

大学基础物理学

University Fundamental Physics

华东师范大学

李波

2019年



华东师范大学

- 电子工程系 & 极化材料与器件教育部重点实验室
- 信息学院 351
- E-Mail: bli@ee.ecnu.edu.cn



1、理想气体状态方程：

$$pV = \nu RT = \frac{M}{M_{mol}} RT \quad \frac{pV}{T} = \text{常量}$$

2、理想气体压强公式：

$$P = n k T$$

$$p = \frac{1}{3} n m \overline{v^2} = \frac{2}{3} n \overline{\omega}$$

3、理想气体温度公式：

$$\overline{\varepsilon} = \frac{1}{2} m \overline{v^2} = \frac{3}{2} k T$$

4、理想气体内能：

$$E = \frac{M}{M_{mol}} \frac{i}{2} RT$$

热力学第一定律



热
↕
机械能



热力学第一定律



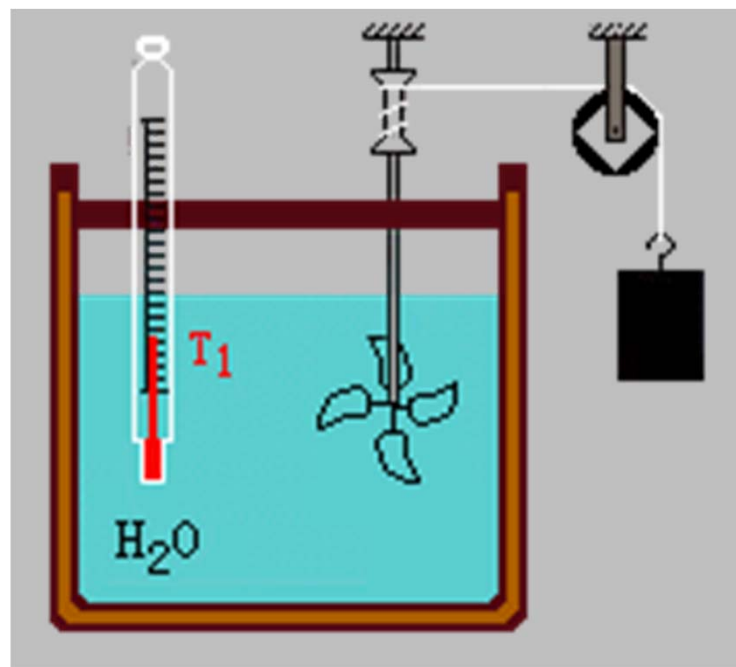
热力学系统状态变化时 **能量** 所遵循的规律



能量 **守恒** 定律



焦耳
James Prescott Joule
(1818-1889年)
英国物理学家





- 8.1 功
- 8.2 热量、热力学第一定律
- 8.3 准静态过程
- 8.4 热容量
- 8.5 绝热过程
- 8.6 循环过程
- 8.7 卡诺循环
- 8.8 致冷循环

8.1 内能



机械能守恒定律 $A_{\text{ext}} + A_{\text{int, n-cons}} = E_B - E_A$

热力学系统由**分子**组成，分子间相互作用力为**保守力** ===》热力学系统是**保守系统**。

E = 无规则运动**动能** + 分子间**势能** (所有分子)

