



中等职业教育国家规划教材
全国中等职业教育教材审定委员会审定

热 工 基 础

电厂热力设备运行专业

主编 唐莉萍



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



中等职业教育国家规划教材
全国中等职业教育教材审定委员会推荐

热 工 基 础

电厂热力设备运行专业

主 编 唐莉萍
责任主审 孙保民
审 稿 陈梅倩 李文彦



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是中等电力职业学校火力发电厂热动力设备运行与检修专业(三年制)的教材,可兼作该专业初、中级工的培训教材,也可供热力工程和有关专业的技术人员参考。

全书共分五个单元,单元下设课题。全书包括工程热力学和传热学两部分内容,主要叙述热力学基础知识;热力学基本定律及应用;水蒸气的热力性质和蒸汽流动规律与计算;蒸汽动力循环的分析与计算;导热、对流换热、辐射换热的基本概念和基本规律,传热的分析与计算,换热器的传热计算和综合分析等。

全书采用中华人民共和国法定计量单位。各课题后附有例题和课堂练习题,各单元后附有小结、复习思考题和习题。

采用本书时,请读者再向出版社购买《水和水蒸气热力性质图表》,以便读者进行热力计算时确定热力状态参数时使用。

图书在版编目(CIP)数据

热工基础/唐莉萍主编. —北京:中国电力出版社,
2001

中等职业教育国家规划教材

ISBN 7-5083-0754-2

I. 热... II. 唐... III. 热工学-专业学校-教材
IV. TK122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 062816 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

实验小学印刷厂印刷

*

2002 年 1 月第一版 2002 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13 印张 293 千字

印数 0001—4000 册 定价 15.60 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

目 录

中等职业教育国家规划教材出版说明

前言

主要符号表

绪论	1
单元一 热力学基础知识	4
课题一 工质、热力状态及基本状态参数	4
课题二 热力过程及参数坐标图	11
课题三 理想气体状态方程式	19
课题四 热容及热量计算	25
小结	30
复习思考题	31
习题	32
单元二 热力学基本定律	34
课题一 热力学第一定律	34
课题二 理想气体的基本热力过程	44
课题三 热力学第二定律	51
小结	60
复习思考题	61
习题	62
单元三 水蒸气的热力性质	64
课题一 水蒸气	64
课题二 蒸汽的流动	80
课题三 空气通过喷管的动力特性演示实验	94
小结	97
复习思考题	98
习题	99
单元四 蒸汽动力循环	101
课题一 朗肯循环	101
课题二 回热循环	109
课题三 再热循环	114

课题四 热电合供循环	119
小结	122
复习思考题	124
习题	124
单元五 传热及换热器	125
课题一 传热的基本方式	125
课题二 固体表面黑度的测定实验	149
课题三 传热	151
课题四 换热器	161
课题五 换热器实验	170
小结	173
复习思考题	175
习题	176
附录	177
附表一 气体的平均比定压热容 $\overline{c_p} _0^t$	177
附表二 气体的平均容积定压热容 $\overline{c_{p,v}} _0^t$	178
附表三 气体的平均比定容热容 $\overline{c_v} _0^t$	179
附表四 气体的平均容积定容热容 $\overline{c_{v,v}} _0^t$	180
附表五 饱和水与饱和蒸汽性质表(按温度排列)	181
附表六 饱和水与饱和蒸汽性质表(按压力排列)	182
附表七 未饱和水与过热蒸汽性质表	184
附表八 几种材料的密度、热导率、比热容和热扩散率	196
附表九 几种材料在表面法线方向上的辐射黑度	197

绪 论

一、能源、热能及其利用

能源的开发利用程度是人类社会生产发展的一个重要标志。所谓能源,是指为生产和日常生活提供各种能量和动力的物质资源。在自然界中,可被利用的能源主要有风能、水能、潮汐能、太阳能、地热能、燃料的化学能和原子核能等。在这些能源中,除风能、水能和潮汐能是以机械能的形式被人们利用之外,其余各种能源都往往以热能的形式被人们所利用。显然,人们从自然界能源中获得能量的主要形式是热能。

热能是指组成物质的所有微观粒子作各种不规则热运动时的能量。热能的利用有两种基本方式:一种是直接利用,即将热能直接用来加热物体,如烘干、蒸煮、采暖、焙烧、冶炼等;另一种是间接利用,即将热能转换为机械能,用作生产上的动力,或进一步将机械能转换为电能,如内燃机、喷气发动机、蒸汽动力装置、燃气轮机动力装置、核能动力装置等。由于电能具有传输方便,使用灵活,且易于转换为其它形式的能量等诸多优点,它已成为发展现代社会物质文明的重要条件。在能源的利用中,电能利用占总能源利用的比例已成为国民经济发展水平的标志。

