澳門城市大學
Universidade da Cidade de Macau
City University of Macau

計算機科學導論

主講人 | 姓名 張琪
Name Zhang Qi
澳門城市大學
City University of Macau

第十章 流體力學及熱力學基礎

本章學習要點：

1. 功，熱量
2. 熱力學第一定律
3. 循環過程，卡諾循環
4. 熱力學第二定律
5. 流體力學基礎

10.1 功，熱量

- 功
- 功是能量傳遞和轉換的量度，它引起系統熱運動狀態的變化。系統作功是通過物體作宏觀位移來完成的。常用符號W表示

- 功的計算
- 氣缸內的氣壓大于外界大氣壓，氣體膨脹推動氣缸活塞對外作功

壓强

$$P = \frac{F}{S}$$

10.1 功，熱量

● 功的計算

● 氣缸內的氣壓大于外界大氣壓，氣體膨脹推動氣缸活塞對外作功

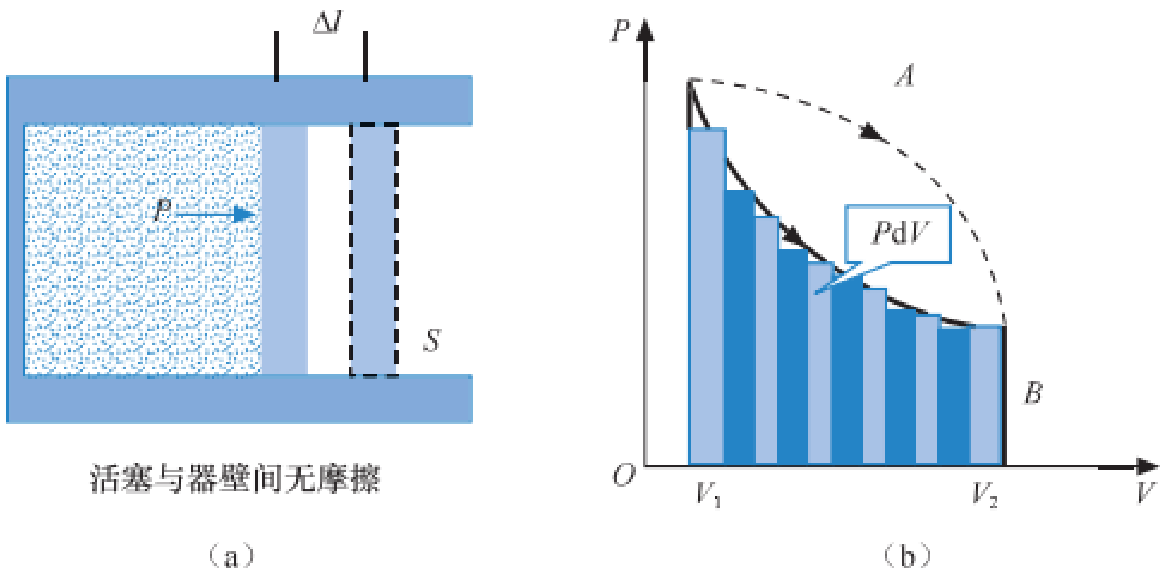


图 5-1　准静态做功过程

10.1 功，熱量

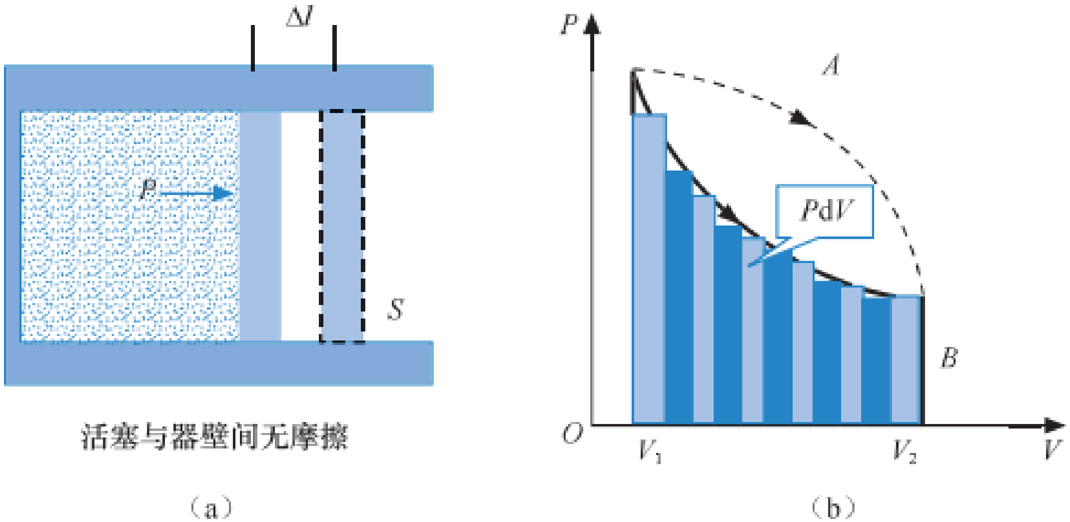


图 5-1　准静态做功过程

$$dW = Fdl = pSdl$$

$$dW = pdV$$

$$W = \int_{V_1}^{V_2} pdV$$

注意：

作功與過程有關

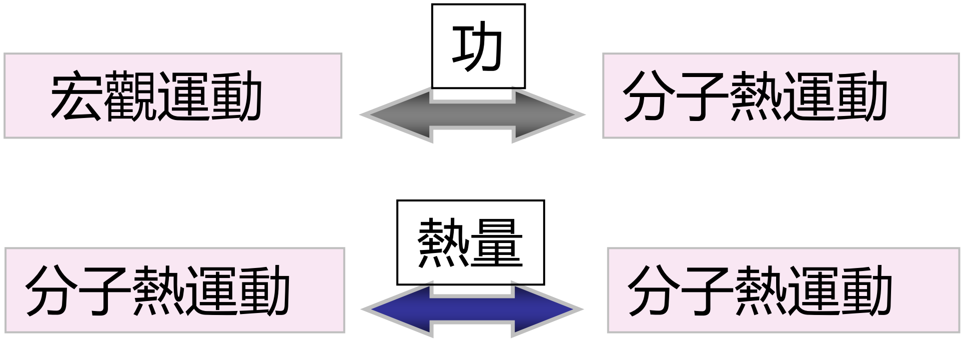
10.1 功，熱量

- 熱量
- 通過傳熱方式傳遞能量的量度，系統和外界之間存在溫差而發生的能量傳遞

功與熱量的异同

(1) 都是過程量：與過程有關

(2) 功與熱量的物理本質不同

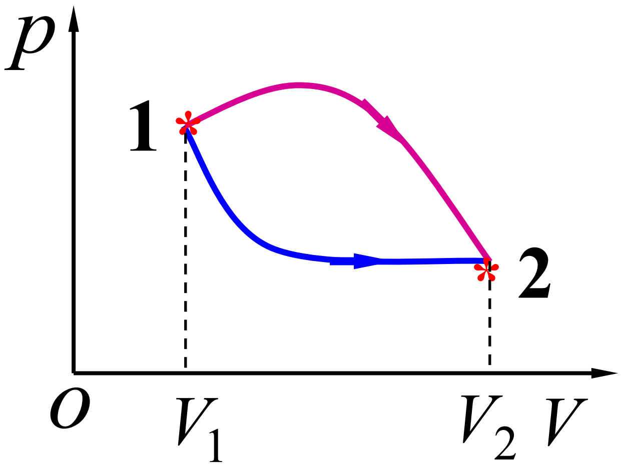


10.2 熱力學第一定律

- 熱力學第一定律
- 系統從外界吸收的熱量，一部分使系統的內能增加，另一部分使系統對外界做功

$$Q = E_2 - E_1 + W$$

$$Q = E_2 - E_1 + W = \Delta E + W$$



- 物理意義
- （1）能量轉換和守恒定律
- （2）實驗經驗總結，自然界的普遍規律

10.2 熱力學第一定律

- 熱力學第一定律

准靜態過程

$$Q = \Delta E + \int_{V_1}^{V_2} p\mathrm{d}V$$

微變過程

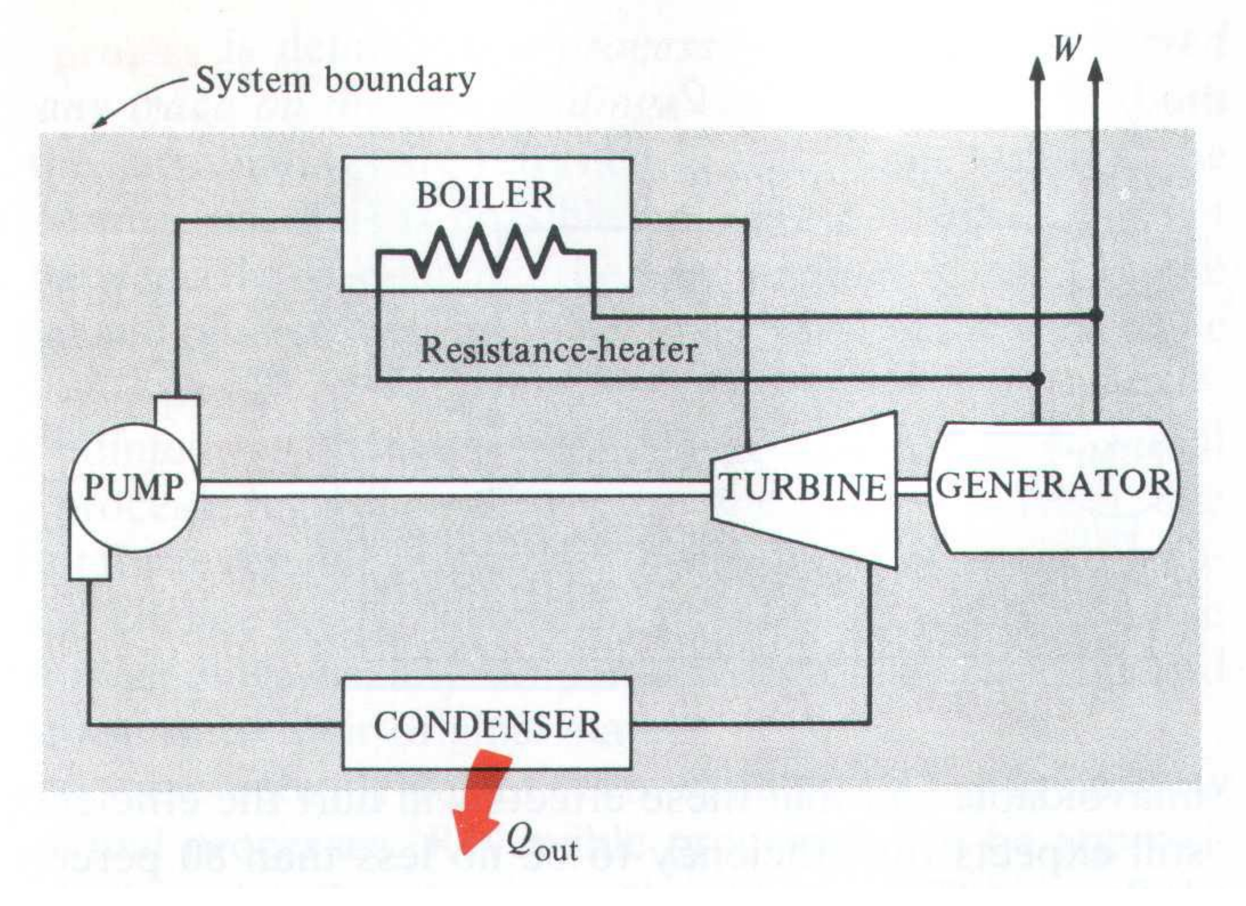
$$\mathrm{d}Q = \mathrm{d}E + \mathrm{d}W = \mathrm{d}E + p\mathrm{d}V$$

第一定律的符號規定

	Q	ΔE	W
+	系統吸熱	內能增加	系統對外界做功
−	系統放熱	內能減少	外界對系統做功

10.2 熱力學第一定律

- 熱力學第一定律
- 歷史上的第一類永動機



第一類永動機：即不從外界吸收能量，而不斷對外作功的機械。

第一類永動機違反能量守恒定律

10.2 熱力學第一定律

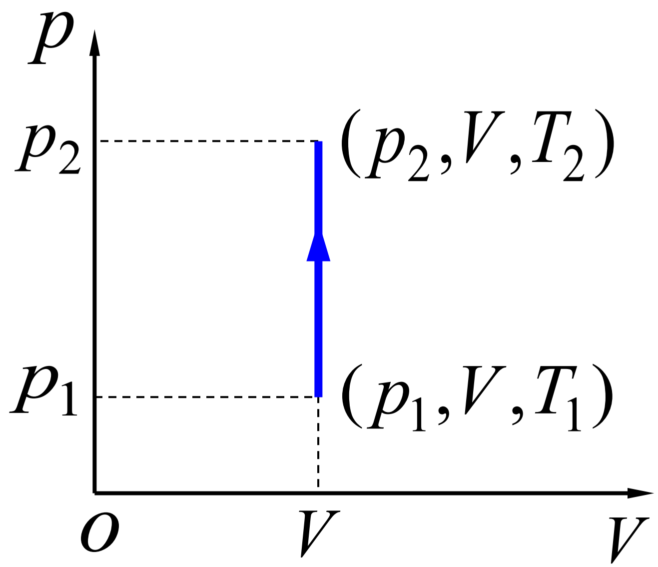
- 熱力學第一定律
- 熱力學第一定律對等值過程的應用

1、等容（體）過程

特性 V ＝常量

過程方程 PT^{-1} ＝常量

$$\mathrm{d}V = 0 \qquad \mathrm{d}W = 0$$



由熱力學第一定律

$$\mathrm{d}Q_V = \mathrm{d}E$$

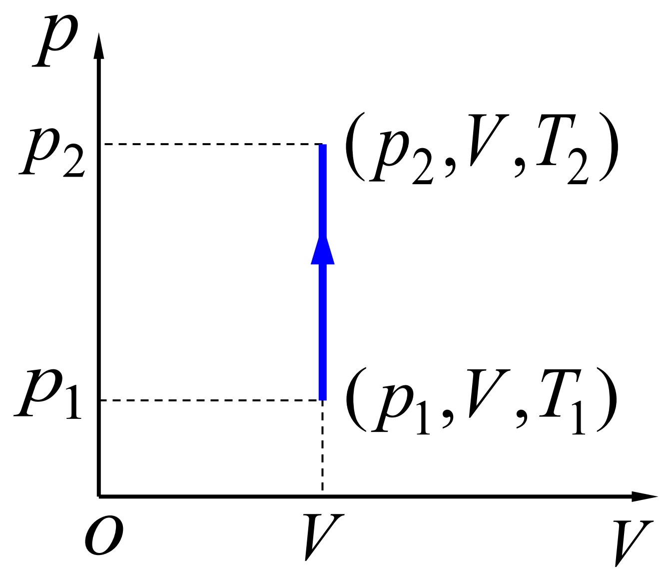
$$\underline{Q_V = \Delta E} = \frac{M}{M_{mol}}\frac{i}{2}R\Delta T$$

系統從外界吸收的熱量全部用來增加氣體內能

10.2 熱力學第一定律

- 熱力學第一定律
- 熱力學第一定律對等值過程的應用

等容摩爾熱容: 1mol理想氣體在等體過程中吸收熱量 $\mathrm{d}Q_V$，使溫度升高 $\mathrm{d}T$，其摩爾定體熱容爲:



$$C_{V,\mathrm{m}} = \frac{\mathrm{d}Q_V}{\mathrm{d}T}$$

單位 $\mathrm{J\cdot mol^{-1}\cdot K^{-1}}$

$$\mathrm{d}Q_V = C_{V,\mathrm{m}}\mathrm{d}T$$

對 ν mol 理想氣體　　$\mathrm{d}Q_V = \mathrm{d}E = \nu C_{V,\mathrm{m}}\mathrm{d}T$

由熱力學第一定律

10.2 熱力學第一定律

- 熱力學第一定律
- 熱力學第一定律對等值過程的應用

$$Q_V = \nu C_{V,\mathrm{m}}(T_2 - T_1) = E_2 - E_1 = \Delta E$$

對于理想氣體：
$$\Delta E = \nu \frac{i}{2} R (T_2 - T_1)$$

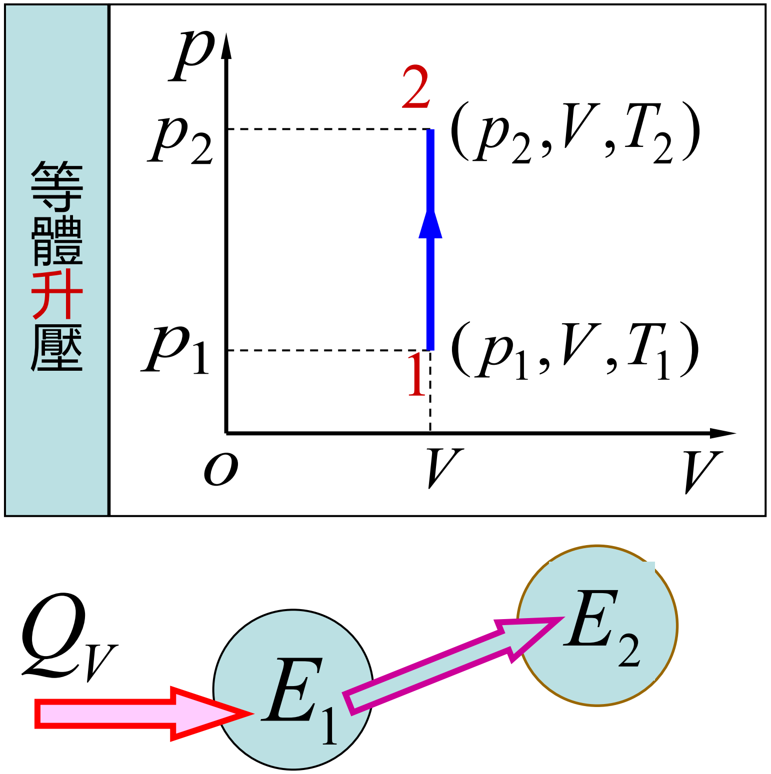
$$\Longrightarrow C_{V,m} = \frac{i}{2} R$$

