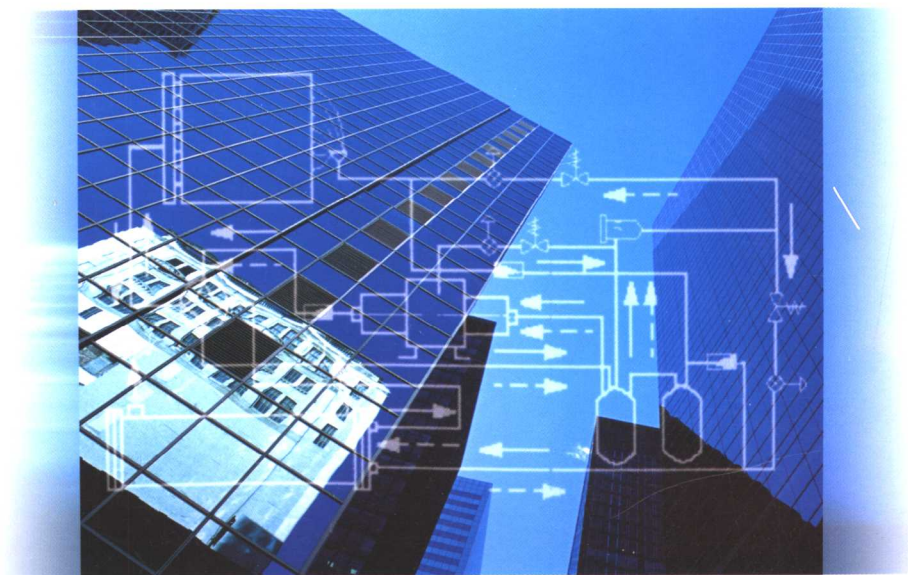


鱼剑琳 王泮浩 编著

建筑节能应用 新技术



Chemical Industry Press



化学工业出版社
环境·能源出版中心

建筑节能应用新技术

鱼剑琳 王沅浩 编著



化学工业出版社

环境·能源出版中心

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑节能应用新技术/鱼剑琳, 王泮浩编著. —北京:
化学工业出版社, 2006. 2
ISBN 7-5025-8229-0

I. 建… II. ①鱼…②王… III. 建筑-节能-新
技术应用 IV. TU111.4-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 006620 号

建筑节能应用新技术

鱼剑琳 王泮浩 编著

责任编辑: 徐 娟

责任校对: 李 林

封面设计: 关 飞

*

化学工业出版社 出版发行
环境·能源出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷有限责任公司印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 14 $\frac{3}{4}$ 字数 365 千字

2006 年 3 月第 1 版 2006 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8229-0

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

能源是人类赖以生存和发展的基本条件。随着社会进步和社会经济的快速发展,能源需求与供给的矛盾日益突出,节约能源是人类当前面临的重要任务之一。对于我国来说,当前的能源形势更为严峻,因此,节约能源对实现国民经济的可持续发展是至关重要的。

建筑能耗在社会总能耗中所占的比重很大,在发达国家已占到能源消费总量的 35%~40%。尽管我国社会经济发展水平和生活水平都还不高,但建筑能耗已占社会总能耗的 20%~25%,并且还在逐步上升。与世界发达国家相比,目前我国单位建筑面积能耗还很高,能源利用率也很低。因此,在我国的建筑领域中,提高能源的有效利用,开展建筑节能工作有着积极的现实意义。

建筑节能是一项复杂的系统工程,在建筑物的设计、建造和使用过程中等都存在着节能潜力。建筑节能的重点应从建筑本体和建筑设备领域发展建筑节能的新技术。近年来,在建筑设备所涉及的能量系统节能技术领域,一些先进的供冷、供热系统与设备以及控制技术等积极推进了建筑节能的发展。提高建筑中的能源利用率,加大利用可再生能源和新能源已是建筑节能的主要方向之一。

本书的编写目的是将近年来建筑节能领域中应用的一些新技术介绍给广大大专院校的师生和相关工程技术人员。目前建筑节能领域中应用的新技术很多,本书仅介绍其中与建筑设备应用相关的若干新技术,这些新技术包括:空调用制冷装置的节能技术、变风量空调技术、蓄冷空调技术、热量回收技术、自然通风技术、地板辐射供热技术、热电联产技术、热泵应用技术、太阳能的热利用技术和建筑能耗模拟分析等。

