广东工业大学
GUANGDONG UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

高等工程热力学

2. 㶲方程

2.1 不可逆过程和㶲损失

能量=㶲+火无

可逆过程

能量（恒量）=㶲（恒量） + 火无（恒量）

不可逆过程

能量（恒量）=㶲↓+ 火无↑

2.2 平衡方程和㶲损失

- 平衡的一般关系式

流入系统的㶲—（流出系统的㶲+㶲损失）=系统㶲的增量

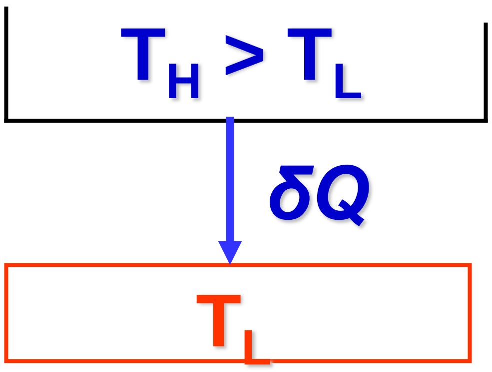
进入㶲 —（流出㶲+㶲损）= 㶲增量

2.3 几种典型的不可逆㶲损失

2.3.1 有限温差传热过程

高温物体放出热量㶲值

$$\left|\delta E_{x,Q_H}\right| = \delta Q\left(1-\frac{T_0}{T_H}\right)$$



低温物体得到热量㶲值

$$\delta E_{x,Q_L} = \delta Q\left(1-\frac{T_0}{T_L}\right)$$

- **㶲损失**

$$\delta E_{x,L} = \left|\delta E_{x,Q_H}\right| - \delta E_{x,Q_L} = T_0\delta Q\left(\frac{1}{T_L}-\frac{1}{T_H}\right) > 0$$

2.3 几种典型的不可逆㶲损失

2.3.2 有摩阻耗散的㶲损失

流入系统的㶲—（流出系统的㶲+㶲损失）=系统㶲的增量

入—（出+损失）=增量

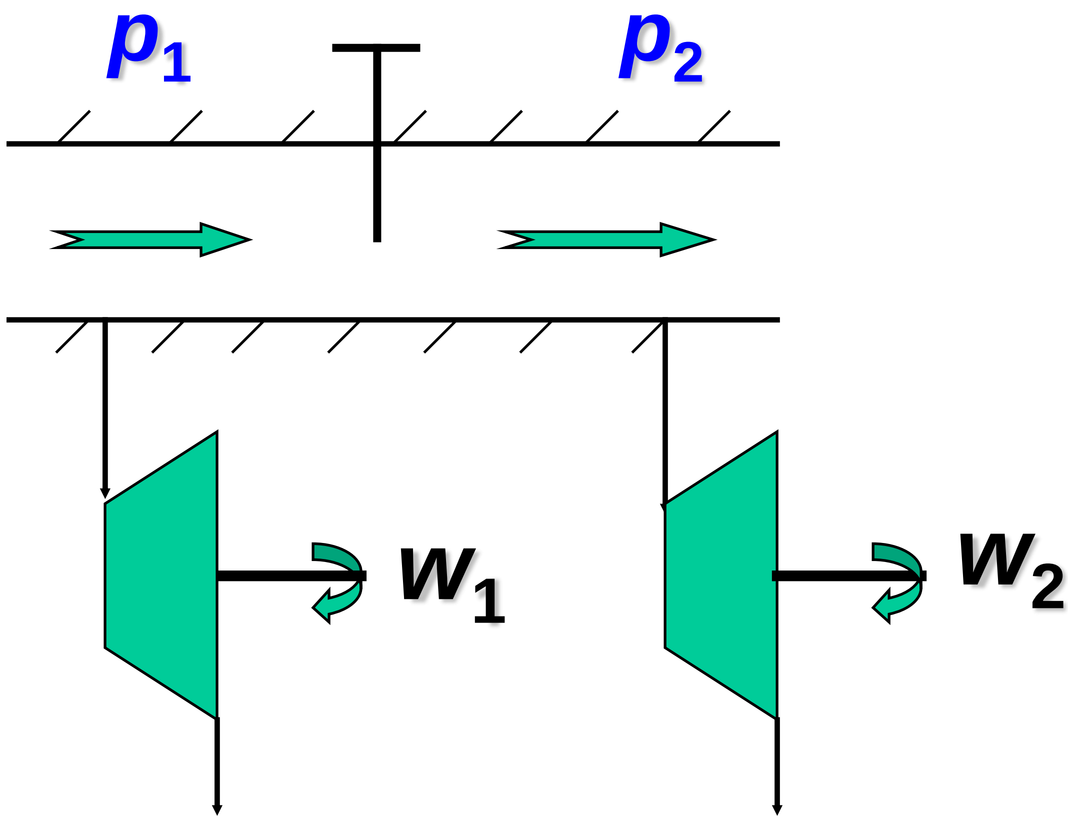
$$\delta W_A = \delta Q$$

$$\delta E_{x,L} = \delta W_A - \delta Q(1 - \frac{T_0}{T}) = \delta Q \frac{T_0}{T} = \delta W_A \frac{T_0}{T} > 0$$

2.3 几种典型的不可逆㶲损失

2.3.3 绝热节流过程引起的㶲损失

$$h_1 = h_2$$



$$w_1 > w_2$$

2.3 几种典型的不可逆㶲损失

2.3.3 绝热节流过程引起的㶲损失

入—（出+损失）=增量

熵分析法

$$\Delta S_{ad} = S_2 - S_1 > 0$$

$$\Delta S_{ad} = \Delta s_f + \Delta s_g$$

$$I = T_0 \Delta S_g = T_0 \Delta S_{ad} = T_0 (S_2 - S_1)$$

㶲分析法

$$E_{x,L} = E_{x,H_1} - E_{x,H_2} = H_1 - H_2 - T_0 (S_1 - S_2)$$

$$E_{x,L} = T_0 (S_2 - S_1) = I$$

2.3 㶲平衡方程及㶲损失

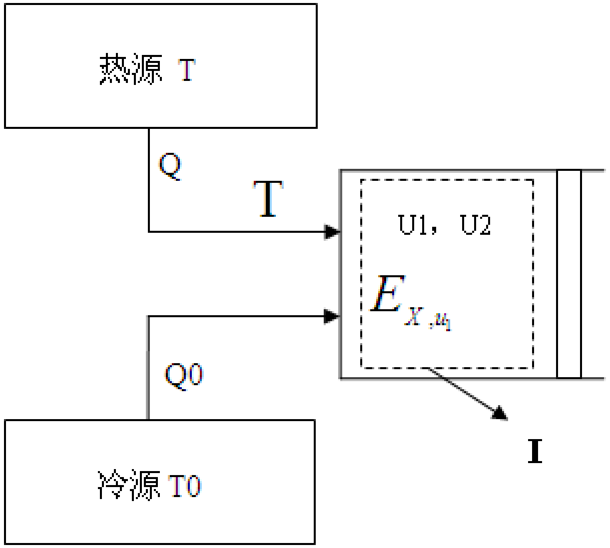
3.1 㶲平衡方程

- **闭口系统能量方程** $\boxed{Q = \Delta U + W}$

✱ 闭口系的㶲平衡方程

$$\mathrm{I} = E_{x,Q} + E_{x,U1} - E_{x,U2} - W_u$$

$$E_{x,Q} = E_{x,U1} - E_{x,U2} - W_u + I$$



❖ 开口系统能量方程 $\boxed{Q = \Delta H + W_t}$

❖ 开口系的㶲平衡方程

$$e_{x,Q} = \mathrm{e}_{x,\ \mathrm{H2}} - e_{x,H1} + \frac{1}{2}c_{f2}{}^2 - \frac{1}{2}c_{f1}{}^2 + w_i + i$$

$$i = e_{x,Q} + \mathrm{e}_{x,\ \mathrm{H1}} - e_{\mathrm{x},H2} - \frac{1}{2}c_{f2}{}^2 + \frac{1}{2}c_{f1}{}^2 + w_i$$