这个由系统状态决定的**状态量**称之为系统的
-----**内能**

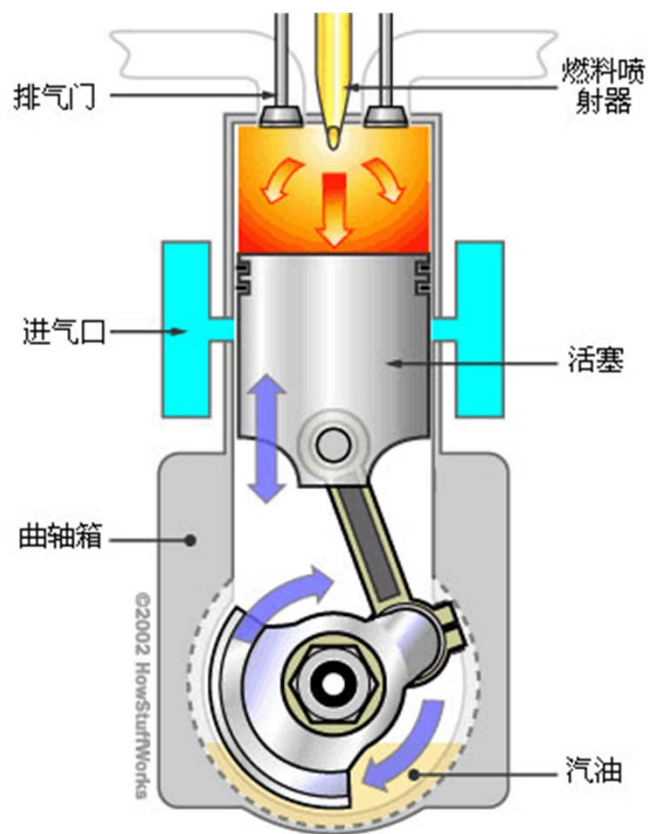
理想气体 $E = ikNT/2$

8.1 功



外力做功

系统边界**宏观位移**



系统边界**无**宏观位移



8.1 功



系统边界宏观位移

气缸中活塞的**宏观**移动使得气体的**体积**发生变化，将**做功**。气体压缩时，活塞做正功，气体膨胀时，活塞做负功。改变气体的内能。

微观上看，外界分子有规则运动的动能和系统分子无规则运动能量的**传递和转化**过程。

外界对系统做的功称为**宏观功** A'

8.1 热量



系统边界无宏观位移

冷水倒入热锅，作为外界的热锅会向冷水（系统）传递能量。

微观上看，水分子和锅分子发生**碰撞**，两种分子间的作用力做**微观功**，宏观上总效果表现为**内能传递**。该过程叫做**热传递**，所传递的能量叫**热量** **Q**

只有平均动能不同，或者说温度不同

8.1 热力学第一定律



外力做功

外力对系统做的功

$$A_{\text{ext}} = A' + Q = \Delta E$$

系统对外界做功 A

$$Q = \Delta E + A$$

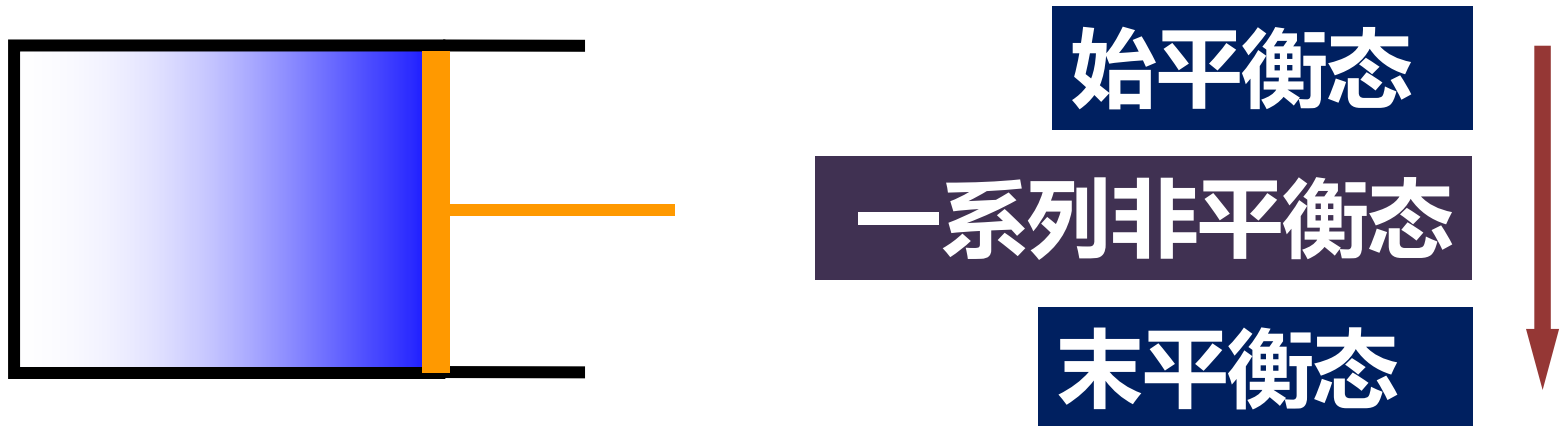
在一个给定过程中，外界对系统做的功和传递给系统的热量之和等于系统的内能增量，这也就是**热力学第一定律**