电能可由自然界的各种能源转换而得到,其中火力发电是电力工业的重要组成部分。在我国,1999年的火力发电量为10050亿kW·h,占全国总发电量的81.5%;在世界上,火力发电约占世界总发电量的80%。预计在今后相当长的一个时期内,火力发电仍将占据主要地位。因此,热能的研究和利用对整个人类的生产和生活有着巨大的意义。

二、火力发电厂的生产过程

利用燃料(煤、石油、天然气等)生产电能的工厂,称为火力发电厂,简称火电厂。

火力发电厂的生产过程,就是将燃料中的化学能转换为热能(在锅炉中),再将热能转换为机械能(在汽轮机中),最后将机械能转换为电能(在发电机中)的一系列能量转换过程。

图0-1是以煤为燃料的火力发电厂生产过程示意图。

煤由煤场经输煤皮带送入锅炉制粉系统,经过磨煤机磨制成煤粉,在热空气的输送下进入锅炉燃烧室内燃烧,生成高温烟气,使燃料的化学能转换为烟气的热能;锅炉受热面将烟气的热能传给水,水受热而蒸发,变成具有一定压力和温度的蒸汽,由此,烟气的热能通过传热就转换为水蒸气所具有的热能;具有一定热能的过热蒸汽进入汽轮机,在汽轮机喷管中降压降温膨胀而形成高速汽流,将蒸汽的热能转换成动能,具有较大动能的蒸汽冲动汽轮机转子上的叶片,使汽轮机转子旋转,将蒸汽的动能转换成汽轮机轴回转的机械能;汽轮机再带动发电机一起旋转而发出电能,将机械能转换为电能。

做功后的蒸汽在凝汽器中将热量传给冷却水(也叫循环水)而凝结成水,再由水泵升压后经低压加热器、除氧器、高压加热器送回锅炉。如此周而复始,就使燃料燃烧时放出

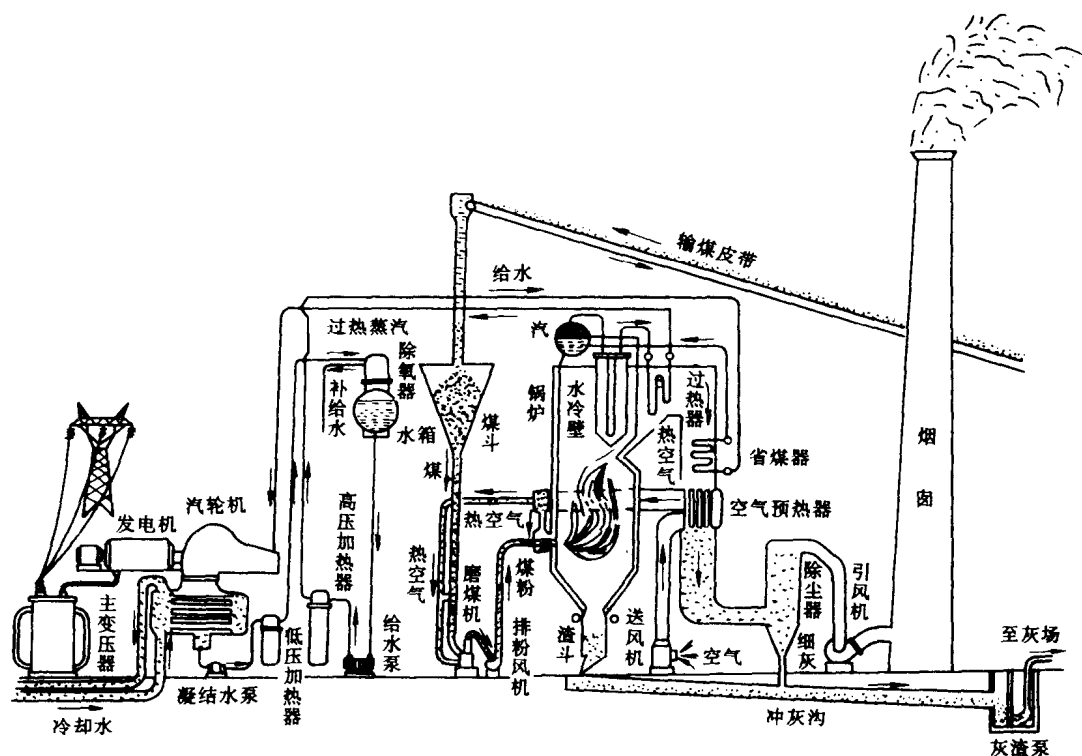


图 0-1 火力发电厂生产过程示意图

的热能连续不断地转换为电能。

由此可见，火力发电厂主要由两大部分组成，即从燃料的化学能转换为机械能的热力部分和从机械能转换为电能的电气部分。热力部分包括锅炉、汽轮机、水泵、加热器，以及连接它们的管道等设备，这些设备的组合通常称之为热能动力装置或热能动力设备。

