

R E E G O N G X U E

热 工 学

李传统 主 编
彭 伟 副主编

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

高等学校教学用书

热 工 学

李传统 主 编
彭 伟 副主编

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书主要讲述了工程热力学和传热学基本概念、基本定律、水蒸气及湿空气的热力性质,导热、对流、辐射三种热传递方式的原理与计算,换热器的热力计算等。本书还简要介绍了制冷原理、化学热力学、传质学的有关内容。全书分为十四章,每章后面附有思考题和习题。

本书可作为高等学校通风与安全、矿建、暖通、化工等专业及其他非动力类专业的教材,也可供有关的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

热工学/李传统主编. —徐州:中国矿业大学出版社.

1994.7(2004.1重印)

ISBN 7 - 81040 - 014 - 2

I. 热… I. 李… II. 热工学 N TK122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 002549 号

书 名 热工学

主 编 李传统

责任编辑 何其华

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail cumtpvip@cumtp.com

排 版 中国矿业大学出版社排版中心

印 刷 中国矿业大学印刷厂

经 销 新华书店

开 本 787×1092 1/16 印张 17 字数 413 千字

版次印次 1994 年 7 月第 1 版 2004 年 1 月第 2 次印刷

定 价 20.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



前 言

本书是高等学校通风与安全、矿建、暖通、化工等非动力类专业的《热工学》教材。全书共十四章,主要内容包括工程热力学和传热学的基本概念、基本原理与计算,制冷原理、化学热力学、传质学的基本理论等。

本书在编写过程中,力求贯彻少而精、理论联系实际的原则,在较全面地阐述有关热工学的基本内容的同时,结合有关专业的实际,突出重点内容。全书采用SI制计量单位。

本书适用于普通工科院校非动力类各专业,也适用于各类成人高校、自学考试等有关非动力类专业的学生。本书教学时数为50~72学时,可根据专业需要选择有关内容。本书也可供工程技术人员参考。

本书由李传统主编,参加编写的有:李传统、彭伟、刘道平、范楹等。

本书由中国矿业大学丁国玺教授主审。在本书编写过程中得到了中国矿业大学赵以蕙教授、何其华教授的大力支持,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请广大读者指正。

编者

1993年12月于中国矿业大学

目 录

绪论	(1)
第一章 热工学的基本概念	(3)
第一节 热力系	(3)
第二节 状态和状态参数	(4)
第三节 平衡状态	(6)
第四节 状态方程和状态参数坐标图	(7)
第五节 过程和循环	(8)
第六节 功和热量	(9)
第七节 三种基本热传递方式	(9)
第二章 热力学第一定律	(12)
第一节 热力学第一定律的实质及其表达式	(12)
第二节 热力系的能量	(12)
第三节 热力学第一定律解析式	(13)
第四节 热力学第一定律应用于开口热力系	(15)
第五节 功和热量的计算及其在 $p-v$ 图和 $T-s$ 图中的表示	(19)
第三章 气体的热力性质和热力过程	(23)
第一节 实际气体和理想气体	(23)
第二节 理想气体状态方程和通用气体常数	(23)
第三节 理想气体热力性质	(24)
第四节 理想混合气体	(28)
第五节 理想气体的热力过程	(32)
第六节 实际气体的状态方程	(42)
第四章 热力学第二定律	(52)
第一节 自然过程的不可逆性	(52)
第二节 热力学第二定律的实质与表述	(53)
第三节 卡诺循环及卡诺定理	(54)
第四节 熵	(59)
第五节 孤立系统熵增原理	(63)
第五章 压气机工作原理	(68)
第一节 单级活塞式压气机工作原理	(68)
第二节 单级活塞式压气机耗功量	(69)
第三节 两级活塞式压气机工作过程	(72)
第六章 水蒸汽	(76)
第一节 水蒸汽的发生过程及 $p-v$ 图和 $T-s$ 图	(76)
第二节 水蒸汽图表及其应用	(79)

第三节	绝热节流	(82)
第四节	水蒸汽的热力过程	(84)
第五节	水蒸汽的热力循环	(86)
第七章	湿空气	(89)
第一节	湿空气的状态参数	(89)
第二节	湿空气的焓湿图及热湿比	(93)
第三节	湿空气的露点和湿球温度	(96)
第四节	湿空气的基本热力过程	(98)
第八章	制冷原理	(104)
第一节	概述	(104)
第二节	常用制冷剂及其性质	(105)
第三节	压缩式制冷	(106)
第四节	吸收式制冷	(112)
第五节	蒸汽引射式制冷	(115)
第六节	制冷系统设计	(117)
第九章	化学热力学基础	(119)
第一节	热力学第一定律在化学反应中的应用	(119)
第二节	生成焓	(120)
第三节	稳定流动中化学反应热效应的计算	(123)
第四节	热力学第二定律在化学反应中的应用	(124)
第五节	热力学第三定律	(127)
第十章	导热	(129)
第一节	温度场与温度梯度	(129)
第二节	傅利叶定律	(130)
第三节	导热微分方程式	(131)
第四节	一维稳态导热	(135)
第五节	二维稳态导热	(140)
第六节	非稳态导热	(142)
第七节	导热的数值解法	(150)
第十一章	对流换热	(165)
第一节	对流换热的概念	(165)
第二节	对流换热微分方程组	(168)
第三节	流动边界层和温度边界层	(172)
第四节	相似原理	(175)
第五节	准则形式的关联式	(179)
第十二章	辐射换热	(187)
第一节	热辐射的基本概念	(187)
第二节	热辐射的基本定律	(190)
第三节	辐射换热计算	(193)

