



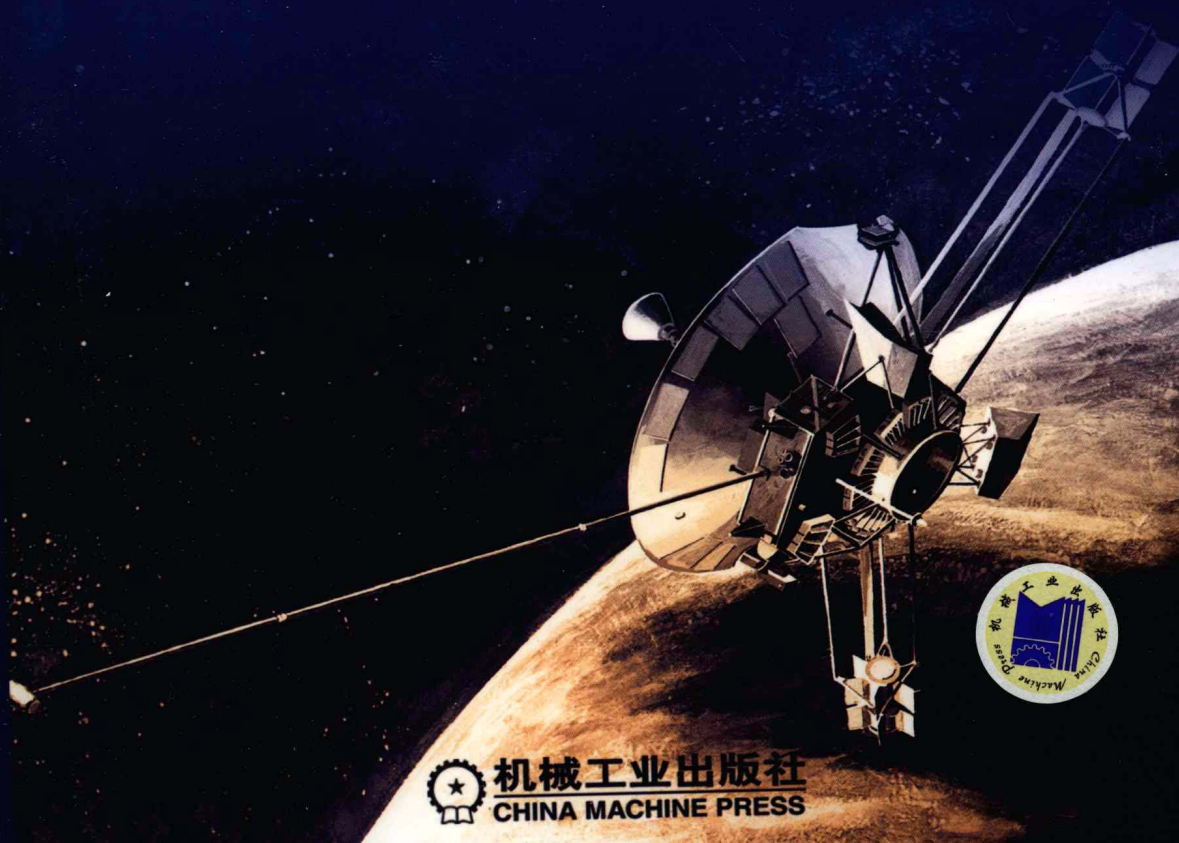
世纪普通高等教育基础课规划教材

大学物理学

下册

任敦亮 主编

王丰 丁红伟 副主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

21 世纪普通高等教育基础课规划教材

大学物理学

下 册

主 编 任敦亮

副主编 王 丰 丁红伟



机械工业出版社

本书依据教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会最新审订的“非物理类理工科大学物理课程教学基本要求”的精神编写。全书分上、下两册，共 20 章。上册包括力学、电磁学两部分，共 11 章；下册包括热学、机械振动与机械波、波动光学基础、近代物理四部分，共 9 章。作为非物理专业的大学物理教材，本书一方面保持了基础扎实、内容经典、实用性强的特点，另一方面又体现出知识面宽、内容现代化等特色。

本书可作为理工科高等院校各专业 100 ~ 130 学时的大学物理教材，也可作为综合大学和高等师范院校非物理专业及各类成人教育物理课程的教材和参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理学. 下册/任敦亮主编. —北京: 机械工业出版社, 2009. 2
21 世纪普通高等教育基础课规划教材
ISBN 978-7-111-26032-5

