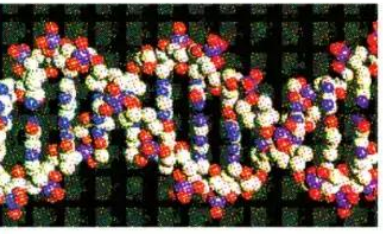
目 录



第 1 章 用统计思想研究分子运动 6

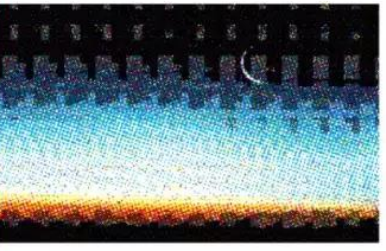
1.1 一种新的研究方法 7

1.2 走进分子世界 11

1.3 无序中的有序 16

1.4 用统计思想解释分子运动的宏观表现 20

1.5 物体的内能 24



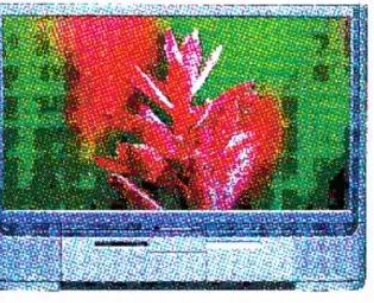
第 2 章 气体定律与人类生活 28

2.1 气体的状态 29

2.2 玻意耳定律 32

2.3 查理定律和盖·吕萨克定律 36

2.4 空气的湿度与人类生活 40



第 3 章 固体、液体与新材料 48

3.1 研究固体的性质 49

3.2 研究液体的表面性质 54

3.3 液晶与显示器 60

3.4 半导体材料和纳米材料 64

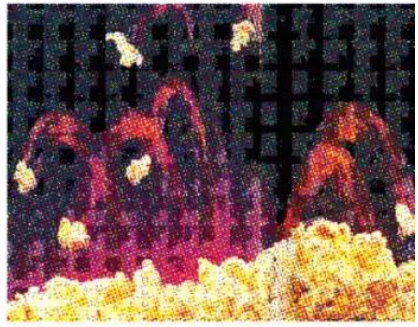
第4章 热力学定律与能量守恒 72

4.1 热力学第一定律 73

4.2 能量守恒定律发现的历程 77

4.3 热力学第二定律 83

4.4 描述无序程度的物理量 88

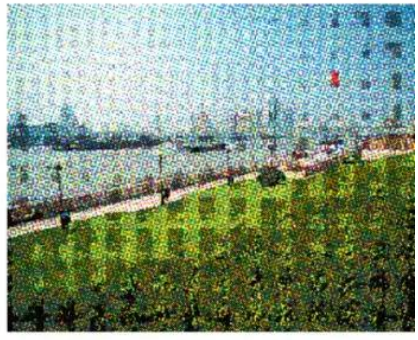


第5章 能源与可持续发展 94

5.1 能源利用与环境污染 94

5.2 能源开发与环境保护 100

5.3 节约能源、保护资源与可持续发展 106



总结与评价 课题研究成果报告会 111

研究课题示例 111

评价表 112

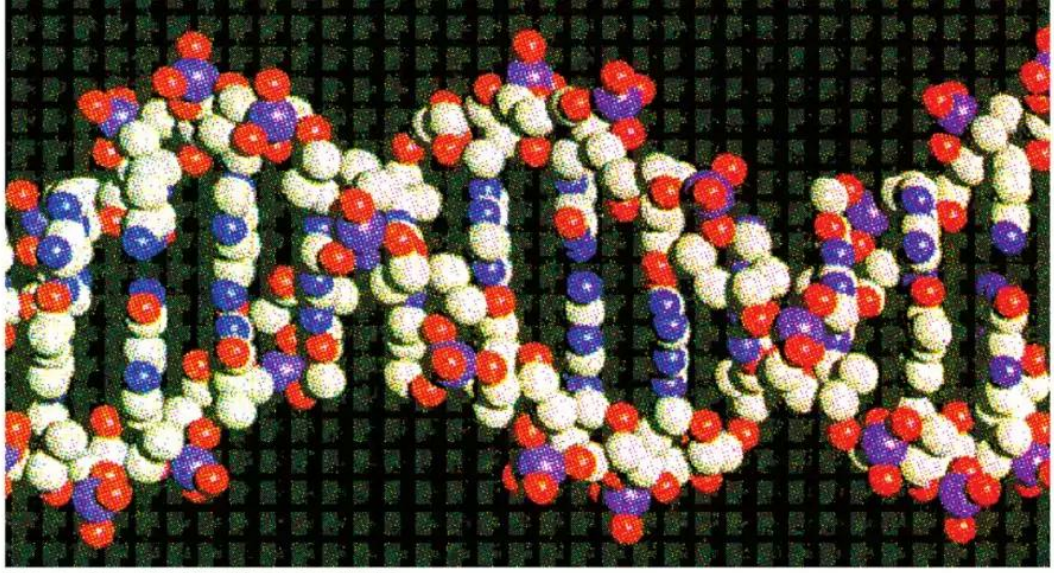


图 1-1　DNA(脱氧核糖核酸)大分子结构图

第 1 章
用统计思想研究分子运动

1827 年,英国植物学家布朗(R. Brown)在研究一种花粉的繁殖过程时注意到,悬浮在水中的花粉颗粒在不停地跳着一种毫无规则的舞蹈,就像"活的"一样。但他后来发现,没有生命的微粒在水中也会做这种杂乱无章的运动。作为植物学家,他无法解释这种现象,然而,当时的物理学家对此也大惑不解。

悬浮微粒为什么会不停地做着这种杂乱无章的运动呢?这种运动是否就是人们梦寐以求的分子运动?

组成物质的分子究竟有多大?

大量分子的运动有什么特点?

如何研究大量的分子的运动?

物质分子的微观运动在宏观上是何表现?

本章将承接初中物理对物质分子及其运动的初步认识,进一步以统计思想和能量的观点为主线贯穿各节内容。首先通过实例和活动,体会一种新的研究方法;接着,用统计方法定性探究分子运动速率的统计分布规律,并结合分子动理论用统计思想阐释物体温度和气体压强的微观意义;最后,研究由分子运动和分子间相互作用决定的另一种形式的能——内能。

1.1 一种新的研究方法

在日常生活中，人们常用"可能性"、"偶然性"等词来描述事先无法确定的事件。你在使用这些词时，有没有对它们进行过仔细的研究呢？你是否了解它们的真正含义呢？

从降水概率谈起

气象台的天气预报，除了报告未来几天的天气状况、气温变化外，还有"降水概率"。这个"降水概率"表示什么意思呢？

"降水概率"是气象的专业用语，它是指下雨可能性的大小。如果在气象台以往的气象记录中，有 100 天的天气变化情况跟今天的相似，而且通过计算机运算，又发现这 100 天中有 70 天的次日会下雨，于是气象台预报说："明天的降水概率是 70%。"这意味着明天有七成可能会下雨。

概率反映的不是一种必然结果，它是在大量资料的基础上，对不确定事件做出的一种估计，资料越丰富、越全面，估计就越可靠。

在数学上，把发生某一随机事件的可能性的定量描述叫做概率(probability)。例如，在 N 次事件中，如果出现事件 A 的次数为 n，当 N 足够大时，则 $\frac{n}{N}$ 即为出现事件 A 的概率。

讨论与思考

有些同学常会说："老师明天八成会提问我对这道题的解法。"我们也常说某件事"十有八九会成功"。雅典奥运会之前，许多人估计射击老将丁义夫有 90 %的可能拿到金牌……。其实这里都包含着概率的含义。

请你再举一些事例，说明概率在日常生活中的运用。



图 1-2　某地 1 月的一次天气预报

投掷硬币的启示

实验探究　探究正反面出现的概率

我们把硬币铸有国徽的一面称为正面，另一面称为反

法国著名数学家、天体力学家拉普拉斯(P. S. M. de Laplace)于1812年出版了一本对统计理论有重大贡献的论著《概率论》,书中意味深长地说:"非常值得注意的是,与游戏中机遇有关的科学知识,将会成为人类知识中一门重要的学科。"

面。用一枚硬币随意投掷,落地时不是正面朝上就是反面朝上。你投掷2次、3次,或者5次,有可能都是正面朝上或都是反面朝上,完全没有规律可言。但是,如果投掷很多次,情况将会怎样呢?

我们来做一个实验。请全班每一位同学各用一枚硬币随意投掷1次和10次,将投掷结果按学号填入下表,并按投掷1次和10次分别进行统计。

学号		1	2	3	4	5	……	41	42	43	44	45
1次	正面											
	反面											
10次	正面											
	反面											

全班同学投掷总次数 $N=$ 。

正面朝上的次数 $N_1=$ _____,概率 $\frac{N_1}{N}=$ _____。

反面朝上的次数 $N_2=$ _____,概率 $\frac{N_2}{N}=$ _____。

从这次活动中,你能悟出什么规律吗?

统计规律及其特点

分析论证

在投掷硬币的实验中,硬币的每一次投掷,都是一个独立事件,即某一次的投掷结果同其他各次的投掷结果都没有关系。投掷次数较少时,结果是正面朝上还是反面朝上,是非常偶然的。但如果投掷的次数很多,就可以发现,正面朝上和反面朝上的概率都在50%左右。

这就意味着,在大量的偶然事件背后,隐藏着一种规律,这种规律要通过搜集大量资料并加以整理分析后才能显示出来,这种规律叫做统计规律。

统计规律的特点

1. 它是在大量的随机(偶然)事件的集合中起作用的规律,它

揭示的是大量事件在整体上的性质及这些事件间的必然联系。在这里，个别事件的性质及它们之间的偶然联系已退居次要地位。

2. 统计规律只能在有大量事件的情况下才显示出来。它的可靠性跟统计事件的数量有关，事件的数量越多，统计规律就显示得越明显。

3. 实测的概率与用统计理论得出的值总会有一定的偏差，叫做“涨落”，这是统计规律所特有的。一般来说，被统计的事件数量越多，涨落的现象越不显著。

统计规律的普遍性

统计规律不仅普遍存在于自然现象之中，也广泛存在于社会现象之中。例如，国家经常进行人口普查，对普查资料进行统计分析，就可估计出今后每年人口的预期增长率，为计划生育、人口控制、入学和就业安排、经济增长控制等方面提供有价值的依据。又如，为了规划高速公路，就需要对汽车的流量进行统计，为合理选址、确定建造规模和公路等级等方面提供依据。企业要统计消费者的需求，作为设计推广新产品的依据。电视台要统计收视率，以了解所播节目受观众的喜爱程度。医学上的统计分析指出，抽烟和肺癌有关，一天抽 10 支烟的人患肺癌的概率比不抽烟的人高 5 倍左右。据有关报道，日本地震研究人员通过分析历史数据，推测未来东京发生大地震的可能性随着时间的推移在逐渐增加：在未来 10 年内，发生里氏 7 级地震的概率只有 30%；在未来 30 年内这一概率达 70%；在未来 50 年内，上升到 90%……

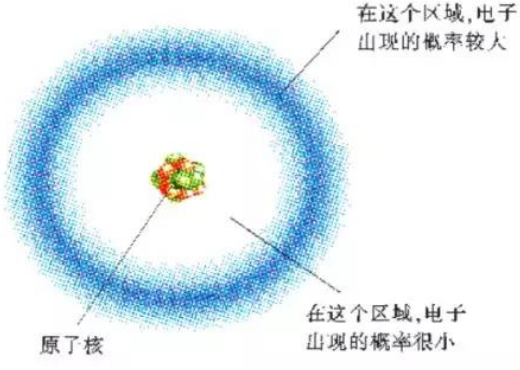


图 1-3　核外电子的概率分布

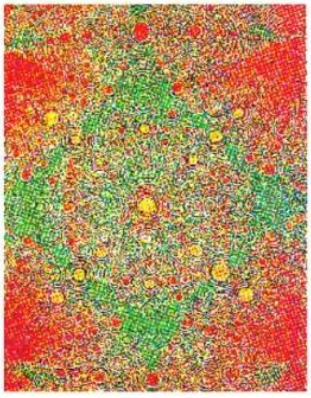


图 1-4　场离子显微镜(FIM)拍摄的图像显示了铂针顶端的原子排列顺序(橘黄色),这个图像放大了 200 000 倍

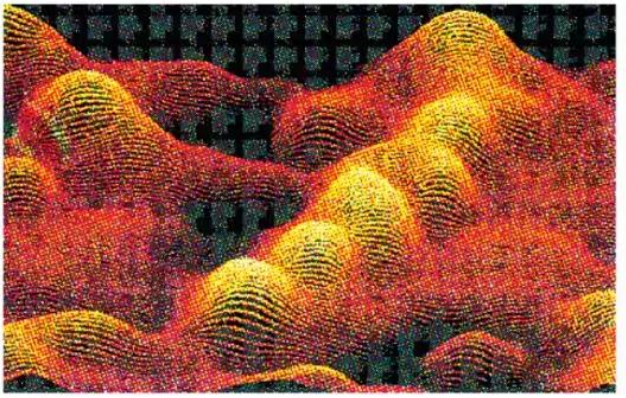


图 1-5　用扫描隧道显微镜(STM)在一个遗传分子上描绘的形状

1.2

走进分子世界

我们知道,通常的物体都是由许多很小的分子组成的。那么,分子有多大呢?教室里的空气分子有多少呢?

分子何其小

实验探究　用油膜法估测分子直径

设计思路

为了研究分子的大小,首先要建立一个简化的分子模型。我们设想组成物质的分子都是球形的,而且同种物质的分子都是一个个大小相同的小球。如果能把某一部分物质的分子一个紧挨一个铺展开来,形成一个"分子地毯",那么,只要知道这部分物质的体积(V)和铺展开来的面积(S),就可以估算出分子的直径及其大小。即

分子直径 $D=\dfrac{V}{S}$

构建物质组成模型是一种普遍有效的科学方法。实际分子有着复杂的内部结构。建立分子的球模型,仅是为了便于研究。

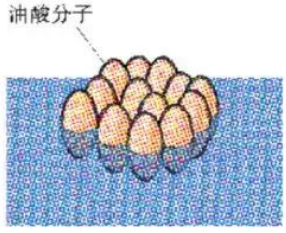


图 1–6　油酸分子形成单分子层的示意图



图 1–7　油膜的形状

分子体积　$V_1 = \frac{1}{6}\pi D^3 = \frac{1}{6}\pi\left(\frac{V}{S}\right)^3$

那么，怎样让分子一个紧接一个地铺展开来呢？

实验计划

为了使分子排列起来，可以利用油酸（$C_{17}H_{33}COOH$）分子的酸根 COOH 对水有很强的亲和力这一特点。把一滴用酒精稀释过的油酸滴在水面上，油酸就在水面散开，形成一层薄薄的膜（酒精溶于水，并会很快挥发）。这层薄膜可以看成是单分子层，它的厚度可以认为等于油酸分子的直径（图 1–6）。

实验操作

在一个边长 30—40 cm 的浅盘里倒入约 2 cm 深的水，将痱子粉或石膏粉均匀地撒在水面上。再用注射器或滴管将配制好的油酸酒精溶液滴上一滴，在水面上很快会形成如图 1–7 所示的油酸薄膜。用玻璃板盖在浅盘上，再在玻璃板上覆一张半透明的坐标纸，将油膜形状画在坐标纸上。

在坐标纸上画出油膜的形状后，怎样算出油膜的面积呢？

实验结论

根据所配制的油酸酒精溶液的浓度和事先测好的每滴溶液的体积，再算出坐标纸上油膜的面积，就可以估算出油酸分子的直径。

你的实验结果怎样？请跟同学们相互交流。

研究表明，一般分子直径的数量级为 10^{-10} m。例如，水分子的直径约为 4×10^{-10} m，氢分子的直径约为 2.3×10^{-10} m。

图 1–8 是用扫描隧道显微镜（STM）观察到的物质表面的原子排列情况。



图 1-8　用扫描隧道显微镜观察到的由 48 个铜原子排成的量子围栏

扫描隧道显微镜(STM)是在 1982 年由德国科学家宾尼格(G. Binnig)和瑞士科学家罗雷尔(H. Rohrer)首先研制成功的，为此，他俩与另一位科学家共同获得了 1986 年的诺贝尔物理学奖。

分子何其多

分子很小，通常的一小块物体中都包含着大量的分子。

我们在化学中已学过，1mol 任何物质所包含粒子的数目相等，这个数目叫做阿伏加德罗常数。根据分子的球模型，我们可以算出阿伏加德罗常数的大小，从而可以推算出一定量任何物质中所包含分子的数目。

以水为例，水的摩尔体积是 $V_{mol} = 1.8 \times 10^{-5}\ m^3/mol$，取水分子的直径为 $D = 4 \times 10^{-10}\ m$，于是水分子的体积 $V_1 = \frac{1}{6}\pi D^3 = 3.0 \times 10^{-29}\ m^3$。假设水分子是一个紧挨一个地排列着的，因此，1mol 水所含的水分子数目(即阿伏加德罗常数)就等于

$$N_A = \frac{V_{mol}}{V_1} = \frac{1.8 \times 10^{-5}\ m^3/mol}{3.0 \times 10^{-29}\ m^3} = 6.0 \times 10^{23}\ mol^{-1}$$

阿伏加德罗常数是一个重要的常数，它仿佛是宏观世界和微观世界之间的一座桥梁。利用阿伏加德罗常数，可以把摩尔质量、摩尔体积等宏观量，跟分子质量、分子大小等微观量联系起来。有了它，我们可以通过对某些宏观量的测量，窥见分子水平的微观世界。

目前，阿伏加德罗常数的公认值是

$$N_A = 6.023 \times 10^{23}\ mol^{-1}$$

在通常的计算中，可取 $N_A = 6.0 \times 10^{23}\ mol^{-1}$。

对于一个系统的状态，从整体上加以描述的方法叫做宏观描述。这时表征系统状态和属性的物理量叫宏观量。

通过微观粒子运动状态的说明，对系统的状态加以描述的方法叫做微观描述。描述微观粒子运动状态的物理量叫微观量。

讨论与思考

如果已知某种金属的摩尔体积 (V_{mol}) 和阿伏加德罗常数 (N_A)，怎样推导出其分子直径的表达式？

案例分析

案例 一间教室长 $a = 8\ \text{m}$，宽 $b = 7\ \text{m}$，高 $c = 4\ \text{m}$，假设教室里的空气处于标准状况。为了估算出教室里空气分子的数目，有两位同学各自提出了一个方案：

方案 1 取分子直径 $D = 1 \times 10^{-10}\ \text{m}$，算出分子体积 $V_1 = \frac{1}{6}\pi D^3$，根据教室内空气的体积 $V = abc$，算得空气分子数

$$N = \frac{V}{V_1} = \frac{6abc}{\pi D^3}$$

方案 2 根据化学知识，1 mol 空气在标准状况下的体积 $V_0 = 22.4\ \text{L} = 22.4 \times 10^{-3}\ \text{m}^3$。由教室内空气的体积，可算出教室内空气的摩尔数 $n = \frac{V}{V_0} = \frac{abc}{V_0}$；再根据阿伏加德罗常数，算得空气分子数

$$N = nN_A = \frac{abc}{V_0} N_A$$

请对这两种方案做一评价，并估算出你们教室里空气分子的数目。

分析 方案 1 把教室里的空气分子看成是一个个紧挨在一起的，没有考虑空气分子之间的空隙，不符合实际情况。通常情况下气体分子间距的数量级为 $10^{-9}\ \text{m}$，因此分子本身体积只是气体所占空间的极小一部分，常常可以忽略不计。方案 2 的计算方法是正确的。

请根据方案 2 完成计算。

信息科技

分子概念·实验验证·关于分子的新发现

分子概念是意大利物理学家阿伏加德罗（A. Avogadro）于 1811 年首先引入的。阿伏加德罗认为：一切物质，无论是单质还是化合物，都是由分子组成的；分子则是由原子组成的。单质分子由相同的原子组成，化合物分子则由不同的原子组成。分子是保持物质化学性质能独立存在的最小颗粒。他还假设，在同温同压的条件下，相同体积的任何气体，都含有相同的分子数。遗憾的是，阿伏加德罗对物质结构理论的重大贡献，却不为当时的科学界所接受，被整整冷落了 50 年后，才得到普遍的认同。

1905 年，爱因斯坦（A. Einstein）运用统计规律对布朗运动做出正确解释，并推导出布朗粒子运动的均方根位移和由此提出的阿伏加德罗常数的表达式。爱因斯坦在他的论文的结尾呼吁："但愿有一位研究者能够立即成功地解决这里所提出的、对热理论关系重大的这一问题。"

1908 年至 1910 年间，法国物理学家佩兰

(J. B. Perrin)通过艰苦卓绝的努力，出色地完成了对布朗粒子的测量，得出了三种测定阿伏加德罗常数的方法，证明了理论与实验结果的一致性。佩兰的实验也直接证实了分子的真实性。从此，分子得到了人们真正的确认。

自那以来，人们对分子的研究一直在进行着，而且随着观测手段的日益进步，新的成果接踵而来，研究领域也不断拓展。

1999 年，欧洲的一个科学家小组发现了一种分子，呈环状，并在周围分子环绕形成的空腔内旋转，他们称之为“分子轮”——像轮子一样的分子。这种极微小的分子轮有朝一日或许能成为无需加润滑油的显微马达的一部分。

在国际商用机器公司(IBM)的苏黎世研究实验室里，科学家们注意到，他们的扫描隧道显微镜图像所呈现的分子中，有一个模糊不清，这使他们大为惊异。后来他们才弄明白，这种模糊不清的现象是由这个分子的旋转引起的。原来，这个分子在仅仅 $\frac{1}{4}$ nm 的间距内前后跳动。在一个位置上，这个分子被其他 4 个分子夹住，动弹不得；而在另一个位置上，它处于这个分子层的一个很微小的空隙中，可以就地旋转。

关于分子，还有不少奥秘，许多国家的科学家仍在继续探索之中。

家庭作业与活动

1. 估算一下，成年人深呼吸一次能吸进多少个空气分子？
2. 一个热水瓶内水的质量约 2.2 kg，其中分子的数目约为多少？
3. 用油膜法做实验时，事先将 1 cm^3 的油酸溶于酒精，制成 200 cm^3 的油酸酒精溶液。已知 1 cm^3 溶液有 50 滴，现取 1 滴油酸酒精溶液滴到水面上，形成一层单分子薄膜，测得油膜的面积为 0.2 m^2，试估算油酸分子的直径大约为多少。
4. 为了测出阿伏加德罗常数，需要知道的物理量是
   A. 水的密度和水的摩尔质量
   B. 水的摩尔质量和水分子的体积
   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

1.3 无序中的有序

利用阿伏加德罗常数，我们可以估算出教室里空气分子数目的数量级竟达到 10^{27}。这么多的分子在一起，它们的运动情况是怎样的呢？

关于分子运动的猜想

有几位同学饶有兴趣地提出了他们的猜想，还形象地作了比喻：

由于空气分子很多，每个分子大概只能在自己位置附近稍稍地运动，就像上课时大家只能在座位上稍稍晃动那样；

很多空气分子挤在一起，只能一会儿一起向这边运动，一会儿一起向那边运动，就像牧场上一群被驱赶着的羊群那样；

因为我们对空气分子的运动没有感觉，所以它们不可能整体一起运动，大概是有些分子不动，有少数分子在其他分子间穿来穿去，就像上课时老师在同学中间走动那样；

每个分子都在不停地向各个方向杂乱无章地运动，相互间又常会发生冲撞，就像足球场上的运动员那样。

你对教室里（或容器里）气体分子的运动有何猜想？请相互交流。



图 1-9　利用分子的运动，对驾车者进行酒精检测

气体分子运动的特点

为了揭开气体分子运动之谜，我们可以在气体分子的球模型基础上再假设一些理想化条件。

通常状况下气体分子间的距离比较大，相互之间的作用力很小，因此可以忽略气体分子间的相互作用，认为气体分子除了相互碰撞或跟器壁碰撞外，不受力的作用，在空间自由运动。

大量分子的无规则运动，必然会频繁地导致分子间的碰撞

(图 1-10)。研究表明,在标准状况下,一个空气分子在 1s 内跟其他空气分子的碰撞竟达到 65 亿次之多。

由此可见,气体分子在不断的碰撞中频繁地改变着方向,做着杂乱无章的运动。

你是怎样理解分子杂乱无章的运动的呢?这么多分子沿各个方向运动的机会是均等的吗?

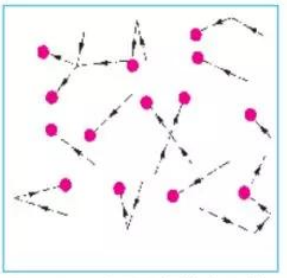


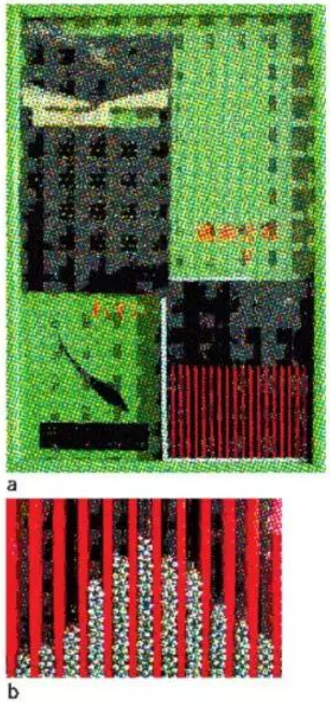
图 1-10　分子间频繁地碰撞

无序中的有序

大量气体分子在做杂乱无章的运动时,它们沿各个方向运动的机会是均等的。那么,这种运动中是否隐藏着某种规律?

实验探究　用伽尔顿板模拟分子的无规则运动

图 1-11a 所示的装置称为伽尔顿板。在一块平板上均匀地密布着许多钉子,平板下方有一木槽,沿木槽分有许多小格。实验时,先让一小球从平板上方下落,在下落过程中这个小球跟钉子磕磕碰碰,最后落到槽内的某个小格中;然后再让一小球下落,最后它可能落进另一个小格。多次重复这样的操作,我们可以发现,一个小球跟钉子碰撞后落进哪一个小格完全是无法预料的,也就是说,小球落入某个小格完全是一个随机的偶然事件。如果让许许多多小球落下去,那么可以看到,有些小格中落入的小球多,另一些小格中落入的小球少。多次重复操作可以发现,槽中各小格中落入的小球数目有着一定的分布规律——始终是中间的小格多,两边的小格少,如图 1-11b 所示。



a

b

图 1-11　伽尔顿板

如果把小球看成分子,它们落入槽中不同的小格,对应着分子经不断碰撞后获得的速度大小,那么,从伽尔顿板的实验中可以得到启示:对于由大量微观粒子组成的系统,就其宏观性质而言,统计规律起着主导作用。

气体分子运动的统计规律

1859 年,英国著名物理学家麦克斯韦运用统计方法,找到了气体分子速率的分布函数,从而确定了气体分子速率的分布规

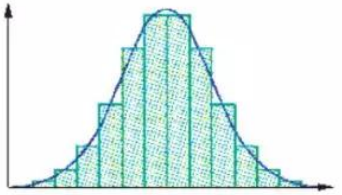


图 1-12　正态分布曲线
如图所示的分布曲线,又叫高斯曲线

历史上曾有人试图采用牛顿力学的方法，根据每个分子受到周围分子的作用列出运动方程，找出它的运动规律，但很快就陷入困境。

律。这个规律指出，在一定状态下，气体的大多数分子的速率都在某个数值附近，速率离开这个数值越远，具有这种速率的分子就越少，即气体分子速率总体上呈现出“中间多，两头少”的分布特征，很像伽尔顿板实验中各小格中落入小球数目的分布。

下表反映了氧分子的速率分布。

如果以横坐标上的各等长区间表示相应的速率范围，以纵坐标表示所占的百分比，那么可以用直方图表示出一定温度下分子速率的分布。如图 1–13 所示。

从氧分子的速率分布中，你得到哪些信息？请相互交流。

麦克斯韦的方法在物理学思想史上具有重大意义。它向人们指出，对于一个由大量微观粒子组成的系统，利用统计方法，一旦找出了其某个微观量的分布函数，便可求出这个微观量的统计平均值，而这个统计平均值正好等于该系统的相应宏观量。这样，就把分子的微观运动跟物体的宏观表现紧密地联系起来了。

因此，人们称颂麦克斯韦的统计方法“标志着物理学新纪元的开始”。

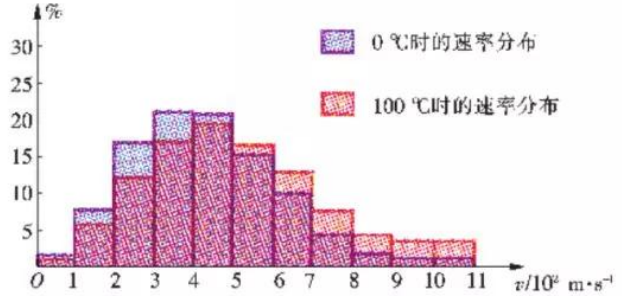


图 1–13　一定温度下氧分子的速率分布

氧分子的速率分布

按速率大小划分的速率区间 v/m·s^{-1}	不同温度下各速率区间的分子数占总分子数的百分比 / %	
	0 ℃	100 ℃
100以下	1.4	0.7
100—200	8.1	5.4
200—300	17.0	11.9
300—400	21.4	17.4
400—500	20.4	18.6
500—600	15.1	16.7
600—700	9.2	12.9
700—800	4.5	7.9
800—900	2.0	4.6
900以上	0.9	3.9

讨论与思考

请比较不同温度下氧分子速率分布的直方图(图 1-13),你得到什么启示?

如果把图 1-13 中的分子速率区间缩短些,例如以 10 m/s、1 m/s 为区间长度,请推测一下,这时的速率分布将是怎样的一种图像?

