

高等学校教材
专科适用

热工学及流体力学

沈阳电力高等专科学校 高桂兰 主编



高 等 学 校 教 材

||||| 专 科 适 用 |||||

热 工 学 及 流 体 力 学

沈阳电力高等专科学校 高桂兰 主编

中国电力出版社

内 容 提 要

本书包括工程热力学、工程流体力学 泵与风机、传热学三部分内容。工程热力学部分主要讲述热力学基本概念及基本定律、工质的热物理性能、主要热力过程及热力循环；工程流体力学 泵与风机部分主要讲述流体静力学、流体动力学基础，理想及粘性流体的流动，泵与风机的分类、基本工作原理及性能；传热学部分主要讲述导热、对流换热、辐射换热的基本概念及换热量的计算，间壁式换热器的分析计算。

本书是电力高等专科学校“热工检测与控制技术”专业的技术基础课教材，也可作为其他非热动专业的教材及参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

热工学及流体力学/高桂兰主编. -北京: 中国电力出版社, 1997

高等学校教材·专科适用

ISBN 7-80125-318-3

I. 热… II. 高… III. ①热工学-高等学校-教材
②流体力学-高等学校-教材 N. TK122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 04597 号

中国电力出版社出版

(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)

三河市水利局印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

1997 年 10 月第一版 1997 年 10 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.75 印张 374 千字

印数 0001—1920 册 定价 15.50 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

本书是根据电力部高校 1993~1995 年专科教材编审出版调整计划编写的,是电力高等专科学校“热工检测与控制技术”专业的技术基础课教材。

本书包括工程热力学、工程流体力学 泵与风机、传热学三部分内容。

本书的内容本着国家教委对高等专科技基础课教学应以“必需够用”为度的原则,根据对本门课程多年的教学体会,对上述三部分内容进行了归纳和选择,力求条理清晰,循序渐进,概念准确,重点突出,简明易懂,以适应专科教学的特点及要求。

本书在注重基本概念、基本理论和基本技能训练的同时,力求理论联系实际。书中还适当地列举了一些例题,每章后还附有思考题和习题,便于学生对本课程内容的理解和掌握。

本书由沈阳电力高等专科学校高桂兰主编,太原电力高等专科学校张华参编。第一、三篇是高桂兰编写的,第二篇是张华编写的。全书由南京电力高等专科学校朱皑强教授主审,审者对教材进行了极认真细致的审核,并提出了很多宝贵意见,作者非常感谢。

由于编写者水平有限,书中难免有不妥之处,恳请读者批评指正。

作 者

1996 年 3 月

ABD 97/5

主要符号

A 面积	Re 雷诺数
a 热扩散率 (导热系数); 声速	r 半径; 汽化潜热; 单位面积热阻
b 宽度	S 熵
C_f 摩擦阻力系数	s 比熵; 距离
c 比热容; 流速	T 热力学温度
D 直径	t 摄氏温度; 时间
d 直径; 汽耗率; 含湿量	U 内能
E 辐射力	u 比内能; 圆周速度
E_e 有效辐射能	V 体积
e 单位质量工质具有的能量	v 流速; 比容
F 力; 角系数	W 功; 投射辐射能
f 单位面积作用力	w 比功
Gr 格拉晓夫数	x 干度
g 重力加速度	y 湿度
H 焓; 扬程	z 高度
h 比焓; 深度; 高度	α 抽汽率; 流量系数; 换热系数; 吸收率
h_f 沿程阻力损失	α_v 体积膨胀系数
h_j 局部阻力损失	β 压力比
K 热能利用系数; 传热系数; 滑移系数	δ 厚度
L 动量矩	ε 制冷系数; 黑度
l 长度	ε' 热泵系数
M 分子量; 摩尔质量	ξ 局部阻力系数
Ma 马赫数	η 效率
m 质量	κ 等熵指数; 压缩率
N 摩尔数	λ 沿程阻力系数; 热导率; 波长
Nu 努塞尔数	μ 动力粘度
P 功率	ν 运动粘度
Pr 普朗特数	ρ 密度; 反射率
p 压力	σ 表面张力
Q 热量	σ_b 黑体辐射常数
q 热流 [量] 密度	τ 切应力; 时间; 透射率
q_m 质量流量	φ 相对湿度
q_v 体积流量	ω 角速度
R 气体常数; 热阻	