➢ 热力循环系统的㶲方程 $\boxed{\sum Ex_{进} = \sum Ex_{出} + I}$

2.4 闭口系统的㶲平衡方程与㶲损失

例： 1kg 空气， 由 p_1=50bar, t_1=17°C, 膨胀到 p_2=40bar, t_2=17°C, 已知p_0=1bar, t_0=17°C

求：该膨胀过程对外界的最大有用功

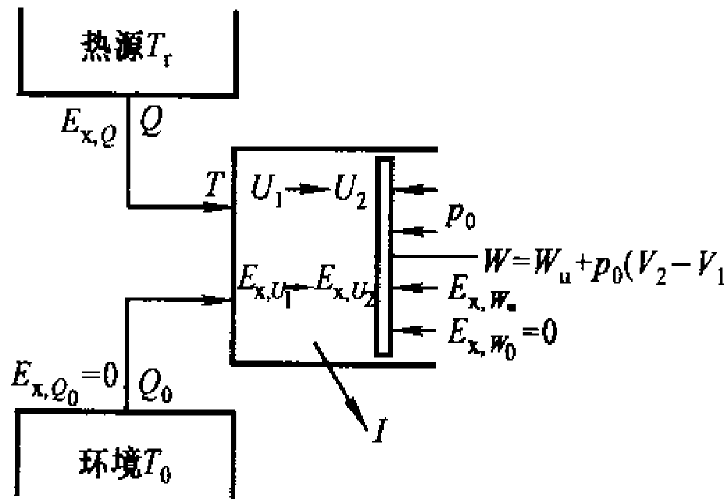
$$ex_{u1} = RT_0\left(\ln\frac{p_1}{p_0} + \frac{p_0}{p_1} - 1\right) = 244kJ/kg$$

$$ex_{u2} = RT_0\left(\ln\frac{p_2}{p_0} + \frac{p_0}{p_2} - 1\right) = 226kJ/kg$$

$$w_{\max} = ex_{u1} - ex_{u2} = 18\mathrm{kJ/kg}$$

2.4 闭口系统的㶲平衡方程与㶲损失

入—（出+损）=增量



$$E_{x,Q}-(E_{x,W}+E_{x,L})=\Delta E_{x,U}$$

$$E_{x,Q}=E_{x,W}+(E_{x,U_2}-E_{x,U_1})+E_{x,L}$$

$$E_{x,L}=E_{x,Q}+(E_{x,U_1}-E_{x,U_2})-E_{x,W}$$

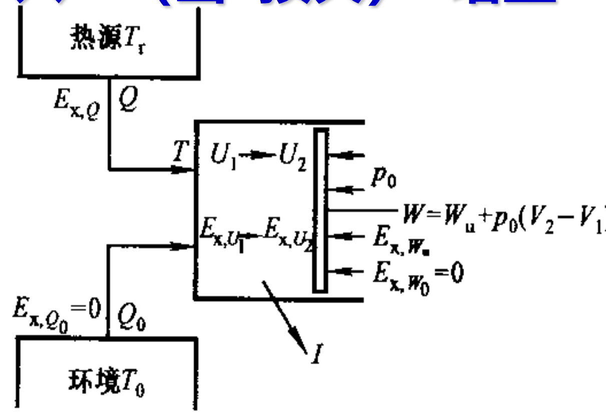
$$=E_{x,Q}-\Delta E_{x,U}-W_A$$

$$\Delta E_{x,U}=E_{x,U_2}-E_{x,U_1}=(U_2-U_1)+p_0(V_2-V_1)-T_0(S_2-S_1)$$

$$E_{x,Q}=\int_1^2\delta Q(1-\tfrac{T_0}{T_H})$$

2.4 闭口系统的㶲平衡方程与㶲损失

入—（出+损失）=增量



$$E_{x,L} = E_{x,Q} + (E_{x,U_1} - E_{x,U_2}) - E_W$$

$$= E_{x,Q} - \Delta E_{x,U} - W_A$$

$$\Delta E_{x,U} = E_{x,U_2} - E_{x,U_1} = (U_2 - U_1) + p_0(V_2 - V_1) - T_0(S_2 - S_1)$$

$$E_{x,W} = W_A = W - p_0(V_2 - V_1)$$

$$W_A = \int_1^2 \delta Q(1 - \tfrac{T_0}{T_H}) + E_{x,U_1} - E_{x,U_2} - E_{x,L}$$

$$= \int_1^2 \delta Q(1 - \tfrac{T_0}{T_H}) + U_1 - U_2 + p_0(V_1 - V_2) - T_0(S_1 - S_2) - E_{x,L}$$

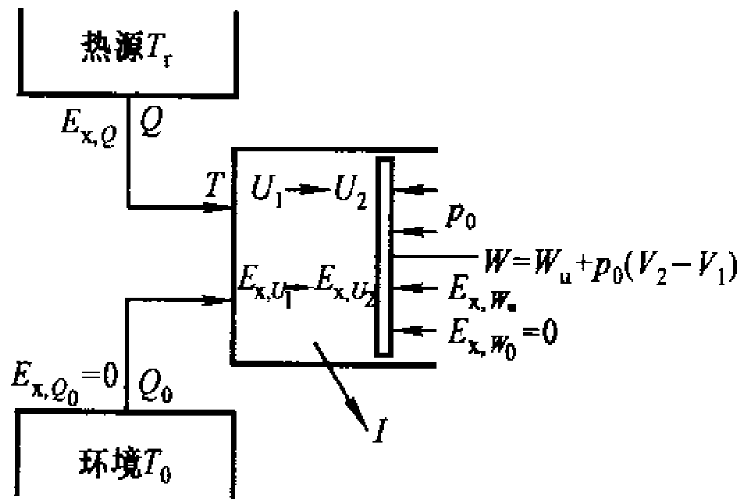
$$W_{A,\max} = \int_1^2 \delta Q(1 - \tfrac{T_0}{T_H}) + E_{x,U_1} - E_{x,U_2}$$

$$W_A = W_{A,\max} - E_{x,L} \qquad\qquad W_A < W_{A,\max}$$

2.4 闭口系统的㶲平衡方程与㶲损失

入—（出+损失）=增量

$$W_{A,\max} = \int_1^2 \delta Q(1-\frac{T_0}{T_H}) + E_{x,U_1} - E_{x,U_2}$$



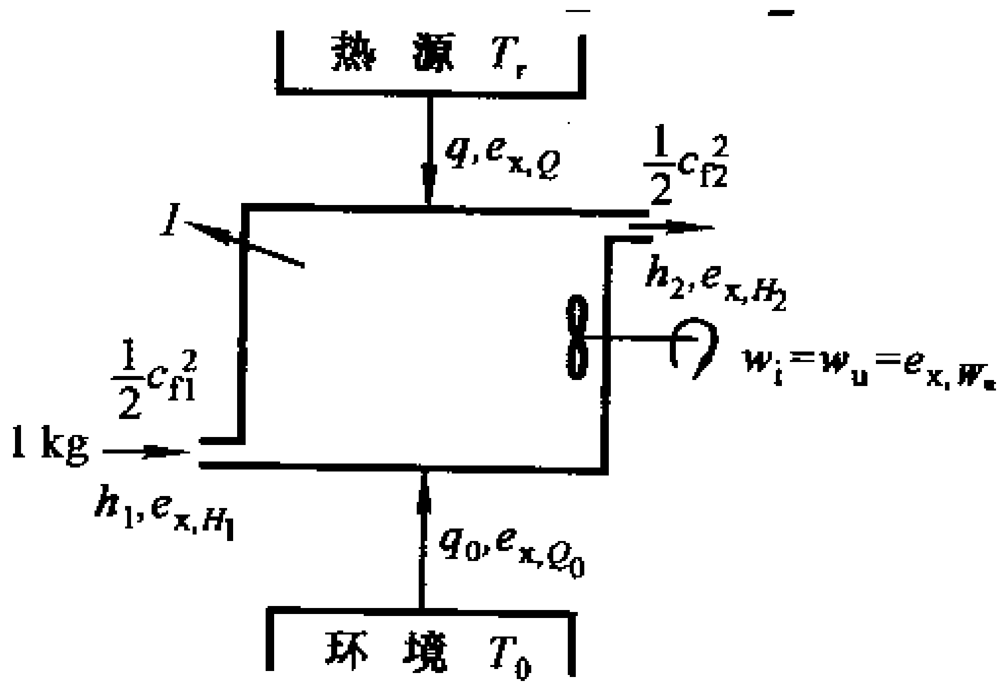
$$E_{x,L} = W_{A,\max} - W_A$$

$$W = (Q+Q_0) - \Delta U$$

$$W = W_A + p_0\Delta V = W_A + p_0(V_2 - V_1)$$

$$E_{x,L} = \int_1^2 \delta Q(1-\frac{T_0}{T_H}) + (U_1 - U_2) + p_0(V_1 - V_2) -$$
$$T_0(S_1 - S_2) - [(Q+Q_0) - \Delta U - p_0(V_2 - V_1)]$$
$$= T_0(S_2 - S_1) - \int \delta Q \frac{T_0}{T_H} - Q_0$$

