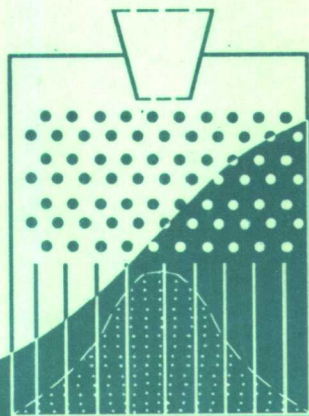


高等学校教材

热 学

张兰知 等编



哈尔滨工业大学出版社

高等学校教材

热 学

张兰知 等编

哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨

内 容 简 介

本书内容包括:温度、热力学第一定律、热力学第二定律、几率与分布函数、分子动理论的平衡态理论、气体内的输运过程、实际气体与焦耳-汤姆逊效应、固体、液体和相变共十章。

本书注重物理思想与实验规律的阐述,还适当地介绍了一些科技新成果。本书在具体内容和思考题、习题的安排上充分注意了与热力学统计物理学的衔接,弥补了现行教材的不足。

本书可作为高等师范院校及其它高等院校物理专业的教材。

高等数学教材

热 学

Re Xue

张兰知 等编

*

哈尔滨工业大学出版社出版发行

肇 东 粮 食 印 刷 厂

*

开本 850×1168 1/32 印张 11.5 字数 300 千字

2000 年 11 月第 1 版 2000 年 11 月第 2 次印刷

印数 1 000~3 000

ISBN 7-5603-1350-7/O·92 定价 15.00 元

目 录

引 言	1
§ 0.1 热学的研究对象和研究方法	1
一、热学的研究对象	1
二、热学的研究方法	4
§ 0.2 热学发展简史	6
一、热现象的初期研究	6
二、热力学的建立	7
三、分子动理论和统计力学的发展	8
四、量子统计	9
第一章 温度	10
§ 1.1 热学基本概念	10
一、系统与外界	10
二、平衡态	11
三、状态参量	12
四、相	14
五、系统与外界相互作用的方式	15
§ 1.2 热力学第零定律 温度	16
一、热平衡	17
二、热力学第零定律 温度	17
§ 1.3 温标	18
一、经验温标	19
二、理想气体温标	22
三、热力学温标	25
四、国际实用温标	26
五、各种温标间的关系	27
§ 1.4 气体的状态方程	28

一、理想气体状态方程·····	29
二、普适气体常数 R ·····	31
三、道尔顿分压定律·····	32
四、混合理想气体状态方程·····	32
思考题 ·····	34
习 题 ·····	36
第二章 热力学第一定律 ·····	43
§ 2.1 热力学过程·····	43
§ 2.2 功·····	45
一、功的表达式·····	45
二、功的图示·····	46
三、功是过程量·····	47
四、广义功·····	48
§ 2.3 热·····	48
一、热的本质·····	48
二、热与功的比较·····	50
三、热容 比热容 摩尔热容·····	52
四、比热容的测量·····	53
§ 2.4 热力学第一定律·····	54
一、热力学第一定律的建立·····	54
二、热力学第一定律的数学表达式·····	58
§ 2.5 热力学第一定律对 pV 系统的应用 ·····	62
一、定容热容与内能·····	62
二、定压热容与焓·····	62
§ 2.6 理想气体的内能与热容·····	65
一、理想气体的内能·····	65
二、理想气体的热容·····	66
§ 2.7 热力学第一定律对理想气体的应用·····	66
一、等容过程·····	67

二、等压过程	67
三、等温过程	67
四、绝热过程	68
五、多方过程	72
六、理想气体吸放热判据	74
§ 2.8 热力学第一定律对循环过程的应用	74
§ 2.9 卡诺循环	78
§ 2.10 热泵	82
思考题	83
习 题	85
第三章 热力学第二定律	93
§ 3.1 热力学第二定律	93
一、热力学第二定律的基本表述	93
二、热力学第一定律与热力学第二定律的比较	96
三、两种表述等效性的证明	97
§ 3.2 可逆过程与不可逆过程	99
一、可逆过程与不可逆过程	99
二、过程不可逆的原因	102
三、各种不可逆过程都是相互关联的	102
§ 3.3 卡诺定理与可用能	104
一、卡诺定理	104
二、可用能	108
§ 3.4 热力学温标	110
§ 3.5 熵与热力学第二定律的数学表述	112
一、克劳修斯不等式	113
二、熵	115
三、热力学第二定律的数学表述 熵增加原理	117
四、热力学基本方程	120
§ 3.6 温熵图	120

