25\text{m} = 0.05\text{m}$ ，

$m = \frac{p_1 V_1}{R_g T_1} = 0.2154 \times 10^{-4} \text{ kg}$ 。初态弹簧压力 $p_0 = \frac{F_1}{A} = \frac{kx_1}{A} = 0.045 \text{ MPa} < p_1$ 。设中间状态氦

气体积为 V ， $p = \frac{F}{A} = \frac{kx}{A} = \frac{k}{A} \left(\frac{V - V_1}{A} + x_1 \right)$ ，代入数据得

$$\{p\}_{\text{Pa}} = 9 \times 10^8 \{V\}_{\text{m}^3} - 4.5 \times 10^4 \quad (\text{a})$$

取氦气为热力系，是绝热系，能量方程 $\delta W = -dU$ 即 $pdV = -mc_v dT$ 。中间状态

$p = 9 \times 10^8 V - 4.5 \times 10^4$ ，所以代入后两边积分后得：

$$T_2 = 313 - 67.064 \times 10^8 V_2^2 + 67.064 \times 10^4 V_2 \quad (\text{b})$$

将式(a)、(b)代入 $\frac{p_2 V_2}{R_g T_2} = m$ ，经整理可解得 $V_2 = 1.4369 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ ，代入式 (a)、(b) 得

$$p_2 = 0.0843 \text{ MPa}、T_2 = 270.89 \text{ K}、\Delta S_{1-2} = m \left[c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R_g \ln \frac{V_2}{V_1} \right] = 0.0652 \times 10^{-4} \text{ kJ/K} > 0，$$

是非定熵绝热过程。

4-19 一竖直气缸截面积 $A = 6450 \text{ mm}^2$ ，内置一重 100 N 活塞，通过管道、阀门与气源相通。如图 4-11，起初活塞在气缸底部，打开阀门空气缓缓流入，当活塞上移至 $L = 0.6 \text{ m}$ 时阀门关闭，这时气缸内空气温度为 30°C ，已知输气管中空气参数保持一定， $p_L = 0.15 \text{ MPa}$ ， $t_L = 90^\circ \text{C}$ 。活塞与缸壁间无摩擦损失，大气压力 $p_0 = 0.1013 \text{ MPa}$ ，求：(1) 气缸内气体的终态压力 p ；(2) 对外作出的功 W ；(3) 过程中气体对外作出的有用功 W_u ；(4) 吸热量 Q 。已知 $c_v = 718 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ ， $c_p = 1005 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。

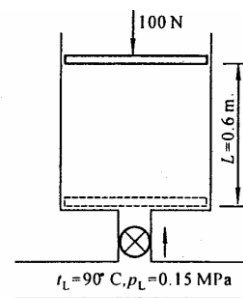


图 4-11

提示和答案：(1) 气缸内气体压力 $p = p_0 + \frac{F}{A} = 0.1168 \text{ MPa}$ ；(2) 空气对外作功，

$W = \int_1^2 pdV = 0.452 \text{ kJ}$ ；(3) 输出的有用功 $W_u = FL = 0.06 \text{ kJ}$ ；(4) 由非稳定流动能量方程

$$\delta Q = dU + h_{in} \delta m_{in} + \delta W_1，\text{ 考虑到 } \delta m_{in} = dm，m_2 = m_{in}，m_2 = \frac{p_2 V_2}{R_g T_2} \doteq 0.0052 \text{ kg}、$$

$Q = -0.313 \text{ kJ}$ 。

4-20 容器 A 中装有 0.2 kg 的一氧化碳 CO ，压力为 0.07 MPa 、温度为 77°C 。容器 B 中装有 0.8 kg 压力为 0.12 MPa 、温度为 27°C 的 CO 见图 4-25。A 和 B 的壁面均为透热壁面，

之间用管道和阀门相通，现打开阀门，CO 气体由 B 流向 A，若压力平衡时温度同为 $t_2 = 42^\circ\text{C}$ ，CO 为理想气体，试求：(1) 平衡时终压 p_2 ；(2) 吸热量 Q 。过程中平均比热容 $c_v = 0.745 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