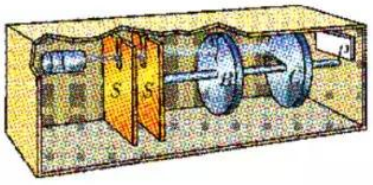


图 1-14　验证麦克斯韦速率分布的实验装置

多学一点　麦克斯韦速率分布的实验验证

实验装置如图 1-14 所示,A 为金属蒸气源,用以产生金属蒸气。S 为狭缝,金属蒸气通过狭缝后形成定向的分子射线。B、C 为两个同轴圆盘,以同一角速度 ω 转动。圆盘 B 上开有一狭缝,作为射线入口;圆盘 C 上也有一狭缝,作为射线出口。这两个狭缝错开一个角度 φ(约 2°),BC 之间的距离为 l。P 是检测器,接收分子射线并测定强度。整个装置放在高真空容器中。圆盘转动一周,分子射线就通过 B 的狭缝一次。

由于分子具有不同的速率,因此能通过 B 狭缝的分子不一定能通得过 C 狭缝。只有速率 v 满足条件 $\frac{l}{v}=\frac{\varphi}{\omega}$ 的分子才能从 B 进入并从 C 射出。因为狭缝有一定的宽度,实际上被检测器 P 收集到的分子并不是速率严格地等于 v 的分子,而是速率处于 v 与 $v+\Delta v$ 区间内的分子。

调节圆盘转速 ω,就可以测出在不同速率值 v 附近的分子,从而得出分子的速率分布。

实验结果显示,金属蒸气分子的速率分布与麦克斯韦用统计方法得出的分布规律完全相符。

麦克斯韦在他的论文中写道:"由此可见,分子间的速率分布所遵循的规律……即符合高斯的统计规律,速率的范围从 0 到 ∞,但是具有很大速率的粒子非常地少。"

1920年美国物理学家斯特恩(O. Stern)首次通过分子散射实验验证了麦克斯韦的速率分布。

1934年,我国学者葛正权测定了铋蒸气分子的速率分布,1955 年美国物理学家米勒(R. C. Miller)和库施(P. Kusch)用钍蒸气原子射线做实验,进一步精确验证了这个分布规律。

课外活动

寻找生活中正态分布的实例

图 1-15 所示是一条古老的阶梯,它记录着千千万万人次的脚印。人们在这条阶梯上走上走下时,脚踏在中间的多,踏在两边的少,因此每一个台阶的中间都比两边磨损得多,显出正态分布的特征。

麦克斯韦得出的气体分子速率分布规律并不神秘,它跟你的学习和生活十分接近。请寻找其他具有正态分布特征的实际例子。



图 1-15　一条古老的阶梯

1.4 用统计思想解释分子运动的宏观表现

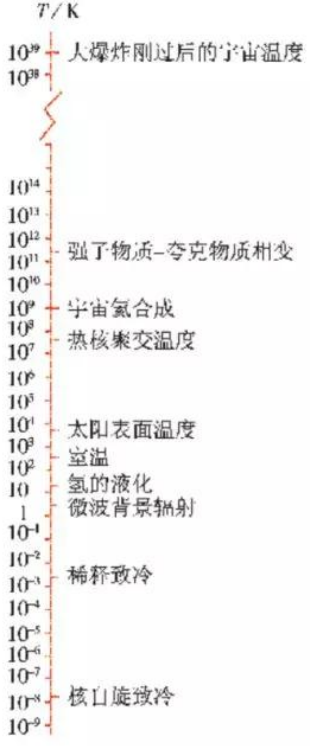


图 1-16 温度阶梯

人类从对冷热程度的直接感觉到伽利略制成第一支验温器，经历了漫长的岁月。如今，在实验室里能产生的最高温度已达 10^8 K，最低温度则低至 10^{-8} K，相差 16 个数量级。如果把目前已知的温度从小到大依次排列起来，就可以得到一个有大约 50 个数量级的温度阶梯。

面对这个温度阶梯，很自然地会想到一个问题：温度的高低究竟是由什么因素决定的呢？

温度的微观解释

分析论证

我们从初中物理中的扩散现象已经知道，扩散是物质分子运动的一种宏观表现，它跟温度有关，温度越高，扩散得越快，表明分子运动得越快。麦克斯韦得到的气体速率分布表明，温度越高，速率大的分子所占的比例越大，所有分子的平均速率也随之增大。由此可见，温度的高低跟物质分子的运动有关。

物理学上把分子的无规则运动称为热运动(thermal motion)。理论研究指出，温度的高低联系着分子热运动的平均动能。温度升高，物体内分子热运动的平均动能增加；温度降低，物体内分子热运动的平均动能减少。因此，从分子动理论的观点来看，微观的分子运动决定着宏观的温度。

温度是物体内所有分子热运动的平均动能的标志。

由此可见，温度是组成物质的大量分子的热运动的集体表现，它具有统计的意义，对单个分子来说，温度是没有意义的。

平均动能就是所有分子动能的平均值。

$$E_k = \frac{1}{n}(E_{k1} + E_{k2} + \cdots)$$

热力学理论证明，它跟温度直接有关。

讨论与思考

初中物理中，把温度定义为“物体冷热的程度”，现在我们把

温度定义为“物体内分子平均动能的标志”，请比较这两种定义的联系与区别。

气体压强的微观解释

在研究大气压的时候，有一个问题常使人们迷惑不解：在“大气海洋”底层的物体（包括人体），受到上方厚厚的大气产生的压强，这个压强为什么会跟地面附近一小瓶气体产生的压强一样呢？要回答这个问题，必须从气体压强的产生原因和决定大气压强大小的因素上去寻找。

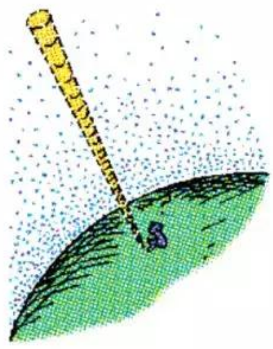


图 1-17　在“大气海洋”的底层

分析论证

为了简化研究，可以把气体分子看成一群弹性小球。分子撞击器壁的运动就像乒乓球对坚硬墙壁的碰撞，每次撞击都会对器壁产生一定的压力。大量分子的频繁碰撞，会对器壁形成一个持续稳定的压力。

实验探究　用钢珠模拟分子碰撞产生的压力

如图 1-18 所示，把小钢珠从同一高度大量持续地落到一台电子秤的秤盘上，电子秤的示数并不做大幅度的跳动，而仅是在某个值附近摆动。这说明在大量粒子的连续撞击下，秤盘上受到的是一个持续稳定的压力。



图 1-18　用钢珠模拟分子碰撞

接着，让小钢珠从更高处大量持续地落到秤盘上，秤的示数会在另一个较大的值附近摆动。

分析论证

气体的压强反映着器壁单位面积上平均压力的大小。那么，从微观角度来看，气体压强的大小由什么因素决定呢？从上述实验中可以找到类比关系：

钢珠越密集——单位体积中的分子数越多

下落高度越大——分子的平均速率越大

指示的数值越大——分子对器壁的压力越大

由此可见，气体压强的大小跟两个因素有关，一个是单位体

积中的分子数(分子密度),一个是气体分子的平均动能。

气体压强是大量气体分子集体行为的反映,它具有统计的意义。气体分子做的是无规则运动,因此在任何时刻分子向各个方向运动的概率都相等,反映在宏观上,就是容器中各处压强的大小都相等。

讨论与思考

"大气海洋"底层的压强,跟地面附近一小瓶空气所产生的压强一样。你能用气体压强大小的两个因素对此进行解释吗?

案例分析

案例 如图 1-19 所示,将封有悬浊液的载玻片置于显微镜下,调节显微镜,即可看到悬浊液中小颗粒的运动。

如果追踪其中的一个小颗粒,每隔一定时间(如 30 s)记下它的位置,然后用线段把这些位置依次连接起来。可以看到,连成的折线曲曲折折,错综复杂。这说明这个小颗粒在不停地改变着自己的运动方向,它做的是一种极其不规则的运动。小颗粒的这种无规则运动叫做"布朗运动"(Brown motion)。这种小颗粒常叫做"布朗粒子"。

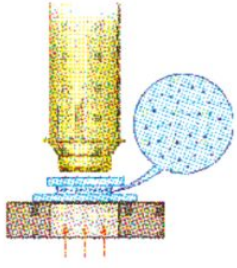
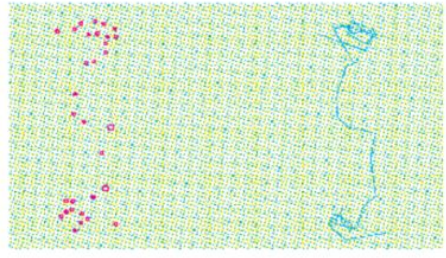


图 1-19 用显微镜观察布朗运动



a 认定一个小颗粒进行观察所得到的一系列位置

b 把这些位置依次连接得到的折线

图 1-20 布朗粒子无规则运动示意图

那么,布朗粒子的运动是否就是分子的运动?你对这个实验现象应该怎样解释?

解答 分子的直径在 10^{-10} m 的数量级,远比布朗粒子小,人眼无法直接看到。因此,布朗粒子的运动并不是分子的运动。

布朗粒子不断地受到其周围液体分子对它的撞击。布朗粒子

很小，因此这些撞击虽然来自四面八方，却一般不会完全抵消。如果在某个瞬间，一个布朗粒子在某个与其运动方向不在一直线的方向上受到的撞击较强，那么它的运动方向就会发生相应的改变；如果在另一个瞬间，它在另一个与其运动方向不在一直线的方向上受到的撞击较强，那么它的运动方向又会发生另一种相应的改变。由于液体分子对布朗粒子的撞击是不规则的，布朗粒子也就不断地改变着运动方向，东倒西歪，踉踉跄跄，做着毫无规则的运动。

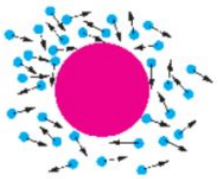


图 1-21　布朗运动的原因

信息浏览

关于布朗运动的研究

1827年，布朗发现了花粉颗粒在水中的这种杂乱无章的运动后，人们对这种运动的产生原因进行了种种猜想：

有人认为，这种运动起因于液体蒸发而造成的容器中液体的缓缓对流；

有人认为，这是一种生物现象，它跟这种花粉所属的植物有关；

……

布朗用无机物颗粒（包括研细的石粉）做了试验，他发现，只要颗粒足够小，它们悬浮在水中都会做这样的运动。布朗说："……在经过多次重复的观察后，我确信这些运动既不是液体的流动，也不是液体的蒸发所引起的，而是属于粒子本身的运动。"

一个小小的花粉颗粒，却掀起了一场轩然大波。面对植物学家的发现，当时的物理学家显得束手无策。

整整过了半个世纪，到 1877 年，才有人指出，布朗运动是由于液体分子的碰撞产生的。

1905 年，爱因斯坦和波兰物理学家斯莫卢霍夫斯基（M. Smoluchowski）发表了他们对布朗运动的理论研究结果，对布朗运动做出了理论上的解释。

布朗运动的实质是大量分子无规则运动引起的随机涨落，这种现象不仅在自然界中大量存在，而且在工程技术和社会生活中也存在。例如，许多精密仪表的指针，由于空气分子的碰撞也会出现无规则的左右摆动；股市中的股票价格，会因各种随机的政治经济因素而发生变动。这些，都是随机涨落。

对布朗运动的研究有很重要的意义。爱因斯坦、佩兰、默顿（R. C. Merton）和斯科尔斯（M. S. Scholes）这四位荣获诺贝尔奖的科学家（后两位是 1997 年诺贝尔经济学奖获得者），都对它进行过研究，这恐怕是布朗始料未及的。

课堂作业与活动

1. 教室里有许多不同种类的物质——铁、铜、塑料、木材、水、空气等，它们同处一室。这些物质分子的平均动能是否相同？这些物质分子的平均速率是否相同？为什么？
2. 根据温度的微观意义，有人提出以下的说法：

   （1）物体的温度升高，物体内每一个分子的动能都一定增加；物体的温度降低，物体内每一个分子的动能都一定减少。

   （2）现有甲、乙两个由同种材料组成的物体，若甲的温度比乙的温度高，那么甲物体内每个分子的动能一定都比乙物体内每个分子的动能大。

   你认为这两种说法对不对？为什么？
3. 有人说，图 1-20b 中画出的就是一个布朗粒子的运动轨迹。这种说法对不对？
4. 实验研究表明：在观察布朗运动的实验中，布朗粒子越小，悬浮液的温度越高，布朗运动就越剧烈。请根据你对布朗运动的理解，分析一下原因。

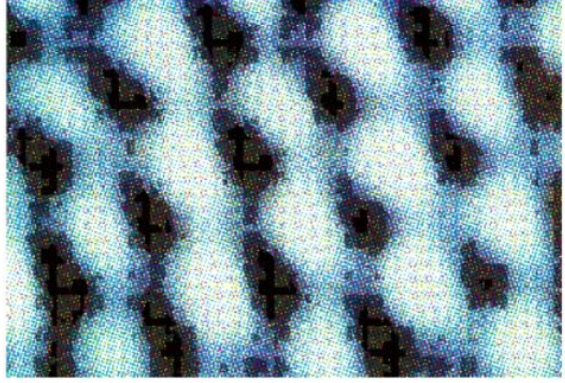


图 1–22　用扫描隧道显微镜拍摄的石墨表面的原子排列情况

1.5 物体的内能

分子力

用分子的球模型对固体和液体进行某些估算时，由于没有考虑分子间的空隙，因此所得结果仅反映了数量级方面的信息。

扩散现象和布朗运动，不仅说明了组成物质的分子在永不停息地运动，而且说明物质分子不是紧紧地挤在一起的，分子之间是有空隙的。

图 1–22 是用扫描隧道显微镜拍摄的石墨表面原子的排列情况，一排排亮点（碳原子）之间的暗背景显示出原子间的空隙。

分子间存在着空隙，而且固体能保持一定的形状，这启示我们：分子之间存在着相互作用力。

研究表明，分子之间同时存在着引力和斥力，它们的大小都跟分子之间的距离有关。图 1–25 中横轴上下的两条虚线分别表示两个分子间的引力和斥力随距离变化的关系，实线表示引力和斥力的合力随距离变化的关系。当两个分子间的距离为 r_0 时，引

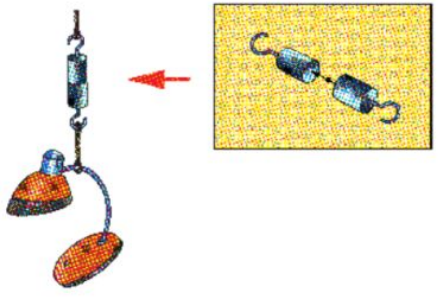


图 1–23　由于分子之间引力的作用，两段铅柱会结合成一体，下方挂上一定质量的重物后也不分开

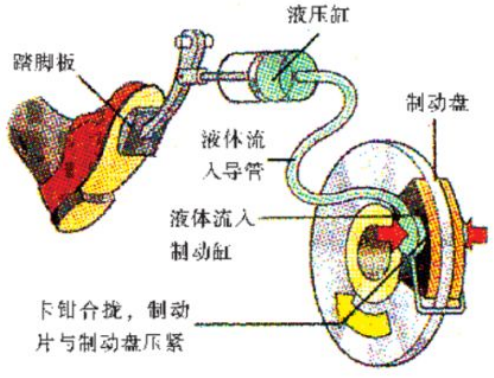


图 1–24　水、油等液体很难被压缩。水压机、液压传动就是利用了它们的“不可压缩性”

力和斥力相互平衡，这时我们说这两个分子处于平衡位置。r_0 的数量级约为 10^{-10} m。

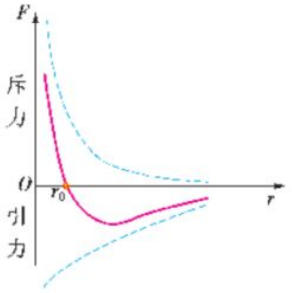


图 1-25　分子力与分子间距的关系

通常把分子间引力的大小用负值表示，而斥力的大小用正值表示。

讨论与思考

1. 从图 1-25 中，你能得到哪些信息？请跟同学们互相讨论。

2. 结合初中物理知识，并回顾前几节内容，请归纳分子动理论的基本内容及其实验（或事实）基础。

分子势能

我们知道，由于地球的万有引力作用，地面附近的物体具有重力势能；电荷与电荷间存在着静电相互作用，因此电荷具有电势能。既然分子间也存在着相互作用，因此同样具有由它们的相对位置决定的势能，叫做分子势能。

分子势能的变化，同样由分子力做功的情况决定。

图 1-26 把两个分子间的相互作用跟两个点电荷间的相互作用做了类比。请你也用类比的方法，找出分子势能的变化与分子力做功的关系。

物体内分子间的距离发生了变化，在宏观上就表现为物体的体积发生了变化，所以，分子势能跟物体的体积有关。

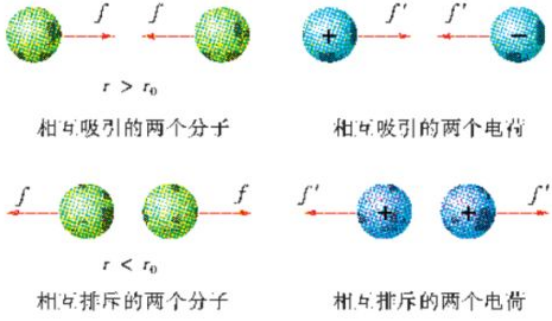


图 1-26　分子力与电荷间相互作用力的类比

内能

前面已经指出，分子具有动能，现在我们又知道分子间由于存在相互作用，还具有势能。物理学中，把物体内所有分子的热运动动能和分子势能的总和，叫做物体的**内能**（internal energy），又叫做热力学能。

内能是不同于机械能的另一种形式的能。由于任何物体的分子都在不停地运动，分子间又存在着相互作用，所以任何物体都具有内能。但是，某物体在一个确定状态下的内能究竟有多大，是

无法计算的。在处理实际问题时有意义的也不是物体内能的大小，而是内能变化量的大小。

讨论与思考

根据内能的物理意义，分别从微观和宏观两方面研究一下，内能的大小由哪些因素决定？

多学一点　如何理解分子之间既有引力又有斥力的现象

我们先来研究一下原子间的引力和斥力是如何产生的。原子中有一个直径约 10^{-15} m 的带正电的核，核外有带负电的电子组成的电子云。整个原子呈电中性。

当两个原子的电子云相距较远时（图 1–27a），可以认为相互间没有静电力的作用。

当两个原子接近到如图 1–27b 所示的情况时，它们有一部分电子云互相重叠。原子 1 的电子已不能把原子 1 的核的正电作用屏蔽掉，使得原子 2 的电子也受到原子 1 的核的吸引；同样，原子 1 的电子也受到了原子 2 的核的吸引。于是，两原子间产生了引力。

当两原子接近到如图 1–27c 所示的情况时，两原子核间的斥力要比它们与对方原子的电子间的引力大，于是两原子间总的相互作用力就变为斥力了。

分子间的相互作用与此类似。分子力是由于构成分子的带电粒子（电子、质子）的相互作用引起的。

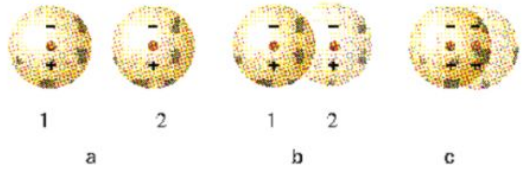


图 1–27　分子间相互作用的微观解释

课后作业与活动

1. 分子间的相互作用力由引力 $f_{引}$ 和斥力 $f_{斥}$ 两部分组成，则
   A. $f_{引}$ 和 $f_{斥}$ 是同时存在的
   B. $f_{引}$ 总是大于 $f_{斥}$，其合力总表现为引力
   C. 分子之间的距离越小，$f_{引}$ 越小，$f_{斥}$ 越大
   D. 分子之间的距离越小，$f_{引}$ 越大，$f_{斥}$ 越小
2. 根据内能的定义，比较下列各组中物体内能的大小，并说明道理。
   (1) 1kg 50 ℃ 的水和 10kg 50 ℃ 的水
   (2) 1kg 50 ℃ 的水和 1kg 80 ℃ 的水
   (3) 1kg 100 ℃ 的水和 1kg 100 ℃ 的水汽
3. 分析下列说法中，哪些是正确的？哪些是不正确的？
   (1) 物体的机械能大，它的内能一定也大。
   (2) 物体可以同时具有内能和机械能。
   (3) 物体的机械能可以等于零，物体的内能不会等于零。
   (4) 物体的机械能改变时，它的内能一定也变化；物体的内能改变时，它的机械能一定也变化。
4. 根据你的认识，对机械能和内能这两种形式的能作一比较。
5. 初中物理已学过分子动理论的基本内容，回顾本章内容，你在哪些方面对分子动理论有了更深刻的认识？

1.x

第 1 章家庭作业与活动

1. nm(纳米)是长度单位，1nm=10^{-9} m。如果有一个边长为1nm的立方体盒子，则其中可容纳的氢分子（直径约为 10^{-10} m）数目的数量级是_____。
2. 1g 食盐完全均匀分布在 1×10^{16} m^3 的水中，则 1cm^3的盐水中所含食盐分子数目的数量级是_____。
3. 一颗小雾珠的体积大约是 6.0×10^{-6} cm^3，这颗小雾珠里含有的分子数目约为_____。
4. 布朗运动是指
   A. 液体分子的运动
   B. 悬浮在液体中的固体分子的运动
   C. 固体微粒的运动
   D. 液体分子与固体分子的共同运动
5. 较大的悬浮颗粒不易发生布朗运动，其原因是
   A. 液体分子不一定与颗粒相撞
   B. 液体分子对颗粒在所有方向上的冲撞的平均效果互相平衡
   C. 颗粒的质量大，不易改变运动状态
   D. 颗粒分子本身的热运动缓慢
6. 关于分子力做功的下列说法中，正确的是
   A. 如果分子间作用力表现为引力，则两分子间距离增大时，一定是克服分子力做功
   B. 如果分子间作用力表现为引力，则两分子间距离减少时，一定是克服分子力做功
   C. 如果分子间作用力表现为斥力，则两分子间距离减小时，一定是分子力做功
   D. 如果分子间作用力表现为斥力，则两分子间距离增大时，一定是克服分子力做功
7. 关于物体的内能和分子势能，下列说法中正确的是
   A. 物体的速度增大，则分子的动能增大，内能也一定增大
   B. 物体温度不变，内能可能变大
   C. 物体的内能与温度有关，与物体的体积无关
   D. 把物体举得越高，分子势能越大
8. 为了估测一气体中分子间的平均距离，需要知道的物理量是
   A. 阿伏加德罗常数、该气体的质量和摩尔质量
   B. 阿伏加德罗常数、该气体的质量和密度
   C. 阿伏加德罗常数、该气体的质量和体积
   D. 该气体的密度、体积和摩尔质量

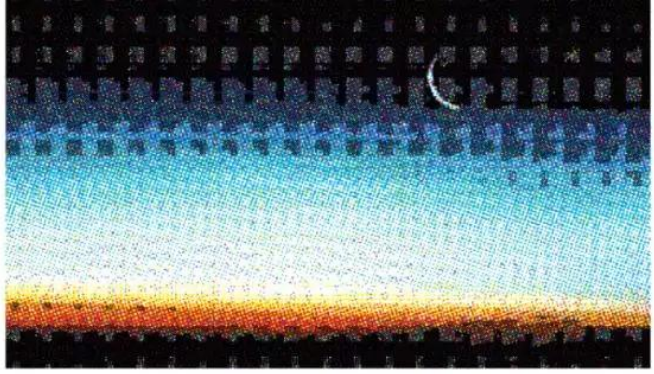


图 2-1　美丽的地球大气层

第 2 章
气体定律与人类生活

每时每刻,我们都生活在空气的怀抱中。然而,在很长时期内,人们对空气的性质却几乎没有想过要进行研究。真是"不识庐山真面目,只缘身在此山中"。直到 17 世纪中叶,意大利物理学家托里拆利(E. Torricelli)和维维亚尼(V. Viviani)揭示了"托里拆里真空",人们才发觉空气有着多么丰富奇妙的性质,从而产生了研究空气的兴趣,并逐渐形成了对气体性质的一些认识。

气体具有流动性,又没有一定的形状和体积。跟力学中研究物体的机械运动不同,研究气体时,关注的是整体的宏观表现。我们需要解决的问题是:

应该用哪些物理量来描述气体的宏观状态?这些物理量跟气体分子的无序运动有什么联系?

让描述气体的某一个物理量保持不变,使气体状态发生变化,这时其他物理量之间的关系遵循什么规律?

空气中水蒸气的含量如何影响空气的潮湿程度?它对人们的生活和生产有何影响?

……

本章先探究如何描述气体状态和研究气体的状态变化;接着运用理想气体模型,重点探究一定质量的气体在等温过程中遵循的规律——玻意耳定律,并从微观上予以阐释;同时,按不同要求去研究查理定律和盖·吕萨克定律;最后,以干湿泡湿度计为背景,在饱和汽、未饱和汽、相对湿度等概念的基础上,讨论相对湿度对人类生活和生产的影响。

2.1

气体的状态

气体的状态跟哪些因素有关

在描述物体的机械运动时，我们引进了质点、位移、速度、加速度等物理量。描述气体的宏观状态，应该用哪些物理量呢？

实验探究 探究用哪些物理量描述气体的状态

把一只被压瘪的乒乓球浸在沸水中，一会儿后，它就重新鼓起来了。在这个过程中，乒乓球内空气的质量未变，温度、体积、压强等都发生了变化。

请思考：描述乒乓球内气体的宏观物理量还有哪些？其中也会发生变化的有哪些？它们跟上述物理量有关吗？

用 T、V、p 描述气体的状态

在物理学中，可以用温度 T、体积 V、压强 p 来描述一定质量气体的宏观状态，这三个物理量叫做气体的状态参量。

作为气体状态参量之一的温度 T，是指热力学温度(thermodynamic temperature)。在国际单位制中，热力学温度的单位是“开尔文”，简称“开”，符号是 K。热力学温度 T 与摄氏温度 t 的关系是

$T = t + 273.15\text{K} \approx t + 273\text{K}$

讨论与思考

气体的温度高低跟气体分子的运动有何联系？

气体的压强是怎样产生的？联系气体分子的无序运动，猜测一下密闭容器内气体压强所具有的特点。

实验探究 用压强计测压强

槽式气压计

图 2-2 所示是实验室常用的槽式气压计，调节其下端针尖，使它刚好接触水银面，移动上部游标，准确读出大气压值。

在实际应用中，气体压强 p 的单位还有“标准大气压”(符号是 atm)和“毫米汞柱”(符号是 mmHg)，但它们不是国际标准单位。

$1\ \text{atm} = 76\ \text{cmHg}$

$\approx 1.013 \times 10^5\ \text{Pa}$

$1\ \text{mmHg} = 133.322\ \text{Pa}$

$\approx 133\ \text{Pa}$

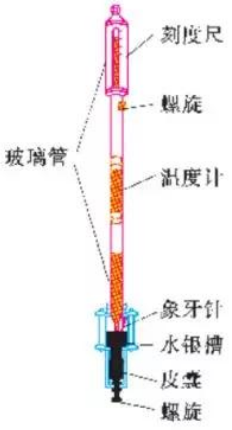


图 2-2　槽式气压计

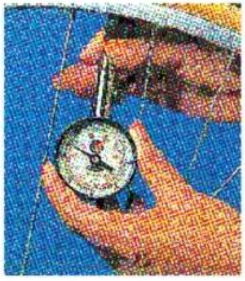


图 2-3　金属压强计

金属压强计

如图 2-3 所示，用金属压强计测出自行车胎内气体的压强。

怎样研究气体的状态变化

实验表明，一定质量的气体处于确定的状态时，气体的温度、体积、压强这三个参量也都有确定的值。如果其中有两个参量发生了变化，或者三个参量都发生了变化，我们就说气体的状态发生了变化。

那么，怎样研究气体的状态变化呢？

建立理想气体模型

实际的气体是比较复杂的，不同的气体，分子的大小和结构不同，何况分子间还存在着随距离不断变化的引力和斥力作用。为了便于研究，我们需要把实际气体理想化。在物理学上，忽略分子本身体积和分子间相互作用的气体叫做理想气体(ideal gas)。

实验指出，当温度不太低，压强不太大时，所有的气体都可以看作理想气体。

理想气体模型是由德国物理学家克劳修斯于 1850 年首先提出来的。

采用控制变量法

温度、体积、压强这三个参量之间有着密切的联系，当它们都发生变化时，情况比较复杂。为了便于研究，可以先保持其中一个参量不变，研究其他两个参量之间的关系，进而确定三个参量的变化规律。

使一定质量的气体在温度保持不变的情况下发生的状态变化过程，叫做等温过程(isothermal process)。相应地，还有等容过程(isochoric process)和等压过程(isobaric process)。

讨论与思考

怎样研究一定质量的气体在温度、体积、压强分别不变时的状态变化规律呢？

有几位同学提出了下列各种实验设计方案：

使气体的压缩和膨胀缓慢地进行，就可以忽略气体的温度变化，这就是一种等温过程；

对密闭容器内的气体加热，忽略容器的热膨胀，这就是一种等容过程；

让密闭气体始终在大气压下缓慢地膨胀或压缩，这就是一种等压过程。

你认为这些方案是否合理？请提出你的看法，并与同学交流。

研究气体的状态变化，就是要找出 T、V、p 这三个参量之间的变化关系。

案例分析

案例 已知地球的半径 $R = 6370\ \text{km}$，请你设计一个简单的实验，估算出包围地球的大气的总质量。要求列出实验器材，说明实验方法，写出结果的表达式。

分析 大气压可以看成是由地球大气的重力产生的。如把地球表面展成平面，那么整个大气的重力就等于大气压强跟地表总面积的乘积。

请根据上述思路完成对地球大气质量的估算。

家庭作业与活动

1. 关于热力学温度的说法，正确的是
   A. 热力学温度的零度是 −273 ℃，叫做绝对零度
   B. 气体温度趋近绝对零度时其体积为零
   C. 热力学温度的每度大小跟摄氏温度的每度大小相等
   D. 热力学温度的每度大小大于摄氏温度的每度大小

2. 如图 2-4 所示，在左端封闭的 U 形管中，用水银封住了 A、B 两段空气柱，外界大气压强为 76 cmHg，则
   A. $p_A = 78\ \text{cmHg}$
   B. $p_A = 75\ \text{cmHg}$
   C. $p_B - p_A = 3\ \text{cmHg}$
   D. $p_B - p_A = 6\ \text{cmHg}$

3. 著名的马德堡半球实验可简化成如图 2-5 的示意图。设两个半球壳拼成的球形容器的半径为 R，大气压强为 p，则要使这两个半球壳分离，施加的拉力 F 至少为
   A. $4\pi R^2 p$
   B. $2\pi R^2 p$
   C. $\pi R^2 p$
   D. $\frac{1}{2}\pi R^2 p$

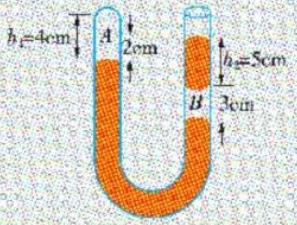


图 2-4

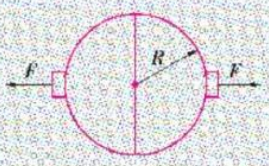


图 2-5

2.2 玻意耳定律

话难中的发现



玻意耳 (R. Boyle, 1627—1691)，英国物理学家、化学家。1659 年用实验阐明气压升降的原理，并发现关于气体的著名的玻意耳定律。在化学方面，将元素定义为不能分解的物质，使化学在科学的基础上进行研究。

17世纪中叶，托里拆利真空的发现，引起了玻意耳研究空气性质的兴趣。他与助手胡克(R. Hooke)进行了一系列关于空气压力的实验。可是，玻意耳的工作受到教会中许多人的攻击，他们不相信空气有“重量”，更不相信这一“重量”能抵挡住托里拆利管中水银柱的压力。有人甚至说，管中水银柱的上升是因为水银被一根“无形的线”牵着。

