

高等学校教材



车辆 内燃机原理

◆ 孙 军 主编

高等学校教材

车辆内燃机原理

Cheliang Neiranji Yuanli

孙 军 主 编
李志军 审 阅



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容提要

本书以车用活塞式内燃机为主,对内燃机的工作原理及其主要工作过程作了较系统的介绍。全书共分九章,分别介绍了工程热力学基础知识、内燃机的循环与性能指标、内燃机的换气过程、燃料与燃烧化学、汽油机的混合气形成和燃烧、柴油机的混合气形成和燃烧、内燃机特性、内燃机增压和内燃机有害排放物的控制等。

本书可作为高等学校车辆工程专业教材,也可作为相近专业的教材或教学参考书,同时还可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

车辆内燃机原理 / 孙军主编. --北京:高等教育出版社,2012.5
ISBN 978-7-04-034002-0

I. ①车… II. ①孙… III. ①内燃机-理论-高等学校-教材 IV. ①TK401

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第026673号

策划编辑 段博原 责任编辑 段博原 封面设计 赵 阳 版式设计 王艳红
责任校对 金 辉 责任印制 田 甜

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印 刷 北京市联华印刷厂
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 13
字 数 320千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2012年5月第1版
印 次 2012年5月第1次印刷
定 价 20.80元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 34002-00

前 言

本书以内燃机工作过程及其性能指标为主要研究对象,着重讲述车用汽油机和柴油机的基本工作原理,主要内容包括工程热力学基础知识、内燃机的循环与性能指标、内燃机的换气过程、燃料与燃烧化学、汽油机的混合气形成和燃烧、柴油机的混合气形成和燃烧、内燃机特性、内燃机增压和内燃机有害排放物的控制等。

本书取材广泛,博采众长,力求内容充实、语言精练准确,注重实用性。同时,本书采用启发思维方式,叙述深入浅出,既保证基本理论的教学需要,又反映了最新技术的发展趋势。

本书主要作为高等学校车辆工程类专业教材,也可作为相近专业的教材或教学参考书,同时还可供相关工程技术人员参考。

本书由合肥工业大学孙军主编,合肥工业大学程晓章(第一章第二、三节,第三章第一、二节,第七章第二节,第八章第一、二、三节)、安徽工业大学涂德浴(第一章第四、五节,第二章第一节)和童宝宏(第一章第六节,第二章第二节,第四章第一节,第九章第一、二节)参加了编写工作。

天津大学李志军教授认真审阅了本书,并提出了许多宝贵的意见和建议,在此表示感谢。

本书在编写中参考了许多国内外的有关教材、专著和文献,在此对有关作者表示敬意和感谢。

由于编者水平有限,书中不足之处在所难免,欢迎同行和读者批评指正。

编 者
2012年1月

主要符号

拉丁字母

D ——气缸直径	W_i ——指示功
A/V ——燃烧室面容比	a ——声速
H_{mix} ——混合气热值	b_e ——有效燃油消耗率
H_u ——燃料低热值	b_i ——指示燃油消耗率
L ——燃烧 1 kg 燃料的实际空气量	c_p, c_v ——工质的比定压热容和比定容热容
L_0 ——燃烧 1 kg 燃料所需理论空气量	g_C, g_H, g_O ——1 kg 燃料中 C、H、O 的质量分数
M ——进气马赫数	g_f ——每循环供油量
M_1 ——燃烧前工质数量	i ——气缸数
M_2 ——燃烧后工质数量	l_0 ——燃烧 1 kg 燃料所需理论空气量 (kg)
P_e ——有效功率	m ——工质质量
P_i ——指示功率	n ——内燃机转速
P_L ——升功率	n_1 ——多变压缩指数
P_m ——机械损失功率	n_2 ——多变膨胀指数
Q_1 ——吸(加)热量	n_k ——增压器转速
Q_2 ——放热量	p ——工质压力
s ——行程	p_0 ——大气压力
T ——工质温度	p'_0 ——排气管压力
T_0 ——大气温度	p_a ——进气终点压力
T_a ——进气终点温度	p_b ——膨胀终点压力
T_b ——膨胀终点温度	p_c ——压缩终点压力
T_c ——压缩终点温度	p_k ——增压压力
T_r ——排气终点温度	p_{me} ——平均有效压力
T_{iq} ——有效转矩	p_{mi} ——平均指示压力
T_z ——最高燃烧温度	p_{mm} ——平均机械损失压力
V ——气缸容积	p_r ——排气终点压力
V_c ——压缩终点气缸容积	p_t ——循环平均压力
V_h ——气缸工作容积	p_z ——最高燃烧压力(爆发压力)
V_r ——残余废气容积	$\Delta p / \Delta \varphi$ ——压力升高率
W ——功	q_{mf} ——每小时燃油消耗量
W_e ——有效功	q_{mr} ——废气流量
	s ——工质熵
	v_m ——活塞平均速度

x ——完全燃烧百分比

希腊字母

κ ——比热容比(绝热指数)

