



普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）

PUTONG GAODENG JIAOYU SHIERWU GUIHUA JIAOCAI GAOZHI GAOZHUAN JIAOYU

热工基础

REGONG JICHU

徐艳萍 柯选玉 主编 ●



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

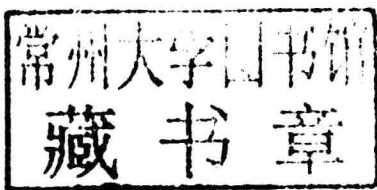


普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）
职业教育电力技术类专业教学用书

热工基础

REGONG JICHU

主 编 徐艳萍 柯选玉
编 写 廖庆庆 刘 媛 苏华莺
主 审 景朝晖



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）。全书分工程热力学和传热学两部分，共 13 章。工程热力学部分共 8 章，叙述热力学基本概念、热力学第一定律和第二定律、理想气体和水蒸气的性质及热力过程、蒸汽的流动规律、动力循环的热力分析及混合气体的性质等。传热学部分共 5 章，介绍导热、对流换热、辐射换热的基本规律，传热过程和换热器的基本概念、计算方法及综合分析等。各章均有例题和课后思考与练习题。书后附有水蒸气的焓熵图。

本书可作为高职高专院校能源动力类各专业的教材，也可兼作能源动力类专业中级工、高级工培训教材，亦可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

热工基础/徐艳萍，柯选玉主编. —北京：中国电力出版社，2012.3

普通高等教育“十二五”规划教材. 高职高专教育
ISBN 978-7-5123-2853-2

I. ①热… II. ①徐… ②柯… III. ①热工学—高等学校—教材 IV. ①TK122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 052146 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2012 年 6 月第一版 2012 年 6 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.5 印张 347 千字 1 插页

定价 28.00 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

本书为普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）。

本书力求体现我国职业教育的培养目标，在编写过程中既注意内容的科学性、系统性和实用性，又考虑到高职学生的基础现状，尽量避免复杂的概念与烦琐的数学推导和计算，以工程应用为主线，强调对基本概念的理解，力图使学生在掌握基本理论的基础上，对电厂热力设备的能量转换和传热问题具有一定的分析能力。

本书有较宽的适用范围，既可作为高职高专院校电厂热动、集控等专业的教材，也可兼作该专业中级工、高级工的培训教材。各章独立成单元，可根据需要选择，书中带*的章节为拓展内容。

本书由江西电力职业技术学院徐艳萍、太原电力职业技术学院柯选玉担任主编，绪论～第三章由柯选玉编写，第四章由太原电力职业技术学院苏华莺编写，第五章、第六章、第八章、第十一～第十三章由徐艳萍编写，第七章由江西电力职业技术学院廖庆庆编写，第九章、第十章由江西电力职业技术学院刘媛编写，全书由徐艳萍统稿，武汉电力职业技术学院景朝晖担任主审。

由于编者水平有限，书中难免有疏漏与不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

2012年2月

目 录

前言

绪论	1
----	---

第一篇 工程热力学

第一章 热力学基础知识	4
第一节 工质和热力系	4
第二节 状态及基本状态参数	5
第三节 平衡状态和热力过程	8
第四节 功和热量	10
第五节 热力循环	13
课后思考与练习	16
第二章 热力学第一定律	18
第一节 热力学第一定律的实质	18
第二节 热力学能	18
第三节 闭口系统能量方程式	19
第四节 状态参数焓	21
第五节 开口系统能量方程式	22
课后思考与练习	27
第三章 理想气体的热力性质及基本热力过程	28
第一节 理想气体及其状态方程式	28
第二节 理想气体的比热容	30
第三节 理想气体热力学能、焓和熵变化量的计算	35
第四节 理想气体的基本热力过程	37
第五节 压气机的热力过程*	46
课后思考与练习	48
第四章 热力学第二定律	51
第一节 热力学第二定律的实质	51
第二节 卡诺循环与卡诺定理	52

