

普通高等教育规划教材

# 工程热力学与传热学

(汽车服务工程专业)

李岳林 / 主编  
龚崇龄 / 主审



人民交通出版社  
China Communications Press

TK123

30

2007

普通高等教育规划教材

Gongcheng Relixue yu Chuanrexue

# 工程热力学与传热学

(汽车服务工程专业)

李岳林 主编

龚崇龄 主审

人民交通出版社

## 内 容 提 要

本书围绕能量转换与传递这一主线,注重科学性 with 教学性的结合,注重理论联系实际,介绍工程热力学及传热学的基本理论和基本分析方法。全书共分两篇、十二章,每章末均附有复习思考题和习题。

本书可作为非动力类专业热工基础课教材,也可供有关工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

工程热力学与传热学 / 李岳林主编.—北京:人民交通出版社,2007.4

ISBN 978-7-114-06459-3

I.工… II.李… III.①工程热力学②工程传热学  
IV.TK123 TK124

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第037764号

普通高等教育规划教材

书 名:工程热力学与传热学

著 作 者:李岳林

责任编辑:钱悦良

出版发行:人民交通出版社

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpres.com.cn>

销售电话:(010)85285838,85285995

总 经 销:北京中文盛世书刊有限公司

经 销:各地新华书店

印 刷:北京宝莲鸿图科技有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:14

插 页:1

字 数:344千

版 次:2007年6月 第1版

印 次:2007年6月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-06459-3

印 数:0001~3000册

定 价:27.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书,由本社负责调换)

# 前 言

本书是根据全国汽车运用工程专业教学指导委员会于1996年在天津会议审订的“工程热力学与传热学教学基本要求”而编写的,按50学时安排,作为非动力类各专业学生学习热工基础的教材。2006年在全国汽车服务工程专业教学指导委员会武汉会议上决定对其进行修订;是汽车服务工程专业本科学生必学的技术基础课之一。

本书将《工程热力学》与《传热学》合二为一,抓住能量转换与传递这一主线索进行了阐述,注重科学性与教学性的结合,注重理论联系实际,以便学生学完本课程之后能熟练地运用热力学及传热学的基本理论和基本分析方法,进一步学好后续课程,解决实际工程技术问题。

书中采用国际单位制,鉴于目前的实际情况,书后附录列出了单位换算表。每章末均附有一定数量的思考与练习题,以帮助学生复习、练习和巩固所学内容。

本书由长沙理工大学李岳林教授主编(第一至四、八、十章),参加编写的还有长沙理工大学刘志强(第五、六章)、重庆交通大学邵毅明(第七、九、十一章)、长沙理工大学徐小林(第十二章),全书最后由李岳林修改定稿。全书由武汉理工大学龚崇龄教授担任主审,审稿期间对本书书稿提出了不少有益的意见,使本书质量有明显的提高,编者在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,时间仓促,书中缺点和错误在所难免,欢迎读者批评指正。

编者

2007年1月

# 目 录

绪论	1
----	---

## 第一篇 工程热力学

<b>第一章 基本概念</b>	3
第一节 热力系统	3
第二节 状态和基本状态参数	4
第三节 状态方程、参数坐标图	7
第四节 热力过程、准静态过程和可逆过程	8
第五节 功和热量	10
第六节 熵和温熵图	12
第七节 热力循环	13
思考与练习题	14
<b>第二章 热力学第一定律</b>	16
第一节 热力学第一定律的实质、内能	16
第二节 热力学第一定律的数学表达式	17
第三节 稳定流动能量方程的应用	22
思考与练习题	24
<b>第三章 气体与水蒸气的热力性质和热力过程</b>	26
第一节 实际气体和理想气体	26
第二节 理想气体的比热	26
第三节 理想气体的内能、焓、熵	31
第四节 分析热力过程的目的与一般方法	33
第五节 四种典型热力过程、多变过程	34
第六节 水蒸气的热力性质	47
思考与练习题	55
<b>第四章 热力学第二定律</b>	59
第一节 热力学第二定律的任务和表述	59
第二节 卡诺循环和卡诺定理	60
第三节 熵的导出	64
第四节 孤立系统熵增原理	66
思考与练习题	72
<b>第五章 气体的流动</b>	74

