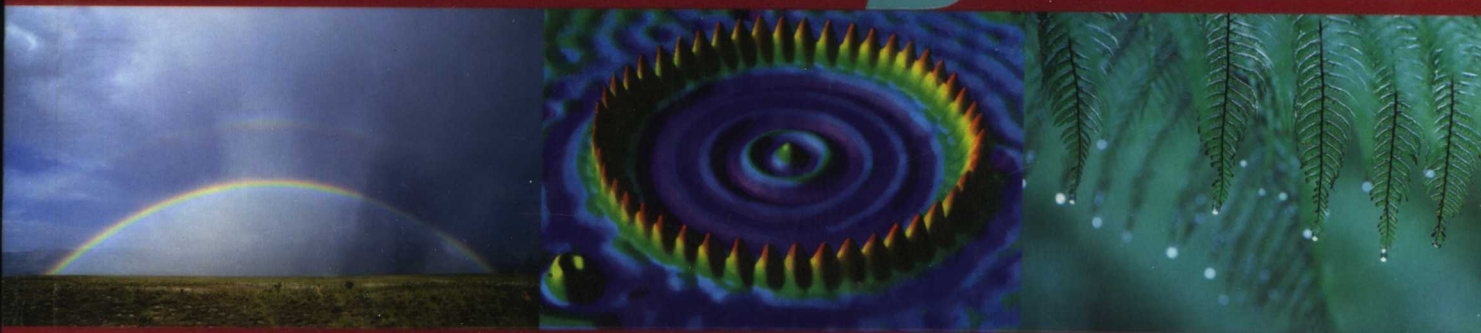


//

大学物理学

(下册)

Physics



■ 毛骏健 顾 牡 主编

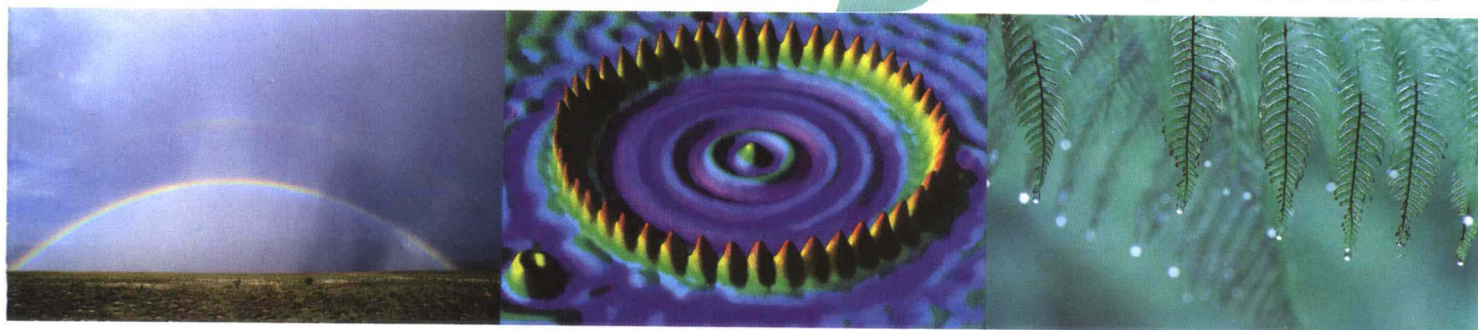


高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

大学物理学

(下册)

Physics



■ 毛骏健 顾 牡 主编
■ 鲍鸿吉 刘钟毅 编

 高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

内容简介

本书是“高等教育百门精品课程教材”项目的成果,该项目整体已被列入新闻出版总署“十五”重点规划,本书也是同济大学国家工科基础物理课程教学基地建设的一项重要成果。本书的思路清晰、表述精练,继承了国内教材的传统特色;同时在教材体例、写作风格、图片和插图设计等方面又充分借鉴了国外优秀物理教材的特点;理论与实际结合紧密,重物理思想和物理图像,内容通俗易懂且不乏趣味。

为满足教育部最新制订的《理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求(讨论稿)》,本书在传统教学体系的基础上对内容有所扩充。全书分上、下两册,上册包括力学、振动与波动以及电磁学,其中在力学中增加了流体力学;下册包括热学、光学和近代物理学,其中在光学中增加了几何光学,在近代物理学中增加了广义相对论和粒子物理简介。

本书可作为普通高等学校理科、工科和医科等各专业大学物理课程教材或参考书,也可供社会读者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学.下册 / 毛骏健,顾牡主编. —北京:
高等教育出版社, 2006.1
ISBN 7-04-017780-3

I. 大… II. ①毛…②顾… III. 物理学—高等学校—
教材IV. 04

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第144630号

策划编辑 陶 铮 封面设计 王凌波
责任编辑 陶 铮 版式设计 王凌波
责任绘图 宗晓梅 责任校对 康晓燕
责任印制 朱学忠

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 100011
总 机 010—58581000
经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京佳信达艺术印刷有限公司

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 850×1168 1/16
印 张 17.5
字 数 500 000
版 次 2006年1月第1版
印 次 2006年1月第1次印刷
定 价 34.00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 17780—00

目录



第9章 热力学基础

9-1 热力学的基本概念	2
9-1-1 热力学系统	2
9-1-2 平衡态 准静态过程	4
9-1-3 理想气体状态方程	5
9-2 热力学第一定律	7
9-2-1 改变系统内能的两条途径 热功当量	7
9-2-2 热力学第一定律的数学描述	8
9-2-3 准静态过程中热量、功和内能	8
9-3 热力学第一定律的应用	11
9-3-1 热力学的等值过程	11
9-3-2 绝热过程、多方过程	15
9-4 循环过程	19
9-4-1 循环过程	19
9-4-2 热机和制冷机	20
9-4-3 卡诺循环及其效率	21
9-5 热力学第二定律	24
9-5-1 热力学过程的方向性	24
9-5-2 热力学第二定律	25
9-5-3 卡诺定理	26

第10章 气体动理论

10-1 气体动理论的基本概念	32
-----------------	----

10-1-1 分子动理论的基本观点	32
10-1-2 分子热运动与统计规律	33
10-1-3 理想气体的微观模型	34
10-2 理想气体状态方程的微观解释	34
10-2-1 理想气体压强的统计意义	34
10-2-2 温度的微观意义	36
10-2-3 理想气体状态方程的微观解释	37
★10-2-4 真实气体的范德瓦尔斯方程	38
10-3 能量按自由度均分原理	41
10-3-1 自由度	41
10-3-2 能量按自由度均分原理	42
10-3-3 理想气体的内能 摩尔热容	43



