

大学物理 B(1)

期末考试

6月14日（周三） 9:00 ~ 11:00

六教-6C201

六教-6C202

考试范围

第6章 振动

第7章 波动

第9章 温度和气体动理论

第10章 热力学第一定律

第11章 热力学第二定律

教学大纲与教材标记不完全符合。有出入的部分：

“*两个相互垂直的简谐运动的合成”

“*玻尔兹曼分布律”

“*范德瓦尔斯方程”

“*非平衡态 输运过程”

以上4小节在教材里都是打星号的，但大纲里是要求的，考试有可能涉及。

第十章 热力学第一定律

§ 10.1 准静态过程



§ 10.2 功、热、内能



§ 10.3 热力学第一定律



§ 10.4 热容量



§ 10.5 理想气体的绝热过程



§ 10.6 循环过程



§ 10.7 卡诺循环



§ 10.8 致冷机



§ 10.4 热容量(Heat capacity)

$$C' = \frac{dQ}{dT}$$

- 摩尔热容量 C , 单位: $\text{J/mol} \cdot \text{K}$
- 比热容 c , 单位: $\text{J/kg} \cdot \text{K}$

dQ 为过程量

定压热容量 :

$$C'_P = \left(\frac{dQ}{dT} \right)_P$$

定容热容量 :

$$C'_V = \left(\frac{dQ}{dT} \right)_V$$

也可以是其它过程

理想气体准静态等容过程:

$$dQ = dE + PdV = dE$$

$$C'_V = \left(\frac{dQ}{dT} \right)_V \quad \left(\frac{dQ}{dT} \right)_V = \frac{dE}{dT} \quad C'_V = \nu C_V \quad \text{广延量}$$

$$dE = \nu C_V dT$$

理想气体准静态定压过程:

$$PV = \nu RT$$

$$C'_P = \frac{dE}{dT} + P \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P = \nu C_P \quad \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P = \nu \frac{R}{P}$$

迈耶公式

$$C_P = C_V + R$$

比热容比 γ $\gamma = \frac{C_P}{C_V} = 1 + \frac{R}{C_V}$

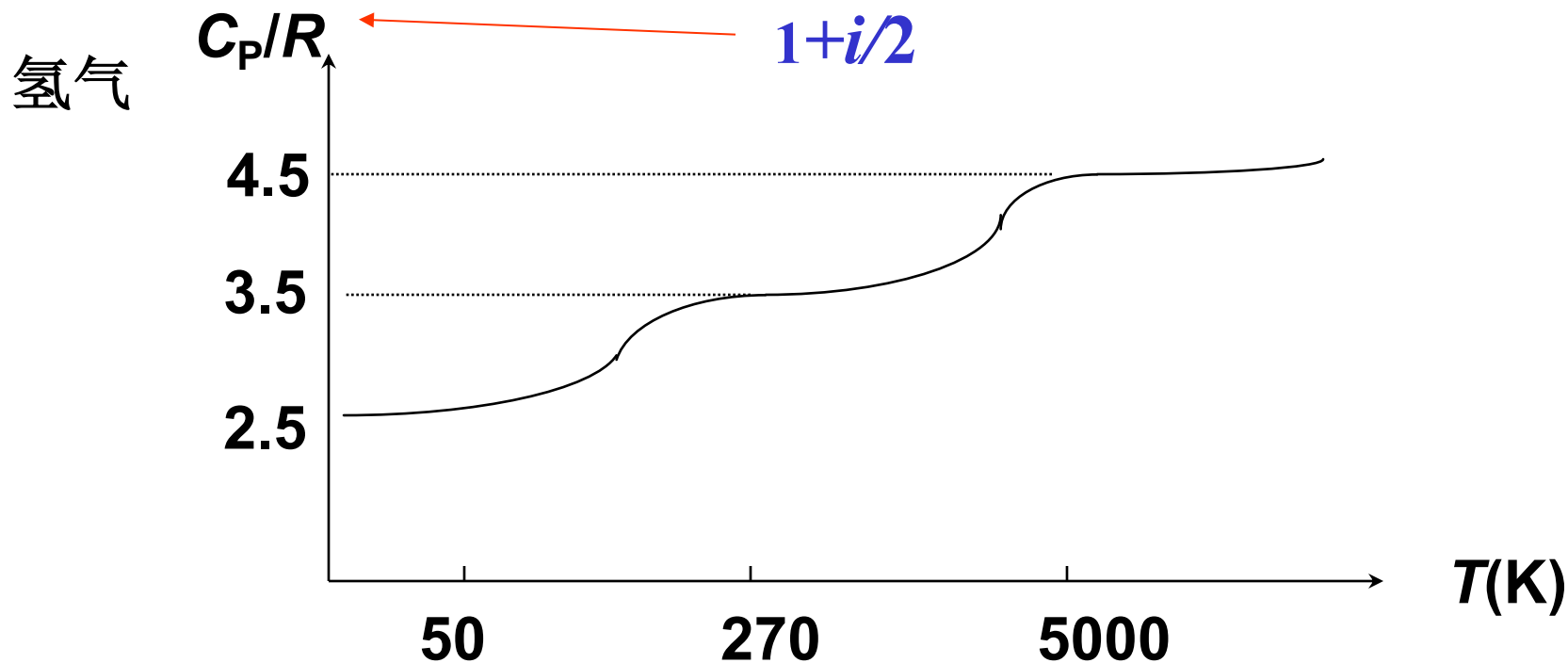
$$dE = \frac{i}{2} \nu R dT = \nu C_V dT \quad \rightarrow \quad t + r + 2\nu$$

$$C_V = \frac{i}{2} R \quad C_P = \left(1 + \frac{i}{2}\right) R \quad \gamma = \frac{2+i}{i}$$

$C < 0$? 恒星；对外做功比吸热多的过程

用 γ 值和实验比较，常温下符合很好，
多原子分子气体则较差，见教材

量子效应



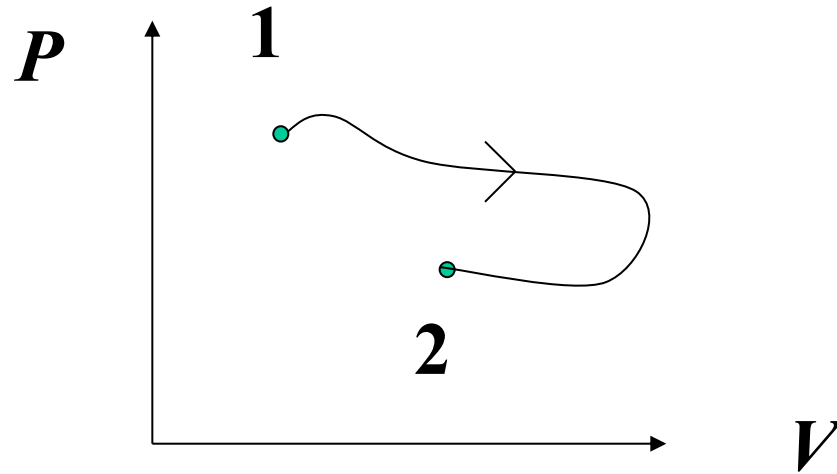
经典理论有缺陷，需量子理论。

低温时，只有平动， $i=3$ ；

常温时，转动被激发， $i=3+2=5$ ；

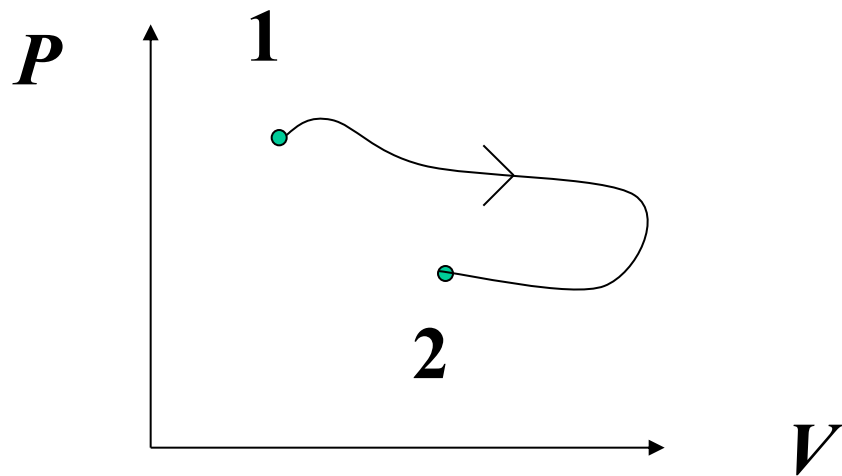
高温时，振动也被激发， $i=3+2+2=7$ 。

例： 下列过程后求内能的变化，已知 P_1, V_1, P_2, V_2



1) 理想气体

$$\begin{aligned}\Delta E &= \nu C_V \Delta T = \frac{i}{2} \nu R \Delta T \\ &= \frac{i}{2} (P_2 V_2 - P_1 V_1)\end{aligned}$$



2) 范德瓦尔斯气体

动能部分变化与
理想气体情况类似

$$\Delta E_K = \frac{i}{2} \nu R \Delta T$$

势能部分增量 = 克服内压力做功

$$dE_V = -P_i dV = \frac{\nu^2 a}{V^2} dV = -d \frac{\nu^2 a}{V}$$

$$\Delta E_V = \int_1^2 -P_i dV = -\nu^2 a \left(\frac{1}{V_2} - \frac{1}{V_1} \right)$$

$$\Delta E = \Delta E_K + \Delta E_V$$

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



§ 10.5 理想气体的绝热过程(Adiabatic process of the ideal gas)

- 理想气体准静态绝热过程

$$dQ = dE + dW = \nu C_V dT + PdV = 0$$

$$PV = \nu RT \quad \text{微分得:} \quad PdV + VdP = \nu R dT$$

$$\frac{dP}{P} + \gamma \frac{dV}{V} = 0$$

$$\gamma = 1 + \frac{R}{C_V}$$

$$PV^\gamma = \text{const.}$$

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

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

范德瓦尔斯气体?

