

发电厂热力设备

苏州电力技工学校 郭祝三 天津电力技工学校 丁志敏
大连电力技术学校 李文艺 湖北省电业技工学校 陈建中
合 编

水利电力出版社

(京)新登字115号

发电厂热力设备

苏州电力技工学校 郭祝三 天津电力技工学校 丁志敏
大连电力技术学校 李文艺 湖北省电业技工学校 陈建中
合 编

*

水利电力出版社出版、发行
(北京三里河路6号)

北京市朝阳小红门印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 23印张 518千字 3插页

1994年6月第一版 1994年6月北京第一次印刷

印数00001—11080册

ISBN 7-120-00546-4/TK·298

定价14.10元

内 容 提 要

本书从发电厂生产过程的实际出发，系统地介绍了发电厂热力部分的全过程及其相应的基本知识。

全书共分两大部分，第一部分讲述热工学及流体力学基础；第二部分讲述热力设备（锅炉及汽轮机）及发电厂的热力系统和主要辅助设备。

本书重点介绍国产设备及其系统，在取材和内容叙述上紧紧围绕发电厂生产过程这根主线，在文字叙述上力求深入浅出、通俗易懂。为便于学习，在每章后附有复习题。

本书可作为电厂热工仪表及自动装置专业技工学校的必修教材，也可作为电厂热动专业的工人培训教材，还可作为发电厂工人、干部、技术人员学习的参考书。

前 言

本书是根据原水利电力部颁发的《关于电力中专、技工学校教材建设的几点意见》和中国电力联合会制订的《1989~1993年电力技工学校教材建设规划》，根据技工学校热工仪表及自动装置专业的教学大纲要求（144学时）组织编写，是电厂热工仪表及自动装置专业的必修教材，对发电厂工人、干部、技术人员的学习也具有一定的参考价值。

本书围绕火力发电厂的生产过程，对现代蒸汽动力循环的基本理论、主要热力设备的工作原理、基本构造和一般运行性能、发电厂的热力系统等主要内容作了较为详尽的阐述。同时在编写过程中本着尽量结合热工仪表及自动装置专业的特点，适当增加了动力设备运行的保护装置、参数调节及发电厂热力系统的内容，紧密联系发电厂生产实际，着重介绍国产设备及其系统。在取材上，力求学科的系统性。在文字叙述上，力求深入浅出，通俗易懂，符合循序渐进的认识规律。

全书采用法定计量单位。考虑到当前我国工程上的实际情况，在个别确实有必要的地方（例如锅炉、汽轮机的系列型号等）仍采用或并列了过去惯用的工程单位制的数据，以备查对。

本书由苏州电力技工学校郭祝三（绪论、第十五至十八章）、天津电力技工学校丁志敏（第一至六章）、大连电力技术学校李文艺（第七至十章）、湖北省电业技工学校陈建中（第十一至十四章）合编。全书由苏州电力技工学校郭祝三统稿，湖北省电业技工学校吴志敏主审。

本书在编写过程中，得到保定电力技工学校赵永民和宋明祥的指导和帮助，在此表示衷心的感谢。

限于编者水平，错误和不妥之处在所难免，欢迎读者批评指正。

编者

1993年6月

目 录

前 言	
绪 论	1
第一章 气体的状态及状态方程式	5
第一节 工质、热源、热力系	5
第二节 工质的状态参数	5
第三节 理想气体状态方程式	9
复习题	11
第二章 气体的比热容	12
第一节 热量	12
第二节 比热容	12
第三节 利用比热容计算热量的方法	14
复习题	17
第三章 热力学基本定律	18
第一节 热力学第一定律	18
第二节 理想气体的热力过程	22
第三节 热力学第二定律	29
复习题	33
第四章 蒸汽 湿空气 蒸汽和气体的流动	34
第一节 蒸汽	34
第二节 湿空气	41
第三节 蒸汽和气体的流动	45
复习题	51
第五章 蒸汽动力装置的循环	52
第一节 蒸汽动力装置的基本循环——朗肯循环	52
第二节 回热循环	55
第三节 中间再热循环	57
第四节 热电联产循环	58
复习题	60
第六章 传热学基本知识	61
第一节 导热	61
第二节 对流换热	68
第三节 热辐射	71
第四节 传热和换热器	74
复习题	81
第七章 流体的基本物理性质	83
第一节 流体的概念	83

