

第6章 气体动理论

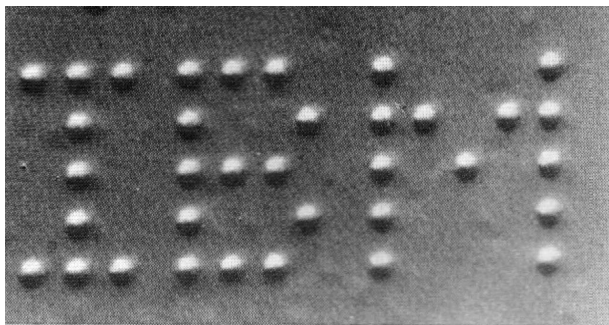
6-1 分子热运动与统计规律性

一、分子运动论的基本观点

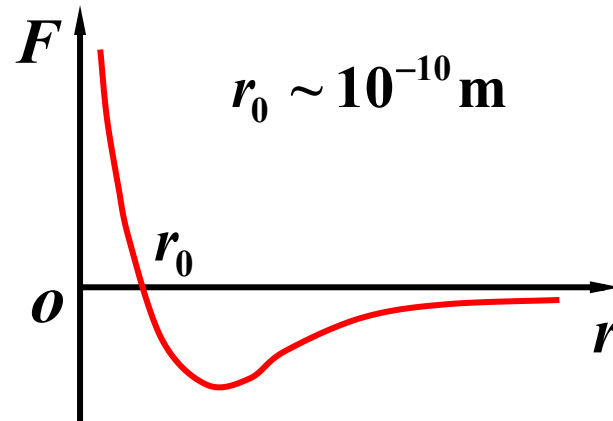
分子观点：宏观物质是由大量分子(或原子)组成

分子运动观点：分子不停地作无规则的运动

分子力观点：分子之间有相互作用力



利用扫描隧道显微镜技术，把一个个原子排列成 **IBM** 字母的照片。



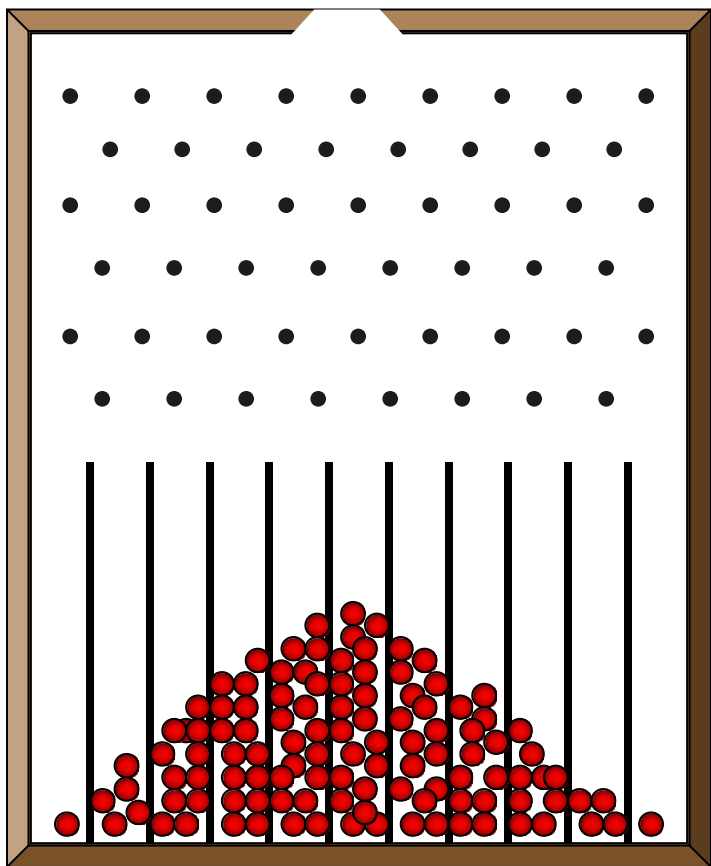
$r < r_0$ 斥力

$r > r_0$ 引力

$r = r_0$ $F = 0$

二、统计规律性

当小球数 N 足够大时小球的分布具有统计规律.



归一化条件

设 N_i 为第 i 格中的粒子数 .

