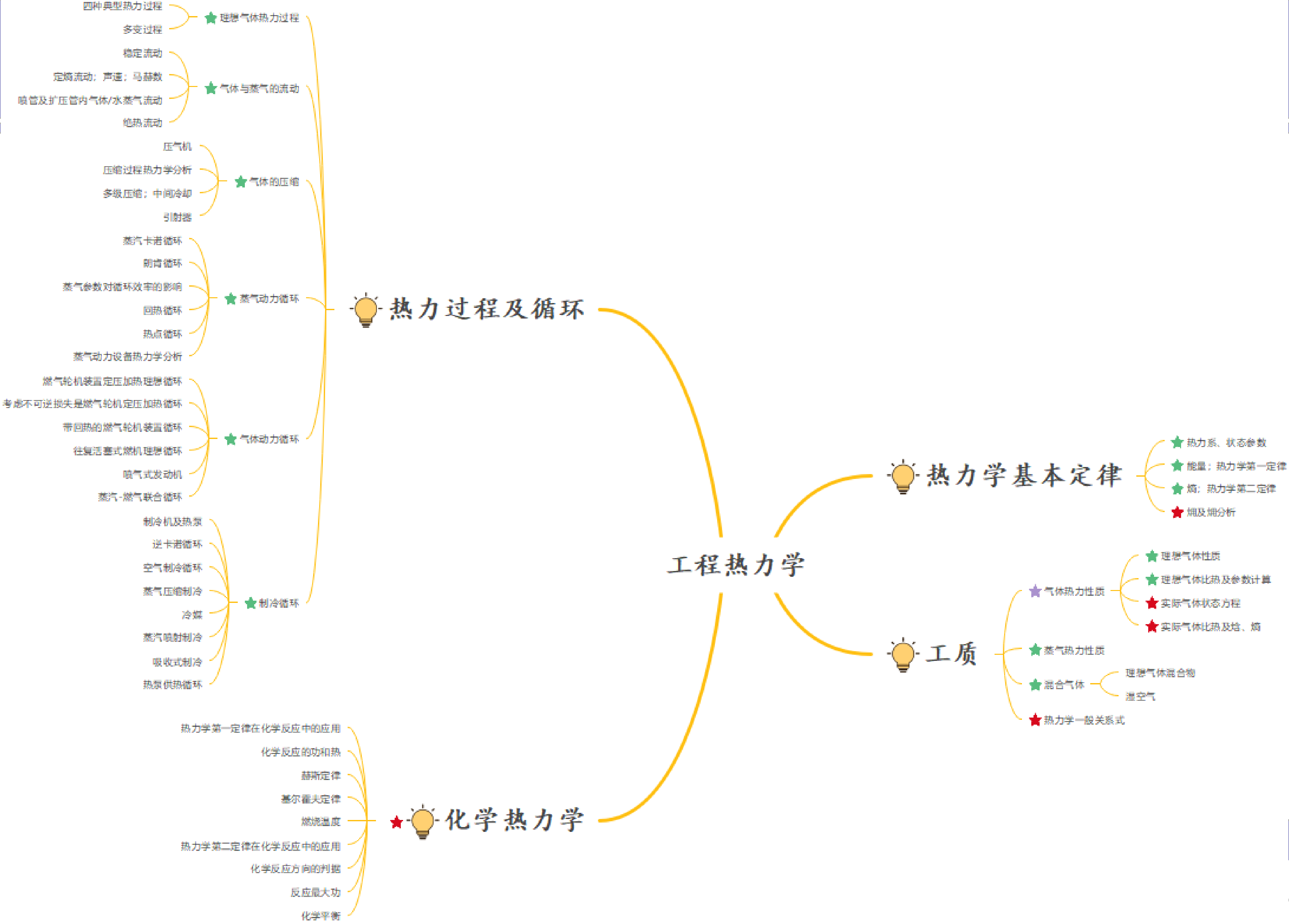
高等工程热力学

1. 物理㶲

何嘉诚
jiachenghe@gdut.edu.cn
工学3号馆 409A

工程热力学

- 热力学基本定律
- 工质
- 热力过程及循环
- 化学热力学



工程热力学
热力过程及循环
理想气体热力过程
四种典型热力过程
多变过程
气体与蒸气的流动
稳定流动
定熵流动；声速；马赫数
喷管及扩压管内气体/水蒸气流动
绝热流动
气体的压缩
压气机
压缩过程热力学分析
多级压缩；中间冷却
引射器
蒸气动力循环
蒸汽卡诺循环
朗肯循环
蒸气参数对循环效率的影响
回热循环
热点循环
蒸气动力设备热力学分析
气体动力循环
燃气轮机装置定压加热理想循环
考虑不可逆损失是燃气轮机定压加热循环
带回热的燃气轮机装置循环
往复活塞式燃机理想循环
喷气式发动机
蒸汽-燃气联合循环
制冷循环
制冷机及热泵
逆卡诺循环
空气制冷循环
蒸气压缩制冷
冷媒
蒸汽喷射制冷
吸收式制冷
热泵供热循环
化学热力学
热力学第一定律在化学反应中的应用
化学反应的功和热
赫斯定律
基尔霍夫定律
燃烧温度
热力学第二定律在化学反应中的应用
化学反应方向的判据
反应最大功
化学平衡
热力学基本定律
热力系、状态参数
能量；热力学第一定律
熵；热力学第二定律
㶲及㶲分析
工质
气体热力性质
理想气体性质
理想气体比热及参数计算
实际气体状态方程
实际气体比热及焓、熵
蒸气热力性质
混合气体
理想气体混合物
湿空气
热力学一般关系式

参考资料

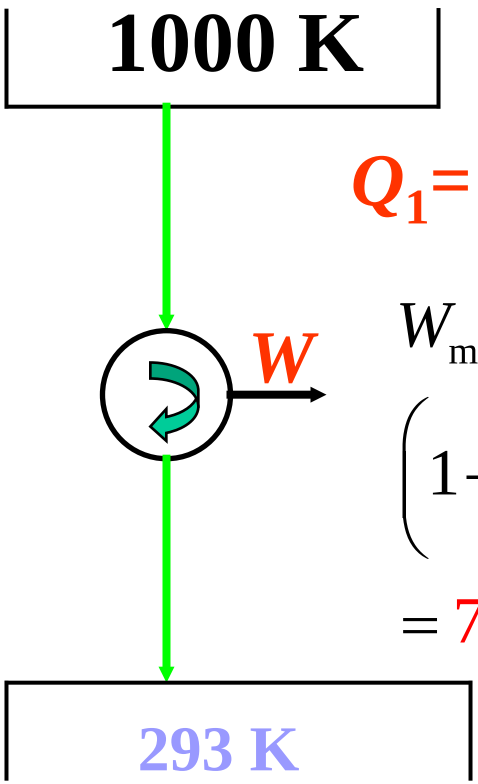
- 工程热力学　　　　　曾丹苓等
- 工程热力学　　　　　朱明善等
- 工程热力学　　　　　沈维道等
- 高等工程热力学　　苏长荪

考核：闭卷考试（70%）+平时成绩（30%）

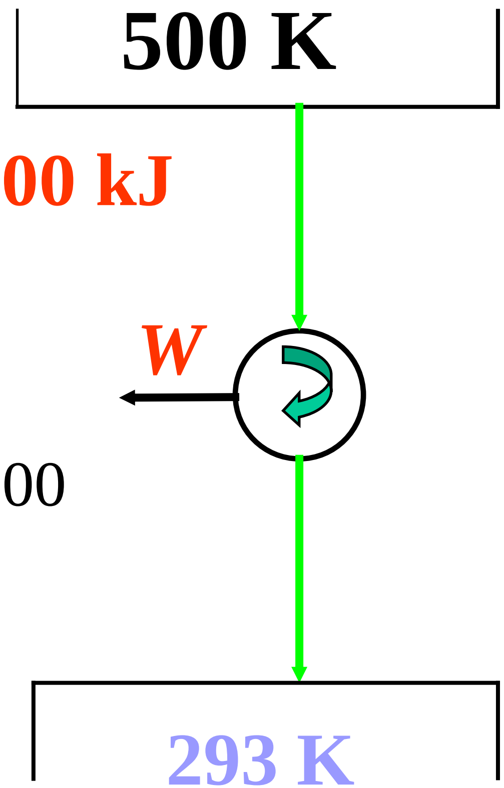
1. 㶲的概念

哪个参数才能正确评价能的价值?

