

经全国中小学教材审定委员会
2005年初审通过

普通高中课程标准实验教科书

物理

选修 3-3

人民教育出版社 课程教材研究所 编著
物理课程教材研究开发中心

普通高中课程标准实验教科书

物理

选修 3-3

人民教育出版社 课程教材研究所 编著
物理课程教材研究开发中心

目 录

第七章 分子动理论	1	
1 物体是由大量分子组成的	2	
2 分子的热运动	5	
3 分子间的作用力	8	
4 温度和温标	10	
5 内能	14	
第八章 气体	17	
1 气体的等温变化	18	
2 气体的等容变化和等压变化	21	
3 理想气体的状态方程	23	
4 气体热现象的微观意义	26	
第九章 物态和物态变化	31	
1 固体	32	
2 液体	37	
3 饱和汽与饱和汽压	42	
4 物态变化中的能量交换	46	
第十章 热力学定律	50	
1 功和内能	51	
2 热和内能	53	
3 热力学第一定律 能量守恒定律	55	
4 热力学第二定律	58	
5 热力学第二定律的微观解释	62	
6 能源和可持续发展	68	
课题研究 如何提高煤气灶的烧水效率	73	

热学这一门科学起源于人类对于热与冷现象的本质的追求……（这）可能是人类最初对自然法则的追求之一。

——王竹溪^①

第七章

分子动理论



暮春时节，金黄的油菜花铺满了原野。微风拂过，飘来阵阵花香。你有没有想过，为什么能够闻到这沁人心脾的香味呢？古希腊学者德谟克利特早就对此做出了解释，他认为这是由于花的原子飘到了人们鼻子里。德谟克利特认为“只有原子和虚空是真实的”。

古人的原子论仅限于思辨的范畴，没有尝试做出实验验证。随着科技的发展，特别是显微镜的发明，人们对微观世界的观察越来越深入，原子论的观点也逐渐为人们所接受。到了1982年，科学家制成了扫描隧道显微镜，使人类第一次实际观察到原子的排列。

^① 王竹溪（1911—1983），中国物理学家，中国科学院学部委员（现称院士），北京大学教授。

1

物体是由大量分子组成的

我们在初中已经学过，物体是由大量分子组成的^①。一个 $1\ \mu\text{m}$ 大小的水珠，尺寸与细菌差不多，其中分子的个数竟比地球上人口的总数还多上好几倍！

我们可以通过什么途径知道分子的大小呢？

实验

用油膜法估测分子的大小

1. 怎样估算油酸分子的大小？

把很小的1滴油酸滴在水面上，水面上会形成一块油酸薄膜，薄膜是由单层的油酸分子组成的^②。尽管油酸分子有着复杂的结构和形状，但在估测其大小的数量级时，可以把它简化为球形，示意图如图7.1-1所示。测出油膜的厚度 d ，就是油酸分子的直径。



图7.1-1 水面上单分子油膜的示意图

油膜的厚度等于这一小滴油酸的体积与它在水面上摊开的面积之比。因此，要估测油酸分子的直径，就要解决两个问题：一是获得很小的一小滴油酸并测出其体积，二是测量这滴油酸在水面上形成的油膜面积。

2. 如何获得很小的1滴油酸？怎样测量它的体积？

请老师配制一定浓度的油酸酒精溶液，例如可以向1 mL油酸中加酒精，直至总量达到500 mL。

各实验小组用注射器吸取这样的油酸酒精溶液，把它一滴一滴地滴入小量筒中，记下液滴的总滴数和它们的总体积，这样便知道1滴溶液的体积了。例如，100滴溶液的体积是1 mL，1滴体积就是 10^{-2} mL。

根据上面的数据可以计算出1滴溶液中所含纯油酸的体积。例如，上述例子中1滴溶液含纯油酸 2×10^{-5} mL。

分子并不是球形的，但这里把它们当做球形处理，是一种估算的方法，估算在物理学的学习和研究中都是很有用的。

^① 在研究物质的化学性质时，我们认为组成物质的微粒是分子、原子或者离子。但是，在热学中，我们研究的是它们运动的规律，不必区分它们在化学变化中所起的不同作用，因此，本书把它们统称为分子。

^② 油酸的分子式为 $\text{C}_{17}\text{H}_{33}\text{COOH}$ ，它的一部分是羧基 $-\text{COOH}$ ，对水有很强的亲和力；另一部分 $\text{C}_{17}\text{H}_{33}-$ 对水没有亲和力而要露出水面。因此油酸分子会一个个地直立在水面上形成单分子油膜。

如果把1滴这样的溶液滴在水面，溶液中的酒精将溶于水并很快挥发，液面上的油膜便是这滴溶液中的纯油酸形成的。

3. 如何测量油膜的面积？

实验中的油酸薄膜是无色透明的，怎样才能看清它？

先往边长30~40 cm的浅盘里倒入约2 cm深的水，然后将痱子粉或细石膏粉均匀地撒在水面上。

用注射器往水面上滴1滴油酸酒精溶液，油酸立即在水面散开，形成一块薄膜，薄膜上没有痱子粉，可以清楚地看出它的轮廓，如图7.1-2。

待油酸薄膜形状稳定后，将事先准备好的玻璃板放在浅盘上，在玻璃板上描下油酸膜的形状。

将画有油酸膜轮廓的玻璃板放在坐标纸上，计算轮廓范围内正方形的个数，不足半个的舍去，多于半个的算一个。把正方形的个数乘以单个正方形的面积就得到油膜的面积。

这样，根据1滴油酸的体积 V 和油膜面积 S 就可以算出油膜厚度 $d = \frac{V}{S}$ ，即油酸分子的大小。



图7.1-2 水面上形成一块油膜

分子的大小 把分子看做小球，这是分子的简化模型。实际上，分子有着复杂的内部结构，并不是小球。我们通常说分子的直径有多大，只是对分子大小的一种粗略描述。知道了分子尺度的数量级，能使我们了解分子是多么微小。油酸分子大小的数量级是 10^{-10} m。

测定分子大小的方法有许多种。尽管用不同方法测出的结果有差异，但数量级是一致的。测量结果表明，除了一些有机物质的大分子外，多数分子尺寸的数量级为 10^{-10} m。

分子如此微小，不但用肉眼无法直接看到它们，就是用高倍的光学显微镜也看不到。直至1982年，人们研制了能放大几亿倍的扫描隧道显微镜^①，才观察到物质表面原子的排列，使人类第一次实际看到单个原子。图7.1-3是我国科学家用扫描隧道显微镜拍摄的石墨表面原子，图中每个亮斑都是一个碳原子。



图7.1-3 用扫描隧道显微镜拍摄的石墨表面原子照片

阿伏加德罗常数 我们在化学课中学过，1 mol的任何物质都含有相同的粒子数，这个数量用阿伏加德罗常数 (Avogadro constant) 表示。

^①由于发明了扫描隧道显微镜，德国物理学家宾尼希(G. Binnig)和瑞士物理学家罗泽尔(H. Rohrer)共同获得1986年诺贝尔物理学奖。

思考与讨论

以水分子为例，知道了分子的大小，不难估算阿伏加德罗常数。

1. 已知每个水分子的直径是 $4 \times 10^{-10} \text{ m}$ ，每个水分子的体积约为多少？
 2. 我们还知道水的摩尔体积是 $1.8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{mol}$ 。如果水分子是一个挨一个地排列的，那么 1 mol 水所含的水分子数是多少？
- 把你的估算结果与化学课本中的阿伏加德罗常数相比较。

为了得到更精确的阿伏加德罗常数，科学工作者不断地用各种方法测量它。1986年利用 X 射线测得的阿伏加德罗常数是

$$N_A = 6.022\ 136\ 7 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

通常可取

$$N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

在粗略计算中，甚至可取

$$N_A = 6.0 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

阿伏加德罗常数是一个重要的常数。它把摩尔质量、摩尔体积这些宏观物理量与分子质量、分子大小等微观物理量联系起来，物理学中定量研究热现象时经常用到它。

问题与练习

1. 把一片很薄的均匀薄膜放在盐水中，把盐水密度调节为 $1.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 时薄膜能在盐水中悬浮。用天平测出尺寸为 $10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 的这种薄膜的质量是 36 g ，请计算这种薄膜的厚度。
2. 在做“用油膜法估测分子的大小”实验时，每 10^4 mL 油酸酒精溶液中有纯油酸 6 mL 。用注射器测得 75 滴这样的溶液为 1 mL 。把 1 滴这样的溶液滴入盛水的浅盘里，把玻璃板盖在浅盘上并描画出油酸膜轮廓，如图 7.1-4 所示。图中正方形小方格的边长为 1 cm 。
 - (1) 1 滴油酸酒精溶液中含有纯油酸的体积是多少？
 - (2) 油酸膜的面积是多少？
 - (3) 按以上数据，估算油酸分子的大小。
3. 把铜分子看成球形，试估算铜分子的直径。已知铜的密度为 $8.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，铜的摩尔质量为 $6.4 \times 10^{-2} \text{ kg/mol}$ 。
4. 在标准状态下，氧气分子之间的平均距离是多少？已知氧气的摩尔质量为 $3.2 \times 10^{-2} \text{ kg/mol}$ ， 1 mol 气体处于标准状态时的体积是 $2.24 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ 。

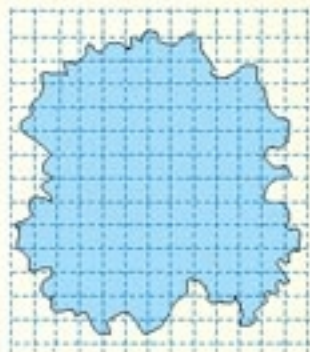


图 7.1-4

2

分子的热运动

一切物质的分子都在不停地做无规则的运动，这是我们在初中已经学过的知识。本节我们通过具体的实验证据来说明这个结论。

做一做

1. 在广口瓶中滴几滴溴，它会逐渐蒸发，变为气体。几分钟后观察瓶中气体的颜色。
2. 在烧杯中盛多半杯清水，然后用长颈漏斗慢慢地把蓝色硫酸铜溶液注入，使它留在杯底，不要搅动液体。几十分钟后观察两种液体分界面的变化。



图 7.2-1 溴蒸汽的扩散



图 7.2-2 液体的扩散

扩散现象 从实验和生活现象中我们都会发现，不同物质能够彼此进入对方。物理学把这类现象叫做扩散（diffusion）。

扩散现象并不是外界作用（例如对流、重力作用等）引起的，也不是化学反应的结果，而是由物质分子的无规则运动产生的。图 7.2-3 中，酱油中的色素扩散到了鸡蛋里面，这是人力无法阻挡的。又如，把金片和铅片压在一起，不管金片放在上面还是放在下面，金都会扩散到铅中，铅也会扩散到金中。扩散现象是物质分子永不停息地做无规则运动的证明。



图 7.2-3 酱油在蛋清中的扩散

扩散现象在科学技术中有很多应用。生产半导体器件时，需要在纯净半导体材料中掺入其他元素，这就是在高温条件下通过分子的扩散来完成的。

布朗运动 19 世纪初，一些人观察到，悬浮在液体中的小颗粒总在不地运动。1827 年，英国植物学家布朗（R. Brown, 1773—1858）首先在显微镜下研究了这种运动。下面我们做一个类似的实验。

实验

如图7.2-4,把墨汁用水稀释后取出一滴放在高倍显微镜下观察,可以看到悬浮在液体中的小炭粒在不停地做无规则运动。

在显微镜下追踪一个小炭粒的运动,每隔30 s把炭粒的位置记录下来,然后用直线把这些位置按时间顺序依次连接起来,就得到类似图7.2-5所示的微粒运动的位置连线。可以看出,微粒的运动是无规则的。

实际上,就是在短短的30 s内,微粒的运动也是极不规则的。

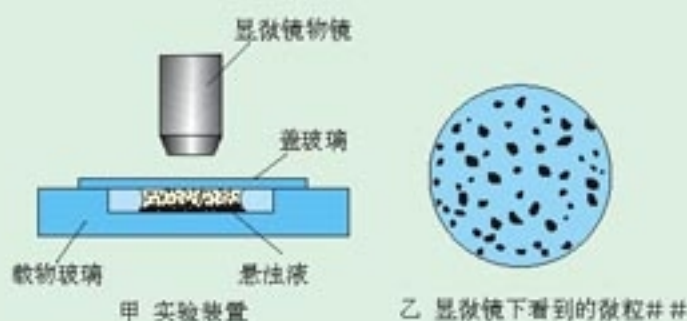


图 7.2-4 实验装置示意图



图 7.2-5 显微镜下看到的三颗微粒运动位置的连线

当时布朗观察的是悬浮在水中的花粉。他起初认为,花粉的运动不是外界因素引起的,而是花粉自发的运动。

是不是因为植物有生命才产生了这样的运动? 布朗用当时保存了上百年的植物标本,取其微粒进行实验,他还用了一些没有生命的无机物粉末进行实验。结果是,不管哪一种微粒,只要足够小,就会发生这种运动;微粒越小,运动就越明显。这说明微小颗粒的运动不是生命现象。后人把悬浮微粒的这种无规则运动叫做布朗运动 (Brownian motion)。

布朗运动是怎样产生的? 在显微镜下看起来连成一片的液体,实际上是由许许多多分子组成的。液体分子不停地做无规则运动,不断地撞击微粒。图7.2-6描绘了一颗微粒受到周围液体分子撞击的情景。悬浮的微粒足够小时,来自各个方向的液体分子撞击作用的不平衡性便表现出来了。在某一瞬间,微粒在某个方向受到的撞击作用较强;在下一瞬间,微粒受到另一方向的撞击作用较强,这样,就引起了微粒的无规则运动。

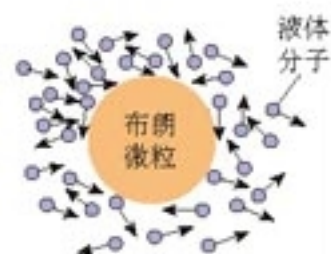


图 7.2-6 微粒很小时,分子沿各方向对它的撞击不平衡

悬浮在液体中的微粒越小,在某一瞬间跟它相撞的液体分子数越少,撞击作用的不平衡性就表现得越明显,因而布朗运动越明显。如果悬浮在液体中的微粒很大,在某一瞬间跟它相撞的分子数很多,各个方向的撞击作用接近平衡,这时就很难观察到布朗运动了。

我们无法直接看见分子的无规则运动。悬浮微粒的无规则运动并不是分子的运动，但是微粒运动的无规则性，间接地反映了液体分子运动的无规则性。

说—说

图 7.2-5 是法国物理学家佩兰 (J. B. Perrin) 在 1908 年研究布朗运动时对三个运动微粒位置变化的真实记录。根据这个实验事实，你能不能否定布朗运动是由外界因素（例如振动、对流等）引起的说法？

热运动 在扩散现象中，我们会发现，温度越高，扩散得越快。观察布朗运动时也会发现，温度越高，悬浮微粒的运动就越明显。这些事实表明，分子的无规则运动与温度有关系，温度越高，这种运动越激烈。因此，我们把分子永不停息的无规则运动叫做热运动 (thermal motion)。

问题与练习

1. 请你通过一个日常生活中的扩散现象来说明：温度越高，分子运动越激烈。
2. 以下关于布朗运动的说法是否正确？说明道理。
 - (1) 布朗运动就是分子的无规则运动。
 - (2) 布朗运动证明，组成固体小颗粒的分子在做无规则运动。
 - (3) 一锅水中撒一点胡椒粉，加热时发现水中的胡椒粉在翻滚。这说明温度越高布朗运动越激烈。
 - (4) 在显微镜下可以观察到煤油中小粒灰尘的布朗运动，这说明煤油分子在做无规则运动。
3. 小张在显微镜下观察水中悬浮的细微粉笔末的运动。他把小颗粒每隔一定时间的位置记录在坐标纸上 (图 7.2-7)，于是得出结论：固体小颗粒的无规则运动证明水分子的运动是无规则的。小李不同意小张的结论，他认为：“小颗粒沿着笔直的折线运动，说明水分子在短时间内的运动是规则的，否则小颗粒怎么会沿直线运动？”对此，请说说你的看法。

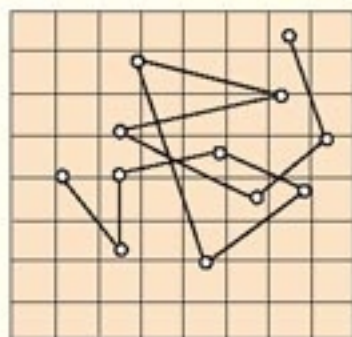


图 7.2-7 小张的观测记录

3

分子间的作用力

演示

取一枝长约 1 m 的玻璃管，注入半管清水，再注入酒精，使液面几乎达到管口。上下几次颠倒玻璃管，观察管中液体体积的变化。
这个实验说明了什么？

分子间的作用力 气体很容易被压缩，说明气体分子之间存在着很大的空隙。水和酒精混合后总体积会减小，说明液体分子之间存在着空隙。压在一起的金片和铅片，各自的分子能扩散到对方的内部，说明固体分子之间也存在着空隙。

分子间虽然有空隙，大量分子却能聚集在一起形成固体或液体，说明分子之间存在着引力。用力拉伸物体，物体内部会产生反抗拉伸的弹力，说明分子间存在着引力。把两块纯净的铅压紧，它们会“粘”在一起，甚至下面吊一个重物也不能把它们拉开，这也说明分子间存在引力。

分子间有空隙，但是用力压缩物体，物体内部会产生反抗压缩的弹力，这说明分子之间还存在着斥力。

深入的研究表明，两个邻近的分子之间的确同时存在着引力和斥力，引力和斥力的大小都跟分子间的距离有关，它们随分子间距离变化的关系如图 7.3-2 所示。图中的横坐标 r 表示两个分子间的距离，纵坐标 $F_{斥}$ 和 $F_{引}$ 的绝对值分别表示其中一个分子所受斥力和引力的大小。图中上面的曲线表示 $F_{斥}$ 随 r 变化的关系，下面的曲线表示 $F_{引}$ 随 r 变化的关系。

从图 7.3-2 可以看到， $F_{斥}$ 和 $F_{引}$ 都随着 r 的增大而减小，但 $F_{斥}$ 比 $F_{引}$ 减小得更快。当两个分子的距离为 r_0 时，其中一个分子所受的引力与斥力相等，那么这个分子所受的合力为 0。当分子间的距离小于 r_0 时，作用力的合力表现为斥力；当分子间的距离大于 r_0 时，作用力的合力表现为引力。



图 7.3-1 压紧的铅块会“粘”在一起

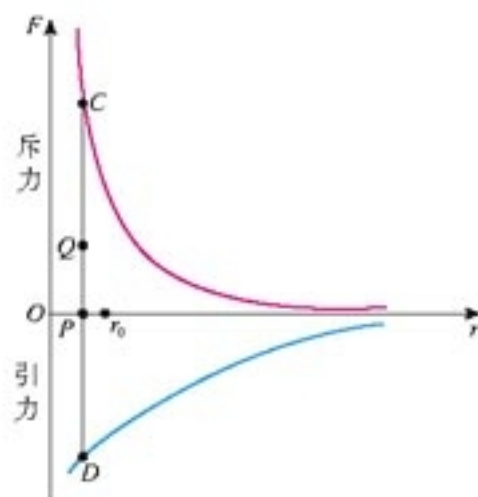


图 7.3-2 分子间的作用力与距离的关系

习惯上斥力以正值表示，引力以负值表示，所以 $F_{斥}$ 和 $F_{引}$ 分别画在横轴的上方和下方。

在下面的思考与讨论中，可以按照这个规则判断得出的合力是斥力还是引力。

思考与讨论

请在图 7.3-2 中作出一个分子所受另一个分子的斥力与引力的合力随分子间距离 r 变化的图象。例如，当 $r = OP$ 时，这个分子所受斥力的大小可以用线段 PC 的长度表示，所受引力的大小用 PD 的长度表示。从 C 向下作 $CQ = PD$ ，于是线段 PQ 的长度就代表了合力 F 的大小： $F = F_{斥} - F_{引}$ 。

再作出 r 取其他大约 10 个值时代表合力的点，连成平滑曲线。这条曲线将在本章第 5 节用到，因此作图时要尽可能准确。

讨论这条曲线的含义。

分子间作用力的合力有些像弹簧连接着的两个小球间的作用力：拉伸时表现为引力，压缩时表现为斥力。

分子动理论 通过前面的学习我们已经知道：物体是由大量分子组成的，分子在做永不停息的无规则运动，分子之间存在着引力和斥力。这就是分子动理论 (**molecular kinetic theory**) 的主要内容。

本册课本的中心是热学。热学包括两个方面：一方面是关于热现象的宏观理论，它研究热现象的一般规律，不涉及热现象的微观解释；另一方面是关于热现象的微观理论，从分子运动的角度来研究宏观热现象的规律。分子动理论就是热现象微观理论的基础。

由于物体是由数量极多的分子组成的，这些分子并没有统一的运动步调，单独来看，各个分子的运动都是不规则的、带有偶然性的，但从总体来看，大量分子的运动却有一定的规律，这种规律叫做统计规律 (**statistical regularity**)。大量分子的集体行为受到统计规律的支配。

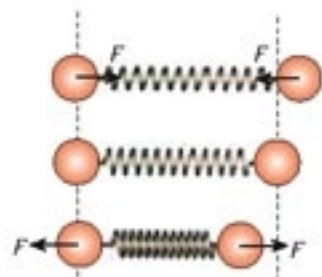


图 7.3-3 分子间的作用力有些像弹簧连接着的两个小球间的作用力

几百年来物理学家对热现象进行了不断深入的研究，在理论上形成了两个重要分支：一个分支是，只在宏观上研究热现象而不涉及微观解释，这个分支叫做热力学；另一个分支是，用统计的观点处理大量分子的热运动，进而研究热现象的规律，这个分支叫做统计物理学。

本模块中我们要学习热力学和统计物理学这两方面的最基础的知识。

问题与练习

1. 请描述：当两个分子间的距离由小于 r_0 逐渐增大，直至远大于 r_0 时，分子间的引力如何变化？分子间的斥力如何变化？分子间引力与斥力的合力又如何变化？
2. 当两个分子间的距离由图 7.3-2 中的 r_0 逐渐增大时，分子间相互作用力的合力会出现一个极大值。你能否用实际生活中的例子说明分子间相互作用的合力的确存在着这样的极大值？
3. 为什么物体能够被压缩，但压缩得越小，进一步压缩就越困难？
4. 如图 7.3-4，把一块洗净的玻璃板吊在橡皮筋的下端，使玻璃板水平地接触水面。如果你想使玻璃板离开水面，必须用比玻璃板重量大的力向上拉橡皮筋。动手做一做，并解释为什么。



图7.3-4 拉力与玻璃板受到的重力相等吗？

4

温度和温标

平衡态与状态参量 在物理学中，通常把所研究的对象称为系统（**system**），例如一瓶气体、几个相互接触的物体、器皿中的液体与它上方蒸汽的整体，等等。我们需要研究系统的各种性质，包括几何性质、力学性质、热学性质、电磁性质，等等。为了描述系统的状态，需要用到一些物理量，例如，用体积描述它的几何性质，用压强描述力学性质，用温度描述热学性质，等等。这些描述系统状态的物理量，叫做系统的状态参量（**state parameter**）。

