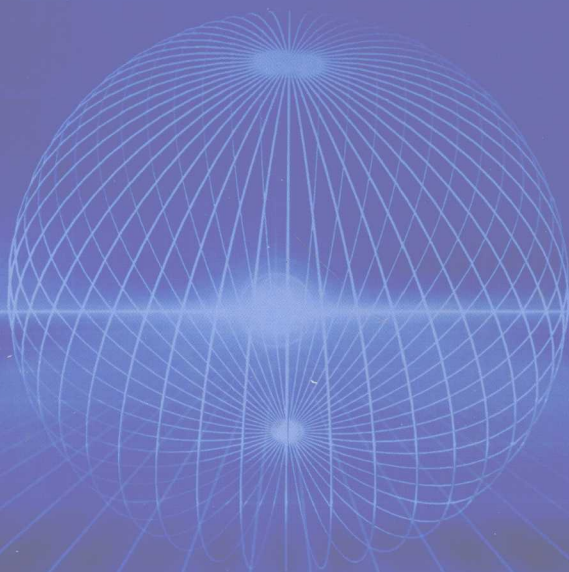




21 世纪高等学校规划教材
Textbook Series of 21st Century

现代发电设备

陈 洁 主 编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

TM621.3

20



21 世纪高等学校规划教材
Textbook Series of 21st Century

TM621.3
20

现代发电设备

主 编 陈 洁
副主编 赵晴川
编 写 牛蔚然 李 岩
主 审 戴庆辉



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书是结合火力发电厂 300MW 及以上机组锅炉、汽轮机、发电机三大主机及主要辅助设备的特点编写的。其主要内容包括热力发电的理论基础, 火室燃烧锅炉及辅助设备、循环流化床锅炉及辅助设备、汽轮机本体和辅助设备、电气系统及主要设备、热力系统及其主要辅助生产系统及设备的工作原理、基本构造和一般运行性能等。在编写过程中, 作者本着紧密联系发电厂生产实际的教学基本原则, 力求保持学科的系统性、完整性, 书中采用了大量的现场实物照片直观介绍设备, 层次清晰, 由浅入深, 循序渐进, 培养学生在自学和职工在工作中充分理解设备、解决现场实际问题的能力。

本书可作为高等学校非热动力专业的教学用书, 也可作为热动力专业的实习教材、并可供从事电厂运行、检修工作的工程技术人员参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代发电设备/陈洁主编. —北京: 中国电力出版社, 2007
21 世纪高等学校规划教材
ISBN 978-7-5083-5165-0

I. 现... II. 陈... III. 发电厂—发电设备—高等学校—教材 IV. TM621.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 011886 号

中国电力出版社出版、发行
(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)
汇鑫印务有限公司印刷
各地新华书店经售

*

2007 年 3 月第一版 2007 年 3 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 13 印张 313 千字 1 插图
印数 0001—3000 册 定价 22.00 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)

前 言

目前, 300MW 机组和 600MW 机组已经成为我国火力发电的主力机组。许多电厂的运行都实行了全能值班, 这就要求学生的知识面更广, 为此编写了这本符合生产实际、指导学生及运行人员理解和熟悉电厂生产设备的教材。本书可作为电力专业的通用教材, 也可作为电厂培训教材和参考用书。

本书围绕着火力发电厂中的能量转换过程, 对现代蒸汽动力循环的基本理论, 电厂中的锅炉、汽轮机、发电机三大主机及主要辅助设备的工作原理、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, 并配以编者长期从事电厂调试、试验和节能开发工作中拍摄收集的照片资料加以说明。作者本着适当地加强热工基础理论、紧密联系发电厂生产实际的教学基本原则, 力求保持学科的系统性、完整性, 同时又适当降低理论计算的难度, 在内容叙述上, 尽量做到层次清晰, 由浅入深, 循序渐进, 力图使学生在学习和未来的工作中培养理解设备、分析问题、解决问题的能力。

本书由山东电力高等专科学校的陈洁主编, 并编写第一、二、五、八章及第七章第二节, 山东电力研究院的赵晴川编写第三章, 山东电力研究院的牛蔚然编写第四章、第七章第一节和第三节, 山东电力咨询院李岩编写第六章。

华北电力大学戴庆辉教授担任本书主审, 山东大学文锋教授也对电气部分内容提出了宝贵意见。同时在书稿的编写过程中, 曾多次地得到清华大学热能工程系李政老师的热情帮助和耐心指导。多位老师的悉心帮助使本书的质量有了较大的提高, 编者向他们表示由衷的谢意。

另外, 在本书的编写过程中, 得到山东电力高等专科学校丁立新、郝卫东、王学同的大力支持, 在资料收集中得到山东沾化电厂刘金元和十里泉电厂李德存、李伟的倾力帮助, 在此亦表示衷心的感谢。

