第一章 基本概念

1-1 英制系统中采用华氏温标，它规定在标准大气压（101325Pa）下纯水的冰点是32°F，汽点是212°F，试推导华氏温度与摄氏温度的换算关系。

解：
$$\frac{\{t\}_{°F}-32}{212-32}=\frac{\{t\}_{°C}-0}{100-0}\qquad \{t\}_{°F}=\frac{180}{100}\{t\}_{°C}+32=\frac{9}{5}\{t\}_{°C}+32$$

1-2 英制系统中朗肯温度与华氏温度的关系为$\{T\}_{°R}=\{t\}_{°F}+459.67$。已知热力学绝对温标及朗肯温标在纯水冰点的读数分别是 273.15K 和 491.67°R；汽点的读数分别是 373.15K 和 671.67°R。(1)导出朗肯温度和开尔文温度的关系式；(2) 开尔文温标上绝对零度在朗肯温标上是多少度？

解：(1) 若任意温度 T 在朗肯温标上读数为$T\{°R\}$在热力学绝对温标上读数为 $T\{K\}$，

则
$$\frac{671.67-491.67}{373.15-273.15}=\frac{T\{°R\}-491.67}{T\{K\}-273.15}\qquad 解得\ T\{°R\}=1.8T\{K\}$$

(2) 据上述关系 $T\{K\}=0$ K 时　　$T\{°R\}=0°R$

1-3 设一新温标，用符号°N 表示温度单位（它的绝对温标是用°Q 表示温度单位）。规定纯水的冰点和汽点100°N和1000°N。试求：(1) 该新温标与摄氏温标的关系；(2) 若该温标的绝对零度与热力学温标零度相同，则该温标读数为 0°N 时，其绝对温标读数是多少°Q？

解：(1)
$$\frac{\{t\}_{°N}-100}{1000-100}=\frac{\{t\}_{°C}-0}{100-0}\qquad \{t\}_{°N}=9\{t\}_{°C}+100$$

(2)
$$\begin{aligned}\{T\}_{°Q}&=\{t\}_{°N}+常数=9\{t\}_{°C}+100+常数\\&=9[\{T\}_{K}-273.15]+100+常数\end{aligned}$$

据题意，当 T{K}=0 K 时，$T\{°Q\}=0°Q$ 故解得上式中常数=2358.35 代回原式得

$$\{T\}_{°Q}=\{t\}_{°N}+2358.35\qquad T\{°N\}=0\ 时\qquad T\{°Q\}=2358.385°N$$

1-4 直径为 1m 的球形刚性容器，抽气后真空度为 752.5mmHg，若当地大气为 0.101MPa，求(1) 容器内绝对压力为多少 Pa；(2) 容器表面受力多少牛顿？

解：(1) $p=p_b-p_v=0.101\times10^6\text{Pa}-752.5\text{mmHg}\times133.3\text{Pa/mmHg}=691.75\text{Pa}$

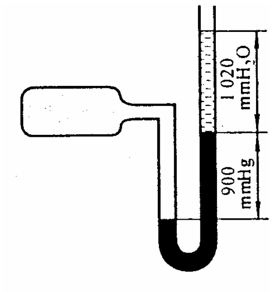
(2) $A_0=4\pi d^2=4\times3.1416\times1\text{m}^2=12.57\text{m}^2$

$F=A_0\Delta p=A_0(p_b-p)=12.57\ \text{m}^2\times(0.101\times10^6\text{Pa}-691.75\text{Pa})=1.261\times10^6\text{N}$

1-5 用∪型压力计测量容器中气体的压力，在水银柱上加一段水，则得水柱高 1020mm，水银柱高 900mm，如图 1-17 所示，若当地大气压为 755mmHg，求容器中气体的压力为多少 MPa？

解：

$$p = p_e + p_b = (1020\text{mmH}_2\text{O} \times 9.81\text{Pa/mmH}_2\text{O}$$
$$+900\text{mmHg} \times 133.3\text{Pa/mmHg})$$
$$+755\text{mmHg} \times 133.3\text{Pa/mmHg}$$
$$= 2.306 \times 10^5\,\text{Pa} = 0.231\text{MPa}$$



1-6 容器中的真空度为 $p_v = 600\text{mmHg}$，气压计上水银柱高度为 $p_b = 755\text{mm}$，求容器中的绝对压力（以 MPa 表示）。如果容器中的绝对压力不变，而气压计上水银柱高度为 $p_b' = 770\text{mm}$，求此时真空表上的读数（以 mmHg 表示）是多少？

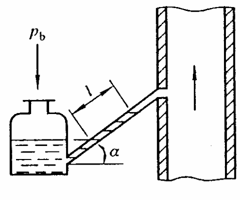
解 ：容器中气体压力低于当地大气压力，故绝对压力

$$p = p_b - p_v = (755 - 600)\text{mmHg} = 155\text{mmHg} = 0.0207\text{MPa}$$

若容器中绝对压力不变，而大气压力变为 $p_b' = 770\text{mmHg}$。则此时真空表上的读数为

$$p_v' = p_b' - p = (770 - 155)\text{mmHg} = 615\text{mmHg}$$

1-7 用斜管压力计测量锅炉烟道烟气的真空度（如图 1-18）管子的倾斜角 $\alpha = 30°$，压力计中使用密度 $\rho = 0.8 \times 10^3\,\text{kg/m}^3$ 的煤油，斜管中液柱长度 l=200mm。当地大气压力 $p_v = 745\text{mmHg}$。求烟气的真空度（以 mmH_2O 表示）及绝对压力（以 Pa 表示）。



解 ：倾斜式压力计上读数即烟气的真空度

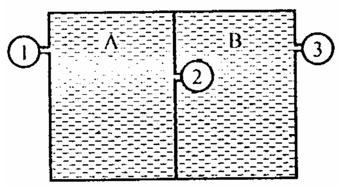
$$p_v = l \sin\alpha \rho g = 200 \times 10^{-3}\,\text{m} \times 0.5 \times 0.8 \times 10^3\,\text{kg/m}^3 \times 9.81\text{m/s}^2 = 80 \times 9.81\text{Pa}$$

而 $1\text{Pa} = \dfrac{1}{9.81}\text{mmH}_2\text{O}$ $\quad p_v = 80\text{mmH}_2\text{O} \quad 1\text{mmHg} = 13.595\text{mmH}_2\text{O}$

烟气的绝对压力

$$p = p_b - p_v = 745\text{mmHg} \times 13.595\text{mmH}_2\text{O/mmHg} - 80\text{mmH}_2\text{O}$$
$$= 10048.3\text{mmH}_2\text{O} = 0.9857 \times 10^5\,\text{Pa}$$

1-8 容器被分隔成 AB 两室，如图 1-19 所示，已知当场大气压 $p_b = 0.1013\text{MPa}$，气压表 2 读为 $p_{eB2} = 0.04\text{MPa}$，气压表 1 的读数 $p_{eA1} = 0.294\text{MPa}$，求气压表 3 的读数（用 MPa 表示）。



解：

$$p_A = p_b + p_{eA1}$$
$$= 0.1013\text{MPa} + 0.294\text{MPa} = 0.3953\text{MPa}$$

$$p_A = p_B + p_{eB2}$$
$$p_B = p_A - p_{eB2} = 0.39153\text{MPa} - 0.04\text{MPa} = 0.3553\text{MPa}$$
$$p_{eB3} = p_B - p_b = 0.3553\text{MPa} - 0.1013\text{MPa} = 0.254\text{MPa}$$

1-9 气缸中密封有空气，初态为 $p_1 = 0.2\text{MPa}$，$V_1 = 0.4\text{m}^3$，缓慢胀到 $V_2 = 0.8\text{m}^3$。(1) 过程中 pV 持不变；(2) 过程中气体先循 $\{p\}_{\text{MPa}} = 0.4 - 0.5\{V\}_{\text{m}^3}$ 膨胀到 $V_m = 0.6\text{m}^3$，再维持压力不变，膨胀到 $V_2 = 0.8\text{m}^3$。分别求出两过程中气体作出的膨胀功。

解 (1)

$$W = \int_1^2 p\text{d}V = \int_1^2 \frac{pV}{V}\text{d}V = p_1V_1\ln\frac{V_2}{V_1} = 0.2\times10^6\text{Pa}\times0.4\text{m}^3\times\ln\frac{0.8\text{m}^3}{0.4\text{m}^3} = 5.54\times10^4\text{J}$$

(2)
$$w = \int_1^2 p\text{d}V = \int_1^m p\text{d}V + \int_m^2 p\text{d}V$$
$$= \int_1^m (0.4-0.5V)\times10^6\text{d}V + (0.4-0.5\times0.6)\times10^6\int_m^2 \text{d}V$$
$$= [0.4(V_m - V_1) - \frac{0.5}{2}(V_m{}^2 - V_1^2) + 0.1\times(V_2 - V_m)]\times10^6$$
$$= [0.4\times(0.6-0.4) + \frac{0.5}{2}(0.6^2 - 0.4^2) + 0.1\times(0.8-0.6)]\times10^6 = 1.5\times10^5\text{J}$$

1-11 测得某汽油机气缸内燃气的压力与容积对应值如下表所示，求燃气在该膨胀过程中所作的功。

p/MPa	1.655	1.069	0.724	0.500	0.396	0.317	0.245	0.193	0.103
V/cm^3	114.71	163.87	245.81	327.74	409.68	491.61	573.55	655.48	704.64

解：

$$W = \int_1^2 p\text{d}V \cong \Sigma\bar{p}\Delta V$$
$$= \frac{(1.655+1.069)\text{MPa}}{2}\times(63.87-114.71)\text{m}^3 + \frac{(1.069+0.724)}{2}\times(245.81-163.87)\text{m}^3$$
$$+ \frac{(0.724+0.500)\text{MPa}}{2}\times(327.74-245.81)\text{m}^3 + \frac{(0.500+0.396)\text{MPa}}{2}\times(409.68-327.74)\text{m}^3$$
$$+ \frac{(0.396+0.317)\text{MPa}}{2}\times(491.61-409.68)\text{m}^3 + \frac{(0.317+0.245)\text{MPa}}{2}\times(573.55-491.61)\text{m}^3$$
$$+ \frac{(0.245+0.193)\text{MPa}}{2}\times(655.48-573.55)\text{m}^3 + \frac{(0.193+0.103)\text{MPa}}{2}\times(704.64-655.48)\text{m}^3$$
$$= 304.7\text{J}$$

1-12 有一绝对真空的钢瓶，当阀门的打开时，在大气压 $p_0 = 1.013\times10^5\text{Pa}$ 的作用下有体积为 0.1m^3 的空气被输入钢瓶，求大气对输入钢瓶的空气所作功为多少？

解 $W = p_0 V = 1.013\times10^5\,\text{Pa}\times0.1\text{m}^3 = 1.013\times10^4\,\text{J} = 10.13\text{kJ}$

1-14 据统计资料，上海各发电厂 1983 年平均发 1 千瓦小时的电耗标煤 372 克，若标煤的热值是 29308kJ/kg，试求 1983 年上海电厂平均热效率 η_t 是多少？

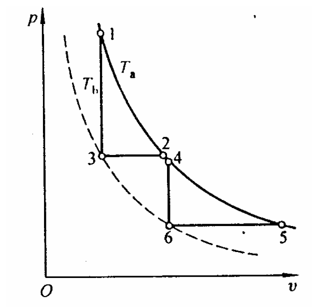
$$解：\eta_t = \frac{W_{\text{net}}}{Q_1} = \frac{3600\text{kJ}}{0.372\text{kg}\times29308\text{kJ/kg}} = 33.3\%$$

1-15 某房间冬季通过墙壁和窗子向外散热 70,000kJ/h，房内有 2 只 40W 电灯照明，其它家有电耗电约 100W，为维持房内温度不变，房主购买供暖系数为 5 的热泵，求热泵最小功率。

解： 热泵供暖功率为 $\psi_1 = \dfrac{70000\text{kJ/h}}{3600\text{s/h}} - (2\times40\text{J/s}+100\text{J/s})\times10^{-3} = 19.26\text{kW}$

因 $\varepsilon' = \dfrac{\psi_1}{P}$ 　　故 $P = \dfrac{\psi_1}{\varepsilon'} = \dfrac{19.26\text{kW}}{5} = 3.85\text{kW}$

1-16 若某种气体的状态方程为 $pv = R_g T$，现取质量 1kg 的该种气体分别作两次循环，如图 1-20 中循环 1-2-3-1 和循环 4-5-6-4 所示，设过程 1-2 和过程 4-5 中温度不变都等于 T_a，过程 2-3 和 5-6 中压力不变，过程 3-1 和 4-6 中体积不变。又设状态 3 和状态 6 温度相等，都等于 T_b。试证明两个循环中 1kg 气体对外界所作的循环净功相同。



证明 ：(1 循环 1231 和循环 4564 中过程 1-2 和 4-5 都是等温过程，T= T_a，据理想气体状态方程，$pv = R_g T$，可知

$$p = \frac{R_g T}{v} = \frac{R_g T_a}{v}$$

$$w_{12} = \int_{v_1}^{v_2} p\text{d}v = \int_{v_1}^{v_2} \frac{R_g T_a}{v}\text{d}v = R_g T_a \ln\frac{v_2}{v_1}\ ;$$

$$w_{4-5} = \int_{v_4}^{v_5} p\text{d}v = \int_{v_4}^{v_5} \frac{R_g T_a}{v}\text{d}v = R_g T_a \ln\frac{v_5}{v_4}$$

根据已知条件：$v_1 = v_3$，$v_4 = v_6$，$p_3 = p_2$，$p_6 = p_5$，$T_2 = T_5 = T_a$，$T_3 = T_6 = T_b$ 得

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{v_2}{v_3} = \frac{R_g T_2}{p_2}\frac{p_3}{R_g T_3} = \frac{T_2}{T_3} = \frac{T_a}{T_b},\quad \frac{v_5}{v_4} = \frac{v_5}{v_6} = \frac{R_g T_5}{p_5}\frac{p_6}{R_g T_6} = \frac{T_5}{T_6} = \frac{T_a}{T_b}$$

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{v_5}{v_4} \qquad 即\ w_{12} = w_{45}$$

该式表明 1kg 工质在 1-2 和 4-5 过程中作出的膨胀功相同：

（2）过程 2-3 和 5-6 都是等压过程，压力分别为 p_2 和 p_5

$$w_{2-3}=p_2(v_3-v_2)=p_3v_3-p_2v_2=R_g(T_b-T_a)$$
$$w_{5-6}=p_5(v_6-v_5)=p_6v_6-p_5v_5=R_g(T_b-T_a)$$
$$w_{2-3}=w_{5-6}$$

（iii）过程 3-1 和 6-4 中 v 不变，故功为零。综上两循环的净功相等，即

$$W_{net,1231}=W_{12}+W_{23}+W_{31}=W_{45}+W_{56}+W_{64}=W_{net,4564}$$

证毕。

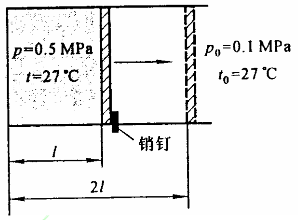
第二章 热力学第一定律

2-1 一辆汽车 1 小时消耗汽油 34.1 升，已知汽油发热量为 $44000\text{kJ}/kg$，汽油密度 0.75g/cm^3。测得该车通过车轮出的功率为 64kW，试求汽车通过排气，水箱散热等各种途径所放出的热量。

解： 汽油总发热量 $Q = 34.1\times10^{-3}\text{m}^3\times750\text{kg/m}^3\times44000\text{kJ/kg} = 1125300\text{kJ}$

汽车散发热量 $Q_{out} = Q - W\times3600 = (1125300 - 64\times3600)\text{kJ/h} = 894900\text{kJ/h}$

2-2 1kg 氧气置于图 2-13 所示气缸内，缸壁能充分导热，且活塞与缸壁无磨擦。初始时氧气压力为 0.5MPa，温度为 27°C，若气缸长度 $2l$，活塞质量为 10kg。试计算拔除钉后，活塞可能达到最大速度。



解：由于可逆过程对外界作功最大，故按可逆定温膨胀计算：

$$w = R_g T\ln\frac{V_2}{V_1} = 0.26\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(273.15+27)\text{K}\times\ln\frac{A\times2h}{A\times h}$$
$$= 54.09\text{kJ/kg}$$

$$W = W_0 + \frac{m'}{2}\Delta c^2 = p_0(V_2 - V_1) + \frac{m'}{2}{c_2}^2 \qquad \text{(a)}$$

$$V_1 = \frac{m_1R_gT_1}{p_1} = \frac{1\text{kg}\times260\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times300.15\text{K}}{0.5\times10^6\text{Pa}} = 0.1561\text{m}^3 \qquad V_2 = 2V_1 = 0.3122\text{m}^3$$

代入(a)

$$c_2 = \sqrt{2\times(54.09\text{J/kg}\times1\text{kg}\times10^3 - 0.1\times10^6\text{Pa}\times0.1561\text{m}^3)/10\text{kg}} = 87.7\text{m/s}$$

2-3 气体某一过程中吸收了 50J 的热量，同时，热力学能增加 84J，问此过程是膨胀过程还是压缩过程？对外作功是多少 J？

解 取气体为系统，据闭口系能量方程式 $Q = \Delta U + W$

$$W = Q - \Delta U = 50\text{J} - 84\text{J} = -34\text{J}$$

所以过程是压缩过程，外界对气体作功 34J。

2-4 在冬季，工厂车间每一小时经过墙壁和玻璃等处损失热量 $3\times10^6\text{kJ}$，车间中各种机床的总功率是 375kW，且最终全部变成热能，另外，室内经常点着 50 盏 100W 的电灯，若使该车间温度保持不变，问每小时需另外加入多少热量？

解 要使车间保持温度不变，必须使车间内每小时产生的热量等散失的热量

即 $Q = Q_m + Q_E + Q_{补} + Q_{less} = 0$

$$Q_m = 375\text{kJ/s}\times3600\text{s} = 1.35\times10^6\text{kJ}\ ;\ Q_E = 50\times0.1\text{kJ/s}\times3600\text{s} = 18000\text{kJ}$$

$$Q_{less} = -3\times10^6\text{kJ}$$
$$Q_{补} = -Q_{less} - Q_m - Q_E = 3\times10^6\text{kJ} - 1.35\times10^6\text{kJ} - 18000\text{kJ} = 1632000\text{kJ}$$

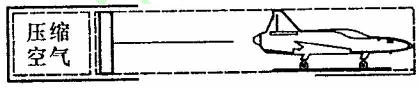
2-5 夏日，为避免阳光直射，密闭门窗，用电扇取凉，若假定房间内初温为 28°C，压力为 0.1MPa，电扇的功率为 0.06kW，太阳直射传入的热量为 0.1kW，若室内有三人，每人每小时向环境散发的热量为 418.7kJ，通过墙壁向外散热1800kJ/h，试求面积为15m^2，高度为 3.0m 的室内空气每小时温度的升高值，已知空气的热力学能与温度关系为$\Delta u = 0.72\Delta T \text{kJ/kg}$。

解 室内空气总质量 $$m = \frac{pV}{R_g T} = \frac{0.1\times10^6\text{Pa}\times15\text{m}^2\times3.0\text{m}}{287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times(28+273.15)\text{K}} = 52.06\text{kg}$$

取室内空气为系统 $Q = \Delta U + W$ 因 W=0 所以$\Delta U = Q$

$$\Delta T = \frac{Q}{0.72m} = \frac{(0.1+0.06)\text{kJ/s}\times3600\text{s}+418.7\text{kJ}\times3-1800\text{kJ}}{0.72\times52.06\text{kg}} = 0.86\text{K}$$

2-6 有一飞机的弹射装置，如图 2-14，在气缸内装有压缩空气，初始体积为0.28m^3，终了体积为0.99m^3，飞机的发射速度为61m/s，活塞、连杆和飞机的总质量为 2722kg。设发射过程进行很快，压缩空气和外界间无传热现象，若不计磨擦力，求发射过程中压缩空气的热力学能变化。



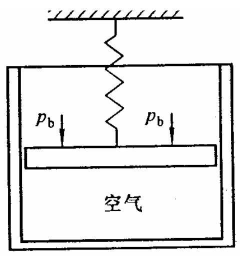
解 取压缩空气为系统 $Q = \Delta U + W$

其中 $Q = 0$ $\quad W = p_0(V_2 - V_1) + \dfrac{m}{2}c_2{}^2$

$$\Delta U = -p_0(V_2 - V_1) - \frac{m}{2}c_2{}^2 = -0.1\times10^6\text{Pa}\times(0.99-0.28)\text{m}^3 - \frac{2722\text{kg}}{2}\times(61\text{m/s})^2$$

$$= -499.3\times10^3\text{J} = -499\text{kJ}$$

2-7 如图 2-15 所示，气缸内空气的体积为0.008m^3，温度为 17°C。初始时空气压力为 0.1013MPa，环境大气压力$p_b = 0.1\text{MPa}$，弹簧呈自由状态。现向空气加热，使其压力升高，并推动活塞上升而压缩弹簧。已知活塞面积为0.08m^2，弹簧刚度为$K = 40000\text{N/m}$，空气热力学能变化关系式为$\Delta\{u\}_{\text{kJ/kg}} = 0.718\Delta\{T\}_{\text{K}}$。试求，使气缸内空气压力达到0.15MPa 所需的热量。



解：先求活塞质量，初始时弹簧呈自由状态，

$$m_{活}\times g + p_b\times A = p_1\times A$$

$$m_{活} = \frac{(p_1 - p_b)\times A}{g} = \frac{(0.1013-0.1)\times10^6\text{Pa}\times0.08\text{m}^2}{9.80665\text{m/s}^2} = 10.61\text{kg}$$

空气质量 $m_a = \dfrac{p_1 V_1}{R_g T_1} = \dfrac{0.1013 \times 10^6 \,\text{Pa} \times 0.008\text{m}^3}{287\text{J/(kg}\cdot\text{K)} \times 290.15\text{K}} = 9.73 \times 10^{-3}\,\text{kg}$

$$h = \frac{V_1}{A} = \frac{0.008\text{m}^3}{0.08\text{m}^2} = 0.1\text{m}$$

终态时 $p_2 = 0.3\text{MPa}$

$$(p_2 - p_b) \times A - m_{活} \times g = xK$$

$$x = \frac{(0.15 - 0.1) \times 10^6 \,\text{Pa} \times 0.08\text{m}^2 - 10.61\text{kg} \times 9.81\text{m/s}^2}{40000\text{N/m}} = 0.0974\text{m}$$

$$V_2 = A(h + x) = 0.08\text{m}^2 \times (0.1 + 0.0974)\text{m} = 0.0158\text{m}^3$$

$$T_2 = \frac{p_2 V_2}{m_a R_g} = \frac{0.15 \times 10^6 \,\text{Pa} \times 0.0158\text{m}^3}{9.73 \times 10^{-3}\,\text{kg} \times 287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}} = 848.26\text{K}$$

$$\Delta U = mc_V (T_2 - T_1) = 9.73 \times 10^{-3}\,\text{kg} \times 0.718\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times (848.26 - 290.15)\text{K} = 3.90\text{kJ}$$

$$W = \int_1^2 p\text{d}V = \int_{A_2}^2 (p_b A + m_{活} \times g + Kx) A\text{d}V$$

$$= \int_1^2 (p_b V + m_{活} \times g + Kx)\text{d}x$$

$$= (p_b A + m_{活} g)(x_2 - x_1) + \frac{K}{2}(x_2{}^2 - x_1{}^2)$$

$$= (0.1 \times 10^6 \,\text{Pa} \times 0.08\text{m}^2 + 10.61\text{kg} \times 9.81\text{m/s}^2) \times 0.0974\text{m} + \frac{40000\text{N/m}}{2} \times (0.0974\text{m})^2$$

$$= 979\text{J} = 0.98\text{kJ}$$

$$Q = \Delta U + W = 3.90\text{kJ} + 0.98\text{kJ} = 4.88\text{kJ}$$

2-8 有一橡皮球，当其内部气体的压力和大气压相同，为 0.1MPa 时呈自由状态，体积为 0.3m^3。气球受火焰照射而受热，其体积膨胀一倍，压力上升为 0.15MPa，设气球的压力与体积成正比。试求：(1) 该过程中气体作的功；(2) 用于克服橡皮气球弹力所作的功，若初始时气体温度为 17°C，求球内气体的吸热量。已知该气体气体常数 $R_g = 287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$，其热力学能 $\{u\}_{\text{kJ/kg}} = 0.72\{T\}_{\text{K}}$。

解 据题意 $\Delta p = (p - p_0) = kV + b$ (a)

当 $V_1 = 0.3\text{m}^3$ 时 $\Delta p = 0$；$V_2 = 0.6\text{m}^3$时，$\Delta p = 0.05\text{MPa}$

代入 (a)，解得 $b = -0.05$ $k = 0.166$ 所以 $\Delta p = 0.1667V - 0.05$

$$m=\frac{p_1V_1}{R_gT_1}=\frac{0.1\times10^6\,\mathrm{Pa}\times0.3\mathrm{m}^3}{287\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times290.15\mathrm{K}}=0.360\mathrm{kg}$$

(1)

$$W=\int_1^2 p\mathrm{d}v=\int_{V_1}^{V_2}(\Delta p+p_0)\mathrm{d}V=\int_{V_1}^{V_2}(0.1667V-0.05+0.1)\times10^6\mathrm{d}V$$
$$=37500\mathrm{J}=37.5\mathrm{kJ}$$

(2) $W_{斥}=p_0(V_2-V_1)=0.1\times10^6\,\mathrm{Pa}\times(0.6-0.3)\mathrm{m}^3=30000\mathrm{J}=30\mathrm{kJ}$

$$W_{弹}=W-W_{斥}=37.5\mathrm{kJ}-30\mathrm{kJ}=7.5kJ$$

(3) $T_2=\dfrac{p_2V_2}{mR_g}=\dfrac{0.15\times10^6\,\mathrm{Pa}\times0.6\mathrm{m}^3}{0.360\mathrm{kg}\times287\mathrm{J/(kg\cdot K)}}=871.08\mathrm{K}$

$$Q=\Delta U+W=m(u_2-u_1)+W$$
$$=0.360\mathrm{kg}\times0.72\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times(871.08-290.15)\mathrm{K}+37.5\mathrm{kJ}=188.1\mathrm{kJ}$$

2-9 空气在某压气机中被压缩，压缩前空气的参数是：$p_1=0.1\mathrm{MPa}$，$v_1=0.845\,\mathrm{m}^3/\mathrm{kg}$。压缩后的参数是 $p_2=0.1\mathrm{MPa}$，$v_2=0175\,\mathrm{m}^3/\mathrm{kg}$。设在压缩过程中每 kg 空气的热力学能增加 146.5kJ 同时向外放出热量 50kJ。压气机每分钟产生压缩空气 10kg。求：(1) 压缩过程中对每 kg 气体所作的体积变化功；(2) 每生产 1kg 的压缩空气所需的功（技术功）；(3) 带动此压气机要用多大功率的电动机？

解 （1）闭口系能量方程

$q=\Delta u+w$，　　由已知条件：$q=-50\mathrm{kJ/kg}$，$\Delta u=146.5\mathrm{kJ/kg}$

得　$w=q-\Delta u=-50\mathrm{kJ}-146.5\mathrm{kJ}=-196.5\mathrm{kJ/kg}$

即压缩过程中压气机对每公斤气体作功 196.5kJ

(2)　压气机是开口热力系，生产 1kg 空气需要的是技术功 w_t。由开口系能量守恒式

$$q=\Delta h+w_t$$

得　$w_t=q-\Delta h=q-\Delta u-\Delta(pv)=q-\Delta u-(p_2v_2-p_1v_1)$

$$=-50\mathrm{kJ/kg}-146.5\mathrm{kJ/kg}$$
$$-(0.8\times10^3\mathrm{kPa}\times0.175\mathrm{m}^3/\mathrm{kg}-0.1\times10^3\mathrm{kPa}\times0.845\mathrm{m}^3/\mathrm{kg})=252\mathrm{kJ/kg}$$

即每生产 1 公斤压缩空气所需技术功为 252kJ。

（3）压气机每分钟生产压缩空气 10kg，即$1/6\mathrm{kg/s}$，故带动压气机的电机功率为

$$N=\mathrm{q}_m w_t=\frac{1}{6}\mathrm{kg/s}\times252\mathrm{kJ/kg}=42\mathrm{kW}$$

2-10 某蒸汽动力厂中锅炉以 40T/h 的蒸汽供入蒸汽轮机。进口处压力表上读数是 9MPa，蒸汽的焓是 3441kJ/kg。蒸汽轮机出口处真空表上的读数是 0.0974MPa，出口蒸汽的焓是 2248kJ/kg，汽轮机对环境散热为 6.81×10^5 kJ/h。求：(1) 进、出口处蒸汽的绝对压力，(当场大气压是 101325Pa)；(2) 不计进、出口动能差和位能差时汽轮机的功率；(3) 进口处蒸汽为 70m/s，出口处速度为 140m/s 时对汽轮机的功率有多大的影响；(4) 蒸汽进出、口高度并差是 1.6m 时，对汽轮机的功率又有多大影响？

解 (1) $p_1 = p_{e,1} + p_b = 9\text{MPa} + 0.101325\text{MPa} = 9.1\text{MPa}$

$$p_2 = p_b - p_{v,2} = 0.101325\text{MPa} - 0.0974\text{MPa} = 0.3925\times10^{-2}\text{MPa}$$

(2) 据稳流能量方程 $Q = \Delta H + W_t$ 每小时技术功

$$P_t = \psi - \Delta\dot{H} = \psi - q_m\Delta h$$
$$= -6.81\times10^5\text{kJ/h} - 40\times1000\text{kg/h}\times(3441-2248)\text{kJ/kg} = 4.704\times10^7\text{kJ/h}$$

功率 $P = \dfrac{W_t}{3600} = \dfrac{4.704\times10^7\text{kJ/h}}{3600} = 13066.7\text{kW}$