本书第 1、3、6、7 和 8 章由鱼剑琳编写,第 2、4 和 5 章由王泮浩编写;由鱼剑琳对全书进行了统稿。在本书编写中,得到了研究生谢康山和蒲辉辉在文字、插图处理方面的大力协助,在此表示由衷的感谢。

由于本书的编写是作者初步尝试,不妥之处敬请广大读者批评指正。

作 者
2005 年 10 月

目 录

第1章 绪论	1	5.1 国内供热方式现状与经济性分析	102
1.1 能源概述	1	5.2 地板辐射供热技术	106
1.2 建筑节能的意义与途径	2	5.3 热电联产技术	122
1.3 建筑节能技术的发展	3	5.4 锅炉供热系统的节能技术	135
第2章 能量利用的热力学原理	5	第6章 热泵应用技术	143
2.1 概述	5	6.1 热泵原理与热泵循环	143
2.2 热力学基本概念	6	6.2 空气源热泵	149
2.3 热力学基本定律	9	6.3 水源热泵	161
2.4 焓及热量与冷量焓计算	15	6.4 热泵技术的发展	168
2.5 节能分析法	18	第7章 太阳能的热利用	170
第3章 建筑物冷热负荷	23	7.1 太阳辐射	170
3.1 建筑围护结构的热传递方式	23	7.2 太阳能热水装置	177
3.2 建筑物热负荷	28	7.3 太阳能供热	194
3.3 建筑物冷负荷	31	7.4 太阳能空调	202
第4章 建筑空调节能	35	第8章 建筑能耗模拟分析	209
4.1 空调用制冷系统的节能技术	35	8.1 概述	209
4.2 变风量空调技术	47	8.2 建筑能耗分析建模方法	209
4.3 蓄冷空调技术	61	8.3 度日法	214
4.4 空调系统中的热量回收技术	78	8.4 分格法	217
4.5 自然通风技术	86	8.5 建筑能耗全面模拟方法	220
4.6 空调系统的节能控制技术	94	8.6 建筑能耗模拟软件	223
第5章 建筑供热节能	102	参考文献	226

第 1 章 绪 论

1.1 能源概述

能源是人类生存和发展最重要的物质基础。从当今社会的发展来看,提高一个国家的机械化、电气化和自动化水平,改善人民的物质文化生活水平,就意味着要消耗更多的能量。虽然从长远看,太阳能、核聚变能、地热能等可以为人类提供几乎无限的能量,但由于技术上的困难,目前对这些新能源还不能大规模开发利用。人类近期应用的能源主要是煤炭、石油和天然气等化石能源,它们对人类的生存和发展做出了巨大贡献,人类依靠它们取得了辉煌的经济发展和科技、文化进步。但发展到今天,这些能源所具有的资源有限性和对生态环境的危害性愈来愈突出,已成为人类面临的巨大威胁和挑战。为了人类社会的可持续发展,必须大力提高现有能源利用效率、节约各种形式的用能,同时千方百计寻求新的能源发展道路,开发利用可以再生、与生态环境和谐的新能源和可再生能源。

通常人类利用的能量有多种形式,一般归纳起来有以下几种。

(1) 机械能 机械能是人类最早认识和利用的能量,如风能、水能等,它包括宏观的动能和势能。

(2) 热能 从微观上看,热能为分子运动中移动动能的平均值,在宏观上表现为温度的高低,如地球上的地热能。

(3) 电能 电能是由带电荷物体的吸引力(或排斥力)引发的能量,目前使用的电能主要是由化学能或机械能转换来的。另外,电能也可由光电能转换,或由热能直接转换(磁流体发电)。

(4) 辐射能 物体以电磁波的形式发射出的能量称为辐射能。太阳是最大的辐射源。

(5) 化学能 化学能是在原子核外进行化学变化时释放出来的一种能量。目前人们所利用的化学能量主要依靠的是放热反应。

(6) 核能 核能是由于物质原子核内结构发生变化而释放出来的巨大能量,又称核内能。核能可从两种不同的反应中得到:核裂变反应和核聚变反应。

目前可提供人类利用的能源很多,如矿物质能(煤、石油、天然气)、生物质能、水能、太阳能、风能、地热能、海洋能、核能等。如前所述,能源的种类非常多。通常,我们把以现成的形式存在于自然界中的能源称为一次能源,把需要依靠其他能源来制作或生产的能源称为二次能源。一次能源还可以按照能否再生而进一步分类。所谓再生能源,就是不会随着它本身的转化或人类的利用而日益减少的能源。非再生能源是指那些随着人类的开发利用而越来越少的能源。

