知识点十一 气体动理论

【内容预览】

<table>
<tr><th>知识体系</th><th colspan="3">具体知识点</th><th>解题要点</th></tr>
<tr><td rowspan="6">热力学系统</td><td colspan="3">热力学系统的描述及类型</td><td rowspan="6">理解光热力学系统的相关概念，重点把握平衡态和热力学过程的概念</td></tr>
<tr><td colspan="3">宏观量与微观量</td></tr>
<tr><td colspan="3">平衡态与状态参数</td></tr>
<tr><td colspan="3">热力学过程和过程曲线</td></tr>
<tr><td colspan="3">热力学第零定律</td></tr>
<tr><td colspan="3">温度和温标的概念</td></tr>
<tr><td rowspan="4">理想气体系统</td><td colspan="3">理想气体的概念和微观模型</td><td>了解理想气体的相关力学假设</td></tr>
<tr><td colspan="3">理想气体状态方程</td><td>牢记公式 $pV=\nu RT$</td></tr>
<tr><td colspan="3">理想气体的压强</td><td>压强 $p=\frac{2}{3}\bar{\varepsilon}_t n$</td></tr>
<tr><td colspan="3">理想气体的温度</td><td>温度 $\bar{\varepsilon}_t=\frac{3}{2}kT$</td></tr>
<tr><td rowspan="5">能均分定理</td><td colspan="2" rowspan="3">气体分子的自由度</td><td>平动自由度</td><td rowspan="3">掌握不同类型分子的自由度个数，尤其是转动自由度和振动自由度</td></tr>
<tr><td>转动自由度</td></tr>
<tr><td>振动自由度</td></tr>
<tr><td colspan="3">能量按自由度均分定理</td><td>每个自由度的平均动能都等于 $\frac{1}{2}kT$</td></tr>
<tr><td colspan="3">气体分子的平均振动势能</td><td>平均振动势能与平均振动动能相等</td></tr>
<tr><td rowspan="5">理想气体的内能</td><td colspan="2" rowspan="3">平均总动能</td><td>平均平动动能</td><td rowspan="3">$\bar{\varepsilon}_k=\frac{1}{2}(t+r+s)NkT$</td></tr>
<tr><td>平均转动动能</td></tr>
<tr><td>平均振动动能</td></tr>
<tr><td colspan="3">平均振动势能</td><td>$\bar{\varepsilon}_p=\frac{s}{2}NkT$</td></tr>
<tr><td colspan="3">理想气体的内能</td><td>$E=\bar{\varepsilon}_k+\bar{\varepsilon}_p$</td></tr>
<tr><td rowspan="2">气体分子的速率和能量分布</td><td rowspan="2">麦克斯韦速度分布律</td><td colspan="2">速度分布函数</td><td>掌握速度分布函数的物理意义，能够理解速率分布曲线</td></tr>
<tr><td>分子的三个特</td><td>平均速率 $\bar{v}$</td><td>理解三种特征速率的物理含义，牢记三个</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td rowspan="5"></td><td rowspan="2"></td><td rowspan="2">征速率</td><td>方均根速率 $\sqrt{\overline{v^2}}$</td><td rowspan="2">特征速率的计算公式</td></tr>
<tr><td>最概然速率 v_p</td></tr>
<tr><td colspan="3">麦克斯韦-玻尔兹曼能量分布律</td><td rowspan="3">了解相关知识点，记忆公式</td></tr>
<tr><td colspan="3">气体分子的平均自由程</td></tr>
<tr><td colspan="3">气体分子的平均碰撞频率</td></tr>
<tr><td rowspan="3">分子的运输过程</td><td colspan="3">动量的运输—内摩擦或粘滞现象</td><td rowspan="3">理解三种运输过程的基本规律</td></tr>
<tr><td colspan="3">能量的运输—热传导</td></tr>
<tr><td colspan="3">质量的运输—扩散</td></tr>
</table>

