



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
职业教育电力技术类专业教学用书

热工理论 及应用

景朝晖 主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
职业教育电力技术类专业教学用书

热工理论 及应用

主 编 景朝晖
编 写 王 祥 谢 新 徐艳萍
主 审 许国良 涂国富

江苏工业学院图书馆
藏书章



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书是高等职业技术学院集控运行、电厂热动力设备运行及检修专业的教材,可兼作该专业中、高级工的培训教材,也可供相关工程技术人员参考。

全书分工程热力学和传热学两篇,共十二章。第一篇工程热力学主要叙述热力学基础知识、热力学基本定律、理想气体的热力性质及热力过程、水蒸气的性质、蒸汽的流动规律与计算、蒸汽动力循环的分析与计算;第二篇传热学主要介绍导热、对流换热、辐射换热的基本概念与基本规律、传热过程的分析与计算、换热器的传热计算和综合分析等。各章均有例题,并附有思考题和习题。书后附有水蒸气的焓熵图,以便读者在进行热力计算时查用。

本书采用中华人民共和国法定计量单位。

图书在版编目(CIP)数据

热工理论及应用/景朝晖主编. —北京:中国电力出版社,2006
教育部职业教育与成人教育司推荐教材
ISBN 7-5083-4045-0

I. 热... II. 景... III. 热工学—高等学校:技术学校—教材 IV. TK122

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第001231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>)

北京同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2006年2月第一版 2006年2月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 15印张 318千字 1插图

印数 0001—3000册 定价 21.00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

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材，是根据教育部审定的电力技术类专业主干课程的教学大纲编写而成的，并列入教育部《2004~2007年职业教育教材开发编写计划》。本书经中国电力教育协会和中国电力出版社组织评审，又列为全国电力高等职业教育规划教材，作为高等职业教育电力技术类专业教学用书。

本书体现了职业教育的性质、任务和培养目标；符合职业教育的课程教学基本要求和有关岗位资格和技术等级要求；具有思想性、科学性、适合国情的先进性和教学适应性；符合职业教育的特点和规律，具有明显的职业教育特色；符合国家有关部门颁发的技术标准。本书可以作为学历教育的教学用书，也可作为职业资格和岗位技能培训教材。

编者在本书的编写过程中既注意到内容的科学性和系统性，又考虑到集控运行专业的特点和要求，注重理论与电厂生产实践相结合，在内容的编排上力求突出针对性和实用性，努力贯彻以必须、够用为度的原则。

本书由武汉电力职业技术学院景朝晖担任主编，参加编写的有景朝晖（绪论，第一、二、三、四章），武汉电力职业技术学院王祥（第五、六、七章），武汉电力职业技术学院谢新（第八、九、十章），江西电力职业技术学院徐艳萍（第十一、十二章）。

本书由华中科技大学许国良教授和武汉钢电股份有限公司自备电厂高工涂国富担任主审，编者感谢主审人对本书的仔细审阅及提出的宝贵意见。在编写过程中，还得到了同行们的大力关心和支持，在此一并深致谢意。

