



13-5 循环过程、卡诺循环

知识点：重点掌握：

能够分析、计算循环效率和制冷系数

一、循环过程

1、**热力学循环过程**：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；

2、**过程特征**：

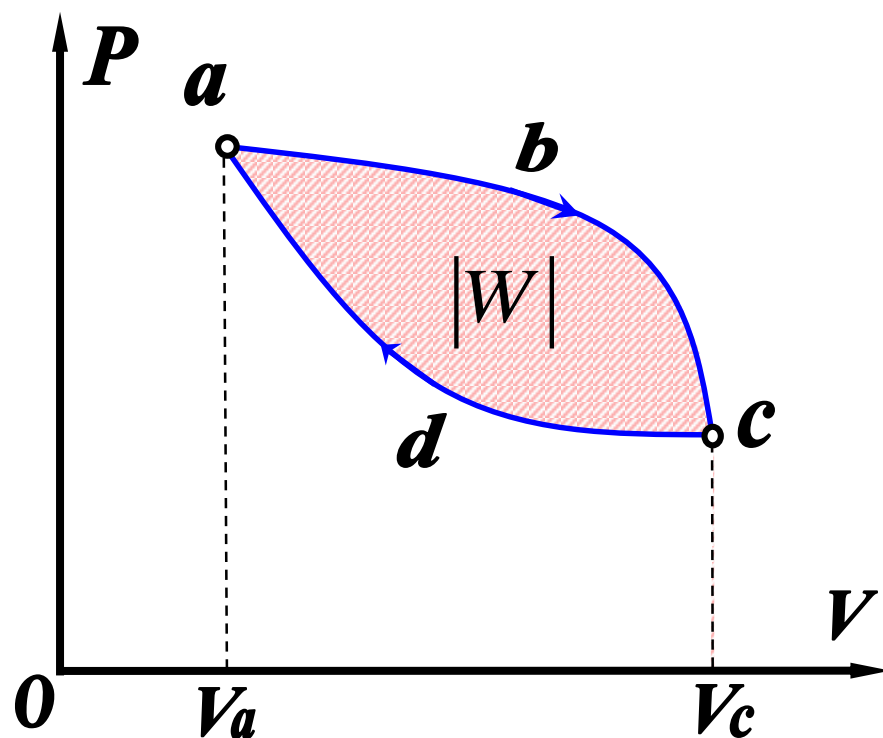
经一个循环系统内能不变，
做功只与吸热、放热有关；

3、**正循环(顺时针) ($p-V$ 图)**
热机的循环过程；

4、**负循环(逆时针) ($p-V$ 图)**
制冷机的循环过程；

5、经历一个循环： $\Delta E = 0$

净功 $W = Q$ 净交换热量



在任何一个循环过程中，系统（或外界）所做的**净功大小**
在数值上等于 **$p-V$ 图上循环曲线**所包围的**面积**

二、热机效率和致冷机的致冷系数

1、热机循环、热机效率

热机：利用工作物质的循环过程把热量转变成功的装置。

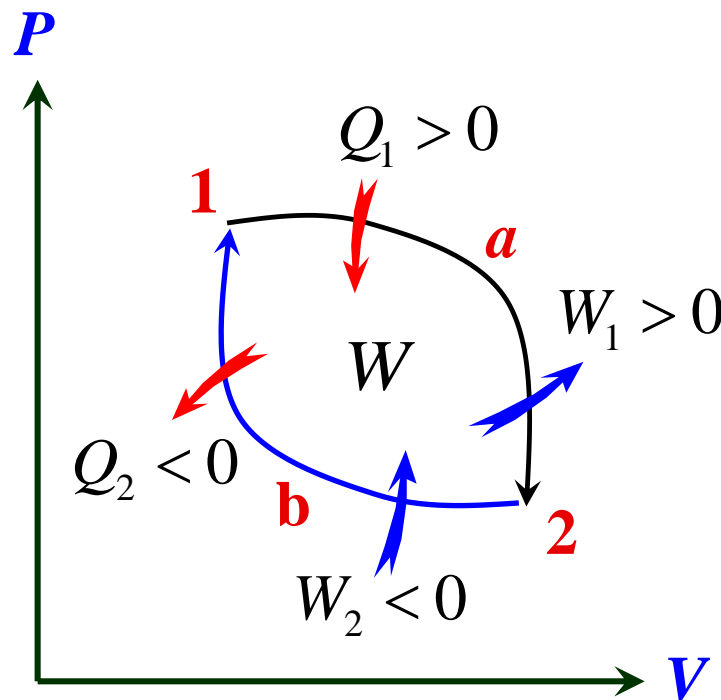
经历一个循环，

W_1 ：系统对外界所做的总功， $W_1 > 0$

W_2 ：外界对系统所做的总功， $W_2 < 0$

Q_1 ：系统从外界吸收的总热量， $Q_1 > 0$

Q_2 ：系统向外界放出的总热量， $Q_2 < 0$



经历一个循环，系统对外界净作的功（净功）为：

$$W = W_1 - |W_2| = \underline{Q_1 - |Q_2|} > 0 \quad \text{净吸热}$$

二、热机效率和致冷机的致冷系数

1、热机循环、热机效率

经历一个循环,

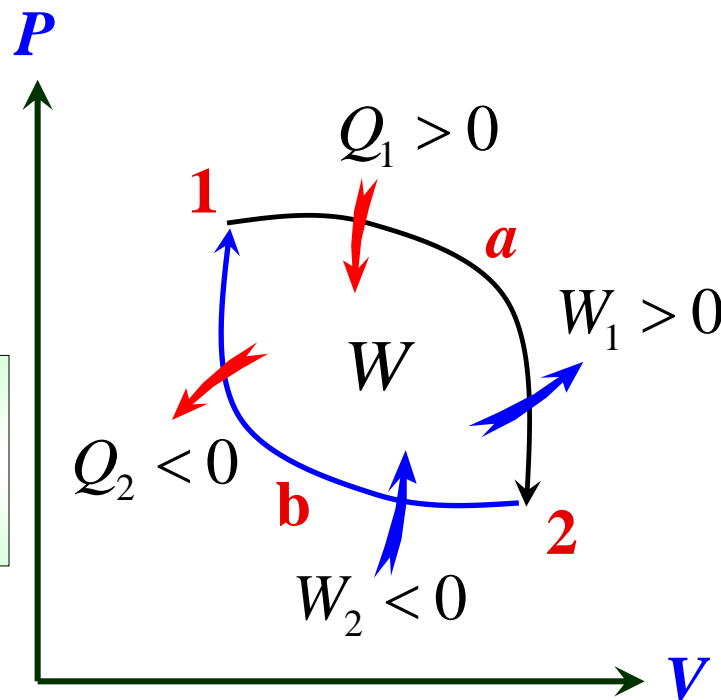
W_1 : 系统对外界所做的总功, $W_1 > 0$

W_2 : 外界对系统所做的总功, $W_2 < 0$

Q_1 : 系统从外界吸收的总热量, $Q_1 > 0$

Q_2 : 系统向外界放出的总热量, $Q_2 < 0$

净功: $W = W_1 - |W_2| = Q_1 - |Q_2|$



热机效率

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

