

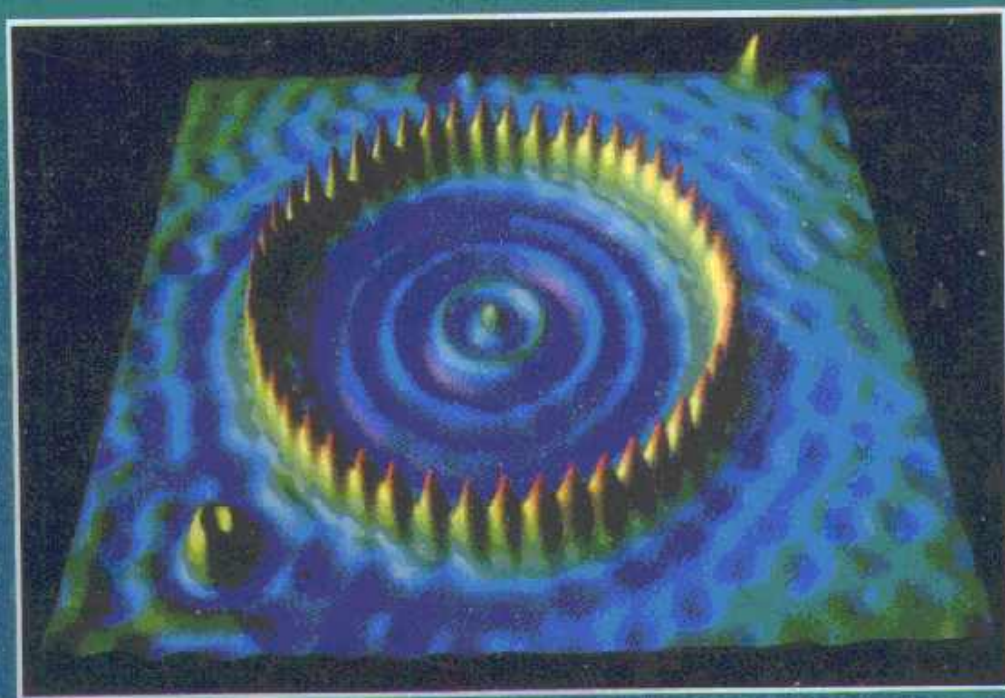
SPT 高等院校教材

# 大学物理

(新版)

下册

吴百诗 主编



科学出版社

高等院校教材

# 大学物理

(新版)

下册

主 编 吴百诗  
编 者 李锦泉 张孝林 徐忠锋  
陈光德 喻有理

科学出版社

2001

## 内 容 简 介

本书是在西安交通大学使用多年的教材的基础上修改而成的.全书力图在切实加强基础理论的同时,突出培养学生分析问题、解决问题及独立获取知识的能力.下册包括热力学基础、气体动理论、机械波、波动光学基础、狭义相对论基础、量子物理基础、原子核基本知识简介、粒子物理简介、固体物理简介、超导、激光.

本书可供工科大学各专业、理科与师范非物理专业及成人教育相关专业的大学生作为教材,也可供自学者使用.

### 图书在版编目(CIP)数据

大学物理(新版)(下册)/吴百诗主编.-北京:科学出版社,2001

ISBN 7-03-008940-5

I.大… II.吴… III.物理学-高等学校-教材 IV.O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 02125 号

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号  
邮政编码:100717

新 莹 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2001年6月第一版 开本:710×1000 1/16

2001年6月第一次印刷 印张:34 插页:2

印数:1—7 500 字数:641 000

定价:32.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)



## 前 言

著名科学家、中国科学院原院长卢嘉锡先生在一次报告中谈到,关于适应 21 世纪需要的人才应具备什么样的知识结构和有关教材改革问题时,有两段话,对我们考虑教学和教材改革问题有重要参考价值(文字未经本人审阅),现介绍如下:

(1)有一点却是十分清楚的,这就是要加强基础课程的教学。大家知道,20 世纪 50 年代中期,我们要搞两弹一星,当时集中了一批人才,其中许多是物理学家,如钱三强、邓稼先、王淦昌、彭桓武、王承书、朱光亚、周光召、于敏等同志,他们中有的搞实验物理的,有相当一部分是搞理论物理的,……他们没有辜负党和国家的期望,做出了很大贡献。

(2)教学内容和课程体系改革是一项涉及面很广、影响极其深远的改革,系统性、科学性很强。改革一定要遵循教学规律和科学发展规律,要处理好传统内容和现代内容的关系,要处理好传授知识和培养能力的关系,教学内容和教材必须是成熟的、稳定的、基础的理论知识,不可能,也不应该将当代科学的所有东西都放进去。