目 录

前言

主要符号

绪论..... 1

第一篇 工程热力学

第一章 气体的性质及计算 4

第一节 工质及热力系 4

第二节 工质的状态参数 5

第三节 理想气体及其状态方程式 8

第四节 理想气体的比热容 11

第五节 理想混合气体 16

第二章 热力学基本定律..... 22

第一节 可逆过程及功 22

第二节 热力学第一定律 25

第三节 理想气体的基本热力过程 30

第四节 热力循环 38

第五节 热力学第二定律 40

第六节 卡诺循环 41

第七节 熵及孤立系统的熵增原理 43

第三章 水蒸气及湿空气..... 49

第一节 基本概念 49

第二节 水蒸气的定压生成过程 50

第三节 水蒸气热力性质表 53

第四节 水蒸气的焓熵图 57

第五节 水蒸气的基本热力过程 59

第六节 湿空气 61

第四章 气体的流动 67

第一节 稳定流动的基本方程式 67

第二节 气体在喷管及扩压管中的流动特性 69

第三节 气体流经喷管时的流速和流量 71

第四节 绝热节流 76

第五章 蒸汽动力循环..... 79

第一节 蒸汽动力的基本循环——朗肯循环 79

第二节 蒸汽参数对朗肯循环热效率的影响 82

第三节 再热循环	84
第四节 回热循环	86
第五节 热电联供循环	89

第二篇 工程流体力学 泵与风机

第六章 流体的物理性质与流体静力学	93
第一节 流体的概念	93
第二节 流体的物理性质	95
第三节 作用在流体上的力	100
第四节 流体静压力的特性	101
第五节 流体静力学基本方程式	102
第六节 液柱式测压计	105
第七节 旋转容器中液体的相对平衡	107
第七章 一元流体动力学基础	112
第一节 研究流体运动的两种方法	112
第二节 流动的分类	113
第三节 流体运动的几个基本概念	114
第四节 流体一元流动的连续性方程式	118
第五节 伯努利方程式	118
第六节 动量方程式	124
第八章 流动阻力和能量损失	129
第一节 粘性流体的两种流动状态	129
第二节 管内流动阻力和能量损失	131
第三节 圆管中的层流流动	132
第四节 圆管中的紊流流动	135
第五节 沿程阻力系数的实验研究	137
第六节 局部损失	140
第七节 流速和流量的测量	143
第八节 附面层的基本概念	147
第九节 曲面附面层的分离现象与卡门涡街	148
第十节 绕流阻力	150
第九章 泵与风机的基本原理	155
第一节 泵与风机的分类	155
第二节 离心式泵与风机的工作原理及性能参数	156
第三节 离心式泵与风机的基本方程式	158
第四节 泵与风机的能量损失及其效率	164
第五节 泵与风机的性能曲线	166
第六节 相似定律和比转数	168
第七节 离心泵的基本构造及类型	173
第八节 热力发电厂常用泵与风机	176

第三篇 传 热 学

第十章 稳态导热	185
第一节 导热基本定律	185
第二节 平壁的稳态导热	187
第三节 圆筒壁的稳态导热	190
第十一章 对流换热	195
第一节 对流换热概述	195
第二节 相似理论	197
第三节 流体无相态变化时的对流换热	202
第四节 流体有相态变化时的对流换热	206
第十二章 辐射换热	212
第一节 热辐射的概念	212
第二节 物体的辐射特性	213
第三节 黑体表面间的辐射换热	216
第四节 灰体表面间的辐射换热	219
第五节 气体辐射	226
第十三章 传热过程及换热器	229
第一节 传热过程	229
第二节 传热的强化与削弱	233
第三节 换热器及其计算	235
附录	241
附表 1 饱和水与饱和水蒸气的热力性质 (按温度排列)	241
附表 2 饱和水与饱和水蒸气的热力性质 (按压力排列)	243
附表 3 未饱和水与过热水蒸气的热力性质	245
附表 4 几种材料的密度 ρ 、热导率 λ 、比热容 c 和热扩散率 a	252
附表 5 饱和水的物理性质参数	253
附表 6 气体的物理性质参数	254
附表 7 几种材料在表面法线方向上的辐射黑度值	256
主要参考文献	257

