

21 世纪高等学校试用教材

# 工程热力学

主 编 薛 兵

副主编 王瑞平 魏忠义 郝丽梅

陕西科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

工程热力学/薛兵,王瑞平编. —西安:陕西科学技术出版社,2005.8

高等工科院校工程类专业课教材

ISBN 7-5369-3967-1

I.工... II.①薛...②王... III.工程热力学—高等学校—教材 IV.TK123

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 063817 号

---

出版者 陕西科学技术出版社  
西安北大街 131 号 邮编 710003  
电话(029)87211894 传真(029)87218236  
<http://www.snstp.com>

发行者 陕西科学技术出版社  
电话(029)87212206 87260001

印刷 西安建筑科技大学印刷厂

规格 787mm×1092mm 1/16 开本

印张 15.5

插页 2

字数 350 千字

印数 1—3000

版次 2005 年 10 月第 1 版  
2005 年 10 月第 1 次印刷

定价 26.00 元

---

# 前 言

热现象是自然界与科学技术领域中最普遍的物理现象,热能是人类利用自然界能源资源的一种最主要的能量形式。我国能源资源丰富,但是人均占有量远低于世界平均水平,而目前我国的单位产值的能耗却是发达国家的数倍。工程领域的技术工作都离不开用能,并且各种形式的能量最终都是以热能的形式散失到环境与宇宙之中。要使我国国民经济走可持续发展的道路,合理用能与节约能源是当务之急。因此“工程热力学”作为介绍热能的有效合理利用及传递与转换规律的热工基础类课程,应该成为培养 21 世纪工科类学生的一门公共技术基础课,学习本课程应是培养复合型工程技术人才科学素养的一个不可缺少的环节。

作为一门技术基础课,在编写本教材的过程中,本着贯彻少而精、理论联系实际的原则,在内容取舍等方面作了精心的策划,并在每章后安排了一定数量的思考题和习题,通过这些题目可以进一步掌握和巩固所学的内容。全书共分十二章,主要由热力学的基础理论、基础理论在理想气体和实际气体中的应用以及动力循环构成。本书可以作为高等院校工程类专业的工程热力学教材,也可作为研究生和工程技术人员的参考资料。

本书各章节的编写分工如下:

薛兵:第一章,第二章,第三章,第四章,附录;

王瑞平:第六章,第七章,第八章;

魏忠义:第五章,第九章,第十章;

郝丽梅:第十一章,第十二章;

全书由薛兵,王瑞平负责统稿。

由于水平有限,谬误之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者

2005 年 8 月

# 目 录

第一章 热工学基本概念	
第一节 热力系统 .....	( 1 )
第二节 热力状态及其基本状态参数 .....	( 3 )
第三节 平衡状态、状态方程 .....	( 7 )
第四节 准静态过程与可逆过程 .....	( 8 )
第五节 热力循环 .....	( 11 )
第六节 三种基本热传递方式 .....	( 13 )
第二章 气体的热力性质和热力过程	
第一节 实际气体和理想气体 .....	( 16 )
第二节 理想气体状态方程 .....	( 16 )
第三节 理想气体热力性质 .....	( 17 )
第四节 理想混合气体 .....	( 21 )
第五节 理想气体的热力过程 .....	( 25 )
第六节 实际气体的状态方程 .....	( 35 )
第三章 热力学第一定律	
第一节 热力学第一定律 .....	( 45 )
第二节 热力系的能量 .....	( 45 )
第三节 闭口系统能量方程 .....	( 46 )
第四节 开口系统能量方程 .....	( 48 )
第五节 功和热量的计算及其在 $p-v$ 图和 $T-S$ 图中的表示 .....	( 53 )
第六节 稳态稳流能量方程的应用 .....	( 54 )
第四章 热力学第二定律	
第一节 自然过程的不可逆性 .....	( 60 )
第二节 热力学第二定律的实质与表述 .....	( 61 )
第三节 卡诺循环及卡诺定理 .....	( 62 )
第四节 熵 .....	( 67 )
第五节 熵产与做功能力损失 .....	( 71 )
第六节 焓与焓 .....	( 76 )
第七节 焓分析与焓方程 .....	( 81 )
第五章 压气机工作原理	
第一节 单级活塞式压气机工作原理 .....	( 89 )
第二节 单级活塞式压气机耗功量 .....	( 90 )
第三节 两级活塞式压气机工作过程 .....	( 93 )

第六章 水蒸气	
第一节 水蒸汽的发生过程及 $p-v$ 图和 $T-S$ 图	(98)
第二节 水蒸气图表	(100)
第三节 水蒸气的热力过程	(104)
第四节 水蒸气的热力循环	(106)
第七章 湿空气	
第一节 湿空气的状态参数	(112)
第二节 湿空气的焓湿图及热湿比	(116)
第三节 湿空气的露点和湿球湿度	(120)
第四节 湿空气的基本热力过程	(121)
第八章 气体和蒸汽的流动	
第一节 绝热流动的基本方程	(127)
第二节 定熵流动的基本特征	(129)
第三节 喷管中的流速及流量计算	(131)
第四节 扩压管	(139)
第五节 具有摩擦的流动	(141)
第六节 绝热节流	(143)
第九章 动力循环	
第一节 蒸汽动力基本循环——朗肯循环	(149)
第二节 回热循环与再热循环	(152)
第三节 热电循环	(156)
第四节 内燃机循环	(158)
第五节 燃气轮机循环	(162)
第十章 致冷循环	
第一节 空气压缩致冷循环	(166)
第二节 蒸汽压缩致冷循环	(169)
第三节 蒸汽喷射致冷循环	(175)
第四节 吸收式致冷循环	(176)
第五节 热泵	(178)
第六节 气体的液化	(179)
第十一章 化学热力学基础	
第一节 热力学第一定律在化学反应中的应用	(183)
第二节 生成焓	(184)
第三节 稳定流动中化学反应热效应的计算	(187)
第四节 热力学第二定律在化学反应中的应用	(188)
第五节 热力学第三定律	(191)

