

国家骨干高职院校建设项目成果
高等职业教育“工学结合”课程改革教材
高等学校“十二五”规划教材

热工技术应用

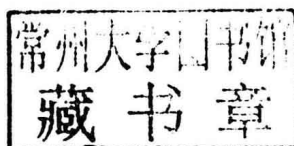
主编 程显峰 贺东伟

HEUP 哈尔滨工程大学出版社

国家骨干高职院校建设项
高等职业教育“工学结合”课程改革教材
高等学校“十二五”规划教材

热工技术应用

主 编 程显峰 贺东伟
副主编 吴丽梅



内 容 简 介

本教材是根据《国家中长期教育改革和规划纲要》对高职院校教材建设的要求,结合机械类及相关专业高职教育的特点,并针对高职院校学生的具体情况,围绕该类专业的职业岗位范围、知识结构、能力结构、业务规格和素质要求,组织编写而成的。书中对热工学中高深的理论、高难的计算、复杂的分析等内容做了大量的删减,增加了热工检测等有针对性、实用性的内容,尽量做到言简意赅、够用为度,便于学生掌握,方便教学。全书共分3个项目,内容包括工程热力学、传热学、热工检测技术。

本书可作为高职城市热能应用技术专业及暖通专业等相关专业的热工学基础教材,也可作为工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

热工技术应用/程显峰,贺东伟主编. —哈尔滨:哈尔滨
工程大学出版社, 2014. 3
ISBN 978 - 7 - 5661 - 0769 - 5

I. ①热… II. ①程… ②贺… III. ①热工学 -
高等职业教育 - 教材 IV. ①TK122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 034749 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传 真 0451 - 82519699
经 销 新华书店
印 刷 黑龙江省委党校印刷厂
开 本 787mm × 1 092mm 1/16
印 张 16
字 数 396 千字
版 次 2014 年 3 月第 1 版
印 次 2014 年 3 月第 1 次印刷
定 价 34.00 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

P 前言 PREFACE



本教材是根据《国家中长期教育改革和规划纲要》对高职院校教材建设的要求,结合机械类及相关专业高职教育的特点,并针对高职院校学生的具体情况,围绕该类专业的职业岗位范围、知识结构、能力结构、业务规格和素质要求,组织编写而成的。

本书在编写时,力求做到内容精练,叙述清楚,在文字叙述上力求深入浅出,通俗易懂。对热工学中高深的理论、高难的计算、复杂的分析等内容做了大量的删减,增加了热工检测等有针对性、实用性的内容,尽量做到言简意赅、够用为度,便于学生掌握,方便教学。

本书在编写时力求做到深入浅出,便于学生自学。每个任务之前都给出了明确的学习指导,包括任务提要、任务要求,每个单元前面都给出学习目标和重点内容,帮助学生掌握重点,突破难点。另外每个任务后面都有思考与练习题,读者可通过适当的作业和练习巩固所学知识。

本书由黑龙江职业学院能源与材料工程学院城市热能应用技术教学团队编写,并由哈尔滨工业大学赵广播教授主审。赵教授在百忙之中对本书做了全面细致的审阅,并提出很多宝贵的建议和意见。在此,向全体编者表示衷心的感谢。本书由程显峰、贺东伟任主编,吴丽梅任副主编,具体分工为:程显峰编写了项目一,贺东伟编写了项目二的任务一、二、三,吴丽梅编写了项目二的任务四、项目三的任务一,刘洋编写了项目三的任务二,徐永慧编写了项目三的任务三,裴昭颖编写了项目三的任务四。

本书在编写过程中,参考或引用了国内一些专家学者的论著,在此表示衷心的感谢。

本教材在编写前广泛听取了高职教学第一线的有关教师和学生的意见,在编写过程中做了一些变革和尝试。由于编者水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,请读者批评指正。

编 者
2013 年 5 月



项目一 工程热力学

任务一	工质及气态方程	1
任务二	热力学第一定律	18
任务三	理想气体的热力过程	44
任务四	热力学第二定律	62
任务五	水蒸气	76
任务六	混合气体和湿空气	92
任务七	气体在喷管中的流动	106

项目二 传热学

任务一	稳态导热	119
任务二	对流换热	137
任务三	辐射换热	162
任务四	传热过程和换热器	171

项目三 热工测试技术

任务一	热工测试简介	186
任务二	压力测试技术	193
任务三	温度测试技术	208
任务四	流量测试技术	217
附录 A		224
附录 B		246
参考文献		247

|| 项目一 工程热力学

任务一 工质及气态方程

► 任务提要

本任务阐明热力学系统(热力系)的定义及其描述以着重介绍热力系的平衡状态的概念;描述平衡状态的基本状态参数比体积、压力和温度,以及体现三者相互关系的状态方程式;定义了热力系的准平衡过程并对热力循环作了初步的介绍。