要定量地描述系统的状态往往很难，因为有时系统各部分的参量并不相同，而且可能正在变化。然而在没有外界影响的情况下，只要经过足够长的时间，系统内各部分的状态参量会达到稳定。举例说，把不同压强、不同温度的气体混在同一个容器中，如果容器和外界没有能量的交换，经过一段时间后，容器内各点的温度、压强就会变得一样。这种情况下我们说系统达到了平衡态（**equilibrium state**），否则就是非平衡态。当系统处于平衡态时，由于系统所有性质都不随时间变化，我们就能比较容易地描述这些性质。在中学阶段，我们主要处理平衡态的问题。

两个温度不同的物体相互接触，这两个物体组成的系统处于非平衡态。

热平衡与温度 同学们在初中已经学过关于温度的知识。当热水中的温度计的读数不再升高的时候，大家就会自然地认为此时温度计的温度就是热水的温度。然而，现在要问的是：我们凭什么说这个时候温度计的温度就是热水的温度？这要从热平衡说起。

上面所说的平衡态，指的是一个系统内部的性质不再改变。下面我们要研究的是一个系统与另一个系统相互作用的问题。如果两个系统之间没有隔热材料，它们相互接触，或者通过导热性能很好的材料接触，这两个系统的状态参量将会互相影响而分别改变。最后，两个系统的状态参量不再变化，说明两个系统已经具有了某个“共同性质”，此时我们说两个系统达到了热平衡（thermal equilibrium）。

两个系统达到热平衡后再把它们分开，如果分开后它们都不受外界影响，再把它们重新接触，它们的状态不会发生新的变化。因此，热平衡概念也适用于两个原来没有发生过作用的系统。因此可以说，只要两个系统在接触时它们的状态不发生变化，我们就说这两个系统原来是处于热平衡的。

实验表明：如果两个系统分别与第三个系统达到热平衡，那么这两个系统彼此之间也必定处于热平衡，这个结论称为热平衡定律^①（law of thermal equilibrium）。

前面已经说过，两个系统处于热平衡时，它们具有一个“共同性质”，我们就把表征这一“共同性质”的物理量定义为温度（temperature）。也就是说，温度是决定一个系统与另一个系统是否达到热平衡状态的物理量，它的特征就是“一切达到热平衡的系统都具有相同的温度”。如果温度计跟物体A处于热平衡，它同时也跟物体B处于热平衡，根据热平衡定律，A的温度便与B的温度相等，这就是温度计能够用来测量温度的基本原理。

初中物理中，我们把温度看做物体冷热的标志，尽管这种认识比较肤浅，但它与我们这里对温度的定义是一致的。设想两个冷热不同的物体相互接触后，过一段时间当它们达到平衡态时，两个物体不就是“冷热相同”吗！

温度计与温标 如果要定量地描述温度，就必须有一套方法，这套方法就是温标（thermometric scale）。

确定一个温标时首先要选择一种测温的物质，根据这种物质的某个特性来制造温度计。例如，可以根据水银的热膨胀来制造水银温度计，这时我们规定细管中水银柱的高度与温度的关系是线性关系；也可以根据铂的电阻随温度的变化来制造金属电阻温度计，这时我们规定铂的电阻与温度的关系是线性关系。同样的道理，还可以根据气体压强随温度的变化来制造气体温度计，根据不同导体因温差产生电动势的大小来制造热电偶温度计，等等。

确定了测温物质和它用以测温的某种性质之后，还要确定温度的零点和分度的方法。例如，早期的摄氏温标规定，标准大气

用管道把两个装着气体的容器导通，不久，两个容器中的气体达到了力学平衡，它们有了一种相同的“力学性质”，我们用“压强”这个物理量描述它。

用导线把两个导体连接，不久，两个导体达到了静电平衡，它们有了一种共同的“电学性质”，我们用“电势”这个物理量描述它。

“温度”在热平衡中的角色，与压强、电势相似。



图 7.4-1 伽利略的温度计

^① 热平衡定律又叫热力学第零定律，这是因为热力学第一、第二定律发现后才认识到这一规律的重要性。

压下冰的熔点为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，水的沸点为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；并据此把玻璃管上 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 刻度与 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 刻度之间均匀分成 100 等份，每份算做 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

现代科学中用得更多的是热力学温标。热力学温标表示的温度叫做热力学温度 (thermodynamic temperature)，它是国际单位制中七个基本物理量之一，用符号 T 表示，单位是开尔文 (kelvin)，简称开，符号为 K。

1960年，国际计量大会确定了摄氏温标与热力学温标的关系：摄氏温标由热力学温标导出，摄氏温标所确定的温度用 t 表示，它与热力学温度 T 的关系是

$$T = t + 273.15\text{ K} \textcircled{1}$$

科学漫步

一、形形色色的温度计

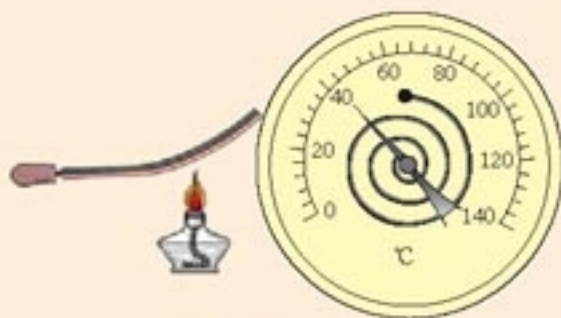
自从伽利略制造了第一个温度计以后，温度就不再是一个主观感觉，而成了一个客观的物理量。至今，形形色色的温度计已经应用在各种场合。

人们总是根据物质某种与温度有关的性质来制作温度计的。最容易想到的就是“热胀冷缩”。例如，可以用一定质量的某种液体的体积来表示温度。玻璃—水银温度计、玻璃—酒精温度计就是根据这种原理制作的。

固体温度升高时也会膨胀。把线膨胀程度不同的两种金属片压合在一起，温度变化时，双金属片的弯曲程度会发生变化，带动指针偏转，指示温度。这就是“双金属温度计”。

在一定容积的容器内，气体温度升高后其压强会增大。根据这种性质，我们可以用气体压强的大小来表示温度。“压力表式温度计”就是利用这个原理制作的。用氮气做测温物质的压力表式温度计，最高可以测量 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，用氢气做测温物质时最低可测到 $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这类温度计适用于对精度要求不高的工业测温。

材料的某些电学性质也跟温度有关。例如，金属的电阻会随温度的升高而变化，我们把某种金属丝绕成一个感温元件，金属丝电阻的大小就可以表示温度的高低，这就是“电阻温度计”。常见的电阻温度计有“铂电阻温度计”和“铜电阻温度计”。铂电阻温度计是目前最精确的温度计，读数可以精确到 $10^{-4}\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。有的半导体材料的电阻随温度的变化比导体更明显，温度上升时电阻会变小，利用它可以制成灵敏的“半导体热敏电阻温度计”。但是热敏电阻的稳定性较差，主要用于低精度的测量。



双金属温度计

①根据国家标准，在表示温度差的时候可以用摄氏度($^{\circ}\text{C}$)代替开尔文(K)。因此，这个式子中 T 的单位用 K， t 的单位用 $^{\circ}\text{C}$ 。

把一条金属丝的两端分别与另一条不同材料金属丝的两端熔焊，接成闭合电路，倘若两个焊点之间有温度差，电路中就有电动势产生，温度差越大，电动势也越大。这就是温差电现象，根据电动势就能量度两个焊点之间的温度差。工业上广泛使用的“热电偶温度计”就是根据温差电现象制作的。这种温度计的测温探头，实际上就是两根金属丝相连的一个焊点。选择不同的金属丝可以做成不同的热电偶温度计，有的可以测量高达 $3\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温，有的可以测量接近绝对零度的低温。

某些铁磁性物质的磁性强弱跟温度有关，磁性的强弱便可以成为温度的标志。声音的传播速度跟介质的温度有关，声速也可以成为温度的标志。有些晶体（如石英）的固有频率跟温度有关，频率也可以成为温度的标志。根据这个思路，磁温度计、声速温度计、频率温度计等都相继制成，而且发挥着各自的作用。



热电偶温度计的原理

二、测温物质引出的问题

细心的同学可能已经注意到，上面谈到早期的摄氏温标时说，我们“规定”温度与细管中水银柱高度的关系是线性关系。难道一种物质的膨胀规律是人为“规定”的吗？当然不是。不过谈到物理规律时总要有个前提，即规律所涉及的物理量是可以测量的，而我们刚刚通过系统间热平衡的关系定义了温度的概念，还没有测量温度的方法，因此这里关于水银膨胀规律所说的规定，实际上是在观察事实基础上的一种假设。

这种规定会引出一些问题。如果规定了水银温度计中水银的体积与温度之间具有线性关系，那么用以测量温度的其他物质的属性就未必与温度构成线性关系。因此，使用不同的测温物质制作的温度计测量同一状态的温度时，难免发生偏差。

为了解决这一问题，人们试图寻找一种与具体的测温物质无关的温标。1848年英国物理学家开尔文（L. Kelvin，原名 W. Thomson，1824—1907）提出的热力学温标就是这样一种温标。至于为什么热力学温标不依赖于测温物质，它的零点是怎样确定的，在中学阶段就不做深入讨论了。

问题与练习

1. “在测定某金属块的比热容时，先把质量已知的金属块放在沸水中加热。经过一段时间后把它迅速放入质量已知、温度已知的水中，并用温度计测量水的温度。当水温不再上升时，这就是金属块与水的共同温度。根据实验数据就可以计算金属块的比热容。”

以上这段叙述中，哪个地方涉及了“平衡态”和“热平衡”的概念？

2. 天气预报某地某日的最高气温是 $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，它是多少开尔文？进行低温物理的研究时，

热力学温度是2.5 K，它是多少摄氏度？

3. 已知某物理量 X 与热力学温度 T 成正比，请把这个关系用等式表示出来。现在用摄氏温度 t 来表示温度，这个关系式该怎样写？

4. 图7.4-2甲表示某金属丝的电阻 R 随摄氏温度 t 变化的情况。把这段金属丝与电池、电流表串联起来(图乙)，用这段金属丝做测温探头，把电流表的电流刻度改为相应的温度刻度，于是就得到一个最简单的电阻温度计。请判断：如果电池的电动势和内阻都是不变的，电流表上代表 t_1 、 t_2 的两点，哪个应该标在电流比较大的温度上？

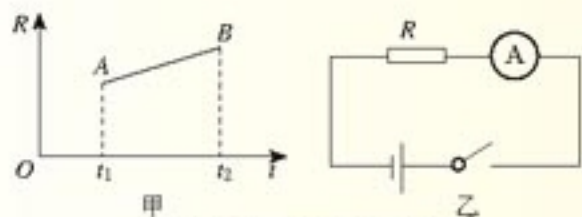


图7.4-2 最简单的电阻温度计

5

内能

分子动能 像一切运动着的物体一样，做热运动的分子也具有动能，这就是分子动能。

物体中分子热运动的速率大小不一，所以各个分子的动能也有大有小，而且在不断改变。在热现象的研究中，我们关心的是组成系统的大量分子整体表现出来的热学性质，因而重要的不是系统中某个分子的动能大小，而是所有分子的动能的平均值。这个平均值叫做分子热运动的平均动能。

从扩散现象和布朗运动中我们看到，温度升高时分子的热运动加剧，因此可以得出结论：一种物质温度升高时分子热运动的平均动能增加。过去我们说，温度是分子热运动剧烈程度的标志，现在就能进一步说，物质的温度是它的分子热运动的平均动能的标志。

分子势能 从《必修2》中我们已经知道，地面附近的物体与地球之间有引力的作用，物体被举高后，地球和这个物体组成的系统就具有了势能；我们还知道，用弹簧连接的两个物体，把弹簧拉伸或压缩后，两物体之间存在力的作用，这个系统也具有了势能。总之，如果宏观物体之间由于存在引力或斥力，它们组成的系统就具有势能，势能是由物体间的相互位置决定的。现在我们又知道，分子间存在着分子力，因此分子组成的系统也具有分子势能，分子势能的大小是由分子间的相互位置决定的。

分子力比重力、引力等要复杂得多，因此分子势能跟分子间距离的关系也比较复杂。

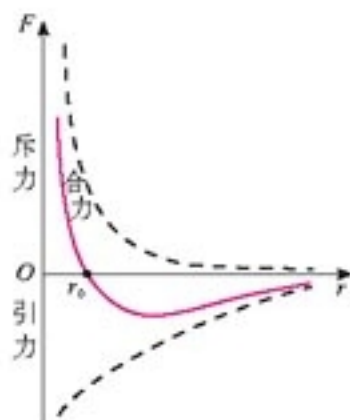


图7.5-1 分子间作用力与分子距离的关系

图 7.5-1 中的实线是根据图 7.3-2 作出的，它表示分子间作用力的合力与分子间距离的关系。曲线位于横轴上方时表示分子间作用力的合力为斥力，位于横轴下方时表示合力为引力。

由图可知，分子间的距离为 r_0 时合力为 0，而 $r > r_0$ 时合力表现为引力，这时要增大分子间的距离必须克服引力做功，因此分子势能随分子间的距离增大而增大。这就像弹簧连接着的两个小球，从平衡位置向外拉伸时，它们的势能增大。

当分子间的距离 $r < r_0$ 时，合力表现为斥力，这时要减小分子间的距离，必须克服斥力做功，因此随着分子间距离的减小分子势能也要增大。这种情形与弹簧被压缩时弹性势能的变化趋势相似。

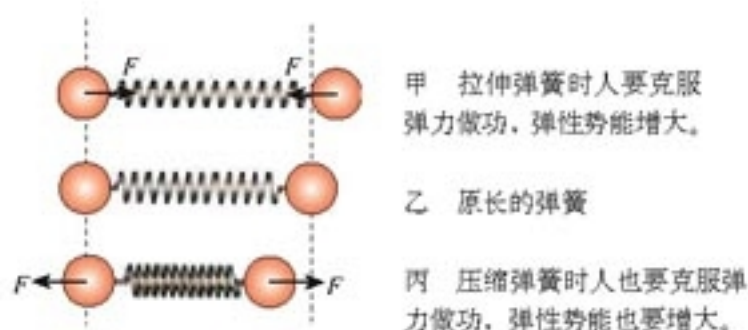


图 7.5-2 弹簧长度变化时弹性势能的变化，图中 F 表示弹力的大小。

思考与讨论

假定两个分子的距离为无穷远时它们的分子势能为 0。使一个分子固定，另一个分子从无穷远逐渐向它靠近，直至相距很近很近。两分子间距离为 r_0 时分子间的引力与斥力平衡。把移动过程分为 $r > r_0$ 和 $r < r_0$ 这样两个阶段。

1. 这两个阶段中分子间的力在做正功还是负功？分子势能各在怎样变化？
2. 分子势能何时最低？
3. 在图 7.5-1 中画出分子势能 E_p 与分子距离 r 关系的曲线，要求表现出 E_p 最小值的位置及 E_p 变化的大致趋势。
4. 如果两个分子只受两者间分子力的作用，从力的角度讲，什么情况下两分子处于平衡状态？从分子势能的角度讲呢？

物体的体积变化时，分子间的距离将发生变化，因而分子势能随之改变。可见，分子势能与物体的体积有关。

内能 物体中所有分子的热运动动能与分子势能的总和，叫做物体的内能（**internal energy**）。组成任何物体的分子都在做着无规则的热运动，所以任何物体都具有内能。

由于分子热运动的平均动能与温度有关，分子势能与物体的体积有关，所以，一般说来物体的温度和体积变化时它的内能都要随之改变。

应当指出，组成物体的分子在做无规则的热运动，具有热运动的动能，它是内能的一部分；同时物体还可能做整体的运动，因此还会具有机械能。后者是由物体的机械运动决定的，它对物体的内能没有贡献。

在热现象的研究中，一般不考虑物体的机械能。

第十章中，我们还将从另外的角度研究内能。

问题与练习

- 两个相同的小球连在一条弹簧的两端，弹簧的自然长度是 l 。
 - 这个系统的弹性势能何时最小？
 - 如果把弹簧拉长，放开时小球的运动是使系统的势能增大还是减小？如果把弹簧压缩呢？如果系统不受外力，处于“稳定”状态（即静止状态）时势能取什么值？
- 两个静止的电荷间也有势能，这是电势能。如果以无穷远处的电势能为 0，当两个同号电荷的距离为 r 时，电势能是正值还是负值？它们运动的趋势将使系统的势能变大还是变小？如果是两个异号电荷呢？
- 飞机从地面由静止起飞，随后在高空做高速航行。有人说：“在这段时间内，飞机中乘客的势能、动能都增大了，他的所有分子的动能和势能也都增大了，因此乘客的内能增大了。”这种说法对吗？为什么？

要推论宏观物质的表现，就必须采用统计方法，由对个体原子（分子）物理参量的适当统计平均，来得出支配宏观行为的规律。

——罗杰·彭罗斯^①

第八章 气体



燃烧器喷出熊熊烈焰，巨大的气球缓缓膨胀……这个场景是否让你想起儒勒·凡尔纳^②的小说《气球上的五星期》？书中描述了一位充满冒险精神的旅行家，他乘坐自己设计的热气球，经历无数艰难险阻，对非洲进行了考察。

热气球在那时还只是用于探险，但现在已经在为人们的休闲娱乐服务。如果有朝一日你乘坐热气球在蓝天翱翔，或许你还能回想起它的工作原理。

^① 罗杰·彭罗斯 (Roger Penrose, 1931—)，英国数学家、物理学家，牛津大学教授，著名科普著作《皇帝新脑》的作者。

^② 儒勒·凡尔纳 (Jules Verne, 1828—1905)，法国著名科幻小说家，他的幻想大多有科学根据，其中有些已经变成了现实。

1

气体的等温变化

打足气的自行车在烈日下曝晒，常常会爆胎，原因是车胎内的气体因温度升高而压强增大、体积膨胀。生活中的许多现象都表明，气体的压强、体积、温度三个状态参量之间存在着一定的关系。本节我们研究一种特殊情况：一定质量的气体，在温度不变的条件下其压强与体积变化时的关系。我们把这种变化叫做等温变化。

实验

探究气体等温变化的规律

如图8.1-1，注射器下端的开口有橡胶塞，它和柱塞一起把一段空气柱封闭在玻璃管中。这段空气柱是我们研究的对象，实验过程中它的质量不会变化；实验中如果空气柱体积的变化不太快，它的温度大致等于环境温度，也不会有明显的变化。

1. 实验数据的收集

空气柱的压强 p 可以从仪器上方的指针读出，空气柱的长度 l 可以在玻璃管侧的刻度尺上读出，空气柱的长度 l 与横截面积 S 的乘积就是它的体积 V 。

用手把柱塞向下压或向上拉，读出体积与压强的几组数据。

2. 实验数据的处理

很容易发现，空气柱的体积越小，压强就越大。空气柱的压强是否跟体积成反比呢？我们可以通过图象来检验这个猜想。

以压强 p 为纵坐标，以体积的倒数 $\frac{1}{V}$ 为横坐标，把以上各组数据在坐标系中描点。如果图象中的各点位于过原点的同一条直线上，就说明压强

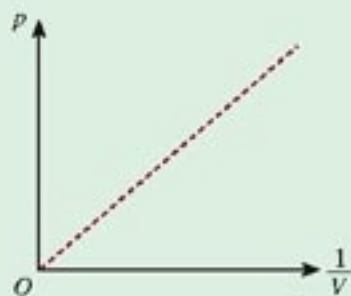


图8.1-2 用图象检验 p 和 $\frac{1}{V}$ 的线性关系

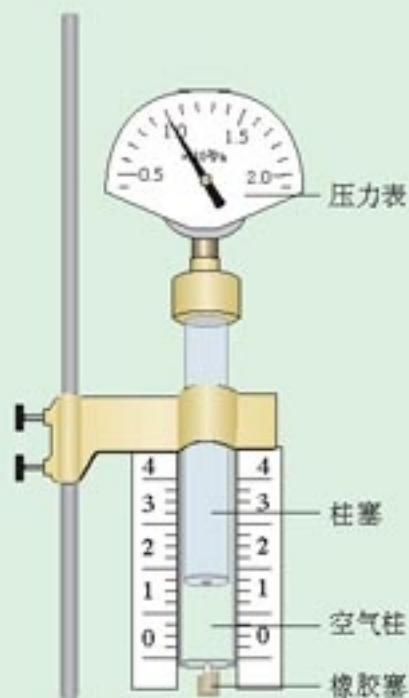


图8.1-1 研究气体等温变化的实验装置

跟体积的倒数成正比，即压强的确与体积成反比。如果不在同一条直线上，我们再尝试其他关系。

如果把实验数据输入计算机，借用数表软件可以在短时间内进行多种尝试，很快获得对应的图象，得知 p 与 V 的关系。

3. 要考虑的问题

在这个实验中，为了找到体积与压强的关系，是否一定要测量空气柱的横截面积？

用刻度尺检查可以发现，玻璃管侧的刻度尽管是均匀的，但并非准确地等于 1 cm、2 cm……这对实验结果的可靠性是否有影响？

测量体积时误差主要出在哪里？怎样减小这个误差？

考虑这些问题，就是在对探究过程做评估。

玻意耳定律 英国科学家玻意耳 (R. Boyle, 1627—1691) 和法国科学家马略特 (E. Mariotte, 1620—1684) 各自通过实验发现，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，即 $p \propto \frac{1}{V}$ 。写成公式就是

$$pV = C \quad (1)$$

式中 C 是一个常量。或者

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \quad (2)$$

其中 p_1 、 V_1 和 p_2 、 V_2 分别表示气体在 1、2 两个不同状态下的压强和体积。

这个规律叫做玻意耳定律 (Boyle law)。

气体等温变化的 $p-V$ 图象 我们在探究一定质量气体压强跟体积关系的实验中，为了用线性关系来检验这两个物理量之间的定量规律，建立了图 8.1-2 中 $p - \frac{1}{V}$ 的坐标系。然而，为了直观地描述压强 p 跟体积 V 的关系，通常还是用 $p-V$ 坐标系。一定质量气体等温变化的 $p-V$ 图象如图 8.1-3 所示，图线的形状为双曲线。由于它描述的是温度不变时的 $p-V$ 关系，因此称它为等温线。一定质量的气体，不同温度下的等温线是不同的，如图 8.1-3。

“ C 是一个常量”，意思是当 p 、 V 变化时 C 的值不变。但是对于温度不同、质量不同、种类不同的气体， C 的数值未必一样。

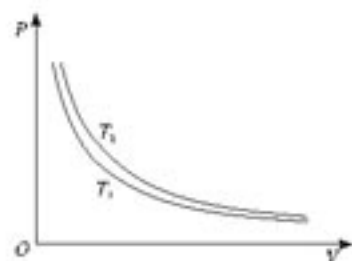


图 8.1-3 一定质量的气体在不同温度下的两条等温线

思考与讨论

图 8.1-3 中有两条等温线,你能判断哪条等温线表示的是温度比较高时的情形吗?你是根据什么理由做出判断的?

