

## 第八章

# 热力学

# ⬇ CONTENTS ⬇

- 热学的研究对象和研究方法
- 平衡态 理想气体状态方程
- 功 热量 内能 热力学第一定律
- 准静态过程中功和热量的计算
- 理想气体的内能和  $C_v$   $C_p$
- 热力学第一定律对理想气体在典型准静态过程中的应用

## ■ 绝热过程

- 循环过程
- 热力学第二定律
- 可逆过程与不可逆过程
- 卡诺循环 卡诺定理

## § 8.7 绝热过程

在绝热过程中，理想气体与外界无热量传递。

1. 特征  $dQ = 0$

2. 过程方程

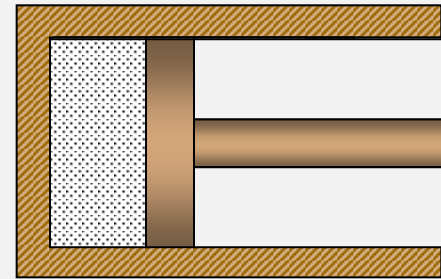
由热力学第一定律

$$dQ = dE + dA$$

得  $dE + dA = 0$

内能增量  $dE = \nu C_V dT$

气体做功  $dA = p dV$



绝热的气缸壁  
和活塞

$$\therefore \nu C_V dT + p dV = 0 \quad (1)$$

由  $pV = \nu RT$  两边取微分, 得

$$p dV + V dp = \nu R dT \quad (2)$$

由 (1), (2) 两式, 得

$$C_V p dV + C_V V dp = -R p dV$$

$$(C_V + R) p dV = -C_V V dp$$

由  $R = C_p - C_v$  ;  $\gamma = C_p / C_v$

得到 
$$\gamma \frac{dV}{V} = -\frac{dp}{p}$$

两边积分，得  $\gamma \ln V + \ln p = C$

即  $pV^\gamma = \text{常数}$

由  $pV = \nu RT$  分别消去  $P$  和  $V$ , 得

$$TV^{\gamma-1} = \text{常数}$$

$$p^{\gamma-1}T^{-\gamma} = \text{常数}$$

绝热过程方程（泊松公式）

$$pV^{\gamma} = C_1$$

$$V^{\gamma-1}T = C_2$$

$$p^{\gamma-1}T^{-\gamma} = C_3$$

### 3. 过程曲线

在  $P-V$  图上，每一个绝热过程对应一条曲线，称为绝热线。

4. 热量  $dQ = 0$

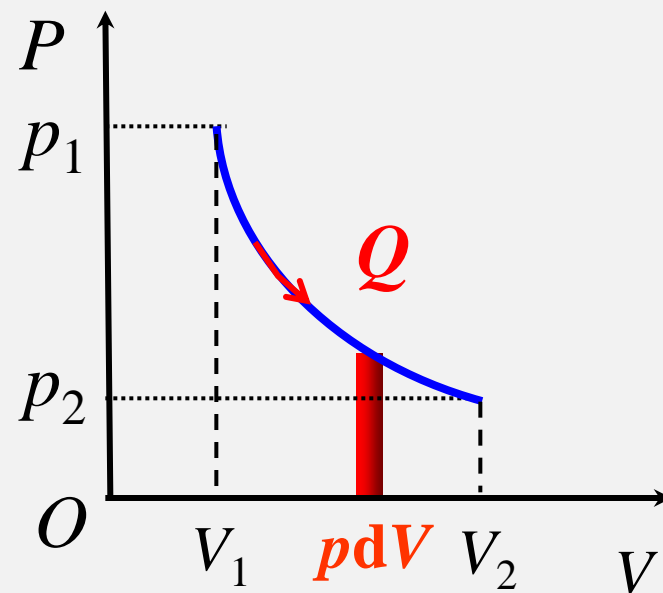
5. 内能变化

$$dE = \nu C_V dT$$

6. 功

(1) 由温度变化计算

$$dA = -dE = -\nu C_V dT$$



$$A = \int_{T_1}^{T_2} -dE = -\nu C_V (T_2 - T_1)$$

$$\therefore A = -\nu C_V \Delta T$$

## (2) 用功的定义计算

$$\because pV^\gamma = C_1$$

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{C_1}{V^\gamma} dV = \frac{C_1}{1-\gamma} (V_2^{1-\gamma} - V_1^{1-\gamma})$$

$$\therefore A = \frac{p_1 V_1 - p_2 V_2}{\gamma - 1}$$



从两个角度计算，效果相同

$$A = \frac{p_1 V_1 - p_2 V_2}{\gamma - 1} \quad \text{由 } \gamma = C_p / C_v, PV = \nu RT \text{ 得}$$

$$A = \frac{1}{1 - C_p / C_v} \nu R(T_2 - T_1) = \frac{C_v}{C_v - C_p} \nu R \Delta T = -\nu C_v \Delta T$$

$$\therefore A = \frac{p_1 V_1 - p_2 V_2}{\gamma - 1} = -\nu C_v (T_2 - T_1)$$

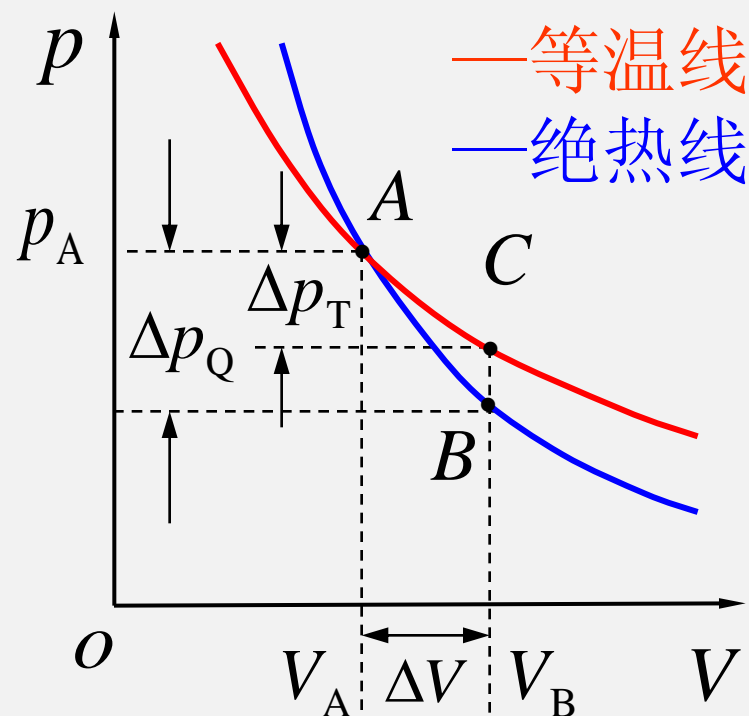
# 绝热线和等温线的区别

## 绝热过程曲线在A点的斜率

$$pV^\gamma = C$$

$$\gamma pV^{\gamma-1}dV + V^\gamma dp = 0$$

$$\left(\frac{dp}{dV}\right)_Q = -\gamma \frac{p_A}{V_A}$$

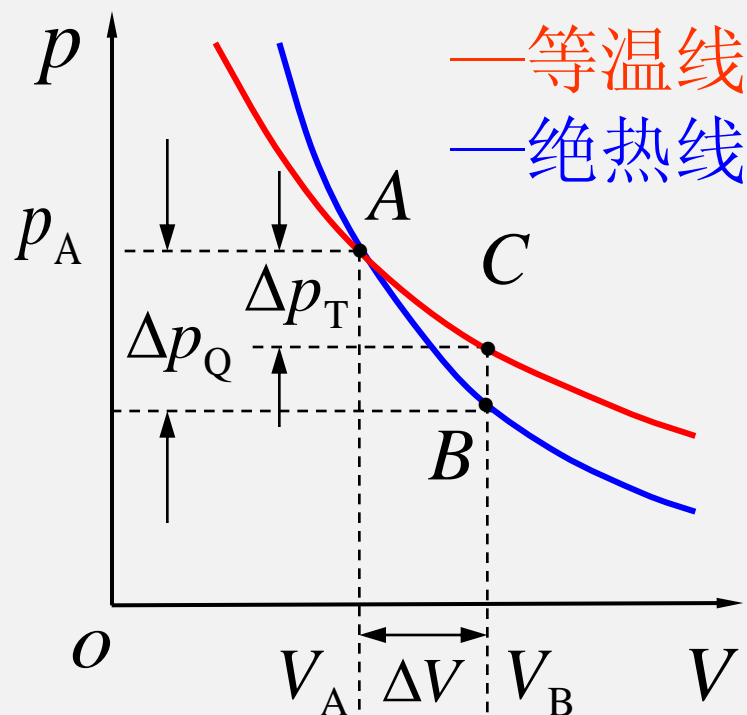


## 等温过程曲线在A点的斜率

$$pV = C$$

$$pdV + Vdp = 0$$

$$\left(\frac{dp}{dV}\right)_T = -\frac{p_A}{V_A}$$



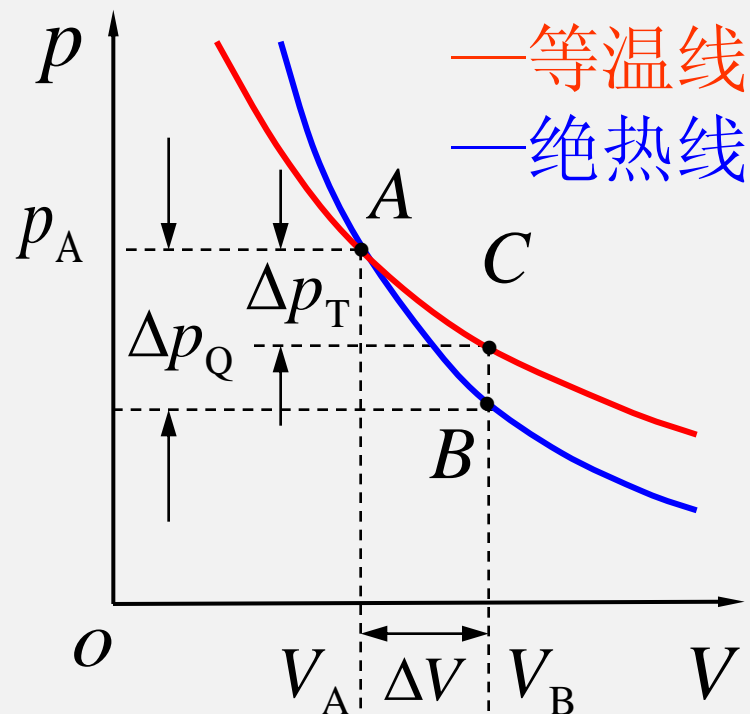
$\gamma > 1$ ，故绝热线的斜率大于等温线的斜率。

绝热线比等温线陡。

$$\left| \left( \frac{dp}{dV} \right)_Q \right| > \left| \left( \frac{dp}{dV} \right)_T \right|$$

气体从交点A 的状态膨胀同样的体积 $\Delta V$ 时，

$$|\Delta p_Q| > |\Delta p_T|$$



**等温过程** 压强的降低是由于体积膨胀而引起。

**绝热过程** 压强的降低是由于体积的膨胀和气体温度的降低共同引起的。

**例1** 狄塞尔内燃机汽缸中的空气在压缩前温度为320K，压强为 $1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ 。假定空气突然被压缩到原来体积的  $1/16.9$ ，试求压缩终了时气缸内空气的温度和压强。（设空气的 $\gamma = 1.4$ ）

**解** 把空气看成理想气体，已知初状态的温度 $T_1 = 320 \text{K}$ ，压强 $p_1 = 1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ 。由于压缩很快，可看成绝热过程，则由式 $TV^{\gamma-1} = C$  可得到终了状态的温度为

