

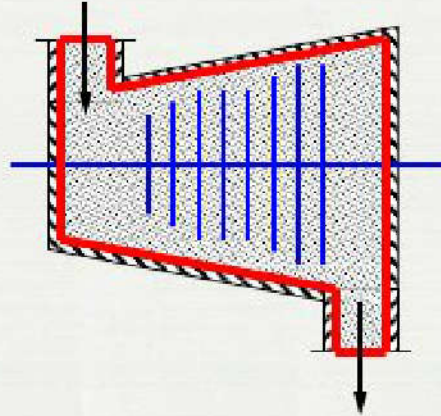
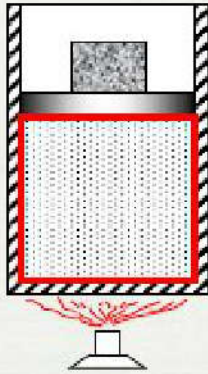
# 第一章

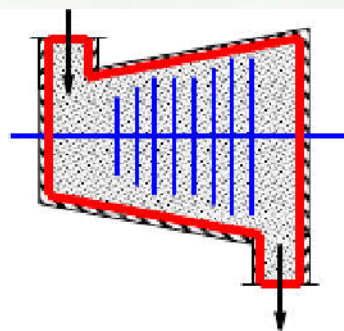
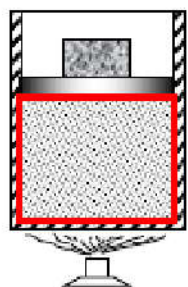
# 基本概念及定义

# 1-1 热力学系统

## 一、基本概念 —— 系统、外界、边界

1、**系统** —— 热力学是通过对有关物质的状态变化的宏观分析来研究能量转换过程的。为了便于研究，选取**某些确定的物质**或者**某个确定空间中的物质**作为主要研究对象，并称之为**热力学系统**，简称**系统**。





\_\_\_\_\_

关的一切其他物

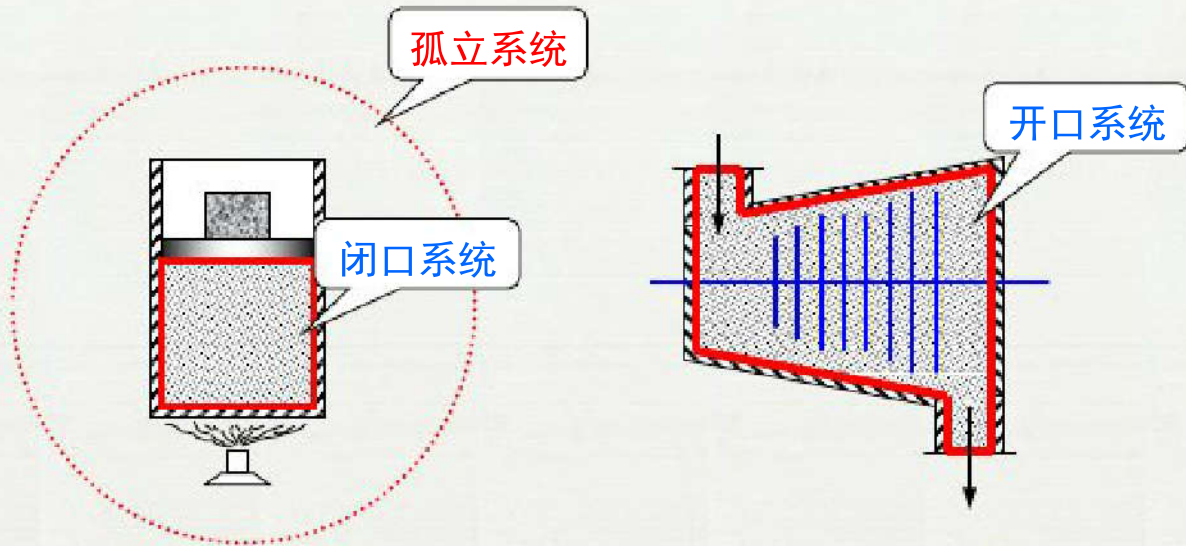
、低温热源

边界。



## 二、热力学系统的分类

依据——有无物质或能量的交换



- 1、闭口系统——热力学系统和外界不发生物质交换。（控制质量）
- 2、开口系统——热力学系统和外界间有物质交换。（控制容积）
- 3、孤立系统——热力学系统和外界间既无物质交换又无能量交换。



# 1-2 热力学系统的状态及基本状态参数

## 关于状态和状态参数

- 1、**状态**——热力学系统所处的宏观状况称为系统的热力学状态。
- 2、**状态参数**——系统的状态常用一些物理量来描述，这种物理量称为 $\sim$ 。如：温度、压力、比体积等

### 3、状态参数的特征：

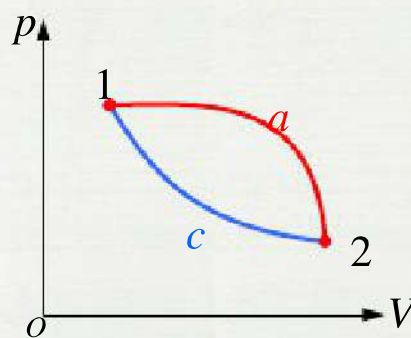
(1) 对应于某个给定的状态，所有状态参数都应有各自确定的数值，反之，一组数值确定的状态参数可以确定一个状态。

