



第二篇 热学

第4章

气体动理论



动理论 (1)

主要内容:

- 平衡态 态参量 理想气体物态方程
- 理想气体的压强公式
- 理想气体的温度公式



气体动理论和热力学

研究对象:

物质分子的热运动及其规律

研究方法:

气体动理论和热力学的研究对象相同，但研究方法不同。

气体动理论的研究方法 —— 统计方法(微观法)

热力学的研究方法 —— 能量法（宏观法）（下一章介绍）



第4章 气体动理论

§ 4.1 平衡态 态参量 理想气体物态方程

1、气体的状态参量

◎热力学系统与外界

◎微观量与宏观量

微观量不属于也不能运用于气体整体，宏观量不属于也不能运用于单个分子。宏观量是微观量的统计平均值。



气体的宏观性质用一组状态参量 (p, V, T) 来描述

(1) 气体的压强 p (pressure)

单位是 Pa (N/m^2), 常用单位还有 atm(大气压), mmHg 等

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

(2) 气体的体积 V (volume)

单位是 m^3 。常用单位有 L (升)

(3) 气体的温度 T (temperature)

单位是 K(热力学温标)。常用单位有 $^{\circ}\text{C}$ (摄氏温标 t)

$$T(\text{K}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273.15$$

三个参量 (p, V, T) 满足
的关系

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

理想气体
状态方程

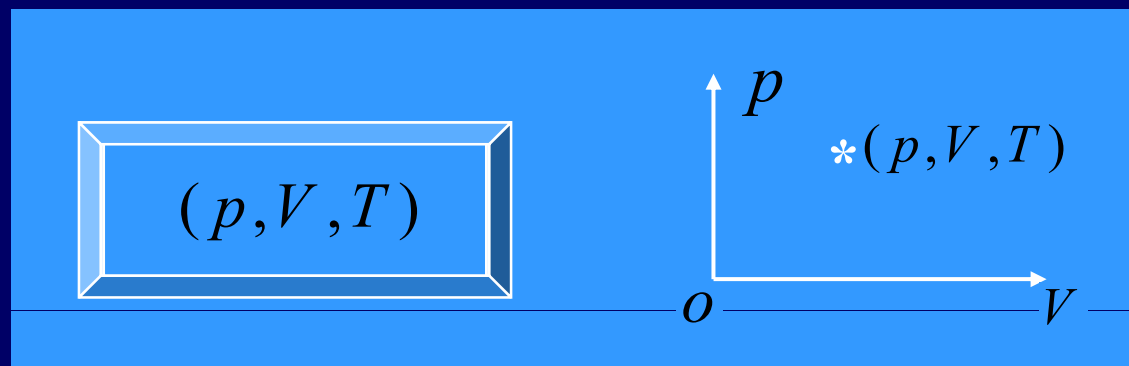


2、平衡态(equilibrium status)

系统的宏观性质不随时间变化的状态，或孤立系统最终达到的稳定状态。

系统的平衡态用一组状态参量 (p, V, T) 描述

$p - V$ 图上一个确定点对应一个平衡状态



3、理想气体状态方程

一定质量的理想气体，
$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0V_0}{T_0}$$

p_0, V_0, T_0 为标准状态下相应的参量。



标准状态下, 1 mol 气体

$$\begin{cases} p_0 = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa} \\ T_0 = 273.15 \text{ K} \\ V_0 = 22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \end{cases}$$

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0V_0}{T_0}$$

比值

$$R = \frac{p_0V_0}{T_0} = 8.31 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K}) \text{ 为普适气体恒量}$$

1 mol理想气体的状态方程

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0V_0}{T_0} = R \quad \text{或} \quad pV = RT$$

质量为 m , 摩尔质量为 M 的理想气体的状态方程

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

$$\nu = \frac{m}{M} \text{ 称为摩尔数。}$$



两个常量

(1) 阿伏伽德罗常量 N_A

1 mol 任何气体中都有

$$N_A = 6.023 \times 10^{23} \text{ 个/mol}$$

若以 N 表示体积 V 中气体分子的总数, 则 $\nu = \frac{N}{N_A}$

(2) 玻尔兹曼常数 k

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

理想气体状态方程又可以写成

$$pV = N_A k T \quad \text{或} \quad \boxed{p = nkT}$$

式中 $n = \frac{N}{V}$ 为分子数密度。



注意点:

理想气体状态方程的适用条件是:

