

• 高等学校教学用书 •

热能转换与利用

731234

GAODENG XUEXIAO JIAOXUE YONGSHU



冶金工业出版社

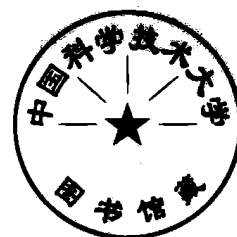
731234

TK11/10

高等学校教学用书

热能转换与利用

北京科技大学 汤学忠 编



冶金工业出版社

高等学校教学用书

热能转换与利用

北京科技大学 汤学忠 编

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街高碑店北街39号)

新华书店总店科技发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张15 1/2 字数 365 千字

1989年5月第一版 1989年5月第一次印刷

印数00,001~2,500册

ISBN 7-5024-0482-1

TF·105 (课) 定价3.10元

前 言

本书是根据热能工程专业教学计划和“热能转换与利用”教学要求编写的，在北京科技大学热能系所用讲义的基础上，经广泛征求意见修改而成。

冶金工业是耗能大户，占全国总能耗的12%左右。我国的能耗指标与先进国家相比要高得多，因此，要发展冶金工业，节约能源消耗，提高能源利用率是一个重要环节。

在能源的利用中，绝大部分是通过热能这一形态加以利用的，或由热能转换成其它形式的能量后再加以利用。在未被充分利用的余能中，绝大部分也是以余热的形式存在。对各种余热的回收与利用，也离不开热能转换与利用的知识。本课程是要介绍有关热能转换与利用的基本原理，分析方法，以及实际转换设备与系统的特点和设计计算方法；还要阐述用系统的观点评价能源系统的方法。热能工程专业的学生通过本课程的学习，可掌握热能转换的基本原理，并具备一定的分析研究和解决热能利用中的具体问题的能力，为今后在实际工作中，管好、用好能源，降低企业的能源消耗，提高能源利用率打下基础。

本书共分六章。第一章是能源概述。在介绍有关能源的一些基本概念的基础上，认识能源的重要性，了解能源利用现状，明确能源工作者的任务。第二章是能量转换的基本理论。重点介绍能量的质量分析——熵分析的方法。详细叙述了不同条件下的熵、熵损的计算方法及其影响因素，并介绍实际热工设备的熵平衡、熵效率的分析方法。第三章是用熵分析方法具体分析热力循环和热力系统，弄清影响效率的因素和提高效率的途径。重点分析动力循环、热电联合系统和热泵系统。第四章是企业中的余热资源及其利用方法。以钢铁企业为例，分析企业的能源平衡、能耗指标以及余热资源情况。还介绍各种不同的余热资源的回收方法，回收系统对节能效果的影响。叙述了高炉炉顶余压发电、干熄焦、烧结矿余热回收系统等成功的实例，以及余热制冷和蒸汽蓄热器等节能设备的工作原理。第五章叙述余热回收用的各种换热器的工作原理及设计计算方法，包括热管换热器、流化床换热器等新型换热器和换热器的发展趋向。第六章以能源系统模型为中心，介绍与能源管理、能源规划及决策分析有关的内容，包括统计模型、网络模型、线性规划方法及投入产出方法在能源系统分析中的应用。

本书的体系新颖，内容的实用性强，可作为热能工程专业的教材，对从事热能工作的工程技术人员和设计人员也有参考价值。

本书由北京科技大学热能系徐业鹏教授主审。东北工学院、重庆大学、马鞍山钢铁学院以及昆明工学院等院校的同行们对教材提出了许多宝贵的意见，在编写过程中，引用了有关书刊中的数据和图表，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限，难免会有不当之处，希望广大读者和专家批评指正。

编 者

1988.4

目 录

第一章 概述	1
1.1 能源及其分类	1
1.2 热能资源	2
1.3 能源与社会发展	4
1.4 能源结构	6
1.5 能耗指标与能源利用率	7
1.6 能源工作者的任务	8
第二章 能量转换基础	10
2.1 能量转换	10
2.2 能量平衡	12
2.3 焓(可用能)	13
2.4 焓的计算	16
2.5 焓损失	30
2.6 焓分析与焓效率	39
2.7 能量转换系统的热平衡与焓平衡	44
2.8 焓分析的意义	52
第三章 热力系统分析	57
3.1 蒸汽动力循环的焓分析	57
3.2 燃气-蒸汽联合循环分析	65
3.3 热电联合生产系统分析	67
3.4 中低温余热动力回收的热力系统分析	75
3.5 热泵系统的分析	85
第四章 工业企业中的热能利用	95
4.1 钢铁企业的能源系统	95
4.2 钢铁企业的余能回收和利用	99
4.3 高炉炉顶气余压能的回收	106
4.4 工业炉烟气余热回收系统	108
4.5 冷却介质余热回收系统	116
4.6 余热制冷与热泵系统	123
4.7 热能的贮存系统	128
第五章 热回收用换热设备	133
5.1 热回收用换热设备概述	133
5.2 高温余热回收装置	139
5.3 余热锅炉	143
5.4 回转式换热器	154
5.5 热管换热器	160
5.6 流化床式换热器	176
5.7 热交换器的发展趋势	180

