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

PHYSICS

主编 束炳如 何润伟



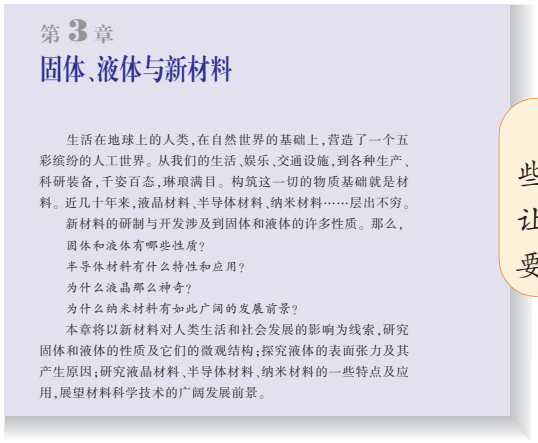
上海科技教育出版社

亲爱的同学：

欢迎你选择学习《物理 3–3》！

通过物理必修模块和《物理 3–1》、《物理 3–2》的学习，你已对力学和电磁学的基本内容及其应用有了许多的了解。现在，你又将跨入研究热学的大门。在这里，你将进一步探索分子动理论，用统计的观点去认识分子运动的一些宏观表现，探究固体、液体与气体的性质，较全面地认识热现象的规律，理解能源开发与可持续发展的重要意义。在这个基础上，你将较充分地认识热学研究与社会发展及人类文明的互动关系，你的才智也将在科学探究和理论思维的过程中得到充分的施展。

为了让你在学习《物理 3–3》的过程中获得更大的成功，请浏览以下的本书栏目介绍。



第 3 章

固体、液体与新材料

生活在地球上的人类，在自然世界的基础上，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。构筑这一切的物质基础就是材料。近几十年来，液晶材料、半导体材料、纳米材料……层出不穷。

新材料的研制与开发涉及到固体和液体的许多性质。那么，

固体和液体有哪些性质？

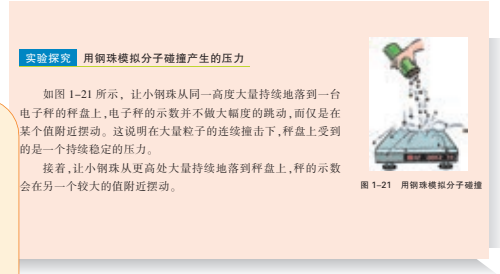
半导体材料有什么特性和应用？

为什么液晶那么神奇？

为什么纳米材料有如此广阔的发展前景？

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及它们的微观结构；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。

每章的开头都有一些情景，提出一些问题，让你明确本章研究的主要内容。



实验探究　用钢珠模拟分子碰撞产生的压力

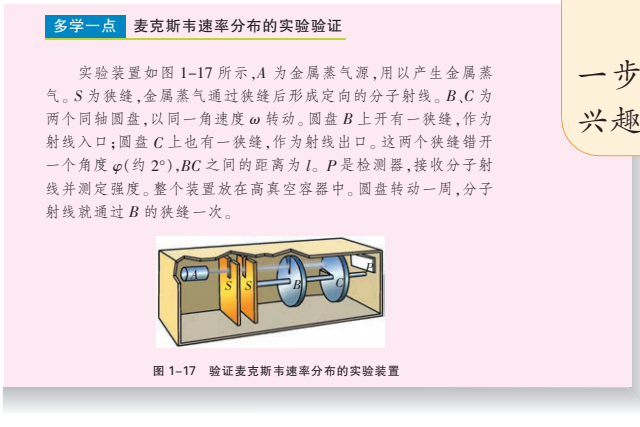
如图 1–21 所示，让小钢珠从同一高度大量持续地落到一台电子秤的秤盘上，电子秤的示数并不做大幅度的跳动，而仅是在某个值附近摆动。这说明在大量粒子的连续撞击下，秤盘上受到的是一个持续稳定的压力。

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。

图 1–21　用钢珠模拟分子碰撞

实验探究

这里将要求你提出问题，设计实验方案，动手做一些有意义的实验，进行科学探究。



多学一点　麦克斯韦速率分布的实验验证

实验装置如图 1–17 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。

图 1–17　验证麦克斯韦速率分布的实验装置

多学一点

这里有更多的奥秘，将进一步开拓你的视野，你如果有兴趣，可以作进一步的探索。

分析论证

在这里，你将经历分析、综合、应用数学工具进行推理，从而得出物理学规律和公式的过程，体会到物理学理论思维的魅力。



图 2-25　密闭容器中的液体

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。

容器中液体的液面上，不断地同时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。

在敞口容器中，飞离液面的分子会很快逃逸，使得每单位时

课题研究

这里提供了一些课题供你选择研究，这种研究将让你经历激动人心的探索，使你的才智得到充分的展示。

课题研究

用 DIS 研究气体压强与体积的关系

实验主要仪器如图 2-12 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 2-13 所示。



图 2-12　研究气体压强与体积关系的 DIS 实验主要仪器

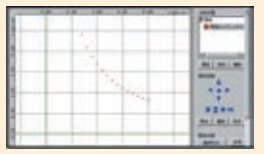


图 2-13　由 DIS 得出的 p–V 图像

家庭作业与活动

这里为你提供了丰富多彩的学习活动，让你通过回顾进行自我评价，从而加深对知识的理解，提高分析与解决有关问题的能力，体验到成功的喜悦。

家庭作业与活动

1. 考察你的家庭与学校，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，量出两层楼梯的垂直高度，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) 求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化？
(2) 求出以瓦为单位的输出有用功率。如果这些能量转化为电能，可点亮几盏 100 W 的灯泡？

3. 如何从能量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. 观察手电筒的结构，画出它工作时的能流图。

5. 图 4-13 是一个现代的燃煤蒸汽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）之间能量转化或转移的情况。



图 4-13　燃煤蒸汽发电厂运作流程示意图

信息浏览、STS 栏目

这里为你提供了各种有趣、有用的资料，包括物理学史上的经典事例、科学家小故事等，反映了物理学与科学、技术、社会的紧密联系。你的视野将更开阔，你会更加热爱科学。

STS

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 所示，燃料电池由燃料（例如氢、甲烷等）、氧化剂（例如氧和空气等）、电极和电解液等四部分组成。在正极（燃料电极），氢气在催化剂作用下被分离为氢离子（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，氢原子分离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。

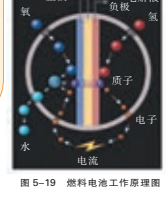


图 5-19　燃料电池工作原理图

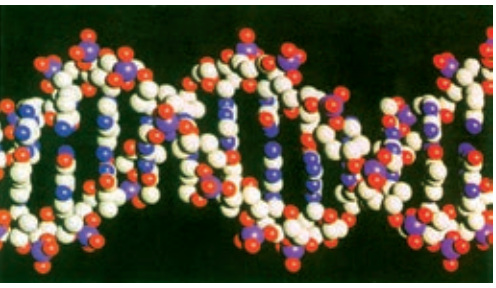
燃料电池构造简单，能量利用率高，工作稳定。理论上，应用于汽车的燃料电池可以把氢燃料能量的 60%～70%转化为动能。更引人注目的是，燃料电池发电时，不产生氢氧化物和硫化物，产生的二氧化碳也很少，不会增加光化学烟雾、酸雨的污染及温室效应的作用。

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 1.5×10^6 ~2.0×10^7 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。

