目　录

第四篇　热　学

14　气体动理论 …… (2)
14.1　热学的基本概念 …… (2)
14.1.1　系统与外界 …… (2)
14.1.2　平衡态 …… (2)
14.1.3　状态参量 …… (3)
14.1.4　状态方程 …… (4)
14.1.5　热力学第零定律 …… (6)
14.2　气体动理论的基本观点 …… (7)
14.2.1　分子运动的基本概念 …… (7)
14.2.2　统计观点简介 …… (8)
14.3　理想气体的压强 …… (10)
14.3.1　理想气体微观模型 …… (10)
14.3.2　分子集体行为的统计假设 …… (10)
14.3.3　理想气体的压强公式 …… (11)
14.4　理想的气体的温度 …… (14)
14.4.1　温度的统计解释 …… (14)
14.4.2　方均根速率 …… (15)
14.5　能量均分定理　理想气体的内能 …… (17)
14.5.1　自由度 …… (17)
14.5.2　能量均分定理 …… (18)
14.5.3　理想气体的内能 …… (19)
14.6　麦克斯韦速率分布律 …… (20)
14.6.1　麦克斯韦速率分布函数 …… (20)
14.6.2　三种统计速率 …… (22)
14.6.3　气体速率分布的实验验证 …… (25)

需要全本请访问 www.ertongbook.com

14.7 玻耳兹曼分布律简介 …… (26)
14.7.1 玻耳兹曼分布律 …… (26)
14.7.2 重力场中微粒按高度的分布 …… (27)
14.8 气体分子的平均自由程和平均碰撞频率 …… (28)
14.8.1 平均碰撞频率 …… (29)
14.8.2 气体分子的平均自由程 …… (30)
思考题 …… (31)
习题 …… (32)
15 热力学基础 …… (35)
15.1 准静态过程 功 热量和内能 …… (35)
15.1.1 准静态过程 …… (35)
15.1.2 功 …… (36)
15.1.3 热量 …… (37)
15.1.4 内能 …… (38)
15.2 热力学第一定律 …… (39)
15.2.1 热力学第一定律 …… (39)
15.2.2 热力学第一定律对理想气体等值过程的应用 …… (40)
15.2.3 理想气体的摩尔热容 …… (41)
15.3 绝热过程 多方过程 …… (43)
15.3.1 绝热过程方程 …… (43)
15.3.2 准静态绝热过程曲线 …… (43)
15.3.3 多方过程 …… (45)
15.4 循环过程 卡诺循环 …… (46)
15.4.1 循环过程 …… (46)
15.4.2 卡诺循环 …… (48)
15.5 热力学第二定律 …… (51)
15.5.1 可逆过程与不可逆过程 …… (51)
15.5.2 热力学第二定律的表述 …… (52)
15.5.3 热力学第二定律的实质 …… (53)
15.5.4 热力学第二定律的微观意义 …… (53)
15.6 卡诺定理 克劳修斯不等式 熵 …… (54)
15.6.1 卡诺定理 …… (54)
15.6.2 克劳修斯不等式 …… (54)

15.6.3　熵 …… (55)
15.6.4　热力学第二定律的数学表达式 …… (56)
15.6.5　熵增加原理 …… (57)
15.7　热力学第二定律的统计意义　玻耳兹曼熵 …… (59)
15.7.1　热力学概率 …… (59)
15.7.2　热力学第二定律的统计意义 …… (60)
15.7.3　玻耳兹曼熵 …… (62)
思考题 …… (62)
习题 …… (63)
阅读材料 …… (67)

第五篇　机械振动和机械波

16　机械振动 …… (75)
16.1　简谐振动 …… (75)
16.1.1　简谐振动的特征及其表达式 …… (76)
16.1.2　描述简谐振动的特征量 …… (77)
16.1.3　简谐振动的旋转矢量法 …… (80)
16.1.4　几种常见的简谐振动 …… (83)
16.1.5　简谐振动的能量 …… (86)
16.2　阻尼振动　受迫振动　共振 …… (87)
16.2.1　阻尼振动 …… (87)
16.2.2　受迫振动　共振 …… (89)
*16.3　非线性振动简介 …… (90)
16.4　简谐振动和合成 …… (92)
16.4.1　两个同方向同频率简谐振动的合成 …… (92)
16.4.2　两个同方向不同频率的简谐振动的合成 …… (95)
16.4.3　相互垂直的简谐振动的合成 …… (96)
*16.5　振动的分解 …… (98)
思考题 …… (99)
习题 …… (100)
17　机械波 …… (105)
17.1　机械波的产生和传播 …… (105)
17.1.1　机械波的产生 …… (105)