(2) **状态参数的数值仅决定于系统的状态，与达到该状态所经历的途径无关。**

例如：系统由状态1变化到状态2，不管经过什么途径，其压力变化总是相同的，即： $\Delta p_{1,2} = p_2 - p_1$

对于微元变化时，压力的微增量具有全微分的性质，即有：

$$\int_1^2 dp = p_2 - p_1 = \Delta p_{1,2}$$



## 一、比体积

比体积是描述系统内部物质分布状况的状态参数。它表明**单位质量物质所占有的体积**，符号  $v$ ，单位  $\text{m}^3/\text{kg}$ 。

$$v = \frac{V}{m}$$

注意：密度是指单位体积物质的质量，所以比体积与密度互为倒数。  $\rho v = 1$

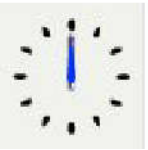
## 二、压力（压强）

1、定义：压力是描述流体物质组成的热力学系统内部力学状况的状态参数，是**流体在单位面积上的垂直作用力**，符号  $p$ ，单位  $\text{Pa}$ 。



## 2、绝对压力 $p$ 、大气压力 $p_b$ 、表压力 $p_e$ 、真空度 $p_v$

工业上，压力容器的受力情况主要取决于其中流体的**绝对压力和环境大气压力的差值**，测压表（计）测量得出的结果就是这个差值。



**例题：**若容器中气体的绝对压力不变，安装在容器上的压力表读数会变吗？

答：会变。压力表上的读数是**绝对压力**和**大气压力**的差值。

### 3、压力的单位及换算（附表14）

Pa    MPa    atm    mmHg    mmH<sub>2</sub>O    bar

名称	单位	换算关系
帕斯卡	Pa	1MPa=10 <sup>6</sup> Pa
标准大气压	atm	1atm=1.01325 × 10 <sup>5</sup> Pa
毫米水柱	mmH <sub>2</sub> O	1mmH <sub>2</sub> O=9.80665 Pa
毫米汞柱	mmHg	1mmHg=133.322 Pa
巴	bar	1bar=1 × 10 <sup>5</sup> Pa
工程大气压	at (kgf/cm <sup>2</sup> )	1at=0.980655 × 10 <sup>5</sup> Pa
磅/英寸 <sup>2</sup> （英制）	psi	1psi=6.895 × 10 <sup>3</sup> Pa

公斤力





### 三、温度

温度

处于热平  
必定存在  
所有处于

故，它表示物

冰点温度作  
(6K)

3、热力学温度和摄氏温度的近似换算公式： $T = t + 273.15 \text{ K}$

冰点温度273.15 K，三相点温度273.16K。



## 1-3 平衡状态和状态参数坐标图

### 一、平衡状态

1、平衡状态定义：如果热力学系统内同时存在热平衡、力平衡；所处的状态就称为热力学平衡状

态的系统：

(系统内一定具有均匀一致的温度)

(系统内一定具有均匀一致的压力)。

平衡状态时，只要没有外界的影响，  
七。

有确定数值的温度、压力及其他参

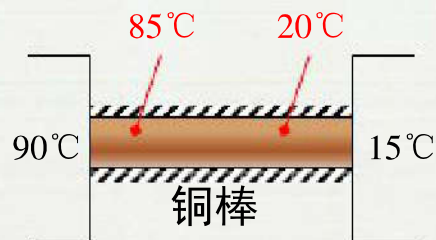


经验表明，**确定热力学系统所处平衡状态所需的独立状态参数的数目，就等于系统和外界间进行能量传递方式的数目。**对于工程上常见的气态物质组成的系统，系统和外界间传递的能量只限于**热量和系统容积变化所作的功**两种形式，因此**只需要两个独立的状态参数即可描述一个平衡状态。**

### 3、平衡状态、稳定状态、均匀状态

#### (1) 关于稳定状态与平衡状态

稳定状态时，状态参数虽不随时间改变，但它是依靠外界影响来维持的。而平衡状态是不受外界影响时，参数不随时间变化的状态。



平衡必稳定，稳定未必平衡。

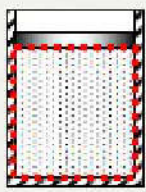
#### (2) 关于均匀状态与平衡状态

均匀必平衡，平衡未必均匀。



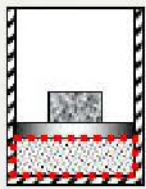
## 二、状态参数坐标图

- 1、两个独立状态参数就可以描述一个平衡状态，进而组成状态参数坐标图。（图上的任意一点，即可代表系统的一个平衡状态。）
- 2、当系统处于不平衡状态时，其状态难以用简单的数值表示，当然也无法在状态参数图上表示。（内部不存在热平衡或力平衡，则系统内各部分会自发地发生热或力的相互作用，使系统状态发生变化，趋于平衡。）