二、热机效率和致冷机的致冷系数

2、致冷循环、致冷系数

致冷机：利用工质的循环过程，使热量从**低温热源**向**高温热源**传递的装置。

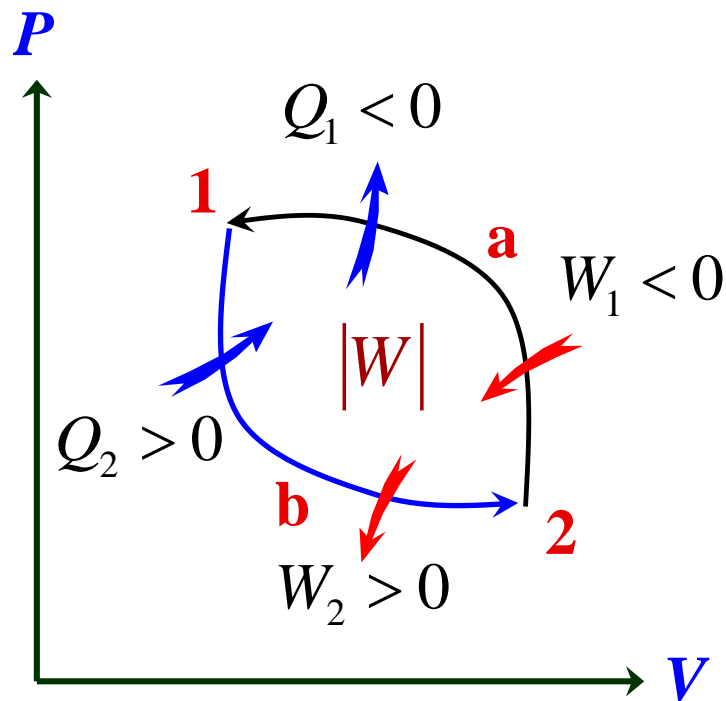
经历一个循环，

W_1 ：外界对系统所做的总功， $W_1 < 0$

W_2 ：系统对外界所做的总功， $W_2 > 0$

Q_1 ：系统向外界放出的总热量， $Q_1 < 0$

Q_2 ：系统从外界吸收的总热量， $Q_2 > 0$



经历一个循环，**外界对系统**净作的功（净功）为：

$$|W| = |W_1| - W_2 = |Q_1| - Q_2 \quad \text{净放热}$$

二、热机效率和致冷机的致冷系数

2、致冷循环、致冷系数

经历一个循环，

W_1 : 外界对系统所做的总功, $W_1 < 0$

W_2 : 系统对外界所做的总功, $W_2 > 0$

Q_1 : 系统向外界放出的总热量, $Q_1 < 0$

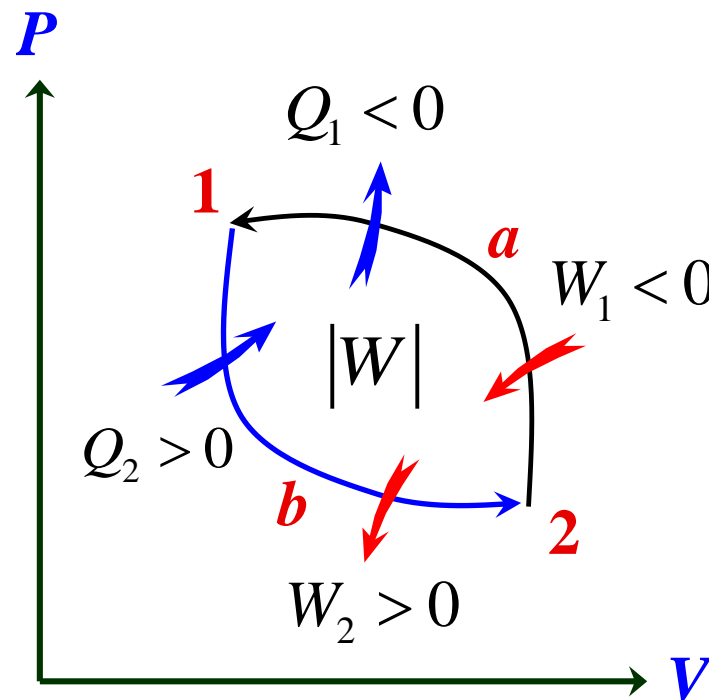
Q_2 : 系统从外界吸收的总热量, $Q_2 > 0$

外界对系统净作的功（净功）为：

$$|W| = |W_1| - W_2 = |Q_1| - Q_2$$

致冷系数

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



二、热机效率和致冷机的致冷系数

1、热机效率

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

经历一个循环,

总吸热 $\longrightarrow Q_1$

总放热 $\longrightarrow Q_2$

2、致冷系数

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

经历一个循环,

总吸热 $\longrightarrow Q_2$

总放热 $\longrightarrow Q_1$

例 6: 1 mol 氧气系统（理想气体、刚性分子）作如图所示的循环，
求：循环效率。

解： $T_c = \frac{2p_0V_0}{R}$, $p_a = 2p_0$, $T_b = \frac{4p_0V_0}{R} = 2T_c$,

