第二部分 热学

第10章 热力学第一定律

杨振 副教授

Email: yangzh97@mail.sysu.edu.cn

中山大学中法核工程与技术学院

2021年6月

第10章 热力学第一定律

——介绍气体处在平衡态时能量守恒定律。

§ 10.4 绝热过程

系统在和外界无热量交换的条件下进行的过程，成为绝热过程。

如何实现绝热过程?

(1)用理想的绝热壁把系统和外界隔开；

(2)过程进行得很快，以至于系统来不及与外界进行显著的热交换。

例如：内燃机气缸内气体的膨胀、压缩；空气中声音的传播引起的局部膨胀或压缩。——近似绝热过程

1. 理想气体准静态绝热过程

热传导时间>过程时间>弛豫时间

绝热　　准静态

(1)在准静态绝热过程中，理想气体的状态参量满足下面关系：

①状态方程：$pV=\nu RT$

②过程方程：$PV^{\gamma}=C_1$（泊松公式）

$$TV^{\gamma-1}=C_2\,,\quad p^{\gamma-1}T^{-\gamma}=C_3$$

γ —比热比，常数; C_1、C_2、C_3— 常数。

$$\gamma\equiv\frac{C_p}{C_V}=\frac{C_{p,\mathrm{m}}}{C_{V,\mathrm{m}}}=1+\frac{R}{C_{V,\mathrm{m}}}>1$$

$$\gamma=\frac{i+2}{i}$$

理想气体准静态绝热过程方程推导

热力学第一定律——绝热过程，外界对系统做的功等于系统内能的增量。

$$\left.\begin{aligned} \text{đ}Q = \mathrm{d}E + p\,\mathrm{d}V = 0 \\ \mathrm{d}E = \frac{i}{2}\nu R\,\mathrm{d}T \end{aligned}\right\} \quad \frac{i}{2}\nu R\,\mathrm{d}T + p\,\mathrm{d}V = 0$$

$$pV = \nu RT \quad \Rightarrow p\,\mathrm{d}V + V\,\mathrm{d}p = \nu R\,\mathrm{d}T$$

$$\Rightarrow \frac{\mathrm{d}p}{p} + \gamma\frac{\mathrm{d}V}{V} = 0$$

$$\Rightarrow \ln p + \gamma \ln V = C \text{ or } pV^{\gamma} = C_1$$

(2)理想气体的

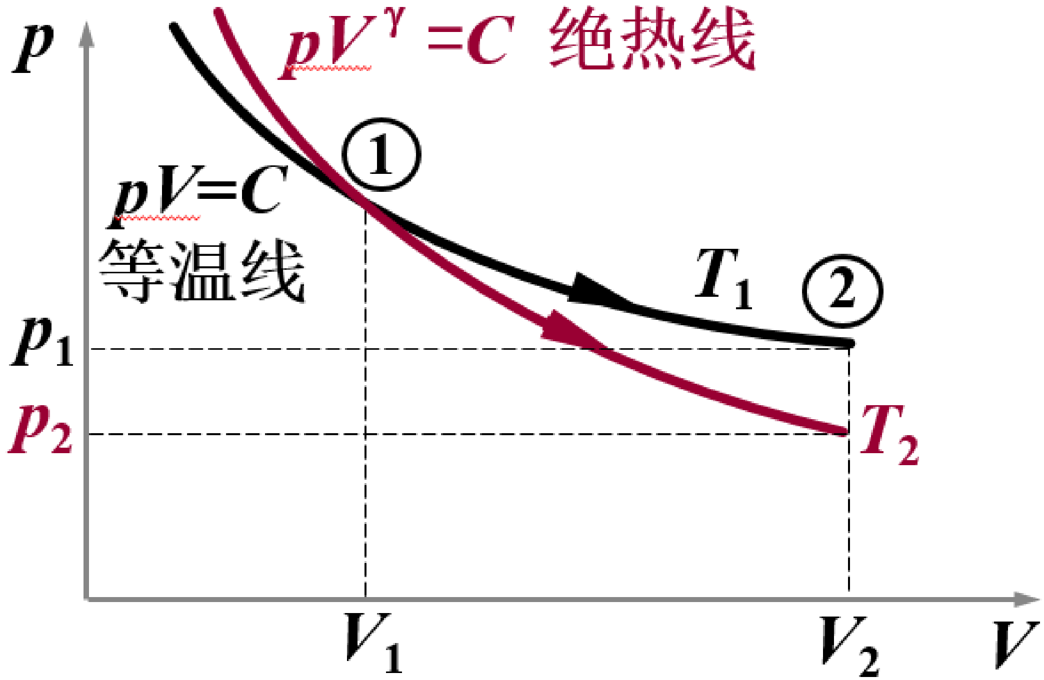
绝热线比等温线陡。

①→②过程：

等温膨胀：

内能不变(吸的热

全做功)($p=nkT$)



绝热膨胀：系统不吸热，对外做功，内能减小，温度降低，

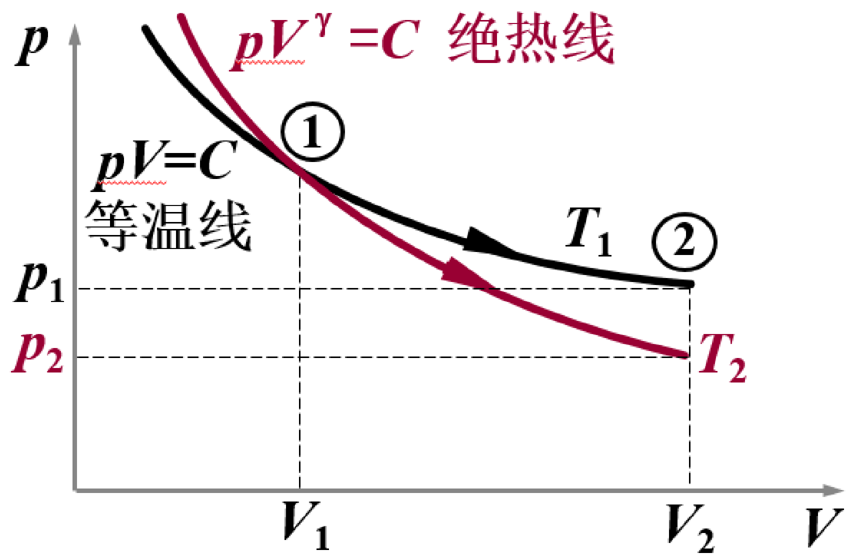
$T_1>T_2$， $p_1>p_2$ ($p=nkT$)

为什么绝热线比等温线陡？物理意义？

$$pV^{\gamma}=p_aV_a^{\gamma} \quad pV=p_aV_a$$

求导：

等温 $\left.\dfrac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}V}\right|_a=-\dfrac{p_a}{V_a}$



绝热 $\left.\dfrac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}V}\right|_a=-\gamma\dfrac{p_a}{V_a}$

$\gamma>1$,所以绝热过程曲线比等温线陡。

(3)准静态绝热过程理想气体对外做的功（例10.5）

$$A=\int_{V_1}^{V_2} p\mathrm{d}V,\quad pV^{\gamma}=C=p_1V_1^{\gamma}=p_2V_2^{\gamma}$$

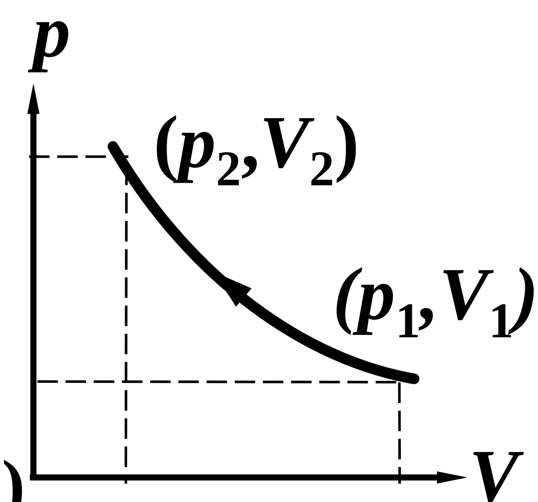
$$A=C\int_{V_1}^{V_2}V^{-\gamma}\mathrm{d}V=\frac{C}{-\gamma+1}V^{-\gamma+1}\Big|_{V_1}^{V_2}=\frac{1}{\gamma-1}(p_1V_1-p_2V_2)$$

或者根据绝热条件求解

$$A=-\Delta E=E_1-E_2=\frac{i}{2}\nu R(T_1-T_2)$$

$$\gamma=C_{p,m}/C_{V,m}=(i+2)/i$$

$$\boxed{A=\frac{\nu R}{\gamma-1}(T_1-T_2)}=\frac{1}{\gamma-1}(p_1V_1-p_2V_2)$$



绝热过程做功跟温差有关。

(4)用绝热过程求空气中的声速 $u=\sqrt{K/\rho}$ （例10.6）

空气中有声波传播时，各空气质元不断地反复经历着压缩和膨胀的过程，由于这种变化过程的频率较高，压缩和膨胀进行得都较快，各质元都来不及和周围的质元发生热传递，因而过程可视为绝热的。

$$\left.\begin{aligned} &pV^{\gamma}=C_1 \Rightarrow \frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}V}V^{\gamma}+p\frac{\mathrm{d}V^{\gamma}}{\mathrm{d}V}=0 \\ &K=-\frac{V\mathrm{d}p}{\mathrm{d}V}=\gamma p=\gamma\frac{m}{MV}RT=\frac{\gamma\rho RT}{M} \end{aligned}\right\} \Rightarrow u_1=\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