10-4 麦克斯韦速率分布	45
10-4-1 麦克斯韦速率分布函数	45
★10-4-2 气体分子速率分布的测定	47
10-4-3 三个统计速率	47
★10-5 玻耳兹曼能量分布	50
10-5-1 重力场中分子数密度分布	50
10-5-2 玻耳兹曼能量分布	51
10-5-3 大气的垂直温度梯度	52
10-6 气体分子的平均自由程和碰撞频率	53
10-6-1 分子的平均碰撞频率	53
10-6-2 平均自由程	54
★10-7 气体的输运现象	55

10-7-1 粘滞现象	55
10-7-2 热传导现象	56
10-7-3 扩散现象	57
10-8 熵与热力学第二定律	57
10-8-1 热力学第二定律的统计意义	57
10-8-2 熵与热力学概率	59
10-8-3 克劳修斯熵 熵增加原理	60



第11章 几何光学

11-1 几何光学的基本定律	66
11-1-1 光的直线传播	66
11-1-2 光的反射	67
11-1-3 光的折射	67
11-1-4 全反射	69
11-2 平面反射和平面折射成像	70
11-2-1 平面反射成像	70
11-2-2 平面折射成像	70
11-3 球面反射和球面折射成像	71
11-3-1 球面反射的成像公式	72
11-3-2 球面镜成像的作图法	73
11-3-3 球面镜的横向放大率	74
11-3-4 球面折射成像	75
11-4 薄透镜成像	77
11-4-1 薄透镜的成像公式	77
11-4-2 薄透镜焦点和焦距	79
11-4-3 薄透镜成像的作图法	80
★ 11-5 光学仪器	81
11-5-1 照相机	81
11-5-2 眼睛	82

11-5-3 放大镜	83
11-5-4 显微镜	84
11-5-5 望远镜	85



第12章 波动光学

12-1 光的本性	90
12-1-1 微粒说与波动说之争	90
12-1-2 光的电磁本性	91
12-2 光的相干性	91
12-2-1 普通光源的发光机制	92
12-2-2 杨氏双缝实验	93
12-2-3 光程	96
12-3 薄膜干涉	96
12-3-1 等倾干涉	97
12-3-2 等厚干涉	101
12-3-3 迈克尔孙干涉仪	104
12-4 光的衍射	105
12-4-1 光的衍射现象	106
12-4-2 惠更斯-菲涅耳原理	107
12-4-3 夫琅禾费单缝衍射	107
★ 12-4-4 单缝衍射的光强分布	110
12-4-5 圆孔衍射 光学仪器的分辨本领	111
12-4-6 平面衍射光栅	113
12-4-7 光栅衍射光谱的光强分布	115
12-4-8 X射线衍射	117
12-5 光的偏振	118
12-5-1 自然光与偏振光	118
12-5-2 偏振片 马吕斯定律	120
12-5-3 反射光、折射光及散射光的偏振性	121