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

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

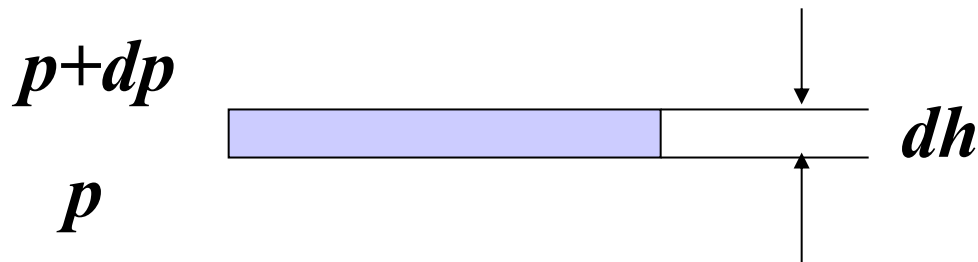
牛顿认为是等温过程，所以算错！

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



$$dp = -\rho g dh$$

密度不变时

$$p + \rho gh = p_0$$

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

气体摩尔质量

考虑温度变化

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

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

绝热准静态过程

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

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

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

$$\gamma = 7/5,$$

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

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

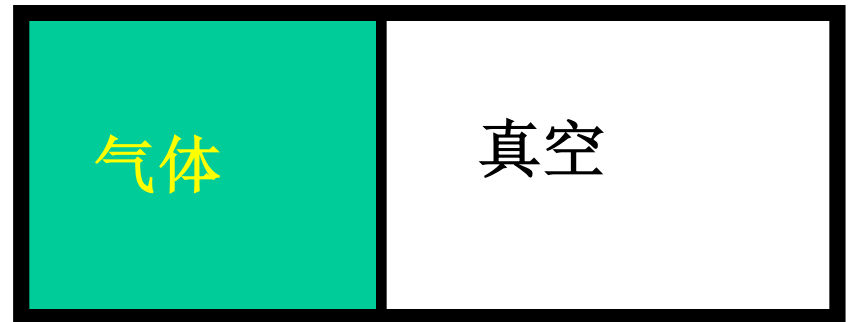
上升1km，温度下降10K，大致符合观察
(距地面<10km)。再向上比较复杂。

◆ 气体绝热自由膨胀

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

理想气体, T 不变

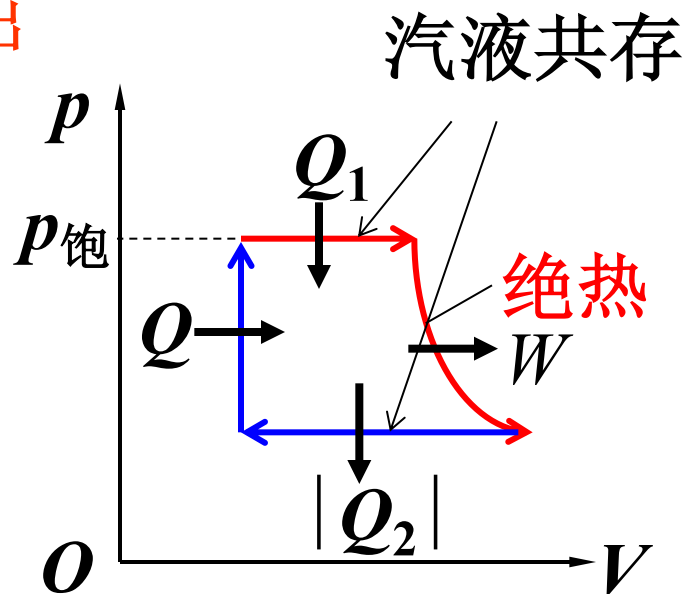
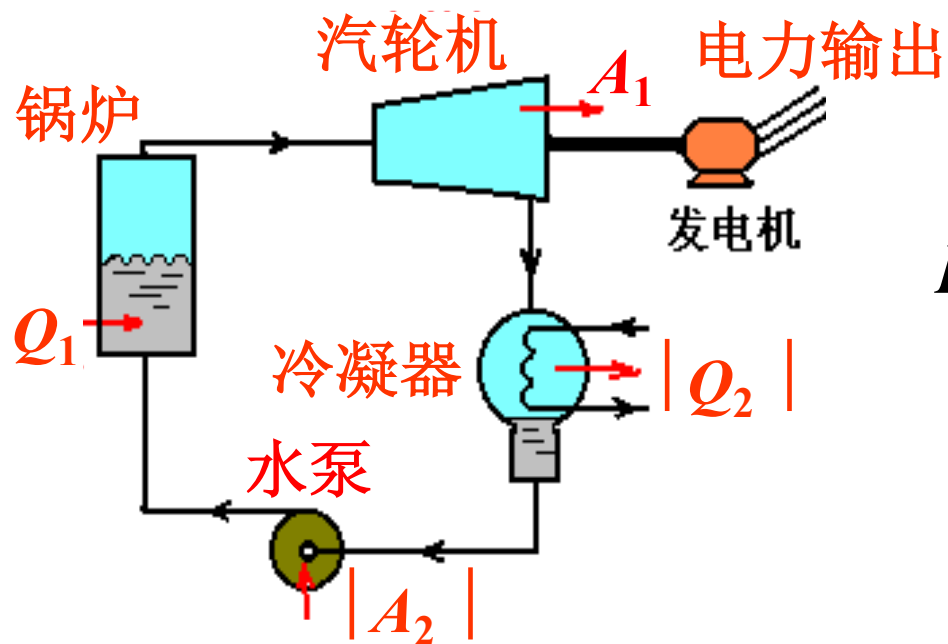
范氏气体(引力为主),
 T 下降



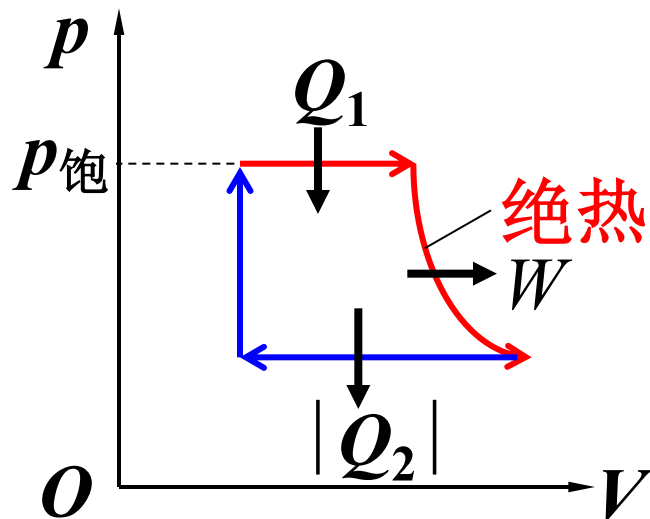
§ 10.6 循环过程(Cyclical process)

- 一系统，或工作物质，简称工质，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。

实例：火力发电厂的热力循环



一般从高温热库吸热 Q_1 ，对外做净功 W ，
向低温热库放热 Q_2 （只是表示数值），
 $W = Q_1 - Q_2 > 0$ 则为正循环；反之为逆循环。



汽化热 \gg 水比热

- ◆ 正循环过程对应热机，
逆循环过程 对应致冷机

热机效率：
(**efficiency**)

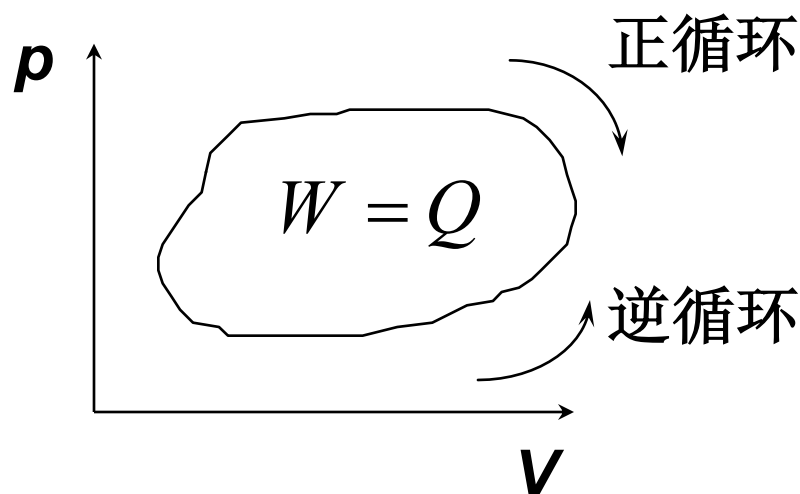
$$\eta = \frac{W}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

