

中等专业学校教材

热工学理论基础

哈尔滨电力学校主编

水利电力出版社

内 容 提 要

全书分两篇。第一篇为工程热力学，叙述了工程热力学的基本概念、基本定理、热力过程、热力循环，着重叙述了水蒸汽性质、气体和蒸汽流动以及蒸汽动力循环，对湿空气也作了介绍。第二篇为传热学，叙述了导热、对流换热和热辐射的基本过程及基本定律；分析了强化传热的方式；并介绍了换热器的工作原理及传热计算。最后，对化学热力学作了简单介绍。

本书可作为中等专业学校热能动力类专业三、四年制的教材，也可供从事热动专业的技术人员参考。

中等专业学校教材

热 工 学 理 论 基 础

哈尔滨电力学校主编

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 19.5印张 439千字 1插页

1979年7月第一版

1983年5月新二版 1987年10月北京第三次印刷

印数 41181—107730 册

ISBN 7 120-00120 5/TK·21

15143·5105 定价 2.95 元

前 言

本教材是根据水电部1978~1981年教材编审出版规划组织编写的。

全书分工程热力学和传热学两篇,包括化学热力学在内共十六章。编写中力求吸取多年来热工教学中的正反经验,加强了对基本概念和原理的讲述,注意联系专业实际。通过本课程的学习为进一步学好专业课打下基础。

为便于复习巩固及培养学生分析和解决问题的能力,书中每章末都附有小结、复习思考题、例题和习题以供参考。其中部分复习思考题可供课堂讨论用。

书中小字排印部分,是三年制大纲之外的材料。这部分材料可作为四年制的教学内容或供自学参考之用。书后附录一化学热力学概述部分,讲课时应安排在第九章后讲授。

参加本书编写的有:哈尔滨电力学校何富智、艾静侯、孔昭昇;山东电力学校于春香;湖北电力学校程上婉;湖南电力学校何鼎铭等六位同志。由孔昭昇同志主编。

全书由北京电力学校刘美德、娄重义同志主审,西安电力学校谷应鸣同志、重庆电力学校龙廷云同志也参加了审稿。他们对书稿提出了许多宝贵的意见和建议。

在编写过程中,曾得到哈尔滨工业大学热工教研室同志们热情帮助和支持,黑龙江省电力设计院和山东电力学校对书稿的描图工作给以大力协助,在此一并致谢。

对于书中存在的缺点和错误,恳切希望读者批评指正。

编 者

1978年12月



B 746608

工程热力学主要符号表

p	压力, 公斤/厘米 ² 。
B	大气压, 毫米汞柱。
T	绝对温度, K。
t	摄氏温度, °C。
V	容积, 米 ³ 。
v	比容, 米 ³ /公斤。
G	重量, 公斤。
γ	重度, 公斤/米 ³ 。
R	气体常数, 公斤·米/公斤·K。
μ	分子量。
u	1 公斤气体的内能, 千卡/公斤。
U	G 公斤气体的总内能, 千卡。
s	1 公斤气体的熵, 千卡/公斤·K。
S	G 公斤气体的熵, 千卡/K。
i	1 公斤气体的焓, 千卡/公斤。
I	G 公斤气体的焓, 千卡。
l	1 公斤气体做的功, 公斤·米/公斤。
L	G 公斤气体做的功, 公斤·米。
q	1 公斤气体的热量, 千卡/公斤。
Q	G 公斤气体的热量, 千卡。
A	功热当量, 千卡/公斤·米。
c	比热, 千卡/公斤·°C; 流速, 米/秒。
r	汽化潜热, 千卡/公斤; 混合气体的容积成分。
g	混合气体的重量成分; 重力加速度, 米/秒 ² 。
m	质量; 莫尔数。
x	干度。
η	热效率。
f	截面积, 米 ² 。
φ	湿空气的相对湿度。
d	湿空气的含湿量。
H	高度, 米。
k	绝热指数。
F	面积, 米 ² ; 自由能。
Z	自由焓; 位能。