问题与练习

1. 一个足球的容积是 2.5 L。用打气筒给这个足球打气,每打一次都把体积为 125 mL、压强与大气压相同的气体打进球内。如果在打气前足球就已经是球形并且里面的压强与大气压相同,打了 20 次后,足球内部空气的压强是大气压的多少倍?你在得出结论时考虑到了什么前提?实际打气时的情况能够满足你的前提吗?
2. 水银气压计中混入了一个气泡,上升到水银柱的上方,使水银柱上方不再是真空。当实际大气压相当于 768 mm 高的水银柱产生的压强时,这个水银气压计的读数只有 750 mm,此时管中的水银面到管顶的距离为 80 mm。当这个气压计的读数为 740 mm 水银柱时,实际的大气压是多少?设温度保持不变。
3. 在验证玻意耳定律的实验中,实验小组记录了一系列数据。但是,仅就以下表格中的两组数据来看,小王和小李却有完全不同的看法:小王认为,这两组数据很好地体现了玻意耳定律的规律,因为两组数据 p 和 V 的乘积几乎相等,说明 p 跟 V 成反比;小李却认为,如果把这两组数据在纵坐标轴为 p 、横坐标轴为 $\frac{1}{V}$ 的坐标系中描点,这两点连线的延长线将不经过坐标原点,因此这两组数据没有反映玻意耳定律的规律。对此你有什么看法?

数据序号	均匀玻璃管内空气柱长度 l / cm	空气柱的压强 $p/10^5$ Pa
1	39.8	1.024
2	40.3	0.998
...

2

气体的等容变化和等压变化

一定质量的某种气体，在体积不变时，压强随温度的变化叫做等容变化；在压强不变时，体积随温度的变化叫做等压变化。

气体的等容变化 法国科学家查理 (J. A. C. Charles, 1746—1823) 在分析了实验事实后发现，当气体的体积一定时，各种气体的压强与温度之间都有线性关系 (图 8.2-1 甲)，我们把它叫做查理定律 (Charles law)。

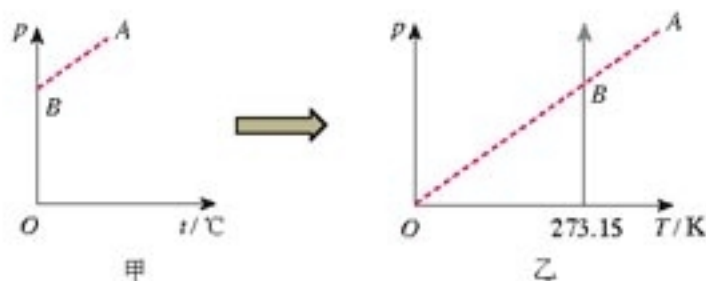


图 8.2-1 气体等容变化的图象

从图 8.2-1 甲可以看出，在等容过程中，压强 p 与摄氏温度 t 是一次函数关系，不是简单的正比例关系。但是，如果把图 8.2-1 甲中的直线 AB 延长至与横轴相交，把交点当做坐标原点，建立新的坐标系 (图 8.2-1 乙)，那么这时的压强与温度的关系就是正比例关系了。图乙坐标原点的意义为“气体压强为 0 时其温度为 0”。可以证明，当气体的压强不太大、温度不太低时，坐标原点代表的温度就是热力学温度的零度。所以说，在 $p-T$ 图象中，一定质量某种气体的等容线是一条通过坐标原点的直线。这时，查理定律可以表述为：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，即 $p \propto T$ 。写成等式的形式就是

$$p = CT \quad \text{或} \quad \frac{p}{T} = C$$

其中 C 是比例常数。

“压强 p 与热力学温度 T 成正比”也可以表示为另外的形式，即

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad \text{或} \quad \frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

在我们的计算中，相当于大气压几倍的压强都可以算做“压强不太大”，零下几十摄氏度的温度也可以算做“温度不太低”。

这里的 C 和玻意耳定律表达式中的 C 都泛指比例常数，两者并不相等。

气体的等压变化 也可以用实验研究一定质量的某种气体在压强不变的情况下其体积 V 与热力学温度 T 的关系。在 $V-T$ 图象中，等压线是一条过原点的直线（图 8.2-2）。

法国科学家盖—吕萨克（J. Gay-Lussac, 1778—1850）首先通过实验发现了这一线性关系，我们把它叫做盖—吕萨克定律（Gay-Lussac law）：一定质量的某种气体，在压强不变的情况下，其体积 V 与热力学温度 T 成正比，即

$$V = CT \quad \text{或} \quad \frac{V}{T} = C$$

其中 C 是比例常数。盖—吕萨克定律表示成另外的形式就是

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad \text{或} \quad \frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

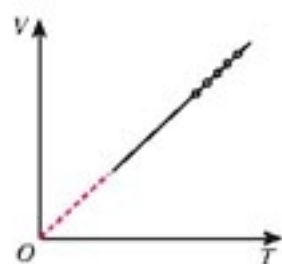


图 8.2-2 压强不变时
体积与温度的关系

这里的 C 和玻意耳定律、查理定律表达式中的 C 都泛指比例常数，它们并不相等。

例题 如图 8.2-3，某种气体在状态 A 时压强为 $2 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，体积为 1 m^3 ，温度为 200 K 。

(1) 它在等温过程中由状态 A 变为状态 B ，状态 B 的体积为 2 m^3 。求状态 B 的压强。

(2) 随后，又由状态 B 在等容过程中变为状态 C ，状态 C 的温度为 300 K 。求状态 C 的压强。

解 (1) 气体由状态 A 变为状态 B 的过程遵从玻意耳定律。

由

$$p_A V_A = p_B V_B$$

得状态 B 的压强

$$p_B = \frac{p_A V_A}{V_B} = \frac{2 \times 10^5 \times 1}{2} \text{ Pa} = 10^5 \text{ Pa}$$

(2) 气体由状态 B 变为状态 C 的过程遵从查理定律。

由

$$\frac{p_B}{T_B} = \frac{p_C}{T_C}$$

得状态 C 的压强

$$p_C = \frac{p_B T_C}{T_B} = \frac{10^5 \times 300}{200} \text{ Pa} = 1.5 \times 10^5 \text{ Pa}$$

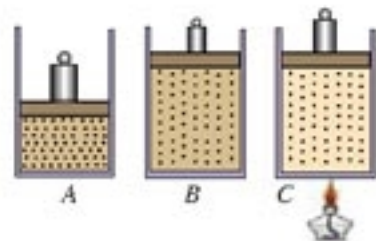


图 8.2-3 求状态 B 和 C 的气体压强

问题与练习

1. 盛有氧气的钢瓶，在 $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的室内测得氧气的压强是 $9.31 \times 10^6\text{ Pa}$ 。当钢瓶搬到 $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的工地上时，瓶内氧气的压强变为 $8.15 \times 10^6\text{ Pa}$ 。钢瓶是不是漏气？为什么？
2. 如图 8.2-4，向一个空的铝制饮料罐（即易拉罐）中插入一根透明吸管，接口用蜡密封，在吸管内引入一小段油柱（长度可以忽略）。如果不计大气压的变化，这就是一个简易“气温计”。已知铝罐的容积是 360 cm^3 ，均匀吸管内部的横截面积为 0.2 cm^2 ，吸管的有效长度为 20 cm ，当温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，油柱离管口 10 cm 。



图 8.2-4 铝罐气温计

- (1) 吸管上标刻温度值时，刻度是否应该均匀？
- (2) 估算这个气温计的测量范围。

3

理想气体的状态方程

理想气体 玻意耳定律、查理定律、盖—吕萨克定律等气体实验定律，都是在压强不太大（相对大气压强）、温度不太低（相对室温）的条件下总结出来的。当压强很大、温度很低时，上述定律的计算结果与实际测量结果有很大的差别。例如：有一定质量的氮气，压强与大气压相等，体积为 1 m^3 ，温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在温度不变的条件下，如果压强增大到大气压的 500 倍，按玻意耳定律计算，体积应该缩小至 $\frac{1}{500}\text{ m}^3$ ，但是实验结果是 $\frac{1.36}{500}\text{ m}^3$ 。如果压强增大到大气压的 1 000 倍，体积实际减小至 $\frac{2.07}{1\,000}\text{ m}^3$ ，而不是按玻意耳定律计算得到的

$\frac{1}{1\,000}\text{ m}^3$ 。

尽管如此，很多实际气体，特别是那些不容易液化的气体，如氢气、氧气、氮气、氦气等，在通常温度和压强下，其性质与实验定律的结论符合得很好。为了研究方便，可以设想一种气体，在任何温度、任何压强下都遵从气体实验定律，我们把这样的气体叫做理想气体（ideal gas）。在温度不低于零下几十摄氏度、压强不超过大气压的几倍时，把实际气体当成理想气体来处理，误差很小，可是计算起来却简便多了。

理想气体的状态方程 描述一定质量的某种理想气体状态的参量有三个： p 、 V 、 T 。前面提到的每一个实验定律所谈的，都是当一个参量不变时另外两个参量的关系。这节课我们将研究三个参量都可能变化的情况下，它们所遵从的数学关系式。

思考与讨论

如图 8.3-1，一定质量的某种理想气体从 A 到 B 经历了一个等温过程，从 B 到 C 经历了一个等容过程。分别用 p_A 、 V_A 、 T_A 和 p_B 、 V_B 、 T_B 以及 p_C 、 V_C 、 T_C 表示气体在 A 、 B 、 C 三个状态的状态参量，请同学们尝试导出状态 A 的三个参量 p_A 、 V_A 、 T_A 和状态 C 的三个参量 p_C 、 V_C 、 T_C 之间的关系。

推导过程中要注意：

1. 先要根据玻意耳定律和查理定律分别写出 p_A 、 V_A 与 p_B 、 V_B 的关系及 p_B 、 T_B 与 p_C 、 T_C 的关系；

2. 由于要推导 A 、 C 两个状态之间的参量的关系，所以最后的式子中不能出现状态 B 的参量。为此，要在写出的两式中消去 p_B ，同时还要以 T_A 代替 T_B （因为 $A \rightarrow B$ 是等温过程，两个状态的温度是相等的）、以 V_C 代替 V_B （因为 $B \rightarrow C$ 是等容过程，两个状态的体积是相等的）。

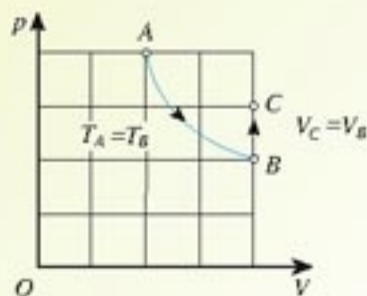


图 8.3-1 推导 p_A 、 V_A 、 T_A 与 p_C 、 V_C 、 T_C 的关系

在图 8.3-1 所示的两个过程中，把 $A \rightarrow B$ 的玻意耳定律方程和 $B \rightarrow C$ 的查理定律方程联立，消去两个方程中状态 B 的压强，便得到关系式

$$\frac{p_A V_A}{T_A} = \frac{p_C V_C}{T_C}$$

这里 A 、 C 是气体的两个任意状态。上面的式子表明，一定质量的某种理想气体，在从状态 1 变化到状态 2 时，尽管其 p 、 V 、 T 都可能改变，但是压强跟体积的乘积与热力学温度的比值保持不变。也就是说

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad (1)$$

或

$$\frac{pV}{T} = C \quad (2)$$

式中 C 是与 p 、 V 、 T 无关的常量。

上面两式都叫做一定质量的某种理想气体的状态方程 (state equation of ideal gas)。

例题 一定质量的某种理想气体由状态 A 变为状态 D，其有关数据如图 8.3-2 所示。若状态 D 的压强是 10^4 Pa ，状态 A 的压强是多少？

解 从题目所给的条件可以看出，A、D 两个状态中共有 5 个状态参量是已知的

$$V_A = 1 \text{ m}^3, T_A = 200 \text{ K},$$

$$V_D = 3 \text{ m}^3, T_D = 400 \text{ K}, p_D = 10^4 \text{ Pa}$$

待求的状态参量是 p_A 。

根据题意，研究的对象是一种理想气体，而且质量是一定的。由理想气体状态方程把这些状态参量联系起来，即

$$\frac{p_A V_A}{T_A} = \frac{p_D V_D}{T_D}$$

由此解出

$$p_A = \frac{p_D V_D T_A}{V_A T_D}$$

代入数值后得到状态 A 的压强

$$p_A = \frac{10^4 \times 3 \times 200}{1 \times 400} \text{ Pa} = 1.5 \times 10^4 \text{ Pa}$$

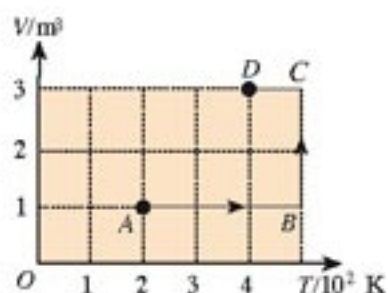


图 8.3-2 状态 A 的压强是多少？

用图象可以清晰、直观地描述气体的状态参量和变化过程。

从这个例题可以看出，一定质量的理想气体的状态方程给出了两个状态间的联系，并不涉及气体从一个状态变到另一个状态的具体方式。

问题与练习

- 对一定质量的气体来说，能否做到以下各点？
 - 保持压强和体积不变而改变它的温度。
 - 保持压强不变，同时升高温度并减小体积。
 - 保持温度不变，同时增加体积并减小压强。
 - 保持体积不变，同时增加压强并降低温度。
- 某柴油机的汽缸容积为 $0.83 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ，压缩前其中空气的温度为 $47 \text{ }^\circ\text{C}$ 、压强为 $0.8 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。在压缩冲程中，活塞把空气压缩到原体积的 $\frac{1}{17}$ ，压强增大到 $40 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，求这时空气的温度。
- 在做托里拆利实验时，玻璃管内有些残存的空气，此时玻璃管竖直放置，如图 8.3-3。假如把玻璃管竖直向上提起一段距离，玻璃管下端仍浸在水银中，则管内空气体积如何变化？管内水银柱长度如何变化？管内空气压强如何变化？

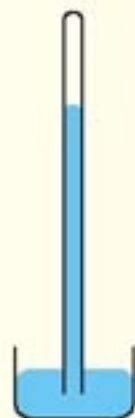


图 8.3-3 漏进了空气的玻璃管

4

气体热现象的微观意义

从微观的角度看，物体的热现象是由大量分子的热运动所决定的。尽管个别分子的运动有它的不确定性，但大量分子的运动情况会遵从一定的统计规律，生活中的事例也有类似的特点。

实验

每人都把4枚硬币握在手中，在桌面上随意投掷10次，记录每次投掷时正面朝上的硬币个数，统计总共10次投掷中有0、1、2、3、4枚硬币正面朝上的次数各是多少，把结果填在以下表格的第1行。

以3~4人为一个小组，把小组中各人统计的数字累计起来，填在表格中第2行。

按座位把全班分成几个大组，把每个大组中各小组统计的数字累计起来，填在表格中第3行。

把各大组的数字累计起来，得到全班的统计数字，填在表格第4行。

次数 \ 统计项目	统计项目	总共投掷 的次数	4枚硬币中正面朝上的硬币枚数				
			0	1	2	3	4
我的实验数据		10					
我所在小组的数据							
我所在大组的数据							
全班的数据							

随着投掷次数的增多，2枚硬币正面朝上的次数比例最多，约占总数的 $\frac{3}{8}$ ；1枚和3枚硬币朝上的次数比例略少，分别约占总数的 $\frac{1}{4}$ ；全部朝上和全部朝下的次数最少，各约占总数的 $\frac{1}{16}$ 。投掷中，不同枚数硬币同时正面朝上的出现次数如图8.4-1所示。它表明，个别事物的出现具有偶然的因素，但大量事物出现的机会，却遵从一定的统计规律。

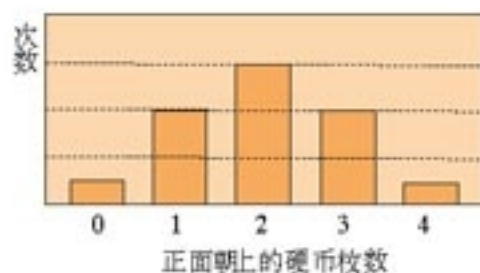


图8.4-1 某班学生硬币实验的统计规律

说一说

上面的实验中，如果在每枚硬币的背面都贴上与它直径相同的铅片，实验结果可能会有什么不同？

社会中的统计规律随处可见。例如，在保险公司投保“人身意外伤害险”时，要按不同的职业交纳不同的保险费；又如，通过人口健康普查的统计数据，可以发现某些地区存在着高发病率的疾病。尽管事先不能知道究竟哪个人以后会患这种疾病，但这个地区很可能存在该病的诱因，我们要对这个地区人群的生活习惯和环境等做进一步调查，以发现这个诱因。

气体分子运动的特点 热现象与大量分子热运动的统计规律有关。要研究气体的热现象，就要了解气体分子运动的特点。

可以认为液体的分子是一个挨着一个地排列的。液体变为气体，体积要增大上千倍，可见气体分子间的距离大约是分子直径的10倍左右，分子的大小相对分子间的空隙来说很小，所以能够把分子视为质点。由于气体分子间的距离比较大，分子间的作用力很弱，通常认为，气体分子除了相互碰撞或者跟器壁碰撞外，不受力而做匀速直线运动，因而气体能充满它能达到的整个空间。

虽然气体分子的分布比液体稀疏，但分子的数密度^①仍然十分巨大，标准状态下 1 cm^3 气体中的分子数比地球上的人口总数还要多上许多亿倍。因此，分子之间频繁地发生碰撞，使每个分子的速度大小和方向频繁地改变。分子的运动杂乱无章，在某一时刻，向着任何一个方向运动的分子都有，而且向各个方向运动的气体分子数目都相等。当然，这里说的数目相等，是针对大量分子说的，实际数目会有微小的差别，由于分子数极多，其差别完全可以忽略。

尽管大量分子做无规则运动，速率有大有小，但分子的速率却按一定的规律分布。表8.4-1是氧气分子在 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 两种不同情况下的速率分布情况。图8.4-2是根据表格中的数据绘制的图象。

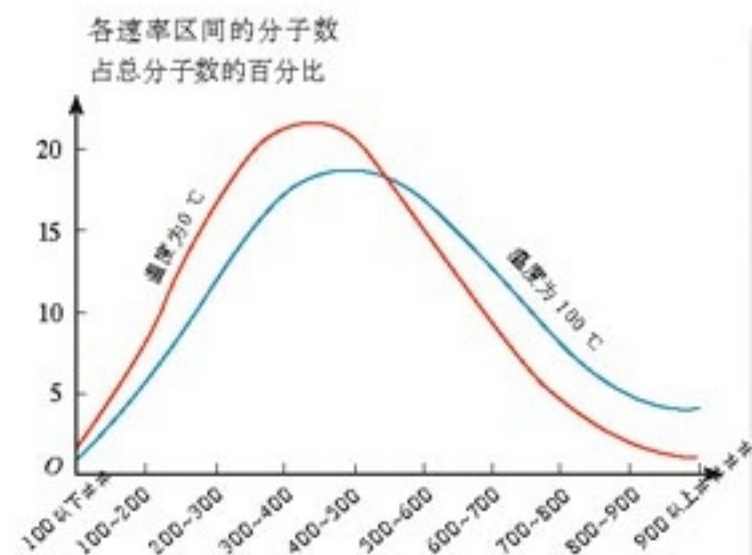


图 8.4-2 氧气分子的速率分布图象

表 8.4-1 氧气分子的速率分布

速率区间 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	各速率区间的分子数占 总分子数的百分比	
	$0\text{ }^\circ\text{C}$	$100\text{ }^\circ\text{C}$
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

^① 分子的个数与它们所占空间体积之比叫做分子的数密度，通常用 n 表示；而物质的质量与其体积之比叫做密度，通常用 ρ 表示。

可以看到，0℃和100℃氧气分子的速率都呈“中间多、两头少”的分布，但这两个温度下具有最大比例的速率区间是不同的，0℃时300~400 m/s速率的分子最多，100℃时400~500 m/s速率的分子最多。100℃的氧气，速率大的分子比例较多，其分子的平均速率比0℃的大。从这里我们可以直观地体会“温度越高，分子的热运动越激烈”这句话的含义。

定量的分析可以得出：理想气体的热力学温度 T 与分子的平均动能 \bar{E}_k 成正比，即

$$T = a\bar{E}_k$$

式中 a 是比例常数。

这表明温度是分子平均动能的标志。

气体压强的微观意义 从微观的角度看，气体对容器的压强是大量气体分子对容器的碰撞引起的，这就好像密集的雨点打在伞上一样，雨点虽然是一滴一滴地打在伞上，大量密集雨点的撞击，使伞受到持续的作用力。



图8.4-3 大量雨点与伞的撞击，使伞受到持续的作用力。

演示

用豆粒做气体分子的模型，可以演示气体压强产生的机理。

把一颗豆粒拿到台秤上方约10 cm的位置，放手后使它落在秤盘上，观察秤的指针的摆动情况。

再从相同高度把100粒或者更多的豆粒连续地倒在秤盘上（图8.4-4），观察指针的摆动情况。

使这些豆粒从更高的位置落在秤盘上，观察指针的摆动情况。



图8.4-4 模拟气体压强产生机理的实验

从微观角度来看，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，一个是分子的密集程度。

对气体实验定律的微观解释 用分子动理论可以很好地解释气体的实验定律。

一定质量的某种理想气体，温度保持不变时，分子的平均动能是一定的。在这种情况下，

体积减小时，分子的密集程度增大，气体的压强就增大。这就是玻意耳定律的微观解释。

一定质量的某种理想气体，体积保持不变时，分子的密集程度保持不变。在这种情况下，温度升高时，分子的平均动能增大，气体的压强就增大。这就是查理定律的微观解释。

一定质量的某种理想气体，温度升高时，分子的平均动能增大。只有气体的体积同时增大，使分子的密集程度减小，才能保持压强不变。这就是盖—吕萨克定律的微观解释。

科学漫步

星体表面的大气蒸发

由于气体分子在不断地高速运动，地球的大气中不断有气体分子像人造卫星一样飞向星际空间，这种现象称为大气蒸发。

在力学中我们已经知道，行星表面上物体的逃逸速度可以表示为

$$v_e = \sqrt{2gR}$$

式中 R 和 g 分别为行星的半径和行星表面附近的自由落体加速度。下表列出了太阳系中几个行星的逃逸速度 v_e 。

几个行星表面的逃逸速度			
	$g/(m \cdot s^{-2})$	R/km	$v_e/(km \cdot s^{-1})$
水星	3.76	2 439	4.3
金星	8.88	6 049	10.3
地球	9.81	6 371	11.2
火星	3.73	3 390	5.0
木星	26.2	69 500	60
土星	11.2	58 100	36
天王星	9.75	24 500	22
海王星	11.34	24 600	24