**第十二章 溶液热力学基础**

第一节 溶液的一般概念 .....	(194)
第二节 二元溶液的温度—浓度图和焓—浓度图 .....	(198)
第三节 相律 .....	(203)

**附录**

附录 1 常用气体的某些基本热力性质 .....	(207)
附录 2 饱和蒸汽表(按温度编排) .....	(208)
附录 3 水与过热蒸汽表 .....	(209)
附录 4 氨(NH <sub>3</sub> )的饱和蒸汽表 .....	(212)
附录 5 氟利昂-12(CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> )的饱和蒸汽表 .....	(213)
附录 6 在 101325Pa(1atm)下干空气的热物理性质表 .....	(214)
附录 7 饱和水的热物理性质 .....	(215)
附录 8 饱和线上蒸汽的热物理性质 .....	(216)
附录 9 液体的热物理性质 .....	(217)
附录 10 金属材料的密度、比热容和导热系数 .....	(218)
附录 11 保温、建筑及其他材料的密度和导热系数 .....	(220)
附录 12 几种保温、耐火材料的导热系数与温度的关系 .....	(221)
附录 13 在大气压力( $p=1.01325\times 10^5$ Pa)下烟气的热物理性质 .....	(221)
附录 14 气体和蒸汽在空气中的质扩散率(25℃, $1.01325\times 10^5$ Pa) .....	(222)

**附表**

附表 1 饱和水与饱和水蒸汽表(按温度排列) .....	(223)
附表 2 饱和水与饱和水蒸汽表(按压力排列) .....	(224)
附表 3 未饱和水与过热蒸汽表 .....	(226)
附表 4 在 0.1MPa 时的饱和空气状态参数表 .....	(232)
附表 5 压力单位换算表 .....	(234)
附表 6 功、能和热量的单位换算表 .....	(234)

**参考文献**

# 第一章 热工学基本概念

本章围绕能量转换过程、工质状态及状态变化热力学研究方法等内容,讨论热力系统、状态特性、热力过程、循环以及功和热等基本概念,为后续内容奠定基础。

## 第一节 热力系统

热力系统的选取是热力学分析方法中的首要步骤,选定了热力系统就明确了研究对象所包含的范围和内容,便于针对热力系统建立定性和定量的关系。

### 一、系统、边界与外界

1. 系统:为了便于研究与分析问题,将所要研究的对象与周围环境分隔开来,这种人为分隔出来的研究对象,称为热力系统,简称系统。如图 1-1 所示,汽缸中虚线包围的气体就是我们的研究对象,则气体便是热力系统。

2. 边界:分隔系统与外界的分界面,称为边界,其作用是确定研究对象,将系统与外界分隔开来。

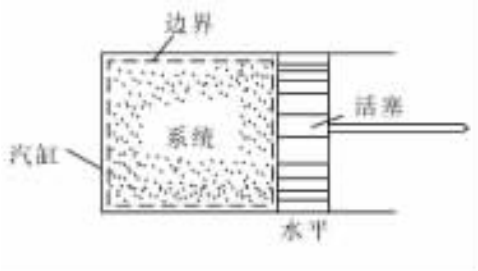


图 1-1 热力系统

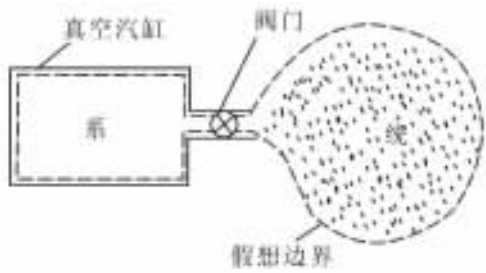


图 1-2 边界可变形系统

如图 1-1 中的边界就是汽缸壁及活塞端部表面等实物界面相一致的实际边界。又如图 1-2 是一个真空的容器,当与外界连接的阀门打开时,外界空气在大气压力作用下将流入容器,直至它们的压力与外界大气压力平衡为止。我们可以把大气中流入容器的那部分空气用一个假想的边界从大气中划分出来,那么,容器内壁以及假想的边界所包围的空气便是我们研究的热力系统。

3. 外界:边界以外与系统相互作用的物体,称为外界或环境。系统与外界相互作用通常有 3 种形式,即功、热和物质的交换,可以设想外界存在能够分别接受或给予系统热量、功量和质量的热力源或物体。如系统的外界是大气环境,则可看作是热容量为无限大的热源(或冷源)和质量为无限大的质源。

### 二、闭口系统与开口系统

在热力过程中,系统与外界之间通过边界可以有能量的传递(例如功或热量),也可以有

物质的流入或流出。

1. 闭口系统:没有物质穿过边界的系统称为闭口系统,有时又称为控制质量系统。闭口系统的质量保持恒定,取系统时应把所研究的物质都包括在边界内,如图 1-1 及图 1-2 都是闭口系统的实例。