大学物理是低年级学生的一门重要基础课,它的作用一方面是为学生打好必要的物理基础;另一方面是使学生初步学习科学的思维方法和研究问题方法,这些都起着增强学生适应能力、开阔思路、激发探索和创新精神,提高人才科学素质的重要作用。打好物理基础,不仅对学生在校学习起着十分重要的作用,而且对学生毕业后的工作和在工作中进一步学习新理论、新知识、新技术,不断更新知识都将产生深远的影响。

本书是根据编者原先编写的《大学物理》(修订本)修改而成。该书 1995 年曾获国家教委优秀教材一等奖。改编中注意了保持原有的风格和特点,包括重物理基础理论、重分析问题解决问题能力的训练和培养,以及结合我国工科教学实际,使教材便于教和学。在此基础上,力图在不过多增加教学负担的情况下,多介绍一些新知识,扩大读者的视野,提高读者的综合科学素质。

编者对一些问题的认识和改编中的一些具体作法是:

(1)在处理经典物理和近代物理关系上,编者认为,经典物理不但是学习工科各专业知识的理论基础,而且也是学习近代科学技术新理论、新知识的理论基础。不仅如此,经典物理当今在科学和技术各领域仍然是应用最广泛的基础理论。而且大学物理中的经典部分对训练和培养大学低年级学生科学思维方法和分析问

题解决问题能力的作用是其他课程所不能代替的. 因此, 在大学物理课程和教材中必需的经典物理内容应予切实保证. 在大学物理课程和教材中加强近代物理内容是必要的. 编者认为, 加强近代物理, 应首先是加强那些学习新理论、新知识所必需的近代物理基础理论, 主要是量子物理和统计物理有关的基本概念和基本理论. 基于这样的认识, 编者认为, 原国家教委颁布的“高等工业学校大学物理课程教学基本要求”中关于经典和近代物理内容分配和要求当前还是合适的.

为了满足教学内容选择的灵活性和学有余力读者的需要, 扩大教材的适应性, 在经典物理和近代物理基础理论部分都写了一些带星号的内容, 如经典变质量力学、多自由度线性系统振动、隧道效应等, 此外, 还在附录中给出矩阵光学、混沌等少量专题, 供有兴趣的读者参考.

(2) 编者认为, 着力于训练和培养学生的科学思维方法. 分析解决问题的能力, 帮助低年级学生打好物理基础, 提高他们独立获取知识的能力是在基础课教学中, 贯彻加强科学素质培养的一种重要途径. 为此, 精选了例题和复习思考题, 加大了例题和复习思考题量, 对例题的求解过程注意了解题思路和方法的引导. 书中尝试着写了多条“解题思路和方法”, 意在向读者介绍如何用刚学过的理论去分析问题的思路和方法, 同时也起着回顾、复习、小结有关内容的作用. 由于这种作法系初次尝试, 各条写法、深度不尽一致, 写得是否中肯, 尚待使用中不断总结、改进提高.

(3) 考虑到工科大学物理课涉及面宽、内容多、而教学时数少的具体情况, 本书在保证物理基础理论的前提下, 尽量在不过多增加教材篇幅和教学负担的情况下, 采取多种形式向读者介绍新知识, 特别是我国当前科研和技术领域的新成就, 以扩大读者新知识面. 激发学生爱国激情和学习积极性. 具体作法有:

① 结合相关内容, 插入教师可以不讲而由学生自己阅读研究的小段内容, 对这些内容尽可能地配以照片、图表. 例如, 火箭、卫星、太阳系、天体、热泵、激波等等. 有些远超出大学物理范围的重要内容, 也提一二句, 使读者稍有所知, 如量子霍尔效应、分数量子效应等, 待以后需要时, 再专门学习.

② 有些和教学内容结合紧密, 而且应用十分广泛的新知识、新技术等, 按大学物理水平写了冠以星号的专节, 供读者参考, 如核磁共振、穆斯堡尔效应、光的多普勒效应等.

③ 这次书中放了一些照片(每章至少两张), 其中有的是结合教学内容, 但限于学时, 工科大学物理教材中一般不专门写, 或只顺便提两句, 例如, 对长度、时间、质量的定义. 这次我们结合我国计量科学研究院基准测量设备照片作了稍多一点介绍, 也有的和教学内容并不直接联系, 这些照片向读者介绍科学技术新成就, 扩大读者眼界, 这类照片下都有相对多一点的文字说明, 虽然在收集各类照片时得到许

多单位的支持和帮助,但毕竟遇到不少困难.本希望这部分内容能搞得更好些,但现在做的尚不能令人满意.编者认为,这种尝试是有益的,但有待在实践中进一步完善.

④本书还介绍了几位物理学家,如法拉第,爱因斯坦等,他们不但在物理学中作出了划时代的重大贡献,而且道德高尚,爱好广泛,堪称为人楷模.

