

## 第14章 热学

我国古代传说，燧人氏钻木取火以化腥臊，奉为千古圣皇；古希腊神话，普罗米修斯盗天火开罪于主神而泽惠天下，崇为世间英雄。在古代各民族的语言里，“火”与“热”几乎是同义词。热学这门科学起源于人类对于热与冷现象本质的追求，由于史前人类已经学会了用火，我们可以想象到，追求热与冷现象的本质可能是人类最初对自然界法则的追求之一。下面，我们来研究一些热学现象。

### 一、分子动理论

费曼在他的物理学讲义中写道：“假如由于某种大灾难，所有的科学知识都丢失了，只有一句话传给下一代，那么怎样才能用最少的词汇来表达最多的信息呢？我相信这句话是原子的假设：所有的物体都是由原子构成的，这些原子是一些小小的粒子，它们一直不停地运动着。当彼此略微离开时相互吸引，当彼此过于挤紧时又相互排斥。”这一句话中包含了大量的有关世界的信息，实际上就是我们下面要讲述的分子动理论的主要内容。

#### 1. 原子论的背景

物质是由离散单位组成的想法是一个非常古老的想法，最早可以追溯到古希腊和古印度时期。“原子（atom）”一词就是由古希腊哲学家德谟克利特和他的老师留基伯创造。然而，他们的观点是建立在哲学和神学推理上而不是依靠实验证据，结果他们对原子的形状和行为方式的认知都出现了错误。他们让每个人信服他们的观点，因为“原子论”只不过是关于物质本性的众多理论之一。直到19世纪，当一些化学现象只有“原子论”可以解释，“原子论”才被科学家所接受和完善。

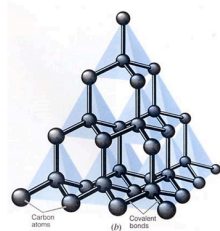
在十九世纪初，道尔顿提出了**倍比定律**，并用实验证明了这一定律，这是人们承认原子学说的重要依据。例如，有两种氧化锡：一种是88.1%锡和11.9%氧，另一种是78.7%锡和21.3%氧。这意味着100克锡会与13.5克或27克氧气结合。13.5和27形成1:2的比率，即小整数的比率。化学中这种常见的模式向道尔顿预示着元素会以离散单位的整数倍数存在，这种离散的单位就是原子。在氧化锡的情况下，一个锡原子将与一个或两个氧原子结合。自此，原子论开始正式走上历史舞台。

#### 2. 气体、液体、固体中的分子

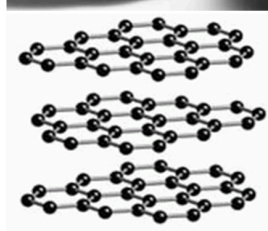
分子是物质中能够独立存在的相对稳定并保持该物质物理化学特性的最小单元。分子由原子构成，原子通过一定的作用力，以一定的次序和排列方式结合成分子。一般而言，气态物质是由一个个分子构

成的，分子之间间隔很大，相互作用很小，因而每个分子都是独立单元。多数气体分子都是由不止一个原子结合而成的，有些是由单个原子构成的（例如惰性气体、金属蒸汽），有些是由多个同类原子构成的（例如氧气、氢气、氮气），还有一些是由多个不同类原子构成的（例如二氧化碳、甲烷）。

固态物质中，原子大多是由较强的化学键（离子键、共价键、金属键）结合起来的，因此固体中往往没有独立的分子。即使是同样的原子，原子间化学键不同，形成分子的化学性质也不相同。例如金刚石中每一个碳原子与周围四个碳原子以共价键结合，它的结构非常稳固，所以金刚石非常硬。但是同样由碳原子组成的石墨，每一个碳原子只与同一层的三个近邻碳原子形成共价键，但是原子层与原子层之间只是以非常弱的 $\pi$ 间结合，所以石墨非常容易以层状形式剥离。



金刚石结构示意图



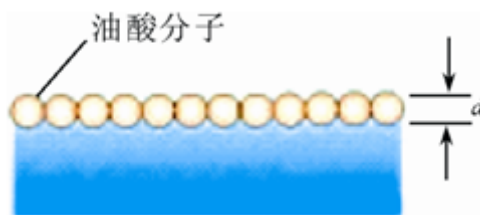
石墨结构示意图

液态物质中，每个分子中原子之间仍以化学键相结合，但分子之间的结合要弱得多。液体的分子由于正电荷中心与负电荷中心并不重合，所以很多液体分子具有极性。具有极性的分子之间由于静电引力的作用而相互结合，由于这种引力较弱，所以液体分子之间的结合也比较弱，从而液体具有流动性。有一些能量较大的分子甚至会脱离束缚从液体中游离出来，成为气态。

### 3. 分子的空间尺度

#### 油膜法估测分子大小

把很小一滴油酸滴在水面上，水面上会形成一块油酸薄膜，薄膜是由单层油酸分子组成的。在估算时我们忽略油酸分子的形状，把它简化为球形。测出一滴液体中油酸所占的体积 $V$ ，油膜的面积 $S$ ，就能估算出油酸的分子直径 $d = \frac{V}{S}$ 。



因此，估测油酸分子的直径，要解决两个问题：① 获得很小一滴油酸并测得它的体积；② 测量这滴油酸在水面上形成的油膜面积。

① 首先，配置一定浓度的油酸酒精溶液，例如可以向1mL油酸中加酒精，直至总量达到500mL。用注射器吸取这样的油酸溶液，把它一滴一滴地滴入小量筒中，记下液滴的总滴数和它们的总体积，这样便知道1滴溶液的体积了。例如，100滴溶液的体积是1mL，1滴的体积就是 $10^{-2}$ mL。根据这些数据就可以计算出一滴溶液中所含纯油酸的体积。例如，上述数据中，1滴溶液含油酸 $2 \times 10^{-5}$ mL。如果把1滴这样的溶液滴在水面，溶液中的酒精将溶于水并很快挥发，液面上的油膜便是纯油酸形成的。

② 先在浅盘里倒入约2cm深的水，然后将痱子粉或细石膏粉均匀地洒在水面上。用注射器往水面上滴1滴油酸酒精溶液，油酸立即在水面散开，形成一块薄膜。薄膜上没有痱子粉，可以清楚地看出它的轮廓。待油酸薄膜形状稳定后，将事先准备好的玻璃板放在浅盘上，在玻璃板上描下油酸膜的形状。将画有油酸膜轮廓的玻璃板放在坐标纸上，计算轮廓范围内的正方形个数，不足半个的舍去，多于半个的算一个。把正方形的个数乘以单个正方形的面积就得到油膜的面积。

## 🍪 分子的大小和阿伏伽德罗常数

### (1) 分子的大小：

除了一些有机物质的大分子外，多数分子尺寸的数量级为 $10^{-10}$ m。

### (2) 阿伏伽德罗常数：

我们在化学课中学过，1mol的任何物质都含有相同的粒子数，这个数量可以用阿伏伽德罗常数来表示。1986年用X射线测得的阿伏伽德罗常数是 $N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$ 。

阿伏伽德罗常数是一个重要的常数，它把摩尔质量、摩尔体积这些宏观物理量与分子质量、分子大小等微观物理量联系起来，物理学中定量研究热现象时经常用到它。

#### ① 固体、液体分子微观量的估算

**分子数：** $N = nN_A = \frac{m}{M_{\text{mol}}} N_A = \frac{V}{V_{\text{mol}}} N_A$  ( $M_{\text{mol}}$ 为分子的摩尔质量， $V_{\text{mol}}$ 为分子的摩尔体积)

**每个分子的质量：** $\mu = \frac{M_{\text{mol}}}{N_A}$

**每个分子体积（分子所占空间）：** $V_1 = \frac{V_{\text{mol}}}{N_A} = \frac{M_{\text{mol}}}{\rho N_A}$ ，其中 $\rho$ 为固体或液体的密度。

**分子直径的估算：**把固体、液体分子看成球形，则分子直径  $d = \sqrt[3]{6V_1/\pi}$ ；把固体、液体分子看成立方体，则  $d = \sqrt[3]{V_1}$ 。

## ② 气体分子微观量的估算方法

物质的量  $n = \frac{V_{\text{标}}}{22.4}$ ， $V_{\text{标}}$  为气体在标况下的体积，标准状态下 1mol 任何理想气体所占的体积都约为 22.4L。

**分子间距的估算：**设想气体分子的分布均匀，每个分子平均占有一定的体积，假设为立方体，则分子间距  $r = \sqrt[3]{V_{\text{mol}}/N_A}$ 。

### 例题精讲

1 用单分子油膜法测出油酸分子（视为球形）的直径后，还需要下列哪一个物理量就可以计算出阿伏伽德罗常数（ ）

- A. 油滴的体积      B. 油滴的质量      C. 油酸的摩尔体积      D. 油酸的摩尔质量

答案 C

**解析** 方法一：已知分子直径，可以求出分子的体积，因此，只要知道摩尔体积，就可以求出阿伏伽德罗常数。

故选C。

方法二：求出一个油分子的体积，只要知道了油的摩尔体积即可求出阿伏伽德罗常数，如果知道油的摩尔量和密度可求出摩尔体积。

故选C。

2 若以  $M$  表示水的摩尔质量， $v$  表示在标准状态下水蒸气的摩尔体积， $\rho$  表示在标准状态下水蒸气的密度， $N_A$  为阿伏伽德罗常数， $m$ 、 $v$  分别表示每个水分子的质量和体积。下面四个关系式中正确的是（ ）

A.  $N_A = \frac{\rho V}{m}$

B.  $\rho = \frac{M}{N_A v}$

C.  $m = \frac{M}{N_A}$

D.  $v = \frac{V}{N_A}$

答案 AC

**解析** A. 因为  $M = \rho v$ , 所以  $N_A = \frac{M}{m_0} = \frac{\rho v}{m_0}$ , 故AC正确;

B. 但是 $v_0$ 不一定表示在标准状态下每个水分子的体积, 故BD错误.

故选AC.

## 照猫画虎

3 据保加利亚媒体2005年8月27日报道，一艘乌克兰油轮在多瑙河保加利亚维丁港附近的河段发生原油泄漏事故，造成河水严重污染，对饮用水和生态环境构成威胁．现假设该艘油轮装载着密度为  $9 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$  的原油在海上航行，由于某种事故使原油发生部分泄漏，设共泄漏出  $9\text{t}$ ，则这次事故造成的最大可能的污染面积约为（ ）

A.  $10^{11} \text{ m}^2$

B.  $10^{12} \text{ m}^2$

C.  $10^9 \text{ m}^2$

D.  $10^8 \text{ m}^2$

答案

A

### 解析

当水面形成单分子油膜时，污染面积最大，根据密度和质量算出泄漏油的体积，再用体积除以单分子直径的数量级 $10^{-10}\text{m}$ 即可得到大约的污染面积。

故选A.

4 估计一个水分子的质量和其所占据的体积. (  $N_A$  取  $6.0 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  )

答案

质量为  $3.0 \times 10^{-26} \text{ kg}$  ; 体积为 :  $3.0 \times 10^{-29} \text{ m}^3$  .

