

# 第八章 热力学基础

( § 8.5– § 8.6 )

## 本课时教学基本要求

- 1、理解循环过程的概念和特征。
- 2、理解正循环、逆循环的能量转换特征，并能计算热效率和致冷系数。
- 3、理解卡诺循环的特点，掌握卡诺循环热效率和致冷系数的计算。

## 8-5 循环过程

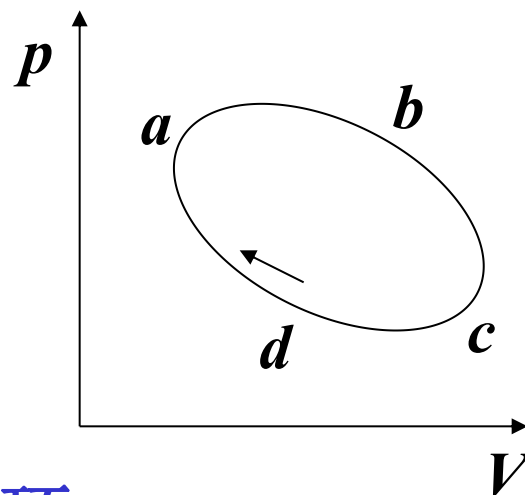
### 一、循环过程

系统经历一系列变化后又回到初始状态的整个过程叫循环过程，简称循环。

循环工作的物质称为工作物质，简称工质。

循环过程的特点： $\Delta E=0$

若循环的每一阶段都是准静态过程，则此循环可用 $p$ - $V$  图上的一条闭合曲线表示。



沿顺时针方向进行的循环称为正循环。

沿逆时针方向进行的循环称为逆循环。

## 正循环

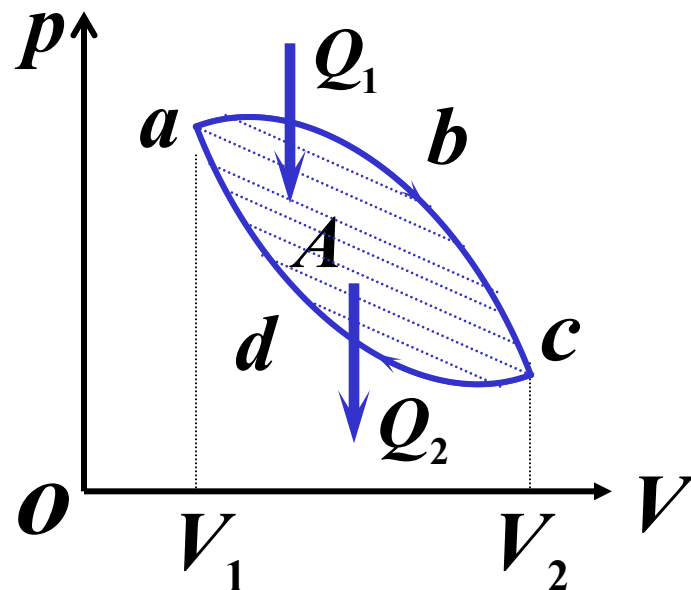
工质在整个循环过程中对外作的**净功** $A$ 等于曲线所包围的面积。

## 整个循环过程

工质从外界吸收热量的总和为 $Q_1$   
放给外界的热量总和为 $Q_2$ (取绝对值)

$$Q_{\text{净}} = Q_1 - Q_2 \quad Q_{\text{净}} = -A > 0$$

正循环过程是将吸收的热量中的一部分 $Q_{\text{净}}$ 转化为有用功，另一部分 $Q_2$ 放回给外界。



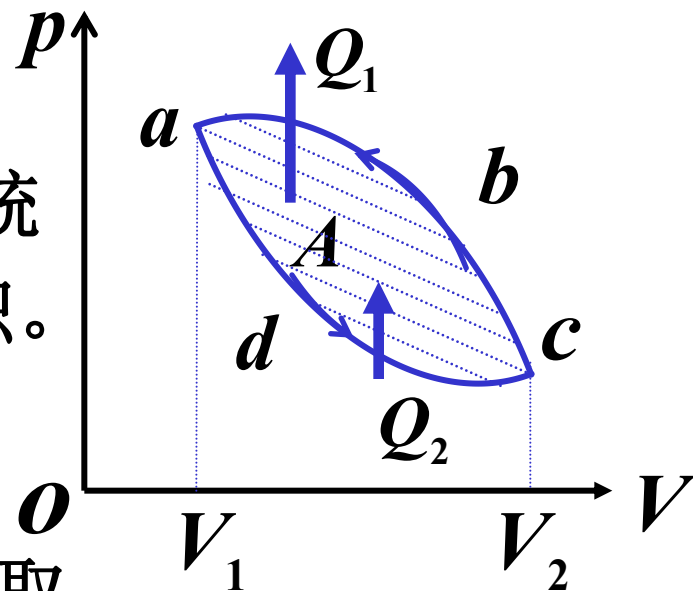
## 逆循环

工质在整个循环过程中外界对系统作的**净功** $A$ 等于曲线所包围的面积。

## 整个循环过程

工质放给外界的热量的总和为 $Q_1$ (取绝对值), 从外界吸收热量总和为 $Q_2$

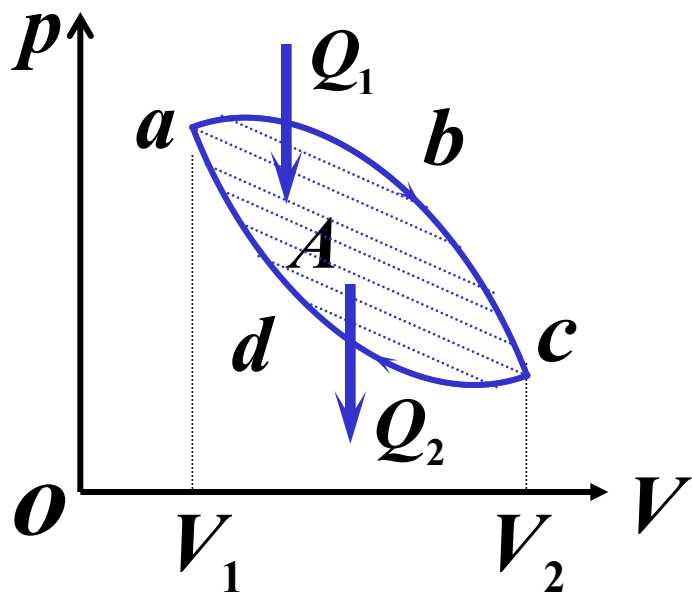
$$Q_{\text{净}} = Q_1 - Q_2 \quad Q_{\text{净}} = A$$



