

§9 循环过程

一. 循环过程

1. 循环过程 系统从某一状态出发经历一系列变化后又回到了原态的整个变化过程。

循环过程
内能变化

$$\Delta E = 0$$

循环曲线包围面积
代表系统作的净功

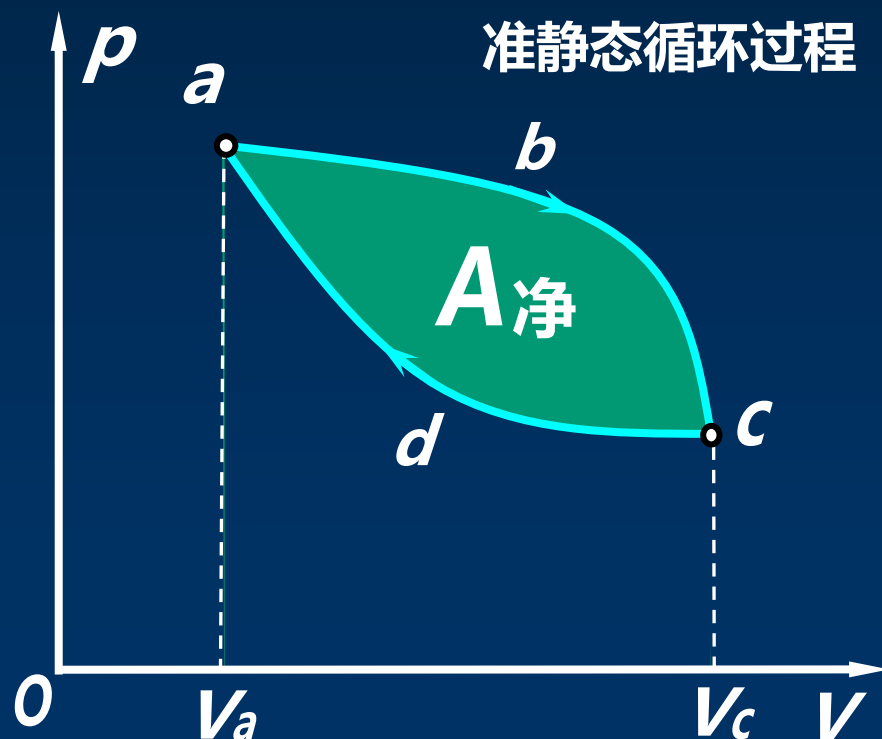
$A_{\text{净}}$

顺时针 正循环 热机

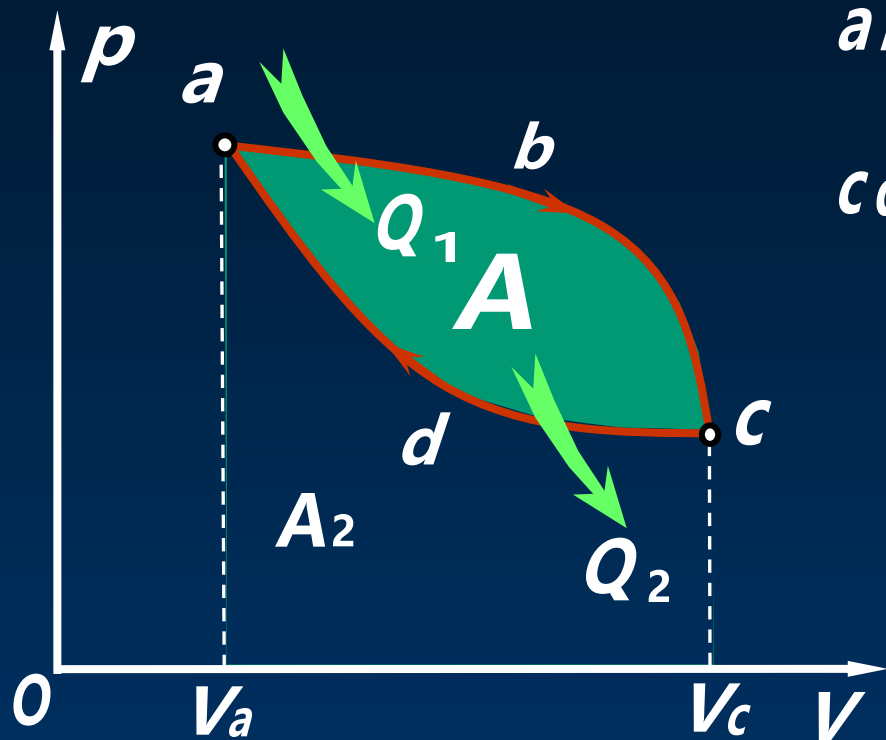
$A_{\text{净}} > 0$ 系统对外作正功

逆时针 逆循环 致冷机

$A_{\text{净}} < 0$ 外界对系统做功



2. 循环过程的热功转换



a b c 吸热膨胀

c d a 放热压缩

吸收热量 Q_1

对外做功 A_1

放出热量 Q_2

外界做功 A_2

绝对值

吸收的净热量 $Q = Q_1 - Q_2$

对外作的净功 $A = A_1 - A_2$

热力学第一定律

$$Q = \Delta E + A$$

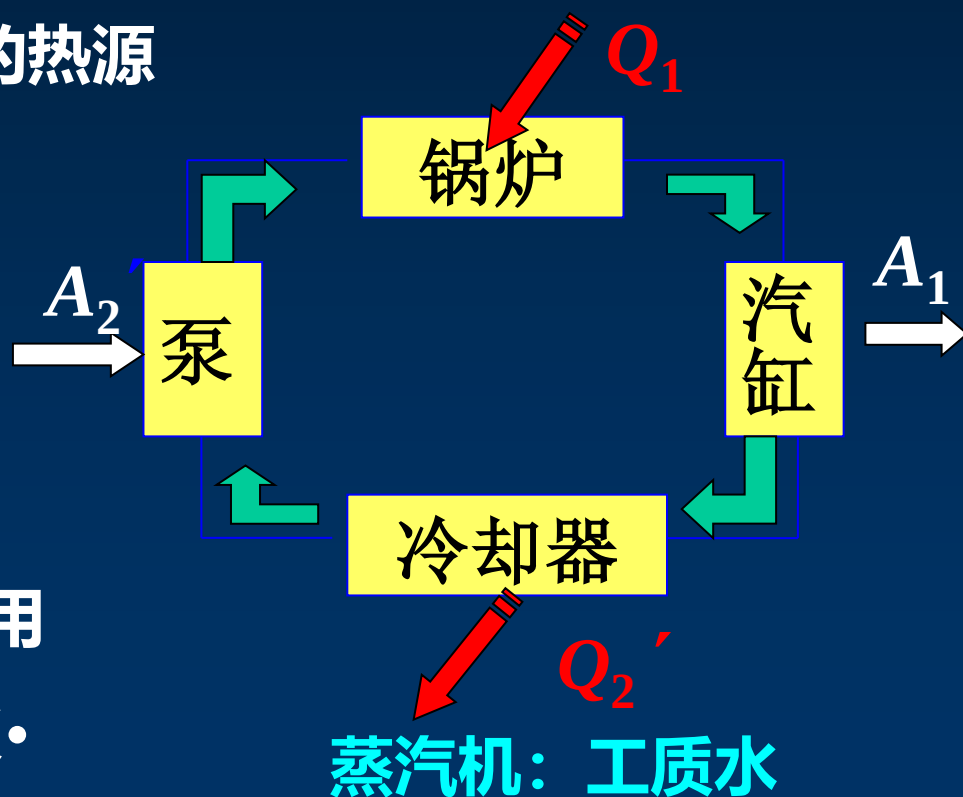
循环过程 $\Delta E = 0$ 则 $A_{\text{净}} =$

$$A = Q_1 - Q_2$$

热机：持续地将热量转变为功的机器。

热机的三个要素：

- 1) 工作物质
- 2) 两个或两个以上温度不同的热源
- 3) 对外作功的机械装置



工作物质(工质)：热机中被利用来吸收热量并对外做功的物质。