2.5 稳定流动系统的㶲平衡方程与㶲损失



流入系统的㶲—（流出系统的㶲+㶲损失）=系统㶲的增量

$$E_{x,L} = T_0 \int_1^2 \frac{\delta Q}{T_H} - T_0 (S_2 - S_1) - E_{x,Q_0}$$

2.6 循环系统的㶲平衡方程式与㶲损失分析

流入系统的㶲—（流出系统的㶲+㶲损失）=系统㶲的增量

$$E_{x,Q}-(E_{x,W}+E_{x,L})=0$$

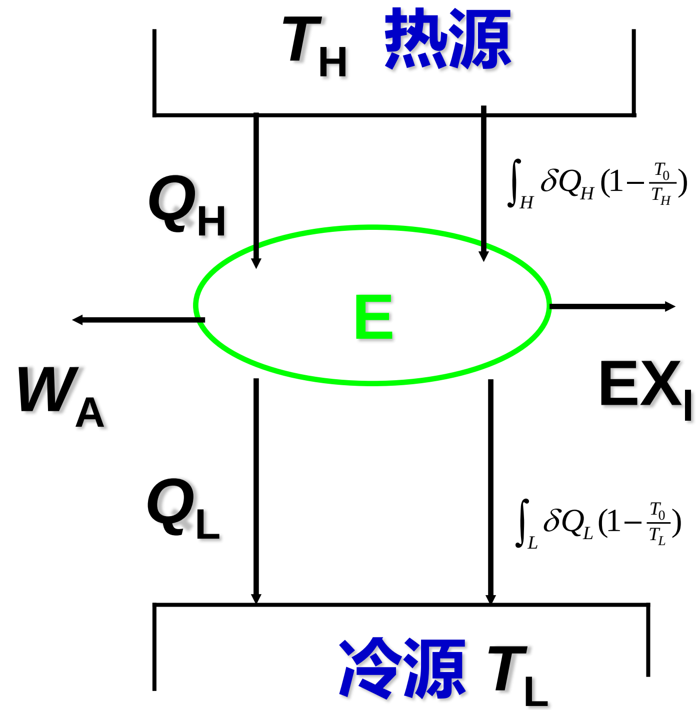
$$E_{x,Q}=\oint(1-\frac{T_0}{T})\delta Q$$

$$E_{x,W}=\oint\delta W$$

$$\oint(1-\frac{T_0}{T})\delta Q=\oint\delta W_A+E_{x,L}$$

2.6.1 动力循环

入—（出+损失）=增量



㶲平衡方程 $\oint(1-\frac{T_0}{T})\delta Q=\oint \delta W_A+E_{x,L}$

$$\int_H \delta Q_H(1-\frac{T_0}{T_H})-\int_L \delta Q_L(1-\frac{T_0}{T_L})-W_A=E_{x,L}$$

$$W_{A,\max}=\int_H \delta Q_H(1-\frac{T_0}{T_H})-\int_L \delta Q_L(1-\frac{T_0}{T_L})$$

$$W_A=W_{A,\max}-E_{x,L}$$

当$T_0=T_L$时 $$W_A=\int_H \delta Q_H(1-\frac{T_0}{T_H})-E_{x,L}$$

$$W_{A,\max}=\int_H \delta Q(1-\frac{T_0}{T_H}) \qquad Q_H=W_A+Q_L=W_A+Q_0$$

$$E_{x,L}=\int_H \delta Q_H(1-\frac{T_0}{T_H})-W_A=Q_0-T_0\int\frac{\delta Q_H}{T_H}=Q_0-A_{n,Q_H}<Q_0$$

2.6.2 制冷循环

冷量㶲与冷量流方向相反

$$W_A + \left|\int_H \delta Q_H (1-\frac{T_0}{T_H})\right| - \left|\int_L \delta Q_L (1-\frac{T_0}{T_L})\right| = E_{x,L}$$

$$W_A = \left|\int_L \delta Q_L (1-\frac{T_0}{T_L})\right| - \left|\int_H \delta Q_H (1-\frac{T_0}{T_H})\right| + E_{x,L}$$

$$W_{A,\min} = \left|\int_L \delta Q_L (1-\frac{T_0}{T_L})\right| - \left|\int_H \delta Q_H (1-\frac{T_0}{T_H})\right|$$

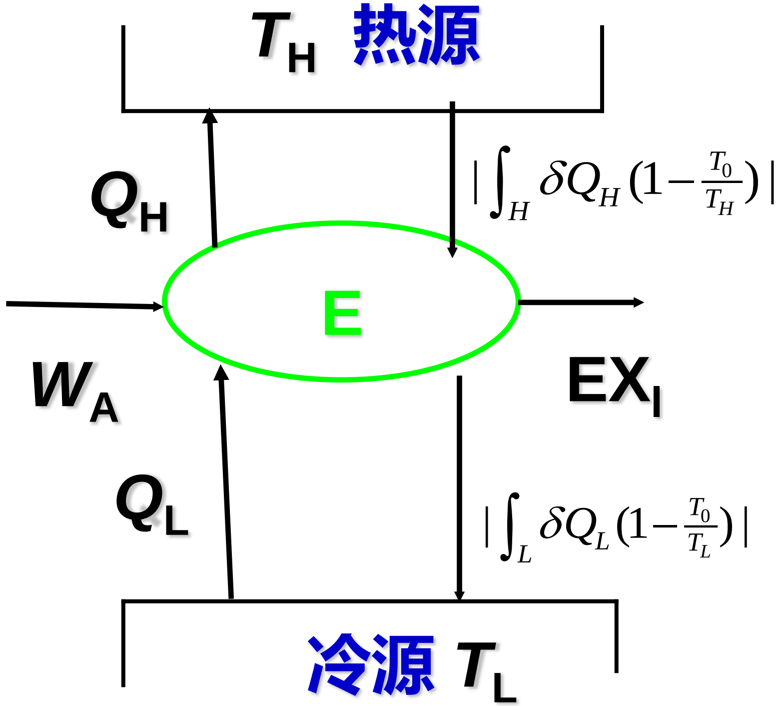
$$Q_H = Q_0 = W_A + Q_L$$

$$W_A = W_{A,\min} + E_{x,L} \qquad T_H = T_0 \text{时}$$

$$W_A = \left|\int_L \delta Q_L (1-\frac{T_0}{T_L})\right| + E_{x,L}$$

$$W_A = -\int_L \delta Q_L (1-\frac{T_0}{T_L}) + E_{x,L}$$

入—（出+损失）=增量



$$E_{x,L} = Q_0 - T_0 \int \frac{\delta Q_L}{T_L} = Q_0 - A_{n,Q_L}$$

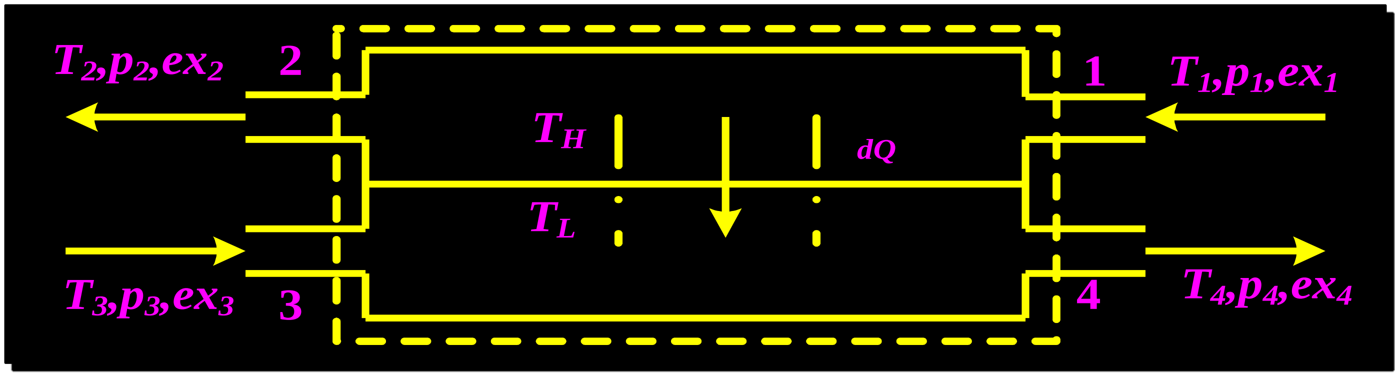
2.7 换热器的㶲损失

$$\delta E_{x,l} = T_0 \delta Q\left(\frac{1}{T_L} - \frac{1}{T_H}\right) = T_0 \delta_Q \frac{T_H - T_L}{T_H T_L}$$

