



高等学校教材

Textbook for Higher Education

工 科 物 理 教 程

★ 宋士贤 文喜星 吴平 主编

下
册

西北工业大学出版社

101

C4-43

S87

2

高等学校教材

工 科 物 理 教 程

(下 册)

宋士贤 文喜星 吴 平 主编



A0975288

西北工业大学出版社

【内容简介】 本教程系西北工业大学“九五”规划教材。全书以教学基本要求为依据,并有所发展和更新。在以现代的观点精选内容,激发学生的创新思维,习题作业改革,以及增强教材的实用性、趣味性,突显工科物理特色诸方面做了大胆的尝试,颇有新意。

全书分上、下两册。上册包括导论、力学、电磁学三篇,下册包括热学、波动和量子物理三篇。统一采用《中华人民共和国法定计量单位》和1994年实施的《量和单位》国家标准,并使用1996年公布的《物理学名词》。

本教程可作为普通高等院校、各类成人高校工科(本科)各专业116~140学时大学物理课程教材,也可供有关工程技术人员、管理干部以及高职院校等相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

工科物理教程/宋士贤,文喜星,吴平主编. —西安:西北工业大学出版社,2001.8
ISBN 7-5612-1320-4

I. 工... II. ①宋... ②文... ③吴... III. 物理学-高等学校-教材 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 78413 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路127号 邮编:710072 电话:029-8493844

网 址:<http://www.nwpup.com>

印刷者:西安市向阳印刷厂

开 本:787毫米×1092毫米 1/16

印 张:19.25

字 数:462千字

版 次:2001年8月 第1版 2001年8月 第1次印刷

印 数:1~5000

定 价:21.00元(下册)

在科学上,每一条道路都应该走一走。发现一条走不通的道路,就是对于科学的一大贡献。

——A·爱因斯坦

前 言

时值世纪之交,工科大学物理教学如何面向 21 世纪,教材建设又如何适应新时期的需求,这是国内外同行们共同关心的问题。当前教材建设正处于“百花齐放,百家争鸣”的繁盛时期。多年来,我们也对此作了一系列的研究、探索和大胆的尝试。本教程就是在此基础上,并汲取了国内外一些教材的优点编著而成的。

编著本教程的指导思想是:

1. 课程任务的定位——为工科专业的培养目标和规格服务

工科大学物理课程是工科各专业学生必修的一门基础理论课,其任务是:为培养面向 21 世纪具有创新能力的工程技术人才打好必需的物理基础,提高人才素质,开阔思路,激发探索和创新精神,增强学习、掌握和研究开发新材料、新工艺、新技术、新设备的能力。

本教程既立足于知识的传授,更着眼于能力、素质的培养与提高。全书内容均围绕“框架、概念、思路、方法”展开,着重论述基本的物理现象、物理概念,加强了对物理过程的分析 and 建立正确的物理图像的论述,保证了足够的信息量,使学生对整个物理框架有所认识,并注意介绍物理学发展过程中一些重大转折的产生和演变过程,使学生受到物理思维的熏陶,提高物理素质,竭诚为工科的培养目标和规格要求服务。

2. 加强两个“有机渗透”,突显工科物理特色

现行教材的内容体系,是经过国内外几代物理工作者努力研究和反复实践而逐步形成并不断完善的,并且至今仍在不断发展,现行“教学基本要求”正反映了这个发展过程的现阶段成果。本教程吸取了 20 世纪 60 年代初教材改革的教训,确定仍以“教学基本要求”为选材的基本依据,但在此基础上,课程体系要有所发展,有所更新,突显两个“有机渗透”,以反映工科物理的特色,例如增加了入门的导论篇;把一些近代物理概念、方法和前沿成果,有机地渗透到全书的有关部分,并从普通物理角度加以讨论;把波动光学与机械波合为波动篇,形成统一的波

动图像;在气体动理论部分,突出了热运动物理图像和统计方法等。同时,还注意将一些物理原理推进近代工程技术发展的内容有机地渗透到教材中,以增强学生的工程观念,提高学习兴趣。