(4)本书体系未作大的调整.编者认为“大学物理”教材体系是国内外经过长期教学实践形成的,因此对体系进行大的改革,宜认真总结过去教学实践中的经验,明确原有体系存在什么问题、改什么、怎么改?大的体系改革应经过仔细论证,通过试点,成功后再根据具体情况(条件)进行推广.

(5)本书分上、下两册,上册包括力学和电磁学部分;下册包括热力学、气体动理论、波动和波动光学、狭义相对论、量子物理和凝聚态物理简介等.

本书与现有多数教材安排上有两点不同.一是在热学中,先讲热力学后讲气体动理论,二是将电磁学放在热学前面,对前者,编者认为对工科学生应首先要求他们掌握热学的宏观规律,在此基础上学习气体动理论,从而在微观意义上对宏观热现象的本质以及如何采用统计平均方法建立宏观量与微观量的联系等有个初步了解.对后者只是为了与后继课程的配合和安排上的方便,对于先讲气体动理论,后讲热力学,或者是先讲热学后讲电磁学,现在这种安排也不会有任何影响.参加本书编写的有焦兆焕、张孝林、李甲科、王小力、周瑞云、李锦泉、徐忠锋、陈光德等.李普选、张俊武、刘会玲同志为本书插图及出版方面做了不少工作.

(6)本书编写中仔细地考虑了我国目前工科大学物理教学实际,包括教学课时数实际、学生实际等,以使本教材有利于教师教和学生学.

(7)为本书提供照片的单位有:中国科学院物理所、力学所、化学所、高能物理所、等离子体所、近代物理所、合肥国家同步辐射实验室,中国计量科学研究院,中国空气动力学研究中心、中国航天总公司、北京天文台、新疆天文台、哈尔滨工业大学、北京航空航天大学等,在此对他们深表谢意.

(8)本书编写过程中得到西安交通大学教务处和大学物理教学中心的大力支持.

(9)全书采用SI单位制.本书中用到的物理量符号、单位和量纲列于书前.

由于编者学识和教学经验的限制,书中不当之处和错误在所难免,还望使用本书的师生和同志们指正.

吴百诗

2000年7月

# 热 学

---

自然界中物质的运动形式是多种多样的.前面我们已经讨论了物质的机械运动和电磁运动两种基本形式.下面将研究物质运动的另一种基本形式——分子热运动.

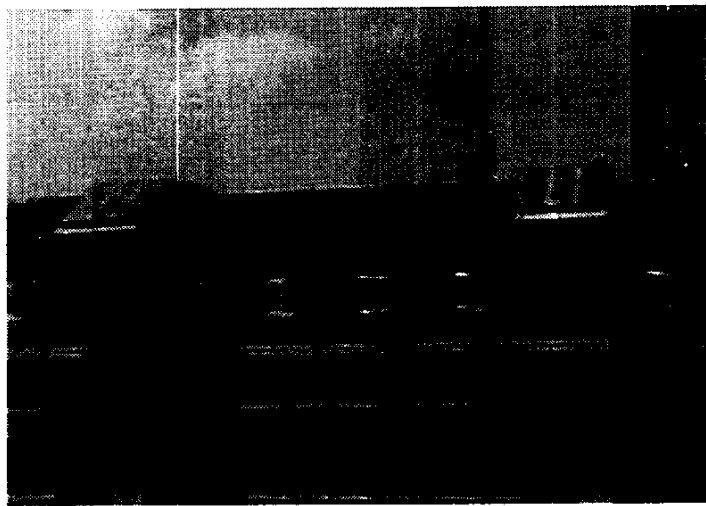
热学就是研究分子热运动及其与其他运动形式之间相互转化所遵循规律的学科.

热学有两种不同理论:一是宏观理论,称为热力学;二是微观理论,称为统计物理学.这两种理论相辅相成,构成统一的热力学理论基础.



图为中国计量科学研究院为实现 90 国际温标而研制的直流电温度比较仪.该比较仪在  $960\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\lambda = 611\text{ nm}$ ) 时,灵敏度达到  $1\sim 2\text{ mK}$ .

## 第 11 章 热力学基础



为了保护环境不受污染,也为了解决一次性能源大量消耗终将导致枯竭的危险,人们都在寻找和利用洁净、可持续发展的替代能源,如太阳能、风能、水力、地热能、潮汐能和核聚变能等都是人们看好的能源,其中太阳能无污染、取之不尽,用之不竭.在世界、在我国开发太阳能方面都做了大量工作,也已在多方面获得应用.27 届奥运会就广泛地使用了太阳能.我国广大地区蕴藏着丰富的太阳能资源有待开发.

图为上海交通大学闵行校区新建 19<sup>#</sup>学生宿舍 4 kW 公共太阳能照明系统.