热量?



Q_1=100 kJ **=** Q_1=100 kJ



$$W_{\max} = \left(1-\frac{293}{1000}\right)\times 100 = 70.7kJ$$

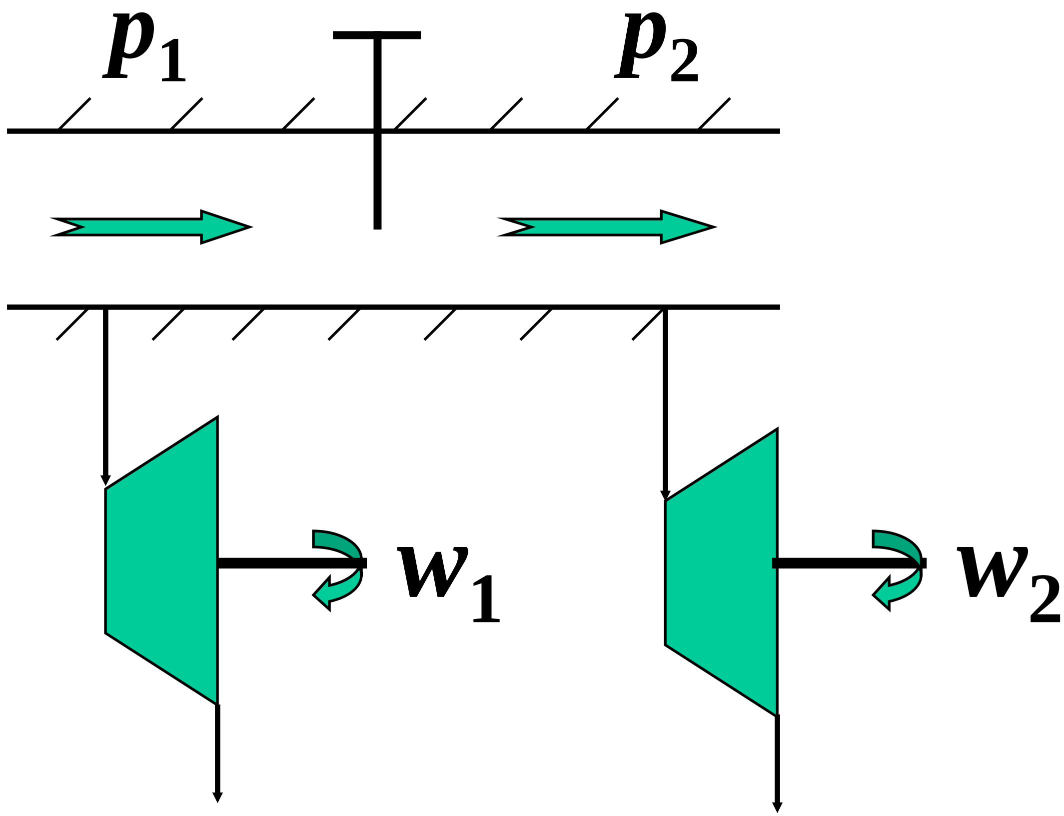
$>$

$$W_{\max} = \left(1-\frac{293}{500}\right)\times 100 = 41.4kJ$$

1. 㶲的概念

焓??

$h_1 = h_2$

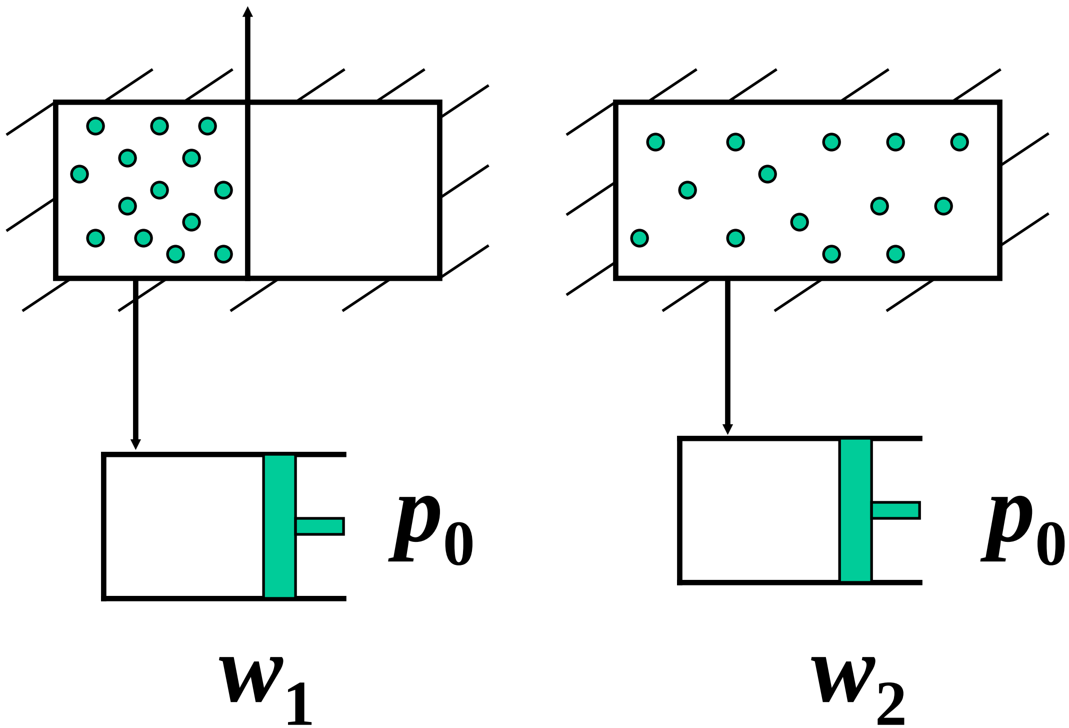


$w_1 > w_2$

1. 㶲的概念

热力学能??