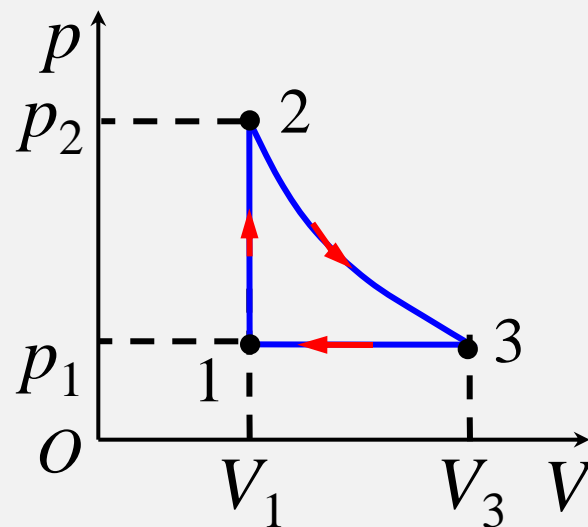
$$T_2 = T_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} = 320 \times (16.9)^{1.4-1} = 992 \text{K}$$

终了时的压强为

$$\begin{aligned}P_2 &= P_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma \\&= 1.013 \times 10^5 \times (16.9)^{1.4} \\&= 45.1 \times 10^5 \text{ pa}\end{aligned}$$

**例2** 一热机用 $5.8 \times 10^{-3} \text{Kg}$ 的空气作为工质，从初态1 ( $p_1=1.013 \times 10^5 \text{pa}$ ,  $T_1=300\text{K}$ ) 等体加热到状态2 ( $T_2=900\text{K}$ )，再经绝热膨胀到状态3 ( $p_3=p_1$ )，最后经等压过程又回到1，如图。假定空气可视为理想气体，且 $\gamma=1.4$ ， $C_V=20.8\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ， $C_p=29.09\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ，摩尔质量 $M=29 \times 10^{-3} \text{Kg}\cdot\text{mol}$ 。

**试求**各过程中气体所做的功及从外界吸收的热量。



**解** 设1、2、3三个状态的参量分别为  
 $(p_1, V_1, T_1)$  、  $(p_2, V_2, T_2)$  、  $(p_3, V_3, T_3)$

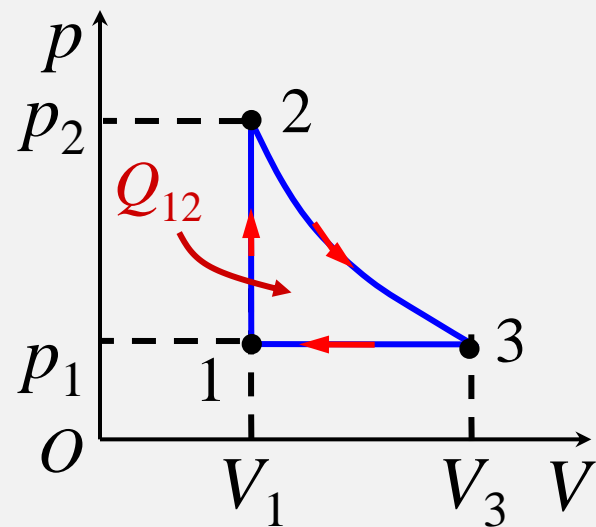
**1→2 等体过程**

$$A_{12} = 0$$

$$Q_{12} = \frac{m}{M} C_V (T_2 - T_1)$$

$$= \frac{5.8 \times 10^{-3}}{29 \times 10^{-3}} \times 20.8 \times (900 - 300)$$

$$= 2493 \text{ J}$$





## 2→3 绝热过程

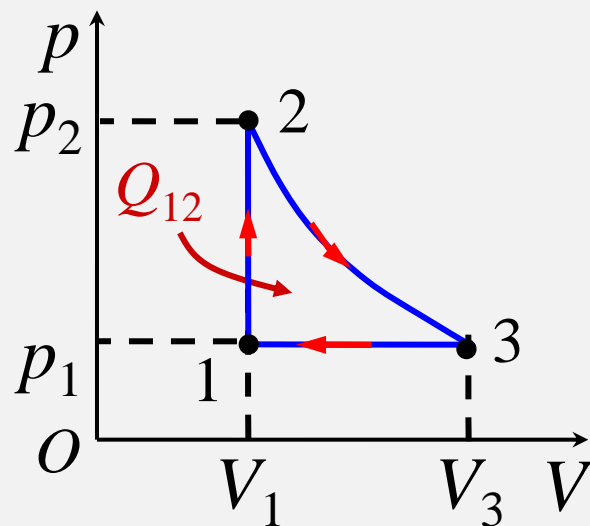
$$Q_{23} = 0$$

$$A_{23} = \frac{p_2 V_2 - p_3 V_3}{\gamma - 1}$$

$$p_2 = 3p_1 \quad V_2 = V_1 \quad p_3 = p_1$$

$$\because p_1 V_1 = \frac{m}{M} RT_1$$

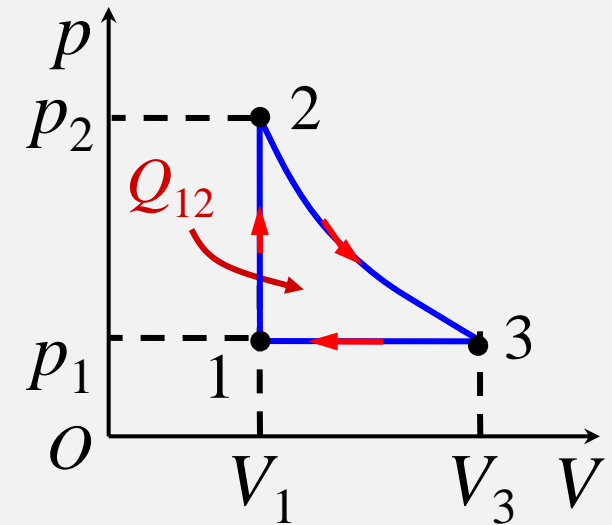
$$\begin{aligned} \therefore V_1 = V_2 &= \frac{m}{M} \frac{RT_1}{p_1} = \frac{5.8 \times 10^{-3}}{29 \times 10^{-3}} \frac{8.31 \times 300}{1.013 \times 10^5} \\ &= 4.92 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \end{aligned}$$



绝热方程:

$$p_2 V_2^\gamma = p_3 V_3^\gamma$$

$$\Rightarrow V_3 = 10.78 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$



$$A_{23} = \frac{p_2 V_2 - p_3 V_3}{\gamma - 1}$$

$$= \frac{3.04 \times 10^5 \times 4.92 \times 10^{-3} - 1.013 \times 10^5 \times 10.78 \times 10^{-3}}{1.4 - 1}$$

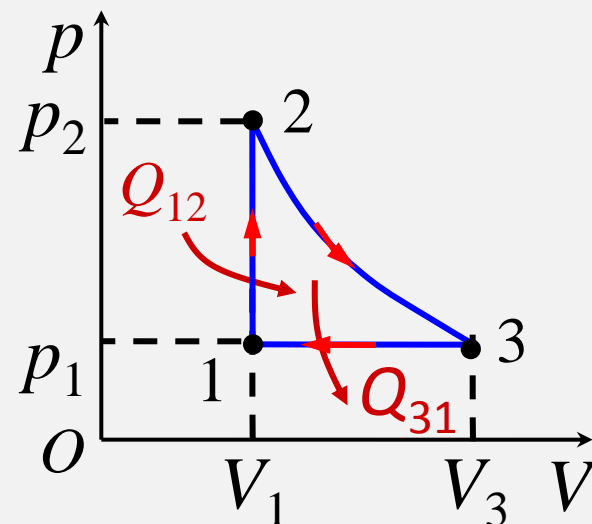
$$= 1008 \text{ J}$$

### 3→1 等压过程

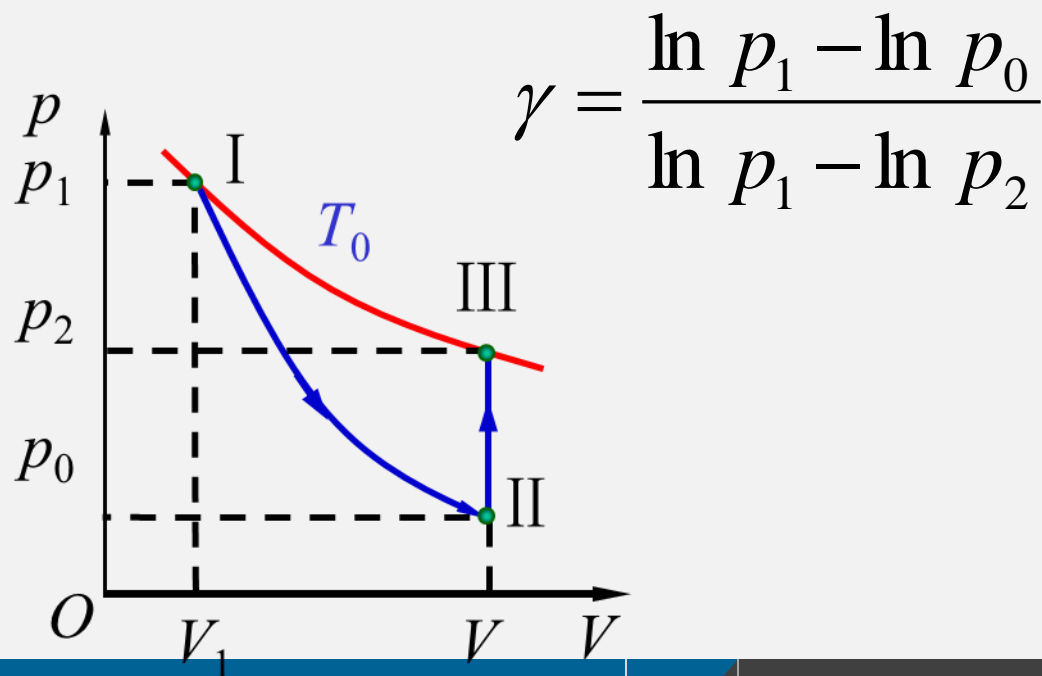
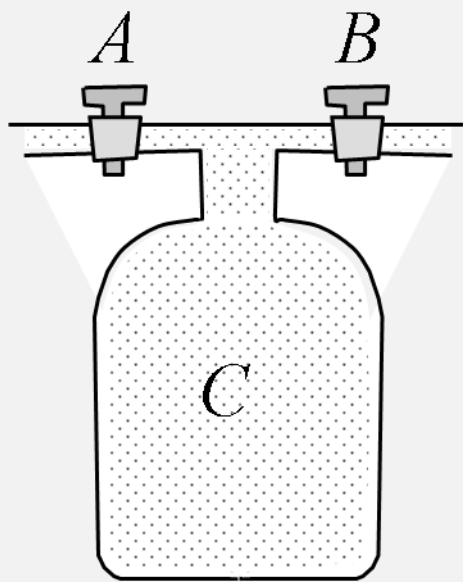
$$A_{31} = p_1(V_1 - V_3) = 1.013 \times 10^5 (4.92 \times 10^{-3} - 10.78 \times 10^{-3})$$
$$= -594 \text{ J}$$

$$T_3 = T_1 \frac{V_3}{V_1} = 657.31 \text{ K}$$

$$Q_{31} = \frac{m}{M} C_p (T_1 - T_3)$$
$$= \frac{5.8 \times 10^{-3}}{29 \times 10^{-3}} \times 29.09 \times (300 - 657.31)$$
$$= -2079 \text{ J}$$



**例3** 测定空气比热容比 $\gamma=C_p/C_v$ 的实验装置如图所示。先关闭活塞B，将空气由活塞A压入大瓶C中，并使瓶中气体的初温与室温相同，初压 $p_1$ 略高于大气压 $p_0$ ；关闭活塞A，然后打开活塞B，使气体迅速膨胀且压强降为 $p_0$ ，温度降为 $T$ ，关闭B后，瓶内气体温度又上升为 $T_0$ ，压强上升为 $p_2$ 。打开B后的状态变化过程如图所示。试证明空气的 $\gamma$ 可以从下是算出：

