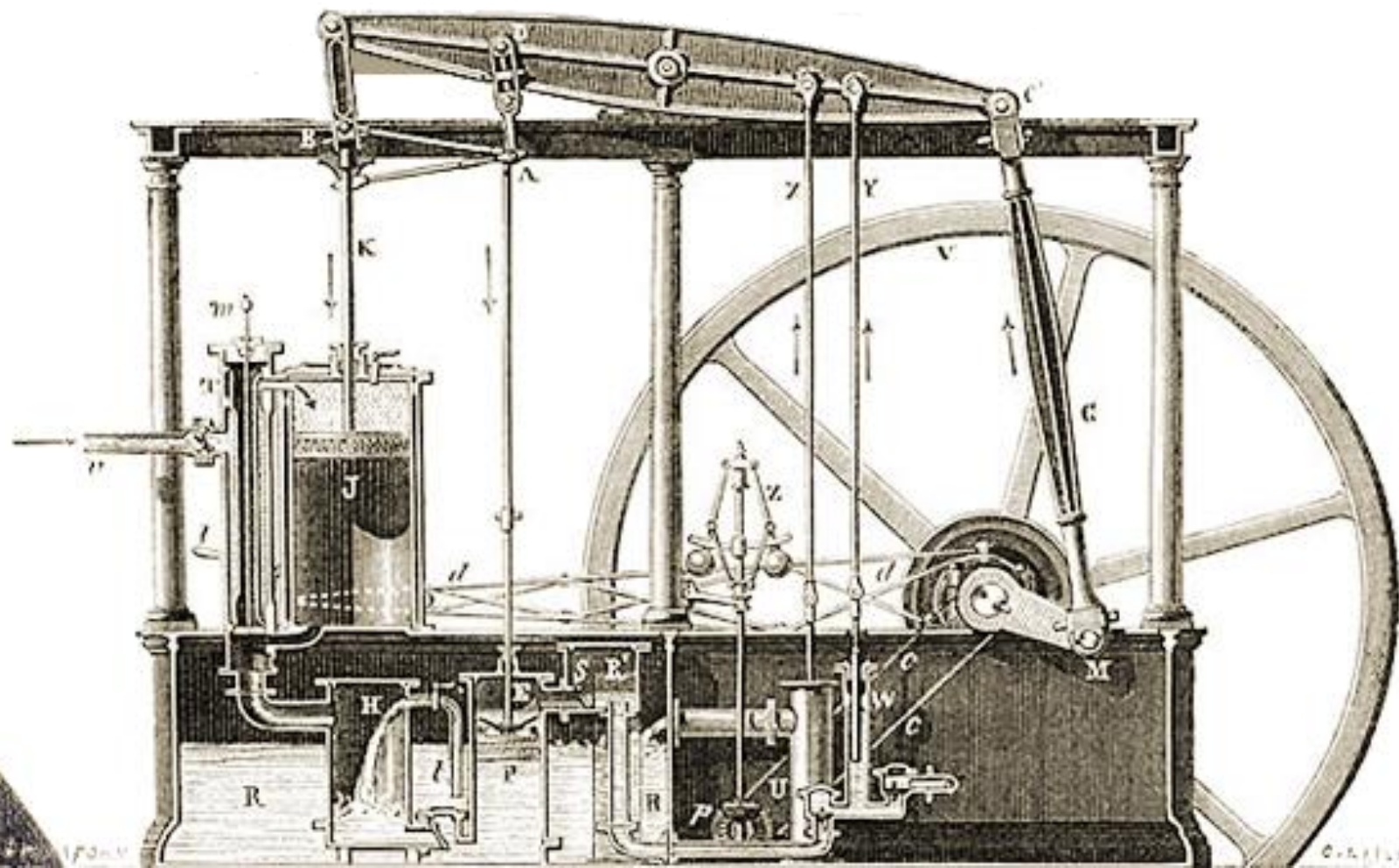


第十章 热力学第一定律



第十章 热力学第一定律

§ 10.1 准静态过程



§ 10.2 功



§ 10.3 内能、热量、热力学第一定律



§ 10.4 热容量



§ 10.5 绝热过程



§ 10.6 循环过程



§ 10.7 卡诺循环



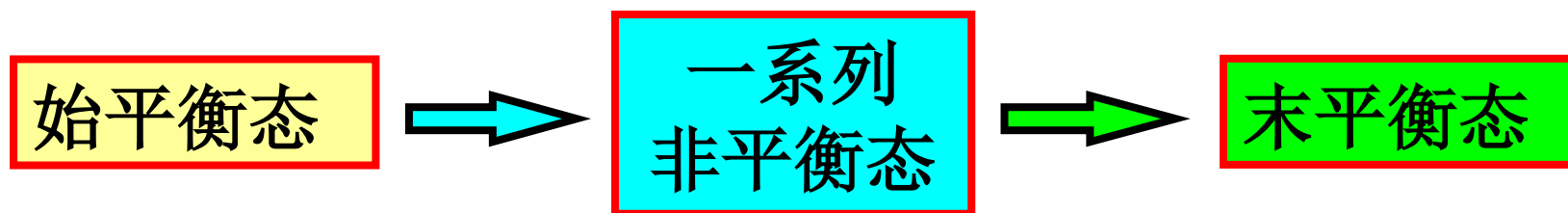
§ 10.8 致冷循环



§ 10.1 准静态过程

热力学系统从一个状态变化到另一个状态，称为热力学过程，简称“过程”。

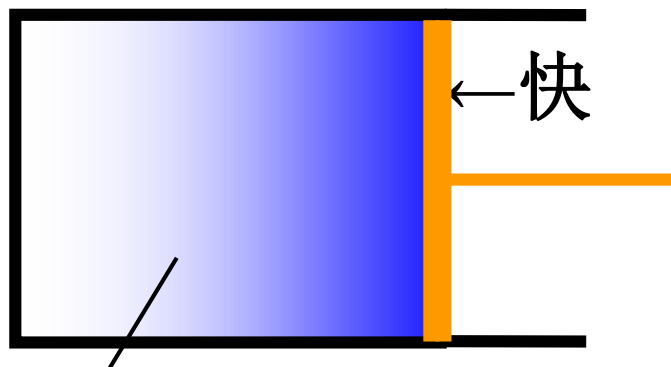
过程进行的任一时刻，系统状态并非平衡态。



热力学中为了利用平衡态的性质，需要引入准静态过程的概念。

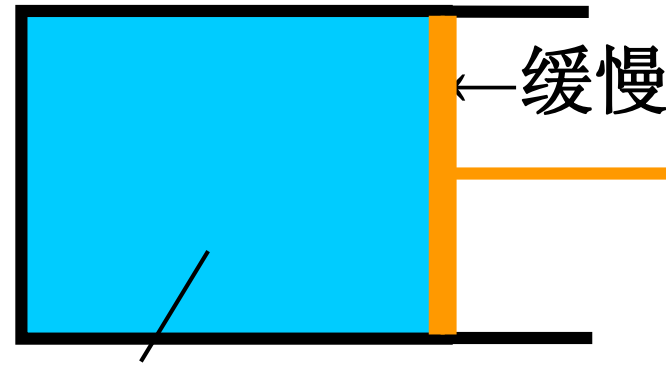
准静态过程：系统的每一状态都**无限接近于平衡态的过程**，即准静态过程是由一系列平衡态组成的过程。

准静态过程是**理想化过程**，是实际过程近似。



非平衡态

非准静态过程



接近平衡态

准静态过程

过程只有进行得**无限缓慢**，每个中间态才可看作是平衡态。

如何判断“无限缓慢”？

引入**弛豫时间 τ** ：

平衡破坏 $\xrightarrow{\text{经历}\tau}$ 恢复平衡

当 $\Delta t_{\text{过程}} > \tau$ 时，过程就可视为**准静态过程**。

无限缓慢是个相对概念。

例如，内燃机气缸内中气体经历的过程：

气体压强 p 的弛豫时间：

$$\tau_p = \frac{L}{\bar{v}}$$

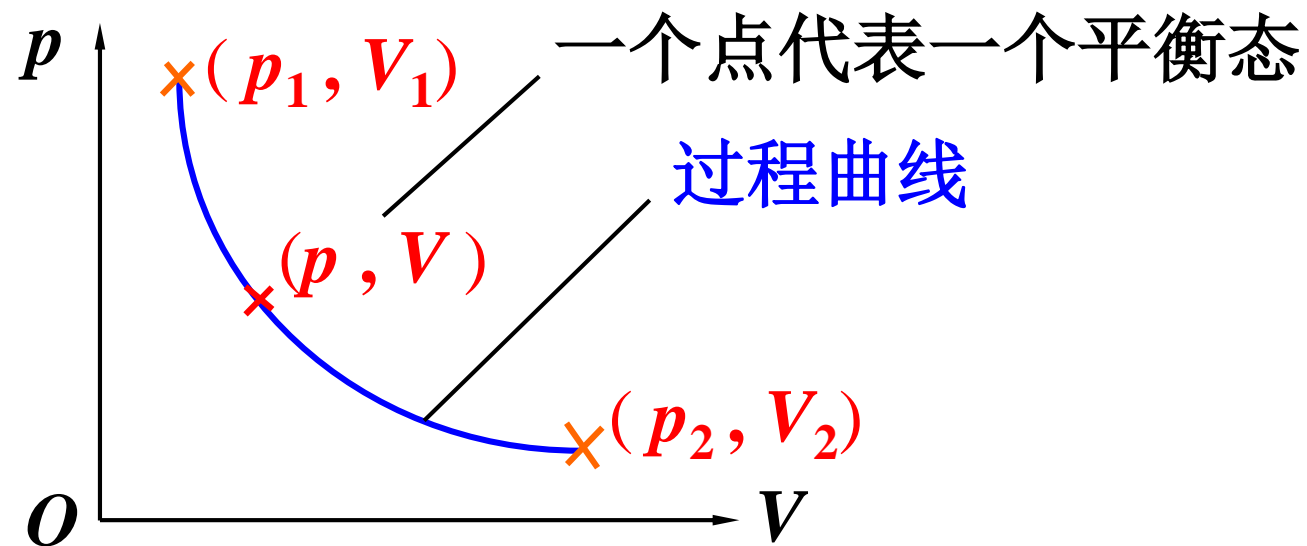
气缸线度 分子热运动平均速率

$$\left. \begin{array}{l} L \sim 10^{-1} \text{ m} \\ \bar{v} \sim 10^2 \text{ m/s} \end{array} \right\} \tau_p \sim 10^{-3} \text{ s}$$