换热器的㶲损失与<u>冷热源温差</u>及<u>乘积</u>有关！

2.7 换热器的㶲损失

2.7.1 换热器的㶲平衡方程与㶲损失

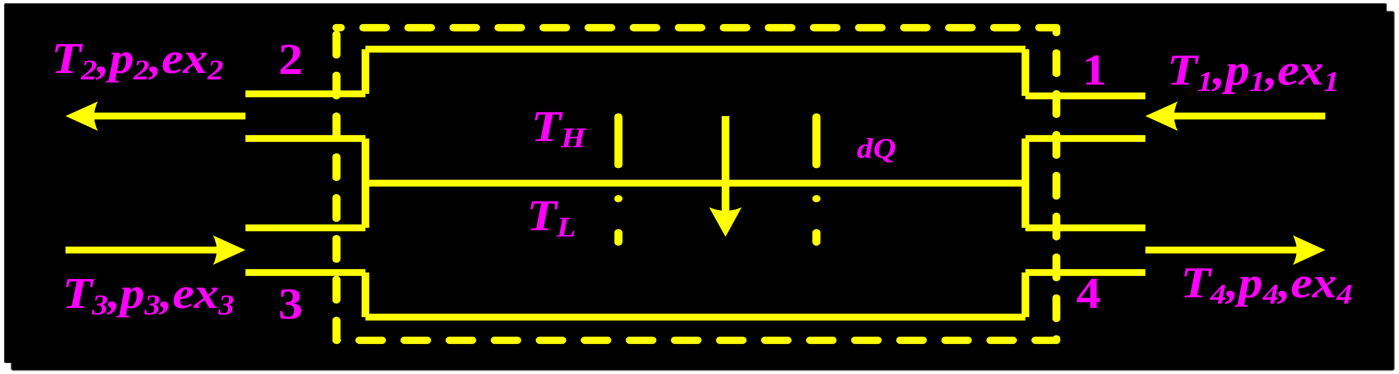


$$(E_{x,H_1}+E_{x,H3})-(E_{x,H_2}+E_{x,H_4})=E_{x,L}$$

$$\begin{aligned}E_{x,L}&=(E_{x,H_1}-E_{x,H_2})+E_{x,H_3}-E_{x,H_4}\\&=(H_1-H_2)-T_0(S_1-S_2)+(H_3-H_4)-T_0(S_3-S_4)\end{aligned}$$

2.7 换热器的烟损失

2.7.1 换热器的烟平衡方程与烟损失



$$E_{x,L}=(H_1-H_2)-T_0(S_1-S_2)+(H_3-H_4)-T_0(S_3-S_4)$$

$$H_1-H_2=H_4-H_3$$

$$E_{x,L}=T_0[(S_2-S_1)+(S_4-S_3)]$$

熵分析法

$$\Delta S_g=\Delta S_{ad}=S_{out}-S_{in}=(S_4+S_2)-(S_1+S_3)$$

$$=(S_2-S_1)+(S_4-S_3)$$

$$I=E_{x,L}=T_0\Delta S_g=T_0[(S_2-S_1)+(S_4-S_3)]$$

2.7 换热器的㶲损失

2.7.2 热交换过程的η_c-Q

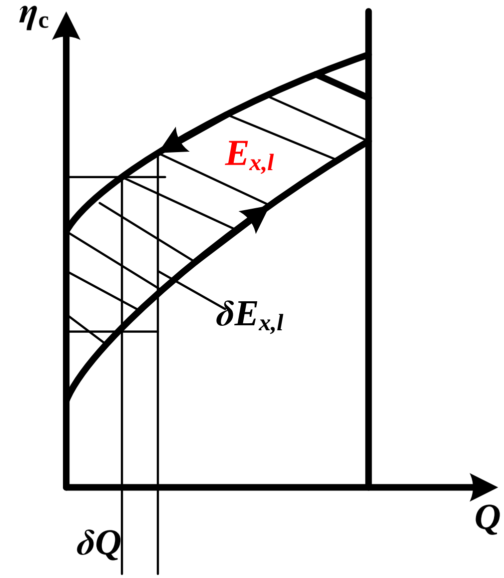
对某一物流，进出口状态1和2，有

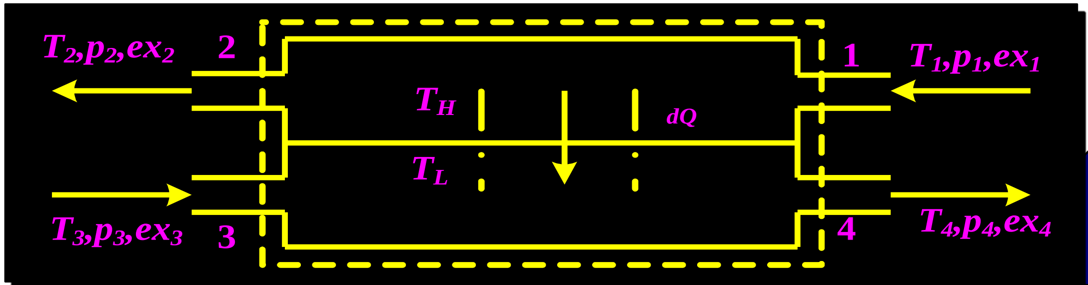
$$E_{x,H_1}-E_{x,H_2}=\int_1^2\delta Q(1-\frac{T_0}{T_H})=\int_1^2\eta_{c,H}\delta Q$$

$$\eta_c=1-\frac{T_0}{T}$$

$$E_{x,H_4}-E_{x,H_3}=\int_3^4\delta Q(1-\frac{T_0}{T_L})=\int_3^4\eta_{c,L}\delta Q$$

$$E_{x,L}=(E_{x,H_2}-E_{x,H_1})-(E_{x,H_4}-E_{x,H_3})$$





2.7 换热器的㶲损失

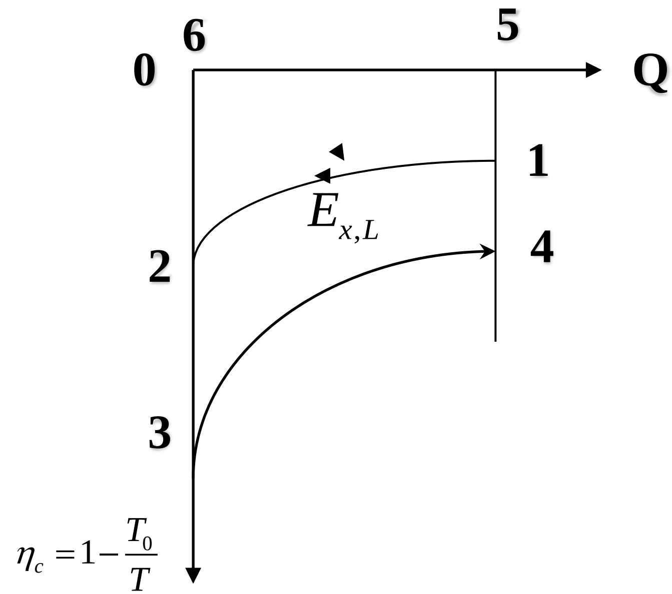
2.7.2 热交换过程的η_c-Q

低温换热器，如图，设$T_H < T_0$, $T_L < T_0$。由于冷流体得到冷量，其㶲减少，而热流体放出冷量，其㶲增加。同理，在不计流体内部阻力损失时，流体㶲的变化等于冷量㶲。此时，卡诺系数$1-T_0/T$ 为负值。换热过程的㶲损失为

