

第 19 讲 理想气体状态方程 理想气体压强公式

教学要求

了解分子热运动的基本特征、平均值、理想气体的微观模型及理想气体压强公式的推导，了解温度的本质和统计意义。

掌握气体的三个状态参量、理想气体的状态方程、压强公式、温度公式。

重点与难点

重点：理想气体的压强公式、温度公式。

难点：压强、温度的微观解释。

7.1 平衡态 温度 理想气体状态方程

7.1.1 平衡态

热学的研究对象是由大量微观粒子（分子、原子等微观粒子）所组成的宏观物体，通常称研究对象为**热力学系统**，简称**系统**。在研究一个热力学系统的热现象规律时，不仅要注意系统内部的各种因素，同时也要注意外部环境对系统的影响。系统以外的物质统称为外界（或环境）。一般情况下，系统与外界之间既有能量交换（例如传递热量、做功），又有物质交换（例如扩散、凝结、蒸发、泄漏）。根据系统与外界交换能量或物质的特点，通常把系统分为三种：

孤立系统——与外界既无能量交换，又无物质交换的系统；封闭系统——与外界只有能量交换，但无物质交换的系统；开放系统——与外界既有能量交换，又有物质交换的系统。

热力学系统按所处的状态不同，可以区分为平衡态系统和非平衡态系统，对于一个不受外界影响的系统，不论其初始状态如何，经过足够长的时间后，必将达到一个宏观性质不再随时间变化的稳定状态，这样的状态称为热平衡态，简称平衡态。反之即使没有外界影响，系统的宏观性质也在随时间变化的状态叫做**非平衡态**。对于气体系统，平衡态表现为气体的各部分密度均匀、温度均匀和压强均匀。

系统处于平衡态，必须同时满足两个条件：系统与外界在宏观上无能量和物质的交换；系统的宏观性质不随时间变化。

如何描述一个热力学系统的平衡状态呢？系统在平衡态下，拥有各种不同的宏观属性，如力学的（压强）、化学的（摩尔质量、物质的量）、热学的（温度）、几何的（体积）、电磁的（磁感应强度、电场强度）等。热力学用具有确定值且可以通过实验直接测量的量来描述系统的宏观属性。这种用来描述系统宏观属性的物理量，称为**状态参量**。对一定量（指质量

为 M 、摩尔质量为 M_{mol}) 的气体, 当处于平衡态时, 可以用压强 p 、体积 V 以及温度 T 等三个宏观物理量来描述其状态, p 、 V 、 T 称为**气体的状态参量**。

任何宏观物体都是由大量分子或原子组成的。分子或原子统称为**微观粒子**, 其线度一般约 $10^{-9} \sim 10^{-10} \text{m}$ 。分子或原子都以不同的形式不停地运动, 它们之间存在着或强或弱的相互作用。统计物理学是从物质的微观结构和微观运动来研究物质的宏观属性, 而每一个运动着的微观粒子(原子、分子等)都有其大小、质量、速度、能量等属性, 这些用来描述单个微观粒子运动状态的物理量称为微观量。微观量不能被人的感官直接观察到, 一般也不能直接测量, 一般只能间接测量。微观量和宏观量之间存在着内在联系。宏观物体所发生的各种现象都是它所包含的大量微观粒子运动的集体表现, 从而宏观量总是一些微观量的统计平均值。气体动理论的任务之一就是要提示气体宏观量的微观本质, 即建立宏观量与微观量统计平均值之间的关系。

在国际单位制中, 压强的单位是帕斯卡, 简称帕(Pa), $1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$, 它与大气压(atm)及毫米汞柱(mmHg)的关系为

$$1\text{atm} = 760 \text{ mmHg} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