绪 论

一、能源概述

人类社会的任何活动与生活过程都离不开能源，所谓能源是指能够为人类提供能量的物质和自然过程。煤、石油、天然气等即为含能体物质；气流、水流和电流等在其流动过程中可以释放能量，这些都是能源。凡是以现成的形式存在于自然界的能源，如煤、石油、天然气、水力、原子能、太阳能、风能、海洋能、地热能、生物能（柴草、沼气），等等，称为一次能源；凡需要利用其他能源间接获得的能源，如机械能、电能、汽油、氢气、酒精和火药等，称为二次能源。

能源不仅是人类生存和从事生产的重要基础和条件，而且每当新的能源被采用及能源的利用范围被扩大时，都伴随着生产技术的重大变革，甚至引起整个社会生产方式的革命。如果说火的利用是人类进化史上的一个重要标志，则电能的利用是人类征服自然的划时代的里程碑。

在所有的能源中，电能有着以下独特的优点：

(1) 电能可以大规模地集中生产，高效率地远距离输送，清洁、方便地分配并应用于各种用户；

(2) 电能可以通过各种电机及电器设备转变成其他形式的能量，如机械能、热能、光能、化学能、声能及电磁波能等；

(3) 电能及其信号便于远距离操作、自动控制和实现工业企业自动化，提高劳动生产率及改善劳动条件；

(4) 电能的来源广泛，许多其他形式的能源都能转变成电能。利用电能代替其他能源，是节约其他能源，提高能源利用率的重要措施。

因此，电能是一种现代化的二次能源，在国民经济和人民生活得到了极其广泛的应用。

根据所用一次能源的不同，电能生产主要有火力发电、水力发电、核能发电、地热能发电、风力发电、太阳能发电等方式。由于我国煤炭资源极其丰富，可探明可开采总储量居世界第一位，且火力发电厂造价较低，建设周期短，收益快，因此至今我国的电力大部分来自燃煤火力发电厂。

二、火力发电厂的生产过程

图 0-1 是一座小型燃煤火力发电厂的生产过程示意图。火力发电厂由锅炉、汽轮机、发电机三大主要设备及凝汽器、泵、风机、加热器等辅助设备和管道组成。

锅炉设备包括燃烧系统与汽水系统。在燃烧系统中，作为燃料的煤经给煤机送入磨煤机，煤在磨煤机中被研制成煤粉，经粗粉分离器及旋风分离器后获得合格的细粉，再与空气混合后被送入锅炉炉膛中燃烧。空气在进入炉膛之前先在空气预热器中预热，以减少锅