由于设备品种多样化, 使得本书的编写有一定的难度, 加之编者的经验有限, 书中难免存在不足, 敬请广大读者批评指正。

编 者

2006 年 12 月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第二章 热力发电的理论基础	6
第一节 工程热力学的理论基础	6
第二节 工程热力学的实际应用	16
第三节 传热学	22
第三章 燃煤锅炉及其辅助系统	26
第一节 火力发电厂锅炉综述	26
第二节 煤粉制备系统	31
第三节 燃烧设备	39
第四节 锅炉烟风系统及设备	50
第五节 汽水系统设备	55
第四章 循环流化床锅炉	69
第一节 循环流化床锅炉概述	69
第二节 循环流化床锅炉燃烧设备	72
第三节 物料循环系统及设备	81
第四节 除渣系统及设备	85
第五节 风烟系统及设备	90
第五章 汽轮机本体及部分辅助设备	94
第一节 汽轮机总体概述	94
第二节 汽轮机本体静止部分	96
第三节 汽轮机本体转动部分	105
第四节 汽轮机调速、保安及油系统	115
第六章 电气系统主要设备	121
第一节 汽轮发电机	121
第二节 变电站及电厂电气一次设备	130
第三节 发电厂和变电站的电气二次回路及电气主接线	139
第七章 火电厂辅助生产系统及设备	145
第一节 输煤系统和除灰系统	145
第二节 供水及水处理系统	150
第三节 测量仪表及自动控制系统	153
第四节 管道阀门	164

第八章 发电厂热力系统	167
第一节 回热加热系统	167
第二节 主蒸汽系统和给水系统	173
第三节 原则性热力系统与全面性热力系统	176
附录	186
附表 1 饱和水与干饱和蒸汽的热力性质表 (按压力排列)	186
附表 2 饱和水与干饱和蒸汽的热力性质表 (按温度排列)	188
附表 3 未饱和水与过热蒸汽的热力性质表	190
附图 1 热力系统管线、阀门的图形符号	197
附图 2 N300-16.67/537/537 型机组发电厂全面性热力系统	198
附图 3 N600-16.67/537/537-1 型机组发电厂全面性热力系统	199
参考文献	200

第一章 绪 论

一、电力在国民经济中的地位、作用和重要意义

电能的应用非常广泛,从科研到生产,从工业到农业,从城市到农村,从国家建设到人民生活,各行各业都离不开它。电能尤其对现代化工业生产的发展和人类物质生活水平的提高,起到了难以估量的巨大作用。电能是优质的二次能源,它是由一次能源(煤炭、石油、水力、风力、地热能、潮汐能、天然气、太阳能和核能等)转化而来的,可以很方便地转换成其他形式的能,经过输送,供给不同的用户。电能有如此广泛的用途,是因其具有以下优点:

(1) 电能可以方便地进行转换。一次能源通过原动机和发电机可以转换成电能,电能又可以通过电动机或其他电气设备转换成机械能、热能、光能和化学能等。

(2) 大规模集中生产的电能可以灵活地分散使用,是比较理想的动力源。电能发电厂集中大规模生产后(即经过一系列的大规模能量转换),在线损很小的情况下,通过高压输电线路远距离输送到 1000km 以外的地区,灵活方便地分配给电网或分散的用户使用。

(3) 电能使许多特殊工艺加工成为可能。例如,电焊工艺、电化学、高频淬火、金属电火花加工等。

(4) 电能可以充分利用地区性动力资源,解决地区条件对发展工业的限制,使工业布局更趋于合理。如有的地区蕴藏着极为丰富的风力、水力、潮汐、沼气、地热、天然气或煤炭等一次能源,有的地区日照长,太阳能亦可利用,还有大量工业集中地区能够产生大量工业废热等。这些地区性资源转变成电能后,输送到利于工业发展或居民集中的地区,使工业布局更为合理,促进了经济发展,提高了人民生活水平。

(5) 电能易于实现工业生产的自动化。为自动控制、远距离操纵,为提高劳动生产率和改善劳动环境创造了有利条件。

目前,世界各国对电力工业的发展非常重视,电力生产日益扩大,电力技术不断提高,电能被应用于生产和生活的各个领域,对促进社会生产力、提高人民生活水平,都有极其重要的作用和意义。在 21 世纪的今天,电气化已成为一个国家生产、科技进步和生活现代化水平的重要标志。

二、电力生产的特点与基本要求

(1) 电能无法大规模储存是电力生产的特点之一。它要求电厂发电机发出的电能与用户电气设备所消耗的电能时刻保持平衡。发电机的运行情况必须随着系统用户负荷的变化而改变,与用户负荷相适应。根据外界用户的需要随时调整发电量,而且在任何时候、任何条件下,都应该做到总供给满足用户的总需求。多供多发,少供少发,不供停发,这就是对电能数量上的要求。

(2) 发电厂输出的电能参数(质量)必须符合用户的要求,即电力系统频率和电压的变动应始终保持在容许范围内。若供电质量降低,就会使电气设备不能正常运行,甚至影响生产或损坏电气设备。尤其在电网容量增大、机组容量增大、参数增高的情况下,保证机组在