► 任务要求

1. 了解热力系的定义、平衡状态的概念和应满足的平衡条件。
2. 掌握基本状态参数 p, v, T 的定义, 计量及不同单位间的换算。
3. 了解准平衡过程的定义及提出准平衡过程的意义和作用。
4. 了解可逆过程的定义及提出可逆过程的意义和作用。
5. 对不同的热力循环及其作用建立起初步的概念。

单元1 工质及热力系统

● 学习目标

理解工质、热力系的定义;掌握热力系的分类。

● 重点内容

热力学模型的基本概念,热力系统的选取及种类划分的基本原则。

一、工质

在热能和机械能的相互转换中必须要有一个工作物质,例如柴油机的工作物质为空气和燃气,蒸汽动力装置的工作物质为水和水蒸气,蒸汽压缩制冷装置的工作物质为制冷剂。在热力转换过程中由这个工作物质来吸收热量膨胀并对外做功,或者由这个工作物质把从冷库吸收的热量放给环境,没有这个工作物质,就不可能实现热能和机械能之间的转换。我们把这个工作物质称为工质,即把实现热能和机械能相互转换的媒介物称为工质。

作为工质,应满足以下几点要求:(1)良好的膨胀性;(2)良好的流动性;(3)较大的热容量;(4)热力性能稳定;(5)无毒、无腐蚀性;(6)对环境友善;(7)价廉,易大量获取。

工程中最适于充当工质的是气体或由液态过渡为气态的蒸汽,如火电厂的蒸汽轮机中



的水蒸气,内燃机中的燃气,制冷装置中的氨蒸气等。

二、热力系统

1. 热力系、外界与边界

从上述热能转换装置的工作过程我们知道,任何一种能量转换装置都是由几个相互作用的实现能量转换或传递的热力设备所组成的。例如蒸汽动力装置是由锅炉、蒸汽轮机、冷凝器、水泵所组成。为了进行热力学分析,首先我们要在相互作用的各种热力设备中划分一个(或几个)热力设备作为研究对象,这种被划分出来的研究对象称为热力学系统,简称系统。系统之外的其他热力设备统称为外界。系统与外界接口称为边界。边界可以是真实的(如图 1.1.1),也可以是设想的(如图 1.1.2)。例如取压缩空气瓶内的空气为系统,则瓶的内壁面就是真实的边界;而当取废气涡轮内的空气作为系统时,则进出口处的边界是设想的。

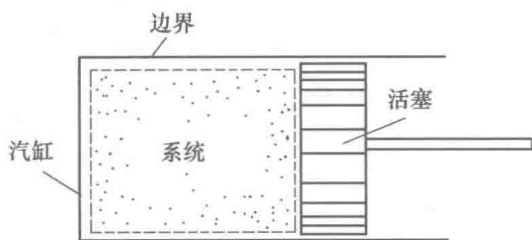


图 1.1.1 热力系统示意图

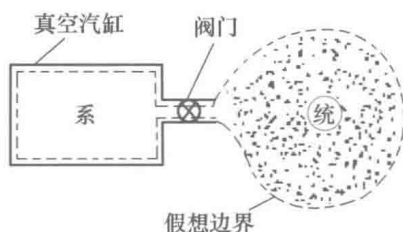


图 1.1.2 闭口系统示意图

2. 几种典型热力系

热力学系统与外界一般有三种相互作用:系统与外界的物质交换、热的交换和功的交换。按照系统与外界相互作用的特点,在热力学中往往把系统分为下述几类。

(1)闭口(封闭)系统。系统与外界没有物质的交换。例如把柴油机汽缸中正进行膨胀的燃气选作系统,尽管燃气会从汽缸与活塞的缝隙间漏泄一点,但泄漏量极小,可以足够精确地看作系统与外界没有物质交换,这就是封闭系统,如图 1.1.2 所示。封闭系统是由闭合表面包围的质量恒定的物质集合。封闭系统与外界可以有热和功的交换,也可以没有。

(2)开口系统。系统与外界有物质的交换。如图 1.1.3 所示。火电厂运行中的汽轮机就可视为开口系统,在运行过程中,有蒸汽不断地流进流出。由于开口系统是一个划定的空间范围,所以开口系统又称控制容积系统(CV)。开口系统与外界可以有热和功的交换,也可以没有。

(3)绝热系统。系统与外界没有热量的交换。如图 1.1.4 所示的燃气膨胀时有热量传给冷却水,如取燃气和冷却水(通常称为冷源)为系统,则包括燃气和冷却水的系统与外界没有热交换,因而该系统为绝热系统。