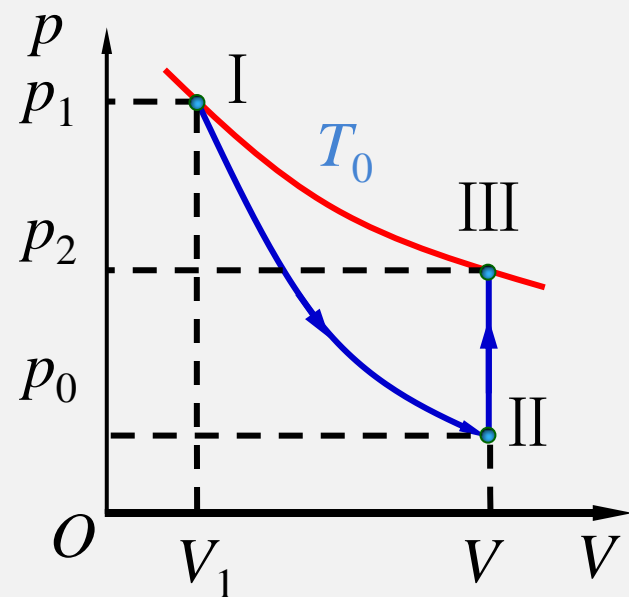


**解** 开始时瓶中气体的压强  $p_1$  略高于大气压  $p_0$ ，故打开活塞  $B$  到迅速关闭这一短时间内，已有一部分气体冲出瓶外。

**选留在瓶内的气体为研究对象，视为理想气体。**

**$B$  打开前：** 所研究气体的体积为  $V_1$ ，只是容器体积  $V$  的一部分，所处状态 I 为  $(p_1, V_1, T_0)$

**$B$  打开后：** 所研究气体的体积由  $V_1$  膨胀到  $V$ ，处于状态 II  $(p_0, V, T)$ 。然后关闭  $B$ 。该过程为**绝热过程**。



**II  $\rightarrow$  III 等体吸热过程：** 状态 III  $(p_2, V, T_0)$

I  $\rightarrow$  II 绝热过程:  $p_1^{\gamma-1} T_0^{-\gamma} = p_0^{\gamma-1} T^{-\gamma}$

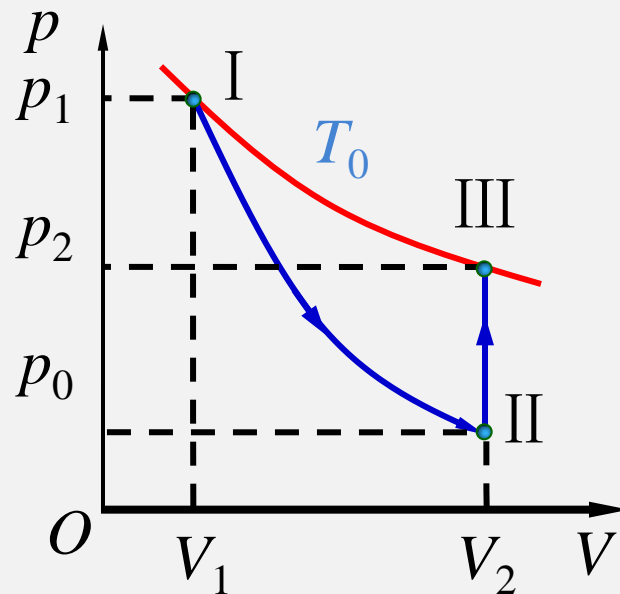
II  $\rightarrow$  III 等体过程:  $p_0 T^{-1} = p_2 T_0^{-1}$

由上两式得  $\left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{p_2}{p_0}\right)^{\gamma}$

两边取对数, 得

$$(\gamma - 1) \ln \frac{p_1}{p_0} = \gamma \ln \frac{p_2}{p_0}$$

$$\therefore \gamma = \frac{\ln p_1 - \ln p_0}{\ln p_1 - \ln p_2}$$



# ⬇ CONTENTS ⬇

- 热学的研究对象和研究方法
- 平衡态 理想气体状态方程
- 功 热量 内能 热力学第一定律
- 准静态过程中功和热量的计算
- 理想气体的内能和  $C_v$   $C_p$
- 热力学第一定律对理想气体在典型准静态过程中的应用
- 绝热过程
- **循环过程**
  - 热力学第二定律
  - 可逆过程与不可逆过程
  - 卡诺循环 卡诺定理

## § 8.8 循环过程

### 一、循环过程

物质系统的状态经过一系列变化后，又回到原来状态的过程叫热力学循环过程。

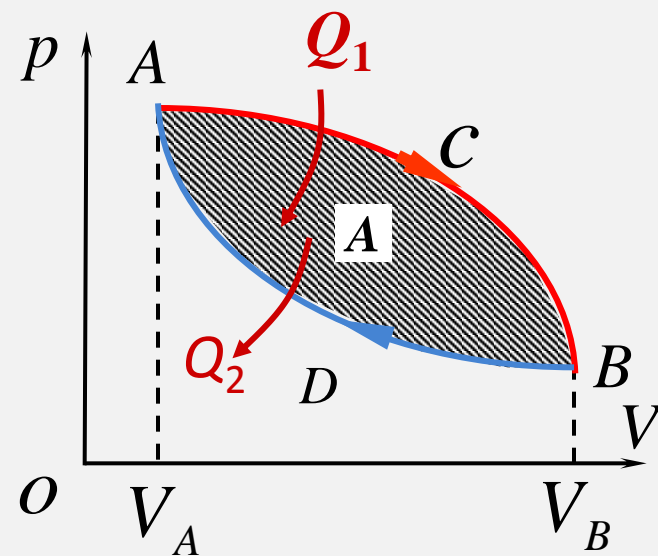
1.特征  $\Delta E = 0$

2.热力学第一定律  $Q = A$

3.净功  $A = Q_1 - Q_2$  (面积)

$Q_1$  总吸热

$Q_2$  总放热 (取绝对值)





**正循环** 沿顺时针方向进行的循环。

**逆循环** 沿逆时针方向进行的循环。

## ★ 热机和制冷机

### (1) 热机 (如: 蒸汽机、内燃机) (正循环)

工质从高温热源吸收热量, 一部分用于对外做功, 一部分向低温热源释放热量。

### (2) 制冷机 (如: 冰箱、制冷式空调) (逆循环)

外界对工质做功, 工质从低温热源吸热, 向高温热源放热。

## 二、循环效率

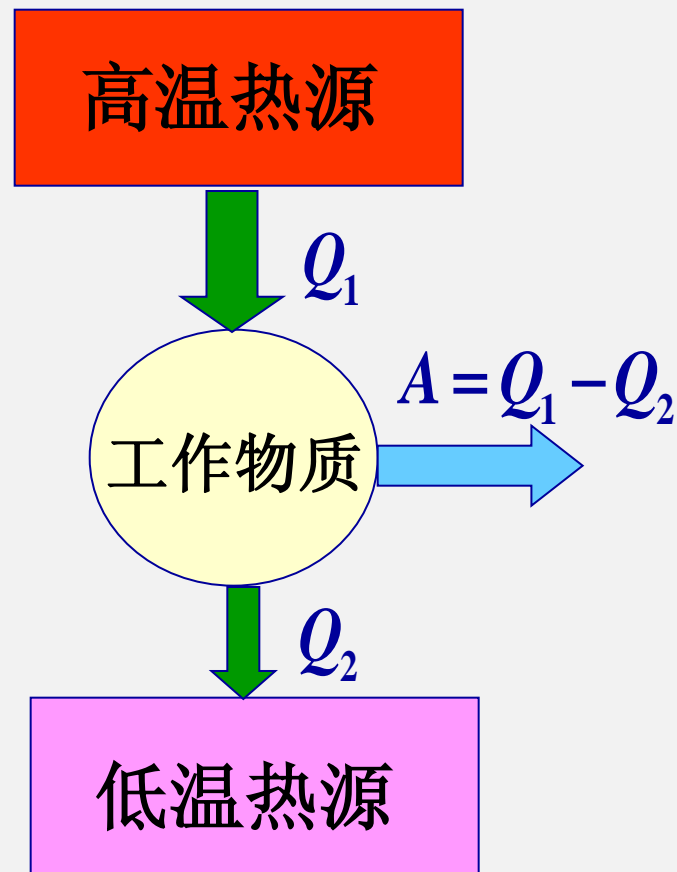
### 1. 热机效率

工质循环一次从高温热源吸热 $Q_1$ ，对外作净功 $A$ ，又向低温热源放出热量 $Q_2$ 。

$$Q_1 = Q_2 + A$$

热机效率

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



## 2. 制冷系数

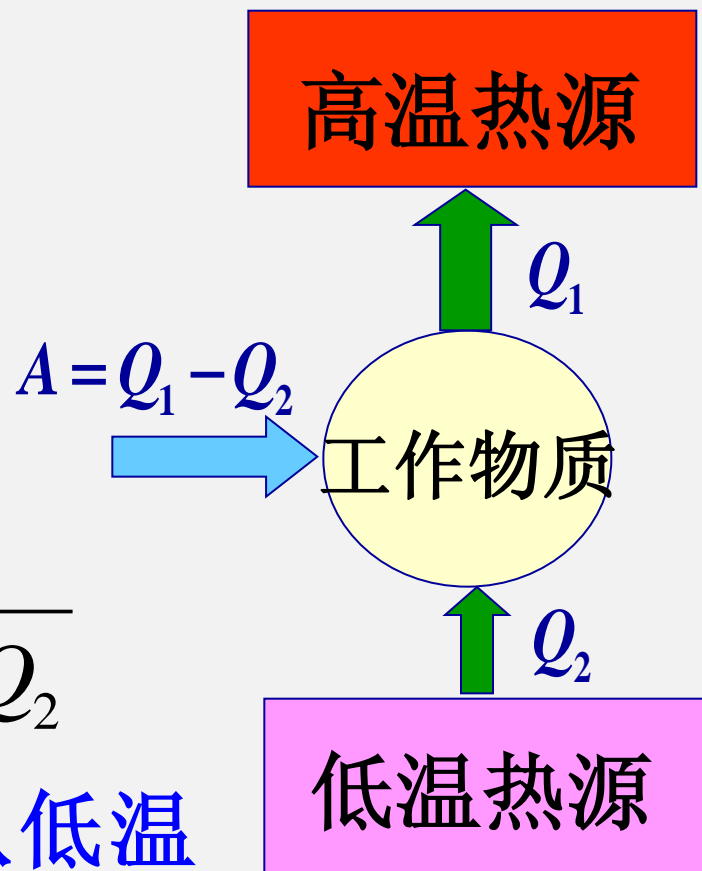
外界对工质做功 $A$ ，工质从低温热源吸热 $Q_2$ ，向高温热源放热 $Q_1$ 。

$$Q_1 = Q_2 + A$$

制冷系数  $\tau_w = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$

意义：每做一份功，可从低温热源提取多少份热

$Q_2$ —追求的效果       $A$ —付出的“成本”



**例1**  $3.2 \times 10^{-2} \text{ kg}$  氧气作  $ABCD$  循环过程。  $A \rightarrow B$  和  $C \rightarrow D$  都为等温过程，设  $T_1 = 300 \text{ K}$ ，  $T_2 = 200 \text{ K}$ ，  $V_2 = 2V_1$ 。求循环效率。（已知氧气  $C_v = 5R/2$ ）

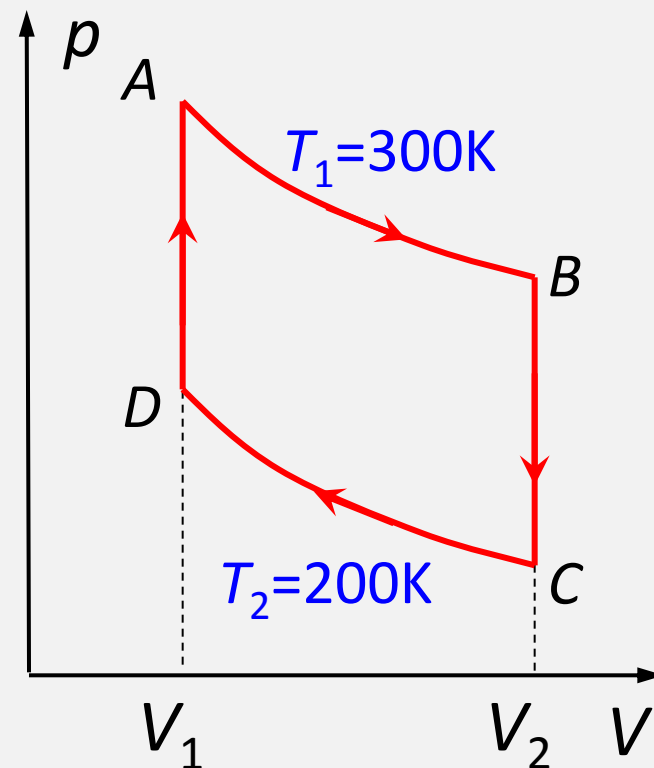
**解**

**$A \rightarrow B$  吸热**

$$Q_{AB} = A_{AB} = \frac{m}{M} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