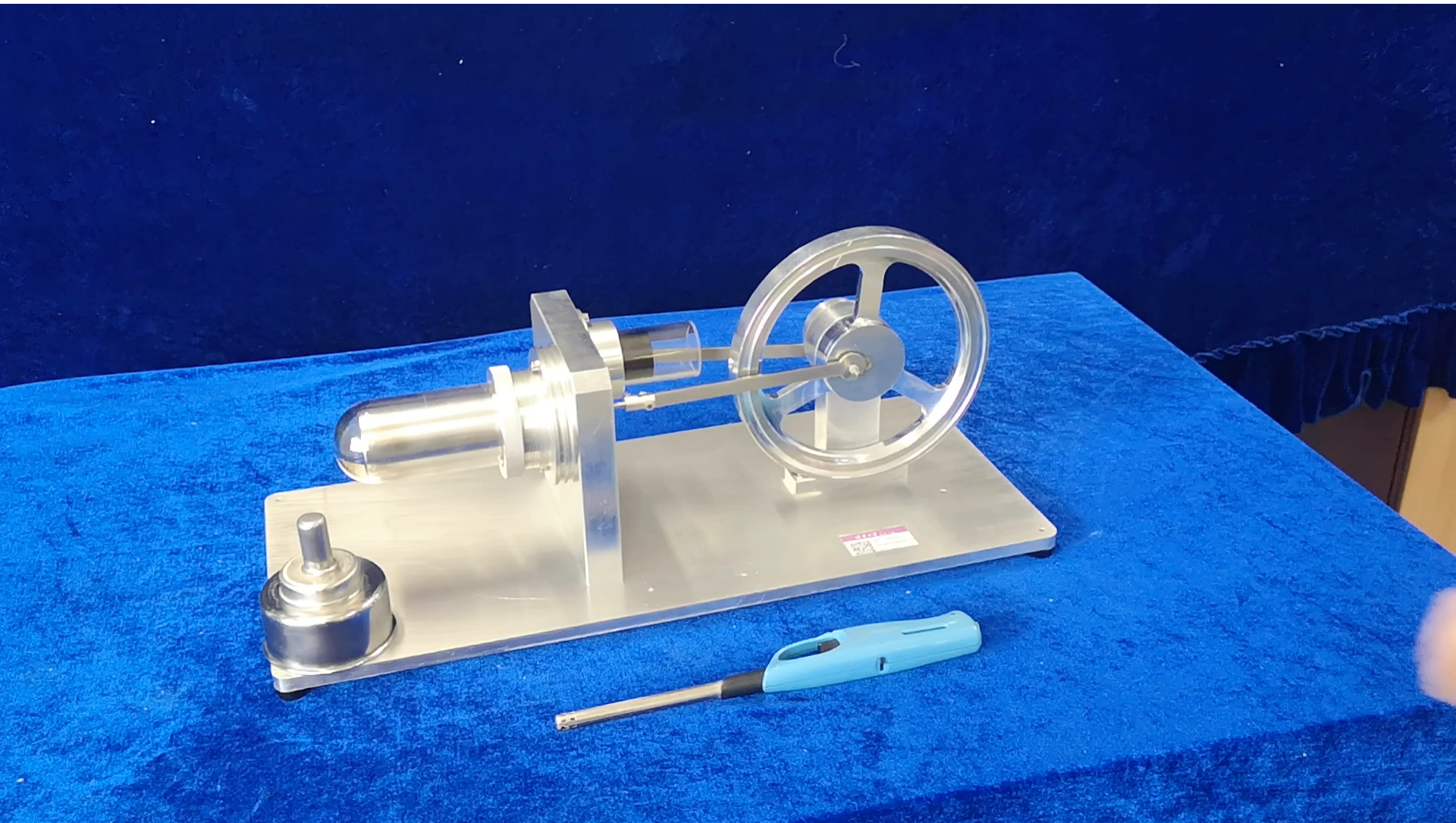
致冷系数：

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

例，在p-V图

- ◆ 循环为准静态过程，在状态图中对应闭合曲线。



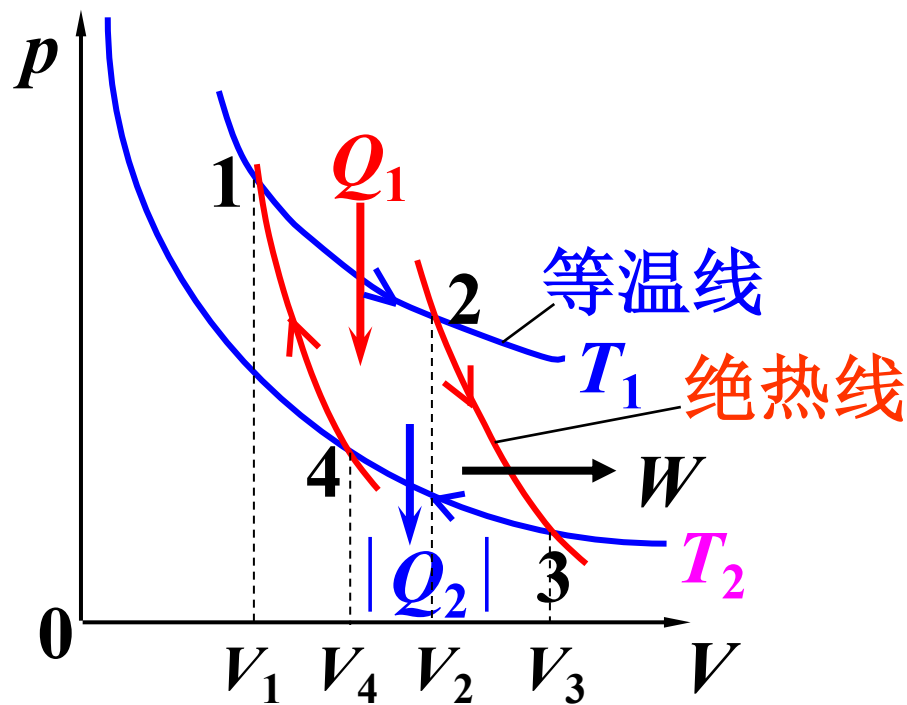
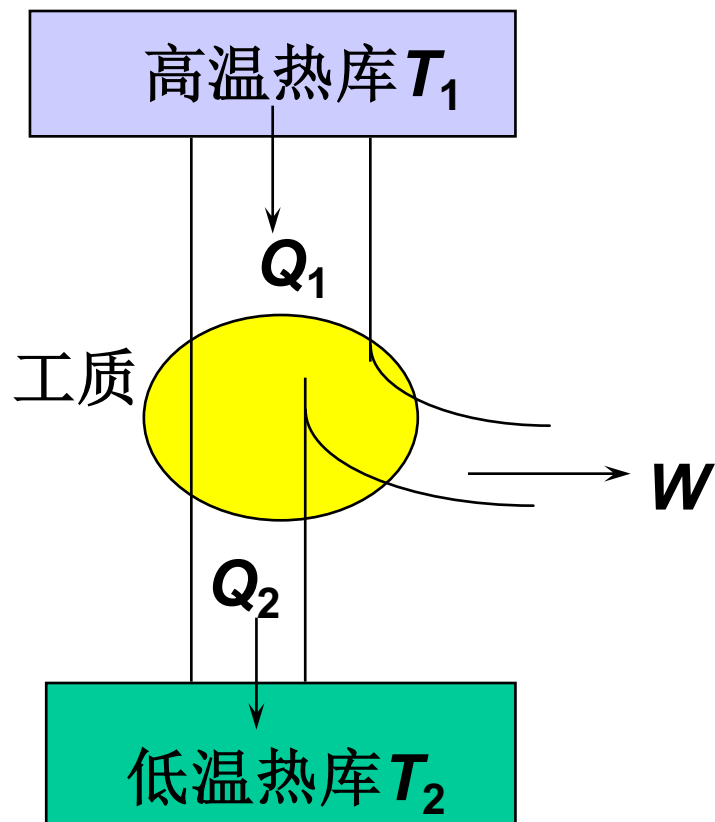


循环过程的特点是经过一次循环，系统回到原来的状态，那么在PV图上是不是循环过程总可以用一个闭合曲线来表示？

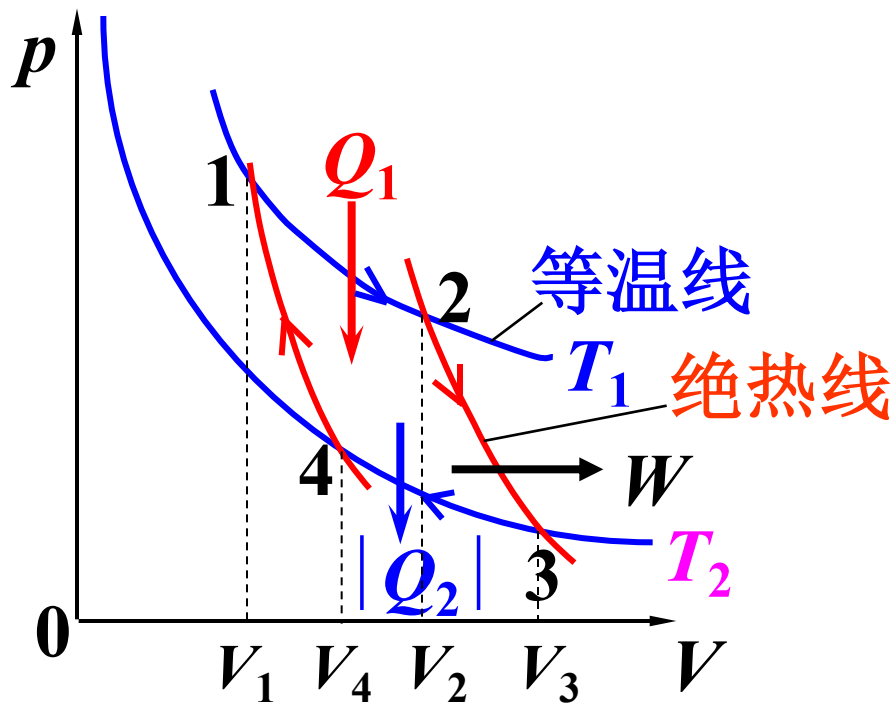
☐ A 是

☒ B 否

§ 10.7 卡诺循环 (Carnot cycle)