17.1.2 描述波动的物理量 …… (106)
17.2 平面简谐波 波动方程 …… (110)
17.2.1 平面简谐波的波动方程 …… (110)
17.2.2 平面波的波动微分方程 …… (112)
17.3 波的能量 …… (114)
17.3.1 波的能量和能量密度 …… (114)
17.3.2 波的能流和能流密度 …… (116)
17.3.3 波的吸收 …… (117)
17.4 波的衍射 干涉 …… (118)
17.4.1 惠更斯原理 波的衍射 …… (118)
17.4.2 波的叠加原理 波的干涉 …… (119)
17.5 驻波 …… (121)
17.5.1 驻波的形成 …… (121)
17.5.2 驻波方程 …… (122)
17.5.3 半波损失 …… (125)
17.5.4 弦线振动的简正模式 …… (125)
17.6 多普勒效应 …… (126)
17.7 非线性波简介 …… (128)
思考题 …… (128)
习题 …… (129)

第六篇 光 学

18 光的干涉 …… (137)
18.1 光波的基本概念 光波的叠加 …… (137)
18.1.1 光波 …… (137)
18.1.2 相干光 …… (138)
18.1.3 光波的叠加与分析 …… (140)
18.1.4 光程 …… (143)
18.2 分波阵面干涉 …… (146)
18.2.1 杨氏双缝干涉 …… (146)
18.2.2 其他分波阵面干涉 …… (150)
18.3 分振幅干涉 …… (152)
18.3.1 平行平面薄膜干涉 …… (152)

18.3.2　等厚干涉 …… (159)
18.4　迈克尔逊干涉仪 …… (165)
18.4.1　迈克尔逊干涉仪结构 …… (165)
18.4.2　迈克尔逊干涉仪的干涉现象 …… (166)
*18.5　多光束干涉 …… (168)
思考题 …… (171)
习题 …… (172)
阅读材料 …… (175)
19　光的衍射 …… (179)
19.1　光的衍射现象和惠更斯-菲涅尔原理 …… (179)
19.1.1　光的衍射现象 …… (179)
19.1.2　菲涅尔衍射和夫琅禾费衍射 …… (180)
19.1.3　惠更斯-菲涅尔原理 …… (180)
19.2　单缝夫琅禾费衍射 …… (181)
19.2.1　菲涅尔半波带法 …… (182)
19.2.2　单缝夫琅禾费衍射图样 …… (184)
19.3　光栅衍射 …… (189)
19.3.1　光栅 …… (189)
19.3.2　光栅衍射的强度分布 …… (190)
19.3.3　光栅衍射的条纹分布 …… (192)
19.3.4　光栅光谱 …… (194)
19.4　光学仪器的分辨本领 …… (197)
19.4.1　圆孔夫琅禾费衍射 …… (197)
19.4.2　光学仪器的分辨本领 …… (198)
19.5　X射线的衍射 …… (200)
思考题 …… (202)
习题 …… (202)
阅读材料 …… (205)
20　光的偏振 …… (207)
20.1　自然光和偏振光 …… (207)
20.2　起偏和检偏　马吕斯定律 …… (209)
20.2.1　起偏和检偏 …… (209)
20.2.2　马吕斯定律 …… (210)

需要全本请访问 www.ertongbook.com

20.3 反射光与折射光的偏振性质 …… (212)
20.4 光的双折射 …… (214)
20.4.1 双折射与偏振光 …… (214)
20.4.2 双折射现象的解释 …… (218)
20.5 偏振光的干涉及其应用 …… (221)
20.5.1 波片 …… (221)
20.5.2 椭圆偏振光和圆偏振光 …… (223)
20.5.3 偏振光的干涉及其应用 …… (224)
20.5.4 人为双折射现象 …… (225)
20.6 旋光现象 …… (227)
思考题 …… (228)
习题 …… (228)
阅读材料 …… (230)

