



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

热能与动力 机械基础

第2版

王中铮 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

热能与动力机械基础

第 2 版

主 编 王中铮

参 编 (按姓氏笔画排序)

李惟毅 赵 军 高文志

陶正良 惠世恩

主 审 徐通模 刘书亮



机械工业出版社

本书系热能与动力工程专业的专业基础课教材,其目的是使该类专业的学生对热能利用原理与基本系统和主要装置,动力机械与动力系统的工作原理、组成、结构和性能有一整体和基本的认识,同时对新能源和可再生能源的利用有所了解。全书共九章,内容包括导论、锅炉结构及原理、涡轮机及喷气发动机、热力发电与核电、内燃动力系统与装置、制冷与空调、新能源与可再生能源利用(含太阳能、风能、生物质能、地热能、水能、氢能与燃料电池)、换热与蓄热装置、热能与动力系统辅助机械等。

本书为第2版,在原有内容基础上进行了更新和扩展,以适应科技进步、社会需要和各校的不同要求。全书内容体现突出基础、知识面宽而新、体系完整、结构严谨的特点,是国内有关热能与动力机械基础方面内容最为全面、系统的教材之一。它不仅适合于作为热能与动力工程专业的教材,而且可作为相关专业(如化工、建筑环境与设备工程、汽车拖拉机等)的参考教材;对于从事能源利用、动力、化工及暖通等方面的科技人员也是一本很好的科技读本。

图书在版编目(CIP)数据

热能与动力机械基础/王中铮主编. —2版. —北京:机械工业出版社, 2007.9

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-07592-9

I. 热… II. 王… III. ①热能—高等学校—教材②动力机械—高等学校—教材 IV. TK05 TK11

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第206103号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:蔡开颖 责任校对:姜婷

封面设计:张静 责任印制:杨曦

北京机工印刷厂印刷(兴文装订厂装订)

2008年2月第2版第1次印刷

184mm×260mm·21印张·1插页·524千字

标准书号:ISBN 978-7-111-07592-9

定价:34.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010)68326294

购书热线电话:(010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010)88379713

封面无防伪标均为盗版

第2版前言

本书为教育部审批通过的我国普通高等教育“十一五”国家级规划教材，适用于热能与动力工程专业作为专业基础课教材，也可供相关专业作为参考教材。本书的第1版作为我国高校动力工程类专业教学指导委员会的“九五”规划教材，自2000年出版至今已有七年多。通过在高校的多次教学实践及相关人员的使用，使我们认识到本书的适宜和不足之处。同时，这几年科学技术和我国国民经济迅猛发展，对人才培养提出了新的要求。作为一本专业基础课教材，应适应新的形势，与时俱进，进行修改和补充。本次作为普通高等教育“十一五”国家级规划教材，其基本宗旨同第1版，在此基础上更新和补充了内容，使知识面进一步扩大，并加强联系工程实际和反映新的技术进展。

本次修订主要体现在以下几方面：

1) 从社会的可持续发展这一战略目标出发，引入循环经济概念，使之与能源的有效合理利用相结合。

2) 补充了有关热能与动力装置的组成、工作条件等总体概述的内容。

3) 修改和补充了锅炉、涡轮机、内燃机、热力发电、制冷与空调的结构、原理与系统方面的内容。

4) 为突出核能发电在我国的发展，在补充内容的基础上将原相关章名改为“热力发电与核电”。

5) 根据我国的能源政策，加强了太阳能、风能等可再生能源的阐述，增加了氢能、生物质能等内容，并将章名改为“新能源与可再生能源利用”。

6) 增加储能内容，使本书在内容上包含能量的发生、传递、存储、转换与利用整套装置，并设立“换热与蓄热装置”一章。

7) 为加强系统性和突出主题，调整了全书的排序和部分章节名。

本书由天津大学王中铮教授主编。原参加第1版编写的刘宁教授因工作变动，其本人要求不再参加本次编写，改由高文志教授担任。各章编写分工为：绪言、第一章及第八章中蓄热装置，王中铮；第二章及第八章中换热器，西安交通大学惠世恩；第三章，上海理工大学陶正良；第四章，天津大学李惟毅；第五、九章，天津大学高文志；第六、七章，天津大学赵军。本书另有一与此配套的多媒体课件，由天津大学高文志教授制作。全书由原教育部能源动力类专业教学指导委员会主任委员、西安交通大学徐通模教授和原全国高等学校动力工程类专业教学指导委员会副主任委员、天津大学刘书亮教授主审。

为适应新的形势和各校的不同情况，本次修订后的字数有所增加，以便各校根据自己的教学安排选用全部或部分内容。我们非常感谢教师们在使用本书第1版中所付出的辛勤劳动和努力，感谢他们和广大读者对第1版所提出的意见和建议。本次虽经修订，一定还会有缺点，甚至错误，衷心期望读者给予指正和建议，并欢迎发送电子邮件至：wangz_z@yahoo.com.cn。