8.2 准静态过程



平衡态: (P, V, T) 在不受外界影响的条件下（与外界无任何形式的物质与能量交换），系统的宏观性质不随时间变化的状态（**动平衡**）。

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的状态并非平衡态。

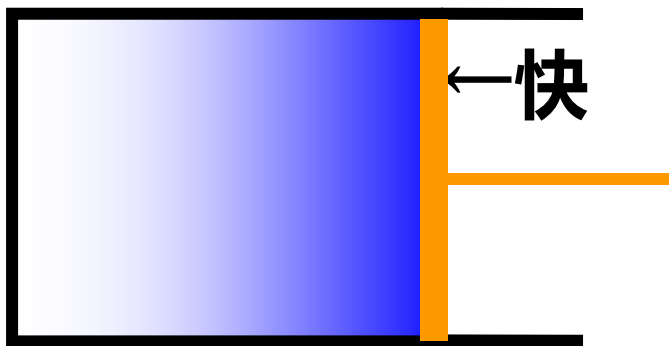


8.2 准静态过程

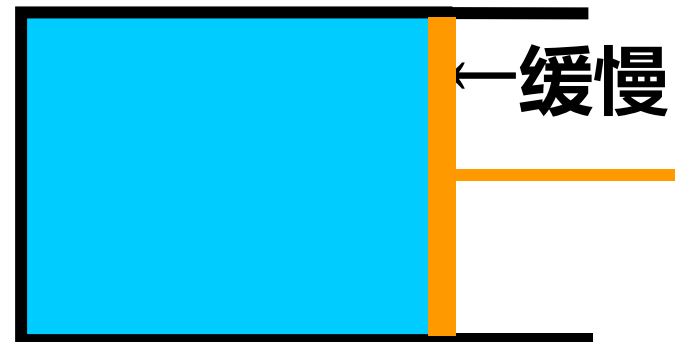


为利用平衡态的性质，引入**准静态过程**。
系统的每一状态都**无限接近**于平衡态的过程。
即准静态过程是由一系列平衡态组成的过程。

准静态过程是一个**理想化**的过程，是实际过程的近似。

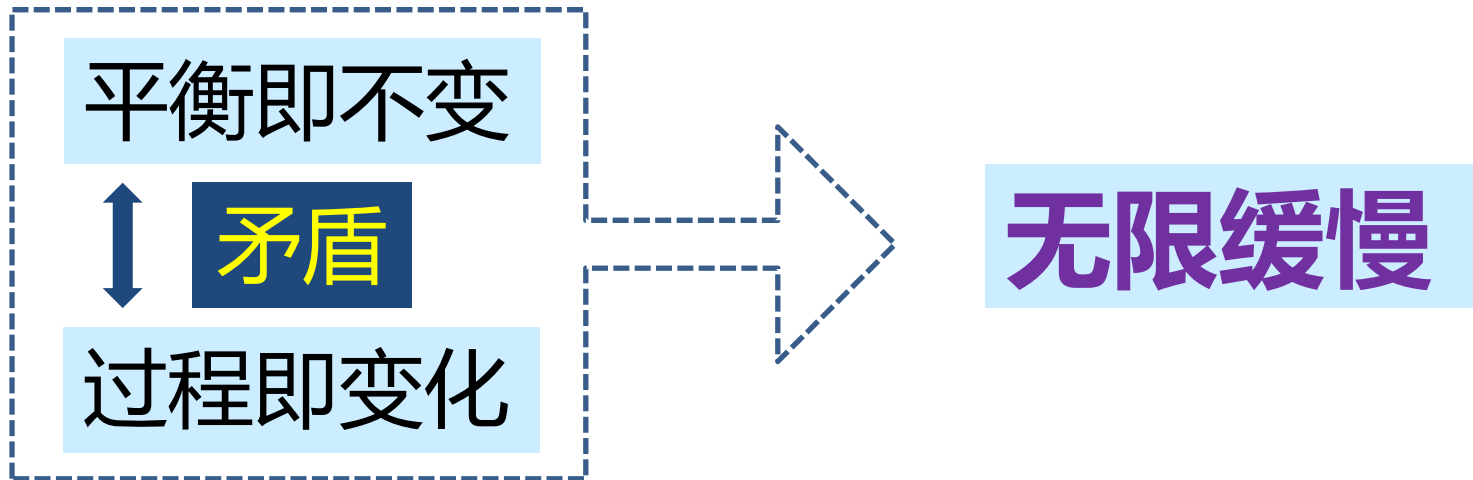


非平衡态
非准静态过程



接近平衡态
准静态过程

8.2 准静态过程