第二节	流体的基本物理性质	84
复习题		89
第八章	水静力学基本知识	90
第一节	液体的静压力及其特性	90
第二节	静力学基本方程式	91
第三节	静力学基本方程式的应用	93
第四节	液柱式压力计	97
第五节	静止液体的能头	100
复习题		102
第九章	液体动力学基本知识	104
第一节	液体运动的基本概念	104
第二节	液体的连续性方程	107
第三节	液体的伯努里方程	108
第四节	伯努里方程的应用	114
第五节	虹吸及其应用	119
复习题		122
第十章	液体阻力计算基础	124
第一节	液体的两种流动状态	124
第二节	沿程阻力及其计算	126
第三节	局部阻力及其计算	129
第四节	减小管路阻力损失的办法	130
第五节	水击与水冲击	131
复习题		132
第十一章	锅炉设备概况	134
第一节	锅炉设备的组成及其工作过程	134
第二节	锅炉的主要参数和型号	135
复习题		137
第十二章	锅炉的燃料及其燃烧系统与辅助设备	138
第一节	燃料	139
第二节	燃料的输送与制备	141
第三节	燃料燃烧及燃烧设备	149
第四节	锅炉的热平衡	160
第五节	锅炉的风烟系统及设备	162
复习题		170
第十三章	锅炉的汽水系统及其设备	171
第一节	锅炉的给水系统及其设备	171
第二节	炉水循环系统及设备	177
第三节	锅炉的蒸汽系统及设备	191
第四节	锅炉附件	202
第五节	锅炉的水处理	206

复习题	208
第十四章 锅炉运行的调节	210
第一节 锅炉运行的参数调节	210
第二节 锅炉的燃烧调节	219
第三节 制粉系统的运行调节	223
第四节 直流锅炉的参数调节	226
复习题	230
第十五章 汽轮机原理	231
第一节 概述	231
第二节 汽轮机的基本工作原理	232
第三节 汽轮机的分类和型号	237
第四节 蒸汽在喷嘴中的能量转换	239
第五节 蒸汽在动叶中的能量转换	245
第六节 轮周效率和最佳速度比	249
第七节 级内损失及效率	253
复习题	256
第十六章 多级汽轮机的主要组成部件及其结构特点	257
第一节 多级汽轮机结构概述	257
第二节 汽轮机静止部分的结构	259
第三节 汽轮机转动部分的结构	282
复习题	294
第十七章 汽轮机的调节和保护	296
第一节 调速系统的任务及调速原理	296
第二节 调速系统的静态特性及其分析	301
第三节 汽轮机的保护	305
第四节 汽轮机油系统	313
复习题	314
第十八章 发电厂的热力系统及主要辅助设备	316
第一节 原则性热力系统及全面性热力系统	316
第二节 主蒸汽管路系统	319
第三节 给水回热系统	321
第四节 再热机组的旁路系统	324
第五节 给水除氧设备和系统	326
第六节 凝汽设备	331
第七节 发电厂全面性热力系统举例	336
复习题	337
附录	339
附表一 压力单位换算	339
附表二 常用能量单位的互换常数	339
附表三 一些气体的千摩尔质量和气体常数	339

附表四	气体的平均比定压热容 c_p	340
附表五	气体的平均定压容积比热容 $c_{p,v}$	341
附表六	气体的平均比定容热容 c_v	342
附表七	气体的平均定容容积比热容 $c_{v,v}$	343
附表八	饱和水与饱和蒸汽性质表 (按压力排列)	344
附表九	饱和水与饱和蒸汽性质表 (按温度排列)	346
附表十	未饱和水与过热蒸汽性质表.....	347
附图	水蒸汽 $h-s$ 图 (插页)	