编者

第 1 版前言

本书为全国高等学校动力工程类专业教学指导委员会审订通过的“九五”规划教材。

为适应 21 世纪培养人才的需要和满足加强基础、拓宽知识面的要求，全国高等学校动力工程类专业教学指导委员会在研讨了热能与动力工程类专业教学计划的基础上，要求编写一本《热能与动力机械基础》，作为该类专业的技术基础课教材（必修）。本书旨在使热能与动力工程类专业的本科生对热能利用原理与基本系统和主要设备、动力机械与动力系统的工作原理、组成、结构和性能有一总体和基本的认识，为继续深入学习某一专业方面的知识和适应毕业后工作的需要奠定基础。为此，在本书内容的组织和编写中，在拓宽知识面的同时，注意加强基础和系统性，以构成一个完整的科学体系；并且适当联系实际和科学技术的新进展，以开阔视野和启发创新。

本书由天津大学王中铮教授主编。各章编写分工为：绪论及第一章，王中铮；第二、八章，天津大学刘宁；第三章，上海理工大学陶正良；第四章，西安交通大学惠世恩；第五章，天津大学李惟毅；第六、七章，天津大学赵军。全书由西安交通大学徐通模教授主审。

鉴于本书系编者适应热能与动力工程类专业的需要而编写的一本新教材，内容涉及面很广，而作为一本技术基础课教材应突出这一大类专业面的共性和各专业面基础性的内容，既要有一定的深度，又要避免过分专业化，此外又受到字数的限制，使编写有相当大的难度。所以，本书只能作为编者在教学改革基础上编写新教材的一次尝试，加之编者水平有限和时间仓促，书中不可避免地会有不少缺点和错误，竭诚欢迎广大读者批评指正。

编 者

目 录

第 2 版前言		
第 1 版前言		
绪言	1	
第一章 导论	4	
第一节 能源(热能)及其利用	4	
第二节 能源利用与循环经济	7	
第三节 能量转换与利用的基本定律	10	
第四节 能源有效利用的评估	13	
第五节 热能与动力装置的组成和工作条件及基本要求	21	
第六节 动力机械与动力传动	22	
第七节 热能与动力技术和环境	24	
思考题和习题	27	
参考文献	28	
第二章 锅炉结构及原理	29	
第一节 概述	29	
第二节 燃料特性与热工计算	35	
第三节 锅炉燃烧设备	49	
第四节 锅炉受热面	67	
第五节 锅炉水动力特性	73	
第六节 余热锅炉的结构及工作特点	81	
思考题和习题	83	
参考文献	83	
第三章 涡轮机及喷气发动机	85	
第一节 概述	85	
第二节 热力涡轮机级的基本理论	91	
第三节 涡轮机级的损失与效率	98	
第四节 多级涡轮机	105	
第五节 汽轮机的变工况	111	
第六节 供热汽轮机	116	
第七节 火箭及喷气发动机	121	
第八节 水轮机概述	126	
思考题和习题	130	
参考文献	131	
第四章 热力发电与核电	132	
第一节 热力发电常用循环	133	
第二节 热力系统	138	
第三节 热经济性指标	145	
第四节 新型热力循环/能源系统	150	
第五节 核能发电原理及系统	156	
第六节 核电的经济性与安全性、可靠性	161	
思考题和习题	163	
参考文献	164	
第五章 内燃动力系统与装置	165	
第一节 内燃机的基本结构及工作原理	165	
第二节 内燃机的组成及工作系统	173	
第三节 内燃机的热力循环及性能指标	192	
第四节 可燃混合气的形成与燃烧	202	
第五节 内燃机的排放与净化	208	
第六节 代用燃料	213	
思考题和习题	215	
参考文献	215	
第六章 制冷与空调	216	
第一节 概述	216	
第二节 蒸气压缩式制冷原理	217	
第三节 制冷压缩机	229	
第四节 冷水机组	232	
第五节 吸收式制冷	236	
第六节 热泵技术及其应用	242	
第七节 空调系统	247	
思考题和习题	253	
参考文献	253	

第七章 新能源与可再生能源利用	255	第三节 热能储存原理	309
第一节 太阳能	255	第四节 蓄热技术的应用及蓄热器热设计	313
第二节 风能	265	思考题和习题	317
第三节 生物质能	272	参考文献	318
第四节 地热能	275	第九章 热能与动力系统辅助机械	319
第五节 水能	279	第一节 概述	319
第六节 氢能与燃料电池	285	第二节 泵	320
思考题和习题	291	第三节 风机	323
参考文献	292	第四节 泵与风机的运行	326
第八章 换热与蓄热装置	293	思考题和习题	327
第一节 换热器的结构与传热计算	293	参考文献	328
第二节 换热器设计计算基本方法	301		