(4)孤立系统。系统与外界没有物质交换,也没有热和功的交换。如果把所有发生相互作用的各种热力设备作为一个整体,并把这个整体选定为所研究的系统,虽然这个系统内部的各部分可以有物质交换、热和功的交换,但这个系统作

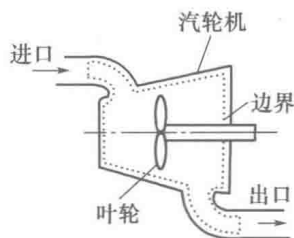


图 1.1.3 开口系统示意图

为整体与外界没有任何相互作用,那么这个系统就是孤立系统,如图 1.1.5 所示。孤立系统一般是由常规系统和与之发生相互作用的外界组成的。可见一个系统可以由多个系统组成。

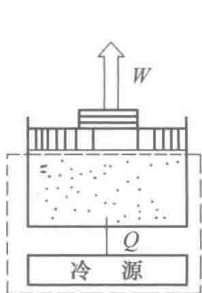
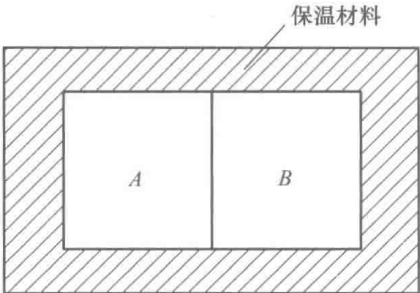


图 1.1.4 绝热系统示意图



A和B温度不同时，两物体发生能量传递，若取A+B为系统，则为孤立系统。

图 1.1.5 孤立系统示意图

严格地讲,自然界中不存在完全绝热或孤立的系统,它们是热力学中为简化问题的研究而提出的抽象概念,但工程上却存在着接近于绝热或孤立的系统。绝热系统是一种系统与外界传递的热量小到可以忽略的简化模式,孤立系统是虚拟的有限的空间范围。用工程观点来处理问题时,只要抓住事物的本质,突出主要因素,就可以将这样的系统看成绝热系统或孤立系统,而得出有指导意义的结论。应当指出,热力系统如何划分、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简便。研究任务不同,所选取的热力系统也不同。

注意:

(1)边界是系统与外界发生相互作用的所在地,它可以是固定的,也可以是运动的;可以是真实的,也可以是假想的。

(2)一旦选定系统,研究的重点在于系统内部工质的变化过程、系统通过边界与外界发生的相互作用以及两者间的关系。

(3)对于外界只是笼统地考察它们通过边界与热力系统发生的相互作用,即物质交换和能量交换(包括热量交换和功量交换)的情况。

基于这一原因,外界通常是指与系统内工质或物体发生相互作用的物体。

系统的种类见表 1.1.1。

表 1.1.1 系统的种类

名 称	Q	W	m	表 述	分析方法
闭口系统	√ ×	√ ×	×	无质量交换	采用控制质量法
开口系统	√ ×	√ ×	√	有质量交换	采用控制容积法
绝热系统	×	√ ×	√ ×	无热量交换	
孤立系统	×	×	×	无任何交换	
简单可压缩系统	√	容积功	√ ×	系统与外界交换的功仅有容积功	



表 1.1.1 中简单可压缩系统是指对于由可压缩物质构成、与外界仅有容积变化功交换、无化学反应的系统,称为简单可压缩系统,是工程热力学主要研究的对象。

3. 系统按内部状况划分

热力系也可按其内部状况的不同而分类为:单元系(只包含一种化学成分的物质)、多元系(包含两种以上的物质)、均匀系(各部分具有相同的性质,如单相系)、非均匀系(各部分具有不同的性质,如复相系)等。

4. 与系统发生作用的外界的分类

热源 热力学中将与系统只发生热的相互作用的外界定义为“热源”。温度高的热源称为高温热源,温度低的热源称为低温热源,并且认为热源的容量足够大,它吸入和放出有限热量时温度保持不变。

功源 热力学中将与系统只发生功的相互作用的外界定义为“功源”。功源与封闭系统交换的功是直接通过系统中工质膨胀或压缩引起的容积改变实现的,称为“容积功”;功源与开口系统交换的功通过转轴传递,称为“轴功”。习惯上,系统对外界(功源)做功为正值,外界(功源)对系统做功为负值。