§ 3.7 熵流与熵产生 能量的退降	122
一、熵流	122
二、熵产生	122
三、能量的退降	123
思考题	125
习 题	127
第四章 几率与分布函数	132
§ 4.1 随机事件与几率	132
一、随机事件	132
二、几率	133
§ 4.2 几率的性质	135
一、几率的加法定理	135
二、几率的乘法定理	136
§ 4.3 随机变量与几率分布函数	136
一、随机变量	136
二、几率分布函数	137
§ 4.4 统计平均值与方差	139
一、统计平均值	139
二、方差	140
§ 4.5 伽耳顿板实验	141
第五章 分子动理论的平衡态理论	143
§ 5.1 分子动理论的基本观点	143
一、历史的回顾	143
二、分子动理论的基本观点	146
§ 5.2 理想气体的压强	149
一、理想气体的微观模型	149
二、理想气体的压强	150
三、讨论	153
§ 5.3 温度的微观解释	153

一、温度的微观解释	153
二、基本方程的一些推论	155
三、分子的方均根速率	156
§ 5.4 麦克斯韦速度分布律	156
一、气体分子速率的测定	158
二、麦克斯韦速度分布律	160
三、麦克斯韦速率分布律	164
四、泻流分布	168
五、约化形式	171
六、误差函数	173
§ 5.5 玻耳兹曼分布律	175
一、玻耳兹曼分布律	175
二、重力场中微粒按高度分布规律	176
三、气压公式和高度公式	177
§ 5.6 热力学第二定律的统计解释	179
§ 5.7 能量按自由度均分定理	182
一、自由度	182
二、分子能量按自由度均分定理	184
§ 5.8 理想气体的内能与热容	187
一、理想气体的内能	187
二、理想气体的摩尔热容	187
三、经典理论的缺陷	189
§ 5.9 分子力	191
一、有心力模型	192
二、无引力的弹性质点模型	195
三、无引力的弹性刚球模型	195
四、有引力的刚球模型——苏则朗模型	196
思考题	196
习 题	198

第六章 气体内的输运过程	202
§ 6.1 输运过程的宏观规律	202
一、粘滞现象	202
二、热传导现象	204
三、扩散现象	205
四、输运过程三个宏观规律的比较	206
§ 6.2 气体分子的平均自由程	207
一、分子的平均自由程和碰撞频率	208
二、分子按自由程的分布	211
三、演示自由程的实验	212
§ 6.3 输运过程的微观解释	213
一、粘滞现象的微观解释	213
二、热传导现象的微观解释	216
三、扩散现象的微观解释	218
四、理论结果与实验的比较	218
§ 6.4 低压下的热传导和粘滞现象	221
一、低压气体	221
二、低压气体的粘滞现象	222
三、低压气体的热传导现象	224
思考题	225
习 题	226
第七章 实际气体与焦耳-汤姆逊效应	229
§ 7.1 实际气体与范德瓦耳斯方程	229
一、实际气体	229
二、范德瓦耳斯方程	230
三、关于范德瓦耳斯方程的说明	231
§ 7.2 实际气体的内能	233
§ 7.3 焦耳-汤姆逊效应	235
一、节流过程与焦耳-汤姆逊效应	235