只有过程进行得无限缓慢，每个中间态才可看作是平衡态。

如何判断 “无限缓慢” *Yes or No ? ? ?*

弛豫时间 (relaxation time) : 平衡态刚刚被破坏形成的**非平衡态**恢复到平衡态所需要的时间。

过程变化的时间 \gg 弛豫时间 就可以看作为准静态过程，无限缓慢是一个**相对**的概念。

8.2 准静态过程



举个例子，内燃机气缸内的气体经历的过程

气体压强的弛豫时间：

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

容器的线度

分子热运动平均速率

气缸线度： 10^{-1} m & 分子平均速率： 10^2 m/s

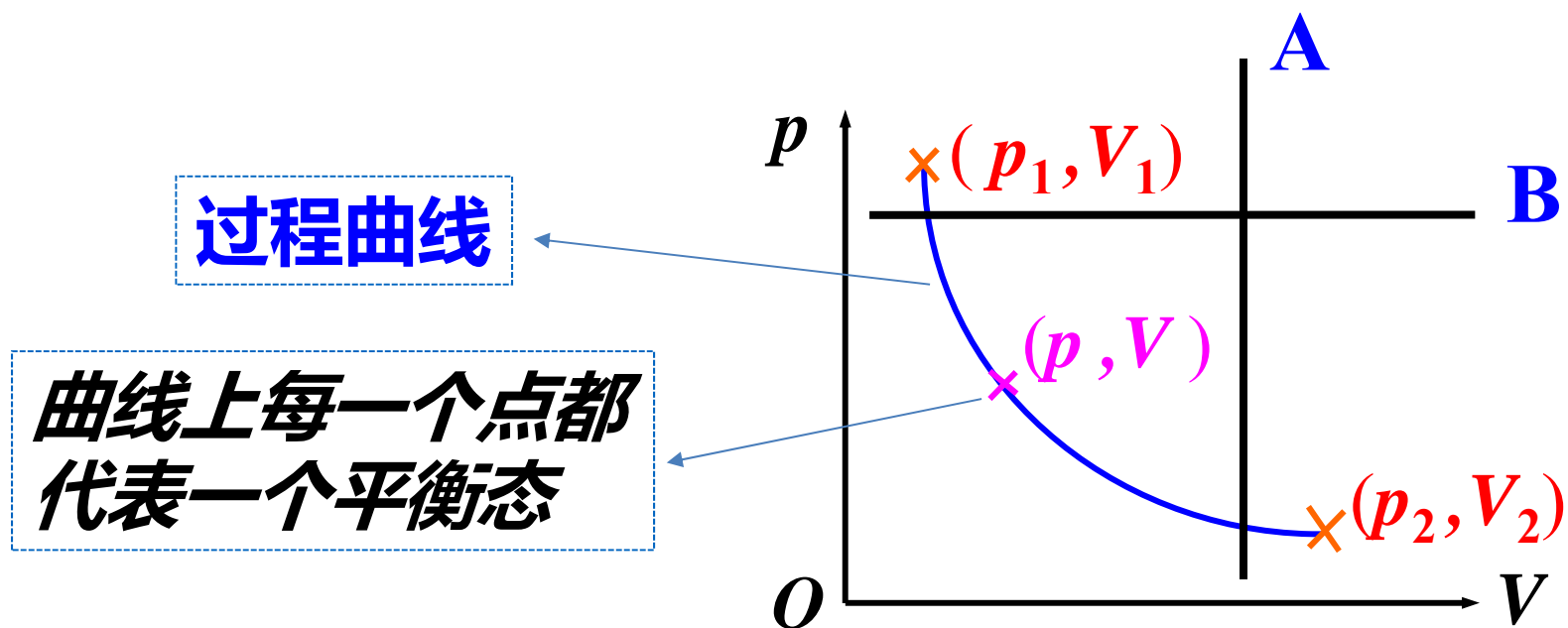
弛豫时间 = 10^{-3} s VS 内燃机活塞运动周期 10^{-2} s

10倍 -----> 气缸的压缩过程为准静态过程！