I. 大… II. 任… III. 物理学 - 高等学校 - 教材 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 214409 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑: 张金奎 责任编辑: 张金奎 孙志强 版式设计: 张世琴
责任校对: 李秋荣 封面设计: 马精明 责任印制: 乔 宇
北京机工印刷厂印刷 (兴文装订厂装订)
2009 年 2 月第 1 版第 1 次印刷
169mm × 239mm · 17.5 印张 · 339 千字
标准书号: ISBN 978-7-111-26032-5
定价: 23.80 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
销售服务热线电话: (010) 68326294
购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643
编辑热线电话: (010) 88379722
封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是根据教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会最新审订的“非物理类理工学科大学物理课程教学基本要求”的精神，凝聚了我院教师长期讲授大学物理课程的实际教学经验，吸收了国内外近年来同类改革教材的优点编写而成的。

大学物理是一门重要的基础课程，它所阐述的物理学知识、基本概念、基本规律和基本方法，是学生学习后续专业课程和其他科学技术的基础。通过大学物理的学习，能够使学生比较系统地了解和掌握物质运动的基本规律；能够培养学生应用物理知识分析和解决问题的能力；能够培养学生的创新能力。可以说大学物理承担了基础知识教育和科学素质教育的双重任务。因此编者在编写过程中，根据课程的性质精心挑选内容，注重概念的准确、物理图像的清晰，简明而系统地讲述了物理学中的基本概念、规律以及基本理论的历史发展进程，其内容涵盖了大学物理教学的最基本要求，并适当介绍了物理学原理在工程技术中的应用。本书内容安排科学、合理，富于启发性和实用性。编者力求物理概念阐述清楚，简洁得当；内容条理清晰，层次分明；语言规范，深入浅出。本书符合高等院校理工科本科素质教育层次中大学物理作为通识教育课程的要求。

本书的一个突出特点是：从工科非物理专业低年级学生的基础理论课出发，参照“教学基本要求”，以经典与近代物理的基本概念和理论为主干，加强有机渗透。即把有关的科技发展新成果及物理原理在工程技术中的应用，适度有机地渗透到相关部分；内容的论述更注重围绕物理概念，知识框架，研究、分析问题的思路和方法。在保证科学性的前提下，把趣味性、实用性适时渗透到相关部分，努力实现教材便于教师教，易于学生学的目标。

全书分上、下两册，主要包括：力学、电学、磁学、热学、振动和波动、光学和近代物理基础等内容。为加深读者对教材内容的理解，本书配有一定数量的例题、思考题和习题，并附习题答案。

这套教材上册由李晓萍、任常愚、尹向宝编写，下册由任敦亮、王丰、丁红伟编写，编写的具体分工为：第1、2、3、4章由李晓萍编写，第5、6、7章由尹向宝编写，第8、9、10、11章由任常愚编写，第14、15、16章由任敦亮编写，第12、13、17章由丁红伟编写，第18、19、20章由王丰编写。

李海宝、姜洪喜、徐宝玉、李社、张林、刘辉等做了大量的资料收集整理工作，并参加了本书部分内容的编写和校正工作。

本书可作为理工科高等院校各专业 100 ~ 130 学时的大学物理教材，也可作为综合大学和高等师范院校非物理专业及各类成人教育物理课程的教材和参考书。

本教材在编写过程中还得到了黑龙江科技学院魏英智教授、金永君教授，华北科技学院张晓春教授的热情支持与帮助，在此表示感谢。

由于编者水平所限，疏忽和不妥之处在所难免，恳请专家、同行和读者批评指正。

编 者

2008 年 11 月于冰城哈尔滨

目 录

前言

第 12 章 热力学基础 1

12.1 平衡态 理想气体的状态方程 1

12.2 准静态过程 功、热量和内能 4

12.3 热力学第一定律 8

12.4 理想气体的内能及 $C_{V,m}$, $C_{p,m}$ 10

12.5 热力学第一定律对理想气体的应用 13

12.6 循环过程 卡诺循环 23

12.7 热力学第二定律 卡诺定理 31

12.8 克劳修斯熵与热力学第二定律的数学表述 38

思考题 41

习题 43

第 13 章 气体分子动理论 47

13.1 统计物理的基本概念 47

13.2 理想气体压强 温度的微观本质 49

13.3 能量按自由度均分定理 理想气体的内能 53

13.4 麦克斯韦分子速率分布定律 56

13.5 分子平均碰撞次数和平均自由程 61

13.6 热力学第二定律的统计

意义 62

思考题 64

习题 65

第 14 章 机械振动 69

14.1 简谐振动 69

14.2 同方向简谐振动的合成 78

14.3 相互垂直简谐振动的合成 81

14.4 阻尼振动 82

14.5 受迫振动 84

思考题 85

习题 86

第 15 章 机械波 90

15.1 机械波的形成及其描述 90

15.2 平面简谐波 95

15.3 波的能量 101

15.4 惠更斯原理 105

15.5 波的干涉 107

15.6 多普勒效应 114

思考题 117

习题 117

第 16 章 光的干涉 122

16.1 光是电磁波 122

16.2 光的相干性 光程 126

16.3	分波阵面干涉	131
16.4	分振幅干涉	137
16.5	迈克耳逊干涉仪	149
	思考题	150
	习题	151

第 17 章	光的衍射	156
17.1	光的衍射现象 惠更斯-菲涅耳原理	156
17.2	单缝夫琅和费衍射	158
17.3	圆孔夫琅和费衍射 光学仪器的分辨率	161
17.4	光栅衍射	164
	思考题	172
	习题	172