稳定工况下运行是十分重要的,只有这样才能保证电能的质量。

(3) 发电厂的电力生产必须保证安全可靠,连续不间断地进行。在电力生产中任何一个小的事故都可能酿成大的灾祸,造成经济损失和人身伤亡。事故停电不仅会造成电力设备的损坏,而且在电能的利用上产生的间接损失更大。所以电力生产必须保证安全。

(4) 电力生产要求运行经济。电力生产是一个复杂的生产过程。一次能源的消耗量大,利用率又低,因而增产节约的潜力很大。例如:一个容量为 1000MW 的大型电站,发电煤耗率按 $306\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 计,24h 要消耗近 7500t 煤,若发电煤耗率降低 $19\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,按 2005 年全国年发电量 (22675 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$) 计算,全国一年就可以节约发电用煤近 4300 万 t。如果全国送电线路的损失和厂用电率降低 1%,则全国一年就可节省近 227 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 的电能,相当一个 1000MW 容量的大电厂四年半的发电量 (设备年利用小时数按 5000h 计)。因此,电力生产必须做到经济运行,对设备进行技术监督。防止跑、冒、滴、漏,提高设备出力。节约煤炭,千方百计地降低成本。

三、现代汽轮机发电厂的组成及其生产过程

热力发电厂的发动机可采用蒸汽机、汽轮机、内燃机和燃气轮机等。蒸汽机的功率太小,热效率很低;内燃机和燃气轮机都不能直接应用廉价的固体燃料,而且每台机组的容量也受到限制;现代结构的汽轮机不仅机组的单机容量可高达 1000MW 以上、热效率较高,并且运行稳定、工作可靠,所以现代中、大型火力发电厂都是汽轮机发电厂。本书所提及的“热力发电厂”或“火力发电厂”一概是指汽轮机发电厂而言的。以图 1-1 为例说明一座燃用煤粉的汽轮机发电厂的生产过程。

用火车或轮船运入发电厂贮煤场的煤,经过碎煤设备破碎后,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,在其中研制成煤粉,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,在其中,空气和煤粉得以分离,分离出来的细粉进入煤粉仓。煤粉由给粉机送入输粉管,而旋风分离器中的空气则由排粉机抽出。煤粉和空气在输粉管内混合后,由喷燃器喷入炉膛内进行燃烧 (也有直接把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,以减小排烟热量损失,并提高空气温度,以改善燃烧过程。炉膛内的燃烧产物——高温烟气,在引风机的作用下,沿着锅炉本体倒 U 形烟道依次流过炉膛、过热器、再热器、省煤器 (给水预热设备) 和空气预热器,将热量逐步传递至给水、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。我国许多电厂已将灰渣和除尘器所捕集到的飞灰加以利用,前者常被用于筑路,后者则可用来制造建筑材料。

给水先在锅炉省煤器中接受烟气的预热,然后引入锅炉顶部汽包 (汽鼓) 的容水空间内。锅炉水由于本身的质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。水不断在下降管、水冷壁管及汽包内循环,不断汽化,形成的饱和蒸汽聚集在汽包上部,将其引入过热器,使之继续加热,变为过热蒸汽。过热蒸汽沿主蒸汽管进入汽轮机,推