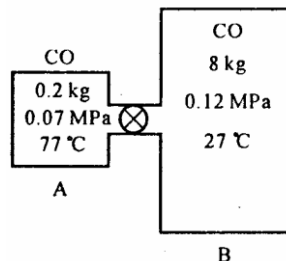


图 4-12

提示和答案： 取 A+B 为热力系，总质量和总容积不变，

对终态写出状态方程，得 $p_2 = 0.105\text{MPa}$ ；由闭口系能量方程求得 $Q = 3.725\text{kJ}$ 。

4-21 有一刚性绝热容器被绝热隔板一分为二， $V_A = V_B = 28 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ，A 中装有 $0.7 \text{ MPa } 65^\circ\text{C}$ 的氧气，B 为真空，见图 4-13。打开安装在隔板上的阀门，氧气自 A 流向 B，两侧压力相同时关闭阀门。试求：(1) 终压 p_2 和两侧终温 T_{A2} 和 T_{B2} ；(2) 过程前后氧气的熵变 ΔS_{12} ，设氧气的 $c_p = 0.920 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

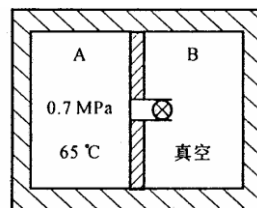


图 4-13

提示和答案： (1) 终态时两侧 O_2 质量即初态 A 侧质量，

$m_{A2} = m_B \frac{p_{A2} V_A}{R_g T_{A2}} + \frac{p_B V_B}{R_g T_{B2}} = m_{A1} = \frac{p_{A1} V_{A1}}{R_g T_{A1}}$ ，考虑到终态压力 $p_{A2} = p_{B2}$ ，所以

$$p_{A2} = \left(\frac{1}{T_{A2}} + \frac{1}{T_{B2}} \right) = 2.07 \times 10^3 \quad (\text{a})$$

A 侧为绝热放气，其中气体经历等比熵过程，参数变化规律

$$p_{A2} = \left(\frac{T_{A2}}{T_{A1}} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} p_{A1} = 0.9860 \times 10^{-3} T_{A2}^{3.5} \quad (\text{b})$$

取 A 和 B 为热力系，是不作外功的绝热闭口系

$$4.48 m_{A2} (T_{A2} - T_{B2}) + T_{B2} = 338 \quad (\text{c})$$

而

$$m_{A2} = 0.10627 \times 10^{-6} T_{A2}^{2.5} \quad (\text{d})$$

采用迭代方法 (a)(b)(c)(d) 四式联解求得 $p_{A2} = 0.35\text{MPa}$ ； $T_{A2} = 277.3\text{K}$ ， $T_{B2} = 432.72\text{K}$ 。

(2) 熵变 $\Delta S_{12} = 0.0352\text{kJ}/\text{K}$ 。

4-22 空气瓶内装有 $p_1 = 3.0\text{MPa}$ ， $T_1 = 296\text{K}$ 的高压空气，可驱动一台小型气轮机，用作发动机的起动机，如图 4-14 所示。要求该气轮机能产生 5kW 的平均输出功率，并持续半分钟而瓶内空气压力不得低于 0.3MPa 。设气轮机中进行的是可逆绝热膨胀过程，气轮

机出口排气压力保持一定 $p_b = 0.1\text{MPa}$ 。空气瓶是绝热的，不计管路和阀门的摩擦损失。问空气瓶的体积 V 至少要多大？

提示和答案：初态气瓶内空气质量 $m_1 = \frac{p_1 V}{R_g T_1} = 35.314V$ 。

打开阀门绝热放气，瓶中剩余气体的参数按等比熵过程变化，

$$T_2 = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} T_1 = 153.31\text{K}$$

终态气瓶内空气质量

$$m_2 = \frac{p_2 V}{R_g T_2} = 6.818V$$

流出的空气

$$-\Delta m = m_1 - m_2 = 35.314V - 6.818V = 28.496V$$

放气过程气瓶内任何中间状态 p_2 、 T_2 都有 $T_2 = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} T_1$ ，若不计摩擦损失，气轮机入口

参数与气瓶内放气参数 p_2 、 T_2 时刻相同。任一时刻气轮机内， $T_4 = T_3 \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$ ，气轮机入

口参数为 p_2 、 T_2 ，气轮机出口参数为 $p_4 = 0.1\text{MPa}$ 、 T_4 ，

$$T_4 = T_3 \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = T_2 \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = T_1 \left(\frac{p_2 p_4}{p_1 p_3} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = T_1 \left(\frac{p_4}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 112.01\text{K}$$