第一节	一元稳定流动的基本方程	74
第二节	促使流速改变的条件	75
第三节	气体流经喷管的流速和流量	77
* 第四节	绝热节流过程	82
	思考与练习题	83
<b>第六章</b>	<b>气体的压缩过程及动力循环</b>	<b>85</b>
第一节	压气机的压气过程	85
第二节	活塞式内燃机循环	91
	思考与练习题	96
<b>第七章</b>	<b>制冷循环</b>	<b>99</b>
第一节	制冷装置的理想循环及制冷系数	99
第二节	蒸汽压缩制冷装置循环	100
第三节	其他制冷装置	106
第四节	制冷剂	108
	思考与练习题	109
<b>第八章</b>	<b>理想混合气体和湿空气</b>	<b>111</b>
第一节	理想混合气体的基本性质	111
第二节	理想混合气体的比热、内能、焓和熵	114
第三节	湿空气的基本概念	115
第四节	湿空气的焓湿图	119
	思考与练习题	123

## 第二篇 传 热 学

<b>第九章</b>	<b>导热</b>	<b>126</b>
第一节	基本概念	126
第二节	导热的基本定律	127
第三节	导热微分方程式	128
第四节	简单形状物体的一维稳态导热计算	130
第五节	通过肋片的稳态导热	134
	思考与练习题	140
<b>第十章</b>	<b>对流换热</b>	<b>142</b>
第一节	对流换热的基本概念	142
第二节	牛顿冷却公式	144
第三节	对流换热的实验方法	147
第四节	对流换热的分析计算	153
	思考与练习题	163
<b>第十一章</b>	<b>热辐射和辐射换热</b>	<b>164</b>
第一节	热辐射的基本概念及基本定律	164
第二节	固体表面间的辐射换热	170

第三节	辐射换热的网络求解法	176
	思考与练习题	180
<b>第十二章</b>	<b>传热与换热器</b>	<b>182</b>
第一节	概述	182
第二节	传热过程	182
第三节	传热的增强和减弱	185
第四节	间壁式换热器及其热计算原理	187
第五节	效率-传热单元数热计算法	193
	思考与练习题	196
<b>附录</b>		<b>198</b>
附表 A	单位换算表	198
附表 B1	饱和水与干饱和蒸汽表(按温度排列)	199
附表 B2	饱和水与干饱和蒸汽表(按压力排列)	201
附表 C	未饱和水与过热蒸汽表	203
附表 D	金属材料的密度、比热容和导热系数	207
附表 E	保温、建筑及其他材料的密度和导热系数	209
附表 F	干空气的热物理性质	210
附表 G	未饱和水( $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ )和饱和水的热物理性质	211
附表 H	干饱和水蒸气的热物理性质	213
<b>参考文献</b>		<b>215</b>

# 绪 论

## 一、热能的利用和热力学的发展简史

人类在长期实践中发现,自然界中存在着许多可被用来为生活和生产服务的能源。其中主要有:风能、水能、太阳能、地热能、燃料化学能、原子能等。在这些能源中,除风能和水能是以机械能的形式直接被利用外,其他各种能源只能直接或间接地(通过燃烧、核反应)提供热能。热能可直接被用于冶金、加热、蒸煮、烘干、供暖等方面。但大量的还是通过热机(如蒸汽机、蒸汽轮机、内燃机、燃气轮机、喷气发动机等)使这些热能部分地转变为机械能,或进一步转变为电能,以供生产和生活中的大量需要。因此,对热能的性质及其转换规律的研究显得非常必要。18世纪中叶以后,蒸汽机的发明首先实现了热能与机械能的转化,从而进一步刺激和推动了热学方面的理论研究,促成了热力学的建立与发展。

虽然人类很早就已经在生产和生活中利用了各种热能,但在很长时间内,只看到了热的现象,认为热是一种没有形体的“热素”,物体得之则热,失之则冷。直到1850年,由于迈耶(Mayer)和焦耳(Joule)等人的艰苦实践,才确立了热能之间的当量关系,也就是确认了热力学等一定律。1850~1851年间,克劳修斯(Clausius)和汤姆逊(Thomson)先后提出了关于热能和机械能在转换上存在着方向性问题,即热力学第二定律的基本观点。它们都是从无数实践经验中总结出来的、公理性的定律。这两个定律的确立,奠定了热力学的基础。

在热力学形成的初期,主要是研究热机中热能和机械能的转换。后来,随着热力学本身的不断发展,除了指导热机的发展外,又被广泛应用到其他自然科学和生产部门中去。它在工程、物理、化学、生物等学科上都显得很重要,不但与热机、制冷、热泵、空气分离、空气调节等传统工程有关,而且发展到宇宙航行、海水淡化、城市排污、超导传递、化学精炼、高能激光及新能源探索等新技术领域中,并相应地发展了新的理论,形成了若干分支,如工程热力学、传热学、气动热力学、化学热力学等。其中工程热力学与传热学的基本理论组合在一起便行成了非动力类的热工理论基础。