$$E_{x,L} = \left(E_{x,H_3} - E_{x,H_4}\right) - \left(E_{x,H_2} - E_{x,H_1}\right)$$

$$= \int_3^4 \delta Q \left(1 - \frac{T_0}{T_L}\right) - \int_1^2 \delta Q \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right)$$

$$= \int_3^4 \eta_{c,L} \delta Q - \int_1^2 \eta_{c,H} \delta Q$$



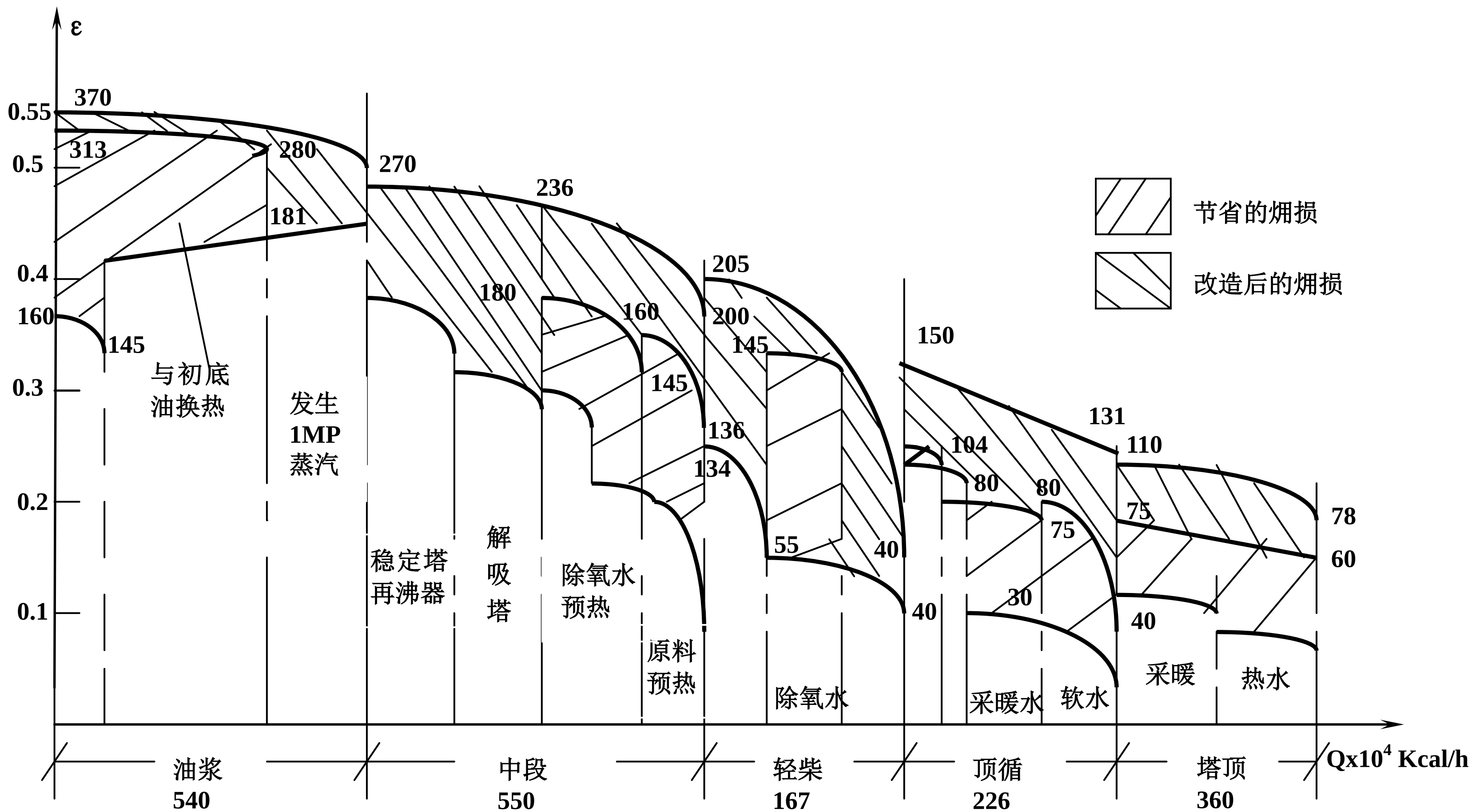
= 面积43654 - 面积12651

= 面积12341

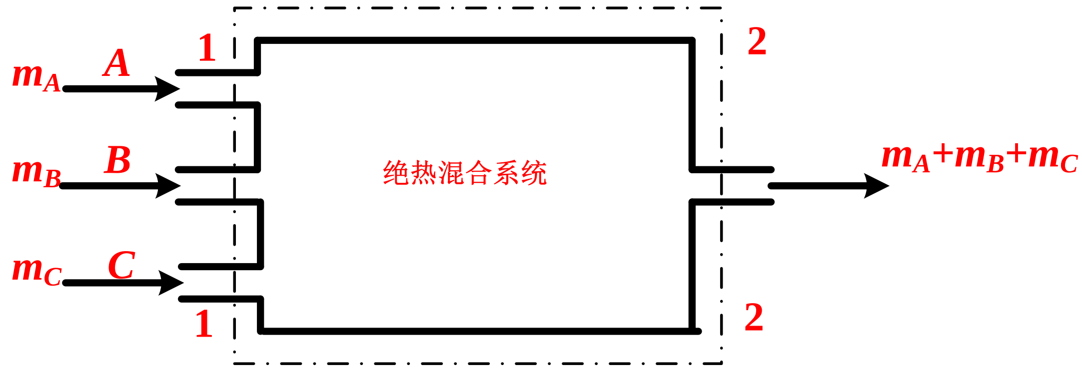
上式表明，低温换热器的㶲损失等于冷流体㶲的减少量与热流体的㶲的增加量之差。

2.7 换热器的㶲损失

2.7.2 热交换过程的η_c-Q



2.8 气体混合过程的㶲损失



$$E_{x,H_A}+E_{x,H_B}+E_{x,H_C}-E_{x,H_M}=E_{x,L}$$

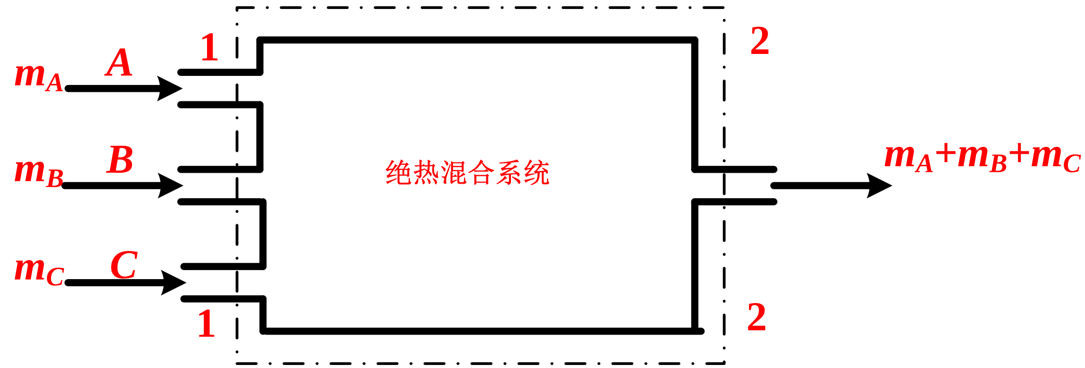
$$(H_A+H_B+H_C)-T_0(S_A+S_B+S_C)-(H_M-T_0S_M)=E_{x,L}$$

$$E_{x,L}=[(H_A+H_B+H_C)-H_M]-T_0[(S_A+S_B+S_C)-S_M]$$

$$H_A+H_B+H_C=H_M \qquad E_{x,L}=T_0[S_M-(S_A+S_B+S_C)]$$

2.8 气体混合过程的㶲损失

$$E_{x,L} = T_0[S_M - (S_A + S_B + S_C)]$$



上述结论根据熵增原理得到，取绝热混合器为系统则

$$\Delta S_g = \Delta S_{ad} = S_{out} - S_{in}$$
$$= S_M - \left(S_A + S_B + S_C\right)$$
$$I = E_{x,L} = T_0 \Delta S_g = T_0\left[S_M - \left(S_A + S_B + S_C\right)\right]$$