接下来研究什么？

能转化多少？ 或者说

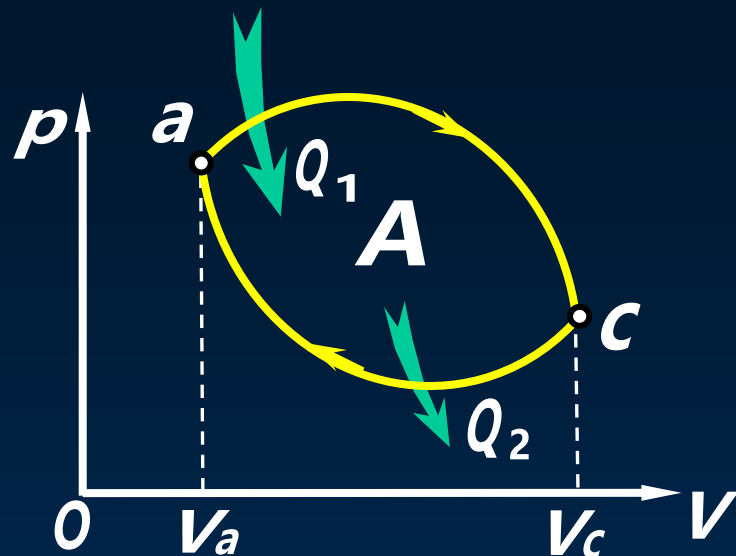
效率

二. 循环效率

● 热机的循环效率

$$\eta = \frac{A}{Q_1} \quad \begin{array}{l} \text{工质对外作的净功} \\ \text{工质从高温热源吸收的热量} \end{array}$$

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



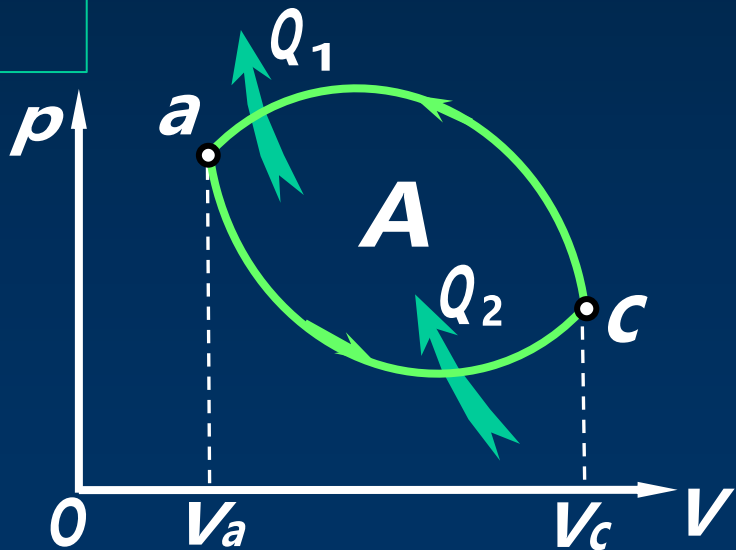
热机效率：标志循环过程中吸收的热量有多少转化为对外做功

Q_1 一定时, A 越大, 热机效率越高。

● 致冷机的致冷系数

$$W = \frac{Q_2}{A} \quad \begin{array}{l} \text{工质从低温热源吸收的热量} \\ \text{外界对工质作的净功} \end{array}$$

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

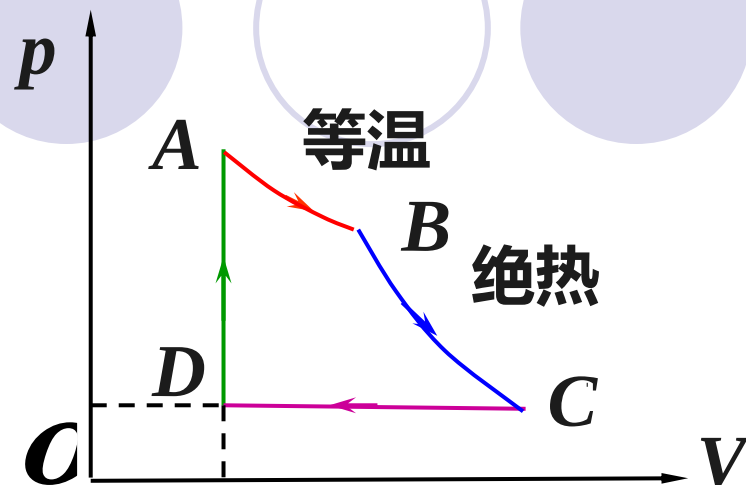


外界对系统做功 A 相同时, 吸收的热量 Q_2 越多, 制冷系数越大



热力学学习题课选讲例题

例 一定量理想气体的循环过程如 $P - V$ 图所示, 请填写表格中的空格.