第 18 章	光的偏振	176
18.1	光的偏振性	176
18.2	反射和折射时的偏振 布儒斯特定律	181
18.3	双折射现象	183
18.4	偏振光的干涉	188
	思考题	190
	习题	190

第 19 章	狭义相对论	194
19.1	狭义相对论的基本原	

理	194
19.2 狭义相对论的时空观 ...	203
19.3 狭义相对论动力学	206
思考题	210
习题	210

第 20 章	量子物理初步	213
20.1	黑体辐射 普朗克的能量量子假说	213
20.2	光电效应 爱因斯坦光子论	216
20.3	康普顿效应	220
20.4	氢原子光谱和玻尔的量子论	224
20.5	微观粒子的波动性	231
20.6	粒子的波函数 一维薛定谔方程	237
20.7	薛定谔方程	240
20.8	氢原子 四个量子数 ...	245
	思考题	251
	习题	252

附录	历年诺贝尔物理学奖名单	255
	习题参考答案	262
	参考文献	273

第 12 章 热力学基础

热力学是物理学的一个重要部分，主要研究物质热运动的现象和规律。对热现象研究的基本方法有两种，即宏观方法和微观方法。相应地，理论也有两部分，以实验定律为基础的宏观理论构成热力学；以物质微观结构为基础的微观理论构成统计物理学。热力学理论主要包括热力学基本定律、热力学函数及其应用，以及相平衡与化学平衡等内容；统计物理理论主要包括分子动理论、统计力学以及涨落理论等内容。

对热现象研究的两种方法相辅相成，互相补充。根据观察和实验总结出来的热力学定律，以严密的逻辑推理来研究宏观物体的热性质，它不涉及物质的微观结构，因此具有高度的普遍性和高度的可靠性，但却得不到物态方程、比热容公式等物性理论，也不能解释涨落现象；而统计物理学则从物质的微观结构出发，依据每个粒子所遵循的力学规律，用统计学的方法研究宏观物体的热性质可以很方便地解释涨落现象，又可以从理论上导出物态方程，但统计物理得到的结果与实际不能完全吻合。

热力学基本理论随 18 世纪工业革命开始发展。18 世纪以蒸汽技术广泛应用为特征的工业发展为能量守恒与转化定律，即热力学第一定律的建立准备了广泛的物质基础。18 世纪末到 19 世纪初，欧洲有迈尔、亥姆霍兹、焦耳等十多位科学家通过不同途径，独立发现了能量守恒与转化定律。不过，在这期间科学家们发现，用于热功转换的蒸汽热机效率很低，只有 3% ~ 5%。为了提高热机效率，1828 年，卡诺从理论上研究了提高效率的方法，提出了相应的热机理论，但这个理论与焦耳的实验结果矛盾。开尔文和克劳修斯发现了这个矛盾并对卡诺理论修正后，各自独立地发现了热力学第二定律。热力学第二定律揭示了自然界中自发过程具有方向性，也就是说能量守恒的过程未必都能够实现。1912 年，能斯托提出了描述低温现象的热力学第三定律。1939 年，福勒又提出了有关热平衡的定律，称为热力学第零定律。至此，四个构成热力学基本理论的定律全部建立起来了。

12.1 平衡态 理想气体的状态方程

12.1.1 平衡态 状态参量

热力学的研究对象是大量微观粒子（分子、原子等）组成的宏观物体，通

常称这样的研究对象为**热力学系统**，简称**系统**。根据系统与外界的关系可以把系统分为以下三类：与周围环境没有任何相互作用的系统称之为**孤立系统**（严格来说是不存在的，只是一种近似）；与周围环境没有物质交换但可以有能量交换的系统，称为**封闭系统**；与周围环境既有物质交换，又有能量交换的系统，称为**开放系统**。本书中所涉及的热力学系统除特殊说明外，均属于封闭系统。

对于一个不受外界影响的系统，不论其初始状态如何，经过足够长的时间后，必将达到一个宏观性质不再随时间变化的稳定状态，这样的状态称为**热力学平衡态**，简称**平衡态**。否则，称为**非平衡态**。这里所谓不受外界影响，是指外界不对系统做功，也不传热，显然这是一种理想情形，实际上并不存在完全不受外界影响和宏观性质绝对保持不变的系统。由于从微观的角度来看，组成系统的微观粒子仍在进行复杂的运动，只是此时无论个别分子如何运动，大量分子的总体给出的宏观物理参量，如压强、体积、温度等不再随时间变化，因此热力学平衡态又叫**热动平衡态**。