体弹模量

在标准状态下的空气，$\gamma=1.40$, $T=273$ K, $M=29.0\times10^{-3}$ kg/mol, $R=8.31$ J/(mol·K),代入有 $u_1=331$ m/s。

(5)用绝热过程求大气高度递减的规律。（例10.7）

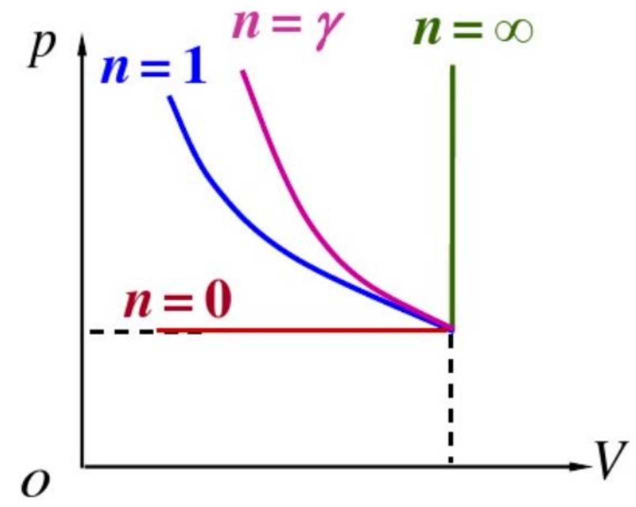
空气导热性差，受热上升气流可以认为是经历绝热过程。通过分析厚度为dh的一层空气的平衡条件得到

$$\left.\begin{aligned}\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}h} = -\frac{Mgp}{RT} \Rightarrow \frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}T}\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}h} = -\frac{Mgp}{RT} \\ \frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}T} = \frac{\gamma}{\gamma - 1}\frac{p}{T} \quad \left(p^{\gamma-1}T^{-\gamma} = C_3\right)\end{aligned}\right\} \Rightarrow \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}h} = -\frac{\gamma - 1}{\gamma}\frac{Mg}{R}$$

对空气，取γ=1.40, T=273K, M=29.0×10^{-3} kg/mol, R=8.31J/(mol·K),代入可得dT/dh=-9.8 K/km。

(6)多方过程

理想气体的实际过程，常常既不是等温也不是绝热的，而是介于两者之间的多方过程。



PV^n =常量（n称为多方指数）

$n=1$ — 等温过程

$n=\gamma$ — 绝热过程

$n=0$ — 等压过程

$n=\infty$ — 等容过程

$$pV^n = C \Rightarrow p^{1/n}V = C'$$

$n \to \infty, V = C'$常数

一般情况$1< n <\gamma$，多方过程可近似代表气体内进行的实际过程。

①多方过程理想气体对外做的功：

$$A=\frac{1}{n-1}(P_1V_1-P_2V_2)\ ,n\neq 1$$

②多方过程理想气体摩尔热容

$$C_{\mathrm{m}}=C_{V,\mathrm{m}}-\frac{R}{n-1}=C_{V,\mathrm{m}}\left(\frac{\gamma-n}{1-n}\right)$$ 利用$C_{V,m}=\frac{i}{2}R$进行推导

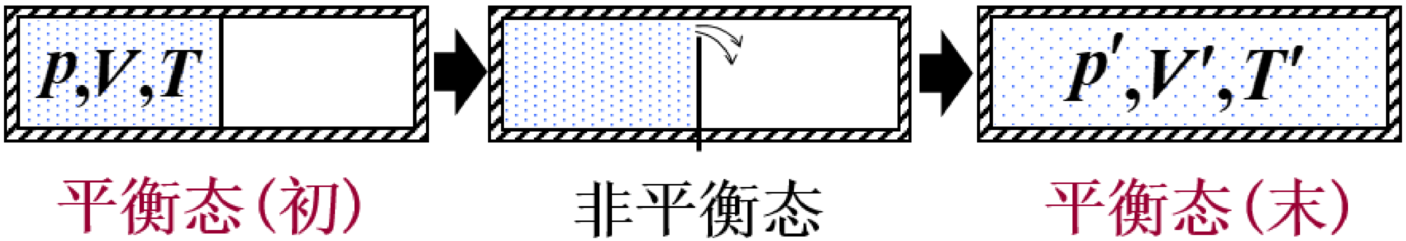
证明：对状态方程和过程方程求微分：

$$\left.\begin{aligned}&p\mathrm{d}V+V\mathrm{d}p=\nu R\mathrm{d}T\\&npV^{n-1}\mathrm{d}V+V^{n}\mathrm{d}p=0\end{aligned}\right\}\Rightarrow\frac{p}{\nu}\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}T}=-\frac{R}{n-1}$$

根据热力学第一定律：$\text{đ}Q=\nu C_m\mathrm{d}T=\nu C_{V,m}\mathrm{d}T+p\mathrm{d}V$

可得：$$C_m=C_{V,m}+\frac{p}{\nu}\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}T}=C_{V,m}-\frac{R}{n-1}$$

2. 绝热自由膨胀



非准静态过程，则$pV^{\gamma}=C$不适用。但服从热力学第一定律，因$Q=0, A=0$得

$$E'-E=0$$

气体经绝热自由膨胀后，内能不变。

【思考】温度会变化么？压强变化么？ $p\downarrow V\uparrow = \nu RT$不变

(1)理想气体绝热自由膨胀

$$E' - E = 0 \quad T' = T$$

(2)实际气体绝热自由膨胀

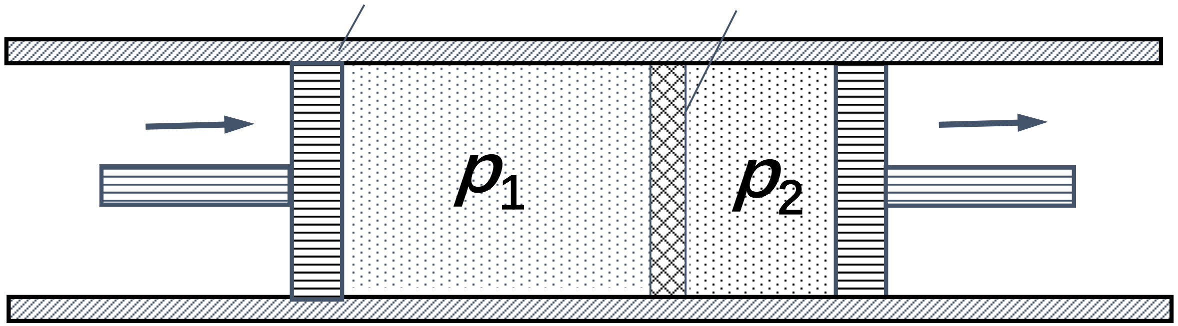
①若分子力以斥力为主，$V \to \infty$过程斥力做正功，势能减小，而内能不变，则动能增大，温度升高。