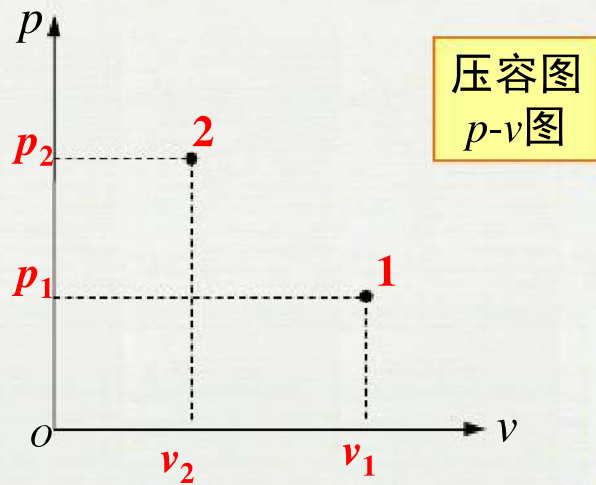
平衡状态1

$p_1 \quad v_1$



平衡状态2

$p_2 \quad v_2$



## 1-4 状态方程式

在平衡状态下，由气态物质组成的系统，只要知道两个独立的状态参数，系统的状态就完全确定，即所有的状态参数的数值随之确定。这说明状态参数间存在**某种确定的函数关系**，状态参数之间存在着确定的函数关系，这种函数关系就称为**热力学函数**。

一、理想气体状态方程（Clapeyron Equation）： $F(p, v, T) = 0$

显函数形式： $T = f_1(p, v)$   $p = f_2(v, T)$   $v = f_3(p, T)$

1、对于1mol的理想气体有： $pV_m = RT$  (1-7)

$V_m$ ——1mol理想气体所占有的容积，称为摩尔体积， $\text{m}^3/\text{mol}$ ；  
 $R$ ——摩尔气体常数， $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$

由Avogadro law可得：同温同压下，任何理想气体的摩尔体积相同，根据式（1-7）可知，任何理想气体的摩尔气体常数 $R$ 相同。

$22.4141 \times 10^{-3}$   
 $\text{mol}\cdot\text{K}$ 。

2、对于1kg理想气体： $pv=R_gT$  (1-9)

$R_g$ ——气体常数。单位：J/(kg·K)

①摩尔气体常数  $R$  J/(mol·K)

$$R_g = R/M$$

②气体常数  $R_g$  J/(kg·K)

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

③摩尔质量  $M$  kg/mol

3、对于物质的量为  $n$  (mol) 的理想气体： $pV=nRT$  (1-10)

4、对于质量为  $m$  (kg) 的理想气体： $pV=mR_gT$  (1-11)

