

第一章 分子热运动 热和功

一、知识结构

本章内容由两部分组成。一部分以气体动理论为核心，介绍分子论的基本内容，以及证实气体动理论基本论点的重要实验基础；另一部分以物体的热力学能为核心，介绍改变物体热力学能的两种方法和能的转化与守恒定律。

气体动理论由相辅相成的四个部分组成：宏观物体是由大量分子组成的；分子间有空隙；分子永不停息地做无规则热运动；分子之间存在着相互作用的引力和斥力。对这一基本理论，教材在初中物理的基础上着重作了以下三方面的充实和引申：

分子的大小和质量是多少？如何借助阿伏加德罗常数进行计算？并提出了测定分子直径的单分子油膜实验法。

介绍确认“分子永不停息地做无规则运动”的典型科学实验——布朗运动。

定性地分析了分子间的相互作用力，并在此基础上引入了分子动能和分子势能的概念。运用气体动理论的观点，教材说明物体热力学能的意义及温度的微观本质，进而通过论述做功与热传递这两个不同的物理过程，对改变物体的热力学能具有等效性的实验事实，揭示自然界最基本、最重要的定律——能的转化和守恒定律。

这种一方面从微观角度，用气体动理论的观点认识热现象，另一方面从宏观的角度，用能量的观点认识热现象的方法，是热学研究的特色。从这两种不同研究方法出发，去学习和认识物理知识，符合学生的认识特点和规律，对学生能力的培养是有益的。

本章的知识结构如下图（见下页）所示。

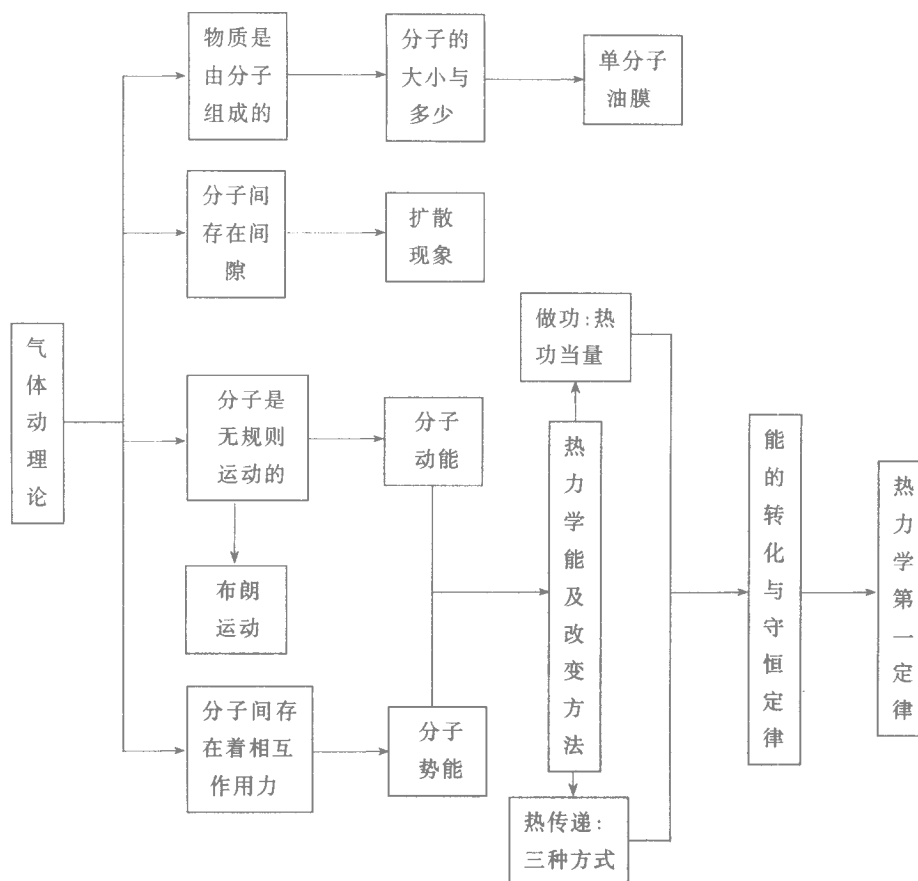
二、物理学史与物理学家

气体动理论的建立

气体动理论是随着人们对物质微观结构的探索逐步建立起来的。

早在 2400 多年前，古希腊的著名思想家德谟克利特（前 460—前 370），就曾根据前人的思想提出了物质的微粒结构假说。德谟克利特很善于观察和思考，据说有一次他在海边散步，看到海岸上的沙滩都是一粒粒微小的沙子组成的，于是就推想到一个他久思未解的答案——自然界的物质也都应该由最小的微粒组成。他把这些微粒称为“原子”，意指构造物质的原始粒子。

与此同期，我国古代哲人公孙龙、墨家学派、印度的耆教等，也都提出了自己的古原子论。但后来一段相当长的时期中，由于封建统治的禁锢，“物质是由原子构成的”这种唯物主义思想，没能得到进一步发展。



历史发展到 16 世纪，在工程师追求热机效率的进程中，开始了对热的本质的探索。当时存在两种关于热本质的学说。一种学说认为，热是一种特殊的物质，即热质说。另一种学说则继承和发展了远古的原子论思想，从而提出了气体动理论。

法国学者伽桑狄是发掘和倡导古代原子论思想的热情先行者。1638 年他就提出假设：各种物质都是由大量的在各个方向运动的坚硬粒子所组成；各种不同物质粒子的不同形状，使它们以不同形式进行结合并表现出不同的性质。利用这一假说，伽桑狄解释了气、固、液三态的区别。

伽桑狄的成功，使不少科学家重新接受了原子论的思想：1678 年胡克提出，空气是由大量快速运动的粒子组成的，它们对四壁的频繁碰撞，形成了空气对器壁的压力；1738 年，瑞士物理学家丹尼尔·伯努利继承了胡克的思想，并推算出了气体压强与体积成反比的玻意耳定律，从而肯定和发展了分子运动假说；此后，罗蒙诺索夫、拉瓦锡、拉普拉斯等相继提出了热的动理学假说，认为物质中的分子处于永不停息的无规则运动中，物质的热能就是分子无规则运动的动能。

19 世纪 60 年代，著名物理学家麦克斯韦、克劳修斯、玻尔兹曼等人在总结前人经验的基础上，开始在运动理论中运用统计的方法，认为物质是数目巨大的分子集合。从本质上说，热现象并不是一个分子的表现，而是大量分子集体行为的共同表现。所以，尽管我们无法描述气体中每个分子的运动特征，但用统计的方法，却能探索物质大量分子集体性质的一般统计规律，从而阐明热现象的本质。这样根据气体动理论对于压强、温度、热容量等热学物理量不但可以做出定性的分析，还可以做出定量的研究。