整个放气过程气轮机出口压力、温度保持为 0.1MPa 、 112.01K 。

取气瓶和涡轮机一起为热力系，能量方程 $\delta Q = dU + h_{\text{out}} \delta m_{\text{out}} - h_{\text{in}} \delta m_{\text{in}} + \delta W_i$ ，积分得

$$m_2 T_2 - m_1 T_1 - \kappa T_4 \Delta m + \frac{W_i}{c_v} = 0$$

代入已知数据，解得 $V \approx 0.043\text{m}^3$ 。

4-23 某锅炉每小时生产 $10\,000\text{kg}$ 表压力为 $p_e = 1.9\text{MPa}$ ，温度 $t_1 = 350^\circ\text{C}$ 的蒸汽。设锅炉给水温度为 $t_2 = 40^\circ\text{C}$ ，锅炉效率 $\eta_B = 0.78$ 。煤的发热量（热值）为 $Q_p = 2.97 \times 10^4 \text{kJ/kg}$ 。求每小时锅炉的煤耗量是多少？汽锅内水的加热和汽化、以及蒸汽的过热都在定压下进行。锅炉效率 η_B 的定义为：

$$\eta_B = \frac{\text{水和蒸汽所吸的热量}}{\text{燃料燃烧时所在发出的热量}}$$

（未被水和蒸汽所吸收的热量是锅炉的热损失，其中主要是烟囱出口处排烟所带走的热量。）

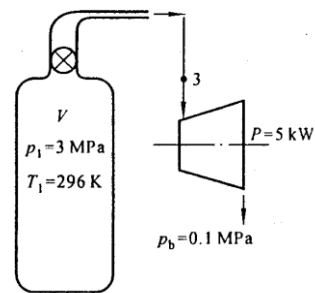


图 4-14

提示和答案： 生产蒸汽需要吸入热量 $q_0 = q_m q$ ，每小时锅炉耗煤

$$m = \frac{q_0}{\eta_B Q_p} = 1\ 281\ \text{kg}$$

4-24 1 kg 蒸汽， $p_1 = 3\text{MPa}$ 、 $t_1 = 450^\circ\text{C}$ ，可逆绝热膨胀至 $p_2 = 0.004\text{MPa}$ ，试用 $h-s$ 图求终点状态参数 t_2 、 v_2 、 h_2 、 s_2 并求膨胀功和技术功。

提示和答案： 由 $h-s$ 图查得： $h_1 = 3345\text{kJ/kg}$ 、 $v_1 = 0.108\text{m}^3/\text{kg}$ 、 $s_1 = 7.082\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ； $h_2 = 2132\text{kJ/kg}$ 、 $v_2 = 28\text{m}^3/\text{kg}$ 、 $s_2 = s_1 = 7.082\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 、 $t_2 = 29.4^\circ\text{C}$ 。绝热过程膨胀功等于热力学能差， $w = 1001\text{kJ/kg}$ ，技术功等于焓差， $w_t = 1214\text{kJ/kg}$ 。

4-25 1 kg 蒸汽，由初态 $p_1 = 2\text{MPa}$ ， $x_1 = 0.95$ ，定温膨胀到 $p_2 = 1\text{MPa}$ ，求终态参数 t_2 、 v_2 、 h_2 、 s_2 及过程中对蒸汽所加入的热量 q_T 和过程中蒸汽对外界所作的膨胀功 w 。

提示和答案： 由 $h-s$ 图查得 h_1 、 v_1 、 s_1 及 $h_2 = 2861\text{kJ/kg}$ 、 $t_2 = 212.5^\circ\text{C}$ 、 $v_2 = 0.215\text{m}^3/\text{kg}$ 和 $s_2 = 6.760\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ，据第一定律解析式，分别求出热量和热力学能差即可求得功，而定温过程 $q_T = T(s_2 - s_1) = 299.2\text{kJ/kg}$ 、 $w = q_T - \Delta u = 169.2\text{kJ/kg}$ 。