第三节 孤立系统熵增原理	55
第四节 烟与烟损失*	58
课后思考与练习	59
第五章 水蒸气	61
第一节 水和水蒸气的相变	61
第二节 水蒸气的定压产生过程	62
第三节 水蒸气图表	67
第四节 水蒸气的热力过程	70
课后思考与练习	73
第六章 蒸汽的流动	74
第一节 一元稳定流动的基本方程式	74
第二节 气流在喷管中的流动特性	76
第三节 喷管的选型与计算	78
第四节 绝热节流及其应用	81
课后思考与练习	83
第七章 动力循环	85
第一节 简单蒸汽动力循环——朗肯循环	85
第二节 蒸汽参数对循环热效率的影响	88
第三节 再热循环	90
第四节 回热循环	93
第五节 热电合供循环	99
第六节 内燃机循环*	100
第七节 燃气轮机循环*	105
课后思考与练习	109
第八章 混合气体和湿空气*	111
第一节 理想混合气体	111
第二节 湿空气	114
课后思考与练习	117

第二篇 传 热 学

第九章 导热	118
第一节 导热概述	118

第二节 导热的基本定律·····	120
第三节 热导率·····	121
第四节 导热微分方程式及单值性条件* ·····	122
第五节 通过平壁、圆筒壁、球壁的稳态导热·····	124
第六节 接触热阻* ·····	129
第七节 非稳态导热·····	131
课后思考与练习·····	133
第十章 对流换热 ·····	134
第一节 对流换热概述·····	134
第二节 流体无相变时的对流换热·····	138
第三节 流体有相变时的对流换热·····	146
课后思考与习题·····	150
第十一章 辐射换热 ·····	151
第一节 热辐射的基本概念·····	151
第二节 热辐射的基本定律·····	154
第三节 物体间的辐射换热·····	156
第四节 辐射的增强与削弱·····	160
第五节 太阳辐射* ·····	164
课后思考与练习·····	166
第十二章 传热 ·····	168
第一节 基本概念·····	168
第二节 通过平壁、圆筒壁、肋壁的传热·····	170
第三节 传热的增强与削弱·····	176
第四节 火电厂中常见传热问题分析实例·····	181
课后思考与练习·····	186
第十三章 换热器 ·····	188
第一节 换热器及其分类·····	188
第二节 表面式换热器的传热计算·····	193
课后思考与练习·····	199
附录 A 常用气体的热力性质·····	201
附录 B 常用气体的平均质量定压热容 $c_p _0^t$ ·····	202
附录 C 常用气体的平均质量定容热容 $c_v _0^t$ ·····	203
附录 D 饱和水与干饱和蒸汽的热力性质 (按温度排列) ·····	204

附录 E 饱和水与干饱和蒸汽的热力性质（按压力排列）	206
附录 F 未饱和水与过热蒸汽的热力性质	208
附录 G 水和饱和水的热物理性质	215
附录 H 部分金属材料的热物理性质	217
附录 I 部分非金属和耐火材料的热物理性质	219
附录 J 常见材料的表面发射率	220
参考文献	221

绪 论

一、热能的利用及其在电力工业中的地位

能源的开发和利用程度是衡量社会生产发展的重要标志。所谓能源，是指可为生产和生活提供各种能量和动力的物质资源。在自然界中，可被利用的能源有水力能、潮汐能、风能、太阳能、地热能、燃料的化学能和原子核能等。在这些能源中，除水力能和风能是机械能外，其余各种能源都是以热能的形式被人们所利用。

热能在能量利用中有着极其重要的意义。热能的利用方式有两种：一种是直接利用，即将热能直接用来加热物体，如利用太阳能和地热能的热能可直接烘干、煮饭、取暖等；另一种是间接利用，即将热能转换为机械能或电能加以利用，如热力发电厂、车辆船舶及飞机的动力装置等。在热能的间接利用中，热能的能量形式发生了转换。

热能的间接利用方式是现代社会利用热能的主要方式。以热能形式提供的能量在能源中占有相当大的比例。从某种意义上讲，能源的开发和利用就是热能的开发和利用。特别是电能，由于具有传输方便、易于控制、使用灵活且易于转换为其他形式的能量等诸多优点，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得到，火力发电是电力工业的重要组成部分。截至2010年底，我国发电总装机容量达到96 219万kW，其中火电装机容量为70 663万kW，占73.44%，比2009年减少1%，主要是随着发电技术的发展，清洁能源发电装机容量所占比例增加。尽管如此，预计今后相当长的一个时期内，火力发电仍将在电力工业中占最主要的地位。