二、节流过程的热力学特征	237
三、焦耳-汤姆逊系数	238
§ 7.4 焦耳-汤姆逊效应的微观解释	241
一、分子引力作用产生的影响	241
二、分子斥力作用产生的影响	242
三、分子力作用产生的影响	242
思考题	244
习 题	245
第八章 固体	246
§ 8.1 晶体的宏观特征	246
一、有规则的外部形状	246
二、晶面角守恒	246
三、物理性质各向异性	247
四、有确定的熔点	248
§ 8.2 晶体的微观结构	250
一、晶体结构的空间点阵学说	250
二、晶体宏观特征的微观解释	256
§ 8.3 晶体中粒子的结合力和结合能	258
一、几种典型的结合力	258
二、结合力的普遍特征 结合能	262
§ 8.4 晶体中晶粒的热振动及晶体的热学性质	264
一、晶体中晶粒的热振动	264
二、固体热容的经典理论 杜隆-珀替定律	266
三、固体的热膨胀	270
四、热传导的微观解释	272
五、热缺陷	273
六、固体的扩散	275
思考题	279
习 题	279

第九章 液体	281
§ 9.1 液体的微观结构	281
一、液体的微观结构	281
二、液体分子的热运动	282
§ 9.2 液晶简介	283
一、向列型液晶	284
二、胆甾型液晶	285
三、近晶型液晶	285
§ 9.3 液体的宏观性质	286
一、热容	286
二、热膨胀 水的反常膨胀	287
三、热传导	289
四、扩散	289
五、粘滞性	291
§ 9.4 液体的表面张力	292
一、表面张力	292
二、表面张力系数的测定	295
三、影响表面张力系数的因素	295
四、表面张力的微观解释	297
§ 9.5 弯曲液面下的附加压强	329
一、球形液面下的附加压强	301
二、任意弯曲液面下的附加压强	303
§ 9.6 润湿现象与毛细现象	304
一、润湿与不润湿 接触角	304
二、毛细现象	307
三、润湿与毛细现象的应用	309
思考题	310
习 题	310
第十章 相变	313

§ 10.1 基本概念	313
一、物态与相	313
二、相变	314
三、单元系一级相变的特点	315
§ 10.2 液气相变	317
一、蒸发 饱和蒸气压	317
二、沸腾	321
§ 10.3 气液等温相变	325
§ 10.4 范德瓦耳斯等温线	329
一、范德瓦耳斯等温线	329
二、麦克斯韦等面积法则	331
§ 10.5 克拉珀龙方程	333
§ 10.6 固液相变 固气相变 三相图	336
一、固液相变 溶解曲线	336
二、固气相变 升华曲线	338
三、三相图	339
§ 10.7 气体的液化与低温的获得	341
思考题	345
习 题	346
习题答案	348
参考文献	355

引 言

§ 0.1 热学的研究对象和研究方法

一、热学的研究对象

力学是物理学的第一个组成部分,研究宏观物体机械运动的规律。热学是物理学的第二个组成部分,研究物质热运动的规律。

在力学中我们只需要长度、质量、时间三个基本量,其它力学量均可由这三个基本量导出。在热学中要描述热运动必须引入第四个基本物理量——温度,来表征物体的冷热程度。在自然界中与物体的冷热程度有关的现象很多,因此我们将与物体冷热程度,即与温度有关的现象统称为热现象。例如,物体受热温度升高,体积膨胀;很硬的钢件烧红后会变软,经过突然冷却(淬火)又会变得很坚硬;室温下的一块铁,在高温下变成铁水,在更高温度下又会变成铁蒸气;一般金属导体,其电阻一般随温度的升高而增大,而有一些金属或化合物在低温下其电阻会突然消失,变成超导体;室温下的半导体,在高温下会变成导体,在很低温度下又会变成绝缘体;室温下的铁、钴、镍呈现出具有剩余磁性的铁磁性质,但当加热到它们的居里温度以上,又会变成没有剩余磁性的顺磁体;宏观物体在各种温度下都在进行热辐射,辐射强度按波长的分布随温度而异,温度越高,与辐射强度的极大值所对应的光波波长越短,因此辐射光的颜色也随温度的升高由红向黄、蓝、紫端变化;化学反应的快慢、生物的繁殖生长也都与温度有关。宏观物体的几何性质、力学性质、电磁性质、光学性质、化学性质以及存在的形态等等