5.8 换热器的优化设计	187
第六章 能源管理与能源系统模型	192
6.1 能源管理概述	192
6.2 能源技术经济	194
6.3 能源系统模型概述	201
6.4 能源统计模型	204
6.5 能源系统网络模型	214
6.6 能源系统线性规划模型	217
6.7 能源投入产出模型	223
6.8 能源预测技术概述	234
参考书目及文献	239

第一章 概 述

1.1 能源及其分类

“能源”是一种自然资源，它在一定条件下可以转换成人类所需的各种形式的能量，例如热能、机械能、电能、光能、声能、化学能等。

存在于自然界的能源有：煤炭、石油、天然气、植物燃料、水能、风能，以及太阳能、原子能、地热能、海洋能、潮汐能等等。这些未经加工或转换的能源又称为“一次能源”。

由一次能源经过加工或转换而成的产品，例如电能、蒸汽、煤气、焦炭，以及各种石油制品、沼气、酒精、氢等，都叫做“二次能源”（或叫“人工能源”）。这些产品都是为了给生产和生活提供能量，并且更便于利用。

自然界的能源来自三个方面，如图1-1所示。

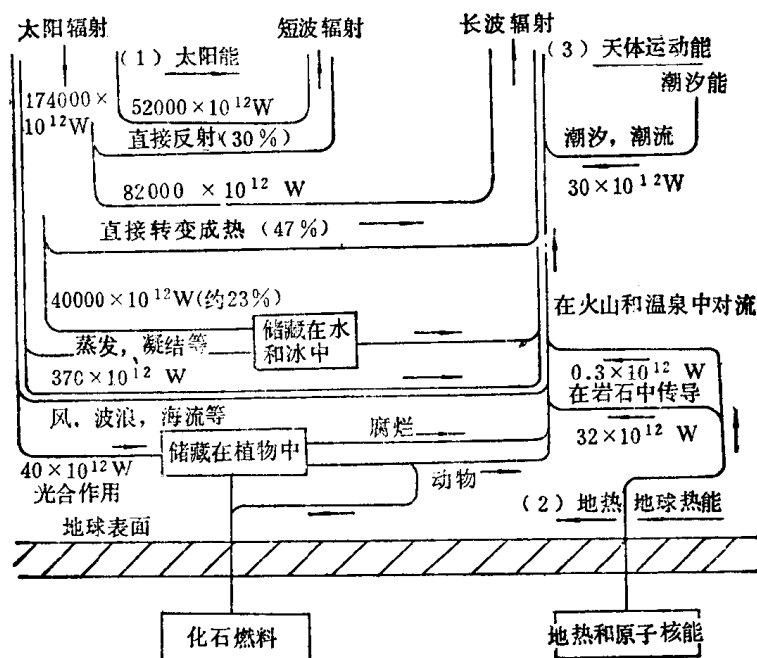


图 1-1 进入和离开地球表面的能量

主要是来自于太阳的辐射能。它除了直接向地球提供光和热外，还成为其它一次能源的来源。例如，靠太阳的光合作用促使植物生长，形成植物燃料；煤炭、石油、天然气、油页岩等矿物燃料都是古代生物接受太阳能后生长，又长久积沉在地下形成的；至于水能、风能、海洋能等归根到底也都来源于太阳辐射能。

能源的第二方面的来源是地球本身，主要是以热能形式存在的“地热能”，它包括已被利用的地下热水、地下蒸汽和热岩层，以及尚无法利用的火山爆发能、地震能等。此

外，地壳内和海洋中蕴藏的各种核燃料也属于地球本身可提供的能源。它经过核反应可以释放出能量来。

第三方面来自地球和其它天体相互作用而产生的能量。例如，太阳和月亮对地球表面海水的吸引作用而产生的潮汐能就属于此列。

一次能源还可以根据它们能否“再生”分为两类。“再生能源”是指每年能重复产生的自然能源，例如太阳能、水能、风能、海洋能、潮汐能、植物燃料等。它们是人类用之不尽、取之不竭的能源。“非再生能源”是指那些随着开采和使用将会枯竭的能源，例如煤炭、石油、天然气、油页岩，以及核燃料铀、钍、钚等。

从能源性质来看，还可以分为“燃料能源”和“非燃料能源”两类。燃料能源有矿物燃料、生物燃料（柴禾，沼气等）、化工燃料（丙烷、甲醇、酒精等）、核燃料四种。非燃料能源中有机械能（风能、水能、潮汐能等）、热能（地热能、海水热能等）和光能（太阳光能）三种。