## 二、本课程的研究对象和主要内容

热力学是研究能量(特别是热能)性质及其转换规律的科学。工程热力学是研究热能与机械能相互转换的一门学科。其主要内容包括三部分:(1)介绍构成工程热力学理论基础的两个基本定律——热力学第一定律和热力学第二定律;(2)介绍常用工质的热力性质;(3)根据热力学的基本定律,结合工质的热力性质,分析计算实现热能和机械能相互转换的各种热力过程和热力循环,阐明提高转换效率的正确途径。

传热学是研究热量传递规律的学科。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,就必然有热能的传递过程。传热学的主要内容就是对传热的基本方式和实际的传热过程进行分析,研究物体内部或物体与物体之间的热能传递机理,从而找出提高传热效果或减少热损失的途径以及确定常见简单物体内温度分布的规律。



### 三、热力学的研究方法

热力学的研究有两个途径:一是现象或经典热力学;另一是统计热力学。经典热力学完全由宏观现象出发,以实践为基础来描述客观规律,把由大量分子组成的物质看成是连续均匀的整体,采用一些宏观物理量来描述物质所处的状况,并且根据两个基本定律,导出这些物理量之间的普遍关系,因此具有高度的普遍性和可靠性。经典热力学的结构比较简单,只要利用几个基本概念就能进行热力学定律的推演,而这些基本概念较为直观,易于理解,涉及的变量也少。

统计热力学是研究热现象的微观理论。它从物质内部的微观结构出发,应用力学规律说明分子的运动,并用统计的方法说明大量分子紊乱运动的统计平均性质,因而它能够从物质内部的微观运动机理,更好地说明宏观热现象的物理实质。但它的分析过程较为复杂,不像宏观理论那样直观、简单,故主要用于理论研究工作。

传热学同热力学一样,从根本上说同属于物理学领域,在研究方法上常采用实验物理和理论物理两种方法。

本课程主要采用宏观方法进行讨论。为了帮助对某些热现象的进一步理解,在必要时则以微观分析方法作适当的解释。

# 第一篇 工程热力学

在现代工业、农业、交通运输和国防建设等方面广泛使用着各种动力机械,如蒸汽机、汽油机、柴油机、汽轮机、燃汽轮机、喷气发动机等。虽然它们具有不同的结构,使用不同的燃料,但从能量转换观点看,他们都有自己的共同点,即都是将燃料燃烧时所释放的化学能首先转换为热能,再通过工作媒质(工质)的作用转变为机械能或进一步转化为电能。工程热力学正是研究这种能量转换规律的学科。

## 第一章 基本概念

在开始研究热功转换的基本规律之前,要建立一些必要的基本概念,如热力系统、热力状态、热力过程、热力循环等。正确理解和掌握这些基本概念,对学习热力学的分析方法并用来解决能量转换的实际问题是很重要的。

### 第一节 热力系统

作任何分析研究,首先必须明确研究对象。热力系统就是具体指定的热力学研究对象。把热力系统外面与热功转换过程有关的其他物体统称为外界。对于外界一般只笼统地考察它们和热力系统间传递的热量和机械功。热力系统和有关的外界之间的分界面称为边界。边界面可以是真实的(如图 1-1 和图 1-2 中取气体工质为热力系统时,气缸内壁和活塞内壁可以认为是真实存在的界面),也可以是假设的(如图 1-2 中进口截面和出口截面便是假想的界面);可以是固定的,也可以是变动的(如图 1-1 中当活塞移动时界面发生变化)。

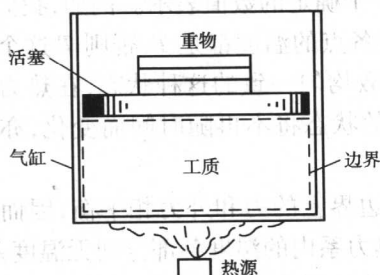


图 1-1

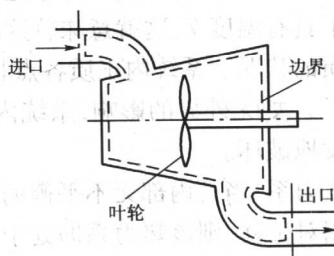


图 1-2

热力系统的选取,取决于研究的目的和任务。它可以是某种物质,如气缸中的气体;也可以是一部动力设备,如包括油箱、发动机、循环水泵在内的整个机器;也可以是某一特定的空间,如研究喷气发动机时尽管划定范围内的物质随时在更换,而仍将划定的空间作为热力系