实际上，气体分子要从星球表面逃逸出去，除了速率必须大于 v_e 外，还要保证它在飞行中不会与其他分子相撞。

由于越高的位置大气越稀薄，所以对每个行星都存在一个高度，超过这个高度后就可以不考虑分子间的碰撞了。这个高度称为逃逸高度。

对地球而言，逃逸高度约为 500 km，这里的温度接近 600 K。利用温度与分子平均动能的关系，可以算出不同气体分子的平均速率。例如，600 K 时氢气分子和氧气分子的平均速率分别为

2.58 km/s 和 0.67 km/s，它们与地球上的 v_0 的比值分别为 $\frac{1}{434}$ 和 $\frac{1}{16.7}$ 。虽然氢气分子和氧气分子的平均速率都比 v_0 小得多，但我们知道，总有一些分子的速率比平均速率大，有的甚至大很多，所以大气中总包含速率大于 v_0 的分子，它们可以逃出地球。

根据分子速率的分布规律，如果大气中某种分子的平均速率是逃逸速率 v_0 的 $\frac{1}{3.5}$ ，这种气体将于 5 万年内消失，如上述比值为 $\frac{1}{4}$ ，则这种气体要经过 3 千万年才能消失，如果比值为 $\frac{1}{4.4}$ ，则要经过 250 亿年才会消失。地球的年龄约为 45 亿年，由于大气中氢气分子的平均速率较大，因此地球大气中氢的含量很少。

不同星体上的气体都遵从气体分子速率的分布规律，所以由星体上 v_0 的数值和行星表面的温度就可以确定，在太阳系里除地球以外，能有大气的行星是金星、土星、木星、天王星和海王星。火星只能保存一些大气的残余，主要由密度较大的气体（如二氧化碳、氩）组成。这些都已为行星光谱的观测所证实。

问题与练习

1. 请列举一个日常生活中表现统计规律的事例。
2. 一定质量的某种理想气体，当它的热力学温度升高为原来的 1.5 倍、体积增大为原来的 3 倍时，压强将变为原来的多少？请你从压强和温度的微观意义来说明。

物理学是一场奋战，强大的对手是自然。

——约·惠勒^①

第九章

物态和物态变化



物质是由分子组成的。分子在不停地做无规则运动，它们之间存在着相互作用力。这两种作用相反的因素决定了分子的三种不同的聚集状态：固态、液态和气态。物质处于不同状态时具有不同的物理性质。

人类对物质属性的认识是从宏观到微观不断深入的过程。应该说，人们对新材料或传统材料新功能的开发和研制从来没有停止过。从远古的石器时代，到后来的青铜器时代、铁器时代……新材料在人类文明进程中都扮演了重要的角色。

^① 约·惠勒 (John Wheeler, 1911—)，美国普林斯顿大学教授，理论物理学家，“黑洞”等名词的创造者。

1

固 体

思考与讨论

把一些常见的固体物质分为两组：一组是玻璃、蜂蜡、硬塑料等；另一组是盐粒、砂糖、石英等。

两类固体物质的外表各有什么特征？

晶体和非晶体 固体可以分为晶体和非晶体两类。石英、云母^①、明矾、食盐、硫酸铜、蔗糖、味精等是晶体。雪花是水蒸气凝华时形成的晶体，它们的形状虽然不同，但都是六角形的图案。食盐晶体总是立方体形，明矾晶体总是八面体形，石英晶体（俗称水晶，图9.1-1）的中间是一个六棱柱，两端是六棱锥。

玻璃、蜂蜡、松香、沥青、橡胶等是非晶体。非晶体没有确定的几何形状。



图9.1-1 水晶

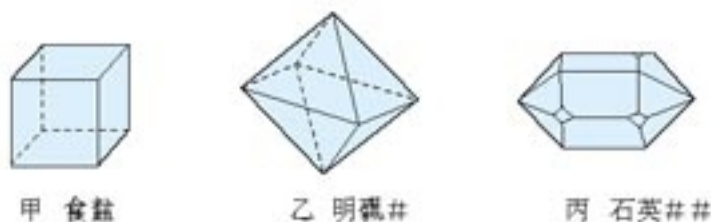


图9.1-2 几种晶体的几何形状

蔗糖受潮后会粘在一起形成糖块，看起来没有确定的几何形状。但是用放大镜观看，仍可发现组成糖块的一个个晶体粒。粘在一起的糖块是多晶体 (polycrystal)，单个的晶体颗粒是单晶体 (monocrystal)。

由于多晶体是许多单晶体杂乱无章地组合而成的，所以多晶体也没有确定的几何形状。常见的金属是多晶体，利用金相显微镜可以看到金属的细微结构(图9.1-3)。

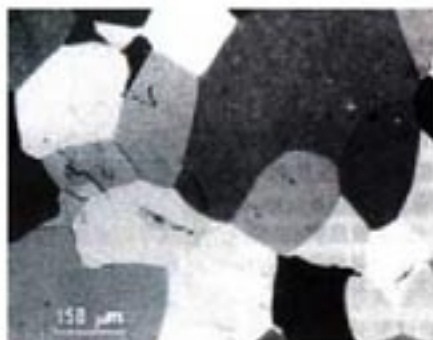


图9.1-3 显微镜下铝—锂—镁合金的断裂面

^① 云母是一种矿物，化学成分为铝硅酸盐，可以剥成一片片的薄层。有些云母的绝缘性能很好，在过去没有塑料的年代，云母常在电器中用做绝缘物。

晶体管、集成电路的工作与材料的微观结构有关，材料内原子的排列不能是杂乱无章的，所以制作晶体管、集成电路只能用单晶体，例如单晶硅、单晶锗。如何以较低的成本生产高纯度、大尺寸的半导体单晶体，是发展微电子工业的关键之一。

除了形状是否规则外，晶体和非晶体在物理性质上也有所不同。我们在初中已经学过，晶体有确定的熔点，非晶体没有确定的熔点，这就是区别之一。此外，其他物理性质也有差异。

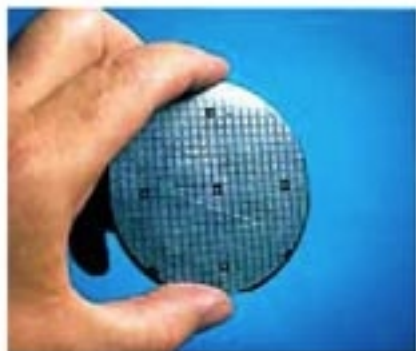


图9.1-4 单晶硅在微电子工业中应用广泛

根据单晶体与多晶体的区别，你认为多晶体是否有确定的熔点？

实验

把熔化了的蜂蜡薄薄地涂在薄玻璃片上。把一枝缝衣针烧热，然后用针尖接触蜂蜡层的背面，不要移动，观察蜂蜡熔化区域的形状(图 9.1-5 甲)。



图 9.1-5 蜂蜡熔化区域的形状

把玻璃片换成单层云母片，再做以上实验。

在玻璃片上和云母片上，蜂蜡熔化区域形状的不同说明了什么？

有些晶体沿不同方向的导热或导电性能不同；有些晶体沿不同方向的光学性质不同。这类现象称为各向异性 (**anisotropy**)。非晶体沿各个方向的物理性质都是一样的，这叫做各向同性 (**isotropy**)。

由于多晶体是许多单晶体杂乱无章地组合而成的，所以多晶体是各向同性的。

思考与讨论

通过晶体呈现的特殊物理性质，你认为晶体在微观结构上可能有什么特点？

晶体的微观结构 为什么晶体的形状和物理性质会与非晶体不同？人们认为很可能是它们的微观结构不一样。从 17 世纪到 19 世纪，陆续出现了一些假说，认为各种晶体内部的微

粒是按各自的规则排列着的，但是由于当时检测技术的限制，缺少实验证据，所以这些想法只能是假说。

到了20世纪初，通过X射线在晶体上衍射的实验，这种假说才得到证实。在20世纪70年代，人们又用电子显微镜观察到了铀、钍原子的像。到了1982年，扫描隧道显微镜的问世，使人类第一次观察到原子在物质表面的排列状况。

关于晶体对X射线的衍射，《选修3-4》中会有粗浅的描述。

在各种晶体中，原子（或分子、离子）都是按照一定的规则排列的，具有空间上的周期性。图9.1-6是食盐晶体中氯离子和钠离子分布的示意图。

有的物质在不同条件下能够生成不同的晶体。那是因为组成它们的微粒能够按照不同规则在空间分布。例如，碳原子如果按图9.1-7甲那样排列，就成为石墨，而按图9.1-7乙那样排列，就成为金刚石。石墨是层状结构，层与层之间距离较大，原子间的作用力比较弱，所以石墨质地松软，可以用来制作粉状润滑剂；金刚石中碳原子间的作用力很强，所以金刚石有很大的硬度，可以用来切割玻璃。

原子（或者分子、离子）并不是在图9.1-6和图9.1-7所画的那些点上静止不动。它们在不停地振动，图中所画的那些点，是它们振动的平衡位置。

同种物质也可能以晶体和非晶体两种不同的形态出现，也就是说，物质是晶体还是非晶体，并不是绝对的。例如，天然水晶是晶体，而熔化以后再凝固的水晶（即石英玻璃）就是非晶体。有些非晶体在一定条件下也可以转化为晶体。

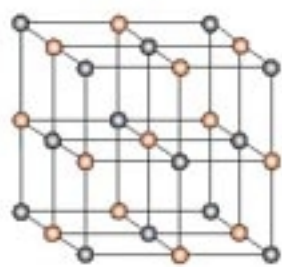
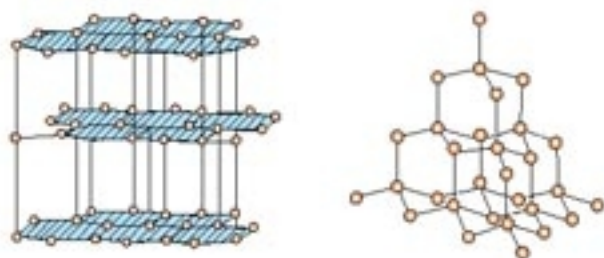


图9.1-6 食盐晶体中氯离子和钠离子分布的示意图



甲 石墨

乙 金刚石

图9.1-7 石墨和金刚石的微观结构

科学漫步

一、“超小物质”的秘密

纳米(nanometer)是长度的单位。 $1\text{ nm} = 10^{-9}\text{ m}$ ，也就是说，一纳米相当于十亿分之一米，它只有头发直径的十万分之一，肉眼无法分辨。纳米科学技术的研究对象就是尺寸处在 $1\sim 100\text{ nm}$ 之间的物质世界，纳米材料是纳米科学技术重要的组成部分。

什么是纳米材料呢？我们知道，物质是由原子、分子等微粒组成的，它们按一定规律组成一个个小单元，这些小单元结合在一起形成了肉眼可见的物体。对于通常材料来说，分子等微粒按一定规律组成的小单元仍然包含着成千上万个原子、分子等。用机械的方法把物质粉碎、研磨，可以得到很细的粉末，但实际上—粒这样的粉末仍比这里说的“小单元”大得多。

如果用化学的方法，使组成物质的每个小单元只包含几个，至多几十个原子、分子，直径只有1~100 nm，就会发现，这样的物质有很多新的特性。例如，通常的金块呈黄色，但是10 nm的金颗粒组成的金块却是绿色的，而1 nm的金颗粒组成的金块是红色的！通常说的纳米材料，指的就是直径1~100 nm的颗粒或直径1~100 nm的细纤维构成的材料。

录音带、录像带、磁卡、计算机磁盘等都采用磁性颗粒作为磁记录介质。磁性纳米微粒尺寸小，因此，用纳米磁性材料制造的磁记录器件，单位面积就可以记录更多的信息，记录密度大大提高。此外，由于一个纳米微粒就可能是单个的磁畴，所以纳米磁记录材料的矫顽力很高，可以大大提高信噪比，改善记录质量。

某些纳米颗粒组成的物质对光的吸收作用大大增强。在感光材料、有机颜料、光电导体等方面，如果应用纳米材料，效能会有极大的提高。

在力学性能方面，纳米金属材料、纳米陶瓷材料及纳米复合材料等也具有很多奇特的性能，例如纳米陶瓷的韧性比普通陶瓷强，因而不易破碎。

纳米材料还会改变材料的表面活性和生物活性。用某些纳米材料制造冰箱和洗衣机的内壁，微生物不易在表面生存，从而不留异味、易于清洗。纳米材料在催化剂和医用材料方面也有广阔的应用前景。

人类在探索微小物质世界的进程中还在不断地进取着。

二、能“记忆”形状的金属

1932年，瑞典人奥兰德在金镍合金中首次观察到“记忆”效应，即当这种合金的形状改变后，一旦加热到一定的温度，它又会恢复原来的形状。人们把这种合金称为形状记忆合金。

为什么会有形状记忆效应？原来这种合金的晶体结构能随温度变化。假设它的单位晶体结构为立方体，当温度降低时，其微观结构发生变化，成菱形块。当然，这样的微观变化用肉眼是看不出来的。在温度升高后，单位晶体结构恢复为立方体，各单位晶体结构之间的相对位置也都复原。合金的宏观形状也恢复为原来的形状。若在温度较高时用这种合金制作一条金属棒，在低温时用力将它弯曲，当温度升高时，整体形状又变成直棒。

目前形状记忆合金已经在许多领域得到应用。例如，人造卫星上的抛物面天线可以用记忆合金制作。发射之前，将天线折叠起来装进星体，当人造卫星到达预定轨道后，只需加热，折叠的天线因具有记忆功能而展开，恢复抛物面的形状。

再如，钛镍合金的生物相容性很好，利用其形状记忆效应可以固定断骨。使用步骤大致如下。

先按以后的使用温度（例如人的体温37℃）下需要的形状制造合金夹骨板，安装则在较低温度（0~5℃）下进行。这时可以把夹骨板变成便于操作的形状。当温度升高至人体温度时，它便

自行恢复至设定的形状，同时产生适当的形状恢复力。除了夹骨板外，医学应用实例还有很多，如血栓过滤器、脊柱矫形棒、牙齿矫形丝、脑动脉瘤夹、髓内针、人工关节等。

还有一种记忆合金，在较低温度下是一种形状，加热后变成另一种形状，冷却后又能恢复低温时的形状。这样的合金在加热和冷却这两个过程中具有形状记忆功能，因此有更广泛的应用。

问题与练习

1. 有一块物质薄片，某人为了检验它是不是晶体，做了一个实验。他以薄片的正中央 O 为坐标原点，建立 xOy 平面直角坐标系，在两个坐标轴上分别取两点 x_1 和 y_1 ，使 x_1 和 y_1 到 O 点的距离相等。在 x_1 和 y_1 上分别固定一个测温元件，再把一个针状热源放在 O 点，发现 x_1 点和 y_1 点的温度在缓慢升高，但两点温度的高低没有差异。于是得出结论，这块薄片是非晶体。

请你说明：以上实验结论的形成，存在着什么科学性问题？

2. 食盐晶体由钠离子和氯离子组成，如果用圆球来表示离子，食盐晶体的结构可以用图 9.1-8 表示。图 9.1-6 是食盐中钠离子和氯离子空间分布的示意图，那个图把相邻离子的中心用线连接起来，组成了一个大小相等的立方体。现在要估算相邻两个钠离子中心的距离，除了知道食盐的密度 $\rho = 2.17 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 外，还要知道哪些数据？请用字母表示这些已知数据，推导出相邻两个钠离子中心距离的表达式。



图 9.1-8 食盐晶体结构示意图

提示：图 9.1-6 中立方体的个数与离子数目相等。

3. 内陆盐矿中开采的氯化钠称为岩盐，岩盐的颗粒很大，我们能清楚地看出它的立方体形状。把大颗粒的岩盐敲碎后，小颗粒的岩盐仍然呈立方体形状。

图 9.1-9 表示岩盐晶体的平面结构：红点为氯离子，灰点为钠离子，如果把它们用直线连起来，将构成一系列大小相同的正方形。作分界线 AA_1 ，使它平行于正方形的对角线，作分界线 BB_1 ，使它平行于正方形的一边。在两线的左侧各取一个钠离子： M 和 N ，为了比较这两个钠离子所受分界线另一侧的离子对它作用力的大小，分别以 M 、 N 为圆心，作两个相同的扇形，不考虑扇形以外远处离子的作用。

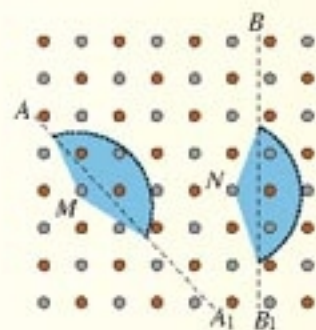


图 9.1-9 食盐晶体的平面结构

(1) 如果 F 表示两个相邻离子之间引力的大小，问： M 、 N 所受扇形范围内的正负离子对它作用力的合力是 F 的多少倍？为使问题简化，设所有离子都是质点，而且它们相互作用遵从平方反比规律。

(2) 根据计算结果解释：为什么敲碎的岩盐总是呈立方形状，而不会沿图中 AA_1 分界线断开？

实际晶体中的作用力要复杂得多，但这里的分析对理解自然现象还是有用的。

2

液体

液体的微观结构 液体在汽化时，体积增大可达上千倍，而在凝固时，体积减小量一般不超过10%。气体很容易压缩，而液体像固体那样不易压缩。这些事实表明，气体中分子是比较稀疏的，而液体分子间的距离及固体分子间的距离都要小得多。

液体不像固体那样具有一定的形状，而且液体能够流动。这说明液体分子间的相互作用力比固体分子间的作用力要小。由于液体分子的移动比固体分子的移动更容易，所以在温度相同的情况下，液体的扩散速度要比固体的扩散速度快。

实际上，非晶体的微观结构跟液体非常相似，所以严格说来，只有晶体才能叫做真正的固体。

做一做

将铅块、铁块等体积小、重量大的物体放在大块的沥青上，静置于温暖的地方，过一两个月后观察发生的变化。

液体的表面张力 叶面上的露珠、小的水银滴，总是球形的；一些昆虫可以停在水面上……你知道这是为什么吗？



图 9.2-1 露珠呈球形



图 9.2-2 水黾(音mǎn)可以停在水面

实验

1. 把一条细棉线的两端系在铁丝环上，不要让棉线过紧，要使它处于略为松弛的状态。然后将铁丝环浸入肥皂液里，再拿出来时环上就留下了一层肥皂液的薄膜。这时薄膜上的棉线仍是松弛的（图9.2-3甲）。

用烧热的针刺破棉线某一侧的薄膜，观察薄膜和棉线发生的变化。

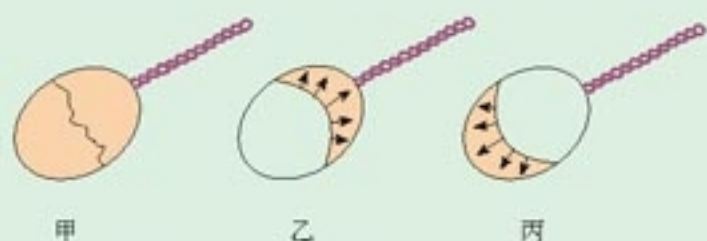


图9.2-3 观察肥皂膜和棉线的变化

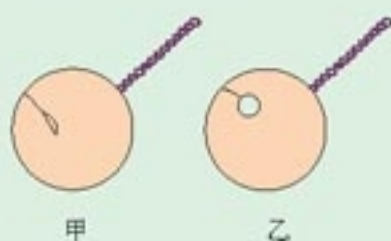


图9.2-4

2. 把一个棉线圈系在铁丝环上，使环上布满肥皂液的薄膜，这时膜上的棉线圈仍是松弛的（图9.2-4甲）。

用烧热的针刺破棉线圈里的薄膜，观察棉线圈外的薄膜和棉线圈发生的变化。实验说明液体表面有什么性质？

我们在上一章已经学过，分子间的距离大于某一数值 r_0 时，分子力表现为引力，小于这个数值时表现为斥力，如果分子间的距离等于 r_0 ，分子力为0。在液体内部，分子间的距离在 r_0 左右，而在表面层，分子比较稀疏，分子间的距离大于 r_0 （图9.2-5），因此分子间的作用表现为相互吸引。也就是说，如果在液体表面任意画一条线（图9.2-6），线两侧的液体之间的作用力是引力，它的作用是使液体表面绷紧，所以叫做液体的表面张力（**surface tension**）。

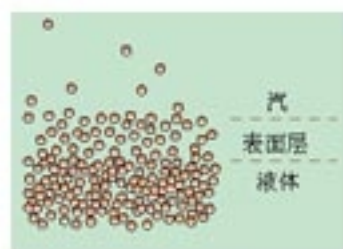


图9.2-5 液体表面层中分子间的距离比液体内部分子间的距离大

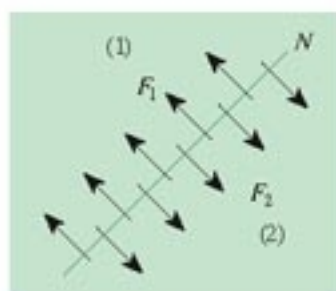


图9.2-6 液体的表面张力

说一说

到现在为止，我们已经从实验上和理论上了解了液体的表面张力，知道它具有使液体表面收缩的趋势。但是，为什么有了表面张力，液滴就有了呈球形的趋势？为什么液滴越小，形状就越接近球形？

演示

分别向一块洁净的玻璃板上和一块涂蜡的玻璃板上滴一滴水。慢慢抬起玻璃板的一端使它们倾斜。你看到什么现象？

浸润和不浸润 一种液体会润湿某种固体并附着在固体的表面上，这种现象叫做浸润 (wettability)；一种液体不会润湿某种固体，也就不会附着在这种固体的表面，这种现象叫做不浸润。上面的演示表明，水可以浸润玻璃，但水不能浸润蜂蜡或石蜡。

一种液体是否浸润某种固体，与这两种物质的性质都有关系。例如，水银不浸润玻璃，但水银浸润铅。如果把水银滴放到打磨干净的铅板上，水银就会附着在铅上，很难擦去。

液体放在玻璃容器中，液面与器壁接触的位置是弯曲的，但有的向上弯，有的向下弯(图9.2-7)。这也是浸润与不浸润两种现象的区别。

浸润和不浸润也是分子力作用的表现。当液体与固体接触时，接触的位置形成一个液体薄层，叫做附着层。附着层的液体分子可能比液体内部稀疏，也可能比液体内部更密，这决定于液体、固体两种分子的性质。如果附着层的液体分子比液体内部的分子稀疏，也就是说，附着层内液体分子间的距离大于前面说过的分子力平衡的距离 r_0 ，附着层内分子间的作用表现为引力，附着层有收缩的趋势，就像液体表面张力的作用一样。这样的液体与固体之间表现为不浸润。如果附着层内分子间的距离小于液体内部分子间的距离，附着层内分子间的作用表现为斥力，附着层有扩展的趋势。这样的液体与固体之间表现为浸润。

