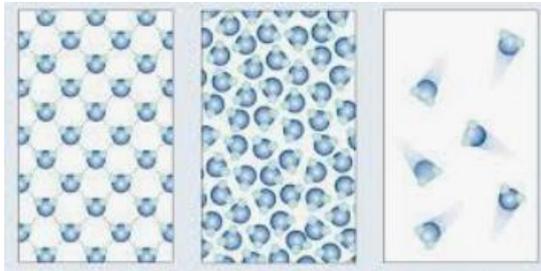


## 第十六章：气体分子运动论与热力学

### 16.1 气体分子模型

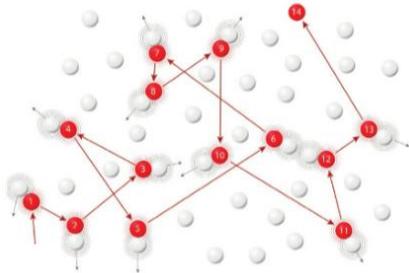
#### 气体分子间的距离较大

1. 固体与液体分子是紧密排布的。
2. 气体分子之间的距离比较大，大约是分子直径的 10 倍。
3. 由于气体分子的\_\_\_\_\_，分子之间的\_\_\_\_\_。（除了分子相互碰撞或跟器壁碰撞外）



#### 分子间的相互碰撞

1. 气体分子的数目很大，而分子热运动的速率也很大，这决定了气体分子在无规则热运动中发生频繁的碰撞。

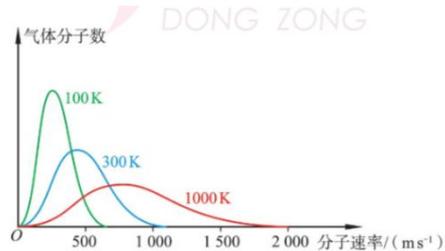


#### 分子沿各个方向运动的机会均等

1. 气体分子的运动方向：
  - a) \_\_\_\_\_而言，某一时刻分子的运动方向是随机的。
  - b) \_\_\_\_\_整体而言，任意时刻，气体分子沿各个方向运动的机率相等。

### 麦克斯韦速率分布

1. 在某一时刻，某一特定分子的速率是不可预知的。
2. 对大量气体分子而言，它们的速率分布却遵从\_\_\_\_\_。
3. 大量气体分子的速率分布呈现“中间多，两头少”的规律。（中间占有分子数较多，速度大或小的分子数较少）
4. 温度升高时，这种“中间多，两头少”的规律不变，但是速率小的分子数减少，速率大的分子增加。



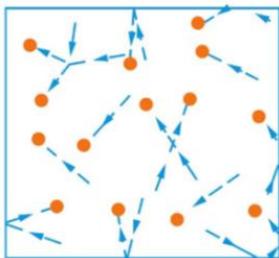
### 理想气体分子的微观模型

1. 理想气体是一种模拟真实气体的物理模型。它实际上就是对压强不太大和温度不太低的真实气体进行理想化的结果。
2. 理想气体分子的微观模型：
  - a) 与分子间平均距离相比，分子的大小可以忽略不计。
  - b) 除了相互碰撞的瞬间，分子之间\_\_\_\_\_。
  - c) 分子之间与分子与器壁之间发生的碰撞都是完全弹性碰撞（\_\_\_\_\_）。
  - d) 分子碰撞的时间比其在空间飞行的时间短得多，因此可以\_\_\_\_\_。
  - e) 除了碰撞的瞬间外，分子的运动可以看作\_\_\_\_\_。

## 16.2 气体的压强

### 气体压强的产生

1. 气体分子不停地做无规则运动，必然会和器壁发生碰撞。每一次的碰撞都会给器壁移动的冲力。
2. 就单个分子来说，这种碰撞是偶然的，所以器壁受到的是间断的、变化不定的冲力。
3. 但对大量分子而言，由于任何时刻都有许多分子与器壁发生碰撞，因而产生一个均匀连续的压力。
4. 气体的压强就是\_\_\_\_\_作用在\_\_\_\_\_。



### 理想气体的压强公式

项目	气体的压强
定义	大量气体分子作用在器壁单位面积上的平均压力，
公式	$P = \frac{1}{3} \frac{Nm\overline{v^2}}{V} \text{ 或 } P = \frac{1}{3} \rho \overline{v^2}$ <p> <math>P</math> = 气体的压强  <math>N</math> = 气体分子总数  <math>m</math> = 气体分子质量  <math>\overline{v^2}</math> = 速率的方均值  <math>V</math> = 容器的容积  <math>\rho</math> = 气体的密度 </p>
单位	$Pa$

### 例子:

1. 两个容积相同的容器中分布装着气体。如果它们分子的 $\overline{v^2}$ 相同，产生的压强也相同，则两容器中
  - A. 一定含有相同的分子数
  - B. 气体分子的质量一定相同
  - C. 气体分子数的密度一定相同
  - D. 不一定是同种气体