从能源的应用广泛程度来看，可分为“常规能源”和“新能源”；根据对环境的影响又可分为“清洁能源”和“不清洁能源”（例如矿物燃料及核燃料）。

综上所述，能源的分类可归纳为表1-1所示。

表 1-1 能源分类表

类 别		第 一 类		第 二 类	第 三 类
		常 规 能 源	新 能 源		
一 次 能 源	再 生 能 源	水 植 物 燃 料 能 料	太 风 生 海 海 海 阳 能 物 水 洋 水 能 能 质 温 波 动 力 (雷 电 能)	地 热 能 (火 山 能) (地 震 能)	潮 汐 能
	非 再 生 能 源	各 石 天 种 然 煤 油 气	油 页 岩	核 钍 钚 燃 料 — 铀	
二 次 能 源		焦 煤 汽 柴 煤 石 油 电 蒸 液 化 能 汽	酒 沼 氢		
		炭 气 油 油 油	精 气 能		

1.2 热 能 资 源

热能是应用最广的一种能源形式。其中，最主要的常规能源为燃料热能，新能源有太阳能、核能、地热能和海洋热能。

1.2.1 太阳能

太阳表面温度为6000℃左右，在它向外辐射的能量中，虽然只有二十亿分之一到达地球大气层，但是也有174万亿kW的功率，相当于全世界耗能的三万倍。其中，到达地球表面的约为47%左右，功率为81万亿kW，其中到达陆地上的有17万亿kW，一年内地球上接受的太阳辐射总能量为 10^{18} kW·h，相当于地球上全部化石燃料能的十倍。因此，太阳能是最大的、对环境又无污染的清洁热源。

太阳能之所以未作为能常规能源而广泛利用，是由于它的能源密度低，随地区、季

节、气候和昼夜变化大。到达地面的太阳能，在中午阳光直射时，也只有 $1\text{kW}/\text{m}^2$ 左右，夜间则降为0。因此，要广泛地利用太阳能，尚需解决一系列的技术问题。例如如何跟踪太阳光线，并有效地把它集中起来，以增加能流密度；如何增加物体表面的吸收率，使更多的辐射能有效地转变为热能；如何经济地利用多变的太阳能，以及解决太阳能的贮存等问题。

目前，利用太阳能有四种方式：光—热转换，光—热—电转换，光—电转换，光—化学转换。

光—热转换是通过集热装置将太阳的辐射能收集起来。集热器分平板式和聚光式两种。平板式可提供生活用热水。对面积为 2m^2 的太阳能热水器，约可提供 200kg 热水，北京地区在夏天可把水加热到 60°C ，冬季可加热到 30°C 以上。这种集热器成本低，得到越来越广泛的应用。

聚光式是通过反射率高的聚光镜片把太阳能集中起来，可以达到很高的温度，并且可提高能流密度。例如，用直径为 $1.3\sim 1.6\text{m}$ 的聚光反射镜构成的太阳灶，可将锅底加热到 $400\sim 650^\circ\text{C}$ 的温度，功率达 $700\sim 1000\text{W}$ 。设计完善的大型旋转抛物面反射镜，在焦点处可达 3000°C 的温度，称为“太阳炉”，可用于熔炼高熔点金属。

光—热—电转换是首先将太阳能集中起来，加热水而产生蒸汽，然后通过蒸汽动力装置转换成电能。由于太阳能的热流密度低，要集中搞一座 1000MW 的太阳能电站，需占地 $(40\sim 50)\text{km}^2$ ，需投资几十亿美元，难以推广使用。目前最大的太阳能发电站为 200kW 。

光—电转换是用硅、砷化镓等半导体材料直接将光能转换成电能，也叫太阳能电池。它的转换效率在6%左右，最高效率达13%， 1m^2 发出的电功率为 150W 。这种装置转换简单，但材料成本较高，适用于微型电源（例如计算器、手表等的电源），和供电困难的灯塔、草原、航天器等电源，功率在数十瓦至数千瓦。目前，最大的太阳能电池发电设备为 1000kW 。

光—化学转换由植物的光合作用完成。人工的光合作用研究是生物工程的重大研究课题，不属于本学科范围之列。

1.2.2 燃料化学能

燃料在燃烧过程中将化学能转换成热能，是应用最广的能量转换形式。但是，由于它是非再生能源，尤其是石油、天然气等高级燃料，储量更为有限，而储量最大的煤在燃烧时又容易污染环境，因此，对燃料的研究主要是对燃料进行改质和组织好燃烧过程，以保证完全燃烧。

燃料改质措施有：1) 煤的气化与液化，包括新的气化方法研究及煤的地下气化；2) 煤水浆(CWM)；3) 煤油混合燃料(COM)；4) 油与水制成乳化油；5) 油页岩中提取油。