准静态循环，**工质**只和两个恒温热库交换热量。₂₁



对理想气体工质：

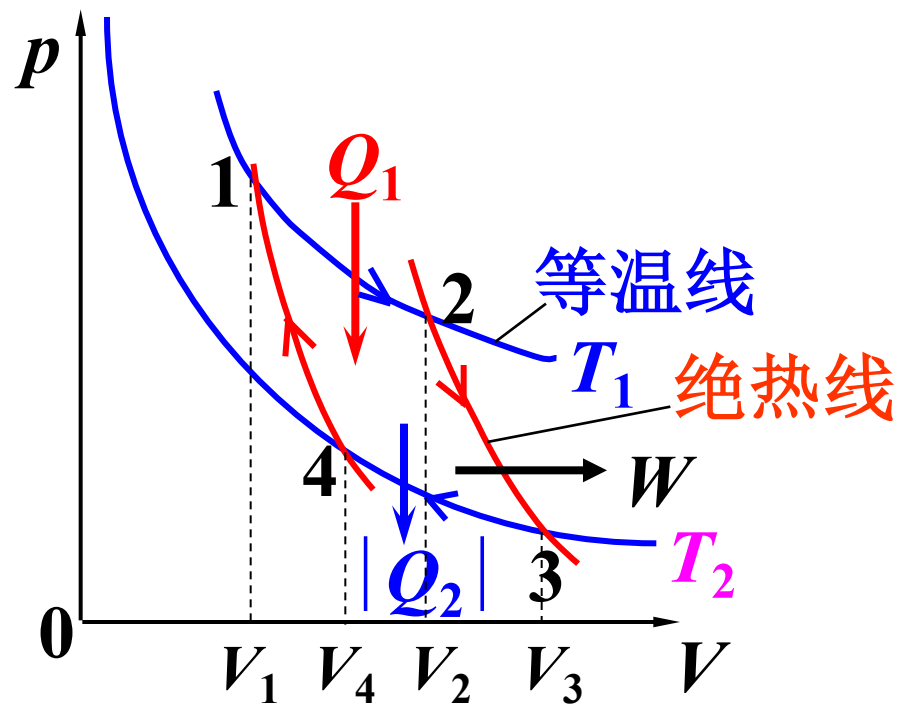
等温
过程

$$1 \rightarrow 2: \quad Q_1 = W_1 = \nu R T_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$3 \rightarrow 4: \quad |Q_2| = |W_2| = \nu R T_2 \ln \frac{V_3}{V_4}$$

$$\eta_c = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}$$

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



绝热
过程

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

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

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$$

卡诺热机循环的效率

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

说明：① η_c 理想气体工质导出
只与 T_1 、 T_2 有关。

② $T_1 \uparrow$, $T_2 \downarrow \rightarrow \eta_c \uparrow$, 实用上是 $\uparrow T_1$ 。

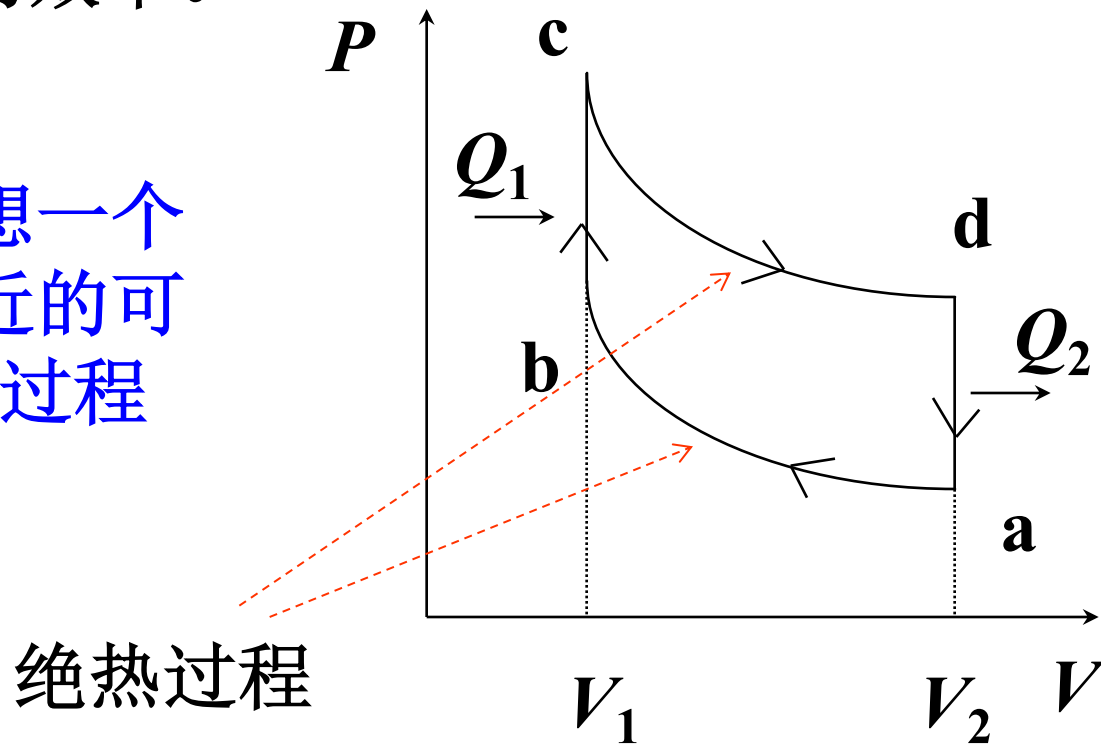
现代热电厂： $T_1 \sim 600^\circ\text{C}$, $T_2 \sim 30^\circ\text{C}$
(900K) (300K)

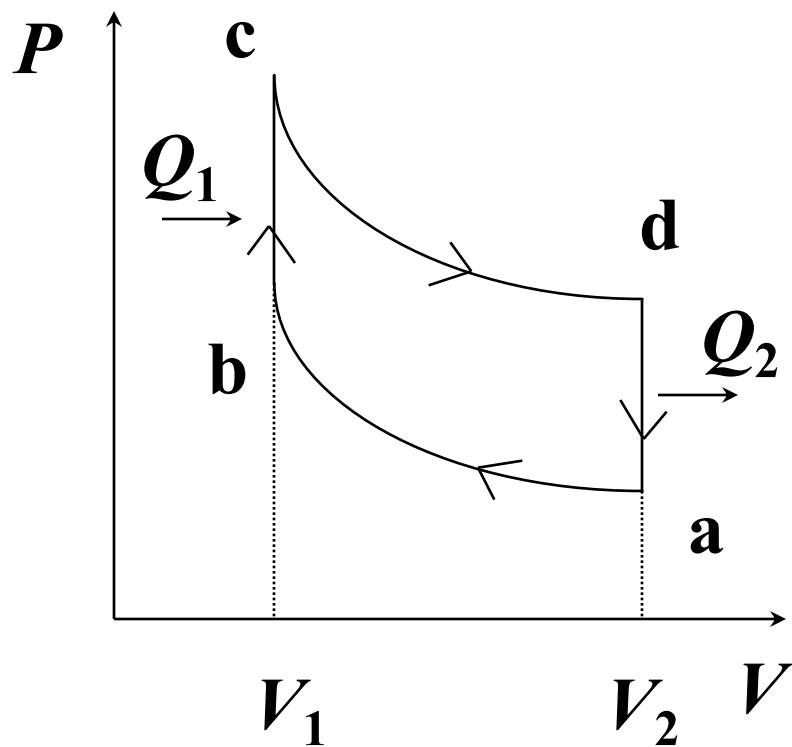
理论上： $\eta_c \sim 65\%$, 实际： $\eta < 40\%$,

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(a-b)，气体爆炸(化学反应放热，等效于系统吸热)，膨胀做功，最后排气(等容降温)，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 $T_c V_1^{\gamma-1} = T_d V_2^{\gamma-1}$ $T_b V_1^{\gamma-1} = T_a V_2^{\gamma-1}$