2. 氦气质量为 2g，处于体积为  $1m^3$  的容器中、若氦气分子的 $\overline{v^2}$ 为  $6 \times 10^9 m^2 s^{-2}$ ，求氦气的压强。  
[ $4 \times 10^6 Pa$ ]
3. 氦气的质量为 1g，处于容积为的  $2m^3$  容器中，氦气对器壁的压强为  $4 \times 10^6 Pa$ 。求该容器中氦气原子的 $\overline{v^2}$ 。  
[ $2.4 \times 10^{10} m^2 s^{-2}$ ]
4. 容器内有密度为  $1.5 kg m^{-3}$  的气体。气体的 $\overline{v^2}$ 为  $4 \times 10^6 m^2 s^{-2}$ 。求该气体的压强。  
[ $2 \times 10^6 Pa$ ]
5. 10l 的钢筒里盛有 90atm、 $120 kg m^{-3}$  的氧气，求钢筒中氧气分子的 $\overline{v^2}$ 。  
[ $2.28 \times 10^5 m^2 s^{-2}$ ]
6. 在标准状况下，空气的密度为  $1.29 kg m^{-3}$ 。试求其气体分子的 $\overline{v^2}$ 。  
[ $2.36 \times 10^5 m^2 s^{-2}$ ]

## 16.3 气体分子的方均根速率与平均速率

1. 气体分子速率的三种统计值:

- a) \_\_\_\_\_  
在速率分布曲线上, 与分子数的极大值对应的速率称作最概然速率。

- b) \_\_\_\_\_  
平均速率是所有分子速率的算术平均值。

$$\bar{v} = \frac{N_1 v_1 + N_2 v_2 + \dots + N_i v_i}{N_1 + N_2 + \dots + N_i}$$

$$\bar{v} = \frac{N_1 v_1 + N_2 v_2 + \dots + N_i v_i}{N}$$

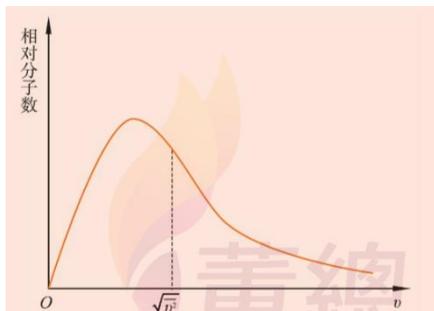
$$\bar{v} = \frac{\sum_i N_i v_i}{N}$$

- c) \_\_\_\_\_  
分子速率平方的平均值的平方根称作分子的方均根速率。

$$\sqrt{\bar{v^2}} = \sqrt{\frac{N_1 v_1^2 + N_2 v_2^2 + \dots + N_i v_i^2}{N_1 + N_2 + \dots + N_i}}$$

$$\sqrt{\bar{v^2}} = \sqrt{\frac{N_1 v_1^2 + N_2 v_2^2 + \dots + N_i v_i^2}{N}}$$

$$\sqrt{\bar{v^2}} = \sqrt{\frac{\sum_i N_i v_i^2}{N}}$$



例子:

1. 有 22 个粒子在某空间运动, 每个粒子的质量都为 1kg, 其速率分布如下表所示:

分子数	2	4	6	8	2
速率 ( $ms^{-1}$ )	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0

- a) 这些粒子运动的最概然速率 [ $4ms^{-1}$ ]  
b) 这些粒子运动的评价速率 [ $3.18ms^{-1}$ ]  
c) 这些粒子运动的方均根速率 [ $3.37ms^{-1}$ ]  
d) 这些粒子的总动量 [ $70kgms^{-1}$ ]  
e) 这些粒子运动的总能量 [ $125J$ ]

粒子数 $N_i$	2	8	6	4	2
速率 $v_i/(m s^{-1})$	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0

2. 计算上述一组粒子的最概然速率、平均速率、方均根速率、总动量和总能量。

(每个粒子的质量都为 0.5kg)  
[ $20ms^{-1}$ ,  $28.18ms^{-1}$ ,  $30.3ms^{-1}$ ,  $310 kgms^{-1}$ ,  $5050J$ ]

3. 在标准状况下, 空气的密度为  $1.29kgm^{-3}$ 。试求其分子的方均根速率。  
[ $485.4ms^{-1}$ ]

4. 在标准状况下，氮的 $v_{rms}$ 为 $1.3 \times 10^3 \text{ms}^{-1}$ 。求这时氮的密度。  
[ $0.179 \text{kgm}^{-3}$ ]

5. 一个容器中，每立方米的氢气含有 $6.8 \times 10^{21}$ 个分子。求分子的方均根速率为 $1.3 \times 10^3 \text{ms}^{-1}$ 时氢气的压强。  
[ $27.5 \text{Pa}$ ]  
(氢分子质量为 $3.36 \times 10^{-27} \text{kg}$ )

6. 在标准状态下，氢气的密度为 $0.09 \text{kgm}^{-3}$ 。试求在 $273\text{K}$ 和 $373\text{K}$ 时，氢分子的方均根速率之比。(氢气体积保持不变)

$$\left[ \sqrt{\frac{273}{373}} \right]$$

7. 在标准状况下某一容器中存放一些氧气。经密闭加热，压强增加1倍，氧气分子的方均根速率增加几倍？(容器容积不变) [ $\sqrt{2}$ ]