α ——空燃比

ϕ_a ——过量空气系数

ϕ_c ——充量系数

ϕ_r ——残余废气系数

ϕ_{lq}, ϕ_n ——转矩和转速储备系数

δ ——后膨胀比;调速率

ε_c ——几何压缩比

η_{adk} ——压气机绝热效率

η_{et} ——有效热效率

η_{it} ——指示热效率

η_m ——机械效率

η_T ——涡轮机效率

η_i ——循环热效率

λ ——压力升高比

μ ——流量系数

π_k ——增压比

ρ ——预胀比

ρ_a, ρ_f, ρ_r ——空气、燃油和废气密度

τ ——行程数

τ_i, φ_i ——着火延迟(s), ($^{\circ}\text{CA}$)

φ ——曲轴转角;增压度

$\varphi_{eo}, \varphi_{ec}$ ——排气提前角和迟闭角

φ_{ig} ——点火提前角

$\varphi_{io}, \varphi_{ic}$ ——进气提前角和迟闭角

φ_{ol} ——气门叠开角

目 录

第一章 工程热力学基础知识	1	第四节 分层燃烧系统	127
第一节 绪论	1	思考题	129
第二节 基本概念	3	第六章 柴油机的混合气形成和燃烧	131
第三节 热力学第一定律	11	第一节 燃油喷射	131
第四节 理想气体的性质	18	第二节 混合气形成与燃烧室	137
第五节 理想气体的热力过程	33	第三节 柴油机燃烧	145
第六节 热力学第二定律	45	思考题	152
思考题	58	第七章 内燃机特性	154
第二章 内燃机的循环与性能指标	64	第一节 概述	154
第一节 内燃机的理论循环	64	第二节 内燃机台架试验	155
第二节 内燃机的实际循环	70	第三节 负荷特性	158
第三节 内燃机的性能指标	77	第四节 速度特性	160
第四节 机械损失	81	第五节 万有特性	163
第五节 内燃机的热平衡	84	第六节 调速特性	165
思考题	85	思考题	168
第三章 内燃机的换气过程	86	第八章 内燃机增压	170
第一节 四行程内燃机的换气过程	86	第一节 概述	170
第二节 充量系数	89	第二节 排气涡轮增压器	172
第三节 提高充量系数的途径	91	第三节 排气涡轮增压系统	177
思考题	98	第四节 增压内燃机的性能	180
第四章 燃料与燃烧化学	99	第五节 汽油机增压技术	182
第一节 内燃机的燃料	99	思考题	183
第二节 燃烧化学	105	第九章 内燃机有害排放物的控制	184
第三节 燃料及混合气热值	109	第一节 内燃机排放物的分类	184
思考题	110	第二节 内燃机有害排放物的生成机理	185
第五章 汽油机的混合气形成和燃烧	111	第三节 汽油机有害排放物的控制措施	187
第一节 混合气形成	111	第四节 柴油机有害排放物的控制措施	192
第二节 汽油机燃烧	117	思考题	197
第三节 汽油机燃烧室	124	主要参考文献	198

第一章 工程热力学基础知识

第一节 绪 论

一、热能及其利用

能源是人类社会不可缺少的物质基础之一,人类社会的发展与人类开发利用能源的广度和深度密切相联。

能源是指提供各种有效能量的物质资源。自然界中可以被利用的能量主要有煤、石油等矿物燃料的化学能以及风能、水力能、太阳能、地热能、原子能等。其中,风能和水利能是自然界以机械能形式提供的能量,其他则一般以热能的形式或者转换为热能的形式被利用。据统计,世界上经过热能形式被利用的能量平均超过 85%,因此热能的开发利用对人类社会的发展有着重要意义。

热能的利用通常有下列两种基本形式:一种是热利用,即将热能直接用于加热物体,如在冶金、化工、食品等工业和生活上的应用;另一种是热能的动力利用,即把热能转化成机械能或电能,为人类社会的各方面提供动力等。18 世纪中叶以后,蒸汽机的发明实现了热能大规模、经济性地转换成机械能,并使工业生产、科学技术和人们的生活有了突飞猛进的变化。

在当今科技条件下,利用得最多的能源是燃料的化学能。通过燃烧,燃料的化学能转换成热能,再将热能转换成机械能或电能供人们使用。20 世纪 60 年代以来,人们已开始把原子能内部蕴藏的巨大能量通过裂变反应释放出来,加以和平利用。目前,世界上已有包括中国在内的数十个国家的数百座核电厂正在源源不断地输出电力。此外,人们也在努力地把太阳能、地热能等转化为动力,供人们利用。热能通过热能动力装置转换为机械能的效率较低,即使是当代最先进的大型蒸汽动力装置的热效率也只是略超过 40%。因此,人们一直在寻求使热能或燃料化学能直接转换为电能的方法,如磁流体发电、太阳能电池、燃料电池等。