(3) 若计及进出口动能差，则

$$\psi = q_m(h_2-h_1) + P_i' + \frac{q_m}{2}(c_{f2}^{\ 2} - c_{f1}^{\ 2})$$

$$P_i' = (\psi - q_m\Delta h) - \frac{q_m}{2}(c_{f2}^{\ 2} - c_{f1}^{\ 2})$$
$$= 13066.7\text{kJ/s} - \frac{40\times10^3}{2\times3600}\times(140^2-70^2)(\text{m/s})^2\times10^{-3}$$
$$= 13066.7\text{kJ/s} - 81.7\text{kJ/s} = 12985\text{kW}$$

即汽轮机功率将减少 81.7kW

(4) 若计及位能差，则

$$P_i'' = (\psi - q_m\Delta h) - q_m g\Delta z$$
$$= 13066.7\text{kJ/s} - \frac{40000\text{kg/h}}{3600\text{s}}\times9.81\text{m/s}^2\times(-1.4)\text{m}$$
$$= 13066.7\text{kJ/s} + 0.174\text{kJ/s} = 13066.9\text{kW}$$

已汽轮机功率将增加 0.174kW。

2-11 用一台水泵将井水从 6m 深的井里泵到比地面高 30m 的水塔中，水流量为 $25\text{m}^3/\text{h}$，水泵耗功是 12kW。冬天井水温度为 3.5°C，为防止冬天结冰，要求进入水塔的水温不低于 4°C。整个系统及管道均包有一定厚度的保温材料，问是否有必要在管道中设置加热器？如有必要的话需加入多少热量?(设管道中水进、出口动能差可忽略不计；水的比热容取定值 $c_p = 4.187\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ 且水的焓差 $\Delta h \simeq c_p\Delta t$，水的密度取 1000kg/m^3)。

解 $Q=\Delta H+\dfrac{m}{2}({c_{f2}}^2-{c_{f1}}^2)+mg(z_2-z_1)+W_s$

因可忽略管道中水进出口的动能差

$$Q=\Delta H+mg(E_2-E_1)+W_s \quad =m[c_p(t_2-t_1)+g(z_2-z_1)]+W_s$$

$$=25\times1000\text{kg/h}\times[4.187\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(4-3.5)^\circ\text{C}$$
$$+9.81\text{m/s}^2\times(30+6)\text{m}\times10^{-3}]-12\text{kJ/s}\times3600\text{s}=1.8\times10^3\text{kJ}$$

所以有必要加入加热器，加热量最小为$1.8\times10^3\,\text{kJ/h}$。

2-12 一刚性绝热容器，容积为$V=0.028\text{m}^3$，原先装有压力为0.1MPa、温度为21°C的空气。现将与此容器连接的输气管道阀门打开，向容器充气。设输气管道内气体的状态参数保持不变，$p=0.7\text{MPa}$，$t=21°\text{C}$。当容器中压力达到0.2MPa时，阀门关闭。求容器内气体到平衡时的温度（设空气可视为理想气体，其热力学能与温度的关系为$\{u\}_{\text{kJ/kg}}=0.72\{T\}_{\text{K}}$；焓与温度的关系为$\{h\}_{\text{kJ/kg}}=1.005\{T\}_{\text{K}}$）。

解 取刚性容器为控制体，则

$$\delta Q=\mathrm{d}E_{\text{CV}}+(h_{f2}+\frac{1}{2}{c_{f2}}^2+gz_2)\delta m_2-(h_1+\frac{1}{2}{c_{f1}}^2+gz_1)\delta m_1+\delta W_i$$

据题意 $\delta Q=0$ $\quad\delta W_i=0$ $\quad\delta m_2=0$ $\quad\dfrac{{c_{f1}}^2}{2}$和$g(z_2-z_1)$可忽略不计

所以 $\mathrm{d}E_{\text{CV}}=h_1\delta m_1=h_{in}\mathrm{d}m_{in}$ 积分有 $\Delta E_{\text{CV}}=h_{in}\,\mathrm{m}_{in}$

而 $\Delta E_{\text{CV}}=\Delta U$ $\quad \mathrm{m}_{\text{in}}=m_2-m_1$ 所以 $m_2u_2-m_1u_1=h_{in}(m_2-m_1)$

$$T_2=\frac{h_{in}(m_2-m_1)+m_1u_1}{m_2c_V}=\frac{c_pT_{in}(m_2-m_1)+m_1c_VT_1}{m_2c_V} \qquad \text{(a)}$$

$$m_1=\frac{p_1V_1}{R_gT_1}=\frac{0.2\times10^6\text{Pa}\times0.028\text{m}^3}{287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times294.15\text{K}}=0.0332\text{kg}$$

且 $$m_2=\frac{p_2V_2}{R_gT_2}=\frac{0.2\times10^6\times0.028}{287\times T_2}=\frac{19.5}{T_2} \qquad \text{(b)}$$

联立求解（a）（b）得

$$m_2=0.0571\text{kg}\,,\qquad T_2=342.9\text{K}$$

2-13 医用氧气袋中空时是扁平状态，内部容积为零。接在压力为14MPa，温度为17°C的钢质氧气瓶上充气。充气后氧气袋隆起，体积为0.008m^3，压力为0.15MPa。由于充气过程很快，

氧气袋与大气换热可以忽略不计，同时因充入氧气袋内气体质量与钢瓶气体内质量相比甚少，故可以认为钢瓶内氧气参数不变。设氧气可作为理想气体，其热力学能和焓可表示为 $\{u\}_{\mathrm{kJ/kg}}=0.657\{T\}_{\mathrm{K}}$，$\{h\}_{\mathrm{kJ/kg}}=0.917\{T\}_{\mathrm{K}}$，理想气体服从 $pV=mR_{\mathrm{g}}T$。求充入氧气袋内氧气有多少 kg？

解： 据能量方程

$$\delta Q=\mathrm{d}E_{\mathrm{CV}}+(h+\frac{c_f^{\ 2}}{2}+gz)\delta m_{out}-(h+\frac{c_f^{\ 2}}{2}+gz)\delta m_{in}+\delta W_i$$

据题意 $\delta Q=0$　　$\delta m_{out}=0$　　$\mathrm{d}E_{CV}=\mathrm{d}U$　，忽略 $\frac{c_{f,in}^2}{2}$ 及 gz_{in}，则

$$\mathrm{d}U-h_{in}\delta m_{in}+\delta W_i=0$$

因 $\delta W_i=p_0\mathrm{d}V$　且氧气袋内氧气质量即充入氧气的质量，所以积分后

$$m_2u_2-h_{in}m_2+p_0(V_2-V_1)=0$$

$$m_2(u_2-h_{in})+p_0V_2=0 \qquad \text{(a)}$$

又　$$m_2=\frac{p_2V_2}{R_{\mathrm{g}}T_2} \qquad \text{(b)}$$

据题意　$p_2=0.15\mathrm{MPa}$，$V_2=0.008\mathrm{m}^3$，$R_{\mathrm{g}}=260\mathrm{J/(kg\cdot K)}$

$\{u_2\}_{\mathrm{kJ/kg}}=0.657\{T_2\}_{\mathrm{K}}$　$\{h_{in}\}_{\mathrm{kJ/kg}}=0.917\{T_{in}\}_{\mathrm{K}}$　代入（a）（b）解得

$T_2=313.20\mathrm{K}$　　$m_2=0.0147\mathrm{kg}$

2-14 一个很大的容器放出 2kg 某种理想气体，过程中容器对外吸热 180kJ，已知，若放发出的 2kg 气体的动能可以完全转变为功，就可发电 3600J，它们的平均比焓为 $\bar{h}=301.7\mathrm{kJ/kg}$ 有人认为此容器中原有 20kg 温度为 27°C的理想气体。试分析这一结论是否合理，假定该气体比热力学能 $u=c_VT$，且 $c_V=0.72\mathrm{kJ/(kg.K)}$。

解： 取容器为控制体积

$$Q=\Delta U+m_{out}\bar{h}+m_{out}\frac{c_f^{\ 2}}{2}=\Delta U+m_{out}\bar{h}+W_u$$

$$\Delta U=Q-m_{out}\bar{h}-W_u$$

据题意 $Q=180\mathrm{kJ}$，$m_{\mathrm{out}}=2\mathrm{kg}$　　$\bar{h}=301.7\mathrm{kJ/kg}$　　$W_u=3.6\mathrm{kJ}$

$$\Delta U=180\mathrm{kJ}-2\mathrm{kg}\times301.7\mathrm{kJ/kg}-3.6\mathrm{kJ}=-427\mathrm{kJ}$$

因$\Delta U = U_2 - U_1 = c_V(m_2T_2 - m_1T_1)$ 若近似认为 $T_2 = T_1$

$$\Delta U = (m_2 - m_1)c_V T_1 = -2\text{kg} \times 0.72\text{kJ/(kg} \cdot \text{K)} \times 300.15\text{K} = -432.2\text{kJ}$$

考虑到$T_2 = T_1$的近似性，上述结论基本合理。

第三章 理想气体的性质

3-1 已知氮气的摩尔质量 M=28.1×10^{-3}kg/mol，求(1) N_2 的气体常数 R_g；(2)标准状态下 N_2 的比体积 v_0 和密度 ρ_0；(3)标准状态 1 米^3 N_2 的质量 m_0；(4)p=0.1MPa，t=500℃时 N_2 的比体积 v 和密度 ρ；(5)上述状态下的摩尔体积 V_m。

解：(1)通用气体常数 R=8.3145J/(mol·K)，由附表查得 M_{N_2} =28.01×10^{-3}kg/mol。

$$R_{g\,N_2}=\frac{R}{M}=\frac{8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}}{28.01\times10^{-3}\text{kg/mol}}=0.297\ \text{kJ/(kg·K)}$$

(2)1mol 氮气标准状态时体积为 $V_{m,N_2}=Mv_{N_2}=22.4\times10^{-3}\ \text{m}^3/\text{mol}$

$$v_{N_2}=\frac{V_{m,N_2}}{M}=\frac{22.4\times10^{-3}\text{m}^3\text{/mol}}{28.01\times10^{-3}\text{kg/mol}}=0.8\text{m}^3\text{/kg}\ (\text{标准状态})$$

$$\rho_{N_2}=\frac{1}{v_{N_2}}=\frac{1}{0.8\text{m}^3/\text{kg}}=1.25\text{kg/m}^3\quad(\text{标准状态})$$

(3)标准状态下 1 米^3 气体的质量即为密度 ρ，等于 1.25kg。

(4)由理想气体状态方程式 $pv=R_gT$，可得

$$v=\frac{R_gT}{p}=\frac{297\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times(500+273)\text{K}}{0.1\times10^6\text{Pa}}=2.296\text{m}^3\text{/kg}$$

$$\rho=\frac{1}{v}=\frac{1}{2.296\text{m}^3/\text{kg}}=0.4356\text{kg/m}^3$$

(5) $V_m=Mv=28.01\times10^{-3}\ \text{kg/mol}\times2.296\text{m}^3\text{/kg}=64.29\times10^{-3}\ \text{m}^3/\text{mol}$

3-2 压力表测得储气罐中丙烷 C_3H_8 的压力为 4.4MPa，丙烷的温度为 120℃，问这时比体积多大？若要储气罐存 1000kg 这种状态的丙烷，问储气罐的体积需多大？

解：由附表查得 $M_{C_3H_8}$ =44.09×10^{-3}kg/mol

$$R_{g,C_3H_8}=\frac{R}{M_{C_3H_8}}=\frac{8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}}{44.09\times10^{-3}\text{kg/mol}}=189\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$$

由 1kg 理想气体状态方程式 $pv=R_gT$ 可得

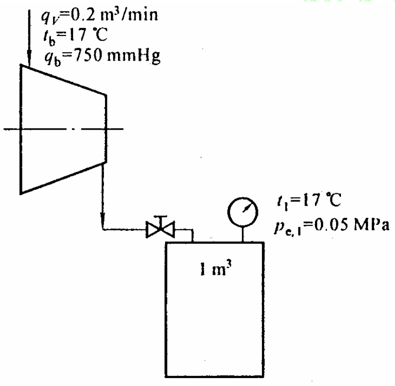
$$v=\frac{R_gT}{p}=\frac{189\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times(120+273)\text{K}}{4.4\times10^6\text{Pa}}=0.01688\text{m}^3/\text{kg}$$

$V=mv=1000\text{kg}\times0.01688\text{m}^3/\text{kg}=16.88\text{m}^3$

或由理想气体状态方程 $pV=mR_gT$ 可得

$$V=\frac{mR_gT}{p}=\frac{1000\text{kg}\times189\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times(120+273)\text{K}}{4.4\times10^6\text{Pa}}=16.88\text{m}^3$$

3-3 空气压缩机每分钟从大气中吸入温度 $t_b=17°\text{C}$，压力等于当地大气压力 $p_b=750\text{mmHg}$ 的空气 0.2m^3，充入体积为 V=1m^3 的储气罐中。储气罐中原有空气的温度 $t_1=17°\text{C}$，表压力 $p_{e1}=0.05\text{MPa}$，问经过多少分钟储气罐内气体压力才能提高到 $p_2=0.7\text{MPa}$,温度 $t_2=50°\text{C}$ ？(参见图 3-9)。



解：利用气体的状态方程式 $pV=mR_gT$，充气前储气罐里空气质量

$$m_1=\frac{p_1v}{R_gT_1}=\frac{\left(0.5+\dfrac{750}{750.062}\right)\times10^5\times1}{R_g(17+273)}=\frac{517.21}{R_g}$$

充气后储气罐里空气质量

$$m_2=\frac{p_2v}{R_gT_2}=\frac{7\times10^5\times1}{R_g(50+273)}=\frac{2167.18}{R_g}$$

已知压气机吸入空气体积流率 $q_{V_{in}}=0.2\text{m}^3/\text{min}$，故质量流率

$$q_{m_{in}}=\frac{p_{in}q_{V_{in}}}{R_gT_{in}}=\frac{p_bq_{V_{in}}}{R_gT_{in}}=\frac{\dfrac{750}{750.062}\times10^5\times0.2}{R_g(17+273)}=\frac{68.96}{R_g}$$

若充气时间为 τ 分钟，由质量守恒得

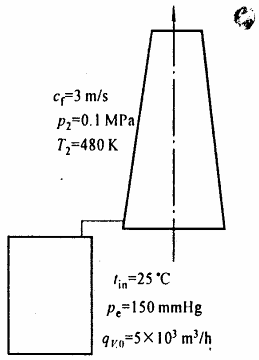
$$q_{m_{in}}\tau=m_2-m_1,\qquad \tau=\frac{m_2-m_1}{q_{m_{in}}}=\frac{2167.18/\text{R}_\text{g}-517.21/\text{R}_\text{g}}{68.96/\text{R}_\text{g}}=23.93\text{min}$$

3-4 锅炉燃烧需要的空气量折合标准状态为 $5000\text{m}^3/\text{h}$，鼓风实际送入的是温度为 $250°\text{C}$、表压力为 150mmHg 的热空气。已知当地大气压力为 $p_b=756\text{mmHg}$。设煤燃烧后产生的烟气量与空气量近似相同，烟气通过烟囱排入上空，已知烟囱出口处烟气压力为 $p_2=0.1\text{MPa}$ 温

度$T_2=480\text{K}$。要求烟气流速为$c_f=3\text{m/s}$。求（1）热空气实际状态的体积流率$q_{V_{in}}$；（2）烟囱出口内直径的设计尺寸，参见图 3-10。

解：（1）标准状态为

$$p_0=760\text{mmHg}=0.101325\text{MPa}，T_0=273\text{K}$$



$$V_{m,0}=22.4\times10^{-3}\text{m}^3/\text{mol}$$

送入锅炉的空气的量

$$q_n=\frac{q_{V_0}}{q_{V_{m,0}}}=\frac{5000\text{m}^3/\text{h}}{22.4\times10^{-3}\text{m}^3/\text{mol}}$$
$$=223.21\text{kmol/h}=0.062\text{kmol/s}$$

实际送风的体积流率

$$q_{in}=\frac{q_nRT}{p}=\frac{223.21\text{kmol/h}\times8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times(250+273)\text{K}}{\left(\frac{150+765}{750.062}\right)\times10^5\text{Pa}}$$
$$=7962.7\text{m}^3/\text{h}$$

或 $$\frac{p_0q_{V_0}}{T_0}=\frac{pq_V}{T}$$

$$q_{V_{in}}=\frac{p_0q_{V_0}T}{pT_0}=\frac{\frac{760}{750.062}\times10^5\text{Pa}\times5000\text{m}^3/\text{h}\times523\text{K}}{\left(\frac{150+765}{750.062}\right)\times10^5\text{Pa}\times273\text{K}}=7962.7\text{m}^3/\text{h}$$

（2） 烟囱出口处烟气的体积流量

$$q_{V_{out}}=\frac{q_nRT_2}{p_2}=\frac{0.062\text{mol/s}\times8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times480\text{K}}{0.1\times10^6\text{Pa}}=2.4745\text{m}^3/\text{s}$$

设烟囱出口截面积为 D

$$q_{V_{out}}=c_f\frac{\pi D^2}{4}\qquad D=\sqrt{\frac{4q_{V_{out}}}{\pi c_f}}=\sqrt{\frac{4\times2.4745\text{m}^3/s}{\pi\times3\text{m/s}}}=1.025\text{m}$$

3-5 烟囱底部烟气的温度为250°C，顶部烟气的温度为100°C，若不考虑顶、底部两截面间压力微小的差异，欲使烟气以同样的速度流经此两截面，求顶、底部两截面面积之比。

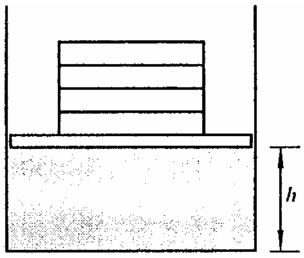
解：设顶、底部两截面面积分别为A_1和A_2，顶、底部两截面上质量流量相同，

即 $q_{m_1}=q_{m_2}$，$\dfrac{A_2c_{f2}}{v_2}=\dfrac{A_1c_{f1}}{v_1}$， 由状态方程式可以得出

$$\frac{q_{V_2}}{q_{V_1}}=\frac{p_1q_{m_2}T_2}{p_2q_{m_1}T_1}=\frac{T_2}{T_1}=\frac{373\text{K}}{523\text{K}}=0.7132$$

因流速相同，$c_{f2}=c_{f1}$， $\dfrac{A_2}{A_1}=\dfrac{v_2}{v_1}=\dfrac{q_{V_2}/q_{m_2}}{q_{V_1}/q_{m_1}}=\dfrac{q_{V_2}}{q_{V_1}}=1:1.4$

3-6 截面积 $A=100\text{cm}^2$ 的气缸内充有空气，活塞距底面高度 h=10cm，活塞及负载的总质量是 195kg（见图 3-11）。已知当地大气压力 $p_0=771\text{mmHg}$，环境温度为 $t_0=27°\text{C}$，气缸内空气恰与外界处于热力平衡状态，现将其负载取去 100kg，活塞将上升，最后与环境重新达到热力平衡。设空气可以通过气缸壁充分与外界换热，达到热力平衡时，空气的温度等于环境大气的温度。求活塞上升的距离，空气对外作出的功以及与环境的换热量。



解：据题意，活塞上负载未取去前气缸内气体的初始状态

为：$p_1=p_b+\dfrac{m_1g}{A}=\dfrac{771}{750.062}\times10^{-1}\text{MPa}+\dfrac{195\text{kg}\times9.80665\text{m/s}^2}{100\times10^{-4}\text{m}^3}=0.294\text{MPa}$

$$T_1=(27+273)\text{K}=300\text{K} \qquad V_1=100\text{cm}^2\times10\text{cm}=10^3\text{cm}^3=10^{-3}\text{m}^3$$

取去负载 100kg 后，因活塞与气缸壁间无摩擦，又能充分与、外界交换热量，最后重新建立热力平衡时，气缸内压力与温度等于外界的压力与温度，故

$$p_2=p_b+\frac{m_2g}{A}=\frac{771}{750.062}\times10^{-1}\text{MPa}+\frac{(195-100)\text{kg}\times9.80665\text{m/s}^2}{100\times10^{-4}\text{m}^2}=0.196\text{MPa}$$

$$T_2=27+273=300\text{K}$$

由 $\dfrac{p_1V_1}{T_1}=\dfrac{p_2V_2}{T_2}$ 得 $V_2=\dfrac{p_1}{p_2}V_1=\dfrac{0.294\text{MPa}}{0.196\text{MPa}}\times10^{-3}\text{m}^3=1.5\times10^{-3}\text{m}^3$

上升距离 $\Delta H=\dfrac{\Delta V}{A}=\dfrac{V_2-V_1}{A}=\dfrac{(1.5-1)\times10^{-3}\text{m}^3}{100\times10^{-4}\text{m}^2}=0.05\text{m}=5\text{cm}$

气缸内气体由状态 1 到状态 2，其间经过的是非准平衡过程，若不克服摩擦阻力所消耗的功，则气缸内气体所做的功等于克服外力的功，故

$$W=p_2A\Delta H=0.196\times10^6\text{Pa}\times0.05\text{m}\times100\times10^{-4}\text{m}^2=98\text{J}$$

因为 理想气体 $T_2=T_1$ 时必有 $U_2=U_1$，即 $\Delta U=0$

所以 $Q=\Delta U+W=W=98\text{J}$

3-7 空气初态时 $T_1=480\text{K}$，$p_1=0.2\text{MPa}$，经某一状态变化过程被加热到 $T_2=1100\text{K}$，这时 $p_2=0.5\text{MPa}$。求 1kg 空气的 u_1、u_2、Δu、h_1、h_2、Δh。(1)按平均质量热容表；(2)按空气

的热力性质表；(3)若上述过程为定压过程，即$T_1=480\text{K}$，$T_2=1100\text{K}$，$p_1=p_2=0.2\text{MPa}$，问这时的u_1、u_2、Δu、h_1、h_2、Δh有何改变？(4)对计算结果进行简单的讨论：为什么由气体性质表得出的u，h与平均质量热容表得出的u,h不同？两种方法得出的Δu，Δh是否相同？为什么？

解：由附表查得空气的气体常数$R_g=0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$

$$t_1=T_1-273=480-273=207°\text{C}，\quad t_2=T_2-273=1100-273=827°\text{C}$$

由附表查出

$$c_p\Big|_{0°\text{C}}^{207°\text{C}}=1.0125\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}，\quad c_p\Big|_{0°\text{C}}^{827°\text{C}}=1.0737\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$c_V\Big|_{0°\text{C}}^{207°\text{C}}=c_p\Big|_{0°\text{C}}^{207°\text{C}}-R_g=1.0125\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}-0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}=0.7255\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$c_V\Big|_{0°\text{C}}^{827°\text{C}}=C_p\Big|_{0°\text{C}}^{827°\text{C}}-R_g=1.0737\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}-0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}=0.7867\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$u_1=c_V\Big|_{0°\text{C}}^{207°\text{C}}t_1=0.7255\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times207^\circ\text{C}=150.2\text{kJ/kg}$$

$$u_2=c_V\Big|_{0°\text{C}}^{827°\text{C}}t_2=0.7867\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times827^\circ\text{C}=650.6\text{kJ/kg}$$

$$\Delta u=u_2-u_1=650.6\text{kJ/kg}-150.2\text{kJ/kg}=500.4\text{kJ/kg}$$

$$h_1=c_p\Big|_{0°\text{C}}^{207°\text{C}}t_1=1.0125\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times207^\circ\text{C}=209.6\text{kJ/kg}$$

$$h_2=c_p\Big|_{0°\text{C}}^{827°\text{C}}t_2=1.0737\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times827^\circ\text{C}=887.9\text{kJ/kg}$$

$$\Delta h=h_2-h_1=887.9\text{kJ/kg}-209.6\text{kJ/kg}=678.3\text{kJ/kg}$$

(2) 利用空气的热力性质表

根据$T_1=480\text{K}$，$T_2=1100\text{K}$查得$h_1=484.49\text{kJ/kg}$，$h_2=1162.95\text{kJ/kg}$

由定义，$u=h-R_gT$

$$u_1=h_1-R_gT_1=484.49\text{kJ/kg}-0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times480\text{K}=346.73\text{kJ/kg}$$

$$u_2=h_2-R_gT_2=1162.95\text{kJ/kg}-0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times1100\text{K}=847.25\text{kJ/kg}$$

$$\Delta u=u_2-u_1=847.25\text{kJ/kg}-346.73\text{kJ/kg}=50052\text{kJ/kg}$$

$$\Delta h=h_2-h_1=1162.95\text{kJ/kg}-484.49\text{kJ/kg}=678.46\text{kJ/kg}$$

(3) 因为理想气体的u、h只是温度的函数，而与压力的大小无关，所以不论过程是否定压，只要是$T_1=480\text{K}$，$T_2=1100\text{K}$不变，则u_1、u_2、h_1、h_2的数值与上相同，当然Δu、Δh也不会改变；

(4) 用气体性质表得出的u、h是以0 K为计算起点，而用比热表求得的u、h是以0°C为

计算起点，故u、h值不同，但两种方法得出的Δu、Δh是相同的。

3-8 体积$V=0.5\mathrm{m}^3$的密闭容器中装有27°C，0.6MPa的氧气，加热后温度升高到327°C，求加热量Q_v：(1)按比热容算术平均值；(2)按平均摩尔热容表；(3)按真实摩尔热容经验式；(4)按平均比热容直线关系式；(5)按气体热力性质表。

解；（1）由低压时一些气体的质量热容表查得$T_1=27+273=300\mathrm{K}$时，

$c_V=0.658\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$；$T_1=327+273=600\mathrm{K}$时，$c_V=0.742\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$

$$c_V\Big|_{300\mathrm{K}}^{600\mathrm{K}}=\frac{0.658\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}+0.742\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}}{2}=0.7005\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$$

由理想气体的状态方程式$p_1V_1=mR_gT_1$求出m，附表中查出

$$M_{O_2}=32.0\times10^{-3}\mathrm{kg/mol}\qquad R_g=\frac{R}{M_{O_2}}=\frac{8.3145\mathrm{J/(mol\cdot K)}}{32.0\times10^{-3}\mathrm{kg/mol}}=0.260\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$$

$$m=\frac{p_1V}{R_gT}=\frac{0.6\times10^6\mathrm{Pa}\times0.5\mathrm{m}^3}{260\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times(27+273)\mathrm{K}}=3.846\mathrm{kg}$$

$$Q_v=mc_V\Big|_{300\mathrm{K}}^{600\mathrm{K}}(T_2-T_1)=3.846\mathrm{kg}\times0.7005\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times(600-300)\mathrm{K}=808.27\mathrm{kJ}$$

（2）$$n=\frac{p_1V}{R_gT}=\frac{0.6\times10^6\mathrm{Pa}\times0.5\mathrm{m}^3}{8.3145\mathrm{J/(mol\cdot K)}\times(27+273)\mathrm{K}}=120.3\mathrm{mol}$$

由附表中查出 $t_1=27°\mathrm{C}$时，$C_{p,m}\Big|_{0°\mathrm{C}}^{27°\mathrm{C}}=29.345\mathrm{J/(mol\cdot K)}$；

$t_2=327°\mathrm{C}$时，$C_{p,m}\Big|_{0°\mathrm{C}}^{327°\mathrm{C}}=30.529\mathrm{J/(mol\cdot K)}$

因此

$$C_{V,m}\Big|_{0°\mathrm{C}}^{27°\mathrm{C}}=C_{p,m}\Big|_{0°\mathrm{C}}^{27°\mathrm{C}}-R=29.345\mathrm{J/(mol\cdot K)}-8.3145\mathrm{J/(mol\cdot K)}=21.031\mathrm{J/(mol\cdot K)}$$

$$C_{V,m}\Big|_{0°\mathrm{C}}^{327°\mathrm{C}}=C_{p,m}\Big|_{0°\mathrm{C}}^{327°\mathrm{C}}-R=30.529\mathrm{J/(mol\cdot K)}-8.3145\mathrm{J/(mol\cdot K)}=22.215\mathrm{J/(mol\cdot K)}$$

$$Q_v=n(C_{V,m}\Big|_0^{t_2}t_2-C_{V,m}\Big|_0^{t_1}t_1)$$
$$=120.3\mathrm{mol}\times[22.215\mathrm{J/(mol\cdot K)}\times327^\circ\mathrm{C}-21.031\mathrm{J/(mol\cdot K)}\times27^\circ\mathrm{C}]=805.59\mathrm{kJ}$$

（3） 由附表中查出氧气的真实摩尔定压热容为

$$\frac{C_{p,m}}{R}=3.626-1.878\times10^{-3}T+7.055\times10^{-6}T^2-6.764\times10^{-12}T^4$$

$$C_{V,m}=C_{p,m}-R,\quad \frac{C_{V,m}}{R}=\frac{C_{p,m}}{R}-1 \qquad Q_v=n\int C_{V,m}\mathrm{d}T=nR\int\frac{C_{V,m}}{R}\mathrm{d}T$$

$$Q_v=120.3\text{mol}\times8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\int_{300\text{K}}^{600\text{K}}\left[(3.626-1)-1.878\times10^{-3}T+7.055\times10^{-6}T^2\right.$$
$$\left.-6.764\times10^{-9}T^4+2.156\times10^{-12}T^6\right]\mathrm{d}T$$
$$=120.3\text{mol}\times8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times[2.626\times(600-300)-\frac{1.878\times10^{-3}}{2}\times(600^2-300^2)$$
$$+\frac{7.055\times10^{-6}}{3}\times(600^3-300^3)-\frac{6.764\times10^{-9}}{4}\times(600^4-300^4)$$
$$+\frac{2.156\times10^{-12}}{5}\times(600^5-300^5)]=805.95kJ$$

(4)由附表中查得氧气 $c_V\big|_{t_1}^{t_2}=0.6594+0.000106t \qquad \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$

$$c_V\big|_{t_1}^{t_2}=0.6594+0.000106(27+327)=0.6971 \qquad \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$Q_v=mc_V\big|_{t_1}^{t_2}(t_2-t_1)=3.846\text{kg}\times0.6971\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(327-27)\text{K}=804.31\text{kJ}$$

（5） 由附表中查得,对氧气

$T_1=300\text{K}$ 时，$H_{m,1}=8737.3\text{J/mol}$

$T_2=600\text{K}$ 时，$H_{m,2}=17926.1\text{J/mol}$

$$U_{m,1}=H_{m,1}-RT_1=8737.3\text{J/mol}-8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times300\text{K}=6242.95\text{J/mol}$$

$$U_{m,2}=H_{m,2}-RT_2=17926.1\text{J/mol}-8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times600\text{K}=12937.4\text{J/mol}$$

$$Q_v=n(U_{m,2}-U_{m,1})=120.3\text{mol}\times(12937.4\text{J/mol}-6242.95\text{J/mol})=805.34\text{kJ}$$