### 解析

一个水分子的质量

$$m = \frac{M}{N_A} = \frac{1.8 \times 10^{-2}}{6.0 \times 10^{23}} \text{ kg} = 3.0 \times 10^{-26} \text{ kg}$$

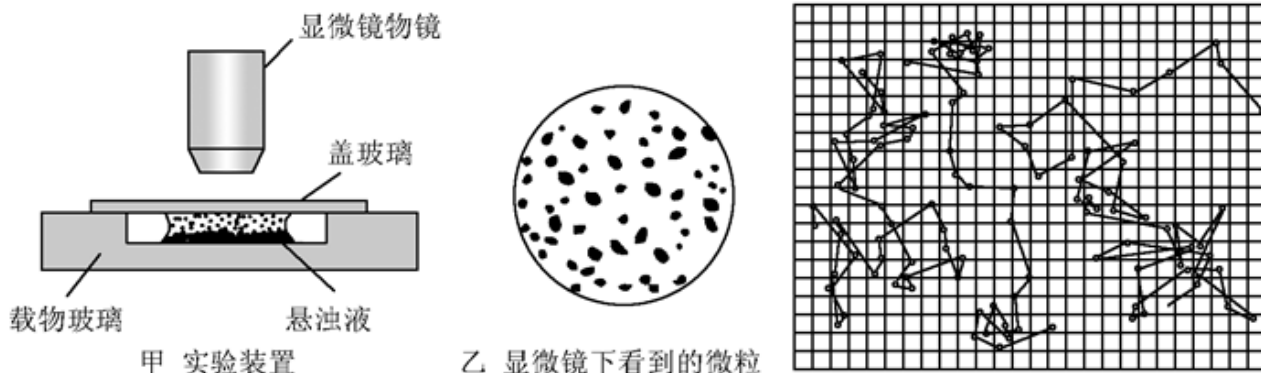
$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{3.0 \times 10^{-26} \text{ kg}}{1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3} = 3.0 \times 10^{-29} \text{ m}^3.$$

故答案为：质量为 $3.0 \times 10^{-26} \text{kg}$ ；体积为： $3.0 \times 10^{-29} \text{m}^3$ 。

## 4. 布朗运动

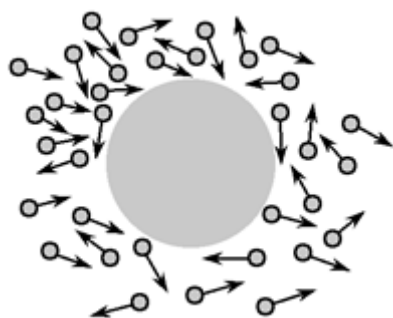
19世纪初，一些人观察到，悬浮在液体中的小颗粒总在不停的运动。1827年，英国植物学家布朗首先在显微镜下研究了这种运动。下面我们来做类似的实验。

把墨汁用水稀释后取出一滴放在高倍显微镜下观察，可以看到悬浮在液体中的小碳粒在不停地做无规则运动，追踪一个小碳粒的运动，每隔30s把碳粒的位置记录下来，然后用直线把这些位置按时间顺序依次连接起来，就得到类似下图所示的微粒运动的位置连线。可以看出，微粒的运动是无规则的。实际上，就是在短短的30s内，微粒的运动也是极不规则的。



布朗运动是怎样产生的呢？

在显微镜下看起来连成一片的液体，实际上是由许多分子组成的。液体分子不停地做无规则运动，不断地撞击微粒。如图为一颗微粒受到周围液体分子撞击的情景。悬浮微粒足够小时，来自各个方向的液体分子撞击作用的不平衡性便表现出来了。在某一瞬间，微粒在某个方向受到的撞击作用较强；在下一瞬间，微粒受到另一个方向的撞击作用较强，这样，就引起了微粒的无规则运动。



### 布朗运动的特点

**关于布朗运动，要注意以下几点：**

- ① 形成条件是微粒足够小；
- ② 温度越高，布朗运动越剧烈；
- ③ 观察到的是固体微粒（不是液体分子）的无规则运动，反映的是液体分子运动的无规则性；

④ 实验中描绘出的是某固体微粒每隔的位置的连线，不是该微粒的运动轨迹。

### 例题精讲

5 下列关于布朗运动的说法，正确的是（ ）

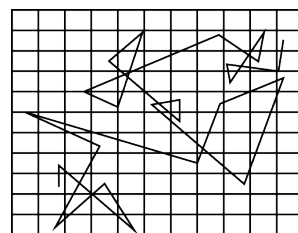
- A. 布朗运动是液体分子的无规则运动
- B. 液体温度越高，悬浮颗粒越小，布朗运动越剧烈
- C. 布朗运动是由于液体各部分的温度不同而引起的
- D. 布朗运动是由于液体分子从各个方向对悬浮颗粒撞击作用的不平衡引起的

答案 BD

解析 布朗运动的研究对象是固体小颗粒，而不是液体分子，故A选项错误；影响布朗运动的因素是温度和固体小颗粒大小，温度越高、固体小颗粒越小，布朗运动就越明显，故B选项正确；布朗运动是由于悬浮固体小颗粒受液体分子的碰撞作用不平衡而引起的，不是由液体各部分的温度不同而引起的，故C选项错误，D选项正确。  
故选BD。

### 照猫画虎

6 某同学做布朗运动实验，得到的观测记录如图。关于布朗运动，以下说法正确的是（ ）



- A. 图中记录的是某个花粉颗粒的运动轨迹
- B. 布朗运动就是液体分子的无规则运动
- C. 布朗运动是由于液体分子的无规则运动而产生的现象
- D. 布朗运动是否明显，与悬浮在液体中的微粒的大小及液体的温度有关

答案 CD

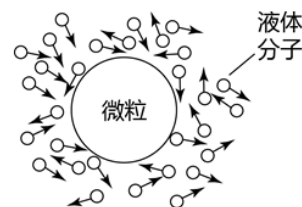


解析

- A．图中记录的不是某个花粉颗粒的运动轨迹，故A错误；  
 B．布朗运动反应液体分子的无规则运动，故B错误；  
 C．布朗运动是由于液体分子的无规则运动而产生的现象，故C正确；  
 D．布朗运动是否明显与悬浮在液体中的微粒的大小及液体的温度有关，故D正确．  
 故选CD．

7

1827年英国植物学家布朗在显微镜下观察悬浮在水中的花粉时，发现花粉微粒的运动是极不规则的，如图所示描绘了一颗花粉微粒受到周围液体分子撞击的情景，以下关于花粉微粒运动的说法中正确的是（ ）



- A. 花粉微粒的运动是花粉自发的运动  
 B. 花粉微粒越大，运动的不规则性越明显  
 C. 花粉微粒的无规则运动，反映了液体分子的无规则运动  
 D. 花粉微粒越大，液体分子撞击作用下不平衡性表现得越明显

答案 C

解析

- A．布朗运动是指悬浮在液体中花粉颗粒的无规则运动，是因为液体分子对花粉微粒的碰撞时冲力不平衡导致的，故A错误；  
 B．颗粒越小，温度越高，运动得越明显，故B错误；  
 C．布朗运动不是液体的无规则运动，反映了液体的无规则运动，故C正确；  
 D．花粉颗粒越大越不明显，故D错误．  
 故选C．

## 二、温度和温标

### 1. 温度的确立



温度是描述热现象时所特有的概念之一。初中物理和日常生活中用温度表示物体的冷热程度，这是对温度的最通俗的理解。但是，凭人的主观冷热感觉来判断物体温度的高低是不准确的，甚至可能产生错误。例如，数九寒天在室外用手触摸铁器和木柄，会感觉前者比后者冷，其实二者的温度是一样的；早在1690年，英国人洛克就曾做过一个实验。他先将左手放入热水中，右手放入冷水中，然后再将两手都放在同一温水中，两只手的感觉是不同的。左手感到温水是凉的，右手感到温水是热的。可见要正确地、定量地表示出物体的温度，必须对温度的概念给出科学的定义，对温度的测量给出客观的依据。

为此我们先定义平衡态。在没有外界影响的情况，热力学系统经过足够长的一段时间后，总要达到一个确定的状态，其宏观性质不再发生变化。这种在没有外界影响的情况下，系统的宏观性质不随时间变化的状态叫做**平衡态**。

设有两个热力学系统，原来各处在一一定的平衡态。在没有外界影响的情况下，让这两个系统互相接触，使它们之间能发生热传递。实验表明，两个系统的状态都将发生变化，热的变冷、冷的变热。但经过一段时间后，两个系统的状态不再变化。这表明两个系统最后对热传递来说已达到平衡，这种平衡叫做**热平衡**。当两个物体达到热平衡后，我们直觉地认为它们是同样冷热的。

现在进一步研究A、B、C三个热力学系统。先将A和B互相隔绝，不使其发生热接触，但使它们同时与C热接触。经过一段时间后，C和A以及C和B都将达到热平衡。这时如果将A和B与C隔开，不再使其热接触，而让A和B热接触，则从实验中可以发现，A和B的状态都不发生变化。这表明，此时A和B也是处于热平衡的。由此我们得出结论：如果两个热力学系统分别与第三个热力学系统处于热平衡，则这两个系统彼此也必定处于热平衡。这个结论称为**热力学第零定律**。粗看起来，这似乎是理所当然的，其实不然，它的真实性必须由实验来验证。

热力学第零定律反映出，处于同一热平衡状态的所有热力学系统都具有某一共同的宏观性质。我们把表征这种宏观性质的物理量就叫做温度，通常用字母 $T$ 表示。这也就是说，**温度是决定一个系统是否与其他系统处于热平衡的物理量**。反过来说，当两个或多个系统处于热平衡时，它们的温度具有相同的量值。

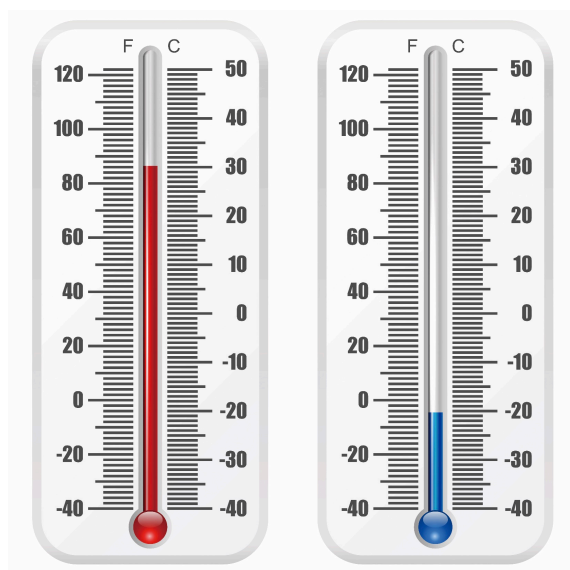
## 2. 温标

根据热力学第零定律，人们可以使具有确定初始状态的第三个物体C（设想中的温度计）与两物体A、B分别进行热接触，来判定物体A、B是否处于热平衡，即判定它们的温度是否相同。如果不同，人们还可以根据C的变化区分A、B温度的高低。但仅这样并不能确定它们温度的具体数值。为能够给出温度的具体数值，还需要有标定数值的方法。温度的数值表示的方法称为**温标**。常用的温标有摄氏温标和热

力学温标。

## 摄氏温标

将内径均匀的细玻璃管与充满水银的玻璃泡相连接，抽出其中的空气。在1标准大气压下,把小玻璃泡浸没在冰、水混合物中，将此时水银面在管中的高度记为 $0^{\circ}\text{C}$ ，读为零摄氏度。再把小玻璃泡浸没在沸腾的水中，泡内水银受热后体积膨胀，管内的水银柱升高。我们把这时水银面的高度记为 $100^{\circ}\text{C}$ ，读作100摄氏度。然后把玻璃管上这两点之间的长度等分为100份，每1份就代表1摄氏度的温度差。这就制成了水银摄氏温度计，相应的温度数值表示法就叫摄氏温标。



