1　典型题解

【例 1.1】气体常量 R_g (　　)

A. 与气体种类有关，与状态无关；　　　B. 与状态有关，与气体种类无关；

C. 与气体种类和状态均有关；　　　　D. 与气体种类和状态均无关。

【解】A。气体常数只与气体的种类有关，而与状态无关。

【例 1.2】闭口系统、开口系统和孤立系统有何区别和联系？孤立系统在实际中存在吗？试举例说明。

【答】闭口系是与外界无物质交换的系统。开口系是与外界有物质交换的系统。孤立系是与外界无任何相互作用的系统，即既没有物质交换也没有能量交换。绝热密闭容器内的气体就可以看成是一个孤立系。

【例 1.3】若容器中气体的绝对压力保持不变，压力比上的读数会改变吗？为什么？

【答】会改变。因为环境压力可能会发生改变。

【例 1.4】有一用隔板分开的刚性容器，两边盛有压力不同的气体，为测量压力，共装有 A、B、C 压力表，如图 1-5 所示。A 表读数为 4bar，B 表读数为 1.5bar，大气压力为 1bar，求 C 表读数为多少？

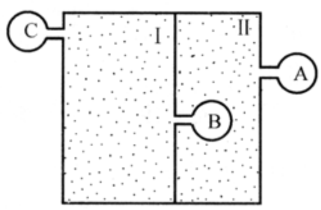


图 1-5

【解】

依题意，有

$$\begin{cases} p_{g,B} = p_{I} - p_{II} \\ p_{g,C} = p_{I} - p_{b} \\ p_{g,A} = p_{II} - p_{b} \end{cases}$$

解得

$$\begin{cases} p_{g,C} = p_{g,A} + p_{g,B} = 5.5\text{MPa} \\ p_{I} = p_{g,C} + p_{b} = 6.5\text{MPa} \\ p_{II} = p_{g,A} + p_{b} = 5\text{Mpa} \end{cases}$$

【例 1.5】如图 1-6 所示的圆筒容器，表 A 的读数是 360kPa，表 B 的读数是 170kPa，表示室 I 压力高于室 II 的压力。大气压力为 1.013×10^{5}Pa。试：

(1) 分析 A、B、C 是压力表还是真空表？

(2) 求真空室以及室 I 和室 II 的绝对压力；

(3) 表 C 的读数。

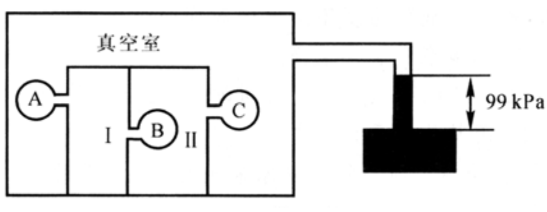


图 1-6

【解】

依题意，有 $p_0+99\text{kPa}=101.3\text{kPa}$，故真空室压力为 $p_0=2.3\text{kPa}$。另外有

$$\begin{cases} p_{\text{g,A}}=p_{\text{I}}-p_0 \\ p_{\text{g,B}}=p_{\text{I}}-p_{\text{II}} \\ p_{\text{g,C}}=p_{\text{II}}-p_0 \end{cases}$$

解得

$$\begin{cases} p_{\text{g,C}}=p_{\text{g,A}}-p_{\text{g,B}}=190\text{kPa} \\ p_{\text{I}}=p_{\text{g,A}}+p_0=362.3\text{kPa} \\ p_{\text{II}}=p_{\text{g,C}}+p_0=192.3\text{kpa} \end{cases}$$

A、B、C 均是压力表，而非真空表。

【例 1.6】 平卧的圆柱形容器内盛有某种气体(如图 1-7)，其一端由一无摩擦的活塞密封，活塞后有弹簧使两侧保持力平衡。在容器另一端缓慢加热，使容器内气体压力由 $p_1=0.1013\text{MPa}$ 慢慢升高到 $p_2=0.3039\text{MPa}$。已知：弹簧的弹性模数 $\text{K}=1\times10^5\text{N/m}$，弹簧遵循虎克定律；活塞的截面积 $A=0.1\text{m}^2$；当地大气压力为 $p_\text{b}=0.1013\text{MPa}$。求过程中气体所作的功。

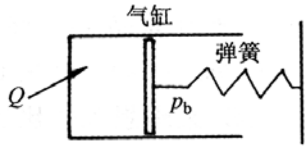


图 1-7

【解】

弹簧的弹力与位移满足虎克定律：

$$F=\text{K}x+c$$

其中 x 是弹簧的位移。若将坐标建立在活塞上并指向弹簧压缩方向，则

$$p=p_\text{b}+F/A$$

在 x＝0 处，$p=p_1=p_\text{b}$，故 F＝0，所以 c=0，即

$$F=\text{K}x$$

力平衡为

$$p_2=p_\text{b}+F/A=p_\text{b}+\text{K}x_2/A$$

故

$$x_2=(p_2-p_\text{b})A/\text{K}=(0.3039-0.1013)\times10^6/(1\times10^5)=0.2026\text{m}$$

气体所作的功为

$$\begin{aligned} W &= W_{大气}+W_{弹簧} \\ &= p_\text{b}\Delta V+\int_{1-2}\text{K}x\,dx \\ &= 0.1013\times10^6\times0.1\times0.2026+\int_{0-x_2}1\times10^5\times x\,dx=4105\text{J} \end{aligned}$$

【例 1.7】 定义一种新的线性温度标尺——牛顿温标(单位为牛顿度，符号为 $^\circ\text{N}$)，水的冰点和汽点分别为 100°N 和 200°N。

(1) 试导出牛顿温标 T_N 与热力学温标 T 的关系式；

(2) 热力学温度为 0K 时，牛顿温度为多少？

【解】

(1) 若任意温度在牛顿温标下的读数为 T_N，而热力学温标上的读数为 T，则：

$$\frac{200-100}{373.15-273.15}=\frac{T_N/^\circ N-100}{T/K-273.15}$$

即

$$T/K=\frac{373.15-273.15}{200-100}(T_N/^\circ N-100)+273.15$$

故

$$T/K=T_N/^\circ N+173.15$$

此即牛顿温标 T_N 与热力学温标 T 的关系式。

(2) 当 T＝0K 时，由上面所得的关系式有：

$$T_N=-173.15^\circ N$$

【例 1.8】 铂金丝的电阻在冰点时为 10.000Ω，在水的沸点时为 14.247Ω，在硫的沸点(446℃)时为 27.887Ω。试求温度 t/℃与电阻 R/Ω 的关系式 $R=R_0\left(1+At+Bt^2\right)$ 中的常数 A、B 的数值。

【解】

由已知条件可得：

$$\begin{cases} 10=R_0 \\ 14.247=R_0(1+100A+10^4B) \\ 27.887=R_0(1+446A+1.989\times10^5B) \end{cases}$$

联立求解，可得：

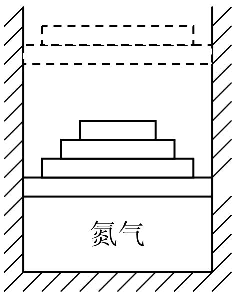
$$R_0=10\Omega$$
$$A=4.32\times10^{-3}\ 1/℃$$
$$B=-6.83\times10^{-7}\ 1/℃$$

故温度 t/℃与电阻 R/Ω 的关系式为：

$$R=10\times\left(1+4.32\times10^{-3}t-6.83\times10^{-7}\times t^2\right)$$

2 典型题解

【例 2.1】有一直立放置的气缸，在活塞和重物的重量作用下，气缸中氮气的压力为 0.5MPa，温度为 50℃，容积为 $0.1m^3$。现突然从活塞上拿去一块重物，使活塞对气体的作用力降为 0.2MPa，气体发生膨胀推动活塞上升。设比热容为定值，膨胀过程中气体和外界的热交换可以忽略不计，试求当活塞和气体重新达到力平衡时气体的温度及气体所作的膨胀功。氮气的气体常数为 296.8J/(kg·K)，热容比为 1.4。



例 2.1 图

【解】

以气缸中氮气为研究对象，其状态方程为

$$pv = R_g T$$

对于绝热膨胀过程，其状态参数满足以下方程：

$$pv^{\gamma_0} = c$$

综合以上两式可得

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma_0 - 1}{\gamma_0}}$$

于是

$$T_2 = T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma_0 - 1}{\gamma_0}} = (273+50)\times\left(\frac{0.2}{0.5}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 248.6(\mathrm{K})$$

在这一膨胀过程中，容积变为

$$V_2 = V_1\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{1/\gamma_0} = 0.1\times\left(\frac{0.5}{0.2}\right)^{1/1.4} = 0.1924$$

氮气所作的膨胀功为

$$W = \int_1^2 pdV = \int_1^2 \frac{c}{v^{\gamma_0}}dV = c\left.\frac{v^{1-\gamma_0}}{1-\gamma_0}\right|_1^2 = \frac{p_2v_2 - p_1v_1}{1-\gamma_0}$$

$$= \frac{0.2\times 0.1924 - 0.1\times 0.5}{1-1.4}\times 10^6 = 2.88\times 10^4\,(\mathrm{J})$$

【例 2.2】一个装有 2kg 工质的闭口系统经历了如下过程：系统向外界传热 25kJ，外界对系统作功 100kJ，比内能减少了 15kJ/kg，并且在过程中整个系统被举高了 1000m。试确定过程中系统动能的变化。

【解】

闭口系统的能量方程为

$$\Delta U + \Delta E_K + \Delta E_P = Q - W$$

其中

$$\Delta E_K = \tfrac{1}{2}m\left(V_2^2 - V_1^2\right),\quad \Delta E_P = mg(z_2 - z_1)$$

于是

$$\begin{aligned}\Delta E_K &= Q - W - \Delta U - mg(z_2 - z_1)\\ &= (-25\times 1000) - (-100\times 1000) - 2\times 9.8\times 1000\\ &= 85.4\times 10^3(\mathrm{J})\\ &= 85.4(\mathrm{kJ})\end{aligned}$$

【例 2.3】 一活塞气缸装置中的气体经历了 2 个过程，从状态 1 到状态 2，气体吸热 $500\mathrm{kJ}$，活塞对外作功 $800\mathrm{kJ}$。从状态 2 到状态 3 是一个定压压缩过程，压力为 $p = 400\mathrm{kPa}$，气体向外散热 $450\mathrm{kJ}$。并且已知 $U_1 = 2000\mathrm{kJ}$，$U_3 = 3500\mathrm{kJ}$，试求过程 $2\to 3$ 中气体体积的变化。

【解】

以活塞气缸中气体为研究对象，其过程 $1\to 2$ 的能量方程为

$$\Delta U_{12} = U_2 - U_1 = Q_{12} - W_{12}$$

于是

$$U_2 = Q_{12} - W_{12} + U_1 = 500 - 800 + 2000 = 1700(\mathrm{kJ})$$

对于过程 $2\to 3$ 有

$$W_{23}=Q_{23}-\Delta U_{23}=Q_{23}-(U_3-U_2)=(-450)-(3500-1700)=-2250(\mathrm{kJ})$$

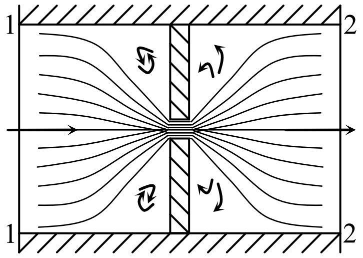
另外，由于过程$2\rightarrow3$是一定压压缩过程，其膨胀功计算式可表示为

$$W_{23}=\int_2^3 pdV=p_3\Delta V_{23}$$

所以过程$2\rightarrow3$中气体体积变化为

$$\Delta V_{23}=\frac{W_{23}}{p_3}=\frac{-2250\times10^3}{400\times10^3}=-5.625(\mathrm{m}^3)$$

【例 2.4】 试证明绝热节流过程中，节流前后工质的焓值不变。



例 2.4 图

【解】

例 2.4 图表示孔板节流装置工作在稳定工况。工质流经孔板时，由于截面突然缩小，流动受阻，产生扰动、涡流等流阻损失，使压力下降，这种现象称为节流。显然孔板附近是非平衡状态，因此在远离孔板一定距离处，取截面 1 及 2 为边界，并以这两个截面之间的管道工质为研究对象。这是一个典型的开口系，其能量方程为

$$\frac{dE}{d\tau}=\dot{Q}-\dot{W}_{\mathrm{sh}}+\left(h_1+\frac{c_1^2}{2}+gz_1\right)\dot{m}_1-\left(h_2+\frac{c_2^2}{2}+gz_2\right)\dot{m}_2$$

按题意可以对普遍表达式加以简化：

节流装置工作在稳定工况，$dE/d\tau=0$；

绝热节流过程，$\dot{Q}=0$；

开口系与外界无轴功交换，$\dot{W}_{\mathrm{sh}}=0$；

宏观动能和重力位能的变化忽略不计，$\Delta E_K=0$，$\Delta E_P=0$。

把上述关系代入普遍表达式，可得

$$\dot{m}_1h_1=\dot{m}_2h_2$$

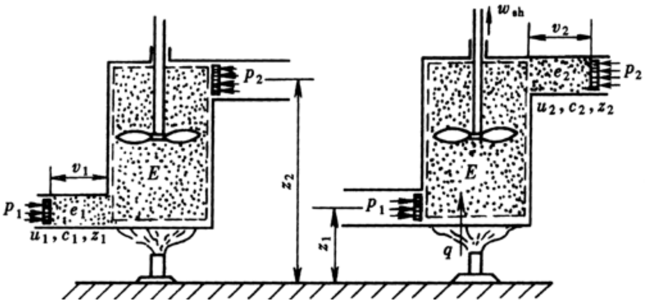
根据质量方程，有

$$\frac{dm}{d\tau}=\dot{m}_1-\dot{m}_2=0$$

代入能量方程，可得

$$h_1=h_2$$

【例 2.5】 针对只有一个进、出口的稳定开口系，表述其轴功与技术功之间的关系。



例 2.5 图

【解】

以例 2.5 图中入口、开口和开口系组成的闭口系为研究对象，其能量方程为

$$q = \Delta u + w = \Delta u + \int_1^2 pdv = \Delta(u + pv) - \int_1^2 vdp = \Delta h + w_t \tag{a}$$

以例 2.5 图中虚线包围的开口系为研究对象，其稳定工况的能量和质量方程分别为

$$\dot{Q} - \dot{W}_{sh} + \left(h_1 + \frac{c_1^2}{2} + gz_1\right)\dot{m}_1 - \left(h_2 + \frac{c_2^2}{2} + gz_2\right)\dot{m}_2 = 0 \tag{b}$$

$$\dot{m}_1 - \dot{m}_2 = 0 \tag{c}$$

由式（b）和式（c）可得

$$\frac{\dot{Q}}{\dot{m}} - \frac{\dot{W}_{sh}}{\dot{m}} + \left(h_1 + \frac{c_1^2}{2} + gz_1\right) - \left(h_2 + \frac{c_2^2}{2} + gz_2\right) = 0$$

即

$$q - w_{sh} + \left(h_1 + \frac{c_1^2}{2} + gz_1\right) - \left(h_2 + \frac{c_2^2}{2} + gz_2\right) = 0$$

上式可变为

$$q = \Delta h + \left[w_{sh} + \frac{1}{2}\left(c_2^2 - c_1^2\right) + g\left(z_2 - z_1\right)\right] \tag{d}$$

忽略闭口系入口和出口处的热交换，则由式（a）和式（d）进行比较可得

$$w_t = w_{sh} + \frac{1}{2}\left(c_2^2 - c_1^2\right) + g\left(z_2 - z_1\right)$$