热力学主要是从能量转换的观点来研究物质的热学性质,它指出了能量从一种形式转换为另一种形式时遵循的宏观规律,它是总结宏观现象而得出的热学理论,并不涉及物质的微观结构和微观粒子的相互作用.它的基本定律是从大量实验观测中总结归纳出来的,所以具有高度的可靠性和普遍性.

本章主要讨论热力学第一定律和第二定律,前者实际上是包括热现象在内的能量守恒与转换定律,后者则指明了热力学过程进行的方向和条件.

## § 11.1 热力学的研究对象和研究方法

经验告诉我们,有一类现象中,物体的状态或物理性质的变化,总是与物体冷热程度变化密切相关的.例如,物体的热胀冷缩,固、液、气各种状态的相互转变,软钢经加热迅速冷却会提高其硬度等.通常用温度表示物体的冷热程度,而把与温度有关的物理性质及状态的变化称为热现象.研究热现象的理论统称为热学,它是物理学的一个重要组成部分.

人们对热现象的认识,经历了漫长的岁月.18世纪以后,不少人认为物体中都含有一种能从高温物体自动流向低温物体的“热质”,而把温度看成是物体中含有热质多少的量度.后来人们发现这种看法与实际不符.例如,它不能解释为什么通过摩擦而并未注入什么“热质”,却可以提高两个相互摩擦物体的温度等.直到物体的分子结构学说建立以后,才逐渐认识到热现象是物体中分子热运动的表现.19世纪中期以后,为了改进热机的设计,提高热机的效率,人们对当时用作热机的工作物质——气体的性质进行了广泛地研究,气体动理论就是围绕气体性质的研究发展起来的.

大家知道,任何物体都是由大量微观粒子(分子、原子等)组成的.通常把描写这些微观粒子特征的物理量(如质量、速度、能量等)称为微观量.而把描写宏观物体特性的物理量(如压强、温度、体积、内能等)称为宏观量.显然,宏观量都是由实验观测的物理量.从微观上看来,物体内部的微观粒子都在永不停息地做无规则运动,这种运动常称为分子热运动.就物体中单个粒子来说,由于受到其他粒子的复杂作用,其运动状态瞬息万变,显得杂乱无章而具有很大的偶然性.但在总体上,大量粒子的热运动却遵循着确定的规律,这种大量偶然事件的总体所具有的规律性称为统计规律性.由于热现象是大量微观粒子热运动的集体表现,所以它服从统计规律,描写物体的宏观量与描写其中粒子的微观量之间,也存在着必然的联系.正是基于这些特点,热运动才成为区别于其他运动形式的一种基本运动形式.

热学中包含两种不同的理论.由观察和实验总结归纳出的有关热现象的规律,构成热学的宏观理论,称为热力学.从分子、原子等微观粒子的运动和它们之间的

相互作用出发,研究热现象的规律,则构成热学的微观理论,称为统计物理学.虽然两者的研究对象都是热现象,但是它们的研究方法却是截然不同的.热力学是根据由自然界大量现象的观察和实验中总结出来的几个基本定律,用逻辑推理的方法去研究宏观物体热性质的,并不追究其微观本质.统计物理学则是从物质的微观结构出发,依据粒子运动所遵守的力学规律,对大量粒子的总体,应用统计方法去研究热现象的规律和本质.因为热力学中的基本定律是从大量实际观测中总结出来的,所以具有高度的可靠性和普遍性.但是由于热力学不考虑物质的微观结构,因而就不能对宏观热现象的规律给出其微观本质的解释,这一点正是热力学理论的局限性和缺点所在.统计物理学则正好弥补了热力学的缺陷,它可以从微观上更好地揭示热现象的本质,给出宏观规律的微观解释,从而使人们更深刻地认识热力学理论的意义.至于统计物理学结论的正确性,则需要热力学来检验和证实.这样,在对热现象的研究上,两种理论起着相辅相成的作用.

气体动理论是统计物理学的组成部分.它是从气体微观结构的理想模型出发,运用统计平均方法研究气体在平衡状态下的性质以及由非平衡状态向平衡状态的转变过程等问题.下一章将讨论这一部分内容,但不全面地介绍统计物理学.

热力学和统计物理学理论,在历史上对第一次产业革命起过有力的推动作用,在现代工程技术问题中也获得了越来越广泛的应用.此外,这些理论本身,也是近代物理学中一个非常活跃的研究领域.

## § 11.2 平衡态 理想气体状态方程

### 11.2.1 气体的状态参量

用来描写物体系运动状态的物理量称为状态参量.例如,位矢和速度是描写物体系机械运动状态的力学参量.热力学的研究对象是由大量粒子组成的宏观物体或物体系,常称为热力学系统,简称系统,也叫工质.要描写热力学系统的状态,需要引入一些新的物理量.气体是一种最简单的热力学系统,也是我们要研究的主要对象.实验表明,对于一定质量的气体,其状态一般可用气体的压强、体积和温度来描写,所以常把这 3 个物理量称为气体的状态参量.