4-26 一台功率为 20 000 kW 的汽轮机，其耗汽率为 $d = 1.32 \times 10^{-6}\text{kg/J}$ 。从汽轮机排出的乏气参数为 $p_2 = 0.004\text{MPa}$ 、 $x_2 = 0.9$ 。乏汽进入冷凝器后凝结为冷凝水，如图 4-15 所示。冷凝器中的压力设为 0.004 MPa，即等于乏汽压力。冷凝水的温度等于乏汽压力下的饱和温度，乏汽在凝结时放出热量。这些热量为冷却水所吸收，因此冷却水离开冷凝器时的温度高于进入时的温度。设冷却水进入冷凝器时的温度为 10°C ，离开时温度为 18°C ，求冷却水每小时的流量 (t/h)。冷却水在管内流动，乏汽在管壁外凝结。管子通常用黄铜管，大型冷凝器中装有数千根黄铜管。

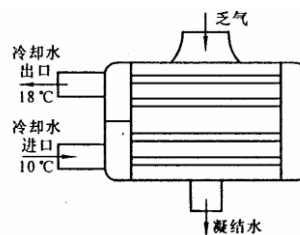


图 4-15

提示和答案： 已知功率及汽耗率可得每小时耗汽量，由乏汽状态可查取汽化潜热，得乏汽凝结为饱和水时放热量，再以冷凝器为体系，列能量方程解得冷却水流 $q_m = 6221.4\text{T/h}$ 。

4-27 锅炉给水在温度 $t_1 = 60\text{ }^\circ\text{C}$ 和压力 $p_1 = 3.5\text{ MPa}$ 下进入蒸汽锅炉的省煤器中，在锅炉中加热而成 $t_2 = 350\text{ }^\circ\text{C}$ 的过热蒸汽。试把过程表示在 $T-s$ 图上，并求出加热过程中水的平均吸热温度。

提示和答案： 水的加热过程可看作定压过程，由未饱和水与过热蒸汽表查取焓、熵数据后可得 $q_p = h_2 - h_1 = 2848.9\text{ kJ/kg}$ ， $\Delta s_{12} = s_2 - s_1 = 5.8316\text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ ， $\bar{T} = \frac{q_p}{\Delta s_{12}} = 215.4\text{ }^\circ\text{C}$ 。
过程 $T-s$ 图略。

4-28 图 4-16 所示的刚性容器容积为 3 m^3 ，内储压力 3.5 MPa 的饱和水和饱和蒸汽，其中汽和水的质量之比为 $1:9$ 。将饱和水通过阀门排出容器，使容器内蒸汽和水的总质量减为原来的一半。若要保持容器内温度不变，试求需从外界传入多少热量。

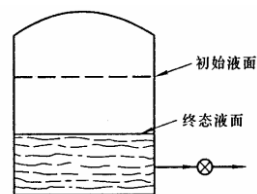


图 4-16

提示和答案： 由饱和水和饱和水蒸气表查得： $p = 3.5\text{ MPa}$ 时的饱和参数，并据 $V = 3\text{ m}^3$ ，汽水质量为 $1:9$ ，即干度 $x_1 = 0.1$ ，

得 $v_1 = 0.0068167\text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $h_1 = 1224.89\text{ kJ/kg}$ 、 $s_1 = 3.06488\text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ 。

$$\text{初态质量 } m_1 = \frac{V}{v_1} = 440.10\text{ kg}，\text{ 其中饱和水 } m_l = 396.09\text{ kg}，\text{ 饱和蒸汽 } m_v = 44.01\text{ kg}。$$

据题意，自阀门排出饱和水 $m_{\text{out}} = 220.05\text{ kg}$ ，容器内终态质量 $m_2 = 220.05\text{ kg}$ 。

$$\text{排出过程容器内温度不变，故蒸汽压力维持 } 3.5\text{ MPa} \text{ 不变， } v_2 = \frac{V}{m_2} = 0.0136333\text{ m}^3/\text{kg}，$$

$$x_2 = \frac{v_2 - v'}{v'' - v'} = 0.2221，\quad h_2 = 1438.95\text{ kJ/kg}。$$

取容器为系统，立能量方程，则 $Q - H_{\text{out}} = U_2 - U_1$ ，解得 $Q = 8531.3\text{ kJ}$ 。

4-29 绝热良好的圆筒内装置自由活动无磨擦的活塞，活塞下有压力为 0.8 MPa ，干度为 0.9 的湿蒸汽 0.5 kg ，活塞上方有空气以保持压力平衡，吹空气入活塞上方空间，下压活塞，使蒸汽压力上升，干度变为 1 。试求：（1）求终态（ $x = 1$ ）的蒸汽压力；（2）压缩中对蒸汽做功多少？