**$B \rightarrow C$  放热**

$$Q_{BC} = \Delta E_{BC} = \frac{m}{M} \frac{5}{2} R(T_2 - T_1)$$



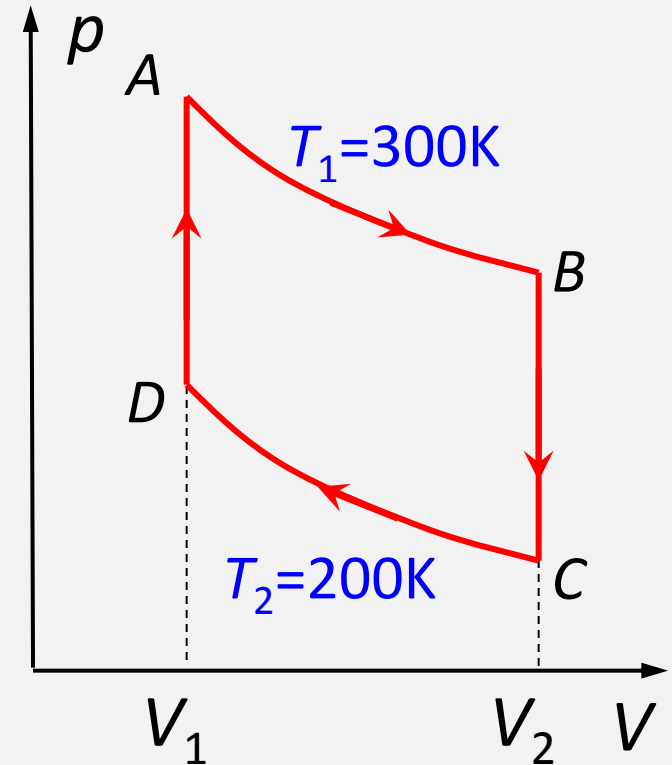
**C→D放热**

$$Q_{CD} = A_{CD} = \frac{m}{M} RT_2 \ln \frac{V_1}{V_2}$$

**D→A吸热**

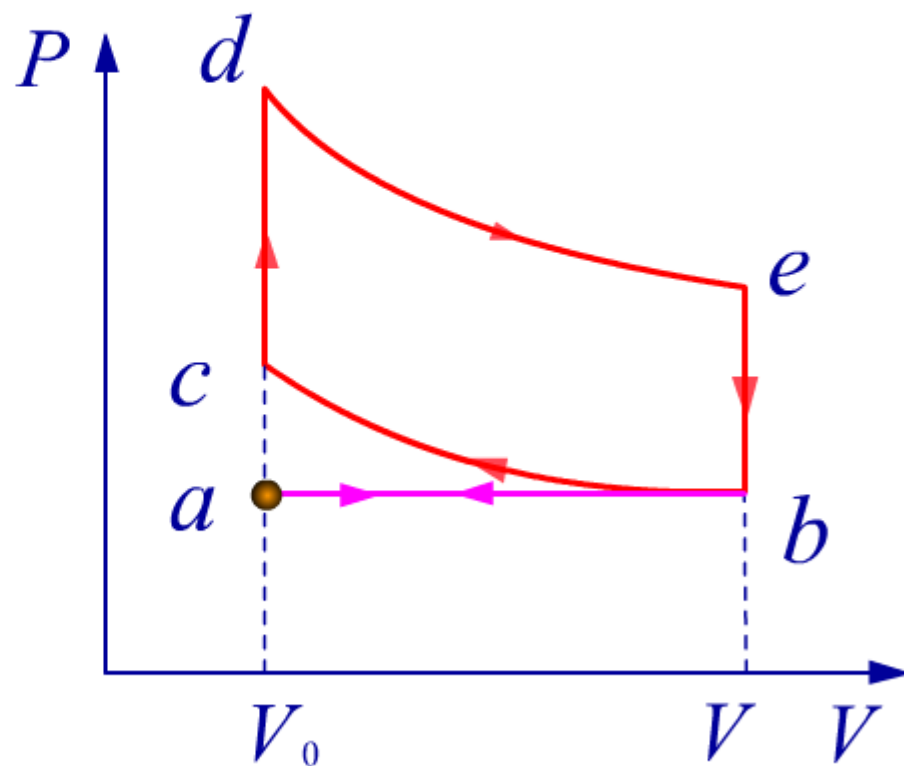
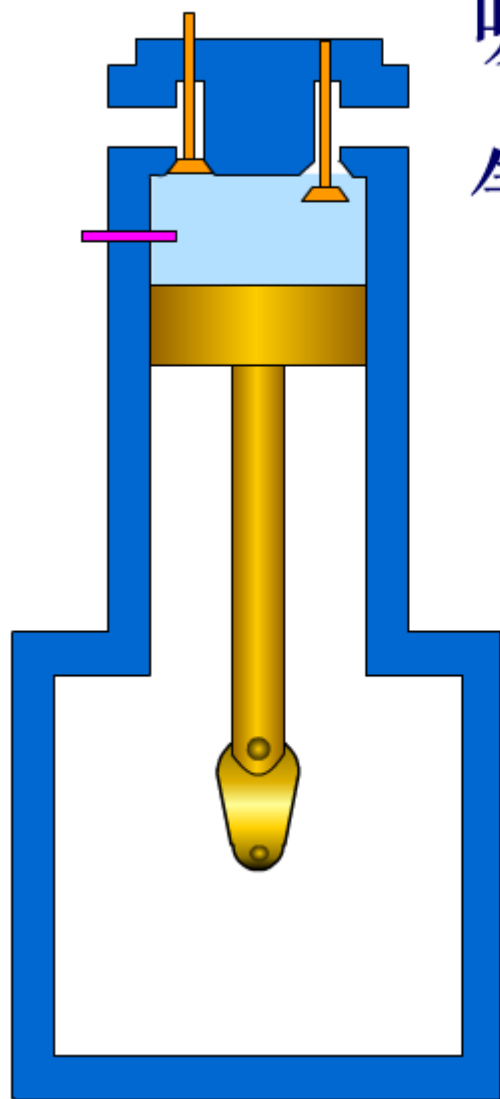
$$Q_{DA} = \Delta E_{DA} = \frac{m}{M} \frac{5}{2} R(T_1 - T_2)$$

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{A}{Q_1} = \frac{A_{AB} + A_{CD}}{Q_{AB} + Q_{DA}} \\ &= \frac{T_1 \ln \frac{V_2}{V_1} + T_2 \ln \frac{V_1}{V_2}}{T_1 \ln \frac{V_2}{V_1} + \frac{5}{2} (T_1 - T_2)} \\ &= 15\% \end{aligned}$$



吸气

# 奥托循环



**例2** 计算奥托机的循环效率。 $c \rightarrow d, e \rightarrow b$ 为等体过程； $b \rightarrow c, d \rightarrow e$ 为绝热过程。

**解**

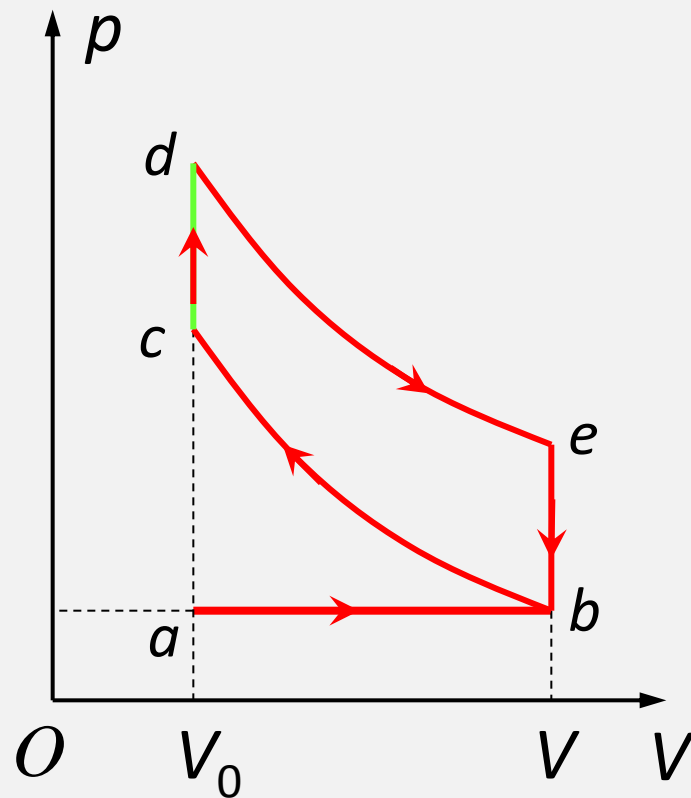
**$c \rightarrow d$ 吸热**

$$Q_1 = \frac{m}{M} C_V (T_d - T_c)$$

**$e \rightarrow b$ 放热**

$$Q_2 = \frac{m}{M} C_V (T_e - T_b)$$

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_e - T_b}{T_d - T_c}$$



$$T_e V^{\gamma-1} = T_d V_0^{\gamma-1}$$

$$T_b V^{\gamma-1} = T_c V_0^{\gamma-1}$$

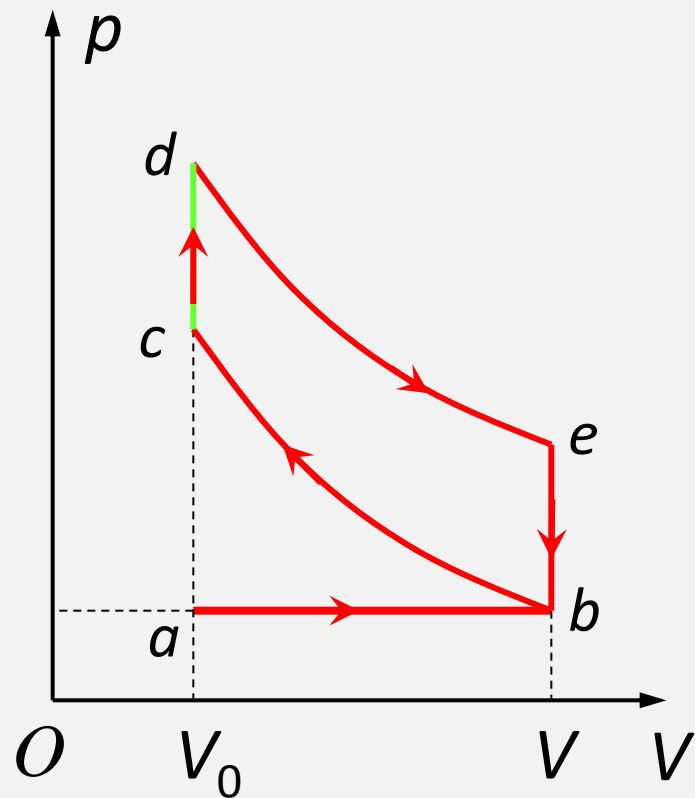
$$(T_e - T_b) V^{\gamma-1} = (T_d - T_c) V_0^{\gamma-1}$$