绪 言

能源是人类社会赖以生存与发展的重要物质基础，是推动国民经济发展的强大动力。任何一个国家或地区的经济发展和社会进步都与能源资源的利用密切相关。就我国情况而论，20世纪90年代初以来，随着经济的增长，我国的能源消费总量基本呈线性模式增长。“十五”期间我国GDP（国内生产总值）从2001年的109655亿元增加到2005年的182321亿元，为2001年的1.66倍。相应地，能源消费总量从2001年的143199万t标准煤增加到2005年的222468万t标准煤，为2001年的1.55倍。能源消费水平在一定程度上反映一个国家的工业发达程度，也间接反映了人民生活水平的高低。工业国家的总人口约占世界人口的1/3，却用去世界能源消费总量的80%。如以1993年为例，设全球人均能耗为1，则美国的人均能耗为5.33，欧洲为2.26，我国人均均为0.42，非洲人均均为0.20。再以2005年为例，我国人均一次能源消费仅为1.18t油当量，约为世界平均水平的3/4、日本的1/4、美国的1/7。因此，每个国家都极其重视能源问题。在我国，国务院把能源作为关系经济发展、国家安全和民族根本利益的重大战略问题来部署。

自然界存在多种多样的能源，如煤炭、石油、天然气、油页岩、木材、水力以及太阳能、核燃料、地热能、潮汐能等。这些能源资源可以直接或通过转换间接地被利用，为生产和生活服务。必须指出，就现有的能量转换与利用技术而言，能源资源中除水力、潮汐能、风能等少数能源外，基本上都是直接地以热能的形式利用或间接地将热能转换成其他的能量形式进行多种方式的利用。如，煤炭、石油一类矿物燃料的能源资源，可以通过燃烧将化学能转变成热能直接加以利用，或通过热力发动机转换成机械能，或再通过发电机转换成电能；核燃料（核能）的利用，可以通过核分裂或核聚变产生热能而直接加以利用，或再通过转换，进行核发电、磁流体发电或核聚变发电；太阳能的利用之一是光能转换成热能，用于洗浴、供暖、制冷等，或再转换成机械能进行太阳能热发电等；地热能，则可直接将地热水（或地热蒸汽）的热能用于供热，或直接、间接地用于地热发电等；海洋热能的利用，可通过热能→机械能→电能的转换，实现海水温差发电。如果把能源的利用从一次能源扩展到二次能源，诸如煤气、焦炭、汽油、酒精、沼气等，它们中的极大多数也都是以热能的能量形式被直接或间接地利用。据统计，经过“热”这个环节而被利用的能量，在我国占90%以上，世界各国平均达85%以上。所以，上述情况充分表明热能是能源利用的最基本和最主要的能量形式，在能源利用中占有主导地位。

在热能的利用中，往往是以动力的方式输出能量来利用的。如煤通过燃烧将物质的化学能转变成热能，然后将锅炉中的水加热成蒸汽，高温、高压的蒸汽推动汽轮机，以蒸汽动力的方式带动发电机；又如，汽油在内燃机中点燃，从而以内燃动力的方式拖动汽车。其他如水力、潮汐能、风能等能源也都是以动力的方式输出能量来利用的。人类的生存和社会的发展离不开动力，动力的发展和进步也同样标志着科学与科学技术的发展和进步。人类早期利用的动力是风力，在5000多年前人类就开始使用帆船。此后又掌握了用畜力和简单的水力从事生产活动。11世纪，荷兰人使用了风车泵水和碾谷。18世纪，蒸汽机的产生促进了第

一次工业革命。19世纪,内燃机的崛起打破了蒸汽机动力的统治地位,并导致了汽车的产生和发展。19世纪末,蒸汽轮机的出现使火力发电得到了很快的发展,进而促进了工业生产的大发展。20世纪以来,随着科学技术的进步,多种多样的汽油机、柴油机、汽轮机、燃气轮机、喷气发动机、火箭发动机等新型动力机械相继出现,多种新型高效的动力循环及新能源(太阳能、地热能、风能、潮汐能等)动力装置应运而生。尤其是动力技术和其他技术的进步,使人类探测和登上其他星球成为可能,这将为人类的生存和社会发展展开新的一页。无数事实表明,能源—动力工业是其他工业的先行者,当今的时代是一个与能源—动力的应用和发展息息相关的时代。

我国国土面积辽阔,蕴藏着丰富的能源资源,世界各国拥有的能量资源我国都有。我国煤炭资源(探明储量)和水力资源均居世界第1位;石油资源占世界第11位;天然气资源占世界第14位。至2000年底,我国已探明的能源总量为8320万t标准煤,其中原煤87.4%、原油2.8%、天然气0.3%、水能9.5%。我国在能源及动力装置的生产和利用上也有了快速发展,2005年,一次能源生产总量达到20.6亿t标准煤,是1949年的87倍,是改革开放初的3.29倍,约占全球能源总产量的13.6%,成为仅次于美国的世界第二大能源生产国。煤炭产量已多年位居世界第一,2005年达到21.9亿t,是新中国成立初的68倍、改革开放初的3.5倍。石油和天然气,2005年原油产量达到1.81亿t,是新中国成立初的1508倍、改革开放初的1.74倍,居世界第6位。天然气产量达500亿 m^3 ,是新中国成立初的5000倍、改革开放初的3.64倍。电力,2005年底发电装机容量突破5亿kW,年发电量达到24747亿 $kW \cdot h$,分别为1949年的275倍和576倍,1996年起稳居世界第二。火电单机容量从1978年的5万kW和10万kW级,发展到目前主力为30万kW和60万kW级锅炉—汽轮机—发电机机组,百万kW超临界、超超临界汽轮发电机组及核电机组正在成为新一代主力机组。在内燃机方面,2001年我国内燃机产量为2200万台,2004年则约为3837.4万台6.65亿kW,产品的质量和技术水平已得到明显的提高,已从量的变化转向质的提升。可再生能源方面,近年来发展迅速。目前,小水电的装机容量达3800万kW;太阳能热水器总集热面积8000万 m^2 ,占世界的一半以上;核电从无到有,发电装机近700万kW;年产沼气约80亿 m^3 ,已拥有户用沼气池1700多万口;风力发电的技术也已比较成熟,现已能生产600kW风力发电机组。