【例 2.6】压气机在 95kPa、$25°\text{C}$ 的状态下稳定地以 $340\text{m}^3/\text{min}$ 的容积流率吸入空气，进口处的空气流速可以忽略不计；压气机排口处的截面积为 0.025m^2，排出的压缩空气的参数为 200kPa、$120°\text{C}$。压气机的散热量为 60kJ/min。已知空气的气体常数 $R_g = 0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，比定容热容 $c_V = 0.717\ \ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，求压气机所消耗的功率。

【解】

以压气机中空气为研究对象，其稳定工况的能量方程为

$$\dot{Q} - \dot{W}_{sh} + \left(h_1 + \frac{c_1^2}{2} + gz_1\right)\dot{m} - \left(h_2 + \frac{c_2^2}{2} + gz_2\right)\dot{m} = 0$$

即

$$\dot{W}_{sh} = \dot{Q} + \left(h_1 + \frac{c_1^2}{2} + gz_1\right)\dot{m} - \left(h_2 + \frac{c_2^2}{2} + gz_2\right)\dot{m} \tag{a}$$

其中

$$\dot{Q} = -\frac{60\times10^3}{60} = -1000\,(\text{J/s}),$$

$$\dot{m} = \rho\dot{V} = \frac{p_1\dot{V}}{R_g T_1} = \frac{95\times10^3}{287\times(273+25)}\times\frac{340}{60} = 6.2944\,(\text{kg/s}),$$

$c_1 \approx 0\,\text{m/s}$，

$\Delta z = 0\,\text{m}$，

$$c_2 = \frac{\dot{m}}{\rho_2 A_2} = \frac{\dot{m}R_g T_2}{p_2 A_2} = \frac{6.2944\times287\times(273+120)}{200\times10^3\times0.025} = 141.99\,(\text{m/s}),$$

$$\Delta h = h_2 - h_1 = c_p\Delta T = (287+717)\times(120-25) = 95380.0\,(\text{J/kg})。$$

将以上数据代入式（a），可得压气机所消耗的功率：

$$\dot{W}_{\mathrm{sh}} = -1000 + 6.2944 \times \left(-95380.0 - \frac{141.99^2}{2} \right) = -6.648 \times 10^5 \ (\mathrm{J/s})$$

【例 2.7】现有两股温度不同的空气，稳定地流过如例 2.7 图所示的设备进行绝热混合，以形成第三股所需温度的空气流。各股空气的已知参数如例 2.7 图中所示。设空气可按理想气体计算，其焓仅是温度的函数，按 $\{h\}_{\mathrm{kJ/kg}} = 1.004\{T\}_{\mathrm{K}}$ 计算，空气的状态方程为 $pv = R_{\mathrm{g}}T$，$R_{\mathrm{g}} = 287\mathrm{J/(kg \cdot K)}$。假设在能量方程中不计动能和重力势能的影响，试求出口截面的空气温度和空气流速。

【解】

选取整个混合室为热力系统，显然这是一个稳定流动的开口系，其能量方程为

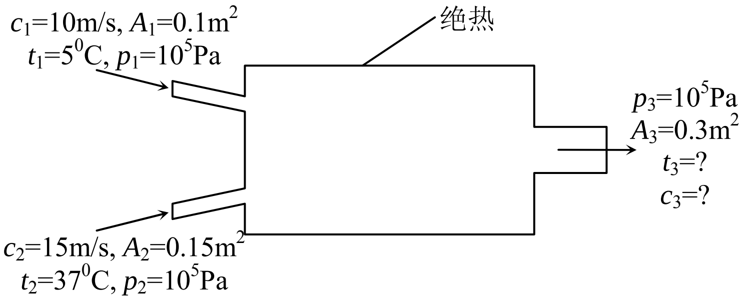
$$\frac{dE}{d\tau} = \dot{Q} - \dot{W}_{\mathrm{sh}} + \sum_i \dot{m}_i \left(h_i + \frac{c_i^2}{2} + gz_i \right) - \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{c_e^2}{2} + gz_e \right)$$

针对此题，$\dfrac{dE}{d\tau}=0$，$\dot{Q}=\dot{W}_{\mathrm{sh}}=0$，忽略宏观动能和重力位能的影响，于是

$$0 = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_3 h_3$$

即

$$\dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 \qquad \text{（a）}$$



例 2.7 图

又

$$\dot{m}_1 = \frac{A_1 c_1}{v_1} = \frac{A_1 c_1 p_1}{R_{\mathrm{g}} T_1} = \frac{0.1 \times 10 \times 10^5}{287 \times (273+5)} = 1.25 (\mathrm{kg/s})$$

$$\dot{m}_2 = \frac{A_2 c_2}{v_2} = \frac{A_2 c_2 p_2}{R_{\mathrm{g}} T_2} = \frac{0.15 \times 15 \times 10^5}{287 \times (273+37)} = 2.53 (\mathrm{kg/s})$$

由质量方程可得

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 = 1.25 + 2.53 = 3.78 (\mathrm{kg/s})$$

将以上数据代入式（a）可得

$$3.78 \times 1.004 \times T_3 = 1.25 \times 1.004 \times 278 + 2.53 \times 1.004 \times 310$$

解得

$$T_3 = 299.4\mathrm{K} = 26.4℃$$

出口截面流速为

$$c_3 = \frac{R_{\mathrm{g}} T_3 \dot{m}_3}{A_3 p_3} = \frac{287 \times 299.4 \times 3.78}{0.3 \times 10^5} = 10.8 (\mathrm{m/s})$$

【例 2.8】 由稳定气源（T_i, p_i）向体积为 V 的刚性真空容器绝热充气，直到容器内压力达到

$p_i/2$ 时关闭阀门。若已知该气体的比热力学能及比焓与温度的关系分别为：$u=c_V T$，$h=c_p T$，$\gamma=c_p/c_V$，气体状态方程为 $pv=R_g T$，试计算充气终了时，容器内气体的温度 T_2 及充入气体的质量 m_2。

【解】

以刚性容器中气体为研究对象，其能量方程的一般表达式为

$$\frac{dE}{d\tau}=\dot{Q}-\dot{W}_{\text{sh}}+\left(h_i+\frac{c_i^2}{2}+gz_i\right)\dot{m}_i-\left(h_e+\frac{c_e^2}{2}+gz_e\right)\dot{m}_e$$

根据题意对一般表达式进行简化：

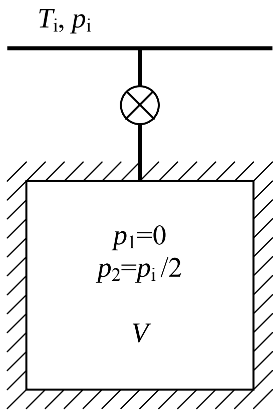
刚性容器是静止不动的，$E=U=mu$；

绝热充气，$\dot{Q}=0$；

无轴功交换，$\dot{W}_{\text{sh}}=0$；

只有充气，没有放气，并忽略宏观动能和重力位能的变化，于是

$$\left(h_i+\frac{c_i^2}{2}+gz_i\right)\dot{m}_i-\left(h_e+\frac{c_e^2}{2}+gz_e\right)\dot{m}_e=\dot{m}_i h_i$$



例 2.8 图

把这些关系式代入一般表达式，可得

$$\frac{d(mu)}{d\tau}=\dot{m}_i h_i$$

即

$$d(mu)=\dot{m}_i h_i d\tau$$

对上式积分

$$\Delta(mu)=\int_1^2 \dot{m}_i h_i d\tau=m_i h_i \tag{a}$$

由于刚性容器的初始状态为真空，于是

$$\Delta(mu)=m_2 u_2-m_1 u_1=m_2 u_2 \tag{b}$$

根据质量方程

$$\frac{dm}{d\tau}=\dot{m}_i-\dot{m}_e=\dot{m}_i$$

积分后得

$$\Delta m=m_2-0=m_i \tag{c}$$

由式（a）、式（b）和式（c）推出

$$u_2=h_i，\ c_V T_2=c_p T_i，\ T_2=\frac{c_p}{c_V}T_i=\gamma T_i$$

再根据气体状态方程，有

$$m_2 = \frac{p_2 V}{R_g T_2} = \frac{p_i V}{2R_g T_2}$$

【例 2.9】已知空气的初态为 $p_1 = 6\mathrm{bar}$、$v_1 = 0.236\mathrm{m^3/kg}$，经历一个 $n = 1.3$ 的多变过程后状态变为 $p_2 = 1.2\mathrm{bar}$。求在这一过程中每千克气体的作功量、吸收的热量以及热力学能的变化量。设 $c_p = 1.01\mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$，$R_g = 287\mathrm{J/(kg \cdot K)}$。

【解】

以空气为研究对象，其单位质量的作功量为

$$w = \int_1^2 p dv = \int_1^2 \frac{c}{v^n} dv = c\left.\frac{v^{1-n}}{1-n}\right|_1^2 = \frac{p_2 v_2 - p_1 v_1}{1-n} = \frac{1}{1-n}\left[p_2\left(\frac{p_1 v_1^n}{p_2}\right)^{1/n} - p_1 v_1\right]$$

$$= \frac{1}{1-1.3}\left[1.2\times\left(\frac{6\times 0.236^{1.3}}{1.2}\right)^{1/1.3} - 6\times 0.236\right]\times 10^5 = 1.464\times 10^5\,(\mathrm{J})$$

比热力学能的变化量为

$$\Delta u = c_V\left(T_2 - T_1\right) = c_V\left(\frac{p_2 v_2}{R_g} - \frac{p_1 v_1}{R_g}\right) = \frac{c_V}{R_g}\left[p_2\left(\frac{p_1 v_1^n}{p_2}\right)^{1/n} - p_1 v_1\right]$$

$$= \frac{1010-287}{287}\left[1.2\times\left(\frac{6\times 0.236^{1.3}}{1.2}\right)^{1/1.3} - 6\times 0.236\right]\times 10^5 = -1.107\times 10^5\,(\mathrm{J})$$

故单位质量空气吸收的热量为

$$q = \Delta u + w = \left(-1.107\times 10^5\right) + 1.464\times 10^5 = 3.57\times 10^4\,(\mathrm{J})$$

【例 2.10】蒸汽锅炉每小时产生 $p_2 = 20\mathrm{bar}$，$t_2 = 350°\mathrm{C}$，的蒸汽 10 吨，设锅炉给水温度 $t_1 = 40°\mathrm{C}$，锅炉热效率 $\eta_k = 0.76$，煤的发热值为 $Q_L = 29700\mathrm{kJ/kg}$，求锅炉的耗煤量。

已知：在 $p_1 = 20\mathrm{bar}$、$t_1 = 40°\mathrm{C}$ 时，$h_1 = 169.2\mathrm{kJ/kg}$；在 $p_2 = 20\mathrm{bar}$、$t_2 = 350°\mathrm{C}$ 时，$h_2 = 3137.2\mathrm{kJ/kg}$。

【解】

以锅炉中蒸汽为研究对象，其能量方程为

$$\dot{Q} - \dot{W}_{sh} + \left(h_1 + \frac{c_1^2}{2} + gz_1\right)\dot{m} - \left(h_2 + \frac{c_2^2}{2} + gz_2\right)\dot{m} = 0$$

根据题意可得

$$\dot{W}_{sh} = 0$$

$$\Delta c^2/2 = 0$$

$$g\Delta z = 0$$

$$\dot{m} = 10\times 10^3/3600 = 2.778\,(\mathrm{kg/s})$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_L Q_L \eta_k$$

所以锅炉耗煤量为

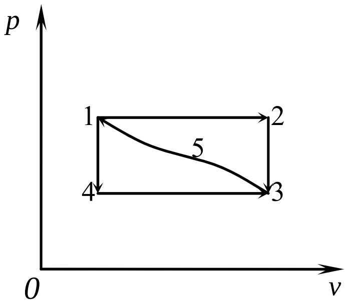
$$\dot{m}_L = \frac{\dot{m}\left(h_2 - h_1\right)}{Q_L \eta_k} = \frac{2.778\times\left(3137.2 - 169.2\right)}{29700\times 0.76} = 0.365\,(\mathrm{kg/s})$$

【例 2.11】一个闭口系从状态 1 沿 123 途径到状态 3，向外界放出热量为 47.5kJ，而系统对外作功为 30kJ，如例 2.11 图所示。

（1）若沿 143 途径变化时，系统对外作功为 15kJ，求过程中系统与外界交换的热量；

（2）若系统由状态 3 沿 351 途径到达状态 1，外界对系统作功为 6kJ，求该过程系统与外界的传热量；

（3）若$U_2 = 175\text{kJ}$，$U_3 = 87.5\text{kJ}$，求过程$2 \to 3$传递的热量及状态 1 的热力学能U_1。



例 2.11 图

【解】

（1）对于过程 123，热力学能的变化量为

$$\Delta U_{13} = Q_{123} - W_{123} = (-47.5) - 30 = -77.5(\text{kJ})$$

对于过程 143，系统与外界交换的热量为

$$Q_{143} = \Delta U_{13} + W_{143} = -77.5 + 15 = -62.5(\text{kJ})$$

（2）对于过程 352，系统与外界的传热量为

$$Q_{351} = \Delta U_{31} + W_{351} = 77.5 + (-6) = 71.5(\text{kJ})$$

（3）对于过程$2 \to 3$，系统与外界交换的功量为 0，所以系统与外界交换的热量为

$$Q_{23} = \Delta U_{23} + W_{23} = (87.5 - 175) + 0 = -87.5(\text{kJ})$$

状态 1 的热力学能为

$$U_1 = \Delta U_{31} + U_3 = 77.5 + 87.5 = 165.0(\text{kJ})$$

【例 2.12】已知在气缸内空气处于热平衡状态。气缸截面积$A = 100\text{cm}^2$，活塞距底面$L = 10\text{cm}$，活塞及其上负荷质量为 195kg，大气压力$p_B = 1.028 \times 10^5\text{Pa}$，环境温度$T_0 = 27°\text{C}$。若活塞除去负荷 100kg，使活塞上升，然后达到平衡。该过程无摩擦，且缸内空气可与外界充分换热。求活塞上升的高度ΔL，及气体的换热量 Q。

【解】

以气缸中空气为研究对象，其初始状态 1 为

$$p_1 = p_B + \frac{m_1 g}{A} = 1.028 \times 10^5 + \frac{195 \times 9.8}{100 \times 10^{-4}} = 2.939 \times 10^5\,(\text{Pa})$$

$$T_1 = 300\text{K}$$

终了状态 2 为

$$p_2 = p_B + \frac{m_2 g}{A} = 1.028 \times 10^5 + \frac{95 \times 9.8}{100 \times 10^{-4}} = 1.959 \times 10^5\,(\text{Pa})$$

$$T_2 = 300\text{K}$$

根据理想气体方程

$$pV = mRT$$

可得

$$\frac{AL_2}{AL_1} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1}{p_2}$$

即

$$L_2 - L_1 = L_1 \frac{p_1 - p_2}{p_2} = 0.1 \times \frac{2.939 - 1.959}{1.959} = 0.05(\text{m})$$

在这一过程中，以外界为研究对象，则外界对空气作功为

$$W' = -p_2 A\Delta L = -1.959\times10^5\times100\times10^{-4}\times0.05 = -97.95(\text{J})$$

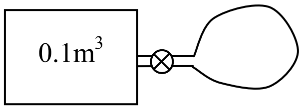
根据缸内空气的能量方程

$$\Delta U = U_2 - U_1 = Q - W = 0$$

所以

$$Q = W = -W' = 97.95\text{J}$$

【例 2.13】一刚性导热容器内贮有压缩空气0.1m^3，压力为0.4MPa，温度为$25°\text{C}$，又有一橡皮气球内贮有空气0.1m^3，压力为0.15MPa，温度也是$25°\text{C}$。现连通两者，使刚性容器中空气流入气球，直到两者内部压力相等。若橡皮球的压力正比于其容积，试求平衡后气球容积及其中空气的压力，已知环境大气温度为$25°\text{C}$，压力为0.1MPa。