传热学主要符号表

λ	导热系数, 千卡/米·时·°C; 波长, 微米。
δ	厚度, 米或毫米。
t	摄氏温度, °C。
Δt	温差, °C。
T	绝对温度, K。
α	导温系数, 米 ² /时; 物体的黑度。
Q	传热量, 千卡/时。
q	热流密度, 千卡/米 ² ·时。
q_l	每米长管道上所传递的热量, 千卡/米·时。
α	放热系数, 千卡/米 ² ·时·°C。
d	直径, 米或毫米。
F	表面积, 米 ² 。
f	横截面积, 米 ² 。
G	液体的重量流量, 公斤/时或吨/时。
k	传热系数, 千卡/米 ² ·时·°C; 气体辐射减弱系数, 1/米·绝对大气压。
l	长度, 米。
r	半径, 米或毫米; 汽化潜热, 千卡/公斤。
E	物体的辐射力, 千卡/米 ² ·时。
A	物体对辐射能的吸收率。
D	辐射能在物体中的穿透率; 蒸汽流量, 公斤/时或吨/时。
R	热阻; 物体对辐射能的反射率。
S	节距, 毫米。有效辐射层厚度, 米。
σ_0	黑体辐射常数, 千卡/米 ² ·时·K ⁴ 。
w	流速, 米/秒。
γ	比重, 公斤/米 ³ 。
ϵ	污垢热阻, 米 ² ·时·°C/千卡。
μ	动力粘性系数, 公斤·秒/米 ² ; 电磁波波长, 微米。
ν	运动粘性系数, 米 ² /秒。
τ	在换热器中同一流体的温度变化, °C。
φ	辐射角系数。
ψ	复杂流动形式求平均温差的修正系数。
ϕ	管子直径。
c	比热, 千卡/公斤·°C。
C	物体辐射系数, 千卡/米 ² ·时·K ⁴ ; 比例系数; 修正系数; 积分常数。
W	水当量, 千卡/时·°C

目 录

前 言

工程热力学主要符号表

传热学主要符号表

绪论..... 1

第一篇 工程热力学

第一章 工质及状态参数	4
第一节 热源、热机、工质及热力系	4
第二节 工质的状态参数	5
第三节 平衡状态与参数坐标图	10
第四节 理想气体状态方程式	11
第二章 气体的比热	18
第一节 比热的定义及分类	18
第二节 影响比热数值的因素	20
第三节 利用比热计算热量的方法	22
第三章 热力学第一定律	29
第一节 热力学第一定律的实质	29
第二节 内能	31
第三节 功和 $p-v$ 图	32
第四节 热量和 $T-s$ (温-熵) 图	34
第五节 热力学第一定律的数学表达式	36
第四章 理想气体的热力过程	40
第一节 定容过程——理想气体内能变化的计算	41
第二节 定压过程——气体的焓	44
第三节 定温过程	48
第四节 绝热过程	49
第五节 多变过程	53
第五章 热力学第二定律	60
第一节 循环	60
第二节 热力学第二定律的内容	63
第三节 卡诺循环	65
第四节 系统的熵增与做功能力的损失	67
第六章 水蒸汽	72
第一节 水蒸汽的基本概念	73

第二节	等压下水蒸汽的形成过程	74
第三节	水蒸汽表及焓熵图	79
第四节	水蒸汽的热力过程	84
第五节	高参数水蒸汽的某些性质	86
第七章	气体和蒸汽的流动	92
第一节	基本概念	92
第二节	稳定流动的基本方程式	93
第三节	气体通过喷管的流动特性	96
第四节	喷管中流速和流量的计算	99
第五节	临界压力比、临界流速和最大流量	109
第六节	喷管的选择和计算	103
第七节	绝热节流及其应用	106
第八章	蒸汽动力装置循环	113
第一节	水蒸汽的卡诺循环	113
第二节	蒸汽动力装置的基本循环——朗肯循环	114
第三节	中间再热循环	119
第四节	给水回热循环	122
第五节	热电合供循环	125
第六节	蒸汽——燃气联合循环	127
第九章	混合气体及湿空气	133
第一节	混合气体的一般概念	133
第二节	混合气体的组成	135
第三节	混合气体的平均分子量及气体常数	137
第四节	分压力的计算	139
第五节	混合气体的比热	140
第六节	湿空气	141

第二篇 传 热 学

第十章	导热	151
第一节	基本概念	151
第二节	导热的基本定律	153
第三节	导热系数	154
第四节	平壁的稳定导热	157
第五节	圆筒壁的导热	160
第六节	不稳定导热	164
第十一章	对流换热	177
第一节	对流换热的基本概念	177
第二节	相似理论简介	180
第三节	自由运动换热	186
第四节	受迫运动换热	187