第四节 气体辐射	(199)
第十三章 传热和换热器	(206)
第一节 传热基本概念	(206)
第二节 换热器种类及平均温差	(209)
第三节 换热器热计算原理	(213)
第四节 传热的强化和保温技术	(220)
第十四章 传质	(223)
第一节 概说	(223)
第二节 扩散的基本定律	(223)
第三节 对流传质及传质系数	(229)
第四节 质量和热量的同时传递	(232)
附录	(235)
附录 1 常用气体的某些基本热力性质	(235)
附录 2 饱和蒸汽表(按温度编排)	(236)
附录 3 水与过热蒸汽表	(237)
附录 4 氨(NH ₃)的饱和蒸汽表	(240)
附录 5 氟利昂-12 的饱和蒸汽表	(241)
附录 6 在 101325Pa(1atm)下干空气的热物理性质表	(242)
附录 7 饱和水的热物理性质	(243)
附录 8 饱和线上蒸汽的热物理性质	(244)
附录 9 液体的热物理性质	(245)
附录 10 金属材料的密度、比热和导热率	(246)
附录 11 保温、建筑及其它材料的密度和导热数	(248)
附录 12 几种保温、耐火材料的导热率与温度的关系	(249)
附录 13 在 $p=1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$ 下烟气的热物理性质 (烟气中组成成分: $r_{\text{CO}_2}=0.13, r_{\text{H}_2\text{O}}=0.11, r_{\text{N}_2}=0.76$)	(249)
附录 14 气体和蒸汽在空气中的质扩散率(25℃, $1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$)	(250)
附图 1 水蒸汽的 $h-s$ 图	(251)
附图 2 氨(NH ₃)的 $\lg p-h$ 图	(253)
附图 3 湿空气的 $H-d$ 图	(255)
附图 4 氟里昂-22 的 $\lg p-h$ 图	(257)
附图 5 氨水溶液的 $h-\xi$ 图	(259)
主要参考文献	(261)

绪 论

人类社会的发展,使人们不断地开发和利用自然界的各种能源。风力、水力、燃料的化学能、太阳能、地下热能和原子核能等,都是先后被人类利用来代替人力或畜力发展生产的自然界的能源。就目前的技术水平看,矿物燃料如煤、天然气、石油等的化学能仍是主要能源,其次是原子能、水力、太阳能、风能等。人类利用能量一般有两种方式:一种是转换为热能应用于生产与生活;另一种则是转换为机械能或电能用作动力。

热工学包括工程热力学和传热学两部分。

工程热力学研究能量(特别是热能)的性质,及其与机械能或其它形式的能量之间的相互转换规律。其主要内容为:(1)作为工程热力学理论基础的三个基本定律,即热力学第一、第二、第三定律;(2)常用工质的热力性质;(3)根据热力学基本定律,结合工质热力性质,分析估算实现热能与机械能之间相互转换的各种热力过程和热力循环,指出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。其主要内容为:(1)三种基本热量传递方式:导热、对流、热辐射;(2)质量传递的基本规律;(3)根据传热、传质规律进行有关分析和计算。

热力学是在研究热机效率的基础上,于19世纪中叶由于建立了热力学第一定律和第二定律而形成的。在初期,它所涉及的内容主要是热能与机械能的转换。以后,由于热力学在化工、冶金、制冷、空调以及近年来的低温、超导、反应堆、以至气象、生物等方面获得了越来越广泛的应用,因而热力学的研究范围扩大到了化学、物理化学、电、磁、辐射等现象。本书仅介绍工程热力学的内容,即仅限于讨论热能与其它形式的能量之间的相互转换。