例 2.13 图

【解】

以容器和橡皮球内空气为研究对象，其初始状态的空气质量分别为

$$m_{11} = \frac{p_{11}V_{11}}{RT_1},\quad m_{12} = \frac{p_{12}V_{12}}{RT_1} \qquad \text{(a)}$$

终了状态的空气质量分别为

$$m_{21} = \frac{p_2V_{11}}{RT_1},\quad m_{22} = \frac{p_2V_{22}}{RT_1} \qquad \text{(b)}$$

由式（a）和式（b）可得

$$\frac{p_{11}V_{11}}{RT_1} + \frac{p_{12}V_{12}}{RT_1} = \frac{p_2V_{11}}{RT_1} + \frac{p_2V_{22}}{RT_1}$$

即

$$0.4\times0.1 + 0.15\times0.1 = p_2\times0.1 + p_2V_{22}$$

此外，橡皮球的压力与其容积的成正比，于是

$$\frac{p_2}{V_{22}} = \frac{p_{12}}{V_{12}} = \frac{0.15}{0.1}$$

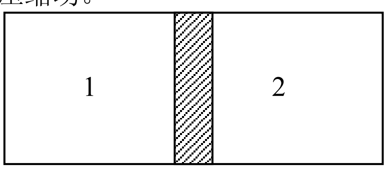
解方程组可得

$$p_2 = 0.222\text{MPa}$$
$$V_{22} = 0.148\text{m}^3$$

【例 2.14】一个绝热活塞，可在绝热气缸中无摩擦的自由运动，活塞两边装有理想气体，每边容积均为0.02m^3，温度为$25°\text{C}$，压力为1atm。今对气缸左侧加热，使活塞缓慢向右侧移动，直到它对活塞右侧的气体加到2atm，若气体绝热指数为$\gamma = 1.4$。试求：

（1）压缩后右侧气体的终温和终容积。

（2）对气缸右侧气体所作的压缩功。



例 2.14 图

【解】

（1）以气缸右侧气体为研究对象，其过程方程为

$$p_{21}V_{21}^{\gamma} = p_{22}V_{22}^{\gamma}$$

$$\frac{T_{22}}{T_{21}} = \left(\frac{p_{22}}{p_{21}}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}$$

即

$$V_{22} = \left(\frac{p_{21}}{p_{22}}V_{21}^{\gamma}\right)^{\frac{1}{\gamma}} = \left(\frac{1}{2}\times 0.02^{1.4}\right)^{\frac{1}{\gamma}} = 0.0122\left(\mathrm{m}^3\right)$$

$$T_{22} = T_{21}\left(\frac{p_{22}}{p_{21}}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} = 298\times\left(\frac{2}{1}\right)^{(1.4-1)/1.4} = 363.27(\mathrm{K})$$

（2）气缸右侧气体与外界的功量交换为

$$W_2 = \int_1^2 pdV = \int_1^2 \frac{c}{V^{\gamma}}dV = c\left.\frac{V^{1-\gamma}}{1-\gamma}\right|_1^2 = \frac{p_{22}V_{22} - p_{21}V_{21}}{1-\gamma}$$

$$= \frac{2\times 1.01325\times 0.0122 - 1.01325\times 0.02}{1-1.4}\times 10^5 = -1114.6(\mathrm{J})$$

【例 2.15】某蒸汽动力锅炉以 30 吨/小时的蒸汽供入汽轮机，进口处蒸汽的焓 $h_1 = 3400\mathrm{kJ/kg}$，流速 $c_1 = 50\mathrm{m/s}$；汽轮机出口乏汽的焓 $h_2 = 2300\mathrm{kJ/kg}$，流速 $c_2 = 100\mathrm{m/s}$。汽轮机的出口位置比进口高 1.5m，汽轮机对环境的散热为 $5\times 10^5\,\mathrm{kJ/h}$。试求汽轮机的功率。

【解】

以汽轮机中蒸汽为研究对象，其稳定工况的能量方程为

$$\dot{Q} - \dot{W}_{\mathrm{sh}} + \left(h_1 + \frac{c_1^2}{2} + gz_1\right)\dot{m} - \left(h_2 + \frac{c_2^2}{2} + gz_2\right)\dot{m} = 0$$

于是汽轮机的功率为

$$\dot{W}_{\mathrm{sh}} = \dot{Q} + \left(h_1 + \frac{c_1^2}{2} + gz_1\right)\dot{m} - \left(h_2 + \frac{c_2^2}{2} + gz_2\right)\dot{m}$$

$$= \frac{-5\times 10^8}{3600} + \frac{30\times 1000}{3600}\left[(3400-2300)\times 1000 + \frac{1}{2}\left(50^2 - 100^2\right) + 9.8\times(-1.5)\right]$$

$$= 8.996\times 10^6\ (\mathrm{J/s})$$

【例 2.16】具有水套冷却的活塞式压气机，以 2kg/min 的速率将空气从压力 $p_1 = 1\times 10^5\,\mathrm{Pa}$、温度 $t_1 = 15°\mathrm{C}$ 升至压力 $p_2 = 10\times 10^5\,\mathrm{Pa}$、温度 $t_2 = 155°\mathrm{C}$。若压气机输入功率为 6kW，试计算每秒钟由水套中冷却水带走的热量。已知：空气的比定压热容 $c_p = 1.01\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$；压气机进出口气流的宏观动能和重力位能变化可忽略。

【解】

以压气机中空气为研究对象，其稳定工况的能量方程为

$$\dot{Q} - \dot{W}_{\mathrm{sh}} + \left(h_1 + \frac{c_1^2}{2} + gz_1\right)\dot{m} - \left(h_2 + \frac{c_2^2}{2} + gz_2\right)\dot{m} = 0$$

根据题意，有 $\Delta c^2/2 = 0$， $g\Delta z = 0$，于是能量方程可整理为

$$\dot{Q} = \dot{W}_{\mathrm{sh}} + \dot{m}(h_2 - h_1) = (-6000) + \frac{2}{60}\times 1010\times(428-288) = -1286.67\,(\mathrm{J/s})$$

所以每秒钟由水套中冷却水带走的热量为 1286.67J。

【例 2.17】一容积为 2m^3 的封闭容器内储有温度为 $20°\text{C}$、压力为 500kPa 的空气。若使压力提高至 1MPa。问需要将容器内空气加热到多高温度？容器内空气吸收的热量又是多少呢？已知：空气的比定压热容 $c_p = 1.01\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，热容比 $\gamma = 1.4$ 。

【解】

（1）对于定容过程，其过程方程为

$$\frac{T_2}{p_2} = \frac{T_1}{p_1}$$

即

$$T_2 = \frac{T_1}{p_1} p_2 = \frac{10}{5} \times 293 = 586\left(\text{K}\right)$$

（2）以容器内空气为研究对象，其能量方程为

$$\Delta U = Q - W = Q$$

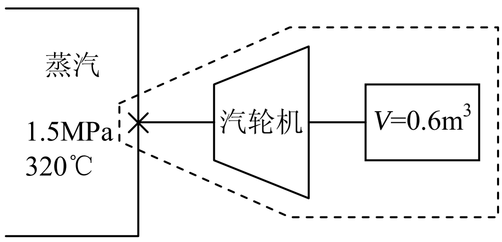
容器内空气吸收的热量为

$$Q = \Delta U = mc_V \Delta T = \frac{p_1 V_1}{R_\text{g} T_1} c_V \Delta T$$

$$= \frac{5\times10^5\times2}{\dfrac{1.4-1}{1.4}\times1010\times293} \times \frac{1010}{1.4} \times \left(586-293\right)$$

$$= 2.5\times10^6\left(\text{J}\right)$$

【例 2.18】 如例 2.18 图所示，一大的储气罐里储存有温度为 320℃、压力为 1.5MPa、比焓为 3081.9kJ/kg 的水蒸气，通过阀门与汽轮机和体积为 0.6m^3 的起初被抽真空的小容器相连。打开阀门，小容器被充以水蒸气，直到压力为 1.5MPa、温度为 400℃时关闭阀门，此时的比热力学能为 2951.3kJ/kg，比体积为 $0.203\text{m}^3/\text{kg}$。若整个过程是绝热的，且宏观动能和重力位能的变化可以忽略不计，求汽轮机输出的功。



例 2.18 图

【解】

以例 2.18 图中的虚线包围的空间为热力系。根据题意，假设大的储气罐内蒸汽的状态保持稳定，小容器内蒸汽的终态是平衡状态，且假设充气结束时，汽轮机及连接管道内的蒸汽量可以忽略。

质量方程和能量方程分别为

$$\frac{dm}{d\tau} = \dot{m}_i - 0$$

$$\frac{dE}{d\tau} = \dot{Q} - \dot{W}_\text{sh} + \left(h_i + \frac{c_i^2}{2} + gz_i\right)\dot{m}_i - 0$$

根据题意，对于绝热过程，$\dot{Q} = 0$；不计宏观动能和重力位能的变化，$E = U$，$c_i^2/2 = 0$，$gz_i = 0$，于是

$$\dot{W}_\text{sh} = \frac{dm}{d\tau} h_i - \frac{dU}{d\tau}$$

$$\dot{W}_\text{sh} d\tau = h_i dm - dU$$

两边积分可得

$$W_{\mathrm{sh}} = h_i \Delta m - \Delta U$$

此外

$$\Delta U = m_2 u_2 - m_1 u_1 = m_2 u_2$$

$$\Delta m = m_2 = \frac{V}{v_2}$$

最后可得

$$W_{\mathrm{sh}} = \frac{V}{v_2}\left(h_i - u_2\right) = \frac{0.6}{0.203} \times \left(3081.9 - 2951.3\right) = 386.6\left(\mathrm{kJ}\right)$$

3 典型题解

【例 3.1】已知理想气体可逆过程中膨胀功等于技术功，则此过程的特性为(　　　)。

A. 定压　　B. 定温　　C. 定容　　D. 绝热

【解】B

在无摩擦的情况下，理想气体定温过程的膨胀功、技术功分别计算如下：

$$w_T = \int_1^2 p dv = \int_1^2 \frac{R_{\mathrm{g}} T}{v} dv = R_{\mathrm{g}} T \ln \frac{v_2}{v_1}$$

$$w_{\mathrm{t},T} = -\int_1^2 v dp = -\int_1^2 \frac{R_{\mathrm{g}} T}{p} dp = R_{\mathrm{g}} T \ln \frac{p_1}{p_2}$$

由于定温过程中 $\frac{v_2}{v_1} = \frac{p_2}{p_1}$，因此有 $w_T = w_{\mathrm{t},T}$，也就是说，理想气体在定温过程中的技术功和膨胀功相等。

【例 3.2】某水平放置的绝热汽缸被一无摩阻的自由活塞分成容积相同的左右两部分。初始时左半部分装有 1kmol 压力为 200kPa、温度为 288K 的理想气体；右半部分为真空且活塞被锁住。已知气体比热 c_V=20.88kJ/(kmol.K)，c_p=29.20kJ/(kmol.K)。在下述过程中：

① 移去锁栓后，左半部分气体发生膨胀后将活塞推向右端；

② 在活塞杆上施加外力将活塞慢慢地推回原来的位置。

求：(1) 过程①之后，气体达到平衡时的温度是多少？

(2) 假定过程②是可逆的，其终态的压力和温度各是多少？外界对气体做功是多少？

(3) 过程①的熵变化量及全过程的总熵变化量各为多少？

【解】

分别设初始状态、移去锁栓后的状态和活塞慢慢地推回原来的位置的状态为“0、1、2”。

(1) 对于过程①，因为不对外作膨胀功，又是绝热的自由膨胀过程，故热力学能保持不变。因此，理想气体的温度也维持不变。

(2) 对于过程②，可以看成是绝热压缩过程，是个可逆过程。

先求比热比：$\gamma_0 = \frac{c_p}{c_V} = \frac{29.20}{20.88} = 1.4$

而 $T_1 V_1^{\gamma_0 - 1} = T_2 V_2^{\gamma_0 - 1}$，故

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma_0 - 1} = 288\left(\frac{2}{1}\right)^{1.4-1} = 380K$$

压力为

$$p_2 = p_1\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma_0} = 200\left(\frac{2}{1}\right)^{1.4} = 527.8kPa$$

外界对气体做功为

$$W = \frac{1}{\gamma-1}RT_1\left[1-\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma_0-1}\right] = \frac{1}{1.4-1}8.314\times288\left[1-\left(\frac{2}{1}\right)^{1.4-1}\right] = -1912.6\text{W}$$

其中负号表示是外界对系统做功。

(3) 对于过程①，它是无摩擦的绝热自由膨胀过程，其熵变为：

$$\Delta S_1 = R\ln\frac{V_1}{V_0} = 8.314\ln\frac{2}{1} = 5.76\frac{\text{J}}{\text{mol}\cdot\text{K}}$$

而过程②是无摩擦的绝热压缩过程，它是个定熵过程。所以全过程的总熵变为 5.76J/(mol.K)。

【例 3.3】热容比为 1.4 的某单一理想气体在定压下从 40℃加热到 750℃，并作了膨胀功 w=184.0kJ/kg。设气体的比热为定值，试确定该气体的

(1) 气体常数 R_g；

(2) 分子量；

(3) 热力学能的改变量；

(4) 吸热量；

(5) 熵的改变量。

【解】

在无摩擦的情况下，定压过程的膨胀功为

$$w_p = \int_1^2 pdv = p(v_2 - v_1) = R_g(T_2 - T_1)$$

故求得气体常数为

$$R_g = \frac{w_p}{T_2 - T_1} = \frac{184.0}{750-40} = 0.259\frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$$

该气体的分子量为

$$M = \frac{R}{R_g} = \frac{8.314}{0.259\times1000} = 0.321\frac{\text{kg}}{\text{mol}}$$

比定容热容为

$$c_{V0} = \frac{R_g}{\gamma_0 - 1} = \frac{0.259}{1.4-1} = 0.6475\frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$$

比定压热容为

$$c_{p0} = \gamma_0 c_{V0} = 1.4\times0.6475 = 0.9065\frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$$

热力学能的改变量为

$$\Delta u = c_{V0}(T_2 - T_1) = 0.6475\times710 = 459.725\,\text{kJ}/\text{kg}$$

吸热量为

$$q_p = h_2 - h_1 = c_{p0}(T_2 - T_1) = 0.9065\times710 = 643.615\,\text{kJ}/\text{kg}$$

熵的改变量为

$$\Delta s = c_{p0}\ln\frac{T_2}{T_1} = 0.9065\ln\frac{750+273.15}{40+273.15} = 1.073\frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$$

【例 3.4】空气的初参数为 p_1=0.5MPa 和 t_1=50℃，将此空气流经阀门发生绝热节流作用，并使空气容积增大到原来的两倍。求节流过程中空气的熵增，并求其最后的压力。若环境温度为 27℃，

空气经节流后做功能力减少了多少？

【解】

视空气为理想气体，则

$$v_1=\frac{R_{\mathrm{g}}T_1}{p_1}=\frac{287\times(50+273.15)}{0.5\times10^6}=0.1855\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{kg}}$$

绝热节流后焓不变，因而温度也不变。故节流过程的熵变和最后的压力为

$$\Delta S=c_V\ln\frac{T_2}{T_1}+R_{\mathrm{g}}\ln\frac{V_2}{V_1}=R_{\mathrm{g}}\ln\frac{V_2}{V_1}=287\ln2=198.9\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg.K}}$$

$$p_2=\frac{R_{\mathrm{g}}T_2}{v_2}=\frac{287\times(50+273.15)}{2\times0.1855}=0.25\mathrm{MPa}$$

