

五、理想气体压强公式

气体压强的微观机制：

克劳修斯指出：

“压强是大量分子对容器壁发生碰撞，从而对容器壁产生冲力的宏观效果”

理想气体的压强

气体分子在单位时间内施与器壁单位面积上的冲量。

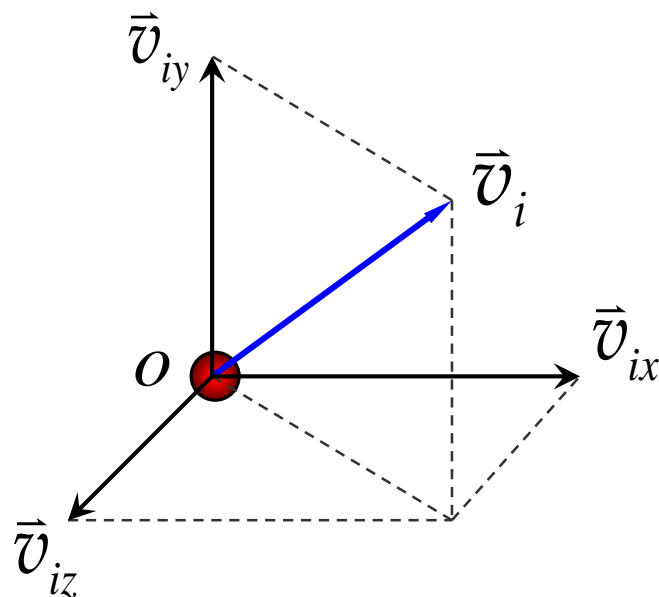
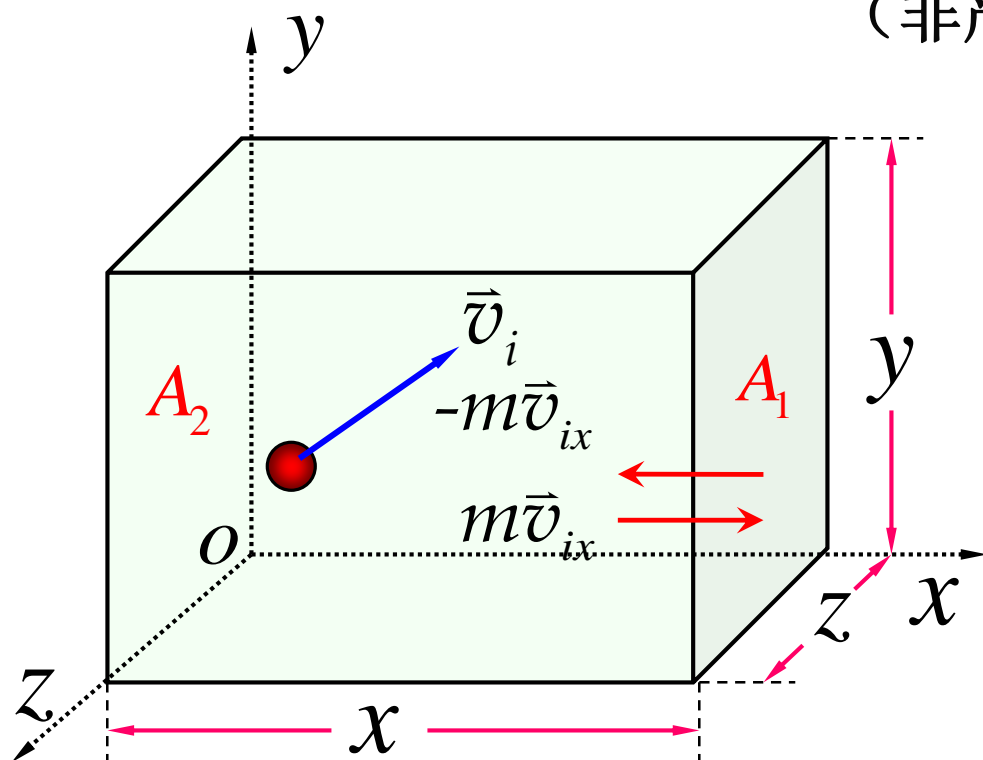
下面，定性说明理想气体压强公式