3-9 某种理想气体初态时 $p_1=520\text{kPa}$，$V_1=0.1419\text{m}^3$ 经过放热膨胀过程，终态 p_2=170kPa，$V_2=0.2744\text{m}^3$，过程焓值变化 $\Delta H=-67.95\text{kJ}$，已知该气体的质量定压热容 $c_p=5.20\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，且为定值。求：（1）热力学能变量；（2）质量定容比热和气体常数 R_g。

解：（1）由焓的定义式 H=U+pV 可得出

$$\Delta H=\Delta U+\Delta(pV)=\Delta U+(p_2V_2-p_1V_1)$$

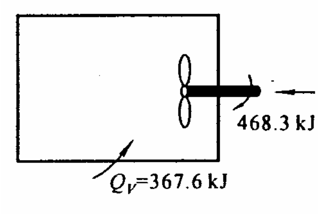
$$=-67.95\text{kJ}-(170\text{kPa}\times0.2744\text{m}^3-520\text{kPa}\times0.1419\text{m}^3)=-40.81\text{kJ}$$

（2） 定值热容时 $\Delta U = mc_V \Delta T$，$\Delta H = mc_p \Delta T$，所以

$$c_V = \frac{c_p}{\Delta H / \Delta U} = \frac{5.20\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}}{-67.95\text{kJ/}(-40.81\text{kJ})} = 3.123\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$R_g = c_p - c_V = 5.20\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} - 3.123\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} = 2.077\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

3-10 2kg 理想气体，定容下吸热量 $Q_v = 367.6\text{kJ}$ 同时输入搅拌功 468.3kJ（图 3-12）。该过程中气体的平均质量热容为 $c_p = 1.124\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，$c_V = 0.934\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，已知初态温度为 $t_1 = 280°\text{C}$，求：



（1） 终态温度 t_2；

（2） 热力学能、焓、熵的变化量 ΔU、ΔH、ΔS。

解：（1）由闭口系统能量守恒式

$$Q = \Delta U + W \qquad \Delta U = Q_v - W = 367.6\text{kJ} - (-468.3\text{kJ}) = 835.9\text{kJ}$$

$$\Delta U = mc_V (t_2 - t_1)$$

$$t_2 = t_1 + \frac{\Delta U}{mc_V} = 280^\circ\text{C} + \frac{835.9\text{kJ}}{2\text{kg} \times 0.934\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}} = 727.48^\circ\text{C}$$

（2） $\Delta H = \Delta U + mR_g \Delta T$

$$\begin{aligned} &= \Delta U + m(c_p - c_V)\Delta T \\ &= 835.9\text{kJ} + 2\text{kg} \times [1.124\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} - 0.934\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}] \\ &\quad \times (727.48^\circ\text{C} - 280^\circ\text{C}) = 1005.94\text{kJ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta S &= mc_V \ln\frac{T_2}{T_1} = 2\text{kg} \times 0.934\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times \ln\frac{(727.48+273)\text{K}}{(280+372)\text{K}} \\ &= 1.1075\text{kJ/K} \end{aligned}$$

3-11 5g 氩气经历一个热力学能不变的过程，初始状态 p_1=0.6MPa，T_1=600K，膨胀终了体积 $V_2 = 3V_1$，Ar 可作为理想气体，且热容可看作为定值，求终温 T_2、终压 p_2 及总熵变 ΔS。

解：氩气 Ar 可看为理想气体，其热力学能只是温度的单一函数，故等热力学能过程也即等温过程，T_2=T_1=600K。 根据理想气体的状态方程有

$$\frac{p_2 v_2}{T_2} = \frac{p_1 v_1}{T_1} \qquad p_2 = p_1 \frac{v_2}{v_1} = 0.6\times10^6\,\text{Pa} \times \frac{1}{3} = 0.2\times10^6\,\text{Pa}$$

由附表查出 Ar 的 $R_g = 0.208\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$

$$\Delta S = m\left(c_p \ln\frac{T_2}{T_1} - R_g \ln\frac{p_2}{p_1}\right) = -m\left(R_g \ln\frac{p_2}{p_1}\right)$$

$$= -0.005\text{kg}\times 0.208\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\ln\frac{0.2\text{MPa}}{0.6\text{MPa}} = 1.14\times 10^{-3}\text{kJ/K}$$

3-12 1kmol 氮气由 p_1=1MPa，T_1=400K 变化到 p_2=0.4MPa，T_2=900K，求：摩尔熵变量 ΔS_m。（1）摩尔热容可近似为定值；(2) 藉助气体热力表计算。

解：（1）摩尔热容近似为定值

$$\Delta S_m = C_{p,m}\ln\frac{T_2}{T_1} - R\ln\frac{p_2}{p_1}$$

氮为双原子气体 $C_{p,m} = \frac{7}{2}R = \frac{7\times 8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}}{2} = 29.10\text{J/(mol}\cdot\text{K)}$

$$\Delta S_m = C_{p,m}\ln\frac{T_2}{T_1} - R\ln\frac{p_2}{p_1}$$

$$= 29.10\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\ln\frac{900\text{K}}{400\text{K}} - 8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\ln\frac{0.4\text{MPa}}{1\text{MPa}}$$

$$= 31.22\text{J/(mol}\cdot\text{K)}$$

$$\Delta S = n\Delta S_m = 1000\text{mol}\times 31.22\text{J/(mol}\cdot\text{K)}=31.22\text{kJ/K}$$

（2） 热容为变值时

$$\Delta S_m = S°_{m,2} - S°_{m,1} - R\ln\frac{p_2}{p_1}$$

由附表查得

T_1=400K 时 $S^0_{m,1} = 200.179\text{J/(mol}\cdot\text{K)}$；$T_2$=900K 时 $S^0_{m,2} = 224.756\text{J/(mol}\cdot\text{K)}$

$$\Delta S_m = S^0_{m,2} - S^0_{m,1} - R\ln\frac{p_2}{p_1}$$

$$= 224.756\text{J/(mol}\cdot\text{K)-}200.179\text{J/(mol}\cdot\text{K)-}8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\ln\frac{0.4\text{MPa}}{1\text{MPa}}$$

$$= 32.20\text{J/(mol}\cdot\text{K)}$$

$$\Delta S = n\Delta S_m = 1000\text{mol}\times 32.20\text{J/(mol}\cdot\text{K)}=32.20\text{kJ/K}$$

3-13 初始状态 p_1=0.1MPa，t_1=27℃的 CO_2，v_1=0.8m³，经历 某种状态变化过程，其熵变 $\Delta S = 0.242\text{kJ/K}$ （精确值），终压 p_2=0.1MPa，求终态温度 T_2。

解： CO_2 的物质的量

$$n = \frac{p_1V_1}{RT_1} = \frac{0.1\times 10^6\text{Pa}\times 0.8\text{m}^3}{8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times(27+273)\text{K}} = 32.07\text{mol}$$

由附表查得对 CO_2，T_1=300K 时 $S^0_{m,1} = 214.025\text{J/(mol}\cdot\text{K)}$

由 $\Delta S = n\left(S_{m,2}^0 - S_{m,1}^0 - R\ln\dfrac{p_2}{p_1}\right)$

$$\begin{aligned}S_{m,2}^0 &= \frac{\Delta S}{n} + S_{m,1}^0 + R\ln\frac{p_2}{p_1}\\ &= \frac{242\text{J/K}}{32.0\text{mol}} + 214.025\text{J/(mol}\cdot\text{K)}+8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\ln\frac{0.5\text{MPa}}{0.1\text{MPa}}\\ &= 234.953\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\end{aligned}$$

由同表查得 T_2

$$T_2 = 500\text{K}+\frac{234.953\text{J/(mol}\cdot\text{K)}-234.901\text{J/(mol}\cdot\text{K)}}{243.284\text{J/(mol}\cdot\text{K)}-234.901\text{J/(mol}\cdot\text{K)}}\times 100\text{K}=500.62\text{K}$$

3-14 绝热刚性容器中间有隔板将容器一分为二，左侧 0.05kmol 的 300K、2.8MPa 的高压空气，右侧为真空。若抽出隔板，求容器中空气的熵变。

解：抽出隔板，自由膨胀 $Q=0$，$W=0$， $\Delta U = 0$ 即 $nC_{v,m}(T_2 - T_1) = 0$

所以 $T_2=T_1=300\text{K}$

$$V_A = \frac{nRT_{A1}}{p_{A1}} = \frac{50\text{mol}\times 8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times 300\text{K}}{2.8\times 10^6\text{Pa}} = 0.0445\text{m}^3$$

$$V_B = V_A = 0.0445m^3 \qquad V = V_A + V_B = 0.089m^3$$

$$\begin{aligned}\Delta S &= n\left(C_{V,m}\ln\frac{T_2}{T_1} + R\ln\frac{V_2}{V_1}\right)\\ &= 50\text{mol}\times 8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\ln\frac{0.089\text{m}^3}{0.0445\text{m}^3} = 288.2\text{J/K}\end{aligned}$$

3-15 混合气体中各组成气体的摩尔分数为：$x_{CO_2} = 0.4$，$x_{N_2} = 0.2$，$x_{O_2} = 0.4$。混合气体的温度 $t = 50^\circ\text{C}$，表压力 $p_e = 0.04\text{MPa}$，气压计上水银柱高度为 $p_b = 750\text{mmHg}$。求：(1) 体积 $V = 4m^3$ 混合气体的质量；（2）混合气体在标准状态下的体积 V_0。

解：（1） $p = p_e + p_b = 0.04\text{MPa}+750\text{mmHg}\times 133.32\text{Pa/mmHg}=0.14\times 10^6\text{Pa}$

由混合气体状态方程式

$$m = \frac{pV}{R_gT} = \frac{0.14\times 10^6\text{Pa}\times 4\text{m}^3}{231\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times 323\text{K}} = 7.51\text{kg}$$

(2) 标准状态下的折合体积

$$V_0 = mv_0 = m\frac{V_{0,m}}{\text{M}} = 7.51\text{kg}\times\frac{22.4\times 10^{-3}\text{m}^3/\text{mol}}{36\times 10^{-3}\text{kg/mol}} = 4.67\text{m}^3 \text{（标准状态）}$$

3-16 50 kg 废气和 75kg 的空气混合，废气中各组成气体的质量分数为：$w_{CO_2}=14\%$，$w_{O_2}=6\%$，$w_{H_2O}=5\%$，$w_{N_2}=75\%$。空气中的氧气和氮气的质量分数为：$w_{O_2}=23.2\%$，$w_{N_2}=76.8\%$。混合后气体压力 p=0.3MPa，求：（1）混合气体各组分的质量分数；（2）折合气体常数；（3）折合摩尔质量；（4）摩尔分数；（5）各组成气体分压力。

解：（1）混合后气体质量 m=75+50=125kg，其中

$$m_{CO_2}=w_{CO_2}\times m=0.14\times 50\text{kg}=7\text{kg} \qquad m_{H_2O}=w_{H_2O}\times m=0.05\times 50\text{kg}=2.5\text{kg}$$

$$m_{O_2}=w_{g,O_2}\times m_g+w_{a,O_2}\times m_a=0.06\times 50\text{kg}+0.232\times 75\text{kg}=20.4\text{kg}$$

$$m_{N_2}=w_{g,N_2}\times m_g+w_{a,N_2}\times m_a=0.75\times 50\text{kg}+0.768\times 75\text{kg}=95.1\text{kg}$$

因此，质量分数

$$w_{CO_2}=\frac{m_{CO_2}}{m}=\frac{7\text{kg}}{50\text{kg}+75\text{kg}}=0.056 \qquad w_{H_2O}=\frac{m_{H_2O}}{m}=\frac{2.5\text{kg}}{50\text{kg}+75\text{kg}}=0.020$$

$$w_{O_2}=\frac{m_{O_2}}{m}=\frac{20.4\text{kg}}{50\text{kg}+75\text{kg}}=0.163 \qquad w_{N_2}=\frac{m_{N_2}}{m}=\frac{95.1\text{kg}}{50\text{kg}+75\text{kg}}=0.761$$

核算 $\sum w_i=0.056+0.163+0.020+0.761=1$

（2） 混合气体折合气体常数

$$\begin{aligned}R_g&=\sum\omega_i R_{g,i}=R\sum\omega_i\frac{1}{M_i}\\&=8.3145\times\left(\frac{0.056}{44.01}+\frac{0.163}{32.0}+\frac{0.020}{18.016}+\frac{0.761}{28.02}\right)\\&=0.288kJ/(kg\cdot K)\end{aligned}$$

（3） 折合摩尔质量

$$\text{M}=\frac{\text{R}}{\text{R}_\text{g}}=\frac{8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}}{288\text{J/(kg}\cdot\text{K)}}=28.87\times 10^{-3}\text{kg/mol}$$

（4） 摩尔分数 $x_i=\dfrac{\text{R}_{\text{g},i}}{\text{R}_\text{g}}w_i$

$$x_{CO_2}=\frac{\text{R}_{\text{g},CO_2}}{\text{R}_\text{g}}w_{CO_2}=\frac{\text{R}}{\text{M}_{CO_2}\text{R}_\text{g}}w_{CO_2}=\frac{8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times 0.056}{44.01\times 10^{-3}\text{kg/mol}\times 288\text{J/(kg}\cdot\text{K)}}=0.037$$

$$x_{O_2}=\frac{\text{R}_{\text{g},O_2}}{\text{R}_\text{g}}w_{O_2}=\frac{\text{R}}{\text{M}_{O_2}\text{R}_\text{g}}w_{O_2}=\frac{8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times 0.163}{32.0\times 10^{-3}\text{kg/mol}\times 288\text{J/(kg}\cdot\text{K)}}=0.147$$

$$x_{H_2O}=\frac{R_{g,H_2O}}{R_g}w_{H_2O}=\frac{R}{M_{H_2O}R_g}w_{H_2O}=\frac{8.3145J/(mol\cdot K)\times 0.020}{18.016\times 10^{-3}kg/mol\times 288J/(kg\cdot K)}=0.032$$

$$x_{N_2}=\frac{R_{g,N_2}}{R_g}w_{N_2}=\frac{R}{M_{N_2}R_g}w_{N_2}=\frac{8.3145J/(mol\cdot K)\times 0.761}{28.01\times 10^{-3}kg/mol\times 288J/(kg\cdot K)}=0.784$$

核算：$\sum x_i=0.037+0.147+0.032+0.784=1$

（5） 各组分分压力 $p_i=x_i p$

$$p_{CO_2}=x_{CO_2}p=0.037\times 0.3MPa=0.0111MPa$$

$$p_{O_2}=x_{O_2}p=0.147\times 0.3MPa=0.0441MPa$$

$$p_{H_2O}=x_{H_2O}p=0.032\times 0.3MPa=0.0096MPa$$

$$p_{N_2}=x_{N_2}p=0.784\times 0.3MPa=0.2352MPa$$

核算：$\sum p_i=(0.0111+0.0441+0.0096+0.2352)MPa=0.3MPa=p$

3-17 烟气进入锅炉第一段管群时温度为 1200°C，流出时温度为 800°C，烟气的压力几乎不变。求每 1 kmol 烟气的放热量 Q_p。可藉助平均摩尔定压热容表计算。已知烟气的体积分数为：

$y_{CO_2}=0.12$，$y_{H_2O}=0.08$，其余为 N_2。

解：摩尔成分 x_i =体积成分 y_i ，所以 $x_{CO_2}=0.12$，$x_{H_2O}=0.08$，$x_{N_2}=0.8$。由附表查得平均摩尔定压热容如下：

t /°C	$C_{p,m}\big\|_0^{t\,^\circ C}$ / J/（mol·K）		
	CO_2	H_2O	N_2
800	47.763	37.392	30.748
1200	50.740	39.285	31.828

混合气体的热容 $C_{p,m}=\sum x_i C_{p,m,i}$

$$C_{p,m}\Big|_{0^\circ C}^{800^\circ C}=0.12\times 47.763J/(mol\cdot K)+0.08\times 37.392J/(mol\cdot K)+0.8\times 30.748J/(mol\cdot K)$$
$$=33.321J/(mol\cdot K)$$

$$C_{p,m}\Big|_{0^\circ C}^{1200^\circ C}=0.12\times 54.740J/(mol\cdot K)+0.08\times 39.285J/(mol\cdot K)+0.8\times 31.828J/(mol\cdot K)$$
$$=34.694J/(mol\cdot K)$$

$$Q_p = n\left(C_{p,m}\Big|_{0^\circ C}^{800^\circ C} t_2 - C_{p,m}\Big|_{0^\circ C}^{1200^\circ C} t_1 \right)$$

$$= 1000\text{mol}\times[33.321\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times 800^\circ\text{C-}34.694\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times 1200^\circ\text{C}] = -149.76\text{kJ}$$

3-18 流率为 3mol/s 的 CO_2，2mol/s 的 N_2 和 4.5mol/s 的 O_2 三股气流稳定流入总管道混合，混合前每股气流的温度和压力相同，都是 76.85℃，0.7MPa，混合气流的总压力 p=０.７ MPa，温度仍为 t＝76.85℃。藉助气体热力性质表试计算：

（1） 混合气体中各组分的分压力；

（2） 混合前后气流焓值变化 $\Delta \dot{H}$ 及混合气流的焓值；

（3） 导出温度、压力分别相同的几种不同气体混合后，系统熵变为：$\Delta S = -\mathrm{R}\sum n_i \ln x_i$，并计算本题混合前后熵的变化量 $\Delta \dot{S}$ ；

（4） 若三股气流为同种气体，熵变如何？

解：三股来流和混合物去流的温度、压力相同：p＝0.7MPa，$T = 76.85 + 273.15 + 350\text{K}$

由稳定流动能量方程，Q=0，$W_i = 0$ 不计动能差、位能差时 $\Delta H = 0$ $\qquad H = \sum H_i$

混合物的摩尔焓 $\qquad H_m = \sum x_i H_{m,i}$

总物质的量 $\quad q_n = \sum q_{n_i} = 3\text{mol/s} + 2\text{mol/s} + 4.5\text{mol/s} = 9.5\text{mol/s}$

摩尔分数 $\quad x_{CO_2} = \dfrac{n_{CO_2}}{n} = \dfrac{3\text{mol/s}}{9.5\text{mol/s}} = 0.3158$

$$x_{N_2} = \frac{n_{N_2}}{n} = \frac{2\text{mol/s}}{9.5\text{mol/s}} = 0.2105 \qquad x_{O_2} = \frac{n_{O_2}}{n} = \frac{4.5\text{mol/s}}{9.5\text{mol/s}} = 0.4737$$

（1）各组分的分压力 $\quad p_i = x_i p$

$$p_{CO_2} = x_{CO_2} p = 0.3158 \times 0.7\text{MPa} = 0.2211\text{MPa}$$

$$p_{N_2} = x_{N_2} p = 0.2105 \times 0.7\text{MPa} = 0.1473\text{MPa}$$

$$p_{O_2} = x_{O_2} p = 0.4737 \times 0.7\text{MPa} = 0.3156\text{MPa}$$

（2）由附表查得 $T = 350\text{K}$ 时

$H_{m,CO_2} = 11399.75\text{J/mol}$，$H_{m,N_2} = 10182.15\text{J/mol}$，$H_{m,O_2} = 10223.1\text{J/mol}$

$$H_m = 0.3158\times 11399.75\text{J/mol} + 0.2105\times 10182.15\text{J/mol} + 0.4737\times 10223.1\text{J/mol}$$
$$= 10586.07\text{J/mol}$$

$$\dot{H} = q_n H_m = 9.5\text{mol/s}\times 10586.07\text{J/mol} = 100567.63\text{J/s}$$

（3） $\Delta S = n_{CO_2}\Delta S_{m,CO_2} + n_{N_2}\Delta S_{m,N_2} + n_{O_2}\Delta S_{m,O_2}$

$$=n_{CO_2}\left(C_{p,m,CO_2}\ln\frac{T}{T_{CO_2}}-R\ln\frac{p_{CO_2}}{p_{CO_2,1}}\right)+n_{N_2}\left(C_{p,m,N_2}\ln\frac{T}{T_{N_2}}-R\ln\frac{p_{N_2}}{p_{N_2,1}}\right)$$
$$+n_{O_2}\left(C_{p,m,O_2}\ln\frac{T}{T_{O_2}}-R\ln\frac{p_{O_2}}{p_{O_2,1}}\right)$$

据题意

$$p_{CO_2,1}=p_{N_2,1}=p_{O_2,1}=0.7\text{MPa}=p，T_{CO_2,1}=T_{N_2,1}=T_{O_2,1}=350\text{K}=T_2$$

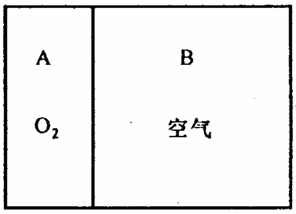
$$\Delta S=-\text{R}n_{CO_2}\ln\frac{p_{CO_2}}{p_{CO_2,1}}-\text{R}n_{N_2}\ln\frac{p_{N_2}}{p_{N_2,1}}-\text{R}n_{O_2}\ln\frac{p_{O_2}}{p_{O_2,1}}$$
$$=-\text{R}\left(n_{CO_2}\ln\frac{p_{CO_2}}{p}+n_{N_2}\ln\frac{p_{N_2}}{p}+n_{O_2}\ln\frac{p_{O_2}}{p}\right)$$
$$=-\text{R}\left(n_{CO_2}\ln x_{CO_2}+n_{N_2}\ln x_{N_2}+n_{O_2}\ln x_{O_2}\right)$$
$$=-\text{R}\sum n_i\ln x_i$$

本题

$$\Delta\dot{S}=-8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}(3\text{mol/s}\ln 0.3158+2\text{mol/s}\ln 0.2105+4.5\text{mol/s}\ln 0.4737$$
$$=82.62\text{kJ/(K}\cdot\text{s)}$$

（3）若为几股同种气流，来流各股 p、T 相同，且与去流混合物的 p、T 也相同，这时 $\Delta S=0$，因每股进出口熵变都为零。

*3-19 刚性绝热容器中放置一个只能透过氧气，而不能透过氮气的半渗透膜，两侧体积各为 $V_A=0.15\text{m}^3$，$V_B=1\text{m}^3$，渗透开始前左侧氧气压力 $p_{A1}=0.4\text{MPa}$，温度 $T_{A1}=300\text{K}$，右侧为空气 $p_{B1}=0.1\text{MPa}$，$T_{B1}=300\text{K}$，这里空气中含有的氧气和氮气的摩尔分数各为 0.22 和 0.78。通过半渗透膜氧气最终将均匀占据整个容器，试计算：



（1）渗透终了 A 中氧气的量 $n_{O_2}^A$；（2）B 中氧气和氮气混合物的压力以及各组元的摩尔分数 x_{O_2},x_{N_2}；

（3）渗透前后系统熵变 ΔS。

解：（1）已知 $p_1^A=0.4\text{MPa}=400\text{kPa}$，$p_1^B=0.1\text{MPa}=100\text{kPa}$

初始状态 A 和 B 中的量

$$n_{O_2}^{A_1}=\frac{p_1^AV_A}{RT_A}=\frac{0.4\times10^6\,\text{Pa}\times0.15\text{m}^3}{8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times300\text{K}}=24.05\text{mol}$$
$$n_{air}^{B1}=\frac{p_1^BV_B}{RT_B}=\frac{0.\times10^6\,\text{Pa}\times1\text{m}^3}{8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times300\text{K}}=40.09\text{mol}$$

其中

$$n_{O_2}^{B_1}=x_{O_2}n_{air}^{B_1}=0.22\times40.09\text{mol}=8.82\text{mol} \qquad p_{O_2}^{B_1}=x_{O_2}p_1^B=0.22\times100\text{kPa=22kPa}$$

$$n_{N_2}^{B_1}=x_{N_2}n_{air}^{B_1}=0.78\times40.09\text{mol}=31.27\text{mol} \qquad p_{N_2}^{B1}=x_{N_2}p_1^B=0.78\times100\text{kPa=78kPa}$$

A 和 B 两侧氧气的量

$$n_{O_2}=n_{O_2}^{A_1}+n_{O_2}^{B_1}=24.05\text{mol}+8.82\text{mol}=32.87\text{mol}$$

取 A 和 B 为热力系，是封闭系，这时 Q=0、W=0，由能量守恒方程可得 $\Delta U=0$，$U_2=U_1$，又因氧气、氮气和空气均为双原子气体，取定值比热容时它们摩尔热容相同，

$$C_{V,m}=\frac{5}{2}R=\frac{5}{2}\times8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}=20.8\text{J/(mol}\cdot\text{K)}$$

$$n_{O_2}^{A_2}C_{V,m}T+n_{O_2+N_2}^{B_2}C_{V,m}T=n_{O_2}^{A_1}C_{V,m}T_A+n_{air}^{B_1}C_{V,m}T_B$$

式中 $n_2^{B2}=n_{O_2}^{A}+n_{air}^{B}-n_{O_2}^{A2}$

$$T(n_{O_2}^{A2}+n_{O_2}^{A}+n_{air}^{B}-n_{O_2}^{A2})=(n_{O_2}^{A1}+n_{air}^{B})T_B$$

所以　$T=T_A=T_B=300K$

氧气由 A 渗透到 B，使 A 和 B 中氧气均匀分布，渗透后氧气的压力

$$p_{O_2}=\frac{n_{O_2}RT}{V_A+V_B}=\frac{32.87\times8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times300\text{K}}{(0.15+1)\text{m}^3}=71295.0\text{Pa}=71.3\text{kPa}$$

A 侧压力即为剩余 O_2 的压力 $p_2^{A_2}=p_{O_2}=71.3\text{kPa}$，

$$n_{O_2}^{A_2}=\frac{p_2^{A_2}V_A}{RT}=\frac{71.3\times10^3\text{Pa}\times0.15\text{m}^3}{8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times300\text{K}}=4.287\text{mol}$$

B 侧 O_2 的量为

$$n_{O_2}^{B_2}=n_{O_2}-n_{O_2}^{A_2}=32.87\text{mol}-4.287\text{mol}=28.583\text{mol}$$

通过半透膜由 A 进入到 B 的 O_2 的量为

$$\Delta n_{O_2}=n_{O_2}^{A_1}-n_{O_2}^{A_2}=24.05\text{mol}-4.287\text{mol}=19.763\text{mol}$$

（2）终态 B 侧为 28.583 mol O_2 与 31.27 mol N_2 组成的混合物 59.853vmol，其压力为

$$p_2^B=\frac{n_2^BRT}{V_B}=\frac{59.853\text{mol}\times8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times300\text{K}}{1\text{m}^3}=149293.4\text{Pa}$$

其中，$x_{O_2}^{B_2}=\dfrac{n_{O_2}^{B_2}}{n_2^B}=\dfrac{28.583\text{mol}}{59.853\text{mol}}=0.4776$，$x_{N_2}^{B_2}=\dfrac{n_{N_2}^{B_2}}{n_2^B}=\dfrac{31.27\text{mol}}{59.853\text{mol}}=0.5224$

$$p_{O_2}^{B_2}=x_{O_2}^{B_2}p_2^B=0.4776\times149.3\text{kPa}=71.3\text{kpa}$$

$$p_{N_2}^{B_2}=x_{N_2}^{B_2}p_2^B=0.5224\times149.3\text{kPa}=78.0\text{kpa}$$

（3） 系统熵变分四部分考虑：留在 A 中的 O_2，渗透到 B 内的 O_2，B 中原有的 O_2，B 中原有的 N_2 的熵变之和。

$$\begin{aligned}\Delta S_{1-2} &= n_{O_2}^{A_2}\Delta S_{m,o_2}^{A_2} + \Delta n_{O_2}^{A}\Delta S_{m,O_2}^{A\to B} + n_{O_2}^{B_1}\Delta S_{m,O_2}^{B} + n_{N_2}^{B}\Delta S_{m,N_2}^{B} \\ &= n_{O_2}^{A_2}[S_{m.O_2}(p_2^A T) - S_{m,O_2}(p_1^A T_A)] + \Delta n_{O_2}^{A}[S_{m,O_2}(p_{O_2}^{B_2}T) - S_{m,O_2}(p_{O_2}^{A_1}T_A)] \\ &\quad + n_{O_2}^{B_1}[S_{m.O_2}(p_{O_2}^{B_2}T) - S_{m,O_2}(p_{O_2}^{B_1}T_B)] + n_{N_2}^{B}[S_{m,N_2}(p_{N_2}^{B_2}T) - S_{m,N_2}(p_{N_2}^{B_1}T_B)]\end{aligned}$$

注意到 $T = T_A = T_B = 300\text{K}$，氧气熵变中温度项为零，由于氮气温度和分压力均不变，故有

$$\begin{aligned}\Delta S_{1-2} &= 4.287\text{mol}\times\left(-8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times\ln\frac{71.3\text{kPa}}{400\text{kPa}}\right) \\ &\quad + 19.763\text{mol}\left(-8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times\ln\frac{71.3\text{kPa}}{400\text{kPa}}\right) \\ &\quad + 8.82\text{mol}\left(-8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times\ln\frac{71.3\text{kPa}}{22\text{kPa}}\right) \\ &= 258.6\text{J/K}\end{aligned}$$

第四章 理想气体的热力过程

4—1 有 2.3 千克的 CO，初态 $T_1 = 477\text{K}$，$p_1 = 0.32\text{MPa}$，经可逆定容加热，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) 设比热容为定值；(2) 变值比热容，按气体性质表。

解：(1) 定值比热容

$$p_2 = \frac{T_2}{T_1} p_1 = \frac{600\text{K}}{477\text{K}} \times 0.32\text{MPa} = 0.4025\text{MPa}$$