绪 论

一、电力在国民经济中的地位及我国电力工业的发展前景

电力是现代生产的基本动力，是国民经济各个部门的先行工业。因此，电力工业的发展水平是衡量一个国家国民经济发展的一个重要标志。从世界发达国家的经济来看，电力工业发展速度应高于国民经济的发展速度，电力工业是国民经济的先行工业。旧中国的电力工业和其它工业一样，基础薄弱，技术落后，直至1949年解放时，我国发电设备的装机容量总共也不过是1850MW。解放后，我国人民在中国共产党的正确领导下，认真贯彻了自力更生、奋发图强，艰苦奋斗、勤俭建国的方针，使我国的电力工业得到了前所未有的巨大发展。我国社会主义制度的优越性在电力工业方面也得到了充分的体现。到1987年底止，我国发电设备的总装机容量，已由1949年的1850MW增加到1亿kW以上；全年发电量则由1949年的43亿kW·h（占世界第25位）上升到4960亿kW·h（占世界第6位）1992年同1987年相比，发电设备总装机容量增长46%，达到16500万kW。

可见，在中国共产党领导下，我国国民经济的发展是十分迅速的。尤其在改革开放、建设有中国特色的社会主义年代里，近五年，国民生产总值以平均每年增长7.9%的速度向前发展，20世纪最后十年要为工业飞速发展打下坚实基础，首先要缓和中国的电力供应紧张状况。“八五”期间，我国电力建设将实行因地制宜，水、火电并举和适当发展核电的方针，电力将以年平均增长率6%左右的速度迅速发展。到1995年，发电量将达到8100亿kW·h，比1990年增加1920亿kW·h。到2000年，我国国民经济和社会发展的主要指标将在1990年的基础上翻一番，或有较大幅度的增长，全国发电量要达到11000亿kW·h左右。尽管如此，我国的电力工业仍然赶不上整个国民经济发展的需要，电力工业的技术水平与一些先进国家相比，也还有一定的差距。因此，电力工业必须加快建设步伐，学习世界先进技术，提高我国电力工业的科学技术水平，提高电力工作者本身的素质，是摆在我们电力工作者面前的一项繁重而光荣的任务。

全国所有的发电厂都应当努力提高安装、检修、运行的技术水平和管理水平，提高设备运行效率，降低发电成本，使电力工业真正起到先行的作用，为早日实现祖国的四个现代化宏伟目标作出应有的贡献。

二、现代热力发电厂的组成及其生产过程

现代的热力发电厂都是以汽轮机为原动机的发电厂。根据国家对一次能源的使用政策规定，我国的热力发电厂以燃煤为主。

图0-1为一座燃用煤粉的小型汽轮机发电厂的生产过程示意图。火车或轮船把煤运到发电厂的贮煤场，经碎煤机破碎、过秤后由皮带输送机送入锅炉房内的原煤仓。煤从原煤仓落入给煤机，由给煤机送入磨煤机，在其中研磨成煤粉，同时送入热空气来干燥和输送煤粉。磨制好的煤粉，经粗粉分离器除去部分不合格的粗粉后进入旋风分离器（即细粉分