三、《热工基础》的主要内容及应用

《热工基础》，是讲述工程热力学和传热学基础知识的教科书，全书包括五个单元，其中前四个单元属于工程热力学，第五单元属于传热学。

工程热力学是研究热能和机械能之间转换规律的科学，它以热力学第一定律、热力学第二定律为基础，着重阐述工质在基本热力过程和动力基本循环中的热功转换规律，最终找出提高转换效率的途径和方法。

传热学是研究热量传递规律的科学。它以导热、对流换热及热辐射三种基本换热方式为基础,研究复杂换热的传热过程及常用换热设备的传热特点,最终找出增强传热和削弱传热的途径及方法。

《热工基础》，着重研究热功转换和热量传递等宏观现象，所以，主要应用宏观研究法，对热现象进行具体的观察和分析，总结出普遍的基本规律。但为了说明热现象的本质及其根本原因，有时也用微观理论去进行解释。为分析问题方便，本课程中还常常采用抽象化、理想化及简化的研究方法。

热能与机械能的转换及热量的传递是火力发电厂热力设备中的主要工作过程，所以热工基础是动力类专业的一门主要的专业基础课，各种热能动力装置的设计、制造、安装、运行、检修与改进都离不开它所讲述的基本理论。

随着我国国民经济的持续、高速发展，电力工业也必将进入一个高速发展时期。虽然我国电力装机容量和发电量已跃居世界第二位，但我国的发电技术经济指标还比较低，人均占有发电量的水平也较低，因此，我们在开发新能源的同时，必须合理地利用能源，使我国的能源工业全面地达到或超过世界先进水平。学好《热工基础》，可为开发新能源和合理利用能源奠定必要的理论基础。

热力学基础知识

内容提要

热力学,是研究热能转换为机械能的规律和方法的一门学科,在对自然现象大量观察的基础上,采用抽象、概括、理想化和简化的手段,建立热力学讨论方法,提出热力系统、热力过程等概念。本单元介绍基本状态参数、容积功和热量的表示及计算;给出理想气体状态方程式并应用它解决实际问题;讨论了热容的影响因素及利用热容计算热量。本单元主要介绍热力学的基本概念,将会出现较多的名词术语,必须准确理解和掌握,为本课程后续单元及专业课程的学习打下良好的基础。

课题一 工质、热力状态及基本状态参数

教学目的

实现热能转换为机械能,是在热力系统中依靠工质完成的。理解工质的概念及特性,正确掌握热力系统的分类,是讨论热力学问题的关键。通过本课题的学习,应掌握基本状态参数的定义及表示方法。

教学内容

一、工质、热机、热源和热力系

热能转换为机械能的装置很多,形式各异,比较典型的有蒸汽动力装置和内燃机装置。在火电厂中采用的蒸汽动力装置如图 1-1 所示。燃料(煤或油)在锅炉的炉膛内燃烧后成为

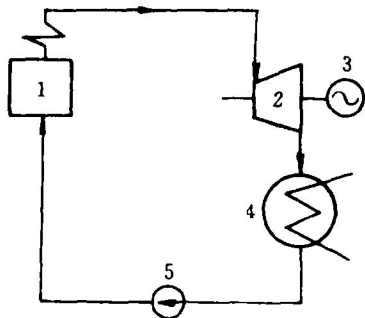


图 1-1 蒸汽动力装置示意图

1—锅炉; 2—汽轮机; 3—发电机;
4—凝汽器; 5—给水泵

烟气,使燃料的化学能转变为热能。锅炉水冷壁内的水吸收烟气的热量后汽化为水蒸气,水蒸气在过热器内进一步吸收热量而提高温度,成为过热蒸汽,此过程为水和水蒸气的吸热过程。从锅炉的过热器中出来的高温高压水蒸气进入汽轮机的喷管中,降压膨胀,水蒸气的速度增大,使热能转变为水蒸气的动能,接着,这股高速的气流冲击汽轮机叶片而做功,将水蒸气的动能传递给汽轮机转子,使汽轮机的轴转动,将蒸汽的动能转换为汽轮机轴的机械能,此过程是水蒸气的膨胀做功过程。汽轮机带动发电机发电,将机械能转变成电能。做完功后的蒸汽在凝汽器中放热

而凝结成水,此过程是水蒸气的放热过程。凝结水由水泵升压后送回锅炉,此过程是水的压缩过程。由上可见,在蒸汽动力装置中,水(水蒸气)经历了吸热、膨胀、放热和压缩等过程,如此周而复始,就将燃料燃烧时放出的热能连续不断地转换为机械能。