## 16.4 气体分子动能与热力学温度的关系

### 气体分子的能量公式及意义

1. 气体分子的能量公式可从理想气体的压强公式、理想气体状态方程和动能的定义推导而出。

项目	气体分子的能量公式
公式	$\overline{E_k} = \frac{3}{2} \frac{R}{N_A} T \text{ 或 } \overline{E_k} = \frac{3}{2} kT$ $\overline{E_k} = \text{气体分子的平均平动能}$ $R = \text{气体常量} \quad T = \text{气体温度}$ $N_A = \text{阿伏伽德罗常数}$ $k = \text{玻尔兹曼常数}$
单位	全部物理量都必须采用国际单位制

2. 气体分子的平均平动能只与气体\_\_\_\_\_相关，即无论气体的种类、质量、压强、体积如何，在同一温度下其分子的平均平动能总是相同的。
3. 按照气体分子的能量公式， $T=0\text{K}$ 时，气体分子平均平动能为零，气体分子的热运动将会停止。
4. 实际物体在热力学为 $0\text{K}$ 时，它的分子动能并不等于零，分子并不完全停止运动。
5. 事实上，在温度还没有到达 $0\text{K}$ 时，气体早已变为液体或固体，气体的能量公式也就不再适用了。

### 玻尔兹曼常数

1. 气体常量和阿伏伽德罗常数的比值称作玻尔兹曼常数。它的数值非常校，但在热学中是一个很重要的常数。

$$k = \frac{R}{N_A} = \frac{8.31 \text{Jmol}^{-1} \text{K}^{-1}}{6.02 \times 10^{23} \text{mol}^{-1}}$$

$$k = 1.38 \times 10^{23} \text{JK}^{-1}$$

例子:

1. 某气体的温度为 300K, 求气体中分子的平均平动能。 [ $6.21 \times 10^{-21}J$ ]

2. 要使气体的平均平动能达到 2eV ( $1eV = 1.6 \times 10^{-19}J$ ), 气体的温度需要有多高? [ $1.55 \times 10^4K$ ]

3. 温度为  $0^\circ C$  时, 分子的平均平动能为多少? 要使分子平均平动能等于 1eV ( $1eV = 1.6 \times 10^{-19}J$ ), 气体的温度需多高? [ $5.65 \times 10^{-21}J, 7726K$ ]

4. 利用气体分子的能量公式求解方均根速率与温度的关系。

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

5. 计算 273K 时氢分子的方均根速率  $v_{rms}$ 。 [ $1.85 \times 10^3ms^{-1}$ ]

统考题:

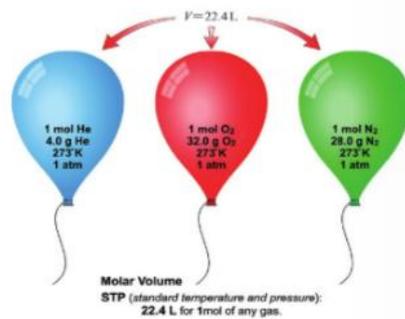
若氢的摩尔质量是 2g, 在 300K 时的氢分子的方均根速率是多少?

- A.  $6.21 \times 10^5ms^{-1}$  B.  $3.74 \times 10^3ms^{-1}$   
C.  $1.93 \times 10^3ms^{-1}$  D.  $7.88 \times 10^2ms^{-1}$

2003 年

## 16.5 阿伏伽德罗定律

1. 阿伏伽德罗定律说明在同温同压下, 相同体积的任何气体含有相同的分子数。



## 16.6 气体的内能

实际气体的内能

1. 气体中所有分子作无规则运动的\_\_\_\_\_和分子相互作用的\_\_\_\_\_之和称之为\_\_\_\_\_。
2. 由于气体热运动的动能跟温度有关, 分子间的势能跟气体体积有关, 因此气体的内能跟气体的温度和体积有关。
3. 内能是因其内部分子无规则运动和分子间相互作用力的存在而存在的, 机械能则是因其物理具有速度或其他物体间有相互作用时而存在的。

### 理想气体的内能

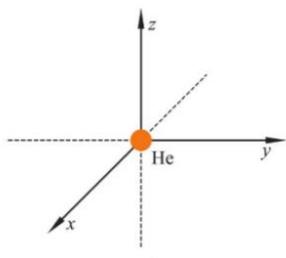
- 在简理想气体模型时，我们忽略了气体分子之间的相互作用，即认为气体分子间的势能为零。因此，理想气体的内能为所有分子无规则运动动能的总和。
- 由于理想气体不存在分子间的势能，因而它的内能与体积无关，只与温度有关。

### 自由度与能量均分定理

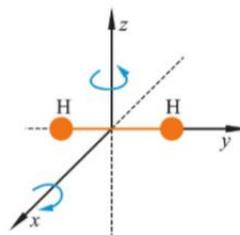
- \_\_\_\_\_是物体运动方程中的独立坐标数。
- \_\_\_\_\_是热平衡时能量平均分配到每一个分子的每一个自由度上，每一个分子的每一个自由度的平均动能都是\_\_\_\_\_。

项目	气体分子的平均动能
公式	$\overline{E_k} = \frac{f}{2} kT$ $\overline{E_k}$ = 气体分子的平均动能 $f$ = 自由度数 $k$ = 玻尔兹曼常数 $T$ = 气体温度 (K)
单位	全部物理量都必须采用国际单位制

