

582

10477

参 5422

669871

全国高等林业院校试用教材

热 工 学

北京林学院主编

木材机械加工专业用

中国林业出版社

77

全国高等林业院校试用教材

热 工 学

北京林学院主编

木材机械加工专业用

中国林业出版社

主 编 张璧光 乔启宇
参加编写人 连仁梯
主要审稿人 解鲁生 杨昌俊 徐永铭

全国高等林业院校试用教材

热 工 学

北京林学院主编

中国林业出版社出版 (北京朝内大街130号)

新华书店北京发行所发行 农业出版社印刷厂印刷

787×1092毫米16开本 17.5印张 1插页 379千字

1980年12月第1版 1982年11月北京第2次印刷
印数 3,101—5,800册

统一书号 15046·1022 定价 2.00元

前 言

本教材是根据 1977 年 12 月全国高等林业院校木材机械加工专业教材会议制定的《热工学》教学大纲编写的。初审书稿时对该大纲作了修订，在内容上也作了相应的调整和增补。本教材按 65 学时数编写。

全书共分四篇，第一篇工程热力学；第二篇传热学；第三篇工业锅炉；第四篇压气机和热力发动机。在内容安排上，除保持热工基本理论的系统性以外，还根据木材机械加工工艺特点，对湿空气的基本概念和焓湿图的绘制及应用，加热器的计算与选型及锅炉等热工设备的原理、结构和性能等作了较详细的论述。同时还纳入一些较新的内容，如网络法辐射换热计算、太阳能利用、换热器计算的传热单元数法、热管；在工业锅炉部分，收集了国内较新的资料与数据。

本教材编写分工如下：绪论乔启宇；第一篇张璧光；第二篇张璧光、乔启宇；第三篇乔启宇、张璧光、连仁悌；第四篇乔启宇、连仁悌。连仁悌担任了主要绘图工作。

西安冶金建筑学院解鲁生、华中工学院杨昌俊和东北林学院徐永铭三位同志担任了本教材的主要审稿工作，提供了许多宝贵意见，在此谨致诚挚的谢意。

由于水平有限，错误或不当之处在所难免，望批评指正。

汽轮机、内燃机两章用·号标明，不作为木材机械加工专业教学要求。

编者

一九七九年十二月

7A 013/06

目 录

绪论.....	1
---------	---

第一篇 工程热力学

第一章 基本概念	4
第一节 工程热力学的研究对象及方法.....	4
第二节 工质的热力状态及基本参数.....	5
第三节 理想气体的状态方程式.....	9
第四节 可逆过程与不可逆过程.....	10
第五节 气体的比热.....	11
第六节 混合气体.....	14
第二章 热力学第一定律及热力过程	17
第一节 热力学第一定律及其解析式.....	17
第二节 稳定流动能量方程式·焓.....	21
第三节 基本热力过程与多变过程.....	25
第三章 热力学第二定律	33
第一节 循环与循环热效率.....	33
第二节 热力学第二定律.....	35
第三节 卡诺循环与卡诺定理.....	37
第四章 水蒸汽	39
第一节 基本概念.....	39
第二节 定压下水蒸汽的产生过程.....	40
第三节 水蒸汽表及水蒸汽状态的确定.....	43
第四节 水蒸汽的焓熵图.....	44
第五节 气体和蒸汽在喷管中的流动.....	46
第六节 气体和蒸汽的节流.....	49
第五章 湿空气	52
第一节 湿空气的性质.....	52
第二节 湿空气的焓—湿量 (H—d) 图.....	55
第三节 湿空气的焓—湿量 (H—d) 图的应用.....	58