$$\frac{T_e - T_b}{T_d - T_c} = \left( \frac{V_0}{V} \right)^{\gamma-1}$$

$$\eta = 1 - \frac{1}{(V/V_0)^{\gamma-1}}$$

$$= 1 - \frac{1}{\delta^{\gamma-1}}$$

绝热压缩比



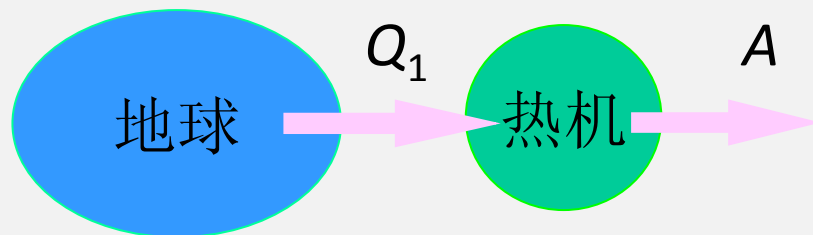


# ⬇ CONTENTS ⬇

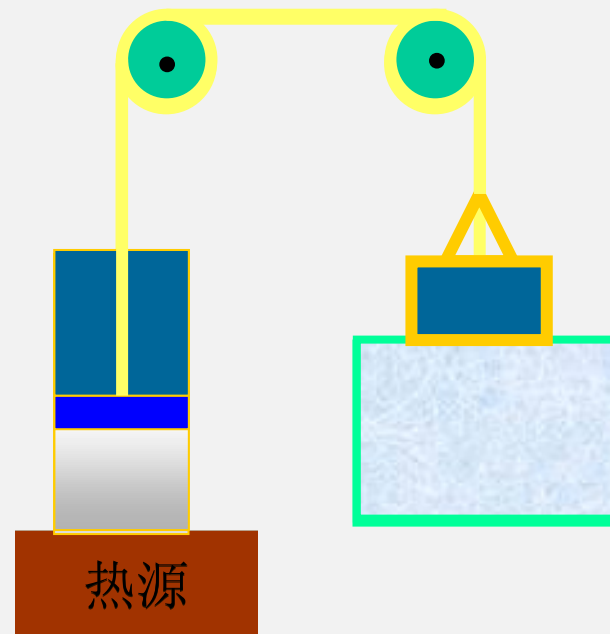
- 热学的研究对象和研究方法
- 平衡态 理想气体状态方程
- 功 热量 内能 热力学第一定律
- 准静态过程中功和热量的计算
- 理想气体的内能和  $C_v$   $C_p$
- 热力学第一定律对理想气体在典型准静态过程中的应用
- 绝热过程
- 循环过程
- **热力学第二定律**
  - 可逆过程与不可逆过程
  - 卡诺循环 卡诺定理

## § 8.9 热力学第二定律

由热力学第一定律可知，热机效率不可能大于100%。那么热机效率能否等于100%（ $Q_2 = 0$ ）呢？



若热机效率能达到100%，  
则仅地球上的海水冷却1°C，所  
获得的功就相当于 $10^{14}$ t 煤燃烧  
后放出的热量。



单热源热机(第二类永动机)是不可能的。

热力学第二定律是一条**经验定律**，有许多表述方法。最早提出并作为标准表述的是1850年的**克劳修斯表述**和1851年的**开尔文表述**。

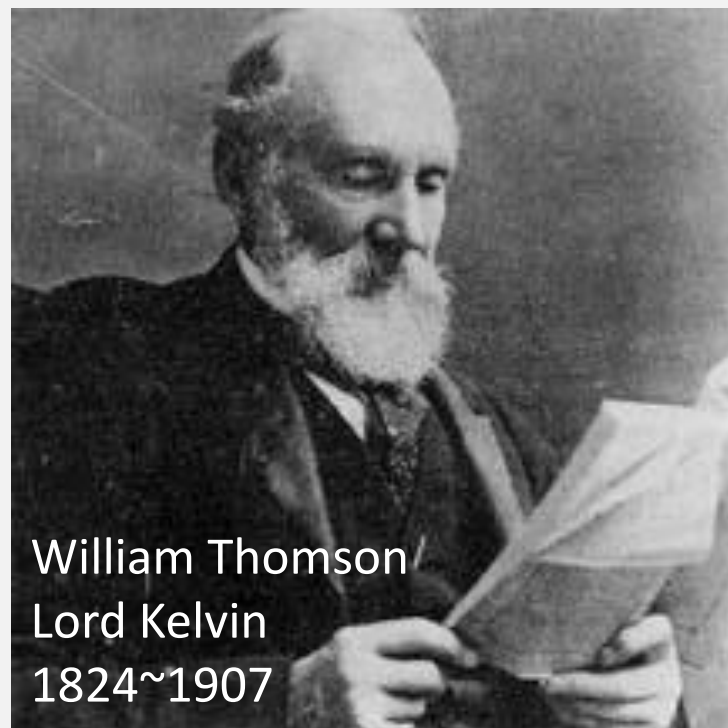
## 1. 热力学第二定律的开尔文表述

不可能从单一热源吸收能量，使之完全变为有用功而不产生其他影响。

(1) 热力学第二定律开尔文表述的另一叙述形式：**第二类永动机不可能制成**

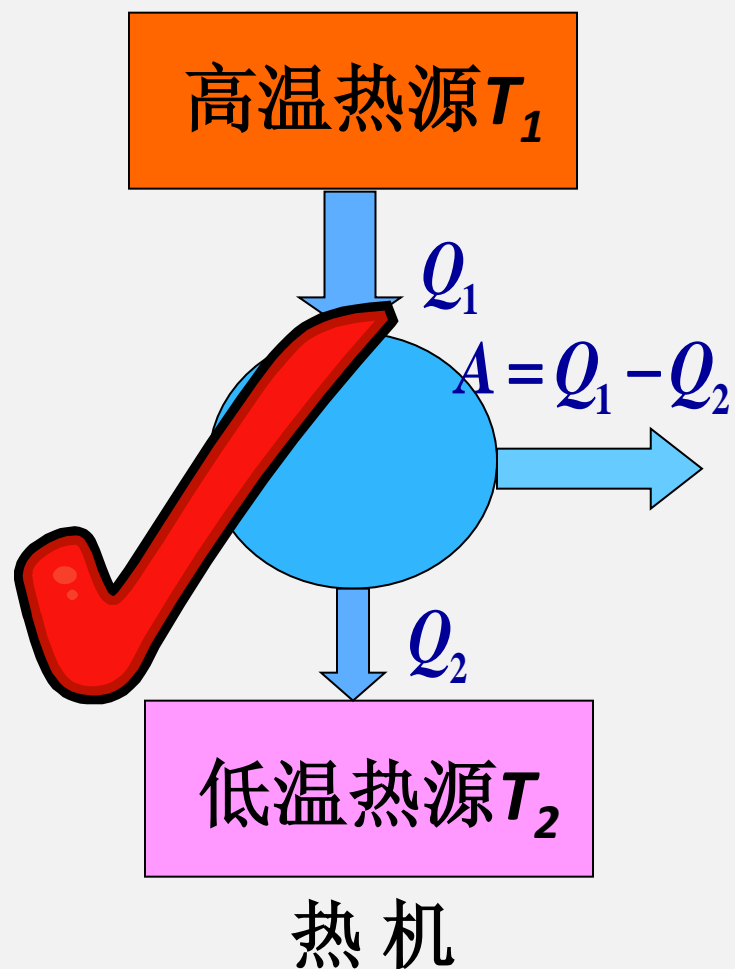
(2) 热力学第二定律的开尔文表述实际上表明了

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

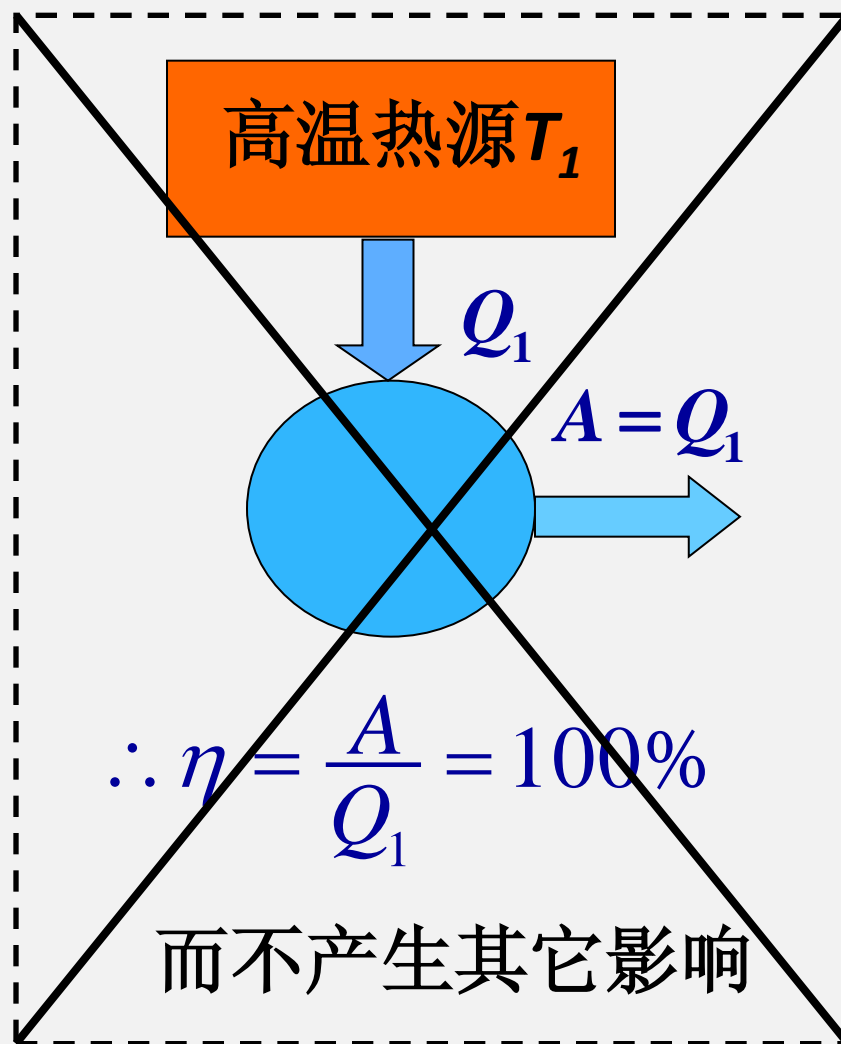


William Thomson  
Lord Kelvin  
1824~1907

## 开尔文表述的示意图



## 是否满足能量守恒？



## 2.热力学第二定律的克劳修斯表述

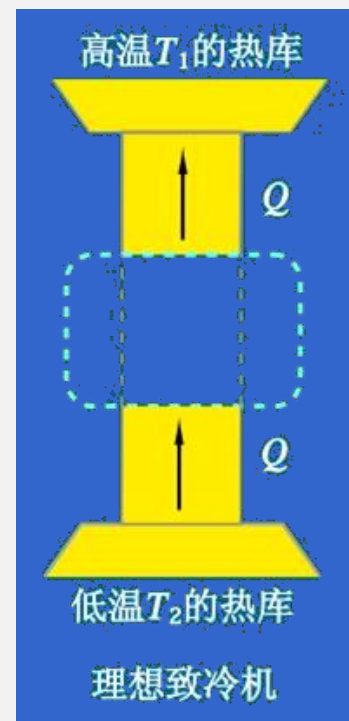
不可能把热量从低温物体传到高温物体而不引起外界的变化。

✦ 说明

(1)热力学第二定律克劳修斯表述的另一叙述形式:理想制冷机不可能制成

(2)热力学第二定律的克劳修斯表述实际上表明了

$$w = \frac{Q_2}{A} \not\rightarrow \infty$$



## 注意

(1)热力学第二定律是大量实验和经验的总结，是不可违背的自然规律。

(2)说明两种本质不同的能量形式之间的转换具有方向性或不可逆性。

(3)第二与第一定律彼此独立又互相补充：

第一定律说明在任何物理过程中能量必须守恒。第二定律则说明，满足能量守恒的过程不一定能实现。

第二定律指出了自然界所发生的自发物理过程是有一定方向的。

## 二、热力学第二定律的实质

一切与热现象有关的实际宏观过程都是不可逆的。

**例** “理想气体和单一热源接触作等温膨胀时，吸收的热量全部用来对外做功。”

- (A) 不违反第一定律，但违反第二定律。
- (B) 不违反第二定律，但违反第一定律。
- (C) 不违反第一定律，也不违反第二定律。
- (D) 违反第一定律，也违反第二定律。