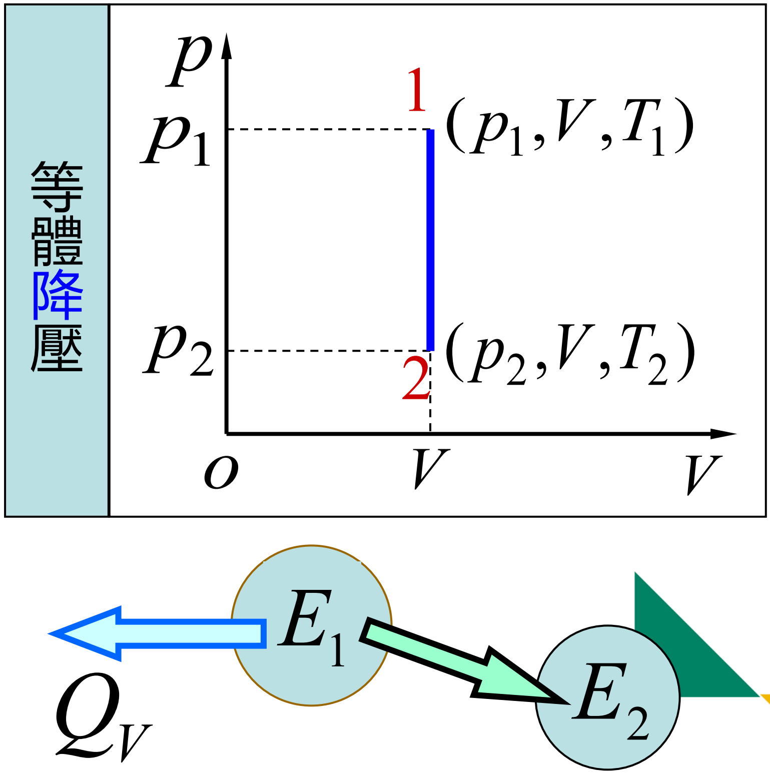
可見：C_V**只與自由度** i **有關，與** T **無關**

10.2 熱力學第一定律

- 熱力學第一定律
- 熱力學第一定律對等值過程的應用

1、等容（體）過程





10.2 熱力學第一定律

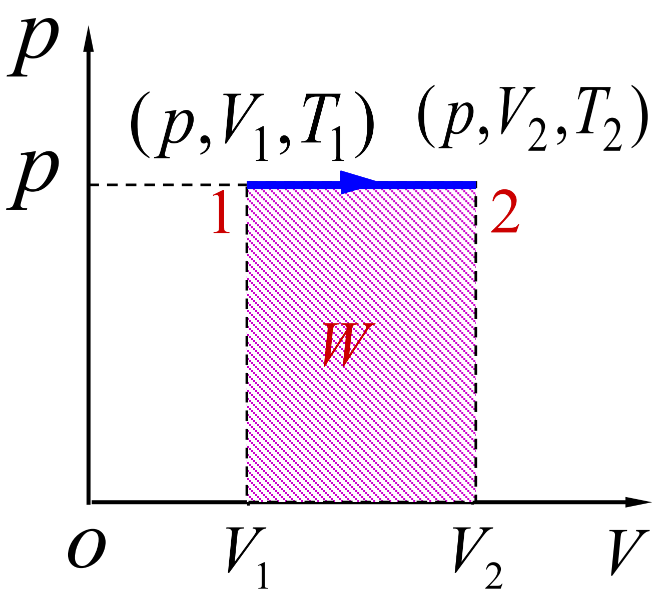
- 熱力學第一定律
- 熱力學第一定律對等值過程的應用

2、等壓過程

特性 $p=$ 常量

過程方程 $VT^{-1}=$ 常量

功 $W=p(V_2-V_1)$



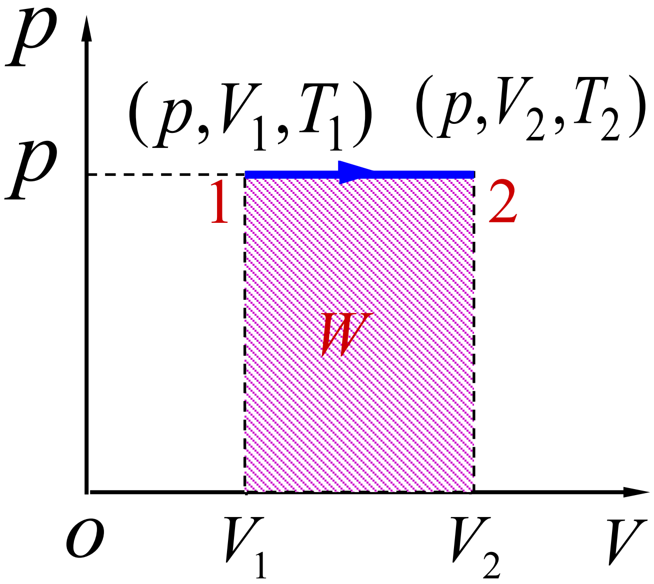
由熱力學第一定律

$$\mathrm{d}Q_p=\mathrm{d}E+\mathrm{d}W$$

10.2 熱力學第一定律

- 熱力學第一定律
- 熱力學第一定律對等值過程的應用

等壓摩爾熱容: 1mol 理想氣體在等壓過程中吸收熱量 $\mathrm{d}Q_p$, 溫度升高 $\mathrm{d}T$, 其摩爾定壓熱容爲:



$$\mathrm{d}Q_p = C_{p,\mathrm{m}}\mathrm{d}T$$

$$C_{p,\mathrm{m}} = \frac{\mathrm{d}Q_p}{\mathrm{d}T}$$

10.2 熱力學第一定律

- 熱力學第一定律
- 熱力學第一定律對等值過程的應用

摩爾熱容比（絕熱係數） $\mathrm{d}Q_p = C_{p,\mathrm{m}}\mathrm{d}T = \mathrm{d}E + p\mathrm{d}V$

$$\mathrm{d}E = C_{V,\mathrm{m}}\mathrm{d}T \qquad p\mathrm{d}V = R\mathrm{d}T$$

◆ 可得摩爾定壓熱容和摩爾定體熱容的關係

$$C_{p,\mathrm{m}} = C_{V,\mathrm{m}} + R$$ —— **邁耶公式**

在等壓過程中，1mol理想氣體溫度升高1K時，要比在等體過程中多吸收8.31 J 的熱量，用于對外作功。

◆ 摩爾熱容比 $\gamma = C_{p,\mathrm{m}} / C_{V,\mathrm{m}}$

10.2 熱力學第一定律

- 熱力學第一定律
- 熱力學第一定律對等值過程的應用

摩爾熱容比（絕熱係數）

$$C_{p,m}=\left(\frac{i}{2}+1\right)R=\frac{i+2}{2}R \qquad C_{V,m}=\frac{i}{2}R$$

$$\gamma=\frac{C_{p,m}}{C_{V,m}}=\frac{i+2}{i}=\begin{cases}1.33 & i=6\\ 1.40 & i=5\\ 1.67 & i=3\end{cases}$$

☞ 理想氣體的熱容與溫度無關。這一結論在低溫時與實驗值相符，在高溫時與實驗值不符。

10.2 熱力學第一定律

- 熱力學第一定律
- 熱力學第一定律對等值過程的應用

2、等壓過程

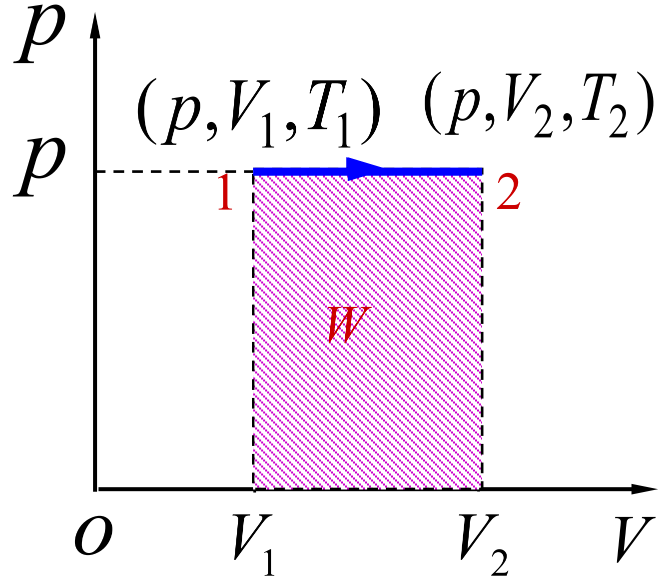
三個量:

$$W = p(V_2 - V_1)$$

$$= \nu R(T_2 - T_1)$$

$$Q_p = \nu C_{p,\mathrm{m}}(T_2 - T_1)$$

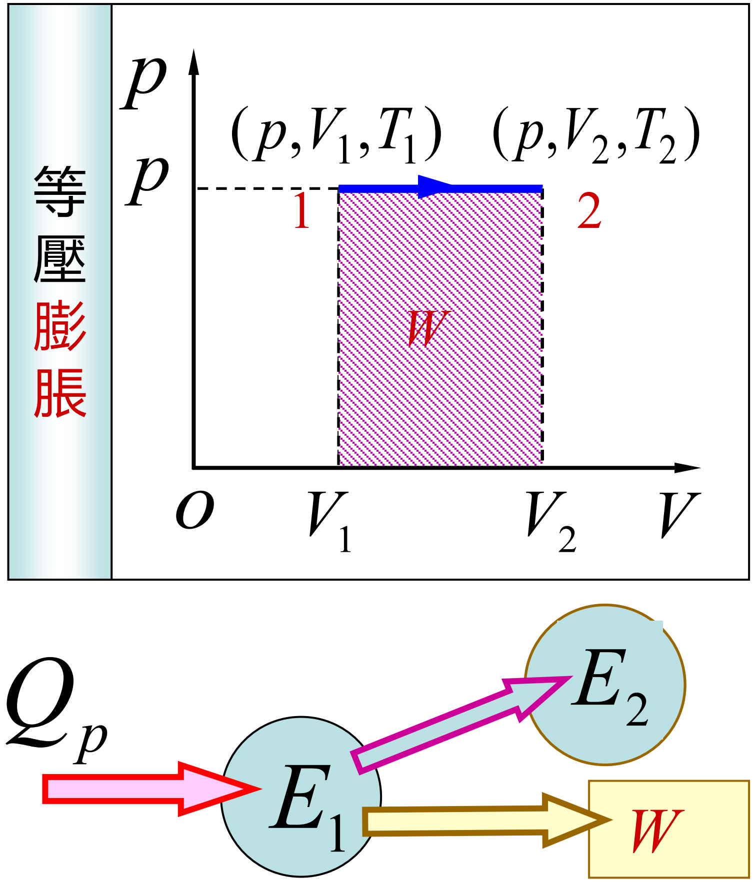
$$E_2 - E_1 = \nu C_{V,\mathrm{m}}(T_2 - T_1)$$

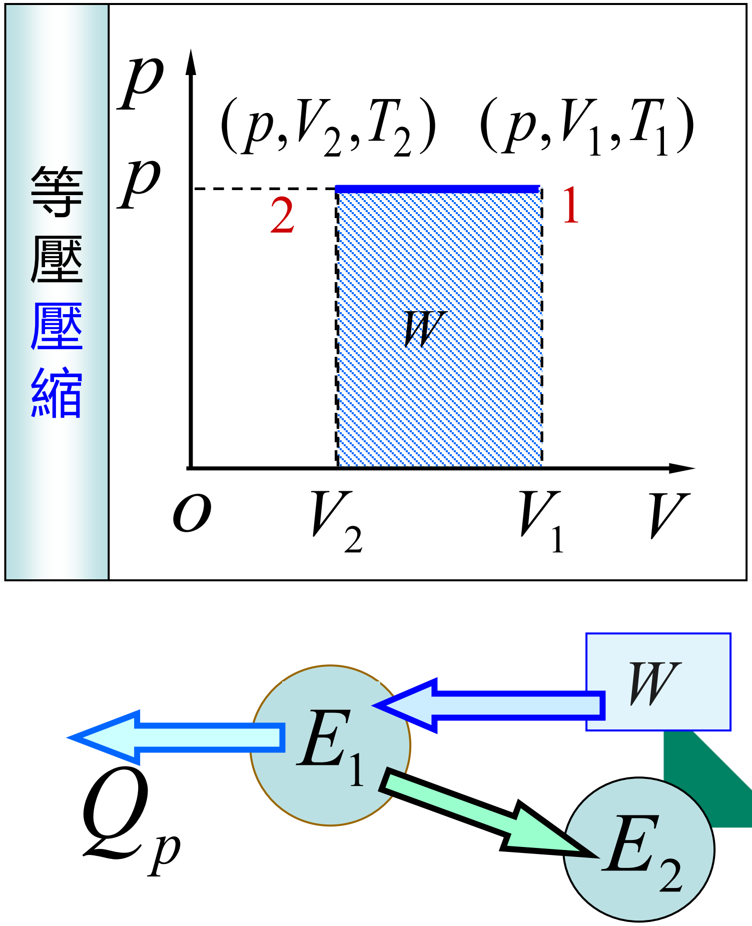


等壓過程中，系統從外界吸熱，一部分用來增加氣體內能，一部分用來對外作功

10.2 熱力學第一定律

- 熱力學第一定律
- 熱力學第一定律對等值過程的應用





10.2 熱力學第一定律

- 熱力學第一定律
- 熱力學第一定律對等值過程的應用

3、等溫過程

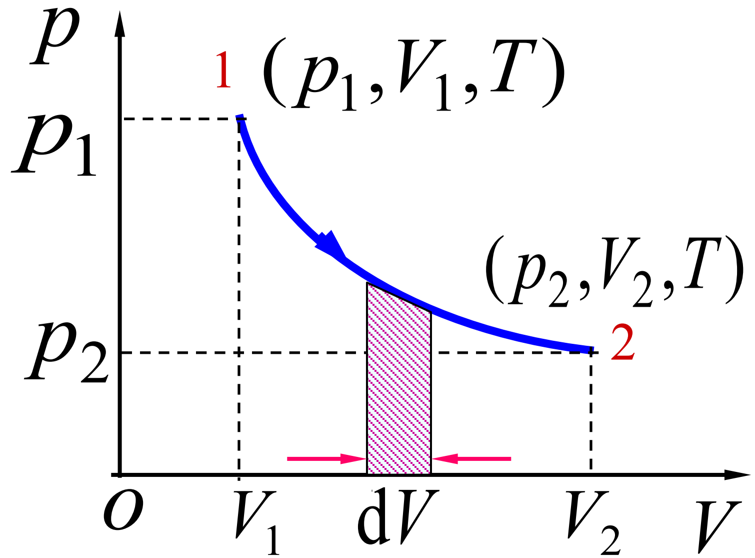
特徵　$T=$ 常量

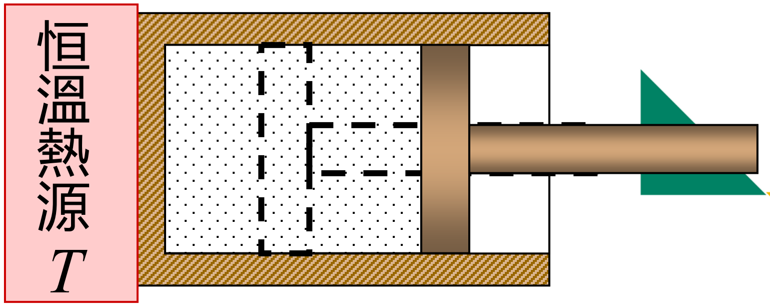
過程方程　$pV=$ 常量

$$\mathrm{d}E=0$$

由熱力學第一定律

$$\mathrm{d}Q_T=\mathrm{d}W=p\mathrm{d}V$$





10.2 熱力學第一定律

- 熱力學第一定律
- 熱力學第一定律對等值過程的應用

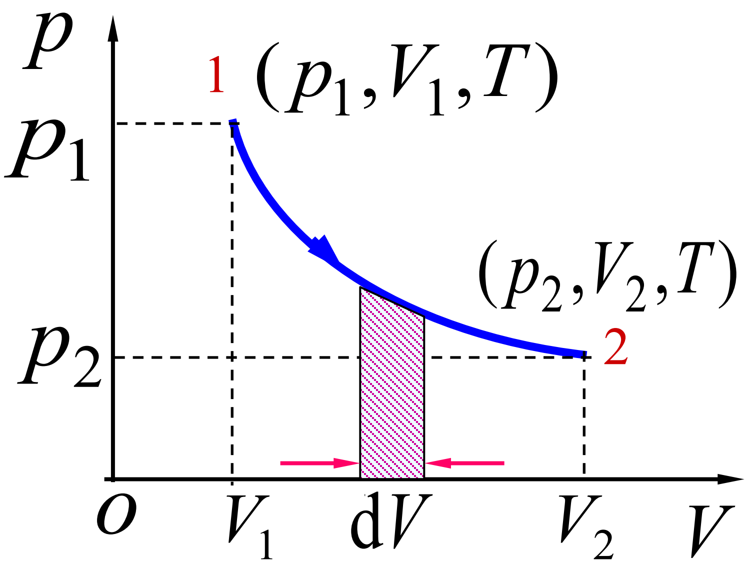
3、等溫過程

$$Q_T = W = \int_{V_1}^{V_2} p \mathrm{d}V$$

$$p = \nu \frac{RT}{V}$$

$$Q_T = W = \int_{V_1}^{V_2} \nu \frac{RT}{V} \mathrm{d}V = \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$= \nu RT \ln \frac{p_1}{p_2}$$