能源的开发利用一方面为人类社会的发展提供了必需的能量,另一方面也造成了对自然环境的破坏和污染。与能源开发利用密切相关的温室效应、酸雨、核废料辐射等对地球的生态系统造成了严重威胁,因此人们正以极大的热情关注节能和可再生能源的开发等,努力在满足人类社会对能量需求的同时不破坏或少破坏自然环境,实现可持续发展。

热力学是一门研究物质的能量、能量传递和转换以及能量与物质性质之间普遍关系的科学。工程热力学是热力学的工程分支,是在阐述热力学普遍原理的基础上,研究这些原理的技术应用

的学科。它着重研究的是热能与其他形式能量(主要是机械能)之间的转换规律及其工程应用。掌握工程热力学的基本原理,必将为能源、动力、化工及环境工程等领域内的深入研究打下坚实的基础。

二、热力学发展简史

人类的生产实践和探索未知事物的欲望是科学技术发展的动力。热现象是人类最早广泛接触到的自然现象之一,但是直到18世纪初,在欧洲,由于煤矿开采、航海、纺织等产业部门的发展,产生了对热机的巨大需求,才促使热学的发展得到积极的推动。1763—1784年间,英国人瓦特(James Watt, 1736—1819)对当时用来带动煤矿水泵的原始蒸汽机作了重大改进,且研制成功了应用高于大气压的蒸汽和配有独立凝汽器的单缸蒸汽机,提高了蒸汽机的热效率。此后,蒸汽机为纺织、冶金、交通等部门广泛采用,使生产力有了很大的提高。

蒸汽机的发明与应用,刺激、推动了热学方面的理论研究,促成了热力学的建立与发展。1824年,法国人卡诺(Sadi Carnot, 1796—1832)提出了卡诺定理和卡诺循环,指出热机必须工作于不同温度的热源之间,并提出了热机最高效率的概念,这在本质上阐明了热力学第二定律的基本内容。但是,卡诺用当时流行的热质说作为其理论的依据,因而虽然他的结论是正确的,但证明过程却是错误的。在卡诺所做工作的基础上,1850—1851年间克劳修斯(Rudolf Clausius, 1822—1888)和汤姆逊(William Thomson, 即开尔文 Lord Kelvin, 1824—1907)先后独立地从热量传递和热转变成功的角度提出了热力学第二定律,指明了热过程的方向性。

在热质说流行的年代,一些研究者用实验事实驳斥了其错误,但由于没有找到热功转换的数量关系,他们的工作没有受到重视。1842年,迈耶(Julius Robert Mayer, 1814—1878)提出了能量守恒原理,认为热是能量的一种形式,可以与机械能相互转换。1850年,焦耳(James Prescott Joule, 1818—1889)在他的关于热功当量实验的总结论文中,以各种精确的实验结果使能量守恒与转换定律,即热力学第一定律得到了充分的证实。能量守恒与转换定律是19世纪物理学最重要的发现。1851年,汤姆逊把能量这一概念引入热力学。

热力学第一定律的建立宣告第一类永动机(即不消耗能量的永动机)是不可能实现的。热力学第二定律则使制造第二类永动机(只从一个热源吸热的永动机)的梦想破灭。这两个定律奠定了热力学的理论基础。

热力学理论促进了热动力机的不断改进与发展,而人类生产实践又不断为热力学的前进提供新的驱动力。1906年,能斯特(Walter Nernst, 1869—1941)根据低温下化学反应的大量实验事实归纳出了新的规律,并于1912年将之表述为绝对零度不能达到原理,即热力学第三定律。热力学第三定律的建立使经典热力学理论更趋完善。1942年,凯南(Joseph Henry Keenan, 1900—1977)在热力学基础上提出有效能的概念,使人们对能源利用和节能的认识又上了一个台阶。近代能量转换新技术(如等离子发电、燃料电池等及1974年人们确定了作为常用制冷剂的氯氟烃物质CFC和含氢氯氟烃物质HCFC与南极臭氧层空洞的联系等)向热力学提出了新的课题。热力学理论将在不断研究解决新课题中发展。

三、工程热力学的研究对象和研究方法

工程热力学的研究对象主要是能量转换,特别是热能转化成机械能的规律和方法,以及提高

转化效率的途径,以提高能源利用的经济性。它的主要内容包括:

1) 基本概念与基本定律,如热力系统、状态参数、平衡状态、热力学第一定律、热力学第二定律等。这些基本概念和基本定律是工程热力学的基础。

2) 能量的转化过程特别是热能转化为机械能是由工质的吸热、膨胀、排热等状态变化过程实现的,因此过程和循环的分析研究及计算方法是工程热力学的重要内容。

3) 常用工质的性质。工质性质对其状态变化过程有着极其重要的影响。

4) 通常的热工设备中涉及燃烧,而且近年来关于燃料电池等新型能量转换技术及有关环境问题的研究与化学过程有关,所以工程热力学中还包括化学热力学方面的有关内容。

热力学有两种不同的研究方法:一种是宏观研究方法,另一种是微观研究方法。

宏观研究方法是以热力学第一定律、第二定律等基本定律为基础,针对具体问题采用抽象、概括、理想化和简化的方法,抽出共性,突出本质,建立分析模型,推导出一系列公式,得到若干重要结论。由于热力学基本定律的可靠性以及它们的普适性,所以应用热力学宏观研究方法可以得到可靠的结果。但是,由于这种方法不考虑物质分子和原子的微观结构,也不考虑微粒的运动规律,所以建立的热力学宏观理论不能说明热现象的本质及其内在原因。应用宏观方法研究的热力学叫做宏观热力学,也叫做经典热力学。

应用微观研究方法的热力学叫做微观热力学,也称统计热力学。微观研究方法从物质是由大量分子和原子等粒子所组成的事实出发,将宏观性质作为在一定宏观条件下大量分子和原子的相应微观量的统计平均值,利用量子力学和统计方法,将大量粒子在一定宏观条件下一切可能的微观运动状态予以统计平均,来阐明物质的宏观特性,导出热力学基本规律,因而能阐明热现象的本质,解释“涨落”现象。在对分子结构作出模型假设后,利用统计热力学方法还可对这种物质的具体热力学性质作出预测。但是,统计热力学也存在局限性,因为对分子微观结构的假设只能是近似的,因此尽管运用了繁复的数学运算,但所求得的结果往往不够精确。

工程热力学主要应用热力学的宏观研究方法,但有时也引用气体分子运动理论和统计热力学的基本观点及研究成果。随着近代计算机技术的发展,计算机越来越多地介入工程热力学的研究中,成为一种强有力的工具。

学好工程热力学首先要掌握学科的主要线索——研究热能转化为机械能的规律、方法以及怎样提高转化效率和热能利用的经济性。其次是在深刻理解基本概念的基础上运用抽象简化的方法抽出各种具体问题的本质,应用热力学基本定理和基本方法进行分析研究。第三是重视练习、实验等环节,通过练习、实验等环节培养分析问题、解决问题的能力,加深对基本概念的理解和应用。

第二节 基本概念

一、热机中热能转化成机械能的一般过程

凡是能将热能转换为机械能的机器统称为热力发动机,简称热机。例如蒸汽机、蒸汽轮机(也称蒸汽透平)、燃气轮机(也称燃气透平)、内燃机(汽油机、柴油机等)和喷气发动机等皆为热机。

以内燃机为例分析热机中的能量转换情况。图 1.1 为内燃机工作原理示意图,内燃机工作时,活塞作往复运动,这一运动借助于曲柄连杆机构使内燃机曲轴转动,以带动工作机器。燃料和空气的混合物在气缸中燃烧,释放出大量热能,使燃气的温度、压力大大高于周围介质的温度和压力而具备做功的能力。它在气缸中膨胀做功,推动活塞,这时气体的能量通过曲柄连杆机构传递给装在内燃机曲轴上的飞轮,转变成飞轮的动能输出。同时,曲轴的旋转完成活塞的往复运动,排出废气,为下一轮进气做好准备。每经过一定的时间间隔,空气和燃料即被送入气缸中,并在其中压缩、燃烧、膨胀,推动活塞做功。这样,活塞不断地往复运动,曲轴则连续回转。飞轮从气体那里得到的能量,除了部分作为带动活塞往复运动所需的能量外,其余部分传递给工作机械加以利用。此外,排出的废气把一部分燃料化学能转换来的热能排向环境大气。

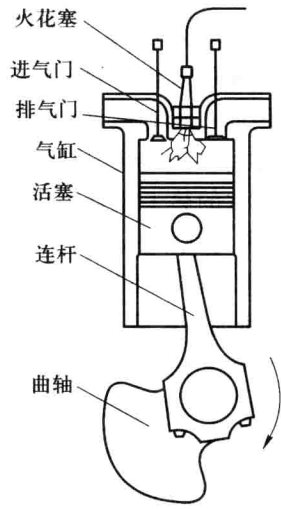


图 1.1 内燃机工作原理示意图

工程热力学不深入研究各种热机的具体结构和各自的特性,而是抽取所有热机的共同问题进行探讨。不同热机的构造不同,工作特性不同,但是概括地来看,无论哪一种热机,总是用某种媒介物质从某个能源获取热能,从而具备作功能力并对机器作功,最后把余下的热能排向环境介质。上述过程中高低温热源吸排热并膨胀作功对任何一种热机都是共同的,也是本质性的。