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

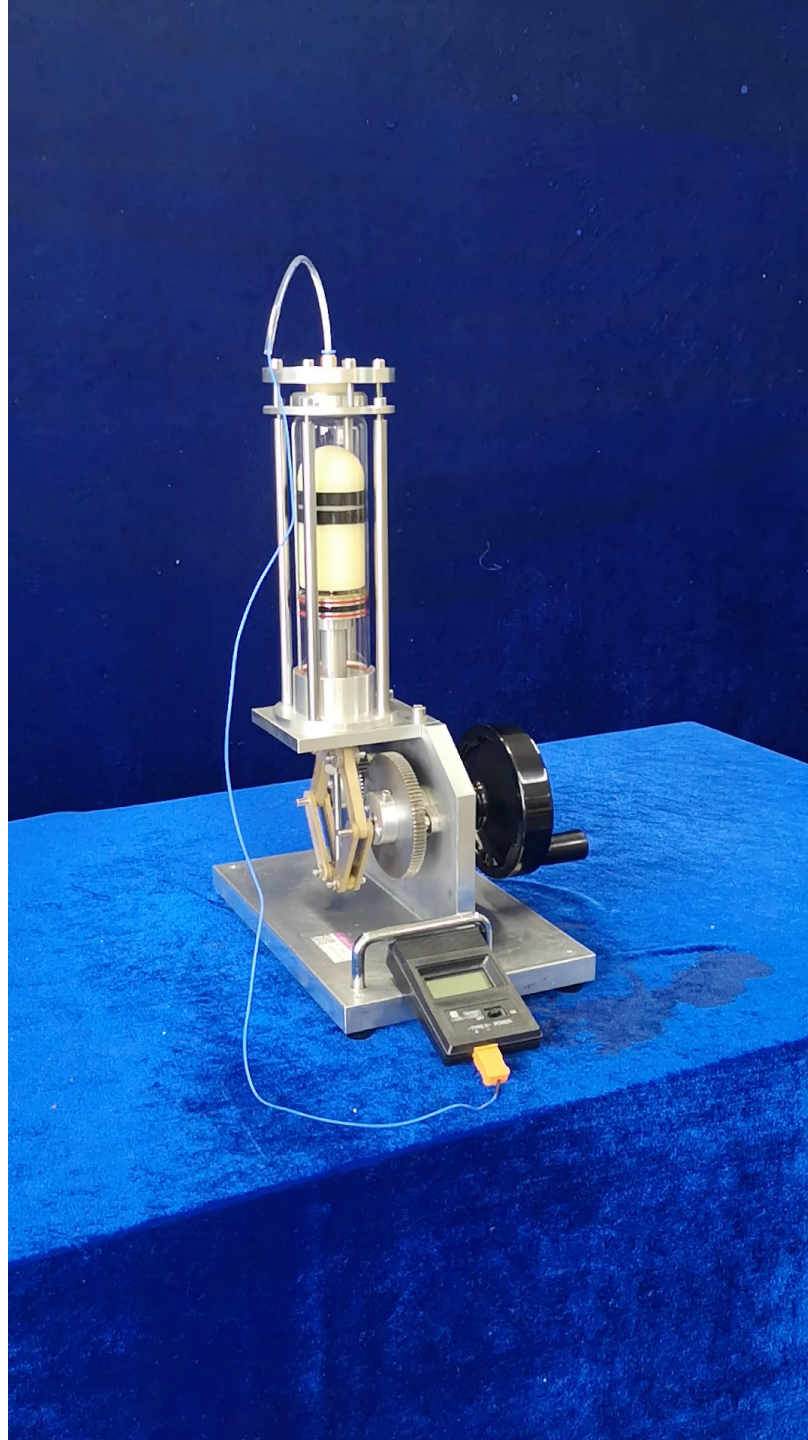
只决定于体积压缩比，若压缩比 7，
 $\gamma=1.4$ ，则 $\eta=55\%$ ，实际只有25%。



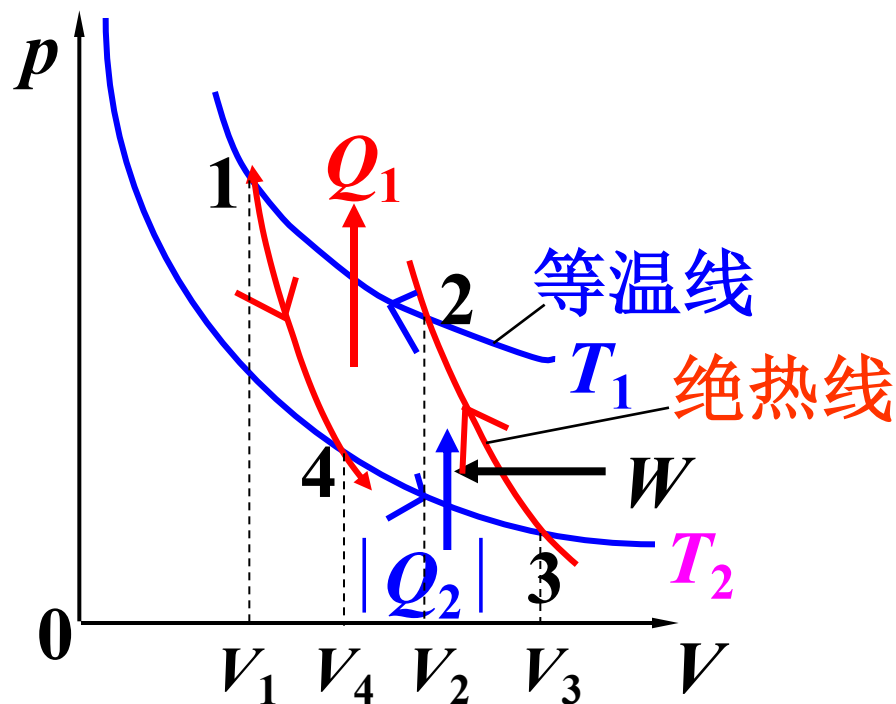
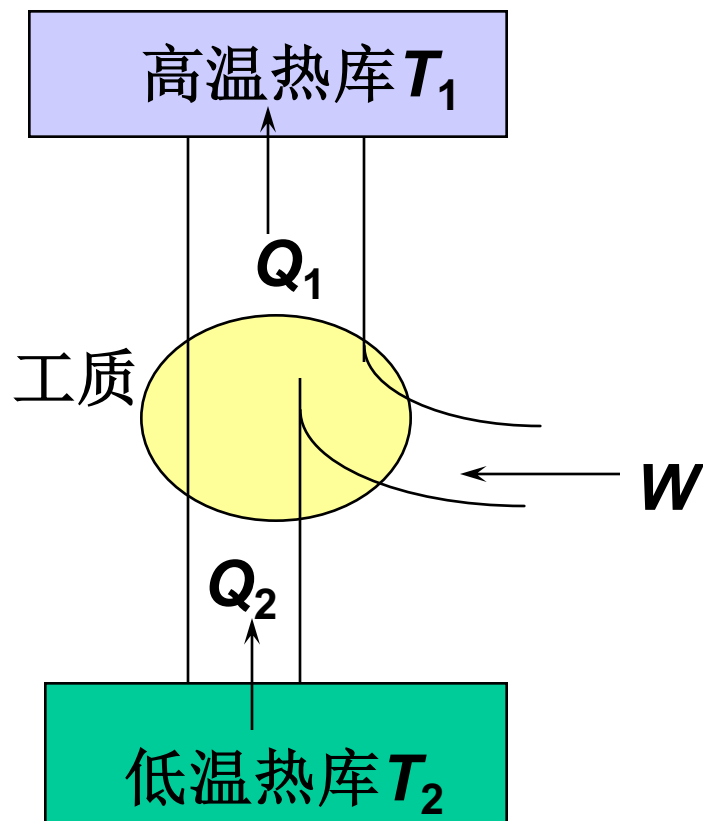
工质做准静态循环的卡诺热机只在两个恒温热库之间工作，因此循环过程必有两个绝热过程

☐ A 错误

☒ B 正确



§ 10.8 致冷机(Refrigerator)



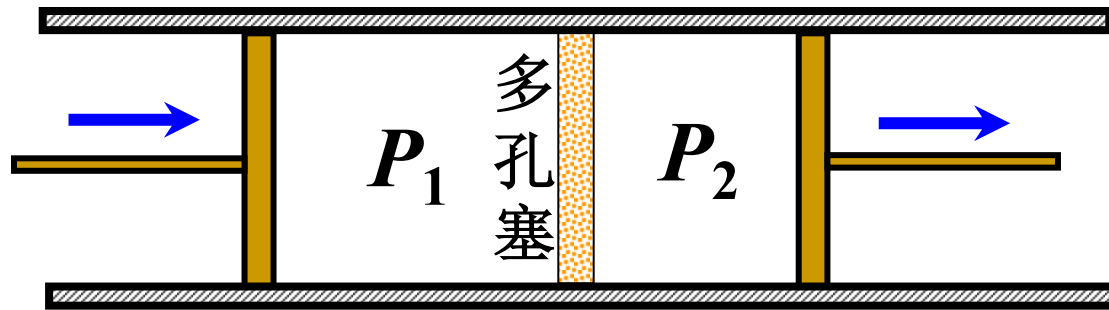
致冷系数:
$$w = \frac{|Q_2|}{W} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

若为卡诺致冷循环, 则

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$$

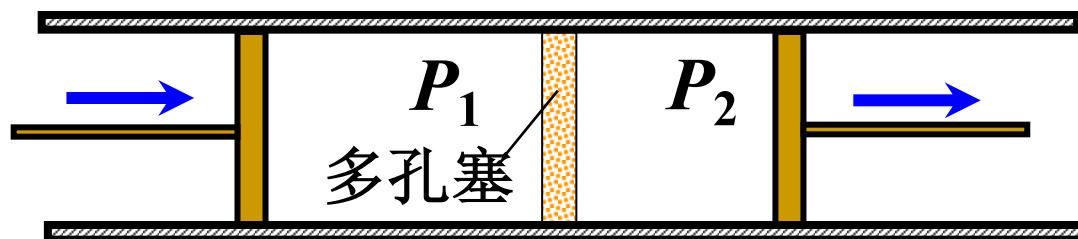
节流过程 (throttling process)