因为是绝热的，㶲损就等于$T_0\Delta S_{\text{工质}}=300\times198.9=59.67\mathrm{kJ/kg}$。这就是做功能力的减少。

【例 3.5】刚性绝热容器被一隔板分为两部分，右侧的容积是左侧的 A 倍，左右两侧均含有 n 摩尔温度为 T 的理想气体。若：

(1) 两边气体种类相同

(2) 两边气体种类不同

试分别计算抽去隔板气体混合平衡后的熵增。

【解】

因为是绝热混合过程，那么混合后的热力学能将不发生变化。假设气体是定比热容的。那么：

$$mc_{V0}T_{\mathrm{h}}=m_{\mathrm{l}}c_{V0,\mathrm{l}}T_{\mathrm{l}}+m_{\mathrm{r}}c_{V0,\mathrm{r}}T_{\mathrm{r}}$$

(1) 两边气体种类是相同的，则有

$$2nMc_{V0}T_{\mathrm{h}}=nMc_{V0}T+nMc_{V0}T$$

即混合后温度不变化。那么熵增为

$$\Delta S=m_{\mathrm{l}}\left(c_{V0,\mathrm{l}}\ln\frac{T_{\mathrm{h}}}{T_{\mathrm{l}}}+R_{\mathrm{g,l}}\ln\frac{V}{V_{\mathrm{l}}}\right)+m_{\mathrm{r}}\left(c_{V0,\mathrm{r}}\ln\frac{T_{\mathrm{h}}}{T_{\mathrm{r}}}+R_{\mathrm{g,r}}\ln\frac{V}{V_{\mathrm{r}}}\right)$$

$$=nMR_{\mathrm{g}}\ln\frac{(1+A)V_0}{V_0}+nMR_{\mathrm{g}}\ln\frac{(1+A)V_0}{AV_0}=nR\ln\frac{(1+A)^2}{A}$$

(2) 两边气体种类是不同的，则有

$$(nM_{\mathrm{l}}+nM_{\mathrm{r}})c_{V0}T_{\mathrm{h}}=nM_{\mathrm{l}}c_{V0,\mathrm{l}}T+nM_{\mathrm{r}}c_{V0,\mathrm{r}}T$$

故

$$T_{\mathrm{h}}=\frac{M_{\mathrm{l}}c_{V0,\mathrm{l}}+M_{\mathrm{r}}c_{V0,\mathrm{r}}}{(M_{\mathrm{l}}+M_{\mathrm{r}})c_{V0}}T$$

那么混合后的熵增为

$$\Delta S=m_{\mathrm{l}}\left(c_{V0,\mathrm{l}}\ln\frac{T_{\mathrm{h}}}{T_{\mathrm{l}}}+R_{\mathrm{g,l}}\ln\frac{V}{V_{\mathrm{l}}}\right)+m_{\mathrm{r}}\left(c_{V0,\mathrm{r}}\ln\frac{T_{\mathrm{h}}}{T_{\mathrm{r}}}+R_{\mathrm{g,r}}\ln\frac{V}{V_{\mathrm{r}}}\right)$$

$$=n\left(M_{\mathrm{l}}c_{V0,\mathrm{l}}+M_{\mathrm{r}}c_{V0,\mathrm{r}}\right)\ln\frac{M_{\mathrm{l}}c_{V0,\mathrm{l}}+M_{\mathrm{r}}c_{V0,\mathrm{r}}}{(M_{\mathrm{l}}+M_{\mathrm{r}})c_{V0}}+nR\ln\frac{(1+A)^2}{A}$$

【例 3.6】氧气瓶容量为 $0.04\mathrm{m}^3$，内盛有 $p_1=147.1\times10^5\mathrm{Pa}$ 的氧气，其温度和室温相等，$t_1=t_0=20$ ℃。试确定：

(A) 当开启阀门使压力迅速下降到 $p_2=73.55\times10^5\mathrm{Pa}$ 时

(1) 瓶内氧气的温度 t_2 和所放出氧气的质量。

(2) 放气完了关闭阀门后，瓶内压力和温度的变化过程和最终达到的数值以及此过程中瓶内氧气与其周围环境间的换热量。

(B) 极为缓慢地放气至 p_2=73.55×10^5Pa，使瓶内气体始终保持在 20℃

(3) 所放出氧气的质量和瓶内氧气与其周围环境间的换热量。

已知氧气的 γ_0=1.4，c_p=0.915kJ/(kg.K)，R_g=0.287kJ/(kg.K)。

【解】

(A) 开启阀门使压力迅速下降的过程可以看成是绝热放气过程。

$$t_2 = t_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma_0-1}{\gamma_0}} = 293.15\left(\frac{73.55}{147.1}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 240.48\text{K} = \text{-32.67℃}$$

容器中剩余的气体质量为：

$$m_2 = \frac{p_2V}{R_gT_2} = \frac{p_2V}{R_gT_1}\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\gamma_0-1}{\gamma_0}} = \frac{p_1V}{R_gT_1}\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{\gamma_0}}$$

故放出的气体的质量为：

$$-\Delta m = m_1 - m_2 = \frac{p_1V}{R_gT_1}\left[1-\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{\gamma_0}}\right]$$

$$= \frac{147.1\times10^5\times0.04}{0.287\times10^3\times293.15}\left[1-\left(\frac{73.55}{147.1}\right)^{\frac{1}{1.4}}\right] = 2.73\text{kg}$$

此过程中瓶内氧气与其周围环境间的换热量为零。

(B) 该过程可以看成是等温放气过程：

$$Q = m_2u_2 - m_1u_1 - \int_{m_1}^{m_2} h dm = (m_2 - m_1)c_{V0}T_1 - c_{p0}T_1(m_2 - m_1)$$

$$= (m_2 - m_1)(c_{V0} - c_{p0})T_1 = R_gT_1(m_1 - m_2)$$

$$= R_gT_1\left(\frac{p_1V}{R_gT_1} - \frac{p_2V}{R_gT_1}\right)$$

$$= (p_1 - p_2)V = (147.1 - 73.55)\times10^5\times0.04 = 294.2\text{kJ}$$

放出去的气体的质量仍然是 2.73kg。

【例 3.7】温度为 298K，压力为 1bar 的 1kg 氢与同温同压下的 1kg 氮在一绝热容器中由一隔板分开。试确定当抽掉隔板后两气体混合后的温度、压力及混合前后熵的变化量。已知：氢的分子量和比热容：$M_{H_2} = 2\text{kg/kmol}$，$c_{VH_2} = 10.2\text{kJ/(kg.K)}$；氮的分子量和比热容：$M_{N_2}$=28kg/kmol，$c_{VN_2} = 0.74\text{kJ/(kg.K)}$。

【解】

因为是绝热过程，混合前后热力学能不发生变化，由此得：

$$T = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i c_{V0,i} T_i}{\sum_{i=1}^{n} m_i c_{V0,i}} = T_0 = 298\text{K}$$

因为两边压力是相等的，所以混合后的压力也不改变。

混合前气体体积为：

$$V_{H_2}=\frac{m_{H_2}R_gT_{H_2}}{p_{H_2}}=\frac{m_{H_2}RT_{H_2}}{p_{H_2}M_{H_2}}$$

$$V_{N_2}=\frac{m_{N_2}RT_{N_2}}{p_{N_2}M_{N_2}}$$

混合后气体体积为：

$$V=\frac{m_{H_2}RT_{H_2}}{p_{H_2}M_{H_2}}+\frac{m_{N_2}RT_{N_2}}{p_{N_2}M_{N_2}}$$

熵的变化量为：

$$\Delta S=m_{H_2}\left(c_{V0,H_2}\ln\frac{T_{H_2}}{T_{H_2,0}}+R_{g,H_2}\ln\frac{V}{V_{H_2}}\right)+m_{N_2}\left(c_{V0,N_2}\ln\frac{T_{N_2}}{T_{N_2,0}}+R_{g,N_2}\ln\frac{V}{V_{N_2}}\right)$$

$$=\frac{R}{M_{H_2}}\ln\frac{V_{H_2}+V_{N_2}}{V_{H_2}}+\frac{R}{M_{N_2}}\ln\frac{V_{H_2}+V_{N_2}}{V_{N_2}}$$

代入体积，得：

$$\Delta S=\frac{R}{M_{H_2}}\ln\frac{\frac{1}{M_{H_2}}+\frac{1}{M_{N_2}}}{\frac{1}{M_{H_2}}}+\frac{R}{M_{N_2}}\ln\frac{\frac{1}{M_{H_2}}+\frac{1}{M_{N_2}}}{\frac{1}{M_{N_2}}}$$

$$=\frac{R}{M_{H_2}}\ln\left(1+\frac{M_{H_2}}{M_{N_2}}\right)+\frac{R}{M_{N_2}}\ln\left(1+\frac{M_{N_2}}{M_{H_2}}\right)$$

$$=\frac{8.314}{2}\ln\left(1+\frac{2}{28}\right)+\frac{8.314}{28}\ln\left(1+\frac{28}{2}\right)$$

$$=1.09\frac{\text{kJ}}{\text{K}}$$

【例 3.8】容积为 V 的真空罐，出现微小漏气。设漏气前罐内压力 p 为零。漏入空气的质量流率与 p_0-p 成正比，比例系数为 a。p_0 为大气压力。漏气过程缓慢，故罐内温度与外界温度 T_0 相同。求：罐内压力 p 的表达式。

【解】

缓慢的漏气过程，任意时刻 τ 时罐内的空气质量为

$$m=a(p_0-p)\tau$$

罐内空气的状态方程为

$$pV=mR_gT=a(p_0-p)\tau R_gT_0$$

故罐内压力为

$$p=\frac{p_0}{1+\frac{V}{aR_gT_0\tau}}$$

【例 3.9】 某理想气体的体积按 $\frac{a}{\sqrt{p}}$ 的规律膨胀，其中 a 是常数，p 代表压力。问：

(1) 气体膨胀时温度升高还是降低？

(2) 此过程气体的比热容是多少？

【解】

(1) 因为$V=\dfrac{a}{\sqrt{p}}$，而状态方程为

$$pV=mR_{\rm g}T$$

所以

$$a\sqrt{p}=mR_{\rm g}T$$

当体积膨胀时，则压力降低，由上式可看到温度也随之下降。

(2) 因为$V=\dfrac{a}{\sqrt{p}}$，故过程方程为

$$pV^2=a^2=\text{const.}$$

这是一个多变过程，多变指数为

$$n=2$$

故比热容为

$$c_n=\frac{n-\gamma_0}{n-1}c_V=\left(2-\gamma_0\right)c_V$$

又由状态方程得

$$R_{\rm g}=\frac{pV}{mT}=\frac{a\sqrt{p}}{mT}$$

故

$$c_V=\frac{1}{\gamma_0-1}R_{\rm g}=\frac{a\sqrt{p}}{(\gamma_0-1)mT}$$

得

$$c_n=\left(2-\gamma_0\right)c_V=\frac{\left(2-\gamma_0\right)}{(\gamma_0-1)}\frac{a\sqrt{p}}{mT}$$

【例 3.10】 如图 3-13 所示，两端封闭而且具有绝热壁的汽缸，被可移动的、无摩擦的、绝热的活塞分为体积相同的 A、B 两部分，其中各装有同种理想气体 1kg。开始时活塞两边的压力、温度都相同，分别为 0.2MPa、20℃。现通过 A 腔气体内的一个加热线圈，对 A 腔内气体缓慢加热，则活塞向右缓慢移动，直至$p_{\rm A2}=p_{\rm B2}$=0.4MPa 时，试求：

(1) A、B 腔内气体的终态容积各是多少？
(2) A、B 腔内气体的终态温度各是多少？
(3) 过程中供给 A 腔气体的热量是多少？
(4) A、B 腔内气体的熵变各是多少？
(5) 整个气体组成的系统熵变是多少？
(6) 在 *p-V* 图、*T-S* 图上，表示出 A、B 腔气体经过的过程。

设气体的比热容为定值，$c_p=1.01\text{kJ/(kg.K)}$，$c_V=0.72\text{kJ/(kg.K)}$

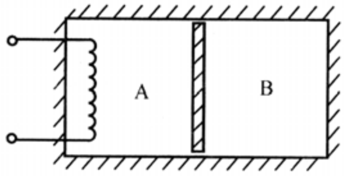


图 3-13

【解】

先计算工质的物性参数：

$$R_{\rm g}=c_p-c_V=1.01-0.72=0.29\text{kJ/(kg.K)}$$

$$\gamma_0 = \frac{c_p}{c_V} = \frac{1.01}{0.72} = 1.4$$

(1) 因为 B 腔内气体进行的是缓慢的无摩擦的绝热过程，故是定熵过程。而 A 腔中气体经历的是一般的吸热膨胀多变过程。

$$V_{\mathrm{B1}} = \frac{m_{\mathrm{B}} R_{\mathrm{g}} T_{\mathrm{B1}}}{p_{\mathrm{B1}}} = \frac{1\times 290\times 293}{0.2\times 10^6} = 0.4249\mathrm{m}^3$$

$$V_{\mathrm{B2}} = V_{\mathrm{B1}}\left(\frac{p_{\mathrm{B1}}}{p_{\mathrm{B2}}}\right)^{\frac{1}{\gamma_0}} = 0.4249\times\left(\frac{0.2}{0.4}\right)^{\frac{1}{1.4}} = 0.2592\mathrm{m}^3$$

$$-\Delta V_{\mathrm{B}} = V_{\mathrm{B1}} - V_{\mathrm{B2}} = 0.4249 - 0.2592 = 0.1657\mathrm{m}^3$$

$$V_{\mathrm{A1}} = V_{\mathrm{B1}}$$

$$V_{\mathrm{A2}} = \left|-\Delta V_{\mathrm{B}}\right| + V_{\mathrm{A1}} = 0.1657 + 0.4249 = 0.5906\mathrm{m}^3$$

(2) 终态温度分别为

$$T_{\mathrm{B2}} = T_{\mathrm{B1}}\left(\frac{p_{\mathrm{B2}}}{p_{\mathrm{B1}}}\right)^{\frac{1-\gamma_0}{\gamma_0}} = 293\times\left(\frac{0.4}{0.2}\right)^{\frac{1-1.4}{1.4}} = 357.5\mathrm{K}$$

$$T_{\mathrm{A2}} = \frac{p_{\mathrm{A2}} V_{\mathrm{A2}}}{m_{\mathrm{A}} R_{\mathrm{g}}} = \frac{0.4\times 10^6\times 0.5906}{1\times 290} = 814.6\mathrm{K}$$

(3) 该问有两种解法。

方法一：取汽缸内的整个气体为闭口系，因过程中不产生功，所以：

$$\begin{aligned} Q &= \Delta U = \Delta U_{\mathrm{A}} + \Delta U_{\mathrm{B}} = m_{\mathrm{A}} c_V\left(T_{\mathrm{A2}} - T_{\mathrm{A1}}\right) + m_{\mathrm{B}} c_V\left(T_{\mathrm{B2}} - T_{\mathrm{B1}}\right) \\ &= 1\times 0.72\times 10^3\times(814.6-293) + 1\times 0.72\times 10^3\times(357.5-293) \\ &= 422.0\mathrm{kJ} \end{aligned}$$

