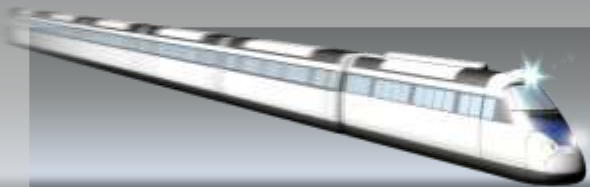




第五章热力学基础

热力学第一定律





5.5 循环过程 卡诺循环

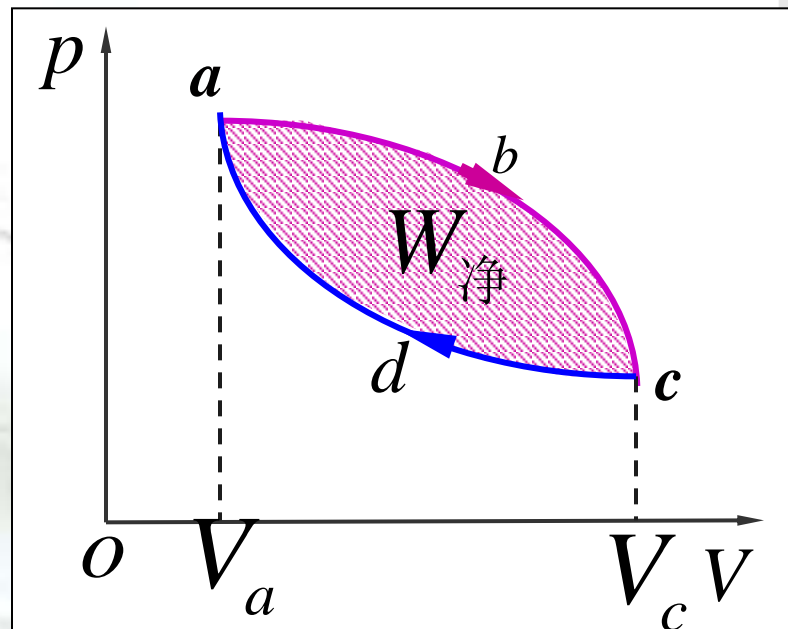
系统从某一状态出发，经过一系列状态变化过程以后，又回到原来出发时的状态，这样的过程叫做**循环过程**，简称**循环**。

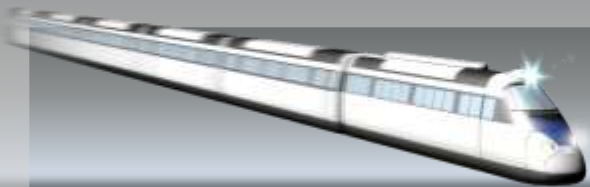
特征 $\Delta E = 0$

在 $p-V$ 图上，如果循环是沿顺时针方向进行的，则称为正循环（或热机循环）。如果循环是沿逆时针方向进行的，则称为逆循环（或致冷循环）。

热力学第一定律 $Q_{\text{净}} = W_{\text{净}}$

净功 $W_{\text{净}} = Q_1 - Q_2 = Q_{\text{净}}$





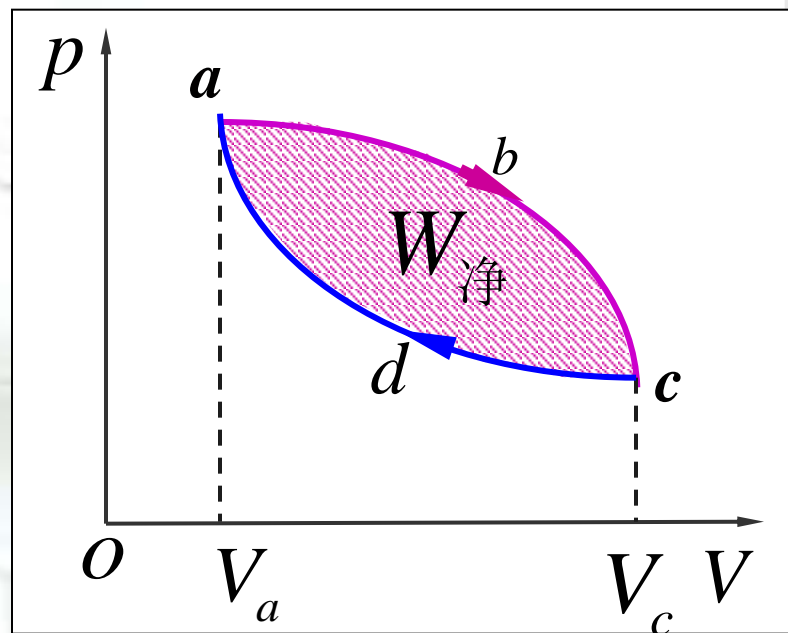
5.5 循环过程 卡诺循环

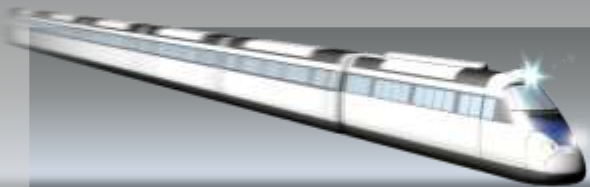
是指高温处吸热 Q_1 ，并膨胀对外做功 W_1 ；在低温处外界对系统做功 W_2 ，并压缩系统使之复原，系统对外放出多余的热量 Q_2 。

系统循环一次所做净功（有用功） $W_{\text{净}} = W_1 - W_2$

即封闭曲线所围的面积。

$W_{\text{净}} > 0$ ，这表示，正循环过程中的能量转换关系是系统将吸收的热量 Q_1 中的一部分转化为有用功 $W_{\text{净}}$ ，另一部分 Q_2 放回给外界。可见，正循环是一种通过工质使热量不断转换为功的循环。





5.5.1 热机 热机效率

能完成正循环的装置均叫热机，或把通过工质使热量不断转换为功的机器叫热机。

热机发展简介：1698年萨维利和1705年纽可门先后发明了蒸汽机，当时蒸汽机的效率极低，1765年瓦特进行了重大改进，大大提高了效率。人们一直在为提高热机的效率而努力，从理论上研究热机效率问题，一方面指明了提高效率的方向，另一方面也推动了热学理论的发展。