都与物体的冷热程度即温度有关,因此,我们说热现象是自然界的一种普遍现象。

从微观角度来看,宏观物体是由大量微观粒子(分子、原子等)组成的。这些微观粒子处在永恒的混乱运动之中。实验表明,分子运动的剧烈程度与温度有关,因此,我们将大量分子的无规则运动称为热运动。机械运动是宏观运动,热运动是微观运动,正是由于这种微观的热运动才导致了宏观的热现象。热运动是热现象的微观实质,热现象是热运动的宏观表现。

热运动在本质上不同于机械运动。在力学中,由少数质点构成的系统,质点按照经典力学的规律进行机械运动,只要给定了这些质点的初始运动状态(初始位置和初始速度),根据牛顿运动定律就可完全确定在以后任何时刻质点的运动状态。在热学中,由于构成宏观物体的分子数之多(数量级为 10^{23}),使由大量分子组成的系统的运动规律发生了质的变化。首先,我们很难列出数量级为 10^{23} 的分子力学运动方程。其次,我们即使列出了所有分子的牛顿运动方程,我们也无法得到数量级为 10^{23} 的关于分子坐标的知识,仍无法解出大量分子的牛顿运动方程,无法确定大量分子系统在各个时刻所处的微观运动状态。因此,在某一时刻,由大量分子组成的系统处于什么微观运动状态,完全是偶然的,即完全是随机的,这和掷骰子出现什么点数有些相似。如果一种现象的发生,可能会有各种结果,而事先掌握的信息(或可控制的条件)又不足以确定它出现哪种结果,那么这种现象就称为随机现象。在观测随机现象中可能出现的每一种结果叫一个随机事件。掷骰子出现什么点数,分子热运动出现哪种微观运动状态,某一时刻某一分子具有什么速度,具有什么空间坐标,都是随机现象,具有极大的偶然性。掷骰子出现 1 点、2 点……具体结果或分子热运动可能出现的每种微观运动状态都是随机事件。对于随机现象,从少数的实验观察来看,出现各种随机事件的结果是杂乱无章的,但是若做大量重复的观察,就会发现随机现象也具有规律性。仍以掷骰子为例,各点

出现的次数 N_i (i 代表 1 至 6 点的点数) 与总掷次数 N 的比值在 $1/6$ 上下变化, N 越大, N_i/N 在 $1/6$ 上下变化的幅度越小。当 N 非常大时, $P_i = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_i}{N} = \frac{1}{6}$, P_i 表示 i 点出现可能性的大小, 称为出现 i 点这个随机事件的几率。通过大量重复的实验观察会发现, 每一个随机事件出现的几率都是一定的, 这是随机现象所具有的规律之一。

在随机现象中, 每个随机现象都以确定的几率出现, 这表明在大量的偶然性中存在着必然性。当观测次数 N 非常多时, 第 i 个随机事件出现的次数 $N_i = P_i N$ 。设有某个量 A , 在第 i 个随机事件中量 A 的取值为 A_i , 这里 $i = 1, 2, \dots$, 是随机现象中各个随机事件的顺序编号, 在随机现象非常多次重复的观测中, 平均一次观测到的 A 的量值为

$$\bar{A} = \frac{1}{N} \sum_i N_i A_i = \sum_i A_i P_i$$

\bar{A} 称为量 A 的统计平均值。仍以掷骰子为例, 显然掷一次骰子出现几点是偶然的, 可能出现 1 点、2 点……, 不能确定, 但对多次的抛掷来说, 平均一次掷出的点数 $\bar{i} = \sum_i i P_i = \sum_{i=1}^6 \frac{i}{6} = 3.5$ 。这表明, 虽然每次掷出几点是无规律的, 但大量无规律量的统计平均值却是完全一定的, 这是随机现象所具有的另一规律。