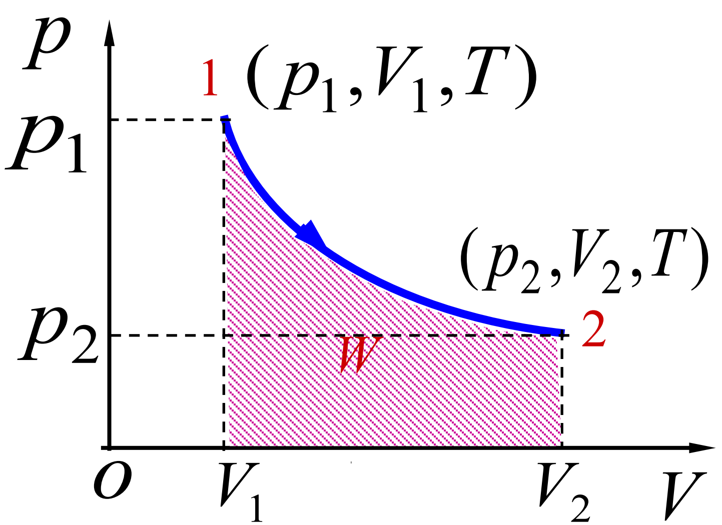


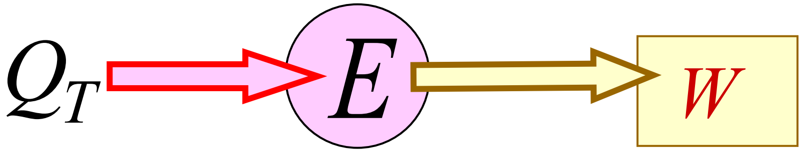
等溫過程中，系統從外界吸熱全部用來對外作功

10.2 熱力學第一定律

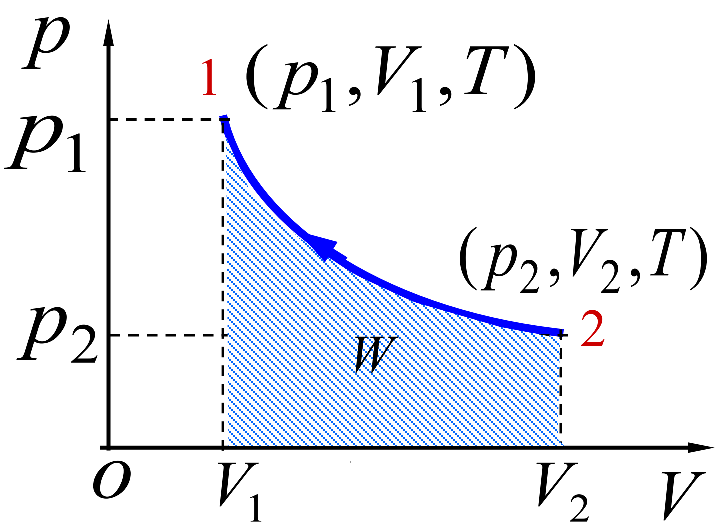
- 熱力學第一定律
- 熱力學第一定律對等值過程的應用

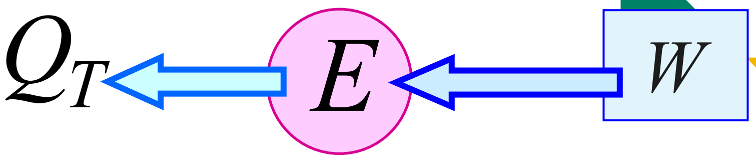
等溫膨脹





等溫壓縮





10.2 熱力學第一定律

● 熱力學第一定律

例 5-1 有 1mol 理想气体，如图 5-6 所示，（1）经历从 a 到 b 等温过程；（2）经历从 a 到 c 等容过程，再经历从 c 到 b 等压过程，计算以上两种过程系统做功和吸热大小。

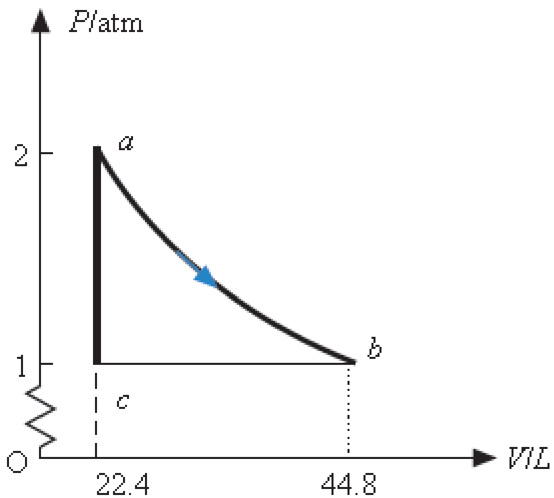


图 5-6 例 5-1 图

解（1）从 a 到 b 等温过程，根据热力学第一定律

$Q_{ab} = \Delta E + W_{ab}$，等温过程 $\Delta E = 0$，则

$$Q_{ab} = W_{ab} = RT\ln\frac{V_b}{V_a} = 2\times1.013\times10^5\times22.4\times10^{-3}\times\ln 2\text{J}$$

$$=31.5\times10^2\text{J}。$$

注意这里运用了理想气体状态方程 $pV = \nu RT$。

（2）从 a 经历 c 到 b 过程，根据热力学第一定律 $Q_{acb} = \Delta E + W_{acb}$，由于初状态 a 与末状态 b 等温 $\Delta E = 0$，则

$$Q_{acb} = W_{acb} = 1\times1.013\times10^5\times22.4\times10^{-3}\text{J} = 22.7\times10^2\text{J}。$$

注意系统从 a 到 c 是等容过程，系统不做功，即 $W_{acb} = W_{cb}$。

10.2 熱力學第一定律

- 熱力學第一定律

例 5-2 一定量的理想气体经历 acb 过程时吸热 500J，如图 5-7 所示，则经历 $acbda$ 过程时吸热为多少？

解 根据热力学第一定律，系统经历 acb 的过程 $Q_{acb}=\Delta E+\int_{V_a}^{V_b}PdV$。

由于系统初状态 a 和系统末状态 b 满足 $P_aV_a=P_bV_b$，因此 a、b 两状态温度相同，系统经历 acb 的过程内能没有改变，即 $\Delta E=0$，则有

$$Q_{acb}=\int_{V_a}^{V_b}PdV$$

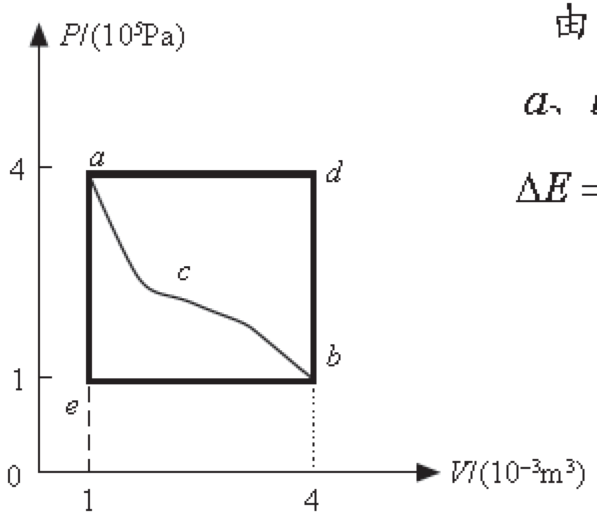


图 5-7 例 5-2 图

在 P-V 图上，系统状态过程曲线下所包围的面积等于系统做功大小，因此

$$A=\int_{V_a}^{V_b}PdV=500\text{J}$$

由于体积增大，因此系统对外做正功。

10.2 熱力學第一定律

- 熱力學第一定律

当系统经历 $acbda$ 过程时，系统初、末状态相同，系统内能改变量 $\Delta E=0$，根据热力学第一定律有

$$Q_{acbda}=\int_{V_{acb}}P\mathrm{d}V+\int_{V_{bda}}P\mathrm{d}V$$

已知 $\int_{V_{acb}}P\mathrm{d}V=500\mathrm{J}$，$b$ 到 d 过程时为等体过程，系统不做功，则有

$$\int_{V_{bda}}P\mathrm{d}V=\int_{V_d}^{V_a}P\mathrm{d}V=-4\times10^5\times3\times10^{-3}\mathrm{J}=-1200\mathrm{J}$$

系统从 d 到 a 过程被压缩，对外做负功，因此得到系统经历 $acbda$ 过程吸收的热量为

$$Q_{acbda}=(500-1\,200)\mathrm{J}=-700\mathrm{J}$$

10.2 熱力學第一定律

- 熱力學第一定律
- 熱力學第一定律對等值過程的應用

4、絕熱過程

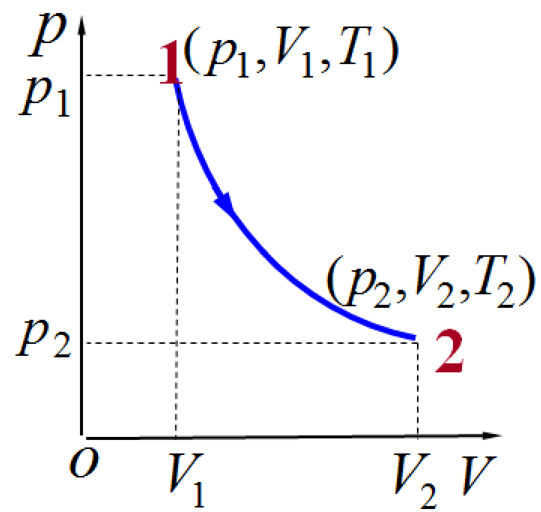
與外界無熱量交換的過程

特徵 $\mathrm{d}Q = 0$

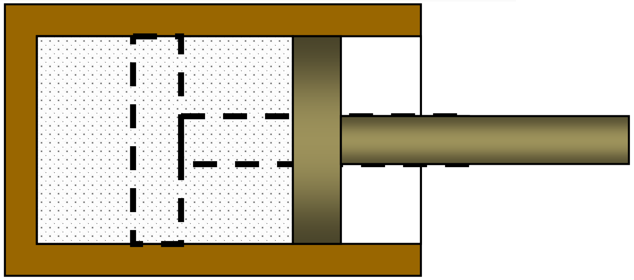
由熱力學第一定律

$$\mathrm{d}W = -\mathrm{d}E$$

$$\boxed{\mathrm{d}E = \nu C_{V,\mathrm{m}} \mathrm{d}T}$$



絕熱的汽缸壁和活塞



10.2 熱力學第一定律

- 熱力學第一定律
- 熱力學第一定律對等值過程的應用

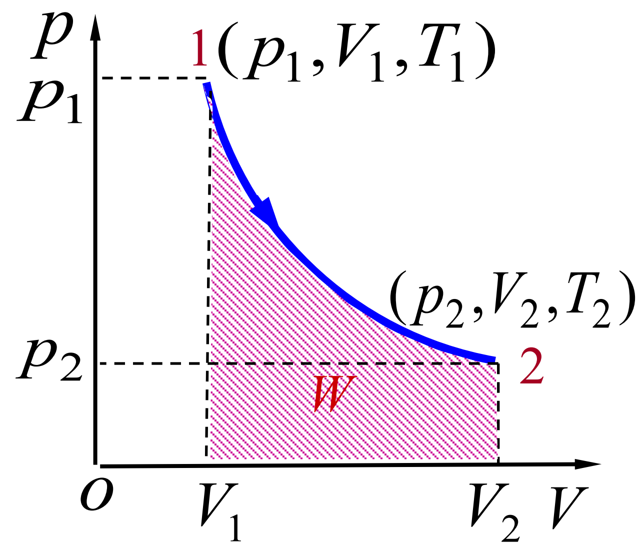
$$W=\int_{V_1}^{V_2} p\mathrm{d}V=-\int_{T_1}^{T_2}\nu C_{V,\mathrm{m}}\mathrm{d}T$$

$$=-\nu C_{V,\mathrm{m}}(T_2-T_1)$$

由熱力學第一定律有

$$W=-\Delta E$$

$$W=\nu C_{V,\mathrm{m}}(T_1-T_2)$$



10.2 熱力學第一定律

- 熱力學第一定律
- 熱力學第一定律對等值過程的應用

若已知 p_1, V_1, p_2, V_2 及 γ

由 $pV = \nu RT$ 可得

$$W = C_{V,\mathrm{m}}\left(\frac{p_1V_1}{R} - \frac{p_2V_2}{R}\right) = \frac{C_{V,\mathrm{m}}}{C_{p,\mathrm{m}} - C_{V,\mathrm{m}}}(p_1V_1 - p_2V_2)$$

$$W = \frac{p_1V_1 - p_2V_2}{\gamma - 1}$$

10.2 熱力學第一定律

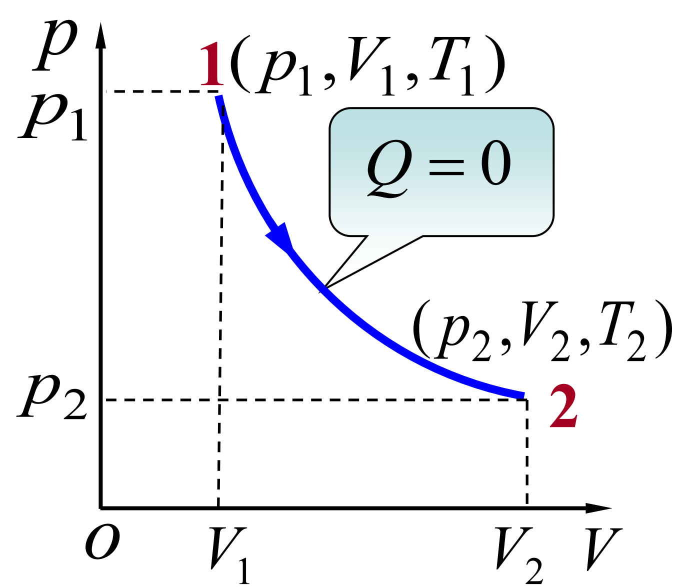
- 熱力學第一定律
- 熱力學第一定律對等值過程的應用

◈ 絕熱過程方程的推導

$$\because \mathrm{d}Q = 0, \quad \therefore \mathrm{d}W = -\mathrm{d}E$$

$$\begin{cases} p\mathrm{d}V = -\nu C_{V,\mathrm{m}}\mathrm{d}T \\ pV = \nu RT \end{cases}$$

$$\nu \frac{RT}{V}\mathrm{d}V = -\nu C_{V,\mathrm{m}}\mathrm{d}T$$



10.2 熱力學第一定律

- 熱力學第一定律
- 熱力學第一定律對等值過程的應用

分離變量得 $$\frac{\mathrm{d}V}{V} = -\frac{C_{V,\mathrm{m}}}{R}\frac{\mathrm{d}T}{T}$$