内燃机是一种广泛应用于汽车、船舶、机车上的动力装置,如图 1-2 所示。活塞右行时,进气阀打开,排气阀关闭,由雾状汽油和空气组成的混合气体被吸进气缸。活塞左行时,进、排气阀都关闭,压缩缸内气体,此过程为压缩过程。当活塞即将接近缸头时,由电火花将燃料引燃,缸内气体压力和温度迅速升高,此为燃烧吸热过程。燃烧后的高温高压气体膨胀,推动活塞右行,将热能转换为机械能,并通过曲柄连杆机构将机械能传递给飞轮和外界,此过程为膨胀做功过程。当活塞再次左行时,排气阀开启,进气阀关闭,将做功后的烟气排至大气,这部分烟气必然带有余热进入大气,此过程为气体的放热过程。重复进行这些过程,即可连续不断地把燃气通过燃烧得到的热能转换为机械能。

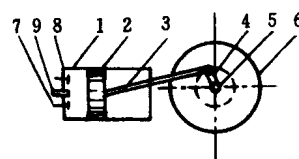


图 1-2 内燃机示意图

- 1—气缸;2—活塞;3—连杆;4—曲柄;
5—机轴;6—飞轮;7—进气阀;
8—排气阀;9—火花塞

在上述蒸汽动力装置和内燃机动力装置中,将热能连续不断地转换为机械能,都需要借助于某种媒介物质通过压缩、吸热、膨胀、放热四个过程去实现。我们把这种实现热能和机械能相互转换的媒介物质称为工质,例如,内燃机中的燃气,火电厂中的水蒸气等。

为了能够充分地热能转换为机械能,要求工质具有良好的膨胀性能。同时,为了保证工质连续地流过热力设备而不断地做功,要求工质具有良好的流动性。当然,在物质的固、液、气三种状态中,我们知道,气体物质受热后的膨胀能力最大,流动性也最好,最适宜于作为能量转换的工质。除此之外,作为工质,还要求热力性质稳定、不腐蚀热力设备、无毒、廉价、容易获得等,所以,在火电厂中我们采用水蒸气作为工质。

热能转换为机械能,必须依靠一定的设备(例如汽轮机和内燃机)来完成。这种用来将热能转换为机械能的设备,称为热机。

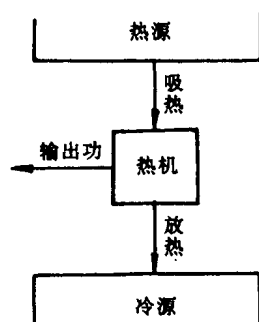


图 1-3 热能动力装置工作示意图

我们把不断向工质提供热能的物体,称为高温热源,简称热源,如锅炉中的高温烟气。将不断接受工质排放余热的物体,称为低温热源,简称冷源,如凝汽器或大气环境。在热能动力装置稳定运行中,热源不会由于给工质提供热能而温度降低,其热容量可视为无限大,即通常认为热源的温度保持不变。同理,工质放出余热给大气或凝汽器,大气或冷却水的热容量也可以视为无限大,冷源不会由于吸收余热而温度升高,即视为冷源的温度也保持不变。

热能动力装置的工作流程可以概括成:工质从高温热源吸收的热能,一部分在热机中转换为机械能,另一部分排至低温热源,如图 1-3 所示。

在力学中,将研究对象取为分离体,分析它与周围物体的相互作用。同样,在热力学

中也要将分析研究的对象从周围物体中分割出来，研究它通过分界面与周围物体之间的能量交换。这种人为分割出来的、由界面包围着的、作为研究对象的物体总和，称为热力系统，简称热力系。周围一切与热力系有关的物体，统称外界或环境。热力系与外界的分界面，称为边界。边界可以是真实的、假想的，也可以是固定的、移动的，如图 1-4 (a) 所示。若取汽缸中封闭的工质为热力系，则活塞、重物及热源为外界，汽缸和活塞的内壁面是真实的分界面，活塞是可以上、下移动的分界面。在图 1-4 (b) 中，取汽轮机进、出口截面 1-1 与 2-2 之间的气体作为研究对象，那么进、出口截面是假想的分界面，汽轮机壳体的内壁是真实的、固定的分界面。热力系与外界之间可以有以功和热的形式进行的能量传递，也可以同时有物质交换。按照系统与外界有无物质交换的情况，热力系可以划分为：

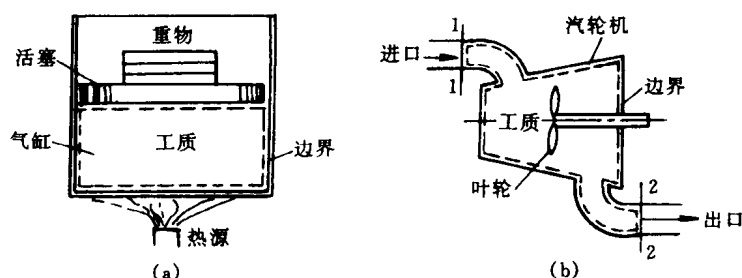


图 1-4 热力系

(a) 闭口热力系；(b) 开口热力系

闭口热力系——热力系与外界只有能量的传递，而无物质的交换，其质量是恒定不变的，也称封闭热力系。如图 1-4 (a)，取封闭在气缸中的气体为研究对象，这就是闭口热力系。