【知识清单】

§11.1 热力学系统

一、热力学系统的基本概念

1.将要研究的对象（宏观物体）称为热力学系统，简称系统；系统之外的一切物体或外界环境称为外界。

2.孤立系统：系统与外界既无能量交换又无质量交换；

封闭系统：系统与外界有能量交换但无质量交换；

开放系统：系统与外界既有能量交换又有质量交换。

3.宏观量：系统的体积、温度、压强等；微观量：分子的质量、位置、速度、动能、动量等。

4.状态参量：温度、体积、压强等。

5.平衡态：在不受外界影响的条件下，一个系统的宏观性质不随时间改变的状态。

6.**准静态过程：指的是除了初、末状态以外每一个中间态也都是平衡态的过程**；

非准静态过程：指的是中间态出现非平衡态的过程。

☞**注意：**无限缓慢进行的热力学过程也是准静态过程。

§11.2 理想气体系统

一、理想气体的微观模型

微观模型的内容：

（1）分子本身大小与分子间平均距离相比可忽略，分子可看成质点；

（2）除碰撞外，分子间相互作用可忽略；

（3）气体分子间以及气体与器壁间的碰撞可看成完全弹性碰撞，遵守动能定理和动量守恒定律。

二、热力学第零定律

如果系统 A 和系统 B 分别于系统 C 的同一状态处于热平衡，那么 A、B 两系统必定也处于热平衡。

三、理想气体状态方程

由气体的基本实验定律，可得平衡态时质量为 m 的理想气体的压强、温度、体积之间的关系为

$$pV=\nu RT$$

其中，$\nu=m/M$ 为气体的摩尔数，M 为气体的摩尔质量，$R=8.31J/(mol\cdot K)$ 为气体普适常量。

引入玻尔兹曼常量 $k=\dfrac{R}{N_A}=1.38\times10^{-23}J/K$

可将状态方程改写为 $pV=\nu N_A kT=NkT$ 或 $p=nkT$

式中，$n=\dfrac{N}{V}$ 是单位体积内的分子数，称为分子数密度。

四、理想气体的压强和温度

理想气体平衡时的统计规律：$\overline{v_x}=\overline{v_y}=\overline{v_z}=0$，$\overline{v_x^2}=\overline{v_y^2}=\overline{v_z^2}=\dfrac{1}{3}\overline{v^2}$

理想气体压强公式：$p=\dfrac{1}{3}nm\overline{v^2}$，又因为 $\overline{\varepsilon_k}=\dfrac{1}{2}m\overline{v^2}$，所以 $p=\dfrac{2}{3}n\overline{\varepsilon_t}$

理想气体温度公式：将公式 $p=\dfrac{2}{3}n\overline{\varepsilon_t}$ 与状态方程 $pV=nkT$ 进行比较，得出 $\overline{\varepsilon_t}=\dfrac{3}{2}kT$

五、能量均分定理

1.自由度：自由度是用来确定物体空间位置的独立坐标数，是描述运动自由程度的物理量。

2.气体分子的自由度：平动自由度，转动自由度，振动自由度。

分子种类		t	r	s	$i=t+r+s$
单原子分子		3	0	0	3
双原子分子	刚性	3	2	0	5
	非刚性	3	2	1	6
多原子分子	刚性	3	3	0	6
	非刚性	3	3	$3n-6$	$3n$

☞注意：分子的平动自由度均为 3，转动自由度和振动自由度个数随分子种类变化。对于不同种类分子的三种自由度个数一定要牢记。

3.能量按自由度均分定理：对于处在温度为 T 的平衡态下的系统，气体分子每个自由度的平均动能相等，都等于 $\dfrac{1}{2}kT$。

六、理想气体的内能

1.一个分子的平均总动能：$\overline{\varepsilon_k}=\dfrac{1}{2}(t+r+s)kT=\dfrac{i}{2}kT$。

2.一个分子的平均振动势能：假如把分子内原子之间的微振动近似看成谐振动，由振动学理论可以证明：谐振动在一个周期内，平均振动势能等于平均振动动能。故可知一个分子的平均振动动能为：$\overline{\varepsilon_p}=\dfrac{s}{2}kT$。

3.气体的内能：理想气体的内能是它所包含的 N 个分子能量的总和，$E=\dfrac{1}{2}(t+r+2s)NkT$。

气体内能：气体的内能是指它所包含的所有分子的能量和分子之间的相互作用势能的总和，而理想气体没有分子之间的势能，所以内能就是它所包含的 N 个分子能量的总和。对于理想气体，其内能只是一个与温度有关的量。

§11.3 气体分子的速率

一、速率分布函数

1.平衡状态下的气体分子速率分布为：$f(v)=\dfrac{d\omega}{dv}=\dfrac{dN_v}{Ndv}$

它表示占有体积V的N个气体分子中速率介于v附近单位速率间隔内的分子数dN_v占总分子数N的比，或分子速率取值在v附近单位速率间隔内的概率，也称$f(v)$为概率函数。

2.分布函数的归一化条件：$\displaystyle\int_N \frac{dN_v}{N}=\int_0^{\infty} f(v)dv=1$。

☞注意：对于一定的气体，分布函数只与系统温度有关；在一定的温度下，分布函数只与气体的种类有关。

二、分子的三个特征速率

1.平均速率$\bar{v}$：$\bar{v}=\sqrt{\dfrac{8kT}{\pi m_f}}=\sqrt{\dfrac{8RT}{\pi M}}\approx 1.60\sqrt{\dfrac{RT}{M}}$；

2.方均根速率$\sqrt{\overline{v^2}}$：$\sqrt{\overline{v^2}}=\sqrt{\dfrac{3kT}{m_f}}=\sqrt{\dfrac{3RT}{M}}\approx 1.73\sqrt{\dfrac{RT}{M}}$；

3.最概然速率v_p：$v_p=\sqrt{\dfrac{2kT}{m_f}}=\sqrt{\dfrac{2RT}{M}}\approx 1.41\sqrt{\dfrac{RT}{M}}$。

三、分子的平均碰撞次数和平均自由程

1.碰撞频率：一个分子在每单位时间内与其他分子的碰撞次数。统计意义下，平均碰撞频率可表示为：

$$\bar{Z}=\sqrt{2}n\pi d^2\bar{v}\text{，}d\text{ 为分子的有效直径}$$

2.自由程：分子连续两次碰撞之间自由通过的直线路程。统计意义下，平均自由程可表示为：$\bar{\lambda}=\dfrac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p}$