方法二：取 A 腔气体为闭口系，则过程中 A 腔气体对 B 腔气体做功，即：

$$\begin{aligned} W_{\mathrm{A}} &= -W_{\mathrm{B}} = -\frac{m_{\mathrm{B}} R_{\mathrm{g}}}{\gamma_0 - 1}\left(T_{\mathrm{B1}} - T_{\mathrm{B2}}\right) \\ &= -\frac{1\times 290}{1.4-1}\left(293 - 357.3\right) = 46.4\mathrm{kJ} \end{aligned}$$

对 A 腔，列闭口系的能量方程：

$$\begin{aligned} Q &= \Delta U + W_{\mathrm{A}} = m_{\mathrm{A}} c_V\left(T_{\mathrm{A2}} - T_{\mathrm{A1}}\right) + W_{\mathrm{A}} \\ &= 1\times 0.72\times 10^3\times(814.6-293) + 46.4\times 10^3 = 422.0\mathrm{kJ} \end{aligned}$$

(4) B 腔中气体为可逆绝热压缩过程，其熵变 ΔS_{B} 为零。

A 腔中气体的熵变为：

$$\begin{aligned} \Delta S_{\mathrm{A}} &= m_{\mathrm{A}}\left(c_p \ln\frac{T_{\mathrm{A2}}}{T_{\mathrm{A1}}} - R_{\mathrm{g}} \ln\frac{p_{\mathrm{A2}}}{p_{\mathrm{A1}}}\right) \\ &= 1\times\left[1.01\times 10^3 \ln\frac{814.6}{293} - 290\ln\frac{0.4}{0.2}\right] = 831.7\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{K}} \end{aligned}$$

(5) 整个气体的熵变为：

$$\Delta S = \Delta S_{\mathrm{A}} + \Delta S_{\mathrm{B}} = \Delta S_{\mathrm{A}} = 831.7\mathrm{J/K}$$

(6) A、B 腔气体所经历的过程在 p-V 图、T-S 图上可以表示为图 3-14 所示。

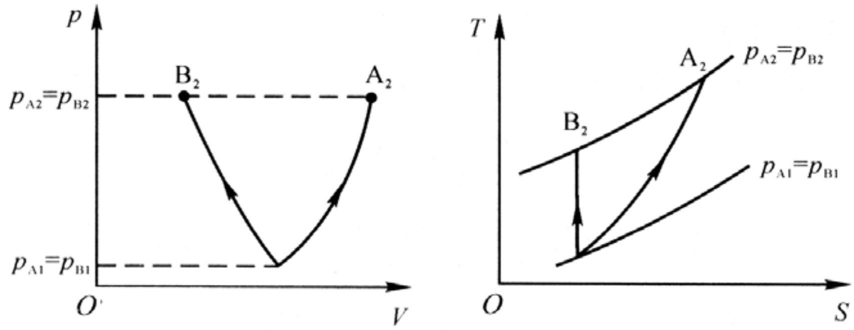


图 3-14　A、B 腔气体所经历的过程

【例 3.11】 透热容器 A 与绝热容器 B 通过以阀门相连，如图 3-15 所示。A、B 容器的容积相等。初始时，与环境换热的容器 A 中有 3MPa、25℃的空气 1kg，B 容器为真空。打开连接两容器的阀门，空气由 A 缓慢地进入 B，直至两侧压力相等时重新关闭阀门。设空气的比热容为定值，$\gamma = 1.4$，试：

(1) 确定稳定后两容器中的状态；

(2) 求过程中的换热量。

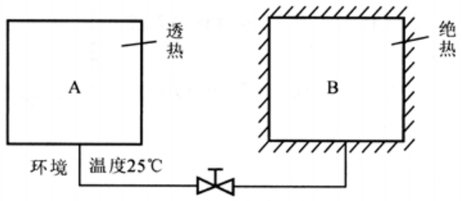


图 3-15

【解】

(1) 由于容器 A 是透热的，且过程进行得很慢，故可以认为，过程中容器 A 内气体是等温过程，即 $T_{A1} = T_{A2} = T_A$。

取容器 B 为系统，由一般开口系统的能量方程，得：

$$\Delta U - h_{in} m_{in} = 0$$

因为

$$m_{in} = m_{B2}, \quad \Delta U = U_2, \quad h_{in} = h_A$$

所以

$$U_2 - h_A m_{B2} = 0$$

即

$$m_{B2} c_V T_{B2} - c_p T_A m_{B2} = 0$$

故

$$T_{B2} = \frac{c_p T_A}{c_V} = \gamma T_A = 1.4 \times 298 = 417.2\text{K}$$

因为两侧压力相等，即

$$\frac{m_{A2} R_g T_A}{V_A} = \frac{(m_{A1} - m_{A2}) R_g T_{B2}}{V_B}$$

所以

$$m_{A2} = \frac{m_{A1} T_{B2}}{T_A + T_{B2}} = \frac{1 \times 417.2}{298 + 417.2} = 0.5833\text{kg}$$

$$m_{B2} = m_{A1} - m_{A2} = 1 - 0.5833 = 0.4167\text{kg}$$

$$p_2 = p_{A2} = p_{B2} = \frac{m_{A2} R_g T_A}{m_{A1} R_g T_A / p_{A1}} = \frac{m_{A2}}{m_{A1}} p_{A1} = \frac{0.5833}{1} \times 3.0 = 1.75\text{MPa}$$

终了时，容器 A 的状态为：$p_{A2} = 1.75\text{MPa}$，$T_{A2} = 298\text{K}$，$m_{A2} = 0.5833\text{kg}$

容器 B 的状态为：$p_{B2} = 1.75\text{MPa}$，$T_{B2} = 417.2\text{K}$，$m_{B2} = 0.4167\text{kg}$

(2) 求换热量时，取整个装置为系统。由闭口系统的能量方程得：

$$\begin{aligned} Q = \Delta U &= \left(m_{A2} c_V T_A + m_{B2} c_V T_{B2}\right) - m_{A1} c_V T_A \\ &= \frac{5}{2} \times 287 \times \left(0.5833 \times 298 + 0.4167 \times 417.2 - 1 \times 298\right) \\ &= 35.64 \times 10^3\ \text{J} = 35.64\text{kJ} \end{aligned}$$

【例 3.12】 试分析多变指数在 $1 < n < \gamma$ 范围内的膨胀过程的性质。

【解】

首先在 *p-V* 图和 *T-S* 图上画出四条基本过程线作为分析的参考线，然后依题意画出多变过程线 1-2，如图 3-16 所示。

然后判断题目中过程的性质。过程线 1-2 在过起点的绝热线的右方和定容线的右方，这表明是热膨胀过程(即 q 和 w 都为正)。又，过程线在定温线的下方，表明气体的温度降低，即 $\Delta u < 0$，$\Delta h < 0$。这说明膨胀时气体所作的功大于加入的热量，故气体的热力学能将减少，而温度降低。

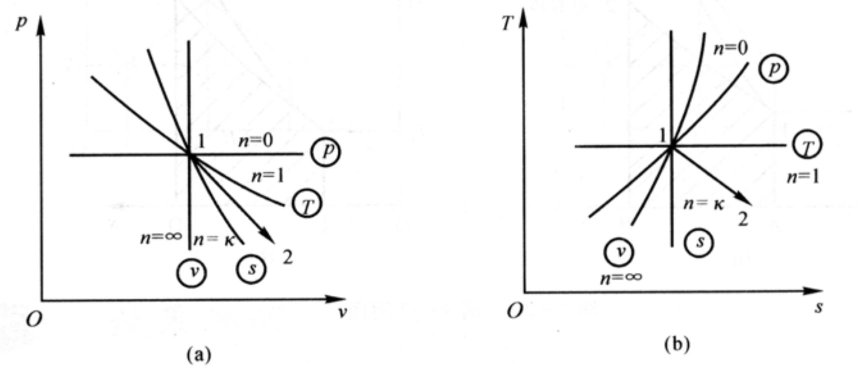


图 3-16

【例 3.13】 将理想气体工质又升压、又升温及又放热的多变过程表示在 *p-V* 图和 *T-S* 图上。

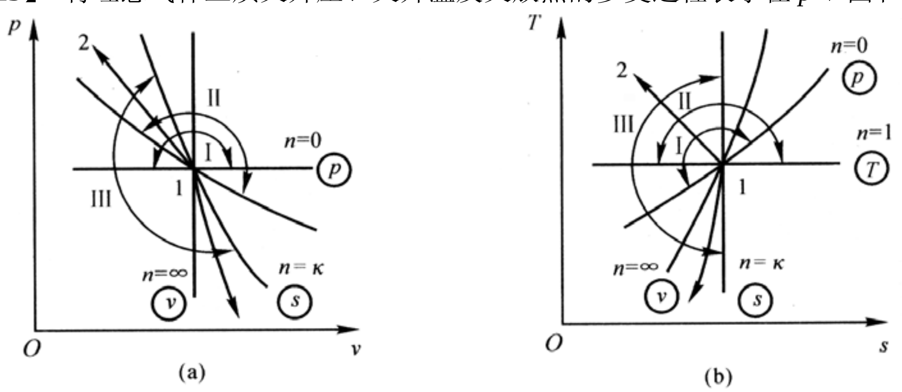


图 3-17

【解】

先在 *p-V* 图和 *T-S* 图上画出四条基本过程，如图 3-17 所示，然后再分别找出升压的区域、升温的区域以及放热的区域。于是，三个区域重叠的区域，就是满足又升压、又升温及又放热的要求的区域，过程线落在这个重叠的区域之内，如线段 1-2 所示。

4　典型题解

【例 4.1】在温度 $T_0 = 300\text{K}$ 的环境中，空气从压力 $p_1 = 0.6\text{MPa}$ 被绝热节流至 $p_2 = 0.1\text{MPa}$，试确定过程引起的可用能损失，并用 $T-s$ 图示意地表示出来。设空气可按理想气体计算，空气的气体常数 $R_\text{g} = 0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，比定压热容 $c_p = 1.004\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$。

【解】

对于理想空气绝热节流过程，有

$$h_1 = h_2 ，\ T_1 = T_2 ，\ \dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

开口系的熵方程为

$$\frac{dS}{d\tau} = \dot{S}_\text{f} + \dot{S}_\text{g} + \dot{m}_1 s_1 - \dot{m}_2 s_2$$

根据题意，节流过程稳定且绝热，所以熵产为

$$\frac{\dot{S}_\text{g}}{\dot{m}} = s_1 - s_2$$

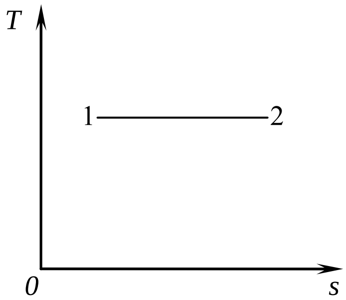
于是可用能的损失为

$$\frac{\dot{I}}{\dot{m}} = T_0 \frac{\dot{S}_\text{g}}{\dot{m}} = T_0 (s_1 - s_2) = T_0 \left(c_\text{p} \ln \frac{T_2}{T_1} - R_\text{g} \ln \frac{p_2}{p_1} \right)$$

代入已知数据可得

$$\frac{\dot{I}}{\dot{m}} = 300 \left(1.004 \ln 1 - 0.287 \ln \frac{0.1}{0.6} \right) = 154.27 (\text{kJ/kg})$$

由于此绝热过程温度不变，有熵产生，所以过程在 $T-s$ 图上表示为



例 4.1 图

【例 4.2】涡轮机以空气为工质。进口处压力 $p_1 = 0.6\text{MPa}$，温度 $t_1 = 277°\text{C}$；出口处压力 $p_2 = 0.1\text{MPa}$。空气流量为 50kg/min，涡轮发出的功率为 160kW，散热量为 960kJ/min。已知环境温度为 $20°\text{C}$，空气的比定压热容 $c_p = 1.004\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，气体常数 $R_\text{g} = 0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$。求涡轮机出口处的空气温度 t_2，并说明该涡轮机是否为可逆装置。

【解】

以涡轮机中空气为研究对象，它是一典型的开口系，其能量方程和熵方程分别为

$$\frac{dE}{d\tau} = \dot{Q} - \dot{W}_\text{sh} + \left(h_1 + \frac{c_1^2}{2} + g z_1 \right) \dot{m}_1 - \left(h_2 + \frac{c_2^2}{2} + g z_2 \right) \dot{m}_2$$

$$\frac{dS}{d\tau} = \dot{S}_\text{f} + \dot{S}_\text{g} + \dot{m}_1 s_1 - \dot{m}_2 s_2$$

根据题意，该涡轮机工作状况稳定，忽略宏观动能和重力位能的变化，所以

$$\dot{Q}-\dot{W}_{\text{sh}}+\dot{m}(h_1-h_2)=0$$
$$\dot{S}_{\text{f}}+\dot{S}_{\text{g}}+\dot{m}(s_1-s_2)=0$$

开口系与环境交换的热量为 $\dot{Q}=-\dfrac{960}{60}\text{kJ/s}=-16\text{kJ/s}$，热熵流 $\dot{S}_{\text{f}}=\dfrac{\dot{Q}}{T_0}=\dfrac{-16}{293}\text{KJ/(K}\cdot\text{s)}$ $=-0.0546\text{KJ/(K}\cdot\text{s)}$；开口系输出技术功 $\dot{W}_{\text{sh}}=160\text{kJ/s}$；空气流量 $\dot{m}=\dfrac{50}{60}\text{kg/s}=0.8333\text{kg/s}$。

把这些数据代入能量方程和熵方程可得：

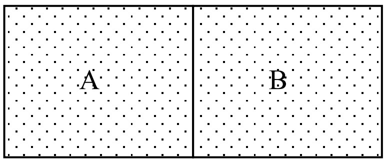
$$-16-160+0.8333\times1.004\times[(277+273)-(t_2+273)]=0$$
$$-0.0546+\dot{S}_{\text{g}}+0.8333\times\left(1.004\ln\frac{t_2+273}{277+273}-0.287\ln\frac{0.1}{0.6}\right)=0$$

解方程可得

$$t_2=66.633^\circ\text{C}$$
$$\dot{S}_{\text{g}}=0.0294\text{kJ/(K}\cdot\text{s)}>0$$

所以该涡轮机是不可逆装置。

【例 4.3】设有相同质量的某种物质两块，两者的温度分别为 T_{A} 及 T_{B}，现使两者相接触而温度变为相同，试求两者熵的总和的变化。



例 4.3 图

【解】

根据题意，A、B 两块物质的初始温度不同，接触以后达到热平衡。在这一过程中，A 和 B 与外界之间没有热交换，也即没有热熵流输出。但是由于 A 和 B 之间存在温差，使得熵产生，所以 A 和 B 的总熵还是增加的。

对于不可压物质模型，TdS 方程简化为

$$TdS=dU+pdV=mcdT$$

整理为

$$dS=mc\frac{dT}{T}$$

对上式积分可得

$$\Delta S=mc\ln\frac{T_2}{T_1}$$

于是 A 物质和 B 物质的总熵变为

$$\Delta S=\Delta S_{\text{A}}+\Delta S_{\text{B}}=mc\ln\frac{T_2}{T_{\text{A}}}+mc\ln\frac{T_2}{T_{\text{B}}}=mc\ln\frac{T_2^2}{T_{\text{A}}T_{\text{B}}}\qquad\text{(a)}$$

另外，根据能量方程可得

$$\Delta U=\Delta U_{\text{A}}+\Delta U_{\text{B}}=Q-W=0$$

即

$$mc(T_2-T_{\text{A}})+mc(T_2-T_{\text{B}})=0$$

解方程可得

$$T_2=\frac{T_{\text{A}}+T_{\text{B}}}{2}\qquad\text{(b)}$$

式（b）代入式（a）可得总熵变：

$$\Delta S = mc\ln\frac{(T_A + T_B)^2}{4T_A T_B}$$

【例 4.4】在工程热力学研究中，为什么要引入可逆过程？

【答】

不可逆过程的分析计算往往是比较困难的，因为热力系和外界之间以及热力系内部都可能存在不同程度的力不平衡和热不平衡。而可逆过程是无耗散效应的准平衡过程，虽然可逆过程实际上并不存在，但却是一种有用的抽象。分析可逆过程可以得出原则性结论，甚至在必要时可通过采用一些经验系数对理想化的可逆过程加以修正，以获取真实的不可逆过程的一些性质。