## 热力学温标

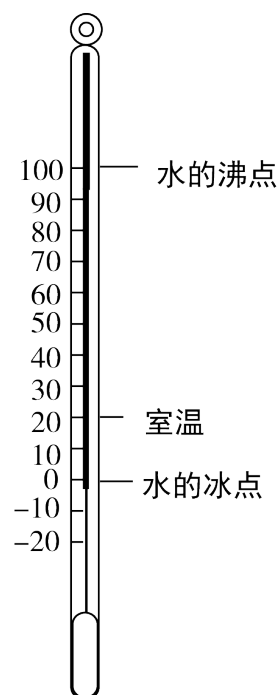
1848年，英国物理学家开尔文从理论上建立了一种不依赖于任何测温物质及测温属性的温标，称为热力学温标或绝对温标，由它所确定的温度叫做热力学温度或绝对温度，用字母 $T$ 表示，单位称为“开尔文”简称“开”，以字母 $\text{K}$ 代表。热力学温标的建立实际上来源于气体体积不变时，压强随温度的变化性质。绝对零度对应的是气体压强为0时的温度，是一个理论上的温度值。

1960年，国际计量大会确定了摄氏温标与热力学温标的关系：摄氏温标由热力学温标导出，摄氏温标所确定的温度用 $t$ 表示，它与热力学温度 $T$ 的关系是

$$t = T - 273.15$$

### 例题精讲

8 摄氏温标：在1954年以前，标准温度的间隔是用两个定点确定的．它们是水在标准大气压下的沸点（汽化点）和冰在标准大气压下与空气饱和的水相平衡时的熔点（冰点）．摄氏温标（以前称为百分温标）是由瑞典天文学家A·摄尔修斯设计的．如图所示，以冰点定作 $0^{\circ}\text{C}$ ，汽化点定作 $100^{\circ}\text{C}$ ，因此在这两个固定点之间共为 $100^{\circ}\text{C}$ ，即一百等份，每等份代表1度，用 $1^{\circ}\text{C}$ 表示．用摄氏温标表示的温度叫做摄氏温度．摄氏温标用度作单位，常用 $t$ 表示．热力学温标由英国科学家威廉·汤姆逊（开尔文）创立，把 $-273^{\circ}\text{C}$ 作为零度的温标，叫做热力学温标（或绝对温标）．热力学温标用 $\text{K}$ 表示单位，常用 $T$ 表示．试回答：如图是一般实验室里常用的一种摄氏温度计：



- (1) 热力学温标与摄氏温标之间的关系为：\_\_\_\_\_．
- (2) 如果可以粗略地取 $-273^{\circ}\text{C}$ 为绝对零度，在一标准大气压下，冰的熔点为 \_\_\_\_\_ $^{\circ}\text{C}$ ，即为 \_\_\_\_\_  $\text{K}$ ，水的沸点是 \_\_\_\_\_ $^{\circ}\text{C}$ ，即 \_\_\_\_\_  $\text{K}$ ．
- (3) 如果物体的温度升高 $1^{\circ}\text{C}$ ，那么，物体的温度将升高 \_\_\_\_\_  $\text{K}$ ．

答案

(1)  $T = t + 273.15\text{K}$

(2) 1 . 0

2 . 273

3 . 100

4 . 373

(3) 1

解析

(1) 摄氏温标冰点温度为 $0^{\circ}\text{C}$ ，汽化点温度作为 $100^{\circ}\text{C}$ ，且用 $t$ 表示；而热力学温标是把 $-273.15^{\circ}\text{C}$ 作为 $0\text{K}$ 的，用 $\text{K}$ 表示，所以热力学温标与摄氏温标之间的关系为

$$T = t + 273.15\text{K}.$$

故答案为： $T = t + 273.15\text{K}$ 。

(2) 如果取 $-273^{\circ}\text{C}$ 为绝对零度，则 $T$ 与 $t$ 的关系为 $T = t + 273\text{K}$ ，显然，在一标准大气压下，冰的熔点为 $0^{\circ}\text{C}$ ，即为 $273\text{K}$ ；水的沸点是 $100^{\circ}\text{C}$ ，即为 $373\text{K}$ 。

故答案为： $0$ ； $273$ ； $100$ ， $373$ 。

(3) 因 $T = t + 273.15\text{K}$ ，所以当 $t$ 由 $1^{\circ}\text{C}$ 增加到 $2^{\circ}\text{C}$ 时， $T$ 就由 $1 + 273.15\text{K} = 274.15\text{K}$ 增加到 $2 + 273.15\text{K} = 275.15\text{K}$ ，显然物体的温度升高了 $1^{\circ}\text{C}$ ，温度升高了 $1\text{K}$ 。

故答案为： $1$ 。

### 三、系统的内能

#### 1. 内能

首先，内能不同于机械能。例如密闭容器中的水蒸气，当温度改变时，从宏观上看，由于水蒸气整体并没有做机械运动，所以其机械能没有改变。但温度变化时，这一系统要释放或吸收热量，说明系统的能量发生了变化，这一部分能量就是内能。

其次，物质的状态改变时，其内能也发生改变。在水蒸气凝结成水的过程中，或水凝结成冰的过程中，虽然温度没有变化，但都要释放热量，说明物态变化也会引起内能的改变。

另外，外界对系统做功，或系统对外界做功，其内能也会发生改变。例如气缸中的气体，被压缩后温度升高，就是活塞对气体做功而使气体内能增加的结果；反之，气体膨胀，推动活塞对外做功，其内能就降低。

需要指出的是，在某些没有物态改变和温度改变的情况下，系统的内能也会发生改变。例如，原子跃迁发光，对外释放能量，同时，原子中电子的状态改变，其内能也改变。

但是，在热力学范围内，往往只涉及原子、分子热运动状态的变化和分子间结合的变化，所以，从微观上看，**系统的内能仅仅包含分子的动能和分子间结合的势能。**

#### 2. 分子动能

对于气体，其内能仅仅包括动能，而分子间的势能可以忽略。若是单原子分子，仅仅有平动动能；若是多原子分子，分子中的原子之间有振动，整个分子作为一个整体还有转动，所以多原子分子气体，除了平动能量之外，还有振动能量和转动能量。**气体的温度升高，分子平动的速度、振动的振幅和转动的角速度都要增大，从而动能相应地增大。**

对于液体，由于分子之间的距离较小，有一定的相互作用，所以与气体相比，分子的动能要小一些。

在固体中，原子都被束缚在平衡位置附近，因而没有平动和转动，只有振动。

### 例题精讲

9 下列关于分子的动能的说法中，正确的是（ ）

- A. 物体温度升高，每个分子的动能都增加
- B. 物体温度升高，分子的总动能增大
- C. 高温物体的分子动能，一定大于低温物体的分子动能
- D. 高温物体的分子运动平均速率一定大于低温物体的分子运动平均速率
- E. 如果分子的质量为 $m$ ，平均速率为 $v$ ，则其平均动能为 $\frac{1}{2}mv^2$
- F. 分子的平均动能等于物体内所有分子的动能之和与所有分子的总数之比

答案 BF

解析 ABC. 物体温度升高，分子的平均动能增加，但是不见得每个分子动能都增加，故AC错误，B正确；

D. 高温物体的分子的平均速率大于低温物体的平均动能， $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ ， $E_k$ 大， $v$ 不一定大，故D错误；

EF. 分子的平均动能等于物体内部所有分子的内能之和与所有分子总数的比值：

$$\overline{E_k} = \frac{\frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2}mv_2^2 + \cdots + \frac{1}{2}mv_n^2}{n}, \text{ E错误, F正确.}$$

故选BF.

### 照猫画虎

10 下列说法中正确的是（ ）

- A. 物体温度降低，其分子热运动的平均动能增大
- B. 物体温度升高，其分子热运动的平均动能增大
- C. 物体温度降低，其内能一定增大
- D. 物体温度不变，其内能一定不变

答案 B

**解析** A、B. 温度是分子热运动平均动能的宏观标志，物体温度升高，分子热运动平均动能增大，反之减小，故A错误，B正确；

C、D. 改变内能的方式有做功和热传递，温度的变化只能改变分子动能，是否做功不确定，所以内能的变化不确定，故C、D错误。

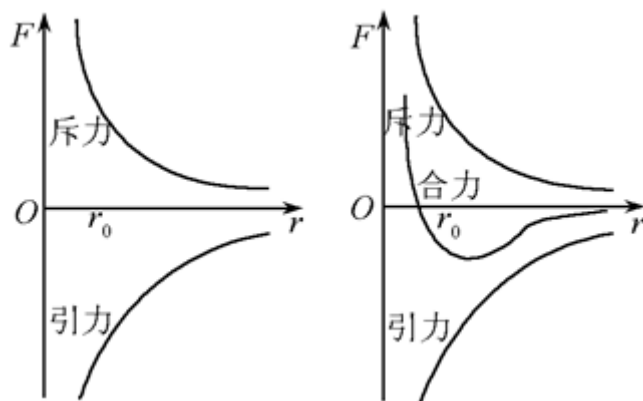
故选B。

### 3. 分子间作用力

气体很容易被压缩，说明气体分子间存在着很大的空隙。水和酒精混合后总体积会减小，说明液体分子间存在着空隙。压在一起的金片和铅片，各自的分子能扩散到对方的内部，说明固体分子间也存在着空隙。

分子间虽然有空隙，大量分子却能聚集在一起形成固体或液体，说明分子之间存在着引力；用力压缩物体，物体内会产生反抗压缩的弹力，说明分子间还存在着斥力。

- ① 分子间同时存在引力和斥力，实际表现的分子力是它们的合力。
- ② 分子力特点：引力和斥力都随着距离的增大而减小；斥力比引力减小得快。



作用力随分子间距的变化规律

- ①  $r < r_0$  时表现为斥力；
- ②  $r = r_0$  时分子力为零；
- ③  $r > r_0$  时表现为引力；
- ④  $r > 10r_0$  以后，分子力变得十分微弱，可以忽略不计。

因此我们在处理气体分子时，由于分子间的距离很大，所以我们一般忽略分子间的作用力。

### 例题精讲

11 分子间同时存在吸引力和排斥力，下列说法正确的是（ ）

- A. 固体分子间的吸引力总是大于排斥力
- B. 气体分子能充满任何容器是因为分子间的排斥力大于吸引力
- C. 分子间的吸引力和排斥力都随分子间距离的增大而减小
- D. 分子间的吸引力随分子间距离的增大而增大，而排斥力随距离的增大而减小

答案 C

解析 A. 固体分子间也满足根据分子力与分子间距离的关系，故A错误；  
B. 是因为气体分子做无规则热运动，故B错误；  
CD. 根据分子力与分子间距离的关系可得答案，C对D错。  
故选C。

### 照猫画虎

12 将橡皮筋拉伸时，橡皮筋内分子间的（ ）

- A. 引力增大，斥力减小
- B. 斥力增大，引力减小
- C. 引力和斥力都增大
- D. 引力和斥力都减小

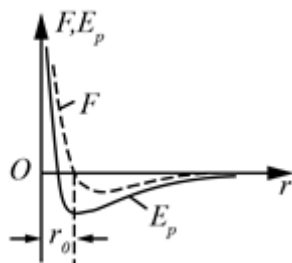
答案 D

解析 分子间的引力和斥力都是随着分子间距离增大而减小。  
故选D。



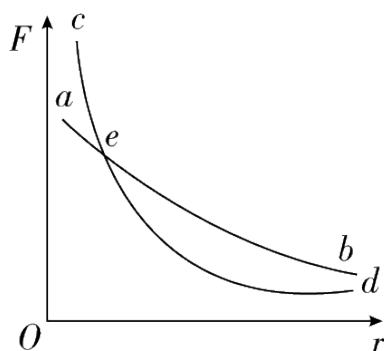
## 4. 分子势能

分子间的作用力主要是静电作用力，所以势能主要是库仑势能，而库仑势能取决于分子间的距离。实验研究表明，分子间既有吸引力，也有排斥力。分子在平衡位置时，吸引力与排斥力平衡，分子间的势能最小，分子间的结合能最大，这时分子间的距离称作平衡距离。排斥力随距离变化的幅度比吸引力要大得多，如果分子间的距离大于平衡距离，排斥力随分子间的距离增大迅速减小，分子间的作用以引力为主，则势能随距离的增大而增大；如果分子间的距离小于平衡距离，排斥力随分子间的距离减小迅速增大，则势能随着距离的减小而迅速增大。分子间的势能以及相互作用力与距离的关系可以用图示表示。