热能和机械能之间的转换是通过一种媒介物质在热机中的一系列状态变化过程来实现的,这种媒介物质称为工质。例如空气、燃气和水蒸气等都是常用的工质。

工程热力学中,把热容量很大,且在放出或吸收有限量热能时自身温度及其他热力参数没有明显改变的物体称为热源。把放出热能给工质的热源称为高温热源,把吸收工质热能的热源称为低温热源。

热机的工作过程可以概括为:工质自高温热源吸热,将其中一部分转化为机械能而作功,并把余下部分传给低温热源。

二、热力系统

在工程热力学中,通常选取一定的工质或空间作为研究对象,称之为热力系统,简称系统。系统以外的物体称为外界或环境。系统与外界之间的分界面称为边界。边界可以是真实的,也可以是假想的;可以是固定的,也可以是移动的。

如图 1.2 所示,如果取气缸中的气体作为研究对象,则气缸内壁及活塞内表面即构成该系统的真实边界,并且一部分边界随活塞移动而变化。

按照系统与外界之间发生的相互作用,进行物质和能量交换的具体情况,系统可分为以下几类:

1) 闭口系统:系统与外界无物质交换,如图 1.2 所示。当工质进出气缸的阀门关闭时,气缸内的工质就是闭口系统。由于系统的质量始终保持恒定,所以也常称为控制质量系统。

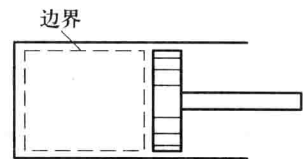


图 1.2 闭口系统示意图

2) 开口系统:系统与外界有物质交换,如图 1.3 所示。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。

3) 绝热系统:系统与外界无热量交换。

4) 孤立系统:系统与外界既无能量(功、热量)交换又无物质交换。

严格地讲,自然界中不存在完全绝热或孤立的系统,但工程上存在着接近于绝热或孤立的系统,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是绝热系统或孤立系统,获得有指导意义的结论。

需要指出的是,选取的热力系统必须具有足够大的尺度,即与物质的微观尺度相比可以认为是无穷大,以满足宏观的假定。

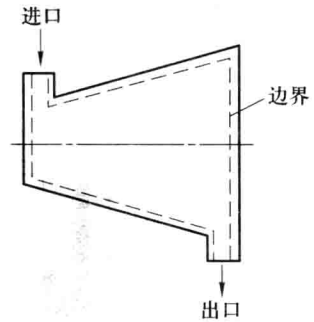


图 1.3 开口系统示意图

三、热力状态及状态参数

1. 热力状态

工质在膨胀或被压缩的过程中,压力、温度、体积等物理量会发生变化,或者说工质本身的情况会发生变化。工质在某一瞬间所呈现的宏观物理状况称为工质的热力状态,简称状态。

用于描述工质所处状态的宏观物理量称为状态参数,如温度、压力、比体积等。状态参数具有函数的性质,工质的状态一旦确定,状态参数就具有确定的数值,与到达这一状态的过程无关。

2. 基本状态参数

在工程热力学中,常用的状态参数有压力、温度、比体积、热力学能、焓和熵等,其中压力、温度、比体积可以直接测量,称为基本状态参数。其余的状态参数根据基本状态参数可以间接计算得到。

(1) 压力

单位面积上所受到的垂直作用力称为压力,用符号 p 表示,即

$$p = \frac{F}{A}$$

式中, F 为垂直作用于面积 A 上的力。根据分子运动论,气体的压力是大量分子与容器壁面碰撞作用力的统计平均值。

在国际单位制中,压力的单位为 Pa(帕), $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} / \text{m}^2$ 。工程上,因单位 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

$$1 \text{ MPa} = 10^3 \text{ kPa} = 10^6 \text{ Pa}$$

其他单位制的压力单位还有 bar(巴)、 mmH_2O 、 mmHg 、atm(标准大气压)、at(工程大气压)等,并有 $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$, $1 \text{ mmH}_2\text{O} = 9.81 \text{ Pa}$, $1 \text{ mmHg} = 133.3 \text{ Pa}$, $1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$, $1 \text{ at} = 0.981 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