通常气体是通过多孔塞或小孔向压强较低区域膨胀——节流过程。



实际气体通过节流过程温度可升高或降低，这称为焦耳-汤姆孙效应 (Joule-Thomson effect)。

温度降低叫正的焦耳-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

当 P_1 和 P_2 保持一定，且过程绝热时：

$Q = 0$ ， $W = P_2 V_2 - P_1 V_1$ ，由热力学第一律有：

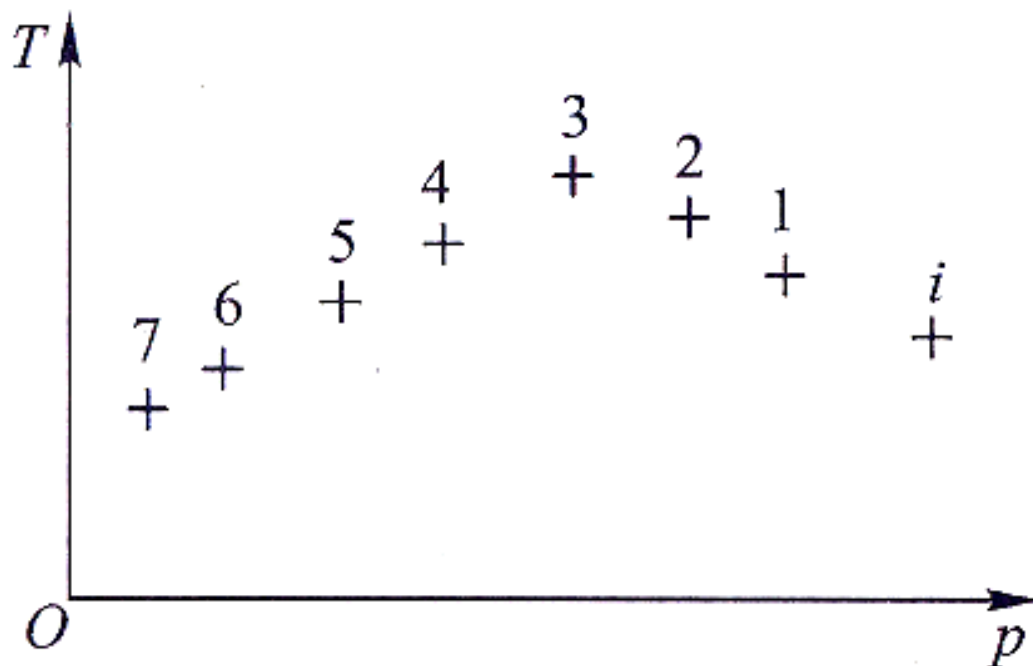
$$0 = E_2 - E_1 + P_2 V_2 - P_1 V_1$$

$$E_1 + P_1 V_1 = E_2 + P_2 V_2 \longrightarrow \boxed{H_1 = H_2}$$

气体的绝热节流过程是等焓过程（但非准静态）

理想气体的等焓过程是等温过程

实际气体节流



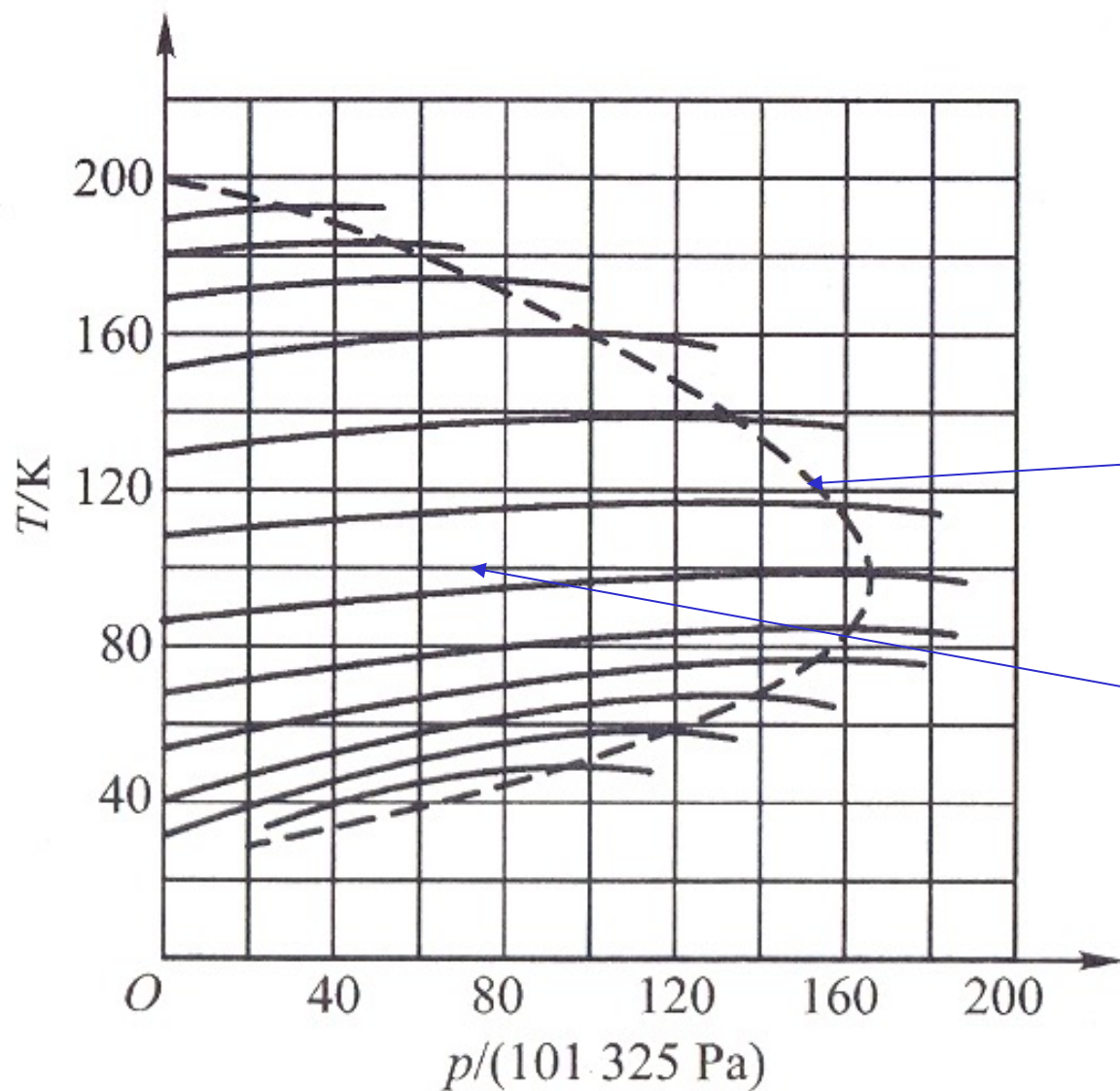
$T_i \quad p_i$	$T_f \quad p_f$
-----------------	-----------------