2. 开口系统:有物质流穿过边界的系统称为开口系统。取系统时只需把所要研究的空间范围用边界与外界分隔开来,故又称开口系统为控制体积,简称控制体,其界面称为控制界面。热力工程中遇到的开口系统多数都有确定的空间界面,界面上可以有一股或多股工质流过。如图 1-3 便是开口系统的实例。

闭口系统与开口系统都可能通过边界与外界发生能量(功和热)的传递。

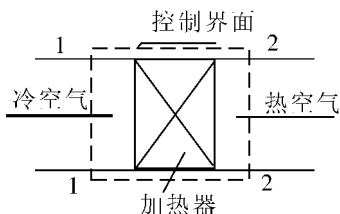


图 1-3 开口系统

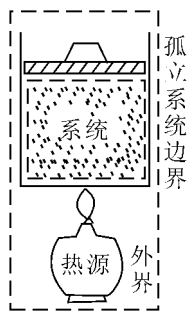


图 1-4 孤立系统

### 三、绝热系统与孤立系统

1. 绝热系统:系统与外界之间没有热量传递的系统,称为绝热系统。事实上,自然界不存在完全隔热的材料,因此,绝热系统只是当系统与外界传递的热量小到可以忽略不计的一种简化模式。热力工程中有许多系统,如汽轮机、喷管等都可当作绝热系统来分析。

2. 孤立系统:系统与外界之间不发生任何能量传递和物质交换的系统,称为孤立系统。当然,自然界中各种事物之间或多或少都要发生一定的联系,绝对孤立的东西是不能存在的。然而,一切热力现象所涉及的空间范围总是有限的,我们把研究对象连同与它直接相关的外界用一个新的边界包围起来,这个新的、扩大了边界就是孤立系统的边界,此时,原系统内部的研究对象及与它相互作用的物体都可以看作孤立系统中的组成部分。由此可见,一切热力系统连同与之相互作用的外界都可以抽象为孤立系统。图 1-4 是闭口系统及其相互作用外界(热源)构成的孤立系统。

应当指出,系统必须根据实际情况来选择,以能给解决问题带来方便为原则。系统选取方法对研究问题的结果并无影响,仅与解决问题的复杂程度有关,如图 1-2 是作为边界可改变的闭口系统提出,但如取气缸为系统,便变成由外界向气缸充气的开口系统。

### 四、系统的内部状况

系统内部工质所处的状况通常可有如下不同的形态:

1. 单相系与复相系:系统中工质的物理、化学性质都均匀一致的部分称为一个相,相与相之间有明显的界限。由单一物相组成的系统称为单相系。由两个相以上组成的系统称为复相系,如固、液、气组成的三相系统。

2. 单元系与多元系:由一种化学成分组成的系统称为单元系,纯物质就属单元系,例如,

纯水、纯氧、纯氮等,无论它们是单相还是复相都是单元系。由两种以上不同化学成分组成的系统称为多元系,例如,氮气、水和冰组成的混合物属二元系统(即  $N_2$  和  $H_2O$ ),化学反应系统及溶液等都属多元系统。但是,对于化学上稳定的混合物,例如,空气在不发生相变时,其化学组成不变,常可当作纯物质对待。

3. 均匀系与非均匀系:成分和相在整个系统空间呈均匀分布的为均匀系,否则为非均匀系。例如:微小水滴均匀分布在充满水蒸气的整个容器中,那么,水和水蒸气的混合物为均匀系,如果水在容器底部而水蒸气在其上部,则为非均匀系。

系统性质与其所处的相及成分的数目和系统是否均匀等因素有关。

## 第二节 热力状态及其基本状态参数

### 一、状态与状态参数

系统与外界之间能够进行能量交换(传热或做功)的根本原因,在于两者之间的热力状态存在差异。例如,锅炉中的热量传递是由于燃料燃烧生成的高温烟气与汽锅内汽水之间存在着温度差;又如热力发动机中能量的转换是由于热力发动机中的高温高压工质与外界环境的温度、压力有很大的差别。这种温度、压力上的差异标志着工质物理特性数值的不同。我们把系统中某瞬间表现的工质热力性质的总状况,称为工质的热力状态,简称为状态。热力状态反映着工质大量分子热运动的平均特性。我们把描述工质状态特性的各种物理量称为工质的状态参数。状态参数是状态的函数,对应一定的状态,状态参数都有唯一确定的数值。工质状态变化时,初、终状态参数的变化值,仅与初、终状态有关,而与状态变化的途径无关。状态参数的数学特征为点函数,它可表示为

$$\int_1^2 dx = x_2 - x_1$$

循环积分 
$$\oint dx = 0$$

式中  $x$ ——表示工质某一状态参数。

热力学中常见的状态参数有:温度( $T$ )、压力( $p$ )、比容( $v$ )或密度( $\rho$ )、内能( $u$ )、焓( $h$ )、熵( $S$ )、焔( $ex$ )、自由能( $f$ )、自由焓( $g$ )等。其中温度、压力、比容或密度可以直接或间接地用仪表测量出来,称为基本状态参数。

### 二、状态参数

#### 1. 温度

两个冷热状况不同的物体相互作用,冷的物体要变热,热的物体要变冷。经过相当长时间,在没有其他外来影响的情况下,两物体终将达到相同的冷热状况,即所谓热平衡状态。实践证明,如两个物体分别和第三个物体处于热平衡,则它们彼此之间也必然处于热平衡,这一规律称为热力学第零定律。从这一定律可以推论,相互间处于热平衡的系统必然具有一个在数值上相等的热力学参数来描述这一热平衡的特性,这个参数就是温度。由此可知,温度是描述平衡热力系统冷热状况的物理量。