活塞运动周期 $\Delta t \sim 10^{-2} \text{ s} > \tau_p \sim 10^{-3} \text{ s}$,

所以汽缸的压缩过程可认为是准静态过程。

准静态过程用过程曲线描述：



改变系统状态的方法： 1. 做功
2. 传热

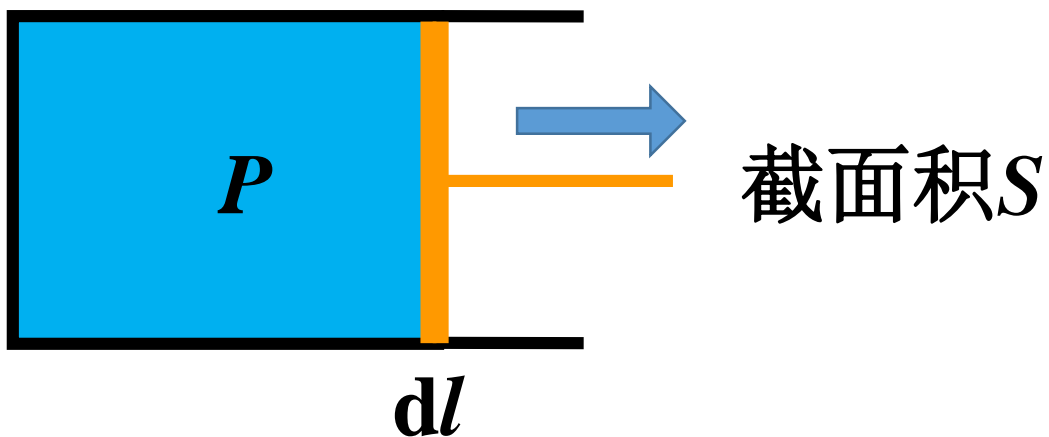
§ 10.2 功

- 做功可以改变系统的状态
 - 摩擦升温（机械功）、电加热（电功）



钻木取火

功



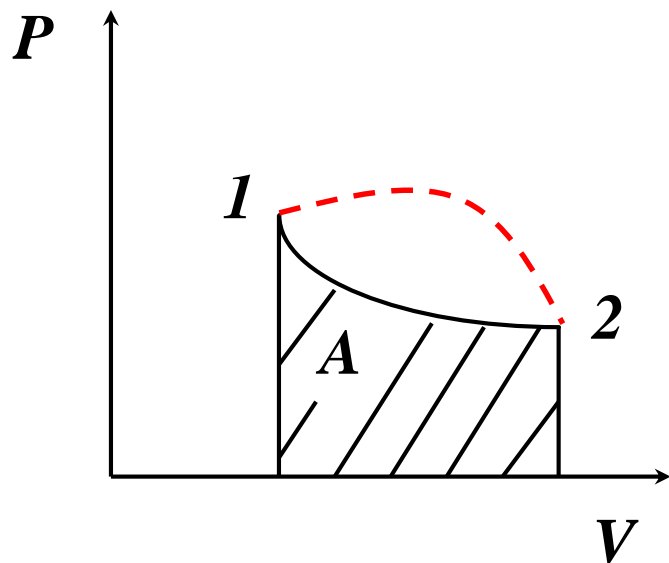
气体对外界所做的功: $PSdl$

准静态过程

气体对外界所做的功: $\bar{d}A = PdV$

功有正有负 $\bar{d}A < 0$

外界对系统做功



总功: $A = \int_{V_1}^{V_2} P dV$

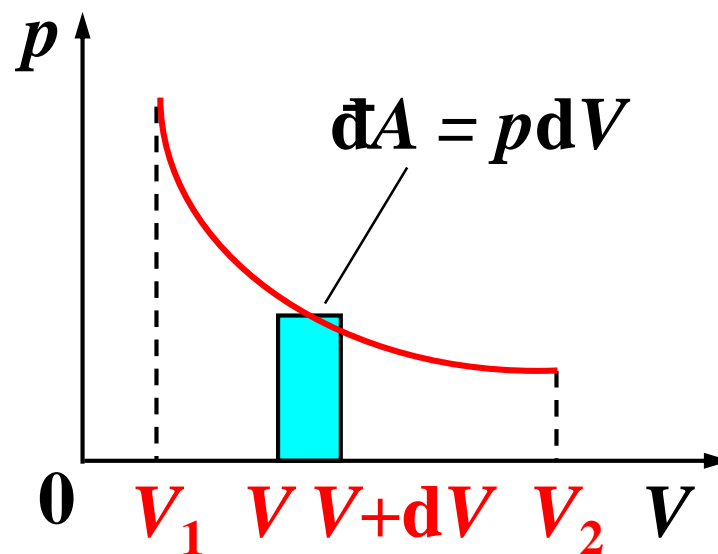
做功的多少和状态的变化过程有关

体积功 $\delta A = p dV$

δA 是微小量，非全微分。

系统对外界做功：

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV \quad \text{— 过程量}$$



此外还有摩擦功、电流功、电磁场的功等。

通过做功改变系统热力学状态的微观实质：

分子规则运动的能量 通过碰撞转变为 分子
无规则运动的能量 — 热运动能量。



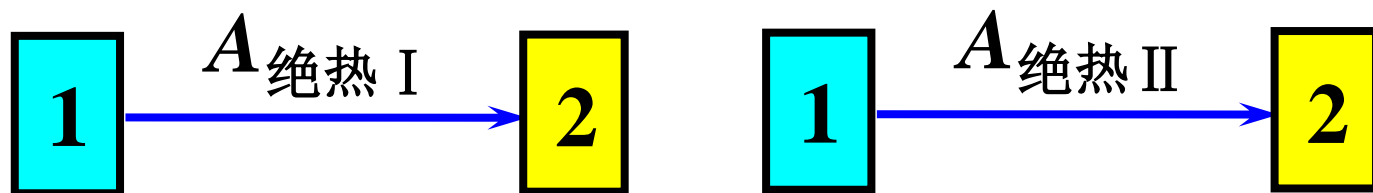
§ 10.3 内能，热量，热力学第一定律

热力学是独立于统计物理的。对于内能和热量这些基本概念及其度量，热力学和统计物理都有各自明确的定义。

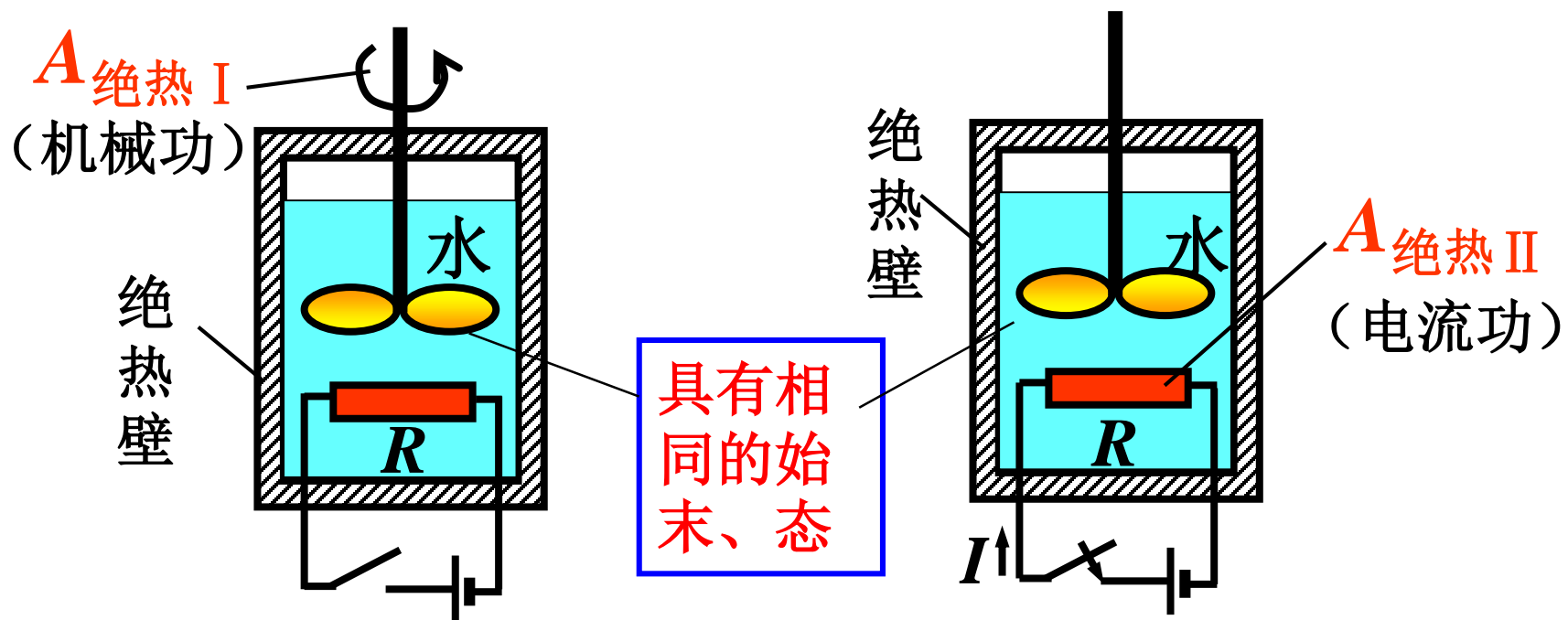
独立于气体动理论，本节将讲述热力学中的内能和热量的概念及其度量。

一. 内能

系统状态可以只通过绝热做功来改变。



例如，由水、叶轮和电阻组成的系统：



实验表明：

对绝热过程，只要状态 1 和 2 确定，就有：

$$A_{\text{绝热I}} = A_{\text{绝热II}} \text{ — 与手段、过程无关}$$

由此可定义系统的一个状态量 — 内能 E 。

定义内能 E 的增量满足关系：

$$E_2 - E_1 = A_{\text{绝热}1 \rightarrow 2(\text{外界})}$$

上式同时给出了内能的度量方式：可用绝热做功多少进行度量。

内能

如同 P, V, T 是系统的状态量

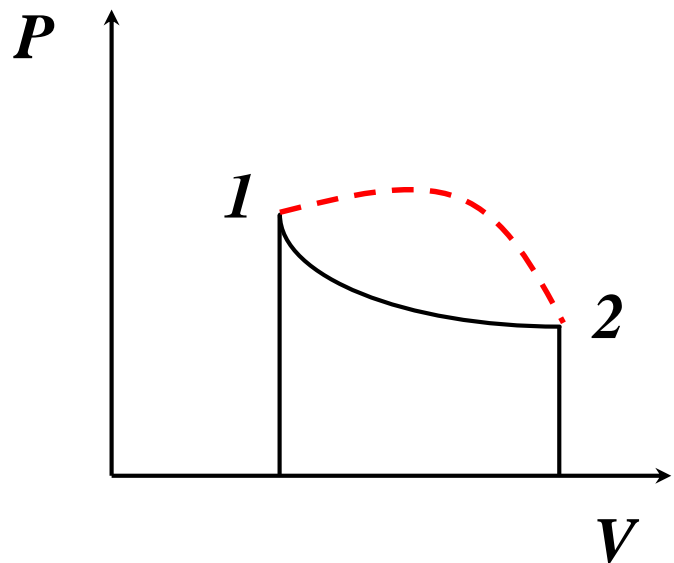
理想气体的内能:

