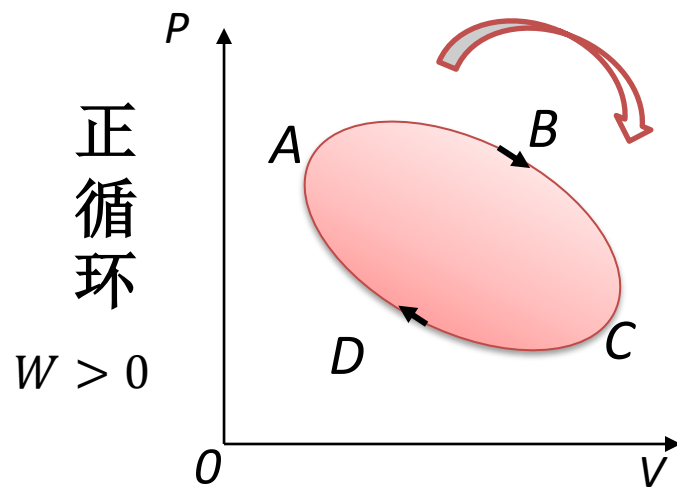
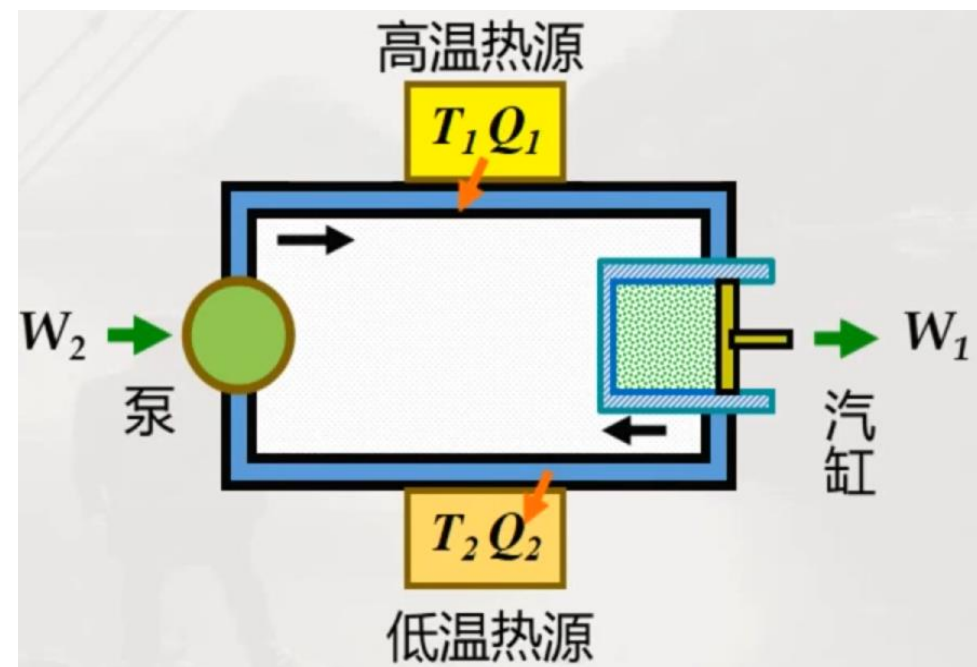