答 (C)

# ⬇ CONTENTS ⬇

- 热学的研究对象和研究方法
- 平衡态 理想气体状态方程
- 功 热量 内能 热力学第一定律
- 准静态过程中功和热量的计算
- 理想气体的内能和  $C_v$   $C_p$
- 热力学第一定律对理想气体在典型准静态过程中的应用
- 绝热过程
- 循环过程
- 热力学第二定律
- **可逆过程与不可逆过程**
  - 卡诺循环 卡诺定理

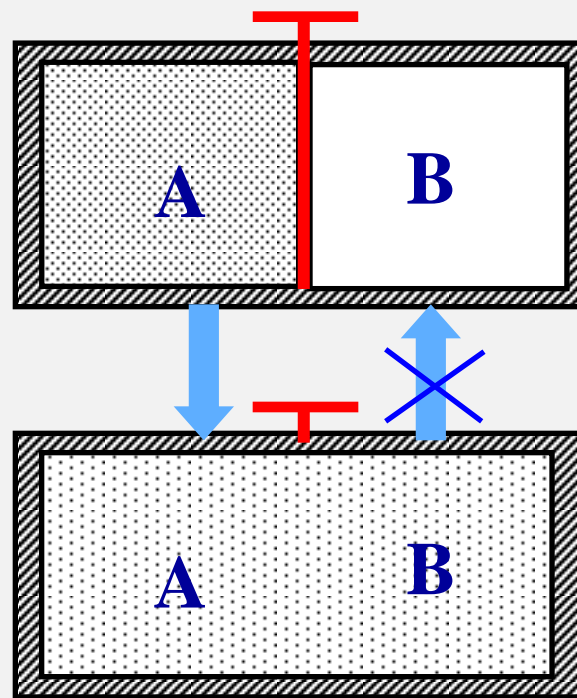
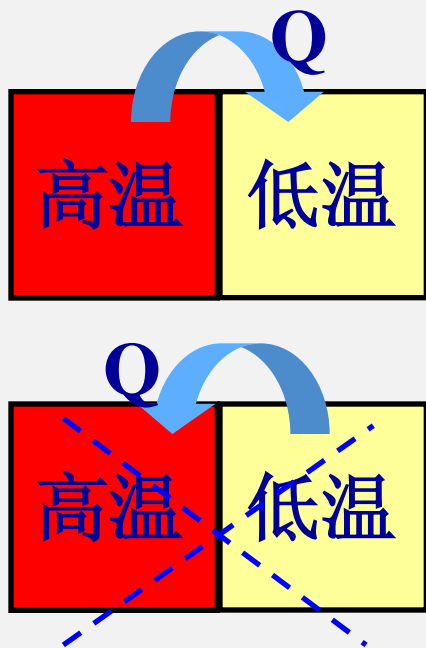


## § 8-10 可逆过程与不可逆过程

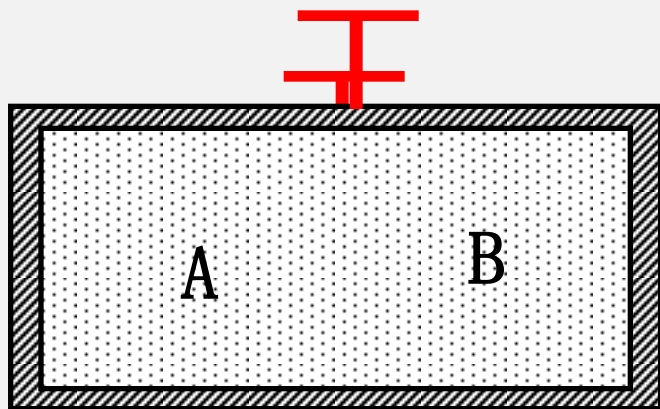
- **可逆过程**：若系统经历了一个过程，而过程的每一步都可沿相反的方向进行，同时不引起外界的任何变化，那么这个过程就称为可逆过程。
- **不可逆过程**：如对于某一过程，用任何方法都不能使**系统**和**外界**恢复到原来状态，该过程就是不可逆过程
- **自发过程**：自然界中不受外界影响而能够自动发生的过程。

## ★ 说明:

- a. 自然界一切与热现象有关的实际宏观过程都是不可逆的。

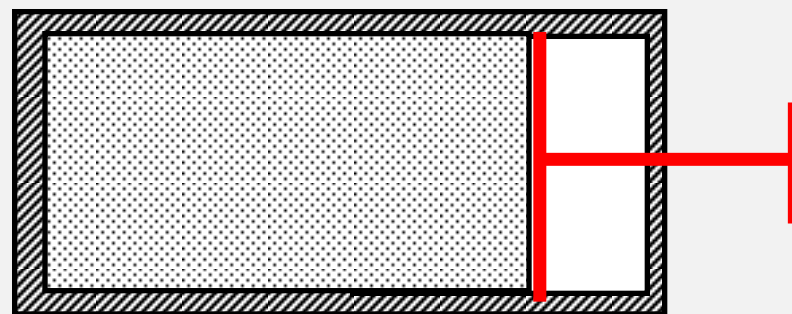


b. 不可逆过程，并不是不能在反方向进行的过程，而是当逆过程完成后，对外界的影响不能消除。



气体对真空的自由膨胀  
——不可逆过程

对外界的影响不能消除！



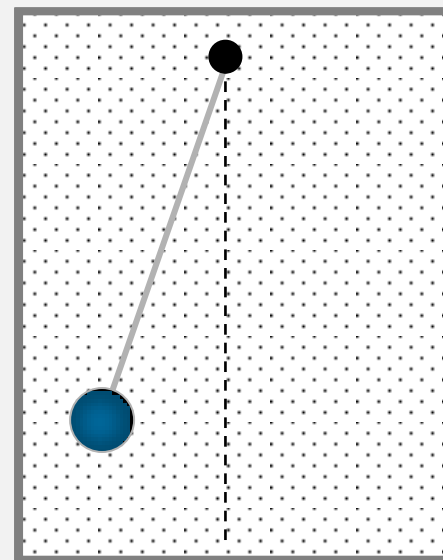
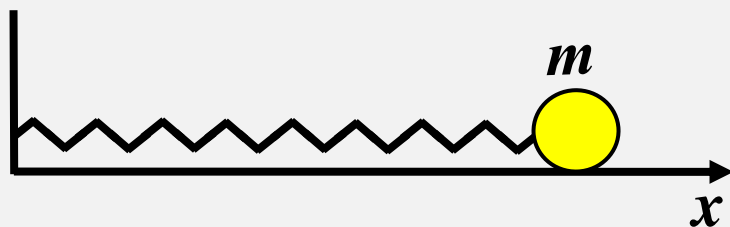
可以通过活塞将气体等温压缩，回到A室内。

但必须对气体做功，功转化为气体向外界放出的热量。

- c. 热力学第2定律的开尔文表述，可以证明：  
“通过摩擦完成的功变热过程是不可逆的”。
- d. 热力学第2定律的克劳修斯表述，实际上就是：  
“热传导的过程是不可逆的”。
- e. 不平衡和耗散等因素的存在，是导致过程不可逆的原因。