$$T' > T$$

②若分子力以引力为主，$V \to \infty$过程引力做负功，势能增大，而内能不变，则动能减小，温度降低。

$$T' < T$$

3. 节流过程



通过多孔塞或小孔，维持两侧压强差恒定，气体向压强较低区域膨胀。

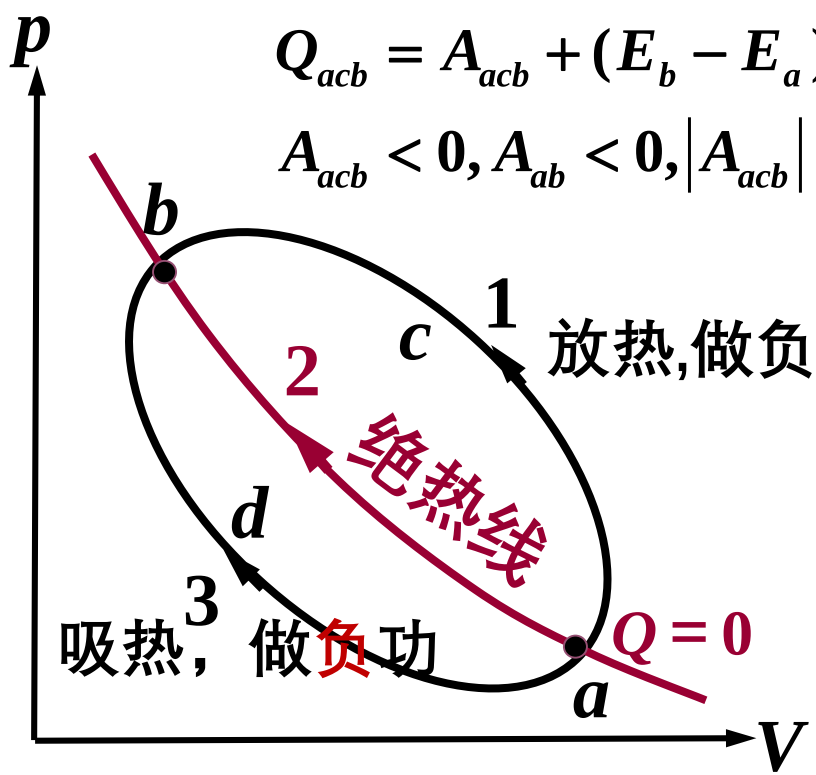
焦耳—汤姆孙效应：实际气体通过节流过程温度可升高或降低。

正焦耳—汤姆孙效应：温度降低（氮、氧、空气）。制冷、气体液化。

$$Q_{ab}=0, E_b-E_a=-A_{ab}$$

$$Q_{acb}=A_{acb}+(E_b-E_a)=A_{acb}-A_{ab}<0$$

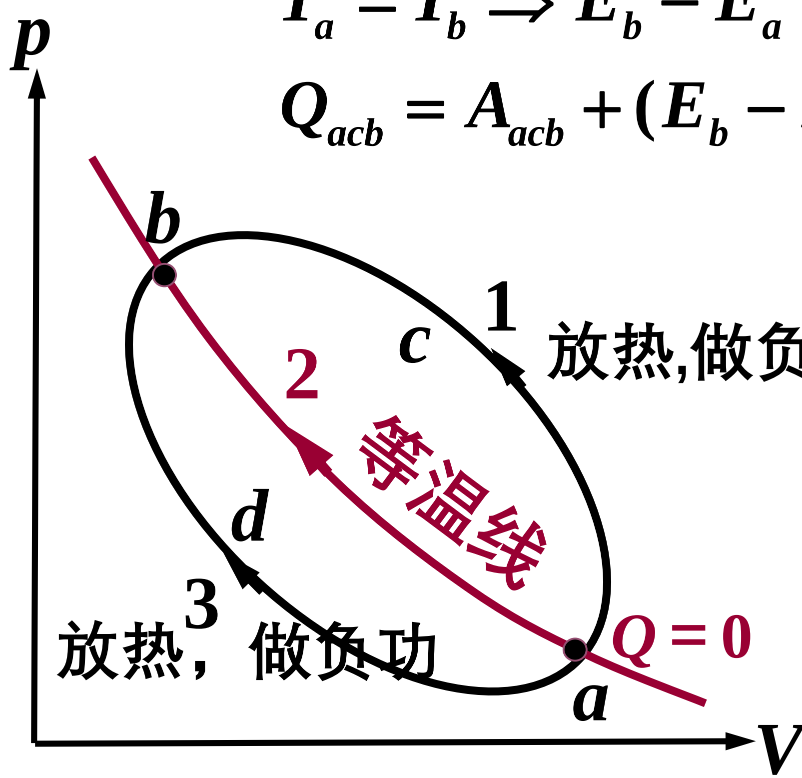
$$A_{acb}<0, A_{ab}<0, |A_{acb}|>|A_{ab}|$$



【思考1】设理想气体分别经历上图3个过程，讨论过程中净吸热或放热情况。箭头方向改变后呢?

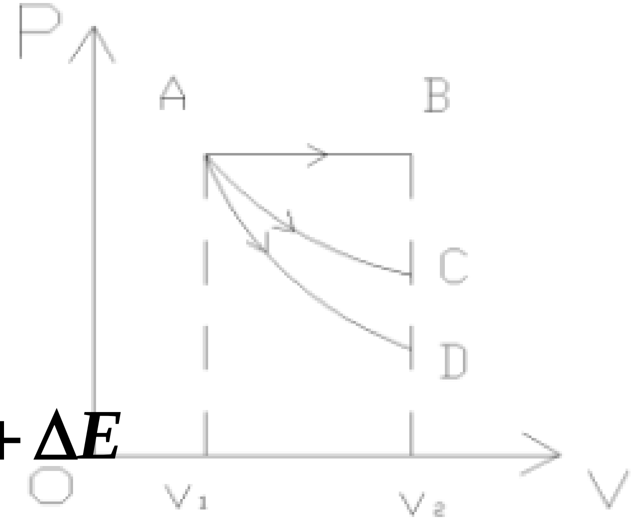
$$T_a = T_b \Rightarrow E_b - E_a = 0$$

$$Q_{acb} = A_{acb} + (E_b - E_a) = A_{acb} < 0$$



【思考2】设理想气体分别经历上图3个过程，讨论过程中净吸热或放热情况。箭头方向改变后呢?

例1 一定量的理想气体从体积V_1膨胀到体积V_2分别经历的过程是：$A\rightarrow B$等压过程；$A\rightarrow C$等温过程； $A\rightarrow D$绝热过程，(1)其中吸热量最多的是哪个过程？(2)如果V_2=2V_1，那么气体温度的改变最大和最小的分别是哪个过程？



解 (1)热力学过程的功即过程曲线p-V下的面积，可知 $A_{AB} > A_{AC} > A_{AD}$

再由热力学第一定律，气体吸热：$Q = A + \Delta E$

$A\rightarrow D$绝热过程：Q=0; $A\rightarrow C$等温过程：Q=A_{AC}；

$A\rightarrow B$等压过程：Q=A_{AB}+ΔE_{AB}，且ΔE_{AB}>0。

所以，$A\rightarrow B$等压过程吸热最多。

(2) $A\rightarrow C$等温过程温度不变$T_A=T_C$。

$A\rightarrow B$等压过程：$p_A=p_B$，根据状态方程$pV=vRT$，得

$$\frac{T_B}{V_B}=\frac{T_A}{V_A}\Rightarrow T_B=2T_A, T_B-T_A=T_A$$

$A\rightarrow D$绝热过程：$T_A V_A^{\gamma-1}=T_D V_D^{\gamma-1}$

$$T_D=T_A\left(\frac{V_A}{V_D}\right)^{\gamma-1}=T_A\left(\frac{1}{2}\right)^{\gamma-1}，T_D-T_A=T_A\left[1-\left(\frac{1}{2}\right)^{\gamma-1}\right]<T_A$$

所以温度改变在等压过程最大，等温过程最小。

(2) 另一求解思路

等压过程：

$$A_p = p_A(V_B - V_A) = \nu R(T_B - T_A),\ T_B - T_A = \frac{A_p}{\nu R}$$

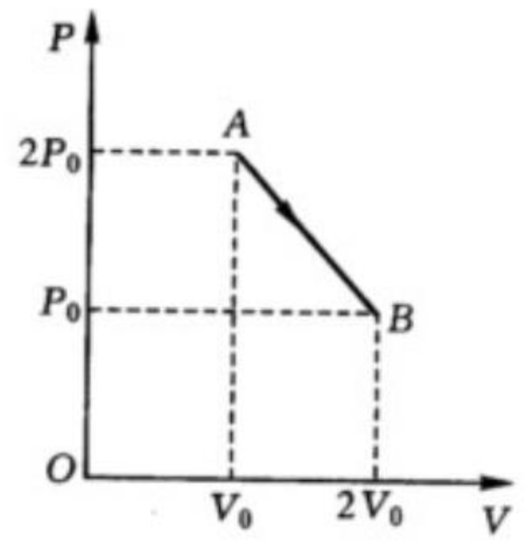
绝热过程：

$$A = -\Delta E = -\frac{i}{2}\nu R(T_D - T_A),\ |T_D - T_A| = \frac{|A|}{\frac{i}{2}\nu R}$$

$$\because \nu R < \frac{i}{2}\nu R, A_p > |A| \ \therefore T_B - T_A > |T_D - T_A|$$

例2 v mol单原子理想气体分子经历如图过程。

(1)确定T-V关系；(2)确定摩尔热容。



解 (1)根据图示可得p-V函数关系

$$p=-\frac{p_0}{V_0}V+3p_0$$

再根据理想气体状态方程$pV=vRT$，可得

$$T=\frac{1}{vR}\left(-\frac{p_0}{V_0}V+3p_0\right)\qquad(\#)$$

以V为横轴，T为纵轴，则T-V曲线为开口向下的二次曲线，

最大值所在位置及大小为

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}V}=0\Rightarrow V_c=\frac{3}{2}V_0,T_{max}=\frac{9p_0V_0}{4vR}$$

根据热力学第一定律有 $\text{đ}Q = p\mathrm{d}V + \nu C_{V,m}\mathrm{d}T$

而根据(#)式有 $\mathrm{d}T = \dfrac{1}{\nu R}\left(-\dfrac{2p_0}{V_0}V\mathrm{d}V + 3P_0\mathrm{d}V\right)$，则有

$$\mathrm{d}V = \frac{\nu R\mathrm{d}T}{(3-2V/V_0)p_0}$$

联立上面的式子

$$\begin{aligned}\text{đ}Q &= p\mathrm{d}V + \nu C_{V,m}\mathrm{d}T \\ &= \left(-\frac{p_0}{V_0}V + 3p_0\right)\mathrm{d}V + \frac{\nu C_{V,m}}{\nu R}\left(-\frac{2p_0}{V_0}V\mathrm{d}V + 3P_0\mathrm{d}V\right) \\ &= \left(\frac{15}{2}p_0 - \frac{4p_0}{V_0}V\right)\mathrm{d}V = \frac{15p_0/2 - 4p_0V/V_0}{(3-2V/V_0)p_0}\mathrm{d}T\end{aligned}$$

$$\Rightarrow C_m = \frac{1}{\nu}\frac{\text{đ}Q}{\mathrm{d}t} = \frac{15/2 - 4V/V_0}{3-2V/V_0}$$

例3 气缸内有单原子理想气体，若绝热压缩使其容积减半，问气体分子的平均速率变为原来速率的几倍？若为双原子理想气体，又为几倍?