统。有时在划定的空间内也许不存在任何物质,如研究真空中的辐射,它也是一个热力系统。

在作热力学分析时,既要考虑热力系统内部的变化,也要考虑热力系统通过界面和外界发生的能量交换和物质交换。工程热力学主要关注系统与外界之间的相互作用,根据系统与外界相互作用的不同情况,可将热力系统分为以下4种类型:

(1)闭口系统:在所研究的时间内,系统与外界只有热量和机械能等能量的交换而无物质的变换。如图1-1所示,气缸中的工质在膨胀时,工质的质量不变,但从外界吸入热量并举起重物提高了它们的势能。

(2)开口系统:在所研究的时间内,系统与外界不仅有热量和机械能等能量的交换,而且有物质的交换。如图1-2所示,在进出口处分别有气体携带着热能及宏观动能通过边界进出系统,同时气流推动叶轮通过轮轴向外界输出机械能。

(3)绝热系统:在所研究的时间内,系统与外界无热量交换,但有其他能量的交换。

(4)孤立系统:在所研究的时间内,系统与外界既无能量交换,也无质量交换。

必须指出,真正的绝热系统和孤立系统是不存在的。例如,研究气体在气缸中的压缩或膨胀过程,不可避免地与外界有热量的交换。但是,为了突出主要矛盾,忽略所交换的微小的能量和质量,将其抽象成为绝热系统或孤立系统,使问题得以简化。

## 第二节 状态和基本状态参数

### 一、热力状态和平衡状态

热动力装置中,热能向机械能的转换是借助于工质吸热和对外膨胀做功来完成的。显然,在此过程中,工质的压力、温度等一些物理特性随时都在改变,或者说工质的状态随时都在改变。热力学中把工质所处的某种宏观状况称为工质的热力状态,简称状态。用来描述和说明工质状态的一些物理量(如压力、温度等)则称为工质的状态参数。状态参数值只取决于工质的状态,也就是说,对应一定的状态,工质的各状态参数有确定的数值。因而,任何物理量,只要它的变化量等于始、终两状态下该物理量的差值,而与工质的状态变化途径无关,都可以作为状态参数。

描述热力系统的状态时,如果整个系统的状态参数均匀一致,在系统内到处有相同的温度和相同的压力,那么系统的每一个状态参数可各用一个确定的数值表示。例如,我们说工质在某一状态下具有温度 $T$ ,这就意味着这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况。系统内工质各点相同的状态参数均匀一致的这种状态,在热力学上称作“平衡状态”。如无外界的影响,系统内工质各部分的状态将不再随时间而变化,亦即平衡状态不会自发地破坏。

一个热力系,当其内部无不平衡的力,且作用在边界上的力和外力相平衡,因而各部分间不会发生相对位移,则该热力系即处于力平衡。若热力系内的温度各部分间无温度差别,且等于外界温度,因而就不会发生热的传递,则该热力系即处于热平衡。所以,为了能够实现平衡状态,必须满足力平衡、热平衡条件。如热力系内还存在化学反应,则还要包括化学平衡。

工程热力学只对平衡状态进行分析研究,这是因为处于不平衡状态时,用工质各部分的状态参数不尽相同,且随时间而变化,还常发生热量传递、相对位移,无法用共同的参数来简单描述工质所处的状态。依平衡状态分析所得的结果与实际变化相差不大,这就使得研究工质的

状态和状态变化规律的工作得到很大的简化。因此,我们研究的热力学是平衡状态下的热力学,不涉及时间因素。

## 二、基本状态参数

在工程热力学中常用的状态参数有6个,即压力、比容、温度、内能、焓和熵。其中压力、比容和温度可以直接测量,也比较直观,称为基本状态参数。下面先介绍这3个基本状态参数。

### 1. 压力

压力是指单位面积上承受的垂直作用力

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

式中: $p$ ——压力;

$F$ ——垂直作用力;