第二篇 传热学

第六章 导热	63
第一节 导热的基本定律.....	63
第二节 导热系数.....	64

第三节	通过平壁的稳定导热	65
第四节	通过圆筒壁的稳定导热	68
第五节	不稳定导热的基本概念	71
第七章	对流放热	73
第一节	影响放热过程的因素和边界层基本概念	74
第二节	对流放热问题的实验求解	77
第三节	大空间自由运动放热	84
第四节	管内受迫运动放热	86
第五节	横掠管束放热	90
第六节	集态改变时的放热	92
第八章	热辐射	97
第一节	热辐射的基本概念	97
第二节	热辐射的基本定律	99
第三节	物体之间的辐射换热	101
第四节	气体辐射与太阳辐射	108
第九章	传热与换热器	110
第一节	复杂换热与传热	110
第二节	换热器及其热计算原理	115
第三节	传热单元数法与换热器效能	122
第四节	传热的增强与热管简介	125
第五节	热绝缘	127

第三篇 工业锅炉

第十章	工业锅炉概述	129
第一节	锅炉设备组成	129
第二节	锅炉工作原理	131
第三节	锅炉设备基本特性	132
第十一章	锅炉燃料和燃烧计算	136
第一节	锅炉燃料的成分和燃料分类	136
第二节	煤的燃烧特性和煤的分类	140
第三节	燃料燃烧计算	144
第十二章	锅炉热平衡	152
第一节	锅炉热平衡方程和锅炉热效率	152
第二节	机械不完全燃烧损失与化学不完全燃烧损失	155
第三节	排烟热损失	157
第四节	散热损失和灰渣物理热损失	158
第十三章	燃烧设备——炉子	159
第一节	炉子的分类及炉内燃烧过程	160
第二节	手烧炉	161
第三节	机械化篦炉	163
第四节	抛煤机炉及沸腾炉	168

第五节	悬燃炉	170
第六节	炉子热强度及燃烧情况的判断	172
第十四章	汽锅及辅助受热面	175
第一节	锅炉型式的发展概况及基本类型	175
第二节	几种典型锅炉的介绍	178
第三节	锅炉的辅助受热面	184
第四节	锅炉的传热过程及水循环	186
第十五章	锅炉的辅助设备、锅炉的选择与改造	190
第一节	锅炉水处理	190
第二节	锅炉的通风、除尘设备	196
第三节	锅炉的选择	200
第四节	锅炉的改造	203
第四篇 压气机和热力发动机		
第十六章	压气机	207
第一节	压气机的分类与构造	207
第二节	单级往复式压气机的工作循环	210
第三节	往复式压气机的功率和效率	213
第四节	多级往复式压气机的工作原理	215
第五节	离心式压气机的工作原理及选择	218
第十七章	内燃机	221
第一节	内燃机的燃料和燃烧方式	222
第二节	四冲程点燃式内燃机的工作原理	224
第三节	四冲程压燃式内燃机的工作原理	227
第四节	二冲程内燃机的工作原理	229
第五节	内燃机的性能指标和使用特性	231
第六节	内燃机的曲柄连杆机构和配气机构	234
第七节	汽油机的燃料供给系和点火系	239
第八节	柴油机的燃料供给系和燃烧室	241
第九节	内燃机的润滑与冷却	244
第十八章	汽轮机	246
第一节	蒸汽动力装置的基本循环——朗肯循环	246
第二节	汽轮机的工作原理	248
第三节	蒸汽在叶片上的能量转换	251
第四节	汽轮机的结构	253
附录		257
表 1	功及热量单位换算	257
表 2	几种气体的平均定压重量比热	257
表 3	几种气体的平均定压容积比热	258
表 4	饱和水与干饱和蒸汽(按温度排列)	258
表 5	饱和水与干饱和蒸汽(按压力排列)	260
表 6	未饱和水与过热蒸汽	262
表 7	空气的热性质(在 1atm 下)	266

表 8	烟气的热性质	266
表 9	饱和水的热性质	267
表10	干饱和水蒸汽的热性质	268
表11	过热水蒸汽的热性质	268
表12	几种油的热性质	270
表13	水的热物性综合项	271
表14	各种材料辐射黑度	271
主要参考文献		272