### 例题精讲

- 13 如图所示，纵坐标表示两个分间引力、斥力的大小，横坐标表示两个分子的距离，图中两条曲线分别表示两分子间引力、斥力的大小随分子间距离的变化关系， $e$ 为两曲线的交点，则下列说法正确的是（ ）



- A.  $ab$ 为斥力曲线， $cd$ 为引力曲线， $e$ 点横坐标的数量级为 $10^{-10}\text{m}$
- B.  $ab$ 为引力曲线， $cd$ 为斥力曲线， $e$ 点横坐标的数量级为 $10^{-10}\text{m}$
- C. 若两个分子间距离大于 $e$ 点的横坐标，则分子间作用力表现为斥力
- D. 若两个分子间距离越来越大，则分子势能亦越大

答案 B

**解析** 在  $F-r$  图象中，随着距离的增大斥力比引力变化的快，所以  $ab$  为引力曲线， $cd$  为斥力曲线，当分子间的距离等于分子直径数量级时，引力等于斥力。当分子间的距离小于  $r_0$  时，当距离增大时，分子力做正功，分子势能减小，故 A、C、D 错误，B 正确。  
故选 B。

### 照猫画虎

- 14 两个相距较远的分子仅在分子力作用下由静止开始运动，直至不再靠近。在此过程中，下列说法正确的是（ ）
- A. 分子力先增大，后一直减小
  - B. 分子力先做正功，后做负功
  - C. 分子动能先增大，后减小
  - D. 分子势能先增大，后减小
  - E. 分子势能和动能之和不变

答案 BCE

**解析** A. 由分子力随分子间距离变化关系分析知，分子力先增大，然后减小，再增大，故 A 错误；  
BC. 分子从相距很远处开始运动，则  $r > r_0$  时合力为引力，力和位移的夹角小于  $90^\circ$ ，分子力做正功，分子动能大。 $r > r_0$  时合力为斥力，力和位移的夹角大于  $90^\circ$ ，分子力做负功，分子动能减小，故 BC 正确；  
D. 由分子力做功与分子势能变化关系知，分子势能先减小，后增大，故 D 错误；  
E. 分子仅在分子力作用下运动，只有分子力做功，分子势能和动能之间相互转化，分子势能和动能之和不变，故 E 正确。  
故选 BCE。

## 四、理想气体微观模型

### 1. 理想气体的性质

**理想气体**是一种用来模拟真实气体的物理模型。只有当气体很稀薄，才能将其近似地看做理想气体。但是在一般温度不太低、压强不太高的情况下，甚至是常温常压下，真实气体的行为可以用理想气体模型很好地解释，所以研究理想气体非常有意义，我们在后续章节中将会详细介绍理想气体的宏观性质，这里只是就理想气体的微观性质进行分析。这里对于构成理想气体的“分子”做一些简单说明：

**(1) 构成理想气体的微粒永不停息地在做无规则运动，运动过程中遵循牛顿运动定律。**

这些微粒可能是单原子，也可能是一组原子，在这两种情况下我们都称这些微粒为“分子”。分子会沿任意方向运动，速度的大小也各不相同。

**(2) 分子的总量是非常庞大的。**

当一个分子在运动过程中被容器壁反弹回来，分子就向容器施加了一个力。如果我们假设分子的数量非常大，那么容器内任意位置单位面积上所受的力基本相同。

**(3) 相比于气体占据的体积来说，气体分子本身占据的体积非常小，几乎可以忽略不计。**

我们知道当气体凝聚成液体时（例如降温液化的过程），液体的体积比气体的体积小得多，说明分子本身的体积非常小。宏观上测量出的气体的体积，是大量无规则运动的气体分子占据的空间，而不是每个分子体积之和。

**(4) 除了碰撞瞬间（包括分子与容器碰撞、分子间相互碰撞），分子不受任何外力。**

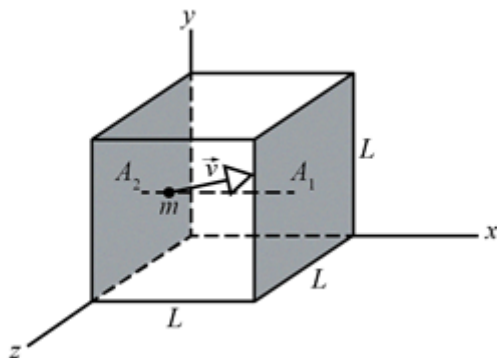
这就意味着理想气体模型将气体分子看做一个体积可以忽略不计的刚球。如果我们追踪一个气体分子，它将沿一条“之”字形的路线前进，在每一条直线段分子做匀速直线运动，在拐弯处分子受到一个碰撞的冲量。

**(5) 所有碰撞都是弹性碰撞，而且忽略碰撞时间。**

弹性碰撞说明分子的总动能是一个定值，忽略碰撞时间说明不需要考虑分子动能和势能转化的过程，也就是说分子的总势能可以忽略不计。

## 2. 理想气体压强的微观机制

理想气体分子的压强产生的原因是什么呢？如果将理想气体分子考虑成微小的粒子，这些颗粒与容器壁发生撞击产生的冲击其实就是压强产生的本源。这个想法最早是由瑞士物理学家伯努利在1738年提出的。在后续内容中，我们将以理想气体为研究对象，并且设法将宏观压强 $p$ 与微观分子的行为表示出来。



考虑一个边长为 $L$ 的正方体容器中装有 $N$ 个理想气体分子，如图所示建立空间直角坐标系。为了分析问题方便，我们将正方体右侧的内表面称为 $A_1$ ，左侧内表面称为 $A_2$ ，显然两个表面的面积都为 $L^2$ 。我们取某一个质量为 $m$ 的分子为研究对象，它的速度矢量 $\vec{v}$ 可以用直角坐标系的三个分量 $v_x$ 、 $v_y$ 、 $v_z$ 来表示。当此分子与容器壁 $A_1$ 发生碰撞，由于这是一个弹性碰撞，所以它速度的 $x$ 分量将反向（即 $v_x$ 变为 $-v_x$ ），而速度的 $y$ 、 $z$ 分量（ $v_y$ 、 $v_z$ ）将保持不变。那么，分子在碰撞过程中动量改变量为

$$|\Delta \vec{p}| = m |\Delta \vec{v}| = m |\Delta v_x| = m |(-v_x) - v_x| = 2mv_x$$

也就是说容器壁 $A_1$ 对分子施加了一个大小为 $2mv_x$ 的冲量。由于力的作用是相互的，所以在碰撞过程中此分子对容器壁的冲量大小也为 $2mv_x$ 。

如果继续追踪这个分子，并且假设这个分子与其他分子不发生任何碰撞，那么在经历时间 $L/v_x$ 后，分子会与左侧 $A_2$ 面发生碰撞，从而使得 $v_x$ 再次发生反向。再经历时间 $L/v_x$ 后，此分子将会回到 $A_1$ 面，并且再次与 $A_1$ 面发生碰撞。显然同一个表面两次受到碰撞的时间间隔为 $2L/v_x$ ，那么容器壁 $A_1$ 受到的平均作用力大小为

$$F_x = \frac{I_x}{\Delta t} = \frac{2mv_x}{2L/v_x} = \frac{mv_x^2}{L}$$

这是对一个分子而言的，如果要计算 $A_1$ 面受到的合力，应该将 $N$ 个分子的作用力相加，即

$$(F_x)_{total} = F_{1x} + F_{2x} + \cdots = \frac{mv_{1x}^2}{L} + \frac{mv_{2x}^2}{L} + \cdots = \frac{m}{L} (v_{1x}^2 + v_{2x}^2 + \cdots)$$

也就是说，从统计效果来看， $A_1$ 受到的气体压强为

$$p = \frac{(F_x)_{total}}{L^2} = \frac{m}{L^3} (v_{1x}^2 + v_{2x}^2 + \cdots)$$

对于任何一个分子，总有 $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$ 。因为有大量分子，而且分子的运动方向是完全随机的，所以从统计意义上来说，每个分子的运动平均速度是相似的，且分子在三维空间中三个方向是等价的， $v_x^2$ 、 $v_y^2$ 、 $v_z^2$ 的平均值是相等的，也就是说 $(v_x^2)_{av} = (v_y^2)_{av} = (v_z^2)_{av} = (v^2)_{av}/3$ 。再引入分子数密度 $n = \frac{N}{l^3}$ ，得到理想气体的压强表达式：

$$p = \frac{1}{3} nm (v^2)_{av}$$

我们还可以利用单个气体分子的平均动能 $\bar{\epsilon}_k = \frac{1}{2} m (v^2)_{av}$ 来改写上式：

$$p = \frac{2}{3} n \overline{\epsilon_k}$$

在上述推导过程中，我们忽略了分子间相互碰撞。但是即使考虑分子间碰撞上述结果也是正确的。因为完全相同的分子间发生弹性正碰撞会使得它们的速度发生交换，也就是说有另一个分子代替原来的分子撞向容器壁，所以容器壁受到的总冲量保持不变。而且，由于理想气体不考虑碰撞的时间，所以容器受到冲量的时间间隔依旧相同，所以容器壁受力并不会改变。

此外，在上述推导中我们选取的是一个正方体容器，但是公式中并没有包含描述容器形状和大小的物理量，说明对于任意形状的容器上述公式都适用。同理，上述公式中虽然计算的是面 $A_1$ 受到的气体压强，但是根据帕斯卡原理，只要气体密度是均匀分布，那么容器中任意位置向各个方向的压强都相等，所以容器内任意一点气体压强都可以用上述公式计算。

### 方均根速率（选读）

如果我们用宏观的气体的密度 $\rho$ 来表述气体压强，那么由于 $N$ 个分子的总质量为 $Nm$ ，不难得到气体的密度 $\rho = Nm/L^3 = nm$ ，上式即可改写为

$$p = \frac{1}{3} \rho (\overline{v^2})_{av}$$

在测量分子平均速率时，有一个非常重要的物理量——**方均根速率** $v_{rms}$ ，它被定义为分子速率平方平均值的平方根。根据前面关系式，不难得到：

$$v_{rms} = \sqrt{(\overline{v^2})_{av}} = \sqrt{\frac{3p}{\rho}}$$

可见，宏观物理量与微观物理量的平均值是相互联系的。

下表给出了一些常见气体分子在室温下的方均根速率。这里需要注意的是， $v_{rms}$ 描述的是分子在两次碰撞间运动的速率，但是不同于宏观分子的扩散的速度。由于分子是沿“之”字形前进的，所以它会不断转向甚至转圈，从而使得气体分子沿着任意方向的平均速度都不会太快，从而使得扩散速度比方均根速率小得多。举例来说，当你打开一瓶香水，香水分子运动的速率会达到几百米每秒，但是香味扩散到整个房间却需要很久，这还是在空气存在对流的情况，如果没有对流扩散的时间会更长。

表2.1 室温（300K）分子速率		
气体	分子质量 $m$ (u)	$v_{rms}$ (m/s)
氢气	2.0	1920
氦气	4.0	1370
水蒸气	78.0	645
氮气	28.0	517

氧气	32.0	483
二氧化碳	44.0	412
二氧化硫	64.1	342

### 例题精讲

15 某容器内单位体积内分子数为 $10^{26} \text{ m}^{-3}$ ，每个分子的质量为 $3 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，设其中 $\frac{1}{6}$ 分子数以速率 $v = 200 \text{ m/s}$ 垂直地向容器的一壁运动，而其余 $\frac{5}{6}$ 分子或者离开此壁、或者平行此壁方向运动，且分子与容器壁的碰撞为完全弹性。则