能源有各种各样的分类方法,但归纳起来,主要有以下几种。

(1) 按来源可分为:①来自于太阳的能源;②来自于地球本身的能源;③来自于地球和其他星体相互作用的能源。

(2) 按成因可分为:①一次能源;②二次能源。

(3) 按性质可分为:①燃料能源;②非燃料能源。

(4) 按使用状况可分为：①常规能源；②新能源。

(5) 按对环境有无污染可分为：①清洁能源；②非清洁能源。

人类利用能源，往往是利用由能源直接提供或通过转换而提供的各种形态的能量。能量本身也可以相互转换，形成我们所需的形态。比如，矿物燃料通过燃烧将化学能转变成热能，然后通过汽轮机将热能转换成机械能，再通过发电机将机械能转换成电能等。热能的直接使用和电能的广泛使用是当今社会主要用能方式。尤其是电能便于集中供应，又便于分散应用，具有传输迅速且消耗低的特点，输送、使用、管理都非常方便，并能转化成多种形式的能量，被称为“能的万能形式”。

我国当前的能源形势甚为严峻，这突出表现在资源不足和供应紧张两方面。从总储量来看，我国常规能源总储量占世界第三位，其中煤的储量仅次于俄罗斯和美国，水力资源居世界前位。但由于我国人口众多，人均可开采能源资源占有量很低，仅及世界平均水平的一半，相当于美国的 1/10、俄罗斯的 1/7。从这个角度看，我国也可说是能源贫国，对能源尤应珍惜。能源的有效利用是包括整个能量系统，从能源生产、加工、转换、储存，直到终端使用等各个环节。目前我国的能源有效利用率只有 32% 左右，而美国已接近 50%，日本也接近 40%，都比我国高很多，这是我国能源利用中存在的严重问题。如果我国能将能源利用率提高到 40%，就相当于增加了 33% 的能源产量。所以对我国来说，提高能源的有效利用率是非常重要的。

1.2 建筑节能的意义与途径

能源是国民经济发展和社会进步的重要物质基础，经济发展的速度依赖于能源的发展。能源的短缺将会严重制约经济的快速发展，而我们目前使用的大多数能源是不可再生的，因此，提高能源的有效利用率也可以说是能源发展的一条新途径。建筑节能是世界建筑发展的一个基本趋势，也是建筑科学技术的一个新的增长点。在可持续发展的战略思想指导下，当今国际上建筑发展的总趋势是在增进人体健康、提高舒适性的条件下，有效利用能源、合理利用资源、减少温室气体排放、保护人类生存环境。

由于我国经济近年来持续快速发展，能源生产的增长速度已不能满足经济增长的需求。建筑能耗是能源消费构成的重要部分，占相当大的比重，在发达国家已占到能源消费总量的 35%~40%。在我国，随着现代化建设的发展和人民生活水平的不断提高，舒适的建筑热环境已成为人们生活和工作的需要；建筑供热和建筑空调面积的增加，也使得建筑能耗占到能源消费总量的 25% 以上。如果在我国目前的能源生产条件下，不能更为有效地减缓建筑能耗增长，这势必成为制约国民经济发展的的重要因素。因此，在我国建筑领域中，一方面应狠抓节约能源、提高能源使用效率；另一方面也应大力提倡新能源和可再生能源的利用，节约资源，保护生态环境，贯彻经济社会可持续发展战略。

建筑节能是一项复杂的系统工程，从建筑本体技术到建筑用材料产品、建筑热环境用设备等都存在着节能潜力。一个国家的建筑能耗水平与其自然环境条件、生活方式、建筑技术水平和国家政策法规等都有关系。因此，建筑节能途径应是在保证使用功能、建筑质量和室内环境的前提下，采取各种有效的节能技术与管理措施。在技术节能方面应积极采用节能建材、新型节能墙体、屋面的保温隔热技术、节能门窗的保温隔热和密闭技术；建筑设备产品的使用方面应采用节能型供热、空调设备及系统，并提高设备运行时的能源利用率；加大新能源和可再生能源如太阳能和地热能建筑中的应用；进一步推广不同能源的热泵技术、产