各种热机的效率

液体燃料火箭

$$\eta = 48\%$$

柴油机

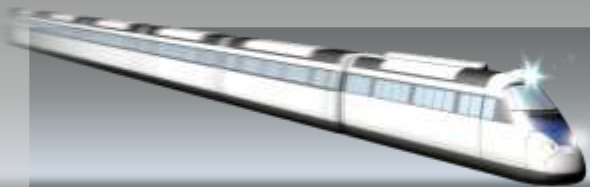
$$\eta = 37\%$$

汽油机

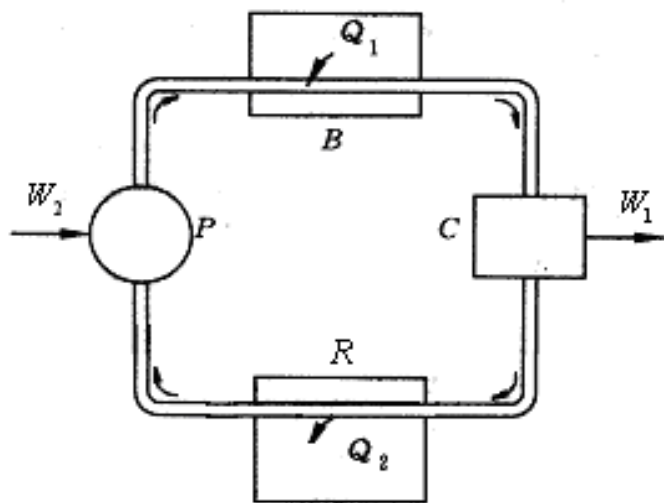
$$\eta = 25\%$$

蒸汽机

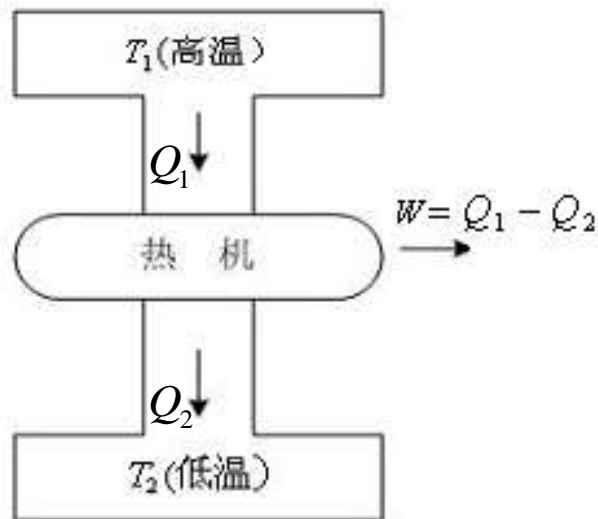
$$\eta = 8\%$$



5.5.1 热机 热机效率

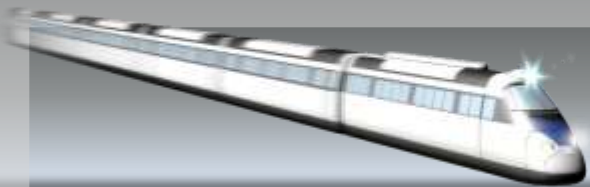


(a)

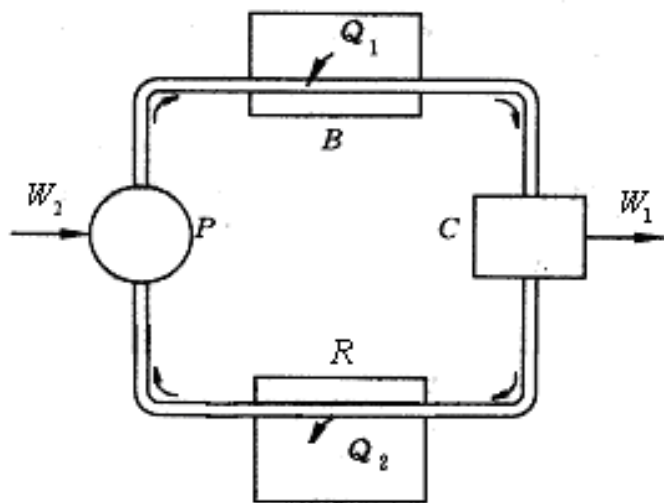


(b)

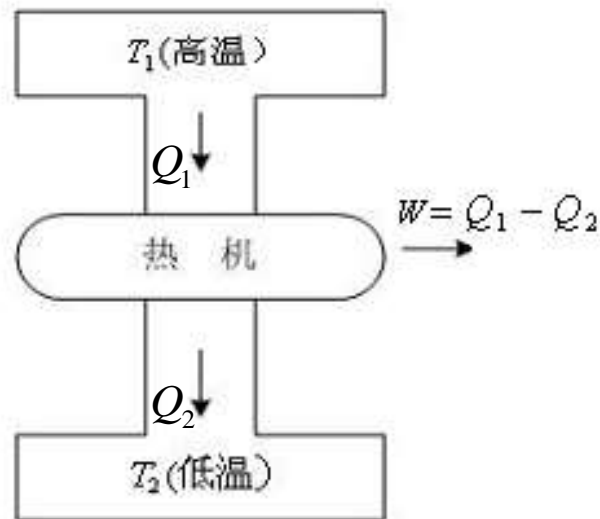
循环由四个过程组成：(1) 一定量的水从锅炉（高温热源 T_1 ）吸收热量 Q_1 ，形成高温高压蒸汽；(2) 蒸汽进入汽缸 C ，推动活塞对外界做功 W_1 ；(3) 做功后的蒸汽是温度和压强



5.5.1 热机 热机效率

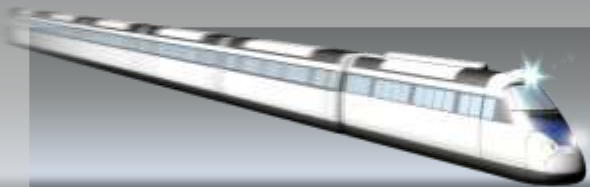


(a)

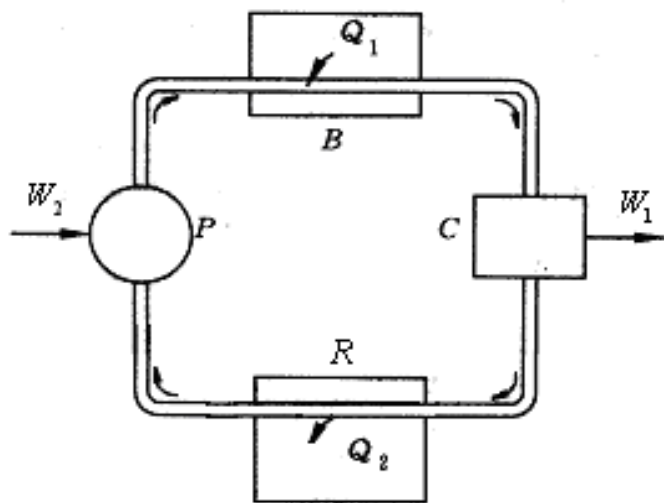


(b)