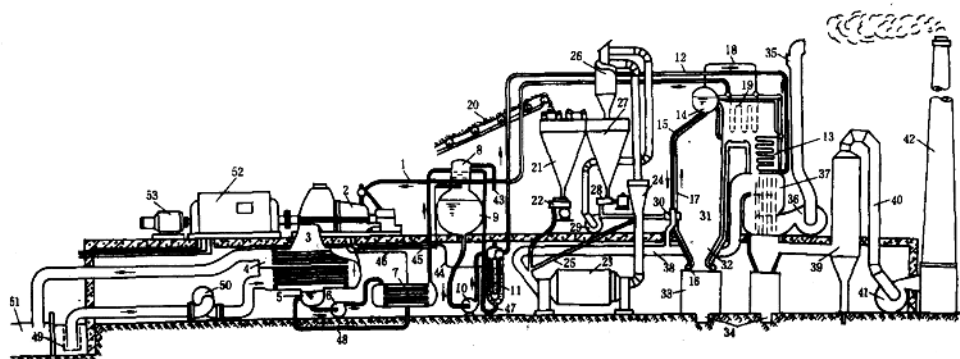


图 0-1 凝汽式火力发电厂生产过程示意

1—主蒸汽管道；2—汽轮机；3—乏汽口；4—凝汽器；5—热井；6—凝结水泵；7—低压加热器；8—除氧器；9—给水箱；10—给水泵；11—高压加热器；12—给水管；13—省煤器；14—汽包；15—下降管；16—下联箱；17—水冷壁；18—饱和蒸汽管；19—过热器；20—输煤皮带；21—原煤仓；22—圆盘给煤机；23—钢球磨煤机；24—粗粉分离器；25—回粉管；26—旋风分离器；27—煤粉仓；28—给粉机；29—排粉机；30—燃烧器；31—炉膛；32—除灰设备；33—冲渣沟；34—冲灰沟；35—送风机吸风口；36—送风机；37—空气预热器；38—热风道；39—除尘器；40—烟道；41—引风机；42—烟囱；43—化学补充水；44—汽轮机第一级抽汽；45—汽轮机第二级抽汽；46—汽轮机第三级抽汽；47—高压加热器疏水管；48—低压加热器疏水管；49—吸水滤网；50—循环水泵；51—江河或冷却水池；52—发电机；53—励磁机

炉排烟损失，提高空气温度，改善燃烧过程。

煤粉燃烧生成的高温烟气在引风机作用下，依次流过炉膛、过热器、省煤器及空气预热器，并将热量依次传给水、水蒸气、水及空气。降温后的烟气经除尘器后由烟囱排入大气。炉渣通常由灰渣泵排至灰场。

在锅炉汽水系统中，给水先在省煤器中预热，然后进入锅炉顶部的汽包。汽包中的水经炉膛外的下降管流入下联箱，再进入炉膛内四周的水冷壁管，在管内吸热、汽化，形成的汽水混合物上升再回到汽包中。在汽包中汽与水被分离，水在下降管、水冷壁及汽包内循环，不断汽化；分离出来的水蒸气进入过热器，进一步被加热成高温高压的过热蒸汽。这样在锅炉中完成将煤的化学能转变成水蒸气的热能的过程。

高温高压蒸汽沿主蒸汽管道进入汽轮机，在喷管内膨胀，形成高速流动的汽流，其热能变成动能，高速汽流冲击汽轮机转子上的叶片，推动汽轮机轴转动，蒸汽的动能从而转变成汽轮机轴的机械能。汽轮机通过联轴器带动发电机转动，于是机械能转变成电能。

汽轮机的乏汽排入凝汽器，在其中被冷却、凝结成水。凝结水由凝结水泵打入低压加热器预热，然后进入除氧器，除去水中的氧（以防止腐蚀管道等），再由给水泵加压后经高压加热器送入锅炉中的省煤器内，重新加热成为过热蒸汽。如此周而复始，不断地完成能量转换。

为使乏汽冷凝成水，需要用循环水泵连续地将冷却水（又称循环水）泵入凝汽器。从凝汽器出来的具有一定温升的冷却水沿排水管流到江河或流到冷却水塔（池）里，经冷却

后再被使用。

综上所述，火力发电厂的生产过程可概括为：通过工质（水和水蒸气）的循环，实现由热能向机械能、再向电能的转换。

三、本课程的任务

由火力发电厂的生产过程可以看出，火力发电厂的生产过程实际上是热能的利用过程。热能的利用有两种方式：一种是直接用于加热，例如锅炉、汽轮机中的各种换热过程；另一种是将热能转变成机械能或其他形式的能量，例如在汽轮机、发电机中发生的能量转换过程。所以，热能利用过程与能量传递和转换过程是密切相关的。另外，热能利用过程往往通过工质的流动来实现，上述问题正是本课程所要研究的内容。火力发电装置是一个庞大而复杂的整体，为使整套装置安全、经济运行，装置中的各种设备和系统必须始终保持协调配合；另外，由于电能无法贮存，发电量应随时适应外界负荷的变化，这就要求对发电机组各系统随时进行协调控制。为了实现正确控制，必须准确地掌握电力生产过程中各种物质的状态和变化情况，对表征生产状况的各种参数、特别是热力参数进行连续的测量和显示，为此也需要掌握有关的热力学基础知识。

本课程的任务就是讲述火力发电厂中热力部分的基础理论知识，包括工程热力学、传热学、工程流体力学及泵与风机三部分，分别研究热能与机械能的相互转换，热量的传递，流体的平衡和运动等规律，泵与风机的结构及简单原理，为进一步学习热力设备——汽轮机和锅炉的结构、原理及运行，解决工程中有关的问题奠定一定的理论基础。

