

罗蔚茵 编
许煜寰

RE XUE
JI CHU

热学基础

中山大学出版社

中国物理学会
热学分会

热学
系列

热学基础

中国物理学会热学分会

热学基础

罗蔚茵 许煜寰 编

中山大学出版社出版发行

广东省新华书店经销

韶关新华印刷厂印刷

850×1168毫米 32开本 13.75印张 34.1万字

1990年8月第1版 1990年8月第1次印刷

印数：1—1000册

ISBN7-306-00293-7

O·21 定价：3.60元

内 容 简 介

本书是为适应当前对物理学人才，特别是应用物理人才的要求而编写的一本改革性教材。本书力图在保证热学基础知识系统性的前提下，增加涉及热学方面的实际应用知识，同时要求对热学领域的近代新进展有所反映，因此，在内容和体系上都有较大的改革。

本书内容共分八章，包括：温度与热量；传热学的基本知识；热力学定律；物质的热学性质及相转变；低温物理基本知识；分子热运动的统计规律；分子间的相互作用；常压和低压下气体的内输运现象等。每章末附有内容提要及精选的应用性较强的习题。

本书可作为高等学校物理类、化学类、热工类专业的基础课教材，并适用于成人教育师生及自学者，也可供科技人员，实验工作者及中学教师参考。

前 言

为了使基础课程能适应当前科学技术发展对物理人才，特别是应用物理方面人才的要求，本书编者从1983年开始编写了一套改革性的热学试验教材，在中山大学物理系进行了教学实践，并在1986年全国热学教材改革讨论会上广泛征求意见，经过多年实践和反复修改，编写出这本《热学基础》。本教材改革的目标是使“热学”这门基础课不仅能为学生学习后继的有关专业课程准备必要的基础知识，而且要使学生懂得如何将这些基础知识运用到实际工作中去，以改变以往学生认为这门基础课“空洞抽象，学了无用”的偏见。编者希望本教材在内容和体系上相对传统的普通物理热学教材有较大的突破，具有自己的特色，并和其他的热学教材一起百花齐放。本教材的特点是：

1. 力图在保证系统的热学基础知识的前提下，加强涉及热学方面的实际应用知识。例如对传热学的基本知识，物质的热学性质和相变，低温状态和低压状态的物理基础都各专列一章作较深入的介绍。在讨论某些基本概念和定律时也尽量和实际情况相结合，如物态方程不限于讨论理想气体，还涉及到真实气体、液体、固体等各类物态方程。

2. 本教材比较侧重于基础知识的实验背景，如热学定律的发现和实验验证，各热学量的测量方法和数据，有代表性的热学实验原理，以及常用的热学实验技术(低温技术、真空技术等)，都作了一定的介绍。

3. 本教材取材的深度和广度都超越了传统的普通物理热学内容，如讨论了四个热力学函数，第一类和第二类相变等，对热学

方面近年来较活跃的领域，如超导现象等也作了适当介绍。物理思想比较开阔，内容跳跃的梯度较大，但编者努力按照学生的认识规律，精心安排教材内容的体系，并提供丰富的参考资料。

编者希望这本教材的出版能起抛砖引玉的作用，并希望教材内容的改革能推动教师的教学方法和学生的学习方法的改革，以更有效地造就我国经济建设和科学发展所需要的人才。

编 者

1990年2月

目 录

第一章 温度与热量	(1)
第一节 温度 热力学第零定律	(1)
一、系统和相.....	(1)
二、状态参量.....	(2)
三、平衡态.....	(3)
四、温度和热力学第零定律.....	(4)
第二节 温度的标定	(6)
一、温度标定的原则、经验温标.....	(6)
二、理想气体温标.....	(10)
三、国际实用温标.....	(16)
第三节 温度计简介	(20)
一、定容气体温度计.....	(20)
二、温差电偶温度计.....	(23)
三、温度计的校正和使用.....	(25)
第四节 热量与热容量	(26)
一、热量概念的引入.....	(26)
二、焦耳实验.....	(28)
三、热容量与比热容.....	(30)
四、比热容的测定.....	(35)
本章要点.....	(40)
习题.....	(41)
第二章 传热学的基本知识	(44)
第一节 热传导与付里叶方程	(44)