3. 遵循教学规律,确保教材的实用性

“教材是教出来的,不是编出来的”,另一方面,出版教材的目的是为了教学所用。本教程充分反映了作者群体在多年教学中行之有效的改革经验,在内容安排上,撷取精华,保证基础,加强近代;合理确定起点和要求,做到既不与中学物理简单重复,又不跨入后续课程的范围,该扩充的就扩充,该删减的内容也毫不吝啬;针对当前教学现状,还选配了相当数量的典型例题供教师和学生选用,并尽量考虑与现行学时相适应,确保教材的实用性,使教师能顺利实施讲授方案,也有利于学生阅读和研究。

4. 增强了教材的趣味性

“在任何行业中,走向成功的第一步,是对它产生兴趣”,学习也不例外。本教程除了在选材和行文中注意启迪思维,引起兴趣,唤起共鸣外,还有意开辟了“趣味物理”、“课间小憩”、“物理学家”等小窗口,并精心选录了一些有关治学态度和治学方法的科学家名言,按内容和教材需求,穿插在各部分。另外,在版式设计,插图设计等方面也力求新颖,使学生在阅读时,从形式到内容都有新鲜感。

5. 对习题作业作了大幅度改革

本教程采用了作者经过 20 多年研究、试验,并被不少院校“移植”、引用的《基础练习题和大作业》的习题作业方式,即习题作业由“基础练习题”与“大作业”两部分组成,并穿插物理小论文(含科技期刊阅读心得)。

基础练习题在本书各章的最后,它紧密结合教学内容,以内容为单元归类选编,并冠以相应的标题。题目从对有关的基本概念和规律的分析讨论,到处理问题的一般思路、方法,再到具体问题的求解和应用,一个层次一个层次地展开,形成一个完整的框架结构。这些练习题一般不要求学生做到作业本上,主要供学生课后复习、自学研究之用,因此,它实际上相当于一份自学指导提纲。

大作业是某一部分教学内容结束后完成的综合性作业,它覆盖了相应部分教学基本要求的内容,题型包括选择题、填空题、计算题、问答题、证明题,以利于从各个侧面检验学生掌握知识的程度和能力。由于它带有阶段总结的性质,故称为“大作业”。学生可直接在其上答题,不需另备作业本。

本教程的初稿于 1995 年 9 月完成,并以讲义形式先后在西北工业大学和南京航空航天大学 6 届部分学生的教学中试用,其间,根据试用情况作了多次修改。后经评选,列入西北工业大学“九五”教材出版计划。

本教程共 6 篇 16 章,分上、下两册。上册包括导论、力学(1~5 章)、电磁学(6~8 章)3 篇,下册有热学(9~10 章)、波动(11~13 章)、量子物理(14~16 章)3 篇,适合于 116~140 学时的各类高校工科(本科)专业大学物理课程使用。

全书统一采用《中华人民共和国法定计量单位》和 1994 年实施的《量和单位》的国家标准,

以及全国自然科学名词审定委员会 1996 年公布的《物理学名词》。

本教程由宋士贤、文喜星、吴平任主编,参加编写工作的有:宋士贤(导论)、杨雁南、孙中禹(1~3 章)、余乐年、孙玉霞(4~5 章)、吴平(6~8 章)、文喜星(9,10,16 章)、郭晓枫(11~13 章)、廖立(14~15 章)。上册由吴平统稿,下册由文喜星统稿,全书由宋士贤作最后修订并定稿。

在编写过程中,得到了西北工业大学应用物理系和南京航空航天大学理学院的支持和关怀,并得到了西安交通大学吴百诗、同济大学严导淦、东华大学汤毓骏、东南大学马文蔚、西北工业大学徐绪笃、长安大学陈大鹏(主审)等教授的关怀和指导。严导淦教授还在病中审阅了原讲义,并提出了许多具体的修改意见。全书的插图由孙卫东用计算机绘制。医学照片资料由西北工业大学医院何雅柏、崔松霞提供。在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中定有一些不妥之处,恳请读者以及使用本教程的师生批评指正。