余热发电系统中，蒸汽装置的动力循环：
水从水泵进入锅炉加热汽化，
过热蒸汽进入汽轮机膨胀做功，
做功后的低压蒸汽被冷却凝结成水，
再回到水泵。

4.4.1 循环过程

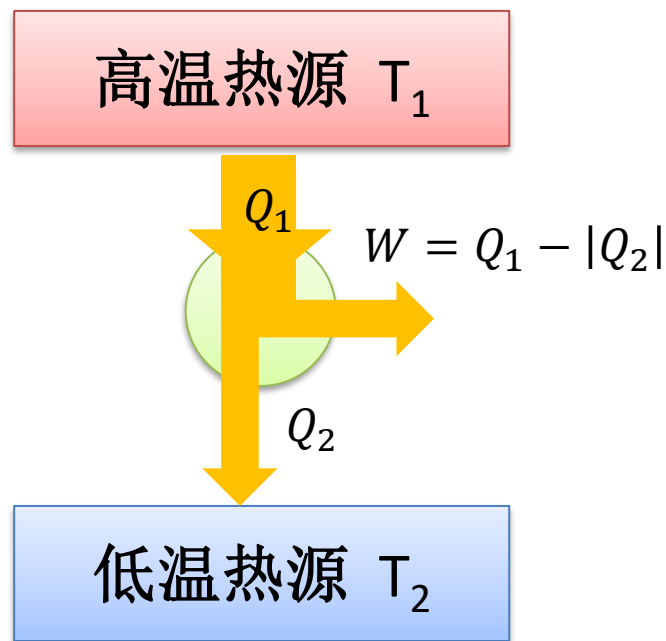
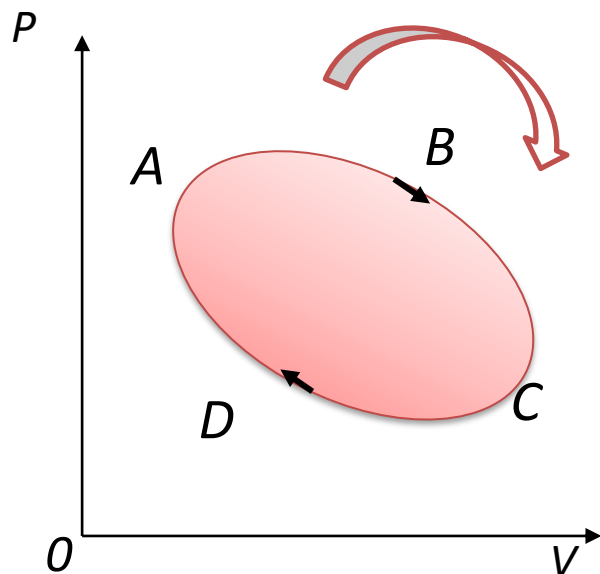
循环过程： 系统经历一系列的变化过程又回到初始状态

循环特点： 经历一个循环，内能没有改变。 $\Delta E=0$ 。



系统对外界做正功，
顺时针方向。

4.4.1 循环过程



热机效率： 对外做功与**从高温热源吸收热量**的比值

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}$$

做功=**净吸收热量**=从高温热源吸热-向低温热源放热**的大小**

习题： 1mol氧气（刚性双原子分子理想气体）作如图所示的循环，其中AB为直线与水平轴夹角45度，BC为绝热线，CA为等温线，已知 $T_1=300\text{K}$ ， $T_2=2T_1$ ， $V_3=8V_1$ ，求：

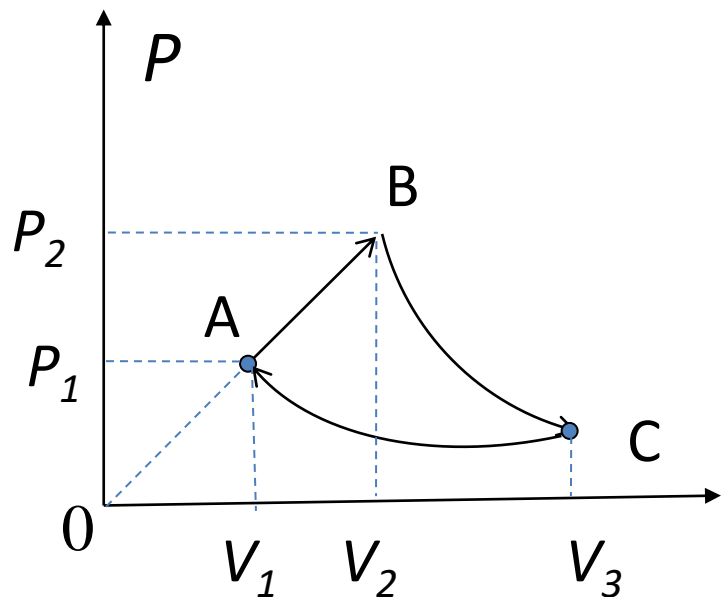
- (1) 各过程中气体做功，吸收热量及内能增量；
- (2) 整个过程的循环效率。

