

高等师范专科学校交流教材

热 学 基 础

刘昌年 尹殿云 任宝祥 编

(上 册)

高等师范专科学校教材

热 学 基 础

刘昌年 尹殿云 任宝祥编

再 版 前 言

一、本书问世两年以来，同行同志寄来了许多宝贵意见，肯定这本书的特色和优点，提出批评和改进意见，鼓励我们修订再版。编者得到的最大帮助是进一步明确了，作为师专使用的热学教材，应该在阐述概念上多下功夫。掌握物理概念，这不仅对于培养学生建立物理思想和掌握物理方法起决定作用，还在于在中学物理的热学部分教学中必须使学生掌握鲜明的物质的分子结构图象、热的本质，温度和内能的概念，以及热力学定律的实质等，从而提高这一部分在培养中学生思维能力中所起的作用。

二、必要的课后思考题和习题是为掌握物理概念、建立物理思想和掌握物理方法所必须的，再版中思考题和习题有所增加。

三、本书第三篇物性学基础部分，为了适应培养中学物理教师的要求，涉及内容较多，以致比较庞杂，讲述不够系统也不能深入。建议教师从（1）范德瓦耳斯气体是比理想气体更接近实际气体的模型；（2）液体是介于气体和固体间的分子聚集状态；（3）表面张力和毛细现象；（4）相变和相变潜热等四个方面进行讲述，其余内容可作为学生阅读材料。

四、再版虽然消除了一些缺点和错误，改写了部分内容，但是一定还存在不妥之处和一些错误，敬请同志们指正。

五、我们对在编写和修订中曾提出宝贵意见的同志表示感谢，对鼓励和支持我们再版的同志表示感谢。

编 者

1984年8月

一 版 前 言

本书是根据我国二、三年制高等师范专科学校物理专业教学计划的基本精神，按照二、三年制师专《热学》教学大纲的要求，结合编者几年来讲授热学的体会，并参考了国内外的一些参考书写成的。

本书编写的特点是：

一、重视热学的实验基础，明确建立模型的重要意义，并指出一定模型的局限性。

二、加强在基本概念讲述中的连贯性和逻辑性，特别对于温度概念的讲述贯穿全部内容，逐步深入。

三、整个内容的中心是热现象的宏观理论——平衡态热力学。气体分子运动论以气体为对象揭示热现象的微观机理，引入了处理体系的统计方法。由气体的分子结构进而讲述固体和液体的微观结构，运用热力学的基本原理来研究物质的一些重要的性质以及相变的规律。

四、为了讲述物体的一些重要性质，特别是在等温过程中的一些性质，介绍自由能这一状态函数和它的应用会带来很多的方便。

五、本书适当联系热传递、热机、降水等实际知识，定性地介绍热学在现代科学技术中的应用以及它的发展，并把它们作为培养初中物理教师的必需内容。

六、本书安排较多的例题。在每章之后将习题和思考题合并列为问题，问题的数量和顺序密切与课堂教学相配合。

根据以上特点，本书适用于师范专科学校物理专业的热

学教学，也可以作为中学教师进修之用。

本书由镇江师专刘昌年、泰安师专任宝祥，北镇师专尹殿云等人集体编写，总论和第一章由任宝祥同志执笔；第二章和第三章由尹殿云同志执笔；第四章至第八章由刘昌年同志执笔；全书写成后由刘昌年统一审定。习题主要由镇江师专严仲强编选。由于我们的水平有限，教学经验不足，书中错误在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

1982年6月

目 录

总 论	1
§ 1 热学的研究对象和方法	1
§ 2 热学发展简史	2
§ 3 热力学状态 状态参量 平衡态	5
§ 4 温度和温标 热力学第零定律	8
§ 5 状态方程 理想气体 理想气体状态方程	14
总论 问题	16

第一篇 气体分子运动论

第一章 气体分子运动论的基本概念	18
§ 1 物质分子运动论的实验基础	18
§ 2 理想气体的微观机制 理想气体的压强公式	23
§ 3 气体分子平均平动动能和温度的关系	28
§ 4 基本公式的一些应用	31
第一章 问题	34
第二章 气体分子按速率和能量的统计分布律	37
§ 1 气体分子速率的实验测定	37
§ 2 麦克斯韦速率分布律	43
§ 3 麦克斯韦速度分布律	60
§ 4 玻尔兹曼分布律 重力场中微粒按高度的分布	71
§ 5 能量按自由度均分定理	75
§ 6 气体的内能 理想气体的内能和热容量	80
附录: 误差函数 有关定积分 误差函数表	84