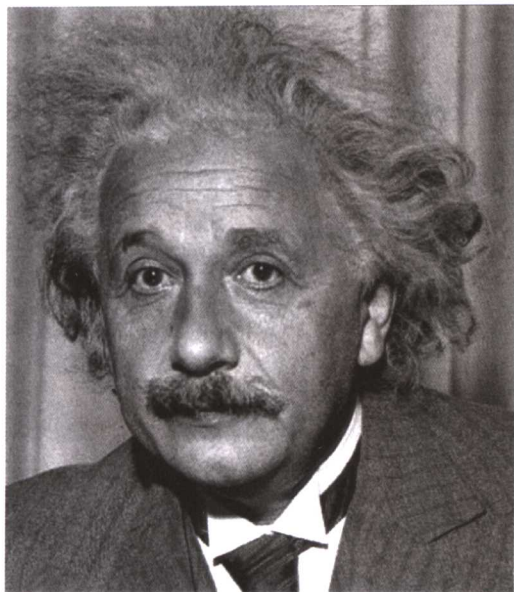
12-6 光的双折射 123

12-6-1 光在晶体中的双折射 123

★ 12-6-2 椭圆偏振光和圆偏振光 波片 125

★ 12-6-3 偏振光的干涉 126

★ 12-6-4 光弹效应与旋光现象 127



第 13 章 狭义相对论

13-1 基于绝对时空的力学理论 134

13-1-1 牛顿的绝对时空观 134

13-1-2 伽利略变换 经典力学相对性原理 134

13-1-3 迈克尔孙-莫雷实验 135

13-2 狭义相对论基本原理与时空的相对性 137

13-2-1 狭义相对论基本原理 137

13-2-2 时空的相对性 137

13-3 洛伦兹变换 141

13-3-1 洛伦兹变换 141

13-3-2 相对论速度变换 143

13-4 光的多普勒效应 144

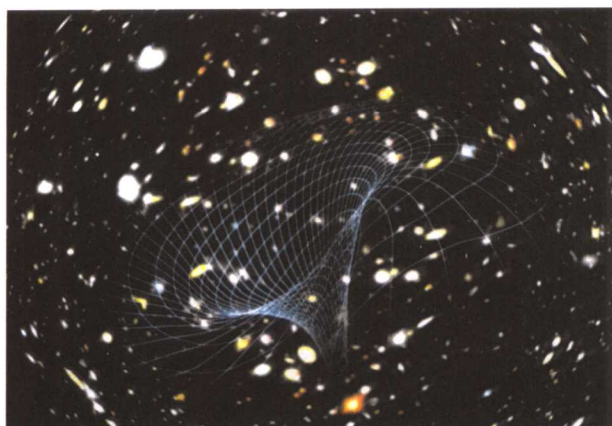
13-5 相对论与电磁特性 146

13-6 相对论动力学 147

13-6-1 相对论质量与动量 147

13-6-2 相对论动力学的基本方程 148

13-6-3 相对论能量 148



★ 第 14 章 广义相对论

14-1 广义相对论基本原理 156

14-1-1 等效原理与局域惯性系 156

14-1-2 广义相对性原理 157

14-2 弯曲的时空 158

14-2-1 弯曲的时空 158

14-2-2 引力场中的时空特性 158

14-2-3 场方程 160

14-3 广义相对论的实验验证 161

14-3-1 光线在引力场中弯曲 161

14-3-2 水星近日点的进动 162

14-3-3 引力红移 162

14-4 黑洞 163

14-4-1 黑洞 163

14-4-2 探索黑洞 165

第 15 章 量子物理

15-1 黑体辐射和普朗克量子假设 168

15-1-1 黑体辐射 168

15-1-2 普朗克公式 普朗克量子假设 170

15-2 光电效应 爱因斯坦光量子理论 172

15-2-1 光电效应 172

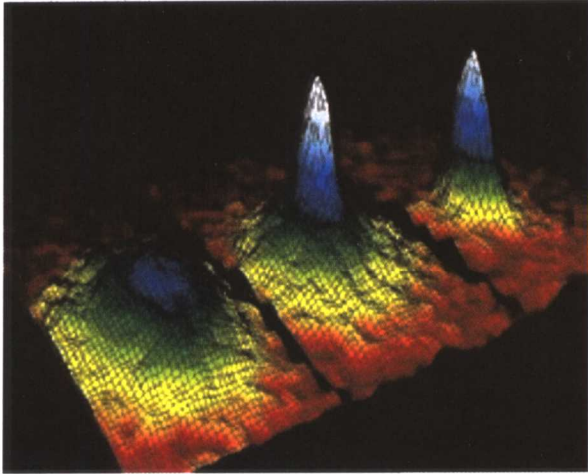

15-2-2 爱因斯坦光量子理论 174

15-2-3 光的波粒二象性 175

15-3 康普顿效应 177

15-3-1 康普顿效应的实验规律 177

15-3-2 康普顿效应的量子解释 178

15-4 氢原子光谱和玻尔理论	180	15-10 ⁻³ 原子的壳层结构	209
15-4-1 氢原子光谱	180	15-11 激光	212
15-4-2 原子的经典模型	181	15-11-1 光的吸收和辐射	212
15-4-3 玻尔的氢原子理论	182	15-11-2 粒子数反转	213
15-5 粒子的波动性	185	15-11-3 光学谐振腔	214
15-5-1 德布罗意波	185	15-11-4 激光的特性	215
15-5-2 物质波的实验验证	186		
			
15-6 德布罗意波的统计诠释			
不确定关系	188	第 16 章 原子核物理	
15-6-1 德布罗意波的统计诠释	188	16-1 原子核的基本性质	220
15-6-2 不确定关系	189	16-1-1 原子核的构成	220
15-7 波函数 薛定谔方程	191	16-1-2 核的自旋和磁矩	221
15-7-1 波函数	192	16-2 原子核的结合能 核力	222
15-7-2 薛定谔方程的一般形式	193	16-2-1 原子核的结合能	222
15-7-3 一维定态不含时薛定谔方程	195	16-2-2 核力	223
15-8 一维定态问题	195	16-3 原子核的稳定性和放射性	225
15-8-1 一维无限深势阱	196	16-3-1 原子核的稳定性	225
15-8-2 一维势垒 隧道效应	197	16-3-2 放射性	226
15-8-3 扫描隧道显微镜	200	16-3-3 放射性衰变规律 半衰期	228
15-8-4 一维谐振子	201	16-3-4 放射性辐射的生物效应	230
15-9 氢原子结构	202	16-4 原子核裂变和聚变	232
15-9-1 氢原子的薛定谔方程	202	16-4-1 原子核裂变	232
15-9-2 三个量子数 角动量量子化	203	16-4-2 原子核聚变	234
15-9-3 氢原子中电子的概率分布	204	16-4-3 热核聚变的几种约束	235
15-10 电子的磁矩 原子的壳层结构	206	第 17 章 粒子物理简介	
15-10-1 电子的轨道磁矩	206	17-1 基本粒子	238
15-10-2 电子的自旋	207	17-1-1 基本粒子——一个历史的概念	238
		17-1-2 粒子的相互作用	239
		17-1-3 粒子的分类	240