在 20 世纪初，当科学家用实验观测证实了分子和原子的真实性（如卢瑟福 α 粒子散射实验），特别是爱因斯坦等人在理论上对布朗运动做出解释后，气体动理论已成为人们研究物质世界的一个系统的理论了。

三、重点、难点解析

1. 气体动理论的基本内容与实验基础

气体动理论的内容是：物质是由大量分子组成的；分子间存在间隙；分子永不停息地做无规则运动；分子间存在着相互作用的引力和斥力。

(1) 分子的大小 分子虽然肉眼看不见，也摸不着，但它的客观存在已被大量的物理、化学实验所证实。科学发展到今天，某些有机物的巨型分子，已经可以从电子显微镜下被观察到，利用先进的电子扫描显微镜，人们甚至可以实现“操作原子”的理想。

分子没有一个固定的形状，但为了学习和研究的方便，我们往往以两种模型来认识分子，一种是把分子看成球形，另一种则把分子视为正立方体。在研究分子的大小时，无论将分子看成什么模型，都是一种方法上的近似。所以分子的大小只有在估算时有近似的意义，没有绝对的意义。在一般问题的处理中，这两种模型计算的结果虽然具体数字可能不同，但数量级却是一致的。

如将铜原子视作球形，其直径为

$$d = \sqrt[3]{\frac{6V_0}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{6M}{\rho\pi N_A}}$$

$$= \sqrt[3]{\frac{6 \times 6.35 \times 10^{-2}}{8.90 \times 10^3 \times 3.14 \times 6.02 \times 10^{23}}} \text{ m} \approx 2.83 \times 10^{-10} \text{ m}$$

而将铜原子看成一个立方体，则其边长为

$$d = \sqrt[3]{V_0} = \sqrt[3]{\frac{M}{\rho N_A}} = \sqrt[3]{\frac{6.35 \times 10^{-2}}{8.90 \times 10^3 \times 6.02 \times 10^{23}}} \text{ m} \approx 2.28 \times 10^{-10} \text{ m}$$

现在，测定分子直径的方法已有许多种，但单分子油膜法仍是一种基本的粗测方法：将一滴已知体积 V 的油滴在水面上，让其充分展开成一单分子的油膜（如图 1.1 所示）。如果假定油分子是球形的，并且油膜中的分子是一个挨着一个紧密排列的，那么便可认为油膜的厚度就等于油分子的直径。因此

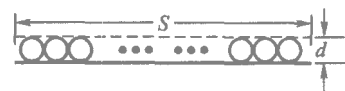


图 1.1

$$d = \frac{V}{S}$$

(2) 分子的运动 物体内的分子永不停息地做无规则运动的观点，是建立在实验事实的基础上的。其中最著名的重要事实是扩散现象和布朗运动。

扩散现象 气体和液体的扩散现象，是人们在日常生活中熟知的事实。其实，固体间同样也能产生扩散现象，只是其现象不太明显罢了，例如在半导体工业中，人们利用扩散作用将一些微量元素向半导体晶片表面渗透，从而改变了晶片内微量元素的浓度分布及导电特性。

布朗运动 1827 年由英国植物学家布朗发现的布朗运动，在科学思维方法上，巧妙地借

用了等效代换的思想，使人们直观而形象地认识到了分子的热运动特征。

布朗用显微镜首先观察到悬浮在水中的花粉颗粒在不停地做无规则运动，最早，他以为这是一种生命运动。但当他用 100 年前的枯死花粉和一些无机物的微粒再做实验时，仍能发现微粒的无规则运动。后来，人们通过大量的实验证实，只要悬浮在流体中的颗粒足够小（直径约小于 10^{-3} mm），在任何液体或气体中都可以发生这种运动——布朗运动。

布朗运动是怎样产生的呢？直到 19 世纪后半叶，通过德耳索和拉姆塞等人的积极努力，特别是 1905 年爱因斯坦的研究成果，才使人们对布朗运动有了一个正确的解释：由于布朗颗粒受到周围分子不平衡的碰撞所产生的力，促使了它们的运动。由于分子热运动的剧烈变化产生一种涨落不定的力，所以布朗颗粒的运动是无规则的。每个布朗粒子在通常情况受流体分子碰撞约 10^{21} 次/s 在气体中也有 10^{15} 次/s，在如此频繁的碰撞下粒子的瞬间运动是无法观测的，所以我们能观察到的只能是一段宏观短时间内粒子的一种平均运动。当悬浮颗粒足够小时，在任何时间液体（或气体）分子从各个方向对布朗颗粒的撞击作用都是不平衡的，所以布朗颗粒就朝着撞击作用较弱的方向运动，这就是产生布朗运动的原因。

由此可见，布朗运动与分子运动不同。分子是那么的小，以至于我们无法直接去观察它的运动，通过光学显微镜也只能看到的是由大量分子组成的布朗颗粒的运动。所以布朗运动不是分子的运动。但是布朗运动却给我们传递了分子运动的信息，布朗颗粒的无规则运动，反映了液体（或气体）分子的无规则运动特征。

(3) 阿伏加德罗常数的意义 阿伏加德罗常数是物理学中的一个重要的常数，它是联系微观世界和宏观世界的桥梁。对此，我们首先应记住这个巨大的数字 $N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ，即 1 mol 的任何物质，其所含的粒子数都为 6.02×10^{23} 个。

设某种物质的摩尔质量为 M ，一个分子的质量为 m 则

$$m = \frac{M}{N_A}$$

对于固体和液体而言，如果假定它们的分子是一个挨着一个排列的，若其摩尔体积为 V_m ，一个分子的体积为 V 则

$$V = \frac{V_m}{N_A}$$

认识上述两种关系时应注意的是：前者是一个准确的关系，对气、固、液三态物质都适用；后者则是一个近似关系，它必须假定分子是紧密排列的。这一假定只有对固体和液体才能看作是近似成立的，所以根据这一关系实际进行的都是估算。

借助阿伏加德罗常数，把物质世界中宏观与微观、大量与个别的现象辩证地统一起来，对学生正确认识物质运动规律、培养科学的思维方法，都是十分重要的。

(4) 正确理解分子间力 物体不易被拉伸，也不易被压缩的事实，说明物体内部分子间既存在引力又存在斥力。将一个固体在截断的地方再结合，一般在常压下是办不到的。这是因为断面上的分子能接触的很少，分子间相对距离大，吸引力很弱的缘故。但如果把两块纯净的、表面平整的铅块紧压在一起，却可以吊起几十牛顿的重物，这是由于两段平整的铅块已达到了充分靠近的原因。