体积的单位是立方米(m^3), 它与升(L)的关系是

$$1\text{m}^3 = 10^3 \text{ L}$$

问题 7-1 比较气体系统的平衡态和力学中物体的平衡态的区别。

7.1.2 热力学第零定律 温度

温度是表征物体冷热程度的物理量。冷热是人们对自然界的一种体验, 对物质世界的直接感觉。但是单凭人的感觉, 认为热的系统温度高, 冷的系统温度低, 这不但不能定量表示出系统的温度, 有时甚至会得出错误的结论。因此, 要定量表示出系统的温度, 必须给温度一个严格而科学的定义。

温度概念的建立是以热力学第零定律为基础的。设不受外界影响的 A 、 B 两个系统, 各自处在一定的平衡态。如果使 A 、 B 两系统相互接触, 让两系统之间发生热传递, 一般地, 两系统的状态都会发生变化。经过一段时间后, 两个相互接触系统的冷热程度变得一致, 状态也不再随时间变化, 这时两系统就处在一个新的共同的平衡态, 则称两系统彼此处于热平衡。再考虑由 A 、 B 、 C 表示的三个系统, A 、 B 两系统分别与 C 系统接触, 经过一段时间后, A 与 C 处于热平衡, B 与 C 也处于热平衡, 最后将 A 、 B 两系统与 C 系统隔离开, 让 A 和 B

热接触，实验表明， A 、 B 两系统的平衡态不会发生变化，彼此也处于热平衡。

实验结果表明：如果两个系统分别与第三个系统的同一平衡态达到热平衡，那么，这两个系统彼此也处于热平衡。这个结论称为热力学第零定律。

热力学第零定律说明，处于相互热平衡状态的系统必定拥有某一个共同的宏观物理性质。若两个系统的这一共同性质相同，当两个系统热接触时，系统之间不会有热传递，彼此处于热平衡状态；若两个系统的这一共同性质不相同，两个系统热接触时就会有热传递，彼此的热平衡状态会发生变化。决定系统热平衡的这一共同的宏观性质称为系统的温度。也就是说，温度是决定一系统是否与其它系统处于热平衡的宏观性质， A 、 B 两系统热接触时，如果彼此处于平衡状态，则说两系统温度相同；如果发生 A 到 B 的热传导，则说 A 的温度比 B 的温度高。一切互为热平衡的系统具有相同的温度。

实验表明，当几个系统作为一个整体处于热平衡状态，若将它们分离开，在没有其它影响的情况下，各个系统的热平衡状态不会发生变化。这说明各个在热平衡状态时的温度仅决定于系统本身内部热运动状态。以后将看到温度反映的是系统大量分子无规则运动的剧烈程度。

热力学第零定律不仅给出了温度的概念，也指出了比较和测量温度的方法。由于一切处于相互热平衡的系统具有相同的温度，因此，我们可以选定一种合适的物质（称测温物质）来作为系统，通过这个系统的与温度有关的特性来测量其它系统的温度。这个合适的系统就成了一个温度计。实验表明，物质的许多性质都随温度的改变而发生变化，一般选定测温物质的某种随温度变化，且作单调、显著变化的性质作为测温特性来表示温度。如金属丝的电阻，定压下气体的体积等随温度变化的特性。温度计要能定量表示和测量温度，还要选定温度的标准点，并把一定间隔的冷热程度分为若干度，这样就可读取温度的数值标度，即温标。

常用的摄氏温标是摄尔修斯（A. Celsius）建立的，用液体（酒精或水银）作测温物质，用液柱高度随温度变化作测温特性。并规定纯水的冰点为 0°C ，气点为 100°C ，并认定液柱高度（体积）随温度作线性变化，在0到100摄氏度之间等分温度，一分表示 1°C 。摄氏温标，用 t 表示，在国际单位制中，单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。另一种温标是开尔文在热力学第二定律的基础上建立的，这种温标称为热力学温标，用 T 表示，在国际单位制中，单位称为开尔文（ K ），是SI制中7个基本单位之一；并规定水的三相点（水、冰和水蒸气平衡共存的状态）为 273.16K 。由热力学温标可导出摄氏温标