$A$ ——面积。

根据分子运动论,气体的压力是大量分子向容器壁面撞击的平均结果。式(1-1)算出的压力是气体的真正压力,称为绝对压力。由于测量压力的仪表通常总是处于大气环境中,因此不能直接测得绝对压力,而只能测出绝对压力和当时当地的大气压力的差值(参看图1-3),当气体的绝对压力高于大气压力时,压力表所指示的是绝对压力超出大气压力的部分,称为表压力( $p_g$ )

$$p_g = p - p_b \quad (1-2)$$

式中: $p_b$ ——大气压力,可用气压表测定。

当气体的绝对压力低于大气压力时,真空表所指示的是绝对压力低于大气压力的部分,称为真空度( $p_v$ ):

$$p_v = p_b - p \quad (1-3)$$

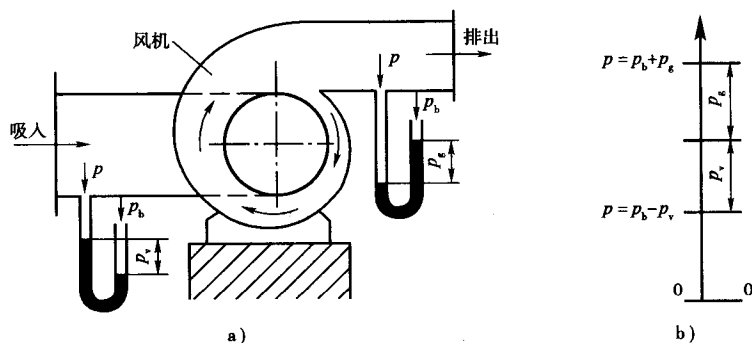


图 1-3

因此,如果需要知道气体的绝对压力,仅仅知道压力表或真空表的读数是不够的,还必须知道当时当地气压表的读数,然后通过下列关系式将绝对压力计算出来。

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

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

显然,大气压力是经常变化的,所以即使绝对压力不变时,随着大气压力变化,表压力或真空度也要发生变化。因而作为气体状态参数的压力,只能是气体的绝对压力。

常用测定气体压力的有U形管压力表和弹簧管压力表,一般测量较小的压力常用U形管

压力表。用U形管压力表(或真空表)通过液柱高度差测定表压力(或真空度)时,其换算关系如下

$$p_g(\text{或 } p_v) = \rho g \Delta z \quad (1-6)$$

式中: $\rho$ ——液体的密度;  
 $g$ ——重力加速度;  
 $z$ ——液体高度差。

在法定单位制中,压力的单位是帕(Pa),即  $\text{N}/\text{m}^2$ ,在工程使用时嫌太小,而以 MPa 为应用单位。已废除的压力单位与法定压力单位换算见表 1-1。

废除压力单位与法定压力单位换算

表 1-1

废除单位名称	废除单位代号		与帕的换算关系	备注
	中文	英文		
巴	巴	bar	1 bar = $10^5$ Pa	
标准大气压	标准大气压	atm	1 atm = 101 325 Pa	
托 (毫米汞柱)	托 (毫米汞柱)	Torr (mmHg)	1 Torr = 1 mmHg = 133.32 Pa	Torr 及 mmHg 均为习惯上常用的符号
工程大气压 (公斤力/厘米 <sup>2</sup> )	工程大气压 (公斤力/厘米 <sup>2</sup> )	at (kgf/cm <sup>2</sup> )	1 at = 1 kgf/cm <sup>2</sup> = $9.806 65 \times 10^4$ Pa	
毫米水柱	毫米水柱	mmH <sub>2</sub> O	1 mmH <sub>2</sub> O = 9.806 65 Pa	mmH <sub>2</sub> O 为习惯上常用的符号

**例 1-1** 某柴油机在做惯性增压试验时,测得气缸内燃烧气体的最高压力为  $72.94 \times 10^5$  Pa,进气管的真空度为  $293 \times 10^2$  Pa,试验时气压表读数为  $1.007 \times 10^5$  Pa,试计算这两处的绝对压力。

解:(1)气缸压力  $p_1$

$$p_1 = p_a + p_g = 1.007 \times 10^5 + 72.594 \times 10^5 = 73.601 \times 10^5 \text{ Pa} = 7.360 \text{ MPa}$$

为了避免复杂的计算,有时认为大气压力近似地为  $10^5$  Pa,则

$$p_1 = 10^5 + 72.594 \times 10^5 = 73.594 \times 10^5 \text{ Pa}$$

两者误差不超过 0.02%。

(2)进气管压力  $p_2$

$$p_2 = p_b - p_v = 1.007 \times 10^5 - 293 \times 10^2 = 0.713 7 \times 10^5 \text{ Pa}$$