绪 论

随着经济的发展，世界各国对能源的需求日见增长，能源的开发和利用已成为当代人类迫切需要解决的一个重大问题。

能量的形式多种多样，如热能、水能、风能、化学能、原子能等等。人类对热能的利用具有悠久的历史。迄今为止，热能仍然是人类所利用的一种主要的能量形式。

热能广泛地存在于自然界，并发生在许多人工控制的过程中。燃料的化学能通过燃烧反应变成热能；原子核的裂变和聚变反应使原子能变成大量的热能；物体吸收了太阳的辐射能转化为热能；热能还广泛地蕴藏在地下（称为地热）和海水之中（称为海水热）；此外，许多工业生产过程的废液、废气（废汽）、废渣以及成品或半成品都带有相当多的余热可供利用。

热工学是研究热能在工程上有效利用的一门综合性技术科学，它由热工理论基础和热工设备两部分组成。热工理论基础包括工程热力学和传热学，分别研究热能与机械能相互转换和热量传递的规律；热工设备包括各种热力发动机（简称热机，如蒸汽机、内燃机、汽轮机、燃气轮机和喷气发动机等）、压气机、制冷装置和锅炉设备等等，这些设备是按照热工理论所研究的规律进行工作的。因此，本课程将在学习热工基本理论的基础上，研究各种热工设备的工作原理、构造特征、运行条件和适用场合等具体问题。

热工学作为一门独立的技术科学，发展历史只有一百多年。人类很早就在与自然界的斗争中学会了取火和用火，但在十八世纪七十年代以前，对热能的利用还局限于直接用来加热的简单方式，而生产所必须的动力主要来源于人力、畜力、风力和水力。十七世纪末，由于采矿业的发展，出现了用于矿井排水的原始蒸汽机，经过不断的改进，到十八世纪八十年代，出现了相当完善的蒸汽机，从此创造了另一种利用热能的形式——把热能转变为机械能再加以利用。蒸汽机出现以后，迅速在纺织、锯木等行业中广泛使用，促进了生产的发展，在欧洲引起了产业革命，推动了资本主义世界的发展。

十九世纪中叶，由于对蒸汽机的研究和改进，逐渐弄清了热机工作的基本原理，从而建立了工程热力学的理论体系。到十九世纪后半叶，由于交通运输业的发展，要求有结构轻巧和高效的热机，当时机械制造水平的提高，以及电机电器制造的发展，也为其它类型热机的出现准备了条件。更重要的是已经建立起来的热工基本理论，指导了其它类型热机的研究，于是在十九世纪的最后二十年内，相继出现了煤气机、汽油机、重油机和柴油机等多种型式的往复式内燃机和蒸汽轮机。进入二十世纪以后，工业的发展对电力的需求迅速增加，用于火力发电厂的蒸汽轮机和配套的锅炉工作参数，也迅速向高温高压和大容

量方向发展,二十世纪五十年代以来,由于高速飞行、宇宙航行和火箭导弹等科学技术的飞跃发展,又为新型发动机在设计理论、燃料、结构材料和制造工艺各方面创造了条件,因此出现了燃气轮机和喷气发动机。同时往复式内燃机在性能和结构上有了很大改进,相对于往复式内燃机具有一定优点的旋转活塞式内燃机也有了发展。

世界上各类热机的拥有量不断增加,所耗用的燃料也随之增长,同时,化学工业的发展使煤、天然气和石油等有机矿物燃料成为塑料、合成纤维和合成食品等化工新产品的重要原料,因此,进一步加剧了燃料短缺的矛盾。此外,发动机排出的大量废气也造成了严重的环境污染。以人工控制的原子核裂变所放出的原子能,作为热机的新热源虽然已经实现,但核燃料来源和环境污染问题并未彻底解决。因此,正致力于探索和开发廉价和“清洁”的新能源,如太阳能、地热、海水热等自然界中取之不尽的能源。在高效率发电装置方面,磁流体发电和燃料电池的研究也取得了显著成就,关于这些新能源利用和新型动力装置的理论已成为工程热力学的新内容。

热量传导的基本规律发现于十九世纪后半叶,随着热机功率的大量提高,传热过程所起的作用越来越显著,同时,在建筑、冶金、化工、机器制造和电工等其它技术领域内也对传热过程进行了大量的研究。二十世纪以来,物理学上的成就,尤其是关于流体“层流”和“紊流”理论,以及流体流动边界层理论的形成和发展,更深刻地揭示出换热过程的物理本质,逐渐形成了传热学的理论体系。随着传热理论的发展,热机的工作得到了很大改善,许多大容量、高效能的换热设备在工程上得到广泛应用,还解决了高速飞行和宇宙航行中一系列复杂的换热问题。