(无摩擦时) 过程可逆

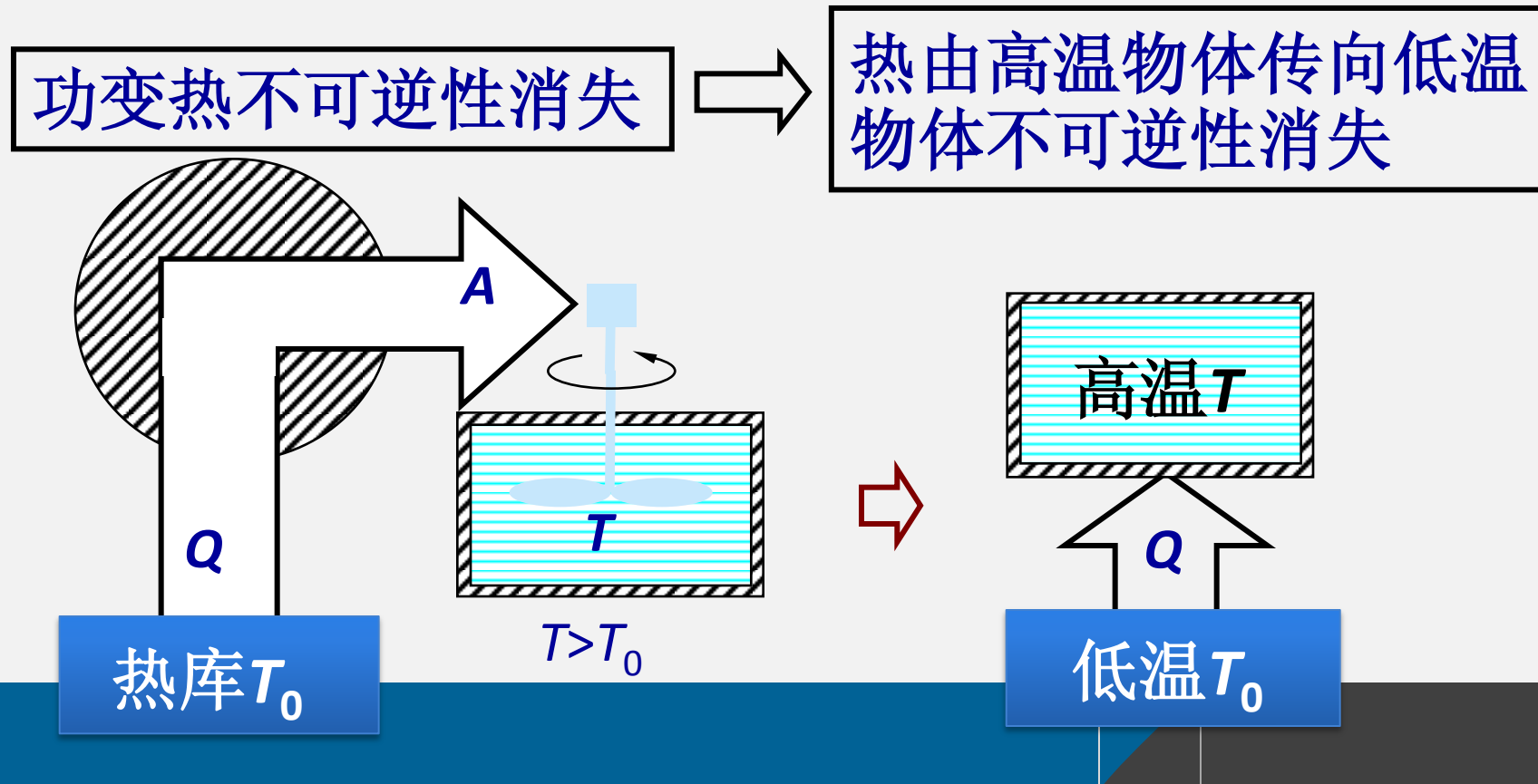
(有摩擦时) 不可逆



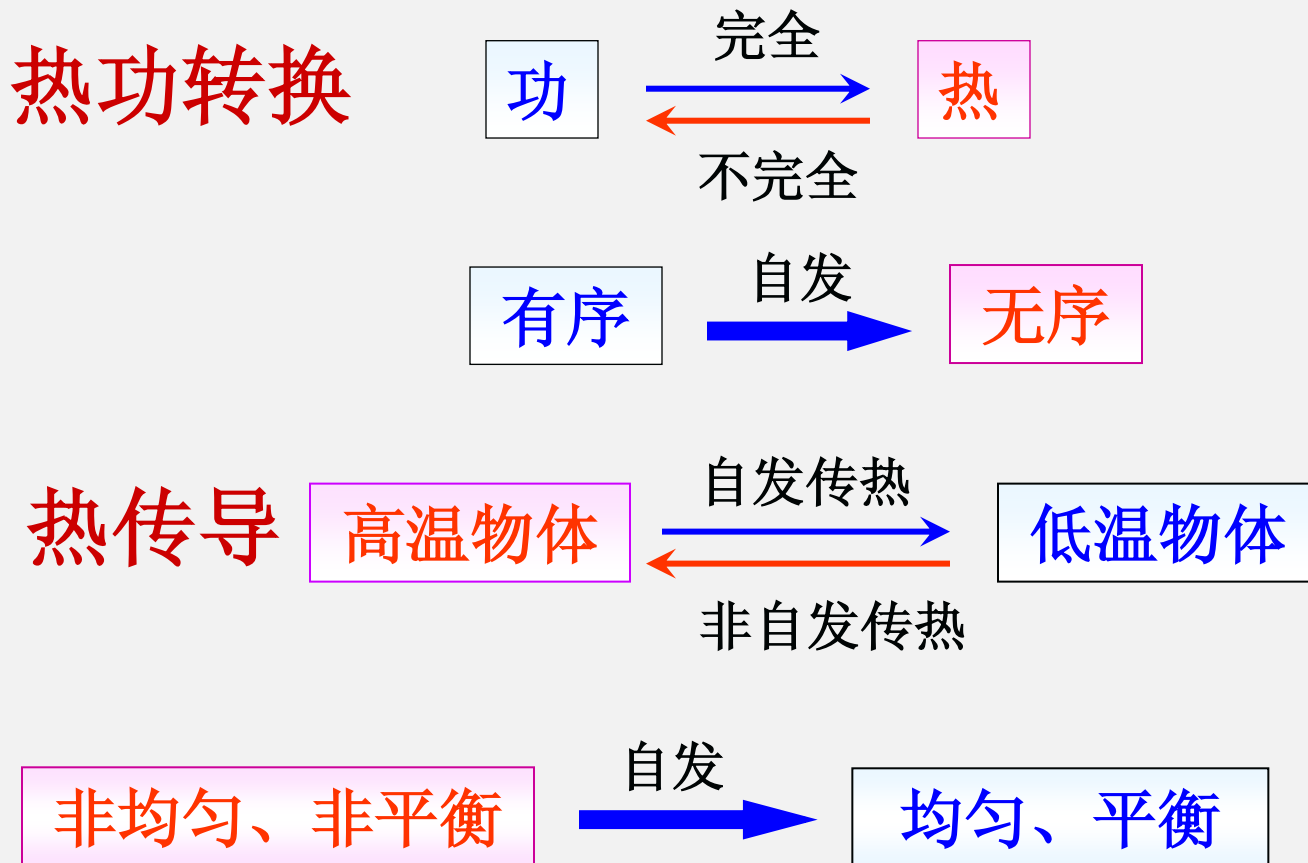
(有气体) 不可逆

## *f.* 各种不可逆性相互依存

自然的宏观过程的不可逆性相互依存。一种实际过程的不可逆性导致了另一种过程的不可逆性。反之，如果一种实际过程的不可逆性消失了，则其它实际过程的不可逆性也就随之消失了。



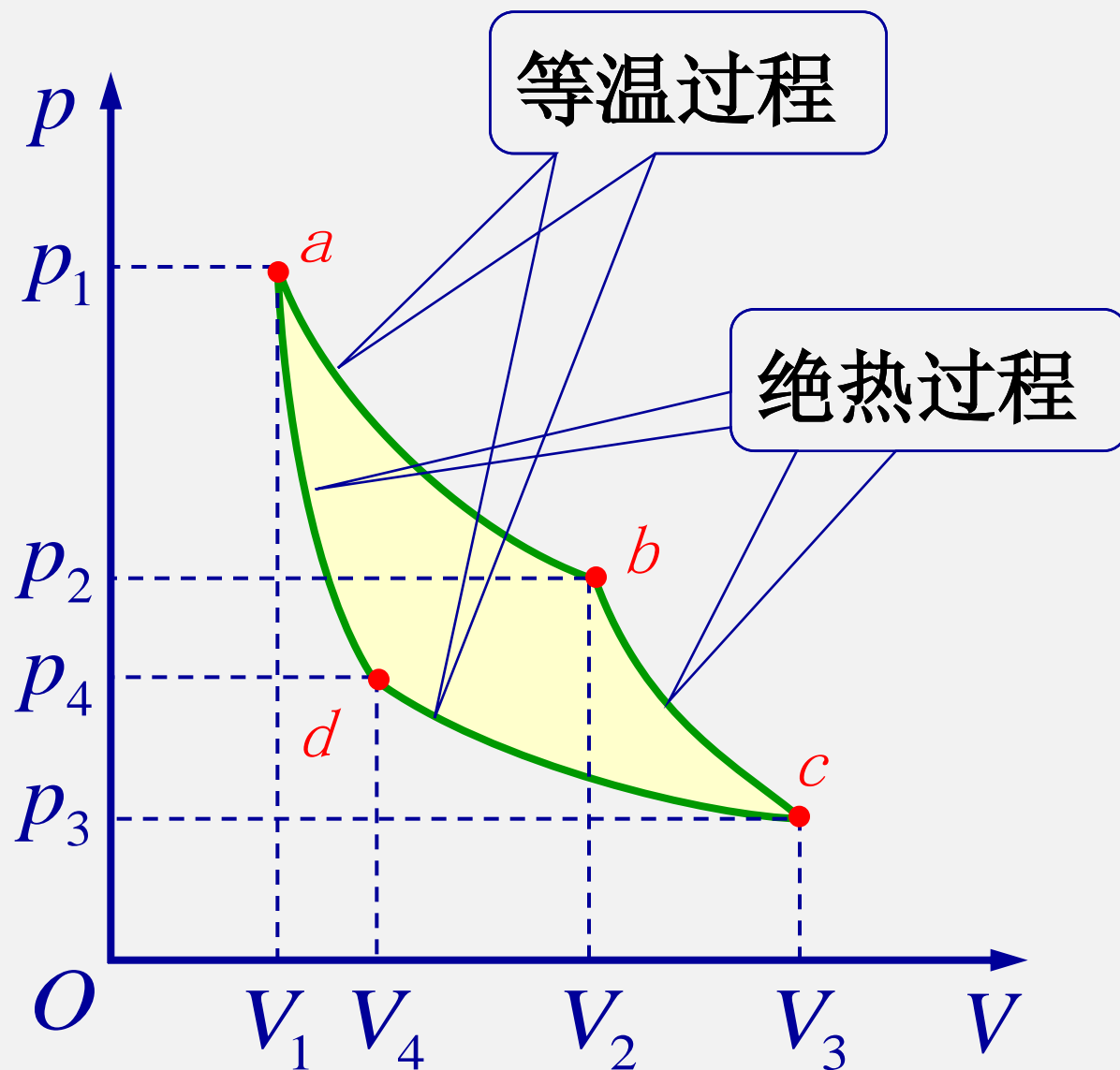
自然界一切与热现象有关的实际宏观过程都是不可逆的，例如



# ⬇ CONTENTS ⬇

- 热学的研究对象和研究方法
- 平衡态 理想气体状态方程
- 功 热量 内能 热力学第一定律
- 准静态过程中功和热量的计算
- 理想气体的内能和  $C_v$   $C_p$
- 热力学第一定律对理想气体在典型准静态过程中的应用
- 绝热过程
- 循环过程
- 热力学第二定律
- 可逆过程与不可逆过程
- **卡诺循环 卡诺定理**