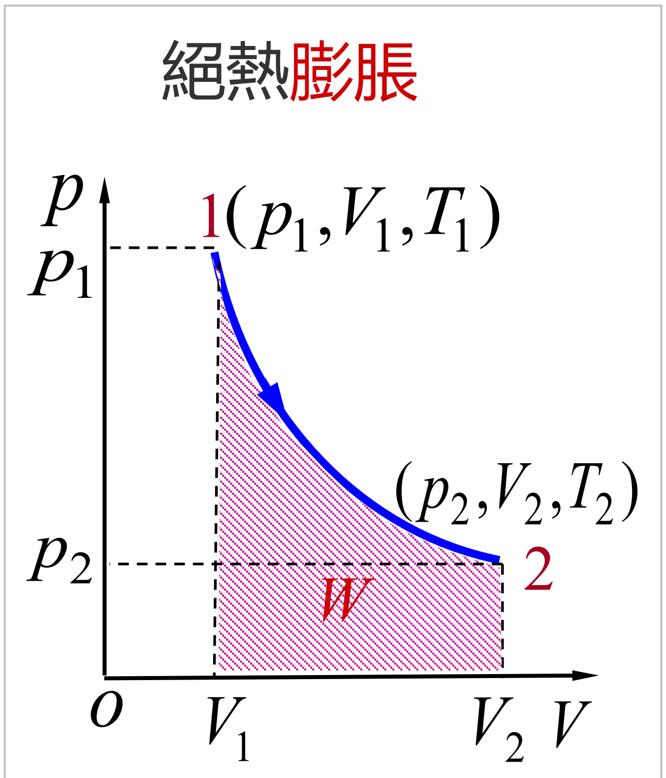
$$\int \frac{\mathrm{d}V}{V} = -\int \frac{1}{\gamma - 1}\frac{\mathrm{d}T}{T}$$

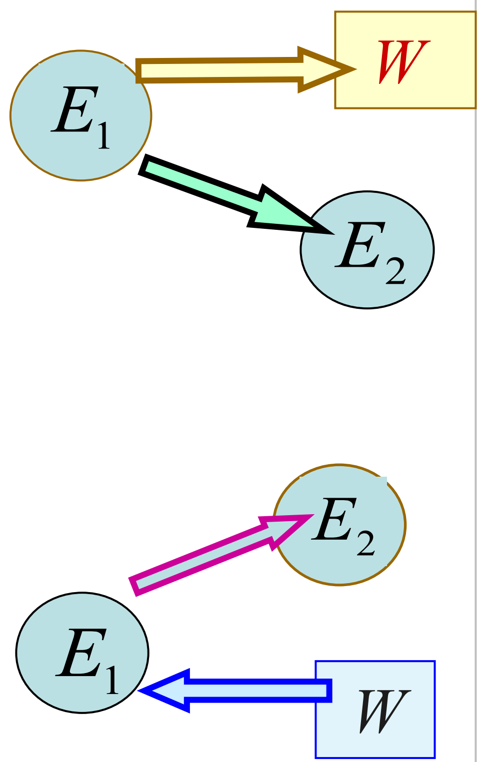
$$V^{\gamma-1}T = \text{常量}$$

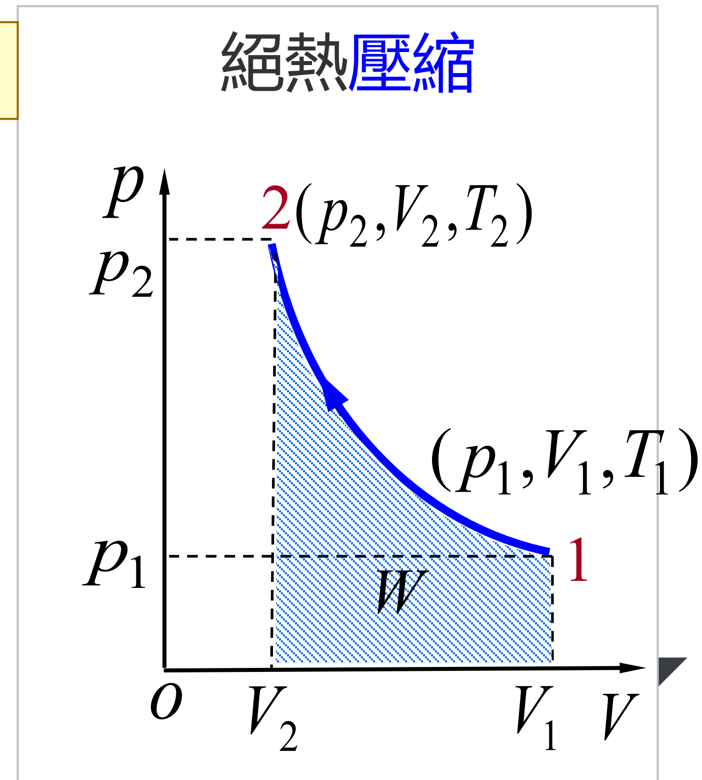
絕熱方程	
	$V^{\gamma-1}T = \text{常量}$
	$pV^{\gamma} = \text{常量}$
	$p^{\gamma-1}T^{-\gamma} = \text{常量}$

10.2 熱力學第一定律

- 熱力學第一定律
- 熱力學第一定律對等值過程的應用







10.2 熱力學第一定律

- 熱力學第一定律
- 熱力學第一定律對等值過程的應用

絕熱綫和等溫綫

絕熱過程曲綫的斜率

$$pV^{\gamma} = \text{常量}$$

$$\gamma p V^{\gamma-1}\mathrm{d}V + V^{\gamma}\mathrm{d}p = 0$$

$$\left(\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}V}\right)_a = -\gamma \frac{p_A}{V_A}$$

10.2 熱力學第一定律

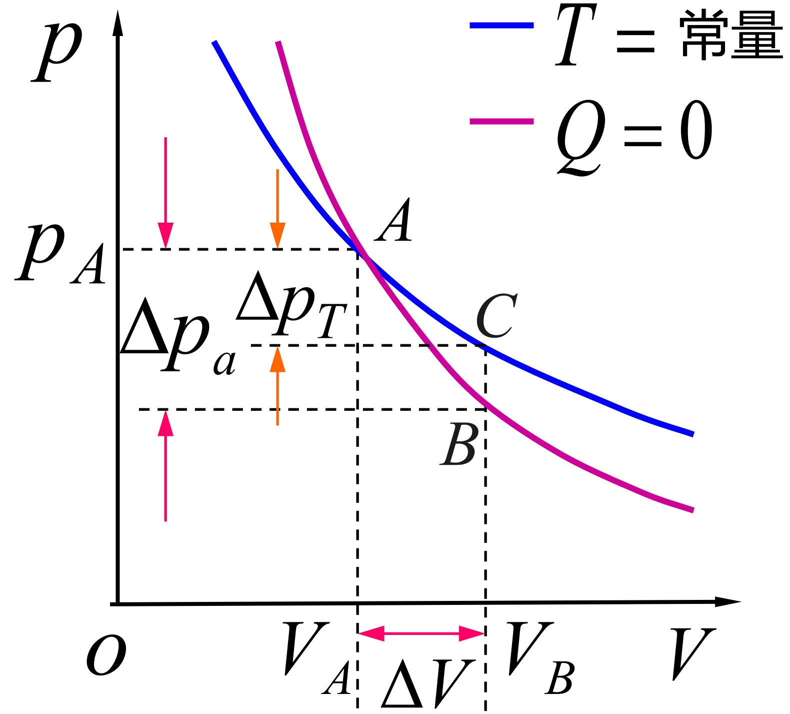
- 熱力學第一定律
- 熱力學第一定律對等值過程的應用

等溫過程曲綫的斜率

$$pV = \text{常量}$$

$$p\mathrm{d}V + V\mathrm{d}p = 0$$

$$\left(\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}V}\right)_T = -\frac{p_A}{V_A}$$



絕熱綫的斜率大于等溫綫的斜率!

10.2 熱力學第一定律

- 熱力學第一定律

练一练 一定量的理想气体在PV图中的等温线与绝热线交点处两线的斜率之比为0.714，求C_v。

解：

$$\left(\frac{dP}{dV}\right)_T = -\frac{P}{V}$$

$$\left(\frac{dP}{dV}\right)_a = -\gamma\frac{P}{V}$$

$$\Rightarrow \quad \frac{\left(\frac{dP}{dV}\right)_T}{\left(\frac{dP}{dV}\right)_a} = \frac{1}{\gamma} = 0.714$$

由 $$\frac{C_p}{C_v} = \gamma \quad \Rightarrow \quad \frac{C_v + R}{C_v} = \gamma$$

$$C_v = \frac{R}{\gamma - 1} = 20.8\ (Jmol^{-1}K^{-1})$$

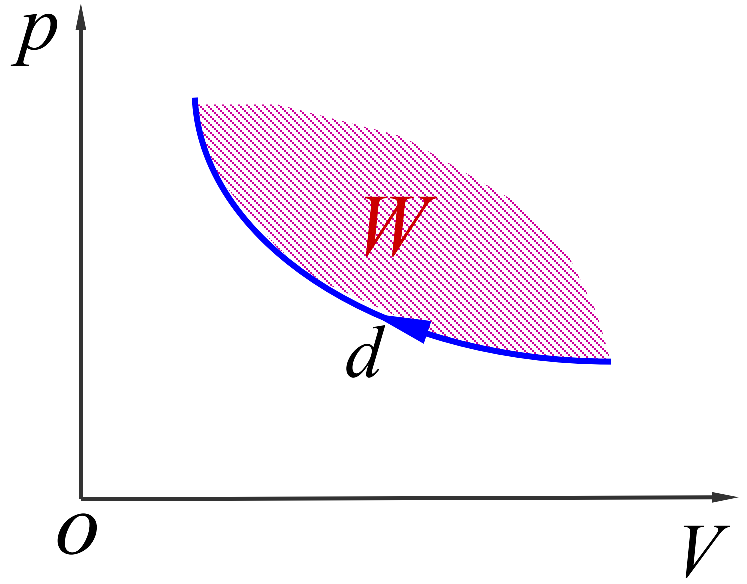
10.3 循環過程，卡諾循環

- 循環過程特徵
- 系統經過一系列變化狀態過程後，又回到原來的狀態的過程叫熱力學循環過程

特徵 $\Delta E = 0$

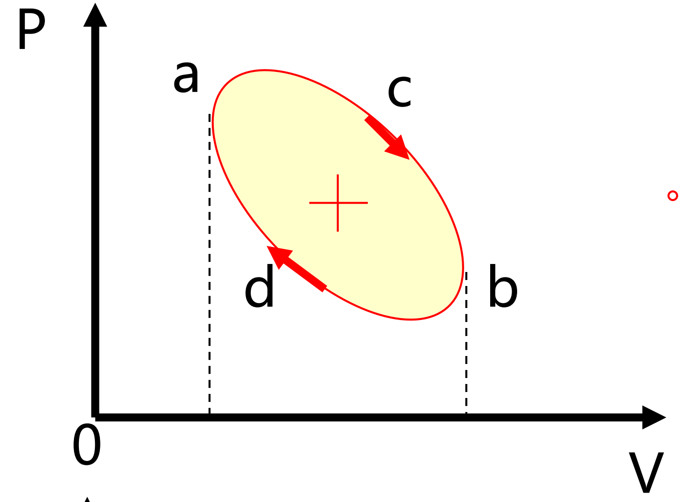
由熱力學第一定律

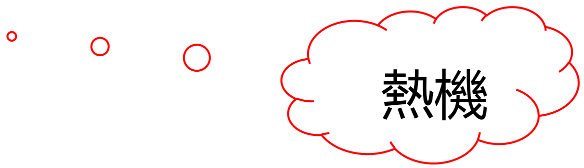
$$Q = W$$



10.3 循環過程，卡諾循環

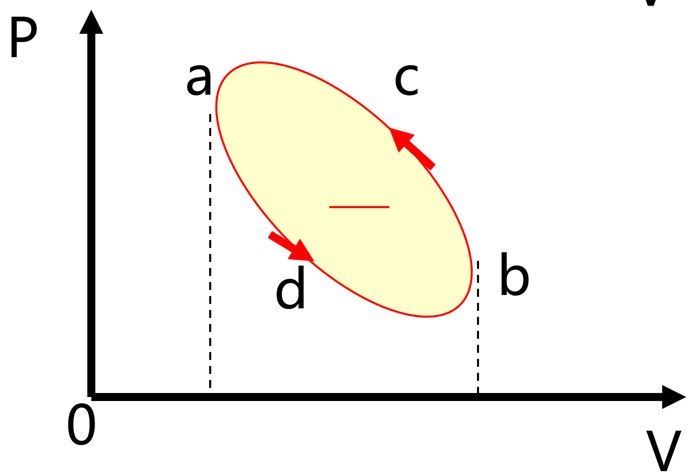
- 循環過程特徵
- 熱機與熱泵





順時針循環（正循環）

系統對外作功爲正

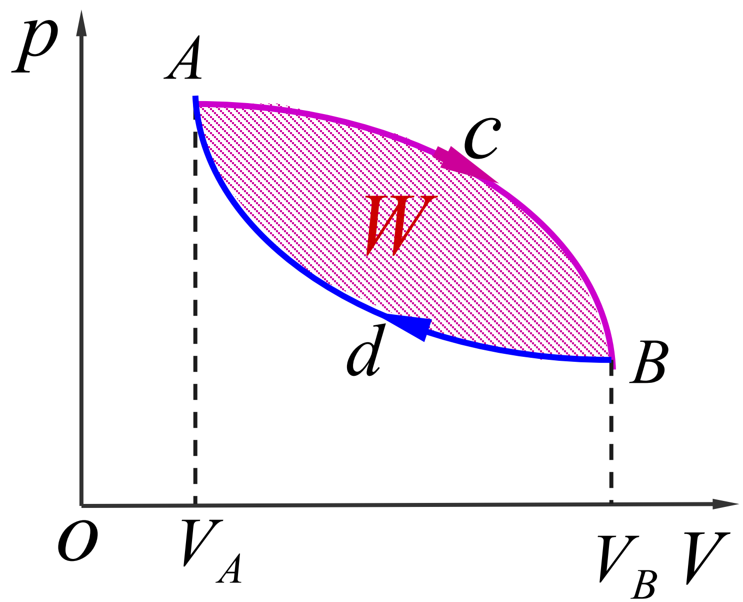


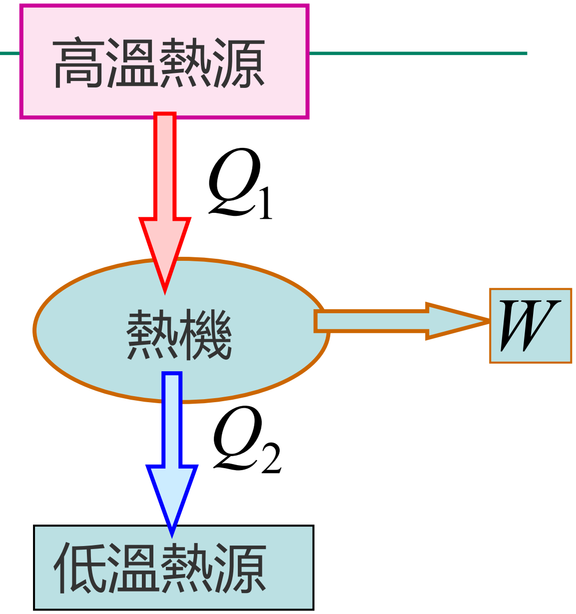
反時針循環（逆循環 ）

系統對外作功爲負

10.3 循環過程，卡諾循環

- 循環過程特徵
- 熱機的效率





淨功 $W = Q_1 - \boxed{Q_2} = Q$

(取絕對值)