制冷装置最早出现于十九世纪八十年代,当时是氨压缩制冷系统,经过近一百年的发展,出现了各种制冷循环和制冷剂,目前由于化工、医疗卫生、冷藏和科学研究等方面的需要,制冷装置向大热流量和深度制冷方向发展。

上述发展历史表明,热工理论是在热力工程实践的基础上建立和发展起来的,而热工理论的发展又反过来指导和促进了热工技术的进步和提高。

在热能利用方面,我国劳动人民有许多杰出的发明和创造,火药、火箭、用于金属铸造时鼓风的压气设备,以及作为现代燃气轮机雏形的走马灯等,在我国历史上的记载,远较世界各国为早,但在近二百年内,由于封建制度对生产力的束缚以及帝国主义的侵略和压迫,在科学技术上与先进国家相比出现了显著的差距。解放前,我国没有完整的动力工业,按人口平均年发电量每人每年不足10度,各种动力机械和设备如火力发电机组、汽车、铁路机车等全依赖进口或掌握在外国人手中,国内仅有一些小规模 of 修配工厂。

解放后,党和国家对于作为工业先导的动力工业的发展十分重视。从五十年代开始,先后在哈尔滨、上海、武汉、北京、四川等地建立了生产大型锅炉、汽轮机和发电机等成套发电设备的动力工业基地,目前已能生产30万千瓦双水内冷汽轮发电机组这样有高度技术水平的产品。汽车拖拉机工业从无到有,现已建立了完整的体系。我国已能生产6000匹马力的机车用柴油机和12000匹马力的大型船用柴油机。我国也有了自己的航空用燃气

轮机 and 喷气发动机，以及发射人造地球卫星的强大的火箭发动机。热工理论和技术研究工作也在许多科研机关和高等学校开展，太阳能、地热的利用已经取得显著的研究成果，并有一些生产装置投入运行。可以预见，随着我国工业、农业、国防和科学技术四个现代化建设的发展，我国热工事业将会出现更大的飞跃。

热工学与森林工业的关系比较密切，木材加工工业中木材的蒸煮软化和干燥、人造板压制等工艺过程，以及林产化学加工工业的发酵、提炼、分馏、蒸发和干燥等工艺过程中，都需要利用热能进行加热，锅炉、加热器、蒸发器和压气机等是这些工业生产中不可缺少的重要热工设备；木材采伐运输机械、营、造林机械，林区道路修建工程机械和小型移动电站等都不同型式的热力发动机作为动力。此外，热工理论还是学习森林工业一些专业课程（如木材干燥学、内燃机等）的基础。所以，作为森林工业的工程技术人员，掌握热工学的基本知识是完全必要的。

第一篇 工程热力学

第一章 基本概念

第一节 工程热力学的研究对象及方法

热力学是研究伴有热效应的能量转换规律及物质热力性质的一门科学。

工程热力学是热力学的一个分支，主要研究热能与机械能之间的转换规律。近年来由于新能源的开发，各种新能量转换方式的出现，已使工程热力学的内容扩大到研究能量转换的一般规律，而不仅仅限于热、功转换。

工程热力学的基础理论是热力学第一定律和第二定律，这两条定律是人类从长期实践中总结出来的普遍规律。

工程热力学的研究方法和热力学一样是宏观的，即从能量观点出发，从能量收支平衡着眼，研究物质热运动的宏观现象和宏观过程。对物质内部的微观结构和宏观现象的物理本质不作深入的讨论。

