

m 914456

高等学校教材

热 学

肖国屏 编

高等教育出版社

高等学校教材

热 学

肖国屏 编

高等教育出版社

内 容 简 介

本书是根据高等学校理科教材《热学》教学大纲编写的。全书共九章:温度、热力学第一定律、热力学第二定律、气体分子运动论基本概念、气体分子速度和能量的统计分布律、气体的输运过程、相变、固体、液体。

本书物理图象清晰,并适当结合现代科技成就和科学前沿,取材较新颖丰富;附有大量的热学常用数据和图表。另外,叙述上条理清楚,通顺易懂,便于自学。

本书可作为高等学校物理专业的教材或参考书,也适合教师进修及自学者学习。

高等学校教材

热 学

肖国屏 主编

*

高等教育出版社出版

新华书店上海发行所发行

商务印书馆上海印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 13.625 字数 325,000

1989年4月第1版 1989年4月第1次印刷

印数 0001—2,200

ISBN 7-04-002049-1/O·796

定价 3.60 元

前 言

1982年,编者在中山大学物理系多年讲授《热学》的基础上,编写了《热学》讲义。1986年4月在高等学校理科物理教材编审委员会综合大学物理系用《热学》教材评选会上中选,并建议编者对原书作适当修改,然后由高等教育出版社作为教材出版。

在改编过程中,编者认真参阅并吸取了近年来国内外各种有代表性的、较先进的教材或专著中的精华,结合编者多年的教学实践,并注意到当前教改形势的需要,对原书内容作了提炼和更新。

在现在出版的这本书中,编者力图突出如下特点:

(1) 对热学的基本概念、基本规律的阐述力图做到准确且合乎逻辑性,使学生建立起清晰的物理图象,且易于理解、记忆和应用。

(2) 尽量反映与热学有联系的现代科技成就和科学前沿,形成一条热学与其它学科之间的横向联系,以利于开拓学生思路,展宽视野。

(3) 适当结合物理学史来阐述重要的物理定律。使学生了解物理定律发现的来龙去脉以及物理规律发展的思维过程,从而启迪学生的科学研究方法和创新精神。

本书引用了丰富的热学常用数据和准确的物理常数,以便读者在学习时及以后从事科技工作时参阅使用。全书所有的物理量的符号、代号全部采用中华人民共和国国家标准(GB 3100—3102—86),本书的单位采用国际单位制(SI)。

本书承蒙北京大学包科达、北京师范大学漆安慎和南京大学

秦允豪诸教授详细审阅和提出有教益的意见, 高等教育出版社钟金城同志担任责任编辑, 他对全书作了审阅和订正, 并作了大量的细致编辑工作, 编者仅对他们致以深切的感谢。由于编者水平所限, 书中的错误或不当之处在所难免, 敬希读者批评指正。

编者

1988年7月于中山大学

目 录

结论.....	1
§ 0-1 热学研究的对象和方法	1
§ 0-2 热学发展简史	3
§ 0-3 微观描述与宏观描述	9
§ 0-4 热学常用单位	11
§ 0-5 压强的测量	13
第一章 温度.....	15
§ 1-1 热力学系统的平衡态	15
§ 1-2 热力学第零定律和温度的概念	17
§ 1-3 温标的建立	20
§ 1-4 定容气体温度计和理想气体温标	25
§ 1-5 国际实用温标、温度的测量	27
§ 1-6 理想气体状态方程	33
§ 1-7 混合理想气体的状态方程	42
思考题	46
习题	48
第二章 热力学第一定律.....	51
§ 2-1 功和热量	51
§ 2-2 可逆过程和不可逆过程	54
§ 2-3 功的表达和计算	59
§ 2-4 热力学第一定律	67
§ 2-5 热量的计量, 热容	74
§ 2-6 理想气体热力过程的分析	84
§ 2-7 两种比热容的比值 γ 的测量	95
§ 2-8 气体内能的实验研究 焦耳效应	97
§ 2-9 热机及其理想循环	98
§ 2-10 实热内燃机的理想循环	101