质源 热力学中将与系统进行物质交换的外界定义为“质源”。

三、系统的选取原则

正确地选择热力系是进行正确的热力学分析的前提。没有明确选定热力系之前,对力、质量、热、功等任何问题的讨论都是不可能进行的。

1. 主要依据是研究对象的特点。

2. 同时应考虑分析问题的需要和方便,必要的时候需要有适当的假设。

应该指出:绝热系统、闭口系统在某些情况下是经过简化处理,如图 1.1.6 所示。类似这样抓住主要矛盾,忽略次要因素的处理方法在工程热力学中是经常遇到的。

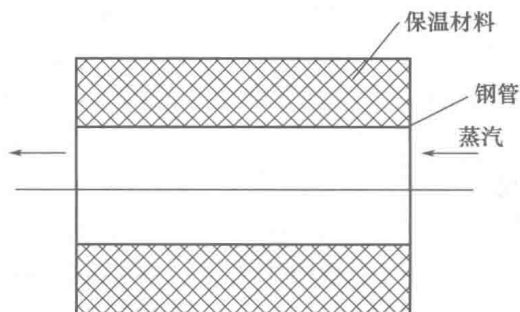


图 1.1.6 系统的简化

思考与练习题

1. 外界是否就是环境介质?

2. 若系统流进、流出工质的质量相同,即系统内工质质量保持不变,该系统是开口系统还是闭口系统?

3. 绝热系统可否与外界交换功? 开口系统可不可以是绝热系统?

单元2 工质的热力状态及其基本状态参数

• 学习目的

1. 理解热力状态和状态参数的定义。
2. 掌握状态参数的特征、分类,基本状态参数的物理意义和单位。
3. 掌握绝对压力、表压力和真空度的关系。

• 重点内容

状态、状态参数及基本状态参数。

热力设备中实现能量传递与转换,工质本身状况必须不断地发生变化,因而必须描述和研究工质的各种宏观状况所发生的变化。

一、状态及状态参数

1. 状态(State)

热力学中将系统中的工质在某一瞬间呈现的各种宏观物理状况的总和称为工质(或系统)的热力状态,或简称为状态。

2. 状态参数(Property)

(1) 定义

用来描述和说明工质状态特性的各种宏观物理量称为工质的状态参数,如压力、温度等。

(2) 状态参数的特征

工质的状态是要通过状态参数来表征的,而状态参数又取决于状态。换句话说,状态一定,工质的状态参数也就一定;若状态发生变化,至少有一种参数随之改变。状态参数的变化只取决于给定的初、终状态,而与变化过程中所经历的一切中间状态或路径无关。数学上状态参数表现为是点的函数,其微量是全微分,它沿闭合路径的积分为零。如用 x 表示任意状态参数,状态参数的特性可用如下数学表达式表示:

$$\oint dx = 0$$

(3) 热力学中常用的状态参数

工程热力学中常用的状态参数有压力、温度、比体积、热力学能(内能)、焓、熵等。其中压力、温度、比体积可以直接用仪器测量,称为基本状态参数;其余状态参数可根据基本状态参数间接导出。

(4) 强度参数与广延参数

强度参数 与系统质量无关,如温度、压力。强度参数不具有可加性。

广延参数 与系统质量成正比,如体积、热力学能、焓、熵等。广延参数具有可加性。单位质量工质的广延参数(如比体积、比焓、比热力学能等),具有强度参数的性质,称为比参数,不具有可加性。

二、基本状态参数

1. 温度(Temperature)

(1) 温度的引出



由热力学第零定律(热平衡定律)可知,与第三个系统处于热平衡的两个系统,彼此也处于热平衡,见图 1.1.7。

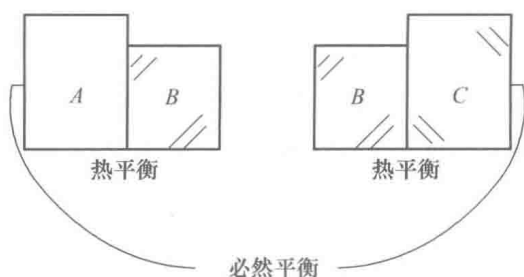


图 1.1.7 热力学第零定律示意图

处于热平衡的两个系统必然具有一个数值上相等的热力学参数来描述这一平衡特性,此即温度。温度是决定一系统是否可与其他系统处于热平衡的物理量。它的特征是,一切处于热平衡的系统都具有相同的温度。从宏观上来看,温度是表示工质冷热程度的量度,是判断工质能否从外界接受热量或者对外传出热量的根据。

(2) 实质

宏观上温度表示物体的冷热程度;微观(分子运动)上,则是物质内部大量分子热运动的强烈程度。根据气体分子运动论,气体的温度是组成气体的大量分子平均移动动能的量度。温度越高,分子的热运动越剧烈。