由于编者水平有限，书中难免存在缺点和不足之处，敬请读者不吝赐教。

编者

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 状态和基本状态参数 6

第三节 平衡状态和热力过程 9

第四节 功和热量 11

思考题 14

习题 14

第二章 热力学第一定律 16

第一节 热力学第一定律的实质 16

第二节 系统储存能 16

第三节 闭口系能量方程式 17

第四节 状态参数焓 19

第五节 开口系稳定流动的能量方程及其应用 21

思考题 25

习题 26

第三章 理想气体的热力性质及基本热力过程 27

第一节 理想气体及其状态方程式 27

第二节 理想气体的比热容 29

第三节 理想气体热力学能、焓和熵变化的计算 34

第四节 理想气体的混合物 36

第五节 理想气体的基本热力过程 40

思考题 47

习题 48

第四章 热力学第二定律 50

第一节 热力循环 50

第二节 热力学第二定律 52

第三节 卡诺循环与卡诺定理 54

第四节 孤立系统熵增原理 58

第五节 热量的作功能力 61

思考题	62
习题	63
第五章 水蒸气	65
第一节 水蒸气的饱和状态	65
第二节 水蒸气的定压产生过程	66
第三节 水蒸气图表	70
第四节 水蒸气的基本热力过程	73
第五节 湿空气	75
思考题	78
习题	78
第六章 蒸汽的流动	79
第一节 稳定流动的基本方程式	79
第二节 工质在喷管中的定熵流动	81
第三节 喷管的计算	82
第四节 绝热节流及其应用	84
思考题	87
习题	87
第七章 蒸汽动力循环	88
第一节 朗肯循环	88
第二节 蒸汽参数对循环热效率的影响	91
第三节 再热循环	93
第四节 回热循环	96
第五节 热电合供循环	102
思考题	104
习题	104

第二篇 传 热 学

第八章 导热	106
第一节 基本概念	106
第二节 导热的基本定律	108
第三节 平壁的稳定导热	109
第四节 圆筒壁的稳定导热	112
第五节 不稳定导热	114
思考题	118
习题	118
第九章 对流换热	119
第一节 对流换热概述	119
第二节 流体无相变时的对流换热	125
第三节 流体有相变时的对流换热	132

思考题	137
习题	137
第十章 辐射换热	139
第一节 热辐射的基本概念	139
第二节 热辐射的基本定律	141
第三节 物体间的辐射换热	143
第四节 气体辐射	149
思考题	151
习题	151
第十一章 传热	152
第一节 基本概念	152
第二节 通过平壁、圆筒壁的传热	155
第三节 传热的增强与削弱	159
思考题	166
习题	166
第十二章 换热器	168
第一节 换热器及其分类	168
第二节 表面式换热器的传热计算	172
第三节 表面式换热器传热实例分析	179
思考题	182
习题	183
附录	184
参考文献	203

绪 论

一、热能的利用及其在电力工业中的地位

能源的开发和利用水平是衡量社会生产发展的重要标志。在已经开始的 21 世纪, 为全面提高各类人才的科学素质, 掌握和了解能源的基本知识是十分必要的。

所谓能源, 是指可向人类提供各种能量和动力的物质资源。迄今为止, 由自然界提供的能源有: 水力能、风能、太阳能、地热能、燃料的化学能、原子核能、海洋能以及其他一些形式的能量。

在上述自然界的这些能源中, 除水力能和风能是机械能外, 其余各种能源都是直接或间接以热能的形式向人类提供能量。例如, 太阳能和地热能是直接的热能; 燃料的化学能, 包括固态的煤、液态的石油和气态的天然气, 则是通过燃烧将化学能释放变为热能供人类利用。如果说燃料燃烧是通过“烧分子”将化学能转变为热能, 那么核能利用则主要是通过“烧原子”将原子核能转变为热能。以热能形式提供的能量占了能源相当大的比例, 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。

热能的利用可分为直接利用和间接利用两种方式。热能的直接利用是指直接利用热能加热物体, 热能的形式不发生变化, 如取暖、烘干、冶炼、蒸煮等。热能的间接利用是把热能转换为机械能或进一步再转化为电能加以利用, 以满足人类生产和生活对动力的需要, 如火力发电、交通运输、石油化工、机械制造和其他各种工程中的蒸汽动力装置、燃气动力装置。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。尤其是电能, 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。

将热能最终转换为电能的热力发电(火力发电、热力发电、核电厂)目前占世界总发电量的 80% 左右, 无论在我国还是在世界, 预计今后相当长的一个时期内, 热力发电仍将在电力工业中占最主要地位。

二、火电厂的生产过程

在我国, 发电量比例最高的是火力发电厂, 火力发电厂是指利用燃料(煤、石油、天然气等)生产电能的工厂, 简称火电厂。

火电厂的生产过程实质上是一个能量转换的过程。先是在锅炉中, 燃料的化学能通过燃烧转换为水蒸气的热能, 接着在汽轮机中水蒸气的热能转换为机械能, 最后在发电机中机械能转换为电能。由于电厂中的锅炉、汽轮机、发电机三大设备分别完成了能量形式的三次转换, 所以锅炉、汽轮机、发电机又称为火电厂的三大主机。