能量的传递和转换需要媒介物质，这种媒介物质称为工质；实现能量传递和转换的设备则分别称为热力设备和热机。例如在木材干燥室内，通常是利用蒸汽加热器来加热空气，然后再用热空气去加热干燥木材，传递热量的蒸汽和空气分别为加热器和干燥室内的工质，蒸汽加热器即是干燥室内的加热设备。图 1—1 为火力发电厂的蒸汽动力装置示意图。首先是水在锅炉中吸收高温烟气的热能而变为蒸汽，蒸汽进入汽轮机推动叶轮旋转，将热能转变为机械能，再带动发电机发出电能。做完功的废汽排入冷凝器被冷却水冷凝成水，再经给水泵重新打到锅炉中去，这就完成了一个蒸汽动力循环。在这个蒸汽动力装置中，汽轮机中的工质是蒸汽；锅炉中的工质是烟气、水和蒸汽。因为工质的热力性质与作功能力大小及传热能力等有密切关系，因此工程热力学中还必须研究工质的热力性质。由于气（或汽）态物质最适于作热机和热力设备的工质，故本

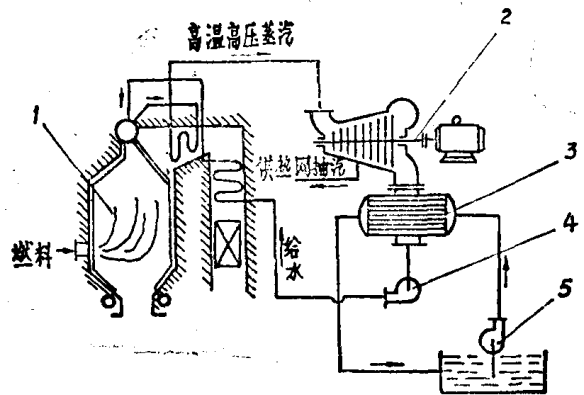


图 1—1 蒸汽动力装置示意图

- 1. 锅炉
- 2. 汽轮发电机组
- 3. 冷凝器
- 4. 给水泵
- 5. 冷却水泵

书中以后所讨论的工质，一般都是指气（或汽）态物质。

为分析方便起见，和力学中取分离体一样，在热力学中常把分析对象从若干物体中分割出来，并把它称为“热力系统”或简称“系统”。系统以外的物质统称为“外界”或“环境”。系统范围的大小视具体要求而定。例如图 1—1 所示的蒸汽动力装置，当需要计算整个蒸汽动力厂的经济性时，可把整个蒸汽动力装置划作一个热力系统，如果只研究蒸汽在汽轮机中的工作，就可把汽轮机进口与出口间的蒸汽划作一个热力系统，计算在一定的时间内从进口输入的蒸汽所带进的能量，从出口排出的蒸汽所带走的能量，以及蒸汽对叶轮所作的功等。

第二节 工质的热力状态及基本参数

工质在工作过程中，温度或压力不断的变化，例如在锅炉中，低温的水变成高温的蒸汽；又如汽轮机中，温度、压力都较高的新汽膨胀做功后变为温度、压力都较低的废汽。上述现象叫做工质热力状态（或简称状态）的变化，用来表征工质热力状态的物理量叫状态参数。对应于工质的每一个状态、各状态参数都有一定的数值，只要其中一个状态参数值有了变化，就意味着工质的状态已发生了变化。

在工程热力学中研究工质的状态时，为使问题简化，都是假定工质处于平衡状态，这种平衡不同于简单的机械平衡，而是包括热平衡（即温度平衡）与力平衡（即压力平衡）。工质在平衡状态下，各部分状态均匀一致，每个状态参数只有一个确定的数值。

在工程热力学中，常用的状态参数有六个：压力 p ；温度 T ；比容 v ；内能 u ；焓 h ；熵 s 。

其中压力、温度、比容是可以直接测量的量，并且容易理解其物理意义，是描写工质状态最常用的热力参数，因此称为基本状态参数。

一、压 力

从分子运动论的观点来看，气压的压力^①是气体的大量分子对容器壁撞击的总结果。

压力的大小以垂直作用在单位面积上的力来衡量，如用 S 表示工质的受力面积， F 表示垂直作用于该面积上的力，则：

$$p = \frac{F}{S}$$

常见的压力单位有以下几种：

1. 公斤/米²及工程气压（公斤/厘米²） 在采用工程度量制时，即当力的单位为公斤（kg）、面积单位为米²（m²）时，压力的单位应为公斤/米²（kg/m²）。但这个单位很小，