五、理想气体压强公式

设一长方体容器，边长分别为 x 、 y 及 z ，
有 N 个全同的质量为 m 的气体分子，如图所示。

平衡态下器壁各处压强相同，计算 A_1 壁面所受压强

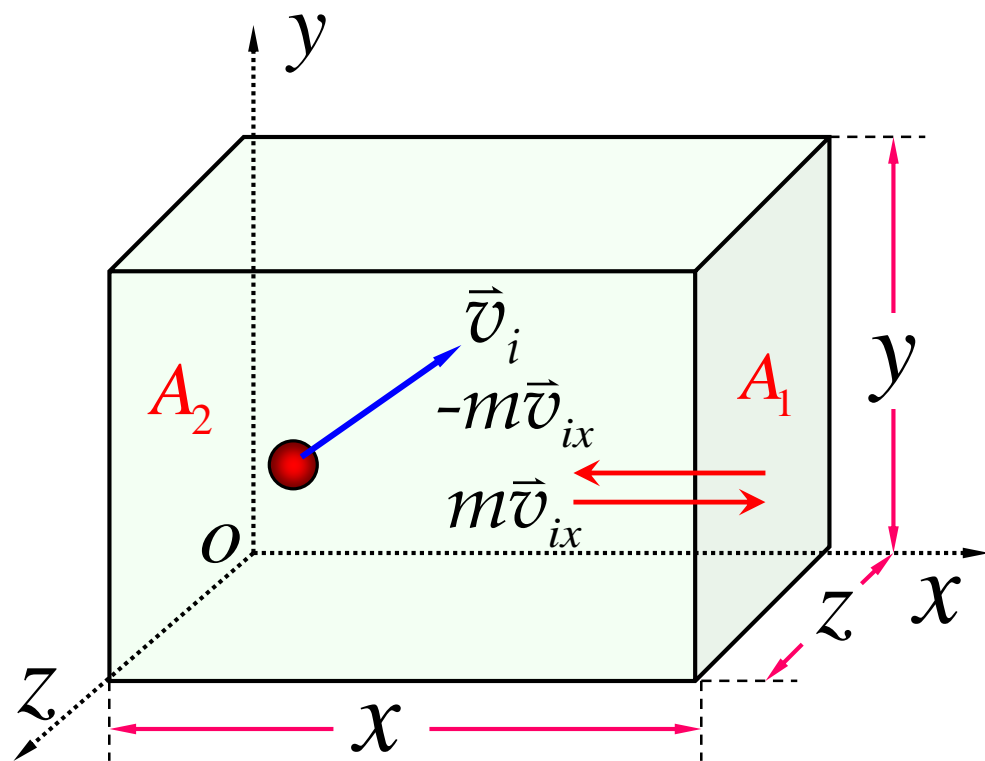
(非严格推导，定性说明)



五、理想气体压强公式

设一长方体容器，边长分别为 x 、 y 及 z ，
有 N 个全同的质量为 m 的气体分子，如图所示。

平衡态下器壁各处压强相同，计算 A_1 壁面所受压强



分子数密度 n :