解 根据麦克斯韦速率分布，气体分子的平均速率为

$$\bar{v}=\sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \Rightarrow \frac{\bar{v}_2}{\bar{v}_1}=\frac{\sqrt{T_2}}{\sqrt{T_1}}$$

由绝热方程有：

$$T_1V_1^{\gamma-1}=T_2V_2^{\gamma-1} \Rightarrow \frac{T_2}{T_1}=\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}$$

则有：

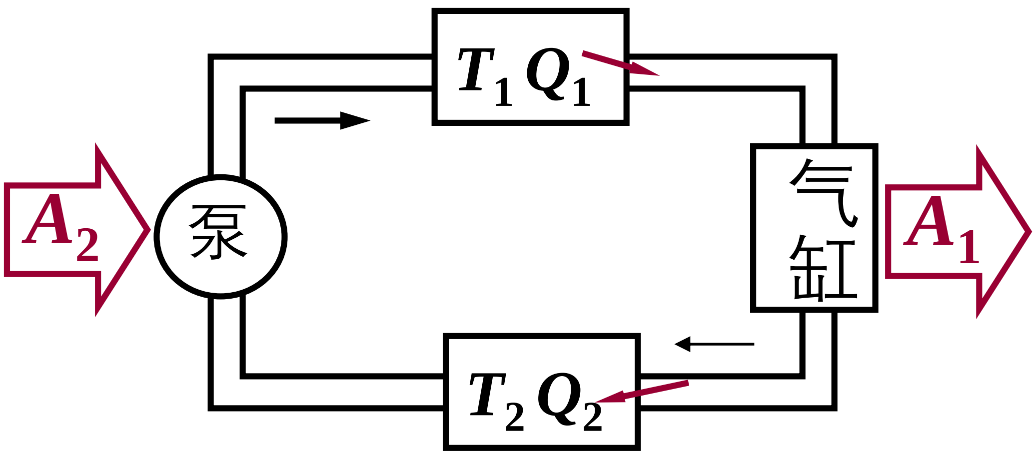
$$\frac{\bar{v}_2}{\bar{v}_1}=\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\frac{\gamma-1}{2}}=\begin{cases}1.15\text{，单原子分子，}\gamma=5/3\\1.26\text{，双原子分子，}\gamma=7/5\end{cases}$$

§ 10.5 循环过程

1. 循环过程

系统(工质)经一系列变化回到初态的整个过程。

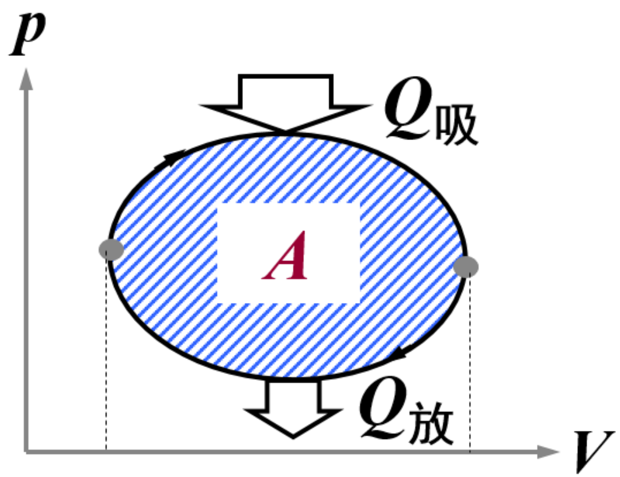
锅炉(高温热库)



冷凝器(低温热库)

循环过程的特征：工质复原，内能不变$\Delta E=0$。

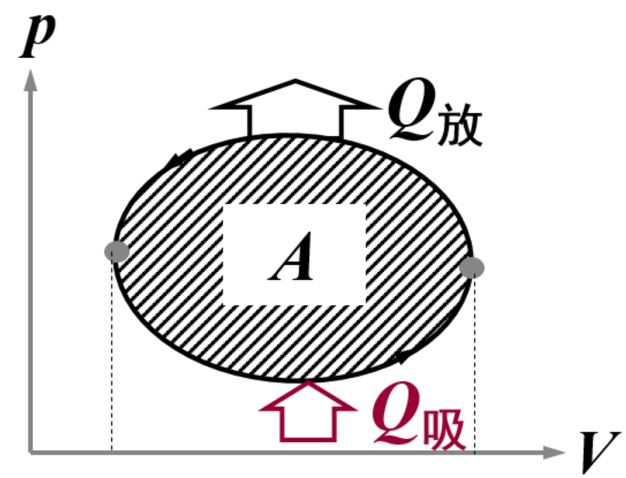
如果循环的各阶段均为准静态过程，则循环过程可用闭合曲线表示：



正(热)循环

系统对外界做净功A

$$A = Q_{吸} - Q_{放}$$



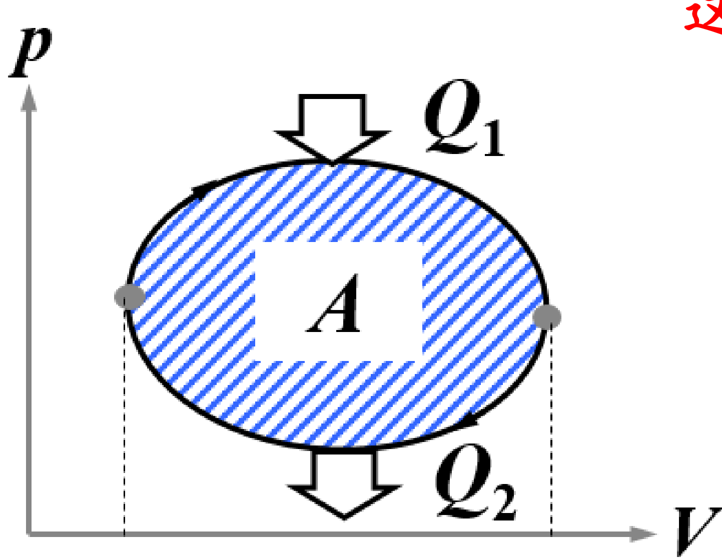
逆(致冷)循环

外界对系统做净功A

$$Q_{吸} = Q_{放} - A$$

这里$Q_{吸}$、$Q_{放}$只表示数值(>0)

2. 正循环的效率



这里Q_1、Q_2也只表示数值(>0)

工质复原内能不变

$$A = Q_1 - Q_2$$

效率：在一次循环中，工质对外做的净功占它吸收的热量的比率。

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

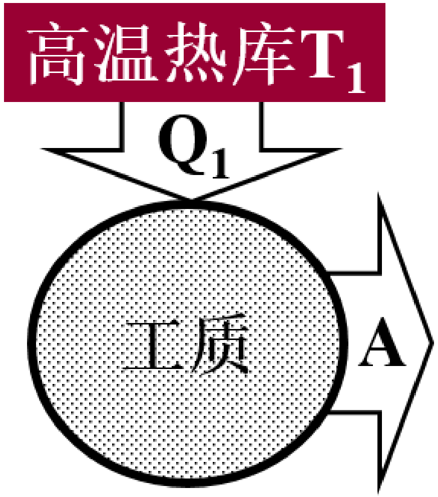
工质经历循环是任意的，包括非准静态过程。

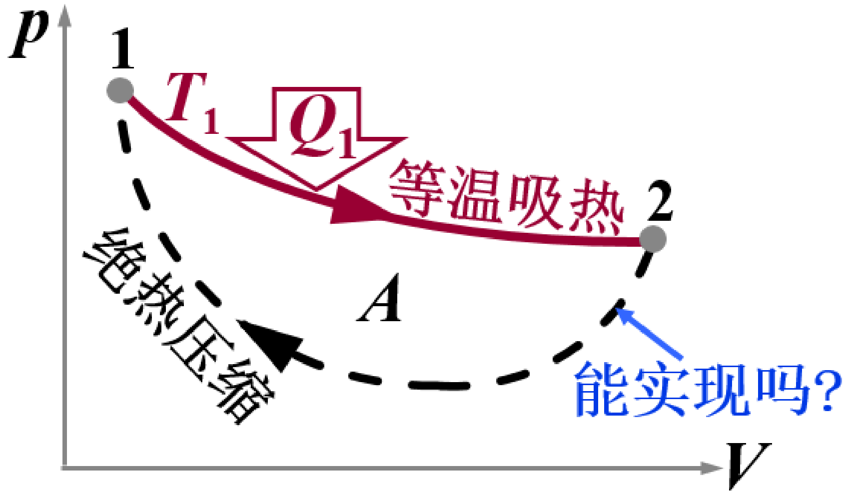
3. 第二类永动机能制成吗？

如果取消低温热库($Q_2=0$)

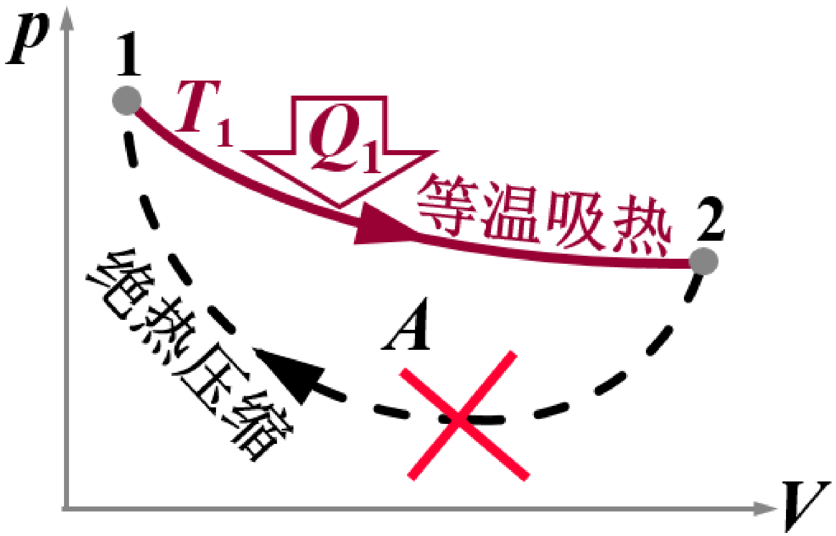
$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1$$