第十二章	流体相态变化时的对流换热	195
第一节	大容器中水沸腾时的换热	195
第二节	管内沸腾	198
第三节	蒸汽凝结时的换热	201
第四节	热管简介	204
第十三章	热辐射	209
第一节	热辐射的基本概念	209
第二节	热辐射的基本定律	210
第三节	物体间的辐射换热	213
第四节	辐射的增强与削弱	216
第五节	气体与火焰的辐射	218
第六节	炉内换热的概念	221
第十四章	传热	225
第一节	传热过程	225
第二节	传热的强化	234
第三节	传热的削弱——热绝缘	239
第十五章	换热器	244
第一节	换热器的基本概念	244
第二节	表面式换热器的计算	246
第三节	锅炉各部分受热面的传热特点	256
附录一	化学热力学概述	264
第一节	基本概念	264
第二节	热力学第一定律应用于化学反应过程	265
第三节	热力学第二定律应用于化学反应过程	269
附录二		274
附表一	定压下气体的平均重量比热 c_p	274
附表二	定压下气体的平均容积比热 c_v	274
附表三	定容下气体的平均重量比热 c_v	275
附表四	定容下气体的平均容积比热 c_v	275
附表五	饱和水和饱和蒸汽性质表(按温度排列)	276
附表六	饱和水和饱和蒸汽性质表(按压力排列)	278
附表七	水和过热蒸汽性质表	282
附表八	常用材料的导热系数	295
附表九	干空气在压力等于760毫米汞柱时的物性参数	297
附表十	烟气在压力等于760毫米汞柱时的物性参数	297
附表十一	水在一个大气压或饱和线上的物性参数	298
附表十二	水蒸汽在饱和线上的物性参数	299
附表十三	计算蒸汽凝结放热系数的一些辅助量计算公式	300
附表十四	常用材料的黑度值	300
附表十五	国际单位制与工程单位制的主要单位及其换算关系	301
附图一	湿空气的 I - d 图	302
附图二	水蒸汽的 i - s 图	

绪 论

一、热工学理论基础的内容

热工学理论基础包括工程热力学和传热学这两门基础科学。

热力学是研究热能和其它各种能量（如机械能、电能、化学能等等）之间的转换关系的科学。其中，专门研究热能和机械能之间转换规律及方法的科学称为工程热力学。

工程热力学是以热力学的两个基本定律为基础的。因为热能转变为机械能是通过工质的状态变化过程和热力循环而完成的，所以对过程和循环的分析是工程热力学的主要内容。在对火力发电厂的过程和热力循环进行分析时，必须用到其工作物质水和蒸汽的性质，故对于蒸汽性质及其循环的讨论也是其中一个重要内容。

传热学的研究对象是热的传递过程，它的内容是以导热、对流换热及热辐射这三种基本换热方式为基础的。实际的热量传递过程是几种基本换热方式同时起作用的传热过程，故对传热过程的分析是传热学的重要内容。

各种热力设备的设计、计算及改进等都要用到工程热力学和传热学的理论及计算方法。我们学习的主要目的是为了将其理论应用于分析和解决生产实际问题。如使得电厂中的能量转换和热量传递在最有利的情况下进行，从而提高电厂的热经济性。

热工学理论基础研究的是热功互换和热量传递等宏观效果，所以主要应用宏观的研究方法。但有时也引用分子运动论的观点来说明问题。为了方便，有时还采用抽象、理想化及简化的研究方法。如将实际的燃烧室概括为抽象的热源，把烟气、燃气等实际气体看作理想气体。这样理想化后，问题变得简单，便于计算，然后再根据实际情况加以修正。

二、热能的利用及其在国民经济中的作用

热能在工农业生产及日常生活中的应用极为广泛，故热力工程在国民经济中具有重要的地位。

热能的利用可有两种方式。一种是直接把热能作为加热之用，例如日常生活中的取暖及许多工业中的加热、干燥等生产过程。这种加热过程广泛应用于造纸、纺织及化工等工业中。

利用热能的另一种方式是：将热能在热机中转变成为机械能以带动工作机械（如蒸汽机、汽动泵等），或者带动发电机发电而转变成为电能。而电能则几乎是国民经济中所有技术生产过程的原动力。

火力发电厂就是将燃料的化学能最后转变为电能的工厂。这种火力发电厂投资少，见效快，加上我国燃料资源极为丰富，因此，在目前和今后相当长一个时期内火力发电厂在国民经济中的动力生产中仍占主要地位。

随着工农业生产的发展，整个国民经济对产生动力的热能的需求量是很大的。因而节约和合理使用现有能源以及开发新能源是当前世界各国研究的一个重要课题。

实践证明，建设热电厂以联合供电、供热，是目前行之有效的可以大量节约能源的好办法。此外，采用大容量发电机组，不但能降低电厂的单位容量造价，加快建设速度，还可以大大节约燃料消耗。目前世界上最大的火力发电机组容量已达到一百三十万千瓦。