电力是发展现代物质文明的重要条件，广大电力工作者肩负着历史赋予的光荣而艰巨的使命。为了对电力事业作出更大贡献，热工检测与控制技术专业的学生和工程技术人员应努力学好这门课程。

第一篇 工程热力学

工程热力学是从工程观点出发,研究热能与机械能之间的相互转换规律和方法,以及研究实现能量转换的工作物质(简称工质)的热力性质的一门科学。

工程热力学研究的主要内容包括:热力学基本概念;热能与机械能相互转换所依据的基本定律,即热力学第一定律和热力学第二定律;常用工质的热物理性质;实现热能与机械能相互转换的各种热力过程、热力循环的分析计算以及提高循环热效率的途径。

工程热力学所研究的是人们直接观察的宏观现象,它的研究方法是以宏观研究方法为主,即从直接观察的宏观现象出发来描述物质能量转换的客观规律。它将由大量分子组成的物质看成是连续均匀的整体,并用宏观物理量来描述物质所处的状态,然后依据由实验和观察总结出来的热力学第一定律和热力学第二定律,运用严密的逻辑推理,导出各宏观物理量间的关系和热能与机械能相互转换的普遍规律。因为宏观的研究方法所得出的结论是以大量的观察和实验为基础的,并为无数经验所证明,所以具有高度的可靠性和普遍性。

第一章 气体的性质及计算

第一节 工质及热力系

实现将热能转变成机械能的设备称为热机,如内燃机、蒸汽轮机、燃气轮机等。热机内热能向机械能的转换是通过工作物质的物理特性变化来实现的,这些工作物质称为工质,如从锅炉中吸收热量的水蒸气进入汽轮机,并在汽轮机中膨胀,推动叶轮转动而做功,将热能变成机械能,水蒸气即为工质。

在研究和分析热力学问题时,要根据研究内容选取一定范围内的物体作为研究的对象,这种研究对象称为热力学系统,简称为热力系。热力系周围的物质称为外界或环境,热力系与外界的分界称为界面或边界。

热力系与外界之间的相互作用是多种多样的,它们之间可以有物质的交换,也可以有各种形式能量的交换。

按照热力系与外界进行物质交换的情况,可将热力系分为闭口热力系和开口热力系。与外界没有物质交换的热力系称为闭口热力系,又称为控制质量,图 1-1 所取的热力系为闭口热力系;与外界有物质交换的热力系称为开口热力系,又称为控制体积,图 1-2 所取的热



图 1-1 闭口热力系

力系为开口热力系。

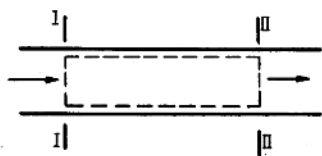


图 1-2 开口热力系

按照热力系与外界进行能量交换的情况，可将热力系分为简单热力系、绝热热力系和孤立热力系。与外界只交换热量和一种形式的功的热力系称为简单热力系；与外界无热量交换的热力系称为绝热热力系；与外界既无任何形式的能量交换、又无物质交换的热力系称为孤立热力系。

合理地选取热力系是正确分析热力学问题的前提。热力系的选取主要依研究目的和任务而定。热力系的边界可以是真实存在的，也可以是假想的。图 1-1 所取的热力系的边界是气缸和活塞的内壁；图 1-2 所取的热力系的 I-I 和 II-II 截面上的边界是假想的。

第二节 工质的状态参数

在热机内，热能与机械能的相互转换总是伴随着工质物理状况的变化，例如在火力发电厂中，水在锅炉内吸热变成高温高压蒸汽，蒸汽进入汽轮机膨胀做功后变成低温低压蒸汽，从汽轮机排出的蒸汽在凝汽器中凝结成水，再由给水泵送入锅炉。这样，通过工质（水和水蒸气）的物理状况周而复始的变化实现热能向机械能的转换。将工质在某一瞬间所呈现的宏观物理状况称为热力学状态，简称状态。描述工质所处状态的宏观物理量称为状态参数，对应工质的每一个状态的各个状态参数都有确定的数值，且与到达这一状态所经历的途径无关。

工程热力系中常用的状态参数有温度、压力、比容、内能、焓和熵等六个，其中前三个状态参数可以直接或间接地测量，称为基本状态参数，其他的状态参数可以根据基本状态参数通过计算间接得出。下面分别介绍这些状态参数。