品以及回收废热、余热技术。在建筑节能管理方面加强建筑节能标准化工作,严格实行建筑的节能设计,要把建筑节能作为建筑设计是否达标的重要考核项目,必须严格执行有关建筑节能的技术标准,在保证室内热环境及卫生标准的前提下,做好建筑和供热空调设备系统设计,确保单位建筑面积能耗达到标准要求。另外,我国目前的建筑节能工作还处于一个发展的阶段,采取经济鼓励政策是快速推动节能进程的积极措施。

1.3 建筑节能技术的发展

自 20 世纪 70 年代中东石油危机以来,建筑节能成为发达国家关注的热点。而 90 年代提出可持续发展理论和环境资源保护的紧迫性以后,建筑节能更成为世界各国关注的热点。

实际上,建筑节能始终与人类对建筑的需求相联系着,在发达国家,建筑节能经历了三个阶段。第一阶段:在建筑中节约能量 (energy savings in buildings),即单纯地抑制需求、减少耗能量。第二阶段:在建筑中保持能量 (energy conservation in buildings),减少热损失。第三阶段:提高建筑中的能源利用率 (energy efficiency in buildings),即是积极意义上的节能。第一阶段和第二阶段是高耗能的阶段,第三阶段则是高能量效率,可以大量利用可再生能源和新能源。

我国建筑节能工作还处在发展初期,从地域、建筑类型、围护结构与设备系统、设计施工和运行等各方面均有十分广阔的发展空间。我国从 20 世纪 80 年代中期开始重视建筑节能,1986 年建设部颁布了《民用建筑节能设计标准(采暖居住建筑部分)》;1993 年建设部又批准了《旅游旅馆建筑热工与空气调节节能设计标准》;1995 年建设部制定了《建筑节能“九五”计划和 2010 年规划》;1996 年建设部发布了《建筑节能技术政策》;1997 年建设部发布了《1996~2000 年建筑技术政策》;2000 年建设部发布了《民用建筑节能管理规定》;2002 年建设部发布了《建设部建筑节能“十五”计划纲要》。这一系列的政策法规的实施,保证了建筑节能工作的进展,并有效地促进了相关的节能技术进步。

建筑节能的重点应从建筑本体和建筑设备领域发展建筑节能的创新技术。这包括在建筑围护结构保温技术方面,采用高效节能建筑新材料、外墙外保温技术、高效保温门窗和热反射保温隔热技术等。高效建筑绝热材料的使用和复合墙体的做法在不断推广,通过墙体采用岩棉、玻璃棉、聚苯乙烯塑料、聚氨酯泡沫塑料、聚乙烯塑料等新型高效保温绝热材料以及复合墙体,降低外墙传热系数。在门窗保温方面,控制窗墙比(指窗户面积与窗户面积加上外墙面积之比值)、增加窗玻璃层数、增设保温窗帘以及使用门窗密封条等技术措施,也逐步在建筑中推广应用。在南方地区和夏热冬冷地区,屋面也可以采用遮阳隔热技术。另外,通过综合考虑建筑物的通风、遮阳、自然采光等,可以对建筑围护结构进行优化集成以实现节能。例如,双层幕墙技术是中间带有可调遮阳板且可通风的方式,夏季可有效遮阳和通风排热,冬季又可使太阳光透过,减少供热负荷。

在建筑设备所涉及的能量系统节能技术领域,采用先进供冷、供热系统和设备以及控制技术 etc 积极推进了建筑节能的发展。

(1) 计算机仿真与智能控制技术 通过对供冷、供热系统实现优化运行节能控制,最大限度减低运行能耗。

(2) 热泵应用技术 采用热泵原理利用低温低品位热能资源,通过少量的高品位电能输入,实现低品位热能向高品位热能转移的一种技术,主要有空气源热泵技术和水源热泵技术。可向建筑物供热、供冷,有效降低建筑物供热和供冷能耗,同时降低区域环境污染。

(3) 变风量空调技术 变风量空调系统是一种节能的空调方式。整个空调系统可以随着负荷的变化调节总送风量，特别是在部分负荷运转时可以最大限度地减少风机动力消耗而节约能量；同时空调制冷机组也可只按实际负荷需要运行，这也降低了能耗和运行费用；在考虑同时使用系数的情况下，空调系统的总装机容量可以减少 10%~30% 左右。