- (1) 每个分子作用于器壁的冲量大小。
- (2) 每秒碰在器壁单位面积上的分子数。
- (3) 作用在器壁上的压强。

### 答案

- (1)  $1.2 \times 10^{-24} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$
- (2)  $3.33 \times 10^{27} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- (3)  $4 \times 10^3 \text{ Pa}$

### 解析

- (1) 分子作用于容器壁的冲量应该等于分子动量的改变量，

$$I = \Delta p = 2mv = 2 \times (3 \times 10^{-27} \text{ kg}) \times (200 \text{ m/s}) = 1.2 \times 10^{-24} \text{ kg} \cdot \text{m/s} .$$

故答案为： $1.2 \times 10^{-24} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ 。

- (2) 每秒碰在容器壁单位面积上的分子数为

$$n_0 = \frac{N}{St} = \frac{1}{6} \frac{N}{SL} \frac{L}{t} = \frac{1}{6} nv = \frac{1}{6} \times (10^{26} \text{ m}^{-3}) \times (200 \text{ m/s}) = 3.33 \times 10^{27} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} .$$

故答案为： $3.33 \times 10^{27} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

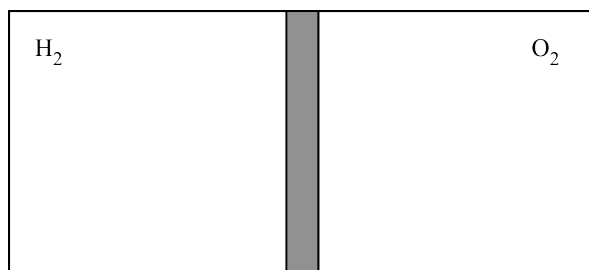
- (3) 作用在容器壁上压强为 $p = In_0 = (1.2 \times 10^{-24} \text{ kg} \cdot \text{m/s}) \times (3.33 \times 10^{27} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}) = 4 \times 10^3 \text{ Pa}$

.

故答案为： $4 \times 10^3 \text{ Pa}$ 。

### 进阶拓展

- 16 如图所示，分子筛（打了很多小孔，刚好能使气体分子通过的活塞）将密闭容器分成两部分，左边充有 $\text{H}_2$ ，右边充有 $\text{O}_2$ ，不计一切摩擦。初始时，两边气体压强、单位体积内的分子数相同，经过一段时间后，活塞将向哪边移动。



**答案** 向左侧移动

**解析** 初始时，两边气体压强 $p$ 、单位体积的分子数 $n$ 相同，由压强的微观表达式 $p = \frac{2}{3}n\bar{\epsilon}$ 可知，分子平均动能相同，由于 $\text{H}_2$ 分子质量较小，因此 $\text{H}_2$ 分子平均速率较大，通过分子筛扩散较快，因此，经过一段时间后，右侧分子数密度将大于左侧分子数密度，即右侧气体压强增大，分子筛将向左侧移动。

故答案为：向左侧移动。

## 五、理想气体实验定律

容器内装有一定质量的气体，我们可以用体积描述气体的状态，但这是不够的，因为容器内气体的体积会随温度和压强的改变而变化。所以，一定质量气体的状态应当用**体积**、**温度**、**压强**等物理量来描述。

### 1. 玻意耳定律

**1. 玻意耳定律：**一定质量的气体在温度不变时，它的压强与体积成反比

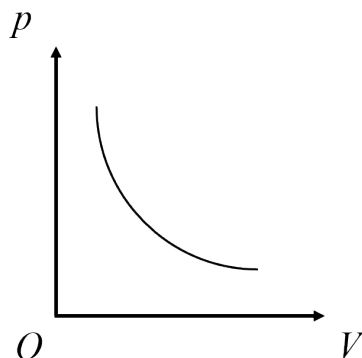
$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}$$

或写成

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

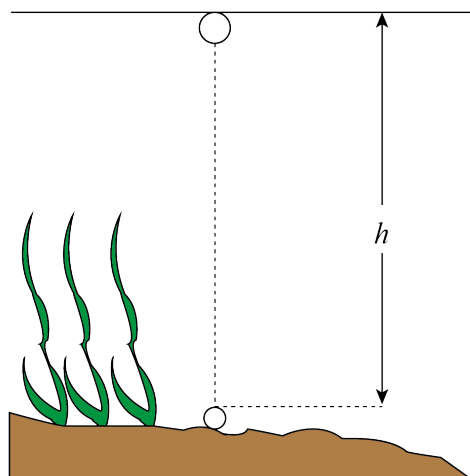
**2. 等温线：**在平面直角坐标系中，纵轴表示压强 $p$ ，横轴表示体积 $V$ 。 $p$ 与 $V$ 的函数图像是一条双曲线，如题所示。这种表示等温过程的 $p - V$ 图像叫做等温线。





例题精讲

- 17 一个体积为 $V$ 的沼气泡自池塘底浮起，如图所示．若水深为 $3\text{m}$ ，沼气泡从池底上升到水面时，它的体积将变为原来的多少倍．（设水底和水面温度相同，大气压强 $p_0 = 1.0 \times 10^5 \text{Pa}$ ，水的密度 $\rho = 1.0 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ ）



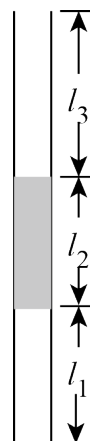
答案 1.29

解析 在池底时，气泡内部气体压强 $p_1 = p_0 + \rho gh$ ，体积 $V_1 = V$ ；当气泡浮到水面后，气体压强 $p_2 = p_0$ ，体积为 $V_2$ ．根据玻意耳定律 $p_1 V_1 = p_2 V_2$ ．

$$\begin{aligned} \text{所以, } V_2 &= \frac{p_1 V_1}{p_2} = \frac{(p_0 + \rho gh)V}{p_0} \\ &= \frac{(1.0 \times 10^5 + 1.0 \times 10^3 \times 9.8 \times 3)}{1.0 \times 10^5} V \approx 1.29V . \end{aligned}$$

- 18 如图，一上端开口、下端封闭的细长玻璃管竖直放置．玻璃管的下部封有长 $l_1 = 25.0\text{cm}$ 的空气柱，中间有一段长 $l_2 = 25.0\text{cm}$ 的水银柱，上部空气柱的长度 $l_3 = 40.0\text{cm}$ ．已知大气压强为

$p_0 = 75.0\text{cmHg}$  . 现将一活塞 ( 图中未画出 ) 从玻璃管开口处缓慢往下推 , 使管下部空气柱长度变为  $l'_1 = 20.0\text{cm}$  . 假设活塞下推过程中没有漏气 , 求活塞下推的距离 .

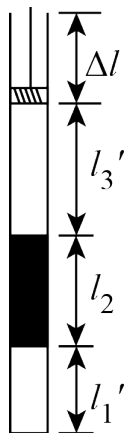


**答案**  $\Delta l = 15.0\text{cm}$

**解析** 以  $\text{cmHg}$  为压强单位 . 在活塞下推时 , 玻璃管下部空气柱的压强为  $p_1 = p_0 + l_2$  ①

设活塞下推后 , 下部空气柱的压强为  $p'_1$  , 由玻意耳定律得  $p_1 l_1 = p'_1 l'_1$  ②

如图 , 设活塞下推距离为  $\Delta l$  , 则此时玻璃管上部空气柱的长度为  $l'_3 = l_3 + l_1 - l'_1 - \Delta l$  ③

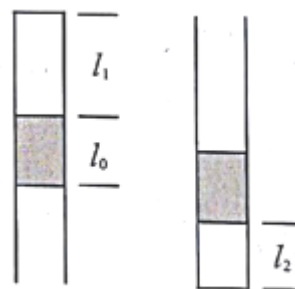


设此时玻璃管上部空气柱的压强为  $p'_3$  , 则  $p'_3 = p'_1 - l_2$  ④

由玻意耳定律得  $p_0 l_3 = p'_3 l'_3$  ⑤

由①至⑤式及题给数据解得  $\Delta l = 15.0\text{cm}$

- 19 如图所示导热U形管中封有长度为  $l_0$  的水银柱 , 当U形管开口向下时 , 其中空气柱长度为  $l_1$  ; 当U形管开口向上是 , 空气柱长度为  $l_2$  . 试求  $\frac{l_1}{l_2}$  .



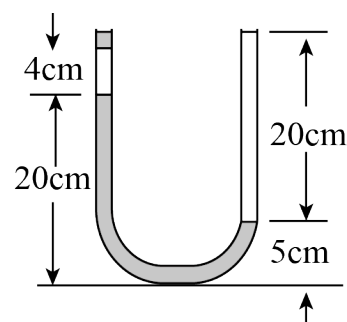
**答案**  $\frac{76 + l_0}{76 - l_0}$

**解析** 大气压  $P_0 = 76\text{cmHg}$  . 对于空气柱 , 有  $PV = \text{Const}$  ,

$$(76 - l_0) \cdot l_1 = (76 + l_0) \cdot l_2 ,$$

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{76 + l_0}{76 - l_0} .$$

- 20 一内壁光滑、粗细均匀的U形玻璃管竖直放置，左端开口，右端封闭，左端上部有一轻活塞．初始时，管内水银柱及空气柱长度如图所示．已知大气压强  $p_0 = 75\text{cmHg}$ ，环境温度不变．



- (1) 求右侧封闭气体的压强  $p_{\text{右}}$  .
- (2) 现用力向下缓慢推活塞，直至管内两边水银柱高度相等并达到稳定，求此时右侧封闭气体的压强  $p_{\text{右}}'$  .
- (3) 求第 (2) 问中活塞下移的距离  $x$  .

**答案**

- (1)  $90\text{cmHg}$
- (2)  $144\text{cmHg}$
- (3)  $9.42\text{cm}$

**解析** (1) 方法一：  $p_{\text{右}} = p_{\text{左}} + \rho gh = p_0 + \rho gh = 75 + (20 - 5) = 90\text{cmHg}$  .

方法二：以管内水银柱为研究对象，则有：

$$P_{\text{右}} = P_0 + P_h = 75 + 20 - 5 \text{cmHg} = 90 \text{cmHg} .$$

故答案为：90cmHg .

(2) 方法一：  $p_{\text{右}} = 90 \text{cmHg}$  ,  $V_{\text{右}} = Sl_{\text{右}}$  ,  $p_{\text{右}}' = ?$  ,  $V_{\text{右}}' = Sl_{\text{右}}'$  ;

$$l_{\text{右}} = 20 \text{cm} , l_{\text{右}}' = \left( 20 - \frac{20-5}{2} \right) = 12.5 \text{cm} , \text{根据 } p_{\text{右}} V_{\text{右}} = p_{\text{右}}' V_{\text{右}}' \text{ 可以解得}$$

$$p_{\text{右}}' = \frac{p_{\text{右}} V_{\text{右}}}{V_{\text{右}}'} = \frac{90 \times 20}{12.5} = 144 \text{cmHg} .$$

方法二：当两边的水银柱高度相等时，左边水银柱下降7.5cm，右边水银柱上升了

7.5cm，所以右侧封闭气体的高度变为12.5cm，则对于右边封闭的气体有：

$$P_{\text{右}} = 90 \text{cmHg} , V_{\text{右}} = 20s ; P_{\text{右}}' = ? , V_{\text{右}}' = 12.5s$$

根据玻意耳定律：  $P_{\text{右}} V_{\text{右}} = P_{\text{右}}' V_{\text{右}}'$

$$\text{所以： } P_{\text{右}}' = \frac{P_{\text{右}} V_{\text{右}}}{V_{\text{右}}'} = 144 \text{cmHg} .$$

故答案为：144cmHg .