提示和答案： 由 $p = 0.8\text{ MPa}$ 时饱和参数，计算得 $v_1 = 0.2164\text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $h_1 = 2564.09\text{ kJ/kg}$ 、 $s_1 = 6.20089\text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ 。（1）活塞下压，可认为是等熵过程，查饱和水蒸气表，经插值，

得 $p_2 = 2.88 \text{ MPa}$ (2) 因 $p_2 = 2.88 \text{ MPa}$ 、 $v'' = 0.069449 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $h'' = 1805.5 \text{ kJ/kg}$ ，
 $w = u_1 - u_2 = h_1 - p_1 v_1 - (h_2 - p_2 v_2) = 785.48 \text{ kJ/kg}$ ， $W = mw = 392.7 \text{ kJ}$ 。

4-30 压力维持 200 kPa 恒定的汽缸内有 0.25 kg 饱和水蒸气。加热使温度升高 200°C ，
 试求：(1) 初、终态水蒸气的热力学能；(2) 过程的加热量。

提示和答案： 由状态 1，查饱和水和饱和水蒸气表得： $t_s = 120.2^\circ\text{C}$ 、 $h'' = 2706.5 \text{ kJ/kg}$ 、
 $v'' = 0.8865 \text{ m}^3/\text{kg}$ ，故 $u'' = 2529.2 \text{ kJ/kg}$ 。由状态 2 查水蒸气热力性质表，
 $h_2 = 3112.4 \text{ kJ/kg}$ 、 $v_2 = 1.3634 \text{ m}^3/\text{kg}$ ，计算得 $u_2 = 2839.7 \text{ kJ/kg}$ ，取水蒸气为闭口系，据能
 量方程有 $Q = m(\Delta u + w) = m[(u_2 - u_1) + p(v_2 - v_1)] = 101.5 \text{ kJ}$ 。

4-31 反应堆容积 1 m^3 ，其中充满 20 MPa 、 360°C 的水。反应堆置于密封、绝热的良好
 压力壳内，初始时压力壳抽空。在反应堆烧毁事故中，水充满压力壳，为了使终态压力壳内
 压力不超过 200 kPa ，确定压力壳的最小体积。

提示和答案： 取水为闭口系，由于可以认为壳体密封、绝热，刚性，所以事故中系统
 不变，热量和功均为零， $u_1 = u_2$ 。初态：由 20 MPa 、 360°C 查得 h_1 ， v_1 ，计算得 $u_1 = 1703.7 \text{ kJ/kg}$ ，

$m = \frac{V_1}{v_1} = 548.5 \text{ kg}$ 。终态：由 200 kPa ，查表得饱和参数后计算 $u' = h' - p_s v' = 504.5 \text{ kJ/kg}$ ，

$u'' = h'' - p_s v'' = 2529.2 \text{ kJ/kg}$ 。因 $u' < u_2 < u''$ ，所以终态为湿蒸汽状态，

$x_2 = \frac{u_2 - u'}{u'' - u'} = 0.592$ ， $v_2 = 0.5253 \text{ m}^3/\text{kg}$ ， $V_2 = 288.2 \text{ m}^3$ 。

4-32 容积为 100 L 的刚性透热容器内含 30°C 的氟利昂 R134a 饱和蒸气，容器 A 和气
 缸 B 用阀门管道相通，如图 4-17。B 中通过活塞传递的压
 力恒定为 200 kPa 。打开阀门，氟利昂 R134a 缓慢流入 B，
 直至容器 A 内压力也为 200 kPa ，过程中容器 A 和 B 内工
 质温度保持 30°C 不变，求过程的热量。

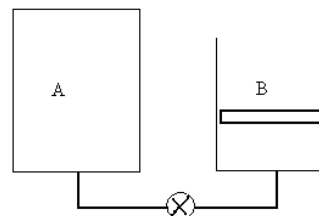


图 4-17

提示和答案： 取全部 R134a 为闭口系。终态时容器 A
 和气缸 B 内 R134a 的状态相同。确定初、终态热力学能及过程中通过活塞作的功即可求得
 热量。利用初态温度及中态压力温度，查 R134a 热力性质表得其他初、终态参数并算得质

量 $m = \frac{V_1}{v_1} = 3.759 \text{ kg}$ 及热力学能 $u_1 = h_1 - p_1 v_1 = 394.3 \text{ kJ/kg}$ 、 $u_2 = h_2 - p_2 v_2 = 403.3 \text{ kJ/kg}$ ，体