开口热力系——系统与外界既有能量的传递，又有物质的交换。如图 1-4 (b)，取汽轮机壳内壁包围的空间为一个热力系，它与外界间通过进出口边界不断交换物质，这就是开口热力系。

按照系统与外界进行能量交换的情况，热力系又可划分为：

绝热热力系——热力系与外界没有热量的交换，但可以有功和物质的交换。

孤立热力系——热力系与外界不发生任何关系，既没有物质交换，也没有能量的传递。

热力系的选择取决于研究对象的特点及研究的任务。例如，我们可以把整个蒸汽动力装置划作一个热力系，计算它与外界交换的功和热量，此时，装置中工质的质量不变，是闭口热力系；若只分析汽轮机的工作过程，取汽轮机内的空间为热力系，此时有工质流进、流出，这就是开口热力系。

需要指出的是，绝对的绝热热力系和孤立热力系是不存在的。但是，如果某些实际的热力系统，在与外界的传热量很少时，可以近似地看作绝热热力系。例如，对图 1-4 (b) 所示的热力系，蒸汽通过汽缸壁对外的散热量，与蒸汽在汽轮机中进行的能量转换相比是非常小的，实际计算时把它当作绝热热力系不会引起很大的误差。同样，如果系统与外界

的物质交换和能量交换都很微弱，对系统所产生的影响可以忽略不计，则这样的系统就可近似地看作孤立热力系。可见，绝热热力系和孤立热力系都是从实际事物中概括出来的抽象概念。在抽象过程中，略去了不起重要作用的次要因素，抓住了事物的本质。从而使复杂的热力学问题研究得到简化，为我们分析问题和解决问题提供了便捷的途径。这种将复杂问题简化，建立热力学模型，总结出热力学基本定律，然后推广应用到实际系统中的方法，是分析热力学问题的基本方法。

二、工质的热力状态

在前面讨论的热能动力装置中，热能转换为机械能是依靠工质的吸热、膨胀、放热和压缩过程来完成的。在这些过程中，工质的物理特性随时发生变化，即工质的宏观物理状况总是在不断变化。为了描述这些变化，把工质在某一瞬间所呈现的宏观物理特性称为工质的热力学状态，简称状态。

用来描述和说明工质状态的一些物理量，称为热力状态参数，简称状态参数，如温度、压力等。状态参数只取决于工质的状态，即对应某一确定的状态，就可以用确定的状态参数来描述。反过来，如果工质有一组确定的状态参数，便可以确定其状态。对本书中所涉及的热力系，只要已知工质的两个独立的状态参数，即可确定工质的状态。工质状态发生变化，则状态参数也会随之改变，其变化量只取决于初、终状态的值，而与变化的途径无关。能满足上述特性的物理量，都可作为状态参数。例如，热力系在初态时温度为 t_1 ，终态时温度为 t_2 ，则不管热力系是如何变化的，其温度变化量总可以表示为 $t_2 - t_1$ ，温度就是工质的状态参数。

在热力学中，采用的状态参数有温度、压力、比容、内能、焓、熵等。其中，温度和压力可由仪表直接测得，比容可以通过物体的质量和容积经简单计算求得，而且这三个状态参数的意义都比较容易理解，所以常称为基本状态参数。至于其它状态参数，均只能由基本状态参数导出，因而又称导出状态参数，以后将陆续介绍。

三、基本状态参数

(一) 温度

温度是表示物体冷热程度的物理量。例如夏天气温高，冬天气温低；锅炉汽包内的水比凝汽器中的凝结水温度高等。两个冷热程度不同的物体接触时，它们之间会自发地进行热交换，热物体逐渐变冷，温度下降；冷物体逐渐变热，温度升高，经过一定时间后，两个物体冷热程度相同，即温度相等，热交换量为零，这表明它们之间达到了某种共同的平衡，这种平衡称为热平衡，即热平衡的条件为物体温度相等。

温度的测量正是利用热平衡的原理来进行的。当温度计与被测量物体达到热平衡时，温度计所指示的温度就是该被测物体的温度。

温度的数值表示方法称为温标。标定温度的方法，有多种形式。任何一种温标的建立，根本问题是确定基准点和分度方法。

热力学温标是基本温标，用这种温标确定的温度称为热力学温度，符号为 T ，单位是开尔文，中文符号为“开”，国际符号为“K”，所以也称开氏温度。根据国际计量会议规定，热力学温标选取水的三相点（即固、液、气三相平衡共存的状态）为基本定点，并