A → B

$$\begin{aligned} W_{AB} &= \frac{1}{2} (P_1 + P_2) (V_2 - V_1) \\ &= \frac{1}{2} (P_1 V_2 - P_1 V_1 + P_2 V_2 - P_2 V_1) \end{aligned}$$

$$\frac{P_1}{V_1} = \frac{P_2}{V_2} \Rightarrow P_1 V_2 = P_2 V_1 \quad \Downarrow$$

$$W_{AB} = \frac{1}{2} (P_2 V_2 - P_1 V_1) = \frac{1}{2} R (T_2 - T_1) = 1247\text{J}$$



A → B

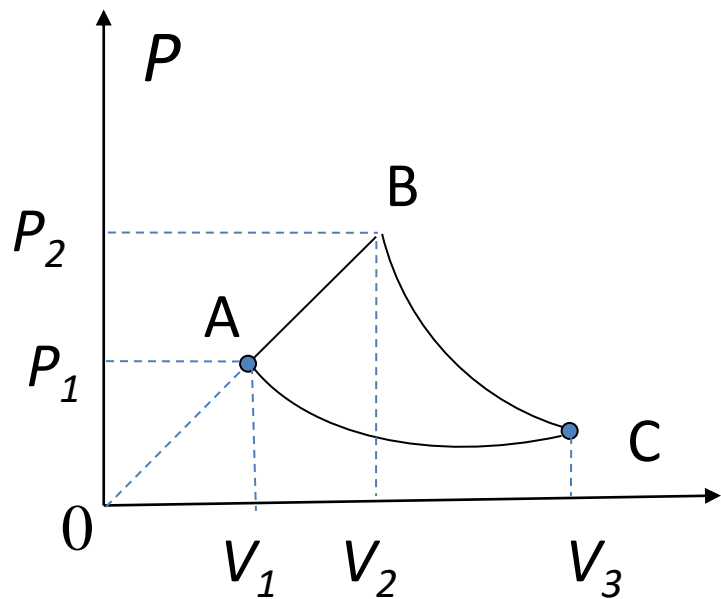
$$\begin{aligned}\Delta E_{AB} &= C_{V,m}(T_2 - T_1) \\ &= \frac{5}{2}R(T_2 - T_1) = 6236J\end{aligned}$$

$$Q_{AB} = \Delta E_{AB} + W_{AB} = 7483J$$

B → C 绝热过程

$$Q_{BC} = 0$$

$$\begin{aligned}W_{BC} &= -\Delta E_{BC} = -C_{V,m}(T_3 - T_2) \\ &= \frac{5}{2}R(T_2 - T_1) = 6236J\end{aligned}$$

