



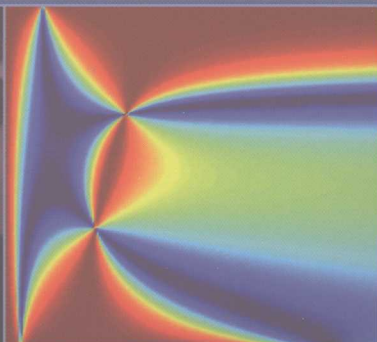
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

物理学 基本教程

(第三版) 下册

■ 张达宋 主编

■ 李行一 修订



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

主要内容

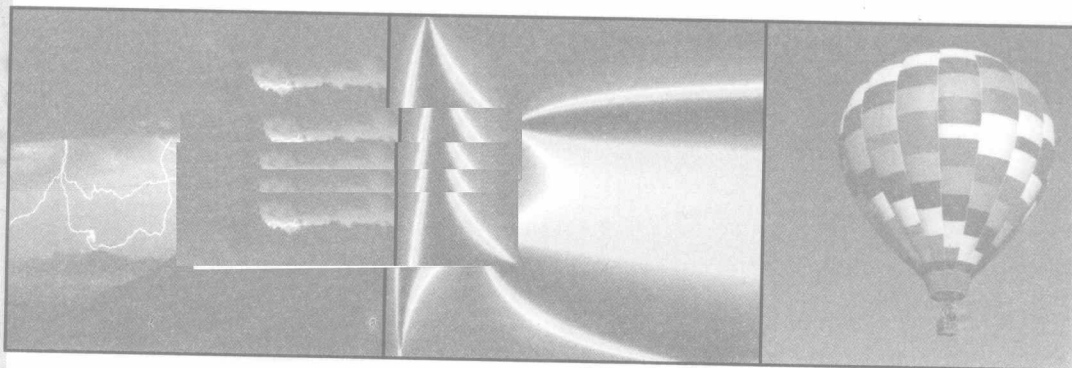
本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材，是“十一五”期间普通高等教育物理类教材改革的重要成果。本书在编写过程中，参考了国内外许多优秀的物理教材，力求做到概念清晰、重点突出、由浅入深、循序渐进。本书可作为高等院校物理专业及相关专业的教材，也可供从事物理工作的工程技术人员参考。

物理学 基本教程

(第三版) 下册

张达宋 主编
李行一 修订

04
zh 9.1 / 下



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

图书在版编目(CIP)数据

物理学基本教程.下册/张达宋主编.—3版.—北京:
高等教育出版社,2008.6

ISBN 978-7-04-023923-2

I. 物… II. 张… III. 物理学-高等学校-教材
IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 061057 号

策划编辑 马天魁
责任绘图 尹 莉
责任印制 尤 静

责任编辑 王文颖
版式设计 陆瑞红

封面设计 王凌波
责任校对 杨凤玲

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京京科印刷有限公司

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

开 本 787×960 1/16
印 张 20.5
字 数 380 000

版 次 1989年6月第1版
2008年6月第3版
印 次 2008年6月第1次印刷
定 价 23.70 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 23923-00

内容提要

本书系普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是在第二版基础上修订改编而成的,凝结了作者长期教学的经验和心血。这次修订保留了原书选材适当、概念阐述清晰、语言精练等特点,并根据新近拟定的“非物理类理工科大学物理课程教学基本要求”,吸取了国内外最新出版的物理教材的优点,调整了全书的体系结构,充实了反映物理学前沿研究、与生活实际和现代工程应用结合的内容,对思考题和习题进行了必要的调整,使之与教材内容协调、与本书所面向的学生相适应。

全书共分上、下两册。上册内容为力学、电场和磁场。下册内容为气体动理论和热力学基础、振动与波动和近代物理学。本册为下册,共七章:气体动理论、热力学基础、振动、波动、光学、狭义相对论基础和量子物理基础。