编者

2001 年 8 月

一本新书像一艘船,带领着
我们从狭隘的地方驶向生活的
无限广阔的海洋。

——凯勒

目 录

(下 册)

第Ⅲ篇 热 学

第 9 章 热运动的统计描述	372
§ 9.1 热现象与热运动	372
〈物理趣闻〉壮观的和平号“流星雨”	
§ 9.2 统计规律	379
§ 9.3 气体动理论的基本概念	382
〈课间小憩〉真实气体的范德瓦耳斯方程	
§ 9.4 麦克斯韦速率分布律	392
〈趣味物理〉方均根速率与大气成份	
§ 9.5 玻耳兹曼能量分布律	397
§ 9.6 碰撞频率	399
内容提要	401
练习 9 热运动的统计描述	402
第 10 章 热力学	406
§ 10.1 理想气体的准静态过程	406
§ 10.2 热力学第一定律	411
〈趣味物理〉液化气体——焦耳-汤姆逊效应	
§ 10.3 循环过程	422
〈课间小憩〉绿色采暖系统	
§ 10.4 热力学第二定律	429
〈物理学家〉L. 玻耳兹曼	

内容提要.....	436
练习 10 热力学	437

第 IV 篇 波 动

第 11 章 简谐运动	446
§ 11.1 简谐运动及其特征.....	446
§ 11.2 简谐运动的描述方法.....	450
§ 11.3 简谐运动的合成.....	460
§ 11.4 阻尼振动 受迫振动.....	467
〈课间小憩〉火车的危险速率	
内容提要.....	470
练习 11 简谐运动	471
第 12 章 机械波的传播规律	477
§ 12.1 机械波传播的物理图像.....	477
§ 12.2 波动的描述方法.....	480
§ 12.3 波的能量特征.....	487
§ 12.4 波的干涉.....	489
§ 12.5 波的衍射.....	496
§ 12.6 多普勒效应.....	497
§ 12.7 声波.....	499
〈课间小憩〉音乐声学	
内容提要.....	506
练习 12 机械波的传播规律	507
第 13 章 光的波动性	513
§ 13.1 光波的物理图像.....	514
§ 13.2 光的干涉.....	515
〈趣味物理〉紫镜头与滤色片	
§ 13.3 光的衍射.....	527
〈趣味物理〉无镜头摄影技术	
§ 13.4 光的偏振性.....	546
〈课间小憩〉诱人的 CD 技术	
内容提要.....	553
练习 13 光的波动性	555

第V篇 量子物理

第14章 光的量子性	563
§ 14.1 普朗克量子论	564
〈物理学家〉 M. 普朗克	
§ 14.2 爱因斯坦的光子学说	568
§ 14.3 康普顿效应	575
§ 14.4 玻尔氢原子理论	578
〈物理学家〉 N. 玻尔	
内容提要	584
练习 14 光的量子性	586
第15章 量子力学引论	589
§ 15.1 实物粒子的波粒二象性	590
〈物理学家〉 L. 德布罗意	
〈趣味物理〉 德布罗意波与玻尔的量子条件	
§ 15.2 物质波波函数的统计解释	596
§ 15.3 不确定(度)关系	598
〈物理学家〉 W. 海森伯	
§ 15.4 薛定谔方程	602
* § 15.5 态叠加原理 力学量的算符	603
§ 15.6 薛定谔方程的应用	605
〈课间小憩〉 梦幻神奇的纳米技术	
§ 15.7 多电子原子中的电子分布	615
内容提要	619
练习 15 量子力学引论	620
第16章 量子理论的应用	623
§ 16.1 激光	623
〈课间小憩〉 我国第一台激光器	
〈物理前沿〉 自由电子激光	
〈趣味物理〉 激光冷冻和俘陷原子	
§ 16.2 固体的能带理论	634
§ 16.3 超导电性	642
〈课间小憩〉 超导研究的发展历程	
内容提要	650