图 0-1 是以煤为燃料的火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。该热能通过锅炉

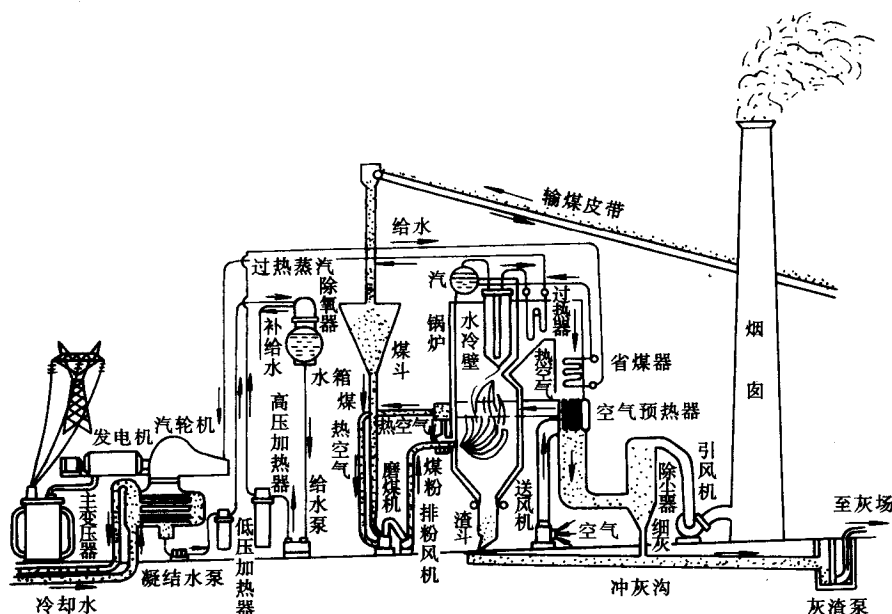


图 0-1 火电厂生产过程示意图

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。

过热蒸汽进入汽轮机中，通过喷管降压增速，形成高速气流，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。

在汽轮机中作完功后的蒸汽（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，通过水蒸气连续循环，使热能连续不断地转变为机械能，并最终转变为电能。

从火力发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。前者称为发电厂的热力部分，后者称为发电厂的电气部分。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、《热工学理论及应用》的主要内容

热能与机械能的转换及热量的传递是发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？热量的传递又要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？怎样提高电厂的热经济性等，都是本课程讨论的主要内容。

《热工学理论及应用》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计算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，所以，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。

无论是工程热力学部分还是传热学部分都着眼于工程实际的应用,本教材在允许的篇幅内尽可能多地对电厂常用热工设备的原理、构造和性能进行介绍。

该课程是从事火电厂集控运行专业人员必须掌握的基本理论知识,是控制运行热动力设备的基础,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。因而学好该课程将为学习锅炉、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重要基础。

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居世界前列,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,我们必须合理利用能源,积极开发新能源,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,可为开发新能源和合理利用能源奠定必要的理论基础。

第一篇 工程热力学

第一章

热力学基础知识

学习任何一门学科,都必须先掌握与之有关的基本概念和术语,就像入门必须先掌握钥匙一样。工程热力学研究热能与机械能之间相互转换的规律,是从实践经验中总结概括起来的学科,它所使用的许多名词术语,如系统、平衡、参数、过程、功和热等等,既是热力学中的常用术语,也是日常生活用语。在日常生活中,这些词涵义广泛,界限不清,与科学用语自然有别。因此,确切地掌握这些概念和术语,以防与日常用语混淆,是非常必要的。

本章介绍工程热力学的一些基本概念,并用热力学观点来重新认识某些大家已经熟悉的术语,以利入门。

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称为热机。如汽轮机、内燃机等都是热机。

在热机中要使热能不断地转变为机械能,需要借助于媒介物质。实现能量转换的媒介物质称为工质。

不同性质的工质对能量转换的效果有直接影响,工质性质的研究是本学科的重要内容之一。原则上,气、液、固三态物质都可作为工质,但热力学中热能与机械能之间的相互转换是通过物质的体积变化来实现的,为使能量转换有效而迅速,常选气态物质作为工质。