单位体积内的分子个数

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

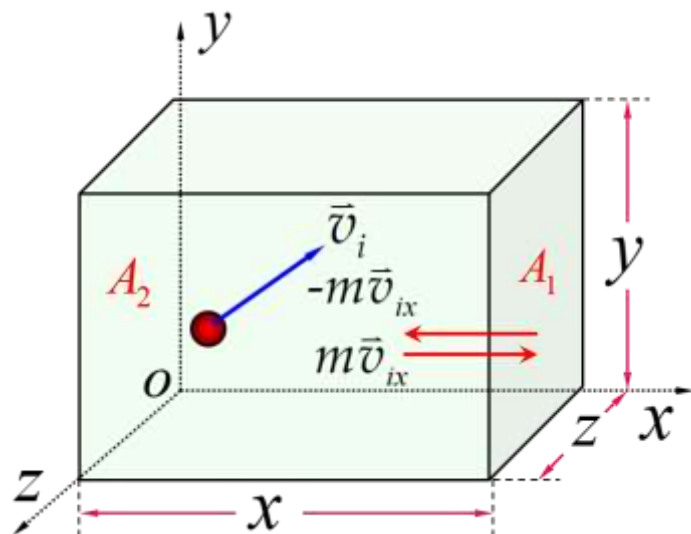
质量密度:

$$\rho = nm$$

五、理想气体压强公式

◆ 单个分子遵循力学规律

第*i*个分子



与 A_1 一次碰撞， x 方向动量变化：

$$(-mv_{ix}) - mv_{ix} = -2mv_{ix}$$

施于 A_1 器壁的冲量大小： $2mv_{ix}$

两次碰撞间隔时间：

$$\frac{2x}{v_{ix}}$$

单位时间内， i 分子与 A_1 碰撞次数： $\frac{v_{ix}}{2x}$

第*i*个分子，单位时间内，施于器壁 A_1 的冲量： $\frac{v_{ix}}{2x} \cdot 2mv_{ix} = \frac{mv_{ix}^2}{x}$

五、理想气体压强公式

大量分子总效应

单位时间内， N 个分子对器壁 A_1 总冲量：

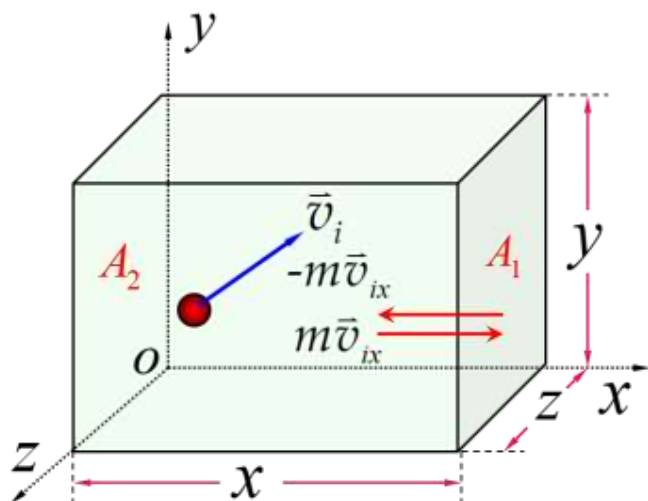
$$\sum_i \left(\frac{mv_{ix}^2}{x} \right) = \frac{m}{x} \sum_i v_{ix}^2 = \frac{mN}{x} \left(\frac{1}{N} \sum_i v_{ix}^2 \right) = \frac{Nm}{x} \overline{v_x^2}$$