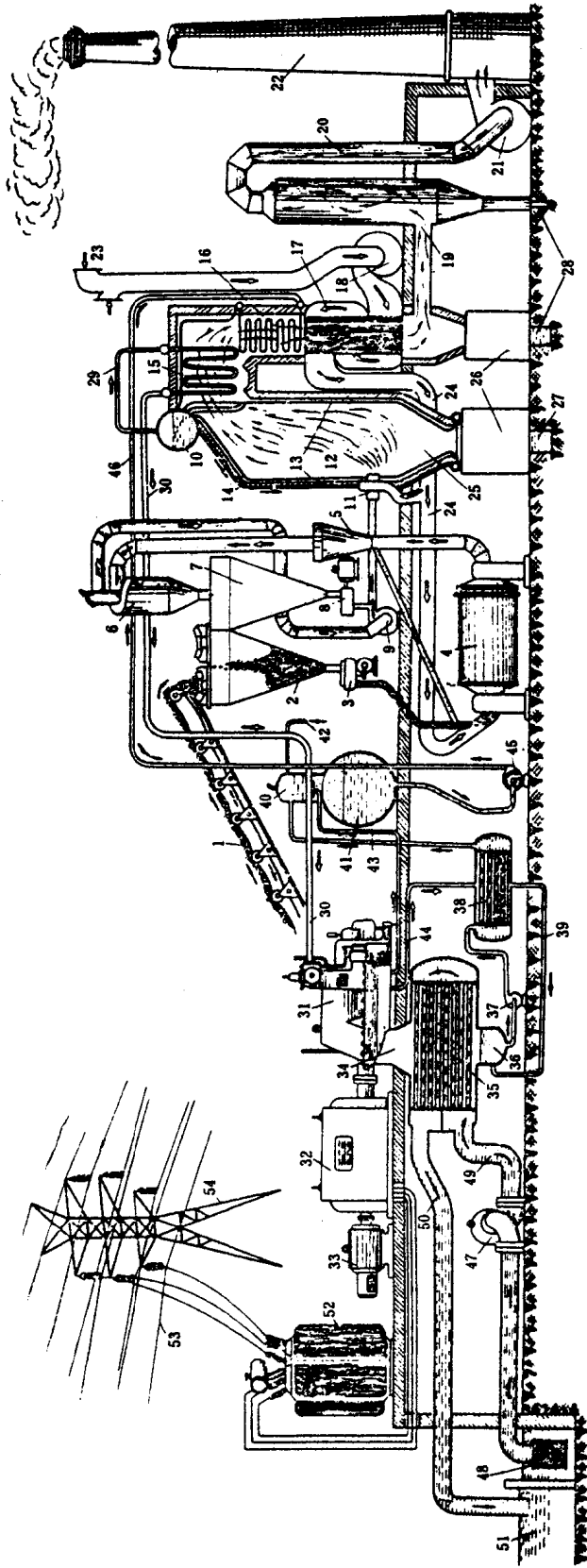


图 0-1 凝汽式发电厂的生产过程示意图

1—运煤皮带；2—原煤仓；3—圆盘给煤机；4—钢球磨煤机；5—粗粉分离器；6—旋风分离器；7—煤粉仓；8—给粉机；9—排粉机；10—汽包；11—喷燃器；12—炉膛；13—水冷壁(上升管)；14—下降管；15—过热器；16—省煤器；17—送风机；18—送风器；19—除尘器；20—烟道；21—引风机；22—烟囱；23—送风机的吸风口；24—热风道；25—冷风道；26—除灰设备；27—冲渣沟；28—冲灰沟；29—抱和蒸汽管；30—主蒸汽管；31—汽轮机；32—发电机；33—励磁机；34—乏汽口；35—凝汽器；36—热水井；37—凝结水泵；38—低压回热加热器；39—低加疏水管；40—除氧器；41—给水箱；42—化学补充水入口；43—汽轮机第一级抽汽；44—汽轮机第二级抽汽；45—给水泵；46—主变器；47—循环水泵；48—给水塔；49—冷却水进水管；50—冷却水出水管；51—江河(或冷却水池、冷水塔)；52—高压泵；53—高压输电线；54—铁塔

离器)，在其中空气和煤粉得以分离，分离出来的细粉进入煤粉仓，而旋风分离器中的空气则由排粉机抽出。煤粉仓的煤粉由给粉机送入输粉管，煤粉在输粉管内与空气混合后，由喷燃器喷入炉膛内进行燃烧（也有直接把磨煤机出口的气粉混合物送入炉内燃烧的）。由送风机送来的空气，在进入炉膛之前，先在空气预热器中接受排烟的预热，以减少排烟热量损失，并提高空气温度，改善燃烧过程。炉膛内的燃烧产物——高温烟气，在引风机的拔风作用下，沿着锅炉本体的倒U形烟道依次流过炉膛、过热器、省煤器和空气预热器，将热量逐步传递给水、蒸汽和空气。降温后的烟气流入除尘器进行净化。净化除尘后的烟气则被引风机抽出，最后经烟囱排入大气。

燃料燃烧时从炉膛内落下的灰渣，从尾部烟道里落入空气预热器下面灰斗中的飞灰，以及除尘器收集下来的飞灰，通常都用水冲入冲渣沟和冲灰沟，并随冲灰水流往灰渣泵房，然后用灰渣泵、灰渣管等设备将其排送到贮灰场。

锅炉给水先在省煤器中接受烟气的预热，然后引入锅炉顶部汽包（汽鼓）内。锅炉水由于本身的重量沿炉膛外的下降管往下流动，经下联箱进入铺设在炉膛四周的水冷壁管（上升管），在其中定压吸热汽化，形成的汽水混合物上升到汽包内，并在其中进行汽水分离。分离出的水又经下降管送至水冷壁管吸热，不断汽化；分离出的饱和蒸汽聚集在汽包上部再引入过热器，在定压下继续加热为过热蒸汽。过热蒸汽沿主蒸汽管进入汽轮机，推动汽轮机转子转动，从而获得机械能。做功后的乏汽排入凝汽器，并在其中冷却凝结成水（称为主凝结水）。主凝结水由凝结水泵打入回热加热器，初步加热后被送入除氧器，在除氧器中水被继续加热并除去溶解于水中的氧气（目的在于防止氧对金属受热面的腐蚀作用）。

