

国家示范院校重点建设专业工学结合系列教材

热工流体

REGONG LIUTI

主编 徐红梅 刘红侠



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家示范院校重点建设专业工学结合系列教材

热 工 流 体

主 编 徐红梅 刘红侠
副主编 白 桦 高喜玲

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书分为热工学基础和流体力学泵与风机两部分,共 13 个单元。热工学基础部分介绍了工程热力学基本概念,热力学基本定律,水蒸气,湿空气,工程热力学基础的应用,传热基本方程式,稳定传热,传热学基础的应用等内容。流体力学泵与风机部分介绍了流体静力学,一元流体动力学,流动阻力与能量损失,流体力学的工程应用,泵与风机的构造与理论基础等内容。

本书可作为高职类建筑设备工程技术、供热通风与空调工程技术专业教材,也可作为相关专业的师生及工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

热工流体/徐红梅,刘红侠主编. —徐州:中国
矿业大学出版社,2010.11

ISBN 978 - 7 - 5646 - 0813 - 2

I. ①热… II. ①徐…②刘… III. ①热工学—高等
学校:技术学校—教材②流体力学—高等学校:技术学校
—教材 IV. ①TK122②O35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第197649号

书 名 热工流体
主 编 徐红梅 刘红侠
责任编辑 张 岩 付继娟
责任校对 杜锦芝
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×1092 1/16 印张 18.5 插页 2 字数 468 千字
版次印次 2010 年 11 月第 1 版 2010 年 11 月第 1 次印刷
定 价 28.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

编委会名单

主 任：袁洪志

副主任：季 翔

编 委：沈士德 王作兴 韩成标
陈年和 孙亚峰 陈益武
张 魁 郭起剑 刘海波

序

20 世纪 90 年代以来,我国高等职业教育进入快速发展时期,高等职业教育占据了高等教育的半壁江山,职业教育迎来了前所未有的发展机遇,特别是国家启动了示范性高职院校建设项目计划,促使高职院校更加注重办学特色与办学质量,力求深化内涵、彰显特色。我校自 2008 年成为国家示范性高职院校建设单位以来,在课程体系与教学内容、教学实验实训条件、师资队伍、专业及专业群、社会服务能力等方面进行了深化改革,探索建设了具有示范特色的教育教学体制。

根据国家示范性高职院校建设项目计划,学校开展了教材编写工作。本系列教材是在工学结合思想指导下,结合“工作过程系统化”课程建设理念,突出“实用、适用、够用”特点,遵循高职教育的规律编写而成的。教材的编者大都具有丰富的工程实践经验和较为深厚的教学理论水平。

本系列教材的主要特点有:

(1) 突出工学结合特色。邀请施工企业技术人员参与教材的编写,教材内容大多采用情境教学设计和项目教学方法,所采用案例多来源于工程实践,工学结合特色显著,着力培养学生的实践能力。

(2) 突出“实用、适用、够用”的特点。传统教材多采用学科体系,将知识切割为点。本系列教材以工作过程或工程项目为主线,将知识点串联,把实用的理论知识和实践技能在仿真情境中融会贯通,使学生既能掌握扎实的理论知识,又能学以致用。

(3) 融入职业岗位标准、工作流程,体现职业特色。在本系列教材编写中,根据行业或者岗位要求,把国家标准、行业标准、职业标准及工作流程引入教材中,指导学生了解、掌握相关标准及流程。学生掌握最新的知识、熟知最新的工作流程,具备了实践能力,毕业后就能够迅速上岗。