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 10

1.3 分子热运动 15

1.4 无序中的有序 18

1.5 用统计思想解释分子运动的宏观表现 22

1.6 物体的内能 25



第 2 章 气体定律与人类生活 30

2.1 气体的状态 31

2.2 玻意耳定律 35

2.3 查理定律和盖–吕萨克定律 39

2.4 理想气体状态方程 43

2.5 空气湿度与人类生活 46



第 3 章 固体、液体与新材料 53

3.1 研究固体的性质 54

3.2 研究液体的表面性质 59

3.3 液晶与显示器 65

3.4 半导体材料和纳米材料 69

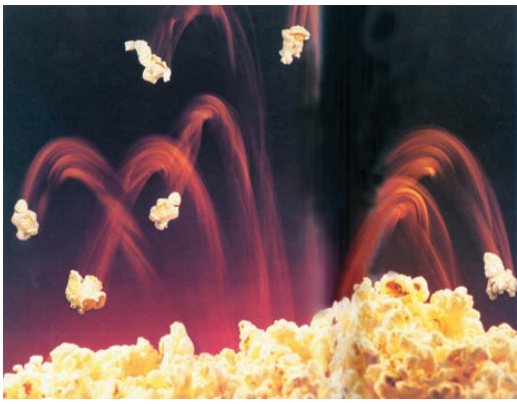
第 4 章　热力学定律与能量守恒　76

4.1　热力学第一定律　77

4.2　能量守恒定律的发现历程　82

4.3　热力学第二定律　88

4.4　描述无序程度的物理量　93



第 5 章　能源与可持续发展　98

5.1　能源利用与环境污染　98

5.2　能源开发与环境保护　105

5.3　节约能源、保护资源与可持续发展　111



总结与评价　课题研究成果报告会　116

研究课题示例　116

评价表　117

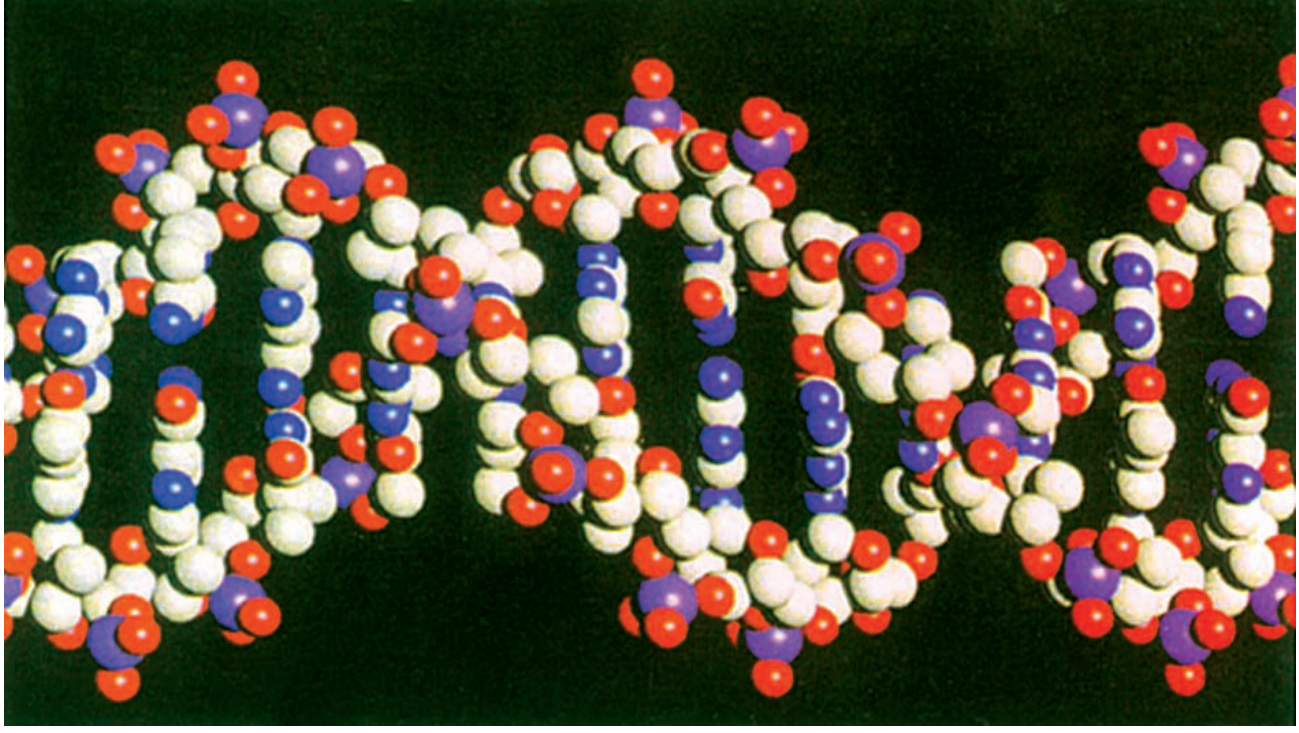


图 1–1　DNA(脱氧核糖核酸)大分子结构图

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会不停地毫无规则地跳动着,就像“活的”一样。后来,他又发现,其他一些没有生命的微粒在水中也会做这种杂乱无章的运动。植物学家发现的这种现象,难倒了当时的许多物理学家。

悬浮颗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?

如何研究大量分子的运动?

物质分子的微观运动在宏观上有何表现?

本章的研究对象是由大量分子组成的物质系统,采用宏观描述和微观描述相结合的方法,以统计思想和能量的观点为主线来研究分子的运动。首先通过实例和活动,体会一种新的研究方法;接着用统计思想定性探究分子运动速率的统计分布规律,并结合分子动理论阐释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”等词语来描述事先无法确定的事件。你在使用这些词语时，有没有对这些事件进行过仔细的研究呢？你是否了解这些词语的真正含义呢？

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。

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。

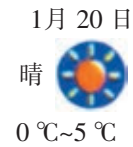




图 1–2　某地 1 月的一次天气预报

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王义夫有 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。

投掷硬币的启示

实验探究　探究硬币出现正反面的概率

如果把硬币铸有面值的一面称为正面，另一面称为反面，随

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。”

意投掷一枚硬币,硬币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者都是反面朝上,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随意投掷一枚硬币1次和10次,将投掷结果按学号填入下表,并对全班的总结果进行统计。

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 $N=$ _____。

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

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

从这次活动中,你能悟出什么规律吗?

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,揭示的是大量事件在整体上的性质及必然联系。

2. 统计规律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,这个偏差叫做“涨落”。一般来说,被统计的事件数量越多,涨落的现象越不显著。

统计规律及其普遍性

分析论证

在投掷硬币的实验中,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,硬币出现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,硬币出现正面朝上和反面朝上的可能性都在50%左右。

这就意味着,在大量的偶然事件背后,蕴藏着一种规律,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。

统计规律普遍存在于自然现象和社会现象之中。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大：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%……

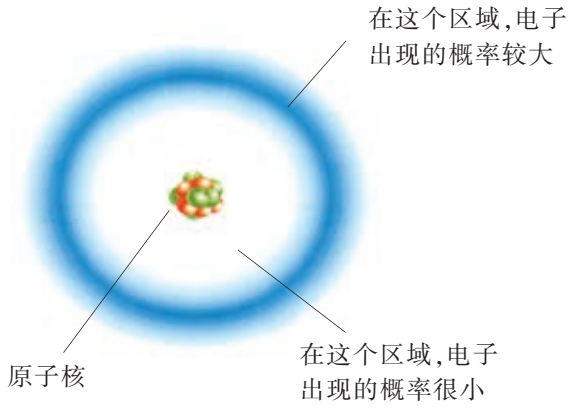


图 1–3　核外电子的概率分布

现代科学研究指出，原子内，电子与原子核的距离并不是固定不变的，电子可以处在原子核外各个不同的位置上，在与原子核距离不同的地方出现电子的概率不同，传统观点中的“轨道”已被概率分布所取代(图 1–3)。

总之，统计规律跟我们的日常生活、经济建设和科学研究都有着密切的联系。

信息浏览

统计方法步入物理学殿堂

随着物理学的发展，统计思想首先从大量分子组成的热学系统找到了突破口，逐渐渗入了物理学。

1856 年，德国物理学家克勒尼希(A. K. Krönig)在一篇论文里说：“按照概率理论的定律……，我们可以用完全的规律替代完全的不规则性。”虽然克勒尼希没有具体用概率理论进行运算，对概率理论在物理学中的重要性还认识不足，但他的话像一道明亮的闪电，照亮了气体分子动理论前进的方向。

1857年，德国物理学家克劳修斯(R. Clausius)发表了分子动理论的奠基性论文，大胆地将概率思想引入物理学及其计算中。

接着，在 1859 年，英国物理学家麦克斯韦(J. C. Maxwell)成功地找出了分子速率分布的函数，明确地向世人宣告：描述分子的运动与牛顿力学中描述宏观客体的运动是不一样的，这里需要新的物理思想和方法。描述大量分子的运动必须应用统计方法。

至此，统计方法终于庄严地步入物理学的殿堂。

家庭作业与活动

1. 请你在不同季节对当地气象台天气预报中的“明天降水概率”做连续10天或1个月的记录，并对照次日的实际天气情况，填入自己设计的表格中，给气象台对不同季节降水预报的准确度进行评价。
2. 请你和同学们一起调查本校一二个年级(或一二个年龄段)的同学喜爱足球、篮球、排球、羽毛球、乒乓球等的情况，列表统计结果，并对照学校目前的设施，对学校的体育发展规划提出相应的建议。
3. 走访校医务室，统计全校不同年龄段的同学患近视眼的情况，并对怎样预防近视眼提出合理的建议。



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(橘黄色)排列顺序,这个图像放大了 20 万倍

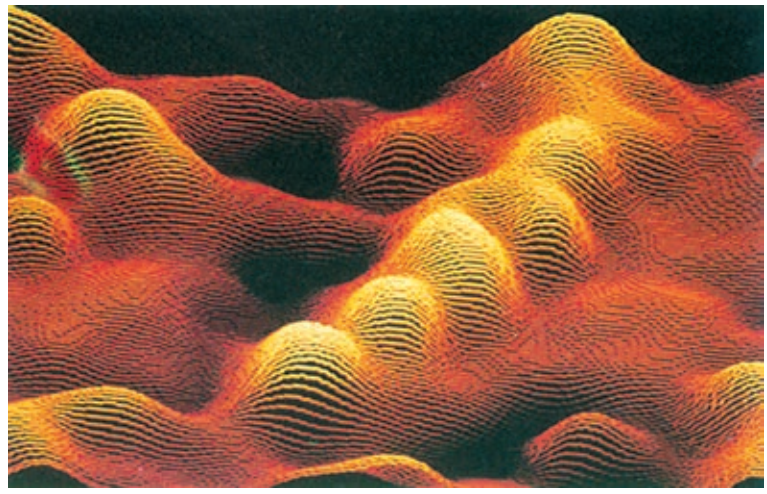


图 1–5　用扫描隧穿显微镜(STM)在一个遗传分子上描绘的形状

1.2 走进分子世界

我们知道,物体都是由许多很小的分子组成的。那么,分子有多大?怎样知道分子的大小呢?