§ 2-11 制冷机	108
思考题	112
习题	114
第三章 热力学第二定律	119
§ 3-1 问题的提出	119
§ 3-2 热力学第二定律的经典表述	120
§ 3-3 热力学第二定律的实质	122
§ 3-4 卡诺定理	126
§ 3-5 卡诺循环和卡诺热机的热效率	128
§ 3-6 热力学温标	132
§ 3-7 态函数熵	135
§ 3-8 不可逆过程的熵变	142
§ 3-9 热力学第二定律的熵表述	149
§ 3-10 热力学第二定律的统计意义	157
§ 3-11 宇宙会“热寂”吗?宇宙起源的标准模型	167
思考题	170
习题	172
第四章 气体分子运动论的基本概念	176
§ 4-1 物质的微观模型	177
§ 4-2 理想气体的压强	180
§ 4-3 理想气体的状态方程和温度的微观解释	185
§ 4-4 分子之间的相互作用力	190
§ 4-5 真实气体的状态方程	195
思考与估计	206
习题	207
第五章 气体分子的速度和能量的统计分布律	209
§ 5-1 引言	209
§ 5-2 速度分布函数	211
§ 5-3 麦克斯韦速度分布律	215
§ 5-4 速率分布的各种计算	226
§ 5-5 麦克斯韦速率分布律的实验验证	229

§ 5-6	统计规律性和涨落现象	232
§ 5-7	玻尔兹曼分布律 重力场中微粒的分布	235
§ 5-8	能量均分定理 气体的内能	243
§ 5-9	气体热容的经典理论	248
**§ 5-10	量子理论对气体热容的定性解释	251
	附录 5.1 积分表	253
	思考题	253
	习题	254
第六章	气体的运输过程	257
§ 6-1	气体的运输现象和分子的碰撞	257
§ 6-2	热传递的三种方式	258
§ 6-3	热传导现象的宏观规律	261
§ 6-4	粘滞现象的宏观规律	266
§ 6-5	扩散现象的宏观规律	269
§ 6-6	碰撞截面	272
§ 6-7	气体分子的平均自由程	274
§ 6-8	粘滞现象的微观解释[附录 6-1]	281
§ 6-9	热传导和扩散的微观解释	287
§ 6-10	运输过程的理论与实验的比较	290
§ 6-11	低压下的热传导现象	293
	附录 6-2 相对速率的平均值	294
	思考题	296
	习题	297
第七章	相变	300
§ 7-1	概述	300
§ 7-2	固-液-气三相的转变	301
§ 7-3	相图	304
§ 7-4	一阶相变的特征	307
§ 7-5	汽化与凝结 液滴的形成	312
§ 7-6	气-液的等温转变 临界点	318
§ 7-7	范德瓦尔斯等温线	324

§ 7-8 克拉珀龙方程	330
**§ 7-9 二阶相变和 λ 转变	335
§ 7-10 液晶	338
§ 7-11 焦耳-开尔文(汤姆孙)效应	341
§ 7-12 气体的液化	350
§ 7-13 低温的获得	354
§ 7-14 低温的物理现象及其应用	360
思考题	363
习题	363
第八章 固体	366
§ 8-1 晶体和非晶体	367
§ 8-2 晶体的基本结合形式和结合能	370
§ 8-3 晶体中的热振动	376
§ 8-4 固体热容的经典理论	380
§ 8-5 固体的热膨胀	383
§ 8-6 热应力	387
思考题	388
习题	388
第九章 液体	389
§ 9-1 液体的微观结构 径向分布函数	389
§ 9-2 液体的热性质	392
§ 9-3 液体的表面张力	395
§ 9-4 液体的表面能	399
§ 9-5 弯曲液面下的附加压强	400
§ 9-6 润湿现象与毛细现象	404
思考题	411
习题	411
附录	413
附录一 国际单位制(SI)	413
附录二 一些基本物理常数	416
附录三 天体、大气、水的常用数据	417

附录四 常用单位换算	418
习题答案	418
参考书目	423

绪 论

§ 0-1 热学研究的对象和方法

一、热学是研究物质的热性质和物质热运动的规律及其应用的一门学科,是物理学的一个重要分支。

当物体的温度发生变化时,物体的状态和性质也将发生变化。例如,物体受热后体积膨胀;水加热到 100°C 后会变为水蒸气,而在冷却到 0°C 时又会凝结成冰;金属经过热处理后,可以改变其内部的结构和性能,等等。这些与温度有关的物体的状态和性质的变化,统称为热性质或热现象。