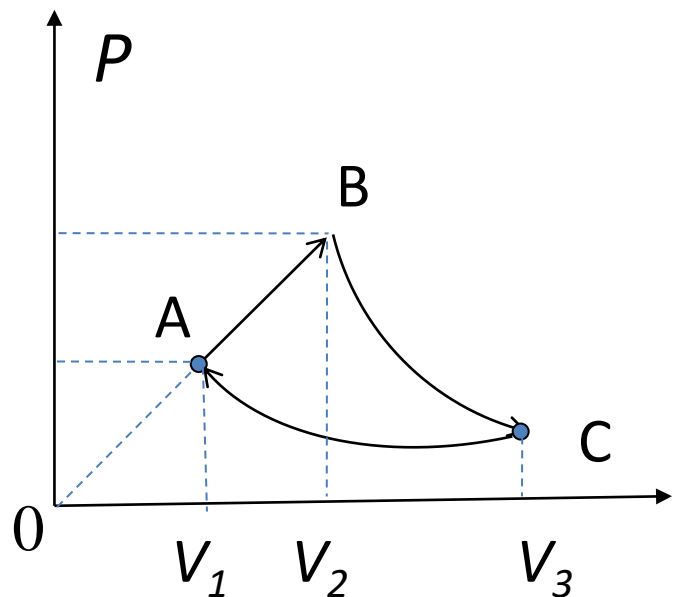


C → A 等温压缩 $\Delta E_{CA} = 0$

$$Q_{CA} = W_{CA} = RT_1 \ln \frac{V_1}{V_3} = -5187J$$

A → B → C → A

$$\begin{aligned}\eta &= 1 - \frac{|Q_{\text{放}}|}{Q_{\text{吸}}} = 1 - \frac{5187}{7483} = \frac{W}{Q_{\text{吸}}} \\ &= \frac{1247 + 6236 - 5187}{7483} = 30.7\%\end{aligned}$$

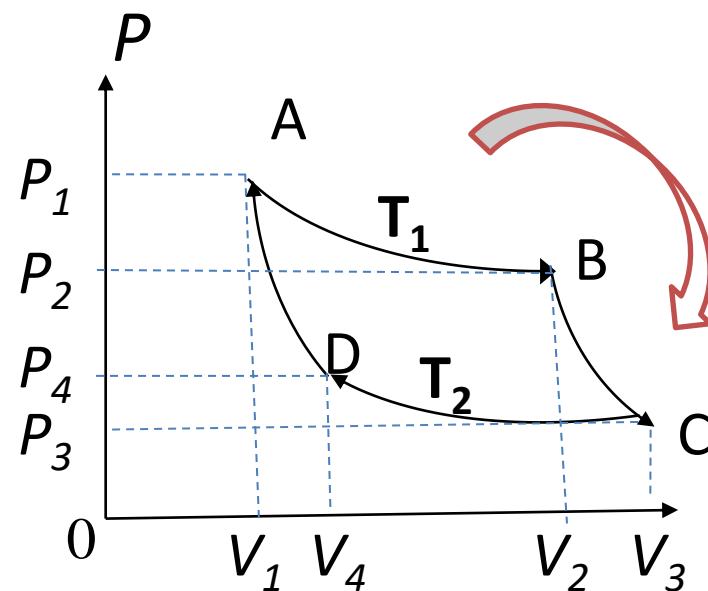
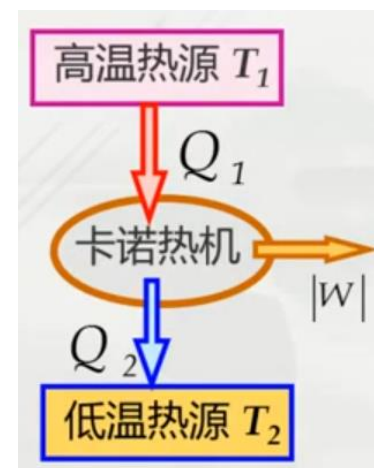