$$E = \frac{i}{2} \nu RT$$

范德瓦尔斯气体内能

$$E = \frac{i}{2} \nu RT - \frac{\nu^2 a}{V}$$

内能的变化: dE



$$\Delta E_{12} = \int_1^2 dE = E_2 - E_1$$

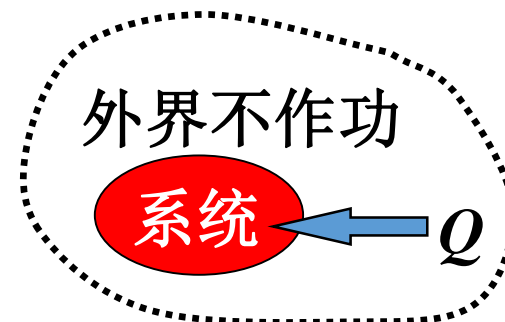
只与初末状态有关，而与过程无关

二. 热量

系统状态可以只通过传递热量来改变。

热量：通过温度差传递的能量，用 Q 表示。

考虑一个只传热不作功的过程：



定义热量：

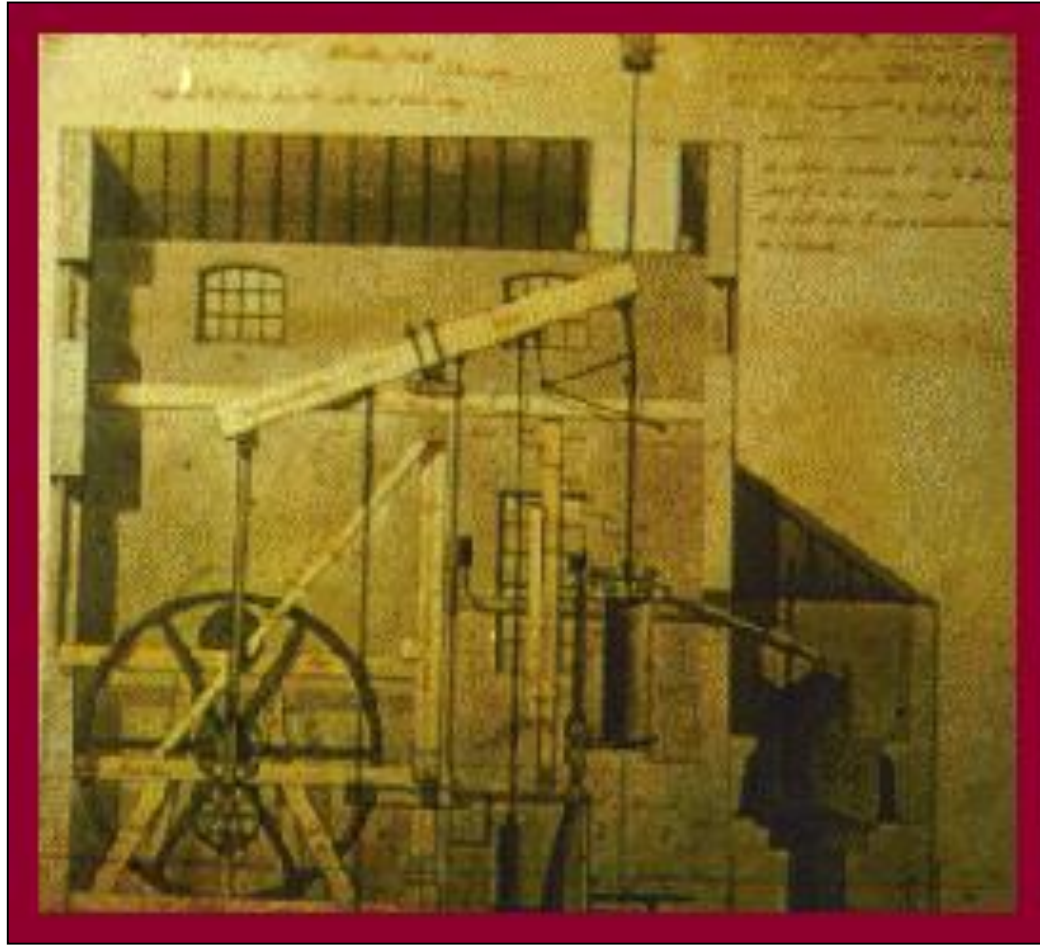
$$Q = (E_2 - E_1)_{\text{不作功}}$$

$Q > 0$ 系统吸热

$Q < 0$ 系统放热

传热的微观本质是：分子无规则运动的能量通过碰撞从高温物体向低温物体传递。

三. 热力学第一定律



瓦特早期发明的蒸汽机

实验表明：热量、内能和功之间的关系是：

系统从外界吸收的热量等于系统内能的增量加上系统对外界作的功。

$$Q = (E_2 - E_1) + A = \Delta E + A$$

— 热力学第一定律

$A > 0$ 系统对外作正功，

$Q > 0$ 系统吸热。

内能 E 是状态量，功 A 是过程量，由热力学第一定律可知，热量 Q 必然是过程量。

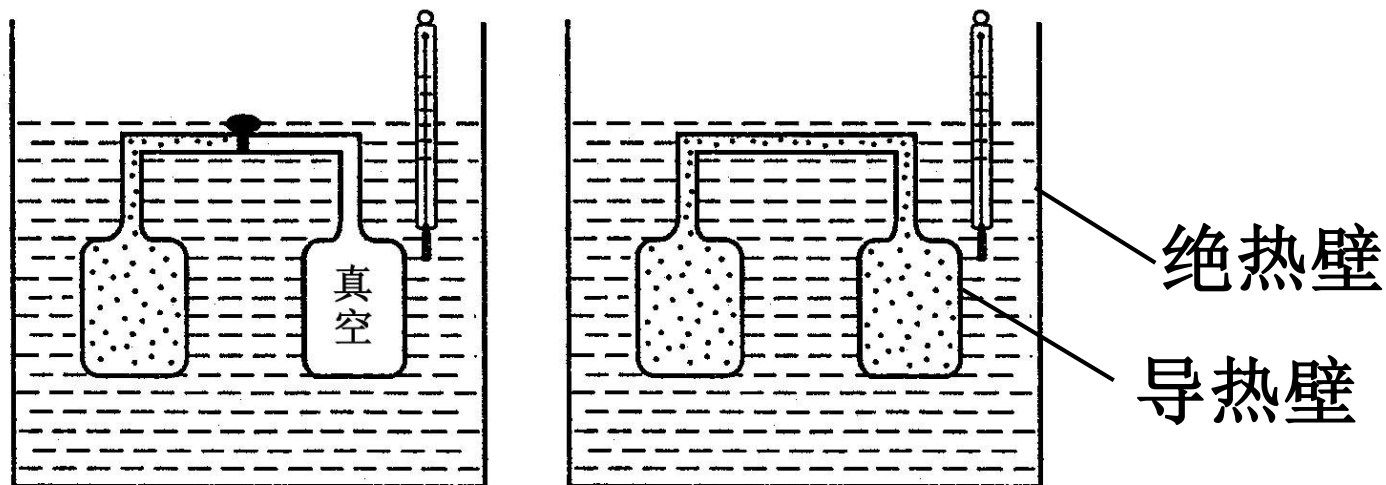
对任意元过程： $\mathrm{d}Q = \mathrm{d}E + \mathrm{d}A$

热力学第一定律是热现象中的能量转化与守恒的定律，因此适用于任何热力学系统的任何过程，对非准静态过程也成立。

违反热 I 律的“永动机”称为“第一类永动机”。

【TV】第一类永动机（饮水鸟永动机）

焦耳定律



实验现象：稀薄气体在自由膨胀过程中，温度保持不变，是绝热自由膨胀过程。

结论：理想气体内能 E 只与温度 T 有关，与体积 V 无关：

$$E_{\text{理气}} = E(T)$$

§ 10.4 热容量

一. 摩尔热容量

热容量：系统温度升高1度所吸收的热量。

$$C = \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}T}$$

定体热容量

$$C_V = \left(\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}T} \right)_V$$

(体积不变)

定压热容量

$$C_p = \left(\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}T} \right)_p$$

(压强不变)

摩尔热容量：1mol 物质温度升高1度所吸热量

$$C_m = \frac{1}{\nu} \left(\frac{\delta Q}{dT} \right) \quad \nu — \text{摩尔数}$$

定体摩尔热容量

$$C_{V,m} = \frac{1}{\nu} \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_V$$

定压摩尔热容量

$$C_{p,m} = \frac{1}{\nu} \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_p$$

热容量是与过程、温度有关的，由实验测量。
在温度变化不大的情况下，可当作常数。

二. 理想气体的内能

1. 等体过程

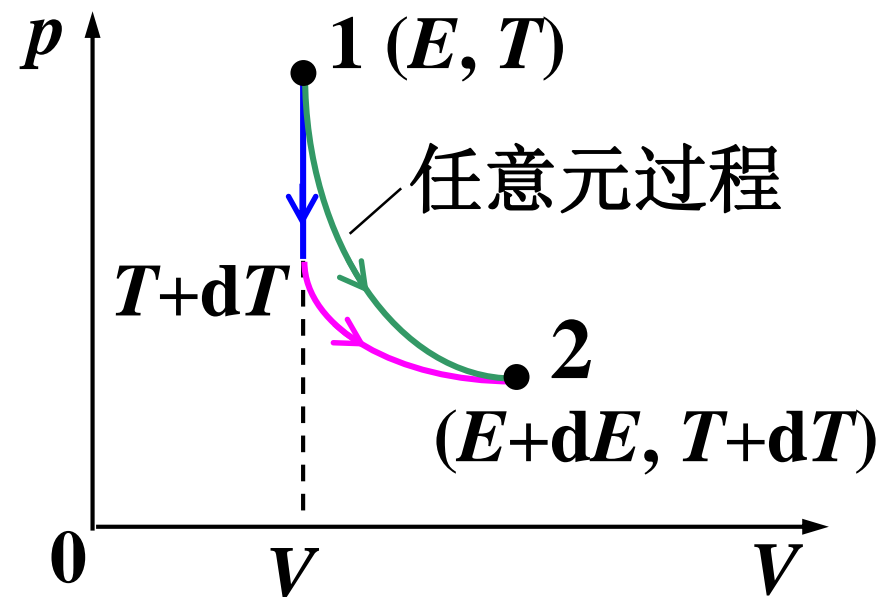
系统做功和吸热: $\delta A_V = 0$, $\delta Q_V = \nu C_{V,m} dT$

根据热 I 律: $dE_V = \nu C_{V,m} dT$

2. 任意元过程

dE 只与状态1、2有关，与元过程无关，因此计算 dE 可选择一条方便路径：

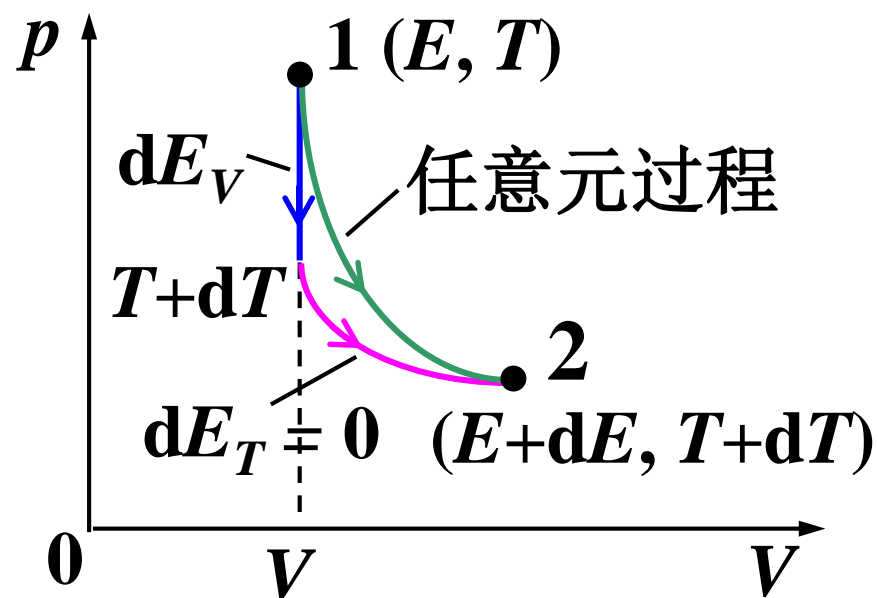
等体 + 等温过程



$$dE = dE_V + dE_T$$

$$= dE_V$$

$$= \nu C_{V,m} dT$$



一般情况下可认为 $C_{V,m}$ 与过程、温度无关，
内能是状态函数，所以理想气体内能：

$$\Delta E = \nu C_{V,m} \Delta T$$

(此时不能再理解成是等体过程中内能变化！)