在了解我国资源比较丰富和能源动力技术进步的同时,也应该看到不足和与先进国家相比存在的差距。我国的资源总量居世界第三位,但是人均资源占有量是世界第53位,仅为世界人均占有量的一半。化石类能源探明储量约7500亿t标准煤,但我国的人均拥有量远低于世界平均水平。煤炭、石油、天然气人均剩余可采储量分别只有世界平均水平的58.6%、7.69%和7.05%。在能源消耗量上,前已提及我国也低于世界平均水平。在我国,能源动力技术上的落后导致能源效率低下,从总的能源利用看,按现行汇率计算,我国单位GDP能源消耗比世界平均水平高2.2倍左右,比美国、欧盟、日本和印度分别高2.4倍、4.6倍、8倍和0.3倍。目前我国已经成为世界上消费煤炭、钢铁、铜最多的国家,也是美国之后的第二大石油和电力消费国。能源问题直接关系到我国的发展,关系到我国的长治久安。面对我国目前能源供需矛盾尖锐,结构不合理;能源利用效率低;一次能源消费以煤为主,化石能的大量消费造成严重的环境污染等问题,为保障我国国民经济的迅猛发展和建设资源节约型社会长远目标的实现,《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》

作出了全面部署，为人们描绘出一幅能源科技发展的“路线图”，并将“能源”确定为未来15年“亟待科技提供支撑”的第一个重点领域。与此相适应，中央制订了《能源中长期发展规划纲要（2004—2020年）》、《可再生能源中长期发展规划》、《节能中长期专项规划》等有关能源发展的规划，确定了能源发展的方向、布局和目标。前景是美好的，任务是艰巨的，有待于我们共同努力。

能源问题已成为全民关注的问题，作为能源动力类的热能与动力专业的学生和工作人员必然更会关切。本书主要阐述能源（热能）利用的原理与基本系统和主要设备，动力机械与动力系统的工作原理、组成、结构和性能，概述新能源与可再生能源利用的基本知识，作者期望能为读者从事相关工作和深入学习构筑一个专业基础知识的平台。

第一章 导 论

工程上有多种形式的能源（热能）利用装置和动力机械，但它们都属于能量的储存、传递、转换和利用的设备，必遵循某些共同的规律和包含某些共同的内容。基于这一基本观点，本章主要简述有关能源（热能）利用装置和动力机械的共同性技术基础知识，以此作为后续各章的导论。

第一节 能源（热能）及其利用

一、能源及其分类

所谓能源，就是可以直接或经过转换而获得某种能量的自然资源。能源按其形成和来源大致可分为三大类。第一类是来自太阳的能量，除了直接的太阳辐射能之外，煤炭、石油、天然气以及生物质能、水能、风能、海洋能等都是间接地来自太阳能。第二类是来自地球本身的能量，其中包含以热能形式储藏于地球内部的地热能（如地下热水、地下蒸汽、干热岩等）以及地球上铀、钍等核燃料所具有的能量（即原子能）。第三类是月球和太阳等天体对地球引力作用所产生的能量，如潮汐能就是以月球引力为主所产生的一种能量。

因能源的不同，能源的消耗、能量的转换、储存或利用也可能有所不同。对能源还有其他几种分类方法。最常用的一种是按是否经过转换来分，凡自然界现已存在的、并可直接取得而不改变其基本形态的能源，称为一次能源，如煤炭、石油、天然气、水能、生物质能、地热能、风能、太阳能等。由一次能源经过加工或转换而成为另一种形态的能源产品，称为二次能源，如电力、蒸汽、焦炭、煤气、氢气、各种石油制品等。此外，在生产过程中排出的余能、余热，如高温烟气、可燃废气、排放的乏汽和有压流体，也属于二次能源。一次能源还可按它们是否能够无穷无尽地利用而分为两类，一类是可再生能源，即可以不断再生并有规律地得到补充的能源，如水能、太阳能、生物质能、风能、海洋能等，它们是取之不尽、用之不竭的；另一类是非再生能源，因为这是经过亿万年形成的、短期内无法再生的，如煤炭、石油、天然气、核燃料等。随着大规模的利用，非再生能源的储量日益减少，总有一天会枯竭。

当今人类使用最多的能源是煤炭、石油、天然气和水能，因这些能源的利用技术比较成熟且已被大规模利用，故称之为常规能源。而对于尚未大规模利用、正在积极研究开发的能源，称为新能源。结合我国的国情，常将太阳能、地热能、生物质能、风能、海洋能、核能、氢能等列为新能源。