同样,当大气压力近似等于  $10^5$  Pa 时,则

$$p_2 = 10^5 - 293 \times 10^2 = 0.714 \times 10^5 \text{ Pa}$$

两者误差将近 1%。所以,工程上当绝对压力较高时,常将大气压力近似地等于  $10^5$  Pa,而在绝对压力接近大气压力时,作这种近似处理则将影响计算的精确度。

## 2. 比容

单位质量工质所占有的容积称为比容,以符号  $v$  表示,单位为  $\text{m}^3/\text{kg}$ ,即

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

式中: $V$ ——容积;

$m$ ——质量。

单位容积内工质的质量称为密度,以  $\rho$  表示,单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,即

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

由上可知比容与密度互成倒数。所以密度  $\rho$  也可以作为状态参数,它们都是描述工质分子的密集程度。当其中一个具有确定值时,另一个也具有确定值,因此它们不能作为两个相互独立的状态参数。

### 3. 温度

温度是表征物体冷热程度的物理量。热物体温度高,冷物体温度低。当两个物体接触时,温度高的物体就要向温度低的物体传热。如果两者间没有热量传递,则两物体的冷热程度一样,即处于热平衡状态,两物体温度相等。“当两个物体同时与第三个物体热平衡时,这两个物体之间也必然是热平衡”,这便是热平衡定律。它也是热力学的基本定律之一,它不是从热力学第一定律或第二定律推演出来的。从热力学的逻辑推理来看,它是居于热力学第一和第二定律之前,因此也称为热力学第零定律。

处于热平衡的物体具有相同的温度,这是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,温度计的温度即等于被测物体的温度。

从微观角度分析,物体的冷热程度取决于物体内部微粒运动的状况。按分子运动理论,气体的热力学温度与气体分子的平均移动动能成正比。它们之间的关系是

$$\frac{\overline{mc^2}}{2} = \frac{3kT}{2} \quad (1-9)$$

式中: $\bar{m}$  ——分子的平均质量;

$\bar{c}$  ——分子的均方根移动速度;

$\frac{\overline{mc^2}}{2}$  ——分子的平均移动动能;

$k$  ——玻尔兹曼常数( $k = 1.380\ 662 \times 10^{-23}$  J/K);

$T$  ——绝对温度。

法定单位制中采用热力学温标,也叫开尔文温标或绝对温标,用开(K)表示;温度值采用  $T$  表示。摄氏温标或百度温标用摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ )表示;温度值用  $t$  表示。它们之间的换算关系如下

$$T(\text{K}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273.15 \quad (1-10)$$

显然,摄氏温标的每一度( $1^{\circ}\text{C}$ )和开尔文温标的每一开(1K)是相等的,只是摄氏温标的零点比开尔文温标零点高出 273.15 度。

## 第三节 状态方程、参数坐标图

### 一、状态方程

对于由气体工质所组成的热力系,当处于平衡状态时,热力系内各部分将具有相同的压力、温度和比容等参数。实验指出,如维持气体的比容不变( $v = \text{常数}$ ),加热后,压力将随温度的升高而增大;当压力不变时,气体的比容随温度的升高而加大;如果比容和压力都保持不变,则温度就只能是个定值。由此可知,状态参数之间并不是彼此孤立的,而是相互联系的。这种内在的联系可用数学式表达如下

$$f(p, v, T) = 0 \quad (1-11)$$

式(1-11)称为状态方程,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。普通物理中所讲的理想气体状态方程  $pV = RT$  或  $pV = mRT$  就是一例。

## 二、参数坐标图

以上说明了三个状态参数之间存在内在的联系,三个状态参数中只有两个是彼此独立的。因此,用三个状态参数中的任意两个参数就可以表明工质所处的状态。这样,只要用三个基本参数中的任意两个独立参数,就可以作为一个平面直角坐标图的横坐标和纵坐标作出参数坐标图,就能清晰地表示工质所处的热力状态。如图 1-4 所示的  $p-v$  图(称为压容图),是以压力作为纵坐标,比容作为横坐标。此坐标图任意一点(如点 1 和点 2)对应于工质某一确定的状态( $p_1, v_1$  或  $p_2, v_2$ )。显然,不平衡状态没有确定的状态参数,不能在状态图上表示。除以上介绍的  $p-v$  图以外,热力学中还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。

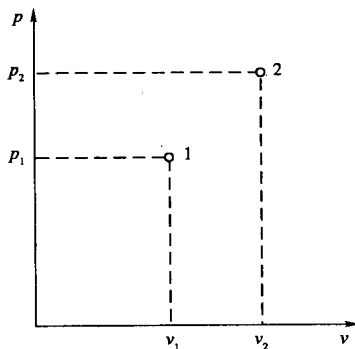


图 1-4 参数坐标图( $p-v$  图)