理想气体

处在热平衡态

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

$$p = nkT$$

§ 4.2 理想气体的压强公式

1、气体分子热运动及其统计概念

(1) 分子动理论的基本观点

◎ 物体由大量分子组成，分子之间有间隙

1 mol 任何物质含有 N_A 个分子

$$N_A = 6.023 \times 10^{23} \frac{\text{个}}{\text{mol}}$$

阿伏伽德罗常数



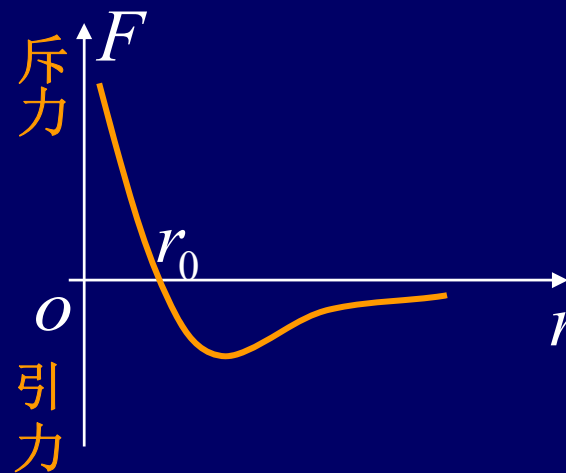
◎ 分子间有相互作用力

分子间有相互作用的引力和斥力, 简称**分子力**。

分子力 F 与分子间距离 r 的关系如图
所示

分子力是一种短程力。

◎ 分子在不停息地运动





2、理想气体的分子模型及其统计假设

分子模型 (对单个分子)

- (1) 气体分子的线度与气体分子间的平均距离比较很小可忽略。
- (2) 除碰撞外，分子间及分子与容器壁之间的相互作用力可忽略。
- (3) 分子间，分子与容器壁的碰撞为完全弹性碰撞。

平衡态理想气体的统计假设 (对分子集体)

- (1) 容器中任一处单位体积的分子数相等。即分子数密度处处相等。(均匀分布)



(2) 分子沿各个方向运动的概(几)率相同。

* 分子速度在各个方向分量的各种平均值相等

分子速率的平均值为
$$\bar{v} = \frac{\sum N_i v_i}{N}$$

分子速度沿x,y,z方向分量的平均值分别为

$$\bar{v}_x = \frac{\sum N_i v_{ix}}{N}, \quad \bar{v}_y = \frac{\sum N_i v_{iy}}{N}, \quad \bar{v}_z = \frac{\sum N_i v_{iz}}{N},$$

根据统计假设 $\bar{v}_x = \bar{v}_y = \bar{v}_z$

分子速度沿x,y,z方向分量的平方的平均值分别为

$$\overline{v_x^2} = \frac{\sum N_i v_{ix}^2}{N}, \quad \overline{v_y^2} = \frac{\sum N_i v_{iy}^2}{N}, \quad \overline{v_z^2} = \frac{\sum N_i v_{iz}^2}{N},$$

根据统计假设 $\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}$



$$\overline{v_x} = \overline{v_y} = \overline{v_z} \quad \overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}$$

又因
$$\overline{v_i^2} = \overline{v_{ix}^2} + \overline{v_{iy}^2} + \overline{v_{iz}^2}$$

N 個分子速度平方的平均值

$$\frac{\sum v_i^2}{N} = \frac{\sum v_{ix}^2}{N} + \frac{\sum v_{iy}^2}{N} + \frac{\sum v_{iz}^2}{N} \quad \therefore \quad \overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}$$