4.4.2 卡诺循环

卡诺循环：准静态平衡过程
气体与两个恒温热源交换热量

接触高温热源，等温膨胀：
高温吸收热量；体积膨胀，对外做功；
与外界无热量交换，绝热膨胀：
内能减少，对外做功。

接触低温热源，等温压缩：
对气体做功，向低温热源放热量；
与外界无热量交换，绝热压缩：
对气体做功，恢复内能。



4.4.2 卡诺循环

对外做功：吸收热量

对外做功：内能减少

对外负功：放出热量

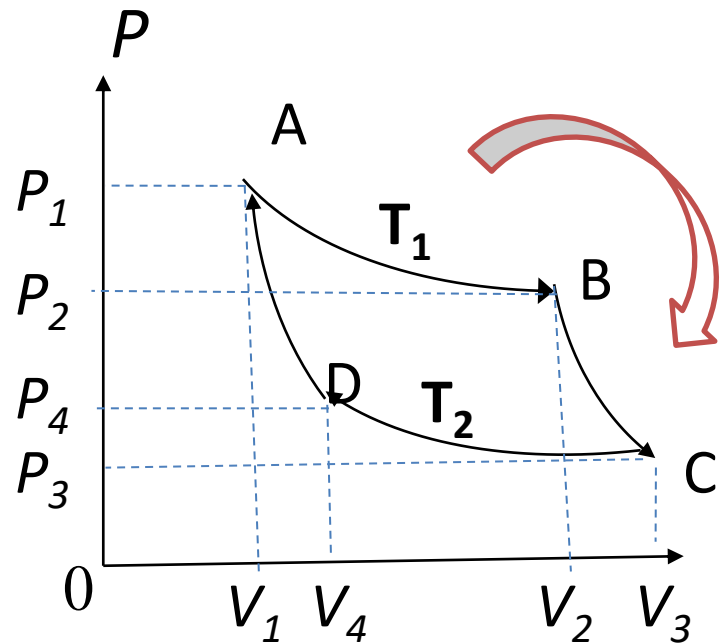
对外负功：内能增加

循环完成后，内能不变。

正循环：总功为正，

气体对外做正功大小 > 气体对外做负功大小

吸收热量大于放出热量，将热能转化为机械能。



4.4.2 卡诺循环

卡诺循环的效率: $\eta_{\text{卡}} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}$

A → B 等温过程

$$Q_1 = W_1 = \mu RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} > 0$$

C → D 等温过程

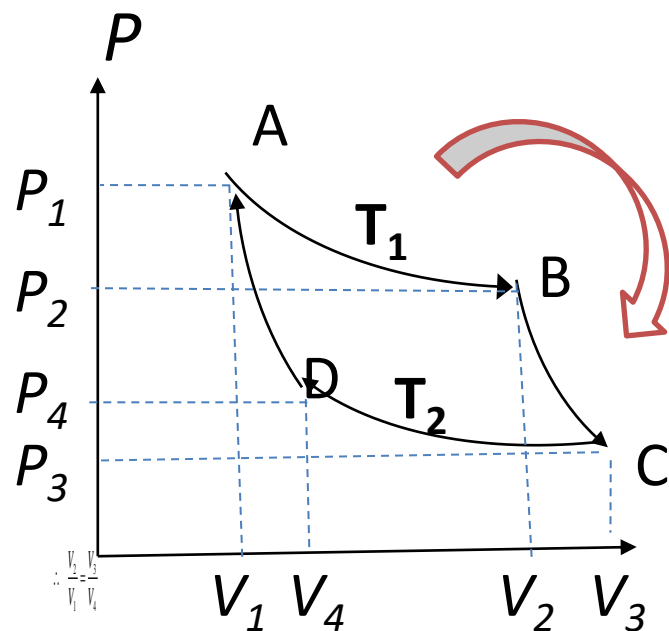
$$Q_2 = W_2 = \mu RT_2 \ln \frac{V_4}{V_3} < 0$$