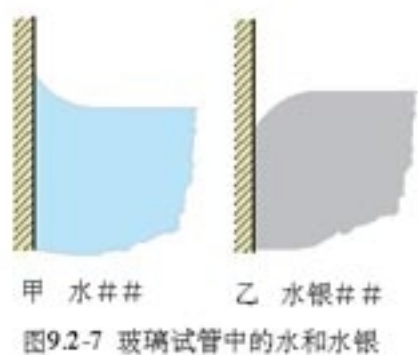


图9.2-7 玻璃试管中的水和水银

说一说

浸润现象和不浸润现象在日常生活中是常见的。例如，脱脂棉脱脂的目的，在于使它从不能被水浸润变为可以被水浸润，以便吸取药液。用不能被水浸润的塑料制作的酱油瓶，向外倒酱油时不易外洒。你还能举出其他实例吗？



图9.2-8 游禽用嘴把油脂涂到羽毛上，使水不能浸润羽毛。

实验

把两端开口的很细的玻璃管竖直插入水中，观察管中水面的高度。

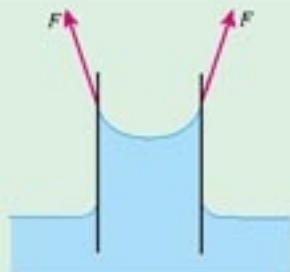


图9.2-9 液体表面张力对管中液体形成向上的拉力(为了看清力的关系，夸张了管的直径与高度的比例)。

毛细现象 浸润液体在细管中上升的现象，以及不浸润液体在细管中下降的现象，称为毛细现象 (capillarity)。

由于液体浸润管壁，液面呈图 9.2-9 的形状。液面边缘部分的表面张力如图所示，这个力使管中液体向上运动。当管中液体上升到一定高度，液体所受重力与液面边缘使它向上的力平衡，液面稳定在一定的高度。实验和理论分析都表明，对于一定的液体和一定材质的管壁，管的内径越细，液体所能达到的高度越高。

在纸张、棉花、毛巾、粉笔、木材、土壤、砖块等物体内部有许多细小的孔道，它们起到了毛细管的作用。

说—说

建筑房屋的时候，在砌砖的地基上铺一层油毡或涂过沥青的厚纸，防止地下的水分沿着夯实的地基以及砖墙的毛细管上升，以使房屋保持干燥。土壤里有很多毛细管，地下的水分可以沿着它们上升到地面。如果要保存地下的水分，就要把地面的土壤锄松，破坏这些土壤里的毛细管。相反，如果想把地下的水分引上来，就不仅要保持土壤里的毛细管，而且还要使它们变得更细，这时就要用碾子压紧土壤。

你能再举一些生活中的实例吗？

液 晶 液晶在现代生活中扮演着重要角色，从最初的电子手表到如今的笔记本电脑、液晶电视、可视电话……液晶一步步地深入了我们的生活。为什么“液体”和“晶体”联系在一起了？液晶到底是什么物质？

1888年，奥地利植物学家赖尼策尔 (F. Reinitzer) 做实验时发现，他加热的化合物熔化后先变成了白色的浑浊液体，继续加热则呈现某些颜色，最后变成透明液体。在对化合物降温后重复实验，依然看到同样现象。赖尼策尔没有像其他人那样将这种新奇的现象简单地归因于材料不纯，而是更加精心地制备材料，对颜色的起因进行探究。1888年3月14日，赖尼策尔将样品寄给德国的年轻物理学家雷曼 (O. Lehmann) 并附上一封长信。雷曼经过系统研究，发现许多有机化合物都具有同样的性质，这些化合物像液体一样具有流动性，而其光学性质与某些晶体相似，具有各向异性，于是取名液晶 (liquid crystal)。

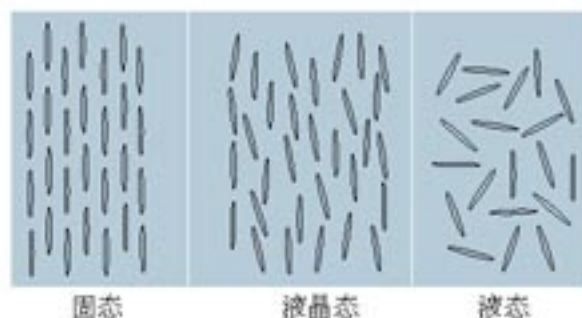


图 9.2-10 液晶分子及固态、液态分子的示意图

液晶是一种特殊的物质，它既具有液体的流动性，又像某些晶体那样具有光学各向异性。有些物质在特定的温度范围之内具有液晶态；另一些物质，在适当的溶剂中溶解时，在

一定的浓度范围具有液晶态。不是所有物质都具有液晶态。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。天然存在的液晶并不多，多数液晶是人工合成的，目前已达5 000多种。

1964年，美国无线电公司（RCA）发现了液晶的多种光学效应，由此开始了液晶在显示器方面的应用。这也是当前液晶最主要的应用方向。数字式电子表的显示窗口中有一层液晶，液晶层的上下是两块透明的电极板，板上刻着组成数字的若干“笔画”，各个笔画上的电压由计时电路控制。没有电压的笔画下面的电场为0，这时液晶能使下面反射来的光线通过，有电场时光线不能通过，于是我们就看到显示的时刻了。

液晶显示的原理涉及光的偏振的知识，我们在《选修3-4》中还要学习。

笔记本电脑的彩色显示器也是液晶显示器。在某些液晶中掺入少量多色性染料，染料分子会与液晶分子结合而定向排列，从而表现出光学各向异性。当液晶中电场强度不同时，它对不同颜色的光的吸收强度也不一样，这样就能显示各种颜色。

某些物质在水溶液中能够形成薄片状液晶，而这正是生物膜的主要构成部分。目前在实验室中已经可以利用这样的人造生物膜研究离子的渗透性，从而了解机体对药物的吸收等生理过程。实际上，液晶的特点与生物组织的特点正好吻合，在脑、肌肉、卵巢、视网膜等多种人体组织中都发现了液晶结构，有关液晶的研究已经成为物理科学（physical sciences）与生命科学（life sciences）的一个重要结合点。



图9.2-11 液晶显示器

问题与练习

1. 把玻璃管的裂口放在火焰上烧熔，它的尖端就变圆（图9.2-12）。这是什么缘故？



甲



乙



丙

图9.2-12 玻璃管锋利的断口在烧熔后变得光滑

2. 在地面上, 盘中较小的水银滴接近球形, 较大的水银滴呈扁平形 (图 9.2-13)。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?



图 9.2-13 较大的水银滴呈扁平状

3. 透过布制的伞面能看得见纱线间的缝隙, 但是伞面却不漏雨水, 解释这种现象。

4. 把一枚缝衣针在手上蹭一蹭, 然后放到一个棉纸上, 用手托着棉纸, 放入水中。棉纸浸湿下沉, 而缝衣针会停在水面。把针按下水面, 针就不再浮起。试一试, 并解释看到的现象。

5. 要想把凝在衣料上的蜡去掉, 可以把两层棉纸分别放在蜡迹的上面和下面, 然后用热熨斗在棉纸上回来回熨烫。为什么这样做可以去掉衣料上的蜡?

6. 在一次小发明讨论会上, 李晓冬有一个创意。他发现厨房碗柜里酱油瓶的下面总是有黑乎乎的酱油痕迹, 这是由于每次倒酱油的时候总会有一些酱油沿着瓶口流下来所造成的。李晓冬想, 只要选择恰当的材料做酱油瓶的瓶口, 就能保持瓶子清洁。于是, 他把酱油分别滴在不同的材料上进行试验。请你观察图 9.2-14, 你认为应该选择哪一种材料? 请你解释李晓冬这项创意的道理。



图 9.2-14 两种材料上的酱油滴

3

饱和汽与饱和汽压

物质从液态变成气态的过程叫做汽化 (vaporization)。汽化有两种方式: 蒸发和沸腾。蒸发 (evaporation) 只发生在液体表面, 而且在任何温度下都能发生。沸腾 (boiling) 是在液体表面和液体内部同时发生的剧烈的汽化现象, 沸腾只在一定的温度下才会发生, 这个温度就是液体的沸点。沸点与大气压有关, 大气压较高时沸点也比较高。

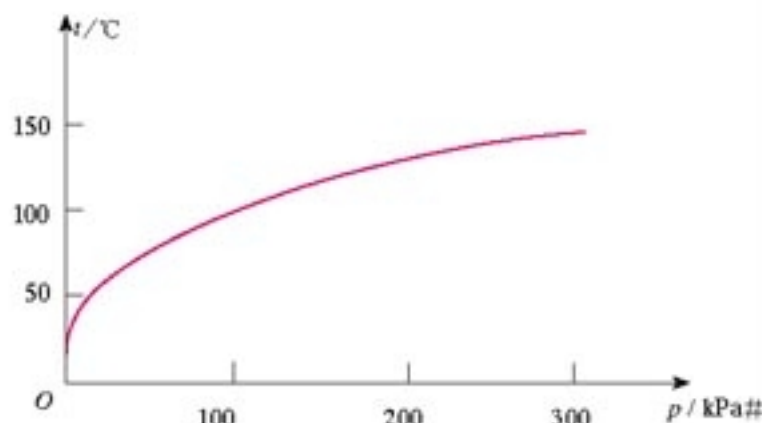


图 9.3-1 水的沸点与大气压的关系

物质的熔点也与大气压有关, 但不像沸点与大气压的关系那样明显。

做一做

观察低气压下的热水

把约80℃的热水倒入与抽气筒相连的瓶内，拉动抽气筒向外抽气（图9.3-2），观察发生的现象。

图9.3-2 减小瓶中的气压，会看到什么现象？



思考与讨论

装在敞口容器里的液体，由于蒸发，过一段时间后会全部消失。而盛在密闭容器里的液体，即使过很长时间，也不会减少。难道密闭容器里液体的分子不再飞离液面吗？

饱和汽与饱和汽压 我们以水为例分析液体蒸发时分子的运动情况。水面上同时进行着两种相反的过程：一方面，水分子从液面飞出来；另一方面，由于水蒸气的分子在不停地做无规则的热运动，有的分子撞到水面又回到水中。在密闭的容器中，随着水的不断蒸发，水面上方水分子的数量不断增多，回到水中的分子数也逐渐增多，蒸发的速度也逐渐变慢。最后，当气态水分子的数密度增大到一定程度时，就会达到这样的状态：在相同时间内回到水中的分子数等于从水面飞出去的分子数。这时，水蒸气的密度不再增大，液体水也不再减少，液体与气体之间达到了平衡状态，蒸发停止。这种平衡是一种**动态平衡 (dynamic equilibrium)**。

与液体处于动态平衡的蒸汽叫做**饱和汽 (saturated vapor)**，而没有达到饱和状态的蒸汽叫做**未饱和汽**。在一定温度下，饱和汽的分子数密度是一定的，因而饱和汽的压强也是一定的，这个压强叫做这种液体的**饱和汽压 (saturated vapor pressure)**。未饱和汽的压强小于饱和汽压。

饱和汽压随温度而变。温度升高时，液体分子的平均动能增大，单位时间里从液面飞出的分子数增多，原来的动态平衡被破坏，液体继续蒸发，蒸汽的压强继续增大，直至达到新的动态平衡。

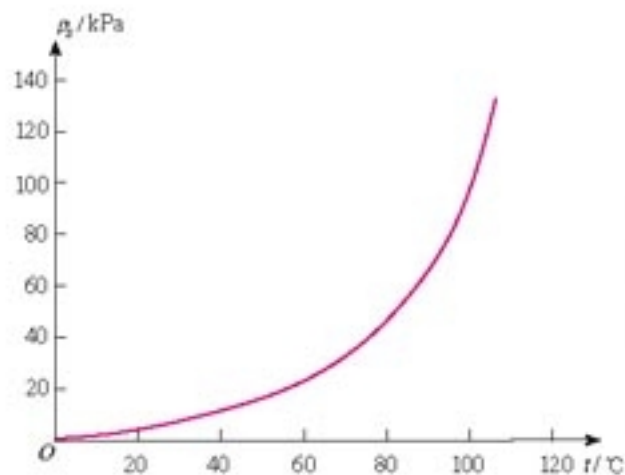


图9.3-3 水的饱和汽压与温度的关系

说一说

对比图9.3-1和图9.3-3，关于水的沸点，你有什么新的发现？

在实际问题中，水面上方不只有水分子，还有空气中其他各种气体的分子。这里说的饱和汽压，指的只是空气中水蒸气的分气压，与其他气体的压强无关^①。谈到其他液体的饱和汽压时，也是只指这种气体的分气压。

空气的湿度 空气的湿度可以用空气中所含水蒸气的压强 p_1 来表示，这样表示的湿度叫做空气的绝对湿度。但是，影响蒸发快慢以及影响人们对干爽与潮湿感受的因素，不是空气中水蒸气的绝对数量，而是空气中水蒸气的压强 p_1 与同一温度下水的饱和汽压 p_s 的差距。例如，某日白天的气温是 $20\text{ }^\circ\text{C}$ ，空气中水蒸气的压强是 $1.1 \times 10^3\text{ Pa}$ ，我们感到比较干爽；到了夜间，如果空气中水蒸气的压强不变，但气温降到 $10\text{ }^\circ\text{C}$ ，我们就会感到有些潮湿。这是因为，白天 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时水蒸气的饱和汽压是 $2.3 \times 10^3\text{ Pa}$ ，当时水蒸气的实际气压与之相差很大，身体表面的水分蒸发得比较快；而到了夜间， $10\text{ }^\circ\text{C}$ 时水的饱和汽压只有 $1.2 \times 10^3\text{ Pa}$ ，当时空气中水蒸气的实际压强与之相差无几，体表的水分几乎不能蒸发，所以人就感到潮湿。

出于这样的原因，我们常用空气中水蒸气的压强与同一温度时水的饱和汽压之比来描述空气的潮湿程度，并把这个比值叫做空气的相对湿度 (relative humidity)，即

$$\text{相对湿度} = \frac{\text{水蒸气的实际压强}}{\text{同温下水的饱和汽压}}$$

湿度计 学校里常见的是干湿泡湿度计 (图 9.3-4)。它由两个相同的温度计组成，其中一枝温度计的玻璃泡外包着纱布，纱布的另一端浸在水中。由于蒸发吸热，湿泡所示的温度小于干泡所示的温度。蒸发的快慢与空气的湿度有关，也与气温有关。读出干、湿两枝温度计的读数，在湿度计木架上的表格中即可查到当时空气的相对湿度。这种湿度计准确可靠但使用不太方便。

过去还用过毛发湿度计。头发脱脂后可以吸收水分，吸水后伸长，干燥后缩短。把头发的长短变成指针的转动，就制成了毛发湿度计。

现代湿度计用传感器测量湿度。一种湿度传感器的工作原理是，在基片上涂着能够吸收水分的导电物质，当空气湿度变化，导电物质中的水分增加或减少，导致元件的电阻值变化，从而影响电路中的电流。市场上与电子钟或电子温度计装在一起的大多是这种湿度计。



图 9.3-4 干湿泡湿度计



图 9.3-5 市场上的家用湿度计常与温度计装在一起

^① 容器中混合气体的压强等于在同样温度、同样体积条件下混合气体各成分单独存在时的分压强之和，这个规律称为道尔顿分压定律。它与玻意耳定律、查理定律、盖-吕萨克定律及阿伏加德罗定律一起，统称为气体实验定律。

说一说

人对湿度的感受

“……今日白天无雨，最高气温将达到 $31\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于相对湿度较大，赶中考的学子可能会感到闷热……”这是2004年6月18日某市晨报的一则消息。空气的湿度对人的生活是有很大影响的。

医学研究表明，夏季引发中暑有三个临界点：

气温在 $30\sim 31\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度大于85%；

气温超过 $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度大于50%；

气温超出 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度大于30%。

不难看出，在相对湿度比较大时，较低的温度就能引起中暑。

只有室内温度和湿度搭配得当、通风良好，人们才会感到舒适。居室内什么温度和湿度最适宜呢？

对于同样的气象条件，从小生活在炎热地区的人和寒冷地区的人，干燥地区和潮湿地区的人，由于适应性不同，主观感受并不一样。一般说来，按我国大多数人民的习惯，夏季温度为 $24\sim 29\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，冬季温度为 $16\sim 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度为40%~60%（最好不低于30%、不超过70%），这才是理想舒适的气候环境。

结合自己的感受并上网查找资料，进一步了解空气湿度对日常生活和生产的影响。

问题与练习

1. 在潮湿的天气里，洗了的衣服不容易晾干。为什么？
2. 液面上部的蒸汽达到饱和时，还有没有液体分子从液面飞出？为什么这时从宏观上看来液体不再蒸发？
3. 一瓶矿泉水喝了一半之后，把瓶盖拧紧，不久瓶内水的上方就形成了水的饱和汽。当温度降低时，瓶内饱和汽的密度会减小，请从微观角度分析饱和汽密度减小的过程。
4. 在严寒的冬天里，房间窗玻璃上往往会结一层雾珠，使玻璃变得雾蒙蒙的。雾珠是在窗玻璃的内表面还是外表面？雾珠是怎样形成的？

计算以下两题时如果还需要其他数据，可以在本书或其他资料中查找。

5. 当空气的绝对湿度是 $3 \times 10^3\text{ Pa}$ ，气温是 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，空气的相对湿度是多大？
6. 白天的气温是 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，空气的相对湿度是60%。天气预报说夜里的气温要降到 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，那么，空气中的水蒸气会不会成为饱和汽？为什么？

4

物态变化中的能量交换

物质的气态、液态、固态在一定的条件下可以相互转变。在转变的过程中会发生能量的交换。我们在初中学过的“蒸发吸热”“液化放热”“熔化吸热”“凝固放热”，指的就是这种能量交换。

熔化热 熔化 (**melting**) 指的是物质从固态变成液态的过程，而凝固 (**solidifying**) 指的是从液态变成固态的过程。

为什么熔化会吸热、凝固会放热？原来，固态物质的分子受到周围其他分子的强大作用，被束缚在一定的位罝，只能在这位罝附近振动。对固体加热，当温度升高到一定程度时，一部分分子的能量足以摆脱其他分子的束缚，从而可以在其他分子之间移动，于是固体开始熔解。

某种晶体熔化过程中所需的能量与其质量之比，称做这种晶体的**熔化热 (melting heat)**。一定质量的晶体，熔化时吸收的热量与凝固时放出的热量相等。不同的晶体有不同的结构，要破坏不同物质的结构，所需的能量也就不同。因此不同晶体的熔化热也不相同。

非晶体液化过程中温度会不断改变，而不同温度下物质由固态变为液态时吸收的热量是不同的，所以非晶体没有确定的熔化热。

表 9-4-1 几种物质在压强为 $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时的熔化热

物质名称	水	铝	铜	碳酸钙	氯化钠	二氧化碳
熔化热 / ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	333.8	395.7	205.2	527.5	517.1	180.9

说一说

一定质量的物质熔化时吸收的能量，与这种物质凝固时放出的能量相等。如果不相等，可能出现什么现象？

汽化热 汽化 (**vaporization**) 指的是物质从液态变成气态的过程，**液化 (liquefaction)** 指的是从气态变成液态的过程。

液体汽化时，液体分子离开液体表面成为气体分子，要克服其他液体分子的吸引而做功，因此要吸收能量。某种液体汽化成同温度的气体时所需的能量与其质量之比，称做这种物质在这个温度下的**汽化热 (heat of vaporization)**。液体汽化时体积会增大很多，分子吸收的能量不只用于挣脱其他分子的束

固体 (晶体) 只在温度达到熔点时熔化，而液体可以在任何温度下汽化，所以在提到汽化热时一定要注意的是在什么温度下的汽化热。

缚，还用于体积膨胀时克服外界气压做功，所以汽化热还与外界气体的压强有关。

一定质量的物质，在一定的温度和压强下，汽化时吸收的热量与液化时放出的热量相等。

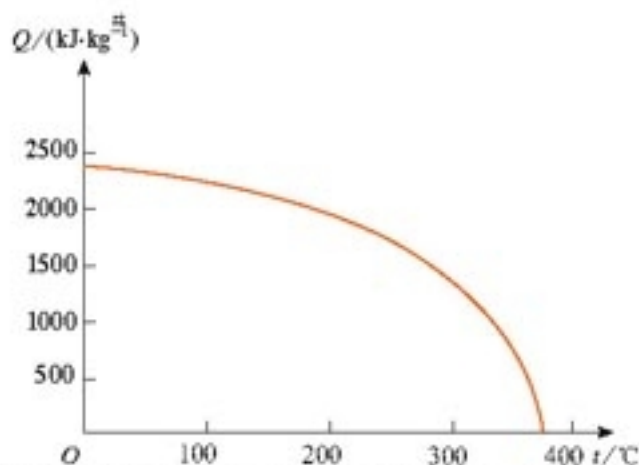


图9.4-1 水在大气压强为 $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ 下汽化热与温度的关系

表 9.4-2 几种物质在压强为 $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、温度为沸点时的汽化热

物质名称	水	氧	氮	硅	硒	钠
沸点/ $^{\circ}\text{C}$	100	-182.96	-195.8	2 355	684.9	882.9
汽化热/ $(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	2 260	213	200	1.06×10^4	7.6×10^2	3.9×10^3

做一做

了解热管

热管是利用液化和汽化传递热量的装置，近年来发展很快。登录一个有搜索功能的网站，键入“热管”二字，你就能获得许多关于热管的原理、应用的知识，以及相关的商业知识。

说一说

在一定的压强下，不同物质的沸点是不同的。利用这个性质可以分离不同的液态物质。图 9.4-2 是我国湖北一个小酒厂从酒与水的混合物中把酒提纯的装置。你能说出它的工作流程吗？

上面的过程在工业上叫做分馏。按照同样的道理，可以从空气中制氧，还可以从石油中分离汽油、煤油、柴油等。



图 9.4-2 小酒厂造酒时的提纯

科学漫步

气体的液化

科学研究、工农业生产和日常生活中都会用到液化气体。炼油厂生产的丙烷、丁烷和丙烯、丁烯等气体，液化后变成液化石油气(LPG)，装在钢瓶中，可以用于烧饭，也可以代替汽油驱动汽车。气体液化后体积大大缩小，便于储存和运输。例如，有的火箭发动机就用液氢和液氧做燃料。液氮和液氦还常在实验室中用来获得低温。

要把气体液化，先要把未饱和汽变成饱和汽。

在一定温度下，饱和汽的密度大于未饱和汽的密度。在保持温度不变的情况下，用增大压强的办法来减小未饱和汽的体积，增大它的密度，那么，压缩到一定程度时未饱和汽就成了饱和汽。这时进一步减小气体的体积，就能使饱和汽凝结成液体。

饱和汽的密度还跟温度有关系。温度越低，饱和汽的密度就越小。如果保持气体的密度不变，降低它的温度，当气体的实际密度等于饱和汽的密度时，气体也就变成了饱和汽，如果进一步降温，饱和汽就会凝结成液体。