理想气体状态方程式，反映出了在平衡状态下气体的温度  $T$ 、压力  $p$ 、比体积  $v$  之间的基本关系式。

## 二、关于理想气体

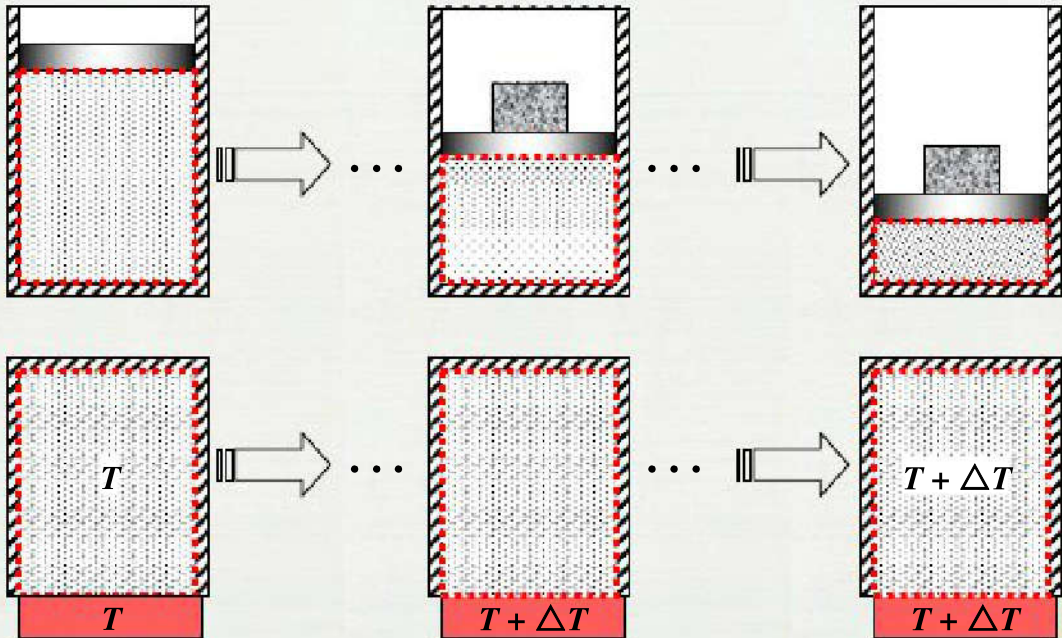


# 1-5 准静态过程和可逆过程

## 一、关于热力过程

1、定义：热力系统从一个状态出发，经过一系列中间状态而变化到另一状态，它所经历的全部状态的综合，称为**热力过程**。

2、举例：

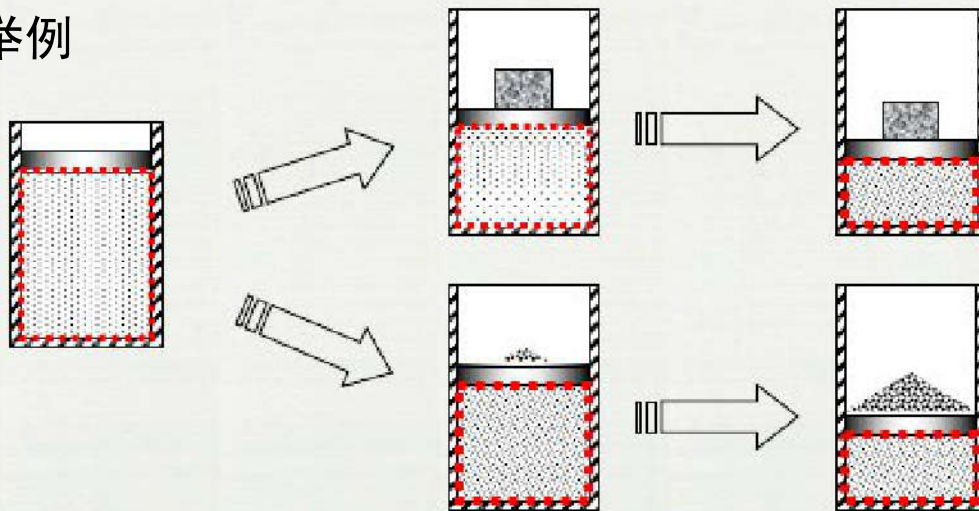


3、**结论**：处于平衡状态的热力学系统，由于外界条件的变化，在外界和系统间形成热或力的不平衡，系统内部平衡状态遭到破坏，从而引起系统状态的变化，系统向新的平衡状态过渡，所以，热力过程所经历的是一系列不平衡状态。

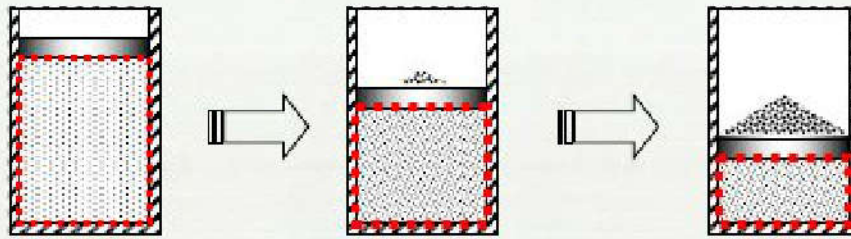
4、**注意**：只有平衡状态才具有确定的状态参数，才能用状态方程式表示状态参数间的关系，故难以分析由一系列不平衡状态组成的热力过程。

## 二、准静态过程

### 1、举例







2、定义：若令系统每次状态变化趋于无限小，而变化次数趋于无限多时，则得到这样的一种热力过程：**过程中热力学系统经历的是一系列平衡状态，并且每次状态变化时仅无限小地偏离平衡状态。**这种过程称之为准静态过程。

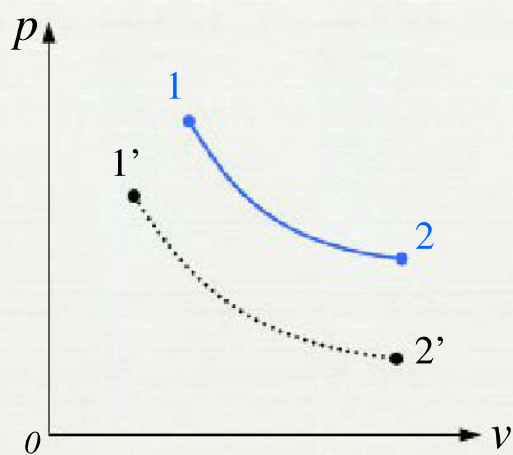
3、准静态过程进行的条件：推动过程的作用无限小。

4、实际过程是否可以作为准静态过程来处理？

大部分实际过程可以近似地当做准静态过程。因为气体分子热运动的平均速度可达每秒数百米以上，气体压力传播的速度也达每秒数百米，因而在一般工程设备具有的有限空间中，气体的平衡状态被破坏后恢复平衡所需的时间，即弛豫时间非常短。



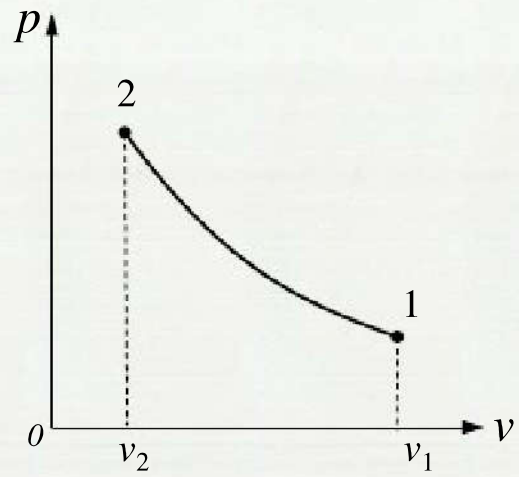
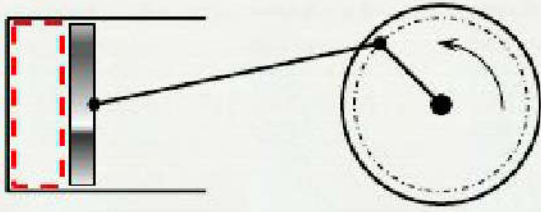
## 5、准静态过程和非准静态过程示意图



注意：准静态过程可表示为一条实线。  
非准静态过程只能以虚线表示。



### 三、可逆过程



#### 1、定义

如果进行一个热力过程后，有可能沿原过程逆向进行，使**系统**和（与系统有关的）**外界**都返回到原来的状态，不留下任何变化，则称这样的热力过程为**可逆过程**。



## 2、典型“不可逆因素”

- 温差传热
- 自发膨胀
- 功耗散（摩擦、涡流等）
- . . .

