

# 第 1 章 绪 论

## Chapter 1 Introduction

**教材目标** 本教材主要讲述航天工程领域所涉及的物质热物性和能量转换规律,它是航天领域工程技术人员必备的基础知识。该教材的出版主要是为了提高学生的热力学和传热学理论水平,培养学生正确的思维模式,并使他们学会运用热力学和传热学理论分析方法处理航天热能转换和热能利用中的有关问题。

**设计思路** 本教材以工程热物理及动力系统教育改革的基本理念为指导,加强与其他高校的相互联系,加速教学研究的进程。将教材的框架设计、内容安排、教学实施等有机结合起来,充分体现教材的先进性和创新点。本教材在介绍热力学基本概念的基础上,重点讲述热力学第一定律和第二定律及其工程应用。通过本教材的学习,使学生理解热力学基本定律和工程应用方法以及传热学的基本概念,初步掌握航天工程系统热力特性分析与工程计算方法。

本章是航天热能工程学的绪论,主要内容包括:热力学的发展简史、研究对象、研究方法和分类,传热学的发展简史,传热学与工程热力学在研究方法上的异同。主要目的是提高学生对航天热能工程学的兴趣。

### 1.1 热力学的发展简史 ( Brief history of thermodynamics )

热现象是人类最早接触的自然现象之一。相传远古时代的燧人氏钻木取火,就是机械能转换为热能、使木头温度升高而发生着火的热现象。但是人类对热现象的利用和认识,却经历了漫长的岁月,从远古时代的神话,到 18 世纪前后机械唯物主义的“燃素说”“热素说”,直到近 300 年来,人类对热的认识才逐步形成了一门真正的学科。

18 世纪初期,由于煤矿开采工业对动力抽水机的需要,最初在英国出现了带动往复水泵的原始蒸汽机。到了 18 世纪下半叶,由于资本主义工厂手工业的发展和自动纺纱机、织布机等工作机的不断发明,迫切需要一种实用的动力机来带动这些工作机,所以到了工场手工业的晚期阶段,热力动力机的发明与应用才

有了需要和可能。

1763—1784年英国人瓦特(James Watt, 1736—1819)对当时的纽科门原始蒸汽机做了重大改进,发明了应用高于大气压的蒸汽作为工质、有回转运动、有独立冷凝器的单缸蒸汽机,现在估计其热效率约为2%,这在当时却已是很大的进步。因此可以说,蒸汽机的发明与应用是社会生产力发展的必然结果。

此后蒸汽机被纺织、冶金等工业所普遍采用,生产力得到很大提高。到了19世纪初,发明了以蒸汽机作为动力的铁路机车和船舶。

随着蒸汽机的广泛应用,如何进一步提高蒸汽机的效率这个问题变得日益突出。这样就促使人们对提高蒸汽机热效率、热功转换的规律以及水蒸汽的热力性质等问题进行了深入研究,从而推动了热力学的发展。

在热功转换规律的研究上,1824年,卓越的年轻工程师卡诺(Sadi Carnot, 1796—1832)发表了卡诺定理。他首先在理论上指出热机必须工作于温度各不相同的热源之间,才能将从高温热源吸入的热量转变为有用的机械功,并提出了热机最高效率的概念。这些实质上已揭示了热力学第二定律最基本的内容,但是由于卡诺受到了当时流行的“热素说”的束缚,使他未能从中发现热力学第二定律。尽管如此,卡诺对热力学的贡献是功不可没的,他指出冷热源之间温差越大,工作于其间的热机的热效率就越高,这成为以后各种实际热机和热动力设备提高热效率的总指导原则。

热力学第一定律即能量守恒及转换定律的建立,世界上目前公认应归功于德国人迈耶(Julius Robert Mayer, 1814—1878)、英国人焦耳(James Prescott Joule, 1818—1889)和德国人亥姆霍兹(H. T. Von Helmholtz, 1821—1892)。迈耶于1842年首先发表论文阐述了这一定律,但当时缺乏实验支持,没有得到公认。焦耳在与迈耶的理论研究没有联系的情况下,在这方面进行了全面的实验研究。1850年,焦耳在他发表的第一篇关于热功相当实验的总结论文中,以各种精确的实验结果使热力学第一定律得到了充分的证实,从而获得了物理学界的公认。1847年,亥姆霍兹发表了著名的论文《论力的守恒》。虽然这篇论文内容就其实质来说并没有超出早他几年的迈耶和焦耳所发表的论文,但它除了兼有迈耶论文的深刻思想和焦耳论文的坚实实验数据外,还充分运用了数学知识,使用的是物理学家的语言,容易令人信服,它是十分接近于今天各类教科书中关于能量守恒定律的一般叙述。在促使人们最终接受能量守恒原理的过程中,这篇论文所起的作用比迈耶和焦耳的论文所起的作用都要大。

能量守恒及转换定律是19世纪物理学最重要的发现,它用定量的规律将各种物理现象联系起来,寻求一个可以度量各种现象的物理量,即能量。能量这一概念是由汤姆逊(William Thomson, 原名开尔文 Lord Kelvin, 1824—1907)于1851年引入热力学的。热力学第一定律的确立宣告了不消耗能量的永动机(第一类

永动机)是不可能实现的。

随着热力学第一定律的建立,克劳修斯(Rudolf Clausius, 1822—1888)在迈耶和焦耳工作的基础上,重新分析了卡诺的工作,根据热量总是从高温物体传向低温物体这一客观事实,于1850年提出了热力学第二定律的一种表述:不可能把热量从低温物体传到高温物体而不引起其他变化。