分子何其小

实验探究　用油膜法估测分子直径

设计思路

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。

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“单分子地毯”,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　　$D = \dfrac{V}{S}$

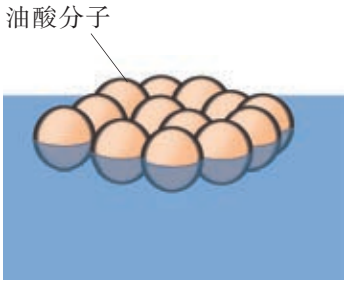


图 1–6　油酸分子形成单分子层的示意图

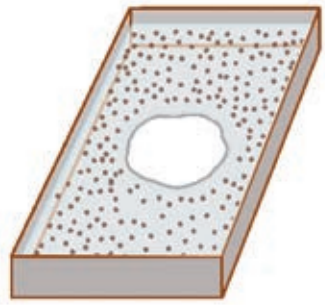


图 1–7　油膜的形状

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

那么，怎样让分子一个紧挨一个地铺展开来呢？

实验设计

以油酸（$C_{17}H_{33}COOH$）为例，为了使分子排列起来，可以利用油酸分子的酸根 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）。

进行实验

在一个边长 30～40 cm 的浅盘里倒入约 2 cm 深的水，将痱子粉或滑石粉均匀地撒在水面上。再用注射器或滴管吸取配制好的油酸酒精溶液，滴入一小滴到水面上，液滴很快会形成如图 1–7 所示的油酸薄膜。用玻璃板盖在浅盘上，在玻璃板上覆一张半透明的坐标纸，将油膜形状描画在坐标纸上。

在坐标纸上描画出油膜的形状后，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。

现在，用扫描隧穿显微镜（STM）已经可以看到原子尺度的微观世界。

扫描隧穿显微镜（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。

1993 年 5 月，美国 IBM 公司的科学家在 4 K 的温度下，用电子束将单层的 Fe 原子蒸发到 Cu 表面，然后用 STM 针尖将 48 个铁原子排列成直径为 14.3 nm 的圆形围栏，它能围住栏内处于铜表面的电子，故称为“量子围栏”。

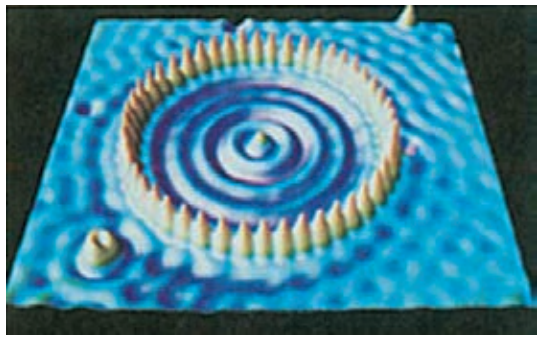


图 1–8　用扫描隧穿显微镜观察到的排列成的圆形量子围栏

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，1 mol 任何物质所包含粒子的数目都相等，这个数目叫做**阿伏伽德罗常量**。根据分子的球模型，我们可以算出阿伏伽德罗常量的大小，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 $V_{mol} = 1.8 \times 10^{-5}\ m^3/mol$，水分子的直径约为 $D = 4 \times 10^{-10}\ m$，得水分子的体积 $V_1 = \frac{1}{6}\pi D^3 = 3.0 \times 10^{-29}\ m^3$。假设水分子是一个紧挨一个地排列着的，因此，1 mol 水所含的水分子数目（即阿伏伽德罗常量）就等于

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

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。

阿伏伽德罗常量是一个重要的常量，它仿佛是联系宏观世界和微观世界之间的一座桥梁。利用阿伏伽德罗常量，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，阿伏伽德罗常量的公认值是

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

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

讨论与思考

如果已知某种金属的摩尔体积（V_{mol}）和阿伏伽德罗常量（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

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

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 $n = \frac{V}{V_0} = \frac{abc}{V_0}$；再根据阿伏伽德罗常量，算得空气分子数

$$N = nN_\text{A} = \frac{abc}{V_0} N_\text{A}$$

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。

信息浏览

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伽德罗（A. Avogadro）于 1811 年首先引入的。阿伏伽德罗认为：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，阿伏伽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 年之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伽德罗常量的表达式。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伽德罗常量的方法，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，他们的扫描隧穿显微镜图像所呈现的分子中，有一个分子模糊不清，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极微小的空隙中，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. 一只保温瓶内水的质量约 2.2 kg，其中水分子的数目约为多少？水的摩尔质量为18 g/mol。
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 该溶液有 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. 为了测出阿伏伽德罗常量，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
5. 为了估算出教室里空气分子的间距，需要知道哪些物理量？请写出用这些物理量表示的分子间距表达式。

1.3 分子热运动

在初中物理中已经知道，物质分子永不停息地做着无规则的热运动，扩散现象就是分子无规则运动的结果。

现在，我们进一步通过实验研究，直观地体会一下分子运动的情况。

分子运动何其乱

如图 1–9 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，纵横交错。这个现象说明小颗粒在不停地改变着自己的运动方向，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）。这种小颗粒通常被叫做“布朗粒子”。

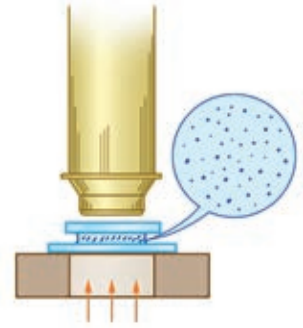


图 1–9　用显微镜观察布朗运动



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起来得到的折线

图 1–10　布朗粒子无规则运动示意图

布朗运动是否就是分子的运动？你认为应该怎样解释这个实验现象？

我们知道，分子直径的数量级为 10^{-10} m，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。

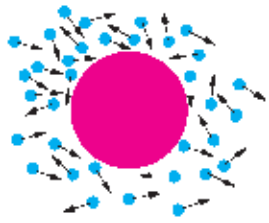


图 1–11　布朗运动的原因

那么,布朗运动是怎样产生的呢?物理学家在迷茫了几十年后,终于搞清楚了布朗运动的原因。原来,布朗粒子悬浮在液体中,会不断地受到其周围液体分子对它的撞击。由于布朗粒子很小,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,做着毫无规则的运动。

热运动

在布朗运动的实验中发现,液体的温度越高,布朗运动越明显。这间接说明了温度越高,液体分子的无规则运动越剧烈。在热力学中,我们研究的对象是由大量分子组成的集合体,叫做**热力学系统**(thermodynamic system)。由此可见,一个宏观系统的冷与热跟系统内大量分子无规则运动的剧烈程度有关。在物理学上,把分子永不停息的无规则运动叫做**热运动**(thermal motion)。

热运动与机械运动是完全不同的两种运动形式。热运动指的是系统内大量分子的无规则运动,机械运动则是系统整体的或某一部分的宏观位置变动。例如,在观察布朗运动的实验中,放在实验桌上容器中的液体,作为一个整体来说相对于实验室参考系是静止的,并不做机械运动,但液体内的分子却不停地在运动,因此使整个液体处在一种热运动状态,显然,它不同于机械运动。

案例分析

案例　几位同学通过对布朗运动的观察后,提出了以下一些看法,其中正确的是

A. 布朗运动是组成固体微粒的分子无规则运动的反映

B. 悬浮的固体微粒越小,布朗运动越显著

C. 观察时间越长,布朗运动越显著

D. 布朗运动的发生与温度的高低无关

E. 从缝隙中射入一缕阳光,从阳光中看到的尘埃的运动就是布朗运动

可以根据布朗运动的产生原因、热运动的意义、布朗粒子与尘埃等固体微粒尺度的比较等方面，对上述看法作出评价。

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。"

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

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. Smolukhovski）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。

家庭作业与活动

1. 有人说，图 1–10b 中画出的就是一个布朗粒子的运动轨迹。这种说法对不对？
2. 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。

1.4 无序中的有序

利用阿伏伽德罗常量，可以估算出教室里空气分子数目的数量级达到 10^{27}。这么多的分子在一起，它们是怎样运动的呢？



图 1–12　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，必然会导致分子间频繁地碰撞（图 1–13）。研究表明，在标准状况下，一个空气分子在 1 s 内跟其他空气分子的碰撞竟达到几十亿次之多。

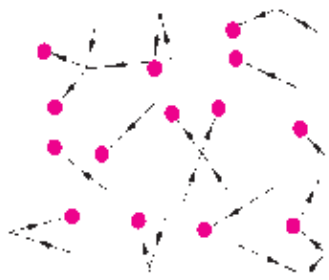


图 1–13　分子间频繁地碰撞

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？

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 1–14a 所示的装置称为伽尔顿板。在一块竖直平板上均匀地密布着许多钉子，平板下方有一木槽，木槽内分有许多宽度相同的竖立的小格。实验时，先让一个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，最后落到木槽的某个小格中；

然后再让另一个小球下落，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，木槽的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 1–14b 所示。

