

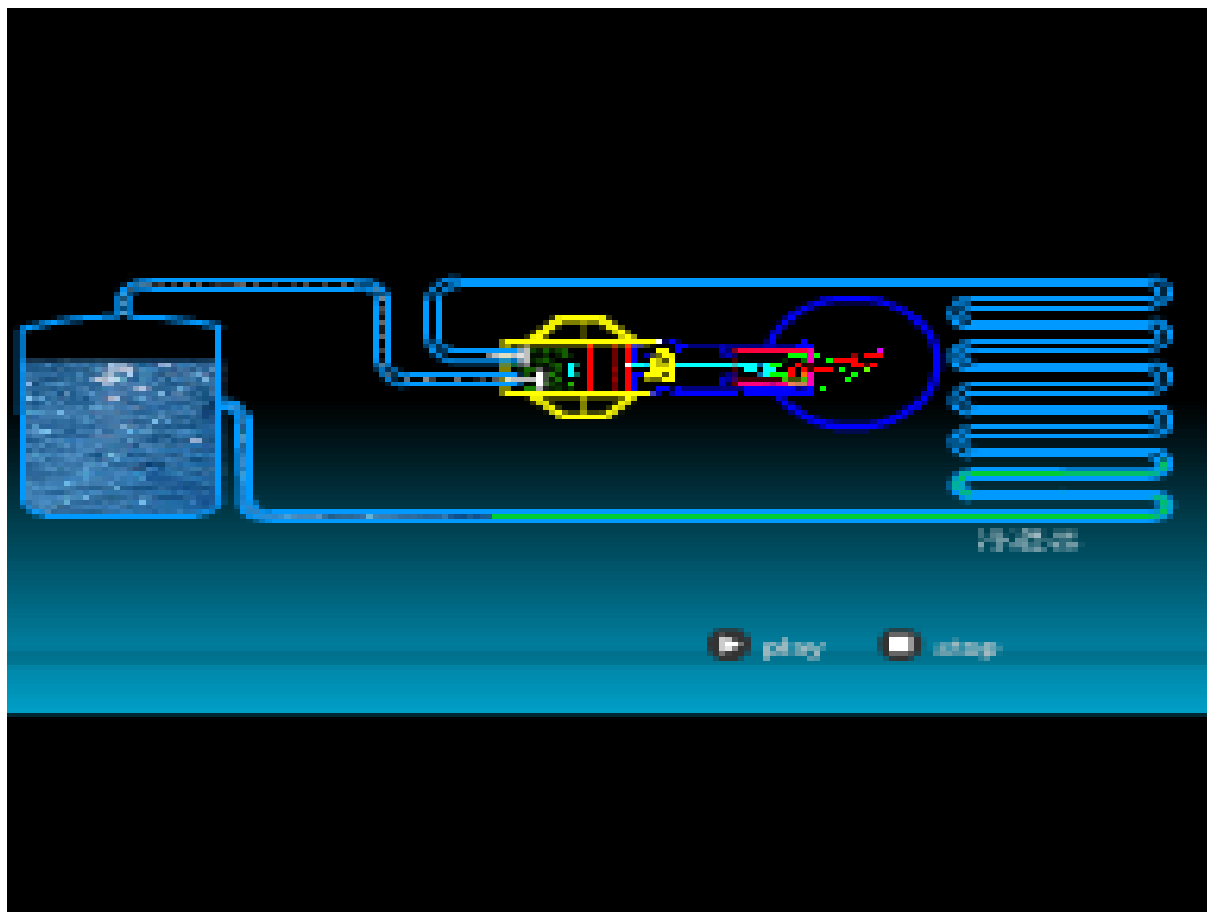
第十三章 热力学基础

第5节 《循环过程 卡诺循环》

理解循环的意义和循环过程中的能量转换关系，会计算卡诺循环和其它简单循环的效率。

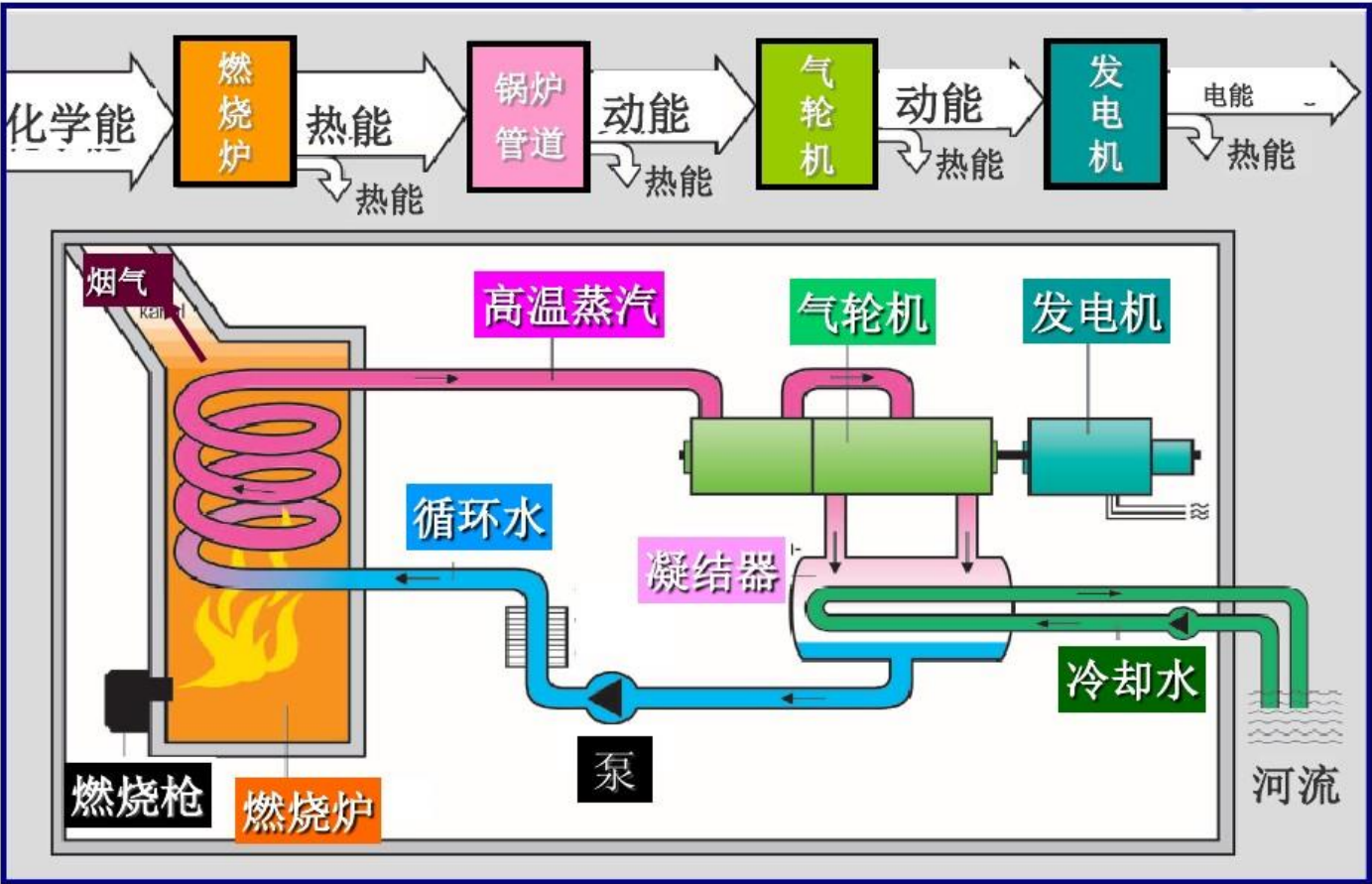


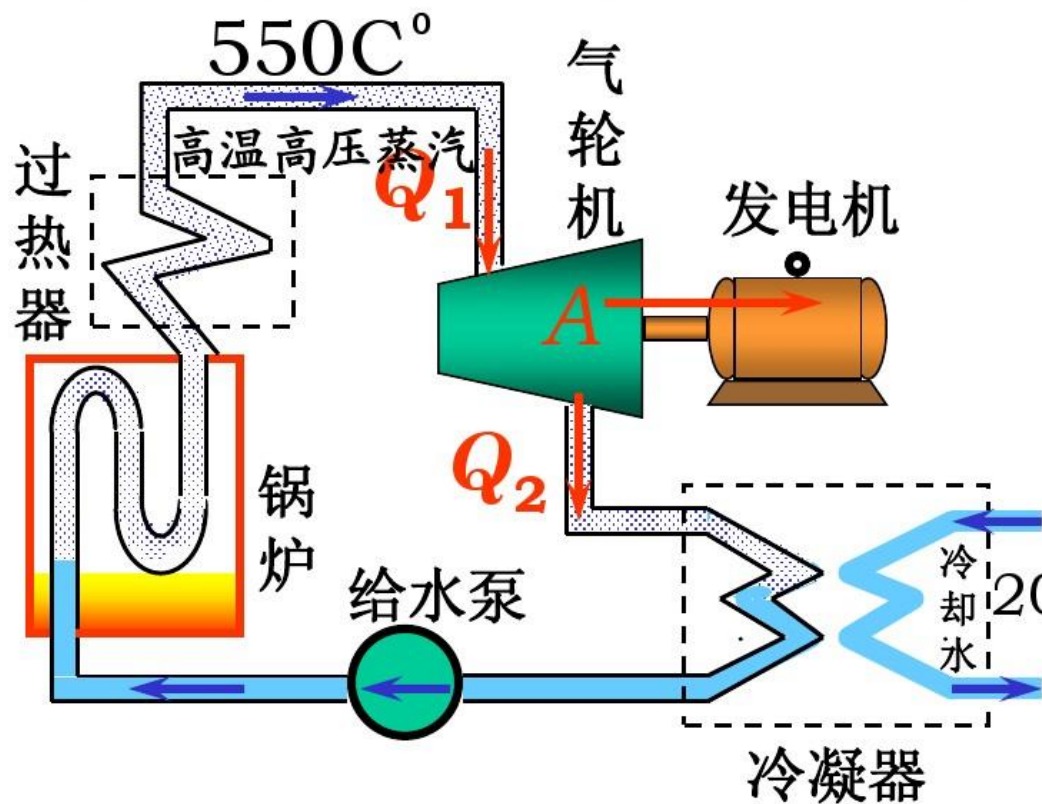
热机：持续地将热量转变为功的机器。