總吸熱 $\longrightarrow Q_1$

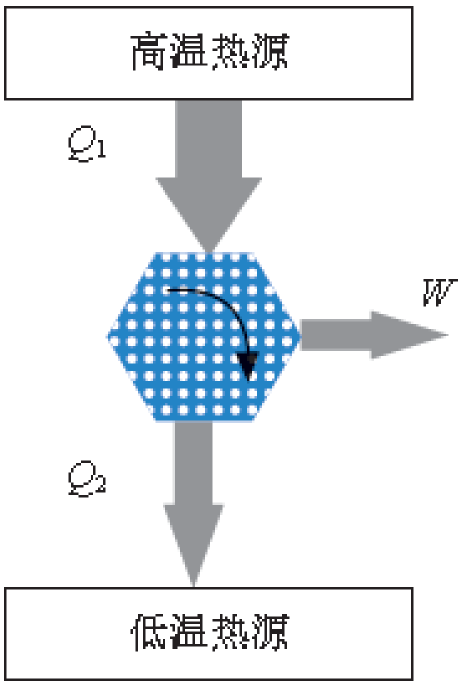
總放熱 $\longrightarrow Q_2$

淨吸熱 $\longrightarrow Q$

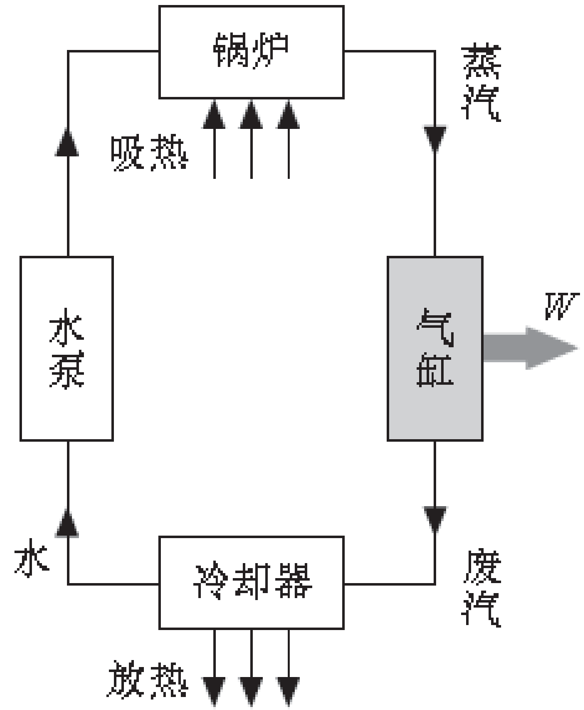
熱機效率 $$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{\boxed{Q_2}}{Q_1}$$

10.3 循環過程，卡諾循環

- 循環過程特徵



（a）

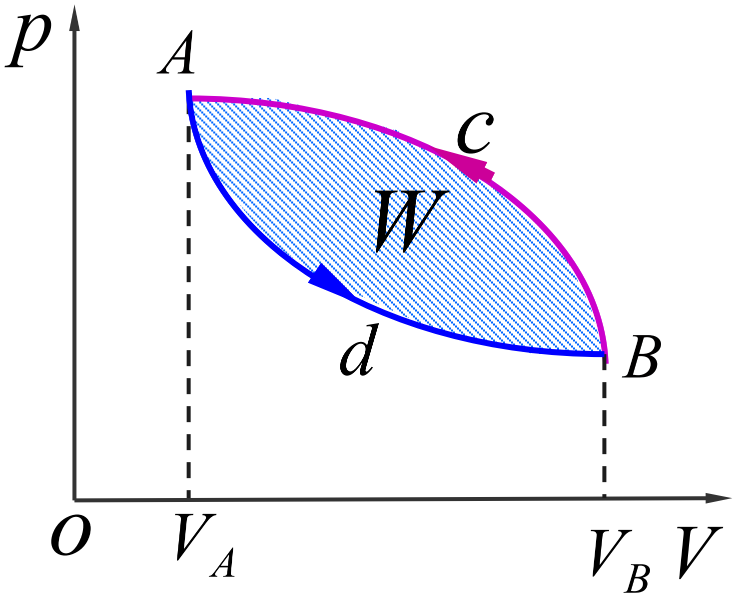


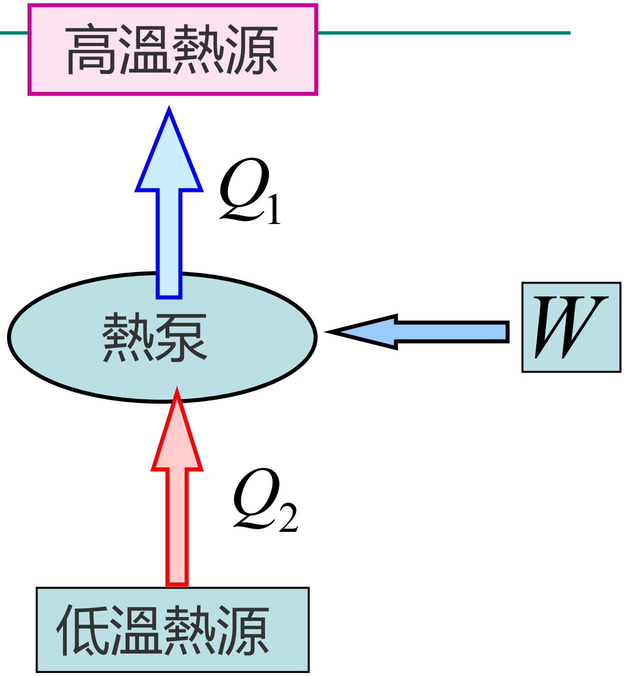
（b）

（a）热机的功热转化示意图；（b）蒸汽机的工作原理图

10.3 循環過程，卡諾循環

- 循環過程特徵
- 熱泵的效率





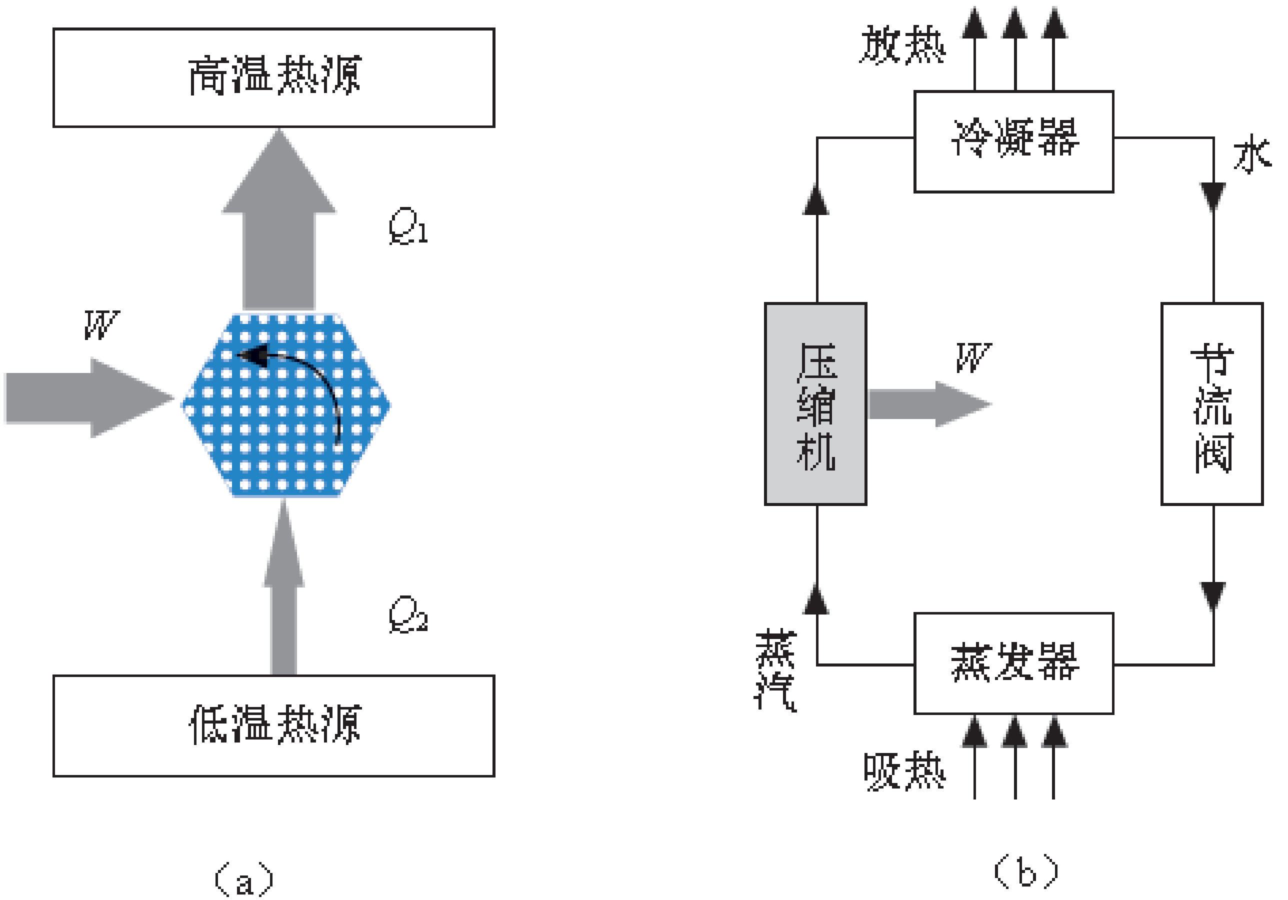
(取絕對值)

制冷係數 $$e_C = \frac{Q_2}{|W|} = \frac{Q_2}{\boxed{Q_1} - Q_2}$$

制熱係數 $$e_H = \frac{\boxed{Q_1}}{|W|} = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2}$$

10.3 循環過程，卡諾循環

- 循環過程特徵



(a) 热泵热功转换示意图；　(b) 热泵工作原理图

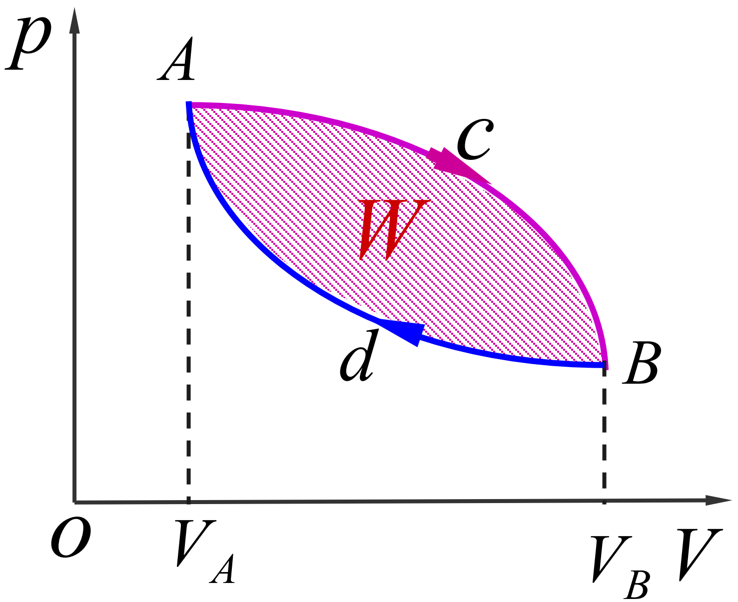
10.3 循環過程，卡諾循環

- 循環過程特徵
- 系統經過一系列變化狀態過程後，又回到原來的狀態的過程叫熱力學循環過程

特徵 $\Delta E = 0$

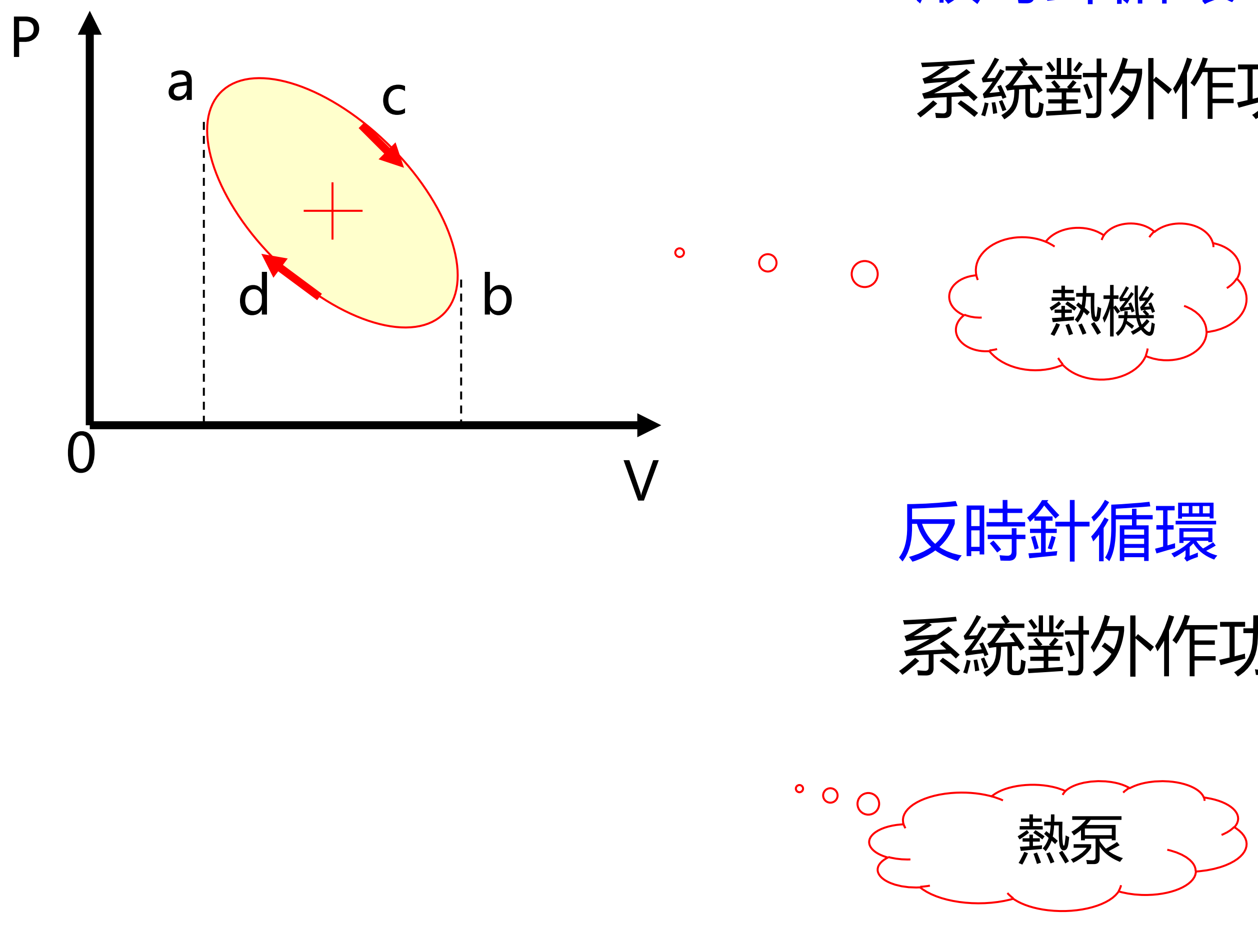
由熱力學第一定律

$$Q = W$$



10.3 循環過程，卡諾循環

- 循環過程特徵
- 熱機與熱泵



順時針循環（正循環）

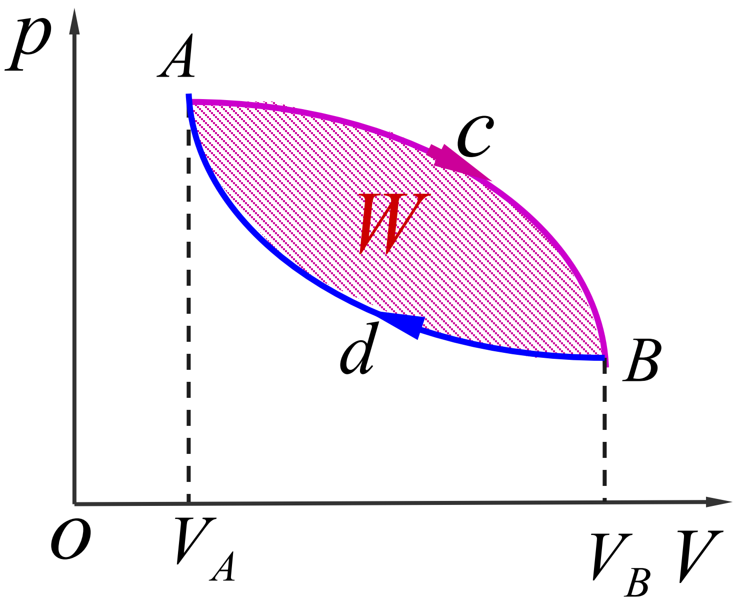
系統對外作功爲正

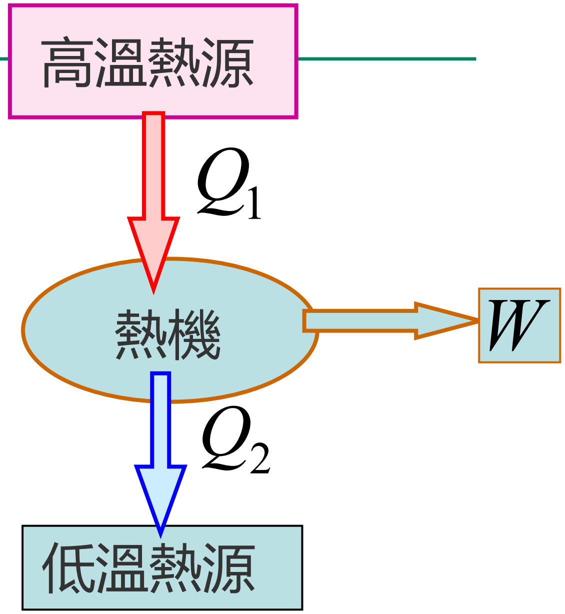
反時針循環（逆循環 ）

系統對外作功爲負

10.3 循環過程，卡諾循環

- 循環過程特徵
- 熱機的效率





淨功 $W = Q_1 - \boxed{Q_2} = Q$

(取絕對值)