哪里有温度差,哪里就有热量交换现象存在。由于换热现象普遍存在并且在人类物质生产过程中起着重要的作用。因此,传热学引起许多部门科技工作者的重视。从事热能动力工程的科技人员,必须掌握和运用换热规律,妥善处理换热问题,根据工程实际需要增强或削弱热量传递。对于其它许多部门,传热学的应用也十分广泛。例如,在机械制造部门,工件在冷加工或热加工过程中的温度控制;在电子工业部门,电子元件或电子设备的冷却;在化工部门,如何保证化工流程中的最佳温度;在食品加工部门,食品在干燥、贮藏和运输过程中,低温的产生和维持;在采矿工程中,矿井通风系统的空气调节、火灾烟流与巷道壁面的热交换等都要用到传热学的知识。

因此,热工学是分析热能与其它形式能量之间的转换规律,以及有效利用能量的重要理论基础。对于从事能源研究和利用的科技人员来说,有必要学习和掌握热工学的知识,并将其应用于不同的工程实际中去。热工学的研究方法是采用宏观的研究方法,其特点是根据工程热力学的基本定律和传热学的热量传递规律,运用严密的逻辑推理,对物体的宏观现象进行分析研究,而不涉及物质的微观结构和微观粒子的运动情况。这种抽出共性,抓主要矛盾的处理问题方法,在热工学的理论分析中特别有用,不仅不脱离实际,而且能反映客观事物

的本质。在学习热工学的过程中,要逐渐掌握热工学的宏观研究方法。

热工学采用国际单位制,其国际代号为SI,国际单位制是1960年第十一届国际计量大会通过的。其基本单位共七个,即长度的米(m),质量的千克(kg),时间的秒(s),电流的安培(A),热力学温度的开尔文(K),物质的摩尔(mol),发光强度的坎德拉(cd)。另有二个辅助单位,即平面角的弧度(rad),立体角的球面度(sr)。利用这些基本单位和辅助单位可以导出一系列具有专门名称的导出单位,这样就可以构成不同科学技术领域中所需要的全部单位。国际单位制是米制单位基础上发展起来的米制单位现代化形式。常用单位的换算表如下表所示:

常用单位换算表

物理量名称	符 号	换 算 系 数		
		国 际 单 位	工 程 单 位	
压力	p	Pa	atm	
		1	9.86923×10^{-4}	
		1.01325×10^5	1	
运动粘度	ν	m^2/s	m^2/s	
		1	1	
		0.092903	0.092903	
动力粘度	μ	$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}), \text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$	$\text{kgf} \cdot \text{s}/\text{m}^2$	
		1	0.101972	
		9.80665	1	
比热容	c	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$	$\text{kcal}/(\text{kgf} \cdot ^\circ\text{C})$	
		1	0.238846	
		4.1868	1	
热流密度	q	W/m^2	$\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	
		1	0.859845	
		1.163	1	
导热系数	λ	$\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$	$\text{kcal}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$	
		1	0.859845	
		1.163	1	
换热系数 传热系数	α k	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	$\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$	
		1	0.859845	
		1.163	1	
功 率 热流量	N Q	W	kcal/h	$\text{kgf} \cdot \text{m}/\text{s}$
		1	0.859845	0.101972
		1.163	1	0.118583
		9.80665	8.433719	1

第一章 热工学的基本概念

本章介绍热力学的基本概念及三种基本热传递方式,它是本课程的基础,应着重掌握。

第一节 热力系

热力系就是热力学所研究的对象。热力系以外与其有关的物体统称为外界或环境。热力系与外界的分界面称为边界。热力系与外界之间发生的一切相互作用(物质或能量交换)都通过边界。边界可以是真实的(如图 1-1 取工质为热力系时,气缸内壁),也可以是假想的(图 1-1 中进口截面 1-1、出口截面 2-2);可以是固定的,也可以是移动的。