为了斩断这根“无形的线”，玻意耳设计了一个实验。

他在一根一端封闭的 U 形管内灌入少量水银，先使左右两臂内的水银面等高，然后从较长的右臂(开端)向管内缓缓倒入一些水银，使较短的左臂(闭端)内的空气柱受压缩短。他测出空气柱的长度和相应的压强。然后再缓缓倒入一些水银，再测出空气柱的长度和相应的压强，如此做下去(图 2-6)。

玻意耳实验所用的 U 形管很长，他把它用绳子吊着做了约 40 次实验，终于得出了密闭气体温度不变时其体积与压强的变化关系。1662 年，玻意耳首次公布了他的发现。

在玻意耳的实验中，为什么可以认为封闭气体的温度保持不变？

玻意耳在实验中是怎样测出闭端空气柱压强的？请猜测一下，玻意耳的实验会得出怎样的关系？

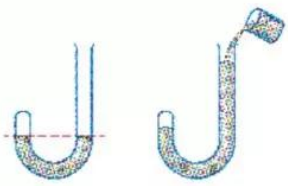


图 2-6 玻意耳实验的示意图

探究等温过程

实验探究 探究等温过程的规律

实验装置如图 2-7 所示。以厚壁玻璃管内一定质量的空气作为研究对象。通过脚踏泵对管内的空气施加不同的压强，使管内

空气的体积发生相应的变化。然后用压强计和刻度尺读出气体的压强和相应的体积，将得到的数据填入下表。

物理量 \ 序号	1	2	3	4	5	6
压强 p(压强单位)						
体积 V(体积单位)						

实验中，每次改变压强后，都要使装置恢复到室温，以确保管内气体在压强变化前后温度相等。

实验表明，一定质量的某种气体，在温度不变的情况下，压强 p 与体积 V 成反比。

这个结论叫做玻意耳定律(Boyle law)。这是17世纪物理学上的一项伟大发现。

1676年，法国物理学家马略特(E. Mariotte)也独立地总结出了温度不变时一定质量气体的压强跟体积成反比的规律。

玻意耳定律的公式与图像

如果用 p_1、V_1 和 p_2、V_2 分别表示一定质量气体在等温过程中任意两个状态的压强和体积，那么玻意耳定律可以用公式表示为

$$\frac{p_1}{p_2}=\frac{V_2}{V_1} \quad 或 \quad p_1V_1=p_2V_2$$

在平面直角坐标系中，用纵坐标表示压强 p，用横坐标表示体积 V，则 p-V 图像是如图2-8所示的双曲线，这条双曲线叫做等温线(isotherm)。一定质量的气体，对于不同的温度，有着不同的等温线，但它们都是双曲线，如图2-9所示。

思考一下，在图2-9中，为什么温度越高，等温线就越往上移？

玻意耳定律的微观解释

分析论证

玻意耳定律虽然是在实验基础上归纳出来的一条反映理想气体状态变化的宏观规律，但它在微观上有其本质的原因。

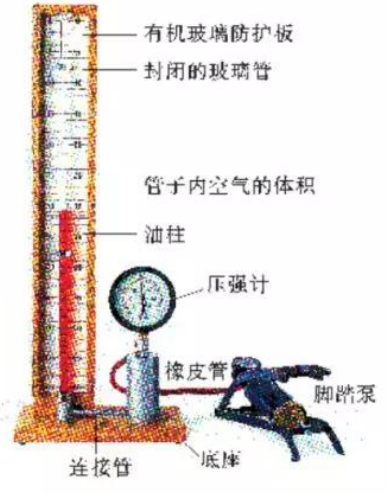


图2-7 探究等温过程的实验装置

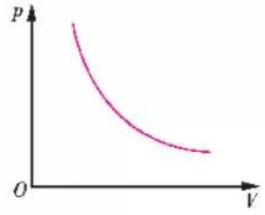


图 2-8　等温线

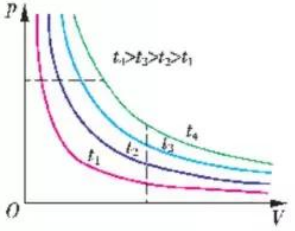


图 2-9　对应不同温度的几条等温线

我们从前面研究气体压强的产生原因时已经知道，从微观上分析，气体压强的大小跟两个因素有关：一个是气体分子的平均动能，另一个是分子的密度。所以在宏观上，气体压强跟温度和体积有关。

一定质量的气体，温度保持不变时，分子的平均动能是一定的，压强的大小完全由分子密度决定。当体积减小为原来的一半时，分子密度增大为原来的 2 倍，因此压强也增大为原来的 2 倍，即气体的压强与体积的乘积保持不变。

案例分析

案例 1　为适应太空环境，去太空旅行的航天员都要穿航天服。航天服是一种高科技产品，它有一套生命保障系统，这套系统为航天员提供合适的温度、氧气和气压，让航天员在太空如同在地面上一样舒适。

研究一下，航天服是怎样创造一个合适的气压环境的？

分析　航天员在地球上正常生活和工作时受到的大气压强是一个大气压，身体内（比方说肺部）气体的压强和身体外的大气压强处于平衡状态。当航天员进入太空时，体外的压强很快减小，根据玻意耳定律，这时肺部气体的体积会急剧增大，可能使肺破裂。当航天员返回地面时，体外的压强很快增大，同样根据玻意耳定律，肺部气体的体积会急剧减小，会使肺部被压缩。

请根据以上分析，设想一下，怎样才能使航天服为航天员提供一个合适的气压环境？



图 2-10　穿上航天服的中国航天员杨利伟

航天服还需要具有哪些功能？请你提出一个关于航天服的设计方案。

案例 2　用打气筒给一个自行车内胎打气。设每按一次打气筒，可打入压强为 1.0×10^5 Pa 的空气 125 cm³。这个自行车内胎的容积是 2.0 L，假设胎内原来没有空气，那么按了 20 次后，胎内空气的压强是多大？设打气过程中温度不变。

分析　以每次打入胎内的这部分气体为研究对象，它经历了一个等温过程，其状态参量如下：

打入前		打入后	
压强	$p_1 = 1.0 \times 10^5$ Pa	压强	$p_2' = ?$
体积	$V_1 = 125$ cm³	体积	$V_2 = 2.0$ L

打了 20 次后，胎内空气的压强 $p_2 = 20\,p_2'$。

请根据上述分析，完成本题的解答。

讨论与思考

你认为这个案例还可以怎样思考求解？请相互交流。

有一位同学通过这个案例归纳出用玻意耳定律求解气体问题的基本思路：明确研究对象→确定状态参量→列式算出结果。你认同他的思路吗？

课题研究

用 DIS 研究气体压强与体积的关系

实验主要器具如图 2-11 所示。

操作步骤：

1. 将压强传感器接入数据采集器。点击软件主界面上的实验条目“气体压强与体积的关系”，打开软件。

2. 移动针筒的活塞，选定初始体积（如 12 mL），并把针筒通过软管与压强传感器的测试口紧密连接。

3. 输入当前体积 $V = 12$ mL，点击“数据记录”，记下气体体积为 12 mL 时所对应的压强数据。改变针筒内气体的体积，输入体积读数，同样点击“数据记录”，记录相应的压强数据。

4. 重复上述实验，记录几组数据，点击“绘图 V”，将得到与各组记录数据对应的压强与体积的一组描点，如图 2-12 所示。



图 2-11 研究气体压强与体积关系的 DIS 实验主要器具

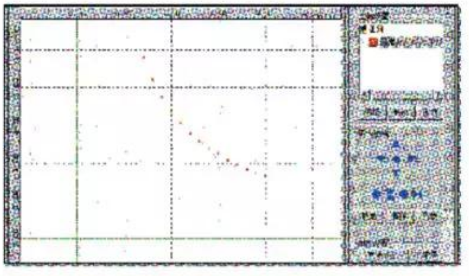


图 2-12 DIS 得出的 p-V 图像

家庭作业与活动

1. 用注射器为主要器材，并添置相关的器材，设计一个实验，粗略地验证玻意耳定律。要求说明实验的主要步骤和应测物理量，并列出相关表达式。

2. 如图 2-13 所示，在一根一端封闭的粗细均匀的细玻璃管中有一小段水银柱，封闭着一定质量的空气，现在要用它测定大气压，那么

(1) 还需要用什么器材？

(2) 说明实验主要步骤；

(3) 用实验中测量的物理量列出大气压的表达式。



图 2-13

3. 在图 2-6 所示的玻意耳实验中，假设当左右两管内水银面等高时，测得闭端空气柱长 40 cm，大气压为 760 mmHg，则当空气柱的压强分别为 790 mmHg 和 2986 mmHg 时，它的长度在理论上应为多少？

4. 某地区空气污染较严重，位学生受桶装纯净水的启发，提出用桶装的净化压缩空气供气。设每人 1 min 内呼吸 16 次，每次需吸入 1 atm 的净化空气 500 mL，而每个桶能装 10 atm 的净化空气 20 L。假定这些空气可以全部被吸完，设温度保持不变，估算一下每人每天需吸多少桶净化空气。请对这位同学的提议做出评价。

2.3 查理定律和盖·吕萨克定律

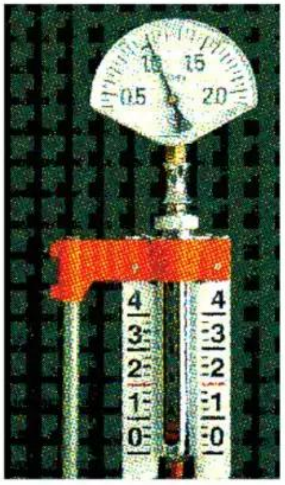


图 2-14　探究等容过程的实验装置

在发现玻意耳定律 100 多年后，两位法国科学家查理(J. A. C. Charles)和盖·吕萨克(J. L. Gay-Lussac)分别找到了一定质量气体在等容过程和等压过程中的状态变化规律。

探究等容过程

实验探究　探究等容过程的规律

实验装置如图 2-14 所示。在玻璃管内封闭着一定质量的空气。记下初始状态的室温 t_0 和压强 p_0，然后将玻璃管浸在盛有热水的烧杯中，过一会儿，估计管内气体温度与杯中热水温度相等时，测出温度 t 和管内气体压强 p。改变杯中热水的温度，重复上面的测量。如此可得到相应的几组数据，如下表。

序号 / 物理量	1	2	3	4	5
温度 T ($=273+t$) / K	301	331	352		
压强 p / 10^5 Pa	1.0	1.1	1.3		
$\frac{p}{T}$	0.0033	0.0033	0.0033		

实验表明，一定质量的某种气体，在体积不变的情况下，压强 p 与热力学温度 T 成正比。

这个结论叫做查理定律(Charles law)。

查理定律的公式与图像

如果用 T_1、p_1 和 T_2、p_2 分别表示一定质量气体在等容变化过

程中任意两个状态的热力学温度和压强，那么查理定律的公式可表示为

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

在平面直角坐标系中，用纵坐标表示压强 p，用横坐标表示热力学温度 T，那么 p-T 图像如图 2-15 所示。这条倾斜直线叫做等容线(isochore)。

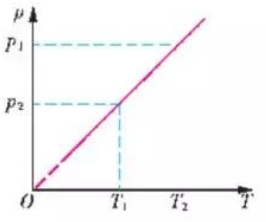


图 2-15 等容线

一定质量的气体，对于不同的体积，有着不同的等容线，但它们都是过原点的倾斜直线，如图 2-16 所示。

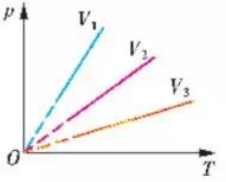


图 2-16 对应不同体积的几条等容线

在图 2-16 中，体积 V_1、V_2、V_3 中哪个大？哪个小？

请你根据分子动理论对查理定律做出解释。

案例分析

案例 1 某登山运动员在一次攀登珠穆朗玛峰的过程中，他手表的表面玻璃突然爆裂了，而这时手表没有受到任何撞击。

该手表出厂时给出的参数为：27 ℃时表内气体压强为 1×10^5 Pa，当内外压强差超过 6×10^4 Pa 时手表表面玻璃可能爆裂。若已知当时气温是 −13 ℃，那么手表表面玻璃爆裂时表内气体压强为多少？外界大气压为多少？

分析 手表的表壳可以看成一个密闭容器，出厂时表壳内封闭着一定质量的空气，气压是一个大气压。从手表出厂到登山运动员戴着它攀登珠峰，表壳内的气体经历了一个等容过程(不考虑表壳的热胀冷缩)。于是在这一过程的初态和末态，表壳内气体的状态参量如下：

初态	末态
$T_1=(273+27)$ K	$T_2=(273-13)$ K
$p_1=1\times10^5$ Pa	$p_2=?$

根据查理定律可算出 p_2，结合表面玻璃爆裂条件，即可求出当时的外界大气压。

请根据上述分析，完成本题的解答。

探究等压过程

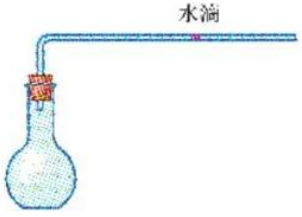


图 2-17　探究等压过程的实验装置

案例 2　一定质量的某种气体，在压强不变的情况下，体积 V 与热力学温度 T 成正比。这个结论是法国科学家盖·吕萨克通过实验得到的，叫做盖·吕萨克定律(Gay-Lussac law)。

利用图 2-17 所示实验装置，使气体在大气压下发生热胀冷缩，就可以粗略地验证盖·吕萨克定律。请你

(1) 从物理原理上说明这个实验的主要步骤；

(2) 根据实验结果，用公式表示出盖·吕萨克定律，并画出相应的图像；

(3) 对盖·吕萨克定律进行微观解释。

分析　以瓶内封闭气体为研究对象。温度升高或降低时，气体发生膨胀或收缩，水平管中的小水滴相应地向外移动或向里移动。由于外界大气压可认为保持不变，根据小水滴的力平衡条件可知，瓶内气体的压强等于外界大气压。因此，瓶内气体经历的是一个等压过程。

请根据以上分析，确定实验步骤，再仿照对等温过程和等容过程的探究，用公式和图像表示出盖·吕萨克定律，并做出微观解释。

多学一点　理想气体状态方程

将关于气体状态的三个实验定律归纳一下，可知：

一定质量的某种理想气体在不同状态时，其压强和体积的乘积与热力学温度的比值是不变的。这个结论叫做一定质量的理想气体的状态方程。用公式可表示为

$$\frac{pV}{T} = C\ (\text{恒量}) \tag{1}$$

或

$$\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2} \tag{2}$$

为了确定恒量 C，可用 1mol 的任何气体作为研究对象。在标准状态下，即 $p_0 = 1.013 \times 10^5\ \text{Pa}$，$T_0 = 273\ \text{K}$ 时，取摩尔体积 $V_m = 22.4\ \text{L/mol} = 22.4 \times 10^{-3}\ \text{m}^3/\text{mol}$。将这些数值代入(1)式，即得适用于 1 mol 的任何气体的常量，这个常量用 R 表示，叫做普适气体常量(universal gas constant)。

$$R = \frac{p_0 V_m}{T_0} = \frac{1.013 \times 10^5 \times 22.4 \times 10^{-3}}{273}\ \mathrm{J/(mol \cdot K)} = 8.31\ \mathrm{J/(mol \cdot K)}$$

普适气体常量是热学中一个重要常量，它适用于任何气体。

于是1mol理想气体的状态方程为

$$pV = RT \tag{3}$$

对于质量为 m 的理想气体，设它的摩尔质量为 M，则该气体的摩尔数为 $n = \frac{m}{M}$，由此可得

$$pV = nRT \tag{4}$$

或

$$pV = \frac{m}{M}RT \tag{5}$$

这就是任意质量的理想气体的状态方程，也叫做克拉珀龙方程。

课题研究

研究气压热水瓶的原理

仔细观察气压热水瓶的结构，跟同学们一起讨论它的出水原理，写一份报告在班上交流。

家庭作业与活动

1. 冬天，剩有半瓶热水的暖水瓶经过一个夜晚，第二天拔瓶口的软木塞时，觉得很紧，不易拔出来，主要原因是

A. 软木塞受潮膨胀

B. 瓶口因温度降低而收缩变小

C. 白天气温升高，大气压强变大

D. 瓶内气体因温度降低而压强减小



图2-18 伽利略验温器

2. 取一根两端开口的细玻璃管，一端通过橡皮塞与一个玻璃泡相连，另一端竖直插入水槽，并使管内吸入一段水柱。这就是一支伽利略验温器(图2-18)。一位同学认为，利用这个装置，也可以粗略地验证查理定律。

你认为上述看法是否合理，请说明你的理由。如认为合理，请提出实验方案。

3. 氧气瓶在车间里充好气，瓶内压强达到 1.5×10^7 Pa。当把氧气瓶运达到工地上后，测得瓶内压强降为 1.35×10^7 Pa。已知车间里的温度为27 ℃，工地上的温度为-3 ℃。试判断氧气瓶在运输途中是否漏气。氧气瓶的热膨胀忽略不计。

4. 一户居民家厨房里的管道煤气泄漏，发生爆炸事故。事后技术人员估计爆炸时厨房温度从常温迅速升高到1800℃。试估算此时产生的气体压强约为大气压的多少倍。

2.4 空气的湿度与人类生活

生活经验告诉我们，空气的潮湿程度对生活和生产有很大影响。空气太潮湿，使人感到气闷，物体容易发霉；空气太干燥，口腔和鼻腔会感到难受，植物容易枯萎。

那么，怎样衡量空气的潮湿程度呢？

从湿度计谈起

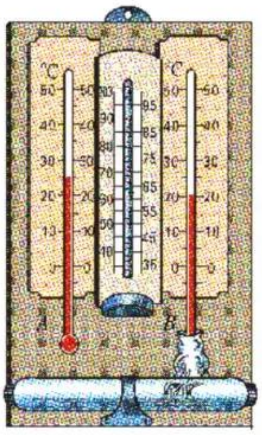


图 2-19　干湿泡湿度计

图 2-19 所示是气象站和家庭中常用的干湿泡湿度计，它由两支完全相同的温度计组成。温度计 A 叫做干泡温度计，用来测量空气的温度；温度计 B 叫做湿泡温度计，它的感温泡上包着棉纱，棉纱的下端浸没在水中。

仔细观察干湿泡湿度计后，可以引发出不少问题：

为什么湿泡温度计的示数比干泡温度计的示数小？

这两支温度计的示数差跟什么因素有关？

怎样使用干湿泡湿度计？

……

你通过观察后想到什么问题？请互相交流。

上述这些问题都跟水的蒸发现象有关。

包有棉纱的湿泡温度计，由于感温泡上的水蒸发吸热，它的示数比干泡温度计低。水蒸发得越快，温度降低得就越多，两支温度计的示数差就越大。反之，水蒸发得越慢，两支温度计的示数差越小。

思考一下，湿泡温度计上水的蒸发快慢与室内空气状况有何关系？

未饱和汽与饱和汽

我们知道，敞口容器里的液体，过一段时间就会全部蒸发掉。但盛在密闭容器里的液体即使过了很长时间，也不会蒸发完，这是什么原因呢？

分析论证

根据分子动理论，液体中的分子都在不停地运动着，一些处在液体表面附近的动能足够大的分子，能挣脱周围分子的引力，飞离液体，形成蒸气，这就是蒸发。

容器中的液面上，同时不断进行着两种相反的过程：一方面有些分子飞离液面；另一方面也有一些蒸气分子撞到液面上又回到液体中去。



图 2-20 密闭容器中的液体

在敞口容器中，飞离液面的分子会很快逃逸，使得每单位时间内飞离液面的分子远多于回到液体中的分子，因此不多久液体就会全部蒸发掉。

在密闭容器中，随着液体的不断蒸发，液面上方蒸气的密度不断增大，回到液体中的分子也逐渐增多。最后，当液面上方蒸气的密度大到一定程度时，在单位时间内回到液体中的分子数等于飞离液面的分子数。这时蒸气的密度不再增大，液体也不再减少，我们称此时液体和蒸气之间达到了动态平衡。所以，密闭容器里的液体经历很长时间仍不会干涸。

在物理学上，跟液体处于动态平衡的蒸气叫做饱和汽(saturation vapor)，没有达到饱和状态的蒸气叫做未饱和汽(unsaturation vapor)。

讨论与思考

在一定温度下，饱和汽的密度是一定的。那么温度变化时，饱和汽的密度会发生怎样的变化？

谈谈你对动态平衡的认识？你能否从生活中找出类似的事例？

饱和汽压

饱和汽所具有的压强，叫做液体的饱和汽压(saturation vapor pressure)。

实验表明，在相同的温度下，不同液体的饱和汽压一般是不同的。挥发性大的液体，饱和汽压大。例如 20 ℃时，乙醚的饱和汽压为 5.87×10^4 Pa，水为 2.34×10^3 Pa，水银仅为 1.60×10^{-1} Pa。

饱和汽压随温度的升高而增大。这是因为温度升高时，液体里能量较大的分子增多，单位时间内飞离液面的分子也增多，致使饱和汽的密度增大，同时蒸气分子热运动的平均动能也增大。因此，饱和汽的压强随温度的变化比通常气体更为显著。

在温度不变的情况下，饱和汽压不随体积变化。这是饱和汽区别于未饱和汽及通常气体的一个重要特征。因为体积增大时，容器中蒸气的密度减小，原来的饱和汽变成了未饱和汽，于是液体继续蒸发，直到未饱和汽成为饱和汽为止。当温度不变时，饱和

不同温度下水的饱和汽压

t/℃	p_s/Pa	t/℃	p_s/Pa	t/℃	p_s/Pa	t/℃	p_s/Pa
−15	1.92×10^2	3	7.58×10^2	21	2.486×10^3	39	6.990×10^3
−14	2.08×10^2	4	8.13×10^2	22	2.643×10^3	40	7.374×10^3
−13	2.25×10^2	5	8.72×10^2	23	2.809×10^3	41	7.777×10^3
−12	2.44×10^2	6	9.34×10^2	24	2.983×10^3	42	8.198×10^3
−11	2.65×10^2	7	1.001×10^3	25	3.167×10^3	43	8.638×10^3
−10	2.87×10^2	8	1.073×10^3	26	3.361×10^3	44	9.009×10^3
−9	3.11×10^2	9	1.148×10^3	27	3.564×10^3	45	9.582×10^3
−8	3.35×10^2	10	1.228×10^3	28	3.779×10^3	50	1.233×10^4
−7	3.63×10^2	11	1.312×10^3	29	4.004×10^3	60	1.991×10^4
−6	3.91×10^2	12	1.402×10^3	30	4.242×10^3	70	3.115×10^4
−5	4.21×10^2	13	1.497×10^3	31	4.492×10^3	80	4.733×10^4
−4	4.55×10^2	14	1.598×10^3	32	4.753×10^3	90	7.009×10^4
−3	4.89×10^2	15	1.705×10^3	33	5.032×10^3	100	1.013×10^5
−2	5.28×10^2	16	1.817×10^3	34	5.319×10^3	150	4.759×10^5
−1	5.68×10^2	17	1.937×10^3	35	5.623×10^3	200	1.554×10^6
0	6.11×10^2	18	2.064×10^3	36	5.940×10^3	250	3.975×10^6
1	6.57×10^2	19	2.179×10^3	37	6.274×10^3	300	8.589×10^6
2	7.05×10^2	20	2.338×10^3	38	6.625×10^3	350	1.653×10^7

汽的密度跟原来的一样，所以压强不改变。

由于饱和汽的压强只与温度有关，与体积没有关系，因此前面得出的理想气体定律对饱和汽完全不适用，而未饱和汽则近似地遵循关于理想气体的那三条实验定律。

试解释温度不变时饱和汽体积减小而饱和汽压不改变的原因。

绝对湿度与相对湿度

空气的潮湿程度显然跟空气中的水蒸气密度(单位体积中水蒸气的质量)有关，但直接测量空气中的水蒸气密度较为困难，而水蒸气的密度又跟水蒸气的压强有关，所以通常用水蒸气的压强来间接反映水蒸气密度，这称为绝对湿度(absolute humidity)。例如，测得某一天空气中水蒸气的压强为 1.228×10^3 Pa，那么这一天空气的绝对湿度就是 1.228×10^3 Pa。

实践表明，地面上水分蒸发的快慢和人们感觉到的空气潮湿程度，并不完全由空气中水蒸气密度决定，而是跟空气中的水蒸气离开其饱和状态的远近程度有关。

若空气中的水蒸气密度远小于饱和汽的密度，即离开饱和状态很远，则物体中的水分会蒸发得较快，人们感觉到空气干燥；反之，若空气中的水蒸气密度接近饱和汽密度，即离开饱和状态较近，则物体中的水分就很难蒸发，人们就感觉到空气潮湿。

现在你知道决定湿泡温度计上水分蒸发快慢的因素了吗？

为了表示空气中水蒸气离饱和状态的远近程度，物理学中引入了相对湿度(relative humidity)的概念。某温度时空气的绝对湿度跟同一温度下水的饱和汽压的百分比，叫做这时空气的相对湿度。

如果用 p 表示空气的绝对湿度，用 p_s 表示同一温度下水的饱和汽压，用 B 表示相对湿度，那么

$$B = \frac{p}{p_s} \times 100\ \%$$

例如，在气温 20 ℃时测得水蒸气的压强即绝对湿度 $p = 1.1 \times 10^3$ Pa，查表知 20 ℃时水的饱和汽压 $p_s = 2.3 \times 10^3$ Pa，所以这时空气的相对湿度为

$$B = \frac{1.1 \times 10^3}{2.3 \times 10^3} \times 100\% = 48\%$$

讨论与思考

请你用简洁的语言归纳一下使用干湿泡湿度计测定湿度的方法。它测定的是空气的绝对湿度还是相对湿度？

如果让干湿泡湿度计中湿泡温度计的棉纱始终浸在水里，两支温度计的示数是否有可能相等？

当绝对湿度不变时，随着气温的升高或降低，相对湿度会发生怎样的变化？

湿度的影响



图 2-21 仙人掌

空气的湿度，尤其是空气中水蒸气的相对湿度，跟人们的生活和生产有密切的关系。通常，在相对湿度为 60%—70%的室内，人们会感到舒服。夏天，空调机不但要使室内温度降低，还要使室内的水蒸气密度降低。否则，相对湿度就会增大，使人感到不爽快。冬天，人们围炉取暖，应同时在火上煮一壶水，以增大空气中的水蒸气密度。否则，相对湿度就太小，会导致皮肤干裂。

植物也要求一定的相对湿度，例如水稻在抽穗扬花期，最适宜的相对湿度是 70%—80%。植物在长期的生存竞争中，也形成了适应不同干湿环境的能力。例如，高山植物多数很矮小，紧贴地面，使于取暖和吸收潮湿空气；生长在干燥炎热的沙漠里的仙人掌，生有肉质的茎和叶，这有利于储水，使水分不会很快地被高温蒸发。

有些工业产品，如纺织品、印刷品，在生产过程中对空气的湿度有一定要求。有些需要长期保存的物品如书画、档案、文物，在贮存它们的库房中，要保持适当的湿度。

多学一点 **露点及露点的测定**

气温逐渐降低时，空气中的未饱和水蒸气将逐渐接近饱和。当气温降低到某个值时，空气中的水蒸气会达到饱和状态，这时将有一些水蒸气凝结成水，在物体表面形成一层细小的露滴。使空气中的水蒸气刚好达到饱和时的温度叫做露点(dew point)。

空气中含的水蒸气多，气温只要少许降低一点，水蒸气就达到饱和，于是出现露滴；反之，空气中含的水蒸气少，气温要降低较多，才能达到露点。因此，可设法降低温度，从而测得露点，再从水的饱和汽压表中查出露点时的饱和汽压，它就是空气在原来温度时的绝对湿度。知道了绝对湿度，再查出原来温度下的饱和汽压，就可以求出相对湿度。

信息浏览

气候对人体的影响

我国古代医学家认为，人体的气血运转跟气候的变化有关。有时，气候的突然变化会造成人体功能紊乱，甚至得病。说到气候，一般总以为是气温、气压以及阴晴风雨的情况。其实，空气中的湿度，特别是相对湿度，也是气候的一个重要方面。

肝炎是一种严重危害人体健康的疾病。据试验，气温在0—20 ℃，气压在9.72×10^4—9.82×10^4 Pa，相对湿度在55%—85%，月日照时数在90—200 h，就容易发生肝炎。而这样的气候条件，一般春季才有，所以春季是肝病的高发期。

每当天气变化时，关节炎病人在患部都有不同程度的酸痛感觉。根据对关节炎病例的观察和调查，人们发现，一旦气温、气压、相对湿度的变化超过某个程度，就容易发病。如果前后两天平均气温的变化大于3 ℃，气压变化大于5×10^2 Pa，相对湿度变化大于10%，关节疼痛的发生率就明显增加。所以关节炎又称为“晴雨病”。

慢性气管炎和支气管哮喘患者都有切身的体会：在秋冬季，特别是在西北风劲吹和冷空气降临的日子里，病情会加重。某地医院通过调查发现，在日平均气温低于或等于0 ℃的寒冷季节里，如果前后两天平均温度的变化大于3 ℃，病情容易加重；而在天气转暖，日平均气温高于12 ℃，相对湿度大于85%的日子里，或者在连续阴雨天期间，病情就比较稳定。由此可见，干冷空气是诱发慢性气管炎及支气管哮喘的主要原因。

课题研究

探究干湿泡湿度计

设计一个实验方案，探究干湿泡湿度计的两支温度计的示数差跟哪些因素有关，并研究空气湿度跟气温、温差等因素的定量关系，写出研究报告。

课后作业与活动

1. 托里拆利实验中，水银柱上方常称为托里拆利真空，你认为这个说法是否正确？
2. 在潮湿的大气里，洗好的衣服不容易晾干，为什么？
3. 在绝对湿度相同的情况下，夏天和冬天的相对湿度哪个大？为什么？
4. 当空气的绝对湿度是1.2×10^3 Pa，气温是15℃时，空气的相对湿度是多少？
5. 干湿泡湿度计上两支温度计的指示数字相同，这时空气的相对湿度是多大？
6. 空气的温度是20℃，露点是12℃，这时的绝对湿度和相对湿度各是多大？

2.x

第 2 章家庭作业与活动

1. 如图 2-22，在一根玻璃管中用水银封闭着一定质量的空气，外界大气压 $p_0 = 76\ \text{cmHg}$，各部分尺寸的单位为 cm，则封闭气体的压强分别为