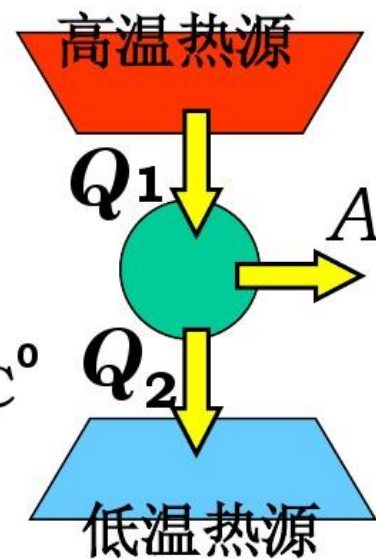
燃煤电厂中的蒸汽循环



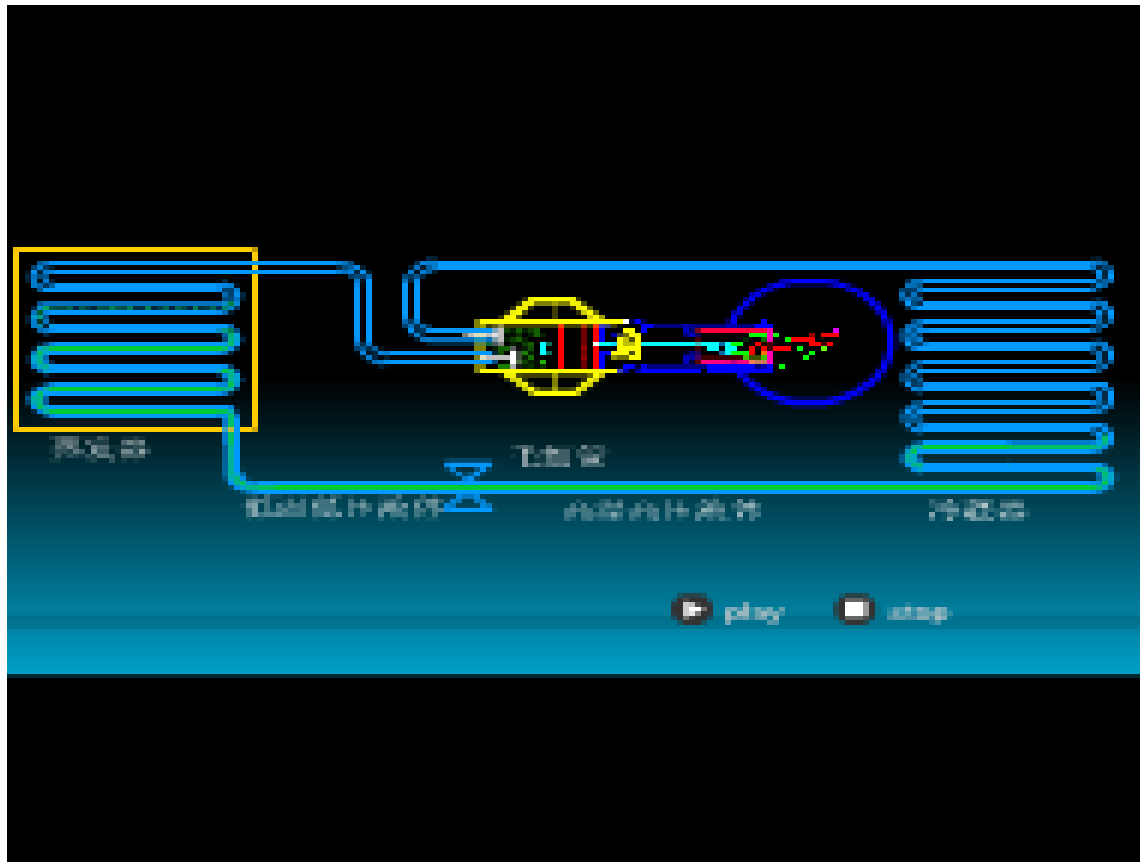


发电厂蒸汽动力循环示意图

热机工作示意图



冰箱循环示意图



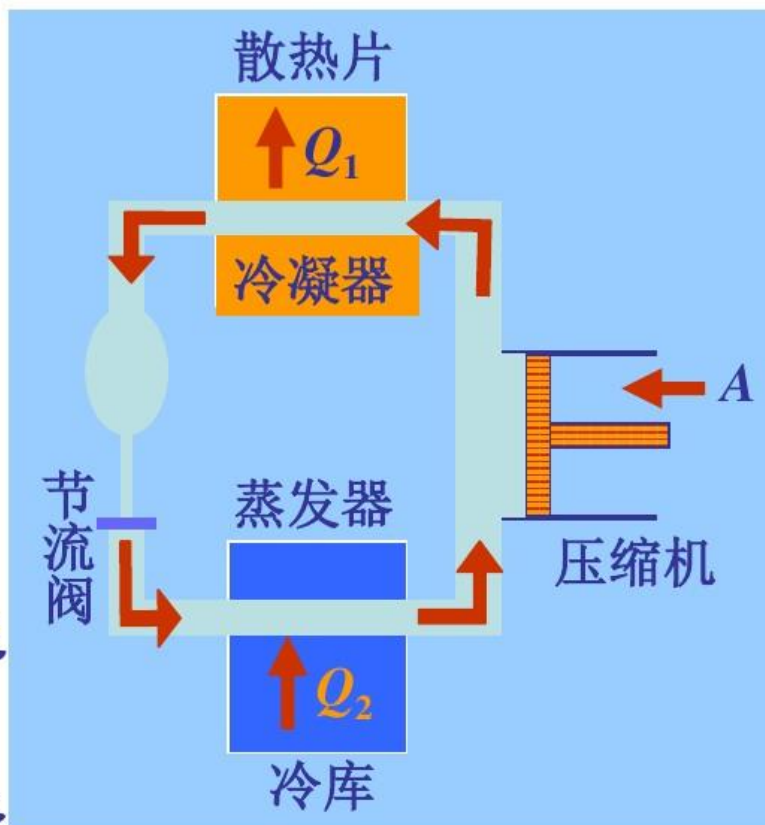
冰箱 (Refrigerator) 工作原理

工质：氨和氟里昂。

工作过程：

工质被压缩机压缩，
温度升高，进入冷凝器，
放热而凝结为液态氨。