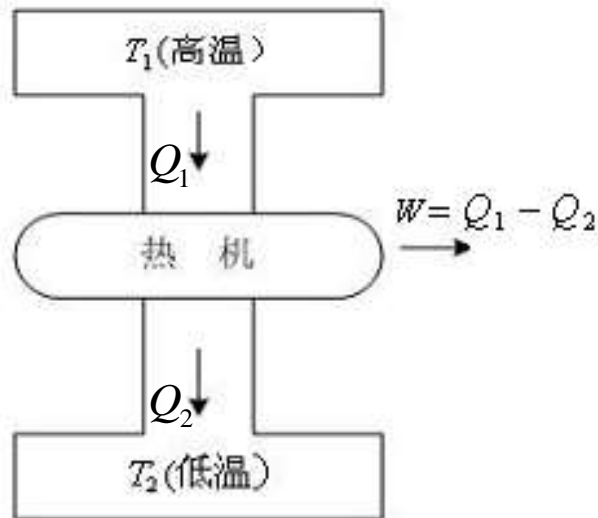
大为降低的“废气”，进入冷凝器 R （低温热源 T_2 ），放出热量 Q_2 而凝结成水；（4）然后由泵 P 将冷凝水压回到锅炉，外界做功为 W_2 。



5.5.1 热机 热机效率

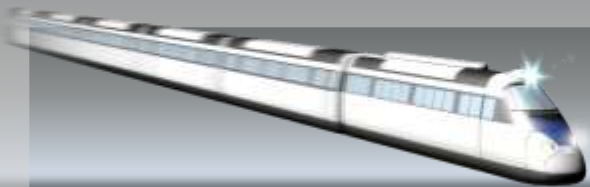


(a)



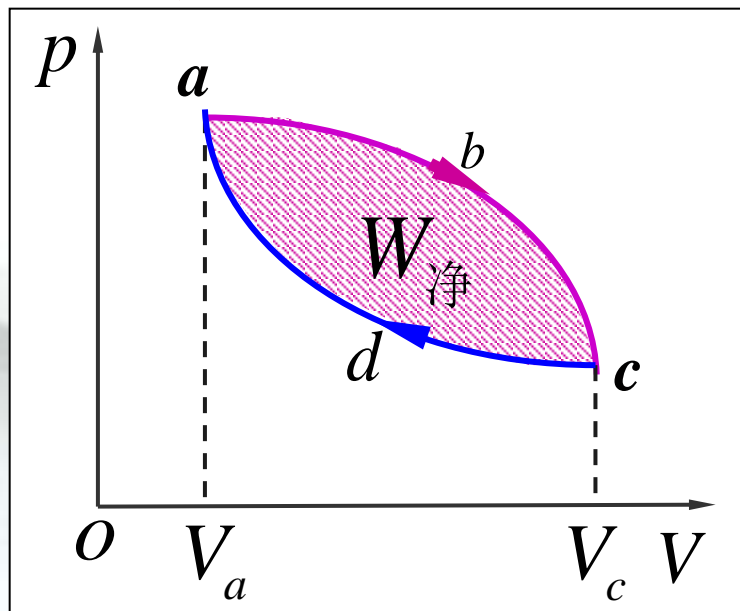
(b)

图(b)给出了过程的能流示意图。一定量的工质在一次循环中要从高温热源（如锅炉）吸热 Q_1 ，对外做净功 W ，又向低温热源（如冷凝器）放出热量 Q_2 。

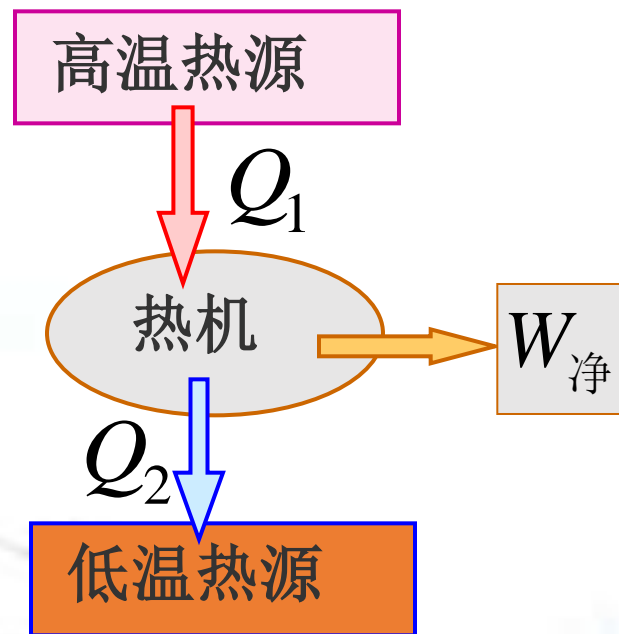


5.5.1 热机 热机效率

热机的效率

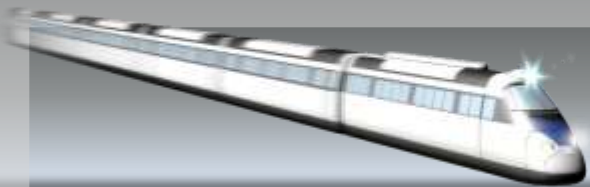


热机（正循环） $W_{\text{净}} > 0$



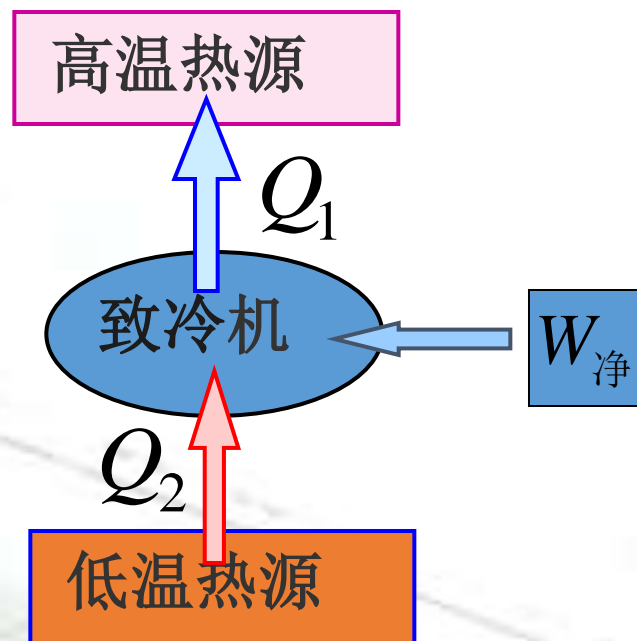
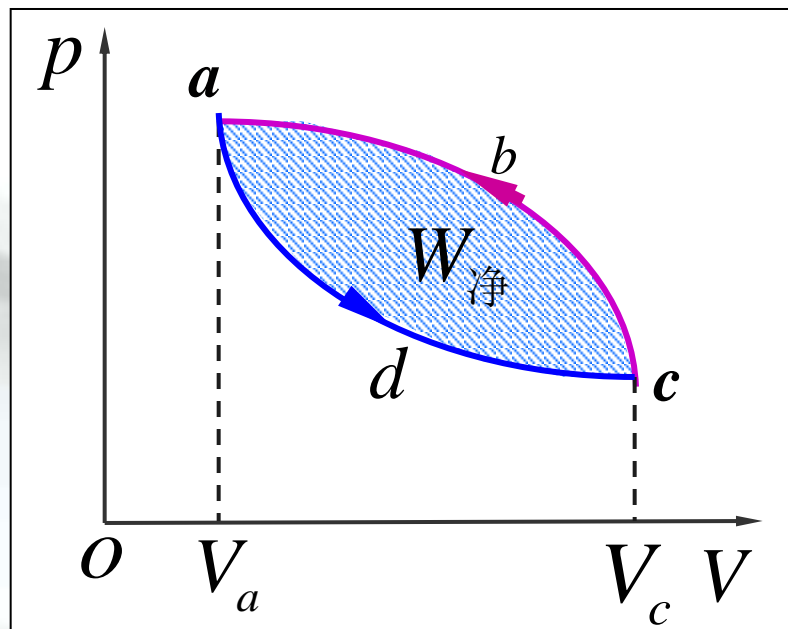
热机效率