## 3、如何消除“不可逆因素”？

避免发生由高温部分向低温部分自发传递热量。这就要求：在热力过程中保持系统内部，以及系统和外界间时刻处于**热平衡**；

避免气体发生自发地膨胀。这就要求：在热力过程中保持系统内部，以及系统和外界间时刻处于**力平衡**。

准静态

避免摩擦、涡流等功耗散现象消耗功而转变成热能。

无耗散

无耗散准静态过程 = 可逆过程



# 1-6 可逆过程的功

## 1、功的定义：

力学中： $W = F \cdot \Delta x$

热力学中：功是热力系统和外界之间通过边界而传递的能量，且其全部作用效果可表现为举起重物。

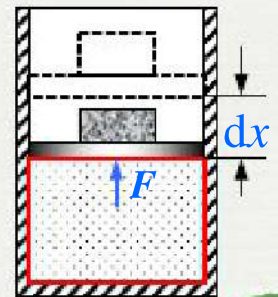
## 2、容积变化功：

直接由系统容积变化和外界发生作用而传递的功称为容积变化功（膨胀功或压缩功）。

## 3、功的计算：

对于由气缸和活塞所包围的热力系统，进行一个微元过程中，如果活塞所受推力为 $F$ ，位移为 $dx$ ，则系统对外界作的膨胀功为：

$$\delta W = F \cdot dx$$



$$\delta W = F \cdot dx$$

如果该过程为**准静态过程**，则有  $F = pA$

$$\delta W = pA \cdot dx = p \cdot dV$$

当系统由状态1到状态2进行一个准静态过程时，系统对外界所作的功：

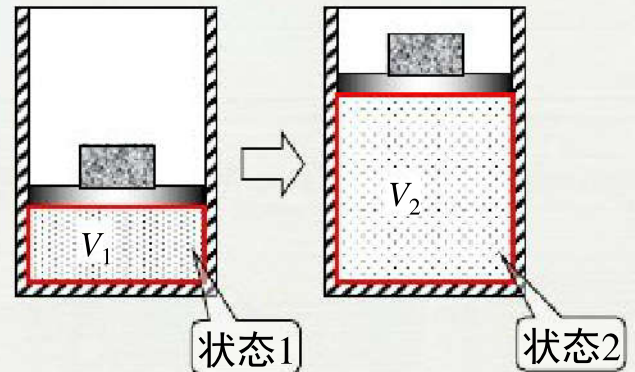
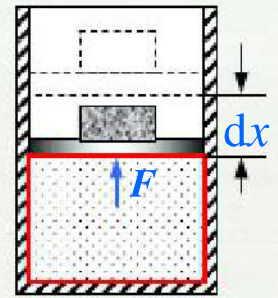
$$W_{1-2} = \int_1^2 \delta W = \int_1^2 p dV$$