^① 在普通物理学中称为压强，虽然含义上比较合理，但在工程上还未被采用。

在工程计量上很不方便，故常采用公斤/厘米² (kg/cm²) 作为压力单位，称为工程气压，简称气压，用符号 at 表示。

2. 毫米汞柱或毫米水柱 压力的大小之所以可以用液柱的高度 h 来表示，是由于液柱的重量在它的底面产生一定的压力。当液柱的高度为 h 、底面积为 S 、液体重量（单位体积的液体重量）为 γ 时，液柱在底面积上的作用力 F 应为：

$$F = hS\gamma$$

则：

$$p = \frac{F}{S} = h\gamma$$

因此，当液体重量 γ 为已知时，液柱的高度 h 即表示工质压力的大小。

一般在压力不大的场合（如通风机），常用毫米汞柱（mmHg）或毫米水柱（mmH₂O）作为压力单位。

以上几种压力单位的换算关系是：

$$1\text{at} = 1\text{kg/cm}^2 = 10^4\text{kg/m}^2 = 10\text{mH}_2\text{O} = 735.6\text{mmHg}$$

3. 物理大气压又称标准大气压 物理学上把纬度45°的海平面上常年的平均空气压力，定为一个物理大气压或称为标准大气压，用符号 atm 表示，它与前两种压力单位的换算关系为：

$$1\text{atm} = 760\text{mmHg} = 1.0332\text{at}$$

在工程上，如不特殊说明是物理大气压时，均指工程气压。

4. 巴和磅/英寸² 在国际单位 SI 制中，压力单位为帕斯卡简称帕（Pa）。

$$1\text{Pa} = 1\text{牛顿/米}^2 (\text{N/m}^2)$$

但在应用上嫌此单位太小，工程上常用巴（bar）作单位，帕与巴的关系如下：

$$1\text{bar} = 10^5\text{Pa} = 1.02\text{at}$$

此外，英美等国家尚有采用磅/英寸² (lbf/in²) 作压力的单位，它与大气压间的换算关系为：

$$1\text{at} = 14.2\text{lbf/in}^2$$

气体的压力常用弹簧管式压力计或“U”形管压力计来测量。“U”形管压力计原理如图 1—2 所示，“U”形管内装有水银或水，其一端与大气相通，另一端与容器相通，当容器内气体压力 p 高于大气压力 B 时（图 1—2a），与容器相通的一侧液柱低而与大气相通的一侧液柱高，二者之差为 h 。当气体压力低于大气压时（图 1—2b），则与容器相通的一侧液柱高，与大气相通的一侧液柱低，也会出现一个液柱差 h 。

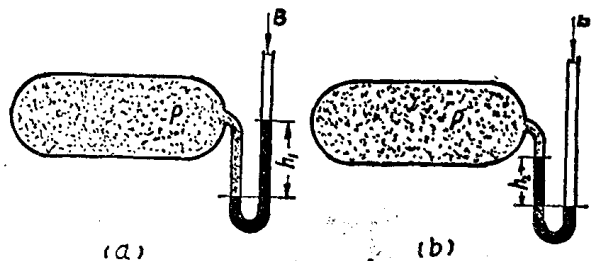


图 1—2 “U”形管压力计原理图

a. 高于大气压 b. 低于大气压

由上述的压力计原理可以看出，由于压力计本身处于大气压力作用下，故由压力计测得的压力，是气体的实际压力与当地大气压力 B 之差值，是一个相对压力，称为表压力，用 p_m 表示，以气压表示的表压力单位用符号 atg 表示。气体的实际压力称为绝对压力（以后简称压力）用 p 表示，以气压表示的绝对压力单位用符号 ata 表示。当气体压力高于大气压力时，其表压力为：