第七篇 量子物理基础

21 量子物理基础 …… (242)
21.1 黑体辐射 普朗克能量子假设 …… (242)
21.1.1 热辐射 …… (242)
21.1.2 黑体辐射定律 …… (243)
21.1.3 普朗克能量子假设 …… (244)
21.2 光的量子性 …… (246)
21.2.1 光电效应 …… (246)
21.2.2 爱因斯坦光子假设 …… (248)
21.2.3 康普顿效应 …… (250)
21.3 氢原子光谱的实验规律 玻尔理论 …… (253)
21.3.1 氢原子光谱的实验规律 …… (253)
21.3.2 玻尔的氢原子理论 …… (254)
21.4 德布罗意假设 电子衍射实验 …… (258)
21.4.1 德布罗意物质波假设 …… (258)
21.4.2 电子衍射实验 …… (259)
21.5 测不准关系 …… (260)
21.6 波函数 薛定谔方程 …… (263)
21.6.1 波函数 …… (263)

21.6.2　薛定谔方程 …… (264)
21.6.3　定态薛定谔方程 …… (266)
21.7　一维势阱　势垒　隧道效应 …… (267)
21.7.1　一维势阱 …… (267)
21.7.2　一维势垒　隧道效应 …… (271)
21.8　氢原子 …… (273)
21.9　斯特恩-盖拉赫实验　电子自旋 …… (276)
21.9.1　电子的轨道磁矩 …… (276)
21.9.2　斯特恩-盖拉赫实验 …… (277)
21.9.3　电子的自旋 …… (278)
21.10　原子的壳层结构 …… (278)
思考题 …… (281)
习题 …… (282)
阅读材料 …… (285)
22　原子核物理与粒子物理简介 …… (291)
22.1　原子核的基本性质 …… (291)
22.1.1　原子核的组成 …… (291)
22.1.2　原子核的大小和密度 …… (292)
22.1.3　自旋和磁矩 …… (293)
22.1.4　核力 …… (294)
22.1.5　原子核的质量与结合能 …… (295)
22.2　原子核的放射性衰变 …… (296)
22.2.1　放射性 …… (296)
22.2.2　放射性衰变定律 …… (298)
22.2.3　三种衰变方式 …… (299)
22.2.4　放射性的应用 …… (301)
*22.3　粒子物理简介 …… (303)
22.3.1　粒子的基本特征 …… (303)
22.3.2　粒子的相互作用及其统一模型 …… (304)
22.3.3　粒子的分类 …… (304)
22.3.4　夸克模型 …… (306)
思考题 …… (308)

23 固体物理基础 激光 …… (309)
23.1 固体的能带结构 …… (309)
23.1.1 晶态固体的基本性质 …… (309)
23.1.2 固体的能带 …… (311)
23.2 绝缘体 导体 半导体 …… (314)
23.2.1 绝缘体 …… (315)
23.2.2 导体 …… (315)
23.2.3 半导体 …… (316)
23.3 pn结 …… (319)
23.3.1 pn结 …… (319)
23.3.2 结型晶体管 …… (320)
23.3.3 场效应晶体管 …… (320)
23.4 激光 …… (322)
23.4.1 激光的基本原理 …… (322)
23.4.2 常见激光器及激光应用 …… (327)
思考题 …… (329)
习题 …… (330)
阅读材料 …… (331)
附表 …… (353)
参考文献 …… (355)

第四篇 热 学

自然界中物质的运动形式是多种多样的。本篇介绍的热学是研究分子热运动及其与其他运动形式之间相互转化所遵循规律的科学。研究物质热运动的规律有宏观的热力学和微观的统计物理学两种方法。统计物理学是从宏观物体由大量微观粒子(原子、分子)所构成,粒子又不停地做热运动的观点出发,运用概率论研究大量微观粒子的热运动规律,有关的气体动理论主要讨论这方面的问题。热力学方法,是从能量观点出发,以大量实验观测为基础,研究物质热现象的宏观基本规律及其应用。热力学和气体动理论从不同的角度研究物质的热运动规律。这两种理论相辅相成,是热学的理论基础。