粒子总数 $N = \sum_i N_i$

$$\omega_i = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_i}{N}$$

概率 粒子在第 i 格中出现的可能性大小 .

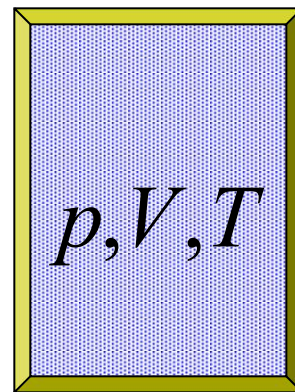
$$\sum_i \omega_i = \sum_i \frac{N_i}{N} = 1$$

6.2 平衡态 理想气体状态方程

一. 气体的物态参量及其单位（宏观量）

(1) 气体压强 p ：作用于容器壁上单位面积的正压力（力学描述）。

单位： $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$



标准大气压： 45° 纬度海平面处, 0°C 时的大气压.
 $1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$

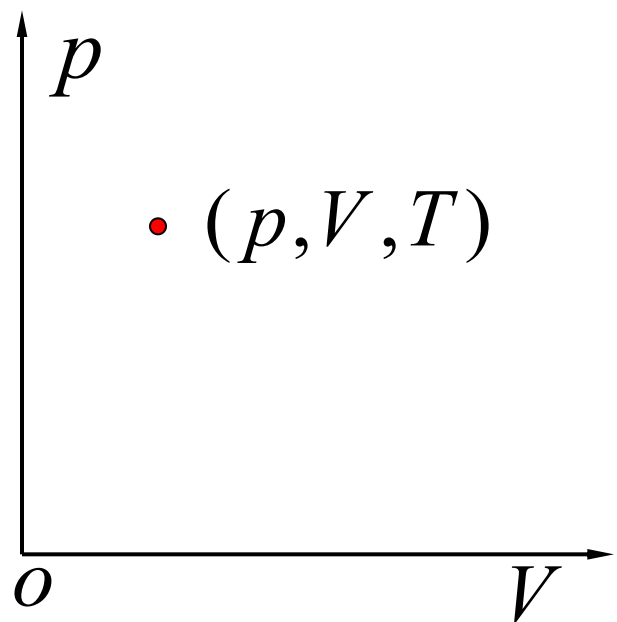
(2) 体积 V ： 气体所能达到的最大空间（几何描述）。

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

(3) 温度 T ： 气体冷热程度的量度（热学描述）·单位： 温标 K （开尔文） $T = 273.15 + t$

二. 平衡态

一定量的气体，在不受外界的影响下，经过一定的时间，系统达到一个稳定的，宏观性质不随时间变化的状态称为平衡态。（理想状态）



- 1) 单一性（ p, T 处处相等）；
- 2) 物态的稳定性——与时间无关；
- 3) 自发过程的终点；
- 4) 热动平衡（有别于力平衡）。

三. 理想气体状态方程

理想气体宏观定义：遵守三个实验定律的气体 .

物态方程：理想气体平衡态宏观参量间的函数关系 .

对一定质量
的同种气体

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

理想气体
物态方程

$$pV = \frac{m}{M} RT$$

摩尔气体常量

$$R = 8.31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

【例1】 容积 $V=30\text{L}$ 的高压钢瓶内装有 $P=130\text{atm}$ 的氧气，做实验每天需用 $P_1=1\text{atm}$ 和 $V_1=400\text{L}$ 的氧气，规定氧气压强不能降到 $P_2=10\text{atm}$ 以下，以免开启阀门时混进空气。试计算这瓶氧气使用几天后就需要重新充气。