由附表 $M = 28.01\times10^{-3}\text{kg/mol}$ $R_g = \frac{R}{M} = \frac{8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}}{28.01\times10^{-3}\text{kg/mol}} = 296.8\text{J(kg}\cdot\text{K)}$

$$c_V = \frac{5}{2}R_g = \frac{5}{2}\times 296.8 = 0.7421\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$c_p = \frac{7}{2}R_g = \frac{7}{2}\times 296.8 = 1.03894\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$\Delta U = mc_V(T_2 - T_1) = 2.3\text{kg}\times 742.1\text{J/(kg}\cdot\text{K)}(600-477)\text{K} = 209.94\text{kJ}$$

$$\Delta H = mc_p(T_2 - T_1) = 2.3\text{kg}\times 1038.94\text{J/(kg}\cdot\text{K)}(600-477)\text{K} = 293.92\text{kJ}$$

$$\Delta S = mc_V \ln\frac{T_2}{T_1} = 2.3\text{kg}\times 742.1\ln\frac{600\text{K}}{477\text{K}} = 0.3916\text{kJ/K}$$

$$W = 0$$

$$Q = \Delta U = 209.94\text{kJ}$$

(2) 变比热容

由附表查得

$T_1 = 477\text{K}$ 时 $H_{m,1} = 13921.704\text{J/mol}$，$S^0_{m,1} = 211.312\text{J/(mol}\cdot\text{K)}$

$T_2 = 600\text{K}$ 时 $H_{m,2} = 17612.7\text{J/mol}$，$S^0_{m,2} = 218.217\text{J/(mol}\cdot\text{K)}$

$$U_{m,1} = H_{m,1} - RT_1 = 13921.704\text{J/mol} - 8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times 477\text{K} = 9955.69\text{J/mol}$$

$$U_{m,2} = H_{m,2} - RT_2 = 17612.7\text{J/mol} - 8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times 600\text{K} = 12624.0\text{J/mol}$$

$$\Delta U = \frac{m}{M}\Delta U_m = \frac{2.3\text{kg}}{28.01\times10^{-3}\text{kg/mol}}(12624.0\text{J/mol} - 9955.69\text{J/mol}) = 219.10\times10^3\text{J}$$

$$\Delta H = \frac{m}{M}\Delta H_m = \frac{2.3\text{kg}}{28.01\times10^{-3}\text{kg/mol}}(17612.7\text{J/mol} - 13921.704\text{J/mol}) = 303.08\times10^3\text{J}$$

$$\Delta S = n\left(S^0_{m,2} - S^0_{m,1} - R\ln\frac{p_2}{p_1}\right) = \frac{m}{M}\left(S^0_{m,2} - S^0_{m,1} - R\ln\frac{T_2}{T_1}\right) = \frac{2.3\text{kg}}{28.01\times10^{-3}\text{kg/mol}}\times$$

$$\left(218.317\text{J/(mol}\cdot\text{K)} - 211.312\text{J/(mol}\cdot\text{K)} - 8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\ln\frac{600\text{K}}{477K}\right)$$

$$= 0.4186\times10^3\text{J/K}$$

$$W = 0$$

$$Q = \Delta U = 219.10\text{kJ}$$

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 4110.76J/mol，试确定其终温及 $1\text{mol}CH_4$ 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，$c_p = 2.3298\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$。

解 由附表查得甲烷的摩尔质量 $M = 16.04\times10^{-3}\text{kg/mol}$，所以

$$C_{p,m} = Mc_p = 16.04\times10^{-3}\text{kg/mol}\times2.3298\text{J/(kg}\cdot\text{K)} = 37.37\text{J/(mol}\cdot\text{K)}$$

$$T_2 = T_1 + \frac{Q_m}{C_{p,m}} = 393\text{K} + \frac{-4110.76\text{J/mol}}{37.37\text{J/(mol}\cdot\text{K)}} = 283K$$

$$C_{V,m} = C_{p,m} - R = 37.37\text{J/(mol}\cdot\text{K)} - 8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)} = 29.0555\text{J/(mol}\cdot\text{K)}$$

$$\Delta U_m = C_{V,m}(T_2 - T_1) = 29.0555\text{J/(mol}\cdot\text{K)}(283-393)\text{K} = -3196.11\text{J/mol}$$

$$\Delta H_m = C_{p,m}(T_2 - T_1) = Q_m = -4110.76\text{J/mol}$$

4—3 试由 $w = \int_1^2 p\mathrm{d}v$，$w_t = -\int_1^2 v\mathrm{d}p$ 导出理想气体进行可逆绝热过程时过程功和技术功的计算式。

解： 可逆过程的过程功 $w = \int_1^2 p\mathrm{d}v$，由绝热过程方式可知 $p_1v_1^{\kappa} = pv^{\kappa}$， $p = \dfrac{p_1v_1^{\kappa}}{v^{\kappa}}$

所以 $$w = p_1v_1^{\kappa}\int_{v_1}^{v_2}\frac{\mathrm{d}v}{v^{\kappa}} = \frac{1}{\kappa-1}(p_1v_1 - p_2v_2) = R_g\frac{1}{\kappa-1}(T_1 - T_2)$$

考虑到 $$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}},\qquad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

又可写作 $$w = \frac{R_gT_1}{\kappa-1}[1-\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}] = \frac{R_gT_1}{\kappa-1}\left[1-\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\kappa-1}\right]$$

可逆过程的技术功 $w_t = -\int_{p_1}^{p_2}v\mathrm{d}p = \int_{v_1}^{v_2}p\mathrm{d}v + (p_1v_1 - p_2v_2)$ 将过程功 $\int_{v_1}^{v_2}p\mathrm{d}v$ 的各关系式代入，经整理可得

$$w_t=\frac{\kappa}{\kappa-1}(p_1v_1-p_2v_2)=\frac{\kappa}{\kappa-1}R_g(T_1-T_2)=\frac{\kappa}{\kappa-1}R_gT_1\left[1-\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}\right]=\kappa w_\tau$$

4—4 氧气 O_2 由 $t_1=40°C$，$p_1=0.1\text{MPa}$ 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；

（2） 按绝热压缩，设为定值比热容；

（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。

解：由附表 查得氧气 $\text{M}=32.0\times10^{-3}\text{kg/mol}$

$$R_g=\frac{R}{M}=\frac{8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}}{32.0\times10^{-3}\text{kg/mol}}=0.260\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\quad T_1=t_1+273=40+273=313\text{K}$$

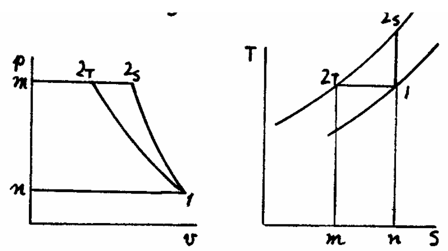
（1） $$w_{t,T}=R_gT_1\ln\frac{p_1}{p_2}=0.260\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times313\text{K}\ln\frac{0.1\text{MPa}}{4\text{MPa}}=-112.82\text{J/kg}$$

（2） $$T_2=\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}T_1=\left(\frac{0.4\text{MPa}}{0.1\text{MPa}}\right)^{\frac{0.4}{1.4}}\times313\text{K}=465.12\text{K}$$

$$w_{t,s}=c_p(T_1-T_2)=\frac{7}{2}\frac{R}{M}(T_1-T_2)$$

$$=\frac{7}{2}\times\frac{8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}}{32.0\times10^{-3}\text{kg/mol}}(313-465.12)\text{K}=-138.34\text{J/(mol}\cdot\text{K)kJ/kg}$$

（3） 在 p-v 图上定温压缩和绝热压缩技术功分别以面积 $1-2_T-m-n-1$ 和 $1-2_s-m-n-1$ 表示 $w_{t,T}<w_{t,s}$，在 T-s 图上，定温过程 $w_{t,T}=q_T$，用面积 $1-2_T-m-n-1$ 表示，绝热过程 $w_{t,s}=h_1-h_2=h_{2T}-h_{2s}$，用面积 $1-2_s-2_T-m-n-1$ 表示，显见 $w_{t,T}<w_{t,s}$。



4—5 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 1kg 氧气消耗的技术功。

解： 由附表查得氧气的 H_m, S_m^0

T / K	H_m / J/mol	S_m^0 / J/(mol·K)
300	8737.3	205.329
400	11708.9	213.872
500	14767.3	220.693

用插值的方法求出

$T_1 = 313\text{K}$ 时 $\quad H_{m,1} = 9123.608\ \text{J/mol} \quad S_{m,1}^0 = 206.44\text{J/(mol}\cdot\text{K)}$

定熵过程有 $\quad \Delta S = S_{m,2}^0 - S_{m,1}^0 - R\ln\dfrac{p_2}{p_1} = 0 \quad$ 所以

$$S_{m,2}^0 = S_{m,1}^0 + R\ln\frac{p_2}{p_1}$$

$$= 206.44\text{J/(mol}\cdot\text{K)} + 8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\ln\frac{0.4\text{MPa}}{0.1\text{MPa}} = 217.97\text{J/(mol}\cdot\text{K)}$$

因为 $S_{m,400\text{K}}^0 < S_{m,2}^0 < S_{m,500\text{K}}^0$，故 $400\text{K} < T_2 < 500\text{K}$

$$T_2 = 400\text{K} + \frac{(217.97 - 213.872)\text{J/(mol}\cdot\text{K)}}{(220.693 - 213.872)\text{J/(mol}\cdot\text{K)}} \times 100\text{K} = 460.08\text{K}$$

$$H_{m,2} = 11708.9\text{J/mol} + (14767.3 - 11708.9)\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\frac{60.08\text{K}}{100\text{K}} = 13546.39\text{J/mol}$$

$$w_{t,s} = \frac{1}{M}(H_{m,1} - H_{m,2})$$

$$= \frac{1}{32.0\times10^{-3}\text{kg/mol}}(9123.608 - 13546.39)\text{J/(mol}\cdot\text{K)} = -138.21\times10^3\text{J/kg}$$

4—6 3kg 空气，$p_1 = 1\text{MPa}$，$T_1 = 900\text{K}$，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。

解 （1）$T_2 = \left(\dfrac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} T_1 = \left(\dfrac{0.1\text{MPa}}{1\text{MPa}}\right)^{\frac{0.4}{1.4}} \times 900\text{K} = 466.15\text{K}$

$$v_2 = \frac{R_g T_2}{p_2} = \frac{8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times466.15\text{K}}{28.97\times10^{-3}\text{kg/mol}\times10^5\text{Pa}} = 1.3379\text{m}^3/\text{kg}$$

(2) $c_V = \dfrac{5}{2}\dfrac{R}{M} = \dfrac{5}{2}\times\dfrac{8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}}{28.97\times10^{-3}\text{kg/mol}} = 718\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$

$$c_p = c_V + R_g = 718\text{J/(kg}\cdot\text{K)} + \frac{8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}}{28.97\times10^{-3}\text{kg/mol}} = 1005\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$W = mc_V(T_1 - T_2) = 3\text{kg}\times718\text{J/(kg}\cdot\text{K)}(900 - 466.15)\text{K} = 933.21\text{kJ}$$

$$W_t = \kappa W = 1.4\times933.21\text{kJ} = 1306.50\text{kJ}$$

(3) $\Delta U = -W = -933.21\text{kJ}$； $\quad \Delta H = -W_t = -1306.50\text{kJ}$

4—7 同上题，考虑变值比热容，按空气热力性质表进行计算。

解 （1）查附表

$T_1 = 900\text{K}$ 时，$h_1 = 934.91\text{kJ/kg}$ $\quad p_{r1} = 76.576$

$$p_{r2} = \frac{p_2}{p_1} p_{r1} = \frac{0.1\text{MPa}}{1\text{MPa}} \times 76.576 = 7.6576 \quad 查得 T_2 = 484.68\text{K}$$

$$h_2 = 484.49\text{kJ/kg} + (494.76 - 484.49)\text{kJ/kg} \times 0.468 = 489.30\text{kJ/kg}$$

$$v_2 = \frac{R_{g.a} T_2}{p_2} = \frac{287\text{J/(kg}\cdot\text{K)} \times 484.68\text{K}}{0.1 \times 10^6 \text{Pa}} = 1.391\text{m}^3/\text{kg}$$

（2）$W = m(u_1 - u_2) = m(h_1 - h_2) - mR_g(T_1 - T_2)$

$$= 3.0\text{kg} \times [934.91\text{kJ/kg} - 489.30\text{kJ/kg} - 0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}(900 - 489.30)\text{K}]$$
$$= 983.22\text{kJ}$$

$$W_t = m(h_1 - h_2) = 3\text{kg} \times (934.91 - 489.30)\text{kJ/kg} = 1336.82\text{kJ}$$

（3）$\Delta U = -W = -983.22kJ$； $\quad \Delta H = -W_t = -1336.83kJ$

4—8 空气按定熵过程由已知 p_1、T_1 变化到（a）T_2，确定 p_2；（b）p_2 确定 T_2。c_p 由空气真实热容确定：

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

若已知 $p_1 = 0.5\text{MPa}$，$T_1 = 1000\text{K}$，①$T_2 = 500\text{K}$ 求 p_2；② $p_2 = 0.1\text{MPa}$ 求 T_2；③将计算结果与利用气体性质表求出的 p_2（或 T_2）作一比较。

解 （1）$\Delta S = \int C_{p,m} \frac{dT}{T} - R\ln\frac{p_2}{p_1} = 0$；所以 $R\int_{1000\text{K}}^{500\text{K}} \frac{C_{p,m}}{R} \frac{dT}{T} = R\ln\frac{p_2}{p_1}$

$$\int_{1000\text{K}}^{500\text{K}} [3.653\frac{1}{T} - 1.337 \times 10^{-3} + 3.294 \times 10^{-6} T - 1.913 \times 10^{-9} T^2 + 0.2763 \times 10^{-12} T^3] dT$$
$$= \ln\frac{p_2}{0.5}$$

$$p_2 = 0.5\exp[3.653\ln\frac{500}{1000} - 1.337 \times 10^{-3} \times (500 - 1000)$$
$$+ \frac{3.294 \times 10^{-6}}{2}(500^2 - 1000^2) - \frac{1.913 \times 10^{-9}}{3}(500^3 - 1000^3)$$
$$+ \frac{0.2763 \times 10^{-12}}{4}(500^4 - 1000^4)] = 0.037\text{MPa}$$

（2） 同理有 $\int_{1000\mathrm{K}}^{T_2\mathrm{K}} C_{p,m}\frac{\mathrm{d}T}{T}-R\ln\frac{p_2}{p_1}=0$

$$3.653\ln\frac{T_2}{1000}-1.337\times10^{-3}(T_2-1000)+\frac{3.294\times10^{-6}}{2}(T_2^2-1000^2)$$
$$-\frac{1.913\times10^{-9}}{3}(T_2^3-1000^3)+\frac{0.2763\times10^{-12}}{4}(T_2^4-1000^4)=\ln\frac{0.1}{0.5}$$

用迭代法得出$T_2=657.4\mathrm{K}$，这时左侧=1.60908,右侧=1.60944。

(3) （a）已知 $p_1=0.5\mathrm{MPa}$，$T_1=1000\mathrm{K}$，$T_2=500\mathrm{K}$

由附表，根据T_1、T_2，查得 $p_{r1}=115.97$，$p_{r2}=8.5558$，所以

$$p_2=\frac{p_{r2}}{p_{r1}}p_1=\frac{8.5558}{115.97}\times0.5\mathrm{MPa}=0.03689\mathrm{MPa}$$

（b）已知 $p_1=0.5\mathrm{MPa}$，$T_1=1000\mathrm{K}$，$p_2=0.1\mathrm{MPa}$

$$p_{r2}=\frac{p_2}{p_1}p_{r1}=\frac{0.1\mathrm{MPa}}{0.5\mathrm{MPa}}\times115.97=23.194$$

根据 p_{r2}，在附表中查得$T_2=650\mathrm{K}+\frac{23.194-22.234}{23.528-22.234}\times10\mathrm{K}=657.419\mathrm{K}$

计算结果表明：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，后一方法方便得多。

4—9 某气缸中空气初始参数 $p_1=8\mathrm{MPa}$，$t_1=1300°\mathrm{C}$，进行了一个可逆多变过程，终态 $p_2=0.4\mathrm{MPa}$，$t_2=400°\mathrm{C}$，空气的气体常数 $R_g=0.287\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$，分别按下列两种方法计算，判断空气该过程是放热还是吸热？

（1） 按定值热容，$c_V=0.718\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$

（2） 比热容是温度的线性函数$\{c_V\}_{\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}}=0.7088+0.000186\{t\}_{°\mathrm{C}}$

解： 由 p_1，T_1，p_2，T_2 确定多变指数

$$\frac{n-1}{n}=\frac{\ln\frac{T_2}{T_1}}{\ln\frac{p_2}{p_1}}=\frac{\ln\frac{673\mathrm{K}}{1573\mathrm{K}}}{\ln\frac{0.4\mathrm{MPa}}{8\mathrm{MPa}}}=0.283401\qquad n=1.3955$$

（1） $\Delta w=c_v(T_2-T_1)=0.718\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times(400-1300)\mathrm{K}=-646.2\mathrm{kJ/kg}$

$$w=\frac{1}{n-1}R_g(T_1-T_2)=\frac{1}{1.3955-1}\times0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(1300-400)\text{K}=653.1\text{kJ/kg}$$
$$q=\Delta u+w=-646.2\text{kJ/kg}+653.1\text{kJ/kg}=6.9\text{kJ/kg}$$

所以是吸热过程。

（2）$\Delta u=\int_1^2 c_V\mathrm{d}t=\int_{1300^\circ\text{C}}^{400^\circ\text{C}}(0.7088+0.000186t)\mathrm{d}t$

$$=0.7088\times(400-1300)+\frac{0.000186}{2}(400^2-1300^2)=-780.21\text{kJ/kg}$$

$$w=\frac{1}{n-1}R_g(T_1-T_2)=653.1\text{kJ/kg}$$
$$q=\Delta u+w=-780.21\text{kJ/kg}+653.1\text{kJ/kg}=-127.1\text{kJ/kg}$$

是放热过程。

可见高温时按定值比热容计算误差太大。

4—10 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时阀门将自动打开，放走部分氧气，使罐中维持最大压力为0.7MPa。问当罐中氧气温度为285°C时，对罐内氧气共加入多少热量？设氧气的比热容为定值，$c_V=0.667\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，$c_p=0.917\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$。

解 由附表查得氧气

$$M=32.0\times10^{-3}\text{kg/mol}，R_g=\frac{R}{M}=\frac{8.3145\text{kJ/(mol}\cdot\text{K)}}{32.0\times10^{-3}\text{kg/mol}}=260\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$m_1=\frac{p_1V}{R_gT_1}=\frac{0.55\times10^6\text{Pa}\times0.15\text{m}^3}{260\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times(38+273)\text{K}}=1.02\text{kg}$$
$$m_2=\frac{p_2V}{R_gT_2}=\frac{0.7\times10^6\text{Pa}\times0.15\text{m}^3}{260\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times(285+273)\text{K}}=0.72\text{kg}$$

根据题意：1-2 是封密容器定容加热过程，$Q_v=m_1c_V(T_2-T_1)$

$$T_2=\frac{p_2}{p_1}T_1=\frac{0.7\text{MPa}}{0.55\text{MPa}}\times311\text{K}=395.8\text{K}$$
$$Q_v=1.02\times0.657\times(395.8-311)=56.83kJ$$

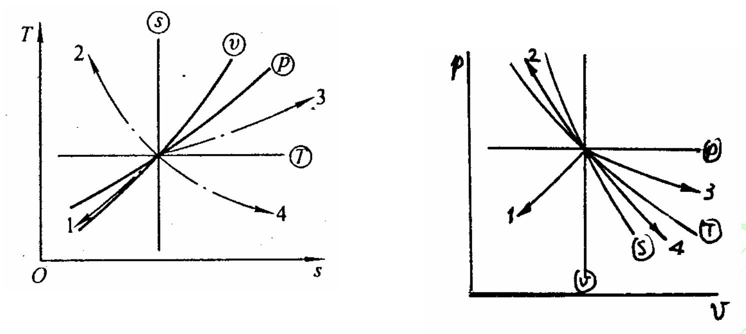
2-3 是边加热，边放气的吸热放气过程，过程中维持容器中氧气压力不变，恒为0.7MPa。罐中气体由$m_2(=m_1)$减少到m_3，温度由T_2升到T_3，任何一中间状态都满足$p_3V=mR_gT$。

$$Q_p=\int_{T_2}^{T_3}mc_p\mathrm{d}T=c_p\int\frac{p_3V}{R_gT}\mathrm{d}T=\frac{c_pp_3V}{R_g}\ln\frac{T_3}{T_2}$$
$$=\frac{917\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times0.7\times10^6\text{Pa}\times0.15\text{m}^3}{260\text{J/(kg}\cdot\text{K)}}\ln\frac{558\text{K}}{395.8\text{K}}=127.19\text{kJ}$$

$$Q = Q_v + Q_p = 56.83\text{kJ} + 127.19\text{kJ} = 184.02\text{kJ}$$

4—11 某理想气体在 T-s 图上的四种过程如图 4-17 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？

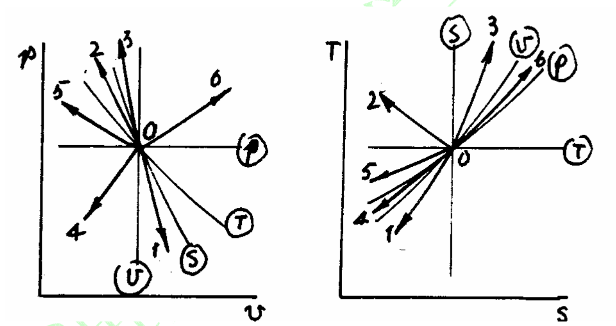
解 （1） $-\infty < n_1 < 0$ 压缩，放热；（2） $1 < n_2 < \kappa$ 压缩 放热



（3） $0 < n_3 < 1$ 膨胀 吸热；（4） $1 < n_4 < \kappa$ 膨胀 吸热

4—12 试将满足以下要求的多变过程在 p-v 和 T-s 图上表示出来（先标出四个基本热力过程）：（1）工质膨胀，且放热；（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。

解：

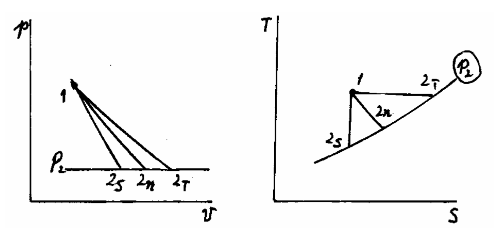


4—13 有 1kg 空气，初始状态为 $p_1 = 0.5\text{MPa}$，$t_1 = 500°\text{C}$，(1)绝热膨胀到 $p_2 = 0.1\text{MPa}$；(2)定温膨胀到 $p_2 = 0.1\text{MPa}$；(3)多变膨胀到 $p_2 = 0.1\text{MPa}$，多变指数 $n = 1.2$。 试将各过程在 p-v 图上 T-s 图上，并计算 Δs_{12}，设过程可逆，且比热容为定值，$c_V = 0.718\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$。

解 （1）绝热膨胀过程 1-2s

$\delta q = 0$，$\text{d}s = 0$ 所以 $\Delta s_{1-2s} = 0$

（2） 定温膨胀过程 $1-2_T$



$$\Delta s = c_p \ln\frac{T_2}{T_1} - R_g \ln\frac{p_2}{p_1} = -R_g \ln\frac{p_2}{p_1}$$

$$= -0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\ln\frac{0.1\text{MPa}}{0.5\text{MPa}} = 0.462\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

(3) 多变膨胀过程$1-2_n$

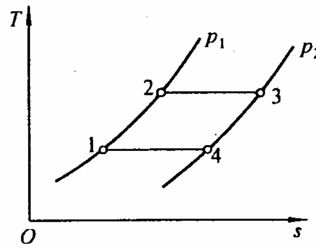
$$T_2 = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} T_1 = \left(\frac{0.1\text{MPa}}{0.5\text{MPa}}\right)^{\frac{0.2}{1.2}}(500+273)\text{K} = 591.13\text{K}$$

$$\Delta s = c_p \ln\frac{T_2}{T_1} - R_g \ln\frac{p_2}{p_1}$$

$$= [0.718\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} + 0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}]\ln\frac{591.13\text{K}}{773\text{K}} - 0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\ln\frac{0.1\text{MPa}}{0.5\text{MPa}}$$

$$= 0.1923\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

4—14 试证明理想气体在T-s图上任意两条定压线(或定容线)之间的水平距离相等,见图4-19,即求证: $\overline{14} = \overline{23}$



解 $\overline{14} = s_4 - s_1 = c_p \ln\frac{T_4}{T_1} - R_g \ln\frac{p_2}{p_1}$

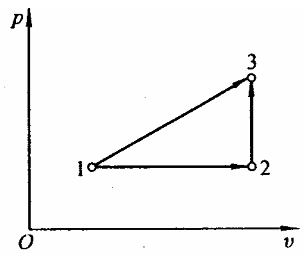
$T_4 = T_1$ $\qquad c_p \ln\frac{T_4}{T_1} = 0$ $\qquad \overline{14} = R_g \ln\frac{p_1}{p_4}$

$$\overline{23} = S_3 - S_2 = c_p \ln\frac{T_3}{T_2} - R_g \ln\frac{p_3}{p_2}$$

$T_3 = T_2$, $\qquad c_p \ln\frac{T_3}{T_2} = 0$ $\qquad \overline{23} = R_g \ln\frac{p_2}{p_3}$

而 $p_1 = p_2$, $\qquad p_3 = p_4$,所以 $\quad \overline{14} = \overline{23}$

4—15 1mol 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 4-20),1-3 为直线。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) $\Delta S_{12} + \Delta S_{23} = \Delta S_{13}$

证明:(1) 由热力学第一定律

$$Q_{1-2} = U_2 - U_1 + W_{1-2} \qquad \text{(a)}$$

$$Q_{2-3} = U_3 - U_2 + W_{2-3} \qquad \text{(b)}$$

因 2—3 为定容过程，$W_{2-3}=0$，(a)（b）两式相加得

$$Q_{1-2}+Q_{2-3}=U_3-U_1+W_{1-2} \qquad \text{(c)}$$

而

$$Q_{1-3}=U_3-U_1+W_{1-2} \qquad \text{(d)}$$

在 p-v 图上，过程线下面积代表过程功，显见 $W_{1-3}>W_{1-2}$

或

$$W_{1-3}=\frac{1}{2}(p_1+p_3)(v_3-v_1)=\frac{p_1+2p_1}{2}(3v_1-v_1)=3p_1v_1$$

$$W_{1-2}=p_1(v_2-v_1)=p_1(3v_1-v_1)=2p_1v_1$$

所以 $W_{1-3}>W_{1-2}$ $\qquad Q_{1-2}+Q_{2-3}\neq Q_{1-3}$

(2) 1—2 为定压过程，$\Delta S_{1-2}=C_{p,m}\ln\frac{T_2}{T_1}$，而 $\frac{T_2}{T_1}=\frac{v_2}{v_1}=3$

$$\Delta S_{1-2}=C_{p,m}\ln 3\,\mathrm{J/(mol\cdot K)}$$

2—3 为定容过程 $\Delta S_{1-2}=C_{V,m}\ln\frac{T_3}{T_2}$ 而 $\frac{T_3}{T_2}=\frac{p_3}{p_2}=2$

$$\Delta S_{2-3}=C_{V,m}\ln 2\,\mathrm{J/(mol\cdot K)}$$

$$\Delta S_{1-2}+\Delta S_{2-3}=C_{p,m}\ln 3+c_{V,m}\ln 2 \quad \mathrm{J/(mol\cdot K)}$$

$$\Delta S_{1-3}=C_{V,m}\ln\frac{p_3}{p_1}+C_{p,m}\ln\frac{v_3}{v_1}, \qquad \frac{p_3}{p_1}=2, \frac{v_3}{v_1}=3$$

$$\Delta S_{1-3}=C_{V,m}\ln 2+C_{p,m}\ln 3 \qquad \mathrm{J/(mol\cdot K)}$$

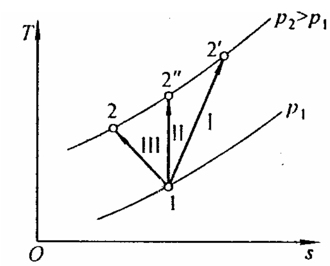
所以 $\qquad \Delta S_{1-2}+\Delta S_{2-3}=\Delta S_{1-3}$

4—16 试导出理想气体定值比热时多变过程熵差的计算式为

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

及

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



并根据式（a）对图 4-20 中示出的三种压缩过程进行分析，它们的 n 是大于、等于、还是小于 κ？它们各是吸热、绝热、还放热过程？

解：

$$\Delta s=\int\frac{\delta q}{T}=\int\frac{c\mathrm{d}T}{T}$$

因 $c_n=\dfrac{n-\kappa}{n-1}c_V\,(n\neq 1)$ 所以 $\Delta s=\int\dfrac{n-\kappa}{n-1}c_V\dfrac{\mathrm{d}T}{T}=\dfrac{n-\kappa}{n-1}c_V\ln\dfrac{T_2}{T_1}$

将 $c_V=\dfrac{1}{\kappa-1}R_g$ 代入，得 $\Delta s=\dfrac{n-\kappa}{(n-1)(\kappa-1)}R_g\ln\dfrac{T_2}{T_1}(n\neq 1)$

又将 $\dfrac{T_2}{T_1}=\left(\dfrac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}$ 代入，得

$$\Delta s=\frac{n-\kappa}{(n-1)(\kappa-1)}R_g\ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}=\frac{n-\kappa}{n(\kappa-1)}R_g\ln\frac{p_2}{p_1}$$

由图显见，过程 I 是熵增过程 $\Delta s>0$，过程线与 s 轴所夹的面积代表热量，是吸热过程，这时

$$\frac{n-\kappa}{n(\kappa-1)}R_g\ln\frac{p_2}{p_1}>0 \qquad (1)$$

因 $p_2>p_1$， $\ln\dfrac{p_2}{p_1}>0$， $R_g>0$， $(\kappa-1)>0$

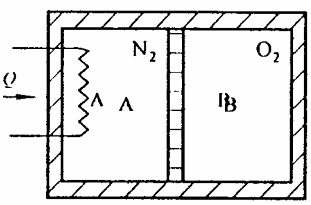
所以 $\dfrac{n-\kappa}{n}>0$ 即 $n>\kappa$ 或 $n<0$ 而 $\kappa>1$