二、火电厂的生产过程

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。

火电厂的生产过程，就是将燃料的化学能在锅炉中转变为热能，热能又在汽轮机中转变为机械能，机械能再进一步在发电机中转变为电能。由于火电厂中的锅炉、汽轮机、发电机三大设备分别完成了能量形式的三次转换，因此锅炉、汽轮机、发电机又称为火电厂的三大主机，如图0-1所示。

图0-2所示为以煤为燃料的火电厂生产过程。

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。该热能通过锅炉受热面（水冷壁、过热器等）的传热，使锅炉中的水变成高温高压的过热蒸汽，由此，烟气的热能转变为水蒸气的热能。

过热蒸汽携带热能进入汽轮机中，通过喷管降压增速，形成高速汽流，冲击汽轮机转子上的叶片，使汽轮机转子高速旋转，将蒸汽的热能转换成机械能。汽轮机再带动发电机转子一起旋转，切割磁力线，将机械能转换为电能，经主变压器送出。

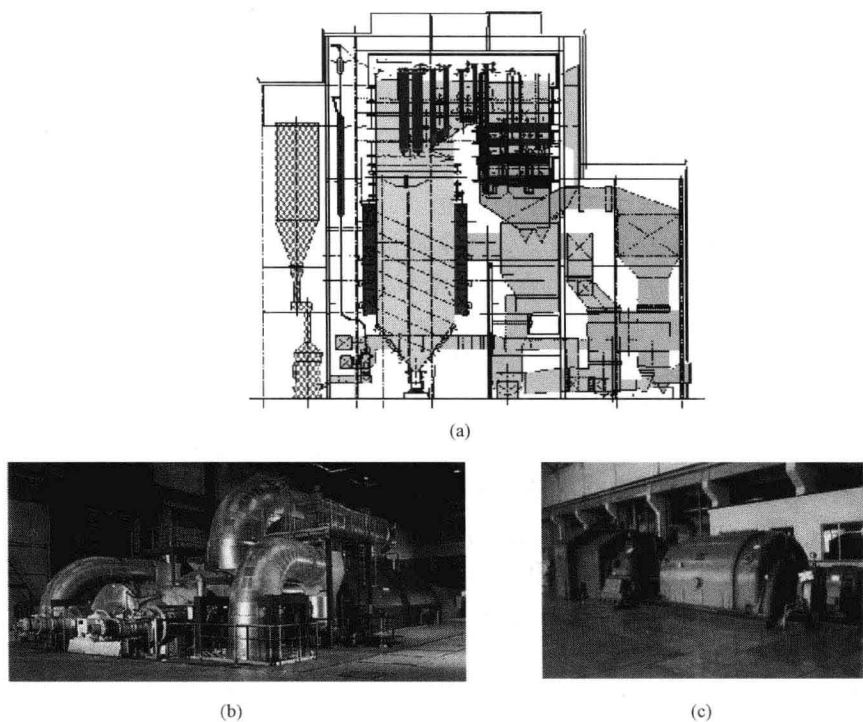


图 0-1 火电厂三大主机图
(a) 锅炉剖面图；(b) 汽轮机；(c) 发电机

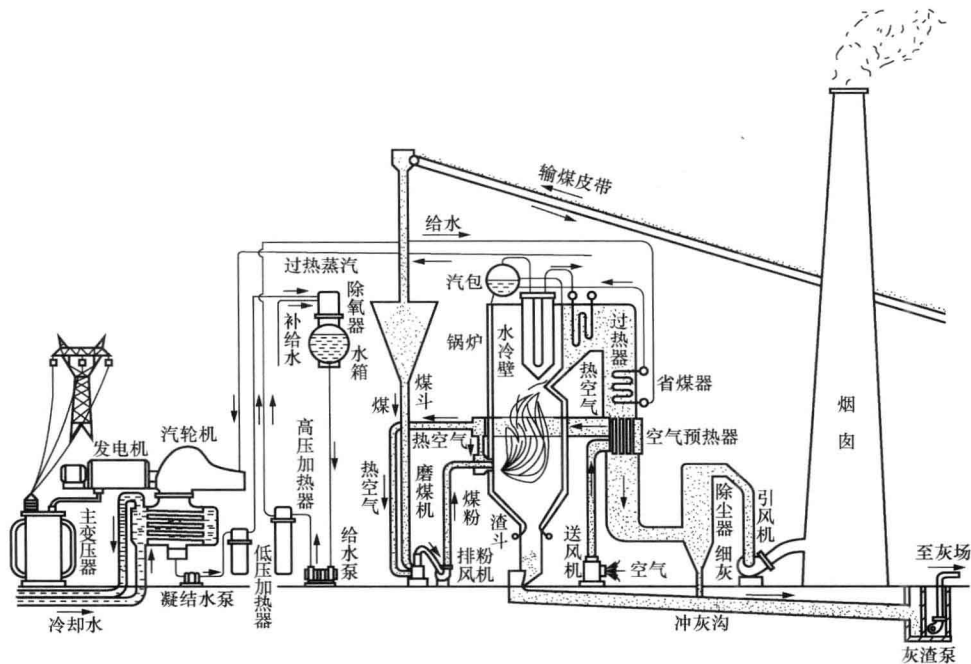


图 0-2 以煤为燃料的火电厂生产过程示意图

做完功后的蒸汽（常称为乏汽）排入凝汽器，在凝汽器中放热而凝结成水，再经凝结水泵打入低压加热器、除氧器，经给水泵压入高压加热器，经省煤器送回锅炉汽包，使水重新在锅炉受热面吸收热量变成高温高压的蒸汽。这样周而复始，使燃料燃烧时放出的热能通过水蒸气连续循环，不断地转变为电能。

从火电厂的生产过程可见，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和从机械能转变为电能的部分。前者称为火电厂的热力部分，后者称为火电厂的电气部分。热力部分包括锅炉、汽轮机、凝汽器、水泵、加热器等热力设备，以及连接它们构成的热力系统。

三、热工基础的主要研究对象及研究方法

热能与机械能的转换及热量的传递是火电厂热力设备中的主要工作过程。能量的转换必须遵循哪些规律、热量的传递受到哪些因素的影响、如何使电厂中的能量转换和热量传递在最有利的条件下进行、怎样提高火电厂的热经济性等，都是热工基础这门课程讨论的主要内容。