第二章 问题	88
第三章 气体内迁移现象	92
§ 1 气体分子的碰撞和平均自由程	92
§ 2 粘滞现象	99
§ 3 热传导现象和扩散现象	108
§ 4 真空知识	116
附录 I 理想气体内部的压强	122
附录 II 分子束矢量及其应用	124
第三章 问题	137

第二篇 热力学基础

第四章 热力学第一定律	140
§ 1 热力学过程 功和热量	140
§ 2 态函数内能 热力学第一定律	152
§ 3 热容量 焓	155
§ 4 热力学第一定律对理想气体的应用	163
§ 5 循环过程与卡诺循环	174
§ 6 热机和致冷机的循环	188
第四章 问题	199
第五章 热力学第二定律	208
§ 1 热力学第二定律	208
§ 2 热现象过程的不可逆性	213
§ 3 卡诺定理	218
§ 4 热力学温标	225
§ 5 熵 熵增加原理	229
§ 6 自由能	254
§ 7 热力学第二定律的统计意义	260
第五章 问题	268

总 论

§ 1 热学的研究对象和方法

热学是物理学的一个重要分支，它是研究物质热现象的理论。

在自然界发生的多种现象中，有一些现象如物质的热膨胀、熔解与凝固、蒸发与凝结、气体被压缩温度升高、蒸汽机中水蒸汽推动活塞作功等等，它们宏观上都是和温度有关的物理性质的变化；微观上都是和分子无规则运动相联系的物质系统的状态变化（这里所说的状态变化是指该物质存在形式发生的任何变化，而不专指气、液、固三种物态间的变化）。这些变化统称为热现象。

研究热现象有两种方法：一种是直接通过观察和实验，去总结热现象的规律性，这种方法叫热力学方法，用热力学方法得到的理论，是热现象的宏观理论，叫热力学。另一种方法是从物质的微观结构出发，即从分子、原子的运动和它们之间的相互作用出发，去研究热现象的规律，这种方法叫统计物理学方法，用这种方法得到的理论是热现象的微观理论，叫统计物理学。

用热力学方法和统计物理学方法研究热现象，各有所长，各有所短，两者互相补充，相辅相成，它们的巧妙结合，大大丰富了人们对热现象的认识。

物质分子无规则运动叫热运动。热运动和其它形式的运

动如机械的、电磁的、化学的等等相互转化的规律，是热力学研究的一项重要内容，而这种转化的机制则需要由统计物理学加以揭示。

气体分子运动论是统计物理学的组成部分。由于使用了简单和鲜明的理想气体模型和其它气体模型（如范德瓦耳斯气体模型等），使它成为统计物理学最先发展起来的并最易为人们所接受的部分。

本课程只讨论热力学的最基本的部分和气体分子运动论，而不能全面阐述热力学理论及其应用，也不能系统地讨论统计物理学。

§ 2 热学发展简史

从远古时代起，由于火的广泛应用，人们就逐渐认识了许许多多的热现象。但是人们在生产和生活中对热的利用最早只限于取暖、照明、煮熟食物等，到利用热来制造陶器、制作金属工具兵器则是较晚的事了。人们关于热的知识的积累缓慢地进行着。直到十八世纪初资本主义萌芽时期，由于社会生产力有了很大的发展，生产中遇到的热的现象增多了，因而提供了大量的关于热的知识，这就大大地促进了人们对于热现象的研究。当时生产上需要动力，人们产生了利用热来获得机械功的企图。1714年华伦海脱(*Fahrenheit*)改良了水银温度计，并制定了华氏温标。生产的需要，知识的积累和量度工具的创造使热现象的研究逐渐形成了一门科学——热学。1705年纽寇门(*Newcomen*)等制造出第一台可以连续工作的蒸汽机，经十八世纪前半叶，特别是十八世纪六十年代瓦特(*Watt*)的改进，产生了划时代的往复蒸