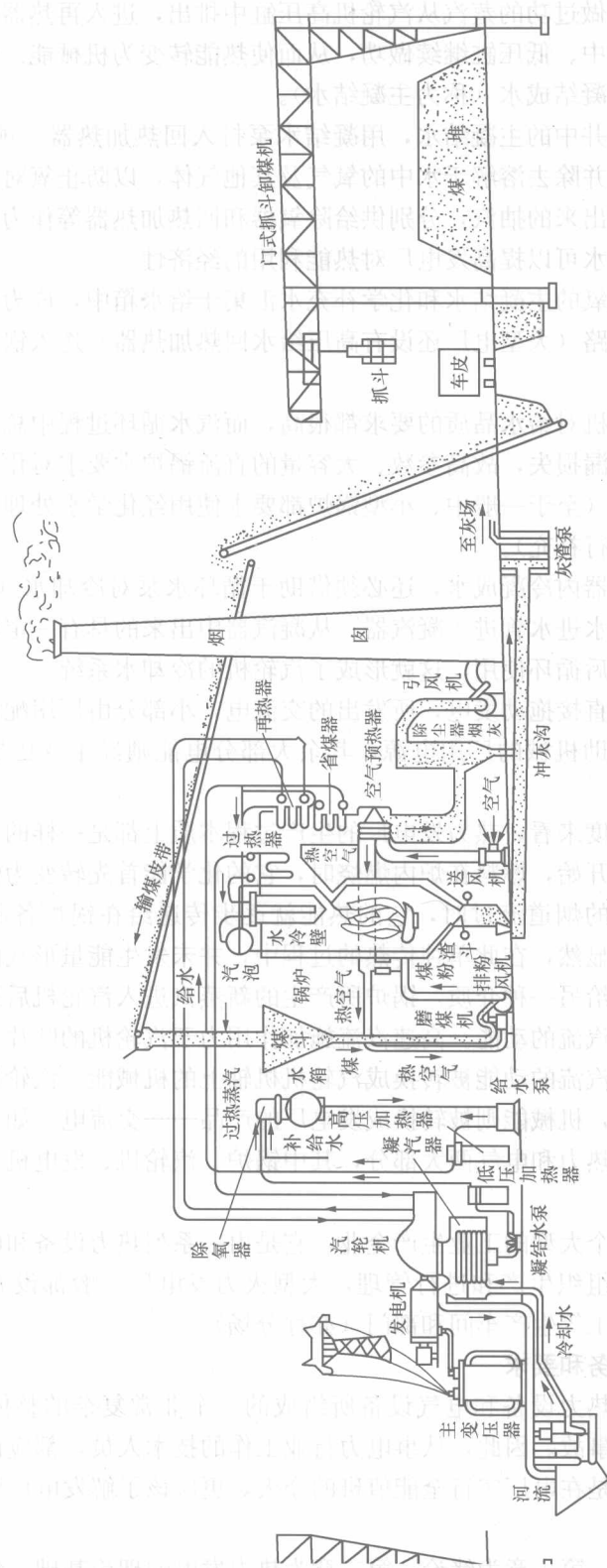


图 1-1 凝汽式发电厂的生产过程示意图

动汽轮机转子转动，做过功的蒸汽从汽轮机高压缸中排出，进入再热器吸收热量。再热后的蒸汽又返回汽轮机的中、低压缸继续做功，从而使热能转变为机械能。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）。

汇集在凝汽器热井中的主凝结水，用凝结水泵打入回热加热器，预热后再进入除氧器，在其中继续被加热，并除去溶解于水中的氧气及其他气体，以防止氧对金属的腐蚀。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、除氧以及预热给水之用，而预热给水可以提高发电厂对热能利用的经济性。

在除氧器里除过氧的主凝结水和化学补充水汇集于给水箱中，成为锅炉的给水，借给水泵升压后，沿给水管路（大型电厂还设有高压给水回热加热器）送入锅炉的省煤器，以便继续使用。

由于锅炉和汽轮机对给水品质的要求都很高，而汽水循环过程中总是难免有一部分水和蒸汽的正常消耗及泄漏损失，故高参数、大容量的直流锅炉常要求对化学补充水和主凝结水作进一步的深度除盐（至于一般中、小型锅炉都要求使用经化学水处理设备处理过的高质量软化水作为补给水进行补充）。

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。从凝汽器中出来的具有一定温度的冷却水则沿排水管流回江河或冷却后循环使用，这就形成了汽轮机的冷却水系统。

发电机由汽轮机直接拖动发电，所发出的交流电，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，其余大部分电能则经主变压器升高电压后，送入电网。

从能量转换的角度来看，热力发电厂的生产过程本质上都是一样的。因为它们的能量转换都是由燃料的燃烧开始，燃料在炉内燃烧时，它的化学能首先转变为烟气的热能；当烟气沿锅炉炉膛及其后面的烟道流过时，它的热能就逐步传递给在锅炉各部分受热面内流动的水、蒸汽以及空气。显然，在此单纯传热的过程中，并未发生能量形式的变化，而只不过是热能从一种介质传递给另一种介质。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。高速汽流施加作用力于汽轮机的叶片上，推动了叶轮连同整个转子旋转，于是汽流的动能被转换成汽轮机机轴上的机械能。汽轮机通过靠背轮（联轴器）带动发电机转动，机械能则被转换成发电厂的产品——交流电。如上可见，现代热力发电厂的主要组成包括热力和电气两大部分，其中锅炉、汽轮机、发电机为发电厂的三大核心设备。

火力发电厂是一个大型的工业生产企业，它是由一系列热力设备和电气设备构成的一个有机整体。为了便于组织生产和进行管理，大型火力发电厂一般都设有燃料、锅炉、汽轮机、电气、化学、热工等生产车间和部门（亦称分场）。

四、本课程的任务和要求

发电厂是由许多热力设备和电气设备所组成的一个非常复杂的整体，设备多且交联复杂，容易发生故障和事故。因此，从事电力行业工作的技术人员，都应该对发电厂系统有一个全面地了解。特别是在电厂实行全能值班的今天，更应该了解发电厂整体及其主要设备的工作原理。

本课程共分八章：第一章为绪论；第二章为热力发电的理论基础，包括工程热力学和传

热学的基本理论；第三章为火室燃烧锅炉设备；第四章为循环流化床锅炉及设备；第五章为汽轮机本体及部分辅助设备；第六章为电气系统主要设备；第七章为火电厂辅助生产系统及设备；第八章为热力发电厂系统。

本课程的任务是介绍现代大型电厂整体及各主机和辅机设备的基本原理、工作流程、构造特点及重要性能等。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设备，了解发电厂整体及其主要设备的工作流程，通过设备工作原理示意图与现场实物照片相对照等学习环节，对现代的中型和大型热力发电厂及其主要设备建立起较为完整的概念。