1851年,开尔文也独立地从卡诺的工作中发现了热力学第二定律,提出了热力学第二定律的另一种表述:任何循环系统不可能从单一热源吸取热量使之完全转变为功而不产生其他影响。

从单一热源(如大气)吸热完全转变为功而不产生其他影响的机器是不违背能量守恒定律即热力学第一定律的。但这种机器可从大气或海洋吸取热量使热量完全转变为功,因而可以说不需要任何代价,是完全免费的,所以实质上这也是一种永动机,称为第二类永动机。第二类永动机是非常吸引人的,曾使许多人浪费了大量的精力。热力学第二定律的建立,宣告了第二类永动机与第一类永动机一样,也是不可能实现的。

在卡诺研究的基础上,克劳修斯和开尔文提出了热力学第二定律。热力学第二定律本质上是指明过程方向性的定律。在热力学两个定律建立以后,热力学理论将它们应用于分析各类具体问题的过程中,得到了进一步的发展。例如应用这两个基本定律,导出了反映物质各种性质的相应的热力学函数以及各热力学函数之间的普遍关系,求得了各种物质在相变过程中、化学反应中的各种规律等。

在将热力学原理应用于低温现象的研究中,能斯特(Walther Nernst, 1864—1949)在1906年得到了一个称为能氏定律的新规律,并于1913年将这一规律表述为“绝对零度不能达到原理”——这就是热力学第三定律。经典热力学的基础理论就是由上述三个热力学基本定律构成的。

纵观热力学的发展简史,可以说是热力学理论与热机技术及热力工程相互促进共同发展的。19世纪末期发明了内燃机,它具有体积小、重量轻、热效率较高等优点,很快成为汽车、飞机、船舶、机车等交通运输工具的主要动力机,也广泛用作拖拉机、采矿设备、国防战车的动力。与内燃机的发明相适应,在热力学中发展了对内燃机中热力过程和热力循环方面的研究。

19世纪后半期,蒸汽机已不能满足工业生产对动力的巨大需要。19世纪末发明了蒸汽轮机,它具有适宜于应用高参数的蒸汽、热效率高、功率可以很大等主要优点,现今成为火力发电厂最主要的动力设备。蒸汽轮机的发明与应用,在工程热力学中提出并发展了高参数蒸汽的性质、气体与蒸汽经过喷管的流动等问题。

20世纪40年代,燃气轮机已经改进发展成为实际应用的一种重要热动力

设备,在热力学中也发展了相应的研究内容。

1942年美国人凯南(Joseph Henry Keenan, 1900—1977)在热力学基础上提出了有效能的概念,使人们对能源利用和节能的认识又上了一个台阶。

近代科学技术的发展向热力学提出了新的课题,如等离子发电、燃料电池等能源转换新技术、环保型制冷工质研究,以及物质在超高温、超高压和超低温、超低真空等极端条件下的性质和规律等。古老的热力学不仅在传统领域中继续保持着青春与活力,而且也必将在解决高新技术领域的新课题中扮演着十分重要的角色。

## 1.2 热力学的研究对象 (Research objects of thermodynamics)

热力学第一定律从数量上描述了热能与机械能相互转换时的关系,热力学第二定律从品质上说明热能与机械能之间的差别,指出能量转换时的条件和方向性。

热力学研究工质的基本热力性质,包括空气、燃气、水蒸汽、湿空气的热力性质。

热力学研究各种热工设备的工作过程。即应用热力学基本定律,分析计算工质在各种热工设备中所经历的状态变化过程和热力循环,探讨分析影响能量转换效果的因素以及提高能量转换效率的途径。

热力学研究与热工设备工作过程直接有关的一些化学与物理过程。目前,热能的主要来源是依靠燃料的燃烧,而燃烧是剧烈的化学反应过程,因此需要讨论化学热力学的基本知识。

随着科技进步和生产发展,工程热力学的研究和应用范围已不限于只是作为建立热机(或制冷装置)理论的基础,现已扩展到许多工程技术领域,如航空航天、高能激光、热泵、空气分离、空气调节、海水淡化、化学精炼、生物工程、低温超导、物理化学等,都需要应用工程热力学的基本理论和基本知识。因此,工程热力学已成为许多工科专业所必修的一门技术基础课。

## 1.3 热力学的研究方法 (Research approaches of thermodynamics)

热力学有两种不同的研究方法:一种是宏观研究方法,另一种是微观研究方法。

宏观研究方法不考虑物质的微观结构,也不考虑微观粒子(分子和原子)的

运动行为,而是把物质看成连续的整体,并且用宏观物理量来描述它的状态。通过大量的直接观察和实验,总结出基本规律,再以基本规律为依据,经过严格逻辑推理,导出描述物质性质的宏观物理量之间的普遍关系以及其他的一些重要推论。由于热力学基本定律是无数经验的总结,因而具有高度的可靠性和普遍性。

应用宏观研究方法的热力学称为宏观热力学、经典热力学或唯象热力学。工程热力学主要采用宏观研究方法。

在宏观热力学中,还普遍采用抽象、概括、理想化和简化处理方法。为了突出主要矛盾,往往将较为复杂的实际现象和问题略去细节,抽出共性,建立起合适的物理模型,以便能更本质地反映客观事物。例如,将空气、燃气、湿空气等气体理想化为理想气体处理,将高温热源以及各种可能的热源概括成为具有一定温度的抽象热源,将实际不可逆过程理想化为可逆过程,以便分析计算,然后再根据实验给予必要的校正,等等。当然,运用理想化和简化方法的程度要视分析研究的具体目的和所要求的精度而定。