如果把小球看成分子，它们落入木槽内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。



a

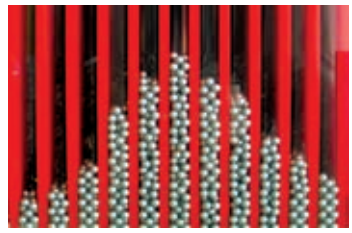

b

图 1–14　伽尔顿板

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落入各个小格中的小球多少所形成的分布。

科学家用实验方法测出了在 0 ℃和 100 ℃时氧分子的速率分布，如下表所示。

氧分子的速率分布

按速率大小划分的速率区间 $v/(\mathrm{m\cdot s^{-1}})$	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

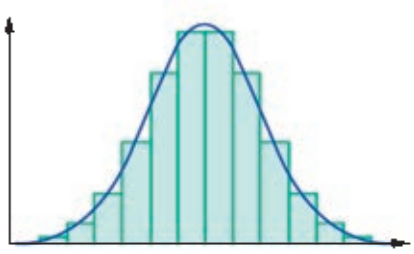


图 1–15　正态分布曲线，又叫高斯曲线

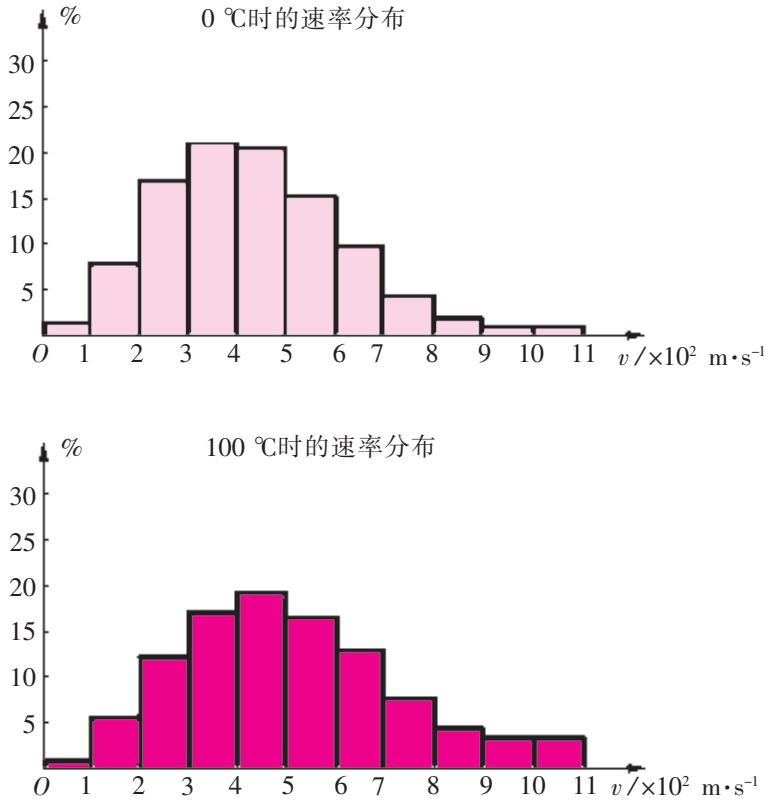


图 1–16　一定温度下氧分子的速率分布

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 1–16 所示。

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 1–16），你得到什么启示？

如果把图 1–16 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？

麦克斯韦的统计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”。

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。

多学一点　麦克斯韦速率分布的实验验证

实验装置如图 1–17 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。

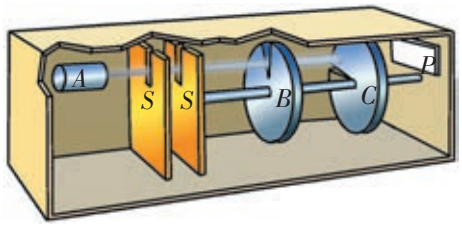


图 1–17　验证麦克斯韦速率分布的实验装置

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过 C 狭缝。如果以某种速率 v 运动的分子，穿过 B 狭缝后运动到 C 狭缝的时间，恰好等于圆盘转过角度 φ 所用的时间，即满足条件 $\frac{l}{v}=\frac{\varphi}{\omega}$，这样的分子才能从 B 进入并从 C 射出。因此利用这个装置可以测定分子的速率。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 $v\pm\Delta v$ 区间内的分子。

调节圆盘转速 ω，就可以检测到在不同速率值 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的少。”

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 1–18 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 1–18　一条古老的阶梯

1.5 用统计思想解释分子运动的宏观表现

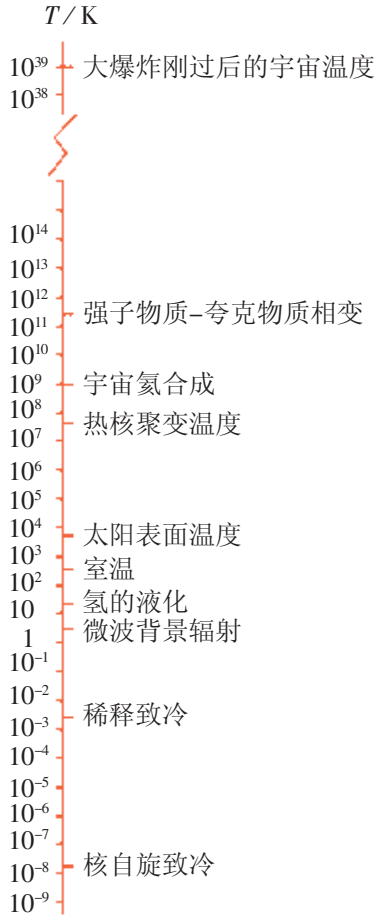


图 1–19　温度阶梯

从人类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

我们从扩散现象和布朗运动的研究已经知道，分子的运动都跟温度有关。温度越高，分子扩散得越快，布朗运动越明显，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，温度的高低由物质分子的运动情况所决定。

理论研究指出，温度的高低与一个热学系统内所有分子热运动的平均动能有关。温度升高，系统内分子热运动的平均动能增加；温度降低，系统内分子热运动的平均动能减少。因此，从分子尺度的观点来看，系统内分子的微观运动决定着系统宏观的温度。

温度是系统内所有分子热运动的平均动能的标志。

值得注意的是，系统内分子的平均动能跟系统整体做机械运动的动能是两个不同的概念。系统整体做机械运动的动能由其质量和速度决定，通常认为与温度无关，相对于参考系静止时，其动能为零。系统内分子的平均动能是指组成系统的大量分子做无规则运动所具有的动能的平均值，这是一个统计平均值。它的大小决定于温度和物质的量。在任何情况下，系统内分子的运动永不停息，系统内分子的平均动能总不为零，因此系统总是有一定的

平均动能就是所有分子动能的平均值。

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

热力学理论证明，它跟温度直接有关。

温度。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,它只具有统计的意义,对单个分子来说,温度是没有意义的。

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“系统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 1–20　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 1–21 所示,让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。

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。



图 1–21　用钢珠模拟分子碰撞

分析论证

气体的压强反映着器壁单位面积上所受平均压力的大小。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对应关系：

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，它同样具有统计的意义。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

根据决定气体压强大小的两个微观因素，你能对“大气海洋”底层的压强，跟地面附近一小瓶空气的压强一样的问题进行解释吗？

家庭作业与活动

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？

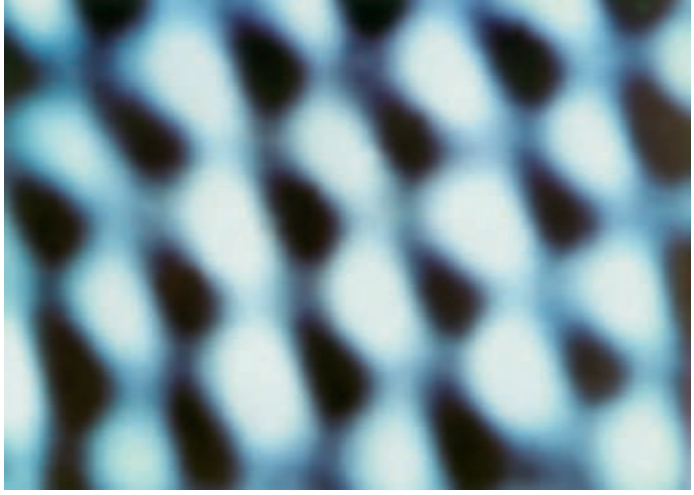


图 1–22　用扫描隧穿显微镜拍摄的石墨表面的原子排列情况

1.6

物体的内能

分子力

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 是用扫描隧穿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，而固体却能保持一定的形状，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