本系列教材的编写得到了中国矿业大学出版社的大力支持,在此,谨向支持和参与教材编写工作的有关单位、部门及个人表示衷心感谢。

本系列教材的付梓出版也是学校示范性建设项目的成果之一。欢迎读者提出宝贵意见,以便在今后的修订中进一步完善。

徐州建筑职业技术学院

2010 年 9 月

前 言

本书是高等职业技术教育建筑设备类专业教材之一。“热工流体”是建筑设备类专业的一门主要职业基础课程,热工学基础和流体力学泵与风机这两部分内容都是以能量转换和传递过程为主线,只是侧重方向不同。前一部分侧重热力过程、热量传递规律、换热器选型等内容;后一部分侧重能量方程、管路计算、泵与风机的构造等内容。

本书在内容整合、章节编排等方面主要根据高职学生培养目标的能力因素和知识需求来选择内容,不单纯追求内容的系统性和完整性,着重介绍基本概念和基本原理,并直接将工程实际应用引入到本课程中,使职业基础课内容更加贴近专业课的需要,进一步突出其实用性和实践性。

内容叙述力求结构合理,层次分明,深入浅出,通俗易懂。每一单元的开始部分是“知识点”和“能力目标”,介绍本单元的主要内容和需要掌握的知识,便于学生按要学习。每一单元的结尾部分是“思考题与习题”,方便学生课后复习,了解掌握知识的程度。

本教材第1~5单元由徐州建筑职业技术学院徐红梅编写,第6~8单元由徐州建筑职业技术学院高喜玲编写,第10~12单元由徐州建筑职业技术学院刘红侠编写,第9、第13、第14单元由徐州建筑职业技术学院白桦编写。

本书由徐红梅、刘红侠担任主编,白桦、高喜玲担任副主编,由徐州建筑职业技术学院陈宏振副教授、刘家春教授担任主审。全书由徐红梅、刘红侠统编定稿。

在教材编写过程中,参考引用了有关院校编写的教材和生产科研单位的技术资料及研究成果,在此一并表示感谢!

由于编者水平有限,书中不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2010年8月

目 录

第一部分 热工学基础

单元 1 工程热力学基本概念	3
1.1 工质和热力系统	3
1.2 工质的热力状态和基本状态参数	4
1.3 平衡状态和热力过程	7
1.4 理想气体状态方程	8
1.5 混合气体	10
思考题与习题	13
单元 2 热力学基本定律	14
2.1 热力系统涉及的能量形式	14
2.2 热力学第一定律	18
2.3 理想气体的热量、内能及焓的计算	22
2.4 理想气体的热力过程	24
2.5 热力学第二定律	30
思考题与习题	35
单元 3 水蒸气	37
3.1 水蒸气的基本概念	37
3.2 定压下水蒸气的生产过程	39
3.3 水和水蒸气图表	41
3.4 水蒸气的基本热力过程	44
思考题与习题	46
单元 4 湿空气	48
4.1 湿空气的状态参数	48
4.2 湿空气的焓湿图	53
4.3 湿空气的基本处理过程	57
思考题与习题	62
单元 5 工程热力学基础的应用	63
5.1 活塞式压气机的基本原理	63

5.2 蒸气压缩式制冷循环	66
5.3 吸收式制冷循环	69
5.4 热泵	70
思考题与习题	71
单元 6 传热基本方式	73
6.1 稳态导热	74
6.2 对流换热	82
6.3 辐射换热	97
思考题与习题	106
单元 7 稳定传热	108
7.1 传热过程及特点	108
7.2 通过平壁、圆筒壁的传热	109
7.3 传热的增强与削弱	112
思考题与习题	115
单元 8 传热学基础的应用	117
8.1 换热器选型及计算	117
8.2 太阳能的利用	123
8.3 围护结构热工计算	124
思考题与习题	128

第二部分 流体力学泵与风机

单元 9 流体静力学	131
9.1 流体的主要力学性质	131
9.2 作用在流体上的力	137
9.3 流体静压强的分布规律	137
9.4 压强的表示方法及计量单位	141
9.5 液柱式测压计	144
思考题与习题	147
单元 10 一元流体动力学	150
10.1 描述流体运动的基本概念	151
10.2 恒定流连续性方程式	155
10.3 恒定流能量方程式及其应用	157
思考题与习题	173
单元 11 能量损失的计算	177
11.1 流动阻力与能量损失的两种形式	177
11.2 两种流态与雷诺数	179
11.3 圆管中的层流与紊流运动	181
11.4 圆管流沿程损失的计算	183