等压过程 ab : $Q_{ab} = \nu C_p (T_b - T_a) = 7p_0V_0$

$Q_{ab} > 0$, 吸热

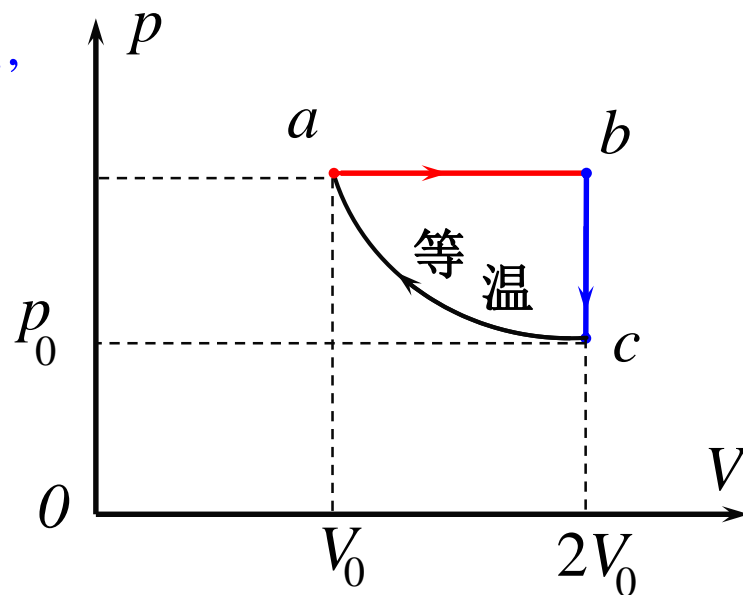
等体过程 bc : $Q_{bc} = \nu C_V (T_c - T_b) = -5p_0V_0$

$Q_{bc} < 0$, 放热

等温过程 ca : $Q_{ca} = W_{ca} = \nu RT_c \ln \frac{V_a}{V_c} = -(2\ln 2)p_0V_0$

$Q_{ca} < 0$, 放热

$$Q_1 = Q_{ab}, \quad Q_2 = Q_{bc} + Q_{ca}, \quad \eta = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{5 + 2\ln 2}{7} = 8.8\%$$



例 7: $3.2 \times 10^{-2} \text{ kg}$ 氧气（理想气体、刚性分子）作如图所示的循环，
 其中，AB和CD都为等温过程， $T_1=300\text{K}$ ， $T_2=200\text{K}$ ， $V_2=2V_1$ ，
求： 1) 各分过程气体系统与外界交换的热量； 2) 循环效率。

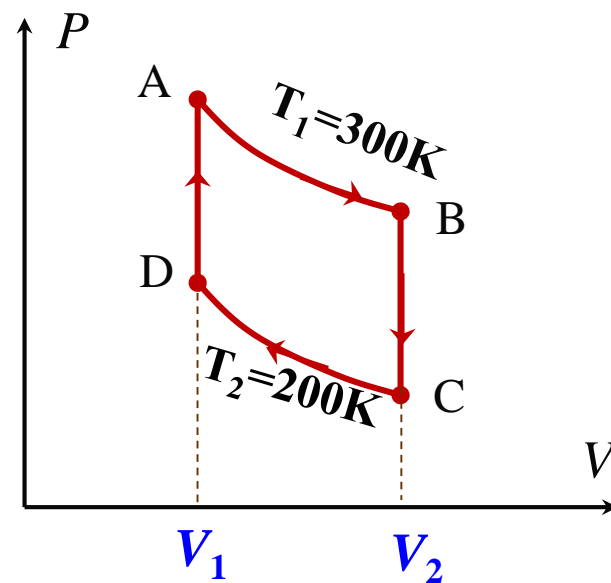
解： 1)

$$Q_{AB} = W_{AB} = \nu RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = (300 \ln 2)R > 0, \quad \text{吸热}$$

$$Q_{BC} = \nu C_V (T_C - T_B) = -250R < 0, \quad \text{放热}$$

$$Q_{CD} = W_{CD} = \nu RT_2 \ln \frac{V_1}{V_2} = -(200 \ln 2)R < 0, \quad \text{放热}$$

$$Q_{DA} = \nu C_V (T_A - T_D) = 250R > 0, \quad \text{吸热}$$



2)