(3) 温标

热力学第零定律除了为建立温度概念提供实验基础外,也是进行温度测量和建立经验温度标尺的理论基础。物体的温度用温度计测量。在温度测量中,温度计作为第零定律中所说的第三个系统。如果将它加以刻度,并与任意热力系接触而达到热平衡,则该系统的温度即可测出。

当温度计与任何被测系统接触时,如果二者不处于热平衡,则将引起温度计中测温物质的状态变化,直至二者达到热平衡时为止。这样,我们可利用测温物质在两系统相互作用中所引起的某种特性的变化,将被测系统的温度显示出来。

温度测量常利用物质的下述特性:

- a. 温度变化时固体、液体、气体的容积变化;
- b. 定体积下气体压力随温度的变化;
- c. 固体温度变化时的电阻变化;
- d. 两种不同材料的导线在接触点温度不等时产生的热电势;
- e. 辐射强度随温度的变化(用于高温测量);
- f. 磁效应(用于极低温度测量);等等。

工程上用温度计来测量物体的温度。处于热平衡的物体,都具有相同的温度,这一事实是我们用温度计测量物体温度的依据。当温度计与被测物体达到热平衡时,温度计指示的温度就等于被测物体的温度。常用的温标有热力学温标和摄氏温标,它们也是我国的法定计量单位。

温度的数值表示法称为温标。温标的三要素:选定一种测温物质的性质;选基准点;分

度法。一般温标的基准点和分度方法的选择是人为的。

①热力学温标

国际单位制(即 SI 制)中,以热力学温标作为基本温标。它所定义的温度称为热力学温度 T ,单位为开尔文,符号为 K。热力学温标又称为绝对温标和开尔文温标。

热力学温标以水的三相点,即水的固、液、气三态平衡共存时的温度为基准点,并规定其温度为 273.16 K。于是 1 K 就是水的三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。

②摄氏温标

1742 年,摄氏温标由瑞典人摄氏(Anders Celsius)提出。他把一个大气压下纯水的冰点取为 0 度,沸点取为 100 度,中间 100 等分作为摄氏温标。它所定义的温度为摄氏温度 t ,单位为摄氏度,符号为 $^{\circ}\text{C}$ 。

1960 年国际计量会议给摄氏温标以新的基准,即由热力学绝对温标来规定摄氏温标,称为热力学摄氏温标,把水的三相点定为 273.16 K,即 0.01°C ,则 $0^{\circ}\text{C} = 273.15\text{ K}$ 。

由于热力学温标实施困难,国际上定义了国际摄氏温标,与热力学温标并用。

热力学温标与摄氏温标的关系:热力学温标 1 K 与国际摄氏温标 1°C 的间隔是完全相同的。热力学温度与摄氏温度之间存在着下述关系:

$$T\text{ K} = t\text{ }^{\circ}\text{C} + 273.15 \quad (1.1.1)$$

所以水的三相点的摄氏温度是 0.01°C 。应当指出,在表示两种状态间的温度差时,用两种温度所得出的差值是相同的,即 $\Delta T = \Delta t$ 。

③华氏温标

1724 年,华氏温标由德国人华氏(Cabridl D Fahrenheit)提出。他把水、冰和氯化铵的混合物作为制冷剂而获得的当时可得到的最低温度作为 0 度,把人体的温度作为 96 度,中间等分,这样的数字是由于当时广泛使用 12 进位法。

符号用 t_{F} 表示,单位为 $^{\circ}\text{F}$ 。与摄氏温度的换算关系为

$$t_{\text{F}}\text{ }^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5}t\text{ }^{\circ}\text{C} + 32 \quad (1.1.2)$$

常用温标的种类、基准点、分度方法见图 1.1.8。

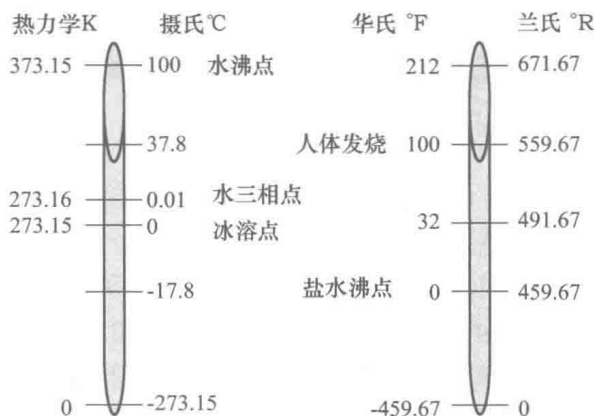


图 1.1.8 常用温标的种类、基准点及分度方法示意图



④各种温标间的关系

- a. 摄氏温度与绝对温度 $t/^{\circ}\text{C} = T/\text{K} - 273.15$
- b. 摄氏温度与华氏温度 $t/^{\circ}\text{C} = 5/9(t_{\text{F}}/^{\circ}\text{F} - 32)$
- c. 兰氏温度与华氏温度 $T/^{\circ}\text{R} = t_{\text{F}}/^{\circ}\text{F} + 459.67$
- d. 兰氏温度与绝对温度 $T/^{\circ}\text{R} = 5/9T/\text{K}$