17-2 守恒定律 241

17-2-1 重子数和轻子数 242

17-2-2 同位旋 I 和同位旋分量 I_z 242

17-2-3 奇异数 242

17-2-4 正反共轭和宇称 243

17-3 夸克 标准模型 244

17-3-1 夸克模型 245

17-3-2 标准模型 246

第 18 章 固体物理简介

18-1 晶格的结构 250

18-1-1 晶格 250

18-1-2 几种常见的晶体结构 250

18-2 晶体的结合类型与能带 251

18-2-1 结合力与晶体分类 251

18-2-2 能带 252

18-3 金属的自由电子模型 254

18-3-1 电子的态密度 255

18-3-2 费米-狄拉克分布 255



18-4 半导体 257

18-4-1 半导体的结构与特性 257

18-4-2 pn 结 259

18-4-3 半导体器件 260

附录

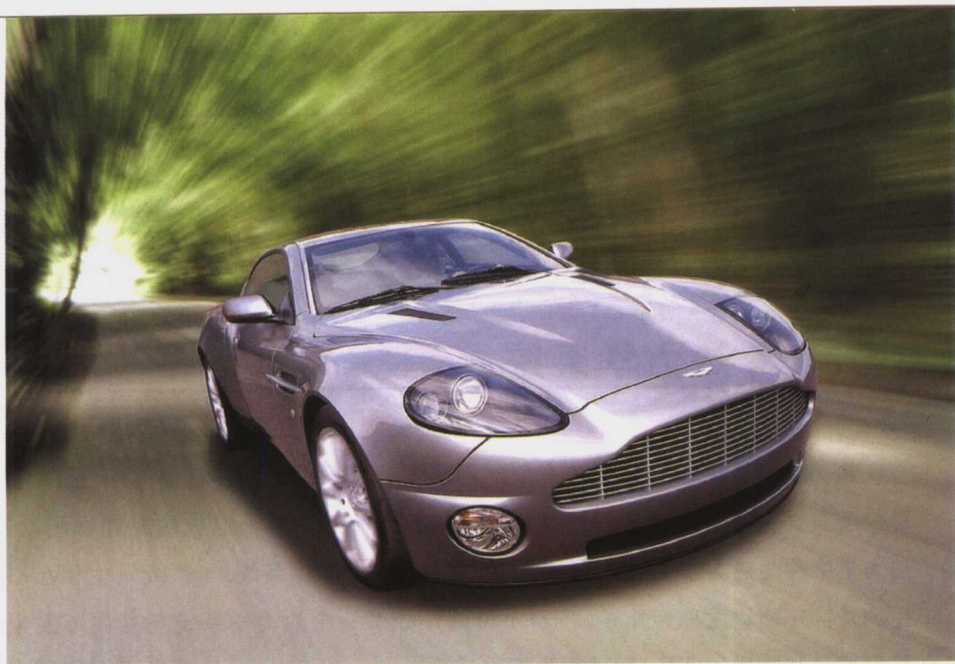
附录 1 基本物理常量 263

附录 2 国际单位制 264

附录 3 地球和太阳的一些常用数据 266

习题答案 267

参考文献 270



汽车在长时间高速运动中,由于车轮温度的升高,会引起轮胎中的气体膨胀,往往发生车胎爆裂,引发交通事故.这就是一种热现象

第 9 章

热力学基础

热

学(heat)是物理学的一个重要组成部分,是专门研究热现象的规律及其应用的一门学科,起源于人类对冷热现象的探索.不言而喻,人类生存在四季交替、气候变幻的自然界中,冷热现象是人们最早观察和认识的自然现象之一.

生活经验告诉我们,当温度达到 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上时,水将发生气化,当温度降低到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下时,水将凝结成冰块;登山运动员在高山上烧煮食物必须使用高压锅,否则得到的必然是一锅“夹生饭”;夏日,当我们驾驶着汽车在高速公路上奔驰时,切记!车胎中的气体不能充得太足,以免在行驶过程中由于温度升高而发生车胎爆裂.诸如此类的种种现象,都与物体的冷热程度有关,我们把它们称为**热现象**(thermal phenomenon).

对于热现象及其规律的研究可以有两种截然不同的研究方法,一是**热力学**(thermodynamics),二是**统计物理学**(statistical physics).热力学是一门宏观理论,根据观察和实验,总结出宏观热现象所遵循的基本规律,然后运用严密的逻辑推理方法,来研究宏观物体的热性质.统计物理学则是一门微观理论,从物质内部的微观结构出发,即从组成物质的大量分子、原子的运动以及它们之间的相互作用出发,运用统计的方法探讨宏观物体的热性质.由于热力学理论以观察和实验为基础,因此它具有较高的准确性和可靠性,可以用来验证微观理论的正确性.但是它没有涉及热现象的本质,对于所得的结果往往是知其然而不知其所以然.统计物理学则能深入到热现象的本质,从分子热运动出发找出宏观测量的微观决定因素,从而弥补了热力学的缺陷.热力学和统计物理学在对热现象的研究上是相辅相成的,正如美国物理学家托尔曼所说:“用较为抽象的统计力学对热力学作出了完满的解释,这是物理学的最大成就之一.”本章我们将从热力学理论出发,来探讨宏观热现象.

9-1 热力学的基本概念

9-1-1 热力学系统



图9-1 读出氧气瓶上的压力表读数,再根据瓶上标注的氧气瓶容积以及当时的温度,可以估算出氧气的用量

热力学研究一切与热现象有关的问题,其对象可以是固体、液体和气体,本章仅就气体的热力学性质进行讨论.这些由大量分子、原子组成的宏观物质,在热力学中称为**热力学系统**(thermodynamic system),简称**系统**.与系统发生相互作用的外部环境物质称为**外界**(surroundings).如果一个热力学系统与外界不发生任何能量和物质的交换,则被称为**孤立系统**(isolated system);与外界只有能量交换而没有物质交换的系统称为**封闭系统**(closed system);与外界同时发生能量交换和物质交换的系统称为**开放系统**(open system).

描述热力学系统状态的物理量称为**状态参量**(state parameter).在力学中为了描述质点的运动状态,我们曾引入了位置矢量、速度等物理量,但是现在我们所要描述的是由大量气体分子构成的宏观热力学系统,从本质上讲,系统的一切宏观热现象与构成系统的大量分子作杂乱无章的运动有关,因此这种大量分子无序的运动称为**分子热运动**(thermal motion).参与热运动的分子数量巨大,我们不可能去追踪每一个分子的运动状态.每个分子所具有的质量、速度、动量以及能量等物理量都是**微观量**(microscopic quantity).在热力学实验中,我们通常不可能对微观量进行直接观察和测量.宏观实验中所能获得的只是气体的**体积**(volume)、**压强**(pressure)和**温度**(temperature)等状态参量,这些都称为**宏观量**(macroscopic quantity).比如,医用氧气钢瓶上往往贴有表示钢瓶容积的标签,并在出口处装有压力表,如图9-1所示.压力表上的读数、钢瓶的容积以及当时氧气的温度,反映了氧气的某一个状态.在使用氧气以后,氧气的状态参量要发生变化,根据这一变化,可以估算出氧气的用量.

气体的体积一般用 V 表示,它是指气体分子运动时所能够到达的空间.而容器的容积则是气体分子的活动空间与分子本身占有的体积之和,两者不能混为一谈.一般在压强不太高、温度不太低的情况下,可以近似用容积来代表体积.在国际单位制中,体积的单位为立方米(m^3),其它常用单位有升(L),换算关系为 $1 \text{ m}^3 = 10^3 \text{ L}$.

气体的压强一般用 p 表示,其宏观定义是:气体作用在容器壁单位面积上指向器壁的垂直作用力.在国际单位制中,压强的单位为**帕斯卡**,简称**帕**(Pa), $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$.其它常用压强单位有标准大气压(atm)、毫米汞高(mmHg)等,其换算关系如下:

$$1 \text{ atm} = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa} = 760 \text{ mmHg}$$



图9-2 用手托一个铁球与托一个木球,感觉到铁球比木球冷,实际上铁球和木球具有相同的温度

温度是热力学中一个非常重要和特殊的状态参量,它最初的概念基于人们对冷热程度的感觉,但是这种感觉往往是不准确的.例如,在寒冷的冬天,用手触摸一个铁球或一个木球,如图 9-2 所示,我们会明显感觉到铁球要比木球冷,但实际上它们具有相同的温度.其中的原因不在物体本身的温度,而在于两种物质的导热本领不同.由此看来不能仅仅凭借人们对冷热的主观感觉来定义温度.以下我们将对温度给出科学的定义.