从汽轮机某几个中间级后引出来的抽汽，分别供给除氧器和回热加热器等作为加热除氧以及预热给水，提高发电厂的热经济性。

在除氧器里脱过氧的主凝结水和化学补充水汇集于给水箱中，借给水泵升压后经高压加热器送入锅炉的省煤器，作为锅炉给水。

为使乏汽在凝汽器内冷凝成水，还必须借助于循环水泵对冷却水（又称循环水）加压并使其沿着冷却水进水管进入凝汽器。从凝汽器中出来的循环水排入江河，形成汽轮机的冷却水系统。

发电机由汽轮机直接拖动，所发出的交流电，一小部分由厂用配电设备予以分配，作为厂房照明和各种辅助机械的厂用电源，其余大部分电能均经主变压器升高电压后送入电网。

从能量转换的角度来看，燃料在炉膛内燃烧时，它的化学能首先转变为烟气的热能；它的热能逐步传递给锅炉各部分受热面内流动的水、蒸汽以及空气。锅炉所产生的新蒸汽进入汽轮机后逐级进行膨胀，蒸汽的部分热能就转变为汽流的动能；高速汽流冲动汽轮机的叶片，推动叶轮连同整个转子旋转，汽流的动能转换成汽轮机轴上的机械能。汽轮机通过靠背轮（联轴器）带动发电机转动，机械能转换成电能。

三、本课程的任务和主要内容

“发电厂热力设备”是热力发电厂热工仪表及自动装置专业的重要技术基础课，为后

继学习热工仪表和测量及自动控制等专业课建立必不可少的理论基础。

热力发电厂就其能量转换来说，可以分为两大部分，即从燃料的化学能转变为机械能的部分以及机械能转变为电能的部分。前一部分称为发电厂的热力部分（或动力部分），后一部分称为发电厂的电气部分。

本课程就是讲述热力发电厂的热力部分，包括热工学基础、流体力学基础、锅炉设备、汽轮机设备及发电厂热力系统和主要附属设备。前两部分为热力设备的基础理论，研究热能与机械能的转换、热量的传递、液体平衡和运动的规律；后三部分讨论锅炉和汽轮机一般概况及其主要附属设备的组成、工作原理、结构特点、连接系统等。

本课程的研究方法，采用以电厂生产实际过程为基础，由宏观现象出发的宏观研究方法；同时也引用分子运动论的微观方法来解释说明某些宏观现象。

通过本课程的学习，要求学生能较全面地认识热力发电厂生产过程的各个主要环节，较好地了解发电厂主要热力设备的工作原理、基本构造和一般运行知识，并通过参观和生产实习等教学环节，对现代发电厂能够建立起较为完整的概念。

以上要求的实现，除了应当十分重视学习本课程的基本理论和基本知识外，还必须充分注意结合发电厂的实际进行学习。

第一章 气体的状态及状态方程式

第一节 工质、热源、热力系

热力工程所利用的能源主要是燃料中蕴藏的化学能。火力发电厂就是用煤、石油、天然气等作为燃料的。燃料在锅炉设备中通过燃烧和传热，把燃料释放的化学能转换成水蒸汽的热能，再借助于适当的热力设备，将蒸汽的热能不断地转变为机械能。这种将热能转变为机械能的设备统称为热机，如汽轮机、蒸汽机、燃气轮机等都属于热机。

在热机中，凡是能实现热能与机械能相互转变的媒介物质，称为工质。为了使热机连续工作并获得较多的功，要求工质必须具有良好的流动性和膨胀性，所以大多数工质都是气体或蒸汽。又由于水具有热力性能稳定、价廉、易得、无毒、不腐蚀设备等优点，所以火力发电厂主要是以水作为工质。