热力学第一定律



准静态过程可以用**过程曲线**来表示：



平衡态组成的准静态过程，非平衡态无法做出过程曲线

改变系统状态的方法：**做功** & **传热**

热力学第一定律

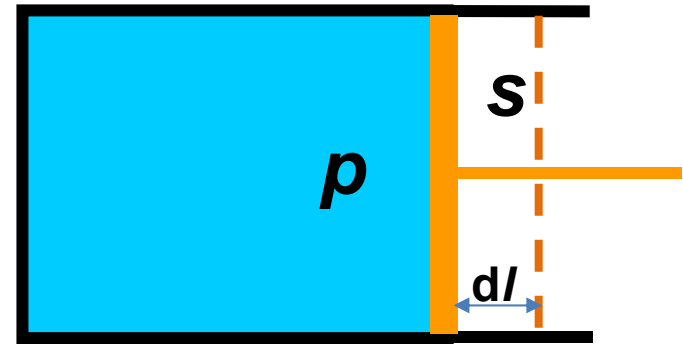


通过**做功**可以改变系统的状态

在忽略摩擦力的情况下，**气体对外界**做的
体积功： $\delta A = p \, \mathrm{d}l = p \, \mathrm{d}V$

膨胀， $\mathrm{d}V > 0$ ，则系统对
外做功

缩小， $\mathrm{d}V < 0$ ，则外界对
系统做功



系统经历准静态过程，体积由 V_1 变化到 V_2 时，系统对外界做的**总功**为

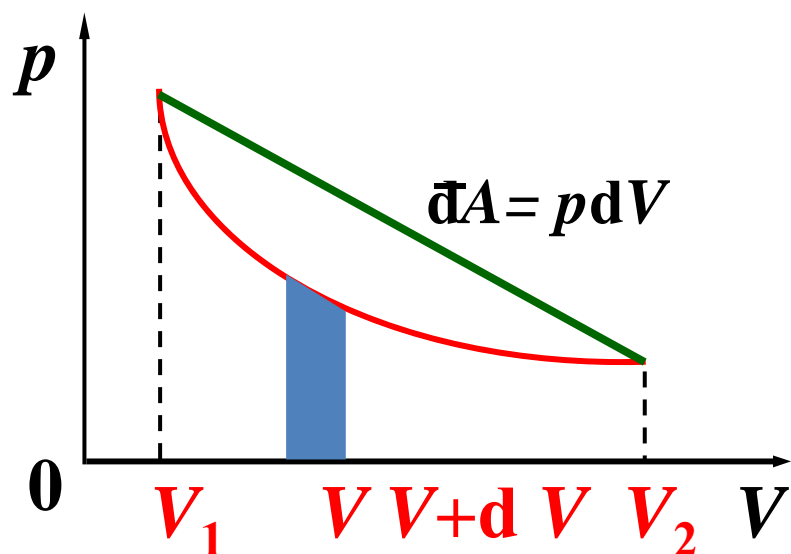
$$A = \int_{V_1}^{V_2} p \, \mathrm{d}V$$