在火电厂中,由于工质连续不断地流过热力设备而膨胀做功,因此,要求工质应有良好的膨胀性和流动性,此外,还要求工质热力性能稳定、无毒、无腐蚀性、价廉、易得等。鉴于此,目前火电厂中采用水蒸气作为工质。水在锅炉中吸热生成蒸汽,然后在汽轮机中膨胀推动叶片旋转对外做功,做功后的乏汽在凝汽器中向冷却水放热又凝结成水。在这一系列过程中,炉膛中的高温烟气是向工质提供热量的高温热源,汽轮机是实现热功转换的热机,凝汽器中的冷却水是吸收工质所释放的废热的低温热源,通过工质的状态变化及它和高温热源、低温热源之间的相互作用实现了热能向机械能的连续转换。

二、热力系

(一) 热力系、外界与边界

作任何分析研究,首先必须明确所研究的对象。在热力学中,具体指定的热力学研究对象称为热力系,如同力学中的隔离体一样。系统外与之相关的所有有关物体统称为外界。热力系与外界之间的分界面称为界面或边界。根据具体情况,这个界面可以是真实的,也可以是假想的,可以是固定的,也可以是移动的,这一切都取决于研究的任务。

如图 1-1 所示,在气缸与活塞所封闭的空间里有一定量的气体。当研究气体受热膨胀而举起活塞上的重物这一热变功的问题时,气缸中封闭的气体就是所要研究的对象,即所选

取的热力系。活塞、重物及热源构成外界。气缸内壁和活塞下表面则构成系统的边界，如图中虚线所示。显然这是真实的界面，并且其中的一部分随着活塞的移动而发生变化。

如图 1-2 所示汽轮机，若取进出口截面 1-1、2-2 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，其中一部分是真实存在的（汽缸内壁），另一部分（1-1 截面和 2-2 截面）则是假想的。

（二）闭口系和开口系、绝热系和孤立系

一般情况下，热力系与外界总是处于相互作用之中，它们可以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。

根据热力系与外界相互作用情况的不同，热力系可区分成若干类型。

按热力系与外界进行物质交换的情况，可将热力系分为闭口系和开口系。若系统与外界无物质交换，或者说没有物质穿过系统边界，则称为闭口系。如图 1-1 所示。若系统与外界有物质交换，或者说有物质穿过系统边界，则称为开口系。如图 1-2 所示。

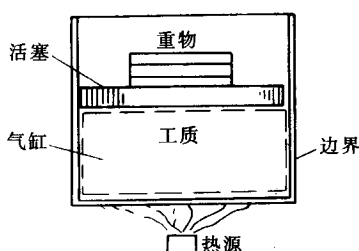


图 1-1 闭口热力系

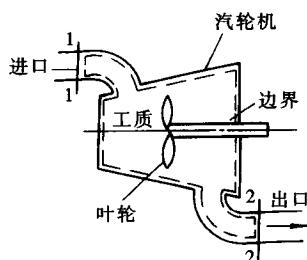


图 1-2 开口热力系

与外界不发生热交换的热力系称为绝热系。

与外界无任何相互作用的热力系，称为孤立系。此时既没有物质穿过边界，系统也不与外界发生任何形式的能量交换。

显然，因为自然界中的一切事物都是相互联系和相互制约的，所以绝对的绝热系和孤立系实际上是不存在的。但在某些特殊情况下，可以简化为这两个理想的模型。

如果某些实际的热力系，在某段时间内与外界的传热量很少，对于系统的能量传递和能量转换所起的作用可以忽略不计，则这样的系统就可以近似地看作绝热系。如图 1-2 所示的热力系，通常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作绝热系看待。

另外，由于一切热力现象所涉及的空间范围总是有限的，因此，如果我们把研究对象连同与它直接相关的外界所有物体一起取作一个新的热力系，则因该系统与外界不发生任何能量和物质的交换，它就是一个孤立系。如图 1-1 所示的闭口系，它与热源、气缸活塞以及活塞上的重物一起就可以共同构成一个孤立系。此时，原来的闭口系以及它与发生相互作用的所有物体都可看作是孤立系中的组成部分。

绝热系和孤立系都是热力学中的抽象概念，它们常能反映客观事物的本质，这种科学的抽象将给热力学的研究带来很大的方便，在后面的学习中，我们还会遇到很多从客观事物中抽象出来的基本概念，如平衡状态、准平衡过程、可逆过程等。学习中不应该把这些抽象概念绝对化，而应该把它们看作一种可靠的、科学的研究方法来理解和掌握。