14 气体动理论

本章从分子运动的观点出发，运用统计方法研究气体分子热运动的宏观性质和变化规律。描述热力学系统性质的宏观量与描述分子运动的微观量之间存在密切的联系，宏观量都是其相关的微观量的统计平均值。气体动理论将通过寻求宏观量与微观量之间的联系，揭示气体宏观热现象及其规律的微观本质。

本章先介绍平衡态、温度、状态方程等热学基本概念。然后介绍统计理论的基本知识，即气体分子运动理论，包括理想气体压强、温度的微观本质、能量均分定理、气体分子的速率分布规律以及气体分子的平均自由度和平均碰撞频率。

14.1 热学的基本概念

14.1.1 系统与外界

在热学中，把作为研究对象的一个物体或一组物体称为热力学系统，简称为系统。如讨论一个容器内的气体，则这容器内的气体就是一个热力学系统。

一个热力学系统由大量的粒子（原子、分子或分子团）组成。例如，视一个气体系统为热力学系统，它所包含的气体分子数目的数量级通常是 10^{23}。

与系统发生相互作用的外部环境，称为外界。通俗地讲，外界就是系统以外的部分。如讨论容器内的气体，则气体为系统，而容器的器壁为外界。外界可能是有形的，也可能是无形的。如盛有气体的容器置于外场（电场或磁场等）中，当讨论气体的行为时，则容器壁和外场都是外界。电场和磁场是无形的。

系统与外界的划分是相对的。盛有气体的容器置于外场和大气中，仅讨论容器内的气体行为，容器的器壁、外场和大气为外界；当讨论容器内的气体以及容器的行为时，气体和容器为系统，而外场和容器外壁接触的大气为外界。

14.1.2 平衡态

讨论热学问题离不开对系统的描述。对热力学系统从宏观的角度描述，相

应的物理量称为宏观参量，简称为宏观量，它描述大量气体（系统）的宏观状态，例如气体的压强、体积等；对热力学系统从微观角度描述，相应的物理量称为微观参量，简称为微观量，它是描述组成系统的分子物理量，例如某一个气体分子的位置、速度、质量、动量等。

当一个系统在不受外界影响的条件下，系统的宏观性质不随时间变化，称系统处于平衡态。这里的“外界影响”是一个统称，当系统与外界有能量和质量的交换时，就说系统受到了外界的“影响”。系统的宏观参量表征系统的宏观性质，因此，所谓平衡态就是系统在不受外界影响的条件下，系统的宏观参量不随时间变化的状态。

平衡态只是一种宏观上的寂静状态，在微观上系统并不是静止不变的。在平衡态下，组成系统的大量分子还在不停地无规则地运动着，这些微观运动的总效果也随时间不停地急速地变化着，只不过其总的平均效果不随时间变化罢了。因此，平衡态从微观的角度应该理解为动态平衡。

应当指出，由于实际的系统总不可避免地会与外界发生程度不同的能量和质量的传递，所以，严格地不随时间变化的平衡态是不存在的，平衡态只是一个理想的状态。然而，若系统状态的变化很微小，以致可以略去不计时，就可以把系统的状态看成是近似平衡态。本章所讨论的气体状态，除特别声明者外，指的都是平衡态。

14.1.3 状态参量

由于系统处于平衡态时各处宏观性质一致，因而其状态可用一组参量来描述。这些描述系统平衡态的参量称为状态参量，如气体的体积、压强、温度等都是气体的状态参量，其中体积 V 是几何量，压强 p 是力学量，而温度 T 是热学量。

气体的体积是指气体所能达到的空间。在国际单位制中，体积的单位名称是立方米，符号是 m^3。有时也用立方分米、升，符号分别是 dm^3、L。$1\ L = 1\ dm^3 = 10^{-3}\ m^3$。