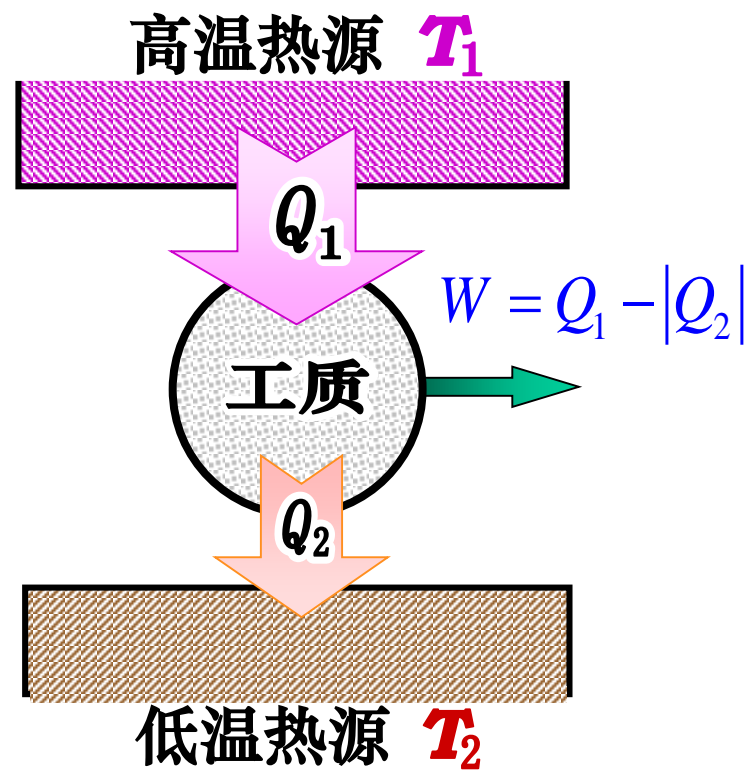
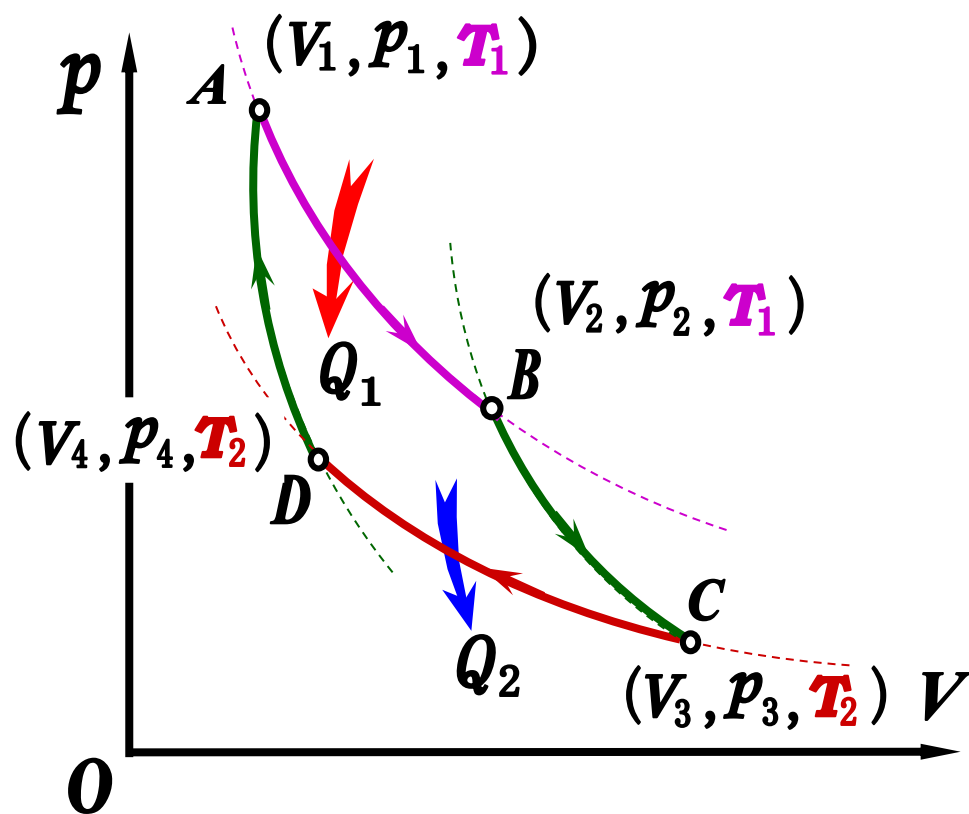
$$Q_1 = Q_{AB} + Q_{DA} = (300 \ln 2 + 250)R$$