应当指出, 热力系如何划分, 划分范围的大小, 完全取决于分析问题的需要及分析方法的方便。它可以是一群物体, 也可以是一个物体或物体的某一部分; 它可以很大, 也可以很小。例如, 我们可以把整套蒸汽动力装置作为一个热力系, 分析计算它与外界的热量和功量交换, 这时整个蒸汽动力装置中工质的质量不变, 是闭口系。我们也可以只取其中的一个设备, 如汽轮机内的空间为热力系, 分析流体流过汽轮机时的作功情况, 这个热力系就是开口系。

第二节 状态和基本状态参数

一、状态与状态参数

在实现能量转换的过程中, 热力系本身的状况也总是在不断地发生变化。要研究热力系, 首先必须知道热力系中工质所处的状态及其变化情况。所谓状态, 是指工质在某一瞬间所呈现的宏观物理状况。它可以用一些宏观的物理量来描述, 如压力、温度等等。这些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。我们根据任何一个状态参数的变化, 都可以断定工质的状态发生了变化。

状态参数是状态的单值函数, 即状态参数的值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, 一组数值确定的状态参数可以确定一个状态。

当系统内工质由初始状态 1 变化到终了状态 2 时, 不管经过什么途径, 状态参数的变化量均等于初、终态下该状态参数的差值, 而与所经历的途径无关。

这一性质用数学表达式写出则为

$$\Delta x = \int_1^2 dx = x_2 - x_1 \quad (1-1)$$

式中, x_1 、 x_2 分别为状态 1 和状态 2 时的状态参数。

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。其数学表达式为

$$\oint dx = 0 \quad (1-2)$$

以上所述是状态参数的特征。

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。其中最基本的状态参数有三个, 分别是压力、温度和比体积, 它们都是可以直接测量的物理量, 并且物理意义都较易理解, 因此常称为基本状态参数。至于其他的参数, 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. 压力的定义及表达式

单位面积上所承受的垂直作用力称为压力, 以符号 p 表示:

$$p = \frac{F}{A} \quad (1-3)$$

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, 在单位面积上所产生的垂直

方向的平均作用力。

式(1-3)所表示的压力是气体的真正压力,称为绝对压力。

要注意的是,在物理学中,我们把这种单位面积上所承受的垂直作用力叫“压强”,而把容器内器壁上承受的总力叫压力。但在工程上,习惯把物理学上的压强叫压力,把物理学上的压力叫总压。

2. 表压与真空

工程上,工质的压力常用压力表或真空表来测量。常用的有弹簧管测压计和 U 形管测压计,如图 1-3 所示。测量压力的仪表通常处于大气环境中,不能直接测出绝对压力的数值,只能显示出绝对压力和当时当地的大气压力的差值。如图 1-3 (a) 的弹簧管式测压计是利用弹簧管内外压差的作用产生变形带动指针转动,指示被测工质与环境间的压差;图 1-3 (b) 的 U 形管测压计一端与被测工质相连,另一端敞开在环境中,测压液体的高度差即指示被测物质和环境间的压差。

当气体的绝对压力高于大气压力时,压力计显示的是绝对压力超出大气压力的部分,称为表压力,用符号 p_g 表示:

$$p_g = p - p_b \quad (1-4)$$

式中, p_b 为大气压力,可用气压计测定。其值随测量的时间和地点不同而不同。

当气体的绝对压力低于大气压力时,真空计显示的是绝对压力低于大气压力的部分,称为真空度,用符号 p_v 表示。

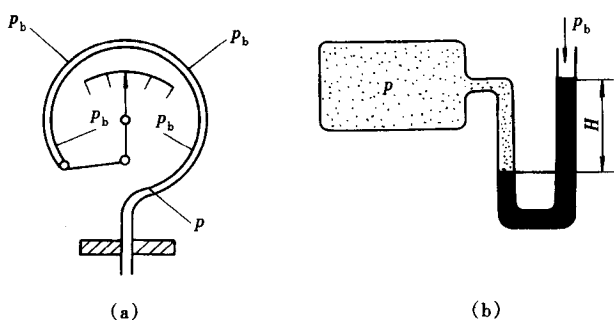


图 1-3 压力的测量

$$p_v = p_b - p \quad (1-5)$$

显然,要想知道气体的绝对压力,仅仅知道压力计或真空计的读数是不够的,还需要知道当时当地气压计的读数,然后通过上述公式计算得出。

表压、真空度和绝对压力之间的上述关系如图 1-4 所示。根据上述关系,如果大气压力发生变化,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之改变。所以,表压和真空度都不是状态参数,只有绝对压力才能作为描述工质状态的状态参数。