解： 设瓶内原装氧气的质量为 m ，重新充气时瓶内剩余氧气的质量为 m_2 ，每天用氧的质量为 m_1 ，

则按理想气体的状态方程有：

$$m = \frac{PVM}{RT}, \quad m_2 = \frac{P_2VM}{RT}, \quad m_1 = \frac{P_1V_1M}{RT},$$

$$\text{可用天数: } \frac{m - m_2}{m_1} = \frac{(P - P_2)V}{P_1V_1} = 9(\text{天})$$

例2.水银气压计中混进了一个气泡，因此它的读数比实际气体小些，当精确的气压计的水银柱为0.768m时，它的水银柱只有0.748m高，此时管中水银面到管顶距离为0.08m，试问此气压计的水银柱为0.734m高时，实际的气压是多少？
(把空气当作理想气体，并设温度不变)。

$$P_1 = \Delta h d_{\text{汞}} = (0.768 - 0.748) d_{\text{汞}} = 0.02 d_{\text{汞}}$$

$$V_1 = 0.08s \quad (s \text{ 为截面积})$$

$$V_2 = (0.748 - 0.734 + 0.08)s = 0.094s$$

$$P_2 = \frac{P_1 V_1}{V_2} = \frac{0.02 d_{\text{汞}} \times 0.08s}{0.094s} = 0.017 d_{\text{汞}}$$

$$P'_2 = 0.734 d_{\text{汞}} + 0.017 d_{\text{汞}}$$

$$= 0.751 \times \frac{1}{0.76} \times 1.013 \times 10^5 = 0.999 \times 10^5 (Pa)$$

6.3 压强和温度的微观解释

理想气体的微观模型

- 1) 分子可视为质点； 线度 $d \sim 10^{-10} \text{ m}$,
间距 $r \sim 10^{-9} \text{ m}$, $d \ll r$;
- 2) 除碰撞瞬间, 分子间无相互作用力;
- 3) 弹性质点 (碰撞均为完全弹性碰撞) ;
- 4) 分子的运动遵从经典力学的规律 .

热动平衡的统计规律 (平衡态)

1) 分子按位置的分布是均匀的

$$n = \frac{dN}{dV} = \frac{N}{V}$$

2) 分子各方向运动概率均等

分子运动速度 $\vec{v}_i = v_{ix}\vec{i} + v_{iy}\vec{j} + v_{iz}\vec{k}$

各方向运动概率均等

$$\overline{v_x} = \overline{v_y} = \overline{v_z} = 0$$

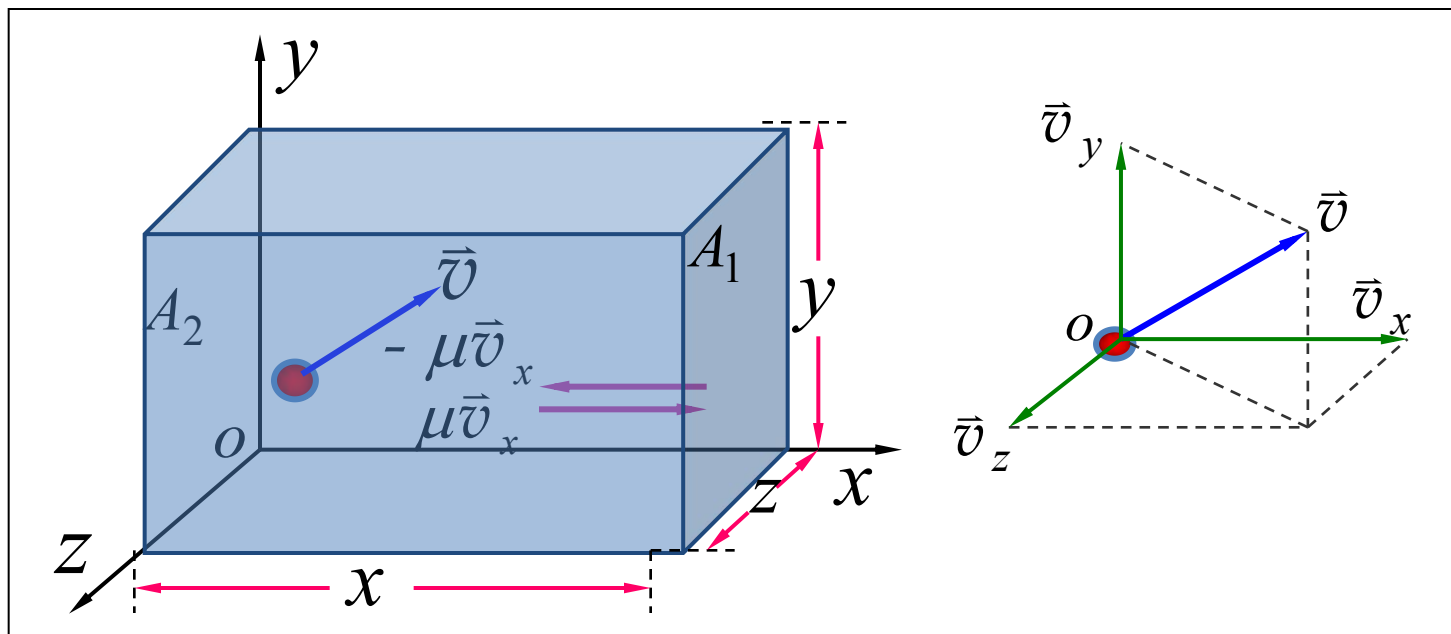
x 方向速度平方的平均值 $\overline{v_x^2} = \frac{1}{N} \sum_i v_{ix}^2$