2. 压力(Pressure)

(1)压力概念

宏观上,压力(或压强)为单位面积上所受到的垂直作用力。微观上根据分子运动论,气体的压力是气体分子运动撞击表面而在单位面积上所呈现的垂直于壁面的平均作用力。

$$p = F/A \tag{1.1.3}$$

式中 F 为垂直作用于面积 A 上的力。

(2)压力单位及换算

在国际单位制中,力的单位为 N , 面积的单位为 m^2 , 压力的单位为 Pa (帕), $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ 。工程上因 Pa 太小,常采用 kPa (千帕)和 MPa (兆帕)作为压力的单位,它们之间的关系为: $1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$, $1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ Pa}$ 。以前在工程上使用的压力单位还有 atm (标准大气压)、 at (工程大气压)等。它们与 Pa (帕)的换算关系见表 1.1.2。

表 1.1.2 各种压力单位与帕的换算关系

单位名称	单位代号	与帕的换算关系
巴	bar	$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$ 或 0.1 MPa
标准大气压	atm	$1 \text{ atm} = 101\,325 \text{ Pa} = 1.013\,25 \text{ bar}$
毫米水柱	mmH_2O	$1 \text{ mmH}_2\text{O} = 9.806\,65 \text{ Pa}$
毫米汞柱	mmHg	$1 \text{ mmHg} = 133.322\,4 \text{ Pa}$
工程大气压	at	$1 \text{ at} = 98\,066.5 \text{ Pa}$

(3)绝对压力、表压力和真空度

①绝对压力。工质的真实压力称为“绝对压力”,以 p 表示。当地大气压力用 p_b 表示。

②表压力。当绝对压力大于当地大气压力时(正压状态),压力表指示的压力值称为“表压力”,用 p_g 表示:

$$p = p_b + p_g \tag{1.1.4}$$

③真空度。当绝对压力低于当地大气压力时(负压状态),用真空表测得的数值,即绝对压力低于当地大气压力的数值,称“真空度”,用 p_v 表示:

$$p = p_b - p_v \tag{1.1.5}$$

总之,即使绝对压力不变,由于大气压力变化,表压力和真空度也会变化。因此,只有绝对压力才能表征工质所处的状态,才是状态参数。各压力之间的关系如图 1.1.9 所示。

(4)压力的测量

工程上测量压力常采用弹簧管式压力表,当压力不高时也可用 U 型管压力计来测定(如图 1.1.10 所示)。目前愈来愈多的采用电子技术的测压设备已进入工程领域。无论采用哪种压力计,因为测压元件本身都处在当地大气压力的作用下,因此测得的压力值都是