11.5 非圆管流沿程损失的计算	189
11.6 局部损失的计算与减阻措施	191
思考题与习题	197
单元 12 流体力学的工程应用	200
12.1 简单管路的计算	200
12.2 串联与并联管路的计算	206
12.3 管网计算基础	209
12.4 有压管中的水击	212
12.5 无压均匀流的计算	215
12.6 孔口出流与管嘴出流	219
12.7 无限空间淹没紊流射流	227
12.8 温差或浓差射流及射流弯曲	232
思考题与习题	236
单元 13 泵与风机的构造与理论基础	239
13.1 泵与风机的基本构造、工作原理	240
13.2 泵与风机的基本性能参数	248
13.3 泵与风机的性能曲线	250
13.4 泵的汽蚀与安装高度	253
13.5 相似律与比转数	257
思考题与习题	262
附录	264
参考文献	284

第一部分

热工学基础

单元 1 工程热力学基本概念

一、知识点

工质及热力系统,热力状态,可逆过程,基本状态参数,理想气体状态方程,混合气体的分压力。

二、能力目标

1. 掌握:工质、热力系统、热力状态、可逆过程、混合气体分压力等基本概念;基本状态参数的物理意义和单位;绝对压力、表压力和真空度的关系。
2. 理解:热力系统的分类及其特征;气体常数的含义。
3. 熟悉:理想气体与实际气体的区别。
4. 应用:能应用基本概念和理想气体状态方程式等公式进行相关工程问题的分析和计算。

1.1 工质和热力系统

1.1.1 工质

工程上或日常生活中,通常会用到某种工作物质来实现热能的输送或转移,最终达到热能利用的目的。这些可以用来携带、输送、转移热能或将热能转变为机械能(电能)的工作物质统称为工质。

工程上所遇到的工质是多种多样的。有处于气态的,也有处于液态的。热力工程中经常采用的工质有水、水蒸气、湿空气、制冷剂等。

1.1.2 热力系统

在分析任何现象或过程时,都应首先确定所研究的对象。例如,在分析力学现象时,常将所研究的对象取为分离体,然后分析该分离体与其他有关物体的相互作用。同样,在分析热力现象或热力过程时,也应根据所研究问题的需要,选取一定范围内的物质作为研究对象。在工程热力学中,将研究对象的总和称为热力系统,或简称为系统。将系统之外的物质称为外界。将系统与外界之间的分界面称为边界。边界可能是真实的,也可能是假想的;可能是固定的,也可能是变化的或运动的。

如图 1-1 所示,活塞在气缸里移动以实现能量转换。若取封闭在气缸中的气体作为

研究对象,则气缸壁及活塞端部内表面就是边界。显然,该边界是真实存在的,并且一部分边界是可以变化的。又如图 1-2 所示的汽轮机工作原理示意图,若取截面 1—1 与截面 2—2 之间的流体作为研究对象,则汽轮机内壁与截面 1—1、截面 2—2 构成系统的边界,显然该系统边界有一部分是固定不变、真实存在的,有一部分边界是假想的。