總吸熱 $\longrightarrow Q_1$

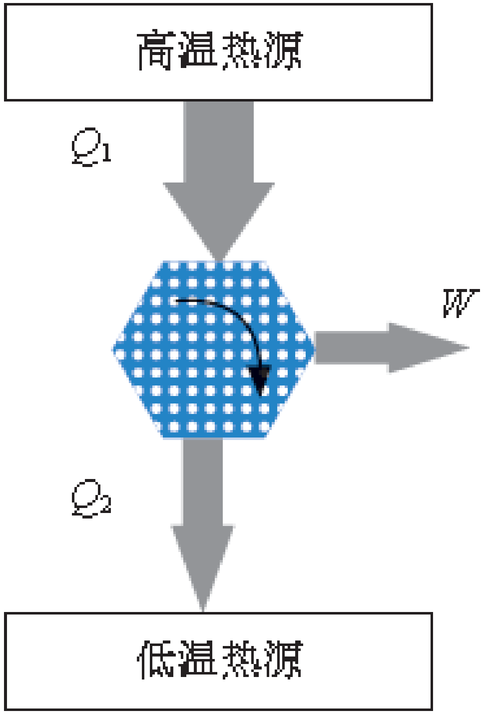
總放熱 $\longrightarrow Q_2$

淨吸熱 $\longrightarrow Q$

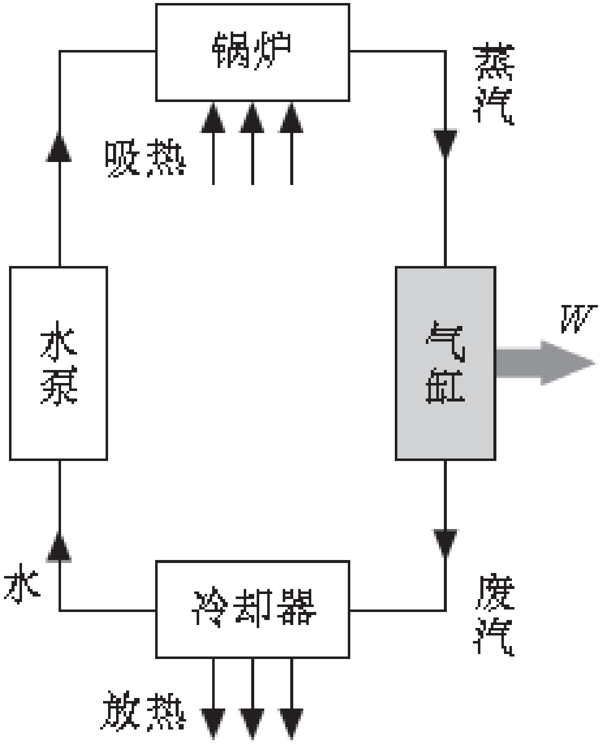
熱機效率 $\eta = \dfrac{W}{Q_1} = \dfrac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \dfrac{\boxed{Q_2}}{Q_1}$

10.3 循環過程，卡諾循環

- 循環過程特徵



(a)

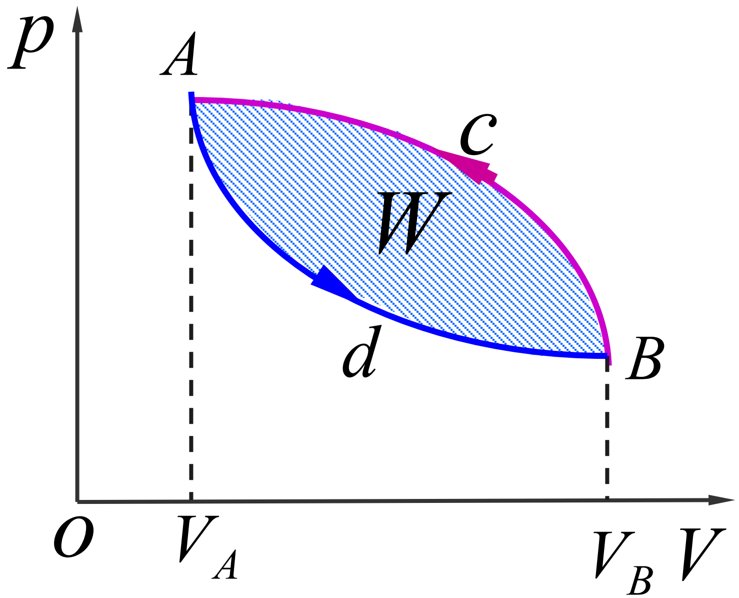


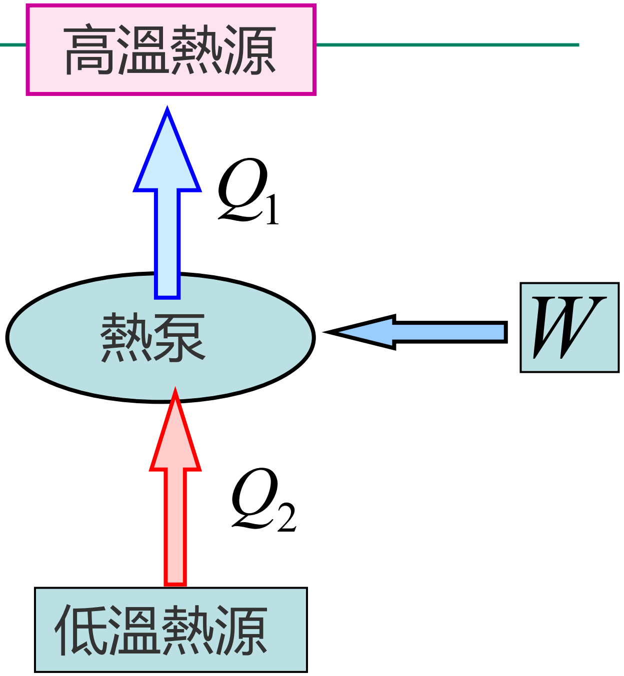
(b)

(a) 热机的功热转化示意图；　(b) 蒸汽机的工作原理图

10.3 循環過程，卡諾循環

- 循環過程特徵
- 熱泵的效率





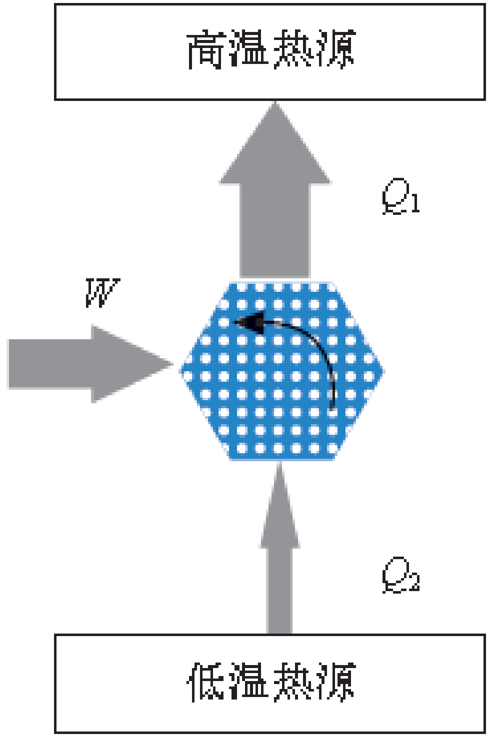
(取絕對值)

制冷係數 $e_C = \dfrac{Q_2}{|W|} = \dfrac{Q_2}{\boxed{Q_1} - Q_2}$

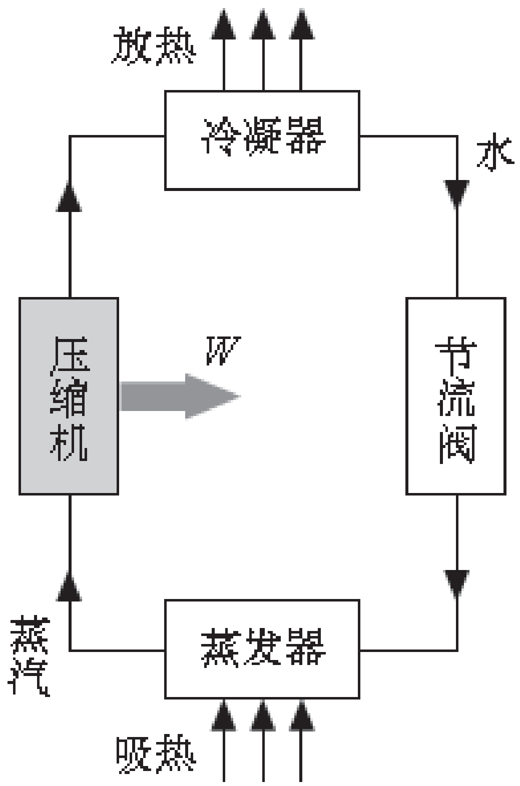
制熱係數 $e_H = \dfrac{\boxed{Q_1}}{|W|} = \dfrac{Q_1}{Q_1 - Q_2}$

10.3 循環過程，卡諾循環

- 循環過程特徵



（a）



（b）

（a）热泵热功转换示意图；

（b）热泵工作原理图

10.3 循環過程，卡諾循環

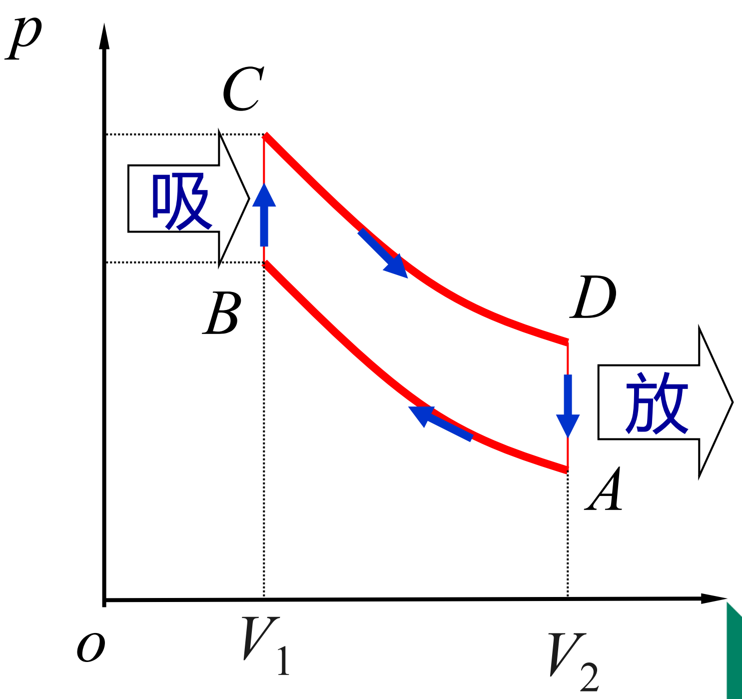
- 循環過程特徵
- 練一練 汽油機可近似看成如圖循環過程(Otto循環)，其中AB和CD爲絕熱過程，求此循環效率

解

$$\eta = 1 - \frac{|Q_{DA}|}{Q_{BC}}$$

$$= 1 - \frac{C_v(T_D - T_A)}{C_v(T_C - T_B)}$$

$$= 1 - \frac{T_D - T_A}{T_C - T_B}$$



10.3 循環過程，卡諾循環

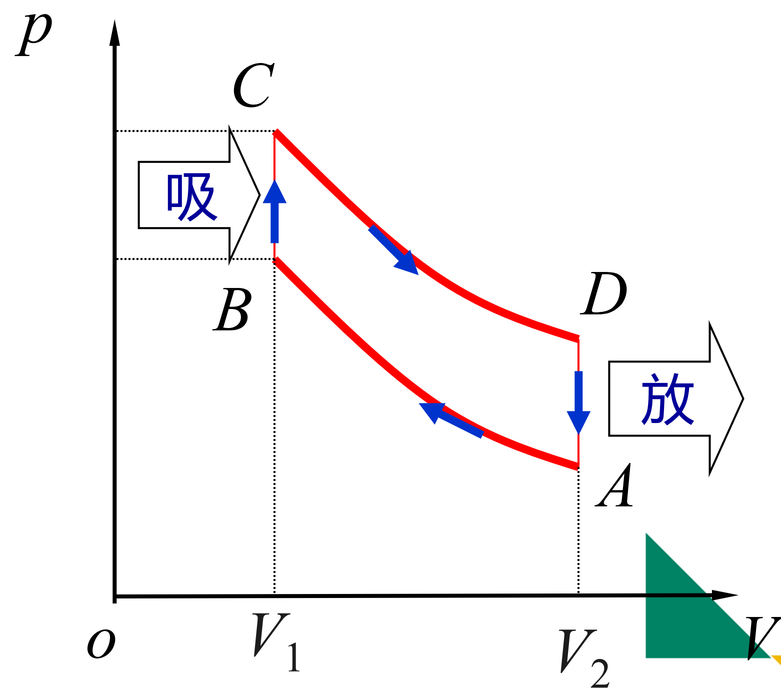
又BC和DA是絕熱過程：

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

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

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

$$=1-\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1}$$



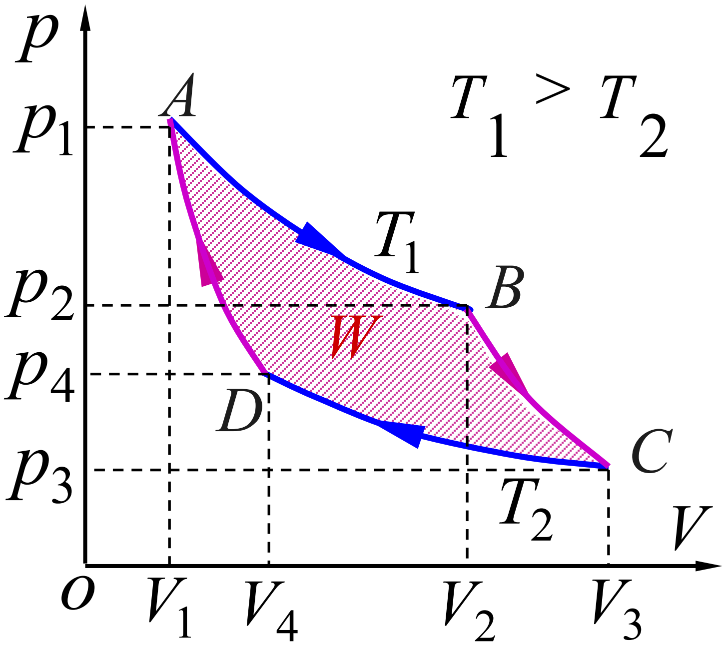
10.3 循環過程，卡諾循環

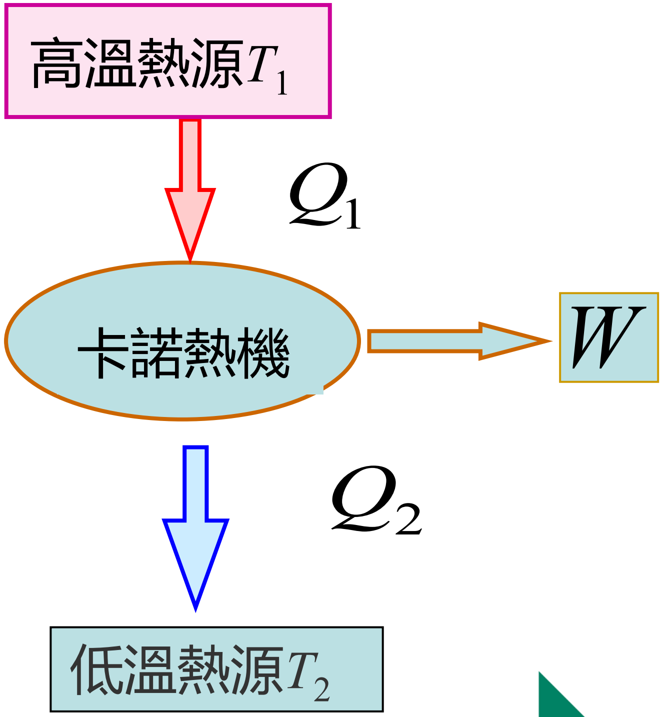
- 卡諾循環
- 1824 年法國的年青工程師卡諾提出一個工作在兩熱源之間的理想循環 ——卡諾循環
- 卡諾不僅給出了熱機效率的理論極限值； 還提出了著名的卡諾定理