热力学第一定律



过程曲线下的面积 = 功

初态，终态相同功也不一定一样，和过程有关。因此，功是**过程量**



$$Q = \Delta E + A$$

内能 E 由系统状态决定，和过程无关，是**状态量**

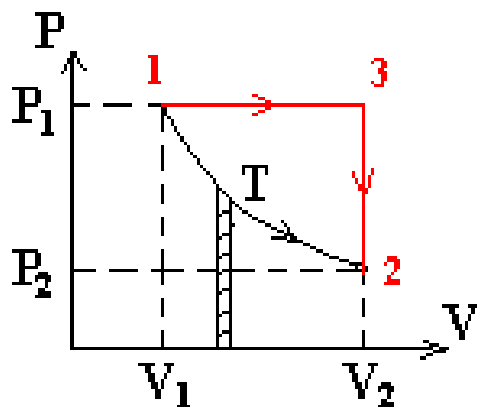
热量 Q 也是 **过程量**

热力学第一定律



例. ν 摩尔理想气体从状态1 \rightarrow 状态2，设经历等温过程。
求气体对外所作的功和它从外界吸收的热。

[解]

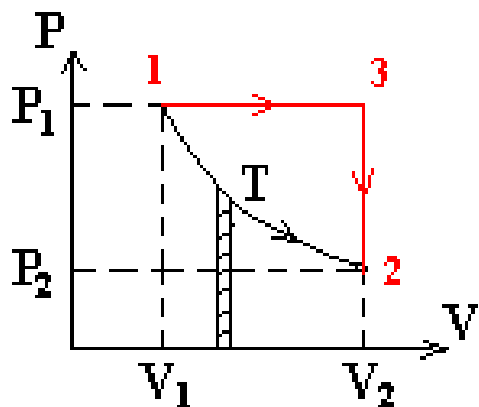


热力学第一定律



例. ν 摩尔理想气体从状态1 \rightarrow 状态2，设经历等温过程。
求气体对外所作的功和它从外界吸收的热。

[解]



$$A = \int_{V_1}^{V_2} P dV = \int_{V_1}^{V_2} (\nu RT / V) dV \\ = \nu RT \ln(V_2 / V_1)$$

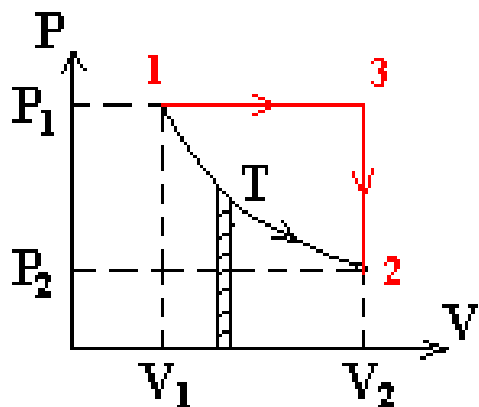
$p - v$ 图上过程曲线下的面积即功A的大小.

热力学第一定律



例. ν 摩尔理想气体从状态1 \rightarrow 状态2, 设经历等温过程。
求气体对外所作的功和它从外界吸收的热。

[解]

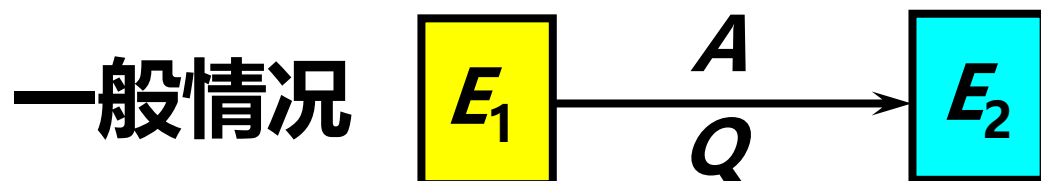


$$A = \int_{V_1}^{V_2} P dV = \int_{V_1}^{V_2} (\nu RT / V) dV$$
$$= \nu RT \ln(V_2 / V_1)$$

$p - v$ 图上过程曲线下的面积即功A的大小.

$$Q = \Delta E + A = A$$

热力学第一定律



$$Q = (E_2 - E_1) + A = \Delta E + A \quad \text{— 热力学第一定律}$$

$A > 0$ 系统对外界做功 $Q > 0$ 系统吸热

$A < 0$ 外界对系统做功 $Q < 0$ 系统放热



过程量与状态量

过程量 A, Q

状态量 E

$$Q = \Delta E + A$$

8.3 热容



定义系统温度升高1度所吸收的热量为系统的

热容量

$$C = \frac{\delta Q}{dT}$$

定体热容量

$$C_V = \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_V$$

(体积不变)