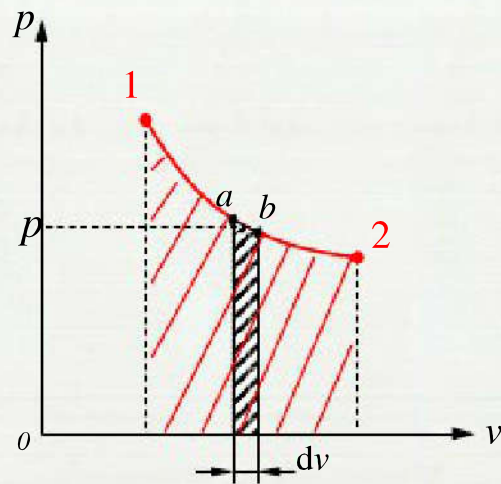
对于单位质量（1kg）气体：

$$\delta w = \frac{\delta W}{m} = p d \left( \frac{V}{m} \right) = p dv$$

$$w_{1-2} = \int_1^2 p dv$$

$W_{1-2}$	$\delta W$	单位：J
$w_{1-2}$	$\delta w$	单位：J/kg



4、容积变化功在 $p$ - $v$ 图上的表示：

$$\delta w = p dv$$

微段a-b下面的阴影部分的面积：微元准静态过程a-b中，系统所作的容积变化功。

$$w_{1-2} = \int_1^2 p dv$$

曲线1-2下面的阴影部分的面积：准静态过程 1-2中，系统所作的容积变化功。

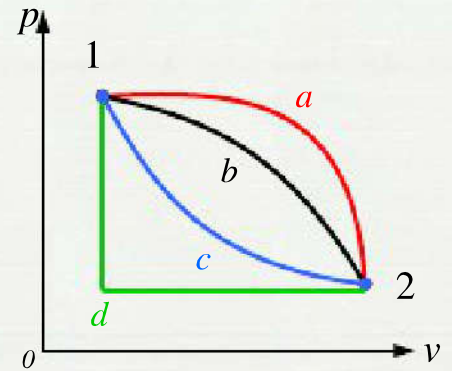


5、功的符号：系统对外做功为正；外界对系统做功为负。

$$\delta w = p dv \quad w_{1-2} = \int_1^2 p dv$$

$dv > 0$     $\delta w > 0$    系统对外做功

$dv < 0$     $\delta w < 0$    外界对系统做功



6、注意：容积变化功 $w$ 是决定于过程性质的量，称为过程量。

$$w_{1-a-2} > w_{1-b-2} > w_{1-c-2} > w_{1-d-2}$$

过程量与状态参数的区别

$$\Delta p_{1-a-2} = \Delta p_{1-b-2} = \Delta p_{1-c-2} = \Delta p_{1-d-2}$$

7、 $\delta$  与  $d$  的区别使用！

$\delta$ 用于过程量的微元增量； $d$ 用于状态参数的微元增量。





# 1-7 热量

## 一、热量的基本概念

1、定义：热力系统和外界之间仅仅由于温度不同，而通过边界传递的能量。

2、热量传递的微观实质（分子运动理论）

3、热量与功量的区别：

**热量**是物体间通过紊乱的分子运动发生相互作用而传递的能量。

**功量**是物体间通过有规则的微观运动或宏观的运动发生相互作用而传递的能量。

4、热量和热能的区别：

**热能**是指物体分子紊乱运动即分子热运动所具有的能量，是储存于物体内部的一种能量。

**热量**是两物体间传递的热能的数量。



5、热量的表示方法：

$$Q_{1-2} \quad \delta Q \quad \text{单位：J}$$

$$q_{1-2} \quad \delta q \quad \text{单位：J/kg}$$

6、热量的符号：**吸热为正，放热为负**

## 二、热量与功的类比：

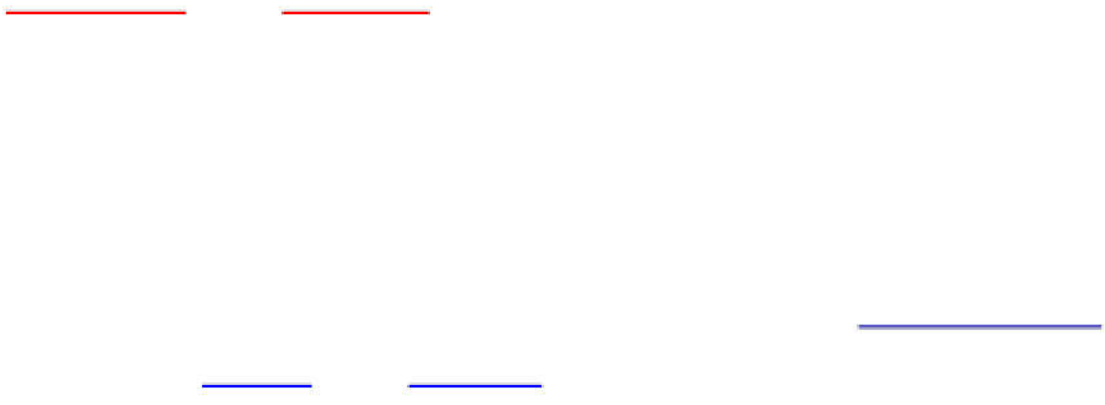
### 1、准备知识

**势**：推动能量传递的作用力，其数值大小决定能量传递作用的强度。（如：压力 $p$ 、温度 $T$ ）

**状态坐标**：其变化可作为衡量某种能量传递作用的标志。（如：比体积 $v$ ）



对于功量 $w$ 而言，推动作功的势是**压力 $p$** ，状态坐标



熵  $S$   