系统处于平衡态时，必须同时满足两个条件：

一是系统与外界在宏观上无能量和物质的交换；

二是系统的宏观性质不随时间变化。

在此我们必须注意平衡态的条件是“一个不受外界影响的系统”。若系统受到外界的影响，如把一个金属棒的一端置入沸水中，另一端放入冰水中，在这样的两个恒定热源之间，经过长时间后，金属棒也能达到一个稳定的状态，称为**定态**，但不是平衡态，因为在外界影响下，不断地有热量从金属棒高温热源端传递到低温热源端。

系统处于平衡态时，系统内部任一体元均处于力学平衡、热平衡（温度处处相同）、相平衡（无物态变化）和化学平衡（无单方向化学反应）之中。同时系统在热平衡状态下，拥有各种不同的宏观属性，如几何的（体积）、力学的（压强）、热学的（温度）、电磁的（磁感应强度、电场强度）、化学的（摩尔质量、物质的量）等。

12.1.2 理想气体状态方程

实验表明，对一般气体来说，在压强不太大（与大气压比较）和温度不太低（与室温比较）的实验范围内，在任何情况下严格遵守玻意耳-马略特定律、盖·吕萨克定律和查理定律的气体，称为**理想气体**。这是以实验为基础，为理想气体下的一个描述性定义。

描述理想气体状态物理量主要有三个，体积（ V ）、压强（ p ）和温度（ T ）， p 、 V 、 T 之间在平衡态下存在着一定的关系。当理想气体的质量一定时满足

$$\frac{pV}{T} = C \quad (12.1)$$

式 (12.1) 称为**理想气体状态方程**, 对任一平衡状态都成立。恒量 C 可以通过气体在标准状态下的 p_0 、 V_0 和 T_0 值确定, 即在标准状态下 ($p_0 = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$, $T_0 = 273.15 \text{ K}$), 1 mol 理想气体所占的体积均为 $V_{0,\text{mol}} = 22.4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。所以质量为 m 、摩尔质量为 M 的理想气体相当于 $\frac{m}{M} \text{ mol}$ 。在标准状态下的体积为

$$V_0 = \frac{m}{M} \cdot V_{0,\text{mol}}$$

于是有

$$C = \frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{m}{M} \cdot \frac{p_0}{T_0} V_{0,\text{mol}}$$

可以令 $R = \frac{p_0}{T_0} V_{0,\text{mol}}$ 。这里, R 是一个普遍适用于任何气体的恒量, 称为**普适气体恒量**, 也称为**摩尔气体常数**。在 SI 单位制中, R 的量值为

$$R = \frac{1.013 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} \times 22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}}{273.15 \text{ K}} = 8.31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

于是, 对于质量为 m 、摩尔质量为 M 的理想气体, 有

$$\frac{pV}{T} = R \frac{m}{M}$$

或

$$pV = \frac{m}{M} RT = \nu RT \quad (12.2)$$

这就是理想气体状态方程, 式中 $\nu = \frac{m}{M}$ 是气体的物质的量。

1 mol 的任何气体中有 N_A 个分子, N_A 叫**阿伏加德罗常数**, $N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ 。若以 N 表示体积 V 中的气体分子总数, 则 $\nu = \frac{N}{N_A}$, 引入另一普适常数, 称为**玻耳兹曼常数**, 用 k 表示

$$k = \frac{R}{N_A} = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$$

因此, 理想气体状态方程 (12.2) 又可以写作

$$pV = NkT \quad \text{或} \quad p = nkT \quad (12.3)$$

式中, $n = \frac{N}{V}$ 是单位体积内气体分子数, 叫做**气体分子数密度**。

12.1.3 混合理想气体的状态方程

前面的讨论仅限化学成分单纯的气体, 但在许多实际问题中常常遇到包含几种不同化学成分的混合气体, 在处理混合气体问题时, 要用**道尔顿分压定律**, 即混合气体的压强等于各组分气体的压强之和。所谓某组分的分压强, 是指这个组分单独存在时 (即在与混合气体的温度和体积相同, 并且与混合气体中所包含的这个组分的物质的量相等的条件下) 的压强。它只适用于理想气体。

用 p 表示混合气体的压强, 用 p_1 、 p_2 、 $\cdots$ 、 p_n 分别表示各组分的分压强, 则道尔顿分压定律可用下式表示

$$p = p_1 + p_2 + \cdots + p_n$$

根据理想气体的状态方程式 (12.2) 和道尔顿分压定律, 可列出各组分的状态方程, 并将所有方程相加得

$$(p_1 + p_2 + \cdots + p_n)V = \left(\frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} + \cdots + \frac{m_n}{M_n} \right)RT \quad (12.4)$$