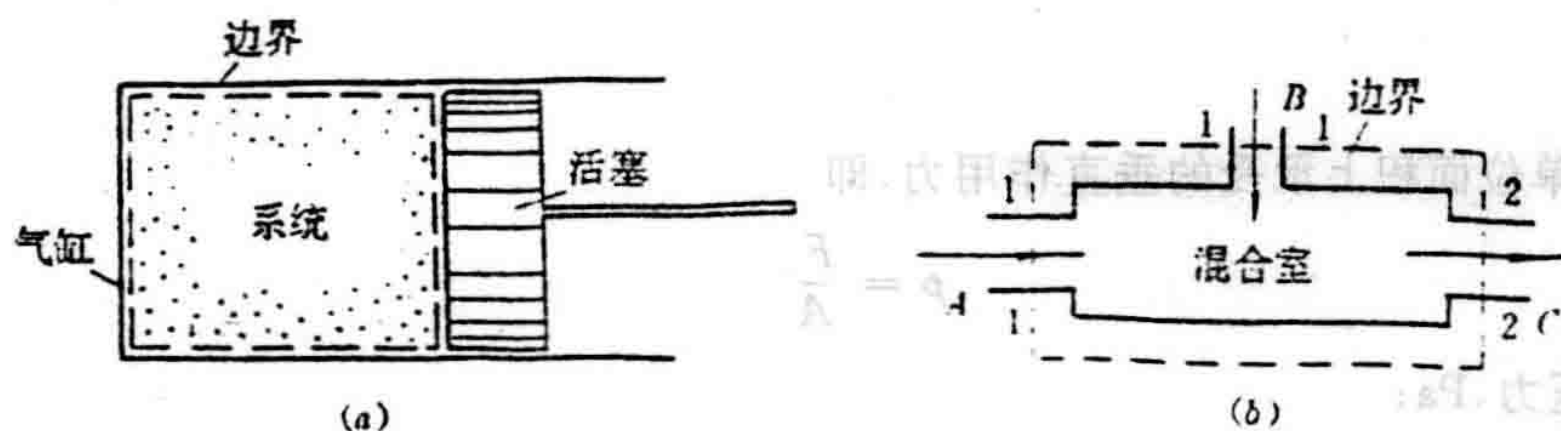


图 1-1 热力系示意图

(a) 闭口系 (b) 开口系

热力系的选择取决于研究对象的特点及研究的目的与任务。它可以是一群物体、一个物体或物体的某一部分。它可以很大,也可以很小(必须能满足统计平均规律)。

在作热力学分析时,不仅要考虑热力系内部的变化,也要考虑热力系通过界面与外界发生的能量交换和物质交换,但对外界的变化则不必追究。因此,热力系的选择,边界的划定,对分析研究能量交换非常重要,若选取不当,会给研究带来困难,甚至会得出错误结论。

根据热力系内部的情况不同,热力系可分为:单一化学成分组成的单元系;多种化学成分组成的多元系;单一相(气相或液相等)组成的单相系;多相组成(气-固两相或汽-固-液三相等)的复相系;各部分性质均匀的均匀系;各部分性质不均匀的非均匀系。

根据热力系与外界的联系(相互作用)不同,热力系也可分为:与外界无物质交换的闭口系;与外界有物质交换的开口系;与外界无热量交换的绝热系;与外界无任何联系的孤立系等。

例如,取图 1-1(a)中的气体(设为 O_2)为热力系,则为单元、单相、均匀的闭口系。如取图 1-1(b)中的气体为热力系,并忽略与外界的热量交换,那么它就是单元、单相、绝热的开口系。

第二节 状态和状态参数

状态是指热力系全部宏观性质的集合。而从各个不同方面描写这种宏观状态的物理量就是状态参数。状态参数从各个不同方面表达热力系的状态特性。如果知道了足够多的状态参数,就可确定热力系的状态。反之,知道了热力系所处的状态,其状态参数也就确定了。因此,状态参数由热力系的状态确定,而与达到该状态的变化路径无关。根据状态参数的这一特性,任何物理量,只要它的变化可以用始终两态来确定,而与热力系的状态变化路径无关,都可作为状态参数。状态参数的这一特性在数学上的表述是:它的微分是全微分,而全微分的循环积分等于零。

状态参数通常分为两类:一类是与质量无关,且不可相加的状态参数,如压力、温度、密度等,称为强度参数;另一类是与质量成正比,且可相加的状态参数,如容积、内能、熵等,称为广延参数。实际上,单位质量的广延参数,如比容积,比内能、比熵等则又成为强度参数。

热工学中常用的状态参数有六个,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,常称为基本状态参数。下面逐一介绍上述六个常用的状态参数。

一、压力

压力是指单位面积上承受的垂直作用力,即

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

式中 p ——压力, Pa;

F ——垂直作用力, N;

A ——面积, m^2 。

气体的压力是大量分子向容器壁面撞击的结果。由式(1-1)计算的压力是工质的真正压力,也称绝对压力。但是,工程中测量压力的仪表通常都处在大气环境中,所测压力则是绝对压力与大气压力之差。如图 1-2 所示,当工质的绝对压力大于大气压力时,压力计能测出绝对压力大于大气压力的部分,称为表压力 p_r ,则有

$$p_r = p - B \quad (1-2)$$

式中 B 为大气压力; p_r 可用气压计测定。

当工质的绝对压力小于大气压力时,真空计所测得的绝对压力小于大气压力的部分,称为真空度 p_v ,则有

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

对于工质的绝对压力,可通过下列关系式计算:

$$p > B \text{ 时, } p = B + p_r \quad (1-4)$$

$$p < B \text{ 时, } p = B - p_v \quad (1-5)$$

由上两式可知,即使工质的绝对压力保持不变,只要大气压力 B 发生变化,所测得的表压力 p_r 或真空度 p_v 也会发生变化。因此,表压力或真空度都不能作为状态参数,只有绝对压力才能作为状态参数。