人们都有这样的经验,如果将一杯热咖啡放在一盆冷水中,不久杯中的咖啡将逐渐变冷,与此同时盆中的水将逐渐变热,最终两者的冷热程度趋于一致.不难觉察,如果两者与外界没有热量交换,则它们的冷热程度将不会再发生变化.这时,我们称咖啡与水达到了**热平衡**(thermal equilibrium).

现在我们来做一个实验,将系统 A 和系统 B 分别与热源 C 接触,经过足够长的时间后, A 和 B 分别与 C 达到了热平衡,如图 9-3(a)所示.然后再将 A 和 B 相接触,这时我们观察不到 A 和 B 的状态发生任何变化,如图 9-3(b)所示,这表明 A 与 B 也已处于热平衡.这一实验规律称为**热力学第零定律**,表述为:如果两个热力学系统中的每一个都与第三个热力学系统处于热平衡,则这两个系统彼此也必处于热平衡.热力学第零定律表明:处在同一热平衡状态的所有热力学系统都具有一个共同的宏观特征,这一特征可以由这些系统的状态参量来描述,这个状态参量被定义为**温度**.因此**温度是表征系统热平衡时宏观状态的物理量**.

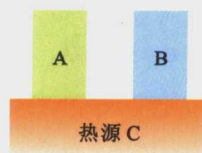
热力学第零定律的重要性不仅在于它给出了温度的定义,而且指出了温度的测量方法.但是要定量地描述温度,还必须给出温度的数值表示法——**温标**(thermometric scale).同一温度在不同的温标中具有不同的数值.在日常生活中常用的一种温标是**摄氏温标**,用 t 表示,其单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$),人们将水的冰点定义为摄氏温标的 0°C ,水的沸点定义为摄氏温标的 100°C ,并将冰点温度和沸点温度之差的 1% 规定为 1°C .在科学技术领域中,常用的是另一种温标,称为**热力学温标**^①(thermodynamic scale of temperature),也叫**开尔文温标**,用 T 表示,它的国际单位制中的名称为**开尔文**,简称**开**(K).

热力学温标的刻度单位与摄氏温标相同,它们之间的换算关系为

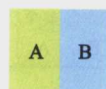
$$T/\text{K} = 273.15^{\circ}\text{C} + t \quad (9-1)$$

温度没有上限,却有下限.温度的下限是热力学温标的绝对零度.温度可以无限接近于 0K ,但永远不能达到 0K .目前实验室能够达到的最低温度为 $2.4 \times 10^{-11}\text{K}$.表 9-1 列出了一些典型的温度值.

① 比较常用的另一种温标是理想气体温标.理想气体温标基于一个实验事实,即通常情况下一定量的气体在体积不变的条件下,压强与温度成正比.在实验中,我们可以测出理想气体的压强-温度线,如图 9-5 所示.该直线与温度坐标轴交于一点,交点的温度值为 -273.15°C ,我们以 -273.15°C 作为理想气体温标的零点(后也被定为热力学温标的零点).定义摄氏温标时用了两个参考点,水的冰点(0°C)和水的沸点(100°C);而定义热力学温标时只需要一个参考点.在第 13 届国际计量大会上,将水的三相点(气态、液态、固态共存时的状态)温度定义为 273.16K (在摄氏温标中对应的温度是 0.01°C),作为热力学温标的参考点.



(a) 系统 A 和系统 B 分别与热源 C 接触,且分别与 C 达到热平衡



(b) 分别与热源 C 达到热平衡的两个热力学系统 A 和 B 相互之间也必处于热平衡

图 9-3

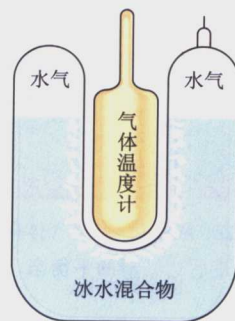


图 9-4 水的三相点,即冰、水、水蒸气同时存在,且达到平衡状态时的热力学温度定义为 273.16K

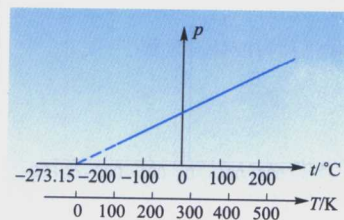
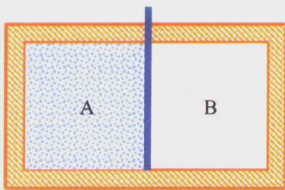


图 9-5 热力学温标与摄氏温标之间的换算关系

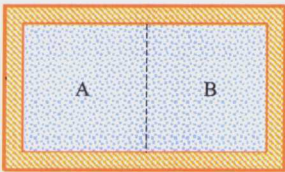
表 9-1 一些典型温度值

大爆炸后的宇宙温度	10^{39} K
实验室能够达到的最高温度	10^8 K
太阳中心的温度	1.5×10^7 K
太阳表面的温度 *	6 000 K
地球中心的温度	4 000 K
水的三相点的温度	273.16 K
微波背景辐射温度	2.5 K
实验室能够达到的最低温度(激光制冷)	2.4×10^{-11} K

* 太阳由于辐射而不断地耗失能量,可是其状态变化甚慢,可以认为处于热平衡状态。



(a) A 室充满某种气体并处在平衡态, B 室为真空



(b) 抽取隔板后, A 室气体向 B 室扩散, 最后达到新的平衡态

图 9-6

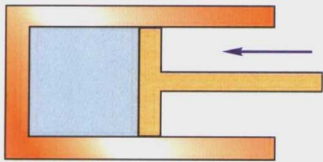


图 9-7 当活塞沿缸壁非常缓慢地移动时, 气缸内的气体系统的变化过程为准静态过程

9-1-2 平衡态 准静态过程

体积、压强和温度是描述气体宏观性质的三个状态参量. 对于一个孤立系统而言, 如果其宏观性质在经过充分长的时间后保持不变, 也就是系统的状态参量不再随时间改变, 则此时系统所处的状态称为平衡态 (equilibrium state), 人们通常用 $p-V$ 图上的一个点, 来具体地表示一个平衡态. 而不满足上述条件的系统状态称为非平衡态 (nonequilibrium state). 比如, 有一密闭孤立容器, 中间用一隔板隔开, 将其分成 A、B 两室, 其中 A 室充满某种气体, B 室为真空, 如图 9-6(a) 所示. 最初 A 室气体处在平衡态, 其宏观性质不随时间变化, 然后将隔板抽去, A 室气体向 B 室扩散. 由于气体在扩散过程中, 其状态参量没有确定的值, 因此过程中的每一中间态都是非平衡态. 随着时间的推移, 气体充满了整个容器, 扩散停止. 此时系统的宏观性质不再随时间而变化, 系统达到了新的平衡态, 如图 9-6(b) 所示.