三. 迈耶公式

对理想气体，考虑一个等压过程：

$$\mathrm{d}Q_p = \mathrm{d}E + \mathrm{d}A_p \quad (\text{热I律}) \quad (1)$$

$$\mathrm{d}Q_p = \nu C_{p,m} \mathrm{d}T \quad (2)$$

$$\mathrm{d}E = \nu C_{V,m} \mathrm{d}T \quad (3)$$

$$\mathrm{d}A_p = p \mathrm{d}V = \mathrm{d}(pV) = \nu R \mathrm{d}T \quad (4)$$

由 (1)(2)(3)(4) 得：

$$\boxed{C_{p,m} - C_{V,m} = R} \quad \text{— 迈耶公式}$$

【思考】为什么 $C_{p,m} > C_{V,m}$ ？

定义比热容比（比热比）：

$$\gamma = C_{p,m} / C_{V,m}$$

四. 理想气体热容量的理论公式

根据分子动理论，对理想气体：

$$dE = \nu \frac{i}{2} R dT$$

$$\text{又} \because dE = \nu C_{V,m} dT$$

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

$$C_{p,m} = \frac{i+2}{2} R$$

$$\gamma = \frac{i+2}{i}$$

书 P363 表 10.1 给出了 γ 的理论值与实验值。

▲ 常温下：

单原子分子气体理论值与实验值符合得相当好；双、多原子分子气体符合稍差；

▲ 在大的温度范围内看，热容与温度有关：

$C_{V,m}$ ， $C_{p,m}$ 和 γ 都不是常量；

这是经典理论无法解释的，需用量子理论。

常温下： C_p / R 和实验比较

单原子分子气体=2.5

Ar 2.51 He 2.52

双原子分子（刚性）气体=3.5

H₂ 3.47 N₂ 3.47

多原子分子（刚性）气体=4.0

CO₂ 4.47 CH₄ 4.28

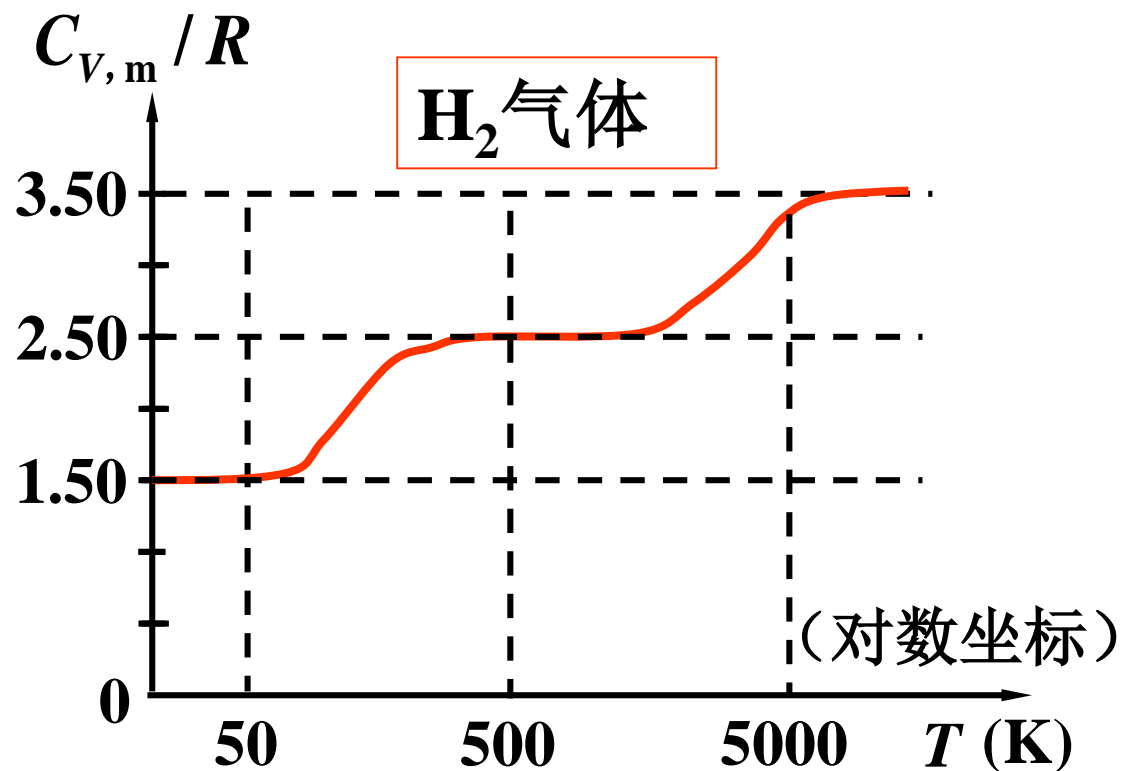
量子理论给出能量是量子化的。对 H_2 分子：
当 $T > 85\text{K}$ 时，分子的转动被激活，
当 $T > 6100\text{K}$ 时，分子的振动被激活。

$$C_{V,m} = \frac{t + r + 2v}{2} R$$

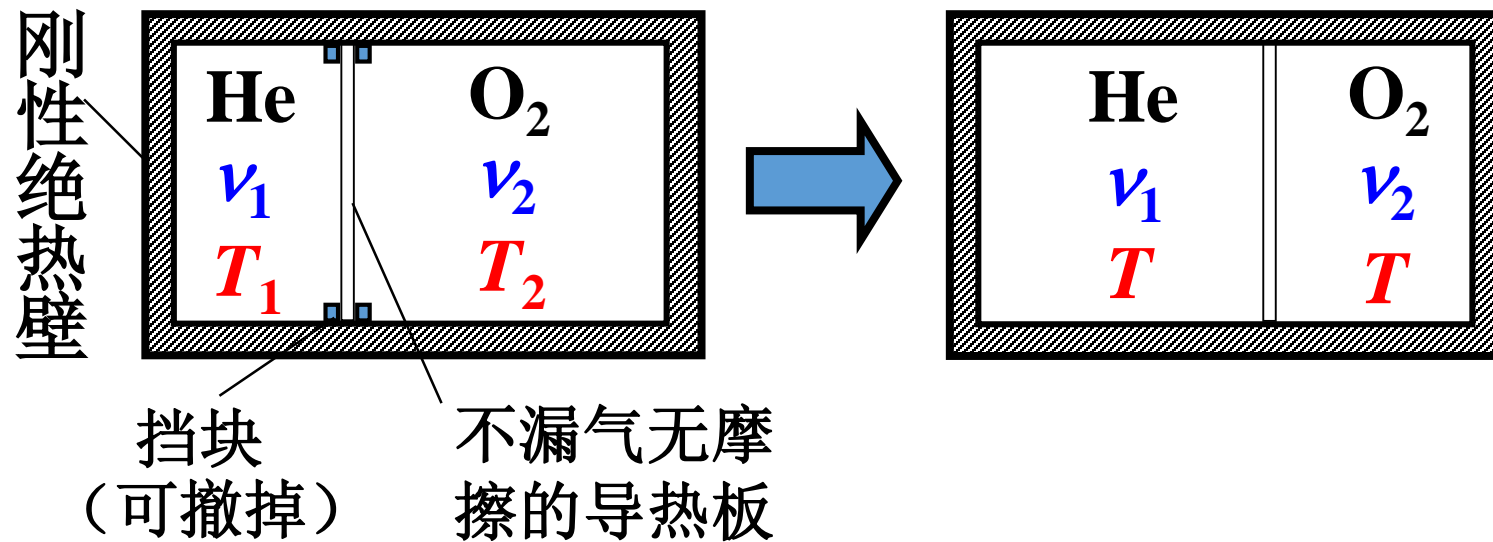
$$\text{H}_2: \quad t = 3$$

$$r = 2$$

$$v = 1$$



【例】已知： ν_1 mol、温度 T_1 的 He 气和
 ν_2 mol、温度 T_2 的 O_2 气经历如下过程。



求：终态的 $T = ?$

解：整个过程中，虽然 He 和 O_2 之间有热和功的交换，但它们总体内能是不变的。

$$\Delta E_{\text{He}} + \Delta E_{\text{O}_2} = 0$$

$$\nu_1 C_{V,\text{m}}^{\text{He}} (T - T_1) + \nu_2 C_{V,\text{m}}^{\text{O}_2} (T - T_2) = 0$$

$$C_{V,\text{m}}^{\text{He}} = \frac{3}{2} R, \quad C_{V,\text{m}}^{\text{O}_2} = \frac{5}{2} R$$

得
$$T = \frac{3\nu_1 T_1 + 5\nu_2 T_2}{3\nu_1 + 5\nu_2}$$



§ 10.5 绝热过程

绝热过程：系统和外界没有热量交换的过程。

下列条件下的过程可视为绝热过程：

- ▲ 良好绝热材料包围的系统发生的过程；
- ▲ 进行得较快而来不及和外界发生热交换的过程，如声音的传播过程。

绝热过程特点： $\delta Q = 0$

$$dE = -\delta A$$

一. 理想气体的准静态绝热过程

根据热 I 律，对绝热过程有：

$$\underbrace{0}_{\text{d}Q} = \underbrace{p \text{d}V}_{\text{d}A} + \underbrace{\nu C_{V,m} \text{d}T}_{\text{d}E} \quad (1)$$

$$pV = \nu RT \rightarrow p \text{d}V + V \text{d}p = \nu R \text{d}T \quad (2)$$

$$R = C_{p,m} - C_{V,m} \quad (3)$$

$$(1)(2)(3): \quad \frac{\text{d}p}{p} = -\frac{C_{p,m}}{C_{V,m}} \frac{\text{d}V}{V} = -\gamma \frac{\text{d}V}{V}$$

一般条件下将 γ 视为常数，两边积分：

$$\int \frac{dp}{p} = \int -\gamma \frac{dV}{V} \rightarrow \ln p = -\gamma \ln V + C'$$

$$\ln(pV^\gamma) = C' \xrightarrow{\text{令}} \ln C$$

$$\boxed{pV^\gamma = C} \quad \text{— 绝热过程方程（泊松公式）}$$

$$\text{或} \quad \boxed{p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma}$$

绝热过程方程的另 2 种表示：

$$\boxed{TV^{\gamma-1} = \text{const.}}$$

$$\boxed{p^{\gamma-1} T^{-\gamma} = \text{const.}}$$

绝热功

根据体积功的定义得：

$$\begin{aligned} A &= \int_{V_1}^{V_2} p \, dV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{p_1 V_1^\gamma}{V^\gamma} dV \\ &= \frac{1}{\gamma - 1} [p_1 V_1 - p_2 V_2] \end{aligned}$$

根据热 I 律得绝热功为：

$$A = -\Delta E = \nu C_{V,m} (T_1 - T_2)$$

两个结果一样吗？请验证。

【讨论】为何绝热线比等温线陡？

物态方程：

$$p = nkT$$

等温膨胀：

$$V \uparrow \rightarrow n \downarrow \rightarrow p \downarrow$$

E 不变

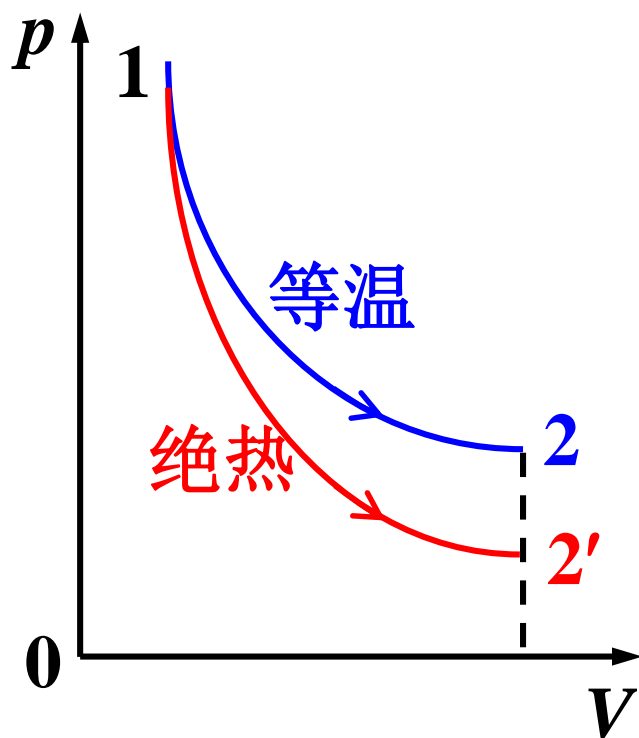
绝热膨胀：

$$V \uparrow \rightarrow n \downarrow$$

$$E \downarrow \rightarrow T \downarrow$$

$$\} \rightarrow p \downarrow \downarrow$$

$$p_2 > p_{2'}$$



声速

$$c = \sqrt{\frac{1}{-\frac{\rho}{V} \frac{\partial V}{\partial P} \big|_0}}$$

绝热过程

$$PV^\gamma = \text{const.} \quad c = \sqrt{\frac{\gamma P_0}{\rho}} = 332 \text{ m/s}$$