这种从单一热库吸收热做功的热机，称为**第二类永动机**。





以工质为理想气体为例说明：



2→1不可能是绝热过程，因为

$$T_1V_1^{\gamma-1} \neq T_1V_2^{\gamma-1}$$

必然存在温度不是T_1的第二个热库。

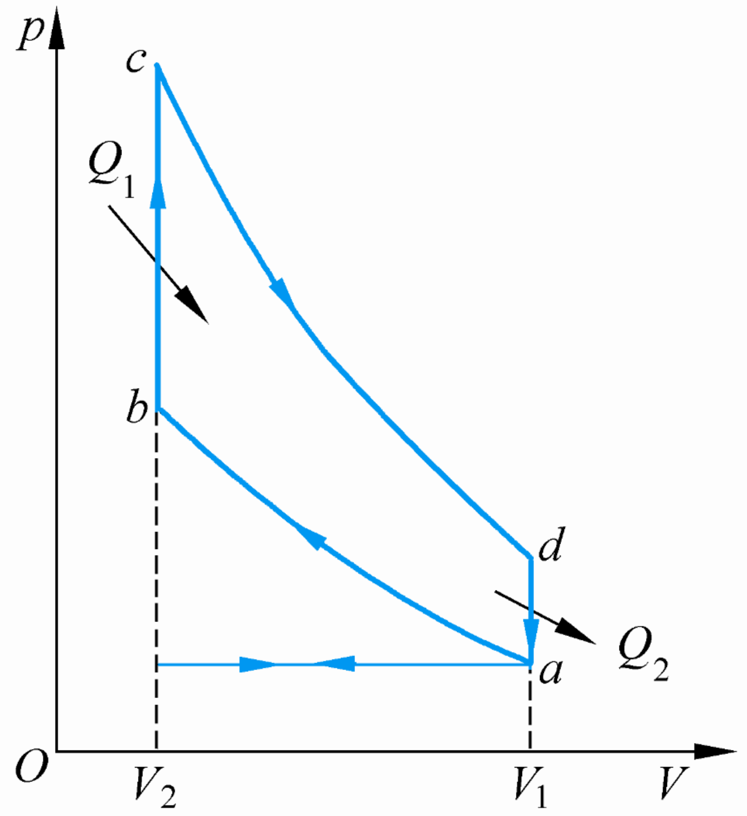
空气标准奥托循环。

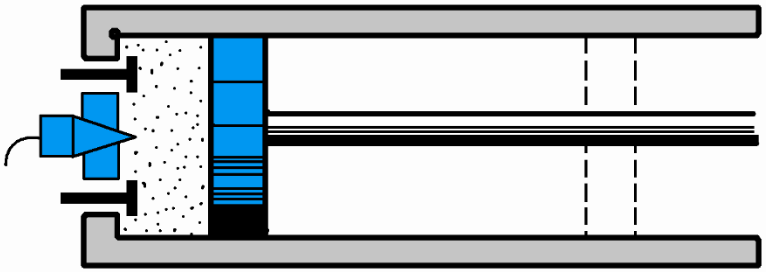
它是燃烧汽油的四冲程内燃机中进行的循环过程。

主要由四步组成：

(1)绝热压缩$a \rightarrow b$,气体从(V_1,T_1)状态变化到(V_2,T_2)状态；

$$\frac{T_2}{T_1}=\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}$$



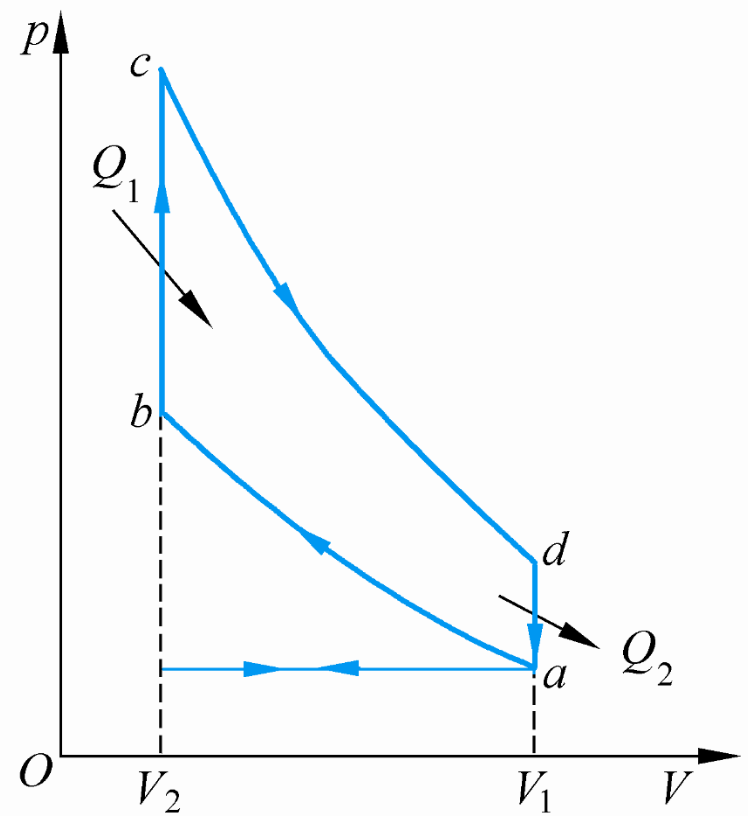


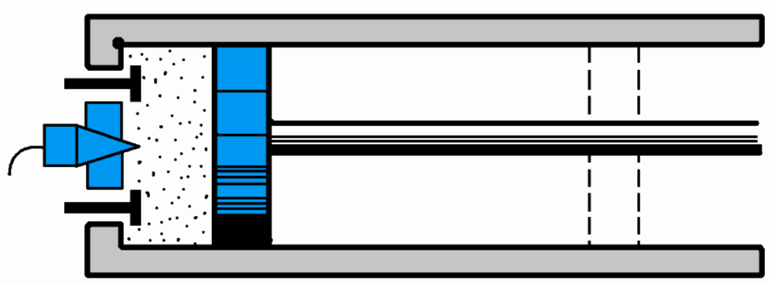
(2)等体吸热(相当于点火爆燃过程) $b \to c$,气体由(V_2, T_2)状态变化到(V_2, T_3)状态；吸收的热量为

$$Q_1 = \nu C_{V,m}(T_3 - T_2)$$

(3)绝热膨胀(相当于气体膨胀对外做功的过程) $c \to d$,气体由(V_2,T_3)状态变化到(V_1,T_4)状态；

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}$$





(4)等体放热$d \to a$，气体由(V_1, T_4)状态变回到(V_1, T_1)状态，放出的热量为：

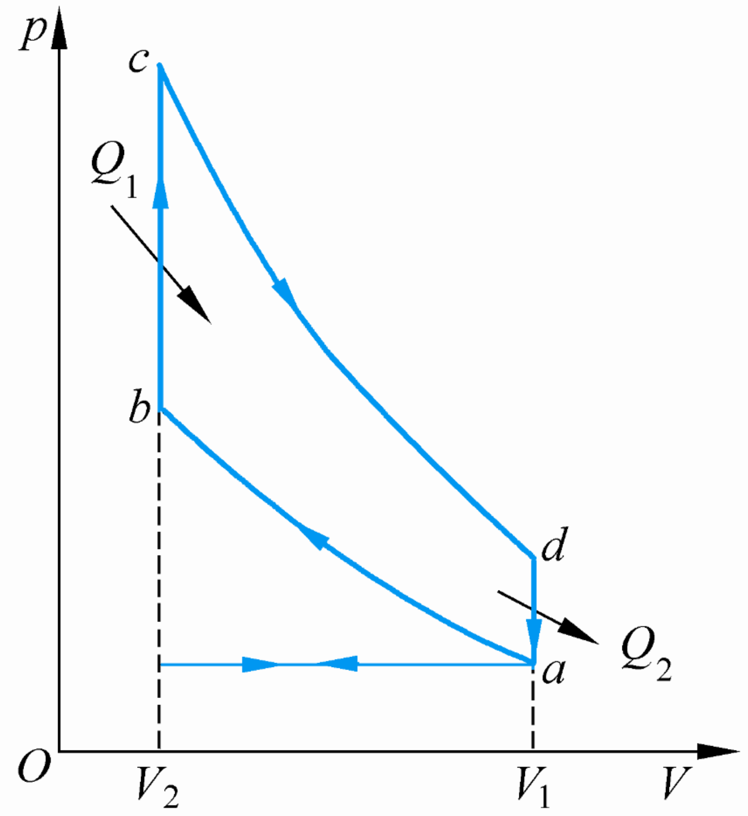
$$Q_2 = \nu C_{V,m}(T_4 - T_1)$$

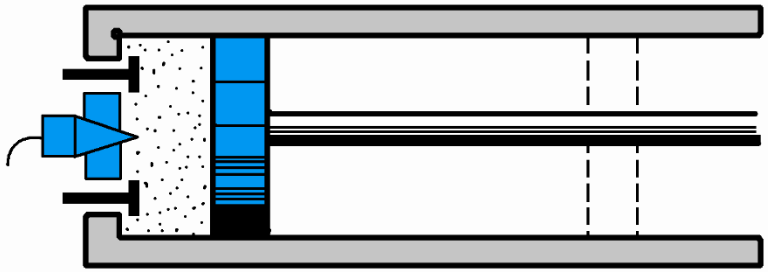
那么，循环效率为

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$

根据两个绝热过程又有

$$\frac{T_3}{T_4} = \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3 - T_2}{T_4 - T_1}$$