积 $V_2 = mv_2 = 0.4462\text{m}^3$ ，并确定在气缸 B 内 R134a 的体积 $\Delta V_B = V_2 - V_A = 0.3462\text{m}^3$ ，求得

$$Q = \Delta U + W = m(u_2 - u_1) + p_2 \Delta V_B = 103.1\text{kJ}。$$

4-33 某大型蒸汽膨胀发动机有两股流体流入，一股是参数为 $p_1 = 2\text{MPa}$ 、 $t_1 = 500^\circ\text{C}$ 的蒸汽，质量流量 $q_{m1} = 2.0\text{kg/s}$ ；另一股是 $p_2 = 120\text{kPa}$ 、 $t_2 = 30^\circ\text{C}$ 的冷却水，质量流量为 $q_{m2} = 0.5\text{kg/s}$ 。两股流体汇合成一股流出设备时 $p_3 = 150\text{kPa}$ 、干度 $x_3 = 80\%$ ，流出管的直径是 0.15m 。若过程中的热损失是 300kW ，试求工质通过管道排出时的速度和发动机输出功率。

提示和答案：查饱和水和饱和水蒸气表后算得： $v_3 = v_3' + x_3(v_3'' - v_3') = 0.09277\text{m}^3/\text{kg}$ ，
 $h_3 = h_3' + x_3(h_3'' - h_3') = 2248.3\text{kJ/kg}$ 。取发动机为控制体积，据质量守恒

$q_{m3} = q_{m1} + q_{m2} = 2.5\text{kg/s}$ ， $c = \frac{q_{m3}v_3}{A} = 131.2\text{m/s}$ 。据稳态稳流能量方程可得

$$P = q_{m1}h_1 + q_{m2}h_2 - \left(q_{m3} \left(h_3 + \frac{c^2}{2} \right) \right) - \dot{Q}_{\text{loss}} = 6。$$

4-34 气缸活塞系统的缸内含有 5kg 氟利昂 R134a 过热蒸气，参数为 20°C 、 0.5MPa 。在温度维持常数的条件下冷却到干度为 0.5 的终态。过程中系统放热 500kJ ，求过程初终态的体积和过程功。

提示和答案：工质在缸内的经历等温升压过程 $1-2'$ 和等温等压过程 $2'-2$ 。初态为过热蒸汽查表，得 h_1 和 v_1 计算 u_1 及 $V_1 = 0.211\text{m}^3$ ，终态为干度为 0.5 湿蒸汽，由 20°C 查得饱和参数，结合干度得 $V_2 = 0.092\text{m}^3$ 。再由闭口系能量方程解得 $W = -87.5\text{kJ/kg}$ 。

4-35 体积均为 1m^3 的两个刚性容器 A 和 B 用管道阀门相连（如图 4-18），初始时容器 A 内干度为 0.15 ，温度为 20°C 的氟利昂 R134a，容器 B 为真空。打开阀门，氟利昂 R134a 蒸气缓缓流入容器 B，直至容器 A 和 B 内压力相等，过程进行足够缓慢，使过程中温度保持 20°C 不变，且两侧状态相同，求过程中的换热量。

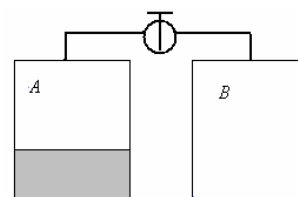


图 4-18

提示和答案：取全部氟利昂 R134a 为控制质量。

初态： $v_1 = 0.06308$ ， $m = \frac{V_A}{v_1} = 164.5\text{kg}$ ， $h_1 = h' + x_1(h'' - h') = 254.8\text{kJ/kg}$ ，

$u_1 = 251.3\text{kJ/kg}$ ；终态： $v_2 = \frac{V_A + V_B}{m} = 0.0122\text{m}^3/\text{kg}$ ， $v' < v_2 < v''$ ，所以终态仍是湿蒸气

状态。 $x_2 = \frac{v_2 - v'}{v'' - v'} = 0.323$, $h_2 = h' + x_2(h'' - h') = 286.3\text{kJ/kg}$, $u_2 = h_2 - p_s v_2 = 279.3\text{kJ/kg}$,

$$Q = \Delta U + W = m(u_2 - u_1) = 4603.7\text{kJ} \text{。}$$