等温过程

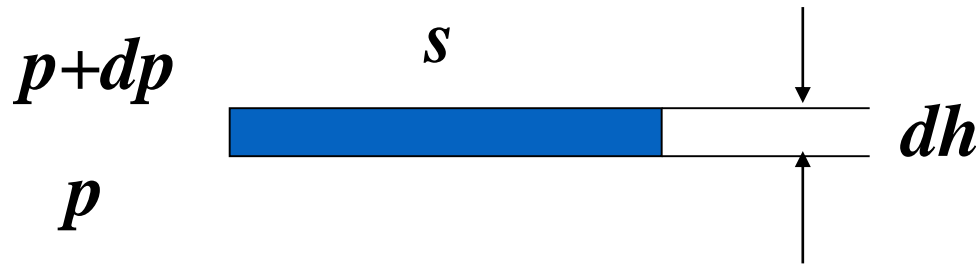
$$c = \sqrt{\frac{P_0}{\rho}} = 280 \text{ m/s}$$

牛顿认为是等温过程，所以算错！

例：大气温度随高度递减

当空气被太阳晒热时，密度减少，缓慢上流，因空气导热性差，认为是绝热过程比较合理。

假设空气温度和压强随高度变化



$$(p + dp)s + s\rho gdh = ps$$

$$\frac{dp}{dh} = -\rho g = -M \frac{p}{RT} g \quad p = p_0 - \rho gh$$

考虑温度变化

$$\frac{dp}{dh} = \frac{dp}{dT} \frac{dT}{dh}$$

绝热准静态过程

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p}{T}$$

$$\frac{dT}{dh} = -\frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{Mg}{R}$$

$$\frac{dT}{dh} = -\frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{Mg}{R}$$

$$\gamma = 7/5,$$

$$M = 29 \times 10^{-3} \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$\frac{dT}{dh} = -9.8 \text{ K} / \text{km}$$

上升1km，温度下降10K，大致符合观察(距地面<10km)。再向上比较复杂。

二. 理想气体的多方过程

热容量 $C = \text{const.}$ 的过程称为多方过程。

多方过程方程:

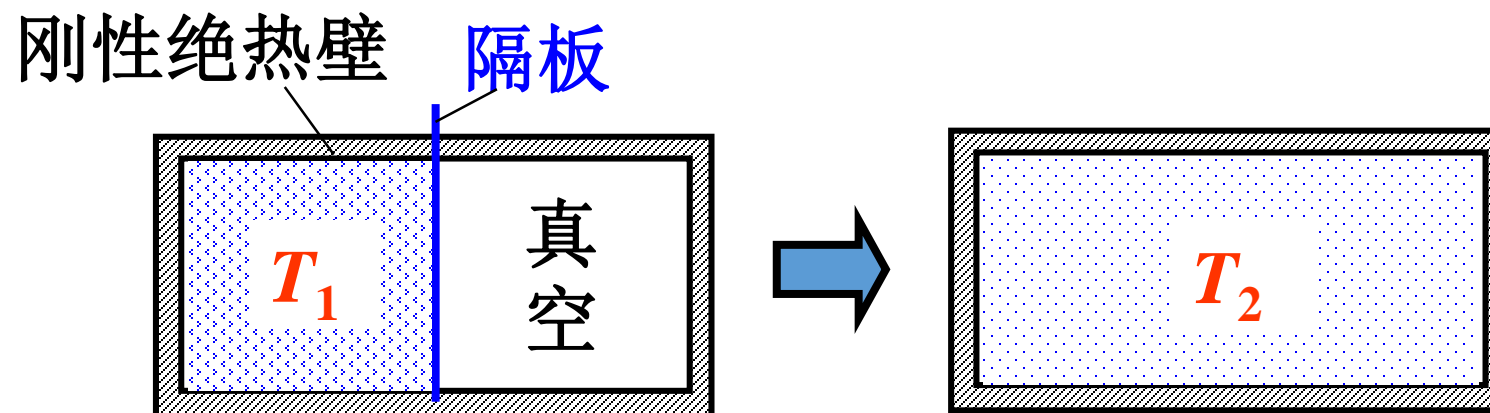
$$pV^n = \text{常量}$$

n 称为多方指数:

$$n = \frac{C - C_p}{C - C_V} = \frac{C_m - C_{p,m}}{C_m - C_{V,m}} = \text{常量}$$

绝热过程: $C = C_m = 0$, $n = \gamma$, $\therefore pV^\gamma = \text{常量}$

三. 绝热自由膨胀过程（非准静态过程!!）



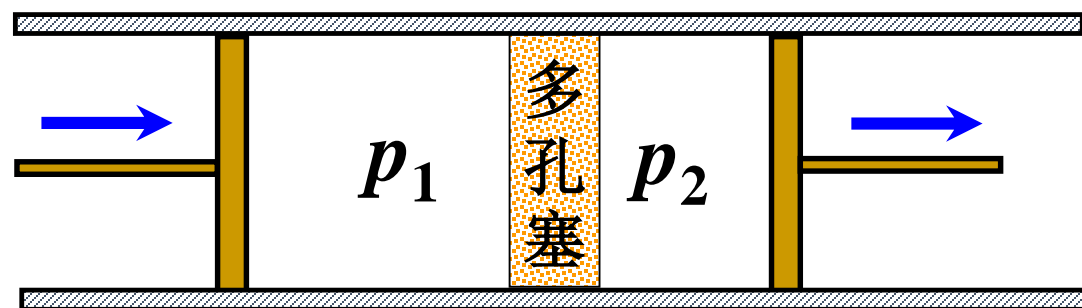
$$\left. \begin{array}{l} \text{器壁绝热: } Q = 0 \\ \text{向真空膨胀: } A = 0 \end{array} \right\} \xrightarrow{\text{热 I 律}} E_1 = E_2$$

对理想气体: $T_1 = T_2$ （是等温过程吗？）

对真实气体: 分子力以引力为主时 $T_2 < T_1$,
分子力以斥力为主时 $T_2 > T_1$ 。

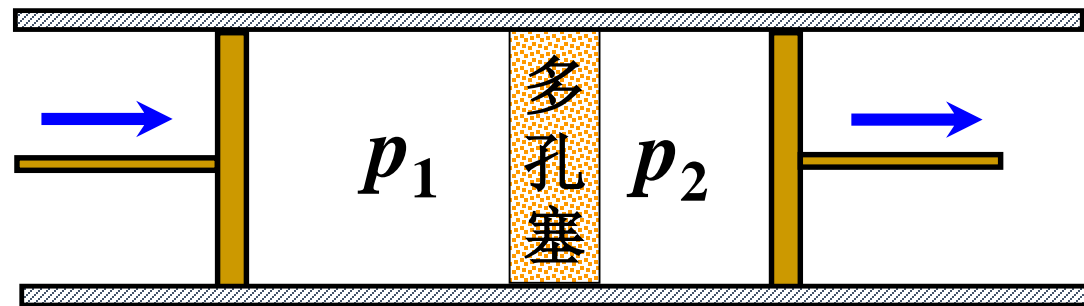
*四. 节流过程

节流过程：气体通过多孔塞或小孔向压强较低区域膨胀的过程。



焦耳 — 汤姆孙效应：实际气体通过节流过程
温度会升高或者降低。

温度降低的称为正焦耳 — 汤姆孙效应，可用
来制冷和制取液态空气。



设：气体通过多孔塞前：内能 E_1 、体积 V_1 ，
气体通过多孔塞后：内能 E_2 、体积 V_2 ，
过程中 p_1 、 p_2 保持恒定，过程绝热，
所以： $Q = 0$ ， $A = p_2 V_2 - p_1 V_1$ ，
由热 I 律有： $0 = E_2 - E_1 + p_2 V_2 - p_1 V_1$
 $\therefore E_1 + p_1 V_1 = E_2 + p_2 V_2$

定义“焓”： $H = E + pV$

$$\therefore H_1 = H_2$$

气体的绝热节流过程是等焓过程。

理想气体内能只是温度的函数，不存在焦耳—汤姆孙效应。

实际气体都存在焦耳—汤姆孙效应，说明它们的内能与体积有关，即气体分子间存在相互作用力。

焓是状态函数，是等压过程中系统吸的热量：

$$\mathrm{d}Q_p = \mathrm{d}E + p \mathrm{d}V = \mathrm{d}(E + pV) = \mathrm{d}H$$

内能是等体过程中系统吸的热量：

$$\mathrm{d}Q_V = \mathrm{d}E + p \mathrm{d}V = \mathrm{d}E$$

内能 E 、焓 H 与系统热容量的关系分别为：

$$C_V = \left(\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}T} \right)_V = \left(\frac{\partial E}{\partial T} \right)_V$$

$$C_p = \left(\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}T} \right)_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p$$

【例】理想气体绝热自由膨胀 $V_1 \rightarrow V_2 = 2V_1$

求: P_2



解: 有人根据绝热过程方程求得:

$$P_2 = P_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma = \frac{P_1}{2^\gamma} \quad (\times) \text{ 不是准静态过程!}$$

有人根据理想气体物态方程求得:

$$\frac{P_1 V_1}{T} = \frac{P_2 V_2}{T} \rightarrow P_2 = P_1 \frac{V_1}{V_2} = \frac{P_1}{2} \quad (\checkmark)$$

但注意: 这只是初、末态温度相同而已,
不是准静态等温膨胀过程!