能源还可以按其性质分为燃料能源和非燃料能源。凡须经过燃烧或反应才能被利用的，称为燃料能源，有矿物燃料、生物燃料（柴草、沼气等）、化工燃料（丙烷、甲醇、酒精等）、核燃料四种。非燃料能源则有水能、风能、潮汐能、地热能、海洋能和太阳光能等。

二、能量的形式

运动是物质存在的基本形式，而运动必然要伴随着能量的消耗或转换，所以整个世界或

宇宙的存在是与能量及其使用紧密相关的。

人类很早就从风力、太阳的照射、水的流动认识到能的存在和作用，现代的科学技术和各种工业过程更反映出能的功用。简言之，所谓能量，就是产生某种效果或变化的一种能力，它是为能源所拥有的。而且，产生某种效果或变化的过程必然要伴随着能量的消耗和转化。例如，煤燃烧发生热，在这一过程中，可燃物质的化学能以热能的形式释放。

能量的类型有多种，一般把它分为六种形式：

(1) 机械能 它包括物质的动能、势能、弹性能及表面张力能等。机械能常以功的形式来实现，并且能方便而有效地转换为其他形式的能。

(2) 热能 它是与构成物质的原子和分子的运动（振动）有关的一种能量。它的宏观表现是温度的高低。热能是一种基本的能量形式，所有其他能量形式都能完全转换为热能。

(3) 电能 它是和电子的流动和积累有关的一种能。电能可以静电场能或感应电场能的形式来储存。电能的传递形式就是电流。电能也能方便而有效地转换为其他形式的能。

(4) 辐射能 因它是物体以电磁波形式发射的能量，故也称电磁能。这种能量仅以传递如光速变迁能量的形式存在。辐射能常依电磁波的波长分为几种不同的电磁射线，通常可分为 γ 射线、X射线、热辐射、微波和毫米波射线及无线电波。其中，热辐射是一种由原子振动而产生的电磁能，包含紫外线、可见（光）射线和红外线，因它们的辐射强度与物质的温度有关，而且常常会产生热效应，故称为热辐射。

(5) 化学能 这是一种仅以储存能的形式存在的能量，当不同物质的原子和（或）分子相结合时释放出来。例如，燃料燃烧就是物质间发生放热的化学反应，使化学能转换成热能。所以，按照化学热力学的定义，化学能就是物质或物系在化学反应过程中以热能形式释放的热力学能。

(6) 核能 核能（原子能）又是一种仅以储存能形式存在的能量形式。它是蕴藏在原子核内部的能量，又称核内能，在粒子相互作用或原子核中的粒子相互作用，即发生原子核反应时释放出来。原子核反应通常有放射性衰变、核裂变和核聚变三种类型，其中核裂变和核聚变反应可释放大量能量，有广阔的应用前景。

三、热能的发生

热能的发生可通过两种途径：一种是直接产生，如地热能和海洋热能；另一种是通过转换产生。归纳起来，由能量形式的转换而产生热能的方法有以下几种：

(1) 化学能的转换 通过燃料中可燃质的发热化学反应即燃烧反应，使它们的化学能转换成热能释放出来。通过燃烧反应，矿物燃料里的可燃元素碳、氢和硫分别转化为二氧化碳、水蒸气和二氧化硫。

(2) 电能的转换 根据焦耳效应，因电路中电阻的存在，电流流过时必产生热。当然，在绝大多数电路里，这种热效应的产生意味着部分电能转换成不可利用的热能的损失。但实际应用中，为满足工业过程或生活的需要，有时要将电能转换成热能，如用电炉炼钢。

(3) 辐射能的转换 这主要是指能使被照射的物体产生热效应的热辐射。

(4) 核能的转换 这主要是指在核裂变和核聚变反应中，大量的核能释放转换成热能。目前已可利用的是核裂变反应。

(5) 机械能的转换 这一典型过程就是摩擦，通常由此产生的热能都不能被利用，故一般都希望减少摩擦耗能。

四、热能的储存、传递与转换

在实际应用中，为适应负荷的变化和调节，能量需要储存，热能是可以储存的能量形式之一。热能的储存有三种基本方式：

(1) 显热储存 这是利用升高固体或液体的温度来蓄热。

(2) 潜热储存 当物体发生相变时会吸收或释放大量的热，实际应用中通常是利用材料从固体到液体的相变蓄热。

(3) 热化学法储存 其特点是利用化学反应或浓度差或化学结构变化，将热能转换为化学能。

热能也是可以输送和传递的。热能常依靠携带能量的物质通过管道实现远距离输送。为了满足实际应用的物质和温度水平的要求，热能可以利用换热器这种热传递装置进行不同物质和温度水平之间的热传递。

人类利用的各种形式的能量基本上都是由一次能源经过一次或多次转换而来的。例如，太阳照射使植物内叶绿素发生光合作用，将太阳辐射能转换储存于生物质中，而成为植物所具有的生物质能。又如，燃料在锅炉中燃烧，并把燃料的化学能转换成蒸汽的热能，再通过汽轮发电机组，完成热能转换为汽轮机的机械能，并继而通过发电机转换为电能输出。表1-1显示了各种能源的不同能量间的转换。对于热能，通过一次转换可成为三种能量形式：