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,负压燃烧锅炉炉膛内的烟气和凝汽器内乏汽的压力值为真空,计算时都须换算为绝对压力。

3. 压力的单位

国际单位制中压力的单位为 Pa (帕), $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$ 。因其单位量值较小,工程上常用 MPa (兆帕) 作压力的单位,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力单位还有 mmHg (毫米汞柱)、mmH₂O (毫米水柱)、atm (标准大气压) 和 at (工程大气压) 等。其中

$$1\text{mmHg} = 133.3\text{Pa}, 1\text{mmH}_2\text{O} = 9.81\text{Pa}$$

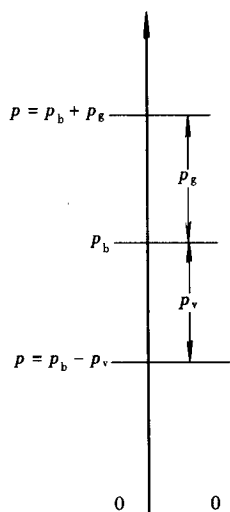


图 1-4 压力关系
换算示意图

在物理学中，将纬度 45° 海平面上的常年平均气压定作标准大气压，用 atm 表示， $1\text{atm}=1.01325\times 10^5\text{Pa}$ 。

工程计算中，大气压力常近似地取为 $1\text{at}=0.1\text{MPa}$ ，称为 1 个工程大气压。

(二) 温度

通俗地讲，温度是标志物体冷热程度的物理量。

温度的数值标尺称温标。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，也叫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：

$$t = T - 273.15 \quad (1-6)$$

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 。这样，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 $\Delta T = \Delta t$ 。

(三) 比体积

比体积就是单位质量的物质所占有的体积，用符号 v 表示，单位为 m^3/kg 。

$$v = \frac{V}{m} \quad (1-7)$$

式中 V ——体积， m^3 ；

m ——质量， kg 。

比体积是表示物质内部分子疏密程度的状态参数，比体积越大，物质内部分子之间的距离就越大，物质内部分子越稀疏。固体、液体、气体比体积逐渐增大。

比体积的倒数称为密度，符号为 ρ 。密度是单位体积的物质所具有的质量。

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-8)$$

密度的单位为 kg/m^3 。

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

解 根据 $p = p_b + p_g$ ，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 火电厂的设备型号中，通常有表示压力的参数。在不同的设备型号中，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 指的是新蒸汽的绝对压力为 16.7MPa 。

② 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。

第三节 平衡状态和热力过程

一、平衡状态、状态方程和参数坐标图

1. 平衡状态

一个热力系可能呈现各种不同的状态, 其中具有特别意义的是平衡状态。所谓平衡状态, 是指在没有外界影响的情况下, 系统内工质的宏观性质不随时间而变化的状态。在平衡状态下, 工质各点相同的状态参数均匀一致, 具有确定的数值。

上节讲到压力、温度、比体积是工质的状态参数, 可以用来描述工质的状态, 这只有在平衡状态下才有可能。例如, 我们说工质在某一状态下具有温度 T (K), 这就意味着此时系统内工质各点的温度都是 T , 否则 T 这个数值就说明不了工质的状态。只有平衡状态才可以用确定的状态参数来描述工质的状态特性, 这是进行热力学分析和计算的基础。

2. 状态方程式

热力系处于平衡状态时, 其每个状态参数都有确定的值, 可以用这些状态参数来描述该平衡状态各方面的性质, 但在确定该平衡状态时, 却不必给出全部状态参数的值, 这是因为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, 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