应当注意,因为气体没有固定的形态,气体分子由于热运动可以到达整个容器所占有的空间,所以气体的体积  $V$  就等于容纳气体的容器的体积.切不可把气体的体积与气体中分子本身体积的总和相混淆.

气体的压强  $p$  工程上也叫压力,是指气体作用在单位面积容器壁上的垂直作用力,它是气体中大量分子对器壁碰撞而产生的宏观效果.

温度的概念比较复杂,它在本质上与物体内部大量分子热运动的剧烈程度密切相关.但在宏观上可以简单地把它看成是物体冷热程度的量度,并规定较热的物体具有较高的温度.经验告诉我们,冷热程度不同的物体相互接触时,最后将趋于冷热程度一致的热平衡状态,具有共同的温度.因此,可以利用某些物质具有的与冷热状态有关并且易于测量的某一特性(例如汞柱的长度)制成温度计,将温度计与待测物体接触,待它们达到热平衡后,观测其测温特性的指示(如汞柱高度),就可以测定物体的温度.温度的数值表示法叫做温标.最基本的温标是 SI 中的热力学温标,其符号为  $T$ ,单位为开尔文,简称开,用 K 表示.第 11 届国际计量大会(1960)决定,热力学温度开尔文是水三相点热力学温度的  $1/273.16$ ,这意味着把水的三相点温度  $273.16\text{ K}$  规定为热力学温度的固定点(热力学温标只有这一个固定点),还规定常用的摄氏温标(符号  $t$ ,单位为  $^{\circ}\text{C}$ )由热力学温标导出,并定义

$$t = T - 273.15\text{ K}$$

必须指出,由上式规定的摄氏温标中,水的冰点为  $0^{\circ}\text{C}$  ( $273.15\text{ K}$ ),非常接近水的三相点  $273.16\text{ K}$ ,而沸点不是正好等于  $100^{\circ}\text{C}$ ,但却非常接近(为  $99.975^{\circ}\text{C}$ ).

### 11.2.2 平衡态

上面说了一定量气体的状态可用压强、温度和体积等参量描写,不过这并不是任何情况下都能做得到,而是有一定条件的.考虑一定质量且具有一定体积的气体,忽略重力及外界其他各种影响,那么不管气体起初处于什么状态,经过一段时间后,气体中各部分的温度、压强以及分子数密度等都将趋于一致.这时,气体的状态参量  $p$ 、 $V$ 、 $T$  都有确定的数值.如果保持气体不受外界影响,内部也没有任何形式的能量转化(如化学变化、原子核变化等),则气体将始终保持这一状态而不会发生宏观变化,其状态参量也将不随时间变化,气体的这种状态称为平衡状态,简称平衡态.

又如,两个冷热程度不同的物体相互接触,经过足够长的时间后,两者的温度将趋于一致.这时,如果没有外界影响,两个物体就会保持这一状态而不再发生宏观变化,这也是一种平衡态.从大量的自然现象中可以归纳出一个结论:对于热力学系统来说,平衡态是指系统的这样一种状态,即在没有外界(指与系统有关的周围环境)影响的条件下,系统各部分的宏观性质长时间内不发生变化的状态.这里所说的没有外界影响,是指系统与外界之间不通过作功或传热的方式交换能量,否则系统就不能达到并保持平衡态.由于实际中并不存在完全不受外界影响,并且宏观性质绝对保持不变的系统,所以平衡态只是一个理想化的概念,它是在一定条件下对实际情况的抽象和概括.在实际问题中,只要系统状态的变化很小而可以忽略时,就可以近似地看成平衡态.应当指出,平衡态是指系统的宏观性质不随时间变

化的状态,但从微观上看来,平衡态下系统内的分子仍在作永不停息的热运动,只不过这时分子热运动的平均效果不随时间变化而已.也正是这种分子热运动的平均效果不随时间变化,系统在宏观上才表现为处于平衡态.因此,热力学中的平衡实质上是一种动平衡,通常把这种平衡称为热动平衡.

只有在平衡态下,系统的宏观性质才可以用一组确定的参量来描写.因此,状态参量实际上就是描写系统平衡态的参量.例如,一定质量气体的平衡态,可以用其状态参量  $p$ 、 $V$ 、 $T$  的一组值来表示.一组参量值表示气体的某一平衡态,而另一组参量值则表示气体的另一平衡态.如果系统的宏观性质随时间而变化,它所处的状态称为非平衡态.在非平衡态下,系统各部分的性质一般说来可能各不相同,并且在不断地变化,所以就不能用统一的参量来描写系统的状态.在下面的讨论中,除非特别声明,所说的状态一般都是指平衡态.