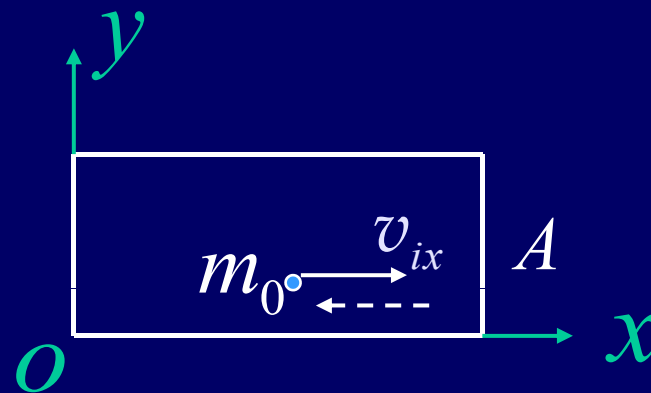
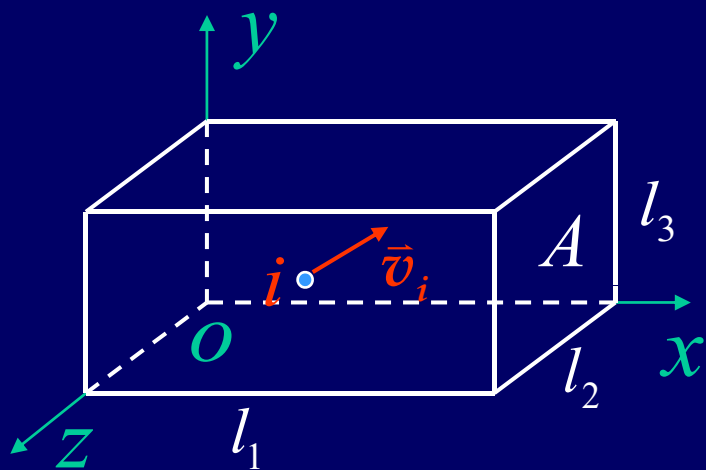
即
$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2}$$



3、理想气体的压强公式

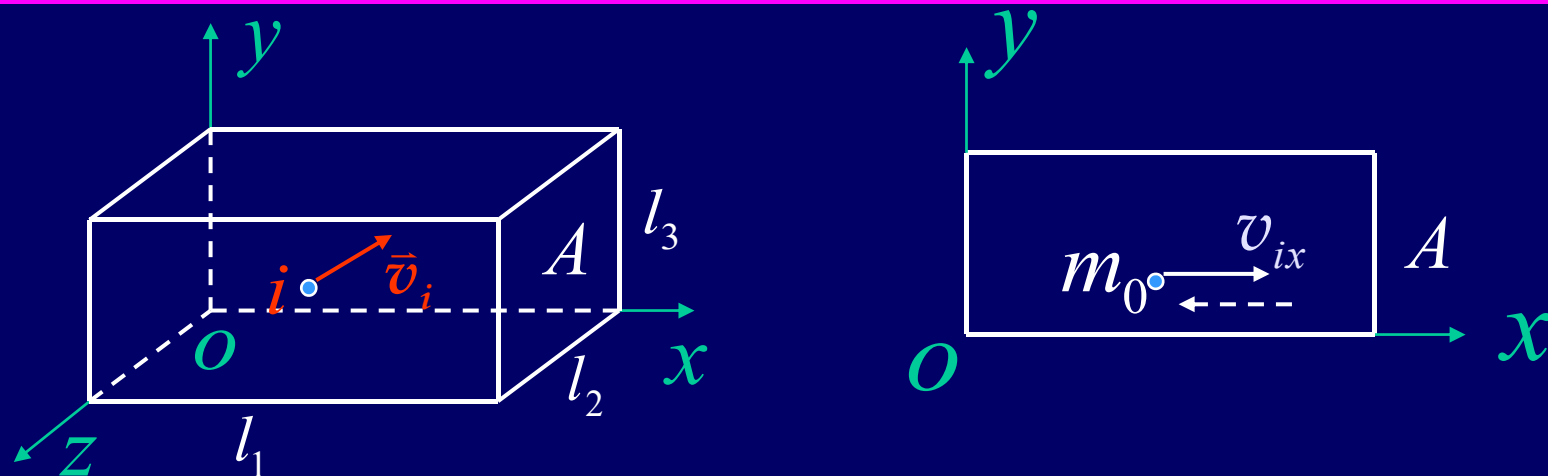
* 气体压强是大量分子不断碰撞容器壁的结果。

取边长分别为 l_1, l_2, l_3 的容器，内有 N 个同类气体分子，每个分子的质量为 m_0 。



下面计算气体分子对容器 A 面的压强。

任取一个分子 i ，速度为 \vec{v}_i



分子 i 与 A 面碰一次施于 A 面的冲量为 $2m_0v_{ix}$

分子 i 与 A 面作相继两次碰撞历时 $2l_1/v_{ix}$

Δt 时间内分子 i 与 A 面碰的次数为 $(v_{ix}/2l_1)\Delta t$

Δt 时间内分子 i 施于 A 面的冲量为

$$I_i = 2m_0v_{ix} \frac{v_{ix}}{2l_1} \Delta t = m_0 \frac{v_{ix}^2}{l_1} \Delta t$$