热工基础包括工程热力学和传热学两部分内容。工程热力学主要研究热能与机械能转换的客观规律，即热力学的基本定律，分析工质的基本热力性质，应用热力学基本定律分析工质在热力设备中所经历的变化过程，并在此基础上进一步分析影响能量转换效果的因素，探讨提高火电厂循环热效率的途径与方法。传热学是研究热能传递的科学。由于热能可以自发地从高温物体向低温物体传递，因此，只要存在温差，就必然有热量传递。传热学的主要内容是以分析传热的三种基本方式为基础，进一步研究实际的复杂传热过程及常用的换热设备的传热特点，最终找出提高传热效果或减少热损失的途径。

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，结合工程应用对热现象进行具体的观察和分析，总结出普遍的基本规律。

热能与机械能的转换及热量的传递是火电厂热力设备的主要工作过程，所以热工基础是动力类专业的一门主要的专业基础课，各种热力设备的设计、制造、安装、运行、检修与改进都要用到该课程的基本理论。学好该课程，也可为学习锅炉、汽轮机、热力发电厂等专业课及毕业后从事本专业工作奠定良好基础。

随着我国国民经济的持续、高速、稳定发展，电力工业已经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居世界前列，但我国发电技术的经济指标还比较低，人均占有发电量的水平也很低。因此，我们必须合理利用能源，积极开发新能源，努力降低碳排放量，使我国的能源工业全面达到或超过世界先进水平。学好该课程，可掌握新能源开发和合理利用能源的必要理论。

第一篇 工程热力学

第一章 热力学基础知识

工程热力学是人们对自然现象进行观察和研究的基础上,总结概括起来的研究热能与机械能相互转换规律和方法的一门学科。我们在学习热力学时,必须准确地理解和掌握它所涉及的名词和术语。

第一节 工质和热力系

一、工质

能够将热能转变为机械能的设备统称为热机,如汽轮机、内燃机等都是热机。

热机要将热能转变为机械能,必须借助于一种媒介物质才能实现,我们把这种实现热能与机械能相互转换的媒介物质称为工质。

由于工质连续不断地流过热力设备而膨胀做功,因此,要求工质应具有良好的流动性和膨胀性,此外,还要求工质热力性能稳定、无毒、无腐蚀性、价廉、易得等。所以,火电厂、核电厂中广泛采用水蒸气作为工质,而内燃机、燃气轮机均取燃气作为工质。