准静态等温膨胀过程：（隔板慢慢向右移动）

$$\Delta E = 0$$

$$\begin{aligned} Q = A &= \int_{V_1}^{V_2} P \, dV = \nu RT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1} \\ &= \nu RT \ln 2 > 0 \end{aligned}$$

— 吸热并对外做功过程

绝热自由膨胀过程： $\Delta E = A = Q = 0$

准静态等温膨胀过程 \neq 绝热自由膨胀过程
 \neq 准静态绝热膨胀过程（等熵过程）

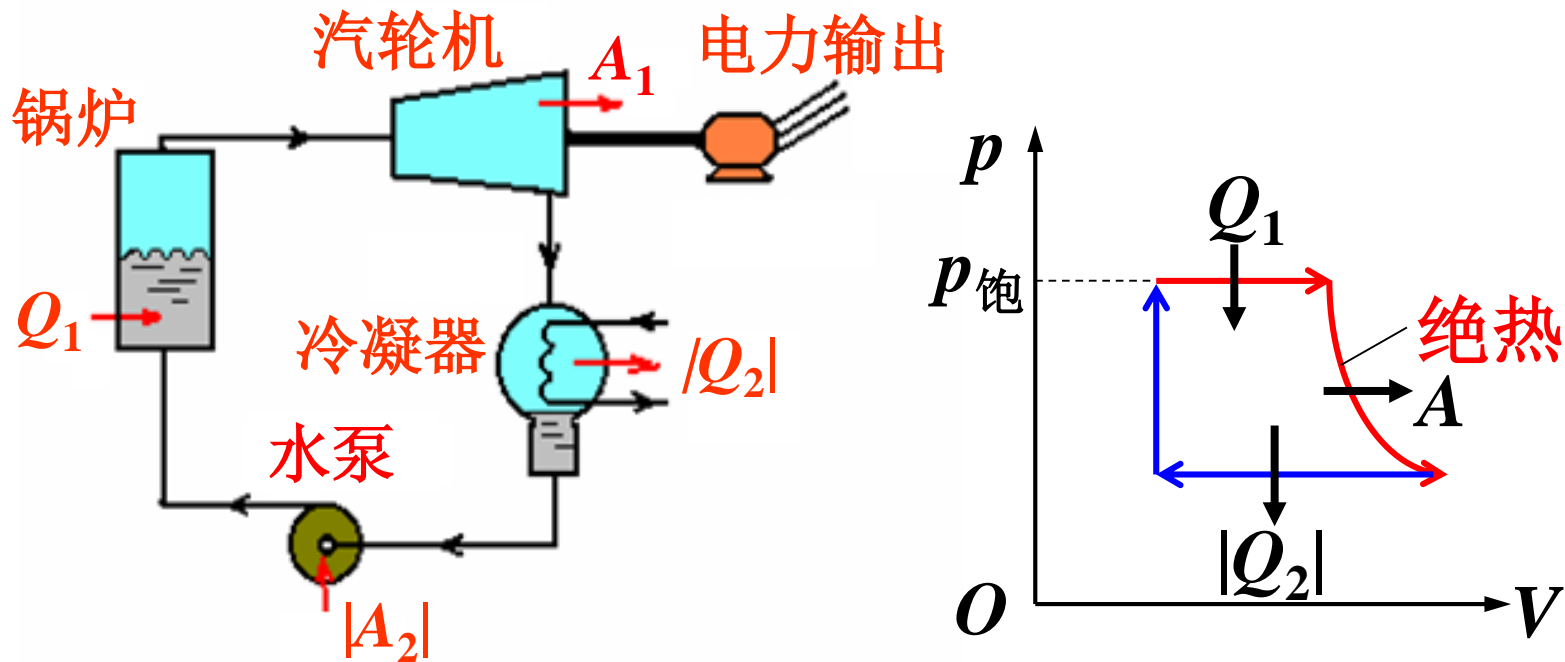
理气过程	ΔE	A	Q
等压	$\nu C_{V,m} \Delta T$	$p \Delta V$ $\nu R \Delta T$	$\nu C_{p,m} \Delta T$
等温	0	$\nu RT \ln(V_2 / V_1)$ $\nu RT \ln(p_1 / p_2)$	$\nu RT \ln(V_2 / V_1)$ $\nu RT \ln(p_1 / p_2)$
等体	$\nu C_{V,m} \Delta T$	0	$\nu C_{V,m} \Delta T$
绝热	$\nu C_{V,m} \Delta T$	$-\nu C_{V,m} \Delta T$ $\frac{p_1 V_1 - p_2 V}{\gamma - 1}$	0
多方	$\nu C_{V,m} \Delta T$	$\frac{p_1 V_1 - p_2 V}{n - 1}$	$\nu C_m \Delta T$ $\nu C_{V,m} \frac{\gamma - n}{1 - n} \Delta T$