比熵  $s$



## 2、熵的基本概念

(1) 熵是热量传递的状态坐标，熵的变化是衡量热量传递的标志。

(2) 系统吸热时熵增加，系统放热时熵减小，系统和外界不发生热交换时熵不变。

$$\delta q = Tds$$

$ds > 0, \delta q > 0$ , 表示系统吸热

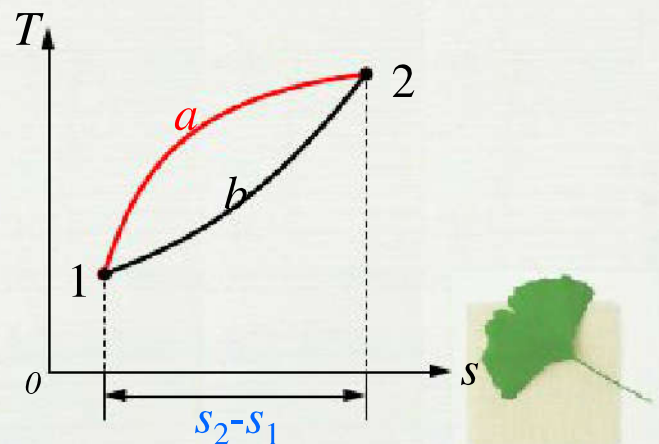
$$q_{1-2} = \int_1^2 Tds$$

$ds < 0, \delta q < 0$ , 表示系统放热

$ds = 0, \delta q = 0$ , 表示系统绝热

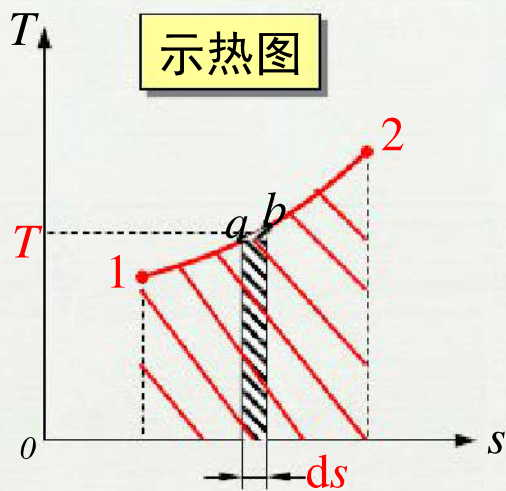
(3) 熵是与路径无关的状态参数

$T-s$ 图和 $p-v$ 图一样，图上一个点可代表一个平衡状态，一条曲线代表一个无耗散准静态过程。

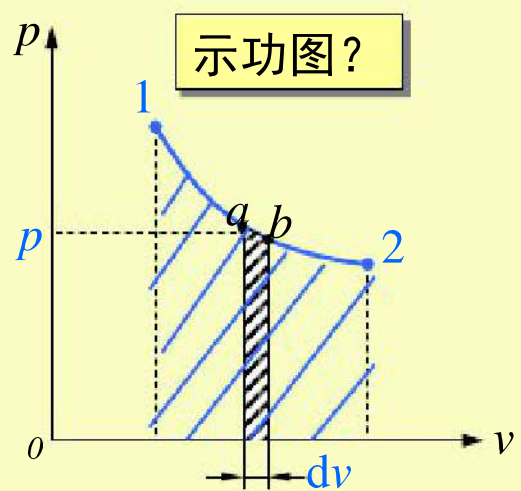


3、热量在温熵图 ( $T-s$ 图) 上的表示

$$\delta q = Tds \quad q_{1-2} = \int_1^2 Tds$$



$$\delta w = pdv \quad w_{1-2} = \int_1^2 pdv$$



类似于 $p-v$ 图上.....表示容积变化功, 在 $T-s$ 图上, 曲线1-2下面的面积表示无耗散准静态过程(可逆过程)中, 系统和外界传递的热量。



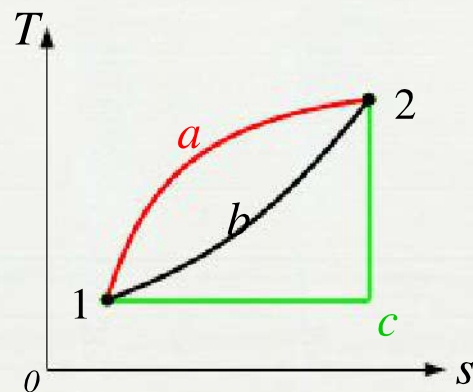
### 三、热量的计算

1、**比热容**：1kg物质温度升高1K或1℃所需的热量，

符号： $c$ ，单位： $J/(kg \cdot K)$ 。

比热容定义式：
$$c = \frac{\delta q}{dT}$$

热量的计算式：
$$\delta q = cdT$$



**因为热量是过程量，所以不同过程的比热容数值不同！**

在定容过程中，1kg物质温度升高1K或1℃所需的热量称为**定容比热容**，符号 $c_v$

在定压过程中，1kg物质温度升高1K或1℃所需的热量称为**定压比热容**，符号 $c_p$



2、**摩尔热容**：1mol物质温度升高1K或1℃所需的热量，符号 $C_{p,m}$ 或 $C_{v,m}$ ，单位： $J/(\text{mol}\cdot\text{K})$ 。

3、**容积热容**：标准状态下， $1\text{m}^3$ 物质温度升高1K或1℃所需的热量，符号 $C_p$ 或 $C_v$ ，单位： $J/(\text{m}^3\cdot\text{K})$ 。

4、比热容、摩尔热容和容积热容之间的换算：

$$C_{p,m} = 22.4 \times 10^{-3} C_p = M c_p$$



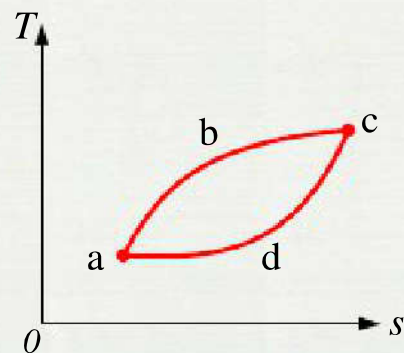
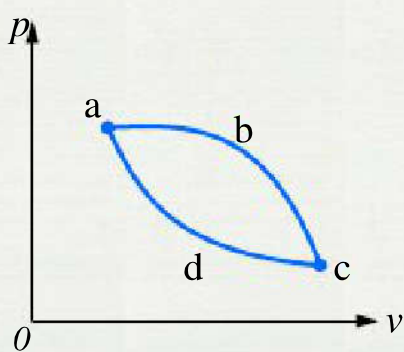
# 1-8 热力循环

## 1、基本概念

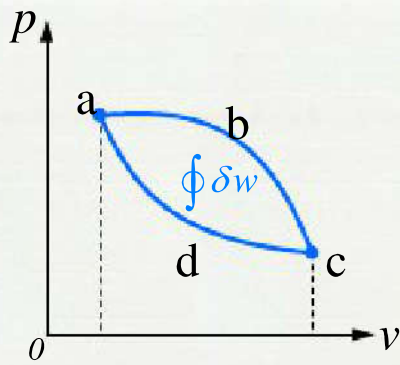
**热力过程**：系统由初始状态出发，经过一系列中间状态而**变化到另一个状态**，它所经历的全部状态的综合。