一、温度

温度表示物体的冷热程度。对于气体，温度实际上是大量分子平均移动动能的度量。气体平均移动动能大，温度就高，反之温度就低。

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，又称绝对温标，符号为 T ，单位是开尔文，简称开，符号为 K。热力学温标规定水的三相点（水的固、液、汽三相共存的状态）温度为基准点，并规定其温度为 273.16K。工程上，与热力学温标并用的还有摄氏温标，符号为 t ，单位是摄氏度，符号为 $^{\circ}\text{C}$ 。摄氏温度的定义为

$$t = T - 273.15^{\circ}\text{C} \quad (1-1)$$

显然，摄氏温标与热力学温标的温度间隔大小是一样的，只是所取零点不同，摄氏温标的 0°C 是热力学温标的 273.15K。

二、压力

压力是指物体单位表面积上所承受的垂直作用力，用符号 p 表示。如果面积为 A

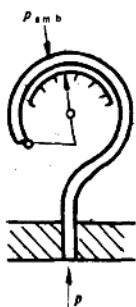


图 1-3 弹簧管压力计

p_{amb} —大气压力;
 p —绝对压力

(m^2) 的物体上作用的垂直力为 F (N), 则压力为

$$p = \frac{F}{A} \text{ N/m}^2 \quad (1-2)$$

气体的压力是大量气体分子在紊乱无序的热运动中对容器壁面频繁撞击的宏观效果。在工程上, 气体的压力是用压力计测量的 (一般采用弹簧管压力计, 图 1-3)。当压力较低时, 采用 U 形管压力计 (图 1-4)。

由于压力计本身总是处在某种环境 (通常是大气环境) 中, 压力计测得的压力不是气体的绝对压力, 而是气体的绝对压力与周围环境 (大气) 压力之差。气体所具有的压力称为绝对压力, 用 p 表示; 周围大气压力用 p_{amb} 表示。当 $p > p_{amb}$ 时, 压力计读数表示气体的绝对压力超出大气压力的值, 称为正表压力, 简称表压力, 用 p_e 表示, 如图 1-4 (a) 所示, 这时有

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

当 $p < p_{amb}$ 时, 压力计读数表示气体的绝对压力低于周围大气压力的值, 称为负表压力, 简称真空, 用 p_v 表示, 如图 1-4 (b) 所示, 这时有

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

绝对压力 p 、表压力 p_e 、真空 p_v 和大气 (环境) 压力 p_{amb} 之间的关系, 如图 1-5 所示。

由上述讨论可见, 气体的表压力 p_e 或真空 p_v 不仅与绝对压力有关, 而且还与大气压力 p_{amb} 有关。大气压力随地球的纬度、距地面的高度及气候条件不同而不同, 其值是用大气压力计测量的。显然, 即使绝对压力不变, 但大气压力变化, 气体的表压力也会变化, 因此表压力或真空不能作为状态参数, 只有绝对压力才能作为状态参数。

根据压力的定义式 (1-2) 可知, 压力的单位是 N/m^2 , 称为帕斯卡, 简称帕, 用 Pa 表示, $1Pa = 1N/m^2$ 。由于 Pa 单位较小, 工程上常用 kPa 和 MPa 作为压力单位, $1kPa = 10^3Pa$, $1MPa = 10^6Pa$ 。

工程上有时也用液柱高度 h 来表示压力, 这时的换算关系为

$$p = \rho gh \text{ Pa} \quad (1-5)$$

式中 ρ ——液体的密度, kg/m^3 ;
 g ——重力加速度, m/s^2 ;
 h ——液柱高度, m。

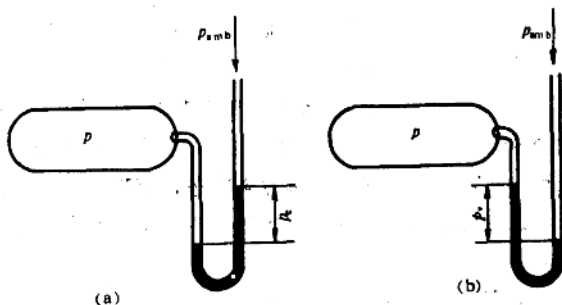


图 1-4 U 形管压力计

(a) 测量正表压力; (b) 测量负表压力 (真空)

p_e —正表压力; p_v —负表压力 (真空)