图 5–15　萨迪 • 卡诺

10.3 循環過程，卡諾循環

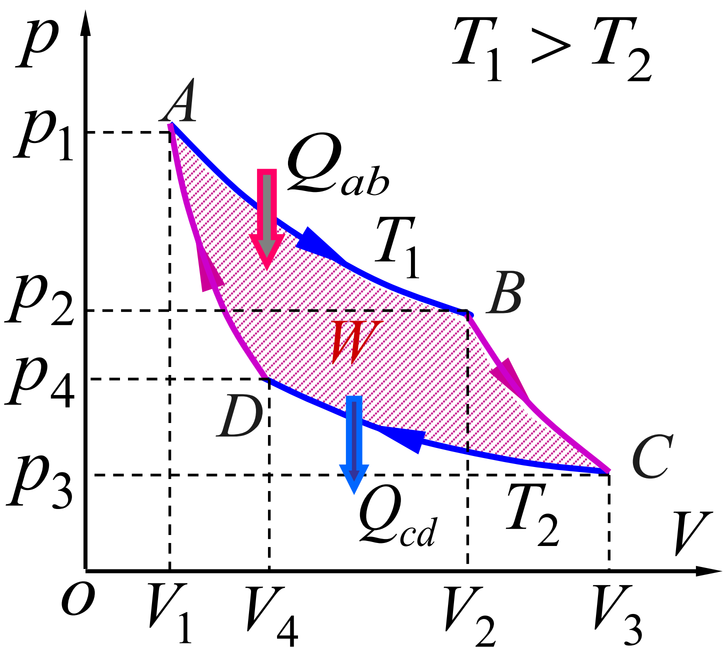
- 卡諾循環
- 卡諾循環是由兩個准靜態等溫過程和兩個准靜態絕熱過程組成





10.3 循環過程，卡諾循環

- 卡諾循環
- 卡諾循環效率



卡諾循環

A — B 等溫膨脹

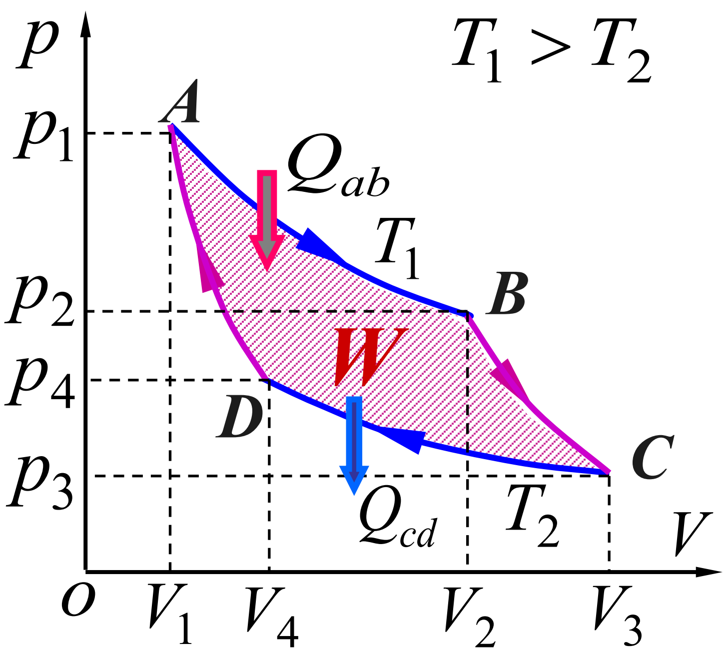
B — C 絕熱膨脹

C — D 等溫壓縮

D — A 絕熱壓縮

10.3 循環過程，卡諾循環

- 卡諾循環
- 卡諾循環效率



$A - B$ 等溫膨脹吸熱

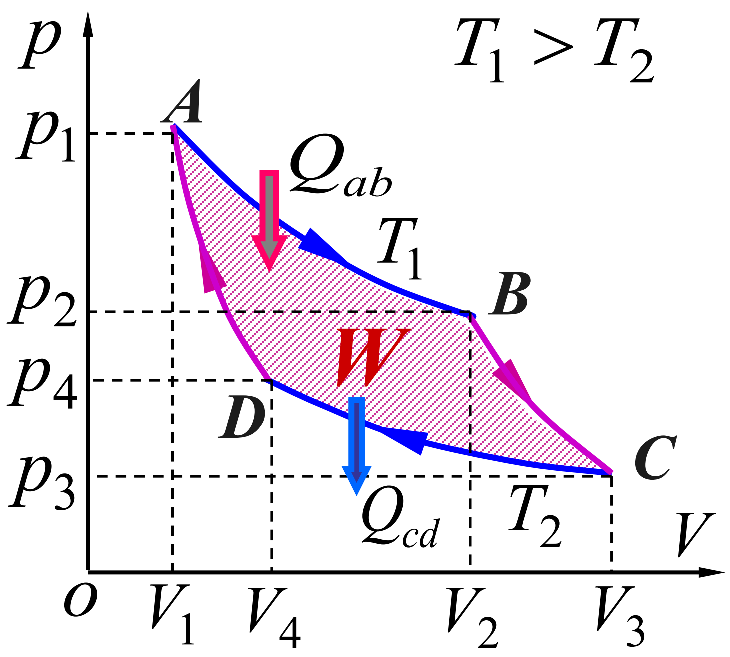
$$Q_1 = Q_{ab} = \nu R T_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$C - D$ 等溫壓縮放熱

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

10.3 循環過程，卡諾循環

- 卡諾循環
- 卡諾循環效率



B — C 絕熱過程

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

D — A 絕熱過程

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

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

10.3 循環過程，卡諾循環

- 卡諾循環
- 卡諾循環效率

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

◆ 卡諾熱機效率

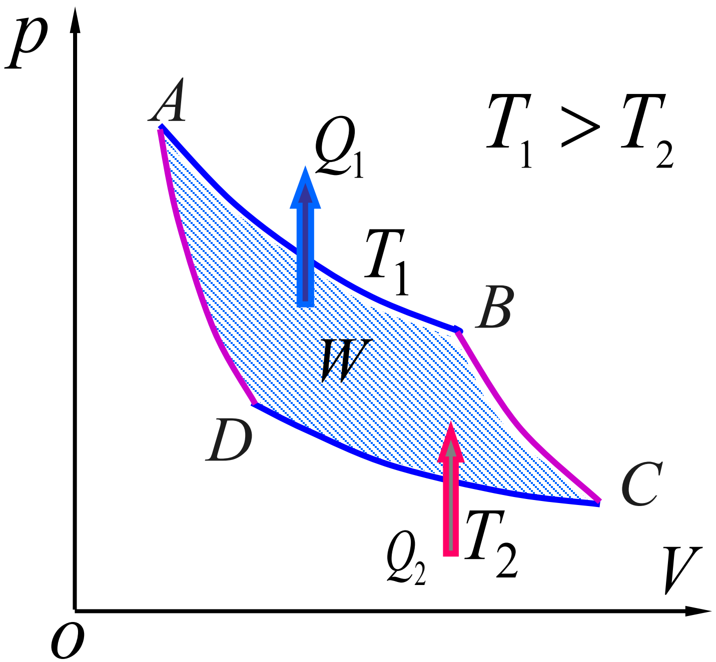
$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

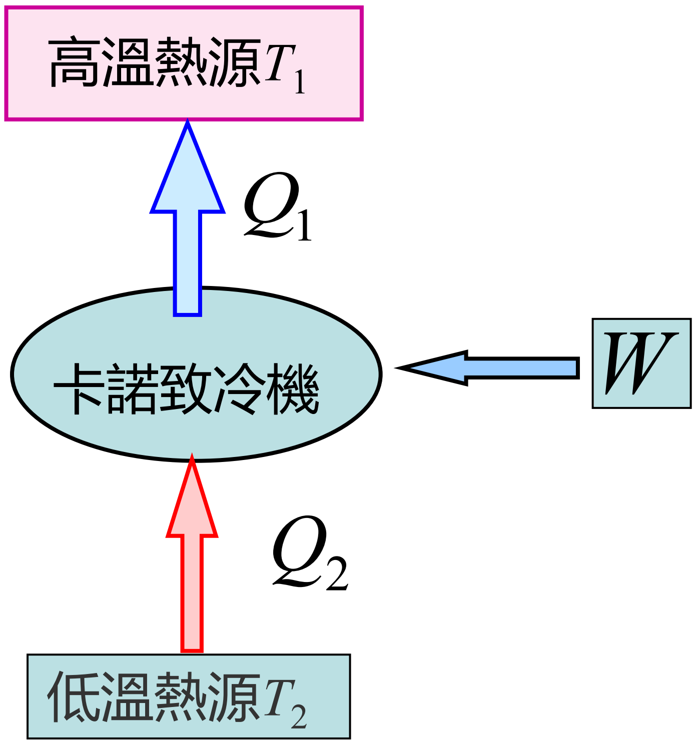
卡諾熱機效率與工作物質無關，只與兩個熱源的溫度有關，兩熱源的溫差越大，則卡諾循環的效率越高 .

10.3 循環過程，卡諾循環

- 卡諾循環
- 卡諾熱泵

◆卡諾逆循環



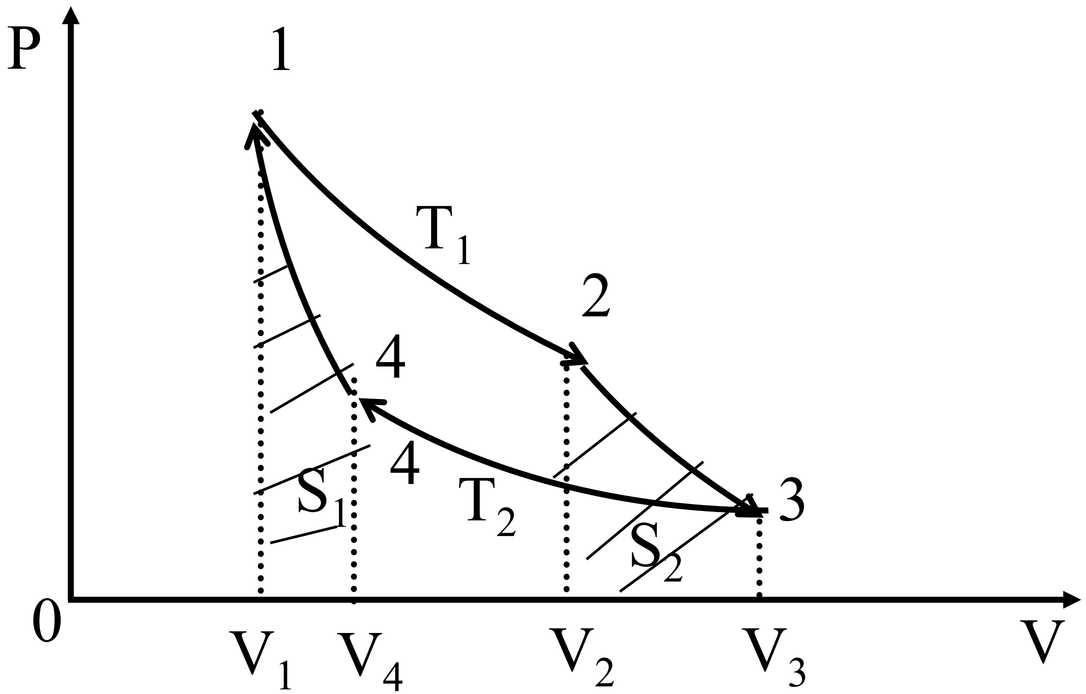


制冷係數 $e_C = \dfrac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \dfrac{T_2}{T_1 - T_2}$

制熱係數 $e_H = \dfrac{Q_1}{Q_1 - Q_2} = \dfrac{T_1}{T_1 - T_2}$

10.3 循環過程，卡諾循環

- 卡諾循環
- 練一練　如圖所示的卡諾循環中，證明：S1 = S2

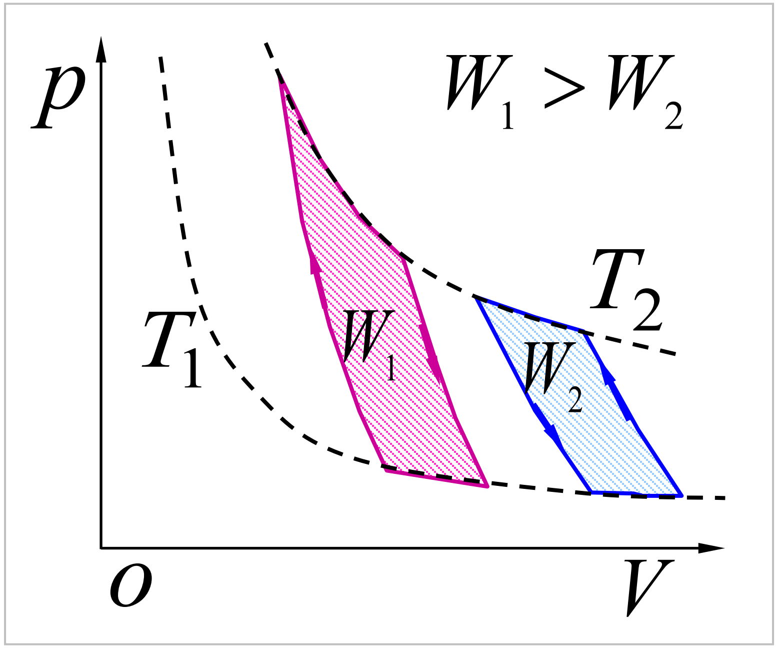


提示：2、3 之間與 4、1 之間溫差相同，內能變化相同，Q = 0，W必定相同。

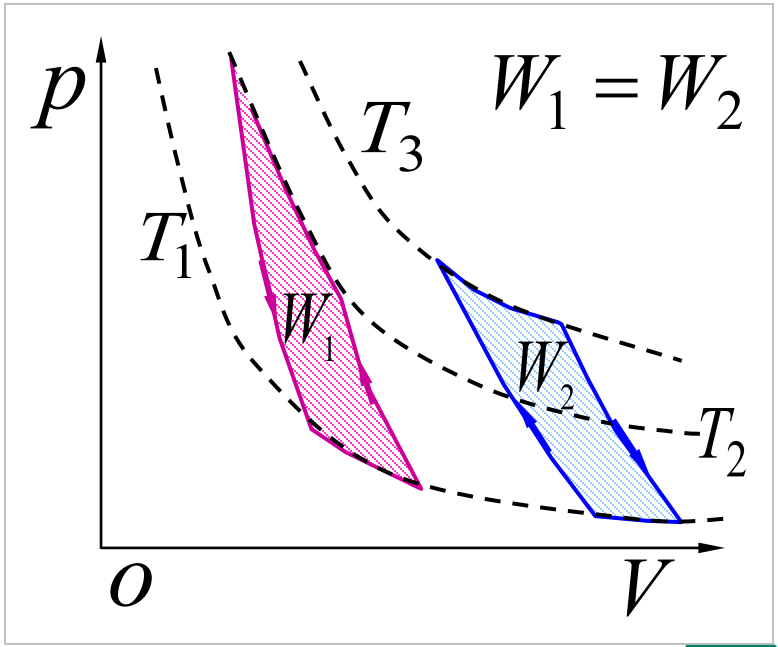
10.3 循環過程，卡諾循環

討 論

圖中兩卡諾循環 $\eta_1 = \eta_2$ 嗎？



$\eta_1 = \eta_2$



$\eta_1 < \eta_2$

10.4 熱力學第二定律

- 可逆過程與不可逆過程

- 在系統狀態變化過程中，如果逆過程能重複正過程的每一狀態，而且不引起其它變化， 這樣的過程叫做可逆過程
- 准靜態無摩擦過程爲可逆過程

- 在不引起其它變化的條件下，不能使逆過程重複正過程的每一狀態，或者雖能重複但必然會引起其它變化，這樣的過程叫做不可逆過程
- 非准靜態過程爲不可逆過程

10.4 熱力學第二定律

- 自然過程的方向性

氣體向真空的絕熱自由膨脹過程具有方向性

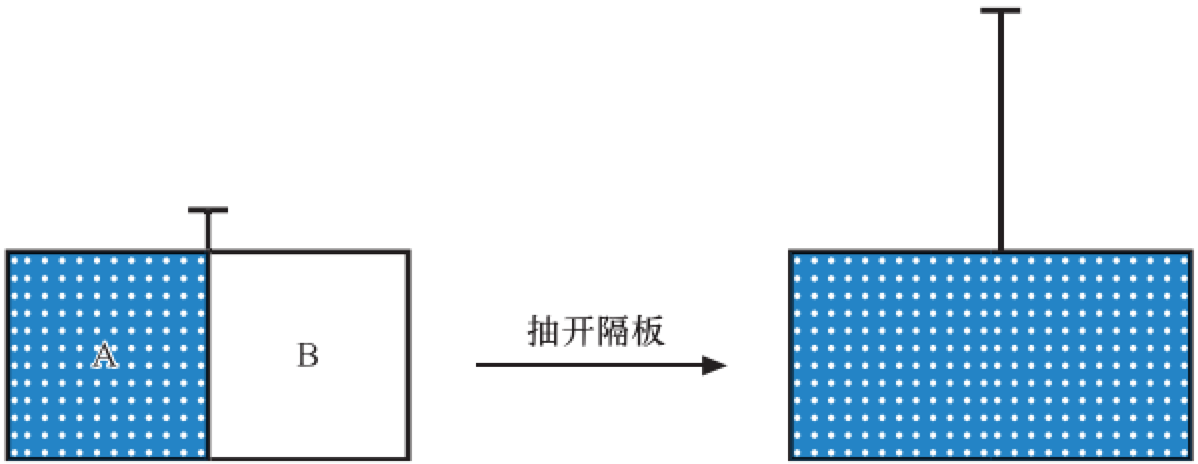


图 5-18　气体向真空绝热自由膨胀

$$Q=0,\quad W=0,\quad \Delta E=0$$

10.4 熱力學第二定律

- 自然過程的方向性

功熱轉換具有方向性

图 5-19　转动及撤除动力后的叶片

熱傳導具有方向性

10.4 熱力學第二定律

- 熱力學第二定律的兩種表述

1 開爾文說法

不可能製造出這樣一種循環工作的熱機，它只使單一熱源冷卻來做功，而不放出熱量給其它物體，或者說不使外界發生任何變化 .