在热力工程中，把不断供给工质热能的高温物体称为高温热源，简称热源。例如燃烧室中的高温烟气。而把接受工质放出热能的物体称为低温热源，简称冷源。例如凝汽器中的冷却水或大气环境。热能动力装置的工作过程，概括地说，就是工质从高温热源吸取热能，在热机中将其中的一部分转换为机械能，并把剩余部分传给冷源的过程。

为了分析问题的方便，在热力学中研究热、功转换过程时，常把要研究的对象从周围物体中分割出来，分析它们在热功转换过程中的状态变化及通过分界面与周围物体的相互作用。这种被人为分割出来的研究对象叫做热力系统，简称热力系。分界面以外的一切物体称为外界或环境。热力系与外界的分界面可以是实际存在的，也可以是假想的，可以是固定不动的，也可以有位移或变形。

按热力系与外界相互作用的特点，可将热力系分为以下几类：系统与外界仅有能量传递而无物质交换的系统称为闭口系统；系统与外界不仅有能量传递并有物质交换的系统称为开口系统；系统与外界没有热量交换的系统称为绝热系统；系统与外界既无物质交换又无能量传递的系统，称为孤立系统。

第二节 工质的状态参数

在热能动力装置中，工质通过吸热、膨胀等过程将热能转换为机械能。在这些过程中，工质的热力状态随时都在发生变化。所谓热力状态是指工质在某一瞬间的宏观物理状况，简称状态。通常将标志工质所处状态的宏观物理量称为状态参数，简称参数。如压力、温度、比容等。对应一定的状态，工质的各状态参数就有确定的数值。对于任何一个物理量，只要它的变化量等于初终两状态下该物理量的差值，而与工质的状态变化过程无关，都可以作为状态参数。

在工程热力学中，常用的状态参数有温度、压力、比容、内能、焓和熵等。其中压力、温度和比容三个参数可以用仪表直接或间接测量，所以称为基本状态参数。下面首先介绍三个基本状态参数。

一、温度

温度是标志物体冷热程度的物理量。分子运动论指出：分子作无规则运动时不断相互碰撞，因而各个分子具有不同的运动速度和动能，温度就是大量分子无规则热运动强烈程度的标志。分子平均移动动能愈大，物体的温度就愈高，所以物体的冷热程度取决于物体内部微粒运动的状况。

测量温度的标尺称为温标。在国际单位制中，温度测量采用热力学温标。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，用符号 T 表示，单位为开〔尔文〕，单位符号为K。热力学温标选取水的三相点（即冰、水和汽三相共存时的温度）为基本定点点，并定义其温度为273.16K。开〔尔文〕所表示的一度等于水三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。在0.101325MPa下纯水冰点的热力学温度为273.15K，与水三相点的热力学温度相差0.01K，在工程计算中一般取273K已足够准确。

与热力学温标并用的还有热力学摄氏温标，简称摄氏温标。它所确定的温度称为摄氏温度，用符号 t 表示，单位为摄氏度，单位符号为 $^{\circ}\text{C}$ 。摄氏温度 t 被定义为

$$t = T - 273.15$$

在此新定义下，摄氏温标的零点与三相点不是严格相等，但差别甚为微小。工程上，常将101325Pa（即760mmHg）下水的冰点和沸点近似地取作 0°C 和 100°C 。

摄氏温度与热力学温度间隔大小完全相同，只是所取零点不同，因此，摄氏温度和热力学温度的关系可以近似取为

$$t \approx T - 273 \quad (1-1)$$

这两种温标表示的温差数值也均相同，即 $\Delta t = \Delta T$ 。

二、压力

单位面积上所受到的垂直作用力称为压力。分子运动学说把气体的压力看作是气体分子作不规则运动撞击容器壁的结果。由于气体的分子数目极多，撞击频繁，所以压力是标志大量分子在一段时间内撞击容器壁的平均结果。而压力的方向总是垂直于容器内壁的。

1. 压力的单位

在法定单位中，计量压力的单位为牛顿/米²(N/m²)，称为帕〔斯卡〕，符号为Pa，即

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

工程实用上，以帕（Pa）为压力单位嫌太小，计量不方便，故常用千帕（kPa）和兆帕（MPa）为实用单位，即

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

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

在工程中及过去的科技书中，压力的单位有多种，为便于阅读有关资料和图书，特将各种压力单位的换算关系列于附表一中。

2. 大气压力

地球表面包围着一层几百公里厚的空气层，这层空气层里的气体分子对大气层里的物体的作用力称为大气压力，简称大气压，用符号 p_{amb} 表示。它随地理位置及气候条件等因素的变化而变化。