练习 16 量子理论的应用	651
附录	653
附录 I 基本物理常量及有关数据的计算用值	653
附录 II 1901—2000 年诺贝尔物理学奖获得者	654
参考文献	665

生活的全部意义在于无穷
地探索尚未知道的东西,在于不
断地增加更多的知识。

——左拉

第 III 篇

热 学

热运动是物质世界的一种基本运动形式,是构成宏观物体的大量微观粒子(分子、原子、电子等)的永不停息的无规则运动。热现象则是组成物质的大量粒子热运动的集体表现。热学是研究宏观物体的各种热现象及其相互联系和规律的一门学科,它是物理学的重要组成部分,也是自然科学中一门基础学科。

热学的研究对象是由大量粒子组成的宏观客体(固体、液体、气体等),所涉及的内容极为广泛。从伽里略及其同时代的一些学者致力于制造温度计开始,到1912年能斯脱提出绝对零度不可能达到为止,历时300多年,物理学家对各种热现象进行了大量的实验测量与研究,从中总结归纳了热现象普遍遵守的四条基本定律。但是,要进一步揭示热现象的本质,深刻探索描述热现象的物理量的含义,还必须从宏观物体的微观结构以及组成宏观物体的内部物质运动入手,去对热现象进行研究。从研究方法上看,热学又分为宏观理论和微观理论,即热力学和统计物理学。热力学是通过观察和实验总结,主要从能量观点出发,分析研究在物态变化过程中有关热功转换的关系和条件,给出普遍而可靠的规律和结论。而统计物理学则是从微观模型出发,应用力学规律和统计方法,从微观上给以本质的解释,并确定宏观量与微观量之间的关系。两种理论相辅相成。

本篇将首先讨论热运动的物理图像和研究方法,并以理想气体为例,讨论气体动理论的基本概念。然后,重点介绍理想气体在物态变化过程中有关热功转换的关系和条件,即热力学第一、第二定律的物理意义及其应用。

第 9 章

热运动的统计描述

科学世界是无穷的领域,人们应当勇敢去探索。吾辈今来,凡成就事业,对人类有所贡献的,无不是脚踏实地艰苦攀登的结果。

—— 钱三强

一切与物体冷热状态相关联的自然界现象,称为热现象。人们通过感官所了解的周围世界,是由各种各样的宏观物体所组成的,它们是热学研究的对象。

本章首先介绍热现象及其宏观规律性,然后讨论热运动的一些基本概念,介绍热运动的实验依据和一些典型数据,以建立热运动的物理图像,同时对热运动的基本特征和研究方法——统计方法作概括性的论述。在此基础上,以理想气体为例,讨论气体动理论的基本概念,用力学原理和统计方法,讨论理想气体的压强、温度、内能等物理量的意义和物理本质,并具体讨论麦克斯韦速率分布律和玻耳兹曼分布律等统计规律性。

教学要求:

- (1) 了解热运动的物理现象、基本特征和研究方法——统计方法。
- (2) 理解理想气体模型及其压强、温度和内能的统计意义。
- (3) 了解麦克斯韦速率分布律,理解速率分布曲线和速率分布函数的物理意义及三种统计速率。
- (4) 了解玻耳兹曼分布律。

§ 9.1 热现象与热运动

一、热现象

前已谈及,“热学”是研究宏观物体的各种热现象及其相互联系和规律的学科。

人们从经验中认识到,宏观物体的许多性质(如力学性质、光学性质、电学性质等),都是与它的冷热状态密切相关的,通常用“温度”这个物理量来表述物体的冷热状态。随着冷热状态的变化,物体的各种宏观性质也跟着变化。下面,我们列举一些属于热现象范畴的例子:

(1) 物体的力学性质 随着物体温度的变化,它的体积会发生相应的变化,即热胀冷缩;很硬的钢件烧红后会变软,再经过突然冷却(称为淬火)又会变得更坚硬;常温下很柔软的橡胶在低温下会变得很硬,敲击它会发出清脆的声音等。这些都说明固体的体积、弹性、延展性等力学性质都会随温度发生变化。