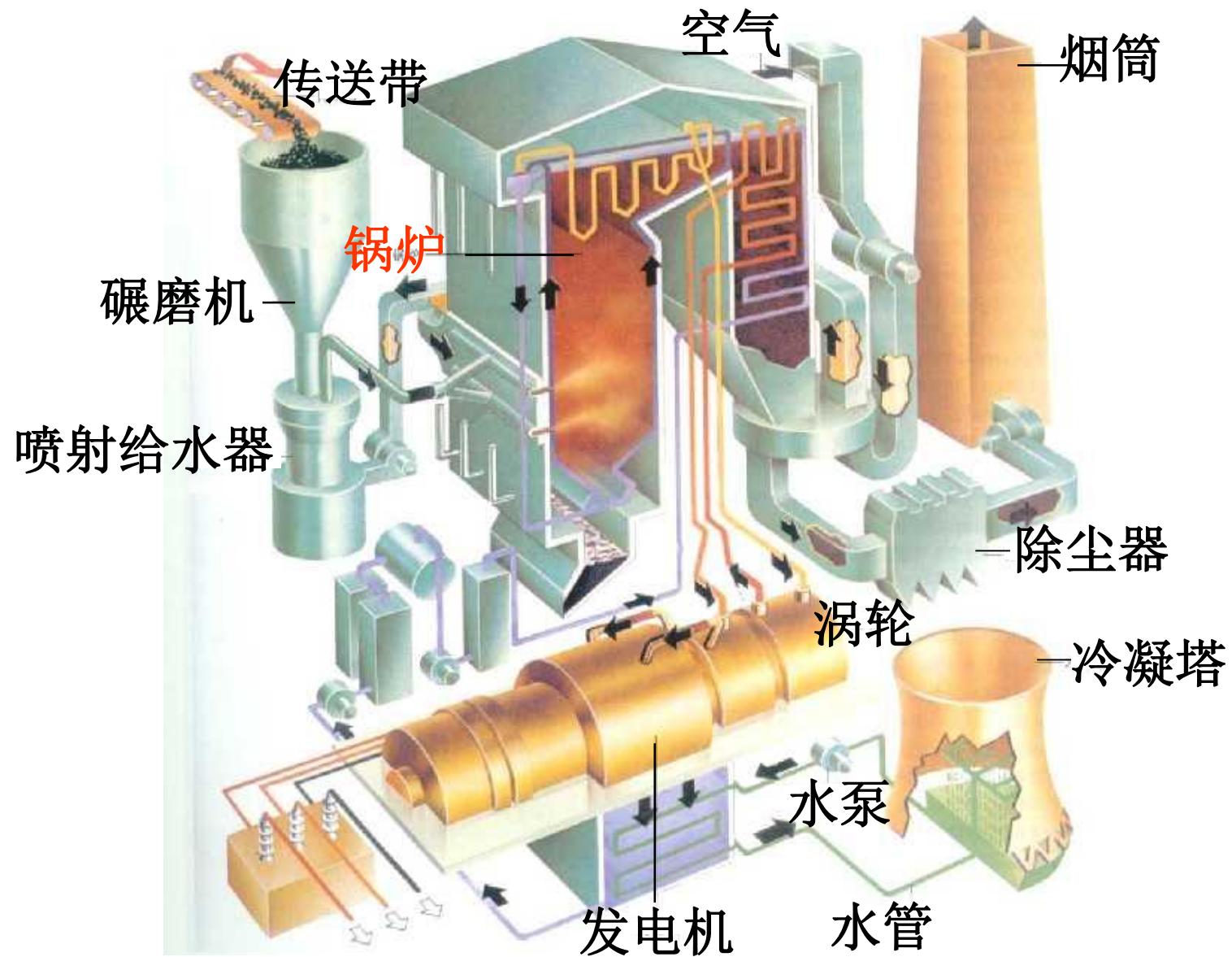


§ 10.6 循环过程

循环过程：系统，如热机中的工质，经一系列变化后回到初态的整个过程。

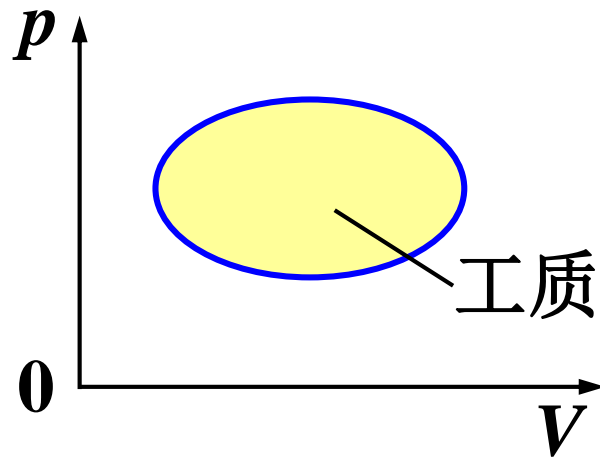
实例：火力发电厂的热力循环：





现代火力发电厂结构示意图

如果循环的各阶段为准静态过程，循环过程可用状态图，如 $p - V$ 图上的闭合曲线表示。



循环过程中，系统将和一系列热源交换热量。

循环一周系统或工质复原，内能不变 $\Delta E = 0$ 。

热循环（正循环）

设在整个过程中：

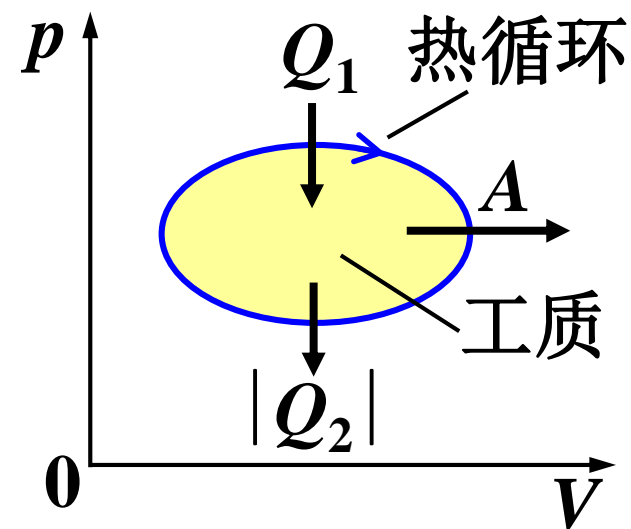
Q_1 —吸收的总热量

$|Q_2|$ —放出的总热量

系统对外界作的净功 A

= 系统净吸热 $Q_1 - |Q_2| > 0$

= 循环曲线所围面积



定义热循环效率 $\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}$

蒸气机 $\eta \sim$ 十几%，内燃机 $\sim 20-30\%$ 。

制冷循环（逆循环）

设在整个过程中：

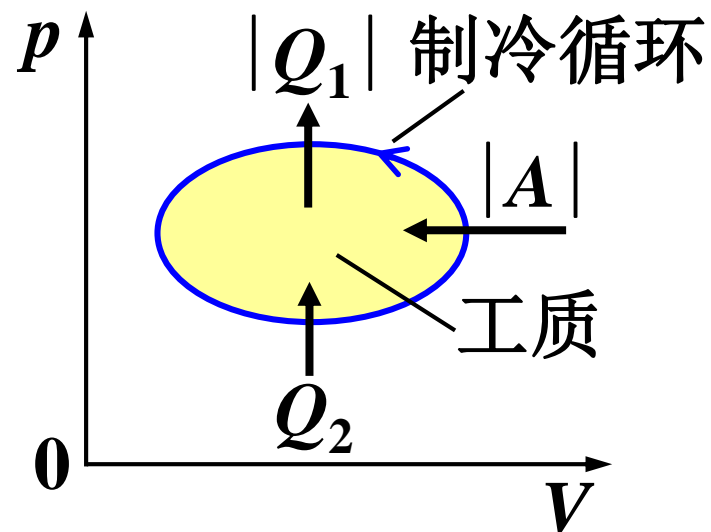
$|Q_1|$ — 放出的总热量

Q_2 — 吸收的总热量

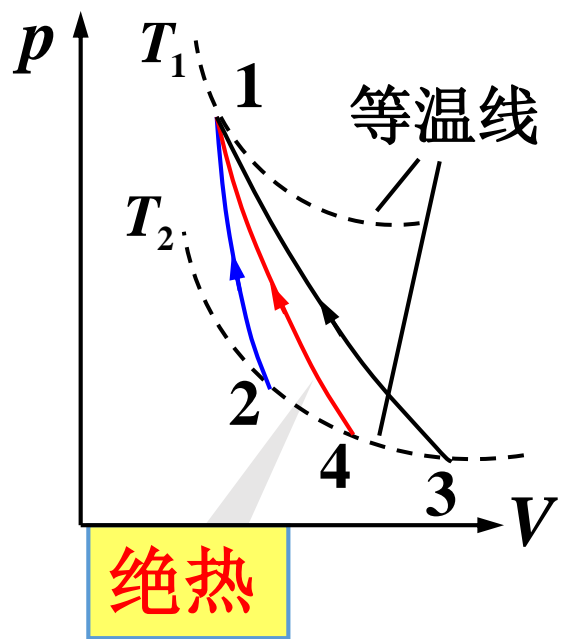
外界对系统作净功 $|A|$

= 系统净放热 $|Q_1| - Q_2 > 0$

= 循环曲线所围面积



【例】热容量可以为负吗？分析图示三个过程



解： $C = \frac{\delta Q}{dT}$

因 $dT > 0$ ($T_1 > T_2$) ,

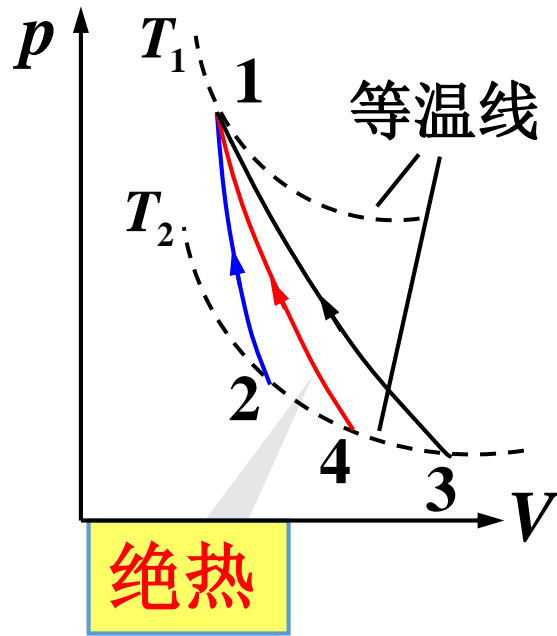
若 $dQ > 0$ 则 $C > 0$

若 $dQ < 0$ 则 $C < 0$

若 $dQ = 0$ 则 $C = 0$

三个过程的 ΔE 相同，且大于 0：

$$\Delta E_{21} = \Delta E_{41} = \Delta E_{31} > 0$$



$$Q = \Delta E + A = \Delta E - A_{\text{外}}$$

◆ $4 \rightarrow 1$ 绝热过程:

$$Q_{41} = \Delta E_{41} - A_{41\text{外}} = 0$$

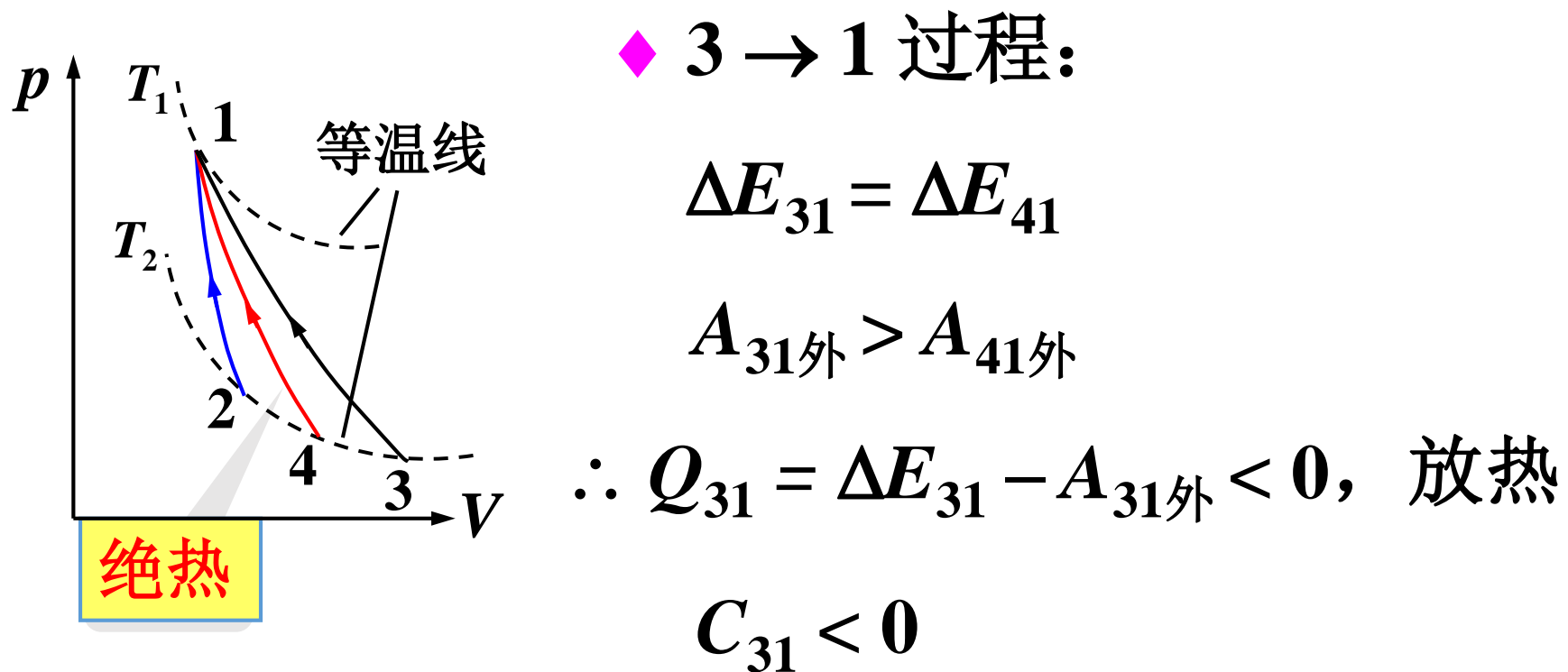
$$C_{41} = 0$$

◆ $2 \rightarrow 1$ 过程:

$$\Delta E_{21} = \Delta E_{41}, \quad A_{21\text{外}} < A_{41\text{外}}$$

$$\therefore Q_{21} = \Delta E_{21} - A_{21\text{外}} > 0, \quad \text{吸热}$$

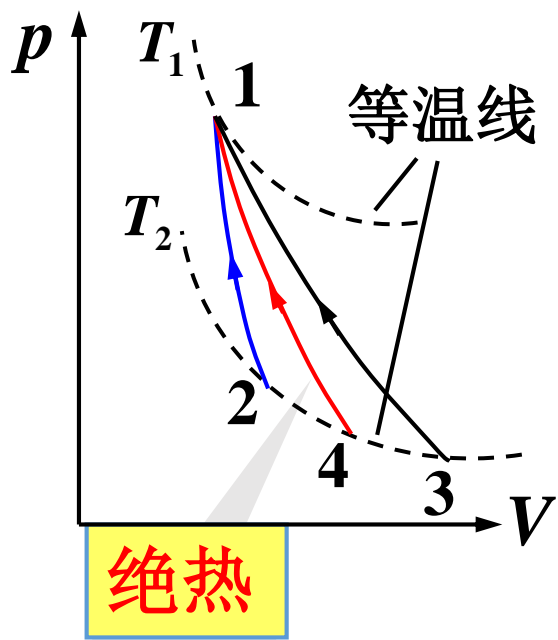
$$C_{21} > 0$$



3 → 1过程温度升高，反而放热？

因为 $A_{31\text{外}}$ 大。

另法：从循环分析



◆ $1 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 1$ 逆循环:

$Q_{1431} < 0$, 总的放热

$1 \rightarrow 4$ 绝热, $4 \rightarrow 3$ 吸热

$\therefore 3 \rightarrow 1$ 必放热!

$C_{31} < 0$

◆ $1 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ 正循环:

$Q_{1421} > 0$, 总的吸热

$1 \rightarrow 4$ 绝热, $4 \rightarrow 2$ 放热, $\therefore 2 \rightarrow 1$ 必吸热!