温度的微观概念表示物质内部大量分子热运动的强烈程度。在物理学中导出了理想气体热力学温度与分子平移运动平均动能的关系式:

$$\frac{m\overline{\omega^2}}{2} = BT \quad (1-1)$$

式中  $\frac{m\overline{\omega^2}}{2}$ ——分子平移运动的平均动能, 其中  $m$  是一个分子的质量,  $\sqrt{\overline{\omega^2}}$  是分子平移运动的均方根速率;

$B$ ——比例常数;

$T$ ——气体的热力学温度。

工程上常要定量地测定系统的温度, 第零定律提供了测温的依据。当被测系统与已标定过的带有数值标尺的温度计达到热平衡时, 温度计指示的温度值就等于被测系统的温度值。

温度的数值标尺, 简称温标。任何温标都要规定基本定点和每一度的数值。国际单位制(SI)规定热力学温标, 符号  $T$ , 单位代号为 K(Kelvin), 中文代号为开。热力学温标规定纯水三相点温度(即水的汽、液、固三相平衡共存时的温度)为基本定点, 并指定为 273.15K, 每 1K 为水三相点温度的  $1/273.15$ 。

SI 还规定摄氏(Celsius)温标为实用温标, 符号用  $t$ , 单位为摄氏度, 代号为  $^{\circ}\text{C}$ 。摄氏温标的每  $1^{\circ}\text{C}$  与热力学温标的每 1K 相同, 它的定义式为:

$$t = T - 273.15 \quad (1-2)$$

式中 273.15 的值是按国际计量会议规定的。可见摄氏温度与热力学温度差值为 273.15K, 当  $T = 0^{\circ}\text{C}$  时,  $T = 273.15\text{K}$ 。两种温标换算, 在工程上采用下式已足够准确。

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

## 2. 压力

(1) 压力和压力单位: 我们取一个充满气体的容器作为系统, 其中气体分子总是不停地作不规则的热运动, 这种不规则的热运动不但使系统中分子之间不断地相互碰撞, 同时也使气体分子不断地和容器壁(即边界面)碰撞, 大量分子碰撞器壁的总结果, 就形成了气体对器壁的压力。通常用垂直作用于器壁单位面积上的力来表示压力(也称压强)的大小, 这种压力称为气体的绝对压力。对于理想气体, 可以从理论上导出作用于单位面积上的压力与分子浓度及分子平移运动平均动能之间的关系式:

$$p = \frac{2}{3}n \frac{m\overline{\omega^2}}{2} = \frac{2}{3}nBT \quad (1-3)$$

式中  $p$ ——单位面积上的绝对压力;  $n$ ——分子浓度, 即单位容积内含有气体的分子数,  $n = \frac{N}{V}$ , 其中  $V$  为容积;  $N$  为包含的气体分子总数。

式(1-3)把压力的宏观量与微观量联系起来, 阐明了气体压力的本质, 并揭示了气体压力与温度之间的内在联系。

压力的宏观定义式为:

$$p = \frac{F}{f} \quad (1-4)$$

式中  $F$ ——整个容器壁受到的力, 单位为牛顿(N);

$f$ ——容器壁的总面积( $\text{m}^2$ )。

SI 规定压力单位为帕斯卡 (Pa), 即  $1\text{Pa}=1\text{N}/\text{m}^2$

工程上还曾采用其他压力单位, 如巴 (bar)、标准大气压 (atm)、工程大气压 (at)、毫米水柱 ( $\text{mmH}_2\text{O}$ ) 和毫米汞柱 ( $\text{mmHg}$ ) 等单位。各种压力单位的换算关系参看附表。

(2) 相对压力与绝对压力: 工程上常用测压仪表测定系统中工质的压力。这些仪表的结构原理是建立在力的平衡原理上, 也就是利用液柱的重力或各种类型弹簧的变形, 以及用活塞上的载重去平衡工质的压力。如图 1-5 所示, 当用 U 形压力计测量风机入口段及出口段气体的压力时, 压力计指示的压力是气体的绝对压力与外界大气压力的差值, 称为相对压力。

由于大气压力随地理位置及气候条件等因素而变化, 因此, 绝对压力相同的工质, 在不同的大气压力条件下, 压力表指示的相对压力并不相同。在本书中如不注明是“相对压力或表压力”, 都应理解为“绝对压力”。绝对压力才是状态参数。

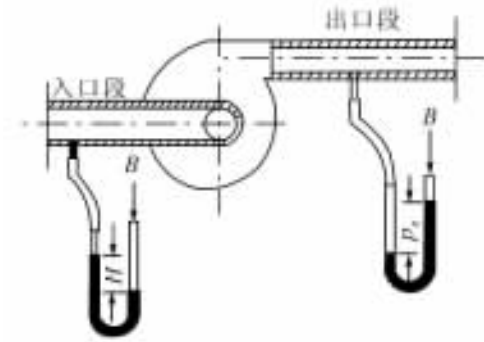


图 1-5 U 形压力计测压

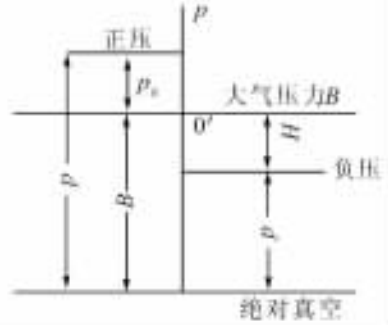


图 1-6 各压力间的关系

图 1-5 中风机入口段气体的绝对压力小于外界大气压力, 相对压力为负压, 又称真空值; 风机出口段气体的绝对压力大于外界大气压力, 相对压力为正压, 又称表压力。如果气体的绝对压力与大气压力相等, 相对压力便为零。