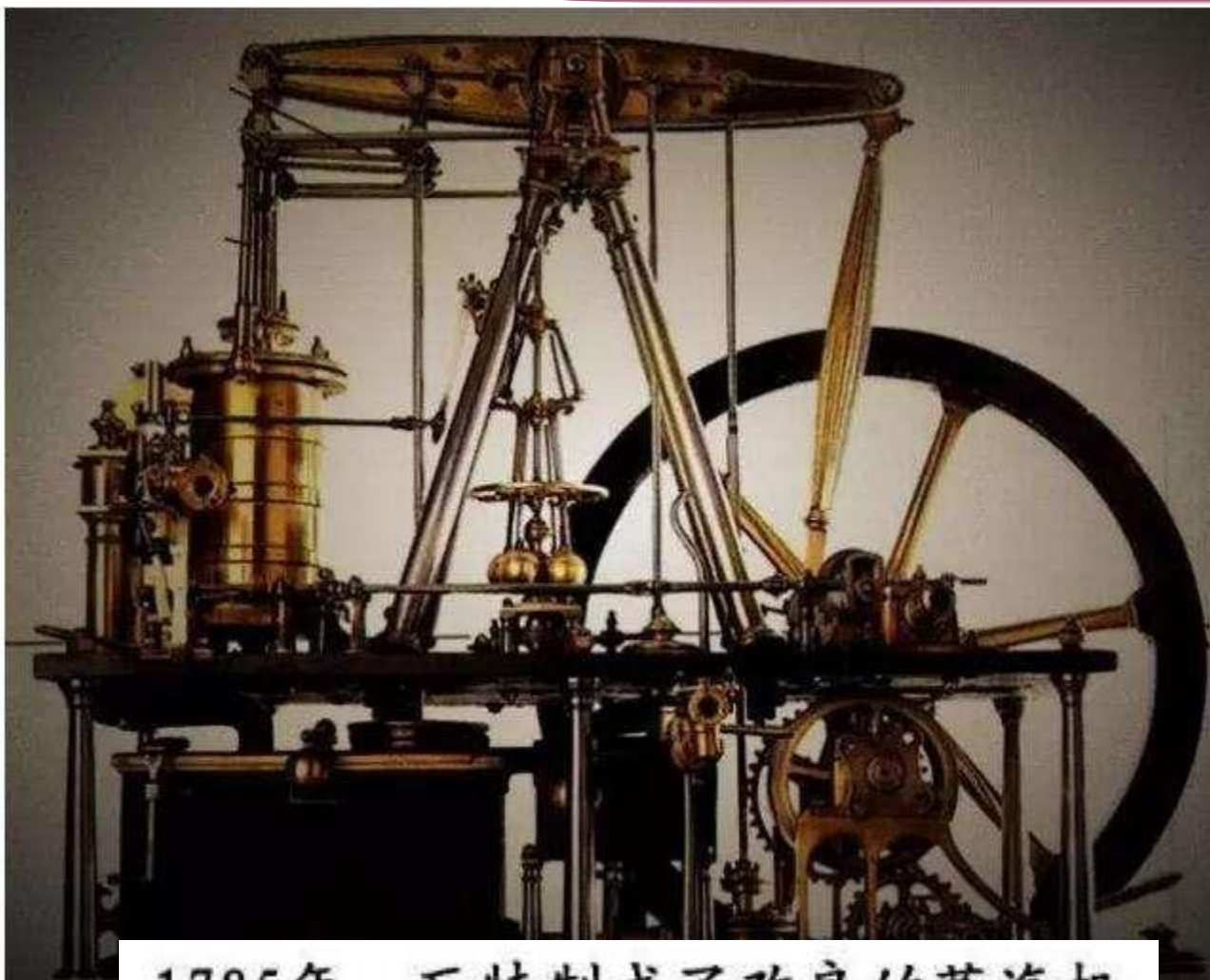
经节流阀小口后，降压
降温，再进入蒸发器，
从冷库中吸热。工质蒸发
为蒸气，被吸入压气机中。



热机发展简介

1698年萨维利和1705年纽可门先后发明了蒸气机，当时蒸气机的效率极低。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。





1785年，瓦特制成了改良的蒸汽机，
人类社会由此进入“蒸汽时代”



热机的分类:

蒸汽机、汽油机、柴油机、燃气机轮、
喷气发动机、火箭发动机

各种热机的效率

液体燃料火箭 $\eta = 48\%$

柴油机 $\eta = 37\%$

汽油机 $\eta = 25\%$

蒸气机 $\eta = 8\%$



一 循环过程

系统经过一系列变化状态过程后，又回到原来的状态的过程叫热力学循环过程。

特征 $\Delta E = 0$

由热力学第一定律

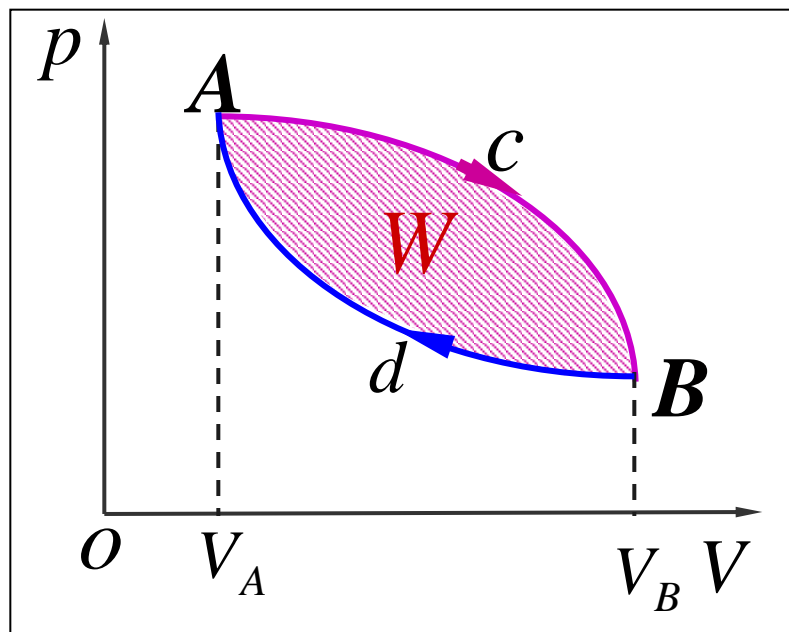
$$Q = W$$

净功 $W = Q_1 - Q_2 = Q$

总吸热 $\longrightarrow Q_1 (AcB)$

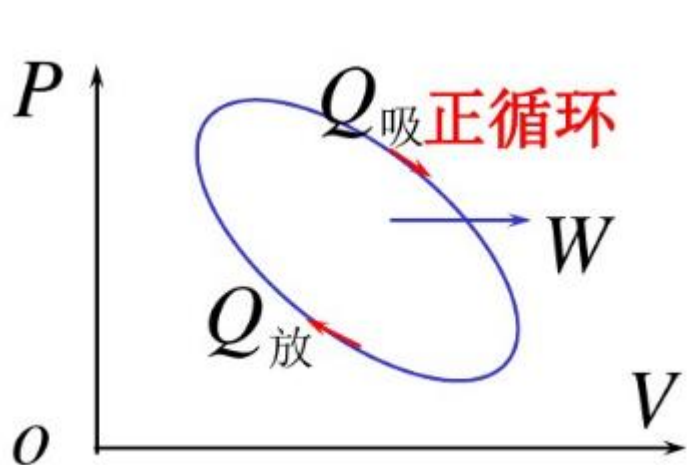
总放热 $\longrightarrow Q_2 (BdA)$ 取绝对值

净吸热 $\longrightarrow Q$

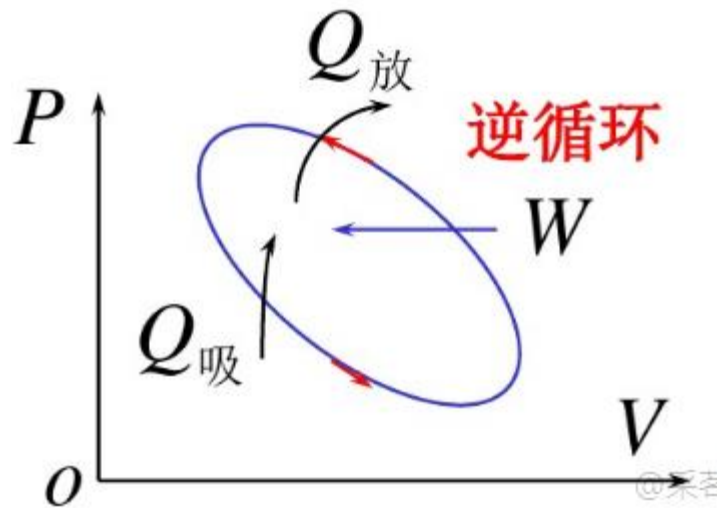


二 热机效率和致冷机的致冷系数

热机（**正**循环） $W > 0$ 致冷机（**逆**循环） $W < 0$



正循环 P-V图循环曲线顺时针



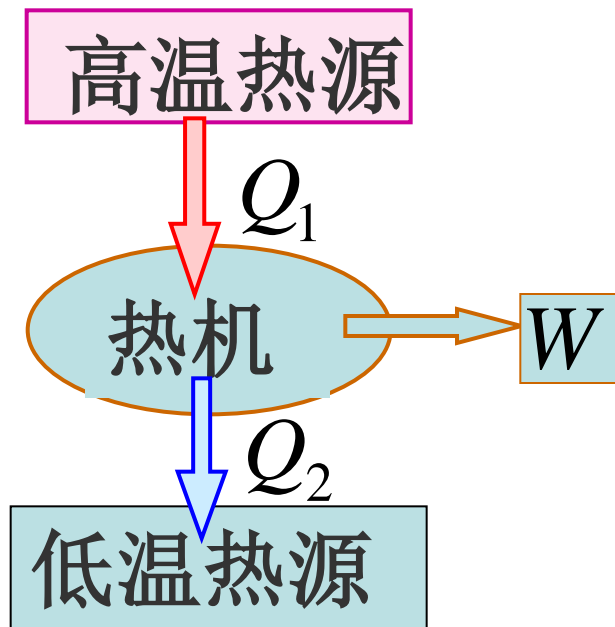
逆循环 P-V图循环曲线逆时针



$p \uparrow$ A

例如：汽车发动机气缸活塞，从喷嘴中喷出油雾，火花塞点火汽油燃烧，体积迅速膨胀，从燃烧的汽油中吸取热量，一部分对外做功，带动发动机转动，另一部分热量排放到大气（低温源）中。