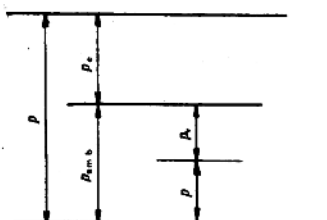


图 1-5 表压力 p_v 、真空 p_v 、绝对压力 p 及大气压力 p_{amb} 间的关系

如果用水柱或水银柱高度表示压力，并分别取 4°C 及 0°C 时的密度，则有

$$1\text{mmH}_2\text{O} = 10^3 \times 9.806 \times 10^{-3} = 9.806 \text{ Pa}$$

$$1\text{mmHg} = 13595 \times 9.806 \times 10^{-3} = 133.3 \text{ Pa}$$

物理学中，将纬度 45° 海平面上常年气压的平均值定义为标准大气压 (atm)， $1\text{atm} = 760\text{mmHg} = 101325\text{Pa}$ 。同时又规定压力为 1atm 、温度为 0°C 时的状态为标准状态。

例 1-1 用 U 形管压力计测量管道内气体的压力，如图 1-6 所示。已读得 $h=60\text{mm}$ (汞柱，汞的密度 ρ 为 13.6g/cm^3 ，重力加速度 $g=9.8\text{m/s}^2$)，当地大气压力计读数为 100kPa ，求管道内气体的压力。

解 如果忽略气体自身质量引起的压力，则 A、D 两点压力相等，即

$$\begin{aligned} p_D &= p_A = p_{amb} + \rho gh \\ &= 100 \times 10^3 + 133.3 \times 60 \\ &= 107998(\text{Pa}) = 107.998(\text{kPa}) \end{aligned}$$

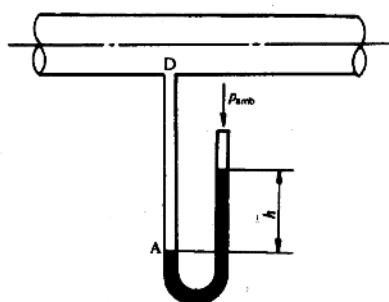


图 1-6 例 1-1

例 1-2 利用 U 形管压力计测得锅炉炉膛内的真空，读数为 50mm (水柱)，锅炉房内大气压力计读数为 101kPa ，求锅炉炉膛内的压力。

$$\begin{aligned} \text{解 } p &= p_{amb} - p_v = p_{amb} - \rho gh = 101 \times 10^3 - 9.806 \times 50 \\ &= 101490(\text{Pa}) = 101.490(\text{kPa}) \end{aligned}$$

三、比容和密度

单位质量的物质所占有的容积称为比容，用 v 表示。其单位为 m^3/kg 。若 $m\text{kg}$ 物质所占有的容积为 $V\text{m}^3$ ，则根据比容的定义有

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

单位容积内所含物质的质量称为密度，用 ρ 表示。其单位为 kg/m^3 。若 $m\text{kg}$ 物质所占有的体积为 $V\text{m}^3$ ，则有

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v} \quad \text{kg}/\text{m}^3 \quad (1-7)$$

不难看出，比容和密度互为倒数，即 $\rho v = 1$ 。因此比容和密度不是相互独立的状态参数，使用时可依据需要任选其一。

四、内能

内能是热力系中全部微观粒子所具有能量的总和。对于一个宏观静止且没有外力场作用的热力系，内能就是热力系本身具有的总能量。在工程热力学研究的范围内，内能包括

分子热运动的动能和由于分子间相互作用而形成的位能,前者称为内动能,是温度的函数;后者称为内位能,是比容的函数。内能用 U 表示,单位是 J。1kg 工质的内能称为比热能,用 u 表示,单位是 J/kg,即

$$U = mu \quad \text{J} \quad (1-8)$$

式中 m ——工质的质量, kg。

五、焓

在工程热力学的分析计算中,经常会遇到 $U + pV$ 这样的表达式,为了便于分析计算,定义它为焓,用 H 表示,即

$$H = U + pV \quad \text{J} \quad (1-9)$$

1kg 工质所具有的焓称为比焓,用 h 表示,即

$$h = \frac{H}{m} = u + pv \quad (1-10)$$

焓的单位与内能的单位相同,是 J,比焓的单位是 J/kg。从焓的定义式可以看出,焓是一个状态参数。由于在任何状态下 p 、 v 和 u 均有确定的值,因此焓也只决定于工质所处的状态,而与工质到达这一状态所经历的路径无关。