因此，当 $n>\kappa$（这是时 n 必大于 0）或 $n<0$（这时 n 必小于 κ）时(1)式都成立

过程 II 与 s 轴垂直，是定熵过程，故为可逆绝热过程，$\dfrac{n-\kappa}{n(\kappa-1)}R_g\ln\dfrac{p_2}{p_1}=0$，由于 $p_2\neq p_1$，所以 $n=\kappa$。

过程 III 是熵减过程 $\Delta s<0$ 因 $\ln\dfrac{p_2}{p_1}>0$，$R_g>0$,$(\kappa-1)>0$，所以 $\dfrac{n-\kappa}{n}<0$，即 $n>\kappa$，$n<0$，由于 κ 恒大于 1，这两条件不可能同时满足，这种情况不成立；$n<\kappa$，$n>0$，即过程 III 的多变指数应满足 $0<n<\kappa$。

4—17 气缸活塞系统的缸壁和活塞均为刚性绝热材料制成，A 侧为 N_2，B 侧为 O_2，两侧温度、压力、体积均相同：$T_{A1}=T_{B1}=300\mathrm{K}$，$p_{A1}=p_{B1}=0.1\mathrm{MPa}$，$V_{A1}=V_{B1}=0.5\mathrm{m}^3$，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和对 N_2 加热，直到 $p_{A2}=0.22\mathrm{MPa}$，设 O_2 和 N_2 均为理想气体，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 作出的过程功）；(4) ΔS_{O_2} 和 ΔS_{N_2}；(5)



在 p-v 图及 T-s 图上定性地表示 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？

解：(1) 已知：

$$V_{A1}=V_{B1}=0.5\text{m}^3,\ p_{A1}=p_{A2}=0.1\text{MPa},\ T_{A1}=T_{B1}=300\text{K},\ p_{A2}=0.22\text{MPa}$$

活塞是自由的，故 $p_{B2}=p_{A2}=0.22\text{MPa}$

由附表可得 $M_{N_2}=28.0\times10^{-3}\text{kg/mol}$，$M_{O_2}=32.0\times10^{-3}\text{kg/mol}$

$$R_{gN_2}=\frac{R}{M_{N2}}=\frac{8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}}{28.01\times10^{-3}\text{kg/mol}}=296.84\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$R_{gO_2}=\frac{R}{M_{O2}}=\frac{8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}}{32.0\times10^{-3}\text{kg/mol}}=259.83\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$c_{V,N_2}=\frac{5}{2}\frac{R}{M_{N_2}}=\frac{5}{2}\times\frac{8.1345\text{J/(mol}\cdot\text{K)}}{28.01\times10^{-3}\text{kg/mol}}=742.1\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$c_{V,O_2}=\frac{5}{2}\frac{R}{M_{O_2}}=\frac{5}{2}\times\frac{8.1345\text{J/(mol}\cdot\text{K)}}{32.0\times10^{-3}\text{kg/mol}}=649.6\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$m_A=\frac{p_{A1}V_{A1}}{R_{g,N2}T_{A1}}=\frac{0.1\times10^6\text{Pa}\times0.5\text{m}^3}{296.84\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times300\text{K}}=0.5615\text{kg}$$

$$m_B=\frac{p_{B1}V_{B1}}{R_{g,o2}T_{B2}}=\frac{0.1\times10^6\text{Pa}\times0.5\text{m}^3}{259.83\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times300\text{K}}=0.6414\text{kg}$$

B 为可逆绝热过程，$T_{B,2}=\left(\dfrac{p_{B,2}}{p_{B,1}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}=\left(\dfrac{0.22\text{MPa}}{0.1\text{MPa}}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}}\times300\text{K}=375.8\text{K}$

$$V_{B,2}=\frac{m_B R_{g,O_2}T_{B,2}}{p_{B_2}}=\frac{0.6414\text{kg}\times259.83\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times375.8\text{K}}{0.22\times10^6\text{Pa}}=0.2847m^3$$

(2) $V_{A,2}=1-V_{B,2}=1\text{m}^3-0.2847\text{m}^3=0.7153\text{m}^3$

$$T_{A2}=\frac{p_{A,2}V_{A,2}}{R_{gN_2}m_A}=\frac{0.22\times10^6\text{Pa}\times0.7153\text{m}^3}{296.84\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times0.5615\text{m}^3}=944.15\text{K}$$

(3) 取 A+B 为热力系

$$Q=\Delta U_A+\Delta U_B=m_A c_{V,N_2}(T_{A2}-T_{A1})+m_B c_{V,O_2}(T_{B2}-T_{B1})$$

$$=0.5615\text{kg}\times742.1\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times(944.15-300)\text{K}$$
$$+0.6414\text{kg}\times649.4\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times(375.8-300)\text{K}=299.99\text{kJ}$$

取 B 为热力系

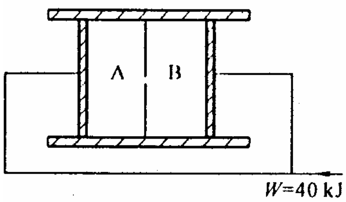
$$W_B = -\Delta U_B = -m_B c_{V,O_2}(T_{B,2} - T_{B,1})$$
$$= -0.6414\text{kg} \times 0.6496\text{J/(kg}\cdot\text{K)} \times (375.8 - 300)\text{K} = -31.58\text{kJ}$$
$$W_A = -W_B = 31.58\text{kJ}$$

（4）由题意，$\Delta S_{O_2} = m_B \left(c_{p,O_2} \ln \dfrac{T_{B2}}{T_{B1}} - R_{g,O_2} \ln \dfrac{p_{B2}}{p_{B1}} \right) = 0$

$$c_{p,N_2} = c_{V,N_2} + R_{g,N_2} = 0.7421\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} + 0.29684\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} = 1.03894\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$
$$\Delta S_{N_2} = m_A \left[c_{p,N_2} \ln \frac{T_{A2}}{T_{A1}} - R_{g,N2} \ln \frac{p_{A2}}{p_{A1}} \right]$$
$$= 0.5615\text{kg} \left[1.0389\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \ln \frac{944.5\text{K}}{300\text{K}} - 0.2968\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \ln \frac{0.22\text{MPa}}{0.1\text{MPa}} \right]$$
$$= 0.5374\text{kJ/K}$$

(5)(6)略

4—18 空气装在如图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 40kJ，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，$c_V = 0.718\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$。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 图上示意画出该过程。



解（1）$V_{A1} = V_{B1} = \dfrac{m_A R_g T_1}{p_1} = \dfrac{1\text{kg} \times 287\text{J/(kg}\cdot\text{K)} \times 400\text{K}}{2 \times 10^6\text{Pa}} = 0.0574\text{m}^3$

取 A+B 为热力系

$$W = -(\Delta U_A + \Delta U_B) = (U_{A1} + U_{B1}) - 2u_2 = 2c_V(T_1 - T_2)$$
$$T_2 = T_1 + \frac{W}{mc_V} = 400\text{K} + \frac{-40\text{kJ}}{2\text{kg} \times 0.718\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}} = 427.9\text{K}$$
$$p_2 = \frac{mR_g T_2}{2V_A} = \frac{2\text{kg} \times 287\text{J/(kg}\cdot\text{K)} \times 427.9\text{K}}{2 \times 0.0574\text{m}^3} = 2.139 \times 10^6\text{Pa} = 2.139\text{MPa}$$

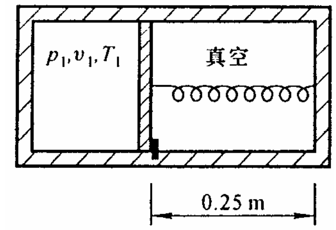
（2）过程中系统体积不变

$$\Delta S = m\left(c_V \ln \frac{T_2}{T_1} + R_g \ln \frac{V_2}{V_1} \right) = mc_V \ln \frac{T_2}{T_1}$$
$$= 2\text{kg} \times 718\text{J/(kg}\cdot\text{K)} \ln \frac{427.9\text{K}}{400\text{K}} = 0.0968\text{kJ/K} > 0$$

所以不是定熵过程。

（3）略

4—19 有一孤立系统由带有隔板的气缸组成，隔板将气缸两部分，一侧装有理想气体氦，气体常数 $R_g = 2.077\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，比热容 $c_V = 3.116\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，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 0.3m，弹性力 $F = kx$，x 表示伸长或压缩的长度，初始位置如图所示。初态 $t_1 = 40°\text{C}$，$V_1 = 10^{-4}\text{m}^3$，$p_1 = 0.14\text{MPa}$，弹簧长度为 0.25m 开始时隔板由销子固定，现拔去销子，则气体和弹簧达到新的力平衡。假定不计隔板质量，隔板也是绝热的，面积 $A = 0.001\text{m}^2$，且不计移动磨擦阻力。求：（1）力平衡时气体的压力 p_2 和温度 T_2；（2）状态变化前后气体的熵变 ΔS_{12}，是否是定熵过程？试在 T-s 图上示意画出该过程。



解； 已知 $p_1 = 0.14\text{MPa}$，$T_1 = 313\text{K}$，$V_1 = 10^{-4}\text{m}^3$，$k = 900\text{N/m}$，自由长度 0.3m，

$$R_g = 2.077\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}，M = 4.003\times10^{-3}\text{kg/mol}，c_V = 3.116\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

（1） 据题意，$x_1 = 0.3\text{m-}0.25\text{m=}0.05\text{m}$

$$m = \frac{p_1V_1}{R_gT_1} = \frac{0.14\times10^6\text{Pa}\times10^{-4}\text{m}^3}{2077\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times313\text{K}} = 0.2154\times10^{-4}\text{kg}$$

初态弹簧压力

$$p_0 = \frac{F_1}{A} = \frac{kx_1}{A} = \frac{900\text{N/m}\times0.05\text{m}}{0.001\text{m}^2} = 4.5\times10^4\text{Pa} = 0.045\text{MPa} < p_1$$

设过程中间状态氦气体积为 V， $p = \dfrac{F}{A} = \dfrac{kx}{A} = \dfrac{k}{A}[\dfrac{V-V_1}{A} + x_1]$，代入数据得

$$\{p\}_{\text{Pa}} = 9\times10^8\{V\}_{\text{m}^3} - 4.5\times10^4 \qquad \text{(a)}$$

取氦气侧为热力系，是绝热系，能量方程

$$\delta W = -\text{d}U \qquad p\text{d}V = -mc_V\text{d}T$$

中间状态 $p = 9\times10^8V - 4.5\times10^4$，所以

$$(9\times10^8V - 4.5\times10^4)\text{d}V = -0.2154\times10^{-4}\times3.116\text{d}T$$

两边积分：$$\int_{10^{-4}\text{m}^3}^{V_2}(9\times10^8V - 4.5\times10^4)\text{d}V = -\int_{313\text{K}}^{T_2}0.0671\text{d}T$$

$$T_2 = 313 - 67.064\times10^8V_2^2 + 67.064\times10^4V_2 \qquad \text{(b)}$$

$$\frac{p_2V_2}{R_gT_2}=m \qquad \text{(c)}$$

将(a)(b)代入(c)

$$\frac{(9\times10^8V_2-4.5\times10^4)V_2}{2077(313-67.064\times10^8V_2{}^2+67.064\times10^4V_2)}=0.2154\times10^{-4}$$

经整理得 $12\times10^8V_2{}^2-7.5\times10^4V_2-14=0$；$V_2=1.4369\times10^{-4}\,\mathrm{m^3}$

代入（a）

$$p_2=9\times10^8\times1.4369\times10^{-4}-4.5\times10^4=8.4323\times10^4\,\mathrm{Pa}=0.0843\mathrm{MPa}$$

代入（b）

$$T_2=313-67.064\times10^8\times(1.4369\times10^{-4})^2\times67.064\times10^4\times1.4369\times10^{-4}=270.89\mathrm{K}$$

校核 $$\frac{p_2V_2}{R_gT_2}=\frac{0.0843\times10^6\,\mathrm{Pa}\times1.4369\times10^{-4}\,\mathrm{m^3}}{20779\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times270.89\mathrm{K}}=0.2153\times10^{-4}\,\mathrm{kg}=m$$

（2）

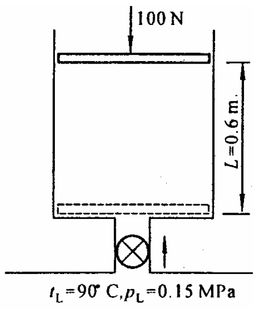
$$\Delta S_{1-2}=m\left[c_V\ln\frac{T_2}{T_1}+R_g\ln\frac{V_2}{V_1}\right]$$

$$=0.2154\times10^{-4}\,\mathrm{kg}\times\left[3116\mathrm{J/(kg\cdot K)}\ln\frac{270.9\mathrm{K}}{313\mathrm{K}}+2077\mathrm{J/(kg\cdot K)}\ln\frac{1.4369\times10^{-4}\,\mathrm{m^3}}{10^{-4}\,\mathrm{m^3}}\right]$$

$$=0.0652\times10^{-4}\,\mathrm{kJ/K}>0$$

是非定熵绝热过程。

4—20 有一垂直气缸截面积 $A=6450\mathrm{mm^2}$，内置一活塞重 100N，通过管道阀门与气源相通。如图 4-24，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 $L=0.6\mathrm{m}$ 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，$p_L=0.15\mathrm{MPa}$，$t_L=90°\mathrm{C}$，活塞与缸壁间无磨擦损失，大气压力 $p_0=0.1013\mathrm{MPa}$，求：(1) 活塞上升过程中气缸内气体压力 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 $c_V=0.718\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$，$c_p=1.005\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$。



解 （1）气缸内气体压力

$$p=p_0+\frac{F}{A}=0.1013\times10^6\,\mathrm{Pa}+\frac{100\mathrm{N}}{6450\times10^{-6}\,\mathrm{m^2}}=0.1168\mathrm{MPa}$$

（2）空气对外作功

$$W=\int p\mathrm{d}V=p\Delta V=0.1168\times10^6\,\mathrm{Pa}(6450\times10^{-6}\,\mathrm{m^2}\times0.6\mathrm{m}-0)=0.452\mathrm{kJ}$$

（3）输出的有用功 $W_u=FL=100\mathrm{N}\times0.6m=60\mathrm{J}=0.06\mathrm{kJ}$

（4）由非稳定流动能量方程

$$\delta Q = \mathrm{d}U + h_{in}\delta m_{in} + \delta W_i$$

因 $\delta m_{in} = \mathrm{d}m$， $m_2 = m_{in}$ 所以

$$Q = m_2 c_V T_2 - c_p T_{in} m_{in} + W_i = m_2 c_V T_2 - m_2 c_p T_{in} + W_i$$

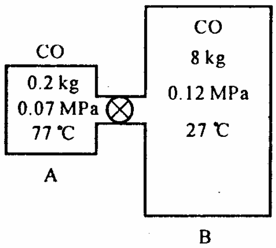
已知 $T_2 = 303\mathrm{K}$，$T_{in} = 363\mathrm{K}$，$R_\mathrm{g} = 0.287\mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$，$c_V = 0.718\mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$，

$c_p = 1.005\mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$

$$m_2 = \frac{p_2 V_2}{R_\mathrm{g} T_2} = \frac{0.1168\times10^6\mathrm{Pa}\times6450\times10^{-6}\mathrm{m}^2\times0.6\mathrm{m}}{287\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times303\mathrm{K}} \doteq 0.00052\mathrm{kg}$$

$$Q = 0.00052\mathrm{kg}\times[0.718\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times303\mathrm{K} - 1.005\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times363\mathrm{K}] + 0.452\mathrm{kJ}$$
$$= 0.375\mathrm{kJ}$$

4—21 容器 A 中装有 0.2kg 的一氧化碳 CO，压力、温度为 0.07MPa、77°C。容器 B 中装有 0.8kg 压力、温度为 0.12MPa、27°C 的 CO 见图 4-25。A 和 B 均为透热壁面，它们之间经管道和阀门相通，现打开阀门，CO 气体由 B 流向 A，若压力平衡时温度同为 $t_2 = 42°\mathrm{C}$，设 CO 为理想气体，过程中平均比热容 $c_V = 0.745\mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$。求：(1) 平衡时终压 p_2；(2) 吸热量 Q。



解： 由附表查得

$$M_\mathrm{CO} = 28.01\times10^{-3}\mathrm{kg/mol},\quad R_\mathrm{g} = \frac{R}{M} = \frac{8.3145\mathrm{J/(mol\cdot K)}}{28.01\times10^{-3}\mathrm{kg/mol}} = 297\mathrm{J/(kg\cdot K)}$$

$$V_A = \frac{m_{A1} R_\mathrm{g} T_{A1}}{p_{A1}} = \frac{0.2\mathrm{kg}\times297\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times350\mathrm{K}}{0.07\times10^6\mathrm{Pa}} = 0.297\mathrm{m}^3$$

$$V_B = \frac{m_{B1} R_\mathrm{g} T_{B1}}{p_{B1}} = \frac{0.8\mathrm{kg}\times297\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times300\mathrm{K}}{0.12\times10^6\mathrm{Pa}} = 0.594\mathrm{m}^3$$

取 A+B 为热力系，总质量不变 $m = m_{A1} + m_{B1} = 0.2\mathrm{kg} + 0.8\mathrm{kg} = 1\mathrm{kg}$

总容积 $V = V_A + V_B = 0.297\mathrm{m}^3 + 0.594\mathrm{m}^3 = 0.891\mathrm{m}^3$

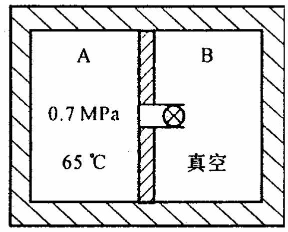
CO 为理想气体，初终态都是平衡态，对终态写出状态方程

$$p_2 = \frac{m R_\mathrm{g} T_2}{V} = \frac{1\mathrm{kg}\times297\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times315\mathrm{K}}{0.891\mathrm{m}^3} == 0.105\mathrm{MPa}$$

闭口系能量方程 $Q = \Delta U + W$，不作外功 $W = 0$

$$Q = \Delta U = U_2 - U_1 = (m_1 + m_2) c_V T_2 - (m_{A1} c_V T_{A1} + m_{B1} c_V T_{B1})$$
$$= [1\mathrm{kg}\times315\mathrm{K} - (0.2\mathrm{kg}\times350\mathrm{K} + 0.8\mathrm{kg}\times300\mathrm{K})]\times0.745\mathrm{kJ/(kg\cdot K)} = 3.725\mathrm{kJ}$$

4—22 有一刚性绝热容器被绝热隔板一分为二，$V_A = V_B = 28\times10^{-3}\,\mathrm{m}^3$，如图所示，A 中装有 0.7MPa、65°C 的氧气，B 为真空。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。(1)：终压 p_2 和两侧终温 T_{A2}、T_{B2}；(2) 过程前后氧气的熵变 ΔS_{12}，设氧气的 $c_p = 0.920\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$。



解：(1) 氧气气体常数 $R_g = \dfrac{R}{M} = \dfrac{8.3145\mathrm{kJ/(mol\cdot K)}}{32\times10^{-3}\mathrm{kg/mol}} = 259.8\mathrm{J/(kg\cdot K)}$

初始时 A 侧 O_2 的质量 $m_{A1} = \dfrac{p_{A1}V_A}{R_g T_{A1}} = \dfrac{0.7\times10^6\,\mathrm{Pa}\times28\times10^{-3}\,\mathrm{m}^3}{259.8\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times(65+273)\mathrm{K}} = 0.2232\mathrm{kg}$

终态时两侧 O_2 质量共为：$m_{A2} + m_{B2} = 0.2232\mathrm{kg}$

$$m_{A2} + m_{B2} = \frac{p_{A2}V_A}{R_g T_{A2}} + \frac{p_{B2}V_B}{R_g TB_2} = 0.2232\mathrm{kg}$$

考虑到终态压力 $p_{A2} = p_{B2}$，所以

$$p_{A2} = \left(\frac{1}{T_{A2}} + \frac{1}{T_{B2}}\right) = 2.07\times10^3 \qquad \text{(a)}$$

A 侧为绝热放气，其中气体经历等比熵过程，参数变化规律

$$p_{A2} = \left(\frac{T_{A2}}{T_{A1}}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} p_{A1} = \frac{T_{A2}^{\ 3.5}}{338^{3.5}}\times0.7\times10^6 = 0.9860\times10^{-3}T_{A2}^{\ 3.5} \qquad \text{(b)}$$

取 A 和 B 为热力系，是不作外功的绝热闭口系

$$\Delta U = 0 \qquad m_2u_2 - m_1u_1 = 0$$

$$m_{A2}c_VT_{A2} = m_{B2}c_VT_{B2} = m_{A1}c_VT_{A1}$$

$$m_{A2}T_{A2} + (0.2232 - m_{A2})T_{B2} = 0.2232\times338$$

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

$$m_{A2} = \frac{p_{A2}V_A}{R_gT_{A2}} = \frac{28\times10^{-3}p_{A2}}{259.8T_{A2}}$$ 将(b)式代入得

$$m_{A2} = \frac{0.9860\times10^{-3}T_{A2}^{\ 3.5}\times28\times10^{-3}}{259.8T_{A2}} = 0.10627\times10^{-6}T_{A2}^{\ 2.5} \qquad \text{(d)}$$

采用迭代方法（a）（b）（c）（d）四式联解 p_{A2}、T_{A2}、T_{B2}、m_{A2}。设定 $T_{A2}=277.3\text{K}$，则由（b）得，

$$p_{A2}=0.35\text{MPa}\ ;$$

由（d）得

$$m_{A2}=0.13608\text{kg}\ ,\qquad m_{B2}=m-m_{A2}=0.2232\text{kg}-0.13608\text{kg}=0.08712\text{kg}$$

由（a）得

$$T_{B2}=432.72\text{K}$$

代入（c）式，左侧=337.97　　右侧=338. 故 T_{A2} 选择合适。

(2) 因 $p_{A2}=p_{B2}$，故理想气体的熵变

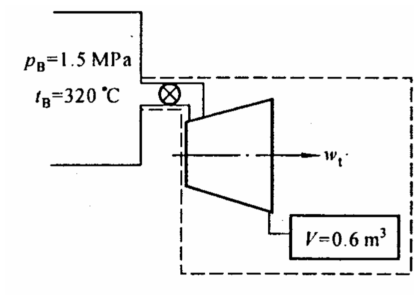
$$\Delta S_{1-2}=m_{A2}(c_p\ln\frac{T_{A2}}{T_{A1}}-R_g\ln\frac{p_{A2}}{p_{A1}})+m_{B2}(c_p\ln\frac{T_{B2}}{T_{A1}}-R_g\ln\frac{p_{B2}}{p_{A1}})$$

$$=\left(m_{A2}\ln\frac{T_{A2}}{T_{A1}}+m_{B2}\ln\frac{T_{B2}}{T_{A1}}\right)c_p-(m_{A2}+m_{B2})R_g\ln\frac{p_{A2}}{p_{A1}}$$

$$=0.920\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\left(0.13608\text{kg}\ln\frac{277.3\text{K}}{338\text{K}}+0.08712\text{kg}\ln\frac{432.72\text{K}}{338\text{K}}\right)$$

$$-0.2232\text{kg}\times0.2598\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\ln\frac{0.35\times10^6\text{Pa}}{0.7\times10^6\text{Pa}}=0.0352\text{kJ/K}$$

4—23 大容器内水蒸汽 $p_B=1.5\text{MPa}$，$t_B=320°\text{C}$，其比焓 $h_B=3080.9\text{kJ/kg}$，通过阀门与汽轮机连接，汽轮机排汽流入 $V=0.6\text{m}^3$ 的小容器，如图 4-27 所示。初始时小容器内真空。打开阀门向小容器充入蒸气，直到终压终温分别为 $p_2=1.5\text{MPa}$，$t_2=400°\text{C}$ 后关闭阀门，这



时 $v_2=0.229\text{m}^3/\text{kg}$，$u_2=2911.5\text{kJ/kg}$，充气过程为绝热的，汽轮机中也是绝热膨胀，且不计动能差，位能差的影响，设大容器内蒸汽参数保持不变，充气过程终态透平和连接管道内蒸汽质量可不计。求①透平作出的功 W_i ②移走汽轮机，蒸汽直接充入小容器，问当小容器内蒸汽压力为1.5MPa 时终温是否仍为 400°C？

解 ：①取图中虚线为控制体积，是绝热系，$q_{CV}=0$，该控制体积只有一股水蒸气流入而流出 $\delta m_{out}=0$ 所以能量守恒式 $\delta Q=\text{d}U+h_{out}\delta m_{out}-h_{in}\delta m_{in}+\delta W_i$ 可简化为

$$\delta W_i=\text{d}U-h_{in}\text{d}m\qquad 积分得\quad W_i=(m_2u_2-m_1u_1)-h_{in}(m_2-m_1)$$

又因小容器内初态为真空，$m_1=0$，故有

$$W_i = m_2(h_B - u_2) = \frac{V}{v_2}(h_B - u_2)$$

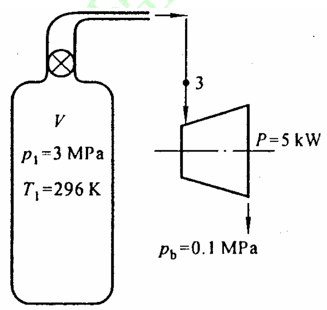
$$= \frac{0.6\text{m}^3}{0.229\text{m}^3/\text{kg}}(3080.9\text{kJ/kg} - 2911.5\text{kJ/kg}) = 443.84\text{kJ}$$

② 移走汽轮机，蒸汽直接流入小容器，控制体积不作功，这时能量方程可简化得出

$$u_2 = h_B = 3080.9\text{kJ/kg}$$

显然，这时小容器内蒸汽状态与前不同，终温约为504°C。

4—24 空气瓶内装有 $p_1 = 3.0\text{MPa}$，$T_1 = 296\text{K}$ 的高压空气，可驱动一台小型涡轮机，用作发动机的起动装置，如图所示。要求该涡轮机能产生 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。设涡轮机中进行的是可逆绝热膨胀过程，涡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，不计算管路和阀门的摩阻损失。问空气瓶的体积 V 至少要多大？



解： 初态气瓶内空气质量

$$m_1 = \frac{p_1 V}{R_g T_1} = \frac{3.0\times10^6 V}{287(23+273)} = 35.314V。$$

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，由 p_1、T_1 变化到 p_2、T_2

$$T_2 = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} T_1 = \left(\frac{0.3\text{MPa}}{3.0\text{MPa}}\right)^{\frac{0.4}{1.4}} \times 296\text{K} = 153.31\text{K}$$

终态气瓶内空气质量 $m_2 = \dfrac{p_2 V}{R_g T_2} = \dfrac{0.3\times10^6 V}{287\times153.31} = 6.818V$

流出的空气 $-\Delta m = m_1 - m_2 = 35.314V - 6.818V = 28.496V$

任何中间状态 p、T 都有 $T = \left(\dfrac{p}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} T_1$

涡轮机入口参数 p_3、T_3 是变化的，若不计磨擦损失，与气瓶内放气参数 p、T 时刻相同，

涡轮机出口参数为 $p_4 = 0.1\text{MPa}$、T_4，放气刚开始时

$$T_4 = \left(\frac{p_4}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} T_1 = \left(\frac{0.1\text{MPa}}{3.0\text{MPa}}\right)^{\frac{0.4}{1.4}} \times 296\text{K} = 112.01\text{K}$$

放气结束时 $T_4=\left(\dfrac{p_4}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}T_2=\left(\dfrac{0.1\text{MPa}}{0.3\text{MPa}}\right)^{\frac{0.4}{1.4}}\times153.31\text{K}=112.01\text{K}$

任一时刻，$T_4=T_3\left(\dfrac{p_4}{p_3}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$，因$T_3$、$p_3$与瓶内气体参数相同，而瓶内参数满足$Tp^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}=$常数，所以整个放气过程涡轮机出口压力、温度保持为$0.1\text{MPa}$,$112.01\text{K}$。

取气瓶和涡轮机一起为热力系，是非稳定流动开口系，能量方程

$$\delta Q=\text{d}U+h_{out}\delta m_{out}-h_{in}\delta m_{in}+\delta W_i\text{，}$$

因绝热$\delta Q=0$，无空气流入，$\delta m_{in}=0$，$\delta m_{out}=-\text{d}m$

若从 0-30 秒积分 $0=m_2c_vT_2-m_1c_vT_1-c_pT_4\Delta m+W_i$，即

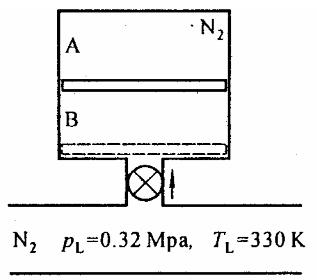
$$m_2T_2-m_1T_1-\kappa T_4\Delta m+\frac{W_i}{c_V}=0$$

据题意，$W_i=5\text{kJ/s}\times30\text{s}=150\text{kJ}$，空气的$c_V=0.718\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，故

$$-35.314\times296V+6.818\times153.31V-1.4\times28.496\times112.01V+\frac{150}{0.718}=0$$

$$V=0.04237\text{m}^3\approx0.043\text{m}^3$$

4—25 绝热刚性容器内有一绝热的不计重量的自由活塞，初态活塞在容器底部，A 中装有$p_{A1}=0.1\text{MPa}$，$T_{A1}=290\text{K}$的氮气，体积$V_{A1}=0.12\text{m}^3$，见图 4-29。打开阀门，N_2缓缓充入，活塞上升到压力平衡的位置，此时$p_{A2}=p_{B2}=p_L$然后关闭阀门，输气管中N_2参数保持一定，为$p_L=0.32\text{MPa}$，$T_L=330\text{K}$。求：（1）终温T_{A2}、T_{B2}；A 的体积V_{A2}；及充入的氮气量m_{B2}。



解 取 A 为热力系，是闭口热力系，其间进行可逆绝热压缩

$$T_{A2}=\left(\frac{p_{A2}}{p_{A1}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}T_{A1}=\left(\frac{0.32\text{MPa}}{0.1\text{MPa}}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}}\times290\text{K}=404.3\text{K}$$

$$\frac{V_{A2}}{V}=\left(\frac{p_{A1}}{p_{A2}}\right)^{\frac{1}{\kappa}}\qquad V_{A2}=\left(\frac{0.1\text{MPa}}{0.32\text{MPa}}\right)^{\frac{1}{1.4}}\times0.12\text{m}^3=0.0523\text{m}^3$$