器壁 A_1 所受平均冲力：
$$\overline{F} = \frac{Nm}{x} \overline{v_x^2}$$

A_1 面所受压强：

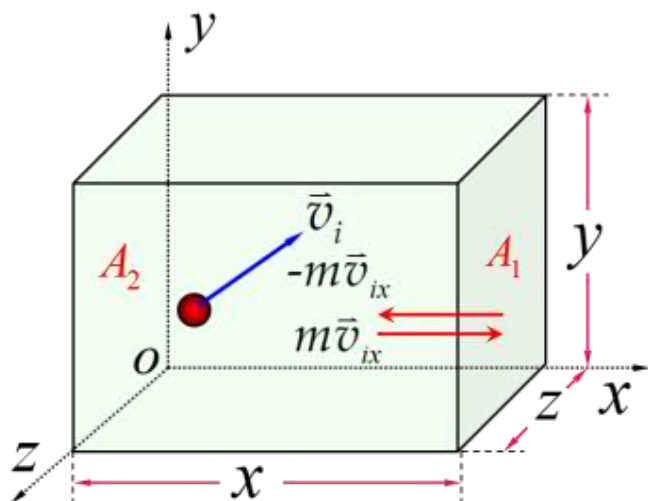
$$p = \frac{\overline{F}}{S_{A_1}} = \frac{\overline{F}}{yz} = \frac{Nm}{xyz} \overline{v_x^2} = \frac{Nm}{V} \overline{v_x^2} = nm \overline{v_x^2}$$

第 i 个分子，单位时间，施于器壁 A_1 的冲量：
$$\frac{mv_{ix}^2}{x}$$



五、理想气体压强公式

◆大量分子总效应



A_1 面所受压强:

气体压强

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

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

(一个) 分子平均平动动能:

$$\bar{\epsilon}_k = \frac{1}{2}m\overline{v^2}$$

理想气体压强公式:

$$P = \frac{2}{3}n\bar{\epsilon}_k$$

五、理想气体压强公式

理想气体压强公式：

统计关系式



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

宏观可测量量

微观量的统计平均值

分子平均平动动能： $\bar{\varepsilon}_k = \frac{1}{2} m \overline{v^2}$

分子数密度： $n = \frac{N}{V}$

六、温度的微观意义 (本质) (重点)

理想气体压强公式: $p = \frac{2}{3} n \bar{\varepsilon}_k$

理想气体物态方程: $p = nkT$

$\left. \begin{array}{l} p = \frac{2}{3} n \bar{\varepsilon}_k \\ p = nkT \end{array} \right\} \bar{\varepsilon}_k = \frac{3}{2} kT$

(一个) 分子平均平动动能: $\bar{\varepsilon}_k = \frac{1}{2} m \overline{v^2} = \frac{3}{2} kT$

微观量的统计平均

宏观可测量

六、温度的微观意义 (本质) (重点)