焦耳 - 汤姆孙过程

气体节流过程虽然是等焓过程，但不是准静态过程，中间状态都不是平衡态。

$$\mu = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_H$$

焦耳-汤姆孙系数



$\mu = 0$

转换曲线

$\mu > 0$

节流制冷区

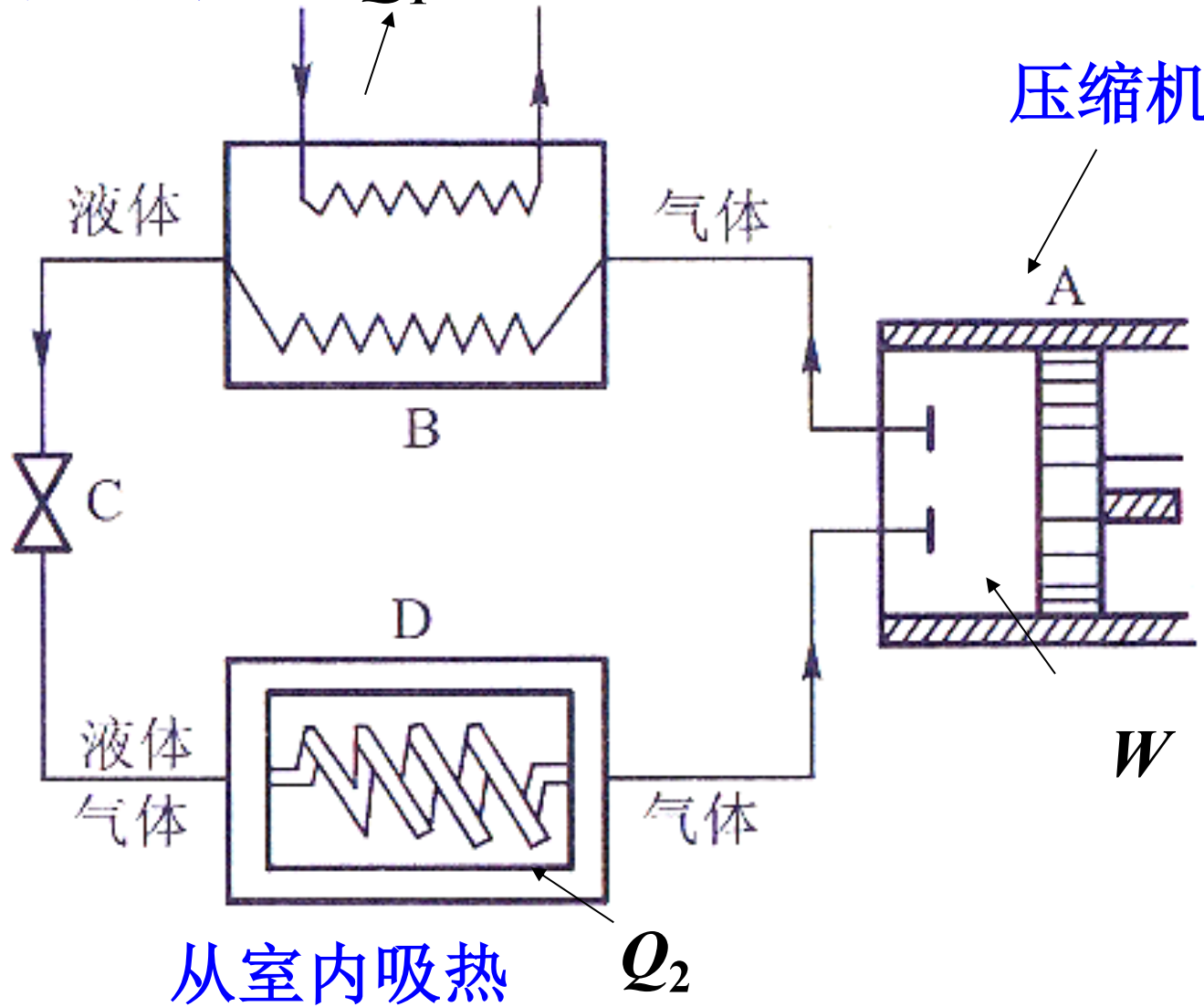
$\mu < 0$

节流制热区

制冷机原理图

向室外环境散热 Q_1

节流
降温



关于节流过程，下列说法不正确的有

- ☒ A 过程的快或慢，决定了是否为准静态过程
- ☐ B 无论过程快慢都不是准静态过程
- ☒ C 缓慢的节流过程是等焓准静态过程
- ☒ D 若是准静态过程，经过节流温度下降
- ☒ E 若不是准静态过程，经过节流温度不变

第十一章 热力学第二定律

§ 11.1 自然过程的方向



§ 11.2 热力学第二定律



§ 11.3 热力学第二定律的统计意义



§ 11.4 热力学几率



§ 11.5 玻耳兹曼熵公式和熵增加原理



§ 11.6 可逆过程和卡诺定理



§ 11.7 克劳修斯熵公式



§ 11.8 温熵图

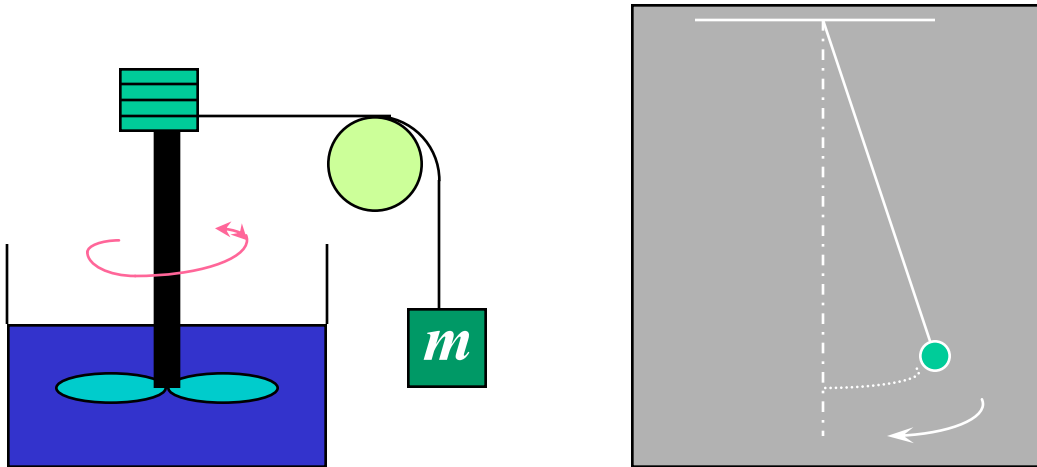


§ 11.9 *熵和能量退化



§ 11.1 自然过程的方向

- ◆ 只满足能量守恒的过程一定能实现吗？
- ◆ 功热转换



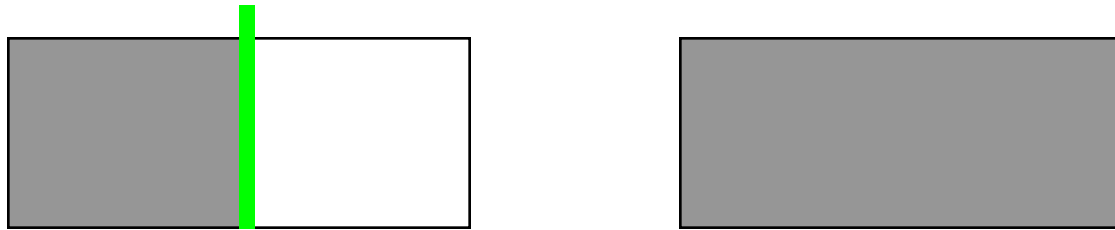
通过摩擦而使功变热的过程是**不可逆的**（irreversible）；
或，热不能**自动**转化为功；
或，**唯一效果**是热全部变成功的过程是不可能的（热机为例）。

功热转换过程具有方向性。

◆ 热传导 (Heat conduction)

热量由高温物体传向低温物体的过程是**不可逆**的；
或， 热量不能**自动地**由低温物体传向高温物体。

◆ 气体的绝热自由膨胀 (Free expansion)



气体向真空中绝热自由膨胀的过程是**不可逆**的。

◆ 非平衡态到平衡态的过程是 不可逆的

不可逆的 \longleftrightarrow 自动地 \longleftrightarrow 唯一效果

- 一切与热现象有关的实际宏观过程都是不可逆的。

§ 11.2 热力学第二定律 (The second law of thermodynamics)