$p_A =$ ；

$p_B =$ _____；

$p_C =$ _____。

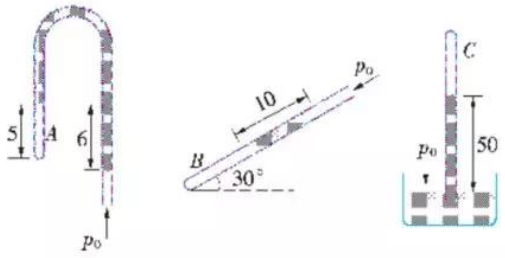


图 2-22

2. 一个圆柱形汽缸，缸内有一个可以无摩擦滑动的活塞。已知活塞的截面积为 S，活塞重力为 G，大气压强为 p_0。当按图 2-23 中三种方式放置时，活塞均保持平衡，则缸内气体的压强分别为

$p_a =$ _____；

$p_b =$ _____；

$p_c =$ 。

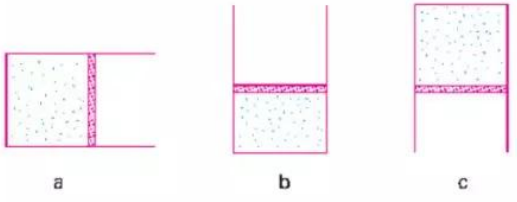


图 2-23

3. 一定质量的理想气体，当保持体积不变时，压强随温度升高而增大，用分子动理论来解释，其原因是

(1) _____；

(2) 。

4. 医院卫给病人打“吊针”(静脉滴注)的装置如图 2-24所示。关于药液滴注的速度，有两位同学产生了分歧。

一位同学说：随着瓶中药液的逐渐减少，它产生的压强变小，药液滴注的速度会变慢。

另一位同学说：根据实际观察，药液是均匀滴注的，没有出现变慢的现象。

你同意哪一种说法？请说明你的理由。

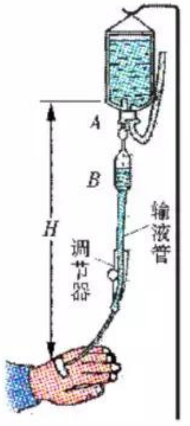


图 2-24 “吊针”装置

5. 设有一定质量的理想气体，处于某个初始状态。现使它经过状态变化后温度不变，则下列过程中可能做到这一点的是

A. 先保持压强不变，使它的体积膨胀，然后保持体积不变减小压强

B. 先保持压强不变，使它的体积缩小，然后保持体积不变减小压强

C. 先保持体积不变，增大压强，然后保持压强不变使它的体积膨胀

D. 先保持体积不变，减小压强，然后保持压强不变使它的体积膨胀

6. 一定质量的理想气体当发生状态变化时，其状态参量 p、V、T 的变化情况可能是

A. p、V、T 都增大

B. p 减小，V 和 T 增大

C. p 和 V 减小，T 增大

D. p 和 T 增大，V 减小

7. 图 2-25 是农村中常用来喷洒农药的小型压缩喷雾器。其贮液筒 A 的容积为 7.5 L，现装入 6 L 的药液。关闭阀门 K，用打气筒 B 每次打入 1×10^5 Pa 的空气 300 cm³。设以下过程中温度都保持不变。

(1) 要使药液上方气体的压强为 4×10^5 Pa，应按压几次打气筒？

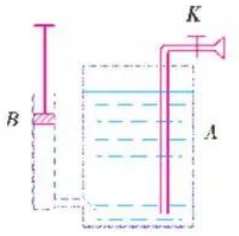


图 2-25　压缩喷雾器

(2) 当贮液筒 A 中有 4×10^5 Pa 的空气时，打开 K 可喷射药液。当药液不能喷射时，贮液筒内还剩余多少体积的药液？

*8. 热气球跨海飞行是许多航空爱好者的一项探险活动。如图 2-26 所示，有一底部开口的热气球，体积恒为 $V = 500$ m³，薄球壳的质量 $m = 3$ kg，飞行者及有关探险器材的总质量 $M = 80$ kg。设空气初温 $t_1 = 10$ ℃，大气压 $p_0 = 10^5$ Pa，该条件下空气的密度 $\rho_1 = 1.2$ kg/m³。假定大气压不随高度而变化。

(1) 若要使气球安全飞行，热气球内气体的温度 t_2 至少加热到多少摄氏度？

(2) 设热气球在 1 atm 下温度由 t_1 升高到 t_2，则气球内气体升温前后的密度之比为多大？气球内气体的质量减少 Δm 是原来质量的百分之几？

(3) 当探险者处于具有巨大响声或气压发生剧烈变化的环境时，应主动张开嘴巴。说明这样做的好处和原因。

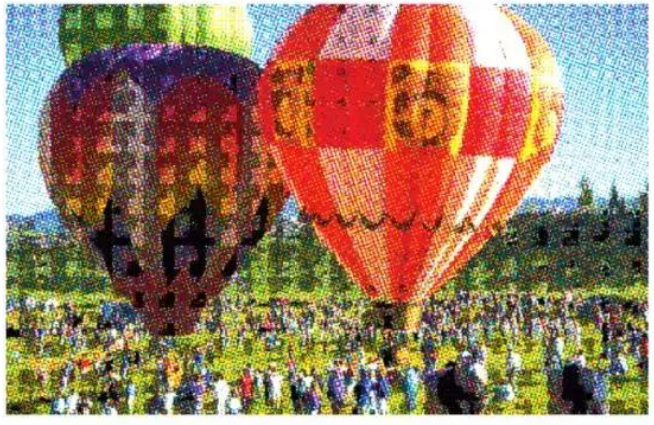
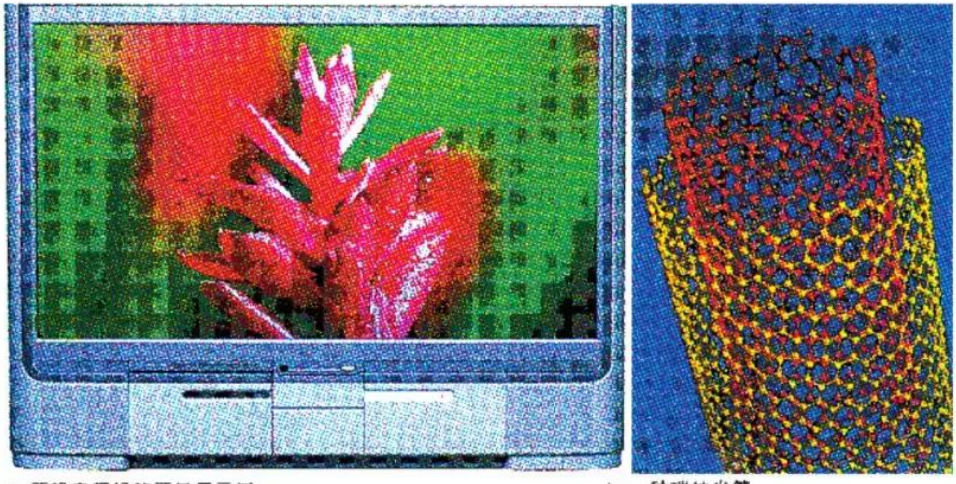


图 2-26　五彩缤纷的热气球



a 背投电视机的液晶显示屏　　b 一种碳纳米管

图 3-1　液晶和纳米材料

第 3 章
固体、液体与新材料

“神女应无恙，当惊世界殊。”千万年来，生活在地球上的人类，在自然世界的基础上，又营造了一个五彩缤纷的人工世界。从我们的生活、娱乐、交通设施，到各种生产、科研装备，千姿百态，琳琅满目。构筑这一切的基础，就是材料。特别是近几十年来，新材料层出不穷，液晶材料、半导体材料、纳米材料、等等，把我们这个人工世界装点得更为绚丽多彩。

新材料的研制与开发涉及固体和液体的性质。那么，

固体和液体有哪些性质？

半导体材料有什么特性和应用？

为什么液晶那么神奇？

为什么纳米材料有如此广泛的发展前景？

本章将以新材料对人类生活和社会发展的影响为线索，研究固体和液体的性质和它们的微观结构；探究液体的表面张力及其产生原因；研究液晶材料、半导体材料、纳米材料的一些特点及应用，展望材料科学技术的广阔发展前景。

3.1

研究固体的性质

我们知道，固体有晶体(crystal)和非晶体(noncrystal)之分。如果把石英、玻璃、云母、明矾、味精、食盐、砂糖、蜂蜡、松香这些固体放在你面前，你能不能区分哪些是晶体，哪些是非晶体？

怎样区分晶体和非晶体

实验探究 从外形来区分晶体和非晶体

用放大镜观察砂糖颗粒和松香颗粒。观察时用针翻动，注意颗粒各个面的形状，并对它们的外形加以描述。

把砂糖颗粒和松香颗粒碾碎，再在放大镜下观察。碾碎前后这些颗粒在外形上有何变化？

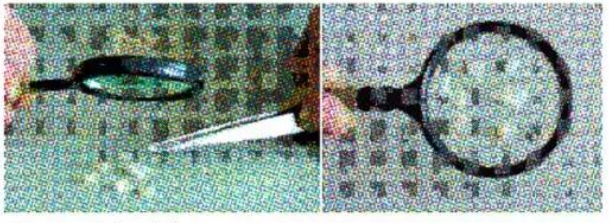


图 3-2 观察固体的外形

可以发现：砂糖颗粒总是保持一种规则的几何形状（立方体）；而松香颗粒则不是这样，不论颗粒大小，外形都是不规则的。研究指出，外形有规则是晶体的一个本质特征。因此，砂糖是晶体，松香是非晶体。

图 3-3 至图 3-8 给出了一些常见的晶体。这些晶体在物理性质上有些什么特征呢？

实验探究 从物理性质来区分晶体和非晶体

取一张云母薄片，在上面涂一层很薄的石蜡，然后用烧热的钢针去接触云母片。观察接触点周围的石蜡熔化后所成的形状。



图 3-3 石英晶体



图 3-4 方铅矿晶体



图 3-7 世界上最大的石膏晶体



图 3-5 石云晶体



图 3-6 雪花晶体图案



图 3-8 食盐

物理性质（如导电性、导热性、导光性、硬度性等）与方向有关的特性叫做各向异性，与方向无关的特性叫做各向同性。

再在玻璃片上做同样的实验，观察石蜡熔化后所成的形状。

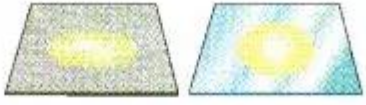
比较观察的结果（图 3-9），你能得出什么结论？

实验表明：像云母这样的晶体，在各个方向上的导热性能不同，即显示各向异性（anisotropy）；而像玻璃这样的非晶体，在各个方向上的导热性能相同，即具有各向同性（isotropy）。

从初中物理已经知道，萘、硫代硫酸钠（海波）、冰等晶体具有确定的熔点；而松香、石蜡等非晶体，没有确定的熔点。因此我们还可以从有没有确定的熔点来区分晶体和非晶体。

请你设计一个可行的实验方案，观察在机压性和导电性方面，晶体和非晶体在各个方向上的性质是不是一样。

通过上面的实验探究，请总结一下，能利用固体的哪些特性来区分晶体和非晶体？



a 云母片　　b 玻璃片

图 3-9 比较晶体和非晶体的导热性

周南物理殷石峰

怎样区分单晶体和多晶体

如果一块具有规则形状的晶体，把它碾成小颗粒后，这些小颗粒仍然保持与原来整块晶体形状相似的规则外形，这样的晶体叫做单晶体(single crystal)。雪花、食盐小颗粒就是单晶体。

如果一块晶体，它是由许多取向不同的单晶体颗粒(晶粒)组成的，这样的晶体叫做多晶体(polycrystal)。食盐受潮粘结成的大"疙瘩"，就是多晶体。

用金相显微镜(图 3-10)观察磨光了的金属表面，可以发现金属是由大量微细的晶粒构成的。

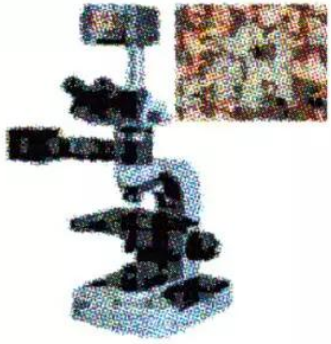


图 3-10 金相显微镜

多晶体有确定的熔点，但没有规则的几何形状，也不显示各向异性。在必要的时候，可以把多晶体制成单晶体，如半导体材料单晶硅、单晶锗等。

怎样区分单晶体和多晶体？平时见到的各种金属材料，如铁、钢等，它们是单晶体还是多晶体？

固体性质的微观解释

为什么晶体和非晶体在外形和物理性质上有那样大的差异呢？

科学家发现，组成晶体的微观粒子(分子或原子、离子)依照一定的规则在空间排成整齐的行列，这种有规则的行列叫做晶体的空间点阵(space lattice)，也称晶体结构。在晶体中，微观粒子之间的相互作用很强，粒子的热运动不足以克服这种相互作用而破坏空间点阵，它只能使粒子在一定的平衡位置附近不停地做微小

严格地说，只有晶体才可以叫做固体。固体的微观结构实际上是指晶体的空间点阵。

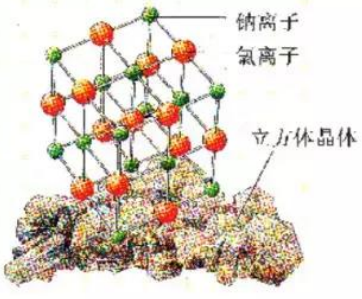


图 3-11 食盐晶体的空间点阵示意图

振动。图 3-11 是食盐晶体的空间点阵示意图。

在晶体空间点阵的一个平面上，微观粒子也呈规则排列，例如图 3-12 所示那样。在沿不同方向所画的等长直线 AB、AC、AD 上，微观粒子的数目不同。直线 AB 上粒子较多，直线 AD 上较少，直线 AC 上更少。

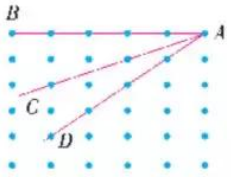


图 3-12　晶体各向异性的微观解释

请你根据这幅微观图景解释一下，为什么晶体具有各向异性？

同样的原子，由于所组成的空间点阵不同，会形成形状和性质都很不同的晶体。例如，石墨的晶体结构中碳原子呈层状结构，在每层上，原子排列成六角形蜂巢状，层与层之间距离较大，各层之间相互作用很弱。因而石墨质地松软，可以用来制作粉状润滑剂、铅笔心等。金刚石的晶体结构中碳原子排列成具有立方单元型的晶格结构，原子间的作用力很强。因而金刚石具有很大的硬度，可以用来切割玻璃，钻入坚硬的岩石。

物质的状态决定于内因（物质结构）和外因（如温度等），而物质状态的变化是一个由量变（如达到一定的温度）到质变（如晶体变为非晶体）的过程。

磷原子也能形成不同的晶体。白磷和红磷都是单质磷晶体，但白磷是立方体结构，而红磷是像石墨那样的层状结构。

晶体和非晶体可以相互转化。例如，天然水晶是晶体，而经熔化后再凝结的水晶（即石英玻璃）是非晶体。非晶体的玻璃，经过相当长的时间，会生成微小的晶体，形成透明性减弱的模糊斑点，因此古老建筑的窗玻璃常出现局部结晶。许多非晶体在一定的条件下可以转化为晶体。在冷却得足够快且冷却到足够低的温度时，几乎所有的材料都能成为非晶体。例如，熔化晶体硫，并使它的温度超过 300℃，然后把它倒入冷水，就能得到柔软的非晶硫。在适当情况下，非晶硫又可变成晶体硫。



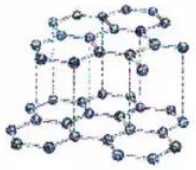


图 3-13　石墨的晶体结构示意图





图 3-14　金刚石的晶体结构示意图

课后作业与活动

1. 下列物质中，哪些是单晶体？哪些是多晶体？哪些是非晶体？
石英、雪花、铁、沥青、食盐、橡胶、硅、单晶锗、玻璃、明矾、松香、石墨、硫酸铜、金刚石。

2. 图 3-15a、b 是两种不同物质的熔化曲线，根据曲线，你认为在下列说法中，正确的是
A. a 是一种晶体的熔化曲线
B. b 是一种晶体的熔化曲线
C. a 是一种非晶体的熔化曲线
D. b 是一种非晶体的熔化曲线

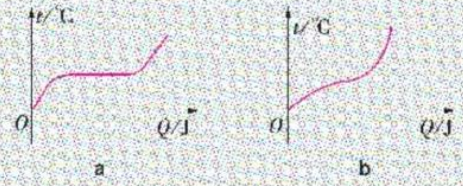


图 3-15

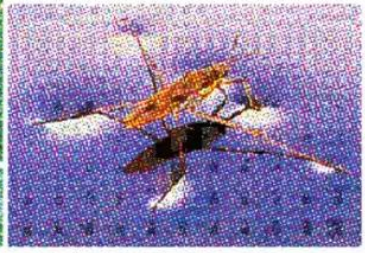
3. 下列说法中，正确的是
A. 显示各向异性的物体必定是晶体
B. 不显示各向异性的物体必定是非晶体
C. 具有确定熔点的物体必定是晶体
D. 不具有确定熔点的物体必定是非晶体

4. 下列说法中，正确的是
A. 有规则的几何外形的固体一定是晶体
B. 晶体的各向异性是由于组成它的微观粒子具有空间点阵的结构
C. 晶体一定显示各向异性
D. 某些物质的微观粒子能够形成几种不同的空间点阵

5. 关于晶体和非晶体，下列说法中正确的是
A. 具有各向同性的物体一定没有确定的熔点
B. 晶体熔化时，温度不变，则内能也不变
C. 通常的金属材料在各个方向上的物理性质都相同，所以这些金属都是非晶体
D. 晶体和非晶体在适当条件下可互相转化



a 朝露滴翠



b 大龟蝽在水面上"亭亭玉立"



c 球形肥皂泡

图 3-16 液体的几种表面现象

3.2 研究液体的表面性质

为什么荷叶上的露珠总是那样晶莹滴翠？为什么有的昆虫能在水面上"亭亭玉立"？为什么五彩缤纷的肥皂泡都是球形的？……当你看到这些有趣的现象时，你想过这些问题吗？

探究表面张力现象

实验探究 观察表面张力现象

1. 在杯子内装满水，试着把一些小硬币轻轻地放在水面上。水面形状有什么变化？小硬币为什么不沉下去呢？

2. 用金属丝制成如图 3-17 所示各种形状的框架，分别把它们浸入肥皂液，使框架上张满皂膜，观察皂膜的形状。

如图 3-18a，用针捅破金属圆环棉线上边的皂膜，棉线的形状有什么变化？如图 3-18b，为什么金属框上的皂膜把细金属丝向里拉？

3. 如图 3-19 所示，把橄榄油滴入水和酒精的混合液中，橄榄油滴呈什么形状？

请讨论：上述实验反映了液体表面的一个什么特点？它为什么会有这样的特点？

这些实验表明，液体的表面就像紧绷着的橡皮膜，它有着一

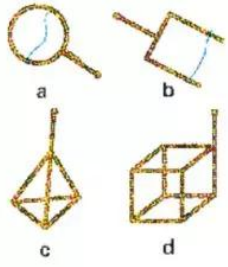


图 3-17 观察表面张力现象用的金属框架

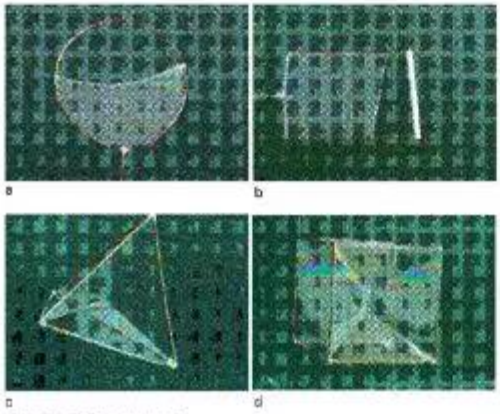


图 3-18 观察表面张力现象



图 3-19 肥皂液薄膜形成

种收缩的趋势。使液体表面具有收缩趋势的拉力叫做表面张力(surface tension)。

那么,表面张力是怎样产生的呢?

表面张力的产生原因

分析论证

液体跟气体接触的表面存在着一个薄层,叫做表面层。图 3-20 是液体表面层附近分子的大致分布情况。表面层的分子要比液体内部稀疏些,即分子间距要比在液体内部的大一些。

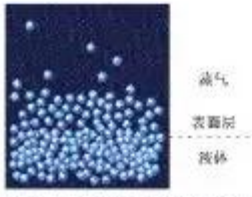


图 3-20 液体表面层附近的分子分布

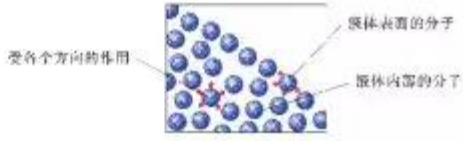


图 3-21 液体表面张力的成因

周南物理段石峰

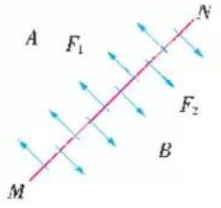


图 3–22　液体表面张力的方向

如图 3–21 所示，在液体内部，液体分子所受的分子力是平衡的。而在表面层里，液体分子所受的分子力是不平衡的，来自液体内部分子的引力要大于来自更接近表面的分子的引力，因此它们有着进入液体内部的趋势，致使液体表面像一张绷紧的膜。这就是液体表面有收缩趋势的微观本质。

如果在液面上画一条分界线 MN，把液面分为 A 和 B 两个部分（图 3–22），那么，由于表面层中分子间的引力，液面 A 对液面 B 有引力 F_1，液面 B 对液面 A 有引力 F_2。由于 MN 处于静止状态，所以 F_1 和 F_2 大小相等，方向相反，它们就是表面张力。表面张力的方向总是沿着与液面相切的方向。作用在液面一条分界线上的表面张力，总是跟这条分界线垂直。

请你用表面张力解释本节开始时提到的几个现象。

多学一点　表面张力的大小

几种常见液体的表面张力系数

物质	t/℃	α/10^{-3} N·m^{-1}
水	10	74.2
	18	73.0
	30	71.2
酒精	20	22
甘油	20	65
水银	20	540

实验表明，作用在液面一条分界线上的表面张力 f，其大小与这条分界线的长度 L 成正比。即

$$f = \alpha L$$

式中 α 是表面张力系数，在数值上等于作用在液面单位长度分界线上的表面张力的大小。表面张力系数的大小除了跟液体性质及液面外相邻物质的性质有关外，还跟温度以及液体中所含的杂质有关。实验表明，表面张力系数随温度的上升而变小。有的杂质可使液体的表面张力系数增大，有的则相反。能使表面张力系数减小的物质叫做表面活性物质。液态金属的表面张力系数很大，水的表面张力系数较小。



a



b

图 3–23　关于肥皂膜的实验

表面张力的应用实例

在自然界、日常生活和科学研究中，常看到表面张力现象，请你选择一些现象做出解释。

案例分析

案例 1　有人在研究肥皂膜时做了下面的实验：在一个用铁丝弯成的圆环上，系上一个用细棉线围成的小线圈。把这个圆环浸在肥皂水中，然后提出液面，于是环上蒙了一层肥皂膜。那个小

线圈可以在肥皂膜中相当自由地来回移动(图 3-23a)。用一根针轻轻地将小线圈中的肥皂膜捅破,这时可看到小线圈立刻被拉成一个圆环(图 3-23b)。这是什么原因呢?

分析 从肥皂膜具有表面张力这个角度出发,分为小线圈中肥皂膜被捅破前后两种情况考虑,再分析小线圈被拉成一个圆环的原因。

请同学们自己讨论,做出解释,并整理成简洁的文字。

案例 2 如图 3-24 所示,在培养皿内注入清水。让两根细木杆相互平行地浮在水面上,再在细木杆之间轻轻地滴入几滴酒精,细木杆会"自动"散开。请你解释这一现象。

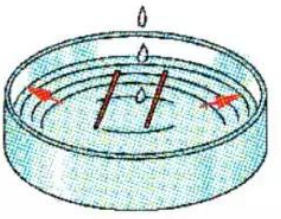


图 3-24 浮在水面上的细木杆

解答 漂浮在水面上的细木杆,原来两边受到大小相等、方向相反的表面张力作用,细木杆处于平衡状态。滴入酒精后,细木杆之间液体的表面张力减小,使得内侧的表面张力比外侧的小,细木杆就散开了。

信息动员

为什么肥皂水容易起泡沫

日常生活中用肥皂或肥皂粉洗衣服时,稍稍搅动一下肥皂水,就会产生较多的泡沫。那么,肥皂水为什么很容易起泡沫呢?

液体起泡沫的过程比较复杂。简单地说,密度较小的液体经搅动,总会与空气混合而形成由液膜包覆的气泡。如果液体的表面张力较大,液膜便很快收缩,使泡内气体体积缩小,压强增大,把液膜胀破,气泡迅速消失;如果表面张力较小,液膜的收缩趋势也较小,又与泡内气体的压强达到平衡,气泡就能存在一段时间。

肥皂水的表面张力系数仅是水的三分之一,因此它容易起泡沫。

一般地说,当水中溶有一些溶质(如肥皂、肥皂粉)后,其表面张力系数会发生变化。根据变化的情况,可把溶质分为以下三类。

一般无机物如氯化钠、硝酸钾、盐酸、氢氧化钠等,溶于水后会使溶液的表面张力系数随着溶液浓度的增加而缓慢增大。因此纯水"托"不住硬币,而一些富含矿物质的矿泉水能"托"住硬币。

乙醇、丁醇、乙酸等,溶于水后会使溶液的表面张力系数随着溶液浓度的增加而降低,开始时降低得快些,后来则慢些。这些水溶液可以作为乳化剂、润湿剂和矿物浮选剂。

肥皂、油酸钠和各种洗涤剂,溶于水会使溶液的表面张力系数先随浓度增加而急剧下降,至一定浓度后几乎不再变化,再达到一定浓度后可缔合形成胶团,从而具有润湿或渗透、乳化或破乳、起泡或消泡等一系列物理化学作用,在加溶、分散、洗涤、防腐蚀、抗静电等方面有相应的实际应用。这类物质称为表面活性剂。

多学一点 浸润和不浸润 毛细现象

浸润和不浸润

将一滴水和一滴水银分别滴在水平放置的干净玻璃板上,你观察到什么现象?

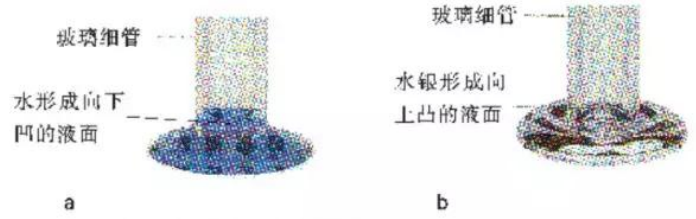


图 3-25　水和水银在细管中形成弯曲的液面

水会附着在玻璃上形成薄层，这种现象叫做浸润。水银在玻璃板上成为球形，不附着在玻璃板上，这种现象叫做不浸润。

同一种液体，对一些固体是浸润的，对另一些固体可能是不浸润的。例如，水能浸润玻璃，但不能浸润石蜡。水银不能浸润玻璃，但能浸润锌。

再把水和水银分别装在玻璃容器里（图 3-25），你观察到什么现象？

装水的玻璃容器里，器壁附近的液面会向上弯曲；而装水银的玻璃容器里，器壁附近的液面会向下弯曲。这也是因为水对玻璃是浸润的，而水银对玻璃是不浸润的。

请你自己分析浸润、不浸润现象的形成原因。

在生活和生产实际中，我们常常要应用浸润和不浸润现象，例如，人们用墨水在纸上写字，喜欢全棉做的内衣和毛巾，医院用经过脱脂处理的脱脂棉，游禽的羽毛不会被水浸湿，等等。

请解释上述事例。

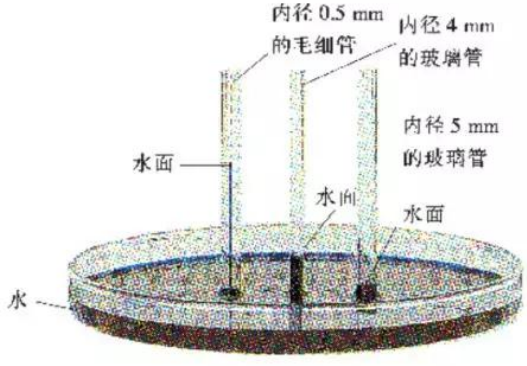


图 3-26　毛细现象

毛细现象

如图 3-26 所示，把几根内径不同的细玻璃管插入水中，可以看到管里的水面比容器里的水面高。管的内径越小，管里的水面就越高。如果把这些细玻璃管插入水银中，结果正好相反，管里的水银面比容器里的水银面低。管的内径越小，管里的水银面就越低。

浸润液体在细管里上升的现象和不浸润液体在细管里下降的现象，叫做毛细现象(capillarity)。能够发生毛细现象的管子叫做毛细管(capillary tube)。

请你分析一下液体在毛细管里上升或下降的原因。

在日常生产和生活中，毛细现象的应用相当普遍。

讨论与思考

如果要保存地下的水分或想把地下的水分引上来，分别应当采取怎样的措施？用怎样的毛巾才能更好地吸汗？为什么砖块能吸水？为什么粉笔能吸墨水？建造房屋时，为什么要在砌砖的地基上铺一层油毡或涂过沥青的厚纸？

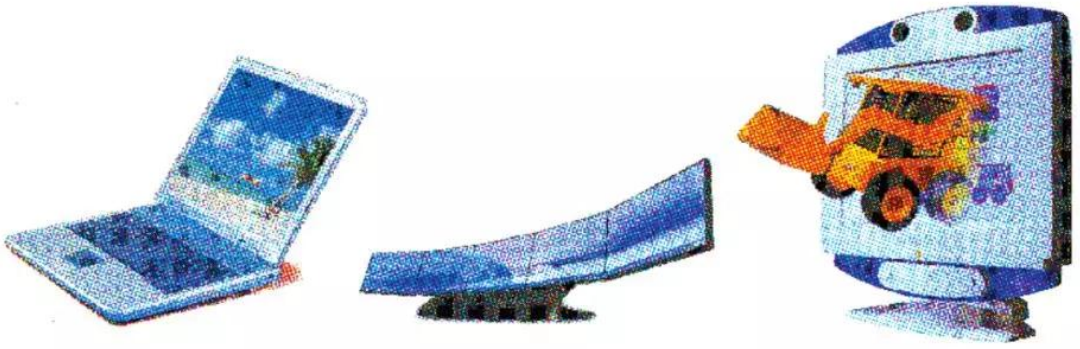
家庭作业与活动

1. 下雨天我们常用布伞遮雨，抬头望去，能看见伞面纱线间的缝隙，但伞面却不漏雨。这是为什么？
2. 如图 3-27，一根竖直滴管的出口处附着一个小液滴，许久也不掉落，好像它被一个看不见的“弹性橡皮袋”兜住了。我们知道液体是没有固定形状的，液体的形状就是盛液体的容器的形状，但这小液滴没有容器却好像有着固定的形状。这是为什么呢？