## 二、热机效率

**热机**: 通过工质使热量不断转换为功的机器。

热机性能的标志之一是效率。

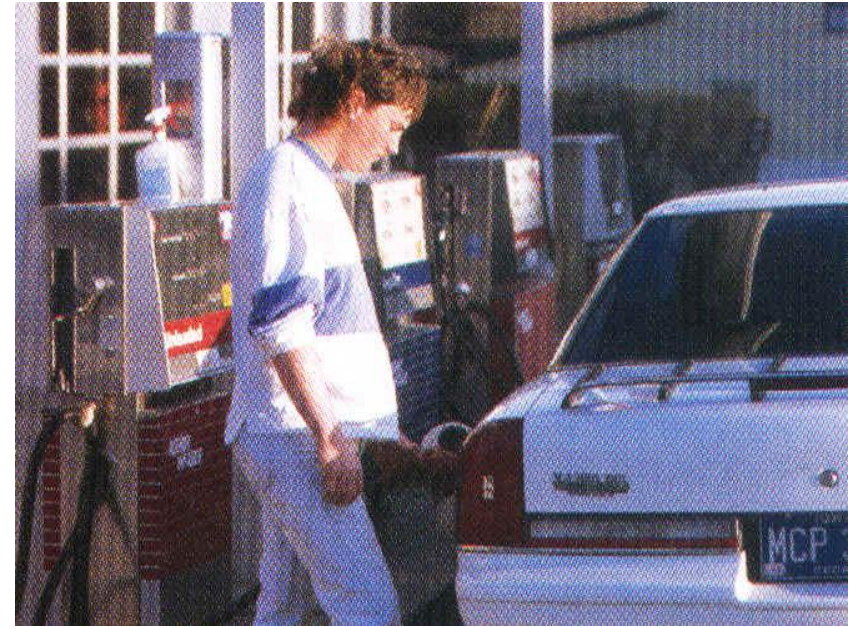


热机效率

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



例如：蒸汽机、

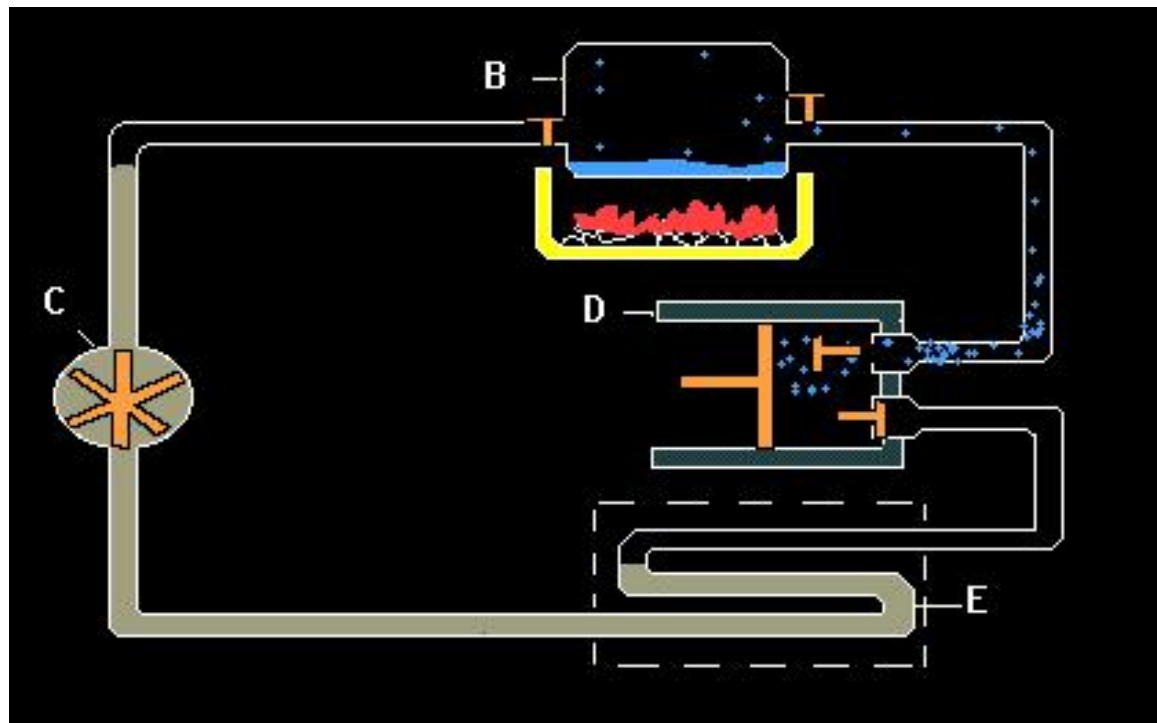


内燃机等



下面我们以蒸汽机为例分析热机的工作过程

B — 锅炉 C — 水泵  
D — 汽缸 E — 冷凝器



水从C→B成为蒸汽→D对外做功→冷却E→C

上页

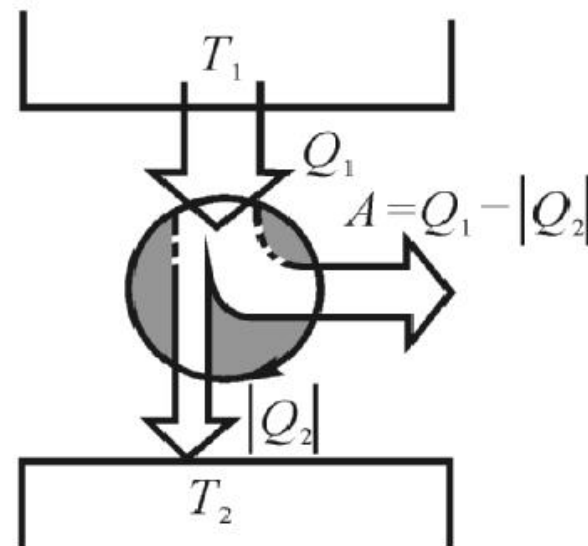
下页

热循环的特征：

一定质量的工质在一次循环过程中要从高温热源吸热 $Q_1$ ，对外作净功 $A$ ，又向低温热源放出热量 $Q_2$ 。而工质回到初态，内能不变。

工质经一循环

$$A = Q_1 - |Q_2|$$



实用上，用效率表示热机的效能以 $\eta$ 表示

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

上页

下页



例：如图所示理想气体的循环过程， $c \rightarrow a$  是绝热过程， $p_a$ 、 $V_a$ 、 $V_c$  已知，摩尔热容比为  $\gamma$ ，求循环效率。

解： $a \rightarrow b$  等压过程

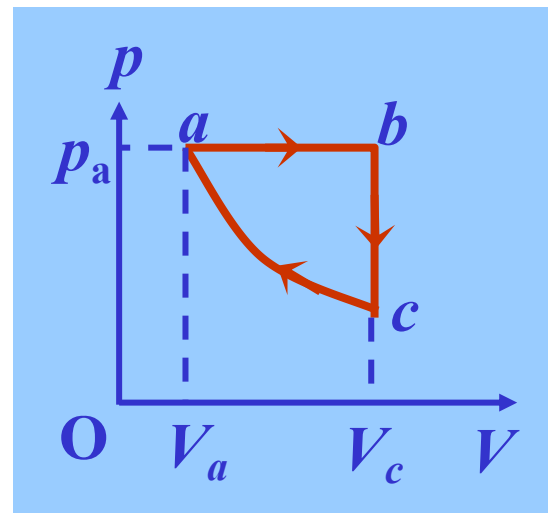
$$Q_1 = \nu C_{p,m} (T_b - T_a) = \frac{C_{p,m}}{R} p_a (V_c - V_a) > 0 \quad \text{吸热}$$