$$p_m = p - B \quad (1-1)$$

当气体压力低于大气压时，其表压力称为真空度，用 H 表示，即：

$$H = B - p \quad (1-2)$$

进行热力状态分析时，作为状态参数的压力应是气体的实际压力即绝对压力，因为大气压力 B 随时随地可能变化，即使气体的绝对压力不变，表压力或真空度仍可能变化。绝对压力的数值一般不能直接测量出来，但由于表压力和大气压力都是可以测定的，故绝对压力可以由计算方法求得，由式 (1-1) 及 (1-2) 可得：

$$p = p_m + B \quad (1-3)$$

$$p = B - H \quad (1-4)$$

例 1-1 某蒸汽锅炉的蒸汽压力用压力表测得为 9.5atg ，当地大气压力 B 为 750mmHg ，求蒸汽的绝对压力。

解：根据式 (1-3) 可知蒸汽的绝对压力为：

$$p = p_m + B = 9.5 + 750/735.6 = 10.52\text{ata}$$

例 1-2 用真空表测得某容器中的真空度为 120mmHg ，当地大气压力为 770mmHg ，求容器中的绝对压力。

解：根据式 (1-4)，容器中的绝对压力为：

$$\begin{aligned} p &= B - H = 770 - 120 = 650 \text{ mmHg} \\ &= 650/735.6 = 0.883 \text{ ata} \end{aligned}$$

二、温 度

温度表示工质的冷热程度，即分子热运动的强弱程度。根据分子运动论，气体的温度与大量分子热运动的平均动能成正比，气体温度高就表明气体分子热运动的动能大。

衡量温度的尺度叫温标，常用的温标有摄氏温标、绝对温标和华氏温标三种。

摄氏温标又称为百度温标，以符号 t 表示，摄氏温标规定，在一个物理大气压下，纯水结冰的温度为零度；沸腾时的温度为一百度，中间分一百个等分，每等分即为一度。摄氏温标的单位是 $^{\circ}\text{C}$ ，例如摄氏 20 度，记为 20°C 。

一般温度计测量出来的温度都是摄氏温度，故一般工程上都用摄氏温度。

热力学中常用绝对温标（或称热力学温标），以符号 T 表示，单位代号是 K （称为开尔文）。绝对温标规定，以物质分子运动完全停止时的温度为零度，称为绝对零度，很显然，绝对零度永远无法获得。绝对温标和摄氏温标每一度间隔是相同的，只是起点不同。二者

的关系是：

$$T = t + 273.15$$

即摄氏温度的 0°C ，为绝对温度的 273.15K 。在一般工程计算上简化为：

$$T = t + 273 \quad (1-5)$$

只有绝对温度才是状态参数，所以在热力学计算中要用绝对温度。

此外在英美等国常用华氏温标，仍用符号 t 表示，单位符号是 $^{\circ}\text{F}$ 。华氏温标规定在 1 物理气压下，纯水结冰时的温度为 32 度；沸腾时的温度为 212 度，中间划分 180 等分，每一等分为华氏一度。华氏温标与摄氏温标的关系为：

$$t^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5}t^{\circ}\text{C} + 32$$

或

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9}(t^{\circ}\text{F} - 32) \quad (1-6)$$

测量温度的温度计种类很多，最普通的是玻璃管水银温度计，它是利用水银的热胀冷缩性质来测量温度的。事实上温度的变化不仅会引起体积的变化，而且还会引起其它物理性质如压力、电阻、热电势等的变化，利用这些性质的变化可做成多种多样的温度计，如压力式温度计，热电阻、热电偶温度计等。

三、比 容

单位重量的物质所占有的容积叫比容，用 v 表示。若工质的重量为 G 、占有的容积为 V ，则：

$$v = \frac{V}{G} \quad \text{米}^3/\text{公斤} (\text{m}^3/\text{kg}) \quad (1-7)$$

比容的倒数，即单位容积内工质的重量，称为工质的重度，用 γ 表示，则：

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad \text{公斤}/\text{米}^3 (\text{kg}/\text{m}^3) \quad (1-8)$$

因为 v 和 γ 互为倒数，显然它们不是互相独立的参数；可任选其中之一，通常取比容 v 作为独立参数。

以上简单地介绍了工质的三个基本状态参数，实践证明要确定工质的状态并不需要全部的状态参数值。对处于平衡状态的工质，只需要知道两个独立的参数就可确定工质的状态。其它的状态参数值，可以根据已知的两个参数值，通过一定的函数关系计算出来。