【例 4.5】（高等教育自学考试 2001 年试题）设炉膛中火焰的温度恒为$t_r = 1500°C$，蒸锅内蒸汽的温度恒为$t_s = 500°C$，环境温度为$t_0 = 25°C$，求火焰每传出 1000kJ 热量时引起的熵产和作功能力损失。

【解】

以炉膛中火焰为研究对象，其熵方程为

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_b + S_g = 0$$

即

$$S_g = -\int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_b = -\frac{Q}{T_r} = -\frac{-1000}{273+1500} = 0.564\,(\text{kJ/K})$$

作功能力损失大小为

$$I = T_0 S_g = (273+25)\times 0.564 = 168.072\,(\text{kJ})$$

【例 4.6】用可逆热机驱动可逆制冷机。热机从热源（$T_H = 2000\text{K}$）吸收热量为Q_H，向大气（$T_0 = 300\text{K}$）放热；而制冷机从冷源（$T_C = 250\text{K}$）吸收热量Q_C，也向大气（T_0）放热。试求制冷量与热源提供的热量之比Q_C / Q_H为多少？

【解】

由于热机和制冷机经历的过程都是可逆循环，于是有

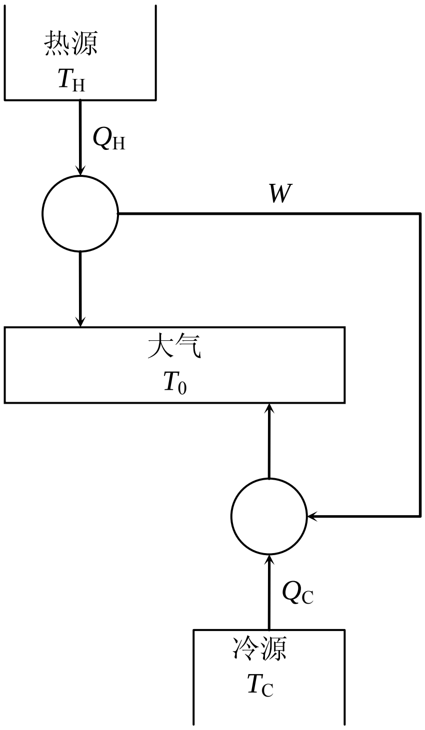
$$\frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{T_0}{T_H}$$

$$\frac{Q_C}{W} = \frac{T_C}{T_0 - T_C}$$

综合以上两式可得

$$\frac{Q_C}{Q_H} = \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right)\left(\frac{T_C}{T_0 - T_C}\right)$$

$$= \left(1 - \frac{300}{2000}\right)\left(\frac{250}{300-250}\right) = 4.25$$



例 4.6 图

【例 4.7】温度为 $800K$、压力为 $5.5MPa$ 的燃气进入燃气轮机，在燃气轮机内绝热膨胀后流出燃气轮机。在燃气轮机出口处测得两组数据，一组压力为 $1.0MPa$，温度为 485K，另一组压力为 0.7MPa，温度为 495K。试问这两组参数哪一个是正确的？此过程是否可逆？若不可逆，其作功能力损失为多少？并将作功能力损失表示在 $T-s$ 图上。燃气的性质可看成空气进行处理，空气比定压热容 $c_p = 1.004\mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$，气体常数 $R_g = 0.287\mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$，环境温度 $T_0 = 300K$。

【解】

以燃气轮机内燃气为研究对象，其熵方程为

$$\frac{dS}{d\tau} = \dot{S}_f + \dot{S}_g + \dot{m}_1 s_1 - \dot{m}_2 s_2$$

根据题意有 $dS/d\tau = 0$，$\dot{S}_f = 0$，$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$，于是上式可变为

$$\dot{S}_g = \dot{m}(s_2 - s_1)$$

即

$$s_g = s_2 - s_1$$

对于第一组参数：

$$s_g = s_2 - s_1 = c_p \ln\frac{T_2}{T_1} - R_g \ln\frac{p_2}{p_1}$$

$$= 1.004\ln\frac{485}{800} - 0.287\ln\frac{1.0}{5.5} = -0.013\left[\mathrm{kJ/(kg \cdot K)}\right] < 0$$

由于过程的熵产小于 0，所以这一组参数是不正确的。

对于第二组参数：

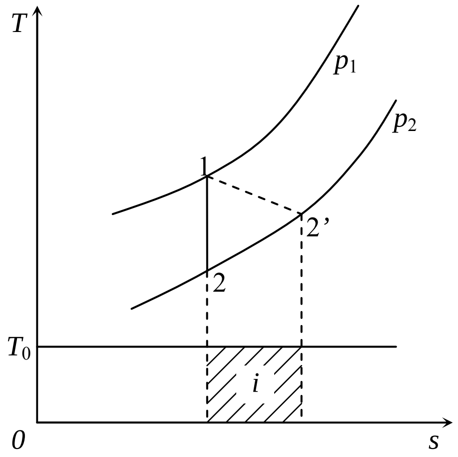
$$s_g = s_2 - s_1 = c_p \ln\frac{T_2}{T_1} - R_g \ln\frac{p_2}{p_1}$$

$$= 1.004\ln\frac{495}{800} - 0.287\ln\frac{0.7}{5.5} = 0.1097\left[\mathrm{kJ/(kg \cdot K)}\right] > 0$$

说明该组数据正确，且此过程是不可逆的，其可用能损失为

$$i = T_0 s_g = 300 \times 0.1097 = 32.91(\text{kJ/kg})$$

表示在$T-s$图上，如例 4.7 图所示。



例 4.7 图

【例 4.8】空气涡轮进口参数为 $p_1 = 5\text{bar}$、$T_1 = 410\text{K}$、$c_1 = 120\text{m/s}$，出口参数为 $p_2 = 1.2\text{bar}$、$T_2 = 300\text{K}$、$c_2 = 70\text{m/s}$，当地环境空气参数为 $p_0 = 1\text{bar}$、$T_0 = 290\text{K}$，假设空气在流动中比定压热容为常值 $c_p = 1.01\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，忽略空气对外散热和重力位能的变化，试计算（1）每千克空气流经涡轮过程中实际完成的技术功和轴功；（2）空气由进口过渡到出口状态，理论上所能完成的最大技术功和最大轴功。

【解】

（1）以涡轮机中空气为研究对象，其稳定工况的能量方程为

$$\dot{Q} - \dot{W}_{\text{sh}} + \left(h_1 + \frac{c_1^2}{2} + gz_1\right)\dot{m} - \left(h_2 + \frac{c_2^2}{2} + gz_2\right)\dot{m} = 0$$

根据题意，$\dot{Q} = 0$，$g\Delta z = 0$，于是比轴功为

$$w_{\text{sh}} = \frac{\dot{W}_{\text{sh}}}{\dot{m}} = \left(h_1 + \frac{c_1^2}{2}\right) - \left(h_2 + \frac{c_2^2}{2}\right) = c_p(T_1 - T_2) + \frac{1}{2}\left(c_1^2 - c_2^2\right)$$

$$= 1.01 \times 1000 \times (410 - 300) + 0.5 \times \left(120^2 - 70^2\right) = 115850(\text{J/kg})$$

比技术功为

$$w_{\text{t}} = w_{\text{sh}} + \frac{1}{2}\left(c_2^2 - c_1^2\right) + g(z_2 - z_1)$$

$$= 115850 + 0.5 \times \left(70^2 - 120^2\right) + 0 = 111100(\text{J/kg})$$

（2）涡轮机中空气的稳定熵方程为

$$\dot{S}_{\text{f}} + \dot{S}_{\text{g}} + \dot{m}s_1 - \dot{m}s_2 = 0$$

根据题意，无热熵流 $\dot{S}_{\text{f}} = 0$；此外，涡轮机工作在可逆过程（$\dot{S}_{\text{g}} = 0$）输出的轴功最大，所以

$$\Delta s = 0$$

即

$$T_2 = T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} = 410 \times \left(\frac{1.2}{5}\right)^{(1.4-1)/1.4} = 272.71(\text{K})$$

涡轮机输出的最大比轴功为

$$w_{\mathrm{sh,max}}=c_p\left(T_1-T_2\right)+\frac{1}{2}\left(c_1^2-c_2^2\right)$$
$$=1.01\times1000\times\left(410-272.71\right)+0.5\times\left(120^2-70^2\right)=143412.9\left(\mathrm{J/kg}\right)$$

最大比技术功为

$$w_{\mathrm{t,max}}=w_{\mathrm{sh,max}}+\frac{1}{2}\left(c_2^2-c_1^2\right)+g\left(z_2-z_1\right)$$
$$=143412.9+0.5\times\left(70^2-120^2\right)+0=138662.9\left(\mathrm{J/kg}\right)$$

【例 4.9】两同种液体，质量均为 m，温度分别为 T_1 和 T_2（$T_1>T_2$）。

（1）若其在等压绝热条件下混合，试计算混合后的平衡温度及熵产；

（2）若将其分别作为冷源和热源，其间放置可逆热机，试计算最终达到的平衡温度及作出的循环功。设液体的比定压热容 c_p 为常数。

【解】

（1）以两同种液体为研究对象。由于在绝热条件下混合，所以

$$mcT_1+mcT_2=2mcT$$

即

$$T=\frac{T_1+T_2}{2}$$

等压绝热混合过程的熵产为

$$S_{\mathrm{g}}=m\left(\Delta s_1+\Delta s_2\right)=mc_p\left(\ln\frac{T}{T_1}+\ln\frac{T}{T_2}\right)=mc_p\ln\frac{\left(T_1+T_2\right)^2}{4T_1T_2}$$

（2）对于可逆热机的某一循环，有

$$\delta Q_1=-mcdT_1'$$
$$\delta Q_2=mcdT_2'$$

热源、可逆热机和冷源的总熵变为

$$-\frac{\delta Q_1}{T_1'}+\frac{\delta Q_2}{T_2'}+0=0$$

即

$$\frac{dT_1'}{T_1'}+\frac{dT_2'}{T_2'}=0$$

两边积分

$$\int_{T_1}^{T}\frac{dT_1'}{T_1'}+\int_{T_2}^{T}\frac{dT_2'}{T_2'}=0$$

于是

$$\ln\frac{T}{T_1}+\ln\frac{T}{T_2}=0$$

平衡温度为

$$T=\sqrt{T_1T_2}$$

某一循环输出的功为

$$\delta W=\delta Q_1-\delta Q_2=-mc\left(dT_1'+dT_2'\right)$$

所有循环输出的功为

$$W=-mc\left(\int_{T_1}^{T}dT_1'+\int_{T_2}^{T}dT_2'\right)=-mc\left(2T-T_1-T_2\right)=mc\left(T_1+T_2-2\sqrt{T_1T_2}\right)$$

【例 4.10】温度为 298K、压力为 1bar 的 1kg 氢与同温同压下的 1kg 氮在一绝热容器中由一隔

板分开。试确定当抽掉隔板后两气体混合的温度、压力及混合前后熵的变化量。已知：$M_{H_2}=2\text{kg/kmol}$，$c_{V,H_2}=10.2\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$；$M_{N_2}=28\text{kg/kmol}$，$c_{V,N_2}=0.74\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$。

【解】

以两气体为研究对象，其能量方程为

$$\Delta U = U_2 - U_1 = Q - W = 0$$

于是

$$mc_{V,H_2}\left(T - T_{H_2}\right) + mc_{V,N_2}\left(T - T_{N_2}\right) = 0$$

混合后平衡温度为

$$T = \frac{c_{V,H_2}T_{H_2} + c_{V,N_2}T_{N_2}}{c_{V,H_2} + c_{V,N_2}} = \frac{10.2\times 298 + 0.74\times 298}{10.2 + 0.74} = 298\left(\text{K}\right)$$

混合气体中氢的摩尔分数为

$$x_{H_2} = \frac{\dfrac{m}{M_{H_2}}}{\dfrac{m}{M_{H_2}} + \dfrac{m}{M_{N_2}}} = \frac{\dfrac{1}{2}}{\dfrac{1}{2} + \dfrac{1}{28}} = 0.9333$$

氮的摩尔分数为

$$x_{N_2} = 1 - x_{H_2} = 0.0667$$

理想气体状态方程表示为

$$pV = mR_g T = m\frac{R}{M}T$$

所以初始状态的氢体积与氮体积之比可表示为

$$\frac{V_{H_2}}{V_{N_2}} = \frac{M_{N_2}}{M_{H_2}} = 14$$

由于混合前后摩尔数相等

$$n_{H_2} + n_{N_2} = n$$

于是

$$\frac{p_{H_2}V_{H_2}}{RT_{H_2}} + \frac{p_{N_2}V_{N_2}}{RT_{N_2}} = \frac{pV}{RT}$$

即

$$1\times V_{H_2} + 1\times\left(\frac{V_{H_2}}{14}\right) = p\left(1 + \frac{1}{14}\right)V_{H_2}$$

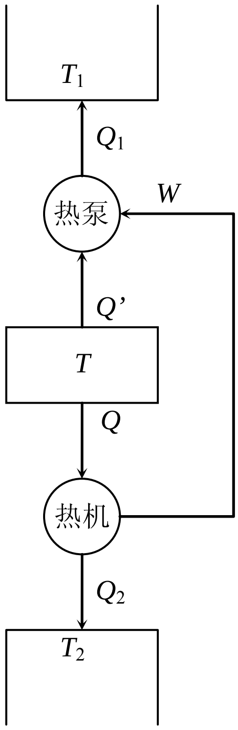
解得

$$p = 1\text{bar}$$

混合前后熵的变化为

$$\begin{aligned}\Delta S &= \Delta S_{H_2} + \Delta S_{N_2}\\ &= m\left(c_{p,H_2}\ln\frac{T}{T_{H_2}} - R_{H_2}\ln\frac{px_{H_2}}{p_{H_2}}\right) + m\left(c_{p,N_2}\ln\frac{T}{T_{N_2}} - R_{N_2}\ln\frac{px_{N_2}}{p_{N_2}}\right)\\ &= m\left(-R_{H_2}\ln x_{H_2} - R_{N_2}\ln x_{N_2}\right)\\ &= 1\left(-\frac{8314}{2}\times\ln 0.9333 - \frac{8314}{28}\times\ln 0.0667\right) = 1090.9\left(\text{J/K}\right)\end{aligned}$$

【例 4.11】某人声称他可以在$T_1 = 385\text{K}$、$T = 350\text{K}$、$T_2 = 295\text{K}$的三个恒温热源之间设计一整套理想的热力设备，如例 4.11 图所示。该设备可将T热源中 50kJ 的热量传给T_1热源，同时向T_2热源放出 50kJ 的热量。试判断该方案能不能实现，为什么？若能实现，计算T热源放出 100kJ 的热量时，能供给T_1热源的最高值是多少？



例 4.11 图

【解】

（1）根据题意，$Q_1 = Q_2 = 50\text{kJ}$，热机输出功为

$$W = Q\left(1 - \frac{T_2}{T}\right) = (W + Q_2)\left(1 - \frac{T_2}{T}\right)$$

$$W = (W + 50)(1 - 295/350)$$

解方程可得

$$W = 9.322\text{kJ}$$

热泵所需功为

$$W' = Q_1\left(1 - \frac{T}{T_1}\right) = 50 \times \left(1 - \frac{350}{385}\right) = 4.545\text{kJ}$$