当工程上用斜管差压计(或真空计),如图 1-3 所示,通过液柱高度差测定表压力或真空

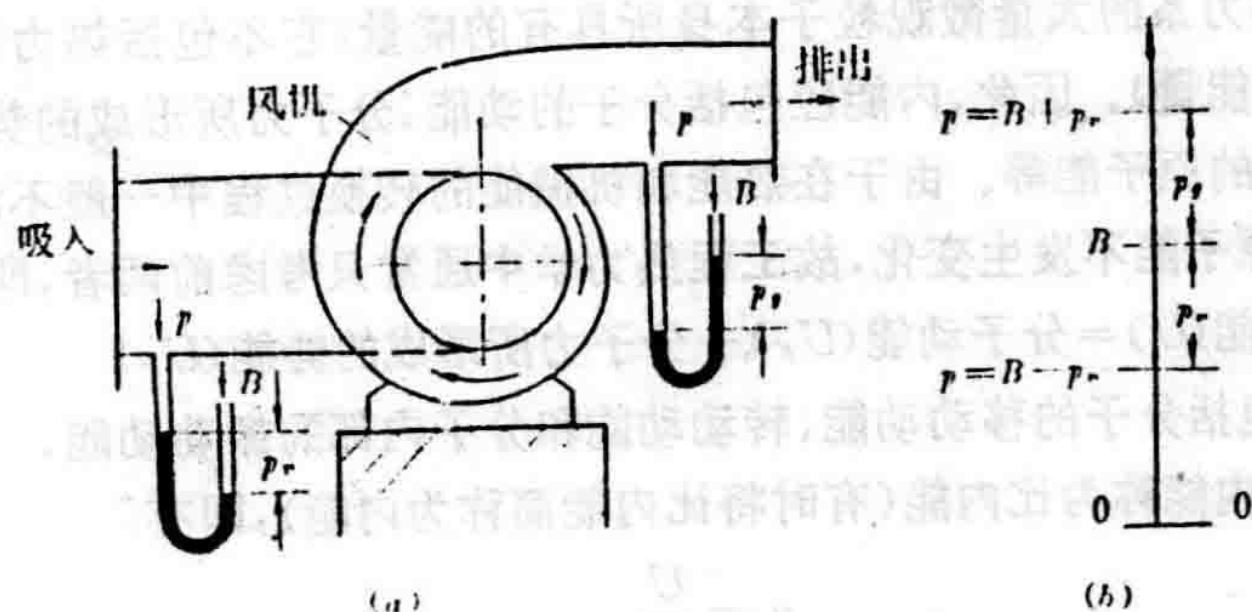


图 1-2

度时,其换算关系为

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

式中 ρ ——液体密度, kg/m^3 ;
 g ——重力加速度, m/s^2 ;
 Δz ——液柱高度差, m 。

二、比容

比容就是单位质量的物质所占有的容积,即

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

式中 v ——比容, m^3/kg ;
 V ——容积, m^3 ;
 m ——质量, kg 。

比容的倒数称密度(ρ),它是指单位容积的物质所具有的质量,即

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

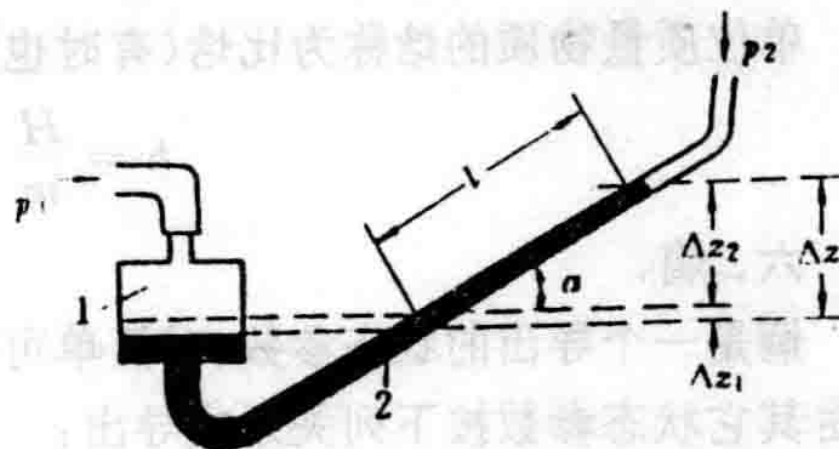


图 1-3

1—容器;2—倾斜肘管

三、温度

温度是描述物体冷热程度的一个状态参数。从分子运动论的观点看,温度标志大量分子热运动的强烈程度。在热力学中,可从热力学第零定律这一公认的科学事实出发,利用热平衡的概念来定义温度。热力学第零定律表述为:“当两个热力系分别与第三个热力系处于热平衡时,则这两个热力系也彼此处于热平衡。”处于相互平衡的热力系具有一共同特性,而标志此特性的量就是温度。所以,温度的热力学定义是热力系是否处于热平衡的一个状态参数。利用温度的概念表述热力学第零定律为:“当两个热力系的温度分别与第三个热力系的温度相等时,则这两个热力系的温度也相等。”即一切处于热平衡的热力系具有相同的温度。