$u_1 = u_2$



$w_1 > w_2$

1. 㶲的概念

现象：

- 机械能、电能（品质高） → 热能(品质低)
- 物体温度越高，技术上可转换的功越多

如何评价能量价值

1956, I. Rant　　eNergy → eXergy

东南大学夏彦儒教授翻译为 Exergy “㶲”

Available Energy　可用能 E_x

Availability　可用度

Anergy　不可用能 *An*

1. 㶲的概念

三种不同品质的能量

1、可无限转换的能量

理论上可以完全转换为功的能量 ⟶ 高级能量

机械能、电能：$A_n=0$ $E_x=E$

2、不能转换的能量 （An）

理论上不能转换为功的能量

环境介质中的热能： $E_x=0$

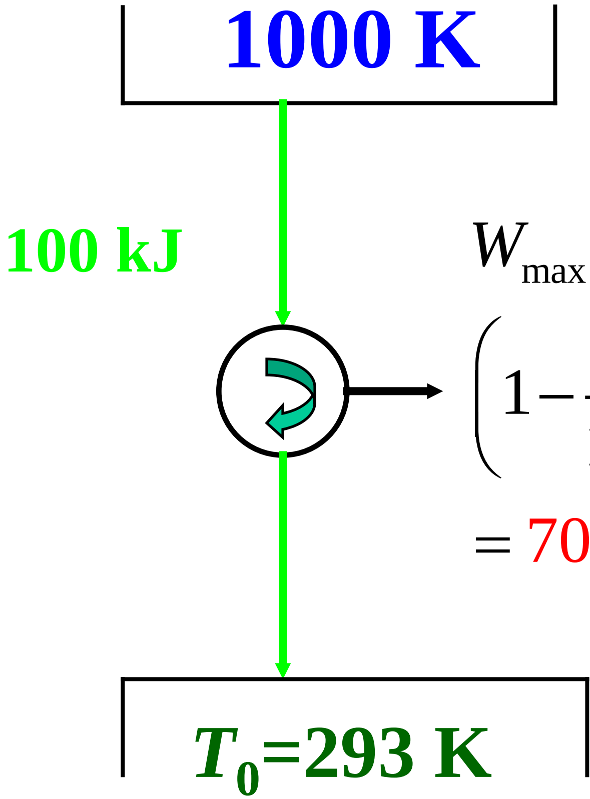
3、可有限转换的能量 （$Ex+An$）

理论上不能完全转换为功的能量⟶低级能量

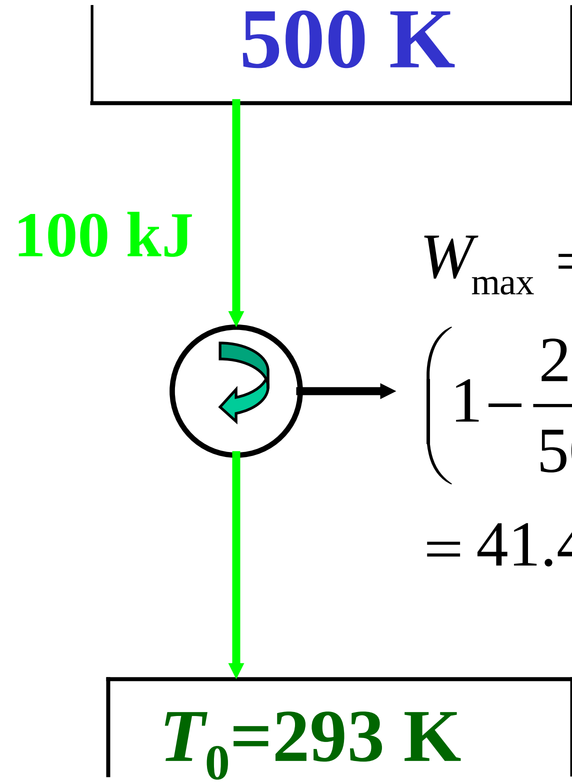
热能、焓、内能 $E=E_x+A_n$

1. *Ex* ——作功能力

环境一定，能量中最大可能转换为功的部分



$$W_{max} = \left(1-\frac{293}{1000}\right)\times 100 = 70.7kJ$$



$$W_{max} = \left(1-\frac{293}{500}\right)\times 100 = 41.4kJ$$

1. 㶲的概念: 热一律和热二律的*Ex*含义

热一律： **一切过程，*Ex*+*An*总量恒定**

热二律：

由*An*转换为*Ex*不可能

在可逆过程中，*Ex*保持不变

在不可逆过程中，部分*Ex*转换为*An*

*Ex*损失、作功能力损失、能量贬值

孤立系*Ex*减原理

任何一孤立系，*Ex*只能不变或减少，不能增加

2. 热量的*Ex*与*An*

2.1 恒温热源*T*下的*Q*

Ex_Q: *Q*中最大可能转换为功的部分

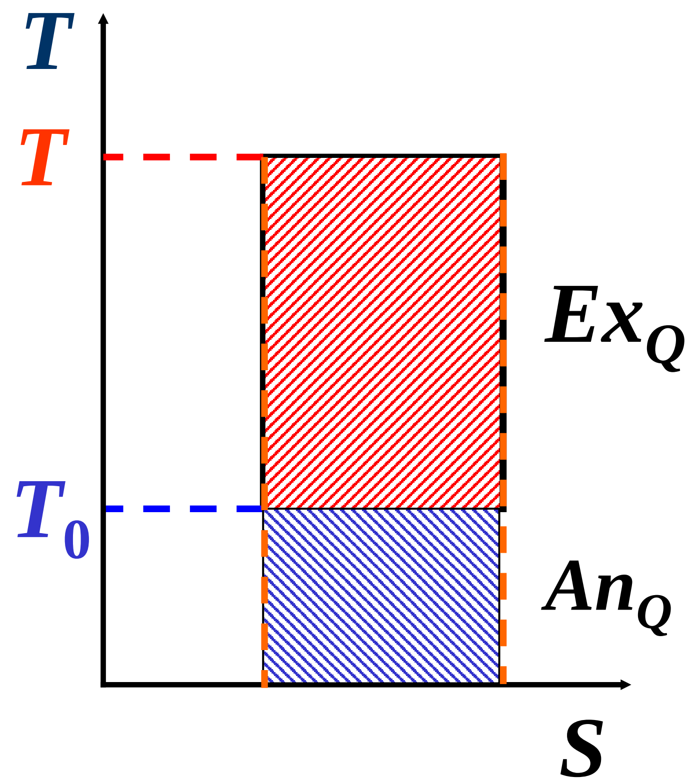
卡诺循环的功

$$Ex_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \times Q = \left(\frac{T - T_0}{T}\right) \times T\Delta S$$

$$= \left(T - T_0\right) \cdot \Delta S = Q - T_0 \Delta S$$

$$An_Q = Q - Ex_Q = T_0 \Delta S$$

$$Q = Ex_Q + An_Q$$



2. 热量的*Ex*与*An*

2.2、变温热源下的 *Q*

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

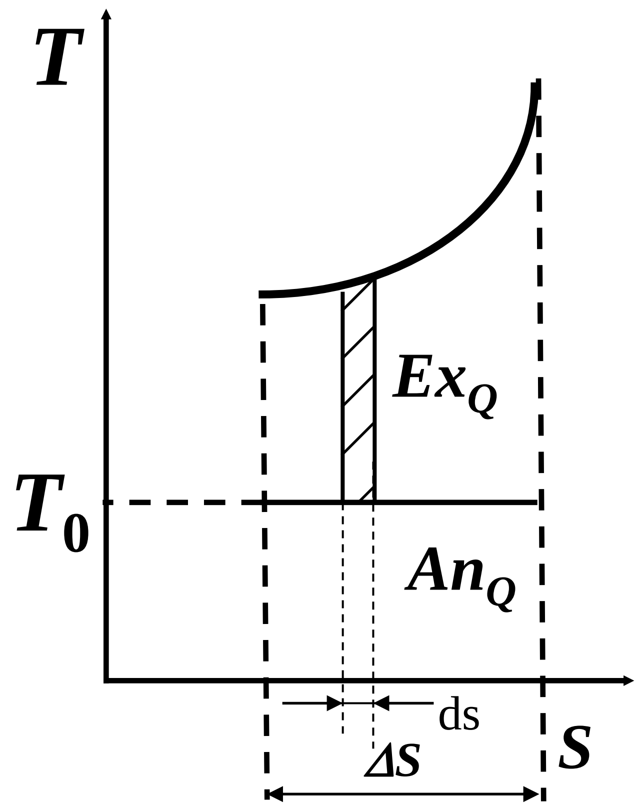
$$Ex_Q = \int \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \times \delta Q$$