(2) 物体的电磁学性质 一般的金属导体随着温度的升高其电阻也跟着增大。而有些金属或化合物,在特定的低温下其电阻会突然消失,变成超导体,使其从正常导电状态突变为超导态的温度 T_c 称为超导转变温度;铁电体和铁磁体在温度高于各自的居里温度时,体内的自发极化和自发磁化区会被破坏,从而失去原有的特性;室温下的半导体在高温下会变成导体,而当它冷却到特定的低温时,又会变成绝缘体等。

物理趣闻

壮观的和平号“流星雨”

在替星或废弃的航天器坠入大气层后,因摩擦会产生极高的温度,从而形成壮观的自然景象。

2001年3月23日北京时间14时01分将成为人类永恒记忆的时刻。在这一时刻,重136 t的和平号空间站(图 T9.1.1),由一枝绽开的花朵散裂为1500多块碎片从太空坠落地球,从而结束了15年饱经风霜的辉煌历史,魂归故里,永藏于4 km深的大洋深处(见图 T9.1.2)。

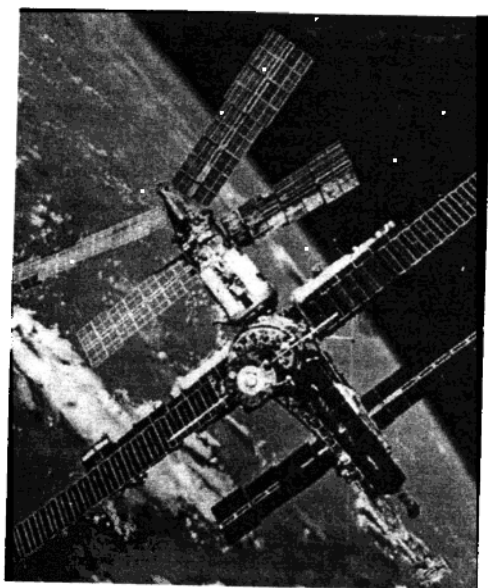


图 T9.1.1 和平号空间站

13时50分,和平号空间站以1000 m/s的下坠速度进入稠密大气层,这个速度足以撞透2 m厚的石块,它与大气剧烈摩擦,产生了高达1500℃的高温。此时的和平号完全成了一个

燃烧着的大火球。首先,烧毁的是太阳能电池板和轨道舱上突出的部件,接下来是外层的仪表、陨石防护层、实验舱的舱壁,最后导致实验舱爆炸解体。能落到大洋中的是那些用高熔点材料制成的大型仪表、发动机部件及喷管和对接部分,其它还有未燃尽的舱室碎片。其中有六七块碎片重达1 t以上,当它们下落时,就像无数个非常闪亮的亮点迅速划过天空,这些亮点闪着蓝光,后面拖着长长的浓烟,如流星雨那样蔚为壮观(见图 T9.1.3)。



图 T9.1.2 和平号坠落过程



图 T9.1.3 和平号“流星雨”

在和平号升空 15 年的科学历程中,来自 12 个国家的 108 名科学家、宇航员共进行了 2.2 万项、近 4 万次科学试验,对人类作出了重大贡献,其功绩将永载史册,并将会加速人类探索太空的步伐。

(3) 物体的光学性质 宏观物体在各种温度下都会向四周辐射电磁波,这种现象称为热辐射。物体的热辐射强度按波长的分布会随温度的变化而变化,温度越高,对应于辐射强度极大值的光波波长越短,因而辐射光的颜色也随温度的升高而由红向黄、蓝、紫端变化。熟练的炼钢工人可从铁水颜色的变化来估计温度,800℃ 时为暗红色,大于 800℃ 是橙黄色,超过 1 000℃ 是蓝色……就是这个道理;液晶在有温度变化的区域会呈现出不同的颜色等。