气体的压强是作用于容器器壁上单位面积的正压力，即 $p = \frac{F}{S}$。在国际单位制中，压强的单位名称是帕斯卡，符号为 Pa，$1\ Pa = 1\ N \cdot m^{-2}$。通常，人们把 45°纬度海平面处测得 0 ℃时大气压的值（1.013×10^5 Pa）称为标准大气压。

温度是物体冷热程度的数值表示。温度的数值标定方法叫温标。热力学温标为最基本的温标，一切温度的测量最终都应以热力学温标为准。在国际单

需要全本请访问 www.ertongbook.com

位制中,热力学温度的符号为 T,它的单位名称是开尔文,单位符号是 K。在工程上和日常生活中,目前常使用摄氏温标。在摄氏温标中温度的符号为 t,单位名称是摄氏温度,符号是℃。摄氏温度与热力学温度之间的关系为

$$t(℃)=T(K)-273.15 \quad 或 \quad T(K)=273.15+t(℃)$$

14.1.4 状态方程

对处于平衡态的一定量气体来说,它的状态参量(p、V、T)之间满足一定的关系。如

$$f(p,V,T)=0 \tag{14-1}$$

这个方程就是一定量的气体处于平衡态时的气体状态方程。一般来说,这个方程的形式是很复杂的,它与气体的性质有关。这里只讨论理想气体的状态方程。

实验表明,在温度不太低、压强不太高的条件下(与室温、大气压比较),气体的变化遵从三个实验定律,即玻意尔(Boyle)定理、查理(Charles)定律、盖吕萨克(Gay-Lussac)定律,则这种气体被称为理想气体。根据以上三个实验定律得到理想气体状态方程为

$$pV=\frac{M}{M_{mol}}RT \tag{14-2}$$

即

$$pV=\mu RT \tag{14-3}$$

方程中 R 是普适气体常数,$R=8.31\ \mathrm{J\cdot mol^{-1}\cdot K^{-1}}$,$M_{mol}$ 为气体的摩尔质量,M 为气体质量,p 为气体压强,V 为气体的体积,T 为热力学温度,$\mu=M/M_{mol}$ 为气体的摩尔数。式(14-2)或式(14-3)是理想气体平衡态各宏观状态参量之间的关系。

理想气体的状态方程还可以写成其他形式。1 mol 的任何气体中都有 N_A 个分子,$N_A=6.022\times10^{23}\ \mathrm{mol^{-1}}$,称为阿伏加德罗常数。

若以 N 表示体积 V 中的气体分子总数,则 $\mu=N/N_A$。引入另一常量,用 k 表示:$k=\frac{R}{N_A}=1.38\times10^{-23}\ \mathrm{J\cdot K^{-1}}$,称为玻耳兹曼常量。

则理想气体状态方程式(14-3)又可写作

$$pV=NkT \tag{14-4}$$

或

$$p=nkT \tag{14-5}$$

其中 $n=\frac{N}{V}$ 是单位体积内气体分子的个数，是气体分子数密度。在 0 ℃和标准大气压下，分子数密度 $n=2.6867773\times10^{25}\ \mathrm{m^{-3}}$，一般计算时取 $n=2.69\times10^{25}\ \mathrm{m^{-3}}$。

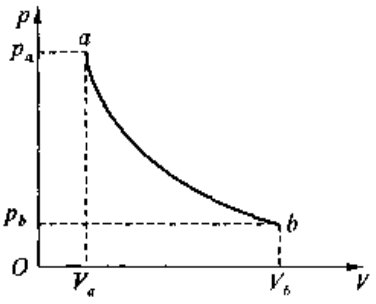


图 14-1 p-V 图上一点代表气体一个平衡态

由理想气体的状态方程可以看出，一定质量的气体，其状态参量只有两个是独立的，因此只需用两个状态参量（如 p，V）便可确定其平衡态。以 p、V 为参量所作的状态图称 p-V 图。p-V 图中的每一点都有一组确定的（p，V）值（如图 14-1 中的 a 点对应的状态参量为（p_a，V_a）。因此，p-V图中的每一点都表示一个平衡态。