保证燃料完全燃烧的措施有：1) 固体燃料的沸腾燃烧、旋风燃烧；2) 液体燃料的雾化燃烧、分层燃烧等等，对新型燃烧装置和燃烧器的开发研究等。

1.2.3 核能

利用核能转变为热能（电能）已成为解决当代能源问题的重要途径之一。 1kgU^{235} 全部裂变可释放出 $69.5 \times 10^{10}\text{kJ}$ 的热能，即使反应堆只有10%产生裂变反应，已相当于2400吨标煤的发热量。

23757

核裂变可以产生很高的温度。但是，利用核能发电，最终仍是利用水蒸汽作为工质。因此，实际利用的温度受到限制，影响到热能利用的效果。

到1986年为止，世界上运转的核电站总容量已达267280MW，占总发电容量的15%，其中，法国的核电站占总发电量的65%。由于核电站的发电成本低于火电成本（相当于火电成本的50%~90%），虽然投资高（约为火电站的1.5~2倍），但是随着燃料价格不断上涨，大型核电站已可与火电站相匹敌。据估计，到2000年，核电容量可达 7×10^5 MW，占电力总容量的30%。我国开始在发展、建设中。

1.2.4 地热能

地球是一个庞大的热库。在地下10km以内蕴藏的地热量约有 10.5×10^{23} kJ，相当于3.57万亿吨标煤，在地下3km以内，目前可供开采的地热相当于29000亿吨标煤。

地热资源按其在地下热储存的形式，可分为蒸汽型、热水型、地压型、干热岩型和岩浆型几类。其中，蒸汽型、高压高温热水型可直接用来发电，70~90℃的热水也可用来加热低沸点工质，由低沸点工质蒸汽来发电。低温地热水可作为直接热利用或综合用于工农业生产。我国的西藏等地，地热资源丰富，又地处偏远，缺乏燃料、缺乏电力，因此，利用地热发电有很大前途。现已有装机容量为7000kW的蒸汽发电机组。利用低沸点工质发电的地热电站也建立了50~200kW的试验机组。日本地热资源丰富，已建立50MW以上的地热电站多处，并正在准备建立200~300MW的大型地热电站。

干热岩是一种有巨大潜力的新能源。据估算，1km³热岩层的总能量相当于产油近1亿桶的大油田。但是，它的利用较为困难，首先需要深钻6km，并破碎热岩，然后灌注冷水，吸热后变成蒸汽或热水，再引出地面加以利用。目前，联邦德国正在研究中。

1.2.5 海洋热能

海洋占地球表面积80%，太阳的辐射能大部分落在海水表面，被海水吸收。在1米厚的海水层内，将吸收掉80%的太阳辐射能。因此，在海水表面与深层之间存在着15~28℃的温差。利用此温差作为热机的冷、热源，用低沸点工质（例如氨、氟里昂等）实现蒸汽动力循环发电是完全可行的。据估算，利用海洋温差发电潜在的能量达 10^{10} kW，如果利用10%，也已超过世界发电容量的数倍。因此，它是一种潜力很大的新能源。目前，世界上已有几座试验性海洋温差发电站，出力达7500kW。并已初步设计了100MW的海洋温差电站方案。

1.3 能源与社会发展

人类社会发展的历史与能源的开发和利用水平密切相关，它是人类生存和发展的重要物质基础。

能源利用的每一个新发明，均使生产带来一次新的飞跃。蒸汽机的发明引起了产业革命。蒸汽机作为冶金炉鼓风的动力，也推动了冶金工业的发展。内燃机的发明，推动了交通运输技术的进步。电的发明引起生产工艺机械化、自动化重大变革，人类社会的生产和生活进入电气化新时代。原子能的发现为人类利用能源开辟一条新途径。

每一个国家的国民经济的发展与能源消费量增长之间有着密切的关系。能源消费量的增加和国民生产总值的增长基本成正比的关系。表1-2所示的是几个国家生产总值和能源消费量的增长指数。由表可见，二者基本保持同步。我国的能源增长与工农业总产值增长