既然工质的平衡状态可以由两个独立的状态参数来描写，那么由任意两个独立参数所组成的平面座标——状态座标图上的任一点，都相应于工质的某一平衡状态。例如以压力 p 为纵座标，比容 v 为横座标组成的 $p-v$ 座标图（称为压容图），如图 1-3。图中的 1 点代表气体压力为 p_1 、比容为 v_1 的状态 1，若气体经过许多中间状态变化到压力为 p_2 、

比容为 v_2 的状态 2，以图上的 2 点来表示，则气体由状态 1 到状态 2 的变化过程叫做热力过程， $p-v$ 座标图上的 1—2 曲线，就代表这一热力过程。由此看出，利用状态座标图可以形象、清晰地分析工质状态变化情况，具有很大的实用意义。

必须指出，只有平衡状态才能在状态座标图上用一确定的点来表示，同时也只有当工质经过一系列平衡状态的平衡过程，才能在状态座标图上用一确定的实线表示。

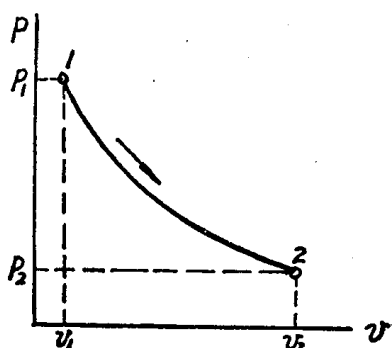


图 1—3 热力状态参数座标图

第三节 理想气体的状态方程式

理想气体是指分子本身不占体积、分子之间无吸引力的一种假想气体。提出理想气体的概念是为了在抓住主要矛盾的情况下，使气体分子的运动规律大大简化。虽然理想气体在自然界并不存在，但一般工程上常用的气体，如氧、氮、一氧化碳、二氧化碳以及由这些气体混合而成的空气、燃气，在压力不太高、温度不太低的情况下，其性质与理想气体接近，可以当作理想气体看待。至于离液态不远的水蒸汽，其分子本身所占的体积和分子之间的作用力都不能忽略不计，因此不能当作理想气体看待，称为实际气体。不过对于空气和燃气中所包含的压力很低的过热水蒸汽，可以当作理想气体来看待。

理想气体的三个基本状态参数之间存在着一定的关系，这些关系可以由物理学中的波义耳—马略特定律、盖—吕萨克定律与查理定律来说明。这三条定律综合起来可以得到如下的关系式：

$$pv = RT \quad (1-9)$$

如果气体的重量为 G 公斤，其状态方程式可写成：

$$pV = GRT \quad (1-10)$$

式中： $V = Gv$ ， V 为气体的总容积

公式 (1-9) 及 (1-10) 分别为一公斤及 G 公斤理想气体的状态方程式，式中 R 为气体常数，它的数值依气体种类而定，对于某一种气体而言， R 是不变的常数。式中压力 p 的单位为 kg/m^2 ；比容 v 的单位为 m^3/kg ；温度 T 的单位为 K ；于是气体常数 R 的单位为 $\text{公斤}\cdot\text{米}/\text{公斤}\cdot\text{度}$ [$\text{kg}\cdot\text{m}/\text{kg}\cdot\text{K}$]。必须指出，气体常数 R 的单位里，分子上的公斤表示作用力的单位，而分母中的公斤是重量单位，二者在概念上有区别，故不能消去。

对于气体，在热力学中还常采用“公斤摩尔”(kmol)——简称“摩尔”这个数量单位。如果气体的分子量为 μ ，则 μ 公斤的气体就称为 1 摩尔的气体。1 摩尔气体的容积称为摩尔容积，用 V_μ 表示，其 $V_\mu = \mu v$ 。根据阿佛加德罗定律可以推得：在同温同压下，各种气体的摩尔容积均相等。在标准状态下，即压力为 1 物理大气压、温度为 0°C 时，各种气体