图示法具有直观、简单和便于分析等优点,本课程将广泛借助热力参数坐标图来进行分析计算。在以后的学习中,将会看到  $p-v$  图具有特殊意义,所以使用最频繁。

## 第四节 热力过程、准静态过程和可逆过程

### 一、热力过程

当工质受到外界影响时,例如,外界对工质加热,工质所处的平衡状态遭到破坏,工质的状态就会发生变化。工质从一个状态经过一系列的中间状态变至另一状态,我们就将这种工质的状态发生变化的过程称为热力过程,简称过程。

### 二、准静态过程

在状态变化过程中,若平衡状态的每一次被破坏都离平衡状态非常近,而状态变化的速度(即破坏平衡状态的速度)又远远小于工质内部分子运动的速度(即恢复平衡状态的速度),则状态变化过程的每一瞬间,工质都可以认为是处于平衡状态。也就是说,工质内部各点的压力和温度随时都是均匀一致的,即随时都处于内平衡状态。这种由一系列内平衡状态所组成的(说得确切些,由无限接近平衡状态的状态组成的)过程,称为准静态过程,或准平衡过程。

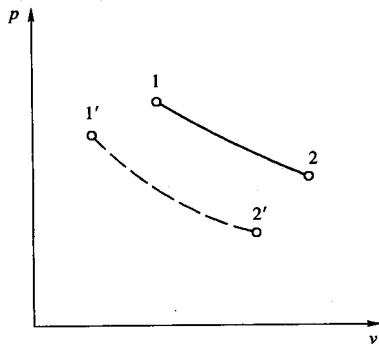


图 1-5

在准静态过程中,工质所经历的每一个状态都是平衡状态,而任意一个平衡状态都可用  $p-v$  图上的一个点来表示,所以一个准静态过程就可以用  $p-v$  图上一条曲线来代表。如图 1-5 所示  $p-v$  图,图上的曲线 1-2 就代表一个准静态过程。如果工质由状态 1' 变化到状态 2' 所经过的不一

个准静态过程,则该过程无法在  $p-v$  图上表示,仅可标出其  $1'$ 、 $2'$  两个平衡状态,而其过程用虚线表示。

准静态过程是实际过程的理想化。因为任何热力过程都是工质状态发生变化的过程,都不可避免地要破坏工质状态原来所处的平衡状态,所以实际过程都不可能是准静态过程。但在适当的条件下,可以近似地当作准静态过程。只有准静态过程才能用热力学方法进行分析研究。

### 三、可逆过程

可逆过程是指当系统由始态变化到终态,又由终态沿原来途径返回始态时,若参与该变化过程的系统及外界均能完全返回原来的状态,则称该变化过程为可逆过程。反之,则为不可逆过程。

图 1-6 所示为一由工质、热机和热源组成的热力系。工质从热源  $T$  处吸收热量进行准静态的膨胀过程,在  $p-v$  图上可用  $1-3-4-5-2$  连续曲线表示。过程中,工质通过活塞将一部分能量传给飞轮,以动能的形式贮存于飞轮中。当  $1-2$  过程完成以后,若完全利用飞轮所贮存的动能推动活塞逆行,使工质从状态 2 沿原路径  $2-5-4-3-1$  压缩回到状态 1。并且在压缩过程中,工质恰好又把同等热量放回给热源  $T$ 。当工质回复到原状态点 1 时,机器和热源也都回复到了原状态,过程所牵涉到的整个系统和外界,全部都回复到原来状态而不留下任何变化。则  $1-2$  这个热力过程就是可逆过程。

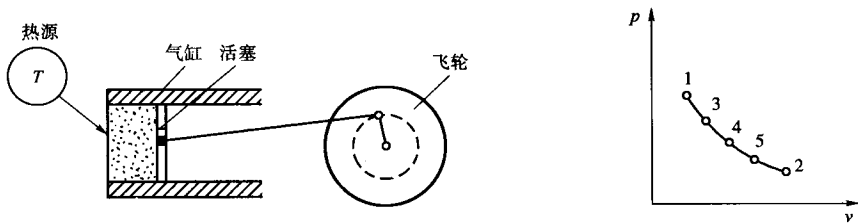


图 1-6

一个可逆过程必定是准静态过程,而过程的不平衡必然导致过程的不可逆。上述例子中若  $1-2$  过程是在力不平衡的情况下发生的,例如工质的作用力大于外界的反作用力,那么要使工质能够从状态 2 按逆过程压缩回到状态 1,就必须改变外力的大小,否则逆过程就不可能发生。这样,在完成正、逆两过程后,工质虽然回到了原状态,但是外界变化了,因而过程就是不可逆的。