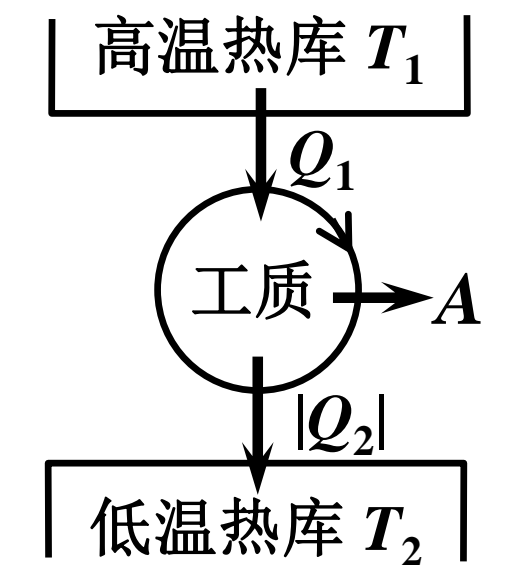
$C_{21} > 0$



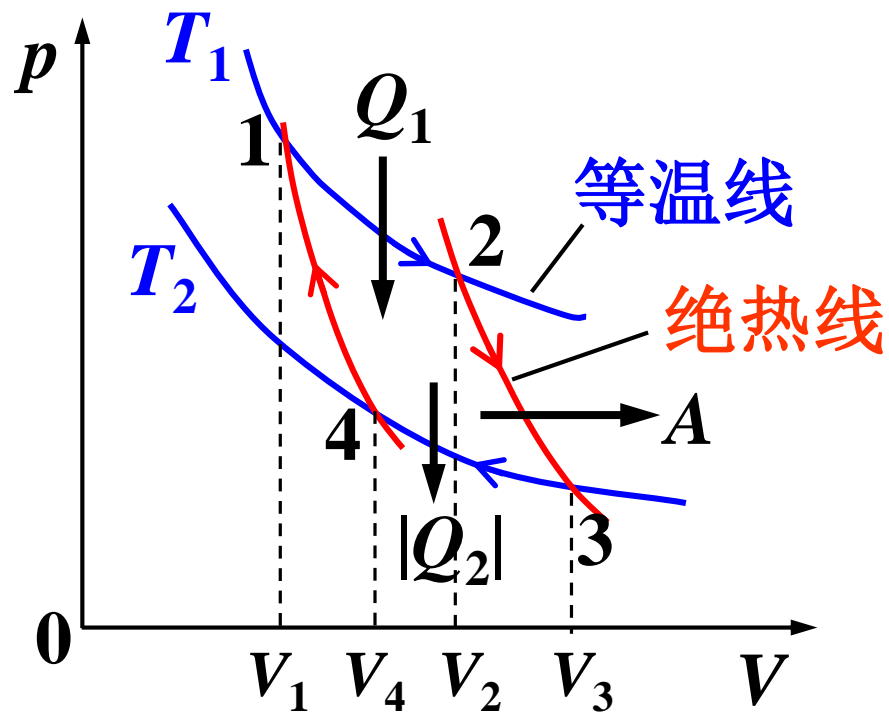
§ 10.7 卡诺循环

卡诺循环：工质只和两个恒温热源交换热量的无摩擦的准静态循环。

卡诺热机：按卡诺循环工作的热机。



热机循环示意图



以理想气体为工质计算卡诺热循环的效率：

等温
过程

$$1 \rightarrow 2: Q_1 = A_1 = \nu RT_1 \ln(V_2/V_1)$$

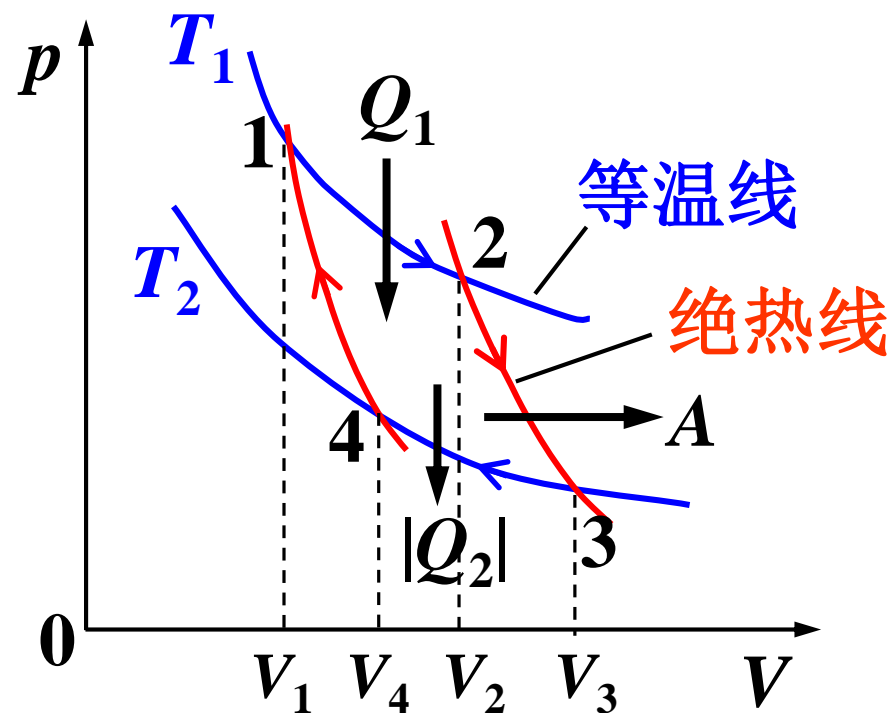
$$3 \rightarrow 4: |Q_2| = |A_2| = \nu RT_2 \ln(V_3/V_4)$$

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

绝热
过程

$$\left. \begin{array}{l} 2 \rightarrow 3: T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1} \\ 4 \rightarrow 1: T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_4^{\gamma-1} \end{array} \right\} \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$$

(闭合条件)



卡诺热机循环效率

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

▲ η_c 只与 T_1 、 T_2 有关，与工质的种类、 M 、 p 、 V 的变化无关。

▲ $\uparrow T_1$ 或 $\downarrow T_2 \rightarrow \eta_c \uparrow$ ，实用上是 $\uparrow T_1 \rightarrow \eta_c \uparrow$ 。

现代热电厂： $T_1 \sim 600^\circ\text{C}$ ， $T_2 \sim 30^\circ\text{C}$

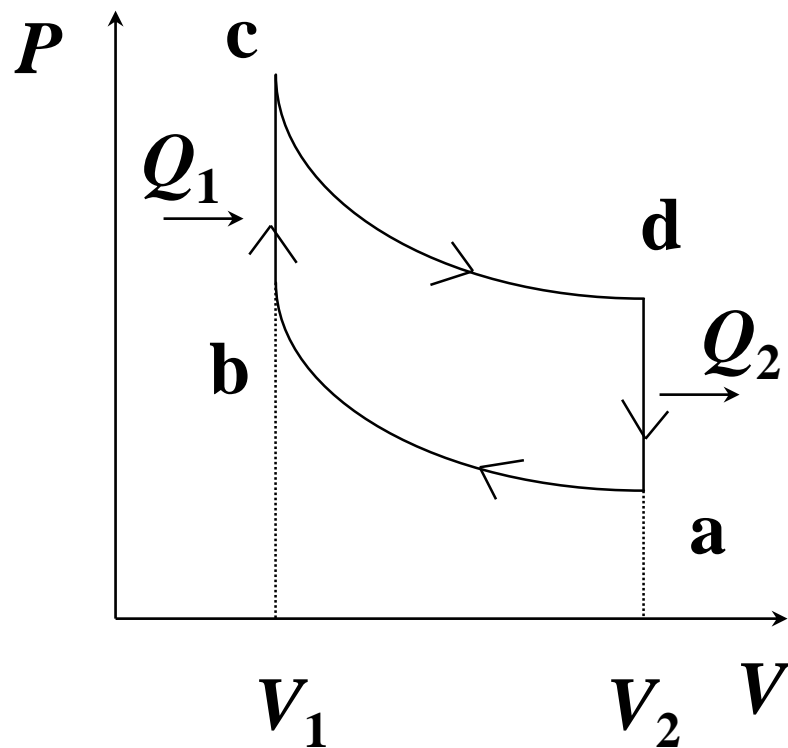
理论上： $\eta_c \sim 65\%$ ， 实际： $\eta < 40\%$ 。

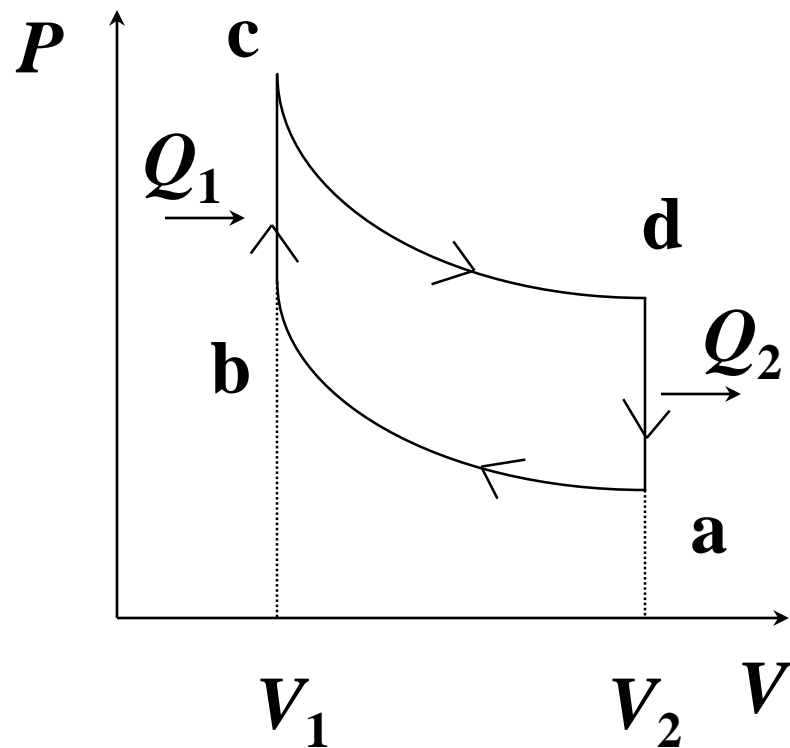
原因： 非卡诺，非准静态，有摩擦。



例：在汽油机中，混入少量汽油的空气所组成的气体被送入汽缸内，然后气体经历循环过程。这个过程可以近似地用以下各步表示，气体先被压缩，气体爆炸，膨胀做功，最后排气，完成循环。求该热机的效率。

解：设想一个比较接近的可逆循环过程





计算 Q_1 $Q_1 = \nu C_V (T_c - T_b)$

同理 $Q_2 = \nu C_V (T_a - T_d)$

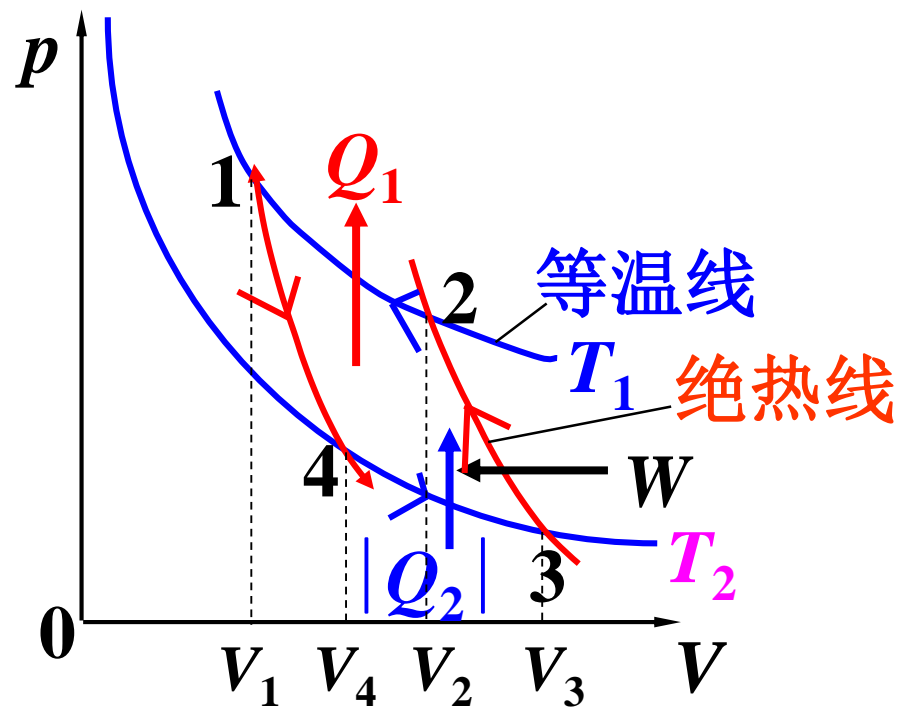
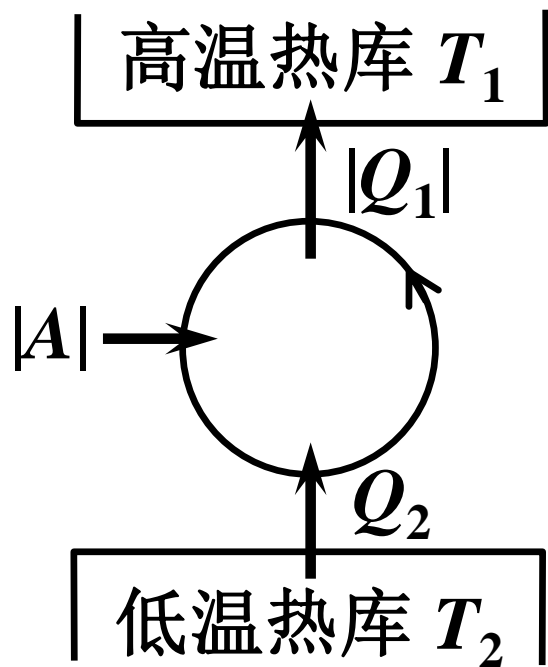
$$\eta = 1 + \frac{Q_2}{Q_1} = 1 + \frac{T_a - T_d}{T_c - T_b}$$

由绝热过程 $T_c V_1^{\gamma-1} = T_d V_2^{\gamma-1}$ $T_b V_1^{\gamma-1} = T_a V_2^{\gamma-1}$

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

只决定于体积压缩比，若压缩比 7，
 $\gamma=1.4$ ，则 $\eta=55\%$ ，实际只有25%。

§ 10.8 致冷循环



致冷系数

卡诺致冷机

$$w = \frac{Q_2}{|A|}$$

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

制冷系数 w_c 总是小于 1 吗?

数据： 若 $T_1 = 293 \text{ K}$ （室温）， $w_c = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$

T_2	273	223	100	5	1
w_c	13.6	3.2	0.52	0.017	0.0034

低温热源 T_2 越低， w_c 越小，致冷越困难。

一般致冷机的 w_c ： 2~7

阅读书 P376—P377 “热泵”