由于$W > W'$，所以该方案是可以实现的。

（2）若$Q_2 = 100\text{kJ}$，热机输出的最大功为

$$W = (W + 100)(1 - 295/350)$$

解方程可得

$$W = 18.644\text{kJ}$$

热泵释放的最大热量为

$$Q_1 = W'/(1 - T/T_1) = 18.644/(1 - 350/385) = 205.1\text{kJ}$$

【例 4.12】绝热封闭容器中装有空气0.8kg，初温$T_1 = 300\text{K}$，现通过叶轮搅拌由外界输入功30kJ，终态变为 2。求容器中空气的熵变化及熵流和熵产。已知：$c_p = 1.005\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，$c_V = 0.718\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$。

【解】

以绝热封闭容器中空气为研究对象，其能量方程为

$$\Delta U = U_2 - U_1 = Q - W = -W$$

即

$$0.8 \times 0.718(T_2 - 300) = -(-30)$$

解方程得

$$T_2 = 352.23\text{K}$$

空气的熵变化值为

$$\Delta S = m\left(c_V \ln\frac{T_2}{T_1} + R_g \ln\frac{v_2}{v_1}\right) = mc_V \ln\frac{T_2}{T_1}$$

$$= 0.8 \times 0.718 \times \ln\frac{352.23}{300} = 0.0922(\text{kJ/K})$$

熵流为

$$S_f = \frac{Q}{T} = 0\text{kJ/K}$$

由于过程熵方程为

$$\Delta S = S_f + S_g$$

所以空气的熵产为

$$S_g = \Delta S = 0.0922\text{kJ/K}$$

【例 4.13】 1kg 温度为 273K 的水与 373K 的热源发生接触换热，当水温升高到 373K 时，求水、热源及由它们所组成的系统的熵变化量。假如水先与 323K 的中间热源换热后，再与 373K 的热源换热，使其温度升高到 373K，这时系统的熵变化量又是多少？水的比热容为 $c = 4.186\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$。

【解】

（1）水的熵变化量为

$$\Delta S_1 = mc\ln\frac{T_2}{T_1} = 1 \times 4.186 \times \ln\frac{373}{273} = 1.3065(\text{kJ/K})$$

373K 的热源的熵变化量为

$$\Delta S_2 = -\frac{Q}{T_2} = -\frac{mc(T_2 - T_1)}{T_2} = -\frac{1 \times 4.186 \times (373 - 273)}{373} = -1.1223(\text{kJ/K})$$

总熵变化量为

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = 0.1842\text{kJ/K}$$

（2）水的熵变化量为

$$\Delta S_1 = mc\ln\frac{T}{T_1} + mc\ln\frac{T_2}{T} = mc\ln\frac{T_2}{T_1} = 1 \times 4.186 \times \ln\frac{373}{273} = 1.3065(\text{kJ/K})$$

323K 的热源的熵变化量为

$$\Delta S_2' = -\frac{Q'}{T} = -\frac{mc(T - T_1)}{T} = -\frac{1 \times 4.186 \times (323 - 273)}{323} = -0.6480(\text{kJ/K})$$

373K 的热源的熵变化量为

$$\Delta S_2'' = -\frac{Q''}{T_2} = -\frac{mc(T_2 - T)}{T_2} = -\frac{1 \times 4.186 \times (373 - 323)}{373} = -0.5611(\text{kJ/K})$$

总熵变化量为

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2' + \Delta S_2'' = 0.0974\text{kJ/K}$$

【例 4.14】 将 100kg 温度为 $30°\text{C}$ 的水与 200kg 温度为 $80°\text{C}$ 的水在绝热容器中混合，假定容器

内壁与水之间也是绝热的，且水的比热容为定值，取$c = 4.187\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，环境温度为$17°\text{C}$。求混合过程导致的作功能力损失？

【解】

以绝热容器内水为研究对象，由其能量方程可得

$$m_1cT_1 + m_2cT_2 = (m_1 + m_2)cT$$

即

$$T = \frac{m_1T_1 + m_2T_2}{m_1 + m_2} = \frac{100\times 303 + 200\times 353}{100 + 200} = 336.33(\text{K})$$

水混合过程的熵方程为

$$\Delta S = S_\text{f} + S_\text{g}$$

根据题意，水混合过程是绝热的，所以熵产为

$$\begin{aligned} S_\text{g} &= \Delta S = m_1c\ln\frac{T}{T_1} + m_2c\ln\frac{T}{T_2} \\ &= 100\times 4.187\times\ln\frac{336.33}{303} + 200\times 4.187\times\ln\frac{336.33}{353} \\ &= 3.186(\text{kJ/K}) \end{aligned}$$

混合过程导致的作功能力损失大小为

$$I = T_0S_\text{g} = 290\times 3.186 = 923.94(\text{kJ})$$

【例 4.15】某可逆热机以$20°\text{C}$的环境大气为热源，以 500kg 温度为$0°\text{C}$的水为冷源，冷源吸收热机放出的热量后上升到环境温度，问此可逆热机对外作出多少功？水的比热容为$c = 4.187\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$。

【解】

对于可逆热机的某一循环，有

热源放热 δQ_1

冷源吸热 $\delta Q_2 = mcdT_2'$

热源、可逆热机和冷源的总熵变为

$$-\frac{\delta Q_1}{T_1} + \frac{\delta Q_2}{T_2'} + 0 = 0$$

即

$$\delta Q_1 = \frac{T_1}{T_2'}mcdT_2'$$

某一循环输出的功为

$$\delta W = \delta Q_1 - \delta Q_2 = \left(\frac{T_1}{T_2'} - 1\right)mcdT_2'$$

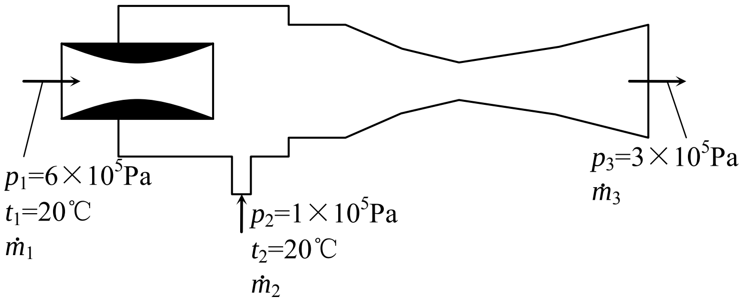
所有循环输出的功为

$$\begin{aligned} W &= mc\int_{T_2}^{T}\left(\frac{T_1}{T_2'} - 1\right)dT_2' = mc\left(T_1\ln T_2' - T_2'\right)\Big|_{T_2}^{T} = mc\left(T_1\ln\frac{T}{T_2} - T + T_2\right) \\ &= 500\times 4.187\times\left(293\times\ln\frac{293}{273} - 293 + 273\right) = 1497.56(\text{kJ}) \end{aligned}$$

式中T_2是冷源的初温，T是冷源吸热后的温度。

【例 4.16】引射器是一种用高压气流引入低压气流并使之压力提高的压缩设备。现有一台引射器，高压气流自进口 1 流入，被引射的低压气流自进口 2 引入，两股气流混合后从出口 3 流出引射

器。流动是稳定绝热的，各开口截面上的参数见例 4.16 图；进出口截面上的流体动能和重力位能略而不计。设气体可按理想气体计，$R_g = 287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$，$c_p = 1003\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$。试求可达到的最大比值 $\dot{m}_2/\dot{m}_1$。



例 4.16 图

【解】

以引射器内空气为研究对象，由于气体流动是稳定绝热的，并且不计流动动能和重力位能的变化，所以其质量方程、能量方程和熵方程分别为

$$\frac{dm}{d\tau} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 - \dot{m}_3 = 0 \quad \text{(a)}$$

$$\frac{dE}{d\tau} = 0 - 0 + (h_1 + 0 + 0)\dot{m}_1 + (h_2 + 0 + 0)\dot{m}_2 - (h_3 + 0 + 0)\dot{m}_3 = 0 \quad \text{(b)}$$

$$\frac{dS}{d\tau} = 0 + \dot{S}_g + \dot{m}_1 s_1 + \dot{m}_2 s_2 - \dot{m}_3 s_3 = 0 \quad \text{(c)}$$

由式（a）和式（b）推出

$$h_3 = \frac{\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} = \frac{\dot{m}_1 + \dot{m}_2}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} h_1 = h_1$$

即

$$T_3 = T_2 = T_1 = 293\text{K}$$

由式（a）和式（c）可得

$$\dot{m}_1(s_3 - s_1) + \dot{m}_2(s_3 - s_2) = \dot{S}_g$$

即

$$(s_3 - s_1) + \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1}(s_3 - s_2) = \frac{\dot{S}_g}{\dot{m}_1}$$

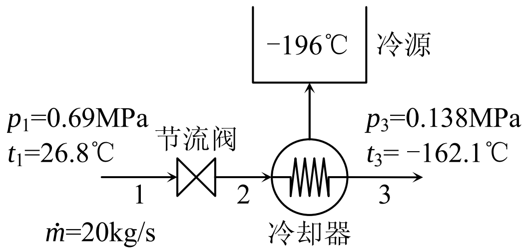
代入数据，得

$$\left(-287 \times \ln\frac{3}{6}\right) + \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1}\left(-287 \times \ln\frac{3}{1}\right) = \frac{\dot{S}_g}{\dot{m}_1}$$

$$\frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} = \left(\ln 2 - \frac{\dot{S}_g}{287\dot{m}_1}\right) / \ln 3 \le \ln 2 / \ln 3 = 0.631$$

因此 $\dot{m}_2/\dot{m}_1$ 可达到的最大比值为 0.631。

【例 4.17】利用稳定供应的 0.69MPa、26.8℃的空气源和−196℃的冷源，生产质量流量 $\dot{m} = 20\text{kg/s}$、0.138MPa、−162.1℃的空气流。装置示意图见例 4.17 图。求：（1）冷却器的每秒放热量 $\dot{Q}$；（2）判断该方案能否实现。已知空气的气体常数 $R_g = 287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$，比定压热容 $c_p = 1004\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$，定熵指数 $\gamma = 1.4$。



例 4.17 图

【解】

以节流阀和冷却器中空气为研究对象，其能量方程和熵方程分别为

$$\frac{dE}{d\tau} = \dot{Q} - 0 + (h_1 + 0 + 0)\dot{m} - (h_3 + 0 + 0)\dot{m} = 0$$

$$\frac{dS}{d\tau} = \frac{\dot{Q}}{T_c} + \dot{S}_g + \dot{m}s_1 - \dot{m}s_3 = 0$$

以上两式整理为

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_3 - h_2)$$

$$\dot{S}_g = \dot{m}(s_3 - s_1) - \frac{\dot{Q}}{T_c}$$

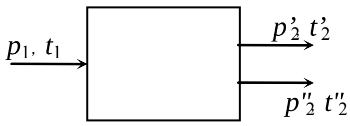
代入数据可得

$$\dot{Q} = 20 \times 1004 \times (110.9 - 299.8) = -3793112\,(\text{J/s})$$

$$\dot{S}_g = 20 \times \left(1004 \times \ln\frac{110.9}{299.8} - 287 \times \ln\frac{0.138}{0.690}\right) - \frac{-3793112}{77} = 38530.08\,(\text{J/(K} \cdot \text{s)})$$

由于熵产随时间的变化率 $\dot{S}_g$ 大于零，所以该方案可以实现。

【例 4.18】 有人设计了一特殊的装置，它可以使一股空气通过这种装置分离成两股流量相等、压力相同的空气，其中一股为高温，另一股为低温。假设空气初始参数为 $p_1 = 0.6\text{MPa}$，$t_1 = 21°\text{C}$，通过该装置后，其中一半为变为 $p_2' = 0.1\text{MPa}$，$t_2' = 82°\text{C}$ 的热空气，另一半变为 $p_2'' = 0.1\text{MPa}$，$t_2'' = -40°\text{C}$ 的冷空气，若空气为理想气体，且 $c_p = 1004\text{J/(kg} \cdot \text{K)}$，$R_g = 287\text{J/(kg} \cdot \text{K)}$，试论证该稳定流动过程能不能实现？



例 4.18 图

【解】

（1）以装置中空气为研究对象,其稳定能量方程为

$$\frac{dE}{d\tau} = \dot{Q} - \dot{W}_{sh} + \sum_i \dot{m}_i\left(h_i + \frac{c_i^2}{2} + gz_i\right) - \sum_e \dot{m}_e\left(h_e + \frac{c_e^2}{2} + gz_e\right)$$

由于没有功交换和热交换，忽略动能和势能变化，以及装置工作在稳定状态，所以能量方程简化为

$$0 = 0 - 0 + \dot{m}_1(h_1 + 0 + 0) - \dot{m}_2'(h_2' + 0 + 0) - \dot{m}_2''(h_2'' + 0 + 0)$$

$$(h_2' - h_1) + (h_2'' - h_1) = 0$$

把数据代入上式进行验算

$$(h_2' - h_1) + (h_2'' - h_1) = 1004 \times (355 - 294) + 1004 \times (233 - 294) = 0\,(\text{J/kg})$$

可见满足热力学第一定律的要求。

（2）熵方程为

$$\frac{dS}{d\tau} = \dot{S}_{\mathrm{f}} + \dot{S}_{\mathrm{g}} + \sum_i \dot{m}_i s_i - \sum_e \dot{m}_e s_e$$

由于装置工作在稳定状态并且与环境之间没有热交换，所以熵方程简化为

$$0 = 0 + \dot{S}_{\mathrm{g}} + \dot{m}_1 s_1 - \dot{m}_2' s_2' - \dot{m}_2'' s_2''$$

$$\Rightarrow \dot{S}_{\mathrm{g}} = \dot{m}_2'(s_2' - s_1) + \dot{m}_2''(s_2'' - s_1)$$

$$\Rightarrow \frac{\dot{S}_{\mathrm{g}}}{\dot{m}_2'} = (s_2' - s_1) + (s_2'' - s_1)$$

把数据代入上式可得

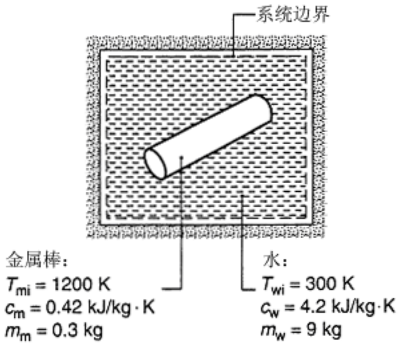
$$\frac{\dot{S}_{\mathrm{g}}}{\dot{m}_2'} = \left(1004 \times \ln\frac{355}{294} - 287 \times \ln\frac{0.1}{0.6}\right)$$

$$+\left(1004 \times \ln\frac{233}{294} - 287 \times \ln\frac{0.1}{0.6}\right)$$

$$= 984.29\ [\mathrm{J/(kg.K)}\ ] > 0$$

可见满足热力学第二定律的要求，因此该过程是可以实现的。

【例 4.19】一根温度为 1200K、质量为 0.3kg 的金属棒浸入温度为 300K、质量为 9kg 的水中进行淬火。假若水和金属棒被认为是不可压的，其比热容分别是 $c_{\mathrm{w}} = 4.2\mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$ 和 $c_{\mathrm{m}} = 0.42\mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$，忽略刚性贮箱中水与外界之间的热交换。试求：（1）水和金属棒的平衡温度，（2）熵产大小。