实际上往往同时增大压强和降低温度以使气体液化。那么，这样的方法是否能使所有的气体液化呢？

19世纪，法拉第和其他一些科学家在这方面做了许多工作。他们运用增压和冷却的办法，把许多气体都液化了，其中有氨、氯、二氧化硫、氯化氢、硫化氢、二氧化碳等。但是，他们发现，有几种气体，例如氧、氢、氮等，无论怎样加压都不能使其液化。当时以为这些气体是不能液化的“永久气体”。

后来，进一步的研究发现，各种气体都有一个特殊的温度，在这个温度以上，无论怎样增大压强也不能使其液化，这个温度叫做临界温度。氧、氢、氮等气体之所以没有被液化，是因为它们的临界温度很低，当时的技术还不能获得这样的低温。于是，科学家和工程师们又努力改进低温技术，结果在20世纪初，所有的气体都被液化了。最后一种气体是氦，它于1908年被液化(临界温度5.35 K)，后来还被凝固成了固态(熔点0.95 K)。



图 9.4.3 液态氮在低温物理学中有很多用途

问题：水蒸气的临界温度是多少？本节已经给出了这个问题的信息，你能找到吗？

问题与练习

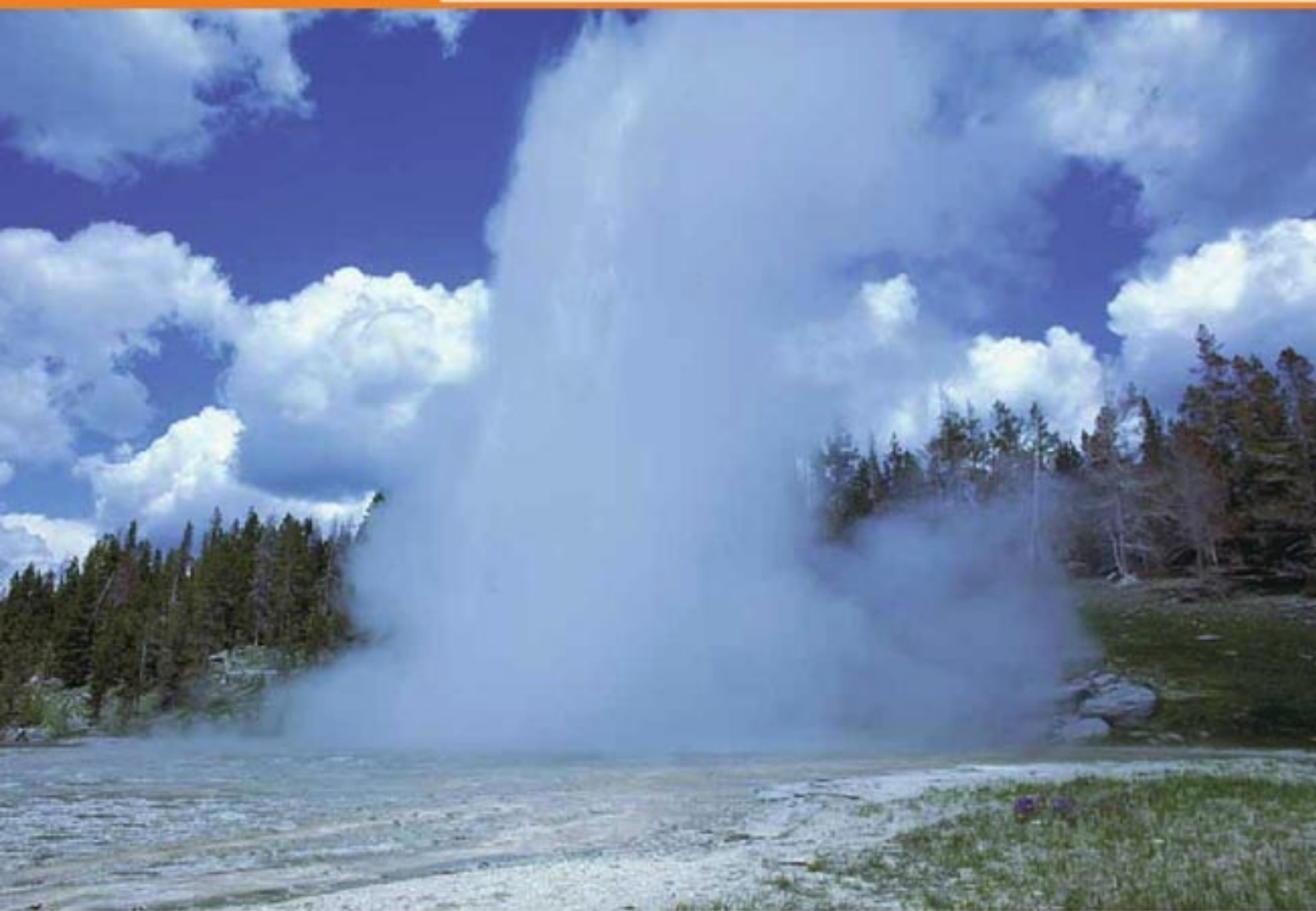
1. 晶体熔化时需要从外界吸热，而温度又不升高，这些热量消耗在哪里？
2. 人的体温是由下丘脑中特殊神经细胞监察和控制的，这些神经就像一个温度传感器，对人体血液的温度很敏感。当流过上丘脑的血液的温度高于正常值时，它促使人体散热机制活跃起来，使人出汗。轻量级举重运动员参赛前常在高温、高湿的环境中通过大量排汗达到减少体重的目的。如果一位体重60 kg的运动员某次训练的排汗量是0.5 kg，而且这些汗水都从运动员身上蒸发掉了而没有流掉，这将导致运动员的体温降低多少？已知常温下水的汽化热是 $2.4 \times 10^6 \text{ J/kg}$ 。人体的主要成分是水，可以认为人体的比热容与水的比热容相等。
3. 某校研究性学习小组为估测太阳对地面的辐射功率，制作了一个直径0.2 m的 0°C 的冰球，在环境温度为 0°C 时，用黑布把冰球包裹后悬吊在弹簧测力计下放到太阳光中。经过40 min后弹簧测力计的读数减少了3.49 N。请你帮助这个小组估算太阳光垂直照射在某一单位面积上的辐射功率。冰的熔化热为 $3.35 \times 10^5 \text{ J/kg}$ 。

在自然过程的庞大工厂里，熵的原理起着经理的作用，因为它规定整个企业的经营方式和方法；而能的原理仅仅充当了簿记员，平衡着贷方和借方。

——R. 埃姆登^①

第十章

热力学定律



冷热变化是最早引起人们关注的自然现象之一。春夏秋冬，温暑凉寒，何时何处不与冷热相关？人类不但掌握了精确的测温控温方法，还可以人工产生高热和深冷，在高热和深冷的“世界”里不断发现新的科学奇迹。可以说，现代科技的每一项成功，不论是试管婴儿的诞生，还是探索原子世界的奥秘；不论是杂交水稻的培育，还是驾驶“神舟”飞船遨游太空，都离不开冷热的学问。有关冷热的科学知识——物理学中的热学，已成为当代科技中最活跃的领域之一。

^① R. 埃姆登 (Robert Emden, 1862 — 1940)，德国物理学家，主要从事天体物理学的研究。

1

功和内能

演示

在有机玻璃筒底放置少量易燃物，例如蓬松的棉花，迅速压下筒中的活塞，观察筒底物品的变化。

这个实验说明了什么？



图 10.1-1 压下活塞，观察筒底物品的变化。

焦耳的实验 从19世纪30年代起，人们逐渐认识到，为了使系统的热学状态发生变化，既可以向它传热，也可以对它做功。从1840年开始，英国物理学家焦耳进行了多种多样的实验，以求精确测定外界对系统做功和传热对于系统状态的影响，以及功与热量的相互关系。

在焦耳的大量实验中，有两个最具有代表性。一个是让重物下落带动叶片搅拌容器中的水，引起水温上升。如图 10.1-2，用绝热性能良好的材料制作容器，容器中安装着叶片组成的搅拌器。重物下落时带动叶片转动，搅拌容器中的水，水由于摩擦而温度上升。

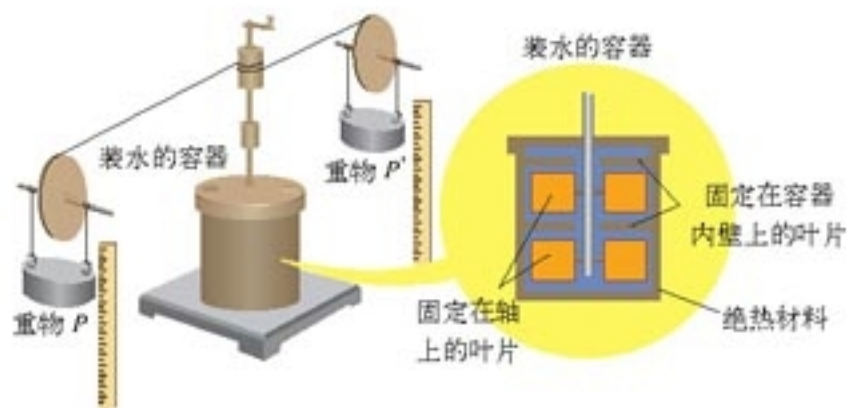


图 10.1-2 焦耳热功当量实验的装置

在这个过程中，系统只由于外界对它做功而与外界交换能量，它不从外界吸热，也不向外界放热，这样的过程叫做绝热过程 (adiabatic process)。



焦耳 (James Prescott Joule, 1818—1889)，英国物理学家。起初研究电学和磁学。1840年12月在英国皇家学会上宣布了电流通过导体产生热量的定律，即焦耳定律。焦耳测量了热与机械功之间的当量关系——热功当量，为热力学第一定律和能量守恒定律的建立奠定了实验基础。焦耳与W. 汤姆孙 (即开尔文) 合作，研究了气体自由膨胀降温的实验，他们的研究成果如今广泛应用于低温和气体液化方面。焦耳对蒸汽机的发展也做了不少有价值的工作，还第一次计算了气体分子的速度。

焦耳的多次实验测量表明，尽管各次悬挂重物的质量不同，下落的高度也不一样，但只要重力所做的功相同，容器内水温上升的数值都是相同的，即系统状态的变化是相同的。

焦耳的另一个有代表性的实验，是通过电流的热效应给水加热。如图 10.1-3，正在降落的重物使发电机发电，电流通过浸在液体中的电阻丝，使液体温度上升。

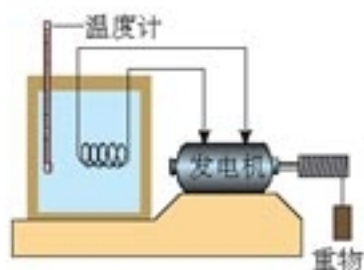


图 10.1-3 重物使发电机发电，电流通过电阻使液体升温。

多次实验结果表明，对同一个系统，如果过程是绝热的，那么不管通过电阻丝的电流或大或小、通电时间或长或短，只要所做的电功相等，则系统温度上升的数值是相同的，即系统的状态变化相同。

焦耳的这些实验表明，在各种不同的绝热过程中，如果使系统从状态 1 变为状态 2，所需外界做功的数量是相同的。也就是说，要使系统状态通过绝热过程发生变化，做功的数量只由过程始末两个状态 1、2 决定，而与做功的方式无关。

内能 在力学中，重力所做的功仅由物体的起点和终点两个位置决定，而与物体的运动路径无关。根据这一事实，人们认识到物体具有重力势能，物体在两位置间的重力势能之差，等于物体在这两位置间移动时重力所做的功。

与此类似，在热力学系统的绝热过程中，外界对系统所做的功仅由过程的始末两个状态决定，不依赖于做功的具体过程和方式。这就使我们认识到，任何一个热力学系统都必定存在一个只依赖于系统自身状态的物理量，这个物理量在两个状态间的差别与外界在绝热过程中对系统所做的功相联系。鉴于功是能量变化的量度，所以这个物理量必定是系统的一种能量，我们把它称为系统的内能^① (**internal energy**)。这样，当系统从状态 1 经过绝热过程达到状态 2 时，内能的增加量 $\Delta U = U_2 - U_1$ 就等于外界对系统所做的功 W ，即

$$\Delta U = W$$

在第七章中我们曾把系统中所有分子热运动的动能和分子间的相互作用势能的总和叫做系统的内能。而且已经认识到，当系统的状态改变时，例如温度、体积改变时，系统的内能也要改变，也就是说，系统的内能是由它的状态决定的。由此可见，第七章谈到的内能与这里的内能是一致的，前者为后者提供了微观解释。

做一做

如图 10.1-4，透明塑料瓶内有一些水，水的上方有水蒸气。用带孔橡皮塞把瓶口塞住，向瓶内打气，当瓶塞跳出时，观察瓶内的变化。

我们研究的是瓶塞跳出的过程，而研究的对象，即“系统”是什么？在瓶塞跳出的过程中，是外界在对系统做功还是系统在对外界做功？这个过程中系统的内能有什么变化？你从什么现象推断出它的内能发生了变化？



图 10.1-4 观察瓶塞跳出时瓶内的变化

^① 内能又名热力学能。日常生活中说的热能也指内能，但热能不是规范的科学术语。

问题与练习

1. 分子动理论中是怎样引入系统内能概念的？本节是怎样引入系统内能概念的？为什么说它们是一致的？
2. 举几个实例说明做功可以改变系统的内能。
3. 在图 10.1-2 和图 10.1-3 所示焦耳的两个实验中，各是什么形式的能转化为系统的内能？
4. 如果气体膨胀时与外界没有热交换，这样的膨胀叫做绝热膨胀。分别讨论气体在真空中和在大气中做绝热膨胀时是否做功。如果做功，所需的能量从何而来？

2

热和内能

热传递 两个温度不同的物体相互接触时温度高的物体要降温，温度低的物体要升温，我们说，热量从高温物体传到了低温物体。这样的过程叫做热传递。

热传递有三种方式：热传导、热对流和热辐射（图 10.2-1）。



图 10.2-1 热传递的三种方式

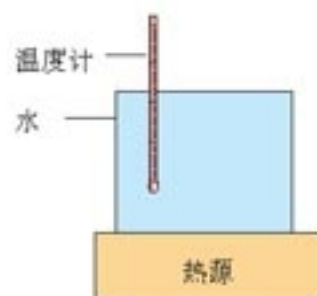


图 10.2-2 外界没有对系统（水）做功，只对系统传热，同样能改变系统的状态。

热和内能 不仅对系统做功可以改变系统的热力学状态，单纯地对系统传热也能改变系统的热力学状态（图 10.2-2）。所以，热量是在单纯的传热过程中系统内能变化的量度。当系统从状态 1 经过单纯的传热达到状态 2，内能的增量 $\Delta U = U_2 - U_1$ 就等于外界向系统传递的热量 Q ，即

$$\Delta U = Q$$

像做功一样，热量的概念也只有在涉及能量的传递时才有意义。所以不能说物体具有多少热量，只能说物体吸收或放出了多少热量。

虽然做功和热传递都能引起系统内能的改变，但它们还是有重要区别的。做功时内能与

其他形式的能，如内能与机械能、内能与电能等发生转化，而热传递只是不同物体（或一个物体的不同部分）之间内能的转移。

科学足迹

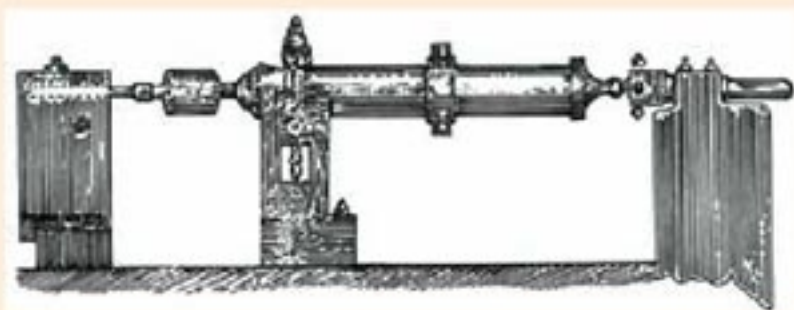
探索热的本质

热质说和热动说 对于“热是什么”，历史上有两种不同的观点。一种是热的物质说（热质说），另一种是热的运动说（热动说）。

F. 培根、R. 波意耳、R. 笛卡儿、R. 胡克、I. 牛顿、D. 伯努利、M. B. 罗蒙诺索夫等人根据摩擦生热等现象，认为热是粒子运动的表现，物体由于粒子的剧烈运动而发热。但在他们的时代，这个观点缺乏足够的实验证据。

与此对立的另一种看法是热质说。它认为，热是一种流质，名为热质，可以渗入一切物体，不生不灭，没有重量。一个物体是冷还是热，取决于其中所含热质的多少。热质说可以解释当时观察到的大部分热学现象：物体温度的变化是因为吸收、放出了热质，热传递是热质的流动与传播，热膨胀是由于热质粒子之间的排斥，等等。

但是，热质说无法解释伦福德的大炮钻孔实验。



在伦福德的时代，炮筒是在铁柱中钻孔制成的。

伦福德的实验 英籍科学家本杰明·汤普森(B. Thompson, 又名伦福德, Rumford, 1753—1814) 在德国慕尼黑兵工厂进行大炮钻孔加工时，发现钻头与钢铁的摩擦能产生大量的热。按照热质说，钻头越锋利，铁屑切得越小，它们能保存住的热质就越少，释放的热质就越多，用来冷却的水沸腾得也就越快。然而，伦福德注意到，在钻头已经变钝时照旧要产生大量的热。不但如此，他发现在钻孔加工中热量似乎是取之不尽的。

伦福德进行了反复的观察和实验，终于在1798年公布了他的研究成果。他明确指出：在这些实验中被激发出来的热，除了把它看做“运动”之外，似乎很难看做其他任何东西。

然而，事情并不简单。伦福德的实验无法进行定量测量，因此他的实验的说服力大打折扣。到了19世纪40年代，英国科学家焦耳以定量的实验为热动说的胜利画上了句号。

与伦福德同时代的英国化学家戴维(H. Davy, 1778—1829)，也通过实验否定了热质说。请你查找资料，向同学们描述戴维的实验。

问题与练习

- 下列事件中，物体的内能怎样改变（固体和液体的热膨胀很小，可不予考虑）？
 - 壶里的水被加热而温度升高；
 - 一条烧红的铁棒逐渐冷却下来。
- 铅弹以速度 $v = 200 \text{ m/s}$ 射入木块后停在木块中，木块没有移动。增加的内能的80%使铅弹的温度升高，铅弹温度升高多少？

3

热力学第一定律 能量守恒定律

热力学第一定律 焦耳的实验一方面表明，以不同的方式对系统做功时，只要始末两个状态是确定的，做功的数量就是确定的；另一方面也向我们表明，为了改变系统的状态，做功和传热这两种方法是等价的，也就是说，一定数量的功与确定数量的热相对应。

我们在前两节已经指出，单纯地对系统做功和单纯地对系统传热，内能的增量与功、热量的关系分别是 $\Delta U = W$ 和 $\Delta U = Q$ 。既然做功与传热在改变系统内能方面是等价的，那么当外界既对系统做功又对系统传热时，内能的增量就应该是

$$\Delta U = Q + W$$

也就是说，一个热力学系统的内能增量等于外界向它传递的热量与外界对它所做的功的和。这个关系叫做热力学第一定律（**first law of thermodynamics**）。

在焦耳之前，人们还没有认识到做功与传热在改变系统内能方面是等价的，焦耳做实验的本意是要探究两者的关系。

思考与讨论

一定量的气体，膨胀过程中是外界对气体做功还是气体对外界做功？如果膨胀时做的功是 135 J ，同时向外放热 85 J ，气体内能的变化量是多少？内能是增加了还是减少了？

请你通过这个例子总结 ΔU 、 Q 、 W 几个量取正、负值的意义。

能量守恒定律 过去我们学过了机械能守恒定律，其实那只是普遍的能量守恒在机械能范围内的表现。

能量守恒定律不是由某一个人通过某一项研究而得到的。从18世纪末到19世纪40年

代，不同领域的科学家从不同角度都提出了能量守恒的思想。人类对于能量守恒的认识经历了一个由浅入深、由含糊到清晰的过程。

俄国化学家盖斯于1836年发现，任何一个化学反应，不论是一步完成，还是分几步完成，放出的总热量相同，这表明一个系统（即参加化学反应的几种物质）存在着一个与热量相关的物理量，在一个确定的化学反应中这个量是不变的。这一发现被认为是能量守恒定律的先驱。

德国医生 J. R. 迈尔任船医时，在热带地区看到海员静脉中的血比在欧洲时更红，他联系到 A. L. 拉瓦锡的燃烧理论，认为在热带时人体会从外界获得一些热量（或说人体向外界散发的热量较少），因而机体需要从食物获得的热量较少，食物氧化过程减弱，静脉血中留下较多的氧，显红色。他由此想到食物中化学能与热能的等效性。迈尔还从海员谈话中听到海水在暴风雨中较热，于是想到热与机械运动的等效性。他在1841年和1842年连续写出论“自然力”（指能）守恒的论文，并推算了多少热与多少功相当。因此，迈尔是公认的第一个提出能量守恒思想的人。

以现代科学的观点看，迈尔的推理未必经得起推敲。但正是这些根据不充分的事实、经过不严格的推理而得出的“猜想与假设”，才是创造性思维中的最活跃的因素。

以上思想说明，这些人已经朦胧地意识到不同形式的运动之间可以相互转换，转换过程中某个物理量可能是不变的，但还没有定量的描述。焦耳的实验精确地测量了做功与系统状态变化之间的关系，也就是精确地测量了做功与传热之间的等价关系，从而为能量守恒定律奠定了牢固的实验基础。

德国科学家 H. 亥姆霍兹在不了解迈尔和焦耳的研究的情况下，从永动机不可能制成这一事实出发，考察了自然界不同的力（指不同的能）之间的相互关系，提出了“张力”（即势能）与“活力”（即动能）的转换。他还分析了在电磁现象和生物机体中能的守恒问题。此外，还有好几位科学家对这条定律作出了贡献。

能量守恒定律（**law of energy conservation**）可以表述为：能量既不会凭空产生，也不会凭空消失。它只能从一种形式转化为另一种形式，或者从一个物体转移到别的物体，在转化或转移的过程中其总量保持不变。

能量守恒定律告诉我们，各种形式的能可以互相转化。燃料燃烧生热，化学能转化成内能；在吸热反应中，内能转化为化学能；在发电机和电动机里，电能与机械能相互转化；电灯发光时，电能转化为光能；蓄电池充电和放电时，化学能与电能相互转化；各种生物电、生物磁现象，则是生物体内的化学能与电磁能的相互转化……事实表明，在所有这些转化过程中，能量都是守恒的。