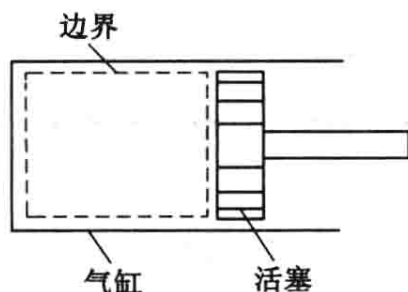


图 1-1 闭口系统

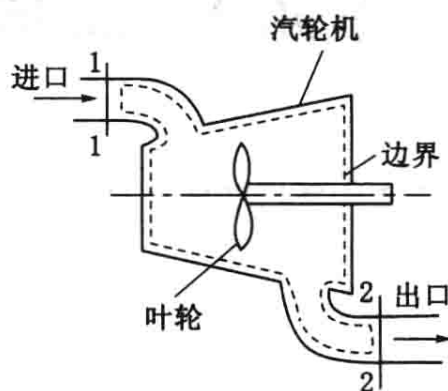


图 1-2 开口系统

1.1.3 热力系统的分类

一般而言,热力系统与外界总是处于相互作用之中,彼此之间可以通过边界进行能量传递和物质交换,根据能量传递和物质交换情况可以将热力系统分为以下四类。

(1) 闭口系统 热力系统与外界可以传递能量,但没有物质的交换,即没有物质的流入和流出。如图 1-1 所示的系统。

(2) 开口系统 热力系统与外界可以传递能量,也可以有物质的交换,即有物质通过边界流入和流出。如图 1-2 所示的系统。

(3) 绝热系统 热力系统与外界无热量交换,但可以有能量和物质的交换。

(4) 孤立系统 热力系统和外界不发生任何作用,既无能量交换也无物质交换。

自然界中的物质都是相互联系、相互制约和相互作用的,并不存在绝对的绝热系统和孤立系统。但若热力系统与外界的热量、功量、物质交换很少,其影响可忽略不计,则可视作绝热系统或孤立系统。

另外还有一些特殊的热力系统,如具有无限大热容量的热力系统,它们在放出或吸收有限热量时不改变热力系统自身的温度,称为热源,如高温热源、低温热源等。

1.2 工质的热力状态和基本状态参数

1.2.1 热力状态和状态参数

在热力设备中,能量的相互转换或转移,需要通过工质吸热或放热、膨胀或压缩等一系列热力状态变化来完成。所谓热力状态,就是指工质在某一瞬间所呈现的宏观物理状况。而这些宏观物理状况必须通过一些物理参数来描述或表示,如压力、温度等。我们把用来描述工质热力状态的物理量称为工质的状态参数。

工质的状态由工质的状态参数来描述。工质的状态发生了变化,其状态参数也相应

地发生变化,状态参数是状态的函数。工质的状态发生变化时,初、终状态参数的变化值,仅与初、终状态有关,而与状态发生的途径无关。

在热力学中,常用到的工质状态参数有温度(T)、压力(p)、比体积(v)、内能(U)、焓(H)、熵(S)等。其中温度、压力和比体积可以用仪器、仪表直接或间接测量出来,称为工质的基本状态参数。而其余的状态参数则是通过基本状态参数推导、计算获得,故称之为导出状态参数。

1.2.2 基本状态参数

1.2.2.1 温度

从宏观上讲,温度是表示物体冷热程度的物理量。从微观上讲,温度是物体分子热运动激烈程度的标志。当两个温度不同的物体相互接触时,热量会自动从热物体流向冷物体,经过一段时间后,两物体温度相等,它们之间就不再有热量传递,达到一个共同的热平衡状态。温度概念的建立以及温度的测定都是以热平衡为依据的。当温度计与被测物体达到热平衡时,温度计指示的温度就是被测物体的温度。

温度的数值标尺称为温标。常用的温标有摄氏温标和热力学温标。摄氏温标所确定的温度称为摄氏温度,用符号 t 表示,单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。在国际单位制(SI)中常采用热力学温标,这种温标确定的温度称为热力学温度,用符号 T 表示,单位为 K(开尔文)。摄氏温度与热力学温度的关系为