$$Q_2 = Q_{BC} + Q_{CD} = -(250 + 200 \ln 2)R$$

$$\eta = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1} = 15.1\%$$

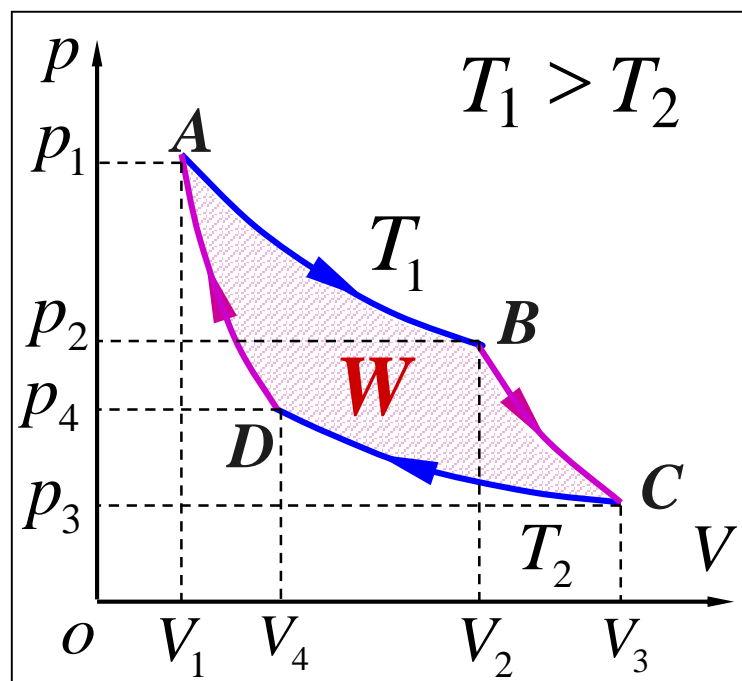
三、卡诺循环

卡诺循环是由 { 两个准静态等温过程
两个准静态绝热过程 } 构成的一种理想循环



三、卡诺循环

1、卡诺热机的效率



$$Q_{AB} = W_{AB} = \nu RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} > 0, \text{ 吸热}$$

$$Q_{BC} = 0$$

$$Q_{CD} = W_{CD} = \nu RT_2 \ln \frac{V_4}{V_3} < 0, \text{ 放热}$$

$$Q_{DA} = 0$$

$$Q_1 = Q_{AB}, \quad Q_2 = Q_{CD}$$

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

$$T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1}, \quad \Rightarrow \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$$

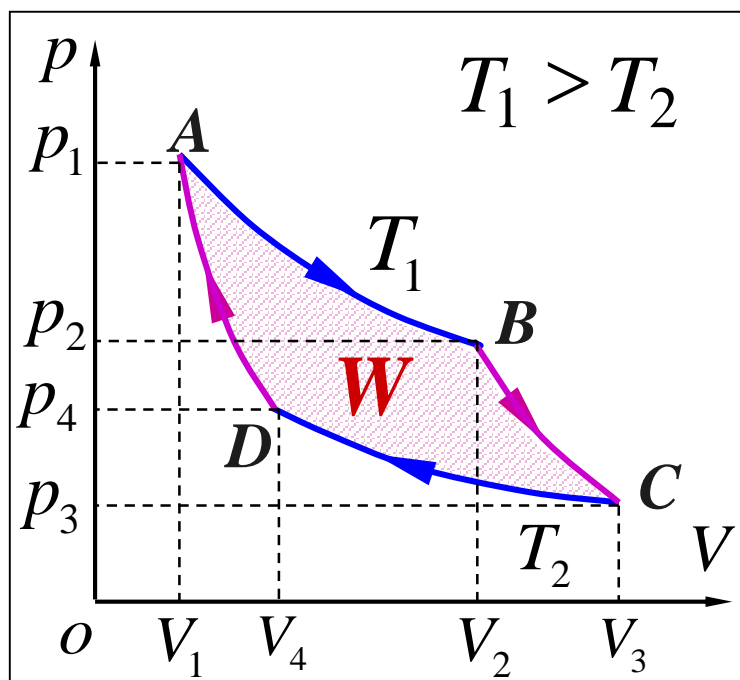
$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_4^{\gamma-1},$$