$$\eta = \frac{\text{输出功}}{\text{吸收的热量}} = \frac{W_{\text{净}}}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$



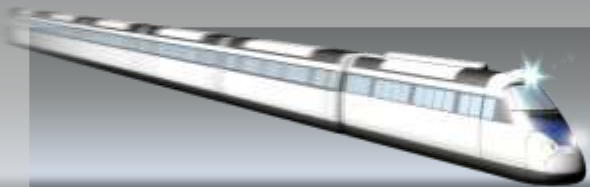
5.5.2 致冷系数

工作物质作逆循环的机器，称为致冷机。



致冷机（逆循环） $W_{\text{净}} < 0$

致冷系数 $\omega = \frac{\text{从低温处吸收的热量}}{\text{外界对工质做净功大小}} = \frac{Q_2}{|W_{\text{净}}|} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$

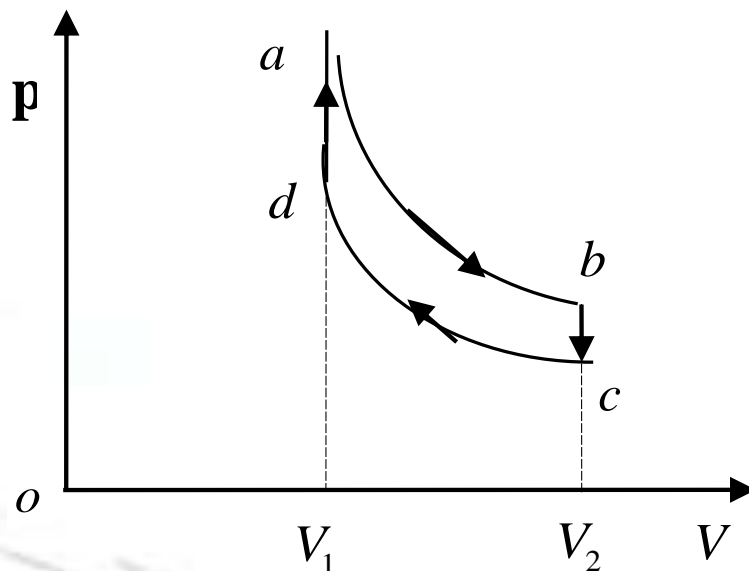


5.5.2 致冷系数

例 5-5 0.32kg 的理想气体氧气作如图所示的 $abcda$ 循环, ab 和 cd 为等温过程, bc 和 da 为等体过程。

设 $V_2 = 2V_1$, $T_1 = 300K$, $T_2 = 200K$,

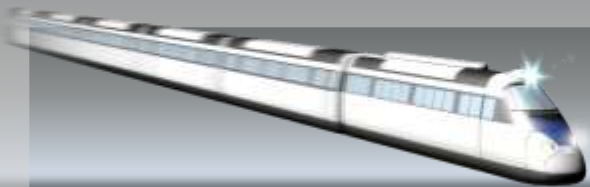
$C_{v,m} = 20.8J/mol/K$ 求循环效率。



解 系统的摩尔数为

$$\nu = \frac{M}{M_{\text{mol}}} = \frac{0.32}{32 \times 10^{-3}} = 10 \text{ mol}$$

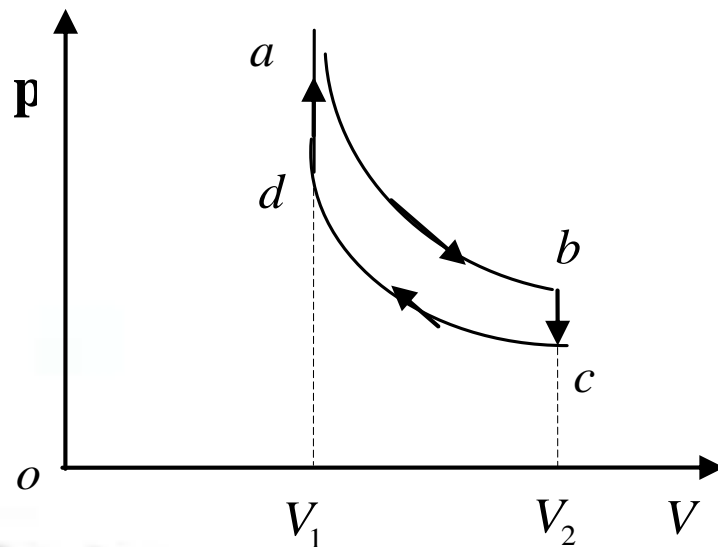
因为 $W_{bc} = 0$, $W_{da} = 0$, 循环过程中仅有 ab 、 cd 两个过程气体做功, 所



5.5.2 致冷系数

以，循环过程中气体所做的净功为

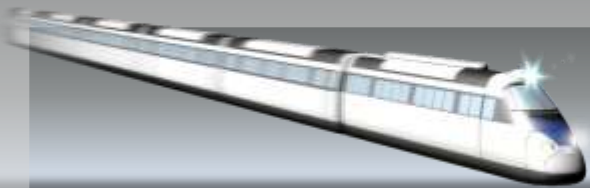
$$\begin{aligned} W &= W_{ab} + W_{cd} \\ &= \nu RT_1 \ln(V_2 / V_1) + \nu RT_2 \ln(V_1 / V_2) \\ &= \nu R(T_1 - T_2) \ln(V_2 / V_1) \\ &= 10 \times 8.31 \times (300 - 200) \ln 2 \\ &= 5.76 \times 10^3 \text{ J} \end{aligned}$$