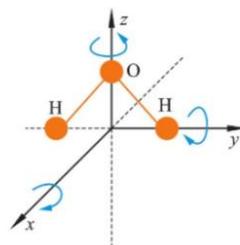
- \_\_\_\_\_，如 He、Ne、Ar 等，分子具有 3 个平动自由度 (\_\_\_\_\_) 它的平均动能为\_\_\_\_\_。



- \_\_\_\_\_，如  $H_2$ 、 $O_2$ 、 $N_2$  等，分子具有 3 个平动自由度和 2 个转动自由度，共 5 个自由度 (\_\_\_\_\_)，它的平均动能为\_\_\_\_\_。



- \_\_\_\_\_，如  $H_2O$ 、 $CH_4$  等，分子具有 3 个平动自由度和 3 个转动自由度，共 6 个自由度 (\_\_\_\_\_)，它的平均动能为\_\_\_\_\_。



- 分子内部还有原子的振动，因此还应考虑\_\_\_\_\_。在常温下，分子的振动自由度被冻结，因此可忽略。

项目	理想气体的内能
公式	$U = \frac{f}{2} nRT$ $U$ = 理想气体的内能 $f$ = 自由度数 $n$ = 气体的量 $R$ = 气体常量 $T$ = 气体温度
单位	全部物理量都必须采用国际单位制

### 例子:

- 某单原子气体的温度为 350K，求单原子分子的平均动能。  
[ $7.25 \times 10^{-21}$ ]

2. 温度为  $27^{\circ}\text{C}$  时, 氧气分子具有多少的平均动能?  $[1.04 \times 10^{-20}\text{J}]$

$[1.61 \times 10^{12}, 9.98 \times 10^{-9}\text{J}, 6.66 \times 10^{-9}\text{J}, 1.66 \times 10^{-8}\text{J}]$

**统考题:**

在室温下, 1 摩尔数的氧气的内能是多少?

- A.  $\frac{3}{2}kT$  B.  $\frac{5}{2}kT$  C.  $\frac{3}{2}RT$  D.  $\frac{5}{2}RT$

2012 年

3. 一容器内装有  $8\text{mol}$  的氮气, 容器内的温度为  $200^{\circ}\text{C}$ , 求氮气的内能。  $[78.6\text{kJ}]$

4. 容器中盛有质量为  $80\text{g}$  的氢气。若氢气的内能为  $150\text{kJ}$ , 求此时氢气的温度。(氢气的摩尔质量为  $2\text{g}$ )  $[180.4\text{K}]$

5. 一个容积为  $10\text{cm}^3$  的电子管, 当温度为  $300\text{K}$  时, 用真空泵把管内空气抽成压强为  $5 \times 10^{-6}\text{mmHg}$  的高真空, 问:

- a) 此时管内有多少个空气分子?  
b) 这些空气分子的平均平动动能的总和是多少?  
c) 平均转动动能的总和是多少?  
d) 平均动能的总和是多少?

(已知  $760\text{mmHg} = 1.013 \times 10^5\text{Pa}$ , 空气分子可认为是双原子分子)

6. 在容积为  $4 \times 10^{-3}\text{m}^3$  的容器中, 装有压强为  $5 \times 10^2\text{Pa}$  的单原子理想气体, 则容器中气体分子的平均动能总和为多少?  $[3\text{J}]$

7. 有  $2 \times 10^{-3}\text{m}^3$  双原子分子理想气体, 其内能为  $6.75 \times 10^2\text{J}$ 。设分子总数为  $5.4 \times 10^{22}$  个, 试求
- a) 气体的压强  $[135\text{kPa}]$   
b) 气体的温度  $[362\text{K}]$

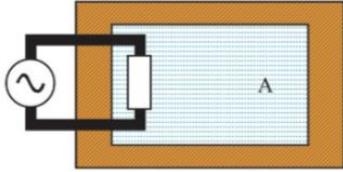
## 16.7 热力学第一定律

### 改变系统内能的两种途径

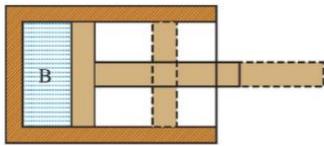
1. 改变系统内能的方式:

- a) \_\_\_\_\_  
电阻丝产生的热量为  $Q$  (全部被系统吸收), 引起系统内能的变化为  $\Delta U$ 。显然, 系统吸收了多少热量, 它的内能就增加多少。

\_\_\_\_\_

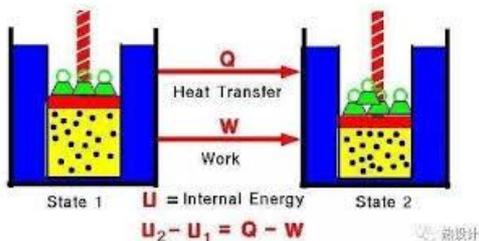


b) \_\_\_\_\_  
 外界对气体做的功为 $W$ ，则引起系统内能变化 $\Delta U$ 。显然外界对系统做了多少功，它的内能就增加多少。



### 热力学第一定律

1. 一个热力学系统的内能增量等于外界向它传递的热量与外界对它所做的功之和。



热力学第一定律	
定义	一个热力学系统的内能增量等于外界向它传递的热量与外界对它所做的功之和。
公式	$\Delta U = Q + W$ $\Delta U =$ 内能的改变 $Q =$ 热量 $W =$ 做功
单位	$J$