### 11.2.3 理想气体状态方程

实验表明,描写一定质量气体平衡态的三个参量中,当任一参量值发生变化时,其他两个(或其中一个)也将随着变化.也就是说,三个参量之间必然存在一定的关系,其中一个参量是其余参量的函数.例如,温度  $T$  是压强  $p$  和体积  $V$  的函数,可以表示为

$$T = f(p, V)$$

这个关系式就是一定质量气体处于平衡态时的状态方程.它的具体形式,一般说来与气体的性质等有关,通常需要通过实验来确定.各种实际气体在压强不太大(与大气压相比)和温度不太低(与室温相比)的条件下,近似地遵守玻意耳定律、查理定律、盖-吕萨克定律以及阿伏伽德罗定律.根据这些实验定律,不难导出 1 mol 气体的状态方程,即

$$pV = RT \quad (11.1)$$

式中  $R = 8.31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , 是摩尔气体常量.

如果气体的质量为  $m$ , 摩尔质量为  $M$ , 则气体的摩尔数为  $\nu = m/M$ . 这时, 气体的状态方程为

$$pV = \frac{m}{M}RT = \nu RT \quad (11.2)$$

上式也称为克拉珀龙方程.

由于状态方程是根据实验定律导出的,而这些实验定律都是在一定的实验条件下得到的,它们反映的都是实际气体的近似性质,所以各种实际气体都近似地遵守式(11.1)或式(11.2).在温度不太低时,压强越低,近似程度越高,在压强趋于零

的极限条件下,各种实际气体才严格地遵守式(11.1)或式(11.2).这个事实表明,一切实际气体在  $p$ 、 $V$ 、 $T$  之间的变化关系上具有共性,它们都近似地遵守关系式(11.1)或式(11.2).至于各种气体的不同个性,则反映在它们遵守状态方程的近似程度上.所有气体表现出的共性不是偶然的,而是反映了气体的一种内在规律性.为了概括和研究气体的这一共同规律性,引入理想气体的概念.通常把在任何条件下都严格遵守克拉珀龙方程的气体称为理想气体,而把式(11.1)和式(11.2)称为理想气体状态方程.显然,理想气体实际上是不存在的,它只是实际气体的近似和理想化模型.实际气体在一般温度和较低压强下,在一般应用问题中可近似地看成理想气体.

以上讨论的是化学纯的理想气体.对于含有多种化学成分的混合气体,根据道尔顿分压定律可知,混合气体的压强等于各成分气体的分压强之和.所谓分压强,是指每一种气体在与混合气体具有相同的温度和体积的条件下,单独产生的压强.假定混合气体由  $n$  种成分的气体组成,第  $i$  种气体的质量为  $m_i$ 、摩尔质量为  $M_i$ 、分压强为  $p_i$ ,则由式(11.2)有

$$p_i V = \frac{m_i}{M_i} RT, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

式中  $V$  和  $T$  分别是混合气体的体积和温度.对  $n$  个方程求和,得

$$\sum_i p_i V = \sum_i \frac{m_i}{M_i} RT$$

混合气体的压强  $p$  和质量  $m$  分别为

$$p = \sum_i p_i, \quad m = \sum_i m_i$$

另外,规定混合气体的表观摩尔质量由下式决定

$$M = \frac{m}{\sum_i \frac{m_i}{M_i}} = \frac{m}{\sum_i \nu_i}$$

即混合气体的摩尔质量等于各成分气体质量的总和与摩尔数总和之比.综合以上关系可得

$$\boxed{pV = \frac{m}{M} RT} \quad (11.3)$$

这就是混合理想气体的状态方程.它与式(11.2)形式虽相同,但必须注意其中各量的含义却有所区别.

从以上讨论可以看出,对一定质量气体来说,其状态参量  $p$ 、 $V$ 、 $T$  中只有两个是独立的.因此,任意给定两个参量的一组数值,就确定了气体的一个平衡态.例如,在以  $p$  为纵轴、 $V$  为横轴的  $p$ - $V$  图上,任一点都对应着一个平衡态.如图 11.1



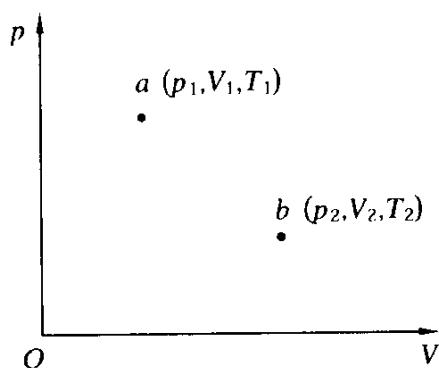


图 11.1

所示.

**例 11.1** 一氧气瓶容积为 30 L, 充满氧气后压强为 130 atm\*. 氧气厂规定, 当压强降到 10 atm 时就应重新充气. 今有一车间每天需用 40 L、1 atm 的氧气. 问一瓶氧气可用多少天? 设氧气可视为理想气体.