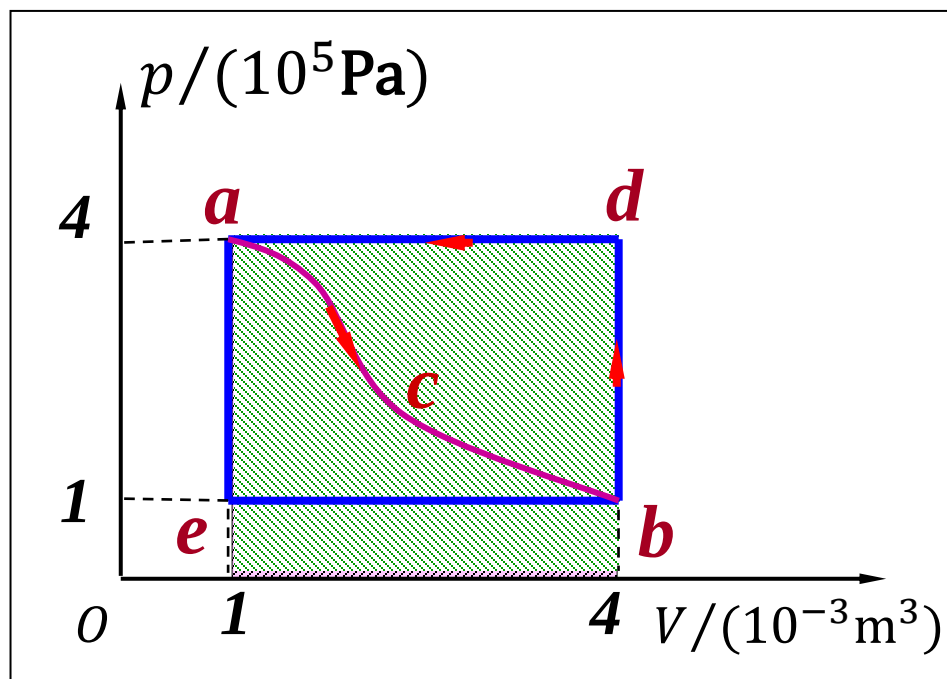
过程	内能增量 $\Delta E/\text{J}$	做功 W/J	吸热 Q/J
$A \rightarrow B$	0	50	50
$B \rightarrow C$	-50	50	0
$C \rightarrow D$	-100	-50	-150
$D \rightarrow A$	150	0	150
$ABCD A$	循环效率 $\eta = 50/200 = 25\%$		





热力学学习题课选讲例题

例：一定量的理想气体经历 acb 过程时吸热 500 J，
则经历 acbda 过程时，吸热多少？



解： $Q_{acb} = 500 \text{ J}$

$$W_{acb} = Q_{acb} - \Delta E_{ba}$$

$$\because p_a V_a = p_b V_b \therefore T_a = T_b$$

$$W_{acb} = Q_{acb} = 500 \text{ J}$$

$$Q_{acbda} = W_{acbda} = W_{acb} + W_{da}$$

$$W_{da} = -1200 \text{ J}$$

$$Q_{acbda} = -700 \text{ J}$$



例 1 mol 单原子分子的理想气体，循环过程如图

求 (1)画出 $p-V$ 图 (2)三个过程的吸放热 (3) 此循环效率?

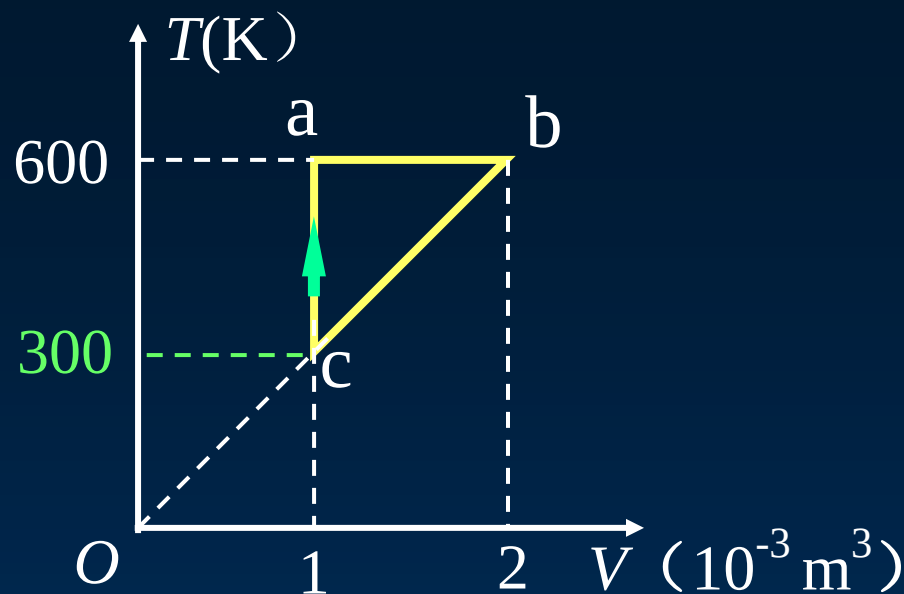
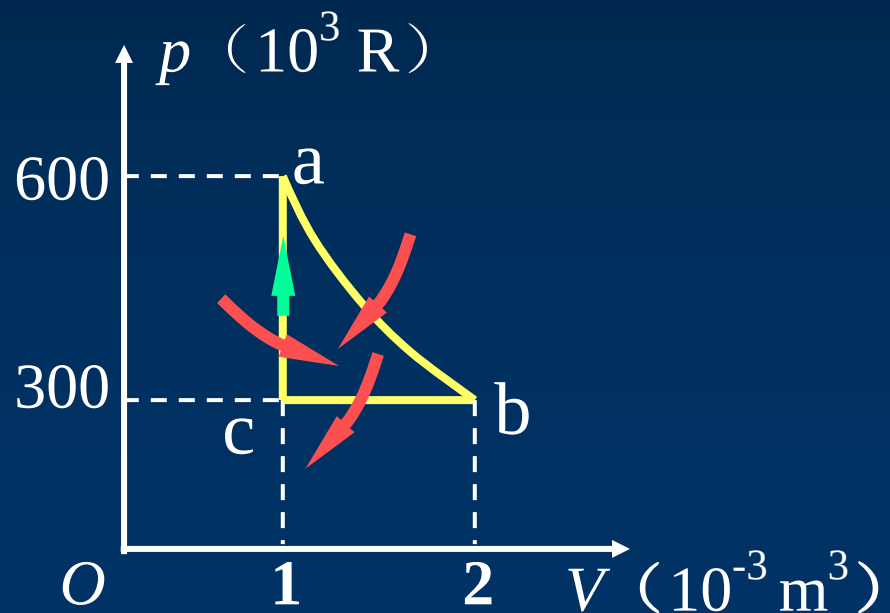
解 (1) $p-V$ 图

(2) ab 是等温膨胀过程

$$\begin{aligned} Q_{ab} &= A = \nu RT \ln \frac{V_b}{V_a} \\ &= 600R \ln 2 \end{aligned}$$

bc 是等压压缩过程

$$Q_{cb} = \nu C_p (T_c - T_b) = -750R$$



例 1 mol 单原子分子的理想气体，循环过程如图

求 (1)画出 $p-V$ 图 (2)三个过程的吸放热 (3) 此循环效率?