$b \rightarrow c$  等容过程

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

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

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



例：内燃机——空气标准奥托循环的效率

利用气体燃料在汽缸内直接燃烧获得热量而对活塞做功。

$a \rightarrow b$ : 绝热压缩

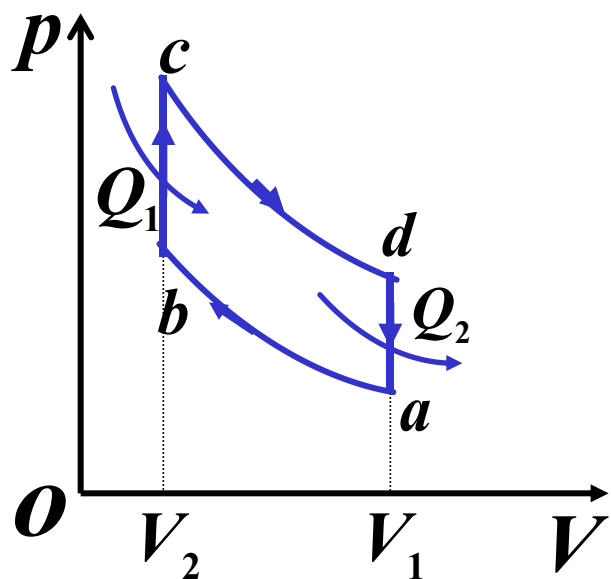
$b \rightarrow c$ : 等容吸热

$c \rightarrow d$ : 绝热膨胀

$d \rightarrow a$ : 等容放热

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

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



$$a \rightarrow b \quad \frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \quad V^{\gamma-1}T = \text{恒量}$$

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

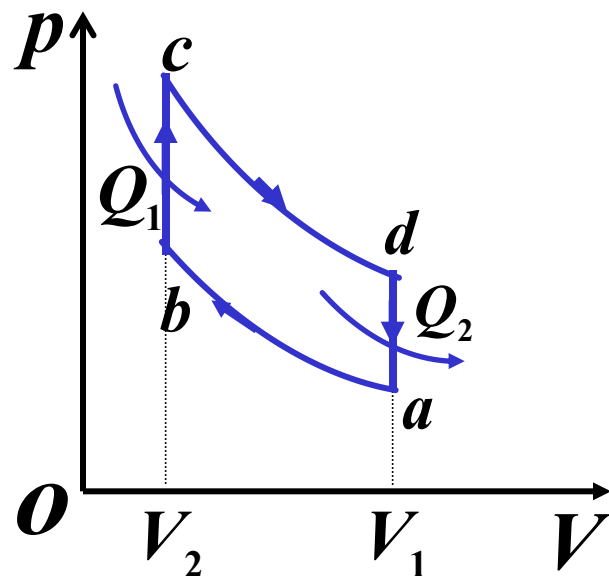
$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{1}{\left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1}}$$