- 1) 机械能，如推动内燃机、汽轮机。
- 2) 电能，如热电发电。
- 3) 化学能，如吸热反应。

表 1-1 各种能源的能量转换方式

能源种类	转换方式	转换装置
水能，风能 潮汐，波浪	机械能→机械能 机械能→电能	水车，风车，水轮机 水力发电，风力发电
太阳能	光能→热能 光能→热能→机械能 光能→热能→机械能→电能 光能→热能→电能 光能→电能	太阳能取暖，热水器 太阳能热机 热力发电装置 热电及热电子发电 太阳能电池，光化学电池
煤、石油等化石燃料 氢、酒精等二次燃料	化学能→热能 化学能→热能→机械能 化学能→热能→机械能→电能 化学能→热能→电能	燃烧装置、锅炉 各种热力发动机 锅炉-汽轮机-发电机组 磁流体发电，热电发电，燃料电池
地热能	热能→机械能→电能	蒸汽轮机-发电机组
核能	核裂变→热能→机械能→电能 核裂变→热能→电能	核发电装置 磁流体发电，热电发电，热电子发电

五、热能的利用

热能，不论是直接利用或转换为其他能量形式后的利用，在各生产部门和民用事业中均占有极大的比重。下面列出热能在一些主要工农业方面的应用：

- 1) 电力工业，如燃烧煤、天然气、油等火力发电及使用核燃料的核发电等。
- 2) 钢铁工业，如平炉、转炉、电炉炼钢，轧钢加热炉、高炉炼铁等。
- 3) 有色金属工业，如铝、铜等各种有色金属的冶炼。
- 4) 化学工业，如酸、碱、合成氨等生产过程。
- 5) 石油工业，如油的开采、炼制、输送等。
- 6) 建材工业，如水泥、陶瓷等行业中各种窑炉的大量耗热。
- 7) 机械工业，如各种设备制造过程中所需要的铸造、锻压、焊接等。
- 8) 轻纺工业，如造纸、制糖、化纤、印染等过程中需要消耗大量蒸汽。
- 9) 交通运输，如汽车、火车、船舶、飞机等的动力拖动。
- 10) 航天领域，如宇宙飞船、航天飞机等火箭的推进。
- 11) 农业及水产养殖业，如电力灌溉、温室培植、鱼池加温等。
- 12) 生活需要，如供暖、空调、烹饪等。

现代化社会是大量消耗能源的社会，有关热能利用方面需要关注两大问题。

1) 提高能源利用率。目前世界各国基本上都是以石油、煤炭、天然气等非再生的燃料能源为主要能源，这种燃料能源的储量有限，提高能源利用率或节能问题就极为重要。因为它们的利用方式主要是热能或由热能转换成为机械能或电能，提高能源利用率也就意味着提高热能利用率及热能在动力等装置中转换为其他形式能量的效率问题。

2) 减少环境污染。燃料能源的使用，将因含有有害物质的废气、废料等排放而对环境造成严重污染，危害人类健康，破坏自然界的生态平衡。尤其是随着工业的不断发展，这一问题日益严重，目前在考虑社会的可持续发展时，已把它列为首要关注的问题。

第二节 能源利用与循环经济

一、循环经济的含义

在以往以及目前的社会生产与发展中，人们习惯于通过把各种资源持续不断地变为废物来实现经济的数量型增长。这种传统经济的模式是由“资源—产品—污染排放”所构成的物质单向流动的线性经济，其特征是“高开采、低利用、高排放”。如长此以往，其结果必然是资源枯竭、环境恶化，带来种种人类生存和社会发展问题。

循环经济是由“资源—产品—再生资源”所构成的物质反复流动的经济发展模式。它要求在经济活动中以“3R原则”作为行为准则，即：

(1) 减量化 (Reduce) 原则 用较少的原料和能源投入来达到既定的生产或消费的目的。

(2) 再使用 (Reuse) 原则 产品和包装容器能以初始的形式被反复使用。

(3) 再循环 (Recycle) 原则 生产出来的物品在完成其使用功能后能重新变成可以利用的资源，而不是不可恢复的垃圾。

与传统经济相比，循环经济的特征就是低开采、高利用、低排放，它是一种与环境和谐

相处的经济发展模式。通过循环经济，使资源的使用减量化、产品能反复使用和废弃物资源化，从而实现“最佳生产、最适消费、最少废弃”。

在体现“3R原则”上已有一些较好的实例，如，美国杜邦公司将“3R原则”应用到化学工业上。他们通过放弃使用某些环境有害型的化学物质，减少某些化学物质的使用量，以及发明回收本公司产品的新工艺，在五年内使生产造成的塑料废弃物减少了15%，空气污染物排放量减少了70%。他们还在废塑料（如废弃的牛奶盒）和一次性塑料容器中回收化学物质，开发出耐用的乙烯材料“维克”等新产品。