例 4.19 图

【解】

（1）能量方程为

$$\Delta U\big|_{\mathrm{water}} + \Delta U\big|_{\mathrm{metal}} = 0$$

即

$$m_{\mathrm{w}} c_{\mathrm{w}} (T_{\mathrm{f}} - T_{\mathrm{wi}}) + m_{\mathrm{m}} c_{\mathrm{m}} (T_{\mathrm{f}} - T_{\mathrm{mi}}) = 0$$

式中 T_{f} 是平衡温度，T_{wi} 和 T_{mi} 分别是水和金属棒的初始温度。于是

$$T_{\mathrm{f}} = \frac{m_{\mathrm{w}}(c_{\mathrm{w}}/c_{\mathrm{m}})T_{\mathrm{wi}} + m_{\mathrm{m}} T_{\mathrm{mi}}}{m_{\mathrm{w}}(c_{\mathrm{w}}/c_{\mathrm{m}}) + m_{\mathrm{m}}}$$

$$= \frac{(9\mathrm{kg})(10)(300\mathrm{K}) + (0.3\mathrm{kg})(1200\mathrm{K})}{(9\mathrm{kg})(10) + (0.3\mathrm{kg})}$$

$$= 303\mathrm{K}$$

（2）熵方程为

$$\Delta S\big|_{\mathrm{water}} + \Delta S\big|_{\mathrm{metal}} = S_{\mathrm{g}}$$

即熵产为

$$S_{\mathrm{g}} = m_{\mathrm{w}} c_{\mathrm{w}} \ln\frac{T_{\mathrm{f}}}{T_{\mathrm{wi}}} + m_{\mathrm{m}} c_{\mathrm{m}} \ln\frac{T_{\mathrm{f}}}{T_{\mathrm{mi}}}$$

代入数据可得

$$S_{\mathrm{g}}=(9\mathrm{kg})\left(4.2\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg.K}}\right)\ln\frac{303}{300}+(0.3\mathrm{kg})\left(0.42\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg.K}}\right)\ln\frac{303}{1200}$$
$$=0.3761\mathrm{kJ/K}+(-0.1734\mathrm{kJ/K})=0.2027\mathrm{kJ/K}$$

【例 4.20】压气机空气进口温度为 17℃，压力为 0.1MPa，每分钟吸入空气 5m^3，经绝热压缩后其温度为 207℃，压力为 0.4MPa。若环境温度为 17℃，大气压力为 0.1MPa，求：（1）压气机的实际耗功率；（2）压缩机压缩过程的绝热效率；（3）压缩过程的熵流和熵产；（4）压缩过程的作功能力损失。设空气比热容为定值，气体常数 $R_{\mathrm{g}}=0.287\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$，比定压热容 $c_p=1.005\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$。

【解】

（1）以压气机中空气为研究对象，其能量方程为

$$\frac{dE}{d\tau}=0-\dot{W}_{\mathrm{sh}}+(h_1+0+0)\dot{m}-(h_2+0+0)\dot{m}=0$$

整理为

$$\dot{W}_{\mathrm{sh}}=\dot{m}(h_1-h_2)=\frac{0.1\times10^6}{287\times290}\times\frac{5}{60}\times1005\times(290-480)=-19118.7(\mathrm{J/s})$$

（2）绝热可逆过程的熵方程为

$$\frac{dS}{d\tau}=0+0+\dot{m}s_1-\dot{m}s_2=0$$

整理为

$$\Delta s=1005\times\ln\frac{T_2}{290}-287\times\ln\frac{0.4}{0.1}=0$$

解得

$$T_2=430.85\mathrm{K}$$

可逆过程输出的轴功为

$$\dot{W}_{\mathrm{sh,s}}=\dot{m}(h_1-h_2)=\frac{0.1\times10^6}{287\times290}\times\frac{5}{60}\times1005\times(290-430.85)=-14173.0(\mathrm{J/s})$$

压气机压缩过程的绝热效率为

$$\eta=\frac{\dot{W}_{\mathrm{sh,s}}}{\dot{W}_{\mathrm{sh}}}=\frac{-14173.0}{-19118.7}=74.13\%$$

（3）压缩过程的熵流为

$$\dot{S}_{\mathrm{f}}=0\mathrm{J/(K\cdot s)}$$

压缩过程的熵方程为

$$\frac{dS}{d\tau}=0+\dot{S}_{\mathrm{g}}+\dot{m}s_1-\dot{m}s_2=0$$

熵产随时间的变化率为

$$\dot{S}_{\mathrm{g}}=\dot{m}(s_2-s_1)$$
$$=\frac{0.1\times10^6}{287\times290}\times\frac{5}{60}\times\left(1005\times\ln\frac{480}{290}-287\times\ln\frac{0.4}{0.1}\right)=10.87[\mathrm{J/(K\cdot s)}]$$

（4）压缩过程的作功能力损失值为

$$\dot{I}=T_0\dot{S}_{\mathrm{g}}=290\times10.87=3152.3(\mathrm{J/s})$$

【例 4.21】水蒸气稳定地流经直径为 76mm 的绝热水平管道，测得管内某一截面上蒸汽的压力和温度分别为 0.2MPa 和 240℃，在另一截面上相应的参数为 0.1MPa 和 200℃。

试求：

（1）蒸气在两截面处的流动速度；
（2）质量流量；
（3）可用能损失（环境温度为 27℃）。

水蒸汽热力性质表

温度	压力	焓	熵	比体积
℃	MPa	kJ/kg	kJ/(kg.K)	m^3/kg
200	0.1	2874.8	7.8334	2.1723
240	0.2	2950.3	7.6688	1.1752

【解】

（1）以绝热水平管道中水蒸气为研究对象，其质量方程和能量方程分别为

$$\frac{dm}{d\tau}=\dot{m}_1-\dot{m}_2=0 \tag{a}$$

$$\frac{dE}{d\tau}=0-0+\left(h_1+\frac{c_1^2}{2}+0\right)\dot{m}_1-\left(h_2+\frac{c_2^2}{2}+0\right)\dot{m}_2=0 \tag{b}$$

由式（a）可得

$$\frac{\pi d^2 c_1}{4v_1}=\frac{\pi d^2 c_2}{4v_2}$$

即

$$\frac{c_1}{1.1752}=\frac{c_2}{2.1723} \tag{c}$$

由式（b）可得

$$2950.3\times1000+c_1^2/2=2874.8\times1000+c_2^2/2 \tag{d}$$

解方程（c）和（d）可得

$$c_1=249.96\text{m/s}$$
$$c_2=462.04\text{m/s}$$

（2）水蒸气的质量流量为

$$\dot{m}_1=\dot{m}_2=\frac{\pi\times0.076^2\times462.04}{4\times2.1723}=0.965\left(\text{kg/s}\right)$$

（3）水蒸气流动过程的熵方程为

$$\frac{dS}{d\tau}=0+\dot{S}_\text{g}+\dot{m}s_1-\dot{m}s_2=0$$

即

$$\dot{S}_\text{g}=\dot{m}\left(s_2-s_1\right)=0.965\times\left(7.8334-7.6688\right)=0.1588\left[\text{kJ/(K}\cdot\text{s)}\right]$$

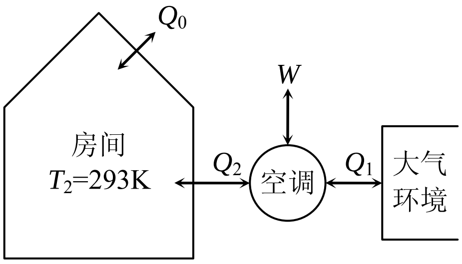
于是可用能损失随时间的变化率为

$$\dot{I}=T_0\dot{S}_\text{g}=300\times0.1588=47.64\left(\text{kJ/s}\right)$$

【例 4.22】某冷暖两用空调冬天用于采暖，夏天用于制冷。若要求房间温度一年四季始终保持在20°C，已知室内外温差为1°C时，通过墙壁、屋顶和窗户传递的热流量为 1200kJ/h，问：

（1）冬天室外温度为 4°C时，驱动该空调所需的最小功率是多少？

（2）若取由（1）计算的输入功率，夏天制冷时室外的最高温度不能超过多少°C？



例 4.22 图

【解】

（1）房间向大气环境放热为

$$\dot{Q}_0 = \frac{1200 \times 1000}{3600} \times (20-4) = 5333.3333(\text{J/s})$$

即空调向房间放热为

$$\dot{Q}_2 = \dot{Q}_0 = 5333.3333\text{J/s}$$

若空调工作在可逆情况，则

$$\frac{\dot{Q}_1}{T_1} = \frac{\dot{Q}_2}{T_2}$$

即

$$\dot{Q}_1 = \frac{\dot{Q}_2}{T_2} T_1 = 5333.3333 \times \frac{277}{293} = 5042.0933(\text{J/s})$$

驱动该空调所需的最小功率为

$$\dot{W} = \dot{Q}_2 - \dot{Q}_1 = 291.24\text{J/s}$$

（2）设大气温度为 T_1，则大气环境向房间放热为

$$\dot{Q}_0 = \frac{1200 \times 1000}{3600} \times (T_1 - 293) = 333.3333(T_1 - 293)$$

即空调从房间吸热为

$$\dot{Q}_2 = \dot{Q}_0 = 333.3333(T_1 - 293)$$

若空调工作在可逆情况，则

$$\frac{\dot{Q}_1}{T_1} = \frac{\dot{Q}_2}{T_2}$$

即

$$\dot{Q}_1 = \frac{\dot{Q}_2}{T_2} T_1 = 333.3333(T_1 - 293) \times \frac{T_1}{293} = 1.13766(T_1 - 293)T_1$$

驱动该空调所需的功率为

$$\dot{W} = \dot{Q}_1 - \dot{Q}_2 = 1.13766(T_1 - 293)T_1 - 333.3333(T_1 - 293) = 291.24(\text{J/s})$$

解方程得

$$T_1 = 309\text{K}$$

所以夏天室外的最高温度不能超过36°C。

【例 4.23】轴流式压气机每分钟吸入 $p_1 = 0.1\text{MPa}$、$t_1 = 20°\text{C}$ 的空气 1200kg，经绝热压缩到 $p_2 = 0.6\text{MPa}$，该压气机的绝热效率为 0.85。试求：（1）出口处气体的温度；（2）压气机所消耗的功率；（3）过程的熵产率及作功能力损失（环境温度 $T_0 = 293\text{K}$）。已知空气的气体常数 $R_g = 0.287\text{kJ/(kg} \cdot \text{K)}$，比定压热容 $c_p = 1.004\text{kJ/(kg} \cdot \text{K)}$。

【解】

（1）轴流式压气机的绝热效率为

$$\eta=\frac{\left(\dfrac{p_2}{p_1}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}-1}{\left(\dfrac{p_2}{p_1}\right)^{(n-1)/n}-1}$$

即

$$\frac{\left(\dfrac{0.6}{0.1}\right)^{(1.4-1)/1.4}-1}{\left(\dfrac{0.6}{0.1}\right)^{(n-1)/n}-1}=0.85$$

解方程得

$$n=1.479$$

出口气体的温度为

$$T_2=T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(n-1)/n}=293\times\left(\frac{0.6}{0.1}\right)^{(1.479-1)/1.479}=523.46(\mathrm{K})$$

（2）以轴流式压气机中空气为研究对象，其稳定工况的能量方程为

$$\dot{Q}-\dot{W}_{\mathrm{sh}}+\left(h_1+\frac{c_1^2}{2}+gz_1\right)\dot{m}-\left(h_2+\frac{c_2^2}{2}+gz_2\right)\dot{m}=0$$

根据题意，绝热压缩过程$\dot{Q}=0$，忽略宏观动能和重力位能的变化，上式简化为

$$\dot{W}_{\mathrm{sh}}=\dot{m}(h_1-h_2)$$

压气机所消耗的功率为

$$\dot{W}_{\mathrm{sh}}=\frac{1200}{60}\times1004\times(293-523.46)=-4.628\times10^6\ (\mathrm{J/s})$$

（3）以轴流式压气机中空气为研究对象，其稳定工况的熵方程为

$$\dot{S}_{\mathrm{f}}+\dot{S}_{\mathrm{g}}+\dot{m}s_1-\dot{m}s_2=0$$

根据题意，绝热压缩过程$\dot{S}_{\mathrm{f}}=0$，上式整理为

$$\dot{S}_{\mathrm{g}}=\dot{m}(s_2-s_1)=\frac{1200}{60}\times\left(1004\times\ln\frac{523.46}{293}-287\times\ln\frac{0.6}{0.1}\right)=1367.48[\mathrm{J/(K\cdot s)}]$$

作功能力损失随时间的变化率为

$$\dot{I}=T_0\dot{S}_{\mathrm{g}}=293\times1367.48=4.007\times10^5\ (\mathrm{J/s})$$

【例 4.24】有一压气机将空气由$p_1=1\mathrm{bar}$、$T_1=300\mathrm{K}$绝热压缩到$p_2=10\mathrm{bar}$、$T_2=650\mathrm{K}$。请分析该过程是否可逆，并求该压气机的绝热效率。已知空气的气体常数$R_{\mathrm{g}}=0.287\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$，比定容热容$c_V=0.718\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$，等熵指数$\gamma=1.4$。

【解】

以压气机中空气为研究对象，其稳定工况的熵方程为

$$\dot{S}_{\mathrm{f}}+\dot{S}_{\mathrm{g}}+\dot{m}s_1-\dot{m}s_2=0$$

根据题意，对于绝热压缩过程，$\dot{S}_{\mathrm{f}}=0$，则熵产为

$$s_{\mathrm{g}}=\frac{\dot{S}_{\mathrm{g}}}{\dot{m}}=s_2-s_1=1.005\times\ln\frac{650}{300}-0.287\times\ln\frac{10}{1}=0.1162[\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}]>0$$

由于此过程的熵产大于 0，所以该过程不可逆。

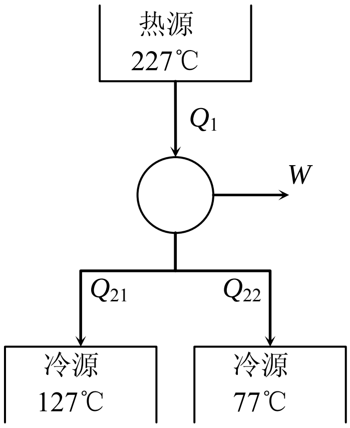
若把实际过程看成一个多变过程，则多变指数为

$$n=\frac{\ln\dfrac{p_2}{p_1}}{\ln\dfrac{p_2}{p_1}-\ln\dfrac{T_2}{T_1}}=\frac{\ln\dfrac{10}{1}}{\ln\dfrac{10}{1}-\ln\dfrac{650}{300}}=1.5056$$

压气机的绝热效率为

$$\eta_s=\frac{\left(\dfrac{p_2}{p_1}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}-1}{\left(\dfrac{p_2}{p_1}\right)^{(n-1)/n}-1}=\frac{10^{(1.4-1)/1.4}-1}{10^{(1.5056-1)/1.5056}-1}=79.77\%$$

【例 4.25】一可逆热机，从 227℃的热源吸热，并向 127℃和 77℃的热源分别放热。已知其热效率为 26%及向 77℃的热源放热的热量为 420kJ，试求该热机的循环净功。



例 4.25 图

【解】

热机的热效率为

$$\eta=\frac{Q_1-Q_{21}-Q_{22}}{Q_1}=\frac{Q_1-Q_{21}-420}{Q_1}=0.26$$

对于热源、可逆热机和冷源组成的整个孤立系有

$$\frac{-Q_1}{500}+\frac{Q_{21}}{400}+\frac{420}{350}+0=0$$

解方程组可得

$$Q_1=1000\text{kJ}，\ Q_{21}=320\text{kJ}$$

该热机的循环净功为

$$W=Q_1-Q_{21}-Q_{22}=260\text{kJ}$$