等式左端的括号内为混合理想气体的压强 p ; 右端的括号内为混合理想气体的物质的量 ν , 即

$$\nu = \frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} + \cdots + \frac{m_n}{M_n}$$

则式 (12.4) 可写作

$$pV = \nu RT$$

这就是适用于混合理想气体的状态方程。

12.2 准静态过程 功、热量和内能

12.2.1 准静态过程

当系统与外界有能量交换时, 它的状态就要发生变化, 从一个状态不断地变化到另一个状态, 其间所经历的过渡称为状态变化过程。如果过程所经历的所有中间状态都无限接近平衡态, 则这个过程称为准静态过程, 也称为平衡过程。

在准静态过程中, 由于系统经历的所有状态都可视为平衡态, 因此, 系统经历过的每一个状态都可以用确定的状态参量描写。对于封闭在气缸中的气体, 在一个准静态过程中, 任何一个中间态都可以用 p - V 图上的一个点表示, 而一个具体准静态热力学过程就可以用 p - V 图上的一条曲线表示。

显然, 准静态过程是一种理想过程。因为状态变化必然会破坏系统的平衡, 原来的平衡态被破坏以后, 需要经过一段时间才能达到新的平衡态。但是在实际发生的过程中, 往往进行较快, 以至于在还没有达到新的平衡态以前又发生了下一步的变化, 因而过程中系统经历的是一系列非平衡态, 这样的过程称为非准静态过程。定性地讲, 只要过程进行得足够缓慢, 使得过程中的每一步, 系统都非常接近平衡态, 这种过程就可近似地看成准静态过程。实际上, 准静态过程就是这种足够缓慢过程的理想极限。

在实际问题中, 除了一些进行极快的过程 (如爆炸过程) 外, 大多数情况下都可以把实际过程看成是准静态过程。设一定量气体贮于气缸内, 如图 12.1a 所示。气缸底部导热, 并与恒温热源接触, 其余外壁绝热。气缸的活塞可自由

移动, 它与器壁之间光滑而无摩擦。开始时, 活塞上有许多小沙粒, 气体处于初始平衡态 $a(p_1, V_1, T_1)$, 在图 12.1b 上用 a 点表示。

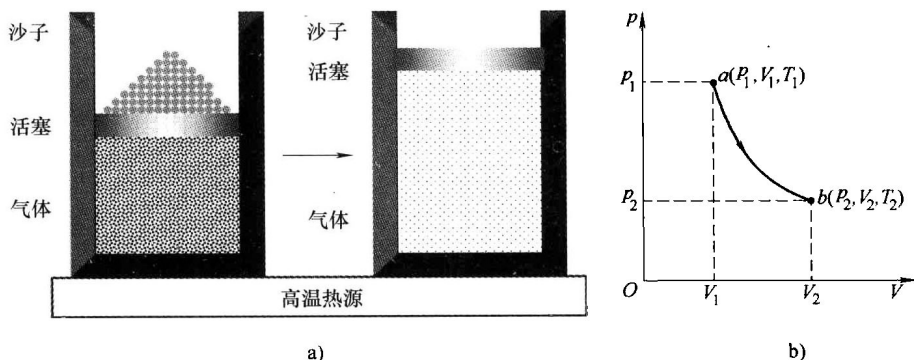


图 12.1

将小沙子一粒一粒慢慢拿走, 气体便缓慢地从初态 $a(p_1, V_1, T_1)$ 变到终态 $b(p_2, V_2, T_2)$ 。由于小沙子非常微小, 拿走的过程又极缓慢, 因此, 这一过程中的任一时刻, 系统都无限接近于平衡态, 即此过程是等温准静态过程。本书中所涉及的热力学过程除特殊说明外, 所讨论的过程都是准静态过程。

12.2.2 功

由力学知识我们知道, 做功是系统与外界交换能量的一种方式。外界对系统做功会使系统的机械运动状态和机械能发生变化。实际上, 做功不只可以引起系统的机械运动状态和机械能发生变化, 还可以引起热运动状态和热运动能量发生变化。如用筷子不停地搅动一杯水, 经过一段时间会发现水的温度升高了, 这就是通过做功的方式, 把有规则的宏观机械运动和机械能, 转化为系统分子的无规则的热运动和系统的内能, 同时系统的热运动状态和热运动能量发生了变化。

在热学中, 准静态过程的功具有重要意义, 准静态过程中系统所做的功可以用系统的状态参量来表示。下面我们来研究准静态过程中, 由于气体体积变化所做的功。

如图 12.2a 所示, 一定量的气体被封闭在气缸中, 气体的压强为 p , 活塞的面积为 S , 则作用在活塞上的力为 $F = pS$, 当系统经历一微小的准静态过程使活塞移动一微小距离 Δl 时, 气体所做的功为

$$A = F\Delta l = pS\Delta l = p\Delta V \quad (12.5)$$

式中, ΔV 为气体体积的变化量。功 A 可用图 12.2b 中画有斜线的小矩形的面积来表示, 故气体在由状态 A 变化到状态 B 的准静态过程中所做的功为 $A = \sum p\Delta V$ 。在 p - V 图上, A 为所有小矩形面积的总和。式 (12.5) 也可用积分式表示。当气体的体积有无限小变化 dV 时, 气体所做的功为 $dA = pdV$, 则式