汽机。随着蒸汽机在生产上的广泛应用，研究工作物质水蒸汽和提高蒸汽机效率的工作便在当时的物理学者和工程师中间成为最迫切的事了。

在热学中出现突破性的研究成果是在十九世纪上半叶。1842年德国医生迈耶 (Wayer) 提出能量守恒的学说，他认为热是一种能量，能够和机械能相互转化。迈耶还从空气定压比热与定容比热之差推算出热功当量。英国人焦耳 (Joule) 毕生作了大量的实验，以各种方式测定了热功当量。正如在力学中把功看作系统机械能变化的量度一样，这些实验都揭示出做功还可以改变系统另一种形式的能量——内能。焦耳进一步研究了气体节流膨胀，也就是今天称做焦耳——汤姆孙 (Thomson) 效应的现象，从而对气体的内能有了更加全面的认识。就这样热学第一定律建立起来了，这是一个包括功、热量和内能的能量守恒定律。

热力学第一定律揭示了系统吸取热量可以做功的规律。但是，在十八世纪，蒸汽机的效率仅有百分之几，这就意味着消耗大量的燃料而仅能获得很少的机械功。仅靠改善机械结构，减少摩擦损失和减少热量散失并不能有效地提高蒸汽机的效率。提高热机效率的要求进一步推动了热力学理论的发展。工程师卡诺 (Carnot) 研究了理想热机的效率，提出卡诺定理 (1824年)。克劳修斯 (Clausius) 于1850年发现热传递过程的不可逆性；开尔文 (Kelvin，即汤姆孙) 于1851年发现功转化为热过程的不可逆性。人们对于不可逆过程的研究导致发现了能量传递和转化进行方向的普遍规律——热力学第二定律。

热力学第一定律和第二定律奠定了热力学的理论基础。

在热力学发展的同时，分子运动论也迅速发展起来。最

早，分子运动论的研究是为了探讨热的本质。在1744—1747年罗蒙诺索夫（Ломоносов）在《论热与冷的原因》中提出热是分子运动的表现。1797年伦福德（Rumford）观察钻炮膛时不断生热的现象，首次从实验肯定热来源于运动。

十九世纪中叶，克劳修斯、麦克斯韦（Waxwell）玻耳兹曼（Boltzmann）等人对气体分子运动论的研究作了大量的工作。克劳修斯第一次清楚地说明分子运动规律的统计意义，麦克斯韦导出了气体分子的速度分布律，玻耳兹曼在分子速度分布律中引进重力场的作用，克劳修斯还引进分子运动自由程的概念。

1870年以后建立了麦克斯韦—玻耳兹曼统计法。1902年吉布斯（Gibbs）建立了系综的理论。从此经典统计物理的理论和方法日臻完善起来。

1900年普朗克（Planck）提出了辐射能量子的概念，1924—1926年发展起来量子力学，这些新的理论的出现，为量子统计物理学的建立奠定了基础。与此同时，在热学的宏观理论方面，非平衡态热力学也开始发展起来。

回顾热学的发展简史，使我们清楚地认识到，一切自然科学都是在生产力发展的推动下发展起来的，而自然科学的发展反过来又会推动生产力的进一步发展。在科学技术高度发达的今天，热学仍占有非常重要的地位。热学中的许多新兴部门，象非平衡态热力学、量子统计等，它们的理论和方法，已经广泛应用于气象学、低温物理、固体物理、表面物理、等离子体、物质结构，空间科学等尖端科学的研究之中。

§ 3 热力学状态 状态参量 平衡态

一、热力学状态

热力学所研究的物质系统有一定的存在形式，例如容器中的气体在某一时刻具有一定的体积，而在这个体积内又有一定的压强分布和温度分布；在气态物质参加的化学反应中，某一时刻反应物和生成物具有一定的组分；在电场中的固态物质具有一定的极化强度，等等。物质系统在某一时刻由一系列的物理量所描述的一定的存在形式称作一个热力学状态，简称状态。