$$\frac{V_1}{V_2} = 7 \quad \gamma = 1.4$$

$$\eta = 55\% \quad \text{实际} \quad \eta = 25\%$$

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

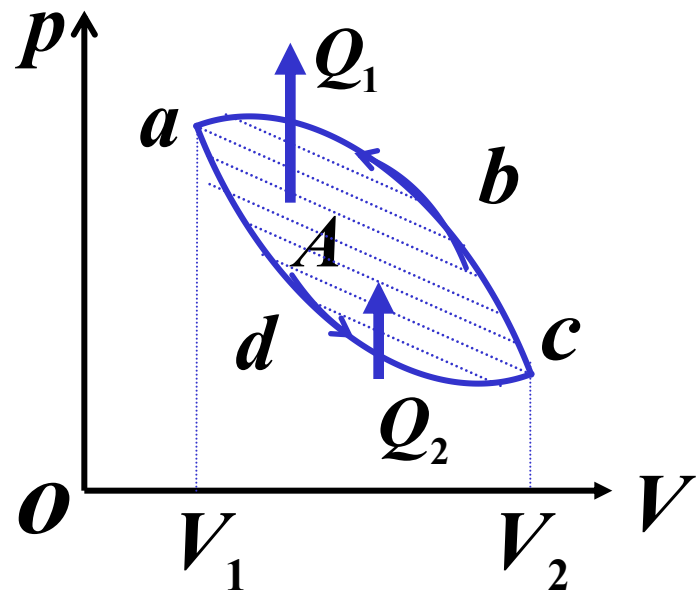
$$Q_2 = \nu C_{V,m} (T_4 - T_1)$$



### 三、致冷机及致冷系数

**制冷机**：获得低温的装置。

外界对工质做功，从低温热源吸收的热量传给高温热源，其结果可使低温热源的温度更低，达到制冷的目的。吸热越多，外界做功越少，表明制冷机效能越好。



$$Q_1 = Q_2 + A$$

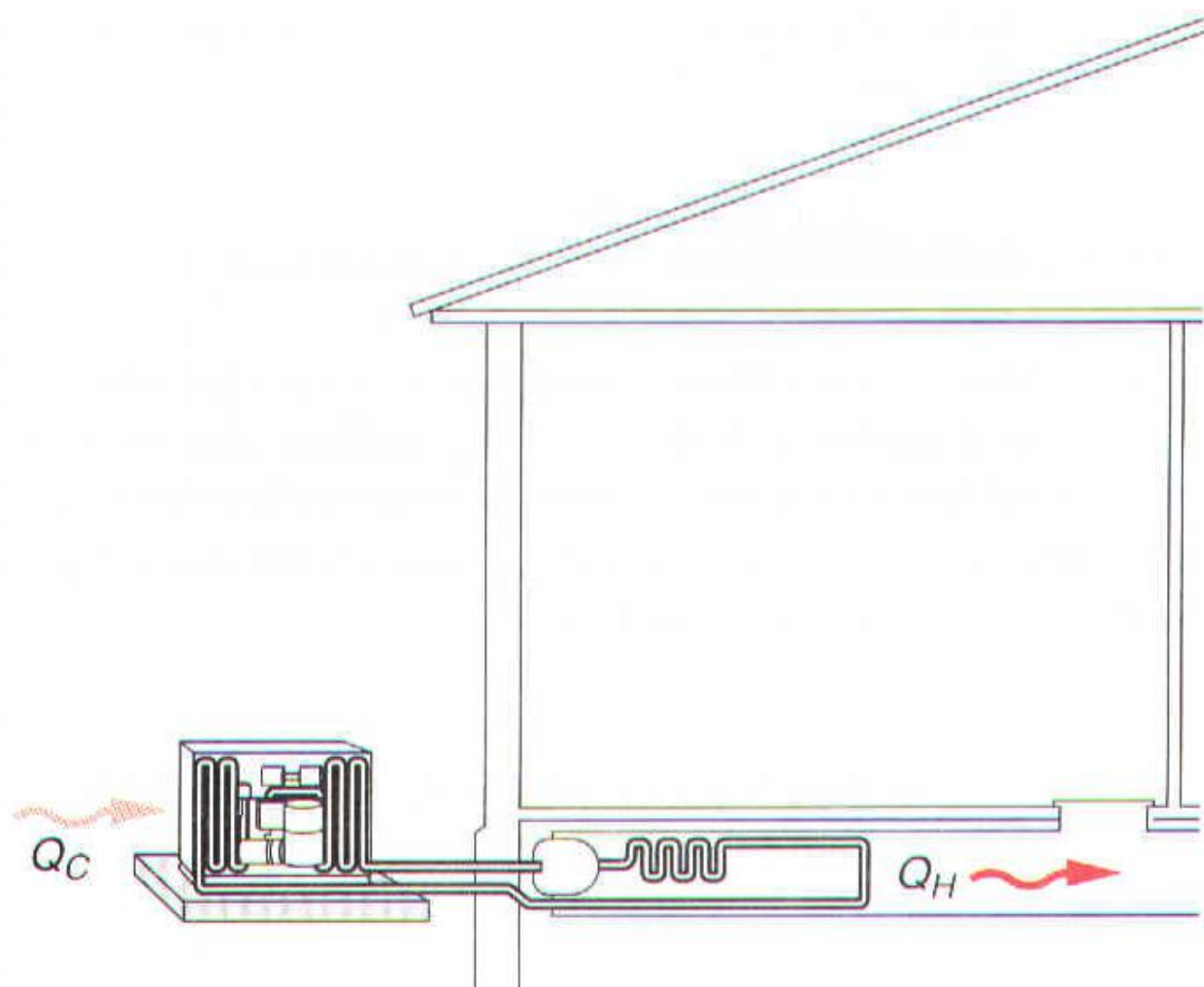
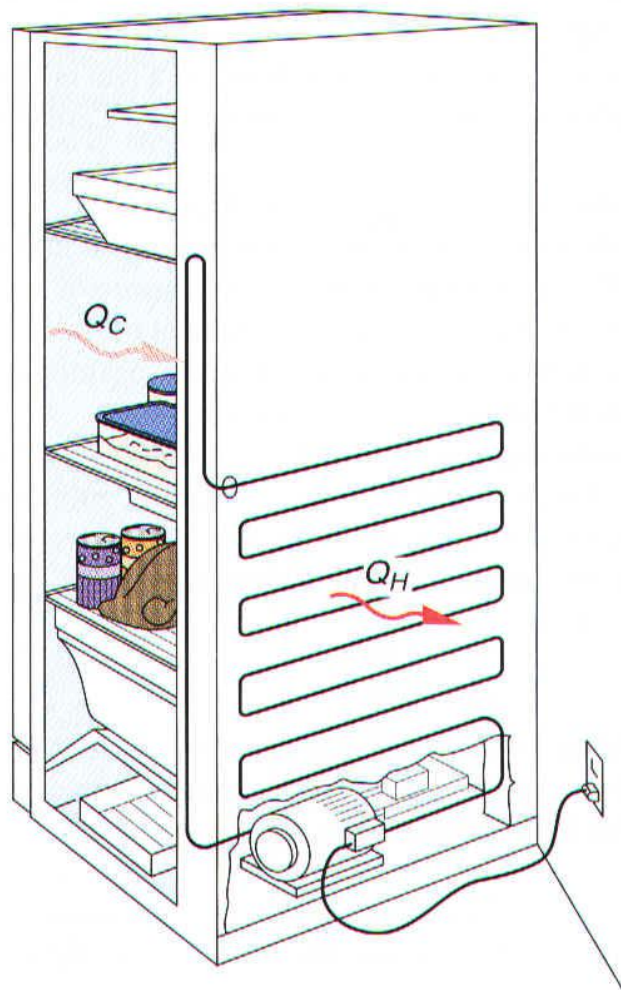
制冷系数

