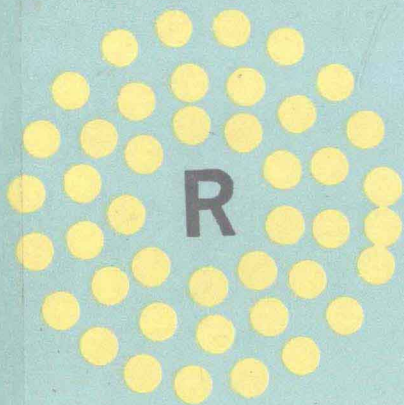


石油大学出版社

热学

等学校教学用书



主 编 栾宝芝

副主编 尹殿云 阎正武

高等学校教学用书

热 学

主 编 栾宝芝

副主编 尹殿云 阎正武

石油大学出版社

鲁新登字 10 号

内 容 提 要

本书是根据 1989 年国家教委颁发的二年制师专热学大纲编写的。全书共分七章,内容包括:热学的基本概念、气体动理论、气体内的输运过程、热力学第一定律、热力学第二定律、实际气体、液体、固体和相变。

本书可作为高等师范院校、师专、教育学院物理专业的教材和函授教材,亦可供中学教师参考。

热 学

栾宝芝 主编

*

石油大学出版社出版
山东省东营市
山东省新华书店发行
滨州激光照排印刷厂排版
石油大学印刷厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 9.875 印张 266 千字
1991 年 12 月第 1 版 1991 年 12 月第 1 次印刷
印数 1—3200 册
ISBN7-5636-0208-9/0₄·09

定价 3.75 元

前 言

本书是山东省教委组织编写的高等师范院校教材,是按1989年国家教委颁发的二年制师范专科学校物理专业热学大纲编写的。全书共分七章,内容包括:热学的基本概念,气体动理论,气体内的输运过程,热力学第一定律,热力学第二定律,实际气体、液体和固体,相变。讲授全书约70学时左右。

本书突出了师范院校的教学特点,注重基本概念和基本知识的阐述,强调物理规律的适用条件和范围,力求做到内容简明、概念准确、语言简练、深入浅出。本书在编写过程中,广泛吸收了国内外现行同类教材的优点,注意引进最新科研成果,并融入了编者多年从事本课程教学的经验和体会。在内容编排上,注意便于教学,融师范性、实用性、高教性为一体。

本书还注意突出探索物理规律的科学思维方法,注重能力培养和智力开发。每章章首有内容介绍,章末有内容结构。每章章后附有适量的思考题和习题。该书采用了国家审定的“物理学名词”和国务院1984年颁布的法定计量单位。

由于编者水平所限,书中不妥之处在所难免,恳请读者提出宝贵意见。

编审成员

主 编 栾宝芝

副主编 尹殿云 阎正武

编 者 (以姓氏笔画为序)

尹殿云 朱金波 曲洪杰 李义荣

李在祥 陈 军 张怀德 梁志强

栾宝芝 高仲明 高连歌 阎正武

曹云勤 韩月奎

目 录

引言	(1)
§ 0.1 热学研究的对象和方法	(1)
§ 0.2 热学的形成和发展	(4)
第一章 热学的基本概念	(7)
§ 1.1 平衡态 状态参量	(7)
§ 1.2 温度	(10)
§ 1.3 物态方程 理想气体状态方程	(17)
思考题	(28)
习题	(29)
第二章 气体动理论	(32)
§ 2.1 气体动理论的实验基础	(32)
§ 2.2 理想气体的压强	(39)
§ 2.3 气体分子速率的实验测定 速率分布函数	(44)
§ 2.4 麦克斯韦速率分布律	(51)
§ 2.5 温度的微观实质	(56)
* § 2.6 麦克斯韦速度分布律	(60)
§ 2.7 玻耳兹曼分布律 重力场中微粒按高度的分布	(63)
§ 2.8 能量均分定理	(66)
§ 2.9 气体的内能 理想气体内能和热容	(70)
思考题	(77)
习题	(79)
第三章 气体内的输运过程	(83)
§ 3.1 气体分子的平均自由程	(83)