图 3-27

3. 表面张力的方向为什么总是跟液面上的分界线垂直？
*4. 试分析植物吸收水分的物理原因。植物所吸水分达到的高度与哪些物理因素有关？



笔记本电脑的液晶显示屏　　超宽液晶显示屏　　立体液晶显示器

图 3-28　几种液晶显示屏

3.3

液晶与显示器

你走在街上，那巨大的变色广告是液晶的；你乘坐的车上，移动电视的显示屏也是液晶的。立体液晶显示器目前尚不多见，但就它那栩栩如生的画面、让人身临其境的空间效果，是令人十分向往的，相信离普及也不远了。

请看看你的周围，还有哪些地方用到了液晶？

那么，液晶是什么？它为什么会有显示功能？它的微观结构是怎样的？液晶有哪些性质？它还有哪些应用？

液晶的微观结构

液晶，顾名思义，既是液体又是晶体。通常，人们把介于晶体和液体之间的中间态叫做液晶态，把处于液晶态的物质叫做液晶(liquid crystal)。

分析论证

液晶既像液体那样具有流动性，又像晶体那样具有各向异性。这是为什么呢？

这是由液晶的微观结构决定的。某一种物质的固态、液晶态和液态的分子排列如图 3-29 所示。我们看到，当该物质处于固态时，其分子排列相当整齐；当处于液态时，其分子排列较凌乱；液

晶态则介于其间，其分子排列较松散（因此液晶具有流动性），但又排列得有一定取向（因此液晶具有各向异性）。

不是所有物质都具有液晶态。天然存在的液晶不多，大多数的液晶是人工合成的。现在已发现几千种有机化合物具有液晶态。通常棒状分子、碟状分子和平板状分子的物质容易具有液晶态。

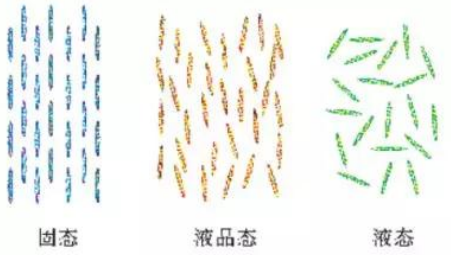


图 3-29 固态、液晶态以及液态的分子排列示意图

不同的分子排列导致了不同的液晶。例如，图 3-30 所示是向列相液晶及其分子排列，这种液晶的分子为细长棒形，沿一定方向排列。图 3-31 所示是近晶相液晶及其分子排列，这种液晶的分子也是细长棒形，但它们往往会相互平行，且排成层状，分子只能在它所在的那一层上运动，无法移动到邻近的一层上去。

液晶的奇特效应

液晶分子的排列是不稳定的，外界条件的微小变动都会引起液晶分子排列的变化，从而改变液晶的某些性质。例如，温度、压力、摩擦作用、电磁作用、化学作用、容器表面的差异等，都可以改变液晶的光学性质。

液晶具有两个熔点。将液晶加热，液晶先是变得混浊，达到第一个熔点时，会变得完全不透明，但达到第二个熔点时，又变得透明了。如胆甾醇在 145.5 ℃（第一个熔点）时会熔化成混浊的液体，在 178.5 ℃（第二个熔点）时又变成了清澈透明的液体。

有的液晶具有电光效应。在一般情况下，由于分子呈有序排列，这种液晶看上去非常透明。加上电场后，其分子排列被扰乱，透射光或反射光的强度和方向都发生了变化，液晶就变得混浊了。但如果去掉电场，液晶又会呈透明状态。

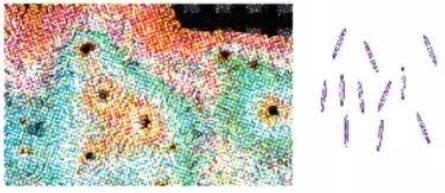


图 3-30 向列相液晶

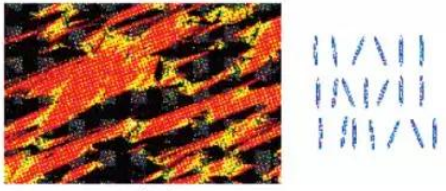


图 3-31 近晶相液晶

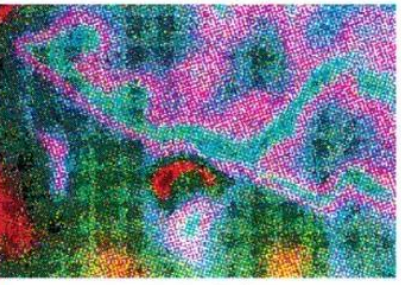


图 3-32　温谱图

有的液晶具有温度效应，在不同的温度下能显示出不同的颜色。当温度逐渐升高时，这种液晶就会按红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫的顺序改变颜色；当温度降低时，又按相反顺序改变颜色。如图 3-32 所示的温谱图，就以不同的颜色反映了人体各部分的不同温度。

有的液晶具有压电效应。当对这种液晶施加压力或撞击时，其两端会产生电压。

有的液晶具有化学效应。这种液晶遇到某些化合物的蒸气时会变色，而且灵敏度极高。

有的液晶具有辐射效应。这种液晶受到放射性射线照射时会变色。

液晶的广泛应用

液晶的这些奇特效应，使液晶得到了广泛的应用。

利用液晶的电光效应，可以制成液晶显示器。以袖珍计算器上的显示元件为例（图 3-33），它是一个小巧的长方形玻璃盒，盒里装着液晶。盒的内壁上方涂有 7 段透明的金属薄膜电极，盒的内壁下方是一整块金属薄膜电极。通电后，有电的那一段电极间的液晶就变为不透明。通过计数和译码电路的控制，就可用这 7 段电极组成 1、2、3、4、5、6、7、8、9、0 这十个数码。

利用液晶的温度效应，可以探测温度。例如医院里检查肿瘤，可在疑有肿瘤处的皮肤表面涂上一层液晶，由于肿瘤组织的温度与周围正常组织的温度不一样，液晶会显示出不同的颜色。又如检修电子线路，可以用这种效应确定电路中的短路点，方法是把液晶涂在印刷线路板上，由于短路处温度升高，液晶显示的颜色就会与其他地方不同。



图 3-33　计算器的液晶显示屏



图 3-34　仪表上的液晶显示屏



图 3-35　红外线测温仪的液晶显示屏



图 3-36　手机的液晶显示屏

把具有化学效应的液晶涂在墙壁上，如果有毒气体从管道中漏出，液晶便会变色，警告人们赶紧把漏洞堵上。

在高能物理的研究中，可用具有辐射效应的液晶显示某些微观粒子的径迹，或者用来测量放射性射线的剂量。

液晶显示具有分辨率高、易彩色化、画面稳定、环保节能、体积超薄、寿命长等优点。

目前，液晶已经广泛应用于电子工业、航空航天工业、生物、医学等众多领域。液晶的基础理论研究已成为凝聚态物理学的一个重要分支。随着科学技术的发展，液晶的理论和技术应用将有更广阔的前景。

信息海洋

液晶是怎样发现的

1888年，奥地利植物学家赖尼策尔（F. Reinitzer）观察到胆甾醇苯酸酯的双熔点现象；更重要的是，在这两个熔点之间，他观察到了双折射和彩虹色谱。赖尼策尔无法确定这些现象的原因，于是给德国物理学家莱曼（O. Lehmann）写了一封信请教，并送去了两个材料的样品。

莱曼通过实验，确认了赖尼策尔的结论：在145.5 ℃时材料熔化成混浊的液体，在178.5 ℃时材料变成清澈透明的液体；降温时，材料先变蓝色，然后便混浊，继续降温，变紫色，最后变成白色固体。他论证，物质只有处在晶体状态，才可能出现双折射现象。他写信给赖尼策尔说："这种晶体那么柔软，几乎能把它叫做液体，这对于物理学家来说，是极其有趣的。"在一份报告中，他附了一张图，这张图非常类似于如图3-37所示的手征丝状相液晶。莱曼称它们为软晶体，因为它们几乎是流体，后来他又使用了流动晶体这个名词，此后又用晶态流体代替。他渐渐开始确信：这种混浊液体的流动性使它类似于液体；而其光学性质又使它类似于固体。这两种特征同时出现在一种物质，这使莱曼把这种物质称为"液晶"。不久，他向一家学术刊物投寄了一篇题为《论液晶》的论文。至此，经过两位不同学科、不同国家的科学家的合作研究，液晶走进了科学的殿堂，走进了人类的生活。

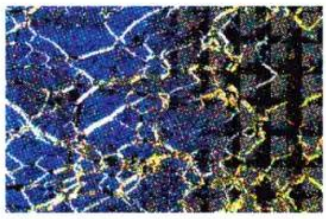


图3-37 手征丝状相液晶

家庭作业与活动

1. 请讨论：液晶是光源吗？
2. 经研究发现，不是所有物质都具有液晶态，容易具有液晶态的分子有
   A. 棒状分子
   B. 碟状分子
   C. 平板状分子
   D. 单原子分子
3. 下列有关液晶的说法中，正确的是
   A. 液晶具有流动性
   B. 液晶具有各向异性
   C. 液晶具有稳定的空间排列规律
   D. 液晶就是液态的晶体
4. 要改变液晶的光学性质，可以通过改变
   A. 电压
   B. 温度
   C. 压力
   D. 磁场

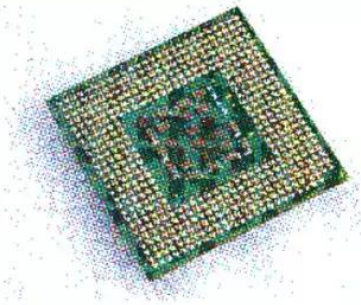


图 3-38　在发明半导体材料之前，微处理器的任务只能由庞大的电子管计算机来完成



图 3-39　用新材料——铝塑复合板装饰的高层建筑

3.4 半导体材料和纳米材料

20世纪中叶，半导体单晶硅材料和半导体晶体管的发明及硅集成电路的研制成功，导致了电子工业革命，深刻地影响着人们的生活和生产方式。20 世纪 80 年代，人类又吹响了向纳米世界进军的号角，一个纳米科学技术的新时代，正敞开大门迎接我们。

半导体材料

晶体管是现代化电子设备的基本元件，而半导体则是制造晶体管的基本材料。那么，什么是半导体？它是怎样使晶体管具有人们所需要的导电性能的？

分析论证

半导体(semiconductor)就是导电能力介于导体和绝缘体之间的物质，如硅、锗、氧化亚铜、砷化镓等。半导体的导电性能会随着一些物理因素的改变而改变：在极低的温度下，纯净的半导体像绝缘体一样不导电；然而在较高的温度下，或者有光照射时，或者掺入一定杂质后，半导体的导电性能就大大增强，甚至可以接近金属的导电性能。

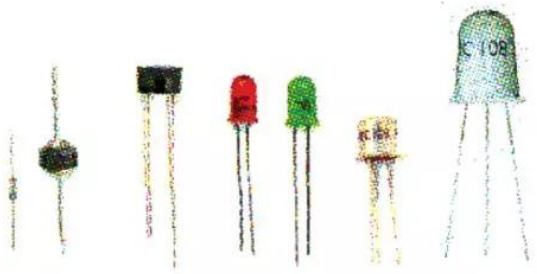


图 3-40 几种晶体二极管

我们已经知道，用半导体制成的晶体二极管(crystal diode)具有单向导电性。这是什么原因呢？

下面以半导体硅为例来说明这种单向导电性的微观机理。

用作半导体材料的硅是一种单晶体，在它的晶体结构中，每个硅原子通过其 4 个价电子分别与周围的 4 个硅原子形成共价键而结合在一起。如果在硅中掺入少量的磷(或砷)，这些磷原子就会取代少数硅原子与周围的 4 个硅原子结合。但磷是五价元素，有 5 个价电子，这样就多出了一个电子，这个电子就成为自由电子。以自由电子参与的导电叫半导体的电子导电。经掺杂后形成电子导电的半导体叫 n 型半导体(如图 3-41 所示)。

如果在硅中掺入的是三价元素硼(或铟)，那就会缺少一个电子，多出一个带正电的空穴。以空穴参与的导电叫半导体的空穴导电。经掺杂后形成空穴导电的半导体叫 p 型半导体(如图 3-42 所示)。

将 n 型半导体和 p 型半导体紧密接触，在接触面上会形成一个 pn 结。这样，便可组成一个晶体二极管。当对晶体二极管加上正向电压时，即把 p 型半导体接电源正极，n 型半导体接电源负极时，n 型半导体的电子受电场力而越过 pn 结，形成电流，二极管导通(图 3-43a)。当对晶体二极管加上反向电压时，电子在电场力作用下很难越过 pn 结，因而几乎没有电流产生，二极管截止(图 3-43b)。这就是晶体二极管具有单向导电性的微观机理。

二极管截止时，实际上还会有很小的电流，通常把它叫做漂移电流。

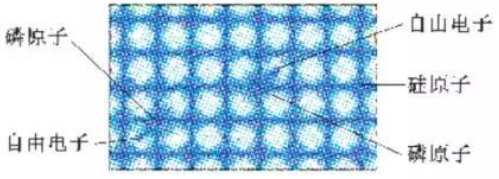


图 3-41 n 型半导体晶体结构图

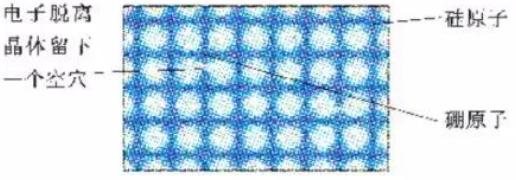


图 3-42 p 型半导体晶体结构图

早期的电子产品中，电阻器、电容器、电感器、二极管、三极管等电子元件都是一个个地分立在印刷电路板上的。使用这种分立的方式，产品体积较大，电能消耗也多，而且容易出故障。后来，人们利用氧化、刻蚀、扩散等方法，把一个电子电路的所有元件按电路连接要求制作成一小块半导体硅片，这就是集成电路(integrated circuit，简称 IC)，也称芯片。图 3-44 所示就是一块集成电路。现代的集成电路技术，已经可以把包括上亿个晶体管等电子元件的复杂电路制作在仅一个多平方厘米的芯片上，使得我们的电子器件越来越小，效率越来越高，使用越来越方便。图 3-45 是微处理器，这么小小的一块芯片，却是控制整台电脑的“司令部”。

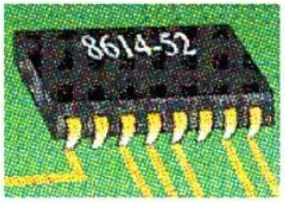


图 3-44　集成电路

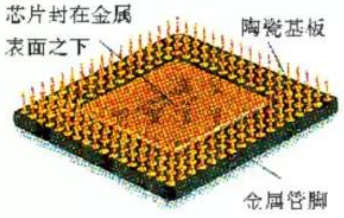


图 3-45　微处理器

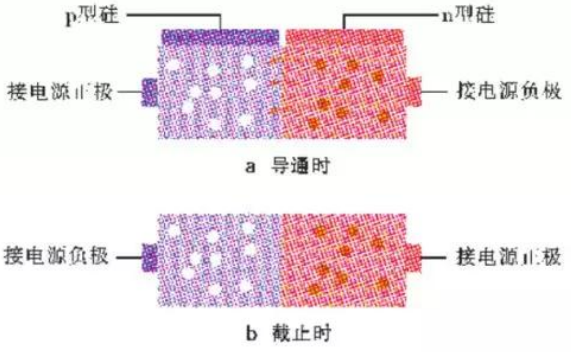


图 3-43　晶体二极管单向导电性的微观机理

讨论与思考

半导体技术在社会生产中应用越来越广泛，走进我们生活的半导体电子产品也越来越多，如电脑、彩色电视机、数码相机、全自动洗衣机、手机、光碟机(CD、VCD 和 DVD)等，而且它们的外形越来越精巧，智能化程度也越来越高。

请你通过调查研究，说明半导体技术给我们生活和生产所带来的深刻影响。

信息浏览

微电子工业中的半导体材料

半导体材料在微电子工业中主要用来制作晶体管、集成电路等器件。目前使用的半导体材料主要还是硅。

硅是元素半导体，它机械强度高，结晶性好，在自然界中储量丰富，制备成本低。硅单晶按晶体生

长方法的不同可分为区熔硅单晶和直拉硅单晶两种。区熔硅单晶主要用于重型电力驱动装备的高频调速、巨型发电站的远距离超高压交直流变电，以及国防尖端领域。目前我国已制出了直径为151 mm、长度为770 mm的区熔硅单晶。在微电子工业中使用的硅单晶主要是直拉硅单晶，目前我国已制出了直径达450 mm的直拉硅单晶。硅单晶的直径越大，生产效率越高，可用以制作的集成电路规模也越大，而且制作成本越低。据说人们正在考虑用空间站在太空微重力环境下制备直径更大的优质硅单晶。

虽然目前硅单晶仍是微电子工业的主导材料，但世界上一些国家正在大力开发化合物半导体砷化镓。人们普遍认为，砷化镓是硅之后的第二代半导体电子材料。这是因为砷化镓的电子迁移率比硅高得多，利用砷化镓制成的晶体管可以制造出速度更快、功能更强的计算机。砷化镓还具有有效的光电转换特性，而这是硅不具备的。因此砷化镓可用于制造发光二极管、激光二极管和太阳能电池等。

2001年10月，北京有色金属研究总院的科研人员，采用我国第一套蒸气压控制直拉法晶体生长系统和工艺技术，成功拉制出国内第一根直径约101mm的半绝缘砷化镓单晶，标志着我国砷化镓晶体生长技术进入世界领先行列。

STS

集成电路

集成电路自1958年发明以来，经历了六个发展阶段：1962年制造出包含12个晶体管的小规模集成电路(small scale IC，简称SSI)；1966年开发出集成度为100—1000个晶体管的中规模集成电路(medium scale IC，简称MSI)；从1967年到1973年，研制出包含1000个至10万个晶体管的大规模集成电路(large scale IC，简称LSI)；1977年又研制出在30 mm^2的硅片上集成了15万个晶体管的超大规模集成电路(very large scale IC，简称VLSI)，这是集成电路技术的第四次重大突破，它标志着微电子时代的真正到来；1993年随着集成了1000万个晶体管的16 M FLASH和256 M DRAM的研制成功，人们迎来了特大规模集成电路(ultra large scale IC，简称ULSI)的时代；1994年集成了1亿个元件的1G DRAM问世，巨大规模集成电路(giga scale IC，简称GSI)时代到来了。

在一块集成电路上，集成的元件越多，电路当然越复杂，电路中的导线也越细。集成电路块上最细线的最小宽度，称为线宽，也叫特征尺寸。线宽是集成电路工艺水平先进程度的标志。目前我国制造的集成电路的线宽已达到了0.18 μm的先进水平。

纳米材料

纳米(nanometer，简写为nm)是一个长度单位，1 nm = 10^{-9} m，1 nm大约是一根头发丝直径的八万分之一。

纳米技术是指在纳米尺度(0.1—100 nm)上制造材料和器件的技术，实际上就是重新排列原子而制造具有新分子结构的技术。纳米材料的制备和研究则是纳米科学技术的基础。

纳米材料有纳米金属材料、纳米磁性材料、纳米陶瓷材料、有机-无机纳米复合物、纳米传感材料、纳米医用材料等多种。

纳米材料具有许多奇特的效应。主要有：量子尺寸效应(如银的超细微粒在温度为1 K时，会由导体变为绝缘体)，小尺寸效应(如当材料超细微粒的尺寸与光波波长相当或更小时，将由超导

科学巨匠爱因斯坦早就预言："未来科学的发展无非是继续向宏观世界和微观世界进军。"

我国著名科学家钱学森曾预言："我认为纳米左右和纳米以下的结构是下一阶段科技发展的重点，会是一次技术革命。"

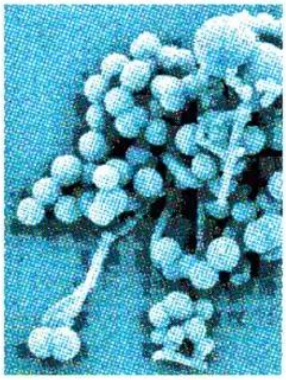


图 3-46 放大后的纳米材料超细微粒

状态变为正常物态)，表面和界面效应(如活性极高，极不稳定，很容易与其他原子结合)，宏观量子隧道效应(如低于某一临界温度时，其微观粒子的运动速度基本上与温度无关)。

纳米材料的奇特效应使纳米材料表现出不同于传统材料的良好性能。例如，在力学性能方面，纳米材料具有高强、高硬和良好的塑性；在热学性能方面，纳米超细微粒的熔点比常规粉体低得多；在电学性能方面，纳米金属在低温时会呈现电绝缘性；在磁学性能方面，当超细微粒的尺寸小到临界尺寸时，常规的铁磁性材料会转变为处于顺磁性甚至超顺磁状态的纳米材料；在光学性能方面，纳米半导体材料在室温下具有光致发光特性、光电转换特性、介电特性和压电特性；在化学性能方面，纳米材料具有相当高的化学活性。

纳米材料在能源、环保、通信、航空航天、医疗以及日常生活等方面应用前景广阔。

课题研究

做一个关于纳米商品的市场调查

随着纳米科学技术的发展，纳米商品开始进入市场，但有的是试销产品，有的却是假冒。请你做一个关于纳米商品的市场调查，弄清关于纳米商品的情况，写成调查报告，在班上相互交流评价。

材料科学技术发展前景



图 3-47 “纳米医生”

人类社会的文明和进步总是与材料密切相关。从石器时代、铁器时代、铜器时代人们采用的天然材料和人造材料，到现在的新型材料，无不对人类的生活和生产产生重大的影响。

至今，已发现的材料有 30 万种之多，并且还以每年 5%的比率递增，新材料层出不穷、琳琅满目。新材料主要包括新型金属材料、高分子合成材料、新型无机非金属材料、复合材料、光电子材料等。

新型金属材料有铝合金、镁合金、钛合金以及稀有金属。铝合金密度小，导电性好，可代替铜用作导电材料。镁合金既轻又强，是制造直升机某些零件的理想材料。钛合金被誉为“未来的钢铁”，可制造超音速飞机和宇宙飞船。稀有金属能改善合金性能，用于制造光电材料、磁性材料、化工材料及原子能反应堆零件。

高分子合成材料是20世纪用化学方法制造的一种新型材料，有合成橡胶、塑料和化学纤维等几类。合成橡胶耐高温、耐低温、耐油、耐腐蚀的性能好，一般用于制造火箭、导弹、飞机的某些零件。塑料的综合性能好，原料丰富，工艺简便，用作建筑材料、包装材料、医用材料，用于交通运输、电器、家具、仪表零件。化学纤维耐用廉价，稳定性高，强度大，褶皱性好，一般用作服装原料，在工业、农业、国防上有广泛用途。

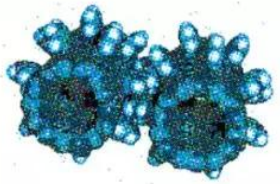


图 3-48 纳米齿轮

新型无机非金属材料有工业陶瓷、光导纤维、半导体材料。新型工业陶瓷具有良好的耐高温性、抗氧化性、耐腐蚀性和抗热冲击性，它强度高，耐磨损，可制造燃气轮机、磁流体发电机的电极、高温燃料电池。光导纤维重量轻，通信容量大，传输性能好，广泛用于通信、医疗、宇航、飞机、舰艇等工业和科学研究领域。半导体材料如砷化镓，处理信息能力比半导体硅快10倍，用于制作晶体管、集成电路和固态激光器。

复合材料是由有机高分子、无机非金属和金属等材料复合而成，可分为结构复合材料和功能复合材料。结构复合材料可根据受力要求进行选材设计及复合结构设计，用于宇航、航空、电子电工、建筑、船舶、车辆、化工容器、管道、生活用品等。功能复合材料性能优于一般功能性材料，已有压电、吸波、屏蔽、隐身、导电等功能的复合材料，广泛应用于新能源技术、信息技术、航天技术及海洋工程等方面。

光电子材料有光电子半导体材料、光纤和薄膜材料、液晶显示材料。它具有方向性、相干性、单色性和储能性等突出的优点，可用于制造高性能、小型化、集成化的光电子器件，并用于光通信、光计算、激光医疗、激光印刷、激光影视、激光受控热核反应、

材料是人类生存和发展的物质基础，也是人类社会现代文明的重要支柱，材料的变化直接影响社会的变革。材料是技术进步的关键要素之一。

能源、信息和材料被称为现代文明的三大支柱。

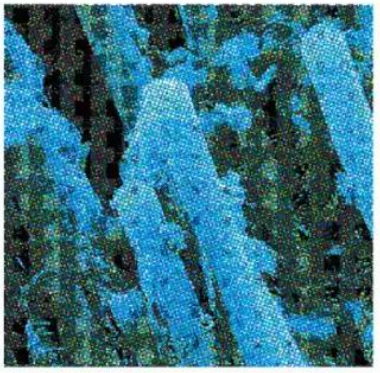


图 3-49 用碳纤维加固的塑料(此为显微镜照片)是钢的质量的1/4，但强度是钢的两倍

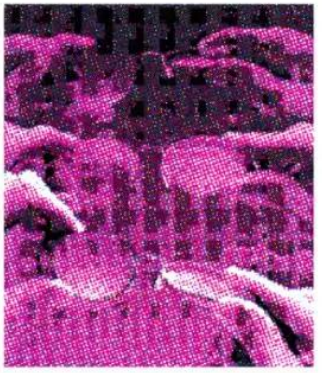


图 3-50 用弹性合金材料制成的眼镜架，被扭曲后仍会恢复原状

激光制导等。

请你走向社会，调查了解更多新材料的应用情况，在班上作一次交流评价。

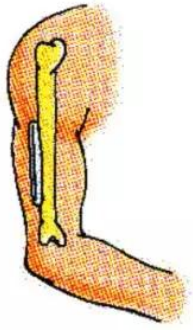


图 3-51 固定骨折用的形状记忆夹板，能依靠人的体温在恢复自己形状的过程中产生压缩力，迫使断骨很快愈合。



图 3-52 光缆

家庭作业与活动

1. 什么是半导体？半导体有哪些特点？半导体是怎样导电的？半导体技术在生活和生产中有哪些应用？
2. 什么是纳米材料？纳米材料有哪些主要特性？纳米材料有哪些应用？
3. 目前主要有哪些新材料？它们有哪些主要特点及应用？

3.x

第3章家庭作业与活动

1. 利用扫描隧道显微镜(STM)可以得到物质表面原子排列的图像，从而可以研究物质的结构。图3-53所示的照片是一些晶体材料表面的STM图像，通过观察、比较，可以看到这些材料表面的原子排列有着共同的特点，这些共同的特点是

(1) _____；

(2) _____。

2. 关于晶体和非晶体，下列说法中正确的是

A. 可以根据各向同性或各向异性来鉴别晶体和非晶体

B. 一块均匀薄片，沿各个方向对它施加拉力，发现其强度一样，则此薄片一定是非晶体

C. 一个固体球，如果沿其各条直径方向的导电性不同，则该球一定是单晶体

D. 一块晶体，若其各个方向的导热性相同，则一定是多晶体

3. 关于草、树叶上的露珠呈球形的原因，下列说法中正确的是

A. 露珠呈球形只是因为重力的作用

B. 露珠受到重力的影响比表面张力小得多，露珠呈球形只能是因为表面张力的作用

C. 重力和表面张力互相平衡，露珠呈球形是因为水的黏力

D. 露珠呈球形是因为重力和表面张力的同时作用

4. 据图3-54所示，做下面的实验，并对结果加以解释。

(1) 把张有皂膜的铁丝圆环置于水龙头之下，让一束细流穿膜而过，观察皂液是否仍完好无损。

(2) 用水浸湿细铁丝后，轻轻捅穿皂膜，观察皂膜是否破碎。

(3) 往皂膜上滴一小滴酒精(或用烧热的铁丝戳皂膜)，观察皂膜是否顷刻四分五裂。

5. 在地球上，较小的水银滴呈球形，较大的水银滴因所受重力的影响不能忽略而呈扁平形状。那么，在处于失重状态的宇宙飞船中，一大滴水银会呈什么形状？为什么？

*6. 据报道，科学家目前正加紧研制一种不用雨刷的挡风玻璃。雨滴落到这种挡风玻璃上仍然保持圆珠状，并自动滑走。这种产品在原理上借鉴了郁金香花瓣的特点：一些水和灰尘落到郁金香花瓣上后会逐渐流走，而不会附着在上面。其中原因在于，郁金香花瓣表面有许多类似人体汗毛的物质，一层层地不断把水滴推走，使其无法摊开，水滴因此仍然保持圆珠形，并像在气垫上一样滑走。科学家把这种原理“嫁接”到玻璃上：他们在玻璃上大量移植只有几个纳米长的塑料“绒毛”，结果取得了与郁金香花瓣一样的效果。

请你分析解释这种挡风玻璃不用雨刷的道理。

*7. 要想把凝在衣料上的蜡去掉，可取两张吸墨纸，分别放在蜡迹的上面和下面，然后用热熨斗在吸墨纸上来回熨烫。为什么这样做可以去掉衣料上的蜡？

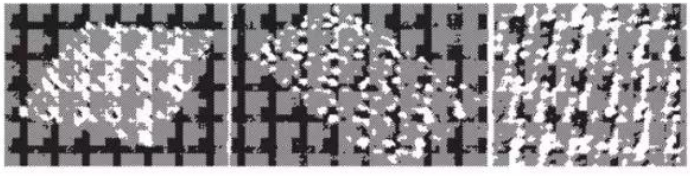


图3-53



图3-54

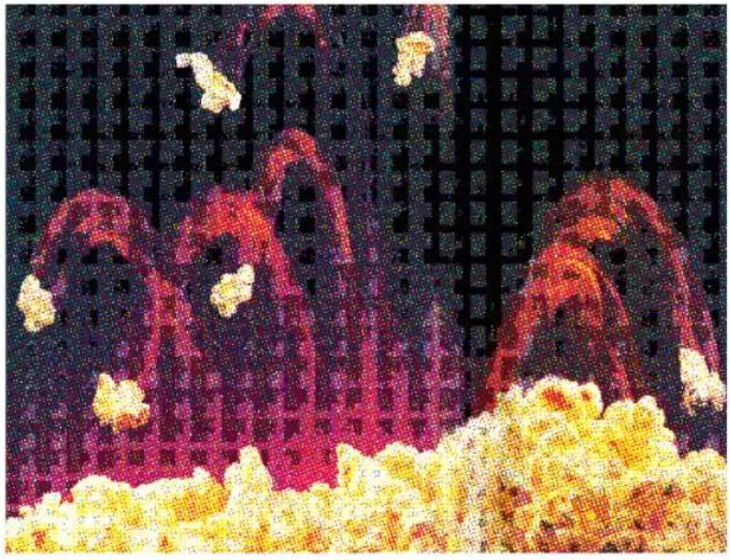


图 4–1　热的杰作(微波炉中的爆玉米花)