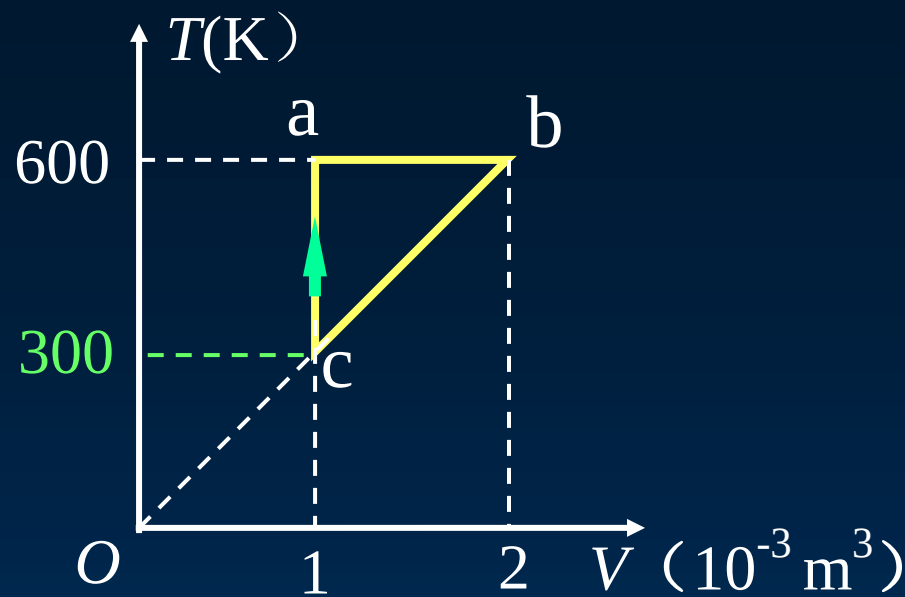
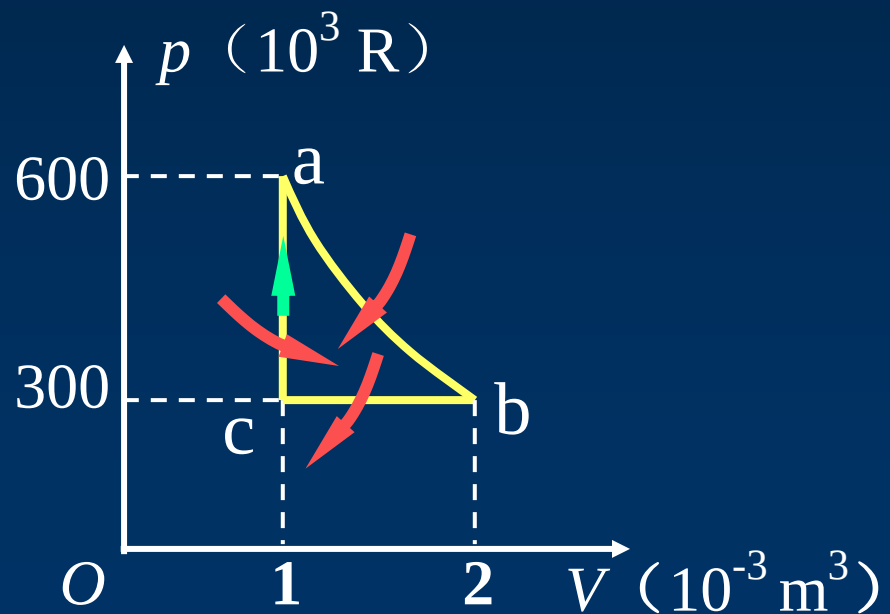
解 (1) $p-V$ 图

(2) ab 是等温膨胀过程

$$\begin{aligned} Q_{ab} &= A = \nu RT \ln \frac{V_b}{V_a} \\ &= 600R \ln 2 \end{aligned}$$

ca 是等体升压过程

$$\begin{aligned} Q_{ca} &= \Delta E = \nu C_V (T_a - T_c) \\ &= 450R \end{aligned}$$



循环过程中系统吸热

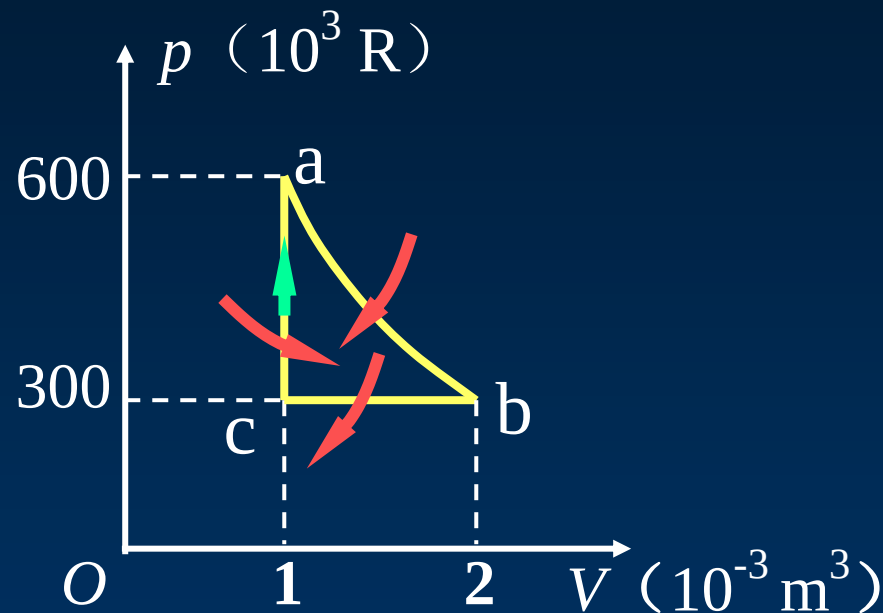
$$Q_1 = Q_{ab} + Q_{ca} = 600R \ln 2 + 450R = 866R$$

循环过程中系统放热

$$Q_2 = |Q_{bc}| = 750R$$

(3) 此循环效率

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{750R}{866R} = 13.4\%$$



例 一定量的理想气体经历如图所示的循环过程， $A \rightarrow B$ 和 $C \rightarrow D$ 是等压过程， $B \rightarrow C$ 和 $D \rightarrow A$ 是绝热过程。

已知： $T_C = 300K$ ， $T_B = 400K$

求 此循环的效率？

分析 $Q_{AB} = \nu C_p \Delta T = \nu C_p (T_B - T_A) = Q_1$

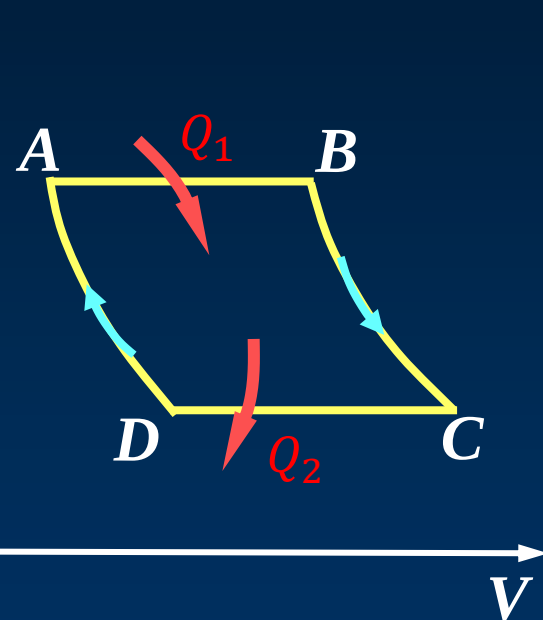
$$Q_{CD} = \nu C_p \Delta T = \nu C_p (T_D - T_C) = Q_2$$

$$\eta = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{T_C - T_D}{T_B - T_A}$$