液体和气体燃料相对于固体燃料来说是比较贫乏的，但固体燃料，特别是劣质固体燃料的运输和燃烧问题比较复杂，对环境污染比较严重。为此，一些国家正在进行固体燃料的液化和气化的研究试验工作，但这种转换的费用还太大。除火力发电外，原子能发电在其它新能源大量发展利用以前，将能维持足够长时期的能源供应。

为了解决燃料的不足及日益严重的工业污染问题，一些国家正开展探索新能源的研究。其中地热能和太阳能是研究和应用较多的两种。它们产生的热能，不需要燃料，因而成本低廉，也不存在污染大气的问题。地热发电在技术上较成熟，在有地热资源的地方将会较快地得到发展。而太阳能发电，目前还造价很高，近期尚难实现。所以将太阳能用于采暖及生活用热较为普遍，这也是节约燃料的主要措施之一。

可利用的新能源还有风力发电、波浪发电、海洋温差热能发电、氢能的利用等等。但它们大多受各种条件的限制，目前未能广泛用于动力范围。

三、火力发电厂生产过程概述

在本书的内容中，经常要提到火力发电厂生产中的一些热力过程及电厂中的一些设备名称。为此，我们简要地介绍一下火力发电厂的生产过程。

图0-1所示为自然循环锅炉和汽轮发电机组所组成的火力发电厂生产过程的简单示意图。它主要由锅炉、汽轮机、发电机、凝汽器、水泵等一整套设备所组成。

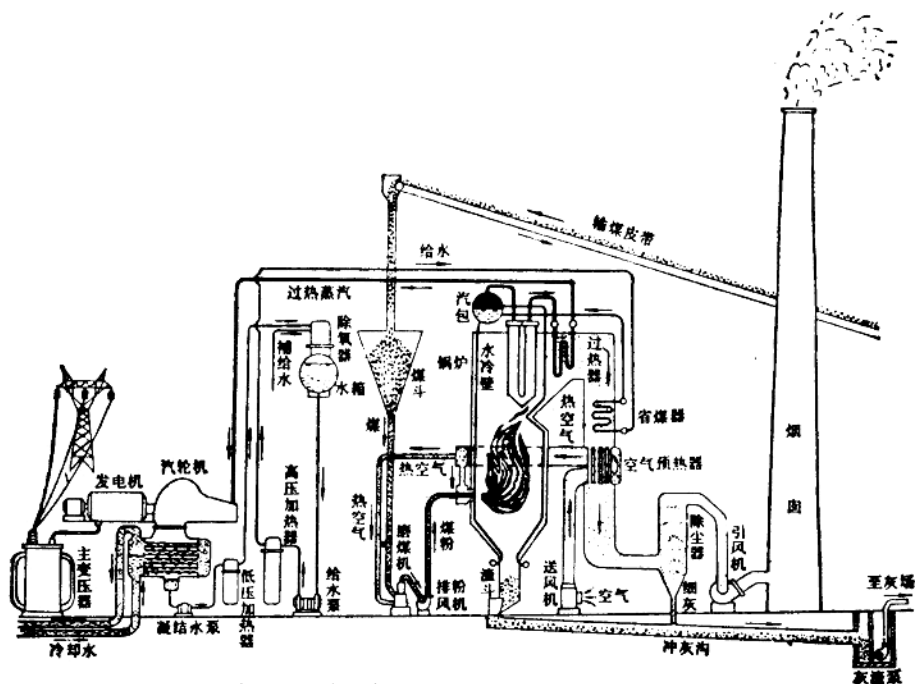


图 0-1 火力发电厂生产过程和主要设备示意图

在锅炉中，燃料（煤或油）燃烧使化学能转变为热能，经过传热变成水蒸汽的热能。在汽轮机中，高温高压的蒸汽冲动汽轮机转子高速旋转，从而将蒸汽的热能转变为汽机轴的机械能。汽机的轴与发电机的转子是连接在一起的，所以汽轮机轴的转动也带动发电机转子同时转动而使发电机发电，这样就把热能最终转变成了电能。

参看图0-1可知，水在锅炉中被加热成蒸汽进入汽包，由汽包再将蒸汽引入过热器加热成过热蒸汽，然后通过主蒸汽管道将过热蒸汽送入汽轮机中。在汽轮机中膨胀做功后排出的蒸汽称为乏汽，乏汽由汽机尾部排汽口排入凝汽器中被循环水冷却成凝结水，此凝结水由凝结水泵送入低压加热器，加热升温后送入除氧器中加热除氧以防止炉管腐蚀。