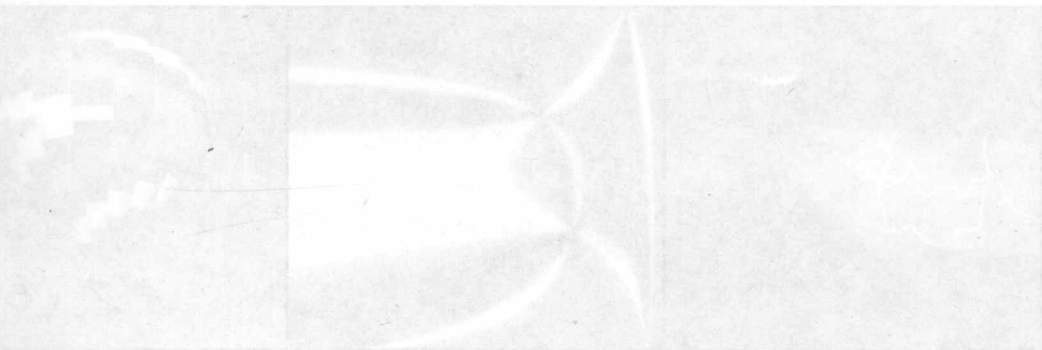
本书可作为高等学校非物理类理工学科各专业的教材,也可供文理科有关专业选用和社会读者阅读。

基础物理学

第三卷(下册)

主编 宋长彬

副主编 李一



郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010)58581897/58581896/58581879

传 真：(010)82086060

E-mail: dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮 编：100120

购书请拨打电话：(010)58581118

出版物数码防伪说明：

本图书采用出版物数码防伪系统，用户购书后刮开封底防伪密码涂层，将16位防伪密码发送短信至106695881280，免费查询所购图书真伪，同时您将有机会参加鼓励使用正版图书的抽奖活动，赢取各类奖项，详情请查询中国扫黄打非网(<http://www.shdf.gov.cn>)。

反盗版短信举报：编辑短信“JB，图书名称，出版社，购买地点”发送至10669588128

数码防伪客服电话：(010)58582300/58582301

“中国高校物理课程网”充值卡使用说明：

1. 欢迎访问“中国高校物理课程网”进行学习，网址 <http://phy.cncourse.com>；
2. 封底所附充值卡可充值50点用于网站消费，请在2010年12月31日前充值，过期作废；
3. 首次访问本网站，请先行注册；
4. 刮开充值卡上的密码涂层，登录网站并进入“个人服务—我的帐户”，按照提示进行充值。

电子邮箱：phycourse@hep.com.cn

咨询电话：(010)58581377

目 录

第三篇 气体动理论和热力学基础

第十章 气体动理论	3
§ 10-1 热力学第零定律	3
§ 10-2 气体的状态参量 理想气体物态方程 平衡状态	4
§ 10-3 气体动理论的基本概念	7
§ 10-4 气体动理论的压强公式	9
§ 10-5 气体分子的平均平动动能与温度的关系	13
§ 10-6 能量按自由度均分原则 理想气体的内能	15
§ 10-7 麦克斯韦速率分布律	18
* § 10-8 玻耳兹曼分布律	22
§ 10-9 分子的平均自由程和平均碰撞次数	24
* § 10-10 气体内的迁移现象	26
* § 10-11 实际气体的范德瓦耳斯方程	30
思考题	33
习题	34
第十一章 热力学基础	37
§ 11-1 功 内能 热量	37
§ 11-2 热力学第一定律	40
§ 11-3 热力学第一定律对理想气体等体、等压和等温过程的 应用	41
§ 11-4 气体的热容	46
§ 11-5 热力学第一定律对理想气体绝热过程的应用	49
§ 11-6 循环过程* 卡诺循环 热机的效率	52

§ 11-7 热力学第二定律	58
§ 11-8 可逆过程和不可逆过程 卡诺定理	60
§ 11-9 熵	64
§ 11-10 热力学第二定律的统计意义	68
思考题	70
习题	71

第四篇 振动与波动

第十二章 振动 79

§ 12-1 简谐振动	79
§ 12-2 简谐振动的能量	87
* § 12-3 阻尼振动 受迫振动 共振	88
§ 12-4 一维简谐振动的合成 拍现象	92
* § 12-5 两个互相垂直的简谐振动的合成	96
§ 12-6 振荡电路 电磁振荡	98
* § 12-7 非线性振动简介	103
思考题	110
习题	111