$$= \int \delta Q - T_0 \int \frac{\delta Q}{T} = Q - T_0 \Delta S$$

$$Q = Ex_Q + An_Q$$

$$An_Q = T_0 \Delta S$$

微元卡诺循环的功



2. 热量的*Ex*与*An*：补充说明

1、Q中最大可能转换为功的部分，就是Ex_Q

2、 $Ex_Q = Q - T_0 \Delta S = f(Q, T, T_0)$

Q，T_0一定，$T\downarrow$ $Ex_Q\downarrow$

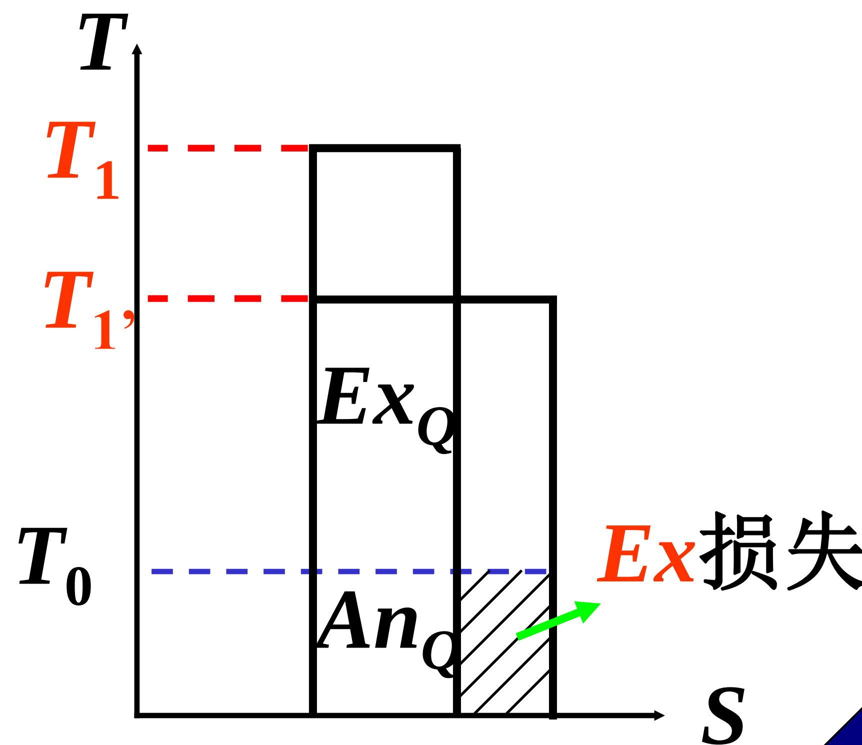
T一定，$Q\uparrow$ $Ex_Q\uparrow$

3、单热源热机不能作功

$T = T_0$, $Ex_Q = 0$

4、Q 一定，不同 T 传热，

Ex 损失，作功能力损失



3. 冷量的Ex与An

$T < T_0$ 的冷量Q_2，有没有Ex？

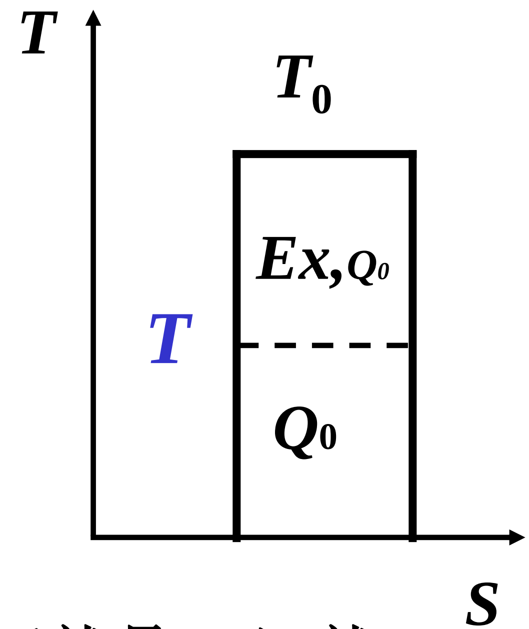
3.1 恒温系统的Q_0

$$E_{x,Q_0} = (1 - \frac{T}{T_0})Q$$

$$Q = E_{x,Q_0} + Q_0$$

$$E_{x,Q_0} = (\frac{T_0}{T} - 1)Q_0 = T_0 \Delta S - Q_0$$

$$A_{n,Q_0} = T_0 \Delta S$$



冷量Ex可理解为:

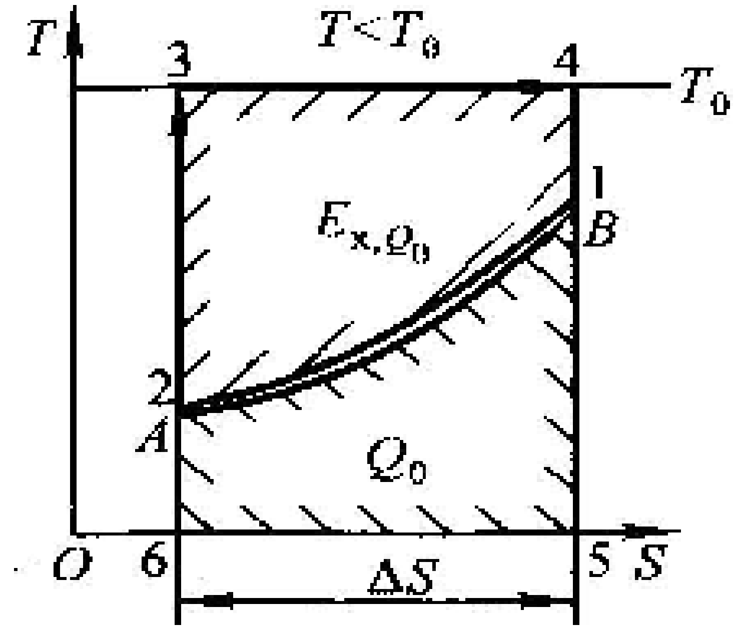
$T<T_0$,肯定是对其作功才形成的，而这个功（就是Ex）就储存在冷量里了。

实际上，只要系统状态与环境的状态有差别，就有可能对外作功，就有Ex 。

3. 冷量的Ex与An

3.2 变温系统的Q_0

取微元卡诺循环



$$\delta Q_1 = T_0 ds \qquad \delta Q_0 = Tds$$

$$\delta W_{net} = (1-\frac{\delta Q_0}{\delta Q_1})\delta Q_1 = (1-\frac{TdS}{T_0 dS})\delta Q_1$$

$$= \left(1-\frac{T}{T_0}\right)\delta Q_1$$

$$\left.\begin{aligned}\frac{\delta Q_1}{\delta Q_0} &= \frac{T_0}{T} \\ \delta Q_1 &= \frac{T_0}{T}\delta Q_0\end{aligned}\right\} \quad \delta W_{net} = \left(1-\frac{T}{T_0}\right)\delta Q_1 = (\frac{T_0 - T}{T_0})\cdot\frac{T_0}{T}\delta Q_0 = (\frac{T_0}{T}-1)\delta Q_0$$