(3) 方法一：  $p_{\text{左}} = 75 \text{cmHg}$  ,  $V_{\text{左}} = Sl_{\text{左}}$  ,  $p_{\text{左}}' = p_{\text{右}}' = 144 \text{cmHg}$  ,  $V_{\text{左}}' = Sl_{\text{左}}'$  ,  $l_{\text{左}} = 4 \text{cm}$  ,

$$l_{\text{左}}' = \left( 4 + \frac{20-5}{2} - x \right) \text{cm} ;$$

根据  $p_{\text{左}} V_{\text{左}} = p_{\text{左}}' V_{\text{左}}'$  , 可以解得  $l_{\text{左}}' \approx 2.08 \text{cm}$  ,  $x \approx 9.42 \text{cm}$  .

方法二：设当两边水银柱高度相等时左边水银柱的高度为  $h$  , 则此时，左右两边的封

闭气体的压强相等，所以则对于左边封闭的气体有：  $P_{\text{左}1} = 75 \text{cmHg}$  ,  $V_{\text{左}1} = 4s$  ,

$$P_{\text{左}2} = 144 \text{cmHg} , V_{\text{左}2} = hs$$

根据玻意耳定律：  $P_{\text{左}1} V_{\text{左}1} = P_{\text{左}2} V_{\text{左}2}$

$$\text{所以： } h = 2.083 \text{cm}$$

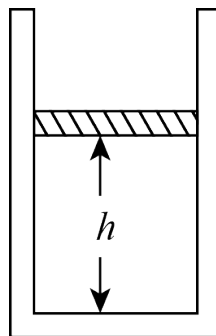
$$\text{则塞下降的距离： } x = 4 + 7.5 - 2.083 \text{cm} = 9.417 \text{cm} .$$

故答案为：9.417cm .

### 照猫画虎

- 21 一定质量的理想气体被活塞封闭在可导热的气缸内，活塞相对于底部的高度为  $h$ ，可沿气缸无摩擦地滑动．取一小盒沙子缓慢地倒在活塞的上表面上．沙子倒完时，活塞下降了  $\frac{h}{4}$ ．再取相同质量的一小盒沙子缓慢地倒在活塞的上表面上．外界大气的压强和温度始终保持不变，求此次沙子

倒完时活塞距气缸底部的高度。



**答案**  $\frac{3}{5}h$

**解析** 设大气和活塞对气体的总压强为 $p_0$ ，加一小盒沙子对气体产生的压强为 $p$ ，由玻马定律得：

$$p_0 h = (p_0 + p)(h - \frac{1}{4}h) \quad ①$$

$$\text{由①式得 } p = \frac{1}{3}p_0 \quad ②$$

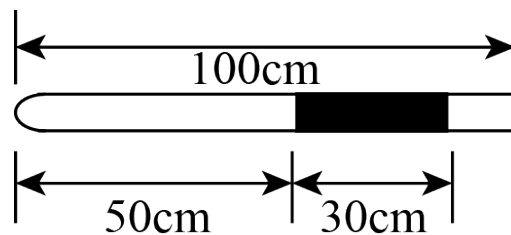
再加一小盒沙子后，气体的压强变为 $p_0 + 2p$ 。设第二次加沙子后，活塞的高度为 $h'$ ，由玻马

$$\text{定律得：} p_0 h = (p_0 + 2p)h' \quad ③$$

$$\text{联立②③式解得 } h' = \frac{3}{5}h .$$

故答案为： $\frac{3}{5}h$ 。

- 22 如图，长 $L = 100\text{cm}$ ，粗细均匀的玻璃管一端封闭。水平放置时，长 $L_0 = 50\text{cm}$ 的空气柱被水银封住，水银柱长 $h = 30\text{cm}$ 。将玻璃管缓慢地转到开口向下的竖直位置，然后竖直插入水银槽，插入后有 $\Delta h = 15\text{cm}$ 的水银柱进入玻璃管。设整个过程中温度始终保持不变，大气压强 $p_0 = 75\text{cmHg}$ 。求：



- (1) 插入水银槽后管内气体的压强 $p$ ；
- (2) 管口距水银槽液面的距离 $H$ 。

**答案** (1)  $p = p_0 L_0 / L' = 62.5\text{cmHg}$

(2)  $H = L - L' - h' = 27.5\text{cm}$

解析

(1) 设当转到竖直位置时，水银恰好未流出，管截面积为 $S$ ，此时气柱长 $l = 70\text{cm}$

由玻意耳定律：

$$p = p_0 L_0 / l = 53.6\text{cmHg} ,$$

由于 $p + \rho gh = 83.6\text{cmHg}$ ，大于 $p_0$ ，因此必有水银从管中流出，

设当管转至竖直位置时，管内此时水银柱长为 $x$ ，

由玻意耳定律：

$$p_0 S L_0 = (p_0 - \rho gh) S (L - x) ,$$

解得： $x = 25\text{cm}$ ，

设插入槽内后管内柱长为 $L'$ ，

$$L' = L - (x + \Delta h) = 60\text{cm} ,$$

由玻意耳定律，插入后压强

$$p = p_0 L_0 / L' = 62.5\text{cmHg} .$$

(2) 设管内外水银面高度差为 $h'$ ，

$$h' = 75 - 62.5 = 12.5\text{cm} ,$$

管口距槽内水银面距离

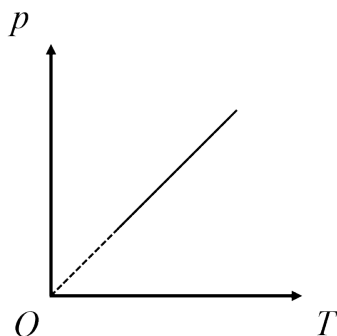
$$H = L - L' - h' = 27.5\text{cm} .$$

## 2. 查理定律

1. **查理定律**：一定质量的气体在体积不变时，它的压强与热力学温度成正比，即

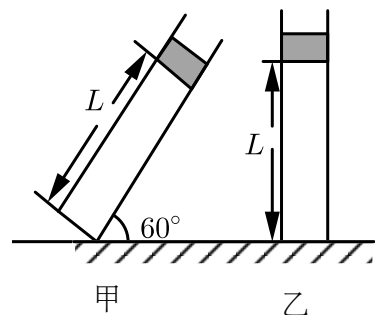
$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

2. **等容线**：在 $p - T$ 图中的等容图线是直线。在等容过程中，气体的压强与热力学温度呈线性关系。



例题精讲

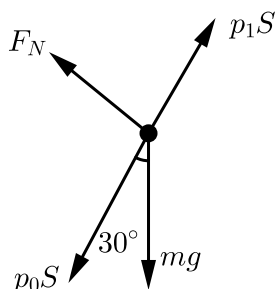
- 23 如图甲所示，汽缸内底部面积为 $0.002\text{m}^2$ ，被活塞封闭的汽缸内的空气温度为 $-5^\circ\text{C}$ ，活塞质量为 $8\text{kg}$ 当汽缸缸筒与水平面成 $60^\circ$ 角时，活塞距缸底为 $L$ ，现将汽缸直立放置如图乙所示，欲使活塞距缸底仍为 $L$ ，应使缸内气体摄氏温度升高到多少。（大气压强 $p_0 = 1.0 \times 10^5 \text{Pa}$ ， $g$ 取 $10\text{m/s}^2$ ， $\sqrt{3} \approx 1.7$ ）



答案  $7^\circ\text{C}$

解析 汽缸直立前，对活塞受力分析如图所示，则有 $mg \cos 30^\circ + p_0 S = p_1 S$ ，所以气体的压强为

$$p_1 = p_0 + \frac{mg \cos 30^\circ}{S} = 1.0 \times 10^5 \text{Pa} + \frac{8 \times 10 \times \frac{\sqrt{3}}{2}}{0.002} \text{Pa} = 1.34 \times 10^5 \text{Pa}$$



此时气体的温度为 $T_1 = (t_1 + 273)\text{K} = 268\text{K}$

汽缸直立后，对活塞受力分析如图所示，则有 $mg + p_0 S = p_2 S$



所以气体压强为 $p_2 = p_0 + \frac{mg}{S} = 1.0 \times 10^5 \text{Pa} + \frac{8 \times 10}{0.002} \text{Pa} = 1.4 \times 10^5 \text{Pa}$  .

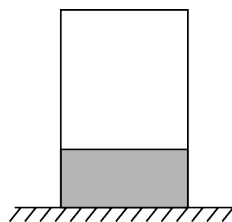
汽缸直立前后，要求气体体积不变，则由查理定律 $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$ ，解得 $T_2 = \frac{p_2}{p_1} T_1 = 280\text{K}$  .

所以汽缸直立后，气体的温度为 $t_2 = (T_2 - 273)^\circ\text{C} = 7^\circ\text{C}$  .



故答案为： $7^{\circ}\text{C}$  .

24 如图所示，圆柱形气缸质量  $M = 10\text{kg}$ ，倒置在水平粗糙地面上。气缸内封有一定质量的空气，缸壁厚度可不计。缸内光滑活塞的质量  $m = 5\text{kg}$ ，截面积  $S = 50\text{cm}^2$ 。当缸内气体温度为  $27^\circ\text{C}$  时，活塞与地面相接触，但对地恰无压力。当缸内气体温度是多少  $^\circ\text{C}$  时，气缸壁对地无压力？（大气压强  $p_0 = 1.0 \times 10^5\text{Pa}$ ）



答案 127

**解析** 当温度  $T_1 = 273 + 27 = 300\text{K}$  时, 活塞对地无压力, 列平衡方程  $p_1 S + mg = p_0 S$ , 解得此状态缸内气体的压强  $p_1 = p_0 - \frac{mg}{S} = 10^5 - \frac{5 \times 10}{50 \times 10^{-4}} = 0.9 \times 10^5 (\text{Pa})$ .

若温度升高，气体压强增大，气缸恰对地面无压力，列平衡方程  $p_2 S = p_0 S + Mg$ ，

$$\text{解得 } p_2 = p_0 + \frac{Mg}{S} = 10^5 + \frac{10 \times 10}{50 \times 10^{-4}} = 1.2 \times 10^5 (\text{Pa}) .$$

根据查理定律  $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$ ,  $\frac{0.9 \times 10^5}{300} = \frac{1.2 \times 10^5}{273 + t}$ , 得  $t = 127$ .

25 水平放置、粗细均匀、两侧者封闭的细长玻璃管中，有一段水银柱将管中气体分为两部分，如图所示，左边气体体积小于右边气体体积，将玻璃管温度均匀升高的过程中，水银柱将（ ）



- A. 向右移动                      B. 向左移动
- C. 始终不动                      D. 以上三种情况都有可能

答案 C

**解析** 假设水银柱不动, 对左边气体, 应用查理定律  $\frac{p'_1}{T'_1} = \frac{p_1}{T_1}$ , 得  $p'_1 = \frac{T'_1}{T_1} p_1$ ,

所以,  $\Delta p_1 = p'_1 - p_1 = \left(\frac{T'_1}{T_1} - 1\right)p_1 = \frac{\Delta T_1}{T_1}p_1$ , 同理得右边的气体:  $\Delta p_2 = \frac{\Delta T_2}{T_2}p_2$ .