【常考题型】

题型 1：理想气体状态方程

1.牢记状态方程以及压强、温度公式；

2.利用题目所给条件，对状态方程进行灵活变换，进行解题。

例 11-1 两种不同类型的理想气体，它们的温度和压强都相同，但体积不同，则它们的单位体积内分子数n，单位体积内的气体质量ρ之间的关系是：（　　）

A.n不同，ρ不同　　B.n不同，ρ相同　　C.n相同，ρ不同　　D.n相同，ρ相同

解：根据状态方程$pV=\nu RT$，可得$n=\dfrac{p}{kT}$，由题意可知，这三个量在两气体之间是相等的，所以n相等，将状态方程变形：$pV=\dfrac{m}{M}RT$，得：$\rho=\dfrac{m}{V}=\dfrac{pM}{RT}$，因为两气体不同，所以$M$不同，而其他量相等，所以$\rho$不同，选$C$。

题型 2：理想气体的内能

1.理解气体分子自由度和能均分定理的概念，并牢记不同种类分子的自由度个数；

2.利用自由度和能均分定理求气体的平均平动动能、平均转动动能、平均振动动能和平均总动能；

3.牢记平均振动势能与平均振动动能相等，以此来求理想气体的内能。

例 11-2 摩尔数相同，温度相同的氢气（H_2）与氦气（He）中，分子的平均总动能较小的为_________气，而内能较大的为_________气。

解：因氢气为双原子分子，其平动自由度为 $t=3$，转动自由度为 $r=2$，振动自由度为 $s=0$，而氦气为单原子分子，其平动自由度为 $t=3$，转动自由度为 $r=0$，振动自由度为 $s=0$。分子的总平均动能包括平均平动动能、平均转动动能和平均振动动能，其公式为：$\overline{\varepsilon_k}=\frac{1}{2}(t+r+s)kT$，可见氦气的平均总动能较小。理想气体的内能只是分子各种运动能量的总和。$E=\frac{i}{2}\nu RT$，所以氢气的内能较大。

例 11-3 一个能量为$10^{12}eV$的宇宙射线粒子射入氖管中，氖管中含有氖气$0.01mol$，如果宇宙射线粒子的能量全部被氖气分子所吸收而变为热运动能量，氖气温度能上升几度？

解：氖气为单原子分子，$i=t+r+s=3$，由$E=\frac{i}{2}\nu RT$，得$\Delta E=\frac{i}{2}\nu R\Delta T$，

代入数值可得$\Delta T=\frac{2\Delta E}{3\nu R}=\frac{2\times1.6\times10^{-7}}{3\times0.01\times8.31}K=1.28\times10^{-6}K$。

题型 3：气体分子的速度

1.理解速率分布函数的物理意义；

2.能够读懂速率分布曲线图，掌握速率分布与温度和气体种类的关系；

3.牢记分子三个特征速率的计算公式。

例 11-4 $f(v_p)$表示速率在最概然速率v_p附近单位速率区间内的分子数占总分子数的百分比。那么，当气体温度降低时，下述说法正确的是（　　）

A.v_p变小；而$f(v_p)$不变　　B.v_p和$f(v_p)$都变小

C.v_p变小；而$f(v_p)$变大　　D.$f(v_p)$不变；而$f(v_p)$变大

解：温度降低会使速率降低，再由归一化条件$\int f(v)dv=1$可知，$f(v_p)$会变大，所以答案选 C.

例 11-5 设分子的速率分布函数为$f(v)$，总分子数为N，分子密度为n，则处在$v\sim v+dv$速率区间内的分子数为（　　）

A.$nf(v)dv$　　B.$Nf(v)dv$　　C.$f(v)dv$　　D.$Nnf(v)dv$

解：$f(v)dv$表示区间$v\sim v+dv$内气体分子占总分子数的百分比，再乘以N就是该区间内的分子数 。

例 11-6 在容积为$3.0\times10^{-2}m^3$的容器中，储有$2.0\times10^{-2}kg$的气体，其压强为50.7×10^3Pa。试求该气体分子的最概然速率、平均速率以及方均根速率。

解：由状态方程$pV=\frac{m}{M}RT$得$\frac{M}{RT}=\frac{m}{pV}=\frac{2.0\times10^{-2}}{50.7\times10^3\times3.0\times10^{-2}}kg/(Pa\cdot m^3)=13.15\times10^{-6}kg/(Pa\cdot m^3)$

$$\text{所以}v_p=\sqrt{\frac{2RT}{M}}=\sqrt{\frac{2}{13.15\times10^{-6}}}m/s=389m/s\text{，}\bar{v}=\sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}=\sqrt{\frac{8}{3.14}}\frac{v_p}{\sqrt{2}}=439m/s$$

$$\sqrt{\overline{v^2}}=\sqrt{\frac{3RT}{M}}=\sqrt{\frac{3}{2}}v_p=477m/s$$

【精选习题】

微信扫码关注公众号“学解”，回复“大物习题”即可获取