$$T = t + 273.15$$

即规定热力学温标的 273.15K 为摄氏温标的零度。

7.1.3 理想气体状态方程

实验表明,当系统处于热平衡态时,描述气体平衡态的三个参量 p 、 V 、 T 之间存在着确定的函数关系,我们把热平衡态下,各个状态参量之间的关系式称为系统的状态方程。状态方程的具体形式是由实验来确定的,比如实验告知,在压强不太大(与大气压比较)和温度不太低(与室温比较)时,各种气体都服从下列三个实验定律。玻意耳-马略特定律:当温度保持不变时,压强与体积的乘积等于恒量,即 $pV = \text{恒量}$,亦即在一定温度下,体积与压强成反比。盖·吕萨克定律:当压强保持不变时,体积与热力学温度成正比,即 $\frac{V}{T} = \text{恒量}$ 。查理定律:当体积保持不变时,气体压强与热力学温度成正比,即 $\frac{p}{T} = \text{恒量}$ 。在任何情况下都能严格遵从上述三个实验定律的气体可以看作理想气体。

从三条实验定律,可以推出一定质量的理想气体状态方程

$$pV = \frac{M}{M_{\text{mol}}} RT \quad (7-1)$$

式中 p 、 V 、 T 为理想气体在某一平衡态下的三个状态参量; M 为气体质量, M_{mol} 为气体的摩尔质量; R 为普适气体常量,在国际单位制中, $R=8.31\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; p 为气体压强; T 为气体温度的热力学温标; V 为气体分子的活动空间。在常温常压下,实际气体都可近似地当作理想气体来处理。压强越低,温度越高,这种近似的准确度越高。

平衡态除了由一组状态参量来描述之处,还常用状态图中的一个点来表示。比如,对给定的理想气体,也可以 p 为纵轴, V 为横轴的 $p-V$ 图上一个确定的点来表示(或 $p-T$ 图、或 $V-T$ 图中的一个点),如图 7-1 中的点 $A(p_1, V_1, T_1)$ 或点 $B(p_2, V_2, T_2)$ 。不同的平衡态对应于不同的点。一条连续曲线代表一个由平衡态组成的变化过程。

例 7-1 容器内装有质量为 0.10 kg 的氧气,压强为 10^6 Pa ,温度为 47°C 。因为容器漏气,经过若干时间后,压强降到原来的 $\frac{5}{8}$,温度降到 27°C 。问(1)容器的容积有多大?(2)漏去了多少氧气?(假设氧气看作理想气体)

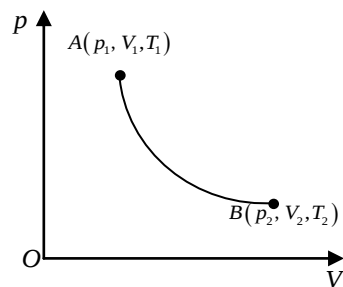


图 7-1 $p-V$ 图上一个点表示气体的一个平衡态

解 (1) 根据理想气体状态方程, $pV = \nu RT = \frac{M}{M_{\text{mol}}} RT$,

求得容器的容积 V 为

$$V = \frac{MRT}{M_{\text{mol}} p} = \frac{0.10 \times 8.31 \times (273 + 47)}{0.032 \times 10^6} = 8.31 \times 10^{-3} \text{ (m}^3\text{)}$$

(2) 设漏气若干时间之后, 压强减小到 p' , 温度降到 T' 。如果用 M' 表示容器中剩余的氧气的质量, 从状态方程求得

$$M' = \frac{M_{\text{mol}} p' V}{RT'} = \frac{0.032 \times \frac{5}{8} \times 10^6 \times 8.31 \times 10^{-3}}{8.31 \times (273 + 27)} = 6.67 \times 10^{-2} \text{ (kg)}$$

所以漏去的氧气质量为

$$\Delta M = M - M' = 0.10 - 6.67 \times 10^{-2} = 3.33 \times 10^{-2} \text{ (kg)}$$

7.2 理想气体压强公式

热力学系统是由大量分子、原子等无规则运动的微观粒子组成, 那么系统的宏观状态参量(如温度、压强等)与这些微观粒子的运动有什么关系呢?