随机现象所具有的这两个规律称为统计规律。由于构成宏观物体的大量分子的微观热运动是一种随机现象, 所以热运动遵循统计规律, 这是热运动的基本特征之一。

热运动的另一基本特征是分子运动的混乱无序性。在标准状态下的气体, 每 1cm^3 中就有 10^{19} 个分子, 如此多的分子在这一有限的空间里不停地运动、碰撞与相互作用, 其运动的情景是非常混乱和无序的, 而且分子运动的状态随时都在变化。如果由于初始条件或某种外界扰动, 使系统内大量分子的热运动的情形出现某种有序性, 例如, 气体内向某一方向运动的分子数明显多于向其它方

向运动的分子数；气体内某一部分气体分子的运动速率明显大于其它部分分子的热运动速率；气体内某一区域的分子数密度明显大于其它区域的分子数密度等等。当系统不受外界作用时，通过大量分子的永不停息的运动与碰撞，这种有序性将会消失，使气体趋于完全混乱无序的均匀状态。气体内沿某一方向运动的分子明显比其它方向多时，分子间的频繁碰撞，将使沿这个方向运动的分子很快地转向其它运动方向，使气体内大量分子的热运动在运动方向上呈现出完全无序的状态。气体内某一部分分子运动速率明显比其它部分大时，通过各部分分子间的频繁碰撞，分子相互交换能量，使气体内各部分分子热运动的平均速率趋于相同。当气体内各区域的分子数密度不同时，各区域分子间的碰撞与运动，使分子数密度大的区域分子数减少，分子数密度小的区域分子数增加，最终使气体分子在坐标空间的分布也趋于完全无序的均匀状态。在没有外界影响的条件下，构成热力学系统的大量分子的热运动总是朝着最混乱无序的方向进行，使系统处于最混乱无序的状态。

热运动与机械运动、电磁运动等基本运动形式之间还可以互相转化。物质不同的运动形式间的相互转化，不但在实际中给我们提供了最好的能源，而且使人类对物质世界的认识产生了一个巨大的飞跃。而热运动与其它运动形式之间的相互转化，是人类应用最早、最为广泛的转化，如热机就是一种将热运动转化为机械运动的装置。热运动与其它运动形式之间相互转化的规律也是热学的研究对象。

二、热学的研究方法

热学的研究方法有两种，宏观方法和微观方法。相应地，理论有两部分，宏观理论和微观理论，即热力学和统计物理学。宏观方法的出发点是实验定律，微观方法的出发点是物质的微观结构。宏观方法的实质是用能量转化的观点研究热现象，微观方法的实质是视物质的宏观性质为大量微观粒子运动的平均效果，视宏观物理量为相应微观量的统计平均值。

宏观方法的优点:①具有高度的普遍性,其理论、方法对任何物质系统都适用。②具有高度的可靠性,由其所得到的结果都能与实验符合。正如爱因斯坦在 1949 年所说:“一个理论,如果它的前提越简单,而且能说明的各种类型问题越多,适用的范围越广,那么它给人的印象就越深刻。因此,经典热力学是具有普遍内容的唯一物理理论,我深信,在其基本概念使用的范围内是绝不会被推翻的。”宏观方法的局限性:①得不到具体的物性理论,如物态方程,比热容公式等。由于热力学方法不深入研究热现象的微观机制,只研究热运动的宏观表现,所以在热力学中物态方程等要由实验来确定。②不能解释涨落现象。由于物质的宏观性质是大量微观粒子运动的平均效果,所以物质的宏观性质必然会出现涨落现象。而热力学理论不涉及物质的微观结构,因此对于说明涨落现象完全无能为力。

微观方法的优点:①能解释涨落现象,提出涨落现象的理论。②可从理论上导出物态方程、比热容公式等,弥补了热力学的局限性。微观方法的局限性:得到的结果接近实际。由于在统计方法中对物质的结构采用了一些模型,这些模型只是物质实际结构的近似代表,所以由统计物理得到的结果与实际不能完全符合,而只是接近实际。当然,随着人们对物质结构认识的不断深入,其结果也越来越接近实际。

两种方法,相辅相成,互相补充。

一般说来,热力学主要包括以下几个大的方面:

- ①热力学基本定律
- ②热力学函数及其应用
- ③相平衡与化学平衡

统计物理主要包括以下三个大的方面:

- ①分子动理论
- ②统计力学
- ③涨落理论