气体仅在 ab 和 da 两分过程吸收热量。因 ab 为等温过程

$\Delta E_{ab} = 0$ ，所以该过程吸收热量为 $Q_{ab} = W_{ab}$ ；因 da 为等体过程

$W_{da} = 0$ ，所以该过程吸收热量为 $Q_{da} = \Delta E_{da}$ 。两分过程，吸收的



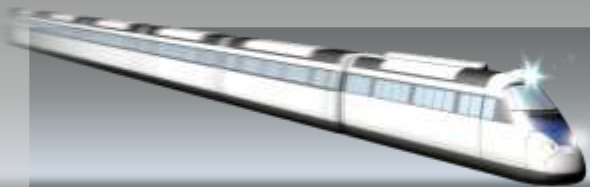
5.5.2 致冷系数

总热量为：

$$\begin{aligned} Q_1 &= Q_{ab} + Q_{da} = W_{ab} + \Delta E_{da} \\ &= \nu RT_1 \ln(V_2 / V_1) + \nu C_{V,m} (T_1 - T_2) \\ &= 10 \times 8.31 \times 300 \times \ln 2 + 10 \times 20.8 \times (300 - 200) = 3.80 \times 10^4 \text{ (J)} \end{aligned}$$

该循环效率为

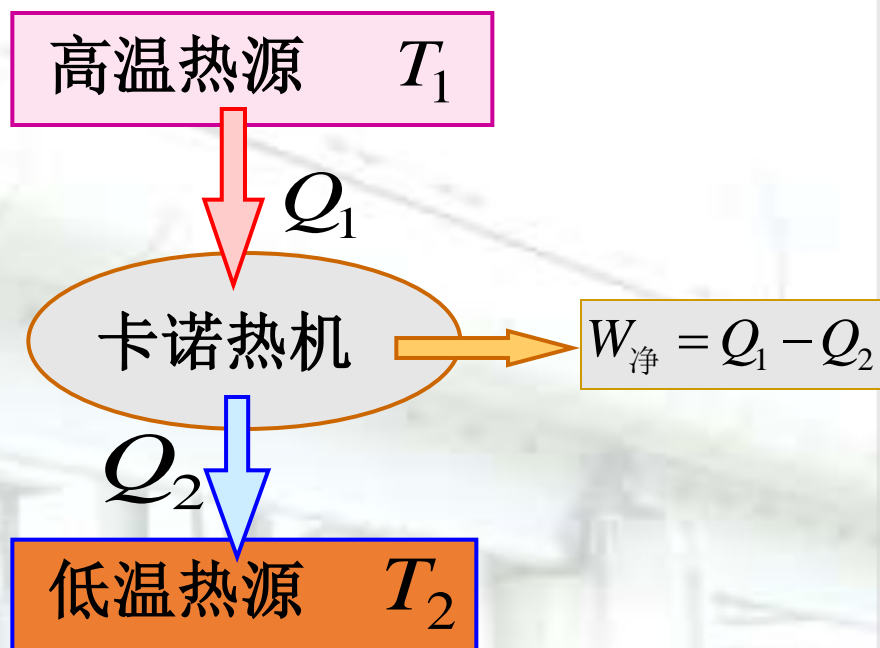
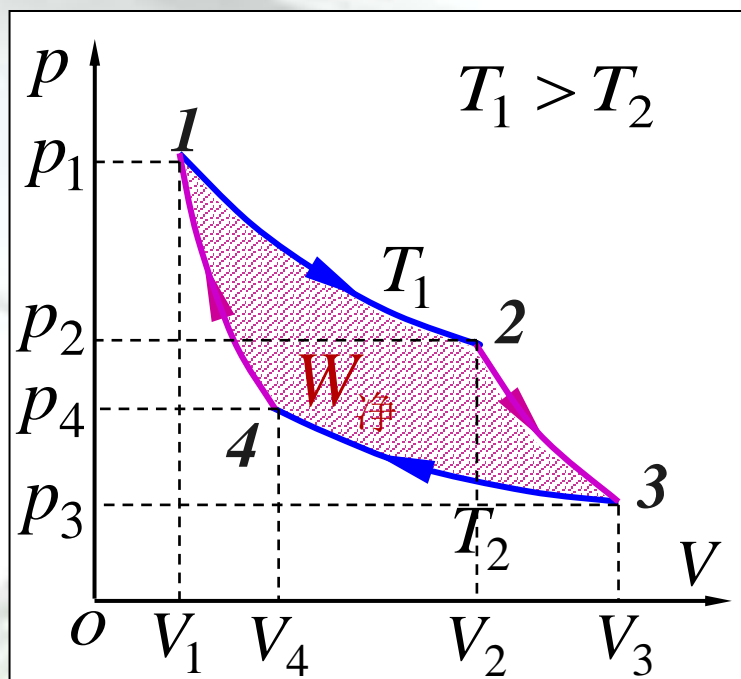
$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{5.76 \times 10^3}{3.80 \times 10^4} = 15.1\%$$