分子间力的作用规律，可以用图像法直观地研究（如图 1.2 所示）。图像表明，分子间的引力和斥力的大小都跟分子间距有关。图中曲线 I、II 分别表示了分子间的斥力与引力随分子间距 r 变化的规律，虽然分子间的引力和斥力都随着分子间距的增大而减小，但斥力的变化要比引力衰减得快一些；我们通常所说的分子间力，其实是如曲线 III 所示的分子间引力和斥力的合力，其特点是：

当分子间距约等于 r_0 ($\approx 10^{-10}$ m) 时，引力斥力平衡，此时分子间力为零；

当分子间距小于 r_0 时，斥力大于引力，此时分子间力表现为斥力；

当分子间距大于 r_0 时，引力大于斥力，此时分子间力表现为引力；

当分子间距大于 10^{-9} m 时，引力和斥力几乎减小到零，此时可以认为分子间无相互作用力了。

分子之间的相互作用力随距离变化而变化的特点，也反映了由量变而引起质变的辩证唯物主义哲学观点的普适性。

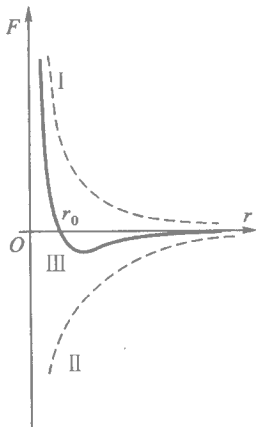


图 1.2

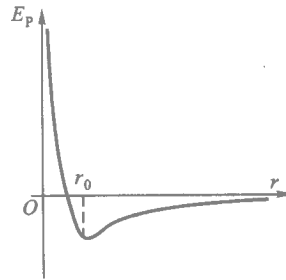


图 1.3

2. 物体的热力学能

(1) 分子动能 物体内的分子永不停息地做着无规则运动，因而分子具有动能。

物体内部大量分子做无规则运动时，由于相碰撞的结果，不仅不同分子的动能不同，而且同一分子在不同时刻的动能也不相同。因而，分子热运动的剧烈程度不是由个别分子动能的大小能反映的，而应由大量分子的动能平均值——分子平均动能的大小来反映。所以从本质上讲，温度是物体内部热运动平均动能大小的标志。

从此我们进一步看出，热学宏观量（如温度）与微观量（如分子动能）和平均值之间存在着一定的联系。也就是说，宏观量所反映的总是大量分子的集体特征，而不是个别分子的行为。我们把宏观量与微观量的平均值之间的这种联系，称为统计规律。

(2) 分子势能 由于分子间存在着相互作用力，因而分子间具有由它们相对位置决定的势能，称为分子势能。

从微观上讲，分子势能与重力势能相似，也与分子间距离有关。当分子间距发生变化时，分子势能也将发生变化，其规律可以用图 1.3 表示：

在一般的研究中，我们规定 $r = \infty$ 时，分子势能为零；

② 当分子合力为零即 $r = r_0$ 时分子势能最小，但不一定为零；

当分子之间的作用力表现为引力时（ $r > r_0$ ），增大分子之间的距离要克服分子引力做功，故分子势能将随着分子间距的增大而增大；

当分子间的作用力表现为斥力（ $r < r_0$ ）时，减小分子间的距离要克服分子斥力做功，因此分子势能将随分子间距的减小而增加

由于分子间距变化的宏观反映是物体体积的变化，因而从宏观上分析，分子势能与物体的体积有关，当物体的体积发生变化时，分子势能将发生改变。对气体而言，分子之间的作用力表现为引力，因此当体积膨胀时，分子势能将增加；当体积被压缩时，分子势能则减小。

(3) 物体的热力学能 物体的热力学能是指物体内所有分子的无规则运动的动能和分子势能的总和。热力学能与物质的种类、质量、物态、温度、体积等反映状态的参量有关。一定质量的理想气体的热力学能只与气体的温度有关。

在理解热力学能的概念时，要注意它与机械能的区别。热力学能与机械能分别与两种不同的运动形式相对应，是两种不同形式的能。热力学能是由于微观上大量分子的热运动及分子间的相互作用而使物体具有的能，而机械能则是由宏观物体的运动及物体间的相互作用而使物体具有的能。所以，一个具有机械能的物体，同时也具有热力学能，即使这个物体的机械能被消耗掉，它仍具有热力学能。

同其他形式的能可以相互发生转化一样，物体的机械能和热力学能之间在一定条件下也可以发生相互转化。

3. 物体热力学能的变化

做功和热传递是改变物体热力学能的两种方式。

从物体热力学能改变的角度分析，这两种方式达到的效果是相同的，因此，做功和热传递是等效的。

从能量转化的角度来分析，做功和热传递则是两个本质完全不同的物理过程。通过做功改变物体的热力学能，是其他形式的能向热力学能的转化过程；而通过热传递改变物体的热力学能，则是物体间热力学能的转移过程。

在大量实验基础上得出的能量转化和守恒定律，是自然界中最普遍、最基本的规律之一，恩格斯曾称之为 19 世纪自然科学的三大发现之一。

在学习能量转化和守恒定律时，应重点理解如下两点：

任何能量转化都是在做功过程（或热传递）中完成的，能量转化的多少可以用做功（或热传递）的多少来量度，即功（或热量）是能量转化的量度。我们学习功（或热量）的意义也在于此。

不同形式的能量转化，意味着物质的运动由一种形式转化为了另一种形式。所以运用能量转化的观点分析问题，是沟通不同运动形式的重要纽带。

4. 热力学第一定律

一个热学系统热力学能的变化，取决于系统与外界交换的热量和做功情况，用数学式可表示为

$$U = Q - W$$

它揭示了热量（ Q ）、功（ W ）和热力学能变化（ U ）之间的关系，我们称为热力学第一定律。其

实质是包括热力学能在内的能量转化和守恒定律。

使用热力学第一定律时，除注意统一各量的单位为 J 外，还应正确地使用各量的符号（表 1.1）。

表 1.1 各量正、负所代表的物理意义

	+	-
W	物体对外界做功	外界对物体做功
Q	物体从外界吸热	物体向外界放热
U	物体的热力学能增加	物体的热力学能减少

四、实验指导

学生实验

(1) 用单分子油膜粗略测定分子的大小 将一滴经酒精稀释的油酸滴到水面上，它便迅速散开；溶液中的部分酒精溶于水，其余的挥发掉，留下的一层油酸的分子层，即为单分子油膜，这样巧妙地将体（滴）转换到面（膜）从而实现了测量分子直径的目的。