2. 对公式符号 $\Delta U = Q + W$ 的规定。

名称	内能的改变	热量	做功
符号	$\Delta U$	$Q$	$W$
+	内能增加	吸热	外界对气体做功 (气体被压缩)
-	内能减少	放热	气体对外界做功 (气体向外膨胀)

### 例子:

- 关于物体内能的变化，以下说法正确的是
  - 物体吸收热量，内能一定增大
  - 物体对外做功，内能一定减小
  - 物体吸收热量，同时对外做功，内能可能不变
  - 物体放出热量，同时对外做功，内能可能不变
- 在热力学第一定律的表达式 $\Delta U = Q + W$ 中，关于各个物理量的正、负号，下列说法正确的是
  - 外界对物体做功时 $W$ 为正，吸热时 $Q$ 为负，内能增加时 $\Delta U$ 为正。
  - 外界对物体做功时 $W$ 为负，吸热时 $Q$ 为负，内能增加时 $\Delta U$ 为负。
  - 外界对物体做功时 $W$ 为负，吸热时 $Q$ 为负，内能增加时 $\Delta U$ 为负。
  - 外界对物体做功时 $W$ 为正，吸热时 $Q$ 为正，内能增加时 $\Delta U$ 为正。
- 一定量的气体在某一过程中，外界对气体做了 $8 \times 10^4 J$ 的功，气体内能减少了 $1.2 \times 10^5 J$ ，则下列各式正确的是
  - $W = 8 \times 10^4 J, \Delta U = 1.2 \times 10^5 J, Q = 4 \times 10^5 J$
  - $W = 8 \times 10^4 J, \Delta U = -1.2 \times 10^5 J, Q = -4 \times 10^5 J$
  - $W = -8 \times 10^4 J, \Delta U = 1.2 \times 10^5 J, Q = 4 \times 10^5 J$
  - $W = -8 \times 10^4 J, \Delta U = -1.2 \times 10^5 J, Q = -4 \times 10^5 J$
- 活塞在压缩气缸里的空气时做了900J的功，同时气缸里的空气向外散热50J。气缸里的空气内能改变了多少？ [850J]

5. 用活塞压缩气缸内的空气，使空气的内能增加  $300\text{J}$ ，若压缩过程中空气向外放热  $84\text{J}$ ，则活塞对空气做了多少功。 [384J]
6. 一定质量的气体，从外界吸收热量  $2.7 \times 10^5\text{J}$ ，内能增加了  $4.3 \times 10^5\text{J}$ ，是它对外界做功还是外界对它做功？做了多少功？ [1.6 × 10<sup>5</sup>J]
7. 气缸内有  $2\text{mol}$  的空气，压强是  $150\text{kPa}$ 。维持压强不变，使空气体积从  $2\text{m}^3$  膨胀到  $5\text{m}^3$ 。求空气膨胀时所做的功。 [4.5 × 10<sup>5</sup>J]
8. 将压强为  $101.3\text{kPa}$  的氢气，由  $1 \times 10^{-4}\text{m}^3$  等压压缩到  $2 \times 10^{-5}\text{m}^3$ 。求此过程外界对氢气做的功。 [8.1J]
9. 若保持压强不变， $1\text{mol}$  的理想气体，温度每升高  $1\text{K}$  时，对外做多少功？ [8.31J]
10. 容器内盛有  $0.01\text{kg}$  的氮气。当气体从  $300\text{K}$  加热到  $800\text{K}$  时，氮气做了多少功？（氮气的摩尔质量为  $28\text{g}$ ） [1.48 × 10<sup>3</sup>J]
11. 一定质量的空气，吸收  $1.6 \times 10^2\text{J}$  的热量，并保持在  $1 \times 10^5\text{Pa}$  下膨胀，体积从  $10\text{l}$  增加到  $15\text{l}$ 。求  
a) 空气对外做了多少功？ [500J]  
b) 它的内能改变了多少？ [-340J]
12. 双原子分子的气体在  $2 \times 10^5\text{Pa}$  下做等压膨胀，体积从  $4\text{l}$  增加到  $5\text{l}$ 。若气体膨胀过程从热源吸收了  $700\text{J}$  热量，求  
a) 空气对外做了多少功？ [200J]  
b) 它的内能改变了多少？ [500J]

**统考题：**

在  $1.2 \times 10^5\text{Pa}$  的恒定压强下， $1\text{kmol}$  的某理想气体的体积从  $10\text{m}^3$  膨胀至  $15\text{m}^3$  时，它对外所做的功是多少？

- A.  $6.0 \times 10^2\text{J}$     B.  $3.8 \times 10^3\text{J}$   
C.  $6.0 \times 10^5\text{J}$     D.  $8.2 \times 10^5\text{J}$