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

$$\eta \text{ 或 } e = \frac{\text{需要的}}{\text{付出的}}$$

上页

下页



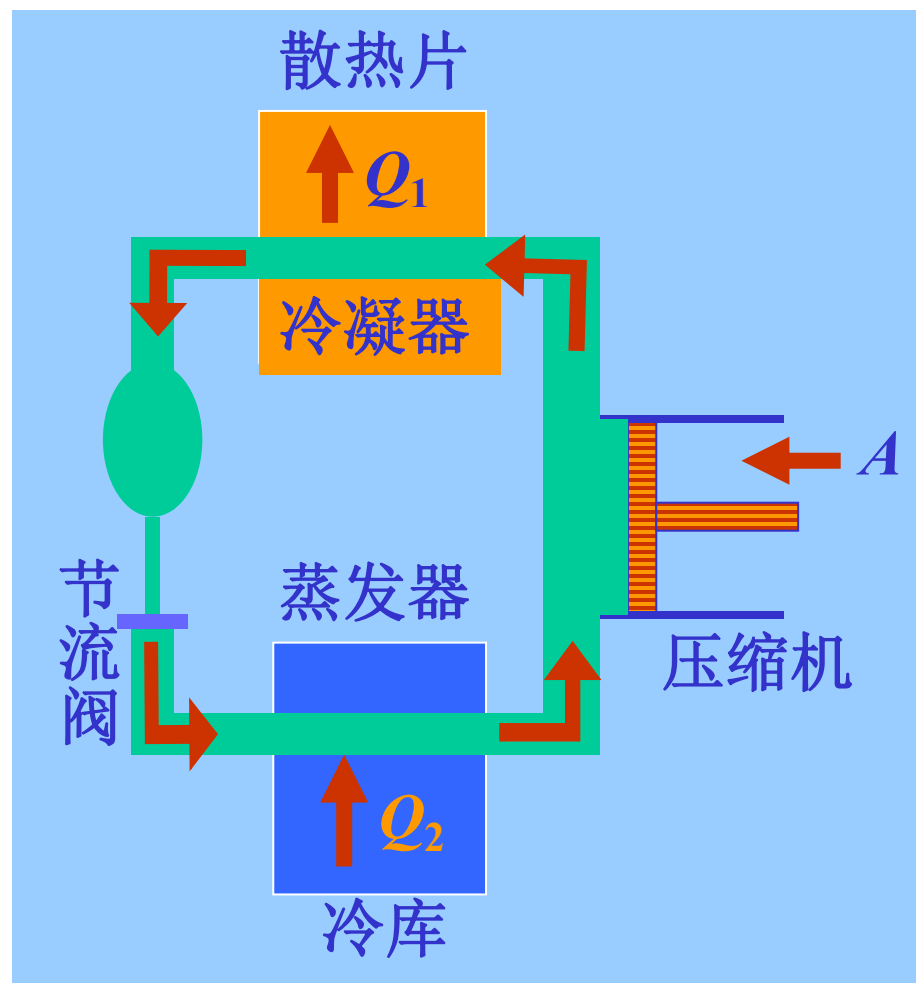
## 下面我们以电冰箱为例分析致冷机的工作过程

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。

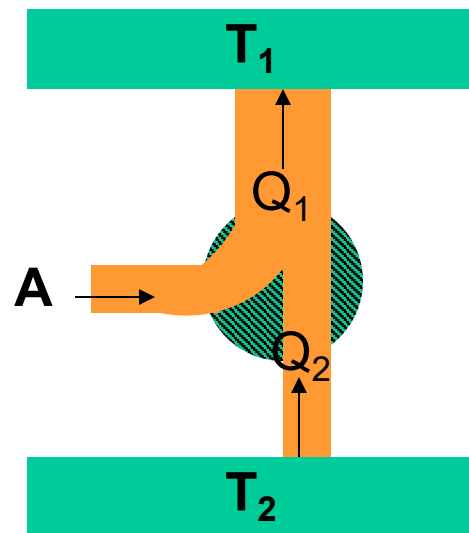


致冷循环的特征：

工质把从低温热源吸收的热量和外界对它所作的功以热量的形式传给高温热源，其结果可使低温热源的温度更低，达到制冷的目的。

吸热越多，外界做功越少，  
表明致冷机效能越好。用致冷系数  $e$  表示之。

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





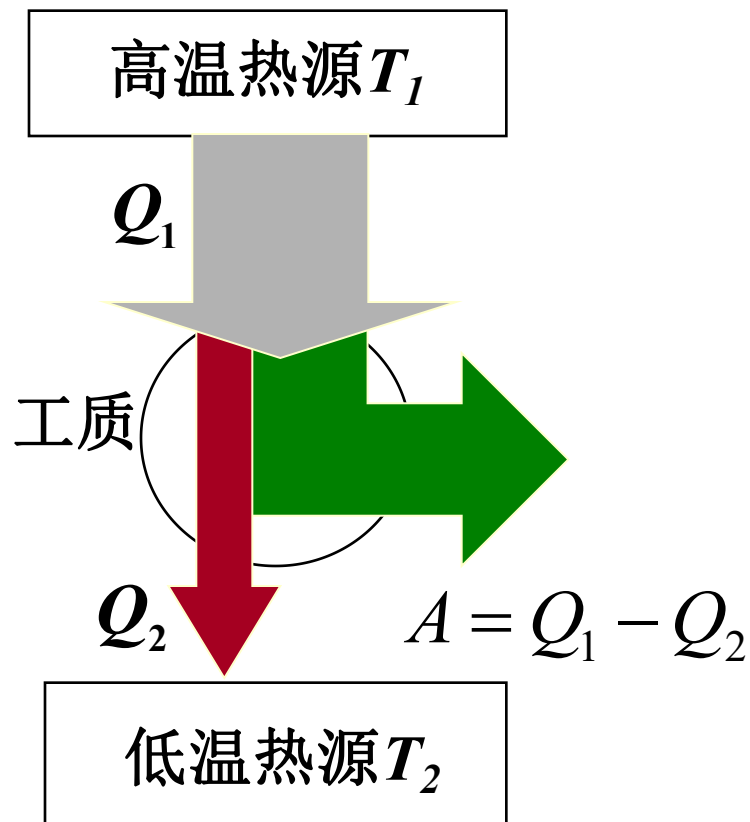
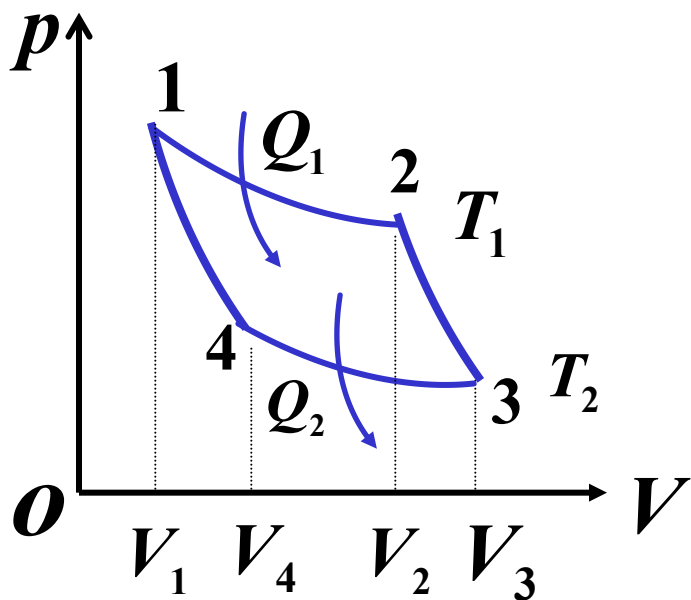
## 8-6 卡诺循环

1824年卡诺（法国工程师1796-1832）提出了一个能体现热机循环基本特征的理想循环。后人称之为卡诺循环。

本节讨论以理想气体为工质的卡诺循环。  
工作物质于两个恒温热源交换热量，整个循环由两个等温过程和两个绝热过程组成。