除氧后的凝结水，经由给水泵升压后送入高压加热器进一步加热升温（给水泵以后的凝结水称为给水），然后送入锅炉中重新再加热。如此周而复始地循环工作，不断产生蒸汽，汽轮机不断做功。这种系统通常称为汽水系统。

锅炉方面还有一个主要系统是燃烧系统，它包括煤粉制备（燃油炉无此系统）、燃烧设备、除灰及风烟系统部分。它们的作用是将煤制成适合燃烧的煤粉送入炉膛中进行燃烧，使燃料的化学能转变成热能。

综上所述，锅炉是数个功用不同的换热器的组合，其设计、运行显然都离不开传热学理论。在汽轮机中通过蒸汽的膨胀做功把蒸汽的热能变为轴的机械能，通常简单地说成热能转变为功。这就是工程热力学所研究的主要内容。由此可见，热工学理论基础在专业学习中的地位是重要的。

第一篇 工程热力学

第一章 工质及状态参数

第一节 热源、热机、工质及热力系

在热力工程中，能不断供给热能的物体称为**高温热源**，或简称**热源**。

热力工程所利用的热源，主要是燃料所蕴藏的化学能。燃料在燃烧设备中进行燃烧，产生热能，并在适当的热力设备中将热能转变为机械能。这种将热能转变为机械能的热力设备称为**热动力发动机**或简称为**热机**。如汽轮机、内燃机、蒸汽机、燃气轮机等都是常见的热机。

在热机里要使热能不断转变为机械能，一定要借助于一种工作物质。例如汽轮机或蒸汽机的工作需要蒸汽，内燃机的工作需要燃气，这种工作物质经过吸热膨胀而完成做功。我们把这种实现热能和机械能相互转化的媒介物质，叫做**工质**。

为了获得更多的功，就要求工质应有良好的膨胀性。同时，为了要求工质连续不断地流过热力设备而不断做功，还要求工质有良好的流动性。显然，在物质三态中，气态物质是最适宜作为工质的，这是因为气态物质受热膨胀的能力最大，流动性也最好。除此以外，在热力工程中还要求工质具有价廉、易得、热力性能稳定、对设备无腐蚀作用等性质。由于水蒸汽具有价廉、易得、不易腐蚀、无毒等优点，所以目前火力发电厂主要以水蒸汽为工质。

在热机中，工质将其所携带的热能的一部分转变成为机械能，而将余下的热能仍由工质携带离开热机而排入大气或冷却水。这种接受工质排出剩余热能的物体叫做**低温热源**或简称**冷源**。如电厂中汽机的凝汽器就是一个冷源。热能动力装置的工作过程，概括地说来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化为机械能而做功，并把余下的一部分传给冷源的过程。

为分析问题方便起见，和力学中取分离体一样，热力学中常把分析的对象从周围的物体中分割出来，研究它通过分界面和周围物体之间的能量交换。这种被人为地分割出来，以作为热力学分析的对象叫做**热力系统**或简称**热力系**。它周围的一切物体统称为**外界**。热力系和外界的分界面可以是实际存在的，也可以是假想的。

按照有无物质通过分界面，热力系统可分成**开口系统**和**闭口系统**。

热力系与外界之间可能有能量传递，也可能没有能量传递。我们在本课程中只讨论有关热能与机械能的转换问题，所以能量的传递可看作有两种方式：传热和做功。

和外界没有热能传递的热力系统，称为**绝热系统**。

和外界没有任何形式的能量（主要指热量和功）传递的系统称为**孤立系统**。

第二节 工质的状态参数

工质在热动力设备中,通过吸热、膨胀等过程将热能转变为机械能。在这些过程中,工质的物理特性随时都在起变化,或者说它的状态随时在起变化。所谓状态就是指工质在某一时刻的物理特性。

凡能够表示工质状态特性的物理量,就叫做状态参数。例如:温度、压力等。知道了必要的状态参数,就可确定工质的状态。而知道了工质的状态,也就确定了它的一切状态参数。在工程热力学中,我们主要学习六个状态参数:比容 v 、温度 T 、压力 p 、内能 u 、焓 i 、熵 s 。由于前面三个参数是可以直接测得的,且它们是最早被确定的具有简单物理意义的三个参数,因而称为基本状态参数。下面先介绍三个基本状态参数——比容 v 、温度 T 及压力 p 。其它三个状态参数——内能 u 、焓 i 、熵 s 将在后面的章节中陆续介绍。