**热力循环**：系统由初始状态出发，经过一系列中间状态后，**重新回到初始状态**所完成的一个**封闭的热力过程**。

若循环中系统经历的是准静态过程，则它可以在 $p$ - $v$ 图和 $T$ - $s$ 图上表示为一条封闭曲线。





2、 $p$ - $v$ 图分析

$$\delta w = p dv$$

$$w_{a-b-c} = \int_{a-b-c} \delta w = \int_{a-b-c} p dv$$

$$w_{c-d-a} = \int_{c-d-a} \delta w = \int_{c-d-a} p dv$$

a-b-c过程： $v$ 增大， $dv > 0$ ， $w_{a-b-c} > 0$ ，系统对外做功。

c-d-a过程： $v$ 减小， $dv < 0$ ， $w_{c-d-a} < 0$ ，外界对系统做功。

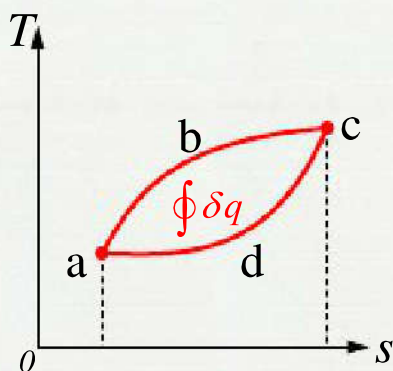
整个热力循环中，系统所作的净功即 $p$ - $v$ 图上循环曲线所包围的面积，应该等于：

$$\oint \delta w = \int_{a-b-c} \delta w + \int_{c-d-a} \delta w > 0$$

循环净功



### 3、T-s图分析



$$\delta q = Tds$$

$$q_{a-b-c} = \int_{a-b-c} \delta q = \int_{a-b-c} Tds$$

$$q_{c-d-a} = \int_{c-d-a} \delta q = \int_{c-d-a} Tds$$

a-b-c过程：s增大， $ds>0$ ， $q_{a-b-c}>0$ ，系统吸热。

c-d-a过程：s减小， $ds<0$ ， $q_{c-d-a}<0$ ，系统放热。

整个热力循环中，系统接受的净热量即T-s图上循环曲线所包围的面积，应该等于：

$$\oint \delta q = \int_{a-b-c} \delta q + \int_{c-d-a} \delta q > 0$$

循环净热

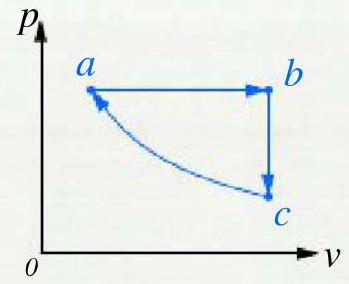


## 4、正循环和逆循环

### (1) 判别方法1

**正循环**：循环方向顺时针

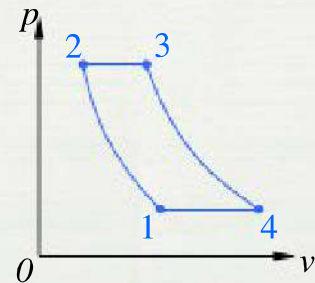
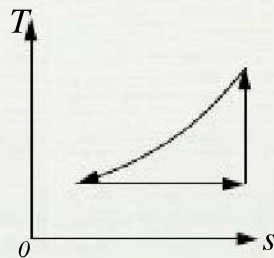
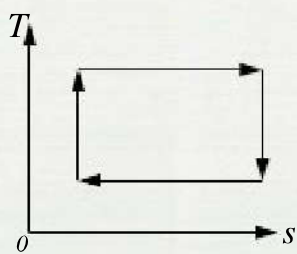
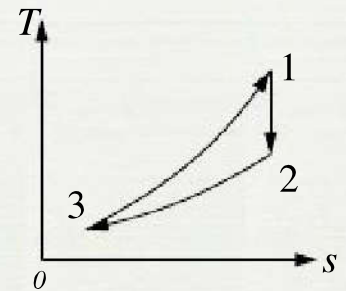
**逆循环**：循环方向逆时针



### (2) 判别方法2

**正循环**：循环净功  $> 0$ ，循环净热  $> 0$

**逆循环**：循环净功  $< 0$ ，循环净热  $< 0$

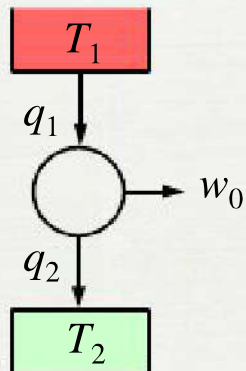


## (3) 特点

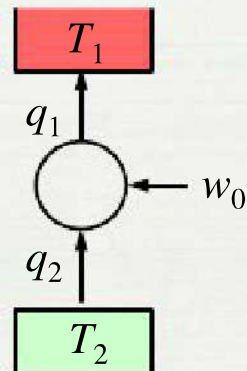
**正循环**：利用热能产生机械功。（**热机循环**）

**逆循环**：付出一定的代价使热量从低温区传向高温区。（**制冷循环**）

## (4) 其他表示方法



热机循环



制冷循环