绝对压力与相对压力和大气压力之间关系如图 1-6 所示。

$$\text{当 } p > B \text{ 时} \quad P = B + p_g \quad (1-5)$$

$$p < B \text{ 时} \quad P = B - H \quad (1-6)$$

式中  $B$ ——当地大气压力;

$p_g$ ——高于当地大气压力时的相对压力, 称表压力;

$H$ ——低于当地大气压力时的相对压力, 称为真空值。

### 3. 比容和密度

工质所占有的空间称为工质的容积, 单位质量工质所占有的容积称为工质的比容。如工质的容积为  $V$ , 质量为  $m$ , 那么比容则为

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

单位容积的工质所具有的质量, 称为工质的密度。即

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{kg}/\text{m}^3) \quad (1-8)$$

显然, 工质的比容与密度互为倒数。即

$$\rho v = 1 \quad (1-9)$$

从式(1-9)可知,比容与密度不是两个独立的状态参数,如二者知其一,则另一个也就确定了。

### 三、内能

内能是指组成热力系的大量微观粒子本身所具有的能量(它不包括热力系宏观运动的能量和外部场作用的能量)。因此,内能应包括分子的动能、分子力所形成的势能、构成分子的化学能和构成原子的原子能等。由于在热能、机械能的转换过程中一般不涉及化学变化和核反应,化学能和原子能不发生变化,故工程热力学中通常只考虑前两者,即

$$\text{内能}(U) = \text{分子动能}(U_k) + \text{分子力所形成的势能}(U_p)$$

对于气体,分子动能包括分子的移动动能、转动动能和分子内部的振动动能。

单位质量物质的内能称为比内能(有时将比内能简称为内能),即有

$$u = \frac{U}{m} \quad (1-10)$$

式中  $u$ ——比内能, J/kg;

$U$ ——内能, J;

$m$ ——质量, kg。

### 四、焓

焓是一个组合的状态参数,即

$$H = U + pV \quad (1-11)$$

式中  $H$ ——焓, J;

$U$ ——内能, J;

$p$ ——压力, Pa;

$V$ ——容积,  $\text{m}^3$ 。

单位质量物质的焓称为比焓(有时也将比焓简称为焓),即有

$$h = \frac{H}{m} = u + pv \text{ (J/kg)} \quad (1-12)$$

### 五、熵

熵是一个导出的状态参数。对简单可压缩均匀系(即只有两个独立变量的势力系),它可以由其他状态参数按下列关系式导出:

$$S = \int \frac{dU + p dV}{T} + S_0, dS = \frac{dU + p dV}{T} \text{ (J/K)} \quad (1-13)$$

单位质量物质的熵称为比熵(有时也将比熵简称为熵):

$$s = \frac{S}{m} = \int \frac{du + p dv}{T} + s_0, ds = \frac{du + p dv}{T} \text{ (J/(K} \cdot \text{kg))} \quad (1-14)$$

上两式中  $S_0$  为熵常数。

**【例 1-1】** 蒸汽锅炉压力表读值  $p_g = 3.23 \text{ MPa}$ ;凝汽器真空表读值  $H = 95 \text{ kPa}$ 。若大气压力  $B = 101.325 \text{ kPa}$ 。试求锅炉及凝汽器中蒸汽的绝对压力。

**【解】** 锅炉中水蒸气绝对压力

$$p = B + p_g = 101.325 + 3.23 \times 10^3$$

$$= 3331.325(\text{kPa})$$

在计算高压容器的绝对压力时,如未给出大气压力数值,这时可设  $B=100\text{kPa}$ ,其计算误差并不大,如:

$$\begin{aligned} p &= B + p_g = 100 + 3.23 \times 10^3 \\ &= 3330(\text{kPa}) \end{aligned}$$

凝汽器绝对压力:

$$\begin{aligned} p &= B - H = 101.325 - 95 \\ &= 6.325(\text{kPa}) \end{aligned}$$

如果大气压力取  $B=100\text{kPa}$ ,则凝汽器绝对压力为

$$p = B - H = 100 - 95 = 5(\text{kPa})$$

$$\text{相对误差: } \frac{6.325 - 5}{6325} \times 100\% = 20.9\%$$

说明在低压时,  $B$  不宜随意取值,以免造成较大的误差。

### 第三节 平衡状态、状态方程

能量的转换有赖于工质的吸热、膨胀、放热等变化过程。在这些变化过程中,工质的压力、温度、密度等一些状态参数会发生变化,即工质的状态参数随时在变化。例如,两端温度不同的物体,或容器内密度不均匀的气体,在不受外界影响时,由于物体各部分之间的热量传递或气体内部各部分之间的相对位移,它们的状态会随时间变化,逐渐达到一种静止状态。即物体各部分温度相同或容器内气体达到密度均匀,也称此种静止状态已处于平衡。所以,平衡状态是指热力系在无外界的影响下,宏观性质不随时间而变化状态。平衡状态是宏观状态中一种重要的特殊情况,并且不会自发地破坏。