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

三、卡诺循环

1、卡诺热机的效率

◆卡诺热机效率

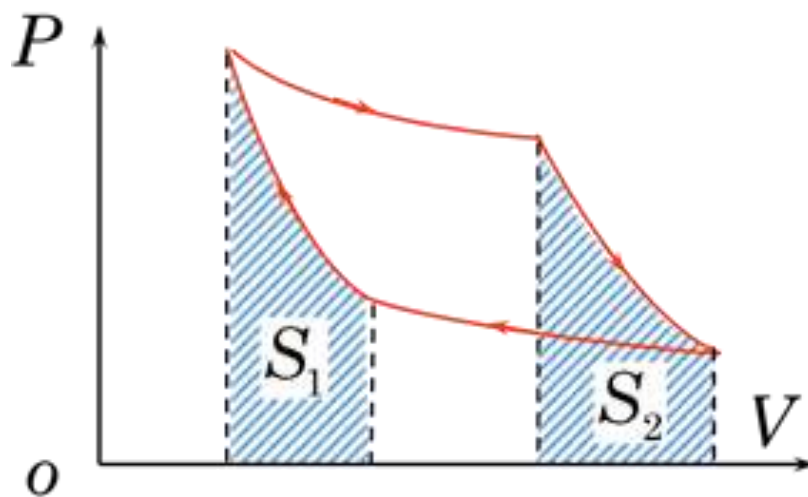


$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

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。

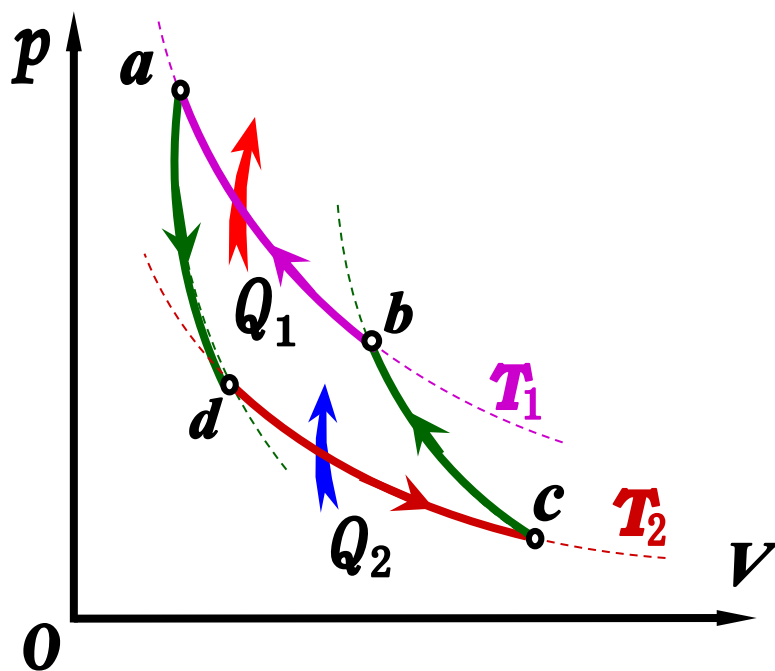
理想气体卡诺循环过程的两条绝热线下的面积大小
(图中阴影部分) 分别为 S_1 和 S_2 , 二者的大小关系为?

$$S_1 = S_2$$

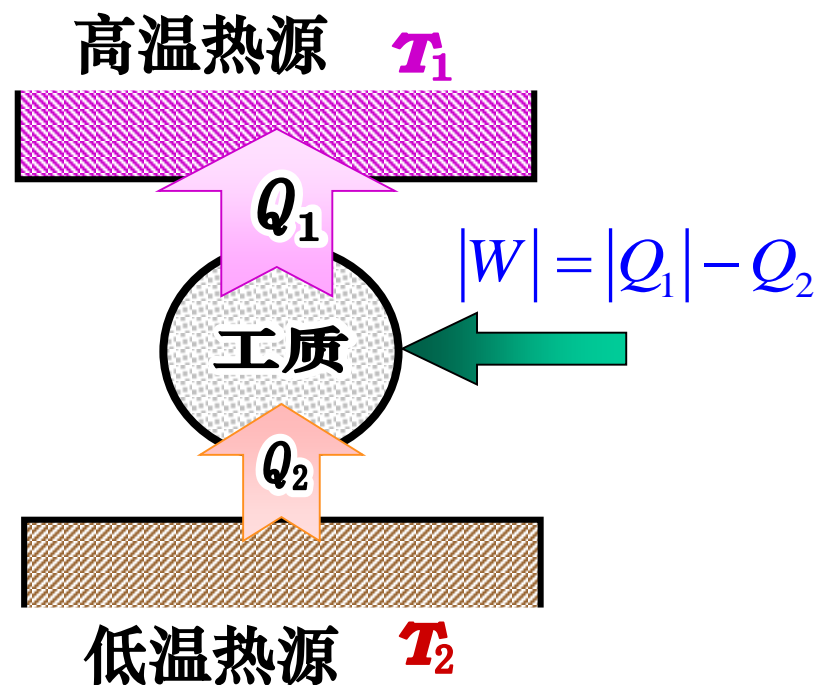


三、卡诺循环

2、卡诺致冷机的致冷系数



卡诺致冷机致冷系数



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

例 8: 1 mol 氦气系统（理想气体、刚性分子）作如图所示的循环，

其中， $p_2=2p_1$ ， $V_4=2V_1$ ，

求： 1) 各分过程气体系统与外界交换的热量； 2) 循环效率。

解： 1) $T_1 = \frac{p_1 V_1}{R}$ ， $T_2 = 2T_1$ ， $T_3 = 4T_1$ ， $T_4 = 2T_1$ ，

$$Q_{12} = \nu C_V (T_2 - T_1) = C_V T_1 = \frac{3}{2} RT_1 > 0, \quad \text{吸热}$$

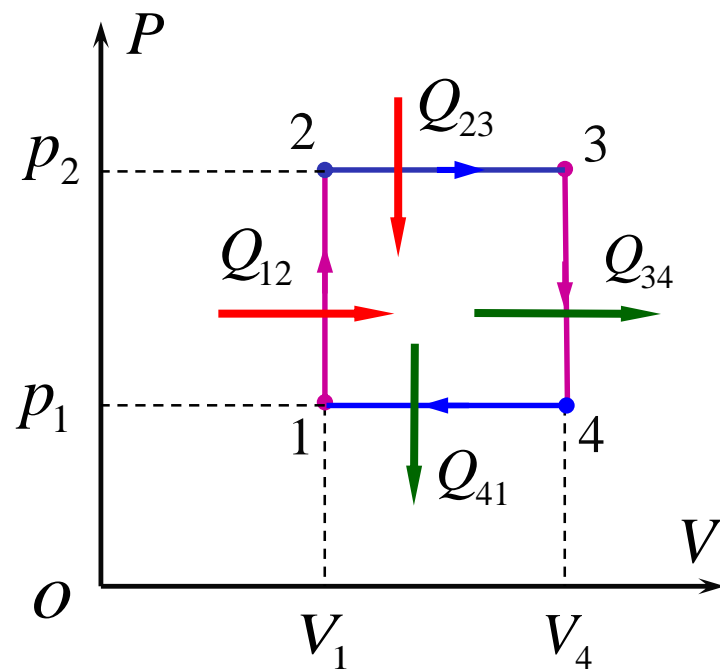
$$Q_{23} = \nu C_P (T_3 - T_2) = 2C_P T_1 = 5RT_1 > 0, \quad \text{吸热}$$