§ 3.2	粘滞现象的宏观规律及微观解释	(8 7)
§ 3.3	热传导现象和扩散现象	(9 2)
* § 3.4	真空技术和稀薄气体	(9 8)
	思考题	(107)
	习题	(107)
第四章	热力学第一定律	(109)
§ 4.1	热力学过程 功	(109)
§ 4.2	热量与传递	(113)
§ 4.3	内能 热力学第一定律	(120)
§ 4.4	热容 焓 理想气体的内能	(123)
§ 4.5	热力学第一定律对理想气体的应用	(127)
§ 4.6	循环过程和卡诺循环	(138)
§ 4.7	热机和致冷机	(147)
	思考题	(157)
	习题	(158)
第五章	热力学第二定律	(164)
§ 5.1	热力学第二定律	(164)
§ 5.2	实际宏观过程的不可逆性	(168)
§ 5.3	卡诺定理	(171)
§ 5.4	热力学温标	(174)
§ 5.5	熵	(178)
§ 5.6	熵增原理	(182)
§ 5.7	热力学第二定律的统计意义	(185)
§ 5.8	热力学定理综述	(190)
* § 5.9	远离平衡态的非平衡过程研究简介	(193)
	思考题	(197)
	习题	(198)
第六章	实际气体 固体 液体	(201)
§ 6.1	实际气体等温线	(201)

§ 6.2	范德瓦耳斯方程	(205)
§ 6.3	实际气体的内能 焦耳—汤姆孙效应	(216)
* § 6.4	气体液化 低温的获得	(222)
§ 6.5	晶体的宏观特征及微观结构	(225)
§ 6.6	物质的热性质	(236)
§ 6.7	液体的微观结构 液晶简介	(240)
§ 6.8	液体的分子现象	(245)
* § 6.9	溶液中的输运过程	(259)
	思考题	(266)
	习题	(267)
第七章	相变	(270)
§ 7.1	单元系一级相变的普遍特征	(270)
§ 7.2	气液相变	(273)
§ 7.3	克拉珀龙方程	(282)
§ 7.4	固液相变	(286)
§ 7.5	固气相变 三相图	(289)
* § 7.6	大气中的含水	(291)
* § 7.7	物质的第四态和第五态	(296)
	思考题	(299)
	习题	(300)
	习题答案	(303)
	参考书目	(308)

引 言

§ 0.1 热学研究的对象和方法

一、热学研究的对象

热学是物理学的一个重要分支,它研究的对象是热现象的规律,也就是物质的热运动与其他运动形式之间相互转化所遵循的客观规律。

在自然界发生的各种物理现象中,有一些现象如物体的热胀冷缩、溶解和凝固、蒸发与凝结、气体被压缩温度升高、导体受热后电阻变大、钢件热处理后硬度发生变化、液氮在温度降低时具有超流动性等等。这些凡与温度有关的物理现象统称热现象。

我们知道,各种物体都是由大量粒子(分子或其他粒子)构成的,这些粒子不停地作无规运动。人们把物体内部大量粒子的无规运动叫热运动。正是由于这种微观的热运动才导致宏观的热现象,可以说热运动是热现象的微观实质,而热现象是热运动的宏观表现。

热运动是物质运动的一种基本形式。在热运动中,个别粒子的运动属于机械运动,运用力学的基本概念,服从力学的基本规律,而大量粒子的热运动虽然包含着机械运动,但是已不能将其归结为机械运动,它是一种更复杂的运动状态,因而遵循着新的运动规律。在这里,如果试图去逐个地研究个别粒子的机械运动,一方面由于粒子数目太多而不可能做到,更重要的是,即使求得了每个分子的运动情况,也解决不了我们的问题,因为量变已引起了质变,所以,必须引入新的概念和新的研究方法。

在物理学中,通常根据物质层次的不同而把物理现象分为宏

观现象和微观现象。宏观现象,一般是指空间线度大于 $10^{-8} \sim 10^{-6}$ m,由大量粒子构成的系统整体以及场在大范围内所表现出来的现象。如气体的膨胀和物质聚集态的转化;微观现象一般是指空间线度小于 $10^{-9} \sim 10^{-10}$ m 的粒子和场在极其微小空间范围内所发生的现象。如单个分子的运动和分子间碰撞。描述宏观现象的物理量(描述分子集体特征和状态的量)称为宏观量,如气体的温度、压强、热容量等;描述微观现象的物理量称为微观量,如气体内某个分子的动量、能量等。用可以测量的宏观量来描述系统状态称为宏观描述;用确定每个分子状态的微观量来描述系统状态称为微观描述。

二、热学研究的方法

研究热现象有两种不同的方法:一种是以大量观察和实验总结出来的规律为基础,根据能量转化的观点,运用逻辑演绎的方法,来研究热现象的规律。用这种方法建立起来的热现象理论是热力学的宏观理论,称热力学;另一种方法是以物质结构为基础,即从组成物质的粒子的运动和它们的相互作用出发,借助微观模型,运用统计的方法来研究热现象的规律。用这种方法建立起来的理论是热现象的微观理论,称为统计物理学。