以焦耳的实验为基础的热力学第一定律，实际上就是内能与其他能量发生转化时的能量守恒定律。

在20世纪30年代初，W. 泡利和 E. 费米根据能量守恒定律预言了中微子^①的存在并在后来得到证实。

^① 中微子是静止质量几乎为零的中性粒子，我们在《选修3-5》中还会遇到它。

能量转化和守恒定律的发现是科学史上的重大事件。恩格斯把它与细胞学说、生物进化论一起列为19世纪的三大发现。

能量转化和守恒定律的意义在于它把原来人们认为互不相关的各种现象——力学的、热学的、电学的、磁学的、光学的、化学的、生物学的、地学的——联系在一起，把表面上完全不同的各类运动统一在一个自然规律中。这样，它就使不同领域的科学工作者有了一系列的共同语言。现在，能量守恒定律仍然是我们研究自然科学的强有力的武器。

永动机不可能制成 17~18世纪，即资本主义发展初期，为了满足生产对于动力日益增加的需求，许多人致力于制造一种机器，它不需要任何动力或燃料，却能不断地对外做功，史称“第一类永动机”。然而，为此目的的任何尝试都失败了。为什么呢？答案就在能量守恒定律之中。

任何动力机械的作用都是把其他形式的能转化为机械能。内燃机把燃料的化学能转化为燃气的内能然后再转化为机械能，电动机把电能转化为机械能……如果没有燃料、电流或其他动力的输入，能量从哪里来呢！永动机的思想违背了能量守恒定律，所以是不可能制成的。

应该指出的是，制造永动机的千万次失败使人们的头脑冷静下来，开始在更深层次寻找失败的原因。1775年法国科学院宣布“不再审查有关永动机的一切设计”。这使得人们走出迷梦，去研究各种能量形式相互转化的规律，促成了能量守恒定律的建立。我国物理学家冯端教授^①指出：除了要为焦耳、亥姆霍兹和迈尔这些做了杰出贡献的科学家树碑立传外，还应建立一个无名英雄纪念碑，其上最合适的铭文将是“纪念为实现永动机的奋斗而失败的人们”，这是因为人类在探索自然规律的过程中必然有各种假设，虽然后来发现某些假设是错误的，但正是前人的失败才使后人的思考走上了正路。

为什么叫做“第一类永动机”？下面一节我们就会看到，还有第二类永动机。

历史上设计永动机的人们以自己的失败帮助我们找到了正确的方向，他们的不懈努力反映了人类追求幸福生活的美好愿望。后人不应该讥笑他们。

但是，今天我们知道了能量守恒定律，就不要在这类徒劳中浪费时间了。

说一说

图10.3-1是历史上有名的一种永动机的设计。从图上看，设计者为什么认为这个机器会永远运动下去？不用能量的概念，你能不能说明它不会永远运动下去？

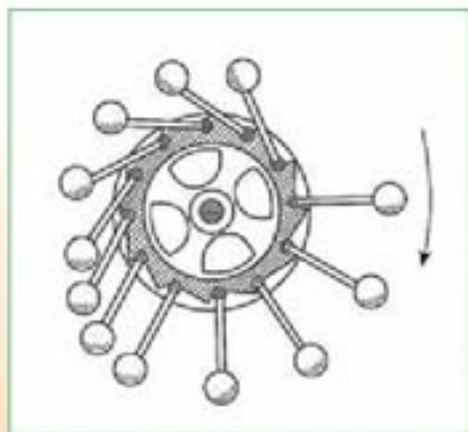


图10.3-1 历史上一种永动机的设计

^① 冯端（1923— ），南京大学物理系教授，中国科学院院士，曾任中国物理学会理事长。主要研究方向为凝聚态物理学。引文见《焯》，科学出版社1992年第1版。

问题与练习

1. 用活塞压缩汽缸里的空气，对空气做了 900 J 的功，同时汽缸向外散热 210 J，汽缸里空气的内能改变了多少？
2. 如图 10.3-2，在汽缸内活塞左边封闭着一定量的空气，压强和大气压相同。把汽缸和活塞固定，使汽缸内空气升高一定的温度，空气吸收的热量为 Q_1 。如果让活塞可以自由滑动（活塞与汽缸间无摩擦、不漏气），也使汽缸内空气温度升高相同温度，其吸收的热量为 Q_2 。
 - (1) Q_1 和 Q_2 哪个大些？
 - (2) 气体在定容下的比热容与在定压下的比热容为什么会有不同？
3. 为测算太阳射到地面的辐射能，某校科技实验小组的同学把一个横截面积是 300 cm^2 的矮圆筒的内壁涂黑，外壁用保温材料包裹，内装水 0.6 kg 。让阳光垂直圆筒口照射 2 min 后，水的温度升高了 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。请由此估算在阳光直射时地面上每平方米每分钟接受的太阳能量。
4. 某风景区有一处约 20 层楼高的瀑布，甚为壮观。请估计：瀑布上、下水潭的水温因瀑布的机械能转化成内能而相差多少？
5. 奶牛的心脏停止跳动后，大约在 1 h 内体温由 $37.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 降低到 $33.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。请你由此估算，在这种环境下饲养奶牛，要维持一个体重 400 kg 奶牛的内能不变，每天喂养奶牛的食物至少要能为它提供多少热量？计算时，可以认为奶牛体内绝大部分为水。
6. 如果用 Q 表示物体吸收的能量，用 W 表示物体对外界所做的功， ΔU 表示物体内能的增加，那么热力学第一定律可以表达为 $Q = \Delta U + W$ 。怎样解释这个表达式的物理意义？

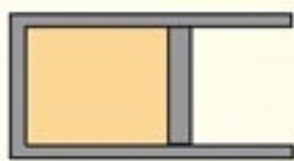


图10.3-2 汽缸内空气吸热温度升高

4

热力学第二定律

思考与讨论

下面，我们设想了一些过程，这些过程都不违背能量守恒定律，但是你见到过这些现象吗？

1. 把刚煮好的热鸡蛋放在冷水中，过一会儿，鸡蛋的温度降低，水的温度升高，最后水和鸡蛋的温度相同。是否可能发生这样的现象：原来温度相同的水和鸡蛋，过一

会儿水的温度自发地降低而鸡蛋温度上升，生蛋变成了熟蛋？

2. 一滴墨水滴进一杯清水中，不久整杯水都均匀地变黑了。有没有这样的“逆过程”：这杯均匀黑水中的小炭粒又自发地聚集在一起，成为一滴墨水，而其余部分又变成了清水？

3. 在平地上滚动的足球克服摩擦力做功，其动能转化为内能，最终停了下来，同时足球、地面及周围空气的温度略有上升。会不会有这样的现象：静止的足球和地面、周围的空气自发地降低温度释放内能，并将释放出的内能全部转化为动能，让足球又滚动起来？

4. 装着压缩气体的钢瓶，打开阀门后会听到“哧——”一声，气体喷到外面。会不会有这样的现象：外面的气体自发地进入钢瓶，使瓶内的压强变大？

……

能量守恒定律告诉我们，在自然界发生的一切过程中能量都是守恒的，一个导致能量创生或能量消灭的过程是不可能出现的。然而，并不是所有符合能量守恒定律的宏观过程都能真的发生。

无数事实告诉我们，凡是实际的过程，只要涉及热现象，如热传递、气体的膨胀、扩散、有摩擦的机械运动……都有特定的方向性。这些过程可以自发地朝某个方向进行，例如热由高温物体传向低温物体，而相反的过程，即使不违背能量守恒定律，我们也从未见到它们会自发地进行。这就是说，一切与热现象有关的宏观自然过程都是不可逆的。

在物理学中，反映宏观自然过程的方向性的定律就是热力学第二定律（**second law of thermodynamics**）。

热力学第二定律的一种表述 德国物理学家克劳修斯(R. Clausius, 1822—1888) 在1850年提出：热量不能自发地从低温物体传到高温物体。这是热力学第二定律的克劳修斯表述。

这里阐述的是热传递的方向性。在这个表述中，“自发”二字指的是：当两个物体接触时，不需要任何第三者的介入，不会对任何第三者产生任何影响，热量就能从一个物体传向另一个物体。当两个温度不同的物体接触时，这个“自发”的方向是从高温物体指向低温物体的。

难道热量不能从低温物体传向高温物体吗？电冰箱通电后箱内温度低于箱外，但还会继续降温，直至达到设定的温度。难道这个过程不遵从热力学第二定律吗？

在电冰箱的例子中，热量的确从低温物体——箱内食品，传到了高温物体——箱外空气。但这不是自发的过程，这个过程必须有第三者的介入：必须开动冰箱的压缩机。如果电

热力学第二定律的表述方式与其他物理定律的表述方式有一个显著的不同。它是用否定语句表述的（绝大多数物理定律都是用肯定语句表述的），它告诉我们什么样的过程不可能发生。

厂不再消耗燃料发电，冰箱的压缩机会停止工作，自发的过程则是热量从箱外的高温空气传向箱内的低温食品。



图 10.4-1 热量可以自发地从高温物体向低温物体传递，但要从低温物体向高温物体传递，必须有第三者的介入。

热力学第二定律的另一种表述 汽车和轮船上用的汽油机、柴油机，火力发电厂和核电站用的蒸汽轮机，飞机和火箭用的喷气发动机，以及过去用的蒸汽机，都是热机。从能量的角度看，热机的工作分为两个阶段，第一个阶段是燃烧燃料，把燃料中的化学能变成工作物质的内能，第二个阶段是工作物质对外做功，把自己的内能变成机械能。

蒸汽机中的水蒸气、汽油燃烧后在内燃机汽缸中形成的高温气体、火箭喷出的炽热燃气，这些都是工作物质，简称工质。



甲 汽轮机的工作原理



乙 大型汽轮机的叶轮

图 10.4-2 汽轮机的工作物质是水蒸气。水在锅炉里加热，变成高温高压的水蒸气，经过喷嘴射到叶轮上，使叶轮转动。水蒸气的余热可以用来为城市供暖。



图 10.4-3 热机能流图

任何机械都有效率的问题，热机也不例外。燃料产生的热量有的由于漏气而损失；有的使机体的温度上升，然后又通过机体散失了；转化为机械能的那部分还要用于克服机械摩擦……因此，热机输出的机械功 W 总要小于燃料产生的热量 Q 。热机的效率

$$\eta = \frac{W}{Q}$$

总是小于 100%。

现在的问题是：如果没有漏气、没有摩擦，也没有机体热量的损失，这样的热机的效率是不是 100%？也不是！原因在于，尽管漏气、摩擦、机体热量损失可以减少甚至在理

想情况下可以消除，但是工质吸收的热量还是不能全部变成功。例如，汽车排出气体的温度一定会比空气的温度高^①，它会向空气散热。

蒸汽机和蒸汽轮机从锅炉中获取热量，内燃机从汽缸中获取热量，锅炉、汽缸是高温热库。水蒸气在蒸汽机或蒸汽轮机中做功后来到了冷凝器，在冷凝器中排出剩余的热量，冷凝器是低温热库。内燃机没有冷凝器，大气就是它的低温热库。

热机工作时从高温热库吸收的热量 Q ，只有一部分用来做功 W ，转变为机械能，另一部分热量要排放给低温热库（冷凝器或大气）。也就是说，热机在工作过程中必然排出部分热量，热机用于做功的热量一定小于它从高温热库吸收的热量，即

$$W < Q$$

因此，即使没有任何漏气、摩擦、不必要的散热等损失，热机的效率也不会是 100%。

开尔文在分析了热机及其他涉及做功的热学过程后，于 1851 年提出了热力学第二定律的另一种表述，即开尔文表述：不可能从单一热库吸收热量，使之完全变成功，而不产生其他影响。

热力学第二定律的开尔文表述阐述了机械能与内能转化的方向性：机械能可以全部转化为内能，而内能无法全部用来做功以转换成机械能。例如，两个相互接触并做相对运动的物体，由于摩擦而静止下来，它们的机械能可以全部转化为内能，但相反的过程不可能自发进行而不产生其他影响。

可以证明，热力学第二定律的上述两种表述是等价的，可以从其中一种表述推导出另一种表述。其实，宏观过程的不可逆性都是互相关联的，由一种过程的不可逆性可以通过推理得知另一种过程的不可逆性。因此，对任何一类宏观自然过程进行方向的说明，都可以作为热力学第二定律的表述。例如，在图 10.4-6 中，盒子中间有一个挡板，左室为真空，右室有气体。撤去挡板后右室的气体自发地向左室扩散，而相反的过程不可能自发地进行。因此，热力学第二定律也可以表述为：气体向真空的自由膨胀是不可逆的。



图 10.4-4 热电厂的冷凝器。烟筒似的器壁内有很多管道，来自蒸汽轮机的废气在管道内冷却。器壁的下沿与地面间留有缝隙，便于冷凝器内空气的流动，同时有冷水喷到管道上，增强冷凝效果。

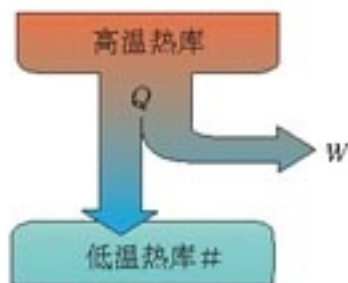


图 10.4-5 热机工作时的能流分配

这里所说“不可能从单一热库吸收热量”，意思是，不仅要从一个热库吸热，而且一定会向另一个热库放热。

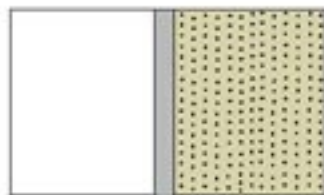


图 10.4-6 撤去挡板后右室气体会自发地扩散到左室，而在均匀地充满气体的无挡板容器中，气体不可能自发地在一侧聚集而使另一侧成为真空。

^① 限于知识基础，本书对其中的道理不做分析。

思考与讨论

有可能制成第二类永动机吗？

地球上海水的总质量达 1.4×10^{21} kg。如果把这些海水的温度降低 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，放出的热量就达 9×10^{18} kW·h，足够全世界使用4 000年。这个设想不违背能量守恒定律，但是不能实现，所以叫做第二类永动机。前面学到的，违背能量守恒定律的永动机，叫做第一类永动机。

热力学第二定律的一种表述就是：第二类永动机不可能制成。

学过热力学第二定律之后，你能说出为什么不能制成第二类永动机吗？

问题与练习

1. 汽车行驶时，要消耗汽油。尽可能详细地说明：汽油燃烧时释放的化学能通过哪些途径最终转化成了周围环境的内能。
2. 以下哪些现象能够发生、哪些不能发生？能够发生的现象是否违背热力学第二定律？
 - A. 一杯热茶在打开杯盖后，茶会自动变得更热。
 - B. 蒸汽机把蒸汽的内能全部转化成机械能。
 - C. 桶中混浊的泥水在静置一段时间后，泥沙下沉，上面的水变清，泥、水自动分离。
 - D. 电冰箱通电后把箱内低温物体的热量传到箱外高温物体。
3. 小李想估测煤气灶烧水时的效率。他在开水壶里装了体积2.5 L的水，测得烧水前的水温是 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，水烧开后便停止加热。烧水前后煤气表的示数如图10.4-7所示。为了得出煤气灶烧水的效率，他还要知道什么数据？请用字母表示相关数据，指出所用的单位，列出计算效率的表达式。



图10.4-7 烧水前后煤气表的示数

5

热力学第二定律的微观解释

热力学定律是以宏观事实为基础的，它告诉我们热学现象、热学过程遵循什么规律。但是，通过前面几章的学习我们已经知道，系统的宏观表现源于组成系统的微观粒子的统计规律。本节就要从微观的角度说明为什么涉及热运动的宏观过程会有一些的方向性。

有序和无序 宏观态和微观态 生活中我们常说到有序和无序这两个词。一副扑克牌，按黑桃、红桃、梅花、方块的顺序，而且从小到大排列，我们说它是有序的，洗牌之后有序变成了无序。当然也可以规定奇数牌在先，偶数牌在后，等等。只要确定了某种规则，符合这个规则的就是有序的。由许多单张纸牌组成的系统，如果对个体的分布没有确定的要求，“怎样分布都可以”，我们就说这样的分布是无序的。

有序与无序是相对的。一副扑克牌，指定按黑桃、红桃、梅花、方块的顺序排列，但对号码的大小不做要求，这样的排列对于完全杂乱的一副牌来说是有秩序的，但对于不仅有花样方面的要求，而且对号码顺序也有要求的排列来说，就是无序的了。这就涉及有序程度的问题。

如果规定了扑克牌的花样顺序与号码顺序，借用统计物理学的术语来说，我们就是规定了一个“宏观态”。这时可能的排列方式只有一种。如果我们宽容一些，只规定花样的先后，号码的顺序可以任意，我们就是规定了另外一个“宏观态”。由于在符合花样先后的情况下不同的号码还可以有不同的排列，我们说这样的“宏观态”对应了好几个“微观态”。如果对花样先后和号码的顺序都不做规定，这也是一个“宏观态”，这个“宏观态”对应的“微观态”就更多了。

如果一个“宏观态”对应的“微观态”比较多，就说这个“宏观态”是比较无序的。

无序意味着各处都一样、平均、没有差别，而有序则是相反。这一点可以通过扑克牌的例子来仔细体会。

你能不能仍照对于扑克牌的讨论，通过学生在操场站队的事例，说明有序、无序、宏观态、微观态这几个概念？

气体向真空的扩散 我们以气体向真空的扩散为例，说明宏观自发过程的方向性。

一个箱子被挡板分为左、右两室，左室有气体，右室为真空。撤去挡板后气体要由左向右扩散。我们将从分子热运动的角度分析这个过程的方向性。为了简单，假定气体只由A、B、C、D共4个分子组成。

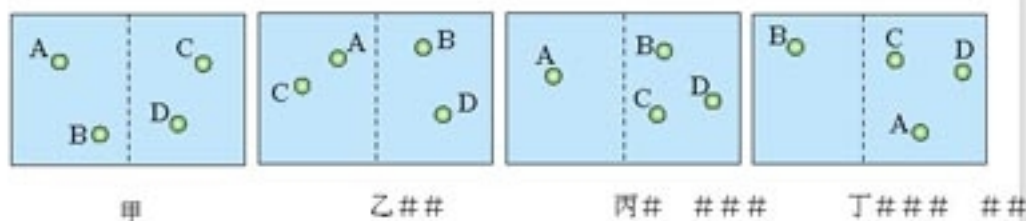


图 10.5-1 甲、乙、丙、丁是 4 个不同的微观态，但甲、乙属于同一个宏观态，丙、丁属于另一个宏观态。

撤去挡板后每个分子都可以处于箱中任何位置，就像队列解散后的学生一样。如果细致地区分哪个分子在哪侧，这样一个一个的状态就是不同的微观态。例如，“A、B 在左室，C、D 在右室”与“A、C 在左室，B、D 在右室”，就是两个不同的微观态。当然“A 在左室，B、C、D 在右室”也是与前两个不同的微观态。

但是，宏观的观察并不能区分图 10.5-1 甲和乙的两个微观态，我们只能说两种情况下左右两室中分子的数密度是一样的，因此，我们说，图甲和图乙属于同一个宏观态；而图丙和

图丁，尽管从微观上看具体分子的位置并不一样，是不同的微观态，它们也属于同一个宏观态，都是“左1右3”。

思考与讨论

对于A、B、C、D这4个分子来说，“左右各有2个分子”的微观状态有多少个？
“左室有1个分子，右室有3个分子”的微观状态有多少个？

可以画简图把几种情况表示出来，然后进行统计。如果数学课中学过了“排列与组合”，计算会简单些。

撤去挡板后，从微观的角度来说，由于分子的热运动，图10.5-1所示的几种微观态，以及其他所有可能的微观态，它们各自出现的概率是一样的^①。那么，宏观上观察到的现象是什么呢？

这4个分子在左右两室总共可能有16种不同的分布，即16种不同的微观态，如下表。

分布情况	左0右4	左1右3	左2右2	左3右1	左4右0
微观态个数	1	4	6	4	1

从表中看出，“左2右2”这种宏观上看来均匀分布的情况，所对应的微观态的个数最多，“左0右4”、“左4右0”这种极端不均匀的宏观态所对应的微观态的个数很少。

撤去挡板后，由于各个微观态出现的概率是一样的，从宏观上看，我们看到“左2右2”这种均匀分布的可能性最大，而分子重新集中在一个室中，另一个室变成真空的可能性最小。实际气体系统中的分子数大得惊人，两室中分子的数密度相同

和大致相同的可能性比两室分子数相差很多的可能性大得多。因此，撤去挡板后实际上我们只能观察到气体向真空扩散，而不可能观察到气体分子重新聚集在一室的现象。

在这个例子中，“左2右2”这种状态对应着6个微观态，而一侧有4个分子另一侧为真空的状态只对应着2个微观态。按照我们前面的说法，“左2右2”是一种更为无序的状态。这与我们日常的感觉一致，即无序指一种“平均”“各处都一样”“没有差别”。

再通过摆积木的例子做些说明。一堆积木的木块杂乱地盛在箱子里，我们说它们是无序的，而按图摆成一个森林小屋，就说它是有序的。“盛在箱子里的积木”和“摆成小屋的积木”可以看做两个宏观状态，两者之中哪一个对应的微观状态比较多呢？按图摆成的森林小屋，虽然其中大小一样、颜色相同的木块也可以调换，但变化的余地很小，也就是说，对应

如果有兴趣可以算一算，对于6个分子组成的系统，均匀分布与大致均匀分布的微观态数之和，远大于分子重新集中于一个室中的微观态数。

^① 这个论断叫做“等概率原理”，它是统计物理学的基础。这个原理是不能直接证明的。一方面，我们没有理由认为这个论断不正确；另一方面，也是更重要的，由这个论断出发，经过逻辑推理，得到的结论都与事实一致，从而间接地证明了这个论断。

于一定形状的小屋的微观态数目很少。但是对应于“盛在箱子中的积木”的微观态很多，因为无论你把哪个木块从上面移到下面，或把哪个木块的方向颠倒过来，它们都是“盛在箱子中的积木”这个宏观态的某个不同的微观态，我们看着都是乱糟糟的一箱。把一批积木随意倒在箱子中，这些木块的各种排列都可能发生，其中碰巧排成图中房子的可能性很小很小，而排成乱糟糟的可能性岂止千万种！所以，随意倾倒木块不可能出现房子！

这个例子再次表明，我们所说的有序状态，指的是对应着较少微观态的那样的宏观态。自发的过程总是倾向于出现与较多微观态对应的宏观态，因此自发的过程总是从有序向着无序发展的。

综合以上分析可以知道：一切自然过程总是沿着分子热运动的无序性增大的方向进行。这就是热力学第二定律的微观意义。

熵 通过前面的分析我们已经知道，系统的宏观状态所对应的微观态的多少表现为宏观态的无序程度，同时也决定了宏观过程的方向性。分析的结果归纳在以下表中。

宏观态的名称	对应的微观态的个数	人们对宏观态的描述	过程自发进行的方向
甲	较少	比较有序	甲 → 乙
乙	较多	比较无序	

看起来，一个宏观状态对应的微观状态的多少是个很重要的物理量，它标志着这个宏观态的无序程度，从中还可以推知系统将朝什么方向变化。物理学中用字母 Ω 表示一个宏观状态所对应的微观状态的数目。