B → C 绝热过程

$$T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1}$$

D → A 绝热过程

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_4^{\gamma-1}$$



循环效率: 只由热源的温度决定

$$\eta_{\text{卡}} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

4.4.2 卡诺循环

4.19

4.21

4.4.3 逆循环过程（了解）

逆循环： 制冷机

外界对气体做正功，

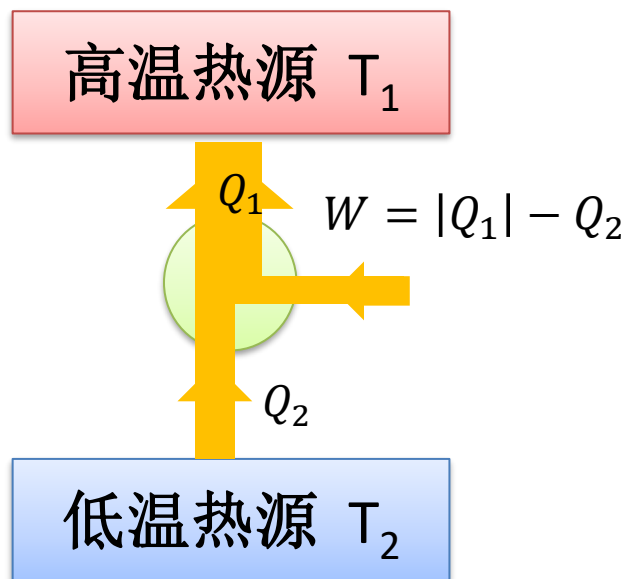
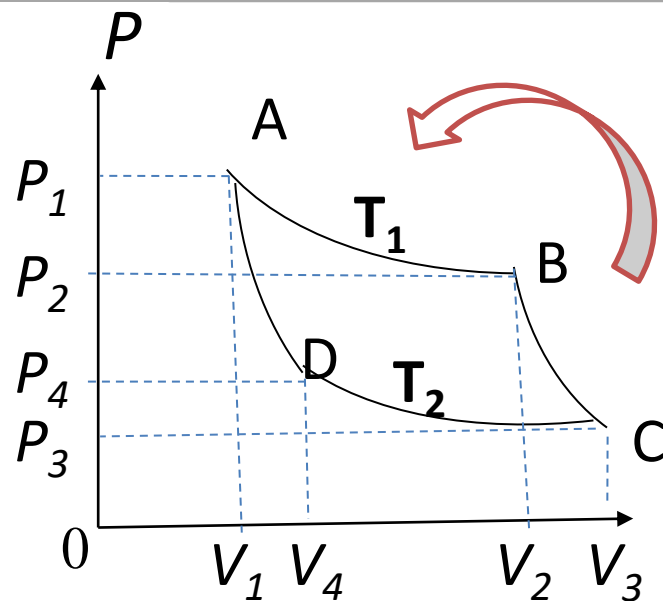
从低温热源吸收热量 Q_2 ，

向高温热源释放热量 Q_1 。

$$|Q_1| = W + Q_2$$

制冷系数：

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{|Q_1| - Q_2}$$



4.4.3 逆循环过程（了解）

逆卡诺循环的效率

卡诺制冷机：

$A \rightarrow B$ 绝热过程

$B \rightarrow C$ 等温过程 (T_2)

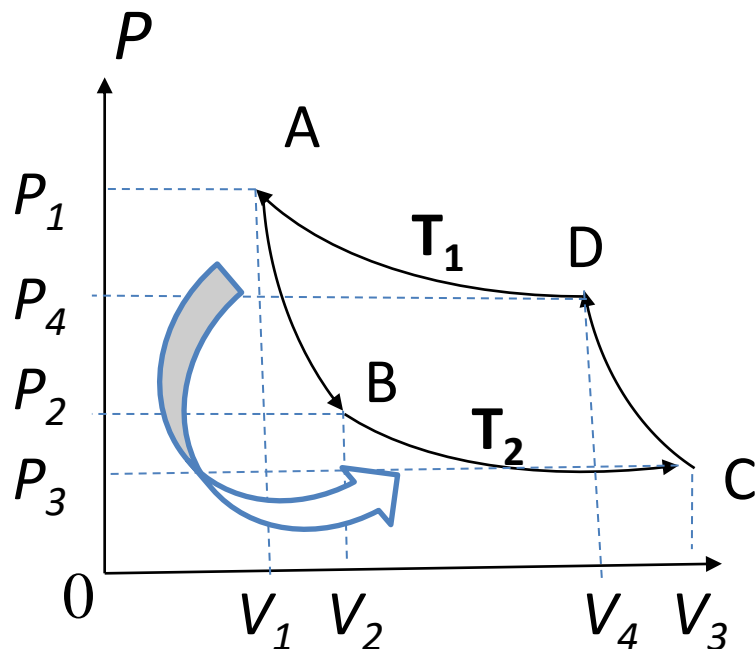
$C \rightarrow D$ 绝热过程

$D \rightarrow A$ 等温过程 (T_1)

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{|Q_1| - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

$T_2 = 300K$ (室内); $T_1 = 350K$ (室外);