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。

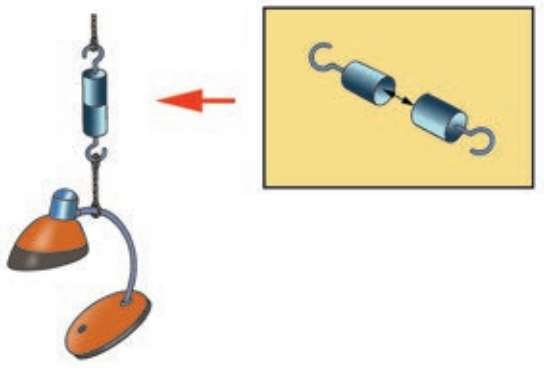


图 1–23　由于分子之间引力的作用，两段铅柱会结合成一体，下方挂上一定质量的重物后也不分开

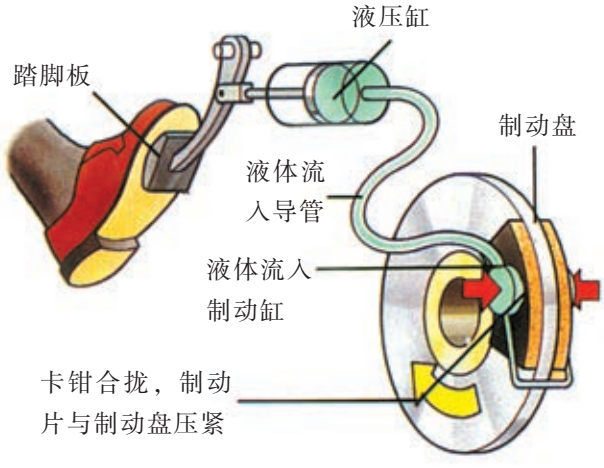


图 1–24　水、油等液体很难被压缩，显示分子之间斥力的作用。水压机、液压传动就是利用了它们的“不可压缩性”

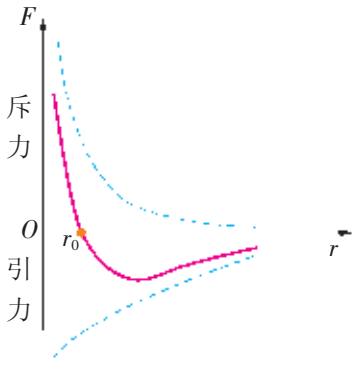


图 1–25　分子力与分子间距的关系

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。

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。

讨论与思考

结合图 1–25 讨论一下：当两个分子间的距离小于 r_0、等于 r_0、大于 r_0 等不同情况时，分子间相互作用力有什么特点？

综上所述，我们知道，一个宏观的热学系统是由大量分子组成的；分子在永不停息地做着无规则运动；分子之间同时存在着引力和斥力。这就是**分子动理论**(molecular kinetic theory)的基本内容。

初中物理也学习过分子动理论，你觉得哪些方面有了更深刻的认识？请相互交流。

分子势能

我们知道，由于地球与物体间的万有引力作用，地面附近的物体具有重力势能；由于电荷与电荷间存在的静电相互作用，电荷具有电势能。既然分子间也存在着相互作用，因此分子同样会具有势能。在物理学中，把由分子间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。

通过类比，可以知道，当 $r > r_0$ 时，随着分子间距离的增大

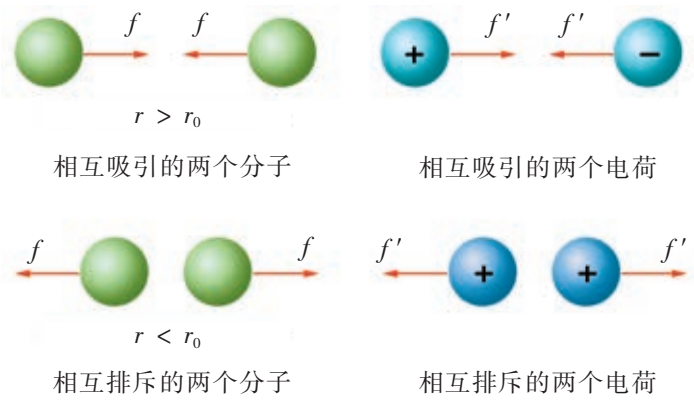


图 1–26　分子力与电荷间相互作用力的类比

(减小),分子引力做负功(正功),分子势能增加(减少);当 $r < r_0$ 时,随着分子间距离的减小(增大),分子斥力做负功(正功),分子势能增加(减少)。总之,当分子力做正功时,分子势能减少;当分子力做负功时,分子势能增加。

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。

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,把系统内所有分子的热运动动能和分子势能的总和,叫做系统的**内能**(internal energy),又叫做热力学能,用符号 U 表示。

从分子论角度,内能的微观定义是:系统内所有分子做无规则运动的动能,分子间相互作用的势能,以及分子、原子、原子核内部能量的总和。

由于在热力学过程中分子、原子、原子核内部的能量都不发生变化,因此可以简化为书中的定义。

根据内能的定义可知,在微观上,一个系统的内能大小跟它所包含的分子的多少、分子热运动的速率和分子间相互作用等因素有关。

内能是不同于机械能的另一种形式的能。由于任何系统的分子都在不停地运动,分子间又存在着相互作用,所以任何系统都具有内能。但是,某系统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系统内能的大小,而是内能变化量的大小。

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

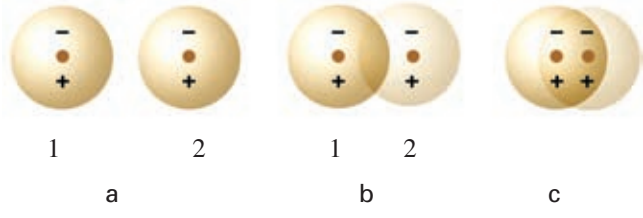


图 1–27　分子间相互作用的微观解释

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。

家庭作业与活动

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. 当两个分子间的距离等于 r_0 时，分子处于平衡状态。若两个分子间对外表现的分子力如图1–28所示，则两分子间的距离 r 应是
   A. $r = r_0$　B. $r > r_0$　C. $r \geqslant r_0$　D. $r < r_0$

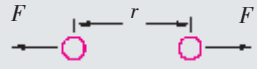


图 1–28

3. 根据内能的定义，比较下列各组中各系统内能的大小，并说明道理。
   (1) 1 kg 50 ℃ 的水和 10 kg 50 ℃ 的水
   (2) 1 kg 50 ℃ 的水和 1 kg 80 ℃ 的水
   (3) 1 kg 100 ℃ 的水和 1 kg 100 ℃ 的水汽
4. 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。
5. 根据你的认识，对机械能和内能这两种形式的能作一比较。

1.x

第 1 章家庭作业与活动

1. 纳米(nm)是长度单位,1 nm = 10^{-9} m。如果有一个边长为1 nm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. 1 g 食盐完全均匀分布在 1×10^{10} m^3 的水中，则 1 cm^3的盐水中所含食盐分子数目的数量级是_____。食盐的摩尔质量为 58.5 g/mol。
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水分子数目约为_____。
4. 利用单分子油膜法可以粗略测定分子大小和阿伏伽德罗常量。如果已知体积为V的一个油滴,滴在水面上散开后形成的单分子油膜面积为S，则这种油分子的直径 d =_____;如果这种油的摩尔质量为M,密度为ρ,则可推算出阿伏伽德罗常量 N_A =_____。
5. 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
6. 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. 颗粒的质量越大,越不易改变运动状态
   D. 颗粒分子本身的热运动缓慢
7. 关于分子力做功,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,则两分子间距离减小时,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
8. 两个分子甲和乙相距较远(此时它们之间的分子力可忽略),设甲固定不动,乙逐渐向甲靠近直到不能再靠近的整个过程中
   A. 分子力总是对乙做正功
   B. 乙总是克服分子力做功
   C. 先是乙克服分子力做功,然后分子力对乙做正功
   D. 先是分子力对乙做正功,然后乙克服分子力做功
9. 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,则分子的动能增加,内能也一定增加
   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
10. 为了估测一容器中气体分子间的平均距离,需要知道的物理量是
   A. 阿伏伽德罗常量、该气体的质量和摩尔质量
   B. 阿伏伽德罗常量、该气体的摩尔质量和密度
   C. 阿伏伽德罗常量、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

我们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“托里拆利真空”，人们才发觉空气有着丰富奇妙的性质，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，更多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？

当气体的状态发生变化时遵循什么规律？

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，在建立饱和汽、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

在力学中，为了描述物体做机械运动的状态，我们引进了位移、速度、动能等物理量。那么，描述气体的宏观状态，应该引入哪些物理量呢？

描述一个热力学系统的平衡态，除温度外，还需用几何参量、力学参量、化学参量和电磁参量等四种不同类型的状态参量。究竟需要用多少个状态参量才能确定一个系统的状态，由系统的复杂程度和问题的要求所决定。

用 T、V、p 描述气体的状态

我们知道，一定量气体是一个由大量分子组成的物质系统。它所反映的宏观性质多种多样，有力学性质、热学性质、几何性质等，跟它们对应的物理量就是压强、温度和体积等。由于分子永不停息地做着无规则运动，系统的各种性质经常会发生变化，要精确地描述每个时刻系统的各种性质是非常困难的，在实际应用中，往往也是不必要的。

研究表明，当一个热力学系统跟外界没有任何相互作用时，不管这个系统内各部分原有的温度和压强如何，经过相当长时间后，系统各部分将具有相同的温度和压强。如果它与外界没有能量交换，内部也没有任何形式的能量转换，系统的温度和压强将不随时间变化。这时，我们就称系统处于**平衡状态**（简称平衡态，equilibrium state）。

由于分子始终在不停地运动，这种平衡状态叫做热动平衡状态。

处在平衡态的气体在宏观上表现为各部分的密度均匀、温度均匀、压强均匀，我们可以用一组 T、V、p 的参量表示它的状态。描述系统平衡态性质的物理量叫做**状态参量**（state parameter）。T、V、p 就是气体的状态参量。