对于一个热力系,如果内部没有不平衡的力,且作用在边界上的力和外力相平衡,则该热力系处于力平衡。若热力系内各部分的温度相同,且等于外界温度,则该热力系处于热平衡。所以,为了能够达到平衡状态,必须满足力平衡和热平衡两个条件。如果热力系内还存在化学反应或相变,则还应包括化学平衡和相平衡。

在工程热力学中,用状态参数描述系统状态特性,只有在平衡状态才有可能。这是因为,热力系处于不平衡状态时各部分的性质不尽相同,且随时间而变化,无法用共同的宏观特性来简单描述热力系所处的状态。而依平衡状态分析所得的结果与实际变化相差不大,这就使研究热力系的状态和状态变化规律的工作得到很大简化。由于工程热力学主要研究平衡状态下的热力系,不涉及时间因素。因此,平衡状态在工程热力学中是一个十分重要的基本概念。当一个热力系处于平衡状态时,各状态参数都有确定的值。而确定一个热力系处于平衡状态时,并不要求给出全部状态参数的值。事实上,对于一个和外界只可能有热能和机械能交换(两个自由度)的简单热力系,只要给出两个相互独立的状态参数就能确定其平衡状态。所谓两个相互独立的状态参数,是指其中一个不能作为另一个的函数。例如比容和密度就不是两个相互独立的状态参数,由于  $v = \frac{1}{\rho} = f(\rho)$ ,给出比容值也就等于给出密度值。

既然两个已知的独立状态参数就可确定简单热力系的一个平衡状态,因而其他状态参

数也就有完全确定的数值。因此,其他状态参数和这两个已知的相互独立的状态参数之间必定存在某种单值函数关系,例如:

$$\left. \begin{aligned} v &= f(p, T) \\ u &= f_1(p, T) \\ h &= f_2(p, T) \\ s &= f_3(p, T) \end{aligned} \right\} \quad (1-15)$$

式(1-15)中,  $v = f(p, T)$  建立了三个可以直接测量的基本状态参数之间的关系。这一函数关系称为状态方程。状态方程可以写为隐函数形式,即有

$$F(p, v, T) = 0 \quad (1-16)$$

既然简单热力系的平衡状态可以用两个相互独立的状态参数来确定,那么由任意两个相互独立的状态参数构成的平面坐标系中的任意一点就对应于热力系的某一平衡状态,如图 1-7 中的状态 1 和 2。至于热力系的不平衡状态,是无法表示在这样的坐标系中的,因为热力系各部分状态参数不一致。但是,如果热力系各部分的差异不是很大,则用各部分状态参数的平均值来近似表示热力系的状态也是可以的。当然,用平均值表示不平衡状态,不能说明实际状态的不平衡程度。

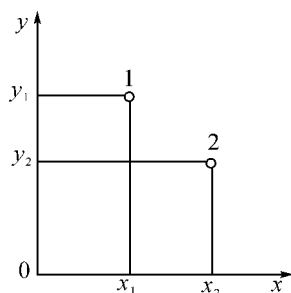


图 1-7 参数坐标图

## 第四节 准静态过程与可逆过程

系统与外界在传递能量的同时,系统工质的热力状态必将发生变化。例如,锅炉中高温烟气由于与水发生热交换,烟气温度由高温降到低温;又如进入汽轮机的高温高压水蒸气,由于对外做功而变为低温低压的蒸汽流出等等。我们把工质从某一状态过渡到另一状态所经历的全部状态变化称为热力过程。实际热力过程是在势差推动下进行的,且工质流动及机械运动存在摩擦等影响,过程非常复杂,给热工分析计算带来很大困难。为了简化计算,我们在引用平衡概念的基础上,将热力过程理想化为准静态过程和可逆过程。

### 一、准静态过程

过程是指热力系统由一个状态变化到另一个状态时经历的全部状态的集合,热力系统从一个平衡状态连续经过一系列平衡的中间状态,过渡到另一个平衡状态,这样的过程称为内部平衡过程;否则便是内部不平衡过程。考查系统内部状态变化过程,发现系统内、外都有引起系统状态变化的某种势差,如温差、压差等,所以系统内部状态变化难免偏离平衡状态。例如,系统吸热时靠近热源界面的温度高于系统其他部位的温度;又如活塞式汽缸中气体膨胀做功时,靠近活塞顶面的气体压力低于其他部位的压力等。内、外势差越大,过程进行越快,则系统偏离平衡态也越大。无论是温差或压差在理论上都有做功的能力,但是,系统内部的这种不平衡势差在系统向新的平衡过渡时,并不能对外做功,而是成为一种损失,称为非平衡损失。然而,这种损失很难定量计算,而且,对于非平衡状态,也无法用少数几个

状态参数来描述,因此,理论研究可以设想一种过程,这种过程进行得非常缓慢,使过程中系统内部被破坏了的平衡有足够的时间恢复到新的平衡态,从而使过程的每一瞬间系统内部的状态都非常接近平衡状态,于是整个过程就可看作是由一系列非常接近平衡态的状态所组成,并称之为准静态过程。这种过程不必考虑内部不平衡的势差对能量转换造成的影响,即没有内部不平衡损失。状态特性可用少数几个参数描述。