宏观研究方法也有它的局限性,由于它不涉及物质的微观结构,因而往往不能解释热现象的本质及其内在原因。

微观研究方法正好弥补了这个不足。应用微观研究方法的热力学称为微观热力学或统计热力学。它从物质的微观结构出发,即从分子、原子的运动和它们的相互作用出发,研究热现象的规律。在对物质的微观结构及微粒运动规律做某些假设的基础上,应用统计方法,将宏观物理量解释为微观量的统计平均值,从而解释热现象的本质及其发生的内部原因。由于做了某些假设,所以其结果与实际并不一定完全符合,这是它的局限性。

作为应用科学的工程热力学,是以宏观研究方法为主,以微观理论的某些假设来帮助解释一些微观现象。

## 1.4 热力学的分类 (Categories of thermodynamics)

热力学是研究与热现象有关的能量转换规律的科学。

能量是物质运动的量度。能量和物质不可分割,能量转换必须以物质为媒介。如何看待物质是研究的出发点,系统状态的描述方法和研究系统性质的理论依据都与如何看待物质有关。

宏观观点和微观观点从不同角度看待物质。前者把物质看成连续介质,后者认为物质是由大量分子、原子等微观粒子组成,因而有宏观热力学和微观热力学之分。

众所周知,在无外界作用时,处于平衡态的体系的状态不随时间变化,但常

见的物系都是非平衡态的。无论是处于平衡态或非平衡态的物系都可用宏观或微观两种不同的观点进行研究,因此又有平衡态热力学和非平衡态热力学的区别。

以宏观方法研究平衡态物系的热力学称为平衡态热力学,又称为经典热力学;用宏观方法研究偏离平衡态不远的非平衡态物系的热力学,称为非平衡态热力学或不可逆过程热力学。用微观方法研究热现象的科学统称为统计物理学。统计物理学用于平衡态物系时称为统计热力学,又称为统计力学。

以宏观观点研究热现象时,是以总结经验而来的基本定律为依据,而统计热力学则以粒子运动遵守的经典力学或量子力学原理为依据。可见,二者的理论依据是不同的。

宏观方法的优点是简单、可靠,只要少数几个宏观物理量就可描述系统的状态。同时,所依据的基本定律已被大量实践所证实,具有极大的普遍性和可靠性。用以进行各种推演时,只要不作其他任意的假定,所得的结论同样是极为可靠的。然而,因为此方法未涉及物质的内部结构,不能解释现象的微观本质,同时也不能用以得出具体物质的性质。经典热力学的不足之处可用统计热力学弥补。后者基于物质的内部结构,不但可以解释宏观现象的本质,而且当对物质的结构做出一些合理的假设后,甚至还可得出具体的物性。但因微观粒子为数众多,要用统计的方法才能进行研究,因此计算麻烦,不如宏观方法简单。又因统计热力学有赖于对物质结构所做的假设,因而所得结论的可靠性也较差。总之,两种方法相互补充,相辅相成,不能说一种绝对优于另一种。

就工程应用而言,简单可靠是首先需要考虑的问题,因此本书的内容以宏观平衡的经典热力学为主。为了解释某些宏观现象的实质和扩大眼界,以及加深对主要内容的理解,本书也安排了一些统计热力学和不可逆过程热力学方面的内容。

## 1.5 传热学的发展简史(Brief history of heat transfer)

热传导、热对流和热辐射是传热的三种基本方式。

19世纪初,兰贝特(J. H. Lambert, 1728—1777)、毕渥(J. W. Biot, 1774—1862)和傅里叶(J. B. J. Fourier, 1768—1830)都从固体一维导热的实验入手开展了研究。1804年,毕渥根据实验提出了一个公式,认为单位时间通过单位面积的导热热量正比于两侧表面温差、反比于壁厚,比例系数是材料的物理性质。这个公式提高了对导热规律的认识,只是在理论上略显粗糙。傅里叶在进行实验研究的同时,十分重视数学工具的运用。他从理论解与实验的对比中不断完善他的理论公式,取得的进展令人瞩目。1807年他提出了求解偏微分方程的分离

变量法和可以将解表示成一系列任意函数的级数的概念,得到学术界的重视。1812年,法国科学院以“热量传递定律的数学理论及理论结果与精确实验的比较”为题设项竞赛。经过努力,傅里叶于1822年发表了他的著名论著《热的解析理论》,成功地完成了创建导热理论的任务。他提出的导热定律现称为傅里叶定律,正确地概括了导热实验的结果,奠定了导热理论的基础。他以傅里叶定律和能量守恒定律为基础而推导出的导热微分方程是导热问题正确的数学描述,成为求解大多数工程导热问题的出发点。他所提出的采用无穷级数表示理论解的方法(即傅里叶级数)开辟了数学求解的新途径。因此,傅里叶被公认为导热理论的奠基人。

在傅里叶之后,导热理论求解的领域不断扩大,许多学者做出了贡献。其中,雷曼(G. F. B. Remann, 1826—1866)、卡斯劳(H. S. Carslaw, 1870—1954)、耶格尔(J. C. Jaeger)和雅各布(M. Jakob)等人的工作值得重视。