工作物质从高温热源吸取热量，内能增加，通过对外做功使内能减小，再通过向低温热源放热，系统内能进一步减小而回到原来的状态。



在热机工作的一个循环过程中，吸收的热量转化为机械功的百分比称为该热机的效率。

热机效率 $\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$





能效比: 3.0



电冰箱和工作在制冷状态的空调机，是一种制冷机。

对于制冷机，我们通常用

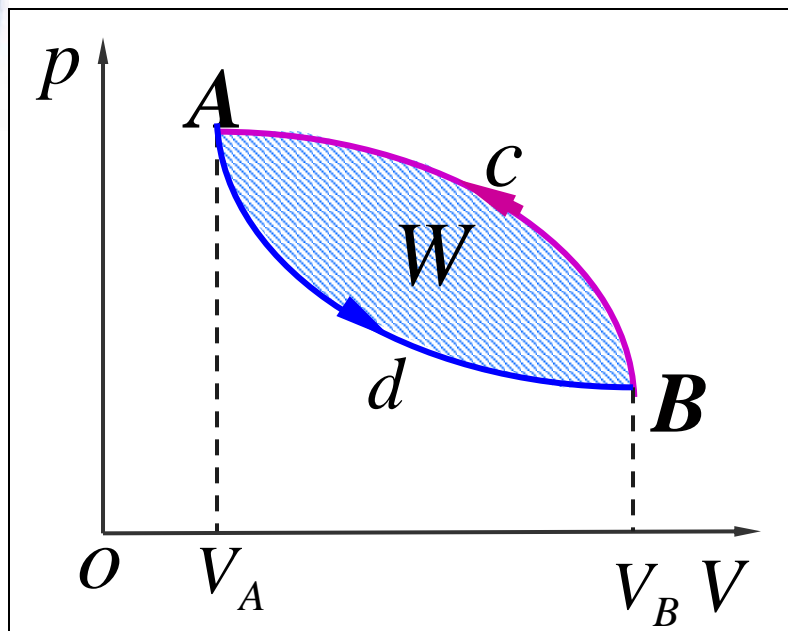
致冷系数 $W =$

$\frac{\text{从待降温的物体中吸收的热量 } Q_2}{\text{为了制冷所做的功 } A}$

来描述制冷的效益。

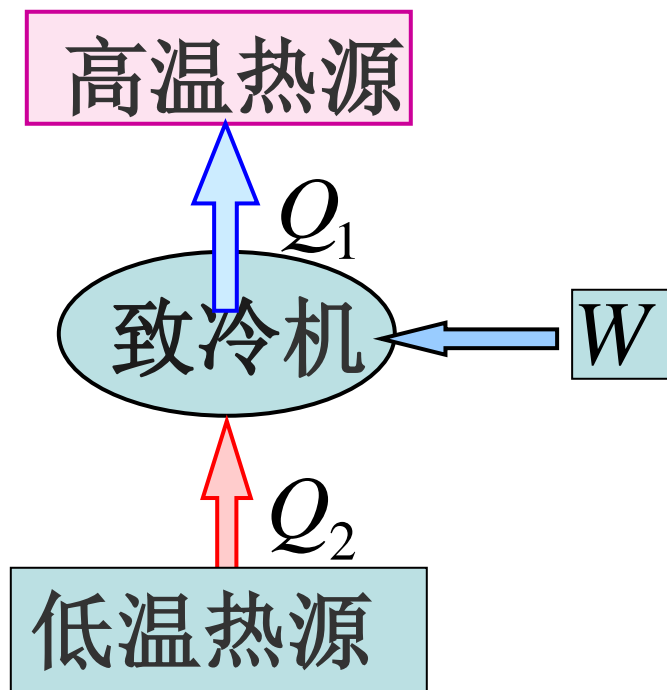
卡诺循环的逆循环过程，是一种理想的制冷循环过程。





致冷机是逆循环工作的，
是通过外界做功将低温源的热量
传递到高温源中。使低温源
温度降低。

例如电冰箱、空调都属于致冷机
致冷机致冷系数



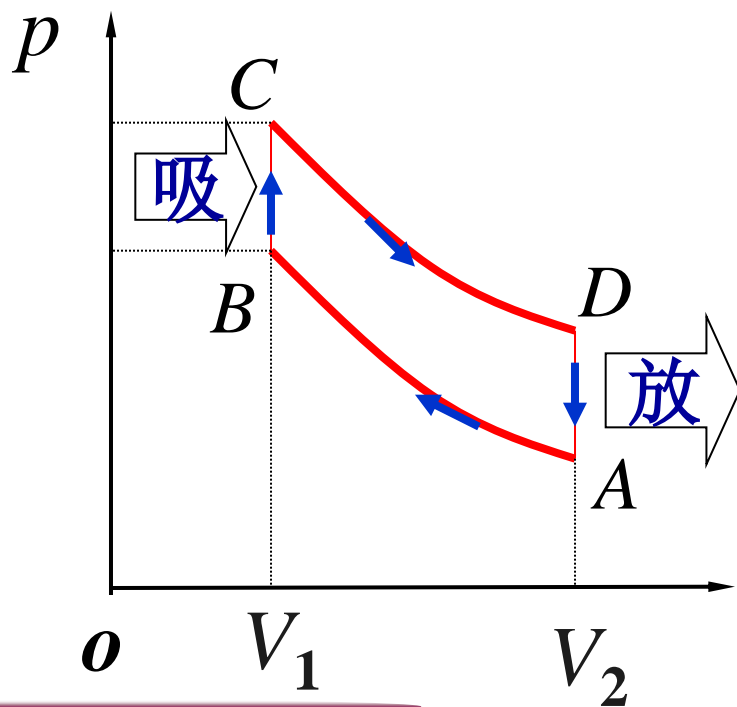
$$e = \frac{Q_2}{|W|} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$

例：奥托机是德国物理学家奥托发明的一种热机，以其原理制造的发动机现仍在使⽤。奥托机的循环曲线是由两条绝热线和两条等容线构成。

汽油机可近似看成如图循环过程(Otto循环)，其中AB和CD为绝热过程，求此循环效率。

解

$$\begin{aligned}\eta &= 1 - \frac{|Q_{DA}|}{Q_{BC}} \\ &= 1 - \frac{C_v(T_D - T_A)}{C_v(T_C - T_B)} \\ &= 1 - \frac{T_D - T_A}{T_C - T_B}\end{aligned}$$

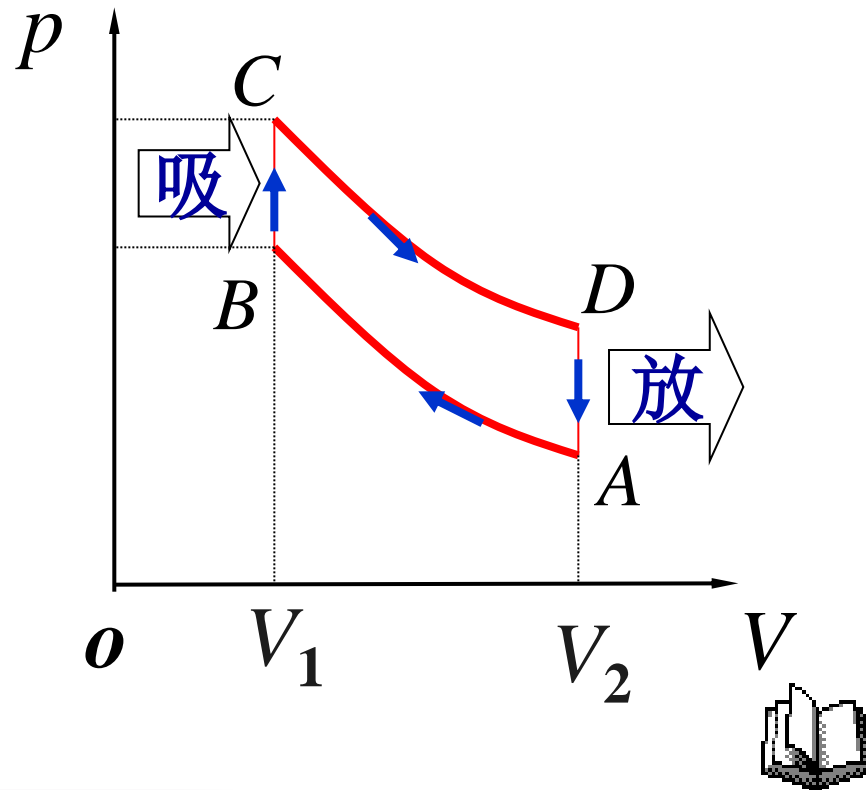


又BC和DA是绝热过程:

$$\frac{T_B}{T_A} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}, \quad \frac{T_C}{T_D} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}$$

所以 $\frac{T_B}{T_A} = \frac{T_C}{T_D}$

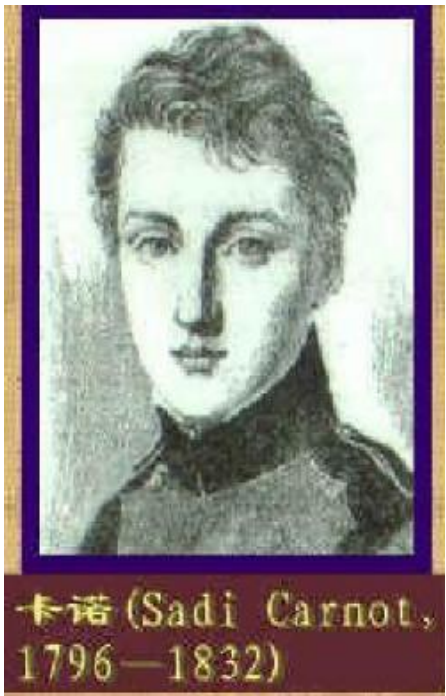
$$\begin{aligned} \eta &= 1 - \frac{T_D - T_A}{T_C - T_B} = 1 - \frac{T_A}{T_B} \\ &= 1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1} \end{aligned}$$





三 卡诺循环

在热能转化为机械能的应用方面，到18世纪末，瓦特完善了蒸汽机，使之成为真正的动力机械，但效率很低。



1824 年法国的年青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；他还提出了著名的卡诺定理.