本实验的主要特点是：

利用油酸分子的特性，使它在水面上形成单分子层的油膜；

用液滴和稀释的办法控制油膜的大小（ 0.01 cm^3 的纯油酸在水面上所形成单分子油膜可达 $7\sim 8 \text{ m}^2$ ）

本实验的关键是：取得极少量的纯油酸并能准确地测出其体积。

为方便 我们通常是将 1 cm^3 的油酸放入一只 200 cm^3 的容量瓶中，然后将酒精加到刻度线，摇动瓶子，使油酸完全溶解于酒精。如取一滴时，其中纯油酸溶液就是每滴体积的 $1/200$ 。实验时 数出滴满 1 cm^3 的滴数，例如需要 100 滴，则每滴溶液的体积是 $1/100 \text{ cm}^3$ 。这样每滴溶液中 纯油酸的体积就是： $\frac{1}{100} \times \frac{1}{200} \text{ cm}^3 = 5 \times 10^{-5} \text{ cm}^3$ 。

(2) 观察布朗运动 本实验的关键就是配制合格的布朗颗粒悬浊液。一般情况下，用藤黄、碳素墨水、花粉均可配制悬浊液。

藤黄 在中药店和国画社可买到取 1 g 藤黄先溶于 20 g 酒精中，然后加入 80 g 左右的蒸馏水稀释成浓度为 1% 的悬浊液，使用效果最佳。但因藤黄有剧毒，实验要特别小心。

墨水 将碳素墨水以 $30\sim 40$ 倍的清水稀释后，静置几小时使碳粒在重力作用下沉降。然后用吸管吸取杯中中间部分作检查液，既可排除上层的悬浮杂物，又可获得大小适度，颗粒均匀的悬浊液。

花粉（或蜂粮）用镊子取下 $2\sim 3$ 朵雄性黄瓜（或南瓜）花的花粉 放在玻璃片上 用移液管滴 $4\sim 5$ 滴清水，用玻璃棒稍加搅拌使花粉的细胞壁破裂，这时许多原生质微粒悬浮于水中，即形成在强光照射下呈淡黄色的悬浊液。

选择适当的显微镜的放大倍数，对提高观察效果是十分重要的，一般选择以不低于 500 倍，

不超过 800 倍为宜,在这样的视场下,实验既便于观察,又便于调节。

(3) 观察分子间的引力 在用内聚力演示仪(两块圆柱形铅块)观察固体分子的引力作用时 要注意:

要用车刀车、刮刀刮的方法使两接触面尽量清洁、平整;

用力时,先将两光洁端面合在一起,在用力挤压的条件下,将两圆柱形铅块沿相反方向转动.旋转时,对某铅块而言,应朝同一方向转动,不能来回转动。

五、物理科学方法

1. 利用模型认识分子世界

模型是理论知识的一种初级形式.进行理论研究时 往往都要从“造模型”入手.利用抽象化、理想化、简约化和类比等方法,把反映研究对象的本质特性抽象出来,构成一个概念或实物的体系 即形成模型。

分子看不见,抓不着,很难想象它的“形状”是怎样的.但为了对热运动作出直观的分析和对诸如分子大小、分子多少等量作出粗略的估算,我们往往把分子假想成最简单的形状——弹性小球或立方体.在这种分子模型的基础上,教材设计了单分子油膜实验,进而粗略地测出了分子的直径;凭借这个模型,成功地解释了布朗运动产生的原因,从而揭示出分子热运动的特征。

2. 利用估算法求分子的大小

物理估算一般是指依据物理规律,对所求物理量的数量级或取值范围进行大致的推算

分子是微小的,一般分子直径的数量级是 10^{-10} m.不同物质分子形状差异很大.任何宏观物体中包含的分子个数是十分巨大的,通过阿伏加德罗常数进行的微观计算是不会精确的,这样微观量的计算常常只要求准确到数量级——这就是微观量的估算。

在处理微观量的估算问题时,应注意如下两点:

(1) 分子模型的正确选取 根据固体、液体和气体的微观结构.在固体和液体的微观估算时.可视固、液体分子为球体或正方体.且分子紧密排列而无间隙(注:实际分子间是有间隙的.但这一理想化处理,对固、液体分子大小的估算在数量级上是相符的),因此固体、液体的宏观体积可认为是大量分子体积之和(这也是油膜法粗略测定分子直径的依据).气体分子线度远小于分子间距离,气体分子分布比较稀疏,可视每个气体分子在一个正方体的空间范围内活动,气体分子在这个正方体的中心.这种气体分子模型给我们估算带来很大方便,如估算气体分子间的距离等。

(2) 阿伏加德罗常数 $N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ 阿伏加德罗常数 N_A 是联系宏观量与微观量的桥梁,是解决微观分子估算问题的关键。

通常称物质的摩尔质量 M 、摩尔体积 V_m 、密度 ρ 以及物质的质量 m 、体积 V 等为宏观量,称一个分子的质量 $m_{分}$ 、体积 $V_{分}$ 和分子的个数 N 等为微观量。

在进行分子估算时,常用到下列几个宏观量与微观量的关系式:

$$\text{一个分子的质量: } m_{分} = \frac{M}{N_A},$$

$$\text{一个分子的体积: } V_{\text{分}} = \frac{M}{\rho N_A} = \frac{V_m}{N_A}$$

(注 对气体, $V_{\text{分}}$ 为一个分子应分配的空间——正方体气体分子模型的体积. 气体分子间平均距离: $d = \sqrt[3]{V_{\text{分}}}$)

$$\text{分子的个数: } N = \frac{m}{M} N_A$$

对于气体, 由于在标准状况下, 1 mol 的气体体积为 22.4 L, 而气体变成标准状况下的体积 V' , 则气体分子的个数

$$N = \frac{V'}{22.4 \text{ L}} N_A$$

分子的直径是 10^{-10} m , 阿伏加德罗常数为 $6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$, 其实都是人们合理估算的结果. 在教材中, 诸如分子的作用间距、气体分子占有的空间体积等不为大家所注重的数量概念, 也都是估算的结晶.

在物理计算中, 采用估算的方法, 往往会使看来错综复杂的问题找到简明的思路, 使计算摆脱繁冗运算的困境.

3. 用统计的规律研究物理现象

由于一个物体分子数目的极其庞大和分子间相互作用的异常复杂, 研究跟分子运动有关的热现象、物质状态变化及固体、液体、气体的性质等问题, 就不能像研究宏观物体的机械运动那样简单, 要想追随每一个分子, 单纯用牛顿力学的方法去研究它的运动状态, 实际上是不可能的, 也是没必要的. 我们只有根据分子的集体的运动特性去确定物质分子运动的规律, 这样所采用的研究方法是统计方法.