在工程热力学中,常把能不断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;将能不断接受工质放出热量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的过程中,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,即通常可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。

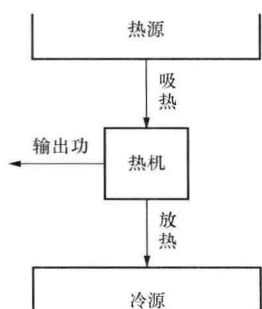


图 1-1 热能动力装置的工作流程

热能动力装置的工作流程如图 1-1 所示,可概括为:工质从热源吸收的热量,一部分在热机中转换成机械能,另一部分排向冷源。

二、热力系

在热力学中,把热力学研究的对象称为热力系,如同力学中的隔离体一样。系统外与之相关的所有物体统称为外界。热力系与外界之间的分界面称为界面或边界。该边界可以是真实的、假想的,也可以是固定的、移动的。

在图 1-2 中,若取汽缸中封闭的工质为热力系(图中虚线所示),则活塞、重物及热源为外界。气缸内壁和活塞内表面是真实的分界面,活塞是可以移动的分界面。

如图 1-3 所示,若取汽轮机进出口截面 1-1、2-2 之间及汽缸内壁所包围的空间为热力

系，则系统的边界是固定的，其中汽缸内壁是真实存在的，而进出口截面则是假想的。

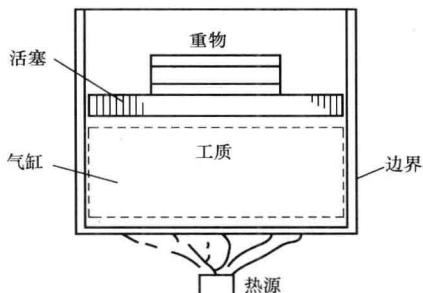


图 1-2 闭口热力系

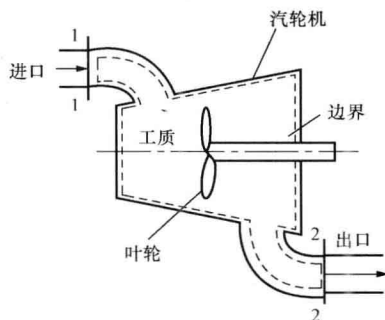


图 1-3 开口热力系

一般情况下，热力系与外界相互作用时，是通过边界进行物质和能量的交换。物质交换是通过物质流进和流出热力系来实现的，能量交换则有传热和做功两种形式。

按热力系与外界有无物质交换，可将热力系分为闭口热力系和开口热力系。若系统与外界无物质交换，则称为闭口热力系，如图 1-2 所示；若系统与外界有物质交换，则称为开口热力系，如图 1-3 所示。

按系统与外界有无能量交换，可将热力系分为绝热热力系和孤立热力系。与外界不发生热交换的热力系称为绝热热力系，与外界既无物质交换也无能量交换的热力系称为孤立热力系。

需要指出的是，绝对的绝热热力系和孤立热力系实际上是不存在的。但是，如果某些实际的热力系与外界的传热量很少，就可以近似地看做绝热热力系。如图 1-3 所示的热力系，蒸汽通过汽缸壁对外散失的热量，与蒸汽在汽轮机中进行的能量转换相比是非常小的，因此在实际计算时常把它当做绝热热力系看待。

同样，如果系统与外界的物质和能量交换都很微弱，对系统产生的影响很小，可忽略不计，该系统就可看做孤立热力系。或把研究对象连同与它直接相关的外界所有物体一起作为一个热力系，则因该系统与外界不发生任何能量和物质的交换，所以它就是一个孤立热力系。如图 1-2 所示的闭口热力系，它与热源、气缸活塞以及活塞上的重物一起就构成一个孤立热力系。此时，原来的闭口系以及与其发生相互作用的所有物体都可看做是孤立热力系中的组成部分。