第 4 章
热力学定律与能量守恒

物质世界在不断地运动变化着。在这纷纭复杂的变化背后，是否存在着某种简单而不变的秩序呢？在《物理 2》中，我们已经知道，自然界发生的任何运动变化过程都遵循着一条最基本、最普遍的规律——能量转化与守恒定律。

你知道人们是怎样发现能量转化与守恒定律的吗？

这条定律在物体内能变化的过程中是怎样体现的？

自然界的能量不会消灭，那么它可以被人们反复利用吗？

能量可以相互转化，那么内能是否可以全部用来做功？

自然过程的方向性蕴含着怎样的物理原理？

本章以能量为主线，研究改变内能的方式与规律——热力学第一定律；在各种运动形式相互转化的基础上，较详细地展示能量转化与守恒定律的发现过程与伟大意义；在自然过程的方向性和理想热机研究的基础上，探讨热力学第二定律，并通过揭示宏观过程方向的微观实质，认识熵的概念及其普遍意义。

4.1 热力学第一定律

内能是一种非常普遍的能量形式。在一切与热有关的自然现象和人类活动中，都有着内能的转移或转化。

根据内能大小的决定因素可知，对于一个确定的物体（或热力学系统），可以从它的温度和体积等宏观量判断其内能是否发生了变化。



图 4-2 火柴与火柴盒磷皮相擦，内能增加，点燃火柴

做功和内能的改变

通过做功来改变物体的内能，这在现实生活中经常可以看到。例如：用打气筒给自行车胎打气，若时间较长，气筒会明显发烫；汽车在高速行驶中紧急制动时，制动片的温度升高很多，轮胎会出现软化现象；内燃机在压缩冲程中，对汽缸内的气体做功，气体的温度升高，在做功冲程中，高温高压的气体膨胀推动活塞对外做功，气体的温度降低。在这些事例中，做功都引起了物体内能的变化。

1852年，英国物理学家焦耳和威廉·汤姆生（William Thomson）在实验中发现，让充分预冷的空气迅速膨胀做功，由于内能减少，空气温度降低，这为制冷技术开辟了一条新的道路。

实验探究 通过做功来改变物体的内能

如图 4-3 所示，在一个厚玻璃筒里放一小块硝化棉，用力迅速地压下活塞，对气体做功，使气体的内能增大，温度升高，硝化棉在瞬间燃烧，产生明亮的火花。

除了通过机械运动对物体做功外，还可以通过什么方式对物体做功，从而改变物体的内能？请你举几个例子。

通过做功来改变物体内能的物理实质是什么？

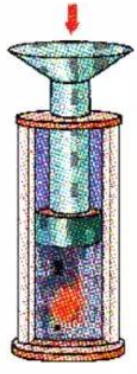


图 4-3 压缩气体使硝化棉燃烧

热传递和内能的改变

热传递有传导、对流、辐射这三种方式。

发生热传递时，能量的形式没有变化，仅是从一个物体转移到另一个物体，或从物体的一部分转移到另一部分。

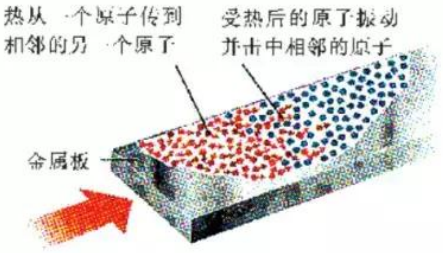


图 4-4　热传递的微观意义

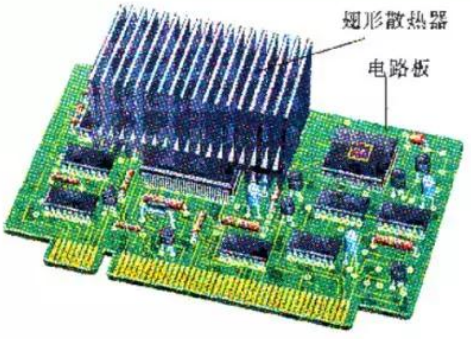


图 4-5　电路板上的散热器
计算机、电视机等电子设备，其电路板上常装有冷却扇或散热器，它们可使电路板释放出来的热量尽快散发

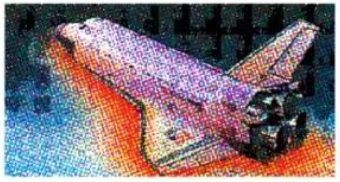


图 4-6　回到大气层的航天飞机
航天飞机回大气层时，与空气的摩擦使其表面温度高达 1500℃。因此在其外部装有一层热绝缘瓦，以保护机舱

在技术产品中，为了防止温度过高造成损坏，有时要创造条件让热传递进行得更为顺利，如加装冷却扇、散热器等(图 4-5)，有时则要采取措施阻止热传递的进行，如加装隔热板等(图 4-6)。

讨论与思考

一根金属棒的温度升高了，也就是说它的内能增加了，你能判断出它是通过哪种方式增加内能的吗？为什么？

内能是状态量，做功和传热都是物理过程，因此功和热量都是过程量。

热力学第一定律

分析论证

内能是由物体的状态所决定的。使物体从一个状态变化到另一个状态，既可以通过做功也可以通过热传递(图 4-7)。这两种方式的物理过程虽然不同，但对于物体内能的改变是等效的。



图 4-7　能流图

这里的物体包括着由大量分子组成的系统。

如果一个物体跟外界没有热交换，那么外界对它做多少功，它的内能就增加多少；反之，它对外界做多少功，它的内能就减少多少。

同样，如果这个物体不对外界做功，外界也不对物体做功，那么它吸收了多少热量，内能就增加多少；它放出多少热量，内能就减少多少。

一般情况下，如果外界对一个物体做功 W，同时给物体传递热量 Q，则该物体内能的增加应为两者之和，这就是热力学第一定律(first law of thermodynamics)。

1853 年，威廉·汤姆生在焦耳等人研究的基础上，对上述关系给出了精确的表述，并用公式表示为

$$\Delta U = U_2 - U_1 = W + Q$$

公式中的各个量都有正负，其意义如下：

物体的内能增加，$\Delta U > 0$；物体的内能减少，$\Delta U < 0$。

物体吸热，$Q > 0$；物体放热，$Q < 0$。

外界对物体做功，$W > 0$；物体对外界做功，$W < 0$。

热力学第一定律是能量转化与守恒定律在一切涉及热现象的宏观过程中的具体表现。它仅考虑做功和热传递这两种方式对物体内能变化的作用，并不考虑对物体整体的动能和势能的影响。

应用热力学第一定律时，必须明确初态、终态和中间所经历的过程，通过画出能流示意图，从能量转化与守恒定律的物理实质上把握各物理量之间的关系。

案例分析

案例 1 阳光烤暖了大地，地面辐射又对地面附近的空气加热，形成暖气团升往高空。于是有人认为高山顶上的气温要比地面的高，但实际情况正好相反。你怎么解释这个现象？

解答 这种大气现象可以用热力学第一定律来解释。

把地面附近温度、压强相同的一大团空气作为研究对象(在热力学中称为系统)。这团空气最初在地面附近受热膨胀，密度变小，因而逐渐上升。在上升的过程中，其边缘部分和外界空气的热交换对整个气团没有明显的影响，可以认为气团与外界之间传递的热量 $Q = 0$，因此气团内能的变化仅与做功有关，即 $\Delta U = W$。

气团上升时，不断膨胀，挤推周围的空气，对外做功($W < 0$)，内能减少($\Delta U < 0$)，温度降低，所以，越高的地方，空气的温度越低。

根据气象学家的考察与科学分析，对于干燥的空气，大约每升高 1km，温度降低 6 ℃左右。

案例 2 一定量的气体，在从一个状态变化到另一个状态的过程中，吸收热量 280 J，并对外做功 120 J，试问：

(1) 这些气体的内能发生了怎样的变化？

(2) 如果这些气体又返回原来的状态，并放出了热量 240 J，那么在返回的过程中是气体对外界做功，还是外界对气体做功？

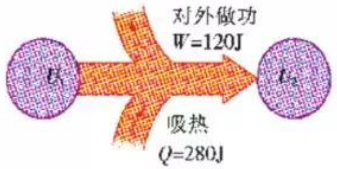


图 4-8 从状态 1 到状态 2 的能流图

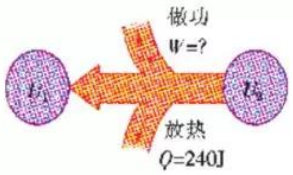


图 4-9　从状态 2 返回状态 1 的能流图

做功多少？

分析　气体前后两个状态用 1、2 表示，对应的内能分别为 U_1 和 U_2。

(1) 当气体从状态 1 变化到状态 2 时，能流图如图 4-8 所示。

(2) 由于气体的内能仅与状态有关，因此它从状态 1 变化到状态 2 时的内能变化，与从状态 2 返回状态 1 时的内能变化相等，其能流图如图 4-9 所示。

根据能量转化与守恒定律，结合能流图，可以不必拘泥于热力学第一定律的公式以及有关正负号的规定。请同学们自己完成解答。

信息浏览

“永动机”梦想的破灭



图 4-10　亨内考的“魔轮”



图 4-11　马尔基斯的永动机

在历史上，有人曾梦想制造出一种不需要任何燃料和动力，一经启动后就能不停地运转并对外做功的机器，这种机器叫做“第一类永动机”。我们在《物理 2》中见到过图 4-10 所示的“永动机”，并分析过它不能成功的原因。

图 4-11 所示是 17 世纪的英国人马尔基斯设计的“永动机”。这是一个转轮，直径达 4.3 m，里了 40 个质量为 43 kg 的重球，它们可沿转轮的辐条运动。马尔基斯设想，当一个辐条间隔在这一侧要转动到下方时，这个间隔中的重球就会向转轮边缘滚动，从而增大转轮这一侧的转动力矩，而当一个间隔在另一侧要转动到上方时，间隔中的重球就会向转轮的轴心滚动，从而减小转轮在另一侧的力矩。这样，一侧力矩大，另一侧力矩小，只要给转轮一个初始的转动速度，这个转轮就会永远地转动下去。当然，这种“永动机”也是不会成功的。

“第一类永动机”的不能成功，最根本的原因是它不符合热力学第一定律，因此热力学第一定律也可表述为：“第一类永动机是不可能制成的。”

家庭作业与活动

1. 给你一小段细铁丝、一盒火柴和一小块粗糙的布片，请你用两种不同的方式使铁丝的温度升高，体验它们的效果，说出其中的道理。
2. 一系统不从外界吸收热量，也不减少内能，它能否对外做功？为什么？
3. 如何理解热量的概念？如果用 Q 表示物体吸收的热量，用 W 表示物体对外界做的功，把热力学第一定律表示为 $Q=\Delta U+W$，你认为应该怎样理解它的物理意义？
4. 一定量的气体，从外界吸收 4.7×10^5 J 的热量，内能增加了 2.5×10^5 J。那么，是气体对外界做功，还是外界对气体做功？做了多少功？
5. 空气压缩机在一次压缩中，活塞对空气做了 2×10^5 J 的功，同时空气的内能增加了 1.5×10^5 J。那么，是空气从外界吸收了热量，还是向外界放出了热量？吸收或放出的热量是多少？

4.2 能量守恒定律发现的历程

源远流长

在变化的世界中探索一种不变的秩序，历来是哲学家、科学家感兴趣的课题。

早在公元1—2世纪，古希腊学者赫伦(Heron)已从人们对简单机械的研究中提出了一个黄金原则：作用力减少到几分之一，速度也就减少到几分之一。后来，伽利略(G. Galilei)把这一原则表述为：在力方面得到的，必在速度方面失去。这也就是说，使用任何一种机械，要省力必须降低速度。这正是机械能守恒的一个必然结果。

当时的科学还没有充分揭示不同运动形式之间的联系，对不同的运动形式也不懂得如何进行统一的量度。虽然伽利略在研究落体运动和力与运动的关系时，曾做过单摆运动的等高实验，设计过对接斜面的理想实验，但仍然只能遗憾地止步于机械能守恒的大门口。牛顿在他的伟大著作《自然哲学的数学原理》中，只是从力与运动的意义上作了深入的分析，关于"功"和"能"的词语都没有出现过。伦福德(C. Rumford)的炮膛实验和戴维(H. Davy)的摩擦实验尽管为机械运动向热的转化提供了成功的实验证明，但也局限于对"热质说"的质疑。19世纪以前，人们还无法从这些实验和研究中悟出普遍的能量转化与守恒的思想。

读史使人明智。
——弗兰西斯·培根

这个原则被形象地称为机械的"牛马特性"——牛耕地的运动速度小，能产生的力大；马拉车的运动速度大，提供的力就小。

伦福德是英籍美国物理学家，1798年他做了用钻头在炮筒内钻孔并使水发热的实验。

戴维是英国化学家，1799年他利用钟摆装置使放在真空中的金属轮子和盘子发生摩擦，在0 ℃的条件下，将蜡熔化。

伦福德和戴维的实验都支持了热是运动的观点。

漫长的发现之路

进入19世纪以后，相继出现了一系列关于不同运动形式之间联系与转化的新发现。

1800年，意大利科学家伏打(A. Volta)发明"伏打电堆"，实现了化学运动与电运动之间的转化，这是不同运动形式的联系与转化的重要环节。

1820年，丹麦物理学家奥斯特(H. C. Oersted)发现了电流的磁效应，揭示了电与磁的联系。1821年，法拉第(M. Faraday)制成

了“电磁旋转器”，实现了电运动和机械运动之间的转化。

1821年，德国物理学塞贝克(T. J. Seebeck)首先发现了“温差电”现象。13年后，法国物理学家珀耳帖(J. C. A. Peltier)发现了它的逆效应——当有电流通过两种金属的结点处时，会发生温度变化。

1831年法拉第发现了电磁感应现象。1834年法拉第得出了电解定律。

思考一下：温差电及其逆效应实现了哪两种运动之间的转化？电磁感应和电解定律又是实现了怎样的能量转化？

“能量”的概念最早是由英国物理学家托马斯·杨(Thomas Young)于1807年提出的，直到1853年才被威廉·汤姆生所采用。

此外，进入19世纪以来，紫外线化学作用的发现(1801年)、用光照射稀酸液中的金属板能够改变电池电动势现象的发现(1839年)，等等，都从不同侧面反映了各种自然现象之间的联系与转化，这促使人们把探索的目光从以前对单个事物的关注逐渐转向寻找自然现象之间的联系。

理论上准备基本就绪，科学思想也逐渐成熟。1807年“能”的概念提了出来；1820年起，“功”的概念首先在工程技术论著中被确定；1829年，机械过程中的能量守恒原理（后来演变为动能定理）提了出来……

“山雨欲来风满楼。”到19世纪40年代前后，科学界已经普遍弥漫着一种气氛，认为应该以一种相互联系与转化的观点去认识自然。能量转化与守恒定律，已犹如一轮喷薄欲出的红日。

共同的发现

美国科学哲学家托马斯·库恩(Thomas Kuhn)指出：“能量守恒正是科学家们在19世纪前40年间在实验室里先后发现的各种能量转化过程的理论概括。”

能量转化与守恒定律，不仅发现过程经历的时间长，而且是多人共同发现的。不同国家、不同领域的多位科学家，分别从不同的途径做出了有效的努力。但在这部激动人心的发现能量原理的奏鸣曲中，迈尔、焦耳、亥姆霍兹发出了三个最强音。

迈尔是德国的青年医生，他是从生理学开始对能量进行研究的。一次偶然的机会中，他观察到生活在热带的人比生活在温带的人静脉血颜色更红。由此想到了食物中含有的化学能，可以像机械能一样转化为热。在热带高温的情况下，有机体只需要较小的热量，所以有机体中食物的氧化过程减弱了，静脉血中留下较多的氧。后来他在一家纸厂设计了一个实验。他通过搅拌纸浆，测出纸浆的升温，计算出一定的机械功所产生的热。他还从空气在压强一定时和体积一定时的比热容关系，推算出热功当量的值。

恩格斯对迈尔作出了高度的评价，他称1842年是划时代的一年。

他从机械能与热能的转化关系，扩展到其他现象，分析了25种不同形式能量的转化现象，形成了一切能量可以相互转化的思想。

迈尔从“无不生有，有不变无”的哲学信念出发，1842年在他的论文中第一个明确提出了能量转化与守恒的原理。

如果说，迈尔从自然哲学的理性思考走到了一个伟大定律的面前，那么焦耳则进一步用系统的物理实验为能量的转化与守恒定律奠定了坚实的基础。因为从各种不同现象之间的联系中诞生出来的“转化”的概念，并不能等同于“守恒”，仅凭能量转化还不能导致科学家们到达能量守恒的彼岸。必须确立各种不同形式能量之间相互转化的当量关系，并且使这种当量具有统一的定量表达，能量的转化和守恒定律才能被真正地确立起来。

在各种不同的自然现象中，机械运动和热运动的联系和转化最为普遍。英国物理学家焦耳以此为突破口，从19世纪40年代起，经历40年的沧桑，其间他设计了各种不同的方案，先后做了400多次实验，呕心沥血，矢志不渝，从一个20多岁的小伙子直到变成一个60多岁的白发老人，为着一个目标——测定功与热之间的当量关系。终于，焦耳用日益精确的数据，无可辩驳地揭示了各种形式能量之间互相转化和守恒的普遍规律。

作为一个伟大的定律，最终还必须给出数学论证。这个工作是德国物理学家亥姆霍兹完成的。他第一次给出能量守恒定律的数学表达式，进而证明自然界的各种过程都遵从这个基本定律。亥姆霍兹的工作完全是以理论物理模式展开的，他的工作被认为是对能量转化与守恒定律的第一个最严谨、最全面的论证。



迈尔（J. R. Mayer，1814—1878），德国物理学家，能量转化与守恒定律的发现者之一。



焦耳（J. P. Joule，1818—1889），英国物理学家。测定了热功当量，为建立能量转化与守恒定律做出了贡献。

珍贵的财富

大量事实证明：各种运动形式及其对应的能量可以互相转化，其总量在转化中守恒。

能量既不能凭空产生，也不能凭空消失，它只能从一种形式转化为另一种形式，或者从一个系统（物体）转移到另一个系统（物体），在转化和转移的过程中其总量不变。这就是**能量转化与守恒定律**（law of conservation of energy）。

能量转化与守恒定律是自然界的一条普遍规律，任何自然过程，不论是物理的、化学的、生物的，也不论是宏观的、微观的，有生命的或无生命的，都得遵循能量转化与守恒定律。能量转化与守恒定律是人类科学宝库中的一件“无价之宝”。



亥姆霍兹（H. L. F. Helmholtz,1821—1894），德国物理学家、生理学家。1847 年发表关于能量转化与守恒定律的重要论著《论力的守恒》，对眼睛的光学结构等也有研究。

恩格斯把能量转化与守恒定律、细胞学说、达尔文的生物进化论，称为 19 世纪中叶的“三大发现”。

能量转化与守恒定律可以指导人们有效地开发和利用新能源，也可以指导人们主动地创造条件，实现能量的转化，以达到某种特定的应用。例如红外摄影，就是把目标物发出的能量微弱的红外线接收下来，转化为电信号进行放大，再把放大了的电信号转化为光信号显示出来。

能量转化与守恒定律可以指导人们对新的物理现象做出解释，建立新的理论，或根据物理现象做出惊人的预言。例如，爱因斯坦光电效应方程就是能量转化与守恒的反映。在 β 衰变的“能量失窃案”中，年轻的瑞士籍奥地利物理学家泡利（W. Pauli）根据能量守恒的普遍意义，预言了中微子的存在。这项成就，已作为能量转化与守恒定律的一次重大胜利而光荣地载入史册。

能量转化与守恒定律也可以用来检验和启迪新的发明。在历史上曾风靡一时的永动机，无论构思多么巧妙，外表多么华丽，由于违背了能量转化与守恒定律，只能以失败告终。

案例分析

案例 科学家根据考察，比较一致地认为 6500 万年前地球上发生的那次生物大灭绝（包括恐龙在内的占地球一半左右的生物在一瞬间消失了）是由一颗直径大约 10 km、质量为 1×10^{12} t 的小行星以 20—30 km/s 的速度碰到地球上而导致的。这次碰撞所释放的能量相当于 6×10^{13} t 的 TNT 炸药爆炸所放出的能量。

现假设有一颗直径 1km 的小行星撞上了地球，请估算所释放的能量，并讨论给地球所造成的危害。



图 4-12 小行星撞击地球的示意图

分析 质量巨大的小行星一般以每秒几十千米的巨大速度运动，具有极大的动能。它在穿越地球大气层的过程中，由于与空气的摩擦，相当部分动能转变为小行星以及周围空气的内能。炽热的小行星燃烧、爆炸，分裂成许多碎片，继续以巨大的速度向地球飞来。小行星在燃烧中把各种矿物的化学能转化为各种形式的能量，向地球释放出大量的热量、冲击波、电磁波及其他各种射线。小行星撞击地球所释放的能量不仅来自于它的动能，更主要的是来自它所蕴含的化学能。

假定这颗小行星的密度与 6500 万年前与地球相撞的那颗星的密度一样，运动速度也一样。根据体积与质量的关系，就可利用案例中的信息加以估算。

解答 由球体积公式 $V=\frac{4}{3}\pi R^3$ 知，球的直径缩小为原来的

$\frac{1}{10}$时，其体积减少为原来的$\frac{1}{1000}$。当小行星的密度和撞击速度不变时，其质量和动能都减为原来的$\frac{1}{1000}$，则它与地球撞击所释放的总能量相当于6×10^{10} t的TNT炸药爆炸所放出的能量，这相当于6万个八级大地震的破坏力，会给地球及居住在地球上的人类和各种生物带来毁灭性的打击。

信息浏览

小行星撞击地球的危险性

科学研究表明，在地球46亿年的历史上，曾发生过难以计数的小行星碰撞事件。仅在20世纪，这些小天体就至少有两次在人类事先毫无知觉的情况下敲过地球的大门。

1908年6月30日清晨7时17分，一颗比太阳更耀眼的大火球在俄国西伯利亚通古斯上空8 km处爆炸，其爆炸当量相当于600至1000颗投在广岛的原子弹(但无明显的放射性辐射)，其强大的冲击波与高温及其导致的大火摧毁了2000 km^2的古老森林。研究与计算表明这是一颗直径仅60 m的小行星。这种大小的近地小天体，平均每200年与地球相撞一次(非周期性)。

1972年8月10日白昼，一颗火球飞越美国加利福尼亚州和加拿大西部的上空后离开了地球，不少目击者亲耳听到了它从58 km上空传来的隆隆声响，美国的空间红外探测器记录了这一事件。研究表明，这是一颗直径约为10 m、质量为几千吨的小行星，飞行速度为15 km/s。假如它下落到地球上，其爆炸当量相当于2至3颗投在广岛的原子弹。

上述事件仅是较小质量的小行星所导致的局部地区效应，而对人类危害甚大的则是质量较大的小行星。现在的研究表明，直径2000 m左右的石质小行星与地球相撞会引起全球效应，其爆炸释放出的能量高达约1×10^{12} t的TNT，相当于上述事件的5万倍以上。它除了直接摧毁1×10^{6} km^2的地区以外，还将大量的亚微米微尘抛向同温层，这个全球性厚尘埃层将阻断植物的光合作用，形成一个“星击之冬”。这一量级的碰撞事件平均50万年发生一次。

现在有足够的证据表明，6500万年前白垩纪与第三纪之间的恐龙灭绝事件（简称K–T事件），就是由一颗直径大约10 km的近地小天体撞击地球导致的，当时还有一半左右的动物和植物物种随同恐龙一起灭绝。

目前，不少国家的科学家都密切地关注着许多小行星的运动，并积极研究着一些预防它们跟地球相撞的措施。

家庭作业与活动

1. 专家你的家庭与学校，说出你在生活和学习中必须用到哪些形式的能量，它们是通过什么样的设备从什么形式的能量转化来的。
2. 称出自己的质量，量出两层楼梯的平均高度，手拿计时器，以正常速度匀速地向上跑完这两层楼梯，记下所用的时间。
   (1) 表出你在跑楼时体内输出的有用能量，这中间发生了什么样的能量转换？
   (2) 求出以瓦为单位的你出有用功率。如果这种能量转化为电能，可点亮几盏“220V 40W”的灯泡？
3. 如何从能量转化与守恒定律的角度去认识闭合电路欧姆定律和法拉第电磁感应定律？
4. 说出手电筒的结构，画出它工作时的电路图。
5. 图 4-13 是一个现代的循环热力发电厂的运行流程图，请从能量的角度分析各生产部门（燃烧室、锅炉、涡轮机、发电机、冷凝器）之间能量的转化或转移的情况。

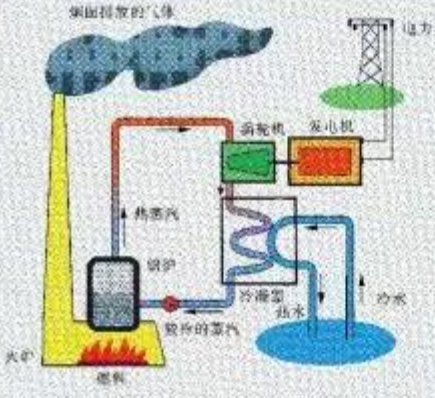


图 4-13 燃煤发电厂运作流程示意图

周南物理殷石峰

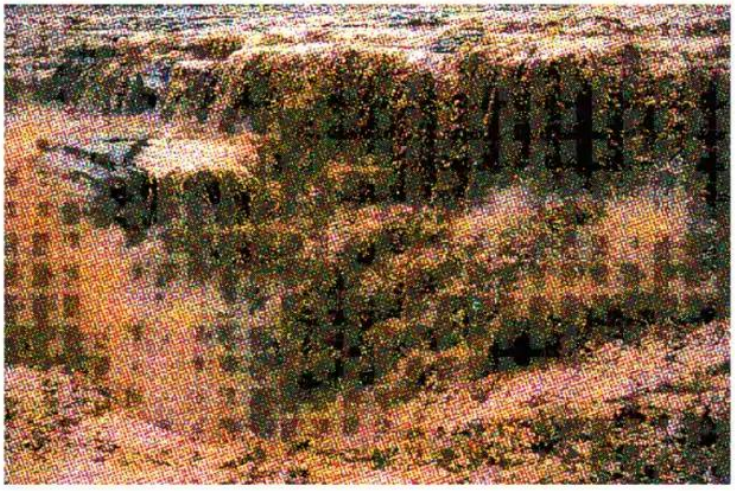


图 4-14 奔腾的黄河(壶口瀑布)

若不见黄河之水天上来,奔流到海不复回。
李白:《将进酒》

4.3 热力学第二定律

在自然界中,任何运动变化过程都得遵循能量转化与守恒定律。那么,能量可以被人们不断地反复利用吗?符合能量转化与守恒定律的过程是否都会发生?如何判断过程演化的方向?热力学第一定律和能量转化与守恒定律对这些都无法回答。自然界中一定还隐藏着另外的奥秘!