(4) 新风处理及空调系统的余热回收技术 新风负荷一般占建筑物总负荷的 30%~40%。变新风量所需的供冷量比固定的最小新风量所需的供冷量少 20% 左右。新风量如果能够从最小新风量到全新风变化，在春秋季可节约近 60% 的能耗。通过全热式换热器将空调房间排风与新风进行热、湿交换，利用空调房间排风的降温除湿，可实现空调系统的余热回收。

(5) 辐射型供热节能技术 地板辐射、天花板辐射、垂直板辐射是辐射型供热的主要方式。它是一种对房间热微气候进行调节的节能供热系统，可避免吹风感，使人热感觉舒适。在有低温废热、地下水等低品位可再生冷热源时，这种方式可直接使用这些冷热源，省去常规冷热源。

(6) 热电联产技术 采用热电联合生产的方式，利用发电余热集中供热取代大量的、分散的、除尘效率很低的小锅炉供热方式，可大幅度地减少大气污染物的排放量，有效地改善环境质量。与直接使用锅炉供热相比，热电联产提高了能源的利用效率，可降低一次能源消耗量 10%~30%。

(7) 相变储能技术 相变储能技术具有储能密度高、相变温度接近于一恒定温度等优点，可提供很高的蓄热、蓄冷容量，并且系统容易控制，可有效解决能量供给与需求时间上的不匹配问题。例如，在供热空调系统中应用相变储能技术，是实现电网的“削峰填谷”的重要途径；在建筑围护结构中应用相变储能技术，可以降低房间空调负荷。

(8) 太阳能热利用技术 太阳能一体化建筑是太阳能利用的发展趋势。利用太阳能为建筑物提供生活热水、冬季供热和夏季空调，同时可以结合光伏电池技术为建筑物供电。用太阳能替代或部分替代常规能源驱动空调系统，正日益受到世界各国的重视。

(9) 建筑能耗模拟分析技术 该技术是在综合考虑气候条件、各种传热方式、建筑物的朝向、墙体材料的性能、门窗性能、建筑物的热惰性、各相邻房间耦合传热、新风要求、用户的作息情况以及供热空调等各种建筑设备的选择和使用等因素的基础上对建筑物的能耗需求进行评估。它对建筑供热和空调系统的节能优化、现有建筑的节能改造、空调系统的运行管理有着重要的意义。

第2章 能量利用的热力学原理

2.1 概述

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、供热等方面。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Mayer和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第一定律。1850~1851年间,Clausius和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。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形成了非动力类的热工理论基础。

热力学的研究有两个途径:一是经典热力学;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。本章主要讨论经典热力学在建筑节能中的应用,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做适当的解释。

2.2 热力学基本概念

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，对学会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。

2.2.1 热力系统

做任何分析研究，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 2-1 和图 2-2 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 2-2 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 2-1 中当活塞移动时界面发生变化）。

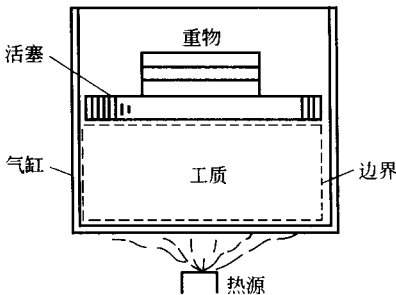


图 2-1 气体定压受热做功示意

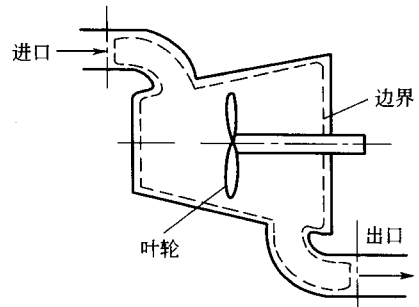


图 2-2 稳定流动能量分析

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；还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，而我们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。

在做热力学分析时，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四种类型。

(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交换。如图 2-1 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 2-2 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，抽象成为绝热系统或孤立系统，使问题得以简化。

2.2.2 热力状态

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 $T(K)$ ，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。

一个热力系统，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，则该热力系统处于力平衡。若热力系统内的各部分间无温度差别，且等于外界温度，就不会发生热的传递，则该热力系统处于热平衡。所以，为了能够实现平衡状态，必须满足力平衡、热平衡条件。如果热力系统内还存在化学反应，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，工质各部分的状态参数不尽相同，且随时间变化而变化，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。