$$E_{x,Q_0} = \int_1^2 (\frac{T_0}{T}-1)\delta Q_0$$

$$\mathbf{Q = E_{x,Q_0} + Q_0}$$

3. 热量Ex、冷量Ex

$(1) T = T_0$

$$\frac{E_{X,Q}}{Q} = 0$$

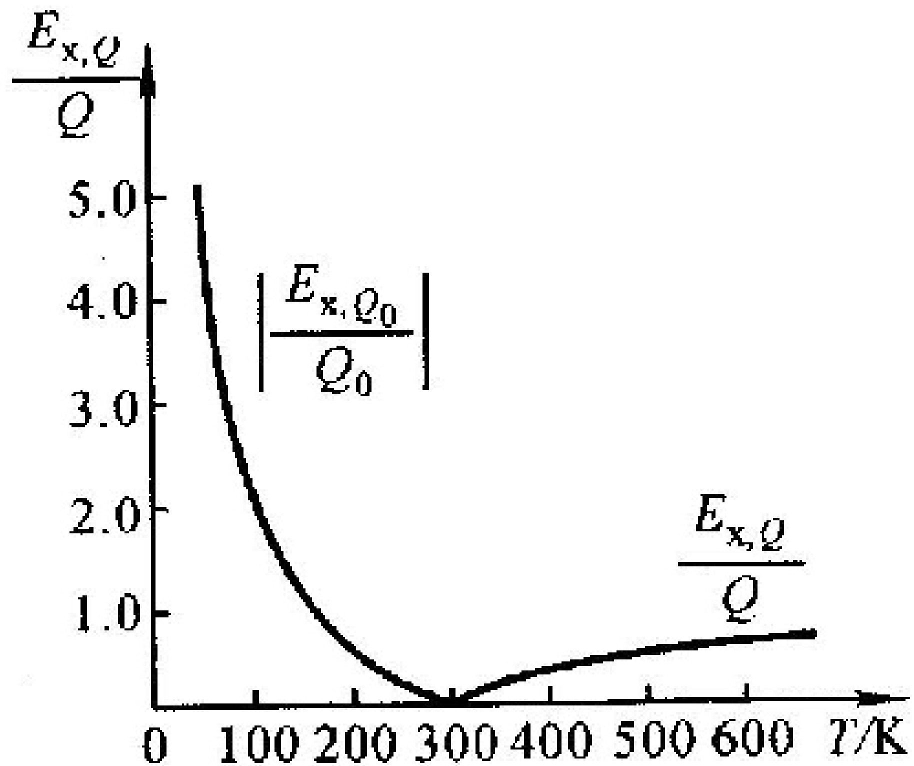
$(2) T > T_0$

$$\frac{E_{X,Q}}{Q} \uparrow, T \to \infty, \frac{E_{X,Q}}{Q} \to 1$$

$(3) T < T_0$

当$\frac{1}{2}T_0 < T < T_0, \left|\frac{E_{X,Q}}{Q_0}\right| < 1$

当$T < \frac{1}{2}T_0, \left|\frac{E_{X,Q_0}}{Q_0}\right| > 1,$



- 热量**Ex**与热量的比值的绝对值总小于**1**；
- 冷量**Ex**与冷量的比值的绝对值可以大于**1**。

4. 孤立系的熵增、㶲损及能量贬值

孤立系熵增原理：

孤立系内发生任何不可逆变化时，孤立系的熵必增大，必有$E_{X,Q}$损失，必有$A_{n,Q}$增加。

A→　　可逆热机→环境 $E_{X,Q(A)}=(1-\frac{T_0}{T_A})Q$

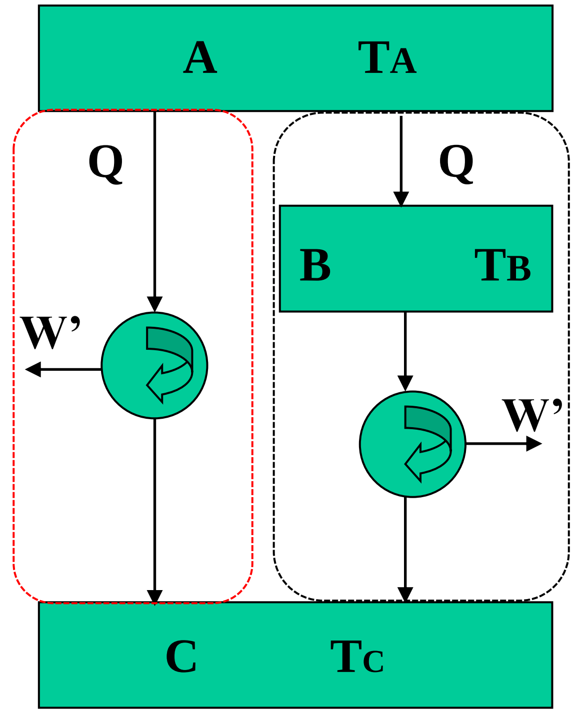
A→B →可逆热机→环境 $E_{X,Q(B)}=W'=(1-\frac{T_0}{T_B})Q$

㶲损 $\mathrm{I}=\mathrm{E}_{\mathrm{X,Q(A)}}-E_{X,Q(B)}=T_0(\frac{Q}{T_B}-\frac{Q}{T_A})$

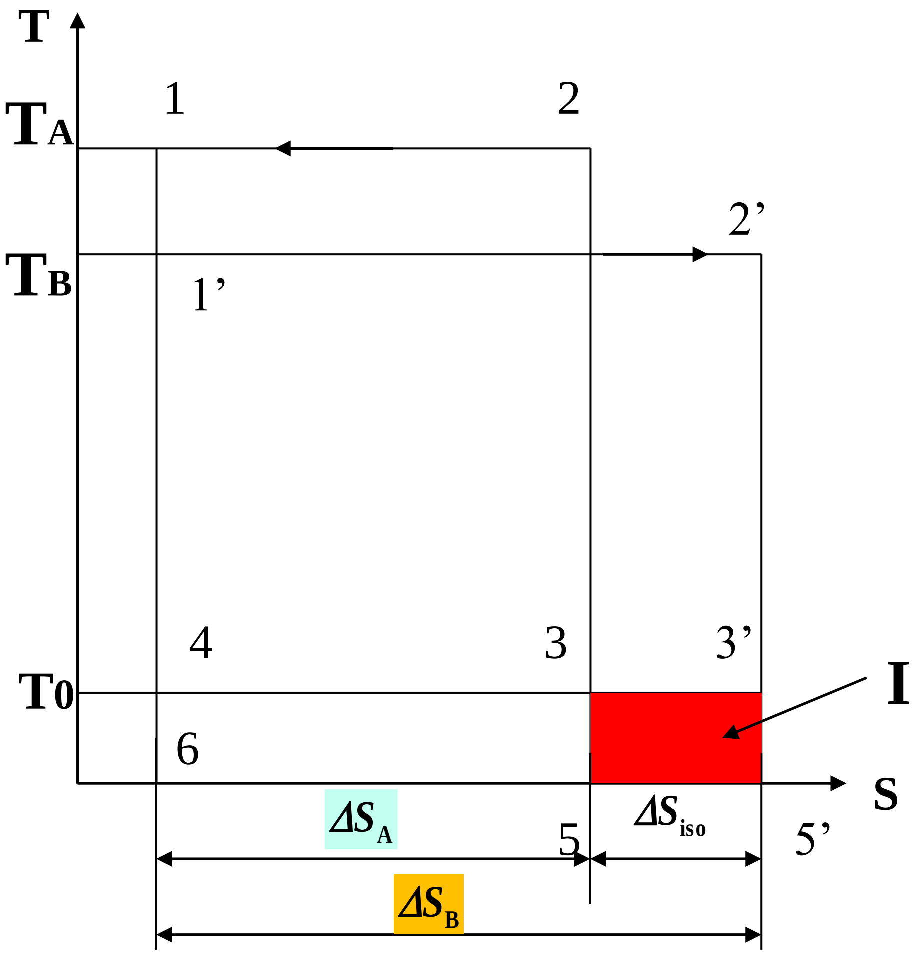
$$\Delta S_{\mathrm{iso}}=\Delta S_B+\Delta S_A=\frac{Q}{T_B}-\frac{Q}{T_A}>0$$