第十三章 波动 115

§ 13-1 机械波的产生和传播	115
§ 13-2 机械波的传播速度	120
§ 13-3 平面简谐波的波函数	123
§ 13-4 波的能量 能流密度	127
§ 13-5 惠更斯原理及其应用	131
§ 13-6 波的叠加原理 波的干涉	135
§ 13-7 驻波	137
§ 13-8 多普勒效应	140
§ 13-9 电磁波的产生和辐射	143
§ 13-10 电磁波的基本性质	145
§ 13-11 电磁波的能量	147
§ 13-12 电磁波谱	149

思考题	150
习题	151
第十四章 光学	155
§ 14-1 关于光的本性的认识发展简史	155
§ 14-2 几何光学基本定律	156
§ 14-3 光在平面上的反射和折射	160
§ 14-4 光在球面上的反射和折射	161
§ 14-5 薄透镜	165
§ 14-6 光源 光的相干性	167
§ 14-7 由分波阵面法产生的光的干涉	170
§ 14-8 由分振幅法产生的光的干涉	176
* § 14-9 迈克耳孙干涉仪	182
§ 14-10 光的衍射现象 惠更斯-菲涅耳原理	183
§ 14-11 单缝衍射	185
§ 14-12 衍射光栅	191
§ 14-13 光学仪器的分辨本领	196
* § 14-14 晶体对 X 射线的衍射	198
§ 14-15 自然光和偏振光 光的横波性质 马吕斯定律	200
§ 14-16 反射和折射时光的偏振	203
* § 14-17 光的双折射现象	205
* § 14-18 偏振光的干涉及其应用	209
* § 14-19 全息照相简介	213
思考题	216
习题	218

第五篇 近代物理学基础

第十五章 狭义相对论基础	225
§ 15-1 伽利略相对性原理 经典力学时空观 伽利略 变换	225
§ 15-2 以太假设 迈克耳孙-莫雷实验	229
§ 15-3 爱因斯坦假设	231

§ 15-4	狭义相对论的时空观	232
§ 15-5	洛伦兹变换	239
§ 15-6	相对论动力学基础	242
	思考题	248
	习题	249
第十六章 量子物理基础 251		
§ 16-1	绝对黑体的辐射 普朗克量子假设	251
§ 16-2	光电效应 爱因斯坦的光子假设	254
§ 16-3	原子模型 原子光谱	262
§ 16-4	玻尔的氢原子理论	265
§ 16-5	实物粒子的波动性	269
§ 16-6	不确定关系	272
§ 16-7	粒子的波函数 薛定谔方程	274
§ 16-8	一维定态问题	277
§ 16-9	氢原子 电子自旋	282
§ 16-10	多电子原子 原子的电子壳层结构	285
* § 16-11	激光	291
* § 16-12	晶体的能带 半导体的导电机制	298
	思考题	305
	习题	306
附录 1 常用基本物理常量(2006 年推荐值)		308
附录 2 常用物理量及其单位		309
习题答案		311

第三篇

气体动理论和热力学基础

物质的运动形式是多种多样的,自然科学的不同学科以不同的物质运动形式作为其研究对象.热力学和气体动理论的研究对象是一种比较复杂的物质运动形式,即物质分子的热运动.什么叫做热运动?自然界的物质都是由大量分子组成的,而这些分子又永不停息地作不规则的运动,这种不规则的运动称为**热运动**.物质中大量分子的热运动的宏观表现称为热现象,例如热传导、扩散、液化、凝固、溶解、汽化等都是热现象,都是分子热运动的宏观表现.有关这类现象的研究属于热学范畴,所以气体动理论和热力学均属于热学范畴.

气体动理论和热力学的研究对象相同,都是物质热现象与热运动的规律,但研究方法不相同,本篇第十章与第十一章将分别介绍气体动理论的统计平均的研究方法和热力学的宏观描述方法.