由上式可知, 对平衡状态, 只需确定两个状态参数, 第三个状态参数即随之而定, 因此, 通常简单热力系的热力学状态只需要用两个独立的状态参数便可确定。热力学中为了分析问题方便和直观, 常采用任意两个独立参数组成一个平面直角坐标图, 称为参数坐标图, 在图上用确定的点来描述工质所处的平衡状态。如图 1-5 所示的 $p-v$ 图也称为压容图, 以压力为纵坐标, 比体积为横坐标, 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

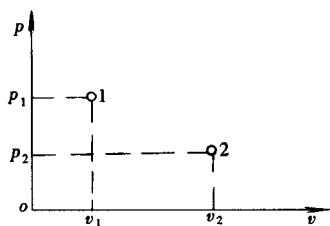


图 1-5 参数坐标图

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。

二、热力过程

任何热力系, 如果它原来已经处于平衡状态, 而又没有外界的作用, 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。我们把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

工质从一个平衡状态连续经历一系列平衡的中间状态过渡到另一个平衡状态，这样的过程称为准平衡过程。

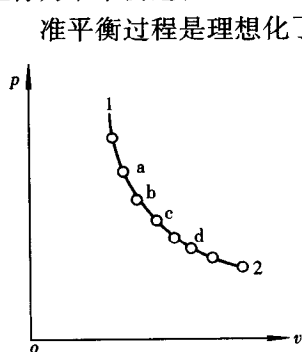


图 1-6 准平衡过程

准平衡过程是理想化了的实际过程，它要求外界对热力系的作用必须缓慢到足以使热力系内部的工质能及时恢复被不断破坏的平衡。实际过程虽然不完全符合这一条件，但有很多过程经过简化后都可以近似地当作准平衡过程来处理。因为气体分子热运动的平均速度可达每秒数百米以上，气体压力传播的速度也达每秒数百米，因而工程中的许多热力过程，虽然凭人们的主观标准看来似乎很迅速，但实际上按热力学的时间标尺来衡量，过程的变化还是比较慢的，并不会出现明显的偏离平衡态。

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 1-6 所示。

2. 可逆过程

准平衡过程是为了便于对系统内部工质的热力过程进行描述而提出的，它只着眼于工质内部的平衡，只要系统内各点工质的状态参数能随时趋于一致，就可以认为该过程是准平衡过程。但在分析系统与外界功量和热量交换的实际效果时，即涉及热力过程能量传递的计算时，还必须引出可逆过程的概念。

可逆过程的定义为：当工质完成某一热力过程后，若仍能沿原来所经历的状态变化途径逆行回复至原状态，并给外界不留下任何影响，则这一过程叫做可逆过程。否则，就称为不可逆过程。

可逆过程的进行必须满足以下条件：

(1) 过程必须是准平衡过程。因为只有准平衡过程才可能对其路径加以描述。

(2) 作机械运动时不存在摩擦。例如，图 1-7 所示，气缸内气体经历一准平衡的膨胀过程，因摩擦的存在，气体的膨胀功将有一部分消耗于摩擦变为了热；而在反向过程中，不仅不能把正向过程中由摩擦变成的热量再转换回来变成功，反而还要再消耗额外的机械功，也就是说外界必须提供更多的功，才能使工质回到初态，这样外界就发生了变化。这将导致过程不可逆。

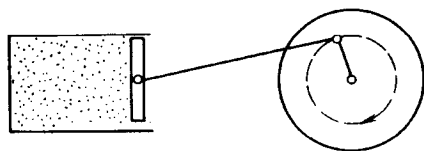


图 1-7 气缸内气体的膨胀过程

(3) 传热无温差。热量总是自发地从高温物体传到低温物体，若过程中工质与外界发生有温差的传热，则过程不可逆。例如当外界温度高于工质温度时，工质将从外界吸热，而当工质逆向返程时，工质所放出的热量便不可能传给温度比它高的外界。因此，有热交换存在的过程，传热有温差必将导致过程不可逆。

显然，任何实际的热力过程在作机械运动时不可避免地存在着摩擦，在传热时也必定存在着温差，因此，实际的热力过程都或多或少地存在着各种不可逆因素，如果使过程沿原路径逆向进行，并使工质回复到原状态，必将会给外界留下影响，这就是实际过程的不可