第二章 热力发电的理论基础

第一节 工程热力学的理论基础

热力学是研究各种形式能量的相互转换及其物质性质之间关系的学科,而工程热力学则是热力学普遍理论在工程上的具体应用。100多年来,工程热力学的主要研究对象是热能转变为机械能的规律和方法以及提高转换效率的途径,它所涉及的领域主要是动力工程。近几十年来,情况发生了很大地变化,新能源的开发、各种节能装置和设备的研制都受到了极大的重视,新的循环方式以及相应的新工质的研究已成为工程热力学的主要研究方向之一。

热能转变为机械能必须借助一套设备和某种载能物质。一套设备就是通常所说的热机,而载能物质便是工质。热机对外做功时,要求工质具有良好的膨胀性,而要热机不断地做功,则必须不断地将新鲜工质引入热机,并将做完功的工质排出,这就要求工质具有良好的流动性。能够同时具备良好膨胀性和流动性的工质,不是固体,也不是液体,而是气体(如空气、水蒸气等)。因此,热机中的工质一般都是气态物质,但在应用蒸汽作为工质时也会涉及到液体。

因此,工程热力学研究的主要内容包括下面三部分:

第一部分是常用工质的热力性质,工质性质对热力状态的变化过程有着极其重要的影响;第二部分是构成工程热力学理论基础的基本概念和两个基本定律,即热力学第一定律和热力学第二定律,它是工程热力学的基础;第三部分是根据热力学基本定律,结合工质的热力性质,分析实现热能与机械能相互转换的各种热力过程和热力循环。

一、气体的基本性质

(一) 分子及其运动

在通常情况下,物质有三态——固态、液态和气态。一切物质都是由极小的微粒组成的,这些微粒叫做分子,如水可以分成水分子,盐可以分成盐分子。水分子、盐分子与原来的水、盐一样,具有同样的化学性质。分子有何特征呢?

(1) 分子的质量很小。在很小的体积内,分子数目却是很大的。

(2) 分子是运动的。一切物质都在不停地运动着。组成物质的分子也同样地在其内部不停地运动着,只是因为分子很小,人们无法直接看到罢了。

(3) 分子与分子之间存在一定距离。分子间不是挤得很紧的,而是存在一定空隙的。

(4) 分子与分子之间有相互作用的分子力。分子力是分子间引力与斥力的合力,当分子间的距离为某一值时,引力等于斥力。距离减小,引力与斥力都增大,但斥力增加得快,因此分子力表现为斥力,这时比较难压缩。距离增大,斥力较引力减小得快,分子力表现为引力,这时比较容易压缩。当分子间的距离很大时,分子力极小,甚至可以忽略不计。大多数气体就属于这种情况。

(5) 分子的运动与物质的温度有关。物质的温度越高,物质内部的分子运动越激烈。因此,物质的热状态与物质内部分子的不规则运动有关,这种运动叫做分子的热运动。热水与冷水都由同样的分子组成,但冷热不同,就在于分子运动的速度不同。

相同物质的分子运动速度不同,它们的动能也不同。物质温度不同,则说明组成物质的分子所具有的运动动能不同。分子除了运动所具有的动能外;还具有和分子间距离有关的位能。分子动能的总和加上分子位能的总和,组成了物质的内能(热力学能)。

在热力学中,许多内容要用分子和分子运动论才能解释清楚,例如压力、温度等,所以热力学以分子为基本粒子,研究一些相关的问题。

(二) 工质、理想气体和实际气体

1. 工质

汽轮机利用具有一定压力和温度的蒸汽做功,把热能转变成机械能。这里,蒸汽起了媒介作用。这种将热能转变为机械能的媒介物质叫做工质。电能生产是连续的,为了方便热机不断地做功,就要求工质连续不断地流过,因此,工质应有良好的流动性和膨胀性。气体正好具有这样的特性,所以目前工业上都采用气体作为工质。而水蒸气还具有价廉易得和无毒等优点,所以热力发电厂中主要以水蒸气作为工质。

2. 理想气体和实际气体

为了研究方便,又把气体分为理想气体和实际气体。气体分子之间不存在引力,分子本身不占有体积的气体叫做理想气体;反之,叫做实际气体。

理想气体实际上并不存在。但自然界中存在的气体,由于它的性质很接近于理想气体,用理想气体规律进行计算能满足工程要求,所以把它看成理想气体。至于在热力工程中作为工质的水蒸气,应看作实际气体。因为在这种情况下,气体分子间的距离比较小,分子间的引力也相当大,水蒸气所处的状态又很接近于液态,所以不能把它看成理想气体。

物理学告诉我们,理想气体在一定的压力变化和温度变化范围内,其 $p\nu$ 乘积与热力学温度 T 之比值为一常量,即

$$p\nu = RT \quad (2-1)$$

式中 p ——气体的绝对压力, N/m^2 或 Pa ;

ν ——气体的比体积, m^3/kg ;

T ——气体的热力学温度, K ;

R ——气体常数, $\text{N} \cdot \text{m}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 或 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