代入可得循环效率公式，并定义压缩比为$V_1/V_2=r$，则有

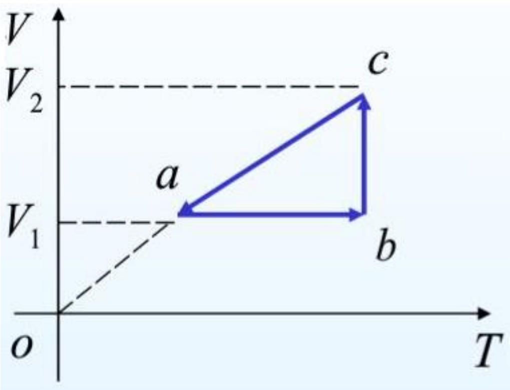
$$\eta = 1 - \frac{1}{T_2/T_1} = 1 - \frac{1}{(V_1/V_2)^{\gamma-1}} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}}$$

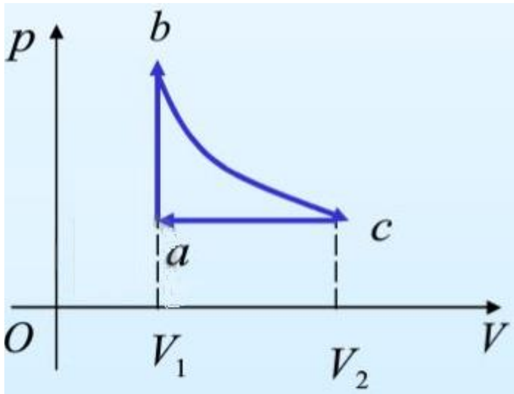
由此可见，空气标准奥托循环的效率决定于压缩比。现代汽油内燃机的压缩比约为10，更大时当空气和汽油的混合气在尚未压缩到b状态时,温度就已升高到足以引起混合气燃烧了。设r=10，当空气的γ值取1.4,则上式给出

$$\eta = 1 - \frac{1}{10^{0.4}} = 0.6 = 60\%$$

实际汽油机的效率比这小得多,一般只有30%左右。

例1 1 mol单原子分子理想气体作如图循环，已知$V_2=2V_1$，求循环效率。





解 先画图对应的p-V图。

b到c是等温过程，

$$\left.\begin{aligned} p_b V_1 &= \nu R T_b \\ p_c V_2 &= \nu R T_c \\ T_b &= T_c \end{aligned}\right\} \Rightarrow \left.\begin{aligned} p_b V_1 &= p_c V_2 \\ V_2 &= 2V_1 \end{aligned}\right\} \Rightarrow p_b = 2p_c = 2p_a$$

$$Q_{bc} = A_{bc} = \nu RT\ln\frac{V_2}{V_1} = RT\ln 2 = 2p_a V_1 \ln 2 > 0$$

a到b是等体过程，吸收的热量

$$Q_{ab}=\nu C_{V,m}(T_b-T_a)=\frac{3}{2}(p_b-p_a)V=\frac{3}{2}p_aV_1>0$$

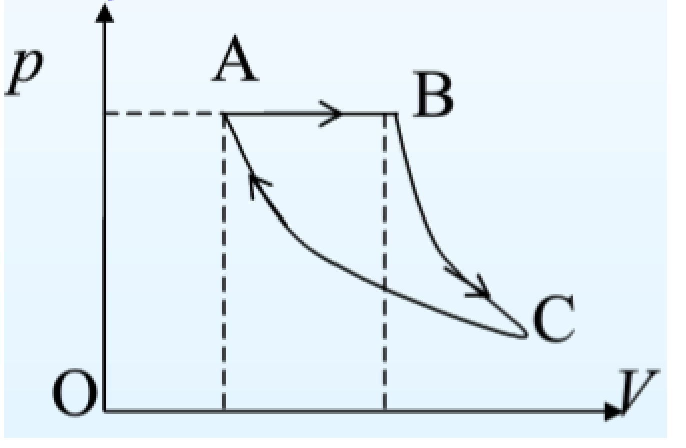
c到a过程是等压过程，吸收的热量

$$Q_{ca}=\nu C_{p,m}(T_a-T_c)=\frac{5}{2}(p_aV_1-p_aV_2)=-\frac{5}{2}p_aV<0$$

则该循环过程的循环效率

$$\eta=1-\frac{Q_2}{Q_1}=1-\frac{5/2}{2\ln 2+3/2}=1-\frac{2.5}{2.89}=13.4\%$$

例2 某理想气体经历图示的循环过程，*AB*为等压过程，吸收的热量为500 J，*BC*为绝热过程，*CA*为等温过程，且已知循环效率η=20%，求(1)*CA*过程气体所吸收的热量Q_2；(2)*ABC*过程气体对外做功*A*。



解 (1)*CA*过程为等温放热过程

$$\eta = 1 - \frac{Q_{放}}{Q_{吸}} = 1 - \frac{Q_{放}}{500} = 20\%$$

$$\Rightarrow Q_{放} = 400\ \text{J}$$

(2)该循环对外所做的总功 $\eta = \dfrac{A}{Q_{吸}} = 20\% \Rightarrow A = 100\ \text{J}$

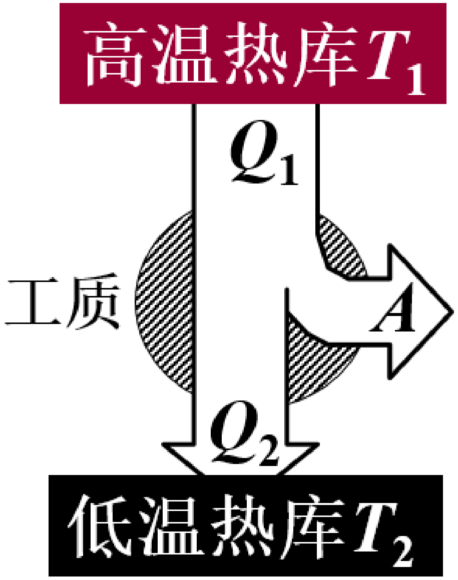
因*CA*是等温过程ΔE=0，$A_{CA} = Q_{CA} = -400\ \text{J}$

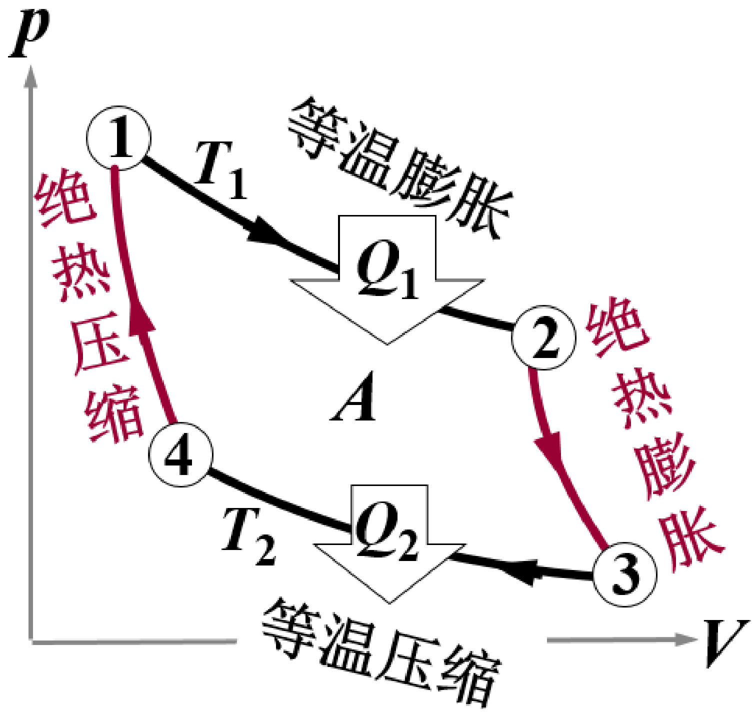
$$A = A_{CA} + A_{ABC} \Rightarrow A_{ABC} = 500\ \text{J}$$