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

在第 1 章，我们已经从微观上对温度作出了定义。现在知道了平衡态的意义后，你认为应该怎样从宏观上对温度作出定义？

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），但它们都不是国际单位制单位。

$$1\ \text{atm} = 76\ \text{cmHg} \approx 1.013 \times 10^5\ \text{Pa}$$

$$1\ \text{mmHg} = 133.322\ \text{Pa} \approx 133\ \text{Pa}$$

多学一点　热力学第零定律

取冷热状态不同的甲、乙、丙三个系统，将甲和乙相互隔绝，

并让它们同时与丙接触，经过一段时间后，甲、乙分别与丙达到热平衡。然后，移开丙，让甲与乙接触，此时甲、乙间不会再进行热交换，表明甲和乙组成的系统也处于热平衡状态。所以，跟第三个系统处于热平衡的两个系统，彼此间也必定处于热平衡。这个规律叫做**热平衡定律**(law of thermal equilibrium)，也称做**热力学第零定律**(zeroth law of thermodynamics)。

由此可见，处于热平衡的所有系统，它们有一个相同的性质，这个宏观性质就是系统的温度。

热力学第零定律是热力学中一个基本的实验定律，其重要意义就在于它为定义温度的概念提供了实验基础，揭示了温度的宏观特征，同时也为测量温度提供了依据。

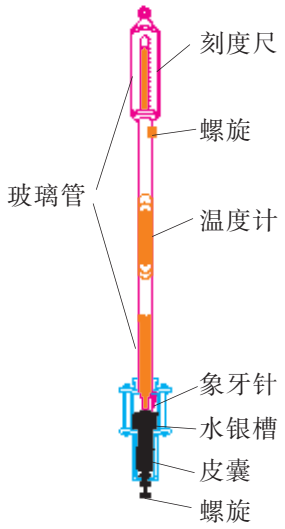


图 2–2　槽式气压计

它是用一根长约 1m、一端封闭、一端开口的玻璃管，管内注满水银后倒立在水银槽内组成的，故称为槽式气压计。

实验探究　用压强计测压强

用槽式气压计测量大气压

图 2–2 所示是实验室常用的槽式气压计，它是根据托里拆利实验的原理制成的。使用时调节其下端螺旋，使水银面刚好接触象牙针尖，移动附在刻度尺上的游标就可以准确读出大气压值。

用金属压强计测量自行车车胎内气体的压强

如图 2–3 所示，用金属压强计测出自行车车胎内气体的压强。



图 2–3　金属压强计

怎样研究气体的状态变化

当气体与外界发生能量交换时，气体的状态就会发生变化。气体从一个状态变化到另一状态所经历的过程叫做**状态变化过程**。气体发生状态变化时，描述气体状态的参量中，至少有两个参量发生了变化，或者三个参量都发生了变化。

那么，怎样研究气体的状态变化规律呢？

建立理想气体模型

实际的气体是比较复杂的。不同气体的分子大小和结构不同，同时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的引力和斥力作用的气体叫做**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。

设想平衡过程

气体实际经历的状态变化过程往往是瞬息万变的。为了研究问题的方便，设想过程所经历的一系列中间状态，都无限接近平衡状态。我们把无限接近平衡态的过程叫做**准静态过程**。

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，进而确定三个参量之间的变化规律，这就是理想气体在状态变化过程中所遵循的规律。

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。

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

实验中，怎样使得一定质量气体的温度、体积、压强分别保持不变呢？

有几位同学提出了下列各种实验方案：

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缓慢地加热，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。

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。如果把

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包围地球的大气总质量的估算。

家庭作业与活动

1. 关于热力学温度，下列说法中正确的是

   A. 热力学温度的零度是−273.15 ℃，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 cmHg

   B. p_A = 75 cmHg

   C. $p_B - p_A$ = 3 cmHg

   D. $p_B - p_A$ = 6 cmHg

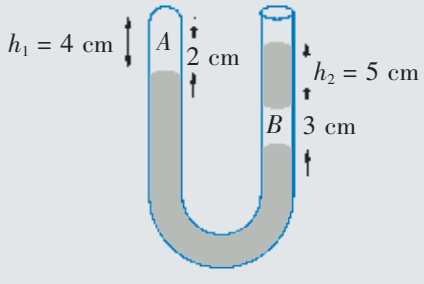


图 2–4

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. $\frac{1}{2}\pi R^2 p$

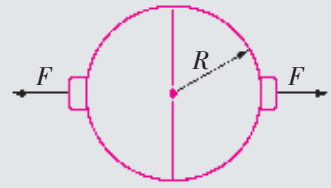


图 2–5

4. 如图 2–6 所示，在水银槽里竖立着一根充满水银的玻璃管，管顶距槽内水银面高 40 cm。已知外界大气压强为 75 cmHg，玻璃管的横截面积为 0.1 cm²，则玻璃管的封闭端 A 的内表面受到的压力为多大？

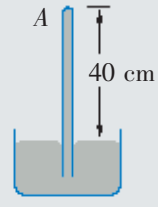


图 2–6

2.2 玻意耳定律

诘难中的发现

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，玻意耳的工作受到当时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。

为此，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。玻意耳测出封闭端空气柱的长度和相应的两端水银面的高度差，然后再缓缓倒入一些水银，再测出空气柱的长度和相应的两端水银面的高度差，依次测出一系列数据(图 2–7)。

玻意耳做实验时所用的U形管很长，他把U形管用绳子吊着做了约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封闭端空气柱压强的？请猜测一下，玻意耳的实验会得出怎样的关系？



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。

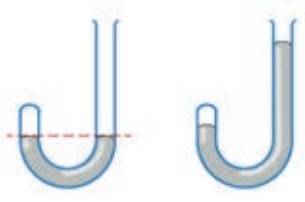


图 2–7 玻意耳实验的示意图

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 2–8 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

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。

空气的体积发生相应的变化。然后在压强计和刻度尺上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)，是 17 世纪物理学上的一项重大发现。

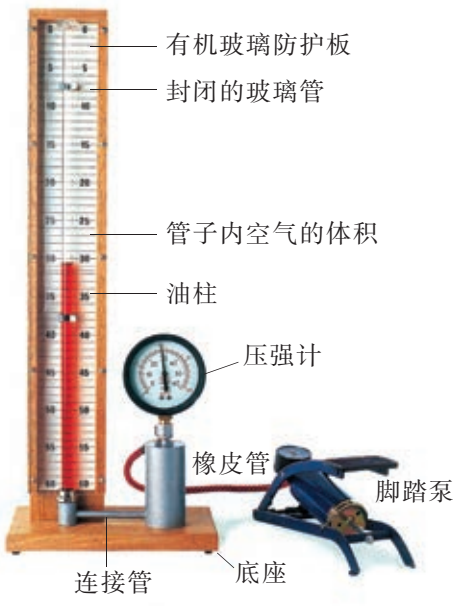


图 2-8　探究等温过程的实验装置

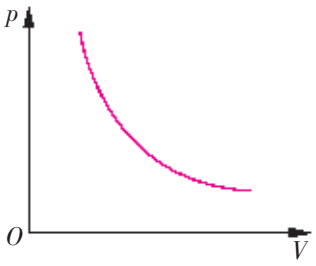


图 2-9　等温线

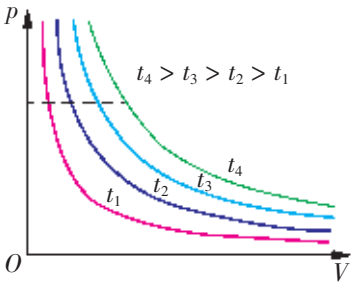


图 2-10　对应不同温度的几条等温线

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 图像就是如图 2-9 所示的双曲线，这条双曲线叫做**等温线**(isotherm)。一定质量的气体，保持在不同的温度下，有着不同的等温线，但它们都是双曲线，如图 2-10 所示。

思考一下，在图 2-10 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。

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了合适的温度、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，航天服内为什么要有一套调节压力的系统？

分析　航天员在地球上正常生活和工作时受到的外部压强是一个大气压，身体内（如肺泡）气体产生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，这时肺泡气体的体积会急剧增大，如果不采取一定措施的话，可能使肺泡膨胀破裂。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可知，肺泡气体的体积会急剧减小，会使肺泡被压缩。

请根据以上分析，设想一下，航天服内的压力系统应该如何调节？



图 2–11　穿上航天服的中国航天员杨利伟

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 cm^3。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　$V_1 = 125$ cm^3		体积　$V_2 = 2.0$ L

根据玻意耳定律，可以算出打入胎内后气体的压强 p_2'。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

你认为案例 2 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

实验主要仪器如图 2–12 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 2–13 所示。



图 2–12　研究气体压强与体积关系的 DIS 实验主要仪器

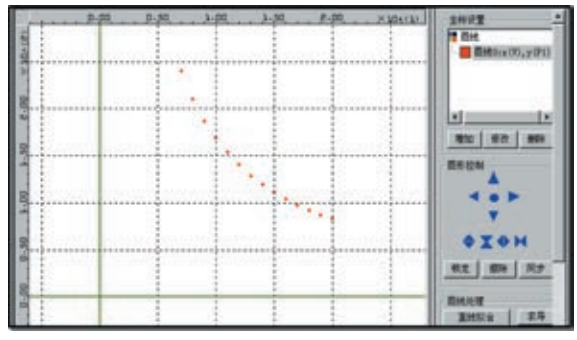


图 2–13　由 DIS 得出的 p–V 图像

家庭作业与活动

1. 以注射器为主要器材，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 2–14 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写出大气压强的表达式。