绝热过程方程 $p^{\gamma-1} T^{-\gamma} = C_3$

BC 绝热过程 $p_B^{\gamma-1} T_B^{-\gamma} = p_C^{\gamma-1} T_C^{-\gamma}$

AD 绝热过程 $p_A^{\gamma-1} T_A^{-\gamma} = p_D^{\gamma-1} T_D^{-\gamma}$



$$\left. \begin{array}{l} p_B^{\gamma-1} T_B^{-\gamma} = p_C^{\gamma-1} T_C^{-\gamma} \\ p_A^{\gamma-1} T_A^{-\gamma} = p_D^{\gamma-1} T_D^{-\gamma} \end{array} \right\} \longrightarrow \frac{T_B}{T_A} = \frac{T_C}{T_D}$$

$$\frac{T_B}{T_A} = \frac{T_C}{T_D} \longrightarrow \frac{T_B}{T_A - T_B} = \frac{T_C}{T_D - T_C}$$

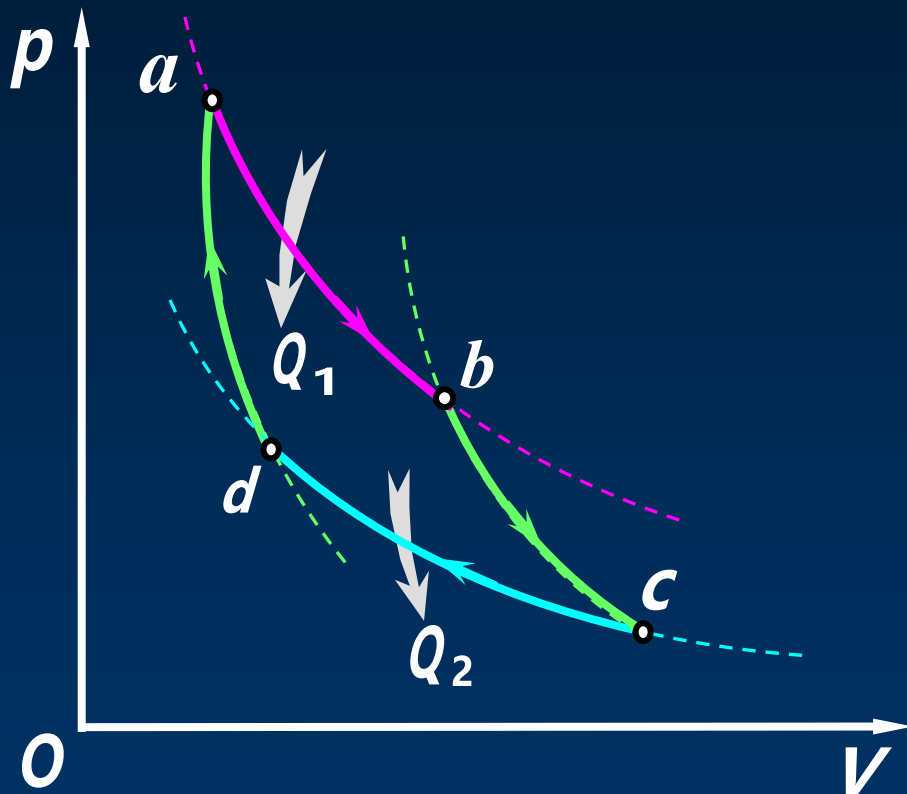
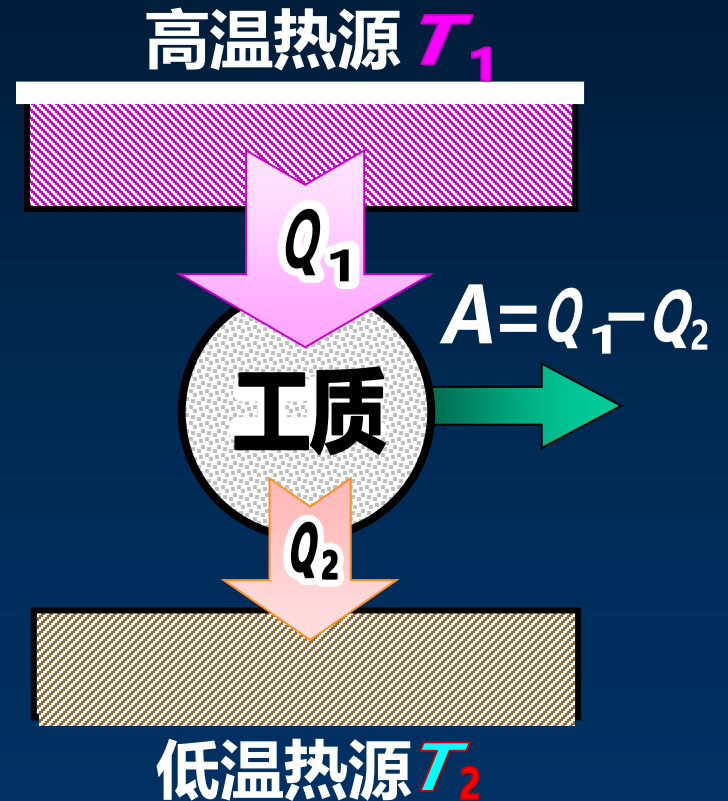
$$\eta = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{T_C - T_D}{T_B - T_A} \longleftarrow \frac{T_C - T_D}{T_B - T_A} = \frac{T_C}{T_B}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_C}{T_B}$$

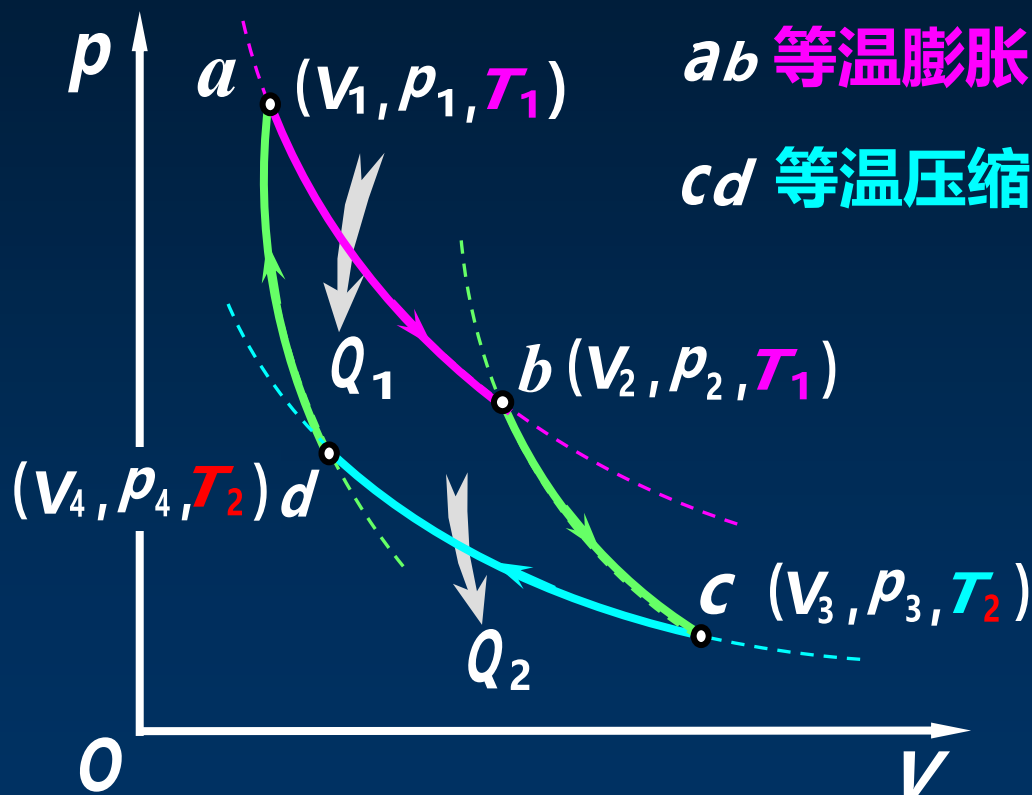
$$\eta = 1 - \frac{T_C}{T_B} = 1 - \frac{300}{400} = 25\%$$