定义其温度为 273.16K，所表示的温度间隔等于水三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。

与热力学温标并用的还有摄氏温标，符号为 t ，单位为摄氏度，单位符号为“℃”。摄氏温度被定义为：

$$t = T - 273.15 \quad (1-1)$$

在我国法定计量单位中规定，温度采用热力学温标和摄氏温标。

摄氏温度与热力学温度之间，每一温度间隔的大小完全一样，只是所取的零点不同，即 0℃ 相当于 273.15K。用摄氏温标表示，水的三相点为 0.01℃。因此凡涉及到温差的地方用 K 或℃ 在数值上均相同，即 $\Delta T = \Delta t$ 。两种温标的换算关系可以写成：

$$T = t + 273.15$$

一般的工程计算中，可以近似为

$$T = t + 273 \quad (1-2)$$

从微观角度看，物体的冷热程度取决于物体内部微粒运动的状况。根据分子运动论，气体的热力学温度与分子平均移动动能成正比，即

$$\frac{1}{2} mc^2 = BT$$

式中 T ——热力学温度；

m ——分子的质量；

c ——分子平移运动的均方根速度；

B ——比例常数。

可见，气体分子热运动越剧烈，分子的平均移动动能越大，气体的温度也越高。所以温度标志着物体内部分子热运动的强烈程度。从上式看出，热力学温度的零点是分子停止运动时的温度。因而，热力学零度是不可能达到的。

(二) 压力

单位面积上受到的垂直作用力，称为压力（即物理学中的压强），用符号 p 表示，即

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

式中 F ——垂直作用力，N；

A ——面积， m^2 。

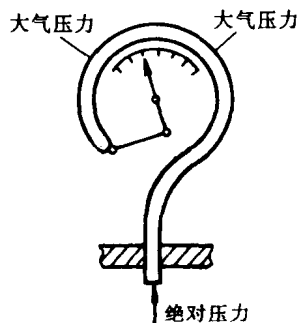


图 1-5 弹簧管式压力计

从微观角度看，气体的压力是气体分子作不规则热运动时频繁地撞击容器内壁的平均总结果。容器内气体温度越高，分子运动速度越快，对容器壁的撞击作用越强，压力就越大。同样，容器内气体分子个数越多，对容器壁撞击次数就越多，压力也就越大。可见，对于一个确定容器而言，气体的压力取决于气体的温度和容器内所含气体的分子数。

工程上，工质的压力是用压力表来测量的。压力测量一般采用弹簧管式压力计（如图 1-5 所示），较小的压力用 U 形管式压力计来测量（如图 1-6 所示）。

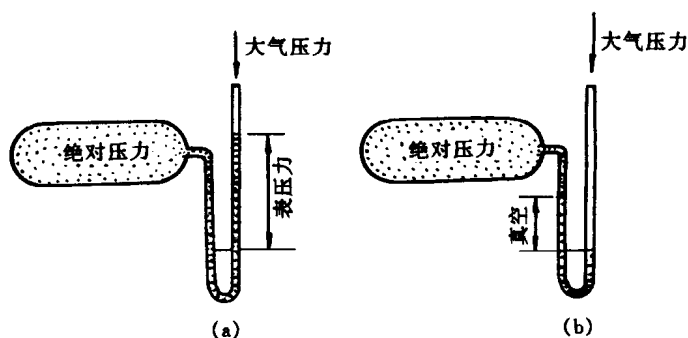


图 1-6 U形管式压力计

它们的测量原理都是建立在力平衡基础之上的。弹簧管式压力计，管内为被测流体，管外为大气，弹簧管在内外压差作用下产生变形，带动指针指示，测出工质真实压力与大气压力之间的差值。在 U 形管压力计中，U 形管内盛有测压液体（水或水银等），它一端和大气相通，另一端与被测容器连通，U 形管两边出现的液柱高度差即为被测工质真实压力与大气压力之差。由此可知，压力计测得的压力并不是工质的真实压力，而是工质真实压力与大气压力之差。

工质的真实压力，称为绝对压力，以 p 表示。大气压力用 p_{amb} 表示。

当绝对压力大于大气压力时，其绝对压力超出大气压力之值，即为压力表计所反映出来的压力，称为表压力，用 p_g 表示。则有

$$p = p_{amb} + p_g \quad (1-3)$$

如果工质的真实压力低于大气压力时，其绝对压力与大气压力之差为负值，此时压力表上所指示的读数习惯上称为负压或真空，用 p_v 表示，则

$$p = p_{amb} - p_v \quad (1-4)$$

若以绝对压力为零作基准线，则绝对压力、表压力、真空、大气压力之间的关系可用图 1-7 来表示。

大气压力的数值是由气压计测定的，其数值随测量的时间、地点而不同。当工质绝对压力不变时，由于大气压力可以发生变化，则测出的表压力和真空也会随之变化。因此，表压力和真空不是状态参数，只有绝对压力才能作为状态参数。工程计算中，选取的压力必须是绝对压力。在火电厂中所测得的锅炉汽包、主蒸汽的压力值都是表压力，负压