二、状态参量

用以描述一个状态的宏观物理量叫做状态参量。

假设我们所研究的系统是贮在气缸中的一定质量的化学纯的气体。如果不计外界影响，则气体的压强保持均匀和恒定，若对气体加热，则气体的体积将发生膨胀。反之，若加热时使气体的体积保持不变，则气体的压强就会增大。由此可见，一定量的气体的体积和压强是可以独立改变的量，就是说，对于一定的体积，压强可取任意值，而对于一定的压强，体积可取任意值。所以为了描述这个气体的状态就要同时给出体积和压强来。体积和压强就是描述上述气体的状态参量。

象气体、液体和各向同性固体的体积，液体的表面积等这类描述物质几何性质的参量，叫做几何参量。而气体的压

强，液体的表面张力系数等描述物质力学性质的参量叫做力学参量。此外，对于混合气体，还有表征其化学组分的参量叫做化学参量；对于处于电场和磁场中的物质，有描述其电磁性质（如电源提供的电量和它的电动势、介质的磁化强度，极化强度等）的参量，叫做电磁参量。

总起来说，在一般情况下，我们需用几何参量、力学参量、化学参量和电磁参量等四类参量来描述热力学系统的状态。

三、平衡态

在不受外界影响或外界影响不改变的条件下，热力学系统总是自发地趋于平衡状态（简称平衡态）。平衡态的特征是：（1）在系统中一切宏观变化停止，表征该状态的参量都不随时间而变化；（2）已转变到平衡态的系统将一直停留在这个状态，直到外来影响破坏了这个状态。所谓不受外界影响或外界影响不变，指的是系统处于恒定的外力场中（达到力学平衡），并且和外界没有其它相互作用（没有能量交换）。不符合以上条件的状态是非平衡态。

看一些例子：

1、一均匀金属棒的一端插在冰水混合物($1\text{atm}, 0^\circ\text{C}$)中，另一端与 200°C 恒温热源接触（图0—1），经过一段时间后，棒上任一点（如A点）的温度虽然和其它各点（如B点C点）的温度不同，但都不随时间变化了。这符合“各参量都不随时间而变化”的条件，可是金属棒和外界有热量交换，因此，这个金属棒作为热力学系统不处于平衡状态。

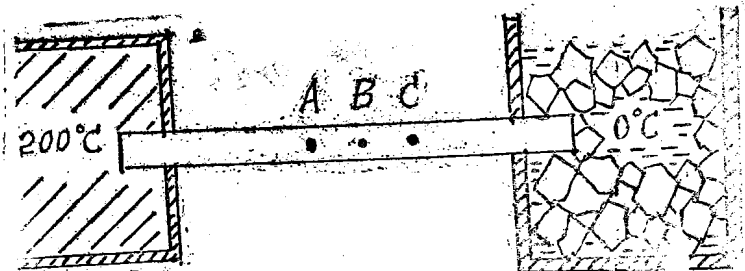


图 0—1

2、一光滑斜面 and 置于其上自由滑动的金属块构成一个系统。如果斜面和金属块的温度保持恒定且相同，它们之间就没有能量交换。但力学平衡未满足。斜面和金属块作为热力学系统，不处于平衡态。

3、用透热隔板将绝热容器分隔为 A 、 B 两部分（图 0—2）。 A 中充一种气体， B 中充另一种气体，经过一段时间， A 、 B 有同一温度。

将隔板抽去，温度虽然是一致的但是化学组分的分布（也许还有压强的分布）将随时间变化。随之，温度也可能发生变化。显然当隔板刚抽去时，系统即不处于平衡状态。

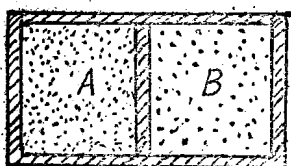


图 0—2

4、若在图 0—2 的 A 中充一气体， B 中充比较稀薄的同一气体，当抽去隔板时， A 中气体冲入 B 。整个系统虽无

外界影响，但有内部的能量转化，因而系统不处于平衡态（也可以把 A 看成 B 的外界； B 看成 A 的外界，仍然属于外界做功的情形）。

5、在重力场中的大气柱（图0—3），竖直方向上各点压强不同，但都不随时间变化。压强差 $p_2 - p_1$ 为重力压强 ρgh 所平衡（力学平衡）。重力场的存在是外界作用，但不作宏观的功。静止而温度均匀的大气柱处于热力学平衡。