的关系如图1-2所示。

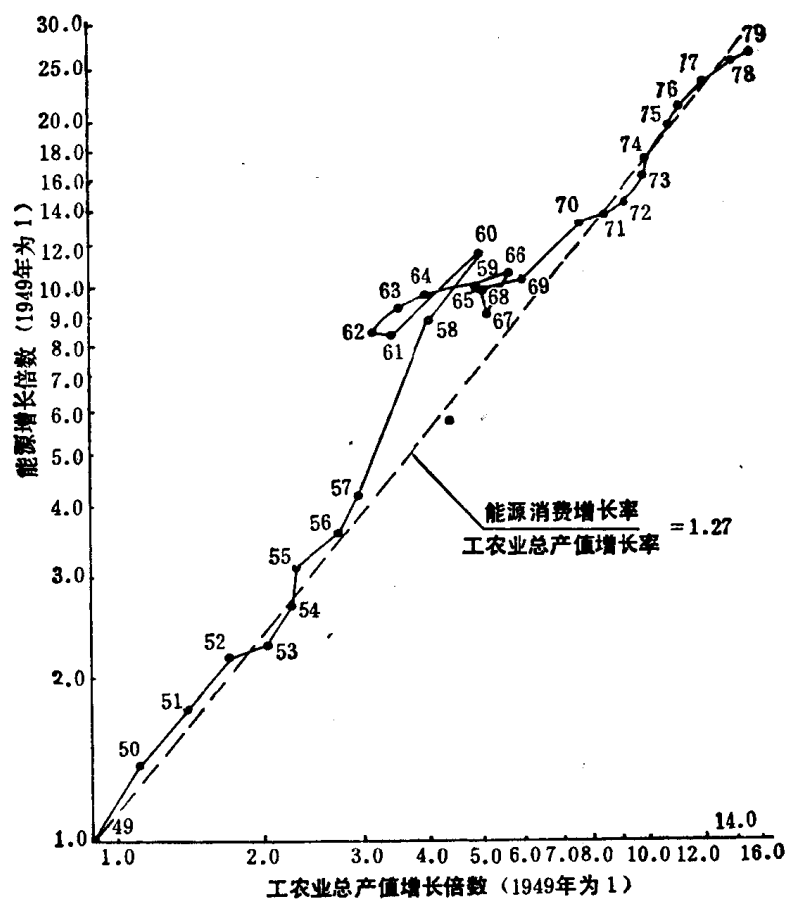


图 1-2 我国能源增长与工农业总产值增长的关系

表 1-2 几个国家国民生产总值和能源消费量指数 (以1952年为100%)

年 份	美 国		日 本		法 国		英 国		西 德	
	国民生 产总值	能源消费	国民生 产总值	能源消费	国民生 产总值	能源消费	国民生 产总值	能源消费	国民生 产总值	能源消费
1952	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1955	112.7	110.3	126.3	113.3	118.0	105.8	117.2	108.9	131.6	116.4
1960	125.5	124.4	189.5	188.7	146.2	125.8	132.7	110.7	177.1	134.1
1965	152.7	150.2	305.3	307.6	192.3	167.5	153.5	119.9	225.7	169.2
1970	181.8	190.2	526.3	597.3	256.4	223.6	172.4	128.8	285.7	215.3
1973	209.1	208.1	678.9	737.1	300.0	259.8	189.7	134.9	320.0	238.8

任何一个国家，如果能源供应不足，将会直接影响到国民经济的发展。优先发展能源工业，才能为国民经济各个部门的发展提供必要的条件。

能源的平均消费水平在一定程度上也反映一个国家的工业发达程度。工业国家的总人口约占世界人口的三分之一，却用去世界能源总消费量的80%。按人口平均，工业国家每年人均能源消费5.5吨标煤，世界人均能源消费2.3吨标煤，而我国人均能源消费只有0.7吨标煤。

我国能源工业经过三十多年的建设，能源供应增长了三十倍，已为发展我国国民经济奠定了一定的基础。但是，总的来说，能源供应一直紧张。根据2000年的奋斗目标，国民生产总值实现翻两番，但是，能源生产只能翻一番，其中一半需要靠节约能源，提高能源利用率来解决。因此，能源问题已经成为当今我国经济发展中的一个突出的问题，能源科学技术的研究，将是我国科学技术研究工作中的重要组成部分。

1.4 能源结构

能源结构包括能源生产结构和能源消费结构两部分。能源生产结构是指各种能源的生产量在整个能源工业总产量中所占的比重。能源消费结构是指国民经济各部门所消费的各种能源量占能源总消费量的比重。

通过对能源结构的分析，可以使我们从能源生产和消费的平衡关系中，看出能源结构的特点和结构是否合理，以及能源有效利用情况，通过分析能源结构的变化，还可预测能源发展的趋势，为今后确定能源发展方向，规划能源生产提供依据。世界能源消费结构的部分数据如表1-3所示。

表 1-3 世界能源消费结构 (%)

国 别	种 类				
	石 油	天 然 气	煤 炭	水 力	核 能
中 国	23.1	3.0	70.6	3.3	0
美 国	47	26	19	4	4
日 本	75	3	15	5	2
世界平均	44	18	30	6	2
预测 2000年	29	20	25	13	13
2020年	10.5	12.5	26	19.5	31.5

各国的能源消费结构不同，它受到许多因素影响。首先与本国的能源资源情况有关，例如，我国的煤炭资源丰富，产量已居世界第二位，所以，在我国的能源构成中占70%以上。其次与能源开发的经济性有关。例如，我国的水能蕴藏量为6.8亿kW，其中可供开发的容量为3.8亿kW，占世界第一位。但是，由于水电站的建设周期长，初投资大，目前在能源结构中只占3.3%。此外，还与一个国家的工业技术水平有关。例如，核能是一种最有发展前途的新能源，随着非再生能源储量的下降，预测到21世纪它在能源结构中的比例将会超过13%。但是，由于它要求的技术高，我国还刚刚起步。