自然过程的方向性

生活经验告诉我们,热量能够自发地从高温物体传到低温物体,却不能自发地从低温物体传到高温物体。这是什么原因呢?这是因为热传递具有方向性。

在自然界中,一切自发过程都是有方向性的,不可逆的。

河水只能从高处流向低处,"奔流到海不复回",不会自动地从低处流向高处。



a 绽放的礼花不可能收回再放



b 水往低处流，下落的石头也不会把内能自动转化为动能，使自己重新飞上天去

图 4-15 过程的方向性



鲁道夫·克劳修斯（R. Clausius，1822—1888），德国物理学家，近代分子动理论的创始人之一。他建立状态概念，并推导出气体压强公式。1865年提出"熵"的概念，使热力学第二定律以定量形式表示出来，其影响科学用着有许多方面。

打开一瓶香水，香水分子总是自发地向四周散开，不会自发地从四周八方重新聚集到瓶子里。

石块从高处落下，重力势能转化为动能和克服空气阻力所做的功。当石块撞到地面最终静止的时候，其动能又转化为内能。然而静止在地面上的石块不会把内能自动转化为动能，使自己重新升到空中。

过程的方向性具有普遍的意义，请再列举一些事例，并与同学相互交流。

1850年，德国物理学家克劳修斯根据热传递的方向性，总结出一条规律：不可能使热量从低温物体传到高温物体，而不引起其他变化。这就是热力学第二定律(second law of thermodynamics)的一种表述，称为克劳修斯表述。

有人说，用电冰箱冷藏食品，用空调机制冷，它们能够源源不断地把热量从温度较低的地方传递到温度较高的地方，这并不违背热力学第二定律。你的看法怎样？

理想热机的启示

面对能源危机，有人提出了一个十分诱人的设想：地球上的海水储量丰富，总质量约 1.4×10^{21} t，如果能够设计制造出一种机

器，它能从海水里吸热做功，则由计算可知，只要使海水的温度降低0.01K，它所做的功就达5.8×10^{22} J，这些功完全可让全世界所有的工厂运转1000多年！这个设想完全符合能量转化与守恒定律，但至今没有研制出这种机器。这是怎么回事呢？

为了解决这个问题，让我们先对热机的工作原理作一分析。

图4–16所示是四冲程内燃机的工作过程。它的工作物质是空气与燃料的混合气。工作物质推动活塞做功后，作为废气必须排出后才能进行下一个循环，也就是说，一个循环完成后，一定会放掉一些热量。

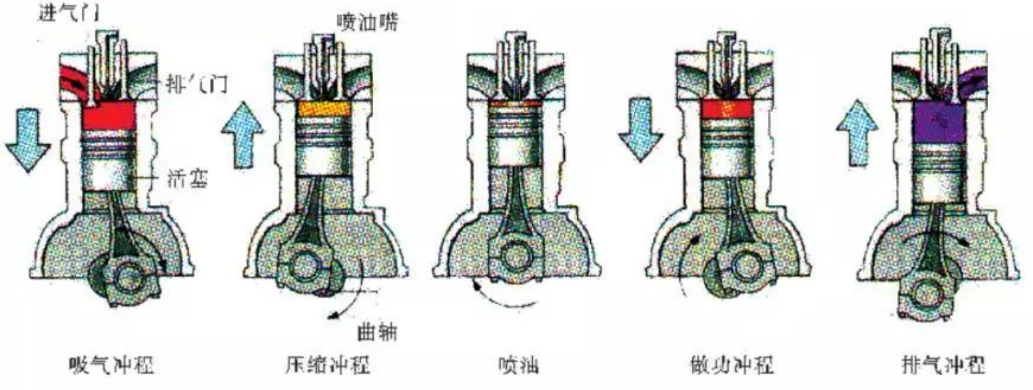


图4–16 四冲程内燃机的工作过程

1824年，法国物理学家卡诺分析了各种热机的工作过程后，运用理想模型的研究方法，对具体的热机进行简化抽象，构筑了一部理想化的热机（图4–17），它概括了各种热机的工作原理。

从理想热机的工作原理，可以得到重要的启示：任何一种热机必须联系着两个热源，分别称为高温热源和低温热源（冷凝器），工作物质从高温热源吸取热量后，除了对外做功，还必须向低温热源放热，不可能实现只有单一热源的热机。这也就是说，从高温热源吸收的热量不可能全部用来对外做功。

设工作物质在一个循环内从高温热源吸收热量Q_1，对外做功W，向低温热源放出热量Q_2，则

$$Q_1 = W + Q_2 \text{ 或 } W = Q_1 - Q_2$$

所以理想热机的效率为

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} < 1$$

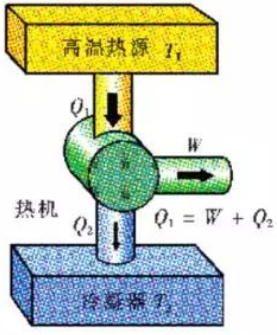


图4–17 理想热机的工作原理

研究指出，理想热机的效率完全由两个热源的温度决定，即

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$



卡诺（S. Carnot，1796—1832），法国物理学家、工程师，毕业于巴黎综合工科学校。1824 年提出了关于热机的卡诺循环和卡诺定理。

讨论与思考

在《物理 1》的开篇中，我们曾问：假如有一种完全没有摩擦的“理想热机”，它的效率能达到 100%吗？现在，你是否有所领悟？

本节开始提出的设想为什么无法实现？

科学家正在研究一种新技术：利用海洋中不同深度的温度差驱动热机。这为什么是可行的？

开尔文表述

1851 年，英国物理学家威廉·汤姆生（即开尔文勋爵）从热机的工作特点出发，总结出热力学第二定律的另一种表述：不可能从单一热源吸收热量并把它全部用来做功，而不引起其他变化。这种表述称为开尔文表述。

当能量转化与守恒定律对“第一类永动机”做出“不可能制成”的判决后，历史上曾有许多人精心构思，想设计出一种从单一热源吸热，并把所吸热量除用于克服摩擦做功外全部用来对外做功的机器，也就是说，一种效率达到 100%的热机。这种机器称为“第二类永动机”。“第二类永动机”并不违背能量转化与守恒定律，但根据热力学第二定律的开尔文表述，同样可以做出判决：“第二类永动机”也是不可能制成的。而这正是热力学第二定律的又一种表述。

案例分析

案例 炎炎夏日，两位同学在充满凉意的空调室内，就空调机的工作过程是否遵循热力学第二定律的问题发生了争论。

一位同学说：空调机工作时，不断地把热量从室内传到室外，即从低温物体传到高温物体，可见它并不遵循热力学第二定律。

另一位同学说：热力学第二定律是热力学系统的普遍规律，空调机的工作过程不可能违反它。

两人各执一词，都无法使对方信服。请你对他们的论点作出评价。

分析 空调机和电冰箱都是制冷机，它们的工作原理基本相同。为了便于分析，我们以电冰箱为研究对象，认识它的基本结构

和工作过程。从图 4–18 可以知道，电冰箱由压缩机、冷凝器、毛细管（节流阀）、蒸发器四个部分组成。这四个部分由管道连接，组成一个密闭的连通器系统，致冷剂作为工作物质，由管道输送，经过这四个部分，完成工作循环。

压缩机是电冰箱的“心脏”，它消耗电能对来自蒸发器的制冷剂蒸气做功，使它变成高温高压的蒸气（如 $p \approx 9.1$ atm，$t \approx 46$ ℃）。

然后这些高温高压的蒸气来到冷凝器，向低温的环境（空气）放热，同时自身被冷却而凝成低温高压的液体（如 $p \approx 8.9$ atm，$t \approx 37.4$ ℃）。

这些低温高压的液态制冷剂由过滤器滤掉水分和杂质，进入毛细管，经节流阀膨胀，变为低温低压的液体（如 $p \approx 1.5$ atm，$t \approx -20$ ℃），随后进入电冰箱的蒸发器。在那里，这低温低压的液态制冷剂在低压条件下迅速汽化，从外界（电冰箱内）吸收大量的热量，使那儿的温度降低。这样就完成了一个制冷循环。

请仔细观看图 4–18 中电冰箱的工作原理和热量流向，理解电冰箱的的工作过程，你就可以对这两位同学的争论作出正确的评价了。

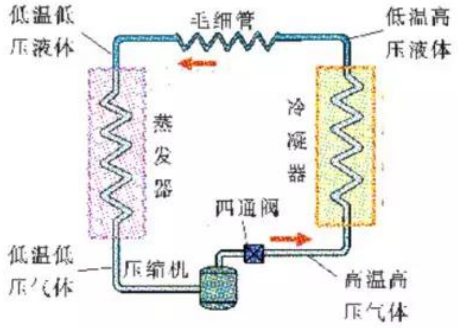


图 4–18　电冰箱的制冷循环回路

家庭作业与活动

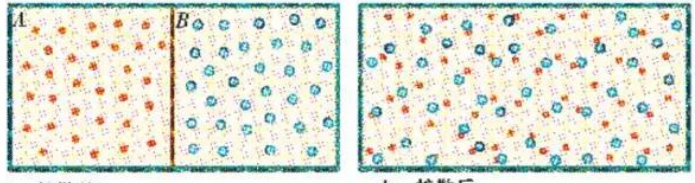
1. 有人把热力学第二定律的克劳修斯表述简化为“热量不能由低温物体传到高温物体”，这样说法是否正确？为什么？
2. 下列说法中正确的是
   A. 热量能够从高温物体传到低温物体
   B. 机械能可以全部转化为内能而不引起其他变化
   C. 不可能从单一热源吸收热量并把它全部用来做功，而不引起其他变化
   D. 凡是不违背能量守恒定律的过程一定都能实现
3. 设一个蒸汽机中，1 kg 煤完全燃烧后，产生 2.9×10^7 J 的热量，其分配情况如下：锅炉损失 5.9×10^6 J；传送蒸汽损失 1.2×10^6 J；蒸汽冷凝损失 4.0×10^6 J；废气带走损失 1.4×10^7 J；机械磨损损失 0.7×10^6 J。
   试画出其能流图。这台蒸汽机输出的机械能是多少？热机的效率是多少？

4.4 描述无序程度的物理量

宏观方向性的微观本质

热力学的研究对象是由大量分子组成的系统。由于分子的无规则运动，它们在整体上表现出来的宏观方向性，必然有其深刻的微观原因。我们以扩散现象和热传递为例进行研究。

如图 4-19a 所示，容器中间是隔板，A、B 两种气体（分别用 • 和 ○ 表示）被有序地分隔在左右两方。抽掉隔板后，由于气体分子的无规则运动，双方都向对方扩散，扩散的结果变成一种由 A、B 两种气体均匀混合而成的气体（设这两种气体不发生化学反应），如图 4-19b 所示。这种气体中的分子完全打破了原来的有序分布，显得比较混乱。



a 扩散前　　b 扩散后

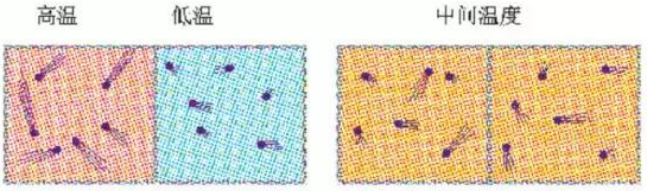
图 4-19　两种气体在扩散的前后

从微观的角度看，这个系统的有序程度变得较差了，或者说，微观无序程度增加了。

如图 2-20a 所示，有两个温度不同的物体，高温物体中分子的平均动能大，低温物体中分子的平均动能小。这些分子很有序地按平均动能大小分居两处。现把这两个物体相互接触，如图 4-20b 所示。经过一段时间后，由于热量从高温物体传到低温物体，导致高温物体的温度降低，其分子的平均动能减小，低温物体的温度升高，其分子的平均动能增加，最后两者达到同一温度。两个物体的分子平均动能都变成一个中间值，运动较快的分子不再同运动较慢的分子隔开了。因此，热传递的结果同样使得终态比初态更混乱，显示出更高的无序程度。

宏观过程方向性的微观本质究竟是什么？你能否根据上述两

例做一概括？



a 一个高温物体与一个低温物体在开始接触的瞬间；高温物体中的大多数分子快速运动，而低温物体中的大多数分子慢速运动

b 在高温物体与低温物体相互接触一段时间后，高温物体中有些分子慢了下来，而低温物体中有些分子快了起来

图 4-20　热传递中分子的微观图景

一个非常有用的概念——熵

在物理学上，为了描述一个系统的无序程度，引入一个物理量，叫做熵(entropy)。系统的熵高，表示无序程度大，显得“混乱”和“分散”；系统的熵低，表示无序程度小，显得有序、“整齐”和“集中”。

根据系统无序程度的变化，我们可以定性地比较熵的大小。

例如，把一碗沙子掺到一碗米里，两者混合在一起，结果不可收拾，我们可以说系统的熵混合后比混合前增加了。

在希腊语中，熵 (εντροπη) 表示“转变”的意思，克劳修斯首先把它引入物理学，定义为热量与温度之比。我国物理学家胡刚复根据其定义，新造一字“熵”来表示。

讨论与思考　比较熵的大小

质量相同、温度相同的水，分别处于固态、液态和气态三种状态下，它们的熵的大小有什么关系？为什么？

根据大量分子运动对系统无序程度的影响，热力学第二定律又有一种表述：由大量分子组成的系统自发变化时，总是向着无

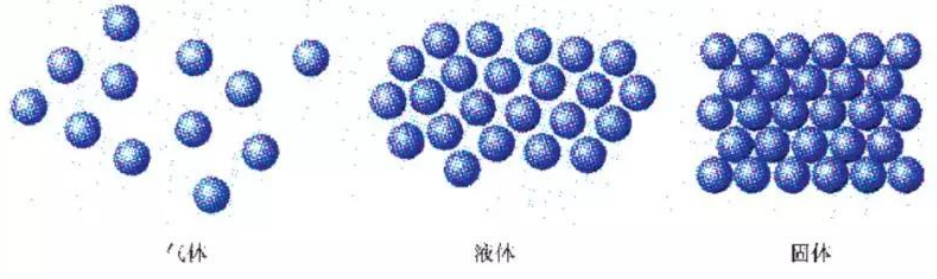


图 4-21　水的三种状态的微观结构示意图

序程度增加的方向发展，至少无序程度不会减少。这也就是说，任何一个系统自发变化时，系统的熵要么增加，要么不变，但不会减少。

功转化为热的过程是一个不可逆的过程，你如何理解这个过程中熵的增加？

无处不在的熵

熵的概念看似抽象，却又十分实在，它时时刻刻伴随着我们。无论是一杯水、一块铁，还是厨房里烹饪的菜肴、工厂里运转的机器，任何宏观物质系统，它们都有熵。而且，熵也可以在过程中产生和传递。

大量事实证明，每一个不可逆过程，都是导致熵产生（增加）的根源。

平时常见的热传递、扩散、功转变为热、煤的燃烧、铁在空气中的氧化等一切自发的过程，都是不可逆的，都会使熵增加。马路上的摩托车急驶而过，喷出阵阵黑烟，严重污染了环境，同样导致了熵的增大。

熵的概念被用于管理科学和社会科学时，企业管理混乱、经济过热就是熵太大，加强管理就是一种减熵措施。

熵虽然诞生于热力学的研究，但现在已拓展到自然科学和社会科学的各个领域。

能量转化与守恒定律和熵增加原理是自然界中两条普遍的规律，堪称是宇宙的法规，它们一起控制着一切自然过程的发生和发展：任何过程中一切参与者的总能量必定保持不变，总熵必定不会减少。

案例分析

案例 热力学第二定律的开尔文表述指出：内能与机械能的转化具有方向性。请结合熵的变化加以解释。

解答 机械运动是宏观情况下物体在空间位置上的变化，物体运动状态的变化完全遵循牛顿运动定律所反映的因果关系，这是一种有序的运动。热运动是大量分子的无规则运动，系统的一个宏观状态包含着大量的微观状态，这是一种无序的运动。机械运动向热运动的转化，属于从有序向无序的转化，会导致熵的增加，符合热力学的规律，因此机械能可以全部转化为内能。反之，

热运动向机械运动的转化，属于从无序向有序的转化，即从高熵向低熵转化，不符合熵增加原理，因此内能向机械能的转化不能全部实现。

家庭作业与活动

1. 请整理热力学第二定律的不同表述，并说明它们分别对应着怎样的物理事实。
2. 如图 4-22，将一滴红墨水滴入一杯清水中，红墨水会逐渐扩散到整杯水中，呈均匀分布。试说明这个过程中熵的变化。
3. 一个软球从高处落下，撞到地面上，最后处于静止状态。试分析这个过程中熵的变化。

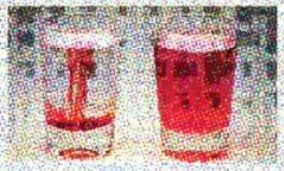


图 4-22　红墨水的扩散

4.x

第 4 章家庭作业与活动

1. 下列关于内能变化的说法中正确的是
   A. 电流通过电阻，电阻会发热，其内能增加是通过热传递方式实现的
   B. 一定量气体经加热，其内能一定增加
   C. 气体膨胀，它的内能一定减少
   D. 橡皮筋被拉长时，内能增大
2. 关于物体的内能及其变化，下列说法中正确的是
   A. 物体在其温度改变时，其内能必定改变
   B. 物体对外做功，其内能不一定改变；向物体传递热量，其内能不一定改变
   C. 对物体做功，物体内能必定改变；物体向外传出一定热量，其内能必定改变
   D. 若物体与外界不发生热交换，则物体的内能必定不改变
3. 关于物体的内能变化，以下说法正确的是
   A. 物体吸收热量，内能一定增大
   B. 物体对外做功，内能一定减小
   C. 物体吸收热量，同时对外做功，内能可能不变
   D. 物体放出热量，同时对外做功，内能可能不变
4. 汽车关闭发动机后恰能沿斜坡匀速下滑，在这过程中
   A. 汽车的机械能守恒
   B. 汽车的机械能逐渐变小，内能增加，总能量逐渐变小
   C. 汽车的机械能逐渐变小，内能增加，总能量不变
   D. 汽车的机械能和总能量都不变
5. 如图 4–23 所示，直立容器内有一薄层隔板，把容器分成体积相等的两部分 A 和 B，A 中气体的密度较小，B 中气体的密度较大。若抽去隔板，加热容器，使 A、B 两部分气体均匀混合，设在此过程中气体共吸热 Q，气体内能增量为 ΔU，不考虑散热损失，则
   A. $\Delta U = Q$
   B. $\Delta U < Q$
   C. $\Delta U > Q$
   D. 无法比较

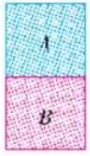


图 4–23

6. 关于热力学第二定律，下列表述中正确的是
   A. 物体可以从单一热源吸收热量并把它全部用来做功，而不引起其他变化
   B. 热传递是有方向性的
   C. 不可能使热量从低温物体传到高温物体
   D. 第二类永动机是可以制成的
7. 在一间隔热很好的房间中，把正在工作的电冰箱门打开，室内空气温度将　　（选填“升高”、“不变”或“降低”），其原因是　　。
8. 三峡工程的主要数据如下表所示。

大坝	坝高(m)	185
	坝长(m)	2335
	最高蓄水位(m)	175
水库	总库容(m^3)	3.930×10^{10}
	防洪库容量(m^3)	2.215×10^{10}
	平均年流量(m^3)	4.510×10^{11}
电站	总装机数(台)	26
	总装机容量(kW)	1.820×10^{7}
	平均发电量(kW·h)	8.468×10^{10}

请根据表中有关数据完成下列问题。

(1) 年平均消耗水能 $E =$　　J，转化为电能的百分比 $\eta =$ _____。

(2) 若 26 台发电机组全部建成并同时发电，则按设计要求年发电时间为 _____ 天。

9. 现代典型的燃煤发电厂，总效率一般为 40%。有一座大型燃煤发电厂，如果发出 1.0×10^9 W 的电力，可供一个大城市使用。图 4–24 表示这座发电厂的能量流向。请回答：

(1) 燃煤提供的能量应等于哪几项能量之和？

(2) 图中烟囱废气所带走的能量没有标出，请你算出来，在图中补上。

(3) 算出这座发电厂的总效率。

(4) 根据图 4–24 所示的电厂能量流向，你认为在哪些地方作些改进，可以提高发电厂的总效率？

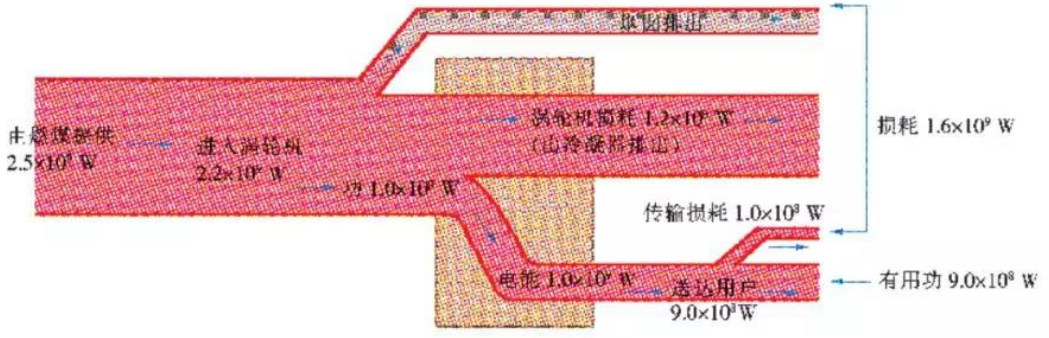


图 4–24　一座燃煤发电厂中的能量流向

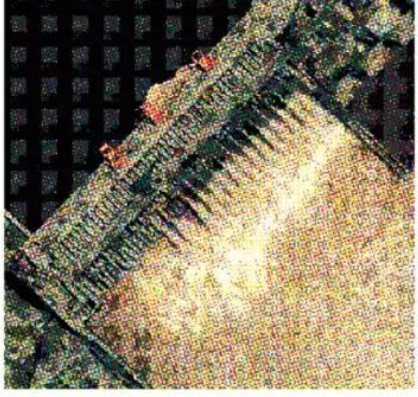


图 5-1　举世瞩目的长江三峡水电站



图 5-2　让天更蓝，地更绿，水更清，空气更洁净

第 5 章
能源与可持续发展

随着人类文明的不断进步，地球上的能源消耗量正在以惊人的速度增长。与此同时，地球上的矿物燃料储藏量正在急剧地减少。而且，矿物燃料的大量消耗，已导致了全球气候变暖等生态环境问题。面对日趋严重的能源危机和环境污染，人类必须思考：

未来究竟应该使用什么样的能源？

能源和环境与人类生存有怎样的关系？

能源的开发和利用会带来哪些问题？

怎样才能做到可持续发展？

本章将从目前的能源状况出发，了解能源的开发、利用和消耗情况，认识能源和环境与人类生存的关系，研究能源开发利用带来的问题及其应对策略，分析技术进步对利用自然资源和节约能源的影响。

5.1
能源利用与环境污染

能源及其分类

所谓能源，是指能够提供可利用能量的物质。它是人类赖以生存和生活的重要物质基础。人类利用能源的历史大致经历了柴

薪、煤炭、石油这三个时期。

目前，人类消耗的能源主要是煤、石油、天然气等。这些能源在有限的时间内不可再生，通常叫做不可再生能源。水能、风能、太阳能、生物质能、海洋能等，可以由自然的力量再生，叫做可再生能源。

能源有不同的分类方法。例如，我们可以把自然形成的、没有经过人为加工的能源叫一次能源（初级能源），由一次能源经过人为加工制备转换而成的能源叫二次能源。请根据这种分类方法，对下列各种能源进行分类：煤、石油、蒸汽、焦煤、煤气、电能、天然气、太阳能、风能、水能、生物质能、汽油、柴油、乙醇等。

当今世界人类最关心的五大问题是：能源、粮食、环境、人口和资源。

标准煤

为了把各种燃料从含能量的角度统一起来，能源科学中引进了“标准煤”的概念，1 kg 标准煤的热值为 2.92×10^7 J。原油、天然气、原煤与标准煤的换算关系为：

1 t 原煤 = 0.714 t 标准煤，

1 t 原油 = 1.43 t 标准煤，

1000 m^3 天然气 = 1.33 t 标准煤。

能源利用状况

改革开放以来，我国的能源工业无论从数量上还是质量上均取得了空前的进步。

目前我国能源消费结构如图 5-3 所示，煤炭 75%，石油 17%，天然气 2%，一次电力（水电、核电、新能源发电）6%，已经形成了以煤炭为主、多种形式能源互补的能源生产体系。

我国能源资源总量约 4×10^{12} t 标准煤。煤炭现有储量为 1.0×10^{12} t，可采储量为 8.93×10^{10} t；石油的资源量为 9.3×10^{10} t；天然气的资源量为 3.8×10^{12} m^3，现已探明的石油和天然气储量约占资源量的 20% 和 3%；水力的可开发装机容量为 3.78×10^8 kW，居世界首位；新能源与可再生能源资源丰富，风能资源量约为 1.6×10^9 kW，可开发利用的风能资源约 2.53×10^8 kW；地热资源的远景储量为 1.35×10^{11} t 标准煤，探明储量为 3.16×10^9 t 标准煤；太阳能、生物质能、海洋能等储量更是处于世界前列。但因我国人口众多，人均能源资源占有量不到世界平均水平的一半。随着经济的发展，我国人均能源消费量将逐年增加。

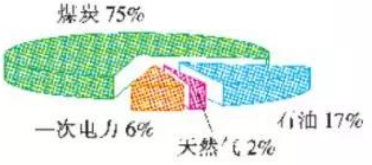


图 5-3 目前我国能源消费结构

人类生存环境及其污染

煤炭、石油等化石燃料的大量使用，带来了严重的环境污染问题。直接的污染是大气污染和水污染，引起的后果是温室效应和

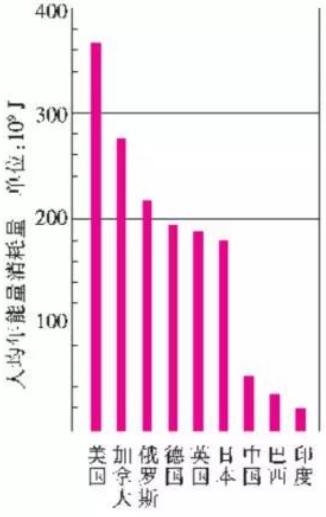


图 5-4 部分国家的人均年能量消耗量

酸雨。据估测，1999 年，我国二氧化硫的排放量达 1.858×10^7 t，其中约 85% 是由燃煤排放的；酸雨面积已超过国土面积的 1/3，由酸雨造成的经济损失约占当年国内生产总值(GDP)的 2%。预计到 2010 年，二氧化硫水平将增长 60%，二氧化碳水平将增长 80%。

我国城市生活垃圾的历年堆存量已达到 6×10^9 t，现在已有不少城市陷入了垃圾的“围城”。迄今为止，我国许多城市生活垃圾仍以露天堆放、填埋为主，这不仅占用了宝贵的土地资源，而且对环境造成了严重的二次污染。

废旧电池对环境的污染也十分严重。资料表明，一节 1 号有汞电池烂在地里，能使 1 m^2 的土地失去农业价值；一粒纽扣电池可以使 600 t 水无法饮用。

保护人类的生存环境已成为世界各国共同关注的问题。“让我们的天更蓝，地更绿，水更清，空气更洁净”，这句口号表现了人们治理环境问题的决心和信心。

案例分析

案例 1 什么叫温室效应？试分析温室效应的产生原因与危害。

解答 大气中二氧化碳含量增加导致气温升高的现象叫温室效应。

通常情况下，地球大气中含有一定量的水蒸气和较少的二氧化碳气体，它们对地球的向外散热起了遮挡的作用。这种遮拦作用叫做自然温室效应。

自工业革命以来，由于工厂、家庭、汽车大量使用煤、石油、天然气等化石燃料，每时每刻都在向大气排放废气，加上森林的毁

图 5-5 大气被污染

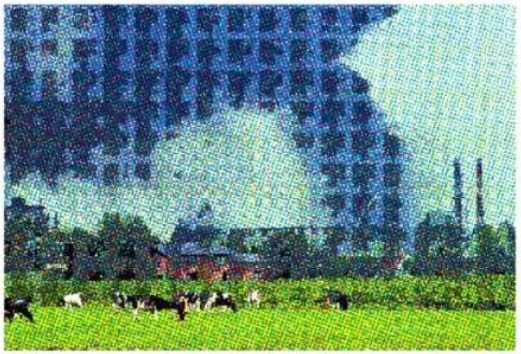


图 5-6 水被污染



坏，大气中二氧化碳的含量明显增加，因此温室效应不断增强，地球的平均气温逐渐升高。由于地球温度的升高，海水的蒸发会加快，大气中水蒸气的含量会增加，使温室效应的增强更为加剧。

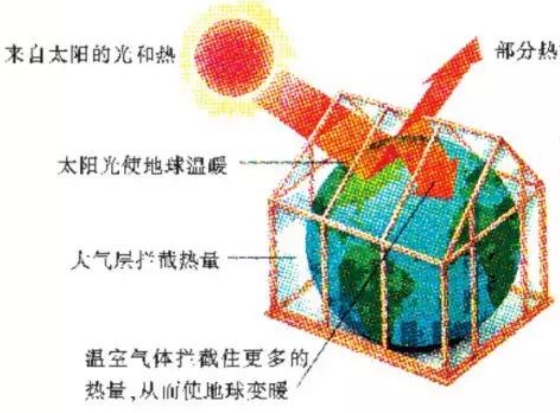
此外，电冰箱、空调机等制冷机所排放的氯氟烃气体破坏臭氧层，使臭氧层变薄，出现空洞，也使温室效应增强。

由温室效应导致的地球变暖、气候反常、海洋风暴增多、海平面上升、病虫害增加、土地干旱、沙漠化面积增多等现象，对人类的生存和发展造成了严重的威胁。

请思考并讨论：温室效应还有哪些危害？如何抑制日益增强的温室效应？

案例2 试分析酸雨的形成原因与危害，以及控制酸雨的措施。

解答 酸雨又称湿性大气污染。大气中的二氧化硫和氮氧化物在高空遇到水蒸气，变成硫酸和硝酸雾等，随同雨雪降落，形成pH值小于5.5的酸性雨或雪，这就是酸雨。



大气中的二氧化碳或其他气体所起的作用像温室的玻璃一样。它允许太阳光照射进来，却把热量挡住，不让它以辐射的形式跑向大气层。被拦截的热量制造出“温室效应”，使地球逐渐变暖。

图5-7 温室好像玻璃房

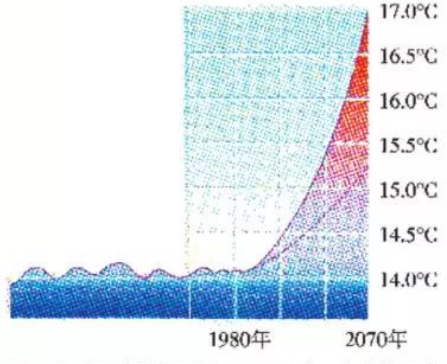


图5-8 据科学家预测，到2070年，地球的平均气温将明显升高

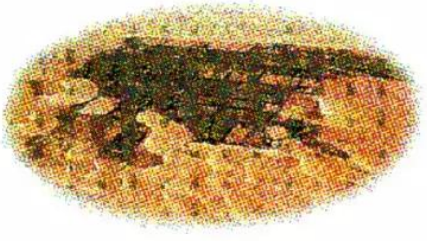


图5-9 温室效应使沙漠吞没农田

酸雨会造成森林退化(图 5-11),湖泊酸化,鱼类死亡,水生生物种群减少,农田土壤酸化、贫瘠,有毒重金属污染增强,粮食、蔬菜、瓜果大面积减产,建筑物和桥梁损坏,文物被严重侵蚀。酸雨还会刺激人的眼睛及皮肤,危害人体健康。

控制酸雨的根本途径是减少酸性物质向大气的排放。目前的控制措施包括:限制高硫煤的开采与使用,治理化工、冶金、建材等行业的二氧化硫污染,重点要治理火力发电厂的二氧化硫排放。

防止酸雨形成的有效手段是使用干净能源,发展水电和核电,采用脱硫、除尘新技术,发展内燃机代用燃料,安装机动车尾气催化净化器,培植耐酸雨农作物和树种等。

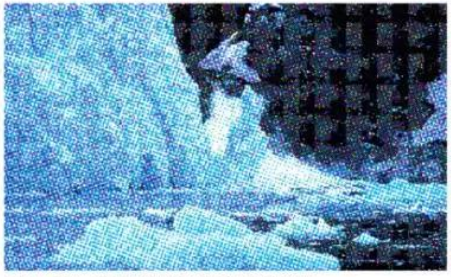


图 5-10 温室效应使极地冰山融化



图 5-11 酸雨对森林的破坏

信息链接

世界六大污染事故

20世纪中,世界上发生了许多起突发性的污染事故,其中最严重的是以下六大污染事故。

意大利塞维索化学污染事故

1976 年 7 月,意大利塞维索一家化工厂爆炸,使剧毒化学品二噁英扩散,许多人中毒。事隔多年后,当地的畸形儿出生率大为增加。

美国三哩岛核电站泄漏事故

1979 年 3 月,美国宾夕法尼亚州三哩岛核电站反应堆元件受损,放射性裂变物质泄漏,使周围 80 km 内的约 200 万人口处于放射物污染的危险之中。人们停工停课,纷纷撤离,一片混乱。

墨西哥液化气爆炸事件

1984 年 11 月,墨西哥城郊一家石油公司液化气站的 54 座储气罐几乎全部爆炸起火,对周围环境造成严重危害,死亡上千人,50 万居民逃难。

印度博帕尔毒气泄漏事故

1984 年 12 月,美国联合碳化物公司设在印度博帕尔市的农药厂剧毒气体外泄,使 2500 人死亡,20 万人受害,其中 5 万人可能双目失明。

前苏联切尔诺贝利核电站事故

1986 年 4 月,苏联基辅地区切尔诺贝利核电站 4 号反应堆爆炸起火,放射性物质外泄,上万人受到伤害,同时其他国家遭受放射性尘埃的污染,中国的北京上空也检测到这样的尘埃。

德国莱茵河污染事故

1986 年 11 月,瑞士巴塞尔桑多兹化学公司的仓库起火,大量有毒化学品随灭火水流进莱茵河,使靠近事故地段河流生物绝迹,成为死河。160 km 处鲫鱼和大多数鱼类死亡,500 km 处的井水不能饮用,德国和荷兰被迫向居民定量供水,德国几十年来为治理莱茵河投资的 210 亿美元也付诸东流。