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

1、温度是分子平均平动动能的量度。

温度标志着物体内部分子热运动的剧烈程度，它是大量分子热运动的平均平动动能的量度。


2、温度是大量分子的集体表现。

3、在同一温度下，各种理想气体分子平均平动动能均相等。

说明：温度是个统计概念，由微观粒子动能的统计平均值决定。说少数几个分子具有多高的温度是无意义的。

例 12-3

一瓶氦气和一瓶氮气分子数密度相同，分子平均平动动能相同，都处于平衡状态，则：

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

$$\bar{\varepsilon}_k = \frac{3}{2} kT, \quad p = nkT,$$

例 12-4

一瓶氦气和一瓶氮气质量密度相同，分子平均平动动能相同，都处于平衡状态，则：

(A) 温度相同、压强相同。

(B) 温度、压强都不同。



(C) 温度相同，氦气压强大于氮气压强。

(D) 温度相同，氦气压强小于氮气压强。

$$\bar{\varepsilon}_k = \frac{3}{2} kT, \quad p = nkT, \quad \rho = nm$$

六、温度的微观意义（本质）（重点）

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

$$\Rightarrow \overline{v^2} = \frac{3kT}{m}$$

方均根速率：

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



12-5 能量均分定理、理想气体内能

重点

知识点：重点掌握：

- 1、自由度 i 、
(刚性) 理想气体分子的自由度数；
- 2、能量按自由度均分定理；
- 3、理想气体的内能

一、自由度 i

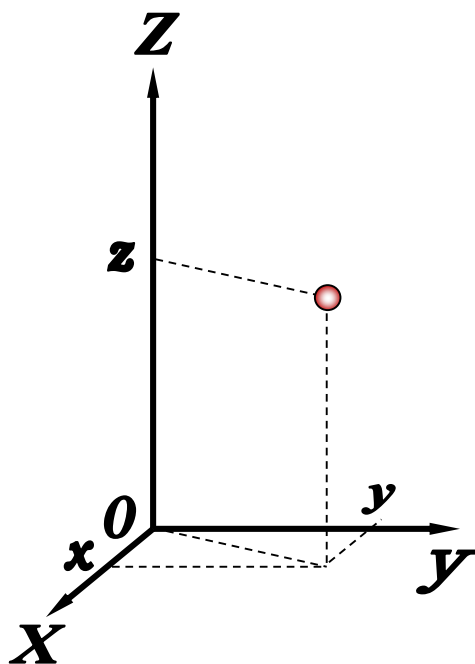
1、自由度： 决定一个物体在空间的位置所需的
 从坐标数角度简单说明 独立坐标数称为该物体的自由度数。

2、理想气体分子（刚性分子）的自由度 i
 不考虑振动

1) 单原子分子

$i = 3$ 平动自由度

质点——位置（ x 、 y 、 z ）



例：氦气、氩气等



一、自由度 i

1、自由度： 决定一个物体在空间的位置所需的 独立坐标数 称为该物体的 **自由度数**。

2、理想气体分子（**刚性分子**）的自由度 i

1) 单原子分子

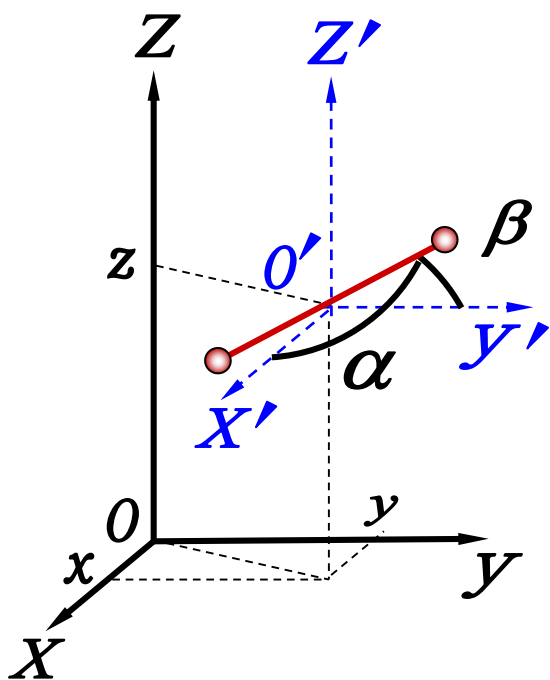
$i = 3$ （3个平动自由度）

2) 双原子分子

刚性细杆 { 质心位置 x 、 y 、 z 平动
杆的方向 α 、 β 转动

$i = 5$ （3个平动+2个转动）

例：氢气、氧气、氮气等



一、自由度 i

1、自由度：决定一个物体在空间的位置所需的独立坐标数称为该物体的自由度数。

2、理想气体分子（刚性分子）的自由度 i

1) 单原子分子

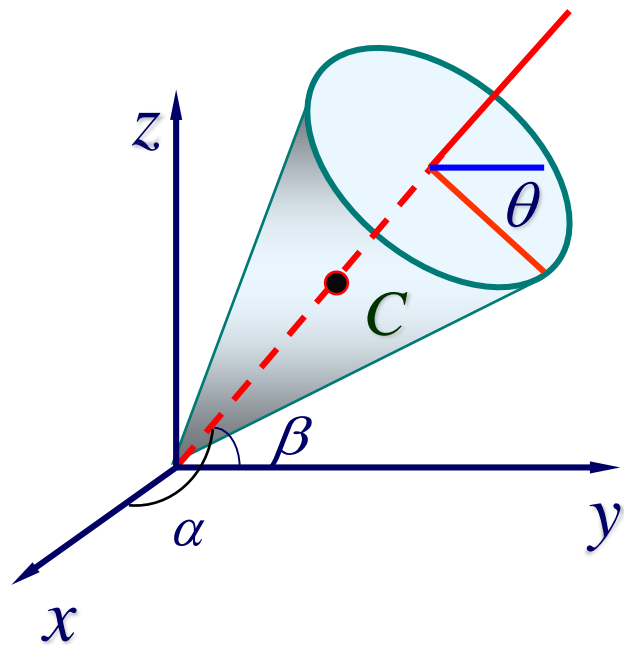
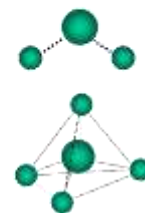
$$i = 3 \quad (3\text{个平动自由度})$$