工程上常用 U 形管压力计和弹簧管式压力表(图 1.4)测量工质的压力。由于压力表本身总

处在某种环境(通常是大气环境)中,因此由压力表测得的压力是被测工质的压力与当地环境压力之间的差值。它是一个相对值,并非工质的真实绝对压力。

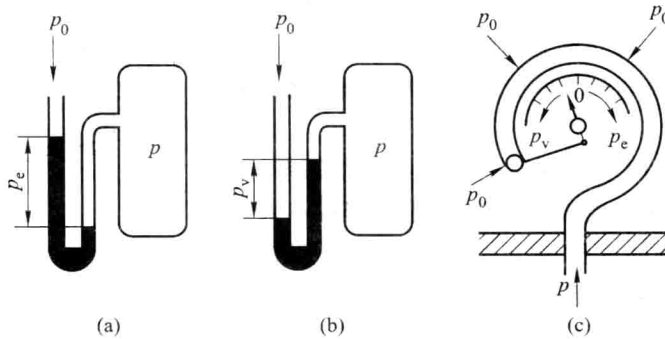


图 1.4 压力测量示意图

工质的真实压力称为绝对压力,用 p 表示。当绝对压力高于大气压力 p_0 时,压力计指示的数值称为表压力,用 p_e 表示,如图 1.4a 所示。显然

$$p = p_0 + p_e \quad (1.1)$$

当工质的绝对压力低于大气压力时,如图 1.4b 所示,测压仪表指示的读数称为真空度,用 p_v 表示,此时

$$p = p_0 - p_v \quad (1.2)$$

大气压力随测量时间、地点而不同,可用大气压力计测定。工程计算中,如被测工质的压力很高,可将大气压力视为常数,如被测工质的压力较低,则需按当时当地大气压力的具体数值计算。因此,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。只有绝对压力才能表征工质所处的状态,才是状态参数。

(2) 温度

温度是用来标志物体冷热程度的物理量。根据气体动理学理论,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,分子不规则热运动越剧烈。

当两个温度不同的物体相互接触时,它们之间将发生热量传递。如果不受其他物体影响,经过足够长的时间后,它们将达到相同的温度而不再进行热量传递,即达到所谓热平衡状态。这一事实导致了热力学第零定律的建立。热力学第零定律表述为:如果两个物体中的每一个都分别与第三个物体处于热平衡,则这两个物体彼此也必处于热平衡。这第三个物体可用作温度计。温度概念的建立以及温度测量是以热力学第零定律为依据的,当温度计与被测物体达到热平衡时,温度计所指示的温度就等于被测物体的温度。

温度的数值表示法称为温标,国际单位制采用热力学温标作为基本温标,用这种温标确定的温度称为热力学温度,以符号 T 表示,单位是 K(开)。热力学温标以水的三相点(纯水的固、液、汽三相平衡共存的状态点)为基准点,并定义其温度为 273.16 K。因此,1 K 等于水的三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。

热力学温标是一种理论温标,可以用气体温度计复现,但气体温度计装置复杂,使用不便,所以国际上决定采用国际实用温标。目前采用的是 1990 年国际计量大会通过的国际温标(ITS-90)。

与热力学温标并用的还有热力学摄氏温标,简称摄氏温标。用这种温标确定的温度称为摄氏温度,用符号 t 表示,单位为 $^{\circ}\text{C}$ (摄氏度),并定义为

$$t = T - 273.16 \text{ K} \quad (1.3)$$

可见,摄氏温标与热力学温标仅起点不同。摄氏温度 0°C 相当于热力学温度 273.16 K 。

(3) 比体积及密度

单位质量的工质所占有的体积称为比体积,用符号 v 表示,单位为 m^3/kg 。如果质量为 m 的工质所占有的体积为 V ,则工质的比体积为

$$v = \frac{V}{m} \quad (1.4)$$

单位体积工质的质量称为密度,用符号 ρ 表示,单位为 kg/m^3 。很明显,比体积与密度互为倒数,即

$$\rho v = 1 \quad (1.5)$$

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,其中任一个都可以作为工质的状态参数,二者互不独立,通常以比体积 v 作为状态参数来表示。

四、平衡状态、状态方程和坐标图

1. 平衡状态

在没有外界作用的情况下,工质(或系统)的宏观性质不随时间而变化的状态称为平衡状态。

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。

工程热力学通常只研究平衡状态。

2. 状态方程式

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,并且互有联系。状态公理指出,对于和外界只有热量和体积变化功(膨胀功或压缩功)交换的简单可压缩系统,只需两个独立的参数便可确定它的平衡状态。例如,在工质的基本状态参数 p 、 v 和 T 中,只要其中任意两个确定,另一个也随之确定,如

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

表示成隐函数形式为

$$F(p, v, T) = 0 \quad (1.6)$$

这种表示状态参数之间关系的方程式称为状态方程式。

3. 状态参数坐标图

由于两个独立的状态参数就可以确定简单可压缩系统的状态,所以在以两个独立状态参数为坐标的平面坐标图上,每一点都代表系统的一个平衡状态。如图 1.5 中 1、2 两点分别代表由独立状态参数 p_1 、 v_1 和 p_2 、 v_2 所确定的两个平衡状态。非平衡状态无法在图中表示,因其没有确定的状态参数。