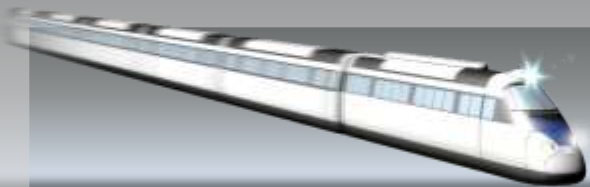


5.5.3 卡诺循环

1824 年法国的青年工程师卡诺提出一个工作在两热源之间的理想循环——卡诺循环。给出了热机效率的理论极限值。

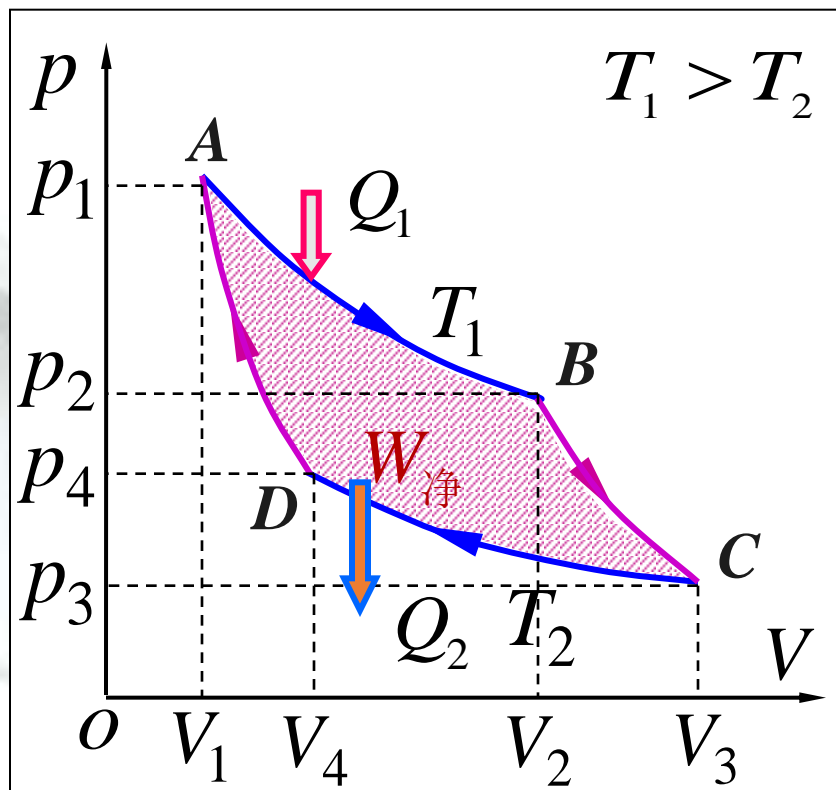
卡诺循环 { 两个准静态等温过程
两个准静态绝热过程 } 组成





5.5.3 卡诺循环

✓ 理想气体卡诺循环热机效率的计算



卡诺循环

$A \rightarrow B$ 等温膨胀

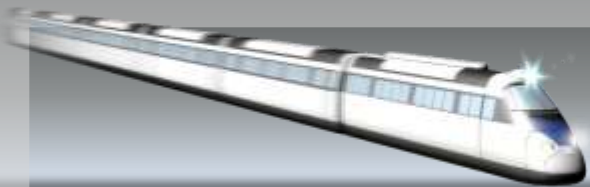
$B \rightarrow C$ 绝热膨胀

$C \rightarrow D$ 等温压缩

$D \rightarrow A$ 绝热压缩

$A \rightarrow B$ 等温膨胀吸热

$$Q_1 = \frac{M}{M_{mol}} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$



5.5.3 卡诺循环

两条绝热线

B—C 绝热膨胀

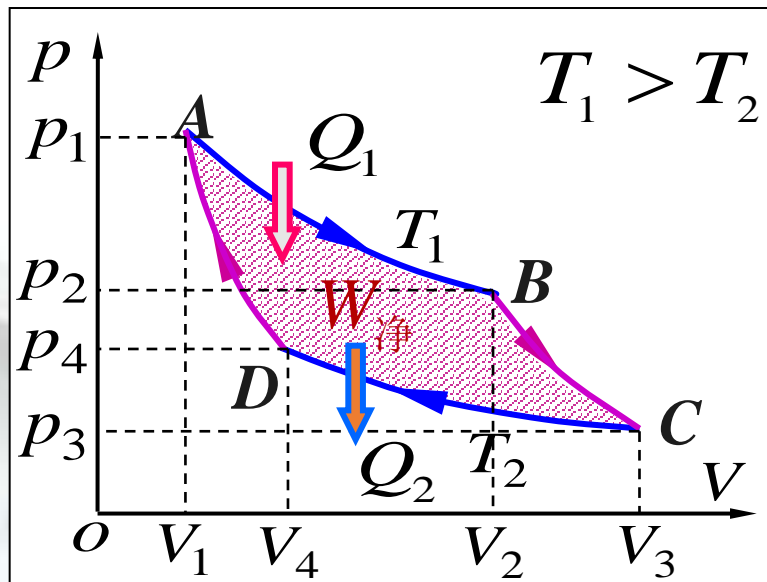
$$T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1}$$

C—D 等温压缩放热

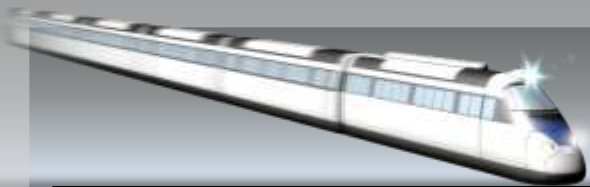
$$Q_2 = \frac{M}{M_{mol}} RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}$$

D—A 绝热压缩

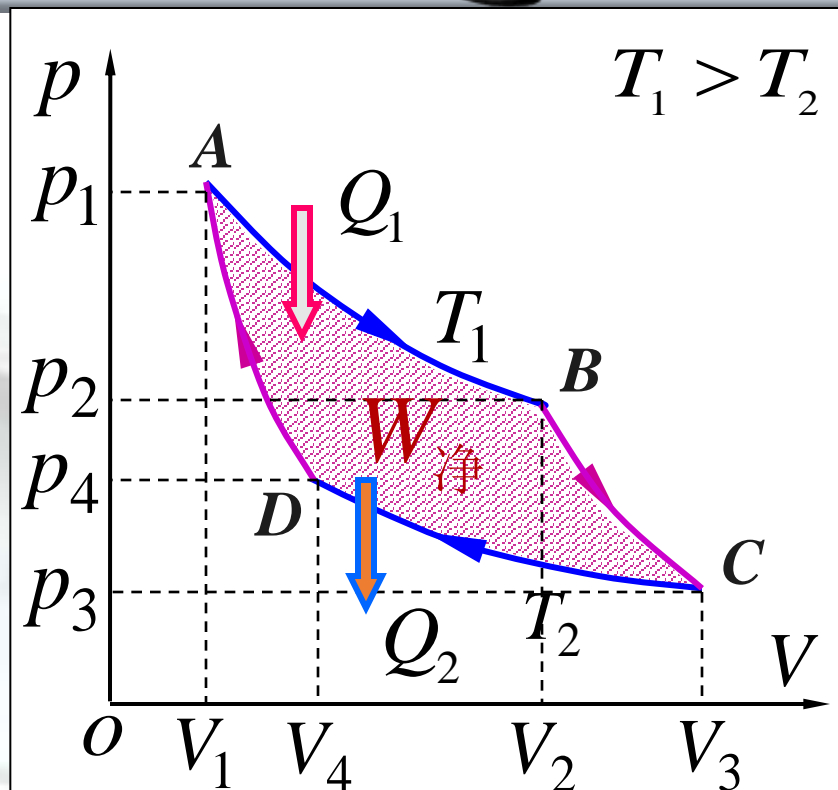
$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_4^{\gamma-1}$$
$$\Rightarrow \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{\gamma-1}$$



$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}{T_1 \ln \frac{V_2}{V_1}}$$