流体流动的理论是对流换热理论的必要前提。1822年纳维埃(M. Navier, 1785—1836)提出的流动方程组,可适用于不可压缩性流体。此方程组在1845年经斯托克斯(G. G. Stokes, 1829—1903)改进,成为纳维尔—斯托克斯方程(即NS方程),完成了建立流体流动基本方程组的任务。然而,由于该方程组是一个耦合的非线性偏微分方程组,非常复杂,只有很少数的简单流动问题能够进行解析求解,流体力学理论的发展遇到了困难。这种局面一直等到1880年雷诺(O. Reynolds, 1842—1912)提出了一个对流动有决定性影响的无量纲物理量群即雷诺数之后才开始有所改观。在1880—1883年,雷诺进行了大量实验研究,发现管内流动从层流向湍流的转变发生在雷诺数的数值为1800~2000,澄清了实验结果之间的混乱,对指导实验研究做出了重大贡献。长期以来,比单纯流动更为复杂的对流换热问题的理论求解进展不大。1881年洛仑兹(H. Lorentz, 1853—1928)对自然对流的理论解,1885年格雷茨(L. Graetz)和1910年努塞尔(W. Nusselt, 1882—1957)对管内换热的理论解及1916年努塞尔的凝结换热理论解分别对于解析求解做出了贡献。只是这些可以得到解析解的问题为数不多,具有突破意义的进展是1909年和1915年努塞尔两篇论文的贡献。他对强制对流和自然对流的基本微分方程及边界条件进行量纲分析,获得了有关无量纲数之间的原则关系,开辟了无量纲数原则关系正确指导下,通过实验研究求解对流换热问题的一种基本途径,有力地促进了对流换热研究的发展。鉴于量纲分析法在1914年才由白金汉(E. Buckingham)提出,相似理论则在1931年才由基尔皮切夫(В. Кирпичев)等发表,努塞尔的成果有其独创性,努塞尔于是被公认为发展对流换热理论的杰出先驱。

在对流换热微分方程组的理论求解上,两个方面的进展发挥了重要作用:其一是普朗特(L. Prandtl, 1875—1953)于1904年提出的边界层(附面层)概念。

他认为,低黏性流体只有在横向速度梯度很大的区域内才有必要考虑黏性的影响,这个范围主要处于与流体接触的壁面附近,而其外的主流则可以当作无黏性流体处理。这是一个经过深思熟虑、切合实际的论断。在边界层理论的指导下,对流换热微分方程组可以得到合理的简化,从而在某些情况下可以获得其解析解,有力地推动了理论求解方法的发展。1921年波尔豪森(E. Pohlhausen)在流动边界层概念的启发下又提出了热边界层的概念。1930年他与施密特(E. Schmidt, 1892—1975)及贝克曼(W. Beckmann)合作,成功地求解了竖壁附近空气的自然对流换热问题。数学家与传热学家合作,发挥各自的长处,成为科学研究史上成功合作的范例。其二是湍流计算模型的发展。1925年的普朗特比拟、1939年的冯·卡门(Th. von Karman, 1881—1963)比拟以及1947年马丁纳利(R. C. Martinelli)的引申,记录着湍流理论早期发展的轨迹。由于湍流问题在应用上的重要性,湍流计算模型的研究随着对湍流机理认识的不断深化而蓬勃发展,逐渐发展成为传热学研究中的一个令人瞩目的热点,它也有力地推动着理论求解向纵深发展。还应该提到,在对流换热理论的近代发展中,麦克亚当斯(W. McAdams)、贝尔特(L. M. K. Boelter)和埃克特(E. R. G. Eckert)等都先后做出了重要的贡献。

在热辐射的早期研究中,认识到黑体辐射的重要意义并用人工黑体进行实验研究对于建立热辐射的理论具有重要作用。1889年卢默(O. Lummer)等人测得了黑体辐射光谱能量分布的实验数据。19世纪末斯蒂芬(J. Stefan, 1835—1893)根据实验确立了黑体辐射力正比于其绝对温度的四次方的规律,后来在理论上被玻耳兹曼(L. Boltzmann, 1844—1906)所证实,这个规律被称为斯蒂芬—玻耳兹曼定律。热辐射基础理论研究中的最大挑战在于确定黑体辐射的光谱能量分布。1896年维恩(W. Wien, 1864—1928)通过半理论半经验的方法推导出一个公式,这个公式虽然在短波段与实验比较符合,但在长波段却与实验结果显著不符。几年后,瑞利(Lord Rayleigh, 1842—1919)从理论上也推导出一个公式,此公式数年后又经过金斯(J. H. Jeans, 1877—1946)改进,后人称它为瑞利—金斯公式。这个公式在长波段与实验结果比较符合而在短波段则与实验差距很大,而且随着频率的增高,辐射能量将增至无穷大,这显然是十分荒谬的。瑞利—金斯公式在高频部分即紫外部分遇到了无法克服的困难,这简直是理论上的一场灾难——因此被称为“紫外灾难”。“紫外灾难”的出现使人们强烈地意识到,原先以为已经相当完美的经典物理学理论确实存在着问题,而问题的解决有赖于观念上新的突破。普朗克(M. Planck, 1858—1947)决心找到一个与实验结果相符的新公式。经过艰苦努力,他终于在1900年提出了一个公式,其后的实验证实普朗克公式与实际情况在整个光谱段完全符合。在寻求这个公式的物理解释中,他大胆地提出了与经典物理学的连续性概念根本不同的新假说,即