注意: 如果系统与外界有能量交换, 即使系统的宏观性质不随时间变化, 也不能断定系统是否处于平衡态. 比如, 将铁棒的一端与高温热源相接触, 另一端与低温热源相接触, 在经过足够长的时间后, 铁棒上每一点的宏观性质不会随时间变化, 但由于铁棒不是孤立系统, 因此这不是平衡态.

平衡态是一个理想概念, 因为任何一个系统不可能不受到外界的影响, 所以状态参量严格地不随时间变化是不可能的.

当热力学系统受到外界的影响而发生能量或物质的交换时, 其状态会发生变化. 例如, 在我们对自行车轮胎充气时, 通过外界做功把空气压入车胎. 如果把车胎中的气体作为一个热力学系统, 此过程中既有能量的交换, 又有质量的交换, 气体的压强将增加, 温度会升高, 体积也会增大, 系统的状态参量发生了变化. 我们把系统状态发生变化的整个历程称为热力学过程, 简称过程. 根据过程中间状态的特征, 可以把热力学过程分为两种. 如果在过程中的每个中间状态都无限接近于平衡态, 那么这个过程称为准静态过程 (quasi-static process). 准静态过程是实际过程进行得无限缓慢的一个极限情况, 它可以在 $p-V$ 图上用一条曲线表示, 因为曲线上的每一点对应过程中的一个平衡态, 具有确定的 p 、 V 值. 若中间状态为非平衡态的过程, 则称为非静态过程. 非静态过程无法在 $p-V$ 图上用曲线表示, 因为每一个中间态都没有确定的状态参量值. 如图 9-7 所示, 气缸内充有一定量的气体, 活塞可以沿缸壁自由移动. 当活塞非常缓慢地移动时, 气体在过程中的每一个中间态都可以近似为平衡态, 具有确定的状态参量值, 所以这是一个准静态过程. 反之, 如果我们快速地移动活塞, 使系统的体积迅速变小, 则气缸中气体分子分布不均匀, 靠近活塞部分的分子数较多, 压强也较大, 无法用状态参量描述整个系统的状态, 这样, 过程中的状态为非平衡态, 过程为非静态过程.

9-1-3 理想气体状态方程

当质量一定的气体处于平衡态时,其三个状态参量 p 、 V 、 T 并不相互独立,而是存在一定的关系,其表达式称为气体的**状态方程**(equation of state),一般可表示为

$$f(p, V, T) = 0 \quad (9-2)$$

对于比较复杂的系统,状态参量之间的关系虽然找不到相应的简单表达形式,但常可以根据实验数据,用曲线或图表加以描述.

在中学物理中,我们已经知道,对一定量的气体而言,在温度不太低,压强不太大的条件下,一般气体遵守玻意耳(R. Boyle, 1627—1691)定律、盖吕萨克(L. J. Gay-Lussac, 1778—1805)定律和查理(J. A. C. Charles, 1746—1823)定律.我们把同时服从这三个定律的气体称为理想气体,这是理想气体的宏观定义,其微观定义将在下一章介绍.综合上述三个实验定律,可以得到描述理想气体的状态参量 p 、 V 、 T 三者之间关系的状态方程:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad (9-3)$$

上式主要用来描述一定量的气体在封闭系统内两个不同状态之间的关系.使用时,要注意温度的单位必须用 K,并统一压强和体积的单位.

根据阿伏加德罗定律:当一定量的理想气体在相同温度和压强下,具有相同的体积.而当温度为 273.15 K,压强为标准大气压 1.013×10^5 Pa 时,1 mol 任何理想气体的体积均为 $V = 22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3$,如图 9-8 所示.气体处于 $T_0 = 273.15 \text{ K}$, $p_0 = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时的状态称为**标准状态**(standard state).设质量为 m ,摩尔质量为 M 的理想气体从状态 (p, V, T) 经一系列变化过程到达标准状态 (p_0, V_0, T_0) ,根据式(9-3)有

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{m}{M} \frac{p_0 V_0}{T_0}$$

令 $R = p_0 V_0 / T_0$,则有

$$pV = \frac{m}{M} RT \quad (9-4)$$

式中 $R = 8.31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,称为**摩尔气体常量**(molar gas constant).式(9-3)称为**理想气体的状态方程**.

设一定量理想气体的分子质量为 m_0 ,分子数为 N ,并以 N_A 表示阿伏加德罗常量($N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$).则气体质量 $m = Nm_0$,气体的摩尔质量 $M = N_A m_0$,代入式(9-4)可得

$$p = \frac{m}{M} \frac{RT}{V} = \frac{Nm_0}{N_A m_0} \frac{RT}{V} = \frac{N}{V} \frac{R}{N_A} T$$

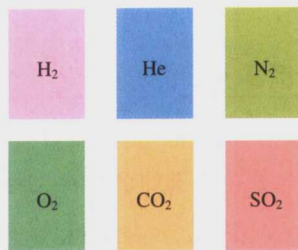


图 9-8 1 mol 任何理想气体在标准状态下的体积均为 22.4 L

令 $k = R/N_A = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$, 称为玻耳兹曼常量 (Boltzmann constant), 令 $n = N/V$ 为单位体积内的分子数, 并称 n 为分子数密度, 则有

$$p = nkT \quad (9-5)$$

上式是理想气体状态方程的另一种形式. 式(9-5)多用于计算气体的分子数密度, 以及与其它相关的其它物理量. 比如, 在标准状态下 $p_0 = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$, $T_0 = 273 \text{ K}$, 将它们代入式(9-5)可以得到标准状态下理想气体的分子数密度为 $2.69 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$. 这一量值称为洛施密特常量 (Loschmidt constant).