**解** 按照题意, 氧气在使用过程中温度不变, 本题计算的关键是比较使用前、后及所使用的氧气的质量. 或者比较三种情况下氧气的体积, 不过应该注意,

比较体积时必须在同温、同压下进行.

**解法一 比较质量**

设充气后瓶内氧气的质量为  $m_1$ , 使用后瓶内剩余氧气的质量为  $m_2$ , 每天使用氧气的质量为  $m_3$ , 并用  $V$  表示氧气瓶的容积,  $p_1$  表示充气后瓶内氧气的压强,  $p_2$  表示使用后剩余氧气的压强,  $p_3$  表示使用氧气的压强,  $v$  表示每天使用(在  $p_3$  下)氧气的体积. 由理想气体状态方程  $pV = \frac{m}{M}RT$  得

$$m_1 = \frac{Mp_1V}{RT}, m_2 = \frac{Mp_2V}{RT}, m_3 = \frac{Mp_3v}{RT}$$

所以可用的天数为

$$n = \frac{m_1 - m_2}{m_3} = \frac{(p_1 - p_2)V}{p_3v} = \frac{(130 - 10) \times 30}{1 \times 40} = 90(\text{天})$$

**解法二 比较体积**

首先分别计算出在室温和  $p_3(1 \text{ atm})$  下, 充气后瓶内氧气的体积  $V_1$ , 使用后瓶内剩余氧气的体积  $V_2$ , 以及用去氧气的体积  $V_3$ , 然后计算一瓶氧气可用的天数.

充气后瓶内氧气的体积, 由玻意耳定律

$$p_1V = p_3V_1$$

解得

$$V_1 = \frac{p_1V}{p_3}$$

使用后瓶内剩余氧气的体积, 由玻意耳定律

$$p_2V = p_3V_2$$

解得

$$V_2 = \frac{p_2V}{p_3}$$

\*  $1 \text{ atm} = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$ .

用去氧气的体积

$$V_3 = V_1 - V_2 = \frac{(p_1 - p_2)V}{p_3}$$

所以,可用的天数为

$$n = \frac{V_3}{v} = \frac{(p_1 - p_2)V}{p_3 v} = \frac{(130 - 10) \times 30}{1 \times 40} = 90(\text{天})$$

**例 11.2** 已知空气中的几种主要组分体积百分比为:氮 78%, 氧 21%, 氩 1%, 它们的分子量为氮( $\text{N}_2$ )28.0、氧( $\text{O}_2$ )32.0, 氩( $\text{Ar}$ )39.9. 试求:在标准状态(1 atm, 0 °C)下,空气中各组分的压强、密度以及空气的密度. 设空气可视为理想气体.

**解** 通常说某一混合气体中各组分的体积百分比,是指每种组分单独处在与混合气体相同的压强和温度状态下,其体积占混合气体体积的百分比. 若用下标 1、2、3 分别代表氮、氧、氩. 在标准状态下,它们的体积分别为

$$V_1 = 0.78V, \quad V_2 = 0.21V, \quad V_3 = 0.01V$$

其中  $V$  为混合气体在标准状态下的体积.

将三种气体混合成标准状态下的空气后,它们的状态分别以  $(p, V_1, T)$ 、 $(p, V_2, T)$ 、 $(p, V_3, T)$  变为  $(p_1, V, T)$ 、 $(p_2, V, T)$ 、 $(p_3, V, T)$ , 其中  $p = 1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ , 为混合气体在标准状态下的压强,  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$  分别为三种组分的压强. 由于气体混合过程中,温度  $T$  保持不变. 由理想气体状态方程可得

$$p_1 V = p V_1, \quad p_2 V = p V_2, \quad p_3 V = p V_3$$

因此有

$$p_1 = \frac{V_1}{V} p = 0.78 p = 7.9 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$p_2 = \frac{V_2}{V} p = 0.21 p = 2.1 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$p_3 = \frac{V_3}{V} p = 0.01 p = 1.0 \times 10^3 \text{ Pa}$$

根据理想气体状态方程,可知理想气体的密度为

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT}$$

所以,在标准状态下,各组分的密度分别为

$$\rho_1 = \frac{p_1 M_1}{RT} = \frac{7.9 \times 10^4 \times 28.0 \times 10^{-3}}{8.31 \times 273} = 0.97(\text{kg/m}^3)$$

$$\rho_2 = \frac{p_2 M_2}{RT} = \frac{2.1 \times 10^4 \times 32.0 \times 10^{-3}}{8.31 \times 273} = 0.30(\text{kg/m}^3)$$

$$\rho_3 = \frac{p_3 M_3}{RT} = \frac{1.0 \times 10^3 \times 39.9 \times 10^{-3}}{8.31 \times 273} = 0.02 (\text{kg/m}^3)$$