一、比容 v

单位重量物质所占有的容积称为物质的比容。其单位是米³/公斤。如 G 公斤●物质占有 V 米³的容积,则,

$$v = \frac{\text{容积}}{\text{重量}} = \frac{V}{G} \quad \text{米}^3/\text{公斤} \quad (1-1)$$

反之,单位容积的物质所具有的重量,称为重度,用 γ 表示。即,

$$\gamma = \frac{\text{重量}}{\text{容积}} = \frac{G}{V} \quad \text{公斤}/\text{米}^3 \quad (1-2)$$

显然, v 与 γ 是互成倒数的, 即 $v\gamma = 1$ 。它们不是互相独立的参数, 实质上是同一个参数, 可以按不同情况选用其中之一。在工程热力学中通常用 v 作为状态参数。而在锅炉和通风机的计算中常用 γ 作为状态参数。

总容积 V 不是状态参数, 因为 $V = Gv$, 当状态参数 v 不变时, 由于物质重量 G 的变化也会引起总容积 V 的变化。

二、温度 T

温度是物体冷热程度的量度。夏天气温高, 冬天气温低, 热水温度比冷水温度高等, 都是用温度表示物体冷热程度的例子。当两个物体相接触时, 如果两者的冷热程度不等, 则高温物体就要向低温物体传递热量。如果两者间没有热量传递, 就说明它们的冷热程度相等, 即两物体的温度相等。从分子运动论看, 温度是大量分子平均移动动能的量度, 分

● 在工程单位制中, 重量的单位是〔公斤力〕, 不过在技术书籍中通常都标为〔公斤〕而省去其中“力”这个字。相应地与重量有关的其它物理量的单位中亦作如此省略。

在目前世界通用的国际单位制(绝对单位制)中, “公斤”只作为质量单位, 不能作重量的单位, 重量的单位是“牛顿”。二者间的换算关系是:

$$1[\text{公斤}(\text{力})] = 9.80665[\text{牛顿}]$$

● 在国际单位制中“公斤/米³”是密度 ρ (单位容积物质的质量)的单位。

故在国际单位制中, 比容定义为 $\frac{1}{\rho}$, 即单位质量的物质所占有的容积。

子运动的速度愈快，物体温度就愈高。它们之间的关系是：

$$\frac{mc^2}{2} = BT \quad (1-3)$$

式中 T —— 绝对温度；

B —— 比例常数；

$\frac{mc^2}{2}$ —— 分子平均移动动能；

c —— 分子平移运动的均方根速度；

m —— 分子的质量。

温度的测量和控制在生产实践中有重要的意义。例如，电厂中锅炉烟气温度、给水温度、过热蒸汽温度等都必须进行准确的测量。如果测温仪表失灵，温度控制不准，就会造成事故。

测量温度的标尺叫做温标。制定温标的根本问题就是规定一个起点和一个间隔。过去习惯上常用的一种温标是摄氏温标，其温度用符号“ t ”表示。测量单位用“ $^{\circ}\text{C}$ ”表示。它规定在 1 标准大气压下冰的熔点为 0°C ，水的沸点为 100°C ，中间等分 100 分度，每一分度叫做摄氏一度。在通用的国际单位制中，把水、冰、和蒸汽共存时的水的三相点的温度以下冰的熔点 273.15 K 定为摄氏温度的零度。

在热力学的分析计算中，常用的是国际单位制中的热力学温标，叫做开氏温标，也称为绝对温标。其温度符号用“ T ”表示。测温单位用“ K ”表示。它与摄氏温标的分度相同，但起点不同。它的起点是把分子停止运动时的温度作为零度。根据公式 (1-3)

$$\text{当 } c=0 \text{ 时} \quad T=0\text{ K}$$

这个温度相当于摄氏温标零下 273.15°C 。这种状态的温度实际上是达不到的。但因这种温标与测温物质的性质无关，便于统一，所以被广泛使用。

绝对温标与摄氏温标都是国际单位制中所规定使用的温标，它们之间换算关系为：

$$T = t + 273.15$$

通常在工程计算中，取 273 已够准确，所以两个温度间的换算关系可用下式计算：

$$T = t + 273 \quad (1-4)$$

绝对温标与摄氏温标起点不同，但间隔划分是一样的。因而凡涉及到温差的地方用 K 或 $^{\circ}\text{C}$ 在数值上均相同，即： $\Delta t = \Delta T$ 。