“能量子假说”。能量子假说认为,物体在发出辐射和吸收辐射时,能量不是连续地变化的,而是跳跃地变化的,即能量是一份一份地发射和一份一份地吸收的,每一份能量都有一定的数值,这些能量单元称为“量子”。科学发展的道路往往是曲折的。普朗克公式因为缺乏理论依据而在当时不为人们所接受,普朗克本人对于他自己的新假设在认识上也有反复。直到1905年爱因斯坦(A. Einstein, 1879—1955)的光量子理论得到公认后,普朗克公式才为人们所接受。按照量子理论确立的普朗克定律正确地揭示了黑体辐射能量光谱分布的规律,奠定了热辐射理论的基础。

在物体之间的辐射热量交换方面,有两个重要的理论问题。其一是物体的发射率与吸收比之间的关系问题。1859年和1860年基尔霍夫(G. Kirchhoff, 1824—1887)的两篇论文提供了解答过程。虽然他在1860年论文中的证明是针对单色和偏振辐射的,然而它的重要意义正在于对全光谱辐射的推广。其二是物体间辐射换热的计算方法。由于物体之间的辐射换热是一个无穷反射逐次削弱的复杂物理过程,计算方法的研究有其特殊的重要意义。1935年波略克(Г. Л. Поляк)借鉴商务结算的原理提出的净辐射法,1954年霍特尔(H. C. Hottel)提出、1967年又加以改进的交换因子法以及1956年奥本亥姆(A. K. Oppenheim)提出的模拟网络法,是三种受到重视的计算方法。他们分别为完善此类复杂问题的计算方法做出了贡献。

除了上述按基本热量传递方式的发展过程以外,测量新技术、计算机技术、激光技术等新技术引入实验研究,对传热学的发展也发挥了重要作用。传热学本来就是一门“唯象”的科学,实验手段是其最基本的也是最重要的研究手段之一。

还要特别提到的是,由于计算机的迅速发展,用数值方法对传热问题的分析研究取得了重大进展。从20世纪70年代起,以英国帝国理工大学的斯波尔丁教授(D. B. Spalding, 1923—)及其同事们的工作为代表,逐步形成了一个新兴分支——数值传热学(Numerical Heat Transfer, NHT)。近年来,数值传热学得到了蓬勃的发展,各种算法不断成熟,各种商业软件如CFX、FLUENT、TASFLOW、ANSYS等不断涌现,呈现出巨大的活力。对于许多很复杂的问题,传统的实验方法和解析方法往往无能为力,数值方法却发挥了极大的优势。数值方法相对来说成本低廉,可以仿真各种复杂的过程,取代一些昂贵、费时、传统方法难以实现的实验。当然,数值仿正确与否,还需要实验和理论模型的验证和校验。

从以上传热学的发展简史可以看出,传热学已经发展成为一门初具理论体系和发展充满活力的基础学科。它在生产力发展需求的推动下不断成长,同时,它的建立和发展反过来又促进了生产力的进一步发展。当前,能源技术、环境技术、材料科学、微电子技术、空间技术、生物技术等新兴科学技术的发展,给传热

学提出了新的课题,同时也提出了新的挑战。可以相信,传热学在迎接时代新挑战的过程中,必将获得更大的发展,取得更加辉煌的成就。

## 1.6 传热学与工程热力学在研究方法上的异同 (similarities and differences on the research approaches of thermodynamics and heat transfer)

工程热力学与传热学都是研究热现象的,都以热能的传递与转换过程中的基本规律作为研究对象。但是,工程热力学与传热学从不同的角度来研究热现象,因此在研究内容与研究方法上有较大区别。

(1) 工程热力学主要研究可逆过程(冷、热介质温差无限小的情况下),而传热学研究的一切热量传递过程都是不可逆过程。

(2) 工程热力学着重研究的是在能量转换与传递过程中各种形式的能量在数量方面的关系以及热能在品质方面的情况。

在经典的热力学中,不考虑能量传递过程所需的时间。工程热力学中的这种研究方法是对实际工程问题的高度抽象,是为了简化复杂的实际问题而又得出具有一定的指导意义的结论所必需的。这只是研究的一个方面。

但是,为了使所讨论的能量传递过程能够付诸实施,并能满足一定的生产和工艺要求,必须引入时间的概念。时间是传热学中的重要变量。在工业实际中,必须致力于研究高效的热量传递方法。

(3) 工程热力学不着重研究过程进行的不同时刻和设备的不同地点上温度变化的情况,而这却是传热学感兴趣的话题。

利用工程热力学的方法可以从理论上分析热力系统的状态、能量传递和迁移的多少以及系统的发展方向与性能的好坏。但是,能量是以何种方式传递和迁移?传递和迁移的速率如何?以及能量状态随时间和空间的分布如何?热力学都没有给予回答。处理和解决诸如此类的问题就是传热学的根本任务所在。例如,对于一个物体的加热过程,我们可以将其视为一个热力学过程。因此,热力学可以根据能量守恒的原则,研究这一系统最终达到的平衡温度,以及初态与终态之间的系统内能变化、过程中与外界交换的热量,对外界所做的功的大小等。而传热学则是基于热传递现象的机理,研究该物体在达到平衡以前的任何时刻、任意位置的温度变化和温度分布,以及加热过程中热量随时间的变化关系等规律。

所以,传热学分析各种具体的传热过程是如何进行的,探求工程及自然现象中热量传递过程的物理本质,揭示各种热现象的传输机理,建立能量输运过程的

数学模型,分析计算传热系统的温度和热流水平,揭示热量传递的具体规律。在一些较为复杂的场合,则通过计算机模拟或直接用实验方法,研究热量传递的规律。

## 思 考 题

- 1-1 简述热力学和传热学发展史。
- 1-2 热力学的研究对象和研究方法是什么?
- 1-3 我国能源面临的主要问题是什么?