图 2–14

3. 在图 2–7 所示的玻意耳实验中，假设当左右两臂内水银面等高时，测得封闭端空气柱长 40 cm，大气压强为 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，一位学生从桶装纯净水得到启发，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作出评价。

2.3 查理定律和盖–吕萨克定律

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。



图 2–15　探究等容过程的实验装置

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 2–15 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。

物理量 \ 序号	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 2–16 所示。这条倾斜直线叫做**等容线**(isochore)。

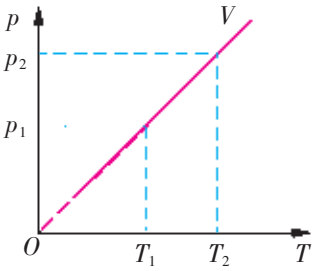


图 2–16　等容线

一定质量的气体，保持不同的体积，改变其温度和压强，可以作出一系列不同的等容线，但它们都是过原点的倾斜直线，如图 2–17 所示。

试比较图 2–17 中体积 V_1、V_2、V_3 的大小？你认为可以从哪些方面进行判断？请相互交流。

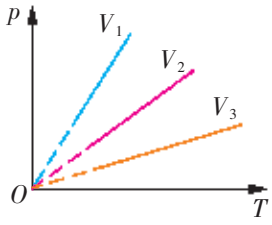


图 2–17　对应不同体积的几条等容线

根据分子动理论很容易对查理定律作出解释。一定质量的气体保持体积不变时，分子的密度也保持不变。温度升高后，分子的平均动能增加，根据压强产生的微观机理可知，气体的压强就会增大。

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，他手表的表面玻璃没有受到任何撞击，却突然爆裂了。

查阅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大？外界大气压强为多大？

分析　手表的表壳与表面玻璃组合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。手表出厂后随登山运动员上珠峰，可以认为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)。

根据查理定律可算出表壳内气体在山上的压强，结合表面玻璃爆裂条件，即可求出当时的外界大气压。

解答　表壳内气体始、末两状态的状态参量如下：

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

由查理定律得手表表面玻璃爆裂时，表内气体的压强为

$$p_2 = \frac{T_2}{T_1}p_1 = \frac{260}{300} \times 1 \times 10^5 \text{ Pa} = 8.7 \times 10^4 \text{ Pa}$$

设此时外界大气压为p_h，则表壳内外气体压强差

$$\Delta p = p_2 - p_h$$

所以外界大气压为

$$p_h = p_2 - \Delta p = 8.7 \times 10^4 \text{ Pa} - 6 \times 10^4 \text{ Pa} = 2.7 \times 10^4 \text{ Pa}$$

等压过程与盖–吕萨克定律

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，用公式可表示为 $\frac{V_1}{V_2}=\frac{T_1}{T_2}$。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)。

请你仿照等温过程和等容过程，用图像表示出盖–吕萨克定律。

解答 在平面直角坐标系中，用纵坐标表示体积 V，横坐标表示热力学温度 T，根据盖–吕萨克定律，其 V–T 图像如图 2–18 所示，这条倾斜直线叫做**等压线**。

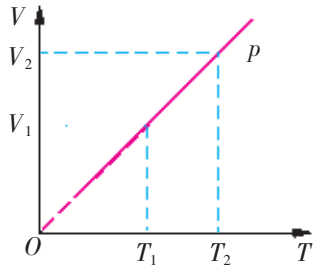


图 2–18

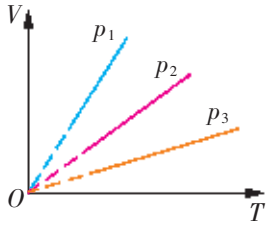


图 2–19

如果使一定质量的气体保持在不同压强下改变其温度和体积，就可以得到一簇等压线，如图 2–19 所示。

你怎样判断图 2–19 中的压强 p_1、p_2、p_3 的大小关系？

根据分子动理论，同样可对盖–吕萨克定律作出微观解释。因为一定质量的气体温度升高时，分子的平均动能增加，为了保持其压强不变，必须相应地增大气体的体积，使分子的密度减小，这正是盖–吕萨克定律的结果。

课题研究

研究气压式保温瓶的原理

仔细观察气压式保温瓶的结构，跟同学们一起讨论它的出水原理，写一份报告并在班上交流。

家庭作业与活动

1. 冬天，剩有半瓶热水的保温瓶经过一个夜晚，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

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 2–20)。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。

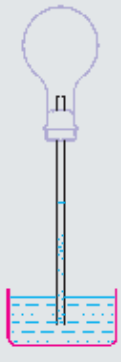


图 2–20　伽利略验温器

3. 氧气瓶在车间里充好气，瓶内压强达到 1.5×10^7 Pa。当把氧气瓶运送到工地上后，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. 一户居民因家中厨房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。

5. 一位同学提出一个粗略地验证盖–吕萨克定律的实验步骤。如图 2–21 所示，在一个大烧瓶中，插入一根带橡皮塞的弯成直角的玻璃管，管的水平部分留有一水滴。请你从物理原理上说明，用这个装置验证盖–吕萨克定律时，还需要添加哪些器材？写出实验的主要步骤。

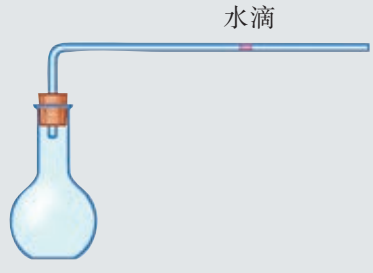


图 2–21　探究等压过程的实验装置

2.4 理想气体状态方程

如果一定质量理想气体的三个状态参量(T、V、p)同时发生变化,那么,变化前后的这些参量之间遵循什么规律呢?

理想气体状态方程

分析论证

设一定质量理想气体始、末两状态用 A、B 表示,对应的状态参量分别为 T_A、V_A、p_A 和 T_B、V_B、p_B。为了找出这两组参量之间的关系,我们让这些气体先经历一个等温过程,变化到中间态 C,其温度、压强、体积分别为 $T_C = T_A$、p_C、$V_C = V_B$。由玻意耳定律知

$$p_A V_A = p_C V_C = p_C V_B$$

再让它经历一个等容过程($V_C = V_B$),变化到末状态 B,由查理定律知

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

由前式得

$$p_C = \frac{p_A V_A}{V_B}$$

代入后式,整理得

$$\frac{p_A V_A}{T_A} = \frac{p_B V_B}{T_B}$$

上式表示,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**理想气体状态方程**。用公式可表示为

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

或

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \tag{2}$$

讨论与思考

(1) 一位同学根据三条实验定律的表达式

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

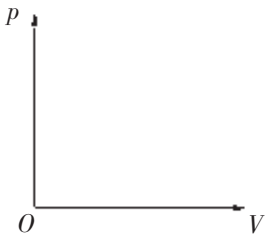


图 2–22

将它们等式左右分别相乘，再开平方，同样可得出理想气体状态方程的表达式。你认为这样推导是否合理，为什么？

(2) 把书中的推导过程在图 2–22 中的 p–V 图上表示出来。请利用 p–V 图另外设计两个过程，推导出理想气体状态方程。

摩尔气体常量

实验表明，一定质量的理想气体在状态变化过程中恒量 C 的值跟气体的种类和质量有关。为了找出能够适用于任何气体的状态方程，我们选用 1 mol 的气体进行研究。它在标准状态下，即 $p_0 = 1.013 \times 10^5$ Pa，$T_0 = 273$ K 时，其体积 $V_{mol} = 22.4$ L $= 22.4 \times 10^{-3}$ m^3。将这些数值代入(1)式，就得到适用于 1 mol 的任何气体的常量，这个常量用 R 表示，叫做摩尔气体常量，又称**普适气体常量**(universal gas constant)。

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

$$= 8.31\ \mathrm{J/(mol \cdot K)}$$

普适气体常量是热学中的一个重要常量，它适用于任何气体。于是 1mol 理想气体的状态方程可表示为

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

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**。

由此可见，任何气体的质量与其三个状态参量之间有着确定的关系。

案例分析

案例 如图 2–23 所示为大炮的一种复位装置。开炮时，炮管反冲带动连杆活塞使空气被压缩。反冲结束后，压缩空气推动活塞使炮管复位。设开炮前封闭空气的压强 $p_1 = 45p_0$ ($p_0 = 1.01 \times 10^5$ Pa)，温度 $t_1 = 27$ ℃，体积 $V_1 = 7.6$ L。炮管反冲使空气温度升高为 $t_2 = 127$ ℃，