从而说明㶲法（㶲平衡方程式）和熵法所得结论一样

2.8.2 理想气体等压等温的混合过程

设图中混合过程中压力、温度保持不变，则

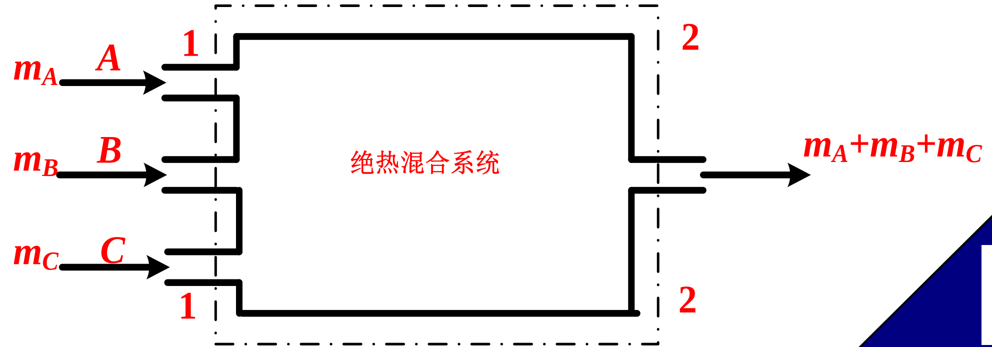
$$\Delta S=\sum m_i\left(\int_1^2 c_{pi}\frac{dT}{t}-R_{gi}\ln\frac{p_i}{p}\right)$$

式中：p_i为某组分混合后的分压力 $x_i=\dfrac{p_i}{p}$ $R_{gi}=\mathrm{R}_{eq}\dfrac{x_i}{w_i}$

对于单位质量的混合气体，有

$$\Delta S_g=-\sum m_iR_{gi}\ln x_i=-\sum m_i\,\mathrm{R}_{eq}\frac{x_i}{w_i}\ln x_i=-\mathrm{R}_{eq}\sum m_i\frac{x_i}{w_i}\ln x_i$$

$$\Delta s_g=-\sum w_iR_{gi}\ln x_i=-\mathrm{R}_{eq}\sum x_i\ln x_i$$



2.8.2 理想气体等压等温的混合过程

绝热混合过程的㶲损失为

$$E_{x,L} = T_0 \Delta S_g = -T_0 \sum m_i R_{gi} \ln x_i$$

$$= -T_0 \, \mathrm{R_{eq}} \sum m_i \frac{x_i}{w_i} \ln x_i$$

或

$$e_{x,L} = T_0 \Delta s_g = -T_0 \sum w_i R_{gi} \ln x$$

$$_i = -T_0 \, \mathrm{R_{eq}} \sum x_i \ln x_i$$

单位摩尔的㶲损失为

$$E_{xm,L} = -T_0 R \sum x_i \ln x_i$$

最小分离功：混合过程要引起㶲损失，根据热力学第二定律，要将混合物分离成各纯组分，必须消耗㶲或有用功，而且至少要消耗和混合时的㶲损失相等的分离功，称为可逆分离时消耗的最小分离功。

2.9 能量系统的㶲效率

㶲效率的一般定义

不可逆过程 → 㶲 → 过程不可逆性越大，㶲损失越大 →

损失

㶲的总量随不可逆过程进行不断减少 → 用能的实质是用㶲 →

<u>能量的合理利用，是能量中㶲的合理利用</u>。

要充分利用为实施某种过程所提供能量中的㶲

在完成一个特定过程时要耗费尽量少的㶲

在实际的能量转换过程中应尽量减少㶲的损失。

——显然，对于在给定条件下进行的过程，能够用㶲损失 的大小用来衡量该过程热力学完善程度。

2.9 能量系统的㶲效率

1、 Ex效率

Ex效率 $$\eta_{\mathrm{ex}} = \frac{\text{有效的输出}Ex}{\text{输入的}Ex}$$ $$\eta_{\mathrm{t}} = \frac{W_{\mathrm{net}}}{Q_1}$$

动力装置 $$\eta_{\mathrm{ex}} = \frac{W_{\mathrm{net}}}{Ex_{\mathrm{in}} - Ex_{\mathrm{out}}}$$

耗功装置 $$\eta_{\mathrm{ex}} = \frac{Ex_{\mathrm{out}} - Ex_{\mathrm{in}}}{W}$$

换热设备 $$\eta_{\mathrm{ex}} = \frac{\text{冷流体得到的}Ex}{\text{热流体放出的}Ex}$$

加热

2.9 能量系统的㶲效率

3.3 Ex损失与作功能力损失

（1）热变功

$$I = Ex_1 - Ex_2 - W_s$$

热一律

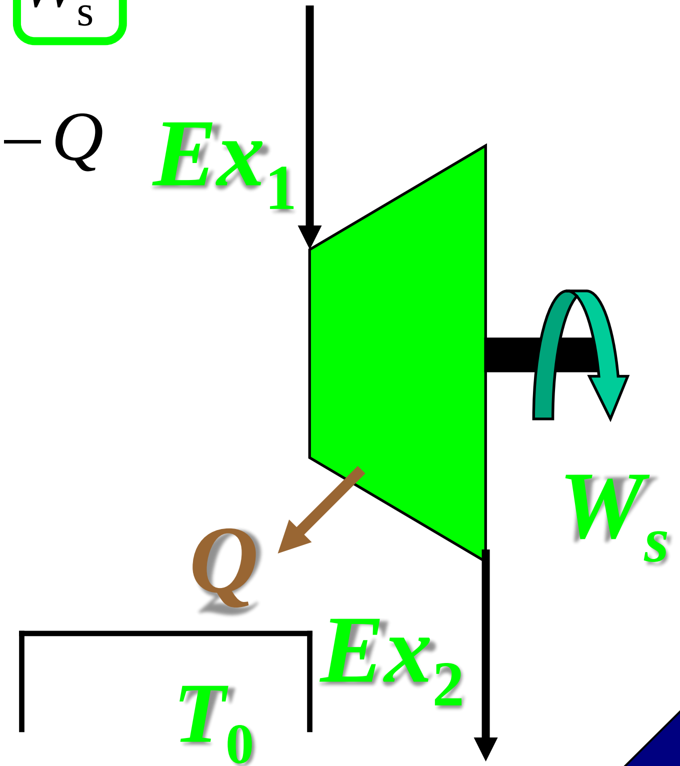
$$Q = H_2 - H_1 + \boxed{W_s}$$

$$I = H_1 - H_2 - T_0(S_1 - S_2) + (H_2 - H_1) - Q$$

$$= -T_0(S_1 - S_2) - Q$$

$$= T_0\left((S_2 - S_1) - \frac{Q}{T_0}\right)$$

$$= T_0 \Delta S_{iso}$$



2.9 能量系统的㶲效率

（2）传热过程

放热 $m_{热}(h_1 - h_2)$ **吸热** $m_{冷}(h_4 - h_3)$

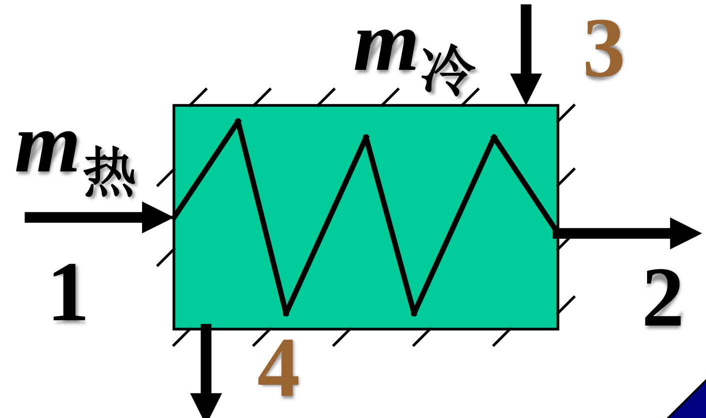
$$I = m_{热}ex_{\text{h1}} + m_{冷}ex_{\text{h3}} - m_{热}ex_{\text{h2}} - m_{冷}ex_{\text{h4}}$$

$$= m_{热}(ex_{\text{h1}} - ex_{\text{h2}}) + m_{冷}(ex_{\text{h3}} - ex_{\text{h4}})$$