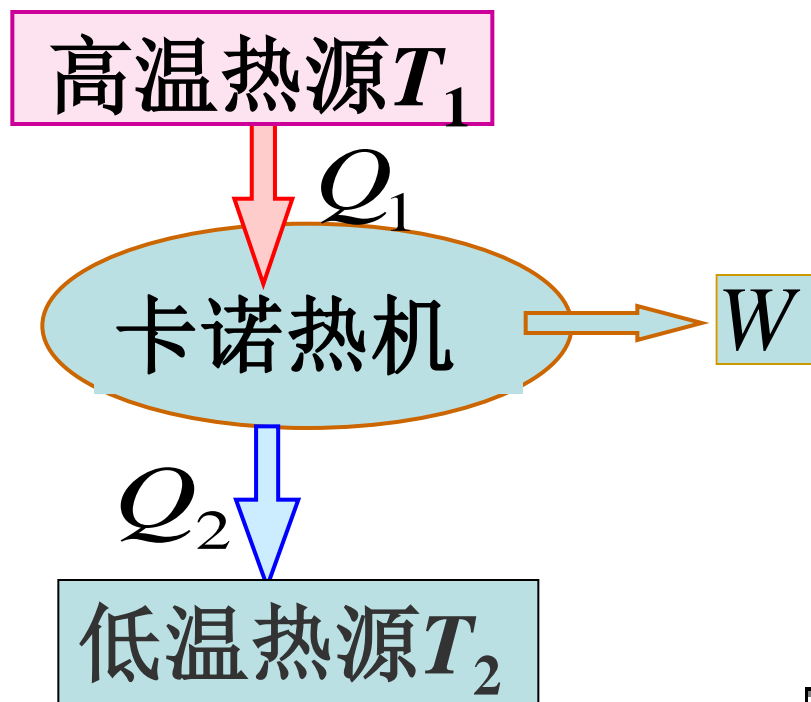
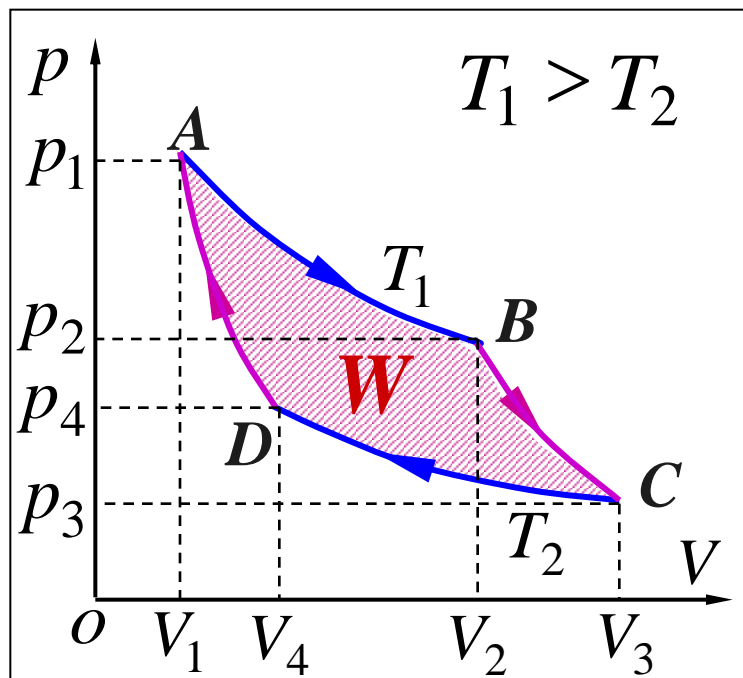
萨迪·卡诺是法国青年工程师、热力学的创始人之一，是第一个把热和动力联系起来的人。他出色地、创造性地用“理想实验”的思维方法，他对蒸汽机所作的简化、抽象十分彻底。提出了最简单，但有重要理论意义的热机循环——卡诺循环，并假定该循环在准静态条件下是可逆的，与工质无关，创造了一部理想的热机（卡诺热机）。卡诺循环是最简单、最基本的循环，为提高热机效率提供了指导。

卡诺的目标是揭示热产生动力的真正的、独立的过程和普遍的规律。1824年卡诺提出了对热机设计具有普遍指导意义的卡诺定理，指出了提高热机效率的有效途径，揭示了热力学的不可逆性，被后人认为是热力学第二定律的先驱。