可逆过程在实际中并不存在,因为实际的热力过程中不可避免地存在着摩擦作用,在上述例子中,若工质内部或热机的部件间存在摩擦,那么,当工质膨胀时,就会有一部分能量消耗于摩擦上。在逆过程中,飞轮要完全依靠在正过程中得到的能量把工质压缩到原来的状态是不可能的。要想完成逆过程,除了飞轮要释放出它在正过程中得到的全部能量外,还需要外界多消耗一些能量来用于支付正、反两过程中的摩擦消耗。这样,在正、逆过程完成以后,工质虽然回到了原状态,而外界并未回到原状态(它失去了一部分能量)。所以,有摩擦作用存在的过程是不可逆的。在这同一例子中,正过程进行时工质从热源  $T$  吸入热量。若热量的传递是在热源  $T$  的温度高于工质温度的条件下进行(不等温传热),那么,在逆过程中,温度较低的工质就不可能把热量交还此热源,而只能向另一温度更低的热源排热。这样,在完成正、逆两个过程以后,外界就有了变化,即热源  $T$  失去了热量,而冷源得到了热量。可见,有温差的传热过



程也必定是不可逆过程。

由此可见,可逆过程应具备以下几个特点:

- (1)在过程进行时,工质内部及其与外界恒处于平衡状态,故过程进行无限缓慢;
- (2)在变化期间,无任何能量的不可逆损耗。

由以上讨论可见,对工质而言,准静态过程与可逆过程同为一系列平衡状态所组成。因此,都能在热力参数坐标图上用一连续的曲线来描述,并用热力学方法对之进行分析。但准静态过程与可逆过程又有一定的区别,可逆过程不仅工质内部是平衡的,工质与外界间的相互作用也是可逆的,也就是可逆过程必须保持内、外力平衡和热平衡,且无任何摩擦。总之,在过程进行中不存在任何能量的不可逆损耗。而准静态过程只是着眼于工质内部的平衡,至于外部有无摩擦对工质内部的平衡并无关系。这就是说,准静态过程进行时,外界可能发生能量损耗。例如气体在准静态过程中所作的功并不一定全为外界所得,只有在可逆过程中,工质所作的功必须无任何损耗地全部为外界所得。因此,准静态过程的概念,只包括在工质内部的状态变化,而可逆过程则是分析工质与外界所产生的总效果。可逆过程必然是准静态过程,而准静态过程只是可逆过程的条件之一。

实际过程都是不可逆的,只是不可逆的程度不同而已。可逆过程虽然不能实现,但是过程中能量损耗为零,理论上由热变功为最大。这就是说,它表示在实际过程中可能获得最大的外功。所以可逆过程是将一切实际过程理想化后所得出的一种科学抽象概念,是进行热力学分析的一种重要的研究方法。引用可逆过程的概念来研究工质与外界所产生的总效果,可作为改进实际过程的一个准绳,并借以指出努力的方向。

除特殊指明外,本书后面所分析的过程,都是指可逆过程。

## 第五节 功和热量

工质经历一个热力过程后,除了本身状态发生变化之外,还将与外界有能量的交换,可能对外作机械功,也可能与外界发生热能的传递,或者两者都有。现在分别讨论如下。

### 一、功

功的基本概念起源于力学,其含义是力与沿力的作用方向所产生位移的乘积。在工程热力学里,热力系统通过界面和外界进行的机械能的交换量称为作功量,简称为功(机械功),以符号  $W$  表示。由于工程热力学中常以单位质量的工质来分析和计算能量转换的情况。故用  $w$  表示 1kg 质量气体所作的功。在法定单位制中, $w$  的单位采用 J/kg 或 kJ/kg。

观察图 1-7a) 气缸内的气体。设有 1kg 的气体在气缸中进行膨胀,经历一个可逆过程从 1 状态到 2 状态。当气体膨胀推动活塞右移一个微小的距离  $dx$  时,气体对外所作的微元功  $\delta w$  为

$$\delta w = pA dx$$

式中: $A$ ——活塞的截面积。

因为

$$A dx = dv$$

所以

$$\delta w = pdv \quad (1-12)$$

这个微元功可以用图 1-7b)  $p-v$  图中阴影面积代表,且全过程所作的功