取 B 为控制体积，是变质量系系统，其能量方程

$$\delta Q = \mathrm{d}U - h_{in}\delta m_{in} + \delta_{W_B},\qquad \text{据题意}\ \delta Q = 0\ 、\ \delta m_{in} = dm_B$$

$$0 = U_{B,2} - U_{B,1} - h_L(m_{B2} - m_{B1}) + W_B$$

$$m_{B,2}c_V T_{B,2} - h_2 m_{B,2} + W_B = 0 \tag{a}$$

$$V_{B,2} = V - V_{A,2} - \left[1 - \left(\frac{p_{A1}}{p_L}\right)^{\frac{1}{\kappa}}\right]V \tag{b}$$

$$m_{B,2} = \frac{p_{B,2}V_{B,2}}{R_g T_{B,2}} = \frac{p_L V_{B,2}}{R_g T_{B,2}} \tag{c}$$

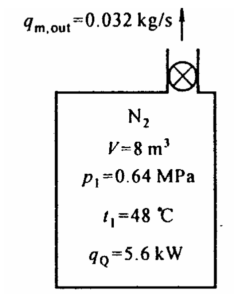
$$W_B = -W_A = -\frac{p_{A,1}V_{A,1}}{\kappa - 1}\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_{A,1}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right] \tag{d}$$

将（b）（c）（d）代入（a），经整理后得出

$$T_{B,2} = \frac{\kappa T_L\left[1 - \left(\frac{p_{A1}}{p_L}\right)^{\frac{1}{\kappa}}\right]}{1 - \frac{p_{A1}}{p_L}} = \frac{1.4\times 330\mathrm{K}\left[1 - \left(\frac{0.1\mathrm{MPa}}{0.32\mathrm{MPa}}\right)^{\frac{1}{1.4}}\right]}{1 - \frac{0.1\mathrm{MPa}}{0.32\mathrm{MPa}}} = 379.22\mathrm{K}$$

$$m_{B,2} = \frac{p_2 V_{B,2}}{R_g T_{B,2}} = \frac{0.32\times 10^6\,\mathrm{Pa}\times 0.0677\mathrm{m}^3}{297\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times 379.22\mathrm{K}} = 0.1924\mathrm{kg}$$

4—26 $V = 8\mathrm{m}^3$ 的刚性容器中装有 $0.64\mathrm{MPa}$、$48°\mathrm{C}$ 的 N_2，容器上方的阀门设计成使 N_2 以固定的质量流率排出，$q_m = 0.032\mathrm{kg/s}$，见图 4-30，已知热流量 $\psi = 5.6\mathrm{kJ/s}$，且保持恒定。设 N_2 按理想气体定值比热容，$c_V = 0.743\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$，$c_p = 1.040\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$。求：(1) 10 分钟后容器内 N_2 的温度 T_2 和压力 p_2；(2) 预期容器内空气温度达 120°C，需要几分钟？



解 (1) 该题为定质流率，定热流率的放气问题，由附表查得

$$M = 28.01\times 10^{-3}\mathrm{kg/mol},\ R_g = \frac{R}{M} = \frac{8.3145\mathrm{J/(mol\cdot K)}}{28.01\times 10^{-3}\mathrm{kg/mol}} = 297\mathrm{J/(kg\cdot K)}$$

$$m_1 = \frac{p_1 V}{R_g T_1} = \frac{0.64\times 10^6\,\mathrm{Pa}\times 8\mathrm{m}^3}{297\mathrm{J/(mol\cdot K)}\times 321\mathrm{K}} = 53.70\mathrm{kg}$$

若以 τ 表示时间，则排出 N_2 气量 $q_{m_{out}} = q_m$，留在容器内氧气质量：

$$m = m_1 - q_m\tau = 53.70 - 0.032\tau \qquad \text{(a)}$$

取容器为控制体积，$\delta W_i = 0$、$\delta m_{in} = 0$ 时能量方程为

$$\delta Q = \mathrm{d}U_{CV} + h_{out}\delta m_{out} \qquad h_{out} = h \qquad \delta m_{out} = -\mathrm{d}m$$

$$\delta Q = m\mathrm{d}u + u\mathrm{d}m - h\mathrm{d}m = m\mathrm{d}u - pv\mathrm{d}m = mc_V\mathrm{d}T + R_gT\delta m_{out}$$

$$\psi = mc_V\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}\tau} + R_gTq_m \qquad \text{(b)}$$

$$5.6 = (53.70 - 0.032\tau)0.743\frac{dT}{d\tau} + 0.297\times 0.032T$$

分离变量

$$\frac{d\tau}{39.8991 - 0.023776\tau} = \frac{dT}{5.6 - 0.009504T} \qquad \text{(c)}$$

积分后解得：　$T_2 = 364.48\mathrm{K}$

$$m_2 = m_1 - q_m\tau = 53.70\mathrm{kg} - 0.032\mathrm{kg/s}\times 600\mathrm{s} = 34.5\mathrm{kg}$$

$$p_2 = \frac{m_2R_gT_2}{V} = \frac{34.5\mathrm{kg}\times 297\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times 364.48\mathrm{K}}{8\mathrm{m}^3} = 466830.54\mathrm{Pa} = 0.467\mathrm{MPa}$$

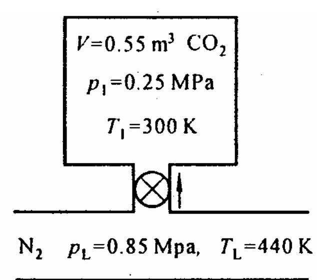
（2）（c）式积分

$$\int_0^\tau \frac{\mathrm{d}\tau}{39.8991 - 0.023776\tau} = \int_{321\mathrm{K}}^{393\mathrm{K}} \frac{\mathrm{d}T}{5.6 - 0.009504T}$$

$$\frac{1}{0.023776}\ln\frac{39.8991 - 0.023776\tau}{39.8991} = \frac{1}{0.009504}\ln\frac{5.6 - 0.009504\times 393}{5.6 - 0.009504\times 321}$$

解得　$\tau = 910.35\mathrm{s} = 15.17\min$

4—27 $V = 0.55m^3$ 的刚性容器中装有 $p_1 = 0.25\mathrm{MPa}$、$T_1 = 300\mathrm{K}$ 的 CO_2，输气管道中流的是 N_2，参数保持一定，$p_L = 0.85\mathrm{MPa}$、$T_L = 440\mathrm{K}$，如图 4-31 所示，打开阀门充入 N_2，直到容器中 CO_2 和 N_2 的混合物压力达 $p_2 = 0.5\mathrm{MPa}$ 时关闭阀门。整个充气过程绝热。求容器内混合物终温 T_2 和质量 m_2，按定值比热容计算，$c_{V,CO_2} = 0.657\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$，$c_{p,CO_2} = 0.846\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$；$c_{V,N_2} = 0.751\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$，$c_{p,N_2} = 1.048\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$。



解： 由附表查得，$M_{CO_2}=44.01\times10^{-3}\text{kg/mol}$，$M_{N_2}=28.01\times10^{-3}\text{kg/mol}$

$$R_{g,co_2}=\frac{R}{M_{CO_2}}=\frac{8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}}{44.01\times10^{-3}\text{kg/mol}}=189\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\ ;$$

$$R_{g,N_2}=\frac{R}{M_{N_2}}=\frac{8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}}{28.01\times10^{-3}\text{kg/mol}}=297\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$m_1=\frac{p_1V}{R_{g,CO_2}T_1}=\frac{0.25\times10^6\text{Pa}\times0.55\text{m}^3}{189\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times300\text{K}}=2.425\text{kg}$$

混合物折合气体常数 $R_g=\Sigma w_iR_{gi}$

$$R_g=\frac{m_1}{m_1+m_{in}}R_{g,CO_2}+\frac{m_{in}}{m_1+m_{in}}R_{g,N_2}$$

$$R_g=\frac{2.425\times0.189+m_{in}\times0.297}{m_1+m_{in}}$$

$$T_2=\frac{p_2V}{m_2R_g}=\frac{0.5\times10^3\times0.55}{(m_1+m_{in})\dfrac{0.4583+0.297m_{in}}{m_1+m_{in}}}=\frac{0.275\times10^3}{0.4583+0.297m_{in}} \tag{a}$$

$$m_{in}=\frac{0.275\times10^3-0.4583T_2}{0.297T_2} \tag{b}$$

取容器内体积为控制体积，其能量守恒式为

$$\delta Q=\text{d}U+h_{out}\delta m_{out}-h_{in}\delta m_{in}+\delta W_i \tag{c}$$

据题意 $\delta Q=0$、$\delta W_i=0$、$\delta m_{out}=0$

$$0=U_2-U_1-h_{in}\delta m_{in} \tag{d}$$

$$U_2=U_{2,CO_2}+U_{2,N_2}=m_1c_{V,CO_2}T_2+m_{in}c_{V,N_2}T_2$$

$$U_1=m_1c_{V,CO_2}T_1$$

$$h_{in}=c_{p,N_2}T_L=1.048\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times440\text{K}=461.12\text{kJ/kg}$$

代入式（d）

$$m_1c_{V,CO_2}T_2+m_{in}c_{V,N_2}T_2-m_1c_{V,CO_2}T_1=c_{p,N_2}T_Lm_{in}$$

$$m_1c_{V,CO_2}(T_2-T_1)=m_{in}(c_{p,N_2}T_L-c_{V,N_2}T_2) \tag{e}$$

将数据代入式（e）

$$2.425\times0.657(T_2-300)=(461.12-0.751T_2)m_{in}$$

$$\frac{2.425\times0.657(T_2-300)}{461.12-0.751T_2}=\frac{0.275\times10^3-0.4583T_2}{0.297T_2}$$

$$0.129T_2^2+275.9T_2-126.81\times10^3=0$$

$$T_2=\frac{-275.9\pm\sqrt{275.9^2+4\times0.129\times126.81\times10^3}}{2\times0.129}=388.9\text{K}$$

代回（b）$m_{in}=\dfrac{0.275\times10^3-0.4583\times388.9}{0.297\times388.9}=0.83779\text{kg}$

$$m_2=m_1+m_{in}=2.425\text{kg}+0.83779\text{kg}=3.26279\text{k}$$

$$R_g=\frac{2.425\text{kg}\times0.189\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}}{3.26279\text{kg}}+\frac{0.83779\text{kg}\times0.297\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}}{3.26279\text{kg}}$$
$$=0.2167\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

校核： $T_2=\dfrac{0.5\times10^6\text{Pa}\times0.55\text{m}^3}{3.26279\text{kg}\times216.7\text{J/(kg}\cdot\text{K)}}=388.9\text{K}$

第五章 热力学第二定律

5-1 利用向卡诺机作为热泵向房间供暖，设室外温度为-5°C，室内温度保持 20°C，要求每小时向室内供热 $2.5\times10^4\,\mathrm{kJ}$，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（kWh）？

解： 已知 $T_1=(20+273)\mathrm{K}=293\mathrm{K}$ $\quad T_2=(-5+273)\mathrm{K}=268\mathrm{K}$ $\quad q_{Q_1}=2.5\times10^4\,\mathrm{kJ/h}$

① 是逆向卡诺循环， $\dfrac{q_{Q_1}}{T_1}=\dfrac{q_{Q_2}}{T_2}$

$$q_{Q_2}=\frac{T_2}{T_1}q_{Q_1}=\frac{268\mathrm{K}}{293\mathrm{K}}\times2.5\times10^4\,\mathrm{kJ/h}=2.287\times10^4\,\mathrm{kJ/h}$$

② 循环的供暖系数

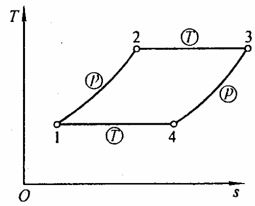
$$\varepsilon'=\frac{T_1}{T_1-T_2}=\frac{293\mathrm{K}}{293\mathrm{K}-268\mathrm{K}}=11.72$$

③每小时耗电能 $q_w=q_{Q_1}-q_{Q_2}=(2.5-2.287)\times10^4\,\mathrm{kJ/h}=0.213\times10^4\,\mathrm{kJ/h}$。电机效率为 95%，因而电机功率为：$N=\dfrac{0.213\times10^4\,\mathrm{kJ/h}}{3600\mathrm{s/h}\times0.95}=0.623\mathrm{kW}$

④ 若直接用电炉取暖，则 $2.5\times10^4\,\mathrm{kJ/h}$ 的热能全部由电能供给，耗电力

$$P=2.5\times10^4\,\mathrm{kJ/h}=\frac{2.5\times10^4}{3600}\mathrm{kJ/s}=6.94\mathrm{kW}$$

5-2 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 5-34 所示。工质加热前的状态为 $T_1=300\mathrm{K}$，$p_1=0.1\mathrm{MPa}$，定压加热到 $T_2=1000\mathrm{K}$，再在定温下吸入 400kJ/kg 的热量。试分别计算不采用回热和采用极限回热后循环的热效率，并比较它们的大小 。设工质的比热容为定值，$c_p=1.004\,\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$。



解： (1) 不回热时

$$\begin{aligned}q_1&=q_{1-2}+q_{2-3}=c_p(T_2-T_1)+q_{2-3}\\&=1.004\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}(1000-300)\mathrm{K}+400\mathrm{kJ/kg}=1102.8\,\mathrm{kJ/kg}\end{aligned}$$

$$T_3=T_2=1000\mathrm{K},\quad T_4=T_1=300\mathrm{K}$$

$$q_{4-1}=\frac{T_1}{T_2}q_{2-3}=\frac{300\mathrm{K}}{1000\mathrm{K}}\times400\mathrm{kJ/kg}=120\,\mathrm{kJ/kg}$$

$$q_2 = q_{3-4} + q_{4-1} = c_p(T_3 - T_4) + q_{4-1}$$
$$= 1.004\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}(1000-300)\text{K} + 120\text{kJ/kg} = 822.8\text{kJ/kg}$$

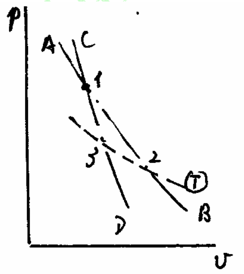
$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{822.8\text{kJ/kg}}{1102.8\text{kJ/kg}} = 0.254$$

（2）采用极限回热时，1-2 过程所需热量由 3-4 过程供给，所以

$$q_1 = q_{2-3} = 400\,\text{kJ/kg} \qquad q_2 = q_{4-1} = \frac{T_1}{T_2}q_{2-3} = \frac{300\text{K}}{1000\text{K}} \times 400\text{kJ/kg} = 120\,\text{kJ/kg}$$

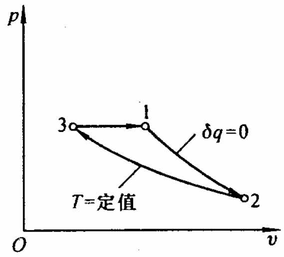
$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{120\text{kJ/kg}}{400\text{kJ/kg}} = 0.70 \qquad \text{或} \quad \eta_t = \eta_C = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{300\text{K}}{1000\text{K}} = 0.70$$

5-3 试证明：同一种工质在参数坐标上（例如 p-v 图上）的两条可逆绝热线不可能相交（提示：如果相交的话，将违反热力学第二定律）。



证 假设 AB 和 CD 两条可逆绝热线可能相交，其交点为 1，设另一条等温线分别与二条绝热线交于 2 和 3。若工质依 1-2-3-1 进行热力循环，此循环由 1-2，2-3 和 3-1 三个过程组成，除 2-3 过程中工质自单一热源吸热外，其余二过程均绝热，这样就可使循环发动机有从单一的热源吸热，全部转化为机械能而不引起任何其他变化，显然是与热学第二定律相矛盾的，肯定是不可能 ，从而证明两条可逆绝热线不可能相交。

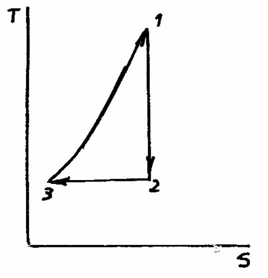
5-4 设有 1kmol 和某种理想气体进行图 5-35 所示循环 1-2-3-1。已知：$T_1 = 1500\text{K}$、$T_2 = 300\text{K}$、$p_2 = 0.1\text{MPa}$ 。设比热为定值，取绝热指数 $\kappa = 1.4$。



① 求初态压力 p_1 ；②在 T-s 图上画出该循环；③求热效率 η_t ；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：算出平均吸热温度）

解： ① 1-2 为可逆的绝热过程，初终状态参数间关系有：

$$p_1 = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} p_2 = \left(\frac{1500\text{K}}{300\text{K}}\right)^{\frac{1.4}{1.4-1}} \times 0.1\text{MPa} = 27.951\text{MPa}$$



②循环 1-2-3-1 的 T-s 图如右

③吸热量 $Q_1 = Q_{3-1} = C_{p,m}(T_1 - T_3)$

放热量 $Q_2 = Q_{2-3} = RT_3 \ln\dfrac{p_3}{p_2}$

而 $T_3 = T_2 = 300\text{K}$，$p_3 = p_1 = 27.951\text{MPa}$，$C_{p,m} = \dfrac{\kappa}{\kappa - 1}R$

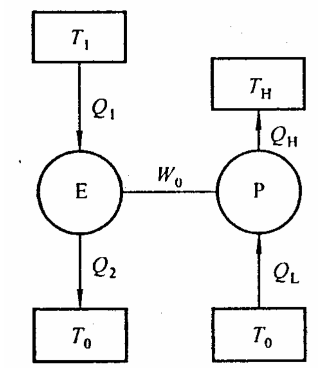
$$\eta_t = 1-\frac{Q_2}{Q_1} = 1-\frac{RT_3\ln\dfrac{p_3}{p_2}}{C_{p,m}(T_1-T_3)} = 1-\frac{T_3\ln\dfrac{p_3}{p_2}}{\dfrac{\kappa}{\kappa-1}(T_1-T_3)} = 1-\frac{300\text{K}\times\ln\dfrac{27.951\text{MPa}}{0.1\text{MPa}}}{\dfrac{1.4}{0.4}\times(1500\text{K}-300\text{K})} = 0.598$$

④ 如果是以 T_1=1500K 为热源，T_2=300K 为冷源的卡诺循环，其热效率可达 80%，（$\eta_C = 1-\dfrac{T_2}{T_1} = 1-\dfrac{300\text{K}}{1500\text{K}} = 0.8$）这里吸热过程按定压，平均吸热温度

$$\bar{T}_1 = \bar{T}_3 = \frac{Q_1}{\Delta S_{3-1}} = \frac{Q_1}{C_{p,m}\ln\dfrac{T_1}{T_2}} = \frac{C_{p,m}(T_1-T_3)}{C_{p,m}\ln\dfrac{T_1}{T_3}} = \frac{1500\text{K}-300\text{K}}{\ln\dfrac{1500\text{K}}{300\text{K}}} = 745.6\text{K}$$

可见，$\bar{T}_1$比T_1 低得多，故该循环热效不高。

5-5 如图 5-36 所示，在恒温度热源T_1、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、T_O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，求这时 Q_H；③计算结果 $Q_H>Q_1$，表示冷源中有部份热量传入温度为 T_H 的热源，此复合系统并未消耗外界机械功，将热量由T_0 传给了 T_H，是否背第二定律？为什么？



解 ①热机 E 输出功

$$W_{net} = \eta_{t,E}Q_1 = 0.4\times100\text{kJ} = 40\text{kJ}$$

热泵向热源 T_H 输送热量

$$Q_H = \varepsilon' W_{net} = 3.5\times40\text{kJ} = 140\text{kJ}$$

②若 E、P 都是可逆机，则

$$\eta_{E,rev} = 1-\frac{T_0}{T_1} = 1-\frac{290\text{K}}{1000\text{K}} = 0.71$$

$$W_{net,rev} = \eta_{E,rev}Q_1 = 0.71\times100\text{kJ=}71\text{kJ}$$

$$\varepsilon'_{p,rev} = \frac{T_\text{H}}{T_\text{H}-T_0} = \frac{360\text{K}}{360\text{K}-290\text{K}} = 5.14$$

$$Q_{\text{H},rev} = \varepsilon'_{p,rev}W_{net,rev} = 5.14\times71\text{kJ} = 364.94\text{kJ}$$

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$Q_2=Q_R-W_{net}=100\text{kJ}-40\text{kJ}=60\text{kJ}$，$Q_1=Q_{\text{H}}-W_{net}=140\text{kJ}-40\text{kJ}=100\text{kJ}$，就是说虽然经过每一循环，冷源$T_0$吸入热量 60kJ，放出热量 100kJ，净传出热量 40kJ 给 T_H的热源，但是必须注意到同时有 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（$T_0\to T_{\text{H}}$）是花了代价的，这个代价就是 100kJ 热量自高温传给了低温热源（$T_1\to T_{\text{H}}$），所以不违力学第二定律。

5-6 某热机工作于$T_1=2000\text{K}$，$T_2=300\text{K}$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$Q_1=0.5\text{kJ}$、$W_{net}=1.5\text{kJ}$。

解： 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，而

$$\eta_C=1-\frac{T_2}{T_1}=1-\frac{300\text{K}}{2000\text{K}}=0.85$$

① $$Q_2=Q_1-W_{net}=1\text{kJ}-0.9\text{kJ}=0.1\text{kJ}$$

$$\eta_t=1-\frac{Q_2}{Q_1}=1-\frac{0.1\text{kJ}}{1\text{kJ}}=0.9>\eta_C \quad \text{不可能实现}$$

② $$\eta_t=1-\frac{Q_2}{Q_1}=1-\frac{0.3\text{kJ}}{2\text{kJ}}=0.85=\eta_C \quad \text{是可逆循环}$$

③ $$Q_1=Q_2+W_{net}=0.5\text{kJ}+1.5\text{kJ}=2.0\text{kJ}$$

$$\eta_t=1-\frac{Q_2}{Q_1}=1-\frac{0.5\text{kJ}}{2.0\text{kJ}}=0.75<\eta_C \quad \text{是不可逆循环}$$

方法二

① $$\oint\frac{\delta Q}{T_r}=\frac{Q_1}{T_r}+\frac{Q_2}{T_2}=\frac{1\text{kJ}}{2000\text{K}}+\frac{-0.1\text{kJ}}{300\text{K}}=+0.000167\text{kJ/K}>0 \quad \text{不可能实现}$$

② $$\oint\frac{\delta Q}{T_r}=\frac{Q_1}{T_1}+\frac{Q_2}{T_2}=\frac{2\text{kJ}}{2000\text{K}}+\frac{-0.3\text{kJ}}{300\text{K}}=0 \quad \text{是可逆循环}$$

③ $$\oint\frac{\delta Q}{T_r}=\frac{Q_1}{T_1}+\frac{Q_2}{T_2}=\frac{2\text{kJ}}{2000\text{K}}+\frac{-0.5\text{kJ}}{300\text{K}}=-0.00067\text{kJ/K}<0 \quad \text{是不可逆循环}$$

5-7 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 $Q_1=1500\text{kJ}$、$Q_2=500\text{kJ}$，向 $T_0=300\text{K}$ 的环境为冷源放热 Q_3，问：①要求热机作出循环净功 $W_{net}=1000\text{kJ}$，该循环能否实现；②求最大循环净功 $W_{net,\max}$。

解：（1） 已知 $Q_1=1500\text{kJ}$ $Q_2=500\text{kJ}$ $W_{net}=1000\text{kJ}$

放热 $Q_3=-\left[(Q_1+Q_2)-W_{net}\right]=-\left[(1500+500)\text{kJ}-1000\text{kJ}\right]=-1000\text{kJ}$

$$\oint\frac{\delta Q}{T_r}=\frac{Q_1}{T_1}+\frac{Q_2}{T_2}+\frac{Q_3}{T_3}=\frac{1500\text{kJ}}{800\text{K}}+\frac{500\text{kJ}}{500\text{K}}-\frac{1000\text{kJ}}{300\text{K}}=-0.4583\text{kJ/K}<0$$

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 $\oint\frac{\delta Q}{T_r}=0$，$\frac{Q_1}{T_1}+\frac{Q_2}{T_2}+\frac{Q_3}{T_3}=0$

$$Q_3=T_3\left(\frac{Q_1}{T_1}+\frac{Q_2}{T_2}\right)=-300\text{K}\left(\frac{1500\text{kJ}}{300\text{K}}+\frac{500\text{kJ}}{500\text{K}}\right)=-862.5\text{kJ}$$

$$W_{net,\max}=Q_1+Q_2+Q_3=1500\text{kJ}+500\text{kJ}-862.5\text{kJ}=1137.5\text{kJ}$$

5-8 试判断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可逆过程，系统与外界交换功量 20kJ，热量 20kJ；

（2） 闭口系经历一不可逆过程，系统与外界交换功量 20kJ，热量–20kJ;

（3） 工质流经稳定流动开口紧，经历一可逆过程，开口系作功 20kJ，换热–5kJ，工质流在进出口的熵变；

（4） 工质流经稳流动开口系，按不可逆绝热变化，系统对外作功 10kJ，系统的熵变。

解（1）闭口系能量守恒 $Q=\Delta U+W$，故 $\Delta U=Q-W=20\text{kJ-}20\text{kJ=}0$，理想气体 $\Delta u=f(T)$，即 $\Delta T=0$，所以过程为定温可逆过程。

可逆过程 $\Delta S=\int\frac{\delta Q_{rev}}{T}=\frac{Q}{T}=\frac{Q}{T_r}>0$ 熵变为正

（2）不可逆过程 $\Delta S>\int\frac{\delta Q}{T_r}$ 热量为负，故熵变可正，可负，可为零

（3）稳定流动系可逆过程时进口、出口熵差 $\Delta S=\int\frac{\delta Q}{T_r}$，换热为负，故熵差为负。

（4）稳定流动绝热系，进行不可逆过程，虽进、出口熵差 $\Delta S>0$，但系统（控制体积）的熵变为零。

5-9 燃气经过燃气轮机，由 0.8MPa、420°C绝热膨胀到 0.1MPa、130°C，设比热容 $c_p=1.01\text{kJ(kg}\cdot\text{K)}$，$c_V=0.732\text{kJ(kg}\cdot\text{K)}$，问：(1) 该过程能否实现？过程是否可逆？（2）

若能实现，算出 1kg 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。

解 （1）该绝热过程的比熵变

$$R_g = c_p - c_V = 1.01\text{kJ(kg}\cdot\text{K)} - 0.732\text{kJ(kg}\cdot\text{K)} = 0.278\text{kJ(kg}\cdot\text{K)}$$

$$\begin{aligned}\Delta s &= c_p \ln\frac{T_2}{T_1} - R_g \ln\frac{p_2}{p_1} \\ &= 1.01\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\ln\frac{(130+273)\text{K}}{(420+273)\text{K}} - 0.278\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\ln\frac{0.1\text{MPa}}{0.8\text{MPa}} \\ &= 0.03057\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\end{aligned}$$

因 $\Delta s > 0$，该绝热过程是不可逆绝热过程。

（2）由稳流系能量方程，在不计动能差，位能差，且 $q = 0$ 时，可简化为

$$\begin{aligned}w_t &= w_i = h_1 - h_2 = c_p(T_1 - T_2) \\ &= 1.01\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times (693-403)\text{K} = 292.9\text{kJ/kg}\end{aligned}$$

5-10 0.25kg 的 CO 在闭口系中由 $p_1 = 0.25\text{MPa}$、$t_1 = 120°\text{C}$ 膨胀到 $p_2 = 0.125\text{MPa}$、$t_2 = 25°\text{C}$，产生膨胀功 W=8.0kJ，试计算过程热量，并判断该过程是否可逆。已知环境温度 $t_0 = 25°\text{C}$，CO 的气体常数 $R_g = 0.297\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，$c_V = 0.747\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$。

解： $T_1 = (120+273)\text{K} = 393\text{K}$、$T_2 = (25+273)\text{K} = 298\text{K}$

由闭口系能量方程 $Q = \Delta U + W = mc_V(T_2 - T_1) + W$

$$\begin{aligned}Q &= 0.25\text{kg} \times 0.747\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times (298-393)\text{K} + 8\text{kJ} \\ &= -17.74\text{kJ} + 8.0\text{kJ} = -9.74\text{kJ}\end{aligned}$$

（负值表示放热）

$$\begin{aligned}\Delta S &= m(c_p \ln\frac{T_2}{T_1} - R_g \ln\frac{p_2}{p_1}) \\ &= 0.25\text{kg} \times \left[0.747\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\ln\frac{298\text{K}}{393\text{K}} - 0.297\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\ln\frac{0.125\text{MPa}}{0.25\text{MPa}}\right] \\ &= -0.00021\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\end{aligned}$$

环境吸热 $Q_{surr} = -Q = 9.74\text{kJ}$ $\Delta S_{surr} = \frac{Q_{surr}}{T_0} = \frac{9.74\text{kJ}}{298\text{K}} = 0.03268\text{kJ/K}$

系统和环境组成的孤立系熵变

$$\begin{aligned}\Delta S_{iso} &= \Delta S + \Delta S_{surr} \\ &= -0.00021\text{kJ/K} + 0.03268\text{kJ/K} = 0.03247\text{kJ/K} > 0\end{aligned}$$

由于孤立系熵变大于零，该过程为不可逆膨胀过程。

5-11 将 $m=0.36\text{kg}$ 的一根金属棒投入 m_w=9kg 的水中，初始时金属棒温度 $T_{m,i}=1060\text{K}$，比热容 $c_m=0.42\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，水的初态温度 $T_w=295\text{K}$，比热容 $c_w=4.187\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，求金属棒终温度 T_f 和金属棒、水、以及孤立系的熵变。设容器为绝热。

解： 由闭口系能量方程 $\Delta U=Q-W$，本题取容器内水和金属棒为热力系，绝热，不作外功，故 Q=0，W=0， 则 $\Delta U=0$ ， $\Delta U_w+\Delta U_m=0$

$$m_w c_w(T_f-T_w)+m_m c_m(T_f-T_m)=0$$

$$T_f=\frac{m_w c_w T_w+m_m c_m T_m}{m_w c_w+m_m c_m}$$
$$=\frac{9\text{kg}\times 4.187\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times 295\text{K}+0.36\text{kg}\times 0.42\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times 1060\text{K}}{9\text{kg}\times 4.187\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}+0.36\text{kg}\times 0.42\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}}=298.1\text{K}$$