## 第 2 章 热力学基础

### Chapter 2 Elements of Thermodynamics

**内容提要** 作为航天热能工程学的核心内容,本章主要讲解热力学基础知识,包括热力学基本概念及定义、热力学第一定律、热力学第二定律、熵和焓等。这些基本概念和基本定律在本课程中,几乎随时都会遇到,对它们必须有一个正确的理解和掌握。

**基本要求** 要求学生深入理解热力学系统及其状态参数、迁移参数的基本概念,理解热力学第一定律和第二定律的实质,掌握开口系统的能量方程和熵方程,深入理解准静态过程和可逆过程的基本概念,掌握功、热量、能量、焓、熵的基本概念及计算式,理解焓参数和熵参数的热力学意义。

## 2.1 基本概念及定义 ( Fundamental concepts and definitions )

### 2.1.1 热力学系统(Thermodynamics system)

工程热力学主要研究热能和机械能之间的转换规律以及工质的热力性质。无论热能还是机械能,作为一种能量,它们都不能脱离物质而单独存在以及相互转换。例如在蒸汽动力装置中,水在锅炉中吸热变成蒸汽,然后在汽轮机中水蒸气膨胀推动叶轮旋转对外做功,做功后的乏汽在冷凝器中向冷却水放出热量而又凝结成水。在这个过程中,实现热能和机械能转换的工质是水蒸气,向工质提供热量的高温热源是炉膛中燃烧生成的高温燃气,而吸收工质所释放的热量的低温热源是冷凝器中的冷却水。正是通过工质的状态变化以及它与高温热源、低温热源的相互作用实现了热能和机械能之间的转换。

热力学是通过对有关物质的状态变化的宏观分析来研究能量转换过程的。为了便于研究,选取某些确定的物质或某个确定空间中的物质作为主要的研究对象,称为热力学系统,简称系统。热力学系统以外一切其他物质统称为外界。在进行热力学分析时,对于热力学系统在能量转换过程中的行为及变化规律,要作详细分析,而对于外界一般只笼统地考察它们与热力学系统间相互作用时所

传递的各种能量与质量。热力学系统与外界之间的分界面称为边界。根据具体问题,边界可以是实际的,也可以是假想的;可以是固定的,也可以是移动的,主要取决于能否简明地分析该热力设备。当热力学系统与外界间发生相互作用时,必须有能量和质量穿越边界,因而可在边界上判定热力学系统与外界间传递能量和质量的形式及数量。实际上,也只有边界上才能判定系统与外界间是否有能量和质量的交换。由于热力设备是通过工质状态变化而实现能量转换,且其变化规律决定了过程的特点,故在分析热力设备的工作时经常取工质作热力学系统,而把高温热源、低温热源等其他物体取作外界。

热力学系统的选取应注意两个限制条件:①较小的热力学系统必须包括大量的微观粒子;②较大的热力学系统必须是有限的。因为工程热力学是建立在统计基础之上,通过人们在长期实践中研究有限空间总结出来的。

热力学系统根据内部情况的不同可以分为:

- (1) 单元系统,由单一的化学成分组成;
- (2) 多元系统,由多种化学成分组成;
- (3) 单相系统,由单一的相(如气体或液体)组成;
- (4) 复相系统,由多种相(如气—液两相或气—液—固三相)组成;
- (5) 均匀系统,系统的各部分性质均匀一致;
- (6) 非均匀系统,系统的各部分性质不均匀一致。

根据热力学系统与外界相互作用情况的不同,热力学系统又可分为闭口系统、开口系统和孤立系统。

### 1. 闭口系统 (Closed system)

若一个热力学系统和外界不发生物质交换,就称为闭口系统。如图 2-1-1 所示,气体在汽缸中受热膨胀而推动活塞及重物做功。这时若取气体为一个热力学系统,而取活塞、重物及热源为外界,则当系统膨胀对外界做功时,系统的边界随活塞一起移动,没有任何物质穿越边界进入或离开系统,因而这个热力学系统为闭口系统。闭口系统中包含的物质是固定的,故也称闭口系统为控制质量系统(Control Mass System)。

### 2. 开口系统 (Open system)

若一个热力学系统与外界之间有物质交换,称为开口系统。如图 2-1-2 所示,有一台汽车发动机,燃料和空气不断从进口流入,在其中燃烧后膨胀对外界做功,然后废气从出口流出。这时若取发动机外壳及进、出口截面(假想边界)所包围空间中的物质为一个热力学系统,则因系统和外界间不断通过进口和出口处的边界交换物质,故这个系统为开口系统。开口系统中物质的量是可以改变的。由于开口系统所占据的空间是固定的,故也称开口系统为控制体积系统(Control Volume System)。