统计方法是从物质的微观结构出发, 依据每个颗粒所遵循的力学规律, 用平均的方法研究物体热现象的科学方法, 它是从分子运动的复杂多样性中发现宏观物体的单一确定性的桥梁. 因此, 我们说统计方法是从微观角度研究热学的基本方法. 我们对布朗运动的理解, 就是在统计规律的指导下进行的; 而根据阿伏加德罗常数求出的分子质量和体积, 也不是具体哪一个分子的质量和体积, 而是全体分子的平均质量和体积, 这也是统计规律的重要体现.

六、实际应用

1. 从蒸汽机到内燃机

动力机械按其工作方式可分为内燃机和外燃机两大类. 它是以工质在汽缸内, 还是在汽缸外进行燃烧和能量的转换来划分的. 蒸汽机是以煤做燃料, 采用外燃方法, 由蒸汽锅炉产生蒸汽, 推动汽缸中的活塞做功的外燃机.

蒸汽机 一般认为, 蒸汽机是由瓦特在 1765—1776 年发明的, 实际上早在 1690 年巴本就设计制造了用水蒸气作工质的活塞式发动机, 从而成为近代蒸汽机的最早创始人. 而瓦特则对蒸汽机的关键部件作了改进, 使之达到了实用化. 在瓦特以后的一个世纪里, 蒸汽机几乎成为惟一的动力机, 推动了英国和欧洲的工业革命, 经历了它的全盛时期. 虽然在此期间, 为了提高蒸汽机的热效率和工作性能, 进行了许多改进, 制造技术也更精细. 但蒸汽机这种活塞式外燃机的一系列

无法克服的固有缺点也暴露了出来。

第一，热效率低。因为蒸汽机利用蒸汽作为工质，当时高压蒸汽的最高加热温度只能到 400~500℃，而循环后的排气温度也在 70℃ 以上，加上在锅炉燃烧及蒸汽传输过程中要损失很多热量，因此，当时的蒸汽机的热效率一般只有 5%~8% 最高也只有 10%~13%。

第二 结构笨重。因为产生高压蒸汽的锅炉要耐高压，冷凝器的体积也十分庞大，不能满足交通工具需要可移动的轻便动力机的要求。一些中小企业也无力购置体积庞大、价格昂贵的蒸汽机。

第三 操作不便、运行不安全。启动蒸汽机，单锅炉预热就需要 2 h，而且锅炉在高温、高压下工作易发生爆炸。

内燃机正是在这样的历史背景下应运而生的。

内燃机及其热效率的提高 1860 年，法国的发明家雷诺制成了第一台实用的内燃机，它是单缸、二冲程、无压缩和电点火的煤气机 功率为 745.7~1 491.4 W 其热效率仅 4%。尽管它还比不上蒸汽机，但却具有内燃机本质上的优点，即“内燃”，在一些技术难点解决后热效率迅速超过了蒸汽机。

提高内燃机热效率的关键是要提高空气和燃气混合物在汽缸中的燃烧温度。1862 年，法国工程师德罗沙对内燃机的热力学过程进行了理论分析，提出了提高内燃机热效率的关键措施，即预先压缩空气和燃气的混合物。从热力学的角度看，点火前的压缩，使燃气的温度升高，燃烧可以在更高的温度和压力下进行。实际上，他已认识到压缩比对提高热效率的意义。此外，他还预见到了压缩燃气的原理，提出了四冲程循环：进气、压缩、燃烧和膨胀、排气。这一循环由德国人奥托实现，被称为“奥托循环”。这三个关键的技术思想，即内燃、压缩燃气、四冲程融为一体，使内燃机的热效率迅速超过蒸汽机，达到 26%~28% 相当于蒸汽机的 2 倍。并且内燃机的体积小、重量轻、马力大、操纵方便等优点更是蒸汽机所无法比拟的。表 1.2 列出了内燃机各发展阶段的主要技术参数。表 1.2 中的油耗率是指发动机每千瓦时的耗油量，该指标实际上反映了热效率，而升功率更是内燃机动力性能的重要指标。

表 1.2 内燃机各发展阶段的主要技术参数

技术参数	第一台稳态 Otto 四冲程煤气机(1876)	第一台 Benz 车用内燃机(1886)	Daimler 二缸车用内燃机(1889)	六缸轿车内燃机(1986)
缸数	1	1	2	6
排量/L	6.1	0.98	0.57	3.43
压缩比	2.3	2.68	2.5	10.0
最大功率/kW	2.2	0.65	1.2	160
转速/(r·min ⁻¹)	180	400	920	5 500
最大功率时扭矩/N·m	117	15.5	12.5	277.8
油耗率/(g·(kW·h) ⁻¹)	约 540	1 170	760	240
升功率/(kW·L ⁻¹)	0.36	0.66	2.1	46.7
比重量/(kg·kW ⁻¹)	680	168	62	1.3

汽油机和柴油机 汽油机和柴油机都是内燃机，前者用汽油，后者用价格更便宜的柴油。汽油机早于柴油机研制成功，在 1883 年就制成了第一台四冲程往复活塞式汽油机，且具有重量轻、体积小、功率大的优点。1886 年，德国人本茨将它用作汽车的动力，成为交通工具的主要动力机械。但在采用提高压缩比（即气体进入汽缸后的体积和被压缩后的最小体积之比）来提高热效率时，却受到汽油这种工质本身燃烧特性的限制，即汽油的燃点低，压缩比至多到 7~8 再大就要产生自燃。在此压缩比下，每次循环所能进入汽缸的混合气体量就受到限制。在 1892 年狄塞尔提出了在内燃机中使用压缩点火的技术思想，这样可省去化油器和点火装置。柴油的燃点比汽油高，可以达到更大的压缩比，当时达到 25:1。在柴油机工作中应用了压燃思想，燃烧过程可以在混合气体压缩所可能达到的最高温度下进行，这样，燃烧所能达到的最高温度和压力也高，有利于在工作过程中热能和机械能的转换。所以，从热效率比较，狄塞尔柴油机的热效率要比其他汽油机高 11%。在 1900 年巴黎的世界博览会上，狄塞尔内燃机获得很高的评价。