在气体分子动理论中, 我们用统计的方法求出与大量分子运动有关的一些物理量的平均值, 如平均能量、平均速度、平均碰撞次数等, 从而对与大量气体分子热运动相联系的宏观现象作出微观解释。理想气体的压强公式是我们应用统计方法得到的第一个关于大量分子热运动的统计规律。

7.2.1 理想气体分子模型和统计假设

从分子运动和分子相互作用来看, 理想气体的分子模型可从下面几点来理解。

1 除碰撞外, 分子力可以略去不计

由于气体分子间距很大, 分子与容器壁、分子与分子之间只有在碰撞的瞬间才有相互作用, 其它任何时候的相互作用可以忽略不计, 因此, 在两次碰撞之间, 分子作匀速直线运动。

2 分子可看作质点

在标准状态下, 分子本身的线度, 比起分子之间的距离(约为分子有效直径的 50 倍)来说可以忽略不计, 即气体分子可看作质点。

3 分子之间的碰撞是完全弹性碰撞

分子与容器壁以及分子与分子之间的碰撞属于牛顿力学中的完全弹性碰撞, 碰撞前后气体分子能量守恒。

以上这些假设可概括为理想气体分子的一种微观模型: 理想气体分子是一个个极小的彼此间无相互作用的遵从牛顿运动定律的弹性的、自由运动的质点。

由于组成物质的分子数目巨大，故分子在热运动中相互间的碰撞极其频繁，无法预测，个别分子的运动具有偶然性、无序性，是极为复杂和难于预测的，然而大量的偶然、无序的分子的整体中包含着一种规律性，这种规律性来自大量偶然事件的集合，这是统计平均的效果。当气体处于平衡状态时，对于大量气体分子的统计假设如下：

1 在无外场作用时，气体分子在各处出现的概率相同

若忽略重力的影响，平均而言，分子的空间分布是均匀的，在容器中分子数密度处处相等。

2 分子可以有各种不同的速度，速度取向在各方向是等概率的

平衡状态时，气体的性质与方向无关，分子沿各个方向运动的概率相等，没有哪个方向更占优势。因此它们在各个方向上的速率的各种平均值相等，如

$$\bar{v}_x = \bar{v}_y = \bar{v}_z = 0 ; \quad \overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2}$$

7.2.2 理想气体压强公式

从微观上看，单个分子对器壁的碰撞是间断的、随机的；而大量分子对器壁的碰撞是连续的、恒定的，也就是说容器中气体作用于器壁的压强，应该是大量气体分子对器壁不断碰撞的统计平均结果。因此，推导压强公式的基本思路是：按力学规律计算任一分子*i*碰撞一次施于器壁的冲量 I_i ，单位时间内该分子对器壁的平均冲力，即 $\overline{f_i'}$ ，然后将所有分子在单位时间内对器壁的作用进行统计平均 $\bar{F} = \sum_i \overline{f_i'}$ ，得出理想气体压强 $p = \frac{\bar{F}}{S}$ 公式的统计表述。

假设有一个边长分别为 l_1 、 l_2 及 l_3 的长方形容器，体积 $V = l_1 l_2 l_3$ ，储有 N 个质量都为 m 同类气体分子，如图 7-2 所示。因为在平衡态时气体内部各处压强完全相同，任选器壁的一个面，例如，选择与 x 轴垂直的 A_1 面，计算出其所受压强。推导分四步：

1 单个分子*i*一次碰撞对 A_1 面的冲量

在大量分子中，任选一个分子*i*，设其速度为 $\vec{v}_i$ ，速度分量为 v_{ix}, v_{iy}, v_{iz} 。分子*i*与器壁 A_1 面作弹性碰撞时，在 x 轴上的分速度由 v_{ix} 变为 $-v_{ix}$ ，由动量定理，分子*i*受 A_1 面给它的作用力 f_i 的冲量 I_i 等于它动量的增量，即 $I_i = (-mv_{ix}) - mv_{ix} = -2mv_{ix}$ 。作用力 f_i 的方向