热力学和统计物理学研究热现象的方法各有特点。热力学不涉及物质的微观结构,只是对热现象作“唯象”的研究,因而由它总结出来的规律具有普遍性和可靠性。统计物理学由于深入到热现象微观机制,它能使我们了解热现象的本质,对于热力学不能说明的问题,可以给出满意的回答,因而弥补了热力学的不足。但是统计物理学在研究热现象时,对物质的微观结构必须作一些简化假设,所以由它得出的结论有一定的近似性和局限性。由此可见,热力学和统计物理学两种研究方法是相辅相成的,它们的巧妙结合将会加深人们对热现象的认识。

三、热学在科技和生活中的应用

热运动和机械运动、电磁运动、发光现象有密切关系。例如摩

擦生热就是机械运动转化为热运动,而热机的作用是将热运动转化为机械运动;各种电热设备(如各式电炉、电烙铁等)都是把电磁运动转化为热运动,而热电偶温度计则是利用热运动转化为电磁运动来测量温度;炽热的物质能发光,可以用来照明,也可以根据光的颜色来测定物质的温度。为了更好的掌握这些转化规律,必须对热运动进行深入研究。热是当前动力的主要来源,火车、汽车、轮船、飞机是由蒸汽机、汽油机、柴油机或喷气发动机来推动的,它们都是利用燃料燃烧而产生的热作为动力的。在火力发电站带动发电机的汽轮机也是以热为动力的。以热作为动力的发动机(即热机),在工农业生产及其国防建设中得到了越来越广泛的应用,热学就是热机的主要理论基础之一。

温度是实现许多生产过程的重要条件。在化学工业中,制取各种化工产品,都需要在适当的温度下进行。例如制取重要的化学肥料氨,通常是在温度为 $450\sim 550^{\circ}\text{C}$,压强为 $25331\sim 32424\text{kPa}$ 的条件下进行的。在冶金工业中需将钢水加热到 $1100\sim 1200^{\circ}\text{C}$ 才好轧制各种钢材。机械工业中的金属热处理,电子工业中半导体材料的制备,都需要在一定的高温下进行。与此相反,有些生产过程,则需在很低的温度下进行。例如工业上和医院用的氧气就是在接近 -200°C 的低温下从液体空气中制取的,而氢、氧等气体的液化就需要更低的温度。温度的高低对有些材料的性质有显著的影响,例如某些半导体对温度就特别敏感,在接近绝对零度时,电阻急剧减小到零,变成最理想的导体,这种性质叫“超导电性”。另外,各种物质的性质与温度的关系,怎样才能达到所需要的低温或高温,怎样准确测量和控制温度,常常是生产的关键问题。

在气象和物相变化及日常生活中,还广泛应用热学理论。热学的发展也给哲学的发展提供了理论基础。因此我们一定要很好学习研究这一门基础理论知识。

§ 0.2 热力学的形成和发展

从远古时代起,由于火的广泛应用,人们逐渐认识了许多热现象。对于火的利用最早只限于取暖、照明,煮熟食物。后来就用火烧制陶器、制作金属工具和兵器。

十八世纪以前,由于生产力发展比较缓慢,积累的知识还不够丰富,热学还不能作为一门系统的科学建立起来。人们对于热的本质只有一些不成熟的看法。古希腊(公元前 500 年)的宇宙四元素说和我国战国时期(公元前 300 年)的五行说都把火看作一种基本的物质。与此不同的看法,古希腊的柏拉图(Plato, 公元前 427~347 年)根据摩擦生热现象,认为火是一种运动的表现形式。

到了十八世纪初资本主义萌芽时期,由于社会生产力有了较大的发展,生产中遇到的热现象增多了,因而提供了大量关于热的知识,这就大大促进了人们对于热现象的研究。当时,生产上需要动力,人们萌发了利用热来产生机械功的动机。1714 年华伦海脱(Fahrenheit)制作了水银温度计,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,使热现象的研究走上了实验科学的道路,逐渐形成了一门科学——热学。

1705 年纽科门(Newcomen)等制造出第一台可供实用的蒸汽机,经十八世纪上半叶,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,促使人们去研究提高蒸汽机的效率和水、水蒸汽以及其他一些物质的热学情况。

量热学是从确定两个不同温度的物体混合后的温度开始的。1750 年彼德堡科学院院士李赫曼首次发表这方面的论文。由于当时对温度和热量含混不清,所以得不出正确的结论。1784 年伽托林引进了比热的概念,从而把温度和热量从概念上区分开来,使热学研究又产生了一次飞跃。在量热学发展的同时,热的传导理论也