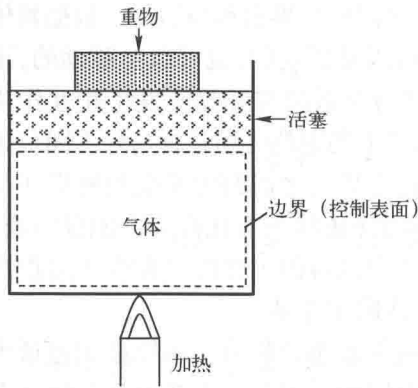


图 2-1-1 活塞—汽缸组件中的气体

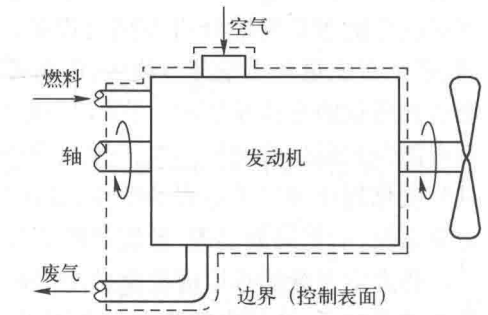


图 2-1-2 汽车发动机

### 3. 孤立系统 (Isolated system)

若一个热力学系统和外界之间既无能量交换又无质量交换,称为孤立系统。例如把进行能量交换的一切有关物质如工质、高温热源、低温热源、耗功设备等一起取作一个热力学系统,则由于该系统与外界不发生任何能量和质量的交换,因此它就是一个孤立系统。

## 2. 1. 2 热力学系统的状态及状态参数(State and state parameters of thermodynamic systems)

在实现能量转换的过程中,系统本身的状态总是在不断地发生变化。为了描述系统的变化,就需要说明变化过程中系统所经历的每一步的宏观状况。热力学中把热力学系统所处的宏观状况称为系统的热力学状态,简称状态。系统的状态常用一些物理量来描述,这种物理量称为状态参数。热力学系统的状态参数包括温度、压强、比体积、热力学能、焓、熵等。其中,温度、压强和比体积称为基本状态参数,它们都是可以测量的物理量。由状态参数的定义可知:对应于某个给定的状态,所有状态参数都应有各自确定的数值,反之—组数值确定的状态参数可确定一个状态;状态参数的数值仅取决于系统的状态,而与达到该状态所经历的途径无关。例如系统由某个状态 1 变化到另一个状态 2,不管经过什么途径,其压强变化总是相同的,即

$$\Delta p_{1,2} = p_2 - p_1$$

相应地,微元变化时压强的微增量  $dp$  具有全微分的性质,即有

$$\int_1^2 dp = p_2 - p_1 = \Delta p_{1,2}$$

下面逐个介绍比体积、压强、温度、热力学能、焓、熵这 6 个状态参数的含义。

## 1. 比体积 (Specific volume)

比体积又称比容,它是描述热力学系统内部物质分布状况的状态参数。它表明单位质量物质所占有的体积,其符号为  $v$ ,单位为  $\text{m}^3/\text{kg}$ 。按比体积的定义可得

$$v = \frac{V}{m} \quad (2-1-1)$$

式中: $m$  为物质的质量,单位为  $\text{kg}$ ; $V$  为物质所占有的体积,单位为  $\text{m}^3$ 。

单位体积物质的质量称为密度,符号为  $\rho$ ,单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。由定义可知,密度和比体积互为倒数,即有

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v} \quad (2-1-2)$$

## 2. 压强 (Pressure)

压强是描述热力学系统内部力学状况的状态参数。流体的压强,也称压力,是流体在单位面积上的垂直作用力,符号为  $p$ 。根据力学原理,若作用于物体上的各力所组成的力系平衡,则物体的运动状况保持不变。热力学中称该物体处于力平衡状态。对于气态物质组成的热力学系统,重力场及电磁力场等体积力的作用通常可忽略不计,因而当气体内各处的压强相同时热力学系统内部就处于力平衡的状态。

工业上,压强容器的受力情况主要取决于其中流体的绝对压强与环境大气压强的差值,所以采用这个差值作为设备工作压强的指标,测压表(计)测量的也是这个差值。通常,把流体压强高出大气压强的差值称为表压,以符号  $p_g$  表示。若大气压强为  $p_{\text{atm}}$ ,则这时流体的绝对压强为

$$p = p_{\text{atm}} + p_g \quad (2-1-3)$$

流体压强低于大气压强的差值称为真空度,以符号  $p_v$  表示,则流体的绝对压强为

$$p = p_{\text{atm}} - p_v \quad (2-1-4)$$

表压、真空度和绝对压强之间的上述关系如图 2-1-3 所示。根据上述关系,即使流体的绝对压强不变,如果大气压强发生变化,表压或真空度也会发生变化。因此,只有流体的绝对压强才能作为描述流体状态的状态参数。

压强的单位为 Pa(帕),因其单位量值较小,工程上常用 MPa(兆帕)作压强的单位,并有

$$1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$$

此外,曾经得到广泛应用、目前仍能见到的其他压强单位还有巴、标准大气压、工程大气压、毫米汞柱、毫米水柱等。在英制单位体系中,常用 Psi 表示压强。

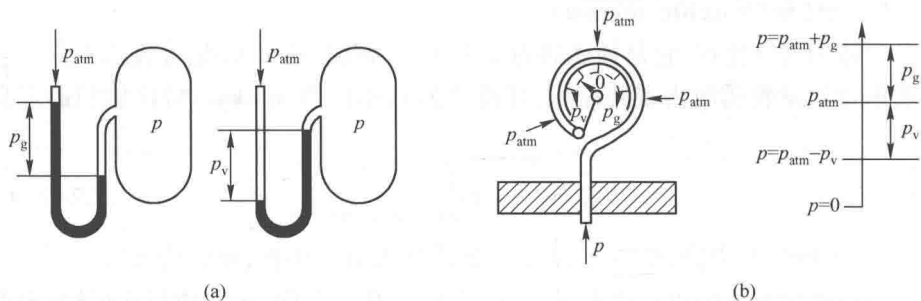


图 2-1-3 表压、真空度和绝对压强之间的关系  
(a) U 型管测量; (b) 压力表测量。

$$\begin{aligned}
 1 \text{ bar (巴)} &= 10^5 \text{ Pa} \\
 1 \text{ atm (标准大气压)} &= 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa} \\
 1 \text{ at (工程大气压)} &= 9.80655 \times 10^4 \text{ Pa} \\
 1 \text{ mmHg (毫米汞柱, } 0^\circ\text{C)} &= 133.322 \text{ Pa} \\
 1 \text{ mmH}_2\text{O (毫米水柱, } 4^\circ\text{C)} &= 9.80665 \text{ Pa} \\
 1 \text{ Psi} &= 6.895 \times 10^3 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$