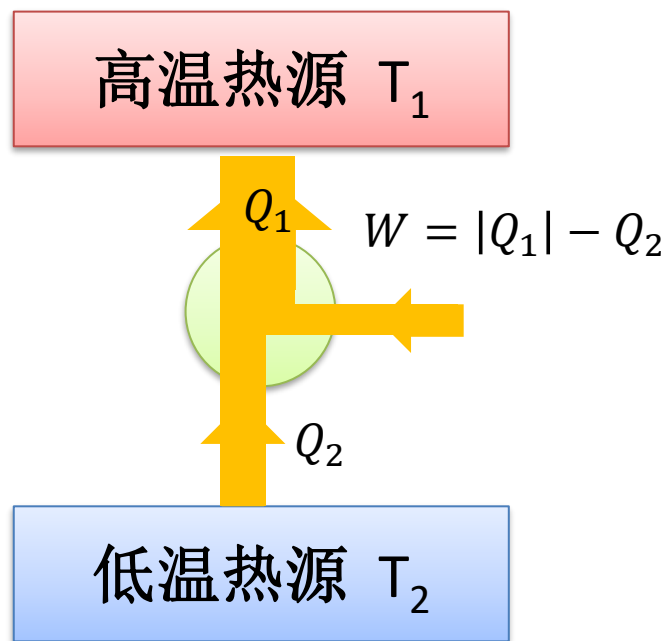
$\varepsilon = 300/50 = 6 = 600\%$ 制冷效率 $> 100\%$??



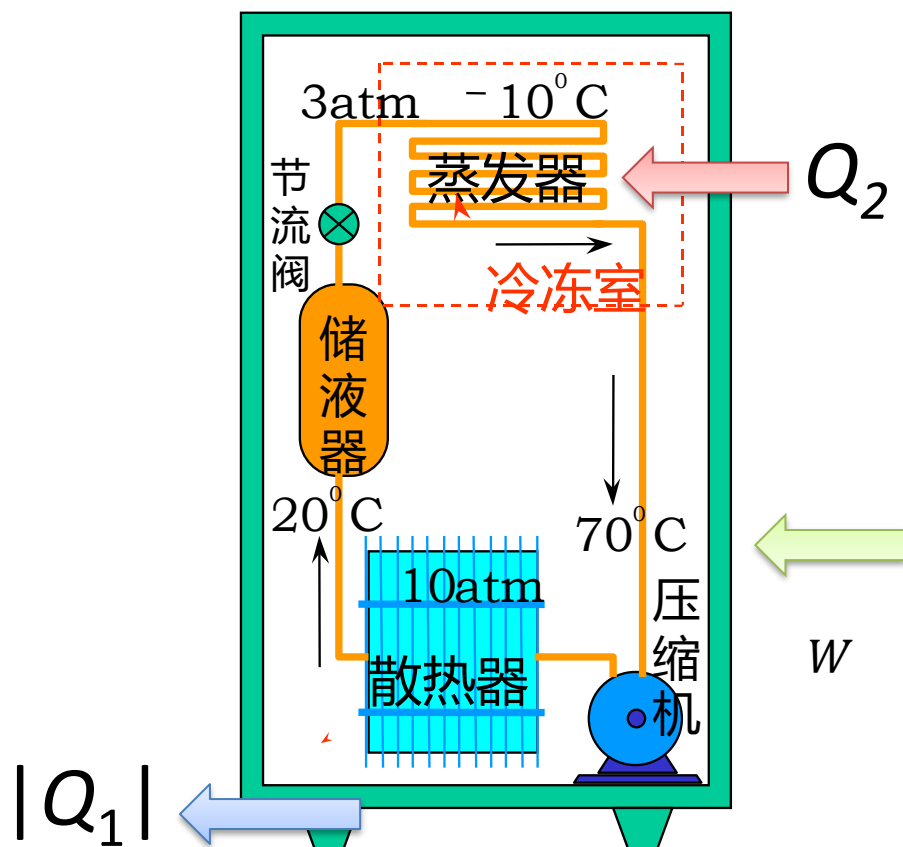
外界对气体做功1J，带走室内6J，向室外排放7J

4.4.3 逆循环过程（了解）

制冷机：电冰箱



蒸发室：液态减压气化，吸热



压缩机：气体加压液化，放热