由金属棒和水组成的孤立系的熵变为金属棒熵变和水熵变之和 $\Delta S_{\text{iso}}=\Delta S_m+\Delta S_w$

$$\Delta S_m=m_m c_m\ln\frac{T_f}{T_m}=0.36\text{kg}\times 0.42\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\ln\frac{298.1\text{K}}{1060\text{K}}=-0.1918\text{kJ/K}$$

$$\Delta S_w=m_w c_w\ln\frac{T_f}{T_w}=9.0\text{kg}\times 4.187\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\ln\frac{298.1\text{K}}{295\text{K}}=0.3939\text{kJ/K}$$

$$\Delta S_{\text{iso}}=-0.1918\text{kJ/K}+0.3939\text{kJ/K}=0.2021\text{kJ/K}$$

5-12 容器中有 1kg 空气，初态压力 $p_1=0.1013\text{MPa}$，可以通过叶轮搅拌，或 $T_r=283°\text{C}$ 的热源加热，或搅拌及加热联合作用，而使空气温度由 $t_1=7°\text{C}$ 升高到 $t_2=317°\text{C}$。如图 5-37 所示。求①联合作用下系统的熵产；②系统的最小熵产；③系统的最大熵产。

解：由已知

$T_1=(7+273)\text{K}=280\text{K}$，$T_2=(317+273)\text{K}=590\text{K}$，$T_r=(283+273)\text{K}=556\text{K}$

容器中空气进行的是定容过程，$\dfrac{p_2}{p_1}=\dfrac{T_2}{T_1}=\dfrac{590\text{K}}{280\text{K}}=2.107$

（1） 由 T_1、T_2 在附表中查得 $h_1=282.22\text{kJ/kg}$， $s_1^0=6.6380\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，

$h_2=598.52\text{kJ/kg}$， $s_2^0=7.3964\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$

由闭口系量方程 $\Delta u=q-w$，这里是输入搅拌功，w 为负值，

$$\Delta u = \Delta h - \Delta(pv) = \Delta h - R_g \Delta T$$
$$= 598.52\text{kJ/kg} - 282.22\text{kJ/kg} - 0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times (590-280)\text{K} = 227.33\text{kJ/kg}$$

$$\{q\}_{\text{kJ/kg}} = 227.33 + \{w\}_{\text{kJ/kg}} \qquad \text{(a)}$$

由闭口系熵方程 $s_2 - s_1 = s_f + s_g$ 或 $s_g = s_2 - s_1 - s_f$ (b)

$$s_2 - s_1 = s_2^0 - s_1^0 R_g \ln\frac{p_2}{p_1}$$
$$= 7.3964\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} - 6.6380\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} - 0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \ln 2.107$$
$$= 0.5445\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

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

将上述两个结果代入式(b)，则 $\{s_g\}_{\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}} = 0.5445 - \dfrac{227.33 + \{w\}_{\text{kJ/kg}}}{556}$

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）据题意，$T_2 = 590\text{K}$、$T_r = 556\text{K}$，$T_2 > T_r$ 所以靠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伴搅而产生。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 靠拌搅。

先由附表查得 $h_a = 563.0\text{kJ/kg}$ ， $s_a^0 = 7.3343\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$

$$\Delta h_{1-a} = h_a - h_1 = 563.0\text{kJ/kg} - 282.22\text{kJ/kg} = 280.78\text{kJ/kg}$$

$$\Delta u_{1-a} = \Delta h_{1-a} - R_g \Delta T_{1-a}$$
$$= 280.78\text{kJ/kg} - 0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times (556-280)\text{K} = 201.57\text{kJ/kg}$$

因此 $q_{1-a} = \Delta u_{1-a} = 201.57\text{kJ/kg}$

$$w_{\min} = -\Delta u_{a2} = -(\Delta u_{12} - \Delta u_{1a})$$
$$= (227.33 - 201.57)\text{kJ/kg} = -25.76\text{kJ/kg}$$

$$s_{g,mix} = s_2 - s_1 - s_f$$
$$= 0.5445\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} - \frac{277.33\text{kJ/kg} - 25.76\text{kJ/kg}}{556\text{K}}$$
$$= 0.18196\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

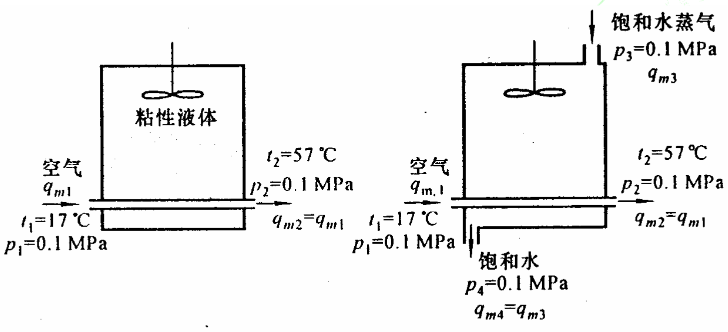
这种情况是尽可能多利用加热，而搅拌功最小的情况，所以是系统的最小的熵产。

(3)最大熵产发生在不靠加热,全部由于搅拌而升温，这时$q=0$，$S_f=0$

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

这时搅拌功最大，$w_{\max}=-\Delta u_{12}=-227.33\text{kJ/kg}$

5-13 要求将绝热容器中管道内流动着的空气由$t_1=17°\text{C}$在定压下（$p_2=p_1=0.1\text{MPa}$）加热到$t_2=57°\text{C}$，采用两种方案：方案 I，叶轮搅拌容器内的粘性流体，通过粘性流体加热空气。方案 II 容器中通过$p=0.1\text{MPa}$的饱和水蒸汽加热空气后冷却为饱和水。见图 5-40 设两系统均稳态工作，且不计动能、位能的影响，对流过 1kg 空气分别计算两种方案系统的熵



产，从热力学角度来看哪个方案更合理？已知$h_3=2675.14\text{kJ/k}$，$h_4=417.52\text{kJ/kg}$，$s_3=7.3589\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，$s_4=1.3028\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$

解： 取控制体积如图，低压下空气作为理想气体。

$$T_1=(17+273)\text{K}=290\text{K}，T_2=(57+273)\ \text{K}=330\text{K}$$

方案 I：稳定流动系空气的熵方程为 $s_2-s_1=s_f+s_g$，该控制体积为绝热：$s_f=0$，

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

根据 T_1、T_2 由附表中查得 $s_1^0=6.6732\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，$s_2^0=6.8029\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$

$$\begin{aligned}s_g&=s_2-s_1=s_2^0-s_1^0\\&=6.8029\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}-6.6732\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}=0.1297\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\end{aligned}$$

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

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

由于绝热，

$$s_{g}=\frac{S_{g}}{q_{m1}}=(s_{2}-s_{1})+\frac{q_{m3}}{q_{m1}}(s_{4}-s_{3}) \tag{a}$$

式中$\frac{q_{m3}}{q_{m1}}$可由稳定流动能量方程确定，不计动能，位能差时可推得$\frac{q_{m3}}{q_{m1}}=\frac{h_{2}-h_{1}}{h_{3}-h_{4}}$

由附表，根据 T_1、T_2 查得 $h_{1}=292.25\mathrm{kJ/kg}$，$h_{2}=332.42\mathrm{kJ/kg}$

$$\frac{q_{m3}}{q_{m1}}=\frac{332.42\mathrm{kJ/kg}-292.25\mathrm{kJ/kg}}{2675.14\mathrm{kJ/kg}-417.52\mathrm{kJ/kg}}=0.0178$$

将这些数据代入（a），得

$$s_{g}=\frac{S_{g}}{q_{m1}}=6.8029\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}-6.6732\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$$
$$+0.0178\times[1.3028\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}-7.3589\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}]=0.022\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$$

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。

5-14 $m=10^{6}\mathrm{kg}$、温度$t=45°\mathrm{C}$的水，向环境放热，温度降低到t_0，试确定其热量 和热量 。水的比热容$c_W=4.187\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$，环境温度$t_0=10°\mathrm{C}$，

解： 方法一：$T_{1}=t_{1}+273=(45+273)\mathrm{K}=318\mathrm{K}$ ， $T_{0}=(10+273)\mathrm{K}=283\mathrm{K}$

温度为 318K 的水放热，温度降低到 283K 过程的平均温度为

$$\bar{T}=\frac{Q}{\Delta s}=\frac{c_{w}(T_{1}-T_{0})}{c_{w}\ln\frac{T_{1}}{T_{0}}}=\frac{(318-283)\mathrm{K}}{\ln\frac{318\mathrm{K}}{283\mathrm{K}}}=300.16\mathrm{K}$$

热量

$$E_{x,Q}=\left(1-\frac{T_{0}}{\bar{T}}\right)Q=mc_{w}(T_{1}-T_{0})\left(1-\frac{T_{0}}{\bar{T}}\right)$$
$$=10^{6}\mathrm{kg}\times4.187\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times(318-283)\mathrm{K}\left(1-\frac{283\mathrm{K}}{300.16\mathrm{K}}\right)=8.38\times10^{6}\mathrm{kJ}$$

热量

$$A_{n,Q}=Q-E_{x,Q}=\frac{T_{0}}{\bar{T}}Q$$
$$=\frac{283\mathrm{K}}{300.16\mathrm{K}}\times4.187\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times10^{6}\mathrm{kg}\times(318-283)\mathrm{K}=138.16\times10^{6}\mathrm{kJ}$$

方法二：热量

$$A_{n,Q}=mT_{0}\Delta s=mT_{0}c_{w}\ln\frac{T_{0}}{T}$$
$$=10^{6}\mathrm{kg}\times283\mathrm{K}\times4.187\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\ln\frac{318\mathrm{K}}{283\mathrm{K}}=138.17\times10^{6}\mathrm{kJ}$$

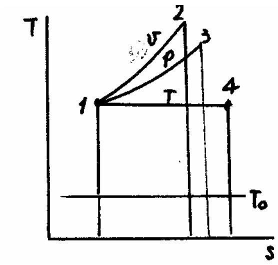
热量

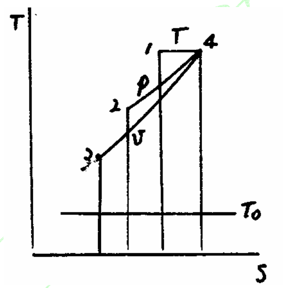
$$E_{x,Q} = Q - A_{n,Q} = mc_w(T_1 - T_0) - A_{n,Q}$$
$$= 10^6\,\text{kg} \times 4.187\,\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times (318-283)\text{K} - 138.17\,\text{kJ/kg} \times 10^6\,\text{kg}$$
$$= 8.38 \times 10^6\,\text{kJ}$$

5-15 试根据熵增与热量 的关系来讨论对气体作：①定容加热、②定压加热、③定温加热，哪一种加热方式比较有利？比较的基础分两种情况：①从相同的初温出发；②达到相同的温度（提示时间取同样的热量 Q_1）。

解：①从相同初温出发

图中 1-2 示定容加热，1-3 示定压加热，1-4 示定温加热，取加热量 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。





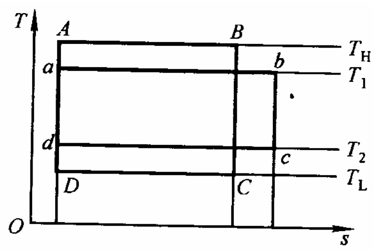
②到达相同的终温

图中 1-4 示定温加热，2-4 示定压加热，3-4 示定容加热，取加热量 Q_1 相同，三条线下面积相等，此时，$\Delta s_{3-4} > \Delta s_{2-4} > \Delta s_{1-4}$，可见，定容最不利，定压次之，定温最有利。

5-16 设工质在 1000K 的恒温热源和 300K 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 50K 的温差。试①计算循环热效率；②设体系的最低温度即环境温度，$T_0 = 300\text{K}$，求热源供给 1000kJ 热量时，两处不可逆传热引起的 损失，及总 损失。

解：(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，因此

$$\eta_t = 1 - \frac{T_2'}{T_1'} = 1 - \frac{(300+50)\ \text{K}}{(1000-50)\text{K}} = 0.632$$



(2) 已知 $Q_1 = 1000\text{kJ}$

$$Q_2 = \frac{T'_2}{T'_1} Q_1 = \frac{350\text{K}}{950\text{K}} \times 1000\text{kJ} = 368\text{kJ}$$

高温热源（$T_H = 1000\text{K}$）放出热量 1000kJ，与工质二者组成的孤立系，其熵增

$$\Delta S_{iso} = \Delta S_H + \Delta S_{ab} = \frac{-Q_1}{T} + \frac{Q_1}{T_1'} = \frac{-1000\text{kJ}}{1000\text{K}} + \frac{1000\text{kJ}}{950\text{K}} = 0.0526\text{kJ/K}$$

这里由于不等温传热引起的 损失

$$I_1 = T_0 \Delta S_{iso,1} = 300\text{K} \times 0.0526\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} = 15.78\text{kJ}$$

350K 的工质放热 368KJ，被 300K 的冷源吸收，二者组成孤立系，其熵增

$$\Delta S_{\text{iso},2}=\Delta S_{cd}+\Delta S_{\text{L}}=\frac{-Q_2}{T_{2'}}+\frac{Q_2}{T_2}=\frac{-368\text{kJ}}{350\text{K}}+\frac{368\text{kJ}}{300\text{K}}=0.1752\text{kJ/K}$$

这时不等温传热引起的　损失

$$I_2=T_0\Delta S_{\text{iso},2}=300\text{K}\times0.1752\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}=52.56\text{kJ}$$

总的　损失

$$I=I_1+I_2=15.78\text{kJ}+52.56\text{kJ}=68.34\text{kJ}$$

5-17 将 100kg 温度为 20°C的水与 200kg 温度为 80°C的水在绝热容器中混合，求混合前后的熵变及　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 $t_0=20°\text{C}$。

解： 闭口系，W=0，Q=0，故 $\Delta U=0$，设混合后水温为 t，则

$$m_1c_w(t-t_1)=m_2c_w(t_2-t)$$

$$t=\frac{m_2t_2+m_1t_1}{m_2+m_1}=\frac{100\text{kg}20^\circ\text{C+}200\text{kg}80^\circ\text{C}}{100\text{kg}+200\text{kg}}=60^\circ\text{C}$$

$$T_1=(20+273)\text{K}=293\text{K}\qquad T_2=(80+273)\text{K}=353\text{K}\qquad T=(60+273)\text{K}=333\text{K}$$

$$\begin{aligned}\Delta S_{1-2}&=\Delta S_1+\Delta S_2=m_1c_w\ln\frac{T}{T_1}+m_2c_w\ln\frac{T}{T_2}\\&=100\text{kg}\times4.187\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\ln\frac{333\text{K}}{293\text{K}}+200\text{K}\times4.187\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\ln\frac{333\text{K}}{353\text{K}}\\&=4.7392\text{kJ/K}\end{aligned}$$

绝热过程熵流 $S_{\text{f}}=0$，熵变等于熵产 $\Delta S_{1-2}=S_{\text{g}}$，　损失

$$I=T_0S_{\text{g}}==(20+273)\text{K}\times4.3792\text{kJ/K}=1388.6\text{kJ}$$

5-18 同例 3-7，氧气和氮气绝热混合，求混合　损失。设环境温度为 $T_0=298\text{K}$。

解： 例 3-7 已得出混合熵变 $\Delta S=0.8239\text{kJ/K}$，对绝热过程 $S_{\text{f}}=0$，$\Delta S=S_{\text{g}}$，所以　损失为

$$I=T_0S_{\text{g}}=298\text{K}\times0.8239\text{kJ/K}=245.5\text{kJ}$$

5-19 100kg 温度为 0°C冰，在大气环境中融化为 0°C的水，已知冰的融解热为 335kJ/kg，求冰化为水的熵变，过程中的熵流和熵产以及　的损失。

解：　100kg 冰融解所需热量　$Q=100\text{kg}\times335\text{kJ/kg}=3.35\times10^4\text{kJ}$

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

$$\Delta S_{1-2}=\frac{Q}{T}=\frac{Q}{T_{ice}}=\frac{3.35\times10^{4}\text{kJ/kg}}{273\text{K}}=122.71\text{kJ/K}$$

闭口系的熵方程 $\Delta S=S_{\mathrm{f}}+S_{\mathrm{g}}$

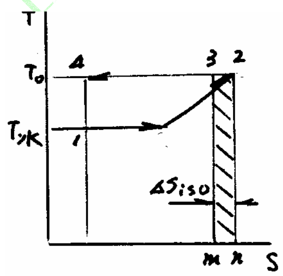
这里热源温度即为环境温度，所以熵流

$$S_{\mathrm{f}}=\frac{Q}{T_r}=\frac{Q}{T_0}=\frac{3.35\times10^{4}\text{kJ}}{293\text{K}}=114.33\text{kJ/K}$$

熵产 $S_{\mathrm{g}}=\Delta S-S_{\mathrm{f}}=122.71\text{kJ/K}-114.33\text{kJ/K}=8.38\text{kJ/k}$

损失 $I=T_0S_{\mathrm{g}}=293\text{K}\times9.38\text{kJ/K}=2455.34\text{kJ}$

5-20 100kg 温度为 0°C的冰，在 20°C的环境中融化为水后升温至 20°C，已知冰的融解热为 335kJ/kg，水的比热容为 $c_w=4.187\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$。求：①冰融化为 20°C水的熵变，②包括相关环境在内的孤立系的熵变 ③ 损失，并将 损失示于 *T*-*s* 图。



解：①100kg0°C的冰融化所需热量

$$Q_1=100\text{kg}\times335\text{kJ/kg}=3.35\times10^{4}\text{kJ}\ ;$$

100kg0°C的水加热到 20°C的水，需要热量

$$Q_2=100\text{kg}\times4.187\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(20-0)^{\circ}\text{C}=8.374\times10^{3}\text{kJ}$$

$$Q=Q_1+Q_2=3.35\times10^{4}\text{kJ}+8.374\times10^{3}\text{kJ}=4.1874\times10^{4}\text{kJ}$$

水的熵变

$$\Delta S_{1-2}=\frac{Q_1}{T_{ice}}+mc_w\ln\frac{T_0}{T_{ice}}$$

$$=\frac{3.35\times10^{4}\text{kJ}}{273\text{K}}+100\text{kg}\times4.187\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\ln\frac{293\text{K}}{273\text{K}}=152.313\text{kJ/K}$$

②环境的熵变

$$\Delta S_{3-4}=\frac{-Q}{T_0}=\frac{-4.1874\times10^{4}\text{kJ}}{293\text{K}}=-142.915\text{kJ/K}$$

由冰和水与环境组成的孤立系熵变

$$\Delta S_{\mathrm{iso}}=\Delta S_{1-2}+\Delta S_{3-4}=152.313\text{kJ/K}-142.915\text{kJ/K}=9.398\text{kJ/K}$$

③ $I=T_o\Delta S_{iso}=293\times9.398=2753.71kJ$。I 在 T-s 图中以阴影 23mn2 表示。

5-21 两物体 A 和 B 质量及比热容相同，即 $m_1=m_2=m$，$c_{p_1}=c_{p_2}=c_p$，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) $T_f=\sqrt{T_1T_2}$，以及最大循环净功 $W_{\max}=mc_p(T_1+T_2-2T_f)$；(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。

解： ① 根据题意，A、B 均为变温热源，要求确定在 A、B 间工作的最大循环净功，因此，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}，因过程全部可逆

热源 A 的熵变 $\mathrm{d}s_1=\dfrac{\delta Q_{1,x}}{T_{1,x}}=\dfrac{mc_p\mathrm{d}T_{1,x}}{T_{1,x}}$

冷源 B 的熵变 $\mathrm{d}s_2=\dfrac{\delta Q_{2,x}}{T_{2,x}}=\dfrac{mc_p\mathrm{d}T_{2,x}}{T_{2,x}}$

经过一系列微元卡诺循环，热源 A 温度由 T_1 变化到 T_f，冷源 B 的温度由 T_2 变化到 T_f，这时

A 的总熵变 $\Delta S_1=\displaystyle\int_{T_1}^{T_f}mc_p\frac{\mathrm{d}T_{1,x}}{T_{1,x}}=mc_p\ln\frac{T_f}{T_1}$

B 的总熵变 $\Delta S_2=\displaystyle\int_{T_2}^{T_f}mc_p\frac{\mathrm{d}T_{2,x}}{T_{2,x}}=mc_p\ln\frac{T_f}{T_2}$

而工质经过的是循环 $\oint ds=0$

由热源、冷源、工质组成孤立系，孤立系中进行的可逆循环，故 $\Delta S_{\text{iso}}=0$，即

$$\Delta S_1+\oint\mathrm{d}S+\Delta S_2=0 \quad 所以\ mc_p\ln\frac{T_f}{T_1}+mc_p\ln\frac{T_f}{T_2}=0$$

即 $\ln\dfrac{T_f}{T_1}\cdot\dfrac{T_f}{T_2}=0$ $\qquad \dfrac{T_f{}^2}{T_1\cdot T_2}=1$ $\qquad T_f=\sqrt{T_1\cdot T_2}$

微元循环的循环净功 $\delta w_{\max}=|\delta Q_{1,x}|-|\delta Q_{2,x}|=|mc_p\mathrm{d}T_{1,x}|-|mc_p\mathrm{d}T_{2,x}|$

全部微元循环

$$\begin{aligned}W_{\max}&=\int_{T_f}^{T_1}mc_p\mathrm{d}T_{1,x}-\int_{T_2}^{T_f}mc_p\mathrm{d}T_{2,x}\\&=mc_p(T_1-T_f)-mc_p(T_f-T_2)=mc_p(T_1+T_2-2T_f)\end{aligned}$$

(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 $|\delta Q_{1,x}|=|\delta Q_{2,x}|$，因此

$$-mc_p\mathrm{d}T_{1,x}=mc_p\mathrm{d}T_{2,x} \qquad -mc_p\int_{T_1}^{T_m}\mathrm{d}T_{1,x}=mc_p\int_{T_2}^{T_m}\mathrm{d}T_{2,x} \qquad -(T_m-T_1)=(T_m-T_2)$$

$$T_m=\frac{1}{2}(T_1+T_2)$$

损失的计算有二种方法，方法一：

A 物体的熵变 $$\Delta S_A=\int_{T_1}^{T_m}mc_p\frac{\mathrm{d}T_{1,x}}{T_{1,x}}=mc_p\ln\frac{T_m}{T_1}$$

B 物体的熵变 $$\Delta S_B=\int_{T_2}^{T_m}mc_p\frac{\mathrm{d}T_{2,x}}{T_{2,x}}=mc_p\ln\frac{T_m}{T_2}$$

由 A 和 B 组成的孤立系熵变

$$\Delta S=\Delta S_A+\Delta S_B=mc_p\ln\frac{T_m}{T_1}+mc_p\ln\frac{T_m}{T_2}=mc_p\ln\frac{T_m^2}{T_1\cdot T_2}$$

又因 $T_1\cdot T_2=T_f^{\,2}$ 所以 $\Delta S_{\mathrm{iso}}=2mc_p\ln\dfrac{T_m}{T_f}$，

损失 $$I=T_o\Delta S_{\mathrm{iso}}=2mc_pT_0\ln\frac{T_m}{T_f}$$

方法二

A 物体放出热量 $Q_A=mc_p(T_1-T_m)$

其中热量 $$A_{n,Q_A}=T_0(-\Delta S_A)=T_0mc_p\ln\frac{T_1}{T_m}$$

热量 $$E_{x,Q_A}=Q_A-A_{n,Q_A}=mc_p(T_1-T_m)-mc_pT_0\ln\frac{T_1}{T_m}=mc_p\left(T_1-T_m-T_0\ln\frac{T_1}{T_m}\right)$$

A 物体放出热量由 B 物体吸收， $Q_B=mc_p(T_m-T_2)$，

其中热量 $$A_{n,Q_B}=T_0\Delta S_B=T_0mc_p\ln\frac{T_m}{T_2}$$

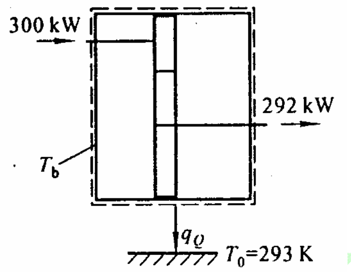
热量 $$E_{x,Q_B}=Q_B-A_{n,Q_B}=mc_p(T_m-T_2)-mc_pT_0\ln\frac{T_m}{T_2}=mc_p\left(T_m-T_2-T_0\ln\frac{T_m}{T_2}\right)$$

损失 $$I=E_{x,Q_A}-E_{x,Q_B}=A_{x,Q_B}-A_{n,Q_A}=2T_0mc_p\ln\frac{T_m}{T_f}$$

5-22 稳定工作的齿轮箱，由高速输入功率 300kW，由于磨擦损耗和其它不可逆损失，从低速驱动轴输出功率 292kW，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 $h = 0.17\text{kW/(m}^2\cdot\text{K)}$，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)。



解 ：根据题意，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。并假设齿轮箱外表面温度均匀。

（1）取齿轮箱为热力系，闭口系能量守恒，

$$\mathrm{d}U = \delta Q - \delta W$$

单位时间的表达式 $\dfrac{\Delta U}{\tau} = q_Q - \Delta P$

由于稳定 $\dfrac{\Delta U}{\tau} = 0$ $\quad q_Q = \Delta P = 292\text{kW} - 300\text{kW} = -8\text{kW}$ 负号表示放热。

由 $q_Q = -hA(T_b - T_0)$ 确定 T_b：

$$T_b = \frac{-q_Q}{hA} + T_0 = \frac{-(-8\text{kW})}{0.17\text{kW/(m}^2\cdot\text{K)}\times 1.2\text{m}^2} + 293\text{K} = 332.2\text{K}$$

闭口系的熵方程 $\mathrm{d}S = \delta S_\text{f} + \delta S_\text{g}$ 写出对单位时间的关系式 $\dfrac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}\tau} = \dot{S}_\text{f} + \dot{S}_\text{g}$

由于稳定 $\dfrac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}\tau} = 0$ $\quad \dot{S}_{\text{g}1} = -\dot{S}_{\text{f}1} = -\dfrac{q_Q}{T_b} = \dfrac{-(-8\text{kW})}{332.2\text{K}} = 0.0241\text{kW/K}$

损失 $\quad I_1 = T_0\dot{S}_{\text{g}1} = 293\text{K}\times 0.024\text{kW/K} = 7.056\text{kW}$

（2）包括齿轮箱和相关环境在内的扩大系统，是孤立系，对其写出熵方程，同样

由于稳定 $\dfrac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}\tau} = \dot{S}_\text{f} + \dot{S}_\text{g} = 0$

$$\dot{S}_\text{g} = -\dot{S}_\text{f} = -\frac{q_Q}{T_0} = \frac{-(-8\text{kW})}{293\text{K}} = 0.0273\text{kW/K}$$

损失 $\quad I = T_0\dot{S}_\text{g} = 293\text{K}\times 0.0273\text{kW/K} = 8\text{kW}$

$\dot{S}_\text{g}$ 和 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 $\dot{S}_{\text{g}2}$ 和 损失 I_2 为

$$S_{\text{g},2} = S_\text{g} - S_{\text{g},1} = 0.0273\text{kW/K} - 0.0241\text{kW/K} = 0.0032\text{kW/K}$$
$$I_2 = I - I_1 = 8\text{kW} - 7.056\text{kW} = 0.944\text{kW}$$

*5-23 体积 $V = 0.1m^3$ 的刚性真空容器，打开阀门将有 $p_o = 10^5 Pa, T_o = 303K$ 的大气环境空气充入，充气终了 $p_2 = 10^5 Pa$。分别按两种情况（1）绝热充气；(2) 等温充气；求：①终温 T_2

和充气量 m;②充气过程的熵产；③充气 损失。已知空气的气体常数和质量定压热容以及比热比分别为 $R_g=0.287\,kJ/(kg\cdot K)$，$c_p=1.004\,kJ/(kg\cdot K)$，$\kappa=1.4$。

解 取容器内空间为控制体积，根据控制体积能量方程的一般表达式

$$\delta Q=dU_{cv}+h_e\delta m_e-h_i\delta m_i+\delta W_i$$

已知是刚性容器不作外功 $\delta W_i=0$，无空气流出 $\delta m_e=0$，空气充入量等于控制体积内空气增量 $\delta m_i=d_m$，且 $h_i=h_o=c_pT_o$，故简化为 $\delta Q=dU_{cv}-h_o dm$

（一） 按绝热充气

① $dU_{cv}-h_o dm=0$ 积分得 $u_2m_2-u_1m_1-h_o(m_2-m_1)=0$

因初态真空，$m_1=0,m_2=m_i$，因而 $u_2=h_o$，$c_vT_2=c_pT_o$，$T_2=\kappa T_o=1.4\times303=424.2K$

$$m_i=m_2=\frac{p_2V}{R_gT_2}=\frac{10^5\times0.1}{0.287\times10^3\times424.2}=0.8214kg$$

② 根据控制体积熵方程

$$dS_{cv}=\frac{\delta Q}{T_r}+s_i\delta m_i-s_e\delta m_e+\delta S_g \quad \text{据题意可化为} \quad dS_{cv}=s_o dm+\delta S_g$$

积分后 $S_2-S_1=s_0(m_2-m_1)+S_g$

$$S_g=m_2(s_2-s_o)=m_2c_p\ln\frac{T_2}{T_o}=0.8214\times1.004\ln\frac{424.2}{303}=0.2775\,kJ/K$$

③ 损失 $I=T_oS_g=303\times0.2775=84.08kJ$

（二） 按等温充气

① $T_2=T_0=303K$ $\quad m_i=m_2=\dfrac{p_2V}{R_gT_2}=\dfrac{10^5\times0.1}{0.287\times10^3\times303}=1.1499kg$

②熵方程简化为 $dS_{cv}=\dfrac{\delta Q}{T_r}+s_o dm+\delta s_g$ 积分得 $S_2-S_1=\dfrac{Q}{T_o}+s_o(m_2-m_1)+S_g$