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

显然,热力学温标和摄氏温标的分度值相同,仅零点不同。在工程上可采用下式计算:

$$T = t + 273 \quad (1-2)$$

1.2.2.2 压力

压力是指单位面积上所受到的垂直作用力,即物理学中的压强。根据分子运动论,气体的压力是大量气体分子作不规则热运动时对容器壁频繁碰撞的平均结果。

压力的符号用 p 表示,压力的国际单位为帕斯卡(Pa), $1\text{ Pa}=1\text{ N/m}^2$ 。由于 Pa 的单位较小,在工程上,常将其扩大千倍或百万倍,即 kPa 或 MPa。

工程上还曾采用其他的压力单位:

用液柱高度表示:如米水柱(mH_2O)、毫米水柱(mmH_2O)和毫米汞柱(mmHg)等。

用大气压的倍数来表示:如标准大气压(atm)、工程大气压(at)等。

各种压力单位的换算关系为:

$$1\text{ mH}_2\text{O}=10^3\times 9.807\times 1=9\,807\text{ Pa}$$

$$1\text{ mmHg}=13\,595\times 9.807\times 1\times 10^{-3}=133.32\text{ Pa}$$

$$1\text{ atm}=760\text{ mmHg}=101\,325\text{ Pa}=10.33\text{ mH}_2\text{O}$$

$$1\text{ at}=1\text{ kgf/cm}^2=1\times 9.807\times 10^4=98\,070\text{ Pa}=10\text{ mH}_2\text{O}$$

压力的大小通常采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。由于测压计的测量总是在某种环境(通常是大气环境)中进行的,因此测得的压力值不是工质的真实压力,而是工质的真实压力与环境压力之间的差值,是一个相对值,称为相对压力。

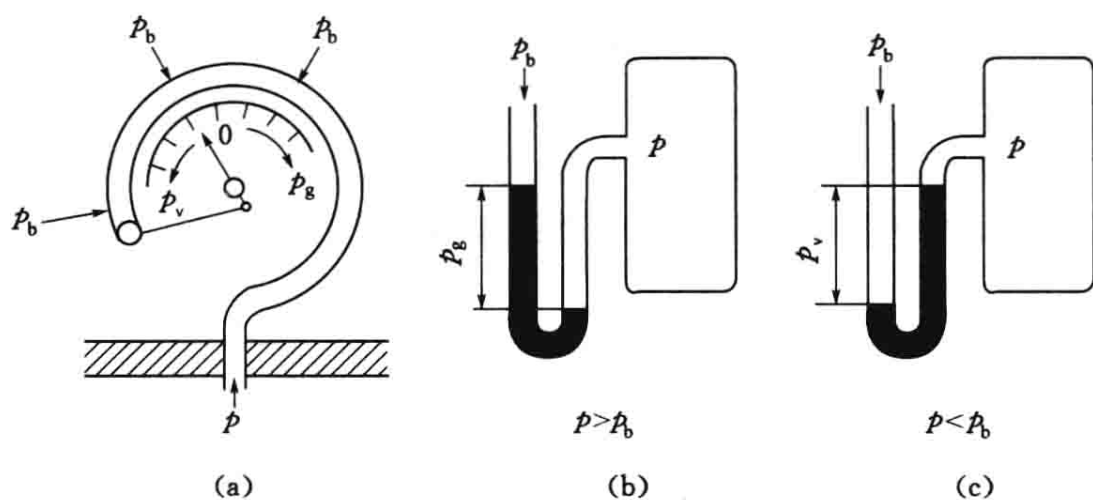


图 1-3 测压计

(a) 弹簧管测压计; (b) U 形管测压计 ($p > p_b$); (c) U 形管测压计 ($p < p_b$)