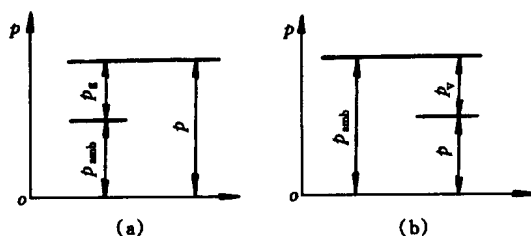


图 1-7 绝对压力、表压力、真空的关系

(a) $p > p_{amb}$; (b) $p < p_{amb}$

燃烧锅炉炉膛内的烟气和凝汽器内蒸汽的压力值为真空，计算时须换算为绝对压力。

法定计量单位中压力的单位是牛顿每平方米 (N/m^2)，又称为帕斯卡，简称帕，符号为 Pa，即

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

在工程实际应用中, 因帕的单位太小, 读数不方便, 常用千帕 (kPa)、兆帕 (MPa) 作为单位。

$$1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ Pa} \quad 1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$$

工程上压力的计量也可用液柱高度来表示。常用的测压液体有水和水银, 其换算关系为:

$$1 \text{ mmHg} \approx 133.3 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ mmH}_2\text{O} \approx 9.81 \text{ Pa}$$

物理学中, 将纬度 45° 海平面上的常年平均气压定为标准大气压, 或称物理大气压, 用 atm 表示, 其值为 760 mmHg , 即

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg} = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$$

在热工计算中, 应将各种不同的压力单位换算成国际单位, 以达到单位的统一。

(三) 比容和密度

单位质量工质所占有的容积称为比容, 用符号 v 表示, 即

$$v = \frac{V}{m} \quad \text{m}^3/\text{kg} \quad (1-5)$$

式中 m ——工质的质量, kg;

V —— $m \text{ kg}$ 工质的总容积, m^3 。

密度是单位容积内工质的质量, 用符号 ρ 表示, 即

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{kg/m}^3 \quad (1-6)$$

显然, 比容和密度互为倒数, 即

$$v = \frac{1}{\rho}$$

从微观意义上讲, 对同一气体, 密度和比容都是描述分子聚集疏密程度的物理量。

例 题

1-1 如图 1-8 所示, 用水银压力计测量凝汽器的压力, 已知测压计读数为 706 mmHg , 当地大气压 $p_{\text{amb}} = 98.07 \text{ kPa}$, 求凝汽器的绝对压力、表压力和真空。

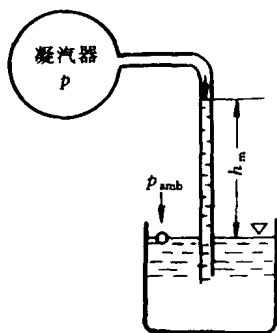


图 1-8 例 1-1 图

解: 由于凝汽器内蒸汽的密度远小于水银的密度, 忽略蒸汽高度产生的压力, 则

$$\text{凝汽器内真空 } p_v = 706 \times 133.3 = 94110 \text{ (Pa)}$$

$$\text{绝对压力 } p = p_{\text{amb}} - p_v = 98070 - 94110 = 3960 \text{ (Pa)}$$

$$\begin{aligned} \text{凝汽器的表压力 } p_g &= p - p_{\text{amb}} = 3960 - 98070 \\ &= -94110 \text{ (Pa)} \end{aligned}$$

说明: 凝汽器内的表压力为负值, 称为负压, 负压与真空的绝对数值是相等的。

1-2 一台型号 HG1021/18.2-540/540 的锅炉, 其中 18.2 指的是蒸汽的表压力为 18.2MPa, 当地大气压为 750mmHg, 试求蒸汽的绝对压力为多少?