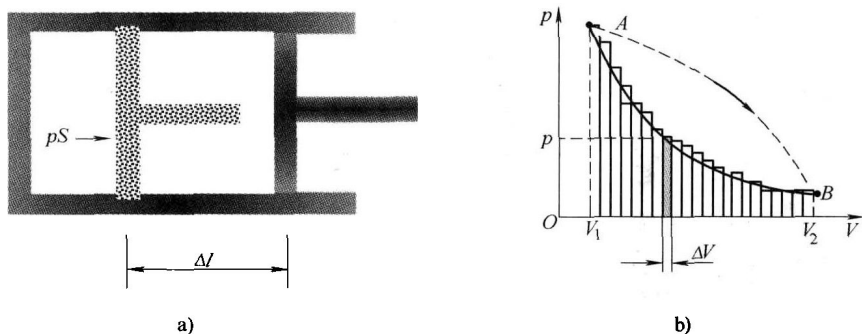


图 12.2

(12.5) 可写成

$$A = \int p dV$$

它等于 p - V 图上实线下的面积, 所以气体所做的功等于 p - V 图上过程曲线下的面积。

为讨论问题方便, 一般约定: 当气体膨胀时, $A > 0$, 系统对外界做正功; 当气体被压缩时, $A < 0$, 系统对外做负功。假定气体从状态 A 到状态 B 经历另一个路径如图 12.2b 中的虚线所示, 则气体所做的功应是虚线下面的面积。因此, 可以看到状态变化过程不同, 系统所做的功也就不同。总之, 系统所做的功不仅与系统的始末状态有关, 还与状态变化所经历的具体过程有关。

12.2.3 热量

前面已指出对系统做功可以改变系统的状态。除此之外, 向系统传递能量也可以改变系统的状态, 这类例子是非常多的。例如, 把一杯冷水放在电炉上加热, 高温电炉不断地把能量传递给低温的水, 从而使水温也相应地提高, 水的状态就发生了改变。又如, 在一杯水中放进一块冰, 冰将吸收水的能量而慢慢融化, 从而使水和冰的状态都发生变化。我们把系统和外界之间由于存在温差而传递的能量叫做**热量**, 用字母 Q 表示。如图 12.3a 所示, 把温度为 T_1 的系

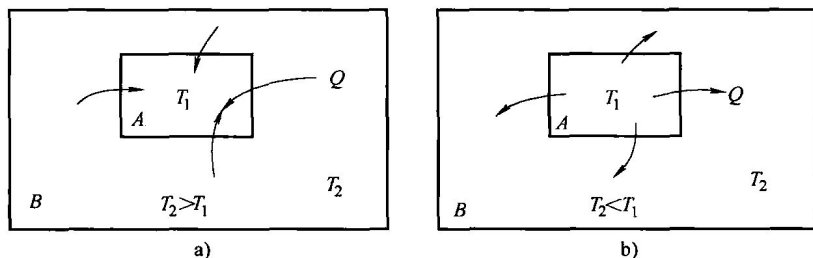


图 12.3

统 A , 放在温度为 T_2 的外界环境 B 之中。若 $T_2 > T_1$, 则有热量 Q 从 B 传递给 A 。若 $T_2 < T_1$, 则热量 Q 将从 A 传递给 B , 如图 12.3b 所示。传递热量的多少与具体热传递过程有关, 因此, 热量与功一样是与热力学过程有关的量。

当系统与外界之间有热量传递时, 系统的温度就要发生变化。但不同的物质因其自身性质的不同, 吸收 (或放出) 相同的热量, 温度升高 (或降低) 的数值并不相同。为了衡量系统的这个性质, 引入比热容这一物理量。设质量为 m 的系统与外界之间交换的热量为 dQ , 系统的温度变化为 dT , 则系统的比热容定义为

$$c = \frac{dQ}{m dT} \quad (12.6)$$

它表示系统中单位质量的物质在该过程中温度升高 (或降低) 1K 时所吸收 (或放出) 的热量。

把 1mol 的某种物质温度升高 (或降低) 1K 时吸收 (或放出) 的热量称为这种物质的摩尔热容, 用 C_m 表示, 单位为 $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 故