例 14-1 求大气压强 p 随高度 h 的变化规律，设空气的温度不随高度而变化。

解 如图 14-2 所示，在高为 h 处取一薄气层，其底面积为 S，厚度为 $\mathrm{d}h$，气层上表面的压强为 $p+\mathrm{d}p$，下表面的压强为 p，气层所在处空气密度为 ρ，薄气层所受的重力为 $(\mathrm{d}m)g=\rho gS\mathrm{d}h$，根据力学平衡条件，有

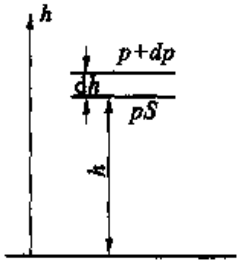


图 14-2 例 14-1 图

$$(p+\mathrm{d}p)S+\rho gS\mathrm{d}h=pS$$

$$\mathrm{d}p=-\rho g\,\mathrm{d}h$$

空气可视为理想气体，由式(14-2)可得

$$\rho=\frac{pM_{\mathrm{mol}}}{RT}$$

$$\mathrm{d}p=-\frac{pM_{\mathrm{mol}}}{RT}g\,\mathrm{d}h$$

$$\frac{\mathrm{d}p}{p}=-\frac{M_{\mathrm{mol}}g}{RT}\mathrm{d}h$$

$$\int_{p_0}^{p}\frac{\mathrm{d}p}{p}=-\int_0^h\frac{M_{\mathrm{mol}}g}{RT}\mathrm{d}h$$

$$\ln\frac{p}{p_0}=-\frac{M_{\mathrm{mol}}g}{RT}h$$

$$p=p_0\mathrm{e}^{-\frac{M_{\mathrm{mol}}gh}{RT}}$$

此式为大气压强随高度变化的规律，也称等温气压公式。可见大气压随高度按指数规律减小。要注意的是这里假定温度不随高度变化，与实际有出入，应用时要做适度的修正。

例 14-2 房间的容积为 5 m×10 m×4 m。白天气温为 21 ℃，大气压强为 0.98×

10^5 Pa,到晚上气温降为 12 ℃,而大气压强升为 1.01×10^5 Pa。窗是开着的,从白天到晚上通过窗户漏出了多少空气?视空气为理想气体,并已知空气的摩尔质量为 29.0 g·mol^{-1}。

解 已知 $V=5\times10\times4=200$ m^3;白天 $T_d=21$ ℃$=21+273=294$ K,$p_d=0.98\times10^5$ Pa;晚上 $T_n=12$ ℃$=12+273=285$ K,$p_n=1.01\times10^5$ Pa;$M_{mol}=29.0\times10^{-3}$ kg·mol^{-1},以 M_d 和 M_n 分别表示在白天和晚上室内空气的质量,则所求漏出空气的质量应为 M_d-M_n。

由理想气体状态方程式(14-2)可得

$$M_d=\frac{p_dV_d}{T_d}\frac{M_{mol}}{R}\qquad M_n=\frac{p_nV_n}{T_n}\frac{M_{mol}}{R}$$

由于 $V_d=V_n=V$,所以

$$\begin{aligned}M_d-M_n&=\frac{M_{mol}V}{R}\left(\frac{p_d}{T_d}-\frac{p_n}{T_n}\right)\\&=\frac{29.0\times10^{-3}\times200}{8.31}\times\left(\frac{0.98\times10^5}{294}-\frac{1.01\times10^5}{285}\right)\\&=-14.6\text{ kg}\end{aligned}$$

此结果中的负号表示,实际上是从白天到晚上有 14.6 kg 的空气流进了房间。

14.1.5 热力学第零定律

人们从经验和科学实验中知道,在没有做功的情况下,若两个状态不同的物体进行热接触,经过足够长的时间后,它们便可达到一个新的、共同的平衡态。此后,如果没有外界的影响,两个物体的状态都不变,此时称两物体处于热平衡。处于热平衡的两系统即使分开后,若没有外界的影响,它们各自的状态也不会改变。

实验表明,如果物体 A 和物体 B 能分别与物体 C 的同一状态处于热平衡状态,那么当把这时的 A 和 B 放到一起时,二者也必定处于热平衡状态。处于热平衡状态的不同物体有共同的某一性质,表征这一性质的物理量就是温度,因此处于热平衡状态的不同物体有共同的温度,这也称为**热力学第零定律**(图 14-3)。