2003 年

## 16.8 气体的摩尔热容量

- 比热容量是指 1kg 的某种物质温度升高（或降低）1K 所需要吸收（或放出）的热量。此概念较多用于固体和液体。
- 根据热力学第一定律，系统内能的变化主要由热传递和做功实现。

$$\Delta U = Q + W$$

- 对于固体和液体来说，吸热和放热的过程对其体积的影响很微小，可以忽略不计，故做功可以忽略，系统的吸热、放热等于系统内能的改变量。
- 对于气体，其热膨胀系数比固体、液体大得多，系统吸、放热过程常常伴随这较大体积的改变，即\_\_\_\_\_。

- 对于多原子理想气体来说，其定容摩尔热容量为\_\_\_\_\_。
- 对于单原子分子和双原子气体，其定容摩尔热容量的实验值与理论值符合得比较好。
  - 对于多原子分子得实验值与理论值则有一定的偏差。这是因为振动自由度起了作用，从而使其实验值大于理论值。

单原子气体	He	Ne	Ar	Kr	Xe
$\frac{C_v}{R}$	1.49	1.55	1.50	1.47	1.51
双原子气体	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	NO
$\frac{C_v}{R}$	2.53	2.55	2.49	2.49	2.57
多原子气体	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	NH <sub>3</sub>
$\frac{C_v}{R}$	3.24	3.01	3.16	4.01	3.42

### 定容摩尔热容量

项目	定容摩尔热容量
定义	1mol 的某种气体，在体积保持不变时，温度升高（或降低）1K 所需要吸收（或放出）的热量。
公式	$C_v = \frac{Q}{n\Delta T}$ $C_v$ = 定容摩尔热容量 $Q$ = 吸收或放出的热量 $n$ = 气体的量 $\Delta T$ = 末温度 - 初温度 (K)
单位	$Jmol^{-1}K^{-1}$

- 由于系统做等容变化，外界对系统做功为零，故根据热力学第一定律，

$$\begin{aligned} \Delta U &= Q + W \\ \Delta U &= Q \\ \Delta U &= nC_v\Delta T \\ \frac{f}{2}nR\Delta T &= nC_v\Delta T \\ C_v &= \frac{f}{2}R \end{aligned}$$

- 对于单原子理想气体来说，其定容摩尔热容量为\_\_\_\_\_。
- 对于双原子理想气体来说，其定容摩尔热容量为\_\_\_\_\_。

### 例子：

- 一个固定容器内盛有 2mol 的氮气，加热后温度由 20°C 上升至 50°C，求此过程中氮气所吸收的热量？（氮气的  $C_v = 20.7 Jmol^{-1}K^{-1}$ ）  
[1242J]
- 质量为 100g 的水蒸气由 120°C 上升至 140°C，水蒸气在等容过程中吸收了多少热量？ [3090J]  
（ $C_v = 27.81 Jmol^{-1}K^{-1}$ ）

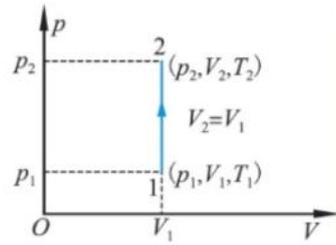
3. 压强为  $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、体积为  $1 \text{ l}$  的氧气，温度从  $273 \text{ K}$  上升到  $373 \text{ K}$ 。已知氧气的定容摩尔热容量为  $21.12 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ，求在等容过程中，氧气吸收多少热量？  
[94.03J]
4. 在标准状况下，体积为  $5 \text{ l}$  的氮气经过加热温度上升到  $100^\circ \text{C}$ 。求在等容过程中，氮气吸收的热量。（氮气的  $C_v = 12.38 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ）  
[276.4J]
2. 质量为  $100 \text{ g}$  的水蒸气由  $120^\circ \text{C}$  上升至  $140^\circ \text{C}$ ，且  $C_p = 36.2 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 。水蒸气在等压过程中吸收多少热量？（水的摩尔质量 =  $18 \text{ g mol}^{-1}$ ）  
[4022J]
3. 一个具有活塞的容器中盛有  $1.5 \text{ l}$  的氧气，压强为。如果对氧气加热，使温度从  $27^\circ \text{C}$  上升到  $177^\circ \text{C}$ ，已知氧气的定压摩尔热容量为  $29.3 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 。求在等压过程中，氧气吸收多少热量？  
[267.1J]

### 定压摩尔热容量

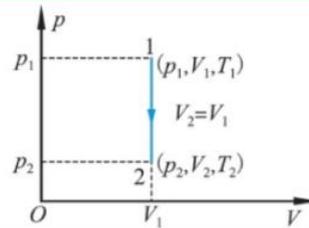
项目	定压摩尔热容量
定义	1mol 的某种气体，在压强保持不变时，温度升高（或降低）1K 所需要吸收（或放出）的热量。
公式	$C_p = \frac{Q}{n\Delta T}$ $C_p$ = 定压摩尔热容量 $Q$ = 吸收或放出的热量 $n$ = 气体的量 $\Delta T$ = 末温度 - 初温度 (K)
单位	$\text{J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$