$$C_m = \frac{dQ}{\frac{m}{M} dT} \quad (12.7a)$$

实验表明, 物质的摩尔热容 C_m 与温度有关。但是实际问题中, 当温度的变化范围不太大时, 可以认为摩尔热容 C_m 与温度无关, 近似地作为常数处理, 因此在一个具体过程中, 系统吸收 (或放出) 的热量可以表示为

$$Q = \frac{m}{M} C_m (T_2 - T_1) \quad (12.7b)$$

由式 (12.7a) 知, $dQ = \frac{m}{M} C_m dT$, 当系统的温度由 T_1 变化到 T_2 时, 系统所吸收 (或放出) 的热量为

$$Q = \frac{m}{M} \int_{T_1}^{T_2} C_m dT \quad (12.7c)$$

由于热量与热力学过程直接相关, 因此摩尔热容 C_m 与过程有关, 即 1mol 的同一物体在不同过程中温度升高 1K 所吸收的热量一般是不相同的。对气体常用的是摩尔定容热容和摩尔定压热容。

摩尔定容热容是指 1mol 物质在等容过程中温度升高 (或降低) 1K 时吸收 (或放出) 的热量, 以 $C_{V,m}$ 表示; **摩尔定压热容**是 1mol 物质在等压过程中温度升高 (或降低) 1K 时, 吸收 (或放出) 的热量, 以 $C_{p,m}$ 表示。按定义有

$$C_{V,m} = \left(\frac{dQ}{dT} \right)_V \quad (12.8a)$$

$$C_{p,m} = \left(\frac{dQ}{dT} \right)_p \quad (12.8b)$$

式中, 下标 p 、 V 分别表示过程中体积不变、压强不变。

12.2.4 内能

做功和热传递都可以改变系统的状态, 系统状态变化的同时必然伴随着某种能量的变化。焦耳通过大量实验证明, 在各种不同的绝热过程 (即系统没有和外界进行热传递的过程) 中, 无论采用何种做功方式使系统的状态从确定的平衡态 1 变化到确定的平衡态 2, 实验测得的功的数值都相等, 即所做功与实施的绝热过程的方式无关, 完全由平衡态 1、2 决定。

在绝热过程中, 系统做功只决定于始末状态, 而与具体过程无关, 表明系统都存在一个由系统本身状态决定的物理量, 而绝热过程中的功等于这一物理量的变化量。若状态 1 确定此物理量的值为 E_1 , 状态 2 确定此物理量的值为 E_2 , 则

$$E_2 - E_1 = A_a$$

A_a 表示绝热过程中的功。显然, 这个完全由系统状态确定的物理量属于系统的一种能量, 我们把这种能量称为系统的内能。内能是由热力学系统内部状态所决定的能量, 系统的状态确定, 内能就确定。由于系统的状态由状态参量表示, 因此系统的内能也由状态参量决定, 是状态参量的单值函数。后续的学习中, 可以证明, 在物质的量相同的情况下, 内能是温度 T 的函数, 并且还会给出内能的微观机制。

12.3 热力学第一定律

做功和传递热量都可以使系统的内能发生变化。一般情况下, 在系统状态改变的过程中, 做功和传递热量往往是同时进行的。一个系统初始状态的内能为 E_1 , 由于外界的作用, 系统经过某一个过程改变到内能为 E_2 的末状态, 则内能的增量为 $E_2 - E_1$ 。在这个过程中, 系统从外界吸收的热量为 Q , 它对外界做功为 A 。实验证明, 这些量之间的关系为

$$Q = (E_2 - E_1) + A \quad (12.9)$$

式 (12.9) 就是宏观过程的热力学第一定律的数学表示式。由热力学第一定律可知, 系统从外界吸收的热量, 其中一部分使系统内能增加, 另一部分用于系统对外界做功。显然, 热力学第一定律是包括热现象在内的能量守恒与转换定律。

在式 (12.9) 中, 必须注意式中各个量的正、负意义。这里规定: 系统从外界吸热时 Q 为正值, 向外界放热时 Q 为负值; 系统对外界做功时 A 为正值, 外界对系统做功时 A 为负值; 系统的内能增加时 $(E_2 - E_1)$ 为正值, 内能减少时 $(E_2 - E_1)$ 为负值。此外, 还需注意, 在应用式 (12.9) 时, 三个量的单位

必须统一，在国际单位制中，都以焦耳（J）为单位。

对于状态发生微小变化的过程，即微过程，如果系统吸收的热量为 dQ ，系统对外做功为 dA ，内能的增量为 dE ，则在微小变化的过程中热力学第一定律的表示式为

$$dQ = dE + dA \quad (12.10)$$

从热力学第一定律可以看到，如果我们使系统经历一个过程，在这个过程中系统的内能保持不变，那么系统从外界吸收的（或放出的）热量必然转变为系统对外界所做的功（或外界对系统所做的功），因此，我们就有“热转变为功”或“功转变为热”之类的表述。