初始时的温度相同, 即 $T_1 = T_2$ , 又升高相同的温度, 即 $\Delta T_1 = \Delta T_2$ , 并且 $p_1 = p_2$ ,

故 $\Delta p_1 = \Delta p_2$ ，水银柱不动。

故选C。

### 照猫画虎

- 26 电灯泡内装有氦氖混合气体，要求混合气体在 $500^\circ\text{C}$ 时压强不超过 $1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ 。问：如果在 $20^\circ\text{C}$ 的室温下充气，灯泡内气体的压强应控制在什么范围内？

答案  $3.84 \times 10^4 \text{Pa}$

解析 当温度 $T_1 = (500 + 273)\text{K} = 773\text{K}$ 时，混合气体的压强 $p_1 = 1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ 。当温度在常温

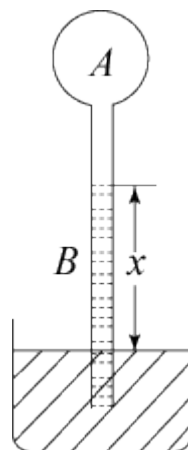
$T_2 = (20 + 273)\text{K} = 293\text{K}$ 时，气体的压强 $p_2$ 可由查理定律求得： $\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$ 。

所以 $p_2 = \frac{T_2}{T_1} p_1 = \frac{293}{773} \times 1.013 \times 10^5 \text{Pa} = 3.84 \times 10^4 \text{Pa}$ 。

故常温下灯泡内气体的压强不应超过 $3.84 \times 10^4 \text{Pa}$ ，否则当灯泡正常工作时，灯泡内气体的压强由于温度升高而变得太大，容易造成灯泡爆裂而发生危险。

故答案为： $3.84 \times 10^4 \text{Pa}$ 。

- 27 有人设计了一种测温装置，其结构如图所示，玻璃泡A内封有一定量气体，与A相连的B管插在汞槽中，管内汞面的高度x即可反映泡内气体的温度，即环境温度，并可由B管上的刻度直接读出。设B管的体积与A泡的体积相比可略去不计：



- (1) 在1个标准大气压下对B管进行温度刻度（1个标准大气压相当于76cmHg的压强），已知当温度 $t = 27^\circ\text{C}$ 时，管内汞面高度 $x_1 = 16\text{cm}$ ，此高度即为 $27^\circ\text{C}$ 的刻度线，问 $t = 0^\circ\text{C}$ 时的刻度线x为多少厘米处。

- (2) 若大气压已变为相当于76cmHg的压强，利用该测温装置测量温度时所得读数为27°C，问此时实际温度为多少。

**答案** (1) 21.4

(2) 22

**解析** (1) 略

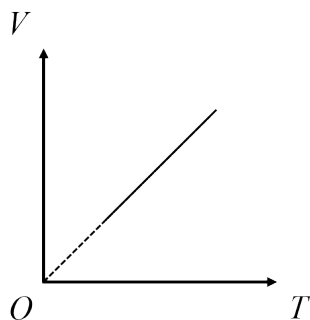
(2) 略

### 3. 盖·吕萨克定律

1. **盖·吕萨克定律**：一定质量的气体在压强不变时，它的体积与热力学温度成正比，即

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

2. **等压线**：在  $V-T$  图中的等压图线是直线。在等压过程中，气体的体积与热力学温度呈线性关系。



#### 例题精讲

- 28 如图 (a) 所示，一支上端开口、粗细均匀的足够长玻璃管竖直放置，玻璃管内一段长度  $h$  为 10cm 的水银柱封闭了一段长度为 5cm 的空气柱，环境温度为 27°C，外界大气压强  $P_0 = 75\text{cmHg}$ 。求：



图 (a)

- (1) 管内封闭气体的压强 .
- (2) 若将玻璃管插入某容器的液体中 , 如图 ( b ) 所示 , 当管内空气柱长度保持为  $7\text{cm}$  时 , 其温度是多少 .

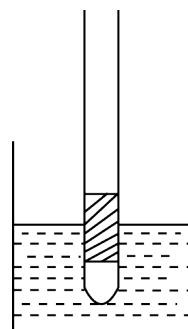


图 ( b )

答案

- (1) 管内封闭气体的压强为  $85\text{cmHg}$  .
- (2) 将玻璃管插入某容器的液体中 , 当管内空气柱长度保持为  $7\text{cm}$  时 , 其温度是  $420\text{K}$  .

解析

- (1) 封闭气体的压强等于大气压强加上水银柱产生的压强 , 故

$$P_1 = P_0 + h = 75 + 10 = 85(\text{cmHg}) .$$

故答案为 : 管内封闭气体的压强为  $85\text{cmHg}$  .

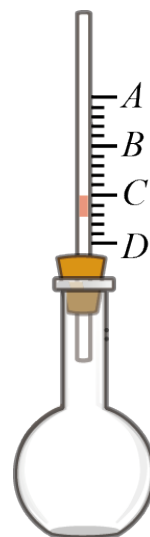
- (2) 气体做等压变化 ,  $L_1 = 5\text{cm}$  ,  $L_2 = L + 2 = 7\text{cm}$  ,  $T_1 = 273 + 23 = 300\text{K}$

根据盖 - 吕萨克定律 , 有 :  $\frac{L_1 S}{T_1} = \frac{L_2 S}{T_2}$

解得 :  $T_2 = \frac{L_2 T_1}{L_1} = \frac{7 \times 300}{5} \text{K} = 420\text{K}$  .

故答案为 : 将玻璃管插入某容器的液体中 , 当管内空气柱长度保持为  $7\text{cm}$  时 , 其温度是  $420\text{K}$  .

- 29 温度计是生活、生产中常用的测温装置 . 右图为一个简单温度计 , 一根装有一小段有色水柱的细玻璃管穿过橡皮塞插入烧瓶内 , 封闭一定质量的气体 . 当外界温度发生变化时 , 水柱位置将上下变化 . 已知  $A$ 、 $D$  间的测量范围为  $20^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$  ,  $A$ 、 $D$  间刻度均匀分布 . 由图可知 ,  $A$ 、 $D$  及有色水柱下端所示的温度分别是 ( )



- A.  $20^{\circ}\text{C}$ 、 $80^{\circ}\text{C}$ 、 $64^{\circ}\text{C}$
- B.  $20^{\circ}\text{C}$ 、 $80^{\circ}\text{C}$ 、 $68^{\circ}\text{C}$
- C.  $80^{\circ}\text{C}$ 、 $20^{\circ}\text{C}$ 、 $32^{\circ}\text{C}$
- D.  $80^{\circ}\text{C}$ 、 $20^{\circ}\text{C}$ 、 $34^{\circ}\text{C}$

答案 C

解析 温度升高，容器内气体的体积增大，A点温度高，可见A、D点温度分别为 $80^{\circ}\text{C}$ 、 $20^{\circ}\text{C}$ ，设D点下容器的体积为 $V_0$ ，一小格玻璃管的体积为 $h$ 。

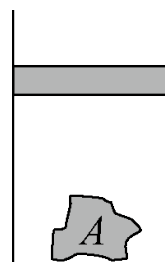
$$\text{由盖·吕萨克定律：} \frac{V_0 + 15h}{V_0} = \frac{273 + 80}{273 + 20} \text{ 即 } \frac{15h}{V_0} = \frac{60}{293} .$$

$$\frac{V_0 + 3h}{V_0} = \frac{273 + t}{273 + 20} \text{ 及 } \frac{3h}{V_0} = \frac{t - 20}{293} \text{ 解得：} t = 32^{\circ}\text{C} .$$

故选C。

照猫画虎

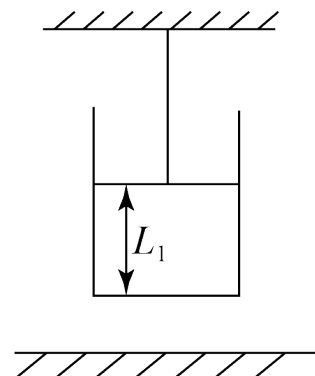
- 30 如图所示，上端开口的圆柱形气缸竖直放置，横截面积为 $0.2\text{m}^2$ 的活塞将一定质量的气体和一形状不规则的固体A封闭在气缸内。温度为 $300\text{K}$ 时，活塞离气缸底部的高度为 $0.6\text{m}$ ；将气体加热到 $330\text{K}$ 时，活塞上升了 $0.05\text{m}$ ，不计摩擦力及固体体积的变化，求物体A的体积。



**答案** 0.02

**解析** 设物体A的体积为 $V$ ，则气体初、末状态参量分别为 初状态： $V_1 = hS - V$ ， $T_1 = 300\text{K}$ ．末状态： $V_2 = (h + \Delta h)S - V$ ， $T_2 = 330\text{K}$ ．由盖—吕萨克定律 $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$ 得， $\frac{hS - V}{T_1} = \frac{(h + \Delta h)S - V}{T_2}$ ．代入数据解得 $V = 0.02\text{m}^3$ ．

31 如图所示，一质量为 $m = 10\text{kg}$ 的导热气缸中有一可自由移动的活塞，活塞的面积 $S = 20\text{cm}^2$ ，活塞通过一轻绳悬挂于天花板上，气缸内封闭一定质量的空气．当外界环境温度保持 $t_1 = 27^\circ\text{C}$ 不变时，活塞距气缸底部 $L_1 = 30\text{cm}$ ．已知：大气压 $p_0 = 1.0 \times 10^5\text{Pa}$ ，重力加速度 $g = 10\text{m/s}^2$ ．求：



- (1)  $t_1 = 27^\circ\text{C}$ 时，气缸内气体的压强 $p_1$ ．
- (2) 当外界环境温度变为 $t_2 = 77^\circ\text{C}$ 且保持不变时，活塞到气缸底部的距离 $L_2$ ．

**答案** (1)  $1.5 \times 10^5\text{Pa}$   
(2) 35cm

**解析** (1) 对气缸受力分析可知：由 $mg + p_1S = p_0S$ 得： $p_1 = \frac{p_0S - mg}{S} = 1.5 \times 10^5\text{Pa}$ ．  
故答案为： $1.5 \times 10^5\text{Pa}$ ．

(2) 等压变化：据盖·吕沙克定律： $\frac{SL_1}{T_1} = \frac{SL_2}{T_2}$ 得： $L_2 = 35\text{cm}$ ．

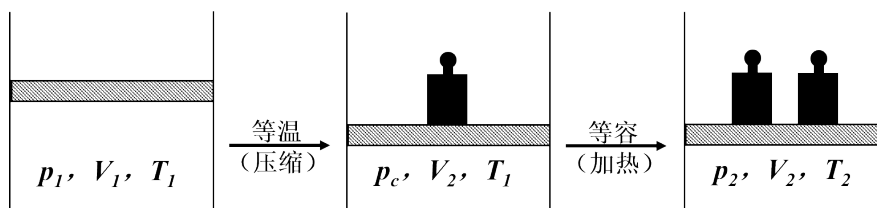
故答案为：35cm .