例 9-1

计算喷气发动机推力时, 需要知道每秒从喷口喷出多少气体. 设喷气发动机喷口的截面积 $S = 0.5 \text{ m}^2$, 高温气流喷射速度 $v = 500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 喷出的气体主要是空气, 空气的摩尔质量 $M = 2.89 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$, 测出喷口处压强 $p = 1.18 \times 10^5 \text{ Pa}$, 温度 $T = 873 \text{ K}$, 求每秒喷出多少气体.

解 每秒喷出气体的体积为 $V = Sv$, 由理想气体状态方程(9-4), 可算得每秒喷出气体的质量

$$m = \frac{pVM}{RT} = \frac{pSvM}{RT}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1.18 \times 10^5 \times 0.5 \times 500 \times 2.89 \times 10^{-2}}{8.31 \times 873} \text{ kg} \\ &= 1.18 \times 10^2 \text{ kg} \end{aligned}$$

例 9-2

一个封闭的圆筒内部被一个导热而不漏气的可移动活塞隔为两部分, 圆筒的横截面积为 S . 开始时, 活塞位于圆筒的中央, 即此时活塞两侧的圆柱长度 $l_1 = l_2$, 左右两边分别充有 $p_1 = 10^5 \text{ Pa}$, $T_1 = 680 \text{ K}$ 和 $p_2 = 2 \times 10^5 \text{ Pa}$, $T_2 = 280 \text{ K}$ 的相同气体, 问平衡时活塞在什么位置 (l'_1/l'_2 为多少)?

解 初始时刻, 活塞左右两侧的体积分别为 V_1 和 V_2 , 设平衡时左边气体的状态参量为 p'_1 、 T'_1 、 V'_1 , 右边气体的状态参量为 p'_2 、 T'_2 、 V'_2 ; 左右两部分气体的质量不变, 分别用理想气体状态方程(9-3):

$$\frac{p'_1 V'_1}{T'_1} = \frac{p_1 V_1}{T_1}$$

$$\frac{p'_2 V'_2}{T'_2} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

因为 $V_1 = l_1 S$, $V_2 = l_2 S$, $V'_1 = l'_1 S$, $V'_2 = l'_2 S$,

可得

$$p'_1 = \frac{p_1 l_1 S T'_1}{T_1 l'_1 S}$$

$$p'_2 = \frac{p_2 l_2 S T'_2}{T_2 l'_2 S}$$

平衡时 $p'_1 = p'_2$, 即

$$\frac{p_1 l_1 T'_1}{T_1 l'_1} = \frac{p_2 l_2 T'_2}{T_2 l'_2}$$

根据题意有 $l_1 = l_2$, $T'_1 = T'_2$, 代入上式得

$$\begin{aligned} \frac{l'_1}{l'_2} &= \frac{p_2 T_2}{p_1 T_1} \\ &= \frac{10^5 \times 280}{2 \times 10^5 \times 680} = 0.206 \end{aligned}$$

9-2 热力学第一定律

9-2-1 改变系统内能的两条途径 热功当量

能量可以有多种形式,力学中有动能、势能,电磁学中有电场能量、磁场能量.就一个热力学系统而言,由于内部大量分子不停息的无序运动以及分子之间的相互作用,因此也具有能量,我们把**系统内分子热运动的动能和分子之间的相互作用势能之总和称为系统的内能**(internal energy).内能的大小取决于系统的状态,是状态参量的函数.一杯咖啡的内能取决于咖啡溶液的多少以及它们的温度,与这杯咖啡的制备过程无关.两杯等量且浓度相同的咖啡,只要温度相同,不管是开水冲的,还是咖啡壶煮的,其内能相同.分子之间的相互作用势能与分子间距有关,由此推测,也应该与系统的体积有关;分子无序运动动能的平均效果与系统的温度有关(理论分析将在下一章讨论),所以一般气体的内能是温度 T 和体积 V 的函数,表示为 $E=f(T,V)$.在压强不太高,温度不太低的情况下,一般气体的性质近似于理想气体,气体分子之间的距离较大,分子之间的作用力可以忽略,因此可以不考虑分子的相互作用势能.这就是说,**理想气体的内能只与分子热运动的动能有关,是温度的单值函数**,可表示为 $E=f(T)$.

改变系统的内能可以有两种不同的方法.例如在冬天里,当我们的两只手被冻得有点僵硬时,可以搓一下手,如图 9-9 所示,或者把手放在火炉边.两种方法都可以提高手的温度.从能量守恒和转换的角度分析,前者是通过做功的方式将机械能转换为手的内能;后者则是直接通过能量传递的方式使手的内能增加.当两个温度不同的系统相接触时,能量会自发地由高温系统向低温系统传递,致使较热的系统变冷,较冷的系统变热,最后达到热平衡而具有相同的温度.这种**系统之间由于热相互作用而传递的能量称为热量**(heat),用 Q 表示.

应该注意,功和热量都是过程量,而内能是状态量,通过做功或传递热量都可以使系统的内能发生变化,因此就内能的改变而言,对系统做功与向系统传递热量是等效的.

焦耳在他的《论热功当量》一文中,介绍了一个测定热功当量的实验.如图 9-10 所示,在一个绝热的注满水的容器中装上一个带有旋转叶片的搅拌器,用两个下坠的重物带动叶片旋转.如果两重物的质量均为 m ,那么重物下降 h ,对系统所做的机械功为 $2mgh$.机械功转化为水的内能,使水温升高,相当于水吸收了热量 Q .由此得到**热功当量**(mechanical equivalent of heat)为 $J=2mgh/Q=4.16\text{ J}\cdot\text{cal}^{-1}$,现在公认的当量值为

$$J=4.18\text{ J}\cdot\text{cal}^{-1}$$



图 9-9 搓手的时候,通过克服摩擦力做功,把机械能转换为手的内能,从而使手的温度升高

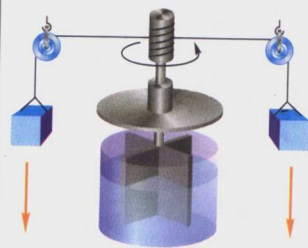


图 9-10 焦耳用于测定热功当量的实验装置

焦耳当时的热功当量实验值与现在的测量值 $4.18 \text{ J} \cdot \text{cal}^{-1}$ 相比较只差 $0.02 \text{ J} \cdot \text{cal}^{-1}$, 误差仅为 0.5% . 在 19 世纪中叶, 焦耳的实验精度竟有如此之高, 足见他对科学实验工作的严谨态度.