体积压缩为 $V_2 = 2.0\ \mathrm{L}$，求这时空气的压强。

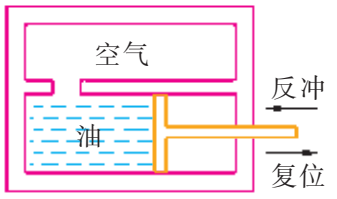


图 2–23　大炮复位装置示意图

分析　以封闭在里面的空气为研究对象，开炮前、后的状态参量分别为

$$T_1 = (27 + 273)\ \mathrm{K} = 300\ \mathrm{K}$$
$$p_1 = 45p_0$$
$$V_1 = 7.6\ \mathrm{L}$$
$$T_2 = (127+273)\ \mathrm{K} = 400\ \mathrm{K}$$
$$p_2 = ?$$
$$V_2 = 2.0\ \mathrm{L}$$

利用理想气体状态方程，就可算出炮管反冲时的空气压强。

解答　根据理想气体状态方程 $\dfrac{p_1V_1}{T_1} = \dfrac{p_2V_2}{T_2}$，得

$$p_2 = \frac{T_2V_1}{T_1V_2}p_1 = \frac{400}{300} \times \frac{7.6}{2.0} \times 45p_0 = 228p_0$$
$$= 228 \times 1.01 \times 10^5\ \mathrm{Pa} = 2.3 \times 10^7\ \mathrm{Pa}$$

请结合本例讨论一下，应用理想气体状态方程解决有关问题的思路。

家庭作业与活动

1. 一定质量的理想气体发生状态变化时，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
2. 容积为 30 L 的钢瓶里装有氢气，使用过程中，压强由 4.9×10^6 Pa 降低到 9.8×10^5 Pa，温度由 27 ℃ 降低到 7 ℃，则钢瓶里剩下的氢气是原来的多少？共用掉多少氢气？
3. 已知高山上的气压为 0.40 atm，气温为零下 30 ℃，则该处 1 cm^3 大气中的分子数为多少？（已知 $N_A = 6.0\times10^{23}\ \mathrm{mol}^{-1}$）
4. 为了估测湖的深度，将一根试管开口向下缓缓压至湖底，测得进入管中的水的高度为管长的 $\dfrac{3}{4}$，湖底水温为 4 ℃，湖面水温为 10 ℃，大气压强为 76 cmHg，则湖水深为多少？
5. 把书中推导理想气体状态方程的过程，在 p–T 图和 V–T 图上表示出来。

2.5 空气湿度与人类生活

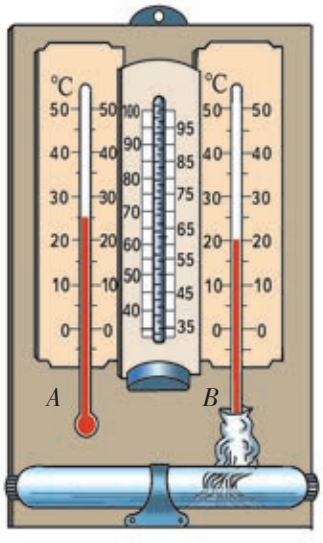


图 2–24　干湿泡湿度计

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？图 2–24 所示是气象站和家庭中常用的干湿泡湿度计，可直接测出湿度。干湿泡湿度计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。在两支温度计之间的狭缝中，装有一个可转动的圆柱体，其侧面贴有相对湿度对照表。使用时，根据两温度计的温度差和干泡温度计的示数，直接可从表中查出当时空气的相对湿度。

为什么两支温度计的示数不同？两支温度计示数差的大小跟湿度有什么联系？什么叫相对湿度？……为了研究这些问题，先要弄清楚空气中水汽的一些情况。

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，也不会完全蒸发，这是什么原因呢？

分析论证



图 2–25　密闭容器中的液体

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，形成蒸汽，这就是蒸发。

容器中液体的液面上，不断地同时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汽分子撞到液面上又回到液体中去。

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,液面上方蒸汽的密度不断增大,回到液体中的分子也逐渐增多。最后,当液面上方蒸汽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。这时蒸汽的密度不再增大,液体也不再减少,我们称此时液体和蒸汽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汽叫做**饱和汽**(saturation vapor),没有达到饱和状态的蒸汽叫做**未饱和汽**(unsaturation vapor)。

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,液体中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,同时蒸汽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,容器中蒸汽的密度减小,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理想气体的三条实验定律。

请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。

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

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,所以通常可用水蒸气的压强间接地反映水蒸气的密度,这样表示的湿度叫做空气的**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。

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之比的百分数,叫做这时空气的**相对湿度**。即

$$\text{相对湿度}(B) = \frac{\text{水蒸气的压强}(p)}{\text{同温度下水的饱和汽压}(p_s)} \times 100\ \%$$

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

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

讨论与思考

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

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？

空气湿度的测量，除了用干湿泡湿度计外，以前还有一种毛发湿度计。因为脱脂的头发吸水时会变长，干燥时会变短，通过机械传动装置，把头发的长度变化变成指针的转动，利用这一原理便制成了毛发湿度计。

传统的指针式温湿度计（图 2–26）精度不够高，现在已广泛应用湿度传感器制成数字式湿度计来测量湿度，如图 2–27 所示。其原理是在基片上涂有能够吸收水分的导电物质，当导电物质中的水分发生变化时，元件的电阻会随之变化，使电路中的电流跟着变化，从而直接显示出湿度的大小。



图 2–26　指针式温湿度计



图 2–27　数字式温湿度计

湿度的影响

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，人们会感到比较舒服。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，否则相对湿度就会减小，将导致人的皮肤干裂。

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，便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，使水分不会很快地因高温而蒸发。

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的要求。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。



图 2–28　仙人掌

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。

附　录

空气相对湿度查算表

干温度计示数 / ℃	干湿温度计示数差 / ℃										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	100	81	63	45	28	11					
2	100	84	68	51	35	20					
4	100	85	70	56	42	28	14				
6	100	86	73	60	47	35	23	10			
8	100	87	75	63	51	40	28	18	7		
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	4	
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	
14	100	90	79	60	51	42	33	25	17	9	
16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22	15
18	100	91	82	73	64	56	48	41	34	26	20
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
26	100	92	85	78	71	64	58	50	45	40	34
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39

家庭作业与活动

1. 托里拆利实验中，水银柱上方的空间常称为托里拆利真空，你认为这个说法是否正确？
2. 在潮湿的天气里，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 2–29，在一根玻璃管中用水银封闭着一定质量的空气，外界大气压强 $p_0 = 76$ cmHg，各部分尺寸的单位为 cm，则封闭气体的压强分别为：

$p_A =$ _____；

$p_B =$ _____；

$p_C =$ _____。

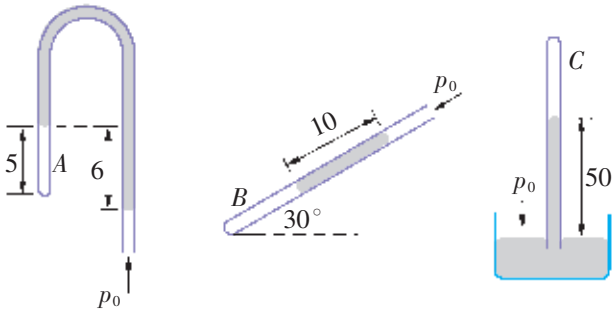


图 2–29

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，活塞所受重力为 G，大气压强为 p_0。当按图 2–30 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

$p_a =$ _____；

$p_b =$ _____；

$p_c =$ _____。

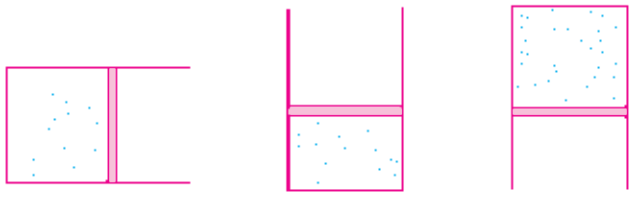


图 2–30

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. 医院里给病人打“吊针”（静脉滴注）的装置如图 2–31所示。在讨论关于药液滴注速度快慢的原因时，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。

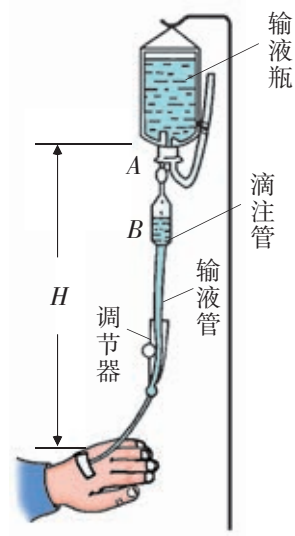


图 2–31　“吊针”装置

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. 图 2–32 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 cm^3。设下列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？

(2) 当贮液筒 A 中有压强为 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？

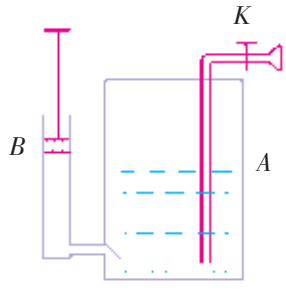


图 2–32　压缩喷雾器

*7. 热气球跨海飞行是许多航空爱好者的一项探险活动。如图 2–33 所示，有一底部开口的热气球，体积恒为 $V = 500\ m^3$，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 $t_1 = 10$ ℃，大气压强 $p_0 = 10^5$ Pa，该条件下空气的密度 $\rho_1 = 1.2\ kg/m^3$。假定大气压强不随高度而变化。

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

(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？气球内减少的气体质量 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 2–33　五彩缤纷的热气球