工质的真实压力与当地大气压力间的差值。

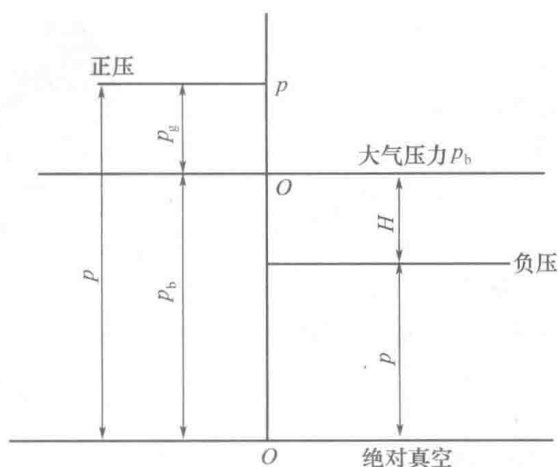


图 1.1.9 各压力之间的关系示意图

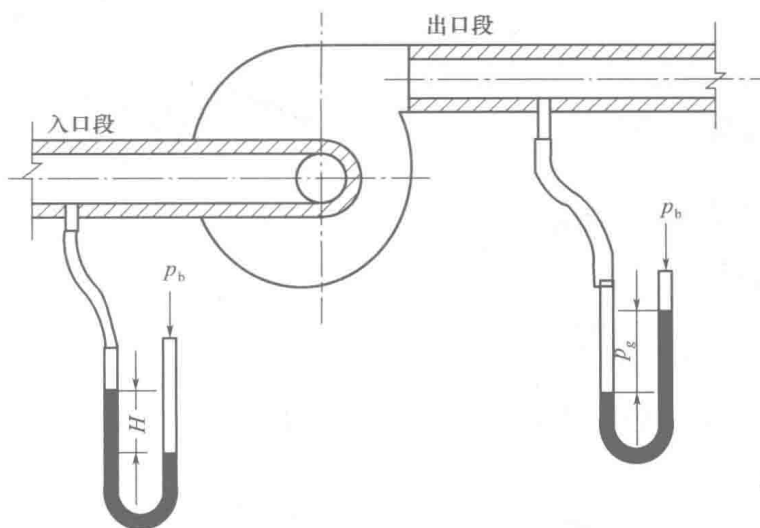


图 1.1.10 U 型管压力计测压示意图

①U 型管压力计

工作原理:在 U 型管压力计没有与测压点连通前,U 型玻璃管内两侧的液面在零刻度线处相平。当 U 型管的一端与测压点连通后,U 型管内的液面会发生变化。若与测压点连通一侧的液面下降,说明测压点处的压力为正压,反之则为负压。

②弹簧管式压力表

弹簧管压力表又可以称作布尔登表。弹簧管压力表的主要组成部分为一弯成圆弧形的弹簧管,管的横切面为椭圆形。作为测量元件的弹簧管一端固定起来,并通过接头与被测介质相连;另一端封闭,为自由端。自由端与连杆与扇形齿轮相连,扇形齿轮又和机心齿轮咬合组成传动放大装置。弹簧管压力表通过表内的敏感元件(波登管、膜盒、波纹管)的弹性形变,再由表内机芯的转换机构将压力形变传到指针,引起指针转动来显示压力。



弹簧管式压力表的技术参数如下：

a. 精度等级 1 级；1.6 级；2.5 级；

b. 安装方式 径向直接式（I）；轴向偏心直接式（II）；轴向同心直接式（III）；轴向偏心嵌装式（IV）；轴向同心嵌装式（V）；径向凸装式（VI）；轴向同心凸装式（VII）；

c. 量程范围（MPa）0.1 ~ 0；-0.1 ~ 0.06；-0.1 ~ 0.15；-0.1 ~ 0.3；-0.1 ~ 0.5；-0.1 ~ 0.9；-0.1 ~ 1.5；-0.1 ~ 2.4；0 ~ 0.1；0 ~ 0.16；0 ~ 0.25；0 ~ 0.4；0 ~ 0.6；0 ~ 1.0；0 ~ 1.6；0 ~ 2.5；0 ~ 4；0 ~ 6；0 ~ 10；0 ~ 16；0 ~ 25；0 ~ 40；0 ~ 60；0 ~ 100；0 ~ 160；

d. 使用工作温度 -40 ~ 70 ℃；

e. 执行标准：GB/T1226—2001。



图 1.1.12 弹簧管式压力表结构图



图 1.1.11 弹簧管式压力表实物图

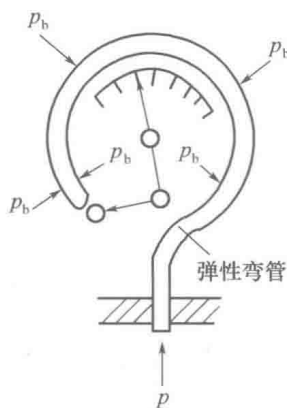


图 1.1.13 弹簧管压力表工作原理图

③气压计

根据托里拆利（Evangelista Torricelli, 1608—1647）的实验原理而制成，用以测量大气压强的仪器。气压计的种类有水银气压计及无液气压计。其用途是：①可预测天气的变化，气压高时天气晴朗；气压降低时，将有风雨天气出现；②可测高度，每升高 12 m，水银柱即降低大约 1 mm，因此可测山的高度及飞机在空中飞行时的高度。

工程计算中，如果被测工质的压力很高，可将大气压力视为常数，一般近似地取为 0.1 MPa。如果被测工质的压力较低，则须按当时当地大气压力的具体数值计算。

3. 比容与密度（Specific Volume and Density）

（1）实质

宏观上比容为单位质量工质占有的体积。从微观意义上讲，对一定气体而言，密度、比



图 1.1.14 气压计实物图

体积为描绘分子聚集疏密程度的物理量。

$$v = \frac{1}{\rho}$$

(2) 单位

比容 $v, \text{m}^3/\text{kg}$; 密度 $\rho, \text{kg}/\text{m}^3$ 。

比体积和密度都是说明工质在某一状态下分子疏密程度的物理量,二者互不独立,通常以比体积作为状态参数。总容积 V 、总质量 m 为具有可加性的尺度量,但 v, ρ 则为强度量而不具有可加性。