我国能源结构的一例如表1-4所示。能源消费量为

$$[\text{能源消费量}] = [\text{实际消费量}] + [\text{损耗}] = [\text{总产量}] \pm [\text{进出口量}] \pm [\text{库存变化}]$$

该年度的能源实际消费量为5.5亿吨标煤。它未包括农村消耗的非商品性生物能源，例如柴草、桔杆、畜粪等，估计约折合标煤2.7亿吨。由于电能是二次能源，当计入电能产量和消费后，生产电能的燃料消耗则不应重复计入，表中用括弧内的数据表示。

能源的具体消费结构，也反映一个国家的工业水平和生活水平。我国的工业部门耗能占69.4%（其中重工业59.3%，轻工业10.1%），远高于主要工业国家。例如，1978年美国为36%，英国为37.9%，日本为57.0%。这正说明我国的工业部门的能源利用率低，万

元产值的能耗指标高。例如，当年的工业部门耗能3.82亿吨标煤，产值为4591亿元，平均万元产值耗能达8.32吨/万元。电能是使用最为方便的能源形式，工业国家发电用能占一次能源总消费的30%以上，而我国只有20%左右，电力供应不足限制了工农业的进一步发展。民用能源的消费水平反映人民的生活水平。我国在1979年人均耗能98千克标煤，而日本平均每人达840千克标煤。

表 1-4 1979年我国能源结构

单位：万吨标煤

项 目	原 煤	石 油	天然气	电 力		能 源 合 计		
				水电	火电	绝对值	比例 (%)	
一次能源总产量	45377	15179	1929	2109		64594		
一次能源总耗量 (扣除出口、库存)	44228	12797	1929	2109		61063	100	
二次能源火电量					11092			
能源损耗量	2941	762	40	2314		6057	9.9	
各部门能源消耗 总 量	32795 (41287)	9435 (12035)	1889	10887		55006	90.1	100
一、工业部门	22137 (30629)	5840 (8440)	1596	8617		38190	62.5	69.4
1. 重工业部门	19133 (27625)	4863 (7463)	1503	7127		32626	53.4	59.3
电力工业	(8492)	(2600)		817		817	1.33	1.5
冶金化工机械工业	10299	2249	745	4807		18030	29.51	32.7
建材及其它	8904	2614	758	1503		13779	22.56	25.1
2. 轻工业部门	3004	977	93	1490		5564	9.1	10.1
二、交通运输	1877	1205		55		3137	5.1	5.7
三、农 业	225	1386		1027		2668	4.4	4.9
四、民 用	7616	585	293	977		9471	15.6	17.2
五、其 它	910	419		211		1540	2.5	2.8

注：资料来源于《能源技术》1981.3。

从能源结构是否合理，也可找出改善能源消费结构的主要方向。例如，重工业部门的万元产值能耗为12.5吨标煤，轻工业部门为2.8吨标煤，重工业部门的单位产值能耗比轻工业高3.5倍，因此，调整轻、重工业的比例，加快轻工业的发展，可以降低能耗，增加产值。再如，在运输及民用耗能中，我国的煤炭消耗分别占59.7%和80%，这是由于大量采用了能量转换效率低的蒸汽机车以及民用煤炉。如果发展内燃机车和民用煤气，改变能源消费结构，则可达到节能的效果，同时还可减轻对环境的污染。

1.5 能耗指标与能源利用率

反映能源有效利用程度的指标通常用单位能耗和能源利用率表示。它可以反映一个工序、一个企业、一个部门或整个国家的能耗水平。单位能耗是指生产某一产品的总耗能量与该产品的总产量之比，即

$$[\text{单位能耗}] = \frac{[\text{该产品总耗能量}]}{[\text{产品总产量}]} \quad (1-1)$$

我国的主要工业产品的单位能耗与国外先进指标相比要高得多。例如,我国钢铁企业的吨钢能耗约为日本的2倍;大中型水泥厂每吨水泥熟料的能耗比日本高50~80%;每吨合成氨的平均能耗相当于日本的2倍多。因此,我国的能源总消耗量虽然已经超过日本和西德,但是国民生产总值却只有日本、西德的一半左右。由此可见,我国节能尚有巨大潜力。

能源利用率是指有效利用的能量与消费的能量之比,即

$$[\text{能源利用率}\eta_i] = \frac{[\text{有效利用的能量}]}{[\text{能源消费量}]} \quad (1-2)$$

能源总利用率 φ 为

$$\varphi = \sum a_i \eta_i \quad (1-3)$$

式中 a_i ——各部门消费的能量占总能耗的比例。

表1-5为我国能源利用率的一例。由表可见,我国的能源总利用率只有30%左右,相当于世界工业国家五十年代的水平。目前,西欧国家的能源利用率多数在40%以上,而日本高达50%以上。

能源总利用率包括从能源生产、加工转换、运输贮存到各部门利用的全效率。由表1-4可见,我国的能源在加工转换和运输贮存过程中的损失就占了能源总产量的9.9%。尽管损耗不可避免,但是,需要采取有效措施尽可能减少不必要的损耗。