三. 卡诺循环

两个等温
两个绝热过程构成的一种理想循环



两个等温 两个绝热过程构成的一种理想循环

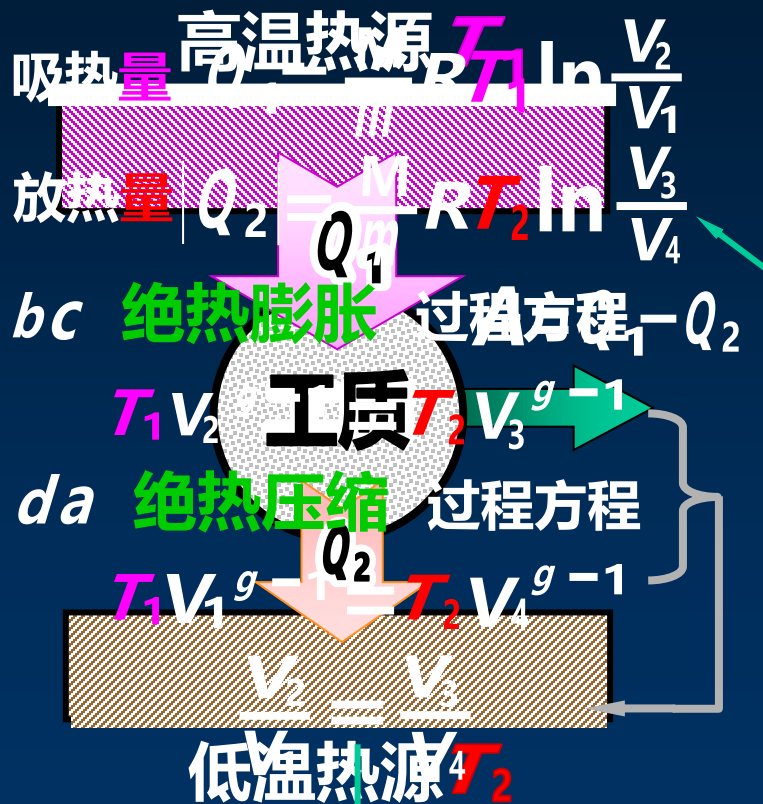


两式对比

$$\frac{Q_2 = \frac{M}{m} R T_2 \ln \frac{v_2}{v_1}}{Q_1 = \frac{M}{m} R T_1 \ln \frac{v_2}{v_1}}$$

得

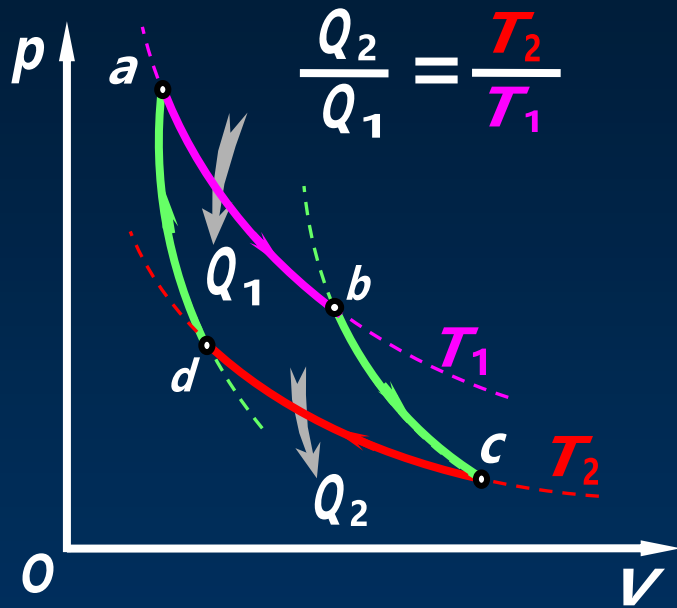
$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$$



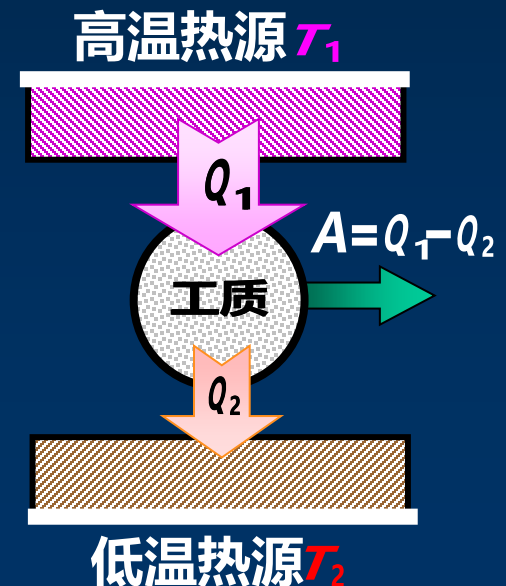
回顾循环效率和热机效率的普遍定义 $\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$