此外,化学反应的快慢、生物的繁殖生长、人体的健康与疾病等,也都与温度有关。这表明,宏观物体的几何性质、力学性质、电磁性质、光学性质、化学性质乃至存在的形态等均与物体的冷热状态相关联。热现象就是统指一切与物体冷热状态相关联的自然界现象,它是自然界中的一种普遍现象。

二、热现象的宏观规律

虽然,宏观物体发生的热现象是各种各样的,但它们都遵从着一些普遍规律。

1. 能量守恒

对热力学系统做功或传递热量,会使系统的宏观状态发生变化。例如,在蒸汽机中,用加热的方法使水变成蒸汽,尔后,靠蒸汽膨胀对外做功,通过做功和传热,使系统从一个状态变化到

另一状态。在这个变化过程中,系统的能量是守恒的,即遵守包括热量在内的普遍能量守恒与转换定律。物理学家把热现象的这种普遍规律总结为热力学第一定律。

2. 方向性

在日常生活中,我们都有这样的经验:在冷热状态不同(即温度不同)的任何两个宏观物体进行接触后会发现,总是“热”物体变“冷”(温度由高变低),而“冷”物体的温度升高,最后趋于冷热相同即温度相同的状态。但是,相反的过程即“热物体变得更热,冷物体变得更冷”的过程,是不会自发地发生的。

摩擦生热是大家熟知的现象,运动物体可以消耗其动能以克服摩擦力做功,从而使物体的温度升高,而物体“由热自动地变冷以增加物体的动能,从而使物体更快运动”的逆过程,也同样是不会自发地发生的。

在一杯清水里滴一滴红墨水,会发现它们将自动相互扩散,最后达到均匀混合的状态。而其逆过程,即均匀混合的两种液体再自动分开的情况也总是不会自发地发生的。

类似的例子还可以列举许多,这些都说明热现象的过程总是按着一定的方向进行的,其逆过程是不会自发地发生的。这是热现象的一个普遍规律。(需要注意,这里不是说逆过程不能发生,而是不会自发地发生)。

物理学家把热现象的这种普遍规律总结为热力学第二定律。

3. 低温极限

爱因斯坦在相对论中断言,任何物体的运动速度可以接近真空中的光速,但永远不能达到或超过光速。光速是一个极限速度。

在热现象的研究中,离不开对温度的测量。在获得低温的各种途径中,人们也发现存在着一个低温极限——绝对零度(即 0 K),从 1895—1979 年,人们在近百年来向绝对零度逼近的记录表明,温度越低,进一步降低温度就越困难,随着低温技术的发展,可以得到非常接近于绝对零度的低温,但永远不可能完全达到绝对零度。迄今人们获得的最低温度是由 1997 年诺贝尔物理奖获得者、美籍华人朱棣文和他的合作者利用激光冷却法获得的 $2.4 \times 10^{-11}\text{ K}$ 。

物理学家把这一规律总结为热力学第三定律。

4. 热平衡

前已提到,当两个冷热不同的物体接触时,热的会变冷,冷的会变热,最后两者的冷热程度趋于一致即温度相同,从而达到热平衡。倘若这两个物体原本温度就相同,也就是冷热程度相同,那么,它们接触时就不会再发生什么变化了。由此推断,几个温度相同的热学系统放到一起,它们必然处于热平衡。因此,如果有两个热学系统 A 和 B,分别与另一热学系统 C 的同一状态处于热平衡(见图 9.1.1),则当 A 和 B 接触时,它们也必定处于热平衡。可见,温度就是决定一个热学系统是否能与其它热学系统处于热平衡的宏观性质。用温度计测量温度就是依据这个性质进行的。

物理学家把这种热平衡规律称为热力学第零定律。

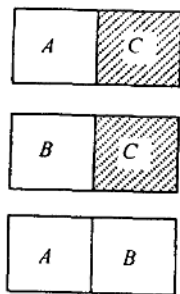


图 9.1.1

三、分子热运动的物理图像

1. 宏观物体的热结构

在导论中我们已经介绍过物质的结构层次,这里所说的宏观物体就是由大量分子所组成的,我们把它称为宏观物体的热结构。

(1) 有关分子的一些数量级概念 宏观物体由大量分子组成,大量到什么程度?分子的大小、质量等又非常小,小到什么程度?为了加深对热现象的研究,了解一些数量级概念,对建立热运动的物理图像是有帮助的。