准静态过程在坐标图上可以用一系列平衡状态点的轨迹所描绘的连续曲线表示,如图 1-8 所示实线 1-2。如果热力过程除初、终状态外,在过程中的每一瞬间系统状态都不接近平衡态,这种过程称为非准静态过程。在图 1-8 中如虚线 1-2 所示。

准静态过程是理想化了的实际过程,是实际过程进行得非常缓慢时的一个极限。实际过程都不是平衡状态的连续过渡,但在通常情况下可以近似地当作准静态过程来处理。由于气体分子运动的速度极大,例如,在  $0^{\circ}\text{C}$  时,  $\text{H}_2$  分子的均方根平移运动速率达  $1838\text{m/s}$ ,  $\text{N}_2$  分子达  $493\text{m/s}$ ,  $\text{O}_2$  分子达  $461\text{m/s}$ ,在气体内部的压力传播速度也是很大的,通常达每秒几百米。而活塞移动速度则通常不足  $10\text{m/s}$ ,因而工程中的许多热力过程,虽然凭人们的主观标准看来似乎很迅速,但实际上按热力学的时间标尺来衡量,过程的变化还是比较慢的,并不会出现明显的偏离平衡态。例如,即使在高速汽油机汽缸内进行的热力过程,也完全可以按准静态过程来进行分析,而过程中偏离平衡的影响并非十分显著。

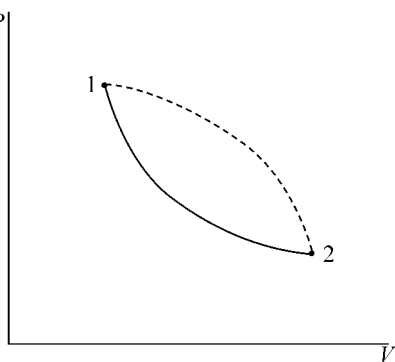


图 1-8 准静态过程和非准静态过程

## 二、可逆过程

在分析系统与外界传递能量(功量和热量)的实际效果时,只考查系统内部状态变化过程是不够的,因为在能量传递过程中设备的机械运动和工质的黏性流动都存在摩擦,将使一部分可用功转变为热,虽然能量的总量没有变化,但是可用功却减少了,转变成了低品位的热能,这种由功转变为热的现象称为耗散效应,而造成可用功的损失称为耗散损失。这部分损失在实际计算中也很难确定,因此,理论分析时可以设想一个完全没有热力学损失(包括非平衡损失和耗散损失)的理想热力过程,即可逆过程作为模式进行研究。

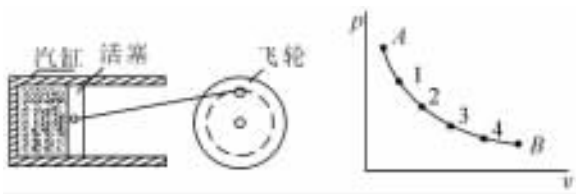


图 1-9 可逆过程图

在如图 1-9 所示装置中,取气缸中的工质作为系统。设工质进行绝热膨胀,对外做功,工质经历  $A-1-2-3-4-B$  的准静态过程(如  $p-V$  图中所示)。假想机器是没有摩擦的理想机器,工质内部也没有摩擦。工质对外做的功全部用来推动飞轮,以动能的形式储存在飞轮中。当活塞逆行时,飞轮中储存的能量逐渐释放出来用于推动活塞沿工质原过程线逆向进行一个压缩过程。由于机器及工质没有任何耗散损失,过程终了将使工质及机器都回

复到各自的初始状态,对外界没有留下任何影响,既没有得到功,也没有消耗功。这种没有热力学损失的过程,其正向效果与逆向效果恰好相互抵消,称为可逆过程。因此,可逆过程可定义为:当系统进行正、反两个过程后,系统与外界均能完全恢复到初始状态,这样的过程称为可逆过程。否则为不可逆过程。实现可逆过程的具体条件,一是过程没有势差(或势差无限小),如传热没有温差,做膨胀功没有力差等;二是过程没有耗散效应,如机械运动没有摩擦,导电没有电阻等。显然,可逆过程是理想化过程,是实际过程的一种极限,实际上是不可能实现的。引入可逆过程只是一种研究方法,是一种科学的抽象。工程上许多涉及能量转换的过程,如动力循环、致冷循环、气体压缩、流动等热力过程的理论分析,都常把过程理想化为可逆过程进行分析计算,既简便又可把所得结果作为实际过程能量转换效果,比较标准。而将理论计算值加以适当修正,就可得到实际过程的结果。可逆过程的概念在热力学中具有非常重要的作用。

最后,为了进一步说明准静态过程和可逆过程的联系与区别,有必要对两种理想过程的概念作一比较。很明显,对热力系统而言,两个过程都是由一系列平衡状态所组成,在  $p-V$  图上都能用连续曲线来表示。但两者又有一定的区别,可逆过程要求系统与外界随时保持力平衡和热平衡,并且不存在任何耗散效应,在过程中没有任何能量的不可逆损失;而准静态过程的条件仅限于系统内部的力平衡和热平衡。准静态过程在进行中系统与外界之间可以有不平衡势差,也可能有耗散现象发生,只要系统内部能及时恢复平衡,其状态变化还可以是准静态的。所以,准静态过程是针对系统内部的状态变化而言的,而可逆过程则是针对过程中系统所引起的外部效果而言的。可逆过程必然是准静态过程,而准静态过程则未必是可逆过程,它只是可逆过程的条件之一。