可见，绝热热力系和孤立热力系都是热力学中的抽象概念。在研究问题时略去次要因素，抓住事物的本质，将使复杂的问题得到简化，给热力学的研究带来很大的方便。

第二节 状态及基本状态参数

一、状态与状态参数

在热动力装置中，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。在此过程中，工质的压力、温度等物理特性随时都在改变，即工质的状态随时都在改变。所谓状态，是指工质在某一瞬间所呈现的宏观物理状况。

用来描述和说明工质状态的宏观物理量称为工质的状态参数，如压力、温度等。状态参

数仅取决于工质的状态。对应于某个给定的状态，工质的所有状态参数都有各自确定的数值；反之，一组确定的状态参数可以确定一个状态。状态参数的变化量只取决于初、终状态的值，而与所经历的途径无关。若工质从某一状态经历一系列的状态变化过程又回到原状态，即工质经历一个循环，则其状态参数的变化量必为零。满足以上特征的物理量，都可视为状态参数。

在热力学中，经常采用的状态参数有压力、温度、比体积、热力学能、焓、熵等。其中，压力、温度和比体积都是可以直接测量或计算的物理量，并且物理意义都较易理解，因此常称为基本状态参数。至于其他参数，都只能从基本状态参数间接导出。下面首先介绍这三个基本状态参数。

二、基本状态参数

(一) 压力

1. 压力的表示方法

单位面积上所承受的垂直作用力称为压力。气体的压力是大量气体分子作不规则热运动时撞击容器壁，在单位面积上产生的垂直方向的平均作用力。

压力的大小按其度量的基准（即零点）不同，有以下三种表示方法。

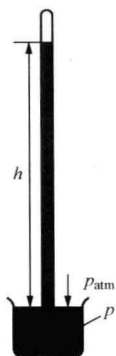


图 1-4 单管式
气压计

(1) 绝对压力。当压力是以绝对真空为零点算起时，这个压力称为绝对压力，即工质的真实压力，用 p 表示。大气层对地球形成的压力称为大气压力，用 p_{atm} 表示。大气压力可用气压计测定。图 1-4 所示为单管式气压计，其高度 h 随测量的时间和地点不同而不同。

(2) 相对压力。以大气压力 p_{atm} 为零点算起的压力称为相对压力，也就是绝对压力减去大气压力的数值，用 p_g 表示。如果某容器的绝对压力大于大气压力，则称其处于正压。压力表的读数反映了工质与周围空气的压力差，故压力表上的刻度是相对压力，工程上又习惯称之为表压力，即

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

容器内工质的压力是由压力表来测定的。工程上常用的压力表有弹簧管测压计和 U 形管测压计，如图 1-5 和图 1-6 所示。这些表计的测量原理都是建立在力平衡基础上的。弹簧管测压计的管外作用着当时当地的大气压力，管内作用着容器内气体的真实压力。当容器内气体的真实压力等于周围的大气压力时，压力表上的指针不动，指在零位。只有当气体的真实压力超过大气压力时，弹簧管在内外压差的作用下才产生变形而带动指针转动，所以压力表上指示的压力数值是真实压力超过大气压力的部分。

(3) 真空值。如果某容器的绝对压力小于大气压力，则称其处于真空或负压。真空的大小用真空值表示，常用真空表和 U 形管测压计测量。

真空值是指大气压力与绝对压力的差值，用 p_v 表示，即

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

表压力、真空值和绝对压力之间的关系如图 1-7 所示。根据上述关系可知，即使工质的绝对压力不变，压力计和真空计所显示的读数也会随当地大气压力的变化而改变。所以，表压力和真空值都不是状态参数，只有绝对压力才能作为描述工质状态的状态参数。