各方向运动概率均等

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2}$$

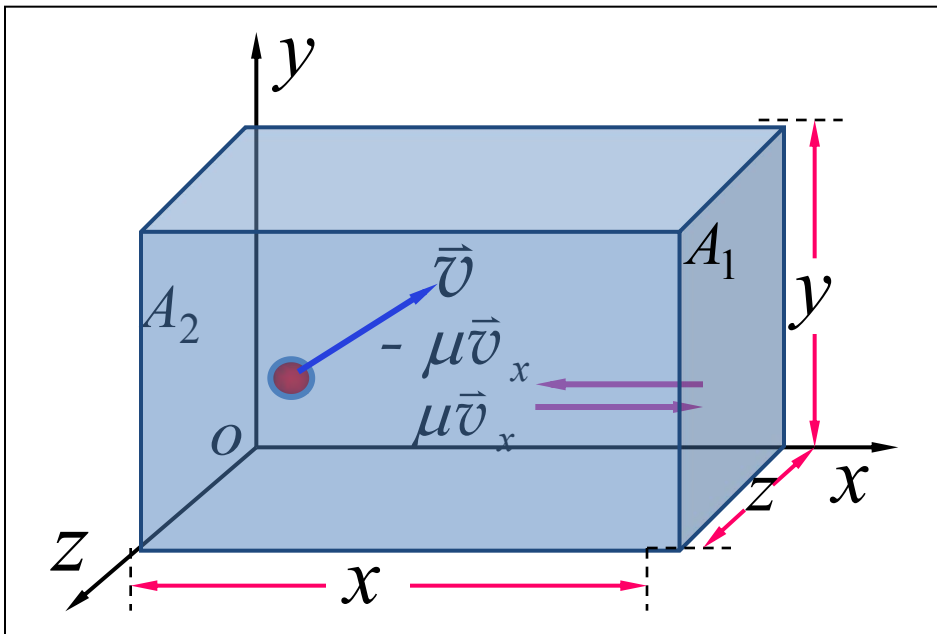
一. 理想气体压强公式

设边长分别为 x 、 y 及 z 的长方体中有 N 个全同的质量为 μ 的气体分子，计算 A_1 壁面所受压强。



单个分子对器壁碰撞特性：偶然性、不连续性。
大量分子对器壁碰撞的总效果：恒定的、持续的力的作用。

◆ 单个分子遵循力学规律



x方向动量变化

$$\Delta p_{ix} = -2\mu v_{ix}$$

分子施于器壁的冲量

$$2\mu v_{ix}$$

两次碰撞间隔时间

$$2x/v_{ix}$$

单位时间碰撞次数 $v_{ix}/2x$

单个分子单位时间施于器壁的冲量 $\mu v_{ix}^2/x$

大量分子总效应

单位时间 N 个粒子对器壁总冲量

$$\sum_i \frac{\mu v_{ix}^2}{x} = \frac{\mu}{x} \sum_i v_{ix}^2 = \frac{N\mu}{x} \sum_i \frac{v_{ix}^2}{N} = \frac{N\mu}{x} \overline{v_x^2}$$