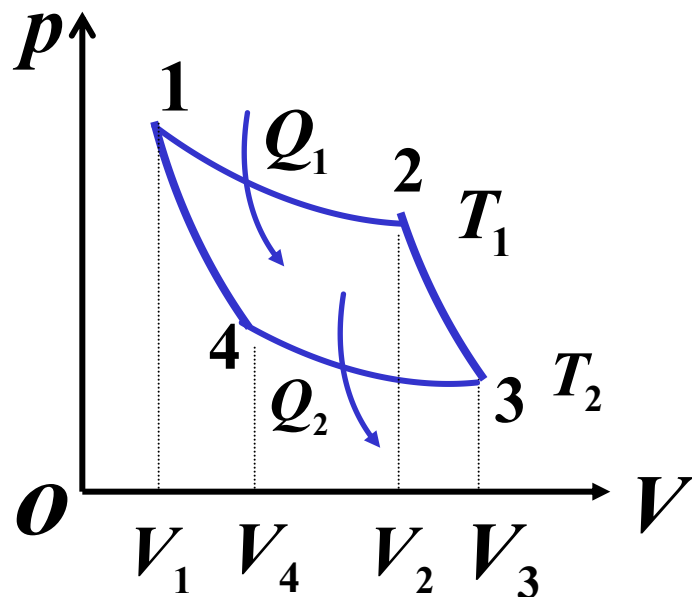
# 一、卡诺热机及其效率

## 卡诺热机



$1 \rightarrow 2$ : 与温度为  $T_1$  的高温热源接触,  $T_1$  不变, 体积由  $V_1$  膨胀到  $V_2$ , 从热源吸收热量为:

$$Q_1 = \nu R T_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$



$2 \rightarrow 3$ : 绝热膨胀, 体积由  $V_2$  变到  $V_3$ , 吸热为零。

$3 \rightarrow 4$ : 与温度为  $T_2$  的低温热源接触,  $T_2$  不变, 体积由  $V_3$  压缩到  $V_4$ , 从热源放热为:

$$Q_2 = \nu R T_2 \ln \frac{V_3}{V_4}$$

$4 \rightarrow 1$ : 绝热压缩, 体积由  $V_4$  变到  $V_1$ , 吸热为零。

$$Q_1 = \nu R T_1 \ln \frac{V_2}{V_1} \quad Q_2 = \nu R T_2 \ln \frac{V_3}{V_4}$$

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

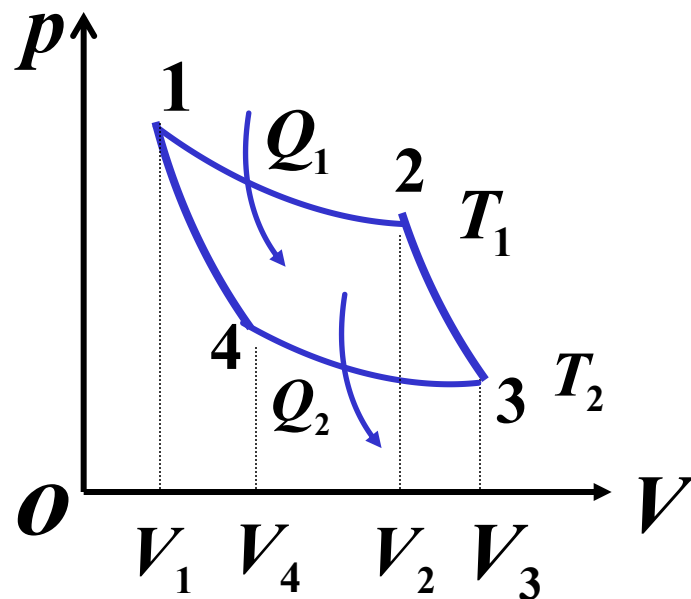
对绝热线23和41:

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

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

$$V_3/V_4 = V_2/V_1$$

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



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

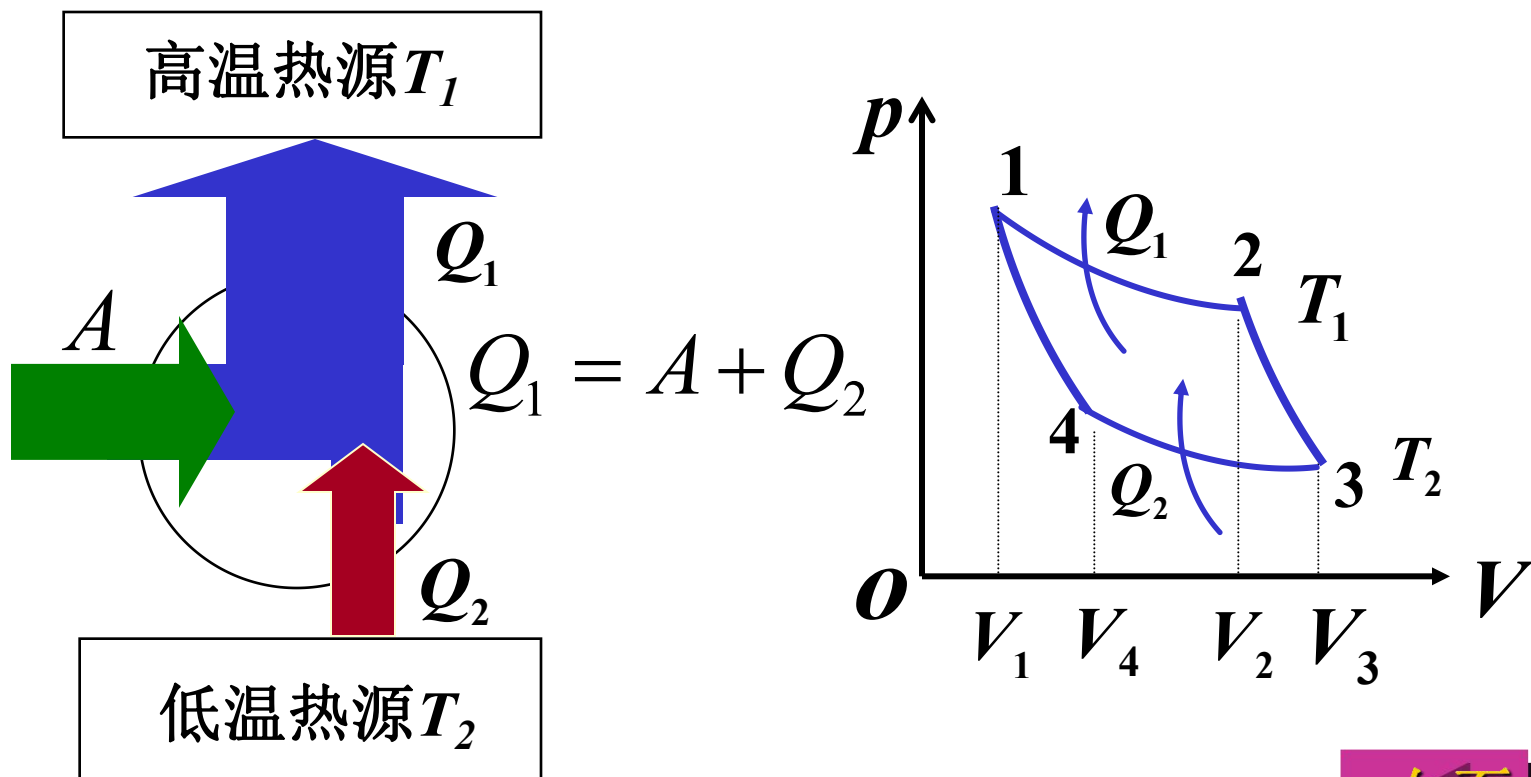
说明：

- (1) 完成一次卡诺循环必须有温度一定的高温  
和低温热源。
- (2) 卡诺循环的效率只与两个热源温度有关。
- (3) 卡诺循环效率总小于1。
- (4) 在相同高温热源和低温热源之间的工作的  
一切热机中，卡诺循环的效率最高。

## 二、卡诺致冷机及其效率

逆向卡诺循环反映了制冷机的工作原理，其能流图如图所示。

工质把从低温热源吸收的热量 $Q_2$ 和外界对它所作的功 $A$  以热量的形式传给高温热源 $Q_1$ 。



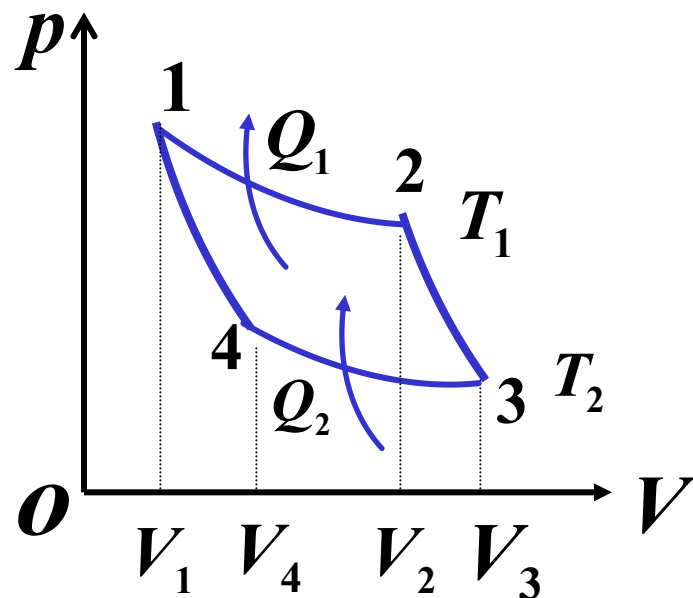
$$Q_2 = \nu R T_2 \ln \frac{V_3}{V_4}$$

$$Q_1 = \nu R T_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$V_3/V_4 = V_2/V_1$$