为了研究的方便，物理学家们用得更多的是一个与 Ω 相关的物理量，这就是今天常常听到的——熵 (entropy)，用字母 S 表示。玻耳兹曼在 1877 年提出了熵与微观态的数目 Ω 的关系，即 $S \propto \ln \Omega$ ，后来普朗克把它写成了等式

$$S = k \ln \Omega$$

式中 k 叫做玻耳兹曼常量。

如前所述，既然微观态的数目 Ω 是分子运动无序性的一种量度，由于 Ω 越大，熵 S 也越大，那么熵 S 自然也是系统内分子运动无序性的量度。

在引入熵之后，关于自然过程的方向性就可以表述为：在任何自然过程中，一个孤立系统的总熵不会减小。这就是用熵的概念表示的热力学第二定律。为此，不少人也把热力学第二定律叫做熵增加原理。

由熵的定义可知，熵较大的宏观状态就是无序程度较大的宏观状态，也就是出现概率较大的宏观状态。在自然过程中熵总是增加的，其原因并非因为有序是不可能的，而是因为通向无序的渠道要比通向有序的渠道多得多。把事情搞得乱糟糟的方式要比把事情做得整整齐齐

右式中符号“ln”表示对后面的物理量取对数，对数的底是个无理数 $e = 2.718 \dots$ 这种对数叫做自然对数， $\ln \Omega$ 实际上就是 $\log_e \Omega$ ，我们不必深入分析这个式子，只要认识到“微观态数 Ω 越大，熵 S 越大”，就可以了。

在物理学中，不与外界进行物质和能量交换的系统叫做孤立系统。

齐的方式多得多。要让操场上的一群学生按班级、按身高，或按任何规则来站队都是比较麻烦的：每个学生都要寻找自己的位置。但是要让已经站好队的学生解散，那就非常简单：每个学生随便朝一个方向跑去，队形就乱了。

从微观的角度看，热力学第二定律是一个统计规律：一个孤立系统总是从熵小的状态向熵大的状态发展，而熵值较大代表着较为无序，所以自发的宏观过程总是向无序度更大的方向发展。

做一做

目前“熵”这个词的应用十分广泛，已经超出了物理学的范畴，深入到信息科学、生命科学和社会科学中。在这些场合中，有些用法是熵的本来意义的延伸，有些只是用做“无序程度”的代名词，描述过程的发展方向。

登录一个有搜索功能的网站，键入“熵”字，看看人们是怎样应用这个名词的。

科学漫步

向绝对零度逼近

在冷热王国里，人们在两个方向上进行着执著的探索。一方面，人们向高温进军，希望能制造和控制越来越高的温度，去实现受控热核反应和模拟宇宙诞生初期的情景；在另一个方向上，人们努力向绝对零度逼近，希望揭示低温世界的秘密。

什么是绝对零度？我们在初中学过，宇宙中存在着温度的下限： $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。热力学温度是以这个下限为起点的，用 T 表示。而 $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 也就叫做热力学零度或绝对零度，即 $T = 0\text{ K}$ 。

我们现在已经知道的一些低温值如下表所示。

已经了解和能够达到的一些低温	
地球上出现的最低温度（南极）	185 K
月球的背阴面	90 K
氮的沸点	77 K
氦的沸点	4.2 K
微波背景辐射的温度	2.7 K
实验室内已经获得的最低温度（激光冷却法）	$2.4 \times 10^{-11}\text{ K}$

从表中可以看出，实验室中的低温已经非常接近热力学零度了。随着科学技术的发展，还有希望获得更低的温度。

在低温领域里，物质呈现出超导、超流等许多新奇的特性，为新材料研制、磁悬浮、直流输电以及生物技术等高科技拓展了广阔的发展空间。然而，人们发现温度越低，降温越困难。在德国科学家 W. H. 能斯特等人的工作基础上，人们在 20 世纪初总结出了一条新的规律：不可能通过有限的过程把一个物体冷却到绝对零度。这个规律称做热力学第三定律 (third law of thermodynamics)。

尽管热力学零度不可能达到，但是温度总有可能降低。因此，热力学第三定律不阻止人们想办法尽可能地接近绝对零度。

问题与练习

1. 一个封闭的方盒内有两个隔板，把方盒隔成了三个小房间，每个小房间内有 2 个球，球上各有一个字，小房间内球上的字恰好组成图 10.5-2 所示的三个词 (从左向右念)。摇动方盒，球在小房间内的左右位置可以变换。

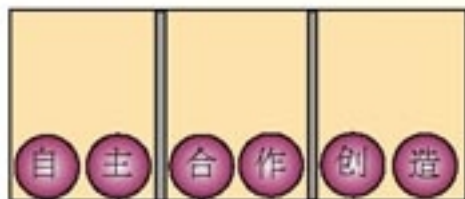


图 10.5-2 六个字排成三个词的概率

- (1) 图中 6 个球同时排列成这三个词的概率是多少？
 - (2) 取去其中一个隔板，摇动方盒，6 个球能同时排列成这三个词的概率又是多少？
 - (3) 把两个隔板全部取去，摇动方盒，6 个球能同时排列成这三个词的概率又是多少？
 - (4) 在这个封闭的方盒内，取消隔板让小球充分地运动，其无序性是增大了还是减小了？
2. 成语“覆水难收”指的是一盆水泼出后是不可能再回到盆中的。请从不同宏观态所对应的微观态数目不同这个角度，解释为什么水不会自发地聚到盆中。

6

能源和可持续发展

思考与讨论

下面这些过程中，能量的“归宿”在哪里？

流水带动水磨做功，什么能转化成了什么能？流水的机械能最终将转化为什么能？传说中，三国时代的猛张飞站在当阳桥前一声吼，“喝断了桥梁水倒流”。吼过之后静下来，他的声能最终转化为什么能？

日光灯把教室照得如同白昼，关灯后满屋漆黑。原先的光能最终将转化为什么能？

把电炉接入电路，电能表转得飞快，表明消耗着电能。这些电能最终将转化为什么能？

燃烧过程中燃料的化学能要释放出来。这些化学能最终将转化为什么能？

能量耗散和品质降低 自然界的一切变化，人类社会的所有活动，都伴随着能量的转移和转化，能量是一切物质运动的源泉，是一切生命活动的基础。

能量守恒定律明确了能量的守恒性。我们在能量转化和转移过程中利用能量，并不会使能的总量减少。那么，为什么还要节约能源呢？

问题的答案在热力学第二定律中。能量在数量上虽然守恒，但其转移和转化却具有方向性。

在取暖照明、耕田犁地、车钻磨锻、开车驾船……各种各样的活动中，机械能、电能、光能、声能、化学能、核能、生物能……最终都转化成内能，流散到周围的环境中。机械能、电能、化学能都是集中度较高因而也是有序度较高的能量，当它们变为环境的内能后，就成为更加分散因而也是无序度更大的能量。分散在环境中的内能不管数量多么巨大，它也不过能使地球、大气稍稍变暖一点，却再也不能驱动机器做功了。这样的转化过程叫做“能量耗散”。各种形式的能量向内能的转化，是无序程度较小的状态向无序程度较大的状态的转化，是能够自动发生、全额发生的。然而，反过来的转化呢？

热机中的确进行着内能向机械能的转化，但我们由热力学第二定律知道，这种转化是有条件的，即环境中必须存在着温度差，而且内能不能全额转化为机械能。因此，从可被利用的价值来看，内能较之机械能、电能等，是一种低品质的能量。由此可知，能量耗散虽然不会使能的总量减少，却会导致能量品质的降低，它实际上将能量从高度有用的形式降级为不大可

热力学的两大定律中的一条告诉我们，能量的数量是守恒的，另一条定律则告诉我们，能量在转化过程中其品质逐渐降低。

用的形式。煤、石油、天然气等能源储存着高品质的能量，在利用它们的时候，高品质的能量释放出来并最终转化为低品质的内能。

虽然能量不会减少但能源会越来越少，所以要节约能源。

能源与人类社会发展 能源是社会存在与发展永远不可或缺的必需品，是国民经济运行的物质基础。它与材料、信息构成现代社会的三大支柱。能源科技的每一次突破，都带来了生产力的巨大飞跃和社会的进步。

火的使用是人类在能源使用上的第一个里程碑，它使人类脱离了茹毛饮血的时代。18世纪末发明和逐步完善的蒸汽机，以对化石能源的大规模利用为特征，开始了人类文明的新纪元，带动了第一次产业革命和资本主义社会的成长。内燃机的发展则强有力地推动了19世纪末、20世纪初开始的机械化与电气化进程。20世纪中叶，蒸汽轮机和燃气轮机的发展为大规模发电和航空事业奠定了基础。

能源与环境 化石能源的资源有限，而且对环境有很大的破坏。石油和煤炭的燃烧增加了大气中二氧化碳的含量，由此加剧了温室效应，使得两极的冰雪融化，海平面上升，全球气候异常……

煤炭和石油中常常含有硫，燃烧时形成的二氧化硫等物质使雨水的酸度升高，形成“酸雨”，腐蚀建筑物，酸化土壤。

内燃机工作时的高温使空气中和燃料中的多种物质发生化学反应，产生氮氧化物和碳氢化合物。这些化合物在大气中受到紫外线的照射，产生二次污染物质——光化学烟雾。这些物质有毒，能引起人的多种疾病。燃烧时产生的浮尘也是重要的污染物。

可持续发展的核心是追求发展与资源、环境的平衡：既满足当代人的需求，又不损害子孙后代的需求。其中，最重要的两个方面就是资源和环境保护，而这都与能源的开发利用有关。

开发新能源 太阳能是一种具有良好开发前景的新能源。太阳辐射到地球的能量是巨大的，每年可以达到 10^{24} J。相对于人类的历史来说，太阳能是取之不尽、用之不竭的。同时，太阳能是一种清洁能源，太阳能的利用对环境的影响很小。

利用太阳能最有前途的领域是通过太阳电池^①将太阳能直接转换成电能。我国青海省已经推广了数万套太阳能发电系统，

煤和石油都是古生物的遗体被压在地层中，经过漫长的地质年代而形成的，所以有人把它们叫做化石能源。

因为燃烧燃料，目前全世界每年要向大气排放213亿吨二氧化碳。这使得大气中二氧化碳的浓度在1800年以后的200年中大约增加了25%。

地球不仅受到了温室效应的困扰，而且还面临着一个新问题——全球变暖。



图 10.6-1 用来为无人值守的信号灯提供能源的太阳电池

^① 新闻报道中，太阳电池常称做“光伏电池”。

建成了多个村庄电站。西藏自治区的安多太阳电站，总装机容量 100 kW。我国计划在 2020 年以前建成 5 座兆瓦级的“阳光站”。

另一类新能源是生物质能。生物质能指绿色植物通过光合作用储存在生物体内的太阳能，储存形式是生物分子的化学能。庄稼秸秆发酵后产生的沼气可以用做生活燃料，这是利用生物质能的一种方式。

风力可以用来发电。为了增加风力发电的功率，通常都把很多风车建在一起，成为“风车田”。我国的新疆、内蒙古等地，风力资源丰富，已经在大规模利用风力发电。

水电站是利用水能的重要形式。水是可再生的，水电对环境的影响小，发电成本低。我国的三峡水利枢纽工程，于 2010 年左右完全建成后，每年能提供 8.47×10^{11} kW·h 的电能。

还有一种重要的新能源——核能，它是蕴藏在原子核内部的能量，我们将在《选修 3-5》中做些较为深入的讨论。



图 10.6-2 新疆达坂城风力发电厂的风车田

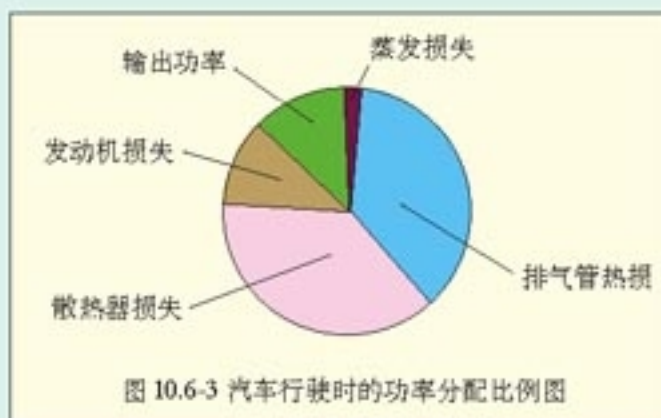
STS

汽车和能源

在发达国家，能源总量的 40% 左右消耗在交通运输业上，而各种汽车消耗的能量又占全部交通工具能耗总量的 73%。在我国，2005 年汽车保有量超过 3 300 万辆，汽车能源消耗、尾气污染大幅度增加。

一辆汽车以 80 km/h 的速度行驶时，每 10 km 耗油约 1 L。根据汽油的燃烧值进行简单的计算可以得知，这时消耗的功率约为 70 kW。这 70 kW 意味着什么？它可以点亮 100 W 灯泡 700 个。它相当于 70 户小康之家日常的用电功率。

图 10.6-3 是一辆小汽车行驶时的功率分配比例图。



由图中看出，平均说来，在70 kW中，1 kW由于汽油的蒸发而消失。当然不是真正的消失，这1 kW的碳氢化合物只是分散到大气中，其化学能无法利用，而且还成了化学污染源。剩下的69 kW进入发动机，大约有17 kW用于做功，而其余的52 kW包括了排气管排出的废热和散热器的热量散失，两者约各占一半。这是最大的一笔能量损耗。废气的主要成分是 CO_2 和 H_2O 。尽管这两种物质对人类没有毒性，但是 CO_2 却是导致全球气候变暖的罪魁祸首。废气中还有 CO 、 NO 、 NO_2 以及未燃烧的碳氢化合物，这些则是有毒的物质。

用于做功的17 kW也有不少损耗。约5 kW用于发动机的水箱循环和空调，约3 kW消耗于传动装置，最后只有9 kW到达驱动轮。

这9 kW的功率推动汽车向前进，其中约一半用于克服空气阻力。空气阻力随着车速的提高而增加，在车速较高时会超过阻力的一半。另外一半用于克服滚动摩擦，这种阻力在低速时是阻力的主要因素。整辆汽车的总效率约为13%。

据预测，2020年中国将拥有约1.3亿辆汽车，年需燃油2.6亿吨，汽车能耗占国民经济总能耗的57%。有人主张大力发展汽车工业，认为汽车进入家庭是社会发展的必由之路，也是国民经济发展的重要推动力；也有人忧心忡忡，认为汽车进入家庭不适合中国国情。你的看法呢？

问题与练习

1. 阅读下列短文：

二氧化碳对较长波长的电磁辐射（如红外线）有较强的吸收作用，而对较短波长的电磁辐射（如可见光）的吸收作用较弱。阳光中多种波长的电磁辐射透过大气照到地球表面，使地面升温，而地面的热辐射是较长波长的电磁辐射，它不容易透过大气中的二氧化碳，于是大气温度上升。大气中的二氧化碳像暖房的玻璃一样，只准太阳的热辐射进来，却不让地面的热辐射出去，这种效应叫“温室效应”。二氧化碳是一种重要的“温室气体”。温室效应使得大气的温度不致太低，昼夜温差不致太大，各种生物能够繁衍生息。然而，近年来由于人类的活动，大气中的二氧化碳增加，温室效应加剧，这是全球变暖的重要原因。

试根据上述观点及从各种媒体得到的其他信息，判断下列说法是否正确。

- 在地球形成的早期，火山活动频繁，排出大量的二氧化碳，当时地球的气温很高。
- 在漫长的地质年代中，地壳的岩石与大气中的二氧化碳发生化学反应，二氧化碳减少，地球上出现了生命。
- 由于现代工业大量燃烧煤炭、石油等燃料，氧和碳在结合成二氧化碳的过程中放出大量的热，导致地球温度升高，气候变暖。
- 1998年5月29日，中国政府签署了削减二氧化碳排放量的《联合国气候变化框架公约》京都议定书》，为控制全球气候变暖做出了贡献。

2. 某地强风速为 14 m/s ，空气密度为 $\rho = 1.3 \text{ kg/m}^3$ 。若通过截面积为 400 m^2 的风能全部用于使风力发电机转动，且风能的 20% 转化为电能，通过这个截面的风的发电功率是多大？
3. 太阳热水器是利用太阳能来为水加热的设备，在我国城乡许多屋顶上都可以看到。太阳单位时间直射到地面单位面积的能量为 $E_0 = 7 \times 10^3 \text{ J/(m}^2 \cdot \text{s)}$ 。某热水器的聚热面积 $S = 2 \text{ m}^2$ ，若每天相当于太阳直射的时间为 $t = 4 \text{ h}$ ，太阳能的 20% 转化为水的内能，计算这个热水器最多能使 $m = 500 \text{ kg}$ 的水温度升高多少。

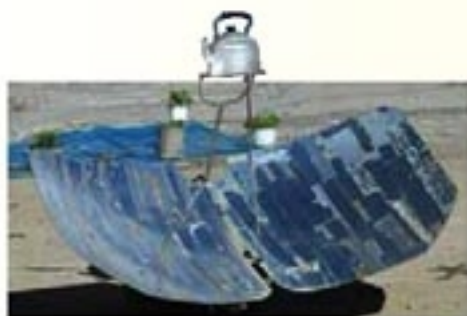


图 10.6-4 太阳热水器

课题研究 如何提高煤气灶的烧水效率

用水壶在煤气灶上烧开水，其效率跟很多因素有关。例如：煤气是否完全燃烧、水壶表面对热量的吸收程度、水壶导热的效果、煤气灶火力的大小等。本课题专门研究煤气灶火力的大小对烧水效率的影响。

煤气灶烧水^①时的能量转化和转移的情况如下：

$$\text{煤气燃烧放出热量 } Q \begin{cases} \text{给水加热 } (\Delta U + Q_1) \\ \text{给空气加热损失热量 } Q_2 \end{cases} \begin{cases} \text{水温升高、内能增大 } \Delta U \\ \text{热水散失给空气热量 } Q_1 \end{cases}$$

煤气灶的火力如果太大，火焰散失在空气中的热量 Q_2 比较多，水所吸收的热量占煤气燃烧所发出的总热量 Q 的比例较小，会降低效率。调小煤气灶的火力，会延长烧水的时间。烧水过程中，由于热水的温度比空气温度高，热水会向空气散失热量 Q_1 ，加热时间延长， Q_1 的值增大，也会使效率降低。

怎样的火力有利于提高煤气灶烧开水的效率呢？以下是一个供参考的研究计划。

(1) 首先要了解水在不同温度下散热的快慢，即不同温度下单位时间内热水向空气散发热量 Q_1 的值。为此，可以在水壶中盛一定量的水，烧开后让其在自然散热下冷却，作出它的温度—时间图象，通过图象计算这壶水不同温度下单位时间中的 Q_1 值。

(2) 还要了解，当以某一恒定火力加热时，水在不同温度下单位时间内水的内能增加量 ΔU 。为此，可以通过实验，作出加热时水的温度—时间图象。通过图象计算不同温度下单位时间中 ΔU 的值。

(3) 煤气灶烧水时，同一时间内水的内能增加量 ΔU 和水向空气中散失的热量 Q_1 之和，



图课-1 研究如何提高煤气灶的烧水效率

^①由于水壶的质量比水的质量小得多，而且水壶的比热容也远小于水的比热容，因此讨论中可以忽略水壶内能的变化。

就是这一时间内水从高温燃气中所吸收的热量。根据(1)和(2)，知道不同温度下单位时间中 Q_1 和 $(\Delta U + Q_1)$ 的具体数值，就能据此判断在不同温度下 Q_1 对效率究竟有多大的影响。

(4)把煤气灶火力略调小到另一恒定值，对同样质量的水加热，这时，可以减小因加热空气而损失的热量 Q_2 而提高效率，但因单位时间 ΔU 的减小又增大了 Q_1 对效率下降的作用。在小火力下完成(2)和(3)步骤，可以知道小火力下 Q_1 对效率影响的程度。

根据以上数据，可以提出一个控制火力大小以提高烧水效率的加热方案。写出你的方案。

家中有煤气表的，可以通过烧开一定质量的水来检验，是不是你的方案所用的煤气最少。

后 记

根据《基础教育课程改革纲要（试行）》的精神，我们按照《普通高中物理课程标准（实验）》的要求编写了共同必修及其他三个系列的全套教科书，本册经全国中小学教材审定委员会2005年初审通过，供普通高中试用。

这套教科书在编写中，得到了诸多教育界前辈和各学科专家学者的热情帮助和大力支持。在本套教科书同课程改革实验区的师生见面时，我们特别感谢担任教科书总顾问的丁石孙、许嘉璐、叶至善、顾明远、吕型伟、王梓坤、梁衡、金冲及、白春礼、陶西平同志，感谢担任教科书编写指导委员会主任委员的柳斌同志和编写指导委员会委员的江蓝生、李吉林、杨焕明、顾泠沅、袁行霈等同志。

这套书的编写者以教育部物理课标组的核心成员为基础，由高校教师、中学教师和出版社的编辑人员三结合组成。共同必修部分和三个选修系列的编写小组分别起草，然后全体编写人员反复讨论、相互修改，因此，本书是编写组集体创作的成果。

在本书的编写过程中，由刘彬生、汪维澄、龙涛组成的实验研究小组做过了全书所有的实验，检验和改进了书稿中的实验部分；由黄恕伯、李友安、叶柯、毛宗致组成的习题研究小组筛选和设计了全书的“问题与练习”。

张同恂、董振邦、窦国兴、扈剑华在编写的不同阶段审阅了书稿，提出了重要修改意见。

我们还要感谢使用本套教材的实验区的师生们。希望你们在使用本套教材的过程中，能够及时把意见和建议反馈给我们，对此，我们深表谢意。让我们携起手来，共同完成教材建设工作。

我们的联系方式如下：

电 话：010-58758389

E-mail：jefk@pep.com.cn

网 址：http://www.pep.com.cn

人民教育出版社 课程教材研究所
物理课程教材研究开发中心
2005年5月

谨向为本书提供照片的人士和机构致谢

第七章章首图，Corel Corporation/7.2-1，7.2-2，《新编物理图解》，第一学习社/7.2-3，张颖/第八章章首图，Corel Corporation/第九章章首图，Corel Corporation/9.1-3，《大美百科全书》，光复书局/9.1-1，《科学技术》，三联书店（香港）有限公司/9.1-4，Corel Corporation/9.2-2，College Physics，Prentice-Hall，Inc./9.2-8，《世界鸟类》，黑龙江科学技术出版社/9.2-11，9.2-12，9.2-13，张颖/9.2-14，黄恕伯/9.3-4，张颖/第十章章首图，Corel Corporation/10.4-2乙，《GCSE Physics》，John Murray (Publishers) Ltd./10.4-4，中国新闻图片网/10.4-7，黄恕伯/10.6-1，张大昌/10.6-2，苏明义/10.6-4，张颖/图课1，朱京