# 一、卡诺循环

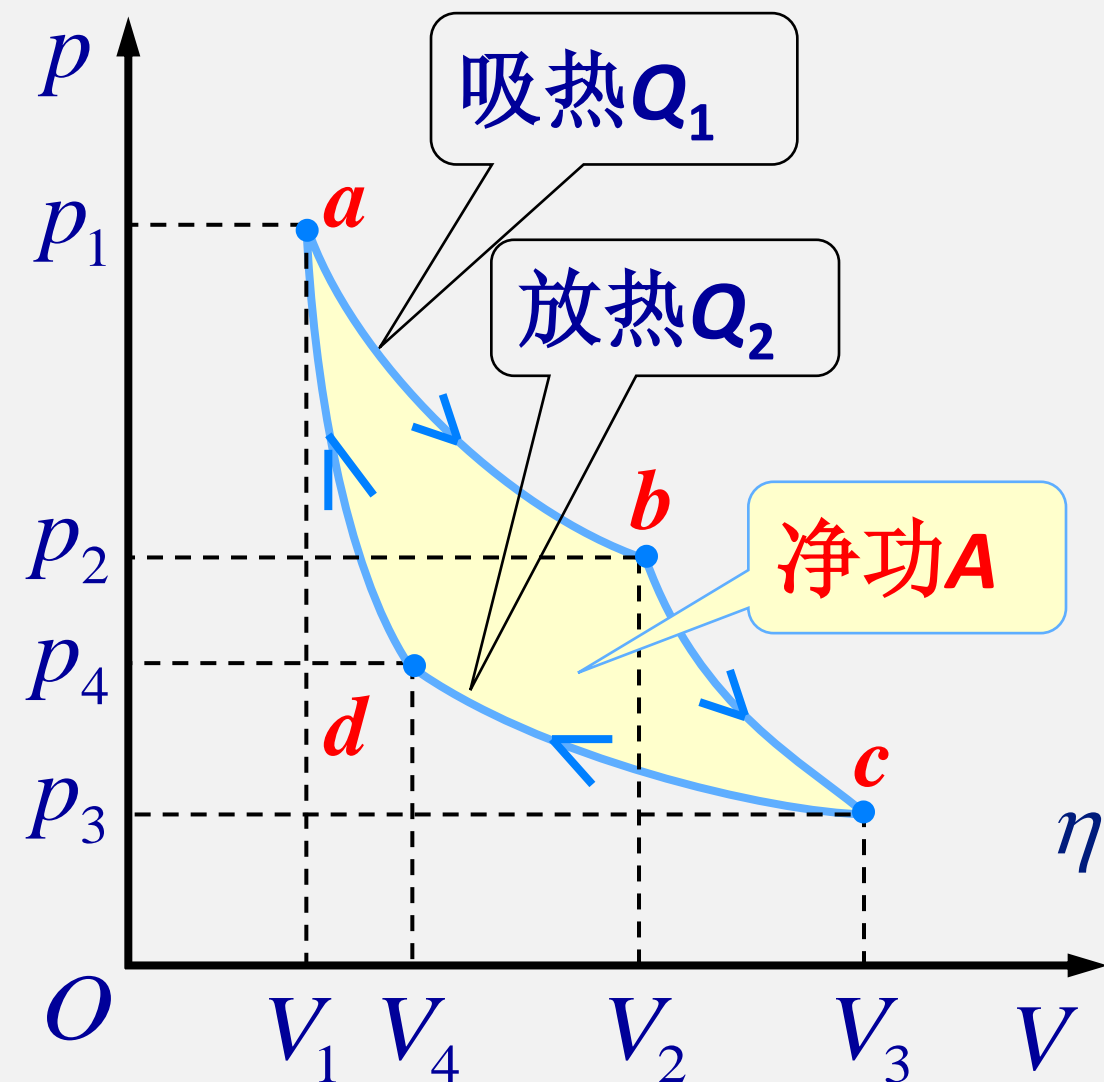


卡诺

卡诺循环：  
由两个可逆  
等温过程和  
两个可逆绝  
热过程组成  
的循环。



# 正向卡诺循环及其效率



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

$$Q_2 = \left| \frac{M}{\mu} RT_2 \ln \frac{V_4}{V_3} \right|$$

$$= \frac{M}{\mu} RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}$$

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

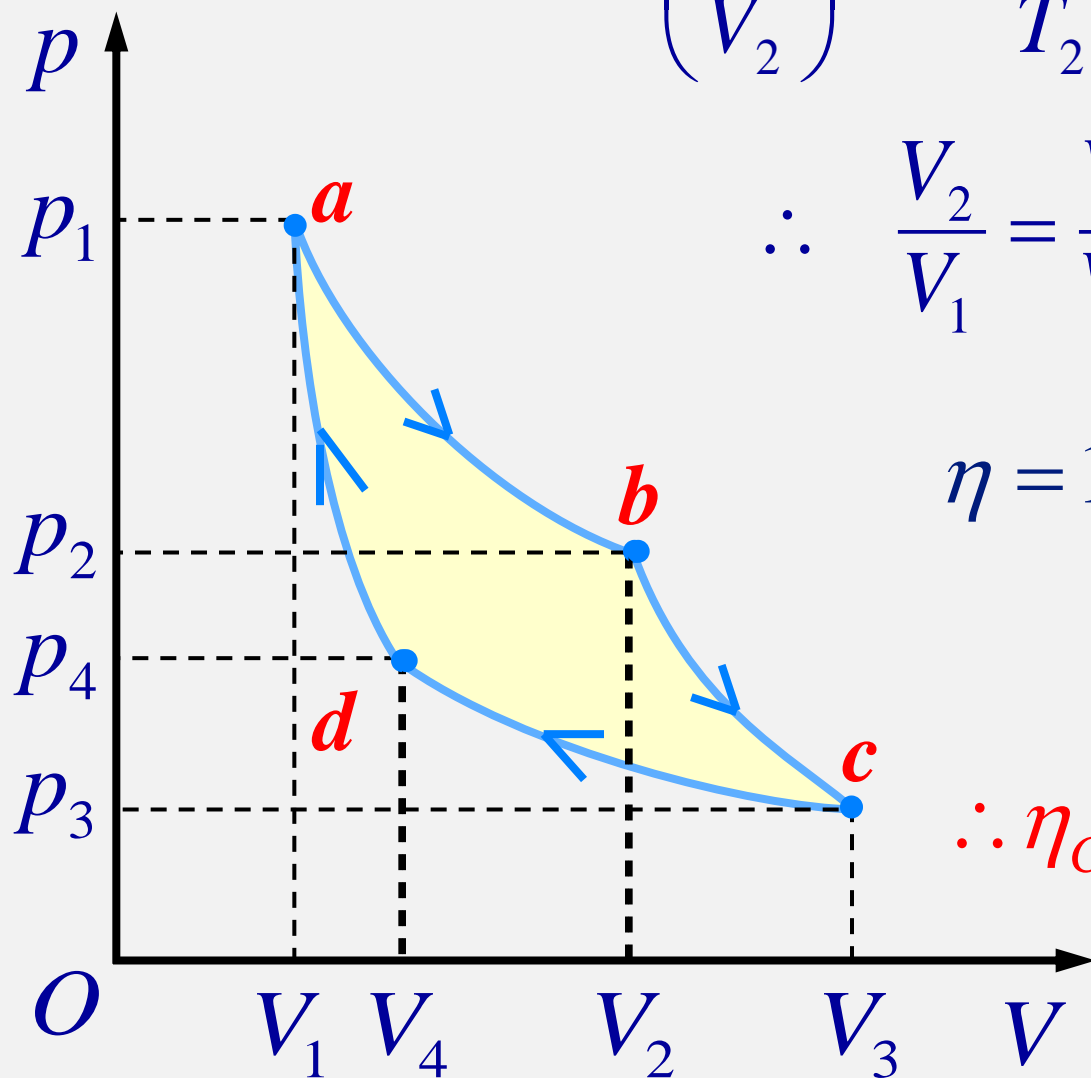
应用绝热方程：

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

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

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

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



卡诺热机效率：

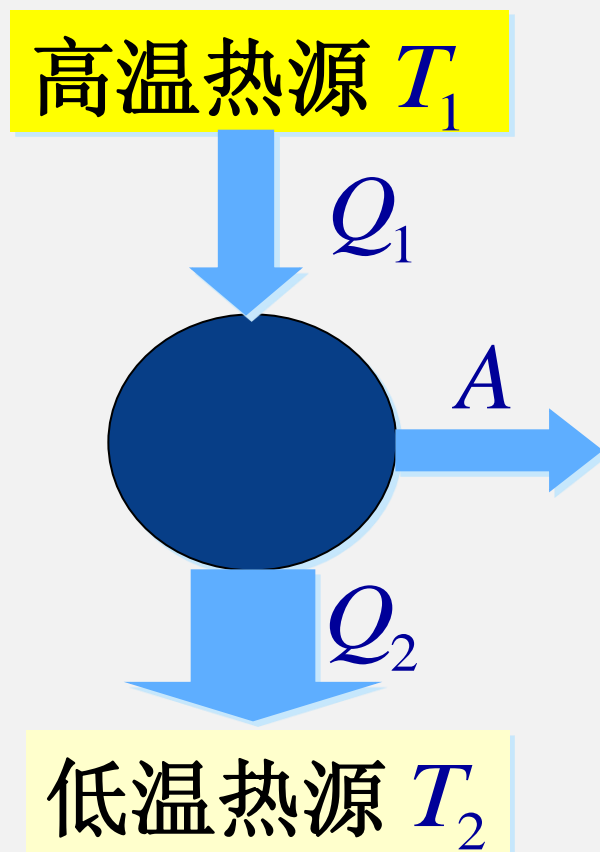
$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

讨论：

a. 卡诺循环必须有高温和低温两个热源。

b. 卡诺循环的效率只与两个热源的温度有关。 $T_2$ 愈低或 $T_1$ 愈高，卡诺循环的效率愈大。工程上一般采用提高高温热源温度的方法。

c. 卡诺循环的效率总是小于1的。



# 逆向卡诺循环的致冷系数

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

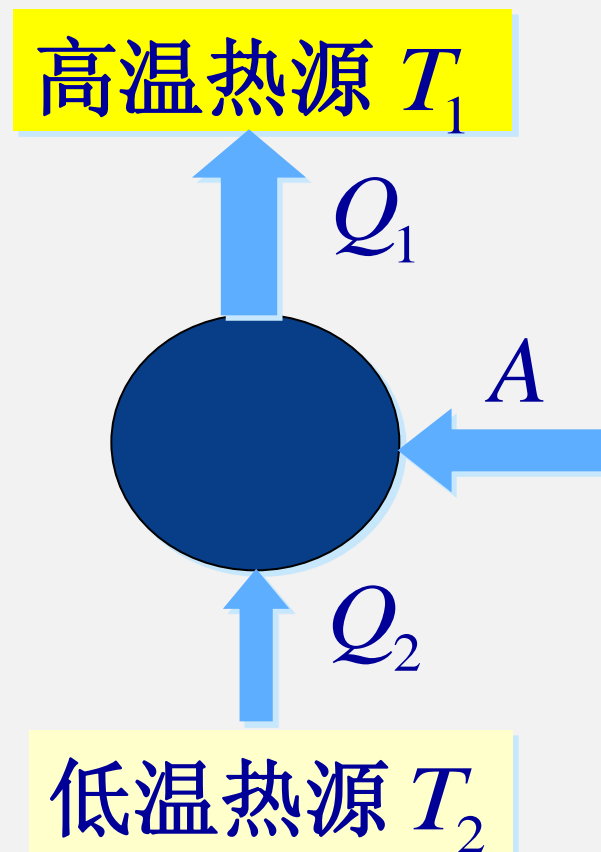
$A$  外界对工质所做的净功

$Q_1$  工作物质向外界放出的热量

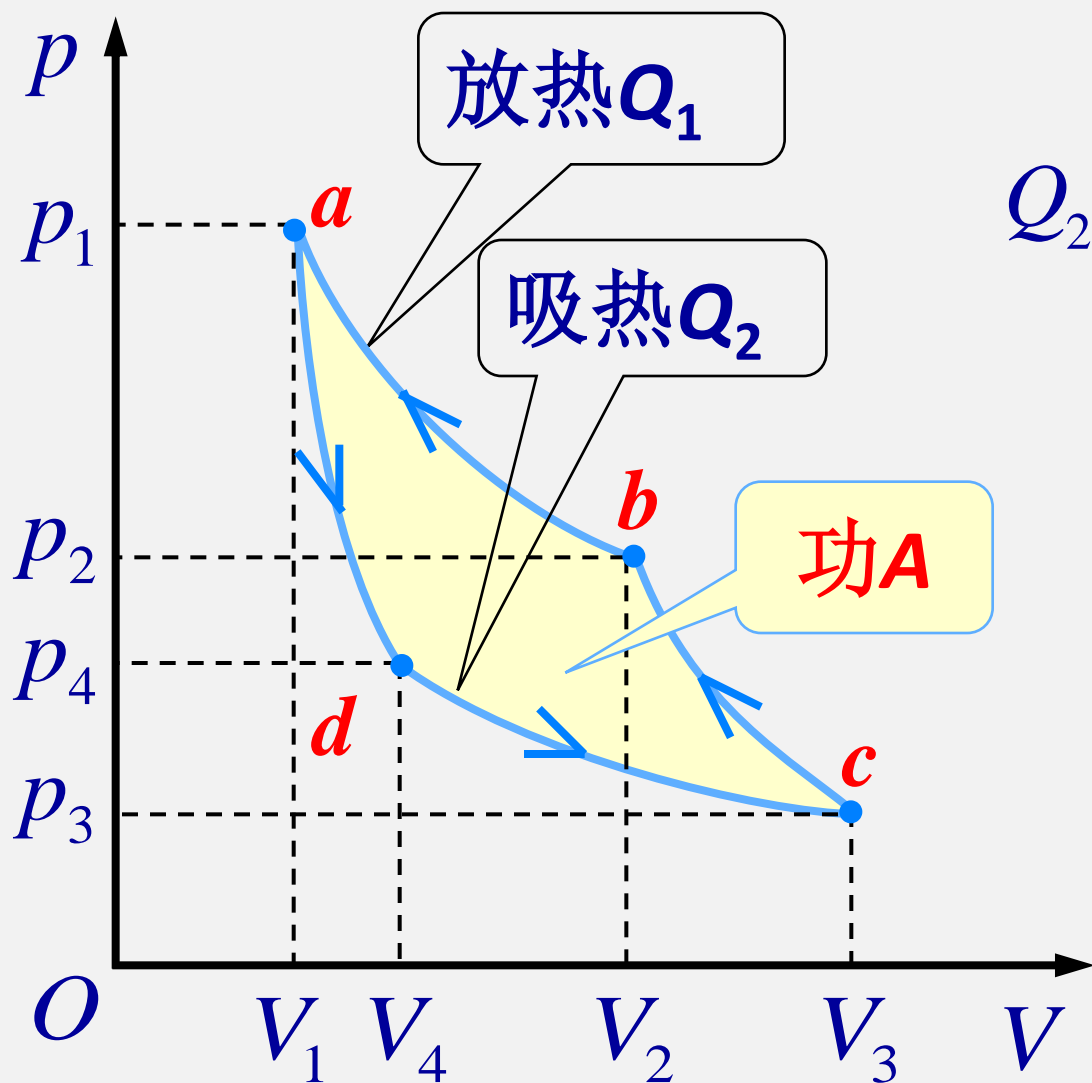
$Q_2$  工作物质从冷库吸取的热量

卡诺致冷系数：

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



# 逆向卡诺循环的致冷系数



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

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

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

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

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

**例题** 有一卡诺制冷机，从温度为 $-10^{\circ}\text{C}$ 的冷藏室吸取热量，而向温度为 $20^{\circ}\text{C}$ 的物体放出热量。设该制冷机所耗功率为 $15\text{kW}$ ，问每分钟从冷藏室吸取热量为多少？

**解：**  $T_1=293\text{K}$ ，  $T_2=263\text{K}$ ， 则  $w = \frac{T_2}{T_1 - T_2} = \frac{263}{30}$

每分钟做功为  $A=15 \times 10^3 \times 60\text{J} = 9 \times 10^5\text{J}$

所以每分钟做功从冷藏室中吸取的热量为

$$Q_2 = \frac{263}{30} \times 9 \times 10^5\text{J} = 7.89 \times 10^6\text{J}$$

此时,每分钟向温度为 $20^{\circ}\text{C}$ 的物体放出的热量为

$$Q_1 = Q_2 + A = 8.79 \times 10^6\text{J}$$

**THANKS**

FOR YOUR ATTENTION