式中 $S_2=m_2s_2=m_2s_o,S_1=0,m_1=o$ 故有 $S_g=-\dfrac{Q}{T_o}$

由能量方程的简化式

$$\delta Q=dU_{cv}-h_o dm \qquad \text{积分得} \qquad Q=U_2-U_1-h_o(m_2-m_1)$$

又因 $m_1=0,U_1=o,u_2=u_o,h_o-u_o=p_ov_o$ 代入后有

$$Q=m_2u_o-m_2h_o=(u_o-h_o)m_2=-p_ov_om_2=-p_oV$$

$$S_g=\frac{p_oV}{T_o}=\frac{10^5\times10^{-3}\times0.1}{303}=0.0330\,kJ/K$$

③ 损失 $I=T_oS_g=303\times0.0330=10kJ$

*5-24 有一刚性封密容器体积为 V，其中装有状态为 p、T_0 的空气，这时环境大气的状态为 p_0、T_0。①若不计系统的动能和位能，试证明其热力学能 为

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

②若 $E_{x,\mathrm{U}} = 1\mathrm{kWh}$、$p_0 = 1\mathrm{bar}$ 利用上述关系式，绘出 $V(\mathrm{m}^3) \sim \frac{p}{p_0}$ 曲线。

解：① 根据工质的热力学能 的定义式

$$E_{x,\mathrm{U}} = U - U_0 - T_0(S - S_0) + p_0(V - V_0)$$

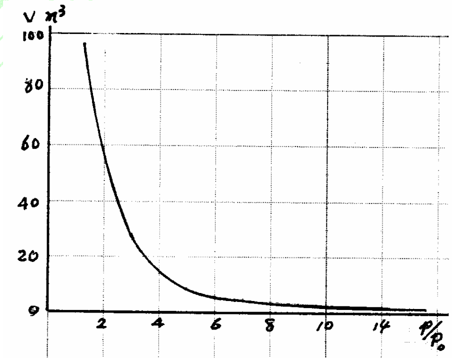
空气可作为理想气体，有 $U - U_0 = mc_V(T - T_0)$，因 $T = T_0$，所以

$$U - U_0 = 0 \qquad S - S_0 = m\left[c_p \ln\frac{T}{T_0} - R_\mathrm{g}\ln\frac{p}{p_0}\right] = -mR_g \ln\frac{p}{p_0}$$

故 $E_{x,\mathrm{U}} = mT_0R_\mathrm{g}\ln\frac{p}{p_0} + p_0V - p_0V_0 = pV\ln\frac{p}{p_0} + p_0V - p_0V_0 = p_0V\left(1-\frac{V_0}{V}+\frac{p}{p_0}\ln\frac{p}{p_0}\right)$

由于 $T = T_0$，由 $\frac{p_0V_0}{T_0} = \frac{pV}{T}$ 可得 $\frac{V_0}{V} = \frac{p}{p_0}$，代入

上式得 $E_{x,\mathrm{U}} = p_0V(1-\frac{p}{p_0}+\frac{p}{p_0}\ln\frac{p}{p_0})$



② $1\mathrm{kWh} = 3600\mathrm{kJ}$ $p_0 = 1\mathrm{bar} = 100\mathrm{kPa}$

从而得 $V = \dfrac{36}{\left(1-\frac{p}{p_0}+\frac{p}{p_0}\ln\frac{p}{p_0}\right)}$

p / p_0	$v(\mathrm{m}^3)$	p/p_0	$v(\mathrm{m}^3)$
1	00	11	2.198
2	93.193	12	1.913
3	273781	13	1.687
4	14.144	14	1.503
5	8.890	15	1.352
6	6.260	20	0.880
7	4.723	25	0.638
8	3.736	30	0.493
9	3.057	100	0.0996
10	2.567		

5-25 活塞式气缸体积 $V = 2.45\times10^{-3}\,\mathrm{m^3}$，内有 $p_1 = 0.7\,\mathrm{MPa}$、$t_1 = 867^\circ\mathrm{C}$ 的燃烧产物，已知环境温度、压力分别为 $t_0 = 27^\circ\mathrm{C}$、$p_0 = 0.1013\,\mathrm{MPa}$。设燃烧产物的气体常数 $R_g = 0.296\,\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$，质量定压热容 $c_p = 1.04\,\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$，求：①燃烧产物的热力学能 ；②除环境外无其它热源的情况下，燃烧产物膨胀到 $p_2 = 0.3\,\mathrm{MPa}$、$t_2 = 637^\circ\mathrm{C}$ 的最大有用功 $W_{1-2\max}$。

解： ① $c_V = c_p - \mathrm{R_g} = 1.04\,\mathrm{kJ/(kg\cdot K)} - 0.296\,\mathrm{kJ/(kg\cdot K)} = 0.744\,\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$

$$m = \frac{p_1V_1}{R_gT_1} = \frac{0.7\times10^6\,\mathrm{Pa}\times2.45\times10^{-3}\,\mathrm{m^3}}{296\,\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times(867+273)\,\mathrm{K}} = 0.00508\,\mathrm{kg}$$

$$V_0 = \frac{mR_gT_0}{p_0} = \frac{p_1T_0}{p_0T_1}V_1 = \frac{0.7\,\mathrm{MPa}\times300\,\mathrm{K}}{0.1013\,\mathrm{MPa}\times1140\,\mathrm{K}}\times2.45\times10^{-3}\,\mathrm{m^3} = 4.455\times10^{-3}\,\mathrm{m^3}$$

$$\begin{aligned}
E_{x,\mathrm{U}_1} &= U_1 - U_0 - T_0(S_1 - S_0) + p_0(V_1 - V_0)\\
&= mc_V(T_1 - T_0) - mT_0[c_p\ln\frac{T_1}{T_0} - R_g\ln\frac{p_1}{p_0}] + p_0(V_1 - V_0)\\
&= 0.00508\,\mathrm{kg}\{0.744\,\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}(1140-300)\,\mathrm{K} - 300\,\mathrm{K}[1.04\,\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\ln\frac{1140\,\mathrm{K}}{300\,\mathrm{K}}\\
&\quad - 0.296\,\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\ln\frac{0.7\,\mathrm{MPa}}{0.1013\,\mathrm{MPa}}]\} + 101.3\,\mathrm{kPa}(2.45-4.455)\times10^{-3}\,\mathrm{m^3}\\
&= 1.93085\,\mathrm{kJ} - 0.20311\,\mathrm{kJ} = 1.7277\,\mathrm{kJ}
\end{aligned}$$

② $W_{u,\max} = E_{x,\mathrm{U1}} - E_{x,\mathrm{U2}} = U_1 - U_2 - T_0(S_1 - S_2) + p_0(V_1 - V_2)$

$$V_2 = \frac{p_1T_2}{p_2T_1}V_1 = \frac{0.7\,\mathrm{MPa}\times(637+273)\,\mathrm{K}}{0.3\,\mathrm{MPa}\times1140\,\mathrm{K}}\times45\times10^{-3}\,\mathrm{m^3} = 4.5633\times10^{-3}\,\mathrm{m^3}$$

$$\begin{aligned}
W_{1-2} &= mc_V(T_1 - T_2) - mT_0(c_p\ln\frac{T_1}{T_2} - R_g\ln\frac{p_1}{p_2}) + p_0(V_1 - V_2)\\
&= 0.00508\,\mathrm{kg}\{0.774\,\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}(1140-910)\,\mathrm{K} - 300\,\mathrm{K}[(1.04\,\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\ln\frac{1140\,\mathrm{K}}{910\,\mathrm{K}}\\
&\quad - 0.296\,\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\ln\frac{0.7\,\mathrm{MPa}}{0.3\,\mathrm{MPa}}]\} + 101.3\,\mathrm{kPa}(2.45-4.5633)\times10^{-3}\,\mathrm{m^3}\\
&= 0.89436\,\mathrm{kJ} - 0.21408\,\mathrm{kJ} = 0.6803\,\mathrm{kJ}
\end{aligned}$$

5-26 设理想气体的比热容为定值，试证明稳定流动时理想气体物质流的无因次焓 的表达式为：$\dfrac{e_{x,\mathrm{H}}}{c_pT_0} = \dfrac{T}{T_0} - 1 - \ln\dfrac{T}{T_0} + \ln\left(\dfrac{p}{p_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$，式中 c_p 为气体的比定压热容，T_0、p_0 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）。

解： 稳定物质流的焓 $e_{x,\mathrm{H}}=h-h_0-T_0(s-s_0)$ 对于理想气体，定值热容时有：

$$h-h_0=c_p(T-T_0)\text{，}\quad s-s_0=c_p\ln\frac{T}{T_0}-R_{\mathrm{g}}\ln\frac{p}{p_0}$$

且 $c_p=\dfrac{\kappa}{\kappa-1}R_{\mathrm{g}}$ 或 $R_{\mathrm{g}}=\dfrac{\kappa-1}{\kappa}c_p$ 一起代入焓 式，得

$$e_{x.\mathrm{H}}=c_p(T-T_0)-T_0\left(c_p\ln\frac{T}{T_0}-\frac{\kappa-1}{\kappa}c_p\ln\frac{p}{p_0}\right)=c_pT_0\left[\frac{T}{T_0}-1-\ln\frac{T}{T_0}+\ln\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right]$$

所以
$$\frac{e_{x.\mathrm{H}}}{c_pT_0}=\frac{T}{T_0}-1-\ln\frac{T}{T_0}+\ln\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

5-27 空气稳定流经绝热气轮机，由 $p_1=0.4\mathrm{MPa}$、$T_1=450\mathrm{K}$、$c_{\mathrm{f}1}=130\mathrm{m/s}$、膨胀到 p_1=0.1MPa、$T_2=330\mathrm{K}$、$c_{\mathrm{f}2}=30\mathrm{m/s}$，这时环境参数 $p_0=0.1\mathrm{MPa}$、$T_0=293\mathrm{K}$，设空气的气体常数 $R_{\mathrm{g}}=0.287\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$ 可不计位能变化。质量定压热容 $c_p=1.004\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$，求：①1kg 稳流工质在进出口处的比焓 e_{x,H_1}、e_{x,H_2}，以及比物流 e_{x_1}、e_{x_2}；②状态变 1 化到状态 2 的最大有用功 $w_{1-2,\max}$；③实际有用功。

解：①比焓 和比物流 ：

进口处工质的比焓

$$\begin{aligned}e_{x,\mathrm{H}_1}&=h_1-h_0-T_0(s_1-s_0)=c_p(T_1-T_0)-T_0\left(c_p\ln\frac{T_1}{T_0}-R_{\mathrm{g}}\ln\frac{p_1}{p_0}\right)\\&=1.004\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}(450-293)\mathrm{K}\\&\quad-293\mathrm{K}\left[1.004\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\ln\frac{450\mathrm{K}}{290\mathrm{K}}-0.287\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\ln\frac{0.4\mathrm{MPa}}{0.1\mathrm{MPa}}\right]\\&=157.63\mathrm{kJ/kg}-12.6745\mathrm{kJ/kg}=144.96\mathrm{kJ/kg}\end{aligned}$$

出口处工质的比焓

$$\begin{aligned}e_{x,\mathrm{H}_2}&=c_p(T_2-T_0)-T_0\left(c_p\ln\frac{T_2}{T_0}-R_{\mathrm{g}}\ln\frac{p_2}{p_0}\right)\\&=1.004\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}(330-293)\mathrm{K}\\&\quad-293\mathrm{K}\left[1.004\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\ln\frac{330\mathrm{K}}{293\mathrm{K}}-0.287\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\ln\frac{0.1\mathrm{MPa}}{0.1\mathrm{MPa}}\right]\\&=37.148\mathrm{kJ/kg}-34.844\mathrm{kJ/kg}=2.31\mathrm{kJ/kg}\end{aligned}$$

进口处工质的比物流

$$e_{x1}=e_{x,\mathrm{H}_1}+\frac{1}{2}c_{\mathrm{f}1}{}^2$$

$$=144.96\mathrm{kJ/kg}+\frac{1}{2}(130\mathrm{m/s})^2\times10^{-3}=144.96\mathrm{kJ/kg}+8.45\mathrm{kJ/kg}=153.41\mathrm{kJ/kg}$$

出口处工质的比物流

$$e_{x2}=e_{x,\mathrm{H}_2}+\frac{1}{2}c_{\mathrm{f}2}{}^2$$

$$=2.31\mathrm{kJ/kg}+\frac{1}{2}(30\mathrm{m/s})^2\times10^{-3}=2.31\mathrm{kJ/kg}+0.45\mathrm{kJ/kg}=2.76\mathrm{kJ/kg}$$

②除环境外无其他热源时的，最大有用功

$$w_{1-2,\max}=-\Delta e_x=e_{x1}-e_{x2}=153.41\mathrm{kJ/kg}-2.76\mathrm{kJ/kg}=150.55\mathrm{kJ/kg}$$

③由稳定流动热力系能量方程 $q=\Delta h+\frac{1}{2}\Delta c_\mathrm{f}^2+w_i$ ，过程绝热 $q=0$，所以

$$w_i=h_1-h_2+\frac{1}{2}(c_{\mathrm{f}1}^2-c_{\mathrm{f}2}^2)=c_p(T_1-T_2)+\frac{1}{2}(c_{\mathrm{f}1}^2-c_{\mathrm{f}2}^2)$$

$$=1.004\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}(330-450)\mathrm{K}+\frac{1}{2}[(30\mathrm{m/s})^2-(130\mathrm{m/s})^2\times10^{-3}]$$

$$=128.48\mathrm{kJ/kg}$$

稳流过程的实际有用功 w_u 和内部功 w_i 相同， $w_u=w_i=128.48\mathrm{kJ/kg}$。

5-28 刚性绝热器内装有 0.5kg， $t_1=20°\mathrm{C}$、$p_1=200\mathrm{kPa}$ 的空气，由于叶轮搅拌使空气压力升高到 $p_2=220\mathrm{kPa}$，空气的质量定容热容 $c_V=0.717\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$，设环境的压力和温度为 $p_0=98\mathrm{kPa}$、$t_0=20°\mathrm{C}$。求：①实际过程的过程功 W（消耗的搅拌功）；②实际过程有用功 w_u；③状态 1 变化到状态 2 的最大可用功 $W_{1-2.\max}$；④过程　损失 I。

解： ① 过程功 W

根据闭口系能量方程，对绝热容器有 $W=U_1-U_2=mc_V(T_1-T_2)$　因 $V_2=V_1$　故有

$$T_2=\frac{p_2}{p_1}T_1=\left(\frac{220\mathrm{kPa}}{200\mathrm{kPa}}\right)\times293\mathrm{K}=322.3\mathrm{K}$$

$W=0.5\mathrm{kg}\times0.717\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}(293-322.3)\mathrm{K}=-10.504\mathrm{kJ}$（负号表示耗功）

②有用功 w_u

$W_u=W-p_0(V_2-V_1)$　本题 $V_2=V_1$，故 $W_u=W=-10.504\mathrm{kJ}$

③ $W_{1-2.\max}=E_{x,U_1}-E_{x,u_2}=U_1-U_2-T_0(S_1-S_2)+p_0(V_1-V_2)$

$$=U_1-U_2-T_0m\left[c_V\ln\frac{T_1}{T_2}+R_g\ln\frac{V_1}{V_2}\right]+p_0(V_1-V_2)$$

因 $V_2=V_1$，故

$$W_{1-2.\max}=U_1-U_2-mT_0c_V\ln\frac{T_1}{T_2}$$

$$=-10.504\text{kJ}-0.5\text{kg}\times0.717\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times293\text{K}\ln\frac{293\text{K}}{322.3\text{K}}$$

$$=-10.504\text{kJ}+10.011\text{kJ}=-0.493\text{kJ}$$

④ 损失 I

方法一：$I=T_0\Delta S_{\text{iso}}=T_0(\Delta S_{\text{sys}}+\Delta S_0)$

由于是绝热系，环境熵不变，$\Delta S_0=0$，$\Delta S_{\text{sys}}=\Delta S_{1-2}$

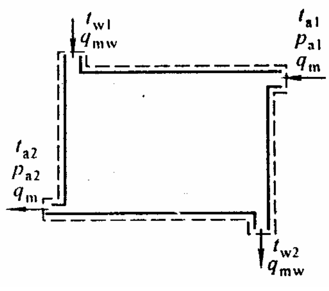
$$I=T_0\Delta S_{\text{iso}}=T_0mc_V\ln\frac{T_2}{T_1}$$

$$=293\text{K}\times0.5\text{kg}\times0.717\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times\ln\frac{322.3\text{K}}{293\text{K}}=10.011\text{kJ}$$

方法二：根据闭口系　平衡方程，除环境外无其他的热源时有

$$I=W_{1-2.\max}-W_u=-0.493\text{kJ}-(-10.504\text{kJ})=10.011\text{kJ}$$

5-29 表面式换热器中用热水加热空气。空气进、出口参数为 $p_1=0.13\text{MPa}$、$t_1=20°\text{C}$，$p_2=0.12\text{MPa}$、$t_2=60°\text{C}$，空气流量 $q_m=1\text{kg/s}$，热水进口温度 $t_{w1}=80°\text{C}$，流量 $q_{mw}=0.8\text{kg/s}$，压力几乎不变。水和空气的动能差、位能差也可不计。见图 5-39，已知环境温度 $t_0=10°\text{C}$、压力 $p_0=0.1\text{MPa}$，空气和水的比热容为



$c_p=1.004\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，$c_w=4.187\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，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。

解：由第一定律热水放出的热量等于空气吸入热量，故 $q_mc_p(t_2-t_1)=q_{mw}c_w(t_{w1}-t_{w2})$

$$t_{w2}=t_{w1}-\frac{q_mc_p}{q_{mw}c_w}(t_2-t_1)=80^\circ\text{C}-\frac{1\text{kg}\times1.004\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}}{0.8\text{kg}\times4.187\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}}(60-20)^\circ\text{C}$$

$$=68.01^\circ\text{C}\approx68^\circ\text{C}$$

$T_1=(20+273)\text{K}=293\text{K}$　　$T_2=(60+273)\text{K}=333\text{K}$　　$T_{w1}=(80+273)\text{K}=353\text{K}$

$T_{w2}=(68+273)\text{K}=341\text{K}\quad T_0=(10+273)\text{K}=283\text{K}$

空气进、出口的比焓

$$e_{x,\text{H}_1}=h_1-h_0-T_0(s_1-s_0)=c_p(T_1-T_0)-T_0\left(c_p\ln\frac{T_1}{T_0}-R_\text{g}\ln\frac{p_1}{p_0}\right)$$
$$=1.004\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}(293-283)\text{K}$$
$$-283\text{K}\left[1.004\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\ln\frac{293\text{K}}{283\text{K}}-0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\ln\frac{0.13\text{MPa}}{0.1\text{MPa}}\right]$$
$$=21.48\text{kJ/kg}$$

$$e_{x,\text{H}_2}=h_2-h_0-T_0(s_2-s_0)=c_p(T_2-T_0)-T_0\left(c_p\ln\frac{T_2}{T_0}-R_\text{g}\ln\frac{p_2}{p_0}\right)$$
$$=1.004\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}(333-283)\text{K}$$
$$-283\text{K}\left[1.004\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\ln\frac{333\text{K}}{283\text{K}}-0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\ln\frac{0.12\text{MPa}}{0.1\text{MPa}}\right]$$
$$=18.78\text{kJ/kg}$$

水进、出口比焓

$$e_{x,\text{Hw}_1}=h_{w1}-h_0-T_0(s_{w1}-s_0)=c_w(T_{w1}-T_0)-T_0c_w\ln\frac{T_{w1}}{T_0}$$
$$=4.187\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}(353-283)\text{K}-283\text{K}\times4.187\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\ln\frac{353\text{K}}{283\text{K}}$$
$$=31.20\text{kJ/kg}$$

$$e_{x,\text{Hw}_2}=h_{w2}-h_0-T_0(s_{w2}-s_0)=c_w(T_{w2}-T_0)-T_0c_w\ln\frac{T_{w2}}{T_0}$$
$$=4.187\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}(341-283)\text{K}-283\text{K}\times4.187\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\ln\frac{341\text{K}}{283\text{K}}$$
$$=21.93\text{kJ/kg}$$

据稳定流动系的 平衡方程，该换热器无散热损失，不作功，所以$E_{x,\text{Q}}=0$、$W_i=0$，

$$I=q_m(e_{x,\text{H}_1}-e_{x,\text{H}_2})+q_{mw}(e_{x,\text{Hw}_1}-e_{x,\text{Hw}_2})$$
$$=1\text{kg/s}(21.48-18.78)\text{kJ/kg}+0.8\text{kg/s}(31.20-21.93)\text{kJ/kg}$$
$$=10.12\text{kW}$$

5-30 空气稳定地流经气轮机，由初态$p_1=0.75\text{MPa}$、$t_1=750^\circ\text{C}$，绝热膨胀到$p_2=0.1\text{MPa}$、$t_2=320^\circ\text{C}$，忽略不计动能，位能的变化。已知空气$R_\text{g}=0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，$c_p=1.004\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$。针对流入1kg空气，计算：①实际过程输出的内部功w_i，过程是否可逆？②1到2的最大有用功$w_{1-2,\max}$；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'，讨论 I 与（$w_i'-w_i$）为何不相同？环境状态 $p_0=0.1\text{MPa}$、$T_0=298\text{K}$。

解： ①实际内部功 w_i

由稳定流动能量方程，考虑到不计动、位能差，过程绝热，可简化得出

$$w_i=h_1-h_2=c_p(T_1-T_2)=1.004(750-320)=431.72\,{}^{kJ}\!/_{kg}$$

$$\Delta S_{12}=c_p\ln\frac{T_2}{T_1}-R_g\ln\frac{p_2}{p_1}=1.004\ln\frac{320+273}{750+273}-0.287\ln\frac{0.1}{0.75}=0.031\,{}^{kJ}\!/_{kg}>0$$

绝热过程 $\Delta S>0$，故为不可逆过程

② 最大有用功

$$\begin{aligned}
w_{1-2,\max}&=e_{x.\text{H}_1}-e_{x.\text{H}_2}=h_1-h_2-T_0(s_1-s_2)\\
&=c_p(T_1-T_2)-T_0\left[c_p\ln\frac{T_1}{T_2}-R_g\ln\frac{p_1}{p_2}\right]\\
&=1.004\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}(1023-593)\text{K}-\\
&\quad 298\text{K}\left[1.004\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\ln\frac{1023\text{K}}{593\text{K}}-0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\ln\frac{0.75\text{MPa}}{0.1\text{MPa}}\right]\\
&=431.72\text{kJ/kg}+9.177\text{kJ/kg}=440.897\text{kJ/kg}
\end{aligned}$$

③ 损失

$$w_u=w_i=431.72\text{kJ/kg}$$

$$I=w_{1-2,\max}-w_u=440.897\text{kJ/kg-}431.72\text{kJ/kg=}9.177\text{kJ/kg}$$

④ 可逆绝热膨胀时终温

$$T_2'=\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}T_1=\left(\frac{0.1}{0.75}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}}\times1023\text{K}=575.25\text{K}$$

可逆绝热膨胀理论内部功

$$w_i'=h_1-h_2'=c_p(T_1-T_2)=1.004\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}(1023-575.25)\text{K}=449.54\text{kJ/kg}$$

少作功 $\quad w_i'-w_i=449.54\text{kJ/kg}-431.72\text{kJ/kg}=17.82\text{/kg}$

显然 $w_i'-w_i\neq I$， 损失小于不可逆绝热膨胀少作的功，原因是两者终态不同，实

际终态 2 工质的焓　比 2′ 的大。

$$e_{x.\mathrm{H}_2}=h_2-h_0-T_0(s_2-s_0)=c_p(T_2-T_0)-T_0[c_p\ln\frac{T_2}{T_0}-R_\mathrm{g}\ln\frac{p_2}{p_0}]$$
$$=1.004\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}(593-298)\mathrm{K}-$$
$$298\mathrm{K}\left[1.004\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\ln\frac{593\mathrm{K}}{298\mathrm{K}}-0.287\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\ln\frac{0.75}{0.1\mathrm{MPa}}\mathrm{MPa}\right]$$
$$=262.63\mathrm{kJ/kg}$$

$$e_{x.\mathrm{H}_2{}'}=h_{2'}-h_0-T_0(s_{2'}-s_0)=c_p(T_{2'}-T_0)-T_0[c_p\ln\frac{T_{2'}}{T_0}-R_\mathrm{g}\ln\frac{p_{2'}}{p_0}]$$
$$=1.004\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}(575.25-298)\mathrm{K}-$$
$$298\mathrm{K}\left[1.004\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\ln\frac{575.25\mathrm{K}}{298\mathrm{K}}-0.287\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\ln\frac{0.75}{0.1\mathrm{MPa}}\mathrm{MPa}\right]$$
$$=253.90\mathrm{kJ/kg}$$

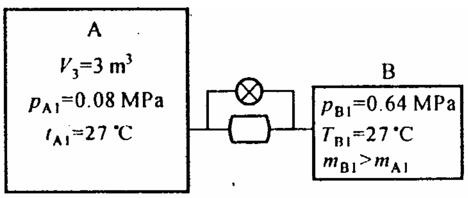
$1-2'$ 是可逆过程，　损失 $I'=0$，　$w_i'=e_{x,\mathrm{H}_1}-e_{x,\mathrm{H}_2{}'}$　故

$$w_i'-w_i=e_{x,\mathrm{H}_1}-e_{x,\mathrm{H}_2{}'}-w_i$$

1-2 是不可逆过程　　$I=e_{x,\mathrm{H}_1}-e_{x,\mathrm{H}_2}-w_i$

因　　$e_{x,\mathrm{H}_2}>e_{x,\mathrm{H}_2{}'}$　　所以　　　$w_i'-w_i'>I$

5-31 容器 A 的体积为 3m，内装 0.08MPa、27°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 0.64MPa，用空气缩压机将容器 A 中空气全部抽空送到容器 B，见图 5-40。设抽气过程 A 和 B 的温度保持不变.已知环境温度为 27°C，压力为 0.1MPa，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°C，求该不可逆过程造成的　损失。



解：①初态 A、B 容器中质量相同

$$m_{B1}=m_{A1}=\frac{p_{A1}V_A}{R_\mathrm{g}T_{A1}}=\frac{0.08\times10^6\mathrm{Pa}\times3\mathrm{m}^3}{287\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times300\mathrm{K}}=2.7875\mathrm{kg}$$

又根据　$\dfrac{p_{A1}V_A}{R_\mathrm{g}T_{A1}}=\dfrac{p_{B1}V_B}{R_\mathrm{g}T_{B1}}$　　$V_B=\dfrac{p_{A1}}{p_{B1}}V_A=\dfrac{0.08\mathrm{MPa}}{0.64\mathrm{MPa}}\times3\mathrm{m}^3=0.375\mathrm{m}^3$

取容器 A 和容器 B 以及压缩机共同组成的热力系，是个闭口热力系，如图中虚线所示，

除环境外无其他热源，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：

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

因 $T_{A1}=T_{B1}=T_{B2}$ ，终态 A 中真空 $V_2=V_B$，$V_1=V_A+V_B$，所以

$$
p_{B2}=\frac{(m_{A1}+m_{B1})}{V_B}R_gT_{B2}=\frac{2\times2.7875\text{kg}}{0.375\text{m}^3}\times287\text{J/(kg}\cdot\text{K})\times300\text{K}=1.28\times10^6\text{Pa}
$$

$$
\begin{aligned}
W_{1-2,\min} &= T_0m_{A1}R_g\ln\frac{p_{B2}^2}{p_{A1}p_{B1}}-p_0V_A\\
&=300\text{K}\times2.7875\text{kg}\times0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K})\ln\frac{(1.28\text{MPa})^2}{0.08\text{MPa}\times0.64\text{MPa}}\\
&\quad -100\text{kPa}\times3\text{m}^3=831.79\text{kJ}-300\text{kJ}=53.179\text{kJ}
\end{aligned}
$$

②打开旁通阀，关闭压缩机后，取为热力系 A、B 和旁通阀。因 $T_{A3}=T_{A1}$，这时压力为

$$
p_3=\frac{2m_{A1}R_gT_{A3}}{V_A+V_B}=\frac{2\times2.7875\text{kg}\times287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K})\times300\text{K}}{3.375\text{m}^3}=0.142\times10^6\text{Pa}
$$

对 2-3 仍写出 平衡方程，这时

$$
I=E_{x,Q}-E_{x,U_2}-E_{x,U_3}-E_{x,w}
$$

除环境外无热源换热，故 $E_{x,Q}=0$ ； 不作功 $E_{x,w}=0$，所以

$$
I=E_{x,U_2}-E_{x,U_3}=U_2-U_3-T_0(S_2-S_3)+p_0(V_2-V_3)
$$

考虑到 $T_{A3}=T_{B3}=T_{B2}$，$U_2-U_3=0$ ，且 $V_2=V_B$，$V_3=V_A+V_B$ ，$p_{A3}=p_{B3}$，

$$
m_{A3}=\frac{p_{A3}V_A}{R_gT_{A3}}=\frac{0.1422\times10^6\text{Pa}\times3\text{m}^3}{287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K})\times300\text{K}}=4.954\text{kg}
$$

$$
m_{B3}=2m_{A1}-m_{A3}=2\times2.7875\text{kg}-4.954\text{kg}=0.621\text{kg}
$$

$$
\begin{aligned}
I &= -T_0\left[m_{B3}(c_p\ln\frac{T_{B3}}{T_{B2}}-R_g\ln\frac{p_{B2}}{p_{B3}})+m_{A3}(c_p\ln\frac{T_{B3}}{T_{A3}}-R_g\ln\frac{p_{B2}}{p_{A3}})\right]-p_0V_A\\
&=T_0R_g[m_{B3}\ln\frac{p_{B2}}{p_{B3}}+m_{A3}\ln\frac{p_{B2}}{p_{A3}}]-p_0V_A
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
&= 300\text{K} \times 0.287\text{kJ/(kg} \cdot \text{K)} \left[0.62\text{kg} 1 \ln \frac{1.28\text{MPa}}{0.1422\text{MPa}} + 4.954\text{kg} \ln \frac{1.28\text{MPa}}{0.1422\text{MPa}} \right] \\
&\qquad - 0.1 \times 10^3 \text{kPa} \times 3\text{m}^3 \\
&= 1054.76\text{kJ} - 300\text{kJ} = 754.76\text{kJ}
\end{aligned}
$$