### 例子：

1. 气缸内有  $3 \text{ mol}$  的氧气，经过加热后温度从  $30^\circ \text{C}$  升至  $70^\circ \text{C}$ 。加热过程中，氧气的压强保持不变，求氧气所吸收的热量。  
[3516J]  
（氧气的  $C_p = 29.3 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ）
4.  $2 \text{ mol}$  的氮气、压强为  $9 \times 10^4 \text{ Pa}$ 。加热后温度由  $27^\circ \text{C}$  上升至  $77^\circ \text{C}$ ，过程中压强保持保持不变。求  
a) 氮气对外界做的功 [-831J]  
b) 氮气吸收的热量 [2070J]  
c) 氮气的内能变化 [1239J]  
（氮气的  $C_p = 20.7 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ）
5. 质量为  $2.8 \text{ g}$ 、温度为  $300 \text{ K}$ 、压强为  $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$  的氮气，等压膨胀到原来气体的 2 倍。求  
a) 氮气所做的功 [-249.3J]  
b) 氮气吸收的热量 [873J]  
c) 氮气内能的变化 [623.7J]  
（ $M_{N_2} = 28 \text{ g mol}^{-1}$ ； $C_p = 29.1 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ）



- b) 气体向外界放出热量，气体的内能减少，引起气体温度降低，压强减少。



### $C_v$ 与 $C_p$ 的关系

1. 在等压过程中，系统吸收热量，一边内能增加，一边对外做功。

$$\begin{aligned}\Delta U &= Q + W \\ Q &= \Delta U - W \\ nC_p\Delta T &= \frac{f}{2}nR\Delta T + P\Delta V \\ nC_p\Delta T &= \frac{f}{2}nR\Delta T + nR\Delta T \\ C_p &= \frac{f}{2}R + R \\ C_p &= C_v + R\end{aligned}$$

这公式称为\_\_\_\_\_。定压摩尔热容量定容摩尔热容量大一个摩尔气体常量。

## 16.9 热力学第一定律在理想气体四个过程中得应用

### 等容过程

1. 在\_\_\_\_\_中，系统的体积保持不变，则外界对系统做功 $W = 0$ ，系统与外界热交换得能量等于系统内能得变化。

$$\begin{aligned}\Delta U &= Q + W \\ \Delta U &= Q \\ \Delta U &= nC_v\Delta T\end{aligned}$$

2. 对于一定量的气体，等容过程中 $\frac{P}{T} = \text{常数}$ 。

3. 在P-V图像中，等容过程的曲线使垂直于体积轴的一条直线段。

- a) 气体从外界吸收热量，气体的内能增加，引起气体的温度升高，压强增大。

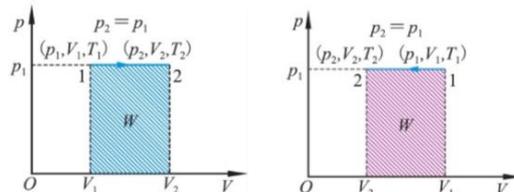
### 等压过程

1. 在\_\_\_\_\_中，系统的压强保持不变（\_\_\_\_\_），让系统体积变化，此过程中气体内能的变化量为 $nC_v\Delta T$ 。

$$\begin{aligned}\Delta U &= Q + W \\ \Delta U &= nC_p\Delta T - P\Delta V \\ \Delta U &= nC_p\Delta T - nR\Delta T \\ \Delta U &= n\Delta T(C_p - R) \\ \Delta U &= nC_v\Delta T \\ \Delta U &= \frac{f}{2}nR\Delta T\end{aligned}$$

2. 对于一定量的气体，等压过程中 $\frac{V}{T} = \text{常数}$ 。

3. 在P-V图像中，等压过程的曲线使垂直于压强轴的一条直线段。



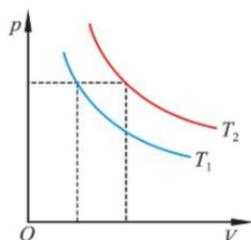
4. 直线段与体积轴所围成的矩形面积，就表示\_\_\_\_\_。

### 等温过程

1. 在\_\_\_\_\_中，系统的温度保持不变，故系统内能变化 $\Delta U = 0$ 。但系统与外界有热量的传递，吸收或放出的热量，直接转化为机械能。

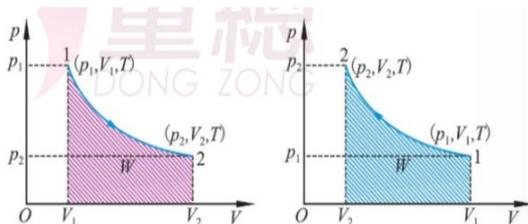
$$\begin{aligned}\Delta U &= Q + W \\ Q &= -W \\ Q &= P\Delta V\end{aligned}$$

2. 对于一定量的气体，等温过程中 $PV = \text{常数}$ 。
3. 在P-V图像中，等温过程曲线为双曲线。等温线离坐标原点越远，温度越高。



4. 等温线下阴影的面积，就表示\_\_\_\_\_。

$$\begin{aligned}W &= -P\Delta V \\ W &= -\int_{V_1}^{V_2} P dV \\ W &= -\int_{V_1}^{V_2} \frac{nRT}{V} dV \\ W &= -nRT \int_{V_1}^{V_2} \frac{1}{V} dV \\ W &= -nRT \ln \frac{V_2}{V_1} \\ W &= -nRT(\ln v_2 - \ln v_1) \\ W &= -nRT \ln \frac{v_2}{v_1}\end{aligned}$$