工质的真实压力是以绝对真空状态为计算基准算起的, 又称为绝对压力。以 p 表示。如以 p_b 表示大气压, 则: 如图 1-3(b) 所示, 此时绝对压力高于大气压力 ($p > p_b$), 压力计指示的读数称为表压力, 用 p_g 表示, 于是

$$p = p_g + p_b \quad (1-3)$$

如图 1-3(c) 所示, 此时绝对压力低于大气压力 ($p < p_b$), 压力计指示的读数称为真空度, 用 p_v 表示, 于是

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

绝对压力、表压力、真空度与大气压力之间的关系如图 1-4 所示。

由于大气压力随地理位置及气候条件等因素而变化, 不是恒定值。当工质的绝对压力不变时, 由于大气压力会发生变化, 则所测出的相对压力也会随之变化。因此, 表压力和真空度不是状态参数, 只有绝对压力才是描述工质状态的状态参数。本书中如无特别指明, 均指绝对压力。大气压力的数值可用气压计测量, 当被测气体的绝对压力很高时, 可以近似取大气压力为 0.1 MPa。

1.2.2.3 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 。若工质的质量为 $m(\text{kg})$, 所占有的体积为 $V \text{ m}^3$, 则比体积的数值为

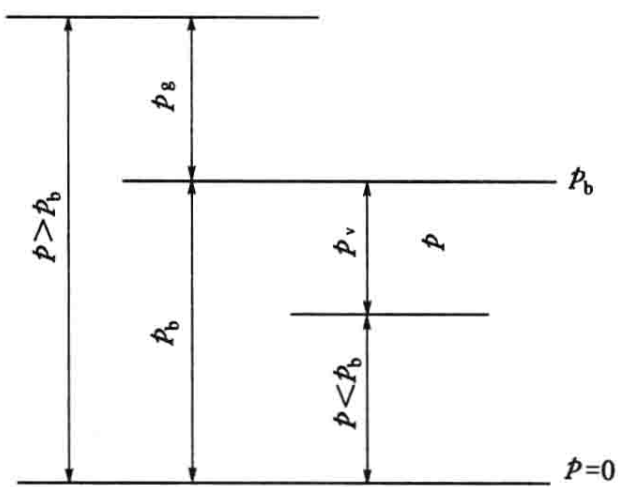
$$v = \frac{V}{m} \quad (1-5)$$

很明显, 比体积 v 与密度 ρ 互为倒数, 即

$$v \cdot \rho = 1 \quad (1-6)$$

可见, 它们不是相互独立的参数。可以任选一个, 在热力学中通常选用比体积作为独立状态参数。

【例 1-1】 某蒸汽锅炉压力表读数 $p_g = 3.23 \text{ MPa}$, 凝汽器真空表读数 $p_v = 95 \text{ kPa}$ 。

图 1-4 p 、 p_g 、 p_v 与 p_b 的关系

若当地大气压力 $p_b = 101.32 \text{ kPa}$, 试求锅炉及凝汽器中蒸汽的绝对压力。

【解】锅炉中蒸汽的绝对压力为

$$p = p_g + p_b = 3.23 \times 10^3 + 101.32 = 3\,331.32 \text{ kPa}$$

凝汽器中蒸汽的绝对压力为

$$p = p_b - p_v = 101.32 - 95 = 6.32 \text{ kPa}$$

1.3 平衡状态和热力过程

1.3.1 平衡状态

系统可以处于不同的热力状态,但这些热力状态不一定都能用确定的状态参数来描述。例如,当系统内各部分工质的压力、温度各不相同,而且随着时间的变化而改变时,就无法用确定的状态参数描述整个系统内部工质的状态。这种状态即不平衡状态。若系统不受外界影响,随着时间的推移,系统内各部分之间位移及能量的传递必将逐渐减弱,最终达到各部分之间不再有相对位移,同时也不再有热量传递,即同时建立了热与力的平衡。此时系统的状态称为热力平衡状态,或简称为平衡状态。

实际上,并不存在完全不受外界影响、状态参数绝对保持不变的系统。因此,平衡状态只是一个理想的概念。但在大多数情况下,由于系统的实际状态偏离平衡状态并不远,所以可以将其作为平衡状态处理。