N 个分子在 Δt 内给 A 面的总冲量为

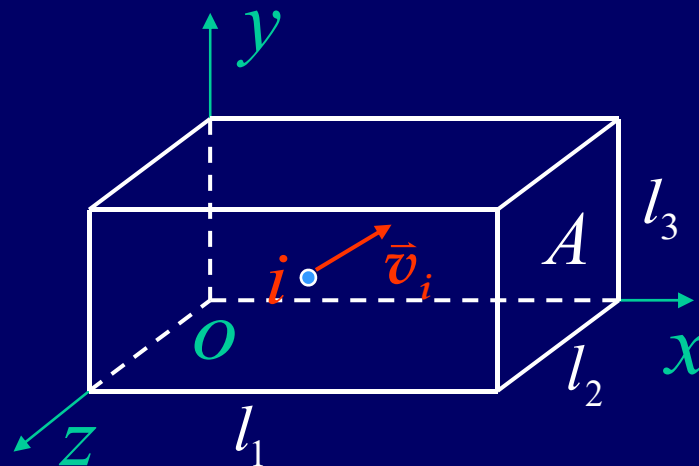
$$I = \sum I_i = \frac{m_0}{l_1} (\sum v_{ix}^2) \Delta t$$

A 面受到的平均冲力为

$$\bar{F} = \frac{I}{\Delta t} = \frac{m_0}{l_1} (\sum v_{ix}^2)$$

分子作用于 A 面的压强

$$\begin{aligned} p &= \frac{\bar{F}}{l_2 l_3} = \frac{m_0}{V} \sum v_{ix}^2 = \frac{m_0}{V} (v_{1x}^2 + v_{2x}^2 + \cdots + v_{Nx}^2) \\ &= \frac{Nm_0}{V} \left(\frac{v_{1x}^2 + v_{2x}^2 + \cdots + v_{Nx}^2}{N} \right) = nm_0 \overline{v_x^2} \end{aligned}$$





式中 $\overline{v_x^2}$ 是 N 个分子 x 方向速度分量平方的平均值。

根据统计假设 $\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}$

又因 $\overline{v_i^2} = \overline{v_{ix}^2} + \overline{v_{iy}^2} + \overline{v_{iz}^2}$

N 个分子速度平方的平均值

$$\frac{\sum v_i^2}{N} = \frac{\sum v_{ix}^2}{N} + \frac{\sum v_{iy}^2}{N} + \frac{\sum v_{iz}^2}{N} \quad \therefore \overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}$$

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

$$\therefore p = nm_0 \overline{v_x^2} = \frac{1}{3} nm_0 \overline{v^2}$$



$$p = nm_0 \overline{v_x^2} = \frac{1}{3} nm_0 \overline{v^2}$$

压强公式也可写成

$$p = \frac{2}{3} n \left(\frac{1}{2} m_0 \overline{v^2} \right) = \frac{2}{3} n \overline{\varepsilon_k}$$

$$\overline{\varepsilon_k} = \frac{1}{2} m_0 \overline{v^2}$$

分子平均平动动能

压强的物理意义

* 压强是大量分子对时间、对面积的统计平均结果。

* 气体作用于器壁的压强 $p \propto n$, $p \propto \overline{\varepsilon_k}$



§ 4.3 理想气体的温度公式

1、理想气体的温度公式

$$p = nkT$$

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

$$\bar{\varepsilon}_k = \frac{3}{2} kT$$

$$\frac{1}{2} m_0 \overline{v^2} = \frac{3}{2} kT$$

$$\sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$$

气体分子的方均根速率



2、温度的微观本质

$$\frac{1}{2} m_0 \overline{v^2} = \frac{3}{2} kT$$

- ◎理想气体的**温度** T 是分子平均平动动能的量度，是分子热运动剧烈程度的标志。
- ◎**温度** 是大量分子热运动的集体表现，是统计概念，对个别分子无温度可言。
- ◎**绝对零度** 达不到——热力学第三定律。



例题、两瓶不同种类的气体，其分子平均平动动能相等，但分子数密度不同。问：它们的温度是否相同？压强是否相同？

解：

$$\bar{\varepsilon}_k = \frac{3}{2}kT \quad \because \quad \bar{\varepsilon}_{k1} = \bar{\varepsilon}_{k2}$$

$$\therefore T_1 = T_2$$

$$p = nkT \quad \because \quad n_1 \neq n_2, T_1 = T_2$$

$$\therefore p_1 \neq p_2$$