在工程热力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，称为基本状态参数。

(1) 压力 压力是指单位面积上承受的垂直作用力。

$$p = \frac{F}{A} \quad (2-1)$$

式中， p 为压力； F 为垂直作用力； A 为面积。

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 (2-1) 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。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)。

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

式中， p_b 为大气压力，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)。

$$p_v = p_b - p \quad (2-3)$$

因此, 如果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, 然后通过上述关系式将绝对压力计算出来。

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。

(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 m^3/kg 。单位容积内工质的质量称为密度, 以 ρ 表示, 单位为 kg/m^3 。比容与密度互成倒数, 所以密度也可以作为状态参数, 它们都是用来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。它是热力学的基本定律之一, 但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。

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。

$$T(\text{K}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273.15 \quad (2-4)$$

显然, 摄氏温标的每度 (1°C) 和开尔文温标的每开 (1K) 是相等的, 只是摄氏温标的零点比开尔文温标零点高出 273.15K。

2.2.3 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。热力过程按照过程是否平衡分为准静态过程和非准静态过程; 按照是否可逆分为可逆与不可逆过程。

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 (确切说是由无限接近平衡状态的状态组成的) 过程, 称为准静态过程、准平衡过程。

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。

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。

可逆过程应具备以下两个特点，一是在过程进行时，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；其次在变化期间，必须无任何能量的不可逆损耗。

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，都能在热力学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做的功并不一定全为外界所得，只有在可逆过程中，工质所做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，本章后面所分析的过程，都是指可逆过程。

2.2.4 热力循环

一部实际有用的热机或制冷机都必须循环不断地进行工作，因此作为能量转换媒体的工质，在做功之后要以某种方式回到初始状态，以便进行第二次、第三次、……、第 n 次做功。同样，工质在吸热后，要以某种方式回到初始状态，才有可能连续不断地实现能量转换。工质从某一初态出发经历一系列状态变化过程之后，又回到了初始状态时，我们称为经历一个“热力循环”，或简称“循环”。既然循环由过程所组成，我们称完全由可逆过程所组成的循环为可逆循环，即工质在一循环达到原状态之后可以按原途径所经历的全部状态而顺序相反地逆行再回到初始状态。不难看出，在整个循环中，只要存在任何一部分不可逆过程，则循环就不可逆。工程热力学中主要讨论的是可逆循环，它们在 p - V 图和 T - s 图上都将呈现为封闭的曲线。

由于一般热功转换希望将热能转换为功，所以习惯上将吸入热量做正功的循环叫做正循环，而将受外力做功、向外界放热的循环叫做逆循环；从图线方向看，顺时针进行的为正循环，逆时针进行的为逆循环。

2.3 热力学基本定律

工程热力学的基本任务是研究能量守恒定律和能量转换定律在热能转换时的具体表现，即研究热机将热变功的规律，以便更合理地控制热机工作。热力学第一定律明确指出，为了让热机能连续地把热能转换成机械功工质必须执行热力循环，任何企图不消耗热量，而能连续产生机械功的“永动机”都是不可能的。热力学第二定律断言，企图把加给工质的热量（能量）全部而且连续地转变为机械功也是不可能的；任何热机的热效率不仅不能越过，而

且也永远达不到 100%。

2.3.1 热力学第一定律及焓

2.3.1.1 热力学第一定律

大量试验和生产实践表明,热能转换成机械能时遵循这样一条规律,即:供给系统的全部热能等于系统内能的增加量与系统对外做功之和。下面用一个试验来说明热力学中这个重要规律。

如图 2-1 所示的容器中有一个活塞,其上放有一块质量固定不变的砝码,其下封存着一定质量的气体,容器周围用隔热性能极好的材料围起来阻止热量传出去。容器底部是一种导热性能很好的金属板,可以从底部下面对容器内气体进行加热。