卡诺循环的效率

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

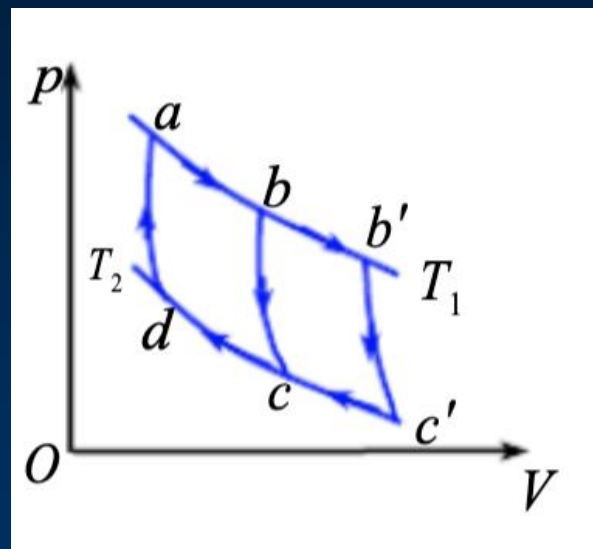


高温热源温度 T_1 越高,
低温热源温度 T_2 越低,
卡诺循环效率就越大。



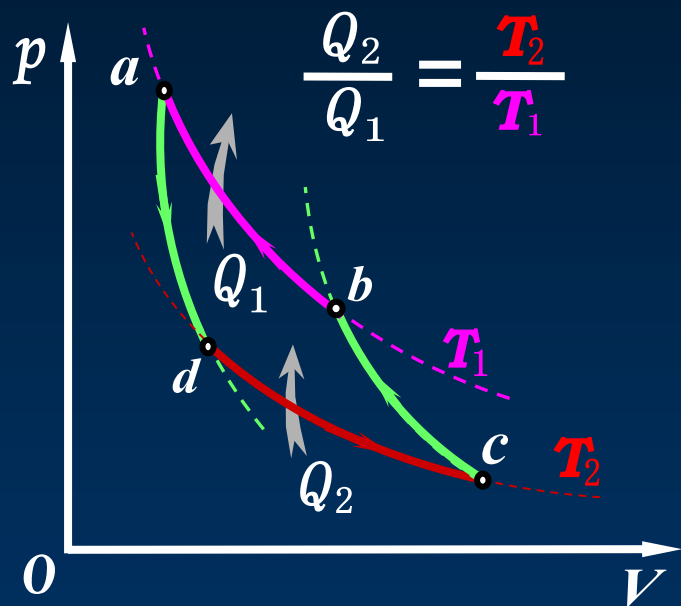
如果卡诺热机的循环曲线所包围的面积从图中的 $abcda$ 增大为 $ab'c'da$ ，那么循环 $abcda$ 与 $ab'c'da$ 所作的功和热机效率变化情况是

- A 净功增大，效率提高。
- B 净功增大，效率降低。
- C 净功和效率都不变。
- D 净功增大，效率不变。



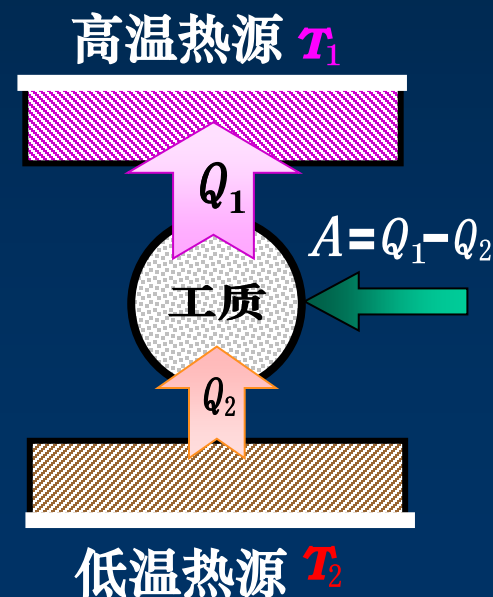
回顾逆循环效率和致冷机致冷系数的普遍定义 $w = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$

卡诺逆循环的制冷系数



$$w_{\text{卡}} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

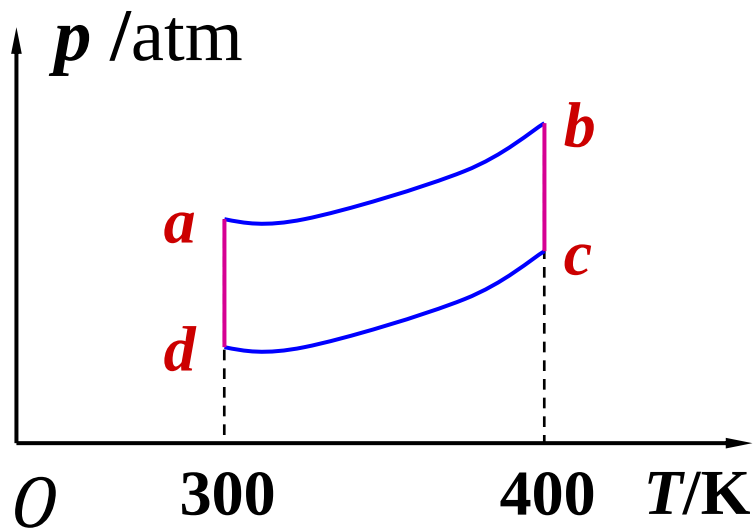
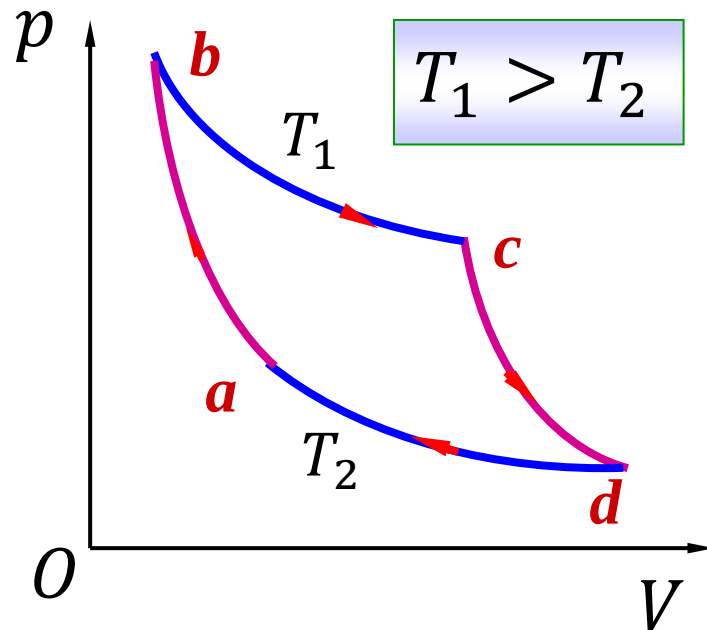
致冷系数随着被致冷物体的温度变化而变化。被致冷物体的温度 T_2 越低，则卡诺逆循环的致冷系数越小。