物质的热性质与物质中的分子运动有着不可分割的联系。任何物质都是由大量的微粒(原子、分子)组成,所谓热运动就是组成物体的大量微观粒子的一种永不停息的无规则运动。热现象是组成物体的大量微观粒子热运动的宏观表现,正是这种微观粒子热运动的综合平均作用决定了物质的宏观热性质。以气体为例,气体内部的分子以不同大小和方向的各种速度运动着,而且由于频繁地相互碰撞,其运动速度还不断发生变化。因此就个别分子来说,其平动动能有大有小,具有很大的偶然性。但从整个气体看,在一定宏观条件下(例如一定的压强和体积),气体分子的平均动能却具有确定的数值,并在宏观上表现为气体具有一确定的温度。分子运动愈剧烈,平均平动动能就越大,而气体的温度就越高。又如容器中的气体分子频繁地碰撞容器壁,就个别分子来说,它每次碰在器壁的什么地方,给予器壁多大的冲量都是不规则的、偶然的。但是就整个气体来说,大量分子碰撞器壁的综合平均作用,在

宏观上就表现为一个持续的恒定的气体压强。由上述例子可见,热运动的特点是:组成宏观物体的大量微观粒子的个别运动是不规则的和偶然的,但在总体上却存在确定的规律性。这种支配着大量粒子集体的综合性质和行为的规律性称为统计规律性。正是这种特点,使热运动成为区别于其它运动形式的一种基本运动形式。

二、热学理论有两个重要分支,一是宏观理论,即热力学;一是微观理论,即统计物理学。热力学从对物体的热现象的直接观察和实验所总结出来的基本定律出发,通过逻辑推论及数学演绎,找出物体各种宏观特性之间的关系,从而解释物质的热性质,它并不涉及物质的微观结构。统计物理学则从物质是由大量的分子组成这一微观结构出发,运用统计方法,把宏观性质作为微观粒子热运动的统计平均结果,找出微观量与宏观量之间的关系,它的目的是从微观的分子运动来解释物质的宏观热性质。

热力学理论有高度的可靠性和普遍性,可以用来检验微观理论,但对特殊物质的特性不能给出具体的知识,需要从实验观测中得到必要的实验数据。统计物理学则深入到物质的微观结构来揭示热现象的本质,它能解决一些热力学所不能解决的问题,使热力学理论获得更深刻的意义。它的局限性在于它对物质的分子结构模型所作的简化假设,使得理论结果与实际不能完全符合,而有一定的近似性。热力学与统计物理学二者的结合恰好研究了物质热运动的两个方面,彼此联系,互相补充。如果说,牛顿力学描述宏观世界中物体的运动规律,量子力学支配微观世界中粒子的行为,那么热学就是把宏观世界与微观世界连结起来的一座桥梁。

本课程的内容可概括为三个方面:一是热力学的物理基础,它包括温度和热力学第一、第二定律;二是分子运动论,主要讨论气体的压强、速度分布和输运现象等问题;三是物质的热性质,例如

相变、固体及液体的热性质。

§ 0-2 热学发展简史

热学发展史,大体可分四个阶段。

(一)第一阶段:从远古到十八世纪初。这是系统的科学还没有建立的阶段。

火的利用是人类支配自然力的伟大开始。五十万年前周口店北京猿人洞穴中的灰烬,是人类用火的最早遗迹之一。真正实现人工取火(摩擦生火)则可能开始于石器时代。我国古代在高温技术方面也有突出成就。例如,五千多年前仰韶文化时期(今河南省渑池县)的彩陶,四千多年前龙山文化时期(今山东省章丘县)的铜器,以及商(公元前十六世纪—公元前 1066)、西周(公元前 1066—前 771)的青铜冶炼,春秋末期(722—476B. C)的冶铁。(而欧洲一直晚至十三世纪末才出现生铁。)至于对热现象与热能的研究和应用,一直没有间断。特别是火药、火箭,我国古代在世界上一一直处于领先地位。

在这阶段中,对热的本质只能是一些不成熟的朴素认识,但已埋下近代关于热的本质争论的种子。中国商周时期产生的“五行”说,认为万物都是由水、火、木、金、土五种基本元素组成。战国后期(约公元前 400 年)写成的《尚书·洪范篇》对“五行”说作了进一步论述。古希腊哲学家赫拉克利特(Heraclitus, 约 550—475B. C)也提出了火、气、水、土循环转化的四元素学说,而设想火是一切自然事物的普遍起源。另一种观点把热与运动联系起来,东汉王充(约公元 27—97)提出“元气”说,把热看成“气”的激烈运动。唐代柳宗元(773—819)和明代罗钦顺(1465—1547)把冷热变化看作是物质“元气”动静往来变化的表现。古希腊的柏拉图(Plato 427—