沿 x 轴负方向。由牛顿第三定律，

分子 i 对 A_1 面的作用力 f_i' 的冲量

$$I_i' = -I_i = 2mv_x,$$

f_i' 的方向沿 x 轴正方向。

2 分子 i 对 A_1 面的平均力

分子 i 与 A_1 面相碰后弹回作

匀速直线运动，并与其它分子相碰，

由于两个质量相等的弹性质点完全

弹性碰撞时交换速度，故可等价分子 i 沿 x 轴以 $-v_{ix}$ 飞向 A_2 面，与 A_2 面相碰后，又以 v_{ix}

与 A_1 面再次相碰，分子 i 与 A_1 面相继两次相碰之间在 x 轴方向上所移动的距离为 $2l_1$ ，所

需时间为 $\Delta t = \frac{2l_1}{v_{ix}}$ 。所以，单位时间内分子 i 与 A_1 面的碰撞次数为 $Z = \frac{1}{\Delta t} = \frac{v_{ix}}{2l_1}$ 次。于是，

在单位时间内，分子 i 作用在 A_1 面上的总冲量，也就是分子 i 作用于 A_1 面上的平均冲力，即

$$\overline{f_i'} = (2mv_{ix}) \frac{v_{ix}}{2l_1}。$$

3 A_1 面所受的平均总冲力

容器内有 N 个质量都为 m 同类气体分子，它们与 A_1 面连续不断地碰撞，使 A_1 面受到

一个几乎连续不断的作用力，这个力应等于 N 个分子在单位时间内对 A_1 面的平均冲力之总

和，对上式对所有分子求和，即

$$\overline{F} = \sum_{i=1}^N \overline{f_i'} = 2mv_{1x} \frac{v_{1x}}{2l_1} + 2mv_{2x} \frac{v_{2x}}{2l_1} + \cdots + 2mv_{Nx} \frac{v_{Nx}}{2l_1} = \frac{m}{l_1} (v_{1x}^2 + v_{2x}^2 + \cdots + v_{Nx}^2)。$$

4 压强

由压强的定义知 A_1 面所受的压强

$$p = \frac{\overline{F}}{S} = \frac{\overline{F}}{l_2 l_3} = \frac{m}{l_1 l_2 l_3} (v_{1x}^2 + v_{2x}^2 + \cdots + v_{Nx}^2) = \frac{Nm}{l_1 l_2 l_3} \frac{v_{1x}^2 + v_{2x}^2 + \cdots + v_{Nx}^2}{N}$$

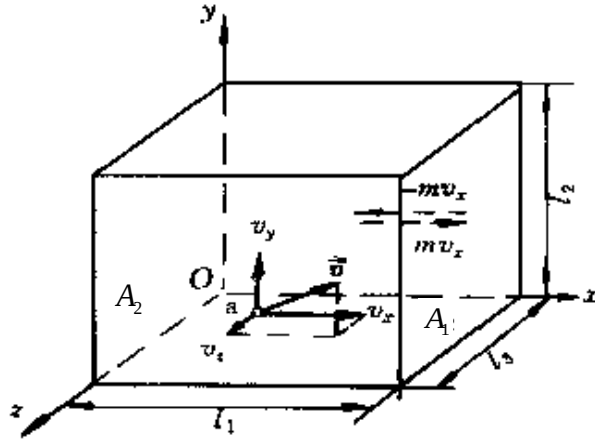


图 7-2 推导压强公式用图

分子数密度 $n = \frac{N}{l_1 l_2 l_3}$ ， x 轴方向速度平方的平均值 $\overline{v_x^2} = \sum_{i=1}^N v_{ix}^2 / N$