二、我国能源利用现状

改革开放25年（1978—2003年），我国GDP年均增长率为9.4%，国力大为加强，但我们的增长方式是传统的高投入、高消耗、高排放、低效率的粗放型增长。表现在能源利用上，如，从主要用能行业和耗能设备看，水泥综合能耗高出国际先进水平23.6%，大中型钢铁企业吨钢可比能耗高15.1%，火电供电煤耗高20.5%，载货汽车百吨公里油耗比国际先进水平高1倍以上。我国在用的中小锅炉约50万台，实际运行效率只有65%左右，比国际先进水平低15~20个百分点。这些中小锅炉中90%都是燃煤锅炉，年消耗煤炭4亿t左右。从能源开发过程看，资源浪费惊人。比如煤矿的综合回采率，国际上一般为45%~60%，我国平均只有30%，小煤矿有的仅为10%~15%。从1978年到2005年我国小煤矿累计生产煤炭120亿t左右，消耗资源储量约800亿t。按照正规开采方法计算，800亿t资源储量可产出煤炭400亿t左右，这意味着少产了近300亿t的煤炭，相当于改革开放以来全国煤炭的总产量。我国煤矸石综合利用率也只有40%，全国累计堆放的煤矸石总量约38亿t，占地约11万亩，而且每年仍以约2亿t的速度增加。每年还产生近亿吨的粉煤灰，历年积存量已有30多亿t。在对环境的影响上，煤炭对环境的影响大，我国又是以煤利用为主。煤矿地表沉陷、煤田自燃火灾、矸石山自燃等所引发的植被破坏、地下水位下降、水体污染等现象比较严重，加之我国煤炭清洁利用水平低，原煤洗选率仅30%左右，比美国、澳大利亚等发达国家低60个百分点，带来的污染更为严重。我国每年矿井排水量超过20亿t，相当于整个钢铁工业耗水的一半左右。每年的瓦斯排放量达100亿m³，绝大部分自然排放，造成重大安全隐患。在全国烟尘和二氧化硫的排放量中，由煤炭燃烧产生的分别占70%和90%。目前我国已是二氧化硫排放量最大的国家，导致区域性的环境酸化，酸雨区已超过国土面积的40%。此外，煤炭燃烧生成的二氧化碳还会加重温室效应。

经济腾飞需要大量的资源作支撑，而我国资源的供给量与经济发展之间存在着巨大的缺口。有专家测算，我国国内能源的缺口量到2030年约为2.5亿t标准煤。在石油的需求上，到2020年前后，我国的石油进口量有可能超过3亿t，一跃成为世界第一大油品进口国。能源问题已成为我国发展经济中的瓶颈问题，在我国推行循环经济已刻不容缓。

三、循环经济模式及在我国的推行

目前世界各国发展循环经济可归纳为四个阶段和四种模式。

(1) 单一企业内部的循环经济模式 它是指一个企业按照清洁生产的要求，采用新的设计和新技术，将单位产品的各项消耗和污染物的排放量限定在先进标准许可的范围内。前述的美国杜邦公司的做法就是实例。

(2) 区域生态工业园区模式 它是指工业园区按照生态产业链组合在一起，通过企业和产业间的废物交换、循环利用和清洁生产，减少或杜绝废弃物的排放。如，丹麦的卡伦堡

生态工业园区是最典型的代表。该园区以发电厂、炼油厂、制药厂和石膏板厂四个厂为中心,通过贸易的方式把其他企业的废弃物或副产品作为本企业的生产原料,建立工业横生和代谢生态链关系,最终实现园区的污染“零排放”。

(3) 城市层面上的循环经济发展模式 它是指在一个城市建立废弃物的回收再利用体系,实现消费过程中和消费过程后物质与能量的循环,如德国的回收再利用体系。

(4) 全社会的循环经济模式 它是指把整个社会建成循环型社会,如日本的循环型社会模式。

我国十分重视发展循环经济,首先在部分企业、工业园区和生态城市内逐步推行。2002年5月,国家环保总局将贵阳确认为全国首个建设循环经济生态试点城市,还得到了联合国环境规划署、欧盟和德国在项目 and 经费上的支持。2006年国家发改委等六部委正式启动了曹妃甸工业区、天津经济技术开发区等13个国家循环经济试点园区的工作。如,曹妃甸工业区将建立三大主导产业的循环经济链:

(1) 以1500t精品钢为龙头的循环经济产业链 将钢铁企业过去单一的生产功能,拓展到钢铁生产、能源转换、城市固体废弃物消纳和为相关行业提供资源等多种功能。

(2) 以大型炼化一体化装置为龙头的循环经济产业链 以大型炼化一体化装置为依托,向下游延伸产业链,配套发展煤化工和盐化工,实现上中下游企业间无缝连接,一体化清洁生产。

(3) 以海水冷却火电项目为龙头的循环经济产业链 利用海水循环直接冷却技术和海水淡化工艺,进行热电生产和海水淡化,减少淡水资源消耗,给工业区补充淡水资源。淡化后的浓缩海水用于盐化工生产,开发溴素、钾肥、镁盐等化工产品。电厂产生的灰渣用于新型建材生产,填海造地。