$$= m_{热}\left[h_1 - h_2 - T_0(s_1 - s_2)\right] + m_{冷}\left[h_3 - h_4 - T_0(s_3 - s_4)\right]$$

$$= T_0(S_2 - S_1) + T_0(S_4 - S_3)$$

$$= T_0 \Delta S_{\text{iso}}$$



（3）膨胀过程

可逆绝热膨胀

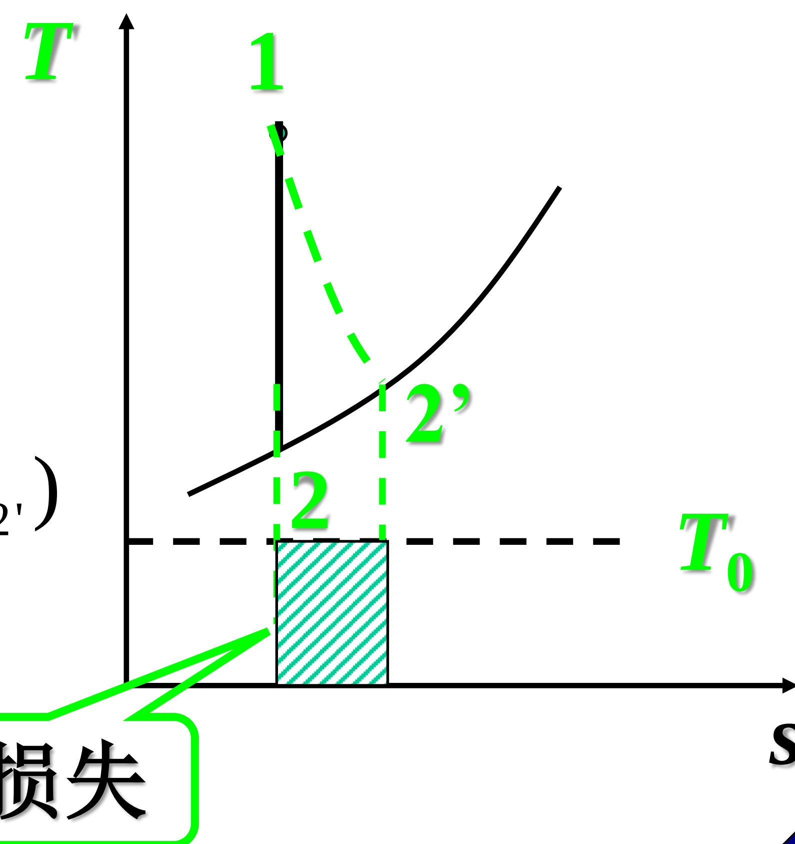
$$w_{max} = ex_{h1} - ex_{h2}$$
$$= h_1 - h_2 - T_0(s_1 - s_2)$$
$$= h_1 - h_2$$

由于不可逆少作功

$$w_{max} - w = h_{2'} - h_2$$

不可逆绝热膨胀

$$ex_{h1} - ex_{h2'} = \underbrace{h_1 - h_{2'}}_{w} - T_0(s_1 - s_{2'})$$



2.9 能量系统的㶲效率

系统或设备㶲效率：

㶲效率：热力系统或热工设备中㶲的利用程度，或系统中进行热力过程的热力学完善程度。

在系统或设备进行的过程中，被利用或收益的㶲与支付或耗费的㶲的比值

$$\eta_{e_x} = \frac{E_{x,gain}}{E_{x,pay}} \le 1$$

㶲损失系数

系统或过程中耗费㶲与收益㶲之差即为系统或设备进行的不可逆过程所引起的㶲损失：

$$E_{xl} = E_{x,pay} - E_{x,gain}$$

2.9 能量系统的㶲效率

㶲效率和㶲损失系数

所以

$$\eta_{ex} = \frac{E_{x,pay} - E_{xl}}{E_{x,pay}} = 1 - \frac{E_{xl}}{E_{x,pay}} = 1 - \xi$$

㶲损失系数

$$\xi = \frac{E_{xl}}{E_{x,pay}}$$

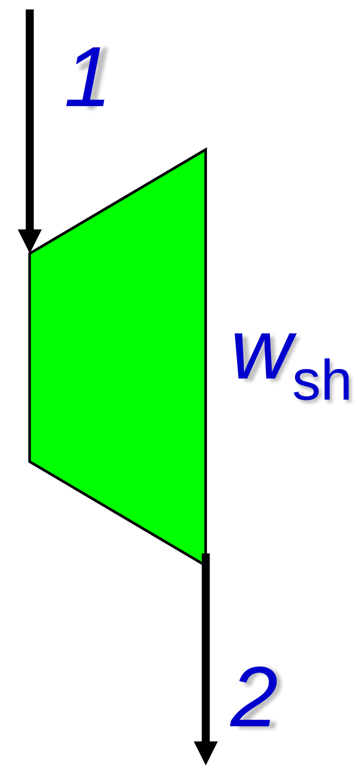
因此　㶲效率是耗费㶲的利用分额，
㶲损失系数是耗费㶲的损失分额。

2.9 能量系统的㶲效率

㶲效率的不同形式

$$\eta_{e_{x1}} = \frac{\omega_{sh}}{e_{x,H_1} - e_{x,H_2}}$$

$$\eta_{e_{x2}} = \frac{\omega_{sh} + e_{x,H_2}}{e_{x,H_1}}$$



2.9 能量系统的㶲效率

建立㶲效率公式的原则

$$\eta_{e_x} = \frac{E_{x,gain}}{E_{x,pay}} \le 1$$

- ✓分子分母中必须包含所有进出系统的㶲；
- ✓任意一项㶲只能出现一次；
- ✓进入的㶲在分子上为负，分母上为正；
- ✓输出的㶲在分子上为正，分母上为负；
- ✓㶲效率大于0小于等于1。

2.9 能量系统的㶲效率

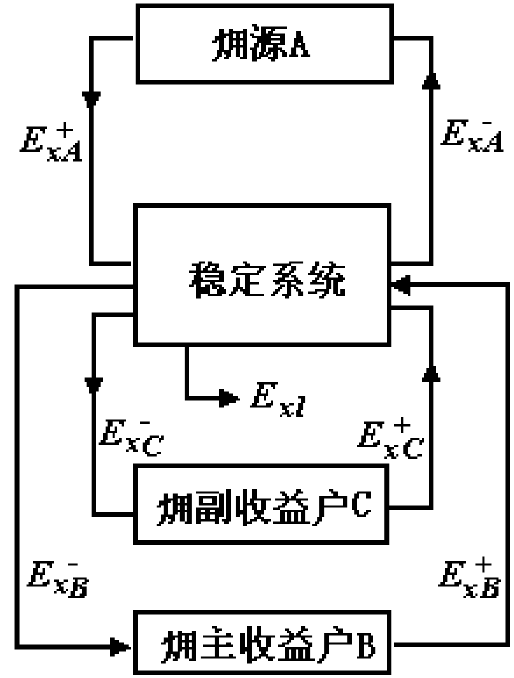
按㶲的作用，可以将外界分为三种：

入= （出+损失）+增量

⊙向系统或设备提供耗费㶲的能源或㶲源A；

⊙㶲的主要收益户B；

⊙是㶲的辅助收益户C。



稳定工作系统㶲平衡方程式：

$$E_{xA}^{+}+E_{xB}^{+}+E_{xC}^{+}=E_{xA}^{-}+E_{xB}^{-}+E_{xC}^{-}+E_{xl}$$

其中每项

$$E_{xi}=\sum\left[E_{x,H}+\frac{1}{2}mc_{f}^{2}+E_{x,Q}+E_{x,W}\right]_{i}$$

没有计入宏观位能

E_{xA}^{+}和E_{xB}^{-} 上述四项至少有一项不为零

其它㶲流，上述四项可以全为零。

入= （出+损失）+增量 $\eta_{e_x} = \dfrac{E_{x,gain}}{E_{x,pay}} \le 1$

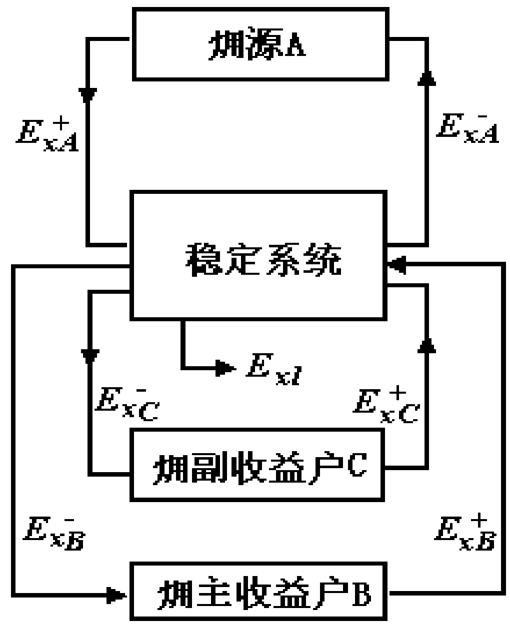
$$E_{xA}^{+} + E_{xB}^{+} + E_{xC}^{+} = E_{xA}^{-} + E_{xB}^{-} + E_{xC}^{-} + E_{xl} \Rightarrow \eta_{ex}^{\mathrm{I}} = \frac{E_{xA}^{-} + E_{xB}^{-} + E_{xC}^{-}}{E_{xA}^{+} + E_{xB}^{+} + E_{xC}^{+}}$$