第十章 气体动理论

自然界的物质由大量分子组成,每一个分子都有它自己的质量、速度和能量,这些属于个别分子的物理量称为微观量.用实验方法来测定微观量是很困难的,一般是不可能的.通常实验所观察到的物理量如温度、压强等都不是属于个别分子的量,而是表征大量分子的集体特性的量,这些物理量称为宏观量.气体动理论的任务是从物质是由大量分子组成以及分子作热运动这一观点出发来研究热现象的本质的,它所用的方法是统计方法.这种方法是对个别分子的运动建立模型,运用力学规律,对大量分子求它们的微观量的统计平均值,建立微观量的统计平均值与宏观量之间的关系,因而它能够从物质的微观结构出发来说明物质热现象的微观本质.

本章首先由热力学第一定律引入温度,并介绍气体的状态参量,理想气体物态方程和平衡状态等热学的一些基本概念.作为气体动理论的主要内容有:理想气体压强公式和温度的微观本质,能量均分原则和理想气体的内能,麦克斯韦速率分布律和玻耳兹曼分布率,分子平均自由程.

§10-1 热力学第零定律

通常,温度的概念与人体感觉到的物体冷热程度相联系,较热的物体应有较高的温度.不过,我们的感官常常会产生错觉.例如,我们从冰箱的冷藏室中同时取出一盒牛奶和一个金属盘,虽然两者的温度相同,但是根据手上的感觉会认为金属盘更凉一些.这是由于金属比纸盒导热性能好,热量从手传输到金属盘比传输到纸盒快得多的原因.因此,要定量地给出物体的温度,首先应该有温度的严格定义.

如果用石棉板类的绝热材料将两个物体与其他所有物体隔开,并使这两个物体在不发生物质交换和力的相互作用的情况下能够传热.这可以由两物体的直接接触,或通过导热特性良好的金属壁间接接触,或借助热辐射来实现.物体间的这种接触称为热接触.实验表明,两个物体通过热接触,热的物体变冷,冷的物体变热,经过一段时间后,两物体的宏观性质不再随时间变化,即达到了一个共同的平衡状态,我们称这两个物体达到了热平衡.

如果将两个物体 A 和 B 用绝热材料隔开,使之不发生热接触,并引入第三个物体 C,让物体 C 通过导热材料同时与物体 A 和 B 实现热接触,如图 10-1

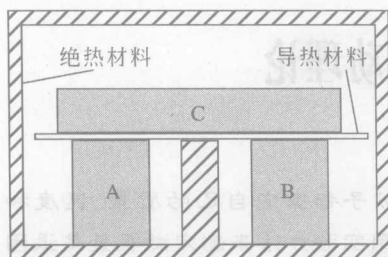


图 10-1

所示.经过一段时间后,C 和 A 以及 C 和 B 将分别达到热平衡.这时,如果再使物体 A 和 B 发生热接触,则 A 和 B 的宏观性质都不会随时间变化,即表明 A 和 B 也达到了热平衡.由这样的实验可以得出结论:在无外界影响的条件下,如果两个物体各自都与第三个物体达到热平衡,则此二物体也必定处于热平衡.这一结论称为热力学第零定律,或热平衡定律.

§10-2 气体的状态参量 理想气体物态方程 平衡状态

一、气体的状态参量

在力学中,物体的运动状态是用物体的位置和速度来描述的,在热学中气体的状态则要用气体的体积 V 、压强 p 和温度 t 等物理量来描述,这几个物理量称为气体的状态参量.

按照热力学第零定律,处于热平衡的物体具有一个共同的宏观性质,因此可以定义这个决定物体热平衡的宏观性质为温度,即两个处于热平衡的物体温度相同.这个定义也为温度的测量提供了理论基础.如果处于热接触的两个物体之一就是温度计,那么当达到热平衡时,二者的温度相同,于是由温度计的温度可以给出待测物体的温度.而温度计的温度则是通过它的随温度改变而显著单调变化的某一物理性质来标志的.例如酒精温度计和水银温度计是利用液体体积的热胀冷缩作为测温属性,金属热电偶温度计则是利用温差电动势作为测温属性.