§ 10.6 卡诺循环

卡诺循环：工质只和两个恒温热库交换热量的准静态循环。

卡诺热机：按卡诺循环工作的热机。





以理想气体工质为例，计算卡诺循环的效率

(1)①→②等温膨胀：

从高温热库吸热：

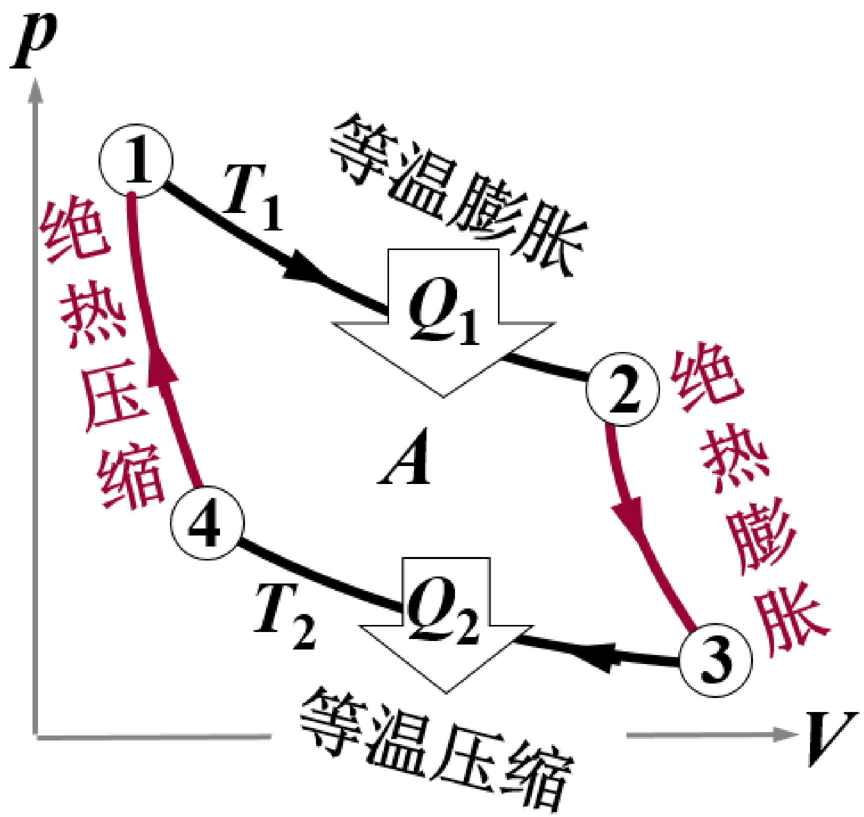
$$Q_1 = \nu RT_1 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

(2) ③→④等温压缩：

向低温热库放热：

$$Q_2 = \nu RT_2 \ln\left(\frac{V_3}{V_4}\right)$$

表示放热量的多少



利用绝热压缩做功特点证明上图绝热压缩和绝热膨胀曲线下面积相等。

(3) ②→③绝热膨胀：

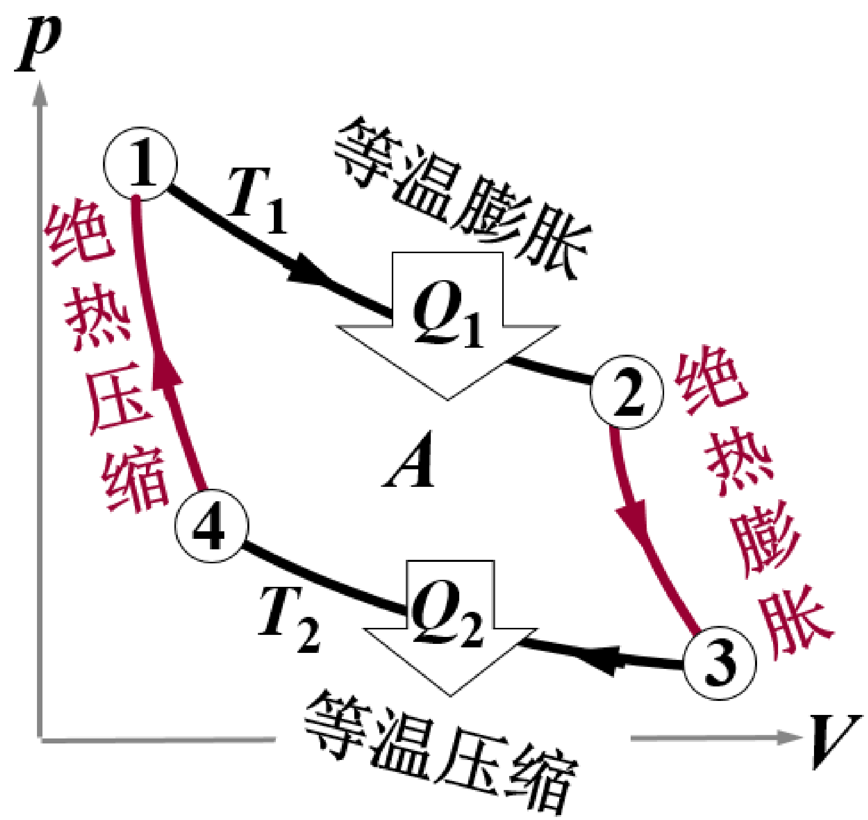
$$T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1}$$

(4) ④→①绝热压缩：

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

因此

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$$



$$\eta_c = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - vRT_2 \ln\left(\frac{V_3}{V_4}\right) / vRT_1 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

则卡诺循环的效率只由热库温度决定：$\eta_c = 1 - \frac{T_2}{T_1}$

在同样两个温度T_1和T_2之间工作的各种工质的卡诺循环的效率都由上式给定，而且是实际热机的可能效率的最大值，即

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \le \eta_c = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

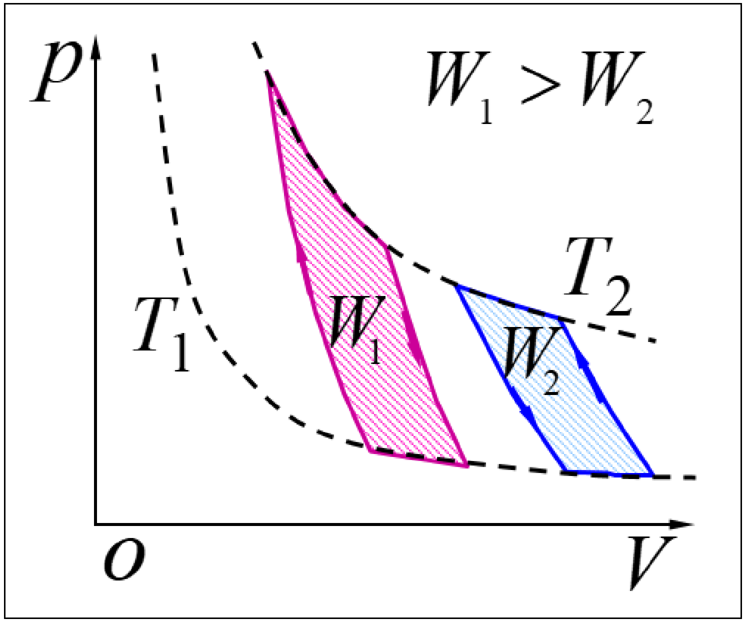
回到之前的规定

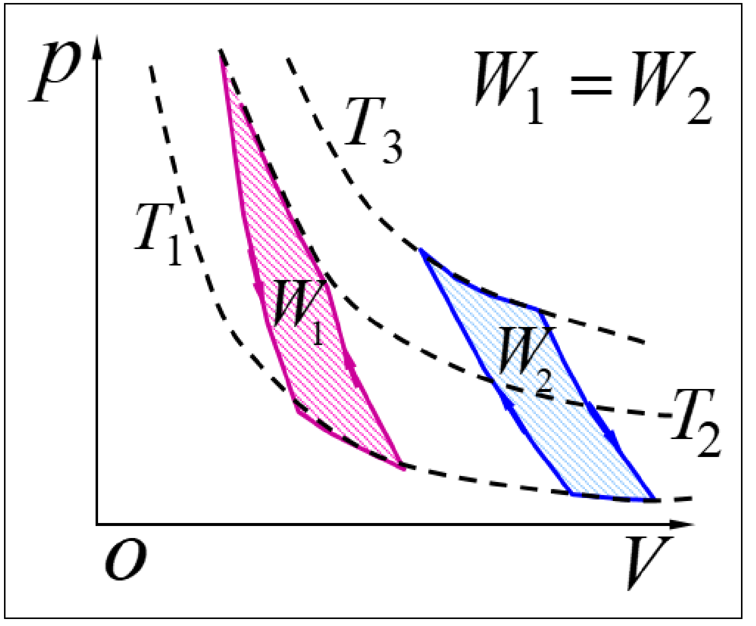
令吸热为正(放热为负)，根据上式可得“热温比”之和满足

$$1 + \frac{Q_2}{Q_1} \le 1 - \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} \le 0$$

其中“=”表示卡诺循环；“<”为不可逆循环。

图中两卡诺循环$\eta_1 = \eta_2$吗？





$$\eta_1 = \eta_2 \qquad\qquad \eta_1 < \eta_2$$

卡诺循环的效率只由热库温度决定

例1 热电厂

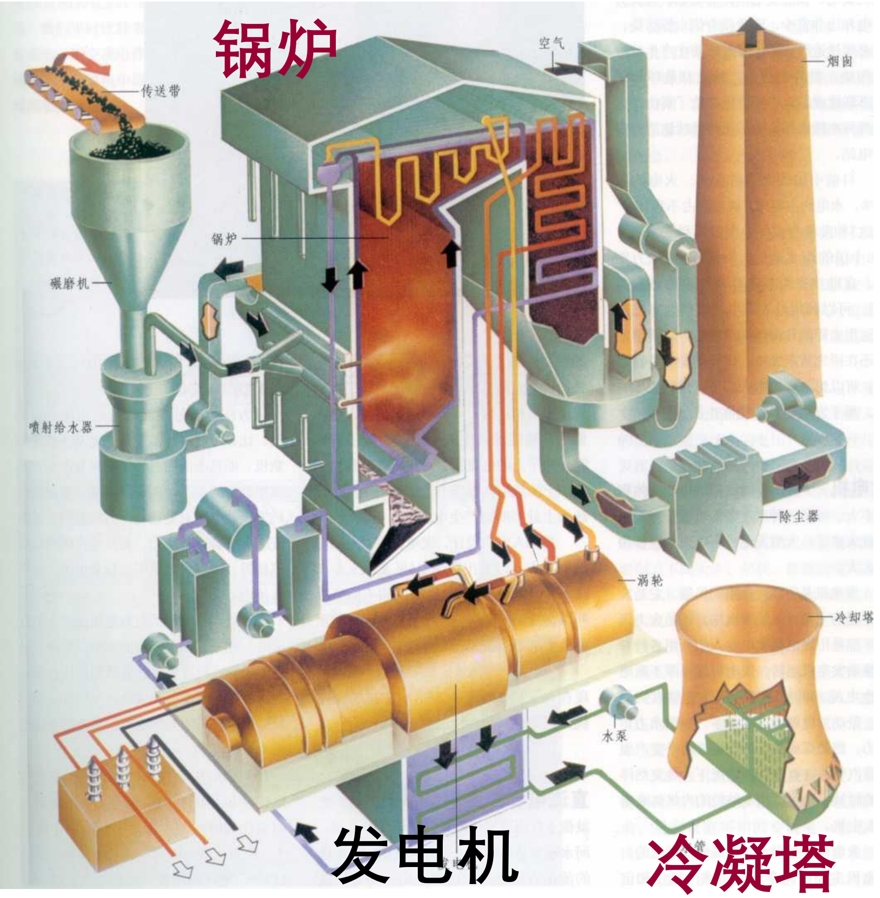
$$T_1 = 580^\circ\mathrm{C}, T_2 = 30^\circ\mathrm{C}$$