设气缸面积为 $A(\text{m}^2)$,砝码与活塞一起的总质量为 $M(\text{kg})$ 。未加热以前,砝码和活塞处于平衡不动时,气缸内气体的压强 p 为

$$p = \frac{Mg}{A} + p_b$$

式中, p_b 为大气压强; g 为标准重力加速度, $g=9.80665\text{m/s}^2$ 。

加热过程中,气缸内气体温度升高,内能增加,气体不断膨胀,推动砝码和活塞缓缓上升,气体工质对外做功,但气压仍保持未加热之前的数值不变。

精确地记录数据可以发现,外界的加热量 Q 、气体的内能增加量 ΔU 以及气体对外做的膨胀功 W 三者之间满足

$$Q = \Delta U + W \quad (2-5)$$

此式表明:供给系统的全部热量等于系统内能的增加量与系统对外做功之和,即热能与机械能之间可以转换,但必须遵循能量守恒的原则。

上式中各项根据实际情况都可以是正数、负数或零。如果 Q 是负数,表明工质向外界放热;如果 W 是负数,表明工质接受外界的压缩功;如果 ΔU 是负数,则表明工质的内能减少了。

虽然是根据图 2-1 这样一个简单的试验导出上面的公式,但是应该指出,无数热力学的实践都证明了这个公式的正确性,它是热力学中具有普遍意义的一条重要规律的数学表达式,人们把这个规律称之为热力学第一定律。

下面讨论热力学第一定律的某些特殊情况。

(1) 式 (2-5) 中 $W=0$,即系统不对外做功,也没有接受外界的功,于是 $Q=\Delta U$ 。这表明系统吸收(或放出)的热量全部用来提高(或降低)系统的内能。

(2) 式 (2-5) 中 $Q=0$,即系统处于绝热状态,因此 $W+\Delta U=0$ 。如果外界对系统做功, W 为负值,则系统内能将逐渐增加, ΔU 为正值;反之,如果系统对外界做功, W 为正值,则系统内能将逐渐减小, ΔU 为负值。

(3) 式 (2-5) 中 $\Delta U=0$ 为正值,即系统内能保持常数,此时 $Q=W$,系统所得到的热量全部转变成相应的功,或外界对系统所做的功全部转换成相应的热量。实际上热机正是这样工作的,它让工质定期地返回到它的初始状态,使其内能保持恒量不变,与此同时,它不断地把热量转变为功。

由此不难看出,若外界不向热机提供热量 Q ,它将不可能对外做功。这就从根本上宣布那些企图制造不消耗热量或少消耗热量,而能连续做出超额机械功的“永动机”的努力是注定要失败的。

2.3.1.2 焓的定义及其计算公式

如前所述,当气体处于一定状态时,将具有一定的内能、压强和容积。随着气体与外界之间的热交换,气体的状态将发生变化,其内能、压强和容积也相应地发生变化。在应用热力学第一定律研究稳定流动开口系统能量交换时,除了依靠 T 、 p 和 V 三个基本热力参数之外,往往还需要补充一个新的表征工质气体热力状态的参数,这个新的热力参数叫做焓,它是气体的内能、压强和容积的函数,用符号 H 表示,单位是 J,计算表达式为

$$H=U+pV \quad (2-6)$$

在许多情况下引入焓的概念之后,将会给热力分析和热工计算带来很大的方便。

所谓稳定流动是指系统工质的情况不随时间改变,即流动各截面上的工质状态和对外热交换均不随时间变化,而且流动各截面上的工质流量都相同地流动。实际工程中许多热机系统,例如蒸汽机、内燃机、压缩机和锅炉内的流动都可以看成是稳定流动。

根据焓的定义,它由两部分组成,一部分是气体的内能,另一部分是流动内上游气体驱动下游气体流动所做的“推进功”,这个推进功是经由流动工质从热机动力装置(泵和风机)处传递过来的能量。由于内能和推进功都与气体的热力状态有关,因此焓本身也是热力参数,它代表工质沿流动方向向前传递的总能量中取决于热力状态的那一部分能量,或者可以简单地把它理解为流动气体工质内含有的做功本领。

显然,对于蒸汽动力装置的锅炉来说,水被蒸发成蒸汽未对外做功, $pV=0$, 于是 $\Delta H=\Delta Q$, 即传入蒸汽锅炉中的热量都被工质吸收,转变成工质焓的增量,提高了工质做功的本领。

又如,当蒸汽通过蒸汽机或汽轮机时,如果气缸绝热性能很好,可以认为向外传递的热量等于零。于是由能量方程可知: $\Delta H=W_0$, 即蒸汽机或汽轮机对外做的机械功是依靠蒸汽的焓降得到的。

在热工中,常把水蒸气和其他气体工质在不同状态下的焓值制成图表,人们可以根据工质的状态查得相应的焓值,从而很方便地算出锅炉加进工质的热量或蒸汽机及汽轮机对外做的功。