得到了发展。1800年左右法国傅立叶(Foacier)建立了热传导方程。

在热学研究中出现的突破性成果是在十九世纪上半叶。1842年德国医生迈耶(Mayer)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和定容比热之差算出了热功当量。英国人焦耳(Joule)前后用了二十多年时间,做了大量实验,以各种方式精确地测定了热功当量,给热力学第一定律的建立打下坚实的基础。1850年4月19日,克劳修斯(Clausius)发表了《论热的动力和可由此推导热学本身的定律》,这篇热力学史上极重要的论文,第一次明确提出了热力学第一定律。

热力学第一定律揭示了系统吸热对外做功的规律。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燃料只能获得很少的机械功。仅靠改善机器结构,或减少摩擦损失与热量散失并不能有效地提高蒸汽机效率。提高热机效率的要求进一步推动了热力学理论的发展。1824年法国工程师卡诺(Carnot)研究了理想热机的效率,提出了卡诺定理。1850年克劳修斯发现热传递的不可逆性。1851年开尔文(Kelvin)发现功转变为热过程的不可逆性。人们对不可逆性过程的研究,建立了关于能量传递和转化进行方向的热力学第二定律。

热力学第一定律和热力学第二定律的建立奠定了热力学的理论基础。在其后,1913年能斯特(Nernst)补充了一个关于绝对零度的定律,叫做热力学第三定律。1931年福勒(Fowler)又补充了一个关于温度定义的定律,叫做热力学第零定律,从而使热运动的宏观理论更加完善。

在热力学发展的同时,热学的微观理论也发展起来,早期的研究是为了探讨热的本质,围绕热是一种“物质”(热质)还是一种运动,人们长期争论不休。1746年俄国学者罗蒙诺索夫(Ломоносов)在《关于热和冷原因的思索》一文中提出了热量是分子运动的表现以及分子无规运动的思想,1797年伦福德(Rumford)观察铝炮筒

不断生热的现象,首次用实验肯定了热来源于运动,反驳了热质说。

十九世纪中叶,热和分子运动的联系在物理界得到了普遍承认。克劳修斯、麦克斯韦(Maxwell)、玻尔兹曼(Boltzmann)等人在气体动理论的研究方面做了大量工作,为动理论奠定了基础。克劳修斯第一次清楚的说明了分子热运动规律的统计意义,并引入了分子平均自由程的概念;麦克斯韦导出了气体分子速度分布律;玻尔兹曼在速度分布律中引进了重力的作用,从而使气体动理论从定性发展为定量的理论。1870年后建立了麦克斯韦—玻尔兹曼统计方法,1902年吉布斯(Gibbs)的《统计力学》著作发表,把统计方法推广发展为系统理论。从此经典统计物理学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年发展为量子力学,这些新的理论的出现,为量子统计物理学的建立奠定了理论基础。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。

回顾热学的形成和发展,使我们清楚的认识到,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促进生产力的发展。在科学技术高度发展的今天,热学仍占有非常重要的地位。热学中的许多新兴分支,象非平衡态热力学、量子统计等,它们的理论和方法在气象学、低温物理、固体物理、表面物理、等离子体、空间科学等尖端科学技术的研究工作中得到广泛应用。

第一章 热学的基本概念

本章首先阐明热力学平衡态的概念,并说明平衡态与非平衡态的区别。温度是热学特有的一个物理量。我们将从热力学第零定律的基础上,重点阐明温度的概念,介绍经验温标和理想气体温标的建立。最后用气体的实验定律推出理想气体状态方程。

§ 1.1 平衡态 状态参量

一、热力学系统及其外界

在热力学中,我们常把研究的物体(是由大量分子或原子组成的客体)或物体系称为热力学系统,简称系统。处于系统之外,与系统相互作用着的周围环境称为系统的外界。例如,我们如果选气缸内的气体作为系统时,则气缸、活塞及气缸周围的大气便属于外界。

根据系统和外界的作用情况,可把系统分为开放系统、封闭系统和孤立系统。与外界既可有物质交换、也可有能量交换(指做功或传热)的系统称为开放系统。如敞口容器中的液体可视为开放系统;与外界只有能量交换而无物质交换的系统称封闭系统。如当气缸关闭气门后,气缸内的气体可视为封闭系统;与外界没有任何相互作用的系统称为孤立系统,这种系统实际并不存在,但当系统与外界的相互作用小到可以忽略时,可近似看成孤立系统。