内燃机的增压系统及提高效率的物理机制 用于航海的大型舰船需要大功率的柴油机，如何在有限的汽缸体积下发出尽可能大的功率，即提高柴油机的升功率（kW/L）单靠向汽缸中多喷燃油是不能解决问题的，关键是要增加进入汽缸的空气量，在此前提下，多喷的油才能完全燃烧。因而就产生了增压技术。在第二次世界大战后，从制造航空发动机积累起来的燃气轮机知识又迅速地使增压技术思想得以实现，产生了利用柴油机燃烧后排出的高温废气推动涡轮增压机，使空气在进入汽缸前先增压，加大进气压力和进气量，喷油量就可相应增加，柴油机的体积不增大，但功率却可成倍地增加。同时柴油机废气中的热能得到了有效地利用，降低了排气的温度，使增压柴油机的热功率循着卡诺定理的方向前进了一步。

燃气轮机发动机 以四冲程为基础的内燃机在一个循环周期的四个冲程中，只有一个冲程（燃烧膨胀冲程）是做功的，因而其做功是不连续的。真正实现连续做功的是燃气轮机。

早在 1873 年布雷顿就提出了燃气轮机的工作原理，它是一种定压燃烧过程。燃气轮机也有四个工作过程，即吸进空气、压缩空气、加入燃料燃烧、排出废气。这四个工作并不像内燃机的四个冲程那样分阶段在汽缸内进行，而是在燃气轮机的不同部位连续进行的。空气先进入一个转子压缩机，被压缩后进入燃烧室，不断喷入燃料，与压缩空气一起燃烧，气体膨胀推动涡轮叶片转动做功，然后废气从排气口排出。燃气轮机的最大优点是连续燃烧做功，故可获得很大的功率。

燃气轮机采用提高燃气燃烧温度的途径来提高热效率。随着制造叶片的耐高温材料的性能的提高，目前燃气温度已可高达 1500 K，但排气温度也较高，达到 700~800 K，因而膨胀气体的利用率较低。为了充分利用排气的热能，就产生了燃气—蒸汽轮机进行联合循环的发动机。因为蒸汽轮机的加热温度一般在 800 K，排气温度为 300 K，所以燃气轮机的排气刚好可作为蒸汽轮机的进气。这样就整体而言，大大地增高了热源的温度和降低了冷源的温度，从而使热效率有了显著的提高，达到 47% 的水平。

2. 城市热岛效应及治理

城市热岛效应的形成和影响 早在 19 世纪 20 年代，就有人发现英国伦敦市区气温要比周围郊区高，以后陆续在许多大城市都观测到这一现象，并把这种城区平均气温比四周郊区和农村稍高的现象形象地称为“城市热岛”，一般城郊平均气温差在 0.5~2℃ 左右，晴朗静风条件下可超过 5~6℃，个别情况可达 10℃ 以上。

城市热岛是城市气候最突出的特征。城市气候是一种在城市化过程中，由城市特殊下垫面

(即大气的下边界)和城市人类活动共同影响下,在区域大气背景上形成的局部地区气候。太阳能是地球唯一的外部能源,但大气对太阳光基本上是透明的,吸收得很少,而对地面的红外辐射的吸收能力却很强,具有选择吸收特性,所以到达地球的太阳辐射先加热下垫面,再由下垫面通过红外辐射 ΔQ_r 、可感热运输 ΔQ_p (伴随着大气中的湍流、乱流引起的空气热量交换)及潜热交换(通过下垫面水分蒸发和植被水分蒸腾) ΔQ_l 等热运输方式烘热大气。下垫面才是低层大气的主要直接热源,下垫面的这三种形式热支出,也就是低层大气从下垫面得到的热收入,但第三项不能直接加热大气,只有在水汽重新凝结时才能释放潜热,可感热及红外辐射运输两项都与下垫面温度成正比,也就是当城区下垫面高于郊区时,城市大气将从下垫面得到更多的热量上述关于地面热收支 ΔQ 的物理过程,在热平衡条件下可简单地表达为地面热量平衡方程:

$$\Delta Q = \Delta Q_s + \Delta Q_p + \Delta Q_r + \Delta Q_l + \Delta Q_a$$

式中 ΔQ_s 是直接吸收的太阳辐射热收入项,日照越强这一项越大,它的大小还和地表反射率大体成反比。最后一项 ΔQ_a 为地面内部储热量的变化,一般在日照增强的过程中为正值储热期,其他时间为负值放热期,其日平均值应接近于零。一天内随着热收入主导项 ΔQ_s 的变化,其他几个支出项相互制约也随着改变,并由此决定了下垫面温度的日变程,如在下垫面热收入不变的条件下,水量充足时,蒸发潜热耗费了大量热量,其他两项支出也就相应减少,下垫面温度相对就比较低,总之,地面热收支处于动态平衡的变化过程中。

从以上地面热量平衡过程中可以看到,在城市化过程中,城市下垫面性质的改变引起城区热量收支和水分循环条件发生很大的变化,对形成“热岛效应”的影响最大。首先,城市化使城区不透水面积比例增大,随之下垫面含水量减少,因而在热量平衡的支出中,潜热运输项 ΔQ_l 明显小于郊区,很显然,城区下垫面温度将高于郊区,因而向大气运输的热辐射 ΔQ_r 和湍流、乱流可感热运输 ΔQ_p 相应增大。此外,下垫面性质的改变还表现在热力特性和几何形状的变化上,以水泥制品覆盖为主的城市下垫面的热导率 κ 和热容 C ,以及由它们计算出的热导纳 μ [$\mu = (\kappa C)^{1/2}$] 都比郊区大,结果城市储热能力明显高于郊区,导致日落后 ΔQ_a 负值大,下垫面释放的大量热量通过热辐射和可感热运输加热大气,使城区降温慢于郊区,成为夜间“热岛”加强的重要因子。城区建筑物形成的街道,白天形成对太阳辐射的多次反射和吸收,各种建筑材料对太阳的反射率相对比较小,热容量比较大,因此能吸收更多的热量。入夜以后,墙体降温慢,热量也不易通过辐射向高层逸散。街道中夜间的“热岛效应”更加明显。另一方面,城市建筑使下垫面粗糙度加大,城区风速普遍小于郊区,聚集的热量更易滞留街道不易扩散。总之,在同等天气条件下,城市下垫面的温度常常高于郊区,这是形成城市热岛的主要原因。

人类活动产生大量的人为热量释放直接加热大气,是“热岛”形成的另一个重要原因。现已证明,高强度的取暖制冷、机动车运行等生产和生活活动排放的大量人为热量及同时所释放的 CO_2 等温室气体都能提高低层大气的温度,对城市“热岛”的维持有一定的作用。城市大气中的悬浮颗粒污染物比郊区多,白天阻挡了一部分太阳辐射,在一定程度上减弱了“热岛效应”,但到了夜间,它又能阻断低层大气的辐射散热过程,加强夜间的“热岛效应”。