有 $p = nm \overline{v_x^2}$

又平衡态下有 $\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}$

及 $\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}$

所以有 $\overline{v_x^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2}$

得到压强 $p = \frac{1}{3} nm \overline{v^2} = \frac{2}{3} n \left(\frac{1}{2} m \overline{v^2} \right)$

引入气体分子的平均平动动能

$$\overline{\varepsilon_{kt}} = \frac{1}{2} m \overline{v^2} \quad (7-2)$$

则上式成为

$$p = \frac{2}{3} n \left(\frac{1}{2} m \overline{v^2} \right) = \frac{2}{3} n \overline{\varepsilon_{kt}} \quad (7-3)$$

式 (7-3) 称为**理想气体的压强公式**。它表明，气体的压强正比于分子数密度和分子的平均平动动能。

压强公式建立了宏观参量 p 与微观量的统计平均值 n 、 $\overline{\varepsilon_{kt}}$ 联系起来，说明压强是大量气体分子对器壁碰撞的统计平均值。由于单个分子对器壁的碰撞是不连续的，产生的压力起伏不定。只有在气体分子数目足够大时，器壁所受到的压力才有确定的统计平均值。因此若容器中只有少量几个分子，压强就失去了意义。气体的压强可直接测量，但气体的分子数密度 n 和分子的平均平动动能不能直接测量。压强公式不能直接用实验验证，它的正确性，是以它能很好的解释或论证已被实验证实了的理想气体的有关定律而被确认。

7.3 温度的统计解释

7.3.1 温度的统计解释

温度是热学中特有的一个物理量，它在宏观上表征了物质冷热状态的程度，那么温度的微观本质是什么呢？

可将理想气体状态方程改写为如下表达式

$$\text{由} \quad pV = \frac{M}{M_{\text{mol}}} RT$$

$$\text{有} \quad p = \frac{N}{V} \cdot \frac{R}{N_A} \cdot T$$

其中 N 为气体的分子数， N_A 是阿伏加德罗常量， $N_A = 6.02 \times 10^{23} / \text{mol}$ ，令 $k = \frac{R}{N_A}$ 称为玻

尔兹曼常量，在国际单位制中 $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 。又 $n = \frac{N}{V}$ 。于是理想气体状态方程改写为

$$p = nkT \quad (7-4)$$

现将压强公式 $p = \frac{2}{3} n \overline{\varepsilon_{kt}}$ 与理想气体状态方程的另一形式 $p = nkT$ 相比较，则有

$$\overline{\varepsilon_{kt}} = \frac{3}{2} kT \quad (7-5)$$

式(7-5)称为理想气体的温度公式，该式将宏观量 T 和微观量 $\overline{\varepsilon_{kt}}$ 相联系，揭示了温度的微观本质，即温度是气体分子平均平动动能的量度，分子的平均平动动能越大，也就是分子热运动的程度越激烈，气体的温度越高。温度的高低反映了物体内部大量分子无规则热运动的剧烈程度。它表明，处于平衡态时的理想气体，其分子的平均平动动能与气体的温度成正比。与压强一样，温度也是一个统计量。对个别分子，说它有多少温度是没有意义的。

由式(7-5)可知，不同种类的两种理想气体，只要温度 T 相同，则 $\overline{\varepsilon_{kt}}$ 相同；反之亦然。如果一种气体的温度高些，则这一种气体分子的平均平动动能要大些。按照这个观点，热力学温度零度将是理想气体分子热运动停止时的温度，然而实际上分子运动是永远不会停息的，热力学温度零度也是永远不可能达到的。而且近代量子理论证实，即使在热力学温度零度时，组成固体点阵的粒子也还保持着某种振动时的能量，称为零点能。至于(实际)气体，则在温度未达到热力学温度零度以前，已变成液体或固体，公式(7-5)也早就不能适用。温度所反映的运动是分子的无规则运动，温度和物体的整体运动无关。物体的整体运动是其中所有分子的一种有规则的运动。例如，物体在平动时，其中所有分子都有一个共同的速度，