$$\therefore I=T_0\Delta S_{\mathrm{iso}}=T_0 S_{\mathrm{g}}$$ G-S 公式

*** 适用于任何不可逆因素引起的**



4. 孤立系的熵增、㶲损及能量贬值



$$\Delta S_A = -\frac{Q}{T_A} = S_{21} = S_{56}$$

$$\Delta S_B = \frac{Q}{T_B} = S_{1'2'} = S_{65'}$$

$$\therefore \Delta S_{55'} = \Delta S_A + \Delta S_B$$

$$E_{X,Q(A)} + A_{n,\ Q(A)} = E_{X,Q(B)} + A_{n,\ Q(B)} = Q$$

$$\therefore A_{n,\ Q(B)} - A_{n,\ Q(A)} = E_{X,Q(A)} - E_{X,Q(B)}$$

exergy loss

$$\mathrm{I} = \mathrm{E}_{\mathrm{X,Q(A)}} - E_{X,Q(B)}$$

$$= T_0\left(\frac{Q}{T_B} - \frac{Q}{T_A}\right)$$

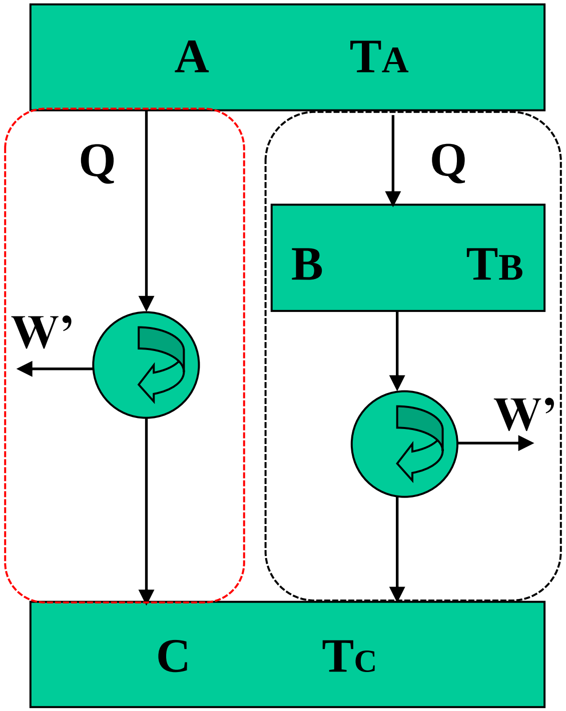
4. 孤立系的熵增、㶲损及能量贬值

能量贬值原理

热量Q由A $\longrightarrow$ B

数量不变,温度下降

质量降低,能量贬值



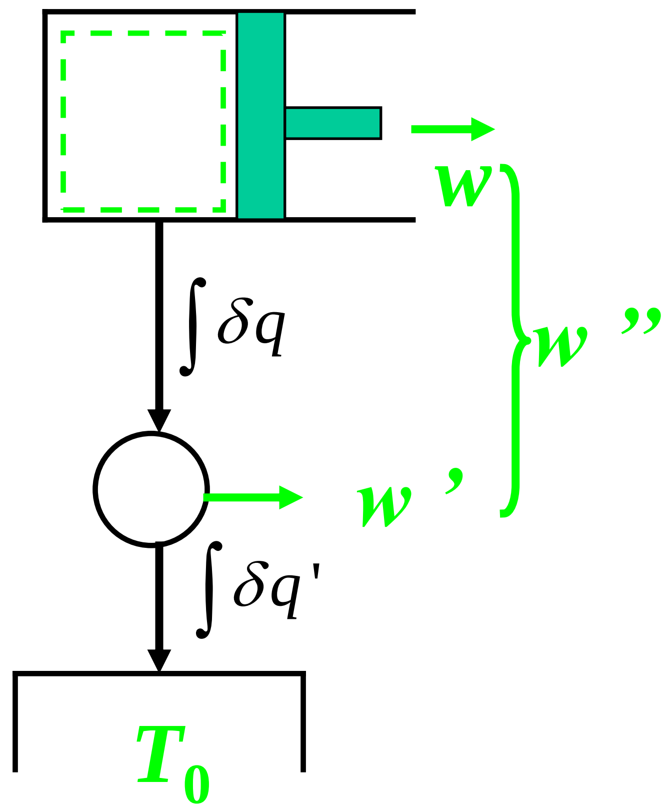
能量贬值原理，孤立系中进行热力过程时exergy总是减小，可逆过程时，exergy不变。

㶲损才是真正意义上的损失；减小㶲损是节能的指导方向

1 热力学能*Ex*与*An*

1.1 闭口系统工质的热力学能*Ex*与*An*

ex_u=?



设一闭口系统（1kg），状态为u_1, s_1, T_1, p_1, v_1，经某可逆过程，与环境达到平衡，状态为u_0, s_0, T_0, p_0, v_0，过程中放热$\int \delta q$，对外作功为w

假定 $\int \delta q$ 通过可逆热机作功 w'