STS

空气的质量指标



空气质量级别	污染物指数	对健康影响的评论
	500	
六级	400	污染物浓度达到这样的危险水平时，所有人都应该呆在室内，减少体力活动。
	300	污染物浓度达到这种级不利于健康的水平时，任何人都应避免户外活动，敏感的人，特别是有心脏病或肺病的人，应呆在室内。
四级	200	污染物浓度达到这种级不利于健康的水平时，所有的人，包括健康成人和儿童，都应避免剧烈的户外活动，敏感的人，特别是有心脏病或肺病的人，应呆在室内。
三级	138	污染物浓度达到这种不利于健康的水平时，任何人，包括健康成人和儿童，都应避免长时间剧烈的户外活动，敏感的人，特别是有心脏病或肺病的人，应避免户外活动。
	100	污染物达到这种不利于健康的水平时，敏感的人，如有心脏病或肺病的人，应减少户外活动。
二级	50	良
一级	0	优

家庭作业与活动

1. 调查一下当地主要使用哪些能源，并了解这些能源的储量和开发情况。
2. 什么叫温室效应？温室效应有哪些危害？如何控制温室效应的增强？
3. 什么叫酸雨？酸雨有哪些危害？如何防治酸雨？
4. 向气象部门了解本地区气候变化的情况及其原因。
5. 取两只大小相同的广口玻璃瓶，一只充满干燥洁净的空气，另一只有少量水，利用你学过的化学知识，使瓶中充满二氧化碳和水蒸气，盖好瓶盖，各插入一支温度计，并使它们密封。把它们一起放在太阳光下，1小时以后，观测它们的温度有什么差异，分析造成差异的原因。

5.2

能源开发与环境保护

能源的大量开发和利用，给我们带来了许多值得引起重视的问题，如经济高速发展与能源资源严重短缺的矛盾，有限的能源与能源利用效率较低的矛盾，能源造福于人类与污染环境的矛盾等等。这些问题影响着人类的生活和生产，制约着社会的更快进步和发展。为此，各国的政府和科学家正在积极努力，按照“高效、接近零排放、经济上可推广”的原则，寻求解决问题的对策。

能源危机和开发新能源

树立能源危机的意识

地球储存的煤、石油、天然气三大“初级能源”，在过去几百年里维系着人类社会和经济的发展。然而，随着人口数量的增长和社会的进步，世界能量消耗量以每年约 2.7% 的速度增长。人们在享用这些资源的同时，也使这些资源的储存量逐渐减少。据估算，到 21 世纪后期将首先面临石油资源枯竭的危机(图 5-12)。

中国能源资源的现状是：人均能源占有量偏低，人均煤炭可采储量为世界平均值的 1/2，人均石油可采储量为世界平均值的 1/10；优质能源资源(石油、天然气等)严重短缺，能源结构不合理；相当长的时间内还得以煤为主，这将给环境和交通运输带来巨大的压力。

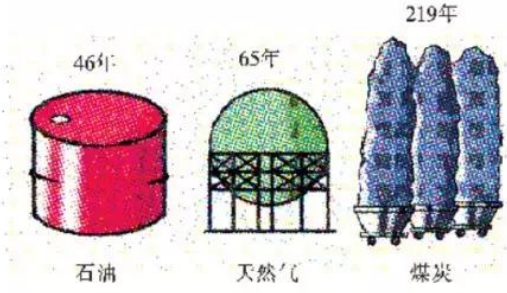


图 5-12　化石燃料目前估计的使用年限

研究和开发新的能源资源

研究和开发新的能源资源，是人类当前面临的重大任务。研究表明，对核能和氢能的开发有重大的价值，核能和氢能有可能在未来替代石油，成为人类的第四代能源。

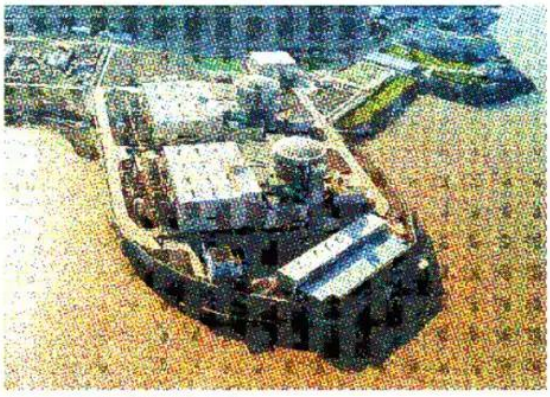


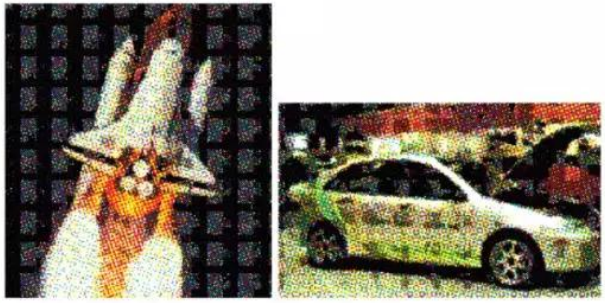
图 5-13 秦山核电站全景

核能 核能的最大优点是无大气污染，集中生产量大，可以替代煤炭、石油和天然气等燃料。自 1954 年世界上第一座原子能电站建成以来，全世界已有 20 多个国家建成了 400 多个核电站，它们的发电量占全世界总发电量的 16%。我国于 1991 年建成了自行设计的第一座核电站——浙江秦山核电站(图 5-13)，后又建成了广东大亚湾核电站。目前，一批新的核电站正在建设之中。到 2020 年，我国核电装机容量将达到 3.6×10^7 kW。

氢能 氢的来源很丰富。据估计，氢构成了宇宙质量的 75%。氢的热值大，为 1.21×10^8 J/kg，是汽油热值的 2.8 倍。氢的燃烧产物是水，污染极小，因此氢能是一种前景广阔的清洁燃料。但是，制氢(如电解水)需消耗大量的能，成本很高，如何开发和利用氢能，是一个重大的技术课题。

发展可再生能源技术

可再生能源包括太阳能、生物质能、风能、地热能、海洋能等，其共同特点是储量大、清洁、可再生。但是，由于可再生能源受自然环境影响大、稳定性差，要利用它们，还有许多问题有待研究。从现实需求，以及从技术与经济可行性的角度看，生物质能和太阳能已经具备应用条件。



a 用液氢为燃料的航天飞机 b 燃料电池驱动的汽车

图 5-14 氢能的利用

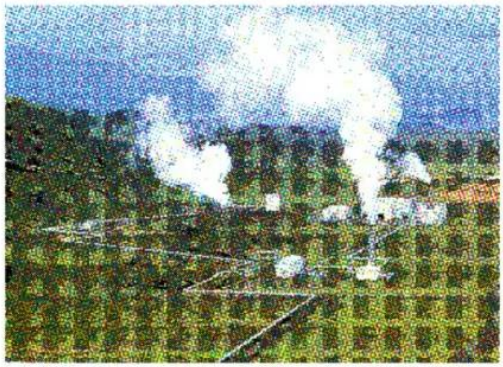


图 5-15　地热发电站



图 5-16　风力发电场

太阳能　太阳能的特点是巨大、清洁、取之不竭。太阳辐射到地球大气层的功率高达 1.73×10^{17} W，也就是说太阳每秒钟照射到地球上的能量就相当于 5×10^6 t 标准煤。

目前利用太阳能的技术主要有：(1)太阳能热利用技术，如太阳能热水器、太阳能聚焦高温加工、太阳灶等；(2)太阳能光电转换技术，即通过太阳能光电池把光能转换成电能；(3)光化学转换技术，如利用太阳能光化学电池电解水，产生氢气。

风能　风能是一种机械能。我国位于亚洲大陆东南，濒临太平洋，季风强盛，风能利用有很大潜力。据估算，全国风力资源的总储量为每年 1.6×10^9 kW。目前我国风力发电装机容量有 2.0×10^5 kW。

生物质能　生物质是指由光合作用产生的各种有机体，如薪柴、农林作物等。生物质能是太阳能以化学能贮存在生物中的一种能量。利用多种技术可把生物质转化成常规的固态、液态和气态燃料。例如，利用热化学转换技术，可把木材等废料通过气化炉加热转换成煤气，或者通过干馏将生物质变成煤气、焦油和木炭。利用生物转换技术，把粪便等生物质通过沼气池发酵生成沼气，沼气的主要成分是甲烷。沼气的应用在我国农村已有了较好的发展，工业沼气技术也已开始应用。

请查阅我国的风力资源以及风能的利用情况，讨论地热能的形成及潮汐能发电的原理。

高能耗和提高能源利用效率

能源的高消耗是对能源的极大浪费，科学家正在为提高能源

的利用效率而进行着不懈的努力。

开发能量转换新技术

传统的能量使用是将燃料的化学能转化成热能，再转换成机械能，然后变为电能。由于热机把热能转换成机械能的效率非常低，有用的热能只有25%—30%，大部分热能都散失掉了。因此，必须开发能量转换新技术。有希望取代热机的新技术是磁流体发电和燃料电池。磁流体发电的热电转换效率可达55%以上，燃料电池的化学能转换成电能的效率则高达75%以上。

煤的洁净利用技术

煤直接燃烧有很多缺点，如燃烧不完全，热能利用率低，造成大面积的环境污染等。而且煤的体积大、笨重，运输、储存、加工和使用都很不方便。

采用煤的洁净技术，可提高用煤发电的效率，并使煤成为一种安全、稳定、廉价的能源。

以制煤浆技术为例。先把煤块研磨成直径90 μm以下的极细微粒，然后通过浮选除去灰粉和有害杂质，再把它们同水按3:1的比例混合，最后加进一种表面活性剂，就制成了一种廉价而清洁的、胶体状的代油燃料——煤浆。煤浆的外观像油，燃烧起来也像油。它能稳定地着火燃烧，既保留了煤的燃烧特性，又具备了类似重油的液态燃料特点。煤浆是一种最现实的煤基流体燃料，也是一种制备相对简单、便于输送储存、安全可靠、低污染的新型清洁燃料。

先进的发电技术

普通发电厂的能源效率只有35%，高达65%的能源大部分以热的形式散发出去，白白地浪费了。联合热电技术就是将这部分热再用来发电或者为工厂和家庭供热，这样可使能源利用率提高到85%以上。

此外，先进的发电技术和装备、先进电机冷却技术、余热利用技术、高效大容量输电技术，以及将计算机引入能源管理系统等，都是有效提高能源利用效率的重要举措。

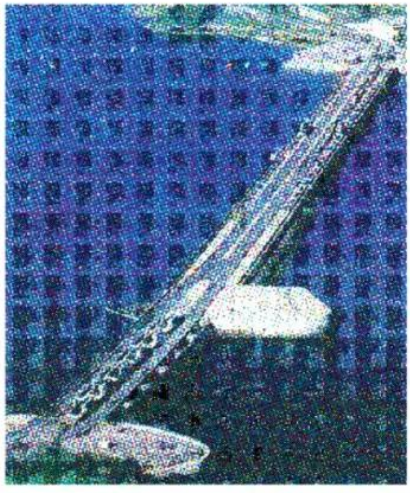


图5-17 潮汐发电站

环境污染和环境保护

为了营造一个天更蓝、地更绿、水更清、空气更洁净的环境，控制现有能源利用过程中的污染物排放，建立清洁高效的能量利用技术，已成为当务之急。科学家正在加紧研究环境能源技术，它主要解决以下几方面的问题。

城市生活垃圾问题

通过垃圾分选技术，使不同垃圾各尽其用。如有些垃圾能供热发电，有机易腐垃圾可转化为高品位有机肥料等。建造日处理数百吨城市生活垃圾的综合利用工业系统，实现城市生活垃圾的能源化、资源化和无害化综合利用，是现代化城市建设的一项重要指标。

汽车尾气污染问题

为了适应越来越严格的汽车尾气排放标准，减少城市中的大气污染，目前正在研制燃料电池电动车。如果汽车能以纯氢为燃料，就可以达到废气的“零”排放。我国在燃料电池材料、电池系统和电动汽车电气驱动系统的研究方面，取得了可喜的进展。



图 5-18　污水处理厂

环境污染的综合治理问题

建立污水处理厂(图 5-18)、垃圾处理场、废水和废气的封闭循环处理系统等，积极采用新科技，有效地做好环境保护。

STS

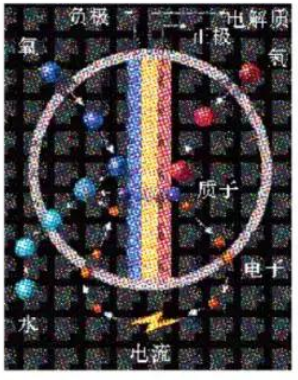


图 5-19　燃料电池工作原理图

几种新能源

燃料电池

燃料电池是将氢、天然气、煤气、甲醇、肼等燃料的化学能直接转换成电能的一种化学电源。

早在 1839 年，英国科学家格罗夫(W. R. Grove)就提出了氢氧燃料电池的原理。如图 5-19，它的主要部分是两个电极和电解液。在正极(燃料电极)，氢气在催化剂作用下被分析为氢离子(质子)和电子，其中氢离子通过电解液流到负极(氧气电极)，而电子不能通过电解液，只能留在正极，这样就在两电极之间形成了电势差。如果接通两电极，氢原子分析出的电子就会沿电路从正极流到负极，在那里同氢离子结合后，与氧气发生反应，生成水并释放出热量。

燃料电池构造简单，能量利用率高，工作稳定。理论上，应用于汽车的燃料电池可以把氢燃料能量的 60%—70%转化为动能。更引人注

意的是，用燃料电池发电时，不产生氮氧化物和硫化物，产生的二氧化碳也很少，不会增加光化学烟雾、酸雨的污染及温室效应的作用。

卫星太阳能发电

卫星太阳能发电就是将太阳能发电装置组装在卫星上进行发电。当卫星绕地球做同步旋转时，装在卫星上的太阳能电池直接将太阳能转换成电能，再通过卫星上的大功率微波发生器转换成微波电磁能，并用定向天线将微波能向设在地面近海或海岛上的微波接收站发射。地面接收站接收卫星发射来的微波能并将其转换为电能供用户使用(图 5-20)。

根据推测，卫星太阳能发电站可设计成容量达 $1.5\times10^6-2.0\times10^7$ kW 的规模，其最大容量可满足几十个百万以上人口的大城市的用电。

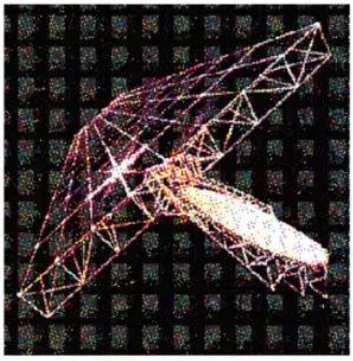


图 5-20 卫星太阳能发电示意图

天然气水合物

天然气水合物是天然气和水分子组成的一种固态结晶体，也称可燃冰合物，主要储藏在海平面以下 500—2000 m 的海底。在我国东海、南海已发现有大量的天然气水合物贮藏。

天然气水合物是在一定条件下，由气体或挥发性液体与水相互作用而形成的白色固体结晶物质，外观像冰。天然气水合物通常含有大量甲烷或其他烃类气体，因此极易燃烧，被称为“可燃烧的冰”，燃烧产生的能量比同等条件下的煤、石油、天然气所产生的要多得多，而且在燃烧以后几乎不产生任何残渣或废弃物，污染比煤、石油、天然气要小得多。

据估计，陆地上 20.7%和大洋底 90%的地区，具有形成天然气水合物的有利条件。绝大多数的天然气水合物分布在海洋底，其资源量是陆地上的 100 倍以上。研究表明，我国的南海海底可能有大量的天然气水合物资源。天然气水合物在地球上储量极大，是自然界中天然气的主要存在形式，因此可以满足人类长期的能源需求。它可能成为 21 世纪中后期的一种重要能源。

家庭作业与活动

1. 有人说，目前已出现了“能源危机”，你的看法怎样？
2. 提高能源利用效率有哪些办法？
3. 请具体说出环境污染的含义，并讨论：保护环境有什么意义？如何保护好环境？向有关工厂或居民调查当地环境污染的情况，了解减少这些污染的方法。
4. 太阳能是用之不竭的清洁能源。试分析开发和利用太阳能的前景。
5. 请你调查一下：本地已用上了哪些新能源？它们在所用能源中占了多大的比例？

5.3

节约能源、保护资源与可持续发展



图 6-21　把完好的地球交给孩子

1996年联合国环境署报告："在过去的 20 年里，全世界能源消耗增长了 50%，从现在到 2020 年，全球能源消耗还将比现在增长 50%到 100%，由此造成的温室效应气体排放会增加 45%到 90%，从而带来灾难性的后果。"

全世界的有识之士都在思考，他们以不同的语言表达了共同的思想——应该采取一切可能的措施，给子孙后代多留一点能源，让他们继我们之后有足够的时间完成开发新能源以替代传统能源的历史使命，让人类的文明永远辉煌。

节约能源与可持续发展

为了使经济得到可持续发展，一方面，在开发利用能源时，要做好环境保护工作；另一方面，在使用能源时，要千方百计地节约，提高利用效率。

由于在产业结构、经济体制、能源政策等方面的努力，过去 20 年，我国在能源领域取得了 GDP 翻两番而能源消费仅翻一番、能源利用效率大幅度提高，以及相当大的环境效益等方面的成就。1980 年至 2000 年期间中国 GDP 年平均增长率高达 9.7%，而相应的能源消费量年均仅增长 4.6%。在能源利用效率方面，我国的单位 GDP 能耗不断下降，每万元 GDP 的能耗从 1980 年的 4.28 t 标准煤下降到了 2000 年的 1.45 t 标准煤。

1981至 2002 年期间，我国由于节约和少用能源，累计减少二氧化碳排放约 7.7×10^8 t，减少二氧化硫排放 1.9×10^7 t 以上。自 20世纪 80 年代开始，我国已大力实施各种节能措施，并在广大农村地区推广适合当地特点的能源项目(沼气、小水电等)；同时开发和利用多种形式的新能源(太阳能、风能、地热能等)。近 10 多年来，这些措施带来了明显的效益，每年节约和少用常规商品能源 3×10^7 t 标准煤以上，相当于每年减少二氧化碳排放 2×10^7 t。

案例分析

案例 1 据报道，由于能源紧张，2004 年世界石油价格连创新高，每桶原油曾超过 50 美元。试讨论原油涨价对我们日常生活所产生的影响。

解答 不断上升的原油价格将影响到我们的吃穿住行。

服装价格可能有少许上涨。目前市场上大部分服装以合成面料为主，其中涤纶等面料所占的比例达到 70%左右，这些产品的价格都与原油价格有关。

洗衣业也将受到影响，这是因为洗衣粉、洗洁精等原材料有一半提炼自石油。

商品包装成本增高。聚丙烯的价格会上涨，导致塑料袋的出厂价格上涨。

汽车销售面临危机。原油上涨，汽油价格会同步上涨。“看一看油价走势，再决定买不买车，买什么车”，成了大多数打算买车人的共同想法。

请同学们做进一步的调查，并思考其原因和解决办法。

案例 2 请你估算一下，一辆汽车每行驶 100km 消耗的能量，相当于一个家庭多少天的用电量？怎样才能更有效地节约能量？（参考数据：小轿车的“100 km 耗油量”约 7 L，汽油的热值为 4.7×10^7 J / kg，电视机功率约 60 W，电灯功率约 40 W，洗衣机功率约 150 W。）

分析 建议先做两项工作：一是访问汽车驾驶员，向他了解汽车的“100 km 耗油量”（同时向他请教节约汽油的技巧），可多访问几位驾驶员，取得多种汽车的“100 km 耗油量”，取其平均值，作为估算依据；二是向家长了解你家的月平均用电量，再算得日平均用电量，然后进行有关的计算，同时归纳有哪些可推广的节能措施。

请你自己完成这个案例。

保护自然资源与可持续发展

自然资源是指地球能提供的为人类衣、食、住、行、医所需的物质原料。人类必须珍惜的自然资源主要有以下四类：

(1) 三大生命要素——空气、水和土壤；

(2) 六种自然资源——矿产、森林、淡水、土地、生物物种、化石燃料(石油、煤炭和天然气)；

(3) 两类生态系统——陆地生态系统(如森林、草原、荒野、灌丛等)与水生生态系统(如湿地、湖泊、河流、海洋等)；

(4) 多样景观资源，如山势、水流、本土动植物种类、自然与文化历史遗迹等。

当前，为保护地球上有限的自然资源，人们已采取了很多措施。例如，为保护地球上紧缺的淡水资源，要求公众应从三方面做起：一、节约用水、一水多用；二、少用化学合成剂；三、收集利用雨水。

又如，为保护好我们的土地，当前处理垃圾的国际潮流是动员公众尽量从三方面努力：一、减少浪费；二、物尽其用；三、废物回收。

请调查了解你所在地区的自然资源利用和保护的情况，在班上交流，谈谈你对保护自然资源的认识。

中国上古时代的《诗经》中有"怀柔百神，及河乔岳"一句，意思是：善待百神，也要善待河流高山。

西周时期颁布的《伐崇令》规定："毋填井，毋伐树，毋动六畜，有不如令者，死无赦。"这是中国古代较早的保护水源、森林和动物的法令，其惩处措施极为严厉。

信息窗

可持续发展战略

可持续发展战略是于1992年6月在巴西里约热内卢召开的"联合国环境与发展大会"上提出的。"可持续发展"(sustainable development)已成为各国公民都应当了解的常识。可持续发展的社会是一种"既能满足当代人的需要，又不对后代人满足其生存能力构成危害"的新型社会发展模式。"可持续发展"关注的方面有生态可持续性、社会可持续性、文化可持续性。

可持续发展战略的九项原则是：

(1) 建立一个具有可持续性的社会；

(2) 尊重和保护生活社区；

(3) 改善人类生活的质量；

(4) 保护地球的生命力和多样性；

(5) 维持在地球的承载能力之内；

(6) 改变个人的态度和生活习惯；

(7) 使公民团体能够关心自己的环境；

(8) 建立协调发展与保护的国家网络；

(9) 创建全球性联盟。

"可持续发展"的理念要求公民了解和关心下列问题：

- 哪些是地球上最基本的生存条件
- 哪些是地球上最重要的自然资源
- 如何能够持续利用地球资源
- 如何能够尽量减少对地球不可再生资源的消耗
- 如何监测环境受损害的信号
- 如何医治地球环境目前的创伤

"可持续发展"的理念是要我们汲取在上个世纪地球环境被很大地破坏的教训，帮助地球环境得到恢复，使我们能把地完好地传给我们的孩子。

STS

环境保护标志

中国环境标志图形由中心的青山、绿水、太阳及周围的十个环组成。圆形的中心结构表示人类赖以生存的环境，外圈的十个环紧密结合，环环紧扣，表示公众参与，共同保护环境；同时十个环的“环”字与环境的“环”同字，其寓意为“全民联系起来，共同保护人类赖以生存的环境”。

请同学们查找有关资料，再列举一些环境保护方面的标志，弄清它们的具体含义。



图 5-22 中国环境标志

家庭作业与活动

1. 论述节约能源的意义。调查家庭或学校的节能经验，提出你的节能建议。
2. 向公交车辆的驾驶员了解每天的载客数和耗油量，了解如何从节能的角度出发合理安排公交线路和停靠站，如何运用驾驶技术来节省油耗，以及公交公司对驾驶员在节能方面有哪些考核措施。
3. 什么叫自然资源？我们必须珍惜哪些自然资源？采取哪些举措来保护自然资源？

课题研究

合理运输货物的可行性方案研究

调查本地运往外地的主要货物，在综合考虑降低能耗、方便运输、减少污染、保证安全、降低费用、减少交通拥挤等因素的基础上，讨论并提出运输这些货物的可行性方案，并对该方案进行评价。

5.x

第 5 章家庭作业与活动

1. 图 5-23 是一幅“能源分类相关图”。以下四组能源中，全部符合图中阴影部分的是

A. 煤炭、石油、沼气

B. 水能、潮汐能、天然气

C. 太阳能、风能、生物能

D. 地热能、海洋能、核能



图 5-23

2. 若有条件，请调查一个发电厂在正常情况下的发电量、每天耗煤量、所用煤的热值，并据此计算该发电厂把煤的化学能最终转化为电能的效率。

3. 备一些 pH 试纸，在你所到之处（如家乡的城市和农村，外地的城市和风景区），凡遇下雨，就用这些 pH 试纸测定雨水的酸度，连同测量时间、地点及所了解到的当地工业发展状况，一起记录下来，并据此写出调查报告或论文。适当的时候可在班上举行一次关于酸雨的研讨会。

4. 某市有 20 万台空调机，每台空调机在夏季平均使用60天，每天耗电 8 kW·h。为了节约能源，该市政府建议大家都把室内设定温度提高 1℃，这样每台空调机每天可节省 6%的电能。那么这样做能使该市节省多少电能？已知标准煤的热值是 2.92×10^7J/kg，发电厂的发电效率是 30%。请计算一下：这项节能建议的实现能为我们后辈留下多少吨标准煤？

5. 请阅读 2004 年 11 月 4 日某报的报道（摘要）：

电荒、地荒、水荒的警钟接连在长三角上空敲响。这使得长三角地区城市的负责人深刻反省，“必须站在长三角全面、协调、可持续发展的全局高度，来统筹全地区的发展”。

日前在长江三角洲 16 个城市峰会上，有关领导在总结一年来的工作情况时说，长三角总的形势虽好，但隐忧凸显。今年以来，我国最大的区域电网——华东电网饱受缺电之苦。仅 1 到 5 月份，全网拉限电总量就超过 56 亿千瓦时，接近去年全年拉限电总量 60 亿千瓦时的水平，达到历史之最。

“河网纵横”、“湖泊星罗棋布”曾是描述“鱼米之乡”长三角典型地貌的用语。但眼下，在卫星遥感照片中，“星罗棋布”的不再是湖泊而是开发区，本是土地丰饶的长三角地区已出现“地荒”。

更令人震惊的是，河网纵横的长三角地区竟然因为水质型缺水而跻成“水荒”。由于工业排污日益严重，长三角的水源不断恶化，一些城市出现了工业用水和居民饮用水吃紧的局面。

你阅读了这一报道后，有什么想法？请与同学商讨、交流后作出回答。

6. 访问下列网站，了解有关能源、环境保护、可持续发展等方面的信息，自拟一个专题，整理一份资料，在班上交流。

中国能源网：http://www.china5e.com

中国环保网：http://www.ep.net.cn

中国清洁生产：http://www.chinacp.com

总结与评价　课题研究成果报告会

亲爱的同学：

祝贺你即将完成物理 3-3 的学习。在这个选修模块中，你和你的同学从宏观和微观两个角度认识了热现象的规律，经受了困难的考验，也享受了成功的喜悦。在学完本书后，你一定有许多新的感受，体会到了许多新的研究方法，那么，就让我们开一个“课题研究成果报告会”吧！

你可以把你平时做过的最满意的课题拿出来，再做进一步的研究，取得更有意义的成果，到这个报告会上去展示；你也可以从下面的研究课题示例中，选择你感兴趣的课题，独立完成或与同学合作完成。当然，你还可以自选其他课题进行研究。

在这个报告会上，也许没有宏篇大论，也许没有什么重大的发明，但这里展示的成果，铭刻着你们的勤奋，凝聚着你们的心血……这里，最可贵的是真实！

简单就是美丽，巧妙就是智慧！

这个“课题研究成果报告会”，将让你的智慧放出灿烂的火花，让你的才智得到充分的展示！

研究课题示例

天气对人类生活和生产的影响

记录电视台或广播电台天气预报的主要指标，了解这些指标的意义。去图书馆或上网查找湿度跟生活和生产的联系实例，讨论气候对人类生活和生产的影响。写出这方面的小论文，并与同学们在班上相互交流评价。

肥皂水与清水的表面张力比较研究

请你设计一个实验，比较肥皂水与清水的表面张力，并粗略地研究表面张力与哪些因素有关；具体地做一下这个实验，并写出课题研究报告，在同学间相互交流评价。

关于新材料的应用研究

你可通过查阅资料、上网搜索、实地调查等方式，了解材料科学技术的有关知识及其应用，体会它们的发展对人类生活和社会发展的影响。自选一个题目，整理一份情况报告资料，在班上交流，并作出相应的评价。

关于新材料信息的网址：

1. 中国材料网：http://www.materials.gov.cn
2. 新材料在线：http://www.materialsone.com
3. 新材料产业网：http://www.materials.net.cn

关于能源开发和利用的调查

结合本地实际情况，调查在能源开发和利用中出现了哪些值得研究的问题，应当采取哪些有效的对策。请说说你的见解。（写一篇调查报告，在班上交流评价。）

关于“环境保护从我做起”的实践活动

环境保护已经成为全人类共同关注的重要问题，保护环境人人有责。为了具体体验环境保护工作，可在学校或社区里，成立环保小组，倡导绿色学校和绿色社区，开展环保兴趣小组活动，交流绿色信息，回收和利用废旧物品，举办绿色信息报，进行环境问题小研究，组织课外活动等，养成“环境保护从我做起”的良好习惯。实践一段时间后，把你的经验体会总结出来，告诉大家。

评价表

课题名称：

姓名：　　完成日期：

合作者：

1. 课题设计思路：

2. 课题研究过程：

3. 收集的主要资料或证据：

4. 分析和论证：

5. 研究成果和结论：

6. 自我评价：

我在课题研究中的表现：　　我对小组研究的贡献是：　　我擅长的是：

我在研究中遇到的困难是：　　我在这些方面应该做得更好：

自我评价等级（在评价的等级上画圈）：

A级（优秀）　B级（良好）　C级（合格）　D级（低于标准）

7. 小组评语：

建议从成果的科学性、创造性、实践性，以及从参与课题研究的热情和态度、克服困难的勇气、团队合作精神等方面进行评价。

8. 老师评语：

建议从成果的科学性、创造性、实践性，以及从参与课题研究的热情和态度、克服困难的勇气、团队合作精神等方面进行评价。

主　　编　束炳如　何润伟
本册主编　谢步时　王溢然
编写人员（按姓氏笔画为序）
王溢然　李金生
汪乾荣　谢步时

后　记

本书根据《基础教育课程改革纲要（试行）》的精神，按照《普通高中物理课程标准（实验）》的要求，力求体现课程改革的理念，贯彻和完成《标准》所规定的多方面教育任务，全面推进素质教育。

在本书的编写过程中，得到了许多专家、学者、教学研究人员和广大教师的帮助和支持。沈永昭教授审阅了全书书稿。上海科技教育出版社的编辑朱惠霖、汤世梁、李志棣和有关工作人员为本书出版在组织协调、编辑加工、美术设计、排版印刷等方面做了大量的工作。特别是全国中小学教材审定委员会的委员们严格把关，对我们的送审本提出了许多宝贵的修改意见和具体修改细节。在此一并表示诚挚的谢意。

编写基于模块结构的普通高中物理教科书，是一个全新的课题。我们编写组全体成员认真学习，潜心研究，分工协作，充分发扬团队精神，终于可以把本书呈献给大家。但由于水平有限，仍不免有错误和不当之处。竭诚希望实验区的师生和广大读者提出批评和建议。

编者
2005年6月