一、付里叶方程	(45)
二、几种常见的热传导	(48)
第二节 热导率与热阻	(50)
一、热导率	(50)
二、“电模拟”方法及热阻	(53)
第三节 有内热源的热传导	(56)
一、有均匀内热源的平壁	(56)
二、有均匀内热源的圆柱体	(59)
三、一般三维导热方程的建立	(61)
第四节 对流换热	(65)
一、牛顿冷却公式	(66)
二、“电模拟”计算方法	(70)
三、有隔热层的热管道	(72)
第五节 辐射传热	(75)
一、热辐射	(75)
二、黑体与灰体 克希荷夫定律	(77)
三、斯蒂芬-玻尔兹曼定律	(80)
四、辐射传热的计算	(82)
五、用“电模拟”计算辐射传热	(87)
第六节 辐射测温	(88)
本章要点	(92)
习题	(93)
第三章 热力学定律	(96)
第一节 热力学第一定律 内能	(97)
一、准静态过程做的功	(97)
二、内能 热力学第一定律	(100)
三、系统内能变化的表示	(103)
四、有关气体内能的实验	(106)

第二节 热力学函数——焓	(110)
一、焓的引入	(110)
二、焦耳-汤姆孙效应	(112)
第三节 理想气体的热力学性质	(116)
一、理想气体的物态方程	(116)
二、理想气体的定容热容量和定压热容量	(118)
三、理想气体的准静态绝热过程	(120)
四、定压与定容热容量的比值 γ 的测定	(125)
第四节 热力学第二定律	(129)
一、热机的效率	(130)
二、卡诺循环和卡诺定理	(132)
三、热力学第二定律的表述	(135)
四、热力学温标和热力学第三定律	(136)
第五节 热力学函数——熵	(140)
一、克劳修斯不等式	(140)
二、熵的引入及热力学第二定律的数学表示	(141)
三、熵差计算举例	(146)
四、熵的统计意义	(150)
第六节 吉布斯自由能及热力学过程的判据	(154)
一、只有体积变化功的情况	(155)
二、有“有效功”的情况	(157)
本章要点	(159)
习题	(160)
第四章 物质的热学性质及相转变	(163)
第一节 物质的热学性质	(163)
一、热容量	(164)
二、压缩率	(165)
三、热膨胀系数	(168)

四、定容压强系数	(170)
第二节 物态方程	(171)
一、理想气体的物态方程	(172)
二、真实气体的物态方程	(173)
三、固体的物态方程	(177)
四、弦(金属线)的物态方程	(178)
五、液体表面薄膜的物态方程	(179)
六、电介质的物态方程	(179)
七、顺磁性固体的物态方程	(180)
第三节 相平衡与相图	(180)
一、化学势	(180)
二、相平衡与相转变的条件	(181)
三、相律	(182)
四、相图	(183)
五、相图的热力学解释	(184)
第四节 第一类相转变	(187)
一、相变潜热	(187)
二、相变的热力学关系	(191)
三、第一类相变的特点	(192)
四、克劳修斯-克拉珀龙方程	(193)
五、相变潜热的测量	(195)
第五节 临界点和气体的液化	(198)
一、临界点	(198)
二、节流膨胀液化气体	(202)
三、绝热膨胀液化气体	(210)
第六节 高阶相转变(连续相转变)	(212)
本章要点	(215)
习题	(215)