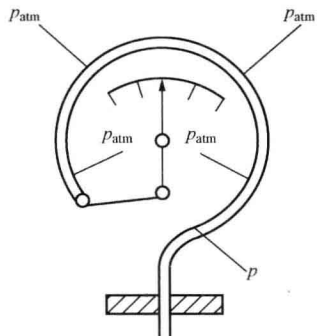


图 1-5 弹簧管测压计

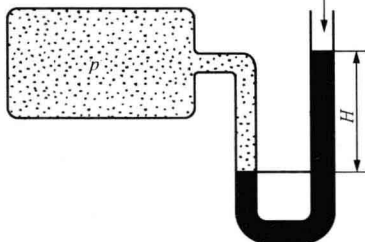


图 1-6 U形管测压计

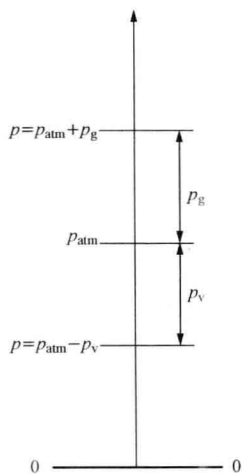


图 1-7 表压力、真空值和绝对压力之间的关系

工程计算中选取的压力必须是绝对压力。火电厂中所测得的锅炉汽包、主蒸汽的压力值都是表压力，运行中的锅炉炉膛、凝汽器内乏汽、送风机和引风机入口等的压力值为真空，计算时都须换算为绝对压力。

2. 压力的单位

火力发电厂中度量压力的单位常用以下三种：

(1) 用单位面积上所承受的力来表示。国际单位制为 Pa（帕）， $1\text{Pa}=1\text{N/m}^2$ 。因其单位值较小，故工程上常用 kPa、MPa。

(2) 用液柱高度表示。这种表示方法在工程技术上，特别是测量压力时很方便。由 $p=\rho gh$ 得

$$h = \frac{p}{\rho g} \quad (1-3)$$

常用的有 mmHg（毫米汞柱）、mH₂O（米水柱）。

需要注意，同一压力 p （单位：Pa）可用不同的液柱高度表示。换算时取什么液体的密度 ρ ，得出的高度就是该液体的高度。如用水的密度 $\rho=1000\text{kg/m}^3$ 计算得出的就是多少米水柱；当已知某液柱的高度 h ，利用 $p=\rho gh$ 换算压力 p 时，式中的 ρ 必须是形成该高度的液体密度。

(3) 用大气压表示。这种单位有两种：一种是标准大气压（又称物理大气压），另一种是工程大气压。

在物理学中，将纬度 45°海平面上常年的平均气压定为一个标准大气压，用 atm 表示。

$$1\text{atm} = 1.013\,25 \times 10^5 \text{Pa}$$

工程中为计算方便，大气压常近似地取 $1\text{at}=0.1\text{MPa}$ ，称为 1 个工程大气压。

(二) 温度

温度是标志物体冷热程度的一个物理量。温度的数值表示方法称为温标。常用的温标有摄氏温标和热力学温标。摄氏温标用 t 表示，单位为 $^{\circ}\text{C}$ （摄氏度）。国际单位制中常采用热力学温标，也称开尔文温标或绝对温标，用 T 表示，单位为 K（开尔文）。它们之间的换算

关系如下

$$t = T - 273.15 \quad (1-4)$$

显然, 两种温标的每一温度间隔的大小完全一致, 只是摄氏温标的基准点比绝对温标的基准点高出 273.15K。因此, 工质两状态间的温度差, 不论是采用热力学温标, 还是采用摄氏温标, 其差值相同, 即

$$\Delta t = \Delta T$$

处于热平衡的物体具有相同的温度, 这是用温度计测量物体温度的依据。当温度计与物体达到热平衡时, 温度计的温度就等于被测物体的温度。

(三) 比体积

比体积是指单位质量的工质所占有的体积, 用符号 v 表示, 单位为 m^3/kg 。

$$v = \frac{V}{m} \quad (1-5)$$

式中 V ——工质占有的体积, m^3 ;

m ——工质的质量, kg 。

密度是单位体积的工质所具有的质量。它等于比体积的倒数, 用符号 ρ 表示, 单位为 kg/m^3 。

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-6)$$

比体积和密度都是表示工质内部分子疏密程度的状态参数。比体积越大, 密度越小, 工质内部分子之间的距离就越大, 分子就越稀疏。

第三节 平衡状态和热力过程

一、平衡状态、状态方程式和参数坐标图

1. 平衡状态

一个热力系在没有外界影响的情况下, 系统内工质各点相同的状态参数均匀一致的状态称为平衡状态, 否则为不平衡状态。

平衡状态下, 热力系与外界处于热和力的平衡。工质内部各部分间无温度的差别, 且等于外界温度, 因而不会发生热量传递, 即热力系与外界处于热的平衡; 各部分间无压差, 且作用在边界上的力与外界平衡, 因而各部分间不会发生相对位移, 热力系与外界就没有功量的交换, 系统处于力的平衡。只要系统与外界不发生热量和功量的交换, 平衡状态就不会自发地改变。