解: 根据 $p = p_{\text{amb}} + p_g$, 则绝对压力为

$$p = 750 \times 133.3 + 18.2 \times 10^6 = 18.3 \times 10^6 \text{ (Pa)} = 18.3 \text{ MPa}$$

说明:

(1) 在火力发电厂的设备型号中, 通常有表示压力的参数。在不同设备型号中, 其含义不尽相同。例如, 在锅炉型号 HG1021/18.2-540/540 中, 18.2 指的是蒸汽的表压力为 18.2MPa; 而汽轮机型号 N300-16.7/537/537 中, 16.7 指的是新蒸汽绝对压力为 16.7 MPa。

(2) 在我国的火力发电厂一些老设备型号中, 仍有采用工程大气压 (at) 作为压力单位的。如 HG410/100-1 锅炉, 其中 100 指的是蒸汽绝对压力为 100 工程大气压 (at)。

$$1 \text{ at} = 98070 \text{ Pa} = 98.07 \times 10^3 \text{ Pa}$$

(3) 在有些计算中, 当工质压力较高时, 大气压力的数值可以近似取为 0.1MPa, 这样引起的误差是很小的。但是, 如果工质本身的压力数值比较小, 则大气压力应取当地大气压力值。

1-3 某凝汽器内, 蒸汽比容为 $45.668 \text{ m}^3/\text{kg}$, 凝结成水后, 比容为 $0.001 \text{ m}^3/\text{kg}$, 试计算蒸汽凝结前后的比容之比为多少?

解: $v_1 = 0.001 \text{ m}^3/\text{kg}$, $v_2 = 45.668 \text{ m}^3/\text{kg}$

则工质凝结前后的比容之比为

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{0.001}{45.668} = \frac{1}{45668}$$

故工质凝结后, 比容缩小到原来的 $1/45668$ 。说明工质在凝汽器内凝结时, 比容大大减小, 这就是凝汽器真空产生的根本原因。

课堂练习题

1-1 从气压计上读得当地大气压力是 755mmHg, 试换算成国际单位。

1-2 已知水的临界温度为 374.12°C , 求出此时的热力学温度。

课题二 热力过程及参数坐标图

教学目的

能量转换是通过工质发生一系列状态变化来实现的, 其中可逆过程是热力学讨论的一种理想模型, 应着重理解其意义。同时应掌握容积功和热量的概念及在坐标图上的表示, 了解它们与状态参数的区别。应理解熵的定义式, 了解其一般用途。

教学内容

一、平衡状态

(一) 平衡状态与不平衡状态

一个热力系，在不受外界影响的条件下，其状态始终保持不变，则这种状态称为平衡状态，否则为不平衡状态。

平衡状态存在的条件是，必须同时满足热力系与外界间的热平衡和力平衡。热力系与外界没有温差，即 $\Delta T = 0$ ，则热力系与外界没有热量交换，热力系就处于热的平衡。热力系与外界无不平衡力，即 $\Delta F = 0$ ，则热力系与外界无功的交换，热力系就处于力的平衡。因此，只要热力系与外界不发生热量和功量的交换，热力系的状态就不会发生变化，即在不受外界影响时，系统的平衡状态保持稳定，不会被破坏。如果热力系内存在着热的不平衡或力的不平衡，则热力系内工质通过分子运动传递能量，使状态发生变化：自发地由不平衡状态变成平衡状态。热力系的状态参数也会随之不断变化，直到达到平衡状态。也就是说，不平衡状态具有自动达到平衡状态的趋势。

要注意平衡状态与稳定状态的区别。平衡状态和稳定状态虽然都不随时间变化，但前者不受外界影响，而后者是依靠外界的作用维持的；还要注意平衡和均匀的区别，平衡是对时间而言，均匀是对空间而言。如果不考虑外力场（重力场、电磁场等）的作用，则单相物质组成的热力系，达到平衡状态时，热力系也是均匀的。此时热力系各部分的状态参数都相同，即热力系内各点的温度、压力、比容等状态参数都应相等。

本书所研究的状态，除有特别指明外，均指平衡状态。因为只有在平衡状态下，工质才具有确定的状态参数。

(二) 状态方程式

热力系的平衡状态可以用各个状态参数描述。状态参数数值不同，说明热力系处于不同的平衡状态。理论和实验表明，各个状态参数之间有着内在的联系，它们之间有确定的相互关系。在本课程讨论的热力系统中，只要两个独立的状态参数的值一旦确定，其他状态参数值也就相应确定，即某一状态参数可以表示成另外两个独立参数的函数，例如：

$$T = f(p, v); p = f(T, v); v = f(p, T)$$

或

$$F(p, v, T) = 0$$

这种由状态参数组成的函数关系式称为状态方程式，其具体形式取决于工质的性质，由实验和理论导出。本单元课题三将介绍理想气体状态方程式。

(三) 参数坐标图

两个独立的状态参数可以确定一个状态，这样可以用两个相互独立的状态参数构成一个状态参数坐标图。坐标图上的一个点表示工质所处的一个状态。例如，已知工质某一状态下的压力 p_1 、比容 v_1 ，在 $p-v$ 参数坐标图上可以确定一个唯一点 1，如图 1-9 所示；如果已知参数坐标图中一点 2，可以通过参数坐标图确定出 2 点的状态参数值 p_2 、 v_2 。

可见，工质的状态和参数坐标图上的点是相互对应的。在平衡状态下，工质内各点的