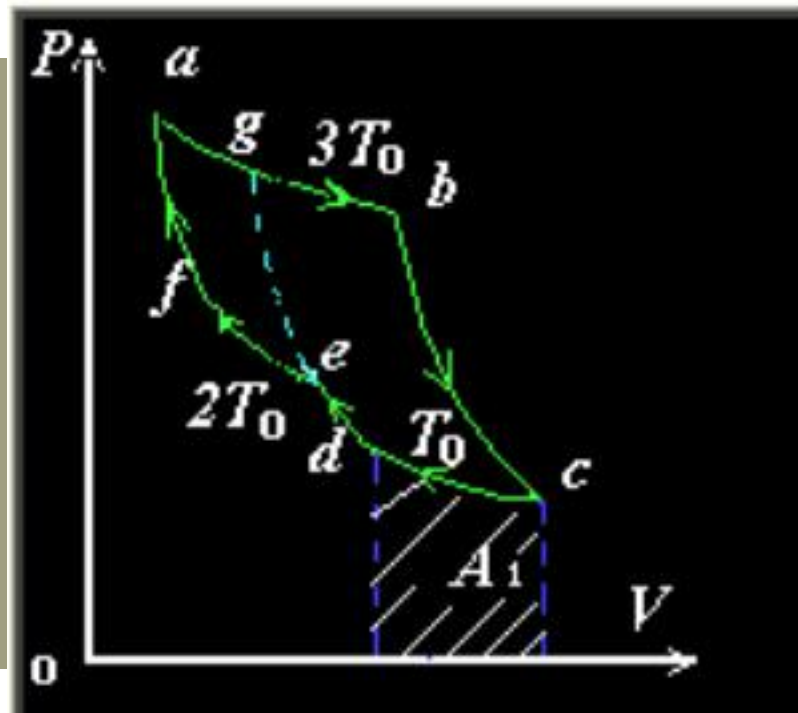
制冷系数

$$e_c = \frac{Q_2}{|A|} = \frac{Q_2}{|Q_1| - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$





如图循环过程  $a b c d e f a$  中,  $a \rightarrow b$ 、 $c \rightarrow d$ 、 $e \rightarrow f$  均为等温过程, 其相应的温度分别为  $3T_0$ ,  $T_0$ ,  $2T_0$  ( $T_0$  为已知)  $b \rightarrow c$   $d \rightarrow e$ ,  $f \rightarrow a$  均为绝热过程, 已知  $c \rightarrow d$  过程曲线下的面积为  $A_1$ , 循环曲线 (绿色) 包围的面积为  $A_2$ , 求循环效率.



分析: 延长  $de$  的绝热线到  $g$ , 分割成两个卡诺循环  $agefa$  和  $gbc deg$ , 设对应的面积分别为  $A_3, A_4$ ; 效率分别为  $\eta_3, \eta_4$ .

$$\eta_c = 1 - \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow \eta_3 = 1 - \frac{2T_0}{3T_0} = \frac{1}{3}, \quad \eta_4 = 1 - \frac{T_0}{3T_0} = \frac{2}{3}$$

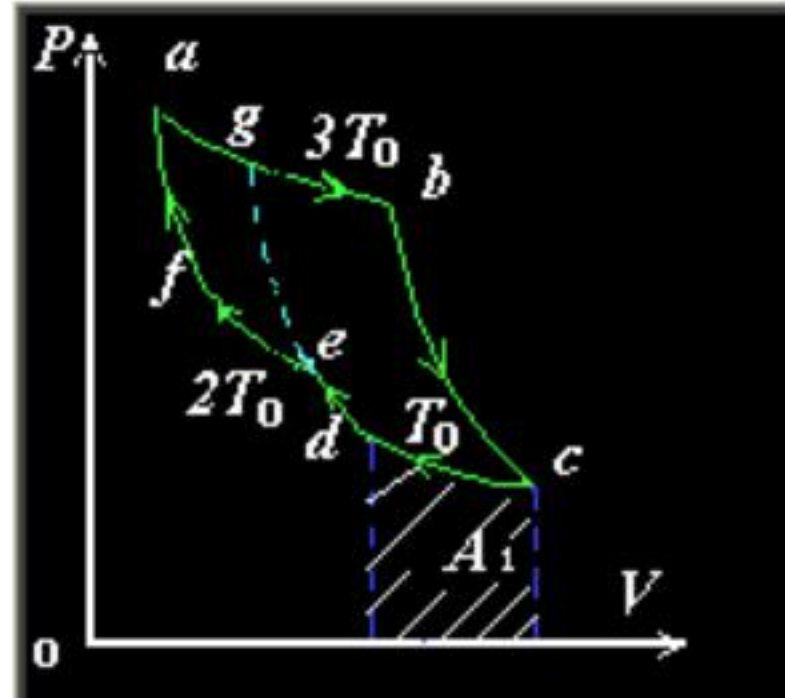
$$\eta = \frac{A_2}{Q_{agb}}$$

$$Q_{agb} = Q_{ag} + Q_{gb}$$

$$\eta_4 = \frac{A_4}{Q_{gb}}$$

$$Q_{gb} = A_1 + A_4$$

$$\Rightarrow Q_{gb} = 3A_1$$



$$\eta_3 = \frac{A_3}{Q_{ag}}$$

$$A_3 = A_2 - A_4$$

$$\Rightarrow Q_{ag} = 3A_2 - 6A_1$$

$$\eta = \frac{A_2}{Q_{agb}} = \frac{A_2}{3A_2 - 3A_1}$$

作业:

**8.29**

**8.30**

**8.32**