第五章 低温物理基本知识	(219)
第一节 氦的低温特性	(219)
一、 ^4He 的相变特性	(220)
二、 ^3He 的相变特性	(223)
第二节 超流性	(226)
一、二流体模型	(226)
二、第二种声	(228)
三、喷泉效应	(234)
第三节 低温的获得	(237)
一、普冷	(238)
二、深冷	(240)
三、极低温	(244)
第四节 顺磁盐的绝热去磁	(248)
一、热力学的分析	(249)
二、绝热去磁致冷装置	(252)
第五节 低温温度的测量	(254)
一、实用温标的定点	(254)
二、低温测量用的实用温度计	(256)
三、磁性温标(顺磁盐温度计)	(258)
第六节 超导电性	(260)
一、超导电性和迈斯纳效应.....	(260)
二、超导体与正常导体之间的相变热力学讨论.....	(265)
三、超导二流体模型及BCS理论简介	(269)
四、超导隧导效应及超导应用的展望	(272)
五、高 T_c 超导材料	(274)
本章要点.....	(276)
习题.....	(276)
第六章 分子热运动的统计规律	(279)

第一节 物质分子运动论的基本观点及其发展	(279)
一、分子运动论的发展简介	(279)
二、分子运动论的基本观点	(280)
第二节 气体压强和温度的统计意义	(282)
一、理想气体的微观模型	(282)
二、理想气体的压强公式及其统计意义	(283)
三、温度的统计意义	(288)
第三节 气体分子速率的统计分布	(289)
一、气体分子速度的测定	(290)
二、气体分子速率的统计分布	(292)
三、最可几速率	(294)
四、平均速率和方均根速率	(297)
第四节 麦克斯韦速度分布和速度空间	(300)
第五节 动能分布函数	(303)
第六节 玻耳兹曼分布律	(308)
第七节 能量均分定理	(311)
一、能量均分定理	(311)
二、理想气体的内能和热容量	(313)
第八节 布朗运动和热涨落现象	(316)
一、布朗运动和无规行走的距离	(316)
二、涨落现象	(320)
本章要点	(323)
习题	(324)
第七章 分子间的相互作用	(327)
第一节 分子间的相互作用力	(327)
第二节 分子力对气体状态方程的影响	(331)
一、关于压强的修正项	(332)
二、关于体积的修正项	(333)

三、范德瓦尔斯力的本质	(336)
第三节 实际气体的内能和焦-汤效应的解释	(337)
一、实际气体的内能	(337)
二、焦-汤效应的解释	(338)
第四节 液体的分子模型	(341)
第五节 液体的表面张力	(345)
一、表面张力系数	(346)
二、表面层内的分子力	(347)
第六节 晶体的结合力和结合能	(349)
本章要点	(354)
习题	(355)
第八章 常压和低压下气体的内输运现象	(357)
第一节 气体内输运现象的宏观规律	(357)
一、牛顿粘滞定律	(357)
二、斐克扩散定律	(360)
三、扩散方程	(362)
第二节 分子的碰撞和自由程	(363)
一、碰撞截面	(364)
二、平均自由程	(365)
三、分子运动的平均相对速度	(368)
第三节 气体内输运现象的微观机理	(369)
一、决定内输运过程的基本因素	(369)
二、粘滞现象的微观解释	(370)
三、热传导的微观解释	(375)
四、扩散现象的微观解释	(376)
第四节 关于内输运现象微观解释的进一步讨论	(378)
一、参加输运的分子数	(378)
二、分子通过截面时的平均自由程	(382)

第五节 稀薄气体的内输运现象.....	(387)
一、稀薄气体的粘滞性 粘滞态和分子态	(387)
二、稀薄气体的热传导	(393)
三、气体的吸附现象	(394)
第六节 真空技术基本知识.....	(397)
一、真空状态和真空度	(398)
二、真空的获得	(399)
三、真空的测量.....	(405)
本章要点.....	(413)
习题.....	(415)
参考书目.....	(418)
附录 I 热量的单位.....	(420)
附录 II 真空度和托.....	(422)

第一章 温度与热量

在力学中，描述一个力学系统的平衡状态或运动，只需要用长度、质量和时间三个基本量，力学中其他重要的物理量都可以用这三个基本量来表示。热学所要涉及的是一系列热效应或热现象，为了描述这些热效应或热现象，还需要第四个基本量，这就是温度。

本章主要介绍涉及热现象的系统、状态及热平衡的概念。温度是研究热学系统的基本物理量之一，我们将介绍温度的概念和温度是如何标定的，以及温度的测量。本章还将讨论有关热的其他物理概念，介绍物质热容量的测量，指出热量是传递着的能量。