式(2-1)即为理想气体状态方程。

二、工质的状态参数

热力发电厂中有很多温度表、压力表及其他表计,用来监视各处蒸汽、水、空气、烟气等的温度、压力及其他值,以保证设备的安全、经济运行。热力发电厂中的汽轮机做功时,蒸汽的压力和温度要降低,这样才能获得冲动汽轮机转子的蒸汽流动速度。这就表明,汽轮机做功与工作物质(工质)的状态变化有密切关系。因此,在研究工质做功的问题时,首先要解决好如何表示工质的状态。

工质的状态是由工质的压力、温度、比热容等物理量来确定的。这些表明工质状态特征的物理量,称为工质的状态参数。如果工质有一组确定的状态参数,就表明工质处于一个确定的状态。若确定工质状态所对应的状态参数中有一个或几个参数发生了变化,则工质的状态就会发生变化。

工质的状态参数可以分为基本状态参数和导出状态参数两种。工质的基本状态参数有温度、压力和比体积,它们可以通过仪表直接测量。工质的导出状态参数有热力学能、焓和



熵，它们需要利用基本状态参数进行计算才能确定。

(一) 温度

温度是表征物体冷热程度的物理量。例如，正常人的体温是 37°C ，热力发电厂中过热蒸汽的温度可达 550°C 等。温度可以有不同的表示方法，温度的数值表示方法叫做温标。工程上用摄氏温标 $^{\circ}\text{C}$ 和绝对温标 K 来度量温度。

1. 摄氏温标

摄氏温标又名国际百度温标，用符号 t 表示，单位为摄氏度，符号为 $^{\circ}\text{C}$ 。它取标准大气压（压力为 101325Pa ）下，冰融化时的温度为零度（ 0°C ），水沸腾时的温度为 100°C 。把上述两点之间分成 100 个刻度，每一个刻度就是 1°C 。

2. 绝对温标（热力学温标）

绝对温标取摄氏零下 273.15°C ，即 -273.15°C 为零度，而每度的间隔与摄氏温标的间隔相同。用绝对温标量度的温度称为绝对温度（热力学温度），可用符号 T_{K} 表示，单位为开（开尔文），符号为 K。例如，绝对温度 60 度可写成 60K，或 $T=60\text{K}$ 。可见，绝对温标与摄氏温标只是起点不同。

两者有如下的关系：

$$T = t + 273.15$$

式中 T ——绝对温标，K；

t ——摄氏温标， $^{\circ}\text{C}$ 。

绝对温标零度（0K）是不可能达到的。既然不可能达到绝对零度，又为什么要提出绝对温标的概念呢？这是因为，在热力学中有很多分析与计算要用到它。

(二) 压力

压力的定义为单位面积上所受到的垂直作用力，或叙述为工质对容器壁单位面积上的作用力。气球内的空气有一定的压力，才能使气球鼓起来，而气体压力又是怎样形成的呢？如图 2-1 所示，在充满气体的容器内，大量分子从各个方向与容器壁碰撞，然后又被弹向另一方向，同时分子就对容器壁产生了持续、稳定的作用力，这种作用在容器壁上的持续、稳定的力就是气体的压力。在单位时间内气体分子对容器壁的碰撞次数越多，碰撞的冲击力就越大。如果升高温度或增加分子数目，就能增大气体的压力。日常生活中，当对轮胎加热或向胎内打气时，就能使压力增大。对轮胎加热，内部气体温度升高时，分子运动速度加快，单位时间内碰撞器壁的次数和每次碰撞的冲击力都增大；向轮胎内打气使气体的分子数增加，即单位时间内分子碰撞器壁的次数增加，所以压力也增大。

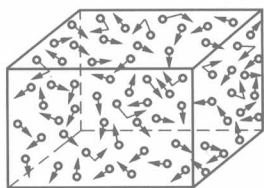


图 2-1 气体分子运动示意图

图 2-1 所示，在充满气体的容器内，大量分子从各个方向与容器壁碰撞，然后又被弹向另一方向，同时分子就对容器壁产生了持续、稳定的作用力，这种作用在容器壁上的持续、稳定的力就是气体的压力。在单位时间内气体分子对容器壁的碰撞次数越多，碰撞的冲击力就越大。如果升高温度或增加分子数目，就能增大气体的压力。日常生活中，当对轮胎加热或向胎内打气时，就能使压力增大。对轮胎加热，内部气体温度升高时，分子运动速度