## 六、理想气体状态方程

### 1. 理想气体状态方程

气体的三个实验定律都揭示一定质量气体系统在某一个状态参量不变时，另外两个状态参量之间的变化关系。但是在实际情况中，一定质量的气体的体积、压强和温度经常是同时变化的。这时，这三个状态参量之间的相互关系是怎样的？

设有一定质量的气体，在初状态时的压强、体积和温度分别是 $p_1$ 、 $V_1$ 、 $T_1$ ，经过某个变化过程，到达三个状态参量分别为 $p_2$ 、 $V_2$ 、 $T_2$ 的末状态。由于状态参量是描述气体状态的，与气体经历的过程无关，所以物理上可以任意设计中间过程。现在设想有这样一个变化过程，它是分两个阶段进行的：在第一阶段中，保持温度 $T_1$ 不变，体积从 $V_1$ 变到 $V_2$ ，压强从 $p_1$ 变到另一值 $p_c$ （如图所示）；在第二阶段中，保持 $V_2$ 不变，温度从 $T_1$ 变到 $T_2$ ，压强从 $p_c$ 变成 $p_2$ 。



第一阶段是等温变化，根据玻意耳定律得到：

$$p_1 V_1 = p_c V_2$$

而第二阶段是等容变化，根据查理定律得到：

$$\frac{p_c}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

联立上述两式，不难得到：

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

即

$$\frac{pV}{T} = \text{const}$$

物理上把上式叫做一定质量的**理想气体状态方程**。反过来说，只有严格遵守上述实验定律的气体才称为**理想气体**。实际情况中并不存在理想气体，只有当气体压强不太大，温度不太低时气体实验定律才与实际情况较好的符合。然而在常温常压下，大多数实际气体的状态变化规律与气体实验定律偏差不太大，所以理想气体状态方程依旧有其实际意义。



## 2. 克拉伯龙方程

理想气体状态方程虽然给出了一定质量的理想气体发生状态变化时三个状态参量的函数关系，但是其中的恒量是多少？首先，此恒量与气体的多少有关，我们生活中典型的实例就是给车胎打气时，在体积和温度不变的情况下，打入的气体越多，气体压强越大，那么恒量  $\frac{pV}{T}$  就越大。其次，此恒量应该与气体的质量无关，因为在建立理想气体模型的时候，物理上并没有考虑气体的种类（显然气体的种类不同，每个气体分子质量就不同，气体的质量也不同）。所以我们猜想这个恒量应该是一个与气体分子个数有关的量。

而实验上也有类似上述的结论：在标准状况下，即  $p_0 = 1 \text{ atm}$ ， $T_0 = 273.15 \text{ K}$  时， $1 \text{ mol}$  的任何气体的体积都是  $V_0 = 22.4 \text{ L}$ 。所以物理上很自然地就先把理想气体状态方程用于  $1 \text{ mol}$  的气体的特例，从而先求得一个适用于  $1 \text{ mol}$  的气体的恒量，通常称为**普适气体常量**，有时简称气体常量，用  $R$  来表示，即

$$R = \frac{p_0 V_0}{T_0}$$

在国际单位制中， $p_0 = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ ， $V_0 = 22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ ， $T_0 = 273.15 \text{ K}$ ，代入上式得

$$R = \frac{1.013 \times 10^5 \text{ Pa} \times 22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}}{273.15 \text{ K}} \approx 8.31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

即对于任意温度、压强、体积的  $1 \text{ mol}$  气体，都满足

$$\frac{pV}{T} = R$$

如果有物质的量为  $n \text{ mol}$  的理想气体，不难外推得其状态方程为

$$\frac{pV}{T} = nR$$

这就是**任意质量的理想气体的状态方程**，也叫作**克拉伯龙方程**（Clapeyron Equation）。有些时候，为了研究分子个数  $N$  与气体状态参量的关系，物理上会引入**玻尔兹曼常量**  $k$ ，其中

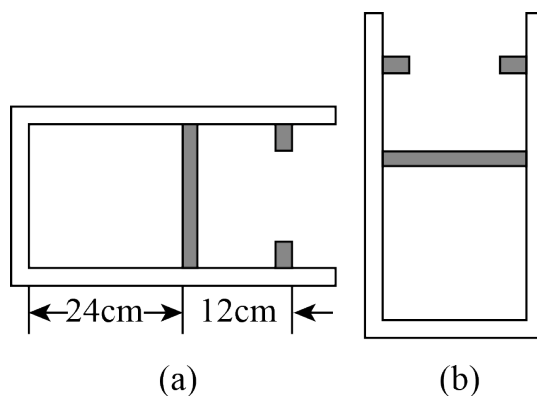
$$k = \frac{R}{N_A} = \frac{8.31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}{6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}} \approx 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$$

这样理想气体状态方程就可以改写成另一种形式：

$$\frac{pV}{T} = Nk$$

### 例题精讲

- 32 如图（a）所示，一导热性能良好、内壁光滑的气缸水平放置，横截面积为  $S = 2 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 、质量为  $m = 4 \text{ kg}$  厚度不计的活塞与气缸底部之间封闭了一部分气体，此时活塞与气缸底部之间的距离为  $24 \text{ cm}$ ，在活塞的右侧  $12 \text{ cm}$  处有一对与气缸固定连接的卡环，气体的温度为  $300 \text{ K}$ ，大气压强  $P_0 = 1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。现将气缸竖直放置，如图（b）所示，取  $g = 10 \text{ m/s}^2$ 。求：



- (1) 活塞与气缸底部之间的距离 .  
 (2) 加热到675K时封闭气体的压强 .

答案

- (1) 20cm  
 (2)  $1.5 \times 10^5 \text{ Pa}$

解析

- (1) 由题意知，气缸水平放置时，封闭气体的压强： $P_1 = P_0 = 1 \times 10^5 \text{ (Pa)}$ ，温度：

$$T_1 = 300\text{K}, \text{ 体积: } V_1 = 24\text{cm} \times S$$

当气缸竖直放置时，封闭气体的压强： $P_2 = P_0 + \frac{mg}{S} = 1.2 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，温度

$$T_2 = T_1 = 300\text{K}, \text{ 体积: } V_2 = HS.$$

$$\text{根据理想气体状态方程有: } \frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

代入数据可得  $H = 20\text{cm}$  .

故答案为：20cm .

- (2) 假设活塞能到达卡环，由题意有：

$$T_3 = 675\text{K} \quad V_3 = 36\text{cm} \times S \quad \text{根据理想气体状态方程有:}$$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_3 V_3}{T_3}$$

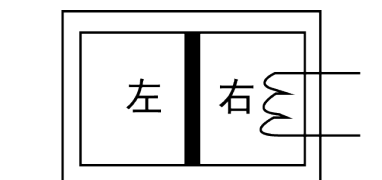
代入数据可得： $P_3 = 1.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，故假设成立，活塞能达到卡环，气体压强为

$$P_3 = 1.5 \times 10^5 \text{ Pa} .$$

故答案为： $1.5 \times 10^5 \text{ Pa}$  .

33

如图所示，一个密闭的气缸，被活塞分成体积相等的左、右两室，气缸壁与活塞是不导热的，它们之间没有摩擦，两室中气体的温度相等．现利用右室中的电热丝对右室加热一段时间，达到平衡后，左室的体积变为原来的 $\frac{3}{4}$ ，气体的温度 $T_1 = 300\text{K}$ ，求右室气体的温度．



**答案** 500K

**解析** 由题意可知，左、右两室内气体初始状态相同，设为  $P_0, V_0, T_0$ ，

由理想气体状态方程可得：

$$\text{以左室气体为研究对象：} \frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{P_1 \frac{3}{4} V_0}{T_1},$$

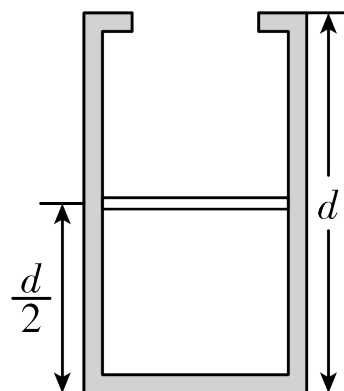
$$\text{以右室气体为研究对象：} \frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{P_1 \frac{5}{4} V_0}{T_2},$$

代入数据解得： $T_2 = 500\text{K}$ 。

故答案为：500K。

### 照猫画虎

- 34 如图所示，气缸呈圆柱形，上部有挡板，内部高度为  $d$ 。筒内一个很薄的质量不计的活塞封闭一定量的理想气体，开始时活塞处于离底部  $\frac{d}{2}$  的高度，外界大气压强为  $1 \times 10^5 \text{Pa}$ ，温度为  $27^\circ\text{C}$ ，现对气体加热。求：



- (1) 当活塞刚好到达汽缸口时，气体的温度；
- (2) 气体温度达到  $387^\circ\text{C}$  时，活塞离底部的高度和气体的压强。

**答案** (1) 当活塞刚好到达汽缸口时，气体的温度为  $600\text{K}$ 。

(2) 气体温度达到  $387^\circ\text{C}$  时，活塞离底部的高度为  $d$ ，气体的压强  $1.1 \times 10^5 \text{Pa}$ 。

**解析** (1) 解：以封闭气体为研究对象： $P_1 = P_0$

$$V_1 = \frac{d}{2} S T_1 = 300K ;$$

设温度升高到 $T_0$ 时，活塞刚好到达汽缸口．此时有： $p_2 = p_0$ ， $V_2 = dS$ ，

根据盖·吕萨克定律： $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$ ，得 $T_2 = 300K$ ．

(2) 解： $T_3 = 660K > T_2$ ，封闭气体先做等压变化，活塞到达汽缸口之后做等容变化．

所以： $l_3 = d$

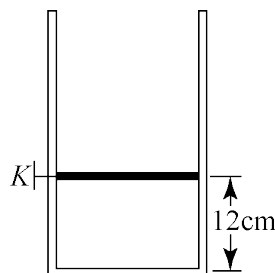
此时有： $p_3$ ， $V_3 = dS$ ， $T_3 = 600K$ ；

由理想气体状态方程：

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_3 V_3}{T_3}$$

解得 $P_3 = 1.1 \times 10^5 \text{Pa}$ ．

- 35 如图所示，足够长的圆柱形气缸竖直放置，其横截面积为 $1 \times 10^{-3} \text{m}^2$ ，气缸内有质量 $m = 2\text{kg}$ 的活塞，活塞与气缸壁封闭良好，不计摩擦．开始时活塞被销子 $K$ 销于如图位置，离缸底 $12\text{cm}$ ，此时气缸内被封闭气体的压强 $1.5 \times 10^5 \text{Pa}$ ，温度为 $300\text{K}$ ．外界大气压为 $1.0 \times 10^5 \text{Pa}$ ， $g = 10\text{m/s}^2$ ．



- (1) 现对密闭气体加热，当温度升到 $400\text{K}$ ，其压强多大．
- (2) 若在此时拔去销子 $K$ ，活塞开始向上运动，当它最后静止在某一位置时，气缸内气体的温度为 $360\text{K}$ ，则这时活塞离缸底的距离为多少．

答案

- (1)  $2 \times 10^5 \text{Pa}$
- (2)  $18\text{cm}$

解析

- (1) 由题意可知气体体积不变，

状态I： $p_1 = 1.5 \times 10^5 \text{Pa}$ ， $T_1 = 300\text{K}$ ， $V_1 = 1 \times 10^{-3} \times 0.12\text{m}^2$ ，

状态II： $p_2 = ?$   $T_2 = 400\text{K}$ ，

由等容变化有： $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$ ，

代入数据解得： $p_2 = 2 \times 10^5 \text{Pa}$ ．

答：现对密闭气体加热，当温度升到400K，其压强为 $2 \times 10^5 \text{Pa}$ 。

故答案为： $2 \times 10^5 \text{Pa}$ 。

(2) 状态Ⅲ:  $p_3 = p_0 + \frac{mg}{s} = 1.2 \times 10^5 \text{Pa}$  ,  $T_3 = 360\text{K}$  ,  $V_3 = 1 \times 10^{-3} \times 1\text{m}^2$

由气体状态方程有： $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_3 V_3}{T_3}$

代入数据解得： $l = 0.18\text{m} = 18\text{cm}$

答：若在此时拔去销子K，活塞开始向上运动，当它最后静止在某一位置时，气缸内气体的温度为360K，则这时活塞离缸底的距离为18cm。

故答案为：18cm。

## 七、后记

在研究理想气体的热力学规律时，我们不仅需要研究气体在平衡状态下的性质，而且还会研究系统状态在改变过程中应当遵循的规律，如外界对系统做功和系统吸放热会如何改变系统的状态（内能）。整个动态的热力学过程中满足的热力学定律分别被称为**热力学第一定律**和**热力学第二定律**。关于热力学定律的介绍应用，我们将在后续高二的课程中再给大家介绍。