由于气体分子作热运动,盛在容器中的气体总是充满整个容器,所以气体的体积就是容器的容积.在国际单位制中,体积的单位是立方米,符号是 m^3 . 容器中的气体分子不断与容器壁碰撞,大量分子与器壁碰撞的结果形成一持续的作用力,器壁单位面积所受的正压力称为气体的压强,在国际单位制中压强的单位是帕斯卡,简称为帕,符号是 Pa , $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$. 通常使用的压强单位还有标准大气压 (atm),它与压强的国际单位 Pa 的换算关系如下:

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

温度的数值表示法称为温标.通常建立一种温标需要三要素:测温物质、测温属性和固定标准点.在日常生活与科技工作中普遍采用的摄氏温度用 t 表示,

单位为摄氏度,符号为 $^{\circ}\text{C}$.摄氏温标规定,在标准大气压下,冰水混合物的平衡温度(冰点)为 0°C ,水沸腾的温度(汽点)为 100°C ,在 0°C 和 100°C 之间按温度计测温物质的测温属性随温度作线性变化来刻度.由于不同测温物质的测温属性随温度的变化不可能都是一致的,因此这样建立的温标的三要素都与测温物质和测温属性的选择有关,故称为经验温标.所以,有必要找到一种不依赖于物质属性的温标作为统一标准的温标,我们将在下面进一步讨论这一问题.

二、理想气体物态方程 理想气体温标

中学已讲过气体的三条实验定律,即玻意耳定律、查理定律和盖-吕萨克定律.

1. 玻意耳定律

在温度 t 不变的情形下,一定量气体的压强 p 和体积 V 的乘积为一常量:

$$pV = C (\text{常量}) \quad (10-1)$$

2. 查理定律

在压强 p 不变的情形下,一定量气体的体积 V 随温度 t 作线性变化:

$$V = V_0(1 + \alpha_V t) \quad (10-2)$$

其中 α_V 为气体的体膨胀系数, V_0 为 0°C 时气体的体积.

3. 盖-吕萨克定律

在体积 V 不变的情形下,一定量气体的压强 p 随温度 t 作线性变化:

$$p = p_0(1 + \alpha_p t) \quad (10-3)$$

其中 α_p 为气体的压强系数, p_0 为 0°C 时气体的压强.

一般的气体在压强不太大(与大气压比较)、温度不太低(与室温比较)时,都服从这三条定律,但不同的气体服从这三条定律的范围不相同.例如 H_2 、 O_2 及 He 等气体在比较大的压强范围和温度范围都服从这三条定律.气体愈稀薄,气体的状态变化与三条实验定律的符合程度就愈好.在气体无限稀薄的极限情况下,所有气体的体膨胀系数 α_V 和压强系数 α_p 都趋于共同的极限值 α ,其数值为

$$\frac{1}{\alpha} = t_0 = 273.15^{\circ}\text{C}$$

在这种极限情况下的气体叫做理想气体.由(10-2)和(10-3)式可以看出,当温度 $t = -273.15^{\circ}\text{C}$ 时,理想气体的压强 p 和体积 V 都趋于0.温度 $t = -273.15^{\circ}\text{C}$ 是可能达到的最低温度的极限,称为绝对零度.由于实际气体在达到这样低的温度前早就液化或固化了,因此理想气体实际上是不存在的,只是一个理想模型.但在较高的温度和较低的压强下,一般气体都可当作是理想气体来处理.

利用理想气体的性质可以建立理想气体温标.理想气体温标以绝对零度为零点,水、冰和水蒸气三相平衡共存的温度规定为固定标准点温度.严格地不依

赖于任何物质的测温性质的温标是建立在下一章中要讨论的热力学第二定律基础上的热力学温标,用该温标确定的温度称为热力学温度.热力学温度是国际单位制的七个基本单位之一.热力学温度用 T 表示,单位为开尔文,简称为开,符号为 K,定义为水的三相点温度的 $\frac{1}{273.16}$.这也相当于将水的三相点温度 273.16 K 规定为热力学温标的基本固定温度.可以证明,在理想气体温标能适用的范围内,理想气体温标与热力学温标是一致的.热力学温度 T 与摄氏温度 t 的关系为