四、能源的合理有效利用原则

结合我国国情,人均能源资源不足、能源利用率低下、污染严重等问题,必须引起我们重视。为保障我国国民经济的稳定、持续发展,建立起资源节约型、环境友好型的社会,必须发展与推行循环经济,以循环经济的模式来开发和利用能源。在此观念指导下,作者认为对于能源的合理、有效利用应遵循以下原则:

1) 最小外部损失原则。如减少能源开采、储存、输送等这些环节中的浪费,减少废渣、废气(汽)、废液、各中间物或产品带走的能量损失。

2) 高能源利用效率原则。如及时更新设备,采用新技术。

3) 最佳推动力原则。使过程在最佳热力势差(温度差、压力差、化学位差等)推动下完成。如按能量品位用能,能量的梯级利用。

4) 回收利用原则。进行废渣、废气(汽)、废液的回收利用,使废变宝。

5) 综合利用原则。将能源资源的单一利用转向与其他工业相结合的综合利用。

6) 节约优先,适度消费原则。资源总是有限的,提倡节约优先,适度消费,如适当调整空调设定温度。

7) 积极开发与利用可再生能源和清洁能源原则。减少不可再生能源和易污染能源的消耗和污染。

第三节 能量转换与利用的基本定律

一、热力循环

要使热能连续不断地转变为机械能，工质（如水蒸气、燃气等）从初始状态起始，必须经历包含做功过程的一系列连续过程，并回到原状态。例如，蒸汽动力装置，水在锅炉中吸热变成高温高压的蒸汽，再进入汽轮机膨胀做功，排汽在冷凝器中凝结为水，经水泵加压送回锅炉，重新吸热变成蒸汽，如此周而复始、循环不已。所谓热力循环，就是工质从某一热力状态起始，经过一系列的状态变化后，又回到原来初始状态的热力过程。当以状态参数坐标图表示这一系列热力过程时，循环成为一封闭曲线，如图 1-1 所示的压力—比体积图。

循环有正循环和逆向循环之分。如图 1-1 所示，当循环按顺时针 $1a2b1$ 的方向时，沿 $1a2$ 过程所做的功即膨胀功 w_{1a2} （相当于曲线 $1a2$ 下面积 $1a2v_2v_11$ ）要大于沿 $2b1$ 过程所消耗的功即压缩功 w_{2b1} （相当于曲线 $2b1$ 下面积 $2b1v_1v_22$ ），故该循环的总功或称为循环净功大于零，即 $(|w_{1a2}| - |w_{2b1}|) > 0$ ，意味着这是属于对外做功的一类热力系统的循环，常称热机循环或正循环，如实现火力发电的循环。反之，当循环按逆时针方向即 $1b2a1$ 进行时，膨胀功 w_{1b2} 的值小于压缩功 w_{2a1} 的值，循环净功 $(|w_{1b2}| - |w_{2a1}|) < 0$ ，意味着这是属于消耗外功的一类热力系统的循环，称为逆向循环，压缩式制冷机所进行的制冷循环就属于这一类。当然，工程上实际的热力循环要比图 1-1 所示的情况复杂，有多种形式（如，单一工质的水蒸气热力发电循环，双工质的水蒸气—燃气热力发电循环），但从其进行的总方向或总结果来看可分属这两种或为这两者的复合。

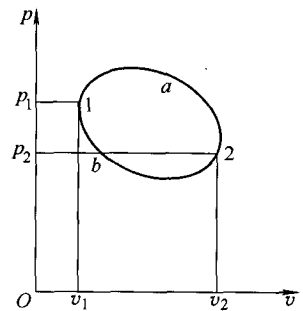


图 1-1 循环在 $p-v$ 图上表示

二、热力学第一定律

人们从长期无数的实践经验中总结得出了存在于各种自然现象中的一条最普遍、最基本的规律：能量守恒与转换定律。它表明各种能量可以相互转换，但它们的总量保持不变。热力学第一定律就是能量转换与守恒定律在伴有热效应的物理及化学等过程中的应用。它广泛地适用于热能和其他能量形式之间的转换，如热能和机械能、热能和化学能、热能和电磁能等的转换，在转换过程中其总量是守恒的。

下面以一简单的具有代表性的例子说明热能向机械能的转换。图 1-2 表示一个热力系，其中包含质量为 m 的工质（如气体）的气缸。如从外界向该热力系加热 Q ，工质受热而膨胀，体积增大，推动活塞，并使活塞及与之相连的重块向右移动，对外界做功 W 。由于工质状态的改变，其本身具有的能量也可能有所改变，假设工质的能量增加了 $\Delta E = (E_2 - E_1)$ 。根据能量守恒与转换定律，工质能量的增量 ΔE 必等于工质从外界吸收的热量 Q 和工质的膨胀做功 W 之差，即

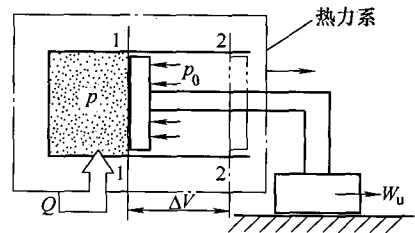


图 1-2 气体受热膨胀做功

$$\Delta E = Q - W$$