摩尔(mol)用来表示物质的量,1 mol的任何物质所包含的分子数为 $6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$,它是一个普适常量,称为阿伏加德罗常数。在通常条件^①下,每立方厘米气体的分子数(即分子数密度 n)的数量级为 10^{19} ,液体为 10^{22} 。有人计算过喝 180 g 的水,意味着喝了 6×10^{24} 个水分子。这些都是巨大的数字!如果每秒钟数 3 个分子,数一数 1 cm^3 的气体分子数目,就得数 10^{11} 年,即 1 000 亿年,比宇宙年龄 10^{10} 年还要长。

但是,分子又是很小的,它的线度(大小)数量级约为 10^{-10} m ,如水分子(H_2O)的大小只有 $2.6 \times 10^{-10} \text{ m}$ 。分子的质量也很小,其数量级为 10^{-27} kg ,如氧分子(O_2)的质量为 $5.3 \times 10^{-26} \text{ kg}$ 。图 9.1.2 示出了几种分子的结构。

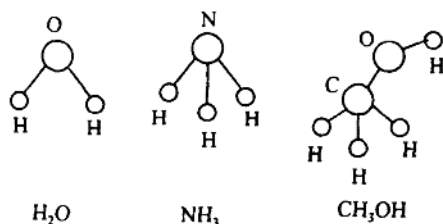


图 9.1.2 分子结构模型

(2) 分子间存在空隙 大量实验表明,分子间存在空隙。把 500 ml 的酒精与

500 ml 水混合后,总体积却小于 1 000 ml。布里兹曼用 20 000 个大气压的压强去挤压装在无缝钢管中的油,结果发现,油透过管壁渗透出来。至于在气体中情况就更好理解了。这说明,宏观物体看上去是一个“连续的整体”,实际上,分子间存在空隙,这就是所谓的宏观连续性掩盖了微观的分立性。正因为分子间存在间隙,在工业上带来许多用途,各种合金就是根据这个原理制成的,如在铝中加入其它元素,就成为常用的铝合金。在半导体基底渗入杂质元素,就可制作成各种电子元件,也是因为基底中分子间有空隙,能够容纳杂质元素的缘故。

(3) 分子不停地作无规则运动 诚然,组成宏观物体的大量分子之间存在着空隙,但是,扩散现象、布朗运动等许多实验事实还表明,宏观物体内的分子不是静止的,而是在永不停息地运动着。

扩散 扩散现象是大家熟知的,如图 9.1.3 所示,两个容器 A、B 用活塞 K 隔开,A 中储有氢气,B 中储有褐色的溴蒸气,现打开活塞,经过一段时间我们会发现:两种气体相互混合,最后达到均匀混合的状态。这就是扩散现象。仔细分析一下这种现象,打开活塞后并没有施加其它任何影响,为什么两种气体能均匀混合呢?这只能是出自分子自身在不停地运动的结果。当然,由于在有限的容器中储存着大量的分子,可以想像这些分子的运动是极其复杂的。A 中的一个分子,要由 A 运动到 B,它将不停地与其它的分子发生无规则的相互碰撞,速度的大小、方向也不断地发生变化,因而,需要经过一段时间方能

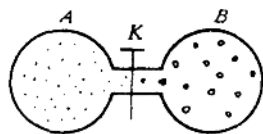


图 9.1.3 扩散

^① “通常条件”指的是温度为 20°C , 压强为 $1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 这样的环境条件。“标准状况”指的是温度 $T = 273 \text{ K}$, 压强 $P = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 这样的环境条件。