必须指出, 热量 Q 的单位过去用“卡”(cal). 现在的国际单位是“焦耳”(J).

9-2-2 热力学第一定律的数学描述

力学中的功能原理反映了功与机械能之间的关系. 但在热力学中, 我们并不关注系统作为一个整体的宏观机械运动, 而是考虑系统内部由于分子热运动所表现出来的宏观热现象. 包括热现象在内的能量守恒的规律称为**热力学第一定律**, 其数学表达式为

$$Q = \Delta E + W \quad (9-6)$$

其中的 Q 和 W 分别表示在状态变化过程中系统与外界交换的热量以及系统对外界所做的功, ΔE 表示内能的增量. 式中的三个物理量都有相应的符号规定: 当系统吸热时 Q 取正 ($Q > 0$), 系统放热时 Q 取负 ($Q < 0$); 系统对外做功时 W 取正 ($W > 0$), 外界对系统做功时 W 取负 ($W < 0$); 系统的内能增加时 ΔE 取正 ($\Delta E > 0$), 系统的内能减少时 ΔE 取负 ($\Delta E < 0$).

式(9-5)表明, 系统从外界吸收的热量, 一部分用于增加自身的内能, 另一部分用于对外界做功, 在状态变化过程中能量守恒. 热力学第一定律不仅适用于气体, 而且适用于液体和固体. 在运用热力学第一定律的公式时, 要注意统一式中各物理量的单位, 一般采用国际单位焦耳(J). 热力学第一定律的适用条件为: 初、末两个状态为平衡态, 定律不仅适用于准静态过程, 而且适用于非静态过程. 对微小过程而言, 可将热力学第一定律的表达式改写成微分形式:

$$dQ = dE + dW \quad (9-7)$$

使用上式时, 要求系统所经历的过程必须是准静态过程.

历史上, 曾经有人试图制造一种机器, 它可以不需要外界提供能量, 但可以连续不断地对外做功. 这种机器称为**第一类永动机**, 显然这是违反热力学第一定律的. 因此热力学第一定律又可以表述为:**不可能制造出第一类永动机**. 图 9-11 是历史上曾经有过的一架第一类永动机的模型.



图 9-11 历史上曾经有过的“第一类永动机”模型. 设计者试图利用左右两侧摆锤产生力矩的不平衡使轮子转动, 以达到永动目的. 请读者分析: 系统是否真的能始终处在不平衡状态呢?

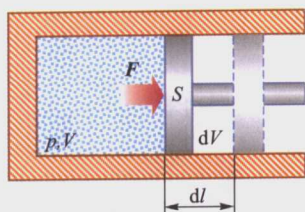


图 9-12 准静态过程中活塞移动微小距离, 系统所做的元功为 $pSdl$

9-2-3 准静态过程中热量、功和内能

1. 准静态过程中的功

如图 9-12 所示, 一带有活塞的气缸, 将气缸内的气体作为热力学系统, 并

假设系统状态的变化过程为准静态过程. 图中 F 为气体作用在活塞上的压力, p 为气体压强, S 为活塞的面积. 设在气体压力作用下, 活塞移动了 dl 距离, 从而使气体的体积增加了 dV . 在这一过程中系统对外所做的元功为

$$dW = F \cdot dl = pSdl = pdV \quad (9-8)$$

若气体体积从 V_1 变化到 V_2 , 则系统对外做功为

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dV \quad (9-9)$$

当 $V_2 > V_1$ 时, 气体膨胀, 系统对外界做功, $W > 0$; 当 $V_2 < V_1$ 时, 气体被压缩, 外界对系统做功 (即系统对外界作负功), $W < 0$. 在任何准静态过程中, 系统 (气体) 所做的功都可以用式 (9-9) 来计算.

当气体的状态变化过程为准静态过程时, 在 $p-V$ 图上可以用一条曲线来表示, 如图 9-13 所示. 由式 (9-8) 可知, 如系统的体积由 V 变化到 $V+dV$, 系统对外所做的元功 dW 在数值上就等于 $p-V$ 图上过程曲线下细窄长方形的面积; 而在气体体积从 V_1 变化到 V_2 的整个过程中, 由式 (9-9) 可知, 系统对外界所做的功, 在数值上等于整条曲线下的面积. 由此可以清楚地看到, 系统做功的大小与过程有关, 功是一个过程量.

2. 准静态过程中的热量

在热量传递的某个微过程中, 热力学系统吸收热量 dQ , 温度升高了 dT , 则定义

$$C = \frac{dQ}{dT} \quad (9-10)$$

为系统在该过程中的热容, 其单位是 $J \cdot K^{-1}$. 由于热容 C 与系统的质量有关, 因此把单位质量的热容称为**比热容** (specific heat), 记作 c , 其单位为 $J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$. 设系统的质量为 m , 则有

$$C = mc$$

由式 (9-10) 可知, 一个质量为 m , 摩尔质量 M 的系统, 在某一微过程中吸收的热量为

$$dQ = \frac{m}{M} c M dT = \frac{m}{M} C_m dT \quad (9-11a)$$

当温度从 T_1 升高至 T_2 时, 其吸收的热量为

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} \frac{m}{M} C_m dT \quad (9-11b)$$

式中的 m/M 为系统物质的量, $C_m = cM$ 称为**摩尔热容** (molar heat capacity), 其单位为 $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$, 即 1 mol 物质温度升高 (或降低) 1 K 所吸收 (或放出) 的热量. 摩尔热容的定义式为

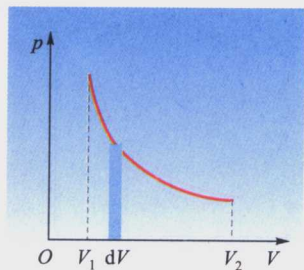


图 9-13 在准静态过程中系统所做的功在数值上等于 $p-V$ 图中曲线下的面积