加快，单位时间内碰撞器壁的次数和每次碰撞的冲击力都增大；向轮胎内打气使气体的分子数增加，即单位时间内分子碰撞器壁的次数增加，所以压力也增大。

压力的大小可用单位面积上作用力的大小表示。在法定计量单位中， 1m^2 面积上作用 1N 的力，其压力值定为 1Pa 。

工质的压力可用弹簧管压力表或 U 形管压力表测量。工程上以弹簧管压力表使用最为广泛，而 U 形管压力表仅适用于测量较低的压力。

弹簧管压力表的基本结构如图 2-2 所示。它是利用弹簧管在内外压力差作用下产生变形，引起活动端产生微小位移，此位移通过传动机构拨动指标转动，从而显示压力读数。

U 形管压力表如图 2-3 所示。玻璃 U 形管内盛有测压用液体（水或水银），U 形管的一

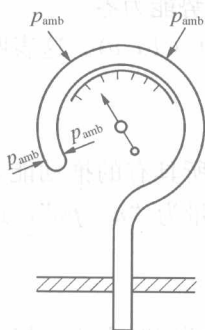


图 2-2 弹簧管压力表

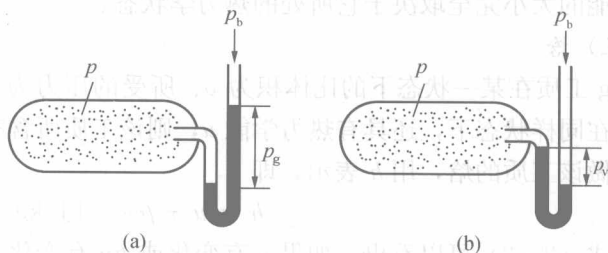


图 2-3 绝对压力与表压力、真空的关系

(a) $p > p_b$; (b) $p < p_b$

端与被测流体相接，另一端与大气相通。若流体压力与大气压力不等时，则 U 形管两边液柱高度出现差值，此差值即为被测流体与大气之间的压差。压力表与真空表所指示的是工质的真实压力和大气压力的差值，所以测量压力时应注意下列两种情况。第一种情况，如图 2-3 (a) 所示。容器中工质的压力（气体的真实压力，称为绝对压力）大于大气压力，压力表上的指示值是工质真实压力大于大气压力的数值，这时的指示值叫做工质的表压力，其平衡关系式为

$$p_g = p + p_b \quad (2-2)$$

式中 p ——工质的绝对压力；

p_g ——工质的表压力；

p_b ——当地的大气压力。

第二种情况，如图 2-3 (b) 所示。容器内工质的压力低于大气压力时，此时的压力常称为真空，其平衡关系式为

$$p_v = p_b - p$$

式中 p_v ——真空度（真空表压力）。

当容器内压力高于大气压力时，工质处于正压状态；当容器内压力低于大气压力时，则工质处于负压状态。容器不严密，处于正压的工质要向外漏，常见的漏水、漏汽属于这种情况；若工质处于负压，则空气要跑到容器中，如空气要向凝汽器内跑，电厂装抽气器的目的就是要把这部分空气抽走。

（三）比体积

比体积是单位质量的工质所占有的体积，单位为 m^3/kg ，是密度 ρ 的倒数。

比体积与密度都是用来说明物质状态的物理量。比体积越大，表明物质越轻；密度越大，表明物质越重。氢气比空气轻，在相同的温度和压力下，氢气的比体积比空气大，而其密度比空气小。热力发电厂中，蒸汽流经汽轮机时，其比体积不断增大，增大几百倍；而蒸汽在凝汽器中凝结成水，比体积却大大减小，可减小几万倍。

（四）工质的热力学能

热力学能是指工质在某种状态下内部所蕴藏的总能量，包括内动能和内势能。内动能是分子运动的动能。工质内部分子运动的动能愈大，工质的温度愈高，即工质的内动能是温度 T 的单值函数；内势能是分子之间由于相互作用力而具有的能量。工质的内势能与工质的比

体积有关,是比体积 v 的函数。理想气体由于不存在内聚力,故内势能为零。

工质的热力学能,决定于工质的热力学温度和比体积,即 $u=f(T, v)$ 。这表明:工质热力学能的大小完全取决于它所处的热力学状态。

(五) 焓

1kg 工质在某一状态下的比体积为 v 、所受的压力为 p ,工质所具有的推动能力为 pv ,该工质在同样状态下,还具有热力学能 u ,则该工质所含有的总能量为“ $u+pv$ ”,这个总能量就叫做该工质的焓,用 h 表示,即

$$h = u + pv \quad \text{kJ/kg} \quad (2-3)$$

由式(2-3)可以看出,如果 u 有变化或 pv 有变化,或这两项同时变化,都可以使焓 h 发生变化,焓仅由状态决定,所以焓也是状态参数。

(六) 熵

熵也是一个状态参数,它的定义是加热 1kg 工质的热量 Δq 与加热时热力学温度 T 的比值即 $\frac{\Delta q}{T}$,叫做工质在这个加热过程中熵的增加量。

用 Δs 表示熵的增加量, s_1 为最初状态的熵, s_2 为最终状态的熵,则在温度不变的过程中熵的增加量可写成

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \frac{\Delta q}{T} \quad (2-4)$$

从式(2-4)可得出如下重要结论:

- (1) 若给工质加入热量,工质的熵增加,这表明工质是吸热,即 Δs 是正值。
- (2) 若工质对外放热,工质的熵减小,这表明工质是放热,即 Δs 是负值。
- (3) 若对工质既不加入热量,也不放出热量,工质的熵保持不变,这表明工质既不放热也不吸热, Δs 为零。因此,由熵的变化就可以判断工质与外界热量交换的方向性,即工质是吸热还是放热。