达到均匀混合的状态,我们把这段时间称为弛豫时间。

扩散现象并不限于气体,把酒精滴入水中,酒精分子会在水中扩散开来,把两种不同的金属表面抛光并清洗干净后,紧紧地挤压在一起,经过一段较长的时间,就会发现两种金属的一些分子也相互扩散到对方金属中去了。

以上现象清楚地表明,无论气、液、固态的宏观物体,它们的大量分子都在不停地运动和相互碰撞,扩散现象就是由此形成的。进一步观察还发现,随着温度的升高,扩散速度也加快,表明分子运动随着温度的升高而不断加剧。虽然,由于无规则的碰撞其速度也在不断变化,但随着温度的升高,大量分子的平均速度将会增大(在通常条件下,气体分子的平均速度约为几百米每秒,与空气中声速的数量级相近),如在进行钢的热处理时,若将钢加热到足够高的温度后进行退火或回火(即在空气中慢慢冷却)时,扩散过程就使加工引起的点阵形变得以回复,并使化学成分均匀一致;而将加热到高温的钢突然冷却到室温进行淬火时,由于扩散过程缓慢,使碳不能从钢中析出而成为渗碳钢,其硬度会大大提高。

布朗运动 1827年英国植物学家布朗用显微镜观察悬浮液体中的花粉时,发现了线度只有 10^{-4} cm的花粉颗粒在液体中无规则地不停运动着,这就是布朗运动。图9.1.4是跟踪一个花粉颗粒记录的径迹平面图。它表明花粉颗粒是在一种无规则的力作用下作无规则的运动。显然,这种无规则的作用力,只可能来自它周围不停运动着的液体或气体分子的不断碰撞和撞击。哪个方向上受到的撞击强,花粉颗粒在该方向上获得净动量,从而沿该方向运动。进一步观察也发现,温度越高,布朗粒子的无规则运动越剧烈,这也意味着那些撞击它的液体或气体的分子运动越剧烈。

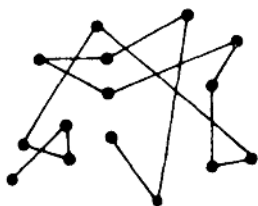


图 9.1.4 布朗运动

总之,这一系列实验事实表明,组成宏观物体的大量分子是在永不停息地、无规则地运动着,这种运动的显著特征是碰撞。同时,这种无规则的分子运动与物体的温度直接相关,温度越高,物体内分子运动越剧烈,我们把这种与物体的冷热状态直接相关的大量分子的无规则运动,称为热运动。它是自然界物质运动的一种基本形态,一切热现象都是这种热运动的宏观表现。

(4) 分子间的相互作用 人们曾经做过这样的实验:将一根直径为2 cm的铅棒从中切成两段,然后将断面对上并加压使两段重新结合起来,此时,即使用几万牛顿的力拉它,也不能把它们拉开。这表明,在两段铅棒断面处的分子通过挤压相互接近到一定距离后,分子间的引力就使它们牢牢地重新接起来了。进一步研究表明,分子间的相互作用力不仅有引力,还有斥力,它们与分子间的距离 r 有关,如图9.1.5所示。当分子间距离变化到某个 r_0 值时,引力与斥力正好相等而抵消,使得分子间作用力趋近于零,常把 r_0 称为平衡距离。当分子间的距离 $r > r_0$ 时,分子间的作用力表现为引力, $r < r_0$ 时,表现为斥力,当 $r \gg r_0$ 时,分子间的作用就很弱,可以忽略不计了,图中定性地反映了分子间相互作用的这些特征。 r_0 约等于 10^{-10} m。

从图9.1.5可以看出,当分子距离 $r < r_0$ 时,强大的斥力是不能忽略的,而且由于斥力随 r 变化的曲线很陡,所以,一旦分子间距离接近到斥力作用半径后,强大的斥力将使分子再也不能进一步靠近,而只能相互斥开了,这就是分子碰撞的微观图像,这与力学中两个小球的碰撞是有区别的。分子间能靠近的最小距离 d 称为分子的有效直径,如图9.1.6所示。