器壁 A_1 所受平均冲力 $\overline{F} = \overline{v_x^2} N\mu/x$

气体压强

$$p = \frac{\overline{F}}{yz} = \frac{N\mu}{xyz} \overline{v_x^2}$$

统计规律

$$n = \frac{N}{xyz} \quad \overline{v_x^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2}$$

分子平均平动动能

$$\overline{\varepsilon_k} = \frac{1}{2} \mu \overline{v^2}$$

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

二、温度的微观解释

理想气体状态方程

$$pV = \frac{m}{M} RT$$

$$m = N\mu$$

$$M = N_A \mu$$

$$pV = \frac{N}{N_A} RT$$

$$p = nkT$$

$$n = N/V$$

玻尔兹曼常数

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

理想气体压强公式

$$p = \frac{2}{3} n \bar{\varepsilon}_k$$

分子平均平动动能

$$\bar{\varepsilon}_k = \frac{1}{2} \mu \overline{v^2} = \frac{3}{2} kT$$

微观量的统计平均值

宏观可测量

温度 T 的物理意义

$$\bar{\varepsilon}_k = \frac{1}{2} \mu \overline{v^2} = \frac{3}{2} kT$$

- 1) 温度是分子平均平动动能的量度 $\bar{\varepsilon}_k \propto T$ (反映热运动的剧烈程度)。
- 2) 温度是大量分子的集体表现，个别分子无意义。
- 3) 在同一温度下，各种气体分子平均平动动能均相等。

注意

热运动与宏观运动的区别：温度所反映的是分子的无规则运动，它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运动的表现。



例1、 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。

解

$$p = nkT = \frac{N}{V}kT = \rho \frac{R}{M}T$$

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



例2 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3】 容积为 $11.2 \times 10^{-3} m^3$ 的真空系统在 $t_1 = 27^\circ C$ 时 $P_1 = 1.0 \times 10^{-5}$ 托 (1托 = 1mmHg)，为提高真空度，将系统放在 $t_2 = 300^\circ C$ 的烘箱内烘烤，使吸附在器壁上的分子释放出来，若烘烤后压强增为 $P_2 = 1.0 \times 10^{-2}$ 托。
问：升温后释放出多少个分子。

解：

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= n_1 k T_1 \Rightarrow n_1 = \frac{P_1}{k T_1} \\ P_2 &= n_2 k T_2 \Rightarrow n_2 = \frac{P_2}{k T_2} \\ \Delta N &= (n_2 - n_1) V \end{aligned} \right\} \Delta N = \left(\frac{P_2}{T_2} - \frac{P_1}{T_1} \right) \frac{V}{k} = 1.89 \times 10^{18} (\text{个})$$

【例4】

试求 (1) 气体分子间的平均距离 \bar{l} 与压强 P 、温度 T 的关系。

(2) 求压强为 1atm ，温度为 0°C 的情况下气体分子间的平均距离 \bar{l} 。

解： (1)
$$\left. \begin{aligned} P &= nkT \\ n &= \frac{N}{V} \Rightarrow \frac{1}{n} = \frac{V}{N} = \bar{l}^3 \end{aligned} \right\} \bar{l} = \left(\frac{kT}{P} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$\begin{aligned} (2) \quad \bar{l} &= \left(\frac{kT}{P} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{1.38 \times 10^{-23} \times 273}{1.013 \times 10^5} \right)^{\frac{1}{3}} \\ &= 3.34 \times 10^{-9} \text{ m} \quad (\text{约为分子直径的10倍}) \end{aligned}$$

例5、某容器内分子数密度为 10^{26}m^{-3} ，每个分子的质量为 $3 \times 10^{-27}\text{kg}$ ，设其中 $1/6$ 分子数以速率 $v=200\text{ms}^{-1}$ 垂直地向容器的一壁运动，而其余 $5/6$ 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。问：

(1) 每个分子作用于器壁 的冲量为多少？

$$I = 2\mu v$$

(2) 每秒碰在器壁单位面积上的分子数 n_0 为多少？

$$n_0 = \frac{1}{6} n' = \frac{1}{6} n v t S = \frac{1}{6} n v$$

(3) 作用在器壁上的压强为多少？

$$P = \frac{F}{S} = \frac{NI / t}{S} = \frac{\frac{1}{6} n s t v I}{s t} = n_0 I$$