定压热容量

$$C_p = \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_p$$

(压强不变)

8.3 热容



—摩尔物质温度升高1度所吸收的热量叫
摩尔热容量， 即：

$$C_m = \frac{1}{\nu} \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)$$

ν —— 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

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

8.3 热容



定体摩尔热容量

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

体积不变 $\delta A_V = 0$

做功为 **0**

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

+

$$C_{V,m} = \frac{i}{2} R \longleftarrow E = \frac{i}{2} \nu R T$$

8.3 热容



定压摩尔热容量

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

$$(\delta Q)_p = dE + p dV$$

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

+

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

$$\longleftarrow E = \frac{i}{2} \nu R T \quad \& \quad pV = \nu R T$$

8.3 热容



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

|

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

||

$$C_{p,m} - C_{v,m} = R$$

迈耶公式

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

+

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

||

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

比热比

8.3 热容



理想气体分子:

$$\gamma = \frac{C_{p,m}}{C_{V,m}} = \frac{\frac{i}{2}R + R}{\frac{i}{2}R} = \frac{i+2}{i} = \begin{cases} \frac{5}{3} = 1.67 & \text{(单)} \\ \frac{7}{5} = 1.40 & \text{(双)} \\ \frac{8}{6} = 1.33 & \text{(多)} \end{cases}$$

8.3 热容



热容量是可以实验测量的， γ 的理论值可以与 γ 的实验值比较（见书P251 表8.1）。

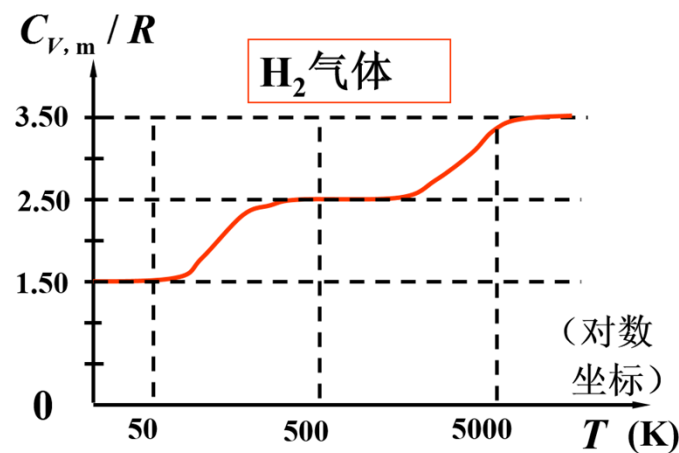
▲ 常温下：

对单原子分子气体理论值与实验值符合得相当好；
对双、多原子分子气体符合稍差

▲ 在大的温度范围上看，热容与温度有关，

即 $C_{V,m}$ ， $C_{p,m}$ 和 γ 都并非常量。

量子理论才能完美的解释



8.3 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。

特点： $\delta Q = 0$

$$\text{由 } \delta Q = dE + \delta A \rightarrow ??$$

8.3 绝热过程



一. 理想气体的准静态绝热过程

热一:
$$\frac{0}{\mathrm{d}Q} = \frac{p \mathrm{d}V}{\mathrm{d}A} + \frac{\nu C_{V,m} \mathrm{d}T}{\mathrm{d}E} \quad \textcircled{1}$$

$$pV = \nu RT \rightarrow p \mathrm{d}V + V \mathrm{d}p = \nu R \mathrm{d}T \quad \textcircled{2}$$

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

$$\textcircled{1} \textcircled{2} \textcircled{3}: \frac{\mathrm{d}p}{p} = -\frac{C_{p,m}}{C_{V,m}} \frac{\mathrm{d}V}{V} = -\gamma \frac{\mathrm{d}V}{V}$$