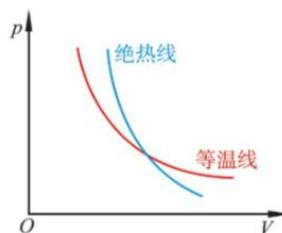


### 绝热过程

1. 在\_\_\_\_\_中，系统不和外界交换热量 $Q = 0$ ，系统内能的变化等于外界对系统做的功。

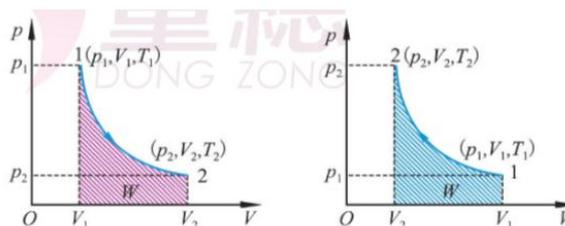
$$\begin{aligned}\Delta U &= Q + W \\ \Delta U &= W\end{aligned}$$

2. 对于一定量的气体，绝热过程中 $PV^\gamma = \text{常数}$ ，其中指数 $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ ，称为比热比。
3. 在绝热膨胀的过程中，气体对外界所做的功完全靠气体内能的减少，因而温度降低，因此在P-V图像中，绝热线比等温线显得陡。



4. 绝热线下阴影的面积，就表示\_\_\_\_\_。

$$W = \int \frac{f}{2} nR\Delta T$$



### 例子:

1. 在体积为5l的容器中盛有3mol的双原子气体。在等容的情况下，气体的压强从 $10^6 \text{ Pa}$ 减小到 $10^5$ 。

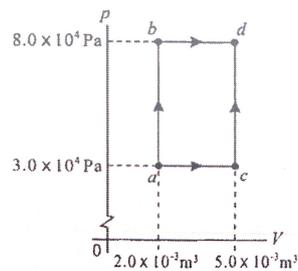
问:

- a) 气体对外界做了多少功?
- b) 气体是吸热还是放热?
- c) 气体的内能改变量为多少?

[不做功，放热， $-1.125 \times 10^4$ ]

2. 1mol 的氦气封闭在容积为  $2m^3$  的容器中，在等容的情况下，压强从  $10^6 Pa$  增大到  $10^7 Pa$ 。问：
- 气体对外界做了多少功？
  - 气体是吸热还是放热？
  - 气体的内能改变量为多少？  
[不做功，放热， $2.7 \times 10^7 J$ ]
4. 2mol 的多原子气体在保持的  $5 \times 10^4 Pa$  情况下，体积从  $10m^3$  减小到  $5m^3$ 。问：
- 气体对外界做了多少功？
  - 气体的内能改变量为多少？
  - 气体从外界吸收多少热量？  
[ $2.5 \times 10^5 J$ ,  $-7.5 \times 10^5 J$ ,  $-1 \times 10^6 J$ ]
3. 1mol 的氦气在保持压强为一个标准大气压的情况下，体积由  $10m^3$  增大到  $20m^3$ 。问：
- 气体对外界做了多少功？
  - 气体的内能改变量为多少？
  - 气体从外界吸收多少热量？  
[ $-1.013 \times 10^6 J$ ,  $1.52 \times 10^6 J$ ,  $2.53 \times 10^6 J$ ]

## 统考题：



图中显示一系列热力做功的过程的 P-V 图。在状态  $ab$  阶段， $150J$  的热量被加入系统中，及在状态  $bd$  阶段中， $600J$  的热量被加入。求

- 在状态  $ab$  阶段时的内能转换
  - 在状态  $abd$  阶段时的内能转换
  - 在状态  $acd$  阶段时所加入的总热量
- 2007 年

## 16.10 热力学第二定律

### 1. 克劳修斯表述

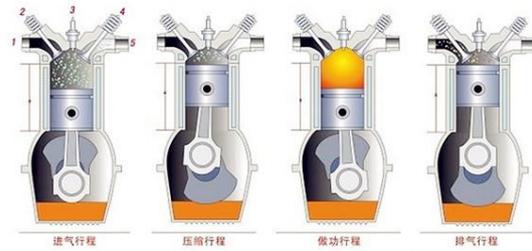
热量不能自发地从低温物体传到高温物体。



### 2. 开尔文表述

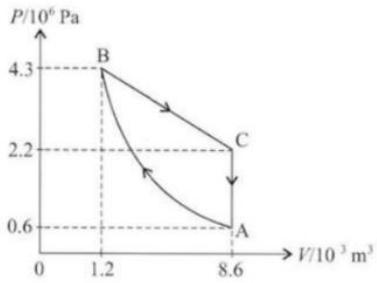
不可能从单一热源吸收热量，使之完全做功，而不产生其他影响。

#### 四冲程汽油发动机工作原理



1. 排气道 2. 排气门 3. 火花塞 4. 进气门 5. 进气道

### 统考题:



如图中所示， $3\text{mol}$  的单原子理想气体，经历一热循环 ABCA。求

- 气体在 B 点的热力学温度
- 气体在 BC 过程的内能改变量
- BCA 过程中气体对外界所做的功
- 在 AB 过程中，气体与外界的热传递

2012 年