第一节 温度 热力学第零定律

一、系统和相

系统是我们要考察的那部分物质世界。系统以外的那部分，我们称之为**周围介质**(或外界，或环境)。有时也将系统称为**体系**。可以与周围介质交换物质和能量的系统，称为**开放系统**。可以与周围介质通过作功和传热交换能量，但不交换物质的系统，称为**封闭系统**。不与周围介质发生任何交换的系统，称为**孤立系统**。

一个系统内物理和化学性质均一的部分叫做**相**，例如一个液体连同它的蒸气可以认为是两相系统。

如果研究的那部分物质世界(或者说,物质和能量的聚集体)的任何性质的变化都伴随有热效应,这种变化便叫**热力学过程**。发生热力学过程时,系统的质量和能量两者都可能会转移而导致系统内部的变化以及系统周围环境的变化。在研究热力学过程中,系统的选取是很重要的。比如说,一个系统是盛有压缩空气的金属桶,那么,这个系统(以及它的边界)是包括还是不包括桶的金属壁?回答是:这取决于分析的目的。如果目的是建立气体的物理性质之间的关系,例如确定在体积不变的情况下,气体的压强怎样随着温度改变,纯粹只涉及气体的行为,那么金属壁就不算在系统之内。但是,如果要确定使桶内气体升高一定的温度需要从外部加多少热,那么金属壁和气体的热容量都必须考虑,系统的边界则必须包括金属壁,因为热量是通过金属壁而达到气体的。在实际的实验室条件下,不管系统的边界取在哪里,容器壁多半是起作用的,往往必须把它计算在内。

二、状态参量

在研究一个系统的变化过程时,还必须确定变化开始或终结时系统的状态,即**初态**或**终态**。系统的状态可以用系统本身的一些可表征宏观性质的物理量来描述。例如若系统是一些气体,就可以用气体的成份(包括质量)、体积、压强和温度等来描述这一系统的整体性质(宏观性质)。这些物理量(成份、体积、压强、温度等)一旦确定之后,系统的状态就能够确定。这些用来描述系统状态的物理量就叫**状态参量**,或者称为**宏观坐标**。

通常用来作为系统的宏观坐标的物理量,都具备以下几个共同特征:

- (1) 它们不涉及与物质结构有关的特殊假设。
- (2) 描述宏观状态时,一般尽可能用少数几个参量。

(3) 这些参量通常是可以直接测量的量。

至于选用哪几个参量才能对系统的状态作确切的描述，这是要由系统本身的性质来决定的。

对每一种纯物质来说，它的几个状态参量(例如对质量为 m 的某物质，它占有的体积 V ，所处的压强 p 和温度 T)之间会存在着一定的关系，这种关系叫做该物质的**状态方程**，用数学语言来描述为

$$f(m, V, p, T) = 0 \quad (1-1)$$

这个函数的精确形式多半是很复杂的，但是我们往往只要知道某一些量随其他的量是如何变化的，或者另一些量是保持恒定的，就可以解决问题。关于状态方程的问题，留待以后再详细讨论。

三、平衡态

本章所讲的状态主要指的是平衡状态。平衡状态是系统状态的一种特殊情形。**在不受外界影响的条件下，系统的宏观性质达到各部分均匀且不随时间变化的状态，称为平衡态。**

经验证明，一个孤立的系统总会趋向一个特别简单的终态——平衡态，此时系统的宏观性质是恒定的，而且在空间上是均匀的(假定系统具有单一相)。系统处于平衡态时，各个宏观坐标(状态参量)具有确定的值。

平衡态是指系统的宏观性质不随时间变化，从微观的角度看，即使在平衡态下，组成系统的分子仍在不停地运动着，只不过分子运动的平均效果不随时间改变，而这种平均效果的不改变，在宏观上就表现为系统达到了平衡态。因此，热力学中的平衡指的是动态平衡(或称热动平衡)。实际上，正是由于微观上分子(或原子)的不停运动，孤立系统才会趋于平衡态。