能源总利用率与各部门的能源利用率有关。因此,各部门首先要加强能源管理,制订必要的制度,减少各种损失,降低产品的单位能耗。在同一部门,不同企业之间的能耗水平也有很大差别,例如,先进钢铁企业的吨钢能耗比全国平均水平低50%左右。因此,推广节能的先进经验和先进技术,加强对老企业的技术改造,搞好各企业的热平衡测试,明确节能方向和措施,对提高能源总利用率是最基本的途径。

表 1-5 1979年我国各部门能源利用率

部 门	能源消耗量 E_i (万吨标煤)	消费比例 a_i (%)	部门能源利用率 η_i (%)	能源利用率 φ_i (%)
一、工业				
冶金、化工、机械工业	13223	24.1	40	9.64
建材及其它工业	16350	29.7	30	8.91
二、电力	10887	19.8	25	4.95
三、交通	3082	5.6	20	1.12
四、民用	8494	15.4	25	3.85
五、农业及其它	2970	5.4	20	1.08
合 计	55006	100.0		29.55

1.6 能源工作者的任务

在能源的总消耗中,以热能形式消耗的能量占58%以上,高的国家达70%。在机械能和电能消耗中,由热能转换而来的也占着相当大的比例。因此,热能转换与利用占总能耗的85~90%左右。作为热能工程的技术人员,在整个能源工程的新技术革命中,肩负着主要的责任。热能工作者的主要任务是研究热能转换与利用的理论和先进技术,为节能工作服务,使能源利用率达到更高的水平。具体来说,有以下几方面的任务:

(1) 提高各种热装置的热效率。

研究各种炉窑、工业锅炉、燃烧装置和能量转换装置等热装置的转换理论，开发新技术，不断改进设备，进一步提高热效率。

(2) 研究各种余热的回收技术，提高总的能源利用率。在生产过程中，特别是高温操作的生产工艺中（冶金生产是典型一例），不可避免地存在大量的各种形式的余能。例如，各工序中间产品及最终产品带走的显热、冷却水带走的热、烟气带走的热等。对于不同形态、不同温度水平的余热的回收，采用的方法也不同。需要研究各种新型的热交换装置以及有效的回收方法，例如热管换热器、热媒换热装置、热泵、热动力回收装置等。回收的能量可以替代其它的能源消耗，从而可以节约能源，提高能源总利用率。

(3) 用系统的观点搞好节能。冶金生产的各生产环节相互联系。有时从局部工序看是节约了能源，但从整个系统来看反而会使能耗增加。例如，炼焦用的洗精煤灰分增加，铁精矿粉的品位降低，对洗煤厂、选矿厂来说是减少了能源消耗，但会增加高炉炼铁的焦比。灰分变化1%，会影响焦比2%。而焦比降低又会降低高炉煤气的发热值，影响到厂内的煤气平衡。降低钢坯的出炉温度可以降低加热炉的能耗，但会增加轧制能耗，等等。因此，要用系统的观点，用最优化的方法，寻求整个能源系统的最优操作参数，使总能耗为最低。

从系统的观点还需考虑到生产工艺过程，比较不同的工艺流程，寻求节能最佳的合理流程。例如，采用连铸、热装、连轧，这本来是属于生产工艺的问题，但与节能也密切相关。生产工艺用热是采用单独的锅炉供汽系统，还是采用热电结合，对企业的节能效益也有很大影响。

(4) 加强对常规能源改质的研究。煤是我国储量最大、应用最广的常规能源。但是它有燃烧效率低、污染环境等缺点。要加强煤的开发利用，必须加强对它的改质研究。例如，煤的高效气化方法，COM燃料、CWM燃料的应用等。

(5) 加强对新能源的开发利用的研究。从长期的观点，需解决新能源利用的经济性问题，使之实用化。作为热能工作者，肩负着光荣的责任，在能源领域，还有许多问题有待进一步开拓。本课程是通过对热能转换与利用中的理论和实际知识的介绍，为今后的工作打下一定的基础。

第二章 能量转换基础

人类的一切生产和生活，都离不开能量的消耗、转换和利用。对自然界存在的各种能源，通常需要经过转换成所需要的形式再加以利用。能量转换过程中必须遵守的基本规律是能量守恒定律。但是，对涉及热能的转换，单从能量在数量上守恒关系分析，掩盖了不同形式的能量在质量上的差异。因为不同温度水平的热能，即使在数量上相等，而其利用价值并不相同。因此，为了有效地利用热能，正确地指导节能工作的开展，找到能量损失所在，需要结合热力学第一定律和第二定律，从量和质两个方面全面地进行分析。本章就是要运用工程热力学的理论，介绍分析能量转换过程的方法，着重介绍焓分析的方法。