天气条件对“热岛”强度的抑扬有决定性的作用,在同一时期,城市中的下垫面和人为热释放等形成“热岛”的因子基本上是不变的,但“热岛”强度却可以变化很大,甚至不出现。研究表明,大气层稳定或小风、无风的晴朗天气,最容易在低空聚集一层温度高于郊区的城市“覆盖层”,使笼

罩在城区上空的热量很不容易散失，“热岛效应”最为明显。相反，风速加大或大气层不稳定，会加强空气在水平和垂直方向的混合与交换，难以形成或维持“热岛”。

随着经济的发展，世界城市化的步伐越来越快，越来越多的人涌向城市，城市成为人类集中居住、从事各种活动的场所，同时也成为人与环境相互作用最强烈、矛盾最尖锐的场所。

“热岛效应”虽然只使得城区温度比郊区高出几度，但在中、低纬度地区的夏季，“热岛效应”犹如雪上加霜，突出地表现为加大了城市内酷暑高温出现的频率和强度，比郊区高温期出现得早，结束得晚。以上海为例，7月份上海城区的极端最高气温和夜间的最低气温均比郊区高出 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。酷热高温($\geq 35\text{ }^{\circ}\text{C}$)持续日数也比郊区多10天以上。酷暑严重影响到居民的生活舒适度、身体健康及城市经济活动，还增加了制冷电力的负载以及事故和火灾发生的频率。此外，城乡温差明显时，可以驱动物区空气上升，郊区空气下沉，并向城区补偿流动，形成“城市热岛环流”。这样，在城区上空很容易聚集成一个与“热岛”相应的“混浊岛”，对空气污染物的扩散极为不利。在高温以及强烈的阳光共同作用下，还可能引起或加强城区光化学烟雾的强度，危害城市居民的生活环境。据对美国得克萨斯州13个城市的研究结果，气温每增高 $2.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，光化学烟雾事故可增加10%。

七、解题指导

1. 解题思路

本章题目类型比较琐碎，为方便，我们可粗略分为三种情形：

(1) 用气体动理论来分析和解决问题。用气体动理论来分析的一些论述说理题，其关键是搞清相关的物理概念的区别与联系，如温度、热量、热力学能等，重点要掌握相关物理量的决定因素，如分子势能、平均动能和分子间力等。搞清楚过程量(如热量、功)与状态量(温度、热力学能)之间的逻辑关系。

(2) 应用阿伏加德罗常数，建立微观量与宏观量互渡的桥梁。解决这类问题的着眼点，一是结合题设条件，选取合适的分子模型(球形或正方体)；二是集中目标确定物质的量；三是用近似估算的方法，使复杂的数学计算因繁就简。

(3) 根据热力学第一定律进行计算。利用热力学第一定律进行计算时，首先要注意公式中的符号法则，其次要注意各量的决定因素，另外还要注意式中各量单位的统一。

2. 典型例题分析

【例 1.1】 一束强烈的阳光照射到昏暗的房间内，常可看见光柱中有悬浮在空气中的微尘做无规则运动。这种运动是不是布朗运动？为什么？

【分析】 有同学误认为所观察到的现象是由布朗运动造成的。事实上，只有足够小的颗粒(一般直径在 $10^{-4}\sim 10^{-3}\text{ mm}$ 之间)才能产生明显的布朗运动，而这样小的颗粒人的肉眼是不能直接看到的，用光学显微镜放大后才能观察到。如果悬浮的颗粒较大，虽然它也会受到周围分子的碰撞，但由于每一瞬间碰撞的分子数太多，来自各个方向的碰撞力的平均效果可视为平衡的。另一方面，由于较大颗粒的质量也较大，惯性也大，凭分子的碰撞力是难以改变它的运动状态的。因此我们说，凡肉眼能看到的颗粒的运动，都不是布朗运动。

【解】 房间内的空气微尘的无规则运动，不是布朗运动。这种现象主要是空气微尘受到对

流、外力扰动和重力、浮力等作用后产生的一种复杂的机械运动。因为布朗颗粒是人的肉眼所不能直接观察到的。

【例 1.2】在常温常压下，气体分子间的相互作用力极其微弱，可近似地认为不存在相互作用。试以此为基础，估算一下分子间能够发生相互作用的半径（分子间距）。

【分析】根据常温常压下气体分子间的相互作用力接近零的事实，可以认为此时气体分子相邻的间隔的数量级，即为分子间能发生相互作用的作用半径。

【解】设常温常压下的气体处于标准状况。因此该气体的摩尔体积可视为 $V_m = 22.4 \text{ L}$ 。则，每个分子平均占有的空间体积为

$$V = \frac{V_m}{N_A} = \frac{22.4 \times 10^{-3}}{6.02 \times 10^{23}} \text{ m}^3 = 3.72 \times 10^{-26} \text{ m}^3$$

假设分子都是球形的，则相邻分子间距即为分子球的直径
因为

$$V = \frac{1}{6} \pi d^3$$

所以
$$d = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{6 \times 3.72 \times 10^{-26}}{3.14}} \text{ m} = 4.14 \times 10^{-9} \text{ m}$$

由上述估算结果，求得分子间能发生相互作用的距离为 10^{-9} m 数量级。

【例 1.3】质量相等的氢气和氧气，温度相同，不考虑分子间的势能，则

- A. 氧气的热力学能较大
- B. 氢气的热力学能较大
- C. 所有氧气分子和氢气分子都具有相同的动能
- D. 氢气分子的平均速率较大

【分析】不考虑分子间的势能，气体热力学能大小由分子平均动能大小及分子数目多少共同决定。因为温度相同，所以氢气和氧气分子平均动能相同；又因为氢气的摩尔质量小，所以同质量的氢气分子数目多，氢气的热力学能较大，选项 B 正确。选项 A 不对。不同物体温度相同反映它们的分子平均动能相同，与个别分子动能无关。所以选项 C 不对。分子的平均动能决定于分子平均质量和平均速率，氢气分子质量比氧气分子质量小，所以氢气分子的平均速率较大，选项 D 也正确。

【解】正确的选项应为 B 和 D。

在此题解答中应注意，大量分子的运动服从统计规律，热力学能、温度是宏观物理量，与个别分子运动无关。

【例 1.4】图 1.4 所示的容器 A、B 各有一个可以自由移动的轻活塞，活塞下面是水，上面是大气，大气恒定，A、B 的底部由带有阀门 K 的管道相连。整个装置与外界绝热。开始 A 中的水面比 B 中的高。当打开阀门使 A 中的水逐渐向 B 中流，最后达到平衡。在这一过程中，大气压对水做多少功？水的热力学能怎样变化？