**例 2-1-1** 应用气压计测定大气压强。气压计的水银柱高度为 758.3mm, 室温为  $25^\circ\text{C}$ 。试求这时的大气压强, 并采用下列各单位表示: (1) mmHg( $0^\circ\text{C}$ ); (2) atm; (3) Pa。

**解** 因为水银的密度随温度而变化, 故应把  $25^\circ\text{C}$  时水银柱高度表示为  $0^\circ\text{C}$  时相应的水银柱高度。其换算公式为

$$h_{0^\circ\text{C}} = h_t (1 - 0.000172 |t|_{^\circ\text{C}})$$

(1) 由上式可得

$$h_{0^\circ\text{C}} = 758.3 \text{ mmHg} \times (1 - 0.000172 \times 25) = 755 \text{ mmHg}$$

(2) 由  $1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg} (0^\circ\text{C})$  可得

$$p = \frac{755 \text{ mmHg}}{760 \text{ mmHg/atm}} = 0.993 \text{ atm}$$

(3) 由  $1 \text{ mmHg} (0^\circ\text{C}) = 133.32 \text{ Pa}$  可得

$$p = 755 \text{ mmHg} \times 133.32 \text{ Pa/mmHg} = 1.007 \times 10^5 \text{ Pa}$$

### 3. 温度 (Temperature)

温度为描述热力学系统热状况的状态参数, 它表示物体的冷热程度。

确立温度概念所依据的理论基础是热力学第零定律 (The Zeroth Law of Thermodynamics) 或称热平衡定律 (Thermal Equilibrium Law)。热平衡现象是一种常见的现象。如果两个冷热程度相同的物体相接触, 两者的热状态便保持恒定不再变化, 这时两物体就处于热平衡。经验表明, 如果 A、B 两物体分别与 C



物体处于热平衡,则只要不改变它们各自的状态,使 A、B 两物体相接触,可以看到该两物体的状态维持恒定不变,即证明它们也处于热平衡。根据热平衡这一性质即可总结得到热力学第零定律:两个系统分别与第三系统处于热平衡,则两系统也必然处于热平衡。根据热力学第零定律,对于所有处于热平衡的系统的某个状态参数具有相同的数值——这个状态参数就称为温度。

按照气体分子运动学说,气体的温度是气体分子平均动能的量度。因此,只要气体的状态一定,其分子的平均动能就有一定的数值,相应地气体的温度也就有确定的数值。这就说明,温度是系统的状态参数。

根据热平衡的概念,只要温度计与被测物体处于热平衡,就可按温度计中测温物质的温度来表示被测物体的温度。而温度的数值可利用测温物质的体积、压强、电阻等性质随温度变化的关系来表示。

温度计量的基本温标是热力学温标,其基本温度是热力学温度,以  $T$  来表示,单位为 K(开)。国际上规定采用水的三相点温度,即水的固相、液相和气相三相共存状态的温度,作为定义热力学温标的固定点,并规定该点的热力学温度为 273.16K。而热力学温度单位 K 为水的三相温度的  $1/273.16$ 。

热力学温标也可用摄氏温度  $t$  来表示,单位为  $^{\circ}\text{C}$ (摄氏度)。摄氏温度与热力学温度的关系为

$$t(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273.15 \quad (2-1-5)$$

即  $0^{\circ}\text{C}$  相当于 273.15K,  $100^{\circ}\text{C}$  相当于 373.15K, 而  $0\text{K}$  相当于  $-273.15^{\circ}\text{C}$ 。显然,水的三相点摄氏温度为  $0.01^{\circ}\text{C}$ 。在工程上,为了简化,有时采用以下的近似计算式:

$$t(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273 \quad (2-1-6)$$

而华氏温标用于英制单位,它规定在标准大气下,水的冰点为  $32^{\circ}\text{F}$ , 沸点为  $212^{\circ}\text{F}$ , 华氏温度与摄氏温度的换算关系为

$$\frac{t(^{\circ}\text{F}) - 32}{212 - 32} = \frac{t(^{\circ}\text{C}) - 0}{100 - 0} \quad (2-1-7)$$
$$t(^{\circ}\text{F}) = \frac{9}{5}t(^{\circ}\text{C}) + 32$$

#### 4. 热力学能(Thermodynamic energy)

热力学系统内部的大量微观粒子本身具有的能量,称为热力学能,或称内能。它与系统内粒子微观运动和粒子的空间位置有关。热力学能包括分子的动能、分子力所形成的位能、构成分子的化学能和构成原子的原子能等。由于热能与机械能相互转化过程中,一般不涉及化学变化和核反应,后两种能量不发生变化,因此在工程热力学中通常只考虑前两者。

分子的动能包括分子的移动动能、转动动能、振动动能,它是温度的函数。