应该指出,熵的增加量定义是工质在等温下吸热量或放热量与温度之比值。如果不是等温,熵的定义仍可适用。这时熵的增加量可以这样计算,即把整个加热过程分割成很多很多小的加热阶段,在每一个小的加热阶段中,加入热量很少,因而温度的变化也很小。加热阶段分割得越多越细,在小的加热阶段中温度的变化就越小。当把整个加热过程分割成无穷多个加热阶段时,这时每个加热阶段都可看成是在等温下进行的加热。这样,在求得了每个小加热阶段工质熵的增加量后,再把每个小加热阶段熵的增加量相加,就是整个加热过程中熵的增加量。其具体计算公式需要应用较艰深的数学知识,这里不再证实。

三、热量

(一) 热量与温度

生活中烧水时对水进行加热,生产中热力发电厂锅炉的省煤器和过热器对水、蒸汽加热等现象,都是不同温度的物质互相接触、相互关联时,相互之间发生热量的转移。温度较高的物质把一部分热量转移给温度较低的物质,直到这两种物质的温度相同为止。这种因温度差存在而发生的热量传递过程,叫作热交换。温度和热量是互有联系又互不相同的两个概念。在不发生物态变化的情况下(物质由液态变为气态或由液态变为固态都是物态变化。若物质最初状态是某一参数值的气态,在吸热或放热后变化为另一参数值的气态,即参数在

变,而物态都是气态,这就是物态不变),一般都是物质吸收热量时温度升高,放出热量时温度降低,这说明两者是有联系的。但温度与热量又是两个不同的概念,温度是指物质的冷热程度,而热量是指物质状态变化前后热能的增减程度,即热量是伴随状态变化才可能表现出来的。如空气在空气预热器中,从预热器进口到出口共吸收了多少热量,这是指状态变化中的热量。进口与出口空气的温度,是指空气在进口与出口的状态。

热量的单位与功、能单位相同,一般常用 kJ 表示。

(二) 比热容

比热容是一个物理量,它是指单位数量的物质当温度升高 1K (或降低 1K) 时所吸收的热量 (或放出的热量),用 c 表示,单位是焦/(千克开) $[J/(kg \cdot K)]$ 。如铁的比热容是 $460.5 J/(kg \cdot K)$; 水的比热容是 $4186.5 J/(kg \cdot K)$ 。要注意:通常说的比热容是指某一物质的平均比热容。实际上不同的物质有不同的比热容,即使同一种物质,在不同温度下,它的比热容也是不同的,即比热容随温度的不同而不同。再进一步说,同一种物质在同一温度下由于加热条件不同,其比热容也不同。对于固体与液体,当吸热时,体积膨胀不大,膨胀对外做功所需的热量可以忽略不计,可认为只是提高温度所需的热量,所以一般对固体与液体可认为比热容为定值。但研究气体的比热容时,情况就不同了。

如图 2-4 所示,将 1kg 气体放在容器内,活塞上放一块一定质量的物体,这是表明气体处于一定压力下。对气体加热并使气体温度升高 1K,可以发现,气体体积会膨胀。因此,气体吸收的热量除了使气体温度升高 1K 所需的一部分热量外,还包括抵抗外力体积膨胀所需的那一部分热量 [图 2-4(a)]。

若又将 1kg 气体放在容器里,并将活塞固定,这时对气体加热,并使其温度升高 1K,由于气体不能膨胀,气体吸收热量只需要提高气体温度 1K 的那一部分热量 [图 2-4(b)]。显然,处于压力不变下的气体比热容值要大于处于体积不变下的比热容值。前者称为定压比热容,以 c_p 表示,后者称为定容比热容,以 c_v 表示,且 $c_p > c_v$ 。

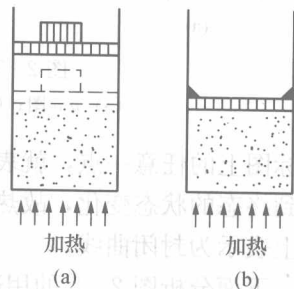


图 2-4 定压、定容加热
(a) 定压加热; (b) 定容加热

(三) 热量计算

知道了物质的比热容 c , 又知道物质在加热和冷却过程中的初温度 t_1 和终温度 t_2 , 则可以进行热量 q 计算。

$$q = c(t_2 - t_1) \quad (2-5)$$

热工计算中,工质吸热为正,放热为负。

四、热力过程、热力循环与参数坐标图

(一) 热力过程

工质在热机中做功,应按照要求进行状态的变化。例如,汽轮机的蒸汽在工作时按要求降低蒸汽的压力、温度到一定值。这种工质状态从初态经过一系列中间状态逐步变化到终态的过程,叫做工质的热力过程,简称过程。

(二) 热力循环

热力发电厂的电能生产是连续而不能中断的。为了使热力设备连续不断地工作,工质的状态变化过程亦必须连续不断地重复进行。这就要求工质在热力设备中的工作不能停顿,工质一个接一个的状态变化,就形成了一个状态变化圈子。在这个变化圈子中,不管从哪一点