8.3 绝热过程



常温下 $\gamma = \text{const.}$

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

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

\therefore

$$pV^\gamma = C$$

— 绝热过程方程

或

$$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma$$

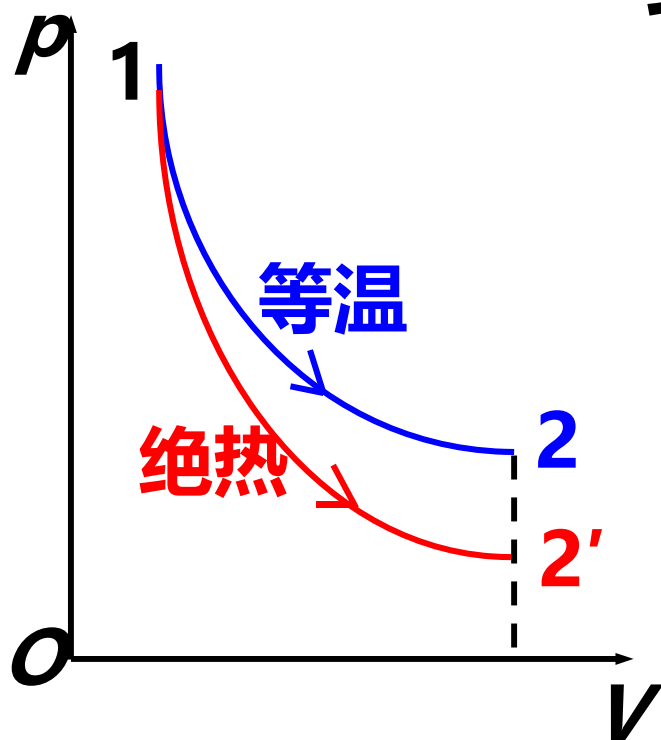
另有

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

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

} 自己推导

8.3 绝热过程



绝热线比等温线陡，因为：

$$p = nkT$$

等温膨胀 (E 不变)

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

绝热膨胀

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

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

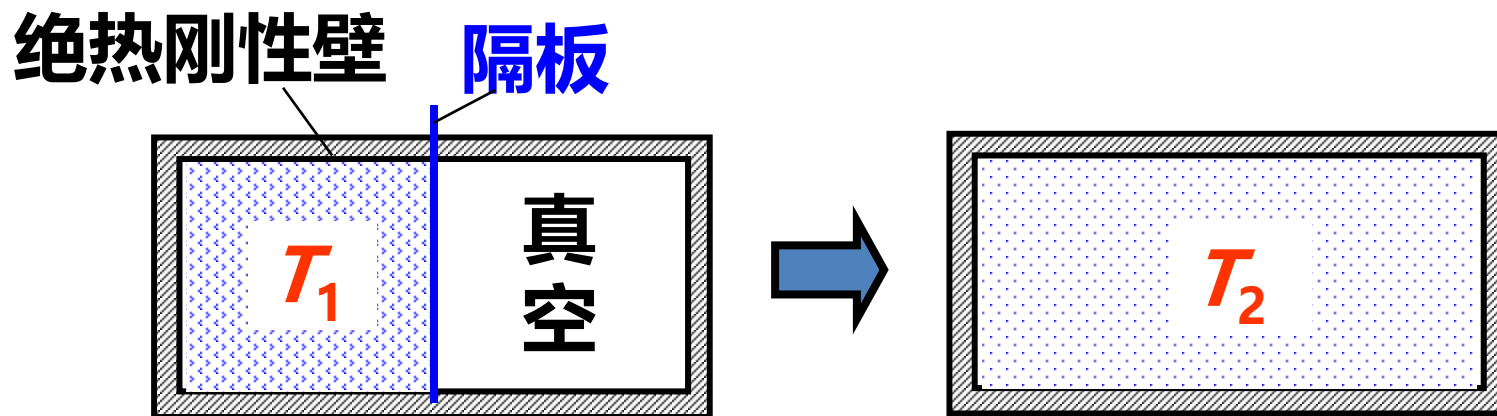
$$\rightarrow p \downarrow \downarrow$$

$$p_2 > p_{2'}$$

8.3 绝热过程



二. 绝热自由膨胀 (非准静态绝热过程)



$$\left. \begin{array}{l} \text{器壁绝热: } Q = 0 \\ \text{向真空膨胀: } A = 0 \end{array} \right\} \xrightarrow{\text{热一律}} E_1 = E_2$$

$$\text{对理想气体: } T_1 = T_2$$

$$V_2 = 2V_1 \quad p_2 = 0.5p_1$$