物理学中，将纬度 45° 的海平面上常年平均气压定为标准大气压，或称为物理大气压，单位符号为 atm。它与其它单位的换算关系为：

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg} = 1.0332 \times 10^4 \text{ mmH}_2\text{O} \\ = 0.101325 \text{ MPa}$$

物理学上还规定，压力为 $1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$ (即 760 mmHg)，温度为 0°C 时的状态，称为标准状态。标准状态的参数下角为零，如 p_0 、 t_0 等。

3. 绝对压力、表压力和真空

绝对压力是指容器内工质的实际压力，符号为 p 。容器内工质的压力有可能高于或低于外界的大气压力。高于大气压力时，说明工质处于正压状态；低于大气压力时，则说明工质处于负压或真空状态。

当容器内的绝对压力大于大气压力时，超出大气压力的值，即为压力表测得的压力，称为表压力，符号为 p_g ，如图 1-1(a) 所示。其关系式为：

$$p = p_g + p_{amb} \quad (1-2)$$

对负压容器来说，绝对压力低于大气压力的值，称为负压或真空，符号为 p_v ，如图 1-1(b) 所示。则有

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

为了进一步理解绝对压力、表压力和真空与大气压力之间的相互关系，可用图 1-2 说明。

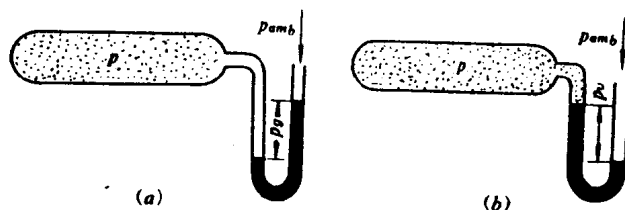


图 1-1 U形管压力计测量压力示意图

(a) 表压力；(b) 负压

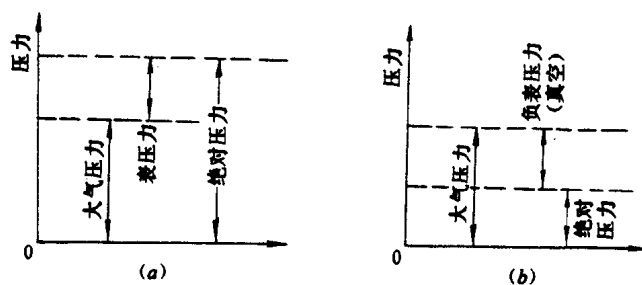


图 1-2 绝对压力、表压力、真空和大气压力的关系

(a) 正压力；(b) 真空，负表压力

必须指出，在绝对压力、表压力和真空三者中，绝对压力才是真正代表工质的实际压力。而表压力和真空则是用压力计或真空表测得的相对数值，其值将随大气压力的变化而改变。所以，只有绝对压力才能作为状态参数。如无特别说明，本书中的压力均应理解为绝对压力。

在工程计算中，如被测工质压力很高，通常把大气压力 p_{amb} 近似取为 10^5 Pa ，或 0.1 MPa 。

三、比容和密度

单位质量的工质所占的容积称为比容，符号为 v ，即

$$v = \frac{V}{m} \quad \text{m}^3/\text{kg} \quad (1-4)$$

式中 V ——工质的总容积， m^3 ；

m ——工质的质量， kg 。

单位容积内工质具有的质量称为密度，符号为 ρ ，即

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

比较式 (1-4) 与式 (1-5) 可见，比容与密度互为倒数关系，即

$$v\rho = 1 \quad (1-6)$$

在热力计算中通常用比容 v ，在锅炉水力计算和通风计算中则常用密度 ρ ， v 、 ρ 都是描绘分子聚集疏密程度的物理量。

【例 1-1】 某电厂锅炉汽包压力表指示为 10 MPa ，当地大气压力计读数为 740 mmHg ，求汽包内工质的绝对压力。

解 根据式 (1-2)

$$p = p_g + p_{amb} = 10 + 740 \times 133.3 \times 10^{-6} = 10.0986 \text{ (MPa)}$$