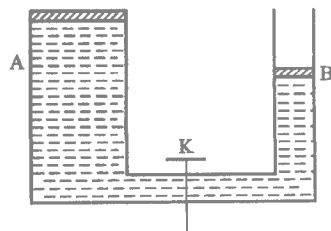


图 1.4

【分析】初看起来，这个问题没头没绪。因为它考查的是有

关功、能的问题，而题目告诉的物理对象又是液体，很难用一般的质点模型来取代。

但水从 A 容器流入 B 容器的过程中，大气压肯定对 A 活塞及 A 容器中的水做正功，而对 B 活塞及 B 中的水做负功。讨论大气压对水究竟做什么功，就需要用公式 $W = F_S$ 来比较其正、负功的大小。

在此基础上，对于大气压参与下的流动液体，若从整体的角度去分析，针对容器中水的初、末状态去认识，根据水的体积不变的特性，我们就可以确定整体重心的改变，从而也就看出了由于重力做功（可能为正，也可能为负）液体热力学能变化的特征来了。

【解】 ① 由于 A、B 液面大气压强相等，当 A 中水的体积减少 ΔV 时，B 中水的体积一定增 ΔV 。所以大气压力对水作的功为

$$W = p_A Sh_1 - p_B Sh_2 = p_A \cdot \Delta V - p_B \cdot \Delta V = 0$$

即，大气压力对水不做功

当阀门打开后，容器 A 中的水逐渐流向 B 容器中，最后达到液面相平。这一过程中，水的重心降低，势能（重力势能）减小；减小的重力势能转变为水的动能和热力学能，最后全部转化为水的热力学能。所以，水的热力学能增加了。

3. 练习

(1) 填空题

气体动理论的基本内容是：

若分子间的距离大于 10^{-10} m，它们之间的相互作用力是_____。若分子间的距离小于 10^{-10} m 时，它们的相互作用力是_____。

做功和热传递虽然在改变热力学能上是等效的，但它们却有本质的不同，做功是_____，热传递是_____。

④ 一壶水的温度升高时吸收了 855 J 的热量。如果用做功的方法使它升到同样高的温度，至少要作_____的功。

⑤ 一个铜原子的质量是_____ kg (1 mol 铜的质量是 63.5 g)， 1 cm^3 有_____个铜原子（铜的密度是 $8.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ）。

(2) 选择题

下列现象中能说明分子间存在引力的是()

- A. 磁铁吸引铁块处于平衡状态
- B. 密闭的打气筒要用力才能把活塞拔出来
- C. 气体保持压强不变，当温度下降时，体积会收缩
- D. 两块铅块压紧后能粘在一起

② 某物质的密度是 ρ ，摩尔质量为 M ，阿伏加德罗常数为 N_A ，单位体积内分子个数为 n ，一个分子质量为 m ，下列公式中正确的是()

- A. $n = MN_A/\rho$
- B. $n = \rho N_A/M$
- C. $m = M/N_A$
- D. $m = M/\rho N_A$

根据下列哪一组数据可以算出阿伏加德罗常数()。

- A. 水的密度和水的摩尔质量

- B. 水的摩尔质量和水的体积
- C. 水分子的体积和水分子的质量
- D. 水分子的质量和水的摩尔质量

关于布朗运动，以下说法正确的是（ ）。

A. 布朗运动既不是固体分子的运动，也不是液体分子的运动，而是液体分子无规则运动的反映

- B. 悬浮在液体中的颗粒越小，它的布朗运动就越显著
- C. 布朗运动永远不会停止，而且随着温度的升高而愈加激烈
- D. 做布朗运动的某一微粒，其速率逐渐变慢，直到停止

⑤ 某种油剂的密度为 $8 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$ 取这种油剂 0.8 g 滴在水面上，最后形成的油膜最大面积约为（ ）。

- A. 10^{-2} m^2
- B. 10^4 m^2
- C. 10^{10} cm^2
- D. 10^4 cm^2

⑥ 用 r 表示两分子间的距离， r_0 是使分子间力为零的距离，则（ ）。

- A. $r < r_0$ 时， r 越小 则分子势能减小
- B. $r > r_0$ 时， r 越大 则分子势能越大
- C. $r = r_0$ 时 分子势能最小
- D. $r \rightarrow \infty$ 时 分子势能最小

⑦ 下列说法中正确的是（ ）。

- A. $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 的冰比 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 的水热力学能小
- B. 水分子的热力学能比冰分子的热力学能大
- C. 100 g、 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 的冰比 100 g、 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 的水热力学能小
- D. 100 g、 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 的水结成 100 g、 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 的冰 分子势能减小

⑧ 两块体积相同的金属从相同高度以不同速度匀速落下，下落过程中产生的热力学能均有一半为金属块吸收，则温度改变量较大的金属的（ ）。

- A. 密度较大
- B. 比热容较小
- C. 下落速度较大
- D. 质量较小

⑨ 关于热力学能、温度、热量和功，下列说法中正确的是（ ）。

- A. 物体温度升高不一定吸热
- B. 热量总是从高温物体传给低温物体，直到两物体热力学能相等
- C. 热量和功都可以作为物体热力学能的量度
- D. 功由过程决定，热量和热力学能由物体温度决定

(3) 计算题

① 两个质量分别为 0.4 kg 和 0.2 kg 的小球 分别以 3 m/s 和 12 m/s 的速度做相向运动 .求两球发生完全非弹性碰撞时放出的热量 Q 。

质量相同的一块铅和一块铝，从同一高度落下，假定它们的势能全部转变为各自的热力学能 哪一个温度升得高？(要求通过分析、计算得出结论)已知铅的比热容 $c_{\text{铅}} = 0.13 \text{ J}/(\text{g}\cdot\text{K})$ ，

铝的比热容 $c_{\text{铝}} = 0.88 \text{ J}/(\text{g}\cdot\text{K})$.

一块质量 $m_{\text{木}} = 2 \text{ kg}$ 的木块，放在离地面高度为 $h = 1.25 \text{ m}$ 的水平光滑桌面上，一粒质量为 $m = 10 \text{ g}$ 的子弹以水平方向射入木块，并留在木块内，测得木块落地后，离桌边的水平距离为 $d = 0.5 \text{ m}$ 不计空气阻力 求：

(a) 子弹射入木块前瞬间的速度。

(b) 如子弹射入木块过程中所产生的热量有 78% 被子弹所吸收，那么子弹的温度升高了多少？（设子弹的比热容为 $c = 0.13 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 取 $g = 10 \text{ m/s}^2$ 。）