二、平衡态

一般来说,系统和外界之间是存在着相互作用的,这样,外界就可能对系统产生某种影响,系统的宏观状态将会发生变化。但是,当一个系统完全不受外界影响(外界对系统既不作功也不传

热)时,实验表明,经过足够长的时间后,系统将会达到一个确定的宏观状态,此时,系统各部分不再发生任何的宏观变化。我们把这种在不受外界影响的条件下,热力学系统的宏观性质不随时间变化的状态称为平衡态。反之称为非平衡态。达到了平衡态的热力学系统,将长时间保持这一状态不变,只有当它受到外界影响时,这种状态才会破坏。

下面我们举两个例子来说明平衡态的概念。

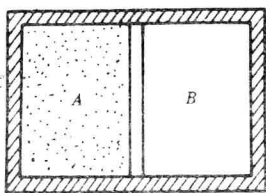


图 1-1

中的气体达到了平衡态。若无外界影响,气体的这种状态一直保持不变。

例题 1-1 有一封闭容器,中间有隔板将容器分成 A 和 B 两部分,A 部储有气体,B 部为真空(如图 1-1)。当把隔板抽去后,A 部气体就会向 B 部运动,此时气体内各处的状况是不均匀的,而且随时间不断变化,一直到最后达到各处均一的状态为止。这时,容器

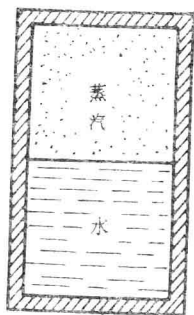


图 1-2

例题 1-2 在一个敞口容器内盛有一定量的水,将容器密封,密封初期水将不断蒸发,水和水蒸汽处在非平衡态。在没有外界影响的条件下,随着水的蒸发,经过一定的时间,蒸汽和水将达到饱和状态。此时,宏观的蒸发终止。水和水蒸汽组成的系统将不再发生变化,即已达到了平衡态(如图 1-2)。

值得注意的是,不能把平衡态简单地理解为系统的宏观性质不随时间改变的状态,也不能理解为系统处在外界条件不变的情况下的状态。例如,取一金属杆,一端与沸水接触,另一端与冰接触,当沸水和冰的温度维持不变时,杆上各处的温度固然不同,但它将处于不随时间改变的稳定状态。这时,金属杆各点的温度差必须由

外界来维持(即有热量连续不断地从杆的一端传向杆的另一端)。所以,此时的金属杆不能说处在平衡态(杆处在稳定态,属于非平衡态的特殊状态)。因此,平衡态必须是系统既不受外界影响,其宏观性质又不随时间改变的状态。

在外力场作用可忽略的情况下,一个均匀系统达到平衡态时,它内部的各种宏观性质处处均匀相同。如例 1-1 中容器内气体处于平衡态时,温度、压强和密度处处相同。对于一个非均匀系统,它处于平衡态时,其中有的宏观性质可以处处不同。如例 1-2 中水和水蒸汽组成的系统,当处于平衡态时,水蒸汽密度和水的密度可以不同,但它们各自的均匀部分,其宏观性质还是处处相同的。

关于平衡态,还需要指出以下三点:第一,热力学系统的平衡态不同于力学中的平衡态。力学中的平衡态是指系统处于静止或匀速直线运动状态,而热力学中的平衡态不仅要求系统整体没有加速度,还要求所有能观测的宏观性质都不随时间改变。例如,把一块较冷的铜块放到另一块较热的铜块上静止不动时,力学上可以说达到了平衡态,但在热学中,系统这时处于非平衡态,因为两块铜块的温度仍在发生变化,冷的变热,热的变冷,如果不受外界影响,经过足够长时间,两铜块的冷热程度将会均匀一致,这时,系统所处的状态才能说达到了热力学的平衡态;第二,在热力学平衡态下,虽然系统的宏观性质不随时间改变,但系统内的分子或原子仍处于不断的无规运动中,只是分子运动的平均效果不随时间改变,宏观上就表现为系统达到了平衡态。因此,热力学平衡是一种动态平衡,有时称这种平衡为热动平衡;第三,由于系统完全不受外界影响是不可能,所以,平衡态只是一种理想的概念。在许多实际问题中,我们可以把实际状态近似当作平衡态去处理。

三、状态参量

当系统处于平衡态时,系统的宏观性质可用一些确定的宏观物理量来描述,这些物理量称为状态参量。经验表明,一个系统的状态,究竟用哪些参量才能完全描述,是由系统本身的性质决定