六、熵

熵是一个导出的状态参数,用 S 表示,单位质量工质所具有的熵称为比熵,用 s 表示。当热力系发生一个微小可逆过程(见第二章第一节)时,热力系内工质的温度为 T ,热力系与外界交换的热量为 δQ ,则在这一微小可逆过程中工质的熵变为 dS ,有

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \quad \text{J/K} \quad (1-11)$$

工质的比熵为

$$dS = \frac{dS}{m} = \frac{\delta q}{T} \quad \text{J/(kg} \cdot \text{K)} \quad (1-12)$$

式中 δq ——在微小可逆过程中 1kg 工质与外界交换的热量。

如果工质经可逆过程由状态 1 变化到状态 2,则工质的熵变为

$$\Delta S = s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{\delta q}{T} \quad \text{J/(kg} \cdot \text{K)} \quad (1-13)$$

熵的单位是 J/K,比熵的单位是 J/(kg · K)。

上述介绍的比内能有时也称为内能;比焓也称为焓;比熵也称为熵。

第三节 理想气体及其状态方程式

一、实际气体与理想气体

在热能动力设备中多采用气体作工质。气体与液体、固体一样,是由大量分子组成的。

但气体分子间的平均距离要比液体和固体的大得多，因此，气体分子本身的体积远较气体所占有的总体积要小，气体分子间的作用力也较液体和固体分子间的作用力小得多。但气体分子仍具有一定的体积，分子间也存在作用力，当工程计算中需要考虑气体分子自身体积及分子间相互作用力的影响时，则称此气体为实际气体。

实际气体的性质和其参数间的关系非常复杂，这给分析计算带来很大困难。为了使问题简化，提出了理想气体的概念。

理想气体是一种实际上不存在的假想气体。这种气体的分子是具有弹性的、不占有体积的质点，且分子之间无相互作用力。经过这样的简化，计算是否符合实际情况，取决于气体所处的状态以及计算所要求的精确度。如果实际气体的温度高、压力低、比容大，则分子间的距离就很大，分子间的相互作用力很小，相对气体分子运动所占据的空间、分子自身的体积可忽略不计。在这种情况下，将实际气体作为理想气体处理，不致引起很大的误差。例如，在压力不是很高、温度不是很低的情况下，工程中常遇到的许多气体（氧气、氮气、氢气、一氧化碳气体、二氧化碳气体以及烟气、燃气等），在工程应用所要求的精确度范围内，均可当作理想气体来对待。但对于锅炉中产生的水蒸气，蒸汽制冷中用的氨气、氟里昂等，由于离液态点很近，且有时是处于汽、液两相共存的湿蒸汽状态，它们不满足理想气体的假想，所以不能作为理想气体来处理。

二、理想气体状态方程式

热力系所处的状态在没有外界影响的情况下，最终总要趋于一致，且保持不变，这样的状态称之为平衡状态。对于由气体组成的简单热力系，如果忽略气体自身的重力，当热力系处于平衡状态时，热力系各部分的性质都相同，即具有相同的状态参数。实验表明，已知两个相互独立的状态参数，就可以确定一个平衡状态。因此，对于由气体组成的热力系，三个基本状态参数（压力 p 、温度 T 、比容 v ）间存在一定的关系，其一般表达式为

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

上述气体的 p 、 T 、 v 之间的关系式为气体状态方程式。不同的气体具有不同的状态方程式。理想气体的状态方程式为

$$\frac{pv}{T} = \text{常数}$$

用 R 表示这个常数，则有

$$pv = RT \quad (1-14)$$

式中 p ——气体的绝对压力，Pa；

v ——气体的比容， m^3/kg ；

T ——气体的热力学温度，K；

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

理想气体状态方程式又称为克拉贝龙方程式。式中的 R 是气体常数，即对于同一种气体，在状态变化时，其值保持不变。但不同气体的 R 值不同。