1.3.2 热力过程

热力系统中工质从一个状态向另一状态变化时所经历的全部状态的总和称为热力过程,简称过程。热能与机械能的相互转换或热能的转移必须通过系统的状态变化来实现。一切实际热力过程都是热力系统与外界之间不平衡势差(温差、压力差等)作用的结果,也就是说,实际的热力过程均是由一系列的不平衡状态变化所形成的,整个过程中难以有确定的状态参数,热力过程的分析计算难以进行。因此,类似于平衡状态的概念,再引入准平衡过程与可逆过程的概念。

1.3.2.1 准平衡过程

热力系统中工质所经历的每一个状态都无限地接近平衡状态的热力过程称为准平衡过程。准平衡过程是一种理想过程,它是实际过程进行得足够缓慢的极限情况。

准平衡过程在热力学中有很重要的意义,因为只有在平衡状态时,工质的状态才能用状态参数来描述,因此,热力学所研究的热力过程,一般都指准平衡过程。

1.3.2.2 可逆过程

如果热力系统完成了某一热力过程后,再沿原来路径逆向进行时,能使热力系统和外界也回复到原来状态而不留下任何变化,则这一过程称为可逆过程。反之,则称为不可逆过程。

可逆过程必须是准平衡过程,而且系统和外界经历了正向和逆向过程后必须都恢复原来状态。由此可见,一切实际存在的热力过程都是不可逆过程。因为要想实现可逆过

程,必须满足以下两个条件:

(1) 作机械运动时,热力系统和外界保持力平衡,即没有因摩擦而使机械能转化为热能的现象(使功转变为热的效应,称为耗散效应)。

(2) 传热过程中热力系统和外界保持热平衡,即无温差。

可见,可逆过程是一种不引起任何能量损失的理想过程。虽然可逆过程实际上并不存在,但可以把它作为一切实际过程的理论极限,可逆过程可以理解为无限小的温差下传热、无限微弱摩擦下作机械运动的过程。因而可以作为实际过程中能量转换效果比较的标准,并借以指出努力的方向。

1.4 理想气体状态方程

1.4.1 理想气体与实际气体

由于工质大多为气体,所以需对气体的性质、运动规律有所了解。根据气体分子运动论,大量的气体分子不停地进行无规则的热运动,分子本身具有一定的体积,而且分子之间存在着引力。所以,气体的性质是非常复杂的。为了方便地研究问题,提出了理想气体这一概念。

所谓理想气体是一种经过科学抽象的假想气体,它必须符合两个假定条件:一是气体分子本身不占有体积;二是气体分子间没有相互作用力。

凡是不符合这两个条件的气体都为实际气体。

当气体的压力不太高,温度不太低,远离液态时,气体分子间的作用力及分子本身的体积可以忽略,此时这些气体可以看做理想气体。如工程中常用的 O_2 、 N_2 、 H_2 、 CO 、 CO_2 等气体及其混合物,都可以作为理想气体处理。另外,空气或烟气中所含的少量水蒸气,由于其分压力很低,比体积很大,也可作为理想气体处理。

而当气体的比体积较小,离液态较近时,则不能当做理想气体来处理。如蒸汽动力装置中的水蒸气、制冷系统中的制冷剂蒸气等均不能当做理想气体。

1.4.2 理想气体状态方程

当理想气体处于任一平衡状态时,三个基本状态参数之间的数学关系为

$$pv = RT \quad (1-7)$$

式中 p ——绝对压力,Pa;

v ——比体积, m^3/kg ;

T ——热力学温度,K;

R ——气体常数, $J/(kg \cdot K)$,与气体的种类有关,而与气体的状态无关。

式(1-7)为 1 kg 理想气体的状态方程式,反映理想气体在某一平衡状态下三个基本状态参数之间的函数关系。

对质量为 $m(kg)$ 的理想气体,状态方程式可写成

$$pV = mRT \quad (1-8)$$

式中 V ——质量为 m kg 气体的体积, m^3 。