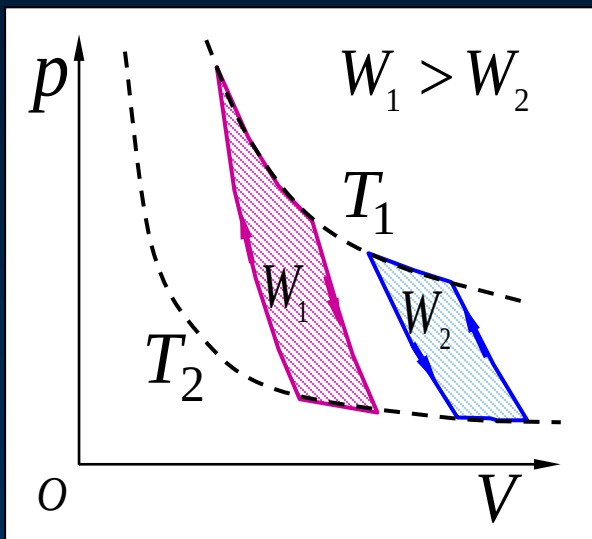
热力学学习题课选讲例题

例 一定量的理想气体，在 $p - T$ 图上经历如图所示的循环过程 $abcd a$ ，其中 ab 、 cd 为两个绝热过程，**求**：该循环过程的效率。

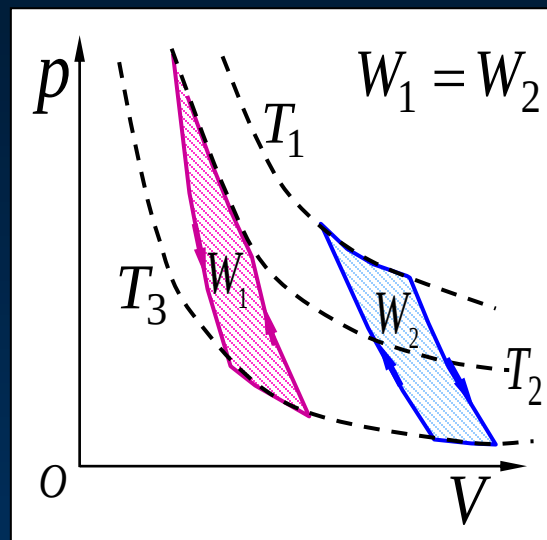


$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{300}{400} = 25\%$$

分析图中两个卡诺循环 η_1 和 η_2 关系



$$\eta_1 = \eta_2$$



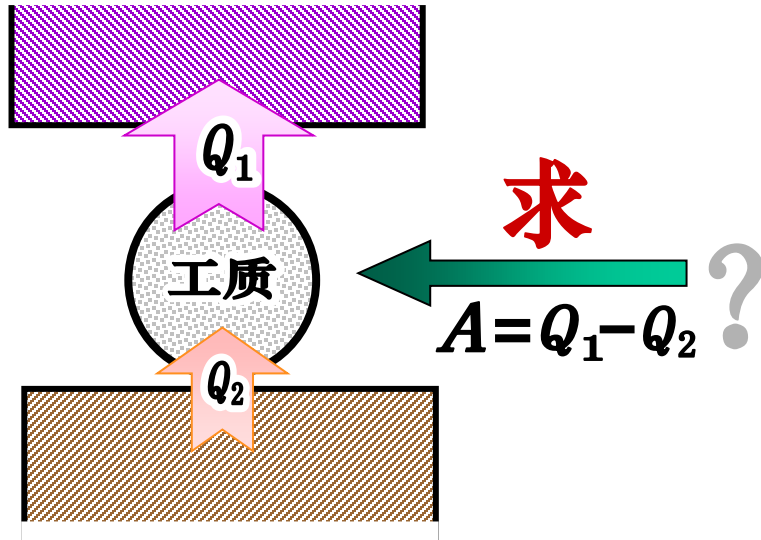
$$\eta_1 < \eta_2$$

卡诺致冷机使1kg 0℃的水变成0℃的冰，需作多少功？

已知

环境温度 27℃

高温热源 $T_1 = 27 + 273 = 300(\text{K})$



被致冷的 0℃水变 0℃的冰

低温热源 $T_2 = 0 + 273 = 273(\text{K})$

冰的溶解热为 $3.35 \times 10^5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$

$$w_{\text{卡}} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} = 10.1$$

1kg 0℃的水变0℃的冰
需取出热量

$$Q_2 = 1 \times 3.35 \times 10^5 \\ = 3.35 \times 10^5 (\text{J})$$

外界需向致冷机做功

$$A = Q_2 / w_{\text{卡}} \\ = 3.32 \times 10^4 (\text{J})$$

例 地球上的人要在月球上居住，首要问题就是保持他们的起居室处于一个舒适的温度，现考虑用卡诺循环机来作温度调节，设月球白昼温度为 100°C ，而夜间温度为 -100°C ，起居室温度要保持在 20°C ，通过起居室墙壁导热的速率为每度温差 0.5kW ，

求 白昼和夜间给卡诺机所供的功率

解 在白昼欲保持室内温度低，卡诺机工作于致冷机状态，从室内吸取热量 Q_2 ，放入室外热量 Q_1

则
$$w = \frac{Q_2}{A} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \quad A = \frac{Q_2}{w} = Q_2 \frac{T_1 - T_2}{T_2}$$

每秒钟从室内取走的热量为通过起居室墙壁导进的热量，即

$$Q_2 = C(T_2 - T_1)t$$

$$A = \frac{Q_2}{w} = Q_2 \frac{T_1 - T_2}{T_2} = C \frac{(T_1 - T_2)^2}{T_2} = 10.9 \times 10^3 \text{J}$$

在黑夜欲保持室内温度高，卡诺机工作于致冷机状态，从室外吸取热量 Q_2 ，放入室内热量 Q_1

$$w = \frac{Q_2}{A} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} \Rightarrow Q_2 = A \frac{T_1}{T_2 - T_1}$$

每秒钟放入室内的热量为通过起居室墙壁导进的热量，即

$$Q_1 = Q_2 + A = C(T_2 - T_1)t = \frac{T_1}{T_2 - T_1} A + A = \frac{T_2}{T_2 - T_1} A$$

解得 $A = \frac{C(T_2 - T_1)^2}{T_2} = 24.6 \times 10^3 \text{ J}$



此种用可逆循环原理制作的空调装置既可加热，又可降温，这即是所谓的冷暖双制空调。

□ 说明

- 1) 卡诺循环热效率的大小只取决于**冷热源温度** (T_2 、 T_1) ;
- 2) 卡诺循环热效率总是小于1。只有当 **$T_1 = \infty$ 或 $T_2 = 0$** 时, 热效率才等于1, 但是这都是不可能实现的;
- 3) 卡诺循环的**热效率与工质无关**;
- 4) 逆卡诺循环的性能系数**只决定于热源温度 T_1 及冷源温度 T_2** , 制冷系数随热源温度 T_1 的降低及冷源温度 T_2 的提高而增大;
- 5) 逆卡诺循环的制冷系数**可以大于1, 等于1, 或小于1**, 一般情况下 **$T_2 > T_1 - T_2$** , 所以制冷系数通常大于1;
- 6) 逆卡诺循环**可以用来制冷, 也可以用来供热**。



问：一条等温线与一条绝热线能否有两个交点？

答：不可能。

因为，若一条等温线与一条绝热线有两个交点，则两条曲线构成了一个循环过程，它仅从单一的热源吸热，且全部转换为功，热机效率达100%，违背了热力学第二定律的开尔文表述，所以不成立。