和这一速度相联系的动能是物体的轨道动能。温度与轨道动能无关。

7.3.2 气体分子的方均根速率

根据气体分子平均平动动能与温度的关系式(7-5),我们可求出给定气体在一定温度下,分子运动速率平方的平均值,如果把该平方的平均值开方,就可得出气体分子运动速率的一种平均值,称为气体分子的方均根速率。

$$\begin{aligned} \text{由 } \overline{\varepsilon_{kt}} = \frac{1}{2} m \overline{v^2} = \frac{3}{2} kT, \text{ 得} \\ \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{M_{\text{mol}}}} \end{aligned} \quad (7-6)$$

$\sqrt{\overline{v^2}}$ 称为气体分子的方均根速率,是反映气体分子热运动状态的一个重要的统计平均值。方均根速率与温度 $\sqrt{T}$ 成正比,方均根速率与分子质量 $\sqrt{m}$ (或 $\sqrt{M_{\text{mol}}}$) 成反比,对于同一种气体,温度越高,方均根速率越大,在同一温度下,气体分子质量或摩尔质量越大,方均根速率就越小。在零摄氏度时,氢的方均根速率为 1830m/s,空气为 485m/s,氮为 491m/s,氧为 461m/s。

课堂训练: 理想气体体积为 V , 压强为 p , 温度为 T , 一个分子的质量为 m , k 为玻尔兹曼常量, R 为摩尔气体常量,则该理想气体的分子数为:

(A) pV/m (B) $pV/(kT)$ (C) $pV/(RT)$ (D) $pV/(mT)$

解: $p = nkT$ $N = nV = \frac{pV}{kT}$

例 7-2 一容器内的气体,压强为 1.33 Pa, 温度为 300K, 问在 1m^3 中有多少气体分子? 这些分子总的平均平动动能 E_{kt} 是多少?

解 根据公式 $p = nkT$, 分子数密度为

$$n = \frac{p}{kT} = \frac{1.33}{1.38 \times 10^{-23} \times 300} = 3.21 \times 10^{20} \text{ (}/\text{m}^3\text{)}$$

因为每一个分子的平均平动动能 $\frac{1}{2} m \overline{v^2} = \frac{3}{2} kT$, 所以 1m^3 中的分子的总平均平动动能为

$$E_{kt} = \frac{1}{2} m \overline{v^2} \times n = \frac{3}{2} kT \times n$$

其中 $n = \frac{p}{kT}$, 所以

$$E_{kt} = \frac{3}{2} kT \times \frac{p}{kT} = \frac{3}{2} p$$

代入 p 值, 得

$$E_{kt} = \frac{3}{2} \times 1.33 = 2.00 \text{ (J/m}^3\text{)}$$

例 7-3 一瓶氦气和一瓶氮气密度相同，分子平均平动动能相同，而且它们都处于平衡状态，则它们

- (A) 温度相同、压强相同。
- (B) 温度、压强都不同。
- (C) 温度相同，但氦气的压强大于氮气的压强。
- (D) 温度相同，但氦气的压强小于氮气的压强。

$$\text{解: } p = nkT = \frac{N}{V} kT = \rho \frac{k}{m} T$$

$$\because m(\text{N}_2) > m(\text{He}) \quad \therefore p(\text{N}_2) < p(\text{He})$$

故选 C。

课堂训练：两瓶不同种类的气体，其分子平均平动动能相等，但分子密度数不同。问：它们的温度是否相同？压强是否相同？

$$\text{解: } \bar{\varepsilon} = \frac{3}{2} kT \quad \because \bar{\varepsilon}_1 = \bar{\varepsilon}_2 \quad \therefore T_1 = T_2$$

$$P = nkT \quad \because n_1 \neq n_2, T_1 = T_2 \quad \therefore P_1 \neq P_2$$

作业： 3、10、11