对于普通气体,比焓 $h(\text{J/kg})$ 也可以采用下式计算。

$$h=C_p T \quad (2-7)$$

式中, C_p 为气体的定压比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

2.3.2 热力学第二定律

2.3.2.1 概述

如前所述,热力学第一定律是一个基本定律,一切热力过程、热力设备和热机都必须遵守这一定律,但是不违背第一定律的热力过程或热机并不是都能实现的。热力学第二定律正是以多种方式阐述了这一问题。

无数实践证明:自然界所有的过程,包括热现象在内都是自发地向一个方向进行。例如热量自发地从高温物体传向低温物体,机械功通过摩擦连续地变成热量等。而相反的过程则不能自发进行,必须有一定的条件。例如,制冷机把热量从低温物体传向高温物体必须消耗能量,在热量转换成机械功的同时必然要有一部分热量从热源传向冷源。

科学家抓住这些生产实践中的基本特征,总结出热功转换过程中的另一条基本定律,即热力学第二定律。热力学第二定律通常可以表达成:单热源的热机是不可能实现的,或热机不能自发地不花费任何代价就把热量从低温物体传递给高温物体。这两种说法侧重点不同,

本质上那是一样的，即自然界的一切变化过程都是不可逆的。

2.3.2.2 热机效率和卡诺循环

(1) 热机效率 热力学第一定律指明了要想连续地把热能转换成机械功，必须让热机的工质定期地返回到它的初始状态，周而复始，循环不息，或者换句话说，让工质执行热力循环。但是热力学第一定律没有说明在这种循环中能否把传给工质的热量全部转换成功。为了衡量热机把热转换为功的能力，人们引用了一个新参数，即所谓热机的热效率。

热机的热效率定义为在热力循环中热源传给工质的热量 Q_1 与工质对外界做功 W 之比，用符号 η 表示，即

$$\eta = \frac{W}{Q_1} \quad (2-8)$$

由于在热力循环中，工质除了从热源那里吸取热量之外，还得向冷源排放废气，带走余热 Q_2 ，因此，每完成一次循环工质对外做功 W 等于工质所吸收的热量 $Q_1 - Q_2$ 。于是式 (2-8) 可以改写成

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \quad (2-9)$$

这是热机热效率的一般表达式。显然，根据热力学第二定律可知，一切热机必须拥有冷源，热损失 Q_2 不等于零，所以热机热效率总是小于 1。

(2) 卡诺循环 热机的热效率既然达不到 100%，那它能达到多高的界限呢？卡诺在仔细考察蒸汽机工作的基础上，从理论上做了深刻的研究，成功地提出了最理想的热机工作方案，即所谓的“卡诺循环”，并且证明了此种热机的热效率最高。

卡诺循环由两个等温过程和两个绝热过程组成，可以用图 2-3 中所示的装置来实现，循环过程中工质的状态变化曲线如图 2-4 所示。

该循环是由两个可逆的定温过程和两个可逆的绝热过程所组成。工质在图 2-4 (b) 所示的 1~2 过程中，由高温热源 T_1 吸入热量 q_1 ；在 2~3 过程中，工质在绝热情况下膨胀，温度由 T_1 降低到 T_2 ；在 3~4 过程中，工质被等温压缩，将热量 q_2 排给低温热源 T_2 ；在 4~1 过程，工质在绝热情况下被压缩，温度由 T_2 升高到了 T_1 ，而工质又恢复到原始状态 1，至此完成了一个循环。

循环中的净功 $W_0 = q_1 - q_2$ ，由图 2-4 (b) 上可以看出 q_1 和 q_2 分别为： $q_1 = T_1(s_2 - s_1)$ 、 $q_2 = T_2(s_2 - s_1)$ 。所以卡诺循环的热效率 η_c 应为

$$\eta_c = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{T_2(s_2 - s_1)}{T_1(s_2 - s_1)} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (2-10)$$

由式 (2-10) 可以看出：①卡诺循环的热效率只取决于高温热源温度 T_1 和低温热源温度 T_2 ；②提高高温热源温度 T_1 、降低低温热源温度 T_2 ，均可提高卡诺循环的热效率；③由于 T_1 不可能无限高， T_2 也不可能为零，所以卡诺循环的热效率不可能等于 1，更不能大于 1，