347 B. O) 认为火和热“本身就是摩擦和碰撞引起的, 但这就是运动”。

1620 年英国哲学家培根(Francis Bacon 1561—1626) 在归纳大量经验事实的基础上, 认为“热是一种膨胀的、被约束的而在其斗争中作用于物体内部较小的粒子之上的运动”。他的观点影响了当时许多自然科学家。英国的玻意耳(R. Boyle, 1627—1691) 认为热是物体内部产生了强烈而杂乱的运动。法国笛卡尔(R. Descartes, 1596—1650) 把热看作是物质粒子的旋转运动。

但是从古代至十七世纪, 由于生产发展缓慢, 积累的知识不够丰富, 热学还不能作为一门系统的科学建立起来。

(二) 第二阶段: 从十八世纪初到十九世纪中叶。

这是热机发展和热学走上实验科学的阶段。

1705 年英国纽可门(T. Newcomen) 发明第一台实用的大气压力式蒸汽机, 英国瓦特(J. Watt 1736—1819) 对蒸汽机进行了根本性变革, 研制出分离的冷凝器, 并于 1769 年获得有历史意义的新型蒸汽机的专利。蒸汽机的出现是人类利用热能方面具有划时代的重大突破。

在蒸汽机的发明和应用的推动下, 促使人们对水和蒸气以及其它物质的热性质作深入的研究。1714 年德国人华伦海脱(G. Fahrenheit; 1686—1736) 改良了水银温度计并制定了华氏温标。1742 年瑞典人摄尔修斯(A. Celsius, 1701—1744) 制定了摄氏温标, 从此建立了测温学。1756 年布莱克(J. Black, 1728—1799) 提出比热的概念, 建立了量热学, 此后热学的研究走上了实验科学的道路。

首先要解决的一个重要问题就是热的本质是什么? 当时存在两种对立的看法。一是“热质说”, 认为热是一种可以透入一切物体之中的、不生不灭的、无重量的流质。较热的物体含热质多, 较

冷的物体含热质少。冷热不同的两个物体接触时，热质便从较热的物体流入较冷的物体。热质说可以说明有关热传导及量热学的一些实验结果，但不能说明摩擦生热的现象。

另一种看法是“热是物质运动的一种表现”，俄国科学家罗蒙诺索夫(М. В. Ломоносов 1711—1765)在《关于热与冷的原因的探讨》(1744—1747)的论文中，断言热是分子运动的表现，他在1760年所写的《论固体和液体》一书中，提出了物质与运动守恒的概念。

第一个用直接的实验结果来驳斥热质说的是美籍英国伯爵伦福德(C. Rumford 1753—1814)，他在1798年发表论文，论述用钻头加工炮筒时摩擦生热的现象。根据热质说，当金属被钻头切削成碎屑，碎屑愈多就愈细，它能保持住热质的容量变得愈小，因此就释放出一部分热质。伦福德发现，当加工用的钻头变得很钝，以致切削出来的金属碎屑数量减少，但热量仍然不断产生。他由此得出结论：热是运动。次年戴维(H. Davy)做了另一个实验：两块冰互相摩擦而完全熔化，冰的熔解热显然是摩擦所供给的。这个实验支持了热是运动的学说。但是当时关于热与机械运动相互转化的思想还没有明确建立，以及电磁现象与化学现象等和热的关系也没弄清楚。热质说与热的运动说的争论还延续了一段时期。

在热机原理方面，法国工程师卡诺(S. Carnot 1796—1832)的工作贡献最大。他在1824年发表《关于火的动力的见解》^①一书，总结了热机工作过程的最本质的条件，即热机必须工作于两个热源之间。他首先论述可逆过程的概念，提出著名的卡诺循环。并提出可逆热机效率最高的原理。他的思想和原理奠定了热力学第二定律的基础。但是卡诺在早期还受着热质说的影响，因此他认为在热机循环中，热机从高温热源吸热 Q_H ，向低温热源放热 Q_L ，而 Q_H