处于不平衡状态的工质, 只要不受外界影响, 一定会自发地趋于平衡状态。

只有处于平衡状态的工质, 各部分才具有确定不变的状态参数, 工程热力学中通常只研究平衡状态。

2. 状态方程式

描述状态的各状态参数并不都是独立的, 往往互有联系。例如, 如果维持气体的比体积不变 ($v = \text{常数}$), 对气体加热, 则气体的压力将随温度的升高而增大; 若维持气体的压力不变, 对气体加热, 则气体的比体积将随温度的升高而加大; 如果比体积和压力都保持不变,

温度就只能是个定值。三个基本状态参数之间的内在联系，可用数学式表达如下

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

这样的函数关系式称为状态方程式。它们的具体形式取决于工质的性质，一般由实验求出，也可由理论分析求得。

3. 参数坐标图

为分析问题方便和直观，通常采用状态参数坐标图来表示热力系的状态。由于两个状态参数就可以确定工质的状态，因此可用两个独立的状态参数组成一个平面直角坐标图，称为参数坐标图，如图 1-8 所示的 $p-v$ 图，也称为压容图。图中每一点代表工质的某一平衡状态，点 1 代表的是系统内工质压力为 p_1 、比体积为 v_1 的平衡状态 1 (p_1, v_1)，点 2 表示工质的另一平衡状态 2 (p_2, v_2)。不平衡状态因没有确定的状态参数，所以不能在参数坐标图上用确定的点表示。

除 $p-v$ 图外，热力学中还常用到由其他状态参数组成的坐标图，这将在后面的章节中陆续介绍。

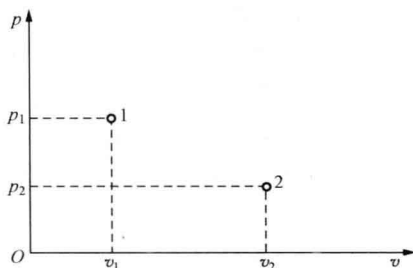


图 1-8 参数坐标图

二、热力过程

任何处于平衡状态的热力系，没有外界的作用，那么它将一直保持这种平衡状态。

处于平衡状态的热力系，若与外界发生功或热的相互作用，则平衡将遭到破坏，状态将发生变化。通常将工质从一个平衡状态过渡到另一个平衡状态所经历的全部状态的总和称为热力过程。

1. 准平衡过程

由一系列平衡状态组成的热力过程称为准平衡过程。

实际的热力过程都不是准平衡过程。但为了便于理论分析、研究和计算，工程热力学中常把实际的热力过程抽象为一个准平衡过程，也就是把实际过程理想化。当然，这是需要条件的。例如，当过程进行的速度相对缓慢，而工质内部分子运动的传播速度又很快时，破坏平衡状态的速度远远小于热力系内部恢复平衡状态的速度，则整个状态变化

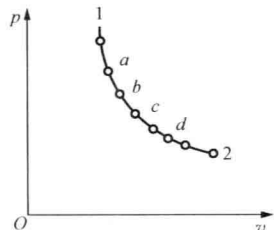
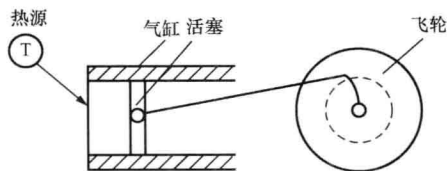


图 1-9 可逆过程示意图

过程可以看成是工质内部各点的温度和压力随时都是均匀一致的，这样的热力过程就可近似地看做准平衡过程。如果破坏平衡的速度较大，在每一时刻系统内部都来不及恢复平衡，则这样的过程就是不平衡过程。

如活塞式内燃机的转速是 2000r/min，曲柄为 2 冲程/转、0.15m/冲程，则活塞运动速度为 $2000 \times 2 \times 0.15 / 60 = 10\text{m/s}$ ，而与气体压力波恢复平衡的速度（声速）400~500m/s 相比，气体分子有足够的时间来恢复平衡，所以这个过程就可以按准平衡过程来处理。

只有准平衡过程才可以在参数坐标图上表示为一条连续的曲线，如图 1-9 所示。