$$T/\text{K} = t/^{\circ}\text{C} + 273.15$$

采用热力学温度后,由气体的上述三条实验定律可以导出质量一定的理想气体的 p 、 V 、 T 三个状态参量的下列关系:

$$\frac{pV}{T} = C(\text{常量})(m \text{ 一定}) \quad (10-4)$$

设 p_0 、 V_0 、 T_0 为气体在标准状态下的压强、体积和温度,则上式可写为

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0}{T_0} \quad (10-5)$$

其中 $p_0 = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$, $T_0 = 273.15 \text{ K}$. 假设气体的质量为 m (以 kg 为单位), 气体的摩尔质量^①为 M (以 kg/mol 为单位), 则气体的物质的量为 $\frac{m}{M}$. 在标准状态下 1 mol 的任何气体的体积都是 $V_m = 22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}$, 所以, 质量为 m 的气体的体积为 $V_0 = \frac{m}{M} V_m$, 代入 (10-5) 式得

$$\frac{pV}{T} = \frac{m}{M} \frac{p_0 V_m}{T_0}$$

$\frac{p_0 V_m}{T_0}$ 为一常量, 称为摩尔气体常量, 用 R 表示, 则上式化为

$$pV = \frac{m}{M} RT \quad (10-6)$$

(10-6) 式就是理想气体物态方程. 这是质量为 m 的气体在平衡状态下的三个参量 p 、 V 、 T 之间的关系式. 当 m 为一定时, 如果 p 、 V 、 T 中有两个为已知, 即可求出第三个, 如果 m 为未知或是变化的, 则 m 为第四个参量. p 、 V 、 T 、 m 这四个参量

^① 在国际单位制中, 摩尔 (mol) 是一个物质系统的物质的量. 该系统所包含的基本单元 (可以是原子、分子、离子、电子等或这些粒子的组合) 数与 $12 \times 10^{-3} \text{ kg}$ 碳同位素 C-12 的原子数相等的物质的量就是 1 mol. 1 mol 物质的质量称为该物质的摩尔质量. 对于由分子组成的物质, 其摩尔质量恰好等于以 g 为单位时的分子量. 例如氮气的摩尔质量 $M_{\text{N}_2} = 28 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$, 氧气的摩尔质量 $M_{\text{O}_2} = 32 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ 等.

满足(10-6)式,已知其中三个,可求出第四个.

R 的数值及单位 R 的数值与各状态参量所用单位有关.

(1) 在国际单位制中压强的单位为 Pa, 体积的单位为 m^3 , 温度的单位为 K, 则

$$R = \frac{p_0 V_m}{T_0} = \frac{1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2 \times 22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}}{273.15 \text{ K}} = 8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$$

(2) 在热学中能量曾用卡为单位, 符号为 cal, 由于 $1 \text{ J} = 0.239 \text{ cal}$, 所以

$$R = 8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K}) \times 0.239 \text{ cal/J} = 2 \text{ cal}/(\text{mol} \cdot \text{K})$$

三、平衡状态 准静态过程

质量一定的气体盛在容器中, 它具有一定的体积. 如果气体各部分的压强相同, 温度相同, 我们说这气体处于平衡状态. 实验证明, 如果气体和外界没有能量交换, 在它内部又没有能量转换 (例如没有化学反应或原子核发生变化), 则不论气体原来是否处于平衡状态, 经过一定时间以后, 它一定变为平衡状态, 并且长期处于这种状态. 当气体处于平衡状态时, 它具有一定的压强 p 、体积 V 和温度 T , 所以质量一定的气体, 它的平衡状态可用状态参量 p 、 V 、 T 一组值来表示, 例如 (p_1, V_1, T_1) 表示一个状态, (p_2, V_2, T_2) 表示另一个状态.