少数欧美国家还习惯上采用华氏温标 $t^{\circ}\text{F}$ 。它是将冰的熔点和水的沸点分别规定为 32°F 和 212°F ，中间分成 180 等分度，与摄氏温标之间的关系为：

$$t^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5}t^{\circ}\text{C} + 32 \quad (1-5)$$

三、压力 p

单位面积上所受到的垂直作用力称为压力（物理学中称压强）。分子运动学说把气体的压力看作是分子撞击容器壁面的结果。由于气体分子数目极多，撞击频繁，所以压力是标志大量的分子撞击容器壁的平均结果。而压力的方向总是垂直于容器壁面的。

1. 压力的单位：压力的单位可从下式得出：

$$p = \frac{P}{F} \quad (1-6)$$

式中 P ——作用力，公斤；

F ——承受作用力的面积，米²。

得到的压力 p 的单位为公斤/米²。因为这个单位太小，在工程实用上常采用公斤/厘米²作为压力的单位。等于1公斤/厘米²的压力叫做1工程大气压。有时用符号 at 表示。例如 $p = 5$ 工程大气压，可写成为 $p = 5at$ 。

显然，1工程大气压 = 1公斤/厘米² = 10⁴公斤/米²

压力的单位有时也用液柱（常用汞柱和水柱）的高度来表示。这相当于一定高度的液柱以自己的重量作用于其底面积上所产生的压力 p 。如图1-1所示：

液柱对底面积的总作用力等于液柱的重量。即：

$$pF = HF\gamma$$

$$\text{故} \quad p = H\gamma \quad (1-7)$$

$$\text{或} \quad H = \frac{p}{\gamma} \quad (1-7')$$

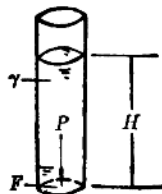


图 1-1 液柱对底面积的压力

式中 H ——液柱高度，厘米；

γ ——液体比重，克/厘米³；

F ——承受液柱的底面积，厘米²。

因为水的比重 $\gamma_{\text{水}} = 1000$ 公斤/米³，汞的比重 $\gamma_{\text{汞}} = 13595$ 公斤/米³（0℃时）所以根据式（1-7'）可得到工程大气压与液柱高度之间的换算关系是：

$$\begin{aligned} 1 \text{ 公斤/厘米}^2 &= 10 \text{ 米水柱} \\ &= 0.7356 \text{ 米汞柱} \\ &= 735.6 \text{ 毫米汞柱} \end{aligned}$$

上述这几种压力单位，在工程上都有其适用的场合。例如锅炉中蒸汽的压力较高，有几十个或上百个工程大气压，就不可能用几万、几十万个毫米汞柱来表示。又如送风机所维持的压差（即所造成的压力升高），引风机所维持的炉膛负压等一般都不大，只有几十或几百毫米水柱，一般就不用工程大气压来表示。

在国际单位制中使用的一种压力单位是“牛顿/米²”。显然，1公斤/厘米² = 9.80665 × 10³ 牛顿/米² = 98066.5 牛顿/米²。

因为1牛顿/米²的压力单位太小，国际单位制中选用比它大 10⁵ 倍的值作为压力的单位，称为“巴”。

根据上述关系有：

$$\begin{aligned} 1 \text{ 巴} &= 10^5 \text{ 牛顿/米}^2 = 10^5 \times \frac{1}{98066.5} \text{ 公斤（力）/厘米}^2 \\ &= 1.01972 \text{ 公斤/厘米}^2 \end{aligned}$$

2. 大气压力：地球表面包围着一层几百公厘厚的空气，通常称为大气。这层很厚的大气因其自身的重量而对地面上的物体产生压力，这个压力叫做**大气压力**，简称**大气压**。自来水笔能吸墨水，抽水机能把低处的水抽向高处，都是大气压力的作用。大气的分布并不均匀，离地面越高，大气越稀薄，大气压力也越小。此外，大气压力还随着当时当地空气的湿度和温度的变化而有所变化。大气压力可用气压计测量。图 1-2 所示，是一种最简单的水银气压计。



图 1-2 用水银气压计测量大气压力示意图

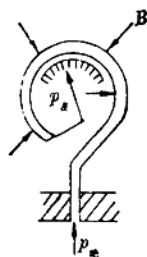


图 1-3 弹簧管式压力表简图

气压计玻璃管的上端是真空。大气压力用符号 B 表示，在 B 的作用下，液柱沿玻璃管上升的高度 H 就等于当时当地的大气压力 B 。

在物理学上，把纬度 45° 海平面上常年平均气压定做**标准大气压**或称**物理大气压**。其值为760毫米汞柱，换算成工程单位，得：

$$\begin{aligned}
 1 \text{ 物理大气压} &= 760 \text{ 毫米汞柱} \\
 &= 0.76 \text{ 米} \times 13595 \text{ 公斤/米}^3 \\
 &= 10332 \text{ 公斤/米}^2 \\
 &= 1.0332 \text{ 公斤/厘米}^2 \\
 &= 10.332 \text{ 米水柱}
 \end{aligned}$$