温度在国际单位制中采用热力学温标(开尔文温标)开(K)表示,温度值用 T 表示。同时并用的摄氏温标用摄氏度($^{\circ}\text{C}$)表示,温度值用 t 表示。它们之间的换算关系为

$$T(\text{K}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273.15 \quad (1-9)$$

显然,摄氏温度的每一度(1°C)和开尔文温标中的每一开(K)是相等的,只是摄氏温标的零点比开尔文温标的零点高出 273.15 度

四、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。由于在热能和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。

五、焓

焓是一个组合的状态参数,即

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

式中, H 为焓, J; U 为内能, J; p 为压力, Pa; V 为容积, 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

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

六、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热力系),它可以由其它状态参数按下列关系式导出:

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

单位质量物质的熵称为比熵(有时也将比熵简称为熵):

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

上两式中, S_0, s_0 为熵常数。

第三节 平衡状态

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的状态。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,只对平衡状态进行分析和研究。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。

第四节 状态方程和状态参数坐标图

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,因而其它状态参数也就有完全确定的数值。因此,其它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 1-4 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。

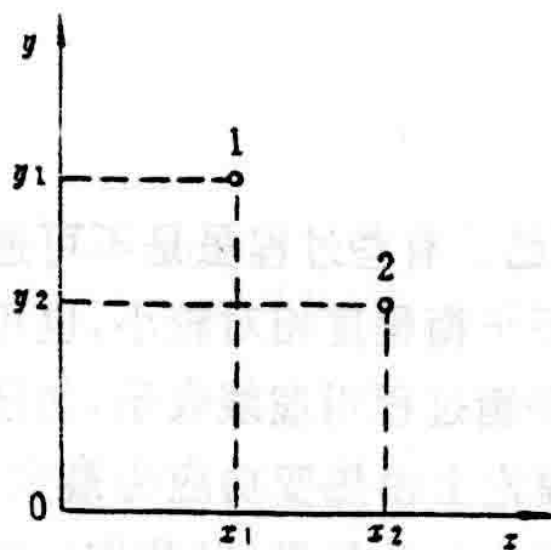


图 1-4 参数坐标图

第五节 过程和循环

一、过程

过程是指热力系由一个状态变化到另一个状态时所经历的全部状态的集合。

热力系从一个平衡状态连续经过一系列(无数个)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。就热力系本身而言,“平衡”意味着宏观静止,而“过程”则意味着变化,意味着平衡被破坏。内部平衡过程把平衡和过程这两个矛盾的概念在一定的条件下统一了起来。这个条件就是:要求外界对热力系的作用必须缓慢到足以使热力系内部能及时恢复不断被破坏的平衡。

如果一个过程进行完以后,能使热力系沿相同的路径逆向回复到原态,且相互作用中所涉及到的外界也回复原态,而不留下任何痕迹,则此过程称为可逆过程。因此,可逆过程不仅在热力系内部是可逆的,而且外部作用也必须是可逆的。由此可见,可逆过程应具备如下两个特点:

1. 在过程进行时,热力系和外界始终保持平衡状态,处于力平衡和热平衡;
2. 过程变化期间,任何能量都不存在从有用变为无用的不可逆耗散效应。

显然,对热力系而言,内部平衡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曲线来描述(图 1-5a),并用热力学方法对其进行分析。但二者又有一定的区别,可逆过程不仅热力系内部是平衡的,热力系与外界的相互作用也是可逆的,不存在任何能量的不可逆耗散效应。可逆过程必然是内部平衡过程,而内部平衡过程只是可逆过程的条件之一。