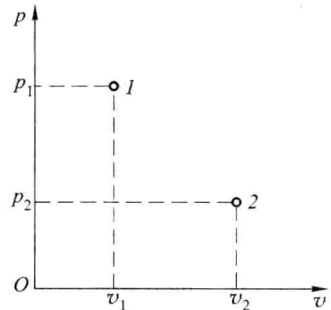


图 1.5 压容图

五、热力过程、准平衡过程和可逆过程

1. 热力过程和准平衡过程

系统由一个状态到达另一个状态的变化过程称为热力过程,简称过程。

状态改变意味着系统原平衡状态被破坏。实际设备中进行的过程,都是由于系统内部各处温度、压力或密度的不平衡而引起的,所以过程所经历的中间状态是不平衡的。

为了便于对实际过程进行分析和研究,假设过程中系统所经历的每一个状态都无限地接近平衡状态,这种过程称为准平衡过程,又称为准静态过程。在状态参数坐标图上可以用连续的实线表示。而非平衡过程由于它所经历的不平衡状态没有确定的状态参数,因而不能表示在状态参数坐标图上。

既要使系统的状态发生变化,又要随时接近平衡状态,只有使过程进行得无限缓慢才有可能实现。实际过程都是以有限的速度并在有限时间内进行的,都是不平衡过程。理论上,在没有外界作用下,一个系统从非平衡状态达到完全平衡状态需要很长时间,但是从非平衡状态趋近平衡状态所需时间往往不很长,这段时间叫做弛豫时间。实际上,在系统内外的不平衡势(如压力差、温度差等)不是很大的情况下,弛豫时间非常短,可以将实际过程近似地看做准平衡过程。例如,在活塞式热力机械中,活塞运动的速度一般在 15 m/s 以内,但气体的内部压力波的传播速度等于声速,通常为每秒数百米。相对而言,活塞运动的速度很慢,这类情况就可以按准平衡过程处理。

2. 可逆过程

如果系统完成了某一过程之后,再沿着原路逆行回复到原来的状态,外界也随之回复到原来的状态而不留下任何变化,则这一过程称为可逆过程。否则就是不可逆过程。

例如,在图 1.6 所示的装置中取气缸中的工质作为系统。开始时系统处于平衡状态 1,随着系统从热源吸热,体积膨胀并对活塞做功,使飞轮转动,系统由初态 1 经历了一系列准平衡状态变化到终态 2。如果此装置是一理想的机器,不存在摩擦损失,那么工质膨胀功将以动能的形式全部储存于飞轮中。如果利用飞轮的动能推动活塞缓慢逆行,则系统将被压缩由状态 2 沿着原路径逆向回到初态 1,压缩过程所需要的功正好等于膨胀过程所作的功。与此同时,系统向热源放热,放热量与膨胀时的吸热量相等。于是,当系统回到原来的状态 1 时,机器和热源也都回到了原来的状态,或者说系统和外界全部恢复到原来的状态,未留下任何变化,这样的过程就是可逆过程。

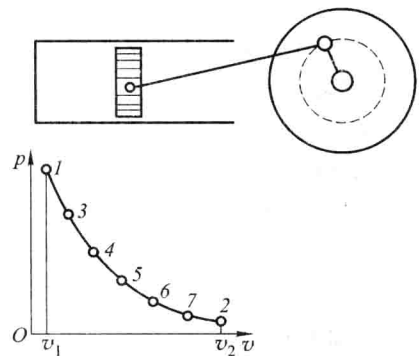


图 1.6 可逆过程示意图

不难想象,有摩擦(机械摩擦、工质内部的黏性摩擦等)的过程,都是不可逆过程。因为在正向过程中,有一部分膨胀功由于摩擦变成了热,而在逆向过程中还要再消耗一部分功用于克服摩擦而变成热,所以要使工质回到初态,外界必须提供更多的功。这样,工质虽然回到了初态,但外界却发生了变化。

传热、混合、扩散、渗透、溶解、燃烧和电加热等实际过程都是不可逆过程。对于一个均匀的无化学反应的系统来说,实现可逆过程最重要的条件不仅是系统的内部而且系统与外界之间都处于热和力的平衡,过程中不存在摩擦、黏性扰动、温差传热等消耗功或潜在作功能力损失的耗散效应。所以说,可逆过程就是无耗散效应的准平衡过程。

可逆过程是一个理想过程,是一切热力设备工作过程力求接近的目标。可逆过程的概念为热力学分析提供了很大的方便。利用这一概念可以将复杂的实际过程近似简化为一个理想的可逆过程加以研究,然后再加以适当的修正,所以研究可逆过程在理论上具有十分重要的意义。