3. 绝对压力、表压力、真空：容器内气体的压力可能高于或低于外界大气的压力 B 。当压力高于 B 时，我们称其为**正压**，反之，则称为**负压**。在火力发电厂中处于正压状态下工作的设备有：锅炉汽水管路，高压加热器等。处于负压状态下工作的设备有：凝汽器、制粉系统、负压燃烧炉等。

不论是正压还是负压，我们把容器内气体的真实压力，称为**绝对压力**。如以工程大气压作为绝对压力的单位时，常简称为**绝对工程大气压**。

容器内气体的压力通常用弹簧管式压力表来测定，压力不大时可以用U形管式压力计来测量。因为压力计本身处在当时当地大气压力的作用下，所以它测得的压力数值并不是容器内的绝对压力，而是绝对压力与当时当地大气压力之间的差数。图 1-3 所示为弹簧管式压力表简图。弹簧管的自由端焊死，开口的另一端与所测压力的容器相通，管外作用着

当时当地大气压力 B 。管内作用着容器内气体的绝对压力 $p_{绝}$ 。当容器内气体的绝对压力等于周围大气压时，压力表上的指针不动而指在零位。只有当气体的绝对压力超过了大气的压力时，表上的指针才开始移动，所以表上所指示的压力数值是绝对压力超过大气压力的部分。

图1-4所示，为一U形管压力计示意图。它的主要部分为一U形玻璃管，管内盛有用来测压的液体，如汞、酒精和水等。U形管的一端与压力为 $p_{绝}$ 的被测工质相连，另一端与大气相通。由U形管中液面的差值即可测得工质的压力。

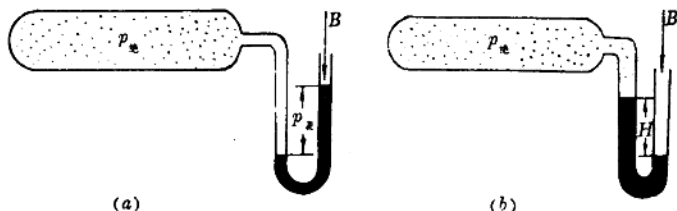


图 1-4 U形管压力计测量压力示意图

如果容器内气体的绝对压力大于当时当地的大气压力 B ，如图1-4(a)所示，则连接大气的玻璃管中的液柱就要升高。升高的这段液柱所相当的的压力，就是气体的绝对压力大于大气压力的部分，称为**表压力**。显然：

$$p_{绝} = p_{表} + B \quad (1-8)$$

如容器内气体的压力低于当时当地大气压力如图1-4(b)所示，则：

$$p_{绝} = B - H \quad (1-9)$$

或

$$p_{绝} + H = B \quad (1-9')$$

H 为气体的绝对压力比大气压力低的部分，称为**负压或真空**。习惯上当 H 值较小时称为负压； H 值较大时称为真空。

式(1-8)和(1-9)中 B 应是当时当地气压计的读数。当表压力的数值较大时，因 B 在总压力 $p_{绝}$ 中所占的比例甚小，故在工程计算中常把 B 当作1个工程大气压来处理。当 $p_{绝}$ 的数值较小，例如在1个工程大气压附近时，则 B 不能作此简化。绝对压力、表压力、真空之间的关系也可用图1-5说明。

公式(1-8)和(1-9)中每项均应使用同一单位。如果各项单位不同，则应按压力的大小而同时换算成工程大气压、汞柱或水柱。

显然，真空值越大，表示绝对压力越低。例如某容器内的真空为600毫米汞柱，当时当地大气压力为760毫米汞柱，则其绝对压力为：

$$\begin{aligned} p_{绝} &= B - H \\ &= 760 - 600 = 160 \text{ 毫米汞柱} \\ &= \frac{160}{735.6} \text{ 公斤/厘米}^2 \approx 0.218 \text{ 公斤/厘米}^2 \end{aligned}$$

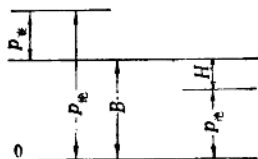


图 1-5 绝对压力、表压力、真空三者之间的关系