@采茗珍白

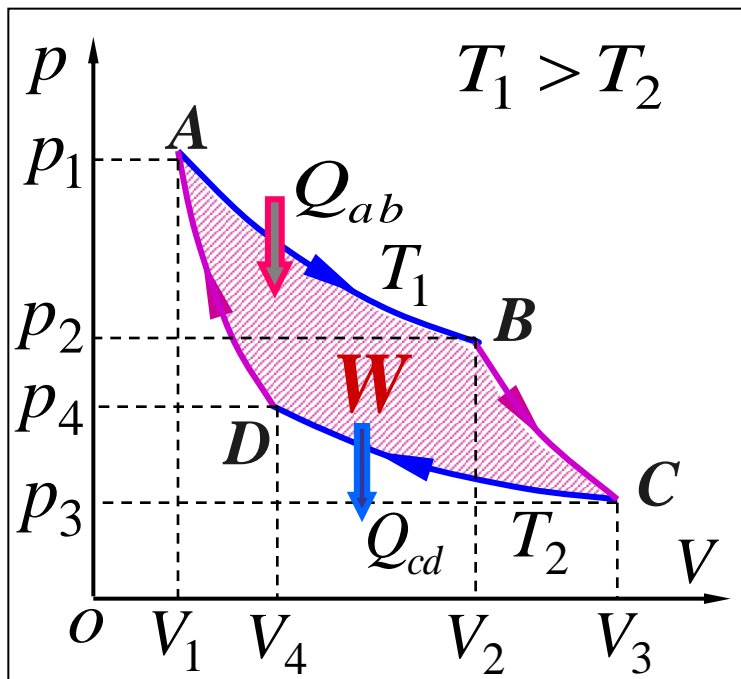


卡诺循环是由两个准静态等温过程和两个准静态绝热过程组成。



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

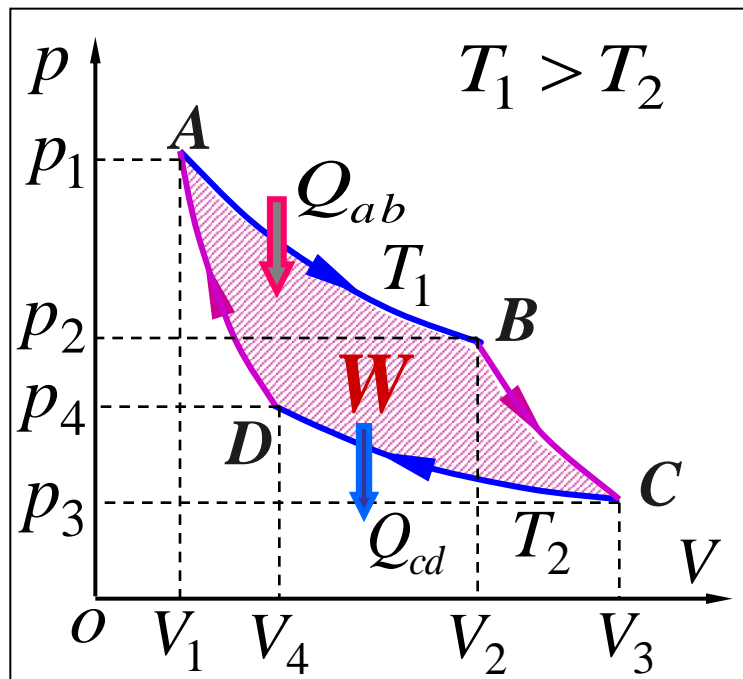


A — B 等温膨胀吸热

$$Q_1 = Q_{ab} = \nu RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

C — D 等温压缩放热

$$Q_2 = |Q_{cd}| = \nu RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}$$



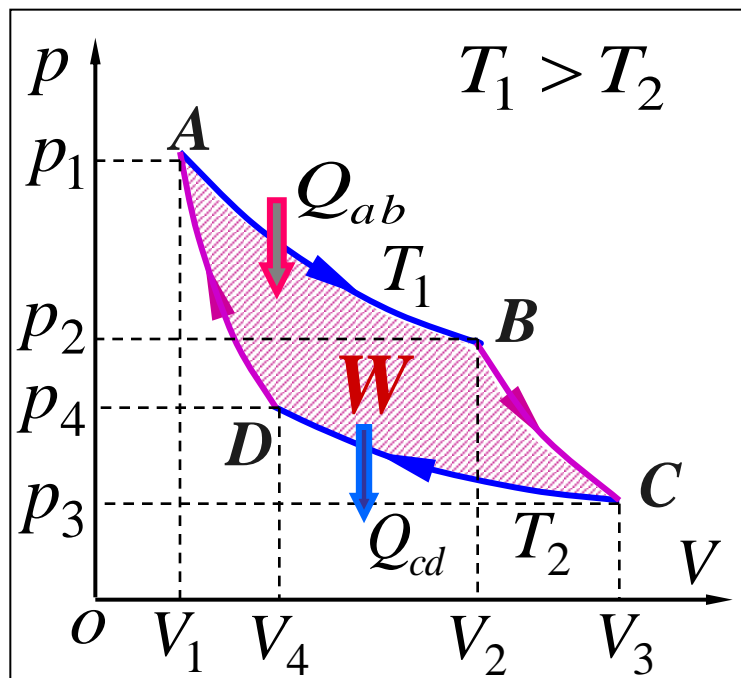
$B \rightarrow C$ 绝热过程

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

$D \rightarrow A$ 绝热过程

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

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



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

◆ 卡诺热机效率

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

卡诺热机效率与工作物质无关，只与两个热源的温度有关，两热源的温差越大，则卡诺循环的效率越高。



1、卡诺机必须有两个热源。卡诺热机的工作物质不一定是理想气体，可以是其他物质。

2、卡诺热机效率与工作物质无关，只与两热源温度有关。

例如：波音飞机不用价格较贵的高标号汽油作燃料，而采用航空煤油作燃料。

3、提高热机效率的方法。

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

要提高卡诺热机效率应尽量提高高温热源温度或尽量降低低温热源温度。使 T_2/T_1 越小越好。

而低温热源的温度常是室温或江、河、地下水的水温，

所以，提高热机效率的主要途径是升高高温热源温度。





一切实际热机的
循环热效率

$$\eta \leq 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

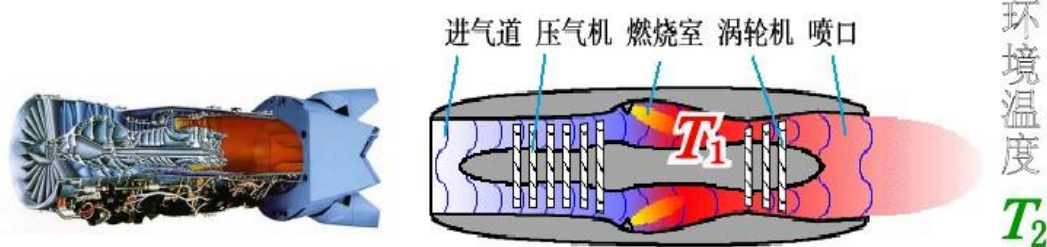

火箭发动机

火箭发动机也是一种热机，其热机效率也要受卡诺理想热机循环效率的限制。

火箭发动机除带燃料之外，还自带助燃的氧化剂，在大气层外仍能燃烧工作。



现代涡轮喷气发动机



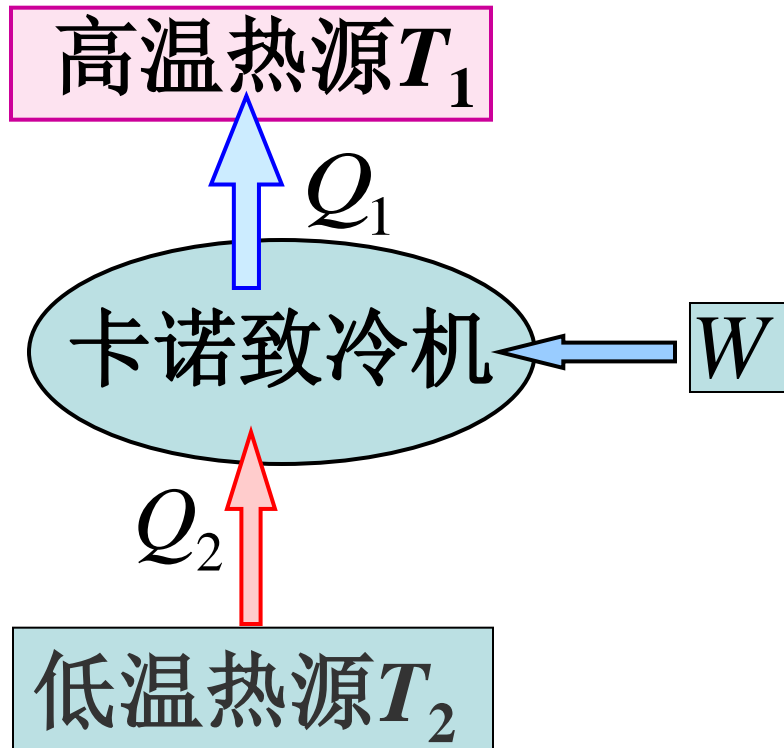
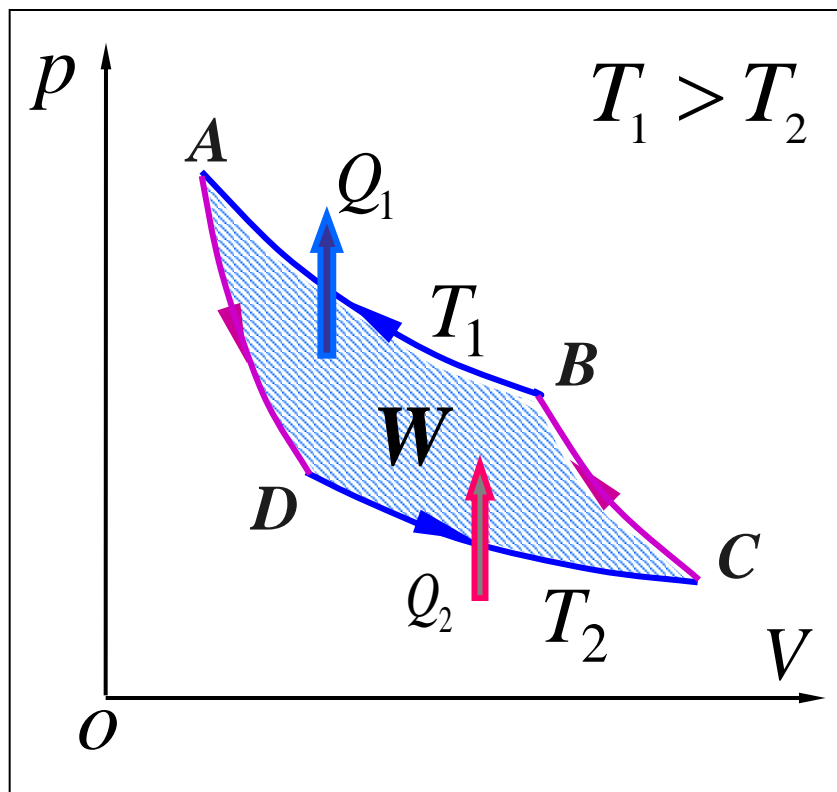
它是将活塞式发动机的进气、加压、燃烧和排气四个分立的阶段，变成一个连续的过程来进行。