按卡诺循环计算可得

$$\eta_c = 1 - \frac{273 + 30}{273 + 580}$$

$$= 64.5\%$$

实际最高效率：36%



原因：非卡诺循环、耗散(摩擦等)。

用卡诺循环定义热力学温标

在卡诺循环中，从高温热库吸的热与放给低温热库的热之比，等于两热库温度θ_1和θ_2之比，且与工质无关：

$$\frac{Q_2}{Q_1}=\frac{T_2}{T_1}\Rightarrow\frac{Q_1}{Q_2}=\frac{\theta_1}{\theta_2}$$

取水三相点温度为计量温度的定点，并规定θ_0=273.16 K。

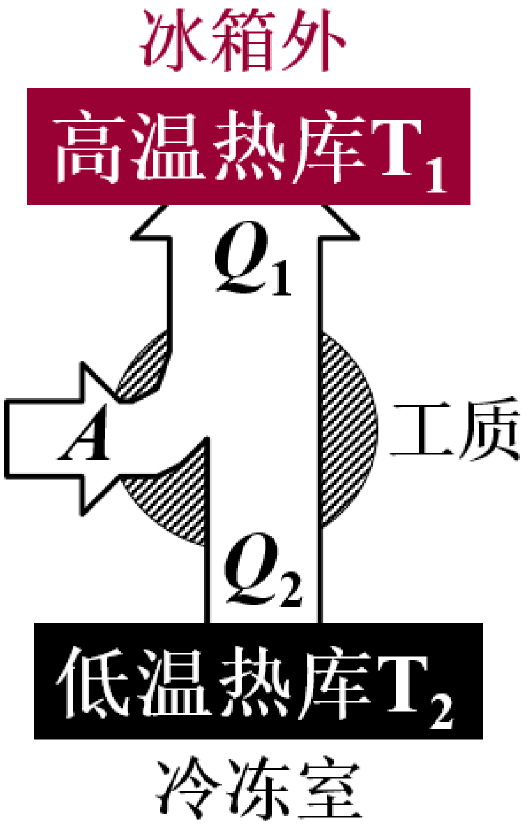
得到热力学温标(理论温标)

$$\theta=\frac{Q}{Q_0}\times 273.16\ \mathrm{K}$$

在理想气体概念有效的范围内，热力学温标和理想气体温标等价。

§ 10.7 致冷循环

将待冷却物体作为低温热源，反向进行热机循环，可实现致冷循环。



Q_2—追求的效果

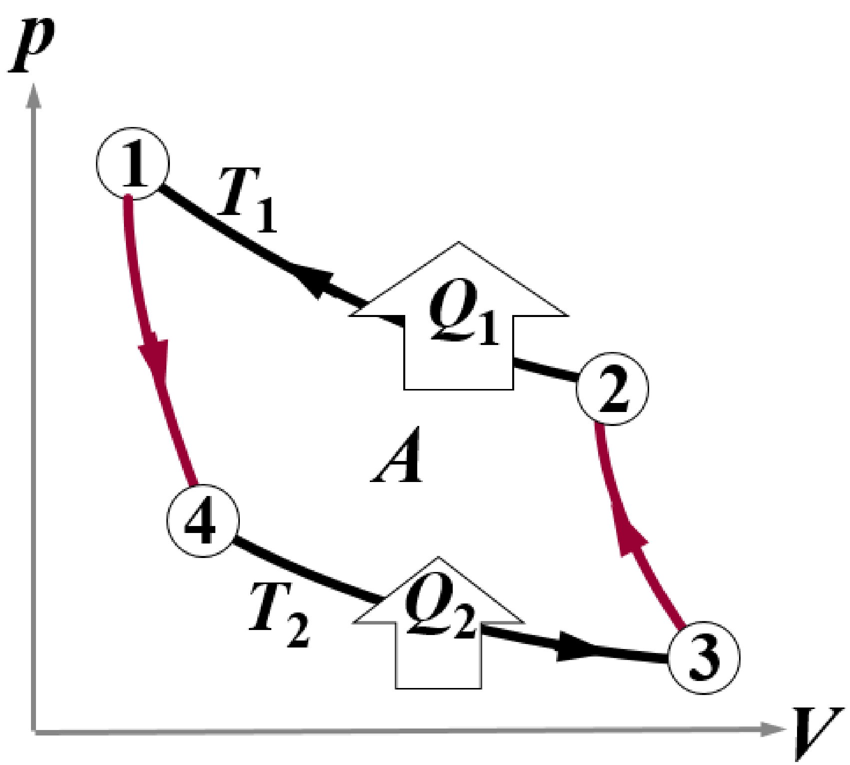
A—付出的“成本”

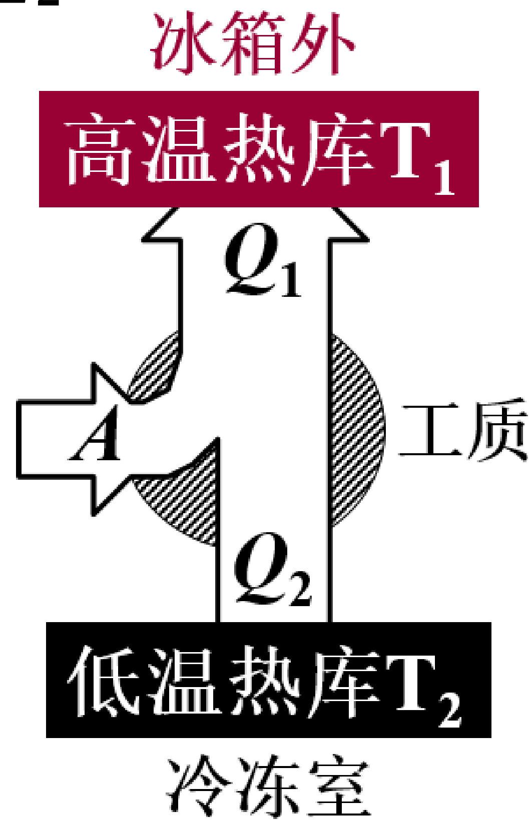
致冷系数：对工质做一份功可从低温热源提取多少热量。

$$w = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$

卡诺致冷机致冷系数

$$w_C = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$





过程	特征	过程方程	吸收热量Q	对外做功A	内能增量ΔE	摩尔热容C_m
等体	$V=$ 常量	$\frac{p}{T}=$ 常量	$\frac{m}{M}C_{V,m}\left(T_2-T_1\right)$	0	$\frac{m}{M}C_{V,m}\left(T_2-T_1\right)$	$C_{V,m}$
等压	$p=$ 常量	$\frac{V}{T}=$ 常量	$\frac{m}{M}C_{p,m}\left(T_2-T_1\right)$	$p\left(V_2-V_1\right)$ 或 $\frac{m}{M}R\left(T_2-T_1\right)$	$\frac{m}{M}C_{V,m}\left(T_2-T_1\right)$	$C_{p,m}=C_{V,m}+R$
等温	$T=$ 常量	$pV=$ 常量	$\frac{m}{M}R\ln\frac{V_2}{V_1}$ 或 $\frac{m}{M}R\ln\frac{p_1}{p_2}$	$\frac{m}{M}R\ln\frac{V_2}{V_1}$ 或 $\frac{m}{M}R\ln\frac{p_1}{p_2}$	0	∞
绝热	$\text{đ}Q=0$	$pV^{\gamma}=$ 常量 $V^{\gamma-1}T=$ 常量 $p^{\gamma-1}T^{-\gamma}=$ 常量	0	$-\frac{m}{M}C_{V,m}\left(T_2-T_1\right)$ 或 $\frac{p_1V_1-p_2V_2}{\gamma-1}$	$\frac{m}{M}C_{V,m}\left(T_2-T_1\right)$	0
多方		$pV^{n}=$ 常量 $V^{n-1}T=$ 常量 $p^{n-1}T^{-n}=$ 常量	$A+\Delta E$	$\frac{p_1V_1-p_2V_2}{n-1}$	$\frac{m}{M}C_{V,m}\left(T_2-T_1\right)$	$C_{n,m}=C_{V,m}+\frac{R}{n-1}$

第16周作业

习题作业：

10.8、10.9、10.17、10.22、10.25

（6月17日or24日交？）