与热现象有关的宏观过程的不可逆性 \longleftrightarrow 宏观过程的方向性

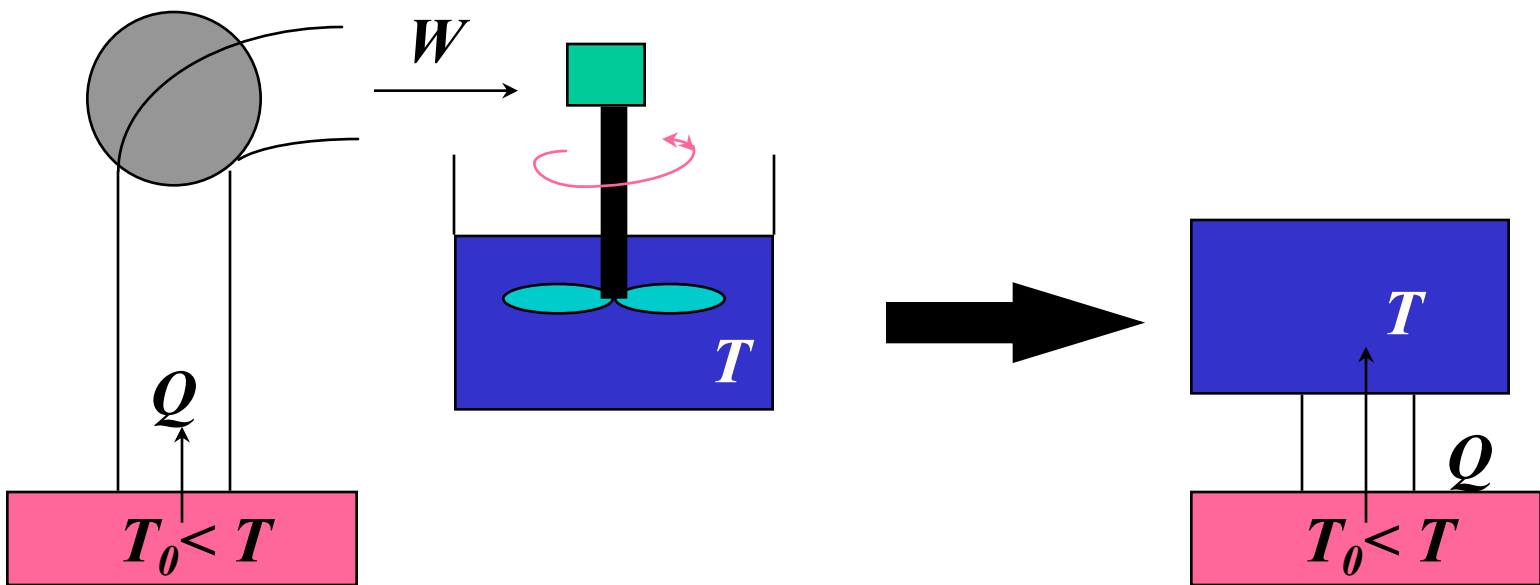
自然宏观过程按一定方向进行的规律就是 热力学第二定律

历史上如何精确而简单表述？

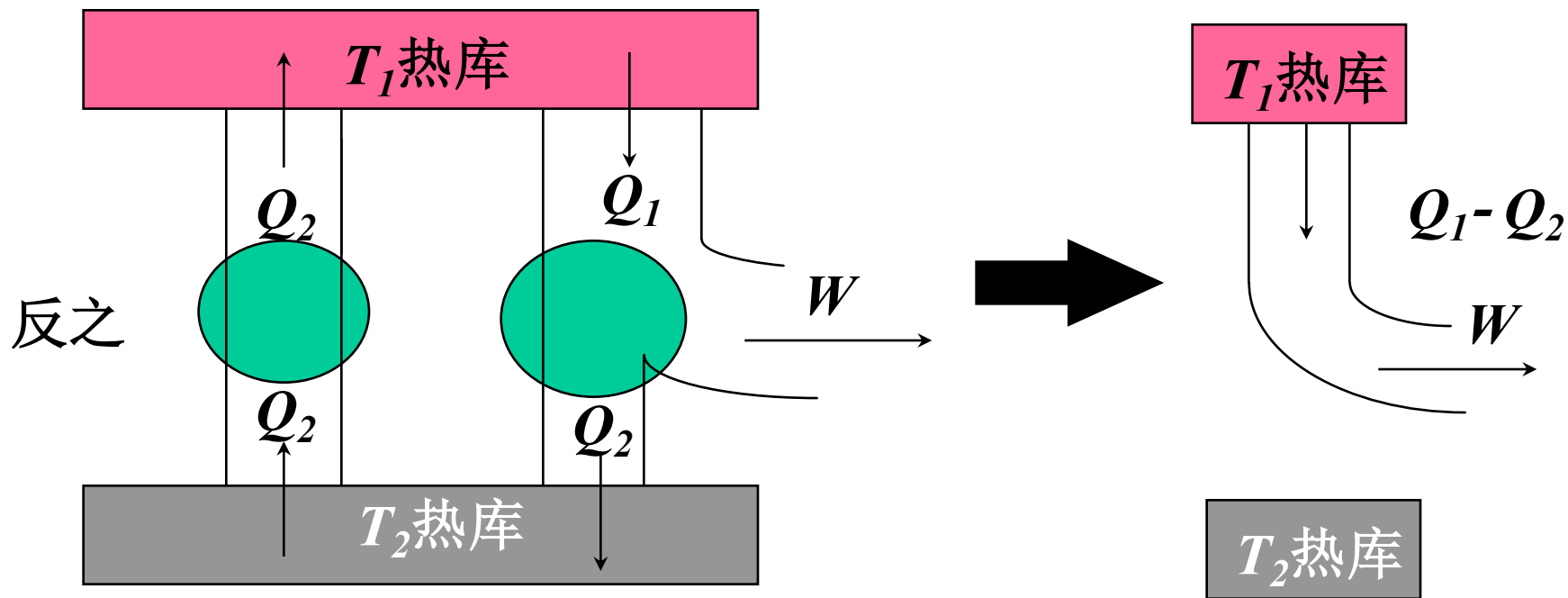
- ◆ 各种自然的能实现的 宏观过程的 不可逆性是相互沟通的

例： 功变热 \longleftrightarrow 热传导

假设， 热可以自动转变成功， 这将导致热可以自动从低温物体传向高温物体。



反之，假设热可以自动从低温物体传向高温物体，
这将导致热可以自动转变成功。

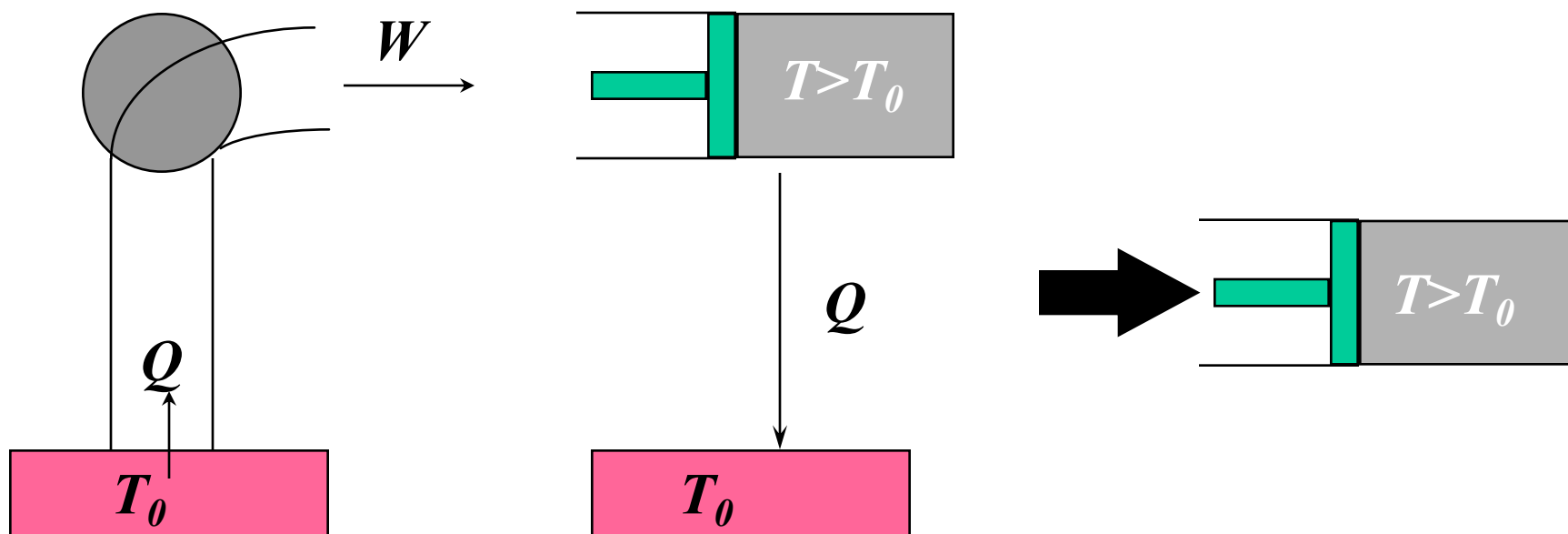


气体向真空中绝热自由膨胀的不可逆性

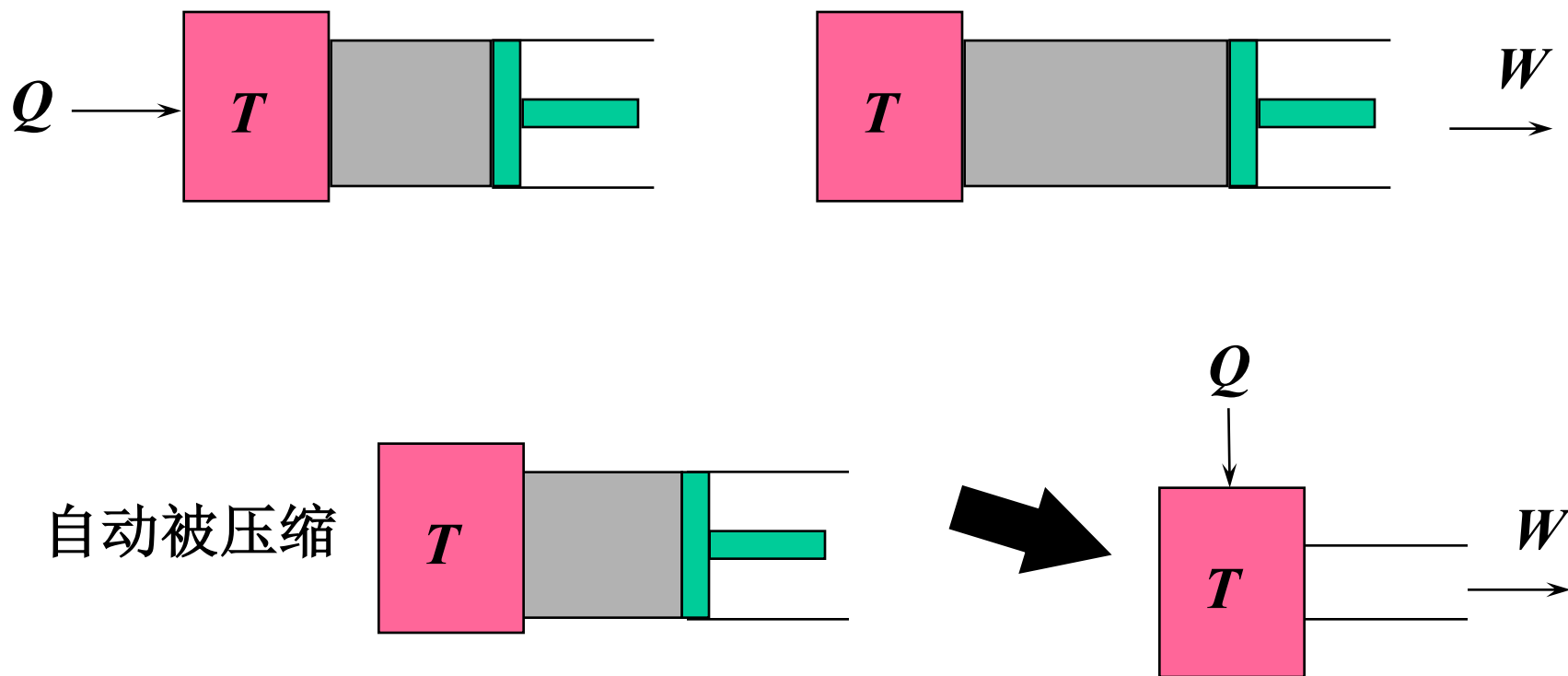


功变热的不可逆性

假设，热可以自动转变成功，这将导致气体可以自动压缩。



反之，假设气体可以自动压缩，
将导致唯一效果是热转变成功。



所有宏观过程的 不可逆性都是等价的。

历史上比较简洁的表述

◆ 热力学第二定律的克劳修斯 表述：
热量不能 自动地 由低温物体传向高温物体。

◆ 热力学第二定律的开尔文--普朗克表述：
其 唯一效果 是热全部变成功的过程是不可能的。

单热源热机是不可能制成的。
(热机的工质是做循环)

一个乒乓球瘪了（但不漏气），放在热水里浸泡，它会重新鼓起来。这是否是一个“从单一热源吸热的系统对外做功过程”，为什么？

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答