$$ex_u = w'' = w + w'$$

5. 工质㶲及系统㶲平衡方程

热一律：

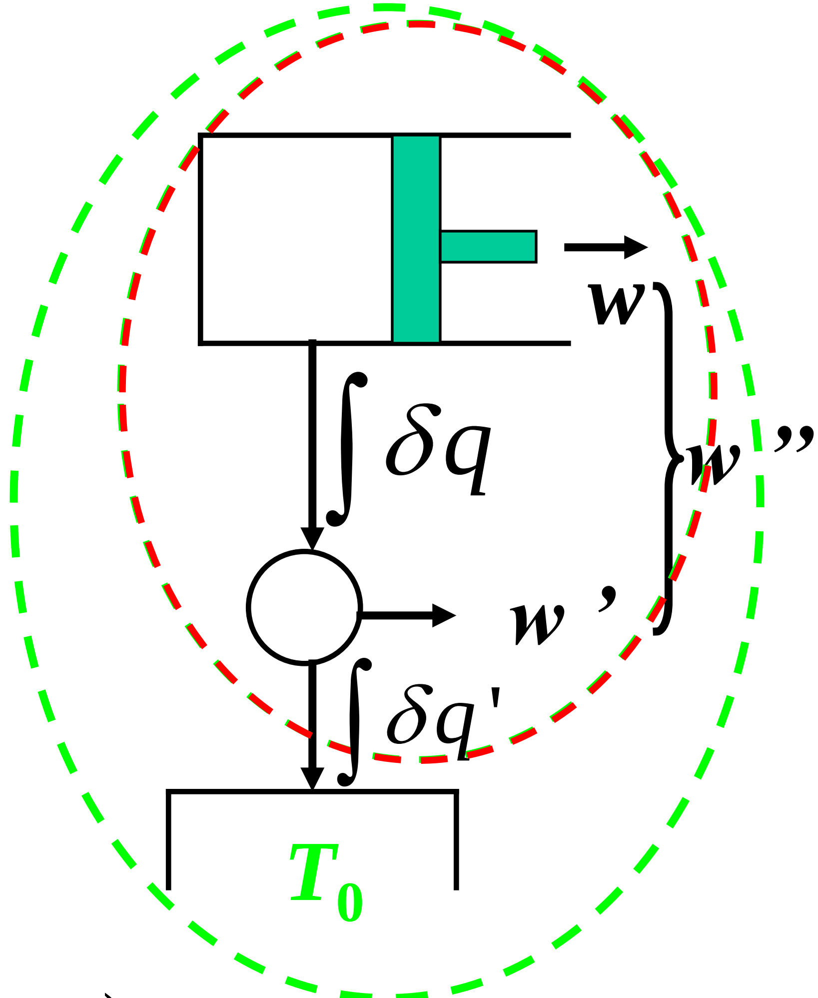
$$\int \delta q' = (u_0 - u_1) + w''$$

热二律：

$$\Delta s_{\text{iso}} = (s_0 - s_1) + \frac{-\int \delta q'}{T_0} = 0$$

$$\int \delta q' = T_0 (s_0 - s_1)$$

$$w'' = (u_1 - u_0) - T_0 (s_1 - s_0)$$



5. 工质㶲及系统㶲平衡方程

$$w'' = (u_1 - u_0) - T_0(s_1 - s_0)$$

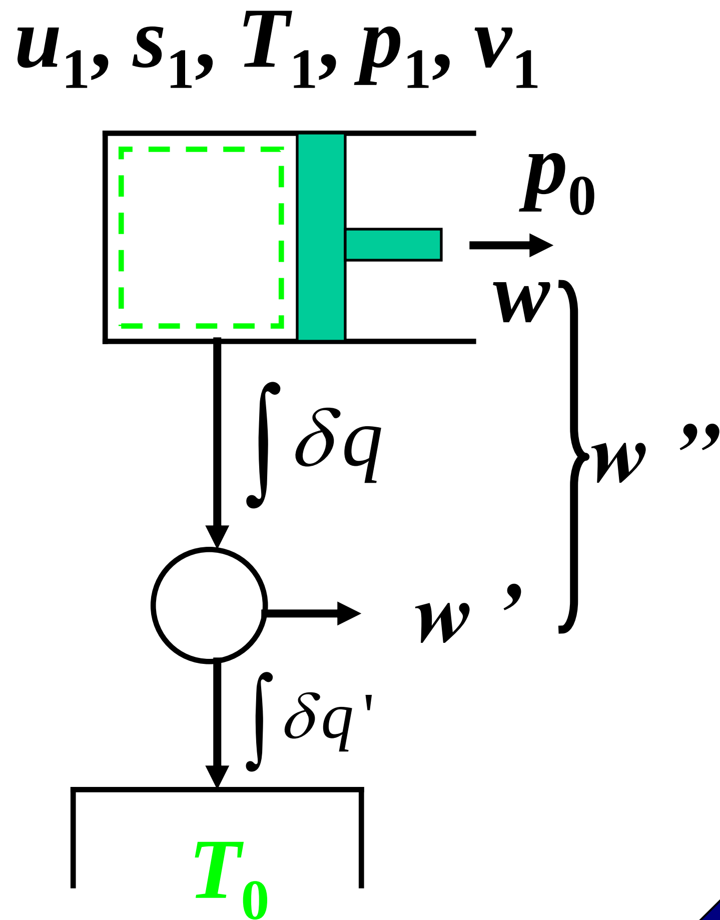
热力学能*ex*：(有用功)

$$ex_{\mathrm{u}} = w'' - \boxed{p_0(v_0 - v_1)}$$

克服环境压力

$$ex_{\mathrm{u}} = (u_1 - u_0) - T_0(s_1 - s_0) + p_0(v_1 - v_0)$$

$$an_{\mathrm{u}} = T_0(s_1 - s_0) - p_0(v_1 - v_0)$$



5. 工质烟及系统烟平衡方程

1.2. 闭口系统内能的Ex与An的说明

$$ex_{\mathrm{u}} = (u_1 - u_0) - T_0(s_1 - s_0) + p_0(v_1 - v_0)$$

1）闭口系的热力学能u_1-u_0，只有一部分是ex_{u}

热力学能$an_{\mathrm{u}}=T_0(s_1 - s_0) - p_0(v_1 - v_0)$

2）当环境p_0, T_0一定，ex_{u}是状态参数

3）环境的热力学能很大，但热力学能 $ex = 0$

4）闭口系由1→2的可逆过程，1kg工质作的最大功

$$w_{\max} = ex_{\mathrm{u1}} - ex_{\mathrm{u2}} = (u_1 - u_2) - T_0(s_1 - s_2) + p_0(v_1 - v_2)$$

5. 工质㶲及系统㶲平衡方程

1.3. 闭口系统内能的Ex举例

1kg空气，由p_1=50bar, t_1=17ºC, 膨胀到p_2=40bar, t_2=17ºC, 已知p_0=1bar, t_0=17ºC。求：该膨胀过程对外界的最大有用功。

$$w_{\max} = ex_{u1} - ex_{u2}$$

$$ex_{u1} = \cancel{(u_1 - u_0)} - T_0(s_1 - s_0) + p_0(v_1 - v_0)$$

$$= -T_0\left(\cancel{c_p \ln\frac{T_1}{T_0}} - R\ln\frac{p_1}{p_0}\right) + p_0\left(\frac{RT_1}{p_1} - \frac{RT_0}{p_0}\right)$$

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

5. 工质㶲及系统㶲平衡方程

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

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

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

2 稳定流动工质的焓*Ex*与*An*

流量1kg的工质，初态为h_1, s_1, c_1, z_1

经稳定可逆流动，与环境达到

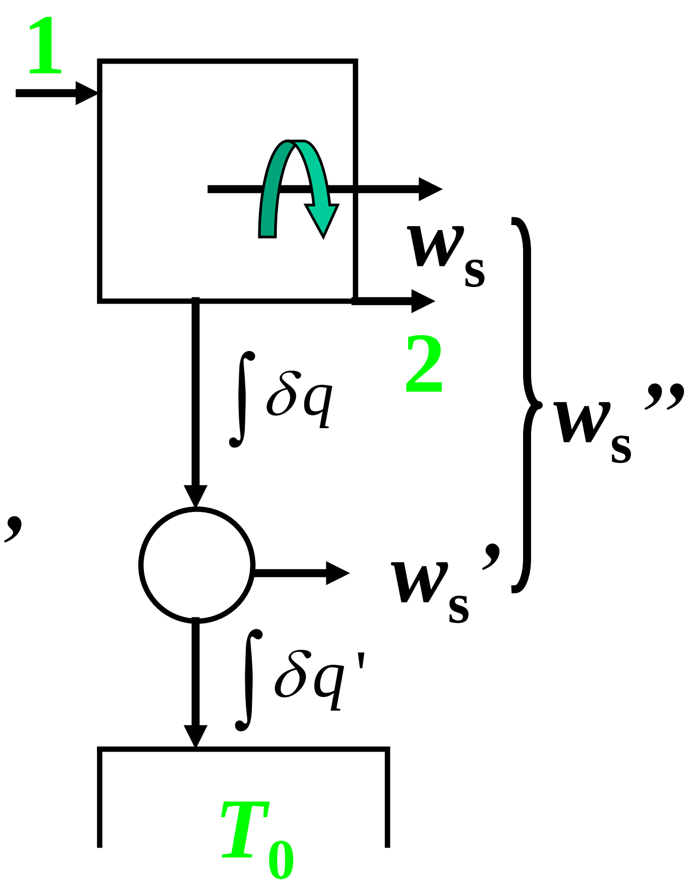
平衡，状态为$h_0, s_0, c_0, z_0,$ 过程

中放热为 $\int \delta q$,对外作功为w_s

假定 $\int \delta q$ 通过可逆热机作功w_s’

$$ex_h = w_s'' = w_s + w_s'$$

ex_h=?