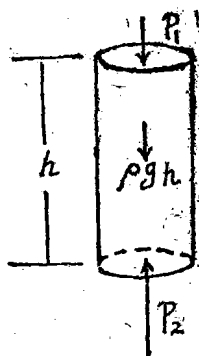


图0—3

从微观结构来看，系统达到热力学平衡态时，宏观性质虽然保持不变而大量分子的无规则运动永远进行着。从这个意义上说来，热力学平衡是热动平衡，它是运动的一种特殊形式。在本书中除了少数场合如讨论气体内迁移现象时外，我们只讨论系统的热力学平衡态。

§ 4 温度和温标 热力学第零定律

一、 温度 热力学第零定律

上节中提到的四类参量都不是热学所特有的，它们都不能直接表征系统的冷热程度。因此，在热学中，还需要引进一个新的物理量，这个物理量就是温度。

这里说“不能直接表征系统的冷热程度”，不是说“不

能表征系统的冷热程度”。因为，只要状态确定，状态参量确定，温度就确定了。

我们仍举气缸中气体为例。一定质量的气体，由体积和确定它的状态。如果保持压强不变，例如与活塞外的大气压 p_0 保持平衡，即 $p=p_0$ ，则在加热时体积 V 变化，显然体积的大小就间接表征了气体的冷热程度。实际上这就是盖·吕萨克定律所总结的经验事实，也是定压气体温度计所根据的原理。

假设有两个热力学系统，原来各处在一定的平衡态。现在使它们互相接触并能发生热传递。一般说来，接触后两个系统的状态都将发生变化，但经过一段时间后，两个系统的状态便不再发生变化，这反映出两个系统最后达到一个共同的平衡态。由于这种平衡态是两个系统在发生热传递条件下达到的，所以叫做热平衡。已经达到热平衡的几个物体即使分离后再行接触仍能保持热平衡（即不再发生热传递）。可见接触只是使未达到热平衡的系统达到热平衡的一种手段，而热平衡的本身并不要求接触。实验证明：如果 A 、 B 两物体各与物体 C 达到平衡，则 A 、 B 亦达到热平衡。显然，处于热平衡的物体间具有一个共同的性质，表征这个性质的物理量就是温度。

以上所说：如果 A 、 B 两物体各与物体 C 达到热平衡，则 A 、 B 亦达到热平衡，这一经验事实被称为热力学第零定律，它是建立温度概念的基础。

应注意，热平衡和热力学平衡（或称热动平衡）是不同的概念。利用热平衡建立温度概念，反过来，温度一致就成为达到热平衡的标志。所以热平衡又称温度平衡。

热力学平衡要求除达到热平衡外，还要达到力学平衡和

化学平衡。

二、温标

温度的数值表示法叫温标。

建立一种温标，需要包含三个要素：选择某种物质（叫做测温物质）的某一随温度变化的属性（叫做测温属性）来标志温度；选定固定点；对测温属性随温度的变化关系作出规定。上述三要素中，第一和第三点，是建立温标的依据，第二点是温度的标度方法。

例如，普通水银温度计上采用的摄氏温标（Celsius temperature scale），是以水银为测温物质，以水银的体积随温度变化的性质为测温属性；选取水在1个标准大气压下的冰点为一个固定点，规定其温度为零摄氏度（ 0°C ），选取水在1个标准大气压下的汽点为另一个固定点，规定其温度为一百摄氏度（记作 100°C ）；规定水银的体积随温度作线性变化，因此温度计上的刻度是均匀划分的，即把温度计上 0°C 和 100°C 两刻度之间的距离等分为100分，每一分是1摄氏度（ 1°C ），这种刻度方法还可外推至 0°C 以下和 100°C 以上。

采用摄氏温标的温度计很多，除了水银温度计之外，还有酒精温度计、定容气体温度计、铂电阻温度计、铂—铑热电偶温度计等等。

需要指出的是，上述温度计虽然都是采用的摄氏温标，但是这些用不同的测温物质的不同测温属性建立起来的摄氏温标，除了冰点和汽点按规定相同外，其他温度的数值并不严格一致。这是因为不同物质的各种属性随温度的变化关系不会是完全一样的，如果规定了某种物质的某一属性随温度作线性变化，从而建立了温标，并以此为标准来测量其他物