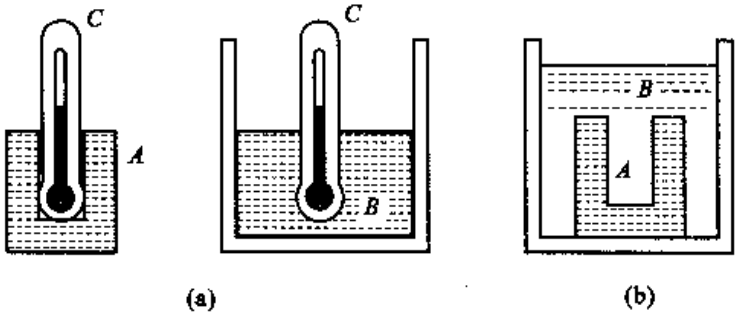


图 14-3 热力学第零定律

(a) A、B 分别和 C 的同一状态处于平衡态;(b) A 和 B 放到一起也处于平衡态

14.2 气体动理论的基本观点

14.2.1 分子运动的基本概念

下面从物质微观结构的观点出发，阐明分子运动的一些基本概念。

1. 一切物质都是由大量粒子(分子或原子)组成

一切物质——气体、液体，固体等——都是由大量分子或原子组成的，实验证明，1 mol 的任何物质均含有 $N_A=6.022\times10^{23}$ 个分子或原子。分子的直径(或线度)数量级一般约为 10^{-10} m；分子的质量很小，如氢分子质量为 0.332×10^{-26} kg，氧分子质量为 5.31×10^{-26} kg。

组成物质的分子之间存在一定的空隙。若将 100 cm^3 的水与 100 cm^3 的酒精混合，实验发现，酒精和水混合后的总体积不是 200 cm^3，而是 194 cm^3，这说明液体分子之间确实存在有空隙。

2. 分子在永不停息地做无规则热运动

人们在较远的地方就能闻到物体发出的气味，一滴墨水滴入水中会慢慢地扩散开来，这类扩散现象说明了气体、液体中的分子在不停息地运动着。固体中也会发生扩散现象，如把两块不同的金属紧压在一起，经过较长时间后，会在每块金属接触面内发现另一种金属成分，这只能是两种金属(原子)扩散的结果。

在显微镜下观察悬浮在液体中的小颗粒(如花粉的小颗粒)，可以看到它们都在永不停息地运动着，其中任一个的运动都是无规则的。如果每隔相等时间记录一次悬浮颗粒的位置，就会得到类似于图 14-4 的运动路径，它明确地显示出这种运动的无规则性质。这一现象是苏格兰植物学家布朗在 1827 年发现的，称为布朗运动。布朗运动是表现分子做无规则热运动的典型例子。布朗运动的无规则性，实质上正是反映了分子运动的无规则性。另外，布朗运动的剧烈程度随温度升高而增大，这反映了分子运动随温度升高而加剧。正是由于分子的无规则运动与温度有关，所以大量分子的无规则运动称为热运动。