还需指出,非平衡损失和耗散损失都不是能量的数量损失,而是表示能量做功能力(即能质)的降低或退化。

### 三、可逆过程的膨胀功(容积功)

热转换为机械功必须依靠工质的膨胀。以图 1-10 所示的汽缸-活塞机构为例,设汽缸内有 1kg 气体,并取其为热力系统。由于系统容积发生变化(增大或缩小)而通过界面向外界传递的机械功称为膨胀功,也称容积功。一般规定:系统容积增大,表示系统对外界做膨胀功,视为正功;系统容积减小,表示外界对系统做压缩功,视为负功。

参看图 1-10,当工质克服外力  $F$  推动活塞移动微小距离  $ds$  时,工质将对外做出微小的膨胀功。按物理学中功的定义式:功=力×距离,则有

$$\delta\omega = Fds$$

假设热力过程是可逆过程,内外没有势差,作用在活塞上的外力与工质作用在活塞上的力相等,外力就可以用系统内部状态参数来表示,即

$$F = pf$$

式中  $f$  是活塞的截面积。于是单位质量工质在微元热力过程中克服外力所做功为:

$$\delta\omega = pfds = pdV \quad (\text{J/kg}) \quad (1-11)$$

在图 1-10 的  $p-V$  图中  $\delta\omega$  以微元面积表示。

可逆过程 1-2 所做膨胀功为:

$$\omega = \int_1^2 pdV \quad (\text{J/kg}) \quad (1-12)$$

由于在  $p-V$  图上可用过程线与坐标轴之间围成的面积表示功的大小,故又称  $p-V$  图为示功图。显然,在初、终状态相同情况下,如果过程经历的途径不同,则膨胀功的大小也不相同,这说明膨胀功与过程特性有关,它是过程量而不是状态量。用数学语言表达,微元功  $\delta\omega$  不是全微分,“ $\delta$ ”表示微小量,而不是微小增量“ $d$ ”,故它的积分式  $\omega = \int_1^2 \delta\omega \neq \omega_2 - \omega_1$ 。

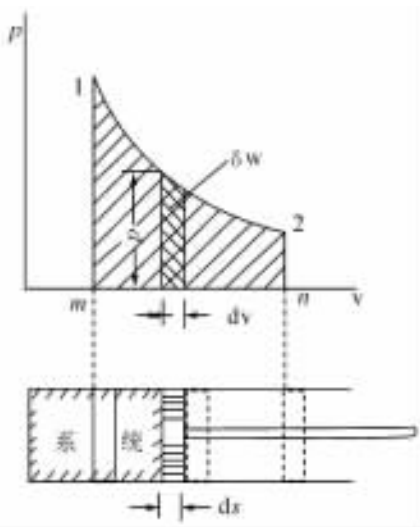


图 1-10 膨胀功

#### 四、可逆过程的热量

热量是除功以外,没有物质流的系统与外界传递能量的又一种形式。热量传递中作为推动力的强度性参数是温度,而作为广义位移的广延性参数的变化是熵的增量。于是热量计算有类似于膨胀功的计算公式,为:

$$\delta q = T ds \quad (\text{J/kg}) \quad (1-13)$$

或 
$$\delta Q = T ds (\text{J}) \quad (1-13a)$$

如图 1-11 所示,在  $T-S$  图上微元热力过程传递的热量  $\delta q$  等于用斜线表示的微元面积。可逆过程 1—2 传递的热量:

$$q = \int_1^2 T ds \quad (\text{J/kg}) \quad (1-14)$$

在  $T-S$  图中, $q = \text{面积 } 12341$ ,故又称  $T-S$  图为示热图。从图中分析可知,初、终态相同但中间途径不同的各种过程,其传递热量也不相同,说明热量也是过程量,它与过程特性有关。

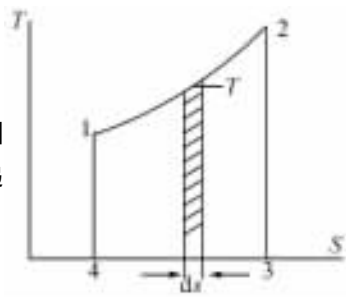


图 1-11  $T-S$ 图

从式(1-13)可以得出可逆过程中系统熵的定义式:

$$ds = \frac{\delta q}{T} \quad (\text{J/kg} \cdot \text{k}) \quad (1-15)$$

通常规定:系统吸热, $q$  为正值;系统对外放热, $q$  为负值。

相应地,可逆过程中熵的变化为:系统吸热, $ds > 0$ ;系统放热  $ds < 0$ ;绝热过程  $ds = 0$ 。

SI 规定:热、功和能的单位均采用 J(焦耳)。

$$1\text{J} = 1\text{N} \cdot \text{m}$$

或 
$$1\text{J} = 1\text{W} \cdot \text{s}$$

式中  $\text{N} \cdot \text{m}$ ——表示牛顿·米;

$\text{W} \cdot \text{s}$ ——表示瓦·秒。

J 与其他能量单位,如卡、千克力·米、千瓦·时、马力·时等的换算关系参看附录表 6。

## 第五节 热力循环

要使工质连续不断地做功,单有一个膨胀过程是不可能的,当它与环境压力达到平衡时,便不能再继续膨胀做功了。为了使工质能周而复始地做功,就必须使膨胀后的工质回复到初始状态,如此反复地循环。我们把工质从某一初态开始,经历一系列状态变化,最后又