5.5.3 卡诺循环

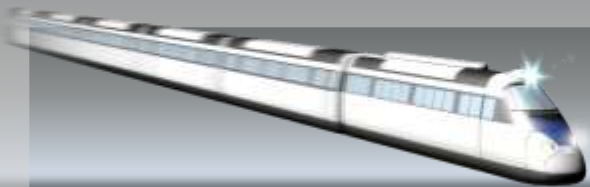


$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$$

✓ 卡诺热机效率

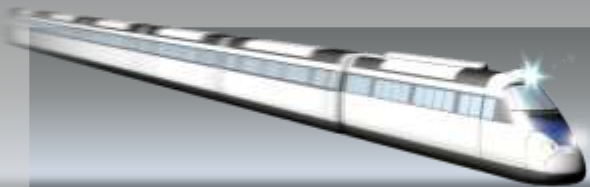
$$\eta_{\text{卡}} = 1 - \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}{T_1 \ln \frac{V_2}{V_1}}$$



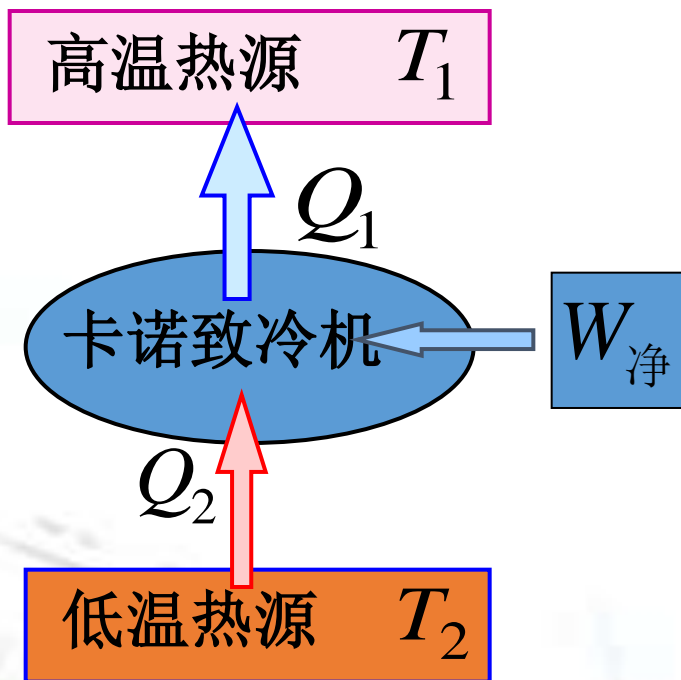
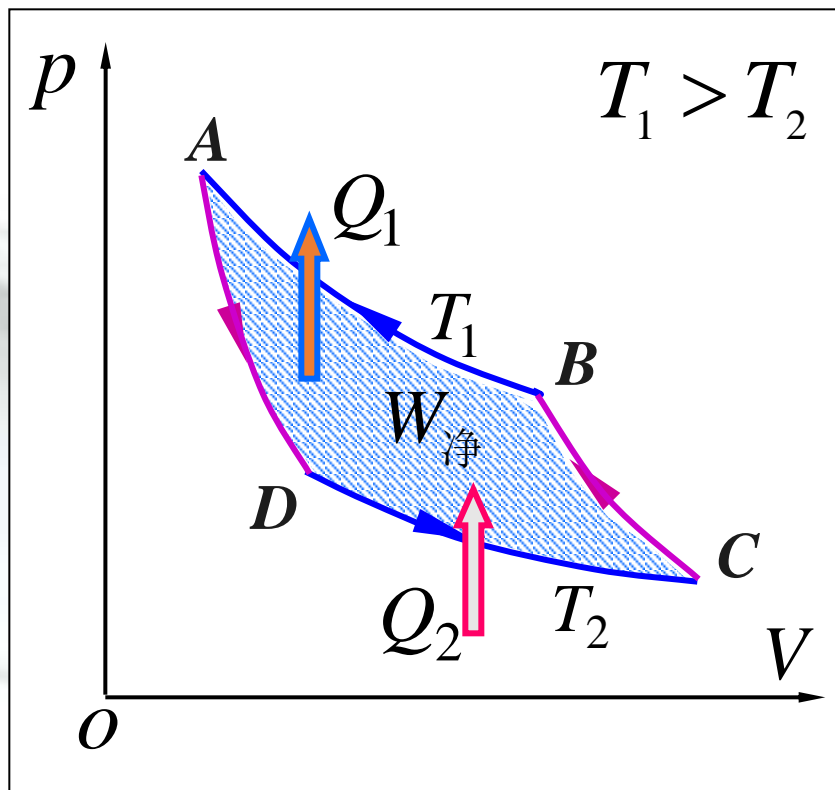
5.5.3 卡诺循环

- 1 由于 $T_1 = \infty$ 和 $T_2 = 0$ 都不可能达到，因而卡诺热机的效率总是小于 1 的。
- 2 卡诺热机的效率只与高、低温热源的温度有关，而与工质性质无关。提高效率的途径是提高高温热源的温度或降低低温热源的温度。而通常后一种办法是不经济的。
- 3 $\eta = \frac{W_{\text{净}}}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$ 适用于一切热机，而 $\eta_c = 1 - \frac{T_2}{T_1}$ 仅适用于卡诺热机。
- 4 要完成一次卡诺循环必须有温度一定的高温 and 低温两个热源。
- 5 可以证明：在相同高温热源和低温热源之间工作的一切热机中，卡诺热机的效率最高。



5.5.3 卡诺循环

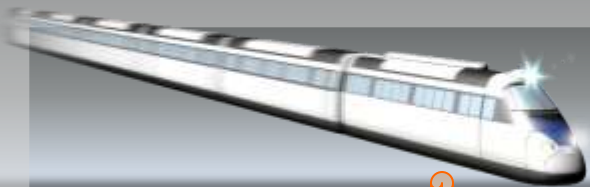
✓ 卡诺致冷机（卡诺逆循环）



$$W_{\text{净}} = Q_1 - Q_2$$

卡诺致冷机致冷系数

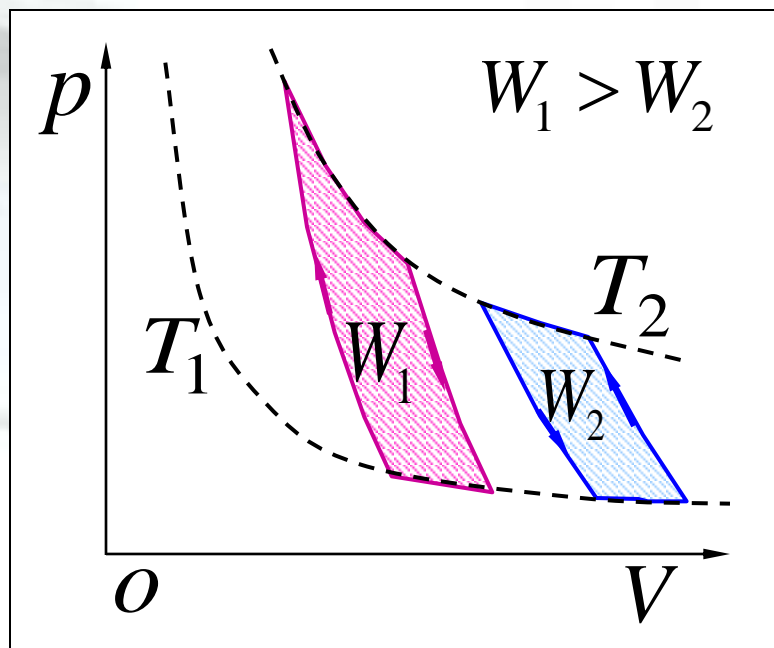
$$\omega_c = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$