若大气压力取近似值，即取 $p_{amb} = 10^5 \text{ Pa}$ ，则

$$p = 10 + 0.1 = 10.1 \text{ (MPa)}$$

误差为
$$\frac{10.1 - 10.0986}{10.0986} \times 100\% = 0.014\%$$

可见，这个相对误差是很微小的。

【例 1-2】 某凝汽器的真空表读数为 720 mmHg ，当地大气压力计读数为 750 mmHg ，求凝汽器内的绝对压力。

解 根据式 (1-3)

$$p = p_{amb} - p_v = (750 - 720) \times 133.3 \times 10^{-6} = 0.004 \text{ (MPa)}$$

若大气压力取近似值 $p_{amb} = 735.6 \text{ mmHg}$ ，则

$$p = (735.6 - 720) \times 133.3 \times 10^{-6} = 0.00208 \text{ (MPa)}$$

误差为
$$\frac{0.004 - 0.00208}{0.004} \times 100\% = 48\%$$

显然，这个误差是很大的。通过 [例1-1] 和 [例1-2] 说明，在工程计算中，当工质压力

较高时，大气压力可取近似值；工质压力较低，或在真空情况下，大气压力不允许取近似值，而要根据实测的大气压力进行计算。

第三节 理想气体状态方程式

一、平衡状态与参数坐标图

所谓平衡状态，是指系统内工质各点的同一状态参数都均匀一致，也就是说，具有相同的压力、温度和比容等。处于平衡状态的系统，如果没有外界影响，各部分之间不会发生热量的传递和相对位移，其状态不随时间而改变，平衡状态不会自发地被破坏。处于不平衡状态的系统，则因工质各部分之间的温度、压力不同而发生传热和位移，它们的状态必将随时间而改变，使传热和位移逐渐减弱，最终达到各部分的温度和压力均相等。所以不平衡状态，即使没有外界条件的影响，也会自发地趋于平衡状态。显然，不平衡状态的状态参数是随时变化的，只有平衡状态才有描述系统平衡特性的、确定不变的状态参数。因此，工程热力学通常只研究平衡状态。

处于平衡状态时，工质所有的状态参数都有确定的数值。经验和理论证明，三个基本参数之间存在着一定关系，只要确定了两个状态参数就可确定工质所处的状态。因此可以利用任意两个独立参数组成一个坐标图，来描述工质所处的热力状态。图1-3所示的 $p-v$ 图，也称为压容图，是以压力 p 为纵坐标，比容 v 为横坐标，图中的每一点代表系统的某一平衡状态，如：点1代表系统内工质的压力为 p_1 、比容为 v_1 的状态点，点2则代表另一个平衡状态 p_2 和 v_2 。显然，只有平衡状态才能在坐标图上用点来描述，不平衡状态因为没有确定的状态参数，无法在参数坐标图上表示。

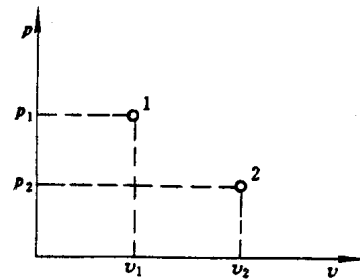


图 1-3 工质状态在 $p-v$ 图上的表示

二、理想气体和实际气体

理想气体是一种实际上并不存在的假想气体，它的分子是一些弹性的、不占体积的质点，分子之间没有相互作用力。凡不符合这两个条件的气体则称为实际气体。引出理想气体概念可使气体分子运动的研究大为简化，各状态参数的关系可以用简单的函数式表示，从而简化了分析和计算。

实验证明，当压力比较低或温度比较高时，一般气体的比容较大，其分子本身所占的体积及分子之间的吸引力随之而小到可以忽略不计，它的性质就比较接近理想气体。在常温常压下，自然界中实际存在的大多数气体符合这些条件。例如氢、氧、氮、二氧化碳及一氧化碳等，以及由这些气体组成的燃气、烟气和空气，由于它们的液化温度都很低，距离液态较远，都可视为理想气体。

对于那些离液态较近的气体，如锅炉中产生的水蒸气就不能当作理想气体。但是，在燃气和大气中混有的少量水蒸气，因其分压力甚小，比容很大，离液态较远，仍可作为理想气体来对待。