2.1 能量转换

自然界是由不断运动着的物质构成，而物质的运动形态是多种多样的。物质的每一种运动都具有作功能力，就是通常所说的具有“能”。不同运动形式的能分别被称为“机械能”、“热能”、“化学能”、“电能”、“光能”、“原子能”等。在钢铁企业中涉及到的主要的能的形式有：

1) 热能。提供冶炼过程还原反应所需的热量，轧制过程金属加热所需的热量，以及提供水蒸汽作为加热源等。它主要是利用燃料的燃烧热，是钢铁企业消耗的最主要的能源，约占80%左右。

2) 机械能。用于流体的输送和压缩，如鼓风机、泵、压缩机等，物料的运输、提升，金属的轧制等。大部分由电能转换而来，也有利用蒸汽动力装置拖动。

3) 电能。主要是通过电动机转换成机械能，同时提供照明、电热等。但是，电能本身实际上是由机械能带动发电机转换而来。机械能多数又是来自热能。

4) 化学能。最常见的是燃料燃烧，将燃料蕴藏的化学能转换成热能。在转炉炼钢过程中，氧化反应将使化学能转换成热能。

在这四种工业生产中所利用的主要能量形式之间，相互转换的关系如表2-1所示。不同形式的能量之间的转换，有些是可能的，有些是不可能的；有些可以全部转换，有些只能部分地转换；有的在理论上正向、逆行都相同，有的需要一定条件。例如，电能与机械能之间，理论上可百分之百地相互转换，它们又可完全转换成热能。反之，则绝对不可能达到百分之百地转换。热能只可能从高温向低温方向传递。

表 2-1 四种主要能量的相互转换过程

输入	输出			
	热能	化学能	机械能	电能
热能	传热	吸热反应	热机	热电偶
化学能	燃烧	化学反应	筋肉、渗透压	电池
机械能	摩擦	—	机械传动	发电机
电能	电热	电解	电动机	变压器

由一次能源向常用形式能的转换及其所用的转换装置如表2-2所示。

表 2-2 各种能源间的转换方式

能 源	转 换 形 态	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, 水力透平 水力发电, 风力发电
太阳能	光能→热能 光→热→机械 光→热→机械→电 光→热→电 光→电	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→热→机械 化学→热→机械→电 化学→热→电	燃烧装置, 锅炉 各种热力发动机 热力发电厂 磁流体发电, 热电发电, 燃料电池
地热能	热→机械→电	蒸汽透平发电
核能	核裂变→热→机械→电 核裂变→热→电	现有的原子能电站 磁流体发电, 热电发电, 热电子发电

一次能源具有不同的固有特性。例如, 太阳能的绝对数量极大, 但辐射到地面上的能源密度很小, 而且随时随地不断变化; 水力资源的能量比较集中, 但受到地域限制, 就地不能全部利用, 要解决蓄能和输能问题; 化石燃料虽具有现成的化学能, 但不能直接利用, 要通过燃烧过程转换为热能, 才便于使用。而且, 来源不同的各种化石燃料中, 能量也有集中或分散使用的技术经济问题; 目前技术水平尚无法控制和有效利用热核聚变能量。由此可知, 充分认识初始能量的固有特性, 对于选择能源以及能量转换和利用是很必要的。从人们实际大量用能的过程来看, 目前绝大多数一次能源都首先经过热能形式, 或者直接使用, 以满足各种工艺流程和生活的需要; 或者通过热机等进一步转化为机械能和电能再使用。经过热能这个重要环节而被利用的能量, 在我国占90%以上, 世界各国平均也超过85%。因此, 分析和研究热能转换特点对有效利用能量有着重要意义。

在实现能量转换时, 对转换装置有以下几项基本要求:

1) 转换效率要高。转换效率的一般定义是指转换后得到的能量(收益)与转换前耗费的能量(支付)之比。转换效率可以指一个设备, 也可指一个系统。能量可以是指数量而言, 也可以是指质量(焓)而言。例如, 煤气的燃烧效率比煤的燃烧效率要高得多, 但是, 城市煤气多数也是由煤转换而来。在比较转换效率时, 要对煤→煤气→热能的转换系统与煤→热能的转换系统进行比较才有意义。由于煤气的转换系统效率比煤直接燃烧的效率, 城市的煤气化是节能的一个重要方向。就热机来说, 蒸汽机的效率只有7~8%, 蒸汽机车也将处于逐渐被淘汰的境地。

2) 转换速度要快, 能流密度要大。一般的能量转换装置希望用尽量紧凑的设备转换更多的能量。例如, 一般的热交换器希望传热强度尽可能大, 单位面积上传递的热量尽可能多, 可以用最小的转换装置满足热交换的要求。尤其是在一些移动式设备上, 例如汽车、火车等, 要求装置尽可能紧凑。目前, 内燃机比燃料电池的转换速度和能流密度都要大得多, 所以燃料电池还不适于用在汽车上。在一些通过化学反应进行能量转换的过程