$$Q_{34} = \nu C_V (T_4 - T_3) = -2C_V T_1 = -3RT_1 < 0, \quad \text{放热}$$

$$Q_{41} = \nu C_P (T_1 - T_4) = -C_P T_1 = -\frac{5}{2} RT_1 < 0, \quad \text{放热}$$

$$2) \quad Q_1 = Q_{12} + Q_{23} = \frac{13}{2} RT_1$$

$$Q_2 = Q_{34} + Q_{41} = -\frac{11}{2} RT_1$$



$$\eta = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{11}{13} = 15.4\%$$

例 9: 奥托机的循环, 如图所示的循环, 其中, ab 、 cd 为绝热过程, bc 、 da 为等体过程, 已知: V_a , V_b , γ

求: 循环效率。

解: 1) $Q_{ab} = 0$

$$Q_{bc} = \nu C_V (T_c - T_b) > 0, \text{ 吸热}$$

$$Q_{cd} = 0$$

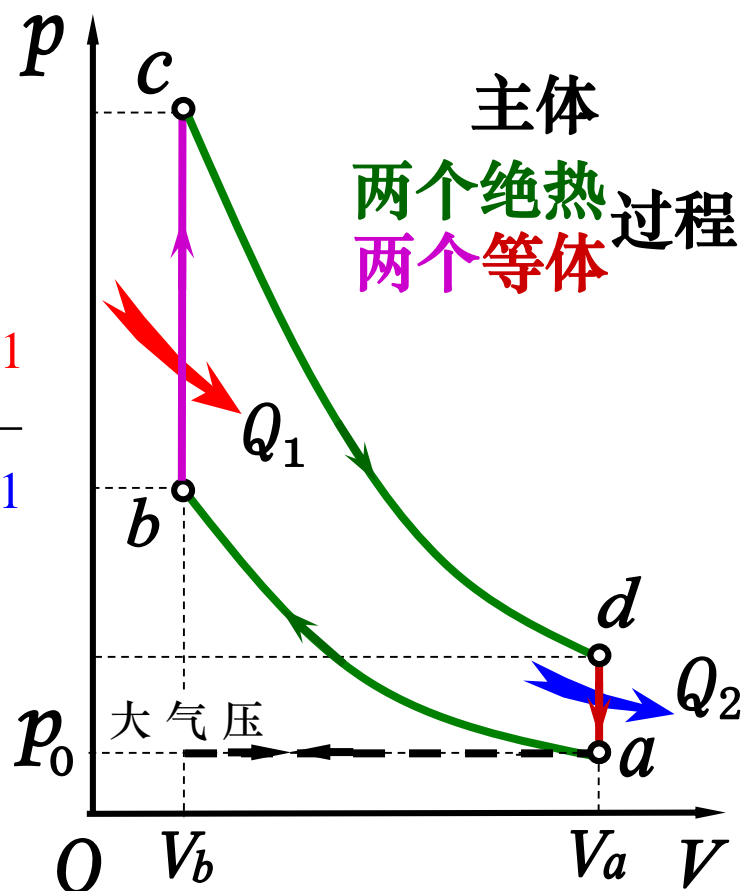
$$Q_{da} = \nu C_V (T_a - T_d) < 0, \text{ 放热}$$

$$2) \eta = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{T_d - T_a}{T_c - T_b} = 1 - \frac{T_a}{T_b} \cdot \frac{\frac{T_d}{T_a} - 1}{\frac{T_c}{T_b} - 1}$$

$$T_b V_b^{\gamma-1} = T_a V_a^{\gamma-1}, T_c V_c^{\gamma-1} = T_d V_d^{\gamma-1}$$

$$T_c V_b^{\gamma-1} = T_d V_a^{\gamma-1}$$

$$\frac{T_c}{T_b} = \frac{T_d}{T_a} \Rightarrow \eta = 1 - \frac{T_a}{T_b} = 1 - \left(\frac{V_b}{V_a} \right)^{\gamma-1}$$