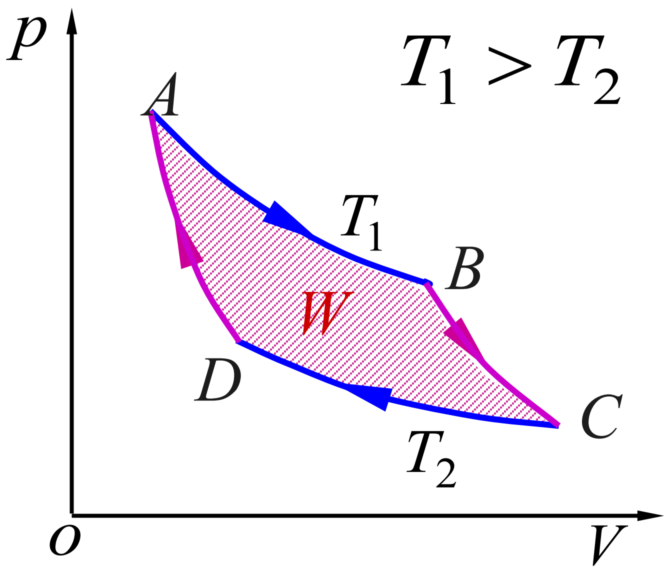
2 克勞修斯說法

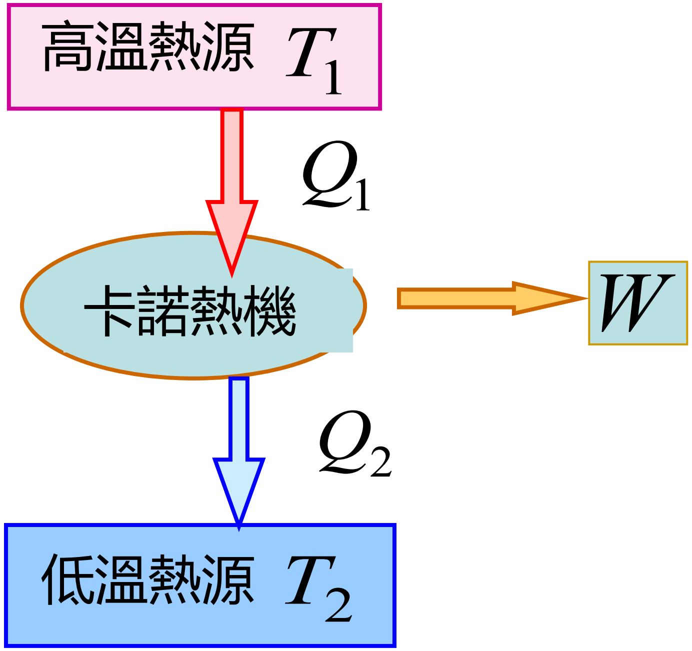
不可能把熱量從低溫物體自動傳到高溫物體而不引起外界的變化 .

10.4 熱力學第二定律

- 熱力學第二定律的兩種表述

1 開爾文說法





卡諾循環是循環過程，但需兩個熱源，且使外界發生變化

10.4 熱力學第二定律

● 熱力學第二定律的兩種表述

1 開爾文說法

第二類永動機：

從單一熱源吸熱，全部用來對外作功的熱機。

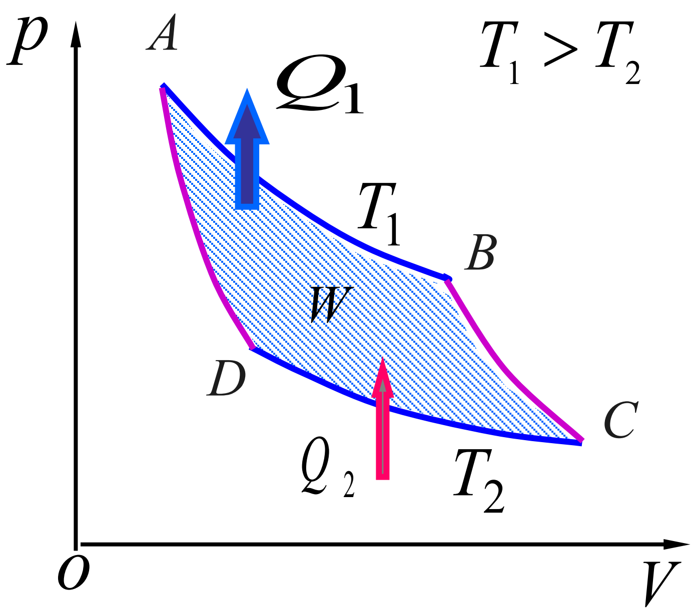
雖然不違反熱力學第一定律，但違反熱力學第二定律。

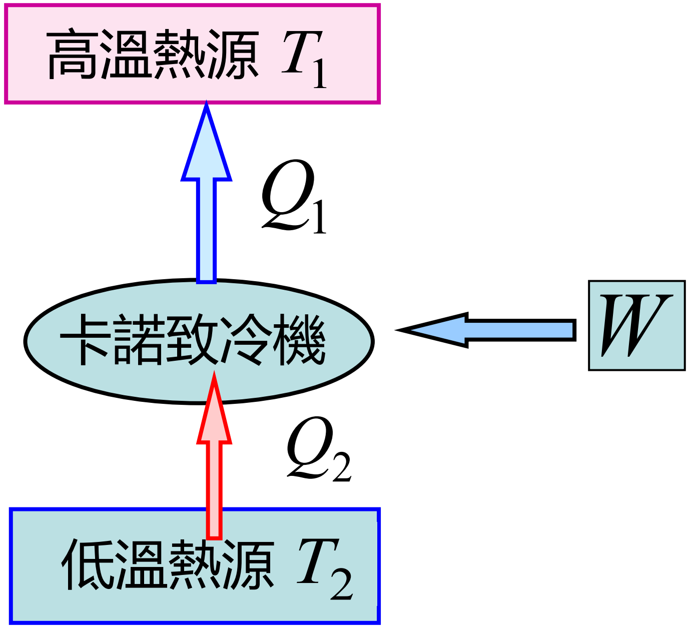
第二類永動機是不可能製造出來的

10.4 熱力學第二定律

- 熱力學第二定律的兩種表述

2 克勞修斯說法





雖然卡諾致冷機能把熱量從低溫物體移至高溫物體，但需外界作功且使環境發生變化 .

10.4 熱力學第二定律

- 熱力學第二定律的兩種表述

注意

1　熱力學第二定律是大量實驗和經驗的總結

2　熱力學第二定律開爾文說法與克勞修斯說法具有等效性

3　熱力學第二定律可有多種說法，每種說法都反映了自然界過程進行的方向性

10.4 熱力學第二定律

- 熱力學第二定律的兩種表述

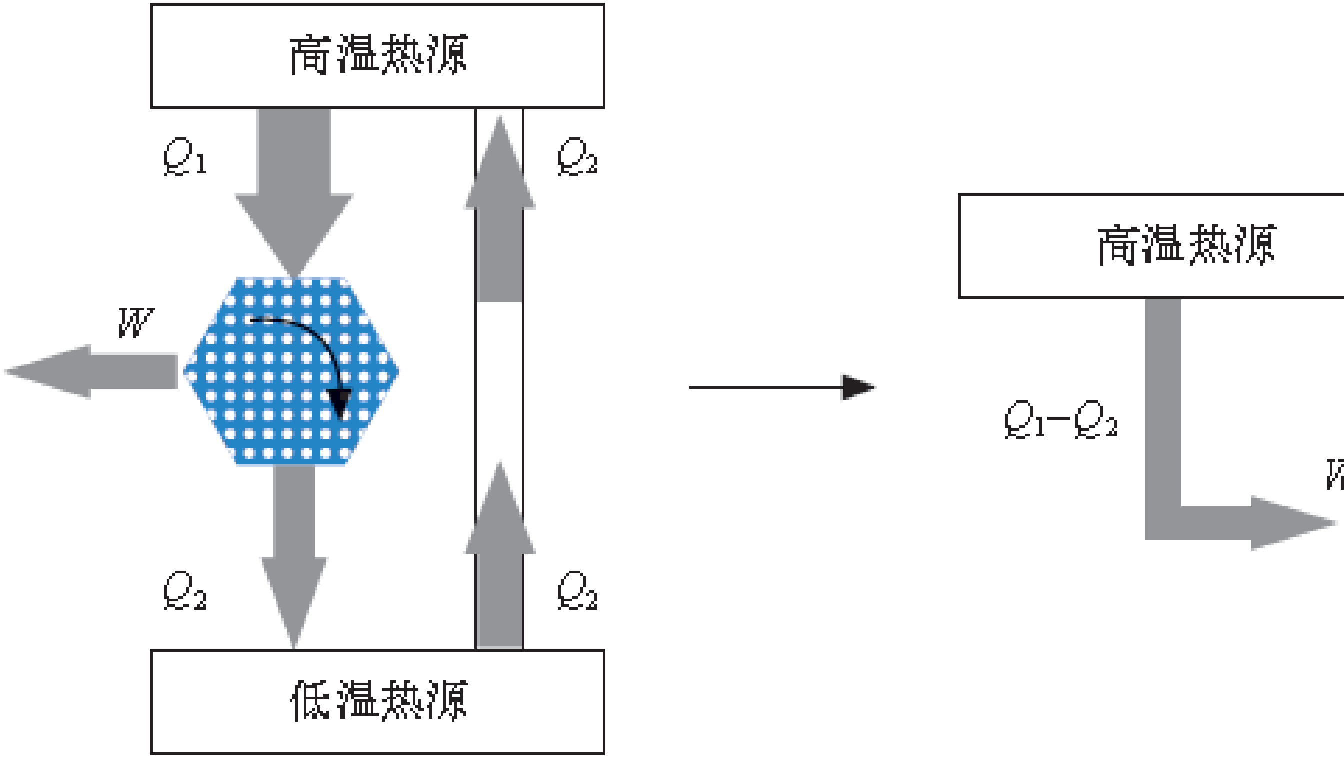


图 5-20　热力学第二定律两种表述的等效性证明示意图

10.4 熱力學第二定律

- 熱力學第二定律的兩種表述

自然界一切與熱現象有關的實際宏觀過程都是不可逆的 .

➢ 熱功轉換

功 $\xrightarrow{\text{完全}}$ 熱

熱 $\xrightarrow{\text{不完全}}$ 功

有序 $\xrightarrow{\text{自發}}$ 無序

➢ 熱傳導

高溫物體 $\xrightarrow{\text{自發傳熱}}$ 低溫物體

低溫物體 $\xrightarrow{\text{非自發傳熱}}$ 高溫物體

非均勻、非平衡 $\xrightarrow{\text{自發}}$ 均勻、平衡

10.4 熱力學第二定律

- 無 序 度 和 微 觀 狀 態 數

擴散過程　$V \xrightarrow{\text{自發}} V+\Delta V$，$V \xleftarrow{\text{外力壓縮}} V+\Delta V$

- 不可逆過程的本質

系統從熱力學概率小的狀態向熱力學概率大的狀態進行的過程 .

- 一切自發過程的普遍規律

概率小的狀態 $\Rightarrow$ 概率大的狀態

10.4 熱力學第二定律

- 熱力學第二定律的統計意義
- 一切自然過程總是沿著無序性增大的方向進行
- 孤立系統內部所發生的過程總是從包含微觀態數少的宏觀態向包含微觀態數多的宏觀態過渡
- 從熱力學概率小的狀態向熱力學概率大的狀態過渡

10.4 熱力學第二定律

- 玻耳茲曼熵
- 一般，熱力學概率Ω（宏觀態包含的微觀態數）非常大，1877年，玻耳茲曼引入態函數熵：

$$S = k \ln \Omega$$

玻耳茲曼熵

图 5-23 玻尔兹曼

熵的微觀意義: 熵是系統內分子熱運動無序性的量度

熵的概念建立，使熱力學第二定律得到統一的定量表述

10.4 熱力學第二定律

- 玻耳茲曼熵
- 與狀態量內能一樣，熵值本身意義不大，熵變才是重要的。熵變只取决于始末狀態，與中間過程無關
- 熵增加原理
- 在孤立系統中所進行的自然過程總是沿著熵增大的方向進行，平衡態對應于熵最大的狀態，這就是熵增加原理
- 熵增原理的微觀實質是：孤立系統內部發生的過程總是由熱力學幾率小的狀態向熱力學幾率大的狀態過度

➡ 或者說 由非平衡態向著平衡態進行

➡ 或者說 向著無序度增大的方向進行

10.4 熱力學第二定律

- 玻耳茲曼熵
- 爲了紀念玻耳茲曼給予熵以統計解釋的卓越貢獻 ，他的墓碑上寓意隽永地刻著 $S = k \log W$
- 這表示人們對玻耳茲曼的深深懷念和尊敬

10.5 流體力學基礎

- 流體:易于流動的物體
- 流體力學:宏觀的機械性質，外力作用下平衡及運動規律
- 易流動性：不能抵抗無論多麽小的拉力和剪切力

- 研究方法
- 理論分析
- 實驗研究
- 數值計算

10.5 流體力學基礎

- 流體力學學科發展簡介
- 第一時期----17世紀中葉以前
- 特點
- 阿基米德浮力定律
- 漏壺計時
- 水輪機
- …

10.5 流體力學基礎

- 流體力學學科發展簡介
- 第二時期----17世紀末葉至19世紀末葉
- 特點
- 1678年牛頓實驗
- 1738年伯努力方程
- 1752年達朗伯佯謬
- 1775年歐拉運動方程
- 1781年複位勢理論
- 1823-1845年Novier--Stokes方程
- 1840年泊蕭葉流動
- 1845年亥姆霍茲定理
- 1883年雷諾的發現
- 1891年速度環量概念
- …

10.5 流體力學基礎

- 流體力學學科發展簡介
- 第三時期----20世紀初葉至20世紀中葉
- 特點
- 1902年庫塔定理
- 1904年邊界層理論
- 1910-1945年機翼理論與實驗的極大發展
- 1912年卡門渦街
- 1921年動量積分關係式
- 1932年熱綫流速計
- 1947年電子計算機
- 1954年湍流特性的出色測量
- ...

10.5 流體力學基礎

- 流體力學學科發展簡介
- 第四時期----20世紀中葉以後
- 特點
- 前沿--湍流流動穩定性,渦旋和非定常流
- 交叉學科和新分支:
- 工業流體力學;氣體力學:環境流體力學
- 稀薄氣體力學;電磁流體力學:微機電系統
- 宇宙氣體力學:液體動力學:微尺度流動與傳熱
- 地球流體力學;非牛頓流體力學
- 生物流體力學:多相流體力學
- 物理--化學流體力學
- 滲流力學和流體機械等
- ...

思考題

- 什麼是熱力學第二定律？請簡要說明。
- 請具體解釋一下熱力學第二定律？
- 什麼是流體？請簡要說明。

休息一下

Take a break

感 謝 觀 賞

Thank you for listening.