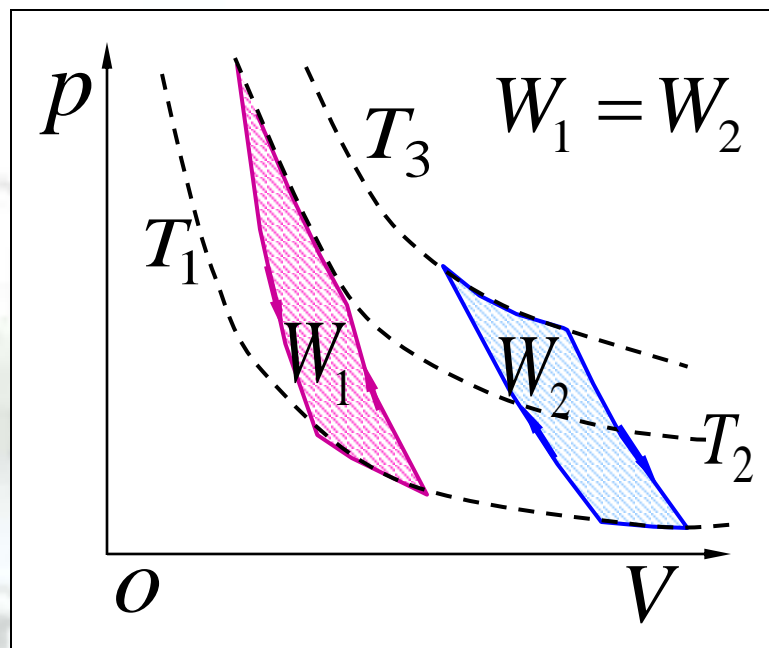
5.5.3 卡诺循环

讨论

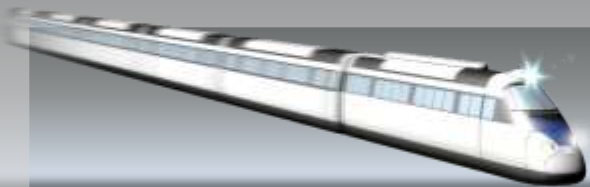
图中两卡诺循环 $\eta_1 = \eta_2$ 吗？



$$\eta_1 = \eta_2$$



$$\eta_1 < \eta_2$$

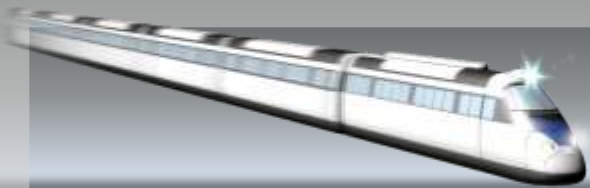


5.5.3 卡诺循环

例 5-6 理想气体卡诺热机，当热源温度为 100°C ，冷却器温度为 0°C 时，作净功为 8000J ，今若维持冷却器温度不变，提高热源的溫度，使净功增为 $1.60 \times 10^4\text{J}$ ，并设这两个卡诺循环工作于相同的两条绝热线之间，求（1）热源的溫度变为多少？（2）效率增大到多少？

解 （1）卡诺热机的效率

$$\eta_c = \frac{W}{Q_1} = \frac{W}{W + Q_2} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$



5.5.3 卡诺循环

解得

$$Q_2 = \frac{WT_2}{T_1 - T_2}$$

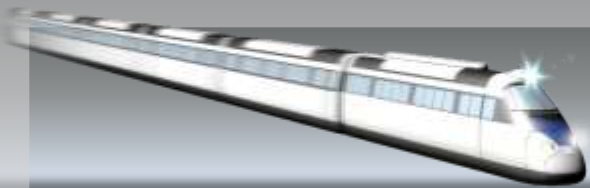
设高温热源温度由 T_1 增加到 T_1' ，净功增加为 W' 时，同样应有

$$Q_2' = \frac{W'T_2}{T_1' - T_2}$$

由于这两个循环工作在同样的两条绝热线之间且 T_2 不变，

$$Q_2 = Q_2'$$

$$\frac{WT_2}{T_1 - T_2} = \frac{W'T_2}{T_1' - T_2}$$

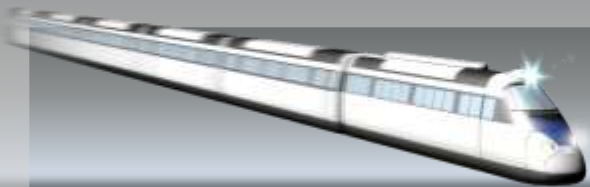


5.5.3 卡诺循环

$$T_1' = \frac{W'}{W}(T_1 - T_2) + T_2 = 2 \times (373 - 273) + 273 = 473\text{K}$$

$$(2) \quad \eta_c' = 1 - \frac{T_2}{T_1'} = 1 - \frac{273}{473} = 42\%$$

例5-7 一卡诺致冷机从温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冷库中吸取热量，释放到温度 $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的室外空气中，若致冷机耗费的功率是 1.5 kW ，求(1)每分钟从冷库中吸收的热量；(2)每分钟向室外空气中释放的热量。



5.5.3 卡诺循环

解 (1) $T_1 = 300K, T_2 = 263K$ 根据卡诺致冷系数有

$$\omega_C = \frac{T_2}{T_1 - T_2} = \frac{263}{37} = 7.1$$

每分钟做功为 $|W_{\text{净}}| = 1.5 \times 10^3 \times 60 J$

所以，从冷库中吸收的热量为

$$Q_2 = \omega_C |W_{\text{净}}| = 7.1 \times 9 \times 10^4 = 6.39 \times 10^5 (J)$$

(2) 每分钟向温度为 27°C 的物体放出的热量为

$$Q_1 = |W_{\text{净}}| + Q_2 = 1.5 \times 10^3 \times 60 + 6.39 \times 10^5 = 7.29 \times 10^5 (J)$$