13-6 热力学第二定律的表述、卡诺定理

定性掌握、理解

知识点：理解：

- 1、热力学第二定律开尔文表述和克劳修斯表述
- 2、热力学第二定律的实质
- 3、卡诺定理

一、热力学第二定律 Second Law of Thermodynamics

1、开尔文（1851）表述：

不可能制成一种循环动作的热机，只从单一热源吸取热量，使之全部变成有用的功而不产生其他任何影响。

$\eta=100\%$ 的热机不可能制成。

第二类永动机不可能制成！

2、克劳修斯（1850）表述：

热量不可能自动地从低温物体传到高温物体

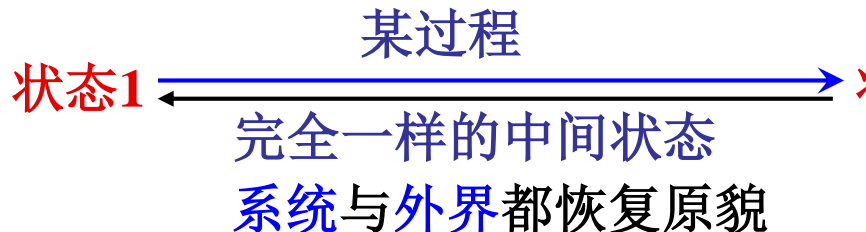
一、热力学第二定律 Second Law of Thermodynamics



注意

- 1) 热力学第二定律是大量实验和经验的总结;
- 2) 热力学第二定律开尔文表述与克劳修斯表述具有等效性;
- 3) 热力学第二定律有多种表述,
每一种表述都反映了自然界过程进行的方向性。

二、可逆过程与不可逆过程

1、可逆过程：  状态1 $\xrightleftharpoons[\text{完全一样的中间状态}]{\text{某过程}}$ 状态2
系统与外界都恢复原貌

无耗散（摩擦、辐射...）的准静态过程是可逆过程
循环过程是可逆的热机、致冷机称为可逆机

2、不可逆过程

如果系统不能回复到原状态，或者虽然能回复到初态，但外界不能恢复原状，那么此过程称为不可逆过程。

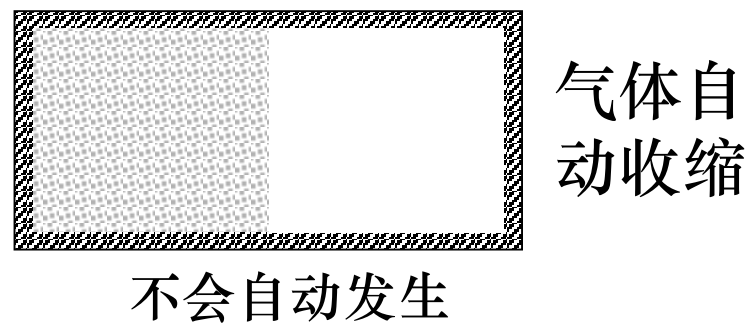
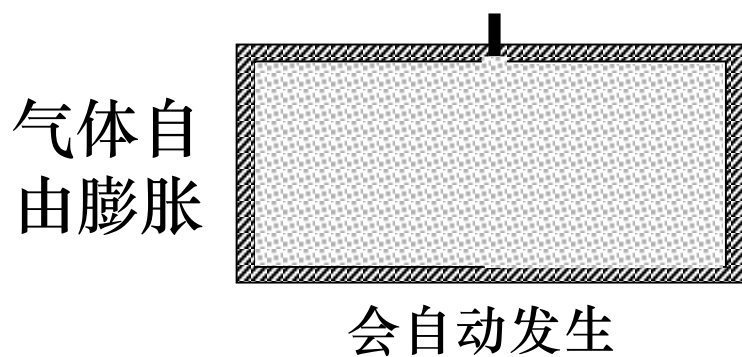
由于摩擦等耗散因素的实际存在，不可能使系统和外界完全复原。因此有关热现象的实际宏观过程和非准静态过程都是不可逆过程。

自然界中，一切与热现象有关的实际宏观过程都是不可逆的，所谓可逆过程只是一种理想过程。

二、可逆过程与不可逆过程

3、自然过程的不可逆性(热力学第二定律的实质)

- 例：**
- 1) 热功转换是不可逆的。
 - 2) 热传递是不可逆的。



大量事实表明：一切与热现象有关的实际宏观过程都是不可逆的，热力学第二定律的实质在于揭示了自然过程的不可逆性。

三、卡诺定理 Carnot Theorem

1、在相同高温热源(T_1)、低温热源(T_2)间工作的一切可逆机效率相等，与工作物质无关。

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

2、在相同高温热源(T_1)、低温热源(T_2)间工作的一切不可逆机效率不可能大于可逆机的效率。

$$\eta_{\text{不可逆}} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1} < 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

$$\eta = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1} \leq 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

“=”——可逆机
“<”——不可逆机

例 10: 某热机在一个**高温热源**和一个**低温热源**之间工作。经历一个循环，该热机从高温热源**吸收热量**为 Q_1 ，并把热量 Q_2 传给**低温热源**。

高、低温热源的温度分别为 $T_1 = 2000\text{K}$ 和 $T_2 = 300\text{K}$ ，

判断: 在下列条件下，热机是可逆的、不可逆的、还是不可能存在的。

1) $Q_1 = 1000\text{J}$ ，净功 $W = 900\text{J}$ ；2) $Q_1 = 2000\text{J}$ ， $Q_2 = -300\text{J}$ ；3) 净功 $W = 1500\text{J}$ ， $Q_2 = -500\text{J}$

解: 此热机效率的理想值（最大值）： $\eta_{\text{可逆}} = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{300}{2000} = \frac{17}{20} = 85\%$

$$1) \quad \eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{900}{1000} = 90\% > \eta_{\text{max}} = 85\% \quad \text{不可能存在}$$

$$2) \quad \eta = \frac{W}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{300}{2000} = 85\% = \eta_{\text{max}} \quad \text{可逆}$$

$$3) \quad \eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{W}{W + |Q_2|} = \frac{1500}{1500 + 500} = 75\% < \eta_{\text{max}} \quad \text{不可逆}$$