5. 工质㶲及系统㶲平衡方程

热一律：

一般动、位能变化忽略

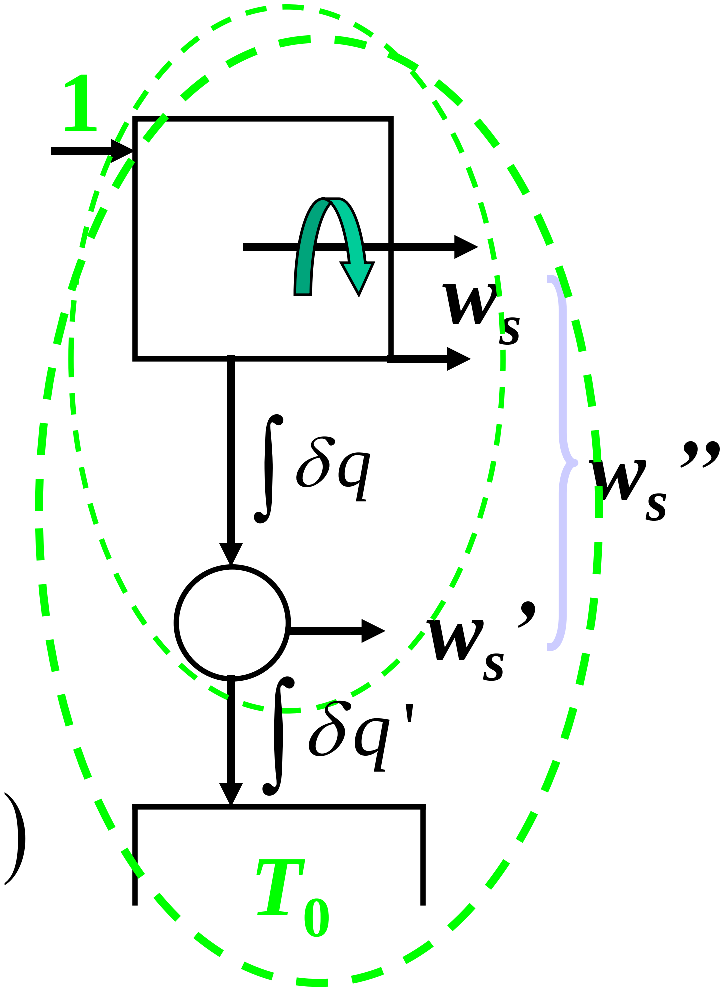
$$\int \delta q' = \left(h_0 - h_1\right) + \cancel{\frac{1}{2}\left(c_0^2 - c_1^2\right)}$$

$$+ \cancel{g\left(z_0 - z_1\right)} + w_s''$$

热二律：

$$\Delta s_{\mathrm{iso}} = \left(s_0 - s_1\right) + \frac{-\int \delta q'}{T_0} = 0$$

$$ex_{\mathrm{h}} = w_s'' = \left(h_1 - h_0\right) - T_0\left(s_1 - s_0\right)$$



2.2 稳定流动工质的焓Ex与An的说明

$$ex_{\mathrm{h}} = \left(h_1 - h_0\right) - T_0\left(s_1 - s_0\right)$$

1）稳流工质的焓h_1-h_0，只有一部分是ex_{h}

焓$an_h=T_0(s_1-s_0)$

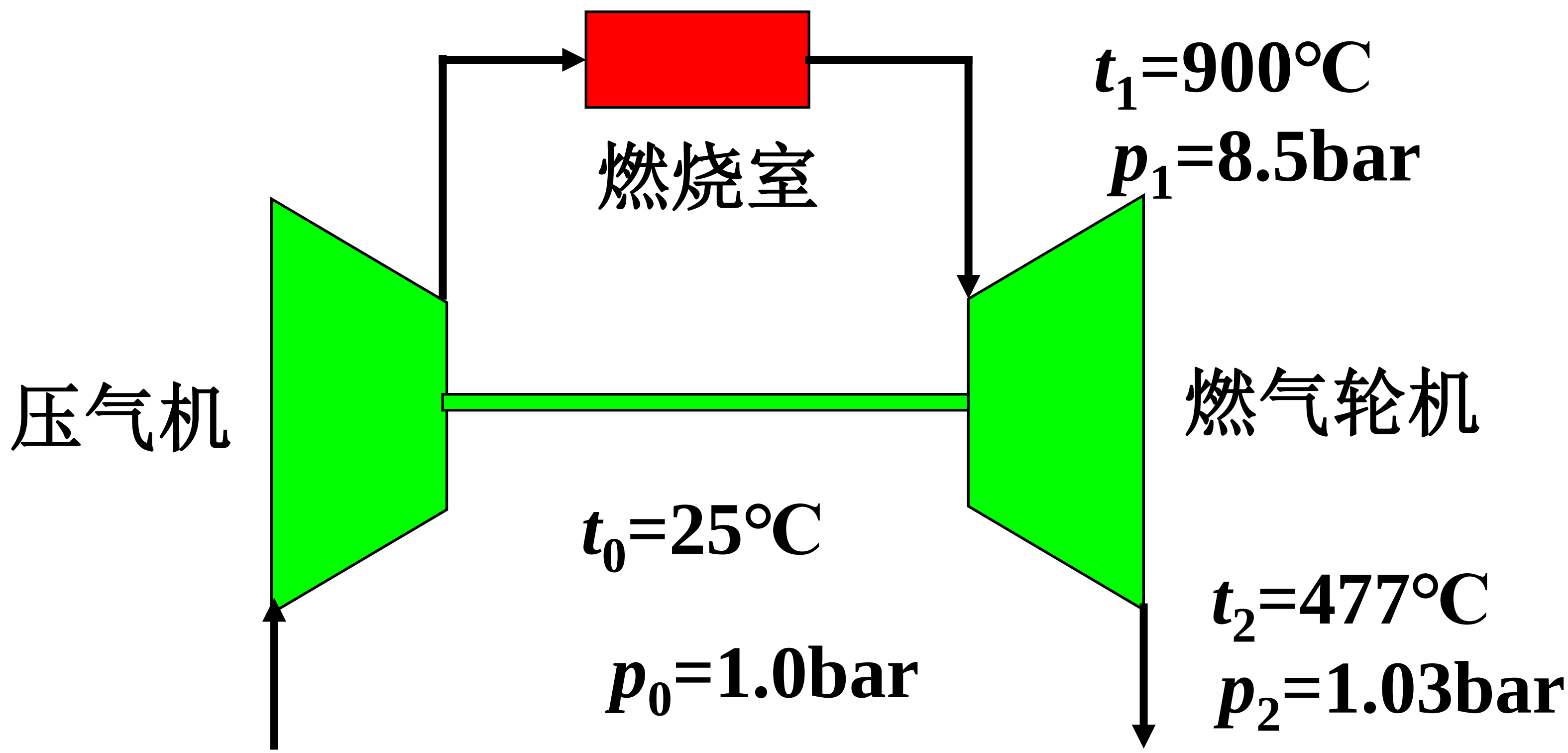
2）当环境$p_{0,}$ T_0一定，ex_{h}是状态参数

3）当工质状态与环境相平衡，焓$ex_{\mathrm{h}}=0$

4）由初态1 ➞ 终态2的可逆过程，工质作的最大功

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

2.3 稳定流动工质的焓Ex举例



R=0.287kJ/kg.K c_p=1.10kJ/kg.K

求： ex_{h1}, ex_{h2} 燃气轮机最大功

5. 工质㶲及系统㶲平衡方程

$$ex_{h1}=\left(h_1-h_0\right)-T_0\left(s_1-s_0\right)$$

$$=c_p\left(T_1-T_0\right)-T_0\left(c_p\ln\frac{T_1}{T_0}-R\ln\frac{p_1}{p_0}\right)=696.4\text{kJ/kg}$$

$$ex_{h2}=\left(h_2-h_0\right)-T_0\left(s_2-s_0\right)$$

$$=c_p\left(T_2-T_0\right)-T_0\left(c_p\ln\frac{T_2}{T_0}-R\ln\frac{p_2}{p_0}\right)=197.2\text{kJ/kg}$$

$$w_{max}=ex_{h1}-ex_{h2}=499.2\text{kJ/kg}\ \text{可逆功}$$