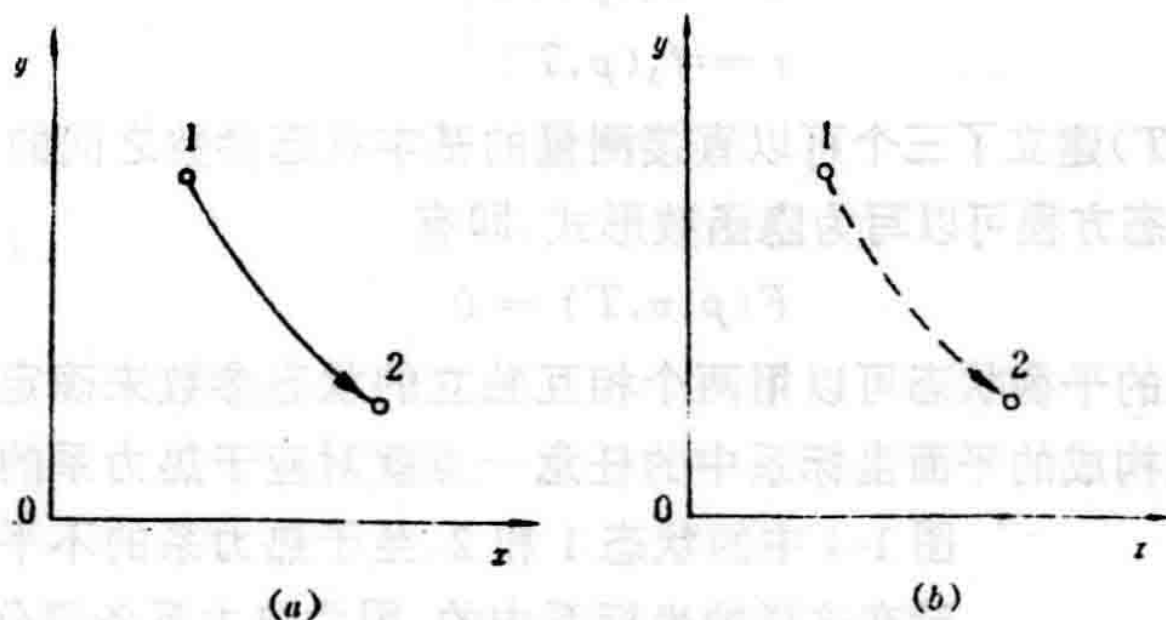


图 1-5 热力过程示意图

(a) 可逆过程; (b) 不可逆过程

事实上,任何实际过程都不是可逆的,只是不可逆程度不同而已。有些过程虽是不可逆的内部不平衡过程,严格说来不能表示在参数坐标图中。但如果不平衡程度相对较小,也可以采用平均状态参数值近似地表示出来。为了加以区别,内部不平衡过程用虚线表示,如图 1-5b 所示。可逆过程虽不能实现,但过程中能量耗散效应为零,理论上由热变功应为最大。在工程热力学中总是引用可逆过程的概念来研究热力系与外界产生的总效果,以此作为改进实际过程的一个准绳和指出努力方向,它是将一切实际过程理想化后得出的一种科学抽象概念,是进行热力学分析时的一种重要的研究方法

二、循环

循环就是封闭的过程,即热力系从某一状态开始,经过一系列中间状态后,又回复到原来的状态。作为过程的一种类型,循环也有可逆循环、内部平衡循环(图 1-6a)和内部不平衡循环(图 1-6b)之分。在工程上,通常将按顺时针完成的循环称为正循环或热机循环;按逆时针完成的循环则称为逆循环或制冷循环。