2) 双原子分子

$$i = 5 \quad (3\text{个平动} + 2\text{个转动})$$

3) 多原子分子

例：水蒸气、
甲烷等气体



刚体 { 位置 x, y, z 平动
方向 α, β 转动
角坐标 θ 转动

一、自由度 i

1、自由度： 决定一个物体在空间的位置所需的独立坐标数称为该物体的自由度数。

2、理想气体分子（刚性分子）的自由度 i

1) 单原子分子 $i = 3$ (3个平动+0个转动)

2) 双原子分子 $i = 5$ (3个平动+2个转动)

3) 多原子分子 $i = 6$ (3个平动+3个转动)

例外，

常温下，二氧化碳分子（ CO_2 ）的所有原子在同一直线上，
等价于刚性双原子分子，总的自由度 $i=3+2=5$

刚性分子自由度

处于平衡态温度为 T 的理想气体，若将气体分子看作刚性分子，如果分子有 t 个平动自由度， r 个转动自由度，则：

$$i = t + r$$

分子 \ 自由度	t 平动	r 转动	i 总
单原子分子	3	0	3
双原子分子	3	2	5
多原子分子	3	3	6

若将分子看作非刚性分子，还要考虑分子的振动动能，按一定的原则确定振动自由度。（略）

二、能量均分定理 (玻耳兹曼假设)

平衡态时, 理想气体分子**平均平动动能**

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

$$\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}, \quad \frac{1}{2} m \overline{v^2} = \frac{1}{2} m \overline{v_x^2} + \frac{1}{2} m \overline{v_y^2} + \frac{1}{2} m \overline{v_z^2} = \frac{3}{2} kT$$

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2} \Rightarrow \boxed{\frac{1}{2} m \overline{v_x^2} = \frac{1}{2} m \overline{v_y^2} = \frac{1}{2} m \overline{v_z^2} = \frac{1}{2} kT}$$

温度为 **T** 的平衡态理想气体

分子的**每一个自由度**对应一份相同的能量: $\frac{1}{2} kT$

二、能量均分定理 (玻耳兹曼假设)

气体处于平衡态时, 分子任何一个自由度的平均能量都相等, 均为 $\frac{1}{2}kT$

——能量(按自由度)均分定理

(一个) 分子平均总动能

分子自由度数为 i

$$\overline{\varepsilon_{\text{总}}} = \frac{i}{2} kT$$

		平动动能	转动动能
{	单原子	$\overline{\varepsilon_{\text{总}}} = \frac{3}{2}kT$	$= \frac{3}{2}kT + 0$
	双原子	$\overline{\varepsilon_{\text{总}}} = \frac{5}{2}kT$	$= \frac{3}{2}kT + \frac{2}{2}kT$
	多原子	$\overline{\varepsilon_{\text{总}}} = \frac{6}{2}kT$	$= \frac{3}{2}kT + \frac{3}{2}kT$