六、功与热量

1. 功与示功图

在力学中,功定义为力和沿力作用方向位移的乘积。例如:若物体在力 F 作用下沿力的方向 x 产生了微小位移 dx ,则该力所作的功为

$$\delta W = F dx$$

如果在力 F 作用下物体沿力的方向从 x_1 移动到 x_2 ,则力 F 所作的功为

$$W = \int_{x_1}^{x_2} F dx$$

热能转换为机械能的过程是通过工质的体积膨胀实现的。工质在体积膨胀时所作的功称为膨胀功,它是热力学的一种基本功量。

如图 1.7 所示,假定气缸中盛有质量为 m 的工质,其压力为 p ,活塞面积为 A ,则工质作用于活塞上的力为 pA 。假设活塞在工质压力的作用下向前移动了一微小距离 dx ,由于在此过程中工质体积膨胀很微小,其压力近乎不变,如果这一微元过程是准平衡过程,则工质对活塞所作的功为

$$\delta W = pA dx = p dV \quad (1.7)$$

式中, dV 为活塞移动距离 dx 时气缸中工质体积的增量。如果活塞从位置 1 移动到位置 2,并且过程是准平衡过程,则工质所作的膨胀功为

$$W = \int_1^2 p dV \quad (1.8)$$

单位质量工质所作的膨胀功称为比膨胀功,用 w 表示。由式(1.7)和式(1.8)可得

$$\delta w = p dv \quad (1.9)$$

$$w = \int_1^2 p dv \quad (1.10)$$

由于可逆过程就是无耗散效应的准平衡过程,所以式(1.7)~式(1.10)也是计算可逆过程膨胀功的公式。具体计算时,除了工质初、终态以外,还必须知道工质在状态变化过程中压力和比体积的变化规律,即 $p=f(v)$ 的函数关系。

一个可逆过程可以用以压力 p 为纵坐标、比体积 v 为横坐标的 $p-v$ 图上的一条曲线来表示,如图 1.7 中的 $1a2$ 所示。根据微积分原理,积分 $\int_1^2 p dv$ 的数值,即比膨胀功 w_{1-2} 的大小可以用曲线下面的面积来表示,因此 $p-v$ 图也称为示功图。

如图 1.7 所示,过程 $1a2$ 与过程 $1b2$ 的膨胀功不同,可见膨胀功的大小不仅取决于工质的初、终状态,而且与过程的性质有关,所以功量是过程量而不是状态量。为了以示区别,微小功量用 δw 表示,而不用 dw 表示。

当工质被压缩时,以上各式同样适用,只不过 dv 为负值,计算出的功也是负值,表示外界压缩工质作功。

在国际单位制中,功的单位为 J(焦)或 kJ(千焦),比功的单位为 J/kg 或 kJ/kg。

2. 热量、熵与示热图

热力系统与外界之间依靠温差传递的能量称为热量,用 Q 表示,单位与功的单位相同,为 J 或 kJ。单位质量工质所传递的热量用 q 表示,单位为 J/kg 或 kJ/kg。

热量和功量一样,都是热力系统在与外界相互作用的过程中所传递的能量,因此不能说“系统在某状态下具有多少热量”,或“系统在某状态下具有多少功量”。热量与功量都是过程量而不是状态量,因此微元过程中传递的微小热量分别用 δQ 和 δq 表示,而不用 dQ 和 dq 表示。

工程热力学中规定:系统吸收的热量的值为正,系统放出的热量的值为负。

在可逆过程中,系统与外界交换热量的计算公式与功的计算公式具有相同的形式。对照式(1.9),对于微元可逆过程,单位质量工质与外界交换的热量可以表示为

$$\delta q = T ds \quad (1.11)$$

式中, s 称为比熵,单位为 J/(kg·K) 或 kJ/(kg·K)。比熵的定义式为

$$ds = \frac{\delta q}{T} \quad (1.12)$$

即:在微元可逆过程中,工质比熵的增加等于单位质量工质所吸收的热量除以工质的热力学温度所得的商。比熵 s 同比积 v 一样是工质的状态参数。

对于质量为 m 的工质

$$\delta Q = T dS \quad (1.13)$$

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \quad (1.14)$$

式中, S 为质量为 m 的工质的熵,单位是 J/K。

这里仅作为基本概念给出了熵的定义,有关熵的物理意义将在本章第六节中进一步深入讨论。

对于从状态 1 至状态 2 的可逆过程,工质与外界交换的热量可用下式计算:

$$q = \int_1^2 T ds \quad (1.15)$$

或

$$Q = \int_1^2 T dS \quad (1.16)$$

可见,式(1.15)、式(1.16)与可逆过程膨胀功的计算式(1.10)和式(1.8)的形式完全相同。

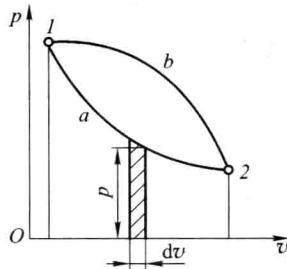
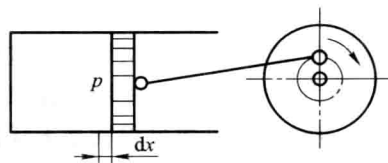


图 1.7 示功图