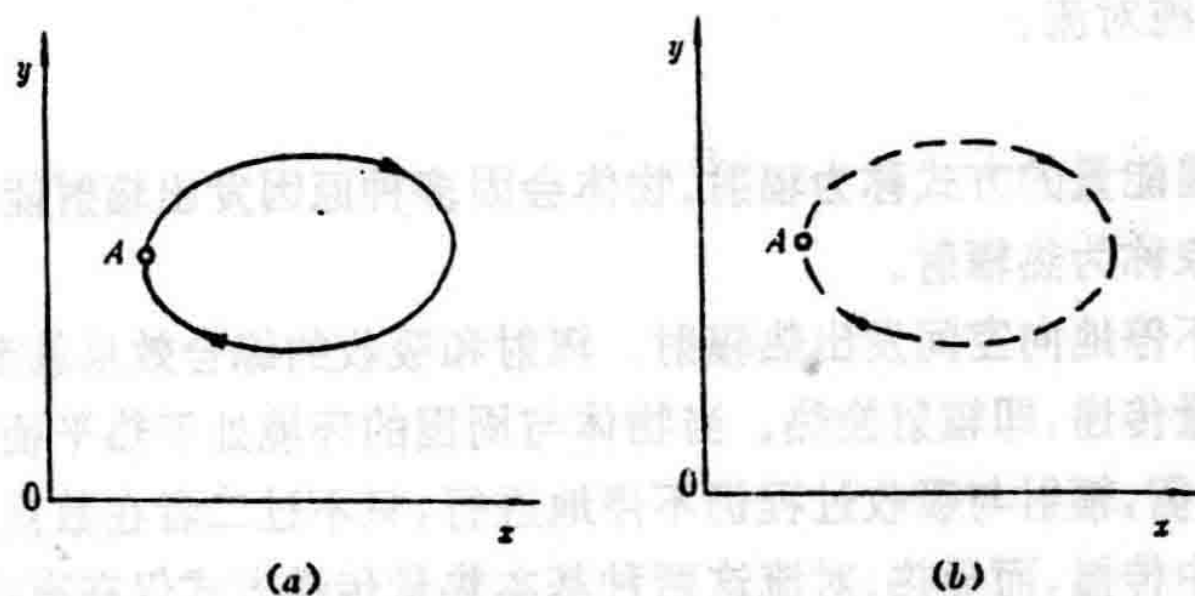


图 1-6 热力循环示意图

(a) 可逆循环; (b) 不可逆循环

第六节 功和热量

热力系通过界面和外界进行的机械能的交换量称为作功量,简称功;热力系通过界面和外界进行的热能交换量则称为传热量,简称热量。功和热量都与热力系进行的过程有关,因此功和热量都不是状态参数。不能说热力系在某一状态下有多少功或多少热量,而只能说热力系在某一过程中对外作出了或从外界获得了多少功;从外界获得了或向外界放出了多少热量。

功的符号为 W ,热量的符号为 Q 。对单位质量工质的热力系而言,功用 w 表示,热量用 q 表示。热力学中通常规定:热力系对外界作功为正($W > 0$),外界对热力系作功为负($W < 0$);热力系从外界吸热为正($Q > 0$);热力系向外界放热为负($Q < 0$)。

在正循环中,热力系对外输出功;在逆循环中,热力系消耗外功。

在国际单位制中, W 和 Q 的单位为 J; w 和 q 的单位为 J/kg。

第七节 三种基本热传递方式

工程热力学主要研究热力系的平衡状态。当热力系内部各部分存在温差时,热力系处于热不平衡状态。温差普遍存在于自然界及各个技术领域中,凡有温差,必有热量传递。热力学虽然可根据热平衡的概念计算出最终的传热量,但却无法研究不平衡状态的中间过程;而传热学则是研究热量传递规律的科学。热量传递有导热、对流和热辐射三种基本方式,现分别介绍如下。

一、导热

物体各部分之间不发生相对位移时,依靠分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动而产生的热量传递称为导热或热传导。例如,物体内部存在温差时,热量从高温部分传递到低

温部分;两直接接触的固体间存在温差时,热量从高温物体传递到低温物体,这都是导热现象。

二、对流

依靠流体的运动,把热量由一处传递到另一处的现象,称为对流。工程上常遇到的不是单纯对流方式;而是流体流过另一物体表面时对流和导热联合起作用的热量传递过程;这称为对流换热,以区别于单纯对流。

三、热辐射

物体通过电磁波传递能量的方式称为辐射。物体会因多种原因发出辐射能,其中因热的原因发出热辐射能的现象称为热辐射。

自然界中各物体都不停地向空间发出热辐射。辐射和吸收的综合效果就造成了以辐射方式进行的物体间的热量传递,即辐射换热。当物体与周围的环境处于热平衡时,辐射换热量等于零。但这是动态平衡,辐射与吸收过程仍不停地进行,只不过二者在数量上相等而已。

热辐射可以在真空中传播,而导热、对流这两种基本热量传递方式仅在物质存在的条件下才能实现。这是热辐射区别于导热、对流的重要特点之一。当两个物体被真空隔开时,例如太阳与地球之间,导热和对流都不会发生,太阳只能以辐射换热的方式将热量传给地球。辐射换热区别于导热、对流的又一个特点是,它不仅产生能量的转移,而且还伴随着能量形式的转化。即发射时从热能转变为电磁波的辐射能,而吸收时又从电磁波的辐射能转换为热能。

思考题

- 1-1 什么叫热力系?为什么要提出热力系这个概念?
- 1-2 什么叫工质的状态参数?表压力和真空度是状态参数吗?
- 1-3 表压力、真空度与绝对压力的关系如何?如果容器中气体的压力不变,试问安装在该容器上的压力表的读数也不变吗?
- 1-4 在系统与外界没有能量交换的情况下,热力系的状态是否会发生变化?为什么?
- 1-5 “平衡”和“均匀”是矛盾的还是统一的?
- 1-6 可逆过程实际上不存在,为什么要提出可逆过程这个概念?
- 1-7 有人说,气体的压力越大,则所具有的功越大;物质具有的温度越高,则所具有的热量越多,对不对?
- 1-8 过程和循环有什么区别和联系?

习题

- 1-1 当 $B=0.1 \times 10^6 \text{ Pa}$ 时,试求:
 - (1) 表压力为 $0.15 \times 10^6 \text{ Pa}$ 时的绝对压力;
 - (2) 真空表上读数为 $4.41 \times 10^3 \text{ Pa}$ 时的绝对压力;
 - (3) 绝对压力为 $0.735 \times 10^6 \text{ Pa}$ 时,相应的真空度。
 - 1-2 某烟囱高 40 m ,其中的烟气平均密度为 0.75 kg/m^3 。若当地的大气压力为
- 10 •