历史上，曾有人企图制造一种机器，使系统经历一个变化过程后回到初始状态，在这个过程中它不需要外界提供任何能量而可以不断地对外界做功，这种机器叫**第一类永动机**。显然，系统经历一个过程回到初始状态，则系统的内能不变，按照热力学第一定律，在系统内能不变的情况下，系统必须从外界吸收热量才能对外界做功。因此，第一类永动机是违反热力学第一定律的，也就违反了能量守恒定律，它不可能实现。因此，人们也常将热力学第一定律表述为：**第一类永动机是不可能造成的**。

例 12.1 如图 12.4 所示，系统经过程曲线 abc 从 a 态变化到 c 态共吸收热量 500J，同时对外做功 400J，后沿过程曲线 cda 回到 a 态，并向外界放热 300J。求系统沿过程曲线 cda 从 c 态变化到 a 态时内能的变化及对外做的功。

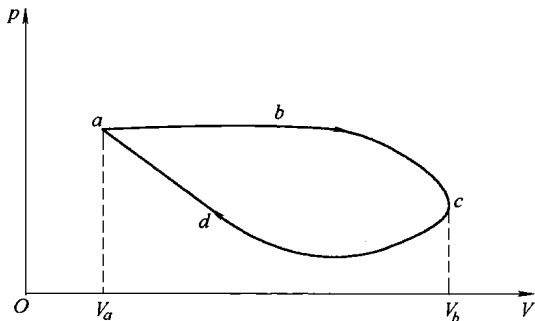


图 12.4

解：在 abc 过程中应用热力学第一定律，得

$$E_c - E_a = Q_1 - A_1 = 500\text{J} - 400\text{J} = 100\text{J}$$

由于内能是状态函数

$$E_a - E_c = -(E_c - E_a) = -100\text{J}$$

在 cda 过程中应用热力学第一定律，得

$$A_2 = Q_2 - (E_a - E_c) = -300 - (-100) = -200\text{J}$$

A_2 为负值，表明外界对系统做功。

12.4 理想气体的内能及 $C_{V,m}$, $C_{p,m}$

前面说过,理想气体内能是系统状态的单值函数,那么气体的内能函数到底具有何种形式?焦耳在1845年曾通过实验研究了这个问题。焦耳实验的原理如图12.5所示,容器A中充满气体,B中为真空,两者连接处用阀门C隔开;全部容器置于水量热器中,水中插入温度计以测量温度;量热器外面包以绝热材料,整个装置可以看成是与外界绝热的。打开阀门C后,气体将由A向B膨胀,最后充满全部容器,这个过程称为气体的自由膨胀过程。所谓“自由”是指气体向真空膨胀时不受阻碍,因而不对外做功(在自由膨胀中,后进入容器B的气体将对先进入B中的气体做功,但这是气体内各部分之间的功,而不是气体对外界所做的功),即 $A=0$ 。焦耳测量了膨胀前后气体与水的平衡温度,发现温度没有改变,这说明膨胀过程中气体与水之间没有热量交换,因而气体的自由膨胀过程实际上也可看成是非静态的绝热过程,因此 $Q=0$ 。

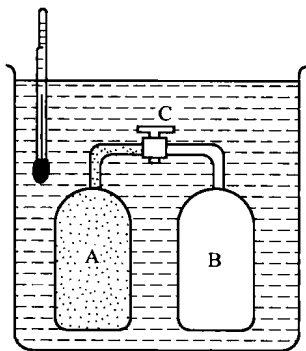


图 12.5

根据热力学第一定律,有 $E_2 - E_1 = 0$ 或 $E_2 = E_1$ 。这说明气体在自由膨胀过程中,虽然体积发生了变化,但是温度不变,内能也不变。由此可见,气体内能仅是其温度的函数,与体积无关,即

$$E = E(T)$$

这一结论称为焦耳定律。焦耳定律从宏观上,证明了理想气体的内能是温度 T 的单值函数,但是并没有揭示出内能的微观机制。

同等条件下,由于水的热容远大于气体的热容,所以焦耳实验中,若产生微小变化的温度不易被测出,所以实验结果也就不够精确。此后,焦耳和其他人又用另外的方法研究了气体的内能,结果发现实际气体的内能不仅是温度的函数,而且还与体积有关。焦耳定律只是反映了气体的内能与体积变化的关系很小,致使因体积膨胀而引起的内能改变不易观测出来。实验还发现,压强越小,气体内能随体积的变化也越小;当压强趋于零时,气体的内能就仅是温度的函数。由于压强越小,实际气体就越接近于理想气体,而当压强趋于零时,实际气体就趋于理想气体。因此,通常也把在任何情况下都遵守焦耳定律的气体定义为理想气体。也就是说,理想气体的内能仅仅是其温度的函数。在实际问题中,当实际气体的压强不太大时,常可近似地看成是理想气体,并且遵守焦耳定律。