三、理想气体的内能

1、内能：与系统内所有分子热运动相关的能量。

{ 动能
相互作用势能 （理想气体不考虑相互作用势能）
化学能、核能 （不涉及化学反应、核反应）

2、理想气体的内能：

组成理想气体系统的全部分子的平均总动能之和。

三、理想气体的内能

一个分子平均总动能: $\overline{\varepsilon}_{\text{总}} = \frac{i}{2} kT$

◆ 1 mol 理想气体的内能:

$$E = N_A \overline{\varepsilon}_{\text{总}} = N_A \frac{i}{2} kT = N_A \frac{i}{2} \frac{R}{N_A} T = \frac{i}{2} RT$$

◆ ν mol 理想气体的内能: $E = \nu \frac{i}{2} RT$

◆ 理想气体内能变化: $dE = \nu \frac{i}{2} R dT$

理想气体的内能是温度的单值函数

三、理想气体的内能

◆ ν mol 理想气体的内能: $E = \nu \frac{i}{2} RT$

◆ 理想气体内能变化: $dE = \nu \frac{i}{2} R dT$

理想气体的内能是温度的单值函数

理想气体的内能或内能的改变都仅与温度有关，而与压强和体积无关。

这个结论与热力学的实验结果是一致的。

小 结

1、理想气体分子（刚性分子）的自由度

- 1) 单原子分子 $i = 3$ (3个平动+0个转动)
- 2) 双原子分子 $i = 5$ (3个平动+2个转动)
- 3) 多原子分子 $i = 6$ (3个平动+3个转动)

2、能量(按自由度)均分定理

气体处于平衡态时，分子任何一个自由度的平均能量都相等，均为 $\frac{1}{2}kT$ ——能量(按自由度)均分定理

(一个) 分子平均总动能

$$\overline{\varepsilon_{\text{总}}} = \frac{i}{2} kT$$

3、 ν mol 理想气体的内能: $E = \nu \frac{i}{2} RT$

例 5

一体积为 V 的容器内储有氧气（视为理想气体，氧气分子视为刚性分子），其压强为 p ，温度为 T ，已知玻耳兹曼常数为 k 、普适气体常数（摩尔气体常数）为 R ，

则：此氧气系统的分子数密度为 $\frac{p}{kT}$ 、

此氧气系统的内能为 $\frac{5}{2} pV$ 。

$$p = nkT,$$

$$n = \frac{p}{kT}$$

$$E = \nu \frac{i}{2} RT, \quad pV = \nu RT,$$

$$E = \frac{5}{2} pV$$

例 6: 一将 1 mol 温度为 T 的水蒸气分解为同温度的氢气和氧气, 所有气体分子均视为刚性分子,
求: 氢气和氧气的内能之和比水蒸气的内能增加了多少?

解: 方程: $H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2}O_2$

$\nu =$ $1 \text{ mol},$ $1 \text{ mol},$ 0.5 mol

$i =$ $6,$ $5,$ 5

$E = \nu \frac{i}{2} RT =$ $3 RT,$ $2.5 RT,$ $1.25 RT$

$$\Delta E = (E_{H_2} + E_{O_2}) - E_{H_2O} = \frac{3}{4} RT$$

例 7 : 容积为 $V = 2.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 的容器中, 有内能为 $E = 6.75 \times 10^2 \text{ J}$ 的

(活页册24、9题) **刚性双原子分子**的理想气体系统,

求: 1) 气体的压强 $P = ?$ 2) 若: $N = 5.4 \times 10^{22}$, 则 $\bar{\varepsilon}_k = ?$ $T = ?$

解: 1) $E = \nu \frac{i}{2} RT, \quad pV = \nu RT,$

$$\Rightarrow E = \frac{i}{2} pV = \frac{5}{2} pV \Rightarrow p = \frac{2E}{5V} = 1.35 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$2) \quad pV = \nu RT = \frac{N}{N_A} RT = NkT$$

$$\Rightarrow T = \frac{pV}{Nk} = 3.62 \times 10^2 \text{ K}$$

$$\bar{\varepsilon}_k = \frac{3}{2} kT = 7.49 \times 10^{-21} \text{ J}$$