根据理想气体物态方程(10-6)式, 三个状态参量 p 、 V 、 T 中只要给出其中两个 (例如 p 、 V), 第三个 (T) 就确定了. 所以气体的每一平衡状态可以用 p - V 图上的一个点来表示, 如图 10-2, 纵坐标为 p , 横坐标为 V , 点 $a(p_1, V_1, T_1)$ 和 $b(p_2, V_2, T_2)$ 表示两个平衡状态.

如果气体与外界交换能量, 它的状态就要发生变化, 状态的变化必然要破坏气体原来的平衡状态. 通常过程进行得较快, 在气体尚未达到新的平衡状态时又发生了下一步的变化, 即在过程进行中气体要经历一系列非平衡的中间状态. 如果过程进行得足够缓慢,

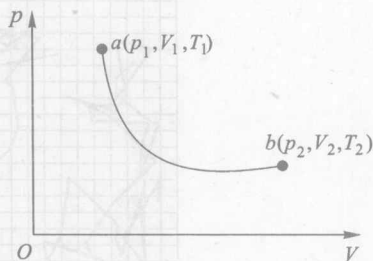


图 10-2

气体所经历的每一中间状态都无限接近于平衡状态, 这个过程称为准静态过程.

准静态过程可以用 p - V 图上的连续曲线表示. 图 10-2 中曲线 $\widehat{ab}$ 即为从状态 a 到状态 b 的一个准静态过程.

§ 10-3 气体动理论的基本概念

人们从大量的实验事实总结出如下关于气体动理论的几个基本概念.

一、一切宏观物体都由大量分子组成 分子间有空隙

从化学中知道,一切宏观物体都是由分子组成的.分子间有空隙的实验根据是:(1)一切物体都是可以被压缩的,特别是气体容易被压缩;(2)水和酒精混合后体积变小;(3)有人曾用 $2.026 \times 10^9 \text{ Pa}$ 的压强压缩钢筒中的油,结果发现油可以透过筒壁渗出,这说明钢的分子间也有空隙存在.

二、分子永不停息地作不规则的运动

分子永不停息地运动的实验根据是扩散现象.把两种不同的金属,如铅及金互相压紧,则经过几个月以后,在铅中发现有金,在金中发现有铅.这说明固体分子也可以扩散.制造半导体器件时,为了改变半导体材料的物理性能,在半导体中掺入某种杂质,就是利用固体中的扩散现象.例如要在半导体硅中掺入杂质硼,就预先在硅片表面沉积一层含硼的二氧化硅(SiO_2),然后把硅片放在 $1100 \sim 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ 的高温炉中维持几十分钟,硼就向硅中扩散到一定程度,硼原子进入硅中证明硼原子是运动的.

分子的运动是无规则的,布朗运动是一个典型例证.在显微镜下观察悬浮在水面上的藤黄粉末的运动,如果将其中三个颗粒的位置每隔半分钟记录一次,并分别用直线将这些位置逐一连接,便得到如图 10-3 所示的曲折路线.

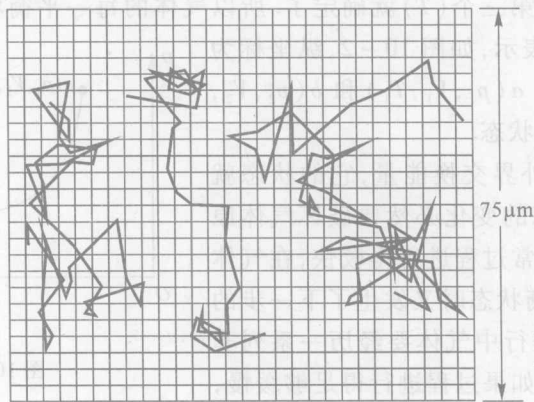


图 10-3

藤黄颗粒不是分子,但它的运动间接反映了其周围水分子的运动情况.藤黄颗粒的运动是由周围水分子对它的无规则的撞击所引起.由于藤黄颗粒很小,其表面积也很小,每一瞬间沿各个方向与藤黄颗粒发生碰撞的水分子不多,致使颗粒所受到的各个方向的撞击力不平衡,其大小和方向是不确定的,因此周围水分子传递给颗粒的瞬时动量的方向和大小也就是不确定的、无规则的.藤黄颗粒越