则空气在标准状态下的密度为

$$\rho = \rho_1 + \rho_2 + \rho_3 = 0.97 + 0.30 + 0.02 = 1.29 (\text{kg/m}^3)$$



### 解题思路和方法

应用理想气体状态方程分析和解决问题时,首先要确定合适的研究对象,并把所需要研究的那部分气体想象地隔离出来.分析研究对象所处的状态或经历的变化过程,弄清状态参量之间的联系或变化的规律.然后再决定选取所需要的计算关系式.一般来说,若题中只涉及到气体的某一状态,则可直接选用状态方程  $pV =$

$\frac{m}{M} = RT$ ,由已知量求解未知量;若题中涉及一定质量的气体依照某一过程从一个

状态变到另一个状态,则可选用  $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \dots = \text{常量}$  来求解;若题中涉及质量变化,可根据实际情况灵活选用公式,有时需要利用变化关系,列出有关方程联立求解.但应该注意无论选用那种形式的状态方程,温度必须用热力学温标表示,其他量也要注意单位的一致.

### 复习思考题

11.1 气体处于平衡态时有什么特征?热力学中所指的平衡与力学中所说的平衡有什么不同?

11.2 一金属杆,一端置于沸水中,另一端置于冰水中.如果沸水和冰水的温度都保持不变,那么经过一段时间后,杆上各处的温度虽然各不相同,但都将不随时间变化.试问金属杆是否处于平衡态?为什么?

11.3 一个与外界隔绝的密闭容器中,贮有一定质量的气体.考虑到重力的影响时,气体中各处的温度虽然相同,但压强将沿高度按一定规律变化,并且这种状态不随时间改变.试问这时气体是否处于平衡态?为什么?

11.4 试由气体实验定律导出理想气体状态方程(11.1).

11.5 理想气体的概念是怎样从实验中抽象出来的?理想气体状态方程有哪些形式,它们各自适用的条件是什么?

11.6 非平衡态是否能在  $p - V$  图中用一点来表示?为什么?

11.7 试根据  $\frac{pV}{T} = \text{恒量}$  的物理意义回答,下列情况下此恒量是否相同?

- (1) 摩尔数相同但种类不同的气体;
- (2) 质量一定处于不同状态的同种气体;
- (3) 质量相同而摩尔质量不同的气体;

(4) 质量不同的同种气体.

## § 11.3 功 热量 内能 热力学第一定律

力学中的功能原理表明,外界对系统做功的结果将使系统的机械运动状态发生变化.在做功过程中,外界与系统之间产生能量交换,从而改变了系统的机械能.更一般地说,由做功所引起的不只是机械运动状态和机械能的变化,还可能发生像热运动状态、电磁运动状态等以及与之相关的能量变化.在热力学中,通常不考虑系统整体的机械运动,只研究系统内分子热运动的宏观规律.无数事实证明,外界对系统做功或传递热量,都可以使系统的热运动状态发生变化.例如,一杯水可以通过外界对它加热,用传递热量的方法使它的温度升高;也可以用搅拌或通以电流做功的方法使它升高到同样的温度.既然系统的热运动状态发生了变化,那么与热运动有关的能量——内能也必然随之发生变化.下面就来讨论内能的概念以及它与功和热量的关系.

### 11.3.1 功 热量 内能

设想有一个容器,外界与它除了通过做功外,再也没有别的方法与其中的物质系统交换能量,就说这个容器是由绝热壁构成的.由绝热壁所包围的系统,其状态发生变化(不考虑物质内部的化学变化、原子核变化等)的过程称为绝热过程.显然,绝热过程中系统状态的变化,只是由外界对系统做功引起的.大量实验表明,当系统从确定的初平衡态变化到确定的末平衡态时,在不同的绝热过程中,外界对系统做功的数值都相同.也就是说,绝热过程中的功仅由系统的初、末状态完全决定,与过程的具体进行方式无关.例如,要使一杯水从 300 K 绝热地升高到 350 K,其方式是多种多样的.可以用搅拌的方式做功,也可以通过电流做功;可以先剧烈后缓慢地做功,也可以用完全相反的方式做功等等.不过无论采用哪种方式,只要系统的初、末状态已经给定,所作功的数值都相等.这与力学中保守力做功的性质相类似.这一事实表明,在热力学系统中也存在一种仅由其热运动状态单值决定的能量,它的改变可以用绝热过程中外界对系统所作的功来量度,这种能量称为系统的内能.如果用  $E_1$  与  $E_2$  分别表示系统在初、末两平衡态的内能,用  $A_Q$  表示外界在绝热过程中对系统所作的功,按照功与能量的关系,做功的结果将使系统的内能增加,因此有

$$E_2 - E_1 = A_Q \quad (11.4)$$

从上式可以看出,绝热过程的功只能决定初、末两状态的内能差,但不能决定任一