^① 书的原文是：《Reflexions sur la puissance motrice du feu》，这本著作是热力学发展的里程碑之一。

$=Q_L$, 热机利用工质的压缩与膨胀过程中的功的差额对外作了净功。这说明了, 尽管热质说在十八世纪末受到冲击, 但在十九世纪前三十年, 热质说仍在欧洲占了统治地位。以热质说为基础的研究, 在某些范围内还取得了重要成果。例如, 1822 年法国人傅里叶(J. Fourier)发表了《热的分析理论》, 提出用导热率来表示物体的热特性, 导出了热传导方程。在解方程过程中产生了傅里叶级数。傅里叶级数不但对数学的发展产生了巨大的影响, 而且直至今天, 傅里叶级数仍是物理学各领域中有力的武器。1816 年法国人拉普拉斯(P. S. Laplace)提出了定压热容与定容热容的比值, 并纠正了牛顿在 1710 年所导出的声速公式的错误。1923 年泊松导出了气体在绝热过程中的方程。热质说虽然取得了局部的成功, 但它毕竟是一种错误的理论, 随着热学的深入发展, 热质说就明显暴露出其阻碍作用。直到十九世纪四十年代末, 当能量守恒与转化定律基本建立之后, 热的运动说才取得了最后胜利, 并完全弄清楚了热的本质: 热是能量传递的一种形式。

(三) 第三阶段: 十九世纪中叶到末叶。

这是热力学定律建立和完善的阶段。

热力学第一定律就是能量守恒和转化定律。从十九世纪初叶起, 自然界各种运动形式(电、热、机械、化学)之间的相互联系和转化的实验事实相继被发现, 到四十年代前后, 欧洲的几个国家从事各种专业的十多位科学家, 分别通过不同的途径, 各自独立地发现并丰富了这个定律, 例如伦福德、卡诺、英国的格罗夫(W. R. Grove)、丹麦的柯尔丁(L. A. Golding)比利时的赫恩(G. A. Hirn)等人, 而其中最重要的是迈尔、焦耳和亥尔姆霍兹的工作。德国人迈尔(R. Mayer, 1814—1878)在 1842 年发表的论文《论无机界的力》首先阐述能量守恒定律, 但他的论文未引起当时的物理学界的重视。直到英国人焦耳(J. P. Joule, 1818—1889)发表了测定热

功当量的实验结果之后，能量守恒与转化定律才得到科学界的公认。焦耳从 1840 年开始，以毕生精力研究机械能、电能、化学能与热能之间的转换，测量热功当量。他的实验前后用了三十九年的时间，不过早在 1850 年在他发表的一篇总结论文中，以各种精确实验结果的一致性，奠定了能量守恒定律的坚实实验基础，这个时候就认为热力学第一定律已完全建立起来。德国人亥尔姆霍兹 (H. Helmholtz, 1821—1894) 在中心力的假设下，把他所得出的能量守恒原理，推广到光、热、电磁现象、化学运动以及生物机体内进行的过程。

紧接着第一定律的建立，德国人克劳修斯 (R. Clausius, 1822—1888) 和英国人开尔文勋爵 (Lord Kelvin, 原名汤姆孙 W. Thomson, 1824—1907) 总结了卡诺的热机理论，先后在 1850 和 1851 年各自提出热力学第二定律的经典表述。克劳修斯把热功当量的结论和卡诺关于热机效率的结论作为热学理论的两个基本原理，修正了卡诺理论中的错误。他认为热机从高温热源吸热 Q_H ，只是把部分热量 Q_L 传给低温热源，另一部分转化为有用的功。不是 $Q_H - Q_L$ ，而是 $Q_H/T_H - Q_L/T_L$ 。热力学第二定律的基本内容是：一切实际的宏观自发过程都是不可逆的。1865 年克劳修斯引入态函数熵。第二定律一个最实质的表述就是：一切自发过程都是朝着总熵 (系统的加环境的) 增加的方向进行。

热学的微观理论，在十七世纪末到十八世纪初开始发展，起初以英国人玻意耳 (R. Boyle, 1627—1691) 及其助手胡克 (R. Hooke, 1635—1703) 为代表，试图用空气中分子的碰撞来解释气体的压强。1738 年瑞士人伯努利 (D. Bernoulli, 1700—1782) 用理想气体弹子球模型与器壁的碰撞，推导出气体的压强。分子运动论的真正兴起是在十九世纪中叶。1857 年克劳修斯首次用统计的方法导出玻意耳定律，次年提出自由程概念。1860 年英国人麦克斯韦