单元3 平衡状态及状态方程

• 学习目的

1. 牢固掌握和理解平衡状态、状态公理等热力学基本概念。
2. 掌握热力学函数、状态方程及状态参数坐标图等描述状态参数间联系的方法。

• 重点内容

状态公理和状态方程。

一、平衡状态(Equilibrium State)

1. 平衡状态定义

系统在不受外界影响(重力场除外)的条件下,如果状态参数不随时间变化,称为热力学平衡状态,简称平衡状态。此时,系统内外同时建立了热的和力的平衡状态。

处于平衡状态的热力学系各处的温度、压力等参数是均匀一致的。试设想系统中各物体之间有温差存在而发生热接触,则必然有热自发地从高温物体传向低温物体,这时系统不会维持状态不变,而是不断产生状态变化直至温差消失而达到平衡。这种平衡称为热平衡。可见,温差是驱动热流的不平衡势,而温差的消失则是系统建立起热平衡的必要条件。同样,如果物体间有力的相互作用(例如由压力差引起),则将引起宏观物体的位形变化,这时系统的状态不断变化直至力差消失而建立起平衡。这种平衡称为力学平衡。所以,力差也是驱使系统状态变化的一种不平衡势,而力差的消失是使系统建立起力学平衡的必要条件。对于有相变或化学反应的系统,还可能出现由某些势差引起的相转变或化学组成变化,而在达到平衡时也应相应的势差的消失作为平衡的必要条件(相平衡和化学平衡条件将在后续有关章节中讨论)。

2. 平衡状态条件

(1) 系统处于内部力平衡和热平衡,即内部的压力与温度均匀一致。无内部不平衡势差。

(2) 系统内外达到力平衡和热平衡,即系统内部与外界的压力和温度相同。无外部不平衡势差。

平衡的本质:不存在不平衡势。

当系统各部分的温度和压力不一致时,各部分间将存在着能量的传递和相对位移,其状态将随时间而变化,这种状态称为非平衡状态。非平衡状态如果没有外界的影响,最后



将过渡到平衡状态。

稳定不一定平衡,但平衡一定稳定。

二、状态公理

热力系统的平衡状态可以用状态参数来描述。系统有多个状态参数,它们各自从不同的角度描写系统的某一宏观特性。状态参数不是相互独立的,必然存在某种联系,因此确定系统的状态不需要已知所有的状态参数。那么需要几个独立的状态参数来确定一个平衡状态呢?

热力系与环境之间由于不平衡势的存在将产生相互作用(即相互的能量交换),这种相互作用以热力系的状态变化为标志。每一种平衡将对应于一种不平衡势的消失,从而可得到一个确定的描述系统平衡特性的状态参数。由于各种能量交换可以独立地进行,所以决定平衡热力系状态的独立变量的数目应等于热力系与外界交换能量的各种方式的总数。对于组成一定的封闭系统而言,与外界的相互作用除表现为各种形式的功的交换外,还可能交换热量。

状态公理指出,确定物质系统平衡状态的独立状态参数个数为 $(m-1)+(n+1)$ 。其中 m 为组成物质的成分数; n 为系统与外界传递可逆功的形式数; $(n+1)$ 中的“1”表示能量传递的热量形式。

三、描述状态参数间联系的方法

1. 热力学函数

$$U=f(T,v), H=f(T,p)$$

即称为热力学函数。函数具体形式取决于工质的种类性质及状态。

2. 状态方程

$$f(T,p,v)=0 \quad \text{或} \quad v=f(p,T)$$

它描述了纯物质组成的简单可压缩系统在平衡状态下基本状态参数之间联系的内在规律。函数具体形式取决于工质的种类性质及状态。各种物质具有不同的状态方程式,所以状态方程式是物质个性的体现。热力学理论告诉我们,一切纯物质均存在着关系式 $f(p,v,T)=0$,但却不能给出任何物质这一关系式的具体形式,其具体形式的确定还需依赖于实验及对物质结构的认识。热力学只能用它的理论来指导这种实验,却不能代替这种实验。

3. 状态参数坐标图

状态参数的坐标图如 $p-v$ 图、 $T-s$ 图等,如图 1.1.15 所示。

两个独立的状态参数就可以确定简单可压缩系统的状态。

注意:

- (1) 系统任何平衡状态可表示在坐标图上;
- (2) 图中任意一点为一确定的平衡状态;
- (3) 不平衡状态无法在图上表示。

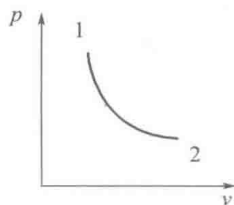


图 1.1.15 状态参数坐标图