其热机效率仍服从 $\eta \leq 1 - \frac{T_2}{T_1}$

由于发动机材料的耐温能力有限，目前，现代战斗机的 T_1 也只能高到 2000 K 左右。



卡诺致冷机（卡诺逆循环）



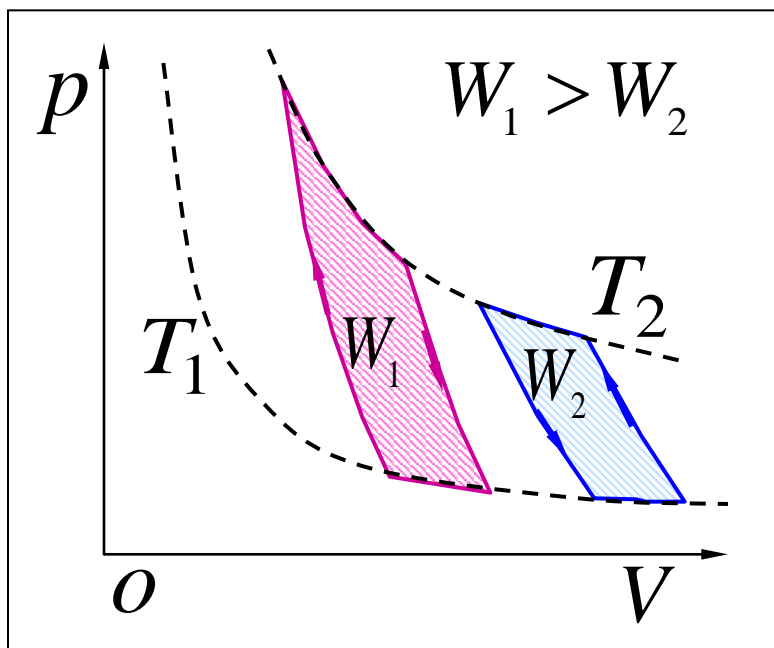
卡诺致冷机致冷系数

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

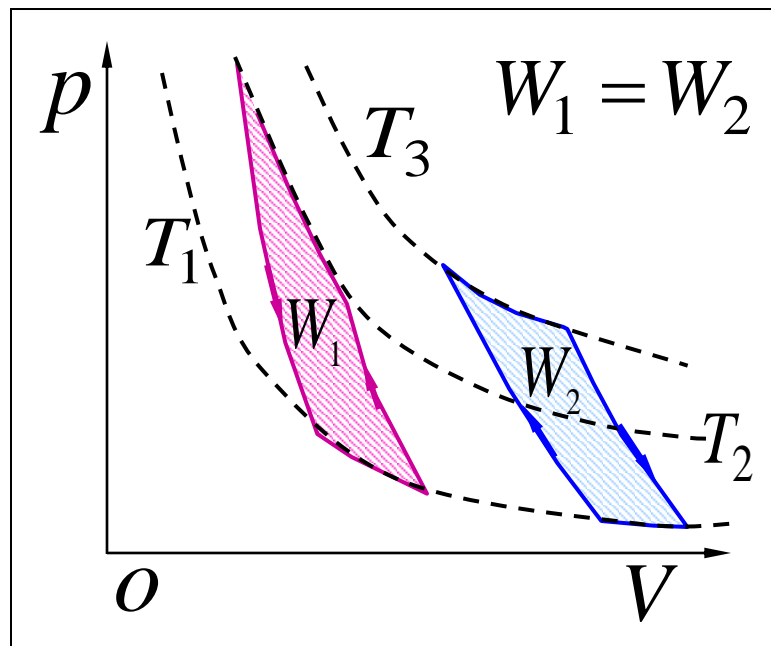


讨论

图中两卡诺循环 $\eta_1 = \eta_2$ 吗？



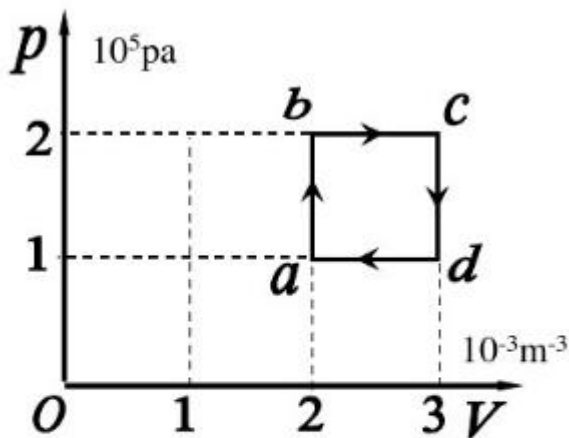
$$\eta_1 = \eta_2$$



$$\eta_1 < \eta_2$$



单原子理想气体循环如图



求 循环一次的

● Q_1 ● A

● 证明 $T_a T_c = T_b T_d$

解法提要

● ab 、 bc 为吸热过程

$$Q_1 = Q_{ab} + Q_{bc}$$

$$= C_V (T_b - T_a) + C_P (T_c - T_b)$$

$$= \frac{3}{2}R \left(\frac{P_b V_b - P_a V_a}{R} \right)$$

$$+ \left(\frac{3}{2}R + R \right) \left(\frac{P_c V_c - P_b V_b}{R} \right) = 800 \text{ (J)}$$

● $A = \text{面积 } S_{abcd}$

$$= (P_b - P_a)(V_d - V_a)$$

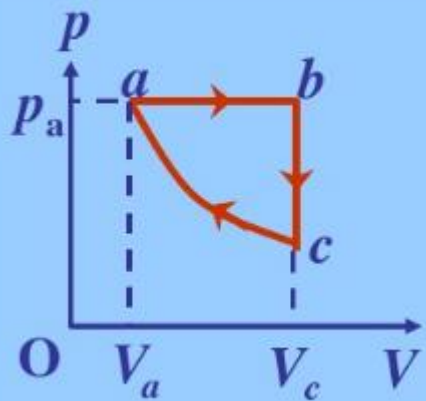
$$= 100 \text{ (J)}$$

$$T_a T_c = \frac{P_a V_a}{R} \frac{P_c V_c}{R}, \quad T_b T_d = \frac{P_b V_b}{R} \frac{P_d V_d}{R}$$

故 $T_a T_c = \frac{P_c V_a}{R} \frac{P_a V_c}{R} = T_b T_d$



例：如图所示循环过程， $c \rightarrow a$ 是绝热过程， p_a 、 V_a 、 V_c 已知，比热容比为 γ ，求循环效率。



解： $a \rightarrow b$ 等压过程

$$Q_1 = \nu C_{p,m} (T_b - T_a) = \frac{C_{p,m}}{R} p_a (V_c - V_a) > 0 \quad \text{吸热}$$

$b \rightarrow c$ 等容过程

$$Q_2 = \nu C_{V,m} (T_c - T_b) = \frac{C_{V,m}}{R} (p_c V_c - p_b V_b) < 0 \quad \text{放热}$$

$$p_c V_c^\gamma = p_a V_a^\gamma = \frac{C_{V,m}}{R} \left(p_a \frac{V_a^\gamma}{V_c^{\gamma-1}} - p_a V_c \right)$$

$$= 1 - \frac{1 - \frac{V_a^\gamma}{V_c^\gamma}}{\gamma \left(1 - \frac{V_a}{V_c} \right)}$$

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{\frac{C_{V,m}}{R} p_a \left(V_c - \frac{V_a^\gamma}{V_c^{\gamma-1}} \right)}{\frac{C_{p,m}}{R} p_a (V_c - V_a)} = 1 - \frac{C_{V,m}}{C_{p,m}} \frac{1 - \frac{V_a^\gamma}{V_c^\gamma}}{1 - \frac{V_a}{V_c}}$$



例2 一电冰箱放在室温为 20°C 的房间里，冰箱储藏柜中的温度维持在 5°C . 现每天有 $2.0 \times 10^7 \text{ J}$ 的热量自房间传入冰箱内，若要维持冰箱内温度不变，外界每天需作多少功，其功率为多少？设在 5°C 至 20°C 之间运转的冰箱的致冷系数是卡诺致冷机致冷系数的 55% .

解
$$e = e_{\text{卡}} \times 55\% = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \times \frac{55}{100} = 10.2$$



$$\text{由 } e = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} \quad \text{得 } Q_1 = \frac{e+1}{e} Q_2$$

房间传入冰箱的热量 $Q' = 2.0 \times 10^7 \text{ J}$

热平衡时 $Q' = Q_2$

$$Q_1 = \frac{e+1}{e} Q_2 = \frac{e+1}{e} Q' = 2.2 \times 10^7 \text{ J}$$



保持冰箱在 5°C 至 20°C 之间运转，每天需做功

$$W = Q_1 - Q_2 = Q_1 - Q' = 0.2 \times 10^7 \text{ J}$$

功率

$$P = \frac{W}{t} = \frac{0.2 \times 10^7}{24 \times 3600} \text{ W} = 23 \text{ W}$$