$$(E_{xA}^{+} - E_{xA}^{-}) = (E_{xC}^{-} - E_{xC}^{+}) + (E_{xB}^{-} - E_{xB}^{+}) + E_{xl} \Rightarrow \eta_{ex}^{\mathrm{II}} = \frac{(E_{xB}^{-} - E_{xB}^{+}) + (E_{xC}^{-} - E_{xC}^{+})}{E_{xA}^{+} - E_{xA}^{-}}$$

$$(E_{xA}^{+} - E_{xA}^{-}) - (E_{xC}^{-} - E_{xC}^{+}) = (E_{xB}^{-} - E_{xB}^{+}) + E_{xl} \Rightarrow \eta_{ex}^{\mathrm{III}} = \frac{E_{xB}^{-} - E_{xB}^{+}}{(E_{xA}^{+} - E_{xA}^{-}) - (E_{xC}^{-} - E_{xC}^{+})}$$

以上所列是针对所研究的系统及其内部进行的过程，㶲损失也是指系统内部以及系统与有关外界间进行不可逆过程所引起的㶲损失，如，系统内部摩擦不可逆因素引起的㶲损失，以及系统与有关外界（包括环境大气）间温差传热等——这种㶲损失称为系统内部㶲损失。

$$(E_{xl})_{in}$$



但系统以外也发生烟损失，例如，燃气轮机的排气、锅炉的排烟和其它场合下的向环境大气的排汽、排热水和排热物体等。由于都排放到环境，它们所具有的烟也全部或部分损失在环境中。这种损失在系统之外进行，所以这种烟损失称为系统外部烟损失 。$(E_{xl})_{out}$

同时考虑了内部和外部烟损失的烟效率总是小于只考虑内部烟损失的烟效率。

常用热工装置或设备的㶲效率

锅炉、透平、压缩机、节流阀、闭口蒸汽动力循环、燃气轮机装置、压缩式制冷、吸收式制冷、暖气取暖、电取暖

	热工设备	耗费㶲	收益㶲	㶲效率
1	锅炉	$m_f \cdot e_{xf}$	$m_v(e_{x1}-e_{x2})$	$m_v(e_{x1}-e_{x2})/(m_f \cdot e_{xf})$
2	燃烧室	$m_f \cdot e_{xf}$	$m_g e_{xg} - m_a e_{xa}$	$(m_g e_{xg} - m_a e_{xa})/(m_f \cdot e_{xf})$
3	透平	$m(e_{x1}-e_{x2})$	W_{sh}	$W_{sh}/[m(e_{x1}-e_{x2})]$
4	压缩机或泵	W_C	$m(e_{x1}-e_{x2})$	$m(e_{x1}-e_{x2})/W_C$

	热工设备	耗费㶲	收益㶲	㶲效率
5	节流阀	me_{x1}	me_{x2}	e_{x2}/e_{x1}
6	闭口蒸汽动力循环	$\int_H \left(1-\frac{T_0}{T}\right)\delta Q$	W_O	$W_O/\int_H \left(1-\frac{T_0}{T}\right)\delta Q$
7	燃气轮机装置	$m_f \cdot e_{xf}$	W_{sh}	$W_{sh}/(m_f \cdot e_{xf})$
8	压缩式制冷机	W_C	$\left(1-\frac{T_0}{T_L}\right)Q_L$	$\left(1-\frac{T_0}{T_L}\right)Q_L/W_C$
9	吸收式制冷机	$\int_H \left(1-\frac{T_0}{T}\right)\delta Q$	$\left(1-\frac{T_0}{T_L}\right)Q_L$	$\left(1-\frac{T_0}{T_L}\right)Q_L/\int_H \left(1-\frac{T_0}{T}\right)\delta Q$
10	蒸汽喷射制冷机	$m(e_{x1}-e_{x2})$	$\left(1-\frac{T_0}{T_L}\right)Q_L$	$\left(1-\frac{T_0}{T_L}\right)Q_L/[m(e_{x1}-e_{x2})]$
11	空气液化	w_C	ye_{x1i}	ye_{x1i}/w_C
12	蒸汽压缩变热器	W_C	$\left(1-\frac{T_0}{T_H}\right)Q$	$\left(1-\frac{T_0}{T_H}\right)Q/W_C$
13	表面式换热器	$m_H(e_{x1}-e_{x2})$	$m_L(e_{x4}-e_{x3})$	$m_L(e_{x4}-e_{x3})/[m_H(e_{x1}-e_{x2})]$

【例】1kg氮气由初态p_1=0.45MPa，t_1=37℃，经绝热节流压力变化到p_2=0.11MPa。环境温度t_0=17℃。,已知氮气气体常数Rg=0.287kJ/kg•K 求：1）节流过程的㶲损失；2）最大有用功；3）在同样的初、终压力之间进行可逆定温膨胀时的最大有用功。

已知：p_1=0.45Mpa，T_1=37+273=310K，

T_0=17+273=290K， p_2=0.11MPa

解：（1）绝热节流过程特征：h_2=h_1，氮气为理想气体，所以T_2= T_1=310K。不计节流前后动能损失，据稳定流动系统㶲平衡方程可知㶲损失为：

$$E_{x,l}=e_{x,h1}-e_{x,h2}+e_{x,Q}-w_u$$

过程绝热 $e_{x,Q}$ =0，不对外作功 w_u =0，

$$E_{x,l}=e_{x,h1}-e_{x,h2}=h_1-h_2-T_0(s_1-s_2)=T_0(s_1-s_2)$$

$$=T_0\left(c_p\ln\frac{T_2}{T_1}-R_g\ln\frac{p_2}{p_1}\right)=-T_0R_g\ln\frac{p_2}{p_1}$$

$$=-290K\times0.287\,{}^{kJ}\!/_{(kg\cdot K)}\times\ln\frac{0.11MPa}{0.45MPa}=121.34\,{}^{kJ}\!/_{kg}$$

（2）最大有用功

$$w_{1-2,\max}=e_{x,h1}-e_{x,h2}=121.34\,{}^{kJ}\!/_{kg}$$

（3）可逆定温膨胀的最大有用功

由第一定律，理想气体定温过程，吸热量等于过程功：

$$q_T = w_T = w_{t,T}$$

$$= -R_g T \ln\frac{p_2}{p_1} = -310K \times 0.287\mathrm{kJ/(kg\cdot K)} \times \ln\frac{0.11MPa}{0.45MPa} = 129.71\mathrm{kJ/kg}$$

$$w_{1-2,\max} = e_{x,1} - e_{x,2} + e_{x,Q} = e_{x,H_1} - e_{x,H_2} + \int\left(1-\frac{T_0}{T}\right)\delta Q$$

$$= e_{x,H_1} - e_{x,H_2} + \left(1-\frac{T_0}{T}\right)q$$

$$= 121.34\,{}^{kJ}\!/_{kg} + \left(1-\frac{290K}{310K}\right)\times 129.71\,{}^{kJ}\!/_{kg} = 121.34\,{}^{kJ}\!/_{kg} + 8.37\,{}^{kJ}\!/_{kg} = 129.71\,{}^{kJ}\!/_{kg}$$

—可逆等温过程系统自热源吸热129.71kJ

同时得到热量㶲8.37kJ。