3. 分子之间有相互作用力

分子间存在的相互作用力，称为分子力。固体和液体的分子之所以会聚集在一起而不分散开，是因为分子之间有相互吸引力。例如，拉断一根钢丝必须

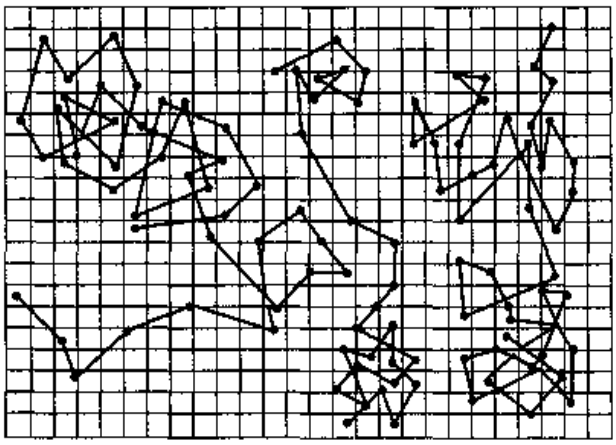


图 14-4 布朗运动

用很大的力，这说明物体各部分之间存在着相互吸引力。分子之间不仅表现有吸引力，而且也表现有排斥力，液体和固体都很难压缩，就说明分子之间有排斥力，阻止它们相互靠拢。

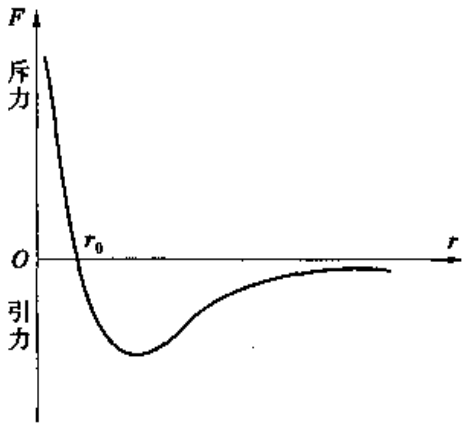


图 14-5 F-r 关系曲线图

图 14-5 为分子力 F 与分子间距离 r 的关系曲线。从图上可以看出，当分子之间的距离 $r<r_0$（r_0 在 10^{-10} m 左右）时，分子力主要表现为斥力，并且随 r 的减小，斥力急剧增加；当 $r=r_0$ 时，分子力为零；当 $r>r_0$ 时，分子力主要表现为引力，r 继续增大到大于 10^{-9} m 时，分子间的作用力就可以忽略不计了。可见，分子力的作用范围是极小的，分子力属短程力。在气体的分子数密度很低的情况下，其分子之间的作用力可以不考虑。分子力的本性十分复杂，与分子的电性结构有关。

14.2.2 统计观点简介

1. 统计规律

热学系统由大量粒子组成，组成系统的单个粒子的运动属于机械运动，遵守牛顿力学规律，大量粒子的整体行为遵循统计规律。

根据气体动理论，单个气体分子的运动是复杂偶然的，但大量分子运动时，遵从一定的统计规律。从统计观点看，宏观物质的特性都是相应的大量微观粒子运动的集体表现，宏观量是相应微观量的统计平均值。例如，气体的压强就

是大量气体分子与器壁碰撞的结果，后面还要对此做详细的讨论。

2. 统计平均值

下面以计算平均成绩为例介绍一种统计平均值的计算方法。

学生总人数为 N，以 X_i 表示某一分数值，以 N_i 表示成绩为 X_i 的学生人数，学生总人数可表示为 $N=\sum_i N_i$，学生平均成绩可表示为

$$\overline{X}=\frac{X_1N_1+X_2N_2+\cdots+X_iN_i+\cdots}{N_1+N_2+\cdots+N_i+\cdots}$$

$$=\frac{\sum_i X_iN_i}{\sum N_i}=\sum_i X_i\frac{N_i}{N} \tag{14-6}$$

其中 $\frac{N_i}{N}$ 表示学生成绩为 X_i 的人数占总人数的百分比(比率)。当 N 很大时，也就是学生成绩为 X_i 的概率，表示为

$$P_i=\frac{N_i}{N}$$

故平均成绩可表示为

$$\overline{X}=\sum_i X_iP_i$$

上式也适用于物理学中对物理量求平均。如果，P_i 为物理量 X 取值为 X_i 的概率，只要知道了概率 P_i，依据上式就可计算出物理量的平均值。

如果物理量 x 是连续变化的，x 出现在某一间隔 $\mathrm{d}x$ 的概率 $\mathrm{d}p(x)$ 应与 x 及 $\mathrm{d}x$ 有关，变量在 x 附近单位间隔内出现的概率称为**概率密度**，以 $f(x)$ 表示，有

$$\mathrm{d}p(x)=f(x)\mathrm{d}x$$

函数 $f(x)$ 事件概率随 x 分布的规律，又称为**概率分布函数**。

对于连续变化情况，则上面求和公式用积分代替

$$\overline{x}=\int xf(x)\mathrm{d}x$$

对于连续变量，它的平均值等于该量与概率密度乘积的积分。

需要全本请访问 www.ertongbook.com